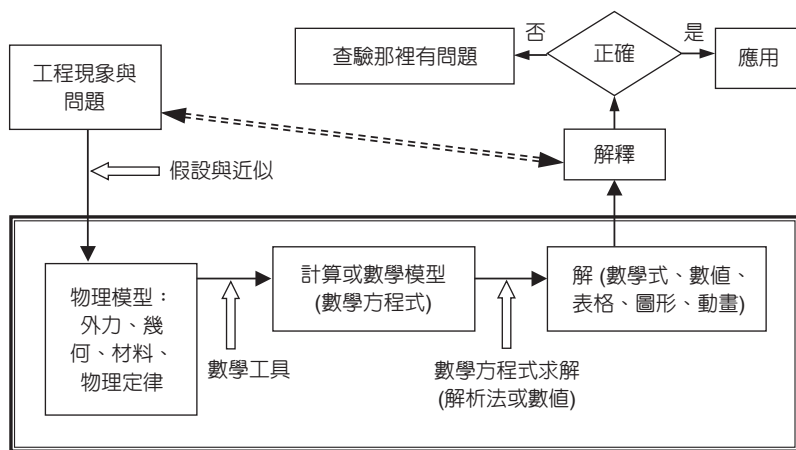


第十二章 模擬與分析技術

12.1 前言

實驗、理論與計算是解決工程問題三種不同的方式，各有其優缺點。實驗方法是以控制實驗條件在真實模型下探究問題，而後兩者是透過虛擬模型的建構，運用解析或是計算的方法來解決問題。理論與計算方法一般的解決步驟，如圖 12.1 所示。首先在面對一個工程問題或現象時，分析者將此分析的對象或系統依經驗準則做適當的假設，將此實際對象以一近似的物理模型來代替，也就是將處理的真實模型轉換成一物理模型。每個物理模型都有其假設條件，因此有一定的適用範圍，背後有對應的材料性質、幾何及外力特性與物理定律等描述此物理模型的行為。例如等向與非等向、線性與非線性、彈性與塑性及剛體與撓性體等都是可能的材料性質；大變形、小變形大旋轉、小變形小旋轉、樑模型與板殼模型及固定邊界等都是可能的變形幾何模式；而牛頓運動定律與歐姆定律是很常見的物理定律。



電腦輔助分析或電腦輔助工程

圖 12.1

工程問題的分析步驟。

經由物理模型之材料、幾何、外力與物理定律等之假設，再配合數學理論與工具，可推導出此物理模型之數學方程式，此稱之為數學模型 (mathematical model)，又稱為統御方程式 (governing equation)。該數學模型可能是代數方程式、常微分方程式、偏微分方程式或是混合的型式。數學方程式有時可利用解析法 (analytical method) 求出解析解 (analytical solution)，此解析解通常為數學式，有時會再利用數值法來求得此數學式之值與其特性。對於無法求得解析解的問題，就必須採用數值方法來求其數值解 (numerical solution)，此時的數學模型又可稱之為計算模型 (computational model)。舉個簡單的例子，如圖 12.2(a) 所示的微結構，它的一端與矽基板連接，另一端為自由端，可受力而產生變形，可能的一個物理模型是懸臂結構，如圖 12.2(b) 所示，此物理模型之計算模型可以是有限元素法之三維元素如圖 12.2(c)，或是用二維板元素如圖 12.2(d)，亦或用一維樑元素如圖 12.2(e)。也可用如圖 12.2(f) 之偏微分方程式的懸臂歐拉樑 (Euler beam) 數學模型來進行分析，也就是假設此結構之剖面在變形時是平面，變形後也是平面，它的固定端假設為不會變形之牆面。至於外力可能假設為集中力，也就是外力是僅作用在一個點上，因面積無限小，故此假設模型在理論上該處所受應力會無限大，但因有限元素之元素是有限大小，所以該節點之應力會相當大，但不是無限大。

數學模型的解可能以數學式、數值、表格、圖形及動畫等不同的方式展現，分析者透過這些不同的展示結果，來解釋物理模型的物理現象，若是物理模型適當的代表要探索的真實物理對象，那也就相當是在解釋真實的問題。結果的正確與否須作適當的判斷，因為有可能在前述之分析過程中，發生錯誤或做了不適當的假設。嚴格來說，正確的意義是在

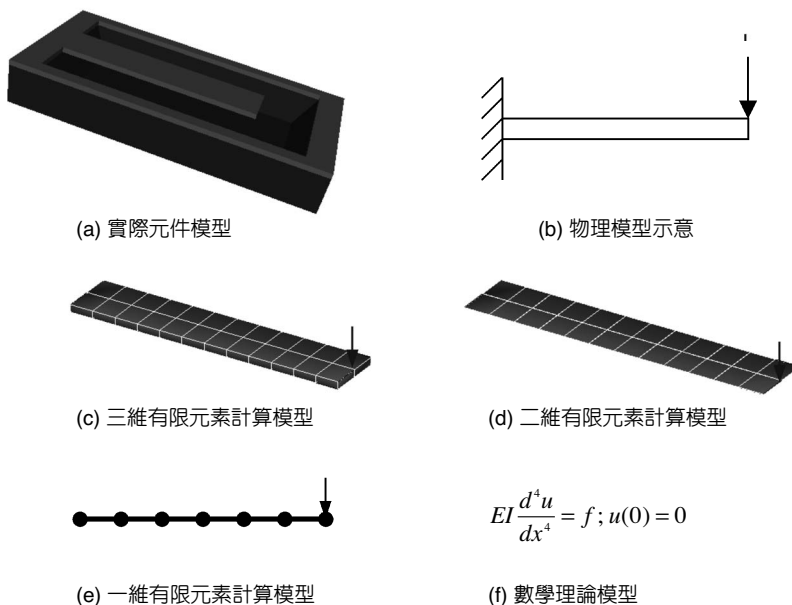


圖 12.2

真實模型與物理模型。

結果的準確度是否是可接受的，不同的問題與不同的要求，可接受的程度就不同。結果是否正確通常需要許多的經驗累積，此經驗包括對相關物理現象的理解程度、理論的基礎及邏輯判斷等。若發現結果有問題，就要從每個過程中去分析判斷那個部分或環節出錯，修正後再分析，直到結果正確為止。若結果正確，就可以應用此分析的結果，也就是可用來瞭解現象、修正設計甚至重新設計。上述的過程稱之為分析，反過來的步驟則稱之為設計或合成 (synthesis)，就是在已知系統特性規格下，找出滿足此特性的物理系統與參數。

在上述的分析過程中，有幾個很重要的關鍵是分析者要特別注意的。真實系統產生物理模型的假設，必須在近似程度與複雜度中取得平衡，物理模型愈簡單通常處理起來愈方便也愈快，但相對的其精確度或與真實系統的相似程度就越差。若要採用解析法則假設條件與限制較多，若運用數值法則可處理的系統可以較複雜。此步驟所需要的專業知識與分析的經驗占很重要的角色，如何運用一個夠簡單卻又能保留重要的性質，是快速且有效分析中不可或缺的能力。推導出物理模型的統御方程式，所需要的是對物理定律的清楚瞭解與數學的運用，因此對分析者專業學養的要求較高，對數學能力也有一定程度的要求。用解析法求解統御方程式需數學求解能力，數值解法則要求對數值方法與電腦程式有所瞭解。對結果的判讀，則對處理對象的物理特性之學理也要有相當程度的認識，經驗也很重要。

由於電腦軟硬體、數值方法與程式語言的發展，使工程師與研究者有了很好的方法解決許多無法由解析解求出的問題。近年來因圖形使用者介面 (graphic user interface, GUI) 技術的迅速發展，使得電腦輔助分析軟體的發展日益蓬勃，使得運用電腦軟體來協助分析與設計之電腦輔助工程 (computer-aided engineering, CAE) 領域被廣泛的應用在各工程領域，運用有限元素法、邊界元素法、有限差分法及有限體積法等數值計算為基礎的商用軟體，被廣為應用在各研究領域和工業。這些年微機電的快速發展，加上微機電之原型開發的耗時與昂貴，讓微機電的專用軟體也隨之應運而生，目的是滿足微機電產業的需要。

現今電腦輔助工程軟體工具的應用，大大的簡化了分析的過程與效率，它們使得分析者用圖形的方式直接建構出物理模型，包括幾何外形、幾何邊界條件、外力型態、求解類型，以及數值方法與參數等，之後電腦程式就可自動產生數學方程式並進行求解。求解完後，使用者可以數值、表格或特別是圖形與動畫的方式來協助結果的解讀。因此使用者不再需要自己推導數學方程式，也不再需要自己求解方程式，便可輕易的將數值結果用視覺的方法呈現出來。但是如何假設與近似，如何判斷與解讀結果，如何應用此結果，則是目前電腦無法取代分析者的部分。分析者不再需要那麼多的學理基礎、數學能力與數值技巧，藉由軟體的專業協助，可以大大加速分析的進行。所以電腦輔助工程軟體應用的優點，是透過滑鼠與鍵盤以具親和力的繪圖方式，建構物理模型來建立虛擬原型 (virtual prototyping)，以取代或減少實體原型之製作與測試時間及成本，易於變更設計與驗證，善加運用可縮短設計開發的時間，降低開發的成本，提升產品的性能。易於操作與對理論及數學能力的要求較低，使更多的人包括專家與非專家都可以參與產品不同層次的設計與分

析。由於微機電製程的成本相當高，更使得電腦輔助工程在此方面的應用益發重要。

本章將針對微機電模擬分析的重要內容與發展做完整的介紹，在下一節先介紹基本架構與重要的技術內容，讓讀者能對其風貌與內涵有所瞭解，後續的三節再分別就系統層次與巨觀模型、元件特性模擬與製程模擬，做更深入的探討與說明，微機電軟體發展狀況則於最後一節中描述。

12.2 微機電分析模擬基本架構與內容

微機電系統是一個結合機械、電子、光學、材料、物理、化學、生物及醫學等多重技術之領域，特別是強調整合不同領域之特性，希望能達到積體化、高效率化、智慧化、低成本化、可量產化和高附加價值之目標。微機電系統包括兩個主要對象，一個是微機電元件，一個是微機電系統。微機電元件意指微感測器、微結構及微致動器等微元件本身，而微機電系統則泛指包含微機電元件，以及其他相互連接或搭配之各類電路、光學等組件或系統。

為了設計或分析微機電系統，所需要的完整微機電設計與分析之主要內容與架構顯示於圖 12.3，其中有多階層 (multi-level) 與多重物理領域 (multi-physics) 兩大特性。多階層特性以由上而下的設計流程來看，最上層的系統階層 (system level)，是探討此微系統整體的特性與性能。下一層的元件行為階層 (device behavior level)，以簡化的數學模型來描述微元件的物理模型。再下一層的元件物理階層 (device physical level)，重點是精確的模擬微元件的各種性能與特性。最底層的製程階層 (process level)，是給定二維光罩圖形及製程步驟與條件下，模擬所製作出來的元件幾何外觀。此四個階層組成微機電多階層模擬的架構⁽¹⁾，由上而下是微系統的設計流程，從系統的規格訂出後，找到合適的元件行為，再找到符合元件行為的元件細部設計，然後訂出製造的方式；由下而上是驗證與分析流程，在實際的設計過程中，設計與驗證流程通常是不斷的交互運用，以決定出最後符合規格的設計。

在多階層模擬特性中，階層間資料的交流是很重要的。就由上而下的設計流程而言，如何從系統的規格，到微元件的行為特性，到元件的幾何與材料等特性，最後到怎樣的製程可以做出此微元件，需要不同的工具來加速設計的過程，合成工具即扮演著由上而下階層間的角色。另外最佳化的工具可以協助在各階層間或是在各階層內找到較佳的設計。因為一個軟體不可能做所有的分析，也不是所有的功能都符合需求，因此各軟體之間的整合運用就很重要。要整合則各軟體之間資料的流通就要靠彼此之間的介面來達成，這就要求軟體的開放性要夠，也就是它應該提供充份的輸出與輸入功能來運用別的軟體資料或讓別的軟體分享它的資料。相關的軟體工具需求即建基於此這兩大特性，以下將扼要說明其內涵。

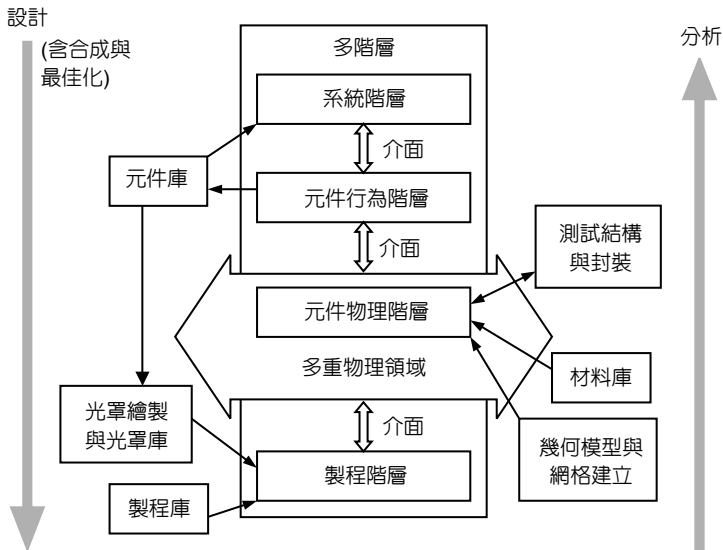


圖 12.3 微機電分析模擬基本架構。

12.2.1 元件物理階層

微元件之分析模擬的一個最重要項目是微機電元件之特性與性能，也就是希望在微元件製作出來之前，能透過分析模擬事前知曉元件的特性與性能是否達到設計規範，經由設計變更或修正以便獲得較佳的元件，此分析模擬之階層稱為元件物理階層。在此階層的重點是精確地模擬微元件的各種性能與特性，所需要的是微元件分析模擬技術。此階層除了可運用解析方法來求解外，特別強調的是運用有限元素法、邊界元素法及有限體積法等場方程式之計算方法來求解問題。

除了個別領域之分析模擬，如結構應力應變、熱傳、流場及電磁場等，另外更重要的是多重領域分析或稱之為耦合分析 (coupling analysis)，因為微元件常運用不同能量轉換來運作，也是最大的挑戰。以能量的種類來區分，主要有機械能、電能、磁能、輻射能、化學能與熱能等不同能量型態，微感測器與微致動器的設計即充份運用這些能量本身，以及能量之間的轉換來達成所要的性能，其中電能與構成微結構本身的機械能耦合是最普遍的設計，機電耦合模擬也就變成最重要的需求。隨著製造與設計能力之進展，牽涉其他能量或更多能量間的耦合分析也益發重要。此外，當微元件最後要成為可直接使用的產品時，一定要做封裝 (packaging)，因此封裝之特性分析以及封裝對微元件特性的影響分析，也是元件物理階層所應探討的問題。

由於元件在微小化後，許多物理特性有可能改變，因此在微機電分析中應特別留意小尺度之準確與可靠性問題。在微系統邁向成熟的階段下，新的小尺度物理模型之研究與建立是必需的。雖然如此，利用現存工程師所熟悉之大尺度物理定律的物理模型與工具，仍在一定範圍內具相當之價值。

運用有限元素法、邊界元素法、有限體積法等場方程式來求解問題的第一步驟是建立網格 (mesh)，因為這些方法都是透過網格的概念將連續體的特性離散化(discretize)，也就是將無限自由度的系統以有限自由度的系統來近似。網格是由許多的元素 (element) 組成，而元素由節點 (node) 組成。每個元素皆有其對應的假設條件，例如一維、二維與三維、線性元素與高階元素、完全 (full) 積分與縮減 (reduced) 積分、樑元素與板殼元素等等不一而足。網格類型的選取與幾何特性的品質好壞，如深寬比 (aspect ratio)、夾角與扭曲度 (distorsion)，與計算的精確度及效率有很大的關係。

能快速建立網格，且又兼具網格的高品質是不可或缺的技術，建立的方式主要有兩種，一種是由下而上，就是先建立格點再組成元素，此法較少使用；另一種方法是由上而下，就是先建立幾何，再將此幾何切割成網格，稱之為實體模型法 (solid modeling)。自動網格產生 (auto mesh generation) 與適應網格 (adaptive meshing) 都是為協助建立網格所發展出來的技術。至於幾何的產生可分為兩種方式，一是直接用具有幾何建構核心之軟體，如所謂的電腦輔助設計 (computer-aided design) 軟體如 Pro/Engineer、I-DEAS 等，或是泛用型前處理軟體如 Patran。另一種方式是透過製程模擬來產生幾何模型，此方式是微機電專用軟體所採用的最主要方法。

材料性質在元件特性分析時是當成已知的，因此在分析前如何取得可靠的材料性質是很重要的。因為微機電的材料性質隨製程的不同條件會有不同的數值，更增加其困難度。透過實驗測試方法或特殊之測試結構來得到可靠的材料性質常是必要的手段，特別是機械性質，尚沒有標準化的測試，文獻中的值也有很大的差異，取得也較不易，若能有材料庫供參考查閱，對分析之進行會有很大的助益。測試結構的設計本身有時也可看成是一種微元件的設計，因此也可採用此階層之分析技術來協助其設計。

12.2.2 製程階層

此階層主要包括四個部分的內容：光罩 (mask) 繪製、製程步驟與條件定義、製程模擬以及設計法則驗證 (design rule check)，其中製程模擬是在現階段微機電元件設計專用軟體開發中最主要的項目之一，是給定二維光罩圖形及製程步驟與條件下，模擬所製作出來的元件幾何外觀。製程模擬軟體工具的開發與應用，最主要的功能是為了得到微元件被製作完成後的幾何，同時也可以透過三維的立體幾何或二維的剖面幾何之視覺圖形，幫助設計者瞭解與掌握微元件幾何尺寸與光罩繪製是否正確。製程模擬的方法可區分為與製程條件有關以及與製程條件無關，製程模擬將於 12.5 節中詳述。

利用微影 (lithography) 製程為基礎的微加工製程，是利用光罩圖形來將形狀轉移到晶片上，製作光罩之前則要有光罩圖形的繪製，此光罩圖形是二維的圖形，它的繪製通常使用光罩軟體工具。光罩軟體提供許多二維圖形繪製、修改、複製等基本功能，由於微機電在

真實曲線之需求，有別於積體電路中微電子元件以多邊形為主，因此能否提供真正曲線之繪製功能，是微機電專用光罩工具軟體必備的功能。此功能結合直接運用真正曲線產生的實體幾何，對網格的建立是非常重要的。另外是否能提供參數化光罩庫，以便讓繪製者對常用的幾何型式或元件能快速的利用幾何參數值的輸入，得以產生並重複使用。

每個光罩工具軟體有自己的光罩檔案格式，但常用來儲存或交換使用之光罩檔案的格式，主要有 GDSII、CIF、DXF 三種，因此具備此三種格式之一種以上的輸出與輸入或轉檔是這些軟體必備的功能。GDS 是圖形設計系統 (graphic design system) 的縮寫，GDS 格式有幾個不同的名稱，如 GDSII、GDS II、Calma GDSII Stream 格式等。CIF 是加州理工中介格式 (Caltech intermediate format)，此兩個格式是原本積體電路設計與代工廠常用的標準格式，此兩格式原則上主要支援多邊形 (polygon) 圖形。DXF 是 AutoDesk 公司為 AutoCAD 軟體所制定出來的繪圖交換檔 (drawing interchange file)，AutoCAD 是機械領域廣泛使用之繪圖軟體，支援各式各樣的圖形繪製能力，但是用來做光罩用途時，通常會限制其為多邊形圖形才可。因此在做檔案交換轉檔時，應注意真正曲線與多邊形之轉換問題。

設計法則 (design rule) 的訂定⁽²⁾，是為了確保製程成功的最大可能性。它是對光罩幾何上的一些限制，包括每層 (layer) 光罩內的圖形，以及不同層光罩內圖形之間的尺寸限制。例如常見的最小線寬 (minimum width)、最小間距 (minimum space)、含括 (enclosed) 或包圍 (surround)、切入 (cut-in) 或重疊 (overlap)、切出 (cut-out) 或延伸 (extend)，如圖 12.4 所示。通常最小設計規範是由微影製程解析度 (resolution) 與對準 (alignment) 能力之限制所產生，所以設計法則驗證 (design rule check, DRC) 是光罩繪製過程中應當進行的驗證工作。若是微機電元件本身並不複雜，可以人為的驗證來取代軟體的協助。

製程模擬給定二維光罩圖形及製程步驟後，自動產生微元件之三維幾何。反過來若已知三維幾何與製程步驟時，自動產生對應之光罩圖形，也可加快設計的進行。

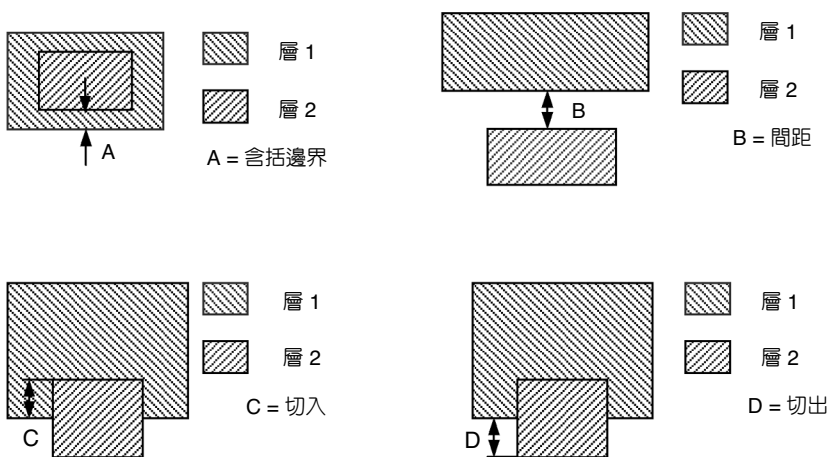


圖 12.4
光罩設計法則圖例。

12.2.3 系統與元件行為階層

系統階層分析的對象是微機電系統，泛指包含微機電元件以及其他相互連接或搭配之各類電路、光學等組件或系統。計算此微系統整體的特性與性能，也就是所謂的系統模擬 (system simulation)，如此之軟體工具即稱之為系統模擬軟體。因此最完整的系統模擬軟體應能處理混合訊號 (mixed signal) 與混合技術 (mixed technology)。所謂混合訊號包括的是數位 (digital) 與類比 (analog) 訊號。而混合技術指的是除了電路外，也能同時處理機械、光學等其他不同元件，所以可視為在系統層次的多重物理領域耦合模擬。此系統模擬雖也可做穩態分析，但最主要的功能是在暫態 (transient) 分析。

既然微機電系統中含有微機電元件，因此在微機電系統模擬時，就需要微機電元件的數學模型。但在系統模擬中，使用需要大量計算的元件物理層次之模型是不切實際的，因計算量會太龐大。所以如何由精確的元件物理層次之計算結果來獲得一個近似的模型，是元件行為層次 (device behavior level) 最重要的工作，此近似模型又稱之為降階 (reduced order) 模型或是巨觀模型 (macromodel)。另外配合系統模擬程式所需的模型描述方式，半自動或全自動產生如 SPICE、HDL-A 等之計算模型，也是重要的功能，可減少學習系統模型語法及人力撰寫模型的時間。於 12.4 節中將對系統模擬與簡化模型有更詳細的說明。

元件庫的提供是對系統設計能快速進行的重要功能，這在半導體電子電路設計中是廣泛被採用的方式，該功能讓設計者可以快速運用現有的各種元件，組合成一個系統後，進行分析驗證其性能。同樣的，若能將微機電元件的巨觀模型建成一元件庫供系統設計者使用，甚至將之建成參數化的元件庫，將可大幅縮短系統設計的時間。若此元件庫的元件，其每個模型又包括其對應的光罩設計，將可縮短光罩之設計與繪製時間。

此外，在積體電路設計中也常提供一個功能，供設計者進行系統與光罩設計的驗證工作。因為系統必須由光罩的設計與製程將之實際製作出來，如何在製作之前確保詳細的光罩圖形所對應的設計就是系統模擬時所設計的系統，是避免錯誤的重要工作。微機電之設計驗證也應包括此類似的功能。

12.3 元件特性之物理領域模擬

為了充份了解微機電結構在各種操作環境狀況下之特性，以配合有限元素或邊界元素法等作各特定物理領域 (domain specific physical level) 的模擬，是微機電元件設計相當關鍵的一環。目前市面上微機電相關的專業模擬軟體，皆能結合元件的光罩設計圖及實際的製程描述 (process description)，自動產生微機電元件三維的實體模型 (3D solid model)，並做特定物理領域的模擬計算。概括而言，特定物理領域的模擬是將相關的物理方程式 (偏微分方程式) 及邊界條件，運用數值分析的理論及技巧，套用於元件實體模型所代表的幾何結構上，完整詳細的計算出相關物理量的數值或分布，並可由此得知元件的性能，驗證是否符

合原來設計者的預期需求，讓設計者在花費最少的金錢及時間之下達到最佳化的成效。

一般模擬的程序是先將元件實體模型網格化 (meshing)，再利用有限元素法 (finite element method) 或是邊界元素法 (boundary element method) 的方式將相關的物理方程式離散化 (discretize) 來分析。就分析數據的精確度來說，使用者可以依照結構的複雜度，或是想要的模擬精確度，自行控制網格的疏密，以達到省時又精準的分析結果；接下來的章節將介紹目前微機電相關軟體在各特定實體領域模擬計算之功能。

12.3.1 機械固力分析

微機電元件設計者常常需要瞭解當元件受各種不同外力後，元件產生機械形變的情況，而分析機械形變的部分，通常皆可用固力的計算軟體達成。機械固力分析也常常跟其他現象耦合分析，後面將舉例說明。

圖 12.5(a) 中所顯示的是一個橋結構 (即兩端固定的長平板) 網格化的結果。圖 12.5(b) 為此橋結構在受一由上至下的均勻外力後之形變。

除了受力分析之外，找出元件的自然共振頻也是非常重要。輸入訊號若是與機械結構的自然共振頻率接近，會激發出最大的振動振幅。預測結構之自然共振頻率的應用極多，例如許多加速度計的操作頻寬之上限即受限於共振頻率。也有很多元件是以共振的現象，作為操作的基礎原理，例如微機電共振器或濾波器等，這些元件之機械結構共振時，其品質因子 (quality factor) 較一般電子式的元件大許多，因此有可能在高頻的應用中取代電子式的元件。圖 12.6 顯示圖 12.5(a) 中的橋結構在自然共振分析中之前三個自然共振頻的共振模式。因便於檢視之故，在圖 12.6 結構之厚度較圖 12.5(a) 放大了 10 倍。

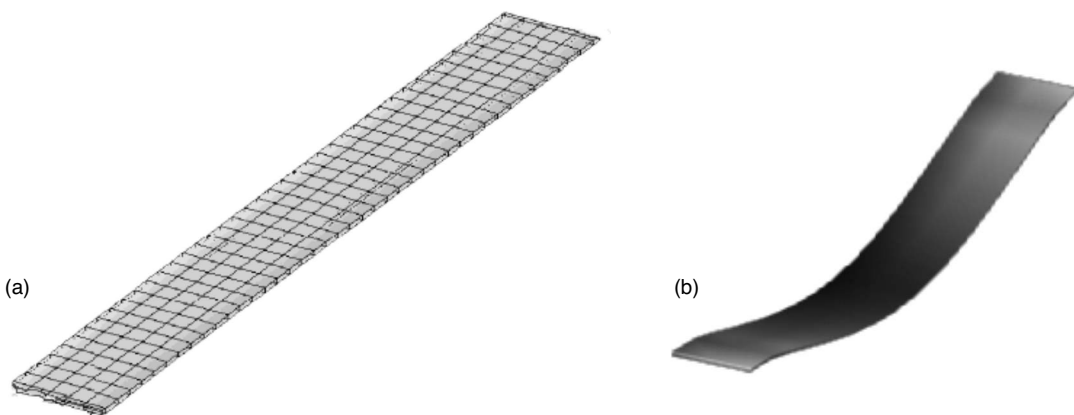


圖 12.5 (a) 經過八節點六面體元素 (8-node brick element) 網格化的橋結構，(b) 橋結構在受一由上至下的均勻外力後之形變。

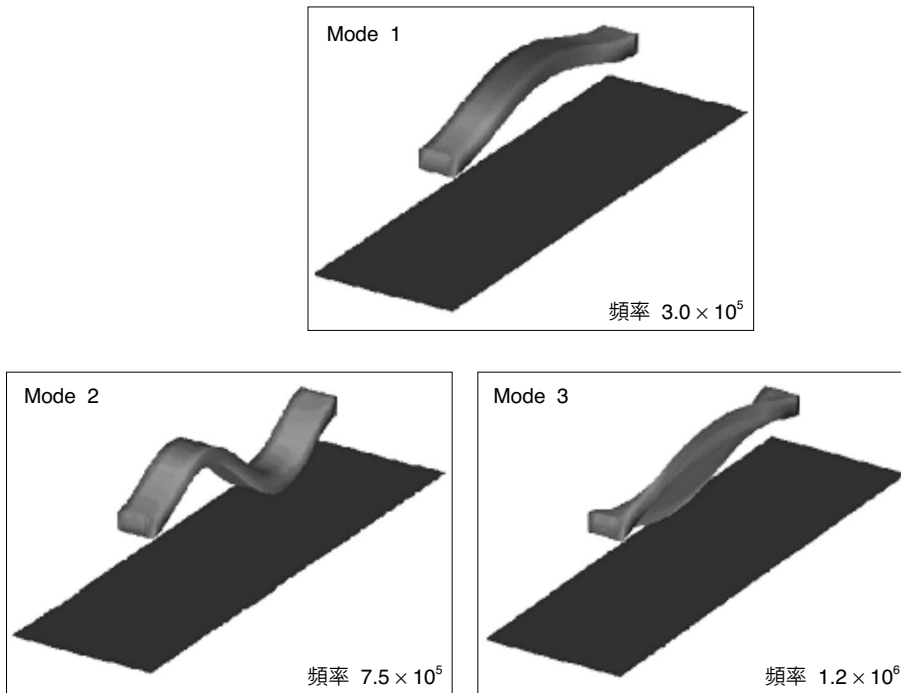


圖 12.6
橋結構之前三
個自然共振頻
率的共振模態。

12.3.2 靜電及固力耦合之分析⁽³⁾

微機電分析中常見卻複雜的分析就是靜電及固力耦合之分析 (coupled electromechanical analysis)。以大部分的應用而言，最輕易輸入微機電元件之訊號 (或能量) 為電壓；此外，電容式靜電力之致動器對微機電元件而言是最易設計、製作及操作的，因此利用靜電力造成微機電元件之機械結構形變是相當普遍的操作方式。

圖 12.7 為一懸臂樑在加電壓前及加電壓後結構變形的示意圖。當此系統達成力平衡時，靜電力與結構之恢復力 (機械固力計算) 互相抵消。以下將介紹如何使用數值方法來整合獨立的靜電力計算程式，以及如何使用機械固力的計算程式來求得最終的力平衡。

(1) 運算方式

一般來說，靜電及固力耦合之分析，都是利用迭代 (iteration) 的方式來求得。其中較為穩定及準確的方式是利用有限元素法模擬程式來解固力的領域，利用邊界元素法模擬程式來解靜電力的領域，而採用鬆弛法 (relaxation method) 來整合兩個領域之模擬程式。在此以懸臂樑為例說明 (圖 12.7)。當懸臂樑給定一外加電壓時，可經由靜電力的模擬程式求出靜電力在結構上的分布；由於此靜電力會對其結構產生向矽基底方向彎曲的形變，因此將此靜電力分布當作固力模擬程式的負載條件，計算出結構實際的變形，完成第一個循環之計

算。此一形變將使結構產生彈性恢復力 (詳細情形應為固定端產生恢復力矩，此處為方便解說而作簡化)，方向為向上，即遠離矽基底方向，且與之前計算出之靜電力相平衡。然而實際上，由於形變的影響，原本因外加電壓而分布的電荷將重行分布，在形變較大，即兩結構彼此比較靠近之處 (如懸臂樑之端點處)，電荷分布將較密集，此一電荷重分布勢必導致靜電力影響增加，因此必須作迭代的計算：將剛求出已「形變的 (deformed)」結構，作為靜電力的模擬程式所將模擬的結構，重新計算靜電力之分布，然後再將此靜電力分布作為固力模擬程式的邊界條件，計算新的變形量。此一「靜電力→引起形變→改變靜電力→引起新形變→…」的迭代流程，即為鬆弛法。每次迭代產生結果的形變量，若收斂的話，差距將越來越小，也越接近一收斂的實際結果。當兩次迭代中形變的差距已小到我們可接受的範圍，或迭代次數 (iteration number) 已達設定值時，運算即停止並輸出結果。

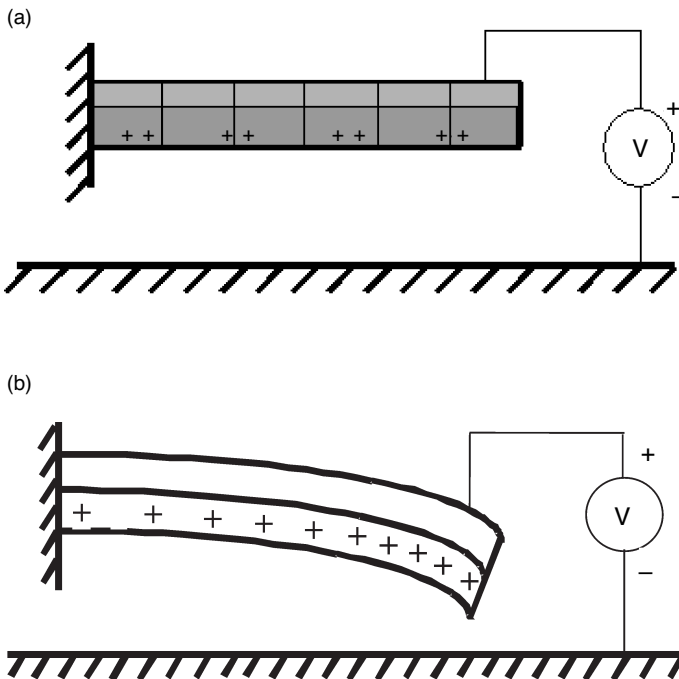


圖 12.7

懸臂樑在加電壓前後結構變形的情况，(a) 加電壓前，(b) 加電壓後。

(2) 突衝現象

突衝 (pull-in) 現象也是靜電及固力耦合分析中較常遇到的應用。這是一種結合靜電力和固體力學的影響，所產生的非線性現象。以微壓力計為例子來解說 (圖 12.8)，當微壓力計結構上方的薄膜給定一個電壓時，由於和底板間靜電力的影響，結構將會產生形變，向底板方向凹陷。當外加電壓逐漸增加時，此一形變量亦隨之增加。而當此外加電壓增加到一个關鍵值時，靜電力將大於結構彈性恢復力的影響，彈性恢復力無法再與靜電力達成平

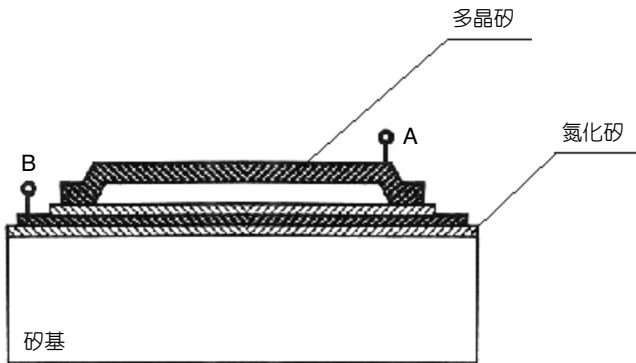


圖 12.8
微壓力計之示意圖。

衡，而使靜電力取得支配性的地位。此時結構形變會突然以非線性方式大量增加，使薄膜凹陷至接觸底板為止，此一現象即為突衝。而開始產生突衝現象的關鍵電壓稱為「突衝電壓 (pull-in voltage)」。

(3) 遲滯現象

當產生突衝現象時，若持續增加外加電壓，整個結構與底材 (substrate) 接觸的面積仍會繼續擴大。當電壓到達一定值後，我們開始以同樣的電壓變化軌跡，反向逐漸減少外加電壓。一般而言，當電壓減少至突衝電壓時，由於此時靜電力的影響仍大於結構彈性的影響，故薄膜結構並不會立刻與矽基底分離，兩部分結構會繼續接觸。直到外加電壓持續下降至一定值後，兩部分才會分離。此一完整的過程，即為遲滯 (hysteresis) 現象，兩部分結構分離時的電壓稱為「釋放電壓 (release voltage)」。

(4) 電容式微壓力計範例

接下來以一個微壓力計為模擬範例 (圖 12.8 及圖 12.9)。此微壓力計之操作原理是，當外面環境的壓力增加時，上層的多晶矽薄膜會向下凹陷，其凹陷將造成結構變形，也將造成電容值發生改變，因此可以在薄膜變形時，藉由在 A、B 兩點加上測試電壓，以量取電容值。圖 12.10 為其壓力差 (P) 與電容值 (C) 之間的關係圖，因此以後只需要量測電容值，即可對應圖 12.10 求得壓力差。

接下來我們來看微壓力計的突衝現象與遲滯現象的模擬情況，首先在 A、B 兩點間加上電壓差，並且以一次增加 20 V 的方式做直流掃描，直到薄膜與底板接觸在一起之後再將電壓遞減，觀察微壓力計薄膜與底板間距離與電壓的關係 (圖 12.11)。由此圖可以看出當薄膜與底板間距離為零時，此時的外加電壓就是微壓力計的突衝電壓，在此電壓附近薄膜的

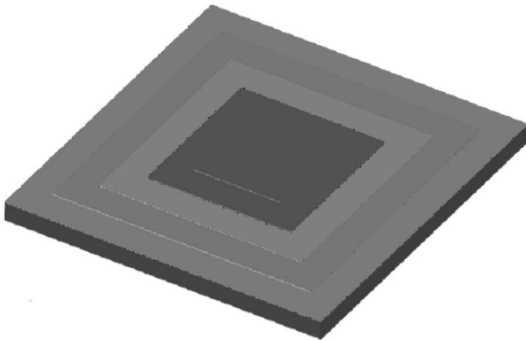


圖 12.9 微壓力計的實體模型。

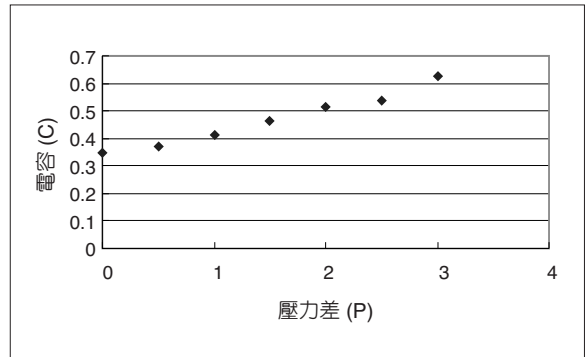
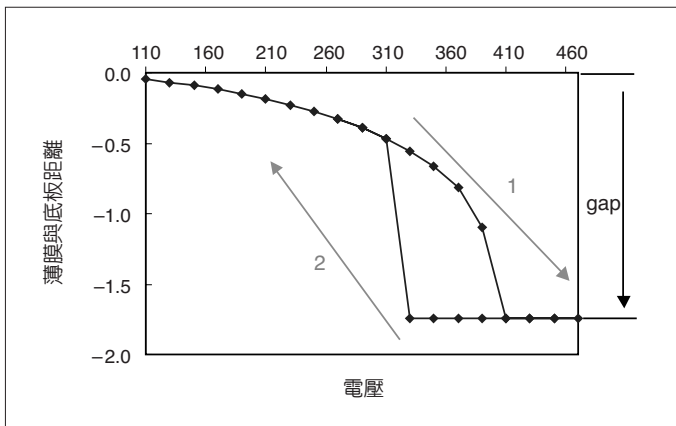
圖 12.10 微壓力計之壓力差 (P) 與電容值 (C) 之間的關係圖。

圖 12.11

微壓力計薄膜與底板間距離的變化。

形變突然發生非線性式的劇烈增加，此圖也可以看出，當電壓自突衝電壓逐漸下降時，遲滯現象也隨之發生。

12.3.3 高頻電感分析⁽⁴⁻⁶⁾

近年來無線通訊科技使用的普及，許多高頻微機電元件的應用也漸漸成形。其中之一即為利用微加工技術所發展出的電感。由於在高頻的運作下，表皮效應 (skin effect) 和近接效應 (proximity effect) 會造成電感元件的整體效應 (包括電阻值及電感值) 隨著頻率變動。

在低頻時，電流乃是因為自由電子受電場影響造成自由電子漂移而使得整個導體的自由電子均產生漂移，但是在高頻交流的情況下，會傾向僅僅只有導體表面的電子產生漂

移，這就稱為高頻電流的表皮效應，因此一個表面氧化的導體可以正常的傳輸直流或低頻交流訊號，但對於高頻訊號而言卻是不良導體。而近接效應的發生原因則是在高頻運作下，電感器周圍的金屬將會產生反方向的感應渦電流，而此感應渦電流又會反過來影響電感器，造成電感值的下降。

以下就以一個螺旋電感感測器 (spiral inductive sensor) 作為分析範例 (圖 12.12)，螺旋電感感測器主要可以分為銅製導線以及鋁製金屬板兩個部分。由圖 12.13 可知，當輸入訊號是低頻時，電阻以及電感值不會發生太大的變化，但是在高頻電路時，由於銅導線本身發生表皮效應，因此電阻值會越來越大。此外，高頻訊號也會產生近接效應，造成鋁製平板上生成反方向的感應渦電流 (圖 12.14)，因而使元件電感值大幅下降。

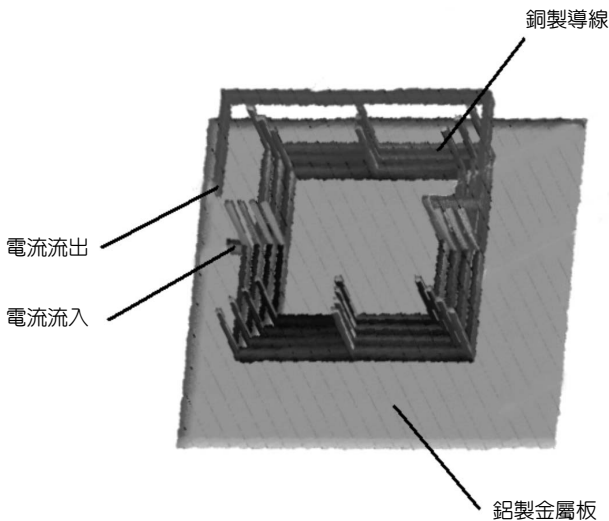


圖 12.12 螺旋電感感測器的三維示意圖。

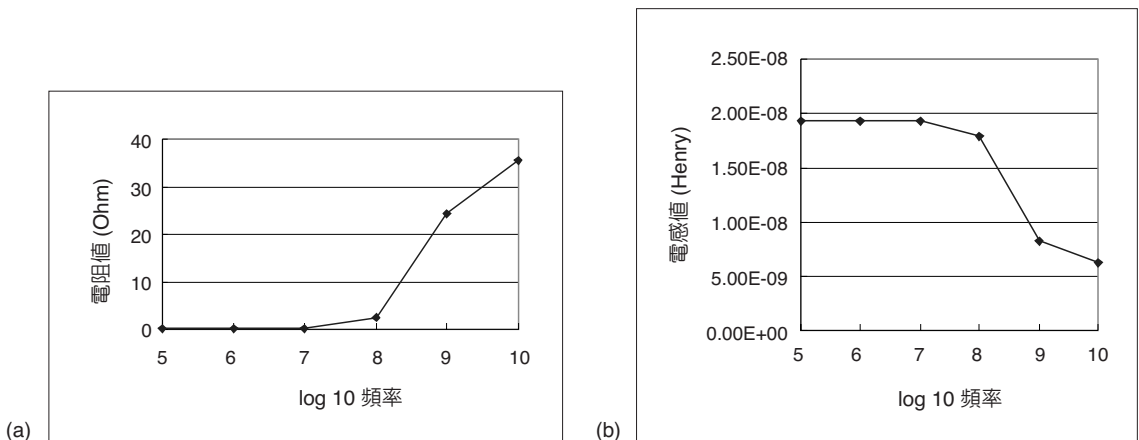


圖 12.13 螺旋電感感測器輸入訊號頻率對電阻關係圖。

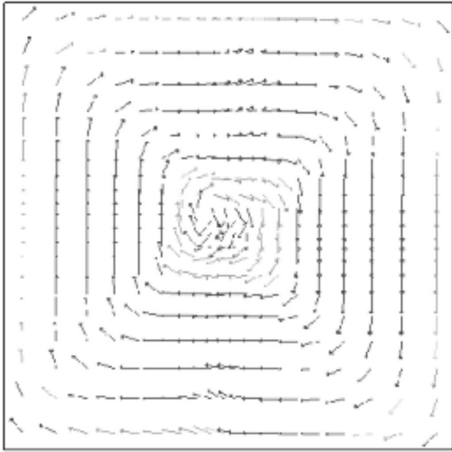


圖 12.14
鋁製平板上的電流密度 (current density) 分布。

另外若是將上例的鋁製平板去除，我們將發現當頻率升高時電感值只會小幅下降 (圖 12.15(a))，反觀由於銅導線中的表皮效應依然存在，電阻值仍會因為頻率升高而增加 (圖 12.15(b))。

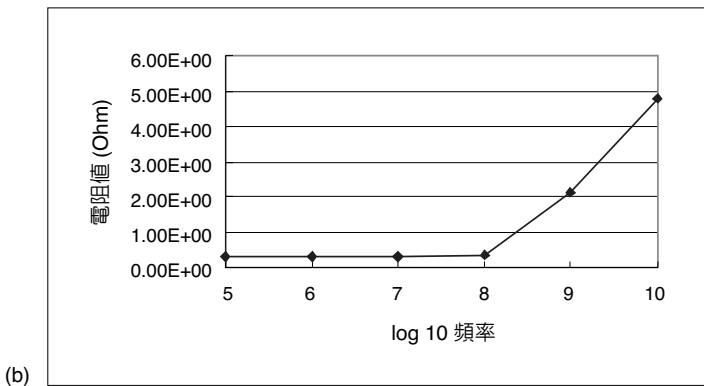
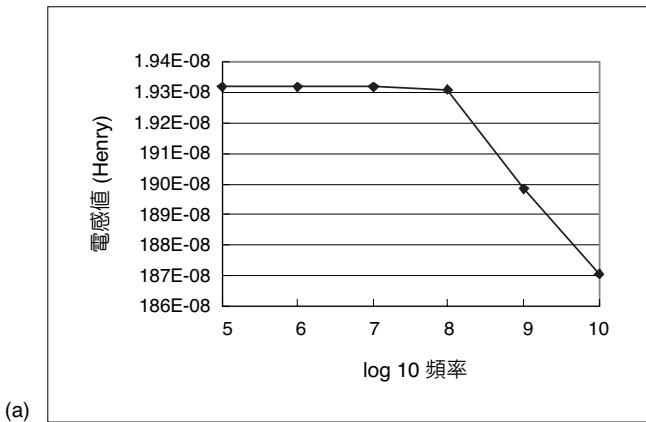


圖 12.15
去掉平板後，(a) 輸入訊號頻率對電感值關係，(b) 輸入訊號頻率對電阻值關係的模擬結果。

12.3.4 電熱固力分析⁽⁷⁾

微機電元件致動器往往都是透過機械結構的變形來達到元件作動的目的，而由於溫度變化所造成的機械變形力量非常的大，相較於其他種類的機械變形可以有較大的驅動力，因此以熱變形做為驅動元件原理的應用也是相當廣泛。接下來就以一個電壓驅動的微熱致動器做為例子，說明微機電元件在電磁、熱、機械方面的綜合模擬。

圖 12.16 係熱致動器的三維設計示意圖。此元件的基本操作原理在於設計時相同材料但結構剖面的粗細不同會有不一樣的電阻，結構剖面越細其電阻值也越大。因此當元件通以電壓差時，較細的地方會產生比粗的地方更多的焦耳熱，溫度也就高於粗的地方。圖 12.16 中的熱臂 (hot arm) 是細的地方，粗的地方則為冷臂 (cold arm)，由於熱脹冷縮的效應，使得熱臂變形較冷臂明顯，因此而造成元件會朝向冷臂的方向彎曲形變。

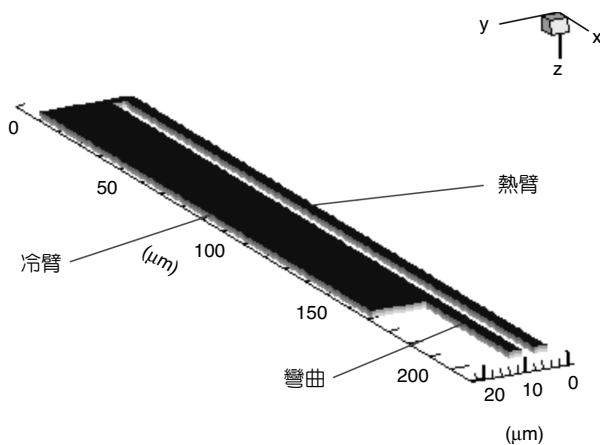
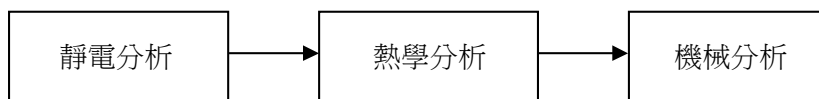


圖 12.16
熱致動器的三維設計圖。

此元件的分析流程分為三個步驟：



首先在元件的兩個端點外加電壓，再根據材料的電傳導係數計算出元件各部分電流密度的分布。接下來再以此電流密度之分布，算出因為電流密度所產生的焦耳熱，作為熱傳分析之熱產生率分布，接著根據各部位上的能量散逸計算出元件各個部位的溫度分布。圖 12.17 即是熱致動器受到焦耳熱影響後的溫度分布情形。

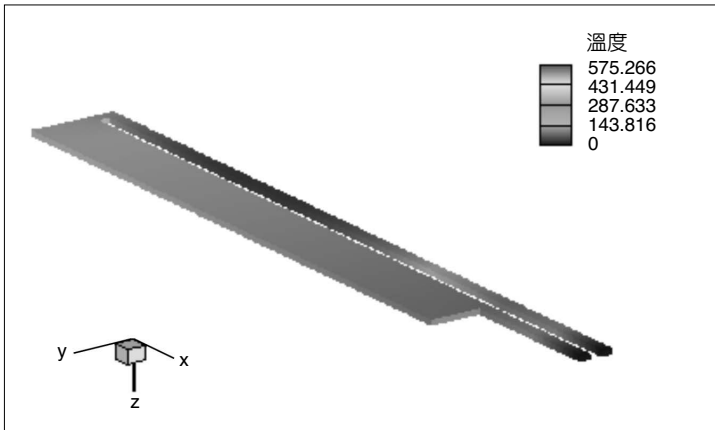


圖 12.17
對元件施加電壓差後各部位的溫度分布情形。

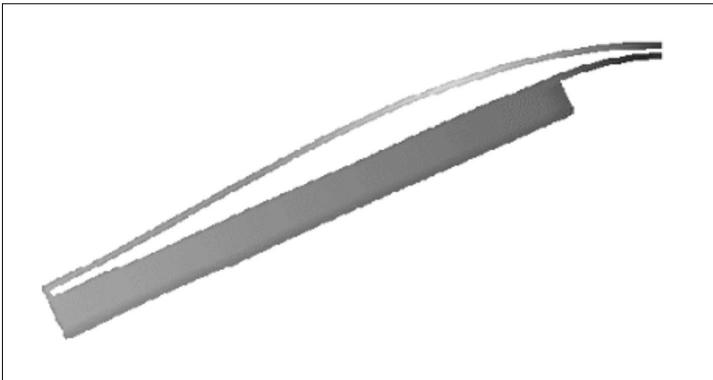


圖 12.18
熱致動器變形的情形。

最後再根據計算出來的溫度分布，以及材料的熱膨脹係數算出因為熱膨脹所造成材料彎曲的情況 (圖 12.18)。

12.3.5 壓阻特性分析

當壓阻 (piezoresistive) 材料遭受到外力產生形變，造成原子位置的變動，使得材料的能帶圖產生些微的變動，若此時材料受到外加電場，傳導帶 (conduction band) 內的情形與原來未遭受外力時不一樣，因而造成材料的電阻係數產生變化。一般來說，晶格之形變將造成某些方向的電阻係數增加，或某些方向的電阻係數減少。一般材料的歐姆定律可以表示為：

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \rho \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{bmatrix} \quad (12.1)$$

加入壓阻 (piezoresistive) 的現象，可將歐姆定律修正為⁽⁸⁾：

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \rho \begin{bmatrix} 1+d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{12} & 1+d_{22} & d_{23} \\ d_{13} & d_{23} & 1+d_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{bmatrix} \quad (12.2)$$

$$\begin{bmatrix} d_{11} \\ d_{22} \\ d_{33} \\ d_{13} \\ d_{23} \\ d_{12} \end{bmatrix} = \rho \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (12.3)$$

其中式 (12.3) 就是當壓阻材料受到外力後，對電場所產生的修正項。 σ_{11} 、 σ_{22} 、 σ_{33} 為正向應力， τ_{13} 、 τ_{23} 、 τ_{12} 為剪應力。

以下就以 Motorola 公司壓力計中的壓阻材料應用⁽⁹⁾ 做為模擬分析的例子 (X-ducer)。圖 12.19 為 Motorola 壓力計的二維示意圖。圖中壓阻材料以斜線表示，其長軸為座標 1 方向，短軸為座標 2 方向，高度方向為座標 3 方向。由圖中可以很明顯看出電流只有在座標 1 (J_1) 方向流動，因此 $J_2 = J_3 = 0$ ，而且由於 X-ducer (即壓阻機構) 是擺在壓力計上端薄膜邊界的附近，壓阻幾乎沒有高度方向的受力與變形，所以其 σ_{33} 、 τ_{23} 與 τ_{13} 都近似於零。

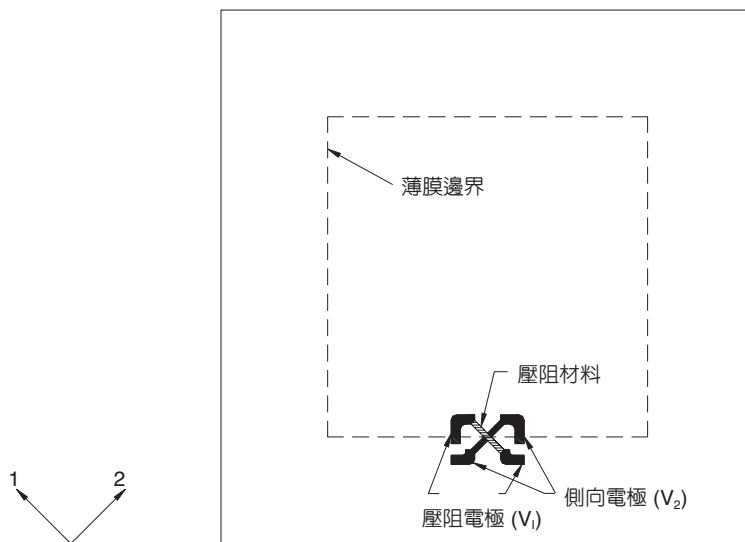
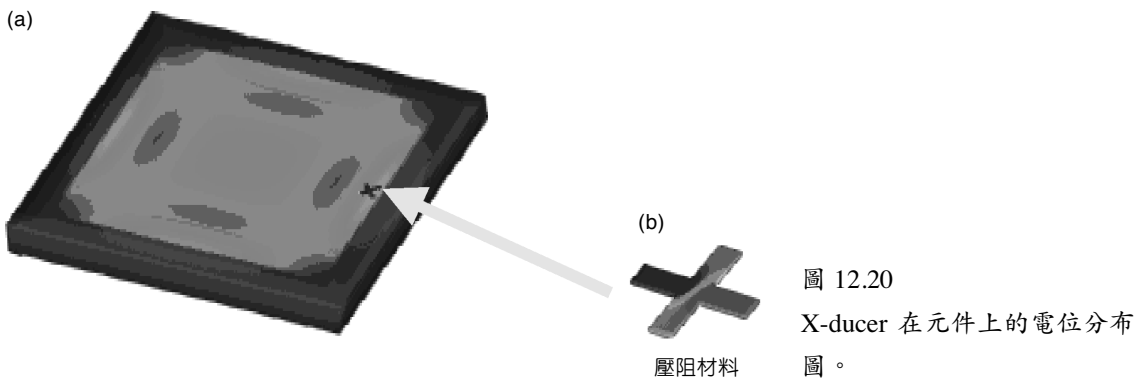


圖 12.19 Motorola 壓力計二維示意圖。

因此根據壓阻方程式，其電場的大小可以寫成

$$\begin{aligned} E_1 &= \rho(1 + \pi_{11} \cdot \sigma_{11} + \pi_{12} \cdot \sigma_{22})J_1 \\ E_2 &= \rho \cdot \pi_{44} \cdot \tau_{12} \cdot J_1 \\ E_3 &= 0 \end{aligned} \quad (12.4)$$

由此方程式可以看出，我們只要給定特定的電壓 V_1 ，並藉由量測 V_2 ，即可經過轉換求出感應到的壓力差。由於在製作的過程當中，壓阻的位置會因為製程的微影誤差，使得壓阻無法正好在薄膜邊緣，這也將會影響到感測計的敏感度，一般來說，製程越接近薄膜的邊緣，敏感度也會越高。圖 12.20(a) 為壓力計整體受到外在壓力差後應力的分布情形，而圖 12.20(b) 則是 X-ducer 電位 (electric potential) 的分布圖。



12.3.6 壓電分析⁽¹⁰⁾

近年來隨著材料加工技術的快速發展，許多元件的設計都朝著微小的外形進行研發，而壓電材料相較於其他可控制材料而言，有著質量輕、體積小、反應快速靈敏等優點，因此應用非常的廣泛。在微機電研究領域中，亦有頗多研究者開發相容之壓電材料製程應用於相關元件中。所謂的壓電材料係指某物質具有可以將機械能與電能做互相轉換的效應，圖 12.21 及圖 12.22 可作一扼要說明。

如圖所示，壓電材料被施加應力時，材料表面會產生電荷，此即為正壓電效應；反之，若對壓電材料施以外加電壓時，則會使該壓電材料產生應變，即為逆壓電效應。事實上某一材料是否為壓電材料，係取決於該材料是否具有極化性質，因為具有極化性質的材料，才會在受到電場作用時產生應力或應變之變化。在忽略材料的磁、熱效應及遲滯的情況下，可以將上列的敘述轉換成下列線性方程式

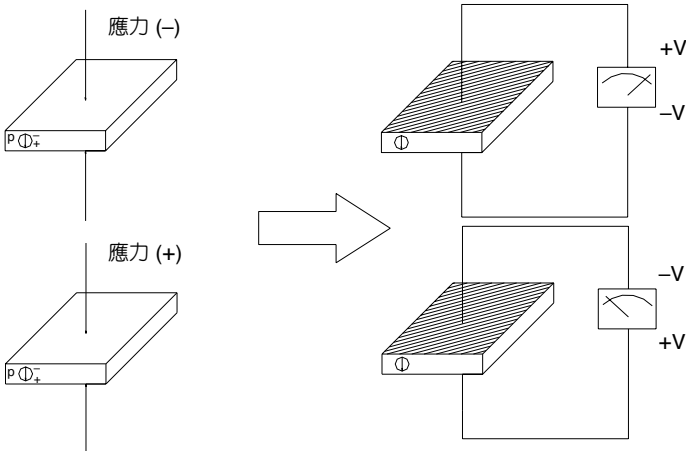


圖 12.21
正壓電效應。

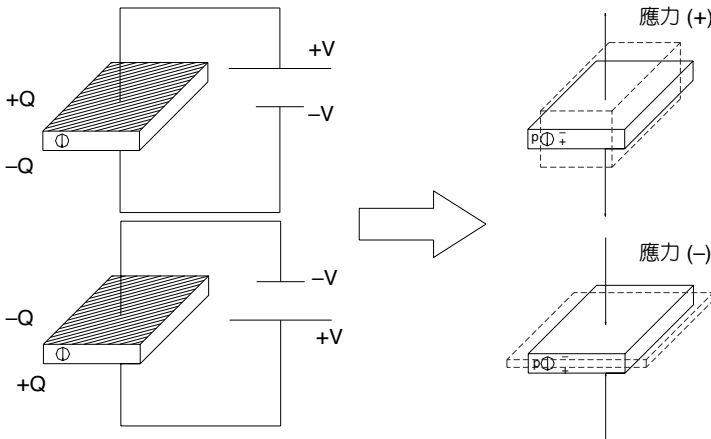


圖 12.22
逆壓電效應。

$$S = Se \cdot T + dt \cdot E \tag{12.5}$$

$$D = d \cdot T + \epsilon T \cdot E \tag{12.6}$$

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Se_{11} & Se_{12} & Se_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ Se_{12} & Se_{11} & Se_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ Se_{13} & Se_{13} & Se_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & Se_{44} & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Se_{44} & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Se_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \epsilon T_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & \epsilon T_{11} & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \epsilon T_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \tag{12.7}$$

其中 Se 是在電場固定時的彈性柔順常數 (elastic compliance constant)， ϵT 是在應力固定時的介電常數 (dielectric constant)， d 是壓電常數 (piezoelectric constant)。

一般來說，為了使壓電材料使用方便，會利用各種製程技術突顯某單一方向的壓電特性，使得材料在施以外加電壓時，只在單一方向有明顯的形變。

圖 12.23 即為同一種壓電材料在受到不同的外加電壓之下，軸向長度的變化情形，由圖中可以明顯的發現，在外加電壓增大時，軸向長度的變化量也會增加。

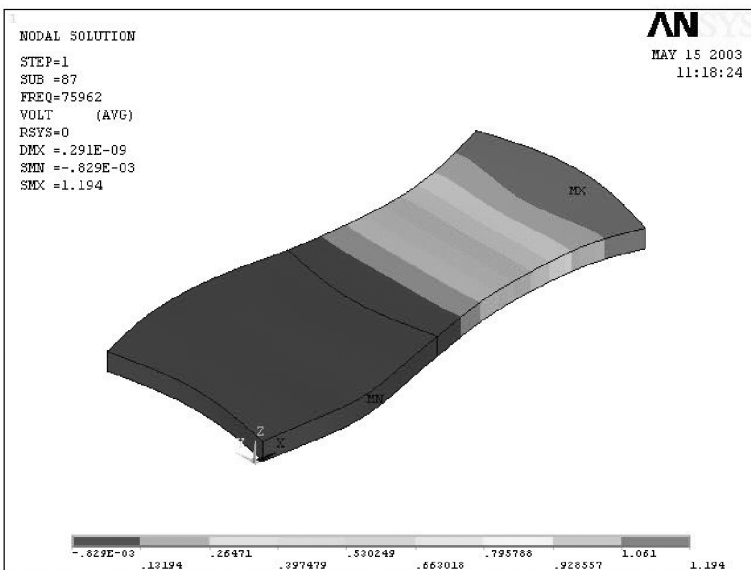
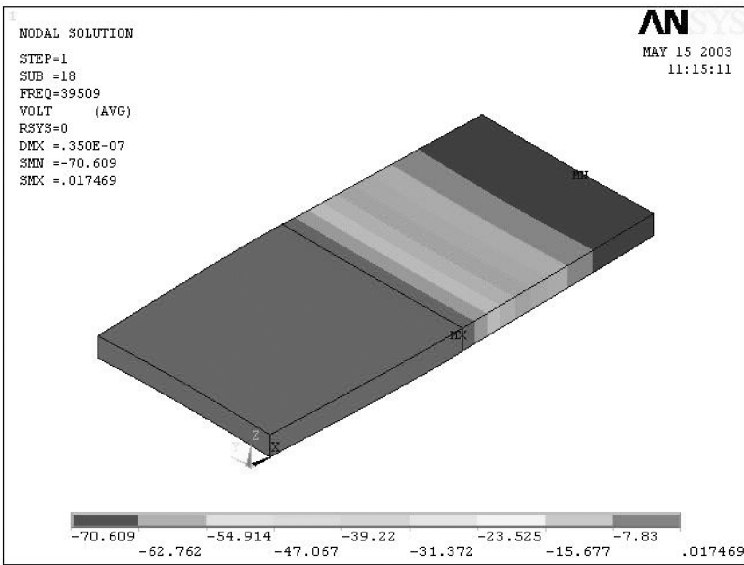


圖 12.23
壓電材料分別在第一模態與第二模態時的軸向變化圖。

12.3.7 封裝模擬⁽¹⁾

微機電元件的封裝處理與電子電路晶片的封裝處理有著非常顯著的不同。一般的電子電路晶片封裝只是為了能隔絕外界的電磁干擾，提供接腳以供外部電路連結，以及提供足夠的散熱能力即可，但是微機電元件的封裝，除了需要注意以上幾點之外，也必須針對元件的功能，作其他更細部、特殊的考量。例如某些振盪元件 (resonant device) 就與電路封裝要求不同，振盪元件需要真空封裝才不會因為阻尼 (damping) 的原因對共振現象造成影響。

因此封裝是相當重要的過程，不然在封裝時，因為溫度、外力等其他因素的影響，造成微機電結構的變化，甚至產生材料疲勞，導致元件效能的退化，這樣之前的設計就前功盡棄了。通常微機電元件的封裝處理過程，就成為此元件是否能商品化最重要的關鍵。不過一般來說，封裝是屬於高度的商業機密，因此學術界在封裝上面的研究可以說是少之又少。

圖 12.24 為微機電元件封裝的三維示意圖，圖中右上角之小方塊即為微機電元件，在封裝過程中由於溫度會產生變化，因此整體材料將會產生熱變形，而經由封裝整體的網格化 (圖 12.25) 後，可以根據各材料參數模擬分析求得整體的熱應變，再反推微機電元件在封裝過程當中受到熱變形的情況 (圖 12.26)。

12.3.8 微流體分析

微機電在流體方面的應用相當地廣泛，常見的應用如微通道 (channel)、微幫浦 (pump)、微閥及微噴嘴等。流體數值分析 (computational fluidic dynamics, CFD，或稱計算流體力學) 的研究在近二十年來受到全世界重視。以微流體而言，由於尺度因素的關係，大多

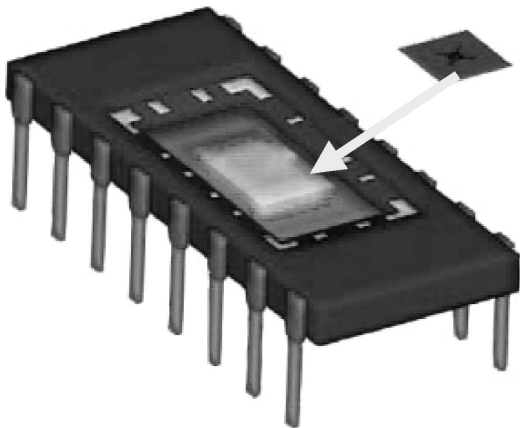


圖 12.24 微機電元件封裝示意圖。

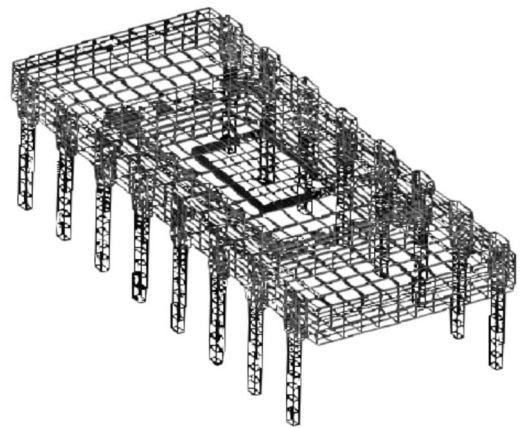


圖 12.25 經過網格化分析的封裝結構。

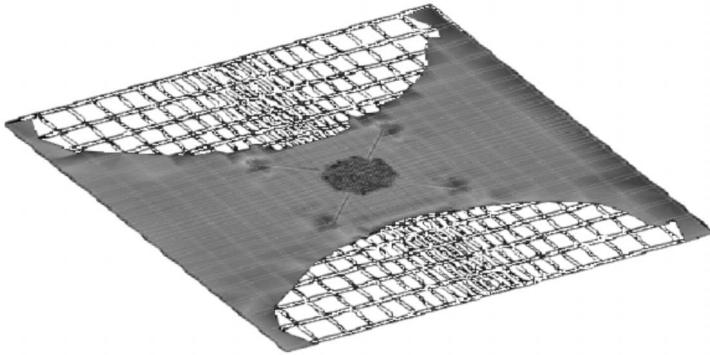


圖 12.26
微機電元件封裝過程中熱應力分布圖。

屬於層流 (laminar flow) 的範疇。計算流體力學所依據最基本方程式分別敘述三項基本的物理守恆定律及熱力學中的狀態方程式 (equation of state)⁽¹²⁾。

$$\text{質量守恆：} \partial \rho / \partial t + (\nabla \cdot \rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\text{動量守恆：} \partial (\rho \mathbf{v}) / \partial t + (\nabla \cdot \rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla P + (\nabla \tau) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}$$

$$\text{能量守恆：} (C_p \partial \rho T / \partial t + \mathbf{v} \cdot C_p \nabla \rho T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + G$$

$$\text{狀態方程式：} P = \rho R T$$

其中 ρ 是流體的密度， \mathbf{v} 是流體的速度， P 是壓力， τ 是剪應力 (shear stress)， $\rho \mathbf{g} + \mathbf{F}$ 是體力 (body force)， C_p 是定壓比熱， T 是溫度， G 是熱產生率。

此外對於流體密度 ρ 又可分為不可壓縮流 ($\rho = \text{constant}$) 及可壓縮流 ($\rho = \rho(T)$)，此時溫度變化會造成浮力，也會造成流體的流動。一般情形下，只要此液體溫度還離其沸點很遠，壓力對流體密度的影響是微乎其微，因此通常都不考慮其影響。流體的紐森數 (Knudsen number, Kn) 也要基於連續流體力學的假設，若是 Kn 太大則此流體不再是連續流體，而是屬於分子動力學 (molecular dynamics) 的領域，此時上述四項方程式便不再適用 (見圖 12.27)。不過在微機電多數的應用情形下 (正常一大氣壓下或液態)， Kn 都遠小於 1，因此傳統 CFD 的套裝軟體大多皆能適用。紐森數的定義為

$$Kn = \frac{\lambda}{L} \quad (12.8)$$

其中 λ 為流體平均自由路徑 (mean free path)， L 為流道的特徵長度。

當溫度因素很重要，或是管內流體溫度與管外溫度差距太大時，也要考慮流體在流管中熱對流以及與管壁間產生的熱傳導現象，因此目前許多流體力學的計算軟體皆能將熱對流等效應用流體力學的計算方式得出，並能接受熱傳導的邊界條件。在流體方面的應用除

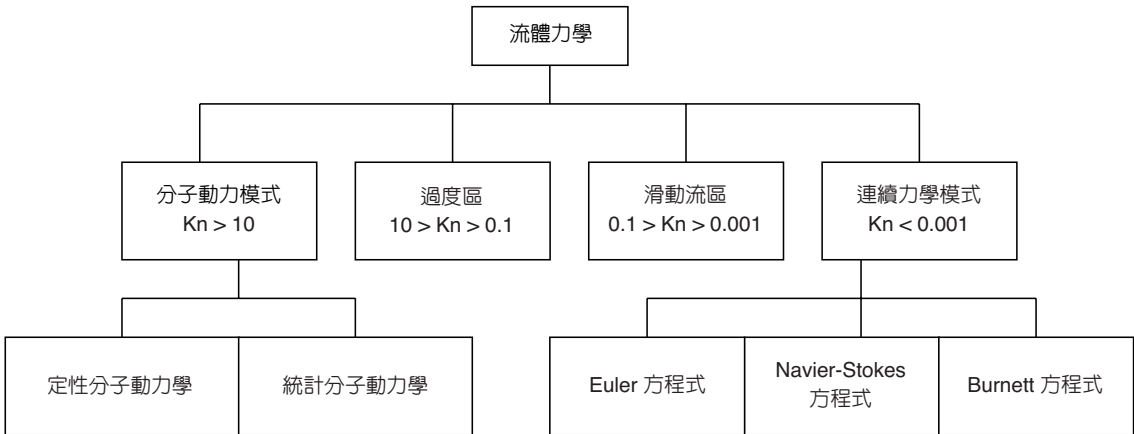


圖 12.27 依紐森數 (Kn) 分類之各種不同性質流體的領域⁽¹³⁾。

了一般流體流動的情況之外，現在也有很多生物、化學方面的應用，此時需要考慮不同成分之流體混和或產生反應之分析，或帶電離子（電解質溶液）等靜電分析，必須結合電磁學等方面的模擬。

12.3.9 電解質溶液、帶電溶質的分析

一般帶電溶質在管道中流動，是利用其外加電場，使流道中的帶電粒子產生遷移速度造成流動現象，此種現象稱為電泳 (electrophoresis)，如圖 12.28 所示，其遷移速度 $V_{ep} = U_{ep} \cdot E$ 。其中 U_{ep} 是離子在溶液中的移動率 (mobility)， E 為外加電場。

第二種現象稱為電滲透 (electroosmosis) (圖 12.29)，此現象的原理描述如下：電解液產生極化現象吸附在管壁上面，使得電解液在管壁附近產生雙層 (double layer) 結構，又由於外加電場的關係，帶動這些電荷流動，再利用流體本身的黏滯力，帶動管中所有的流體一起移動。

接下來以一個樣品取樣蒐集之「非擠縮式 (unpinched)」及「擠縮式 (pinched channel)」

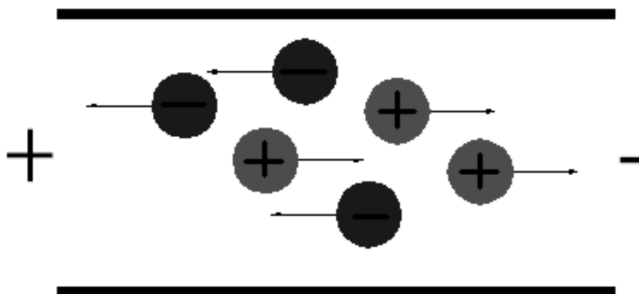


圖 12.28 電泳原理的示意圖。

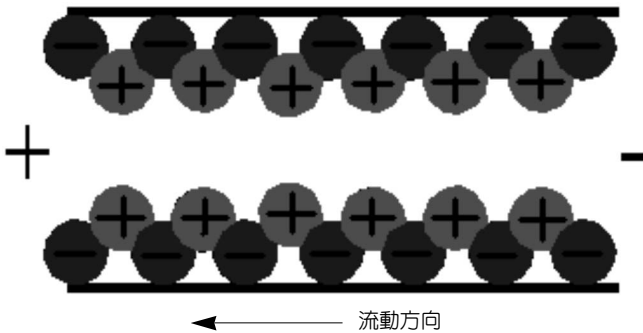


圖 12.29
電滲透原理示意圖。

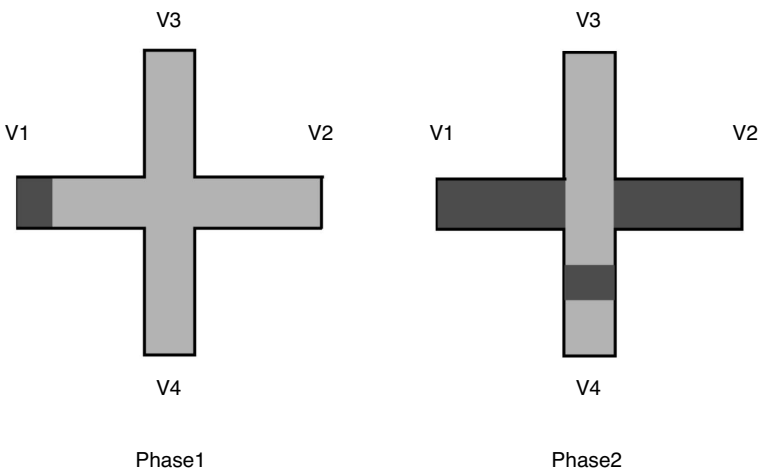


圖 12.30
一般切換流道的模型。

設計做為例子⁽¹⁴⁾。此流道設計為十字型 (圖 12.30)，液體由 V_1 端輸入，在 V_4 端採集樣本，在非擠縮式切換流道的情況下 (表 12.1)，一開始 V_1 端電壓為 0 V， V_2 端電壓為 18 V， V_3 與 V_4 端皆為 9 V，因此在 phase1 時液體會因為 V_1 、 V_2 端的電壓差帶動，由 V_1 流到 V_2 ，經過一段時間後，將 V_1 、 V_2 端變為 18 V， V_3 改為 0 V， V_4 改為 18 V (即 phase 2)，此時正在流道交叉口處的液體樣本則會因為 V_3 、 V_4 端的電壓差，流往 V_4 端，如圖 12.30 之 phase2 所示。

非擠縮式切換流道在 phase1 時由於電位能在管中分布相當均勻，所以在 phase1 時液體樣本會因擴散效應 (diffusion effect) 堆積在中間交叉處，因此造成在 phase2 時會採集到過多的樣本。為了改善這種情形，我們將 phase1 改變為 $V_3 = V_4 = 0$ V (表 12.2)，而為了使液體

表 12.1 非擠縮式切換流道的操作狀態表。

	V_1	V_2	V_3	V_4	持續時間
Phase1	0 V	18 V	9 V	9 V	0.6 sec
Phase2	18 V	18 V	0 V	18 V	0.6 sec

表 12.2 擠縮式切換流道的操作狀態表。

	V_1	V_2	V_3	V_4	持續時間
Phase1	0 V	18 V	0 V	0 V	0.6 sec
Phase2	18 V	18 V	0 V	18 V	0.6 sec

樣本由 V_1 端流向 V_2 端，因此 V_1 、 V_2 還是保持不變，此時由於流道內的電位能分布不均勻，液體也會由 V_3 及 V_4 端流至 V_2 端，因此當 phase1 結束時，非但不會有任何液體樣本堆積在流道交叉處，且在交叉處的樣本 (species) 會因擠縮的效應而較為細長，因此更易採集較小的樣本。圖 12.31 顯示當 phase1 結束時，擠縮式切換流道及非擠縮式切換流道內液體樣本的分佈情形。

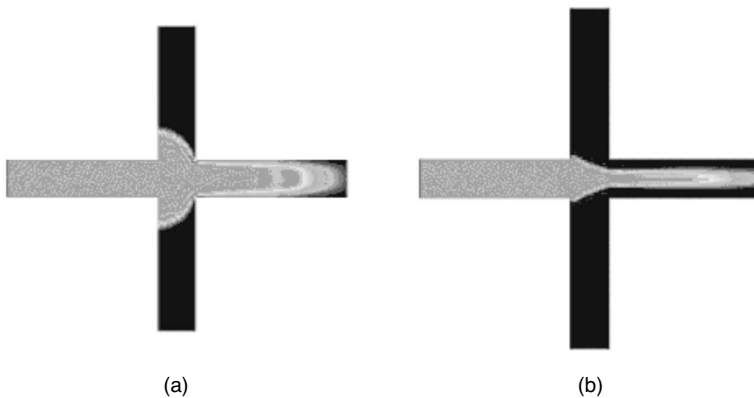


圖 12.31

兩種流道內液體樣本的分佈情形，(a) 無擠縮效應，(b) 施加擠縮效應。

12.3.10 微液滴分析

隨著噴墨技術的解析度要求越來越高，以及醫療器材要求越來越精密，利用微機電的元件來製作液體噴頭也是非常重要的應用。目前使用在電腦週邊以及其他應用研究的 drop on demand (DOD) 噴墨頭主要有壓電式噴墨列印頭及熱氣泡式噴墨列印頭兩種。壓電式噴墨頭有下列幾個優點⁽¹⁵⁾：

- (1) 由於壓電機構反應速度較熱傳導快，列印速度比較有提升的空間。
- (2) 壓電噴墨頭不用將液體加溫，不會破壞液體的化學成分，因此也可以用於生物溶液與藥劑方面的應用。
- (3) 壓電式的噴墨頭不存在熱應力破壞現象，因此生命週期較長。
- (4) 液滴大小較容易控制，可以大幅提升列印的品質。

因此以下就以壓電材料作為驅動的 DOD 噴墨頭液滴模擬部分作為範例。此噴墨頭的基

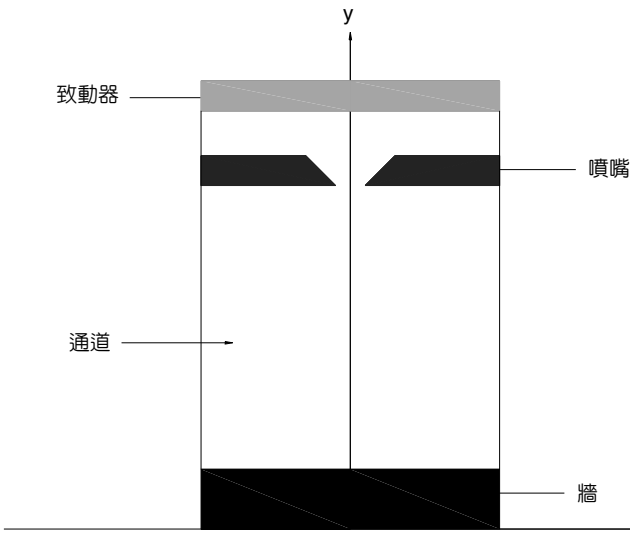


圖 12.32
噴墨頭元件的二維示意圖⁽¹⁵⁾。

本操作原理為透過給定壓電致動層變形量的大小，使流道內壓力產生變化，因而擠壓裡面的液體向外溢出，一開始液體由於受到噴嘴 (nozzle) 的表面張力之束縛，因此只在表面上形成液滴，不會直接滴下來，直到致動器擠壓力超過表面張力的負荷，此時液滴才開始往下掉。

此模擬分析考慮了流體的黏滯力、表面張力，以及通道 (channel) 內表面粗度之關係，而分析出液滴噴出過程中液滴密度、壓力以及速度的動態關係。圖 12.32 為噴墨頭元件的二維示意圖。

接下來只要再將各元件的幾何大小關係定義清楚，即可利用模擬軟體模擬出液滴噴出過程中的各種動態關係。顏色越偏向紅色表示速度越大，越偏向藍色表示速度越小。圖 12.33 顯示液滴從形成到滴到牆上完整的速度模擬情形。

12.4 系統階層模擬分析技術

12.4.1 基本介紹

微機電系統之設計有相當多的考慮因素，基本上可把它分成外在因素與內在因素兩大類⁽¹³⁾。如圖 12.34 所示⁽¹⁶⁾，外在因素包括了市場分析、競爭者、技術層級以及製造方面考量等因素；內在因素則包括了最重要的創新設計，以及如何落實該設計所需之分析、模擬、試做與驗證等。通常一個微機電系統之設計牽涉到數個領域之整合，整個系統是否能夠達到所需之性能要求，需要一個有效的系統階層設計評估。整個系統的優劣，必須仰賴許多次系統間之設計匹配，絕非對單一次系統作最佳化設計即可。

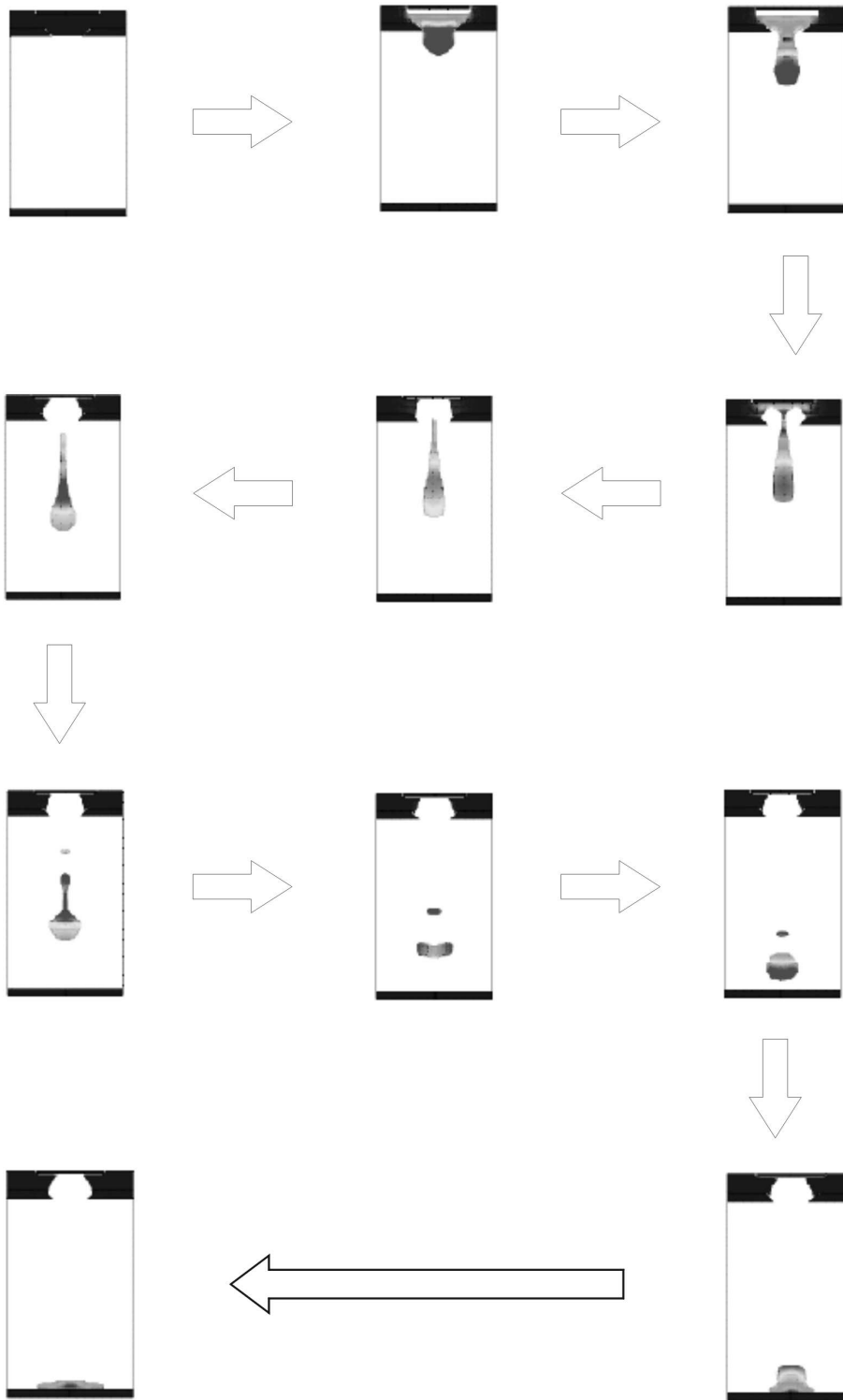


圖 12.33
液滴的速度模擬情形。

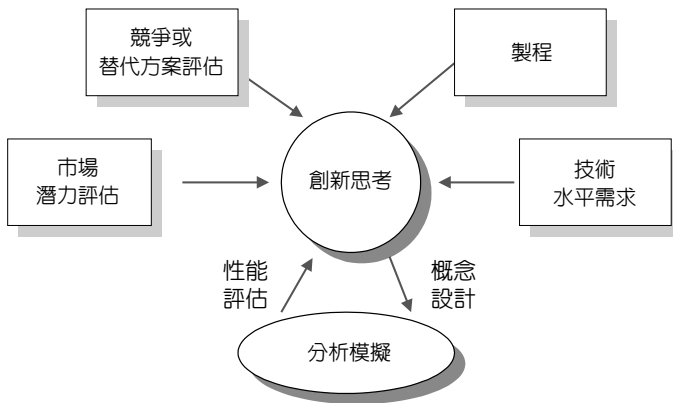


圖 12.34

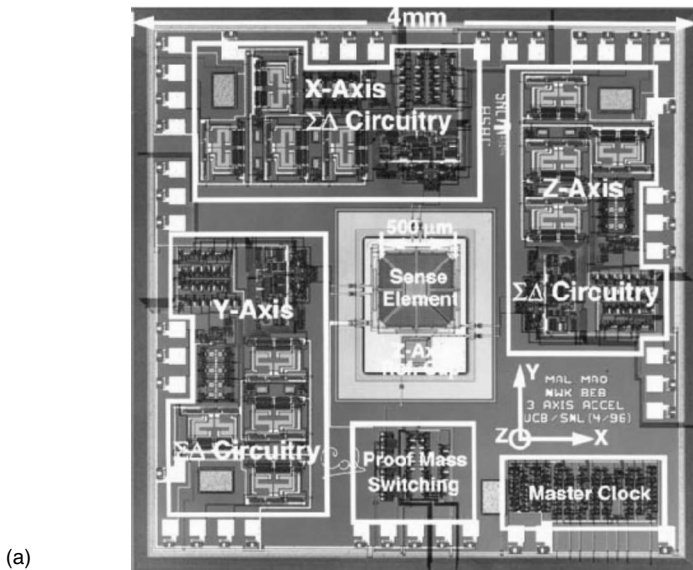
微機電系統設計需要考慮的要素。

以面型微加工之力回授加速規為例，如圖 12.35(a) 所示，它可粗分為微機電與微電子兩大部分。若往下細分，微機電部分可再分成機械結構、感測部分及致動部分等，而微電子部分又可以分成差分、放大、濾波及控制電路等。另外，一個典型的生醫檢測晶片如圖 12.35(b) 所示，是由許多生化檢測以及微流體次系統，如酸鹼度偵測、加熱器、閥、幫浦及管路等所整合而成。而這些次系統又是整合了許多元件而成。很明顯的，某一部分設計得非常好並不保證足以提升系統的整體效能。任何一部份設計得不完善，均將衝擊到產品的最終性能。但是從另一個角度觀察，若某一次系統之性能無法做有效提升或是其所耗成本過大，仍可利用改善其他次系統的性能，達到提升整體產能與性能之目的。

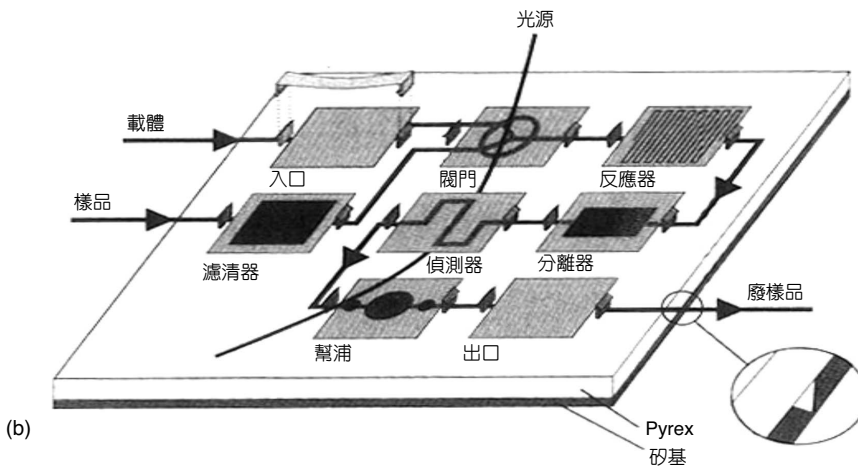
再以力回授加速規為例，它的功用是將外界的加速度訊號轉成電壓訊號輸出。當然微機電部分對提升性能有支配性的影響，若其設計與製作受限於製程設備而使得整個加速規之性能無法滿足時，是否要更改微機電設計或更新製程設備則有待商榷。因為這可能會大幅度的提升成本而喪失競爭力。比較可行的方式是經由整體評估，找出替代的方法。通常上述問題可以藉由改變後續之電子電路設計而獲得解決，它的成本較低且更具自由度。

上述的例子說明了系統階層設計的重要性，如果沒有系統階層之規劃，元件的設計者很容易將其注意力完全侷限在自己的部分，而忽略了元件與元件間之相互作用。對於如何整合各部門之設計以達成最後的目標將是一件很困難的事。本節的目的即在於深入討論微機電「系統」之設計、分析與模擬方法，並對現今微機電「系統」設計工具作一概略介紹。

一般而言，系統階層模型之建立仰賴的是對基本物理與工程定律的靈活應用，以及對微機電各次系統之交互影響與因果關係的確實掌握，並以簡單的聯立常微分方程式表示。然而，即使是最簡單的模型，對於複雜的系統而言，例如機械場與靜電場之耦合問題，即便要獲得一簡單的解析解亦屬不易⁽¹⁷⁻²⁰⁾。因此許多的電腦輔助設計 (CAD) 工具便應運而生。若能有效的應用 CAD 工具，則可以快速而有效的獲得系統階層問題之解，進而迅速的決定微機電系統之初始基本設計 (initial baseline design)，並在後續之設計變更 (design iteration) 過程之中，持續的扮演各次系統間仲裁與協調之角色。



(a)



(b)

圖 12.35

(a) 一個三軸微加速度計之結構圖，它包含了微機電系統與電子電路等部分⁽¹⁶⁾，(b) 一個生醫晶片是由許多生醫感測以及微流體系統組成⁽⁵⁴⁾。

儘管今日 CAD 在微機電系統設計上已經取代了相當可觀的人力，它仍然無法獨立的創建系統階層模型。有關建立模型部分，仍然仰賴設計者豐富的學識與認知。一個良好的系統階層模型對於微機電系統之性能與成本有著決定性的影響^(1,3,22)。一般而言，優良的微機電系統模型需具備以下幾個條件：(1) 它必須是可解析的，(2) 它必須能夠清楚的表現出正確之因果關係，(3) 它的結構必須有充分的自由度，可以隨著設計的進展而加以修正。

另一方面，基於過去積體電路以及機械設計之發展所累積的理論方法，也在微機電系統設計上引起了相當熱烈的討論。由於微機電系統身兼電機與機械二者之特性，通用之數位電路的高階設計或是機械工程之同步設計，何種方式才是真正契合微機電系統設計，是一個相當重要的課題。在本節之中我們也會詳細介紹。

在本節中將依序對上述之重要議題逐一討論。首先在 12.4.2 對於微機電系統設計理論方面的研究提出概略性之說明。接著於 12.4.3 對系統階層分析模擬的步驟與流程作詳細的說明。為了能充分的反映元件詳細的設計，必須能將其設計內容引進系統模型之中，然而過度繁瑣的細節會降低一個系統模型之可用性。因此如何對元件或物理模型作合理的簡化是一個重要的工作。此模型簡化與整合將於 12.4.4 介紹。緊接著在 12.4.5 對幾種目前較受肯定的系統分析模擬方法作討論，一些相關的系統分析軟體則於 12.4.6 介紹。

12.4.2 微機電系統設計與設計合成理論

有鑒於微機電研究的蓬勃發展，一個媲美 IC 產業的新型工業似乎儼然成型。人們開始關心微機電系統從實驗室的純粹學術研究到工業生產之間如何銜接。簡而言之，如何將學界在實驗室內展示出來之可行性，以一個低成本且快速的方式，透過工業生產，將其實際的應用在生活之中。正確而有效的設計理論被認為在這之中扮演著舉足輕重的地位。在 1995 年美國國家科學發展基金會 (National Science Foundation, NSF) 舉辦了一系列微機電系統設計方法相關的研討會。其中 95 年底在美國加州理工學院所舉辦的結構化微機電系統設計方法最具代表性。在該研討會中，學者試圖從過去 IC 設計製作之成功經驗中，尋找出微機電系統設計的正確途徑⁽²³⁻²⁶⁾。

學者在該研討會中指出，一個各方採用的統一格式是 IC 工業能夠成功發展的基本。但真正促使 IC 工業蓬勃發展的主要因素，則是它的設計乃是以功能設計為導向，在做 IC 設計時只要考慮到電路布局，並不特別需要在設計過程中考慮到製造上的細節因素。但如何確保一個可製造 (manufacturable) 的設計則必須仰賴一些規範及工具的協助。從高階抽象的電路設計到詳細的實際物理布局以至於最後之實際成品的過程中，不斷的有自動化的工具協助驗證設計之合理性。例如，經過多年之討論，各方面討論將光罩幾何形狀轉換的檔案形式—加州理工中介格式 (Caltech intermediate format, CIF) 即是一證明。假使一個 CIF 檔能夠符合所有幾何方面的設計規範，則該設計必是可製造的。因此積體電路設計與布局的工程師在執行其設計工作時，一般而言，並不需要考慮到詳細的製程細節。另一方面，電路設計以功能為導向，並不特別考慮其幾何形狀，因此一般均以直角式的曼哈頓 (Manhattan) 型式為主。學者認為設計與製造脫勾，以及在設計過程中完全以性能考量，不必特別考慮幾何形狀及結構安全的兩大特性，正是積體電路設計如此成功的主要原因⁽²⁴⁾。

從 CIF 的發展觀察，一個統一的介面格式至少有下列優點：

- (1) 此一介於設計與製造間之標準介面使得電腦輔助設計得以發揮，從而推動了積體電路電腦輔助設計軟體之蓬勃發展。而電腦輔助設計之成熟也加速了積體電路工業的成功，二者有著相輔相成的效果。
- (2) 學生可以在完全沒有任何製程基礎之下，學習積體電路設計；並且可以透過 CAD 的協助，立刻讓學生知道其電路設計之真實物理形狀與特性。

- (3) 代工廠可以依 CIF 格式發展其標準製程，而不需知道詳細的電路設計。
- (4) 電路設計師可利用代工廠來實現其硬體。因此設計與製造可徹底分離，電路設計公司不需維持昂貴的設備成本。而代工廠之設備也可以供給各大公司使用，以增強競爭力。

反觀機械系統之設計，上述兩項特點均不存在。機械系統設計中，結構安全考量一直處於相當關鍵的地位，但它通常是性能考慮方面的主要限制。另外，機械系統之性能通常與結構物外形息息相關，需要小心設計。除此之外，機械系統強調同步設計，需同時考慮從設計分析乃至於製造的所有因素，方可獲致最佳化⁽²⁷⁾。因此機械設計製造與電子電路設計製造似乎在其基本的方法上存在著極大的差異。微機電系統身兼機械與電機之特性，其設計方法很可能因為機械與電子間之根本性矛盾而變得相當的複雜。而建立一個有效率的微機電系統設計方法是微機電工業能夠永續發展的關鍵。然而，目前在此方面仍未獲致一結論。

由於微機電系統在機械方面的根本限制，以及諸多製造上的不確定因素，例如蝕刻率、負載效應、角落之過度蝕刻，甚至於沉積薄膜厚度之不確定性等，目前要產生一個性能最佳化設計，經常需要仰賴試作過程。此舉必須建立在設計者與製造者合一之情形，或設計者必須擁有相當深入之製程知識方可勝任。但此項條件並不利於微機電系統之發展，因此許多學者建議發展有系統的方法，建立誤差影響評估矩陣，以系統化的角度評估設計參數與製程不確定性之交互關係。學者 Antonsson 教授對於微機電之最佳化設計方面有深入的研究⁽²³⁾。他認為如何著手一項強健的設計以抵抗諸多製程上的不確定性來保持性能著手的最佳化，是一個相當重要的課題。他以蝕刻率之不確定性為例，發展出蝕刻模擬程式以作為最佳設計之參考⁽²⁸⁾。如圖 12.36 所示，最左邊是我們希望的蝕刻結果，但若是製程參數控制不當，則底切或者是角落之過度蝕刻效應可使得結果完全走樣。另外，整體的微機電結構設計大致上可分成光罩 (mask) 設計、結構形狀 (shape) 設計以及功能 (function) 設計三大階段，如圖 12.37 所示。他認為目前之微機電設計多偏重於光罩—形狀—功能方向之設計分析，但此設計分析僅能被動的預測該設計之最後功能，而無法主動的提出功能需求，而

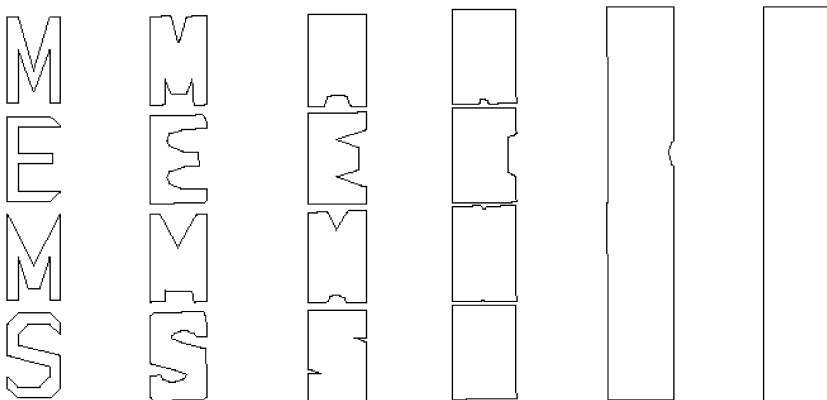


圖 12.36

加州理工學院之非等向蝕刻模擬結果，它顯示了蝕刻結果與製程不確定性間有極大之關聯。

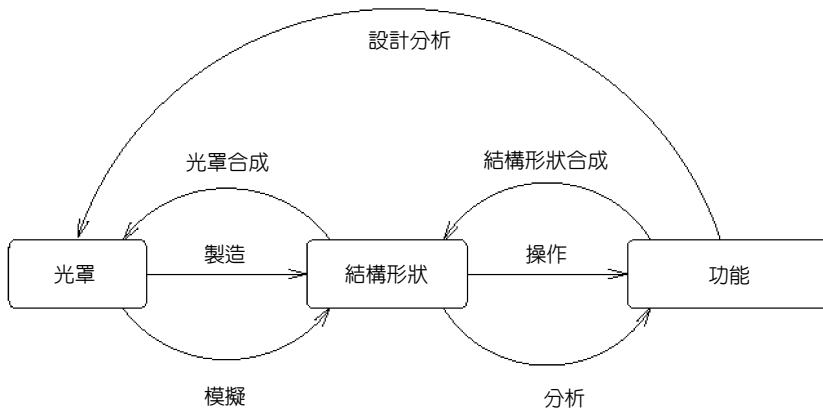


圖 12.37
工程設計分析 (順向)
與設計合成 (逆向) 流
程。

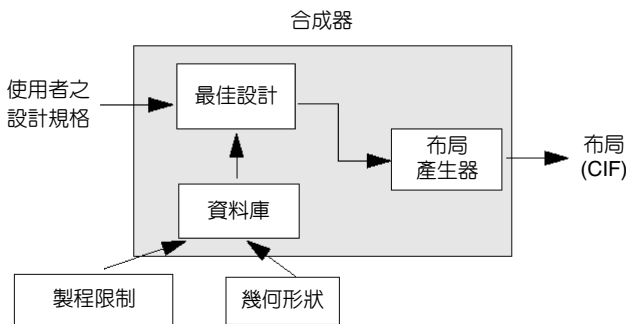


圖 12.38
布局設計合成流程⁽²⁹⁾。

且若不考慮製程之不確定性，該分析工作不一定能夠確保最後之設計功能。若能從設計合成方向思考，由功能—外型—光罩方向著手，以最終所欲之系統性能為考慮的焦點，考慮製程不確定性，設計出較強健之結構外型乃至於光罩形狀，將會是較合理的做法。此論點及做法與機械設計之逆向工程極為類似。另外，學者 Fedder 亦針對梳狀致動 (comb driven) 微加速度計之設計布局，嘗試著以一個非線性之最佳化問題模擬之，來發展自動化之布局系統，其示意圖如圖 12.38 所示⁽²⁹⁾。

對於外形最佳化設計，學者 Ye 等人曾對梳狀致動器之形狀以邊界元素法 (boundary element method, BEM) 分析，以便獲致效率最佳化之幾何形狀⁽³⁰⁾。Fedder 等人亦對等效電路 (equivalent circuit) 設計方法在資料流通交換以及分析流程做一改良，期望能夠將一般較鬆散的等效電路微機電系統設計流程 (他稱之為不具結構性 (unstructured) 的微機電系統設計方法，見圖 12.39)，經由此改良，使其具結構性 (見圖 12.40)，因此可以較具規則程序式的方法，有系統的達成最佳化設計之目的⁽³¹⁾。

學者 Senturia 與 Annathasuresh 則針對超大型積體電路 (VLSI)、大型機械與機電系統，以及微機電系統三者，就動態特性、設計限制以及製作技術等方面做一比較，如表 12.3 所示。由於多領域耦合之故，機電系統之設計較積體電路之設計更複雜。根據比較，Senturia

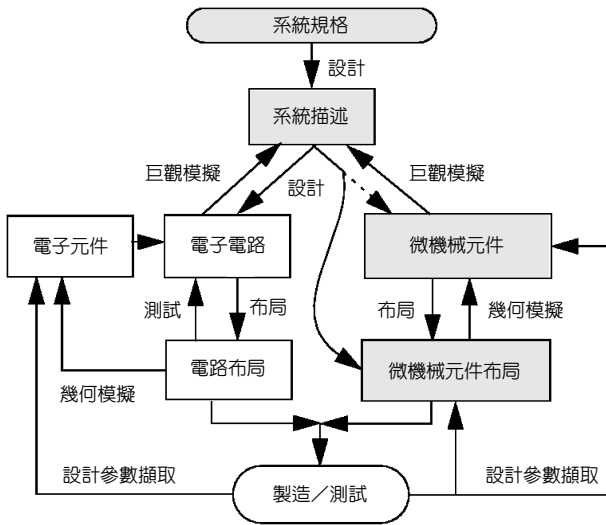


圖 12.39 非結構性微機電系統設計⁽³¹⁾。

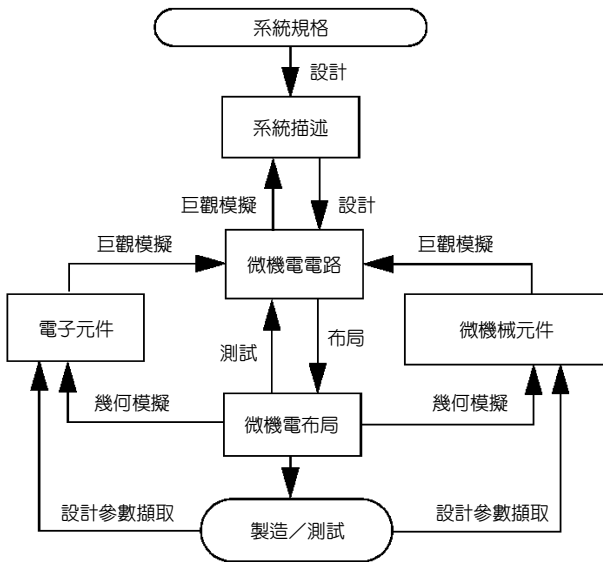


圖 12.40 結構化微機電系統設計⁽³¹⁾。

等人認為微機電系統之設計較大型機電系統有較多的限制。但從另一方面解讀，這也表示在大型機電系統無法使用的積體電路設計方式，可以有限度的被應用在微機電系統設計上⁽²⁶⁾。

12.4.3 系統階層分析模擬流程

除了設計理論外，一個合理有效的分析流程也是非常重要。然而微機電系統設計從

表 12.3 積體電路系統、大尺寸機械與機電系統，及微機電系統在各方面特性之差異⁽²⁶⁾。

	積體電路系統	大尺寸機械－機電系統	微機電系統
能量域複雜度	單能量域	多重耦合能量域	多重耦合能量域
元件功能與形狀之關係	電路元件之功能與形狀皆清楚定義	元件之形狀與功能沒有直接關係	元件之形狀與功能沒有直接關係
元件接合準則	以簡單之連結原則 (KVL 或 KCL) 連接電路元件	不存在簡單的機械元件連結原則	不存在簡單的機械元件連結原則
幾何外形之重要性	幾何形狀基本上並非主要之設計考量	幾何形狀與機械性能息息相關，特別是在結構安全或是運動部分。	與大尺寸機械－機電系統類似，但其自由度較少。
製程複雜度	以平面微影製程製作，基本上為二維製程。	擁有相當多的製造程序，包括各種三維製程。	以平面微影製程為主流，但亦擁有限之三維加工能力。

最上層的功能需求到最下層之詳細製程參數決定等諸多細節，沒有任何一個分析模型有足夠的能力將這些因素完全考慮，因此勢必要在詳細程度與宏觀程度兩方面做適當的取捨。在 1990 年代初期，學者 Senturia 教授在構思微機電電腦輔助分析系統架構的過程中，提出了四階層模擬的主張^(1,3,19)。他認為一個微機電系統之設計模擬由上而下，最好將其分成四個層次，如圖 12.41 所示分別是：系統階層、元件階層、物理階層，以及製程階層。各階層之重點各不相同，但是必須要能夠互相搭配，並且在一定的程度之下，各階層之模型能與其上下層緊密銜接並具修正能力。其中物理與製程階層，一為複雜之三維有限元素分析或是具三維外形結構之邊界元素分析，一為牽涉到熱流、擴散、化學及物理等詳細之製程模擬。二者在本質上均屬分布 (distributed) 或連續 (continuous) 系統，必須以偏微分方程描述之。因此解題之困難度甚高，需以極細緻之格點並耗費大量的計算方可達成。因此它們均缺乏靈活度，雖然準確度極高，但也無法在沒有完善的系統與元件設計分析之前，即貿然為之。

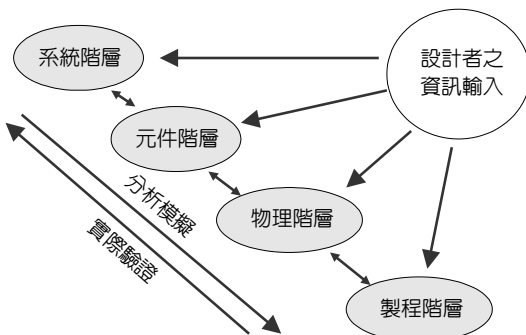


圖 12.41
微機電四階層分析架構。

系統與元件階層之分析，即是試圖以一般之基本物理定律為主體，將複雜的元件物理行為簡化成簡單的 (lumped element)，然後再以訊號流 (signal flow) 或是功率流 (power flow) 等方法，考慮各元件間之交互作用，將這些元件組成微機電系統動態模型。本質上，此二階層可以用聯立之常微分方程式描述之，並以發展得相當完善之微分方程、矩陣以及線性或非線性分析等數學工具，做進一步的運算。甚至有可能求出解析解，以清楚的引導整個微機電系統設計的發展。即便是無法獲致解析解 (通常如此)，其所花費的計算成本也較小，適合做大量之參數研究，求出經驗式以引導設計之進行。

因此，我們可以說系統階層模型即是數個元件模型經由合理的元件連結模式所構成，而如何建構合理的元件階層模型乃是最基本的要件。目前在元件階層模擬方面，一般人均已接受巨觀模型 (macro model) 的概念。一個巨觀模型顧名思義即是忽略過度詳細之資訊，僅保留其具指標性的部分而形成之簡化模型。然而，一個理想的巨觀模型必須具有下列數個要件⁽⁴⁾：

- (1) 它是一個解析的模型，而非僅是數值解。它的表示式必須能夠清楚的表明材料性質及結構物幾何尺度等設計參數對於元件或系統之影響趨勢，使設計者可以從這個解析模型之中獲得清楚之資訊。
- (2) 它必須能夠表示元件之靜態與動態特性、小訊號線性行為，甚至於大訊號之非線性行為。
- (3) 它必須能夠符合大體之元件行為，並與複雜的有限元素分析結果互相搭配，並且能夠很快速的進行計算或是運用於系統階層之模擬。
- (4) 它必須有正確的能量交換行為，若是一個守恆系統，則它必須能夠表現出能量守恆的行為，反之亦然。

至於系統或是元件階層之數學表示法，通常不外乎三種⁽³³⁾。其一是微分方程式，它能夠表示出最詳細的物理系統之動態。但它能夠使用的工具也比較少或是較無效率。其二是轉移函數表示法，它是一個相當簡便的表示方式，注重輸入／輸出間的關係。然而，它的限制也是最大，必須是線性非時變系統方可以此方式表示。然而轉移函數經系統理論和古典控制數十年之發展，已經發展出一套相當嚴謹且便利之操作，因此，一旦該系統可以用轉移函數表示，此意味著該系統模型具有較佳之可操作性，亦較有效率。其三是狀態變數表示法，此法之限制較轉移函數表示法為小，可擴展至時變與有限度的非線性，也有相當多的數學工具與法則可資運用。

一般而言，除了簡單的系統之外，很少有任何的巨觀模型能夠完全擁有上述的特性。另外，巨觀模型的產生基本上是以物理定律如力平衡、克悉合夫 (Kirchhoff) 環路或節點定律，或是能量守恆等定律及元件之組成律為著手點，以微分方程式的方式將其表現出來。然而，對於幾何形狀或是材料行為複雜的元件而言，要清晰的以上述方式得到一純解析模型幾乎是不可能的。比較可行的方式是在某一層面上必須仰賴物理階層之二維或是三維數值模擬所提供之結果，來修正巨觀模型之準確性⁽³³⁾。因此，此四階層分析模擬流程絕非一條鞭式，而是在其中有相當程度的耦合。在微機電系統中，它經常包括了微機電、類比電

路，甚至數位電路等次系統，各次系統之設計均或多或少顯示了這種階層化的趨勢。圖 12.42 與圖 12.43 分別為數位與類比次系統之設計流程。由於電機系統不需考慮元件之詳細物理結構，因此由系統／元件階層之設計模擬完成之後，即可經由光罩與製程設計實現之。而微機電次系統之設計，如圖 12.44 所示，介於系統／元件與製程階層間之物理階層模型，扮演著一個相當關鍵的地位。巨觀模型與物理階層之間存在著相當密切的互動。

如圖 12.45 所示，由上而下 (top down)，從系統階層以至製程階層之工作，我們可稱之為設計或是設計合成 (synthesis)。而由下而上 (bottom up)，由製程階層著手，最後探求系統性能，我們則稱之為設計驗證 (design verification) 或是分析 (analysis)。一般而言，目前之微

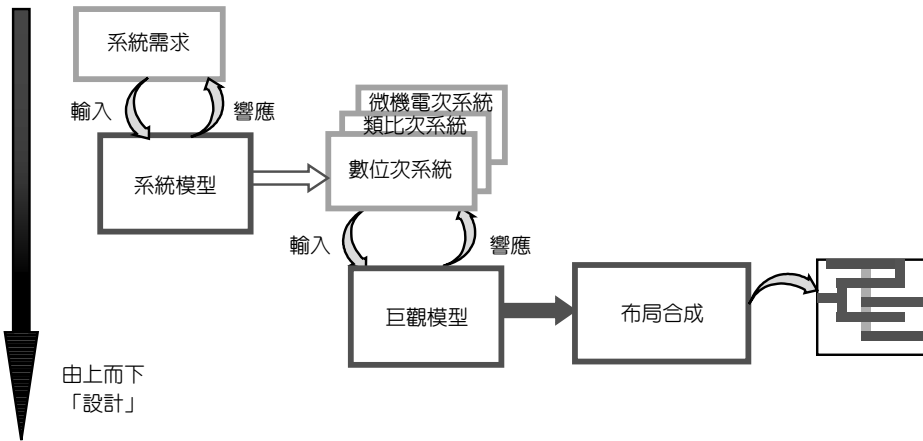


圖 12.42 數位次系統設計流程。

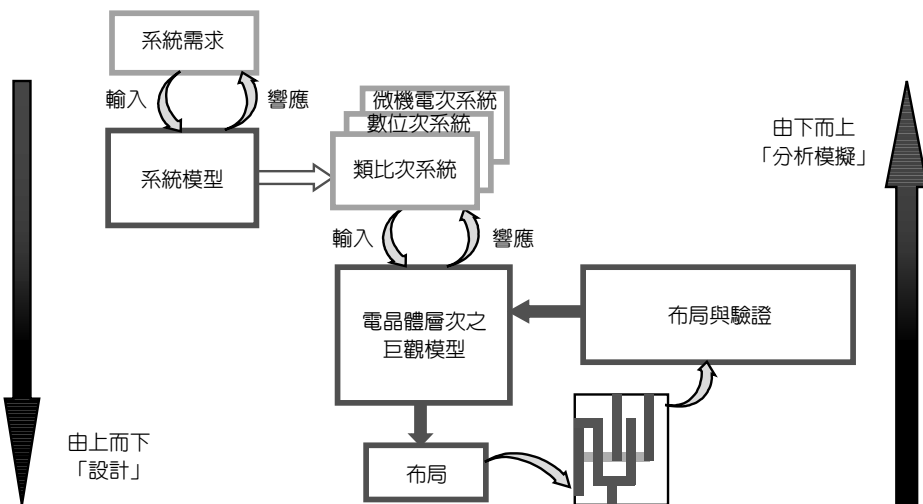


圖 12.43 類比電路次系統設計流程。

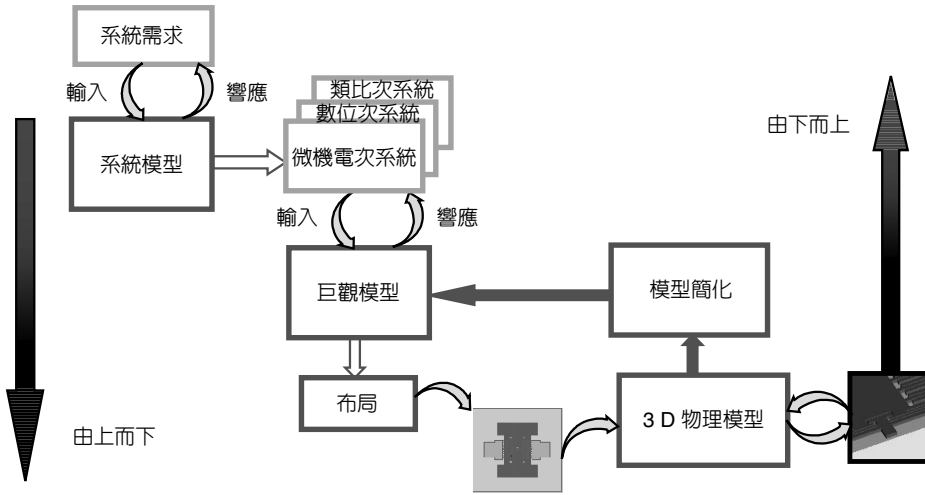


圖 12.44 微機電次系統設計流程。

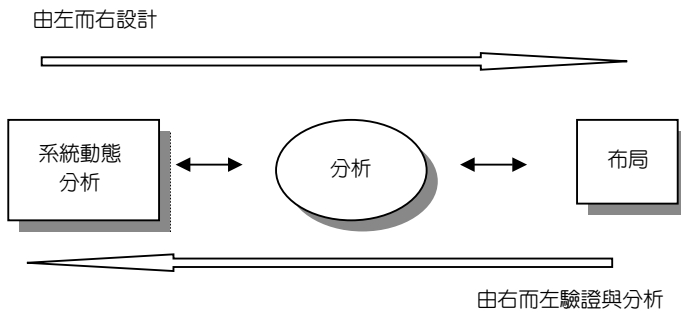


圖 12.45 微機電系統設計合成與微機電設計分析。

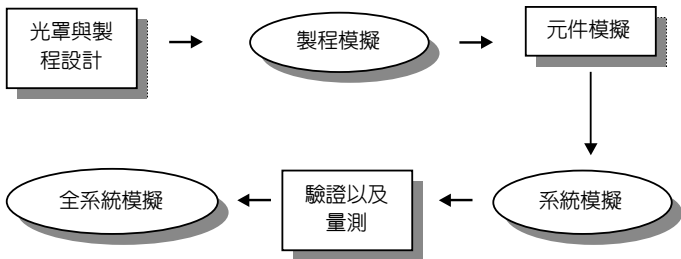


圖 12.46 微機電系統分析流程。

機電電腦輔助分析軟體之功能均較強調分析，其流程如圖 12.46 所示，意即設計者已經達成某種程度之設計，而以微機電電腦輔助設計軟體做性能評估與設計驗證。一般而言，分析過程其解具唯一性。反之，設計過程則可能有不只一個解。目前微機電解析方面的研究並不是很多，軟體開發也大多僅限於學術層次。但不可諱言的是，如何建立一合理有效的設計合成方法並開發相關工具，是未來微機電系統設計的一大瓶頸。

另外，由於物理階層為數值分析模型解，其數值分析結果僅能用於驗證特定設計之性能，並無法提供明確的設計改善方向。且其自由度過高，無法將其完全納入元件階層之設計考量。因此，如何將物理階層之模擬結果加以簡化，忽略其次要部分，僅保留最具代表性的部分並將其納入巨觀模型之中，有其實際上的重要性^(33,34)。

12.4.4 模型簡化與整合

一般而言，物理系統簡化的方法不外乎兩種，其一是已經擁有一相當明確之巨觀模型，但某些特定的係數由於幾何形狀過於複雜，必須由數值方法獲得。因此利用物理階層之有限元素模型等進行軟體實驗，以標準的測試程序如單軸拉伸、彎矩或是步階輸入等方式求取此有限元素模型之響應，並將此數值化的動態響應以曲線模擬 (curve fitting) 的方式得到一實驗式，然後將此實驗式插入元件模型中需要的部分，最常見的例子為微陀螺儀結構體之等效彈簧常數之求取，如圖 12.47 所示，一個複雜之連續體可以被簡化成振動學中最簡單之彈簧質量系統。其等效彈簧常數或許是一個常數，但也有可能是一個變量。然而它可以查表 (look-up table) 的方式表示之。其二是以有系統之系統鑑別 (system identification) 的方式，將一個物理模型之結果轉化成轉移函數⁽³⁵⁾，此方法則可獲得一解析之動態方程式。然而其階數仍可能過高，必須再做進一步的簡化。例如，我們可以從有限元素模型求取結構物之質量與剛性矩陣，藉由這些矩陣我們可以建立相當完善之動態模型。然而這些矩陣之階數因節點數目而異，但一般而言可高至數萬階。若將有限元素模型轉化成如此詳細之巨觀模型，此巨觀模型將無任何的意義。因此必須考慮整體設計可能之操作頻寬，對此詳細之矩陣動態方程式做適當之降階。一般而言，在絕大多數的狀況下，所需要的巨觀模型之動態很少會超過四階以上。至於模型簡化的方法，一般均由頻域出發，可以用各式的簡化方式如 brutal truncation 將高階的動態現象忽略之⁽³⁵⁾。商用微機電設計軟體亦發展出

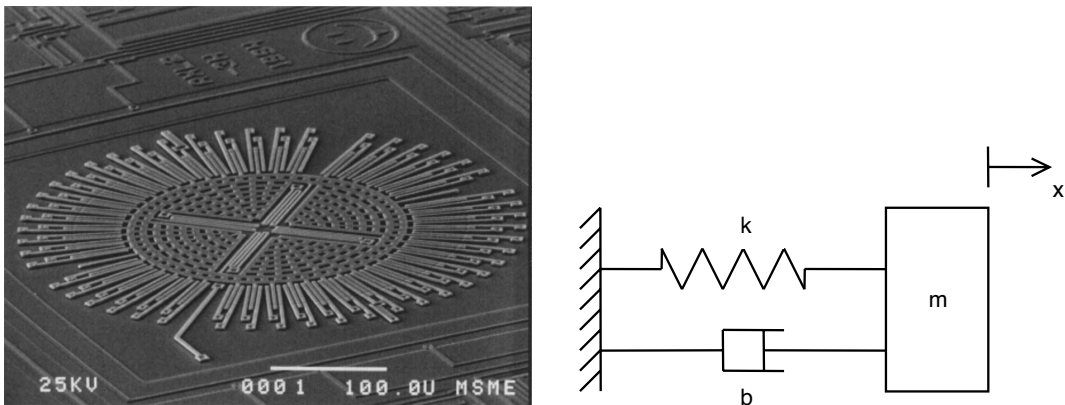


圖 12.47 微機電陀螺儀最簡單之系統動態模型⁽¹⁶⁾。

模型簡化模組，如前 MEMCAD 之 AutoSpring 模組即是從有限元素模型中將元件之等效彈簧常數估測出，以利巨觀模型之發展⁽⁹⁾。對於模型簡化的過程，我們接下來以微阻尼為例子說明。

壓縮阻尼 (squeeze film damping) 是微機電系統阻尼之最主要的形式⁽³⁶⁻⁴⁰⁾。然而，它的行為事實上相當的複雜，遠非簡單的黏滯阻尼可比擬。考慮一對平行板 (長 L 、寬 W 、間距 d) 在恆溫以及小位移狀況下，如圖 12.48 所示，平行板結構內之流體運動可以用雷諾方程式 (Reynold's equation) 表示如下⁽³⁶⁾：

$$\frac{P_a d^2}{12\eta_{\text{eff}}} \nabla^2 \left(\frac{P}{P_a} \right) - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P}{P_a} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{x}{d} \right) \quad (12.9)$$

其中 P_a 、 P 分別代表靜壓以及壓力改變量， x 為氣隙大小與結構移動量， η_{eff} 為等效黏滯係數， ∇^2 為 Laplacian 操作因子 (operator)。定義壓縮因子 (squeeze film number)

$$\sigma = \frac{12\eta_{\text{eff}} W^2}{P_a d^2} \omega \quad (12.10)$$

其中 ω 為角頻率 (angular frequency)。經由數學運算，可以獲得下列級數解：

$$p = -\frac{z_0}{d} \sum_{n \text{ odd}} \frac{4}{n\pi} (\sin n\pi\xi) e^{-\alpha_n t} \quad (12.11)$$

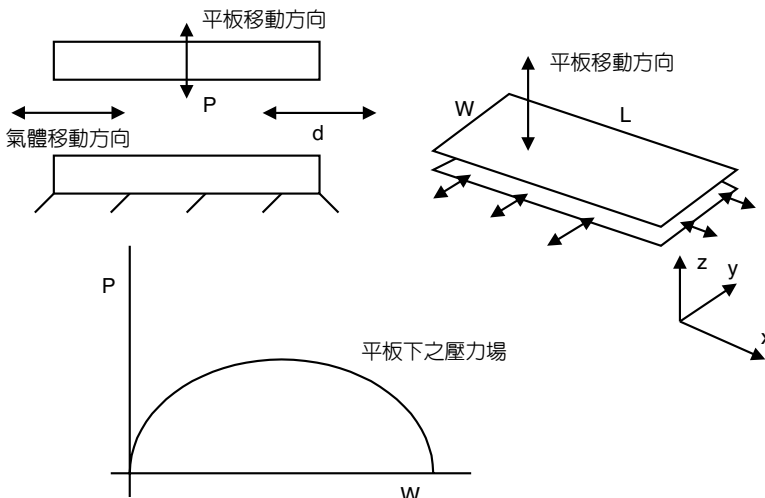


圖 12.48

平行板阻尼器模型示意圖。

其中 z_0 為平板移動之距離。若以轉移函數表示，則上式可以表示成

$$F(s) = \left[\frac{96\eta_{\text{eff}}LW^3}{\pi^4 d^3} \sum_{n \text{ odd}} \frac{1}{n^4} \frac{1}{1 + \frac{s}{\alpha_n}} \right] sZ(s) \quad (12.12)$$

其中 F 為平板之總受力。雖然上式乍看之下相當複雜，但仍可容易的以電腦求解，且其收斂相當的快速。若僅取第一項，則上式可表示成

$$F(s) = \frac{b}{1 + \frac{s}{\omega_c}} sZ(s) \quad (12.13)$$

其中

$$b = \frac{96\eta_{\text{eff}}LW^3}{\pi^4 d^3} \quad (12.14)$$

$$\omega_c = \frac{\pi^2 \omega}{\sigma} \quad (12.15)$$

一含壓縮阻尼之微機電系統，如加速規等，其行為可以用式 (12.13) 之巨觀模型表示。它代表著一簡單的 RC 電路，在操作頻率小於 ω_c 之下，系統阻尼可由式 (12.14) 表示。因此可透過等效電路的方式，以力—電壓類比的方式解出此微機電系統之動態。式 (12.15) 是較詳細之模型，對於精度要求更嚴苛的環境，必須使用到該式。例如針對一電容式加速規 (如圖 12.49 所示)，學者 Veijola 等人曾以力—電流類比的模式，建立該式之等效電路模型，如

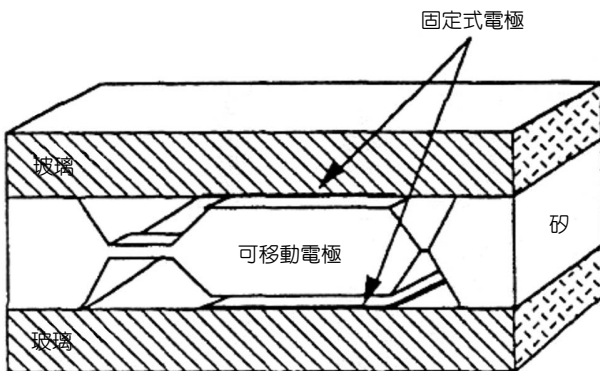


圖 12.49 電容式加速規之示意圖⁽³⁸⁾。

圖 12.50 所示⁽⁴⁰⁾。另一方面，我們可以藉由 Simulink 系統動態模型，將式 (12.12) 寫成轉移函數模型，而以訊號流法評估該阻尼器之效能，其示意圖如圖 12.51 所示。

若該微阻尼器之形狀不符合式子之初始假設時，例如形狀無法用上述之矩形平行板表示或是二者不平行時，便無法獲得解析或是級數解。但是，可以其簡化之表示式 (12.13) 為微阻尼器之巨觀模型的骨架，並配合詳細之數值流體力學計算的結果，試圖找出一修正因子以改善巨觀模型之精確度。

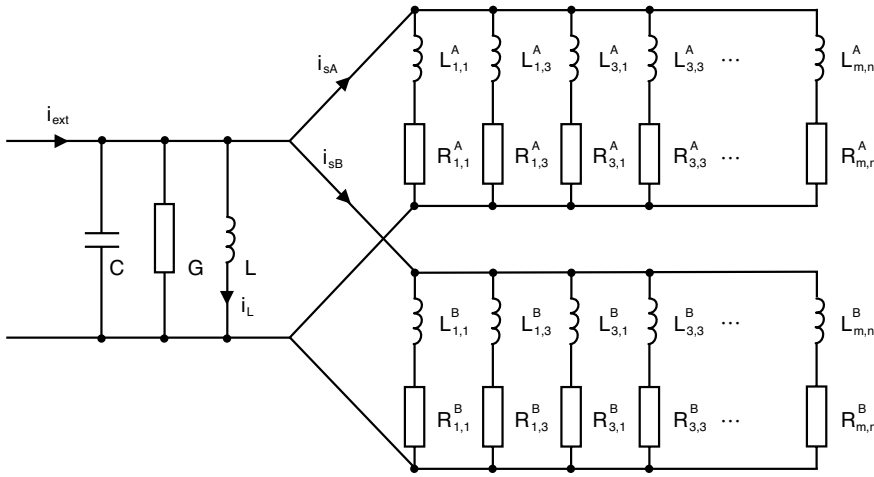


圖 12.50 電容式加速規之等效電路模型⁽³⁸⁾。

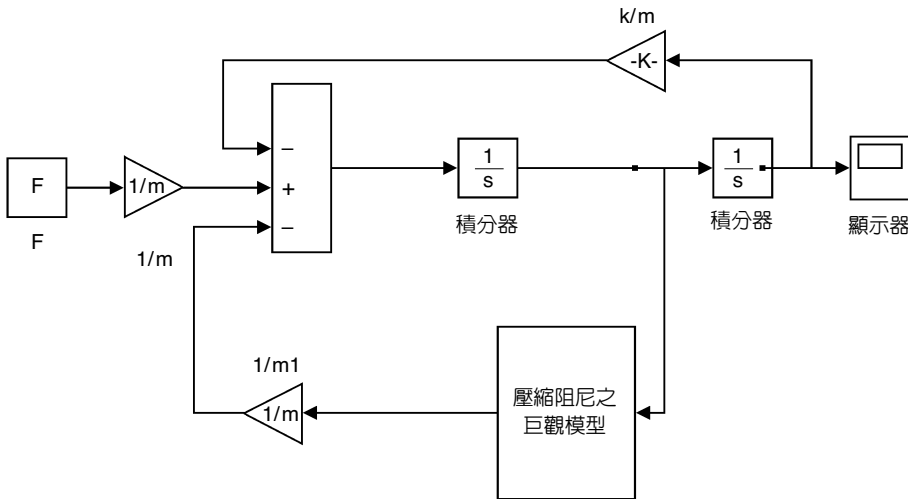


圖 12.51 電容式加速規之 Simulink 系統動態模型。

12.4.5 系統階層模擬分析方法

目前在微機電設計方法的研究大抵上有幾個方式，最常用的是以等效電路方式，將微機電之機械部分簡化成電阻、電感及電容等基本電路元件，然後以解電路的軟體如 SPICE 等解此等效電路，然後再將解出之電壓、電流等轉換為機械系統之受力與位移等資訊。此方法是基於電子與機械系統動態之數學微分方程式具有相同的型式或系統類比 (analogy system) 之概念，而非真實物理特性之類比。因此，此類設計方法僅考慮機械或電機領域動態行為。一般而言，等效電路法主要有下列幾點特性^(18,34,41-44)：

- (1) 一般而言，此方法對含非線性元件之分析較困難，常限於線性化的小訊號分析，因此無法對真正的非線性系統做有效的分析。
- (2) 此法亦受限於在 SPICE 中可用之電路元件。
- (3) 以等效電路法分析之結果，並不保證能量的守恆性。
- (4) 最後，亦是最基本的問題，是如何將一物理系統轉換成其等效電路。對於不熟悉系統動態分析的工程師而言，這恐怕是此法最根本的問題。

另一種經常用於跨領域系統動態分析的工具是 MATLAB/Simulink^(32,45-48)。它基本上是完全以訊號流縱貫整個系統模型。其優點是只要能夠將元件之動態方程式寫出，不管是線性或非線性，均能以最接近物理概念方式將元件串接成系統模型求解，省去了求取等效電路之麻煩 (此舉對相當多設計分析人員而言，是一項挑戰)。然而，它亦有相當多的缺點：第一，此軟體並非針對微機電系統設計而開發，因此其計算效率遠較等效電路軟體為低。其二，使用者必須了解每個元件之數學模型，再依正確之訊號交流將其串接，整個基本運作道理與電路分析軟體在電腦上藉由串接各式電子電路元件相比完全不同。其三，使用訊號流完全無法考慮到負載效應，正常狀況下也無法保證能量守恆。雖然它有相當多的缺點，然而由於其頗受一般系統動態分析人員之喜好，因此，它仍是一個相當重要的工具。一些學術性質之微機電動態分析軟體，如加州大學柏克萊分校發展出之 SUGAR⁽⁴⁶⁾，即是以 MATLAB/Simulink 為其基本架構。

另一重要的跨領域分析方法則是以能量交換與功率流為主要的依據。此類方法如 Bond Graph 等已經在大尺度機電整合系統的設計分析上發揮了相當有效的功能^(42,49-51)。Bond Graph 法以廣義化的電阻、電容以及慣量元素，配合廣義電壓源 (effort)、廣義電流源 (flow) 以及廣義的變壓器與 gyrators 等元件，這些元素以功率流的概念互相連結。一旦該系統之 Bond Graph 畫出之後，經過制式方法即可將此系統之狀態方程式求出。此方法可分析機械、電機、油氣壓、熱系統等多重耦合系統。Analogy 公司所發展之 Saber 軟體即是基於功率流 (power flow) 的架構下寫成⁽⁴²⁾，它被前 Microcosom 公司使用於其 MEMCAD 中的 MemSys 模組⁽⁴¹⁾。

硬體描述語言 (hardware description language, HDL)^(34,52) 原是針對數位系統設計而發展出的高階硬體語言，但隨著日益重要之發展，它也逐漸地被使用於類比電路設計上。它是一

種程式語言介面，提供了一個極具彈性的設計入口 (design entry)，以作為電路設計者與各種電腦輔助設計工具之間溝通的橋樑。例如商用軟體 Saber 的類比硬體描述語言 (AHDL) 以及 Verilog 的 VHDL (very high speed integrated circuit HDL) 語言，都是利用此法進行系統分析。HDL 的一重要分支 VHDL-AMS (VHDL analog and mixed signal) 即可將含微分方程或矩陣形式之系統藉由元件行為模型發展出其 HDL 模型。且系統內允許非線性元素之存在，因此其動態分析可以不侷限於小訊號分析。

12.4.6 系統階層模擬分析工具

目前對於系統動態的分析工具相當多，無論是商用或是學術上的軟體都有相當不錯的分析能力，在此提出相關軟體以提供日後分析的參考。

(1) 學術性軟體

SUGAR⁽⁴⁶⁾ 的設計是仿照 SPICE 的概念，最主要是讓設計者能夠使用 SUGAR 描述類比裝置與元件的工作形式。其主體程式是以 MATLAB 為架構，使它更容易安裝和改進。

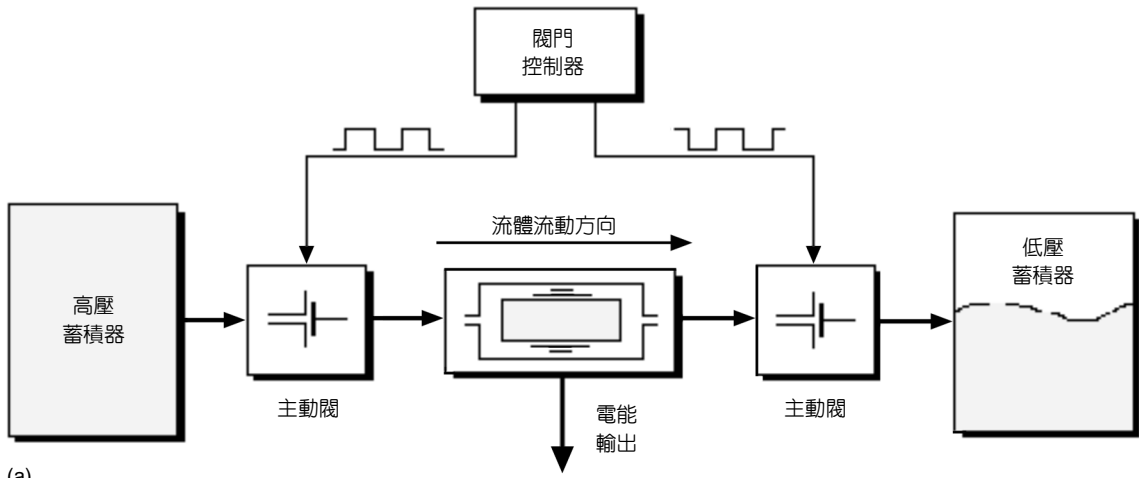
(2) 商用軟體

Cadence 公司所出之 IC 設計軟體⁽⁴¹⁾，乃一系列之積體電路電腦輔助設計軟體，從系統設計、電路設計、布局驗證以至於 PCB 製作皆有相對應之功能提供使用者使用，乃是一套完整之整合型電腦輔助設計環境。

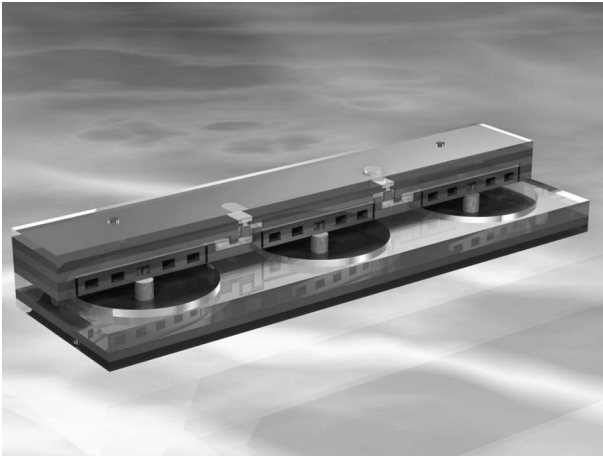
SPICE⁽⁵²⁾ 提供類比／數位電路模擬、分析與偵錯，並針對分析系統頻率高低而有不同之類型，如 PSPICE、ISPICE 及 HSPICE 等。

如之前所提及，Simulink 是 MATLAB 內部的一個工具箱，是目前學術上以及工業界在建構及模擬分析動態系統最廣泛的軟體，它支援線性及非線性系統，並能建立離散時間或連續時間以及兩者混合的系統模型。除了標準功能方塊外，它的 S-Function 功能可以允許使用者自行設計系統動態方塊，常被使用者用於複雜系統之巨觀模型建立上，如 MIT 微引擎之整體操作性能評估與壓電式微獵能器 (micro energy harvester) 之系統設計⁽⁴⁷⁾。圖 12.52 為該系統之功能與示意圖，它是一個複雜之壓電、機械、流力、電子耦合系統⁽⁴⁵⁾。圖 12.53 則為該系統 Simulink 模型之最上層示意結構。

Saber⁽⁴²⁾ 軟體為虛擬開發工具，為一大型系統設計分析軟體。它能提供混合訊號、混合技術與混合階層等完整設計的模擬功能。混合訊號指的是數位與類比訊號混合，混合技術指的是電子、電磁、機械、熱、光學、控制及油壓等領域的混合，而混合階層指的是從元件、零件、功能到行為等特性的混合。因此它提供了系統設計與開發者一個統合模擬設計



(a)



(b)

圖 12.52

微獵能器示意圖，中間之壓電元件用於產生能量，兩側之壓電源件則用於控制工作流體閥門之開合。

的環境。

Verilog⁽⁵²⁾ 是利用硬體描述語言所開發出來的電路模擬軟體，它提供了使用者一個非常具有彈性的模擬環境，工程師可如同撰寫軟體般，以程式語言的方式，描述數位電路內部的電氣行為、架構、功能及各種輸出入的狀態，以作為設計時的模擬參考。

12.4.7 結語

本節介紹了微機電系統階層的模擬分析方法、系統設計理論以及各種分析工具。一個合理有效的微機電系統設計分析方法，對於微機電工業的發展有舉足輕重的地位。這包括了幾大部分，如設計理論、分析、解析以及電腦輔助設計等方面。經過多年的發展，在許

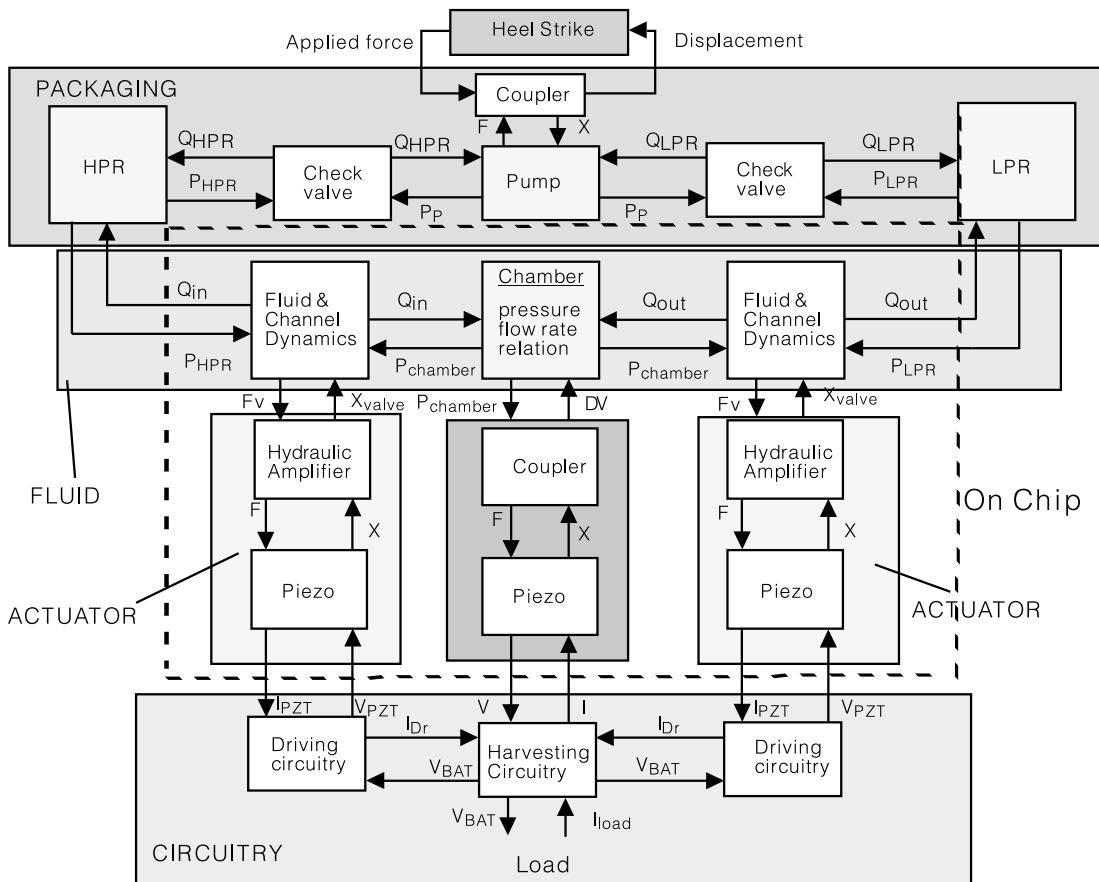


圖 12.53 以 Simulink 構建微獵能器之系統模型。

多方面已經卓然有成，但是相較於製程發展與微機電應用元件之開發而言，所投入的資源與成果仍嫌不足，這也是未來要積極努力的一個目標。

12.5 製程模擬

微機電元件的製程大致上可分成體型微加工 (bulk micromachining)、面型微加工 (surface micromachining)、接合 (bonding)、微影光刻電鑄模造 (LIGA) 及微精密機械加工等不同製造技術。微精密機械加工製程所需要的輔助工具原則上與傳統機械加工所需的電腦輔助設計與製造 (CAD/CAM) 是相同的，不再贅述。前三項是矽基微機電製程最重要的製程，其與微影光刻電鑄模造是本節所要介紹的重點。

矽基微機電製程基本上是利用薄膜成長與沉積來堆疊材料層，用蝕刻來挖掉部分的材料，並以兩者交互搭配進行來製作微小元件。其中的蝕刻要搭配微影製程來定義蝕刻區域

及不被蝕刻區域，此區域範圍是由光罩圖形與正負光阻技術來決定。製程模擬 (process simulation) 的基本要求是在已知製程步驟以及光罩圖形下，得出元件二維剖面外觀幾何，甚至三維立體幾何，來幫助設計與驗證。為求得此幾何，分析的模型分成兩大類，一是建基在真正的製程現象，一是純粹的幾何模型。前者是利用製程特性，以經驗或理論模式之計算來得出元件的幾何或材料特性，這在積體電路製程模擬中有較久的發展，尤其是一維與二維的問題，常稱之為半導體製程模擬，例如 SUPREM III 與 SUPREM IV 分別為史丹福大學發展出來的一維與二維的矽製程模擬軟體^(55,56)。雖然在如氧化、擴散 (diffusion) 等製程有較多的應用，但在實務上因製程特性的複雜性，在大多數製程尚有實際應用上的困難與限度。以真正製程現象為基礎的三維幾何軟體如 SAMPLE-3D⁽⁵⁷⁾，或結合製程現象與幾何模型之混合式三維製程軟體如 OPUS/3D⁽⁵⁸⁾，運用複雜的沉積與蝕刻法則可以產生高精細的三維幾何，但卻要耗費大量的計算時間，所以目前微機電製程模擬除了體型微加工使用的非等向蝕刻 (anisotropic etching) 製程技術是以製程特性來模擬蝕刻出來的三維結構外，最主要的還是以幾何模型來模擬製程，因此以幾何模型為基礎的製程模擬又可視為一種建立三維幾何的特殊方法。

12.5.1 非等向蝕刻模擬

矽晶片的材料本是單晶矽 (single crystal silicon)，若將之置於如氫氧化鉀 (KOH) 與氫氧化四甲氨 (TMAH) 這類蝕刻液中，搭配在矽晶片表面製造一層蝕刻遮罩 (etching mask)，將不要暴露或要暴露在蝕刻液的區域定義出來，利用不同晶格方向的蝕刻率 (etching rate) 不同，就可以製作出一些特殊型態之幾何，此就是所謂的非等向蝕刻。非等向蝕刻模擬 (anisotropic etching simulation) 就是希望透過模擬的方法得到蝕刻後的三維幾何外形，在已知晶片類型 (如 $\langle 100 \rangle$ 或 $\langle 110 \rangle$ 晶片)、蝕刻遮罩光罩圖形、蝕刻時間以及不同晶格方向之蝕刻率即可模擬。各晶格方向之蝕刻率取決於晶片摻雜濃度、蝕刻液種類、濃度與配方、蝕刻溫度等製程參數，通常必須經由實驗來決定出蝕刻率。此外，一個軟體要能接近可能運用的真實製程、可模擬雙面蝕刻 (double side etching)、蝕刻終止 (etch stop)、多次蝕刻 (multiple etching) 等，是此類軟體能充分發揮效力應具備的功能。

非等向蝕刻模擬的結果是此製程製造出之元件外形，可讓製程工程師或設計者用來選擇適當的蝕刻液及其配方、濃度、溫度，評估蝕刻的時間、各方向蝕刻率、光罩對準誤差、底切 (undercut) 效應等對元件幾何的影響。也可用以決定適當的光罩補償 (mask compensation) 來修正蝕刻遮罩的形狀以得到所要的外形。能有各蝕刻液在不同配方、濃度、溫度下的蝕刻率資料庫，就可減少實驗的次數，對分析的進行也有很大的幫助。若產生之三維幾何能直接輸出給元件分析用，也可節省建立元件模型的時間。

AnisE 是微機電專用軟體 IntelliSuite 軟體內的一個非等向蝕刻模擬模組⁽⁵⁹⁾，有上述的蝕刻模擬功能，也提供了 KOH 與 TMAH 之蝕刻率資料庫，但其所產生的幾何形狀無法供元

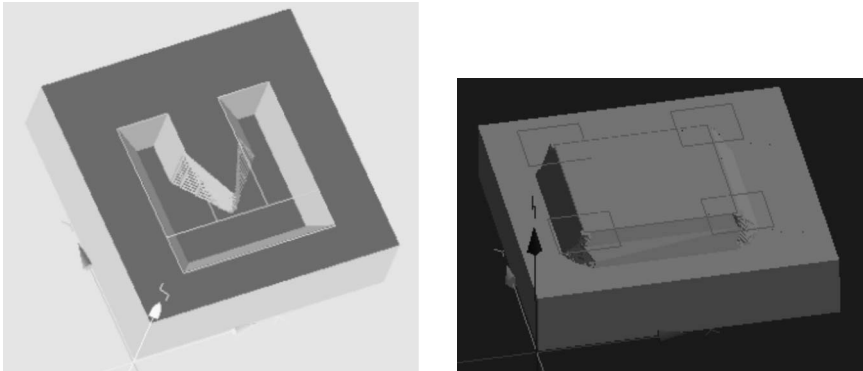


圖 12.54
非等向蝕刻後之三
維幾何。

件分析用。它計算時需要的是 (100)、(110) 與 (111) 三個方向的蝕刻率，圖 12.54 是利用 AnisE 所模擬出三維幾何的一個簡單例子。MEMS Xplorer 是另一套微機電專用軟體⁽⁶⁰⁾，其中含有一非等向蝕刻模擬模組。另外兩個商用軟體是德國的 SIMODE⁽⁶¹⁾ 與日本的 MICROCAD⁽⁶²⁾，後者也有一個叫 ODETTE 的資料庫模組。

另外美國加州理工學院有一網路線上蝕刻模擬軟體 SEGS⁽⁶³⁾，提供免費的模擬，而美國伊利諾大學香檳校區的微致動器感測器與系統 (MASS) 研究群發展了一套適用在視窗 95/NT 上的非等向蝕刻模擬軟體 ACES⁽⁶⁴⁾，放在網路上供人免費下載。ASEP⁽⁶⁵⁾ 是 Buser 等人所開發出來的軟體，其所模擬出的幾何可以用來產生網格。

12.5.2 製程幾何模擬

因為以物理模型為基礎的三維製程模擬既複雜且耗時，所以使用純粹的幾何模型方式變成是略為損失精確度但加快速度的折衷方案，這也是目前微機電製程模擬軟體的主流。此方法就是將每個製程直接對應成一特定幾何的形成或改變，也就是將所有的製程看成是一連串幾何成長與拿掉的過程，可稱之為長與挖的製程，模擬過程直接指定長和挖的方式與尺寸的大小，與製程參數無關。

長的製程是在晶片表面長一層指定厚度的材料，但長的方式或是長出來的幾何形狀有不同的型式，圖 12.55 顯示幾種不同的類型，包括均勻型、水平面成長型、平坦型、填入凹洞型及堆疊型。不同的長膜方式，只是為了能近似各種製程所會產生的幾何形狀。例如厚度均勻型用來模擬階梯覆蓋性 (step coverage) 良好之等向沉積製程，水平面成長型可用來近似階梯覆蓋性很差之非等向沉積製程，平坦型可用來模擬沉積再進行化學機械研磨的製程，填入凹洞型可用來模擬電鍍製程，堆疊型可用來模擬接合製程。

不同挖的製程，挖之後的幾何也有所不同，如圖 12.56 所示。如直接沿光罩圖形垂直整層厚度拿掉或部份厚度拿掉，或可指定側壁之角度及底切的量，甚或指定犧牲層而將此材

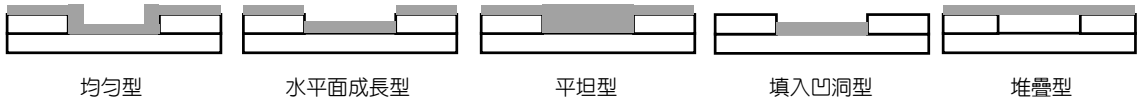


圖 12.55 不同幾何型式的長膜製程。

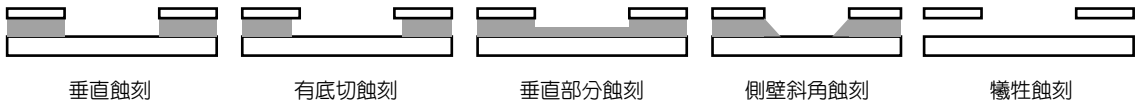
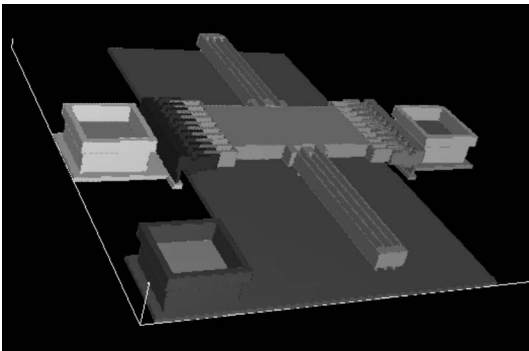


圖 12.56 不同幾何型式的蝕刻製程。

圖 12.57
製程模擬後的三維幾何。

料全部去除，抑或挖的是晶片上面或下面或是雙面。其中的側壁斜角蝕刻可以用來模擬〈100〉晶片的非等向蝕刻後之近似幾何。其他如接合則只是幾何的堆疊連接，摻雜、微光刻電鑄模造等也都可以類似的幾何方式來定義。圖 12.57 是一典型著名的微機電系統共用製程 (MUMPs) 利用製程模擬軟體所模擬出來梳狀致動器 (comb drive) 的三維幾何，除了可以清楚的看到三維的外觀之外，又可容易的直接運用來建立分析網格。

此方法最大的好處是，若製程步驟固定，只要變更光罩的二維圖形，就可模擬出變更後的幾何。所以將常用或是標準的製程步驟建立成一個個製程檔案並組成製程庫，如此可重複使用，可加速設計的進行。若再配合參數化的光罩庫，利用參數變化快速變更光罩尺寸設計，會更有效率。

當然不同的軟體在自己的架構、製程分類與幾何運算產生上有自己的發展，如 IntelliSuite⁽⁶⁶⁾、CoventorWare⁽⁶⁷⁾、MEMS Pro⁽⁶⁸⁾、MEMS Xplorer⁽⁶⁰⁾、等這類商用微機電專用軟體皆提供此製程模擬之功能，只是功能上有或多或少的差異而已，另外如 CFDRC 也提供了一個 CFD-micromesh 模組⁽⁶⁹⁾。在此模擬下，是否能完全真實的呈現製程的步驟，是否能建構出相當複雜的三維幾何，此三維幾何能否自動產生元件分析所需之網格，或是此幾何是

否能容易的傳輸給其他網格建立的前處理軟體，都是這類製程模擬軟體所應提供或克服的功能。加州大學柏克萊分校開發了一個 SIMPLer 程式⁽⁷⁰⁾，是只可顯示二維剖面之製程幾何模型模擬軟體。另外還有一個讓人免費下載的軟體 An's MEMS CAD⁽⁷¹⁾，能畫光罩並能模擬出三維之幾何外觀。此外，OYSTER⁽⁷²⁾、3DMX⁽⁷³⁾、Jale3D⁽⁷⁴⁾、3D μ V⁽⁷⁵⁾ 是另外一些被開發出來的軟體。

12.6 現有之發展介紹

電腦輔助設計與分析軟體的發展已有很長的歷史，許多以各產業特性為對象的專用軟體或是以模擬技術導向的泛用型軟體，被廣泛的應用在很多的產業中。原有的泛用型系統模擬工具如 Saber，或電路模擬軟體如 SPICE 等，皆可應用於微系統之系統階層模擬，在 12.4 節中已有介紹，製程模擬軟體於 12.5 節也作了介紹，本節將介紹其他技術部分與微機電專用軟體，讀者也可參考文獻中有關微機電軟體的發展與相關介紹⁽⁷⁶⁻⁸⁰⁾。

12.6.1 光罩工具與技術

光罩工具 (layout tool) 在半導體等領域早有發展，且已有非常多商業化的軟體可使用，也有免費的軟體供人下載使用，如 LASI⁽⁸¹⁾ 與 MAGIC⁽⁸²⁾，這些光罩工具當然也可用來繪製微機電系統之光罩。然而微機電元件與半導體元件在特性上有所不同，所以針對微機電專用的光罩工具軟體也陸續出現。微機電元件較常用到真實曲線，而不像半導體元件光罩圖形最主要是垂直與水平線段組成的曼哈頓 (Manhattan) 型式之多邊形，或是任意多邊形。因此如 IntelliSuite、CoventorWare 與 MEMS Pro 的光罩工具都支援某種程度的真實曲線繪製功能。

提供可重複使用的參數化光罩 (parametrized layout) 庫也是微機電光罩工具的重要發展之一，因其可大幅簡化光罩圖形之建構。例如 CoventorWare 軟體內的光罩軟體針對常用的微流體元件與機電元件提供參數化的圖形繪製工具，如圖 12.58 所示，使用者選擇所要繪製圖形的類別，再填入所希望的尺寸值，就可以在某光罩層內繪出所要的圖形，另外也提供了英文字型的光罩圖形。而 MEMS Pro 的光罩工具則針對著名的 MUMPs 製程建了一個參數化微元件光罩庫，共分為四大類：主動元件、被動元件、測試元件與振盪元件，另外流體元件光罩庫則與前述 CoventorWare 的流體光罩庫類似，圖 12.59 顯示其介面。所謂的參數化微元件光罩庫是讓使用者選擇所要的微元件類型後，填入尺寸值就可繪出該元件所有需要之光罩層，在 CoventorWare 內要有 Cronos 設計工具箱 (design kit) 才會提供類似的微元件光罩庫。這兩個軟體也都提供了讓使用者自行建立自己的參數化光罩庫的功能。另美國 Cronos 公司有一套稱為 CaMEL 的光罩庫⁽⁸²⁾，內含參數化與非參數化的微機電光罩庫，這個光罩庫的內容是前兩個商用軟體所參考的基礎，它可透過網路申請，由電子郵件來免費取得所要的光罩圖形。

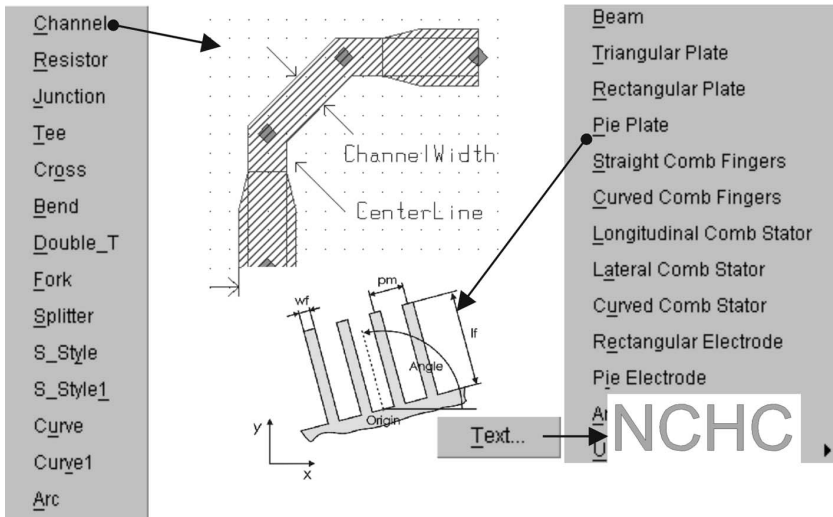


圖 12.58 CoventorWare 光罩工具中的圖形參數化光罩庫。

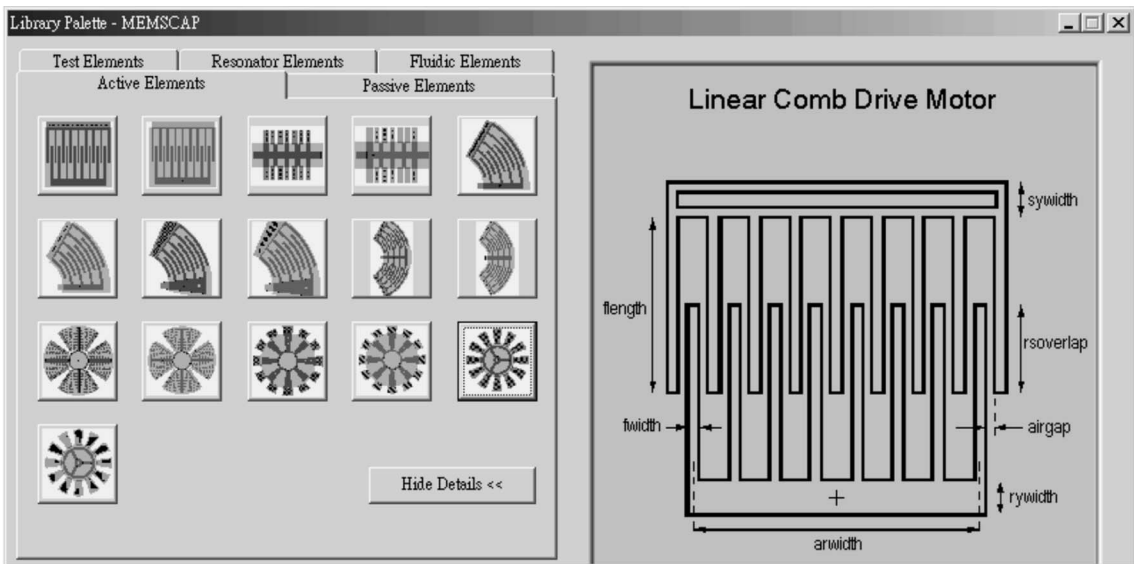


圖 12.59 MEMS Pro 光罩工具中的微元件參數化光罩庫。

12.6.2 元件物理技術與軟體

元件物理階層的分析模擬技術主要是像有限元素法、邊界元素法等場方程數值解法，傳統各領域的泛用型軟體可直接運用來做微元件的特性分析，例如結構有限元素軟體 NASTRAN、ABAQUS，流力軟體 CFDRC、STARCD，電磁軟體 Ansoft 等。

泛用型多物理領域模擬軟體原本也已存在於市場中，如最著名的是 ANSYS⁽⁸³⁾，另外還有 CFDRC⁽⁸⁴⁾ 與 Algor，它們也被應用到微機電領域。ANSYS 除了原有的多領域模擬功能

(機械、流體、電、磁、輻射與熱) 外，近年也為微機電系統的分析發展出所需的機能，其各領域分析與耦合主要建基在有限元素理論。CFDRC 公司是以計算流體著稱，在固流耦合問題上也有相當多之經驗，近年為微機電系統所開發之 CFDACE + MEMS 軟體套件，將有限體積法之流體、有限元素法之結構以及邊界元素法之電場三個求解核心整合起來。瑞士的 ISE 原是半導體元件製程與物理模擬軟體中的著名軟體之一，其中的 Solidis 模組是為半導體元件與微機電元件所開發之二維與三維熱、機械與電耦合的模擬軟體，它可完全整合在其 TCAD 的模擬環境中，但目前已不再繼續發展。FEMLAB⁽⁸⁵⁾ 是最新的多領域模擬軟體，是以有限元素法求解偏微分方程式之技術為基礎，可與著名的軟體 MATLAB 完全整合在一起，也可直接以偏微分方程式輸入做為數學模型，進行耦合領域的計算。

耦合領域模擬 (coupled field simulation) 最大的挑戰是如何快速有效又精確地解出不同領域之場偏微分統御方程式。直接耦合 (direct coupling) 解法是同時求解所有的方程式，常會利用牛頓 (Newton) 法的迭代 (iteration) 方法，收斂性較好，但缺點是求解核心要重新寫，而不能利用現有功能完整的單一領域軟體。為了可充分利用已有個別單一領域軟體之功能，將之整合起來求解耦合的問題，最常用的方法就是順序 (sequential) 或非直接 (indirect) 耦合解法，又稱之為鬆弛法 (relaxation method)。ANSYS 提供上述兩種方法，但並非所有耦合問題兩個方法都可用或適合用。耦合領域分析概念與相關問題，讀者可參考文獻 86。

因微機電技術的蓬勃發展，完全以微機電元件特性為市場定位的軟體也相繼出現。CoventorWare 與 IntelliSuite 此兩軟體的機電耦合分析是運用邊界元素靜電場分析與機械有限元素，以順序法將兩者耦合在一起，並不斷開發其他微機電元件不同領域所需相關的分析模組。CoventorWare 的前身是著名的 MEMCAD，它提供了靜電、機械、熱、機電耦合、空氣彈簧與阻尼特性、壓阻、壓電、封裝、光學與頻率相關之電阻與電感、流固耦合以及其他許多與微流體元件相關之不同模組的分析能力。而 IntelliSuite 的原名是 IntelliCAD，它提供了靜電、機械、熱、機電耦合、壓電、微流、高頻電磁等分析功能。另外 AutoMEMS⁽⁸⁷⁾ 軟體是完全以邊界元素法所開發之靜電、熱與機械耦合的軟體，目標是利用邊界元素法的特性來加快求解的時間與加大可解問題的尺度，另有一 AutoMEMS-SMP 軟體是針對具分享式記憶體處理器 (shared memory processor) 之電腦所開發，更加速它的處理能力。瑞士的 SESES⁽⁸⁸⁾ 軟體是為微機電所開發的靜電、熱與機械耦合的有限元素分析軟體。

網格建立的快慢與品質良好與否是微元件特性分析的重要技術指標，傳統上的分析軟體皆提供功能不一的幾何與網格建立工具，也有泛用型前處理軟體 Patran、I-DEAS、Hypermesh 可用來協助複雜網格的產生。自動網格產生法與適應性 (adaptive) 網格法是有效的網格建立法，其中自動網格產生法在二維問題產生三角形或四邊形網格的技術相當成熟，對三維問題產生四面體網格也很成熟，但純六面體網格卻依然是個有待努力的方向。微機電元件常見的幾何特性之一是以一層層長與挖的過程產生的幾何，而非具複雜曲面的

三維幾何，所以應用此特性的 IntelliSuite 與 CoventorWare 兩專用軟體已發展出能自動快速產生高品質六面體網格的技術，讓使用者更方便的進行分析。在 IntelliSuite 中另外發展了一個像蓋房子似的方法 (3D Builder)，讓使用者不透過幾何，能直接用一層層網格建立的方式來快速的建立分析網格。針對微流道流場分析模型之網格建立，CoventorWare 發展了一個特別功能，讓使用者不透過幾何，直接且快速地建立六面體網格，圖 12.60 顯示此參數化微流道產生工具的例子，此工具讓使用者選擇不同的微流道造型與剖面形狀後，指定尺寸大小與網格切割參數，就可自動產生網格，接著可依序組合成複雜的微流道網格。

此外，MEMS Pro 軟體發展了在已知三維幾何與製程步驟下，自動產生對應之光罩圖形的功能，讓使用者在 ANSYS 驗證過的微元件幾何得以轉成 CIF 格式的光罩檔案，免除繪製光罩的時間。而 IntelliSuite 也建構了一個目前唯一的商用化微機電專用的材料庫 (material database) MEMaterial 模組，讓使用者可以查詢常用之微機電材料的材料性質與製程參數的關係圖，如圖 12.61，也可加入自己的材料性質。

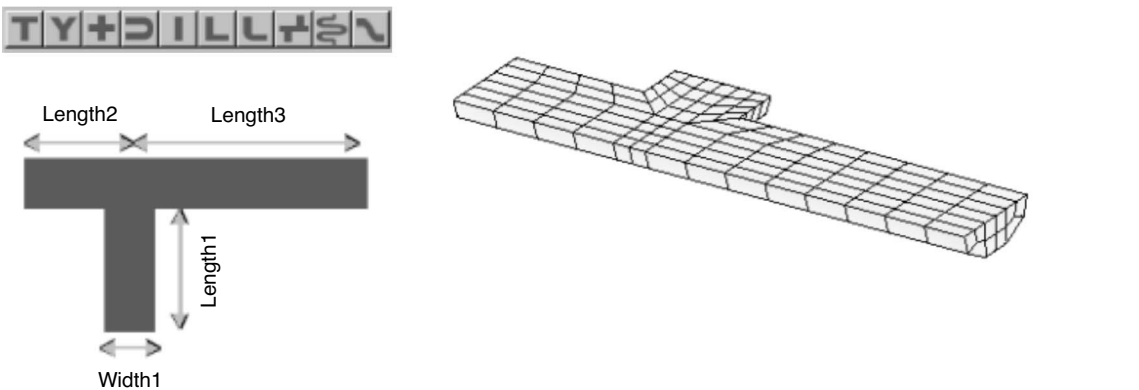


圖 12.60 CoventorWare 的微流道參數化網格產生工具。

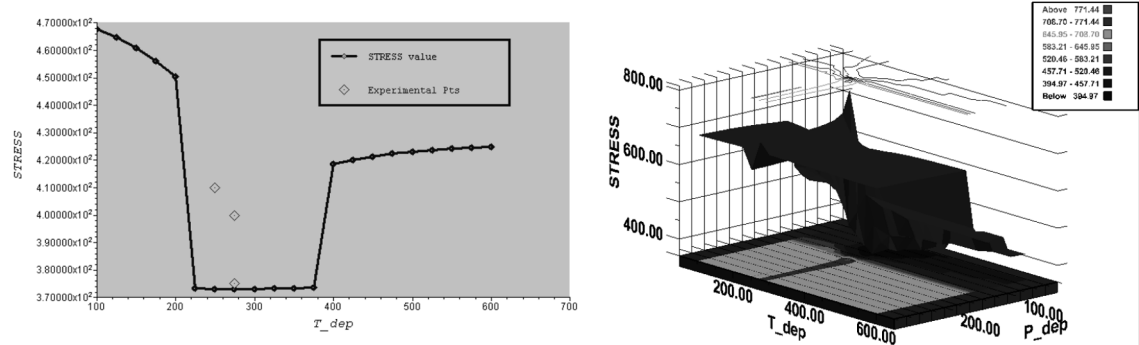


圖 12.61 MEMaterial 材料庫的材料性質平面與立體圖。

12.6.3 巨觀模型工具與微元件庫

巨觀模型階層分析主要有兩類問題，一是如何將複雜的元件物理計算結果轉換成一個簡單的降階計算模型；另一個是將此簡單的降階計算模型寫出系統模擬軟體所用語法 (如 SPICE 或 HDL-A) 的模型。CoventorWare 提供了上述的功能，而 MEMS Pro 在 ANSYS 內開發了一些使用介面，運用 ANSYS 的降階法也提供上述的功能。這兩個軟體也提供了常用微機電元件庫，協助系統設計的進行，這些元件庫除了含有巨觀模型外，也有對應的光罩圖。

12.6.4 軟體在不同階層的功能

以多階層特性的四個階層來看最重要的幾個軟體目前的定位，IntelliSuite 主要提供的是製程與元件物理兩個階層的功能，CoventorWare 四個層次皆有，MEMS Pro 本身提供製程與系統階層，當 MEMS Pro 與 ANSYS 整合時，MEMS Pro 又可提供元件行為階層。而 ANSYS 則可提供元件物理階層、元件行為階層與系統階層之功能，CFDRC 則可提供製程與元件物理之功能。非等向蝕刻模擬與微機電材料庫是 IntelliSuite 有別於其他幾個軟體特有的功能。這僅是很粗略的畫分，各軟體在各階層的功能上有多有寡。隨著微機電技術的發展，軟體廠商可能會有策略性的改變，可以預見的是，為微機電設計分析者開發愈來愈好用、功能愈多愈強的軟體是一定的趨勢，也是微機電產品與應用愈來愈普遍的重要助力之一。

參考文獻

1. S. D. Senturia, *IEEE*, **86** (8), 1611 (1998).
2. D. A. Koeser, B. Hardy, and K. W. Markus, *MUMPs Design Handbook*, Revision 7.0, <http://www.memrsus.com/mumps.pdf>.
3. S. D. Senturia, *Microsystem Design*, Kluwer Academic Press (2000).
4. F. W. Grover, *Inductance Calculations, Working Formula and Tables*, New York: Dover Publications (1946).
5. M. Kamon, F. Wang, and J. White, "Recent Improvements to Fast Inductance Extraction and Simulation", *Proc. of the 7th Topical Meeting on Electrical Performance of Electronic Packaging*, West Point, New York, 281 (1998).
6. A. E. Ruehli, *IBM J. Res. Develop.*, **16**, 470 (1972).
7. Q. A. Huang and N. K. S. Lee, *Journal of Micromech. Microeng.*, **9**, 64 (1999).
8. K. Matsuda, K. Suzuki, K. Yamamura, and Y. Kanda, *J. Applied Physics*, **73**, 1838 (1993).
9. Motorola, *Sensor Device Data / Handbook*, 4th ed., Phoenix, AZ: Motorola, Inc., (1998).
10. T. Ikeda, *Fundamentals of Piezoelectricity*, New York: Oxford University Press (1990).

11. CoventorWare / Supplemental Tutorials and Reference Guide, Inc., Coventor (2001).
12. R. W. Fox and A. T. McDonald, *Introduction to Fluid Mechanics*, 2nd ed., Wiley (1998).
13. L. Lofdahl and M. Gad-el-Hak, *Progress in Aerospace Sciences*, **35**, 101 (1999).
14. D. J. Harrison, K. Fluri, K. Seiler, Z. Fan, C. S. Effenhauser, and A. Manz, *Science*, **261**, 895 (1993).
15. 方昱仁, 單體單噴孔壓電致動式噴液裝置之設計與製造, 國立台灣大學機械工程學研究所碩士論文.
16. M. A. Lemkin, B. Boser, D. Auslander, and R. L. Smith, "A 3-Axis Force Balance Accelerometer Using a Single Proof Mass," *Transducers '97*, 4B2.01 (1997).
17. K. S. Nabors and J. White, *IEEE Trans. Computer-Aided Design*, **10**, 1447 (1991).
18. 姚志民, *National Science Council Monthly*, **29** (3), 174 (2001).
19. 姚志民, 微系統科技協會季刊, **3**, 29 (2001).
20. P. M. Osterberg and S. D. Senturia, *IEEE J. Microelectromechanical Systems*, **6**, 107 (1997).
21. S. D. Senturia, N. Aluru, and J. White, *IEEE Computational Sci. Eng. Mag.*, **4** (1), 30 (1997).
22. S. D. Senturia, R. M. Harris, B. P. Johnson, S. Kim, K. Nabors, M. A. Shulman, and J. K. White, *IEEE J. Microelectromechanical Systems*, **1**, 3 (1992).
23. E. K. Antonsson, "Structured Design Methods for MEMS," in *NSF Sponsored Workshop on Structured Design Methods for MEMS Final Report*, 53 (1996).
24. J. Hilibrand and B. Chern, "Getting a Clean Separation between Design and Fabrication," in *NSF Sponsored Workshop on Structured Design Methods for MEMS Final Report*, 69 (1996).
25. T. J. Hubbard, "VLSI and MEMS, VLSI vs. MEMS," in *NSF Sponsored Workshop on Structured Design Methods for MEMS Final Report*, 71 (1996).
26. G. K. Anathasuresh and S. D. Senturia, "Structured Design for MEMS," in *NSF Sponsored Workshop on Structured Design Methods for MEMS Final Report*, 97 (1996).
27. N. P. Suh, *Axiomatic Design, Advances and Applications*, Oxford (2001).
28. T. J. Hubbard and E. K. Antonsson, *J. Microelectromech. Syst.*, **3**, 116 (1993).
29. Y. Zhou, *Layout Synthesis of Accelerometers*, Master Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University (1998).
30. W. Ye, S. Mukherjee, and N. MacDonald, *J. Microelectromechanical Systems*, **7**, 16 (1998).
31. G. K. Fedder, "Structured Design of Integrated MEMS," *Proceedings of the 12th IEEE International MEMS Conference*, Orlando, Fla., 1 (1999).
32. C. M. Close, D. K. Frederick, and J. C. Newell, *Modeling and Analysis of Dynamic Systems*, 3rd ed., Wiley (2002).
33. E. S. Hung and S. D. Senturia, *IEEE J. Microelectromechanical System*, **8**, 280 (1999).
34. B. F. Romanowicz, *Methodology for the Modeling and Simulation of Microsystems*, Boston: Kluwer Academic Press (1998).
35. E. Crawley, M. Campbell, and S. Hall, *High Performance Structures: Dynamics and Control*, Cambridge University Press (2001).

36. J. J. Blech, *J. Lubrication Technology*, **105**, 615 (1983).
37. W. S. Griffin, H. H. Richardson, and S. Yamanami, *J. Basic Engineering*, June, 451 (1996).
38. Y. J. Yang, *Squeeze-Film Damping for MEMS Structures*, S. M. Thesis, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA (1997).
39. R. P. van Jampen, *Bulk-Micromachined Capacitive Servo-Accelerometer*, Ph.D. Thesis, Delft University (1995).
40. T. Veijola, H. Kuisma, J. Lahdenperg, T. Ryhtinen, *Sensors and Actuators A*, **48**, 239 (1995).
41. Cadance 網站: <http://www.cadance.com>
42. Saber Designer Intro Course, Analogy Corp. (1995).
43. H. A. C. Tilmans, *J. Micromech. Microeng.*, **7**, 285 (1997).
44. 黎立民, 微機電製程模組與機電耦合之分析, 國立成功大學機械系碩士論文 (2002).
45. N. W. Hagood, *et. al.*, "Development of Micro-Hydraulic Transducer Technology," *10th Intl' Conf. On Adaptive Structures and Technologies (ICAST'99)*, Paris, France (1999).
46. SUGAR 網站: <http://www-bsac.eecs.berkeley.edu/~cfm>
47. C. Liu, *Dynamical System Modeling of a Micro Gas Turbine Engine*, Master Thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology (2000).
48. K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice-Hall (1995).
49. R. C. Rosenberg, *Introduction to Physical System Dynamics*, McGraw-Hill International (1996).
50. D. Wormley and D. Rowell, *System Dynamics, an Introduction*, Prentice-Hall (2001).
51. D. Karnopp and R. Rosenberg, *System Dynamics: A Unified Approach*, Wiley (1975).
52. Verilog 網站: <http://www.verilog.com/>
53. J. Keown, *MicroSim Pspice and Circuit Analysis*, Prentice-Hall (1998).
54. M. Madou, *Fundamental of Microfabrication*, CRC Press (1998).
55. SUPREM III 網頁: <http://www-tcad.stanford.edu/tcad/programs/suprem3.html>
56. SUPREM IV 網頁: <http://www-tcad.stanford.edu/tcad/programs/suprem4.html>
57. E. W. Scheckler and A. R. Neureuther, *IEEE Trans. On Computer-Aided Design of Ics and Systems*, **13** (2), 219 (1994).
58. U. Shintaro, K. Nishi, S. Kuroda, *et al.*, *IEEE Trans. On Computer-Aided Design of Ics and Systems*, **9** (7), 745 (1990).
59. AnisE 網頁: <http://www.intellisense.com/software/anise.html>
60. MEMS Xplorer 網頁: <http://www.memscap.com/cad-memsexpl-ds.html>
61. SIMODE 網頁: <http://www.gemac-chemnitz.de/mst/simode.htm>
62. MICROCAD 網頁: <http://www.fuji-ric.co.jp/crab/electric/semicon/microcad/micro.html>
63. SEGS 網頁: <http://www.design.caltech.edu/Research/MEMS/software.html>
64. ACES 網頁: <http://galaxy.ccs.m.uiuc.edu/aces>
65. R. A. Buser and N. F. de Rooij, *Sensors and Materials*, **28**, 71 (1991).
66. IntelliSuite 網頁: <http://www.intellisense.com>

67. CoventorWare 網頁: <http://www.coventor.com>
68. MEMS Pro 網頁: <http://www.memscap.com/cad-memscap-pro-ds.html>
69. CFDRC 網頁: <http://www.cfdrc.com>
70. SIMPLer 網頁: <http://www-inst.eecs.berkeley.edu/~ee40/SIMPLer/SIMPLer.html>
71. An's MEMS CAD 網頁: <http://myhome.dreamx.net/piyo123/MEMSCAD.html>
72. G. M. Koppelman, *Sensors and Actuators*, **20** (1), 179 (1989).
73. D. L. DeVoe, S. B. Green, and J. M. Jump, "Automated Solid Model Extraction For MEMS Visualization," *Proc. Int. Conf. On Modeling and Simulation of Microsystems, Sensors, and Actuators*, 292 (1998).
74. L. C. Ost, M. Mainardi, L. S. Indrusiak, and R. Reis, "Jale3D- Platform-Independent IC/MEMS Layout Edition Tool," *14th Symposium on Integrated Circuits and Systems Design*, 174 (2001).
75. N. R. Lo and K. Pister, *SPIE*, **2642**, 290 (1995).
76. S. D. Senturia, *IEEE*, **86** (8), 1611 (1998).
77. S. D. Senturia, *Sensors and Actuators A*, **67**, 1 (1998).
78. G. Wachutka, P. Voigt, and G. Schrag, "CAD Tools For Microdevices and Microsystems: Today's Demand, Potentials and Visions," *ASDAM'98, 2nd International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems*, Smolenice Castle, Slovakia, 299 (1998).
79. B. Courtois, J. M. Karam, M. Lubaszewske, V. Szekeley, M. Rencz, K. Hofmann, and M. Glesner, *Material Science and Engineering*, **B51**, 242 (1998).
80. LASI 網頁: <http://cmosedu.com/cmos1/winlasi/winlasi.htm>
81. MAGIC 網頁: <http://www.research.digital.com/wrl/projects/magic/magic.html>
82. CaMEL 光罩庫網頁: <http://www.memsrus.com/cronos/svcs/ml.html>
83. ANSYS 網頁: <http://www.ansys.com>
84. CFDRC 網頁: <http://www.cfdrc.com>
85. FEMLAB 網頁:
86. 姚志民, 工程 (中國工程師學會會刊), **75** (1), 63 (2002).
87. AutoMEMS 網頁
88. SESES 網頁: <http://www.nmtec.ch>