

## (二) 電磁模擬與最佳化 (EM Simulation and Optimization)

隨著通訊科技之日新月異，電磁分析(electromagnetic analysis)在電信工程中扮演愈來愈重要之角色。電磁分析中求解馬克斯威爾方程式(Maxwell's equations)之方法上由早期紙筆推導解析(closed form)和近似(approximate)解，演進至現今計算機上藉由電磁模擬技術求得數值解。拜計算機科技發達之賜，電磁模擬技術因此蓬勃發展，並被廣泛應用於複雜系統中電磁場之分析，例如計算機晶片設計與電路分析、電磁相容與干擾分析、無線通訊與電波傳播、天線設計與分析及遙測等。模擬之數值方法依求解馬克斯威爾方程式之數學表達型式之不同，可歸類為兩大類：積分方程法(如矩量法(method of moments))與微分方程法(如時域有線差分法(finite difference time domain method)與有限元素法(finite element method))；另一方面，依求解系統電性尺度不同考量，可分為全波分析(full-wave analysis)法與高頻漸近近似(high-frequency asymptotic)法。

早期電磁模擬技術之效率(efficiency)較差，當計算資源(computational resources)受限時，常無法分析較複雜之電磁問題。舉例而言，當模擬結構之自由度(degree of freedoms)或未知數個數(number of unknowns)為 $N$ 時，早期技術所需之計算資源為 $O(N^2)$ 之記憶體與 $O(N^3)$ 之中央處理器時間(CPU time)；因應數值方法效率之改善，近年來電磁數值技術發展走向快速算法 (fast algorithm)與混合式算法(hybrid algorithm)，在相同之自由度條件下，大部份快速算法與混合式算法所需之計算資源為 $O(N\log N)$ 之記憶體與 $O(N\log N)$ 之中央處理器時間，因此當結構之自由度很大時，傳統算法與快速算法及混合式算法於計算資源上之差異會相當明顯。目前部份商用電磁軟體，如IE3D (Zeland)、HFSS (Ansoft)、Microwave Studio (CST)等，已將開發成熟之快速算法及混合式算法嵌入來解決部份過去無法分析之大型或較複雜之結構。

然而由於無線通訊科技進展迅速，隨著系統頻率及傳輸速率的提高及電路的縮小，電路設計與架構愈趨複雜，此外電磁新材料之開發與應用以及系統中多重物理(multiphysics)(如量子效應、電磁場與熱之耦合現象)之分析，大幅增加電磁模擬之困難度。整體而言，電磁模擬領域仍有許多問題需要解決，重要的研究課題如下：

### 1. 電磁模擬之加速技術

已開發之快速算法及混合式算法，如快速多偶極(fast multipole)法、有限元素及邊界積分(boundary integral, BI)混合法，亦即Hybrid FEM-BI，著眼於理論與數值算法上提升模擬技術之效率，但當處理更複雜之實際問題時，仍會有解準確度不佳、解不收斂或計算資源太高之問題，因此電磁數值技術仍然有很大的改善空間。改善的方法上可重兩方向著手：理論與算法效率之提升及計算機硬體之加

速。

在理論建立上，可根據電磁場之物理特性以其它數學方式表示，如上述之快速多偶極法中將電磁場以數值計算上效率較高之多偶極展開法表示，達到大幅降低計算資源之需求。在算法效率之提升上，可利用如快速傅利葉轉換(fast Fourier transform)這類高效率之數值算法，大幅降低算法中矩陣向量乘積(matrix-vector multiplication)之計算量。

在計算機硬體之加速上，由於現今計算機硬體效能卓越，單一台個人電腦可分析的問題可能是過去工作站所無法處理的，加上近年來圖形處理器(Graphic Processing Unit, GPU)技術發展迅速，一張GPU卡上即擁有上百個核心，在計算能力上較目前雙核心、四核心、和八核心的多核心CPU更適合於高速電磁模擬之應用。另一方面，電磁模擬之加速上可將配備有GPU卡之多台計算機之串接，形成一計算機叢集(PC cluster)，透過平行處理(parallel processing)技術，進一步提升電磁模擬技術之效率。

## 2. 電磁電路共模擬及最佳化

傳統電路設計常將電磁效應以等效電路來探討，並採用電路模擬技術預測電路的響應，以節省設計電路的時間與成本。目前因產品開發時程縮短，加上複雜的系統模擬需時較長，在有限時間內，無法頻繁地更改設計。因此如何發揮最佳化技術以減少模擬次數為重要的課題。例如使用傳統的全波電磁模擬技術以進行電路最佳化，將使用者自行輸入設計參數及修正量，進行全波電磁模擬的自動最佳化，可使電路參數在小範圍內自動修正，並利用內差(interpolation)法搜尋全波設計的最佳化參數，節省設計時間。

另一方面，以全波電磁模擬的最佳化，開發全波電磁模擬與電路模擬的混合最佳化，配合已有的電路最佳化技術，經由電路模擬達成初步最佳化，再利用全波電磁模擬進行細部設計的微調最佳化，可以加速整體最佳化的流程。另外，目前微波設計軟體的使用已相當普遍，可相當準確地預測所設計系統的性能。但是大部份的微波設計軟體較少考慮封裝結構的效應，因此常常在電路封裝後發現系統偏離原訂規格，必須微調參數以符合規格要求，甚或需要重新設計。如何針對各個封裝結構，模擬其電氣特性，將之加入電路的模擬程序，有助於整個系統的設計。

## 3. 多重物理模擬

當一系統中有多重物理效應存在時，無法以傳統單一物理之模擬技術正確預測系統特性。例如射頻微機電裝置(RF-MEMS)，裝置中包括電磁場與熱之耦合(electromagnetic-thermal field coupling)、結構場與熱之耦合(thermal-structural field coupling)與結構場與靜電場耦合(structural-electrostatic field coupling)效應，因此裝置之分析必需同時仰賴電磁與熱力模擬技術；另外，當物體或電路尺寸進入奈

米尺度時，正確之分析需於電磁模擬中考量量子效應，因此多重物理模擬技術為瞭解多重物理系統之不可或缺之工具，然而如何在透過模組化之方式，將各模擬技術銜接在一起是此類技術開發之關鍵。

## 參考文獻

### (三) 電磁模擬與最佳化 (EM Simulation and Optimization)

- [2.1] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 14, pp. 302–307, 1966.
- [2.2] A. Taflove, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, Norwood, MA: Artech House, 1995.
- [2.3] J.-P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," *J. Comp. Phys.*, vol. 114, pp. 185–200, 1994.
- [2.4] R. F. Harrington, *Field Computation by Moment Method*, Malabar, FL: Krieger Publ., 1982.
- [2.5] S. M. Rao, D. R. Wilton, and A. W. Glisson, "Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 30, no. 3, pp. 409–418, 1982.
- [2.6] J. L. Volakis, A. Chatterjee, and L. C. Kempel, *Finite Element Method for Electromagnetics: Antennas, Microwave Circuits, and Scattering Applications*, Piscataway, New Jersey: IEEE Press, 1998.
- [2.7] J. M. Jin, *The Finite Element Method in Electromagnetics*, New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [2.8] S. W. Lee and G. A. Deschamps, "A uniform asymptotic theory of electromagnetic diffraction by a curved wedge," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 24, pp. 25–35, 1976.
- [2.9] V. Rokhlin, "Rapid solution of integral equations of scattering theory in two dimensions," *J. Comput. Phys.*, vol. 36, no. 2, pp. 414–439, 1990.
- [2.10] A. F. Peterson *et al.*, *Computational Methods for Electromagnetics*, IEEE Press, 1998.
- [2.11] W. C. Chew *et al.*, *Fast and Efficient Algorithms in Computational Electromagnetics*, Artech House, 2001.