

電磁脈衝屏蔽防護測試

作者/張衍智 博士

提要

針對電磁脈衝武器的輻射侵襲效應，建構屏蔽層已成為最有效之手段。驗證屏蔽層之功能，通常是使用頻域測試方法。本文不僅描述電磁脈衝屏蔽效值測試之系統架構與量測方法，同時也應用該等測試系統，進行通信車輛外殼之屏蔽防護能力的評估，並針對缺失與改善作一扼要的說明。

前言

高空核爆電磁脈衝是一種快速、時變、暫態電磁波，為瞭解此一電磁脈衝如何對用電設備產生損傷、能量耦合的路徑，以及適當可行的防護措施，因此可以頻域的連續波測試方式，照射用電設備，以量取其對HEMP的感受性與轉換函數(Transfer Func-

tion)^①。假設在相同頻率與相同極化之電磁輻射源照射下，接收天線在沒有電磁屏蔽與具有電磁屏蔽，所量測出之電壓訊號分別為 V_c 與 V_m 。據此，而可定義出屏蔽效值為此兩接收訊號大小的比，如式(1)所示：

$$SE = 20 \log \left(\frac{V_c}{V_m} \right) \quad (1)$$

① P. Chowdhuri, "Electromagnetic Transients in Power Systems", John Wiley & Sons, New York, 1996.

一、在HEMP防護工程與研究之領域，依待測裝備或設施之尺寸，以及測試系統之特性限制，一般頻域測試方法有下列三種：

(一) 連續波照射測試 (Continuous Wave Immersion, CWI)

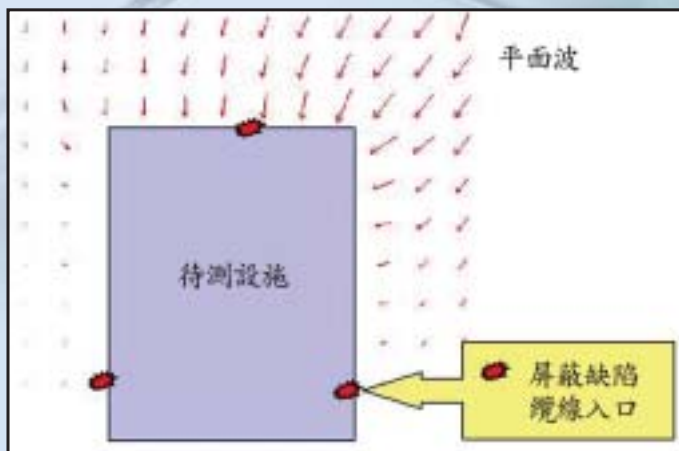
連續波照射測試是由激發源輸入信號到一寬頻天線，照射所欲防護之系統。並由所欲防護之系統內，量測輸出響應，以求出電磁脈衝對該系統耦合的轉換函數以及耦合路徑。因此該測試方式，非常適合於量測任一欲進行電磁脈衝強化(hardening)工程之系統，其內任何位置或裝備與元件之對電磁脈衝之耦合能量。該測試系統發波與量測方式通常可歸類為一遠場測試，如圖一所示。

(二) 屏蔽效能測試 (Shielding Effectiveness, SE)

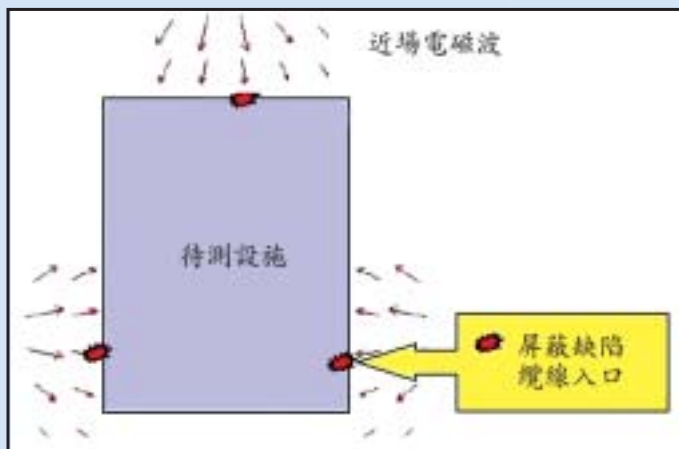
不同於連續波照射測試之將待測設施完全籠罩於平面電磁波裡，屏蔽效能測試僅針對待測設施某一局部區域、門、窗、以及各式防護組件等進行測試。屏蔽效能測試程序，可保證一個具有電磁脈衝防護功能的設施，其屏蔽性值是可滿足規格需求的。同時，也可與連續波照射測試之結果相互驗證，並補足無法進行連續波照射測試之處。屏蔽效能測試之程序是輸入激發源到各種不同頻段之天線，而在待測物之另一端則放置接收天線，其所量測出之訊號，是以電壓來正比於場強。屏蔽效能測試應用於電磁脈衝防護工程時，通常為一近場測試，如圖二所示。

依據美軍電磁脈衝防護規範(MIL-STD-188-125)，通常是近場屏蔽效能測試與遠場連續波照射測試交互並用。無論採用何種方法，所測試出的屏蔽效值結果，都是可以信賴的。其間之差別在於：測試系統架設時複雜程度，待測物測試點數目多寡，需考慮收、發天線尺寸大小所造成之腔振效應等因素。至於測試系統之選擇，則需遵循「因地制宜」原則而選取適宜之測試方法；亦即，需考慮測試時因待測物之佈陣位置與幾何結構的限制，而選取適宜之測試系統與方法。

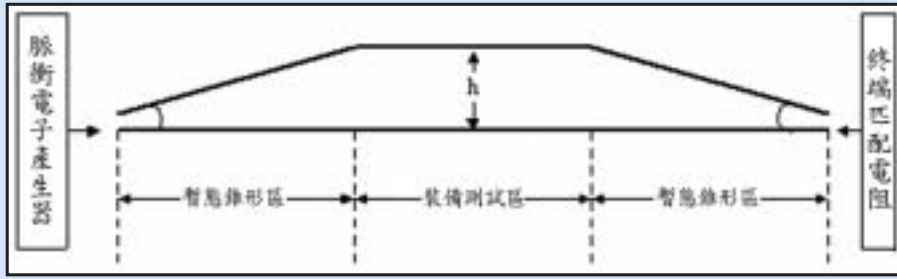
然而針對現行國軍或民間所使用之電子設備而言，通常具有電源模組、輸出入電



圖一 連續波測試系統為一遠場測試 (作者繪製)



圖二 屏蔽效能測試為一近場測試 (作者繪製)



圖三 平行板模擬器測試系統 (作者繪製)

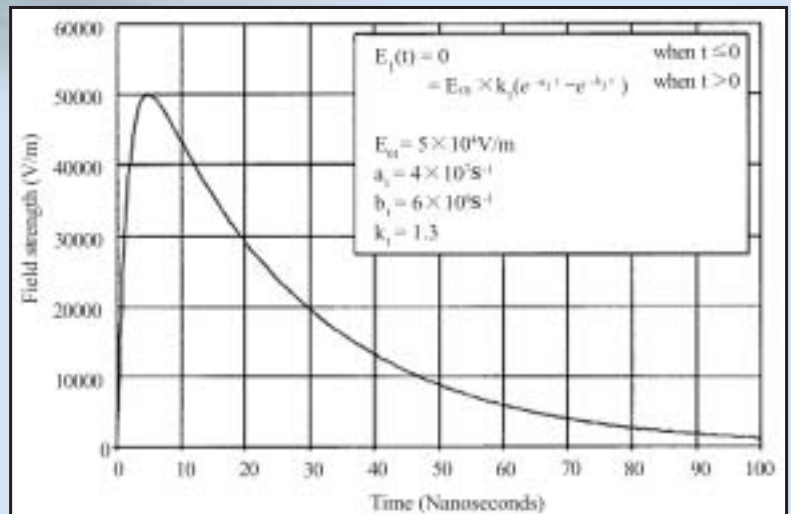
路、資料儲存裝置、數位處理電路等，且都需要通過國家電磁相容安規檢驗(所適用之規範為：EN55022、CISPR22)，以避免所產生之電磁輻射散溢出，而對人體產生危害，因此其外殼就是一個電磁屏蔽層。由互易定理，裝備之機殼對外來之電磁輻射，也具有一定之屏蔽效應。由於上述兩項測試系統，其天線尺寸遠大於一般電子設備之機殼，因此欲求得機殼對電磁脈衝威脅之屏蔽效值，通常使用如下所述之高能暫態測試系統，以及相對應之微型電通微分感測器(Micro $\dot{D}$ Sensor)。

(三)高能暫態測試(High Energy Transient Testing)

高能暫態測試系統即為吾人所熟知的平行板模擬器(Parallel Plate Simulator)，如圖三所示②。其可模擬出電場強度50KV/m、上升時間小於10ns、半脈波寬度250ns的標準電磁脈衝波形，如圖四所示。待測裝備可置入其平板測試區，並將微型電通微分感測器擺進裝備機殼內，而可直接測試其

電通微分訊號，並與模擬器所發出之標準電磁脈衝電通微分訊號相比較，經由式(1)之運算可得出機殼之屏蔽效值。

針對高空電磁脈衝之威脅，任何重要設施或建築物，都會具有完整的防護措施。本文所討論的屏蔽效能與連續波照射法，都是電磁脈衝頻域測試程序所需，以連續波為照射源，以驗證、評定該設施及建築物，對於高空電磁脈衝防護的能力及性能，進行確認的依據。一個優良之電磁脈衝頻域測試系統，應具有：高靈敏度、極大之動態範圍(Dynamic Range)、所需之測試設備是極普遍的、不受到雜訊干擾、可涵蓋極寬頻段、以及所測出之數據可直接套用既存之頻域理論分析模式等特點。本文將先描述連續波照射法，而後屏蔽效能測試法、高能暫態測試



圖四 標準高空核爆電磁脈衝波形③

② 張行智，吳國祥，「中型纜線式平行板測試場」，民國91年6月30日。

③ 張行智，吳國祥與朱建中，「電磁脈衝防護規範」，中山科學研究院電子所電力電子組，民國90年12月。

法，最後進行一些案例分析。然而在討論測試系統與方法前，首先在下一段討論頻域測試之基本量測理論。

二、轉換函數之理論基礎

電磁脈衝頻域測試所得到的結果通常是轉換函數，該函數代表任何一個受測系統對於一連續頻率範圍激發源之響應。假設受測物為線性系統，轉換函數可表示成：

$$G(\omega) = \frac{V(\omega)}{E(\omega)} \quad (2)$$

其中， $G(\omega)$ 即為轉換函數， ω 是角頻率，而 $E(\omega)$ 代表外來之激發電場源(或者是激發磁場源)， $V(\omega)$ 代表測試點所得之響應電壓(或者是響應電流)。轉換函數之求出是由傅立葉積分(Fourier Integral Pair)而來，即：

$$\begin{aligned} F(\omega) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt ; \\ f(t) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \end{aligned} \quad (3)$$

就實際量測而言，轉換函數之數據是以單一頻率 ω_n 而顯現出。據此，在 $V(0)=0$ 與 $t>0$ 等條件下，式(3)須轉化成數值積分。即：

$$V(\omega_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{k=1}^N (t_k - t_{k-1}) \left(\frac{v(t_k) + v(t_{k-1})}{2} \right) e^{-j\omega_n \left(\frac{t_k + t_{k-1}}{2} \right)} \quad (4a)$$

$$v(t_n) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \operatorname{Re} \left(\sum_{k=1}^N (\omega_k - \omega_{k-1}) \left(\frac{V(\omega_k) - V(\omega_{k-1})}{2} \right) e^{j t_n \left(\frac{\omega_k + \omega_{k-1}}{2} \right)} \right) \quad (4b)$$

其中，量測之頻率點數需由Nyquist取樣原理以及暫態脈衝之頻譜或頻段來決定。根據上述之基本原理，轉換函數可變成：

$$\begin{aligned} G(\omega_n) &= \frac{V(\omega_n)}{E(\omega_n)} = \frac{|V(\omega_n)| \angle V(\omega_n)}{|E(\omega_n)| \angle E(\omega_n)} \\ &= \frac{|V(\omega_n)|}{|E(\omega_n)|} \angle (V(\omega_n) - E(\omega_n)) \end{aligned} \quad (5)$$

其中， $\frac{|V(\omega_n)|}{|E(\omega_n)|}$ 為轉換函數之比值，通常以分貝(dB)表示，即：須轉換成 $20 \log \frac{|V(\omega_n)|}{|E(\omega_n)|}$ 之型式。而 $\angle (V(\omega_n) - E(\omega_n))$ 為轉換函數之相位差，通常表示成弧度(Radians)或角度。

假若時間與頻率之取樣都是等間隔，即： $\Delta t_k = t_k - t_{k-1} = \text{const}$ 、 $\Delta \omega_k = \omega_k - \omega_{k-1} = \text{const}$ ，則式(4a)、(4b)之相位項之有效積分，皆需滿足 $\omega_n \Delta t_k < 2\pi$ 及 $\Delta \omega_n t_k < 2\pi$ 等條件。由Nyquist取樣原理，為求有效之積分，通常在一個循環週期取樣5點。因此，就電磁脈衝而言，轉換函數之求得，至少需1,000個取樣點。

連續波照射測試方法

連續波照射量測方法為利用水平及垂直極化發射天線，照射機動或固定設施外側的電磁屏蔽層，以確認其屏蔽層是否有效？並找出不適當之屏蔽開口的防護措施，以提供HEMP防護評估的參考。為模擬仿真電磁脈衝輻射侵襲設施後的殘餘電磁場，以連續波照射測試來量測設施的轉換函數的方式，通常有：連續波輻射(CW Radiation)與連續波注入(CW Injection)兩種測試方式④。連續波輻射測試方式，就是本文所討論之以輻射電磁波照射設施之屏蔽效能測試。

而連續波注入測試方式，就是以輻射電磁波照射設施之外來纜線，以作為注入脈衝電流測試箱壓防護器是否有效之電流大小之依據。由於設施之外界進入纜線，其延伸範

④ T. Karlsson, "The CWI test method", December 2003.

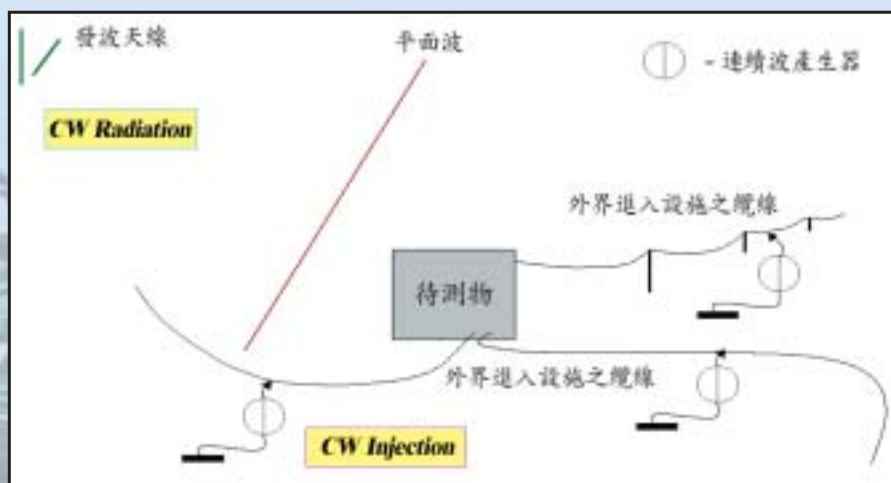
圍極廣(如：輸送電力纜線、電話線等)，因為發射天線輻射出之平面波無法完全籠罩，致使吾人無法量測出全部纜線與電磁脈衝耦合之感應電流。解決的方式是以連續波輻射測試方式，照射設施外之個別纜線，並量測出其單位長度之轉換函數，據此即可求出個別纜線對電磁脈衝之總感應電流。再以脈衝電流注入測試法，驗證設施之防護措施是否有效。連續波輻射與注入等測試方式，可如圖五所示。

一、連續波照射系統之架構

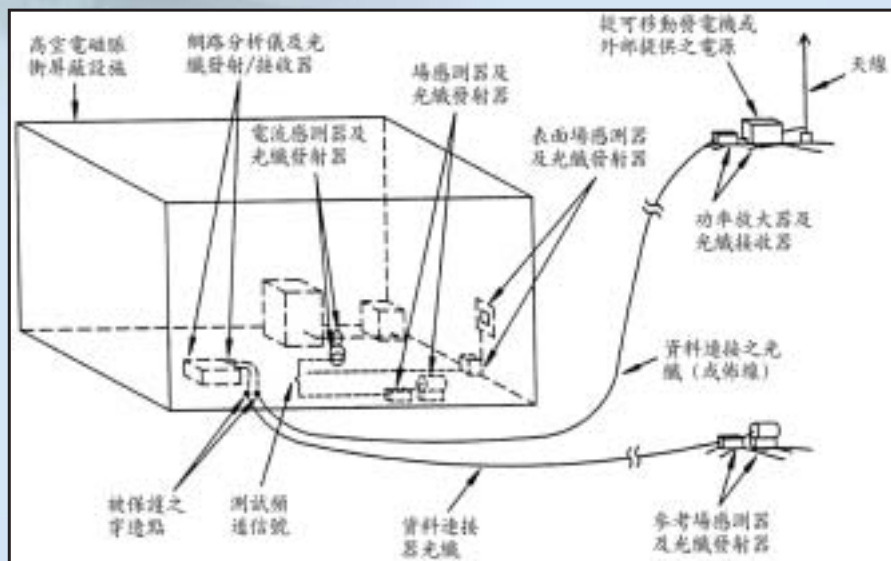
連續波照射源是由網路分析儀所產生，然後透過光纖或其它硬體纜線傳遞至發射天線。在傳遞的過程中，信號須利用放大器放大再透過天線輻射出去，最後照射至設施上。設施內置有可量測內部自由場、屏蔽層表面電流、電荷密度與內部纜線電流之感測器，以驗證設施屏蔽層之功效。參考感測器必須放置於無干擾區域，此區域的量測場會與照射至設施的總照射場有一已知恆定

的關係，透過參考感測器可監視發射天線的輸出。連續波照射測試系統的組成儀表、感測器，以及相關附屬裝備，可分成幾個部分：(一)網路分析儀。(二)光纖傳輸系統。(三)功率放大器。(四)發射天線。(五)接收天線或感測器。(六)資料擷取系統。

圖六所顯示的即為以連續波測試法進行測試時，各個重要測試儀器的架設位置。在屏蔽室內，我們利用網路分析儀作為發射與



圖五 CW照射測試方式 (作者繪製)



圖六 連續波照射測試系統的架構與配置⑤

⑤ 同註③。

接收訊號的分析儀器，而為了避免訊號受到干擾，所以在選擇傳送訊號到天線端與由感測器到接收訊號端，都以光纖傳送系統替代傳統的電纜，這是因為光纖傳送系統傳送資料的方式是以光的形式在光纖內傳送，這樣做的好處是可以避免自由界中的電場或磁場對訊號產生干擾，造成量測的不準確。

在測試過程中，我們所使用的發射天線包含有：單極天線、雙極天線，以及對數週期天線。其中，單極與雙極天線分別發射近場電場與近場磁場，其頻段為100KHz~30MHz；而對數週期天線主要發射遠場平面電磁波，其頻段為20MHz~1GHz。而相對於產生連續波發射天線之某一距離處的總電磁場值，稱為照射場。此一電磁場須包含大地對波反射效應，但不包含設施及設備的反射效應。也就是說量測該處之照射場時，須假想該處之設施及設備並不存在。為了監控發射天線輸出，而以感測器所量測出之照射場稱為參考場，即為本項測試屏蔽效值之入射場。此場通常透過網路分析儀作資料搜集。而參考場感測器的放置地點，在測試頻寬範圍內，必須選在CW發射天線及設施間，而且必須位在待測物的反射效應可忽略的地方。如此，所量測出之參考場與照射場間有一恆定的關係。

此外，為降低後續資料分析的誤差，在測試頻寬範圍內，參考感測器所量得的場，其成份必須是平滑而且平坦的。參考場必須記錄下列兩種量測型態：

(一)場映射(Field Mapping)

場映射是指利用感測器在無電磁反射裝置(大地除外)的場映射區域進行照射場的量

測。場映射區域之照射場感測器的位置為相對於發射天線及非場映射區域感測器間位置的翻轉或映射處。

(二)系統響應(System Response)

當設施遭CW場照射時，設施內感測器所量得之殘餘響應場(Residual Response Fields)及電流的大小。

二、連續波照射系統量測程序

連續波照射測試量測的前置分析工作，包括：發射天線位置的選定、參考感測器位置的選定，以及量測地點的選定⑥，可描述如下：

(一)發射天線位置的選定，必須考慮到待測設施能夠獲得所需之照射場的強度，及所有區域內之電磁屏蔽表面都能有效地耦合到此一照射電磁場。

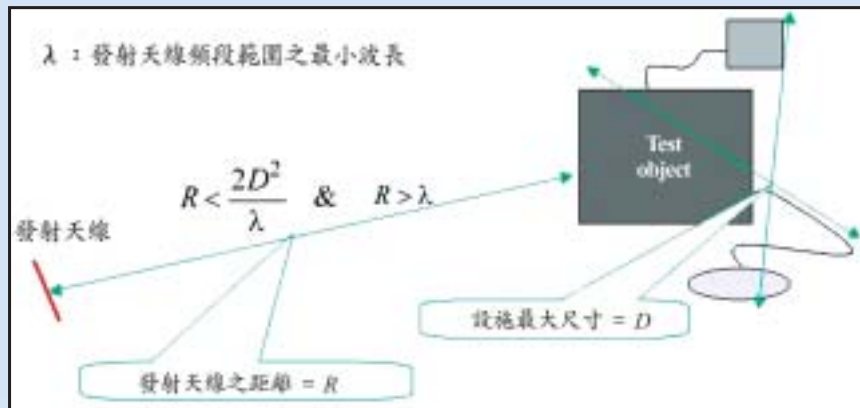
(二)參考感測器位置的選定必須考慮到能夠監測發射天線的輸出及決定照射場的強度。

(三)在受保護區域及特殊的保護區域範圍內，感測器的量測地點之選定必須考慮到感測器對照射場之感應外，還要能夠量測出代表性之場響應映射值。

針對發射天線位置的選定，而進行之分析步驟可描述如下：

(一)首先需分析待測設施之拓樸幾何與尺寸，以確定發射天線之位置。所謂設施之拓樸幾何，包含有設施之大小、週邊附屬設施(如：天線鐵塔等)、進出設施纜線之數量與大小。當明瞭設施之地理拓樸與尺寸後，吾人即可決定出發射天線之適當位置，使得籠罩整個設施之電磁波為平面波。發射天線位置之選擇(R)，由設施之最大尺寸(D)、天線頻段範圍之最小波長(λ)而決定，如圖七所

⑥ 張衍智，「連續波測試步驟」，中山科學研究院電子所電力電子組，民國92年11月。



圖七 發射天線位置之選擇 (作者繪製)

示，且須滿足下列條件：

$$R < \frac{2D^2}{\lambda} \ \& \ R > \lambda \quad (6)$$

舉例而言，若一待測設施之最大尺寸為10m，而發射天線之頻段為5MHz~500MHz。天線之最小波長 $\lambda=0.6m$ ，吾人選擇發射天線離待測設施之距離為100m，可滿足式(6)之條件，如圖八所示。

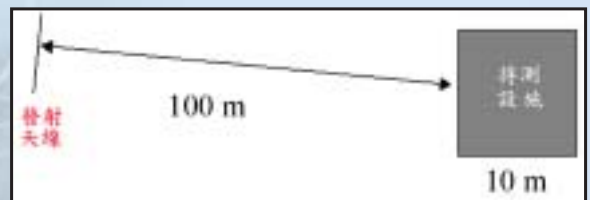
(二)就設施之拓模幾何，如：待測設施之尺寸、是否具有良好屏蔽層，與外接線路情況，而選擇適當的測試方式。約可分成下列狀況：

1. 發射天線所輻射出之平面電磁波可完全籠罩待測設施，且待測設施之屏蔽效能未知，同時其外接線路延伸極廣無法完全被平面電磁波所籠罩時，需輔以CWI(或PCI)測試方式，如圖九所示。

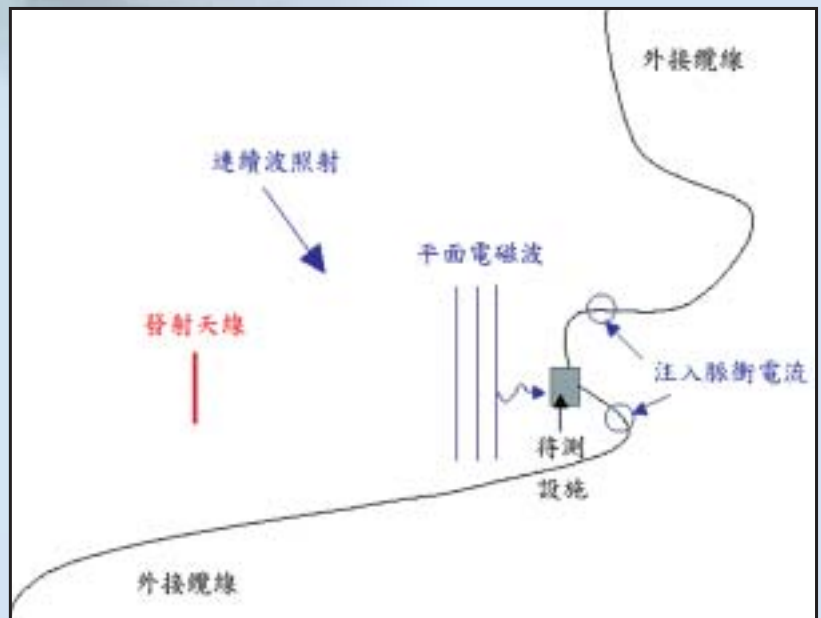
2. 發射天線所輻射出之平面電磁波可完全

3. 若待測設施已具有良好之屏蔽層時，僅使用脈衝電流注入測試方式即可。

(一)就選定之CW測試法，進行測試工作。連續波照射測試步驟可參考註釋3，在此不



圖八 發射天線位置之範例 (作者繪製)



圖九 待測設施外接線路延伸極廣時之測試方式 (作者繪製)

再贅述。

(二)量測前分析注意事項。在CW照射測試電磁屏蔽物時，HEMP防護系統及受保護相關設備必須要能夠毫髮無傷地進行正常的運作；且在量測過程中為避免影響量測靈敏度，因而必須限制使用電性雜訊過大的設備。因此，一些非常態運作，譬如設備維修和調校，可能因此被迫暫停。而與任務相關的運作則要如常進行，除非需要安排特別的測試流程，才能變更任務相關的運作狀態。此外，測試操作時也需考量干擾問題，低輻射信號對設備不會產生危害，但信號傳輸的頻率清淨度及頻寬內的雜訊干擾必須被限制以避免自我干擾及干擾臨近設備。且一般電氣安全防護工作要謹慎遵行，以免人員及設備遭受危害。

三、量測細節

由圖六，在電磁屏蔽內(有必要時可在外部)之區域，依所選擇出之量測點，裝置自由場B-dot感測器，其任務為監視各量測點的相關響應。量測出之信號透過前置放大器及光纖傳遞到資料記錄器。參考點及量測點的測試狀態和資料皆由網路分析儀監控及記錄。一個典型的量測資料可表示如圖十所示，此一資料是由B-dot感測器所量測出的感應磁場對頻率的變化，頻率範圍為1~100 MHz。

正如上述，發射天線的位置取決於發射天線照射範圍是否能夠籠罩所有電磁屏蔽物表面。對一發射天線所能照射到的範圍裡已被屏蔽之設施而言，若其樓板面積小於

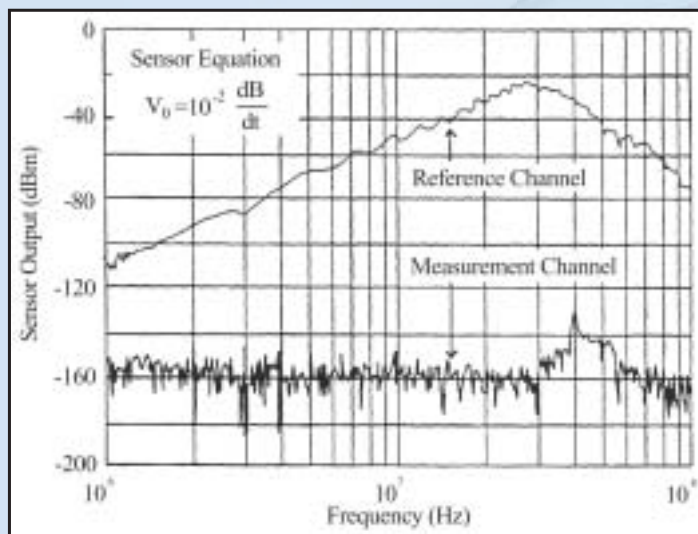
900平方公尺(約10,000平方英尺)時，則至少需要選擇5個電場或磁場的量測點。若為較大的設施，量測點的數目則隨其籠罩範圍區域之樓板面積成正比增加。

對一已被屏蔽的待測設施，通常量測點的選擇，必須集中在受保護空間40%~50%的區域內。若是遇到更需要加強防護，而且又直接遭受照射場威脅之區域時，則量測點更需要置放於靠近電磁屏蔽的附近區域。

內部自由電磁場的量測點選擇，必須能夠量測出照射場穿透電磁屏蔽到內部空間的電磁場響應映射。量測時應注意在無其他設備干擾的區域執行，且三個互相垂直的場響應分量應被忠實地記錄。其中，應該特別注意所量測出的磁場響應量。總之，當待測設施被天線照射時，內部的量測點應選在能夠產生最大響應的地方。尤其是應注意到電磁屏蔽會被照射場滲透的區域。

屏蔽效能測試

由於EMP的頻譜分佈範圍極廣，其中



圖十 參考點與量測點的信號量測值⑦

⑦ 同註③。

有部分頻率之波長會與屏蔽設施或電纜線的尺寸相同，而使得以連續波照射法所測之低頻段屏蔽效值，因受限於雙極天線之特性，因而無法反應出EMP場之低頻特性。據此，需以屏蔽效能測試方法來做適時的調整與補償。同時，屏蔽效能測試方法也可執行：

(一)利用高頻的發射器、接收器與天線，找出屏蔽設施內任何具傳導性的缺縫。

(二)進行磁場衰減量測，並修正不良的黏接點。

(三)估算缺縫衰減值。

屏蔽效能測試的目的是就一屏蔽層，在不同的量測位置上，以相同的儀器配置方式，來確定其屏蔽效值，如式(1)所示。通常，應進行屏蔽效值量測的頻率範圍有：

(一)磁場測試為1kHz~1MHz，所使用的天線為環形天線，其測試頻率電磁波之波長，須大於天線的距離。

(二)電場測試為200kHz~18MHz，使用的天線為桿形或偶極天線，所使用的測試頻率電磁波之波長，須大於天線的距離。

(三)平面波場測試則為450MHz~1GHz，可使用環形、桿形、偶極或號角天線，所使用的測試頻率電磁波之波長，須小於天線的距離。

磁場與電場測試頻率之分界點通常介於150kHz和10MHz之間，此二場的測試頻率可重疊，但非屬必要。而屏蔽層所應考慮到需要進行測試的耦合型態有：

(一)屏蔽設施之門、鑲板、孔洞。

(二)具電性回路之穿孔。

表一 天線的特性 (作者繪製)

頻 率	發 射 器	接 收 器	模 式
10kHz	Loop, 30cm R Single turn	Loop, 30cm R Single turn	Rectilinear
1MHz			Polarization
100MHz	Passive whip Dipole 2x1m	Active tuned Whip dipole	Rectilinear
18MHz			Polarization
20MHz	Bicone or Dipole	Active tuned Whip dipole or bicone	Rectilinear
200MHz			Polarization
1GHz	Spiral log	Turned dipole	Circular

(三)射頻信號之穿孔。

(四)控制信號用之穿孔。

(五)供應電源的穿孔。

(六)內部設備。

一、屏蔽測試系統之架構

屏蔽測試所需之儀器有：信號產生器、功率放大器、接收器、電纜線、衰減器，以及依測試頻率而採用不同的各種天線套件(磁場測量用環形天線，電場測量用偶極天線)，如表一所示。

接收器之靈敏度與其所需的動態範圍和發射功率有關，通常最好是使用電源電池之型式，且應放置在屏蔽設施內。同時，接收器的濾波器頻寬會影響到輸入端的雜訊，因此不應使用窄頻的濾波器。目前市面上有許多不同型式的功率放大器設備，可用來產生並放大射頻信號，其需具備下列的特性：

(一)頻率的穩定性。

(二)能量位準的穩定性。

(三)20W到50W的功率。

(四)諧波失真。

大體而言，屏蔽測試裝備之規格需求為：

(一)頻率範圍：10kHz到100MHz。

(二)頻率解析度：1kHz。

(三)頻率精確度

大體而言0.1%的頻率精確度就可以滿足需求。然而，當使用較窄的頻寬進行量測時，就需要較高的精確度，以確保接收器能精確的追蹤信號產生器所產生的訊號。通常在實際測試時，信號產生器和接收器是置放在不同的位置，此時不同的溫度會使得頻率的溫度係數變得很重要，因此需要較高的精確度。

(四)頻率的點數

如果採用固定頻率或者使用步階頻率產生器(Stepped Frequency Generator)的方式進行測試，那麼在每一個十倍頻段上最少要量測16點，且各點在該頻段尺度上須呈線性分布。若量測結果落在標準參考值的邊緣或附近，就需進行更多頻率點量測，以確保每個頻率均能符合標準。

(五)信號產生器/放大器之輸出位準

輸出位準須視量測所需的動態範圍而定。更高的輸出位準可能產生無法令人接受的EMI干擾。

(六)位準的穩定度和精確度

絕對的位準精確度是不需要的。整體的穩定度再現性必須要在 $\pm 0.25\text{dB}$ 以內。相對於整體的精確度如包含線性誤差在內，誤差在 $\pm 1.0\text{dB}$ 是足以滿足需求。

(七)動態範圍和設備雜訊

由測試接收器所顯示的雜訊，有測試裝備產生的雜訊，與由裝備或發射器所產生，並影響到接收系統的輻射信號。後者的雜訊源，大部分是無法以測試設備的最大雜訊量與最小的發射功率位準來加以描述的。在測量時，整體的需求不是要獲取最小的雜訊比6dB，就是要使量測的動態範圍超過屏蔽的要求。在充分的測試頻率下，可確保設施能

滿足整個頻率範圍的要求。

(八)天線的尺寸

環形天線的直徑為30公分；電場天線的長度為1公尺。建議採用內建前置放大器的接收天線，但非屬必要。

二、設施屏蔽與孔洞開口的量測程序

無論磁場測試、電場測試，或平面波測試，設施屏蔽與孔洞開口之測試步驟描述如下：

(一)首先需進行測試系統校正測試。在一自由空間且無屏蔽時，依圖十一之裝備配置，以記下信號產生器的輸出位準、衰減設定值和接收電壓位準(V_{ref})的方式，確認訊號在發射器與接收器之間傳輸情形。

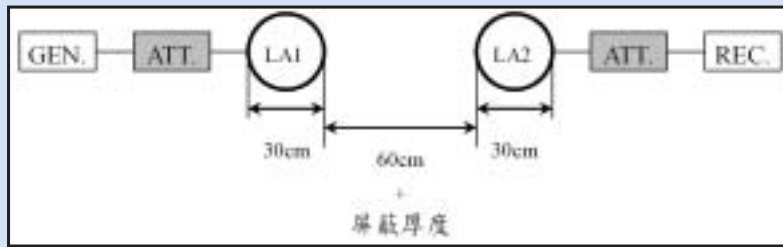
(二)將天線依圖十二所示之測量位置放置，並記下接收到的電壓位準(V_{meas})，以確認在發射器與接收器之間的變化情形。

(三)承上一步驟，但將信號產生器關閉，記下接收到的電壓位準(V_{noise})。

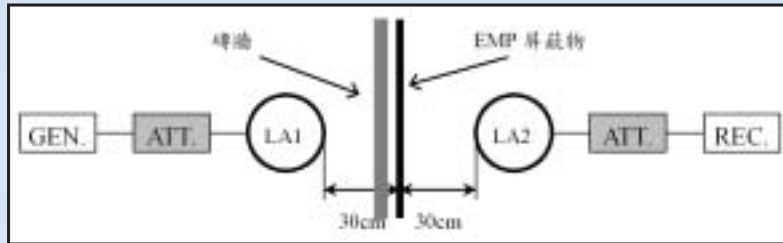
(四)由 $SE=20\log(V_{ref}/V_{meas})$ 計算屏蔽效值，訊雜比則由下式決定： $S/N=20\log(V_{meas}/V_{noise})\text{dB}$ 。

(五)如同測試計畫所要求的，對所有的待測頻率重複執行(一)到(四)的步驟。

所有的屏蔽測試，其天線間距或天線與屏蔽物之間的距離皆需如圖十一與圖十二所示。然而，當牆壁的厚度(如碉堡)大於天線與屏蔽物之間的距離時，則可在維持兩邊天線與金屬屏蔽物等距離的情形下，增加圖十一與圖十二的距離。為了增加量測顯示的動態範圍，在圖十一與圖十二中的訊號產生器位準與衰減器之設定值均可予以調整，以便對上述測試步驟(一)、(二)及(三)所測得之數據提供正確的說明。



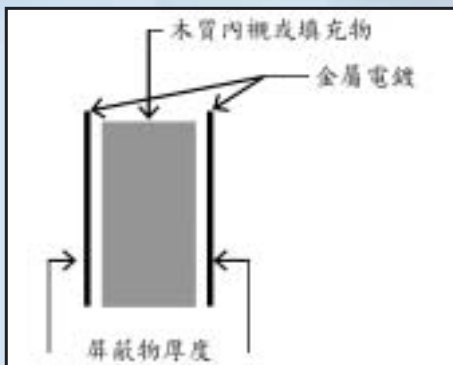
圖十一 校正測試時系統配置⑧



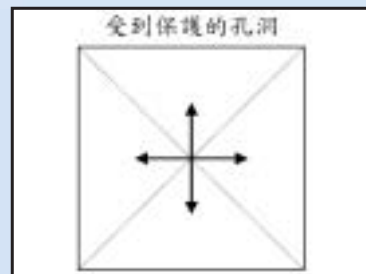
圖十二 測量測試時系統配置⑨

在測試過程中，接收器的頻寬設定必須一致(步驟(二)和(三))。如果是雙重屏蔽，如掩體或墊木襯裡結構，屏蔽的厚度為由內部到外部包括中介物的總距離，如圖十三所示。

以下為對設施屏蔽效能測試時所需之最少測試點的建議。對維護監視測試而言，可由接受測試結果中，找出在每一個保護盒及每一孔洞保護元件之最弱的測試點，作為執行維護監視測試之測試點。當要對所有屏蔽



圖十三 雙重屏蔽之厚度示意圖⑩



圖十四 孔洞之尺寸大於1公尺時，量測天線之配置圖⑪

物的敏感區域進行磁場量測時，對電場量測之測試點則可酌量減少。在此建議至少須對每面牆、每個保護盒、每扇門、蜂巢狀防護網(honeycomb)以及每一孔洞之中心點分別執行一次水平極化方向與垂直極化方向之測量。

就最大尺寸小於1公尺之窗口與蜂巢防護網而言，需將天線對準待測物的中心處，進行全頻範圍的屏蔽測

試。測試時，應包含天線的水平極化與垂直極化等方向的測量，如圖十四所示。

就最大尺寸大於1公尺之門、窗口與蜂巢防護網而言，應自各組件邊框之頂端開始，於每隔1/3長度之位置進行量測，如圖十五所示。若因結構的關係，使得測試不能以前述方式執行，則可選擇與門縫對稱的最近位置作為測試點(參考圖十五，在門的底部)。進行該項測試時，應注意：

(一)當最大尺寸超過4公尺時，應每隔1公尺

⑧ 彭政雄，張國樞，「NATO電磁脈衝測試標準規範」，中山科學研究院化學所有機化學組，民國92年3月。

⑨ 同註⑧。

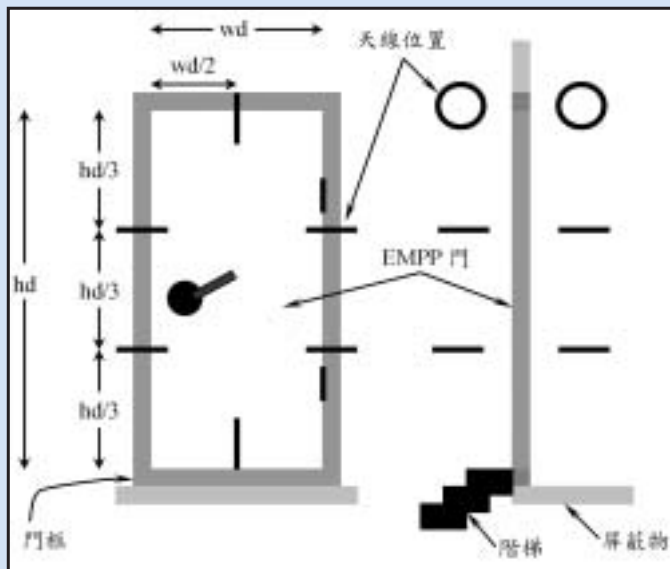
⑩ 同註⑧。

⑪ 同註⑧。

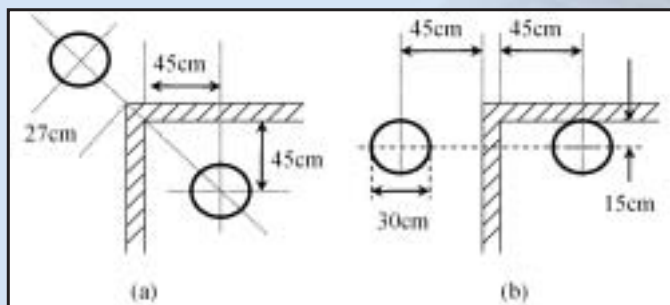
測量一次，天線的位置應予明示。在確定測試結果之前，應於測試點附近改變接收天線的位置，以確保每處都符合標準。除了在測試點取的測試數據外，其它的不列入報告

中。

(二)電場測量：在孔洞防護的中心，做一次雙極化方向的測量，就可滿足一般的測試需求。



圖十五 門之尺寸大於1公尺時，量測天線之配置圖^⑫



圖十六 在轉角處環形天線之量測位置示意圖^⑬

表二 天線的位置 (作者繪製)

天線	門、孔洞	邊緣測試	轉角測試
環形天線 (與嵌板垂直並相距30公分)	Xmt 30cm Rcv 30cm 水平與垂直	參閱圖十七， 標示為 A 之部分	參閱圖十七， 標示為 A 之部分
雙錐天線 (與嵌板平行)	Xmt ≥ 30cm Rcv ≥ 30cm 水平與垂直	參閱圖十七， 標示為 B 之部分	
Spiral (與嵌板垂直)	Xmt ≥ 1m Rcv 5cm 水平與垂直	參閱圖十七， 標示為 C 之部分	

就以螺釘或鉚釘固定的屏蔽層轉角處而言，天線的位置需完全對準角落，如圖十六(a)所示，圖中天線為直徑30公分的環形天線。圖十六(b)為天線無法完全對準角落之測試點選取方式，其天線的置放位置類似圖十七。

就設施連續屏蔽物測試而言，應先對結構體之細部項目進行UHF頻段的測試，以研判有無待補強修正者，例如縮小缺口間隙、上緊螺栓以及將門密接等。至於屏蔽設施組件(如：門、通氣口和鑲板)進行測試時，依據MIL-STD-285之規範，要求應對整體屏蔽結構的鑲板及金屬接縫部分，以合適的量測設備，每隔50公分就測試一次，而鑲板的測試則須在其結構的中心處執行。表二列舉了一些在屏蔽設施內部進行測量時，天線應置放的位置。

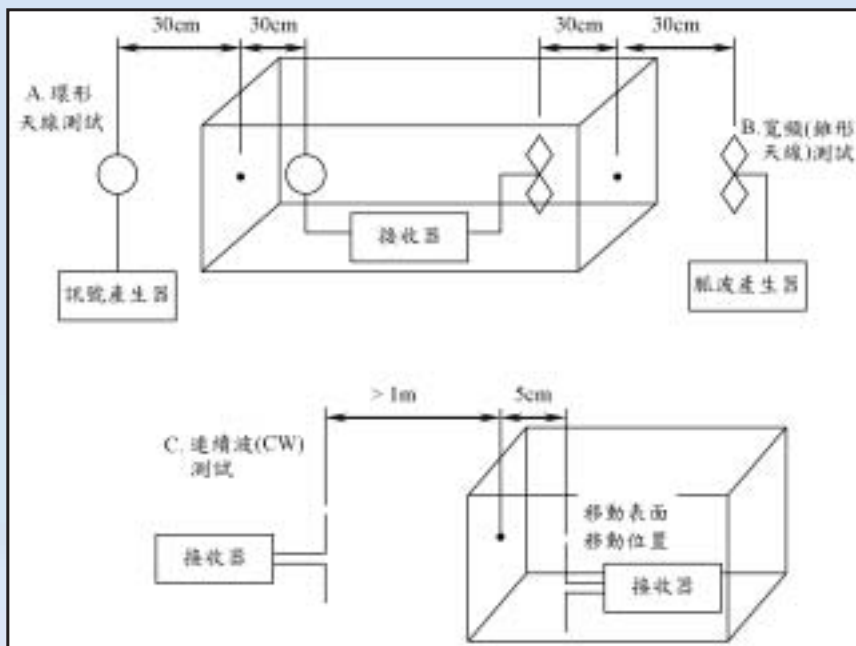
測量時應將儀器接收訊號的刻度範圍，設定在比預估的屏蔽衰減值高。當重複進行多次量測時，可將測試結果繪成曲線圖用來鑑定振幅與頻率的漂移情形。經過一小時之漂移變化量應低於3dB。

通信車廂屏蔽測試案例

一.通信車廂屏蔽測試

^⑫ 同註⑧。

^⑬ 同註⑧。



圖十七 天線位置⑭

國軍通信管理車輛的功能是擔任系統管制中樞，負責系統網路開設之規劃、設定，並提供頻率管理、地形分析、系統通信流量監控、裝備及人員狀態分析等多項功能服務。全系統配置網管中心兩套，其一為主控台，另一為備用台。若主控台發生故障，則備用台立即接替作業，並與節點連結實施系統控管作業，可依參謀指令執行系統各項管制分析工作。此一備用台之配置，完全符合電磁脈衝防護之「備援」原則。

通信管理車廂內部裝備包括：收發信機、無線電機、通信交通機組、電話機、電源處理器與印表機，及通信數據機、數位電腦及螢幕。由於現今積體電

路及記憶體等零件是愈做愈小，致使其內之微帶傳輸線(Micro-strip Line)之尺寸愈加細微，因而對於輸電配件，如電容器、電阻器等的要求愈加精密，而可達到更穩定之電壓要求。據此以及表一，愈精密、傳輸速度愈快速的電子設備，其硬體愈不耐 HEMP 電磁能量。

針對高空電磁脈衝之威脅，任何重要之設施或建築物，都會具有

完整的防護措施。本文即在於測試通信車廂之屏蔽性能，所使用的屏蔽效能與連續波照射法，都是電磁脈衝頻域測試程序所需，以連續波為照射源，以驗證、評定該待測系統，對於高空電磁脈衝防護的能力及性能，進行確認的依據，其測試之佈置如圖十八所示。連續波照射測試時，是採用偶極天線與對數週期天線，其任務為分別發出 1MHz~30MHz 與 20MHz~1GHz 之電磁波。至於低於 1MHz 之車廂屏蔽效值的量測，則採



圖十八 偶極天線與對數週期天線連續波照射系統佈置 (作者拍攝)

⑭ 同註⑧。

用前述之屏蔽效能測試。

連續波照射量測時，使用自由場的感測器，其任務為監視各量測點的相關響應。量測出之信號透過前置放大器及光纖傳遞到資料記錄器。參考點及量測點的測試狀態和資料皆由網路分析儀監控及記錄，透過電腦數值擷取與分析，如圖十九所示。

正如同第二節所述，連續波發射天線的位置須使其所發射出之電磁波照射範圍，可籠罩所有車廂之表面。同時，也需考量車廂內部所置放之自由電磁場感應器，能夠量測出照射場穿透電磁屏蔽到內部空間的電磁場響應映射。因此量測前需先考慮發射天線位置之選定。因待測物體通信車廂之最大尺寸為 $D=2.5\text{m}$ ，由圖七與式(6)，可將發射天線與待測物的距離，設定為大於車廂尺寸十倍以上，據此而可設定

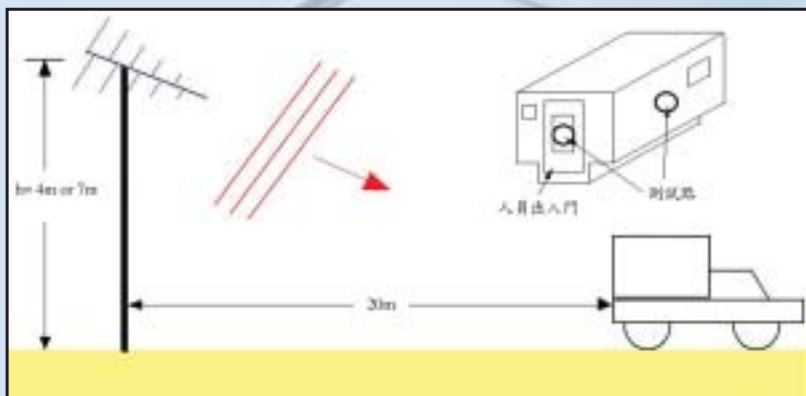
$R=20\text{m}$ 。同時，本次測試也依據電磁波照射車廂之不同角度，將天線高度分別設定為 4m 、 7m ，使得電磁波入射角度分別為 78.6° 、 70.7° ，車廂之方位分別為背向與側向而進行測試，如圖二十所示。

二、通信車廂屏蔽測試結果

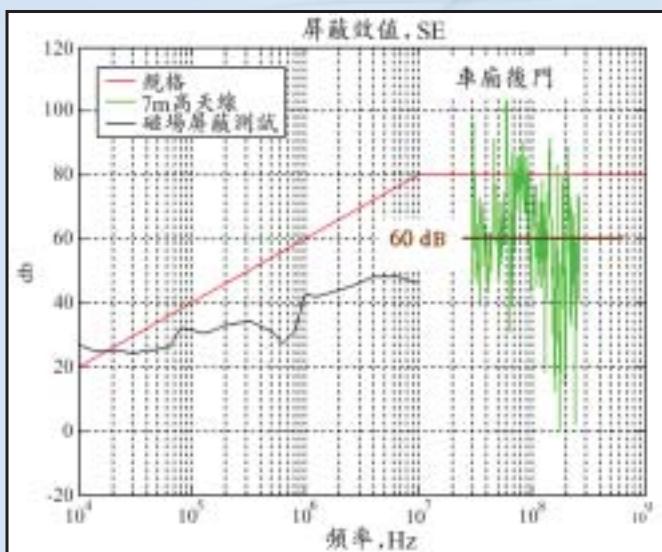
就通信車廂而言，其門向測試與側向測試之結果，可分別如圖二十一、二十二所示。由圖中顯現出車廂之屏蔽效值，均無法滿足規範



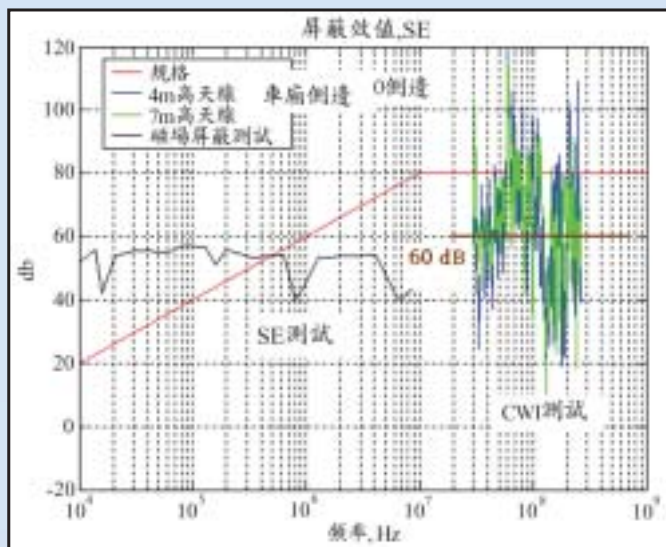
圖十九 量測信號擷取與分析所需之儀表 (作者拍攝)



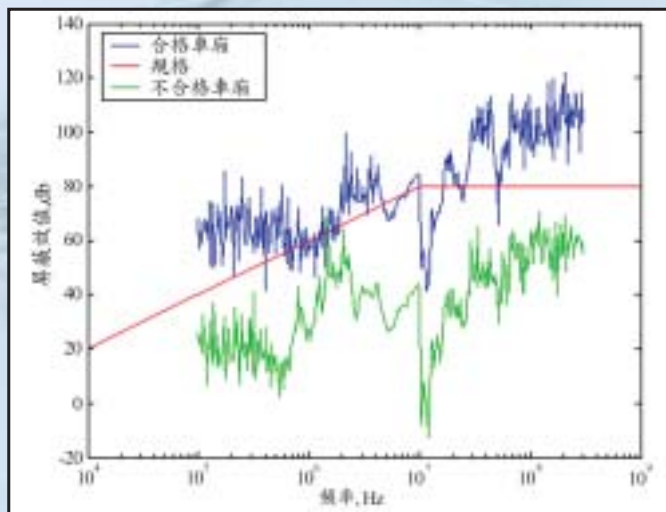
圖二十 測試佈置與車廂量測點示意圖 (作者拍攝)



圖二十一 通信車廂門側向測試之屏蔽效值 (作者拍攝)



圖二十二 通信車廂側向測試之屏蔽效值 (作者拍攝)



圖二十三 補強後通信車廂門測向測試之屏蔽效值 (作者拍攝)

所訂定之規格值。同時，由圖二十二顯示，車廂之屏蔽效值並不會因為天線置放之高度不同，而有明顯差異。

由高頻段屏蔽效值之測試結果，可顯示出數值震盪的極為激烈，上下可達±50dB之間。這是因為高頻電磁波洩漏進車廂內部，而在車廂內部形成了「腔內體共振效應」(Cavity Resonance)，其腔振頻率為 $f_r = \frac{212}{l}$

MHz，其中 l 為最大尺寸；而發生效應之腔振頻段則介於 $0.8f_r$ 至 $3f_r$ 之間^⑮。

就本次受測車廂而言，其最大尺寸為 $l = 2.5\text{m}$ ，由上述公式，可求出受測車廂發生腔內體共振效應之頻段為67MHz~254MHz，與實驗結果相吻合。而一合乎規格之車廂，因其高頻電磁波洩漏進去的量比較少，其屏蔽效值之震盪就比較不會那麼激烈，如圖二十三所示。

就高頻連續波遠場測試而言，無論背向與側向測試，通信車廂之屏蔽效值約為60dB。然而就低頻近場測試而言，由於車廂背後有人員進出門，且尺寸較大，因此其低頻之屏蔽效值較側邊屏蔽效值來得小。同時，車廂側邊之開口皆合乎屏蔽搭接之方式施作，因此電磁波較不易洩漏進去。由此可顯出，任何車體之屏蔽效能要達到規範要求，是必須依據標準的方法來施作的。

三、失效分析

就車廂抗電磁脈衝之輻射侵襲而言，就是要達成全車廂之法拉地籠效應。經本院檢視受測之通信車廂，可發現在其各個開口組件與外殼組裝時，僅考慮到水密功能而施以不導電膠，造成組件與外殼間之電性搭接不完全，以致電磁波洩漏進去車廂內。同時，車廂防護門設計為門的四周是梯形面，並以磁密條置於外側，內部則為吸波泡棉設計，如此形成之接合面再與門框金屬板

⑮ 彭政雄，張國樞，「IEEE電磁屏蔽圍籬效值之標準量測方法」，中山科學研究院化學所有機化學組，民國91年3月。

面密合，而與刀板鑲入式設計不同。經本院測試電磁波防護門以磁密條之方式密合，效果不如刀板鑲入式之設計^⑩。

本院依據標準之施工方法，將上述車廂之搭接瑕疵補強修正後，所量測出之屏蔽效值結果，可如圖二十三所示。本項測試是採用全頻段連續波照射方法，而並未採用較低頻段之屏蔽效能測試。即採用偶極天線與對數週期天線，其任務為分別發出0.1MHz~10MHz與10MHz~1GHz之電磁波。測試時則是將天線高度設定為10m，而發射天線與待測物的距離，仍設定為20m，使得電磁波入射角度約為63.4度，車廂之方位則為門向測試。由圖中可顯現出車廂之屏蔽效值，均滿足規範所訂定之規格值。

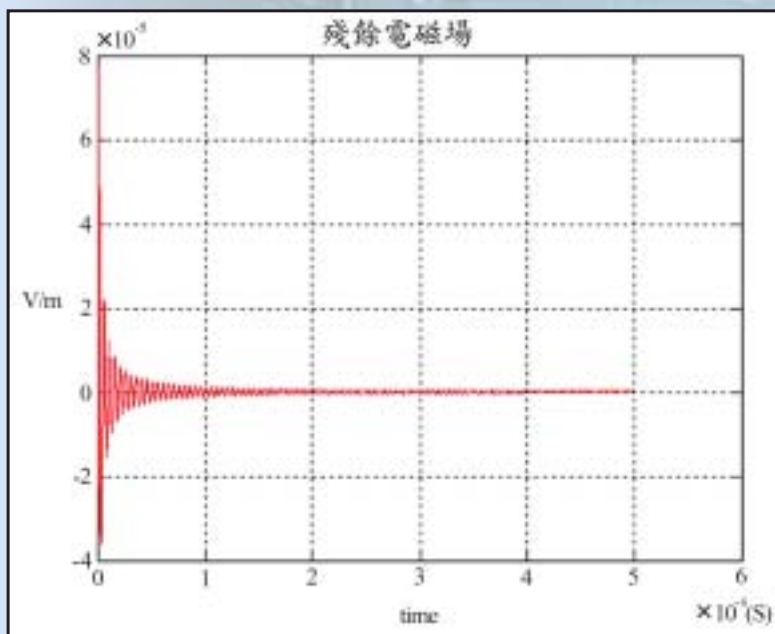
本項測試也進行一置放已久，且無定期保養維護車廂之屏蔽效值量測，其結果可如圖二十三之綠色曲線所示。整體屏蔽效值約為30dB，比起上述戰備中系統車廂屏蔽效值衰退了約30dB。台灣氣候潮濕致使金屬物容易氧化，且通信車輛又為野外裝備，因此車廂金屬搭接面容易鏽蝕，進而影響車廂金屬面之整體電氣的連貫性。同時，防護門之磁密條與車廂之門框金屬板面的接合面，不僅已嚴重鏽蝕、還有車漆塗敷其上，造成組件與外殼間之電性搭接不

完全，以致電磁波洩漏進去車廂內。因此，為避免車廂屏蔽性能衰退，需要嚴格執行定期保養維護之程序。

四設備機殼之高能暫態測試結果

就規範所訂定之最小屏蔽效值規格之意義，是指當有一高空核爆電磁脈衝經由合於規格之屏蔽防護後，任一電子板皆可在防護後之殘存電磁環境下正常運作。可將圖四所示之電磁脈衝波形，經由合於電磁脈衝規範所訂定之屏蔽規格，屏蔽防護而衰減後之殘餘場可求出如圖二十四之波形。請注意：殘存之峰值電場僅餘 $8 \times 10^{-5} \text{V/m}$ ，而在此一電磁環境下運作之任何電路板，絕對是安全不受影響的。

就電磁脈衝防護而言，都是採取「分層防護」原則。由於通信車輛之通資裝備是佈置於車廂內，其外殼也具有一定之屏蔽效

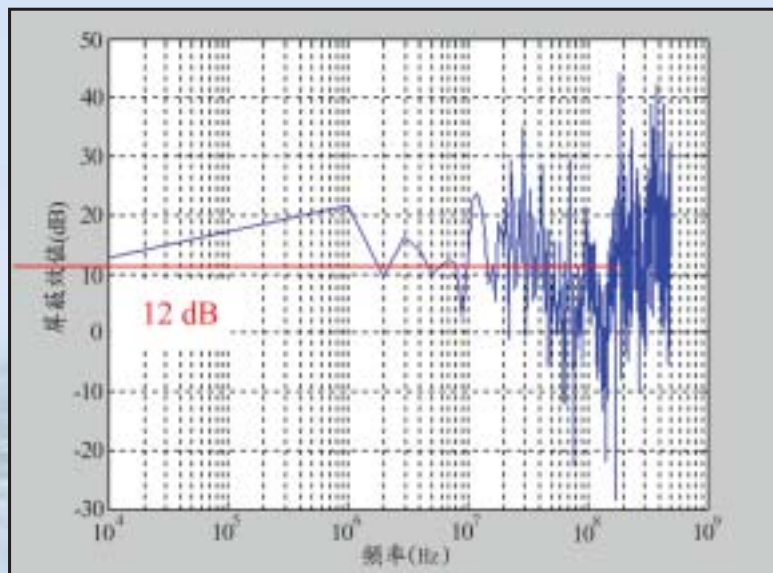


圖二十四 經由屏蔽規格防護衰減後之殘餘場 (作者拍攝)

⑩ 張衍智，彭政雄，「電磁脈衝防護隔離室工程」，陸軍通信電子資訊學校，陸軍通資半年刊第104期，預計民國94年9月出版。



圖二十五 示波器機殼屏蔽效值之高能暫態測試(作者拍攝)



圖二十六 示波器機殼之屏蔽效值 (作者拍攝)

值。由於上述之CWI、SE等測試方式無法測出外殼屏蔽效值。如前所述，吾人可利用高能暫態測試系統得出機殼之屏蔽效值。本項測試是量測數位示波器之機殼，其測試情景可如圖二十五所示。

示波器機殼之屏蔽效值結果如圖二十六所示，由圖中可知機殼之屏蔽效值約為12dB左右，再加上車廂之60dB屏蔽效值，實際上通信車輛對於電磁脈衝之輻射侵襲，是具有一定防護能力。

結論

頻域測試為電磁脈衝驗證測試的一環，

當設施之HEMP防護措施完工且開始運作時，即可立即對該設施進行驗證測試。經由頻域測試，可找出屏蔽防護之缺失，而進行修復及強化的工作。由於連續波照射法對於經外部導體耦合而穿入內部區域的傳導防護評估，並不十分有效且有其限制，因此需要使用脈衝電流注入測試方法，以進行此類問題的量測評估。

本文應用連續波照射與屏蔽效值等測試方法，量測出國軍通信車廂之屏蔽效值，同時也以高能暫態測試系統量測出示波器機殼之屏蔽效值。雖然車廂與機殼之屏蔽效值是低於規範所訂定之規格，然而基於「分層防護」原則，可分析出通信車

輛內之數位電路，其整體屏蔽效值約為70dB上下；對於電磁脈衝之輻射侵襲，是具有一定防護能力。然而，為保持戰力以及避免氣候潮濕致使車廂屏蔽性能衰退，確實執行定期保養維護是首要工作。

譯者簡介

張衍智博士，成功大學航空工程學系、國立臺灣大學應用力學研究所碩士、國立臺灣大學應用力學研究所博士。曾任助理研究員。現任國防部軍備局中山科學研究院電子系統所電力電子組副研究員。