

12. 電機科技重要領域

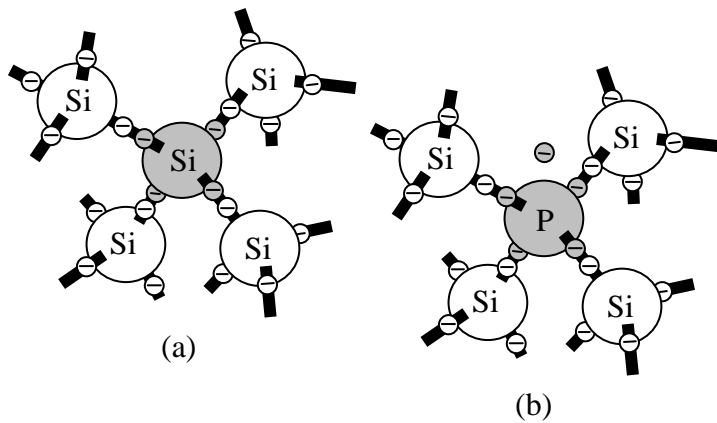
電晶體與積體電路

參考資料：維基百科 <http://zh.wikipedia.org/>

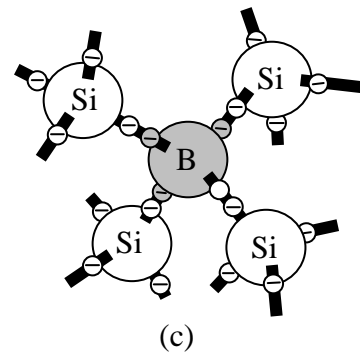
物質若以導電性來區分，大致上可歸類為導體或絕緣體兩種，一般所稱的導體即金屬，其導電性會隨著溫度升高而減弱，也就是說電阻會隨著溫度升高而增大，在 1833 年，電子學之父法拉第發現了硫化銀的電阻與金屬不同，隨著溫度的上升，它的電阻反而降低，即導電性增強，這是人類首次發現異於導體特性的物質，或者是說「非導體」或「非絕緣體」，這一類物質就是所謂的半導體，其導電性比導體小很多，但卻又比絕緣體好。隨著科學的逐步發展，半導體也漸漸展露頭角，進而引領二十世紀的科技。



Michael Faraday
1791-1867



最常見的半導體材料，就是地表含量最多的矽(Si)，矽原子本身具有四個價電子，分別位在 sp^3 的四個軌域中，由於每個軌域需擁有 2 個電子，以形成八隅體的穩定狀態，正好在純矽中，每個矽原子都與四個矽原子相鄰，並且與這四個外圍矽原子共用軌域，形成矽原子間的共價結構，如上圖(a)所示，此種共價結果相當穩定，不存在自由電子，也因此純矽的導電性極差。



但是，如果我們在純矽中摻入少許的砷(As)或磷(P)，每個砷或磷原子會取代某個矽原子，仍與四個矽原子相鄰，需要四個電子以形成四個共價鍵，由於砷或磷原子的最外層有五個電子，卻只與矽共用四個電子，因而多出了一個可自由活動的電子，也就是自由電子，這種架構就是所謂的 n 型半導體，如上圖(b)所示。如果我們在純矽中摻入少許的硼(B)，就反而少了一個電子，而形成一個電洞，這樣就形成 p 型半導體，如上圖(c)所示。此時若在矽晶兩端加電壓，就能使電子產生自由移動而顯著地增加其導電性。

半導體的發現對電子、光學和能量工業等都產生重大的影響，其後電晶體

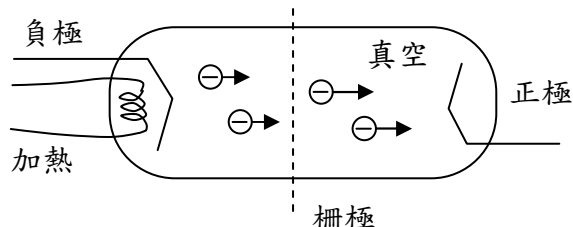
與積體電路(IC)的發明，更讓整個世界的科技獲得全面的提升。

積體電路就是我們常聽到的 IC 晶片，它是目前最為大家所熟悉的科技名詞，人類的生活品質也因為 IC 晶片的開發，受到巨幅的改善，平日觸目所見的手機、電腦、數位相機、汽車、...等等，都必須利用到 IC 晶片。

談到 IC 晶片，就必須介紹二十世紀最重要的發明—電晶體(transistor)，這是 1947 年 12 月 23 日，由美國貝爾實驗室之蕭克利(Shockley)、巴丁(Bardeen)、布拉頓(Brattain)等三位科學家所開發出來的，是具有放大電流效果的固態三極體電子元件，屬於點接觸式電晶體，這項成果於 1948 年六月才正式發表，三人後來在 1956 年也因電晶體的發明獲頒諾貝爾物理獎。

事實上，在研發電晶體的時代，有一項科技正蓬勃地展開，那就是建構自動計算的電子計算機，當時的電子計算機是採用 0 與 1 的代數運算，為了表達 0 與 1 的符號，乃採用快速的開關元件—真空管。

真空管是具有三個電極的元件(如圖所示)，在負極加熱以產生電子，若在柵極施加電壓，則電子受到阻力無法到達正極，此時真空管是處在'關'的狀態，反

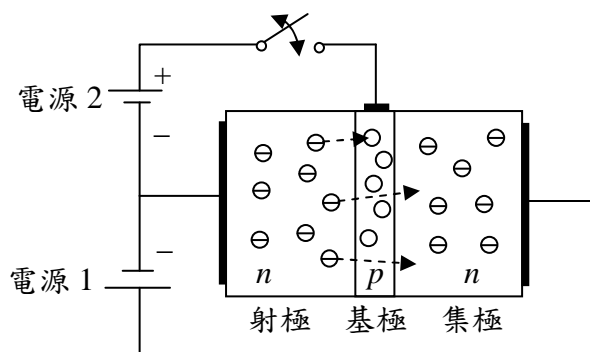


之，若除去柵極上的電壓，則阻力消失，管內產生電子流衝向正極，此時真空管是處在'開'的狀態。在 1940 年代初期，電子計算機開始出現，利用真空管的'開'與'關'當作'0'與'1'，或者是'1'與'0'，來進行數值計算，其中英國的「Colossus」咸信是世界上第一台電子計算機，共用了 2500 個真空管，其目的是為了破解德國納粹的通訊密碼；當時在美國也為了軍事用途，製造了具有計算積分能力的「ENIAC」，所使用的真空管約兩萬個，除了體積龐大及價格昂貴外，所消耗的功率更是嚇人，不過「ENIAC」的主要缺點還不是這些，而是真空管的壽命，通常一個真空管約可使用三千小時，將近四個月，乍聽之下，似乎還算正常，但是以機率來看，四個月必須汰換兩萬個真空管，平均起來，約 10 分鐘就會燒壞一個，也就是說可能十幾分鐘就要從兩萬個酷似的真空管中，去尋找出那一個是燒毀的，光想到這件事就令人感到沮喪，幸好不到幾年的光景電晶體就誕生了。由於電晶體的體積小，消耗功率低，且量產容易，成本低廉，更重要的是它的壽命幾乎是無限的，所以一出現後，就取代真空管，成為最重要的開關元件。

事實上，電晶體也可以當作訊號或功率放大器來使用，但是底下只著重在開關功能的應用。關於第一個電晶體的構想，事實上是蕭克利提出的，但理論的問題卻是由巴丁加以解決才獲得成功，為了爭一口氣，不服輸的蕭克利於是閉關苦思，嘗試解決原點接觸式電晶體品質難以掌控的缺點，經過一個月的努力，終於在 1948 年開發出品質相當穩定的接面式電晶體(BJT)，由於生產技術不難，旋即成為矚目的焦點及當時半導體元件的主流。後來蕭克利離開貝爾實驗室，在加

州灣區開創第一家半導體公司，引起了風起雲湧的矽谷盛事。

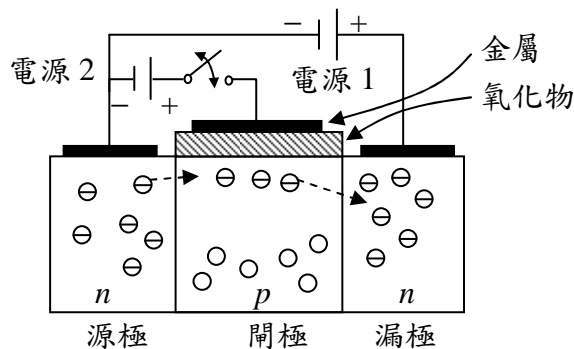
接面式電晶體有 $n-p-n$ 及 $p-n-p$ 兩型，以 $n-p-n$ 型來做說明，如上圖所示，共分三層，中間層為 p 型半導體，載子為電洞，另外兩層都是 n 型半導體，載子為電子，這三層並不是用三塊不同的半導體黏合而成，而是在同一塊的 Si 材料中，摻入少許的三價原子，在中間基極形成 p 型半導體，而在兩邊摻入少許的五價原子，形成 n 型半導體，分別當作射極與集極。



使用時將集極與射極分別接上電源 1 的正負極，先假設電源 2 為斷路，則在電源 1 正負極的作用下，電子由負極出發，穿越電晶體，再回到正極，形成電子流，應注意的是並非所有的電子都能順利回到正極，在穿過基極時，會有少數的電子被其中的電洞捕捉住，而停滯不前，成為射極中電子的前進障礙，一旦基極累積了過多的電子，造成後來的電子無法再前進時，電子流便會消失，使得電晶體即呈現出關閉的狀態；若想要再度形成射集與集極間的電子流，必須隨時清除基極中所累積的電子，解決的方式是在基極與射極間接上電源 2，其電壓值不大，在基極與射極間形成較小的正負極作用，以產生小的電子流，將累積在基極上的少數電子不斷清除，讓電子順利通過基極，形成導通的狀態。顯然地，經由基極上電壓的控制，電晶體可具有開關的功能，成為比真空管更經濟與實用的開關元件。

電晶體除了接面式電晶體外，還有場效型電晶體 (FET)，場效型的觀念早在 1930 年便申請到專利，但是在開發上並不順利，一直到 1960 年，才由柯恩(D·Kahng)及阿塔拉(M·Atala)設計出來，由於他們所利用的是金屬-氧化物-半導體(簡稱金氧半)的閘極結構，所以稱為金氧半場效電晶體(MOSFET, metal-oxide-semiconductor field-effect transistor)。由於金氧半場效電晶體的體積大幅縮小，加上具備低耗電量、高穩定性、容易量產等優勢，因此在微電子的應用領域中，後來居上，在產量及用途上都一枝獨秀，遠遠超過其他的電子元件。

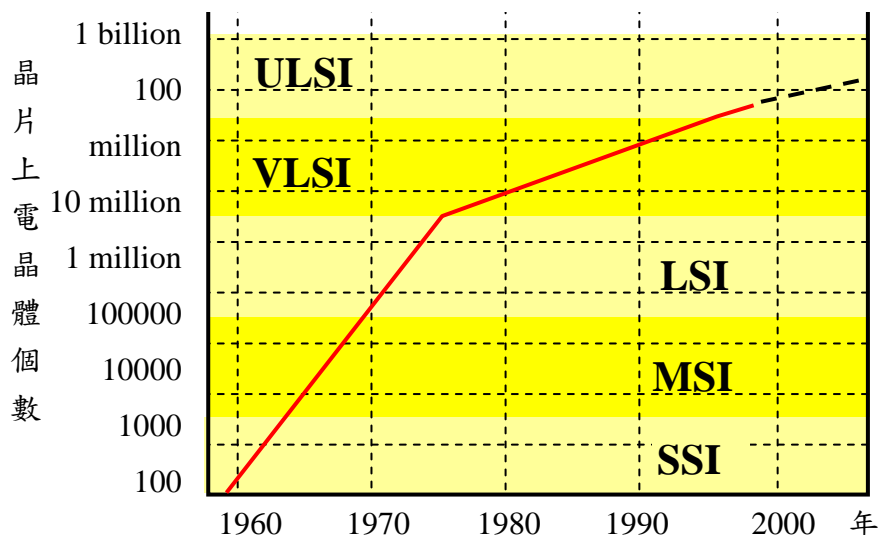
金氧半場效電晶體的結構如上圖所示，為 $n-p-n$ 型半導體，分為源極、閘極與漏極，與接面式電晶體相似，所不同者在於閘極的厚度寬大，且上面覆蓋一層氧化物 SiO_2 ，當作絕緣體，使用



時將漏極與源極分別接上電源 1 的正負極，先假設電源 2 為斷路，則在電源 1 正負極的作用下，電子由負極出發，沿著上層穿越電晶體，再回到正極，形成電子流，同樣地，在穿過閘極時，電子會被其中的電洞捕捉住，成為電子前進的障礙，最後導致電子流消失，電晶體呈現關閉的狀態；為了避免電洞的捕捉效應，在源極與閘極間接上電源 2，此時閘極上的正極將 p 型半導體的電洞推向底部，讓閘極上層形成電子的無障礙通道，又由於氧化物的隔絕，電子不會自閘極流失，全部順利進入漏極，形成導通的狀態。顯然地，經由閘極上電壓的控制，電晶體是具有開關功能的元件。

兩種電晶體在不同的應用上各有優缺點，當要求高操作速率時，通常考慮使用接面式電晶體，而當要求高密度的積體電路製造時，金氧半電晶體才是較佳的選擇，因為它是採平面的配置方式，所以製作容易，成本較低，加上可以緊密排列，使體積大幅縮小，目前製作 IC 晶片時，都是以金氧半電晶體為主要技術。

事實上，在 IC 晶片的優勢中，最吸引人的就是體積不斷縮小，摩爾(Gordon Moore)在 1964 年曾預言晶片上的電晶體數目每年都會加倍，這就是有名的「摩爾定律」，當然這個預言只是在初期時有效，不可能一直持續，所以人們也開始注意必須要經過多少年，摩爾定律才會逐漸失效？由下圖中的統計圖，可以看出在 1980 年代的中期之前，由電晶體個數小於 50 個的小型積體電路(SSI)，到中型積體電路(MSI)，再進展至大型積體電路(LSI)，摩爾定律仍算吻合；但是自 1980 年代後期至今，由大型積體電路(LSI)，已經進展至電晶體個數超過 10 萬個的超大型積體電路(VLSI)，目前甚至再朝電晶體個數將近數百萬個的極大型積體電路(ULSI)發展，可是在三十年內只有大約成長了 100 倍，每年倍增的趨勢早已和緩，換句話說，摩爾定律不再適用。到底是什麼因素限制了摩爾定律？到底晶片的密度到底可以縮到多小？雖然這些是相當重要的問題，值得做進一步的探索，但是屬於非常專業的領域，所以這裡不再做進一步的說明，留待有興趣的同學自己去研究。目前的科技已經進入次微米時代，並且向奈米技術邁進，電晶體個數超過十億個的積體電路將不再是難事。



通訊技術簡介

參考資料：

1. <http://other.ce.fcu.edu.tw/CEhistory/personage.htm>
2. <科學發展> 2002 年 9 月 357 期

遠距離通訊起源於人類自保的需求，如通知食物的出現或警告危機的來臨，由於古代的信號、篝火或鼓聲所能傳遞的信號有限，為了傳遞較複雜的信號，後來發展出鏡子與旗幟的通訊方式；但這些方法都只能使用在視力所及的範圍內，人類想突破這個通訊上的限制，仍需等待至十九世紀。

一八〇〇年，義大利科學家伏特(Alessandro Volta)發明了第一個電池—伏打電堆，自此電成了發展通訊技術的主要工具。在一八二〇年，丹麥物理學家奧斯特(Hans Christian Oersted)利用伏打電堆，發現電流通過電線時會使磁針發生偏轉；接著美國科學家亨利(Joseph Henry)又發現，讓電流通過纏繞軟鐵心的線圈，就可以將軟鐵心變成電磁鐵，若中斷電流，則軟鐵心便失去磁性，這項發現為電報的通訊技術奠定了基礎。

一八三五年，美國科學家摩斯(Samuel Morse)首先成功地傳遞了短促電脈波羣。他選用兩種脈波—短脈波代表點，長脈波代表短線—創造了摩斯電碼，以點與線的不同組合模式，設計出二十六個英文字母和 1 至 9 的數目字；在一八四四年，摩斯曾用他的電碼在巴爾的摩與華盛頓之間傳遞一項。摩斯電報的基本理論一直沿用到現在，不過現在的收報機與發報機技術都已大幅改進，工作速度更是驚人，不可同日而語。



通訊技術上的另一個重大突破，是美國發明家貝爾(Alexander Graham Bell)所發明的電話機，他在一八七六年登記了電話機的專利權，並且在一八九二年啟用了第一條紐約到芝加哥的九百哩長途電話線，使人類首次可以隔著遠距離相互通話。



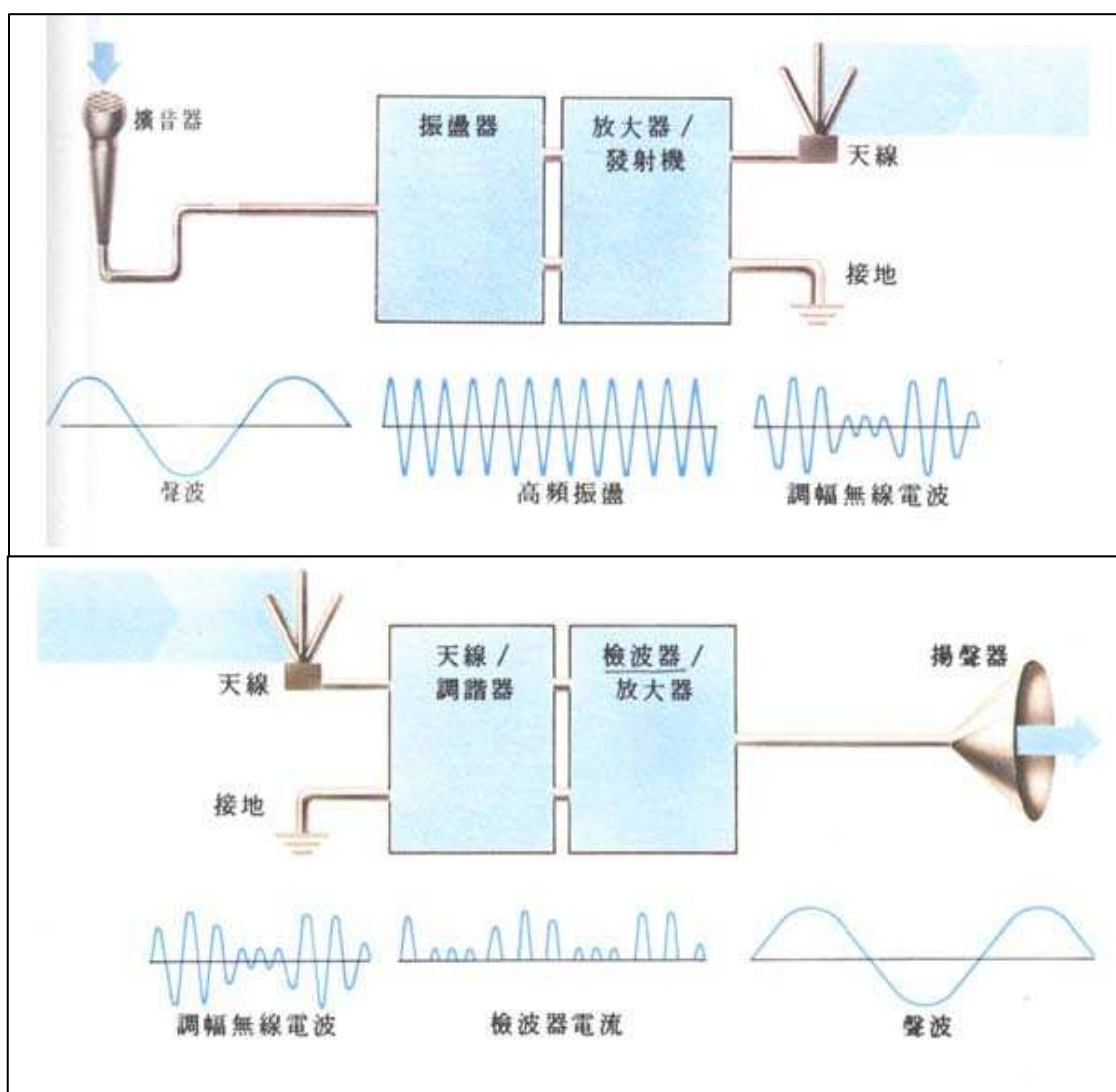
不過電話的傳遞必須藉由電話線，因此仍然無法解決隔海或海面通訊的問題，到了十九世紀下半葉，蘇格蘭的物理學家馬克斯威爾(James Maxwell)用數學闡釋人們已知的電磁現象，並提出電磁場可以像波一樣，在空間中傳播，後來再由德國的科學家赫茲(Heinrich Hertz)用實驗證實了上述的理論。



一八九五年，義大利發明家馬可尼(Guglielmo Marconi)利用電磁現象，從住宅的一端發出無線電波，並成功地在住宅的另一端接收無線電波。一八九六年，他在英國將信號輸送到九哩遠的地方，並取得

了世界上第一個無線電報系統的專利。接著在一九〇一年，他再利用無線電，將一項訊息從英國越過大西洋傳送到加拿大，奠定了遠距離通訊的長遠地位。

在無線電通訊的發展初期，發射的效率很低，為了產生無線電波，一定要製造電火花以便能在天線上產生強大的振盪電流，讓部分的電磁能以無線電波的形式向外輻射。此外，無線電波的接收設備也很原始，當時已經發現，電火花產生時，附近鬆散的鐵屑會相互黏附在一起，因此設計一種粉末檢波器—充滿鐵屑的小玻璃管—與天線連接，便可以發現遠處電火花所發出的電磁波。但在每次接收電訊工作完畢後，必須搖動玻璃管，使鐵屑再次鬆散，才能繼續使用。馬可尼的早期設備性能雖然有限，但證實了無線電波實際上可以代替電線輸送信號。美國科學家雷費森登(Reginald Fessenden)曾在一九〇六年十二月二十四日，利用他的無線電設，向停泊在麻薩諸塞州沿岸的船播送音樂與講詞。



利用無線電波來傳遞聲音有許多方式，最簡單且應用最廣的是 AM 技術，即”調幅(amplitude modulation)”技術(如上圖)，它是依照擴音器所接收的聲音起伏，來改變發射天線所傳送的無線電波強度。而在接收端的收訊過程剛好相反，

它是將接收天線所收到的電磁波轉換回聲波。利用 AM 技術的大眾性商業廣播系統出現於一九二〇年，結束了無線電通訊的實驗階段，人類文明正式步入無線電廣播時代。

通訊的原意是指意見的溝通或訊息的交換。但現代的通訊還包括了以無線或有線方式，將聲音、影像與文字等多媒體訊息傳輸至遠端。從技術層面來定義，則是指將各種訊號經編碼與調變處理後，仍能有效率、安全且成功地傳送至遠方，其間即使有各種吵雜、干擾也不受影響。

現代人利用「電」的傳輸功能，看電視、打電話、收聽廣播節目、傳送文件，或利用數據機經電話線或有線電視纜線，透過網路發送或接收電子郵件、上網瀏覽網頁與使用網路電話等，輕輕鬆鬆地便擁有了千里眼與順風耳的能力。

通訊產業是政府繼電子與資訊產業後所推動的高科技產業，目前已占有很高的產值。電信的普及率與平均通訊量是衡量進步的指標之一，由於資訊與半導體技術的急遽發展，有了快速的電腦與功能強大的軟體系統之後，人們進一步對通訊品質、寬頻、無線與低價通訊的需求，使得通訊系統業者競爭激烈。目前世界各大國對無線通訊及寬頻網際網路的發展無不卯足全力，使得各類有線、無線、網際網路的應用快速崛起，並將通訊、媒體內容、電腦、消費電子產品整合，成為電子工業的主流。近日內雲端技術崛起，通訊如虎添翼，未來人類文明的發展，實難以預估。



淺談控制科技

陳永平

參考資料：

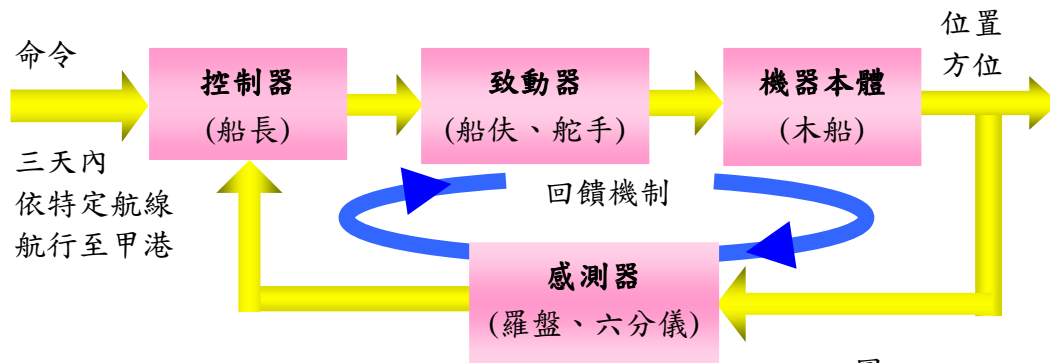
<科技社會人> 楊谷洋/陳永平/林文源/方俊育 2010 年 國立交通大學

壹、前言

目前專門介紹控制科技發展的書籍並不多[1]，本文中所參考的資料，大部分取自一些控制專業書籍的小章節[2]，還有一些個人在控制領域中的心得，本文之內容首先說明”什麼是控制科技？”，說明控制科技所應具備的結構與回饋機制，其次介紹”控制科技發展過程”，依傳統動力時期、機器動力時期與全自動化時期，分別說明各時期控制科技的發展狀況，接著提出”以控制觀點看自然鐵則—有得必有失”，說明控制科技的設計和應用，都無法背離「有得必有失」的鐵則，必須審慎地權衡得失。

貳、什麼是控制科技？

在日常生活中，’控制’是個耳熟能詳的語詞，用來表示去支配與管理特定事物的能力，以達到預期的目標。隨著時代的進步，今日的控制早已邁入科技化，個人、團體或整體社會都可藉由控制科技的運用，來提升生活品質或改善社會問題，舉凡：船、汽車、飛機、直昇機、人造衛星、馬達、冷氣機、洗衣機、微波爐、機器人...等等無一不是控制科技，在我們的日常生活中，控制科技早已扮演著舉足輕重的角色。



圖一

控制科技所處理的系統主要是機器，控制這些機器時，所採用的系統架構如圖一所示，整個系統主要包括機器本體、致動器、感測器與控制器四個部分，其中機器本體就是受控的特定物，在操作機器本體運轉的過程中，「回饋機制」是最大的特色，它是指系統中的控制器會根據命令與所獲得的感測器資料，來設定控制法則，進而驅動致動器，以調整機器本體的運作，達成所預期的控制目標。為了說明回饋機制的運作，底下以舊時的木船航海為例：假設有一任務要求木船必須依特定航線，在三天之內駛抵甲港，當船長接獲此命令後，即開始指揮木船

前進，在整個航行過程中，機器本體就是木船，船上的船伕與舵手就是致動器，所配備的羅盤與六分儀就是感測器，而船長就是控制器，整個回饋機制就是船長(控制器)根據羅盤與六分儀(感測器)所測得的方位、位置，與特定航線(命令)作比較，下達調整的指令給船伕與舵手(致動器)，以改變船速與方向，進而操控木船(機器本體)，在三天之內駛抵甲港。

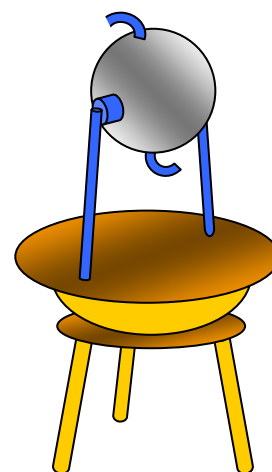
雖然以上所舉的例子是舊時木船，但是對現代的機器而言，整體的系統架構並未曾改變，只是隨著科技的發展，現代的遠洋輪船不再是木造的，致動器早已改由渦輪機取代，而羅盤與六分儀，也被汰換成全球定位系統，至於船長的控制器角色，也由先進的自動領航技術所取代，更重要的是整個回饋機制已朝向系統化與智慧化發展，這些創新正是控制科技發展的重大成就。

綜合以上的描述，所謂控制科技就是指一套系統包括機器本體、致動器、感測器與控制器四個部分，以「回饋機制」來操控並達到所設定的預期目標。

參、控制科技發展過程

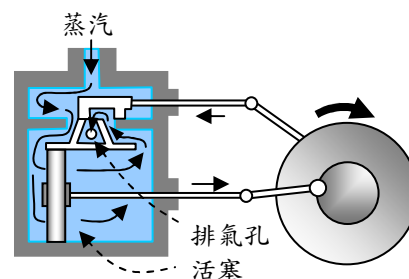
以人類的觀點而言，'控制'是一種能力與優越感的展現，因此自古以來，人類即嘗試藉由器械的發明，來改善周遭的生活環境，控制科技也就在此動機下逐步發展，底下將以蒸汽機與半導體的發明做為分際，把控制科技的發展過程分為傳統動力時期、機器動力時期與全自動化時期。

傳統動力時期：在蒸汽機未問世之前，即十八世紀末的英國工業革命之前，人們在日常生活中所用來從事勞動的輔助動力都取自自然力，包括人力、獸力、風力與水力等，因此特稱此時期為傳統動力時期。在這個時期，所使用的器械都十分簡單，大多是為了省力、省時或便利性而創造出來的，由於不具備「回饋機制」，因此不能算是真正的控制科技，不過這個時期所開發出來的器械，包括槓桿、齒輪、滑輪等，對後世的影響深遠，其中也有許多代表性的人物，例如古希臘的阿基米德(Archimedes)與海龍(Heron)，以及歐洲文藝復興時代的達文西(Leonardo da Vinci)，他們都對當代的科技發展有相當大的貢獻，也為後世的科技遺留下寶貴的經驗與知識。尤其是海龍，他一生設計了許多具有真正回饋機制的機械，包括高壓蒸汽帶動的旋轉金屬球(如圖二)、自動開合的神殿大門、自動供水的洗手台等相當吸引人的作品，也因此被冠上「科技魔術師」的稱號。可惜在古代的這些發明，只被用來當作舞台上的表演，以取悅君王與貴族，根本不會被考慮用來取代充斥的人力與獸力。



圖二

機器動力時期：工業革命前的控制科技發展緩慢，主要的原因是沒有持續而強大的致動器可驅動機器，但隨著人類知識的累積與科技的演進，終於在 1765 年，由英國的發明家瓦特成功地改造舊有的蒸汽機，創造出高效率的旋轉式蒸汽機(如圖三)，不但將科技帶入另一個新的階段，也讓整個歐洲進入了影響深遠的工業革命時代。



圖三

在機器動力時期所開發的致動器，除了瓦特的蒸汽機以外，還有引擎與馬達，三者所使用的能源不同，分別為煤、石油與電力。為了利用這些持續而強大的致動器，許多實用的機器也被陸陸續續地開發出來，並大幅改善了人類的生活。只可惜，人類卻也因為大量使用機器，百年來已造成了嚴重的環境污染，直到今日都還無法提出有效的解決方案。

在控制科技中，瓦特的貢獻不只是改造蒸汽機，在 1788 年，他為了調節蒸汽機的轉速，又發明了離心飛球調速器，它讓轉動太快的蒸汽機，自動減少蒸汽量以降低轉速，讓轉動變慢的蒸汽機，自動增加蒸汽量以提高轉速。瓦特成功地利用離心飛球調速器完成蒸汽機的回饋機制，來達到穩定蒸汽機運轉的要求。此外最值得一提的是，在 1868 年，電磁學大師麥克斯威爾(James Clark Maxwell)以其精湛的數學長才，針對離心飛球調速器的回饋機制，發表了控制科技史上的第一篇學術性的論文[3]，展開控制理論發展的新頁。

全自動化時期：今日控制科技得以發展至全自動化，半導體材料的開發是主要的關鍵技術，所謂半導體，顧名思義，就是指物質既非導體亦非絕緣體，此種奇異的特性是由法拉第在 1833 年從事硫化銀的電阻實驗時所發現的，它的導電性雖比導體小很多，但卻又比絕緣體好。

隨著科學的發展，半導體材料早已應用在 IC 晶片的製造，目前 IC 晶片的相關產品充斥在生活中的每個層面，包括控制科技所需的控制器與感測器。人類的生活品質因為 IC 晶片的開發，受到巨幅的改善，平日觸目所見的手機、電腦、數位相機、汽車、...等等，無一不是 IC 晶片的應用。

IC 晶片的最大優勢就是體積不斷地縮小，摩爾在 1964 年提出著名的「摩爾定律」，預言 IC 晶片上的電晶體數目會逐年加倍成長，當然這個預言只適用在 IC 晶片的發展初期，不可能一直持續增長，目前的科技已經由微米、次微米進步到現今的奈米時代，在小小的晶片上植入數千萬個電晶體早已不是難事，這個優勢更引發了各式各樣的科技創意產品，也提升了控制科技中的控制器與感測器技術，使人類生活全自動化的美夢最終得以實現。

今日的科技在半導體與 IC 晶片的推波助瀾下，已然走向全面整合，人類的生活也步入全球化與全自動化的時代，下一個世代的科技將如何影響人類的文明，已是眾所矚目的焦點，相信控制科技仍將在未來的科技開發中，扮演著重要的角色。

不過值得注意的是，隨著人類對科技的過度仰賴，已使得許多的生活習慣或社會行為都與科技息息相關，有時甚至受制於科技，例如有人沉溺於網路世界而無法自拔，就是一個相當令人憂心的例子。此外早在半世紀前就有人注意到人與機器的互動問題[4]，目前人類為了提升科技的效益，正嘗試讓機器擁有仿人腦的類神經網路的結構，配合模糊理論、基因搜尋與灰色預測等智慧法則，賦予機器更多的智慧，雖然這些技術還在摸索的階段，今日的機器智慧也相當幼稚，但是誰能知道，機器是否會藉著永無止息的自我訓練，在若干年後，擁有凌駕在人類之上的能力，甚至主宰人類的社會？誰說不可能呢？

四、以控制觀點看自然鐵則—有得必有失

在漫長的控制科技發展過程中，除了機器本體、致動器、感測器與控制器的實體開發外，還包括各種控制法則的研究，這些控制法則正是對機器下達命令的總司令，乍聽之下，總司令似乎是威風八面，可以讓機器言聽計從，朝著預期的目標前進；可是在實際的狀況下卻非如此，反而是機器時有不從，經常無法達成預期目標，甚至會產生其他不良的後果，這些在控制過程中所發生的狀況，和我們在日常處理事情時，所面對的狀況是十分相似的，究其原因，正是「有得必有失」的自然鐵則所致。

「有得必有失」早已是一般人的經驗與認知，因為凡事要面面俱到是不可能的，此外人們總希望能在事先便看穿得失，讓事情的處理更加平順，只是古諺有云：「塞翁失馬焉知禍福」，要想看穿得失，必須要有足夠的智慧，往往人們只能「事後諸葛」加以評斷，畢竟周遭的環境是動態的，要想隨時掌握所有的影響因素，根本是不可能的。

有經驗的控制法則設計者都明白，在系統的運作過程中，「有得必有失」是無法避免的，因此會更細膩地去處理系統，去權衡得失，到底該「得」多少或應「失」多少，期能獲得最大的效益。

科技經常被用來解決社會問題，但是在無法背離「有得必有失」的情況下，我們可以推論，即使科技真的解決了某個社會所期望解決的問題，必然也會衍生出其他的社會問題，例如在[5]中，作者針對攝影機濫用的問題，提到『裝了攝影機的地方通常犯罪率會有所降低，然而監視攝影機對全國犯罪率的降低並沒有

明顯的效果，換言之，監視攝影機的效果往往只是促使罪犯改在其他地方犯案』顯然地，監視攝影機被用來解決了所期望解決的問題，確實降低了裝設有攝影機地方的犯罪率，但卻衍生出另一個社會問題，那些仍存犯意的罪犯，被迫改到其他的其他地方犯案。這個例子除了說明「有得必有失」外，也凸顯出另一個事實，那就是消弭犯罪意圖不是單靠科技就能夠解決的，或許利用教育或創造工作機會，更能有效降低社會的犯罪率，科技絕不是萬能的。

最後再以物理學中的「熵」來說明「有得必有失」的意義，依據「熵」的定義：封閉空間的亂度一直朝著增大的趨勢在變動。換個角度來看，就是說整個世界只會越來越無序，即使利用控制手段解決了某區域的失序問題，還是會導致其他區域的失序加遽，這個現象似乎意味著「自己的快樂必然會建築在別人的痛苦之上」，事實上只要想想一些周遭的實例便可以理解此現象，例如：都市所清理的垃圾，似乎理所當然地傾倒至郊區的垃圾場，又如：各國的能源過度利用，已經造成全球的溫室效應，這些「有得有失」的實例，都不斷地發生在我們的周遭環境，所造成的不良後果你我都無法避免。或許，當下次還想利用控制科技來解決問題時，應該想想：控制不會是最好的選擇，也不會是必需的手段！在權衡得失之後，或許「回歸自然」也會是個不錯的選擇。

伍、結語

處理問題時，選擇控制或是回歸自然，抑或是其他折衷的辦法，本來就需要經驗與智慧去權衡得失，而權衡得失的關鍵，則與對問題的了解程度息息相關，只可惜在面對問題時，人們通常都著眼於「解決問題」，漠視「了解問題」的重要性，因而導致於事無補的窘境，甚至陷入新的困局。

事實上，重視「解決問題」而輕忽「了解問題」的習性，與台灣數十年來的教育制度有所關聯，在考試掛帥的情況下，學生只得忙於解題，根本無暇去了解各種問題的背景知識，而教師也在升學率的壓力下，往往無心再指導學生去深入了解問題。在這種教育環境下所訓練出來的學生，在面對問題時，通常不會去質疑「解決問題」的必要性，也很少會主動去「了解問題」或蒐集相關的背景資料，最常採取的態度是習慣性地接受問題，並埋首去解決問題，但礙於背景知識的不足，其結果往往只能在問題的枝微末節上打轉，更無法提出獨到的見解或創新。近年來，科技界與學界已逐漸意識到這個教育制度的缺失，開始重視「科技與社會」的訓練，在大學開授相關的通識課程，相信這是一個轉機，藉由這類課程的開授，讓學生們有機會接觸不同於過去專注在「解決問題」的訓練，有機會去體會除了科技之外，還有許多與社會面相關的議題必須兼顧，才能權衡得失，並且在教師的指導下，去學習「了解問題」的方法，有時必須獨力去蒐集資料，

有時必須從課堂上的爭辯去釐清問題，有時則必須直接從事田野調查，相信經由這些課程的開授，未來一定可以培養出更有創意更能關懷社會的科技人。

參考資料：

- [1] Mayr, Otto, (1970) *The Origins of Feedback Control*, MIT Press.
- [2] Lewis, Frank L., (1992) *Applied Optimal Control and Estimation*, pp.4-17, Prentice-Hall.
- [3] Maxwell, James Clark, (1868) “On Governors,” Proc. Royal Soc. Landon, Vol.16, pp.270-283.
- [4] Wiener, Norbert, (1948) *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Cambridge: MIT Press.
- [5] 李尚仁 (2002), “老大哥在看著你：監視攝影機的使用與濫用”《科學發展》，第 353 期。

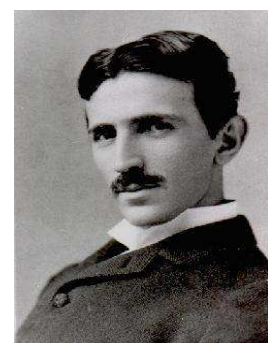
愛迪生與特斯拉

《青年文摘（綠版）》2003 年第 10 期

感謝交流電，正是由於交流電技術，今天的世界才得以運行。然而，交流電的成功卻是建立在一場發生在 19 世紀末最偉大的兩位發明家之間的激烈爭辯之上的。他們就是愛迪生和特斯拉。在利益面前，他們毫不猶豫地使用各種手段，甚至包括魔術表演和殘忍的展示。



「我認識兩位偉人，你是其中之一；另外一個就是站在你面前的年輕人……」1884 年深秋的一個清晨，就是帶著這樣一封推薦信，尼古拉·特斯拉跨入了位於紐約著名的第五大道上一座漂亮大廈的門檻。特斯拉是一名優秀的塞爾維亞工程師，當時 28 歲的他剛剛準備和世界上最著名的發明家一起工作，而這位發明家僅僅用了幾年的時間就開始了他的電燈照明時代。托馬斯·愛迪生在他公司總部的辦公室熱情接待了這位躊躇滿志的年輕人。



看過了特斯拉的簡歷以後，愛迪生馬上委派給他一份工作。為特斯拉寫推薦信的人是查爾斯·巴特切羅，歐洲大陸愛迪生公司的負責人，這家公司是愛迪生電燈公司在巴黎的分公司，特斯拉在來美國以前曾在那裡工作。

特斯拉欣然接受了愛迪生交給他的工作，並且耐不住性子大膽地向愛迪生提出了自己的設想，他認為有可能利用交流電流來產生電能。然而愛迪生的態度是冷淡的，他表示對這種理論毫無興趣，而且在愛迪生看來，由他製造的直流電照明系統已經足夠使用了。此後，愛迪生只是在直流電系統基礎上進行改進。然而，他的新合作者特斯拉所期待的卻絕不止於此。

19 世紀下半葉，幾乎所有人都認為在實踐中是不可能使用交流電的。因為直流電始終朝著相同的方向流動，而交流電則反覆使電流的大小和方向發生變化。最早的電動機使用的都是直流電，那些試圖讓交流電動機運轉起來的人發現，這種電動機產生的磁場並不能使電動機正常運行。事實上，當電流改變方向的時候，磁場隨後也改變了強度和方向，因此電動機自然就不可避免地停止轉動。

事情發生轉機是在 1882 年，特斯拉在經過嚴謹的數學分析之後，擬訂了一個新的實驗方案，他利用兩個異相交流電換相器，以保證有充分而強大的電流使發動機運轉。根據這位塞爾維亞科學家設計的方案，在電動機固定部分中的線圈裡，對流動電流的一個適當聯結(定子)能夠產生一個強度不變的磁場，這個磁場在轉動的同時，會使電動機的活動部件也跟著它一起轉動(轉子)。實際上，磁場

會在轉子的線圈裡產生一個流動的感應電流，而感應電流能夠引發一個加快線圈自身轉動的力，而且這都不需要任何電線去連接運動中的各個部分。1883年，特斯拉已經製造出了第一個小型交流電電動機，但是他很需要有財政上的支持來進一步試驗和推進自己的發明。

和特斯拉第一次見面時，愛迪生正在投入大量的資金去研發直流電設備。1879年，愛迪生發明了白熾燈，這種燈在現實生活中的迅速普及使愛迪生本人也成為了一名成功的大企業家和世界知名的發明家，但是他當時所面臨的問題也不少。首先，一個住宅區裡的照明燈如果和發電站的距離超過1公里，就無法得到足夠的電流發出強光，這是因為直流電無法在遠距離的情況下傳輸能量。愛迪生為了使他設計的照明系統能夠正常運行，只好在每隔1公里的地方建造1座發電站，要不然就要增加發電機的功效，或者將若干個發電機連接在一起，以便產生更多的電流。

愛迪生交給特斯拉的工作任務就是完善這些直流電系統的性能。不過特斯拉始終堅信能夠說服愛迪生去接受在許多方面明顯佔優勢的交流電。愛迪生很清楚特斯拉在技術方面的能力，他還拿出5萬美元作為基金，讓特斯拉去改進發電站中的發電機。特斯拉研究制訂出了20多個新直流電發電機的計劃，這些發電機具有調節簡單並能產出強大電流的特點。愛迪生對這些新型發電機進行了多次實驗，取得了很好的效果，並為這些發電機申請註冊了專利權，用它們代替了那些老式機器。然而當特斯拉向愛迪生索取自己應得的那部分報酬時，愛迪生卻拒絕了他。他說：「特斯拉，您並不懂得美國式的幽默。」這件事對於這位塞爾維亞年輕人的打擊很大，他的美夢被再次打破了。

特斯拉感到極度的失望和厭倦，於是他辭職了。長時間以來，特斯拉給愛迪生帶來了很多利益，然而愛迪生始終對他的交流電持一種質疑和敵視的態度。不過，除了暴露出愛迪生對科學缺乏遠見以外，特斯拉還清楚地看到，愛迪生已經將太多的金錢投入到他的直流電上而不能自拔了。

相信特斯拉的西屋公司

1888年，一位希望能向愛迪生發起挑戰的美國發明家和企業家喬治·威斯汀豪斯將賭注押在了交流電上，他邀請特斯拉到他的公司去工作。

其實，早在1883年的時候，威斯汀豪斯就對交流電產生了極大的興趣。當時，法國人呂西安·戈拉爾和英國人約翰·吉布斯在倫敦的一個博覽會上向人們展示了一款能夠進行遠距離傳輸的交流電設備。這個設備運用了「二次發電機」：一種他們已經註冊了專利權的特殊變壓器。就是利用戈拉爾—吉布斯的變壓器和

由恩斯特·沃納·馮·西門子校準的發電機，1886年3月，西屋公司在美國馬薩諸塞州的大巴靈頓小鎮中首次使用了交流電照明設備。

然而，為了能夠真正和愛迪生進行較量，西屋公司必須要考慮給工業企業提供交流電動機。當時工業用電動機用的都是直流電，這種電動機存在著明顯的不足，例如功率不足等等。於是，特斯拉開始為西屋公司設計生產大型的、高功率和高頻率的交流電電動機，彌補了老式發電機功率不足的缺陷。

1888年3月，意大利物理學家伽利略·費拉里斯向都靈科學院展示了他的交流電「異步電動機」（這個機器實際是在1885年設計完成的）。它的原理是建立在一個轉動的磁場上，和特斯拉5年前的設計理念很相似，只是技術更加完善，功率更大。與此同時，圍繞著交流電動機的「鬥爭」也日趨激烈：特斯拉要求擁有其發現轉動磁場的優先權，並且針對費拉里斯製造的交流電動機，在同年5月對自己發明的一款與其非常相似的電動機申請了專利。經過一系列冗長的、令人厭煩的訴訟過程，德國和美國法庭最後判定：轉動磁場的原始發現人屬於意大利科學家伽利略·費拉里斯。然而令人遺憾的是，費拉里斯並沒能把握住這個契機，他沒有像特斯拉那樣將異步電動機的巨大潛力運用到日常生活中去。

特斯拉始終堅持著自己的研究工作。1890年，他發現了共振現象，即在特定的環境下，一個機械系統振動的振幅，不論是聲學的還是電力的，都會有一個相當高的振幅。最值得一提的是，這位塞爾維亞科學家利用共振原理製造出了一個變壓器，也就是今天的「特斯拉線圈」，它能夠承受極高的電壓，從幾百到幾千伏不等。到19世紀末期，經過數月的實驗之後，威斯汀豪斯和特斯拉獲得了極大的成功，他們終於可以將已經成熟的產品推向市場，惟一令他們煩惱的就是上市以前那些過於繁瑣而官僚的手續。

無休止地相互中傷

獲悉特斯拉取得的成功以後，愛迪生意識到自己將要面對的競爭對手是何等強大，他開始了一場針對交流電的中傷詆毀運動。為了向人們展示這種新型系統假定的危險性，愛迪生在眾多記者面前用高壓交流電做了一系列可怕的實驗。他先是將一塊白鐵皮板和一台可達1000伏電壓的交流電發電機相聯，然後再把一隻小貓或是小狗放在鐵板上，小貓或小狗會瞬間死亡。這樣，人們就可以親眼目睹特斯拉和西屋公司的交流電的致命效果了。電椅就是在這樣一系列「展示」的「啟發」下發明出來的。同時，作為對愛迪生宣傳攻勢的反擊，特斯拉也在舞台上進行了很多真正的「電魔術」表演。除了使人們為之驚歎，特斯拉的另一個目的就是向世人展現，當交流電不被用在故意犯罪的目的時，它是非常安全的。

當這場「電流大戰」愈演愈烈之時，芝加哥正在籌備一個世界博覽會，主辦者希望尋找到一套可以照亮整個會場的照明設備。於是，威斯汀豪斯開出了一份極具誘惑力的合同，他試圖以超低價格來從愛迪生手中搶到這筆生意。1893年1月，博覽會開幕了，9萬多盞由特斯拉的交流電點燃的電燈照亮了整個會場。這是一次偉大的成功，同時也是大獲全勝之前的一個前奏。

尼亞加拉大瀑布的交流發電站

不久以後，在尼亞加拉大瀑布將要建造世界上第一座水力發電站，交流電系統由於其經濟實惠和便於製造而被選中了。威斯汀豪斯將設計製造任務交給了蘇格蘭工程師喬治·福布斯。後者製造出的一套設備使用了3個特斯拉的交流發電機，每台的功率為110千瓦。

1895年，發電站建成了，它可以將電流傳輸到距發電站35公里外的布法羅市。這一事件宣告交流電徹底戰勝了直流電，而愛迪生的直流電則瞬間成了一種過時的技術。愛迪生本人不得不接受這個殘酷的現實。從那時起，交流電便成為了工業、商業和民用電的惟一選擇。

「電流大戰」是在兩位19世紀和20世紀的天才而多產的發明家之間展開的，兩人也是截然不同的科學家。愛迪生具有驚人的創造性和工業策劃能力，是一位非常聰明的試驗者，但是卻缺乏數學知識和複雜的理論洞察力。相反地，特斯拉和其同時代的人相比是一個前衛式的人物，通過對現象精確地數學解析，他完成了很多偉大的創造性工作。他不像愛迪生那樣，僅僅因為個人願望而去做很多事情，而是在設計任何設備之前都從理論的角度去分析問題，直到得出絕對有把握的結果，才會付諸實踐。

1915年，愛迪生獲得諾貝爾獎的提名，特斯拉則在1937年獲得諾貝爾獎的提名，但他們倆都沒能獲得這一獎項。一些人認為，正是因為那場持續了數年的「電流大戰」，愛迪生和特斯拉都暴露出了他們人性中的弱點，這與人們長期賦予他們的「天才」和「科學家」的稱號是極不相稱的。

附錄：

交流電最終能夠普及，是因為相對於競爭對手，它具有多面性和更經濟的特點。今天，我們所生活的社會，每天都需要大量的電，這些電通過電線被傳輸到距離發電站很遙遠的各個地區，有的地方甚至遠在成百上千公里以外。這樣，能量的一部分在傳送的過程中就不可避免地損失掉，轉化成熱能。電流越大，距離越遠，浪費也就越大。

為了減少這種能量的損失，就需要把電線做得非常粗，這樣一來，就造成了對原材料的極大浪費，成本也會相應提高。解決這個問題的方法就是提高電壓，舉個例子，這就好比一個瀑布，電流就相當於瀑布從高處到達地面的水量，而電壓則是水從出發的高度下降時的勢能。增加電線中的電壓，就可以減少電線內的電流，從而保持被傳輸的功率總量不變：這樣做能夠降低損失，用較細的電線就行了。

變壓器可以將發電站產生的電壓提高到幾萬伏。另一些被安裝在使用地點的變壓器則可以根據使用需要來適當降低電壓，比如說平常我們在家裡所用的220伏電器。正是因為對變壓器的需要，使我們必須使用交流電。事實上，這些變壓器的原理就是利用了交變磁場，這種交變磁場是由交流電產生的，而非被愛迪生死死捍衛的直流電。

《青年文摘（綠版）》2003年第10期

