

电子系统 抗干扰实用技术

滕旭 胡志昂 编著

国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

电子系统抗干扰实用技术

滕旭 胡志昂 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

全书共分12章。第1章介绍电磁干扰的概念。第2章和第3章介绍电磁干扰的分析方法与电磁干扰的耦合性质。第4章至第12章主要介绍抑制电磁干扰的实用技术,其中包括电场与磁场干扰耦合的抑制技术、印制电路板布局与系统间的接地技术、干扰信号频域特性与数字滤波技术、屏蔽腔体孔缝效应与干扰抑制技术。最后,介绍一些常用的电磁兼容标准与电磁兼容试验场地。

本书可供从事电子系统及电子产品开发、设计的广大工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子系统抗干扰实用技术 / 滕旭, 胡志昂编著. —北京: 国防工业出版社, 2004.7

ISBN 7 - 118 - 03494 - 0

I. 电... II. ①滕... ②胡... III. 电子系统 - 抗干扰 - 技术 IV. TN103

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 041027 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17 388 千字

2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月北京第 1 次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 27.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

前 言

随着电子技术的迅猛发展，各种各样复杂的电气电子设备或系统已经广泛地应用于人们的日常生活中。这些设备或系统在正常运行的同时会向周围发射电磁能量，对其他的电子设备或系统产生电磁干扰，严重时会造成一定程度的危害。在同一电磁环境中，各种电气电子设备或系统能否相互兼容地工作，已是人们非常关注的问题。当前，电磁兼容（EMC）已经成为绝大多数电子产品设计者无法回避的课题。为了设计出能满足一定电磁兼容性能电子产品来，设计者有必要了解一下电磁学中的一些专门内容。本书将就此方面的内容全面而详细地进行论述。

为了更好地理解书中的内容，在内容安排上先利用电路理论进行定性的描述，然后再根据电磁场理论给出定量的分析结果，并结合实际情况给出对一些问题进行处理的实用方案。电路理论与电磁场理论有着内在的联系。电路理论对电子产品设计者来说，已是较为熟知的内容，但是应用电路理论不能解决元器件的分布电感和分布电容等问题，这是因为对实际中的分布电感和分布电容进行定量分析是比较困难的。另外，利用电磁场理论进行分析时，需要知道实际硬件设备的物理尺寸，这对于那些不是专门从事电磁学工作的设计者来说往往是比较生疏的。

在书中讨论了电场和磁场耦合作用下电缆的屏蔽效能，给出了几种电缆屏蔽体和相关电路的接地技术。分布电流的返回路径是关键的控制技术，书中分析了电缆屏蔽体多点接地技术，研究了采用平衡电路、共模阻抗等技术对分布电流的返回路径实施控制的内容，再利用电磁场理论对出现问题的严重性给出定量分析和定量预测。另外，安全接地的要求常常与信号返回路径的处理方法经常发生冲突，书中给出了一些能同时满足这两方面需求的技术方法。

对于设备之间的辐射干扰，书中进行了解析分析，正像许多电磁学的内容那样，将麦克斯韦（Maxwell）方程作为讨论问题的切入点，利用偶极子天线构成麦克斯韦方程的边界条件。书中还介绍了近场与远场的物理特性，讨论了近场和远场电场与磁场的屏蔽效能。S.A.Schelkunoff 曾经提出过一种理论，这一理论为确定由低导电性能材料制成屏蔽腔体时的厚度给出了理论上的参考依据。书中同时还介绍了其他种类的屏蔽方法，如导电涂层技术等。

对屏蔽体上有穿过的导线与没有穿过的导线，以及存在的孔缝，在书中进行了研究。

应用缝隙天线理论可预测屏蔽腔体壁上出现的缝口或缝隙对屏蔽效能的影响，孔缝的大小尺寸决定了泄漏电磁场的幅度和泄漏电磁场的频率。

在实际中，很容易忽视导线穿过屏蔽体和屏蔽体上留有孔的情况，实践证明，当没有经过适当处理的电源线穿过屏蔽体时，会使整个屏蔽体失去应有的屏蔽效能。书中给出了几种方法，使得当低频或高频导线穿过屏蔽体时，屏蔽体能保持完好的屏蔽效能。

书中还讨论了周期和非周期信号的谱分析，其目的在于拓宽分析电磁波泄漏特性的范围，进行宽带泄漏与窄带泄漏比较。利用统计信号和随机信号分析的基本知识，讨论了每种泄漏产生的干扰特性。

在很多实际情况中，人们已经意识到了电磁兼容标准的重要性与必要性，本书介绍了一些电磁兼容方面的国际标准化组织和目前使用的电磁兼容方面的国家标准。为了更好地理解和使用这些标准，书中讨论了常用的并被国际上承认的电磁兼容测试场地。对开阔场地、屏蔽室、电波暗室的特性进行了比较。

伴随着电气电子技术工程发展的每一阶段，都会相继出现新的电磁干扰问题，这一现象越来越被实践所证明。因此，未来的电子产品设计者，在产品的设计阶段就应充分考虑到要将电磁兼容技术融入产品设计之中。本书所介绍的一些设计方法与实用技术具有典型意义，重点是训练读者将类似的设计原则与实用技术，应用到未来的产品设计中去，提高产品质量，降低产品成本。

本书可作为电气电子工程领域设计者的参考用书，同时也可作为学习电子系统抗干扰实用技术的大专院校学生的教学用书。在阅读本书之前，读者应首先完成电磁场与传输线理论课程的学习，一般情况下，应完成大学电子工程课程的学习。

目 录

第 1 章 电磁干扰的概念	1
1.1 电磁干扰的现象及危害	1
1.2 电磁干扰形成的必备条件	3
第 2 章 电磁干扰的分析方法	6
2.1 电路理论分析方法	8
2.2 电磁场理论分析方法	9
2.2.1 用电磁场理论分析电磁干扰	10
2.2.2 电磁场理论分析方法的适用条件	11
2.2.3 干扰耦合途径衰减系数	12
第 3 章 近距离的电磁干扰耦合	14
3.1 容性(电场)干扰耦合	14
3.1.1 容性(电场)干扰耦合等效电路	14
3.1.2 容性干扰耦合的描述	18
3.1.3 容性干扰耦合的分析	19
3.2 感性(磁场)耦合	21
3.2.1 感性干扰耦合的分析	21
3.2.2 减小感性干扰耦合的方法	24
3.2.3 感性干扰耦合电感量的计算	25
第 4 章 电场与磁场干扰耦合的抑制	29
4.1 电场干扰耦合的抑制	30
4.1.1 电场干扰耦合等效电路分析	30
4.1.2 屏蔽层本身阻抗特性的影响	32
4.2 磁场干扰耦合的抑制	34
4.2.1 高频磁场干扰耦合的特点	35
4.2.2 高频磁场干扰耦合的计算	36
4.3 屏蔽层阻抗对屏蔽效能的影响	40
4.3.1 屏蔽效能的表示	40
4.3.2 屏蔽效能的计算	40

4.4	漏电感对屏蔽效能的影响	41
4.4.1	漏电感的概念及等效	41
4.4.2	漏电感对屏蔽效能影响的分析	43
4.5	返回路径分布电流对屏蔽效能的影响	45
4.5.1	产生影响的原因	45
4.5.2	共模电流与差模电流	45
4.5.3	共模电流与差模电流的测量	46
4.5.4	抑制共模电流的方法	47
4.6	利用共模阻抗抑制共模电流	48
4.7	电缆干扰辐射与干扰吸收的抑制	51
4.7.1	电缆干扰辐射与干扰吸收的概念	51
4.7.2	电缆芯线屏蔽与滤波技术	52
4.7.3	电缆干扰辐射与干扰吸收的抑制技术	56
4.8	低通电缆的滤波特性及应用	58
4.8.1	低通电缆的滤波特性	59
4.8.2	低通电缆滤波特性的应用	59
第5章	系统间的接地技术	61
5.1	信号地的连接	61
5.1.1	公共地产生干扰的分析	62
5.1.2	公共地产生干扰的抑制方法	63
5.2	安全地的连接	65
5.2.1	安全地的概念	65
5.2.2	安全地的有效连接	65
5.3	供电系统中的接地	66
5.3.1	TN-C 制式系统	66
5.3.2	TN-S 制式系统	67
5.3.3	TN-C-S 制式系统	67
5.3.4	TT 制式系统	67
5.4	几种接地技术	67
5.4.1	单点接地	68
5.4.2	多点接地	68
5.4.3	混合单点接地	68
5.4.4	混合多点接地	69
5.4.5	接地的一般性原则	69
第6章	印制电路板布局与接地	71
6.1	印制电路板的类型及特点	71
6.1.1	音频电路	71

6.1.2	射频(RF)电路.....	72
6.1.3	功率转换电路.....	72
6.1.4	数字逻辑电路.....	73
6.1.5	机电电路.....	74
6.2	印制电路板的布局技术.....	74
6.3	印制电路板信号布线中的电流特性.....	75
6.3.1	带状布线.....	75
6.3.2	布线中的缝隙泄漏.....	77
6.3.3	布线过孔产生的干扰.....	79
6.3.4	网格地平面技术.....	80
6.4	印制电路板电源布线中的电流特性.....	81
6.4.1	电源布线产生的干扰现象及分析.....	81
6.4.2	电源布线的传导干扰特性.....	83
6.4.3	电源布线干扰抑制措施.....	85
6.5	高速印制电路板的设计技术.....	87
6.5.1	电源布线.....	87
6.5.2	信号线布线.....	96
第7章	干扰信号的频率特性及数字滤波技术.....	101
7.1	干扰信号的频率表示.....	101
7.1.1	确定性信号的频率表示.....	101
7.1.2	随机性信号的频率表示.....	104
7.2	干扰信号的频谱分析.....	105
7.3	干扰信号的频谱密度估计.....	106
7.3.1	开关电源传导发射的干扰信号功率谱密度估计.....	107
7.3.2	计算机局域网线传导发射的干扰信号功率谱密度估计.....	109
7.3.3	计算机键盘连线泄漏信号的功率谱密度估计.....	112
7.3.4	印制电路板上信号线产生的电磁辐射谱密度估计.....	112
7.4	抑制干扰信号的数字滤波技术.....	114
7.4.1	数字滤波技术的特点.....	114
7.4.2	数字滤波器的类型及实现.....	115
第8章	设备(系统)间的辐射干扰耦合.....	129
8.1	麦克斯韦(Maxwell)方程.....	129
8.2	电场源麦克斯韦方程的解.....	130
8.3	磁场源麦克斯韦方程的解.....	134
8.4	非正弦电流激励的印制电路板时钟布线辐射场特性.....	137
8.4.1	偶极子模型.....	137
8.4.2	解正弦电流模型及功率谱密度.....	138

8.4.3	时钟布线的电偶极子等效	141
8.4.4	时钟布线应考虑的问题	143
8.5	设备(系统)的辐射近场特性	143
8.6	设备(系统)低辐射特性设计技术	146
8.6.1	辐射干扰现象	146
8.6.2	辐射的分析	147
8.6.3	辐射的抑制技术	150
第9章	屏蔽腔体抑制辐射耦合技术	158
9.1	屏蔽技术原理及分类	158
9.1.1	屏蔽技术原理	158
9.1.2	屏蔽技术分类	159
9.2	电磁屏蔽技术基本理论	159
9.2.1	屏蔽体的吸收损耗	160
9.2.2	屏蔽体的反射损耗	164
9.3	磁场屏蔽技术	167
9.3.1	低频磁场屏蔽	168
9.3.2	高频磁场屏蔽	170
9.4	铁磁性材料(铁氧体)特性	172
9.4.1	磁导率对电磁干扰的影响	172
9.4.2	铁氧体的特性阻抗	174
9.4.3	铁氧体材料的特性	176
9.5	屏蔽材料	178
9.5.1	低频磁场屏蔽材料	178
9.5.2	铁氧体插损器件及应用	182
第10章	屏蔽体的孔缝耦合效应及抑制	190
10.1	屏蔽体中的电流	190
10.2	屏蔽板特性阻抗与屏蔽效能	193
10.3	屏蔽体孔缝阵列耦合效应	195
10.4	屏蔽效能的低频测试技术	199
10.5	电源线路磁耦合干扰抑制技术	201
第11章	导线穿透屏蔽腔体的干扰抑制技术	205
11.1	穿透孔引入/引出线的天线效应	205
11.2	低频引线或电源引线的干扰抑制	206
11.3	高频引线的干扰抑制	211
11.4	电磁干扰抑制器件	212
11.4.1	EMI 电源线滤波器	212

11.4.2	EMI 信号滤波器	217
11.4.3	阵列板式滤波器	222
11.4.4	浪涌雷电抑制器	223
11.5	电磁干扰抑制材料	224
11.5.1	导电橡胶	224
11.5.2	双重导电橡胶	225
11.5.3	金属编织网套屏蔽材料	225
11.5.4	金属编织缠带屏蔽材料	225
11.5.5	橡胶芯编织网套屏蔽材料	226
11.5.6	螺旋管衬垫屏蔽材料	226
11.5.7	炭黑导电橡胶屏蔽材料	226
11.5.8	弹性簧片屏蔽材料	227
第 12 章	电磁兼容标准与电磁兼容试验场地	228
12.1	电磁兼容标准化组织及其标准	228
12.1.1	IEC/CISPR 国际(标准)化组织	228
12.1.2	IEC/TC77 国际(标准)化组织	230
12.1.3	欧洲电工标准化委员会(CENELEC)	231
12.1.4	德国电气工程师协会(VDE)	232
12.1.5	英国标准学会(BSI)	232
12.1.6	日本工业标准调查会(JISC)	233
12.1.7	中国 EMC 标准化组织	233
12.2	电磁兼容试验场地	236
12.2.1	室外开阔试验场地	236
12.2.2	屏蔽室	239
12.2.3	电波暗室	244
12.2.4	横电磁波室	250
附录 A	计算图 3-4、图 3-5 容性耦合干扰的 MATLAB 程序	254
附录 B	计算功率谱密度估计值的 MATLAB 程序	255
附录 C	IIR 数字滤波器设计实现	257
附录 D	FIR 数字滤波器设计实现	260
参考文献	262

第 1 章 电磁干扰的概念

1.1 电磁干扰的现象及危害

在开放式的电子电气产品的周围一定会存在着电场和磁场，这是电子电气产品本身所固有的电磁辐射特性决定的。电场是由电路中要保持电流流动的电位差（常说的电压）产生的；磁场是由电路中流动着的电流产生的。电场和磁场能存在于任何的物质中，如果发射的电磁场的强度足够强，一种电子产品可能会对另一种电子产品产生干扰，这种现象就称为电磁干扰（Electromagnetic Interference, EMI），有时也称为“电磁噪声”。由电磁干扰（EMI）而引起的一些现象，早在几个世纪前人们就已经意识到了。人们最早亲身体会到的是指南针（罗盘）被干扰的现象。早在 11 世纪，中国人就发明了指南针，当把两个指南针放在一起时，人们发现它们之间会出现一种互相干扰的现象，即两个指南针的指针会发生一定程度的偏离指示误差，这就是一种磁干扰的现象。在自然界中，雷电是产生电磁干扰的天然干扰源，同时又是产生天然磁石的根源，虽然在那个年代里没有人知道会有电流存在，但是人们已经意识到了，自然界中的天然磁石是由雷电产生的，而且利用天然磁石制成了指南针。

虽然电子设备能够产生电磁干扰，但是人们并没有因此而停止发展电子电路技术，每年仍然有大量而复杂的电子设备不断问世，而且这些设备的工作速度有越来越高的发展趋势。十几年前，在设计中还认为是高速而复杂的电子源器件，如今已经变成了应用普及，被人们广泛接受的普通器件。以前功能低下、运行速度慢的电子器件已经不再使用，取而代之的是功能强、运行速度高、设计结构复杂的电子系统。这种变化除了需要有聪明的才智和精心的设计技术之外，还要取决于两个方面的原因作为动力。第一个原因是在有限的时间内，人们需要完成和处理大量而复杂的工作；第二个原因是生产厂商有能力设计并生产出来满足需求的电子产品来。随着电子器件工作速度的不断加快，产生电磁干扰的可能性必将大大增加。

在电子产品设计中，人们非常容易忽视在产品技术中融入抗电磁干扰的技术，这是因为设计者常常把全部注意力都集中在实现产品的功能设计方面，而忽视了电子产品内部或电子产品之间还会出现互相的电磁干扰问题，尤其是在进行高频电子系统设计时，一旦忽视了抗电磁干扰技术，不但本设备或本系统可能会出现工作性能等级下降或工作不正常的现象，与本系统相邻的或与本系统有功能关系的其他电子设备或系统，因受到本系统的电磁干扰，同样也会出现工作性能等级下降或工作不正常的现象，严重时还会出现无法工作或停止使用的情况，最终导致不得不重新进行设计的尴尬局面。图 1-1 说明了电子产品在开发研制过程中，考虑抗电磁干扰技术的自由度及产品成本费用的关系。从图 1-1 中可以看出，在电子产品的初级设计阶段，也就是说板级的设计阶段中，把抗电

磁干扰技术应用到产品设计中的自由度最大，所使用的成本费用最低。随着电子产品研制的逐渐深入，把抗电磁干扰技术应用到产品设计中的自由度在不断降低，同时注入的成本费用在不断增高，如果在最终产品阶段才开始考虑引用抗电磁干扰技术，那么能融入的可能性是最低的，而且所花费的成本费用又是最高，这一道理已经被实践所证实。

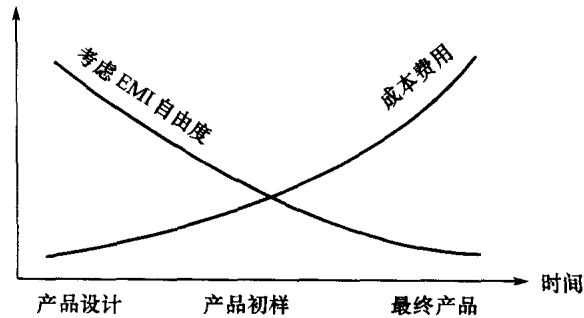


图 1-1 抗电磁干扰自由度及产品成本费用的关系

电磁干扰本身所造成的危害是无法估量的，轻则使电子设备或系统的工作性能等级下降，重则使人们的生命财产受到严重的威胁。例如，在民用方面，家用电脑所产生的电磁干扰能使电视接收机的屏幕图像模糊不清，影响视觉效果；在铁路运输方面，铁路上的电子控制设备受到电磁干扰的影响可能会导致道岔异位，造成车毁人亡重大事故；在航空方面，电子设备所产生的电磁干扰会使飞机或飞行器失去控制，甚至坠落，造成生命财产的损失，因此，当客机在起飞或降落时，要求乘客关闭各种手持的或便携式的电子设备，其目的是确保飞机上配有的各种电子控制设备不受外来电磁干扰的影响，从而能够使其完全可靠地正常工作。

电磁干扰可以说是无孔不入，但就其传输耦合方式来讲只不过有两种。一种是将空间作为传输媒介，即干扰信号通过空间耦合到被干扰的电子设备或电子系统中，这种耦合方式被称为辐射耦合；另一种是将金属导线作为传输媒介，即干扰信号通过设备与设备或系统与系统之间的传输导线耦合到被干扰的电子设备或电子系统中，例如两个电子设备或系统共用同一个电源网络，其中一个设备或系统产生的电磁干扰就会通过公共的电源线路耦合到另一个电子设备或系统中，这种耦合就被称为传导耦合。由此可知，电磁干扰的传输途径可分为两种，一种是辐射耦合途径，一种是传导耦合途径。

随着电气电子设备的广泛应用，这些设备在正常工作的同时还向外界辐射电磁能量，并对其其它的电气电子设备产生不良的影响，甚至造成严重的危害。因此如何实现在同一电磁环境中工作的各种电气电子元器件、设备和系统都能正常工作，互不干扰，达到互相兼容目的，一直是人们普遍关注、梦寐以求的事情。正因如此，一门综合性的学科——电磁兼容（Electromagnetic Compatibility, EMC）应运而生，并逐渐扩大，日趋成熟。国家军用标准 GJB72-85《电磁兼容干扰和电磁兼容性名词术语》第 5.10 对电磁兼容作了如下的定义：设备（分系统、系统）在共同的电磁环境中能一起执行各自功能的共存状态，即该设备不会由于受到处于同一电磁环境中其他设备的电磁发射导致或遭受不允许的降级；它也不会使同一电磁环境中其他设备（分系统、系统）因受其电磁发射而导致或遭受不允许的降级。这种共存状态就被称为电磁兼容。由此可见，从某种意义上讲，

电磁兼容是研究干扰与抗干扰的一门学科，但作为一门学科它研究的对象不仅限于电气电子设备，它涉及的范围已经非常广泛，例如，雷电、地磁脉冲等自然界的干扰源，信息数字设备的电磁辐射与泄漏，电磁辐射对人体、环境的生态效应，核电磁脉冲，静电放电，频谱资源管理等等，几乎涉及到现代化工业的各个领域，例如军工、航天、电力、交通、通信、医疗等，在这些领域内必须要解决电磁兼容的问题。电磁兼容这门学科需要用到的理论基础包括数学、电磁理论、电波传播、电路理论、信号分析、通信理论、材料学、生物医学等。因此可以说，电磁兼容是一门综合性的尖端科学。

从设计者的角度来看，两个相互独立的设备或系统之间的电磁干扰是很难处理的，解决问题的最好办法就是将两个设备或系统分开相当远的距离，但有的时候这种办法又不是切合实际的。因此，每个设备或系统的内部都必须要考虑各自的电磁兼容性。另外，设计者并不知道哪些种类的设备或系统与自己所设计的设备或系统相临近，因此也就无法准确地预知自己的设备或系统在工作时是受到哪类设备或系统的干扰，或是对其他的设备或系统产生干扰。寻找一种安装布设的设计方法，避免设备或系统之间出现干扰，一直是电磁兼容设计者们为之努力的方向。如果条件允许的话，将设备与设备或系统与系统之间留有适当的距离或空间的这种做法是避免出现互相干扰的最简单、最直接和最有效的方法之一。

1.2 电磁干扰形成的必备条件

电磁干扰的存在必须具备三个条件：（1）电磁干扰源；（2）电磁干扰传播途径；（3）电磁干扰敏感体。电磁干扰源指的是能产生电磁干扰（电磁噪声）的源体，电磁干扰源一般都具有一定的频率特性，其干扰特性可在频域内通过测试来获得，电磁干扰源所呈现的干扰特性可能有一定的规律，也可能没有规律，这完全取决于干扰源本身的性质；电磁干扰敏感体是指能对电磁干扰源产生的电磁干扰有响应，并使其工作性能或功能下降的受体，一般情况下，敏感体也具有一定的频率特性，即在敏感的带宽内才能对电磁干扰产生响应；电磁干扰途径是连接电磁干扰源与电磁干扰敏感体之间的传输媒介，起着传输电磁干扰能量的作用，电磁干扰途径主要有两种形式，一种是通过空间途径传播（辐射的形式），另一种是通过导体（或导线）途径传播（传导的形式）。不管是电磁干扰源还是电磁干扰敏感体，它们都有各自的频率特性，当两者的频率特性相近或干扰源产生的干扰能量足够强，同时又有畅通的干扰途径时，人们所看到的干扰现象就会出现。图 1-2 给出了电磁干扰源、电磁干扰途径和电磁干扰敏感体三者之间的关系。

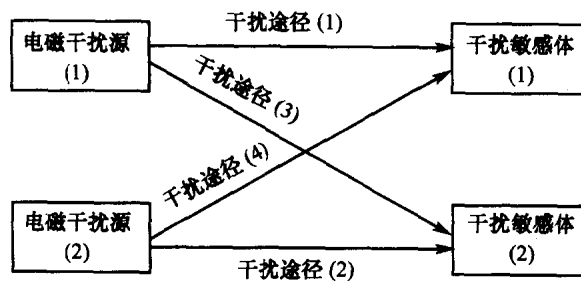


图 1-2 电磁干扰源、干扰途径、干扰敏感体三者之间的关系

电子电路中的电磁干扰（通常称为噪声）的能量往往比电路中 useful 信号的能量弱很多。一般情况下，只有当电磁干扰源与电磁干扰敏感体之间的距离较近时，才会出现干扰的现象。这种情况往往会出现在同一设备中的两个子装置之间，而且干扰敏感体仅对干扰源有响应。因此为了避免出现不必要的干扰现象，每个装置不仅要尽量减少或抑制干扰源，同时还要提高装置本身的抗电磁干扰的能力。根据互易原理，在减少或抑制干扰源的同时，也意味着提高了装置本身的抗干扰能力。在本书中介绍的屏蔽技术，经常被用于抗干扰的措施之中。

如果一个电子设备或系统对电磁干扰较为敏感，那么在应用中必然会出现意想不到的问题。这样就迫使电子产品设计者在设计的过程中，用尽一切可能的技术手段，来提高电子设备或系统本身的抗干扰性能。但是，这样做却往往忽视了另外的一方面，这就是设备或系统本身对外界其他设备或系统产生的干扰影响，这一点通常很少有人意识到。也就是说，设计者往往只是关心设备或系统是否能够抗拒外来的干扰，而忽视了设备或系统向外界辐射或泄漏干扰（噪声）的可能性和辐射或泄漏的严重程度。因此，为了促使设计者在设计过程中，不仅要考虑设备或系统本身的抗电磁干扰的能力，同时还要考虑设备或系统本身对周围环境产生的辐射或泄漏的程度，特别制定了一些大家共同遵守的标准和一些检测规则。这就意味着对电子设备或系统要有两方面的要求：一方面是电磁抗扰敏感度，简称 EMS，它分为辐射抗扰敏感度和传导抗扰敏感度两种，其目的是衡量电子设备或系统能够承受各种电磁干扰的能力；另一方面是电磁骚扰度，简称 EMI，它分为辐射骚扰（或干扰）和传导骚扰（或干扰）两种，其目的是衡量电子设备或系统向周围环境发射的各种电磁干扰的程度。早在几十年以前，人们就为此制定了相关的检测标准，并成立了相应的标准化组织机构。在这方面，到目前为止，国际上有影响的标准化组织主要有国际电工委员会——IEC 和国际无线电干扰特别委员会——CISPR 等。除此之外，许多国家还为之制定了相关的强制性标准，其目的主要是控制电子产品电磁干扰发射的强度。这表明人们已经意识到了必须要关注环境和保护环境。

我国虽然在电磁兼容方面起步较晚，但是发展较为迅速，目前与国际上的差距正在逐渐缩小，已经先后制定了许多有关这方面的检测标准，其中有一些标准还要做到强制执行。

实际上，电磁兼容包含了两个方面，一方面是抑制电子设备或系统的电磁干扰发射；另一方面是提高电子设备或系统的电磁抗扰敏感度（EMS）。在电子设备或系统设计的初级阶段必须要考虑电磁兼容的问题。从图 1-1 中可看出，在电子设备的板级设计阶段，融入电磁兼容技术的自由度最大，而且这一阶段所用的成本费用最低。例如，在印制电路板级布线设计阶段中，要想增加两条印制导线之间的间距，我们大家都知道借助于计算机辅助设计软件，只要在计算机屏幕前击几下键盘就能完成，是一件举手之劳非常容易办到的事情；但是，一旦印制板经过工厂加工成为定型产品，再想要完成上述的工作那就是非常困难的了。不仅大大增加了成本费用，而且有时甚至无法办到。

在电子设备或系统的电磁兼容设计中，很重要的一点就是要首先分析电磁干扰信号的耦合途径，包括辐射干扰和传导干扰的耦合途径。传导干扰可以借助于电路理论和传输线理论，辐射干扰只能借助于电磁场理论，应用麦克斯韦方程来描述。在分析过程中，后者比前者较为困难。在本书的论述中，读者能够体会到，有时电路理论可以为分析辐

射干扰提供一些非常有价值的参考依据。

几乎所有的电子设备或电子系统都存在着电磁干扰的问题，可以说电磁干扰的问题所涉及的方面非常广泛，本书的重点内容是论述如何抑制（或减少）电子设备或系统产生的电磁干扰发射。

第 2 章 电磁干扰的分析方法

在我们的日常生活中，电磁干扰的现象可以说是随处可见。下面列举两个生活中常见的实际例子来说明这一点。例如我们经常能看到空气中的放电现象，包括静电放电和雷雨天的闪电，还有开关断开时接触点之间的火花放电等，这些现象都是产生电磁干扰的例子。放电的过程就是绝缘介质（例如空气）被很高的电压击穿，同时介质中通过了随时间变化非常快的电流，也就是说 $di(t)/dt$ 非常大，这种随时间变化极快的电流能产生很强的电磁干扰，这种电磁干扰的能量有着向周围辐射的特性，因此称这种干扰为射频（RF）干扰，它所形成的场称为射频干扰场。图 2-1 给出了开关接触点之间的火花放电所产生的电磁干扰射频场实测信号的时域波形。

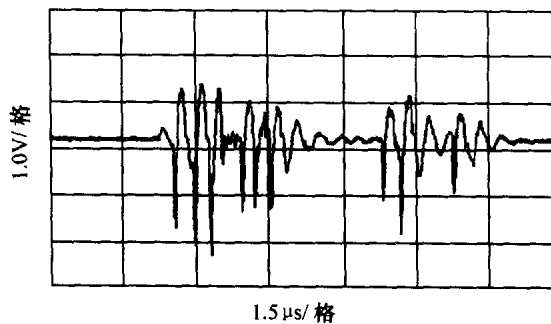


图 2-1 开关接触点之间火花放电产生的 EMI 信号时域波形

另一个例子就是计算机的电磁辐射。计算机是一个很复杂的低电压电子系统，它产生的电磁干扰有两种形式：一种是辐射电磁干扰，另一种是传导电磁干扰。这里需要特别指出的是，计算机所产生的电磁干扰有两种含义：

(1) 一种含义是指计算机及其附属设备向外界产生的无意干扰，包括辐射干扰和传导干扰。为了使读者有一个感性的认识，下面的图 2-2 和图 2-3 给出了作者在实际工程中捕捉到的计算机产生的电磁干扰，其中 2-2 是计算机主机板产生的辐射干扰信号时域波形，图 2-3 是计算机网络线上产生的传导干扰信号时域波形。这种无意产生的电磁干扰能对周围环境及与之相连的其他电子设备或系统产生无法估量的干扰影响。

(2) 另一种含义是指有用信息的电磁泄漏，这种电磁泄漏虽然不一定是强信号，但是其影响并不是由信号幅度的绝对大小来决定，而是由相对的大小来决定，特别是截获者对某些泄漏信息感兴趣时，他们会利用放大、特征提取、解密、解码等方式来获取这些泄漏的信息，即使是很小的信号，采用现代化的信息处理技术也是可能截获的，而被截获信息的危害，绝对不亚于设备工作被干扰。

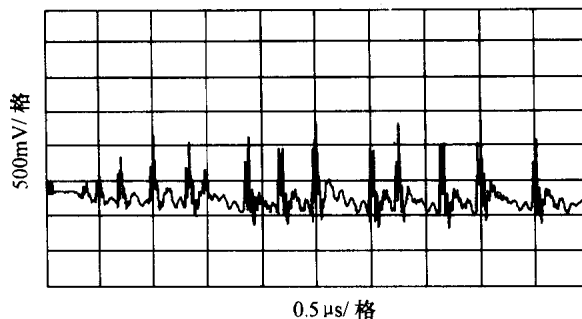


图 2-2 计算机主板产生的辐射电磁干扰

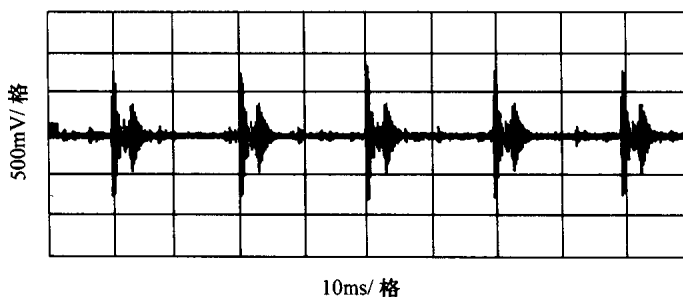


图 2-3 计算机网络线上的传导电磁干扰

在实际中，上面所提到的电磁干扰大部分都是无意产生的，也就是认为产品本身向外界辐射的射频能量并不是产品本身所设计的应有功能。有一类电子设备，其设备本身就要求具有实现向外界辐射电磁能量的功能，例如，无线通信对讲机、广播电台电视台的射频发射机、寻呼机的基地发射台、移动通信手持机和基地台等，这些设备辐射出来的电磁波能量对一些其他的电子设备或系统来说就是一种电磁干扰源，要想抑制这种电磁干扰，就不能直接采用对干扰源进行抑制的方法或措施，而应该在干扰途径上做些文章，想办法切断干扰途径，或增加干扰传输途径对干扰信号的衰减，例如采用屏蔽或滤波等技术。射频能量发射机所产生的射频干扰有一个很明显的特点，即这种电磁干扰有很强的频率特性，只有在射频带宽内才能对干扰敏感体产生影响，而在射频带宽以外对干扰敏感体不产生任何影响。要想很好地抑制这种电磁干扰，应必须对干扰途径加以控制。实践证明，根据干扰途径对干扰信号衰减的大小，是能够预测出干扰源对干扰敏感体产生干扰的强弱的。

目前，通常用于分析电磁干扰的方法有两种：一种是电路理论分析方法，另一种是电磁场理论分析方法。电路理论（又称等效近似）分析方法，其特点是计算简单、方法直观、容易理解，但是得出的分析结果的准确性较差；电磁场理论分析方法（又称直接分析方法），其特点是计算复杂，方法不很直观，但是所给出的分析结果的准确性较好。这两种方法经常被用来作为分析电磁干扰的工具。

为了由浅入深给出分析方法，先从一个简单的三线回路入手，应用电路理论分析方法和电磁场理论分析方法。三线回路在多导体系统中是非常典型的一种实例，其表现形式如图 2-4 所示。图中三条导线分别记为线 A、线 B 和线 G，线 A 与线 B 定义为信号线，