

大電流注入法及其負載效應之研究

李惠中、鄒騰億、吳汶榮

財團法人車輛研究測試中心 副工程師

505 彰化縣鹿港鎮鹿工南七路 6 號

doris@artc.org.tw

摘要：大電流注入(Bulk current injection, BCI)為車輛整車及零組件國際標準中所規範之電磁耐受(electromagnetic susceptibility, EMS)試驗項目，規定正式試驗前須於 50 Ω 治具(待測)系統下執行校正，以校正所得之順向功率等參數作為正式試驗時之注入設定參數，但因待測系統所接收之功率會隨待測裝置、負載及線束等特性而不同，故目前國際標準中之替代法(substitution method)及閉迴路法(closed-loop method)二種試驗方法雖廣受使用，但仍具增進試驗公平性的空間。本論文即為大電流注入之二種方法做基本介紹，並說明以大電流注入探棒架於不同負載系統下，其注入特性之量測及研究結果，以瞭解負載效應對於大電流注入試驗之影響。

關鍵詞：大電流注入(Bulk current injection, BCI)、負載(load)

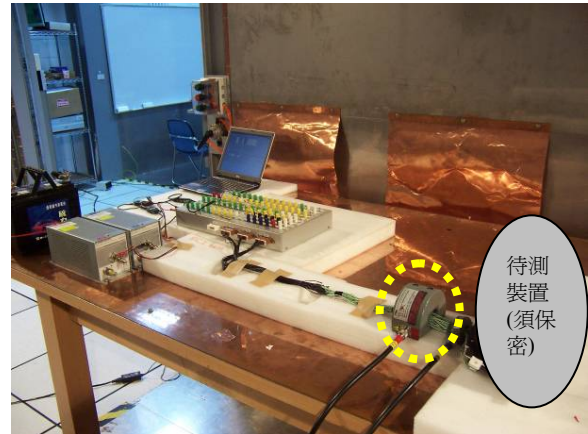
一、背景介紹

為確保乘車者及用路人的安全，車輛領域較一般資訊家電類別在電磁相容試驗上被要求更多之電磁耐受(electromagnetic susceptibility, EMS)試驗項目。其中，大電流注入(Bulk current injection, BCI)試驗法因僅需於屏蔽室中執行，並於 400 MHz 或更低頻率之試驗不需使用高功率之功率放大器，成本較需於電波暗室中進行之典型輻射耐受法為低，故在眾多頻域之電磁耐受系列試驗中，通常作為頻率 400 MHz 以下之必須試驗項目，除為車輛零組件之國際標準 ISO 11452-4 及國內 CNS 15207-4(測試配置如圖一)所規範外[1][2]，亦為車輛整車國際標準 ISO 11451-4 及國內 CNS 15194-4 (測試配置如圖二)所規範[3][4]。

因大電流注入試驗方便及成本經濟，近年之國際趨勢上更將其試驗架構概念應用至更高頻率，在將於 2011 年改版公告之 ISO 11452-4 國際標準中[5]，除既有試驗頻率至 400 MHz 之大電流注入法外，將新增試驗頻率 400 MHz 至 3 GHz 之管狀波耦合器(Tubular wave coupler, TWC)法，由此而見大電流注入法之測試概念於車輛電磁相容領域的應用及地位。

簡單來說，大電流注入法係使用大電流注入探棒環繞在待測裝置與其電源或負載之連接線束周圍，依頻率將目標強度之電流以耦合方式注入待測裝置之線束，使之產生擾動電流，以觀測待測裝置在此電磁干擾狀況下之功能表現狀態，並判定其電磁耐受設計是否已符合國際標準或廠規需求。

在正式試驗前，包含信號產生器、功率放大器、大電流注入探棒等設備組成之測試系統，及校正治具及負載組成之 50 Ω 待測系統須先經校正



圖一、車輛零組件之大電流注入試驗，虛線圈起處為大電流注入探棒



圖二、車輛整車之大電流注入試驗，虛線圈起處為大電流注入探棒

程序，以求得此配置下達到目標注入電流(ISO 及 CNS 舉例為 25 mA 至 100 mA)時，在各測試頻率所需產生之流入注入探棒之順向功率(forward power)，以作為正式測試時產生注入電流之參考功率。

在正式測試上，於 ISO 及 CNS 規範了替代法(substitution method)及閉迴路法(closed-loop method)二種方法。替代法係以校正所得之順向功率由大電流注入探棒直接耦合至待測線束，由於此時待測線束連同待測裝置及負載已不為校正時之標準 50 Ω，故於待測線束上產生之擾動電流將隨整個待測系統特性而不同。就閉迴路法而言，在正式測試之配置中除大電流注入探棒外，亦架設一相似之環形電流量測探棒於待測線束上，以量測待測線束上實際之擾動電流大小，但顧及測試之標準化及測試效

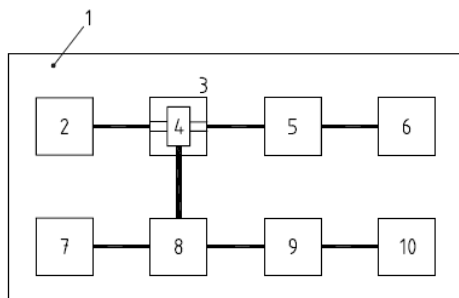
益，標準中規定僅可將順向功率調整至校正時的 4 倍為止，故此測試法雖未必可令所有頻率之注入電流符合目標值，但至少可使部分頻段之注入電流達到目標值。

關於待測系統對於大電流注入測試之實際擾動電流大小的影響，經搜尋相關研究文獻並不多見，除 John W. Adams 於 1992 年之研究文獻[6]，典型為大電流注入探棒注入功率及待測系統擾動功率二量測埠間之 S 參數量測，及其電路模型分析，此資料將可作為後續研究之輔助資料，但於此問題研究初期，我們感興趣的仍是從標準測試系統下探究問題全貌，故此論文僅先將待測系統之負載設為可變參數，探討其於校正配置下與原 50 Ω 校正系統之順向功率等參數差異。

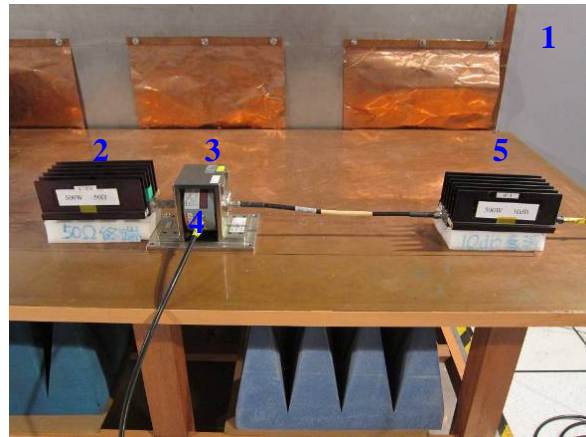
二、實驗說明

ISO 及 CNS 之大電流注入法校正配置規定如圖三所示，此配置分為二個部分，一是高功率(大電流)產生系統，即圖中之項目 4、7~10，目的為使大電流注入探棒產生高功率，以令電流探棒以耦合方式將功率傳遞至另一(待測)系統，並在此射頻系統中以特性已知之耦合器量得探棒之順向功率。另一系統即待測系統，為圖中之項目 2、3、5、6 所組成，標準校正架構下之待測系統為 50 Ω 系統，所謂校正即是在此系統下求得目標電流所需之順向功率、信號產生器輸出功率等設備參數，以作為後續正式測試之設備參數參考依據。

為瞭解負載改變對於正式測試時之所需功率及實際電流大小之影響，我們改變標準校正配置架構下之負載，此負載仍須為可承受高功率(大電流)之被動元件，故採用可承受 2000 W 之可變電阻，雖此可變電阻之電阻值僅可於直流或低頻下參考，但仍可作為此實驗中負載改變之實驗工具。本實驗在大電流注入法標準校正配置下，使用廠牌型號為 FCC F-140 之大電流注入探棒，其負載分別連接校正用之 50 Ω 標準負載、25Ω、50 Ω 及 75 Ω 高功率可變電阻等 4 種負載，並以本中心實驗室之測試系統及控制軟體執行標準校正程序，為確保過程中之人員設備安全及避免不可預期之狀況發生，以本系統可產生之最小目標電流 10 mA，於頻率 1 MHz 至 400 MHz 達成此目標電流時，各負載之測試所需的順向功率、信號產生器輸出位準等參數進行分析。



圖三、大電流注入法之校正配置，各符號代表設備如下，(1)屏蔽室，(2)50 Ω 同軸負載，VSWR 最大為 1.2:1，(3)校正治具，(4)注入探棒，(5)50 Ω 衰減器，(6)頻譜分析儀或相同功能的設備，(7)射頻功率位準量測設備(需要二個)，(8)50 Ω 射頻雙向耦合器(去耦合係數最小為 30dB)，(9)輸出阻抗 50 Ω 之寬頻放大器，(10)射頻信號產生器[1]



圖四、大電流注入法之標準校正配置，符號代表設備同圖三，其中(2)為 50 Ω 同軸負載，(3)為校正治具，(4)為注入探棒



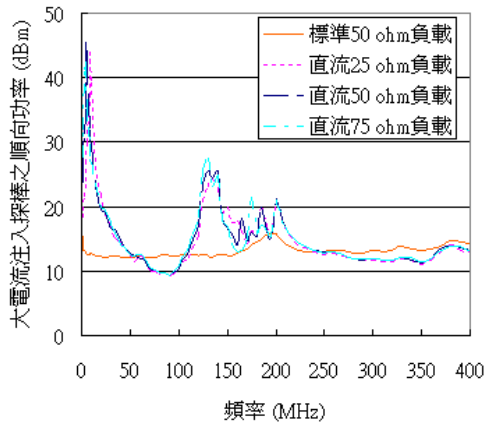
圖五、改變負載之大電流注入法量測，與圖四唯一不同處為以虛線圈起處之高功率可變電阻取代圖四之(2) 50 Ω 同軸負載

三、量測結果

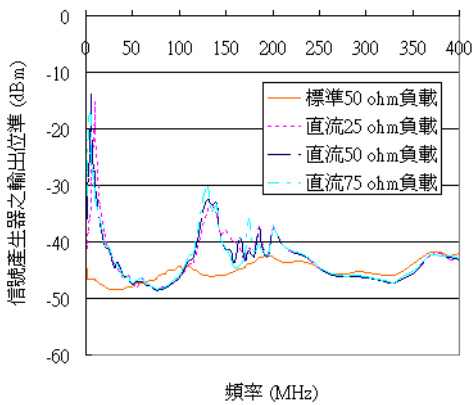
依上節實驗進行量測，得出不同負載待測系統下由功率產生系統產生 10 mA 之參數，圖六為流入大電流注入探棒之順向功率比較，圖七為信號產生器所需之輸出位準比較。

結果顯示，將可變電阻調整至直流 25、50、75Ω 下之順向功率及信號產生器輸出位準的頻率曲線接近，而與標準 50 Ω 負載有所差異，標準 50 Ω 負載之所需功率隨頻率變化較穩定，可推測其阻抗特性亦應隨頻率較無劇烈變化；而雖調整可變電阻之直流電阻為不同值，但其 1 MHz 至 400 MHz 之頻率響仍非常接近，由此可推估此可變電阻在 1MHz 以上之阻抗特性應是由等效模型上隨頻率而變之電容、電感所主宰，而非由直流電阻主宰，以於 1 MHz 以上有近似之所需功率，關於不同直流阻值之阻抗量測及計算亦於本研究第四節中探討。

回到探討以標準校正配置所得之順向功率，作為不同負載下正式測試之功率產生參考值，就替代法而言，如圖六所示，當其他負載所需之順向功率曲線大於標準 50 Ω 之順向功率曲線，表示此負載在正式測試中需要更高的功率才能產生目標電流大小，故其在正式測試所注入之電流將會小於目標值；反之，當所需之順向功率曲線小於標準 50 Ω



圖六、不同負載下之大電流注入探棒順向功率



圖七、不同負載下之信號產生器輸出位準

順向功率曲線，表示在此負載下不需如此高的功率即可產生目標電流大小，其在正式測試所注入之電流將會大於目標值。

若就閉迴路法而言，ISO 及 CNS 均規定為達目標電流，最大可將順向功率增加至校正時之 4 倍(約 6dB)，但由圖八所示，將各負載所需順向功率與校正所得之值相較，尚有頻段如 3 MHz~25 MHz 及 125 MHz~150 MHz 超出順向功率之 4 倍(約 6dB)，顯示此負載使用閉迴路法進行正式測試時，在部分頻段是不足甚至遠小於目標電流的。

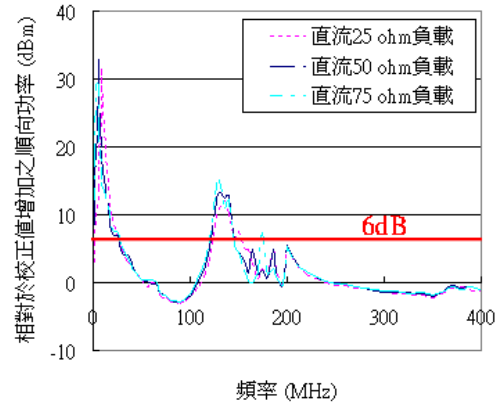
四、延伸分析

由上述量測結果得知，負載影響大電流注入法之順向功率，進而影響注入電流之大小，故進一步分析負載阻抗及進入負載之功率與上述量測結果之相關性。

負載阻抗可藉網路分析儀量測 S(散射)參數，再以射頻電路軟體或以(1-2)計算而得。對於單埠網路，其 S 參數與負載之輸入阻抗關係為(1-1)所示[7]：

$$S_{11} = \frac{z_{in} - 1}{z_{in} + 1} \quad (1-1)$$

其中， $S_{11} = S_{11R} + jS_{11I}$ 表示由網路分析儀量測到之單埠網路 S 參數， $z_{in} = r_{in} + jx_{in}$ 表示負載之 50 Ω 正規化輸入阻抗，經整理可得 z_{in} 如(1-2)，



圖八、相對於校正值增加之順向功率

$$z_{in} = \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} = \frac{(1 - S_{11R}^2 - S_{11I}^2) + j2S_{11I}}{1 + 2S_{11R} + S_{11R}^2 + S_{11I}^2} \quad (1-2)$$

對於大電流注入法之負載，進入負載之功率 p 為(2)所示[7]， V_{in} 表示輸入電壓， I_{in} 表示輸入電流， $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$ 表示負載輸入阻抗，

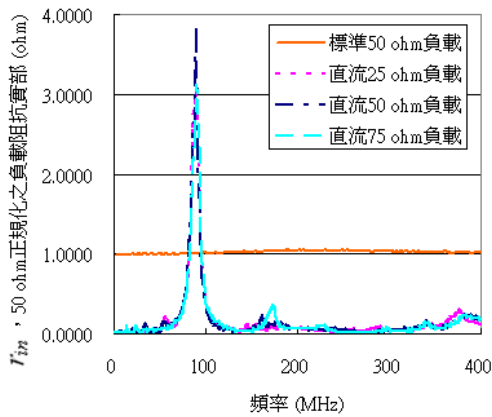
$$P = \frac{1}{2} \text{Re}(V_{in} I_{in}^*) = \frac{1}{2} |I_{in}|^2 \text{Re}(Z_{in}) \\ = \frac{1}{2} |I_{in}|^2 R_{in} = 25 |I_{in}|^2 r_{in} \quad (2)$$

由(2)可知進入負載之功率僅與負載阻抗之實部相關，50 Ω 正規化之負載阻抗實部 r_{in} 的頻率響應如圖九所示，就校正用之標準 50 Ω 負載而言，經網路分析儀量測及(1-2)計算而得之 50 Ω 正規化阻抗實部約為 1，即其阻抗實部約為 50 Ω，此與已知吻合。

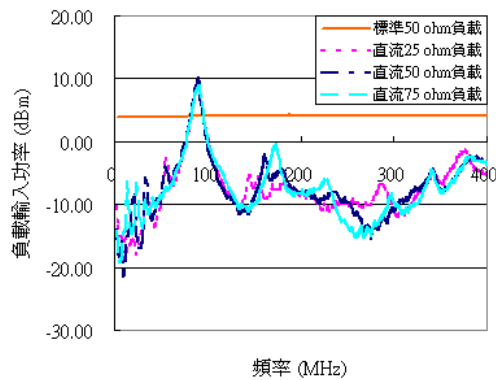
依本研究第二節之量測條件，電流約為 10 mA，負載之輸入功率計算依(2)如圖十所示。就標準 50 Ω 負載而言，以頻率 100 MHz 為例，圖六所示之順向功率約為 12 dBm，依大電流注入探棒校正報告之插入損失約為 4.5 dB[8]，二者相差之功率 7.5 dBm，可視為待測系統所吸收之功率。而經阻抗量測計算及功率計算如圖十所示之輸入功率約為 4 dBm，考量線束另一端有一相等之進入 50 Ω 頻譜分析儀的功率，由此計算進入待測系統線束兩端之功率約為 7 dBm，這與前者透過功率量測而得之待測系統吸收功率 7.5 dBm 頗相吻合。

進一步比較圖六之大電流注入探棒注入之順向功率，與圖十計算而得之注入負載功率，並依(2)考量進入 50 Ω 頻譜分析儀的功率約 2.5 mW，可知在許多頻段之順向功率遠大於進入待測系統之功率，差距甚至可達 40 dB，此差距即是因待測系統與大電流注入探棒及其功率產生系統阻抗不匹配所造成之功率反射。

進而就圖八中順向功率超出校正值 6 dB 之 3 MHz~25 MHz 及 125 MHz~150 MHz，即閉迴路法中順向功率已達 4 倍仍無法達到目標電流之頻段，圖十所示其負載所需功率很小，故其需要如此高之順向功率，乃因待測系統與注入探棒間之阻抗不匹配造成之功率反射耗散。



圖九、50Ω 正規化之負載阻抗實部



圖十、負載輸入功率

另就圖八中，順向功率較校正值增加為負數之頻段 55 MHz~110MHz 及 240 MHz~400 MHz，即表示以替代法執行正式測試時，所用之順向功率將可使線束產生超過 10 mA 之電流，此意謂著產品之電磁耐受設計等級將可能被無意識地提高至超出 10 mA 的等級，進而造成產品設計成本之浪費。

五、結論及未來工作

由本研究結果，顯示 ISO 及 CNS 規範之車輛整車及零組件大電流注入電磁耐受測試法，不論是替代法或閉迴路法，除非該頻率之待測裝置、負載、線束等組成之待測系統與標準校正配置之阻抗相同，才能於正式測試中確實產生目標電流值。

正式測試之順向功率係以校正值為參考參數，表示由待測系統與注入探棒間之阻抗匹配程度產生之反射功率，及負載之阻抗決定了注入電流大小。在相同之順向功率下，較大之反射功率及負載阻抗使得注入電流變小，以閉迴路法可調整功率至校正值之 4 倍，雖對於產品是否已具備所需之電磁耐受防護設計等級仍是未知，但依然符合當今之標準測試程序，可以較低之電磁耐受防護設計等級通過測試。較小之反射功率及負載阻抗使得注入電流變大，當以替代法執行時，將因而提高產品之電磁耐受防護設計門檻，帶來多餘之資源成本耗費；當以閉迴路法執行時，能因閉迴路法中之電流監控探棒作用調整至目標電流，不致提高電磁耐受防護設計門檻。

關於待測系統特性對正式測試時之電流大小的

影響，本研究僅就標準 50 Ω 校正架構下改變其負載特性，往後，除將繼續探討更具車輛領域代表性之負載，亦將涵蓋待測系統中之線束等特性，乃至整體待測系統特性進行研究。

如本研究第一節所提，當今文獻中關於大電流注入法之研究幾為大電流注入探棒注入功率及待測線束擾動功率二量測埠間之 S 參數量測，以及電路模型分析，後續也規劃整合國內外學者專家此部分之研究成果，繼續為大電流注入測試法之實際內涵進行研究。

參考文獻

- [1] ISO 11452-4:2005/2009(Cor.1), "Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 4: Bulk current injection (BCI)"
- [2] CNS 15207-4: 民國 97 年, "道路車輛窄頻輻射電磁能量之電擾動組件試驗法—第 4 部: 大電流注入"
- [3] ISO 11451-4:2006, "Road vehicles — Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy —Part 4: Bulk current injection (BCI)"
- [4] CNS 15194-4: 民國 97 年, "來自窄頻輻射電磁能量的電擾動之車輛試驗法—第 4 部: 大電流注入"
- [5] ISO/FDIS 11452-4:2011, "Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances for narrowband radiated electromagnetic energy — Part 4: Harness excitation methods"
- [6] John W. Adams, Jose Cruz, and Dean Melquist, "Comparison measurement of currents induced by radiation and injection", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol 34, No. 3, Aug. 1992
- [7] David M. Pozar, "Microwave Engineering", 2nd, John Wiley & Sons, 1998
- [8] "Certificate of Calibration", EMC Kashima Corporation, Certificate No. CR-11501, Calibration date 2011/3/17