

電磁脈衝防護的 概念與方法

國防大學中正理工學院副教授 楊順欽博士

提 要

- 一、近十年來的戰爭型態改變，資訊權的掌握成為戰場制勝的關鍵，對於相關電磁脈衝防護技術的研究，便成為發展的重點。
- 二、電磁脈衝具有在極短時間內產生相當大能量的特性，對於電子、通訊、軍事等各方面設備造成嚴重破壞，以致癱瘓戰力。
- 三、對於電磁脈衝的威脅，本文針對電磁脈衝防護機制的建立，整理國內外的相關研究。
- 四、電磁脈衝的防護方法主要有屏蔽、濾波、接地、終端保護及網路加固等方式。
- 五、驗證防護性能的方法則有屏蔽效能測試法、連續波照射測試法及脈波電流注入測試法等。
- 六、面對未來中共電磁脈衝武器的威脅，積極發展電磁脈衝防護技術將是一項刻不容緩的任務。

關鍵字：資訊權、電磁脈衝、屏蔽

壹、前 言

美軍在1991年波斯灣戰爭中，向伊拉克發射一枚具有非核電磁脈衝破壞效能的戰斧巡弋導彈，攻擊伊軍指揮中心

的電子系統，造成電子通信系統的損壞，開啓運用電磁脈衝武器在戰場的實例，相繼在1999年北約對南聯盟轟炸^{註一}及2003年美軍攻擊伊拉克也均使用電磁脈衝相關武器，做為克敵的利器。^{註二}所以綜觀近十年國際間發生的戰爭，在型

^{註一} 應天行，「電磁脈衝武器及其防禦」，全球防衛雜誌(臺北)，第218期，民國91年10月，頁46。

^{註二} <http://www.ettoday.com/2003/03/26/91-1430951.htm>

態上，已由過去使用傳統毀滅性武器，轉變為電子戰、資訊戰為導向的模式，在戰場上克敵制勝的關鍵是資訊權的掌握，因應而生的是以電磁脈衝(Electromagnetic Pulse，簡稱EMP)為主的武器，而電磁脈衝的特性是可以針對高精度電子設備進行擾亂或損毀，造成敵人通信系統的癱瘓，以取得戰場的主導權。因此，有關電磁脈衝防護的理論與技術便成為世界各國研究的重點。

電磁脈衝防護最主要的概念，在於電磁脈衝對敏感設備的各種耦合途徑，通過對電磁脈衝能量的反射、吸收、隔離和洩漏時，使其衰減到設備能夠承受的程度。^{註三}防護方法主要有屏蔽、濾波、接地、終端保護及網路加固。其中以屏蔽為防護中最常使用的方法，所以本文中將著重於屏蔽防護介紹。

貳、電磁脈衝的簡介

一、電磁脈衝的發現

1930年代，義大利物理學家費米(Enrico Fermi, 1901-1954)曾預言，伴隨原子彈的爆炸，將有電磁場的產生，但在當時對於原子彈的研究，著重於爆炸的威力與技術，故電磁場的產生並未受到重視。1958年美國在太平洋上空進行

氫彈實驗，核爆所產生的電磁脈衝造成夏威夷群島的路燈全部熄滅，無線電導航系統中斷，甚至澳洲也受到影響。直到1961年至1962年間，蘇俄及美國相繼進行多次的高空核爆試驗，產生驚人的電磁脈衝現象，因此，開始對電磁脈衝產生重視。1961年10月，蘇俄於北極新地島進行高空核爆，威力相當於5,800萬公噸黃色炸藥，所產生的電磁脈衝，使美國設在阿拉斯加及格陵蘭的預警雷達以及4,000公里內的遠程通信系統立即失靈，並中斷24小時。美國在1962年7月於太平洋強森島(Johnson)上空248哩處，試爆一枚威力相當於萬噸黃色炸藥的核彈，使得800哩外夏威夷群島中的歐胡島路燈熄滅。^{註四，註五}

二、電磁脈衝的產生

(一)雷電電磁脈衝(Lightning Electromagnetic pulse)

電磁脈衝的產生原係一種自然現象，當空中帶電雲層堆積時，與地面間電場強度超過特定臨界值，就會產生局部的空氣絕緣崩潰，此一崩潰產生一個雲塊與地面之間瞬間大電流導通的路徑，並在路徑附近感應出高強度的雷電電磁脈衝(LEMP)。^{註六}

(二)核電磁脈衝(Nuclear Electromagnetic pulse)

^{註三} 周壁華、陳彬、石立華，電磁脈衝及其工程防護(北京，國防工業出版社，2003年)，頁251。

^{註四} 同註一，頁43。

^{註五} 唐繼善，「電磁脈衝(EMP)簡介」，新新季刊(桃園)，第13卷第3期，民國74年7月，頁18-26。

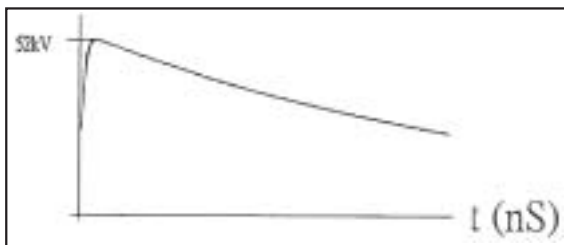
^{註六} 蔡德平，「電磁脈衝工作原理與模擬」，新新季刊(桃園)，第27卷第5期，民國88年10月，頁157。

核爆後，所產生的 γ 射線，以光速由爆點向四周輻射，在其行進過程中，藉由康普頓效應與其周圍物質作用，將分子內的電子彈離其母體，向外飛馳，此大量帶負電荷之自由電子與帶正電荷之離子，產生強烈的靜電場，此稱為源區。此源區中之靜電場並不對外輻射，其後因自由電子運行途中，四周環境之不對稱而產生不同的電磁脈衝型態。^{註七}

(三)非核電磁脈衝(Nonnuclear Electromagnetic pulse)

非核爆電磁脈衝彈藥作用時，起動電源的電容組（或一個較小的磁通壓縮發生器）先行放電，定子因而產生一個逐漸增強的磁場，當起動電流達到顛峰時（可高達10萬安培以上），由「炸藥透鏡平面波發生器」起爆炸藥，該發生器在炸藥中產生的均勻平面爆轟波陣面，在電樞中穿過炸藥進行傳播，當電樞在爆轟的作用下被擴張成與定子口徑

圖一 時域的電場分布



資料來源：同註九，頁7。

相當時，磁場受到快速壓縮而產生強烈的電磁脈衝。^{註八}

三、電磁脈衝的特性^{註九}

(一)時間短暫，能量大

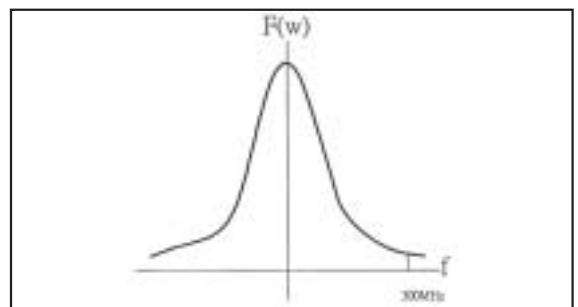
電磁脈衝的電場時間響應在極短的時間(約 10^{-9} 秒)能達到最大強度，每公尺約為1~10萬伏特，並隨時間衰減，而迅速減弱，整個脈衝持續約 10^{-3} 秒，雖然過程非常短暫，但其在瞬間內釋放出的能量威力驚人，時域的電場分布(如圖一)所示。

(二)頻率範圍廣

電磁脈衝的電磁場在頻率的影響，可利用傅利葉轉換而得。其頻率分布(如圖二)所示，所影響的頻率範圍低於300MHz，因此，對極低頻(VLF)、高頻(HF)、極高頻(VHF)、超高頻(UHF)無線電通訊影響甚大，高頻部分由於衰減大反而影響小。

四、電磁脈衝的影響^{註十}

圖二 電磁脈衝波頻域波形



資料來源：同註九，頁8。

註七 同註五，頁18-19。

註八 羅承烈，電磁脈衝之研究，http://www.lmcf.org.tw/Htm_F/defence/defence2.htm

註九 蕭宇廷，「防護電磁脈衝之屏蔽效應研究」，元智大學(桃園)，碩士論文，民國90年6月，頁1-2。

註十 張福安，「軍事設施對電磁脈波武器攻擊防護設施之研究」，國防工業發展基金會委託學術機構研究計畫，民國91年12月，頁10。

決定電磁脈衝破壞的程度，主要取決於電磁脈衝能量傳遞到目標的多少而定，由於電磁脈衝是以電磁波之型態發射與傳播，因此，任何金屬導體(如飛機、軍艦、電纜線、天線……等)均能接收電磁脈衝並將能量傳輸至物體內，內部電子系統(記憶體、積體電路、邏輯電路……等)均可能超載而燒毀，以致無法正常運作，對於愈先進、複雜的裝備影響愈大，其影響如后：

(一)電力線及有電線的影響

電磁脈衝很容易使電纜感應超過最大容忍限度的電壓值，其結果會產生火花或短路現象，線路上各式終端設備(如電源供應器、交換機等)易遭受燒毀。

(二)無線電的影響

電磁脈衝其頻譜可涵蓋大部分軍、民用無線電通信波段，且無線電機的大型天線是電磁脈衝良好的蒐集體，在強大電場影響下，將使無線電系統受到嚴重破壞。電磁脈衝能量可藉由外露天線、地線等路徑，進入電路中，造成元件燒毀、短路，進而使系統失效。

(三)雷達系統的影響

電磁脈衝可影響電離層之穩定性，當雷達波在通過此一被擾亂之區

域時，傳播途徑會彎曲，造成所確定的位置和實際位置有所差異，嚴重時甚至產生吸收作用，使雷達信號中斷。更嚴重的是，雷達接收發射模組將受到強大脈衝而燒毀。

(四)資訊系統的影響

對軍事作戰而言，迅速而確實的情報資訊是非常重要的。但電磁脈衝卻能夠破壞或消除儲存在記憶體內的資料，或將中央電腦系統破壞，造成資訊中心癱瘓，因而使得指揮官誤判或無法迅速下達正確命令，以致延誤作戰時效。

五、損害影響研判

(如表一)中顯示，電磁脈衝能量對電子儀器所造成的損害程度，也可清楚了解，極小的能量對電子儀器就可造成很大的傷害^{註士}。(如表二)中說明武器裝備遭受電磁脈衝攻擊時，對航空器、艦艇、陸軍攻擊武器及通信設備，均受到相當程度的損壞。(如表三)中說明，遭受電磁脈衝攻擊時，在民生經濟等相關體系均受到嚴重的影響。^{註士}

表一 電子元件所能承受的電磁脈衝能量

感應能量 (焦耳)	可 能 損 害
10^{-7}	微波二極體燒毀
10^{-6}	線性積體電路產生不正常工作或燒毀
10^{-5}	低功率電晶體不正常工作或燒毀
10^{-4}	CMOS積體電路、中等功率電晶體、二極體及電容器損壞
10^{-3}	JFET、SCR高功率電晶體及薄膜電阻損壞
1	真空管燒毀

資料來源：同註五，頁22。

註士 同註五，頁22。

註士 鍾堅，「電磁脈衝攻擊」，<http://www.hle.com.tw/bookmark/nature/08/08-02.asp>

表二 電磁脈衝攻擊對武器裝備之衝擊研判

	裝 備 設 施	裝備使用中	裝備停放中
航空器	線控操控戰機 機械操控戰機 直升機	極嚴重 嚴重 中度	嚴重 中度 輕微
艦 艇	飛彈巡防艦 攻擊潛艦 飛彈巡邏艦	極嚴重 嚴重 無影響 中度	嚴重 嚴重 輕微
陸 軍	主戰坦克 自走榴砲 防空飛彈	嚴重 嚴重 極嚴重	中度 中度 嚴重
通 用	觀通(電子)裝備 傳統火炮、防砲、岸砲 步機槍、機砲	極嚴重 無影響 無影響	嚴重 無影響 無影響
註：戰力保存指數：以五分法劃分 無影響80-100%，輕微60-90%，中度40-60% 嚴重20-40%，極嚴重0-20%。			

資料來源：同註五。

表三 核電磁脈衝對民眾日常活動之衝擊

體制與體系	攻擊瞬間	攻擊後一日	攻擊後一週
電力供應	極嚴重	嚴重	中度
油品供應	極嚴重	嚴重	嚴重
用水供應	中度	中度	輕度
民防體系	極嚴重	極嚴重	極嚴重
政府體系	極嚴重	極嚴重	嚴重
治安體系	嚴重	中度	輕微
交通體系	極嚴重	極嚴重	嚴重
醫療體系	嚴重	中度	中度
金融業	極嚴重	極嚴重	極嚴重
商企活動	嚴重	中度	輕微
傳播媒體	極嚴重	極嚴重	嚴重
教育體系	輕微	輕微	輕微
註：攻擊效應分類以極嚴重、嚴重、中度、輕微、無影響五分法劃分。			

資料來源：同註五。

六、電磁脈衝武器類型^{註三}

「電磁脈衝武器」可概分為「弱核爆電磁脈衝彈」與「非核爆電磁脈衝彈」兩類，前者是利用彈道飛彈投送「低核

當量核子彈頭」在目標區的適當高空爆炸、而對廣大的地面目標區產生強大的電磁脈衝損毀效果，後者則是巡弋飛彈、炸彈（或砲彈）在目標區附近引爆「炸藥式爆炸電磁脈衝彈頭」，而對有限的局部目標區產生電磁脈衝損毀效果。

美國與前蘇聯早在1980年代，已先後研發完成低當量「內爆式」核子彈頭，已具有以彈道飛彈發射「弱核爆電磁脈衝彈」的能力。中共於1996年的一次核試

爆，核當量首度低於1KT，因此，中共可能正在積極研發或已具有發射「弱核爆電磁脈衝彈」的能力。「非核爆電磁脈衝彈」部分，美軍已具有MK-84炸彈與AGM-86巡弋飛彈；俄國則有「阿特洛普斯」電磁脈衝砲彈；至於中共的非核爆電磁脈衝彈，可能尚在研發中。

非核爆電磁脈衝彈的有效範圍，當然不能與弱核爆電磁脈衝彈相比，有效範圍只有幾公尺至幾百公尺，但已足以損壞爆炸點附近的飛機、艦船、飛彈、雷達、通訊系統與武器系統中的電子元件與主件，而使它們失去功能。綜合而言，「弱核爆電磁脈衝彈」用以攻擊大面積的目標，執行戰略性攻擊；「非核爆電磁脈衝彈」用以攻擊小面積目標與活動目標，執行戰術性攻擊。

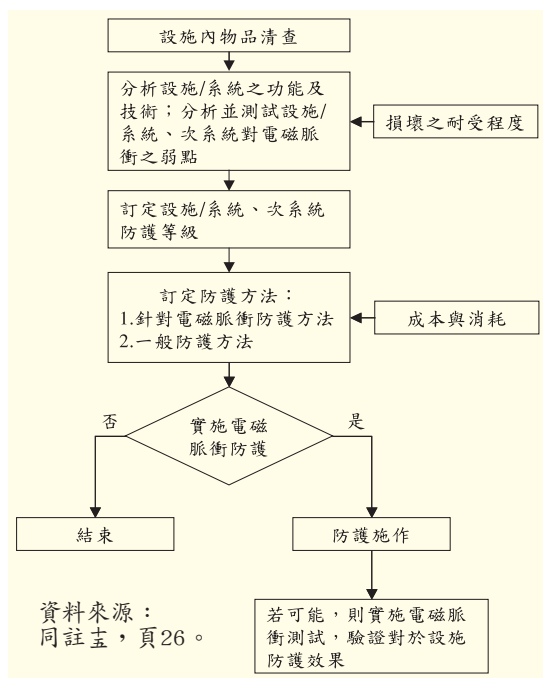
註三 同註八。

參、電磁脈衝防護機制

Jacob Gut於1987年發表的一篇「瑞士電磁脈衝防護觀念」，^{註5}了解瑞士對電磁脈衝防護的作法，其中關於電磁脈衝防護流程的建立(如圖三)，首先針對設施內的物品清查，再將設施、裝備對電磁脈衝的弱點進行分析並訂定防護等級，依照防護等級選定是否需要電磁脈衝防護，防護方法需考量成本與消耗等問題，電磁脈衝防護完成後，若可能則進行防護效果測試。

2004年馬保明的碩士論文中，^{註5}則針對國內電磁脈衝防護的建立流程做

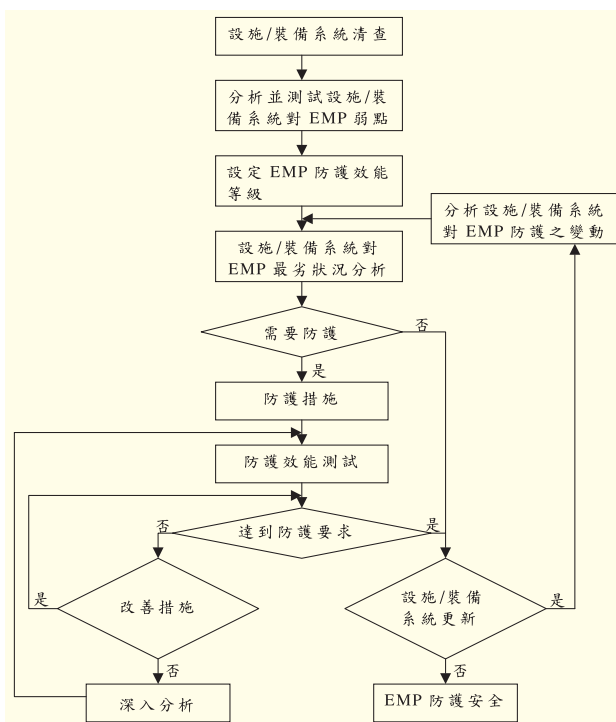
圖三 瑞士電磁脈衝防護建立流程圖



說明，首先清查設施與裝備系統的數量、規格，分析對電磁脈衝之弱點，設定電磁脈衝防護效能等級，就設施與裝備系統之最劣狀況予以分析後，檢討是否需要防護，同時並考量設施與裝備系統在爾後更新需求時，其對電磁脈衝防護等級是否須同時變更(如圖四)；在防護建立流程中，亦應考量防護措施之成本效益、施工性等，以期在有限的國防預算，達到最大的防護效能。

肆、電磁脈衝防護方法

圖四 電磁脈衝防護建立流程圖



資料來源：同註5，頁59。

^{註5} Jacob Gut, "The Swiss EMP Concept of General Defense", IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter, (December, 1987), pp.5-10.

^{註5} 馬保明，「軍事設施對電磁脈衝防護之研究」，國防大學中正理工學院軍事工程研究所(大溪)，碩士論文，民國93年6月，頁59。

本節將針對軍事設施的電磁脈衝防護方法做介紹，並特別著重於常用的屏蔽防護說明。

一、防護方法種類

(一)屏蔽

屏蔽是將那些對於電磁脈衝比較靈敏的電子、電氣設備及系統，在空間上與電磁脈衝輻射環境相隔離，減少電磁脈衝場對設備及系統的耦合影響，在電磁脈衝防護中是相當重要的方法之一。

(二)濾波

濾波可以對一定頻段範圍的干擾進行限制，包括信號線濾波和電源線濾波。電磁脈衝是寬頻的干擾，對於在特定頻率或一定頻段的無線電信系統，濾波器可以有效抑制引入的電磁脈衝能量。濾波器常用在電源引線上，以減少電磁脈衝通過電源線引入系統。

(三)接地

接地是各種電磁防護的基礎，亦是最廉價有效的防護方法。利用金屬與大地的連接，建立一條低電阻的路徑，將電磁能量有效引入大地中，減少對電氣設備或系統的損害。

(四)終端保護

電磁脈衝主要通過天線及連接電纜，以及設備之間的長連接線和電源線引入設備。終端保護就是在設備終端與設備主機之間，採用適當的電磁脈衝保護器件或是濾波器，減少耦合進入設備前端的能量。

(五)網路加固

對系統的網路與電路進行電磁脈衝的加固設計，也可以有一定程度的能量衰減。加固設計的範圍十分廣泛，主要有：合理的電路布局，選用已加固器件等。

二、屏蔽方法

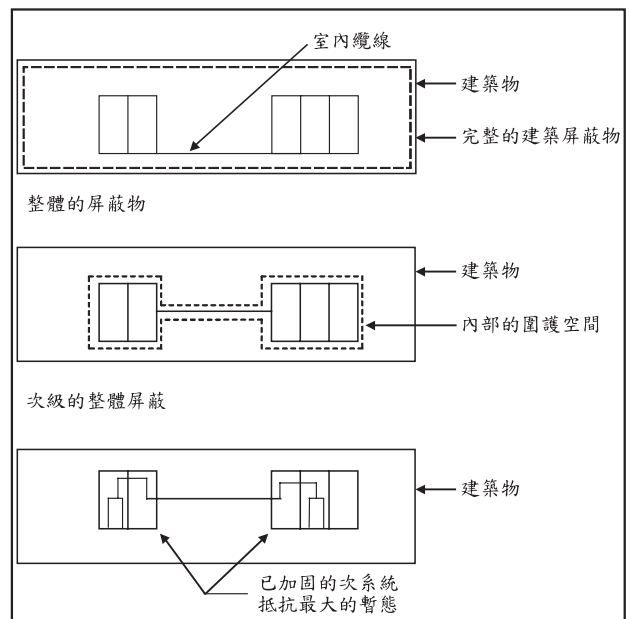
(一)屏蔽防護概念

電磁屏蔽的防護在某些軍事設施是必要的。屏蔽包括障礙物或一系列障礙物的使用，以減少入射至被保護電子或電器系統上的電磁能量。屏蔽可以圍繞一些不同的解決方式而發展出來(如圖五)，^{註六}分述如后：

1. 整體(global)屏蔽

整體屏蔽是一種保護的概念，

圖五 重要裝備保護的三種概念



資料來源：同註六，pp.3-11。

^{註六} U.S. Army Corps of Engineers, Engineering and Design-Electromagnetic Pulse (EMP) and TEMPEST Protection for Facilities (Washington. DC, 1990.), pp.3-4至3-7.

使用完整的屏蔽物圍繞整體設施。目的在於將所有的電磁脈衝場及因電磁脈衝感應引起的暫態，都被置於保護體外部。以地面基地為例，常用的整體屏蔽物材料是有焊接接縫的鋼板。

2. 特製(tailored)屏蔽

特製屏蔽也是一種保護的概念，其屏蔽與設計是以內含裝備的特定保護需求為依據。目的在於讓被指定附有重大軍事任務的系統，其保護措施能發揮至最大的效用。特製屏蔽其選擇方式可能包括整體屏蔽、分區屏蔽、機櫃或組件的屏蔽，或者是這些方式的組合。典型的特製屏蔽設計，可以提供個別的保護，以消除某些特定的局部缺陷。

3. 分區屏蔽

分區屏蔽是一種概念，將設施劃分成許多區域，屏蔽障礙物是依據電

路布局而被安置在屏蔽物構型內的被屏蔽物上。(圖六)是一個分區屏蔽的簡單概念圖；每一個區域都可能含有多組次要區域，屏蔽物的類別，包括基地外罩屏蔽物與室內的屏蔽房間，以及由裝備與組件機殼形成的次一層分區屏蔽物。

4. 系統構型

系統構型是依電纜、電線、裝備與次系統彼此之間的關係，以及這些項目對分區邊界的關係，而來選擇屏蔽方式的一種方法。在某些實例，電纜、接頭與裝備外殼是分區保護的實際部分。雖然系統構型並不會直接讓電磁脈衝環境減弱，卻是分區保護概念中的一項重要因素。

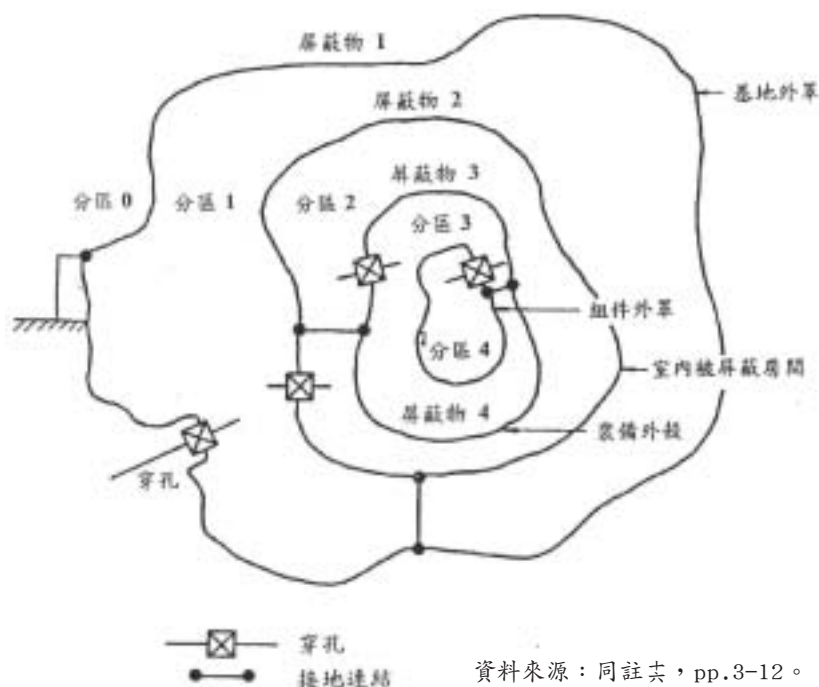
5. 電纜屏蔽

導電或金屬電纜屏蔽物的導管，被使用於分區保護的概念，以延伸由裝備維護空間形成的邊界，並提供一種方法來互連元件，同時也能維持邊界的連續性。

6. 接地裝置

對於任何的電氣或電子系統，為了避免人員遭受雷擊，控制被干擾、讓環繞敏感電子裝置的暫態電流能夠被適度的分流、以及其它的原因，使用某些形式的接地是必須的。接地不能直接提供電磁

圖六 分區屏蔽的概念



資料來源：同註六，pp.3-12。

脈衝的保護，但必須被適當的完成，以預防更嚴重的電磁脈衝弱點產生。

(二)屏蔽原理^{註七}

屏蔽理論主要是以輸電線路理論的類推法為基礎，電磁波前(EM Front Wave)觸及屏蔽的邊緣輪廓時，通過電磁屏蔽體(Shield)的傳輸，其數學模擬方式類似雙線輸電線路傳送電流及電壓的方式。假設一個功率 P (單位 W/cm^2)的入射電磁波，撞擊一個平板屏蔽物，當入射波接觸屏蔽物的第一層表面時，入射功率(P_{in})的一部分(P_{r1})會朝入射源的方向反射回去，剩餘的部分(P_{t1})則進入屏蔽物，同時開始傳播並通過屏蔽物，其中一部分會轉化成熱，這種能量損失稱為「吸收損失」，通過屏蔽物的功率繼續朝第二層表面前進，一部分(P_{r2})會被反射回屏蔽物，其餘功率(P_{t2})通過該表面。若吸收損失很小(低於10dB)，相當大的功率會在第二層表面反射(P_{r2})，傳向第一層表面，其中一部分功率通過第一層表面(P_{r2t1})，一部分功率又被再度的反射(P_{r2r1})回屏蔽物，而在第二層表面通過 P_{r2r1t2} 的功率，反射 P_{r2r2} 的功率，依此類推。在第二層表面上，第一次通過的 P_{t2} 與第二次反射後再通過的 P_{r2r1t2} 之和為 P_{out} ，亦可依此類推。每一層表面，部分的能量被反射，部分被傳遞，促成了通過屏蔽物總能量的增加(如圖七)。

在電磁屏蔽中，屏蔽物的有效性界定，是以「屏蔽物能減少入射電磁場強

度的數量」來表示，因此屏蔽效能(SE, Shielding Effectiveness)的定義是：「沒有屏蔽物時的場強度對有屏蔽物時的場強度之比值」，單位是分貝(dB, Decibels)。

$$SE = 20 \log \left(\frac{E_1}{E_2} \right) = 20 \log \left(\frac{H_1}{H_2} \right) = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (1)$$

E_1 ：沒有屏蔽物時的電場強度；

E_2 ：有屏蔽物時的電場強度；

H_1 ：沒有屏蔽物時的磁場強度；

H_2 ：有屏蔽物時的磁場強度；

P_1 ：沒有屏蔽物時的功率密度；

P_2 ：有屏蔽物時的功率密度。

當平面波垂直入射一個無限大的金屬板時，在厚度遠小於入射波長的情況下，根據Schelkunoff屏蔽理論，利用傳輸線原理，可求得屏蔽效能的近似公式：^{註六}

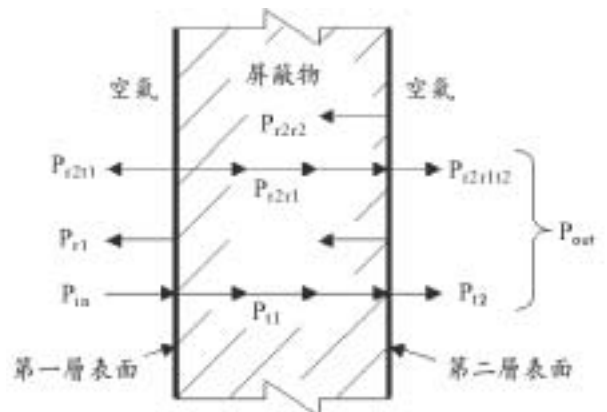
$$SE = A + R + B \quad (dB) \quad (2)$$

金屬板吸收損耗 A ：

$$A = 1.34 \sqrt{f \sigma \mu_r} \quad (dB) \quad (3)$$

單一的反射損失 R ：

圖七 屏蔽模型



資料來源：同註五，頁48。

註七 同註六，pp.5-5至5-6。

註六 同註三，頁278-279。

遠場，對平面波電磁波

$$R=168+10\log(\sigma_r/\mu_r f) \quad (4)$$

近場，對高阻抗場(電場)

$$R=321.7+10\log(\sigma_r/\mu_r f^3 r^2)(dB) \quad (5)$$

近場，對低阻抗場(磁場)

$$R=14.4+10\log(\sigma_r f r^2/\mu_r)(dB) \quad (6)$$

再反射修正項B：

$$B=20\log(1-e^{2t/\delta}) \\ =20\log(1-10^{-0.14})(dB) \quad (7)$$

t ：屏蔽金屬板的厚度；

f ：入射波的頻率(Hz)；

r ：波源與屏蔽物的距離；

μ_r ：相對於銅的屏蔽物材料的相對磁導率；

σ_r ：相對於銅的屏蔽物材料的相對電導率；

δ ：集膚深度。

屏蔽近似公式，主要由吸收損失、反射損失及再反射的修正項組成，近場及遠場主要取決於能量的波長(λ)而定，若發射源與屏蔽體的距離大於 $\lambda/2\pi$ ，則屬於遠場；反之小於 $\lambda/2\pi$ ，則屬於近場。另外阻抗場的特性，依據電場(E)及磁場(H)的比值，在近場中，E/H大於377歐姆(Ω)屬於電場特性；E/H小於377歐姆(Ω)屬於磁場特性；遠場中，E/H等於377歐姆(Ω)屬於平面波。

(三)開口防護

電磁脈衝防護中，最佳防護是一個完整沒有開口的屏蔽設施，但一般軍事設施均有一些必要的開口，如人員進出口、管線(給、排水管、空調管線、電力纜線、電訊纜線、天線等)進出口、窗

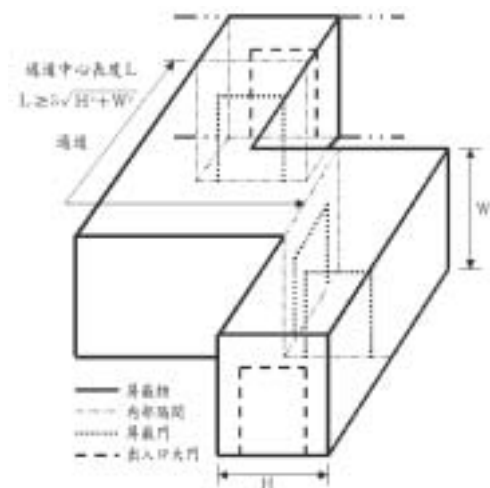
戶等，這些開口是電磁脈衝能量最易進入的地方，對設備、系統造成損害。所以在開口的防護技術，是一個相當重要的部分。^{註九}

1.人員進出口：兩扇呈九十度之屏蔽門，互鎖控制；門縫以簧片墊接方式；若採通道式設計，通道長度最好是門對角尺寸的五倍以上(如圖八)，若有纜線，需外套金屬管並要做好與屏蔽層的結合。

2.通風與用水管道：運用導波管低頻衰減效應(WBC)技術，管徑d小於10cm者，管長L的設計準則是 $L \geq 5d$ ；管徑d大於10cm者，可將其細分為小於10cm之多孔網狀結構，設計準則仍是 $L \geq 5d$ (如圖九)；若管徑d大於10cm者，無法細分為小於10cm之多孔網狀結構者，則管長L的設計準則是 $L \geq 10d$ ；非金屬管在穿牆段要改為金屬管。

3.電力與電訊纜線：其中電訊纜線

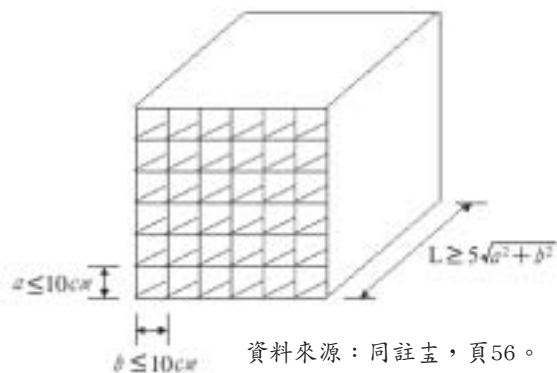
圖八 通道式人員進出口示意圖



資料來源：同註五，頁56。

註九「核爆電磁脈衝防護規範」，(桃園，中山科學研究院，民國90年)，頁37-42。

圖九 多孔網狀金屬套管示意圖



儘量採用光纖線路，如無法採用者，亦可考量外加金屬套管後接地或埋入地下。另一方面採用突波吸收器和濾波器的妥善設計，以改善對電磁脈衝的暫態響應。

(四)屏蔽規範

(如表四)屏蔽效能與衰減之關係中，說明電磁能量入射屏蔽物時，屏蔽效能對能量所能衰減的百分比。例如：100焦耳的電磁能量，入射具有40dB屏蔽效能的屏蔽物，真正透射至屏蔽物內的能量就是1焦耳。所以到底多少屏蔽效能才是有效的防護，要視電磁脈衝能量及裝置所能承受的強度而定。

在(如表五)中，所列屏蔽效能區分之適用範圍，^{註二}從表中可以明顯發現，越是精密與重要性高的設備或儀器，屏蔽效能的要求越高，以60dB至

表四 屏蔽效能與衰減之關係

屏蔽效能 (dB)	衰 減 比	屏 蔽 百分比
20	101 : 1	90
40	102 : 1	99
60	103 : 1	99.9
80	104 : 1	99.99
100	105 : 1	99.999
120	106 : 1	99.9999

資料來源：彭政雄，「電磁脈衝威脅與防護技術簡介」，專題講演簡報，頁36。

表五 屏蔽效能適用範圍

屏蔽範圍 (dB)	0-10	10-30	30-60	60-90	90 以上
效 果	沒有	較 小	中 等	較 高	最 佳
適用範圍			工業或商業電子設備	航空及軍用儀器	高精度及高敏感度的儀器

資料來源：同註二。

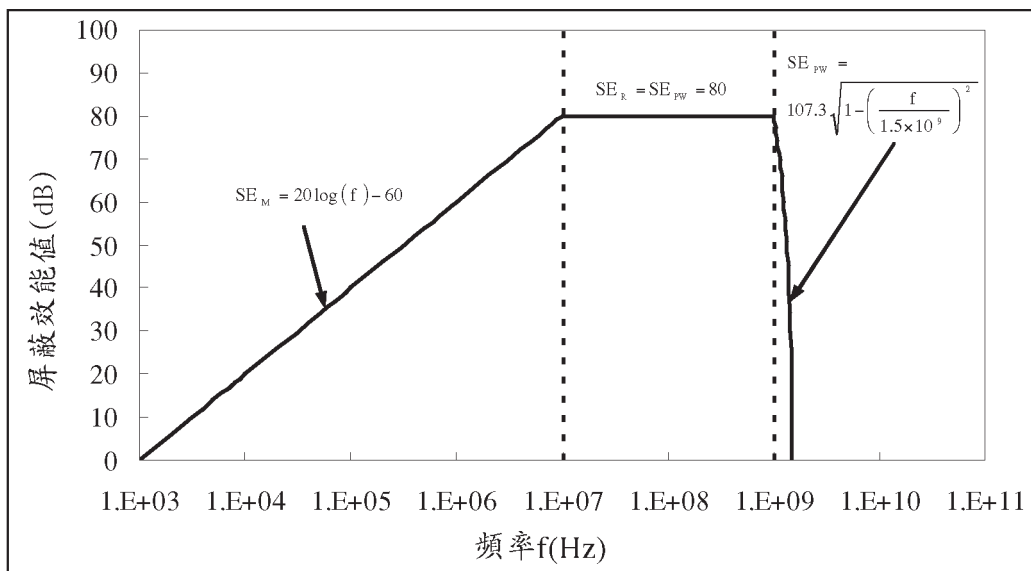
90dB的範圍為例，並配合表四的說明，對於航空及軍用儀器的範圍可以衰減99.9%至99.995%的能量，所以此表可以提供簡易方式，以了解電磁屏蔽效能值適用於那一類型的設備或系統，做為系統屏蔽效能防護需求判斷的初步依據。

對於高空核爆時，屏蔽層測試之最小屏蔽效能值需求，^{註二}美軍規範MIL-STD-188-125-1中規定(如圖十)，其測試頻譜分為三段，在1kHz至20MHz為低頻區，20MHz至1GHz為

^{註一} 杜仕國、高欣寶，「電磁屏蔽導電複合材料」，兵器材料科學與工程(包頭)，第22卷第6期，1999年6月，頁62。

^{註二} High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Protection for Ground-Based C4I Facilities Performed Critical Time-Urgent Missions (Part 1-Fixed Facilities), (MIL-STD-188-125-2, 1998), pp.20.

圖十 高空核爆時屏蔽層測試之最小屏蔽效能值需求



資料來源：作者參考註二，整理繪製。

表六 屏蔽效能要求

頻 段	1kHz-10MHz	10MHz-1GHz	1GHz-1.5GHz
屏蔽效能需求 (dB)	$SE_M = 20 \log(f) - 60$	80	$SE_{PW} = 107.3 \sqrt{1 - (f / 1.5 \times 10^9)^2}$
註：f：頻率 (Hz)			

資料來源：作者參考註二，整理繪製。

中頻區，1GHz至1.5GHz為高頻區。近場和遠場的分界頻率為20MHz，係依規範訂定

量測之發射與接收天線距離3m，且近場和遠場之分界約於 $\lambda/6$ 處計算而得。

在低頻區中，頻率範圍在1kHz至10MHz，磁場強度的最小屏蔽效能值需求為 $SE_M = 20 \log(f) - 60$ ；但10MHz至20MHz，最小屏蔽效能值需求下限為80dB。

在中頻區，頻率範圍為20MHz至1GHz，電磁波假設為平面波，因此，僅考量遠場特性，最小屏蔽效能值需求下限為80dB。

在高頻區，頻率範圍為1GHz至1.5GHz，屏蔽縫隙或孔洞的波導衰減效

值，會主導屏蔽效能值，最小屏蔽效能值需求為 $SE_{PW} = 107.3 \sqrt{1 - (f / 1.5 \times 10^9)^2}$ ，以上各頻區的最小屏蔽效能值需求綜整(如表六)。

伍、電磁脈衝防護驗證方法

電磁脈衝防護性能測試，對於性能的驗證是相當重要的，只有通過相關的測試，才能確保在遭受電磁脈衝攻擊時，發揮其防護作用，目前性能的驗證技術有屏蔽效能(SE)測試法、連續波照射(C.W.I.)測試法及脈波電流注入

(P.C.I)測試法。^{註三}

一、屏蔽效能測試

依照MIL-STD-461E及IEEE-299屏蔽效能值標準測試方法，用於設施的高空電磁脈衝屏蔽及屏蔽入口而設的裝置檢驗；也可適用於，當修復或置入新的屏蔽入口防護元件於原防護架構後的測試；驗證要求依圖八最小屏蔽效能值需求為標準。

二、連續波照射測試法

依照MIL-STD-188-125附錄之標準測試程序，以連續電磁脈衝為照射源，以驗證該設施及建築物，對於高空電磁脈衝防護的能力及性能，進行確認的依據。當某一固定頻率之動態量測範圍，大於圖八所示的衰減量時，照射強度與內部場量測值的比，應大於或等於最小屏蔽效能值。

三、脈波電流注入測試法

依照MIL-STD-188-125附錄之標準測試程序，用做屏蔽入口保護裝置和長線保護模組性能確認的依據。針對不同種類之管線入口，所量得之內部殘值電流，對入口保護裝置不可有毀損及功能衰退的現象，以及任務攸關裝備不可有產生毀損及失效的現象。

陸、結 語

在現今世界各強國積極發展電磁脈衝武器的同時，防護技術的研究發展也受到相當的重視，軍事實力比較弱小的瑞典、挪威、以色列、瑞士及新加坡等

國，亦大力加強電磁脈衝的防護，所以電磁脈衝防護在未來戰爭中將扮演相當重要的關鍵角色。

民國91年的國防報告書，明確指出中共近年來以「打贏高技術條件下局部戰爭」為軍事戰略指導。資電作戰能力，在2010年時，將擁有電磁脈衝武器系統，具有癱瘓敵人指、管、通、情資料鏈能力，使中共具有打擊國軍士氣及癱瘓我指揮中樞的能力，對我國現今積極發展的指揮、管制、通信、電腦、情報、監偵及偵蒐(C⁴ISR)作戰指揮整合平臺，具有相當大的威脅，所以積極發展電磁脈衝防護技術將是一項刻不容緩的任務。

收件：93年11月15日

修正：93年12月22日

接受：94年01月10日

作者簡介

楊順欽博士，陸軍上校，中正理工學院76年班、國立臺灣大學土研所博士；現任職於國防大學中正理工學院副教授。



註三 同註九，頁55-89