智慧車電 PCBA 之 BCI 及 ESD 模擬技術簡介

研究發展處　李沛錦

隨著自動駕駛、車聯網與電動化快速發展，汽車產業進入智慧車電系統高度演化的新階段。其中，印刷電路板組件（PCBA）作為車載電子系統的核心，其電磁耐受性（Electromagnetic Susceptibility，EMS）至關重要。EMS 係指電子系統在充滿電磁干擾的環境中，仍能維持原有性能且不發生功能降級的能力。倘若系統電磁耐受性不足，可能導致元件誤動作、訊號失真，甚至造成系統失效，進而危及行車安全。

在傳統開發流程中，電磁相容性（EMC）驗證往往被視為最後階段的盲盒，通常需待樣品製造完成後，才送往實驗室進行測試。然而，僅憑經驗難以保證設計能一次到位，一旦測試失敗，不僅須面臨重新佈線與更換元件，造成成本急遽攀升，更可能導致產品上市延宕。更具挑戰的是，傳統測試缺乏可視化能力，無法直觀呈現電磁波在系統內部的耦合路徑，進而限制除錯效率。要打破「設計、打樣、實測、再修改」的惡性循環，導入高階電磁場模擬分析技術，預期將成為當前車電產品電磁相容性設計的重要解方。

此模擬分析技術可在電腦輔助工程（CAE）環境下，建構符合相關規範的等效虛擬測試場景。一般而言，車載電子產品的電磁耐受（EMS）分析涵蓋範圍相當廣泛，包含大電流注入（BCI）、靜電放電（ESD）、輻射抗擾度（RI）、橫電磁波室（TEM Cell）以及傳導暫態抗擾性等多項關鍵測試。倘若能在產品設計初期，即針對這些 EMS 項目進行 PCBA 等級的模擬與對策分析，將可提前預防電磁干擾問題，並大幅降低產品開發成本。本文將先針對智慧車電產品 PCBA 中較具代表性的 BCI（大電流注入）與 ESD（靜電放電）模擬分析技術進行介紹，相關簡介如下：

一、 大電流注入（BCI）模擬分析

智慧車電產品主要仰賴錯綜複雜的線束進行電力與訊號傳輸，當外界雜訊耦合至線束時，可能在導線上感應出強大的干擾電流，並傳導至 PCBA 內部。BCI

模擬可建立虛擬注入探頭，並依據 ISO 11452-4 等國際標準，校準出符合規範等級的注入電流，如圖 1 所示。再藉由高頻電磁場與電路的聯合模擬，可提前掌握干擾電流在電路板上的分佈與耦合路徑，進而評估干擾訊號透過連接器及走線耦合至核心晶片所產生的電壓波動，並據此採取防護措施（如優化濾波電路設計、調整共模電感參數或改善接地迴路等），以確保干擾訊號維持在容許的工作範圍內。

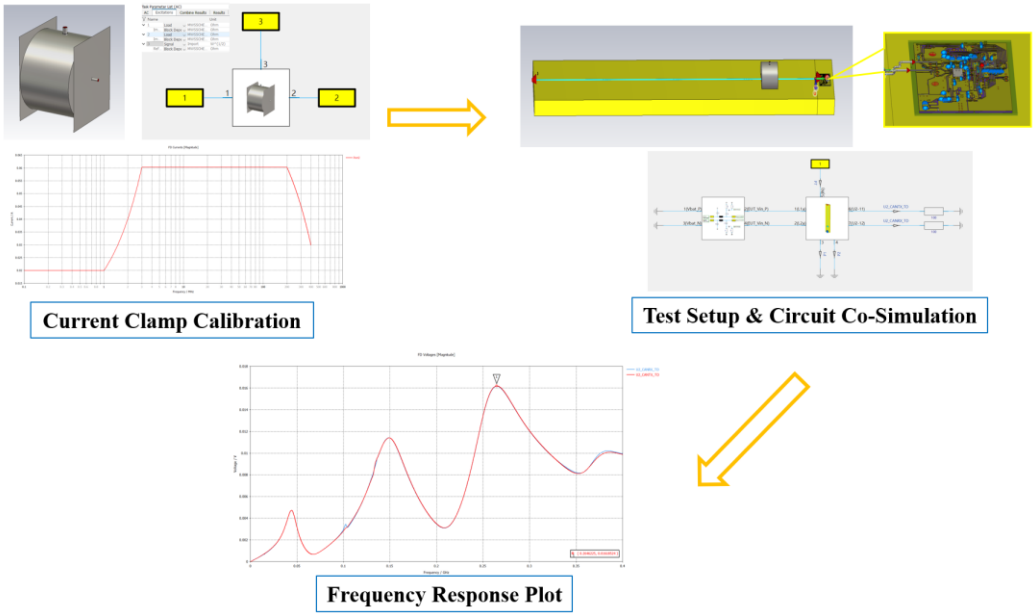


圖 1、大電流注入（BCI）模擬分析示意圖

資料來源：Dassault Systèmes CST Example，車輛中心整理

二、 靜電放電（ESD）模擬分析

靜電放電屬於具有極短上升時間的暫態放電現象，極易在製造或操作過程中，透過介面、縫隙進入 PCBA。ESD 模擬可導入暫態電路模型，模擬符合 ISO 10605 國際標準的靜電槍放電暫態響應，如圖 2 所示。在 ESD 模擬過程中，可清晰觀測靜電放電對 PCBA 電路中電壓、電流的影響，並透過調整或增加靜電防護元件，有效將靜電能量快速導向安全區域，以避免過大的突波對核心晶片造成永久性損害。

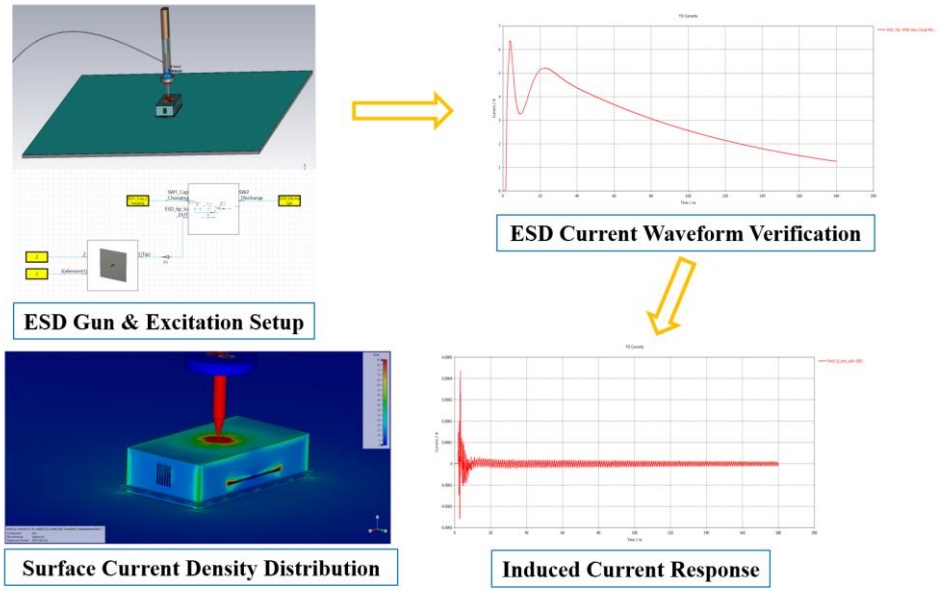


圖 2、靜電放電（ESD）模擬分析示意圖

資料來源：Dassault Systèmes CST Example，車輛中心整理

透過 CAE 模擬分析技術，能有效協助智慧車電業者在產品開發初期，將抽象的電磁相容問題轉化為可視化數據與科學依據。此舉不僅能大幅提升除錯效率、縮短開發週期，更能確保智慧車電產品在嚴苛的電磁環境下，具備良好的穩定性與行車安全性。

倘若需要進一步瞭解相關內容細節，歡迎洽詢:車輛中心/研究發展處/工程分析中心/李沛錦副工程師。電話：04-7811222 分機 3325/ E-mail：raisa@artc.org.tw