

电磁兼容导论

Introduction to Electromagnetic Compatibility

(美) Clayton R. Paul 著

闻映红 等译

Introduction to Electromagnetic Compatibility

CLAYTON R. PAUL



WILEY SERIES IN
MICROWAVE AND OPTICAL ENGINEERING
Kai Chang, Editor



机械工业出版社
China Machine Press

电子工程丛书

本书是作者多年从事电磁兼容(EMC)研究的经验总结,也是作者多年从事EMC教学和研究的经验总结。本书共分10章,主要介绍EMC的基本概念、EMC的测试方法、EMC的抑制技术等。本书可作为从事EMC工作的工程技术人员、研究人员、管理人员的参考书,也可作为高等院校相关专业师生的教材。

电磁兼容导论

内容简介: 本书介绍了电磁兼容的基本概念、电磁兼容的测试方法、电磁兼容的抑制技术等。本书可作为从事电磁兼容工作的工程技术人员、研究人员、管理人员的参考书,也可作为高等院校相关专业师生的教材。

Introduction to Electromagnetic Compatibility

(美) Clayton R. Paul 著

闻映红 等译



机械工业出版社
China Machine Press

本书全面系统地讲述电磁兼容(EMC)的基本原理及其应用,包括 EMC 概论、电子系统的 EMC 要求、电磁场理论、传输线、天线、元件的非理想性能、信号谱、辐射发射和敏感度、传导发射和传导敏感度、串扰、屏蔽、静电放电、EMC 的系统设计等内容。本书讲述深入浅出,配合典型例证,实用性强。可作为高等院校相关专业电磁兼容课程教材,也可供 EMC 设计开发人员参考。

Clayton R. Paul; Introduction to Electromagnetic Compatibility(ISBN: 0-471-54927-4)

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

Copyright © 1992 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved.

本书中文简体字版由约翰-威利父子公司授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

本书版权登记号:图字:01-2004-6189

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容导论/(美)保罗(Paul, C. R.)著;闻映红等译.-北京:机械工业出版社,2006.8
(电子工程丛书)

书名原文:Introduction to Electromagnetic Compatibility

ISBN 7-111-19216-8

I. 电… II. ①保… ②闻… III. 电磁兼容性-概论 IV. TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 053924 号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:王 璐 王曼姝

北京牛山世兴印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2006 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·33 印张

定价:68.00 元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线(010)68326294

译者序

中国实行 3C 认证和市场准入制度以来,电磁兼容(EMC)得到了极大的关注和发展。各方面对 EMC 人才的需求越来越多,各种各样的培训班也层出不穷。但到目前为止,国内依然没有具权威性的、系统的 EMC 教材。Clayton R. Paul 的这本 EMC 教材系统而全面地阐述了 EMC 的基本原理及其应用,并非常精练地概述了 EMC 的基础理论所涉及的专业理论。本书内容全面而通俗易懂,很适合作为大学通信与弱电类专业 EMC 课程教材,也可作为研究生的学习参考书和广大工程技术人员的参考书。本书的理论基础是电磁场与电磁波、电路分析、信号与系统、传输线理论、天线和电波传播这几门课程所涵盖的基本概念和基本原理。

本书从总体上可分为两大部分:第一部分讨论基本的电磁学原理,包括电磁场理论、传输线和天线的重要概念等。第二部分讨论了 EMC 的原理和设计,解释了怎样利用基本原理去设计电子系统,尤其是数字系统,使它们能满足政府法规的要求,并能在干扰源存在的情况下可靠地工作。

本书的翻译首先得到了张林昌老师的指点和帮助,其次得益于许多人的共同努力,梁婷、闫绍楠、吴翔、宋维嘉、姜山和肖猛等为本书的翻译付出了辛勤的劳动,在此一并表示衷心感谢。因译者水平和时间所限,本书内容不当之处,敬请各位同行指正。

闲映红
2005 年 10 月

前 言

本教材适用于大学电磁兼容(EMC)课程,也可作为对 EMC 设计感兴趣的专业工程人员的参考书。学习本教材的先决条件是已经修完了以下几门本科电气工程专业的基本课程:电路、信号与系统、电磁和电磁场。本教材的理论基础是这几门课程所涵盖的基本概念和基本原理。本教材将这些基本概念和基本原理应用于电子系统的设计,使得所设计的系统能与其他电子系统相兼容,并符合各项有关辐射和传导发射的政府法规。实质上,EMC 主要解决电子系统的干扰问题,早期称作为 EMI(电磁干扰的缩写)或 RFI(射频干扰的缩写)。现在用更明确的词汇“兼容”代替了“干扰”一词。

过去 10 年中,EMC 在美国变得越来越重要,主要是因为美国联邦通信委员会(FCC)对数字设备强制执行的辐射和传导发射限制。时钟频率超过了 9KHz 的数字设备不允许在美国市场上出售,除非它们经过检测确认,其辐射和传导发射没有超过 FCC 所设定的限值。在强制执行 FCC 的法规以前,数字设备在其他国家出售时,也必须服从相应国家类似的必须严格遵守的法规。据说,目前 EMC 已被全世界的数字产品制造商所关注。在对数字产品强制执行 FCC 的法规以前,在美国市场上出售的电子系统中,只有军用系统的干扰受军用标准控制,而对商业产品只是根据自愿的原则,看是否符合产品制造商的要求。对某些会干扰无线电和有线通信的电子系统产品则受到 FCC 的控制。

由于当今市场的价格竞争,全世界的工厂现在都对 EMC 表现出强烈的兴趣。如果一个产品不符合规定的限值,那么,无论它具有多么创新的设计,都不能出售。为了修改产品的设计以符合要求,可能需要增加额外的抑制器件,并/或者改进产品的物理结构。这些费用由制造商承担,有可能造成产品的价格在市场上不再具有竞争性。为了改进产品而耽误的时间有可能使产品的发布错过最佳时机,导致销售量降低。此外,还有其他影响产品质量的 EMC 方面。最好的例子就是对静电放电(ESD)的敏感性。如果一种数字产品对 ESD 非常敏感以至于在干燥的气候中不能可靠工作,那么消费者将很快停止购买这种产品。总之,如果在产品的设计阶段不考虑 EMC 问题,将对产品的盈利和制造商在业界的名誉带来不利的影响。

目前的电气工程(EE)专业课程中没有明确提到 EMC,本教材填补了这个空白。第 1 章给出了几个干扰的例子,并介绍了 EMC 发展的历史和分贝的概念。第 2 章通过讨论政府的法规和有关产品质量的各种不同的设计要点提出了学习 EMC 的另外“动机”。

本教材的其余部分分为两部分。第一部分讨论基本的电磁学原理,主要包括电磁场理论(第 3 章)、传输线(第 4 章)和天线(第 5 章)的重要概念。

第二部分讨论了 EMC 设计,解释了怎样利用基本原理去设计电子系统,尤其是数字系统,使它们能满足政府法规的要求,并能在干扰源存在的情况下可靠工作。一个工程师将 EMC 问题有效融入设计中的能力的一个重要方面是理解电子元器件的非理想化特性,这将在第 6 章中讨论。第 6 章也讨论了典型的抑制元件,如铁氧体磁芯。第 7 章分析了信号时域

表达式和频域表达式之间的关系。大多数的 EMC 法规都是基于频域写的，因此，设计者能够在时域或频域任一域中同样灵活地分析信号是很重要的。本章还强调了数字信号的上升/下降时间与信号谱分量之间的重要关系。测量仪器，如频谱分析仪，也在本章中进行了讨论。第 8 章提供了能给出一阶预测的简单发射和敏感度模型。这些模型定性地强调了影响产品辐射发射和敏感度的重要因素。同样重要的是通过产品电源线传递的噪声干扰。EMC 的这一重要方面在第 9 章中讨论。第 10 章讨论 EMC 常常被忽略的一面：产品自我干扰的本质。这将结合导线间及印制电路板上带状线的串扰来分析。第 11 章的内容是屏蔽外壳。EMC 的这一方面常常用来补救较差的设计，而实际上理想的屏蔽性能往往难以实现。第 12 章讨论了静电放电，阐明了静电放电的概念，并提出了降低静电放电危害的设计技术。最后，第 13 章讨论了前面所讨论的有关系统设计的所有内容。常常被误解的接地问题与系统的物理结构一起讨论。印制电路板的布线和设计是数字系统是否符合 EMC 法规的关键所在，这也在本章中进行讨论。最后一章是本教材的最高点。学习完本教材后，读者将能理解 EMC 设计的基本原理。虽然本书将重点放在数字系统上，但所涉及的概念可以应用于其他电子系统。

每章的最后设计了一些习题，有的答案附在习题后面，有一些重要的理论，也有其他一些应强调的应用，还提供了详细的解答指南。此外，每章还包含了参考资料，并注明了参考处。

要深入理解本教材，做实验非常重要。实验能帮助理解电流测量设备的局限性和对预测数据的实际评价。出于这个原因，在本课程的学习过程中应建立几个能举例说明基本原理的“小实验”。现在的 EMC 测试设备相当复杂(昂贵)，并不是所有大学都能够拥有这种设备，而本地做 EMC 测试的厂商倒有可能以“现场实习”的形式给学生提供机会，使他们能利用厂商的测试设备去获得有关本教材的感性认识。

很多 EMC 领域的人们为作者编写本教材提供了帮助，从 Henry W. 先生那里获得的见识极大地影响了作者的 EMC 观点。作者也十分感谢与 Robert F. German 和 Keith B 先生的多次讨论，收获良多。还有其他很多人也同样影响了作者的 EMC 观点，对他们，作者一并表示感谢。作者还非常感谢 Carol Gage 对手稿的编辑整理和她的鼓励。

Clayton R. Paul

1991 年 7 月

目 录

译者序
前言

第 1 章 电磁兼容概论	1
1.1 EMC 涉及的方面	2
1.2 EMC 历史	6
1.3 例子	8
1.4 电尺寸	9
1.5 分贝与常用的 EMC 单位	11
1.5.1 电缆的功率损耗	16
1.5.2 信号源的特性	20
参考资料	23
习题	23
第 2 章 电子系统的 EMC 要求	26
2.1 政府的要求	26
2.1.1 对美国市场上出售商品的要求	26
2.1.2 对美国以外市场上出售商品的要求	31
2.1.3 对美国市场上出售的军用产品的要求	34
2.1.4 出于符合性验证目的的产品发射测量	38
2.1.5 典型的产品发射	42
2.1.6 说明满足规定限值困难性的例子	45
2.2 额外的产品要求	46
2.2.1 辐射敏感度	47
2.2.2 传导敏感度	47
2.2.3 静电放电(ESD)	47
2.3 产品的设计限制	47
2.4 EMC 设计的优点	48
参考资料	50
习题	50

第一部分 电磁原理基础

第 3 章 电磁场理论	53
3.1 矢量分析	53
3.2 麦克斯韦方程组	56
3.2.1 法拉第定律	56
3.2.2 安培定律	58
3.2.3 高斯定律	60
3.2.4 电荷守恒定理	61
3.2.5 媒质的本质参数	61
3.3 边界条件	62
3.4 正弦稳态	64
3.5 功率流	64
3.6 均匀平面波	65
3.6.1 无耗媒质	67
3.6.2 有耗媒质	69
3.6.3 功率流	70
3.6.4 导体与介质	70
3.6.5 趋肤深度	71
参考资料	72
习题	72
第 4 章 传输线	76
4.1 传输线方程	77
4.2 单位长度的电参数	80
4.3 时域解(瞬态)	91
4.3.1 图解	91
4.3.2 数值方法	97
4.4 频域解(正弦稳态)	99
4.4.1 作为位置函数的电压和电流	99
4.4.2 功率流	104
4.4.3 有耗传输线总结	104
4.5 集总参数电路近似模型	105
4.6 时域至频域的转换	108
参考资料	108

习题	109	6.7 铁氧体和共模扼流圈	192
第 5 章 天线	113	6.8 铁氧体磁珠	197
5.1 偶极子天线	113	6.9 电磁器件	199
5.1.1 电偶极子	113	6.9.1 直流电动机	199
5.1.2 磁偶极子(环)	116	6.9.2 步进电动机	201
5.2 半波偶极子和四分之一波长的单极 天线	117	6.9.3 交流电动机	201
5.3 天线阵	123	6.9.4 螺线管	202
5.4 天线的特性	125	6.10 数字电路器件	202
5.4.1 方向性和增益	125	6.11 元件可变性的影响	203
5.4.2 有效孔径	128	6.12 机械开关	204
5.4.3 天线因子	129	6.12.1 开关触点的电弧放电	204
5.4.4 平衡与不平衡转换器的 作用	131	6.12.2 电路的影响	207
5.4.5 阻抗匹配和阻抗变换器的使用	133	6.12.3 电弧抑制	209
5.5 FRIIS 传输方程	135	参考资料	212
5.6 反射的影响	137	习题	213
5.6.1 镜像法	137	第 7 章 信号谱	217
5.6.2 均匀平面波在媒质界面上的 垂直入射	138	7.1 周期信号	217
5.6.3 多径效应	142	7.1.1 正交基函数和级数展开式	217
5.7 宽带测量天线	146	7.1.2 傅里叶级数表达式	219
5.7.1 双锥天线	147	7.1.3 线性系统对周期信号的响应	224
5.7.2 对数周期天线	148	7.1.4 重要的计算技术	228
参考资料	150	7.2 数字电路波形的频谱	232
习题	151	7.2.1 梯形波(时钟)的频谱	232
		7.2.2 梯形波的频谱范围	235
		7.2.3 利用频谱范围计算线性系统输出 信号频谱的范围	244
		7.3 频谱分析仪	245
		7.3.1 基本原理	246
		7.3.2 峰值和准峰值	248
		7.4 非周期波形的表示	249
		7.4.1 傅里叶变换	249
		7.4.2 线性系统对于非周期信号的 响应	251
		7.5 从线性系统的频域响应求解时域 响应	251
		7.6 随机信号的表示	253
		参考资料	255
		习题	255
		第 8 章 辐射发射和敏感度	262
		8.1 导线和 PCB 覆铜线的简单发射模型	262
第二部分 EMC 设计的应用			
第 6 章 元件的非理想性能	155		
6.1 导线	155		
6.1.1 导线的电阻和内电感	158		
6.1.2 平行导线的外电感和电容	160		
6.1.3 平行导线的集中参数等 效电路	161		
6.1.4 局部电感的概念	163		
6.2 印刷电路板(PCB)带状线	169		
6.3 元件引线的影响	175		
6.4 电阻	176		
6.5 电容	182		
6.6 电感	188		

8.1.1	差模电流和共模电流	262	10.2	屏蔽线	377
8.1.2	差模电流发射模型	266	10.2.1	单位长度参数	379
8.1.3	共模电流发射模型	269	10.2.2	感性耦合和容性耦合	380
8.1.4	电流探头	272	10.2.3	软辫线的影响	389
8.1.5	实验结果	275	10.2.4	多层屏蔽的作用	394
8.2	导线和 PCB 覆铜线的简单敏感度模型	282	10.2.5	MTL 模型预测	396
8.2.1	实验结果	287	10.3	双绞线	400
8.2.2	屏蔽电缆和表面传输阻抗	288	10.3.1	单位长度参数	401
参考资料		291	10.3.2	感性耦合和容性耦合	403
习题		292	10.3.3	扭绞的作用	408
第 9 章	传导发射与传导敏感度	296	10.3.4	平衡的作用	415
9.1	传导发射测量	296	10.4	多导体传输线和入射场的影响	417
9.1.1	电源线阻抗稳定网络(LISN)	297	参考资料		418
9.1.2	共模电流和差模电流增益	298	习题		420
9.2	电源滤波器	301	第 11 章	屏蔽	427
9.2.1	滤波器的基本特性	301	11.1	屏蔽效能	429
9.2.2	通用电源滤波器的结构	303	11.2	屏蔽效能——远场源	431
9.2.3	滤波器元件对共模电流和差模电流的影响	304	11.2.1	精确解	431
9.2.4	出于诊断目的将传导发射分为共模分量和差模分量	307	11.2.2	近似解	433
9.3	电源	311	11.3	屏蔽效能——近场源	439
9.3.1	线性电源	313	11.3.1	近场与远场	439
9.3.2	开关电源(SMPS)	315	11.3.2	电场源	441
9.3.3	电源器件对传导发射的影响	317	11.3.3	磁场源	442
9.4	电源和滤波器的布置	320	11.4	低频磁场屏蔽	442
9.5	传导敏感度	321	11.5	开孔效应	445
参考资料		322	参考资料		447
习题		322	习题		447
第 10 章	串扰	324	第 12 章	静电放电(ESD)	449
10.1	三导体传输线及串扰	324	12.1	ESD 的起源	449
10.1.1	时域串扰与频域串扰	324	12.2	ESD 的影响	452
10.1.2	传输线方程	327	12.3	减轻 ESD 的设计技术	453
10.1.3	单位长度参数	330	12.3.1	防止 ESD	454
10.1.4	频域(正弦稳态)串扰	337	12.3.2	硬件抗扰度	454
10.1.5	时域(瞬态)串扰	352	12.3.3	软件抗扰度	461
10.1.6	集总电路近似模型	361	参考资料		461
10.1.7	无耗耦合传输线的精确 SPICE 模型	361	习题		462
			第 13 章	EMC 的系统设计	464
			13.1	接地	465
			13.1.1	安全接地与信号地	469
			13.1.2	单点与多点接地	471

13.1.3	接地环路	476	13.3.1	元件的选择	483
13.2	系统结构	479	13.3.2	晶振/振荡器频率的分频	483
13.2.1	系统外壳	479	13.3.3	元件的布局	485
13.2.2	电源线滤波器的放置	480	13.3.4	多方面的考虑	488
13.2.3	印刷电路板的相互连接和 数量	480	13.3.5	重要的 PCB 接地网	490
13.2.4	内部电缆的布线和连接器的 布置	481	13.3.6	电源分布和去耦电容	498
13.2.5	PCB 和子系统的布局	482	13.3.7	环路面积的减小	501
13.2.6	去耦子系统	482	13.4	小结	503
13.3	印刷电路板设计	483		参考资料	503
				习题	504
				索引	508

第1章 电磁兼容概论

自从无线电通信和电报通信问世以来,人们就已经知道电火花能产生谱分量(频谱分量)很丰富的电磁波。这种电磁波能在各种不同的诸如无线电接收机和电话等电子和电气设备中产生干扰或噪声。很多其他的电磁发射源,如闪电、继电器、直流电动机和荧光灯,也能产生频谱分量丰富的电磁波,并在这些设备中产生干扰。除此以外,也存在窄带电磁发射源。高压电力输电线产生工频(60 Hz)电磁发射,无线发射机需要将编码信息(声音、音乐等)以载波频率发射出去。无线接收机接收这些电磁波,放大后提取包含在电磁波中的信息。雷达发射机也发射单一频率的载波脉冲,当载波频率启动和关闭时,这些脉冲由天线向外辐射,遇到目标后可返回雷达天线。整个电磁波的传输时间直接与目标距雷达天线之间的距离有关。与无线电传输相比,这种雷达脉冲的频谱分量分布在载波周围一个很宽的频带上。另外,越来越清楚地认识到电磁发射源与专门的数字计算机和一般的数字设备有关。这些数字设备利用脉冲来表示二进制代码,0(关)或1(开)。数字和其他符号则用这些二进制码的序列来表示。脉冲从开到关(或相反)的过渡时间是决定脉冲谱分量的最重要因素。过渡时间快(短)的脉冲的频谱比过渡时间较慢(较长)的脉冲的频谱要宽。数字设备的频谱分量常常占据很宽的频率范围,在电子和电气设备中产生干扰。

1

本教材讨论的是这种类型的电磁发射在电子和电气设备中引起干扰的程度。毫无疑问,读者也许经历过附近的雷电放电在调幅(AM)收音机中引起的噪声。雷电放电的谱分量很丰富,有一些可以通过收音机的输入滤波器,将噪声叠加到有用信号上。还有,即使收音机没有调谐到特定的发射机频率上,发射信号也有可能被接收到,以至于成为接收到的无用信号。这些都是在有意接收机 intentional receivers 中产生干扰的例子。同样重要的是在无意接收机 unintentional receivers 中也会产生干扰。例如,由调频(FM)广播电台或电视(TV)台发送的强电磁波有可能被计算机选择接收,并被误认为是数据或控制信号从而导致计算机出错。相反地,由数字计算机产生的频率辐射也有可能被耦合到电视台,从而导致干扰。

此外,本教材也讨论电子系统的设计,使得电子系统所受的干扰或对外干扰变得最小,重点是数字电子系统。一个电子系统如果能与其他电子系统相兼容地工作,也就是不产生干扰又能忍受外界干扰则称为该电子系统与其环境电磁兼容。本教材的目的是学习怎样设计具有电磁兼容性(EMC)的电子系统。一个系统如果满足以下三个准则,就认为具有电磁兼容性:

1. 不对其他系统产生干扰;
2. 对其他系统的辐射不敏感;
3. 不对自身产生干扰。

EMC 设计不仅仅对设备的性能来说是重要的,事实上,产品在全世界各国出售以前必须满足法定的要求。如果一个电子产品不能投放于市场,那么将它的功能设计得再新和令人激动都是徒劳的!

EMC 设计技术和方法已经作为一个整体,成为设计的一部分,如数字产品的设计。相应地,本教材的内容也将作为一个电气工程师背景的基本部分。并且毫无疑问,由于数字系

统的时钟速度和数据传输速率有持续提高的趋势，本教材的重要性将越来越突出。

本教材是为大学电气工程专业本科或研究生 EMC 课程编写的。有关 EMC 的书籍现在也有，但他们主要是为专业技术人员用的。因此，我们列出了一系列的参考资料，将在每章的最后给出。教材中参考处用方括号表示，如[XX]。许多商业杂志，EMC 会议论文集和电气电子工程师协会(IEEE)EMC 杂志中都包含了我们所讨论的 EMC 各方面的有用文章。这些文章同样在适当的地方被用作参考。成功进行 EMC 设计的一个最重要的方面是对电气工程——电路、电子学、信号、电磁学、线性系统理论、数字系统设计等基本原理有一个很好的理解。因此，需要对这些基本原理作必要的复习以便读者能理解这些基本理论，并有效而正确地利用它们来解决 EMC 问题。这些基本理论有代表性的参考资料为[1-3]，有代表性的但并不是全部覆盖 EMC 基本方面的参考资料为[4-10]，Ott[4]的著作是本 EMC 教材的主要参考资料，其他包含 EMC 各方面的著作和杂志文章在适当的章节中作参考，有关 EMC 课程发展的讨论见[11, 12]。

1.1 EMC 涉及的方面

如上所述，EMC 涉及电磁能量的发射、传输和接收。EMC 问题的这三个方面构成了 EMC 设计的基本框架，如图 1-1 所示。源(也被称为辐射体)产生辐射，传输途径或耦合将辐射能量传递到接受器(接收机)，在被处理的地方引起所期望的或不期望的特性动作。如果接收到的能量引起接受器以非期望的方式工作，这就产生了干扰。电磁能量常常通过无意的耦合模式传递。但是，只有当在接受器输入端接收到的能量有足够的幅度和/或频谱分量而引起接受器以非期望的方式工作时，电磁能量的这种无意传递才会造成干扰。电磁能量的无意发射或接收并不一定就是有害的；接受器的非期望动作才构成了干扰。所以接受器对接收到的能量的处理，是干扰能否会发生这一问题的一个重要方面。通常很难确定，入射到接受器的信号是否会对该接受器造成干扰。例如，在雷达范围内的杂乱回波会使得雷达操作新手不能正确地解释所得到的数据，而对于经验丰富的雷达操作者来说，这种杂乱回波就不会带来问题。在一种情况下造成了干扰而在另一种情况下却没有造成干扰。虽然有人会争辩说接受器是雷达操作者而不是雷达接收机。这就表明了常常难以唯一识别，如图 1-1 所示的 EMC 问题的三个方面！

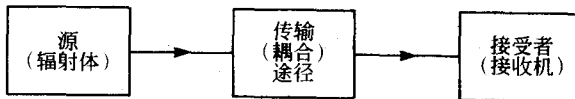


图 1-1 EMC 耦合问题的基本分解框图

理解源或接受器被分为有意或无意两类也是很重要的。事实上，源或接受器可能同时以两种类型起作用。源或接受器是有意的还是无意的取决于耦合路径以及源或接受器的类型。例如，对于一个 AM 无线电台发射机，它发射的电波被一台调谐到载波频率的无线电接收机接收到，那么，这个电台发射机就是有意辐射体。另一方面，如果同一台 AM 无线电台发射机发射的电波被另一台未调谐到该发射机载波频率的无线电接收机所接收，那么这种发射就是无意的。（实际上发射仍然是有意的，只是耦合路径是无意的。）也有一些辐射体它们的发射并没有任何有意的目的，其中一个例子就是来自荧光灯的（看不见的）电磁发射。

上述也就意味着防止干扰的三种途径：

1. 抑制源的发射
2. 尽可能使耦合路径无效
3. 使接受器对发射不敏感

当我们排查 EMC 问题时，这三点要牢记于心。“首条防御线”是要尽可能抑制源的发射。例如，发现数字脉冲信号的快速(短)上升/下降时间对这些信号的高频谱分量起主要作用。一般情况下，通过耦合路径传播的信号频率越高，耦合路径越有效。所以应当减缓(增加)数字信号的上升/下降时间。但是，数字信号的上升/下降时间仅能增加到数字电路不出现误动作的某一点。当系统用 10 ns 上升/下降时间的脉冲能正常工作时，使用 1 ns 上升/下降时间的数字信号的理由也不充分。记住抑制发射的高频谱分量会从本质上降低耦合路径的有效性，并因此减小接受器的信号电平。这里将讨论一些减小耦合路径有效性的“蛮方法”。例如，将接受器放入金属盒里(屏蔽盒)有助于减小耦合路径的有效性。但是屏蔽盒比起减少辐射体辐射脉冲的上升/下降时间费用要高，并且，在使用中它们的实际性能远差于理想状态。要实现降低接受器对噪声的敏感性而同时仍要保留产品的有用功能相当困难。降低接受器对噪声的敏感性的一个例子就是在数字接受器中使用纠错编码。虽然非期望的电磁能量入射到接受器上，但是纠错编码能让接受器处于有潜在的干扰信号存在的情况下依然能正常工作。如果根据图 1-1 中所示的从左到右地减少耦合去考虑，通常将会更容易地并且用较少的系统设计的额外费用来达到减小耦合的目的。在 EMC 设计中，使系统达到电磁兼容性而附加成本最小，将依然是一个重要的考虑方面。如果将所有的电子产品放在金属盒里并使用内部电池供电，但是产品的外观、实用性和价格对用户来说都是不可接受的。

3
2
4

将电磁能量的传递(与干扰防止有关)划分为四类：辐射发射，辐射敏感度，传导发射和传导敏感度，如图 1-2 所示。一个典型的电子系统通常由一个或多个相互间通过电缆通信的子系统组成。为这些子系统供电的方法通常是系统使用场所中的交流市电系统。在一特定的电子系统中，将 120 V，60 Hz 电压(欧洲为 240 V，50 Hz)变换为给系统内部电子元器件供电所需要的各种直流电压电平。例如，数字逻辑器件需要 5 V 直流电供电，模拟电子器件需要 +12 V 和 -12 V 直流电供电。其他的直流电压为诸如电动机之类的器件供电。有时需要 60 Hz(50 Hz)的交流电为其他元器件供电，如小冷却风扇。60 Hz，120 V 的系统交流电源可以通过一根电线从市电电网中获得。还需要其他一些电缆来连接子系统，以使有用信号能在它们之间传递。所有这些电缆都有潜在的发射和/或接收电磁能量的能力，并且通常在此方面相当有效。一般说来，电缆越长，它发射或接收电磁能量就越有效。在这些电缆上直接传导的干扰信号也可以在子系统间直接传递。如果子系统被金属外壳所包围，那么内部信号或外部信号可在外壳上感应电流。然后这些感应电流向外部空间或者外壳内辐射。使用非金属外壳，常常是用塑料，变得越来越普遍，尤其是在低成本系统中。包含在非金属外壳里的电子电路，大部分完全暴露在电磁辐射中，这样就可能直接向外辐射或者对电磁辐射敏感。如图 1-2 所示的 EMC 问题的四个方面：辐射发射，辐射敏感度，传导发射和传导敏感度就反映了这些需要考虑的事项。

电磁辐射可以发生在交流电源线上，装载子系统的金属机壳上，连接子系统的电缆上，或者是非金属封装的电子元器件上，如图 1-2(a)所示。通过以下文字，将努力纠正会妨碍理解此类问题的某些误解。一个例子就是交流电源线上载有 60 Hz 信号的概念。虽然这根电缆

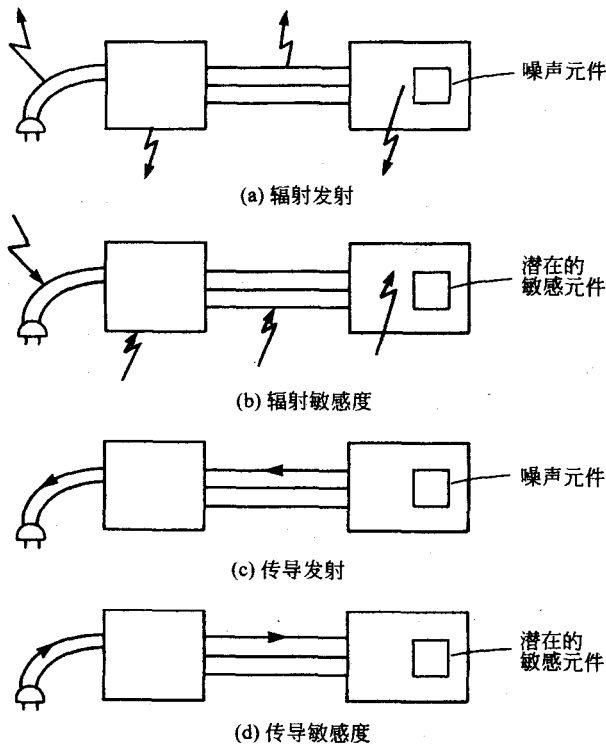


图 1-2 四个基本的 EMC 子问题

的主要用途就是将 60 Hz 的市电传输到系统中，但是能意识到在交流电源线上可能并且常常存在众多其他高频信号却是非常重要的！这些信号通过众多耦合途径从内部子系统耦合到交流电源线上，这些耦合途径将在后文讨论。一旦这些高频电流出现在长电缆上（1 m 或更长），电流将非常有效地向外辐射。这根长电缆的作用就像是一根有效“天线”，可以接收附近其他电子系统的辐射发射，如图 1-2(b)所示。这些外部信号一旦被这根电缆及任何连接子系统的电缆所感应，那么外部信号就会传入子系统的内部元器件中，并在那些电路中引起干扰。总之，交流电源线，连接电缆，金属机壳或者子系统的内部电路都可能辐射或接收非期望的信号，即使这些结构或电缆并非有意要传递这些信号。

电磁能量的发射和对电磁能量的敏感性不仅仅通过空气中的电磁波传播而发生，也会通过金属导体的直接传导而发生，如图 1-2(c)和(d)所示。本质上这种耦合路径比空间耦合路径更有效。电子系统设计者意识到了这一点，所以有意地在此路径上设置障碍，如滤波器，以阻断能量不期望的传播。能意识到干扰问题常常会扩展到如图 1-2 所示的界限之外尤为重要。例如，在交流电源线上传导的电流进入安装地点的配电网，那么这种电力配电网就是一种直接相连的扩展导线阵列，因此可能非常有效地将这些信号辐射出去。在这种情况下，传导发射又导致了辐射发射。因此，限制交流电源线上的传导发射将有助于降低配电系统的辐射发射。

当然主要关注的还是电子系统的设计，以使电子设备能够符合政府机构制定的法定要求。但是，在这里也将讨论其他很多重要的 EMC 关注点。其中有一些如图 1-3 所示。图 1-3(a)所示当前小规模集成电路日益常见的敏感性问题，静电放电(ESD)。穿着橡胶底的鞋走过尼龙

地毯会在人体上积聚起静电。这时如果人接触电子设备，如键盘，静电电荷就可能转移到设备上，在指尖和设备之间就会产生一个电弧。电荷的直接转移能导致如集成电路芯片等的电子元器件永久性的损害。电弧将器件暴露在电磁波中，内部电路就会接收该电磁波，这将导致系统错误。ESD在今天是一个普遍的问题，将在第12章中讨论。

在20世纪40年代中期第一颗原子弹爆炸之后，人们发现用来监视爆炸效应的电子系统中的半导体设备(一种新型放大器件)都被破坏了。这不是由于爆炸的直接物理作用，而是由爆炸中电荷的分离和运动所产生的高强度电磁波所造成的，如图1-3(b)所示。因此，军事团体对有关“硬化”通信和数据处理设备以对抗这种电磁脉冲(EMP)的影响很有兴趣。如果通信和数据处理设备由于EMP而导致失效，所关注的不是爆炸的物理作用，而是对直接对抗动作的无能为力。这代表了辐射敏感度的问题。由于发现用来降低附近电子系统的辐射发射影响，同样的原理也可以应用于该问题上，但是数量更大。

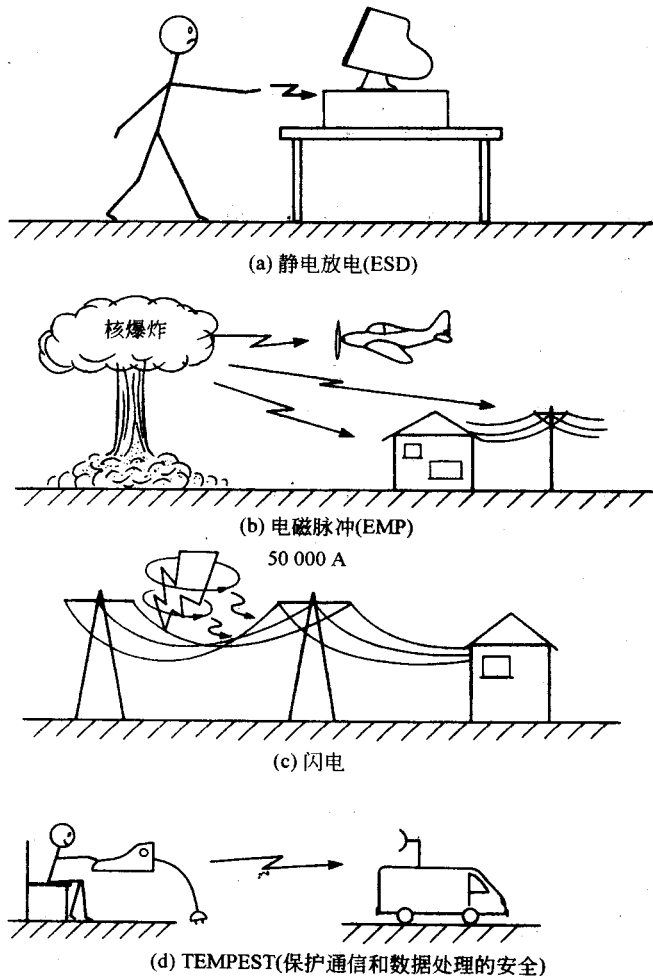


图 1-3 EMC 的其他方面

闪电频繁发生，如图1-3(c)所示的直接电击明显很重要。但是，对电子系统的间接作用也具有同样的破坏性。“闪电通道”携带高达50000 A的电流。由这种强电流产生的电磁场

7
8

可以耦合到电子系统中, 或者通过直接的辐射, 或者通过耦合到市电电力系统, 然后经过交流电源线传导进入设备中。因此, 设计和测试产品对交流电源线上的瞬变电压的敏感度非常重要。大多数生产商在交流电源线上标注“浪涌”, 并使他们的设计产品能经受住这些浪涌和其他非期望的瞬变电压。

防止未经授权者拦截电磁发射也开始成为人们感兴趣的课题。例如, 如图 1-3(d)所示, 通过监视电磁发射就有可能确定电子打字机上正在打的内容。也有一些其他的关于直接截取电磁发射的例子, 从电磁发射中可以确定通信的内容或数据。显然, 对于军事组织来说, 存在称为 TEMPEST 的问题是必然的。从保守商业秘密和保护影响公司市场竞争力的知识产权这一立场出发, 商业团体对该问题也感兴趣。

还有很多其他在 EMC 原理范围内的有关问题。能根据四个基本子问题: 辐射发射, 辐射敏感度, 传导发射和传导敏感度, 如图 1-2 所示, 来看待这些问题是很重要的。只是该问题的背景有所变化。

用于理解干扰问题的主要工具就是数学模型。数学模型量化了对现象的理解, 并且也能得到一些不那么明显的重要性质。此外, 数学模型的另一个重要的优点就是能利用它进行辅助设计。判断模型是否充分代表了某现象, 来决定它能否用于预测实验中可观察到的结果。如果模型的预测不能与该现象的实验观察结果相一致, 那它就是毫无用处的。但是, 对由模型给出的方程求解能力和对模型的抽象能力常常用近似条件去构造模型。例如, 常用线性近似模型来对非线性现象建模。

由于经常要进行计算, 因此, 很有必要统一一下单位转换。虽然国际上的科学组织倾向于米制的或 SI 单位系统, 但仍需使用其他的单位系统。必须要能够将一个系统中的单位转换为另一个系统中的等效单位, 因为在一个方程中有时常数是以另一个单位系统中的单位给出的。一个简单而完美的方法是在两个单位系统间乘上单位转换率, 并去掉单位名称以保证这个量应当是被乘而不是被除, 反之亦然。例如, 在英制中距离的单位是 in[⊙], ft[⊖], mile[⊕], yd[⊗] 等等。一些有代表性的转换式是 1 in=2.54 cm, 1 ft=12 in, 1 m=100 cm, 1 mile=5280 ft, 1 yd=3 ft 等。例如, 假设希望将 5 mile 的距离转换为以 km 为单位。只需乘上

$$5 \text{ mile} \times \frac{5280 \text{ ft}}{1 \text{ mile}} \times \frac{12 \text{ in}}{1 \text{ ft}} \times \frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ in}} \times \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \times \frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}} = 8.047 \text{ km}$$

9 在转换中取消了单位名称并避免应当使用除法(乘法)时, 使用了不当的单位比率的乘法(除法)。不能正确转换单位是导致数值误差的首要原因。

1.2 EMC 历史

或许有人会说干扰及其抑制早在 19 世纪后期, 马可尼的第一个火花隙实验就已经提出来了。1901 年他使用铜线阵列实现了首次跨大西洋的电波发射。当时唯一的重要接收器就是无线接收机, 数量极少且相距甚远, 所以干扰问题的修正相对比较简单。但是, 关于无线电干扰的技术文章大约是在 1920 年左右在各种技术杂志上出现的。那时的无线接收机和天线相当粗糙, 易受外部源或内部源的干扰如自激振荡一样。设计技术的提高消除了很多这类

- ⊙ 1 in=0.0254 m。——校者注
- ⊖ 1 ft=0.3048 m。——校者注
- ⊕ 1 mile=1609.344 m。——校者注
- ⊗ 1 yd=0.9144 m。——校者注

问题。来自电气设备的无线电干扰,如电机,电气化铁道和电信号灯,在1930年左右很快开始出现并成为主要问题。

在第二次世界大战期间,电子设备尤其是无线电收发设备、导航设备以及雷达的使用,飞行器上的无线电收发设备和导航设备之间的干扰的例子开始增多。通过在并不拥挤的频谱上发射频率的重新分配,或将电缆远离噪声发射源以避免电缆接收那些发射,通常就可以很容易地解决干扰问题。电子器件的密度(主要是电子真空管)远小于今天的。因此,为了解决电磁干扰(EMI)问题,在逐个排查的基础上很容易实现干扰的修正。但是,随着高密度电子元器件的发明,如20世纪50年代发明的场效应晶体管,20世纪60年代发明的集成电路(IC)和20世纪70年代发明的微处理器芯片,干扰问题极其显著地增加。由于语音和数据传输需要的增加,频谱也变得越来越拥挤。这就要求对频谱的利用进行合理规划,直到今天也是如此。

将目前对EMC的关注引领到最前沿的主要技术还是数字信号处理及计算机的引入。在20世纪60年代早期,数字计算机采用电子管作为开关元件。它们速度相当慢(按照现在的标准),耗电量大,占地面积大。在20世纪70年代集成电路支持了计算机的构造,使其耗电量小得多,需要的物理空间也小得多。到了20世纪70年代末期,用数字信号处理代替模拟信号处理的趋势开始加速。由于开关速度的提高和IC的小型化,几乎所有的电子功能都以数字化实现。从计算到数字处理再到数字控制,以数字化实现各种不同功能变得非常普遍,现在也仍在继续。这意味着含频谱分量(开关波形)的噪声源密度正变得相当大。因此,EMI问题的出现开始增加了。

由于干扰有线和无线通信的数字系统日益增多,所以1979年美国联邦通信委员会(FCC)颁布了一个规定要求所有的“数字设备”的电磁发射必须低于某个限定值。这一规定的目的是要限制对环境的“电磁污染”,以防止或至少能减少EMI案例的数量。因为除非“数字设备”的电磁发射满足FCC强制的限定值,否则不能在美国销售,所以在从数字计算机到电子打字机的民用电子产品生产商中都激起了对EMC学科的浓厚兴趣。

这并非有意暗示美国处在制定电磁发射限定值的“净化电磁环境”的最前沿。许多欧洲国家在FCC颁布其规范之前就已经很好地对数字设备强制实施了类似的要求。1933年国际电工技术委员会(IEC)在巴黎的一次会议上建议成立国际无线电干扰特别委员会(CISPR)来处理不断出现的EMI问题。该委员会产生了一份文件,详细说明用于确定潜在的EMI发射的测量设备。CISPR在二战结束后于1946年在伦敦重新召集会议。随后的多次会议产生了各种技术出版物,讨论测量技术,建议发射限定值。一些欧洲国家采用了CISPR各版本建议的限定值。FCC规范为美国第一个针对数字系统的规范,限定值参照了CISPR推荐值而又根据美国的环境有所改动。为了防止与EMI相关的“场问题”,美国的大多数电子产品生产商已经对他们的产品设定了内部限定值和标准。但是,FCC规范使得这样一种自愿行为变成了法定的符合性程序要求。

美国军事组织在FCC颁布其规范之前也通过MIL-STD-461强制规定了电子系统的电磁发射限定值以防止出现EMI问题。该标准从20世纪60年代早期开始生效,实施这一标准以保证“军事任务的成功”。从手持式电钻到复杂的电子计算机,所有的电子和电气设备都要求满足这些标准的发射限定值。军用标准中另一方面是设定了敏感度要求。将干扰信号有意注入设备,设备被要求在有这些干扰信号存在时必须能正常工作。在写作本书时,CISPR