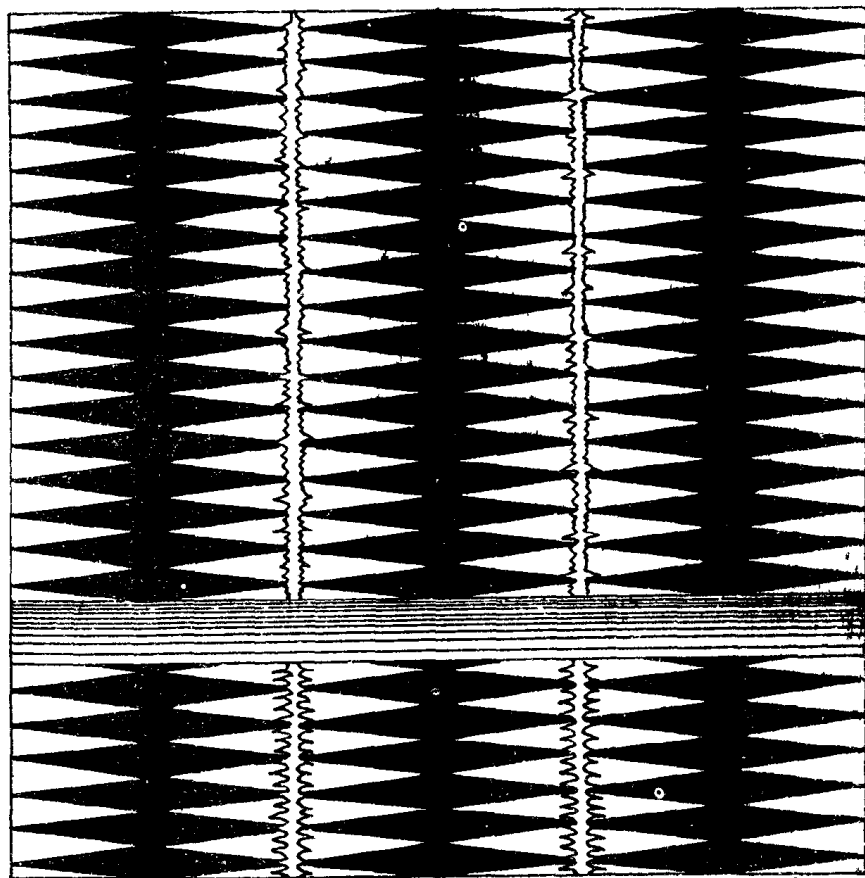


大專用書

電磁干擾及控制

林國榮 編著



全華科技圖書股份有限公司 印行

电磁干扰及控制

林国荣 编著

全华科技图书股份有限公司出版

世界图书出版公司 重印

(北京朝内大街137号)

北京中西印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1990年6月第1版 711×1245 $\frac{1}{4}$

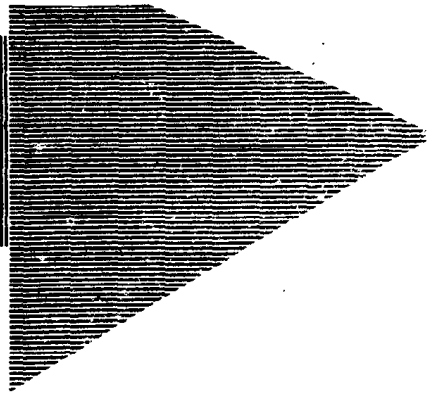
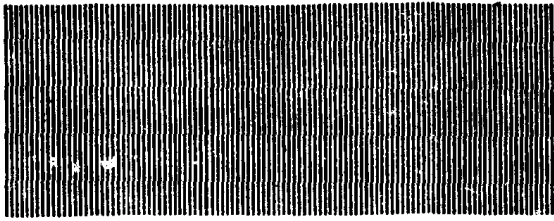
1990年6月第1次印刷 印张16.34

印数: 0001—1450 字数: 40.4万字

ISBN 7-5062-0725-7/TN·3

定价: 7.40元

本书经全华科技图书股份有限公司香港和中国大陆总代理鑫港出版社有限公司特许世界图书出版公司独家重印, 限国内发行



序 言

昔日收聽電台廣播後容易瞭解到“雜音”的存在；機車或汽車經過時，收音機總是會發出同步於汽機車點火系統的雜音。到了電視傳播的年代，人們仍然能感受到“雜訊”的問題；當飛機經過自家上空，電視總是會產生不愉快的畫面。時至今日，個人電腦普及，到處都是數位電路的環境，又產生了新的困擾。當您陶醉於美妙的調頻電台所播送的旋律之時，如果有人打開個人電腦，您很有可能就無法再繼續收聽電台的音樂。現在的問題不再是雜音或雜訊足以描述者，更廣義的“電磁干擾”（electro-magnetic interference, EMI）已被近代的設計工程師拿來描述各類的雜訊問題。

電磁相容（electro-magnetic compatibility, EMC）環境設計是一門新發展的行業，一個有經驗的電磁相容工程師所獲取的報酬也高達普通電子工程師的兩倍至三倍，而其地位更因電路系統複雜度的增加而益受重視。當數位系統，特別是電腦系統，及交換式電源被大量使用，使得電磁干擾更趨嚴重與複雜；如何造成電磁相容工作環境業已成為電子工程師另一個新的努力方向。

概括說來，電磁干擾就是過去傳統雜訊問題的延伸，如何解決雜訊干擾的問題也等同於如何選出一個電磁相容的工作環境。但電磁干擾與電磁相容比雜訊有更嚴密的定義與規定。工業或軍用產品製造或設計過程中，都可找到可依循的電磁干擾規格，如MID-STD-461，FCC，VDE，CISPR。

本書針對電磁干擾問題及其防治方法作入門性的介紹，對每一可能發生的情況都有極詳細的解說，並佐以例題，使讀者能瞭解電磁干擾現象及防治技術外，更能對實際的應用有直接的感受。每一

例題都為實際情況之濃縮，各公式都依合理的數學推導解析給讀者瞭解，並導出一實際可用的結果，這些結果皆可直接應用於實質問題，而不必考慮到原始的數學推導過程。

每章後面都附有相關之習題供讀者檢查是否全盤瞭解每一章所提及的內容，附錄B為簡單的習題解答。除附錄B外，附錄A也簡單介紹分貝之類的單位，使不熟悉分貝單位的讀者能有基本的認識。附錄C、D及E的圖表相當實用，可供實驗或設計時作參考。

因資料來源甚為珍貴，整理時間又極倉促，疏忽或無心之誤在所難免，尚請專家或先進能對本書有建設性的建議與指教。

最後要感謝一千朋友幫忙收集資料，甚至美國台灣兩頭忙，如無他們的幫助無法使本書的內容如此豐富。全華圖書公司陳本源先生、鐘秀鳳小姐、林淑華小姐及有關同仁的配合與鼓勵，也使本書能儘早問世，在此一併致謝。希望本書的發行能對解決實際的電磁干擾問題有幫助。

林國榮 謹識



目 錄

(0)	引 言	1
0-1	電磁相容性	4
0-2	定 義	5
0-3	雜訊干擾管制之規定	5
0-4	雜訊干擾途徑	10
0-5	干擾的方式與控制	13
0-6	摘 要	16
	習 題	17
1	電磁相容性之設計	19
1-1	干擾源與受干擾者之物理性質	23
1-2	電磁干擾源	33
1-3	電磁干擾之預測與性能分析	42
1-4	受干擾端的性能	47
	習 題	54
2	導線對導線的干擾及屏蔽措施	55
2-1	電容性雜訊干擾	56
2-2	電感性雜訊干擾	62
2-3	兩導線間的串話量	75
	習 題	85

3 接地與接地阻抗引起的干擾 89

3-1 安全接地與訊號接地	90
3-2 電路的接地參考點	98
3-3 共同阻抗產生的雜訊干擾	114
習 題	132

4 輻射性共模干擾及地迴路干擾 137

4-1 電磁場對電路的干擾	138
4-2 降低共模干擾之方法	146
4-3 地迴路之干擾	149
4-4 降低地迴路之干擾	157
習 題	181

5 輻射性異模干擾 185

5-1 異模干擾	186
5-2 異模干擾之降低	194
5-3 綜合例題	198
習 題	207

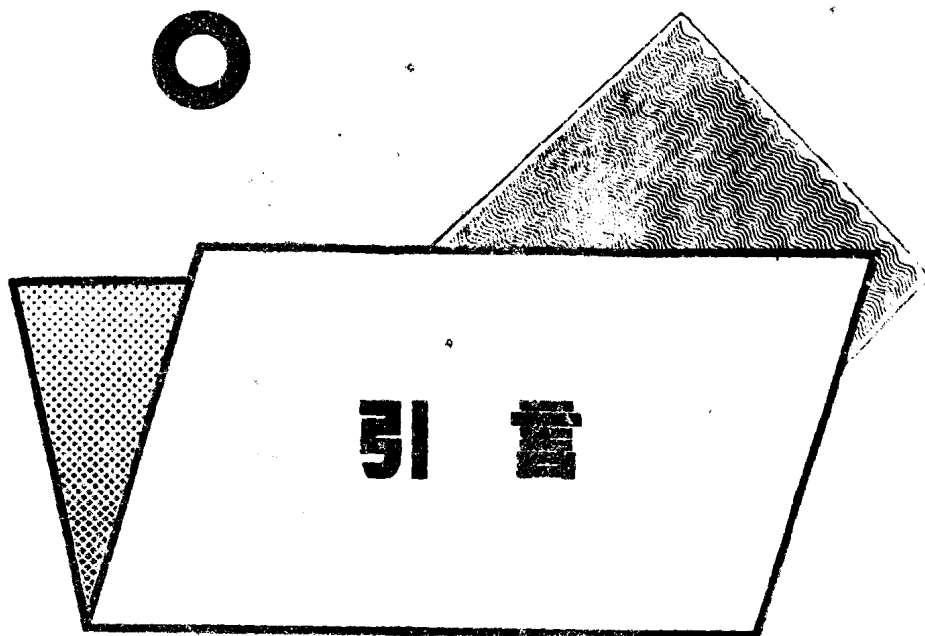
6 電力線與電源系統的干擾 209

6-1 電力線與電源系統間的相互干擾	209
6-2 電力線的干擾	218
6-3 降低電力線的干擾	219
6-4 電源系統的干擾	237
習 題	245

7 電磁干擾的來源與控制 247

7-1 逆轉律	247
7-2 幾種雜訊發射源	251

7-3	外導線及地迴路產生的干擾	282
7-4	同軸電纜的輻射	290
7-5	長載流導線的磁場	291
7-6	傳導性發射雜訊	294
	習題	300
附錄 A 分貝等單位之介紹		301
A-1	分貝的定義	301
A-2	分貝毫伏	303
附錄 B 習題解答		306
附錄 C 導線間的近場干擾		315
C-1	簡介	315
C-2	電容性干擾	315
C-3	電感性干擾	324
附錄 D 地迴路干擾		333
D-1	地迴路干擾之數學模式推導	333
D-2	地迴路干擾	336
D-3	地迴路干擾設計圖	338
附錄 E 使用接地電感及結合導線降低地迴路干擾量		376



科技的發展使得各種行業都必須大量採用電子或電氣性設備，例如通訊工業、電子線配電系統、自動化工業，計算機科技、資料通信事業、醫療器材、維生設備、保全系統、測量儀器等等；或因使用場合之需要，而需數種設備相互配合使用，導致電路間互相干擾之問題。其中以電磁干擾（electro magnetic interference, EMI）及雜訊（noise）頗令設計工程師感到困擾，尤其以個人電腦必須滿足美國聯邦通訊委員會（federal communication commission, FCC）B級（class B）之要求最為電腦製造廠感到頭痛。當然干擾及雜訊之起因大部份為電路元件的分佈密度過高；加上積體電路大大縮小了電子設備的體積，但電路變得愈靈巧，則會有更多的電路元件擠在一小空間，因而增加了干擾的機會。

今日的電子工程師或是線路設計者除了要確保其設計之電路能工作於理想之實驗室環境外，更要使這些電路能工作於含有電磁干擾或雜訊的實際環境中。換言之，設計好的電路或完成的儀器設備於工作中不得被外來的雜訊所干擾，而且本身也不得成爲一雜訊干擾源，如何消除或免於電磁干擾，已經成爲今日電路設計的一個主要課題。

2 電磁干擾及控制

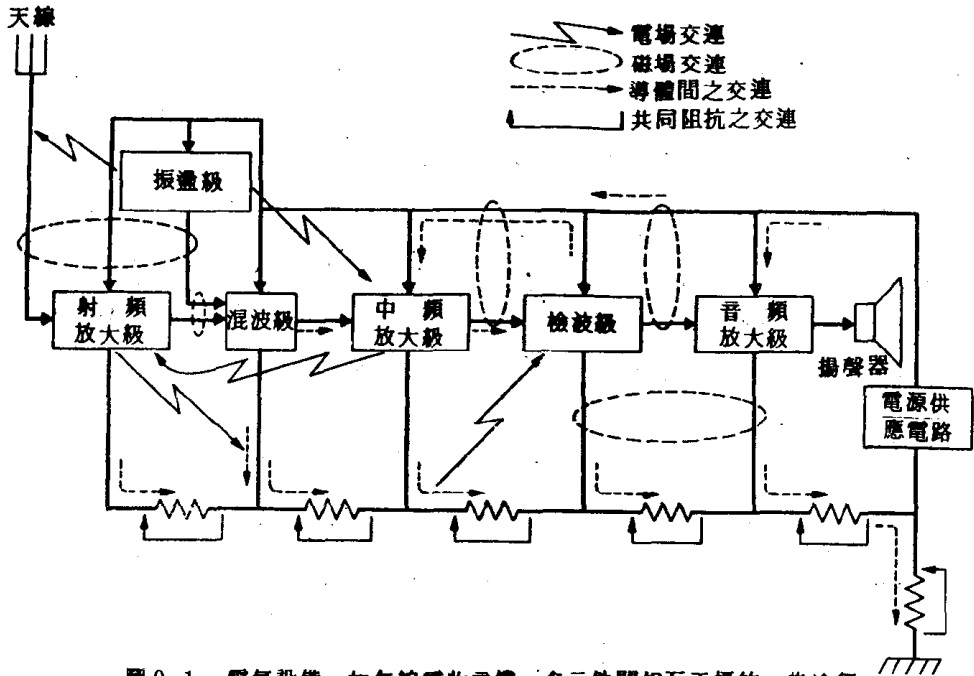


圖 0-1 電氣設備，如無線電收音機，各元件間相互干擾的一些途徑

圖 0-1 收音機之方塊圖例子說明電子儀器內可能發生之干擾種類；譬如各電路級間的連線很容易導入雜訊，而有些電路級也會產生雜訊。此外各級之地電路皆流經同一接地阻抗，使地迴路產生可觀的雜訊電位。圖上亦即指出各導體上之訊號的電場與磁場相互交連之情況。這種內部的雜訊問題必須在收音機進入實驗室測試之前先被解決掉；當這部收音機（電氣設備）置於實際的環境中運作時，它又可能遭受外來的雜訊源干擾，如圖 0-2 之說明。外來的雜訊電流可能經由交流電源端引入收音機中，而且整部收音機也可能將暴露於充斥著電磁輻射訊號之惡劣環境下，這些雜訊源都不是收音機（儀器設備）設計者所能控制者。然而不管環境為何，收音機（儀器設備）設計者都要使它能在此類實際環境下正常工作。

圖 0-3 指出雜訊問題的另一面，收音機（或儀器設備）本身可能就是一雜訊源，而且會干擾到其他的設備。電路上的元件直接輻射雜訊至其他電路，而電源線也會將雜訊引到其他電路。電源插頭之銅導體也會有天線之功能，將流動的雜訊電流輻射至空中，干擾到其他的電氣設備。因此如何降低雜訊之發生與如何避免遭受雜訊之感染在電路設計上佔有同等重要的地位。

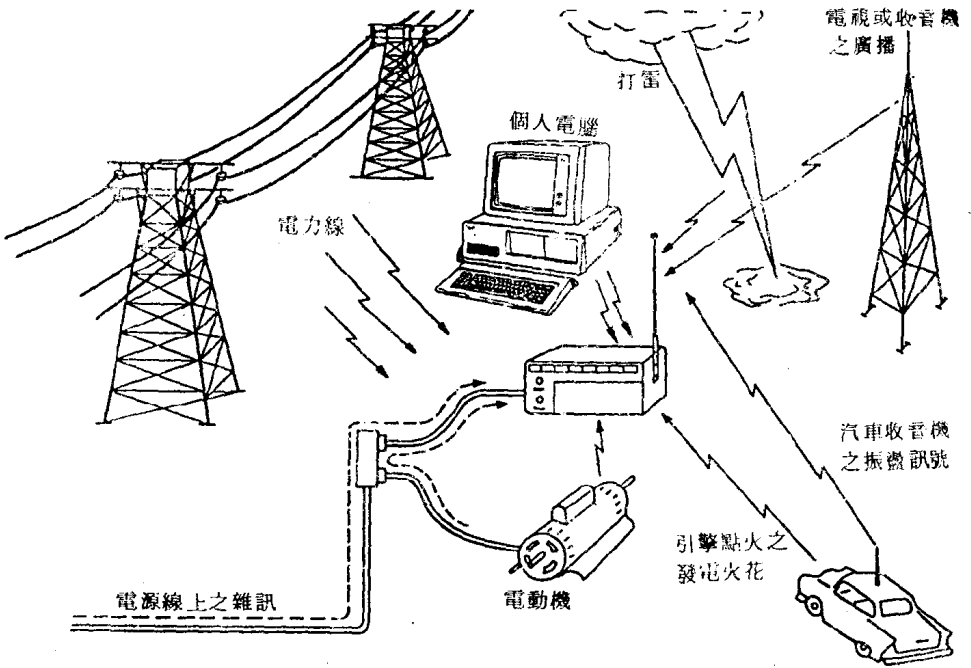


圖 0-2 在實驗室之外，電氣設備（如收音機）可能要承受各類不同之電磁雜訊源

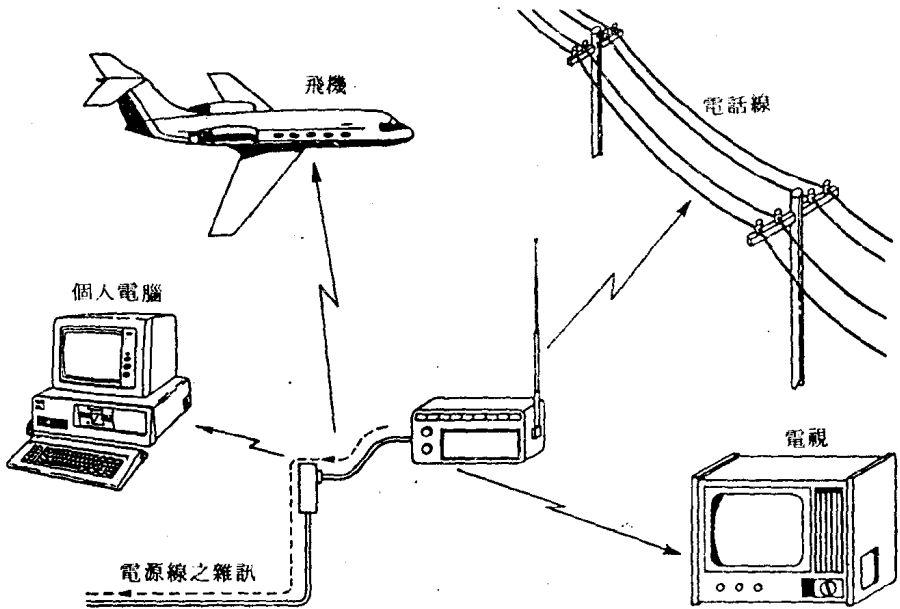


圖 0-3 電氣設備（如收音機）也會輻射雜訊干擾其他電路

0-1 電磁共存性

電磁共存性 (electro-magnetic compatibility, EMC) 是指儀器設備於可能的電磁干擾環境下仍然能正常工作之能力。電路設計之初一定要先考慮其電磁共存性，否則於產品測試階段才發現問題，或許要花較高的代價與精神才能解決部份的問題，有時還可能無法徹底解決這些問題。一般說來，產品設計階段能用的雜訊祛除技巧較測試階段來得多，而測試階段能用的雜訊祛除技術又較生產階段來得多，而其花費剛好相反，以生產階段之雜訊祛除費用最昂貴，測試階段次之，而設計時花在祛除雜訊之費用為最少，這些關係重新標示於圖0-4，套句格言「預防重於治療」，儘早發現干擾問題儘早解決，其效果最彰而費用最廉。

例如電路設計之初就考慮雜訊祛除之問題，則引用的技巧將非常直接而且簡單，經驗告訴我們這種辦法所得到的產品有百分之八十或九十於測試前都不會有雜訊干擾的困擾。

另一方面，若設計者於設計之初不考慮雜訊問題，我們幾乎可以確定這些產品於測試階段都會出現雜訊干擾的問題。此時雜訊問題的分析將變得相當複雜，雜訊的傳導路徑相互交夾不清，要找出雜訊源就不再那麼單純。額外的花費也大幅提高，如工程費用增多、元件數增加、安裝費用提高，而且會引發體積增加、重量增加、功率消耗增加等其他問題。

對於電路設備所產生的雜訊量也必須考慮將它減至最低的情況，因發出的

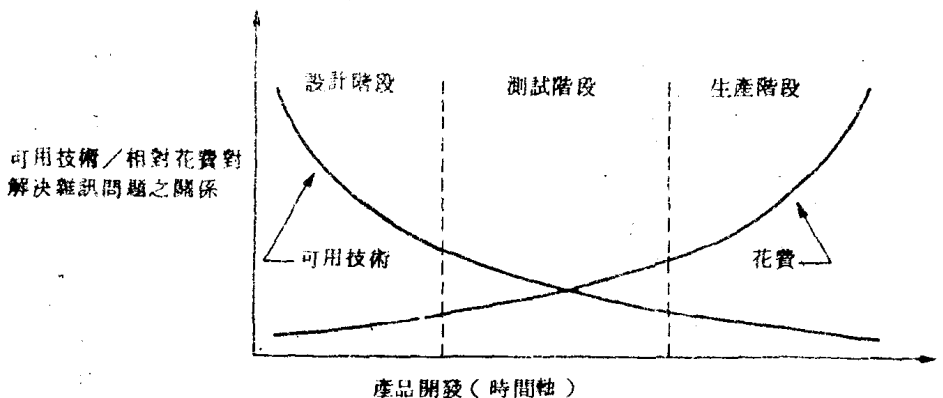


圖 0-4 產品開發過程中，愈近生產階段可用之雜訊解決技術愈少而花費却反而提高

雜訊可能會干擾到其他的電路設備或儀器，故設計者之主要目標總是要設法將雜訊儘可能控制在雜訊源附近，而不外洩到電路設備外，以避免衆多無關的接收電路都發生電磁干擾的問題。欲達到電磁相容性之要求，電路之設計不但要不產生雜訊影響其他的電子設備，而且也要不被其他的電子儀器所干擾。

0-2 定 義

雜訊 (noise) 可定義為電路中除所要的訊號外之任何電氣訊號或能量。此定義之例外現象為電路非線性所造成的失真，這是電路的設計問題而不是真正的雜訊問題。雖然這類失真並非電路所要者，但除非它交連到其他電路上，否則不被視為雜訊。根據此雜訊定義某電路所要的訊號若交連到其他電路上，則可能被視為該電路之雜訊。

通常雜訊之成因可歸為三類，一是純質雜訊 (intrinsic noise)，此因元件本身不規則之變化所致。熱雜訊 (thermal noise) 即為純質雜訊之例，其二為人為雜訊 (man-made noise)，如馬達電動機、電力開關、無線電發射機所產生者。三是自然界之擾動，如閃電打雷、太陽黑子爆炸等。

干擾 (interference) 可定義為雜訊所導致的異常影響，如果雜訊造成不必要的結果，則稱此為干擾。通常雜訊無法完全被祛除，僅能將它減弱，使其無法產生干擾。

感受度 (susceptibility) 意指元件或電路對雜訊之反應，電路或元件之感受程度是指設備還能正常工作之最惡劣雜訊環境。

0-3 雜訊干擾管制之規定

美國聯邦通訊委員會 (FCC) 對於無線或有線之通訊提出了管制之規定，其中某些部份是相關於雜訊干擾之控制者。如第 15 章 (part 15，有關無線通訊元件部份) 及第 18 章 (有關工業用、科學用、醫學用等儀器設備) 某些條文談到雜訊干擾之控制。這些條文規定各類等級之儀器所被容許之輻射能量。典型例子如第 15 章第 7 節 (section 15.7) 指出可發射電磁輻射能量元件之一般要求，該類電磁輻射元件之定義為“其設計之目的即為發射電磁能量至電路外面之元件，……”。此類元件裝置包括車庫大門遙控設備，100mW 的無線對講機、無線麥克風或高頻式保全元件。FCC 規定元件於 $\lambda/2\pi$ (約

6 電磁干擾及控制

$\frac{1}{6}$ 之波長)處產生之電磁場強度不得超過 $15 \mu\text{V}/\text{m}$ 。若發生輕微之干擾，則需提出可行之辦法來消除這些干擾，若干擾嚴重至影響到正常之通訊設備，則干擾被祛除前都不得使用此類發生電磁輻射能量之裝置。

第二個例子如 FCC 第 15 章 31 節 (section 15.31) 指出偶發電磁輻射能量之元件的定義為“其設計不作為電磁能量發射者，而於正常工作中會發生電磁能量輻射至外面之元件。”此類元件包括開關電路、時鐘脈衝電路、矽控整流器、電源轉換裝置、汽車引擎之點火系統及氙燈等。

FCC 第 18 章提到用於工業、科學、醫療方面之無線電材料之使用規定。其中包括電療器材、工業用加熱設備、高頻熔接機及其他無關於通訊而會輻射

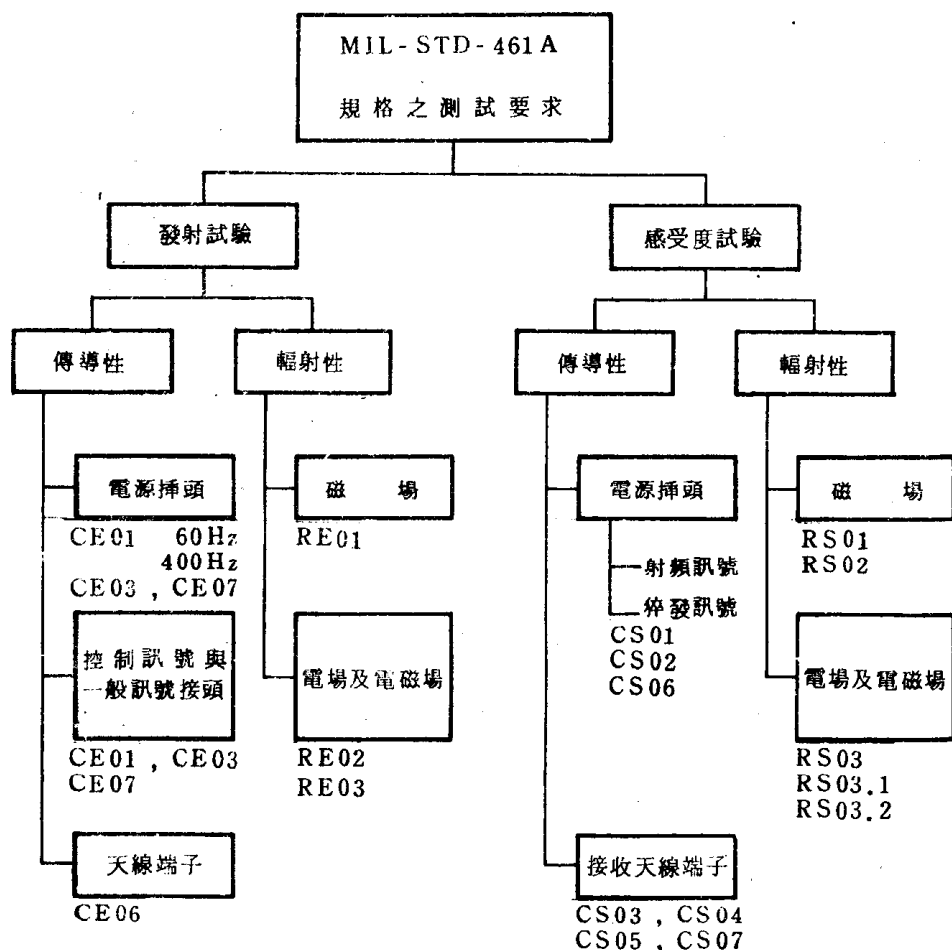


圖 0-5 軍用規格涵蓋雜訊之發射能量與雜訊感受度之規定

電磁能量之元件。第 18 章規定這些器材操作時，不得產生過大的電磁能量干擾到正常的無線電通訊，若發生有害之干擾，這些儀器設備之操作者必須採取適當的步驟以遏止干擾之發生。

另一套可依循之干擾規定是由美國軍用規格第 8 條衍生者。如 MIL-STD-461A 提出有關 30Hz 至 10GHz 頻率間之電磁輻射干擾限制。MIL-STD-462 則列舉測試電磁干擾之程序與方法。

歸納 MIL-STD-461A 之測試規定可得圖 0-5 之方塊圖，MIL 規格涵蓋範圍相當廣，它也被工業界採用於設計無干擾之器材設備的參考標準。測試項目含發射 (emission) 試驗及感受度 (susceptibility) 試驗，這二者各包含傳導性 (conducted) 及輻射性 (radiated) 測試。

RE01 (RE 為 radiated emission 之縮寫) 規定要求發射的輻射磁場能量於離開發射源 7 公分處不得超過圖 0-6 所列出的值，RE02 規定發射的寬頻帶電場於離開發射源 1 公尺處不得超過圖 0-7 所列之值。

RS01 (RS 為 radiated susceptibility 之縮寫) 規定輻射磁場之感受程度。此規定要求被測試者處於圖 0-6 之磁場強度時，不得出現性能變差，工作異常或運作情況偏離標準規格等狀況。RS03 規定輻射電場之感受程度，此規定要求被測試者處於表 0-1 所列電場強度時，不得有性能變差，工作異常或運作情況偏離標準規格等狀況出現。

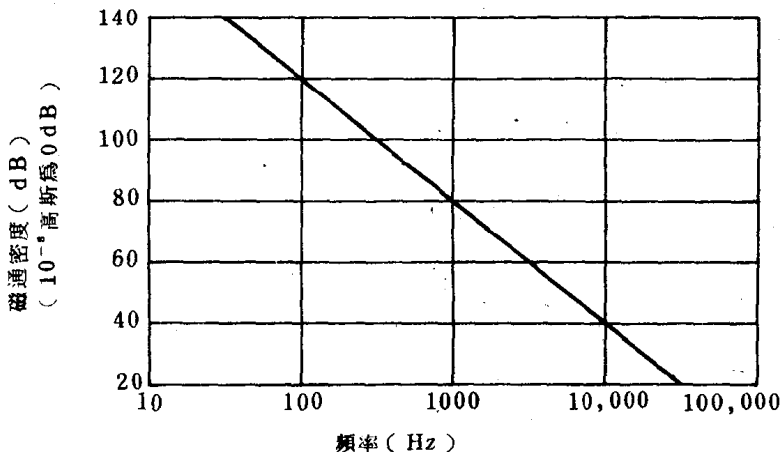


圖 0-6 發射源 7 公分處，輻射磁場能量之限制。此圖亦適用於磁場感受程度之規格，1 高斯等於 10^{-4} 特斯拉

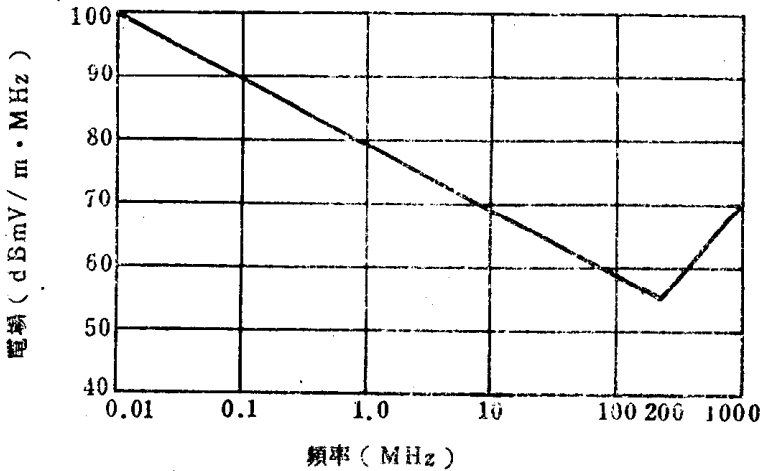


圖 0-7 發射源 1 公尺處輻射電場之強度規定

表 0-1 輻射電場感受度

頻率範圍 (MHz)	感受程度 (V/m)
0.01 ~ 1.9	1
2 ~ 29.9	5
30 ~ 400	10

CS06 (CS 為 conducted susceptibility 之縮寫) 之猝發雜訊測試，規定電源接頭傳導感受度之要求。此測試要求 10 μs 長度之突波加到未接地之直流或交流電源接頭，突波之振幅為兩倍之直流電壓值或 100 V (特 (選最小者))，測試項目包括正、負極性之單獨或重複 (每秒約 5 至 10 個脈衝) 突波之試驗，且每回總試驗時間不得超過 30 分鐘。被測試之儀器設備不得有性能變差，工作異常或運作偏離標準規格等異常狀況出現。

除 FCC 之規定外，較早有國際無線電波干擾委員會 (Comite international special des perturbations radioelectriques, CISPR) 針對無線電干擾有關之妨礙源產生之妨礙波之測定，以及干擾容許值之規定。CISPR 為國際電機協會 (International electrotechnical commission, IEC) 下的一個基層組織，其主要工作目標在於如何對下列各項工作條件達成協議：

1. 保護無線電接收設備防止受到各類電子電機、點火設施、電力供應設施（包括輸配電系統）、工業、科學及醫療儀器設備及收音機或電視機等之干擾。
2. 干擾測定用測試儀器及其測量方法之擬定。
3. 第1項所列妨礙源發射之干擾訊號之容許值。
4. 祛除干擾收音機或電視機之雜訊應注意事項，及其測定方法。
5. 抑制電子電機干擾之安全規則實施後，可能產生之影響。

這些規定就是後來被 FCC 收到其第15章及第18章中，而西德的VDE-0871也是參考這些規定所擬定者。其中最常被電子資訊業者所注意者為A級（class A）及B級（class B）規定之內容。

A級：能滿足A級機器干擾之限定值（表0-2、表0-5），却不能滿足B級機器干擾限定值（表0-3、表0-4、表0-6）之資訊處理裝置及事務機器等。其銷售地區以住宅區為主，其限定值之規定以30公尺為基準，超過30公尺處之干擾值不得超過A級之限定值。

表 0-2 A級機器之限定值（雜訊電壓）

頻 率 範 圍 (MHz)	峯值限定值 (dB μ V)	平均值限定值
0.15 ~ 0.20	83	70
0.20 ~ 0.50	79	66
0.50 ~ 5	73	60
5 ~ 30	79	66

表 0-3 B級機器之限定值（接地型）

頻 率 範 圍 (MHz)	峯值限定值 (dB μ V)	平均值限定值 (dB μ V)
0.15 ~ 0.20	70	57
0.20 ~ 0.50	60	56
0.50 ~ 5	60	56
5 ~ 30	60	56