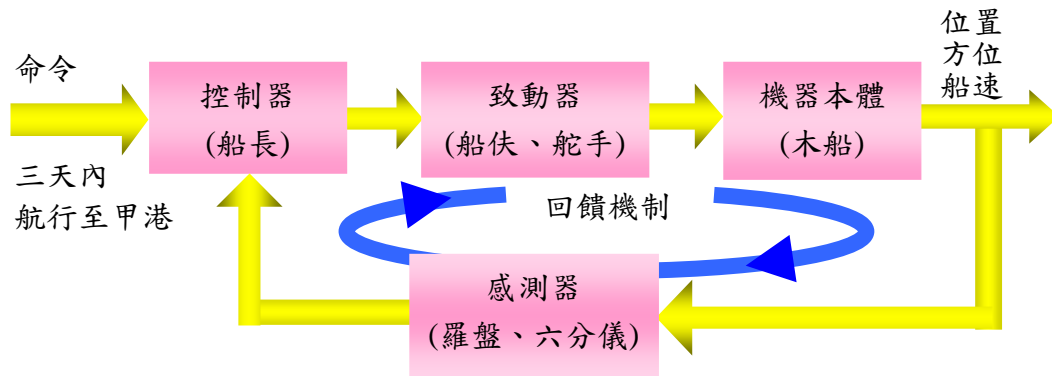


## 11. 控制科技之發展

在日常生活中，'控制'是個耳熟能詳的語詞，它被廣泛地使用在各種場合中，表示有能力去支配與管理某些特定事物，以獲取較高的利益或效率為目標，只是能否達到此預期目標，則取決於支配與管理的方法，或者是說，與控制的手段息息相關。隨著時代的進步，現今的控制手段早已邁入科技化，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，控制科技在我們的日常生活中已扮演著舉足輕重的角色。

控制科技所處理的特定事物主要是機器，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…等等皆是，控制這些機器時，所採用的架構與遵循的流程如下圖所示：



整個架構包括機器本體、致動器、感測器與控制器四大部分，其中機器本體就是受控的特定事物，操作機器時，控制器會根據接受的命令與感測器所獲得的資料，按設定的法則來驅動致動器，進而使機器正常運轉。

在整個架構中，最大的特色是回饋機制，控制器是利用感測器所測得的資訊，與所接受的命令相比較後，進而設定法則來驅動致動器，主動調整機器本體的運作，直到達成目標為止。以古代木船航海為例，當船長一接獲命令，必須在三天內航行至甲港，即開始指揮船隻前進，在航行過程中，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，他必須依據回饋機制，也就是感測器所測得的方位、位置與船速，隨時下達欲調整的指令給船伕與舵手，來改變船速與方向，進而操控船隻，在三天內將木船駛抵甲港。

雖然以上所舉的例子是古代木船，但是對現代的機器而言，整體的控制架構未曾改變，只是隨著科技的發展，現代的遠洋輪船不再是木造的，致動器早就由渦輪機取代，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

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，這些創新正是控制科技發展的重大成就。

以人類的觀點而言，‘控制’是一種能力與優越感的展現，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，隨著時代循序漸進地發展，若以蒸汽機與半導體的發明做為分際，則可將控制科技的發展分為傳統動力時代、機器動力時代與全自動化時代三個階段，其中傳統動力時代與機器動力時代，兩者的差別在於發明了新型態的致動器，而機器動力時代與全自動化時代，兩者的差別則在於開發了新型態的感測器與控制器，底下所將介紹的控制科技發展，在傳統動力時代中是以人物為主，在機器動力時代中是以致動器為對象，而在全自動化時代則是探討感測器與控制器的關鍵元件—IC 晶片。

### (I) 傳統動力時代—代表性人物：阿基米德、海龍、達文西

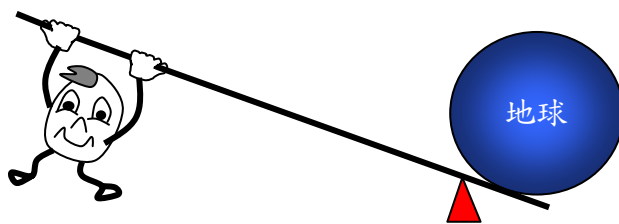
在蒸汽機發明之前，人類所使用的動力幾乎都是效率較差的人力、獸力與自然力，所使用的器械也都十分簡單，大多是為了省力、省時或便利性而創造出來的，這些器械雖然簡單，但是數量與種類頗眾，此外這個時期也出現過許多的代表性人物，包括古希臘的阿基米德與海龍，以及文藝復興時代的達文西，他們都對當代的科技發展有相當的貢獻，也為後世的科技遺留下寶貴的經驗與知識。

#### 阿基米德

阿基米德是古希臘最富傳奇色彩的科學家，他除了在數學、物理、機械等領域有許多重要的發現及貢獻外，還為後人留下許多膾炙人口的故事，讓科技的歷史平添了不少有趣的事蹟。阿基米德在控制科技最大的貢獻是在於「槓桿原理」的應用，他對滑輪、槓桿、齒輪等機械元件的使用相當熟悉，曾誇口說：「只要給我一個支撐點，還有一根夠長的木棒，我就可以舉起整個地球。」雖然是誇大了點，但也顯示出阿基米德對自己的研究成果相當有信心。



阿基米德曾把他在機械方面的知識，用來幫國王將建好的大船推入大海；也用來抵禦外侮，精心設計起重機，將敵艦吊起後摔下，



粉碎敵艦(如右圖)；建造巨大投擲機，用飛石及標槍擊退靠近城牆的敵人；更難

以相信的是，據說還製造過聚光鏡，把陽光聚焦到敵艦上，燒毀敵艦。這些巧妙的武器使敵軍驚慌害怕，連敵軍將領都只能苦笑承認：「這是一場與阿基米德的戰爭」。

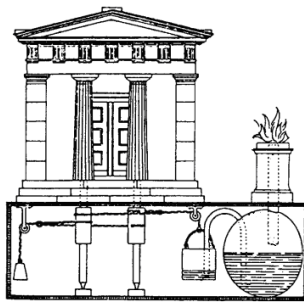


## 海龍

海龍也是古希臘人，在物理及數學兩方面都有相當高的造詣，且有十幾本著作流傳後世，詳細描述如何將數學及物理利用到測量、機械及土木建設上，是科技史上相當罕見的一位技師，一生設計了許多具有回饋機制的機關，因此也被冠上「科技魔術師」的稱號。



海龍



海龍的作品中最吸引人的是蒸汽裝置與機械結構，在蒸汽裝置方面，海龍是第一位使用蒸汽機的科學家，他利用水加熱後所噴出的高壓蒸汽，帶動金屬球旋轉，該裝置已被視為最原始的



蒸汽旋轉球

的蒸汽渦輪。在機械結構方面，海龍對槓桿、滑輪、輪軸、斜面及螺絲等五樣機械元件相當了解，他曾經設計過一項大型機關，用來打開神殿大門(如上圖)，還設計過自動供水的洗手台，只要把錢放進樂捐箱中，就會從箱底流出水來供人洗手，這種相當現代化的裝置，竟然在古代就有人加以實現。

## 達文西

達文西的多才多藝是世人皆知的，除了關於藝術的繪畫、雕刻、鑄造外，舉凡解剖、地質、水理、植物、天文、力學、建築、土木等科學，達文西幾乎是無所不學，無所不能，他一生的藝術成就，或許能與之匹敵者不少，但是他的多才多藝，恐怕是前無古人後無來者。



達文西



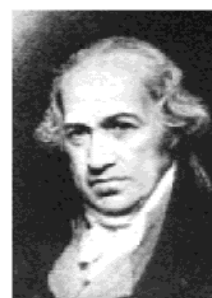
達文西的研究和發明都以手稿的方式詳細記錄，由學徒梅爾濟保存，內容約四千頁，記載了達文西對於各種理論的想法，也包括科技的創新與發明。他為了讓船隻順利地在運河上航行，曾經設計水門來控制水位的升降；他是史上第一位設計飛行器的人(如

右圖)，雖然結果都失敗了，可是卻刺激了人類征服天空的慾望；他也發明過各種新型武器，例如投石器、大砲、機槍、弩箭、戰車、攻城器等。對於科技研究，達文西認為「只有我們的判斷會犯錯，實驗不會犯錯」，在在表明了他從事研究時謹慎的態度。

阿基米德、海龍及達文西的研究在當代是相當耀眼的，即使以現代人的眼光來看，也不得不佩服他們的前瞻性，也由於他們的努力，激發起更多的後起之秀投入研究的行列，讓知識不斷的累積，靜待新動力的來臨。終於在十八世紀盼到了瓦特及其改良的蒸汽機，其成功的主要關鍵在於引入了回饋機制，這正是步入現代控制科技的必要機制。

## (II) 機器動力時代—新型致動器：蒸汽機、引擎、馬達

工業革命前的控制科技緩慢地發展，主要的原因是沒有持續而強大的動力來驅動機器，所幸隨著科技的演進，人類累積的知識與日俱增，漸漸能掌握許多物理與化學現象，終於在 1765 年，由英國的發明家瓦特改造出高效率的蒸汽機，將科技帶入一個新的階段，也讓整個歐洲進入了影響深遠的工業革命時代。

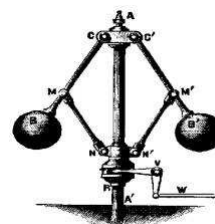


在這個時期所開發的主要致動器計有：蒸汽機、引擎及馬達，所使用的能源分別為煤、石油與電力，有了持續強大的動力後，許多實用的機器也接著被開發出來，巨幅地改善了民生生活。但由於仍未使用半導體技術，控制器的能力不足，操作機器時，精密度、效率、功能等，與現今的技術相比，仍是天壤之別。

### 蒸汽機

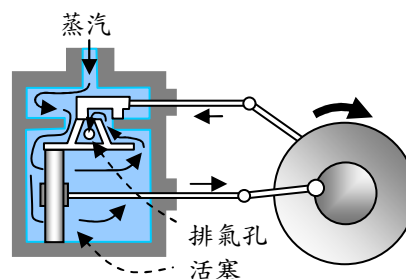
蒸汽機的發明導致工業革命，當今只要提到蒸汽機就必然讓人聯想到瓦特，事實上，瓦特並不是第一個製造蒸汽機的人，他只是改良了紐可門蒸汽機，可是為什麼世人竟把所有的功勞歸於瓦特？下面就來談談這段歷史，也順便介紹蒸汽機在控制科技中所扮演的角色。

1705 年，紐可門成功地發明了往復式運動蒸氣機，用來排除礦坑內的積水，可惜效率太低，難以大量推廣，這種情況持續了半世紀之久，直到 1763 年，瓦特在格拉斯哥大學的委託下，著手修理紐可門蒸汽模型機，他才正式與蒸汽機結緣。在過程中，瓦特了解到紐可門蒸汽機效率不高的主要原因是在於汽缸的溫度過高，在操作過程中為了不斷冷卻汽缸，造成許





多熱量的白白損耗。在經過鍥而不捨地苦思和實驗後，瓦特終於在 1765 年提出附加冷凝器的方法，成功地節省了一半以上的熱量，不過事情並沒有如預期般順利，當時仍面臨接縫技術與經費的問題，由於接縫技術不佳，使得蒸汽大量地從縫隙無端流失，導致蒸汽機的效能無法提升，而經費的短缺更讓整個實驗幾乎停擺，就在這樣的困境下，瓦特歷經七年的努力，最後終於創造出具有前伸後退功能的往復式直線運動蒸汽機，當時被大量使用在礦場的抽水，後來為了將蒸汽機運用在紡織業上，瓦特著手進行旋轉式蒸汽機的研究，於 1782 年獲得了旋轉式蒸汽機(如上圖)的專利權。有了蒸汽機之後，工業界如虎添翼，開始了歐洲的工業革命。

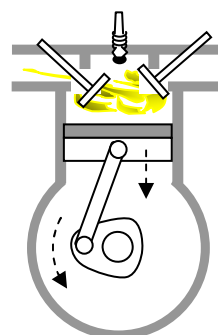


瓦特的貢獻不只是發明旋轉式蒸汽機，在 1788 年，他為了調節蒸汽機轉速，又發明了離心飛球調速器(如右圖)，用來自動保持蒸汽機的轉速，當蒸汽機轉動太快時，它可減少蒸汽量，使速度降低；相反地，當轉動速度變慢了，它會增加蒸汽量，以提高轉速。對控制科技而言，瓦特成功地利用回饋機制，達到機器的運作要求，離心飛球調速器可以稱得上是工業自動化的先驅。後來電磁學大師麥克斯威爾以其深厚的數學長才，針對離心飛球調速器的回饋機制，發表了控制科技史上的第一篇學術性論文，展開控制理論的新頁。

## 引擎

引擎是直接由「engine」翻譯而來，原意是將熱能轉變為機械能的機器，可分為外燃引擎與內燃引擎，或直稱為外燃機與內燃機，所謂外燃機就是指蒸汽機，雖然蒸汽機對人類的貢獻卓著，但是效率過低且配備笨重，因此逐漸地就被內燃機所取代，今日所稱的引擎是專指內燃機而言。

引擎的開發可回溯自十九世紀初，科技界為了改良外燃式蒸汽機的熱效率缺失，就著手開發內燃式的致動器，不過初期發展並不順利，直到 1870 年代，才由法國的工程師羅挈斯提出熱力循環的設計模式，緊接著在 1876 年德國工程師鄂圖才依據羅挈斯的熱力循環模式，成功地製造出世上第一部引擎——鄂圖引擎(如右圖)。



繼 1876 年鄂圖發表引擎之後，德國工程師卡爾於 1879 年也成功地完成試

驗性內燃機，並在 1883 年創立賓士公司和萊茵煤氣發動機廠，1885 年製成第一輛賓士專利機動三輪汽車，接著在 1886 年德國戴姆勒製成了世界上第一輛四輪的“無馬之車”，配有 1.1 匹馬力，每分鐘 650 轉的引擎，當時號稱該車是以每小時 18 公里“令人窒息”的速度前進。

此後，引擎被視為重要的致動器，並廣泛地運用到各種重型的機器上，帶動了交通及工業的發展。但是引擎燃料的成本不低且易造成環境污染，為了解決這些問題，新型的致動器—馬達—也就在期許中孕育而生。

## 馬達

馬達是現今的主要的致動器，除了日常帶動交通工具的引擎外，幾乎都是利用馬達來驅動機器(如右圖)，例如工業用機器手臂、電梯、電動機車、光碟機、印表機等，馬達都是不可或缺的基本元件，廣大的市場需求，使得馬達的設計、製造與控制技術蓬勃發展。



馬達的正式稱呼是電動機，顧名思義是採用電力來驅動的機構，因此穩定的電力品質是相當重要的要求，電力的產生則需要發電機，其機構與馬達完全相同，但是卻是以不同的方式操作，馬達是將電能轉變為機械能，而發電機則是將機械能轉變為電能，兩者的基本原理都是在 19 世紀經眾多的科學家，不斷研究後所完成的，其中最著名的就是法拉第，他曾提出類似現今的馬達機構，並且以實驗證明其可行性，但是真正具備近代結構的馬達是由美國的物理學家約瑟夫·亨利所發明，他先製作了強大的電磁鐵(如右圖)，再利用電磁鐵於 1831 年開發出具動力機構的第一部馬達。



馬達的基本機械結構包括轉子及定子兩部分，兩者都必須具有磁場，再根據電動機原理，利用相互間的磁力作用以產生轉動，電動機原理聽起來相當學術性，難有直接的感覺，事實上，馬達的操作原理很簡單，就是「驢子與胡蘿蔔」(或「驢子與皮鞭」)的原理，這匹驢子就是指轉子，而胡蘿蔔(或皮鞭)則是指定子，當定子產生隨時間作週期性變化的磁場，以吸引(或排斥)轉子上的磁場時，將使轉子旋轉，其轉動速度由定子上磁場的頻率來決定，此種狀況就好像在磨坊中，為了讓驢子前進，將其眼睛蒙上，然後在前面掛上胡蘿蔔引誘(或在後面以皮鞭拍打)驢子，使其不斷繞著磨坊轉，原理就是這麼簡單，但是為了實現原理，通常在馬達的機構上必須要有特殊的設計，以使磁場能作週期性的變化。

馬達依電源型式可分為直流馬達、交流馬達及步進馬達三大類，不同的馬

達因為啟動方式和動力特性的不同，而使用在不同的機械中。通常大型機械需要大功率的馬達來驅動，而作為定位或定速等控制用途時，則採用小功率馬達。以直流馬達而言，它早已廣泛地使用在各類的消費性電子產品中，例如：電動刮鬍刀、錄音機、錄影機、CD 唱盤、模型汽車、模型火車等，此外也有大功率的直流電動機使用在電車、快速電梯、工作母機等重型機械上。

引擎與馬達雖然提供了穩定且持續的動力來源，但是要達到今日科技的全自動化，沒有精確快速的控制器與感測器是絕對不可能辦到的，而這兩類元件得以順利發展，全拜半導體科技之賜。

### (III) 全自動化時代—代表性基本元件：IC 晶片

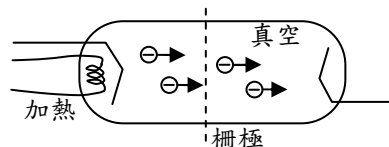
今日控制科技得以發展至全自動化，半導體材料的開發是主要的關鍵技術，所謂半導體，顧名思義，就是指物質既非導體亦非絕緣體，此種奇異的物質特性是由法拉第在 1833 年從事硫化銀的電阻實驗時所發現，它會隨著溫度的上升而降低電阻，而且它的導電性雖比導體小很多，但卻又比絕緣體好。



隨著科學的發展，半導體材料早已應用在 IC 晶片的製造，目前使用 IC 晶片的相關產品更充斥在生活中的每一個層面，控制科技所需的控制器與感測器也與 IC 晶片息息相關。IC 晶片就是所謂的積體電路晶片，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，底下就來談談 IC 晶片的發展及影響。

談到 IC 晶片，就必須介紹二十世紀最重要的發明—電晶體，這是 1947 年由美國貝爾實驗室之蕭克利、巴丁、布拉頓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 6 月才正式發表，三人也因此獲頒 1956 年諾貝爾物理獎。

事實上，在研發電晶體的時代，有一項科技正蓬勃地展開，那就是能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(如右圖)。



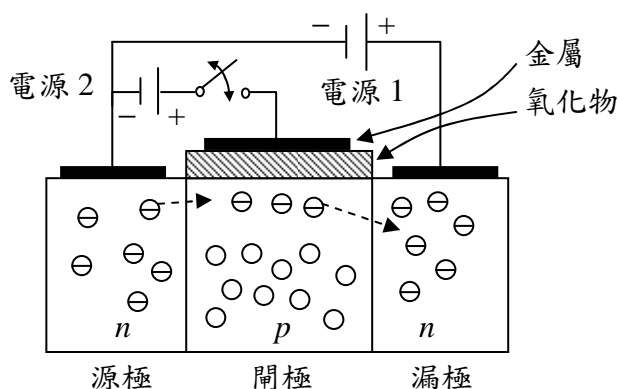
真空管是具有三個電極的元件，在負極加熱以產生電子，若在柵極施加電壓，則電子受到阻力無法到達正極，此時真空管是處在'關'的狀態，反之，若除

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，不過它除了體積龐大與價格昂貴外，所消耗的功率更是嚇人，而最大的致命傷是它的壽命—3000 小時(約 4 個月)，乍聽之下，4 個月的壽命似乎蠻長的，但是以機率來看，4 個月內若必須汰換兩萬個真空管，則約 10 分鐘就會燒壞一個真空管，也就是說每 10 分鐘就必須從兩萬個酷似的真空管中，去找出到底是那一個燒毀了，光想到這件事就足以令人感到沮喪，幸好不到幾年的時間電晶體就誕生了，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，就取代掉真空管，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，嘗試解決原來點接觸式電晶體的缺點—品質難以掌控，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。

電晶體除了接面式電晶體外，還有場效型電晶體 (FET)，場效型電晶體早在 1930 年便被申請到專利，但是在開發上一直都不順利，到 1960 年才由柯恩及阿塔拉設計出來，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)。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以右圖之  $n-p-n$  型電晶體為例，具有源極、閘極與漏極，其閘極厚度寬大，且覆蓋一層氧化物  $\text{SiO}_2$  當作絕緣體，使用時將漏極與源極間接上電源 1，當電源 2 為斷路時，在電源 1 的作用下，電子由源極出發，沿著上層穿越閘極，再回到漏極，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，讓源極與閘極間的電源 2 接通，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，利用電源 2 的開關來控制閘極上層的電子流通路，可以讓場效型電晶體具有開與關的功能。

兩種電晶體在不同的應用上各有優缺點，當要求高的操作速率時，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，金氧半電晶體是當然的選擇，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，摩爾在 1964 年曾經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」，當然這個預言只適用在初期，不可能一直持續，目前的科技已經進入奈米時代，晶片上單位面積的電晶體個數早已超過數千萬個，每年倍增的摩爾定律當然不再適用，半導體技術與 IC 晶片的開發，為各種科技帶來了革命性的發展，控制科技更是深受其惠，可說是舉目可見，盡是半導體，盡是 IC 晶片，它們的誕生與存在讓控制科技中的控制器與感測器技術得以提升，達成迅速與精確的要求，實現人類生活全自動化的美夢。

在半導體與 IC 晶片的推波助瀾下，今日的科技已然走向全面整合，並且引領人類的生活步入全球化與全自動化的時代，在下一個世代，科技將如何影響人類的文明，已是眾所矚目的焦點，相信未來控制科技仍會在全自動化系統的開發中扮演著重要的角色，不過，值得注意的是隨著對科技的過度仰賴，人類有不少的能力與行為已不得不配合科技，甚且受控於科技。早在二十世紀初就有人注意到人與機器的互動問題，美國數學家羅勃·維納(Robert Wiener)也在 1948 年出書 *Cybernetics* 專門探討人與機器間如何互動與相互傳遞訊息。目前人類為了大幅提升科技的效益，正嘗試賦予機器更多的人工智慧，或許現今的機器智慧還處在相當幼稚的階段，但是誰知道是否它們會藉著永不止息的訓練與自我提升，在若干年後能力凌駕在人類之上？是否在不久的將來，人類終將為機器或科技所控制？有誰說絕對不可能呢！

