

可靠度技術手冊

電磁相容設計技術



彭鴻霖 編著

中華民國八十六年十一月三日

目 錄

1	前言	2
2	電磁特性	2
3	電磁干擾概述	3
3.1	形成電磁干擾的基本要素	4
3.2	電磁干擾源	4
3.3	電磁干擾耦合途徑	5
3.4	敏感裝備	6
3.5	電磁干擾效應	6
4	電磁環境	6
4.1	地表面自然電磁場	6
4.1.1	地表面自然磁場分佈概況	7
4.1.2	地磁場起伏與磁暴	7
4.1.3	地表面自然電場	7
4.2	自然電磁雜訊	8
4.2.1	宇宙雜訊	8
4.2.2	雷電放電	9
4.2.3	大氣雜訊	10
4.3	人為干擾	10
4.3.1	人為干擾的產生	10
4.3.2	有意發射干擾源	11
4.3.3	無意發射干擾源	12
4.3.4	靜電放電干擾	13
5	電磁相容設計	13
5.1	電磁相容性	13
5.2	電磁相容設計基本準則	14
5.3	電磁相容設計要點	15
5.3.1	抑制干擾源設計要點	15
5.3.2	抑制干擾耦合設計要點	16
5.3.3	敏感裝備設計要點	16
5.3.4	搭接設計要點	16
5.3.5	接地設計要點	17
5.3.6	屏蔽設計要領	18
6	電磁相容標準與規範	19
6.1	CNS	19
6.2	CISPR	19
6.3	IEC	19
6.4	EN	20

電磁相容設計技術

1 前言

隨著科學技術的發達人們在生產與生活中使用的電氣及電子裝備的數量越來越多這些裝備在工作的同時往往會產生一些有用的或無用的電磁能量這些能量將影響其他裝備的正常工作從而形成了電磁干擾(electromagnetic interference, EMI)。這些人為干擾及自然干擾，可能使系統或裝備的性能發生有限度的降級，甚至於可能使系統或裝備異常，即性能發生永久性下降，干擾嚴重時會使系統或裝備發生失效或事故。例如：由於雷電和靜電放電干擾和其他人為干擾，使火箭、飛彈發射後出現計算機失效或自毀系統誤爆而炸毀的事件多次發生。各種強電干擾可能引起易揮發燃料的自然燃，彈藥和含電爆裝置的自爆，交通工具上電子自控系統的失效等事故，同時，長期的電磁輻射將影響人體健康而造成電磁污染。

客觀事實使人們認識到電磁干擾的嚴重性，為了保障電子系統與裝備的正常工作，必須研究電磁干擾現象，分析預估干擾，限制人為干擾強度，研究抑制干擾的有效技術與手段，提高抗干擾能力，並進行合理的設計，以使共同環境中的系統與裝備能執行各自的正常功能，這種對電磁環境進行設計的新學科領域，就是電磁相容(electromagnetic compatibility, EMC)。

此外，一般外銷至美國、加拿大或歐洲等地區的電器產品，諸如電視機、無線電調頻接收機、無線電收發信號等，都受到電磁干擾輻射的限制。雖然各地區所訂定的限制標準不盡相同，但是對於這種電磁干擾的限制，主要是在保護大多數使用者的安全與利益，使電器使用者在使用這些產品時，不會妨礙到其他使用類似電器產品的人的信號接收功能，或者是自己受到其他使用者的電磁干擾而影響到自己的接收。

通常所有的無線電接收機，其操作頻率範圍在30MHz到800MHz之間。以美國為例，在運送或銷售這些產品到美國之前，必須先取得美國聯邦通信委員會(FCC)之認可後，才可以在美國市場上銷售。因此，如何瞭解電子系統之電磁干擾及如何設計電子系統，使其能在電磁環境中本身既不受干擾又不會對其它系統造成干擾是相當重要的設計課題。

2 電磁特性

電磁擾動能量會隨時間變化，且以有限的速度在空間傳輸，稱之為電磁波動。電磁波的電場能量與磁場能量能夠在空間中傳輸，當電磁能量向遠方傳播而不再返回能源的現象稱為輻射性電磁能量。電磁能量為空間、時間與頻率的函數，一般以功率密度為表示其基本單位。

傳導性電磁能量可用電流或電壓(A or V)表示，輻射性電磁能量則以單位頻率之電壓(V/m)表示，

$$p_d = F(r, \phi, f, t) \\ = P_0 G(\theta, \phi) L_p$$

式中 p_d 為電磁能量密度(W/m^2)， P_0 為電磁輸出功率(W)， $G(\theta, \phi)$ 為方向增益係數， L_p 為傳輸路徑損耗，在自由空間的傳數路徑損耗為：

$$L_p = \left(\frac{1}{4\pi r} \right)^2$$

其中 r 為觀測點至電磁能源之距離(m)。

對大多數民用裝備而言，建議的電磁環境能量為：

- (1). 10 kHz – 25 MHz， $E = 1 V/m = 120 dB\mu V/m$ ；
- (2). 25 MHz – 1 GHz， $E = 10 V/m = 140 dB\mu V/m$ 。

對軍用裝備而言，建議的電磁環境能量為：

- (1). 10 kHz – 25 MHz， $E = 1 V/m = 120 dB\mu V/m$ ；
- (2). 25 MHz – 1.2 GHz， $E = 10 V/m = 140 dB\mu V/m$ ；
- (3). 1.2 GHz – 10 GHz， $E = 100 V/m = 160 dB\mu V/m$ 。

3 電磁干擾概述

一般生產與生活中使用的電氣及電子裝備在工作的同時往往會產生一些有用的或無用的電磁能量這些能量將影響其他裝備的正常工作從而形成了電磁干擾(electromagnetic interference, EMI)。電磁干擾係指任何引起電子系統或裝備功能降低或失效等不良反應的電磁輻射訊號，包括人為或自然產生者，但故意產生以欺瞞敵方之反制用電磁輻射除外，因此EMI乃是現象的描述。例如：繼電器在通、斷作用時所產生的瞬間電磁脈衝可能使計算機工作失常；汽車行駛過或飛機低飛過住宅時，將干擾電視機和收音機的正常工作的，使電視機出現雜亂的畫面，使收音機收到討厭的雜訊。嚴格地說，只要把兩個以上的元件放在同一環境中工作，就會產生電磁干擾。在兩個系統之間會出現系統間的干擾，例如飛機航管系統、船上電子系統、雷達系統、通信系統、電視與廣播系統等等，相互之間都會出現干擾。

在系統內部各裝備之間會出現裝備間的干擾，例如：汽車內自動點火系統對汽車內收音機的干擾，雷達發射機對雷達接收機的干擾等，稱為系統內干擾。

在太空飛行器、飛機、艦船中，大量的電子裝備安裝在密集的狹小空間，相互間的電磁干擾非常嚴重。例如：短波接收機遭到阻塞干擾，通信發射機會干擾雷達的工作；在飛機或艦艇上，一般安裝許多種雷達，當所有的雷達同時工作時，一部雷達可能遭受幾部雷達的干擾；在戰鬥機中，由於飛機軍艦上的防衛電子系統和戰鬥系統攻

擊電子系統的相互干擾不能同時兼容工作，而遭到敵方發射飛彈攻擊的案例屢見不鮮的。由於電磁干擾問題無法解決，使新型太空船、衛星、飛機、艦艇等產品長期不能投入使用，而增加研製時間與經費更是不乏其例。

3.1 形成電磁干擾的基本要素

由干擾源發出干擾電磁能量，經過耦合途徑將干擾能量傳輸到敏感裝備，使其工作受到影響，此一作用過程稱為電磁干擾效應。因此形成電磁干擾必須具備下列三個基本要素：

- (1). 電磁干擾源：指產生電磁干擾的任何零件、組件、單機、設備、系統或自然現象。
- (2). 耦合途徑或耦合通道：指將電磁干擾能量傳輸到受干擾裝備的通路或媒介。
- (3). 敏感裝備：指會受到電磁干擾影響，或者會產生電磁干擾影響的裝備。

例如汽車中的發電機電刷產生電弧放電是干擾源，而敏感裝備為收音機，其干擾耦合途徑有二：一是通過端子的輻射途徑；另一是通過電源線和地線的傳導途徑。分析電磁干擾問題，首先要確定形成干擾的三要素，然後透過抑制干擾源、消弱干擾的耦合、降低敏感裝備對干擾的影響等措施來抑制干擾效應的形成。

一個大型電子系統內可能有很多干擾源、敏感裝備及耦合途徑，它們所構成的干擾組合的數量可能高達 10^{10} 以上，在這些干擾組合中找到主要作用的干擾組合是非常有價值的工作。

3.2 電磁干擾源

電磁干擾源的種類很多，大致可分為自然電磁干擾源和人為電磁干擾源兩類。自然電磁干擾源包括：大氣干擾、雷電干擾和宇宙干擾。人為電磁干擾源包括功能性干擾和非功能性干擾：功能性干擾係指系統中某一部分正常工作所產生的有用能量對其他部分的干擾，例如各種無線電裝備所發射的電磁能量對其他裝備的干擾等；而非功能性干擾係指無用的電磁能量所產生的干擾，這些無用的電磁能量可能是自然現象產生的，也可能是某些系統或裝備工作時所產生的副產品，例如各種點火系統所產生的干擾等，顯然自然干擾也屬於非功能性干擾。

各種電磁干擾源產生干擾的頻率範圍各自不相同，按干擾的頻率範圍可將干擾分為各頻段的干擾，如表1所示。

干擾源的分類方法很多，除了根據干擾源的性質進行分類之外，還可根據干擾的途徑、干擾的特性及干擾的方式等予以分類。例如：按干擾的耦合途徑可分為傳導干擾和輻射干擾，傳導干擾是指通過導體傳輸的干擾，而輻射干擾是指通過介質(包括自電空間)以電磁場的形式傳輸的干擾。有的干擾源產生的干擾可用傳導方式傳輸，亦可用輻射方式傳播，那麼它既是傳導干擾源又是輻射干擾源。此外，按干擾場的性質可分為電場干擾、磁場干擾及電磁場干擾。按干擾波形可分為正弦波干擾、脈衝干擾和准脈衝干擾。按干擾信號的頻帶寬度可分為寬頻帶干擾和窄頻帶干擾。按干擾的幅度

特性可分為穩態干擾和暫態干擾。按干擾的方式可將傳輸線上的干擾分為導模干擾和共模干擾，導模干擾是指兩條導線上的干擾電流振幅相等而相位相反；共模干擾是指兩導線上的干擾電流振幅相差很小而相位相同。根據各種干擾源性質不同，必須採用不同的技術或措施予以抑制。

表1: 電磁干擾的頻段分類

干擾按頻段分類	頻率範圍	典型干擾源
工頻與音頻干擾	50 Hz及其諧頻	輸配電線 電力牽引系統 有線廣播
甚低頻干擾	30 kHz以下	雷電等
載頻干擾	10 kHz – 300 kHz	高壓直流輸電高次諧波 交流輸電 電氣鐵道高次諧波
射頻與視頻干擾	300 kHz – 300 Mhz	工業科學醫療設備 內燃機 電動機 照明電器
微波干擾	300 Mhz – 100 Ghz	微波爐 微波通信設備 衛星通信發射機

3.3 電磁干擾耦合途徑

電磁干擾的耦合途徑通常分為兩類：傳導(conductive)耦合途徑及輻射(radiative)耦合途徑。傳導耦合途徑又可分為電路性傳導耦合、電容性傳導耦合及電感性傳導耦合，輻射耦合途徑又可分為近場感應耦合及遠場輻射耦合。

傳導耦合途徑要求在干擾源與敏感裝備之間有完整的電路連接，該電路可包括導線、供電電源、公共阻抗、金屬支架、裝備機架、接地平面、電感或電容等。於是，只要共用一個回授通路將兩個電路直接連接起來，就會發生傳導耦合，此回授通路可能是另一根導線，也可能是共用接地回路、互感或電容。

輻射耦合途徑是干擾源的能量以電磁場的形式傳播的根據干擾源與敏感裝備的距離可分為近場耦合模式(系統內部)和遠場耦合模式(系統之間)輻射耦合不僅存在於兩天線之間裝備的機殼機殼的孔洞傳輸線及元件之間都可能存在著輻射耦合一般而言干擾源與敏感裝備之間有三類不同的輻射干擾途徑：

- (1). 發射天線與接收天線之間的輻射干擾途徑
- (2). 元件與機殼之間的輻射干擾
- (3). 傳輸線(電力線與信號線)之間的輻射干擾

這三類干擾將產生九種不同的組合：天線對天線、天線對機殼、天線對傳輸線、機殼對天線、機殼對機殼、機殼對傳輸線、傳輸線對天線、傳輸線對機殼、傳輸線對傳輸線，每一種干擾組合都含有干擾源、耦合途徑及敏感裝備。

上述各干擾途徑的影響不盡相同，若裝備含有天線，且信號是以載波傳輸則天線對天線之輻射途徑為主要干擾途徑；若干擾源含有天線，而受干擾端無天線，則主要干擾途徑為天線對傳輸線；若裝備間距離很近，且導線之間距離很小，則主要干擾途徑為傳輸線對傳輸線。

3.4 敏感裝備

敏感裝備係指受干擾影響的系統、裝備或電路其受干擾的程度，以敏感度表示之。所謂敏感度是指敏感裝備對於干擾所呈現不受影響的程度，而敏感度門檻是指敏感裝備最小可辨別的不受干擾影響的信號位準，也就是敏感位準的最小值。敏感度越高，則其敏感位準越低，抗干擾能力就越差。

3.5 電磁干擾效應

電磁干擾環境對正在工作中的系統會產生很的影響，例如：

- (1). 引起飛行體飛行偏離航道；
- (2). 可能增大距離誤差；
- (3). 對控制信號產生干擾；
- (4). 使飛機的操縱控制不穩定。

4 電磁環境

現代的每一種電子系統或裝備都是在一定的電磁環境中工作，電磁環境包括自然電磁環境與人為電磁環境。自然電磁環境起源於地球與宇宙的自然過程，而人為電磁環境則是來自人類活動中所產生的各種電磁場。為保證系統與裝備能夠正常工作，首先必須研究系統或裝備所處的電磁環境的特色。所謂電磁環境是指裝備、分系統或系統在執行規定的任務時，可能遭遇到的輻射或傳導電磁量，電磁環境的大小一般是以在不同頻率範圍的功率和時間的分佈來表示，有時亦以場強度來表示。電磁環境位準是指在規定的試驗地點和時間內，當試驗樣品尚未通過試驗時，已存在的輻射及傳導的信號與雜訊位準。電磁環境位準必須同時考慮人為與自然的電磁能量。

4.1 地表面自然電磁場

大地的電磁環境是人們長期以來的研究課題，迄今為止雖然仍有許多電磁現象的產生機制尚無法完全確知或掌握，但根據觀察研究結果大致已可總結出有關地球電磁場的分佈與變化規律。

4.1.1 地表面自然磁場分佈概況

地球磁場強度隨著時間和地點不同而異，其變化範圍約在16~56 A/m之間。所謂地球磁場強度，就是指在地球上某一地點在某一年內的平均場強度。在地球表面，該場基本上是軸對稱的。它的水平分量的方向是由南向北，而垂直分量的方向，在北半球是向下，在南半球則是向上。在某一地區，磁場向量和水平面的夾角稱為磁傾角。在地球上，有兩個地點的磁傾角為 90° ，該地點的磁場強度最強，稱為地球的磁極，磁極的位置並不是固定的，隨著時間作長期變化，目前的南極在南極洲，北極則在北美洲。磁傾角為零的點的軌跡稱為地磁赤道，它並不與地理赤道相重合，在南美地區地磁赤道與地理赤道之間的最大偏差約為 15° ，地磁赤道上的地磁場強度大約只有磁極處的一半。

在地球表面地磁場向量的水平分量切線的軌跡稱為地磁子午線，而垂直於子午線的線稱為磁緯線。在地表面每一點的地理子午線與地磁子午線相交成一角度，稱為磁偏角。如果地磁子午線向東偏離地理子午線，則磁偏角為正；如果向西偏離，則為負值。相同磁偏角各點的連線稱為等偏線。

4.1.2 地磁場起伏與磁暴

地球的磁場並不是穩定的而是變化的，這些變化可以是周期性的或是非周期性的，慢的或是快的。一般認為，極慢的變化即所謂的長期變化(例如地球磁極的移動)是來源於地球的內部，而快速變化則發生於地球磁層，首先是來源於太陽活動變化的影響。這些變化一般都不大，通常不超過恒定分量的1%，習慣上以 γ 為單位來表示其大小， $1\gamma = 10^{-10} \text{Oe}(7.94 \text{A/m})$ 。

地磁場的短周期變化可以視為規則擾動，它屬於日變化，變化幅度約為幾十 γ ，而不規則擾動幅度則可達數倍 γ 。

極大強度的擾動稱為磁暴，通常磁暴開始時場強的水平分量猛增。在中與低的地磁緯度上，數分鐘內水平分量可增加數十 γ 。而在整個地球，可以同時觀察到相似的變化，其場強升高可持續達數小時之久，這是磁暴開始的階段。然後，場強就降低，在數小時內同一觀察地點的場強可以比平均值低幾百到幾千 γ ，這是磁暴的主要階段。在場強降低到最小值時，場強的水平分量慢慢回升到平均值。這可能需要數小時到數天的時間之久。在這期間，場強呈不規則的變化。

4.1.3 地表面自然電場

除地磁場外，在地球上還可以觀察到自然界的電場，它的強度也隨著時間和觀察地點而變化。在晴朗無風的天氣，電場力線與地球表面垂直，並且使地球表面帶負電。在這些條件下的電場稱為正常場，由於地形的不規則，使該地區的場變形，通常以一定時間內重複若干次量測結果的平均值表示其電場場強。

大氣中的自由電荷(電子)是由於宇宙輻射和太陽活動所引起的，在每單位體積空氣中，宇宙射線的電離子會隨著緯度增加而增加。由於離子漂移而產生的離子電導會隨著高度增加而增加，而大氣密度隨著高度增加而減少，結果造成離子數目增加，而且

它們的自由行徑變長。當達到足夠的高度時，電導就會高到使大氣層成為類似導體的電離層。這個高度發生在離開地球約50 km的地方，與地球形成一個巨大尺寸的球形電容器。實驗證明此一等效電容器內的場強度並不是均勻的，而是隨著高度增加而減小，此一等效電容器極板間的電壓為200 kV。

大氣中的電荷在該電場的作用下移動，產生一個恒定電流流入大地，使地球像一個巨大的發動機一樣。上述考量只適於晴天區域，而隨著雲層的出現，此一電場將發生變化，由於地球的局部電位比雲層的電位高。當雷電放電時，負電荷將從雲中送到大地，形成反方向的大氣電流。

4.2 自然電磁雜訊

自然電磁雜訊是地球與宇宙間客觀存在的自然過程，不受人類任何限制亦無法由人為加以控制，只有掌握各種自然雜訊的分佈與變化規律，才能為電子系統或裝備的電磁相容設計提供自然電磁環境參數。自然電磁雜訊主要是由宇宙雜訊、雷電放電和大氣雜訊所構成的，其特性如表2所示。

表2：自然雜訊特性

	來源	頻帶	干擾能量位準
宇宙雜訊	地球以外的能源所產生的輻射。	幾十兆赫至200兆赫	0.1~1.0 μV
雷地放電	雷電在裝備中引起的瞬間擾動。	頻帶寬(低頻到超高頻)	脈衝功率大(具有破壞性)
大氣雜訊	大氣熱輻射、大氣放電、大氣中物質對電氣裝備上放電、大氣影響電波傳播。	低頻帶(頻率小於幾十兆赫)	0.001~100 μA ，其干擾能量位準隨頻率的升高而下降。

4.2.1 宇宙雜訊

宇宙雜訊指的是來自地球以外的輻射能源所產生的電磁雜訊，包括：銀河系的無線電輻射、太陽輻射、和銀河系外系統的各向同性輻射。極大多數的宇宙輻射源都像黑體輻射一樣，是屬於非極化的輻射，亦即其能量是均勻地分配給各正交的極化分量；除此之外，部份輻射源，例如太陽輻射則為部分極化的輻射源，即非極化和橢圓極化的合成，其最高強度分量稱為主分量，而最低強度分量稱為最小分量。

銀河系輻射峰值出現的頻段為150 – 200 MHz。在20 – 500 MHz頻率範圍內，宇宙雜訊的影響相當大，這些雜訊會使太空船產生一些隨機失效或異常現象，也常造成通信與遙測中斷。

太陽輻射分為熱輻射雜訊和非熱輻射雜訊兩種形式，處於靜止狀態的太陽所發射出來的熱輻射佔據了整個無線電頻段。在高於30 GHz的頻段，由太陽表面(絕對溫度為6000 °K)產生的黑體輻射所覆蓋；在較低頻段，由太陽的高溫度表層(色球層和光球層)提供絕大部分輻射。處於活動期的太陽所產生的輻射與太陽黑子的面積和數量有關。劇烈活動的太陽產生的太陽輻射比靜止期的太陽輻射約大60 dB，太陽黑點也是太陽輻

射太陽輻射雜訊源的重要形式，當黑點發展到極大時，曾經導致全球無線電通信中斷達兩小時之久。

由於地球的大氣層、電離層和磁層形成一個天然屏蔽，把地球與地球外星球之間的電磁能量隔離開。在人造衛星時代之前，人類對於外太空電磁輻射的認識只限於能夠穿透這種屏蔽的電磁波的頻率範圍。這些頻率範圍分佈在兩個頻率窗，一個是「光窗」，另一個是「無線電窗」，前者從紅外線區(10^{-3} cm)到紫外線區(10^{-5} cm)，而後者則包含波長由0.25 cm至30 cm左右的無線電波。無線電窗的短波邊界是能量被大氣中粒子(主要是 H_2O 和 O_2)吸收所引起，長波邊界則是由電離層的屏蔽效應所引起的。地球外無線電輻射源的輻射在地球上只有處在這些邊界內才能觀察到。

4.2.2 雷電放電

雷電放電是大氣雜訊的主要形式，雷電放電對於航空與太空系統或其他電子系統來說，是一種危險的電磁現象。在航空太空史上，由於雷擊而造成事故是屢見不鮮的。例如，1969年11月14日土星V-阿波羅12號發射後，土星V號火箭連續兩次遭到雷擊，這就是轟動一時的大型運載火箭 - 載人太空船在飛行中誘發雷擊的事件；1961年秋，一系列的雷擊曾使部署在義大利的美國Jupiter飛彈系統遭到嚴重的損壞。因此，研究雷擊對系統的效應、分析雷電的特性是非常重要的，雷電雖然是人們所熟知的自然現象，但其放電機制、電磁效應與防護方法則一直是人們關注的研究課題。

(1). 雷電形成及放電過程

利用高速攝影觀察方法，知道雷電放電過程大致經歷三個階段：首先是先導階段，或稱先導放電。此時，從雷雲到大地方向的空氣分子逐漸電離化，一步一步發展出一條導電通道，為緊接而來的主放電階段提供良好的放電途徑。這就像用導線一般，一段一段地把雷雲和大地連接起來，為即將流過強大電流作好準備。在此過程中，電流不大，發光非常微弱，肉眼難以察覺。接著是主放電階段，雷雲中的電荷沿著先導階段形成的電流通路迅速洩放入大地。此一過程的電流很大，時間短促，瞬間功率極大，閃光耀眼，空氣受熱膨脹，發出強烈的雷鳴聲，一般所稱的雷電交加現象就是此一階段的放電結果。最後是餘輝放電階段，雲中剩餘的電荷繼續沿上述放電通道向大地洩放，雖然電流很小，但持續時間較長，能量也較大。一次雷電放電教過三個階段即告結束。但有一半以上的雷電，在第一次對地閃電後，隔了幾十毫秒的時間，又發生第二次或連續多次沿著原導電通道對地閃擊，這就是多重雷擊。

(2). 雷電電磁效應

- A. 靜電感應：出現雷雲放電前，雷雲及隨後的先導階段中的通道與大地之間形成了一定的電場，此時位於其中的金屬物體會出現與雷雲異號的感應生成電荷，一旦發生雷雲放電，該物體上的電荷來不及洩放，本身就會出現很高的對地電位，可能引起對其他物體的火花放電，如果這種現象發生在貯存有易燃或易爆物的油庫、彈藥庫的內部，就會發生起火爆炸事故。
- B. 電磁感應：雷擊時，主放電的電流幅值很高，變化度易大，雷電通道就像一條良好的發射天線，當雷電電流流經過通道時，會在周圍空間輻射出強大而變化

迅速的電磁場。處在輻射範圍內的金屬物體會因此而感應出高幅值的脈衝電壓或電流，對與該物體相連的電子裝備造成危害。

- C. 行波與干擾效應：雷電直接打擊在通信線路時，除通過熱和機械效應可能造成通信線路損壞之外，還會在線路上行形成行波。行波也可能由上述的靜電和電磁感應引起，不論是雷電直接打擊或雷電感應所形成的行波場，會沿著線路向兩邊傳播，因而危害較遠處的裝備，影響通信品質或產生危害人體健康的音響衝擊。

4.2.3 大氣雜訊

除了雷電放電之外，在大氣中如能形成滿足電荷分離和儲存條件時也會出現放電雜訊的現象。大氣中的水蒸氣、雪、砂石、灰塵、水滴等物質碰擊電子裝備的線路或天線時，也會造成電荷轉移或靜電放電，從而引起隨機電流而產生電磁子雜訊。無線電波在大氣電離層表面反射條件的變化及電離層中的非線性現象等，改變了電磁波正常傳播條件而造成干擾。隨著接收地點和季節不同，所受干擾的強度與頻率也不同，通過熱帶地區的短波通信就會受到極其嚴重的干擾。大氣雜訊的功率通常與熱雜訊功率有關，並可用等效雜訊溫度或等效雜訊係數來表示。

4.3 人為干擾

前述自然電磁現象構成了地球電磁環境的一些基本要素，除了自然雜訊造成的干擾之外，隨著科學技術的發展人們不斷地產生和應用各種用電裝備，其中有些裝備是用以專門輻射電磁能量的，例如：廣播、電視、通信、雷達與導航等無線電裝備，還有一些裝備是無意發射電磁能量，例如：交通車輛、照明設備、輸配電線、工業科學與醫療電子設備等，這些有意或無意產生的電磁能量形成了人為干擾。

4.3.1 人為干擾的產生

電磁學理論說明，電荷與電流周圍必然存在著電場和磁場，電磁場中的各種物質在電磁場的作用下會產生電磁效應，而電磁場中存在的物質同時也會影響電磁場的分佈，因而形成一種場的相互影響。根據電磁感應定理，當電路中存在電流變化時，會產生自感電動勢。如果電流變化是一種無用訊號的電流突變，則會在電路中產生干擾電壓降。由某處場源產生的交變電磁場，會透過傳導、感應和輻射等方式向各處傳播。因此，不僅無用的電磁能量會干擾鄰近線路的正常工作，而且當預定傳給某一線路的有用訊號能量傳輸到不需要該訊號的一個或數個其它線路上時，也會構成電磁干擾。嚴格地說，任何一段導線和零件都可能成為干擾源，但根據干擾產生的原因可知，電磁干擾主要是由於下列幾個方面所產生的：

- (1). 由於放電產生干擾：各種放電現象都會產生高頻輻射，在配電線路上引起電壓和電流的衝擊，這種高頻輻射和電壓與電流的衝擊，就形成了對其它電路的干擾。放電干擾包括：電暈放電(如高壓輸配電線、發電機高壓電路)，氣體放電或輝光放電(如螢光燈、放電器、霓虹燈、開流管)，弧光放電或金屬霧放電(如電焊機、電弧放電探照燈)，火花放電(如內燃機、電火花加工設備)。

- (2). 由電路斷開或接通產生的電壓或電流急變(脈衝)而造成的干擾：造成這種干擾的設備包括：有觸點裝備(如繼電器、開關、各種斷電式裝備)，直流與交流整流子電機。
- (3). 由於電路中電壓與電流脈衝振盪造成的干擾：產生這種干擾的裝備根據電路作用原理分為：脈衝振盪器(間歇振盪器、掃描發生器)，脈衝調制器，脈衝放大器，多諧振盪器，觸發器，磁性邏輯元件，電流互感器等。
- (4). 由於磁性元件的磁泡和造成電壓與電流的正弦波形失真而造成的干擾，此類零組件有：磁放大器、磁性邏輯零件、電流互感器等。
- (5). 在整流過程中由於電壓與電流正弦波波形失真而造成的干擾，例如整流器等。
- (6). 由於高頻或低頻振盪的諧波分量造成的干擾，例如振盪器、倍頻器與分頻器、變頻與混頻器、功率放大器等。
- (7). 由於各種有缺陷零件而造成的干擾，例如：接點和帶滑環線路的接觸不良，以及接觸點不清潔、不完全貼緊、扭曲變形等引起電壓與電流的急變或脈衝；高壓導體與零件有毛邊和尖端、不清潔及絕緣子之間的縫隙引起的電暈放電；電氣裝備絕緣擊穿或急劇變化而造成的寄生電流和電壓；電機、變壓器結構上的缺點；以及偏離所使用磁化曲線的直線部分而造成電壓與電流曲線的失真；放大級的過載，或在電子管或半導體元件非線性工作特性部分工作而造成電壓與電流曲線的失真等。
- (8). 由二次輻射產生的干擾：電磁波在傳播過程中，碰到各種建築物、金屬結構件及各種裝備時，會在表面上產生感應電荷及感應電流，這些感應源在空間會產生電磁場，疊加在原訊號上而形成干擾，例如：電視機訊號的重影現象。

4.3.2 有意發射干擾源

專用於輻射電磁能量的裝備，例如廣播、電視、通信、雷達、導航等發射裝備，是通過向空間發射有用訊號的電磁能量來工作的，它們將會干擾不需要這些訊號的電子系統或裝備的功能，而且是電磁環境的重要污染源。經過分析後，不難看出此類干擾源有下列幾項特點。

- (1). 為了保證一定的作用距離，這些裝備具有高功率的發射機，向空間發射大量的電磁能量。例如中波廣播的功率可達兆瓦，短波廣播輸出功率可達幾百千瓦，高頻電視頻到的輸出功率一般為 10 kW，超高頻以上頻道的輸出功率為 30 kW，遠程雷達的脈衝發射功率則可能高達 10 MW 以上。
- (2). 這些無線電發射裝備均按無線電管理的有關規定，在規定的頻段上工作，以抑制各無線電系統間的相互干擾，這些裝備的發射功率及工作頻率均由人為加以規定與限制，而且輻射能量的空間分佈是由發射天線的方向性決定的。
- (3). 廣播(包括調頻廣播)和電視發射台的數量多，發射功率大而且發射天線高，發射的電磁能量函蓋區域很廣，廣播與電視發射對環境所造成的電磁污染比同功率的其它工業干擾源要大得多，因為前者發射的是有用訊號不能施加電磁屏蔽，

而後者產生的無用干擾訊號可用屏蔽等技術措施予以抑制，而廣播電視發射塔多建造在都市附近，因此廣播與電視發設是污染都市電磁環境的主要干擾源。

- (4). 無線電裝備發射機除了發射有用訊號外，在一些寄生頻率上還產生許多不需要的電磁輻射，亦即發射無用訊號。發射機除了在指定頻段上的基頻發射之外，還有諧波發射、寄生發射和雜訊發射等。諧波發射的頻率是基頻頻率的整數倍，其發射功率隨諧波次數的增加而減少。寄生發射是發射機電路中產生的不希望有的寄生振盪所發射的電磁能量，它既不是訊號的組成部分，也不是諧波，稱為亂真發射。寄生發射功率位準通常低於諧波發射位準，而在特殊情況下，特別是低於基頻的頻率上(諧波發射不存在)，可能引起嚴重干擾。此外，大功率發射機寬頻帶雜訊的干擾也應加以考慮。

4.3.3 無意發射干擾源

許多裝置無意地發射出電磁能量，例如汽車的點火系統，各種不同用電裝置和帶電動機的裝置，照明裝置，霓虹燈廣告，高壓電力線，工業、科學和醫療設備，以及接收機的本機振盪輻射等等，都在無意地發射電磁能量。這些發射可能是向空間的輻射，也可能是沿導線的傳導發射，它們所發射的電磁能量可能是隨機的，或是有規則的，一般佔有非常寬的頻帶或離散頻譜，所發射的功率可以從微微瓦到兆瓦量級，以下介紹幾種常見的無意發射干擾源。

(1). 工業、科學與醫療用及生活中的高功率裝備

此類裝備包括工業用加熱設備(感應加熱器和介質加熱器等)，射頻電弧焊，醫療加熱設備(微波調理機)，微波外科手術設備，超音波產生器及微波爐等。

此類裝備的特點是功率高、數量多，一般輸出功率可達千瓦甚至於兆瓦，而且數量在逐年迅速增加中。工作時的電磁洩漏會造成很強的干擾。

雖然這些裝備通常有專用的工作頻段，例如微波爐及醫療加熱設備的工作頻率為2450 MHz，國際無線電干擾特別委員會(CISPR)對此類設備規定了干擾極限值，但是目前世界各國有相當數量的設備沒有在國際電信聯盟指定的頻段上工作，滿足CISPR規定的干擾極限值的設備數量比例不高。根據國際組織的統計資料，大約只有30 %的設備在指定的頻段上工作，而滿足CISPR極限值的設備只佔32 %。因此，此類設備的電磁洩漏不僅干擾其他電子裝備的工作，而且對周圍空間將會產生嚴重的電磁污染。即使有些裝備在指定的頻段上工作，由於輸出功率高，其高次諧波仍有較強的功率，這些高次諧波可能干擾其他無線電任務。

(2). 汽車等機動車輛

汽車等機動車輛的點火系統、發電機、風扇、擋風玻璃雨刷馬達等，在操作使用時會向外輻射電磁能量而造成干擾。通常點火系統是最強的寬頻帶干擾源，當點火時產生波形前沿很陡的電弧，其頻譜是一個低頻的基頻分量在加上許多諧波，以及佔有很寬一段頻譜的暫態訊號，這樣的雜訊在(10~100) MHz範圍內具有很強的場強。一般觀測顯示，小汽車比卡車的雜訊要小約10 dB，而機車的雜訊與卡車的雜訊差不多，這

是因為雖然機車比小汽車、卡車的功率小很多，但是很少採取或根本沒有採取屏蔽措施的緣故。例如，小汽車的金屬外殼就可以提供大約15dB的屏蔽作用。汽車干擾一般為垂直極化(特別是在100 MHz頻率以內的範圍)，汽車產生干擾的幅度一般為常態分佈，而且干擾脈衝的峰值幅度與汽車點火系統的類型、汽車的速度，正常工作的機械負載，以及汽車的老化和磨損程度等因素有關。隨著經濟的發展，自用汽車逐年增加，統計資料顯示，當交通量增加一倍時，其干擾功率頻譜強度就會增加3~6 dB，因此汽車等機動車輛是重要的干擾源之一。

4.3.4 靜電放電干擾

靜電放電是個古老的問題，人們對靜電放電的研究一直比較重視，因為靜電放電干擾不僅干擾電子系統的工作，而且會造成裝備失靈、器械損害等永久性故障，還可能引起燃料及彈藥的燃燒及爆炸。由於靜電放電所引起的事故時有發生，例如：遭於靜電放電干擾，導致美國1971年發射的火箭計算機故障，起飛後姿態失控而炸毀。

靜電放電是物體(人體、飛機、車輛、設備等)上所積累的靜電荷以電量電流(約 $100\mu\text{A}$)或火花形式的放電，所產生的電壓可達40~1000kV，電荷量0.04~1.0mC。雷電與靜電放電的差別在於雷電是雲與雲之間或雲與地之間的靜電浪湧，雷電放電的數量級大約是靜電放電的 10^6 倍，因此雷電有強烈的機械破壞作用，而靜電放電的機械破壞作用是不明顯的。

靜電放電的起因是兩種介質常數不同的材料發生直接接觸時，特別是發生彼此摩擦時，會發生電荷的轉移而各自帶有不同的電荷，即靜電充電，當電壓達到一定值時就會產生電量放電或火花放電。例如：雨點、冰結晶、灰塵、砂粒等雜質撞擊絕緣表面使其帶電；飛機在空氣中飛行時是向著有害質點運動，雪、雨、灰塵等質點撞擊飛機表面就使其帶電，採用聚乙烯等作絕緣材料的同軸電纜，由於彎曲和振動而使絕緣體表面帶正電，外導體帶負電。隨著電纜的不斷彎曲，振動將引起靜電放電。此外，技術人員的工作服與內衣摩擦會使人帶電，帶電的人體觸摸電子裝備時可能發生瞬間放電，將使電子裝備遭受靜電危害。

5 電磁相容設計

5.1 電磁相容性

電磁相容性(electromagnetic compatibility, EMC)係指系統或分系統或附屬電子裝備執行任務時，在遭遇的電磁輻射環境中能夠互相協調處於共存狀態，各自在需求規格下正常地操作，而不產生系統功能降低或失效的能力，亦即裝備、分系統或系統不會由於受到處於同一環境中的其他裝備所產生的電磁環境而導致性能降低或失效，也不會由於本身的電磁環境使處於同一環境中的其他裝備、分系統或系統產生不允許的性能降低或失效。電磁相容性是任何電子系統與裝備的重要性能指標之一，它又可分為系統間電磁相容及系統內電磁相容兩類。

對於各種電子裝備的設計，只按理想正常信號進行功能性分析是不夠的，因為這些裝備是在帶有電磁干擾的實際環境中工作。一個電子裝備必然會受到外來電磁信號

的影響，同時本身也是干擾源，會產生電磁信號干擾其他裝備。電磁相容設計就像其他可靠度設計技術一樣，必須保證系統或裝備在電磁環境下仍然可以正常工作，在產品研製的每一階段都必須配合設計作業一並考量，並作為研製過程相對階段的驗證或試驗的內容，以確保所設計的系統或裝備滿足所規定的技術指標與要求。設計時要充分考量系統的特點以及與周圍系統的關係，使之在時間域、頻率域和空間域等方面均有合理的配當。

進行電磁相容設計時，在整體上首先根據系統的精度要求、安全性要求、可靠度要求、和環境保護要求等績效規定，提出對電磁相容指標的總體要求。電磁相容設計是一門專業的學科，包括屏蔽、接地、濾波、去藕、佈線等。

5.2 電磁相容設計基本準則

電磁相容設計的基本準則為：

- (1). 電子單機儘可能採用金屬外殼屏蔽，以防產品內部各組件間的輻射耦合；
- (2). 屏蔽罩的金屬接縫要焊接；
- (3). 必須開口的孔洞要儘可能小；
- (4). 接插頭是可能造成電磁洩漏的部位，它的外殼應有導電防護層，以免影響屏蔽功用的完整性；
- (5). 射頻信號、視頻信號和中頻信號的傳輸應採用同軸電纜連接，屏蔽層兩端均要接地，所有射頻導電襯墊必須壓緊；
- (6). 音頻信號傳輸線的屏蔽只允許在信號源端接地，不能把屏蔽層用作信號回授線；
- (7). 電源引線應採用標準成對絞線自成回路；
- (8). 高敏感電路應裝置於單獨的機盒內，其引線應儘量短；
- (9). 射頻接地應儘可能不用接地線，不得已須使用接地線時應儘量短；
- (10). 採用濾波器抑制干擾源的高頻部份電流；
- (11). 電源線與信號線應分開，輸出線與輸入線應分開，不要放在同一捆線束內或同一個插接頭內；
- (12). 導線束內每一根電纜的屏蔽層與其他電纜的屏蔽層應保持電隔離；
- (13). 敏感電纜的佈線應遠離電源、變壓器和其他大功率裝置；
- (14). 連接信號的電纜和連接器必須確保阻抗匹配；
- (15). 多層印刷電路板(尤其是計算機)層間應濾波、去藕；

- (16). 在數位電路接口線上增加旁路電容，以抑制尖脈衝干擾；
- (17). 數位電路的多餘輸入端應接正電壓或接地，不要懸空，以防外界對輸入端產生干擾；
- (18). 大電流信號的接地要與小電流信號的接地分開；
- (19). 數位電路的接地要與類比電路的接地分開，若實務上不能分開時，加濾波等保護之；
- (20). 交流電路接地與直流電路接地分開；
- (21). 在滿足設計性能指標前題下，不要把射頻信號的輸出功率設計得過大，以免增加其他電子裝備的電磁相容設計困難；
- (22). 射頻信號的高次諧波必須予以限制。

5.3 電磁相容設計要點

5.3.1 抑制干擾源設計要點

- (1). 減少干擾源數目：儘量去掉對系統工作用途不大的潛在干擾源。
- (2). 適切地選擇工作模式：儘量使裝備在設計特性曲線中線性最好的部分工作，以使輸出諧波分量最小。例如設計振盪器時，應儘量少用倍頻的方法來產生發射機的載頻，以減少發射機的諧波輸出，在滿足輸出功率的前題下，其輸出級儘量採用適切的工作狀態，同時為了抑制輸出級產生載波的各次諧波，輸出級最好採用雙調諧回路設計。
- (3). 對有用的發射信號要進行功率與頻帶控制：根據國際無線電規則規定：「所有電台只應發射保證業務令人滿意所必需的功率」。因此發射信號功率一定要選擇恰當，不是越大越好，否則不僅造成功率浪費，而且還會引起有害的干擾。同時發射信號的頻帶應儘量接近必需的原信號頻帶，並且儘量使用窄頻帶技術，以降低頻帶外干擾。
- (4). 天線選擇：根據任務需求範圍的大小、形狀，適切地選擇天線的型式與天線的高度。首先根據任務範圍的特殊形狀要求，設計天線的方向圖，以免天線方向圖覆蓋非工作區，而造成干擾。用於點對點通訊的天線，應是方向性強的高增益天線，其旁溢電信號位準小可降低干擾信號位準。同時應根據任務區的大小及場強度要求來確定天線的架設高度，其高度應以達到任務邊界的最小場強度正好滿足要求為準，不是天線高度越高越好，更不能不顧任務區的大小搶先佔領高山架設天線，以免對鄰近區域造成干擾。
- (5). 脈衝形狀選擇：對控制設備及其它工作的脈衝形狀應適切地予以選擇，因為當脈衝上升較慢，持續時間較長時，產生的電磁干擾較小，當脈衝的寬度減小、上升時間縮短時，脈衝的高頻成份增加，頻譜寬度增大，將會在很寬的頻帶內

造成干擾。對於一個控制裝備而言，其脈衝的上升時間只需快到能在指定時間內保證可靠工作即可。同理可知，振盪器和開關速度不應高於性能所需要的速度。

- (6). 控制電弧放電：當兩個物體之間的電位差大到足以使它們之間的絕緣擊穿時，就會產生電弧放電，造成放電干擾。因此，在設計中要考慮物體間的電位差與其間距，儘量避免出現電弧放電，對於放電工作開關，應選擇觸點的閉合形狀和適當的工作電位準，以減少所產生的電磁干擾。例如：由於微型開關的尺寸小，工作電位準低，因此產生的干擾比繼電器觸點產生的干擾小。

5.3.2 抑制干擾耦合設計要點

電路內部距離很近的長導體之間的干擾耦合現象是很嚴重的，為了減少干擾耦合在設計時應注意下列事項：

- (1). 把攜帶雜訊的零件和導線與連接敏感零件的佈線隔離起來，把有雜訊的零件回路線與敏感零件的回路線隔離起來，例如把電源線、控制線、高電壓線與低電壓線隔離，並且儘量避免彼此平行。
- (2). 為了縮短干擾耦合路徑的長度，儘可能減短導線長度，並用較粗的屏蔽線或屏蔽套，以減少導線間的電容耦合。
- (3). 要注意佈線與結構體的天線效應：電路中的每根導線及印刷電路板上的每根金屬線，在某整程度上，既可以作為發射天線之用，又可以作為接收天線之用，頻率越高這種作用越明顯。對於通過磁場耦合的輻射能量，低阻抗的環形電路更為顯著，減少這種干擾耦合的方法應該是增加電路的阻抗。對於通過電場耦合的輻射，高阻抗的直導線較為顯著，減少電路的阻抗可減小干擾耦合。
- (4). 通過屏蔽來達到隔離作用：在干擾源與敏感零件之間進行屏蔽可以明顯地減少輻射耦合，當使用實體屏蔽材料來完全包圍干擾源和敏感零件時，屏蔽效果最好，使用網狀屏蔽或在主要輻射途徑上用屏蔽體造成輻射屏蔽，也能達到良好的屏蔽效果。

5.3.3 敏感裝備設計要點

上面所述對於干擾源的各種電磁防護措施同樣也適用於敏感裝備或零件，可以採用濾波、整體屏蔽、內部屏蔽、機內走線與電路的隔離、內部電路去耦及結構的合理佈局等措施來抑制電磁干擾。此外，在設計中儘量少用低電壓零件，去除一些不必要的敏感零件。敏感裝備的靈敏度不必設計的過高，只要滿足工作要求即可。

5.3.4 搭接設計要點

- (1). 良好搭接的關鍵在於金屬表面之間的緊密接觸：被搭接表面的接觸區應該保持光滑、清潔、沒有非導電物質。鎖緊方法應有足夠的壓力將搭接處夾緊，以保證即使在機械扭曲、衝擊和振動時表面仍然接觸良好。

- (2). 最好採用同類金屬的搭接，當使用不同類金屬作搭接時，特別要注意腐蝕存在的可能性，可在其間插入可更換的墊片，搭接完成後外面應加一層保護層。
- (3). 不要靠焊料來增加機械強度。
- (4). 在搭接處應採取防潮及其他防腐蝕的保護措施。
- (5). 跨接片只是直接搭接的代用方法，為減小搭接條的阻抗，應使它儘量短，並儘量減小搭接條的長寬比(保證長度比小於或等於 5)。不要使跨接片在電化學序列中低於被搭接件材料。應直接與主結構搭接，而不要通過鄰近零組件，不要使用自攻螺栓或任何其他以螺紋為主的搭接方式。
- (6). 要保證直接搭接處或搭接片能夠承受預計的通過電流。

5.3.5 接地設計要點

- (1). 當所考慮的電路或零件尺寸小於 0.05λ ，使用單點接地；大於 0.15λ 時，採用多點接地；介於 0.05λ 和 0.15λ 之間時，則應根據接地線的實際配置以及接地電路的傳導發射和傳導耐受容限來決定接地方式。對於工作頻率範圍很寬的電路，還要採用混合接地。
- (2). 出現地線環路問題時，可採用浮地隔離方法(例如：使用變壓器隔離)。
- (3). 使所有接地線儘可能短，而且儘可能直接連線。
- (4). 所設計的接地參考平面應具有較高的電導率，而且要便於維護，以保持良好的導電性能。
- (5). 對信號回線、信號屏蔽層回線、電源系統回線，以及底板或機殼，都要有單獨的電路接地系統。所有這些接地回線可以一起連接到單一接地參考點上。
- (6). 對會產生大突變電流的電路，應有單獨的接地系統，或單獨的接地回線，以減小對其他電路的瞬態干擾。
- (7). 低電壓電路的接地線要與所有其他接地線隔離開來。
- (8). 使用平衡差分電路，以儘量減小接地電路干擾的影響。
- (9). 最好使用雙絞合線作電源的母線和回線，而且避免把信號線和電源線捆成一束或相互靠得很近。在信號線與電源線必須交叉的地方，要使導線互相垂直。
- (10). 對於工作頻率在 1MHz 以下的電路，使用單點接地的緊絞合線(是否需要屏蔽視實際情況而定)是降低裝備敏感度最好的方法。
- (11). 端接電纜屏蔽時，避免使用屏蔽層辮狀引出線。
- (12). 需要用同軸電纜傳輸訊號時，要通過屏蔽層提供信號回路，低頻電路可在信號源端單點接地，高頻電路則採用多點接地。

- (13). 低電壓傳輸要使用多層屏蔽，各屏蔽層用單點接地較好。

5.3.6 屏蔽設計要領

- (1). 對於良好導體材料，如銅、鋁和鎂等，應該用於高頻的電場屏蔽，以獲得最高的反射損耗。
- (2). 對於磁性材料，如鐵、鎳鐵、高 μ 合金等，應該用於低頻磁場的屏蔽，以獲得最高的透入損耗(吸收損耗)。
- (3). 對電場屏蔽的屏蔽體，其厚度只要能保證屏蔽本身有足夠的強度就可以了，一般電屏蔽體對各種頻率的電場均具有良好的電屏蔽作用。
- (4). 對於薄層屏蔽，當材料的厚度小於 $\lambda/4$ 時，其屏蔽效果為一常數。當厚度超過 $\lambda/4$ 時，屏蔽效果隨厚度的增加而增加。
- (5). 多層屏蔽(對於屏蔽殼體或電纜)能夠提供高的屏蔽效果，且可擴展其屏蔽的頻率範圍。但是，在多種可供選擇的電磁相容方式中，是否採用多層屏蔽，主要是由它的成本來決定。此外，電纜線採用雙層編織線屏蔽後，其柔軟度將要降低，這也是是否選用多層屏蔽的一個考慮因素。
- (6). 為保持屏蔽體的屏蔽完整性，在設計時應該認真地考慮在它上面可能存在的開口和不連續處的問題，以保證屏蔽效妥受到的影響最小。同時在材料的選擇上亦要特別注意，不僅應從屏蔽的觀點來考慮，還應該從電化學腐蝕的觀點來考慮確定最合適的材料。
- (7). 當系統設計的其他條件允許時，採用連續對焊或互搭對焊是最好的焊接方法，同時應該儘可能使兩金屬板的結合面有更多緊密接觸的部分。
- (8). 在接合之前，接縫的配合表面必須予以淨化，將其表層的非導體物質徹底清除乾淨，除非在接合過程中能夠可靠地且有效地切除表面塗覆層，表面塗覆層應滿足電磁相容規範要求。
- (9). 導電襯墊、指形接觸簧片、波導衰減器、金屬絲網、百葉窗、和導電玻璃等是可用於保持屏蔽殼體屏蔽效果的主要零件與結構。在具體情況下，究竟採用何種方法，涉及的因素很多。除了屏蔽能力本身的要求外，還涉及到從空間利用率到成本等因素，以及從通風要求到可見度要求等許多問題，因此在設計選用時必須認真考慮。
- (10). 電纜屏蔽的關鍵性因素之一為屏蔽覆蓋率，一般軍用裝備的覆蓋率需求為不得低於 85%，而在駕駛艙內則要求不得低於 94%。電纜屏蔽層應該沿邊緣周界與連接器外殼尾部搭接，以保持在接受面部位的屏蔽效果。

6 電磁相容標準與規範

6.1 CNS

CNS 13438,

CNS 13439,

6.2 CISPR

CISPR 11,

CISPR 13,

CISPR 14,

CISPR 15,

CISPR 22,

6.3 IEC

IEC 801-2, ESD

IEC 801-3, RS

IEC 801-4, EFT

IEC 801-5, Lightning Surge

IEC 1000-4-2, ESD

IEC 1000-4-3, RS

IEC 1000-4-4, EFT

IEC 1000-4-5, Lightning Surge

IEC 1000-4-6, CS

IEC 1000-4-8, Power Frequency Magnetic Field Test

IEC 1000-4-11, Power Line Voltage Dip-Up Test

IEC 61000-4-2, Electrostatic Discharge (ESD)

IEC 61000-4-3, Radiation High-Frequency Electromagnetic Fields

IEC 61000-4-4,	Electric Fast Transients / Burst Test (EFT)
IEC 61000-4-5,	Surges
IEC 61000-4-6,	Conducted High Frequency
IEC 61000-4-8,	Power Frequency Magnetic Field Immunity Test (PFMF)
IEC 61000-4-11,	Voltage Dips and Variations
IEC 61000-4-12,	Oscillatory Transients

6.4 EN

EN 50081-2 (1993),	Generic Emission Standards
EN 50082-2 (1995),	Generic Immunity Standards
EN 50140,	Radiated Immunity Test (RS)
EN 50141,	Conducted Immunity Test (CS)
EN 50142,	Surge Immunity Test (Surge)
EN 50204,	Radiated Immunity Test (RS)
EN 55011,	Conducted Emission Test (CE)
EN 55011,	Radiated Emission Test (RS)
EN 61000-4-2,	Electrostatic Discharge (ESD)
EN 61000-4-3,	Radiation High-Frequency Electromagnetic Fields
EN 61000-4-4,	Electric Fast Transients / Burst Test (EFT)
EN 61000-4-5,	Surges
EN 61000-4-6,	Conducted High Frequency
EN 61000-4-8,	Power Frequency Magnetic Field Immunity Test (PFMF)
EN 61000-4-11,	Voltage Dips and Variations
EN 61000-4-12,	Oscillatory Transients

放射性(emission)

傳導性放射(conducted emission, CE)

電源導線(power leads)及連接導線

CE01: 30 Hz – 15 kHz

CE03: 15 kHz – 50 MHz

CE05: 30 Hz – 50 MHz

控制與訊號導線(control and signal leads)

CE02: 30 Hz – 20 kHz

CE04: 20 kHz – 50 MHz

CE05: 30 Hz – 50 MHz

天線座端(antenna terminal)

CE06: 10 kHz – 26 GHz

輻射放射性(radiated emission, RE)

磁場(magnetic field)

RE01: 30Hz - 30kHz

RE04: 20Hz - 50kHz

電場與電磁場(electric and electromagnetic field)

RE02: 14kHz - 10GHz

RE03: 10kHz - 40GHz

RE05: 150kHz - 1GHz

RE06: 14kHz - 1GHz

耐受性(susceptibility)

傳導耐受性(conducted susceptibility, CS)

電源導線(power leads)

CS01: 30 Hz – 50 kHz

CS02: 50 kHz – 400 MHz

CS06: 突波試驗

接收機天線座端(receiver antenna terminal)

CS03: 30 Hz – 10 GHz

CS04: 30 Hz – 20 GHz

CS05: 30 Hz – 20 GHz

CS07: 壓制線路

CS08: 30 Hz – 10 GHz

輻射耐受性(radiated susceptibility, RS)

磁場(magnetic field)

RS01: 30 Hz – 30 kHz

RS02: 磁性感應

RS03: 14 kHz – 40 GHz

電場與電磁場(electric and electromagnetic field)

RS03: 10 kHz – 10 GHz

RS04: 10 kHz – 30 MHz