

電磁干擾(EMI)模擬 技術簡介

◆郭俊佑

工研院電腦與通訊研究所

副工程師

前言

一、傳統的EMI電磁干擾問題偵錯做法

隨著3C技術的突飛猛進，電子產品的世代交替迅速，新產品的生命週期大幅縮短，如何在短期內完成新產品的開發，尤其是要符合各國嚴格的電磁干擾/耐受規範要求，是深具挑戰性的工作。在傳統的產品開發流程裏，印刷電路板的電磁干擾(Electromagnetic Interference, EMI)除錯是在產品雛型出來後才開始進行。首先將產品送入EMI實驗室進行檢測，針對缺點找出對策(如屏蔽、濾波)加以修改，然後再進實驗室驗證。重複這幾個步驟，直到產品符合相關規範的要求為止。如果要做大幅度的修改，例如走線(Trace)重新佈局(Layout)或是更改元件擺放位置，就需重新洗製電路板，不僅耗費人力、物力，更延誤了產品的推出商機。

二、引進電磁干擾模擬技術的效益

引進電磁干擾模擬(EMI/EMC Radiated Emission Noise Simulation)技術就是為了改善上述的情況。電磁干擾模擬在電路完成設計、元件的選用定案後，即可開始進行。當佈局在進行的時候，電磁干擾模擬所需的元件特性模型(Behavior Model)的建立亦同時進行，一旦佈局完成，就開始對比較可能出問題的信號線進行分析。從分析的結果找出對策，可以馬上回饋給佈局人員或硬體

設計者修改，接著再重新分析模擬。待分析結果符合要求後，開始雛型產品的製作，然後再送到EMI實驗室檢測，此時在EMI實驗室所需的修改次數與修改的幅度將減少許多，達到減少產品在EMI修改方面所需耗費的人力、物力及時間的預期目標。

電磁干擾模擬技術的基礎

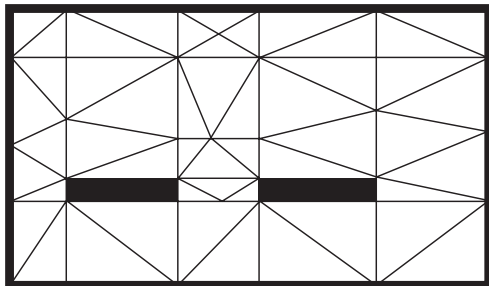
隨著普及率的提高，電腦已經被廣泛應用在各個研究領域中，電磁干擾模擬當然也不例外。常見的電腦模擬軟體，按照其演算法則可分成兩大類，一是以數值方法來分析，一是以經驗法則的資料庫來分析。數值方法從基本的馬克士威方程式(Maxwell's Equations)出發，再輔以適當的邊界條件，來求解電磁場的輻射。電磁輻射的求解法有很多種，而需要進行大量的運算是他們的共同點。以經驗法則的資料庫來分析電磁場的輻射，通常不做或是作一些假設來簡化運算，這種方法對於已知狀況的分析比較有效率，但是可能無法分析經驗法則之外的狀況。

一、電磁輻射的求解

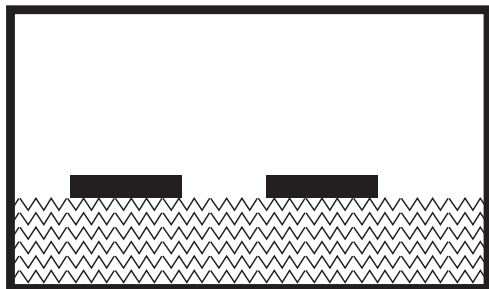
本文主要著重在以數值方法求解電磁場的輻射。接下來是介紹求解馬克士威方程式的各種數學模型，各個模型有它適用的範圍，截至目前為止，還沒有一種適用於所有EMI狀況的分析用數學模型。

二、數學模型

►圖一
待分析之幾何結構



►圖二 有限元
素法將圖一切割
後的結果



電磁干擾模擬所應用的電磁場模擬技術有下列幾種常見的數學模型：

1. 有限元素法(Finite Element Method)

有限元素法最先被廣泛應用在土木與機械工程的領域中，來分析材料與結構的問題。經過幾年來的發展，目前也有不少的電磁場模擬技術引用這個方法。有限元素法的第一個步驟是將待分析的結構(圖一)切成許多的小單位(圖二)，這些小單位的幾何大小不一定相同，在待分析的結構有變化的地方可以切得比較小，在待分析的結構較少變化的地方可以切得比較大。在這些分割出來的小單位中，我們假設它内部的電磁場變化是線性的，而他們與其他小單位相接的角落，稱為節點。有限元素法即是求解這些節點的電磁場強度。

大多數的有限元素法都是使用變分法推導計算式，求解電磁場強度可以從電磁場的能量方程式著手。式1是三維的時變電磁場的能量守恆方程式，等號右邊的第一項是磁場所攜帶的能量，第二項是電場所攜帶的能量，第三項則是前兩者產生的感應電流所損耗的能量，或是從外加感應電流得到的能量。

$$F = \int_V \frac{\mu |H|^2}{2} + \frac{\epsilon |E|^2}{2} - \frac{J \cdot E}{j\omega} dv \quad \text{式1}$$

將上式中的磁場(H)以電場(E)來表示，然後在令它對電場的微分等於零，即可得到如 $f(J, E) = 0$ 形式的式子。再對 f 取 k 階近似，然後套用到先前提到的 n 個節點上，並將邊界條件也加上去，就可以

得出如式2的矩陣。

$$\begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & \cdots & \cdot \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & \cdots & \cdot \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & \cdots & \cdot \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} \quad \text{式2}$$

等號左邊的 J 代表激發信號源。 Y 矩陣的元素是邊界條件與幾何結構的函數。因為每個節點只與它鄰近的點有交互作用，所以 Y 矩陣的值會集中在對角線附近。 E 是待求的電場強度，得到電場值後即可求出磁場、感應電流與能量損耗等未知數。

有限元素法的主要優點是：每個單位的電場與幾何大小都可以分別定義，因而可以用來分析幾何結構複雜，而且又有任意形狀的介電質的問題。它的缺點是無法有效的分析含有未知的邊界條件的問題。

2. 權重法(Method of Moment)

權重法亦是從複雜的積分方程式出發，然後再將它化簡為線性的聯立方程式、求解。與有限元素法不同的是：它使用權重的誤差法(Method of Weighted Residuals)，藉由調整方程式的真實解(True Solution)與其嘗試解(Trial Solution)的差值的權重，使得嘗試解逼近真實解，而達到求解方程式的目的。

權重法可以用來解電場的積分方程式(Electric Field Integral Equation, EFIE)與磁場的積分方程式(Magnetic Field Integral Equation, MFIE)。它們都是從描述“電磁場被一完美導體散射”的馬克士威方程式所推導出來的。底下是他們的形式：

$$E = f_e(J) \quad \text{式3}$$

$$H = f_m(J) \quad \text{式4}$$

等號的左邊 E 與 H 是入射的電場、磁場，等號右邊是產生在導體上的感應電流 J 。依照問題的特性，採用式3或式4來求解。例如電場的積分方程式適用於細導線結構的問題，而金屬面結構的問題則適合用磁場的積分方程式來分析。這兩種形式的方程式通常都以頻域表示之，如果以時域表示也能用權重法求解。

接著以磁場的積分方程式為例子，說明權重法求解的步驟。首先，把電流 J 表示成如式5：

$$\mathbf{J} = \sum_{i=1}^M J_i \mathbf{b}_i \quad \text{式5}$$

然後定義一組線性獨立的權重函數，並將它與磁場的積分方程式內積得到如式6：

$$\langle w_j, \mathbf{H} \rangle = \langle w_j, f_m(\mathbf{J}) \rangle \quad j = 1, 2, 3, \dots, M \quad \text{式6}$$

將式5代入上式可以得到M個方程式與M個未知數如式7：

$$\langle w_j, \mathbf{H} \rangle = \sum_{i=1}^M \langle w_j, f_m(J_i, \mathbf{b}_i) \rangle \quad j = 1, 2, 3, \dots, M \quad \text{式7}$$

把它改寫為矩陣的表示法如式8：

$$[\mathbf{H}] = [\mathbf{Z}][\mathbf{J}] \quad \text{式8}$$

其中，

$$Z_{ij} = \langle w_j, f_m(b_i) \rangle$$

$$\mathbf{J}_i = J_i$$

$$\mathbf{H}_j = \langle w_j, \mathbf{H}_{inc} \rangle$$

H矩陣代表入射的磁場，Z矩陣則是幾何結構的方程式，而J矩陣就是待求解的感應電流。同樣的，亦可以從求解出的感應電流算出被散射的電磁場。

權重法適用於分析線形天線，或是導線接在大型的導體表面之類的問題，但是它不適用於幾何形狀太複雜、介電質不均勻或是導體外殼的內部之類的問題。

3 時域的有限差分法(Finite Difference Time Domain Method, FDTD)

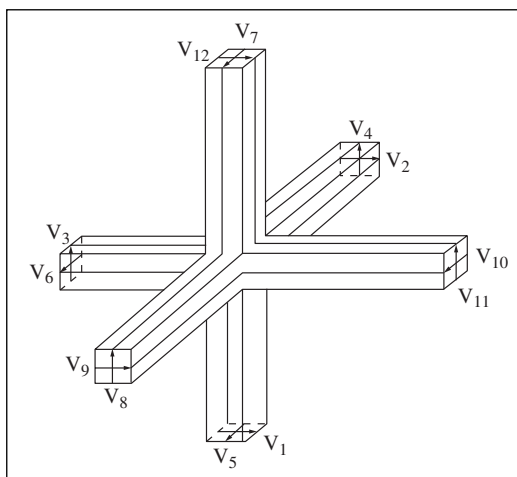
時域的有限差分法乃是直接求解下列的時變的馬克士威方程式：

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad \text{式9}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad \text{式10}$$

它是用中間差分近似法來進行對空間以及時間作微分。

時域的有限差分法是以時間的增量為基準來進行運算。輸入是以時間取樣過的類比訊號。每個單位區域包含兩個相關聯的節點，一個代表求解出的電場，另一個代表求解出的磁場，參閱圖三。每一個磁場的分量，一定會被四個電場的分量圍繞，表示成方程式則如式11。



◀圖三
時域的有限差分
法的基本單元

$$\begin{aligned} & \frac{1}{A} [E_{x1}(t) + E_{y2}(t) - E_{z3}(t) - E_{y4}(t)] \\ &= -\frac{\mu_0}{2\Delta t} [H_{x0}(t + \Delta t) - H_{x0}(t - \Delta t)] \end{aligned} \quad \text{式11}$$

其中，A代表圖三中最最近的那一面四方形的面積。在上式中，只有 $H_{x0}(t + \Delta t)$ 式未知，其餘都是已知，所以式11可以從電場(在時間t)算出磁場(在時間t+Δt)。同理，式12可以從磁場(在時間t+Δt)算出電場(在時間t+2Δt)。

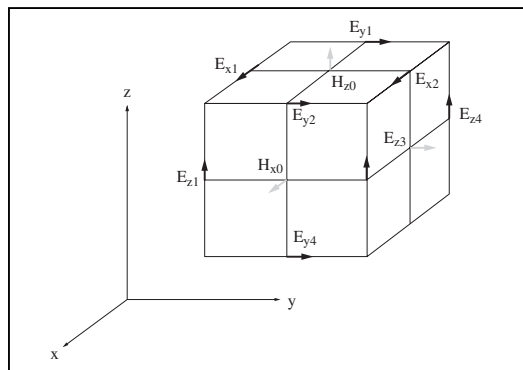
$$\begin{aligned} & \frac{1}{A} [H_{x1}(t + \Delta t) + H_{y2}(t + \Delta t) - H_{z3}(t + \Delta t) - H_{y4}(t + \Delta t)] \\ &= E_{x0}(t + \Delta t) + \frac{\epsilon}{2\Delta t} [E_{x0}(t + 2\Delta t) - E_{x0}(t)] \end{aligned} \quad \text{式12}$$

因為有限差分法限制每個基本單位必須是正方形，當應用在曲面的問題上時，必須以很小的基本單位來近似，這會大大的增加計算時間與資料量。有許多改良的方法來改進這個缺失，其中最具有前景的是FVTD(Finite Volume Time Domain)法，它的基本單位可以是任意形狀。

有限差分法的應用非常廣泛，它可以處理任意波形訊號的電磁波在複雜的導電或介電質的幾何結構中傳播的問題。此外，具有平行處理能力的電腦亦可以利用它來處理更複雜問題。這個方法唯一的缺點是：基本單位的大小是由待分析的幾何結構的細微程度來決定，因此對於一個很大的物體內含一個微小但是幾何結構複雜的物體的問題，可能會使得這個方法失效。

4 傳輸線矩陣法(Transmission Line Matrix Method, TLM)

►圖四
Symmetrical
Condensed Node
Formulation的節點



傳輸線矩陣法也是在時域上做分析，並且把整個待分析的區域切成數個基本單位。與有限差分法不同的是，每個基本單位中只有一個節點，這些節點之間相互以假想的傳輸線連結在一起。電磁場藉由節點之間的傳輸線，在單位之間傳播。三維的傳輸線矩陣法有很多種萃取節點的方式，最常見的是 Symmetrical Condensed Node Formulation，示意圖如圖四。每個節點之間以一對極化方向互相垂直的傳輸線連接，如果遇到負載或是有損耗的介質，則以一小段等效的傳輸線來表示。

傳輸線矩陣法的優點與適用範圍都和有限差分法相似，它同樣能處理電磁波在複雜的導電或介電質的幾何結構中傳播的問題，也同樣適用於具有平行處理能力的電腦上。但是，對於有限差分法無法負荷的幾何結構，它也同樣無法克服。

電磁干擾模擬軟體的應用

一、電磁干擾模擬軟體簡介

1. 數學模型的選擇

目前市面上的電磁干擾模擬軟體都是以其中一種或是數種數學模型為其運算核心，來模擬出結果。這些方法都有各自的優點與缺點，而我們最在意的運算結果準確性與所需的時間，恰如魚與熊掌不可兼得。考慮到我們應用的案子都是頗複雜的電路板，計算量非常大，因此，選用速度較快的傳輸線矩陣法來當運算核心。

2. 運算核心的介紹

接著介紹電磁干擾模擬的電磁波模擬方法。EMI雜訊的計算以下列兩個步驟來完成。首先，計算電路板上的走線所可能用到的傳輸線矩陣，將他們結合到元件的SPICE模型後，再解出流過走線上的電流。然後，以偶極天線模型(Dipole

Antenna Model)算出每條走線在使用者指定的觀測點的電磁輻射，再用向量法將它們加總起來，即可得到全部走線的電磁輻射。

3. 共模雜訊(Common Mode Noise)和差模雜訊(Differential Mode Noise)的考慮

使用偶極天線模型來計算全部走線的電磁輻射有個很重要的好處，就是共模雜訊和差模雜訊都有考慮到，而共模雜訊常常都是EMI除錯時所關注的重點。

二、電磁干擾模擬的分析流程

引進電磁干擾模擬軟體後，發展出的電磁干擾模擬分析流程舉例介紹如下，流程圖請參考圖五。

1. 取得佈局的檔案(Layout File Acquisition)

用ApsimRADIA分析PCB，必須先讀入PCB的佈局檔案。ApsimRADIA可以直接讀入用Mentor Board Station佈局的PCB佈局檔案。此外，藉由PADS to Mentor Layout Translator的轉換，也可以把PADS佈局的PCB佈局檔案，轉換成Mentor Board Station佈局的PCB佈局檔案，然後就可以讓ApsimRADIA讀入。

2. 元件模型的建立(Device Modeling)

為了知道各個主動元件如何將信號灌入走線，需要各個元件的特性模型(Behavior Model)，目前最通用的就是IBIS模型(I/O Buffer Information Specification Model)。一些半導體大廠如Intel，Motorola，National等等都已經提供元件的IBIS模型給客戶。如果無法取得這些模型，則必須自行參考DATA BOOK或用儀器量測來建元件的模型，然後再用ApsimIBIS將元件的IBIS模型轉換成SPICE模型。

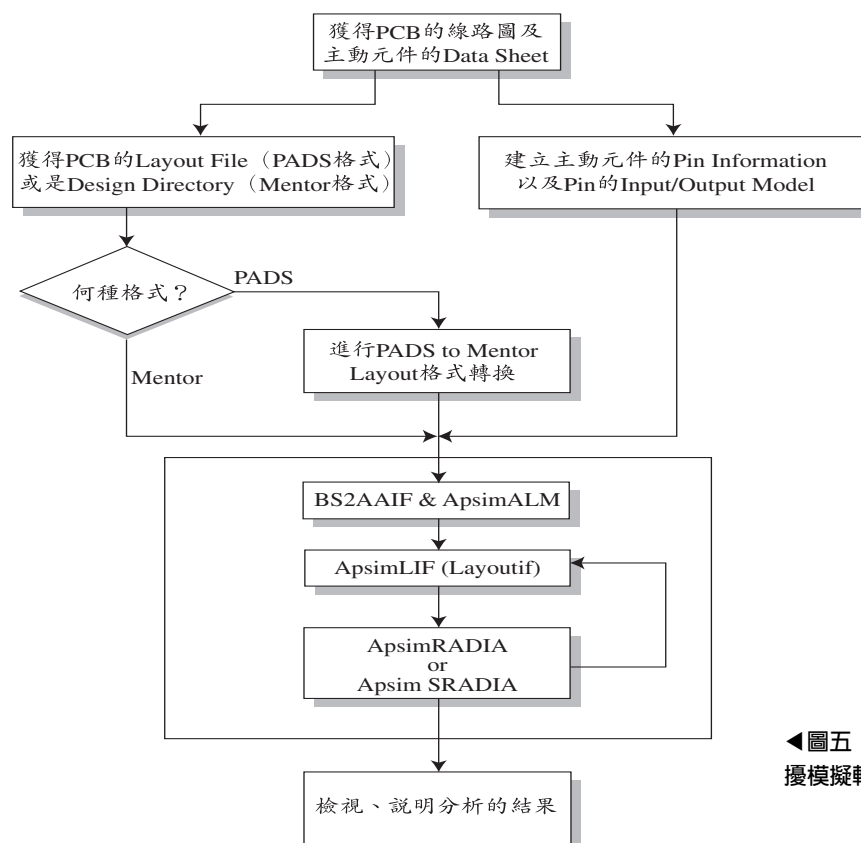
3. 類比式佈局模型化(Analog Layout Modeler)

這個部分主要是分析所取得之佈局的檔案，將走線、電源層等轉換成Layout Interface看得懂的格式。

4. 佈局介面(Layout Interface)

Layout Interface包含兩個部分，一是讀取Analog Layout Modeler中有關走線和電源層的資料，計算它們的傳輸線矩陣，並以Spice模型來表示之。二是元件 Browsing，這部分是將佈局的檔案中的元件和它們所屬的模型串起來，另外，再把第一部份產出的Spice 模型合併進來，成為一個完整的電路模型。

5. 輻射模擬(Radiation Simulation)



◀圖五 電磁干擾模擬軟體簡介

以ApsimSpice分析 Layout Interface的第二部分產出的電路模型，即可得到流過每條走線的電流，再引用偶極天線模型來計算每條走線所產生的電磁輻射。當然，觀測點是由使用者自訂，為了模擬在開放場地(Opensite)的量測結果，使用者可自行定義電路板方向(Board Orientation)、天線高度、待測物(EUT)與天線的距離以及測量值的最大值保持(Max Hold)等等參數。

程式輸出的結果則包含每個節點的電壓值，走線的電磁輻射以及全部的電磁輻射等資料，並且可依照使用者指定的規範(如FCC，CISPR等等)，顯示出走線的電磁輻射是否超出規範要求。

結論與未來展望

如眾所知，描述EMI的模型是建立在理想的狀況下，因此，軟體模擬也是以理想狀況為假設。但是EMI的變異性很大，每個案子都有不同的特性，受限於模型與軟、硬體的能力，要模擬出完全正確的結果仍有一段路要走，然而電磁干擾模擬是未來的趨勢，我們下一步的工作目標是加強應用分析軟體之元件替換修改的功能、提高傳輸線參數萃取的

準確度與更新SPCIE版本使其至少能支援到Level 13，以提昇此軟體的EMI Debug能力。相信隨著經驗的累積，一定可以讓EMI模型更加完備，進而使得模擬出的結果更具可信度。

參考文獻

1. T. H. Hubing, Survey of Numerical Electromagnetic Modeling Techniques, Intel Corp., 1991.
2. Frederick M. Tesche, et. al., EMC Analysis Methods and Computational Models, Wiley, 1997.
3. Applied Simulation Technology, ApsimOMNI Guide with ApsimALM, Jan. 20, 1997.
4. Applied Simulation Technology, ApsimRLGC Guide, Jun. 1, 1997.
5. Applied Simulation Technology, ApsimLIF Software Guide, Aug. 27, 1995.
6. Applied Simulation Technology, ApsimSPICE Reference, Jun. 4, 1995.
7. Applied Simulation Technology, ApsimRADIA User Guide, Oct. 22, 1995.