

第一章 概論

1.1 緣起

微機電系統 (micro-electro-mechanical systems, MEMS) 在歐洲被稱為微系統科技 (micro system technology)。著名的費曼博士 (1965 年諾貝爾物理獎得主) 在 1959 年美國物理學年會上發表「There's Plenty of Room at the Bottom」的專題演講中，首先提到把機器微型化的概念，而「微機器 (micromachines)」此一名詞在 1978 年首次正式出現在國際學術研討會的名稱中；接著彼得森博士在 1982 年發表了著名的「以矽為機械材料 (silicon as a mechanical material)」研究報告；1989 年在美國猶他州鹽湖城的一場研討會 (Micro-Tele-Operated Robotics Workshop) 中，則具體提出「微機電系統」此一名稱。

這名稱也正顯現了當時此一新科技的特質：以原本用於微電子產業的半導體製程技術來製作微米 (百萬分之一公尺) 尺度的機械結構，並可整合多種微元件，包含積體電路，而成為一微型系統。演變至今，微機電系統的發展已逐漸從學術研究走進產業界，衍生出多項商品，潛力產品更是廣泛，所涵蓋的範疇包含光學、電子、電機、機械、通訊、材料、物理、化學及生化醫學等多種知識與技術，形成一個典型的跨領域型整合科技。

1.2 尺寸效應

當元件微小化時，其表現出來行為也常跟著改變，如輸出力及位移量的大小，但其整體表現卻不一定是隨著尺寸縮小而呈線性化減少，所以通常不能僅將巨觀世界的設計按比例縮小至微觀世界來應用。在自然界中，我們常可以發現不同大小的生物，其各器官的比例也不同。例如螞蟻可以舉起其十倍體重的物體，但它的腿與身體比起來就顯得很細；而人雖然腿與身體的粗細比例比螞蟻大得多，卻連舉起與自己相同重量的物體都很吃力。這就是尺寸造成的效應，因為體重與尺寸為三次方關係，而腿的截面積與尺寸為平方關係，所以腿單位截面積所承受的體重，與尺寸就成為線性關係，如公式 (1.1) 所列，也就是尺寸越小，腿的每單位面積所需負荷的體重就越小，因此螞蟻在體型比例上只需較細的腿，就可支撐數倍於其體重的負荷。

$$\frac{\text{體重} (\propto L^3)}{\text{支撐面積} (\propto L^2)} \propto \text{長度} (L) \quad (1.1)$$

在設計微元件時，當然不能忽視尺寸效應，更希望透過尺寸分析而充分利用自然定律在微小化帶來的優點。表 1.1 列出一些基本物理量的公式與其尺寸效應。

要注意的是，有些自然定律在極小尺寸下，必須應用不同的數學模式，例如熱傳導係數 (thermal conductivity)。當材料是厚度小於一微米的薄膜時，其特性不再是常數，而有不同的數學模型來描述其隨厚度而變化的特性，這也是奈米科技所要探討的。因此在作尺寸分析時，選擇適當的數學模式或材料參數也是不可忽略的。

表 1.1 尺寸效應表。

物理量	公式	比例因子	說明
面積	$s = \alpha L^2$	L^2	α ：常數
體積	$v = \alpha L^3$	L^3	
質量	$m = \rho v$	L^3	ρ ：密度； v ：體積
壓力所造成的淨力	$f_p = sp$	L^2	s ：受壓力面積； p ：壓力
重力所造成的淨力	$f_g = mg$	L^3	g ：重力加速度
壓力所造成的應力	$\sigma_p = \frac{f_p}{s}$	1	
重力所造成的應力	$\sigma_g = \frac{f_g}{s}$	L	
庫倫靜電力	$f_q = \alpha \frac{q_1 q_2}{d^2}$	L^{-2}	q_1 、 q_2 ：粒子 1、2 的帶電荷量 d ：兩粒子間的距離
平板間的靜電力	$f_e = \alpha \frac{S}{d} V^2$	L	d ：兩板間距； V ：電壓
線性彈簧常數	$k = 2U \frac{V}{\delta^2}$	L	U ：單位體積應變能； δ ：位移
自然頻率	$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$	L^{-1}	
轉動慣量	$I = \alpha m r^2$	L^5	r ：旋轉體的半徑
電阻	$R = \alpha \frac{L}{s}$	L^{-1}	
電阻功率消耗	$P = \frac{V^2}{R}$	L	
熱傳導	$h_c = \alpha s \frac{dT}{dx}$	L	s ：面積； $\frac{dT}{dx}$ ：溫度梯度
熱對流	$h_r = \alpha s \Delta T$	L	ΔT ：溫度差
熱輻射	$h_r = \alpha s (T_1^4 - T_2^4)$	L^2	T_1 、 T_2 ：物體 1、2 的溫度

1.3 發展趨勢

1.3.1 製程技術

雖然早在 1959 年費曼博士就提出微型機器的概念，但真正促使此一領域蓬勃發展的推手還是由於半導體製程技術的日趨成熟，使得製作微機電元件的可行性大大提升。所以標準半導體製程技術與微機電製程技術常密不可分，如薄膜沉積、微影與蝕刻技術，可是微機電系統的發展雖然是搭著半導體製程設備與技術的便車，但由於在性能及結構上的要求已不同於積體電路，所以也逐步發展出不同的製造技術。與標準的積體電路結構相比，微機電元件的結構特徵有：三維結構、高深寬比、可動結構及多元性材料。

(1) 三維結構

積體電路基本上是一個平面結構，但微機電元件的幾何形狀比較複雜，配合晶片接合技術，常有微柱、微孔、微腔室及微溝等立體結構，再搭配立體微接頭，可構成多變的三維結構。

(2) 高深寬比

為了增加強度或是感測及驅動量，微元件的厚度常要求較高，可能是數十到數百微米，甚至更厚，但微結構中的微孔或間距可能只要數微米，側壁垂直度要好，所以發展出厚膜光阻、深蝕刻、同步輻射 X 光光刻等技術。

(3) 可動結構

微機電元件常可見到立體或懸浮式的微結構，以容許微結構變形或運動，所以掏空微結構下層材料的犧牲層 (sacrificial layer) 技術、背面蝕刻 (back-side etching) 技術、連接懸浮結構而形成立體結構的微鉸鏈 (micro hinge) 技術，及避免懸浮結構與下層基底沾黏的技術，都是微機電製程中特有的技術。也由於微機電元件常有中空或懸浮式結構，微元件及微系統所需的封裝技術，也就常不同於電子元件已發展相當成熟的封裝技術，目前仍處於發展中的階段。

(4) 多元性材料

早年微機電元件的結構中多是用矽基材料，如單晶矽、複晶矽、氮化矽或二氧化矽等，再搭配一些金屬，如鋁，因為這些可用標準半導體製程製作，但隨著微機電元件的多

樣化，也越來越常用到各式金屬及高分子材料，甚至用到所謂智慧型材料，如壓電、磁性材料及形狀記憶合金，這些就不是目前標準半導體製程所能提供的，所以非矽材料的微加工製程技術在微機電製程技術中也日漸重要，如微放電加工及深刻模造術中的精密電鑄及微成形技術。

對研究人員來說，在微機電系統中揮灑的空間更大，可以不必拘泥於標準的半導體製程，但從產業界的角度來說，也由於微機電製程的多樣化，不僅要考慮最小線寬與結構厚度，還要包含不同結構層數及不同材料，有時還要兼顧不同元件整合時的製程技術相容性問題，所以不但傳統的半導體製程工廠無法完全滿足微機電產品的需求，也使微製造技術的單一標準化十分困難。

在微機電產品商品化時，若從成本及技術成熟度考量，自然最好是利用現有的半導體製程技術，但從功能性考量，單單半導體製程技術無法滿足所求時，常需要為特定產品建立專用的生產線。另一方面，也有越來越多的微機電製程代工廠設立，嘗試建立其自有的標準製程，如 1980 年代由美國北卡微電子中心 (Microelectronics Center of North Carolina, MCNC) 所開發可製作三層複晶矽結構的 MUMPs (multi-user MEMS processes)，及美國 Sandia 國家實驗室 (Sandia National Laboratory) 所發展可作三層或五層複晶矽結構的 SUMMiT (Sandia Ultra-planar, Multi-level MEMS Technology) 製程，顯示標準化的量產技術仍是發展微機電系統時所要考慮的重要課題。

1.3.2 元件與應用

微機電元件可分為三大類：微結構、微感測器與微致動器。微結構是屬於靜態式作用，如微透鏡、微齒輪、微噴嘴與微流道；微感測器是用來量測物理量或化學量，如壓力計、陀螺儀、加速度計與氣體感測器；微致動器則可將輸入能源轉化為運動輸出，如微馬達、微幫浦及微光開關。若將一個或數個微機電元件與電路或訊號處理單元結合，則可形成一微系統。以汽車上的安全氣囊為例，當汽車受到嚴重撞擊時，車上的微加速度計會將所受撞擊轉換成訊號，經過適當處理，送至使空氣氣囊膨脹的致動機構，啟動氣囊以保護車上人員。

一般對微機電系統所期待的特性及優點可分為下列幾項：

- (1) 微小化：省材料、省空間、低耗能、高性能、易攜帶。
- (2) 多功能：整合不同微元件，由單功能成為多功能。
- (3) 陣列化：相同元件可在小面積內大量複製排列，並能個別操作。
- (4) 模組化：不同元件可整合在一小面積內。
- (5) 量產化：低成本、可用後拋棄。

感測器與致動器是智慧型系統所必備的元件，如同微處理器一樣，在許多產品中都已存在，而微機電系統技術除了可帶來這些產品在功能上的提升外，更有機會創造新的用

途。根據英國皇家科技協會 (Royal Institute of Technology) 的報告，目前採用微機電系統技術的產品主要是 (1) 磁性儲存設備的讀寫頭；(2) 噴墨印表機的噴墨頭；(3) 汽車內的各式感測器。未來主要產品則可能是 (1) 醫療技術、設備與用品；(2) 生化科技；(3) 無線通訊設備。表 1.2 則是美國肯那集團 (Cahners In-Stat Group) 對微機電技術產品市場變化的研究統計。

表 1.2 微機電技術應用產品市場變化表。

2000 年十大應用領域	市場佔有率	2005 年十大應用領域	市場佔有率
汽車	26%	光開關	24.4%
工業設備	14.7%	投影系統	14.6%
噴墨印表頭	9.5%	繼電器	14.0%
投影系統	8.2%	汽車	11.6%
血壓計	4.4%	工業設備	6.9%
消費電子	4.0%	噴墨印表頭	6.0%
生物晶片	1.6%	生物晶片	4.0%
光開關	0.8%	通訊用濾波器	2.9%
醫療設備	0.6%	血壓計	2.2%
醫學儀器	0.4%	通訊用雷射	1.7%

資料來源：Cahners In-Stat Group

雖然目前微機電元件或系統的成熟產品並不算多，各研究單位對未來的市場分析也不盡相同，但是可以確定的是微機電是個正在發展中的產業，許多可能的應用仍在探索中，一開始應用領域會不明確，但當微機電技術隨著時間逐漸演進，生產與研發微機電元件的成本更具競爭力時，將會有越來越多的微機電產品出現在市場上。

參考文獻

1. R. P. Feynman, *J. MEMS*, **1** (1), 60 (1992).
2. R. P. Feynman, *J. MEMS*, **2** (1), 4 (1993).
3. 張志誠, 微機電技術, 商周出版社 (2002).
4. K. E. Petersen, *Proc. of the IEEE*, **70** (5), 420 (1982).
5. M. J. Madou, *Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization*, 2nd edition, CRC Press LLC (2002).
6. T. R. Hsu, *MEMS & Microsystems: Design and Manufacture*, McGraw-Hill (2002).