

# 貓掌與彈弓

# 目錄

自然與人造的機械世界 .....	1
第一章 相異的兩個世界 .....	6
第二章 設計的兩派 .....	11
天擇的本質 .....	11
演化所受的限制 .....	13
從比較觀點看設計 .....	20
文化的傳播 .....	21
天擇 .....	22
孤立的重要性 .....	22
保守主義的偏見 .....	23
變遷的時間歷程 .....	23
漸進式的發展 .....	24
舊器新用 .....	25
類似發展 .....	25
物種的滅絕 .....	27
第三章 大小攸關 .....	29
長度、表面積和體積 .....	31
體積和飛行 .....	33
表面張力和擴散 .....	36
重力和慣性 .....	39
圓柱和橫樑 .....	42
第四章 表面、角和角落 .....	44
平面對曲面 .....	44
直角 .....	50
轉角和裂縫 .....	61
第五章 軟和硬 .....	65
材料證據 .....	66
特性之適用 .....	68
相互關係和影響 .....	72
柔性的優點 .....	75
膨脹導管 .....	81

第六章 導致剛性的兩種途徑 .....	86
有機物的非金屬世界 .....	86
自然界拒用金屬的原因何在？ .....	88
材料的限制 .....	88
化學問題.....	89
超高密度.....	91
無法生長.....	92
金屬建造物的使用 .....	92
非金屬物質，如何避免斷裂？ .....	96
一段非機械的插曲 .....	102
第七章 拉與推.....	107
張力對壓縮 .....	110
繫材對支架 .....	112
再談張力對壓縮 .....	117
繫材和支架的形式 .....	120
流體支架和螺旋狀繫材 .....	123
第八章 機械世界的引擎 .....	129
功 .....	130
能量.....	130
功率.....	131
效率.....	131
引擎大觀.....	132
燃燒引擎.....	133
電動引擎和發電機 .....	136
風力和水力 .....	138
肌肉和纖毛 .....	142
自然引擎.....	145
效率的比較 .....	147
第九章 讓引擎產生功用 .....	150
槓桿作用.....	151
輪子.....	156
馬達和轉子的搭配 .....	161
水壓連接.....	163

暫時蓄電.....	166
第十章 幫浦、噴射機和船舶 .....	174
幫浦.....	174
噴射推進.....	183
水面的游泳 .....	190
第十一章 提出一些假設性的例子 .....	196
生命的工廠 .....	196
向上建造，而非向下 .....	197
食譜或藍圖？ .....	199
例行維修.....	202
非例行維修和機動性更改 .....	205
要多好才夠好？ .....	208
無生命的工廠 .....	211
尺寸趨向.....	212
控制.....	212
維修.....	213
品質標準.....	213
安全係數.....	214
第十二章 抄襲回顧史 .....	216
田園浪漫主義 .....	218
橡樹與艾迪石燈塔 .....	218
鑿船蟲和挖鑿隧道框架 .....	219
大型蓮花和水晶宮 .....	220
抄襲成功的例子 .....	222
鱒魚、海豚和流線形的身體 .....	223
鳥類翅膀和弧虛機翼 .....	224
鳥類和飛機的轉向 .....	225
黃蜂及木製紙張 .....	226
蠶和擠出式的紡織纖維 .....	228
耳膜和電話機的變換器 .....	230
有刺鐵絲網 .....	231
鏈鋸.....	232
維可牢.....	232

抄襲成功，原因為何？.....	234
一個案例紀錄：人類的飛行 .....	235
第十三章 抄襲、現在與未來 .....	240
各式各樣的可能 .....	240
腸管和蠕動泵 .....	240
海豚和低阻力潛水艇 .....	241
減低阻力的魚黏液和聚合物 .....	242
鯊魚鱗和阻力的降低 .....	242
現行工作的前景 .....	243
微科技.....	243
肌肉類似物 .....	244
合成物質 .....	244
智慧物質.....	245
機器人操縱器 .....	245
行走的工具 .....	246
靠變曲游泳 .....	247
QUD VADIMUS ? .....	248
第十四章 對比、趨同和因果關係 .....	252
相似點.....	255
做出類比.....	262
最後一則故事——圓錐體和螺旋形 .....	266
趨同.....	269
結語.....	272

# 自然與人造的機械世界

這是一本非常有趣的書，從力學、機械設計的立場來比較人造的與生物界自然產生的材料及機械。由最廣義的定義來看，引擎就是產生有用機械能的設計，所以飛機引擎、火車引擎、汽車引擎等，用螺旋槳的、噴氣的、蒸汽的、內燃機的真是不勝枚舉，本書都一一比較其原理與性能，深入淺出，由熱力學的基本觀念，一直談到各種引擎設計之精妙處。更有趣的是，本書又拿肌肉、鞭毛、纖毛等自然動力產生的裝置來做比較，進而論及心臟、海棉、海豚，以及蜂鳥與昆蟲的翅膀(這是引擎加機翼)。我是研究生物力學的專職人員，也不禁佩服作者知識之廣博。不論您的專業是什麼，您一定會從中得到新的想法，學到新的知識，這就是一本好書的定義，不是嗎？

把自然的作品與人工的作品一起放在您的眼前讓您品頭論足，就像世界小姐選美或健美先生的選拔一樣二這是多麼豐盛的饗宴。作者的努力尚不只如此，他還進一步提醒這位健美先生的三頭肌是如何有力，身體曲線是如何美觀；而那位美女的眼睛如何有神，讓你目不暇給。

其實這是一個非常不公平的比較，自然的作品是上帝的傑作，人工的器械是「人」的傑作。

我們由看到的東西取得資訊，由摸得到的東西下手改造創作。每當我們了解了一個新的現象，發現了一個新的定律或是發明了一種新的工具，不僅會聚眾歡呼喝采，更會用各種文字、圖像加以記錄。所以，人造的東西是在有了文字之後才突飛猛進的，因為每一個具體的成就都可經由文字來交流。不僅在當時廣為流傳，而且也可以傳給子孫。也因為這種廣博的交流與傳播，所以人類的知

一樣的演化過程，適者生存，最高效力者到處傳播。

在我們的四周，我們用眼睛看到的、手腳摸到的各種事物，當然，也包括我們自己；我們的身體、腦子、思考、運動甚至我們用來創造人工作品的一切，其實都是自然的傑作。但是我們對這些事物大都一知半解，反倒是我們自己創

造出來的器械，我們總是一點一滴地記錄，清清楚楚地突出我們的成就。所以拿著這樣記錄良好的人工機械與我們完全沒有參與而又一知半解的成品——自然的機械相比，怎會有公平的比較呢？

這個缺點反而成了本書非讀不可的優點。這本書一方面將人工產品做了非常清晰、總結式的回顧，一方面對自然的作品也盡其所知地提出可能的比較這是一個全新的嘗試。當兩個相似而又不盡相同的作品放在一起，讓我們仔細地思考每一個異同點的原因及目的，這是非常有啟發性的。作者只提供了一個引子，整本書把進化論的「天擇」與商場中產品之「物競」做了許多角度的比較；提出的問題比答案還多，這也是一本好書的定義。答案是死的知識，問題才是創作的泉源，在今天這個智慧財產權掛帥的時代，誰能發掘新的問題並進而提出可能的解答，他可能就是下一個比爾·蓋茲(微軟公司創始人)。

現代物理與工程的研究越來越重視奈米結構，所謂的 nano——material 就是  $10^{-9}$  公尺尺寸的物件，這正是自然產品的基本尺寸。書中提到的蛋白質、纖維素、酵素、纖毛、微肌纖維等，這些自然產品的基本元素哪一樣不是奈米結構？目前最流行 MEMS(微機電系統)一定可以從自然的產品中得到許多啟示，而這本書正是一個絕佳的參考書，或起點(如果您是生物學的門外漢)。

醫學、生物學本就是研究我們的身體及其他自然的作品。但是現代的醫學絕大部分只是解剖或組織的描述，我們很少更深層地思考這些解剖或組織長成的原因。而現代工程學中之人工器官，更是以人工來仿倣天然物的功能。閱讀本書，不禁令人感到醫學與人工器官還有好長的路要走。換句話說，你會開始知道我們對自己身體的了解是何等不足。這本書會為您開啟一扇全新的大門，讓人忍不住往裡一探究竟。

我們看生物世界必須有一個更廣闊的視野。所有人造的，不也是由我們這個生物體利用地球上其他的資源所造出來的？我們的知識在我們的腦子、電腦中演化，借著文字及網

路傳播，演化的速度越來越快，甚至可以模仿太陽製成了氫彈。我們建立城市，消滅了雨林及其他的物種；不只參加了自然的演化，甚至在改變自然的演化。在生物界的演化中，所有的中繼產品都要經過嚴格的考驗，適者生存，可是在人腦與電腦中演化的過程卻是虛擬的。可怕的不是這個最後的產品不能生存，而是這個最終產出的產品使我們不能生存。當堅固的塑膠產品經由石油的裂解而大量生產時，一片歡呼與膜拜；反觀今日，這個堅固的塑膠製造了成堆的垃圾，而燒毀它又製造致癌的戴奧辛，這恐怕是發明塑膠的人當初沒有想到的吧！

今日知識的爆炸迅速得讓我們擁有太多的能力，這些能力又經由網路以光的速度四處散布：但是我們的本性、我們的身體卻仍是一個未知的世界。但願我們的本性是善良的，不會再產生希特勒、東條英機等屠夫：我們的身體是高適應性的，不怕各種人工毒物。看了這本書，由自然產品與人工產品的比較，誘發了我許多的想像，而最大的期望是自然的產品——包含人類自己不要被人工的產品給毀滅了。

親愛的朋友，看了這本書，我有這麼多的感想，您也來試試看。



# 前言

生命是生物學所關心的對象，科技卻全然屬於另外一回事。我奉行服膺這個想法，一直到接觸生物學的另一個範疇，同樣的關係著生命與科技才得以改變。更深入一點的說，即生物力學——觀照生命的科技面與自然界的機械運作。有時這個世界與我們人類所創造的機械世界類似，但有時兩者又截然不同。此書便是討論比較這兩種科技的一本書。它涵蓋了我們四周許許多多的日常事物和創造物：但它也毫不留情地企圖改變我們對這些周遭事物的看法——至少在某種程度上。這是它特殊的使命。

如今我們逐漸體認到工程師對於生物世界的好奇，並不亞於生物學家對機械世界的好奇，有些工程師甚至認為觀察有機物的世界，或許會有助於他們對各種機械器具的設計和製造。而身為生物學家，我們又如何能夠否認這個可能？但是兩個世界之間的變換轉移，又豈可能只是區區一件小事？每一個旅客都必須具備一張地圖、一本指南手冊。本書的企圖，便是透過對生物世界與我們人類科技世界的逐一比較，引介生物力學來提供這樣的嚮導。

同時呢，我也企圖為我們對生物世界一昧的浪漫情懷注入一絲的冷靜清明。自然界設計的美妙，蠱惑了我們許多人，讓我們投入生物學家的行列。確實不錯，自然界在她的工作領域中成就非凡；但是——而且這也就是難度所在，為何她需要以最佳的方式來運作？為何她又應該提供我們人類做為範本？人類視自然界為設計的黃金準則，並且寄望她成為人類科技突破的重要根據，這正是我在此所要挑戰動搖的觀念。

此外，我想要澄清力爭。自然設計所提供的，絕非打擊人類科技的正當武器。在從事本書資料的收集過程當中，我不斷地遇到各式各樣的反科技文章——包括講求自然崇拜，或是貶抑工程師成就的著述等等。這些作者對於當代情勢和未來展望，採取一種完全不切實際的看法，並且將之胡亂的歸罪，將科技的社會影響歸因於工程師，豈不是形同將

機場的擁擠阻塞，追究在萊特兄弟頭上？

關於以上所述的意圖，我必須樂意地承認屬於我個人的一點偏見。我在工程學上沒有任何正式的學養背景，而在基礎物理和數學方面，知識也僅僅是粗淺而已。若是缺少許多工程師不遺餘力的支援和慷慨，我今天也無法完成這些科學著述。在過去漫長的四十年中，在數個不同的機構裡，他們不厭其煩地對我解說，從死胡同的難題中解救我，在我發表任何荒謬的言論之前，適時阻止我，並且提供我各種可能的資料來源，簡而言之，他們盡其一切可能的，歡迎我進入他們的領域範疇。

寫作本書，讓我足足的享受了一場知性的盛宴。在仿製古埃及鑽子的過程中，我沉溺於自己對製作物體的一股狂熱中，我並有幸得以接觸(並且瀏覽)由木漿製成紙張所印行的第一本書。我有充分的理由閱遍杜克大學校園內的九所圖書館(還有其他幾處)，這還不包括跨越圖書館的借覽 CD——ROMS、政府文獻、各個資料庫、舊報紙和微縮影片，以及網路上的新聞機構等等。

對於所有的人類學、考古學、古生物學、經濟學、建築學、幾何學、地理學、法學以及科學、科技、探險、馴養和文化的歷史，他們之間清楚的關聯性及各自分離的複雜度，我仍然抱以無比敬畏的心態。這些錯綜複雜的關聯，在提醒我們，當我們面對生物力學的問題時，不管是從近到遠，由低至高，都必須多方索引，全面考察。

最後，我必須向所有幫助我的同儕、朋友及家人致謝，我在諾頓出版社的編輯巴伯先生，對我文字方面的幫助，無人能及。尤其是在企圖達到文字的自然流暢上，以及克服所有學術性的誇耀與深奧難解方面，他都不遺餘力地給予我最詳盡的指導、最忠實的告誡。

此外，我還要藉此對那些支援我的圖書館——將那些我所需要的資料，陳列在容易取得的書架上——表達我最誠懇的謝意和擁護。

# 第一章 相異的兩個世界

記得當我們年輕時候，相當於四〇年代後期吧，每個週日總要在報紙的漫畫版裡搜讀《閃電俠》(Flash Gordon)。或許是屬於一種孩子們無心的信賴感，我們總認為漫游太空的時代已經近在咫尺。高登先生好比喬治·華盛頓一樣親近，甚至比凱撒大帝還要可親。至於史波克先生(Mr. Spock)的《星際爭霸戰》(Star Trek)與《閃電俠》相較，就顯得複雜世故多了，對於接觸另一個世界的存在，似乎也沒有那麼樂觀。事實上，這並非是我們失去了年輕的赤子之心，或是史波克先生不如高登先生高明，而是隨著太空時代的來臨，正如任何可觸的現實一般，會帶來更多一層的嚴肅思考，也無可避免地造成天真的泯滅。事實證明，太空旅行比想像中更加困難，也更昂貴；而外太空文明，也比想像中更加遙遠。

但是無論如何，《星際大戰》(Star Wars)和《星際爭霸戰》的成功，各種科幻小說的大行其道，在在說明這種誘惑的存在。顯然我們人類心中的訴求，仍然專注在這個地球上難以發掘的另類文化。地球，是一個單一世界。古東方文明，與來自歐洲、非洲的文明已經有千年的交流歷史，進一步與美洲文明的融合也進行了五個世紀。人類的科技或許已經巨幅地進步發展，極度地錯綜複雜，但也失去了它的多元化，逃不出一個僵硬的模式，失掉了想像的空間。這全球的大融合，無異連傳說中沉沒於大西洋裡的島嶼，也排斥在外了。同時，我們也更加地懷疑，我們是否仍有可能遇到另一個世界的科技。

雖然心裡免不了愧失，可是事情其實並沒有那麼糟。生物界有機體的技術，過去幾十億年靠著天擇的生物演化，正形成一面最好的鏡子，提供我們另類科技的參考。綜觀生命界的各種生命，無論是以其設計的多樣性，或是以其使用的材料、引擎和複雜精微的層面來看，無一不是一種高深的技術。

兩種科技，一個是自然界的各種機巧，一個是人類的許多發明。自然界的科技與人類的文明，在同樣的行星上發

展，是故分享同樣的物質材料，承受同樣的物理及化學限制。但是自然界克服困難與創新的方式，卻與人類文明有一個基本差異。至少對我們人類而言，自然界順應，權變的速度，簡直慢的可比冰河流動一般。

兩種科技的形式也大相逕庭，放眼看看你的四周，那一個不是九十度的直角？書本的邊、書桌的角、大街轉角、地板的角落、書架、門窗、紙箱、磚頭等等。再看看田野、公園和森林綠地，哪裡找得到直角？完全缺乏嗎？也不盡然，只是極少。使我們不禁想問，為什麼自然界的直角極少？而人類文明對直角卻情有獨鍾？

自然與人類科技的差異極其普遍，處處可見。人類的建築物既乾燥又僵硬，自然界的建築卻濕潤而柔軟易曲我們使用金屬，自然界則不。我們的鉸鏈滑行，她的卻彎曲。我們使用輪子和旋轉運動來製造奇觀，自然界沒有使用任何這些機巧，卻創造了無數稱職的輪船、飛機以及陸上工具。我們的引擎膨脹、旋轉，她的引擎卻收縮或滑行。人類直接製造大型設備，自然界的大型設計卻是微小物件的精密放大。這樣的比較，難以盡述；這本書所探討的，也不過是它們的對比——其是機械技術方面。

所以在某些基本層面上，絕大多數的人都能體認，人類文化與自然界的產物差異何其鉅大。藝術家們試圖描繪物體時，常用出乎意外的非物體形式來表現，便是利用這種潛意識的觀點來箝制我們。立體派畫家畫人臉，扁平的側面，筆直幾近嚴苛的稜邊，處處形成直角。達利(Salvador Dali)的繪畫、奧登伯格(Chas Oldenburg)的雕塑，卻使用自然界的柔和曲線而非勁直，來表現屬於人為科技的硬性物質——例如手錶、引擎等。其刻意造成的不協調性，顯然是藝術家別出心裁之舉。

但吾人也極易過於渲染這種差異。自行車與竹莖，不都是利用管狀物較實心棒更能承受彎曲的原理嗎？蜘蛛對體內的流液施壓，便能伸展蜘蛛腳，這不正是採摘櫻桃的機器手向外延伸剪枝的原理？兩種科技同樣使用曲狀的外殼(頭骨、蛋及圓屋頂)，圓柱(樹幹、長形骨、電線桿)、埋藏於基

質的石塊(蟲孔、混凝土)，來架構物體。這種科技也同樣利用皺褶結構(見圖一 ~ 一)達成增加強度，而又不失其精巧的目的——例如海扇貝是雙殼貝軟體中少見能游泳的動物的外殼，或包裝紙箱、飛機底層等強硬的結構，或是折疊的紙頁，以及某一些特別的屋頂等。不管是蜘蛛或是鯨魚，刺網捕漁的漁船或是利用細網的獵鳥老手，都不外乎借著漏網讓流體通過，以捕獲飛行或游水中的獵物。

其實我並非不關心工程技術，只是不知是職業或天性使然，我仍然屬於一名生物學家，而非工程師。人們對兩者隱隱畫上的等號其實是個小小的謬誤，它們所代表的豈只是一面牆的相反兩面。生物學家研究既存之物，即自然界所展現的各樣奇美；相反地，工程師不斷創新。更進一步地說，工程師的成就往往比生物學家造成更大的衝擊，其失敗也需索更大的代價。

事實上，稱呼我生物學家或許不夠準確，因為真正的生物學家對機械技術的興趣，往往只不過是維持科學儀器的正常運作而已。吾輩致力於研究自然界的機械性，稱呼這個領域為生物力學〔biomechanics，或是如同某次我從美國某協會收到一張退款支票，稱呼我們為「生物機械學」

(biomechanics)I——不知是出於極度高興、非常氣惱，或是純然意外〕。不巧的是，一門稱做生物科技的學問，在現今的科學界大行其道。事實上，生物科技是一門截然不同的學問，它首重合成，與我們著重分析的生物力學不同，除此之外，它的著眼點在於分子和顯微鏡下的世界，而我們則放眼於生物的機械性與肉眼世界？相對地，吾人所謂的生物物理學(biophysics)雖然著重分析，但其研究對象則屬於分子的範疇。

所以一開頭，生物力學就必須做一番坦誠布公的宣告。最簡單的邏輯便是建議我們在創造與了解人類科技之前，先檢視大自然的科技，以做為它的第一步——至少參照設立它的可能性範圍。誰能否認自然比我們先來一步？所以說，我們的另一面鏡子早已為我們準備好了。生物力學者往往是在人類的工程師提供了某一種模型之後，才體認自然原始的精巧設計。換一種說法，所謂的生物力學最主要的研究目的，便

是發現為什麼自然工程師與人類工程師做法相似，如何相似，又在何處相似。

任何正當的生物學家，理所當然都會對自然界非人為的系統加以推崇，甚至把它當成美學上的標準看待。我們通常如此，如果不是出自對自然的熱愛，誰會願意把時間花在這個上面，所以幾乎每一個生物學家，都無可避免地成為親生命者(biophilic)。但是，熱愛自然並不等於發現它的至上完美，推崇它做為所有設計的黃金準則。吾人前輩許許多多的知名之士，常把自然視為有如在伊甸園裡精心製作出來的傑出產品。雖然斷章取義地引用節錄有失公允，但是做為一個生物學家，我對下列記載的文字，仍然不禁感到一絲膽顫。早期的前輩或許還可以原諒，但是對於達爾文之後的現代學者專家們的理論，實在難以容忍，如：

如果以優劣來論法則，那麼自然勢必是得勝的一方  
亞里士多德，西元前四世紀

人類才智雖能創造多種發明，但是如果比較成果的精美、純粹和功能，有誰能夠超過大自然？因為在她的偉大創造裡，無一物缺乏，無一物多餘。

達文西，十五世紀

自然界裡，水力發明和機械運動各種設計的概念來源，多得不勝枚舉。如果機械師法自然，便能在她的指導下，掌握最高準則，並能在處理任何偶發事故時，做出最適當的權變修正。

伊龐克(Thomas Ewdank)，十九世紀中葉

一本從未褪流行的手冊，且可以預言永不會褪流行的手冊，便是自然手冊。在這本手冊裡，總計生物學及生物化學的範疇，人類所面對的問題已經清楚地被答覆及解決，而且可以說是借著參考類似物，所有的問題都得到了最佳的解答。

巴培納充(Victor Papanek)，現代學者

這種自然至上論的隨意態度，絕不可以等閒視之。一方面，它意味著任何師法自然的工程師或事業家，成就將會超越仰賴人類發明才智的努力工作者；另一方面，則為那些將現今時代的各種弊端歸因於人類科技的人們提供了太好的藉口。兩種態度我都不能苟同(雖然，人類工程師的進步，至今似乎略呈倒退現象，甚至有一些大眾社會，他們的反科學態度極為猖獗。或許這些六〇年代、七〇年代的反科學打手，到了八〇、九〇年代，反而因為對個人電腦無可抗拒的熱愛，而陣前倒戈了)。

所以說二這本書是一本討論師法自然的書？顯然不是。我們將會陸續看見，只有在出奇少數的例子裡，抄襲自然對吾人有用。確實如此，一鱗一爪的精工臨摹是絕對沒有必要的。我們所面對的，是在機械設計上兩個完全分離的背景，以其獨特內在元素的和諧及一貫性，各自形成的兩個系統。此外，其中的一個系統雖然包括我們(人類畢竟是自然的創造物)，然其機械技術對我們而言遠此我們所認知的還要陌生。所以任何自然的技術都值得特別的關注，這便是身為一個生物學家、生物力學家的我為何如此迫切地寫下這本書，一本關於技術，或是說，一本關於兩種技術的書。

## 第二章 設計的兩派

凡事皆始自一個計畫，不管是一張藍圖、一具模型、某種高分子的化學符號，或僅僅是腦海中閃過的一個企圖。但是，每一個計畫無一不出自一先例，無論是神祕的個人煉金技術，或是無數次累積的前人經驗。自然或人類科技所憑藉的，絕非單一發生的創造，它們打從計畫之初，在一路設計的過程中，分歧就不知有多少。

自然的設計過程乃是達爾文發現的法則，即天擇的演化。人類科技的起源，則有發明、發現或是發展、構思等，各種說法不一。演化一詞，現今也被人引用於人類科技的發展，頗令人困惑。所謂的演化，有時是意謂著一種萃取的過程，但是它通常更是暗示著一種逐步漸次的改變和事物疊層的累積。

### 天擇的本質

令人稱奇的是，人類創造發明的行為雖然早已為人熟知，但若要以精確的科學名詞來形容它，則恐怕要比自然界的創造發明還困難。雖然人類在日常生活中的創意，舉凡是畫畫、寫詩，或是烘烤蛋糕，都可使我們脫離一成不變的公式化。可是當這種直覺一旦面對天擇演化時，卻失去了效用。自然演化自有其方向，也似乎有其進展，但看起來卻完全不像是出自一個計畫。所有的知識傳達及處理都建築在對分子的分析上，但分子卻缺乏足夠的感官說服力：而且其演化過程漫長地超出任何人類直接的個人經驗。所以，雖然自然演化至今早已是一個不容否認的事實，但是整件事情仍然不真切且令人難以置信。

吾人所關心的，是自然界的法則，也就是在這個叫做「天擇」的法則裡，存在著演化過程的動力及它的重大缺失。由下可知，用一系列的觀察及相關的敘述來陳述這個法則，便得以證實我們的基本邏輯，並抵銷一些「自然完美」的謬誤與奧秘想法：



## 一、觀察

- a. 每一個生物體都能產生一個以上的後代，如果不加限制，生物的數量將會持續增加。
- b. 每一個生物體都需要自環境中取得最低量的物質，以維持生存及繁衍。
- c. 每一個生物體所能獲得的物質是有限的，因此限制了其物種的增加。

## 二、綜合上述 a、b、c 的觀察結論

- d. 一個地區的每一種生物數量將會有其上限。

## 三、a 和 d 的結論

- e. 當一種生物數量成長至極限時，多餘的個體仍然會在環境無法供養下持續產生。
- f. 某些個體將無法存活和繁衍後代。

## 四、進一步觀察

- g. 生物個體的差異性，將會影響其繁衍後代的成敗。
- h. 至少某些差異性將會受到遺傳影響；而個體襲自其父母超過其他遠親族類。

## 五、從 e 到 h 的結論

- i. 任何一種能夠增加個體後代子孫存活數目的特質，將在其後代中得以延續。

最終的結論當然是把演化原則濃縮成「天擇」，可是在整個構思裡，獨不見「設計」一字。把設計說成一個名詞或許還不會引起太多意見，但如果要把它變成一個真正的動詞狀態，則幾乎是不可能的。誰都知道，設計通常少不了設計師，可是在自然界的演化中，所謂的改變，不過是一連串對任何有利於物種繁衍特性淘汰選擇的盲目結果而已。從這觀點來看，自然界沒有一物是出自「設計」，或是有其「目的」的。儘管如此，大部分生物的顯著部分都有其特定的功能，不然它們如何增加繁殖的成功機率呢？例如弱小動物的耳朵特別發達，使它們能夠察覺肉食動物的侵襲，並採取逃生措施借以存活和繁殖。所以，從另一種觀點來看，耳朵的「設計」當然存在著一個「目的」，難怪早期生物力學所使用的名稱「生物體的機械設計」，未曾引起任何爭議

或反對！

簡言之，自然界約設計乃是一個產生物種變異性的過程(g 項以上，從技術面來講，不外就是不利生存。近期因遺傳學上特殊貢獻而得獎的諾貝爾獎得主貝德爾(George Beadle)，使用了一個類比，比喻這個過程好比打字小姐重複地繕打一頁手稿，每一份複本都被仔細地校正：如果發現任何錯誤，複本就被丟掉(廢棄)——除非在罕見的情況，錯誤反而替文章增色。一但發生這種情形，新版的文稿立刻成為下繕打的範本。如此說來，自然的設計過程牽涉大批的錯誤與有限的選擇，既不經濟，又冷酷無情；而無心的失誤，卻鑄成有益的變格，任何的預期或構想或構思都不曾出現。

這種徹底不智的天擇過程所產生的結果，使人很難把它歸類為進化。試想哺乳動物的求偶系統中，雄性動物對雌性動物乳房大小的本能偏好，會造成什麼樣的影響？自然界在她義無反顧的邏輯下，不斷地增加供應這種具有特殊稟賦的雌性動物，毫不考慮嬰兒哺乳的功能，更遑論這樣的構造會造成任何機械方面的不便。或許前述例子並非假設性的；即使在我們側重前胸文化的偏見下，平胸手術仍很普遍。

## 演化所受的限制

生物世界令人眩目的多樣性讓人幾乎忘了一件事實，那就是自然演化所面臨的限制，遠較任何人類設計家所面對的阻礙來得嚴重。生物學家體認到這樣的限制，但是往往逃脫不了自然沙文主義的窠臼，也無力做出任何有效的呼籲。

任何有機體的演變過程勢必是由小變大。事實上，自然界將小型機車轉變為自動機車的過程中，仍需永續提供交通功能，不得中斷。既要滿足生長的需求，又不能失掉其固有功能，實在增加了不少幾何應用上的問題。試舉軟體動物為例，這種分布極廣且種類極多的生物，包含各種扇形貝、蛞蝓、蝸牛，以及烏賊等它們都有各式各樣不同的形狀。軟體動物的外殼不會生長，除非增加邊長和內部面積，否則外殼無法變大。但大部分的形狀，一旦任何一邊增長，便會迅速導致比例上拙劣的改變，圖二~一即可說明。

如果需要借拉長來增大圓柱體外殼，則會使它相對地變

瘦且易於斷裂。拿一根乾的義大利麵條為例，你自然便會了解長竿較短枝來得易斷。補償性的增厚內部則會使內部容納內臟和生殖腺的空間相對縮小。將圓柱體及其他形狀進行比較，空的圓椎體最能夠增大體積，而又不影響其原來形狀。所以軟體動物基本上都是圓椎體，不管是蝸牛和鸚鵡螺類的單殼，或是貝類的雙殼。藉著電腦，由一個圓錐形的衍生物產生虛設的軟體動物外殼，早在三十年前便已經由古生物學家勞普(David Raup)辦到了。自然加諸在形狀上的限制是這樣地嚴苛，以致所有真正的外殼形狀，竟然可用一個簡單的電腦程式模擬產生。

生命，是不會輕易地為小小的創新駐足的，雖然我們看到所有昆蟲的蛹生階段，都有著一段極為類似生長休止符的時期。一般說來，所有的節肢動物，包括以昆蟲、蜘蛛及甲殼動物為主的生物，其生長方式都是斷斷續續間歇地發生，一會兒這裡脫掉一層外殼，一會兒那裡又失去內部機關。軟體動物藉著增加邊長來生長，節肢動物則是靠蛻皮。因為蛻皮的需要，又限制了其結構的發展，使它們喪失了擁有許多極有用的樑柱或架構的機會。除此之外，所有的昆蟲都是無與倫比的超級飛行家，沒有昆蟲會蛻其翅膀，所以飛行永遠都發生在最後一個階段，一個非生長期；小小會飛的蒼蠅，絕對不會是剛生出來的幼蠅。再者，蛻皮耗損物資，並且會強制造成機械上的脆弱階段。

只有一群主要生物例外，能夠解決架構和生長之間的問題。我們脊椎動物擁有一個既能夠生長，又能夠持續調整的骨骼組織。相對於軟體動物的外殼和節肢動物的外皮，骨骼是一種有生命的組織，一個你在魚類、青蛙、鳥類或人類身上可以發現的複雜而了不起的成就。一個生長的骨骼，或許是脊椎動物最大的革新所在，也是我們這些中型到大型生物的成功存活之祕。

有機體必須繁殖後代，所以他們必須具備足夠的裝備來產生後代(這裡指的是在具有一兩性差別的物種中的雌性動物)。這無異又增加了另一層的需求，好比一部自動汽車，現在得在後面拖著一個製造另一部汽車、或至少是一部機車的

工廠跑。再一次我們可在某些群棲的生物中，發現偶爾的例外。例如在蜜蜂和螞蟻這兩種生物中，工蟻、工蜂都是沒有繁殖能力的。在群棲的腔腸動物中(包括水母和海葵)，只有少數特殊的水媳——看來像是個體，其實卻是一群群棲生物——能夠繁衍後代。雖然如此，所有的繁殖單位，不管是蜂后或是生殖水媳，仍然都是可辨識的有機體。還沒有生物發明了體外的生殖工廠，以達到繁殖的目的。

生物除了進行生長繁殖外，接著便向外散布。有時三種功能是由單一形態的有機體來執行，例如人類，其生命歷史極其單純。有時則牽涉極為精巧的變形，造成生物每一階段的形態大大的不同。大多數的植物、昆蟲，以及海洋裡各式各樣的無脊椎生物，都具有這種變形的特質，並形成極為複雜的生命歷史。較諸上述生物，人類是極為特殊的。人類往往將行動自由視為理所當然，但如果想要讓一棵樹、蠟、寄生蟲，或是一塊海綿生物從這裡移到那裡，恐怕是非常艱難的。所以這些生物為了達到散布自己的目的，便得釋出自己的特殊樣本。在許多藤壺貝類及蛤類的生活史中，細小浮游且靠掠食為生的幼蟲，最後卻變形成附著固定、具有生殖能力，且靠著過濾水中微生物而生的成蟲。蝴蝶則是由食葉匍匐的蠕行生物，一變而成為吸食花蜜的多產飛行者。自然界裡如此的變形過程，勢必會嚴重地限制其訣計的發展範圍。

自然界的另外一些限制，乃是來自我們所謂的資訊有限性。製作任何生物的這個計畫，有一個問題值得我們注意。在當今電腦和位元組當道的世紀裡，所有的資訊都可以數量化，可以計量。其基本單位——位元，是在兩個具有完全相等可能性的選擇下擇一，以達成解決事物的方法。這就像丟一個銅板，再看看它落在哪一面頗為類似。簡而言之，一個計畫乃是資訊的累積。為了建造人類或是類似動物，一個受精卵在它的DNA(去氧核糖核酸)裡需要備有十的十次方那麼多位元的資訊。聽起來這個數目挺嚇人的，但如果你知道我們每個人體有十的十四次方那麼多的細胞，比起這DNA裡的資料至少還要多過一萬倍，那它就不算稀奇了。在電腦裡，繪圖是種平面二度空間的表達，其耗損的記憶體，遠遠

超過普通的文字。姑且不論是否一張圖片勝過一千個文字，它可是確實不客氣地吃掉了那麼大的儲存空間。有機體卻是立體三次元式的，而且它的每個細節，不管是否微小到百萬分之一公釐，都是一樣的重要。如果要描述這樣的細節，當然需要無比鉅量的資訊，或許是一個蛋或是受精卵內十的十次方位元的好幾百萬倍吧！因此我們可以相對地說，一個生物型態的造成，是出自一個概略的計畫。即使是雞群中長得一模一樣的雞，其細節也並非是由於同樣的規格造成！

這種資訊的短缺，正好清楚地說明了許多生物設計的基礎。遠在一九五〇年，一名有先見之明的物理學家克萊恩(Horace Crane)，就預言許多的次細胞結構(他也不知道是哪些)將會以螺旋形的形式出現。這未必是因為螺旋形的功能絕佳，而是因為組合螺旋形，只需要使用格外簡單的指示。一個螺旋形的結構，可以由完全相同的小單位形成(好比一面牆是由相同結構的磚砌成)；再者，每一個次單位所插入的方式，與別的次單位一模一樣(見圖二~二)。只要你一旦明白一個次級結構的裝置方式，你便可以掌握全部。克萊恩並預期除了DNA的雙螺旋形式外，還有許多蛋白質裡出現所謂 $\alpha$ 螺旋的超級螺旋形(螺旋中的螺旋)，以較寬的尺度來說，螺旋形的微管及微絲都是維持細胞形狀和運動性的重要因素。微管及微絲都有自我組合的驚人能力，只要將所有的成分加在一起(或許需要一些成形的結構做為開端)它們便會自然而然地歸位，不需要任何模鑄成鷹架；或者說更重要的是，不需要任何資訊的供給。

或許正是因為資訊的短缺，才造成大型有機物必須由大批細胞組成的必要。細胞看來雖然各有不同，但卻有許多共同性；如果能成功地建造其中的一種，其餘的便不需太多額外的資訊(當然，是相對的)來完成。此外，在每個個體的發展過程中，同樣一套的知識指令往往應用於不只一種的生物架構上。比如人類，手的尺寸往往是足部大小的絕佳指標：早在彈性布料流行之前，所有的售貨員想要知道襪子是否適合你的尺寸，只消將襪子在你的拳頭上裹一圈便知曉。任何基因物質的單一改變——即突變——通常會同時影響動物

的兩邊。一個基因突變的果蠅絕對不會只有一隻白眼；一定是一雙。除了這種資訊的精簡性之外，尚有其他因素。我們所有人類的心臟和肺臟大致相同，但是細看各個器官的確切位置，卻難以預測。解剖學學生要識得大血管的名稱，但是對於小血管，就可幸運地鬆一口氣——原因非常簡單，實在是因為小血管的排列因人而異。

自然演化對基本變異的處理方式，也屬非易。一方面，提供原料物質的生物變異——透過基因突變及兩性結合造成的特性掉包——主要仍是由小小的改變組成。天擇只是測試這些改變，看看毛皮濃密一些，或是耳朵加長一些，是否會對繁殖產生有利的條件。另一方面，天擇也印證在每一個個體身上。是故任何改變若是想要增加物種的數量，就必須產生立即的優勢。如果是一個結構，其生殖上之優勢要等到其他的改變產生之後才能顯現出來，其用途便會大減。誠如演化生物學家道金斯(Richard Dawkins)的雄辯(不容任何爭議的)，他主張演化的過程是一個笨拙的工匠，而非一個稱職的設計家，中其一身都在不停地修修補補，絕非始自一個有創意的發明。

重大的發明創造，顯然並不是沒有出現過。生物學家們也嘗試運用聰明才智，設計各種可能的劇本，來模擬證明這種創造的出現，並不需要經過長時間對各種無用構造的細心經營。鳥類、蝙蝠及昆蟲，皆是靠振翅而飛。缺乏任何適當飛行物的前例，我們便不禁憂慮，在每個族系裡翅膀到底是如何開始的？是否有一種奔跑的鳥狀物，伸展其羽毛狀的手臂，以利長距離的跳遠？還是這種附加物只是為了樹枝間跳躍的方便而產生？或者這伸長的附加物——像是增長的手臂——幫助排除長跑中所產生的熱度？所有的美洲飛鼠和滑行蜥蜴，在前肢及後肢之間都有薄膜般的外皮，是否早在具體有效的真正飛行發生之前，這些生物都當過鳥類和蝙蝠類的範本？

演化過程所受的限制尚不止於這些。每一個有機體都是個別生物演化的結果，其演化歷史嚴重地限制未來設計的發展，絕非像當今電腦磁碟片只要確保與舊電腦的相容性那

般輕易。我們總是易下定論，認為每一個有機體，在一連串漫長的演化的過程中，都會在最理想的狀況心下與個體環境調適，其實這是大錯特錯。大錯特錯。祖先的族譜，其實早已為一個有機體的發展設下界限。試著想想一些優良的特性僅僅會出現在單一的族系中，我們便可以從中而知。

之前我們曾論及軟體動物的外殼、節肢動物的表皮，以及脊椎動物的骨骼。軟體動物與節肢動物從來研究不出如何製造一個適當生長的骨骼，兩者各自採用了一套體系來克服支撐的問題，其中之一還提供了外在的保護作用(無人能夠斷言，這是出於偶然或意外)。脊椎動物則因為製造出一個會生長的骨骼，因而解決了問題。雖然當中有一些生物——例如烏龜及穿山甲——目前仍需要借助附加的構造，以產生外在的保護。

節肢動物會製造一種有彈性的蛋白質，稱為節肢彈性蛋白(resilin)，其彈性(即放鬆時恢復的能量較伸長時所花費的能量為高)高過任何一種軟體動物或脊椎動物所產。貝類和蛤類等軟體動物則製造出另一種蛋白質，即外展蛋白質(abductin)，用來開闔兩片外殼，貝類游泳時便得靠拍打它們前進。脊椎動物的彈力素則是另一種彈性蛋白質(elastin)，可在韌帶及血管壁內發現(見圖二~三)。節肢彈性蛋白的主要功能，是在昆蟲拍打翅膀即將結束減速時能夠儲存能量，以利緊接而來的振翅加速。但其幫助昆蟲的翅膀達成最有效率的拍動，是否真的會比製造一個優良的樞紐韌帶以連結游水的貝類，或是製造一個低耗損的彈性組織來支撐低頭吃草的羊，來得更有效率?也許不然，但是如果貝類和羊隻能夠換得一隻蒼蠅的蛋白質，它們的日子可能會更加幸福些。

在上述的比較中，軟體動物也並非是註定的輸家。它們獨家掌握的祕訣，便是保持肌肉的收縮，毋需多花一點能量。在理想狀態下，你不須使用任何能量來支撐一負荷物，只有在移動它時才須付出能量。如果對一固定物運力——例如阿特拉斯(Atlas)以雙手擎天，或是水晶吊燈以掛鍊支撐——應該不會損耗能量。但在現實生活中，我們肌肉即使不做任何活動，仍然需要耗損能量。不動的蛤類，卻可以不付出

任何代價，摒雙瓣靜坐。

是故，大自然勢必遵循著一套承襲的計畫，而人類設計師卻可以向別的設計師借鏡。如果這個設計已經註冊專利，則會牽涉權利金或訴訟問題；但不管如何，大部分所謂具有用途的物件，在大眾領域中都是一個眾所周知的普通常識。正因為如此，互相競爭的兩家製造簡可以從同一個供應簡購買同一種零件，大自然對類似這方面的實現，卻有很大的困難。當然，大自然裡跨族系的技術轉移並非完全沒有可能，下列兩個例子就可以說明這不尋常的特點：

#### 一、白蟻的消化系統中蘊含著一種原生動物

*mixotrichs*，它可以分解纖維素，白蟻便借此獲得能量。白蟻的群棲生活，甚至可以說是為了確保白蟻們能夠彼此充分地傳染這種 *mixotrichs* 而設計的。這些原生動物，長久以來又被認為是靠著一種附著於它們表面的細胞器官 *undulipodia* 來推動。奇怪的是，這些 *undulipodia* 竟然是一群細菌，仔細一點地說就是波狀菌(見圖二~四)。原生動物將這些細菌當做它的引擎，就好比人類使用馬隊一般，但是其彼此倚存的共棲性當然是更為緊密些；可以說兩種有機體都必須賴對方而存。更有趣的是，這種共棲性，至少在其他的情況中亦發生過；在另一種白蟻身上，我們亦發現不同的細菌棲息於不同的消化原生動物中。這些原生動物的引擎，是一種桿狀細菌的鞭毛。千餘個細菌附在這些原生動物上，其中每一個細菌都帶有一打的鞭毛，長在原生動物的外緣，以利原生動物的活動。

#### 二、少數的腔腸動物，例如水母，懂得如何製造刺胞(stinging cell)，即它們的刺絲囊(nematocysts)。如果接觸這種大型水母(葡萄牙僧帽水母尤其惡毒)，往往會使人極端難受，也會使魚喪命。但是有一些生物，當它們接觸這種腔腸動物時，卻不會引起刺絲囊的發作。這些生物，包括一些魚類，因而更能利用腔腸動物的這種特性，做它們的屏障、保護所，甚至是食物來源上些裸鰓亞目(nudibranch)的軟體動物(無殼的海蝸牛)，更把這種特性發揚光大。它們不只不受到絲毫傷害，還可以把這種刺絲囊納入自己的皮膚體系中，並



且不解除其毒性，以保留原水母的自衛能力。這裡我們看到的不是生物的共棲性，而是將水母的技術竊據挪用以及再部署，這好比自軍隊那裡偷來上了膛的槍枝。

在上述二例中，都有某種機械特性在跨族系的生物間傳遞。舉例來說，最常見的化學性傳遞，是當某一種動物一旦攝取了原本有毒的植物，便對它們的掠食者產生毒性(比如帝王蝶吸食了牛奶草)。體認上述這些案例的存在，其一般目的不外乎幫助我們明白我們在找尋什麼。所以我們可以斷言，如此的族系間技術轉移並非尋常，而且對於自然演化而言也相當困難。

做為一個設計師，大自然不僅速度緩慢好比冰河，其實際作為亦缺法變通性及想像力。基礎的創造得來不易，一旦得之，廣布於整個族系。自然界繽紛的多樣性，不過是出於這個超級保守和陳腐的工匠手中之一種膚淺炫耀的表面罷了。沒有專利權需要註冊，因複製而侵犯專利也不可能發生(雖然意外的違例——不同族群的趨同——並不帶來刑罰)，整個設計的最基本出發點，便是立即的利益——鞏固繁殖。不斷地試驗、犯錯和忍耐。

## 從比較觀點看設計

人類科技的設計較少受到限制，所有生命歷史的複雜性都被排除；基本的重大改變或許不易獲致，但卻不需面臨重大的障礙。當然，我們所有的技術仍然得建築再過往的成就上，而這些成就也受到諸多限制，例如人類的聰明才智與思考方式、材料的供給，以及創造發明時因時因地而不同的社會支援。無論如何，發明家總需要進食，他所處的社會，也必須要有接納一個發明創新的意願。人類社會對於科技的創新，毫無疑問地也盡其一切所能，從敵對的態度轉為殷勤款待。羅馬帝國以其版圖及年代而言，接受程度可說是較低的；百餘年之間，船隻、建築材料，甚至武器的技術改進都不大。反觀十九世紀，北歐及北美人類社會對創新的接受顯然極高。隨意舉例，創新的發明包括鐵路、蒸汽機、電信通訊、合成纖維，以及電動馬達、電燈照明等等。

人類科技的設計以一種直覺上較大自然的設計簡單很

多的方式，造成改變與進步；但是換一個角度來看，這個設計亦難於如何濃縮簡化。發明家擁有概念，產生模型；從測試，經認可至傳播——這些步驟自然而然地產生。貝爾(Alexander Bell)想到一個簡單的方法來轉換電訊和聲音，費了一番工夫成功地創造了一個雛型，他便申請專利，與另外幾個人合力推出了電話這項產品。之後愛迪生發明更有效率的送話口(monthpiece)，又取代了貝爾系統中這一重要元素。整個設計過程清清楚楚地牽涉到計畫、預期，以及深思熟慮，這都是大自然的設計所欠缺的。但是人類設計的興正基本源頭，年代過於久遠，以致我們對它一無所知。試問到底是誰創造了直角？誰首先利用金屬製作器物？人類對科技的歷史雖然一直保存著完整的記載，但卻無法追溯到幾千年前。兩種科技的設計過程，擁有如此顯著的差異，但兩者卻也有著共同的重要元素——而且可能多得超過我們的認知。

## 文化的傳播

動物之間的創新及文化的傳播，不會受到任何事物的阻礙(植物是另外一回事)。猴子與猩猩們的創作最豐，但我最偏愛的個案，卻是發生在不被我們認為具有許多智力的鳥類身上。幾年前，有四種英國山雀，其中幾隻發現如果找到留在一般人家門口的牛奶瓶蓋，用嘴巴啄食兩下，便可以獲得一頓上好的乳油。對於鳥類而言，乳油並非尋常食物，但是如果有機會獲得，這乳油便會成為它們飛行時最好的燃料，脂肪的最大來源。這些飽食了乳油的飛行家，或許便可以經歷繁殖的最大成功率；而它們的後代子孫，或許會更喜歡在具備牛奶瓶蓋的課程中享受啄食之樂吧！天擇在它們續接的後代身上，勢必也做了有利的調整，事實也證明英國山雀的繁衍傳播速度因而加快。鳥類們彼此相授啄食牛奶瓶的技術迅速地散播開來——直到後來牛奶瓶蓋的設計改變，攪亂了這些鳥類，才使生物學家的觀察劃下了休止符。正如生物學家伯恩(John Burn)的警句：這個個案由於山雀是主角，因此有著淡淡預適應(preadaptive)的沫道！

## 天擇

即使是有知覺的人類，也無法阻止任何意外的發生與選擇的過程。所謂幸運的意外事故在早期人類的歷史中，扮演一個相當重要的角色。動物的馴養、植物的栽培、烹飪的起源、使用特異形狀的石器並導致刻意地模鑄其他形狀——在在都只需最低限度的前瞻性及原始藍圖。傳統的醫療大多是由幾近隨意的醫療行為中演生出來的。我們之所以得知，長期服用阿斯匹靈可以降低栓塞性心臟疾病的危險，不過是在使用阿斯匹靈治療關節炎時附帶所觀察到的結果。多少的美味佳餚，想必也都是出於例行公事中的意外變更吧！

不管是自然或是人為科技，都必須臣服於經濟效益之下。生物改進物種繁衍的成功——即適者——和人類公司團體的優勢頗為類似。根據經濟學者咖爾布萊斯(John Kenneth Galbraith)的說法，公司團體是否在人類社會裡具有優勢，與生物學家所謂的適者最為接近。他指出，大公司的經理人一般最屬意組織擴張——正好相等於生物數量的膨脹——而不喜將股息發放給大眾投資者。此外，我們常聽人抱怨某個公司的組織文化，因為他們對於利益的看法非常短視。所以，兩種科技成敗的最主要衡量，都不外乎它的立即效應。

## 孤立的重要性

有許多演化的改變明顯地發生在一些範圍極小、物種較孤立的生物中，因為地域或生態的屏障，這些物種較少面臨來自其他物種的競爭。一般說來，較少移動的有機體比較常移動的有機體會產生更多不同的種類。一種障礙產生後，一個原已適應良好的形式便會加入更新的競爭，並取代他種——或許這個解釋正好可以說明為何生物地理學在研究演化的生物學中，占有如此重要的地位。

隨著全球越來越趨向統一的科技，我們擁有這種暫時庇護的機會也越來越少，但是我們仍然設有一些減除競爭壓力的孤立保護領域。許多以前軍方贊助保護的祕密工作，最後卻出現在公開、非軍方的場合裡，此一現象不知是喜是憂。美國的太空計畫保護了微電子工業。當然，政府贊助的生物

藥學研究及製藥商的利益，也在同一個保護傘下因此得到了結合。

## 保守主義的偏見

在一個純粹競爭的對抗中，沒有一種優勢技術的取代是輕易的。自動汽車的技術，許久以前便建立在奧區式(Otto)循環過程的內燃引擎上，這種全球普遍的使用卻並不能證明它是帶動汽車最能符合經濟效益的方式。一百年間不斷地精益求精，燃料的易於取得，維護的日趨便利，都是不易放棄的優點。如果這種引擎會被別的引擎取代，絕對不會是出於公開市場上的純粹競爭。現今廣播電視上的解析度標準完全是一種時代的錯誤。但是市場上幾億的電視機占有率使它的地位難以動搖。同樣地，昆蟲即使因為周期性的蛻皮而造成不便，以致無法形成大型的地球生物，它們仍然構成地球上最多數的物種。在兩種科技中，沒有一個新進者會因為其基本優勢而得以確保成功，他們各自的歷史才是最大的限制包袱。

## 變遷的時間歷程

過去我們一直相信人類文化的穩定步調，所有的事物都是「向前的」和「向上的」；今天我們才明瞭，我們的歷史其實比想像中更加崎嶇，更不可預期。在生物學上，吾人已經普遍接受演化的過程有時會以間歇式的突發行為出現(這是埃德雷奇[Niles Eldredge] 和古爾德[Stephan Jay Gould]最早提出的觀點)剩餘的問題只是決定他們這種「間斷平衡理論」，與經歷時間的規律改變，彼此之間的相對重要性。在這個議題上，大部分頗具爭議的例子都極為深奧難解。但是試以生物界資歷頗為久遠的一群小種生物——哺乳類為例，它們爆炸式的出現成長，大約發生在六千五百萬年前，恐龍絕種之後。哇！幾百萬年的演化停滯，然後，忽然一夜之間....多麼不可思議!另外一個插曲發生的年代較近，大約在兩千萬年前左右的草種演化產生，接著發展成廣大的草原。草種的發生或許不難，但是對於毫無準備措手不及的生物而言，這種既磨傷腸胃又低能量的青草，實在不是什麼

優良的飼料。但奇妙的是，許多哺乳類卻在相對很短的時間內，發展出牙齒這種構造(見圖二~五)，以便咀嚼青草這種卑賤的物料。所謂[間斷式的平衡]理論，正意味著絕大部分時間天擇所做的工作，不外是為了功能而維持某種既定的形式。一旦一個有機體建立鞏固，隨意偶然的改變幾乎難以對它造成任何改進。

想觀察人類科技之路的坎坷，則需把時間標準加快，如此做法就可以顯示出人類科技以多快的速度所進行的相同變化。今天你在市場上買到的小電扇，八十年來幾乎沒有什麼改變。但是談到膝上型電腦，就算四十年似前，有誰能夠想像得出來？緊接著電燈和家庭配線的產生，電扇、烤麵包機，以及其他小家電用品好不容易地接踵而生。即使是一個孤立的設計，變異也非常態。一個單眼的反射照相機機身和二十年前或五十年前相比，形狀和功能都非常類似，一直到最近才有一層新的電子技術介入其外殼和骨架之間。在人類現代科技史上最大的突破改變，可能是一九四〇年代晚期半導體擴大器（電晶體）的發展，以及一九六〇年代數位積體電路（晶片）的產生了。相反地，人類的房舍、交通工具，以及家用器具、穿著衣飾，比四十、五十年前我們所預期的改變要少得多。舉目看看我們屋內四周，除了少數一些新電子產品和幾塊軟塑膠之外，新奇的事物實在稀少可數。

## 漸進式的發展

如前幾頁所強調的，天擇是一種倚賴微小改變逐漸演化的過程，而非改革式(革命)的發展。當然人類可以創造出重大的科技改革，但是實際上，我們真正做到什麼？早年教育告訴我們瓦特發明了蒸汽機，福特創造了自動車，但是真正仔細地檢視，我們會發現幾乎沒有一種近代的人類發明不是逐漸發展的一部分。關鍵人物當然舉足輕重。大凡所有的近代科技史，皆視科技為一種漸進式的發展，這有別於我們的認知。長期不定期的進展，並不能印證短期的改變並非漸進式的；如同在自然界中地理上的突變或改變，若是從世世代代的角度來看，它們也不屬於改革性的發展。

## 舊器新用

演化生物學者談論「預適應」，意即生物預先存在的特性能使這有機體適應新的環境狀況。例如，兩棲類及其餘的有腳脊椎動物似乎都是自一群葉狀魚鰭的魚類產生，而非來自我們所熟悉的放射狀魚鰭的魚類(葉狀魚鰭的唯一代表，至今尚可在非洲東岸的深海中發現其存在，人類也是直到一九三八年發現它們之後，才改變我們認為這種腔棘魚早已在千萬年前便已絕跡的想法)。生活在氧氣貧乏的沼澤裡，這些葉狀魚鰭的魚類只好發展出呼吸空氣的肺部和多肌肉的魚鰭，以助頭部露出水面(見圖二~六)。這個肺部及葉狀魚鰭的發展使它們能在古代沼澤生存，相當於人類具有移動性、呼吸空氣及陸棲生活形態的預適應形態。

人類文化的驟然擴張，往往使許多有機體的預適應性得以曝光。舉例來說，一個野生雜草的種子原本與其共生的耕種植物難以分離，卻在一夜之間發現它們完全適應了一個全新的棲境。一些小型的蒼蠅，如搖蚊科(chironomids)，它的幼蟲通常附著在急流中的岩石上，現在卻在下水道污水處理廠的通風器上造成大大的困擾。

但是，這種預適應性在人類科技裡卻尋常得引不起任何的注目。電腦程式以文字方式寫成，由鍵盤下達指令，顯然便是文字處理機的預適應發展。水輪自古以來一直是動力的來源二這正好提供了第一代蒸汽船一個最好的應用方式。的確，舊器新用造成一種特殊反傳統的神祕魅力，更因為那些物種超過了它們原始的應用範疇，因而引起一種獨特的滿足感。例如說，一個舊的油滾筒，縱向切開便可以做成一種風車的轉子:對某些人來說，這種事天天都發生。好比我最近壓平了一個塑膠水管，做成窗簾的支架；並且使用一個普通的金屬車床，做為測試扭力的機器。

## 類似發展

自然界在好些不同的族系裡常常有雷同的事物產生，這種事物的趨同性包括了許多值得一提的案例。舊大陸的沙漠中演化出來之多肉、多刺、無葉片的植物，全屬於同一科大

戟屬植物(euphorbs)(好比荊棘植物的冠部)。而在美洲沙漠中發展出來的，也是形式類似的植物，屬於另一個仙人掌科。但是無論是仙人掌科或是大戟屬植物上，它們最近共同祖先都不是多肉、多刺及無葉片的植物；它們是真正因環境需要而趨同的產物。有袋及有胎盤的哺乳類，在許多方面都有驚人的相似處。有袋老鼠、鼯鼠、美洲飛鼠，以及犬類，看起來與他們有胎盤的對應動物非常類似，但是它們都代表著哺乳類演化史上各自獨立的發展。人類的眼睛(脊椎動物)與章魚(頭足類動物)的眼睛看上去相像，功能也類似，但它卻屬於獨立發展及趨同演化的另一個案例。優良設計就是優良設計，而不同的族系在天擇的驅動下朝著類似的方向發展，也是理所當然。這物種的趨同性告訴我們許多在功能上極為重要的特質，即任何趨同作用皆會對繁殖成功造成決定性的影響。二七同時也讓我們留意到，在演化的過程中，何者才是較為容易達成的功能。

吾人對人類文化科技的趨同性則較不重視，但是它們仍然存在。一些類似的發展，例如十七世紀的萊布尼茲(Gottfried Wilhelm von Leibniz)及牛頓發明微積分，十九世紀的達爾文和華萊士(Alfred Russel Wallace)提出天擇的物種演化理論，這些都是純然知性的發展。上述各個發展的時代，勢必是處於頗富學術和知性的環境中。科技上的相類似發展則更為普遍：到底是布魯內爾(Marc Brunel)還是惠特尼(Eli Whitney)發明可互換的零件？是豪(Elias Howe)還是辛格(Isaac Merritt Singer)發明縫紉機？是斯旺(Swan)還是愛迪生發明電燈泡？或者說，在上述的每一個例子中，發明家都有兩人？貝爾的第一個電話專利，不過比另一名對手早了幾個鐘頭：萊特兄弟飛行的同時，多少人幾乎已經試飛成功，使得萊特兄弟必須在取得保障飛機發明的專利權與立耶公諸於世的選擇之間，能夠不偏不倚地取得一個平衡點。當科技不斷的改進時，顯而易見的進一步發展(正如在自然界裡所見，是由於需要及容易)將會發生在不只一人的身上。

在早期的人類歷史中，當跨文化的接觸較為有限時之過種趨同作用的發生是必然的。至於它的普遍與否，則一直是

主張孤立主義(獨立起源)與散布主義的人類學者之間的爭執所在。同樣地，到底人類文化中的編織、射箭、冶金術是單獨發生，還是同時於好幾處進行？鑑於自然界的趨同作用是如此地普遍，我較偏向孤立主義的論點。

## 物種的滅絕

談到滅絕，我們所聯想到的經常是達爾文的說法，但事實上物種的滅絕除了直接由於物種缺乏競爭的優勢外，同樣也因為棲息所在與環境的改變。平常生活裡發展的有利特質，在面對劇烈變動時，往往成為生物有機體的絆腳石。畢竟所謂正常有利的特質，全是當未來參照過去歷史而淘汰出來的；例如一個在陰涼處適應良好的植物，一旦森林消失，便勢必面對難題。至少我們可以肯定上當所處世界的變化是如此迅速時，極端的特殊設計恐怕產生的是不利生存的反效果。吾人常懷疑，人類科技是否可以鑑察棲所的改變在大量物種滅絕中所扮演的角色，或是領悟物種的特定設計對物種並非俾益，而它其中學到具體的教訓。當然，相較於自然界，人類某種科技的滅絕，其原因勢必要複雜得多。馬鞍製造與蹄鐵場的沒落，絕非因為科技自動化，而是因為自動汽車的普及。面臨昂貴的燃料使用及普遍為人詬病的廢氣排放(事實上，這好比棲息所的改變)，或許汽車內燃引擎也會沒落。所以我們認為，現狀沒有一個競爭者是永遠處於優勢的。

上述對所謂「演化」及「改革」著墨甚多，但是這兩個名詞卻因為在生物學上的聯想及政治學上的含義，容易招致混淆亂用。也許我們應該堅持使用經量級的字眼，例如「漸進」(gradual)和「突躍」(jumpy)，或者較學術化一點，用「漸增」(incremental)及「突然異變」(salutatory)來形容小步驟和大幅度的改變。我們特別容易偏向於突躍的歷史觀，完全是導因於我們過於崇拜英雄，傾向把歷史成分離的小事件、小時段，以及各種不同的類別。一個不完整的化石紀錄使我們不禁認為自然界的發展也是如此突躍式的。或許唯有當我們體認到我們對這種偏見的傾向時，才能對這種陷阱更加警惕。

最重要的論點，意即我們重複申述的主題，便是借著同



時觀察兩種科技——自然的及人類的——使我們能夠採用一種嶄新的角度來看待兩者。在本章中，我們看到兩者在應用上驚人的相似處，但其基本的法則卻是如此地不同。兩種科技的相似處已經為人注目良久，接下來便是兩者的相異點占據舞台的時候了。

### 第三章 大小攸關

尺寸大小，事關緊要，而且正如同演化這關係將會影響其後代。第一，有利於大型事物的設計通常對小型事物功效不彰，反之亦然。其次，我們的兩種機械科技涵蓋的尺寸範圍極廣，包括從最小實質的微分子到最大的人體結構。再其次，自然科技的產物一般說來較人類科技的尺寸稍小，雖然兩者的尺寸太小有相當廣泛的重疊。因為兩種科技共用同樣的星球，所以歷經同樣的壓力、溫度、重力加速度、風力，以及水流影響。雖然有實例為證，在許多方面這些物理因素對兩者的影響往往大不相同，但事物應用的實況往往取決於它的尺寸大小，這卻是事實。

尺寸對事物的決定性影響自古以來便有體認。伽利略全神貫注絲毫不差地計算出(在沒有空氣阻力時)，任何大小的動物都應該與其他動物跳得一般高。這意謂著以相對的身體長度而言，較小的生物能夠穩操勝算(甚至在有著空氣阻力的現實世界裡，跳蚤的實力也是挺驚人的人它們可清除的障礙比自己的身長高好幾百倍)。偉大的十七世紀法國博學家笛卡兒，對於物質有這樣的說法：「我所見到的自然物與機械物之間唯一的差別，便是機械的運轉全是憑藉大到感官足以察覺的器具(其實這正是人類能夠製造它們的必要條件)，而自然界的進行卻全部仰賴小得幾乎逃過我們肉眼感官的細微要素。」

什麼東西混淆了我們的直覺——卻沒有錯導笛卡兒?是我們人類自己不合宜的尺寸。最小具有完全功能的有機物(不包括濾過性病毒)，例如讓你得到輕微肺炎的細菌，只有○.二微米，相當於五千分之一公釐那麼長，就算是在極精密的顯微鏡下，也不過是像小黑點般可見。生物中體積最大的大型鯨魚，長度大約是二十公尺，或是六十呎餘。粗略地說，生物的尺寸大約涵蓋了一千萬個層次範圍。再從一個適當的幾何比例尺上來看，如圖三 ~ 一所示，我們人類的定位屬

於整個比例尺的上端。以二公尺的身長為準，我們比最大的鯨魚短十倍，但卻比最微小的細菌長上千萬倍。在上述的比較中，我們捨棄算數比例尺不用，而採用幾何比例尺，將每一個多餘的○或是大小的次方數當成一個等量的增值。正如同生物數學家先驅湯姆森(D'Arcy Thompson)所說的：「吾人能夠將小自分子，大至美洲杉、鯨魚，用不超出一打的分界線便輕易地數算完畢，實在是令人訝異，也值得我們留步深思。古埃及的算數法，不論是加法、減法，對這樣的作業實在已經不敷所需。」(在此值得一提的是，湯姆森的專書《論生長與形態》(On Growth and Form)，寫成於一九一七年，再版於一九四二年，無疑是討論生物學機械特性方面的最佳著作二這本書的一部分魅力——此書仍在印行——來自它純粹屬於語言方面的光彩，或者說在於它的易讀易懂、驚人的寬廣度，以及富於想像的內在訊息。雖然值得一讀，但是從生物學的角度來看，卻是怪異且過時的，因為它所追尋的目標是自然界裡的一種幾何完美平衡，與天擇中的演化完全無關。一些非生物學者，好比建築師，往往視《論生長與形態》為生物學或生物力學的主流著作。所以在此我要特別澄清，這位湯姆森是受人愛戴的老祖父，但絕非我們正確知識的源頭)。

絕大部分有機物的尺寸不僅比人類的尺寸為小，而且在大部分的生物中，小尺寸才是祖傳的特質，大尺寸卻是物種的特異。大型化石似乎令人印象深刻，但小型化石才真正在各處獨領風騷。大自然始於微小。有機物建築於細胞之上，而非分裂成細胞；最早的化石全是極度微小的。人類科技卻朝相反的方向走。我們的輪船、建築物以及橋樑的大小與日俱增，但是增加的係數卻極小，且發展的時間甚長。更讓人印象深刻的是我們的組織架構(或是它們的要素)如何由大變小。我們第一代蒸氣引擎體型龐大，在低壓下操作緩慢；現在的噴射渦輪卻既小又快，使用高壓。最極端的例子更非電子儀器莫屬。試將今天大型積體電路中超小型半導體的接合面與三〇年代使用的巨大真空管相比，大小差距何其大。

## 長度、表面積和體積

長度、表面積和體積並非同一件事。試想有兩個立方體盒子，如圖三~二，如果其中一個盒子的邊長是另一個盒子的兩倍，則大盒子的表面積比起小盒子的表面積，是四倍而非兩倍，同時其體積也是小盒子的八倍。依此類推，一個邊長十倍的盒子，其表面積會成為一百倍，而其體積絕不會小於一千倍。面積的增加相當於長度的二次方(二的二次方等於四，十的二次方等於一百)，而體積的增加是長度的三次方(二的三次方是八，十的三次方等於一千)。這個準則通用於任何形狀類似的物體，例如球體或是(至少是大約)鮭魚。當事物的尺寸變大，體積的增加較面積來得劇烈得多。因此，所謂的大，意即相對於你的外部表面，你的內部其實及其豐富；所謂的小，即是相對於你的裡面內容，外表反而更充分。

生物界的物體，無論是樹木、人類或是細菌，其密度相差不多——與水的密度相似——所以重量及質量皆可參照體積的準則。一個身長兩倍、體型類似的魚，將會此體積小的魚重上八倍；廚師們，請注意點哪！

是故因體積而異的變數，例如重量，會比因表面積或是邊長而異的變數增加得快，其影響不可說不大。舉例來說，動物的體熱產自它們身體內部，卻由其接觸外界的表皮散放。如果有兩種動物，一大一小，用同樣的速度產生體熱(根據它們的體積)，則大型動物因為體積較豐腴而表面積相對較小較容易保持溫暖。但在哺乳類及鳥類中，無論其體積大小，身體溫度差異都不大。我們大型動物不過產生較少的體熱而已(相對於我們的體積)，比例上我們也需要較少的食物，可以靠著薄薄一層隔緣的毛皮、脂肪或羽毛得以存活，也可以在較冷的氣候中漫步、游泳而不受影響。成為溫血動物對於大型恐龍來說，並非是什麼了不起的成就，但是對恐龍同時代的小型哺乳類卻影響深遠。確實如此，溫血特性的形成，只會發生在質量大於數克的動物身上；舉一個最好的趨同例子，最小的鳥類(蜂鳥)與最小的哺乳類地鼠體型相當，兩種動物都是胃口奇大無比的吃客。到了晚上兩者同時得讓身體降溫，進入冬眠狀，這樣才能確保早晨醒來的時候

尚不致餓死。對於極帶的溫血動物，其最小體積的要求則更加提高。對超小型動物而言，溫血造成許多問題，表面積只會闖禍。

人類科技竭其所能地利用熱能——舉例來說，用來製造物質。但是我們一則使用大型烤箱，一則大批製造，所以實際的能源需求尚不致太大。然而對於一個只有一公釐或一公分闊的有機體而言，不管製造多麼微小的熱量，不管是來自內在或是外在，相較於其體積，都可說是昂貴無比的事。這好比是一個大型建築物的暖氣費用，相對於其體積而言，一定比小房子來得經濟。群居的蜜蜂同心協力保持蜂巢的溫暖，這種功能是什麼任何一種獨居的昆蟲可以辦得到的。我們看到尺寸大小決定長度、表面積和體積，而熱能交換只不過是其一個影響而已。大凡任何工程，一但牽涉到四周環境的物質交換，變脫離不了這種關係的限制——不管是好是壞。如果你的體積小，則氧氣交換會相對地較為容易，這種原則甚至在沒有肺部或鰓部的狀態下都能成立。但是，你的身體內部卻因體積的關係與表皮相去不遠，使你更容易招致各種掠奪者和外在污染的化學攻擊。

如同前述，生物有機體必須成長變大，但卻不能對其功能構成干擾，這樣的前提使得依據尺寸大小的變數更加地複雜。正如圖三~三，一個長大的成人，不可能成為也不會成為一個放大的小孩。試想兩位普通體型的人，一高一矮(較矮一方是否是成人或是小孩無關緊要)，則其重量想當然應該根據前述立方體高度的規則變化，或至少說大略上會如此，而其兩者的雙腳鞋底也必須能夠支持其體重。但是說到鞋底——這豈不是表面積嗎？如果身材高的一方只是矮方的加長版的話，那麼他將會在每平方吋(表面積)的鞋底上承受更多的磅數(重量)。雖然如此，人類的被造卻自有其巧妙精微之處。耐吉公司研究發展中心的調查員發現到，長人的腳往往大的不成比例，其不成比例的程度正好得以彌補每平方吋鞋底所承受的重量。當然此處的重量是指根據上述立方體長度所計算出來的預期重量；如果你的體積變胖，雙足並不會增大補償你體型上的變化，即使它們會相應地變扁一些。

試舉另一例子。一個自由落體越落越快，一直到它持續增加的阻力與其重量相當時，落地才會達到一個最後穩定的速度。這個物體的表面積決定它的阻力，而拖向地面的重量卻是因體積而異。既然大型物體是體積增加較表面積為多，並且在達到最後速度時重量與阻力相等，是故大型物體落地的速度快，請參照表三~一。對於人類而言，落地無疑是冒生命的危險；而對於一個尚未離巢的雛鳥，除非是它們的掠食者窺伺在下，不然落地絕不會構成任何嚴重的傷害。正好比偉大的生物學家霍爾丹(J.B.S. Haldane)在他的一篇名為〈論正確的尺寸〉(On Being the Right Size)的短文中說：「老鼠毫髮無損，人類斷手殘臂，馬匹血肉四濺。」(在《往威干碼頭之路》〔The Road to Wigan Pier〕，這本描述英國採煤的枯燥書中，歐威爾——後來寫成《動物農莊》〔Animal Farm〕及《一九八四》兩本名著——猜想老鼠們如何進得了礦坑，「或許是自通風口掉進去的吧！因為他們說老鼠可以自任何高度掉落而不受傷害」。這是由於相對於老鼠的表面積，它的重量真是太輕了。至少歐威爾及其他英國的社會學家都有這樣的常識——霍爾丹這篇短文的首次刊登，便是獲得他們的報紙青睞)。

簡而言之，大型陸棲動物居住的世界是由重力來主導，對於體型較尋常的生物，重力的關係則小得多。至於水中的生物，則完全不受它的影響。

## 體積和飛行

論到機械方面的神效，沒有什麼比飛行更令人難忘了。因為飛行這件事無法自我顯明，所以是由自然界對我們展示了飛行的可能性。但是當飛行動物向我們指出這條走向飛機製造的路徑時，卻嚴重誤導我們，尤其是在細節部分——最主要的原因，便是飛行

實際問題與體積大小有完全的依存關係。換句話說，一個飛行器的大小可以決定它的設計和功能。

首先，一個飛行器具有兩種不同的任務；維持高度以及前進，兩種任務都需賴體積大小來決定其難易。對於一個微小的飛行昆蟲，抗拒地心引力以維持高度應該是相當簡單，

但是它們若要排除阻力前進，則遠比鳥類或飛機來得難多了。再一次我們看到體積大小如何影響阻力以及重量。維持飛行的高度必須應用朝上的力量來抵銷飛行物的重量；而往前推進則需要在當時的飛行速度下平衡空氣的阻力。重量依體積而定，阻力則因表面積而異。飛行物的長度若減半，當阻力減低至四分之一，重量則會降至八分之一，因此重量對小型生物產生的困擾遠不如阻力。小型生物飛行的速度因而較慢，並且嚴重地受到任何風力的左右——好的一面是可以利用氣流，但卻必須克服逆風及航行的複雜等頭痛的問題。

其次，飛行器翅膀的揚力，正如同其阻力一般，隨面積而有所不同。因此，長度加倍(不改變其形狀)可以使飛行器增加四倍的揚力和八倍的重量(雖然這重量的增加聽上去不太樂觀)。解決方法之一，便是在較大飛行器上安裝大型翅膀；另一個方法，則是使用某種方法加快飛行速度；揚力，好比阻力，隨著通過空氣的速度而增加。在此處我們再一次得以證明，較大即較快。舉凡小小昆蟲，到大型鳥類或是更大的飛機，無一不適用這原理。但是這種速度的加快不需要(也不會)非常地快速，因為雙倍的速度造成揚力及阻力的增加是四倍而非兩倍。果蠅一小時可飛行三哩，大黃蜂可飛行十二哩左右，只有大型的鳥類可超過時速四十或五十哩；可是對飛機而言，這恐怕是它們最低的速度呢。

第三個受到大小影響的因素，使物體的設計和功能更加複雜。最佳的翅膀設計可以產生更多的揚力，以及更小的阻力。這種揚力及阻力的相互關係，雖然不是絕大部分，但卻極重要的部分要依賴體積的大小和速度，其中對於慢速飛行的小型翅膀尤其重要。飛行器越小，揚力對阻力的關係則益發處於不利，其中的罪魁禍首便是所有流體的一種特質，稱做黏性(viscosity)。簡單地說，黏性是流體對流動的抗力，是它們內在的凝聚力。如果物體組織的尺寸變小，速度變慢，則黏性所產生的影響會持續的增大，有時甚至會成為致命的阻礙。小小一個昆蟲的翅膀在空氣中拍打向前，就好比在黏稠的糖漿中推動一支細棒(魚竿)一樣；揚力所需依賴的物體形狀，同時也被運載它的空氣所阻礙。小而慢的翅膀其

阻方總會多過於揚力，這道功課可成了自然設計師的大難題！

讓我們來看看滑翔機。不管是有生命的或是無生命的，一個滑翔機在靜止的空氣中降落的角度，完全端賴它們的揚力對阻力的比例而定。比例增至極至，則產生較平面或幾乎是水平角度的滑行。鳥類無法像滑翔機一般水平滑行，原因非常簡單，只是因為它們的體積較小之故，讀者可見附表三~二。更實際一點地說，鳥類無法從固定的高度上滑行很遠的距離。那麼人類的科技是否因為我們的翅膀擁有較鳥類為小的阻力與揚力比例，就比自然更勝一籌呢？這種比較實在因為大小不成定論而難以界定，而我們也應該避免做任何不公平或無用的裁決。我們只是知道，做為一個滑翔器，昆蟲遠比鳥類差得遠，而且只有極少數的大型昆蟲，譬如蝗蟲和蝴蝶，才具有滑翔的功能。

滑翔再加上空氣的流動，整件事更顯得複雜難理。人造的滑翔機或自然滑翔的動物，都需要乘駕氣流以延續和導向他們的飛行，我們稱作飛翔。所以在這種狀態下，浮在空中的時間也許與在靜止空氣中所能前進的距離一樣重要。下降的角度以及下降的速度對於空中浮行的時間，具有同樣的決定力。通常「小」的物體意味著較陡較慢，所以我們看到飛行的鳥類此滑翔機降落的角度更陡峭，速度也更慢。如此看來，老鷹和滑翔翼在空中浮行的時間是相差無幾的。至於滑行的度的昆蟲則降落更陡，速度更慢，帝王蝶的滑翔因此次於鳥類及滑翔翼。

體積的大小對飛行器造成的影響還有第四個層次，它的微妙也常誤導我們早期對飛行的嘗試。飛行動物努力拍打翅膀以產生揚力及驅動力：高效能的人類飛機(不包括直升機和侵略者的噴射機)則分別使用固定的翅膀及螺旋槳推進器，來產生揚力和驅動力。是否鳥類應該仿效我們分別兩種功能的形式？為什麼人類只有靠著分解成兩種功能時才能達成相當的效率，而鳥類卻全然不需要？

飛機為了保持前進，必須使空氣後斥的速度超出它飛行的速度，同時它為了保持高度，也必須使空氣下壓的速度超



過它升高的速度。升高的速度比起前進的速度，實在是微不足道；確實如此，多數鳥類或飛機的飛行升高幾乎是零。對於水平飛行，任何使空氣下壓的企圖都會構成揚力，如果能夠將最多的空氣給予最低量的下壓速度，這便是我們最高的效率所在。飛機的向前便是推擠原已快速流動的空氣而造成的，長而固定的機翼吸收了不少下壓空氣；短小的推進器快速旋轉推動較少的空氣，卻給予飛機本身需要的更大速度。如此功能分開卻造就了飛機的效率——所需引擎不大，燃料亦不多。飛行動物體積雖小，但飛行速度不快，以致它們不易遭受到急速迎面來的風。對它們而言，分開的推進器和翅膀並沒有多大助益，反而是振翅一飛，頓時揚力與驅動力自然而然地產生。這樣的比較我們將在第十章繼續討論。

## 表面張力和擴散

做為人類，限於龐大的體型和障礙，我們很少關心物質的黏性；至於表面張力和物質的擴散，我們更是毫不在乎。但是對於一隻小小的昆蟲，一個不小心翅膀碰到一灘水，這表面張力便成為生死攸關的事。自然界對於表面張力可是小心翼翼，根據所扮演的角色，使它們有時輕易沾濕，有時卻具有強悍的防水功能。

表面張力是一種來自液體分子間互相的吸引力，水便是這種液體的最好例子。如果分子們相互吸引，則易聚集在一起——這意味著形成最小的外在面積。表面張力便彷彿是一大群人為了防止熱能流失而緊緊地靠在一起，往往一滴水珠所形成的形狀，能夠滿足在固定體積下維持最小表面積的需求。如果小水珠停留在一個平面上，其分子與這平面的吸引力不如水滴自己分子間的吸引力，則水滴便會聚攏來成為扁平的球體狀，如同我們在剛剛上過蠟的汽車上發現的雨滴。在繞軌道環行的太空船上，因為沒有重力，水滴會變成完全的球體。相反地，如果水分子強烈地被某種平面吸引，超過它們彼此之間的吸引力，水珠則會在這平面上灘成一層薄膜。

將水注入薄薄的玻璃試管裡，水面會上升，這是因為水和乾淨的玻璃彼此強烈的吸引力；如果換成水銀灌在同樣的

試管裡，表面會下降，則是因為水銀對玻璃的吸引力極低。我通常在擦拭東西時加一點點洗潔精在水裡以減低它的表面張力，而得到更好的洗滌作用。我們同時留意到(經常出於一種不自覺的原因)一些像是脫脂棉球或天然纖維布類的吸收劑，當它們乾燥時會壓縮變小；所謂的「吸收劑」，意即會吸收水分，使水分附著其上，所以當水被蒸發而造成水分喪失時，水分子尋求減低表面積的傾向便把濕潤的纖維向內牽引。吾人利用此現象，可做出一個小型自動開啟的虹吸管；只消在玻璃杯上懸掛一塊棉布，自玻璃杯底開始跨過杯緣再導至鄰進較低的水槽中，如此整杯的水便可以完全吸光。雖然如此，這些事情對於我們日常生活影響實在不大。

但是對於水黽而言，表面張力卻是生命攸關的事，見圖三~四。它們足部包覆著一層蜜蠟，因此不會吸水；它們的身體重量藉著足部對水面施壓，而水卻往土推擠試圖拉平水面來達到最小表面積的目的。只要水面往上推擠的力量正好抵銷水黽的重量時，水面的凹陷便適時停止。如果昆蟲舉起兩腳離開水面，則其他四隻腳便對水面施加更多壓力，產生更凹陷的漣漪。在這樣的世界裡，表面張力便是主要的演員，有一些在水面浮游的昆蟲還要靠尾部噴射清潔劑才能往前推進。至於我們人類呢？為何我們無法在水面上行走？我們下墜的力量，也就是我們的重量，必須與上托的力量平衡，這力量等於表面張力乘上足部、空氣和水面接觸線的長度。下墜的力量取決於體積，上托力量則有賴於長度。人類的體積是如此地龐大，以致我們對於任何適當長度的足部都嫌過重。我一個六十公斤重的身體，需要長度達八千公尺(五哩)的足部，而一隻十毫克蚊子般大小的昆蟲，只需要全部不過一公釐長的足部。

但是體積夠小能夠行走於水上，缺點便是無法穿透這表面張力；對於一公釐長的昆蟲而言，表面張力給它們的限制就好比帳篷的帆布牆對我們一般。我們可以隨意地躍入水裡，重複地把木槳插入水中以划動小船；我們可以在水中游泳，變換各種泳姿，不管是自由式、蝶式或是仰式，但是小小的昆蟲卻只有待在水面上或水面下兩種選擇。

其實表面張力的影響並非只限於水塘或小水灘。樹木的水分由其導管上升，由樹葉蒸發。吾人在使用吸管時，一旦停止吸入，空氣便進入吸管上部，汽水就會回到原處。這樣說來，為何沒有空氣會再回到葉子裡？維持空氣不致入侵，表面張力在此處扮演了舉足輕重的角色。樹葉細胞壁上的氣孔，使得水分得以蒸發，但是其開口太小，以致空氣無法進入。若要從這樣一個大約千分之十公釐寬的氣孔中使空氣通過，穿透水分與空氣形成的防線，估計約需三十單位的大氣壓力。所以我們再次看到，相對的尺寸甚小(在這裡指氣孔的直徑)，表面張力就可以大顯神通了！

擴散要登上舞台甚至要發生在更小的尺度上，每種液體或瓦斯其分子漫無目的地四處遊蕩便造成擴散。單獨來講，物質裡的氧和氮、淡水和鹽水皆極易混合在一起。分子擴散最常見的示範，便是在課室內打開一瓶香水，不消一會兒，每個人都可以聞到那股強烈的氣味。一般人便認為，香味的傳播是借著分子們任意游蕩——以致造成的擴散。其實並不盡然，除了當香水靠近我們鼻腔上皮細胞附近一點點距離以外，香水完全是靠著室內一股不規則而洶湧的氣流載運四布，這種形式是有別於分子四處亂竄的擴散理論的。空氣和水的對流性是如此地普遍，以致想要把擴散以一種感官的方式示範出來都變得幾乎不可能了。

但是如果我們把注意力放在細微的世界裡，看看次細胞的層面，我們就會發現，擴散作用是物質運送和混合的重要媒介。不但在人類自己身上，也發生在所有的有機體個體上。任何的神經衝動，經常要靠傳導體物質(transmitter substance)的擴散作用由一個神經細胞傳送到另一個細胞。每一個神經細胞的間隔大約只有千分之五十公釐寬，而擴散的時間延遲大約是千分之十秒。對於這樣次細胞式的距離，擴散的速度可說是相當地快捷。的確如此，幾乎所有動物細胞間的物質傳遞都需要利用擴散作用，但是擴散的功效卻徹底地依大小遠近而有所不同；距離上拉遠十倍，擴散的功能卻要足足減低一百倍。由一個以上或幾個細胞組成的動物，通常是無法單單靠著擴散作用來傳送體內的物質，動物們必須

擴增到具備心臟血管、充氣的肺部、消化管道以及其他種種器官，才能造成流體的流動。

遠較細胞龐大的人類科技發明，則只有在偶然的機會裡才使用擴散原理。一種專門用來為腎臟功能喪失的病人清血的透析器，便是使用擴散作用，透過一些極為細小、為數極多、總合表面積極大的管子，達到讓血液進出替換的功能。另一個極為出名的(或說是惡名昭彰)的例子，其過程是利用大小不同的分子具有不同擴散速度的原理來達成。稀有而可進行核子分裂的鈾二三五，在它們穿透一個多氣孔的藩籬進行擴散之時(以氣體形成)它們的速度遠遠超過常見、體積較大而核子不會分裂的鈾二三八。人類限於體積的龐大，又缺乏耐心，往往忍受不了短短距離內擴散作用的緩慢而訴諸攪和、灌輸等動作。這不正是動物循環系統的作法？那些細胞般大小的生物對於我們的行為心裡一定十分納悶。

## 重力和慣性

我們至今所討論的三種現象——黏性、表面張力和擴散——都是對小型生物非常重要的影響因素。其他因素——尤其是重力及慣性——則左右著多數的大型生物。重力的問題早已提過，它使我們大型生物掉落的速度較小型生物快，它使大型的生物無法在水面上借著表面張力來支撐它們自己，而且也是因為它的存在，使大型飛機要格外努力地加快速度飛行，才能在合於經濟效益的情況下維持不墜。

重力與大小有關的惡作劇更是微妙不已，試想我們水域裡被風吹動而一波接一波前進的波浪。水的慣性造成浪濤不斷，水的表面張力和重量使波浪平靜。對於一個波峰間距離不超過三分之二吋的小漣漪，表面張力是平靜波浪的重要因素；它的水分子向內凝聚以減低其表面積。對於大的波浪，則是重量——地心引力——決定一切，也就是水往下流的傾向，使其波浪平靜，這種轉變使大波浪與小波浪的行為有別。波浪大小與其翻騰的速度，其間的關係完全是取決於波浪大小。如果是大波浪，則越大越洶湧快速；增加波峰間的距離，或是波長成為四倍，則波浪翻騰的速度會增快兩倍。一艘普通的船，其速度難以超過與船身等長的波浪，一艘四

倍長的船隻，若不考慮推進引擎成本不成比例地增加，其速度可增至兩倍，所以大船較小船快，而小船又較鴨子和麝香鼠來得快。但是對於每一個波浪間隔不到三分之二吋的小小漣漪，規則就完全相反：小即是快。對於鼓甲蟲而言，它們的迷你水上世界，勢必像是一個充斥著小型超級跑車和緩慢大箱型車的高速公路吧！

慣性，一種固體和液體的共有特性，是物體在沒有外力干擾的情況下，停留在靜止不動或維持前進狀態的趨勢。換句話說，驅動靜止的物體需要使力，但是中止物體的活動同樣需要額外的力量。更明確一點地說，這力量等於物體的質量乘上改變它狀態的加速或減速力，所以這個牽涉到慣性的力量隨物體的質量而異。一個龐然大物突然停止必然需要用到無比的力量；相反地，子彈為了彌補其體積的不足，必須以驚人的速度發射，而低速短槍口的手槍則通常靠沉重的發射物來彌補其速度缺點。人類長久以來使用的各種工具，包括一端用石頭做成的棍棒、金屬頭的釘鎚，以及雪撬、大鎚、十字鎚和斧頭等，都是分量不輕而不需要剎那間停住的物體。要改變大塊金屬的形狀，需要更大塊金屬的撞擊，這是工業界一個世紀以來極重要的祕訣。大型動物兩腳一踢，便可加諸其他動物相當的傷害，甚至人類都可以毆打別人造成傷害。但是這種不帶武器而借著慣性使然的侵略行為，對於比我們體型稍小的生物卻毫無價值；生物界最好鬥的螞蟻從來不會踢打它們的敵手。即使對我們而言，一拳打出去的效果還得視對方的慣性——也就是它的質量而定。踢翻一隻貓，行為令人不齒；但是如果異想天開去踢一隻老鼠，卻是徒勞無功。

換一種說法，我們可以說凡是較小的物體，因為質量較小，是故較容易開始也較容易中止——也就是容易加速和減速。較早以前我們提過，所有自然界的跳躍選手，如果不考慮空氣阻力的因素，都可跳至差不多的高度，這意味著它們起跳的速度必然是相等的。但是短腿的跳蚤僅僅在極短的距離內就能達到這種速度，而長腿的袋鼠距離可要比其長的多，所以說跳蚤的加速比袋鼠強得多。大一點也許快一點，

但是大一點同樣加速也慢一點，這是一個印證在所有有機物和無機物的原則。試試看逮住一隻停在你手中的蒼蠅，不啻是難上加難！美國大兔子的起跑，快過最好的賽馬和任何兇悍的高速賽車。但是，大型動物的慣性動作一旦開始，便會較小型動物的滑行來得更順利。要中止一艘行進中的大船，往往需要好幾哩距離；渡輪如果不能逆轉其引擎，鐵定會把碼頭撞個粉碎；而所有的汽車都必須帶有煞車的裝置。但是一個游水的微生物可以在任何時刻停住——典型的距離比其身長還短。對於小型生物，因表面積而異的阻力對它們的影響至鉅，而與體積有關的慣性卻奈何不了它們。

慣性同樣影響液體的流動。當水流量尚小，黏性主控一切，水流呈平順的層流形式。每一個流體的一分子與它們的鄰居做著同樣的動作。當水流量變大，慣性逐漸抵銷其黏著性，此時流體中的每一分子傾向於重複它們原來的動作，而無視於它們新夥伴的任何不同動向；我們稱這種混亂的漩渦式水流為紊流(或紊亂運動)(圖三~五對兩者的差異有詳細的說明)。緊鄰飛機或船隻的氣流或水流必然成為紊流，而微生物四周的水流毫無疑問地成為層流狀。紊流確實攪亂一切，而層流毫無攪動的能力。小人世界的湯匙無法輕易地把牛奶攪進咖啡。血液在身體裡四處流動，但即使是大型動物最粗的血管，其流動仍是層流狀；但是工業界及家庭用的水管，則全屬紊流式的水流。

兩種體系的差別豈只僅僅是自我攪和；任何流體的流動，都受到兩個不同版本規則的左右。黏性是一種內在的特性，造成內裡的小型物體慢慢地隨流體而流動，帶出更多的流體。蒲公英和牛奶草的種子使用一簇簇纖細的絨毛，能夠緩慢地自空中落下，宛如使用降落傘一般，讀者可參見附圖三~六；這絨毛帶動足夠的空氣，使它們一整簇便形成了氣球一樣的功能。但是若將這種設計加大，卻毫無價值，因為對於大型物體的速度而言，黏性的重要影響性遠遠低於重量和慣性。所以無論在那一種科技中，都看不見使用這種絨毛種子的方法來解決大型物體減速下降的問題。為了減速，兩種科技各行其是。和人類使用的降落傘最粗略的類似物，恐

怕要算是陸棲或是樹棲的生物吧！自然界卻情有獨鍾，選擇了一種轉個不停的旋翼式種子設計(嚴格地說其實是果實)，例如楓樹和其他樹木的種子。這種被動的旋翼式設計也曾被放大來做為人類設計的考量，卻發現降落傘的設計仍然較為合用。物理事實排除了為體積較大的物體選擇絨毛簇簇的設計方案，至於是要選擇旋翼機，還是降落傘，則沒有一定嚴格的界定。

## 圓柱和橫樑

如果你把一個支撐屋頂的圓柱加長兩倍，試問要加寬多少才能配合？我們只消隨意瀏覽一下普通機械工程師的設計原則，便可以再次看到體積大小所扮演的角色。這些原則也必須適用於自然界的設計。最簡單的例子，我們可以考量圖三~七中的兩個圓柱，它們以普通材料製成，而且負載的重量並不會因時而異。

首先看看左邊那個直立的圓柱，它所支撐的重量包括它自己，以及在它頂上的物體負荷。或許每個人都可以猜測得到，只有肥胖短小的圓柱才能支撐重物而免於壓垮的命運。我們擔心一個物體又長又細，以致當我們突然把兩端互相彎曲使力，它就承受不住而斷裂，這情形好比我們握住一根乾的義大利麵兩端向內施壓一樣。這如何造成的？決定的力量在於圓柱直徑的四次方，除以圓柱高度的二次方。這種組合對於任何毫無助力的直覺判斷來說實在困難，但是如果我們試圖把整個圓柱加大兩倍，也就是把直徑和高度同時加倍，情況會如何？此時承受彎曲的力量，是二的四次方除以二的二次方，等於十六除以四，也就是變成原來的四倍。這真是再棒不過的事，體積增大兩倍，竟然導致四倍的抗彎曲力。

但這只是整件事情美好的一面。如果我們非常準確無誤地加倍其體積，則結果會是八倍的重量，這重量包括圓柱體本身以及任何承載物。所以如果把整個尺寸放大一倍，將會得到四倍強韌的圓柱，但是卻要承受比原來大上八倍的重量！此時最佳的狀況，最可能只是安全系數減半，但是最差的情形，圓柱卻會斷裂。大型的圓柱想要與小型的功能相當，便得加寬增厚。更糟糕的是，圓柱一旦加厚，自我負荷

更大，更加需要增厚。所以建築體要加大，至少需要比例不同的結構，但如果結構各種尺寸差異太大，則需要考慮使用不同強度的材料做不同的設計。大型哺乳類的骨骼較小型動物強韌得多(因此也更易受到骨折的威脅)。大蚊(或長足蚊)用它們苗條易曲的多隻腿行走自如；而大象的四隻腳卻是結結實實像圓柱般筆直。

同樣的原理也可以應用到有兩個支撐點的水平橫樑，而且不管它的承載物是單單架在中心一點，還是平均地分布於整個長度上，這個原則都行得通。如果一個橫樑照著原來的比例增大一倍，其向下彎曲的傾向便得靠選用較堅韌的材料，或加厚雙倍以上來克服。換句話說，如果架於兩個支撐點中間的橫樑距離、橫樑本身直徑，以及承載物的長、寬、高都加倍，則橫樑下陷的程度可不是兩倍，而是四倍之譜。我們在此再次獲得證明，不管在哪一個技術裡，增大即是相對地減弱。若是根據同樣的設計原理，一座橋樑增大增長，將會招致自我承重的嚴重後果；若以一定的比例充分增大，最後它將會因自己的重量而倒塌。大象的身體比起貓來說，骨骼大塊得多，但行走時卻需格外小心。

上述例子不過是各種因體積大小造成的多樣現象中的取樣，這些例子正足以說明，大小規格對設計來說是多麼重要的決定因素。有時它加諸多重限制，有時它又提供多種機會。重力對於體積龐大者非常重要，擴散現象對於小型生物則舉足輕重。最適切的論點，便是人類科技和自然科技，因為兩者牽涉的對象涵蓋兩個完全相異的尺寸範圍，是故有所不同。一個設計原則有可能適用於兩者，但如果這個原則牽涉到大小因素，則應用的方式將會大大地不同。



## 第四章 表面、角和角落

從大小走向形狀，一開始我們便選擇日常生活中最不引人注目的平凡事物來起頭。其實這也是本書的主要目的：往往在別處被忽略的事情，我們在此處格外用心，藉此引起更多的注意。

### 平面對曲面

人類對平面，似乎有著莫大的感情。我們的地板是平面，牆壁、屋頂、樓梯、桌面和書籍，無一不是平面。公路的表面，要盡量地平坦；高級的高速公路，即是有著最平滑路面的公路。舊約聖經〈以賽亞書〉裡提到「變崎嶇為平原」，顯示只有平坦的地面，而非圓頂式或凹槽式的表面，才能成為一種祝福。當然我們並非一味地執著於平面，我們的汽車、飛機擁有一些平面，我們的甕缸、瓶罐和水管卻幾乎都是圓柱狀的。

另一方面，自然界製造的平面，卻屬於極少數。唯一一個常見而略具規模的，是它的光合作用組織：大多數植物的樹葉及大型海藻的葉狀體。這些樹葉越是平伸，越是有利，因為朝天向陽的面積部分決定它們吸取日光的多少。但是除了這些葉片及葉狀體之外，遍尋四周，努力搜尋的結果也零星星的雜物，好比魚鱗、蝙蝠翅膀與鴨掌等。

首先，讓我們來談談平面的好處。一個在任何一點、任何方向都能利於行走的地板，一定屬於平面——而且是完全一致的水平。所以，平坦在一個受到地心引力支配的世界裡有其絕對的功用，尤其是對於大型陸棲的動物，好比人類，更是如此。但是地心引力的命令可不是唯一的指導原則。一面區隔兩個空間最小面積的牆通常是扁平的平面，如果想要讓任何一組表面以任何方式排列，並且彼此順利地相疊，平面則無疑是最容易造成，也是最容易變通的一種。想想如果要讀一頁半球型的書頁，會是什麼樣的滋味？若書本成了圓椎狀或是圓頂式，我們的圖書館管理員要如何整理它？

不論是水平或是傾斜式的屋頂，則並非一定要做成平面：年代久遠的圓頂形或拱形屋頂自有其卓越的口碑。但是平面的屋頂仍然是最容易製造、最便利使用的一種，至少只要將它們稍稍傾斜，積水便可流出。完全相同而筆直的橫樑可以彼此平行排列，覆蓋其上的面板，則只須以兩度空間，而非三度空間來切割。屋頂油紙能夠以最少的安裝來完成展開及固定的作業，瓦片或石板也只需要二度空間的操作，便能應用其上。架構屋頂的各組成分子，其交集處都形成直線，使得接合的裝置極其簡單。相反地，如果是拱形或圓頂形屋頂(圖四~一)，其組成則完全以彎曲方式相交，使得接合變得較為複雜。

簡而言之，平面代表簡單、方便，而且在人類的科技文明中利用頗多。我們儲存材料，它們的尺寸和形狀都極其有限；然後再簡單地切割幾下，便造成各式各樣不同的結構。基本上，鋸木廠和造紙廠的實用原則，都在於它們的產品之平面使用，以及結果的多重應用。

平面，同時也有它的缺點。在真實的世界裡，若要無限延伸一條直線，除非是條由上而下的垂直線，否則不是一個簡單的工作。當然不管是對人或是蜘蛛，讓它們在任何兩點間拉開一條細線都不會構成問題，但是兩者卻都不能豁免因為重力在中點處所造成的下垂。如果是一條極長的線，則下垂的跡象更明顯。跨越的距離越遠、則測量員為了得到正確的數字，便需要將測量尺拉得越使勁。如欲達到完全的筆直線，如欲瓦解地心引力和自我重量的惡意干涉，則非有無限強大的拉力不可。這樣的拉力自然會扯斷細線、繩子或任何膠帶。如果把某物懸掛在中間，則情況會更糟，下垂現象會更明顯。所以我們在圖四~二中可以看到，電線桿之間的電線總是下垂，使用吊床時亦會往下低墜，即使它們自己本身的下陷已被減至最低。

現在我們知道平面的地板並不是件尋常的事了。我們如何才能製成地板？加長的平板想當然是無法行得通的，實際上我們使用橫樑——具有某一種厚度的厚度，使這種結構組織具有抗彎曲的特性。大略來講，橫樑的厚度(如圖

所示)掩飾了它的曲度，使它的下垂隱而不見。其上承載的重量越大(這當然包括它自己的重量負荷)，支撐的地板或水平橫樑就得越厚。這樣的平面索價不低，其價格完全取決於平面的厚度，就好比我們對水平的屋頂及抗彎曲的書架付出的代價一樣。

到書架——這裡提供了具體實例，讓你輕易地就值回書價。一個書架事實上就如前章圖三~七所示，是一個兩端各有一支點的橫樑。一個書架的壓陷如何受到其承重及尺寸的左右？首先，中間壓陷的程度是根據其承重(在這裡我們不談自我負荷，因為書籍的重量遠超過書架自己的重量)，如果重量加倍，則壓陷亦加倍。其次，壓陷的程度又依書架長度的立方體(三次方)而異。如果負載同樣的重量，則一個長三十六吋的書架會比一個長三十吋的書架多壓陷百分之七十二。但通常一個書架預期承擔的重量又與書架的長度成正比，因為長一點的書架可放置更多的書。所以更實際一點來說，書架壓陷的程度隨書架長度的四次方而增，一個長度三十六吋的書架，其實壓陷的程度是雙倍於長度三十吋的書架。

所以，堅守你的短書架吧！但如果你一定要使用長的書架，則記住，即使額外增多一點點的厚度，助益也甚多。壓陷之差異與橫樑厚度的立方正好相反，所以三十六吋長的書架只消增厚一點點——大約增加百分之四十的厚度，其壓陷的程度便與三十吋長的書架無異。用一吋厚的木板取代原來的四分之三吋，其工作就圓滿了。這樣的木板當然不是現成的，但是即使是再麻煩不過的木工，也阻礙不了愛書人的決心。無論如何，我們懇切地請求你，避免使用那種只能觀賞的古玩家具，並且在擺放書籍之前，先找一塊樣板書架試試。

(這個概念——當物體需要面臨彎曲，長度的增加即意謂力量的減弱——我們已經在前一章中提出，並且還將會在陸續的章節中看到。幾個月前，它竟然成為我個人的一個事務經驗。當時我在一個電視節目中，為了解釋尺寸大小的原理，我首先將一塊木板架在兩塊相隔三呎遠的鋸木架上，然後把一百四十磅重的重物放置其上，那就是我自己。此時在

中點的壓陷距離是半吋。接下來我把兩個鋸木架拉遠至相隔六吋，期望它下陷四吋，合於理論上的推論及我前一天測試的結果。但是由於一個不慎，我錯取了一塊有斜紋面的木板，其結果竟然出人意料，由原先設想的踏木板而行變成了墜海而死！所幸只有木板是唯一真正的傷亡者。）

自然界如何對付平面？就好比書架的問題一般，自然界處理葉片設計的原理，就是面對所謂的下垂這種棘手問題。通常葉片都是從樹枝向外平行伸展，葉片下的葉脈，見圖四~三，看起來也許微不足道，但是它們卻是以小小一點額外的物質投資來換取鞏固葉片厚度的功能。它們其實就好比一個橫樑，有了它們的支撐，葉片下陷的程度往往減少得多。

另外一種能夠有效增厚及加強平面的方式，便是些微的曲度。即使握住一張紙的底部，你仍然無法讓它筆直地立起來——除非你把它做小小的彎曲，就像你每次拿著一頁紙張閱讀它的時候一般。生物界不少物體的表面，便是借著這種稍微的彎曲度來增加其硬度。許多樹葉生成一對從主脈往兩邊伸展各自往下凹陷的平面。南方玉蘭便是最好的例子：除了本身的主脈外，它的葉片缺乏顯著的葉脈。但是由於稍稍的彎曲(以及葉片本身的一些厚度)，它們便形成一個相當堅固的支撐。

同樣地，羽毛也是自中央一根縱向發展的主軸朝兩邊各自彎曲，這種曲度幫助它們抵銷地心引力，有如樹葉的情形一般。但是做為羽毛，它又多了一層氣體力學的功能，這種功能對於翅膀尖端手指一般的加長羽毛意義非凡。一個世紀以前，人們發現螺旋槳如果稍加彎曲，凹面朝下，即能發揮最佳的功能。早期的飛行器確實利用曲板做翅膀，而現代的飛機則不過是在下層凹陷處加了一塊平板，正好藏住了它的彎曲罷了。同樣地，我們使用薄而彎曲的金屬板或塑膠板來做成電扇的葉片，便是靠著物體的彎曲，同時得到較堅固的結構，以及較佳的氣體動力學功能。在此附帶說明，葉片彎曲的方向，無關乎物體硬度的增加，但是只有在它的凹面幾乎朝向氣流下游的狀況下，氣體動力學的功能才能得以改變。檢視一下你們的電扇，偶然你會發現一個葉片裝反的電

扇，這是由微風來轉動葉片的。

堅固一個平面的第三種方式，便是加上一套皺褶，使它的走向與彎曲的角度同方向。延伸在兩個支撐點中間的一張紙，單單因為自我負荷已經產生下陷現象，但是如果把這張紙褶疊數次，使其褶痕通過兩個支撐點，它便可以支撐其本身數倍的重量。憑借著皺褶的使用，一個物體的有效厚度彷彿可以增大，而無需在平面下另加樑柱支力。瓦楞紙板便是這種設計的例子之一，其他尚可以在有凹凸波紋的天花板及屋頂設計中看到。自然界有時亦在大型的葉片中使用這種設計，尤其是那些葉脈呈幅射狀而非分枝狀的植物：

自然界使用最精簡的物質以打達到鞏固平面功能的，莫過於昆蟲的翅膀了。昆蟲通常投資在它們翅膀上的，不過是百分之一的身體質量。但是這個翅膀卻能夠以每秒數公尺的速度在空氣中運動，並且在短短一秒之間，還可以逆轉其振動方向數百次。為了滿足這樣高度的需求所須具備的足夠硬度，翅膀結合了彎曲、翅脈以及縱向的皺褶特性。彎曲是氣體力學中不可或缺的要害，但是對於小型的昆蟲而言，它卻造成了振動翅膀時的難題：這翅膀彎曲的方向如果順應翅膀往下拍打，就無法符合翅膀往上拍打時的需求，反之亦然。此時許多昆蟲就生出一個絕妙的解決方法：它們翅膀的結構能夠順應它們所遇到的風向來改變其彎曲。翅膀上的風向是隨著昆蟲上行或下行的動作而隨時逆轉，因此它們的曲面也隨時可以調整配合。

薄而扁平的表面，即使是承載小小的負荷，也極易歪斜。吾人的自動汽車所採用的圓型設計，其目的似乎是為了將阻力及風速所引起的噪音減至最低，借此增強其銷售的魅力——後者或許是出於一種倣仿人體美妙曲線的策略暗示吧！事實上，汽車做成圓形設計的主要原因是為了強化鞏固結構，這種做法總比給汽車加上皺紋或是波浪來得吸引人一些。況且把一片金屬壓製成彎曲的形狀，要比在一塊金屬板上焊接數個堅硬的鋼條來得省事又省材料。有時候人類對事物的解決方法簡直比這個還粗糙馬虎。例如暖氣管，其切面通常呈長方形，全部排成一列列既薄又扁的金屬薄板，隨便

一點壓力或溫度的變化，便會影響這些薄板向側面移動彎曲，造成惱人的噪音。我們如何減輕這個問題的嚴重性(並不算是徹底的解決，至少在我家是如此)？便是在它們的薄薄平面上，加上一些細微的對角線折紋。

讓我們對平面的問題再概括地檢視一番。設想若有一個空心的球體由極為細薄的材料製成，並且內在壓力比外壓力來得大。我們要知道，這樣的球體在爆裂前至少可以經得起多大的壓力？實際上，這等於是在問(如圖四~四)，在得到兩個分裂的半球體之前，這個物體的表面可以承受多少程度的擴張——就是張力？此時球壁內外的壓差與球內的張力關係如何？說也奇怪，在某一個特定壓力下，張力的強弱完全取決於球體的大小，這個定律通常被人稱為拉普拉斯定律(Laplace's Law)，規定張力等於當時的壓力乘上球體半徑的二分之一。所以如果壓力固定，球體越大，其表面每一個點每一塊面所承受的張力就越大。或者說，在一定的張力下，較大的球體所需要的壓力則較小——所以要吹破一個大氣球比小氣球來得容易，你無需太費力氣就可以達成足夠的張力來撐破氣球。

容我再加述一個論點：較大的球體其球壁較平直，較為缺乏彎曲的角度。一般說來，球壁越平直，則一個固定壓差所產生的張力則越大。一個完全平直的球壁只有在球體擴張成無限龐大時才有可能出現，而在此種完全平直的球壁間，內外壓差也會產生無限龐大的張力。我們在兩個支點間拉一條繩子，其實正是同樣的問題：任何重量(便等於是壓力)都會造成繩子無法完全拉直，除非兩端有無限的拉力(這等於是張力)。

所以根據拉普拉斯定律，在各種關連暗示中都排除在氣球或其他內在受壓的結構上使用平直的牆面(吾人當然可以製造假想的平直例如我們用加厚的地板來內化彎曲一樣，這種因為厚度產生的平直，可以隱藏張力的曲線)。這定律也同時告訴我們，選擇圓形切面的管子，是因為它們比方形切面的管子較優，不會因為一點點的刺激便自接縫處斷裂。這同時也足以解釋長方形的牛奶盒(如果裝滿牛奶)為何總是兩邊

鼓脹突出，它們必須靠著鼓脹的兩邊製造一些彎曲才不致迸裂。只有在這些紙盒緊緊地包裝在一起時，它們才能擁有真正平直的紙壁，因為此時所有紙壁承受的壓力都能彼此平衡。飛機的機身，幾乎不是圓筒狀，就是橢圓形。這實在無關乎它們的線條是否優雅，甚至減輕阻力也不是設計的考慮重點，壓力才是真正的重點所在；大部分的飛機因為飛行的高度必須在受壓的狀況下運載旅客，因此便必須排除使用薄而平直的機壁的可能。只有一種大眾運輸機——shorts，擁有平直的機壁——看上去像是長著翅膀的公共巴士——卻因為這種結構不能承受壓力，造成飛行高度受到極大的限制。裝茶葉的罐子可以容忍扁平的四壁，但是如果內容換成豆類或是湯類，則勢必容器要改成圓筒狀。而這個形狀並非像我們一度所聽說的，帶有某種男性陽物的表徵，雖然我們知道罐頭與男性的生殖器同樣受到拉普拉斯定律的限制。

生物的構成通常會使用一些柔軟的質料，而且不論是生物本身或是它們的內部構造，其內外所承受的壓力各有不同。所以為何拉普拉斯定律告訴我們，自然界對扁平的平面有多麼地憎惡。所有的蚯蚓、腸管、血管、肺泡和活細胞——不是圓柱形、橢圓形就是圓球狀，扁扁平平的四壁是不在考慮範圍內的。

一個圓頂建築物的大小與它所能承受的重量，也可以適用於同樣的法則。圓頂越大，曲面越小，承重力便相對地減弱。如果大小超過某種尺寸，它連負荷自己本身的重量都會發生問題。類似的原理也可以應用在拱門結構、吊橋的主纜，以及其它種種結構上，一個案例都足以說明，曲度越平緩，物體承受某種重量的張力就越嚴重。正因為如此，物體尺寸的增加便受到嚴格的限制。大自然也許不喜歡那些僵直的平面，但是她對於強勁的圓頂物卻頗多偏愛；這些例子包括蛋殼、堅果殼、蛤蜊殼及人類的頭蓋。

## 直角

對於人類而言，直角毫無爭議之處。在我們的世界裡，它們無所不在的程度簡直罄竹難書，包括書頁、書桌、窗戶、地板、天花板、牆壁、書架和抽屜、盒子、木瓦，以及圍繞

汽車輪胎和家具支腳的各組直線裝置。所有木材場裡標準尺寸的木材都呈長方體，正如同磚頭與水泥一般。埃及文明與馬雅文化的金字塔，全部由建築在方形地基上的長方形石塊築成。二十世紀的立體派主義更是用他們的作品炫耀我們對這種直線世界的著迷。相反地，讓我們看看地球上最簡單的棲所，從熱帶到北極，幾乎全是圓形的結構：不管是圓椎形、圓頂狀，還是有著圓椎或圓蓋屋頂的直立圓柱體，以及其他種種等。我最近拜訪了一間博物館，此間博物館以追溯一萬年以來的考古學及歷史學上的各種變化著稱。我發現到直角的使用千年又復千年地更加穩固不移，它們幾乎是等於高度科技、複雜文化的成功印記。

自然界對於直角，似乎既無偏愛，亦無偏見。至少有一種細菌是方形的，至少這直角也曾經出現在若干原生物類，也就是有孔蟲類的骨骼邊緣間。如果表面上覆蓋著單獨一層細胞，分隔細胞的薄膜或細胞壁則與其包裹的物質形成一個直角。一顆樹從地表往上生長，則樹幹與地面生成一個直角，即使地面形成陡坡，樹幹與絕對的地平線之間，依舊保有不變的直角。好比我前院中的一棵松樹，其樹幹簡直是完美無缺的筆直。所以，事實上，值得我們探討的，不是自然界如何迴避直角，而是為何我們人類如此鍾愛直角。關於此點，最富趣味的便是我們內耳的半規管。三個一組的半規管（圖四~五），每一個都以直角形式與另外兩個彼此排列，這便是我們身體用來維繫方位和保持前進的系統中極重要的部分。是否我們對直角的偏愛，僅僅是因為我們的感覺器官傾向在這個幾何錯綜複雜的世界裡挑選一個最簡單的形式？

在前章中，我們提到的尺寸大小，重要性與時俱增：本章亦不例外。我們是大型生物，在我們的體積與陸上的棲息所之間，我們受制於地心引力。而且只要是使雙足維持在重力的中央點——也就是你全身重量最有效的支撐點——你就不致摔倒，所以人便可以垂直站立著。況且你喜歡在平面上行進，當然這平面是大部分地表的特性。垂直加上水平，那豈不是直角的誕生嗎？它不是正好出現在你與地面之間、牆壁與地板之間，或是樹幹與地平面之間？層層相疊的物體必



須盡量維持與地面垂直，不然它們便會翻倒。至於石塊築牆，直立式的發展顯然較其他方式簡易得多。自有人類歷史以來，大型結構的牆壁無一不是藉著這樣層層石塊相疊而成。

但是這樣的原則卻不適用於小型結構，或是隨時要收拾上路的輕便居所，以及保暖的用途結構。對於這種需求，圓形的牆壁，或者微微向內傾斜的外牆，才是較佳的選擇；印第安人的帳篷，以及類似圓錐形或半圓形的屋舍，都是無數文化的發明先例。考古學及人類學者告訴我們，圓形的房子是遊牧民族或半遊牧民族社會的典型代表：曲線式的建築物，既省物料亦便於安裝。相對地，長方形的房至代表定居的社會模式，它們容許在一個局限的地域內有更多的建築物——好比一個圍牆境內或城市裡。它們的室內隔間更趨容易，而且因它們的外牆可以同時為兩個相鄰的建築物共用，若要隨時增建也不會構成任何的問題。平均而言，原始社會的圓形房子，其地板面積只有後來長方形建築物的一半。一個家庭可能同時擁有數個圓形屋子，再加上一些其他的儲存設備：所以一整個圓形結構的功能，只不過等於長方形屋子裡的一間房間而已。

人對事物的觀點往往被個人的經驗所左右。對於大多數的人類而——這便反應了我們根深柢固的長方形文化觀點。有一個特殊的測驗正好可以顯示這種奇特的偏見。早在一九五〇年代，有一些心理學家對兩群祖魯人做研究，測驗他們對一種特別的視覺幻象的反應：其中的一組祖魯人來自鄉下，住在傳統的圓形屋中，另外一組人則已城市化，住在普通長方形的住宅裡。這個視覺幻像，叫做阿米斯（Ames）窗戶（見圖四~六）或是旋轉的梯形幻覺，由一扇窗戶模型襯著背後的物體繞著一根直立的主軸旋轉。但是窗戶通常都是長方形，而非這個測驗中的梯形。當深度之知覺不夠清晰時（例如閉上一眼或是自遠方觀看），城市祖魯人（正如同普通非祖魯人一樣）往往把這個模型看成一個擺動的長方形，正好打從目測者的面前斜向另一方。事實上，是我們自己在腦海裡想像出一個透視圖，硬將這個窗子的模型裝入我們對

傳統長方形窗戶的觀念認知中。但是那些來自鄉下的祖魯人就不那麼容易受騙了。也正因為如此，他們的語言裡缺少像是「方」或是「長方」一類的字彙。在其他許多跨文化的比較試驗中，亦可見到類似的結果。舉例來說，北加拿大的印第安人，住在圓錐形的印第安帳篷裡，對上述的視覺幻像，也較其他的加拿大人具有抵抗力。

再回到前面的話題。若是建築時使用石塊一層一層地堆疊，那麼長方形的石塊真是再好變通不過了。正如同我們前面談到的平面一樣，某些形狀就要比另外一些形狀在設計上受到更多的限制。彎曲的石塊，一開始就決定了一個房間或房子的尺寸：如果使用一呎長每個以十度向內彎曲的石塊來蓋房子，將會完成一個圓周三十六呎，直徑十一·五呎的圓形屋子。相對地，平直的長方形石塊則可以蓋成任何不同尺寸的屋子，擁有各種不同的內在隔間，長方形的住宅，不管其屋頂是平直或傾斜，都可以使用完全一樣的橫樑做支柱。一旦你擁有了長方形的屋子，那麼長方形的家具自然也是購買在即了。

長方形的書籍端坐在長方形的書架上，長方形的抽屜安然躺在長方形的壁櫥裡。所以一開始只是簡簡單單堆積石塊的決定，然後一個直角又帶到另一個直角。

堆積石塊或是磚塊，對於一個缺乏優良黏著劑和捆綁鋼索的技術文化來說，是一種特別的吸引力。一堆物體相疊，上層的石塊向下壓迫下層石塊，這便是利用壓縮力來結合物體：拉伸力，也就是往外緣拉的力量，在這裡無足輕重。抗拒拉伸力需要使用黏著劑、鋼索或是張力接合工，這些都遠比使用磚塊石塊的技術複雜得多。我們使用灰泥(膠泥)把磚塊結合在一起，但是磚塊和灰泥的結合處卻無法抗拒多少張力。其實這灰泥自有其另外兩種目的：其一，它的存在使磚塊上下之間不會往兩邊錯開；其二，它填滿磚塊之間的隙縫，使上下磚塊之間受力平均，避免因為數個不同的接觸點而造成易脆物質的斷裂。當我們在建築木造房子時，我們用鐵釘來釘木板，但是這個鐵釘正如同灰泥一樣，只能維繫鄰近的木板在它們承受所謂的剪應壓力時，使它們不致往兩側

滑開。對於張力的抗阻，鐵釘簡直是無可救藥；確實如此，吾人只能利用它的這種弱點(以及拔釘鎚)來拔出錯置或是釘彎的釘子。所以，事實上任何使用鐵釘打造的結構，基本上仍然是等於堆積物塊。檢視一下圖四~七，你對這種情形就可以了然於心了。為了完成任何木造結構，我們用螺絲釘及黏著劑來取代釘子，但這樣子蓋成的木造屋，既費時又不經濟。船的建造則面臨較多的變數：較輕的固定壓力，也使得造船的營造商除了精通張力結合工之外，別無選擇。

再進一步說，設計成長方體的磚塊、樑柱及平板，便於儲存和運送。大部分相同物質堆在一起——例如糖晶體、乾燥的種子、小砂礫、釘子等——如果它們外壁陡斜的程度超過其能夠平置的關鍵角度，便會造成它們東倒西歪，不得安穩。但是長方體卻可以不費吹灰之力編排成規律、而非漫無目的的陣列，因而免除了上述的問題。所謂的庫存，即不過，是最簡單的實心大型長方體，由一個個小型的實心長方體組成，彼此以垂直的牆壁緊緊靠立，內在沒有任何一點空隙。如果我們以空盒子來搭配這種大型長方體，我們便會發現，身為長方體，它們的主要優點除了易於堆積外，也便於包裝。唯一的麻煩倒是屬於文化面的。我們的手有五個指頭，向來習慣的計算是用十為底或是十進位的制度。長方體如何排列堆積呢？卻是另一種列陣的方式實現。在這裡我們嘗試用一個個單獨的物體順應地排成一堆。你或許可以安排八個物體，排成二橫、二深、兩高，或者以別種方式排列：

2×3×2	或者 12 個物體	2×4×4	或者 32 個體物
2×4×2	或者 16 個物體	2×2×5	或者 30 個體物
2×3×3	或者 18 個物體	2×3×4	或者 36 個體物
2×4×3	或者 24 個物體	3×4×4	或者 48 個體物

十的倍數在這裡並沒有占到上風。這也足以解釋，為何在我們這個以十進位為主的文化裡，一打、一籬筐這些字眼，以及使用這些計量的批發行，至今仍然盛行不墜。

自然界的營造鮮少以堆積的方式實施，大多數都是以某一種粗索來繫住纏繞。這包括在人類身上發現的韌帶、肌肉

及肌腱：毛毛虫、蚯蚓及海葵，則有一層薄膜狀具伸縮性的外覆皮；對於植物，則是它們內在的張力纖維。人類早早便知道使用天然纖維來製成繩子，這便是我們喜用自然抗張力物質的例子。但是說到自然界，她使肌腱附著於骨骼比我們將支架添加繩索來得更從容不迫。如果物體的密度不大，則堆積的方式根本行不通；堆積物體要靠重量才能對側邊的壓力產生相當程度的抗阻，這壓力就是像風力所產生的壓力一般。如果物體太軟，堆積同樣也會失去它的效力。也別妄想在水裡堆疊低密度的物體，因為在這種情況下，浮力抵銷了重量，而水流的力量更是極端強勁。自然界或許不喜堆積，但她有時也需要包裝物質。只不過，我們接下來將會看到，她的包裝從來不用長方形的盒子。

方形——也就是直角形式——雖然對自然界的用途不多，但是對於人類文化倒是非常理想。雖然理想，有時卻也使人忽略了一些相關的事實。我們用鉸鏈栓把四根勁直的支架連結在一起，形成如圖四~八所示的一個擁有四邊、二度空間的結構體。但是這樣的結構形狀卻不能固定，也不能輕易安置。這種配置我們稱呼它做機械結構(mechanism)——一個不太高明的用詞，但至少影射它的機動性。正如圖所示，機械結構造成優良的機械接合，不管是哪一種機械，我們都是這樣使用它們的，甚至自然界也借助這種設計來達成複雜的動作。比如蛇類，它們需要一口吞嚥體積龐大又不能嚼碎的物體，而魚類的嘴巴(見圖例)則只消單一一個動作，它們便能完成張嘴及往前伸出的作用。

但是不管在上述的結構多麼有利於攝食，它們的每一支支柱卻不能彼此支撐。相對地，若以鉸鏈栓接合三根支柱，其結果卻成為固定而紮實的形狀：此種配備(圖四~九)是較為複雜的一例)，被稱為「靜定結構」(Statically determined structures)。如果你用垂直及水平的支柱組成木牆(好比圖四~七所示，用垂直的支柱延伸上下兩層水平支柱之間)，很不幸地，你會得到一個機械結構，此時你便需要某些交叉的支柱來穩固它，以抵抗來自兩側的負重。不管是使用一條或兩條對角線，或甚至將一張仍然屬於長方形的三夾板釘入，都可

產生固定的作用。我們有效地使用這樣的對角線，使得缺乏穩定性但易於變通的長方形一變而為牢靠但僵硬的三角形。長方形，正是人類的整個設計中從來沒有間斷的產物，人類遵循這種做法亦有相當長久的歷史。我們在瑞典西海岸發現類似雪橇或船隻的銅器時代雕刻(見圖四~十)，就可以見到這種影響實在饒富趣味。當然較不美觀的例子，是屬於我屬於我自己校園裡美式足球場的積分板（亦見圖四~十）。

自然界並不常用三角形——部份原因或許是因為很少需要真正的堅硬，或者是她另有其法可以取得這種堅硬。三角形的架構極少，幾乎難以認定——好像在大型鳥類的翅膀骨頭裡才有發現：我也從來沒有發現過任何長方形構造因為事後的需要被加上支撐而成為三角形的例子。在自然設計中，事後回想補救並非不存在。自然界不永遠是這裡添一點，那裡加一點，拼拼湊湊地把一個舊結構變成新功能？這正是古爾德關於貓熊大拇指的論文重點所在。這位演化論首屈一指的解說者，形容貓熊如何靠著分裂每一個手掌的第一趾節以生出第六根手趾，因而產生與我們人類類似、具有功能的大拇指。

既然兩兩相連(end——to——end)的四根支柱具有如此良好的變通性，吾人自然會認為，一個結構系統若非因為對結構堅固有特殊的偏愛，否則一定會捨棄三邊式的支架安排而選擇四邊形的架構，但事實卻不然。在圖四~十一中我們可以看到，大部分的海綿組織，其柔軟易曲的骨骼都是由生硬的支柱組成，尾端以蛋白質構成的柔性軟墊互相連接。某次我觀察這些海綿骨骼良久，試圖發現一些三角形的最短線，以及它有利於支撐和架構的特別配置，結果毫無所獲，這才體認到我是以人類對一般堅固結構的偏見來看海綿。找尋有四邊的架構，一樣的徒勞，這不過是另外一個人類偏見的表現而已。海綿的小小支柱（針骨）架構從來不會以三角形的結構出現，而且五邊、六邊或七邊的排列也遠比四邊的排列來得普遍。在這個環狀結構中，頭尾相接的支柱數量越多，則其整體的伸縮性就越大。

我們再來看一看直角世界的另一個問題。要維持一張直

立在地上的椅子或桌子的穩定，最少需要兩個基本元素。首先，接地點必須有三，這三點便形成一個三角形；其次，整個物體重力的重心必須落在這個三角形之上。四支腳當然更好，重力的重心位置受到的限制較少，當重心轉移的時候，結構物就不致那麼容易翻倒。所以，四支腳的椅子比三隻腳的椅子站得較穩。此外，一點點的重複多餘攪起來更具吸引力，其實這第四隻腳造成了一個頗為微妙的問題。當結構物形成三角的時候，支腳的長短並不重要，它幾乎可以在任何平面上成立，這就是為何我們使用三角架來架設照相機和望遠鏡的原因。但如果需要四隻腳同時接地，則腳與地面間的關係就必須要格外小心，互相協調，或是讓其中的一隻腳具有一點伸縮的彈性。比如我們日常生活中的四腳桌通常都具備一些調整高度的螺絲釘，減少其在不平地面上的搖晃不定。三腳桌就無此調整的必要。

貓類、駱駝、鱷魚也是四足動物，但卻不適於這四腳桌的類比。一則它們擁有關節的四肢能夠自動調整長度：重要的一點，四腳獸若是提起一腳，便可以形成一個相當穩定的三角架。仔細瞧瞧貓的慢步行走，它們保持一腳離地的時間相當長（對於人類而言，若是一腳站立，則不免搖搖晃晃，相當困難）。但是若想要達到利於步行的最便捷途徑，恐怕四隻腳還不夠，因為每次只有一隻腳可以被舉起，才不致失掉平衡。大部分的昆蟲都是以六足行走，因此這些足部可以提供輪流替換的三角架——一側一隻腳，另一側兩隻腳——如此達成不失平衡的目的，這樣子的安排似乎更理想。對於任何具備足部以利步行的仿生物交通工具上，六這個數字似乎是足部數目的最佳選擇，這點我們在第十三章中再細述。

現在讓我們再回到稍稍偏離的「直角」這個正題上。在一些相當平坦的地帶，我們把土地分隔成長方形（或經常是正方形）的局部小區域，不管是八英畝的房子預定地或是州界。到現在為止，在美國的各州或是加拿大的各省之間，絕大多數隨意測量的疆界都是以東西向和南北向相交形成直角。我們再度重申一次，這種情形的造成並非是某一特定規定使然。我們曾經看到過斜角線畫成的界線，也在跨州的邊

境上(在達拉威及賓州之間)發現到測量成圓弧狀的州界。

簡單是造成長方形土地丈量的依據原則。但是它的容易並非獨一無二，它的效力也不容易自動產生。等邊正三角形能夠把一塊地表毫無間隙地分隔清楚，我們只要拉緊一組同等長度的繩子便可辦到。因為不需要測量或切分任何角度，所以它被視為最簡單的土地丈量方法。它的主要缺點，在於其分隔的邊界數量反而較其界內的區域來得繁多。規則六角形的六邊都等長，同樣能夠分隔地表，不致留有任何間隙。它們就好比六個等邊三角形加起來一樣，配置分隔也並不困難，至於其界線和區域面積的比例也不失理想。而它們尚有另一優點，即是如果我們想要分隔我們所居住的星球，只需加上額外的二十個五角形，整個地球便可以結結實實地分割成一個個的六角形而無損於任何一個角度的曲面（懷俄明州看似長方形，但事實上其北界要比南界來得短），但是，六角形的分隔法完全排除了在連續邊界上單一方向進行的可能，而且三角形與六角形也無法使農作地的耕種沿著一列列等長的行列進行。上述兩者都不利於長方形的結構。當然，建築物的形狀並不是非長方形不可。在我住家附近有一個行為模式研究室曾經對一個周圍為六個房間環繞的六角形房間做過研究，此時身處中央房間的觀察者可以輕易地獲

悉另外任何五室的動向(第六個房間只是提供通道)。這種設計並非不合常理，只是較難為人熟悉：而且若是用標準的配備，也較不容易達成。在圖四~十二中，我們看到一個以六角形要素為主的道路藍圖：以我看來，這與我們平常的道路具有一樣的功能。

顯然人類對於方形土地的利用鍾情已久。古埃及人拉緊繩索成為三角形進行土地丈量，其三邊並非等長，而是成三：四：五的比例。一個三邊形成這種比例的三角形，在其兩個短邊之間夾著一個直角九十度，因此他們才可以保持轉角的四四方方。無獨有偶的是，埃及人並非唯一具有這種偏好的民族，應用於這種三：四：五的三角形或其他任何直角三角形的畢氏定理為：兩個短邊的平方總和等於長邊的平方，例如  $32+42=52$ (或者  $9+16=25$ )。只有那些關心直角的



人們才會在乎這個精微的理論。事實上在畢達哥拉斯學派的正式舉證之前，這個論點在古中國、印度和中東地區早已為人熟知（而且極像是每個地區個別的發現）。一些富邏輯的人並建議，在地球上某一個空曠地帶（好比撒哈拉沙漠）選一個地方，標土如圖四~十三所示的模型示範這個理論，將來任誰在觀看地球的時候都不會忘了這是人類智能生活的印記。

讓我們再回到有關六角形的討論，思考一下群居動物如何把它們的棲息地劃分成個體範圍。吾人所酷愛的方形與矩形當然有利於耕地與築路，但是別種動物卻鮮少使用這種形狀。如果想要將防禦的邊界減至最低，要使整個區域自成一區或是別屬他區，或是使整個區域內每一塊地方都同樣適合居住，而且每一個個別區域在建造及防禦方面都能同樣有效，那麼勢必非六角形區域不可。即使這些要求已經如此嚴苛，天擇仍然有時會發現它的邏輯不敷所需。在自然界裡發現的接近六角形的隔間計有：鵲所居住的凍土苔原，燕鷗所在的北卡羅萊納的沿岸沙島，以及棲息水底的非洲麗魚所住的繁殖槽裡。當然最富盛名的六角形隔間莫過於蜂巢和蜜蜂、黃蜂的幼蜂窩了。我們偶而使用這種形式加在空心的大門上以當做強化內在的隔間，或是加在飛機底層地板上達到堅固支撐的目的。這對於後者尤其重要。一談到平面，就需要耗費材料，而對於飛機的設計者來說，再也沒有什麼比有效的重量控制更能讓他們熱中的了。地板上小小尖針般的腳後跟所產生的壓力——每一個單位面積的平均受力都可說相當地強大，若地板以鋁製的蜂巢式架構來做支柱，將比起平行排列、間隔良好的橫樑更難被打穿。

正如同正方形在劃分區域時無法提供最低數量的邊界，立方體亦受到同樣的限制，無法在劃分體積時提供最佳的表面接觸。如何才能夠達成緊密包裝的最佳幾何體，無疑是一個不可解的神祕。它是一個具有十四面的幾何體，開始時是一個擁有八個三角形表面的立體圖形（一般的八面體），然後切除其六個頂點，使它的每一個表面都變成六角形。對於大部分人而言，實在難以想像這個過程，所以圖四



~十四在此可以提供絕對的幫助。無論如何，這個幾何體擁有八個六角形的表面與六個正方形表面（沒錯，這裡確實出現直角）；而且，它們竟然可以確實緊密地接合，彼此毫無空隙，就彷彿是奇蹟一般。最類似的模擬，可以將一箱滿滿的鉛彈壓縮，一直到所有的鉛彈都變形彼此擠壓而無任何空氣殘存。至於在自然界裡，這種模型何處可見？許多草本植物（非木本的）葉莖中間所充滿的薄壁細胞即接近這個形狀，它們每個細胞平均都有十四個面。據我所知，人類科技對於這種怪異的截稜八角形並無特別用途，除非在極偶然的狀況下，大件的海綿或許會由數個小型珠狀泡棉意外構成。

直角也絕非製造支撐骨架或肩平看板的最佳選擇，富勒（R. Buckminster Fuller）的網格球頂（geodesic dome）才是節省材料的最有效途徑。如圖四~十五所示，每一個結構中一系列的支柱（或者是每一個面板間的交集）都遵循著這個球面，我們稱之為大圓形路線，它們的交集皆非直角。我曾經用過金屬配管蓋成數個這種網格球頂，功能絕不亞於我們在操場上提供攀爬的叢林體育場——它們的重量夠輕，承重時不失安穩，又不需要特別的下錨固定。但是當我試著設計一個網格式小屋時——此時牽涉到金屬支柱以外的學問——我就發現它們的不切實際。在我們這個習用長方形木材和夾板的文化裡，要完成一個滿意的網格式結構是需要格外加倍的努力的，而材料過多的耗損正抵銷了其經濟效益。

有機物對於這種網格球頂的使用亦並不多見。或許是因為當它們需要這種尋常結構的時候，它們自然就會製造不需支柱的平滑圓頂，也許是因為它們極少需要這種中空、規律、表面切割的球體。經常為人提到的只有一組網格式的集合：就是球狀濾過性病毒的蛋白質薄膜。一模一樣的蛋白質分子包裹在這層薄膜下，其組成數目一八〇、一八〇、三二〇就與整個球體的網格式結構面完全無差。雖然我認為不管是機械結構的強度，或是物質材料的經濟效益，都無法解釋它們的出現原因。比較可能的情形是，第二章中提出的資訊缺乏又再度浮現。上述這種結構能夠允許一個濾過性病毒被單一蛋白質的多層次重複所覆蓋，造成這個蛋白質的每一個

分子都能搭配占據完全相同的位置，也就是使其自我組裝時，將困難度減至最低。

## 轉角和裂縫

兩個物體相互接合，轉角通常便如此形成。我們心中一直有一個疑問，是否這個轉角必須是直角？現在讓我們正視——卜這個轉角的本質。在此，自然和人類科技再次證明他們不同的偏好。人類的建造往往具有尖銳的稜角，自然界卻善用磨圓的轉角——除非是不得已的功能需求才會引起變異。在這裡的基本問題非常簡單：第一，尖銳的稜角有何不妥？第二，在人類科技裡，這些尖銳的稜角在何處無法適用？

當第三個問題得到解答時，上述兩個問題便可以迎刃而解了。這個問題是，一個硬結構若承受重力，第一個裂痕會自何處開始？它的答案想必無人不知：當然是自結構承受重力最大的地方開始。若試圖將一根易碎的棒桿自其彎曲或轉折處折處扳直，那麼其斷裂一定開始自彎曲或轉角的內側。此外，要讓這樣的彎曲物產生斷裂，比起讓筆直桿子產生斷裂所需的力量要小得多，其效果並非是由於一開始彎曲棒桿時所造成的弱點。不管是從大塊材料上切割下來或是鑄模產生的彎曲桿子，其作用都如出一轍。所有的彎曲處內側顯然都是它們的天然弱點所在。至於桿子因彎曲被削弱的程度並非決定於這個彎曲的全部角度，而是取決於角度內側的銳利與否。刻意讓一個角度不那麼尖銳，也就是磨圓它，使它的變得平緩，便可以增加物體的強度。

為了試試看平緩轉角內側能夠達成何種功效，讓我們剪一個寬約一吋的長形鋁箔紙，在中央點處剪出一個約略六十度的轉角——略似一個迴力棒的形狀，平放在桌上扯其兩端，它就會自轉角的內側開始一裂為二。再剪另一塊鋁箔紙條，這一次用打洞器或是圓形的剪器小心地剪出較為圓順的內側轉角，然後再拉拉看，第二次所要使用的力量也許就大些，這證明斷裂在此遭到抵禦。如果對塑膠保鮮膜做同樣的試驗（當然得看是哪一種塑膠製品），結果可能更使人印象深刻；其平緩的轉角可能完全防止了撕裂的發生。力道的集

中——這是尖銳稜角的缺失；而且物體越堅硬，問題越嚴重。我們便曾使用這種現象來切割玻璃。磨擦一塊玻璃，可使其產生類似轉角或至少是力道夠集中的地方，這個區域便會有週期中的裂紋穿透。同樣地，我們也可以在剪布時以一個小小的裂縫開始，讓布能夠輕易地撕開，只要這塊布不是太具有彈性的話。從一個小小的裂縫開始，撕裂的力量便可持續穿透，使整個工作極為輕鬆。

尖銳的稜角顯然不理想，但是還有比它更糟的事，便是當兩片固體物件以尖銳的稜角相互接合，好比相框的四個轉角。光是轉角本質的脆弱不說，還要克服各種困難；比如使用能夠抵抗張力負荷的固定方法，並且將一個轉角拉直，等於是強行延展它的內側邊緣。但這不正是我們人類製作窗戶、門框、製造木箱、抽屜、有腳家具以及種種用具的方法嗎？從過去的使用經驗中，你自然也知道他們不中用的地方——就是在接合處，而且通常是接合處的內側。我們製造接合的轉角並非優良的設計考慮，但是它們的製造卻是如此地簡便！

因此，磨圓的轉角可以對我們有所幫助，就如同你在上述鋁箔紙的實驗中看到的一般。人類的科技確實如此實行，但通常只有在強制的情形下才會發生。有一次我扭斷了一個汽車的門把手，經過檢查才發現在它塑膠製邊緣內的模鑄金屬裡，具有一個尖銳的內在轉角。但是在「原裝工廠替換零件」中，這個轉角已被磨圓；顯然是某人終於想通了這點，變得聰明起來。許久前，汽車的機械齒輪被人發現如果將齒間的隙縫底部從尖角磨圓，則它會更耐斷裂。輪船的舷窗永遠維持圓形，便是想要避免當大浪撲到船身時任何斷裂的發生。我們在飛機的設計上蓄意使用圓角的窗戶；一架飛機的窗戶是機身外殼間的間隙，而這層外殼是整個機械結構的一部分，絕不單單只是為了保存內部旅客和空氣，隔開風和氣候變化的保護膜而已。一個相當好用的羊角榔頭，前面的釘錘部分與木頭身體相接的地方都會有一點點的變圓，如果我們要在任何一個轉角上接合兩種物體，我們通常會燒成圓的焊接點，或是附加另一塊物質，使其轉角受到變圓或是交互

支撐的保護，諸如此類的例子還很多。

自然界的結構較為柔軟，因而在轉折處的耐斷力勢必要高得多。除此之外，自然界的結構鮮少是也分離的物體在轉折處相互接合而成的。通常我們發現他們的共通特性，都是由單一物質構成，自單一地點生長，角度磨圓的技術往往早已根植在他們的要素裡，而非臨時起義的添加物。我認為在這裡最主要的重點，在於它們的生長過程。不管其牽涉程度有多複雜，這種形式的自然生長能夠大幅地簡化產生平圓角度單一結構的過程，在圖四~十六裡，我們就可以看到這樣的例子。哺乳動物肩胛骨上的長形脊骨與其他骨骼一樣，形成一個圓緩的角度；樹幹上伸出的樹枝，木質纖維定會在結合處的上側轉角（功能上應屬內側轉角）生出。我就曾經試圖用大槌把一塊木塊敲進橡樹的交叉處；之後就發現這是一件多麼不智之事。一個打碎的眼鏡幾分之一秒後就會造成真正的傷害，便可以讓我們牢牢記住角度磨圓的教訓。自然通常只有在兩個物體需要形成一個活動的機械結構時，才讓它們以尖銳的角度相接合；例如人體的前臂和上臂的接合。而且，顯然在這些地方斷裂並不是我們的考慮重點所在。

直至最近，人類終於開始利用更多的單一物質製成具有渾圓內角和外角的物體。這並非是由於我們刻意地師法自然，而是由於我們能夠更有效地利用塑膠原料鑄成或合成更錯綜複雜的物體形式，以取代之前用金屬合板切割的技術。這樣製造出來的彎圓角度不但使得物體較易清洗，而且由於減輕了力道的集中，物體龜裂的機率變小，因而使得整個重量和物質的使用更能符合經濟效益。花園用的手推車，若是用單一塑膠原料一體成型，其形狀的變化多端遠遠超過金屬切刻出來的盆形手推車。玻璃纖維壓製成的浴缸比起金屬製浴盆，也具有同樣類似的優勢。

即使是簡單的幾何層面，自然技術和人類科技在其機械設計的對比上也是如此地鮮明。人類建構平面，而自然則喜好曲面；人類視直角為至寶，自然界卻不為所動；我們的轉角尖銳俐落，自然界都渾圓厚實。即使是在最平常的事物上，我們也可以發現兩種科技的明顯差異。重要的是，免除

了未經深思熟慮的優劣論斷，我們更能夠發掘出反覆出現的真理範例。更重要的是，我們即將能夠看到兩個科技各自在其內在凝聚的範疇內運作，分別形成一個分離而又完整的實體。

## 第五章 軟和硬

自然界和人類科技的物體形狀不同，使用的物質材料亦大異其趣。人類喜用堅硬、易脆的物質，自然界卻偏好柔軟易曲的物質。飛機停駐在登機門口與飛行中相比，形狀並無差異，而靜止中的樹葉與暴風雨中的樹葉相較，兩者形狀卻截然不同。這樣的比較帶我們進入材料科學的領域，這個既有趣味又直接相關的領域是值得我們這些非工程師更加關注的。我們對物理世界的認知或許可以歸咎於我們的基礎教育。小學的物理課程假設所有的質量運作都集中在數點上，所有的固體都像是一成不變的堅固勁直；這種優良的抽象、善意的虛構，卻完全不適用於現在的故事。如果有任何物體具有伸縮彈性，那麼加諸其上的力量將會改變其形狀與質量的中心點，這樣便使整個物體世界更形複雜。更糟的是，形狀的改變可能會導致不同的重力產生。事實上，這種分析上的複雜度只代表人類的問題，而非自然界的難處。正如同我們即將會看到的，物體的伸縮彈性將會為所有的巧思妙計提供各式各樣的可行機會。

我們或許需要一些特別的工具來形容這個較複雜的世界。所謂的「固體」，便意謂著非流體，或者是不能流動的物體。我們可以暫且把絕對的堅固置諸腦後，沒有任何固體是絕對堅固的。即使是正式區別流體固體的試驗，也會假設固體在接受試驗時至少會產生一些微量的彎曲妥協。強力扭曲（不使其折斷）一個固體物，當壓力被免除時物體就會彈回；若是同樣扭曲一個流體，它就會親切自然地改變自己的形狀。我們所食用的果凍沙拉是一種柔軟的固體，它會永遠維持鑄模的形狀；相反地，咖啡能夠倒入任何形狀的杯子。

更進一步地分析，我們了解到真正發生作用的並非由於力，而是由於應力（STRESS），意即力除上它所施力的範圍面積。即使是小小一點力也能迫使一根尖針穿透硬物，因為尖針極為尖銳，其施力範圍面積極小，所以即使是小小的力

也能產生極大的應力。同樣地，如果施加相等的力道，一把有利刃刀口的刀子會較鈍刀更容易穿透，這是因為利刃在牛排或長豆上能夠發揮更大的應力之故。

## 材料證據

拉扯一個固體，將會造成它的伸張。如果這個固體是石頭或骨骼，則其伸張難以辨認，但它的伸張確實可由測量得知。你可以將這種測量伸張的數據資料繪成圖表以伸張拉長的距離做為橫坐標，施加的力量做為縱坐標，如圖五~一左圖所示。但是這個圖表只能描述你所使用的某種特定物體。理想的圖表應該更能闡明力與伸張之間的關係，其表達不應僅限於某種特定物體，而應該涵蓋某一類物質——不管是石頭或骨骼、佛蒙特州的花岡岩或是牛的大腿骨。為了獲致這種普遍性，我們用應力來取代力。讓我們重申一次，這裡的應力代表拉張力除以拉張物的截面積。我們也捨棄原來拉張得到的距離不用，而將這個物體的原來長度去除其伸張的距離，得到的結果稱為應變力（stress），或又稱延長係數。如圖五~一中的右圖所示，我們所繪出的圖表以應力為縱向坐標，以應變力為橫向坐標。在材料科學中，應力和應變力兩者意義差距甚遠。總之，撇開惱人的專有名詞不談，一個每平方公尺百萬牛頓(簡稱，相當於每平方吋一五〇磅)的拉張應力將產生百分之十的應變力，這即是某種橡膠的數值。

對於非塑性的固體，問題變得較為複雜；一條橡皮圈與一塊太妃糖的軟硬度即大不相同。圖五~二中的應力——應力應變曲線可幫助讀者入門去了解各類材料的相關性質。其中一項性質是，某種材料可接受「多大」的拉張力而不斷裂，亦即是可承受的最大應力，我們稱之為物質的強度。第二項性質是可伸張到「多長」而不斷裂——即最大的延長係數(應變力)，通常我們稱之為物質的延展度。在圖上示出縱軸的最高點為強度，橫軸的最右前方點為延展度。對許多材料而(如金屬)，又有其他係數將延展度變得更複雜。如果延展至某一個程度，材料會彈回原狀，但若再加以延展會維持伸長而不再回復。這類材料有其彈性的極限，極限即是該材料可使用的延展度。彈性極限不僅受制於伸張：一個條狀物若彎曲

到它彈性極限之外，就會維持彎曲不再回復。

除了上述的強度和延展度以外，我們所面對的第三種特性即物質的剛性。用力拉扯一物，看看若要達到某種捏壓的應變力需要多少的應力，這即是剛性——應力除以變力。橡皮容易延展，這意謂著低剛性。以剛才提到的橡皮為例， $1\text{MN}/\text{m}^2$  應力除以 0.1 的應變力，得到每平方公尺十百萬牛頓的剛性( $1 \div 0.1 = 10$ )，如果換成剛性遠超過這橡皮的鋼鐵，想用相當的力量讓它延展則難上加難。有一種鋼需要兩萬個  $\text{MN}/\text{m}^2$  (也就是每平方吋三百萬磅) 的應力才能產生同樣百分之十的應變力，所以它的剛性是為每平方公尺二十萬百萬牛頓( $20,000 \div 0.1 = 200,000$ )。這一行業的工程師稱呼剛性為楊氏模數，以紀念湯瑪士·楊(一七七三~一八二九)，他曾經致力於將牛頓的力學應用於真實的材料上，並且在偶然的機會裡成為能量的概念之父。但是我們寧可使用剛性這個名詞，因為它更能訴諸我們的認知，配合我們的共同語。在圖中，剛性即是以整個曲線的斜率(傾斜度)來代表。

另外再加上一些小小的複雜因素:對於許多物質，剛性的數值並非固定，完全因拉扯時延展力有多大，或是被延展的有多遠而定。一個物質很可能一開始難以延展，也可能抵抗延展一直到斷裂，這樣的物質繪成圖形的應力—應變線就勢必成為曲線，而非直線。最常使用的物質——尤其是金屬——形成幾乎近於直線的圖形，所以我們對引用某個特定數值代表物種物質的剛性習以為常。但是絕大部分生物界的物質，都會形成弧形的應力—應變曲線，不管這個曲線的弧形是朝上或朝下。換句話說，所謂這些物質的剛性可能是一個大略的平均值，或者只是代表某種特定情況下的數值。如此造成的複雜度，卻可以容許不同的物質在不同情況下延展，例如在圖五~三中我們可以看到，構成肌腱的物質，其畫出的曲斜弧形朝下，右下方留下極大的空間；而構成我們動脈血管壁的物質，其曲線弧形朝上，右下方留下來的區域相較肌腱留下來空間就小得多。

這些在曲線下方的空間，代表第四物質特性。延展物質需要能量，若要延展加厚的物質，或是延展得更遠更長，則須要更多的能量；我們在每天的生活裡都可以得到證。我們使用延展功來計算延展物質所需能量(嚴格地說，即每一平方體積的能量用)，在圖形中，個能量即是以應力—應變曲線



的下方從零一直到物質斷裂點為止的塊區域為代表。如果所有的應力—應變線是直線，這個物質特性就毫不足奇，但是如同前面所述，自然界的物質大都依據其功能需要各色各樣的曲線。延展功，有時被稱為韌性，可說是相當訴諸直覺的名稱，但我們將會發現它對我們極為有用。

第五個特性——回彈能——這正是橡皮所有而太妃糖所沒有的特性。如果你在延展某物時(例如橡皮筋或是鐵彈簧)，計算你所耗費的延展功，並將之記錄下來，然後你再鬆開幾個物體，記下它所歸還的能量或功效，在這個不完美的世界裡兩者永遠不會相等。延展它所使用的功永遠會超過放鬆時歸還的能量，歸還的功除以使用的功便得到物質的回彈能。當我們在前幾章談到昆蟲翅膀的蝶鉸軟墊以及海扇貝的蝶鉸韌帶時，就已經約略地提過這個特性。至於在應力—應變的圖解中，回彈能得自兩個區域，即是以放鬆物體得回之功效除以延展時所運用的功效。我們在此列出一張摘要(包括一些非生物界的例子)，以便日後參考：

### 【受影響的物質特性】

強度：使物質發生斷裂所需之應力(每區域面積受力)

延展度：使物質發生斷裂所需之應變力(相對延長係數)

剛性：當物質被延展時，應力除以應變力

延展功、韌性：延展物質使它發生斷裂所需之能量

回彈能：物質彈回時所解放的能量除以伸張時輸入的能量

### 【低】

果凍

磚

軟塑膠

鑄鐵

太妃糖

### 【高】

鋼索

橡皮筋

磚

彈簧鋼

橡皮筋

## 特性之適用

這五種物質之特性各有所長，孰優孰劣實在無法用單一尺度來評斷。當然生物界的物質早已得到不少的讚詞，但是這種讚美不過是一種過於簡化的嘮叨而已，我們必須要考慮到物質運用在某些特定情況下的適當性。即使是在這裡，我們也需要一些延伸心智的想像力，因為任何工作的完成，方法林林總總，巧妙各有不同，這個論點或許還要借助一些實例才能具體表達。

人類製成抗張力的物件，運用各式各樣的物質：包括鋼鐵、其他金屬和天然纖維，例如黃麻、瓊麻、呂宋麻及大麻

纖維；合成的聚合體，例如尼龍、聚乙烯及聚丙烯。我們也將它們製成各式各樣的形狀：鏈狀、帶狀、條狀及編結的、纏繞的繩子和鋼索它們的任務似乎也足夠明確，即抵抗拉力（張力）。這樣說來，讓物質發揮所謂的最佳功效，應該不過是使它們在相對於重量或價格的考慮下，產生最大極限的強度而已。事實上卻不然，整個事情遠比我們想像的更微妙、更多層面。

讓我們來思量一下剛性。行船下錨，若是使用的繩索毫無伸縮性，那麼你的麻煩就大了。船在下錨處附近輾轉移動，遲早這繩索會拉緊，讓船停住，此時它將會承受多少力量？根據我們的最佳權威牛頓先生說這個力量將會等於船身的重量乘以船行進的減速度。如果這個繩索在某一個特定長度處拉緊——意即如果它有著極高的剛性——這船就會以極大的減速，也就是極大的力量，猝然止住。這種停止極有可能繃斷一條厚重的錨線，或者更糟的是，扯斷船身或是碼頭。最好採用較能伸縮，剛性較低的繩索，這樣的繩索止住船隻比較沒有那麼突然，受力也因此相形較小。如此實行，不僅傷害較難發生，而且光憑一根較弱繩索竟然就能辦到使用剛性較低的物質容許我們運用較少的力量（同樣地，一個較長的繫船繩索或許比短索來得理想，對於長索短索來說，它們的延展度或許不會有所不同，但是真正延展的距離卻會隨繩索的拉長而增加），但若是應用在別的狀況下，剛性卻顯然成為一種優勢。如自行車的索鏈、汽車引擎的皮帶，無一不靠抵抗張力來工作。所以物質在使用的過程中延展得越少越好。彎曲需要，延伸，卻敬謝不明。

同樣的論證也可以應用於有生命的世界。大型吃草的哺乳類長有一條韌帶，自其後腦蓋的一根脊骨沿著頭部後半的皮層向下延伸，一直達到它頸部和胸腔脊椎骨的上行延伸骨骼（見圖五~四）。這個韌帶的剛性相當低——它很能被延展——如此才能維持極重要的頭部不被搖斷，或者使這些韌帶在動物行走的時候不致截斷鬆開。買一塊沒有切開的羊頸肉（這是做串燒的絕佳肉類），你可以切出它的韌帶，感覺一下它的韌性。相反地，連接肌肉和骨頭的肌腱，卻需要較高

的剛性。肌肉的工作是靠收縮，通常是將兩塊骨骼拉攏在一塊，而肌腱的任何延展便意謂著骨頭的移動相對減少。羊小腿的脛骨上即有這樣一截既長又佳的肌腱，你可以取來拉拉看，感覺一下它對延展的抗力，它的反應與拉扯頸部韌帶的感覺真有天壤之別。

一直到十九世紀，自然界在製造非硬性而具張力的物質方面——也就是能夠拉伸的繩子，仍然遠遠領先人類。人類對於我們所使用的硬性材料當然也花了不少心思變化，製造出來的物質可以姑且稱為虛擬彈性。試舉我們早先提到的一個規律，沒有任何一根繩索可以被延伸至絕對的水平線為例。若試著扯一條中間下垂的重鐵鏈，則當中間的下墜逐漸消滅時，需要拉扯的力量就越來越大。這鐵鏈本身並不會延展，但它的重量使它的兩端朝相反的方向各自移動，使之看上去就像是能夠延展一般。停泊船隻若是需要使用鐵鏈，則一定要使用重量級的，不然便需要在這條鏈子的中點懸掛一個重錘。當然，科學發展至今，我們已經可以製造出各種具有延伸力的物質，例如橡膠及其他聚合物等。我們向自然界看齊，不只是在製造物質的形式，也在於製造的原料來源；即使是完全合成的物質也幾乎全是碳基的有機化學產物。

回彈能正好像剛性一樣，優劣的論定取決於不同的應用。游水的海扇貝若是想要具有一個優良的接合韌帶，那麼高度的回彈能是絕對必要的。海扇貝拍打它的兩片貝殼——排出的水流儼然形成兩股噴泉——此時它便需要收縮大肌肉(同時也是可口的肌肉)。如何再打開這兩片外殼上完全是靠它接合韌帶處的彈性裝置；它的肌肉一旦收縮，不但關上兩片貝殼，而且拉緊韌帶蓄積能量以利後來再打開。韌帶的回彈能越高，浪費的能量就越低；但是相反地，在某些情況下高度的回彈能卻全然不符合需要。蜘蛛若要以蛛網困住飛進的小蟲，這個獵物就必須粘著在蜘蛛絲上，如果用的是高度回彈能的蛛網，那不就像是彈跳床一般立刻把它到手的獵物彈回去。此時的最佳選擇應該是一張具有高強度、高延展力、高韌性的絲網，但其剛性及回彈能又要極低。放眼自然界或是人類的科技，再也沒有其他材料能夠比蜘蛛所吐的絲

更符合這種特別的訂單了。當然這種要求並非尋常，只是值得我們特別注意的是這個例子中材料與應用之間的配合。

對於回彈能的不同經營，正好點明了自然與人為科技的截然不同。人類對於製造這種既能拉得老長又能以低回彈能回到它原來長度的物質(此如蜘蛛絲)並不擅長，為了達到這種目的，一個物質必須成為所有能量輸入的熱力中心，但是它又不能流動(如液體)，或在過程中發生自我毀滅的高熱。我們人類所製作的彈簧，不管是以鋼鐵或橡皮為材料，特性都如此一：優良的彈性。獲得較低回彈能的方法之一，如圖五~五所示，便是在與彈簧平行之處，加上額外的機械配合。我們稱做防震器一類的東西，通常在汽車彈簧裡面或旁邊和門的扭把手裡都可發現。這種機械設計正確名稱應為減震器或制動器(damper)，沒有理想的長度，並且毫無回彈能。它們與彈簧類似，抵抗任何的延展或擠軋，但與彈簧又不同，並不會彈回，所有的機械能量轉化成熱能，而非儲存在彈力中。

保持低回彈能及維持低的反彈，在自然界裡都是同等的重要。蜘蛛網只不過是其中一個極端的例子而已。舉例來說，一棵在風中搖擺的大樹若是回彈能太高——也就是太少的阻尼(damping)——恐怕不太妙吧!。這樣子樹木搖擺的幅度會大大增加，而樹根也會逐漸地鬆動。雖然如此，大自然並不會用像是防震器這一類的東西來限制回彈能；相反地，她的阻尼通常已經生在她的基本構造裡，好比這樹木的木材。自然界的低回彈能物質占絕大多數，高回彈能物質的產生，則一定是因為某種特殊情況的需要，好比可逆轉的能量儲存(例如蝶鉸軟墊及韌帶)，或是引發流體的刻意振動(例如我們的聲帶以及某彈射種子的特殊裝置)。

動物如何抵銷某些多餘無用的動作，其方法策略花樣百出，通常遠遠地超過簡單的阻尼作用：例如使用感測器、反饋迴路，以及肌肉的收縮。人體站立時比任何百貨公司裡的假人模型一還要來得穩定，為什麼呢？兩者的底盤一樣狹窄，而且你的肌腱又具有高度的回彈能；但是你如果將重心約略地往外移動，超出原來底盤的支撐點，肌腱與肌肉的感應器立

刻察覺這個變化，你的大腦便接著通知各個有關肌肉做輕度的長度調整（「姿勢反射作用」，在許多物理學及神經生物學中，是屬於教科書討論的一般性科目）。但是，人類科技只有在極偶然的情形下才能達到這樣的高深境界。例如，大型飛機利用同樣的自動控制，減低飛機在經過不穩定氣流時發生的顛簸不平。或許你也曾經注意到機翼後方的副翼，似乎隨著飛機的飛行在那裡上下開闔。這些副翼的操縱並非出於飛行員的直接號令，而是完全依賴電腦的控制，飛行員的反應是無法快過飛機在天空中一咻而過的。我們也聽過自動汽車的懸承系統，會在車輪撞到馬路中隆起的緩速器之前便察覺到這種情況，並對車輪做出必要的擴充或收縮。

在所有的物質裡，最能夠展示屬於這些機械特性之複雜多樣性的，莫過於木材了。對我們而言，木材極為普通，並無任何優劣選擇可言，但若需講求材質時，我們就不得不正視它，看看各種變化多端的機械特性如何配合同樣多變的應用實況。為了區別不同的本地木材，我曾經借助一本討論每種材質傳統用途的書籍。每種材質的特殊用途，或許都代表使用的傳統，但傳統來自使用經驗，而非出自任意的慣例。白松製成火柴棒、紅雲杉製成獨木舟划槳和鋼琴的共鳴板、黑柳製成人工義肢、黑胡桃木製成飛機的螺旋槳、白橡木製成威士忌酒桶、美國山毛榉做成曬衣夾和線軸、桑科木材可做成弓、黃楊可製成木桶塞子、癒瘡木可做成滑輪、級木樹可做成繪圖板。這些還不算是建築用的木材。在建築用的木材裡，黃松是有名的軟木，而紅橡木是極好的硬木。上述這些發現完全得自一般工匠的歸納綜合，他們對於那些討論應力/變力圖表的祕密一無所知。所憑藉的，無非是手中物質實際特性的靈活運用而已。

## 相互關係和影響

蜘蛛絲富有延展力，強勁、有韌性，但不特別僵硬或具彈性；膠原質的肌腱既硬又韌，並富彈性，但不易延展，不夠強勁些我們所關心的機械特性或許定義分明，但是它們若是歸屬於一種真正物質時，不論是兩種科技中的任何一者，這些特性卻都不一定會走上截然不同之路。簡而言之，所有

這些機械特性的各種組合，無論是那一種科技，都不能完全涵蓋。換句話說，如果希冀獲得具有某種特性的材質，那麼對於他種特性的選擇勢必要受到多重限制。所以，當設計用到某項特別材料的超級優點，勢必需要面對其他特性較不便利的缺點。更概括地說，兩種科技若使用完全不同的基本材料——例如說，混凝土對照新鮮木材——那麼，許多的相異點便會接踵而至。

再讓我們來看看剛性、強度和韌度。堅硬的物質通常沒有韌性，怕一強而有力的物質(如果不太硬的話)卻通常夠堅韌。舉例來說，眾所周知磚塊極硬但缺乏韌性，像這一類硬物的真正麻煩，即是斷裂口太容易就擴大穿透它們。隨便拿一塊硬物用力一擊，便可將磚塊敲裂，尤其是當你將磚塊兩端架起，而力道又落在磚塊的中央點時更加容易。如果用灰泥接合，則可以讓磚塊大部分的表面得到較多的支撐，使得那些無法靠些微下垂來重新分配的集中力量不致造成磚塊的斷裂(正如同木材一般)。相反地，軟鋼、尼龍、蜘蛛絲和新鮮木材都是強而有力的物質材料，不特別堅硬，但卻具有相當的韌性。要想將由這些材料製成的物體一斷為二絕非易事，它們通常都需要整個被橫向切割，所以像關於空手道一掌擊碎層層堆疊的新鮮木頭之事，向無所聞！

葛登(James Gordon)，一名退休的海軍工程師，從事過斷裂延伸的研究，同時也是生物觀察家。他便指出，人類的製造通常以適度的剛性做為遵循準則，而自然界卻以適當的強度為規範。我們把這一好剛性、一喜強度的兩種截然不同偏好稱做兩種設計哲學的基本相異處，或許也太過於武斷了！因為兩種偏好的形成基本上是極偶然的，並沒有真正的主宰，只不過是意外之間受到當時最容易得到的物質的左右罷了。其差異也並非絕對——因為我們真正的注意點，在於趨同與另類設定的發生——但是這樣的差異，當然代表著人類科技和自然界的普遍分歧點。

磚塊、水泥塊、混凝土製品、石塊、陶器和玻璃都是堅硬物質裡的極端例子，鐵鑄模型及高鋼也同樣堅硬。木材若是被切割並形成乾燥木材後，雖然仍較鋼鐵和陶器為軟，但

其剛性卻遠遠超過存活為樹木的階段。我們對種種特性挑三揀四，結論就是，因太硬太緊而斷裂實在是輕而易舉，況且這麼做有失公允。我們所能發現的物質材料，數量概多，用途亦廣，品質也耐久，不巧它們正好都屬於堅硬物質。好比說你已有一個釘槌工具，你就會覺得鐵釘勝過螺絲釘：如果你發現了膠泥（灰泥），石頭就會忽然變得有吸引力；拿到一把電鋸，保證你會捨棄圓型木材不用，蓋出一個矩木搭建的木屋。如果防腐的絲柏或紅杉貨源充足，石頭築的碼頭或許就會被木頭取代。況且，地面上的高大建築——全然受制於重力的影響——若是用堅硬的材料來建造，將比用非硬性材料來得簡單多了。

重要的是，我們對硬性物質的這種偏好會造成什麼樣的結果？給我們的結構帶來多少非難？首先，它使結構體出奇地脆弱，易受任何意外災害、任何不尋常重力負荷的影響而造成斷裂（影響）包括我們使用結構物時遇到意外的附加重量，以及極端的環境變化產生的負荷，比如龍捲風、大風雪、冰雪及地震等等。其次，碎裂要比變形來得傷害更深；一旦結構有了斷裂，絕對無法輕易彈回或恢復原來形狀。因此人類使用的堅硬材料，要比自然界的柔韌物質為我們帶來更多的災禍。諸如此類的災禍，不知刺激了多少工程師的反省深思、實用分析，因而產生了多少有貢獻的著述呢！

葛登同時也指出第三點更為微妙的影響。絕大部分都有足夠的強度，但適當強度的結構物卻並非絕對地堅硬。換句話說，要建造一個足夠堅硬的結構，比起一個強度符合所需的建築物，需要花上更多的材料，這樣說來，因為對剛性的推崇，我們的科技不就成了浪費的代表？我們當然也有不夠堅硬的地板，那些地板具有超級彈性，但即使它們強度夠大能夠安全地避免斷裂，我們仍然發現它們令人難以忍受。幾年前我曾經使用較厚的木條重整我家的陽台，原先的陽台已經使用多年，即使在人數最多的宴會時刻依然安然無恙，只不過，走在上面感覺實在太有彈性、太過生氣蓬勃了！現代的摩天大樓、吊橋、機翼的低剛性上者實讓不少人操心了一陣子，但是任何關於這個剛性與強度的優劣評斷，如果不能從



現實和歷史的可能及選擇來檢視的話，就有失公平。僅管如此，地震對堅硬結構的摧殘還是比柔軟的樹木大得多。

大型動物的骨骼都相當堅硬，它們能支撐這些動物以抗衡地心引力，並做為一種槓桿和附著物，俾使肌肉引擎能夠驅動身體的行進運動。就好像伸縮太過的肌腱會阻礙肌肉的活動一般，彎曲的腿骨亦就無法支撐站立。自然界的確也使用堅硬物質，但通常會保留它們只用在絕對必須的應用上。較骨骼更堅硬的還有真正的生物陶瓷(biological ceramics)，它的蛋白質成分較低，無機物的成分較高。硬珊瑚是一種特殊堅硬的材質，但是若遭受風暴，珊瑚礁的斷裂反而造成更多更新的珊瑚體之散布。因此，堅硬的缺點並非意謂著適應生存的失敗，海洋中軟體動物的外殼亦屬於堅硬物質，但是這個外殼卻為它們提供了必須的保護。不管如何，這些外殼和硬珊瑚一樣皆由鈣化合物組成，其花費極低。再說海洋裡並非缺乏鈣成分，相反地，鈣在海洋中幾乎呈超飽和的狀態，吾人不需花多少的能量便能自海水中提煉出鈣質。人類牙齒的琺瑯質甚至比軟體動物的外殼還要更硬，但是想想看，軟的牙齒如何適應咬合？在每一個個案中，我們都能體認到堅硬物質的選擇與堅硬結構的存在都自其有特定的道理。

也正如同人類的工程師和建築師一樣，自然界必須面對堅硬物質缺少韌度的這個問題，畢竟牙齒、骨骼和珊瑚礁都會因堅固而斷裂。但重要的是，兩種科技都如出一轍地把最堅硬因而最易於斷裂的物質用於小面積的結構。牙齒的琺瑯質僅僅是牙齒外緣薄薄的一層，它的牙質遠多於它的琺瑯質。同樣地，當你切割硬物或需要長時間使用電鋸時，你通常會選擇尖端是碳化物製成的鋸刀。「尖端」——便是我們在鋸齒尖上限制這堅硬陶瓷，使其成為小面積的表徵。

## 柔性的優點

使用非硬物的好處，絕非只是逃過便宜木板上的幾個裂縫而已。對於非硬物的使用，自然界可說是不費吹灰之力就穩操勝算，我可以從不勝枚舉的可能中選出數個例子以說明兩個概念。第一，不管是應付外來的艱難處境——好比強風、大浪和大力的撞擊等等，或是關係內在的運作，包括血



派的流動和肌肉肌腱的牽引、扭曲等，柔性這個特質都能成功地奏效。第二柔性的功效可不只是改善韌性及增加對衝擊的抵禦力能夠使結構物在承受特殊有助益的重量負荷時，改變形狀來順應新情況。

試想想，若要製成一個長形結構，既擁有大片的表面積，又需要應付強大水流的衝擊，我們要如何著手設計？就拿船身來說，使用極堅硬的材料做成，就必須具備相當牢固的支撐。它也許會在瞬間產生斷裂，而且若是撞到其他的硬物，更會引起莫大的麻煩。再看看一種海洋藻類是一種大海藻植物，住在浪潮洶湧的岩岸（見圖五~六），身長可達一百五十呎，幾乎等於一艘船隻的長度。對於這樣一個受制於狂風暴浪大力拖曳的長形結構而，它附著在岩石上的根基看起來真是極其薄弱，整株植物看起來不但易於曲撓，而且絕對弱不禁風。

研究各種富柔性海洋有機物的柯伊賀(Mimi Koehl)就指出這大海藻的祕訣所在。她的思想也頗富柔性，發掘了早期觀察家所不能發現之處。風浪產生的水流，其隨時的逆轉流向間隔不過幾秒。當一個足夠柔弱的大海藻生長之長度超過其附近水流不時逆向的流動距離後人的阻力就停止不再增加了。任何多加的長度都只不過追隨著水流罷了。相對於四周的水流，它的速度幾乎等於零，因此完全免除了阻力。假設水流速度是每秒三呎，並且每四秒便逆轉流向一次，那麼唯一還拉扯它的附著基點的，只有前面一段十二呎的海草。柯伊賀的這種海藻需要生長至某一個相當的長度才能避免阻力，但是如果沒有柔性，戲法也是無法變的：這海藻的其中一部分必須與它的另一部分朝著不同方向延展，長海藻的柔軟易屈一如繩索。

我們的旗幟和小三角旗在強風中總是會撕爛得體無完膚。除了一些植物生態學家要靠著撕裂來測量風力影響所及之外外，這種現象著實令人苦惱。氣流中的旗幟確實拖拖拉拉；如果尺寸同樣大小，一張旗幟的阻力大約是一個硬風標的十倍。所以，顯然柔性並不能保證自動優勢。大海藻的避難手段在陸地上並不實用，因為風速太快，而且風向逆轉不

如海中水流頻繁。以一個風速每小時四十哩(每秒五十九呎)，風向逆轉最頻繁不到每十秒一次來計算，一個柔軟物體幾乎要長到六百呎才能達到它無阻力的境界。自然界當然也有在長桿上飄動柔軟旗幟的例子：她的旗幟名叫樹葉，而且這些樹葉在狂風中並不會輕易屈服。樹木為了營生，為了自陽光中取得能量，就需要大片面積的樹葉，而這樹葉便造成了大問題。絕大部分樹木的阻力都來自樹葉，樹幹也占了一些，而這種阻力一旦遇到暴風，便自樹葉一路傳至樹幹、樹根，導致整棵樹木的倒落。

所以，一片樹葉的阻力為何？幾年前我在一個高度亂流的風洞中，以一個接近樹葉會遇到約暴風速度做了一些測量。樹葉或許富有柔性，它所遭遇到的阻力相當於硬風標的低阻力及旗幟的高阻力之總和，但是它們卻使用了一個絕頂聰明的柔性策略。舉例來說，當一陣風牽動楓樹或美國鵝掌楸的葉片時，這風力就正好攫住葉身靠近葉柄尾端的兩側分裂葉片，這兩側葉片就向上彎曲，整個葉身捲成一個圓錐體，如圖五~七所示。當風力加大，這圓錐體裹得就越加緊密。即使在極度狂暴和波動的大風中，這個圓錐體仍然保持穩定，並且承受相當低的阻力——相當於同樣尺寸的方旗所遭遇的阻力的四分之一。吾人也可以用紙張或塑膠片製成的簡單模型來仿倣它的運作，但是它們的效果相當地粗糙，光是具有柔性仍然是不夠的。你必須具備適當的份量，並使用在適當的地方才行。然而，這樹葉所使用的方法並非沒有缺點。葉片如果捲起，則它受到日光照射的面積就會相形地變小，而接受日光照射卻是樹葉們的主要工作，難怪楓葉只有在需要減低其阻力時，才做暫時性地捲起，就好比帆船收帆一樣。

捲成圓錐形只不過是樹葉在起風的季節裡用來減低阻力的方法之一。羽狀葉——即樹葉作羽毛狀安排——的小葉，比如黑刺槐及黑胡桃樹的小葉，遇風時會重新安排表面配置而成為圓柱形以便隨時收縮束緊(見圖五~八)。除了這種單獨的把戲外，樹葉有時也會聯合起來一起禦風，就像松樹的針葉，每逢天氣惡劣就會集體減低展開的幅度，再一次達

成減低阻力的目的。美國冬青樹生硬的葉片通常在懸掛的莖上一起搖擺，好像多層夾心三明治一般(見圖五~九)，有的單獨捲成圓錐體的葉片，當彼此樹葉長得極靠近時，也會一起捲成一個共同的圓錐體。至於樹葉為了改變配置是否尚有其他的策略呢？毫無疑問地是肯定的，只是目前尚無人做過系統性的調查而已。

人類科技並非從來沒有發生過類似樹葉的這種行為；強勁的風速裡，許多老舊的風車葉片若是帆布製的，都會稍微地合攏起來，若是太堅硬的話，則會在樞軸上產生扭轉。或許我們人類在地面上從來不用操心樹葉所面對的問題，因為我們並不常需要大面積的日光曝曬。我所不解的是，難道為了材料上小小的節省，我們就必須容忍暴風雨中折彎的天線和電線桿？

重新改變結構配置的機械原理饒富趣味，引人入勝。群集的一叢樹葉較單獨樹葉感覺到更少的阻力。為了聚集一處，每一個樹莖的柔性與葉片的柔性都一樣重要，因為葉莖隨時需要應付扭曲的力量。這樣的需求造成設計上一個奇特的問題。為了支掉葉片向外伸展，吸收陽光，葉莖因而必須能夠抵抗彎曲。如此說來，葉莖必須能夠抵抗彎曲負荷，而同時又得順應扭曲負荷，它的扭曲傾向必須大於其彎曲傾向。「風中的扭曲」可不是尼克森任期終了時的一句口號而已。

我們可用一個極易示範的簡單裝置，來說明如何協助扭曲並防止彎曲。首先選一個鋁箔紙、保鮮膜或衛生紙的硬紙板核心，或是用一隻塑膠吸管，先彎曲，再扭擰。然後，在你的圓筒上縱向切出一條細縫，再做同樣彎曲扭擰的動作。這個細長的裂縫確實會削弱圓筒，但其影響對兩者並非相同；圓筒對扭曲的抗力會大大地減低，超過它對彎曲的抗力。事實上，任何直向的凹槽、減弱線條或甚至任何橫切面的偏差都可能造成同樣的效果，只不過不如上述例子那樣予人印象深刻。許多樹葉沿著它們的頂端都布有縱向的凹槽(見圖五~十)。加上裡部一些細胞和纖維的特質，這凹槽可以使扭曲的發生較彎曲來得輕鬆愜意，甚至可以達到塑膠或金屬

圓筒的四、五倍。

構成鳥類翅膀尖端的羽毛也面對同樣的問題，協助扭曲再度成為重要的功能。翅膀驅使鳥類，好比螺旋槳推動飛機一樣：它們只不過是用上下的拍動來代替旋轉。一個螺旋槳的葉片必須縱向扭曲才能對經過的空氣做適當的推動。如果旋轉的方向改變，則扭曲也必須逆轉。但鳥類的翅膀每拍打一次，翅膀上的羽毛便得改變方向兩次，所以它們必須能夠變換它們的扭曲方向。同時這羽毛又得抵抗彎曲畢竟鳥類是靠著翅膀才能升至空中，而在空中飛行時全身的重量也靠它來支撐。我們在此再度看到一個結構體需要扭曲又不能彎曲；誠如許多葉莖上分布的凹槽一般，沿著鳥類翅膀的羽軸也分布著許多縱向的凹槽。現今已成為生物學家的賀爾(Melina Hale)在她大學的第一年就指出這種可能性，後來經過實地測量才得到證實。

但是在翅膀羽毛和葉莖之間有一點不同；羽毛上的凹槽是長在底部，而葉莖上的凹槽卻生在頂端。其實這非常合理，用硬紙板核心或塑膠吸管一比便知道。在彎折一物時，一側會遭到拉張，另一側則蒙受壓縮，而細長的裂縫若是加諸於拉張的一側，則彎曲折斷的麻煩最小。對於葉莖而言，葉片的重量使它自動傾向下方彎曲，因此凹槽應該分布在頂端。至於翅膀羽毛則是底部受到伸張，鳥類振翅飛行，向土升高，羽毛因此彎曲。

所以一個縱向的凹槽，便是可受扭曲的指標。這種設計尚可見於何處？目的又何在？以海星來講，它的五支手臂下藏著無數細小的足，海星靠著這足上的吸盤才能(極緩慢地)捕獲一個蛤蜊。然後它持續地對蛤蜊殼施壓，向外拉扯，一直到蛤蜊累得稍微放棄掙扎，海星就趁此機會把它的消化胃擇入兩個硬殼中間，大啖它的晚餐，但是海星的手臂勢必要能夠適應所有的蛤類才行。歐尼爾(Patericia O' Neill)就曾經觀察過這些海星、海膽和其他棘皮動物的生存方式。她發現是因為沿著海星手臂底部往外發展的凹陷紋路，容許海星能夠隨意扭轉手臂，以便獲得最佳握法——這是一個絕對的需要，因為活蛤緊閉兩瓣外殼，不止力氣驚人，其持續力也相

當可觀。

檢視彎曲和扭曲，我們再度發現，許多可行的事物原理鮮少為人類科技所用。人類的主要作法，即是把易扭曲的結構置於沒有外力扭曲的環境中，所以路標若是架在一個圓柱上，則它既不易彎曲、也不易扭曲；但是質料稍差的柱子，比如那些只有直向打上摺痕的便宜柱子就較易彎曲（圖五~十一）。為了避免任何風力扭曲這些柱子，我們就得把路標牌子一分不差地對準中間安放。同樣地，一個普通的 I 型樑也極易扭曲，但是我們卻將它的柔性隱藏起來。我們的做法便是將兩根以上的樑柱排在一起，所以它們便能彼此支撐。

具有柔性的結構如何彎曲對自然的重要性遠超過人類，或至少自然界視之若寶，而我們人類卻頗受其擾。一個結構物如何彎曲，不只取決於材料的剛性，而且也在於材料的多寡，以及如何安排材料等。這材料的多寡即使是經過小小的變動也會造成極大的效果。可曾記得書架若是加厚一點點，則中間下陷的情形就會改善不少？一個圓柱體的抗彎曲力是與它半徑的四次方成正比，把半徑加倍便等於產生原來十六倍強的剛度。或者從相反的角度來說，只要能夠正確地削弱局部結構，便可以達成最簡單的彎曲式關節。柯伊賀曾展示一個極高大的海葵（見圖五~十二）如何讓海流折彎它的觸鬚冠，使其彎曲的程度恰恰能夠捕捉到海流中帶來的細小可食生物。通常若是從側面對陀螺施壓，則其最底端是效果最佳之處。一個海葵如果具有一致的剛性及直徑，則其彎曲處應該會發生在最底部。但是海葵的主幹頂端處較薄弱，足以構成一個適當的彎曲關節，使其觸鬚冠可以在上自由地迴轉。

類似的情形也發生在水仙花苞出現的時候。但它與海葵唯一的差別在於它只發生一次。一開始，花苞朝上生長，但在開放前便彎曲到某種程度。在這裡它似乎以減弱剛性，而非削薄物質，來創造一個臨時的關節，然後再把工作交給地心引力來完成。我曾經把一朵水仙上下顛倒地插在虹吸管裡，么化苞不朝上反而朝下生長，這樣造成的水仙花形態真是奇特。一旦把它扶正，就會發現它的彎曲不但沒有發生，而且

整個花苞筆直地朝天空開放，看起來完全有別於原來低頭不語的羞答答模樣。

人類並非完全未曾使用過局部的柔性。在我的書桌上有一個用整片軟塑膠製成的檔案盒，其接合處只不過是一片在凹槽和盒蓋之間的扁平超薄地帶正是盒子需要發生彎曲的地方。而這個檔案盒開開闔闔已有十年之久，始終也沒有造成任何惱人的壞經驗。

## 膨脹導管

談夠了這些物體突出部分的扭曲和彎曲，讓我們進一步地深入內在世界。收縮你的左心室會產生一股心臟壓力，迫使血液流至你的動脈；然後心室舒張，再度被充滿。心臟中每一次脈動的血管壓力都可能不同，相當於在水銀柱的○到一二○公釐之間。為何是零？那麼為何當我們手臂加個包夾套測量時，範圍都在八○和一二○之間？原因很簡單，我們的動脈善於伸縮，足以調節心臟壓力的上下伏動。當心臟收縮時，它所輸送的血液伸張動脈的血管壁；當心臟舒張時，動脈便抽空，同時在過程中動脈本身會進行一些微量惰性的抽送。這種同步完全是自動的，而且正是你為何能靠著感覺手腕或頸頂上動脈直徑的改變便能數出心臟跳動次數的原因。這對調節心臟壓力的作用也是一件好事。血液湧入細小血管時會變得較為順利，而且較低的峰值壓力也可以產生足夠的血液。動脈硬化症——即動脈血管壁的變硬——便意謂著麻煩。動脈硬化症的警訊之一，便是在你手臂上量最高壓及最低壓分布範圍差距極大。

許多普通的幫浦(例如我們用來給腳踏車輪胎充氣的活塞打氣筒)與任何心臟的脈動都極為類似。我們也許可用類似動脈般的伸縮性導管來調節氣流，但我們通常選擇採用不同的策略。因此，我們的幫浦擁有好多個不同的氣室，以便在循環氣流的過程中適用不同的階段，如此每個氣室可在稍稍不同的時段裡產生最高壓，使得整體的壓力不致掉落於零。同樣的問題，我們在這裡卻使用不同的解決方法，而且此一方法不需用到特別具有柔性的物質。

試圖把一個圓筒狀的氣球或橡皮套充氣，它們的擴充方

式與橡皮筋的拉張不同。展開一條橡皮筋，開始的時候頗為容易，但是到後來延展得越遠，所需要的力量就越大。剛剛開始吹脹一個氣球與後來擴充階段所需的力量幾乎無異而且經常還要更多)一旦氣球開始膨脹之後，其餘工作就可以留給那一股持久不變的壓力去完成。不僅如此，這個圓筒狀的氣球其中總是有一部分無可避免地早別人一步到達它的爆破點。像氣球這樣奇特(或許也可以說吾人所熟悉的)的行為，便反映了前一章中提到的拉普拉斯定律。在氣球的擴充中，它的球壁逐漸趨向扁平。

一條橡皮筋拉張的距離或許可以很遠，但是拉張扁平的球壁其壓力的使用卻較前者更有效率。橡皮筋是越達越難拉，而拉張的壓力卻是越拉越有功效，兩者之間是彼此平衡的(橡皮的應力 $j$ 應變力曲線圖在到達爆破點前有一段特別的陡斜，正是因為這個事實，才讓圓筒狀的氣球得以正常運作。如果其曲線是完全筆直的話，恐怕氣球在別的部分還沒擴張以前就已經從某一點破開了)。

這種普通的彈性延展若發生在動脈裡，就會造成局部的鼓脹，也就是動脈瘤；這可比動脈硬化的毛病還要嚴重。所幸的是，正常動脈的四壁都會做均等的擴張，與氣球的擴張完全不同。而人類是如何獲得這種生命攸關的訣竅呢？若要達成均等一致的擴張，任何彈性管路都必須在一開始時就具有極佳的伸縮性，但是一旦開始擴充，管路就必須隨著擴充的過程越變越硬；亦即在開始時擴充容易，到後來卻不成比例地越來越難。這些動脈壁上皆附有膠原質組成的纖維，這些纖維與構成我們肌腱組織的不易延展物質正屬於同一類。但是纖維在血管沒有擴張時，完全糾結捲縮在一起，所以它們此時完全沒有機械關連，這好比一個沒有承受拉力的鬆弛繩子。在圖五 ~ 十三中可以看到，當血管擴張時，連帶著延展越來越多的纖維，纖維本身的延展到了某一個程度便可以提供拉張強度。這種不尋常的延展力會產生一個向上彎曲的應力——應變力曲線，如圖五~十三中的動脈血管壁。在此我們再度看到，柔性在自然界裡從事的是一個多麼微妙複雜又多方位的事業。人類((或者說，至少是我們的血



管)，是多麼地特殊！

但是不管我們多麼特殊，設計是如何優良，我們卻不是唯一的。史克里普海洋學研究所(Scripps Institution of Oceanography)的沙維克(Robert Shadwick)與他的同事觀察過某些生物，這些生物循環系統運作與我們類似，但他們也和其他動物一樣，與人類的關係甚遠。這些科學家們發現在章魚和烏賊的動脈中，其具備的柔性幾乎與人類動脈一模一樣。主要的差別在於這些生物是隨著它們較低血壓來調整血管伸縮，有如我們低血壓的近親：蟾蜍和蜥蜴。最令人驚訝的是，這些烏賊和章魚使用一種與脊椎動物完全不同的彈性蛋白質，達成它們的可變柔性，所以它們的動脈柔性必然是根據一個截然不同的基因基礎，代表著一個完全獨立的演化革新。但是不管如何，當心臟的動脈將血液往具有彈性的血管輸送之時，血管最簡單的設計目的，即是避免動脈瘤的發生。

容我再一次強調，另外還有第三類動物同樣也發展出箝制動脈瘤的血管機制。沙維克在螃蟹和龍蝦身上也發現這種具伸縮的柔性血管，只不過它們是以另外一種物質為基礎，並且它們的血管伸縮也是應特定的血壓來調整。他同時發現這種彈性的調整允許我們做前兆的預測。如果獲得某一截血管壁的取樣，那麼這個動物的血壓便可輕易測知。在這個試驗中，大烏賊（從來沒有在人類的手中存活下來）顯然與人類具有同樣高低的血壓。

一條朝上彎曲的應力——應變力曲線表當示，物質被延展時，儲存的能量不多，曲線下方的區域不大。其實這可能也是一種安全特性。氣球的曲線圖形曲度較小，吹氣時就吸收了極多的能量（哇）！而一旦氣球爆破，所有的能量都得到猛烈的釋放。向上彎曲的曲線多見於生物性的物質，例如皮膚，包括蝙蝠翅膀以及鴨掌上的彈性皮膚；或者是在我們外耳裡可以發現的軟骨；以及韌帶。一個切割或是戳傷不致造成多少能量的釋放，而能量的釋放便是促成裂痕蔓延的原因。故上述這些物質若受到小小傷害，絕不會發生像針刺氣球一般的慘烈結局。



但是向上彎曲的曲線也並非通則。肌腱的曲線（如圖五~十三所示）在曲線下方就擁有一大片其高無比的危險帶，但也就是在這塊區域裡，蘊藏了一種與其功能有關的重要性。肌腱這種東西非常僵硬，不能輕易地延展——大概原長度的百分之十就是極限——但是它仍然可以完成它的工作。生物彈性界(bioelasticity)第一流的調查員亞歷山大（R. McNeill Alexander）便發現到，即使是這麼低的應力，它所儲存的能量，也能夠容許一隻袋鼠跳高而不需付上昂貴的代價。一旦觸地，肌腱便開始伸張，然後肌腱和動物體便一起反彈，所憑藉的力量中有百分之四十是來自再使用的儲存能量：我們人類跑步時的情形也很類似。腳後跟的肌肉在我們跑的每一步結束時，吸收了許多因為雙足減速而釋放出來的能量，然後再將這些吸收的能量用於下一步起跑時的加速力上，能量的儲存使得雙足的運用更有功效。我們的雙腿具有這樣儲存能量的肌腱，雖然無法達到像輪子一般的功效，但比紅不能在步步之間儲存能量的足部簡直是好得太多。這樣的肌腱運作代表著另一種方法，使非硬性的物質也能夠揮它的實際功能。

如果你想要對現行的兩種科技比較有一個明確的心像描述，那麼請你思量一下貓耳朵和門鉸鏈。在其中一個科技中，調適的改變乃是由於要讓物體產生彎曲；而在另一個科技中，改變卻是由於要使它們產生滑動或轉動。我書桌上的塑膠檔案盒有一個彎曲的鉸鏈；而當我的關節移動時，我的骨頭之間彼此產生滑動。我們再度看到兩種科技的區別是程度和原始設定（default）的不同，而且也再度面臨許多造成這些區別的基本因素，諸如歷史和演化的持續性、物質的可用性，以及製造的形式等。簡而言之，這些因素便是為何物體以不同的方式來設計及建造的原因。

如果你想要對現行的比較找到它的背景，那麼請你思量一下，如果沒有自然界完全不同的設計對比，你是否會在使用堅硬物質來設計物體、營造居所的同時，質疑過它的影響？或是你可曾猜測得到，柔性這個物質特性會是如此地多元化？影響我們的思維，最易使它產生偏頗的，便是我何日

常最熟悉的事物；而我們日常最熟悉的事物，又莫過於我們自己所製造出來的成品了。

## 第六章 導致剛性的兩種途徑

自然界，教導我們了解柔性的價值。樹葉、大型海藻，以及羽毛，告訴我們如何有效地利用物質，如何改變自己的形態來順應環境中力量的變遷，以及如何利用這些環境力來達成變形。但是，自然界並非完全將堅硬物質排除於外。貝殼、珊瑚、牙齒、骨骼和木料，比較上都屬於相當堅硬的物質；殼質的甲殼動物，例如龍蝦和大甲蟲，也是一樣。或許堅硬物質並非建造大型生物的必要材料，但卻不可說它沒有助益，雖然兩種科技都使用堅硬材料，但是在它們所使用的種類卻大大不同。

### 有機物的非金屬世界

現行的有機物中，沒有任何為機械目的而使用金屬的紀錄；關於這一點，事實上可說沒有任何有機物會合成金屬。這裡我們所談論的金屬，意謂著某種相當特定的東西，這包括各選不同金屬的合金；人類本身也少量使用這樣的合金。但是任何以金屬原子和非金屬原子結合而成的化合物，無論是有機物或無機物質，都不合乎這個金屬的定義。這並非是什麼合法的遁辭，因為此類包含金屬的化合物在機械性方面與真正金屬的作用已然不同。鋼鐵和青銅肯定為正當的金屬，因為在它們的結構中，金屬原子彼此直接結合，但是氧化鐵及硫化銅卻只是含有金屬的化合物而已。

自然界這種完全缺乏任何金屬的物質現象頗為獨特。首先，大部分（也許是全部）的有機物都包括某種類似金屬的原子，以成就機械工作。這些原子的存在卻絕非偶然，任何生物都需要它們，而且生物們都具有特別的酵素能夠合成有金屬的大型分子。當然，我們最熟悉的便是含鐵的血色素。其他含鐵的化合物可以幫助細胞，將能量自儲存它的化合物中轉化變成促進生物合成的燃料，因此造成肌肉的運作等等。色素（hemoglobin）本身的演化，無論是在動物界或植物界裡，都屢見不鮮。除了我們體內含鐵的化合物之外，

我們人類再加上各種含鋅、鉻、錫及以鎳的化合物。動物界的莫中一種，即海鞘類或被囊動物(又名 sea squires 或 sea pork 見圖六~一)，它們的血細胞內神秘地充滿著鈳元素。另外，有一些金屬元素也以微量的形式被其他的有機物所需要。但是可以確定的是上它們絕對是微量的，即使是我們身體裡最豐富的金屬原素鎂，也僅僅占我們身體重量萬分之五的比例。如果是純鎂的金屬，其反應過於迅速，做為結構的物質則有失其安全性；舊日照相時即利用燃燒鎂粉產生鎂光。至於鐵元素在每一個成人身體裡大約只有四公克（大部分都在血色素中），比起鎂不到十分之一。不過，我們仍然含有金屬，利用金屬，同時也需要金屬。

一些有機物甚至以含金屬的化合物來建造重要的機械裝置。許多軟體動物（特別是蝸牛）以一種叫做齒舌(radulae)的特殊器官來餵食（見圖六~二），齒舌的運作，就好比貓舌和鏈鋸的混合物；這個易於伸縮且富有角質的結構物，伸進伸出，便把食物自表面銼磨下來送入嘴中。齒舌上有著極硬的突出小齒做為銼磨的工具，它們大都含有豐富的金屬。這些金屬最後都成為金屬鹽的形式可能是——鐵鹽或銅鹽——硬度極為適中，但與其說它們是某一種金屬，還不如說它們是礦物質。在這方面，齒舌並非唯一的例子。對於以草葉和樹木為食的動物——例如母牛、毛毛蟲等等——咀嚼構成一個奇特的問題。以它的體積大小來講，植物提供的養分完全不夠，所以這些動物便需要以大量的進食來彌補。更糟的是，這些植物本身也引起不少的麻煩(演化的結果)，使它們變得難以咬斷和咀嚼。青草和熱帶樹木滿含著砂石(二氧化矽)，而這些砂石簡直就是草食動物們的一大障礙，所以牙齒的磨損對於草食動物而言，嚴重性往往更超過肉食動物；讀者諸君可以回想一下圖二~五所附的馬齒。金屬鹽可以將非金屬的物質變硬；例如，草食的昆蟲們在它們的上顎中有鋅及鎂的存在；但同樣地牠們是以金屬鹽的方式存在，而非純金屬形式。

大約在二十年前有一篇短文發表，宣稱在細菌中發現一種富含鐵的微粒存在，並且它們會順應磁場的方向產生移

動。先從表面上來看，磁場似乎意謂金屬性，但是這篇原始報導並沒有做任何的說明，也沒有指出是何種形式的鐵。後來證明它所謂的鐵，不是金屬鐵，而是鐵與氧的化合物，因此被稱為磁鐵礦。我們使用這種磁鐵礦去做磁帶和磁碟片的塗料，至今在我們的生活中，幾乎是有磁感應的地方就有磁鐵礦，我們並懷疑在某些地方亦有它的存在；例如鳥類的腦、蜜蜂(可能在它的腹部)、鮭魚，以及一些齧齒類老鼠的頭腦裡。事實證明，在我們人類的腦中確實有它的存在，但是我們對磁場的感應仍然有待進一步的證實。

## 自然界拒用金屬的原因何在？

諷刺的是，有機物內從無大塊金屬的蹤跡。從某一個角度來講，金屬物質的缺乏正足以鑑定我們的一個主要觀點；即自然界的設計受到嚴格的限制。但如果從相反的圩度來看——假設自然界的每一件設計，都是最優良、最明智的——那麼你便需要考量各種情況，是否缺乏金屬材料，金屬物質不適用，或至少它們的功效比不上自然產生的非金屬物質？我們接著再問，這些假設的情況到底有多準確？

## 材料的限制

我們之所以會發覺金屬材料的缺乏，或許是由於這些材料在地球表面上的分布太過於零星分散了。畢竟，人類在許久許久前，便懂得金礦或一些天然精緻礦石的珍貴值得我們大費周章地遠程搬運，而且完全不以它們的沉重和龐大為意。在古代社會裡，西班牙、不列顛，以及康瓦爾都出口錫，因為它是使軟銅轉化為硬青銅的必要添加劑。有機物營造他們自己，使用的是分布更普遍的元素：碳，得自植物進行光合作用時在大氣中所產生的二氧化碳；氫，得自光合作用所產生的水；氧，得自大氣層，亦是光合作用的副產品；以及氮，借著大氣中製作氮氣的細菌和其他一些媒介的共同合作產生；再加上鈣和磷，便構成我們身體裡所有元素的一覽表，其總和也不過占全身重量的百分之一強。鈣在多數岩石和自然水域裡都可發現。磷礦占整個地殼不到千分之一的比例，它在海水中的比例比陸地上還小，但是也算是分布極普

遍了。所以截至目前為止，金屬材料的缺乏尚且算是通得過的論點。

但是，有機物體內的主要成分與地球表面的各種元素並不相符。上述提及的元素雖然並非極稀少，但許多蘊含極富的元素卻沒有廣為應用：比如鋁，這種絕佳的建築材料就是最著名的例子，它構成大約八個百分比的地殼。鐵，長久以來一直是我們最鍾愛的非珍貴金屬，也占了足足五個百分比。雖然豐富的金礦礦藏分布稀疏，但是地表上鐵和鋁的供應分布卻是綽綽有餘。除此以外，有機物尚且擅長從稀釋的來源中獲取需要的元素。充滿著鈳元素的海鞘類，就是自海水中獲得這種物質，可是鈳在海水中的比例，十億中不過兩份而已(占十億分之二)。所以，經過仔細謹慎地推敲，零星的分布實在不足以構成金屬元素缺乏的論點基礎。金屬元素的分布較吾人推想的要更廣，而有機物也可以自稀有的來源中獲取許多元素。

雖然如此，金屬元素缺乏的論點不應該就如此遭到隨意的忽略，原因有二：其一，使用某種微量的金屬元素作為引起某種酵素作用的共同誘因，與使用足量的金屬去建造一個相當可觀的機械裝置，是完全不同的兩件事。舉例來說，我們的身體使用鐵，但使用它的機會卻遠遠小於鈣的使用：；鈣是構成骨骼的主要成分，在我們重量裡占的此例是鐵的兩百倍。也許有機物就是無法負擔抽取大量鐵質的代價吧！。其二，如果演化史上最早期、生化界上最具革新性的事件是發生在海洋中的話，那麼地殼中的豐富礦藏就完全成為誤導的根據。海水中不只是含有鈣，它簡直被鈣過度地飽和充滿，所以海洋完全是免費釋出鈣質，毫不吝嗇。鐵、銅，以及鋁等，在海洋中都極為稀少，比起每二千五百份之中就有一份鈣的比例，這些元素稀少到每一千萬份之中，只有一份或甚至更少。

## 化學問題

或許，正是因為化學問題限制了金屬的使用。有機物或許可被稱做活潑的化學師，但是對於他們而，並非所有的反應都一樣容易。自然界裡幾乎所有具機械實用性的金屬都是

以化合物而非純金屬的形式出現，它們大多與別的元素，例如氧、氯、矽和硫結合在一起。從礦石中提煉出純金屬需要消耗不少的能量；更糟的是，它們需要一種完全濃縮的能量輸入，例如高熱或強力電壓等。以化學的術語來講，金屬必須經過還原才能從它氧化的化合物中分離出來。上表即是一個電化系列（electrochemical series）的等級表，對提煉各種金屬的難易程度提供了一個極佳的比較。這個等級表是根據提煉金屬時，將足夠的電子粘合在氧化物上所遭遇的不同阻礙而定。

這個等級是自最穩定、最不活潑的金，一直列舉到最具活性的鈉。金對氧完全不起任何作用，所以也無定時擦拭的需要；鈉則是一接觸任何物質就立刻與它結合，一遇到空氣便自動燃燒。但是上述元素組成化合物時，其反應能力則與上述圖表完全相反。水銀和金的化合物結合極弱，非常不穩定。列表的前面三種元素，在自然界裡都能以分離、非化合物的方式存在，銅礦有時包含金屬銅，但金屬鉛則極為少見，它們的礦石就可以輕易地提煉出銅和鉛。繼續往圖下方移動，此時若想從化合物中提煉出純金屬形式的鐵，工作就困難的多了。同樣的道理，若要提煉鋁，它在列表的更下方則表示工作更加的艱困。

金屬越是難以分離，就越難以維持；這裡所牽涉的問題便是自然氧化，即生鏽。銀在空氣中會輕微地變色，但是鈉的反應即使在水中也異常激烈。吾人只有在鋁形成一層白鏽，也就是氧化鋁的時候，才能夠使用它們，因為這白鏽造成一層優良無感應的覆蓋層以保護其下的金屬。生鏽的過程發生得極快，但它也因此自我設限（為了防止鋁在遇到氧時所發生的反應，我們也會用各種不同的塗料及其他處理方式）。鐵的氧化較為緩和，但是它一旦氧化，即會產生鐵鏽屑片，表皮剝落的不良習慣，然後又導致裡面尚未氧化的金屬暴露氧化。大部分的有機物都需依賴氧氣生存，因為它們都要使用氧氣來氧化碳化合物，好做為生存所需的能量來源。如果以氧化這種因素來考慮，或許使用金屬結構並非太切實際，不及其他的替代物來得理想。換句話說，防止生鏽

往往大費周章，得不償失。

以上這些化學的限制——還原所牽涉的成本和困難，以及接下來防止氧化所面對的耗費和麻煩（比如定期的油漆粉刷船身鐵皮和橋樑）——在在顯示使用金屬的潛在代價。鋁元素是地球表面所含的第三富藏元素，僅次於氧和矽，每一吋泥土都含有它。但是據我所知，沒有任何生物與它發生過關連，那怕即使是用來做微量的營養素，或是生化的輔助因素（cofactor），也未曾聽聞。接觸鋁或許會導致鋁元素在體內的囤積，但在病理學上，它的相關紀錄尚稱良好，比起許多重金屬，鋁元素的毒害算是極其輕微的。在電化系列的圖表上，鋁元素遠居其下，卻鮮為生物所用二邁個現象或許告訴我們，若要使用在圖表中位置較高的鐵元素，則難度可能更高。

## 超高密度

或許有機物不用金屬的原因，是由於生命的發展演化一切始自水中吧！.在所有能夠製成像樣結構的金屬中，只有化學上頗棘手的鋁莫密度不會特別的高。它的密度只不過是水的二·七倍。同樣比較水的密度，銅是八·九倍，鐵是七·九倍，錫是五·八倍，甚至鈦都是水密度的整整四·五倍。例如說，只要是一點點的鐵結構，便可以讓有機物比水的密度高上許多。如果有有機物自水底長大，地心引力便會給予它們極重的負擔，而且更排除了任何有機體游水的可能。自然界用來營建骨骼、貝殼和其他類似物的礦物質密度都較金屬為低。二氧化矽的密度大約是水的二·二到二·六倍，碳酸鈣大約是二·七到二·九倍，磷酸鈣則是二·二到三·一倍，其幅度變化反應著不同的結晶形成。體內不含空氣的有機體（比如樹木）大都比海水的密度大，但程度極輕微，即使是長著厚重貝殼的蛤蜊，沉到水裡的速度也遠比一塊鐵塊慢得多。再加上一點點脂肪的累積，小小一袋氣囊的充飽即可抵銷這些稍稍過密的礦物質，使得有機物完全不致於沉沒；若是用上可觀的鐵或銅，則密度的增加反而會造成空間上、材料上，或是能量上的更大投資代價。

金屬和上述礦物質彼此之間密度的不同，對於生活在水



域下沉積物裡的動物們或許也同樣重要，若是一旦受到攪動，這沉積物中的粒子便根據它們的密度（當然，也是尺寸）把自己分類出來。絕大部分的砂礫、粉砂和泥土的密度都在水的二・三倍之間，所以那些輕量級的有機化合物，即使是含有大量的礦物質，其密度也比周遭的沉積物密度來得輕。相反地，有機物若含有大量的金屬，則不管為自我毀滅。生物的棲息處極為普遍，大部分的有機體體積極小，而且這些極度多樣化的微小生物遍布於湖泊底的砂礫間、岩海的砂岸邊、大陸的暗礁中。然而，任憑密度的差異是如此地一致，如此地有說服力，金屬的重量似乎仍然不足以做為解釋金屬在生物界中完全缺席的原因。

## 無法生長

我曾經碰到這樣的爭論，認為金屬結構無法像非金屬的有機物一般生長；對此，我並沒有被說服。此外，生物界的軟體動物外殼、節肢動物表皮，沒有一種是可以生長的，但卻對各個生物貢獻卓著。同樣地，樹木的木質一體成型，逐年再以添增周邊木材的方式加寬其幹圍，也就是我們所知的年輪。簡而言之，上述的爭論無疑是以脊椎動物為中心的思考方式所產生的。

當我們提出有機物為何不用金屬的問題時，還需要思考另一個可能性；或許金屬缺少某些耐力，而且完全不像傳說中的那麼好。為了探索這種可能性，我們需要進一步地觀察金屬的特質何在，人類科技又如何使用它們。

## 金屬建造物的使用

長久以來，人類對金屬的獲取一直不遺餘力。古代的中東及地中海地區已有頗富盛名的冶金術；煉鐵術在非洲亦極為普及；北美的印第安人在任何可能的地方，好比北密西根州及加拿大的鄰近區域，都努力不懈地發掘銅礦；北格林蘭約克角（Capc York）的伊努伊特人若是找到一塊隕石沉積處，便千方百計地辛勤工作，企圖敲下一點點鐵塊以做為他們日常工具的邊刃。試問人類科技是否能夠輕易取得比金屬更好的物質？這個可能性看似極微。再者，為何金屬如此有

用？金屬的特別之處就在它們易於延展、可塑性強；冒著極低微的斷裂風險，它們可以被壓縮、鎚打成形，或是拉製成細纜、薄片。優良的延展性和可塑性同時意謂著絕佳的高韌性。所謂的高韌性，我們在前一章已有定義，即斷裂此物時需要耗費高度的能量。

想要了解金屬的特性，只需延展其中的一個樣品，並繪製出吾人所熟悉的應力——應變圖，便可一目了然。圖六~三顯示出一個鐵金屬的圖表；代表一個向下彎曲的 I 型鐵的下緣，或是一個圓柱側邊受壓突出的一側。一開始，延展將會遇到極高的回彈能反應；這 I 型鐵上所承受的重量一旦移開，或是圓柱的壓力一鬆開，都會立即強力地回復到原來的長度。在這個範圍內，整個圖形是以一條幾近筆直的直線上升，應力加倍則應變亦隨著加倍。若是使用此種特色，一塊金屬便可製成磅秤上靈敏的彈簧以做為測重之用，這磅秤上的數字刻在平均的刻度上，每次使用後數字便會自動歸零。大部分像肌腱一類的生物性物質，它們所產生的應力——應變圖形都傾向於曲線形式，而非直線；而且正如同我們的觀察所得，生物體對這些曲線也能夠擅加利用。金屬在這裡所產生的直線圖形，也只有在製造簡單彈簧磅秤時，才能顯示出它固有的優勢。高度的回彈能正是它產生優勢的原因。

一旦超過剛開始的這條上升線，我們稱為彈性極限的範圍之後，情況就更加特殊了。整個圖形通常會在金屬延展得更遠之際突然地打平（或幾乎呈水平），此時金屬進入它的可塑性範圍，之後便可以在沒有任何（或是一些）額外的加壓之下產生進一步的變形，而這變形正是所謂的可塑性。圖中應力——應變線所顯示的水平延伸，正代表著具有這種重要功能的金屬行為。

因此，若你在具有高度回彈能的彈性範圍內使用一塊金屬，就算你對它反覆施壓也不會產生任何永久的變形彎曲，此時的金屬可以容忍各種非難（或摧殘）。若是施壓過度，金屬便順應地產生變形；這樣也許會破壞了它日後的使用，但此時金屬並沒有真正斷裂，若是經過小心的設計考慮，它就不會造成任何大災難。

整個結構體只不過是採取了另一種稍稍不同的方位承受重量。儘管腳踏車的車體有時會遭到彎曲變形，你卻也安然無恙，甚至還能夠一路飛馳到家。我有一輛老舊的輕型小貨車，其車底、車身處處都是凹痕，但真正需要注意的只不過是凹痕引起的銹爛而已。讀者是否記得，應力應——變曲線下方的區域代表著拉緊某物時所蓄存的能量？一塊金屬意外地變形到超過了它的彈性限制，此時它曲線下方的區域便鞏固了它的安全：拉緊它會吸收原本也許會造成困擾的能量。一個極能承受拉張、具有高度回彈能的物質好比橡皮，一旦被解除重量壓力，反彈可是極度危險的。但金屬若是進入可塑性範圍，它們就不再具有回彈能，它們順應，不具彈力，而且變形所作的工良性地轉化為熱能，而不再以彈性能量的方式儲存。重複地拉開或彎曲一塊橡皮，它們的發熱不容易為肉眼察覺（飛車之後輪胎便會微微發熱）。重複地彎曲一條金屬超過它的彈性界線，金屬散放的熱能卻顯而易見。

觀察裂口的擴展情形同時也告訴我們關於斷裂的另一種觀點。裂口擴展是因為裂嘴上的力量集中，一旦發生斷裂，力量得以紓解，那些會引起進一步斷裂的能量便得到釋放。所謂的力量集中，便是指裂嘴上所承受的應力，遠遠高於物體以其整個橫截面區域平均分配到的力量。可塑性極強的金屬若是進入可塑性階段，當它面對更大的局部施壓時，便以延展這種反應來代替斷裂。延展可將力量散布到較廣的區域，因而減低局部的應力——或者至少可以保證壓力的增大不會造成相對應力的增加。相對之下，斷裂只不過藉著裂口的擴張將高應力的承受點換一個地方而已。這種做法反而會造成未來應力的增加，因為此時能夠承受重量、尚稱完好的區域，已經所剩無幾了。我們可以說，以金屬的堅硬度而言，它們可算是安性極高的物質。或者換一個說法，變形易曲的這種過失，遠較脆裂來得理想：一個凹陷的杯子尚能盛水，破裂的杯子便一籌莫展了。

人類在使用金屬製造器物方面，便利用了金屬這種優良的可塑性，尤其是它們在應力——應變的曲線上表現出來的

特殊性質。用力擠壓或拉張一塊金屬，你就能使它向你的意志低頭，你可如彎曲、強迫它進入可塑性階級。鬆開壓力後，這金屬仍會保留其新塑的形狀，但是它同時也形成了一個新的彈性範圍，此時它的圖形便是以圖六~三中的虛線代表。新塑的形狀仍然能夠維持長久、可靠的功能，仍然可以在遭受微量施壓時有效地回彈，金屬物質的硬度和強度並沒有因為過度處理而遭受太多損失，就是汽車製造商在將我的輕型貨車賣出前所遵循的動作，也是每一部自動汽車中的每一片弧狀面板之成型過程，我們並以強大的擠壓和鎚打製成各式各樣的日常用品，好比有頭的鐵釘等。對於大型物體，我們便將金屬加熱來延長這可塑性階段，這過程稱為鍛造。我們將金屬做成線纜和中空的導管，同樣也是利用它易曲易撓、極利塑造的特性。

試以一個為人熟知的生物性物質為例。骨骼的應力——應變曲線表面上看去與軟鋼的曲線頗為類似；一開始它有一個向上傾斜的彈性區，然後才在更大的延展下展現其可塑性（再見圖六~三）。在彈性區域之下負重當然司空見慣，而可塑性的區域又能提供安全的緩衝。但是經過居雷（John Currey）用各式各樣的骨骼、千奇百怪的方式試驗負荷的結果，他發現在骨骼上與金屬上的變化有基本的差異。骨骼受壓時，並不會順應變形，而會產生黏彈性；這意思是說，當骨骼進入它的可塑性階段時上匕就轉為黏稠，可以流動。更糟的是，此時它還會發展出細小裂縫，四處擴張，並藉由這裂縫的相互作用而產生軟化。骨骼過度的承重一旦發生了這種狀態，即使真正的骨折尚未發生，也必須重新建造。重新建造便有賴於骨骼本身是一種有生命、會生長的物質。若是講到使用的功能，骨骼與一塊不錯的金屬相差無幾；若是以支撐特定重量所需要的質量來考慮，它的功能尚要優過金屬。但是它也只有靠著持續不斷的細微修補術才能達成這種功效，如果不能重新修補，骨骼的價值就蕩然無存。雖然自古以來取得骨骼都不曾構成問題，人類蚩於骨骼的使用仍然只有在別種物質——就像特別的伊努伊特人一般——好比木材、石頭，或金屬缺乏時，才會想到它。

至於金屬至上的宣言，勢必要受到一些警惕與節制。金屬的機械特性比木材還要多樣，但卻沒有一種金屬能夠證實它的所有特性都是百分之百的完美適當。我們的文化偏見起源於人類自身的經驗以及傳承歷史的方式，或許在科技如何演進複雜的這件事情上，我們給予金屬事業過多的功勞。誠然，金屬的使用流傳，甚至用於飾物之外，是早期地中海和中東文明的輝煌事件，但可別忘記，高度發展的非金屬文化一樣在別的地區繁榮興旺，其中尤以美洲為最。再其次，早期的金屬並非全然理想。紅銅太軟，若是敲打兩下，它會變硬而導致易碎；青銅則較優，但是它若做成刀鋒，其鋒利遠低於削成薄片的黑曜石。我清楚地記得曾經遇到一名人類學者以一把自製的黑曜石刀用膳，他還說（我也深深相信）他可以用這把刀來刮鬍子。但是話說回來，青銅即使是落在外行人手裡，使用上也不會產生斷裂，這最後一個觀點其實才掌握了初期金屬受人歡迎的真正原因。石斧雖然堅硬，薄片打火石雖然銳利，但是它們都易碎亦極脆弱，也造成使用時需要極度的小心與技巧。

最後，金屬可被銘刻，可被軋製，可經鍛鍊，可被鑄造，也可以拿來磨細、切片或加以鋸斷，但是生物卻不需要這些。他們靠著內生的生長、表面的沉積，便能將物質製成產品。所以我們人類的製造技術不管再怎麼美妙多元，卻對自然界產生不了吸引力。在這裡再一次看到，我們所面對的是兩種截然不同但又各自綜合完整的科技；一種科技中令人心動的一面，也許對於另一種科技卻產生不了任何關聯。

## 非金屬物質，如何避免斷裂？

有機物或許迴避金屬物質，但是人類科技卻使用金屬與非金屬的物質。雖然在人類的大部分歷史或史前史中，我們也一如有機物偏向非金屬，真正大規模地使用金屬絕對沒有超過兩個世紀。葛登便指出，即使是一八〇七年富爾頓

（Fulton）蒸汽船的主要汽缸（雖然並非鍋爐），仍然是木製的，他並且聲稱在維多利亞女王長期統治的期間，最重要的大事莫過於鐵價跌落了十倍。過去人類科技的主要材料來源計有：經過篩選、塑形、削鑿或磋磨的石頭；陶瓷材料，包

括磚塊、陶器和玻璃：木頭，從綑綁成束的竹竿到經過曬乾處理的木材和膠合板；以動物皮毛內的角蛋白和植物的纖維素為主要來源的各種天然纖維，在前一個世紀左右，我們又添加了一些生力軍；一是橡膠，始自固特異輪胎的化學製程；其次是塑膠，從一開始的酚醛塑料到更加多樣的各種聚合物；再加上人工合成纖維，比如尼龍和聚酯纖維；以及一些更複雜的物質，比如碎紙膠合板和玻璃纖維。或許相對於其他物質的而言，人類對金屬的使用已經越過了顛峰期，在過去的五十多年中我有這樣的觀察，那就是金屬製品一個接著一個地被再造的塑膠製品所取代，包括檔案盒、花園手推車，甚至連我們新車的側邊板金也不例外。

就此點而言，人類科技正在朝著自然方向走，但這並不是意謂著回歸自然。人類絕少用自然做明顯的典範；我們將在第十二章中看到，人類的紡紗行為並非襲自蜘蛛。同時，我們也傾向在使用天然的合成物質之前進行越來越複雜的加工；舉例來說，紙和尼龍同樣是以木材的纖維為原料製成，但兩者與其自然的原始材料無一類似。

自然界如何在非金屬物質上取得硬度和韌性之間的平衡，是值得我們學習採用的對象。正如同前述，金屬在硬度和韌性的這兩種特性上都可說是相當地不錯（雖然加強其中一項特性必得承擔另一項特性被削弱的後果；高張力的鋼較軟鋼延展得少，但同時也較易斷裂）。非金屬的系統，如果屬於普通、單一物質的組成，則情況還要更糟。玻璃奇硬無比，但是也極易破碎，它若是在現代出現，恐怕根本不會被批准成為新的材料。普列克斯玻璃（Plaxiglas）的硬度較低，但也經不起多大的刺激；較軟的塑膠類，例如做導管的聚乙烯基氯化物，韌性極佳，但這裡所謂的「較軟」不過是「減低硬度」的溫和說法而已。

雖然如此，仍有一件事情頗不尋常。人類所使用的，像玻璃、普列克斯玻璃、磚塊或瓷磚這些非金屬單一組成的物質，比起自然界的木材、角質及骨骼，往往更易碎裂，自然界裡即使是看似極脆弱的物質，事實上都比其外型堅韌軟體動物的外殼與瓷磚形貌類似，但是當它面對撞擊和穿鑿時，

抗拒破裂的耐力卻要高得多。我就曾經利用實驗剩餘的一堆貝殼製成懸掛用的裝飾物，在這些貝殼薄薄的邊緣上鑽上一個小洞，即使不用什麼特別的工具和技術，每一個貝殼仍然能夠在穿鑿的過程中保持完整。有一些原始文化便使用貝殼來製作出功能完全的魚鉤。有機物不知為何總是對堅硬物質容易斷裂的頭痛問題應付自如。

對類似鋼鐵這種物質的強度測定，可以幫助我們計算出以這些物質構成的樑柱之強度，但是早在二十世紀初期的悲慘經驗告訴我們，當樑柱被實際應用時，這樣的計算提供的是一個多麼差勁的指引。船身一斷為二所承受的應力，理應是製船的鋼鐵能輕易承受的範圍；追究其因，才發現禍因完全是起源於力量的集中——即非比尋常的高應力實施在極小的區域上——裂口便從此處開始擴展開來。但比起其他特殊堅硬的非金屬物質，鋼鐵斷裂擴展的程度還算是較輕微的。尖銳的稜角和已存的斷裂誠然是一個壞跡象，可是整個斷裂問題的本質至今仍然是不解的謎。

大約在一九二〇年左右上央國的一名工程師葛里費斯（A.A. Griffich）無意間做了一項不屬於他工作範圍之內的事，他發現玻璃纖維比玻璃棒更經得起拉張（延展）——意即纖維可承受高應力。纖維越細，則承受應力的程度越高；最細的纖維可以細到直徑只有千分之十吋那麼細。換句話說，一束細小的纖維即使在沒有彎曲力量的牽涉情況下，其所能承受的重力也遠遠大於同等粗細的單一棒條；就算是最最細薄的纖維，也還是無法達到化學鍵（chemical bonds）般的強度。所以問題真正的重心不是在纖維束的強度，而在棒條的薄弱。造成兩者之間差別的，乃是因為極度微小肉眼難見的斷裂極易發生於棒條之中。

關於現今吾人對裂縫擴展的了解，葛里費斯也在此提供了一番說明。如同早先所述，並在圖六~四中粗略提到的，裂口的尖端乃是力量集中之處。拿一塊堅硬材料製成的樣品做試驗，如果你往當中切下，然後再向兩端拉開，則其極易斷裂，所需的力道往往還不到折斷一個未有裂口樣品的一半。力量的集中使斷裂極易擴展，這樣品受到進一步的侵



害，更多的力量會更加集中在裂口尖端；不到片刻工夫，這完整無缺的樣品便成了歷史陳蹟。一個裂口是否會擴展，完全取決於它一開始時的斷裂深度及裂口尖銳的程度；裂口越深越尖銳，其擴展的機會就越大。

在一個固體物件或一片水域上增加其多餘的表面積，會造成能量的吸收——不管切一塊麵包、打一個蛋，或甚至是水黽用足部在水塘中製造出一個凹陷的小小漣漪。裂縫增加表面積，因此它需要吸收能量。但是，一旦斷裂，它解除了裂口尖端的集中力，同樣也釋放出能量；裂口進行得越深，便有越多的力量集中在裂口的尖端處。因此，當一個裂口進行擴展時，它便會解除更多的力量，釋放更多的能量。一直到最後，裂口尖端集中力量的解除所導致的能量釋放，終於超過了裂縫進行擴大表面積所需的能量，此時你便可以袖手旁觀，因為整個系統已經失控，裂縫的擴張便以幾分之一的聲速自然而然地發生了。所以，你會刻意地在易碎的玻璃或是石膏板上製造出（刻劃）一個開端的凹糟——當成一個潛在的力量集中點，然後再稍稍運用一點力量，這個物質便會自這個裂縫處一裂為二；要想不完全打破玻璃實在並非易事。

所有真實生活中的物件無一不帶有隙縫，重要的是這隙縫的深度、裂口尖端的銳利與否，以及物件所承受的重力負荷。葛里費斯所謂的關鍵性裂口長度，便是在釋放的能量恰好足以讓斷裂持續進行時達成的。較薄的物體一般說來隙縫較淺，使它們能夠經得起較大的應力，強度也因而增高，這就是造成一大束細小的玻璃纖維反而較厚厚的玻璃棒來得強勁的原因。此外，使用這些細細的纖維束來取代單一的棍棒尚有另一層收穫。如果應力增高，面對應力的纖維便一裂為二，但通常這事便到此為止。下一根緊臨的纖維會有多少機率恰好是在持續斷裂處預存著一個裂縫呢？試著折斷一把義大利麵，每一根麵條的斷裂處絕不會都發生在同一個地方。

對善於通融且極有韌性的金屬施力，金屬本身可塑的延展力會使它的裂縫口變得魯鈍，所以金屬的關鍵性裂口長度比起一般非金屬硬物，例如玻璃，要長上一萬倍或一百萬倍



之間。當然斷裂仍然影響他們——船體仍然會折斷，所以船舷窗戶，艙口都必須採取圓角——但是鐵棒絕不像玻璃製品那麼脆弱不堪。

對於這些硬物，尤其是非金屬的堅硬物質，如何能夠避免這種易於斷裂的脆弱？最明顯的應急措施便是使用極細的纖維，使它們平行排列，好比在使用繩子一樣。只要每一根纖維彼此之間能夠自由地交錯滑行，便能達到很好的功效。一根繩子若是它一縷縷單股線都黏在一塊，便會大大地削弱它的強度——也許這就是繩子結凍時的問題所在，但是繩子並不承受彎曲，而是接受拉力。第二種較佳的（或者說更普遍的）補救方法，便是使用某種介面來作為斷裂的終侍者，這些介面並非什麼特殊之物，事實上它甚至不足以構成一物，只不過是一個定點提供了某一種物質的結束和另外一種物質的開始——就好像最近一則廣告裡提到的橡皮輪胎遇到馬路之處；但是一個介面也可能以一種極為奇特的方式發生。

容我再一次重申，斷裂的擴展與否有賴裂口尖端的尖銳度而定。通常把這尖口磨成圓洞便能阻止斷裂的延續；在我仍是研究生的時候，一名年長的機械工程師便教我這個把戲，而且我在前面第四章中也曾經提到如何使用鋁箔包裝紙示範這個方法。但是這個裂口的尖端到底是如何變鈍的？就拿隨處可見的物質——塑膠泡綿為例，以它的重量而言算是相當強韌的材料；而它的強度之所以能夠增加，重量之所以能夠減輕，完全是有賴於使它成為泡沫形式的細微洞隙。塑膠和空氣便在這洞隙的邊緣得以會合，這洞隙就成了兩者之間的介面。一個擴展延伸的裂縫終究碰上了個洞隙，而洞隙便緩和鈍化了它的尖銳裂口，所以裂縫便無法在洞隙的另一端營造出足夠的集中力使其裂縫得以進行，讀者可借圖六~五的圖示略知一二。我們因而得知，要得到一個裂縫終止器最容易的方式便是將材料做成泡綿形式。海星這一類的棘皮動物，它們用以支撐和增加強度的小型堅硬元素就是以這種泡綿形式形成，它們的基本材料——碳酸鈣（即方解石的結晶）是一種相當脆弱的東西，但是介於這材料中互相連接的

孔隙，寬度大約在五百分之一到五十分之一吋之間，都具有圓潤平滑的邊緣，如圖六~六所示。

所以說，一個隙縫甚至能夠終止另一個隙縫；隙縫在固體物質和空氣間形成一個介面，而這個介面所造成的鈍化功效便好比圓形洞孔一樣。設想有一種物質縱向排列許許多多的隙縫，而且這些隙縫非常微小，甚至連肉眼也難以鑑察。這些縱向排列的隙縫對於整個物件的承重而言，彷彿是一個不相干的旁觀者，這情形就好比高速公路上的中間分隔島對於高速公路交通流量所造成的影響一般。但是若此時發生橫向的斷裂，裂口從物體上擴展開來，一旦碰上整個縱向的隙縫，它會就此打住——這好比汽車開進了分隔島一般。

像這樣的縱向隙縫如何才能併入物質的結構？成束的纖維或許可以成為理想的繩子，但是卻難以構成良好的橫樑直柱。對於後兩者而言，戲劇性較低的介面功效較佳，也就是兩種機械特性截然不同的固體物質相互搭配要比固體和空氣的配合來得更好。玻璃纖維就是利用此種技巧。玻璃當然可以承受某種程應力，但是玻璃纖維的強度卻遠遠超過玻璃棒。正如同圖六~七所示，玻璃纖維內承受應力的一根根玻璃纖維彼此以一種較軟的膠泥相粘，所以當斷裂透過堅硬的物質繼續擴展而碰上了這軟物時，便會造成它四面伸張(力的衰減)，而不會將這斷裂繼續往下一層硬物傳達。

大凡使用這種方法形成的物質，我們通稱為合成物。暗喻它的組成多過一種成分。如果你也想要體驗一下合成物，便可以把麥麩當纖維，蛋白當膠泥，混合之後烘烤，一直到整個成品變硬為止，捏塑成形的動作可以選擇在固體化之前或之後做。調整混合的成分，改變烘烤的時間及溫度，都會改變這個成品的性質：添加一些糖類及調味料，便會為你提供一個絕對夠韌又能大口咀嚼的東西(請大家注意，不要重蹈我某些學生的覆轍。當我提出一個可食合成物的挑戰時，他們將白色棉花糖(marshmallow)與米花(Rice Krispies)攪混做成一個介於半固體半流體之間的產物，導致後來米花糖下陷完全失掉了原來的形狀)。

人類科技所製造出的合成物質中，玻璃纖維既非最普

遍，亦非最優良。夾板結合了木屑和黏著劑上這夾板便是構成我們傢俱表面一層薄木板下面的主要成分。在我們的高速公路以及公共建築中，強化混凝土內所摻入的軟鋼能夠抵銷彌補混凝土過於脆弱的缺點：可說是千變萬化。單獨的纖維排列，並不需要涵蓋整個結構全長，只要黏著良好，短纖維細絲的功效並不差於長纖維。所有的纖維也不是絕對需要往同一個方向排列，比如用玻璃纖維製成的魚竿：在玻璃纖維薄片，纖維排列的方向全是隨意而不規則的(二度空間式)。其實這種纖維式的排列並非物體變硬的唯一實用幾何結構，薄而扁平的平板或是薄片一樣有用。

對於人類科技而言多種合成物的主要缺點便是成本，往往較一般的金屬或單一成分的塑膠製品高出許多。除此之外，合成物的材料和結構通常需要一起製作完成，這是稍為複雜、較不為人所熟知的一點。一張或一卷金屬板可被隨意切割、彎曲，最後鉚接在一塊做成一艘獨木舟。相對地，一塊玻璃纖維則必須在模型中與環氧膠結台，同時做成玻璃纖維與獨木舟。

自然界對於它的堅硬物質同樣也使用合成物，而且通常是相當複雜結構的合成物：讀者可以在圖六~八中看到兩個例子的說明。木材就是一種合成物，由堅硬多纖維的纖維素和屬於黏膠類的木質素組成。節肢動物的表皮亦是一種合成物上的組成是由形成蛋白質矩陣的甲殼質纖維，加上一些能夠增強大型甲殼動物硬度的碳酸鈣鹽而成：軟體動物的外殼則是由一層一層的硬礦物質，中間隔以幾個百分比的重要蛋白質而成：骨骼由膠原蛋白、一些其他蛋白質，以及磷酸鈣鹽合成。即使是你的牙齒，也是礦物質和蛋白質的合成物：補牙時牙齒一旦遭到鑽鑿，燃燒的蛋白質即發出硫磺味來。在這裡的一個案，其結構都能高度配合物質獨特的應用需要。不但每一種樹木的木材都不同，甚至樹根與樹幹的木材特質也截然不同。即使在一個個體身上，骨骼都不僅僅是骨骼：它的組成及特質對於它所要執行的功能，都有著極大的依存關係。

## 一段非機械的插曲

讓我們暫時告別物質和結構的世界。我們的兩種科技，

其真正重要的非機械性差別，乃是肇因於有機物內金屬物質的缺乏；特別是在物質的傳熱和導電性上，金屬與非金屬的差別極大。金屬在這兩方面的傳導性都比非金屬強過幾百倍到數千倍，而這兩種屬性對物質世界事物的運作往往有著決定性的影響。

試舉幾個例子為證。銅的傳熱性是木材的三千倍、玻璃的五百倍、水的六百六十倍，以及新生樹葉的一千倍。如此差異造成的結果可是非同小可。物質的傳熱性越高，則熱度在物體上由較熱的部位移至較冷部位的速度就越快，所以物體便可以在較短的時間內獲得一致的溫度。若是在電爐上煮食，具有高度導熱性的炊具就能達到較平均的熱度分配，較不需要隨時的攪拌混合。相對於其體積而言，鋁的傳導性大約是鐵和鋼的兩倍半，所以鋁自然成為炊食工具的理想選擇。

純鋼製的炒鍋令人生厭，而鑄鐵除非是又厚又重，不然難合理想：這樣又使它們難以隨著爐火的調整而改變溫度，這造成了另一項不利。即使是耐熱的陶製容器其加熱也難以均勻，所以只能用做爐具儘管這是它們製造商的聲明。然而，一旦食物要端上餐桌，高度的導熱性便成了一項頭痛的問題。冷冰冰的金屬、暖滋滋的木頭——許多格言警句以及修辭手段(比如冷冷的鋼)所擅用的比喻——其實不過是一種感覺的表徵，描述物質的導熱性有多麼不同而已。一塊鋁皮往往比一件陶器摸上去冷，那是因為鋁皮傳導熱能，使它從你手中傳走的熱較陶器快得多。同樣的道理，銀盤或鋁盤傳導食物中的熱氣，增大熱能轉移到四周空氣中的面積，並且將熱迅速傳至手握盤子之處。童子軍露營時，每個人都有從金屬器皿取食冷掉食物的經驗，但我們卻將之怪罪於天氣或咖啡，若是用金屬茶壺盛裝尤其是銅、鋁或是銀製的，則因為它們極高的傳熱性，冷卻的速度將較快。至少根據一部指南手冊，殖民時代住在維琴尼亞地方的威廉斯堡郡長曾經以銀盤來用膳——這真是所有可用物質裡遭糕透頂的選擇，因為食物的烹調是在用餐的建築物之外進行，所以有人懷疑那時代的郡長沒有一位曾經享用過熱騰騰的食物；相反地，金屬

的把手往往變得異常的燙手。用銀製的湯匙攪混一杯煮沸的液體，便立刻顯示出高度傳熱性的劣處：至於它的優點，只有在它們做為冷卻汽車內燃引擎或家庭用蒸氣加熱的冷卻器時，才具有其重要價值。

金屬的高度傳熱性或許可以在各式各樣的狀況中對生物提供有用的服務。大型或中型的動物從事激烈的體能活動會產生大量的廢熱，需要排放到它們四周的環境中二局傳導有助於將熱自肌肉傳送至皮膚：但是人類的傳導性極低，大約與水差不多，所以人類只好捨棄傳統不用，而以對流和蒸發來替代。在所謂的對流中，熱的轉移是藉著已知熱物質的移動，而非熱本身在物質中由一處傳至另一處。最常見的移動物質即為流體熱傳或是熱氣而移動它們時需要幫浦及能量。蒸發之所以能夠散熱，是當水蒸汽被製這並且經過移動或排放時，熱便跟著一起轉移：蒸發需要耗損能量，這能量便是水蒸汽所包含的內容，當水蒸氣逸失身體便冷卻下來。人類會流汗，犬類會喘氣，我們都因此喪失水分，但是水分仍需被保留攜帶，因此上述的活動，是可能會引起一些麻煩的。

樹葉也是一樣。一俟風息，樹葉們苦於日曬，它們的熱度便會相對地提高，往往高於四周的空氣，有時可高至攝氏二十度。它們的中心點由於更少接觸到僅存的流動空氣，是故面對的問題更嚴重。如果樹葉是由傳熱良好的金屬製成，則熱中心便不會如此的高溫，但是它們卻沒有這種運氣，植物們只好以限制其他活動，或是干擾其他設計的理想特質來做交換。它們做成精心設計的葉片形狀能夠得到許多的葉緣，或許這樣便能減少陽光的吸收。它們使用大量的水分來造成蒸發冷卻，因此需要相當可觀的水源。它們形成厚厚的葉片以便能夠慢速地增溫，並忍受更長時間的風力平息，但是如此卻要耗掉更多的物資。當日照正強、風力正弱、水分又缺乏的時候，許多樹葉便垂頭喪氣，下垂成為一個受到較少日曬、較多氣流接觸的垂直姿勢，但是如此做卻要犧牲一部分的光合作用。

我們同時也可以利用金屬的高導電性。每一條電線都由金屬製成，在大部分的電子設備裡面，唯一非金屬的元件只

有主動元件，例如半導體，或是任何需要仰賴低傳導才能發揮功能的元件，例如電阻。至於神經又如何？既然神經系統和電子設備做的工作類似，我們想必可以將它比做電線。但是這種神經和電線的類比完全是誤導的。神經脈動沿著神經細胞的軸上傳導，與電波的脈衝沿著銅線上

傳導，採用的是兩個截然不同的物理方式。孰者為優？我會選擇電線。舉例來說，神經的傳導比起電波在電線上的傳導，慢如冰河。每秒一百二十公尺等於時速區區二百七十里，就是任何神經可以傳達神經脈動的最高速度：相形之下，電線傳達電波的速度可達其五百萬倍。每秒傳達一千個神經脈動，恐怕就是一根神經的最大上限；而電線卻可以每秒載送百萬個電波。人類腦部執行的各種複雜功能得依賴大量的平行處理——也就是使用許多彼此平行排列的神經，才能達成大量的迴路同時運轉。

若是以剛度為設計重點時，金屬顯然就比合成物占了上風：自然界對於合成物的使用可說是盡心竭力，但是在它們之中，沒有任何金屬的成分。我曾經在本章中提出幾個理由說明自然界不用金屬的原因，但顯然它們都缺乏完整的說服力。早先提出的另外兩個解釋似乎也不夠明確——我們必須承認這是一件令人不滿意的事。

或許，自然界不用金屬的原因只是單純地因為她已經擁有一些各式各樣的好用物質，如果必須要質問自然界的合成物是否具有與金屬一樣的水準，我們不得不說是的。舉例來說，如果以硬度和密度的相對質來做取捨標準，則木材和金屬的價值相差無幾。如果物質的延展力是我們的考慮基點，重量替代體積成為我們的參考範圍，則紫杉木（用於英國大弓）、膠原蛋——匿（用於羅馬彈弓或弩砲）、鶯餡（伊努伊特人常用），以及動物的角（用於中國的綜合弓），功能都要超過彈簧鋼。吾人當然也可以選擇另類的比較以突顯人造物質的優點。大致來說，兩種科技的堅硬物質雖然形類各異，但是功用卻不分軒輊。人類現今積極地發展合成物，主要是鑑於我們對過去所使用的甚至是最粗糙形態物質的良好經驗，而非受到大自然卓越技術的驅使。至少我們開始小量地製造合成

物二道合成物並能以符合人類需求的方式提供人類服務，而且品質優過自然界的任何其他物質。

自然界所謂的”設計”，其過程多麼令人稀奇!不論結果的好壞，自然界的合成物確實是由一個莽撞冒進、欠缺周密思慮、資訊缺乏，且統合最低的系統所製成的產物。明確地說，即使在極微小的層面上，稍稍變動修補一點點這些合成物任何的組成分量或安排，都會造成他們特性的波動。簡單言之，人類的創造是一種肉眼可見的精心刻意:相反地，天然合成物產生的方式卻是顯微世界裡的即興創作!這種說法使我們聯想到最後一種可能。

或許在發現自然界捨棄金屬、選擇合成物的這件事情上，我們只不過是觀看了一場以天擇為主導、超級保守、毫無創意又堅持嘗試——真實的演化過程。一旦有機物的非金屬組成結構確立，試問原始粗糙的金屬形式還能有多少機會?未來的福祉是演化一無所知的事，而它的冒險資本又少得稀奇:但即使這種演化的慣性可以成為合理的解釋，我們仍然難以為之辯護。我們如何進一步追求證明或反證呢?或許最安全的方式，便是將這種演化的慣性當成是不得不接受的假設——雖令人不悅，但也無可避免。這是我一再推遲，但仍不得不提出的。

## 第七章 拉與推

繩子，抗拒兩端被拉開；磚頭，抗拒兩頭被擠壓。為了正視這區別，讓我們把抗拒拉張的結構物稱做繫材，將抗拒內推的結構物稱為支架。我們使用鋼索、繩子、帶子或是一些膠劑，以及金屬、木頭和塑膠製成的棍棒，做為繫材結構；至於支架結構，我們則利用牆壁、樑柱、棍子，以及磚塊、石塊、混凝土、木頭和塑膠製成的粗條。自然界的繫材包括肌肉、肌腱、韌帶、絲線以及水果的果柄，絕大部分的骨骼、硬珊瑚、樹幹以及許多昆蟲的外殼，則有支架的功能。

在這個繫材與支架的簡單區分上——或許稍嫌過於簡單——存在著人類科技與自然科技某種相互關連的對比。這種對比當然不像金屬與合成物那樣對比鮮明，但是它們卻具有同等的重要性、同樣的普遍性。關於這推與拉，人類科技的做法源自上古，且年著跨越文化的一致性——對於吾人而言，普通之至且司空見慣，因此唯有透過另一番檢視，我們才能真正了解它的獨特。讀者諸君，你們的韌性、彈性，不是在第五章中已經受到各種機械特性資訊的脅迫和曲張？雖然在討論這些特性時，我們只考慮到物體受到拉張時的狀況——就是不同物質樣品的抗張力測試，但若是論到推力的效應，值得我們注意的便不只是張力一項特性而已。吾人可以強壓一物，施以極大的壓縮力；也可以剪切一物，使其變形。好比圖七~一中，一個長方塊變形為一塊所謂的平行六面。所以在此有三種應力：拉張應力、壓應力與剪應力。

在真實的世界裡，我們對機械特性的獲知並不會去測試某一種物質本身，而是借著所拿到的某一個形狀的某一塊物質來做測試對象。在抗張力的測試中，形狀無足輕重；不管是拉張一根圓棍、一根 I 型樑或是一束肌腱，應力的大小都是以拉張的力量除以受拉張物件的橫截面積而致。所以對拉張應力而言，這一塊橫截面積的形狀不會造成任何影響：一束繩子、一根圓棍和一根 I 型樑，受拉張的結果都是一樣。



相反地，在壓力的試驗中，形狀則舉足輕重。對短而肥的物體施壓，它會被擠扁；若是換了長而細瘦的物體，它則會先向一邊彎曲，繼而斷裂。施壓在一個具有薄壁的管狀物上——比如可樂罐子——則其罐壁往往會忽然之間自其上某一點皺成一團。圓形、方形或是扁形的棍棒，即使橫截面積一樣，造成它倒塌的重力負荷卻不相同。拉張極為單純，推擠卻一點也不單純，當我們只需要考慮到物質的差異時，我們(通常)光做抗張力的試驗便足以應付。但是物質必須組成結構，而為了了解結構，我們就必須考慮到形狀。

除了拉張應力(拉張)、壓應力(推擠)和剪應力，結構物還牽涉另外兩個複雜的負荷：那就是彎曲和扭曲。當一個結構整體受到彎曲或扭曲，它的各個部分都承受到上述三種基本應力的影響。試想若是加重於圖七~二中所示長而突出橫樑的尾端，必然會發生何種狀況？此時添加的重量會急切地朝地心移動，而不偏不倚的橫樑則會抵抗這種傾向。在這個抵抗的過程中，此橫樑的頂部就會伸張，或至少稍微地伸張。伸張——即是繫材所面對的抗阻，所以我們可將此橫樑頂部視成繫材。較不明顯的是，橫樑的底部也受到壓縮，再一次我們可說它至少受到輕微的壓縮。壓縮——即意謂著橫樑的底部作用好比支架。若是我們此時取代這繫材和支架，則保證災禍臨頭：如果繫材不能抵住這伸張，支架無法支撐壓縮，則整個結構必然會向下往內倒塌無疑。橫樑在開始時側看原是長方形，現在倒成了平行四邊形，顯然這橫樑的中間正巧妙地承受著極艱鉅的工作以抵抗剪切。所以在這裡我們看到，當一個橫樑被彎曲，三種應力——即拉張應力、壓應力及剪應力——都同時加諸於物質上，而且在橫樑上各個位置所承受的應力都有不同。

類似的情形也會發生在扭曲的結構上，例如圖七~三中的圓柱體，外負拉張力，內積壓縮力。扭乾一塊濕毛巾，正好可見二力運作：外在的拉張力極為明顯，中間所承受的壓縮力則是擰乾水分的主要原因。除此之外，剪力也負載於整個物體中(除了正中線之外)。若是扭曲一個畫有正方形的長氣球，這個正方形就會變形成平行四邊形，剪切力的運作在

此就可以得到最好的證明(如圖所示)。所以我們再度看到上個物質承受單一的負荷會誘發三種應力同時的運作。

人類科技顯然擅於利用這種扭曲圓柱所產生的應力組合。我們將一支支短短的天然纖維平行排列，例如麻、棉或羊毛，再將其一起扭轉交織(紡線)成為長絲線或繩子，即使這些纖維並非從頭至尾地結合在一起，它們所結成的繩子也相當地牢固。這些纖維被壓縮時，產生了對彼此的抗剪力，因此可以保持不被扯散。拉扯一束紡好的絲線或是一根交織的繩子，其效果與剪切一個結構是一樣的，都是將中間的纖維往內擠壓在一起。如果纖維不是太過光滑的話，那麼它的斷裂會較繩子的鬆開早一步發生。這種張力引起的壓縮力在蓬鬆多毛的線紗上尤其明顯。在許多古老文化中，不管是為了結繩或是編織，紡紗都占了極為重要的地位，而且在每個文化中，紡紗都幾乎毫無例外地成為女人的工作，消耗了她們絕大部分的工作時間。

自然界卻從未玩過這種奇特的把戲。她所造的絲線和繩子全是運續不斷的線縷——例如蜘蛛的絲。或是在像蔓藤一類的例子中，她使用的是一個細木工系統，其理論基礎完全有別於上述那種螺旋形扭轉和纖維間產生的磨擦抗剪力。當然在自然界承受負重的結構中，並非完全缺乏這種多重線縷組成的螺旋線——微管的雙螺旋以及膠原蛋白的三螺旋，都是明顯的例子——但是這種扭曲並不是借由抗剪力來獲得拉張強度。編織，其實完全是一種人類的活動，儘管長久以來一直被誤用來做為形容蜘蛛和桑蠶吐絲行為的字眼。

在上述的例子中，突出的橫樑若是在尾端加上重物，則彎曲就成了顯而易見的簡單結果。至於一個長形建築，若是兩端同時被擠壓，則幾乎也會發生同樣的狀況，只不過沒有上述例子那樣明顯而已。最典型的例子，便是古埃及人和希臘人最愛用來支撐他們廟宇，使屋頂保持高巍直立圓柱。在這個圓柱上有重力的作用往下拉，但圓柱並不會往下加速；而力量必須得到平衡，所以地面勢必會往上施壓。因此大致來說，圓柱所面對的是壓縮的力量。但是一旦它開始彎曲，這原本承受壓縮力的圓柱便在它凸出外側的那一邊產生了

張力，如圖七~四所示。彎曲圓柱的內側，則受到格外的壓縮，此時在圓柱內就好比上述橫樑一般，自然而然產生了剪力。所以，除了特別短而肥的圓柱在碰到重大危難便壓得支離破碎之外，所有的圓柱都如橫樑一樣，受到拉張應力、壓應力及剪應力的負荷。他們的主要差別，乃是在於圓柱可以往任何一個方向彎曲，而橫樑則上下有別，因此何處發生張力、何處產生壓縮也一目了然。一根正當的I型樑，想當然高度要大過寬度，而所謂的圓柱也不應該脫離圓形的標準太多。

## 張力對壓縮

假設你正在設計一個結構，而你可以自由選擇繫材與支架的任何一種組合，那麼什麼樣的因素會影響你的決定？在這些因素中，最主要的便是你所使用物質的特性。而在所有的特性中最重要的，莫過於物質在處於拉張和壓縮兩種負荷情形下的相對性能罷了

石塊、磚塊、磚石，以及其他陶瓷材料，都具有絕佳的抗壓縮力，如果將東西放置其上，它們都可以保持穩穩不動，不受任何影響。一個普通的磚塊可以支撐好幾十萬磅的重量；相反地，這些陶瓷材料的抗張力卻奇差無比，至少比其抗壓縮力少了十倍的強度。況且這個抗張力的削弱多少與它們的硬度也有一定的關係；這再一次證明，堅硬的物質易於碎裂——就是意謂著它們無法防止裂縫擴散。裂縫在承受張力時，因張力使它們有擴散蔓延的傾向，所以情況特別嚴重，而物體在承受壓縮力的負荷時，則未養成這種遭人非難的不良習慣。除此之外，傳統上用來接合磚塊、石頭的水泥和膠泥黏著性極差，幾乎與它們本身的脆弱一樣。鑑於在這樣一個不明確的物質世界，完全純粹的壓縮力負荷得不到百分之百的保證，那麼一點點的抗張力保證便絕對是值得的。想必這就是為何將日頭中曬乾的磚泥和以稻草碎禾，便能份外堅固的原因(見〈出埃及記〉五章七節)這同時也解釋了製造建築物的飛簷時，為何需要在灰泥中摻入馬鬃。

無論如何，如果你能夠確保所有的負重都屬於壓縮性的，而且重量的經濟考慮並非至高原則(比如在設計可移動的

結構時)，那麼陶瓷就不失為理想的材料。除非是用於極大型的結構物上，不然它們極高的硬度，使它們即使完全忽略重量因素，也不會招致危險。上面牆壁基部的磚塊，從來不會被上層的磚塊擠扁。像歌德式大教堂這種真正壯觀的建築物，想必是人類有史以來所能建造承受壓縮重力的最偉大結構了。拱形的圓屋頂在牆面上往外施力，而外在的拱壁則向內施壓，兩者得到一個非常接近的平衡點。牆壁的厚度越單薄，則平衡便縛越加縝密，不然這些牆壁——不過是層層堆疊的石頭便會向內或朝外倒塌。建造一座大教堂，在拱形屋頂及拱壁兩個要素之間，需要伴隨著不停的半途調整，以便使每一部分都能處於適當的抗壓縮力下，所以施工期間的失敗案子比比皆是，或許這也是為何建造一座大教堂往往要花費一個世紀那麼久的時間。羅馬聖彼得大教堂的修築時間超過一百八十一年，但是真正紀錄的保持者，要屬法國波微(Beauvais)的聖皮耶大教堂；總共歷時三百五十年斷斷續續的修築，夾以兩次驚人的大倒塌，一直到現在教堂都還未完成。但是這樣的教堂，一旦正確無誤地蓋成，便經久牢固且無維修保養之虞。同樣的情形也發生在石拱橋、高架渠，當然，還有金字塔這些結構物上。

繩子、鋼索、索鏈及蔓藤都能夠抵抗張力，但施以壓縮，卻立刻承受不穩而垮掉。吊床可以承受張力負荷，吊橋也是一種張力結構，當然除了它的吊塔及行道以外。這些張力結構同時也形成支撐電梯及起重機桅桿的次級系統。橡皮輪胎內的張力——與空氣壓力一樣——使得汽車體保持離地，而外緣結構內的張力又使得它們得以保持球體的形狀。但是比起抗壓縮力的結構，這些抗張力物質可說是既少又微，而且它們大部分的發明使用都屬於近代的事情。

金屬的最優之處，即在它們承受拉張和擠壓的能力同樣地優良。這種特性使它們極適宜用來製作許多人類鍾愛的裝置這些裝置需要同時承受兩種應力，有時應力的發生甚至採取快速的變換交替方式。試想想汽車在崎嶇路面疾速奔馳時，它的外殼骨架所要承受的汽車重量及快速晃動，或是波濤洶湧的大海中載沉載浮的船身。如果船身超過兩個波浪的

寬度，則船的兩頭勢必遭到向上的推擠，中間將陷落；如果船身只橫跨一個浪濤，則它的一端遭到向上推擠，另一端則向下陷落。金屬對壓縮及拉張的良好適應能力往往使粗心的旁觀者，難以從結構的細節上猜出它們的各個特定部分到底是為了抵抗那一種負荷所做出的設計。

生物性的物質又稍稍地不同。我們的肌肉、肌腱、韌帶就好比鋼索，只能抗拒張力。肌肉拉張，繼之又被拉張，所以你所嚐到的苦惱終究是拉張的肌肉，而非受擠壓的肌肉。我們的骨骼和軟骨卻好比鋼架，同時得承受壓縮和拉張，但是他們之間仍有重大的差別。第一，生物界若要找出好比磚塊一樣純粹只能抵抗壓縮力的物質元素，幾乎是件不可能的事。即使是牙齒，也必須抵抗張力；試想它們若是承受不住張力，那麼以它們的負荷而言，斷裂恐怕是難以避免了。第二，生物性物質在承受壓縮和張力的行為上與金屬並不一樣，幾乎全部以纖維組成的木材，其承受張力的能力是承受壓縮力的兩倍強；強折一根活樹枝或是細木樺，它便自內側開始彎曲變形，較外緣的裂縫發生還要早一步。相對於此，骨骼對壓縮的耐力則要較它的抗張力強一些。不出我們所料，軟體動物的外殼其抗壓縮力較強。在此有一點觀察饒富趣味值得我們留意，即這些硬殼和生物性陶製品的抗張力與其抗壓縮力相比，都僅僅只弱三倍，遠遠低於人類傳統陶製品的十倍比例，難怪人造泡綿或合成物受到如此青睞。

## 繫材對支架

理所當然地，人類科技和自然科技都會使用繫材和支架，但是功能上的需求並不能決定兩者的應用組台。許多複雜的結構，比如一座鉅大的橋樑，它們的設計者具有相當的彈性空間來決定繫材和支架的結構比例。我認為兩個科技在各自的設計上脫離不了它們顯而易見的偏見。從歷史的角度來看，人類在處理壓縮力上的成績較佳；我們取信於支架，對於綁束東西的繫材，卻沒有多大信心。自然界傾向於拉張物質，因此對繫材別有獨鍾。

這樣的偏見對於最後的結構具有莫大的影響。如果你是站在支架的那一邊，你便會造出一個拱形橋(見圖七~五)，幾

乎每一部分都承受著來自壓縮力的負擔，兩端尚且將河岸往兩邊推擠傾軋，這就是拱形結構為何在以石頭做基礎的傳統建築中如此盛行的原因。但如果你心向繫材，那麼你選擇兩端傾向於拉緊河岸的吊橋結構機率就會大得多。除了材料的成本、特性，以及取得的難易與否之外，尚有其他多項因素會對繫材和支架的選擇取捨造成影響。

- 當我們將注意力自物質材料轉至結構時，體積太小就會再一次獲得決定性的肯定，但是這完全是出於一種反直覺式的——就是我們在前面第三章中的一般論點。一根上面標示著「十磅重測試」的魚竿，表示不管魚線放出有多長，它都可以承受住十磅的拉力。為了承受某一固定負荷，長繫材並不需要比短繫材來得粗，或至少這是當繫材本身重量——它的自我負荷——尚未成為重大因素之前的狀況(一段題外話:理論上，一個人造衛星在地球軌道上環繞時，可以自其衛星體上懸吊一根繩子於地球表面。如果衛星的質量重心點夠高，軌道因此便能與地球同步旋轉，這根繩子甚至可以保持不動。棒極了!自此以後任何東西想要進入軌道，只消沿著繩子往上爬，往上提升一直到整個系統的質量中心不致落下為止。這種說法有何不妥?在物理理論上或許不會有所抵觸，但是在材料科學方面卻完全行不通；至今還沒有任何一種物質製成的繩子，其拉張強度能夠應付這樣的長度而不被自己本身的重量拉斷)。

但是對於壓縮力的承重而言，加長即等於是削弱。對一根棍子兩端施壓，短棍較長棍來得難以折斷。試著以同樣的試驗實行在任何細長的堅硬物質上，例如木樺、吸管或是義大利麵，禍首總是起於側邊斷裂，而這即是瘦長物質最脆弱的地方，即使我們按照長度增加的比例來加厚這些支架，仍然不能解決問題。如同我們在第三章中所述，將一個支架組織體積加倍卻不改變其形狀，會造成整個應力承擔的加倍，為了讓應力保持常數，它們厚度的增加絕對需要超出比例。

自然界對於這些支架尺寸大小的問題完全了然於心。樹

木增加高度，其樹幹的直徑就會不成比例地增加。大型陸棲哺乳類的骨骼重量比例，要比小型哺乳動物來得高得多。一隻十磅的貓骨骼大約構成它全部重量的百分之七，一個一百三十磅重的人則其骨骼要占掉八點五個百分比；一千三百磅重的馬骨骼占十個百分比，但是一隻重達一萬五千磅的大象，其骨骼重量就要占它全部重量的十三個百分比。事實上，即使這樣不成比例的骨骼增重，也無法確保所有動物都能達到同等的強壯堅實，往往體積越大的，越較外觀上看來脆弱。湯普森使用這樣詩意的句子描寫：「大象和河馬，龐大而又笨拙；麋鹿卻基於生存需要，失去了瞪羚的優雅美姿。」

所以隨著體積的增大，支架的問題便接踵而至，而繫材卻絲毫不受影響。在這裡或許可以長臂猿來做為一個具有教育性的參考例子，因為長臂猿能夠以兩足行走，又能以雙臂在樹枝間盪來盪去；在擺盪之間，它們的手臂幾乎承受了全部的張力。身體的重量不改變，但是它們手臂的骨骼卻較雙腿的骨骼來得細長單薄；這證明繫材可以瘦長，可是支架卻必須越短越好。

- 支架和繫材的堅固程度，其差異可說是極奇特，而又合於邏輯。一旦支架開始彎曲，它就越演越烈，可怕的崩潰倒塌立刻到來。波微大教堂的倒塌勢必是極為可怕的。問題是，只要支架開始彎曲，便強度盡失，而且彎曲越是進展，支架越是削弱。它的不穩定性一部分來自彎曲的支架往外移動，一部分來自彎曲進行時交叉裂縫的擴展會越來越快。工程師法蘭區(Michael French)就曾指出，大力士參孫只要使足力氣一舉折彎神殿裡的圓柱，他就可以神輕氣爽地坐等屋頂垮掉了。

關於這一方面，繫材可說是真正的堅固牢靠，隨便在兩個柱子之間展開一條繩子，在中間懸一重物，這繩子便會向下陷落。重量越重，則陷落越深，不管是讓柱子受到彎曲，或是繩子遭遇拉張。但是，不消一會兒整個過程便能達到自我維持的平衡；曬衣繩很少造成重大的危險。所以如同前面體

積增大的例子一樣，繫材在堅固方面的性能要優過支架。在這裡，自然界再度讓我們看到她的合理面。大型哺乳類的骨骼雖然較多，但是它們的肌肉卻並沒有特別發達，幾乎每一種動物的肌肉比重都在四十個百分此左右。

- 但是以繫材來建造，複雜難度卻要超過以支架來建造的工程。支架作用在一起極其容易，它們可以彼此相疊，拿重力做為彼此的黏劑；但繫材要彼此結合，或是連接在另外一些支架上，都相當的困難，在前面我們已經數次提到這個現象。這扣繫和黏著的技術深深地挑戰著人類史上的每一種文化，只要他們曾經使用過任何非以石塊堆疊來做為建造的方案。舉例來說，在一座圓頂屋中，圓形的四圍低處都承受著極大的張力。義大利佛羅倫斯的聖馬利亞大教堂內有著布魯內萊斯基(Brunelleschi)設計的大圓頂屋，四周環繞著許多高張力的鐵鍊隱藏在水泥築的磚牆裡。這些鐵鍊兩兩相連形成一個環狀，布魯內萊斯基便因此巧妙地解決了張力結合的問題。繫材的另一個問題在於重力的負荷，大部分人類的結構物都是從地面往上空發展延伸，這對於支架結構來說不會構成問題，但是碰到繫材就不是那麼一回事了。所以木造船對於細木工業不啻構成特殊的挑戰，而且造船木工這個行業在傳統上一向就比木匠享有更高的名聲；古諺不是說，差勁的造船工，抵得上一個優良的木匠。

繫材並非不能用於日常的建築中。傳統的尖頂木板房都有水平的部分(繫樑)與屋脊成直角式的排列，它們通常形成閣樓的地板；兩片屋頂支撐(椽木)，再加上一根繫架，使之圍成一個三角形(見圖七~六)。屋頂受到重力的負荷會傾向對四面牆壁施力，使其分崩離兮；這繫樑此時便成為捆住牆壁的繫材。當然也有其他的方法讓尖頂屋在沒有繫樑的束縛下也可以存在，其中之一便是使用外在的拱



壁，在牆壁頂部提供一個往內推擠的反作用力，例如在歌德式大教堂以及一些 A 型結構屋上可見。另外一個方法，便是在屋脊下使用一塊大型極硬的桁木，下托以一根不起眼的直立圓柱，這樣造成所謂類教堂式的天花板屋頂，給予房子一股愉快的開放感。這個縱向的水平屋脊部分因此得以維繫橡木，使其不致散開。

因為某一種因素(或者可以說，某幾種因素)，這個張力的細木工業對自然界完全不構成任何困擾。除了偶爾肌腱一不小心自骨頭上拉鬆之外，其他最常見的張力截斷——包括樹葉、種子與果實自它們的母株植物上的脫離——都不能拿來當做失敗的例子論斷。

- 一個結構物能夠高度巧妙地運用繫材，卻難以達到我們人類所屬意的堅硬程度。一根鐵鍊或是鋼纜以原本的物質硬度來說或許夠硬——意即它在被直向拉開時具有足夠的抗張力，但是從結構上考量它就有所欠缺，稍稍刺激便引起它的彎曲。這是繫材能夠高度容忍長度以及單薄的缺點。自然界則因為她能夠容忍較低的結構硬度，是故更能利用繫材的各種優點。

人類對抗張力繫材的使用，其規模再大也莫過於懸索橋了。除了最初級的蔓藤製吊橋不談，所有的吊橋設計只有在抗張力的金屬——是鍛鐵再是鋼——能夠以相當便宜的價格順利取得時，才得以開始(絕大多數的懸索橋，都是用鋼線包裝成束來做成主幹索以及道路吊索，但在橫跨英國布里斯托谷(Bristol)的艾芬(Avon)河谷中，亦有以可愛的鍛鐵做成的吊橋沒有用任何金屬線，主幹索以骨頭形狀的環節眼狀桿組成，彼此以橫釘相連，而兩旁的吊索則是一根根長長的細棍，自連接的釘索處下垂而成。偉大的工程師布魯內爾(Lsambard Brunel)自一八三一年起設計這座橋:到了一八六四年吊橋

完工的時候，鋼材的價格已經大為降低，而這吊橋也立刻成了落伍的過時貨)。懸索吊橋是一種極有彈性的東西，但在一個世紀以前，火車鐵路卻發現它們極不理想。蒸汽機車是一種高噸位的行進負重——對於橋樑和鐵軌火車之間的結構完整性，這實在是一種極壞的組合。這吊橋的彈性至少曾經有一次被證明它的失效。美國歷史上最著名的一次橋樑災難，是發生在一九四〇年代塔可馬窄橋掉入普吉灣的事件。直接的肇因並非只是風力，而是由於強大的風力自某一個特定方向吹來，並與窄而優美的彈性吊橋甲板相互作用，產生了激烈的擺動(共振)。整個崩潰大約持續一個小時，目擊者駐足驚嘆，整個事件並被拍成一部紀錄影片|從此便成為每一名工程系學生不可錯過的影片。

## 再談張力對壓縮

回溯前面所講到的突出橫樑，頂端有拉張的負荷，底部有壓縮的負荷，中間則需承受剪力，我們要如何設計才能得到一個有效的橫樑呢?最盛行的解決辦法即為 I 型樑，這是因它的橫切面形狀類似英文字母的 I 而得名的。I 型樑的卓越優秀，部分原因是由於它在承受張力和壓縮力的負荷時，性能反應與金屬頗為類似，這一模一樣的上緣與下緣(就是「I」字體中的細橫線)，代表著中線以上及以下都存在著許多物質，使它們較能承受樑柱的彎曲。中間垂直的「樑腹」承受剪力，則分開這上緣與下緣。

樑腹(或網狀物)這個字眼，正好暗示我們如何稍做修改。我們可以將它用斜角線條畫成的格子花樣取代——也就是一個真正的網狀物。為了承受剪力，這個格子形式的基本結構必須以斜角排列，因為在前述的突出橫樑陷落成爲平行四邊形時，垂直排列的線條全都逃不掉折疊分段的命運；讀者諸君可回憶一下圖七~二。若是在橫樑上裝備這樣的格子架構，如圖七~七所示，我們就稱之爲桁架，但其實真正的改變並不多。容我們再細細思考這個格子架構。這些斜角線的結構有一半是承受著張力，另一半則是壓縮力，就像在上

下緣的情形一樣，如果我們使用金屬來製作，這些斜角線可以完全一樣；但是如果我們利用鋼索來做成抗張力的斜角線，則或許可以減輕許多重量。當然我們勢必也得犧牲一些整體上的硬度，同時也受到下墜負荷的限制，以免造成纜線的鬆弛無力。事實上，我們可以將這個邏輯做更進一步的推論。如果假設負荷是持續下墜式的，那麼它們的上緣將始終承受著張力，因此便可以用一條鋼索來取代——當然這是要基於我們能夠接受硬度被削弱的事實。支架和繫材，在此便是以一種可辨認的形式，也就是實心棒條與鋼索出現。

自然界同樣也利用這種專門設計的橫樑支撐許多哺乳動物的頭部，湯普森在許多年前便指出這個事實。我們可在圖七~八中看到，底部承受壓縮的下緣，是由頸、胸部脊椎的中央骨及這些脊椎之間的軟骨椎間板構成；而承受張力的上緣，則是由肌肉及一條韌帶組成，這條韌帶，正如我們在前面第二章中提過的，含有極高量的彈性蛋白。負荷壓縮力的斜角線是由脊椎延伸出去的骨骼組成，而負荷張力的斜角線排列的方向正好相反，是由更多的肌肉、肌腱和韌帶組成。所以整個結構或許極有彈性，但是我們卻應該了解，這個結構的真正目的並非是達成一個僵硬的頸部，相反地，人類科技中所使用的桁架鮮少會區分它們的支架和繫材。從某種意義上來說，我們根本只是建造支架，然後將它們的半數拿來做繫材使用，接受重量上較不經濟的缺失，卻可以換得構造簡單、硬度滿意的代價。

一匹馬的全身負重大都落在前腳上，它們的前腳並不連於脊骨和胸腔，正如同車輪與汽車體的彼此配屬一般。再高級的馬路也免不了一點凹凸，而為了確保牙齒不嘎嘎作響，軀體不上下顛簸，一部理想的交通工具就需要具備懸架的裝置——至少附帶彈簧或是加上一些減振器，使彈簧不致反覆地彈回。當路面和車體彼此靠近時，此時彈簧正被壓縮；當路面和車體的距離較遠，彈簧就處於拉張狀態。但馬和車輛一樣時，兩者本身都有重量，所以即使馬路平滑如鏡也絲毫不引起任何麻煩，彈簧也已經載有負荷——就是所謂的前載荷。一個懸架裝置經過設計，便可以承受不管是張力形式或

是壓縮形式的前載荷及現行載荷；一個重量(比如騎者)或是一個反重量(比如一個坑洞)，都可能成為任何一種形式的負載，決定因素乃是在於懸架裝置的各個構成元件是如何安排的了。

馬和汽車這兩種交通工具用的正好是完全相反的載荷及前載荷。正如同圖七~九所示，一匹馬的全部身體就等於是懸掛在它胸部的環狀骨上，強壯的肌肉、肌腱及韌帶一路從其肩胛骨(等於人類的肩胛骨)延伸下至脊骨和胸腔。如果負載增加，則會提高這些組成分子的張力，使其較前載荷期的張力還高，所以對整個系統施加壓縮力反而造成彈簧的伸張！大部分的汽車都具備了盤繞在底部的彈簧，這樣的安排使得汽車裡的重量一旦增加，彈簧就受到壓縮。金屬製的彈簧無論在承受張力或是壓縮力方面，性能都極佳，而汽車的設計(如同馬的設計一樣)就是要利用這樣的懸架裝置，才能達到懸浮在中間的目的。如此設計的汽車，因為車體的重心往往低於彈簧的裝置水平，所以造成轉彎時不朝外，反而朝內傾斜，微微地讓人懊惱。其實比起汽車設計在其他方面所受到的限制，在底盤上裝置一個受壓縮的彈簧簡直是太方便了。人類除了伸張和壓縮的彈簧之外，還廣為利用彎曲的、扭力式的彈簧，甚至偶爾連剪力式的彈簧也可以派上用場，這些彈簧都可以抗拒上述題到之任何形式的負重。

自然界所提供的彈簧種類花樣則少得多，只有極少數的彈簧裝置，例如扇貝和其他雙殼軟體動物的蝶鉸軟墊，不是憑藉伸張，而是靠著壓縮來吸收能量。更少見的例子，是一些骨頭或是外骨骼組織可以像某些汽車裡的片簧(或鋼板彈簧)一樣，發揮彎曲彈簧的功效，例如鳥類的如願骨在飛行時所扮演的角色。其他絕大多數的自然界彈簧，都是靠伸張來達成功效。

然而，對於運載器的懸架功能而言，經過審慎設計的前載荷絕對不僅僅是一個次要的福祉而已，兩種科技都同時大量地利用這樣的設計考慮，以便確保每種物質接受負荷的時候，都是以它們最經得起負荷的方式來承重。應用這種設計考慮的最佳例子，就是我們稱為預應力混凝土的使用。我們

可以在鑄造大塊混凝土時，以鋼條排列於其中，再將鋼條收緊，或是趁著混凝土凝固變硬的時候，將鋼條拉張，使它保留在張力狀態中。不管是那一種方法，這鋼條都已經預先負載了張力，而混凝土也承受了壓縮力，此時拉張這混凝土正好會解除早先存在的壓縮力，而不致刺激到它承受張力的危險弱處。有時，我們的設計還可以更花俏。使用微曲的鐵條，我們可將一根長樑以彎曲來預加應力，而這種彎曲便可以抵銷長樑的重量和現場負重。預加應力不單單只是提供鞏固措施，防止裂縫發生，好比在上述例子中混凝土鑄在鋼條四周所發生的效果；總體來說上它是一個較佳的方法、較理想的選擇。

若是物質抗張力的功效不彰，則可以對其做預先壓縮的處理：同樣地，若是物質對壓縮力的承受度較差，它也可以接受預先拉張的處理。木材即是這樣的物質，而樹木正好就對其特質做了預先的處理。樹幹的最深處是受到樹木彎曲影響最淺的地方上它所承受的壓縮力不僅僅來自壓在它上面的木材重量，還有一些附加的壓縮力來自它四周木材張力的壓迫。當樹幹彎曲時，彎曲的外側被伸展，而張力正是木材所擅長承受的負荷；它的內側被壓縮，則是木材難以承受的負荷。但是這個壓縮力正好解除了預先存在的張力而得以平衡，木材也因此能夠發揮它的功能而成為最有用的建築材料。

## 繫材和支架的形式

鋼索和棍棒，兩種形式截然不同，即使是以相同的材料製成也不可混為一談。繫材的最佳形式鮮少會與支架的最佳形式雷同——這點是絕對沒有意外的。至少，所有的壓縮元素都應該相當地短，而張力元素則不受任何長度的影響。人類科技和自然科技都同時體認到這個原則，但是它們應用和取捨的方式則大不相同。

懸索橋再度成為人類努力的最好寫照；它們巨大的體形使其建造者關切如何減低成本和吊橋重量，並同時使用張力和壓縮力結構，而且大部分的結構成分都一目了然，張力結構——主要吊索及路旁垂下的懸索——都是又長又細。壓縮

力結構，即吊塔，則看起來十分堅固。若是按照十九世紀的設計以磚石築成，則放眼望去吊塔盡成雄偉的大樁，高大壯觀，絕非單薄結構：即使是使用鋼鐵做其材料，它們也遠比主要吊索粗肥得多。鋼製吊塔可用格子花樣的柵網做成，它們的功用與實心的圓柱類似，只不過在這些實心圓柱做支架的例子裡，它們都必須維持粗短的原則。在這裡必須事先預防的，便是吊塔的坍塌變形，而在張力負荷的狀態下，這是根本不需要煩惱的問題。

其他的結構也同樣遵循這個壓縮元素必須維持粗短的一般原則。通常在吾人房屋的牆壁內，二乘四的直立壁骨長度都約在八呎到十呎左右，這種比例若是單獨一根，則極易於側邊彎折。但是我們將壁板，也就是石膏灰膠紙夾板，以及各種不同的護板釘在這個壁骨上，使它們變成彼此相應、自我支撐的列柱。即使是最輕薄的壁板也能夠防止壁骨的折斷：事先預防最初的側向移動極為容易，即使整個情勢到後來會愈發激烈。

在自然界裡現象就較不明顯，即使我們有各式各樣的張力元素可供參考。純粹的張力結構相對於其長度，或許可說是相當地細薄，看看蜘蛛網的絲線或是百尺長的海帶即知。但是壓縮的結構並非永遠是粗肥的形狀——試看看熱帶樹的樹幹，以及瞪羚和白鸛的腿骨——雖然這壓縮的結構相對於其長度，是較張力結構來得較為厚實。高大木質的陸生植物，其演化發生在好幾個時期。生裏任何族系曾經廣泛利用外在的張力支撐結構——支索(牽索)——儘管木材本身負荷張力有絕佳的強度。對我言，更奇特的是節肢動物們經常使用的壓縮力結構，竟是那麼薄薄一層皮，而且至少每一種主要節肢動物群內，都有某些分子長著完全不合乎效率的細長附屬肢：大蚊(昆蟲)、長足蚊(蛛形綱動物)、蛛形蟹(甲殼綱動物)，某些百足蟲(多足綱動物)以及海蜘蛛(皆足蟲)，全部都具備著又長又細的足部特徵。這些足部節節相接，並且在內部長有肌肉，所以它們勢必是負荷著壓縮力；我們在圖七~十中便可以看到一些具有這種特異機械性的生物。我們的生物力學恐怕尚欠缺完整的一章吧！

有一群動物倒是值得我們特別一提。正如第四章中所提，大部分海綿動物的支撐系統，是靠著鈣鹽或矽石(最主要的是玻璃)組成細小堅硬的針狀體，以與我們的肌腱頗為類似的蛋白質彈性軟墊繫結在一起。整個這種動物群都缺少實質的肌肉，所以它們並不需要具備長而堅硬的支架，以便它們的繫材拉張，這種主要的限制一旦放鬆，那麼壓縮力結構必須盡量縮短的通則就變得舉足輕重。它們的堅硬部分就是這些抗壓縮力的針狀體，全部都不超過一公釐長。海綿動物也並非全部都體形短小或弱不禁風——有單一的海綿長達三呎高，歷經颶風和颱風仍然存活——但是如此建造出來的海綿動物對環境都具有相當的適應性。

從海綿跳出小小一步，卻導致一個我們從未遭遇的新鮮事情：一個看去極為引人、卻鮮少被兩種科技使用的方案。因為支架和繫材向來就是兩種極為不同的元素，所以我們會期待，一個結構便足以支架形成一個連續而互相銜接的網路系統，再加上繫材穿插於其間而成。還有什麼其他方法能夠抗拒除了純粹張力負荷以外的任何負荷？事實上，這種互相銜接的支架網路並非絕對唯一的選擇，一個能夠抗拒彎曲、扭結和壓縮的結構是可以單單用繫材連續排列——對於架構這個名詞，吾人暫持保留態度而成。支架與支架之間並不需要彼此銜接，這個結構方案不知是否為某特定人士所發明，但是主要的專利權是屬於福勒(R.Buckminster Fuller)，而且被命名為「無一定尺寸限制的結構」，在他專利書的一段華麗文字中如此形容它：「張力汪洋中的壓縮孤島。」

讀者可參考圖七~十一，在此處圖形比文字更能夠解釋一個桅柱或是高塔，如何在支架毫無連接的情況下得以直立高聳。主要的關鍵，便是將繫材與結構承受推力、彎曲或扭曲之處結成一體，藉此增加它們承受張力的強度。畢竟繫材只能抗拒張力負荷，任何其他的負荷都會使它毫無招架能力。桅柱及高塔並不是唯一可能的無一定尺寸限制的結構：舉例來說，做成一個圓頂屋也不難設計。我相信吾人絕對有能力製造出一個布帳篷，以堅硬的小夾板包在彼此不相連的布袋中而成；說不定這早就有了先例。這種「無一定尺寸限

制的結構」之主要結構缺乏硬度，對繫結之物依賴太深，所以「無一定尺寸限制的結構」至今仍屬於一種藝術形式。

或許海綿也曾借用過這樣的概念，至少它們的針狀體大部分都不直接相連。但是這些針狀體的排列與福勒設計的相似處實在極為有限，部分原因是因為連這個「無一定尺寸限制的結構」都比表現最佳的海綿動物還要來得堅硬。與其說海綿動物是有意地限制

其彈性，還不如說是無條件地接受它。骨針——就是抗張力的組織內埋藏著小小堅硬的物質——並不是只限於海綿動物，它們也出現在某些軟珊瑚、海參、葷形藤壺貝類及別種生物身上。其實這些動物看上去並不像是福勒式結構，而比較像是從非正統的「無一定尺寸限制的結構」發展到合成物的連續過程中之一個步驟。

至於自然界為何沒有盡情竭力地使用這「無一定尺寸限制的結構」，我的最佳猜想與前面我們在分析為何大自然獨缺金屬時的原因一樣，都是一種規避。當硬度是我們的考慮重點時，「無一定尺寸限制的結構」就顯得太過柔軟；若是可以容忍柔軟，那就有更好的物質可以使用。我們可以轉向張力支撐的最高表現——流體靜力系統。

## 流體支架和螺旋狀繫材

對於半數的人類而言，這是我們再熟悉不過的事情。例如想想妳或是妳最親密靠近另一半的那話兒，以一種立即演化的觀點來看，硬者即適者。彼此不相連的支架已經夠怪異了，但現在竟然出現一個沒有固態支架的堅硬結構，那到底一個支架是否真的要成為固態才能抗拒壓縮力？事實上並非如此。讓我們考量一下物質的三種平常狀態是如何運作的。固體能抗拒張力和壓縮力，氣體則只能抗拒壓縮力。一旦遭到逼迫，物質的任何一種狀態都會反擊——它們都抗拒壓縮力。所以，流體不管是液體或是氣體形式，都可能產生支架的功能；聽起來雖然奇怪，但也可能是因為我們從未以夠寬廣的角度來看支架。流體支架當然經濟，因為水和空氣是取之不竭的物質。那麼，它們是如何形成的？

流體支架的構成極其簡易，只要具備一層抗張力的護皮



包裹在一團抗壓縮力的流體外，就會形成某一種特定形狀，並有幾分堅硬強度的結構。這裡所談論的，不外是以氣填充的氣球，或是注水充滿的帆布製水龍(消防水帶)，或者長話短說，其他尚且包括以空氣壓力支承的飛船及建築物，也不能忘記許許多多的蠕蟲和大群的細胞——最後再加上多數的雄性生殖器。當然這結構物的特性與它的填充物是氣體還是液體有著極大的依存關係。水的密度是空氣的八百倍，對於壓縮的抗力也高出氣體許多。一個被水注滿的氣球，總是維持著與其負荷相當的固定體積，但是它的形狀則多少會反映重力向下牽引的傾向。被氣充滿的氣球形狀，則對重力毫無興趣，但是它的體積卻變化較大。我們對於這種膨脹的、受壓的類氣球結構難以有統一的名稱：如果是充水的，我們稱之為流體靜力；如果是充氣的，我們則稱之為氣體靜力。

做為一個實用的受壓式結構，橡皮製氣球實在受到許多嚴重的局限。第一，橡皮不夠硬，所以整個結構有點鬆弛無力。其次，橡皮的應力——變曲線幾乎形成一條直線，而非一條向上彎曲的曲線，這樣的曲線造成的結果(正如同第五章所提到的)氣球便傾向於形成靜脈瘤，也就是一個各處膨脹不均勻的圓筒。此外，充氣將一股有潛在危險的彈性能量儲存起來，所以氣球一旦失靈，結果非常激烈。若是外壁選用不那麼易於延展的物質，情況或許會得以改善，但是真正實際、多用途浮空器和水壓調節器則有賴於複雜而多種成分組合的外壁，有時還包含了抗張力的纖維。這些纖維往往並不採用縱向或是繞著圓柱成環狀排列，而是以螺旋狀排列，如同圖七~十二中所示。

兩種科技同樣使用這種普遍的設計原則，但是方法有異，程度也有所不同。人類科技對它的使用相對於自然界非常有限，氣體往往就是它所選擇的流體，氣體支撐的建築，物即一例。雖然有時候我們也會以液體代替，比如可摺疊收縮的水龍和以纖維強化的儲放槽，大自然科技則廣泛地利用它，至於選擇的流體則可能是水或是某種肌肉、黏液。至於對於氣體的利用，可在自然界的浮游物中零星可見，例如惡名昭彰的僧帽水母。

傳統的齊柏林飛船具有硬式骨架和內在氣袋，現代飛船則是真正的浮空器，以內在的氦氣做為外在張力皮層的相對性壓縮結構。走進一個充氣式的建築物，當你經過前廳的時候——這是一個真正的有頂通路——或許會感覺幾許怪異，但是只要一進入建物內部，你就不會感受到任何增加的內在壓力。所有汽車的充氣式橡皮輪胎使用的也是同樣的原理，只不過規模較小、壓力較大。但是，上述這些應用沒有一個設計是既普遍又大型的。至於水壓調節器則更為少見，除了剛才提到的水龍和儲放槽之外，一些運載液體貨物的接駁船也是以張力袋的形式建成，就好比外覆一層巨形火箭的外皮內載著流體式的發射燃料一般。

自然界少有以空氣填充膨脹的例子，但是她在利用水充滿的水壓調節器方面，卻在外觀上、功能上都各具特色、令人驚嘆。除了前述提到的例子之外上它們尚可提供海星及海膽細小管足的主要硬度支撐。游泳行進中的鯊魚藉著它們來增加骨骼的硬度：它們所造成的高壓水力也是烏賊噴射推進系統造成噴射前進的原因。若是想要了解這個系統如何作用，我們就必須審視一下圓柱形水壓調節器，看看它的體積是如何因長度的改變而異(見圖七~十三)。在這圖形中，我們看到兩個極端。其中的一個極端是當圓柱被擠壓成一個扁扁的圓餅時，其纖維排列在這個圓餅的四周，另外一個極端則變成扁平的直線狀，其纖維採取縱向排列。最大可能體積幾乎是出現在圖形中兩個極端的中點，此時強化的纖維幾乎都是以五十五度角排列成螺旋狀，也就是圓周排列的傾向稍稍大過縱向排列之時。圓柱處於這種角度的纖維排列時，內在壓力的增加會導致體積增大的機會最小，圓柱體變肥變長的傾向也同樣較小。這一個特定的角度，正代表著自然界在使用水壓調節器之時，兩種不同方式的分水嶺。

讓我們來看看烏賊如何噴出噴射水流。烏賊身上覆蓋著一層外膜它的肌肉沿著腹帶圍繞排列，並具備許多螺旋狀的纖維，其排列方式較偏於縱向，多過於四周圍繞排列。收縮這些肌肉，會使外膜變長(就像是當你擠壓一個陶土或麵糰製成的圓筒一樣)，而纖維的走向就更接近縱直，整個體系就會

更靠近圖的右方，體積也越加縮減。此時水根本不需要壓縮便能噴出一道噴射水流，不到片刻工夫，烏賊就已經身處異地了。

另外再讓我們考慮一種擅長穿洞鑿穴的軟式蠕蟲，假設它是一種相當簡單、不分節的蠕蟲，外皮上的纖維幾乎完全是以圍繞四周的方式排列。若是收縮縱向肌肉，或許會使蠕蟲變肥，但如此一來上它的纖維更加傾向環狀，使它往圖的左方靠近，體積也同時縮小。因為蠕蟲是一種密閉式系統，因此肌肉的收縮便會大幅地提高它的內在壓力，使其身體變硬，進而便利它的掘洞過程。如果收縮身體某一側的肌肉，就會使它因受壓而彎曲，所以蠕蟲因為巧妙地操作它的水壓調節器，使身體得以行動。對於蠕蟲來說上可是一件好事，但是對於我們人類而言，卻不見得有多美妙；這不正好說明了某些寄生蟲是如何的在我們的肉體中橫行無阻呢！

這種機械理論的另外一種應用，則並不牽涉以抗壓縮力的水、血液及腸管做為被動式核心的結構，相反地，卻全程使用主動的肌肉來操控。肌肉，理所當然地能夠縮短，是故所有的肌肉結構都需要藉著某種方式來伸張|不管是在一開始或是在每次重新開始，等待下一個拉張的時候。如果一個圓筒體積是不變的常數，那麼縮小它的直徑將會使它體形變長這就是我們的舌頭、手臂、烏賊和章魚的觸手，甚至包括大象的鼻子如何得以伸長的原因。這些「肌肉式的水壓調節器」用途極為廣泛。肌肉做出不同的安排可以使整個圓柱慢慢地伸出，強而有力擴展一段短短的距離(比如大象的鼻子)，也可以相當快速地伸展較長的距離，相形之下力道也較為削弱(比如烏賊的觸手)。關於這點，我們將留待討論槓桿作用時再做更明確的說明。本章所著重之點，只是在於一般的原則主旨；也就是說，一個支架要達成目的，抵抗壓縮力，並不是非固體物質不可。

有關於浮空器和水壓調節器，我們還有最後兩個問題。第一個問題，為何自然界唯獨對水中世界竭心盡力、極具創意地使用水壓調節設計做為支撐？為何自然界鮮少將之使用在陸地上？雖然水壓調節器的設計絕對少不了水的存

在，但是陸棲的生物並不缺乏這些。我們的舌頭、陰莖，某些植物的細胞、葉莖及其他例子，與蠕蟲的數個門、或是蝸牛、海星的腳、頭足動物的觸手以及鯊魚等，毫無任何相似之處。所以我懷疑，而且這個懷疑可能與人類對這個機械結構的使用有關，其中的重要關鍵在於地心引力。撇開陰莖一例不談，水壓調節器無法達成絕對的硬度，對於這個重力支配一切且生物體需直立於地面之上的世界來說，構成一個極為嚴重的缺憾。譬如說，樹幹和動物的長骨頭，在樹木和哺乳動物必須保持直立的前提下，便必須維持不曲。

第二個問題，是關於自然界裡某種奇特的疏漏：她從未製造過飛船——就是輕於空氣的飛行器。要知道，靠著較空氣為重的飛行代價並不便宜，而傳播的功能在自然界的事物設計上又極其重要，所以一個輕於空氣的飛行器對於完全被動式的傳播，想必是再適合不過了。那麼是否製造氫氣，超乎自然的能力？不然也——每一個綠色植物中的光合作用不正是始於水分子分解氫和氧？我們身體內的每一個細胞不就是在它重新輸送所儲存的化學能量時，不停地從脂肪或碳水化合物中除去氫？我的最佳猜測雖然缺乏重大的說服力，還是訴諸於尺寸大小。自然界一切自(小)開始，或許她發現一個小小的飛行船種子或果實難以實現、用途不大。為了保持物體的浮力，它的外壁厚度不能超過其直徑的某種比例，所以一艘小小的飛行船必須擁有非常細薄的外壁，這樣的限制往往提高了氣體滲透的困難度，其機械整體性也不易達成。

本書使用自然科技的作法來提供對我們自己科技的一種透視。如果能夠超越科學家的分析，採取工程師式的綜合處理，將會更有助於這種透視看法的獲得。好比是做一道綜合的創意習題，你可以自行設計(在紙上)一種另類科技人它的設計基礎是基於繩索、水壓調節器和其他張力結構。你也可以設想一個文化，它的固體物質只能抵抗張力，不能抵抗壓縮力；或是另一個文化，處於一個只有流體，不管是氣體或是液體，才能抵抗壓縮力的世界中？在這樣的世界裡，一座建築物、一部交通工具、一張家具，以及其他種種的日常

事物、器械，會有什麼樣的外觀和功能？

## 第八章 機械世界的引擎

到目前為止，我們所討論的主要題目仍然限於靜態系統——著重於各式建築物、橋樑的幾何面、物質面和結構面，以及它們在有機世界的對等物。本章開始，我們的目標將轉向動力系統，也就是操作結構各部分以達成活動目的的系统。不管牽涉的對象是生物與否，共同的基本原則應該仍然適用，但是我們將會再一次看到，它們各自的實際應用有著顯著的差異存在。

製作活動的器械裝置要素不過兩、三種。要素之一，系統必須有能量的輸入。自然科技和人為科技顯然本身都無法真正製造任何能量，而是想盡各種辦法自外在資源取得能量。容我們將普通的定義稍做修改，這個「引擎」一詞，便是對所有以非機械性能量輸入機械系統之設計裝置的通稱。這些引擎使用不同形式的能量，例如熱與電，達成推擠、拉張、膨脹、縮小、彎曲、轉動或滑動的目的。要素之二，機械能量必須被運用於某一種特定的任務上，比如奔馳、碾磨穀粉或是搜集黃金。另外一個名詞，我們也可以

強加解釋，將所有必要的連接器，包括自最簡單的銅索、軸心以至極複雜的滑輪、齒輪，都稱做「傳動器」。第三個要素——至少發生在某些時候，機械能量在被引擎產生之後與真正被用來推動某物之前，需要暫時的儲存。能量的供給有可能以脈衝的形式出現(好比引擎汽缸不同時段的點火)，它的工作或許是間歇式的(好比前後來回的鋸子)，或許這能量需要以一股較集中的方式發生(就像是慢慢蓄積動量的釘鎚忽然之間出擊鐵釘一樣)。無論如何，我們將這種能量的蓄積器通稱為蓄電池。本章的論述重點便在於引擎，然後再談到傳動器及蓄電池。

兩種科技使用能量的目的並不僅限於移動物體:有的為了生物的成長、為了有效的化學合成、或者加熱身體及建築物，也有的是為了達成神經或是電線之間的傳達目的。所有

天地的開始、創世大爆炸的存留，便讓太陽成為幾乎所有能量的首要來源。生命系統經過植物和細菌的光合作用得到它所提供的能量，人類科技的能量來源也是出自同樣的過程，只不過我們更偏愛陳年老朽的產品——化石燃料。兩種科技都少量地使用大氣和水力，其實最終也不過是取得太陽能的另外一個途徑而已。此外，人類還可以從核子反應獲取一些額外的能量以及非常非常少量的地熱能源，但是這些都不是自然界的主要能量來源。最後，我們還徵用了自然界本身的發動機——人類以及家畜的肌肉。圖八~一是以圖表來說明所有這些能量的轉移。在這裡它至少指出兩點；光合作用在兩種科技中的核心位置，以及人類使用這些能量過程的多樣化。

一段題外話：如果想要清楚地表達我們即將要討論的運動性，那麼以科學意義註解一些額外的名詞是絕對需要的，所以我們在這裡談到：

## 功

物體雖然抗拒移動，卻仍然被推動了一段距離，這便是功的達成。以量來計，功便等於所用的力乘上物體移動的距離。如果你將一個十磅重的某物拉起一呎高，所達成的便是十呎/磅的功，你所面對的阻力便是地球和重物之間的引力。將五磅重的重物舉起兩呎，花費的是同樣份量的功，不管這舉起是以何種方式達成。所以無論是使用槓桿、滑輪或絞盤，你若是運用僅僅一磅的力道將你的設備一端舉起十呎，達成的功仍然一樣。唯一重要的，是力量乘上距離，而且兩者的方向必須相同。槓桿、滑輪及絞盤，都不過是傳動器的使用。

## 能量

這是一項神祕東西。但是標準的遁辭：「作功的能力」應該可以解釋我們現在的目的。在此處重點有二：第一，所謂的能量和功有時幾乎指的是同一件事，而且我們以標著同樣單位：呎/磅、卡路里，或是(以正式科學的用法)焦耳來衡量它們。第二，能量的觀念允許我們聲明這個物理世界的一些

通則。通則之一為守恆定律：即在任何真正的過程中，能量既不創造，也不能消滅，最多只是形式之間的轉換而已。當我們說一個能量被用去，我們真正的意思是指能量從一個潛在有用的形式(電池裡的蓄電或是水壩後的高水位)轉化為一個用途較低的形式(特別是指熱能)。守恆定律對人類的貢獻如此大，以致我們值得發明一種計量的方式來衡量表達這能量。

## 功率

簡單的解釋，便是使用能量或作功的快慢程度——以能量或功除以時間而得。我們以馬力、或每秒多少呎/磅、或(正式的)瓦特做為它的計量標準。直接的解釋是，一個引擎的輸出功率即是它完成機械功所需要的時間。功率越高的引擎，完成工作所需的時間越短。越大馬達帶動的電梯，以越短的時間載你上樓。功率還可以用另一個方式來看待：力乘以距離再除以時間等於力乘上速度。所以就如同一定數量的功能夠以任何不同力與距離的組合達成一樣，一定數量的功率便可以消耗在任何不同組合的力與速度上。物體需要在水中游泳或是天上飛行，便必須留心這最後的交換代價。吾人可將飛機的燃料消耗在巨大而又慢速的螺旋槳上，亦可以花在小而快速旋轉的噴射引擎上。

## 效率

即使這個觀念牽涉並不複雜，我們還是必須小心準確地使用它。效率等於你從某種裝置中得回的功効除以放進去的能量，所以電梯的效率，便是以電梯的重量乘以它升高的高度，再除以它的馬達所耗損的能量而得。如果用功或者能量做為交換媒介（能量效率），那麼剛才提到的守恆定律將會限制這個效率筒數不超過一。你是無法達到一個超過一、或是百分之一百的效率的。所以簡言之，不播種，那來收穫？或者更簡短一點地形容，便是天下沒有白吃的午餐。真實世界中，我們所有機械裝置的效率都低於百分之百，這意謂著某些能量的最終結果將對你毫無用處。若是快步跑路，你就會發熱；而你的汽車引擎，竟然還要一個冷卻器才能處理散放



的熱氣。

所以一個引擎的主要評價標準盍范在於它的功率輸出(或相對於重量的功率)。另外一個相關點，雖然或許楣關性不高，是在於當它運轉速度改變時，引擎的功率輸出會歇如何的調整。舉例來說，許多電動馬達都只能在某一種非常狹小的速度範圍內，才能達到具有相當效率的輸出。自動汽車的引擎速率雖然並不那麼重要，但仍然受到多方限制，以致引擎需要極為複雜和昂貴的傳動器。老式的蒸汽引擎在這方面則較為寬容，蒸汽帶動的汽車和火車都將引擎直接連在它們的車輪上。

## 引擎大觀

對於自然與人類科技而言目，引擎的重要性有時舉足輕重，有時則扮演次要角色。對於現代人類而言，首席演員——或者可以說主要引擎——即為熱能的引擎，這包括所有燃燒燃料以產生蒸汽、或是直接帶動活塞或渦輪的內燃機、外燃機——這些幾乎已經囊括所有我們用來推動汽車、輪船和飛機的發動機。核能動力是藉著熱的傳達來作功，是故也應該包括在內。一個核能電廠即是利用反應器所產生的熱能來製造蒸汽，以發揮與一個燃煤電廠所產蒸汽同樣的功用。我們的另一個演員陣容尚包括電動馬達，雖然我們的電力並非取自環境，是故這種電動發動機與熱能式的發動機並無類似之處它們經常與系統式的發電機一起搭配合作，將電力從發電廠一路送至家中的廚房。在十九世紀蒸汽帶動的工廠中上它們借由單單一個共通水車的力量驅動所有的機器，其角色就如同工廠頂頭的排氣口和升降帶一樣重要。除了上述提到的熱能式引擎以及電動發電機之淋，其他方式的引擎尚可以組成長長一張名單，只是一般說來它們整體的貢獻都不大:包括水力發電廠、風車、潮力發電所及其他等等。

對於人類本身的歷史而言，主要引擎非肌肉莫屬——首先是人類的肌肉，然後逐漸開始借助別種動物的肌肉。為了達到使用的目的，動物需要被馴養並加以訓練，使它們的能量得以利用，幫助我們耕種、拖曳或完成任何我們指定的工作。利用能量——尤其是傳送——早在中古時代之前便已有

所聞。水力——好比水車——傳統世界裡尚占有一席之地，真正風力的廣泛利用，除了帆船的例子之外，都是屬於較近代的事。到了中古世紀，風車和水車都已經相當地普遍。亞歷山卓(Alexandria)的英雄在紀元第一世紀發明了類似的蒸汽引擎，但是其設計在實際應用上卻並不順利，這一點等到我們更明確地討論到噴氣引擎時，便自然會更加清楚。所以我們的主要引擎都是近代的應用，實用的熱能式引擎在十八世紀出現，而電動馬達一直到一個世紀之前才受到廣泛的利用。

自然界發動機基本種類的變化並不會更多，吾人最熟悉的便是早先提到的肌肉，相等於一個典型哺乳類動物全部體重的百分之四十。我們也使用自動的纖毛，一種極微小的汽缸，可以運用自如地彎曲，以達成類似推進精蟲及移動呼吸系統黏液的目的。動物中不管大小，都普遍地使用這種纖毛來達成運動、輸送及其他的目的(奇妙的是，這種纖毛系統在整個節肢蟲物中，不管是昆蟲、甲殼動物、蜘蛛綱的節肢動物，或是蜈蚣等等，都不曾見到它的存在。讀者諸君是否記得在前面第二章中，我們曾經提到每種族群所受到的各種限制)。除了這些看似比較快速顯著的引擎之外，如果我們願意稍微放棄一點以動物為中心的速度感，使得植物也能得到足夠的觀照的話，一些較慢、較不足道的引擎也可以微微露出一點頭角:好比玉米植物或樹木，終其一身從土壤中不知汲取了比它們本身重量多多少倍的水分輸送到樹葉裡。除此之外，少數的引擎能夠直接從流動的空氣中、水中獲取能量，以不同的方式行使類似風車和水車的功能。

若是以功率和質量的相對值來做為優劣的權衡標準，那麼即使是大自然的最佳引擎，其功效也不過與人類科技中最低層次的引擎齊觀。以這種標準來看，現代的熱能式引擎才是真正的優良出色。表八之一中列出一系列生物和非生物引擎，每單位質量(每公斤或每磅)的功率輸出(瓦特或馬力)——類似這種的比較，過去鮮少有人考慮過。

## 燃燒引擎

雖然難逃過度簡化的嫌疑，但是我們仍將熱能式——即

燃燒氧化——的引擎概略分為兩類。燃燒可來自外在，其能量由加熱器以某種流體方式運載至引擎的推進器，好比所有的蒸汽引擎，不管是活塞帶動式的火車頭或是現代的蒸汽渦輪。燃燒也可能發生在內部，比如我們的自動汽車，以汽缸中的燃料燃燒產生壓力來推動活塞。它的運轉可能是間歇和交替式的，好比活塞的一來一回；或者也可能是連續而循環式的，好比所有的渦輪引擎，這包括電廠的蒸汽廣射式引擎以及內燃式的噴射式引擎。

熱能式引擎是人類科技中一項獨特的發明，而且在它的發展過程中遭遇到重重的障礙困難，沒有自然界的類似先例可以提供任何設計上的提示，對整個基礎技術的掌握了解又進展得極慢，再加上冶金術和製造術的限制，長久以來更排除了在高溫中維持規律操作的可能

最初的實用燃燒引擎大概與吾人猜測的形式相差無幾。十八世紀時最為流行的鈕克曼(Thomas Newcomen)式採礦幫浦（見圖八~二），即為一種外燃式的活塞引擎，使用大氣壓力下的蒸汽來做為工作流體。活塞的運作並非因為汽缸內蒸汽的膨脹，而是藉著一道噴水降低氣室的溫度，造成蒸汽的壓縮，此時活塞另外一側的大氣壓力便得以推動整個機械活動。如此說來，便不需要過度的高溫、良好的抗壓裝置，以及小心組合的機軸，這樣的機械引擎所需的科技配合不高。相反地，如果壓差太低(一個大氣壓力即是最極端情形)，則要產生高功率勢必需要巨大的活塞，但是此時汽缸壁上發生許多不經濟的加溫和冷卻，其效率卻保證無法提高。雖然如此，如此巨大、緩慢的機器仍然為我們提供了良好的服務，當燃料供應無缺時，它們由煤礦中將水汲出，貢獻卓著。

十九世紀的蒸汽引擎則功能較佳，不論是在重量方面或是燃料的耗損方面，其效率都足以推動自身和四周環境的負重——至少是在某一種溫和程度上處理得順順當當。大約在十八世紀末期，瓦特(James Watt)充分利用改良金屬和進步的機械加工，使得蒸汽能夠直接推動活塞，取代原來以汽缸內蒸汽受到壓縮造成外界大氣壓力往內施壓的方法。瓦特的引擎在各方面的功能都較原來為優。一組蒸汽輸入可以自兩個

不同的方向推動活塞，注入的水流可利用剩餘熱事先加熱，汽缸能因為壓縮外界蒸汽而保持高溫，而且活塞推動轉輪，取代以前搖擺的機器手臂。其贅.瓦特和他的同儕早已構想出蒸汽渦輪的雛形——畢竟，其設計原則基本上與風車、水車如出一轍|但是因為這種引擎架構需要的精確度，以及產生高速運轉所需要的傳動機，所以使得蒸汽渦輪機的真正實現要等到本世紀初才得以達成。

至於內燃機的故事情節也大同小異，只不過時間上需要挪前或移後五十年到百餘年。十九世紀末期，活塞式引擎大為普及，渦輪的流行則始於二十世紀中葉左右。我們在此需要再度強調、這整個人為科技與自然界機械事物的類同不啻是奇珍至寶，唯一的相似處，在於兩種科技的燃料都是從有機體生物合成作用產生的碳氫化合物。人類科技使用的金屬、高溫高壓下的氣體、早期引擎的巨大體積、現代引擎的高速運轉，包括活塞、機軸以及整速輪等——自然界裡全然缺乏它們相近的類比物。即使是熱能引擎的基本操作形式也屬於非自然式的，這些引擎不是藉著推擠(將鈕克曼的大氣引擎定義稍稍地延伸)，就是靠旋轉來推動。

為何自然界從不使用類似熱能的引擎呢?這是因為控制熱能引擎的最基本原則對於這個星球上的生物來說，完全像是外星球文化。而為何熱能式引擎對自然界如此地陌生呢?一個熱能式引擎需要的不只是高溫，還有溫度的上下差異——即同時需要一個熱源以及一個冷卻槽，能量即沿著如此溫度的下降坡度流動，好比熱咖啡在空氣中冷卻或是冰塊在溫水中溶化一般。這溫度的差異大小為一個熱能式引擎的優劣設定了它絕對的極限，其基本原則非常簡單，但是它確實要求我們使用一個能夠達到真正零度的溫度標準——最可能低溫的冷度。要將攝氏溫度轉換成這種真正零度的溫度標準僅需加二七三度，若是轉換華氏，則需加上四五九度。以這種溫度標準來計算，則最高的效率等於冷卻槽的溫度除以熱源的溫度，再用一減去結果便可得。(乘止一百便是其效率百分比)。所以只有在冷卻槽溫度降到不可能實現的攝氏負二七三度或是華氏負四五九度，或是熱源溫度達到無限大的

極溫時，才可能達到百分之一百的效率（一〇〇或百分之百）。對於一個蒸汽引擎而言，輸入的蒸汽越熱，釋放的蒸汽越冷，則功效越佳，這個理論關係著所有熱力學的效率。

試比較一下我們人類的科技與自然界的所做所為。我們輕易地使用高達攝氏一千度（華氏一千八百度）的熱源，以及含有攝氏一百度（華氏一二一二度）沸水的冷卻槽，所得的熱力效率是七十一個百分比——算是不差的功效。自然界所使用的熱源約在攝氏四十度（華氏一〇四度）左右，冷卻槽可以低至攝氏零度（二七三度 K），這就相當於任何活動生物可容忍的最大溫度範圍。這樣子算起來，她的引擎效率只有十三個百分比不到，再減去容易讓人理解的十個百分比差異，理想的效率則掉至悲慘的三個百分比。而根據這種理論計算出來的最高熱效率，往往還要超過實際設計的真正效率。

自然界下使用熱能式引擎的事實，附帶地傳達了一個幾乎每一名工程師都熟悉，而其餘的我們卻毫無所知的訊息。或許我們可以利用湖泊海洋表層和深處的溫度差異，來開發一片無可限量的優良能量來源？的確，能量是存在的，是可供我們採用的；不管怎樣，溫差的存在是無庸置疑的。從能量守恆的原則來看，吾人可輕易地算出在那裡的能量龐大的末可限量，但其結果卻也可能錯得離譜。關鍵的考慮因素，在於小小的溫差需要付出多少熱力的代價？恐怕連運轉一個抽水幫浦所耗損的能量都要大過從這種基礎來源獲得的能量。

## 電動引擎和發電機

人類現代科技的另一個主要引擎即為電動馬達，實際的版本小自幾分之一吋的微裝置，大至重達好幾噸、驅動大輪船推進器的電動馬達它們可以完成各式各樣的工作，效率既高，性能也可靠。就拿我那個不怎麼特別高科技的住屋來說，它就擁有超過六十種的小型電動馬達。你可以自己算算看，包括容易使人忽略的電扇、壓縮機、冰箱的解凍計時器等：你會訝異地發現，一個居所竟然可以快快樂樂地藏匿著這麼多的電動馬達。電動馬達比起燃燒式引擎，效率較高，而且運轉時不會太過高熱，但是它們的高效率也極容易誤導我們（早先已略有所述）。大部分的電動馬達只不過是大型熱能

式引擎的輸出裝置而已，就像是大型主機電腦的多種傻瓜終端機一樣。在一般的發電廠中，熱能式引擎當然是屬於化石燃料及核能轉換器的天下(在電力的供給製造中，水力和風力發電實在貢獻不大)。所以，我們討論效率應該考慮整體性的效率，從燃料的取得、機械功率的輸出，還要包括發電廠中及傳動線上的實際耗損。關於這點，我們不久會再細述。

我們此處的目光再度放在人為科技的引擎上。電，在生物體內是一個非常尋常的現象，比如說，每一個細胞都有電荷經過它外側的細胞膜，大概是不到十分之一瓦特的電力。沒有多少細胞排列串聯可以產生相當的電力，即使是將它們並聯也無法傳送出一股重大的電流。只有少數的放電魚類將它們的肌肉改裝成串聯和並聯的電路排列，傳送出的電流，據報導可高達六五〇瓦特，簡直令人絕倒。雖然這只是少數魚類的選擇行為，但是它也足以證明，要產生大量的電力，並不需要對正常的肌肉組織或新陳代謝作用做大幅度的修正。我們的肌肉，甚至包括我們的心臟，或許是受到電的操控，但它們絕非被電所驅動。

為何自然界不製造電動馬達呢？是否她們的馬達也要使用同樣不自然的輪子、輪軸，致力於同樣不自然的旋轉活動？也許不然。雖然吾人所熟悉的電動馬達全是靠著旋轉來帶動，但是旋轉作用只能適台容易取得輪子和輪軸的科技，和喜好多種皮帶和齒輪的科技。每一種旋轉式電動馬達都自有其線性或往復式的對等物。線性引擎為了驅動火車而發展，連軌道也形成馬達的一部分。重複來回短擊的拔出器、螺線管，則在我們的洗衣機內執行開關進水管、排水管的任務；接上電源，一個金屬核心便開始在線圈裡激烈地運動。最早期電動馬達的發明家，在美國有亨利(Joseph Henry)，在英國有維特史東(Charles Wheatstone)，不約而同在十九世紀上半設計了往復式電動馬達，可以採用類似鈕克曼蒸汽引擎一樣的方式來帶動幫浦。家居生活裡，以金屬片來回快速振動而造成的馬達時常帶動我們的電鬍刀、按摩器以及往復式的打磨機。

生物界產生電動馬達的最可能障礙，還是元件間線路的

愚蠢問題。正如兩章之前所述，良好的導電性少不了金屬，憑藉鹽分的細胞解決方法，甚至連邊也搭不上。舉例來說，一種含氯化鉀(每公升含七十一克，就是所謂的一摩爾溶液)的濃溶液，是種特殊為導電而調理的溶液，但是比起銅來說，導電性仍然低了九百萬倍。若是要達到同樣的功效，一根僅僅十分之一公釐寬的銅絲線換成一管氯化鉀的話，需要足足一尺寬的直徑才夠。在真正自然界的全套裝備中，找不到任何一件物質能夠勉強適台用來將發動機的動力帶到轉片，電動馬達只有在使用金屬的科技中才能發揮主要的實際用途。神經肌肉系統使用電的特殊方式，不知是因為適應，還是受限於它們的低傳導性(讀者可二選一)。神經的電流只能傳導極短的距離，長距離的信息傳導則完全要憑藉一個奇特的機制;在這個機制中，局部的電力事件在它的毗鄰處激發同樣的電力事件——這就像是海洋裡的波浪，在沒有移動海水多遠的前提下，一波又一波地傳送。

電力受人青睞的原因，是因它方便隨時可以成為一種可傳輸的中間形式的能量。我們在一地發電，然後可將電力(為了減低電力耗損)以好幾十萬的電壓傳送遠遠一段距離。為了安全及便利起見，我們在使用處附近又重新將這高壓電轉換成低壓電(主要是二四〇和二一〇伏特)。脊椎動物在推動肌肉時，其實也做著同樣的事情，雖然我們的作法是屬於化學性的，而非電力的。我們將分解碳水化合物所獲得的糖透過一套特別的血管輸送至肝，在那裡儲存(以一種聚台物的形式——肝糖)，再將它計量發放到其餘的循環裡。在肌肉的細胞裡，糖類引發了更進一步立即有用的能量轉換:糖分解成為乳酸(緊急時的處置)或是二氧化碳與水分(在氧供應充足時之正常代謝)，同時將腺甘二磷酸(ADP)轉換為腺甘三磷酸(ATP)，最後產生的腺甘三磷酸便成為肌肉引擎的真正燃料。在肌肉裡發生的這種糖分解到 ATP 合成作用的聯結，與變壓器中高壓電力轉換成低壓電力的作用，如出一轍。

## 風力和水力

首先，我們必須提醒自己，要產生動力，並非只要具有能夠運轉的空氣或水即可。裝置在自由沉浮的氣球上的風車



並不會轉動，氣球隨著風飄動，全然沒有地面運動的幫忙。對於一個風車而言，它的立足點固定在地上，與它的葉片在空中旋轉是同等的重要。拮取動力需要產生動力的裝置經歷兩種不同的速度，對於風車而言，是空氣和地面之相對速度：對於水車，是水和地面之相對速度：對於一個拖著水中渦輪的氣球，則是水和空氣之相對速度。二這個要求正好與電池需要兩極、發電水壩兩側的水位需要有高低不同，與熱能引擎需要有熱源和冷卻槽一般，具有同樣的理論基礎。我們奉行的法則，在兩種科技都有義不容辭的履行義務。

最典型的水力推動引擎——水車有幾種不同的應用，我們可在圖八~三中看到。上射式的水車，水源沖過頂部，水的重量(重力的能量)將一側往下拉。下射式的水車，則是靠水的流動(運動能量)推動底部的水車葉片。如果水由中間引進，則同時利用兩種能量，是為胸射式的水車，另外一種較不常見的水車，水流由上往下落灌注到這個水車的傾斜葉片上。這些水車，不管是那一種應用，效率都不高，而且它們被各種不同的渦輪機取代至少也有一個世紀之久。這渦輪機，就是水力發電廠的管道系統裡隱藏著的快速旋轉葉片。舊式穀類磨坊和鋸木廠所用的小型水力發動機，早因電力和電動馬達的普及便利，以及麵粉、木材的大規模製造，而被廢棄不用了。

最典型的風力推動的引擎則是風車，我們在圖八~四可以看到好幾種較具代表性的設計。風車比水車屬於更近代的設備，原因正好與內燃機追隨外燃機的脚步相同，因為它們所面臨的技術問題更複雜、更具挑戰性。為了要產生較高的功效，風車就必須有極大的葉片，但是葉片一大又抵不住強風暴雨。大氣中的風速改變，遠較水壩裡儲存的水壓變化大得多，早期設計的基本結構也較為嚴格：水車不須全部浸在水中，但是風車就必須整體暴露在空氣中才能產生功效。

所有的風車其機械設計都不外乎有二。最舊式的一種使用垂直的軸心，並在水平面上旋轉上它們就像是旋轉杯式的氣流計一般，隨著任何方向的風力旋轉。但是，旋轉的發生主要是取決於面風時阻力較高的葉片，而非背風時，這種方



式無疑便成了低效率的保證書。至於較近期的發展，薩伏紐斯轉子(Savonius rotor)則因為它是由金屬圓筒直向切片而成，曾蔚成短短一陣子反傳統文化的風尚，但是絕大部分屬於近千年內的風車，都是使用水平軸心，帶有一組螺旋槳式的葉片沿著垂直面上旋轉。葉片要在全部循環內產生功效，整個風車便必須轉至向面風。從氣體力學上來說，揚力的產生，也就是與風向成直角的一種力量，才是推動風車的原因，而非憑藉著葉片面風、背風時兩者的阻力差異造成。而如何產生揚力，則是個難解的問題上它的物理原則也一直到了本世紀初才為人所了解(飛機對機翼和螺旋槳性能的要，當然是促成它的原動力)。果然不出所料，以氣體力學來講，舊式的風車被證明功能其差無比它的葉片和支架所遭受的阻力，相對於它所產生的動力，也高得超乎必要。

所有上述的水車、渦輪和風車一律都使用輪子和輪軸，所以其中沒有任何一項科技可以在自然界裡找得到類似物，而且以嚴格的機械觀來評判也確實是沒有可能。雖然如此，若是光光考慮能量的運用，類似體倒是存在的。有時自然界利用地面和空氣流動或水流的速度差異，以取得動力。我們所知的類似實例為數不少，而且布置巧妙也各有不同。

讓我們來思考一下圖八~五中的例子。一對埋在地下的U形管道兩端開口高低不同，若是有一陣風吹過這兩個開口，高處的開口通常便會招致較快的氣流：而根據伯努利定律(Bernoulli's principle)，氣流越快，氣壓就越低。而任何流體，不管是氣流或是液體，都會自然地從高壓流至低壓，所以在這個U形管道中，氣流是由低處的開口流向高處的開口，而與外在氣流吹動的方向無關。北美大草原上的犬鼠便是使用這種巧妙的裝置，來做為它們地洞深長多孔隙的通風設備。我在七〇年代初參與了這個現象的調查工作，當時我認為，這個通風裝置主要的目的是供給犬鼠氧氣，但是現在細想一下卻沒有那麼確定它們絕對有著比生存必需更好的理由。更好的理由是，這樣子經過地洞的氣流可以為動物提供地面上的氣味資訊，整個設計可說是一個嗅覺事件。同樣地，許多的蠕蟲和甲殼類動物以水分做為運動流體，也能夠使用類似

的裝置灌溉它們在淺水中、沙土下層的洞穴。

如果空氣或水流流經高度的變化，通常這氣流或水流會在峰頂流速最快，所以山脊處往往此山谷裡風力強勁得多。如果我們用管道或是多孔隙的媒介物(比如沙石)連接這山谷與峰脊，例如圖八~六所示，則此時裡面的氣流或水流便會從一處流動至另一處。我們再度看到，外在流體的方向無關緊要，伯努利定律仍是主導一切的物理基礎(當然需要加上一些輔助的效果)。在東非開闊草原上的巨型白蟻塚就是使用這第二種裝置，包含氧氣在內的空氣便藉著風的吸取得以通過白蟻窩。同樣地，靠著自海水中過濾微生物為生的海綿動物，也會利用它周圍的水流來減低滲透的成本，如此增加的收益往往就是它們在某些特殊環境裡賴以存活的因素。身上帶有狹長隙縫的沙錢，在它們所處的沙灣底成批地形成微微的突起地帶，所以當海流經過它們的時候，便將沙石間隙中食物微粒連帶著水流一起汲送到它們的狹長隙縫中。

圖八~七展示的是另一種更簡單的配置。一截管道，其中的一個開口面向逆流，而另外一個開口則與流體的方向交叉成十字形。這第三種裝置卻需要依靠其對準外在水流的方向。據我們所知，至少有一種昆蟲的幼蟲利用這種配置：有一些住在溪流中的石蠶蛾，在它棲息的下層土中築出特別的管子，並在管子上加裝捕網。除此之外，許多使用兩兩相連鼻孔的魚類將前面的鼻孔裝上足夠的罩蓋，使其能面向逆流。由於水往下流而魚往前進，兩者對水流的方向都不構成任何問題。

我們尚且知道一些少數的其他例子，是自然界利用經過固體表面的流體流動以獲取動力的設計。舉例來說，有些海鳥不斷重複地循著垂直方向繞著大圈，而完全不需拍動它們的翅膀，像這樣輪流交替地在高處、低處間滑翔，是利用上下高度的速度差異達成不消耗能量、而仍然能維持浮在高處的方法之一。關於這一點，我們有時也使用類似海綿動物和草原犬鼠同樣的技巧做成簡單建築的通風設備，例如印第安人的圓錐形帳篷及部分埋藏在地裡的土墩屋。礦坑的通風設備也經常借助可逆轉的風扇，以便利用任何被風力引發的氣

流。這樣的氣流將會發生在所有具備多重開口的坑道中，除了那些開口上的外在氣流是同等速度的坑道之外；因為這些開口在幾何上來說，完全一樣，而它們所在的地面也沒有任何的高低不平。

所有上述的例子，都是使用水流或氣流來帶動內在水分或空氣的流動。一個流動引發另一個流動，其間所需的轉換機械可以減至最低，但是無論這種現象在自然史裡扮演多麼有趣的角色，當它們比起自然界賴以獲取能量的光合作用，仍然是微不足道的。而且在上述的設計中，沒有一個方法可提供一種可儲存形式的能量，而這正是光合作用最重要的特性。

## 肌肉和纖毛

讀者諸君走讀至此或許心裡會有些疑惑，為何自然界總是以亞軍姿勢出現？雖然在某一種引擎上，自然界是別無分號，只此一家。在此我所引證的，是一種被稱為分子引擎的東西。人類科技的功效，在於大型事物使用各式各樣的手續，鑄造、壓模、切片、切丁及碾碎處理大塊的物質；在我們複雜的電子設備中，為了要讓微小的元件發生威力而又不讓體積變成機能不良的巨大，可真是讓人類歷經了不少艱苦。但是自然界卻正好相反；她的一切都是超微的，即使是稍大的系統都是次微科技最低限度的整合。若是我們允許優劣判斷的話，那麼分子引擎就是顯示自然界最卓越、最獨特一面的代表了。其中的兩個代表——肌肉及纖毛——就是她最快速運動的驅動者了。

好幾個固定種類的纖毛(也可說是鞭毛，在這裡這些差異都不重要)出現在各種不同的動物和植物中；它們是細小毛髮狀的機器，藉著單個或集體排列的波動、拍打、或者是扭動來四處移動物體。有的突出於單獨的細胞(好比人類的精子)，有的突出於微小的生物體，推動它們一路前進；另外一些則沿著表面(例如蛤貝的鰓)或是導管排列，作用好比幫浦和濾網，在我們的輸卵管內上它們將卵子推至子宮。它們所使用的化學能量與肌肉所使用的相同，都是腺苷三磷酸。讀者可在圖八~八中看到一個簡化的纖毛結構，其中意義最重

大的，即是它們內在結構裡的兩種蛋白質。高分子蛋白之一，微管蛋白，組成九對縱向排列、兩兩成對的細管，另外一個高分子蛋白——動力蛋白，形成這九對細管上的一對對手臂。微管蛋白和動力蛋白彼此滑行藉以產生運動，動力蛋白的手臂周期性地自鄰近的微管蛋白上附著又分離。當只有纖毛的一側發生滑行時，就導致整體纖毛的彎曲。簡而言之，纖毛基本馬達的運動是靠著棘輪般漸進式的微調，這就好比一個人在淺灘中上岸，慢慢地以篙撐船而上。

肌肉，也使用同樣棘輪式轉動產生的化學動力，雖然它們看似有別於我們縮短手臂肌肉以舉起重物的情形。縮短的發生是由於肌肉的基本單纖維互相棘輪似的磨擦滑戰，以致它們越加地相間錯雜，這就好比交叉兩手手指彼此滑動一般(見圖八~九)。肌肉的基本運動方式或許與纖毛類似，但是相關的主要蛋白質——肌凝蛋白和肌動蛋白其演化卻異於微管蛋白和動力蛋白。事實上，就算沒有實質的縮短，肌肉也可以收緊上它們只要兩端產生拉力即可收緊，所以無論是以顯微鏡或是肉眼來看，我們用來形容肌肉功能的一詞『收縮』，其實稍有誤導之嫌。一塊肌肉能夠產生力量，但是這個力量對於是否要將兩端距離拉近、是否要將它的腹部變平坦，自然有它的選擇自由(取決於它所承受的負重)。

肌肉需要獲得能量以產生力，即使是當它們沒有縮短、沒有作功的時候也是如此，這種情形經常引起我們對『力』與『功』這兩個名辭的混淆不清，而唯有肌肉才具有如此與眾不同的特異性。水晶大吊燈的鎖鏈必須使用足夠的力量才能吊住吊燈它們從來沒有燃料的供給，也仍然年復一年地盡忠職守(說也奇怪，只有一種肌肉可以在不消耗任何多餘的能量下維持一個力量，這便是將蛤類兩片貝殼連結在一起的肌肉，我們在前面第二章中已有提到。但是它們的緩慢動作完全抵銷了便宜、穩定的拉力好處，或許也只有個性慢吞吞的蛤蜊才能忍耐這種步調)。肌肉比起人類科技的引擎，尚有另外一個小小的缺憾。劇烈的收縮是完全無法逆轉的，不但肌肉無法做劇烈的重新擴張，而且拉張它也無法得回化學能量。如果你去轉動電動馬達的軸心，就會得到電力，這時你

便產生了一個發電機:強迫活塞來回移動或是旋轉渦輪葉片，都會使它們成為幫浦;一個喇叭也可以被用來做麥克風。但是，你卻無法靠著下坡跑路來重拾能量，或是在你的運動自行車上加裝馬達驅動你的雙腿。

我們的肌肉至少有一方面行為與人類的內燃機類似，兩種引擎能夠產生的最大功率都得視動力持續的時間長短而定。飛機起飛、短暫的增壓器增強馬力(對輪入加壓)、或是汽車開動片刻忍耐起動馬達的高熱，都可以獲得較高的功效。在這方面，自然界的做法更佳，她的肌肉可以因應特定的使用期間而量身訂做。如果需要維持良好的持續輸出，肌肉便得犧牲一些收縮性的纖維(因此功率也受影響)，讓更多處理氧的代謝機器得到足夠的空間。所以鳥類或魚類的深色肉是側重持續輸出的肌肉，淺色肉則含較多的纖維，輸出功率較高，以劇烈的間歇式行為產生動力。若是擁有一大堆的白肉(顏色較淺的肌肉)，則保證百米短跑的成功;而紅肉產生的動力較小，但是卻可以在長跑項目中大放異彩。至於白肉、紅肉能夠發展多少的比例完全有賴於你的訓練計畫，達成高功率瞬間輸出所使用的策略或許一樣，但是他們所使用的方法卻截然不同。人類的熱能式引擎藉著添加燃料和氧化劑，增加它們的尖峰輸出。相對地，肌肉卻改變它使用燃料的方式，暫時雀卻氧化劑，並囤積乳酸(使人感覺頗不舒服)取代原來的二氧化碳。

有機物裡尚有一些其他類似肌肉的組織，比如所有非細菌性的細胞，都含有最基本的運動蛋白質，即肌凝蛋白和肌動蛋白二這兩個蛋白之間發生棘輪式的相互作用，似乎就推動了植物細胞內的物質移動，以及阿米巴變形蟲的運動行進。同樣地，當細胞分裂時，微管蛋白似乎就是推動染色體四處移動的參與者，雖然它們採用的方法或許與纖毛所使用的棘輪方式略有不同(我們發現，了解一個組織的蛋白質結構要比了解它們之間如何運作來得容易得多)。

有機物形形色色、多采多姿，但是它們由蛋白質組成的運動馬達卻不是這樣。自然界一開始發明了幾個版本，從此以後便忠實地固守不放。或許這也不是一件太讓人訝異的

事。酵素，自然界的化學機器，實際上全是蛋白質的組成，但是它們的化學作用全是藉機械的方式來完成：它們靠攫取、改造和釋放別的分子來完成工作。肌凝蛋白和動力蛋白兩者皆屬於酵素的一種，它們所執行的功用不是傳統的化學轉換，而是推動別的蛋白質，包括肌動蛋白和微管蛋白。

肌肉的運作與人類機械大相逕庭。這種差異使得生物醫學工程師在設計人類肌肉性器官的修補物時，遭遇到巨大的困難。譬如說，心臟比起腎或肝臟都還算是簡單的東西，可是它主要仍然由肌肉構成。我們可以模擬出上等的心瓣膜（有時以豬的心瓣膜來做替代仍然頗受歡迎），但是我們卻無法造出一個與原來器官完全一樣的替代物。

## 自然引擎

如早先所述，自然界除了纖毛、肌肉和一些其他的設計以其蛋白質互相棘輪式的運動來產生動力以外，尚有其他數種引擎是她的獨門祕笈。它們的動作緩慢，對於我們這種性急冒進的動物來說，似乎毫不顯眼，但是它們的威力卻無庸置疑。在人類科技中，也有它們的類似物，這些引擎最使人感興趣的一點是，它們竟然能夠不靠著可移動的固體部分達成功用。其中三種最常見的引擎如下：

● 一株普通的玉米植物平均一天自土壤裡汲取約四夸脫的水分。汲取即是功，所以玉米植物勢必有引擎，正如大部分的陸生植物一樣。它主要的引擎極簡單而又奇特：一個直接反應的太陽能蒸發式引擎。它的必要條件有三：第一，植物的管徑必須自樹根到樹葉連續不斷地充塞著水；第二，水分能夠自葉片蒸發到大氣中而不會有任何的空氣滲入；第三，植物的管徑有足夠的硬度不會倒塌，如此才能使蒸發喪失的水分不停地經過樹根、樹幹和樹枝，由土壤內上升的水分來補充替換。若能符合這三個條件，那麼一株玉米植物或一棵樹中絕大部分的水分就能靠著這來自頂頭的拉力上升。當然，蒸發作用消耗不少的太陽能：在室溫中蒸發一克水分甚至比熱水壺中沸騰一克水

分需要更多的能量。我們將會在後面的第十章中，再細述這個不需使用任何運動零件承受一百個大氣壓力(幾乎等於每吋一噸的壓力)、而仍能夠拉起物質的了不起機器。

● 絕大部分的碳水化合物(主要是澱粉)和蛋白質都有親水性上它們都會強烈地吸收水分。廚房中的玉米粉和膠質就是如此，所以我們使用它們來幫助物質變濃稠。將一塊澱粉或蛋白質(至少是許多種蛋白質)放入水中，它們就會無法抑制地脹大。如果水泥人行道底下的一粒乾燥種子得到水分上它的擴張也足以讓人行道裂開。種子的發芽培育就是利用這種引擎來破除它們的種皮，穿透所處的土壤二道 種所謂的吸漲作用在動物中也有一例:雄性蚊子將它的蛋白質爪筯與水結合，造成觸鬚上的茸毛突起，因此便能嗅得散發香氣的雌蚊所在地。

● 就像其他氣體和液體中的分子一樣，水分子會自然地擴散——也就是說，它們會漫無目的地四處蔓延、自我混淆。從它們這種隨意不經心的動作中推論出它們的作功，可以在下列的文字中得到解釋。如果某一處的水比它鄰近區域的水更濃縮，則水分會自稠密處往稀釋之處流動，而不會反向流動。原因非常簡單，純粹只是因為濃縮處的水分較多。我們如何利用它?假設我們將某種溶質，比如是鹽或糖，加入水中，使它稀釋，再將這個稀釋了的水放置於一個隔間中，這個隔間與另外一間充滿著純水的隔間是分開來的；兩個隔間中的屏障，我們使用一種只能容水通過的東西做成，如圖八~十所示。此時含有加了溶質稀釋水的那個隔間會因為進入的水分較離開的多而開始膨脹起來，雖然它的動作不快，但卻相當有力，儼然它的工作就好此另一個擴充機器。依據這種設計所產生的壓力，便是水母用來將它們的螫針(刺細胞)從

母體細胞中射出的動力來源。樹根從土中吸收水分，並將其抽打至樹莖中，也是這種設計的另一個版本。所有樹葉及植物其他部分的物質移動全然依賴軟式細胞(非剛性細胞)內的壓力變化，而壓力變化的產生原來只不過是調整細胞內的溶質濃度而已，其餘的工作便交給了擴散作用。

## 效率的比較

相對於重量的功率與相對於能量效率的功率同樣是衡量引擎優劣的標準，但是即使連合兩種標準，它們仍然不能概括全面:而且對於某些引擎，例如對早先談到的蒸發式引擎、吸漲式引擎以及滲透式引擎而言，上述的標準完全無法表明真象。雖然如此，能量效率仍然值得我們注意，就如同重量系統在圖八~一中所得到的重視一樣。對於電動引擎，吾人還要加以考慮發電機的效能：至於獲得燃料及處理燃料的成本，不管是藉著開礦或是由於消化作用，沒有一個引擎能夠輕易地定出價碼。再加上燃料的傳輸成本差異亦極為分歧，因此也無法計算出溫血動物(亦包括一些大型活動的魚類和飛行昆蟲)在溫度調節中使用多少的餘熱能，更別說在我們的建築物裡有多少的能量被拿來重新使用。了解了上述這些限制，我們才可以看一看幾個關於能量效率的數字統計。

活塞式引擎具有許多優點，但是它們的效率不彰。自動汽車引擎最高效率可達二十五個百分比，但是通常真正的運轉都遠較最佳輸出率為低。柴油引擎則較自動引擎稍佳，但是它們的效率也經常被我們使用它們的方法犧牲掉。至於蒸汽推動的活塞式引擎，它們的蒸汽在連續的汽缸中不斷擴張膨脹，效率也只能從一九〇〇年代的十七個百分比進展到現在的十九個百分比(瓦特的單階段式的引擎，只有二個百分比的效率)。

渦輪的效率較佳，因而取代了活塞式引擎成為發電廠、大輪船及大部分飛行器的引擎。一家燃煤的蒸汽發電廠或許可能達到四十個百分比的效率，核能推動的蒸汽發電廠(考慮安全因素，使用降溫的蒸汽)可以達到三十二個百分比，而汽



渦輪機(內燃式)則可達二十六個百分比。

試想一個由渦輪、發電機及馬達組成的電力系統，渦輪的效率相當於四十個百分比或以下，所以代表著龐大的能量損失。大型發電機的效率通常高於九十五個百分比，所以這個階段的能量損失不大。電動馬達的效率則差距頗大，可以從小型電扇馬達的二十個百分比到一百馬力的多向進氣馬達最佳狀況的九十個百分比。因此以整體的效率來說，只有最理想的系統效率才能超出三十個百分比。若是用水力發電，則功效較佳——水渦輪會將水洗的百分之九十龍量傳送給發電機——但是我們卻需要一偃隨時可用的良好水源，這個原因使得水力發電的好處無法彰顯普及。

至於肌肉的效率如何?以機能來說，肌肉實在了無活力，就算是忽略它們在運轉機器時所發生的耗損，效率也無法超過二十五個百分比，而且有時會更低。縮短的機械工並不算太差，但是它們在轉換能量時，也就是將糖變成腺甘三磷酸繼而成為肌凝蛋白的化學過程中，遭受大量的能量損失。而且肌肉的效率(正如同其他引擎一樣)與它操作速度有著極大的關聯，而這個速度又會因不同的肌肉、不同的動物、不同的時刻而產生極大的差異。所以論及效率，肌肉勢必是無法得到頭獎的；但是以另一個角度來看，它也不會釀成災難。

自然科技和人類科技在它們的個別設計過程中，都給予能量效率相當高的優先考慮。或許在自然科技中證據並不直接，但卻頗具說服力：那就是大部分有機物的結構面和行為面只有在能量被珍視的條件下才具有某種意義：至於人類科技，不管是對拖曳動物馬具的改善或是蒸汽引擎的歷史發展，我們都保存了完好的紀錄。這些引擎效率的相似處即使是出於偶然，也令人不禁好奇——無論是汽渦輪機、蒸汽或汽油推動的活塞引擎、電力系統或是肌肉，全部都在百分之二十及三十之間。如果要說有那一個科技稍稍地勝過一籌的話，那麼應該算是人類科技了。而且人類科技尚在不停地進步，而自然界卻無此機會。

除了所有的細節之外，對於這些引擎的優劣好壞，我們還有什麼任何遺漏之處嗎?熱能式引擎及擴張式、旋轉式引擎支配

了人類科技，恆溫式引擎和大部分靠縮短或剪切的引擎則支配了自然科技。一個科技傳輸的能量能夠經過極遠的距離，譬如電力或化學燃料；另一個科技只能傳送短距離的能量，而且它的電力只用在訊號傳輸上。人類科技在能量的效率方面或許只是險勝，但是我們在相對於重量的功率輸出上冠軍當之無愧：還有什麼引擎效能比得過我們的現代飛行器？

雖然如此，我們對於自然界這個卓越的引擎——肌肉——不禁仍要投上幾分艷羨的目光。一隻微小的昆蟲的個體肌肉或許重不到百萬分之一公克，而一隻大型鯨魚的肌肉卻可重達一百公斤/等於好幾百磅的重量：它們的質量是幾千億的差別，相當於十的十一次方倍，儘管是在兩個極端上，但是它們肌肉的功能也不因此而具有顯著的變質。兩種科技中，鮮少有任何其他引擎可以像肌肉這樣處理龐大的體積差異，而仍然如此從容不迫。

除此之外，肌肉尚可以供人食用。這並非是我尖酸刻薄的告別式。探險隊使用動物來做馱獸，有時卻也會行使取食它們的選擇權。劉易士和克拉克在美國大陸西北太平洋沿岸的探險任務中，曾經在山窮水盡時吃過馬肉，然後一個世紀後，阿蒙森(Roald Amundsen)在南極的探險隊按照預先計畫的進度，吃掉了他們的狗。諸位不妨對你們的內燃式引擎試試看。

## 第九章 讓引擎產生功用

單使引擎「有效」地運轉，並不能使之變成「有用」，惟有當它在執行指定工作時，方能產生功用。我們只有在偶然的機會裡，才能憑著一時的洞察力或是運氣將引擎結合於機器上，如馬達軸心承接在除草機、風扇及攪拌器的葉片上。通常機器都需要某種東西在馬達及能量輸出之間做為耦合比如傳動器。人類發明的機器通常需要傳動器，但是肌肉帶動的自然機器卻「永遠」需要它，這是因為人類的旋轉引擎至少可以在它們自己的動力帶動下，完成一個完整的循環運轉。肌肉卻無法如此，它們雖然以收縮來作功，但始終需要某些東西來使它回復原來的長度。所以在人類科技中，傳動器可說是無所不在，但是在自然界中，它更是屬於宇宙共通的。

對引擎而言，重要的因素計有：相對於耗損功率的產出功率、相對於重量的產出功率，以及速度改變時造成的功率差異。對於傳動器來講，唯一有關的功率，則是在仍然維持運轉的情況下它所能承受的最大功率，重量和效率都不是它所考慮的重點。然而，有兩件事與傳動器關係密切。第一是動力與距離之間的取舍(在固定作功的情況下(或動力與速度之間的平衡)在固定功率的情況下。發動汽車使其在低速檔內行走，表示當汽車在慢速開動時需要許多動力(用來加速)。然後你變換到高速檔，速度加快，而動力卻減少；同時，你的引擎只需要在較狹窄的範圍內運轉。第二是引擎與其他零件的匹配，也就是機械動力學，比如臀骨如何與大腿骨相聯結。適當的動力學設計，使得一上一下的活塞推動輪子旋轉，也使得電動馬達的轉子推動鋸刀來回。

在兩種科技中，傳動器的多樣性都要超過引擎，但是兩種科技各自擁有它的最愛，而且它們重疊的部分要比吾人猜測的少得多。事實上，兩種科技各自具備的傳動器，其對比之鮮明，一如引擎。造成這個差別的原因，部分是由於組成

分子的差異，部分是因為起動引擎的不同，另外一部分則是由於機器達成最後目的的有所不同。

## 槓桿作用

或許在所有的機械裝置中，沒有什麼能夠比槓桿更來得年代久遠了。它雖然構造簡單，但用途極廣，難怪它的發展史要比人類歷史還要早。加拉巴格群島(Galapagos Islands)的鳴雀會用尖嘴當針去取出樹皮中的蟲，而黑猩猩面臨土堆中的白蟻時，也必須利用槓桿來完成工作。槓桿是種十分強而有力的裝置，希臘物理學家阿基米德就曾經誇張地宣稱他可以用極大的槓桿，在某個支撐點上將地球移動。而如果不是因為槓桿，又如何能撬開瓶蓋、在罐頭上開口、上緊螺帽和開關燈光呢……？

一個槓桿的基本結構是由一根硬棒和三個著力點組成。一是支撐點，就是槓桿轉動的點。另一是負荷點，就是被作功物的接觸點。最後是施力點，就是我們施力的位置。槓桿有兩種完全相反的形式，如圖九~一。其中一種為施力放大器，其支撐點與施力點之間的距離，要大於支撐點與負荷點間的距離。另外一種，為力距或是速度放大器，其支撐點與施力點間距則小於支撐點與負荷點間距。至於有關速度的問題，我們將在後續幾頁中有所討論。

槓桿相當於最簡單的傳動器。它並未作功，所謂的作功，我們將之定義為施力與力距的相乘數。它只不過是改變引擎(肌肉或馬達)的某種施力與力距之混合比，使之成鑄更有效的施力與力距的混合比而已。槓桿的存在可以使個人能夠用較小的力量來制衡較大的負荷(如應用於撬桿)，也容許施力端移動的較小距離造成負荷移動的較大距離(比如我們揮動高爾夫球桿或棒球桿)。

在各式各樣利用施力來交換力距的裝置中，槓桿僅僅是其中最簡單的一種，而且帶有傳動的功用，這類裝置全部都是在施力放大與力距放大之間選擇其一。圖九~二就有數個人類科技中的應用例子；其一是絞盤，由不同大小的輪子聯結而成，上由繩子繞過；另一種稱為滑車，是由繩子繞經幾個滑輪組成，以及一種由輪帶帶動幾個大小不同滑輪的結構。

絞盤在結構和操作上都類似於槓桿；其他兩種雖然產生同樣的功能，但是結構都有所不同。左自然科技中，槓桿相當普遍，但是像滑車一類的槓桿類似物卻不多見。

在施力放大器及力距放大器的區分上，自然科技和人造器有著極有趣的差異。我們對於施力放大器具有強烈的偏好，讀者可在圖九~三中看到幾個例證。你的四肢大距離地擺動，卻不甚費力，這就是利用施力放大器來達到我們所謂的「槓桿作用」。在我們的廚房中瀏覽一下，你就會發現幾乎所有的手控工具都是施力放大器，唯一的力距放大器，可能就只有我們的沙拉分配勺了。它的把手短，前叉長，前端長著一對木鉗，可以將英式鬆糕從烤箱深處拾起。在我們工作臺的手工具箱中，有螺絲起子、撬桿、剪線鉗、金屬剪、活動扳手和鉗子等…全都是施力放大器。在園藝工具中，唯一的力距放大器就是修剪草的剪子，用來修剪那些太靠近屏障而剪草機不易構著的草坪；除此之外，全都是施力放大器的天下。

每當我們在轉動曲柄時，我們就是在使用手動式施力放大器。假若你要拉一艘小艇到船架上，你利用曲柄來轉動絞盤，大量的手臂動作經由曲柄便可以將力量大大地施在鋼索上。門的把手和水龍頭也屬於較小規模的曲柄。我們對於施力放大器的偏好亦顯示在我們所用的術語上，例如用「機械優勢」來代表「施力優勢」，顯然那力距的優勢就算不上優勢。所以當槓桿的施力點至支撐點的距離為負荷點至支撐點的二倍時，我們就稱之為「兩倍的」機械優勢，而非「二分之一的」機械優勢。

可是生物學家的選擇卻正好相反。在自然界裡，力距放大器才是真正的支配者，這乃是由於肌肉是短程引擎，它們縮減一段短短距離卻可以產生許多力量。肌肉所作的最大的功(負荷乘以距離)是在它僅僅縮短百分之十長度時達成，雖然大部分的肌肉可以在較輕的負荷下，最多縮短百分之三十。為了使手臂及雙腿擺動相當的弧度、或讓它的前端移動相當的距離、或使肌肉向著骨骼縮攏——這些工作都需要力距放大器。試以那些操縱你前臂的肌肉和骨骼為例，各位

可在圖九~四中看到，其中上臂前側的雙頭肌及肱骨後面的三頭肌，都是真正的力距放大器。

所以我們的肌肉乃是力的專家，我們的身體並以肌腱及骨骼這一類力距放大性質的內部槓桿與之搭配。這使得我們的四肢成為力距專家，而人類科技再以它們施力放大性質的手控工具與我們配合補償。但是即使不事先做內部結構上的調整，我們仍然酷愛使用這些工具，這無寧是一件事頗為矛盾的事，甚至可說是有一些反理性。

當我們需要相當力量時，就會用到較不激烈的力距放大器。例如鼯鼠前臂上附著的肌肉被它用來挖掘地洞；它的骨骼較一般為短，肌肉的附著處與其關節的距離也較一般為遠。同樣的抉擇也見於哺乳類及爬蟲類下顎肌肉與牙齒的相對位置，它們前方的牙齒生在突出的顎上，在掠食時可快速咬台，動作的距離大，但力量卻很小，而後方牙齒較近於下顎收縮肌肉，咀嚼的力量可以很大。鼯鼠的前臂與獅子的白齒同樣屬於力距放大器，只不過其激烈程度不如我們的前臂及獅子的門牙動作而已。相反地，當我們需要動作距離大(或是速度)時，力距放大器便可產生極度效應。許多昆蟲的飛行肌肉能夠縮短百分之五的長度——為了達到它們振翔的高頻率，如此的短幅動作對昆蟲而言也許是必需的——又因為肌肉收縮於昆蟲的胸部內，所以它們非短不可。昆蟲翼尖所移動的距離，要比其肌肉縮短的距離大過數百倍之多。

為了使身體部位移動得更遠或更快，自然界利用特殊的肌肉聯結方式來提升其力距優勢。纖維的生長不是從一端的肌腱直線連接到另一端的肌腱，而是由一對外緣肌腱往中心方向短短地斜紋方式排列，如圖九~五所示。外緣的肌腱附著在一個骨架上，中間的肌腱則附著在另一個骨架上。如此排列大為限制了肌肉纖維可縮短的距離，但卻增加了纖維的總截面積，這便是它的力量的來源。這種排列在昆蟲與甲殼類動物中極為普遍，因為它們的肌肉需要包含在它們管狀骨骼的內部。當肌肉在骨內時，若要在其關節點及附著肌肉間產生相當的側向力距，幾乎是不可能的。由於肌肉僅能縮短很小的距離，所以它必須先產生很多力量才能轉為力距放大

器。龍蝦的大螯就是個很好的例子，它用其中一條羽狀的肌肉來收攏它的螯，又用另外一條羽翼狀的肌肉來張開螯。看看這類肌肉的解剖圖，或許便可以找到我們愛吃大螯的藉口，不然的話，光是有附圖九~五的說明也已經足夠使人明白了。另一個例子，是蚱蜢後腿上最強壯的那個部分，其纖維的聯結方向即使從外表上都可以看得出來。另外還有數種肌肉的排列方式較直接聯結更能使自然物得以移動肢體更遠、更快及更省力。在第七章將近尾聲的地方，我們曾經提到一種被稱為肌肉式水壓調節器的流體靜力裝置，類似的例子包括烏賊的觸手、各類舌頭及大象的鼻子等等。設若烏賊的觸手全由肌肉組成，其實它幾乎就是如此，設若它的觸手又細又長，其實這也是事實，那麼它將直徑稍稍縮小，長度就可以大大的增加。假設肌肉收縮使一個不可壓縮的圓柱體縮小百分之十的直徑，那麼圓柱體便可增加百分之二十四的長度。但是烏賊的觸手原就是又長又細的結構，假若它的長度是其直徑的二十五倍，那麼以絕對值而言，其直徑縮小一單位會使其長度增加六十單位：其力量也當然會從輸入到輸出相反地縮小為六十分之一。所以烏賊利用觸手來掠食，儘管延伸得又遠又快，卻並不十分費力。另外一個更普遍且與人息息相關的例子可以在我們的心臟中發現，我們的球形心室上所附的厚而不可壓縮的肌肉，以極有限的收縮產生極大的功能。經由計算顯示，如果心室肌肉的體積是其所包圍空間的兩倍，則縮短纖維百分之六就可以壓出一半的心室容積：如果縮短百分之十三，則可以將整個心室壓空。所以百分之六至十三涵括了肌肉收縮的有效範圍。類似的計算亦可應用於肌肉所包附的圓柱體，好比我們的腸管。腸壁較為薄些，所以需要較多的收縮，而且它們的肌肉種類也有所不同，但是應用的原則卻是相同的。

將高力量轉變為大距離並非是肌肉動力機器所特有的問題。纖毛中的蛋白質會互相制動，在接近纖毛中心位置的蛋白質，只要稍稍的制動就可以造成整個纖毛顯著彎曲。植物上的葉子開始凋謝，從水平向外伸出轉為垂直向下僅需要從葉莖中損失少許細胞便可以達成(見圖九~六)。

我們人造的引擎，在它的施力與力距的行為上，就較肌肉、纖毛和腫脹細胞更具有多樣性。但是在大多數的例子中上它們的機械活動部分移動較遠，但卻較有力——正是有生命引擎的相反。近代製造的引擎特徵——不論是電動式或燃燒式的引擎——就是它們極高的速度。高速所造成的結果與長距離是一樣的：功率輸出等於施力乘以速度，正如作功等於施力乘上距離：較高的速度使得我們能夠使用較輕及較小的引擎。例如我們以極速的馬達來驅動手提或動力工具和飛機，這兩種裝置的尺寸及重量都必須極盡可能地縮減。事實上，高速表示引擎被使用得更頻繁，高速也表示我們會經常需要在引擎與應用物之間降低速度，所以減速器乃是一個施力放大的裝置。

簡而言之，肌肉常需要力距放大器，如肌腱和骨骼的結合來一起作功；而旋轉的馬達，通常需要施力放大的齒輪箱來驅動有用的機器。

然而距離與速度並非全然相同，我們的手臂和腿移動得較遠些，而人類科技的引擎相較之下則移動得較快些，我們在手動式機器的過程中老是難以得心應手，便是這種差異引起的結果。許多年前，幾乎每一個家庭都少不了一個研磨機，等待著每隔一秒鐘便有一隻樂意的手來轉動它。現在這些工作全部成了食物處理機的任務，而這個食物處理機，是一個具有電動馬達、截然不同設計的東西。舊式研磨機加裝馬達的設計真是少之又少，我們就擁有一個這樣設計的研磨機，但是它的性能卻平淡無奇。

然而，對於一些簡單的電動化的過程，這種比較倒是頗具指導效益的。「想想看我們手動式和電動式的碎肉機及冰淇淋製造器。手動式的設計往往會用到一根長長的曲柄，這便是讓力量增強的裝置，並且消除了手臂和手之間所增長的距離。電動化的版本，則將這種長長槓桿轉變為轉速為每秒五十到一百次的馬達來取代，所以超速的問題取代了超距離的問題。為了防止馬達熄火或是裡面內容立即液化，就必須使用一組齒輪來降低速度、增強力量。所以我們現在製造紡織線的機器與舊式的手紡車截然不同，旋轉葉片帶動的割草機



取代了早先機械帶動的捲軸形式，電鑽中使用最有效的部分則完全異於手搖式鑽子的最佳功能部分。

## 輪子

人類科技對輪子情有獨鍾，除了奇特雪橇或重型雪橇之外，所有的陸上交通工具無一不組裝在它之上。我們的船隻推動，不是藉著旋轉的槳輪，就是靠螺旋槳推進器。我們的飛機，不管是否具備旋轉式的螺旋槳推進器，使用的都不外乎旋轉式的渦輪。吹雪機、挖壕機、輸送帶、鏈鋸，無一不是繞著一個軸心做環形運作的工具。在機器內部財有曲軸、旋轉式電動馬達、旋轉的滑輪、齒輪、絞盤、鉸鏈、轆轤、棘輪、滾柱軸承及紡錘，這些只不過是其中較顯著的例子。自然界則除了一個特別例子以外，對繞著輪子轉動的事情毫無興趣。兩種科技在這方面的差異懸殊，也只有在金屬的使用上可以提供同樣鮮明的對比了。

當我還在做學生的時代，這個題目就是這麼直接了當地陳述著：自然界從未發明過輪子，所有的教科書都是這麼說的。但是科學的進展讓我們現在了解到在自然界裡，確實存在著一個真正而且優良的輪軸。但若不是具備輪子的有機物發生在最久最古老以前二這件事也不會對我們構成什麼新鮮事。這個輪軸的發現——是經由貝格(Howard Berg) 與他的同事在一九七〇年代的努力——要求我們不要質疑為何自然界從不製造輪子，而要了解為何自然界唯獨在這個案例中使用輪子。當然，我們首先便要檢視一下這個案例。

我們在前一章中討論到纖毛與鞭毛，完全未提及細菌的鞭毛，它們比一般更高等的有機物之附屬物都來得小，而且也缺乏纖毛運作所需要的正常內在齒輪。在高倍電子顯微鏡的放大下，細菌的鞭毛通常看去像是一組小心描繪出來的正常波浪——使人難以相信它是一個剛硬的結構組織。但是事實上證明上它確實是一個好比螺絲錐般堅硬的螺旋體。正如同在圖九~七中所展示出來的上它是藉著旋轉運動、而非沿著長長的鞭毛傳播一波一波的彎曲來前進。鞭毛的基部形成一個穿越細胞膜的驅動軸，將這個驅動軸連於細胞內的旋轉機器上，而這個細胞膜的功能正好比一套完整的軸承。這個

機器無論是在外觀上或是功用上，都與我們的電動馬達具有奇妙的相似處，它甚至還能夠逆轉。這引擎加上螺絲籬之組合整置攪動或拉扯細菌使其得以移動的方式，就正好有如螺旋槳推進器推動船隻或是推動飛機一樣。

這種細菌鞭毛引擎的性能如何？以每單位重量的輸出功率而言它的功效要勝過肌肉五十倍，而且甚至比汽渦輪機還要理想。但是只比這種典型細菌大上一點點的原生動物使用的卻仍然是傳統的鞭毛方式，它們的移動完全有賴於我們早先提到過的微管蛋白——動力蛋白引擎，這是一種效能較低的引擎，這個現象冷人感到無比的困惑。是否這些細菌所利用的資訊永遠無法傳遞到非細菌的世界？奇怪的是，高等一點的有機物卻已經藉著共棲性徵用細菌的這種極端手段，取得了細菌的機械性能，如果各位回想一下前面第二章的內容，即可得知。或許是因為某種原因造成這個細菌引擎無法放大製造：出於較大承軸製造上的不切實際、或是非金屬世界裡做長距離電傳動所遭遇的困難、或是其他完全不同的原因？

輪子，在此意指真正的輪軸裝置，可以不受任何限制繞軸心旋轉。如果你從山坡上往下滾，你的整個身體或許形成一個輪子，但是你卻不能算是一個輪軸系統。所以我們在此討論的範圍，絕非風滾草、金龜子滾回巢裡餵食幼蟲的小小糞團、或是關於少數可以全身一起滾動的甲殼動物。我們所關心的，也絕非是拳頭可以繞著手臂轉多遠，或是頭部繞著肩膀繞多少圈。所謂的「旋轉」自有其特定的意義。當你在一張紙上畫上一個圓，是否旋轉你的手臂？或許手臂是繞著一個圓移動，但你並非真正地「旋轉」它：畫圓時你的手心都是面對著同一個指南針方向。人類的舞蹈便大量使用這種環行式，而非旋轉式的律動，大概這樣子才不會使我們頭暈目眩吧！當然也並非所有的舞蹈都如此：華爾滋就是屬於旋轉式的，而且有人懷疑它根本是故意設計來使人暈眩的。自行車的輪子旋轉：但是你的雙足和踏板卻只不過是沿著環行的路徑上運動。摩天輪確實整個旋轉，但是它的座位和乘客也只不過繞著圓圈行走。所以用最精確的定義來講——排除所有

藉整體滾動和繞圓圈行走的狀況——自然界裡唯一真正的輪軸裝置只有細菌的鞭毛了。

一般傳統的觀點認為輪子雖然理想，但是自然界(姑且不論細菌這個例子)卻不知如何製造它們來為她效力。古爾德就發現到，若要將營養素加入有機體內的某種結構中，而這個結構與有機體內其他的元素呈滑動連接關係時，過程會相當地困難。而這個建議與此處的主要觀點不謀而合：也就是自然科技和人為科技各具不同的環境背景。除此之外，他還提出有關演化持續性的問題。一個沒有演化完全的輪子如何能夠帶給任何生物優勢？這個論點好比吾人對金屬的論點一樣，看似有趣，但卻不具說服力。古爾德的整個論證，完全是基於對輪子運輸方式的絕對優勢性看法。

正如同其他許多議題的情形一樣，進一步的觀察可以揭露許多不為人知的複雜。至今我們知道至少有兩個人，耶生物學家拉巴貝拉(Michael LaBarbera)和歷史學者巴沙拉(George Basalla)提出的論點，是古爾德自由輪至上的假設之例外。他們承認輪子確實能夠較足部提供更價廉的運輸方式。畢竟，騎乘自行車當然比走路或跑步來得更有效：添加二十五磅的被動式機械，結果可以節省運輸成本好幾倍。但是他們也同時指出，輪子的優勢只有在平坦的表面上——馬路或是地板上，手推車輪子所能跨越的地面突起高度不會超過其輪子直徑的四分之一，而且這樣的突起也增玩了不少運輸成本。草原六篷車的輪子就其大無比，大得超過普通篷車許多。想要能夠經常有效地利用輪子運輸，一個安居樂業而且組織完全到足以發展許多土木工程文明便是絕對的必要條件。對於比人類小上許多的有機物而言，自然世界恐怕是一條更崎嶇坎坷的路途吧！

無論輪子是如何被廣泛地運用，它們卻不能為人類科技下定義。輪子應該是在相當於五千年前的中東地區以兩種不同的運用方式首次出現：帶輪子的交通工具和陶輪(拉坯輪)。他們彼此之間是否有任何關聯，或是輪子的發明是否可能源自不只一次的場合機會，至今尚不能確定，但是在哥倫布之前的新大陸地區卻完全不見輪子的蹤影，駝獸和雪橇是當時

的運輸工具，甚至連軸對稱式的陶器，都不是借著旋轉陶輪，而是靠捲繞細長的濕陶土圓筒而成。造訪一下任何印加或中美文明的博物館，都可以說服我們，在技術層次上他們絕不屬於初期的文化。除此之外，他們並非不知輪子的存在；在馬雅人和阿茲特克人的玩具中就發現動物的腳後帶有輪子的模式。而且事實證明，西半球也並非唯一文化中不是充斥著輪子支配影響力的地方；非洲的下撒哈拉沙漠、東南亞及澳洲地區居民，都能在缺少輪軸的情況下仍然適應良好。

若是要帶輪子的運輸工具對我們有所助益，那麼街道馬路就必須築得夠寬，好讓車和役畜能夠轉彎，因為這樣的組合是難以倒退的！而且，要有相當體積大小的役畜受到馴養，而這個條件對前哥倫比亞時期的美洲而言。看來卻又不像是能夠實現的！任何乘客自我推動的輪椅，一旦上了長毛地毯或是厚地毯，都完全失掉了它的機動性，所以我們的政府設立標準，不准在公共建設中鋪設厚毛地毯。北非和中東地區在相當於紀元第三世紀和第七世紀之間，放棄了帶輪子的運輸工作，而且在往後的一千年中也沒有再使用它。反而是馴養的駱駝靠著載運而非拖曳，成為一個較佳的選擇。

所以吾人大可對帶輪子運輸工具的絕對優勢論調表示懷疑與不信任，但是這樣的主張卻又未能闡明人類科技對輪子的使用和重視。在此處，我認為人類對輪軸的廣泛利用自有其明顯的因素。以輪軸為基礎的傳動裝置不但效率極高，而且功能廣泛，一對簡單的齒輪從一個軸心傳至另一個軸心的例行傳輸效率可超過百分之九十九（見圖九~八），至於錐齒輪（軸心以九十度角相連）、傳動皮帶以及滾輪鏈的效率都在百分之九十五到九十九之間。在渦輪傳動中，一根長而轉動的主動輪（渦輪）滑過被帶動齒輪的牙齒間，即使是如此，它們的效率也可達百分之八十。

馬路的平坦與否誠然限制了輪軸在運輸工具上的應用，但是做為一個一般用途的機械元件，輪子的真正限制還是在軸承上。不用軸承的唯一可能途徑，便是使用自由滾輪（例如樹幹）置於載運的物體之下，移動時後方的滾輪一旦

出空便移至前方，這真是一個乏善可陳的方法，古代不朽紀念物的建造者便是用此種方法來搬運巨大的石塊；而且我也發現，如果距離不遠，照此滾動長而末切開的木頭也不失為一個相當有效的方法。除此之外，當然整個運輸工具本身也可以一起滾動，但是在一般正常的直立式運輸工具中，總是有些部分要與其他部分彼此接觸滑動，滑動的接觸面則必須承受負荷，而接觸面之間的磨擦力則會耗損動力。所以任何的車子，不管是介於輪子和軸心之間，或是介於軸心和骨架之間，都需要具備轉動非常平滑順利的軸承。

是故所有利用軸承轉動的事物都必須同時面對兩個問題，即磨擦力和磨損，而這兩個問題所構成的重大障礙，一直到幾百年前具有相當精確度的金屬車床發明後，才得以克服，這是一個頗為棘手的基本問題。較粗的軸心，以其承受物質的應力較低，故能提供良好的支撐系統，但是其軸承表面的運轉速度較高，以致會產生較高的熱量及耗損。相反地，較細的軸承運轉較慢，產生的能量及耗損都低，但是承受的應力卻較高，因此軸心容易受到斷裂的威脅。優良的軸承正好比電線一樣，平淡無奇卻不可或缺，它們現存的優點往往遭人輕易地忽略——除了當它們卡住，或是因為缺乏潤滑油吱吱作響的時候，才能稍稍喚起人們的注意力；或者是因為戰事的發生，製造軸承的工廠才會成為最優先考慮的目標。

自然界雖然不用輪軸，但卻製造生產一些傑出的軸承。我們的骨骼兩端，生有層層多孔的軟骨，其間分泌著一種潤滑油(滑液)，使毗連的骨頭永遠不會彼此真正接觸。這樣造成的磨擦力與任何工程應用所能達成的磨擦力幾乎一樣低——除非是你患有關節炎或是滑囊炎。如果你想要感覺一下這種關節之間的潤滑，可以將一隻小羊尾部或膝部的肌肉和結締組織切開，試著把關節兩端的骨骼緊緊壓在一起，然後移動這些骨骼。至少從知覺上來判斷，此時的關節毫無任何摩擦力。自然界的軸承將不需為輪軸的缺席承擔任何責任。

在使用以輪子為基礎的裝置上，人類是無法抄襲自然

的。人類對輪子廣泛的使用，證明它們的技術價值超越任何口頭的爭議或數字的計算，但是輪子為何在自然界裡如此罕見亦無法輕易地得到解釋。至少我們不了解是什麼樣混合的因素造成這樣的結果。它們是否無法見用於崎嶇不平的自然世界——一個不用堅硬物質的科技？它們是否不利於演化和維持？或是每一次當有機物身長超過千分之一公釐長時，輪子便不再受到歡迎？

## 馬達和轉子的搭配

有機物裡完全不見輪軸和旋轉式的運轉，而在人類設備裝置中，它們卻是極為普通常見之物，兩相對照不由得產生了這樣一個奇特的問題：如何才能轉動一個旋轉式的機器。如果照每一種人類或是動物肌肉帶動引擎的作法，我們的引擎自然不會轉動，那麼直線式的或是往復式的運動勢必得轉換成旋轉式的運動才行。我們的推與拉一旦作用在旋轉的機器上，就無異於不同機械性的大結合，但是被轉換的問題所困擾的對象絕非只限於肌肉性的驅動器而已。

一個仰賴推力拉力的引擎，不管它是運用肌肉還是移動活塞，如何才能變成旋轉？我們的汽車引擎使用活塞來轉動曲軸，或是讀者諸君可還記得，蒸汽火車輪上附屬的滑動曲柄？這些設備要一直到十八世紀末期，瓦特為了讓他的固定蒸汽引擎能夠帶動輪子，因而發明了一種曲軸之後，才得以普及。瓦特也不是從往復式引擎中取得旋轉運動的第一個人，在早期紐克曼的引擎中，旋轉式的運動就已經被製造過，只不過用的是一種冒險而無效率的方式：它的引擎帶動幫浦，將水抽高，繼而水自高處落下，推動上射式水車。

如果引擎本身能夠繞圓旋轉的話，那麼從肌肉中重複取得旋轉運動的這個問題不是正好就迎刃而解了？就好像是將一隻動物栓在長而彎曲的手臂上讓它繞著單調的圓形路線一直走一樣。不然，我們就需要一根類似活塞引擎中所使用的曲柄。現代版的曲柄，應該可以推至紀元前二〇〇〇年左右阿基米德的發明；它們在中國的文獻上首次被提到是在公元三十一年，想必與阿基米德是屬於兩個完全不同的發展吧！但是真正最早的原始概念，應該要歸溯自古代的埃及人，只

不過他們的版本需要一些練習和技巧才能發揮功用。他們的裝置與我們現代版的最大差異，乃是在於主軸所擁有的不同活動空間。我們的曲柄所使用的，是導向完全受到控制的轉子，其中的軸承安排，使得主軸除了繞著軸心旋轉之外別無他種選擇。操作員的手或腳都受到引導，只能在事先決定的圓形線路上運作，好比我們在使用舊式碾肉機或騎乘自行車時一樣。這種安排的極端相反，便是好比西部牛仔旋轉套索一樣地不受引導式轉子，操作它們則非真正的全神貫注不可。

至於兩個極端的中間物，就是部分受到導向的轉子，這個例子我們可以在一些埃及的浮雕作品中窺得一二。譬如圖九~九中的一例，一端固定，另外一端則沿著圓形線路打轉。但是它們實在太不穩定，所以即使一端固定，操作者仍然得時時看住軸心，使其不致左右晃動。依照設計方式，我們確實能夠製成完全可用的鑽子，但是使用鑽子的時候略微需要一些練習，而且最好是將它們使用在較能夠容忍輕微晃動的淺洞上。一個傳統的手搖曲柄鑽需要操作者維持鑽軸的對正，但是對正的動作只需要以對正的手做為固定的上軸承，而不需要繞著圓圈轉動，這種手搖曲柄鑽占據了操作者的雙手，而古埃及的裝置，則可以空出另一隻手來幫忙握住作功的對象物品。手動式的打蛋器，是另外一個部分受到導向轉子的例子，它們與手搖曲柄鑽一樣，操作時需要一點點的技巧。

一種如今已徹底絕跡的裝置——弓鑽，或許也可以用來做成推動轉子的肌肉動力手臂。我們可以在圖九~十中看到，弓的一端連接著一根具有伸縮性的繩索，這根繩索繞在軸心上以利旋轉。軸心的下端握住鑽子使其方向固定，軸心的上端則抵在手握的推力軸承下轉動。一前一後地拉扯這弓，軸心便會忽而轉這、繼而轉那二道裡並沒有牽涉真正的旋轉動作轉換，因為週期式的逆轉軸心，只不過是順時針轉動及逆時針轉動的互相抵消罷了！但是它仍然實踐了旋轉動作對鑽鑿這類工作的最大效益。弓鑽不但自古即有，而且也遍及多種文化。北美的印第安人從未使用過其他任何旋轉式



裝置，單單靠著它所產生的熱量來生火，便是一種出色卻不明顯(就像專利局所宣稱的一樣)的發明。

## 水壓連接

在一個水壓設備中，液體受到壓力便推擠某些固體物(如果是氣體給予推力，則屬於氣壓式裝置，但是兩者的基本原則並無差異)。我們在前面已經接觸到好幾個不同形式的水壓設備。在第七章中，我們看過流體靜力式和氣體靜力式的支持系統，例如蚯蚓和飛船，在第八章中，我們考察過水力傳輸、水分吸收，以及蒸發式引擎(主要是在植物方面)，本章的前面部分，我們討論過像是烏賊觸手一類的肌肉式水壓調節器。除了少數氣體靜力式的飛船和建築物之外，所有的實例都牽涉有機物，不管是從單細胞生物到樹幹，甚至到鯊魚都有，顯然自然界發現這種設計對於她而言是種「簡單」的科技。即使她為了別的目的抽打大量的流體，即使她包圍圓形內室或筒狀管道的一點區區肌肉就足以擔任增壓的大任務，都不會引起我們太大的意外。

汽車煞車就是我們最熟悉的液壓機器。踩一下踏板，活塞就會被推入唧筒內更深，繼而迫使煞車液流出唧筒，流經一些管子再流入另一個唧筒，此時液體再向外推動另一個活塞。這第二個活塞便將煞車皮往煞車鼓(或煞車盤)上擠壓，產生了許多造成減速的磨擦力，這個系統得以貫徹實行，是因為在任何一個充滿流體的密閉結構中，任何一處施受的壓力都會在其他所有的地方出現，壓力的傳達可說是精準迅速、毫無耗減。

水力設計的最大巧妙之處，在於它的基本原則。任何水壓流體中的力等於活塞上所承受的壓力乘上它的表面，而在整個系統中，壓力總是維持不變，所以只要將活塞的表面積改變，你就可以產生各式各樣不同程度的力。比如在圖九~十一中，你用十磅的力將活塞往一個橫截面積一平方吋的唧筒中推進(壓力便是每平方吋十磅力)。此時另外一邊的活塞，如果唧筒的橫截面積是四平方吋，那麼被外推的力量就不會少於四十磅。雖然聽起來這簡直是白白得來的好處，但事實上是因為功和能量得到妥當完善的保存。大唧筒中的活



塞或許移動的力更強大，但距離卻無法太遠，如果小唧筒推進一寸，大唧筒只能往外移動四分之一寸。簡而言之，整個裝置的作用就像是一根槓桿，輕輕鬆鬆地將力、功或功率從一處又轉到另一處。自由地交換力與距離(或力與速度)真是再理想不過了！

這種水壓傳動對於自然界的吸引何在？將一枝新剪的鮮花插在花瓶中，水分便會自然而然地從花瓶裡吸入花梗。一隻海星靠著一千隻細小的管足得以四處移動，這是低壓水力系統中互相連接的流體靜力裝置。一隻蚯蚓調整它一截截連續區間內的壓力，加上一些向後指的剛毛，便能夠穿透泥土。蜘蛛使用一組普通肌肉來收縮足部，但當它將足部向外伸展時，用的卻是液壓方式而非它的伸肌：它用力擠壓身體的上部和下部(頭胸部)之壓成血壓的增加，因此得以延伸足部。蝴蝶自蛹破繭而出的時候，將其腹部短暫往內拉緊，藉以增加血壓漲大翅膀上的血管，達到擴充其薄膜的目的。我們人類便藉著同樣的液壓方式來操作腎臟中的濾除設備(腎小球)，利用動脈的高血壓強迫血漿(但不包括血細胞)通過細小孔隙，做為製造尿液的第一個步驟。或許這就是為什麼一個功能良好的心臟可以左右我們身體適當液體平衡的部分原因吧！人類(包括男人與某些雄性哺乳動物)也使用同樣的血壓來造成生殖器的勃起；至少我們是部分如此，利用閥和局部的肌肉活動將壓力推展至更高程度。液壓裝置若不是被有機物如此普遍地使用，那麼它簡直是毫無價值可言了。

但是對於人類科技而言，水力學和氣體力學都不是輕易得來的技術。我們缺乏像是肌肉一類的有效壓搾機，而且我們所製造的管子大部分都十分堅硬。我們用活塞來製造壓力，除此之外，活塞似乎也沒有其他的功用了。但是活塞一定得緊密而平滑地揮在它的唧筒中，才能活動自如又不致滲漏(我們對汽車引擎做的壓縮測試，目的就是在探測活塞是否有滲漏存在)。古代民族無此技術，所以液壓設備只能限於虹吸管，以及其他在大氣壓力情況下作用的非活塞設計。活塞和唧筒之間的滲漏同樣也限制了早期蒸汽引擎所能達到的壓力範圍，如今滲漏的問題已經得到適當的控制，液壓式和

氣壓式的裝置因而得到更廣泛的使用:早期承受巨大障礙的技術，如今卻轉為無比的便利管用。我們的應用雖然類似於自然，但我們的機械裝置卻與自然界的裝置形貌迥異。

讓我們再以汽車的煞車為例。近代的煞車踏板不只作用在一個、而是作用在兩個唧筒上，這是系統防漏的安全措施。如果你的汽車採用動力式的煞車系統，因為引擎進油引起的壓力減經便會形成一股氣壓式的作用產生液壓。如果系統稍有滲漏，你就可將煞車液加入貯液槽，或是自系統中除去空氣或泡沫確保其功用。某些汽車也使用液壓連結的方式來操作它們的離合器:這樣的裝置使得不管是建造左邊或是右邊駕駛的汽車模組，都會來得簡便許多。農耕用的牽引車通常會具備一個液壓設備來伸高和降低它的各種附件，而它的液壓來自一個引擎帶動的幫浦。操縱面——包括舵、電梯、副翼和襟翼——以及飛機上可伸縮的降落輪，通常也是由液壓來控制。重型的工程用裝備正逐漸增加它們對液壓帶動設計的使用。至於日常生活中的例子，自動關門器、減震器及手控的水槍或噴霧器，都是利用液壓或氣動原理的裝置。

巧妙明智地使用液壓動力傳輸幾乎是所有自動汽車傳動設備的基本條件。這種液體式聯結的效率並不會特別高——早期的汽車傳動還需要靠水來冷卻以排除它們的廢熱但它卻具有一種優良特質，便是當汽車慢速行進時，它們可以做不適當的(或是有利的)滑行。意思是說，汽車的駕駛人可以在不將它們從輪子上分離出來的情況下，任由引擎處於無力的閒置狀態。附圖九~十二中，我們可以看到一個液體聯結的基本設計。它的作用方式如下:首先，任何大塊質量的走向都是直線勝過環繞，如果你握住一端繫有重錘的繩子繞圈圈而行，則這個重錘就會向外飛轉，將繩子繃得緊緊的。液體本身便包含質量，所以當它被旋轉的時候，密室內的液體便傾向往外緣移動，形成我們一般所謂的離心力。第二，旋轉時質量若是朝著旋轉軸心的方向移動，則整個系統可以旋轉得較快，這個原則早已為人所熟知:我們觀看花式溜冰選手，他們不正是藉著將手臂往軀幹靠攏以加快他們的

旋轉速度?如果旋轉一個輸入軸的結果使得液體向外移動,然後在附屬於輸出軸的鄰近隔間裡向內移動,此時輸出軸的速度便會加快,旋轉的動作和力量(加在一起,便是轉矩)就藉著這樣的方式從輸入轉成輸出。在一定的限制內,輸入軸旋轉地越快,則聯結就越有效率。當你加快引擎之時,輪軸便聯繫起它們所附屬的另一個引擎。

## 暫時蓄電

要加速或減速任何有質量的物體,需要用力:要對任何物體用力一段距離,需要作功,這即意味著能量的耗損。但是一個擺錘能夠重複不停地往下加速,往上減速,其所需要的也不過是定期輕輕的一推,維持它的持續動作。擺錘的能量從何而來?它的做法,乃是藉著每擺動完全一周就完成四次能量投資的轉換。當它往上減速時,它將動作的能量(運動能)轉換為重力龍量,只有小小一部分能量(這部分可藉我們的推力來彌補)轉移為熱能。當這個擺錘往地面擺回之時,重力的能量投資便遭到結算,並以加速的面貌重新出現。擺錘此時再往另一個方向擺去,完成另外兩次的能量轉換。事實上,擺錘是反覆地將運動能儲存在重力蓄電池中。

除了重力以外,能量還能以何種形式儲存?另外一個顯著的力量是為彈性能量,亦即物質可恢復的變形/那便是我們汽車彈簧所做的事情。除此之外,可充電式電池常見於我們的汽車、可攜帶式電器、電腦裡的時鐘及其他地方等等。最後,能量也能夠藉著慣性輪的旋轉以慣性的形式來儲存,機器便龍因減慢旋轉而被帶動。有一些舊式的陶輪常常只需要偶爾推一下,便可以借著小量分發推力的方式維持不停的轉動。

人類科技的運用,包含上述所有四種儲存形式:重力的、彈性的、電力的及運動力的。長久以來,鐘錶一直都是機械鐘裡的定速器,電梯軸心裡的平衡砝碼則讓我們使用原來較低的能量來升高重物。在中古世紀的彈射器中,提高一個平衡砝碼便會造成能量慢慢地輸入,忽然讓這個砝碼掉落,能量便得到釋放,投射物便因此被射出。我們通常在產生電力時大規模地使用重力式儲存;我們稱這種計畫為抽水蓄能系統。一天之中,我們對電力的使用變化極大——————這

是在我們的預料中事。所以電力公司必須能夠調節它的產能。核能廠建造成本太高、燃料成本太低，所以只適合用在全產能供電，對這種上下變化很大的電力使用幫助不大。燃煤的火力發電廠較能夠滿足這種間歇式的需求，但是，它卻讓電力公司在一天中的大部分時間裡擁有大量恭使用的發電容量。如果用蓄電池來調節電力的需求變化，則這個電池會巨大得難以符合經濟原則。抽水蓄能系統事實上並沒有產生新的電力，只是在電力需求極低的時候，使用多餘的電容量將水抽送至高處的蓄水池，當電力需求升高之時，再操作這個水力發電廠使之滿足發電的需要。但是它的配合條件乃是一座鄰近便利的高山，加上當地的居民對這個每天水位上下波動的蓄水池不發出一點非難之聲。

當地居民接受的程度是不容輕忽的條件。設置抽水蓄能系統當然是在靠近人口密集中心的未開發山區功用最佳——但是，這樣做保證會引起自然風景資產保育者的大力反對。一九六〇年期間，紐約市的主要電力公司曾經提出建議，要在哈德遜河上方五十哩處靠近西點(West point)，也就是在風景優美、歷史悠久的海蘭(Highland)地方建造一座電廠。一片強烈的反對聲浪最後終於遏止了這個計畫。做為一個從小在距上述地點不到數哩之遙地區長大的生物學家，我或許早已帶著預期中的偏見：保持海蘭地區的完整無暇，值得哈德遜河下游地區付出一點點能源節約的努力。吾人必須謹記，不管他們的形象如何，電力公司的事業主要目的並非在節省能源，而是在銷售能源。

彈性能的儲存則更為常見，雖然說大部分汽車和器具中彈簧的目的是為了我們的舒適，或是因為它們允許較簡單的設計多於它們做為儲存大量能量的功用。機械打字機使用大批的彈簧，每一個洗碗機、錄音機及照相機裡也都有少許彈簧上它們在鐘、錶，以及一些類似玩具和少數割草機啟動開關所用的發條式裝置上，倒是認真與地確實儲存能量。幾章前我們也提到過，金屬具備高度的回彈能，並且能夠忍受相當程度的變形；張力、壓縮力、彎曲力，以及扭力。此外，彈簧也可以是非金屬(例如橡皮筋)，或甚至是氣體形式。擠

壓一種氣體，好比空氣，它能夠在完全不喪失任何能量的情況下再重新擴張。在爆炸式攻擊武器尚未問世以前，彈性儲存在武器使用上占有一席重要的地位：一枝羽箭的射出是藉著彎弓上儲存的能量來推動：最傳統典型發射石頭的弩砲，用的則是纏繞的牛腱。不管如何，相對於接下來討論的儲存方式，彈性儲存已經算是逐漸在走下坡的方式了。

一直到近代，大部分的充電式電池都是用來儲存電力以便啟動內燃引擎。雖然這種電池對於它們所能儲存的能量而言，稍為嫌重了一些，但是它們仍然便利了各式各樣小家電的使用：但是電動汽車的不能普及卻印證了它們的缺點。此外，電池的退化速度要遠遠超過彈簧和擺錘，流行的風尚也可能具有一些影響力：比如在幾年前，有一種裝有發條的機械刮刀在市面上流行了一陣子，你可以將這種刮刀留在車中或手提箱中，而完全不須在意它們何時需要充電，或是當地的電壓是多少伏特。

最後，我們偶爾使用的慣性輪亦不過是繞著大圓周旋轉的大塊質量而已。這種最簡單形式的暫時電池也可能是最古老的儲存形式，需要間歇二推的陶輪被人類使用已超過五千年的歷史。我們利用慣性輪讓引擎，包括活塞引擎和電動馬達，得到平順的運轉，我們同樣也將它們使用在好比陀螺和溜溜球一類的玩具及小型模型汽車上。我們偶然也聽到一些建議，在汽車內以慣性輪搭配較小的內燃引擎以便達成較有效率的高速和定速：使用慣性輪，將會供應汽車的加速和爬坡間歇式的能量。

上述四種方式的其中兩種，即重力式與彈性式的能量儲存，在自然界裡的使用極為普遍，而且甚至要超過它們在人類科技中被使用的程度。大約在動物移動的各種不同方式中——包括行走、奔跑、跳躍、飛行和游泳——都會利用到莫中兩者之一。自然界的三大奇特缺失在在使得暫時的能量儲存成為一種迫切的需要。其一為她缺乏輪軸，因此極端地仰賴類似足部或翅膀的往復式或震動式裝置。其二是她的肌肉缺少再擴張自己的能力，導致她需要一些簡單的方式來回復肌肉的收縮。其三是肌肉的收縮並非是猝發式的，而且化學

炸藥也非自然界的尋常裝備，但是高度瞬間的加速動作卻給予生物明顯的優勢：舉凡鱷魚到貓科的各種掠食者，都以撲前的方式來獲取食物。能量儲存經過慢慢的累積以及瞬間的釋放才允許了剎那間最高的功率輸出。

彈性式的儲存在自然界裡勢必要比重力式的儲存還要普遍，這是因駕重力式的儲存只能適用於具有相當重量的陸地上生物，而地球上絕大部分的生物不是居住在水中，就是體型微小。但是絕對的選擇劃分並非必要：一種單一生物可以同時使用兩種儲存方式。想想看我們如何運用我們的雙腳四處活動——二種依靠足部的運動方式實在不怎麼特別有效率——諸位可還記得，如果附加上一架自行車，那麼兩地之間的旅行成本可以大幅減低？但是用腳活動，若是缺少了能量的儲存，情況可不是更糟？這能量的儲存是重力形式，還是彈性形式？正如同圖九~十三所示，我們同時使用兩種，而且幾乎在毫無意識的情況下，輕易地在兩種儲存形式中變換自如。我們在每一闊步之間使用一點點重力式，好比擺錘一般的儲存方式，來減輕我們的步法負擔。當我們的步伐需要加快，我們就傾向將搖擺的幅度變得更大、而非更頻繁。就如同在擺錘中的情形一樣，對於一個既定的腿部長度，只有一種頻率是最「自然」或是最有效率的。一直到最後，你的人體結構拒絕做出更大幅度的擺動，因此你便轉成慢跑，開始了另外一種的步法。對於一個典型的人類，這種情況大約會發生在十二分鐘走完一哩路之時。

里茲大學的亞歷山大(R. McNeill Alexander)，從事過關於步行和跑步機械原理的最佳研究，發現了計算這個轉換點的規則。除了常數的值以外，計算步法轉換點的公式與計算擺錘週期的公式正好相同。不管是烏鴉或是袋鼠從步行轉為跳躍，或是人或狗(甚至是昆蟲)從慢步轉為小跑，都必須遵循這個亞歷山大規則。轉換點的發生，是在你的速度平方，大約等於重力加速度乘上你臀部至地面長度的一半時。對於一個中等身高的人類而言，就是當你以十二分鐘完成一哩，或是時速達到五哩的時候。對於一個體型較小的動物，轉換點的速度要更低；這就像是當你在步行時，你的小孩或小貓、

小狗都必須維持小跑步才不致落後。

超過了這個轉換速度，重力式的儲存方式便不再有效，但是此時能量儲存的需要，仍然存在。你在慢跑或跑步時使用彈性的方式、而非重力的方式儲存能量，也就是延伸你的肌腱代替原來上下擺動的兩腿。儲存的形式有異，步法也絕對不會相同。從某一個角度來說，步行時使用一起一落雙腿的重力式儲存像是一個特殊個案，因為所有其他常見的步法——小跑、奔馳、跳躍等等——都是仰賴彈性式的儲存。舉例來說，一隻跳躍的袋鼠在它從地面上彈回的時候，可以取回它在落地時吸收能量的百分之四十。延伸肌腱以儲存能量，是以一種膠原蛋白質做為它的蓄電池——就是古代取自母牛用來做弩砲的東西及我們人類肌腱裡最主要的物質。膠原蛋白的彈性(回彈能)大約是在百分之九十三左右——意即是說，所有在延展時投入能量的百分之七將無法在彈回時以機械形式再出現。其實這也不算太差，至少要好過我們以橡樹汁做成的普通橡膠。但是膠原蛋白的致勝之處，乃是在於相對於它的重量所能儲存的能量 $I$ 約近於彈簧鋼的二十倍。

附屬肢需要重複變換方向的這種問題並非只有陸上有腿的生物才遭遇得到。昆蟲們拍動翅膀的頻率，幾乎每秒可高達一千次(最小的昆蟲)，這麼驚人的頻率我們人類早已有所聽聞(而且也時時稱奇)。一九四〇年間，一名有不凡才華的芬蘭學者勘查家沙塔瓦達(Olavi Satavalta)，光憑著聆聽昆蟲，便編輯出一套翅膀振動頻率的手冊概要。他的工作也絕非簡單：不只要分別完美的高低音，還要訓練自己分辨基礎音和泛音，避免他所謂的「高音與次中音的錯誤」。不善於分辨音高音低的如我之流就只好訴諸於擴音器、錄音機及其他電子設備的輔助了(記得在我年幼時，我曾經將果蠅用細鐵絲栓在我的留聲機唱頭上)。沙塔瓦達所得的資料向來相當地準確可靠。附帶在此一提，我們也可以偶爾藉著減除系統負擔的方式，將頻率加到更高——稍稍地剪掉翅膀的尾端。根據同樣的沙塔瓦達資料，最高紀錄每秒可達二千二百一十八次，這簡直是所有有機物裡面最最快速的前後運動了！

正如同人類步行時的踏步頻率一般，一隻既定昆蟲的振



翅頻率不會有太大的上下差異，飛行速度的調整基本上是由於翅膀擺動的幅度和其他變數而定。一個最合乎理想的頻率，幾乎是任何重力式和彈性式儲存系統的最佳特徵——這就是我們使用擺錘或是小型彈簧來控制機械計時裝置的原因。

飛行的昆蟲使用彈性儲存能量，在它們一對翅膀的接縫處有著為兩種科技熟知的最佳彈性聚合物，節肢彈性蛋白所組成的軟墊，我們在第二章中也略為提過。節肢彈性蛋白是在一九六〇年左右由一名傑出的丹麥科學家威斯福(Torkel Weis——Fogh)所發現，它的彈性可高達另人瞠目的百分之九十七，因此相對於我們膠原蛋白所喪失的百分之七，節肢彈性蛋白只喪失百分之三的能量。百分之九十七也不過比百分之九十三稍稍強一點，所以比較兩者的功效差別或許還不是太大；重要的關鍵卻是因為消耗能量所引起的小小損害：它們轉變為熱。而三個百分比是七個百分比的一半還少，這意謂著使用肌肉的飛行器如果不能冷卻它們自己，勢必要遭到更大的困難。

肌肉的再擴張是另外一個需要暫時能量儲存的常見之處，每次舉起一隻手臂，我們都用到一些重力式儲存。但是我們大部分都是使用成對或成群的肌肉，所以一塊肌肉可以用來再擴張另一塊肌肉。舉例來說(見圖九~四)，你上臂前側的雙頭肌就同時舉起你的前臂並擴張你肱骨另一側的三頭肌。能量儲存的另外一個重要演出，則是發生在雙殼的軟體動物上，例如蛤類以及扇貝它們的兩片貝殼完全靠肌肉來合攏及維繫，具有彈性的鉸合韌帶能夠重新打開貝殼以及再擴張肌肉。二週個過程在扇貝身上發生得尤其快速，它們重複地拍合兩片貝殼，一次一次間歇式地噴出水分，以利游泳。它們以蛋白質外展組成的蝶鉸韌帶具有差強人意百分之九十一的彈性。至於這流成熱量的九個百分比，對於一個一次只需運轉幾秒鐘的自然水冷式機器應該不會構成多大的問題。

另外一個使用彈性式能量儲存的重要例子是在前面第五章中出現過的人類心臟，它們是一種進行節奏式舒張和收縮的幫浦。心臟的部分工作是將血液直接抽打經過我們的循



環系統，但是這個工作的一部分，就是使用血液做為水壓式鈞流體將我們的動脈壁向外推擠——就是延展。在每次跳動之間，動脈則會彈回，此時彈性上的收縮便將血液擠向前方。憑藉著這種方式，我們動脈壁的彈性得以減輕因為心臟跳動所引起的劇烈的血壓變化，而且使得流經微細管及其他小血管的血流能夠更為平順。

最後，彈性式儲存可以被用來獲取更大的加速度，這是對於小型生物極為重要的一個特性。為了要達到一個相當的距離，一個彈射體必須具備極高的起動速度——無論它是在跳躍、被踢出，或是遭到彈射。彈射體的速度在它離開推動器時達到最高點；物體越小，達到這個速度(在槍砲火器裡，我們稱之為「初速」)所需的距離則越短；距離越短，則意謂要達成同樣的最終速度需要越大的加速度。跳蚤、蚱蜢和袋鼠起跳速度或許都相差不大，但是比起它們的加速度，跳蚤卻是袋鼠的大約一百倍，蚱蜢是袋鼠的大約十倍。袋鼠的跳躍，絕大部分憑藉著它們直接的肌肉威力，但是跳蚤和蚱蜢卻是藉著扭

曲彈性物質——在跳蚤是節肢彈性蛋白墊，在蚱蜢是甲殼質的外骨骼——來造成肌肉的儲存能量，然後它們再用一些觸發裝置來將累積的能量在霎時間釋放出來。許多植物也用同樣的方法投射它們的種子。各式各樣的裝置簡直可以形成一個大觀園。但是不管是什麼方式，所有的裝置都是將能量裝在具彈性的物質裡；至於觸發的機關，可以藉著數滴水滴，也可以乾燥到某一個關鍵程度，或是動物們輕輕地擦過等等。

所以我們總共使用四種不同的方式來儲存機械能量以備暫時所需：重力式、彈性式、電力式，以及慣性式的。自然界則僅僅使用兩種：重力式以及彈性式。我們在此再度看到，人類的科技看來似乎是更具多樣性的科技。雖然如此，暫時的能量儲存對於自然界的重要性卻更為超過它對人類科技的重要性。原因何在？純粹只是因為大部分自然界的暫時蓄電池能夠為她解決我們人類通常不會面對的問題，包括使用旋轉裝置、炸藥，以及其他種種技巧等。

在這裡讓我提出有關兩種科技引擎和傳動裝備的兩個觀點。第一，自然界複雜精細的替代品或許最能指出我們旋轉式機械的好用便利。第二，引擎的行為與傳動裝備的特質會彼此影響、互相作用。兩種科技各自做成多種多樣的傳動裝備，這或許是因為它們各自以其不同的方式，要求為數不多又功能相似的引擎來完成各種不同需求的工作吧！

## 第十章 幫浦、噴射機和船舶

人類技術如何能夠幫助我們了解非人類的世界？讓我們來問一些關於更複雜裝置的問題，將討論中心從單獨的元件擴大到全盤的系統。在接下來的這一章中，我們將要特別審查三個案例，在這些案例中，藉著物理定律與人類設計實際經驗的結合，我們可以將自然的行為賦予其道理。所謂「賦予其道理」，即意謂著自各種變化中發現秩序，獲得超越純粹只是沿襲祖先偶然事件的規則，這三個實例包括移動流體的幫浦、依賴噴射引擎的推進力，以及進行於水面的游泳。請留意它們全是屬於物理、而非生物的範疇。在這樣的比較中，若要獲得最高的效益，我們便需要以物理現象為起點考慮幫浦、噴射引擎以及表面浮泳，而非生物界的心臟、鳥賊以及鴨子。

### 幫浦

我們的血液循環、樹汁上升、貝殼過濾食物、鳥賊噴出汁液，所有這些行為都有一個重要的共同特徵：即在每一個例子中都有幫浦在推送流體，但是這些暗示的共同性卻往往被各種令人眩目的多樣性所遮蓋。或許這種多樣性的由來並無任何令人驚奇之處：除了各式各樣不同的幫浦裝置之外，每一種幫浦處理的壓力各有不同，其差異範圍可達千萬倍之譜。

那麼到底一個幫浦——任何形式的幫浦——的功能為何？幫浦使用動力，將在其內流過的流體加壓。所以它牽涉三件事：功率輸出、壓力增加和流率。功率等於增加的壓力乘上流體的流率（每次流動的數量，而非流體的速度）。換一種說法，一個幫浦的目的便是協助流體通過它原來無法靠自己力量通過的系統（負荷）。如果負荷阻力太高，好比流體在經過一個細細長長的管子時的狀況，此時不管用多少的壓力也只能產生極有限的流量。相反地，如果負荷阻力很低————就像是流過一個短而肥的管道——那麼一點點的壓力便能造成流體多如泉湧。幫浦需要足夠的動力來完成它的工

作是一件顯而易見的事。至於幫浦的功率輸出需要適當地配合它所遭遇到的負荷阻力，倒是一件不怎麼明顯的事。

設計師必須面臨抉擇。一個幫浦可能產生極大的壓力，卻只有偏低的流率。另外一個幫浦，則可能將其功率大半投注於高流率的產生而僅增加一點點的壓力。如果你將一個製造良好壓力的幫浦廳用在一個主要以高流率為目的裝置上，那麼整件事情可糟了！我會如此說是來自一次慘痛的教訓。許多許多年以前，可能年代久遠得連我的尷尬都已經記不清了，我曾經建造過一個循環式的水槽(笕槽)，使用兩匹馬力的離心幫浦將水四處抽送，這個可以插入房間電插座中最大的一種幫浦每秒只能移動兩加侖的水。幾年後又重新使用船舶的推進器做為幫浦，建造了另一個水槽。相對於同樣的功率輸出，這一次我得到的是六十倍的流率，而流率即是一個水槽的主要目的所在。

我的第一個幫浦如果用來將水提高十或二十呎，或是用來迫使水分經由噴嘴向外噴出，就不失為一個理想的選擇，它所生產的是不必要的高壓力及太少的流率。相對於此的，我第二次用的推進器卻在產生低壓力、高流量的功效上，提供了一個良好的幫浦角色。可是我至少不是第一個選錯這種壓力與流量組合的例子二九四四年諾曼第登陸前，港口的組成要件都是事先製造好的，為了避免暴風雨的損害，再用水將之浸滿，沉於英國陸地的南端。此時便需要幫浦將水抽空，使港口能夠重新浮現於英吉利海峽，而他們所使用的幫浦，雖然體積夠大，但是種類卻不對，因此無法產生足夠的壓力。一名警覺的海軍軍官便預演了一場極具說服力的不成功示範，迫使他的上司察覺到整個問題的嚴重性。為了拯救這一天，倫敦消防隊的幫浦便大肆出動，這個舉動在當時飽受空襲威脅的倫敦，可不是一件平常的通融動作。

一般幫浦的分類大致有兩種，這兩種都各自有其壓力和流率的不同取捨。第一種我們稱之為正面置換式或流體靜力式的裝置(見圖十~一)它們包括我們通常用來給輪胎充氣的手控式活塞唧筒，做為大部分汽車燃料幫浦的隔膜式幫浦，以及移動汽車潤滑油的葉片或齒輪式幫浦。在上述這些幫浦

中，其作用方式不是藉著縮小密室的容積來將流體從某一個預定的出口擠壓出來，就是因為密室的位置更動而內在的流體也就隨著移動。

第二種幫浦我們稱為流體動力式、旋轉動力式，或運動能式的幫浦(見圖十~二)。有一些好比飛行器螺旋推進器的封閉式版本將流體沿著管道往下縱向推擠，其他的幫浦(比如我的離心式幫浦)將流體不停地旋轉，使它們往外猛拋出去。還有一些幫浦，利用一股流體的流動來推動另一股流體，而不需要具備任何可以運動產生動力的部分。後者的例子之一便是噴氣式幫浦，它將流體自一個噴嘴中噴出，並牽引著其他流體與其一起流動。另外一個例子便是抽吸裝置(或抽氣機)。比如在汽車的汽化器中，流體本身運動所產生的壓力降低可以吸入別的流體——我們在第八章中也在海棉體、草原犬鼠，以及其他系統中提過類似的例子。

雖然「流體動力」似乎聽起來較「流體靜力」來得高明些，事實上以一般觀點來看，它們彼此並沒有什麼優劣可言，只不過各自有其特定適合的應用範圍罷了。流體靜力式或正面置換式的幫浦產生高壓、低流率，最適合應用於高阻力負荷的情況，比如說，若想將水從一口深井中汲出，便需要這種幫浦。流體動力式幫浦則產生高流率、低壓力。況且，在每一種幫浦中所包含的壓力範圍差距極大，所以即使是我的舊式水槽偏向高壓，但是仍然算是流體動力式的幫浦。同時，功能上特殊勝任的例外也不是沒有。舉例來說，進入一個噴射引擎的空氣首先需要經過一個軸式壓縮機(見圖十~五)，這壓縮機便是一個設法達到高壓狀態的流體動力幫浦。當空氣經過一連串旋轉和靜止輪流交替的葉片，便會陸續受到壓縮逐步地達到高壓狀態。

至於生物界的幫浦又如何?人類幫浦的特質是否能夠幫助我們認識自然界幫浦的共同特性?自然界的幫浦與我們的幫浦想當然沒有一處相像，但是它們所完成的工作卻也一樣是推動氣體與液體，其面對的操作情況、涵蓋也是同等的廣泛。表十~一便列有一系列幫浦的性質和性能摘要。

毫無疑問地，生物性幫浦面對最高阻力狀況的操作

莫過於樹木和蔓藤提升蒸發樹液的裝置，它與任何其他的普通機器差別極大，但卻是一個道道地地的正面置換式幫浦。在這裡讓我們來思考一下它的運作方式。一道連續的液體水柱，憑藉著直徑小於一公釐的導管(木質部)自根部一路延伸至其上的樹葉，經由葉細胞壁多纖維網狀組織所發生的蒸發作用，使得樹葉內樹液的含量降低，因此便將其下方的水分往上汲取。一道水柱提高不過三十呎(或十公尺)便需要在其底部運用一個氣壓單位的壓力，所以一棵樹的幫浦抽打每隔十公尺的高度，便需要對抗一個氣壓單位的重力式壓力。事實上，除此之外它還得面對另外兩種阻力。狹窄的導管對於液體流動所造成的水動力阻力，與它們的重力式阻力一樣高，再加上它根部四周的土壤(特別是在它們幾乎完全乾掉的時候)會以無比的黏性保住分，要將這水分從土壤中分離出來就好比扭乾一條濕毛巾一樣；一旦水分的供應降低，汲取的工作就益形困難。此時我們若是正視這問題，便會無可避免地更換計畫，訴諸狀態的改變——利用蒸發——來汲取最後一點點的剩餘水分晾乾整個毛巾。但是一棵樹只靠提升液體水分，所以它的根部根本無法做任何計畫的更換。沙漠植物生存在最為乾燥的土壤中，尤其得汲取得更加努力：為了汲取水分，它們或許得拼命工作，努力對抗相當於一百氣壓單位的壓力，那是等於從底部往上抽取三千三百呎高的水柱所需運用的壓力，或是一艘低於水面三千三百呎深的潛水艇所承受的壓力。

另外一個使用正面置換式設計的裝置便是滲透式幫浦，我們同樣也在第八章中討論過其中的一種引擎。就如同蒸發式幫浦一樣，它沒有任何運動的部分，而且它給我們的印象完全像是一種陌生的機器。要抵銷相當平常的濃度差異需要花上十個氣壓單位的壓力，所以滲透式幫浦可以對抗相當高的阻力負荷。對於單個細胞或數個細胞組成的小型系統，因為它們的高壓只帶來適度的拉張應力(第四章中提到的拉普拉斯定律)，所以滲透式幫浦對它們有極大的用處。這種幫浦對於我們胰臟中水分的分泌、樹根的水分吸收，以及樹莖中樹液的往上推進，都扮演十分重要的角色。其中最後一

項採用低壓過程的裝置，對蒸發式樹液提升器有輔助補充的作用。

最為吾人熟知的正面置換式幫浦，便是心瓣膜和心室，在圖十~三中有一個一般設計的圖示。一個介於兩根導管之間肌肉組成的心室，再加上一個單向打開的瓣膜接在每一根導管上，便形成我們心臟的基本單位。但是為了允許只有單向的流動，這個瓣膜便得保證一根導管將液體導進，一根導管將液體排出二逼種幫浦通常為了產生較高的整體壓力，便需要使用連續好幾個唧筒密室——例如心房和心室，但是它們比起樹液提升器所產生的壓力，簡直無法望其項背。舉例來說，我們心臟產生的壓力僅及一個氣壓單位的四分之一，並非十倍或一百倍：至於動物中產生的最高壓力，來自長頸鹿的心臟及烏賊的噴射過程，但仍然低於半個氣壓單位。許多魚鰓和青蛙肺部的打氣筒同樣用到這種瓣膜和密室式的幫浦，所有動物的噴射引擎似乎也都屬於正面置換的裝置。其中有一些帶瓣膜(例如烏賊)，另外一些(例如水母和蜻蜓幼蟲的尾部射出)則附有單獨、不帶瓣膜的導管，其功能就像廚房裡用來滴油的大型塑膠針管一樣，一手包辦了噴出和充滿的雙重任務。自然界的瓣膜和密室式幫浦與我們人類活塞式和隔膜式的幫浦頗有幾分類似，只是它們缺乏人類幫浦中活塞環裡滑動的部分，而我們人類幫浦也見不到自然幫浦中好比肌肉一類積極收縮的元素。

此外還有另一種正面置換式幫浦，其作用是將消化的食物一路從我們的腸子中往前推動。在這一類蠕動性的幫浦中，一波一波的壓縮經過肌肉形成的管道，因此便一路將一團團的液體食物漿運送下去。許多蚯蚓都有心臟——或許也可說是大一點的血管，因為定義並不清楚——來做蠕動式的幫浦。醜陋的沙蠋(見上圖)便是藉著身體上傳遞蠕動式的波浪，而自部分灌滿沙(因此是高阻力)的洞穴將水分排除。蠕動式的幫浦在科技上的使用極為有限(我們將在第十三章中再提到，而且在附圖十三~一中有一實例展示)。只有在我們必須要將流體保存在輪送它的管道中，以及幫浦設備的效率不需付出昂貴的代價時，它的應用才有可能被考慮。

在人類的科技中，流體動力式的幫浦大部分都採用輪子和輪軸，所以自然界的版本(見圖十~四)無法與我們的幫浦產生任何相像之處。某次，我們的流體動力式幫浦體積龐大、動作迅速，所以若是使用像扇葉之流的推進器，績效良好。自然界正好相反，牠的流體動力式幫浦既小又慢，此時使用螺旋槳式的葉片來推動功效就顯著減低。取代它的最佳基本推進方式，便是沿襲老式浸於水的船槳；在高阻力狀況使用往下的運動，低阻力狀況使用往上的動作，兩者輪流交替。人類科技自從槳輪讓位之後，便久久不再使用這種設計，螺旋推進器趕走了所有大型的槳櫓。但不管自然和人類流體式幫浦的外形與運作有多大的差異，它們的基本原則和應用與正面置換式幫浦仍然非常相似。

流體動力式的幫浦，無論是屬於有生命的或是無生命的，處理的都是低阻力的系統。有一些裝置處理的阻力低到某一種程度，就讓我們根本不認為是幫浦所為。這些裝置的流體並非內部的流體，而是大量外界的流體。我們在這裡所討論的，便是靠著移動附屬肢，不管是拍打翅膀或是扁附節，或是借擺動纖毛或鞭毛來達成的游水或飛行動作。這些運動都需要經過大量流體的處理，但卻只受到輕微的增壓。至於推動黏液的流體動力幫浦(主要是有纖毛的表面)面對的阻力雖然較前者稍高，但仍然屬於相當低的阻力。絕大部分自然界的流體動力幫浦都與懸浮餵食有關：生物界依賴這種安靜但吃力的方式維生的動物多得簡直超出我們的想像——從最簡單的海綿到巨形的鯨魚，無一不是。大部分的自然界水域都含有食物的微粒，但它們的含量通常不到很高的濃度，所以這些動物便必須要處理大量的水分才能得到一點點的食物。為了讓它們營養的利益超過處理的代價，一個分離的系統就無法負擔過高的壓差，此時便是需要流體動力幫浦的時候了。對於這些吃懸浮體的動物，生活變成一場比賽萃取效率的戰事，誰能夠將最多的能量放在生長和繁殖上，最少的精力花在取食上，誰就是贏家。

我們對懸浮餵食幫浦的資料收集的頗為豐富，主要是因為它們被雙殼的軟體動物廣泛地使用。所以我們對它們的研



究，一方面出自於生態上的重要性，一方面也是受到口腹之慾的驅使。軟殼的蛤類和蚌類用力一擠就可以產生千分之二的氣壓單位，平常的擠壓則產生相當於十分之一的氣壓單位(海綿也是一樣)。雖然這些壓力聽起來微不足道，但是它們推動的水量卻多得令人驚訝，每秒鐘有相當於其身體容積一半的水分得到處理(相形之下，我們的循環系統簡直無法望其項背；即使是最激烈的運動，不過每秒抽送身體容積百分之一的流體，而且每秒不超過五十五次)。同樣地上罄海棉使用當地的水流來幫助它們的幫浦抽打，草原犬鼠讓它們的地洞獲得通風，牽涉的都是低壓的狀態；也只有低阻力的系統才能夠取得高流量的優勢。另外一個在同樣壓力範圍下操作的流體動力幫浦是蜜蜂窩的通風設備，它是由一群駐留的蜜蜂不停地在蜂巢進口處拍打翅膀而形成的幫浦。這個幫浦因為蜜蜂一個接一個的排列方式，就好比噴射引擎中的壓縮機一樣，是一個分成多階段操縱的幫浦，但是因為缺乏一個適當的管道系統二七只能適用於低壓狀態的工作。

所以，人類將機械幫浦區分成兩種一般類別幫浦的作法，幫助我們在各種不同的自然裝置中發現到它的規則所在；兩種科技對於幫浦的選擇同樣受對以阻力為基礎的性能差異所左右。若是想要了解自然，我們勢必需要獲得外來的助力，一味地假定天擇會導致優良的設計並不會對我們有多少助益。有機物不只體積構造迥異，而且各個族系也形成各自不同的科技小宇宙。樹液的提升器不會為脊椎動物的心臟所用，植物也無法下令調動任何肌肉組織，但是人類幾千年的科技發展讓我們從樹見林、觀微知著。至少它能夠對於那些將自然系統做不自然劃分的專家們，當他們研究不同種類的生物，或是考察不同的生物功能、出版不同的紀事、寫出不同教科書裡不同的章節時，提供一番抗衡的作用吧。

這樣的分析同時也有助於我們了解為何某些部署總是無法發生的原因。我們的循環系統使用極細小的管道——毛細管——來做血液和細胞間物質交換的途徑，而使用大型的管道——動脈和靜脈——來連接不同的毛細管。幫浦的完成，當然是要靠連接大型血管的肌肉性心臟。但是為何不能建造一

個依賴纖毛式毛細管推動的循環系統，而不靠肌肉性的心臟？畢竟，血液流經毛細管的速度與纖毛幫浦的推動並沒有矛盾不配合之處，更何況蛤蜊就是用纖毛抽打大量的水分呢！許多年前，拉巴貝拉和我兩人曾經針對這個現象做出猜測，認為純粹是因為纖毛無法產生像肌肉一般的效率，使得應用纖毛的計畫昂貴得不切實際——當然任何功能疏散的優點此時也用不著了。我們那時就應該想到，做為流體動力幫浦的纖毛是無法與循環系統的高阻力狀態配合的。為了讓纖毛式幫浦保持夠低的阻力，一個系統需要大型互相連接的管子，包括大量的血液流量及超級短小的毛細管——如果這樣的系統能夠擺進任何生物身體的話。

關於自然界的流體幫浦，容我再加一段最後的註腳，陳述一個若不是經過與人類科技比較便不能彰顯的觀點。生物學家研究已發生的事，不關心沒有發生的事，因為沒有發生的事無法提供任何可檢視的資料。但是在此書中的比較對照，一再重複地將我們的注意力帶到自然世界裡那些零零星星為人所遺漏的明顯疏失，每一個疏失似乎都陳述著一個故事，要不然便提出一些引人爭議的問題。以下的例子便是另一個自然界奇特的疏失。

利用纖毛來推動哺乳動物血液的這種潛在不合，或許可以用一種以壓力變化交換容積的設備來克服。我們在這裡的企圖絕對不會比槓桿對力量和距離所做的，或是變壓器在電壓與電流之間扮演的角色更為急進。在我們的科技裡，這種轉換器的使用不但廣泛，而且歷史悠久。一種古代地中海沿岸所使用的裝置——戽水車，讀者可以在附圖十~五中看到。戽水車利用水的流動推動一個帶有旋轉式吊筒鏈的水閘，或是推動一輛上帶吊筒下面有水流轉動的水車。不管是那一種情形，都有大量輕微往下作用的水流將一些較少量的水流載至更高處——這裡便是從低壓力高流量轉換成了高壓低流量。有一種至今仍然在使用名叫水錘揚水機(hydraulic ram)的裝置，也能夠使用不同的方式達到同樣的轉換。一道往下游的水流帶動另外一小部分的水流，使其能夠向上流動好一段距離——這裡我們所運用的，是當某些流動中的水忽然間停

止時所釋放出來的能量。也就是說，一股水波嘎然中止便驅動了另外較少的水量，達到較高的水平面——而且動作不斷地重複。一本一九四〇年出版的暢銷書《蛋與我》(The Egg and I)裡面就曾經提到，自從家家戶戶獲得這種水錘揚水機的便利後，農場的生活不知改善了多少；現今徹底城市化的讀者們，不覺對這個取自英文字裡暗喻羊(ram)的奇特名稱感到幾分好奇。所有自然界的瓣膜和密室式的幫浦產生的都是脈衝式的水流，像水錘揚水機這一類的幫浦還從來沒有出現過。

我們將壓力減低，容積就變大；壓力增大，容積就變小。在附圖十~五中，我們看到一個導管風扇帶動的噴射引擎，在其前方用一個大型的風扇來吹動圍繞在引擎四周管道裡的多餘空氣，因此它獲得較大的容積流量，以及較輕微的壓力變化(我會立刻遇到「何必多此一舉」的疑問。)動物通常會使用一種流動來引發另一種流動，但是卻不見任何烏賊或水母使用我們討論的這種轉換器。飛機上使用長而固定的機翼結合小型的螺旋槳推進器，從事的也是同樣的轉換。當小小氣流通過螺旋推進器，它給予氣流一股強大的增壓，因而產生推進器的推力；而此時長長的機翼便利用某些水平推力，讓許多的空氣氣流微微地往下。所以它們是在不同的方向上，將高壓低容量的流動轉換成低壓高容量的流動，但是在所有飛行的動物中，只有甲蟲使用這種將推進器和翅膀分離的配合。

自然界藉著改變管道的口徑來影響流體變快或變慢。烏賊噴射所用的噴嘴使它在水中產生極速，其作用正如同花園裡水管用的噴嘴一般，但是這個例子只是以面積來交換速度，而非以容量來換取壓力。為何大自然獨缺壓力和流量的轉換，至今仍然是個不解的謎，不知是否因為我們遺漏了什麼，或是研究系統看錯了角度。或許是因為自然界幫浦涵蓋的壓力範圍無遠弗屆，因此便減低了她對這種轉換器的需要？但是這樣似乎意味著天擇對於每一個特定情況都提供有各樣齊全的幫浦選擇，這種假設未必真確。或者說有機體的體積偏小是個無法克服的障礙，對於小而緩慢的流量，黏

性成為流體機械設備效率的極重負擔，所以自然界無法製造出任何其效率值得所花費之時間精力的轉換器。

## 噴射推進

還有什麼能比這更簡單？往一個方向噴出流體，身體便朝另一個方向前進。如果使用的是引擎四周的流體(通常是空氣)，我們稱這個引擎為噴射器；如果流體完全來自其內部，則我們稱之為火箭。兩者的差別在此處並不重要，因此我們將所有這種引擎所產生的反應稱為噴射推進。它的功用可以驅動飛機、船隻，或是潛水艇；它甚至可以帶動吸塵器。對於動物而言，還有什麼能比它更自然？吾人只消將一層肌肉在一袋流體外一包，然後將袋子緊緊一握，流體便自任何一個可能的洞口迸出，不管是有心還是無意。幾乎每一種動物，只要是大得肉眼可識，都在某處某地使用到它。擠壓我們的心臟，血液便送出；收縮我們的腿肌肉，又幫助血液向內送回；一連串對食道的行進式擠壓，將我們的食物往胃中推進，而腸管中類似的擠壓又將處理的食物漿推送得更遠。事實上不是靠推進流體，而是藉排出流體，你就得到了一個噴射引擎。此外，我們最常見的流體即液態的水，密度夠高流動也不困難，因此功能特佳。塑膠製的噴水式火箭即是一個絕妙的玩具。只要用水將火箭注得半滿，再把空氣灌入剩餘的空間裡，當火箭發射之時空氣的再擴張造成水被往下排除，它的反衝力便將火箭射了一百呎高；若是操作者稍有經驗，也不致被射出來的水柱弄得一身濕。

自然界的噴射式引擎種類繁多，或許再也沒有其他的動力系統像它一樣，能夠在各種不同的族系中演化發展成形。水母具備它，而且大部分的頭足動物——烏賊、章魚，以及墨魚——也具備它。扇貝使用一對貝殼兩側接合處的噴射器做短程爆發式的游水。一隻幼年期的蜻蜓藉著從尾肛擠出水分在水塘中前進。鰓魚科則是將流經它魚鰓的水分自它靠近魚腹附近的鼻子噴出，因而得以在水中游走自如。其他諸如此類的例子不勝枚舉。

所有這些噴射器其作用與玩具噴水式火箭類似。自然界噴射器的冠軍——烏賊，在其最外緣肌肉質組成的護皮與各

個內臟之間，有一個充滿水的中空地帶。當烏賊縮緊它的護皮層，這個區域的水就由其噴嘴擠出，不消一溜煙的工夫烏賊便可以身處異地了；對於一個不到一尺長的水生動物而言，時速能夠達到十五到二十哩的確是予人印象深刻的。如果為了逃避即將臨頭的大難，它可以在瞬間便將掠食者遠遠地拋在後面，當然這不包括鯨魚類和其他少數游速最快的魚類。若自海平面算起，它往上的射程可達十六呎高，或是在空氣中射出一個弧形的軌跡，最遠可達五十呎的距離。

所以噴射器的功能聽起來真是棒極了，可是不管它是多麼地簡易、通用，卻不見任何使用它的動物能夠走得又快又遠。烏賊所能持續的極速最多不超過幾個脈動。水母或許可以用規律的速度游泳，但是它們只能達到每小時四分之一哩左右的速度。魷魚的速度僅僅是水母的兩倍，這以魚類的標準來看簡直是不能想像地慢。蜻蜓幼蟲的游遠相當於每小時一哩多一點，扇貝則是一小時一哩半左右，兩者都與烏賊一樣，其噴射行為只是間歇式地發生。它們的障礙何在？到底其限制是屬於生物性、還是流體機械性的？

人類如何使用噴射器正好為自然提供了一點啟示。噴射機和火箭或許可算是以燃燒燃料來產生動力的最古老機器了，原則上它們是所有熱能式機械中最簡單的一種。最早為人所知的蒸汽引擎就是一個直接的噴射式裝置，它只需要一個運動的機件部分，而且在建造過程中不需太高的精確度。在圖十~六中可以看到一個紀元第一世紀極富盛名的機械裝置，名為亞歷山卓英雄(Hero of Alexandria)的引擎。一個架於軸上的球形密室，內部盛水，下部加熱，這個密室有兩個沿切線方向開口的噴嘴，這便是蒸汽排出的地方；而從此的射出的蒸汽便帶動整個密室的旋轉。但是這種英雄引擎的貢獻卻只不過是一聲英雄式的蒸汽口哨而已，完全沒有在羅馬文化裡鑄下任何一個印記。推動工業革命發生的蒸汽引擎，其建造則是基於另外一個完全不同的設計藍圖。

甚至在噴射引擎發展已有五十年之久的今天，我們仍然只能將這種反應式引擎用在需要高速的飛機上，而幾乎從未用於汽車、火車或船舶上。為何自然科技和人類科技無獨有

偶，對這種看似極簡單而又有力的機械裝置同時持有如此特異的冷淡態度？那是因為這種設計有一個主要的基本缺失。

問題的關鍵所在，便是噴射器在各種不同的狀態下效率都太低之故。原因如下：一個噴射引擎產生向前的力量——即噴出的動力——是藉著向後推動流體的作用。我們可能使用大量的流體，增加的向後速度卻只有一點點；或者也可能利用少量的流體，卻大大地增加它向後的動力。關鍵的因素所在，便是由質量流率乘上速度來決定。如果每秒有一公斤的空氣或水流出增加它每秒兩公尺的額外速度，與每秒兩公斤的流體增加每秒一公尺的速度，產生的是同樣的推力。但是這種設計的效拿絕大部分是在於排出流體的流量與流速的特定組合。如果流率固定，那麼向後的推力便直接由經過流體的速度來決定。但是產生那股推動流體所需能量的成本，其增加卻不是與其速度、而是與其速度的平方成正比。速度加倍，當然力也加倍，但是加倍的速度卻需要花上四倍的能量。所以你便需要將排出的流體速度減至越低越好；降低成本，便意謂著利用大量的流體再給它一點點向後的推動。這就是噴射引擎的難處所在。這一點也正好與我們的噴射機和火箭的行為相反；它們需要噴出少量的流體，但流動卻極為高速。

我們如何能夠使一個引擎利用更多的流體？顯然讓所有的流體通過它的腹部中央再由小小的噴嘴排出，絕對無法符合我們的需要；因為太少的流體得以流過，以致流體必須流得太快才能達成高流量的需求。一個完全相反的途徑，可以不需強迫流體通過引擎本身，而只要在引擎周圍努力爭取大量的流體通過。讓引擎通過流體，要勝過讓流體通過引擎。如何才能達成這個目的？將任何長而活動的附屬肢連接在這個引擎上——不管是魚鰭、槳，或是螺旋槳的葉片，任何上述的這些附件都可以增加噴射器的推進效率，所有這些設備都遠較英雄式引擎或水母的單純式噴水來得複雜。雖然如此，複雜化所換來的成果卻是值得的。一隻搖擺身體和尾巴的鱒魚，它在每一個時間單位中流過的水量可以是一隻同樣體積烏賊的十倍，是故鱒魚只需消耗一半的能量便能此烏

賊的速度還要快上一倍。

噴射器如此簡單、如此沒有效率，那麼我們是否應該視其為粗糙的原始雛形？是否它們只是某個動物祖先發出來的一手爛牌？這個說法不但錯誤，而且有失公允。要知道，若要藉著往後推送局部的流體來游泳或飛行，機器(不管是有生命或是無生命的)推動的速度往往要比自己前進的速度還要快。結果呢？從推進器產生的流體速度就已經為航行器的前進速度設下了極限。如果速度是我們今天的重點，那麼噴射引擎便較能吸引我們了。這即是我們使用噴射機的方式；我們製造大型噴射機，也製造小型噴射機，唯獨不造慢速的噴射機。鳥賊的做法也與此頗為類似，它的尾部生長了小小的鰭為它提供了更多一層的選擇。在它攝取食物之時，游速極慢，魚鰭便成為主要的推動力；但是一旦後有大魚或鯨魚的追兵，它便開啟噴射引擎，急駛而去。在生死攸關的時刻，生物的適性對能量經濟的考慮就不是那麼有興趣了！

也就是為了這種能量經濟的考慮，商業用噴射引擎在過去幾十年間歷經多次的變革，一直試圖處理更多的空氣流量，以減低引擎的平均輸出速度；它們甚至加入了渦輪帶動的導管風扇。自最簡單的純粹噴射引擎演變成導管風扇式的噴射引擎(見圖十~五)，正如同我們在前面討論壓力流量轉換器時所註明的，早期的噴射引擎入口極小，而且所有進入的空氣在它們接受燃料充電之前，都必須經過一個風扇式的壓縮機。後期的風扇式噴射引擎入口極大，而且在入口處都具備一個大而顯著的進口風扇。引擎設計師竭盡所能地增加經過燃燒室四周的空氣，相對於進入燃燒室的空氣——這便是旁通的比率——來改進效率，以獲取較低的燃料耗費、較大的範圍及載重。

噴射式飛行器若採用動物般的體積大小，並以它們的速度來飛行，其低劣的推進效率會使得整個飛行完全不切實際。除了一些科幻小說(以及浮誇的幽默)裡的情節之外，我們對於任何有生命的噴射式飛機一無所知——我們幾乎可以肯定自然界從未製作過它們。但是奇怪的是，噴射器對於水中慢速的游泳倒不失為一個太壞的主意。在穩定的游速



下，它所產生的推力等於其遭致的阻力。低速產生不成比例的低阻力，所以要制衡它們不需太大的推力。一些烏賊就使用噴射器來完成長時間的遷徙，但是它們的移動速度大約相當於每秒鐘一個身體的長度，也就是時速不到一哩它們以低速來迴避阻力，或許也就是憑藉著這個特殊的方式，奠定了像是水母一類慢速噴射器成功的基礎。

雖然空氣和水的流動受到同樣的流體力學定律的支配，但是飛行還是較游泳困難得多。低密度的空氣或許可以幫助飛行器的前進，但是它卻需要額外的力量來保持飛行器的高度。光是這個額外的需求，便需要消耗許多動力(浮在空中的軟式飛艇和氣球除外)，這還不考慮飛行器是否要往前推進。關於飛行這個功能，我們永遠不要奢想利用低速來達成低空氣阻力的優勢，因為除了達成目的所需要的成本之外，我們尚要加上浮在空中的成本，而較低速的飛行便意謂著浮在空中更長的時間。簡而言之，水母或魷魚這種避免造成阻力的低速游泳，是無法為重於空氣的飛行器提供任何良好的模範的。

為了維持高度，飛行器必須將空氣往下推擠；我們必須給予一些空氣適當的加速度，但是現在有關的加速度卻又必須是往下的。我們又再度面臨不同的選擇，倒底是要使大量的空氣產生小幅的加速度，還是使小量的空氣產生大幅的加速度。飛行器藉著促使空氣往下流動而保持它的高度，它的相關速度即是這飛行器上升的速度，如果它只是維持某一種高度(就如同平常)，那麼上升的速度就是零。所以向下流動空氣的速度越慢，情況越佳；相隨而來的，向下流動的空氣流量越大，情況也越理想。我們因此得知，驅使一道大量而高速的氣流——就是噴射氣流——使其往下，是一種維持高度的極不經濟作法，小型朝下的螺旋槳效果恐怕也只不過比它稍稍好一些。

這個現象便解釋了直升機為何擁有極長的迴轉翼；為何一般傾斜的螺旋槳飛機使其引擎從水平轉為垂直時，會造成如此缺乏效率的翱翔器。有一種軍用機獵犬式(Harrier)便是一種可翱翔的噴射機，但是它們從事這種翱翔時不知要吃掉



多少燃料。這個例子的極端對比，便是長著無限長機翼的直升機，它們的翱翔可說是零成本的！

也就是這種與推進有關的效率，說明了飛行動物與普通飛機的基本差異。鳥類、蝙蝠及昆蟲，都是靠著拍打翅膀同時產生往前進的推力與維持高度的揚力。它們的翅膀通常不僅僅是上、下拍打，而且還包含某一種程度的前後擺動。較慢的飛行通常較少上下拍打，而較多前後擺動；如同我們在圖十~七中所看到的，一個生物如欲減速，就必須靠著往後傾斜它擺動的平面來達成。就拿蜂鳥為例，當它要徘徊在花間或飼鳥器中時，它就將頭部朝上，尾部朝下，翅膀不停地前後拍打。直升機要慢速翱翔的時候，作法與蜂鳥幾乎一模一樣。直升機的迴轉翼正如同蜂鳥的翅膀一般，翱翔時在平面上轉動，將旋轉的平面稍稍向前面下方傾斜，直升機就往前飛去。但是，平常的飛機都是靠螺旋槳推進器驅動前進，以固定的翅膀維持高度。成功的飛機較成功的直升機之發展要早上三十五年左右，直升機至今卻仍然是最浪費的燃料消耗者。我們因此放棄了使用鳥類和直升機的安排方式來建造飛機，開始在同一架飛機上，以兩種不同的方法使用機翼(如將螺旋槳做切片，其形狀就與翅膀一樣，其實兩者是同類的器具。

固定機翼的飛機其向後推動空氣的速度，往往較飛機已經極為快速的前進運動還要高速，因此才產生它的推力。至於飛機的揚力則靠著長而固定的翅膀，將大量的空氣微微地向下擠壓，其中的微妙之處在於帶動這固定機翼的動力來源。既然螺旋槳推進器是唯一具有引擎附件的設備，那麼想必便是唯一可能的動力來源了。整個事情的演變如下：飛行器浮在空中所需的動力被螺旋槳推進器和飛機引擎當成一股額外的阻力，因此便要求更多的推力來平衡；機翼(除非是無限長的！)在產生揚力的時候，較其僅僅突出於流動空氣中所造成的阻力往往大得多。事實上，飛機產生前進的推動力不是使用小小的機翼、便是借助高度水平速度運動的噴射器來達成。正如同早先所提引的壓力流量轉換一般，在這裡飛機藉著大型機翼垂直速度幾近於零的作用，將一部分的推力

轉為揚力。這樣的安排十分合乎效率，這也就是為何優良的直升機雖然早已到手可用，而我們仍然一味執著於這種需要使用極長跑道才能達到高度起飛速度的飛機。

那麼，鳥類、蝙蝠和昆蟲如何憑藉著單單一套機翼便如此應付裕如？其爭論的終結，我們在第三章中也已約略提到，便是兩種科技飛行器的相對尺寸。翅膀產生的揚力與其表面積成正比，但是一架飛機所需的揚力又與其重量成正比。畢竟在一趟規律平穩的飛行中，揚力和重量必須取得一個恰當的平衡點，正如同推力與阻力一般。試想如果一架飛機的體積加倍，形狀和密度卻保持原狀，此時所有的長度，包括機身的長度、機翼展開的長度，全部也隨著增大一倍；所有的面積——包括總表面積、機翼面積等——則會成為四倍；此時的體積和重量其增加絕不會祇於八倍。所以，相對於表面積的重量將會加倍，意即加倍的較大型飛機，其體重的增加相對於機翼的面積將會是兩倍。如此造成的結果使得飛機承受揚力的能耐相對地受到剝奪，對於飛行的功能來說也是相當不利。

克服這種不利局勢的方法有二：第一，便是在這些大型飛行器上使用完全不成比例的超大型機翼。一九〇三年萊特兄弟的飛行器便有著巨型的翅膀，正如同人力推動的超級複雜飛行器系列(Gossamer)一樣，但是兩者設計的原意都只是慢速的飛行，不像是第二種解決方法，目的是能夠達到更高的速度。如果將飛機的速度加倍，那麼翅膀的揚力便可以提高為四倍(所以一個加倍的重量可以用一·四倍的加速度來平衡)。普通的飛行器或許較鳥類有更高的重量——翅膀面積比率，但是它們飛行的速度也更快，只有極少數大型鳥的水平飛行可以超過時速五十哩，而人類的飛機恐怕也只有少數特殊設計的機型才會以這樣的速度飛行。較大的體積尺寸不僅容許高速的發生(相對於體積的表面積較小，引起的阻力也較小)，事實上也非要它發生不可(相對於體積的表面積較小，是故揚力也較小)；依此類推，高速的需求便要以小而快的空氣後推器來配合，所以飛機藉著分開機翼和螺旋槳推進器來達成更高的效率。大而慢的空氣後推器，對於身體屬小型、

速度慢吞吞的鳥類來說，已經足以應付它們的需要，所以也找不出任何理由讓它們用一種固定翅膀產生揚力，又用另一種拍打振動的翅膀產生推力。

但是即使是天生飛行的動物，也不能完全脫離這種困境。大型鳥類的重量相形於其表面積要比小型鳥類重得多，它們的飛行或許比小型鳥類快速，但它們卻缺乏足夠的翅膀面積來完成有效的翱翔；對於翱翔而言，它們的推進系統帶動的空氣太少、太快，以致無法達到適當的效率。大型的水鳥為了達到起飛速度，往往需要在水面上猛烈地滑行。一隻鴿子可以在空中翱翔數秒，但它卻無法產生足夠的動力以維持更久。只有蜂鳥是唯一的例外，稱得上是出色的鳥類翱翔器。但是對於小型的昆蟲而言，翱翔根本是家常便飯，這些速度極慢的小生物，其製造揚力的翅膀表面積和要求揚力的體重比例其高無比。既然擁有如此的翅膀面積，它們便能夠將大量的空氣往下推擠，因此免除了往下快速振動的需要。

在此我們學到兩個教訓：第一，兩種科技同時都缺乏一種以中等速度驅動中等大小飛機的噴射引擎，這種引擎會將我們的注意力帶至毫不浪漫卻絕對必然的推進效率的考慮上，而且這樣的考慮會對噴射背包、噴氣船和其他相似物體的計畫案提供一個恰當的質疑觀點。其次便是我們一再重複提出的要點。我們在比較何種狀況下固定機翼最理想、何種狀況下鼓動翅膀又最實用的時候，又重新開啟了體積大小如何造成影響的議題。長久以來，這個議題既難以捉摸、又無所不在，有時甚至還構成災難。體積大小的差異，實在太容易混淆我們對於人類製品和自然界產品孰憂孰劣的批判住比較了！

## 水面的游泳

游泳的機器有二：水面船舶及潛水艇，兩者在兩種科技中都不虞匱乏。我們所製造的潛水艇雖然也可以在水面上前進，但這個現象的存在並不應該混淆兩種機器的基本差異。讀者也許會猜想，水面上的游泳容易得多；這只是因為在水面上，一個產生推力的附屬肢較能夠享受到在低密度空氣中的復原階段罷了。小船、獨木舟及槳輪帶動的汽船都具備這

種在空氣裡復原的優勢，但它卻遭到人類和自然界優良船舶的忽視，所以空氣裡復原並非那樣的重要。兩者之間另外一個更重要的差異，則是出於水對游泳者的運動產生不同的抵抗，這個差異正好造成大家預料之外相反的效果。在水面下的游泳暗藏著尋常的阻力，而這些阻力大部分都能藉著小心刻意的流線形化得以避免。水面上的船舶則必須還要與水面的波浪阻力抗戰，它的船身沒在水中的部分減少，所受到的普通阻力便可以減少一些，但是這樣節省下來的阻力，往往比起船身因波浪而引起的阻力還是得不償失。潛水艇便能比同樣體積大小的水面船隻走得更快，燃料也更節省。

兩種科技都同時營造兩種形式的泳者，正如同它們同時具備流體靜力與流體動力的幫浦，同時也建造噴射引擎一樣。雖然在此我們看到一個主要的偏好：自然界的泳者，除了少數幾個偶然的例子，如鴨子、麝香鼠和水黽是在水面上活動以外，幾乎全部都採用潛水艇式的游泳方式；而人類所創造的泳者，則幾乎全部都是水面上的船隻。任何具有自動推進能力的潛水艇都不過只有兩百年的發展歷史，即使發展至今，潛水艇的使用仍然只限於能夠不計成本的軍事用途。所以我們產生了兩個問題：是什麼因素限制了潛水艇的發展？而有生命的船隻為何獨獨不喜水面游泳？

回答第一個問題較第二個問題簡單的多，但是卻無法像第二個問題那樣有趣。第一件事，我們必須在海平面的大氣壓力下呼吸空氣，所以我們將潛水艇以極其堅固、抵抗高壓的船身打造。這種船身必須非常地堅固，因為潛水艇內含空氣，使得它必須要面對獨特的不安定狀況。當它往深處潛的時候，外界逐漸增高的壓力企圖壓縮船身和它內在的空氣，這使得潛水體的整體密度開始增大，因此浮力更差、更傾向於往深處潛(鯨魚和潛水者的肺部都只含有空氣，肺部中的空氣一旦遭到壓縮，所產生的氮氣便會由肺部傳至血液中造成嚴重的問題)。除此之外，大部分人類的引擎也呼吸空氣，它們需要氧氣的程度比船體內所載運的人類還要高。所以完全潛於水中的船隻驅動，一開始是用手搖動曲柄，然後才進步到電動馬達和再充電電池，一直到最近才開始利用核子反應

器來帶動蒸汽渦輪。

如果核子式引擎能夠獲得商業上的普及，我們或許至少會使用潛水艇運送大宗笨重而又無法壓縮的貨品，例如長距離的石油載運。這樣一來燃料效率會更經濟，遭到惡劣天氣損害的機會會更降低，而且鯨魚形狀的船身比起現在的巨型油輪會來得更小巧結實，而船上的工作人員想當然便會有一個小型的壓力船艙。

至於自然界的泳者為何鮮少將其頭部保持在水面上倒是一個較複雜微妙的問題。逃離水面似乎在動物中是相當普遍的現象。鴨子雖然游於水的表面，但是它做這事的時候速度極慢，它們沉在水中或是飛在空中都遠較其浮在水面上的行進快得多。呼吸空氣的動物，如企鵝、海豹及鯨魚類動物等雖然必須來到水面上呼吸，但是它們大部分的游泳都是在水中進行。自然界的潛水艇尺寸可從最小的微生物到最大的鯨魚不等，至於她的水面上船隻包含的範圍則要小得多，相當於一公分左右到不及一公尺的長度。對照於自然界的各種泳者，想想看人類水面船隻的悠久歷史和廣受歡迎，想想看它們所使用的是多麼不同的材料和設計，發展它們的是多麼多樣性的文化，以及地球上有多少地方是許久以前藉著船隻的到來而得以開化的？簡而言之，為何水面船隻對於自然界形成如此的難題，或是說，因為她建造了太過優良的潛水艇，使得水面船隻反而成為一種多餘？

這裡的罪魁禍首——波浪對於游泳動物所構成的問題，恐怕其嚴重性還要超過它對船隻的影響。影響最大的波浪並不是風力吹送所產生的波浪，而是泳者自己本身製造的波浪。無論是鴨子或海洋遊輪，無一能夠避免在它們行進時波紋不生。在圖十~八中，一艘浮行的船隻在水面上會製造一對波浪，大約以其吃水線的長度來分隔——我們稱為船首兩側浪花和船尾浪花。這個吃水線的長度(也就是船身的長度)正好就界定了波浪間的距離，也就是波長。波浪永遠是行進狀態，而且波浪的長度就界定了它們的速度。波速的增長與波長的平方根成正比，這是已經為人所承認了一個世紀的公式；所以波長加倍，波速即增加一·四倍左右。較大的船隻

便是靠著製造較長的波浪而得到行進較快的波速。你只須用繩子、馬錶及玩具小船(如果它們在水面漲得太高，則可試加一些重量)就可以在任何游泳池中證實這個理論了。

但是，當一艘普通浮行的船隻或是泳者發現它們無法超越自己的波速時，麻煩就來了。如果它要試著超越，就得面對一系列排山倒海式的浪濤，此時不是鼓起勇氣切過大浪，就是直角朝上爬上浪頭——就好比乘坐升降機一般上上下下，如圖十~九所示。所以水面船隻必須承受一個非常切身的速限，我們稱之為船體極速，超過它的船體速度後，船的阻力就會忽然間猛烈地增加。既然船體的速度依船身長度的而定，那麼越長越大的船隻便能在達到它船體極速之前走得越快。當然若是將船體的形狀略作修改，或許可以對它的速度以及阻力的增加產生一些正面的效果。但是真正的基本問題仍然不能被輕易地忽略。我們製造相當龐大的船隻，比如一艘百呎長的輪船，大概在時速十五哩左右時達到它的船體極速。我們所使用的最小船隻，船身只有十來呎，其極速可達一小時五哩。至於船體一呎長的鴨子，它的極速只能達到一小時一哩半——可是它的飛行卻可達時速三十哩。麝香鼠的極速則可能更低。甚至於人類的泳者，不管是否具備流線形，在水裡前進也會較在水面上游泳來得快速，當然這是不考慮任何手臂在空氣中復原階段的一種假設。就因為潛泳的效果是如此良好，所以過度地使用它遭到游泳比賽的禁止，以防狂熱的競賽選手傷害他們自己；當我們以最大的功效作功時，適當的呼吸絕對是有益於健康的。

克服這種速限的方法之一，便是使用水上滑行，也就是輕快地掠過水面；我們在一些較平靜的水域就可以將這種方法使用在小型或中型的汽艇上。有一些鳥類，例如刀嘴海雀和潛鳥，會做短距離的水上滑行，但若是要載著大量的負荷行走一段不算短的距離，這種方法就有失實際。所以問題又得歸咎於體積大小。水面船隻的建造科技只有對大體積、而非小體積的物體有吸引力，所以兩個科技在游水上最終的深層差異再怎麼深奧難解，其實說穿了不過是兩種科技體積大小的不同罷了。

就好像是為了對稱或公平競爭的利益一樣，自然界也有幾種不同的方式能夠在液體面上表現良好。豉甲蟲這種小而黑的卵形物(見圖十~十)，便是用這種方法在池塘小溪裡四處亂竄。一般平常的表面波浪牽涉兩個互相對抗的現象；行進中的水產生的慣性會讓水面起伏，但是重力又試圖將水面拉平，兩者之間的互動便界定了波浪的速度。雖然重力並非拉平水面的唯一作用，但是它卻是影響大型波浪的重要因素。另外有一個力量，它使得小水滴集攏，使得掉在上蠟平面的水凝成珠狀，讓我們能將一根乾淨的針安放在一盆水的表面上，或是用一些肥皂、清潔劑便能減輕它的作用，這力量便是表面張力，它同樣也能拉平水的表面。重力的對象是大型物件，而表面張力的重要性卻要在小型物品上才顯示得出來，所以當波浪短於三分之二吋時，是由慣性與表面張力的互動而非慣性與重力的互動所決定。

如果牽涉的只有重力，那麼一公分長的船身僅能達到一秒五吋左右的速度，但是當我們加入表面張力的考慮時，其極速便幾乎可以達到每秒十吋。對於一個半公分長的船體，表面張力可以造成的差別甚至會更大：每秒十二吋取代原先的三吋半。所以對於船體長度介於公釐到公分之間範圍的小生物而言，限速的影響並不如我們想像的那麼糟。事實上，在這個奇特的領域裡，較小即較快，非較慢也。

雖然如此，豉甲蟲仍然是屬於小型水面船隻世界裡少數的棲息動物之一(以現在的觀點來看水黽、彈尾蟲和一些其他小型生物，它們是在水面上行走，而非游泳)。使用表面張力必須要具備相當平靜的水面，而且表面張力對於小於幾公釐長度的更小生物並不是個友善的世界。雖然限速對它們不是任何問題，但是表面張力本身卻反而成了陷阱。有時也許你會注意到一隻小小的蒼蠅掉落到池塘或小水坑裡而逃脫不了。在一碗水內灑一點滑石粉，你就會發現問題的所在了。滑石的密度較水大上好幾倍，但是一但它的小粒子被水的表面攔住，它就堅持守在那裡不動了。

兩種科技各自使用各自的幫浦、噴射推進器及水面的游泳。試問我們將兩者拿來比較可以學到什麼樣的經驗？兩種

科技都竭心盡力地使用各式各樣設計不同的幫浦，但是都是以同樣的規則來連接基本設計與實際應用。兩種科技都大量地使用噴射推進，但是兩者給予這個計畫案的背書似乎都嫌不夠清楚、有力——而且原因也雷同。噴射推進雖然效率不高，但是當某些需求凌駕它的效率考慮之上時，它就會被拿來使用。這些需求包括對高速度的要求，或是猛然爆發的瞬間速度的需要、對極度慢速的接納力，或是使先存結構利於修改的單純性等。兩種科技都同樣使用水面的游泳，但是人類科技顯然認為它的吸引力比較大。自然界的難題仍然是屬於體積大小的問題，也就是當小型船隻試圖快速移動時其波浪傳送的方法所造成的困難。我們檢視這些幫浦、噴射引擎和船隻，再一次體會自然界和人類科技的目的和外觀是多麼的分歧，但是兩者所恪守的基本限制和前提則大同小異。



# 第十一章 提出一些假設性的例子

物體要開始工作，則必須被製造；物體要維持工作，則必須被維修。我們對於自然界和人類科技所造之物已經有了詳細的敘述，讀者或許也可以說，這種敘述已經令人筋疲力盡，但是我們對於兩種科技如何製造物體及如何維修物體卻尚未討論。兩種科技的差異分歧，實在沒有任何一方面要比它們的製造和維修方法來得更大的了！最主要的情節是生物的故事；即使身為一個最勝任的有機物，我們卻仍然缺乏了解生物如何運作的內在省思！人類的科技也值得我們觀照；即使親身處於現代工業的結構中，似乎也未能促進人類對他們所創的科技有所了解。

## 生命的工廠

我們大型生物，可說是在兩個截然不同的領域中活動。一方面、整個生物構成單一個體，在天擇的市場裡，有機物之間彼此考驗、彼此測試，看看誰才能達到繁衍成功的標準。另一方面，製造這個個體的工廠便是我們的細胞。一個微小的生物可以僅僅由一個細胞組成，但是我們四周所看到的動物和植物無疑全是超細胞的結構。一個人包含的細胞可達一百兆個(或者是十的十四次方個)。假設一個細胞典型直徑為百分之一公釐，則這些細胞排成縱列便可長達一百萬公里，相當於一根細線圈繞地球二十五周。這些微小的製造單位上下左右間的差異不大，平均長度在千分之四十吋左右，難怪做為生物學家最原始表徵的光學顯微鏡要以這個尺度來觀察結構。生物教科書討論組織的不同層次，比如器官和群落，但只有在講到物種時才觸到細胞和有機體的重點。如果這種將細胞和有機體並列的二元論太過於理論化、或是太流於抽象的話，那麼請各位排除這樣極端的思想：我的企圖只不過是一篇報導，而非新世紀世代的分析。至少在目前階

段，我們不須理會為何每次肉眼可視的有機體演化時，基本細胞的結構設計仍然保持原狀。在這裡我們所關心的奇特現象，乃是一個製成品體積遠較其工廠為龐大的製造系統；這是一個如火如荼的家庭小工業，而且這個小工業對於自然界如何製造及維修她的成品，以及製造何種特別的成品，有著極深遠的影響。

## 向上建造，而非向下

細胞是基本的製造單位，是由體積小於它們的元件、分子組成體積大於它們的個體有機物。最接近單一切除鑄造或是壓樸的零件相似物，便是單一的蛋白質分子了；如果將一個細胞光是用這樣的分子裝滿而不放其他東西，這將可以容納大約一百億個分子(或者十的十次方個)。分子的體積雖小，但構造卻極為複雜。蛋白質可以是好幾百個單體化學單位結合的聚合物，但它們與任何工業界產生的聚台物都有兩點大大的不同。所有這些單體的化學單位(我們稱之為胺基酸)沒有一個一樣，而且每一個不同個體結合的先後次序也極為重要。所以不只是組成比例，就連組成的特別次序也舉足輕重，分子的本身內部就是一切複雜的開始。

製造蛋白質是細胞們最重要的任務。這些蛋白質不是供細胞使用，就是被細胞輸出，形成細胞間結構或是流動在細胞間的流體內。做為製造系統，細胞應該會發現製造比它們本身體積小的物體是最容易不過的事。當然，要將好幾個不同種類的蛋白質組成次細胞結構，也不會完全自動的發生；但是至少對於細胞而言，比起製造遠較細胞本身還要大上許多的物體，這顯然容易對付得多。我們在最古老的岩層中發現的微體化石證據，正好就符合這個觀點；地球上自從有生命出現以來，絕大部分的時間這些超細胞結構都一直受限於細胞結合所能使用的膠著物質。

有機物製作的大型物體，正好可以拿來反映細胞從分子階層開始往上建造的過程。鋼柱一律由純鋼組成，可是取自一棵死樹的木樑則不然，它們的結構，在一層之外尚有一層。人類在製造金屬和塑膠的過程中總要設法達到材料同質性，可是生物系統對這種同質性的材料卻似乎存著強烈的偏

見，它們不低到細胞以下的層次，同質性永遠不會出現。試以肌腱為例(圖十一 ~一)它不僅僅只是一個堅硬的彈性帶，還可以分成肌肉束(由纖維組成，纖維又由次纖維組成，而次纖維本身的構成元素是微纖維，後者的主要成分便是胺基酸鏈捆束在一起的三層螺旋形結構。甚至連我們的頭髮，即使只是由單一的蛋白質，即角質組成它們也是一個可分成多種等級層次的結構。自然界按照慣例輕而易舉就把組織的複雜度帶入這微小的世界，比較起我們人類製造技術所面臨的障礙，實在輕鬆得不費吹灰之力。

自然界使用合成物做為她所有堅硬物質的材料，反觀人類，每當我們製造出一個具有競爭力的合成物時，就不免洋洋得意、大肆聲張一番。或許自然界只是順應自然的發生行事，雖然她正好發現細胞的尺寸與優良合成物元件的最理想尺寸，不謀而合，這個巧合便大大提供了她利用的良機。所以只需要細胞間一點點有限的合作搭配，便可以產生許多高度異向性的合成物，這些合成物的元素安排自有其規律性，而非隨意無心的結果，而其特質也取決於元素填裝的方向。我們人類也對玻璃纖維做同樣的事，將一束束的玻璃纖排列在同樣的平面或圓柱中，使這些纖維彼此平行走向。但即使是最最精選約玻璃纖維，拿來與木材或骨骼一比(圖十一 ~二)就顯得它們毫不生動、了無變化。

製作生物性的合成物綜合了許許多多微工廠的功效輸出，使它們發揮最大的優勢。至於對其他的生物性產物而言，任何細胞式的綜合是否優於肉眼可見的綜合恐怕就沒有那麼明顯了，但是細胞的綜合作用，其影響絕對不僅僅是結構物質的內在安排而已，這是無庸置疑的事。試以肌肉為例，它們與電動馬達的不同處，我們尚有一點未提及。馬達是一單一機器，省略其中任何一個部分，它就無法工作，而且馬達的任何一個部分都不能自己獨立運作。相反地，肌肉是許許多多小小相同的單位，即肌節的混合物，每一個肌節長約二微米，即相當於百分之一吋的長度，每一個肌節的運作完全不需要依賴別的肌節是否運作。我們因此可以利用它們的自主性，以改變馬達單位運轉的數目，來調整肌肉的操

作程度。這個馬達單位就是比肌節稍大的操作元素。

參照這種原則，較大型系統純粹只是集合更多基本小單位造成的有生命機器，而且肌肉並非是唯一的例子。我們的腎臟、腸子，以及肝臟看去都頗具幾分分量，做為器官的功能，它們的功能也被教科書仔細描述過，但是這些器官的功能只不過是由幾個單獨細胞或是一群細胞組成的同樣元素所完成。我們每一個人對個別器官的獨特功能都有強烈的認知，但是卻無人對個別的細胞產生特別的感情，而我們人類竟然是這個極微小元素的最低度結合體。即使在最複雜的有機體內，細胞內部的資訊傳遞遠比細胞與細胞間的資訊傳遞發生得更多。就連複雜的人類頭腦，比起純粹細胞內部的活動，也就是以來自基因物質的資訊主控整個蛋白質合成的過程，其程度都不過是次要演員而已。

換另一個說法，當自然界在大約五億年前發明了多細胞式整合良好、肉眼可見的有機物，就已經證明她卓越非凡的成就了。自然界自小往上建造，機會更多於她自大往微型的设计。除了少數的例外，不管生物如何運作、他們的個體如何成艱，或是他們如何造成演化，所有的大型尺寸都代表著獨一無二的特殊化結果。演化已經多次對大型生物造成威脅，但是主要的演化改變大多數仍然發生在小型的有機體內。簡而言之，大型生物往往是由小型祖先遞傳而來，反之則絕不成立。

## 食譜或藍圖？

「烤到兩面焦黃為止。」「煮沸，並時時攪動，使溫度達二百三十度為止。」「降低火力，保持微微的小火煨燉。」這每一道說明都直陳其最後目的，而不像是一個特殊的處理過程。每一個指示都要求你對某件事情先觀察，再根據觀察的結果改變操作程序。每一個步驟都牽涉反饋，此處反饋的意義正代表著你饋養有關結果的資訊，再反應到程序中以利控制。在前述的二個例子中，你最後停止操作；在第三個例子中，你則作了某種調整。我們以烹調大全做類比，將這一類的指示稱為食譜，即使並非每一個烹飪食譜都必然牽涉反饋。相對於此，有些指示與結果並無關聯，缺乏這鍾資訊迴

路；我們稱此類指示為藍圖。細節是否詳盡並不重要，重要的只是在於各個指示說明是否依賴結果而定。圖十一 ~ 三中，即是將這樣一個依存結果的設計用一個更通用的形式來表示。

反饋的控制可以完全自動、不需任何人類的動作來連接迴路。根據梅爾（Mayr）的說法，這種自動控制最早期的明顯例子見於早期傳統回教文明的一些浮閥。它們的作用正像是家裡抽水馬桶用來調節水箱水位的裝置一般；高水位舉高浮球，並關掉水源，如圖十一 ~ 四所示。十七世紀初期，有一名現在已經不為多少人知曉的荷蘭多產發明家德雷布爾（Cornelis Drebbel）為烤箱和孵卵器發明了熱控制，在這個控制器中，高溫便會導致燃料燃燒速度的降低。瓦特最大的成就之一，就是發明蒸汽引擎的調速機；輸出軸的速度增加，進入引擎的蒸汽就會減少。反饋的控制如今四處可見；烤箱、暖爐和冰箱的溫度控制；數據機自我檢錯的協議；馬達上與負荷有關的速度控制器；以及其他種種。至於有人類行為介入的反饋控制，也並沒有絕跡或被我們忽視。駕駛一部汽車，就是將這樣一個反饋的迴路連接起來。車子若是走向偏左，你就得將前輪往右方稍稍轉動；若是它轉得太過偏右，你又得微微地向左調整。沒有一條馬路能夠筆直到讓你一旦瞄準方向，就可以閉起眼瞓一路到底。

在有機體內，生理機能系統的反饋控制最惹人注目，大腿肌肉產生的緊張、心臟的輸出、呼吸的頻率、眼睛瞳孔的直徑，這些事情都受到反饋結果的規律。將一條腿舉離地面，另外一隻腿的僵硬肌肉馬上察覺負荷增加，繼而更用力地拉張以補償所失；你絕不會像某些不計算自己功效的系統一樣，一蹶不振地癱倒在地。事實上，在有機物一開始的形成過程中，這種反饋迴路的連接作用不知扮演多麼重要徹底的角色？這是較少為吾人認知的一點。生物的基因物質——DNA 通常被認為是製造有機物的藍圖，但是如果「藍圖」一子，只是意謂著一套完整而詳盡的計畫說明需要被製作合成的機器讀出的話，那麼我們顯然受到了誤導。DNA 的功用事實上就好比一個現在式的食譜，沒有任何一套說明，詳盡準

確到使製造複雜一如有機物的事情，在不因應發生狀況而做出調整下還能夠完成。你或許能夠以程式操縱汽車，行駛一百哩也不歪出路面，但是這種狀況只有在裝上汽車車道感應器讓它的感應能夠回流到方向盤上時，才可能達成。不然的話，就算是一絲絲輪胎壓力的改變、頂頭的雲朵造成路面溫度微微下降、或是忽然來了一陣橫風，都足以讓你的計畫全部泡湯。化學程序，比如說有機體發展的中心過程，完全因反應物的濃度與反應時的溫度而異，而且不同的反應在它們的依存關係上亦截然不同。環境裡的溫度、次要離子的濃度，或是其他任何變數的操作主體稍有變化，整個發展過程就會徹底脫離常軌。不能詳盡地使用反饋，成功的機率就渺茫無望。

有機體產生的過程具有如此自我調節的功能，這種領悟確實給生物界及哲學界帶來不小震驚。在一八九一年，一名德國的胚胎學者德里斯契（Hans Driesch）試著讓一個海膽的卵子分裂成兩個細胞，然後他再將這兩個細胞分開，並持續觀察它們的個別進展。出乎他的意料之外，每一個細胞竟都發展成一個形狀較小卻完美無缺的幼體（在這之前，羅克斯（Wilhelm Roux）曾對青蛙卵做過同樣試驗，卻得到相反的結果）。觀察到細胞能夠如此重新組織它的發展程式，完全改變了德里斯契，使他從原來對生命持有的機械論、調轉為生機論的忠實擁護者，所謂生機論，即認為生命力是一種物理學和化學均無法解釋的理論。我們追溯以往，知道德里斯契所面臨的問題，正是因為在他所處理的時代，生物學無法在細胞的層次上理解反饋控制的作用而造成的。

討論到目前為止，有機體的發展與現代工業的發展似乎並沒有那麼大的差別。我們的現代工業中，機械與操作員一樣可以提供許多優良而自我檢錯的反饋控制。但是，自然界的步驟確實是更完善些、也更適合「食譜」這個字義。廣泛來說，現代製造過程所產生的不同產品，只有在他們形成過程類似的情況下功能才會類似。我們最經常藉著使用一模一樣準確的成分來達成產品尚可差強人意的準確度。相反地，兩個有機物，即使在基因上同出一源，其相似處卻僅僅只限

於表面;越仔細觀察，其差別也越大。我們給大血管取名字，卻忽略小血管，因為小血管的構造每一個個體都不同。自然界追求勝任適應，而不講究準確或一貫性，並且每一個階段的發展都受到目標的制約，而非精確程式計畫的結果。研究調查員經常可以將早期胚胎的一大部分除去，而竟然只有輕微或甚至沒有任何產後的效應。在它們的每一個 DNA 裡，不同的個體差異至鉅；自然界不但包容多樣性（以演化的角度來看），而且她也重視這種多樣性。當然這也是為什麼我們藉著檢驗血液樣品抽樣或身體其他部分的 DNA 便可以區別不同的個體。有些個體之間的差別或許可以被使用在社會族群中，便利個體之間的辨認;換一個較淺易的說法，如果我們每一個個體都長得一模一樣，那我們就會有極大的麻煩了。但是大部分細節上的差異都沒有立即的目的，它得到包容是因為它對我們的適應並不會造成任何影響。

缺乏基因，就無法造成結構|這通常是我們驗明基因的方法，所以基因的必要性無庸爭議。但是即便有其必要，基因也仍然不夠充分，就算是以純粹資訊的角度來看仍然如此。當早一代的進化生物學家(始於德里斯契)發現胚胎無論承受多少摧殘，都毫不影響它們所產生的複雜有機體的生存能力，他們便為這一個現象鑄造了一個新名詞；相等的終極目的（*equifinality*）。這個名詞至今已不再沿用。文字或許難以取代真正的意義，但是這個名詞或多或少可以喚起我們的注意，告訴我們自然界如何使用精湛的反饋控制，讓一些在結構細節上僅僅粗略相像的機器，其功能竟然可以達到幾近完美的相近。

## 例行維修

鮮少有任何機器能夠不留意自己的健康狀態還得以終老。除了偶發事件和意外事故外，總是有一些小零件會在整個機件朽爛到需要丟棄之前便先行磨損。或許根本是一個暫時的零件，比如過濾器或彈性墊圈，他們較永久的零件還要好用、經濟;或許根本是一個藉磨損來工作的零件，比如汽車的煞車踏板;或許這機械的日常操作需要憑藉清理濾網及定期添加潤滑劑來達成。我們的問題是，生命的機器是否也需

要這樣的例行維修？故障送修危及有機物的永續存在；弱病的、傷殘的，不但做為掠食者無法犀利地發揮獵捕行動，要是成了捕食的對象，更是連逃命的機會都沒有。也許睡覺及冬眠在這個維修行為中扮演著某種角色吧！.但是，大多數的有機物並不旋事這兩種活動；或者我們可以說，有機物的設計特別，維修時不需停止動作？

這種現象真是非此尋常，有機物竟然能夠持續不斷地在它們裡面重新建造所有的事物，它們是如此地無法預料、晦暗不明，所以長久以來一直沒有被我們察覺，也見不到任何的建議。舍恩海默（Rudolph Schoenheimer）在一九三〇年代末期，使用當時剛剛可以取得的同位素「標記」合成物來餵食老鼠之時，便已經察覺這一點，他記載寫成的（生物體組成的動機狀態）（The Dynamic State Of Body Constituents）至今仍然值得一讀，其中雖然不乏疏漏之處，但是整個著述觀點仍然歷久彌新。舍恩海默在一九四一年辭世，死前剛剛做完了有關這本書觀點的演講。若是他今天尚存於世的話，或許早得了諾貝爾獎！.只可惜諾貝爾獎從來不會頒給作古的人！

同位素標記可以將原子加上記號，使它能夠與其他化學性質相同的原子分別出來。舍恩海默便是以標記著氮原子的食物餵食動物，藉此觀察這些新的氮原子的去處，不然這些新的氮原子就不免被原來動物身體中大量的其他氮原子所吞沒。他想要了解這個額外的氮原子到底如何被排出——就是這個被標記的原子最後全隨著哪一個排泄物出現。更明確一點地說，他是以含有標記氮原子的蛋白質餵食已經停止生長的成年老鼠。照理說，額外的蛋白質輸入便會引起額外的氮排出，而且是以意料中的平常形式/尿素出現。但是出乎人的意料之外，大多數的標記氮原子卻沒有在鼠科的尿液裡出現，反而是沒有標記的氮原子取代了它們的位置，這些未標記的氮原子很可能是來自老鼠身體內原已存在的蛋白質。基於老鼠並沒有縮小或體格衰敗的因素判斷，他們勢必在體內添加了許多新的蛋白質，這些蛋白質與那些轉換成尿素而排出體外的舊有蛋白質應有完全相同的數量和組合二遭樣



的預期終於在解剖老鼠屍體時，在它們身體組織的蛋白質中，發現了這些上了標記的蛋白質而得以證實。

所以我們便不可避免地得到了如下的結論；有機體絕非機械式引擎，只有在引擎需要服務工作時，食物才供給能量和物質。相反地，許多食物會成為有生命機器的一部分，即使它已經不再生長亦然；同時，亦有一部分等量的機器會分崩離析而遭到排出。這個現象幾乎無時無刻不發生在所有的有機體身上，其效應幾乎包括有機體細胞內的每一種物質。細胞內的物質，能夠在絲毫不影響任何細胞或有機體整體組織的情況下，得以持續不停地更新交迭。這真是一件了不起的事情。有機體保存原來的結構，由同樣的分子組成，但是駐守參與其事的特定分子卻短暫無常。舍恩海默的用語；[生物體組成的機動狀態]，因此而來。

這個機動狀態，正代表著生命系統及無生命系統的真正差別。四千多年前古埃及人搭成金字塔，某中的分子結構至今仍然不變，而你卻絕不是一年以前的那個人。從組織上來講相同，但是從物質上來講卻不相同；個體有機物的結構組織，將會超越其物質組成而持續存留。而且整個更迭的過程，並非只是對某一種即序毀壞的物質之抄襲行為而已，它是一種全新的合成。製造生物最重要、最複雜的物質，即蛋白質所遵循的說明指示持續不斷地自基因物質中重複讀出。細胞不需要分裂來達成，有機體對於這種機動狀態也絲毫沒有給予任何形態上或是顯微鏡下的暗示。

所以為何多此一舉？我們為什麼需要在這個生物力學故事中加入蛋白質的替換更迭——屬於生物化學的情節，以及討論生物體組成的機動狀態——屬於生理學範疇的情節？首先，蛋白質不是最穩定的化合物，安定性會隨著溫度升高而降低（它們會腐壞得更快）。溫血動物——要包括哺乳類及鳥類——身體的溫度都維持在相當高的程度，足夠使蛋白質以極可觀的速度變壞，即使是非溫血的有機物，也須面對同樣種類的衰敗，只是速度稍微緩慢而已。這種現象使得維護修復成為絕對的必要。這些更迭替換的時間預定表也正說明了一個有機體所面對的問題。結構蛋白質越穩定，就越

能持久，可溶性蛋白質越不安定，就越不能持久。在此，我們可以引用物理學家在比較不同放射性同位素分解有多快時所使用的「半反應」，此處的「半反應期」，即意謂著一半量的某種物質被替換更迭所需的時間。普通老鼠獸體蛋白質的「半反應期」包括肌肉、肌腱及骨骼——相當於二十一天，但是它的肝臟和血液的蛋白質半反應期卻只有六天，平均成人所含蛋白質的半反應期則大約在八十天左右。這個替換更迭的過程是如此地完美無缺，使得你連多年以前發生的事情仍然不會忘記。

所有細胞內的蛋白質都共享這個機動的狀態（相對地，基因的物質 DNA 是受到修復——經常如此——而非全面的取代），至於細胞外的物質，例如毛髮，我們純粹只是不停地製造與拋棄。哺乳類動物的紅血球，則是在維持了平均壽命的一百二十天左右之後，整個遭到丟棄，但是他們其實並非真正的細胞，因為缺乏細胞核使它們無法指揮蛋白質的再合成，我們必須重新完整地製造它們。

簡而言之，自然界不是單單一次就打造完成它的小玩意，而是在永無盡頭、永不休止的艱苦過程中，不停地製造她的小裝置。我們禁不住想要再問一次，為何多此一舉？或許是因為蛋白質的不安定性，使得它們為了被有機體使用便得保持不斷的維修；或許是因為這些蛋白質由多種胺基酸以某種特定的秩序排列而成，它們的構造複雜、資料又太過繁多，以致無法找到任何合格的檢錯系統足夠承擔整個維修的工作。所以結合了這樣的複雜性及不安定性，使得有機體除了進行大盤的更替工作外別無選擇。

## 非例行維修和機動性更改

除了漫無目的的分子混亂之外，有機體也得承受大規模的破損和傷害，如骨頭挫傷、皮層撕裂、以及附屬肢被咬掉等等。有時鄰近的細胞會做有計畫的增殖，將傷口以疤痕組織癒合，有時傷口修補得如此準確完美，甚至連一點痕跡也不留下。我們人類到了成人階段，不管是否受到多少現代醫藥的補救調停，早都已經身經百戰、傷痕累累了。至於有多少的修補進行、多少的能力再生，則每一種有機物的每一個

部分都大不相同，但是所有的多細胞動物及植物都或多或少具有某種程度的復原能力。

修復和再生或許對我們來說並不陌生，但是卻非普通的工作。即使是樹枝自樹上斷掉，或是人的割傷燙傷，要為它們補上一點點的疤痕組織，其系統都需要具備特別的自我知識。細胞增殖需要在適當的指導控制下刺激發生，然後終止，至於為我們人類所不太擅長的全面再生，則更需要選擇正確的時間、在正確的地點、製造正確種類的細胞；血液和神經供應必須重新連接、外在覆蓋層必須加長延伸等，一切都是為了使事物呈現原來的風貌。所以這些幾近自主的細胞總要設法遵循它們個別的指示密碼，在完美無間的合作中完成艱鉅複雜的任務。受傷的脊椎動物容易因感染發炎或血液流失而死亡，但是它們卻仍然能夠在嚴重的組織喪失之後修復還原。蝶螈和蜥蜴能夠再生整個失掉的尾巴；一隻火蜥蜴甚至可以重新長出整隻腳。無脊椎動物的神技更是多得瞠乎人目。舉例來說，海星可以再生身體的一半，這對許多牡蠣採拾者來說造成極不愉快的意外經驗，因為他們發現，當他們將捕食牡蠣的海星切半，再將其兩半丟回水中的時候，竟然無意中增加了敵人的數目。一些更簡單的扁形蟲和海葵生存附著在極硬的表面上，故意混淆再生及繁殖，當體內各部分同時生出了一個朝向不同方向發展的念頭時(是半個念頭)，一個就變為二，再生也就開始了。

無論是替代作用或再生作用，都不能涵蓋自然界供應有機物終身照應的全部範圍。自然界裡尚有另外一些作用，因為我們太熟悉了，以致忽略它的特別存在。運動某一塊肌肉，它就變大；將四肢的一部分加上石膏一個多月，肌肉就會因為身體再循環而造成萎縮。骨骼也是如此，缺乏使用就喪失礦物質，變軟變弱；重複使用承重，就密度大增、增加血液流入器官的流量就是藉著運動引起的毛細管增殖，供應器官血液的血管就會變寬變粗。許多與老化有關的變質退化都並非是因為年紀、而是由於廢棄不用所造成的。長時間的太空飛行會造成各式各樣嚴重的生理衰退，所幸這些改變大部分仍得以逆轉。像我們這一類動物的身體各部分元素，就會

因應我們使用程度的改變而隨時不斷地重新做適應調整。

因應使用率而造成結構改變並非只發生於動物身上。添加重量在樹枝上，再加上一股重量，它就會(當然這重量不會太過，不然樹枝就會折斷受傷)微微地將重量舉離地面。砍倒一棵樹，鄰近樹木日照增加的那一側樹枝就會因此而增長。增加樹木的一側負荷，樹幹就會在一絲不差的地方增加木材，以抵銷額外的壓力。較達爾文還早的演化理論先驅拉馬克學說，強調生物對某種特質的重複使用會直接導致它在遺傳上的功能擴大，這個觀點不過是將上述為人所熟悉的現象從個體擴展至族系的發展上而已。這個外推法雖然合乎理性，但是對於地球上的生命來說，卻是完全錯誤的。

我們已然了解有機體是如何努力積極地反應，其中有兩個觀點較細節來得更重要些。首先，在有生命的機器裡，這種反應所扮演的日常角色與無生命機器裡缺乏任何同等角色的情況成為鮮明的對比。考古學家若要決定石頭是否曾經被當成工具使用、或者工具如何使用、物件目的是為裝飾或是實際用途，都得靠檢視物件的磨損使用情形及它被磨損使用的方式來判斷。相對於此的，同樣的考古學家藉著研究骨骼的異常發達——就是越使用反而越增大的現象，來了解人類如何完成重複性的工作，譬如碾磨穀類。只有一些細胞以外的部分已不全然處於其功能的全盛期，才會因為使用而耗損，比如牙齒表面及軟體動物的外殼等等。

第二點，所有這些修補、再生和要求反應的更改，都不約而同地開啟了對反控制的需要。整個系統必須要不停地將現行所有拿來與預計達成的狀態做比較，因此便需要收集它所達成、以及所沒有達成的各項資料。整個過程便致力於減低目標與現行狀態之間的差異，再一次重新定義了反饋控制。全部系統的關鍵要素在於那個可以告知現狀的感應器，也就是最足以顯示自然科技是如何有別於我們的人類科技。我們相當了解，用來控制四肢位置或是心臟跳動速度的感應器——屬於高速神經肌肉和神經內分泌的反饋系統的一部分。我們同樣也獲得了許多關於資訊攜帶連接器的知識，包括那些自感應器擴散開來、或是隨著血液或其他內在液體流動的化學

物質，鮮少有人會在植物中聯想到它們的感應裝置。但是，植物若要長離地面，便得倚賴重力探測器；若要迎向陽光，便少不了感光器，此不過略舉二一例而已。

有機物對其自身的控制，層次還要更低更基本。除了少數幾個例外，每一個細胞都包含了整套的基因指示，就是全套食譜大全。雖然大部分的時間、大部分細胞內的大部分資訊，都駐留在它的磁碟片上不動，即使是在再生的強烈要求下亦然。除了少數情況之外——其中尤以無性系繁殖最為出名——我們是無法將這些資訊喚回使用的軟體中的。所以，有機物受到高度的抑制、精心的鎮壓。為了不讓所有的事物同時發難，幾乎所有的可能性上面都必須加上一個蓋子。這種壓制有時候也會失敗，那就是當某些原該自重自愛的細胞，竟然在一陣複製的狂熱中釀成了癌似生長蔓延的時候。多年前，神經生物學家薛林頓（Sir Charles Sherrington）便曾經指出（用大腦來做類比），使用電話時最重要的一件事，不是如何接上正確的號碼，而是如何防止整個世界的錯誤撥號。

我們因此得知，自然界的製作過程與維修過程攙合得是如此徹底，以致我們難以一一分辨。某些個體有機物（比如我們人類）只能生長至某種固定高度，但是另外一些有機物（例如許多樹木及魚類），卻可以終其一生保持不斷地生長。然而，不管是哪一類有機物，生命的發展從未休止過。

## 要多好才夠好？

有生命的機器是一群競爭性的集團，不管從事的是一場公開或幕後的戰爭，他們始終都需要為食物、能量、空間及配偶不停地奮鬥。競爭就會產生贏家和輸家，也就是適者與不適者，而這種矛盾衝突極像是不加節制的資本主義經濟，儼然助長了惡劣的社會達爾文主義理論。在這個理論中，功能良好的個人、種族和國家之所以能夠達到富裕繁榮，是因為他們是生物界的適者，而其他那些不能達到富裕繁榮狀態的體制，雖然值得我們同情，但是任何減輕他們困苦企圖，都會無可避免地導致原已低落的適應力之崩潰。所幸這個理論有一重大的缺失，便是生物演化觀點之適應力對於人

類社會完全不適用。

但是，體認自然界競爭的存在又帶出了另一個可與人類活動相比擬的地方。生物設計的品質有多優良？這種自然界具有優良設計的假定，至少在她內在本質的約束下，充塞於整個人類對動物如何生存運作的研究中。至於是用天擇還是用造物主全知的角度來證明這個論點，想必沒有什麼太大的差別。

近幾年來，這個優良設計的假定也經過了各式各樣的評估、非議、檢定及量化的分析，完美的最佳條件(我們或許可稱之完美主義)也遭受了來自演化生物學家們的多方撻伐。雖然從廣泛的層面來說，他們所非議的對象只不過是一個稻草人式的假想敵；優良的設計並非是什麼嚴苛的原則，而是生理學家們使用的假設前提而已。我們的確知道，有機體絕非是完美的典範——畢竟，沒有一種生物元素是在沒有任何情況的制約、沒有任何時間的限制下發展出來的，但是我們假定生物經過理性的組合，其間並沒有摻雜大量的無益功能，至少可以給我們進一步探討生物各種特色功能一個合理的出發點。不管這個設計優良的假設有多麼冒險，我們生物確實情況良好、適應極佳。研究生物如何運作的實際問題，乃是在於絕大多數的結構都是多功能的，而要在這麼多的功能中，實在難以自我證明誰才是決定結構設計的顯著因素。

但是良好的調適、理想的設計，並不意謂著完全準確一絲不差的製作，我們被建造的方式絕不是如此的。科學資料的不明確、無組織、零星四散，我們常常將之歸因於測量法的不正確，但是在生物學裡，它們卻也同樣反映了被測事物的真正變動情形。光速或碳原子質量能夠維持恆久不變，或許是因為我們受到限制的測量能力，但是人類肝臟細胞的直徑卻有其實質上的大小差異。自然界裡諸如此類的零星小事情鮮少為人注意，至少我們可從一些非正式的證據上，得知自然界對變異本身的容忍度。每種結構體都各有不同；她所建造的事物，有的根據非常嚴格的規格說明，有的卻從不堅持；天擇本身必然也是以這種變異性做為目標吧！

自然界許多事物的變異程度，必須在不喪失它們適應力

的條件下，不超過她所能容忍的範圍。若是過度的標準化不需要付出額外的代價的話，那麼就應該堅持不懈地進行。舉例來說，許多取代可以發生在蛋白質的胺基酸順序中，而絲毫不影響蛋白質的工作品質，但是這種取代幾乎沒有發生過。當某一種胺基酸為數眾多的時候，顫然我們的合成機械並沒有取捨任何胺基酸的選擇自由，而且取捨變異的結果也無足輕重(但是另外一方面，個體之間的變異卻會增強適應力。當子系被放入一個不安的環境中，不管是因為氣候或是其他因素，其中只有少數得以存活，此時完全的複製或許就無法增加存活者的數目。這個現象為有性生殖的普遍性提出了論據)。

自然設計的品質還可以用另外一個角度來探討。思想敏銳的人類工程師不相信任何的估計和假定，企圖設計出遠優於最低功能的各種事物。我們傾向於超額建造，自然界又如何？我們將造成失敗的負荷和經常承受的最大負荷比率稱為安全係數，任何比率值超過一，就表示超額建造。要決定自然界的安全係數遠比想像的困難。首先，天擇並不事先預料，而這裡所謂的安全係數通常是代表事先預料任何可能的失敗，而非事後的補救；不管是由工程師再重新設計或是自然界繼起的選擇淘汰。其次，我們往往無法輕易地估出自然界結構的最大可能負荷。有些物體承受穩定而又可預期的負荷，而另外一些物體卻隨時得面對極度不穩定的負荷變化。再其次，自然界產物的使用年限差異極大，各個有機體的生命歷史與他們的生命期限更是各有不同。好比橡樹平常可以往上生長二十年才結出橡實，卻在第十年時因為停止生長喪失了它所有的適應力。然而，這棵橡樹的蔓藤則因在第五個年頭時已經撒出了種子，以致損失較經。大部分的人類產物都是在一開始便能提供完全的服務，而有機物卻要等到繁殖結果才能實現真正的獲利。

姑且不論這個題目多麼複雜艱深，一些生物學家仍然逞其蠻勇著手解釋安全係數及有關的成本效益分析。樹木折斷樹枝，蜥蜴失掉尾巴，兩者的成本都不大，損失也不是什麼了不起的事，所以樹枝和尾巴都不會擁有極高的安全係數。



有兩種深海的頭足類軟體動物，烏賊和鸚鵡螺它們的浮室每天都要面對四周壓力造成的崩潰可能性，它們的安全係數相對於它們所處的環境，大約只維持在四左右。但是這種壓力通常都格外地穩定不變，並且能夠事先預知。骨骼和肌腱的安全係數則較高，約在二和六之間，其中肌腱的安全係數要稍微低於骨骼。飛行動物的骨骼重量較輕，它們骨骼的安全係數也較低，或許這是因為它們身為飛行生物，過度的重量會造成極為不利的後果。樹幹的安全係數大約在四左右，一年生的植物樹莖則在二左右，但是此處所顯示的資料非常有限、缺乏明確性。我們對植物的生長行為特別關注，或許是因為我們為了農業目的常常要刻意地改造它們；或是因為自然界的暴風雨常常惡劣難難以預期；也或許是因為人類整片的作物田和大面積的人工林，總是不時遭到休止的命運。

## 無生命的工廠

我們之中少有人曾經涉足工廠，所以我們對人類如何製造事物的知識只不過此自然界的製造稍為熟悉一點而已。這些分段操作、大量製造、集體裝配線所製出的產品卻是我們賴以存活的事物，而我們卻不甚了解，真是一件不幸的事。除非我們能夠忍受極度低落的經濟狀態，不然手工製造注定只能停留在偶爾性、選擇性的階段。農業技術的進步，正好就可以持續地反映這種注重標準化、尺度和減低人工的經濟型態；現代社會裡速食商品的供應簡，也把同樣的必要性帶入了另外一個新的領域中。

雖然在古埃及、羅馬和中國的文明中不乏各種物品的生產製造，但是大量製造的開始還是屬於近代的事情。以美國為最的許多歷史學家都曾經仔細描寫現代工廠的發展情形；在這方面的進展，新大陸或許領先了舊大陸許多，北美洲所經歷的工業革命與北歐稍稍地不同，後者主要依賴水力，而非以蒸汽引擎著稱；它的城市多屬座落在急湍匯入通航河流之處的小型城市，而非集中在鐵路中心的大型城市；後者也受到機械化高價人工的刺激。這段工業革命的故事可以藉我們奉為英雄的各個人物事蹟一路數來。我們首先遇到惠特尼（Eli Whitney）和他革命性的理論，認為藉著擁有最低



技術的勞工，機械零件就可以被準確製造，以利零件間的互換；遇到泰勒（Frederick W. Taylor）和吉爾布里斯（Gilbreth），他們有關時間和運作的研究能夠將製造系統的組織科學系統化；又遇到亨利福特和他大型製品多重裝配線的統合生產法。做為沙文主義式的美國人，我們習慣性地忽略許多主要的發明家，像是布魯內爾（Mart Brunel），他在拿破崙戰爭期間為皇家海軍大量製造了木製的船舶滑輪。

## 尺寸趨向

我們人類多採向下建造，而非向上建造。我們的工廠——即使是組裝最大型飛機波音七四七的工廠——都會使他們的產品相形見绌。對於一些例外情形，比如大型的建築工程以及全球性的通訊網路，吾人或許也可以提出關於工廠和產品需要被重新界定的異議。但是無論如何，我們在這裡所要討論的，是以平常角度看待的大量製造。此外，以 Cope 定律來看，他認為生物的體積大小通常會隨著生物族系的演化增加，顯然人類的科技正是反其道而行，也就是向下建造。早期的蒸汽引擎體積龐大、動作緩慢，其開始速度之慢，甚至進氣閥和出氣閥都可用人工操縱；讀者諸君是否還記得圖八~十二所展示的鈕克曼引擎？製造技術日益提高的準確度允許了更高的壓差、更快的操作，使得引擎更小，動力卻不減。早期的水車既巨大又慢；現代的渦輪則輕小又快速；電子設備的大幅度縮小則肇始於一九一一〇、四〇和五〇年早期各種零件的尺寸遞減及電子管中各種元件數目的增加；近期數位積體電路的精益求精，則更將早期已然開使的這種趨向推至一個登峰造極、令人難以想像的層次。

## 控制

有關於各種工作所牽涉的複雜度，人類工業使用的是較自然界更明確、更詳細一點的指示說明。相對於自然界，我們較少使用反饋控制，這至少反映當我們執行某一特定工作時有關反饋的迴路數目上。這並不是意味著在製造過程中反饋控制不重要，事實上，現代的機械裝置若是少了它，是根本無法實現的。人類反饋控制的使用自有其奇特的歷史。早

在工廠誕生之前，就有使用反饋控制的極端例子，那就是以件計酬的手工製造，其主要工作極端地依賴工匠的敏感度，包括他們對其成品的視覺、觸覺、甚至聽覺和嗅覺的各種感應。人類的機器缺乏如此細膩的感官輸入，所以它勢必要具備較少、較簡單，因此能夠更快的迴路。但是機器最終極的準確度和變通性仍然視反饋控制所能達到的層次而定，就是它對現階段達成功效的察覺認知。至於測試最終的產品決定它們是否合乎某種標準，則真正屬於事後之事。所以從工匠業轉型至機械為主的製造業，提供了人類許多刺激的因素，推動機械朝向具有感應裝置的層次及熟練技工的判斷方向發展。大多數的機器人正是如此；它們具有很好的感覺裝置、快速複雜的計算程式，以及反饋迴路的配合。

## 維修

我們只有在極不嚴謹的角度下，才可以說人類科技和有機物內在物質不停地替換更迭作用有一點相似之處。我們四周零星分布的物體依循著它們預期的安全使用期限被更換，這裝置需要的技術層面越高，其失敗造成的危險就越大；設計裡多餘物的成本、或是機器不定期停工的成本越大，我們就越加願意在它們完全故障之前將它們做零零星星的更換。讀者諸君當然可以了解，此處我所形容的正是我們的商用客機。基於人類基本技術的穩定，飛機的使用不會很快成為過去式，所以我們要求一般飛機都具有極長的使用年限。但是經過十年、二十年的使用，想必除了飛機外殼之外，沒有什麼部分還能夠與當初從工廠飛出來的那架飛機比擬了，尚未故障就加以更換的例子還不止於此。我就聽說有一些大型建築物將裡面的電燈泡做定期的更換，不管它們是否已經燒完，更換下來的燈泡便以低價賣給那些經濟稍為拮据的用戶。

## 品質標準

雖然繁殖適應力是生物特有的屬性，但是對於現行工作的適任也提供了類似的共同標準。對於自然界而論，任何事物趨向一致，只有在與適應力發生關聯時才事關緊要，而且

我們也曾經遇見過「相等的終極目的」這種現象，知道自然界實在是遠超乎我們技術經驗之外的世界。對於人類科技來說，物體細節的統合一致則具有格外的重要性。物體功能要達到整齊畫一，通常得憑藉建造過程的持續一貫，零件要能夠彼此互換同樣也需要高度的一貫性。自然界卻正好相反，不僅對於互相交換毫無興趣，甚至還積極反對它。為了不讓我們與病原體和睦相處，我們的免疫系統不知發揮了多大的威力，使我們幾乎摧毀了它才可以讓個體之間達成器官或組織的互換。心臟的移植手術，困難度尚不如身體內部進行的勸服接受工作（但是這種排斥現象並非是生物的共通特性；舉例來，昆蟲就可以容忍大幅的腺體或其他器官移植；法國葡萄可以長在美國根上，而這個根對某種病原體有著特殊的排斥作用）。

人類科技的品質與生物的適任在某一個方面可說粗略相似，「越好越理想」全然不是說明零件或是整個機件的實用標準。對於機器來說，最重要的標準乃是在於恰恰足夠的品質，使它能夠完滿地達成指定的工作。到底是加強一點品質可以抵銷它的成本呢？還是降低一點水準更能達到真正的節約？對於一個裝配線上小小的元素，真正重要的是它的品質可以多差，可以從最佳的理想形式分歧多遠仍然可以滿意地適任，這即是不同解釋的適任。鑑定一個複雜機件的設計品質，其重要標準乃是在於，它對於零件的品質差異有多大的容忍度。較佳的設計，便是能夠以較草率的零件來完成製造的設計。

## 安全係數

在人類科技中，安全係數當然有著一段悠久而輝煌的歷史；生物力學雖然借用這個觀點，但卻必須使力詮釋、牽強附會，使它幾乎難以辨認。但是不管這些不明確是來自我們所遇到的負重，還是來自我們自己對設計的分析，若是沒有這安全係數，現代工程真不知從何開始想像。真正的真理、十足的明確，以及徹底的安全，只有在律師和神學家的字典裡才找得到。其餘的我們也只有在這個難以完美的世界裡，以我們純粹統計式的期待、過分簡化的假定以及漫不經心的

督察勉強維持著。我們確實可以自失敗中學習事物，但是我們卻更鍾意於別的教育方式。

關於人類的製造尚有一點值得我們注意。從歷史上來講，人類科技持續在減少對自然材料的使用，並且增加它在使用自然材料前對這些材料的修改程度。或許這是肇因於冶金術和高分子化學的日益複雜進步吧，人類科技至今，或許尚不是很明顯地體認到，自然材料的選擇完全是為了它們對自然結構的適合，而非為了我們人類的應用。自然材料的原始形式，通常較不適應要求同類組合一貫性質的現代製造方式；自然材料所要求的，是工匠們共鳴式的交流處理，而非裝配線上快速劃一的製造程序。木材靠自己生長，但是鋁製、玻璃纖維製的獨木舟遠較木製便宜。石材需要開採，而磚塊必須經過成形及窯燒，但是磚牆的最後成本總要低過石牆。

本章一開始的觀點，在此值得我們重申一次。初看它們的製造方式，自然界和人為科技頗為不同。經過更深入的分析、更進一步基礎因素的探討，我們發現它們不但不類似，反而更分歧。兩者是如此地分歧，以致連共通的詞彙都是大家避免的對象。日常的詞彙，比如「組裝」、「聚合物」、「藍圖」、「安全係數」、「設計」以及「預定的用途」，都是屬於我們製造系統的用語，若是將它們用來形容自然系統，我們不免冒了不少自欺的風險。同樣地，「天擇」、「適應」、「再生」、「機動狀態」及「衰退」都是形容生物現象的用語，將它們用在人類製造上，恐怕也會因一時不慎的語言誤導造成真正的危險呢！

## 第十二章 抄襲回顧史

抄襲自然來做成更理想的工具——生物仿效（bioemubtion）——並不是什麼新的觀念。古希臘神話中戴達魯斯（Daedalus）和他的兒子伊卡魯斯（Icarus）便想要以襲自鳥類的翅膀，逃離他們被拘禁的克里特島；「接著他以麻線和蜜蠟，在這翅膀的中間和底部綁牢羽毛；並且將它彎出一個緩和的弧線，宛若真鳥的翎膀。」接下來的奧維德（紀元前四十一年到紀元後十七年）他的《變形記》一書中/第二次論及這造福人類的抄襲行為。伊卡魯斯墜海死亡之後（他的蠟製翅膀想當然沒有符合美國聯邦航空局的標準），戴達魯斯又繼續做了十二年真正創意的學徒；「他觀察魚的背骨，以它傲為模型，從一條細長的鐵片上切出一排鋸齒，因此發明了鋸子。

除了傳說中的福祉不算，抄襲自然至少有三點吸引我們。排名在最先的，當然是因為自然以精密多樣化的科技傳達給人類無比優越的印象。暴風雨中的樹、奔跑的馬、蜘蛛結的網、飛行中的鳥，或是跳躍的跳蚤，看似尋常，卻遮掩不了它們卓越的機械性能。即使再嚴密的檢查，也無法否認它們是優良設計的概念。自然界的每一種發明都有著某種技術，超乎人類科技經易可及的範圍，而且超過的程度並不是一點點。

第二點吸引力，則來自一個頗為奇特的動機，一個與現代人糾結不清的動機。對於絕大部分的人類歷史來說，自然世界與人類世界永遠採取著對立的立場。自然通常是我們需要征服、利用的對象：我們對於其他物種，也是以看待有機物的普通態度視之。如今，自然世界對人類的畏懼日益減少，但是自然受到毒害的機會日益加深。試問我們為何改變態度？當人類日用的肉食品全數來自超級市場，當蝗蟲早已無法危害我們的農作物，當中央空調和水管裝置已成了家家戶戶生活的必備條件，自然界的美學當然便成為更大的魅力。

我們信奉泛神論，或者採用威爾遜(E. O. Wilson) 已較少輕蔑的字眼「親生命的」來形容這一股趨勢二邁種與自然界的親密關係，促成了我們對保護自然資源的最後一刻努力。也同時促使我們認識自然界的純正，意即在道德上認同自然界所作所為的優越性。

第三點吸引我們之處，反映了文化和經濟因素結合後的影響，人類科學和技術的支柱有賴於持續穩定的明確承諾，或至少得到過去成功的歷史保證。不管參與者的動機何在，這種承諾保證只有在以最實際的報酬，而非以任何智力或心靈啟迪方面的標準來衡量表示，才具有最佳的效益。一些特別有效的承諾包括：工業獲利、疾病紓解，以及軍事優越性。上述的每一個承諾與抄襲自然便可使我們大幅度邁進的建議，都十分吻合。

但是「抄襲」，似乎難以做為我們大步追隨某後的理想口號，所以有一些更好的字被新造出來。第一個字「仿生學」(bionics) 由斯蒂爾(J. E. Steele) 在一九六〇年代下的定義：一種系統科學，其功用的發展主要根據有生命的系統，或是具有生命系統的特徵，或是仿倣它們而得二在此，「系統」二字似乎自然而然地便成為大部分工程師的用語；神經系統和生理控制，彷彿是人類科技的控制論與系統論的生物性類比。模式辨認和反駁設計，尤其受到重視。但是「仿生學」這個用語，近期已有衰退之勢。一機器人技術和「人工智慧」占據了整個舞台中心。此外邊有一個更近期的稱謂——「生物仿倣」(biomimetics)則要求更明確的機械性——比如合成物質和步行的工具等等。

但是抄襲行為是否有效？當然成效並不像是每一個有關仿生學、生物仿倣學的書籍、文章和座談會所陳述的那樣。我們對過去抄襲成功的例子，幾乎所有的引用典故，最多只不過是辨別其構成機械共同性的元素而已。所以噴射機仿倣鳥賊，或者吸杯抄襲章魚吸盤，都不能成為我們的標準釋例。一個共同的物質環境背景，才是造成技術共同性的最大驅動力。所以在這一方面，當我們宣稱過去的抄襲行為極為成功、廣泛之時，我們實則是對人類的創造力抱持著相當貶

抑的看法。

事實上，我認為成功的抄襲實在少之又少。但是要將這個主張拿來與更受歡迎的肯定抄襲主張做抗辯，又使我處境困難。所以，我的最佳援手，便只有努力搜尋抄襲的成功例子了。因此我扮起歷史學者，小心翼翼地檢視過往的紀錄，其間還得到專業的參考圖書館理員的協助，那便是我的內人啦。

我們設立了一些基本原則來界定我們的搜尋工作。既然這本書討論的是機械學，我們因此也照此限定我們的範圍。獲致的結果，必須是一種已經受到普遍使用的實際物體，而非一種原型樣品或是建議書。在本章的結尾，我們將會看到搜尋的結果，尚差強人意的生物仿倣例子全數不超過一打。但是，這些例子本身的趣味性遠比一張清單或是一個數目高得多了！

## 田園浪漫主義

首先，讓我們來看看一個被人重複舉證的例子。一旦經過仔細地審查，這三個例子都不免叫人失望。三個例子皆發生在英國，年代也粗略相當。

### 橡樹與艾迪石燈塔

在距英國普利茅斯(plymouth)大約十四哩外的沙洲上，坐落著艾迪石(Eddystone)燈塔三百年來一直為英吉利海峽過往船隻扮演著導航的角色。第一座艾迪石燈塔倒塌於一次暴風雨，第二座燈塔(木製)則毀於一場祝融。英國第一個偉大的土木工程師史密頓(John Smeaton)在一七五六年和一七五九年之間，建造了第三座燈塔(圖十二~一)，材料採用相互扣接的石頭，由普利茅斯市供應預備。史密頓揚棄這個燈塔前身所使用的長方形截面，也沒有採用為現代人所喜愛的均勻變細的圓錐形，而選擇了一種優雅的縮小方法，正如同他所述，「一株龐大向四處延伸的橡樹」。一七九一年他寫道：「讓我們考量一下它的奇特外形。下連於深埋地底的樹根，它便從地表聳立，有著一個肥大腫脹的基部，並在相當於一個直徑高度的地方，以優雅的弧度均勻變細，向中心生長，

一直到直徑減少三分之一，有時甚至減到原基底的二分之一。從此開始縮減漸趨緩和，邊緣逐漸陡削垂直，一直到某個高度幾乎形成圓柱體為止。」

在此處有兩個問題，使得整個抄襲主張籠罩於一片烏雲之下。首先，以任何工程學的標準而論，上述的規格說明太過於籠統。所謂的大致縮減」、至少三分之一有時到二分之一等等，皆非充分的指示 I 或許可算是類比或靈感，但絕對稱不上定量的模型。一八五〇年代的史蒂文生(Alan Stevenson)則提出另外一個問題，認為沒存一個開化的工程師會拿橡樹來做仿倣的範本。因為，橡樹的阻力主要來自它的樹葉，所以它不是一個局部承重的樑柱，而是屬於末端承重的樑柱。再者，橡樹構成的質材，是屬於輕量級、具抗張力的木材，而非沉重具抗壓縮力的石塊。史密頓只不過是在尋找替代說明他的設計圖解時正好在他的腦海裡浮起一個與他的燈塔形狀足夠類似的東西，而這個類比正是過去記載中從未提到的。附帶在此一提，這個燈塔如今尚完好存在，只不過換了一個不同的地點。原來燈塔所座落的石基逐漸崩潰，所以燈塔便於一八八二年從原地移走，在附近一塊地點被一座更大的燈塔取代。它的上半部亦被重新組合，挺立於俯視普利茅茨沿岸的海岬上自然形成了史密頓紀念碑。

## **鑿船蟲和挖鑿隧道框架**

早在十九世紀初，布魯內爾(Marc Isambard Brunel)在泰晤士河下穿鑿了一個行車的隧道——現在仍然為倫敦地下鐵所使用。在河道下築隧道在當時算是創舉，所以沒有多少經驗可供借鏡。開始穿鑿時，認為河川的底部土質較乾、較堅實，因而較適於鑽鑿隧道，而結果證明卻不盡然。事實上，在從開始一直到完工的整整十七年中，幾乎任何可能的錯誤都發生了：包括資金、工人、布魯內爾的健康等等所有的事情，只除了布魯內爾的穿鑿技術外。這個穿鑿隧道的技術重心，在於他新式的挖鑿隧道框架，他們在一路進行的挖鑿中，幾乎從無修改調整的必要。這個框架容許一次三十六個工人(圖十二~二)同時從隧道前方挖去，挖掘時沒有受到支撐的部分則極為有限。



鑿船蟲(Shipworm)的挖掘工具想必提供了這個重要框架一個很好的典範。嚴格地講，鑿船蟲並非一隻蟲，而是一種聲名狼藉的雙瓣軟體動物，它那一對比它身體剩餘部分還小的外殼，正是它穿鑿木頭的堅硬工具。一名年輕的工程師撰寫了布魯內爾的傳記，在這傳記中記載著他與布魯內爾隧道內一起工作的情形：

據他所述，有一天當他經過造船廠時，他的目光被一塊老朽的船板所吸引，這塊船板已經遭到一種極有名的木材殺手——鑿船貝(*Teredo navalis*)的貫穿。他先檢視了貫穿的情形，繼而又觀察了一下這些動物。發現這些動物長著一對貝殼的外殼，包在前部的外皮四周，以足部做為支點，便藉著肌肉爆發的威力使雙殼產生迴旋式的運轉，以一種漸進而篤定的方式穿鑿，就好像螺絲鑽。所以模仿這種動物的行為，便成了布魯內爾研究的重心所在。

這個例子雖然看去極為明確，但是卻完全不合乎事實。鑿船貝的鑽孔情形一直乏人觀察上個世紀後才由一名動物學家做了第一次的描述(經過了幾番波折)二七採取的完全不是螺絲鑽一般的旋轉動作，而是以外殼前後不停地搖動上宛若粗銼刀一樣，將其攝食的木頭銼成片片。其次，不管是布魯內爾想像中看到的、或是鑿船蟲真正的挖洞方式，都有別於挖鑿隧道所用框架的操作方式。在這個框架中，一個工人移走一片硬板，向前挖鑿一尺餘，放回原板，再對下一塊硬板重複同樣的動作。整個框架則藉著起重螺一步一步地往前推動。鑿船蟲穿孔必須貫穿硬木頭，而非鬆軟的沉積岩，但是因為身為完全在水裡的生物上，它不須對任何空氣與水的介面問題，也不須擔憂壓力的差別。布魯內爾的問題正好相反：要能夠取得通往下層土壤的途徑，卻又不能讓河流湧進。鑿船貝或許的確為挖掘隧道而非築橋提供了許多靈感，但是其餘的工作對它實屬神話。布魯內爾才應居功。

## 大型蓮花和水晶宮

一八五〇年，派克斯頓(Joseph Paxton)在倫敦設計完成了一座龐大的展示廳，名為水晶宮(Crystal Palace)，這個結構體不論是在任何一方面(見圖十二~三)都是蔚為奇觀、不同

凡響。展示廳的開放是在設計被批准之後的一年內，建築物本身使用了史無前的玻璃和模組元件，外觀極其惹人注目，大異於當代其他任何的結構體。而且它後來又成功地被拆開，在另一個地點重建。派克斯頓經常被人視為園藝家，雖然這是一件不容否認的事實，但是這樣的暗示，卻會使人對於他早先的成就和名聲產生一種錯覺。在他所處的世代裡，派克斯頓可說是溫室建築方面最卓越、最優秀的創新者，並且擁有諸多專利。其中的一項專利——屋脊和屋谷系統，允許一片廣大的區域由一塊水平而自行排水的玻璃屋頂遮蓋，這個玻璃屋頂正是水晶宮的最大特色所在。

水晶宮的屋頂結構反覆地被人引用做為抄襲自然的成功例子，特別是抄襲自一種土生於南美的巨型蓮花(Victoria Amazomica)。這種蓮花可不是普通蓮花，葉片伸展可達六呎寬，浮力有若小船，足夠支撐一個小孩。葉片的背面有一互相連接的精密支架系統，得以加強整片扁平葉片的硬度。但它仍然屬於浮力結構，以它背面的支架抵銷小型的波浪及水流的側面力量，而不需面對向下的重力。派克斯頓首創在英國栽培這種蓮花，種在他為贊助者德文郡公爵所建造的一座特殊結構物中，這個結構的最大創舉便是在它的水池中，提供了一個泉湧不息的水流緩慢地反覆循環著。

抄襲自然的聲明直接來自創始者本人，也就是在水晶宮建築期間派克斯頓對皇家藝術協會(Royal society of arts)演說的一篇講稿中，記載於一八五〇年十一月十四號的「泰晤士報」：

我們在一八三六年，就決定建造一座新的曲線型溫室，六十呎長，二十六呎寬。……後米這墨室就被用來容納這些巨型蓮花。而且我們還發明了一個水輪讓這植物生長的水域可以走生一些波動，所以我們終於在一八四九年十一月九號那一天，看到這個獨特美麗的水生植物首次綻放(然後拿出葉片，展示出來)。你們將會發覺，在這個例子中自然界是我們真正的工程師。如果你地檢視，並將其圖繪和模型比較，就不難看出自然界

已經使它具備了縱向和橫向的桁樑與支撐物。借用它的設計，我使能夠採用同樣的原則來建造此座建築物。

但是派克斯頓所講的這番話按照字面上來講，可說是與真的故事並不符合。在巨型蓮花所使用的支架系統中，有的支架無論其排列方向為何，與其支撐物的表面都有直接接觸。這與派克斯頓的屋脊與屋谷系統截然不同。在水晶宮屋頂上，水平的鐵樑以兩個垂直的方向相交排列，支撐其屋脊與屋谷，但是這些鐵樑的安排方式是採用傳統的一組架於另外一組之下的方式，而非採取蓮花的平面方向的排列。而且在他這個屋脊與屋谷的創新設計中，並沒有抄襲任何巨型蓮葉的蛛絲馬跡，反而是一些大型氣生植物的葉子倒像是它們打褶式安排的仿對象，讀者在此可參考圖四~三。但是謬誤尚不止於此，根據上面摘述的最後一段文字，「這個建築物」，意指派克斯頓一八一三年的溫室建築，而非一八五〇年完工的水晶宮，給予建築結構這樣一個屋頂，其形式與其說是為了解決工程的問題，還不如說是為了未來屋主耽溺式的美感。最後一點，早在演講稿發表的一個月前，在一篇附刊於（圖解倫敦新聞）(Illustrated London News)，名為，(派克斯頓在一八五〇年為偉大展覽會所設計的建築物歷史)的文章中，對這個巨型蓮花隻字未提。

在上述三個例子中，自然界的影響不可說是沒有，但是誇大她的功勞卻只是徒然貶抑工程師的卓越成就而已。或許這種膨脹自然的傳奇從未間斷過，並且隨著因工業革命而起的反技術專家論與田園浪漫主義而達到推崇的極點，這個現象在十八與十九世紀的文學、詩歌及繪畫中都可明顯地看到。詩人布萊克(William Blake)在面對他所謂的那些陰暗惡魔式的工廠時，從來不會有任何的讚詞。

## 抄襲成功的例子

讀者想必現在已經充滿了疑慮，但是我們即將轉入一系列較具說服力的主張。大家將會看到，成功的例子不但確實存在，而且成效輝煌。

## 鱒魚、海豚和流線形的身體

在空氣中或水中行進的身體，如果能夠形成我們所熟悉的鮪魚或鯨魚式的流線形，也就是前方變圓並逐漸往後方縮細的形狀上，它便能夠歷最低的阻力。觀察任何適當的海洋生物，不管是魚類、海豹、海豚，還是企鵝在水面下的滑行，你便會發現這全然不是幻覺：這些動物的前進看似毫不費力，那是因為它們遭遇極輕微的阻力，幾乎等於同樣大小之球體或人體的十分之一不到。

試問一個前方變圓、後方變尖的加長體如何大幅度地減低其阻力？這個微的現象一直到本世紀才得到合理的解釋。但在這之前，相當於一八〇九年左右，凱萊(Sir George Cayley)就已經設計出第一個特別低阻力的流線形狀，正是使用我們四周最好用的模型：那些在流體中移動非常快速的動物。他於這些設計有極明確的記載：「根據實驗發現，對於減低阻力，紡錘後部的形狀與前半部一樣重要……但是我擔心這整個題目在本上太過深奧，所以用實驗來探討它或許比分析論證更有效。而且在缺乏來自任何一方面的結論性證明情勢下，唯一可行的方式便是抄襲自然，因此我便引用鱒魚和山鵲鳥為這個紡錘體做實例。

凱萊於是便沿著鱒魚的身體在好幾個不同點上測量其肚圍，他把所得數字每個除以三，再將其結果用在一個加長木製物體的直徑上。二十世紀最富盛名的氣體力學家卡爾曼(Theodore von Karman)便指出，凱萊的流線形物體形狀與現代最精良低阻力的飛機翼和水中翼極為相像，所以在這一點上他的確是成功了。他也曾經自海豚身上取得類似資料(圖十二~四)，但是最為人注目的成就還是測量鰭魚的工作。

接下來的進展卻沒有太多意外斬獲。凱萊將他的木製物體模型一劈為二，再用其所得的兩個半部製成船身，並說道：「船隻的設計應該根據來自比人類更傑出的建築師，才能達到貨真價實的最低阻力。」但是這個步驟卻無法幸運地產生一個真正的船體，阻力不低不說，而且左右晃動搖擺，難以達成適當的穩定度。回想一下，我們便知道水面船隻所遭遇的阻力絕大部分來自水面上的重力浪潮，而非鱗魚或潛

水艇所遇到的那種阻力。設計更合乎原理的船隻，要到幾十年之後才出現。

## 鳥類翅膀和弧虛機翼

機翼上方呈曲線，下方較扁平，如圖十二~五所示，稱為弧度機翼。機翼擁有這樣不對稱的結合產生揚力阻力的比率，卻遠比傾向扁平機板的機翼或是上下對稱的機翼要高出許多。在早期的飛行中，飛機因為引擎效率和設計的限制，無法以高速飛行，所以高度的揚力和阻力比率是極為重要的事情。正如同前面所提到的低阻力物體例子一樣，在此實際的經驗又比分析理論先發生：從弧形機翼的發現一直到適當的理論出現，中間相差了好幾十年。

大約是在一八八〇年代，先後有兩個人向大眾展現了弧形機翼遠較斜的扁平機板為佳的優越性。在兩個個案中，鳥類的翅膀都是主要基礎或許可說是最重要的模型。英國的菲力普(Horatio Phillip)實驗了各式各樣的形狀，甚至包括白嘴鴨的翅膀(見圖十二~六)。德國的李連塔爾(Otto Lilienthal)，則做了更廣泛的一系列測量，他發現到鋼板只有在微微的弧形曲度下才能產生最佳的效果——上彎曲至相當於翅膀兩端距離十二分之一(八個百分比)長短的曲度。他並且註解道，這即是最佳鳥類翅膀的弧度，這樣一點點的彎曲竟能造成如此驚人的效果，難怪他會堅信鳥類是值得我們進一步模仿的！在李連塔爾意外死亡(一八九六年)的前幾年中，他同時也對鳥類的飛行進行研究，並建造了一種今天我們稱為懸掛式滑翔翼的飛機，其最終目的，乃是借由拍打翅膀的飛行器產生動力飛行。李連塔爾為我們留下來的的主要遺產，是一本難忘的著作《航空的基礎：鳥類飛行》(Bird Flight as the Basic for Aviation)

(除了菲力普及李連塔爾之外，還有第三個人也在一八九〇年代左右對這個弧形機翼發生興趣。這人便是蘭卡斯特(Frederick Lancaster)，他在解釋這種現象的原理上邁出了第一個關鍵的腳步。機翼如何產生揚力，是基於空氣在翅膀上方的流動要較空氣在其底部的流動要快的原因，根據伯努利定理一爐個現象使得其上方承受的壓力較底部為小，所以整

個飛機便會上揚。至於這快速氣流的來源卻奇特地超出我們的想像，也不是我們從學校或博物館裡習來的一點點文雅的故事可以解釋的。)

正如凱萊的船體事件一樣，接下來的發展便讓這個故事的主角失掉了他的英雄氣概和先見之明。萊特兄弟開始時對李連塔爾的數字堅信不疑：畢竟，他是一個為人稱道的工程師。所以他們便採用了他的機翼形狀及資料建造一個全尺寸的滑翔翼，結果滑翔翼產生的揚力太小，他們因此重新建了一風洞，並改用自己收集的數據資料。李連塔爾的錯誤，或許是肇因於他未將機翼放置於風洞中，而讓它們懸掛於旋轉手臂的兩端；當旋轉手臂旋轉了第一圈之後，測試物體便碰上了前一輪循環所產生的亂流。他的處境我不難體諒，因為我曾經也遭遇過同樣的問題。

## 鳥類和飛機的轉向

在我們的汽車和輪船所處的二度空間裡，駕駛掌舵所牽涉的不外乎藉著重新對準前輪方向、或是轉動在後的方向舵，因此便可以造成前進方向的改變。但是飛機的飛行遭遇的卻是三度空間。它們不但可以兩側搖擺、上下顛簸，還可以左轉右轉。早期飛行的嘗試發明對這種三度空間的控制都沒有給予它應得的注意，有些設計依賴我們熟悉的方向舵；另外一些飛行器還得靠飛行者移動位置，就像自行車選手側身轉彎一般才得達到改變方向的目的。這些飛行器完全沒有經過任何特定氣體力學的調整。

威爾伯和萊特兄弟便認真地研究這種控制上遠遠超過早期的開創世代。他們最原始、最重要的專利，便是描述一個控制系統，而這個控制系統的基本架構到如今仍然受到普遍使用。觀察鳥類對他們確實有助益，雖然後來奧維爾卻傾向於貶低鳥類功勞。但是根據一封一九〇〇年威爾伯寫給夏努特(Ovctave Chanute)的信，其中說道：「我對紅頭美洲鷺鳥的長期觀察，使我相信當它們有時因為一陣強風而導致部分身體翻倒時，是藉著翅膀尖的一股扭力才得以回復它們的側邊平衡。如果右級的後面邊緣向上扭轉，左翅向下扭轉，那麼整個鳥體便形成一個活生生的風車，可以立即開始轉動，

至於從它的頭部到尾巴的一條線，就是這風車的軸心……在我打算從事的裝置設計中就用到了這種扭力原則。」

簡單地說，萊特兄弟發現鳥類能夠調整翅膀尖端的角度，以控制身體左右的晃動。一端稍做傾斜造成前面部分微微地上彎，因此便可增強它的揚力；另一端的前面部分則稍稍往下彎，造成揚力的減弱。揚力如此不對稱便會導致傾斜，而且在這種傾斜的狀態中，整個揚力多少作用在機身側面，而非直接集中往上這個側面的力量(或許也有從方向舵來的些許補償力量)便會拖著機身沿著一個曲線路途前進。所以主要的關鍵，在於扭轉或彎曲翅膀，就好比萊特兄弟所設計的巧妙粗索配置，如圖十二~七所示。在這裡你可以照著他們的設計扭曲這個兩頭空空的加長矩形盒子(好比牛奶紙盒一樣)，示範形狀的改變二昌然，正如同奧維爾講到有關向鳥類學習飛行的事：「一旦你找到訣竅，知道你要留意的目標，你就會注意到那些在你沒有確定目標之前從未注意的事。」自從萊特兄弟之後，飛行系統所經歷的唯一主要改變，不過是將彎曲改成一對襟翼或是副翼，裝在真正機翼的外緣後側。這種裝置對於後來飛機漸趨堅硬的機翼可說是理想得多。其實副翼的功效也是一樣，藉著提高一翼並降低另一翼來產生有曲度的轉彎。

## 黃蜂及木製紙張

雖然製紙早就成為一種古老的藝術，但是人類開始使用木纖維來做為材料還是屬於近代的發展。一直到十八世紀，大部分的紙張仍是用棉布或麻布碎片做原料，但是隨著人們識字能力的增加，漸趨複雜的商業需求二這是一有限的碎布供應量便成了令人頭滿的問題。死人下葬必須身著毛織衣服(這是英國當時的法律)，以便節省製紙用的棉布、麻布。在一七一九年左右，法國一名昆蟲學家兼博物學家列奧慕爾(Rene——Antoine Reaumur)，便建議仿倣胡蜂築巢的方式(長足胡蜂和其親屬種類)，用木材來製造紙張：

美國黃蜂能夠製出質地極細緻的紙

張，與人類的紙張不相上下，它們是自所居之處的常見樹木中抽取纖維而成。它們教導我們，不

用碎布、麻布、紙張同樣可以用植物的纖維來製造。而且它們似乎也發出邀請，鼓舞我們嘗試好幾種不同的木材，看看它們是否能夠製成品質優良細緻的紙張，我們用來製紙的、碎布實在不是一種合適經濟效益的材料，而且幾乎每一個製紙漿者都知道，這種物質正日益稀少。紙張的消耗量與日聚增，但是麻布的產量卻仍停滯不前。

列奧慕爾本人並沒有製出任何紙張，但是在接下來的一個世紀中，便有許多人相繼嘗試從木材中製出紙來，並有充分的證據顯示這些人的努力與列奧慕爾和黃蜂有關。德國的薛飛爾(Jacob Christian Schaffer)，在一七五〇年使用各種不同的植物物質(有些採自黃蜂的蜂巢)，並摻入一小部分的碎布製成紙張，顯然他是列奧慕爾的忠實追隨者。在他有關製紙的論述中，到處充塞著描繪成年黃蜂、幼蟲及蜂巢的顯眼圖形。在一八〇〇年的英國倫敦，柯普斯(Matthias Koops)，則嘗試不摻任何的碎布，以純粹稻草和木材來製成紙張，而且他製出的紙張可以適用於印刷機。他並使用這樣製成的紙張印成一本小書的最後幾頁，藉以展示他的成果；——小書的主題——還能有什麼例外必然是製造紙張的歷史囉(歷史上似乎沒有任何其他科技，能像製紙一樣留下如此詳盡廣泛的文字記載。在這本書內，他盛讚列奧慕爾和薛飛爾，認為他們是產生製紙原料取代物的原始概念的重要先驅。在此他並沒有明確地提到黃蜂，但之間的關聯似乎鑿鑿有據。

所以黃蜂為我們備好了舞台，展示了未來可能的途徑；木材的細胞膜纖維，幾乎是取之不盡的物質來源，能夠自它的結合劑及木質素中分離出來，重新再造成為一個涵蓋二度空間的編織墊。木製紙張的來臨，即使得到許多實用的指引，但還是不如想像中那樣唾手可及。最初的原始概念不知經過了多久、多麼艱辛的奮鬥，才得以真正成熟。柯普斯自己便在蓋了一座製紙工廠後宣告破產；不管破布紙張品質多優、成本多高，木製紙張當時就是無法與之競爭。但是自此之後，製紙的技術發展逐漸平穩；並且在幾十年之間，四處林立的製紙廠便開始大量地吞食我們的森林了。



## 蠶和擠出式的紡織纖維

列奧慕爾的另一個建議後來也被證明極具實用性。飛蛾幼蟲在成蛹之前會產生一種我們稱為絲的蛋白質，當它們以液體形式從一個極細微的孔隙中被吐出之後，立即凝結成連續不斷的纖維，自然界為了蠶蛹所設計的絲長久以來一直被人類當成既美觀又有商業價值的紡織纖維。我們將蛹切開，使有黏性的蛋白質溶解(藉以取得生絲)，或是在馴養的例子中，利用某些種類的蠶蟲，如家蠶，將蠶絲纖維展開。十七世紀有胡克(Robert Hooke)，十八世紀有列奧慕爾，兩人都建議採用類似的擠出過程來製造紡織纖維。胡克把蠶絲視為「一條乾掉的膠線」，並且時時思索：「或許我們可以發現一種方法，如何製成類似的人工黏性物質。即使無法像這些分泌物一樣好用、甚或更差，但只要有任何物質可以從它擠出，我們就可像蠶蟲將其線團拉成蠶絲一樣照辦。如果能夠發現這種黏性物質，那麼接下來要發現如何將其抽出，製成可用的長絲，則當然是極其簡易之事了。至於這樣發明的益處，不需我在此處多加贅述。」

結果事實證明，胡克的「簡易之事」毋寧是一種一廂情願的想法。在整個十九世紀期間，陸續有許許多多的人探索過這種可能性，即是將纖維自細縫中擠出或「抽出」的可行方法。英國人夏瓦比(Louis Schwabe)，早在一八四二年就擠壓製成玻璃纖維。瑞士人奧狄馬斯(Georges Audemars)，則在一八五五年自硝酸纖維中抽出一人造絲的絲線。歐扎南(M. Ozzanam)在一八六二年提到，可以將絲的剩餘碎布溶解及重新擠壓，以便再次製成絲料。一八八〇年間，終於在經過夏爾多內(Hilaire de Chardonnet)，無比的努力和花費之後，成功地發展出一個簡業上切實可行的製造方法，自原先極具危險性的易燃硝酸纖維中製成擠壓的人造絲。追隨蠶的足跡，真是一點不差。夏瓦比、奧狄馬斯及夏爾多內都曾先後參與過天然絲的製造過程。夏瓦比在他自己的工廠裡為維多利亞女王製造絹布，夏爾多內則曾經與巴斯德(Louis Pasteur)一起從事蠶蛾的病變研究——這是當時獸醫學理一支尚未受到應得重視的學派。夏爾多內後來自述他的企圖，就是盡莫最

大可龍地楔仿蠶的工作。

到了二十世紀初，便有人造絲及醋酸纖維絲陸續用這種蠶絲的 J(以及夏爾多內的)擠出方法製成，直到今天，我們仍然使用同樣的方法來製造其他的纖維。蠶蟲是否可以做為我們實際的模式？即使影響並非直接，但是肯定的答案卻有根據。首先，工樂用的擠壓器，我們稱為噴絲頭的裝置，與稱呼蠶蟲吐絲的器官用的是同一個名稱。其實這個字眼完全不適用於兩者中的任何一個例子，因為它是早期昆蟲和蜘蛛並不真正「紡出」它們的繭和蛛網：工廠裡絲線的製造，也是在接續的動作中抽取擠壓的纖維。蟲學家自短紗紡成長絲的勃紗過程中借來的術語。不管是蠶或是製造纖維的工廠，其工作的噴絲頭或吐絲器既不紡線、旋轉，也不做任何圍繞物體旋轉的動作。所以工業界大概是沿用了昆蟲學的既有術語吧。

早期的機械擠壓器事實上與昆蟲的類似部位極為相像——小型的管子一路縮細，最後縮成極其細小的縫隙，正如圖十二~八所示。這些管子是以玻璃製成，而抽出正沁的玻璃（相當於十分之一公釐以下）的吃力工作會造成產品太過嬌弱、太容易造成破裂及阻塞。大約是在本世紀初左右，多重孔隙貴金屬製成的噴絲頭開始被大量使用。這種頂針似的裝置（見圖）雖然功效較好，但是因為它們必須藉著液壓通過扁平的表面才能運作，所以它們忍經不屬於那種像是會發生在自然界裡的設計了。即使是如此，仍有一段一九九〇年代的文字這樣記載著：

人造絲（即嫫縈絲等）的裝造方法密切地摩仿真絲的形成過程。蠶將絲心蛋白從它嘴已下方的兩個細孔中擠出，它的絲腺並同時噴出絲膠，將兩個絲線黏結在一起。在人造絲的裝造過程中，絲腺被大型容器所取代，而細孔則成為細小的噴嘴。在整個紡絲的過程中，也就是將工羽黏性的大塊物質轉變為絲線的過程，我們習慣將乾紡和濕紡做一區別……濕紡利用單一的噴絲頭，它是由厚壁的玻璃管子縮小成為極其纖細的毛細，其裡層直徑只有 0.0 八公釐，而不同的細絲便可組成一縷絲線。

## 耳膜和電話機的變換器

電報通訊到了一八七〇年代左右已經成了人們習以為常的通訊方式，但是莫爾斯電碼所使用的一點一劃既慢又笨拙的編碼、解碼，卻完全抵銷了立即通訊的優點。電報迴路只有兩種狀態，即連接或不連接(這種二元式的編碼方式也正為我們現今電腦所使用？唯一的差別是在於電腦從一個狀態轉換成另一個狀態，其頻率可達原來的百萬倍)。貝爾(Alexander Graham Bell)就在此時成為研究如何傳輸聲音以取代電信訊號的泉多成員之一。一個可能的計畫便是將複雜的聲音分解成不同的頻率，經過平行線路來傳送:其接收器再將收到的訊號重新組合而成。貝爾卻別具洞悉力，認為這種複雜處理完全沒有必要:只要有一個單一裝置，便足夠將聲音不同頻率的信號轉換成單一的電訊。本人並不是電學大師的貝爾，他的概念完全來自類似的生物性結構。

當時貝爾是波士頓大學發聲生理學的教授。他和他的父親首倡教導聾啞人如何用高度的智能說話，如何發出他們從未聽聞過的聲音，所以他一直埋首於研究發聲和感受聲音的各種生理面和行為面。貝爾認知到我們的耳膜是一個可以同時處理所有頻率的單一裝置上，它們一進一出的運動造成中耳骨的振動，然後才鑄達給充滿液體的內耳，這便是我們神經設備所在之處。貝爾自述道：「我想如果一張纖細有如面紙的薄膜可以控制遠較其尺寸和重量都巨大許多的骨骼振動，那麼體積更大、更厚的薄膜為何不能振動一片位於電磁石前的鐵片？……而且在電報迴路的另一頭，也同樣使用一片簡單的鐵片將其附著於薄膜上？」

雖然接下來的工作並沒有想像中那麼順利，但是話筒的發明卻克服了主要問題，顛倒同樣的裝置就可以做為收回聲音的收話器，我們在圖十二~九中即可看到這個取自或許是有史以來專利獲益最高的設計圖樣，所以這個設計裝置自然而成為雙向溝通。雖然貝爾所設計的送話器很快地就為愛迪生靈敏度更高的炭粒話筒所取代，但他的收話器設計(至少是基本原則)卻在耳機和喇叭中永久存留下來。

我們不能想像現代人的生活若是少了飛機、便宜紙張、

人造纖維及電訊傳輸的情形它們都是主要元件，缺一不可。以下還有另外三個例子合乎我們抄襲模仿的標準，但是只牽涉到應用沒有那麼廣泛的特定工作，而且對我們日常生活的影響也不像上述那些例子那麼深遠。

## 有刺鐵絲網

人類用刺棘的植物築成灌木籬牆以圈住家畜，是一個由來已久的古老行為，尤其是在木材或石塊極為缺乏的時期上它們更是有用。當北美大平原上的開拓者往西移進的時候，便曾經面對過這種史無前例的木材荒。中西部所選擇的植物，是一種土生於德州東部及附近區域的灌木植物——桑橙，而且有一個小型工業在一八六〇年到一八七一年間專門提供北方這種植物的種子和幼苗植物但是這些多刺的矮灌木也有重大的缺點。平均長成一叢具有實效的矮籬大約需要二年，葡萄柚般大小的非食用性果實又是個累贅，而且整個矮籬既不能移動，又難以維護。凱利(Michael Kelly)在一八六八年登記的專利是極明顯早期鐵絲網：「我的發明給予這些鐵絲柵欄一種類似刺棘樹籬的特徵。我寧願指定這些柵欄以刺棘的形式做成。」的確如此，一家生產鐵絲的企業組織，名為刺棘鐵絲圍欄公司(Thorn Wire Hedge Company)，似乎是想喚起大家對熟悉事物的注意力，藉以達到為其產品宣傳的目的。圖十二~十中即有明白的圖例，顯示桑橙這一類植物的刺棘與早期刺鐵絲網的相似之處。

凱利的有刺鐵絲網，比起一八七四年後發明出來更具競爭性、更便宜的鐵絲網，便顯得黯然失色：正如同我們在飛機翼、噴絲頭及電話傳聲器的例子裡看到的一樣，忠實於自然並不能保證神奇的經濟效益。新型式的專利持有者是葛利登(Joseph Glidden)及海希(Jacob Haish)。葛利登將其發明做了更具體的實現，所以通常被視為是有刺鐵絲網的創使者：至於海希，則幾乎是無巧不成書地擁有一個出售桑橙種子的木材場。歷史學家巴沙拉(George Basalla)記載：「有刺鐵絲網的產生並非是人類碰巧將鐵絲以這樣奇特的方式切割扭曲而成的，它的起源是源自人類抄襲一種有效防止動物走失的有機物形式的刻意企圖。」有刺鐵絲網的成功地位如今已經成為

不朽，光是美國現在每年的消耗量，業已超過了一萬噸。

## 鏈鋸

小型的汽油引擎在本世紀初葉被發展出來一八五八年，一個鋸刀做成循環鏈形式、並且在連接處也附有利齒的鏈鋸申請專利成功。帶有附屬汽油引擎的鏈鋸以及電動引擎帶軌的鏈鋸，都是出現在一九一〇到一九三〇之間，但是商業性的鋸木業仍然停留在人工操縱的橫鋸階段。馬達帶動的橫鋸和圓鋸都太過龐大、笨拙，難以適合森林中砍樹的需要，鏈鋸又無法順利地工作，需要不時地磨利：即使連上巨大重型的馬達，它們切割的速度仍然非常緩慢(圖十二~十一)。在一九四〇年代，一名機械工程師在做伐木工人的時候，詳細地檢視了那些穿鑿的工具，以及巨型鑿木甲蟲的鑿木技術。這種甲蟲的幼蟲是少數能夠消化木材的昆蟲之一(白蟻是另外一種)——也就是可以分解纖維素聚合物，成為代謝作用中可吸收的單糖。但是一開始，它們是以一種向兩邊側向移動(這是昆蟲的方式)而非上下咬合(這是脊椎動物的顎)的一對咀嚼口將木片咬下。不出所料，這些木材穿鑿者擁有強健無比的咀嚼口人匕們自頭部呈扇形展開，所以其銳利的前緣可以將延伸洞穴的牆壁切割下來，這正好相當於鋸子鋸縫的底部和側面。

所以這個從前擔任機械工程師、現職伐木工人的柯克斯(Joseph Cox)，就想出了一種鏈鋸，其切割器的形狀與所在位置都仿效甲蟲幼蟲的形式，鋸齒並不側向移動，而是輪流交替地指向左右兩方(不然毗鄰的對對鋸齒便會立即卡住)。但是毫無疑問的，這是甲蟲版的設計，後來證實這種切割木頭的鋸齒是如此地好用，所以直至今日，上百萬的可攜帶鏈鋸都還在使用這項設計，而且使得柯克斯本人在一九四七年成立的公司仍然在整個市場裡居支配的地位。今天你買到的鏈鋸，或許連鏈子都是俄勒岡製的呢！

## 維可牢

這種極為靈活好用、又不需對齊調整的鈎環黏合物，已經在現代生活中確立了它不可動搖的地位，逐漸地取代鞋帶、釦子、拉鏈、按釦、掛畫的金屬線、窗簾圈及許多其他

簡單而古老的黏合裝置。它是一個勤勉可靠的接合工，能夠使手指缺乏靈巧度的笨拙得到社會的改造重生。對於大部分過著較傳統生活的我們來說，那種慢慢扯開兩半的聲音和感覺仍然帶有那麼一點自我毀滅的味道，但是我們最後終將會適應習慣。維可牢(Velcro，出自「絲絨」{Velvet}和「鉤針編織」[crochet]兩字)被消費大眾接受的速度，遠遠慢於有刺鐵絲網及鏈鋸，這是因為它的產生，並非出於一種急需或是取代原有事物所欠缺的功能。但是正如它們一般，維可牢的起源是襲自生命世界的模型。

太約在一九四八年左右，一名熱中於散步的瑞士工程師梅斯特拉(Georges de Mestral)有一次在附近山區步行回來時，對著黏著於他的襪子和狗身上的刺果暗自思忖。這個據記載可能是蒼耳或是牛旁的刺果，尖端處有小小的鉤子吸引任何毛茸茸的東西(見圖十二~十二)。此時年齡只有十歲的尼龍纖維就正好成為製造這種鉤子的理想材料——經過加熱及冷卻的過程，它就會在所有承受摧殘的表面上保持一種弧度——但是如要做成鉤子，則必須比天然的刺果對於其所附著的對象更加有選擇性，所以它的設計最後成為一對匹配的表面——也就是鉤子和釦環。後來也有其他改進和衍生產品的問市，比如不銹鋼維可牢(非常堅固)及無聲維可牢(軍服用)，但是市場上製造維可牢的基本材料並沒有多大變化。

人可以懸掛在一片直徑小於五吋的標準維可牢上而維持不墜，但是這樣一片強力的黏著物卻可以用一隻手便拉鬆開來。維可牢(如同膠帶一樣)支持力如此強大，鬆開又極其容易，這是因為它巧妙地運用了一種所謂幅員縮減的技巧。它所支撐的力量能夠延伸涵蓋一塊廣大的區域，它的剝開卻只是回應集中在一條線上的力量；意謂著它的附著屬於二度空間，而剝開卻屬於一度。剪刀或拉鏈運用的也是同樣的原理，唯一的差別不過是它們並非由一塊區域縮減成一條直線，而是由一元的直線縮減成零次元的一點。為了使所有的事物循環不息，這種幅員縮減對於自然界也同樣的重要。許多動物在攝食時剝開撕裂食物——便是將面積減小成直線、或是直線縮成一點：貓是如此使用它的貓爪，毛毛蟲也是

如此才切過它所在的葉片。相反地，某些帽貝的寬大裙襖可以牢牢地黏在岩石上，難以剝離。青草同樣也長有縱向的葉脈，以抵抗橫向的撕扯。

## 抄襲成功，原因為何？

我們到目前為止所提到的例子，尚不足以構成一個在統計上造成重大影響的數據資料。在此只能約略地挑出它們的共通點，就算不是決定性的因素，也至少可以提供我們參考。

首先，純粹的抄襲並不像是會導致成功的途徑。凱萊並非雕刻了一座鱒魚肚圍做成一個軸心對稱物才邁進了抽象的領域；菲力普的最佳機翼，能夠比他的白嘴鴨產生更高的揚力阻力比率；李連塔爾的機翼是圓形的一截拱弧，而非真正鳥翅膀的橫截面；而且即使說翅膀的彎曲是鳥類的不二特徵，但是萊特兄弟所製成的機翼卻全然與鳥類的方式有別。此外，翅膀彎曲很快地就被副翼——這種更少鳥類色彩的裝置搶去了光彩。有刺的鐵絲網是一種張力結構，一種較類似於蔓藤而非樹枝的鐵絲。在原始的設計中，它的刺並非是整體的一部分，而是後來附加上去的，而且其放射狀的安排也絕非生物的形式。鏈鋸切刀的活動方式根本不像幼蟲咀嚼口的運動，兩者的共同點在於它們切刀的形狀、切刀連接於鋸子或頭部的靈活方式，以及切刀切割於地洞或切口的部位。維可牢是一組成對的黏著系統，好比拉鏈及按釦，而刺果則是單一的元素，更像我們易貼紙上的雙面膠，只有決定性的鉤子才是他們兩者的唯一共通點。自然界提供給我們的，不管我們選擇用什麼名字稱呼它，不過是一個觀念、一點啟示，或是一種策略，絕不是人類所使用的細節或方法。而這種原則性的啟發到真正的仿倣行為之間，尚存著好大一段的實用性差距呢！

其次，抄襲的成功率幾乎是與我們對基礎科學的了解程度成反比。當科學發達之時，抄襲所能產生的最好只是用途狹窄、目標專一之物，譬如有刺鐵絲網、鏈鋸及維可牢等。但是當科學未盛之時，抄襲行為便可以產生具備廣泛用途的裝置。在本世紀初之前，流體力學尚未發達，所以流線形的身體、有弧度的機翼及副翼等，都無法輕易地從最初發現的



原則中推行出來，正如同凱萊極費力強調的重點，即抄襲是吾人在種種狀況下所能發揮的最大功能。因為電子訊號的複雜電波形式尚未為人了解，所以耳膜功能的確認使得當時的科技得以先理論而邁進一大步。製紙的過程和纖維的擠壓牽涉許多固體機器、流體力學和化學性的複雜組合，但是這種複雜組合卻不會影響天擇行為，所以自然界因而更能提供我們各種有利的提示，告訴我們什麼是可信的，及使用何種方法進行等等。

第三點原因，也是最重要的原因，便要歸因於兩種科技的重大差異。自然界的物體，以微小、濕潤、非金屬、不具輪子和柔性高為其特徵；人類科技則正好完全相反：既大、又乾、金屬性強、多帶輪子，且極為剛硬。只有一種科技運作在通常屬於另外一種科技的領域裡時，仿倣才能確得保障。就像刺棘以及甲蟲的咀嚼口，在所有自然界的結構物裡它們都算是特別堅硬的物質，所以它們與人類使用物質的標準較為接近。至於在人類大部分的發明裝置中，維可牢算是較具柔性的物質，所以我們用它來觸弄的世界是被大自然做過更多探索可能的世界。

## 一個案例紀錄：人類的飛行

我們觀察成功的事例純粹只是後見之明，為了反制這種發生於其後必然是其結果的偏見，我們也許需要專注於特定的一項人類努力成就上。人類的飛行歷史雖然也展示了數次成功的模擬行為，但是它所經歷的失敗紀錄還要更多。即使將其中特別怪異的撇開一旁不談，譬如說有人載著臨時創作的翅膀自穀倉上一躍而下，這段歷史也活像是一組多層次的故事在我們的面前一一展開。關於這個故事的其中一面，馬克沁(Hiram Maxim)在一九〇九年說得好，他剛剛花了大筆的金錢——這是他製造機器槍的盈餘——在一個超級龐大但不幸失敗的飛行機器上：「人類基本上是一種陸地動物。極可能如果大自然沒有將無計其數會飛的鳥類、昆蟲放在他面前，他或許永遠不會企圖自己來試飛。」這個故事的另外一面告訴我們，大多數有機物的飛行實在是一個相當差勁的指導來源，正如馬克沁也提到的：「成功的火車頭並不是



基於對大象的模仿。」萊特兄弟的飛行器除了不會拍打的翅膀之外，幾乎沒有任何一處是模仿鳥類：螺旋槳推動的兩翼機，在前有水平的穩定器，在後有大型直立的控制表面。為了強調自然經常誤導我們的論點，我們可以試著看看飛行器設計的幾個特別層面。

單一的結構產生向上與向下的力量，只有在這個飛行者翅膀負荷不重的狀況下才是一種合理的方案：意即其翅膀體積不能太大，這是我們在前面第十章中提到過的論點，也是科學界一直到十九世紀末之後才發現的原則。此外，自然界裡這種彼此相反的動作——一上一下，一下一上——對於要運用大量動力的人類馬達來說，相當地笨拙不便，所以戴上一對拍打的翅膀，對人類飛行的前程註定是個不祥的徵兆。人類供給動力的飛行器受到其動力嚴格的限制，絕對無法以此種方式成功運作。使李連塔爾出事的那架滑翔翼，本來正打算要裝上一個引擎，利用水力或氣體帶動的汽缸拍打機翼。我們極度懷疑，如果不是死於這次意外的話，他是否真的能夠如願以償成功地駕駛第一座完全由引擎帶動的飛行器？

大多數早期飛行機器的嘗試都有著鳥類或蝙蝠的翅膀，如果硬要說它們有什麼不同的話，那就是它們都較這些飛行動物的典型翅膀要來得短和寬（見圖十二~十三）。另外尚有一點也同樣重要，即最好的揚力阻力比率得自最長的翅膀，雖然在一個世紀以前人類尚未完全明白這一點。對於一個固定面積的翅膀，其形狀越長越細功效越佳。鳥類和蝙蝠的翅膀則是取其折衷；因為較短的翅膀或許較易拍打，而且能夠給予這些動物們較高的機動性，更能夠應付反覆無常的氣流。所以稍稍減少一點對這些動物的注意力，多加一點對孤立單獨翅膀的具體實驗，將會對我們人類更有助益。

或許這些動物們給予我們的最大誤導，莫過於控制飛行不是什麼大不了這件事的印象了。不管是在一般運動機械的例子或是在飛行器要求特殊嚴格的例子裡，機動性與穩定性都是傾向於對立的兩個特性。現存的三個飛行動物族系，每一種都具有相當久遠的歷史，所以根據演化生物學家史密斯

(John Maynard Smith)所提出的論點上，它們確實有一段時間不穩定，並有一段時間發展它們的神經系統，使它們能夠應付因良好的機動性而帶來的不穩定。畢竟，良好的機動性總是有利於飛行動物的，因為它們不是身為空中的掠食者就是掠食者的對象，或是它們常常需要飛越障礙並翱翔於不規則的氣流中。

李連塔爾模仿鳥類過於天真。他在一本關於鳥類飛行的著述中表現出他的行事哲學：「自然的鳥類飛行能夠如此完美地利用空氣的性質，並且包涵如此重要的機械特性，任何設計若是離開這種優勢就意謂著放棄達成飛翔的每一種可行途徑。」難怪他最後會喪命於一個極不穩定的仿鳥滑翔翼。曾經在更早時期便試驗過滑翔翼的夏努特，就對李連塔爾飛行器的不穩定感到極為擔憂。譬如說，鳥類可以憑藉著翅膀適當控制側彎，因此它們的尾巴有著水平的表面，不需垂直的方向舵。這樣的認知造成許多在一八八〇年到一九〇五年間建造的看似充滿希望的飛行器都只有小小的直立尾巴表面，或者根本有。

隨後而來的一些飛行器朝向另外一個方向發展過了頭，使得它們雖然極度地穩定，卻幾乎無法靈活機動，至少這又是一個襲自天然飛行器的例子。動物憑著敏銳的知覺器官和快速反應的迴路便能做出美妙的動作，植物顯然無法辦到，所以滑行植物的部分穩定性必然極高。我們早先提到的降落替代品，楓樹的翼果(包在果實中的種子)以螺旋方式滑行至地，這樣滑行使它落地的速度減慢，如此才能被吹落它的風載至更遠。一些果實可以沿著筆直的路徑滑行，在完全沒有風力的協助下遠遠地飄離母株。這其中最富盛名的大概是爪哇黃瓜，一種生長在東南亞森林林冠樹篷下，可以在寧靜無風的空氣中滑行至地的飛行翅膀。李連塔爾死後，伊納茲(Ignaz)和伊特利契(Igo Etrich)將他剩下的滑翔翼全數買下，而這些機器的不穩定性改造(或嚇死)了他們，使他們成為極端穩定飛行器的擁護者。伊特利契自漢堡市植物博物館(Hamburg Botanical Museum)獲得飛行果實，再將它們抄進一連串的飛行器設計中——不管是有沒有人操縱或機

器帶動。但是滑翔翼的穩定性幾乎無法操縱，同時也欠缺適度的機動性。更糟的是，一旦裝上馬達，又失去太多的穩定性，等於是結合了兩個世界（動物與植物）的最大缺點。

人類最後終於領悟到我們的飛行器與鳥類不同，必須具備某種固有的穩定性，這樣才能免除駕駛員持續不斷的動作配合。但是同時它也不能太過穩定而失掉了可操縱的特性，所以也與滑行果實不同。現代飛行器把這樣的折衷取捨處理得相當好，就正如我之前的同事貝恩漢（Molly Bernheim）形容如何飛行一般：「所以飛行駕駛在他正式安全的飛行之前，必須先學會一門艱難的課程，這門課程教導我們不按本能直覺行事。如果倒栽蔥似地向地面下墜？往後拉絕對幫不了忙！你必須放鬆桿子，它便往前飛去。翅膀拉不起來？放開！飛機此時照顧它自己可比你還好哩！只有放鬆它，你才能輕鬆溫柔地駕著它，讓它帶你遨遊四方！」

只有一個領域原則與此有所不同。小型高性能的軍用機刻意設計成特別的不穩定，俾能達到高度的機動性。但是因為它們採用了動物飛行的重要特質，所以至少讓飛行員得到足夠的穩定感。現代控制科技以其靈敏的偵測器和制動器來運作反應快速直接的迴路，便是結合了兩個世界的最大優點。飛行員做重大的戰略性決定，而把戰術的細節交給自動駕駛裝置。這就像是哺乳類和鳥類動物將控制區分為大腦的統領管理及其餘中央神經系統的中層管理一樣。

這樣亦步亦趨地跟隨自然法則，事實證明至少在人類另一種機動裝置中也宣告不適。一般公認富爾頓（Robert Fulton）在一八〇七年發明汽船。事實上，汽船早已存在，富爾頓本人也不是不知道，只不過他擁有一個較佳的引擎（從英國的包爾頓{Boulton}及瓦特得來）以及較寬裕的財務支援而已。但是他的汽船有一主要優勢，即非生物性裝置——旋轉式的槳輪。一七八七年拉姆塞（Ramsey）所造的汽船則是藉由蒸汽帶動的活塞來產生一股烏賊式的脈衝噴氣，由船頭底部進水，再由船尾將其用力排出。一個活塞式的引擎自然能夠往復運動，所以只要幾個活門便足以帶動一個脈衝式的噴射器。但是拉姆塞的汽船與烏賊有一樣的嚴重問題：它高速

度、低質量的輸出造成極差的推進效率。一七九〇年菲奇（John Fitch）的汽船利用一組往復轉動的後槳，輪流地浸入水中及向後推動，就好像一個人手掌成了鴨掌，不停地滑著自由式一般。槳（明輪），首先在前然後又移至船身兩側，是一種更為簡單、更有效率、也更經濟的設計裝置。

本章真是充滿著懷疑與爭議性的一章，但是它所要傳達的信息，就是要對那種過度天真的浪漫主義以及自欺欺人表示極度的不信任與惱怒。歷史學家註定要往後看，而科學家卻需要向前看。但是無論如何，在這麼多赤裸的批判之下，我們仍然不應該失去一個肯定的聲音：抄襲的紀錄或許不多，但是優良的例子仍然存在。盲目的模仿或許沒有可取之處，但是有時我們抄襲的卻比其高明許多。的確不錯，如果我們的科技能夠採取較多的自然界特徵——得到更多具有柔性的物質和結構、體積更加縮小、使用更多的非金屬物質等等——那麼自然便會成為我們更加得力的導師。

## 第十三章 抄襲、現在與未來

歷史，並非宿命。不然我們在一八七五年便會知道城市注定的命運，到一九二五年時不斷增加的馬肥會造成整個都市的大覆沒。我們只能看到過去，而我們的過去，對於抄襲自然這些件事所傳達的信息極為混雜，難以信賴。或許我們的最佳選擇，只能做出明智的猜測。今天的生物仿倣確實製造了不少新聞——至少包含許多大公司所宣傳的抄襲，但是，新聞媒體的宣傳從不能保證他們均衡的態度與未來的展望。

### 各式各樣的可能

問題:抄襲或許有效，但是卻無法證明它比另一種替代方法有更多的優勢。或許抄襲已經錯誤地被人認為是成功有效的方式，或許「抄襲自然」的裝置確實發生作用，但後來卻發現它並非得自抄襲。以下我們對上述的可能各舉一例，為有心的懷疑論者提供了開砲的燃料。

### 腸管和蠕動泵

我們的腸管是座幫浦，將消化的食物漿往下推進。一波一波的肌肉收縮，一路沿著我們二十呎長的小腸、八呎長的大腸直向運動，這個過程我們稱之為蠕動——就好比我們將牙膏自一個即將用光的牙膏管部向上擠的過程。動物的消化系統大致都是使用這種幫浦;甚至許多蠕蟲類的循環系統，也採用這種蠕動式的推進。蠕動泵（peristaltic pumps）——借自生理學的名詞——在今天的人類科技中，偶有規模不大的用途，尤其是在生物醫學方面的應用上(見圖十三~一)。蠕動泵各種不同版本的基本共同點，即在於它們的運作都是靠著壓扁一個塑膠管壁的運績部位，造成管內物質的移動。這種蠕動泵有兩個賣點，其一，管內物質的黏性可以在不影響其運送速率的情況下，具有極大的變化空間，自稀薄如水到含有水分的漿狀等。其次就是這物質在經過幫浦時，不需離開

它的塑膠管，藉此避免接觸幫浦其他部分而造成污染，並能夠簡化消毒殺菌的過程。若不是因為這兩點，蠕動泵根本就是個製造麻煩的東西。塑膠管需要時時更換不說，而且幫浦的運作完全沒有效率可言；改變塑膠管形狀耗掉許多的能量，而耗損的能量絕大部分都不能再回收。

那麼這個蠕動泵到底是否抄襲自自然界腸壁的蠕動？名字雖然暗示著模仿，但實際證明卻是另外一回事。一八九四年一名英國的發明家基澄(John G.A. Kitchen)得到一個與現代版頗為類似的蠕動泵專利，但是並沒有採用蠕動泵這個名稱。這個幫浦是一個用手操作的手提裝置，其目的是為了給自行車的輪胎重新充氣，速度極低，只能偶爾使用在橡皮管經過重複的擠壓而不立刻破裂的狀況中。現在沿用的名稱，最可能是來自生物醫學界對它的使用吧(或是出於宣傳)。

## 海豚和低阻力潛水艇

人類如何發現海豚低阻力的游水方式，然後加以模仿的歷史，簡直可以說成一則美妙的故事。在一九三〇年代中葉，現代生物力學創始者之一的格雷(Sir James Gray)在計算海豚要達到極速所需花上的代價時，得到了一個奇特的結果。身體四周的水流可以是層流，也可以是紊流，這完全取決於身體的體積大小、速度、平滑度和形狀各項因素。格雷算出這海豚四周的水流唯有在層流狀態時，肌肉才能產生足夠的動力達到極速，紊流將會造成太大的阻力。但是以海豚的體積和速度而言，通常都會經歷到紊流現象。這個結果被人稱為格雷矛盾論(Gray's paradox)。

二十年之後，克拉馬(Max Kramer)宣稱海豚是以柔軟易順從的皮膚來削弱初起的亂流，藉此維持層流的狀態，而他為潛水艇設計的仿層流塗料即襲承了這種驚人的效果。很不幸地，這些故事全然經不起考驗。首先，我們現在了解到格雷完全低估了哺乳動物的肌肉可以產生多大的有氧動力，同時也過於高估了海豚連續游泳的極速。海豚即使是處於紊流之中，也有足夠的應付能力。其次，雖然海豚確實具有柔軟的皮膚，游泳時也似乎造成極小的水波，但是卻無人能夠證明這是克拉馬所建議的方式。最後，仿層流塗料從未

實現它對減輕阻力的諾言。

## 減低阻力的魚黏液和聚合物

如果你將某些分子較大的物質加在水裡，使水變黏稠，則它的流動便會減弱。但是有一些情況卻正好相反，將少量線狀長而易溶的聚合物加在不穩定的水流中，反而減低其內在的摩擦力，使得通過管子或身體的液體流速變快。一些魚類有時便使用這種聚合物一邊游泳一邊流出魚黏液。這種魚黏液以及其他的生物性聚合物能夠減輕水流的阻力，不管是發生在魚身上，或是通過管子的水流，或是在固定的測試物體上。但是實際應用這個技巧卻需要持續不斷的排放這種聚合物，因為水流會將其自表面載走。甚至魚類也只有在進行短短一陣掠食者進行捕食的生存活動時，才會分泌這種聚合物。此外，因為魚類顯著的使用這種聚合物，所以大部分人類的模仿努力都集中在它們身上。但是事實上，以添加聚合物來降低摩擦力的最原始發現和探索並沒有牽涉生物系統，它的發現是來自於人類對一種所謂非牛頓液體(Non—Newtonian)的探索，這種複雜液體系統的黏性會因時因地而有所不同。

## 鯊魚鱗和阻力的降低

並非所有的魚類都是黏黏的。例如說，鯊魚皮摸上去就像是中級的磨砂紙。再仔細檢查一下，結果發現鯊魚鱗的表面有許多稜紋排列，而且這些稜紋看上去似乎對準著地區水流的方向。這些稜紋非常的小，兩兩相隔，間距約莫是十分之一公釐不到，其高度則更小於此數字，但是它們分別在好幾個生物族系——尤其是游速極快的鯊魚中各自演化出來。人類對人造鯊魚進行實驗，其成效已經足以產生一種商業用的塗料(肋條)，用來塗在高性能的賽艇上。但是這種塗料對於降低表皮的摩擦力，最多不超過十個百分比，而且通常還要更少。更何況不管是在任何情形下，表面摩擦力對於水面上船隻的重要性，遠不如波浪的阻力。除此之外，是否鯊魚也用同樣的方式使用這個稜紋，還是個未知數。

最後一項註解：我們用口傳的方式學習，往往比我們自己

願意承認的還多。近年來，自從我們能夠自由地進入另一個非正式的查詢管道——網際網路之後，口傳學問似乎又獲得了一個新的發展空間。我在好幾個網路的訊息團體中，解釋我正在尋找仿倣自然的成功例子。我並附上我所知道的案例以及遵循的指導原則。上述的故事中，有一些便出自於網路中得到的答覆，此外我還收到了一篇介紹現行工作進展情形的精彩序文。我因此更加自信，未來的困難將會逐一的克服。

## 現行工作的前景

追逐生物仿倣學的浪潮如今最為熱烈，參加的人數幾達頂點。而且我們也看到大家對生物系統謹慎而系統化的探討，以及對模擬仿倣的努力同等重視，齊頭並進。越來越多人對我們的路徑兩旁同樣地熟悉：即生物仿倣學和工程學。抄襲自然的歷史或許未能產生重大影響，但是它漫無目的似的行為早已不具任何代表意義。簡而言之，它成為一則警世的故事，而非一個因循的軌道。接下來，我們將會在幾個例子中看到人類不遺餘力讓生物仿倣的思想與我們的生活發生重大的關連。

## 微科技

自然界的事物由分子、細胞往上建造，而人類則不然。雖然有一些事物如此建造反而容易些。舉例來說，你的蛋白質形成，是在遺傳密碼的指示下，以一種特定的秩序將不同的氨基酸鉤組而成，而並非煮上一大票相同的小分子，讓它們胡亂任意地互相黏著。好比骨骼一類的複合物製造也是得靠著各種元素各司其職、各守其位的合成，而不是隨便將元素混合，再將成品結固就可以獲致的。人類科技往上建設的一個可能，是藉微生物做為主其事的工廠，再插入我們所選擇的DNA。事實上，當我們在製造小量的人工胰島素和其他極重要的生物分子時，就已經辦到了這一點。任何事物都無法阻礙人類製造一般或經過修改的結構蛋白質——除了可怕的經濟因素。即使有著最專心一意的微生物，要製造出一噸而非一克的這種產品的成本其高無比，所以必要條件便是它們要比普通聚合物更具有超級的優勢。那麼它們到底在何



處才最具有價值？或許是在我們最不介意揮霍浪費的醫藥應用上吧。例如說，我們或許想要製造出某種東西，使我們的身體及免疫系統都能夠接受它成為身體的一部分。細菌合成的人工胰島素，即擁有上述的優點。或者想像一種固體形式的彌補物質不只不受到身體的排斥，而且還能加入整個身體的生長和替代過程。另外一個向上建設的方式便是設計大的分子，它能夠自我組裝形成微小結構，比如微管及其他的細胞元素。

## 肌肉類似物

人類科技中的引擎利用收縮來達成功效的真是少之又少，利用可以任意變小的柔軟物質做成室溫引擎的例子也不多見。但是不管什麼情況，也不能阻止我們製造這種將化學能量轉化為機械能量的類肌肉裝置：只不過到目前為止，這種裝置尚未發展到足夠實際應用的階段而已。雖然我們也明白，若要產生任何與肌肉真正類似的裝置，都需要一個發展成熟的微科技支援製造，只是我們對於這個裝置類似肌肉的程度尚未確定。誠然肌肉是一個好東西，但它也是一個只能在冷卻和濕潤的情況下才能操作的引擎。除了在直接替換身體零件的情形下之外，我們不須受制於低溫的操作，而且也不需事事在水中進行。

## 合成物質

骨頭、琺瑯質、珊瑚、木材——自然界是如此擅長製造分級的合成物質，人類如何能夠不從她的產品中學到功課？事實上，這個領域在現階段是格外地活躍。貝殼似乎為製造混凝土——陶瓷和金屬的合成物——提供了最佳的學習課程。甲蟲的體外壁——外皮——似乎是結合了纖維和基質的超級系統。海膽和其他棘皮動物的硬殼部分，顯然是單一的方解石結晶，但是它們卻摻入了一點點的蛋白質，使它們饒富趣味地憑添了一些對斷裂的抵抗力。諸如此類種種，從不同的物質到大型結構，從竹莖到軟體動物的牙齒等等。即使人類更進一步地仿倣，或許仍然需要等待更有效率的微科技發展，但是自然界裡許多結合了合成前元素的產品，都提供

了我們短期內明白可行的方向。舉例來說，一種由木材中衍生出來曾經得到專利的產品，現在已經可用產瓦楞硬紙板的機器來製造生產。

## 智慧物質

肌肉、骨骼、木材、皮膚及其他的自然物質，都會因應外在負荷的改變而調整它們的組成或量比。這種因負荷而定的重組能力必須仰賴對負荷的察覺——就是屬於骨骼、樹幹、血管及各種通常我們不認為具有感覺機能的結構。感官系統向來就是屬於神經生理學的範圍，但是在這些結構性的物質中，被吾人所熟知的神經性反饋迴路並沒有扮演什麼重要的角色。加負荷於骨骼或木材一類的有生命的物質上，就會使它們產生電力的改變。這種被稱為壓電的現象，早已在水晶及合成陶製作上為人所熟知；對這類的物質施壓，電荷就會出現在它們的表面上。我們在諸如留聲機電唱頭和麥克風一類的設備中，就是使用這種壓電現象將機械性的改變轉化為電波訊號。因此生物學家面對的不尋常現象反而成了工程師的標準資料，壓電感應也應該比神經感覺受到更多的仿倣。但是，感官知覺仍然是反饋系統中唯一必須能夠處理資訊，又能夠執行資訊的元素。自我察覺的飢餓感，若是沒有獲取食物的機械裝置便成了枉然。另外一些元素——比如電荷如何促使生長——仍然是件不可思議的事。所以製造一個有反應的物質絕非易事。但是如果能夠將物質放置在最需要它的地方，能夠補償磨損、能夠因應負荷的改變，這未嘗不是一個極大的誘因。

## 機器人操縱器

近年來機器人廣受注目，其中尤以工業用機器人為最。除了電影工業之外，沒有人真正在乎它們是否要在視覺上賦予人的形象，但是人類確實具有令人欣羨的靈巧雙手和觸覺能力。一個好的機器人最需要征服的艱鉅任務，莫過於拾起和放下一個精緻、非硬性的物體了。人類靠著有關節的四肢，加上視覺、觸覺和自感器（告訴你任何時刻身體部位之所在）各種官覺的組合，便能將這件工作圓滿地達成。我們

現在已經能夠製造出各種多關節而功能像手的操縱器，在自然界版本（就好比設計飛機、製作合成物和智慧物質材料一般）的持續提示下，我們可以了解到何者可行，何者不可行。其中有一種設計方式捨棄有關節的附屬肢不用，而採取有伸縮性、充氣式的結構，饒富趣味（見圖十三~二）。這是一種襲自觸角、舌頭及大象鼻子的肌肉式氣動控制器，以便處理易脆物品的裝置。我們哺乳類動物大抵仍是以使用有關節的附屬肢為主，但是若以生物性的用途來說，它本質上並不會比肌肉式的氣動控制優越太多。至於做為機器人技術的模型，則效果恐怕更差。確實如此，忠實地模仿觸角，或許比模仿一隻手像是更好的賭注，因為手所牽涉的，需要太多不連續和單獨控制的元素。雖然說，觸角的使用強行帶我們進入了一個完全沒有堅硬元件的陌生世界。

## 行走的工具

若是處於堅硬、平坦的環境前提下，輪子就較四肢理想。地形越趨惡劣，則四肢就越加管用。若是完全立於一個柔軟的地基上，例如沙土中，此時一隻腳仍然能夠有效地將自己撐起，而輪胎則必須一邊移動，一邊從自己的車轍中爬出，這種情形就好比要一艘船隻以超過它自己船身的速度航行一般。軍方常需要擔心馬路未築之前的人馬調動，所以他們較傾向於有腳的載運工具，有時甚至想出一些別出心裁的種類也在所不惜。這種載運工具的引擎裝置和反饋系統察覺器都是極端的複雜。一個六千磅重的行走器時速只有五哩，載運不超過五百磅；但是在另一方面，它所爬行的傾斜度，卻幾乎可達六十個百分比。一般看法都一致偏愛六隻腳的機器，所以這個行走器（如圖十三~三）看上去有點類似一隻巨型的昆蟲。四腳的機器平衡較差，如果一腳舉起，整個機器就易翻倒。但是一個六腳的機器，卻可以每隔一隻腳舉起而仍然維持三足鼎立的姿勢，或者它可以在不影響其平衡安定的情況下，舉起任何兩隻腳。關於這一點，你只要用一點黏土（或是一塊巧克力蛋糕）和幾隻牙籤，就可以示範證明了。所以現行設計行走工具的努力，對於昆蟲的生物力學格外地另眼相看。雖然如此，這種追尋六腳直立的邏輯原則，

並不意謂著所有好的行走器其形狀都會類似昆蟲；別忘了一些不可避免的分歧因素，譬如肌肉與引擎的差異、體積大小的區別等等。

## 靠變曲游泳

魚類的游泳顯然是輕鬆愜意、無比靈活，完全有別於人造的水面船隻或潛水艇。鱒魚、鱸魚等魚類，無論是起動或是任何猛烈的轉彎，加速度都令人印象深刻。在這樣的游水形式中，一波波的彎曲由頭部傳達至尾巴，而當彎曲移到尾部時，波動的幅度更加增大，使得整個身體形成一個由大塊可食肌肉所驅動的統合推進器。人類的機器想要模仿這種形式，那甚至比模仿鳥類拍打翅膀還要棘手。即使是如此，我們人類仍然費力地將一組實心的片段，一截一截複雜地連接在一起模擬這種波狀動作，我們稱之為機器鮭魚。或是更經濟一點，使用軟塑膠製成的簡單魚狀模型來模擬。正如同圖十三~四所示，旋擺魚（twiddlefish）以頭部後上方呈現的定點為直立的軸心，藉著身體的扭力向左向右做兩側的擺動。現在旋擺魚在市面上以玩具型式出售，這下可成了一個當真的事業了。一人坐於一艘小船上，扭轉一個從船身連於類似旋擺魚的軸心，那麼這樣一個一呎長或兩呎長的模型範本，便可以驅動這艘人工動力的小船。此外人類正在測試、正在建造的還有較大型的版本，使用不同幾何學的設計，結合各種推進器的組合，以及嘗試不同程度的硬度配合等等。

上述的裝置是否可能取代各種船舶的推進器？實在令人懷疑：旋轉式的推進器或許比任何形式的旋擺魚都來得有效率。真正游速極快的海洋生物，比如鮭魚和鯨魚等，其行進都是藉著寬闊的尾巴，在僵硬的魚身之後一前一後地猛烈拍打，而不是靠傳送身體彎曲的波動來達成。這充分顯示（正如同別的證據一樣），鱸魚為了身體的靈活度及加速能力犧牲了驅動效率。但是正如同有腳的載運工具自有其特殊用途一樣，即使它內在再複雜，效率再不經濟，也無法排除其存在的需要。所以這種柔軟而左右擺動的推進器也是一樣。譬如說，設想漁船需要經過一片水面下草葉雜生糾結的水域，此時做為這個拖釣船的馬達，左右擺動的推進器想必要比旋轉

式的推進器，纏結的機會少得多了。

## QUD VADIMUS ?

如果你想要做成小小的東西，或是製造出一些在細小層面上形式各不相同的材料，那麼自然界不但可以對你有所助益，還可以提供前車之鑒。規模尺度越小，則模擬的前景越光明。人類向來在大型事物上表現較佳，這也是金屬和輪胎進占我們科技的原因。所以對於生物仿微來說，上述的論點暗示著材料科學將是一塊肥沃膏腴之地，而結構和機械系統則非。鑑於早期的抄襲例子都屬於大型的事物，我們因此得以窺見一條新的途徑，一些不同的可能。

如果你發展出與自然物類似的新材料，那麼自然界自然會告訴你如何使用它才是最佳途徑。開始使用新材料絕非易事。最早期的鐵橋，造得就像是那些木造或是石造的，而最早期的鋼橋，也造得與那些鐵橋一樣。我們許多人仍然記得開始出現的塑膠水桶、園藝用手推車，模樣與它們的金屬製前身有多麼相像，與現今的設計型式有多麼不同。當各種合成物能夠比金屬和同類塑膠在價格上更具競爭力時，自然界的設計或許便更能對我們產生一種新的吸引力。

如果你要製造柔韌而非堅硬的物質，那麼便需要體認自然界比我們尚早一步的事實。觸角式的機械手裝置和旋擺魚，都在在證明與自然界看齊的柔性物質往往便能圓滿地達成工作。設計時若以柔軟為目標，便需將強度而非剛性做為首要原則，這樣便能達成精簡材料的保證：以少濟多。

如果你要製造身體內任何部位的修補物，那麼你所使用的物質和結構，越接近自然界原版作品的性質和運作，則得到優勢的機會就越大。在這個情況下，一種科技的一項元素，必須要調和適應另一種科技。若是以純粹的商業角度來說，這種修補物所需要的經費，相對於其所運用的材料數量，實在是相當可觀。

即使上述所提全屬告誡，但每一個論點仍然為我們指出一個比簡單的歷史記錄所暗示的還要光明的未來。我們在各種事物的設計上，越來越趨向縮小的元件，也就是更接近了自然界的迷你世界；請各位記住一個普通身材的動物，長度

只是一公釐左右。我們發展出一達串柔軟的材料，補充或替代僵硬的金屬及易脆的陶瓷。我們也不停地發掘探討各種合成物質的用途，這些合成物質要比我們舊日的玻璃纖維高明得太多，我們因此得以進入自然界的世界，了解到她是一個如此經驗深厚、多項全能的玩家(也許是因為缺乏金屬吧)。由於小的制動器及複雜的控制系統日益改進，許多以肌肉、肌腱、骨骼和神經做成的裝置，便逐漸成為廣受歡迎的模擬對象。

但是我們必須再一次地接受忠告。自然界或許能夠指示我們各種事物的可行性，可是她對於各種模仿是否值得執行，卻是一個極差勁的嚮導。坊間誇大的公司廣告總是不停地預報著工業界蜘蛛絲的合成近在眉睫。蜘蛛絲(種類極多)確實具有非比尋常的特性，既耐，又可以拉張，也非常堅韌(它們的硬度及彈性都極低)。雖然如此，它們卻也不像廣告暗示的那樣，品質種類更優於現存的聚合物，譬如牢固超過任何已知絲纖維的凱夫拉爾(Kevlar)合成纖維。能夠製成一縷蜘蛛絲，確實會成為生物科技界了不起的成就。這項工作所牽涉的，絕對不僅是將氨基酸按其秩序串連起來：吐出蜘蛛絲，完全要參照結晶部分和非結晶部分的正確編制才行。

試問我們對蜘蛛絲的需要到底有多深？降低足夠的製造成本在此處難以預料，因為任何的應用都需要大量的物質才行。因此從應用的角度來分析頗難成功。蜘蛛絲的特性事實上便是結構蛋白的特性，一般都極端地依賴它們的含水成分——嚴格地說，是水和的程度——以及環境的溫度。而且當水和程度及溫度一旦遭到變動，即使它們再度回復正常，其導致的改變也無法逆轉，使得我們對蜘蛛絲的使用更趨複雜。什麼樣的應用可以有足夠的寬容力，讓我們忍受這樣的麻煩？此外還有其他頭痛的問題，便是蜘蛛絲的低回彈能——或許這是它最與眾不同，也是最被看好的潛在性能。蜘蛛絲結合了極高的堅韌度和極低的回彈能，這意味著在它的伸張之間許多的能量會被吸收，而這些能量又不會以橡皮圈反彈的方式被釋放出來。換句話說，蜘蛛絲很容易伸張，但它的行為與橡皮筋卻不全然相像：它吸收能量，並保存能量。但是

根據熱力學的第一定律，能量不會消失，而且能量會以熱的方式出現。對於細細的一根絲線來說，這倒不會構成什麼大問題。它們內部沒有任何一點距離表面太遠，所以能夠藉著散熱至四周的空氣或水中，使其溫度不致過熱。但是，設想我們若是要以蜘蛛絲纏成的繩索，阻止自由落體或是行駛的飛行器，如果這根繩索要能夠粗到足以擔負這麼龐大的任務，那麼它內部劇增的溫度，如何能夠不立即地摧毀這些絲線？

所以，即使能夠輕易取得蜘蛛絲纏成的粗索，卻未必會更有利於我們。它們或許就像是其他生物界的東西一樣容易普遍地取得，但是卻不特別實用。我家院子中，長得既高大又茂密的竹莖便是極好的例子：它們每年生長旺盛，收穫豐實，但卻無法做任何的應用。或許只有了解蜘蛛絲如何獲致這樣奇特的特性組合，才能真正幫助我們，使我們在設計材料時，採用它們不尋常而可取的特質，捨棄它們的不利之處：或是設計出合乎人類製造經濟的物質和材料。

歷史的教訓或許還不只於此：忽視自然的危險程度與盲目抄襲無異。以後見之明來批判改寫歷史也許有失公允，但是請各位讀者看看下列例子：船隻的螺旋槳推進器是在十九世紀的上半，主要由史密斯(Francis Pwttit Smith)和埃里克森(John Ericsson)兩人發明成功。他們的設計模型，是一個在人類科技中享有悠久歷史的幫浦，也就是阿基米德螺旋(Archimedean screw)(見圖十三~五)。這個螺旋裹在一個緊密貼合的管道中，便可行使簡單而不怎麼有效率的抽水機功能。對於驅動一艘船隻而言，這種螺旋相對於槳輪的優點在於：體積較袖珍，而且可完完全全在水裡運作。史密斯的第一艘商業船(在一八三八年下水)甚至以「阿基米德」來命名。但是作為一個推進力的產生者，阿基米德螺旋的效能恐怕比它作為一個抽水機還要差。而且偶然的意外事件，竟然成為它一路改進發展的肇因。木製螺旋的外緣部分不小心地脫落，造成的短葉螺旋反而效果更佳。事實上最後證明、效能最理想的螺旋是由一組扁平的葉片，繞著軸心排列而成，而這些葉片本身的長度延伸不會超過其轉彎的小小一部分(對於葉

片弧度的體認，是要等到一十世紀，飛行推進器的發展之後，才得以確立)。

史密斯和埃里克森完全忘記了水中的推進器還有一個更好的範本存在。船的推進器與鯨魚的尾片，或是鮪魚的寬大尾巴，用的是一模一樣的流體力學原理。唯一的真正差別是我們一再提到的：它們的運轉並非採取反覆交替式的動作，而是旋轉式的。如果這些螺旋泵的發明家們早早領悟到他們是在製造鯨魚尾葉或鮪魚尾鰭的旋轉式版本的話，他們或許成就會更佳，成效也會更快。

一邊是生物力學，另外一邊是生物工學、生物仿倣及機器人技術，我們所面對的是純粹科學和應用科學的差異。為圖書分類設計的老式杜威十進位分類法，對這個差異就表現得一點都不含糊。所有關於基礎科學的書籍，編目是五〇〇，是在圖書館的一角；而所有關於應用科學的書，編目是六〇〇，則會在圖書館的另一隅發現。而且關心兩個系統的人往往也從不交集，若是能將兩組人號召在一起合作，必然會使得兩者更能彼此效力，相得益彰。



## 第十四章 對比、趨同和因果關係

我們對天擇和人類發明的研究越深，就發現兩種科技的相似處越少。由於兩種科技具備的共同情況，使我們很容易就會往相反的方向猜測。自然界的生命在這個行星上忍經繁榮興盛了數十億年，而我們人類的創造發明也大約在百萬年左右——這段時間已經足夠讓所有第一優先的必須任務得到體認和重視。然而兩者基本的差異，仍然普遍地存在：

- 自然界較人類少用平面，而多是起伏的曲面。
- 我們的世界極度偏好直線，而自然界卻對直角明顯有偏見。
- 人類科技中的轉角非常陡峭，而自然界的轉角多偏圓緩。
- 我們的裝置是由無數個機件上分離、個體上卻同質的元件組成：自然界使用較少的元件，但其元件各具不同的內在特質。
- 自然界的設計擅長利用擴散、表面張力及層競：而地心引力、熱傳導及紊流則對人類的科技發明影響較大。
- 人類的設計通常會達到某一種適當程度的剛性，而自然界似乎更關切一般物體是否有足夠的強度。
- 因上述導致的結果，便是我們所製造發明的物體較易碎，而自然界的物體則較堅韌。
- 另外一個影響是，我們的物體運作傾向在兩個堅硬物件的接觸面上滑動，而自然界的物體卻在預定的地方做出彎曲、扭曲或是伸展的動作。
- 另外一個結果，便是我們只能使用固定形態的流線形軀幹減低阻力：而自然界通常是以非硬性的軀體在流體中不斷地重新塑形達成目的。
- 人類科技使用大量的金屬，而這些金屬材料（相對於含金屬原子的材料）卻在自然界裡完全缺席。

- 我們利用金屬的延展性防止裂縫蔓延:自然界表現也不差，但是卻是以泡沫狀物和複合材料來達成。
- 人類的物質通常負荷壓縮力，而自然界的物質卻得經常承受張力。
- 伴隨而來的，我們便得大量使用釘子與膠泥一類的剪力預防措施，以便維捲堆積物體的定位。
- 自然的設計裡，在外有具張力的外皮，在內有增壓的流體，這種結構出現的機會遠較人類科技為更尋常及更多樣化。
- 對於這樣的流體靜力和氣體靜力系統，自然界的主要流體是水，而我們的結構大多包含著空氣或其他氣體。
- 我們以輪子和輪軸為基礎，毫不吝惜地使用各式各樣的滾動裝置:但是自然界裡的東西卻鮮少滾動，自然界出現的真正輪子和輪軸，已知只有一個。
- 我們的主要推動器——引擎——其帶動完全是以旋轉和膨脹為基礎:自然界的引擎則多數基於滑動和收縮的運作。
- 許多人類的引擎會自溫差中取得機械能量:而自然界所有的引擎全屬恆溫運作。
- 人類科技中的槓桿經常靠犧牲距離來擴增力量，而自然界最常見的槓桿，卻不顧力量的損失一味地加長距離。
- 我們人類的裝置，是以電力、運動力、動力及彈力的能量形式儲存機械功:自然界只有使用後二者，其中以最後一項最為常見。
- 我們的流體輸送裝置經常將壓差和流量互換，但是類似的轉換器在自然界裡卻不常見。
- 水面船隻在人類科技中一直扮演著極重要的角色，但是自然界卻無法抗拒潛水艇的魅力，而被它完全地征服。
- 我們的工廠比起自己的產品像是巨人:而自然界的工廠卻製造遠比他們體積龐大許多的產品。
- 當人類裝置的維修可以減至最低的時候，我們稱之為最佳設計:而自然界的裝置卻得以持續不斷地更新重建。
- 人類科技乾燥之程度，可與自然界的濕潤相比擬。

列出上述的差異，便暗示著它們彼此之間的關連。如果重力成為決定的因素，那麼能夠抵抗它的堅硬物質就會特別合乎效益。手邊有了釘子一類的剪力預防措施防止錯開，一層一層向上堆積便成了建造物體的合理方法。若要容許四處滑行，便非賴關節的功能不可：同樣地，因為我們使用金屬，才使它們的特殊性質得以曝光（例如它們高度的導熱性和導電性），也因此允許了一些不太實際的裝置（置如電絲）及營造方法（例如壓製及鍛造）的使用，合成物就從不可或缺的角色一變而為單純的實用。

自然界和人類各有各的領域，各自發展出不同的內聚力、遵貫性及合理度，各自在其特定的環境裡自成一完整的實體。我們是否可能將兩者截然不同的性能混合搭配以產生大量的未來種類？想當然大多數的成品都會失去原有的內聚力、連貫性及合理度：兩種科技特性的大結合往往還凌駕歷史偶然性上。到底是什麼因素決定科技裡所謂有效的設計種類？其一是它的物理狀況：科技成品的大小、基本媒介物是水或是空氣、是否在這些媒介物的表面工作或是懸吊其中等等。其二是它如何將工作達成：即製造的方法、對於革命性改變的抗拒程度、以及科技傳播的相對容易度等等。

即使是社會族群之間的互動關係也會對科技如何運作產生影響。自然界在組織和協調每一個個體的努力時，面對著極為嚴重的限制：我們可以稱之為「制度性的限制」（institutional limits），以便與人類的成就做一鮮明的對照。簡單明瞭的說法，即是有機物的自然運作並不是為了「族群種類的好處」：（也許）除了人類之外，沒有一個個體的有機物或基因知道任何關於它所屬種類的事情，或是察覺到它對這個種類的任何義務。只有極小部分的有機物，其個體的運作是為了某些共同生活體、生態系統或生物圈的益處，在自然界裡，個體之間規律發生的協調努力只會在兩種特殊情形下才會出現。第一種情況，有機物可能會做出一些減低其自我繁殖機會的事，以便增加其近親的繁殖機會，因為親屬本來便具有共同的基因，所以這種自我犧牲式的行動仍然能夠增強一個個體對下一代的基因貢獻。第二種情況，如果有機體幫

助別人可以圖利自己的話，那麼這種熱心公益的行為以演化的角度來看，是可以接受的利己主義，但是這麼嚴苛的條件勢必阻礙了所有可能合作行為的發生。

人類科技的運作隸屬截然不同的社會環境。大型的企業完全得依賴彼此沒有任何親屬關係的個人合作，雖然一張薪水支票確實代表一種尚稱正派的互惠原則。政府和宗教組織——最古老極端的便是軍隊——綜合協調各式各樣來自最遠、關係最疏遠的人員一起從事活動。英國康瓦爾地方出產的錫將地中海沿岸生產的赤銅變為青銅，而這件事情在兩地尚未有任何政治實體的劃分之前早就已經發生了。人類社會擅於集合不同個人的努力，這種非凡的便利允許了各種工作的大量專業化：想想看你所駕駛的汽車及操作的電腦，有多少的個人曾經參與和經手？而我們能夠產生運輸系統的便利，也意味著人類已經擺脫了自然界必須仰賴當地出產物質來製造物品的限制。

## 相似點

若要將兩種科技的相似點一一列出，不啻將一些次要細節和主要事物漫無目標地參雜在一起，無法得到任何啟示。兩個科技中的絕大部分相似點都來自它們必然的物理定律及環境狀況，而這兩點我們在前面都已有細述。功能最理想的抗重力直立圓柱，其橫截面將會是圓形的，不管它的產生是因為自然發展還是人類製造：不管是生長造成或是鑄模而成：不管其材料是木材或是混凝土、是骨頭還是鋼鐵。兩種科技都只有在噴射引擎的其他特殊優點（例如高速或是機械的單一便利）超過其低效率的比重時，才採用噴射引擎。低壓的幫浦利用的是流體動力現象，而高壓的幫浦使用的卻是流體靜力現象等等。

越來越多微妙而抽象的相似點在現階段得到更多的注意：這些類似點發生在過程與歷史的軌道中，而非產品身上，而且就連共同的物理環境也無法給予適當的解釋。討論它們需要將我們的論題帶回沉寂已久的第二章。

● 主要發明對任何一種科技來說都不是一件易事，但是其不易的原因卻各有不同。我們始終相信，人類科技

的進步是建立在足夠的科學基礎上，但是這可能只是部分真象。巴沙拉就辯論道(而且我並不會不贊成)，人類太過於誇大科學對科技的貢獻。其實當兩者產生互動時，往往是科技帶動科學，而非科學帶動科技；例如蒸汽引擎刺激了熱動力學的發展：飛行的需要為氣體力學提供了原動力。我猜測人類科技創新的主要困難，恐怕大部分時間還是來自引介一種全新事物時所遭遇到的本質上的複雜度，僅僅有一個美好的觀念是不夠的。蒸汽渦輪的觀念，瓦特在一八〇〇年左右就已經提出，雖然其功能顯然優於活塞引擎，但是等到真正用來推動船舶，已經是一個世紀之後的事了。蒸汽渦輪的運用，對於冶金術、精密製造的技術及潤滑技術各方面，都有高得難以應付的要求。帆船確實能夠省卻人們不少的勞力，但是，除了在風平浪靜的水域以外，行駛帆船在在都要求與原先槳動船隻截然不同的設計。一架巴貝治(Babbage)設計的裝置，要成為一台電腦，等了一個世紀才等到了電子學；用機械方式完成工作有時成本過高，因此造成科技的開展無法達成足夠的訴求力。一個成熟發展的科技必須具備極大的動力趨勢，而不僅僅只是超越市場的競爭原則耶可。關於這最後一點，容我們後述。

自然界演化式的創新，面對的是更大的難題。天擇對生物優勢的要求幾乎是立即效果，如此便使持續設計成為一種強制的需求，並且使許多原本最終將會成為優良品種的生物形式，失去了它們的機會。一個包括兩性重組及隱性基因的還傳系統，可以提供一些立即的性質改變，但是它並沒有特別鼓勵大幅度的改變。至於小幅度的改變，又遭遇不同的問題，新的設計若是只經過稍稍的變動差異，勢必與現存的既定設計難以一爭長短。所以在兩種科技中，能夠暫時逃離競爭的全面束縛顯然都是極為重要的一環——比如說，人類科技中的軍事發展，以及自然世界裡地理位置的隔絕。

● 所謂的改變或進步，其時間過程也包含了一些奇特的對比。當我們以相對而不是絕對的標準來衡量時間間

段時，兩種科技的變化似乎看來都極為緩慢和平穩。自然界陸上生物的產生遠在她完成大型組織結構許久之後，然後再經過一段極長的時間才發展出飛行的技能。人類經營設計發明也是一步一步地以各種不同的方式來應用人類肌肉，然後再慢慢以逐漸增加的效率添加其他動物的肌肉使用；此外，我們更按部就班地加上無生命的能量來源。同樣地，在食物的取得、工具的製成、居所的建造及破壞性的社會互動上，人類能力效率的增進也具有一樣漸進的特色。

但是若仔細觀察，則所謂的緩慢和平穩全然不是那麼一回事。在每一個文化中，在每一個緩慢的前古生物時代（對於肉眼可見的大型化石而言）或是史前時代（對於歷史記載的文化而言）之後，都會續接著一些突飛猛進的大躍前。各種細胞，不管是以單體形式、小型鏈狀、或是聚集集成體的方式組成，在達成各種努力和協調以衍生大型生物之前，在地球上的生存已然維繫了數十億年之久。但是大型生物的出現完全是出於突然——大概是在僅僅千萬年之間——而且其存在也不過是微不足道的六千萬年而已。早在現代世紀個人的高度專業和精心整合之前，人類已經占據了大部分地球很長的一段時間——約不到一萬年。所以在許多屬於人類文化的複雜商業、運輸系統和政治組織的發生之前，人類歷史早就過了大半。至於當自然界和人類社會一旦越過了他們突飛猛進的階段，各種改變進步是否還會持續加速則是一件尚末明確的事。寒武紀時代的化石年代溯至五億年前，可是其組成卻複雜得令人難忘，然後再看看古埃及的文物，不管體積是大是小，以人造物來講予人同樣深刻的印象。試問我們的科技，二十世紀是否較十九世紀進步？十九世紀的發展，包括自動推進的動力系統之普及、靠電力設備完成的立即通訊、廉價的金屬以及大量製造的普遍發達，然後二十世紀再輔以電子技術、航空學、現代醫學及聚合物材料研究發展為主的各項生力軍。若是同時往回倒退一百年，我們現代人所面對的文

化震驚，比起一八九〇年代的人物或許感受要少得多了。

● 至於發生在較細微尺度上的變化又如何？特定裝置或性質的改變又如何？在兩種科技中，細部的變化與大幅度的結構改變幾乎是一樣的枝節片斷，不能連貫。小小的一個挑動，便引起整個球的滾動，混雜這個比喻來說，即是觸發了整個快速的變化時期。某些重要的環境狀況或許會改變：譬如一粒種子落在島上，一艘船隻來到了新大陸。某些新奇的材料或一般性的元素得以取得：自然界裡發展出會生長的骨骼或是能食用的青草：人類科技中多了一種更堅硬的金屬或是船隻的推進器。或是某些主要限制因素得以免除：牙齒能夠容忍青草中的粗糙磨蝕，發電機取代電池成為主要的電力來源。對於任何一種科技，任何一種觸發所造成的範圍都可說是極其廣泛的。

演化的過程到底是穩定為主、還是片斷稱霸，引起相當不小的爭議，但是我們在此大可不需要為「漸進主義」還是「間歇性主義」這種爭辯操心。在分子的層次上，基因物質以相當固定的速度改變，是故演化的進行屬於漸進式。但是在有功能的有機體層次上，事物的改變則較不規律；固定數量的基因改變並不能造成有機體的定量變異。而其間的差異，並不是存在著一個似是而非的矛盾：只不過在一連串 DNA 上的鹼基中，以及一個有功能的多細胞結構體之間，有太多複雜而相互影響的過程干預介入。所以在分子的層次上，是漸進主義掌握優勢。在有機體的層次上，則某種程度的不規律早就獲得了默認，現行的爭論重點，只是在於這個間歇性的模式到底應該占掉多少比例？演化的生物學家們關心演化的改變，所以，當他們聽到多數生物種類多半時間都適應良好、不需多做大幅度演化的論調時，都難免大吃一驚。

人類科技改變的冷斷無常——或是一般人類的機構中——不常被人質疑，或說近年來很少被人質疑。不管是一個世代或兩個世代之前，人們多麼相信人類的歷

史演進永遠維持著穩定「向上向前」的步調。歷經農業革命、工業革命，甚至加上後工業革命，「革命」一詞或許成了時髦的口號，但是卻確實貼切。任何的科技史都可以提供許多迅速改變隨著重要發明接踵而至的例子，無論是早期的青銅或廉價的鋼、蒸汽引擎或是內燃引擎、真空管和電晶體的快速電子開關等。但是迅速並不就意謂著即時。基本創新得以應用，獲致成本和效率的改進，因而又導致更進一步其他的應用，但即使是這樣一個正面的反饋過程仍然需要時間的配合。從鈕可曼體積龐大的蒸汽驅動幫浦，發展到一個輕巧、足以有效推動陸上車輛的引擎——即特里維西克(Trevithick)的蒸汽汽車和史蒂文生的火車頭，足足經過了一個世紀之久。那樣的時間延滯或許並不尋常，但是這種靠壓差來產生功效的引擎特殊結果，到現在仍然還不能夠處理大量的壓力。緊接著電池、電線的易於取得，便導致了電報、電話和電動馬達的產生。而實用的內燃引擎發展出來的幾十年間，靠馬匹拖曳的都市交通工具就全然消聲匿跡了。

兩種科技還共享另一個會降低變動規律性的共同因素，那就是嶄新設計可能獲得改善進步的機會，往往較舊有已確立無疑的設計來得容易。對於自然界來說，一個突變能被接受(當然機率總是很低)而最終又能夠溶入生物體，在一個剛剛發生過其他變化、或是最近才入侵一個新棲所的有機體身上，機率總是大得多。如果這突變是發生在經年居於同一塊區域、執行同一種功能的生物身上，則絕大部分的突變便會失效或甚至反而有害。在人類的科技範疇中，所謂的進步便是從純粹業餘的領域進入有經驗的職業領域——不管我們考慮的對象是農具、汽車引擎或電腦。

● 如果變革的現象極易分辨，那麼中間停滯的狀況自然不再晦暗不明，在自然界裡我們便不再需要訴諸有名的活化石，例如葉鰭的腔棘魚類、銀杏或是鱉等。我們在不同年代的化石床上發現極為類似的化石，或是家常



種類的成員竟然在遙遠的島嶼上出現，基於這些化石的證據，我們可以確認，自然界的變化不但不屬於連續式的，也並非不可避免的。

即使現代科技的改變是如此明顯地快速，許多事物仍然得以持久。一旦拿掉許多附加的機械裝置，我們汽車基本的四缸引擎和手控排擋，對於一個自一九三〇年代沉睡醒來的機械師將不會造成多大的困惑。我們家裡的烘乾機所取代的是原來已經使用了二十五年之久的舊式烘乾機，其中許多的零件部分與它的前身都可以彼此互換。打字機剛剛問市的時候，發展改進極快，但是接下來的半個世紀卻變化甚小。噴射機在過去的三十年間，改變可說是微乎其微。至於在我們電動馬達的基本種類中，在幾乎所有的幫浦和工業動力傳動設備中，以及製造人類產品基本材料的各種技術中，停滯不前的現象顯而易見。資訊處理——可類比神經系統——變化不可謂不劇，但是它的最終效應——也就是相對於肌肉和骨骼的工業對等物——卻相當的穩定。偵測器、電腦及機器人或許可以取代人類操作員，但是它們用來切割、成模和組裝的工具大抵都與原來無異。

● 在兩個科技中，隨著一個創意發明的事件，一段初期多樣化發展而來的便可能是多樣性的衰減。暫時減低的生存競爭允許了比平常標準更多的實驗機會，創造了一種讓創意和增殖更有餘裕的發展環境。恢復自然界或是市場完全的競爭淘汰，則自動就刪減了不肖的後裔或成果。

自然現象的第一個發展階段，我們稱之為生態的釋放(ecological release):物種 發展擴張形成多樣化，以便能利用多種的棲息地。最有名的例子包括東非大型湖泊中的麗魚科魚(cichlid)以及祕魯沿岸加拉巴格群島上的雀鳥。第二個發展階段 稱為生態的取代(ecological displacement)。某種特殊的有機物，它們在島上不須面對生存競爭，因此具有極大的變異多樣性，但它們在別處則因生存競爭而導致其多樣性受到多方限制，此時一

旦兩者面臨比較，便出現了第二個發展階段——生態的取代。前寒武紀晚期的埃迪卡拉(Ediacara)生存年代約於五億年前，古爾德即將這種極為細微的生物視成一種多樣化的結果，而且其中只有小小的一個元素留存下來成為後續生命的原始先驅。但是這種對於埃迪卡拉的看法，至今尚未得到定論。在其他個案中，少數較優的設計取代許多較差的設計雖然確有可能，但是卻頗令人困惑。對於全面的多樣性衰減，我們至今雖然缺乏證據，但是古生物學家卻仍然得到一致的結論，他們認為在過去的五億年之間，生物形式的多樣性並沒有得到一個規律的增長。

至於人類科技的統一整合其特性則更為明顯，總是有一連串的強勢力量持續驅使著各方調整。從螺紋和鑽頭的規格到電子計算機的編碼，不管是工業界的、全國的或是全世界的標準，無一不設立完備。優良的物品供應和維修網絡使得某些設計更能吸引消費者。較為吾人熟悉的設計便是令我們感到舒適的設計，新奇事物對於我們產生的蠱惑，常常輕易地被誇大|如此，若是一個設計一開始便在市場上贏得了卓越的優勢，那麼它的支配地位便益形增加:而且真正的科技優勢，除了那些可能削弱它力量的因素之外，其影響確實至鉅。所以一個成熟的科技通常會較其革命性的先驅具有較低的多樣性(有趣的是，宗教文學也經過類似的昌盛和標準化階段:例如，早期的福音書一旦封為聖典之後便立刻遭到刪減)。

● 另外一個因素同樣驅動著兩種科技。人類在整個地球上以同樣的方式重複做著同樣的事情，這是風潮時尚、遠距離運輸和傳播普及的結果。而許多的有機物，也藉著同樣的全球運輸系統，使它們的種類傳播得以超越原來的地理範圍。有的傳播事出意外，有的則是起於刻意的計畫，後者大部分都是藉著馴養的動物或是栽培的植物來達成。不管其原動力為何，同質單一化減低了兩個科技中的多樣性;固有的技能(連同許多固有文化的其他各方面)遭到取代，土生的種類更面臨絕種。

## 做出類比

產品相似並不意謂過程也相似。我相信比較兩種科技的產品將會拓寬我們的思路，提供我們別處無法獲得的洞察力。關於過程，我較傾向模稜未決，因為天擇是一個最為奇特的過程，而且對於它所受限制的一般認知也並不正確。吾人最常遇到的類比，即是將人類科技的演變拿來與天擇的演化相提並論，我認為這一個類比需要經過生物學家的仔細研討。首先，我們須對手法技巧和歷史有一個明顯的劃分——這也就是我們生物學家區別自然天擇與自然歷史的標準。更基本的問題是類比所不能解釋的事情。我們論斷一個類比，不是看它是否真實、或是微不足道，而是取決於它是否有用或是誤導。

演化的類比，對於我們在早年教育中所受到的教導以個人的、英雄式的觀點來看科技演進的方法，無異是一種反動。這一點我並無多少意見，但是這種類比卻無法幫助我們了解在人類科技改進中個人創意所扮演的角色。不幸的是，我們的科技中最重要、最神祕的元素，即是人類創意的起源與本質，而且在非人類的事物中完全找不到任何可與它匹敵之物。一旦演進要依賴繼承遺傳，個人的努力全然不受重視，那麼還有發明家或政治領袖置喙的餘地嗎？自然界所能顯示的，不過是證實一個系統如果要能在成果上創造發明，並不需要在目的上企圖創意。這個觀點姑且不論在直覺上是否能夠讓人明白，但它卻並不是那麼重要。誰能夠質疑創造力在人類科技進步中所扮演的中樞角色？對於我們的科技而言，若是針對人類創造的意圖任意地增加市場選擇淘汰的影響，這無異是給我們的科技增添更多的無理性、無效率和危險度。

所以，一個類比或是一個相似的觀點有可能激發帶動進一步的分析，也可能成為這個分析的劣等替身，但是它自己本身卻不具任何分析性。舉例來說，海爾布朗爾(Robert Heilbroner)曾發表聲明：「特別回顧過去的歷史，所有的改進顯然本質上都是屬於遞增式、逐漸演化而成的，如果自然界從不做出大幅度的躍進，那麼人類科技想當然也不會。」說得不錯，但是接下來到底它們何去何從？附帶一提，留心他所

用的字眼「改進」一字即有著逐漸進步的意謂，這便是假定在自然界也有著相等形式的進步，而如今我們對自然界的進步已經不如我們一度認知的那麼明顯了。或許演化曾經一度是漸次發展的，但在許久之前便已達到某種狀態，在這種狀態中，所有的複雜和多樣性的改變都是屬於任意發生的。或許人類的科技正好與自然演化相反，尚末達到這樣的高原狀態，而仍然存留在漸次發展的階段。如果這個說法成立，那麼我們比較兩個科技近代的發展就完全成了一種謬誤。

科技決定論則是另外一個理論，無法確認天擇所提供的類比價值。科技是否(或者更實在一點地說，以何種程度)驅動歷史，這個問題向來在從馬克思到近代科技的社會批評論家，例如曼福德(Lewis Mumford)等各式人物中，引起極大的爭議。中古世紀舉足輕重的發明計有馬蹬、馬前胸吊帶、馬頸圈及重量級的犁具，因為它們的出現才使大型動物的動力得到有效的應用。而自然歷史中相同意義的決定論也同樣顯而易見，甚至不需用類比做任何的佐證。對於有機物而言，除了天擇，其他則無關緊要——就是說，繁殖的成敗決定一切。沒有任何社會意識、政治權宜、知識判斷或群眾性的歇斯底里可以混淆這個真相。

達爾文式或天擇主義的類比吸引我們，是因為天擇較缺乏可信度的非理性系統更直接易懂：後者根本抗拒演繹推論的過程，我們在第二章中已略有所見。但是，無論天擇主義的模式多麼引人入勝，它至少必須承當過度簡化或甚至更糟的罪名。譬如說，人類是藉著製造前的分析及行銷前的應用試驗刻意在彼此競爭的設計中將其選擇減至最低，我們竭盡一切可能預測我們產品的效力。正如摩凱爾(Joei Mokyt)談論其間差異的關鍵所在：「新的概念與突變在天性上即有不同，因為突變襲自錯誤，而概念則是蓄意企圖造成改變。」另外，我們人類尚能從失敗中學習，這個因素在我的同僚皮特羅斯基(Henry Petrosk)的許多著述中有非常清楚的解釋和論證。除此之外，我們可以不斷地質問：「如果某物能夠達到……，豈不更好？」人類的科技出自理性和非理性的複雜組合，即使我們對此再熟悉，也不該遮掩它抗拒精密分析的事實。當然在

同時，不管分析是如何複雜難為，也不該遮蓋了它確實有用的效能。

天擇主義的模式尚有另外一層危險性。自然之所為，依據定義便是「天然的」，但是「天然的」一字卻帶有強烈的言外之意，意即正確、甚或代表神聖。對於自然原則是人類做法指標的這種一般觀念，我們必須竭力駁斥。自然有時確實能夠提供我們典範：但是在其他情況下，對於自然的尊崇恰恰就像是江湖郎中醫治我們現代百病的萬靈丹。這並不是說我們從未遭遇過史無前例、難以克服的困難，也不是意謂著其中某些困難不是人類科技不能預期的結果，我們只是不能一昧耽溺於過度單純的信心，認為所有的問題一旦走向自然、使用自然的方式或尊崇自然法則，便能迎刃而解。

自然界對我們所能展示的，是一個極度複雜的科技系統，能夠在完全缺乏有先見的指導舵手之步步為營情況下，仍然得以出現、運作和持久，現代高度複雜化、科技化資本主義制度的持續存在也展示了同樣的特性。此外，後者的功過論定，必須以它對我們社會目標的貢獻來衡量，而非藉任何與自然的類比來評斷。自然界的角色或許比一個世紀前「紅牙紅爪」的怪獸(旦尼生[Tennyson]的用語)形容好一些，但是我們卻不需要強制將她拿來做為模擬的範本。想必是達爾文跟隨亞當·史密斯的腳步，而非亞當·史密斯跟隨達爾文的腳步。

我不認為任何一個生物學家在這種準神學的意識下還能成為自然的崇拜者。我們並不是更理性，只不過身經多年令人反感的社會學說爭戰，早已傷痕累累。這些學說借用自然過程做為辯護，絡繹不絕地以新的名稱借助新的支持者重複地出現。其中之一便是社會達爾文主義(我們在第十一章中提過)。這是十九世紀末、二十世紀初所產生的理念，他們認為既然自然界可以從事忘形的競爭，那麼人類社會未嘗不能追隨這個操作準則；另外一個便是生物決定論，它的極端看法全盤否定了任何對個人或種族繼承的缺失修正。

除了天擇誘人的合理性之外，有生命的生物歷史與人類科技的相似點也觸弄了吾人對於它們共同結構的一些好

奇，其中一個相似點便是經濟歷史學家所謂的鎖定(卡位)，和古生物學家們所用的在職特權(privilege of incumbency)。在兩個案例中都發現，即使產生某種經濟上或是選擇上較優勢的設計，也無法取代原來既定的裝置或生物形式。在經濟學上，這不啻是對所謂理想的市場競爭再加上重重的一擊。在生物學上，它否決了所謂競爭排它原則(competitive exclusion)的所有應用可能——這原則主張如果有兩種群落(其生物分類必須屬於種或以上才不會造成基因的混合)處於完全自由競爭的情況下，一方將會取代另一方。

有機體業已固定存活的群體，即利用這種在職特權抵禦來自廣懋的地理範圍內大群不同的種類，以及大量的個體因素所帶來的絕種可能。它的存在實體是基於一些不充分完整的間接證據，因為所牽涉的時間因素，我們因此只能看到結果而無法一窺戰鬥實況。但是這個在職特權的觀念，倒是讓許多原本無法自圓其說的化石紀錄得到合理的解釋。第六章曾經提到自然科技的非金屬特性即是這個在職特權的可能個案，但是我們又怎能確定呢？

對於人類科技，鎖定現象的證據則較自然界為優，但是仍然不能盡善盡美，即使它的一般概念是如此合於邏輯，令人難以否認。標準打字機鍵盤(QWERTY)的持續存在即可提供鎖定的尋常例子。這種標準打字機鍵盤上字鍵的安排最初是為了減低彼此的傾軋擁擠，而非為了增加打字的速度，一旦技術的進步解決了這個擁擠的問題，那麼一個合於人體工學的優良鍵盤想必便會取代它了。但是重新訓練打字員既耗時又費錢，而且一個機構若擔有兩種鍵盤或許對彼此都會產生反效果，因此較快的鍵盤設計(Dvorak)便永遠失去了被消費者接受的機會。但是這個個案或許並不如表面那麼理想。比較兩種鍵盤其實都有嚴重的缺失，而且有明顯的偏袒。標準打字機鍵盤竟然優於按字母排列或是任意排列的鍵盤：為了避免擁擠而特意強迫輪流使用雙手的結構竟然能夠增加打字的速度。

另外一個稍有瑕疵的例子，便是 VHS 錄影帶系統擊敗本該較占優勢的 Beta 系統，而在市場上存留下來。任何 Beta

系統的優勢都被它較短的錄影帶時間——一開始是較一般電影正常長度稍短的一小時——所抵消了。此外，認為內燃引擎得到卡位的優勢，認為我們如果在一個世紀前就著手電動汽車的標準化，則現在就會擁有性能優良的電動汽車的這種觀念，也犯了類似的缺失。這個論點假定任何的科技要是給予足夠的刺激和資金，其改善進步都可以不受到任何限制。電動汽車的唯一限制來自電池的重量。若不是因為軍方為了潛水艇的使用對電池重量產生興趣(一九五〇年核能出現之前)，以及太空計畫類似的當急之需，這個尋求節省電池重量的路程那裡能受到這麼強烈的推波助瀾呢？

不管如何，鎖定(卡位)現象——因為固守原來的選擇而宣告新產品市場策略的失敗——必屬尋常。現今電腦的銀幕是否擁有最佳形狀？或只是電視機一成不變的再版？照相機的三十五公釐軟片格式留下大量的空間給它的孔眼，這難道不是起源於沿用最初三十五公釐電影軟片的意外？而且卡位現象所代表的，或許並非是嚴重的市場挫敗。畢竟一個較複雜的物品如果獲得大量生產，因而造成設計和機械裝備的成本得以分攤，製造這個物品豈不成了較經濟之事？我們在這裡的疑問是，自然界是否也有相同的現象說明卡位的存在和角色？市場的支配性、消費者違反理性的行為、擁護原本選擇的結構組織——上述這些現象，在自然界在職特權的各項基礎因素中完全找不到任何明確的類比。

## 最後一則故事——圓錐體和螺旋形

前面我們已經見識到，將自然和人類科技過程的相似處拿來做為辯論的根據真是陷阱重重，若是根據它們產品的相似點來論證，則所招致自欺的風險將會較低。風險是降低，但並沒有完全排除；只消再過目一次第二章的主題，便勝過我任何的忠告。

試以一個圓錐體為例。衡量圓錐體的尺度有二，一是直徑，另外一個則是自其邊緣至頂點的距離，如圖十四~一所示。延長底部邊緣使得圓錐體變大，但是尺寸改變形狀卻仍然不變，加倍直徑則使得邊緣至頂點的距離也加倍。相反地，若是延長圓柱體的邊緣，則它的形狀會益發瘦長。



圓錐體還有另外一個有趣的特性。如果它們內緣和外緣是以同樣的斜度變尖，則圓錐體便可以重疊在一起，要多緊便有多緊，數目也不受任何限制——這就是我們運送、儲存冰淇淋蛋捲和圓錐形紙杯的方法。將它們互相擠壓，便恰恰好讓彼此緊緊相連。而且這種相同斜度的圓錐體最易製造，無論是以車床切割、用模型鑄造，或是用任何其他的技术來達成。在此我們再度看到，它們與圓柱體形成鮮明的對照。將圓柱體彼此套疊，最大的用處莫過於收音機天線的收縮。但是每一個圓柱體的準確尺寸，必須永遠固定在彼此接合緊密的程度上，沒有任何一模一樣的圓柱可以彼此套疊在一起。

雖然兩種科技都同樣大量使用圓錐體，但是它們的使用原因卻不同。對於自然界而言，圓錐體的主要優點是靠著添增邊長來達成整個個體的成長，而又能維持其固有形狀。這種特性使得圓錐體非常適合用來做為軟體動物的外殼，因為這樣的增長正好就是它們的生長方式。人類並不製造會生長的物件，所以這種優點對我們毫無用處。圓錐體能夠彼此套疊，能夠以可操縱的舒適程度彼此壓擠相容，才是我們真正看重的優點所在。圖十四~二便展示了幾個這種優點的應用。

(我們現在面對的是極度的偏見，而非絕對的二分法。自然界裡一些相同的圓錐體確實可以彼此套疊。許多水母在它們固生的階段，會產生一疊疊我們稱為疊生體的組織。每一個疊生體後來便會長大脫離，形成一個可辨認的游泳水母。如果你將一個煮熟的疊生體標本打散開來，便會發現每一個單獨的肌肉組織都是彼此相疊的圓錐體。而且當你每次削細你的鉛筆時，你就是在利用圓錐體能夠不改變形狀、而允許零生長的特別方式。)

車床上的軸式切割工具正好嵌進車床尾座的洞孔中，好比一對互相套疊圓錐體的雄性部分。往內施壓，也就是這個切割工具發生作用之時，正好拉緊它們之間的接合，但是如果工具在使用中突然卡住而不能動彈，此時它就會從洞中鬆開，做著不具傷害力的旋轉。這個套疊的圓錐體不只是容易製造而已，它逐漸變尖的角度也使它對熱脹冷縮造成的尺寸變化較為不敏感。老式的毛玻璃瓶塞也是因為同樣的理由而



採取圓錐形：易於達成必要的接合，以及不管鬆弛或收緊狀況都能保持一定可靠的行為。相反地，玻璃製的皮下注射針管的活塞，每每需要與其圓柱狀的針管做個別的配合。它們通常都被編上號碼，以便每次共同清洗消毒之後還可以重新配對。僅僅需要使用一次的軟木塞，比如酒瓶的軟木塞，都是圓柱狀的：重複使用的軟木塞(比如在實驗室中所使用的，或是早一代的保溫瓶的塞子)都做成圓錐形，如此一來它們才能適應各種不同的導管口，使用經年仍然保持良好的接合。

我們之中鮮少有人注意到，現代科技對圓錐體的偏愛是多麼地勝過圓柱體。金屬水管一端的螺紋與一般螺絲釘的螺紋不同，它們並非是一個有一致深度凹槽的圓柱體，而是經由凹槽往水管內側的逐漸加深形成一個長形圓錐體的部分——這樣造成的水管，即使它們的螺紋深度稍有出入，也可以彼此緊緊地密合在一起。汽車輪胎內的滾柱軸承做成圓錐形，而非圓柱形，因此當我們將一個外緣螺栓鎖上標準轉矩時，便能夠抵制耗損，或是中和製造過程的偏差。但是容我再一次聲明，圓錐體的這些優點與軟體動物外殼所利用的特性截然不同。

自然界不僅喜好普通的圓錐體，甚至連圓錐體衍生出來的種類也一樣愛戴。動物的角和長牙、蛤殼和蝸牛殼，甚至在英國南部多佛(Dover)地方白色山崖上形成的微小原生動物(protozoa)——都是圓錐體的衍生物。回想圓錐體的高度與直徑是如何地符合比例，同樣的關係也可以應用在涵蓋更廣的實體種類上，即對數或等角螺旋物；只要以曲線代替直線，便可以產生這種特別的螺旋物，有別於原來普通的圓錐體。一個線形螺旋自某一個起點開始往外生長，轉彎處形成的狹道逐漸變寬，其變寬的程度與這螺旋物往外生長的距離成一定比例。我想對於大多數的人而言，一個如圖十四~三所展示的圖形會勝過文字好幾倍。正如同圓錐體一般，對數式(logarithmic)的螺旋體可以單單添加物質而不產生形狀的改變。此外，它們正好符合了生物典型的對數式生長——這個生長中，物質添加的速率正好與現有物質的數量成一定比例。事實上，在前面一段文字中略微提到的圓錐體，好比

帽貝之流的貝殼，其實正是曲度極低的對數螺旋體。

早在本世紀初，就有三名生物學家受到這種一再出現於自然界的螺旋體的蠱惑，圖十四~四裡附有幾個實例說明。對於博蒂古(James Bell Pettigrew)來說，它們所展示的是一個造物者的奇特偏好，一宗反演化作品的代表物。對於湯姆森而言，它們提供了幾何理想主義的最佳範例，或至少顯示了生物形式在數學方面的一絲不苟。湯姆森在蘇格蘭聖安德魯(St. Andrew)南街四十四號的房子中就掛著一個飾有對數式螺旋體的紀念匾。庫克(Theodore Andrea Cook)則全神貫注於它的美學面，而缺乏上述那種關於宇宙的聯想。螺旋體於今仍然強烈地吸引著我們，純粹只是因為它們在資訊處理上的簡易單純，以及它們為有機物生長方式所提供的便捷有利。產生這種對數式螺旋體所用的數學公式正好也是決定細菌培養生長率的數學根據。

鑑於自然設計對對數式螺旋體的滿意程度，我們人類科技是否便應該對它們多加注目？非也。這些對數式螺旋體在自然界裡的盛行，正反應著它們與自然界所作所為的相容性。而這個相容性，也正是它們與圓錐體，一個屬於本質上未轉彎的螺旋體，共同分享的特性。我們對圓錐體的興趣所在並不能延伸至螺旋體，因為螺旋體不能套疊。所以，人類的設計創造與螺旋體全無關聯。

## 趨同

從達爾文以後，生物學家們了解到相似的有機體未必源自相近的共同祖先：類似的結構安排經常一而再再而三地重複出現。魚類或哺乳類動物影像成形的眼睛與烏賊或章魚的眼睛，具有極為顯著的相似處。它們兩者基本差異與彼此功能的無關更加肯定了我們的信念，確認它們雖然同時具有這種讓影像成形的眼睛，但卻不是來自一個共同的祖先。我們所知道的趨同現象例子真是不計其數——譬如有袋動物和胎盤動物的趨同。對於生物學家而言(竟然是也是自達爾文開始)，它代表麻煩的開端——演化理論倒是輕鬆如意地接受了它，沒有嫌棄它，反而是真正實用的有機物分類對它十分頭痛。既然結構的相似並不能顯示彼此的關係，趨同現象使得

解讀族系變得更為困難。相反地，對於一個有興趣剖悉功能的生物學家，趨同現象倒不失為一便捷的工具。功能上的重要性(尚包括一些其他的事情)必然是在天擇的直接影響下策使趨同現象發生的原因；何者有用，何者便受到萃選。正因為如此，大凡發生趨同的範例，便自然地向我們展示了何者才代表了功能上的重要性——就是在有機物的設計中，哪一方面才對其繁殖功能產生具體的影響。萃選出來的特性，必然也是具有實用的特性。

此外，趨同現象尚可以在演化的過程中，表明何者是容易產生的。如果某種事物一再重複地出現，即意謂著它勢必能夠在遺傳資訊不做巨幅的變動下達成使命。重建演化族譜的生物學家旨在尋找具有最少創意步驟的連續方案秘世襲計畫，所以「容易」一詞在此絕非一個無關緊要的考慮。

或許同樣的步驟用於檢視人類科技發展的過程也會一樣地有效。所有我們的通訊媒介完全剝奪了現代文化的獨立性，使它們無法像自然界那樣族系涇渭分明。但是事實或許未必如此。人類或許全部都起源於一小撮的原始人類，而在獲得眾多科技技術之前便已分散四地。或許趨同現象對於兩種科技都意謂著同樣重大的意義：趨同的實例即是顯示何者重要、何者簡易的指標冬檻個理念在李約瑟(Joseph Needham)所著的《中國的科學與文明》(Science and Civilization in China)不朽作品中受到相當的注目。也許並非巧合，李約瑟本人除了身為案所公認的漢學家之外，還是一名傑出的生物學家。

讓我們細想一下人類使用金屬的早期歷史。在缺乏一個更具說服力的選擇之下，我們只有採取最為遞增的方案，也就是需要最少天才創意的最「容易」方案。以自中東地區所收集的證據來判斷，一個可能的發展也許如下：幾乎在所有具有機械實用性的金屬中，銅是唯一以天然金屬形式出現的元素，銅礦裡通常便含有大塊的金屬銅。但是若將一些相關礦石與銅一起溶解，則其產生的銅產將會比溶解純銅還要高，所以從溶解到煉製的轉變過程自然不會發生太大的困難。含有些許雜質的礦石反而會產生較佳的金屬：錫青銅和砷青銅比純銅更具有實用價值。會對煉製工匠產生些許毒素

的錫青銅則更為理想，但是它也更不像是偶然之間發現的提煉方法。總的來說，鐵仍然在金屬中號稱最優，但煉製過程卻需要較高的溫度。

這個從金屬銅歷經煉製礦石、砷銅、錫銅到鐵的過程順序到底有多少可能、或是多少合理性？但是，一旦我們發現這種從銅礦到錫銅的發展順序不只發生在中東，也同樣發生在幾千年後的新大陸南美地區，便不禁對上述的歷史重構充滿信心。吾人也可以舉出人類學家和考古學家稱為傳播的例子做為另外一種解釋，表示科技經由不同文明之間的偶然接觸得以散播開來。但是我認為以傳播來解釋美洲大陸的金屬使用，未免有點牽強附會。

舊大陸和新大陸紡織業的發展也為趨同現象提供了一個類似的故事。雖然說其中某些成分確實可能跟隨著早期入侵北美的侵略者越過白令陸橋而傳來，但是兩者大部分的紡織技術仍然可說是獨立發展完成的。舊大陸和新大陸都同樣使用織布機，但是其各自的一貫性及彼此的相異點，在在顯示它們是各自獨立的創新發明。兩個半球的發展程序看去極相像，都是從不捻轉的繩索到捻轉的繩索，再到籃子式的編織及打結的網狀編織，最後才演變成真正的編織，其間紡紗的技術與織布機的人工效率也不斷地改進配合。在兩個案例中，諸如亞麻和劍麻的長纖維，其使用都先於棉花和羊毛一類的短纖維；短纖維可以大量製造，但卻難以形成有適當強度的捻線。地球兩邊都有棉花和羊毛的發展應用，兩種棉花分別源自棉屬植物中的不同種類，羊毛則來自不同的動物——舊大陸的綿羊和山羊、新大陸的駝馬和羊駝。仔細比較分析，或許可以進一步顯示出早期紡織業發展的一般原則。

金屬和紡織業的發展過程都同時顯示出，輕鬆容易的達貫性秩序是發展的重要因素。一個需要最低大幅度創意的發展，也就是演化的生物學家最熟悉的一種。金屬和紡織業當然也並非比較研究趨同現象的唯一探討對象。地球兩邊都廣泛地使用燒製的陶瓷器具，但卻各有各的技術。其他的候選人尚包括各種捕魚、耕種、撒種、製革和捕獸設陷的技巧，以及船隻製造的方式、打獵和戰爭所用武器的製造技術。

趨同現象的另外一個功能，便是以它的反面事物，也就是不能趨同的現象，來顯示何者是難以造成的，並且強迫我們探尋發生困難的原因。為了達到此目的，我們便應該注意尋找一個科技中看似尋常、但在另一個科技中卻缺乏或鮮少見到的元素。試以工具使用的歷史為例，當我們得以認識哺乳動物及鳥類所使用的少數工具時，我們訝異的不是它們的存在，而是它們的稀少與偶然形式。動物使用工具的有限性，正好與它們利用環境中的物質來建設居所的方式形成鮮明的對比：比如石蠶蛾的幼蟲管、寄居蟹的外殼；魚類、爬蟲、鳥類、哺乳類的巢穴及海狸壩等，而且它們也同時與人類工具的多產成為另外一個鮮明的對照。為何會有此差異？若是我非正式、未經證實的想法來看，差異的造成是因為工具的精心使用一直要等到它們達到某一個關鍵性的起飛點以後才可能發生。這個起飛點的到達，大抵每一種動物都只有唯一的一次——人類的這個起飛點應該是發生在我們史前時代的階段。或許是由於人類獲得了知性的、象徵形式的語言，以及因為語言所造成文化資訊傳播的突飛猛進促成了它們的發生。但是除了在比較兩種科技的情況下，誰又會提出這種問題呢？

## 結語

將自然同樣視為一種科技的觀點，讓我們對周遭的世界有了嶄新的視野，體認到自然所面對的是與人類設計師一模一樣的變數——現階段這些設計師多以機械工程師的角色出現，引導我們去比較兩者的成品和過程。但是比較的主要驗證乃是在於應用；簡單地說，也就是我們自其中學到什麼樣的經驗？

辨認我們人類可以藉著模擬而獲致的特別結構裝置，或許其收穫最微不足道。搜尋電動馬達的各個部分，我們有多少機會可以發現到，其中的一個部分能夠提供內燃引擎性能的改善？那麼更何況是肌肉性的蛋白質呢？相反地，我們可以從自然科技最卓越出色的設計中得到充分的洞察力，但是關於此

點，我們的著墨也已頗多。兩種科技各自形成一個凝聚完整的實體，彼此有著顯著的差異，也各有各的利弊。或許如果讀者諸君不嫌瑣碎陳腐的話，容我以最精簡的一句話來形容，即自然界昭示我們何者才是可能的途徑。

我們看到兩種科技的成品自有其巧合一致之處，但同時也看到它們大相逕庭的地方。不管是相同或相異，它們各自都傳達了一個洞察未來的訊息。兩種截然不同科技背景中出現的相同一致，讓我們察覺到兩者都無法豁免的局限。同樣問題的不同解決方法，或是同樣工作使用的不同設備，意義同樣有趣；也就是第三種，甚或是第四種方法或設備的可能性。是故比較兩種科技能夠提供我們創新發明的建議，何處較為可能，而何處則非。主要的創新發明確實得來不易，若是得到小小協助，或許便能踏出另外一大步。

不管是科學還是科技的歷史都充塞著各種例子，以一個擁有不尋常背景或見解的人——也就是門外漢——來解決久懸未決的問題。那麼吾人是否可以刻意變成一名門外漢？或者更理想一些，如何在不失內行專精的技術情況下，又能獲得屬於一個門外漢的嶄新觀點？對於人類的設計師而言，從新的角度來觀看自然正好可以符合這個要求；她能夠提供廣角的視野，揭露各種極易於逃過我們考察的事物可能性。

本書一開始便陳述了各式頌讚自然至上的聲明。所以在某種形式上，整本書便是對這種論調質疑。自然確實美妙至極，但是我們卻不能忘記人類所做的，正是她所不為的：不管它們由來如何，我們人類獨一無二的成就值得我們全面地表揚。金屬材料、短纖維繩索、絲線交織而成的紡織布料、輪子和輪軸、熱膨脹引擎、快艇、電化能源儲存以及較空氣還輕的飛行器，這些全是人類工程師製造出來的不凡成品。至於我們如何使用，則又是另外一碼子事。

讀者諸君在本書已經接觸到我最直接的科學興趣：生物力學。相較於科學界其他領域的學問，生物力學多側重於現存實體的機械問題，尤其是在於這些問題的解決方法，如何因為有機體不同的尺寸、不同的族系、不同的生長、繁殖和傳播方式而有異。它的許多基本概念都借自工程學，也因

為這樣而獲益良多。我們在嘗試了解自然行為的努力中，無拘無束大量有效地利用了人類現存的科技，我們的書籍和論文也全然沒有掩飾這個過程的企圖。事實上，我們經常被一些剛剛遇到生物力學的生物系學生問道：「這是什麼？工程學？」做為生物力學的重要參考，人類科技對我們的重要性可以藉著重申我們在一開頭所做的承認來表達。畢竟，我們在有機體裡識得的機械裝置，哪一個不是在工程學裡已經耳熟能詳的？不知是我們創意不夠或是想像力不足，或是工程師們早已捷足先登占盡數字上的優勢？或許這種情勢正好指示我們，在從事任何分析了解的企業中，外界參考的價值與重要性所在。