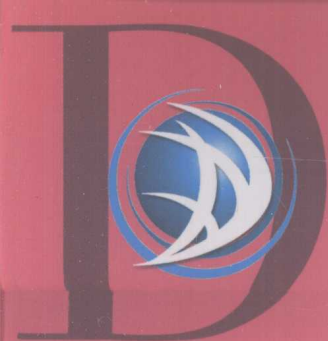




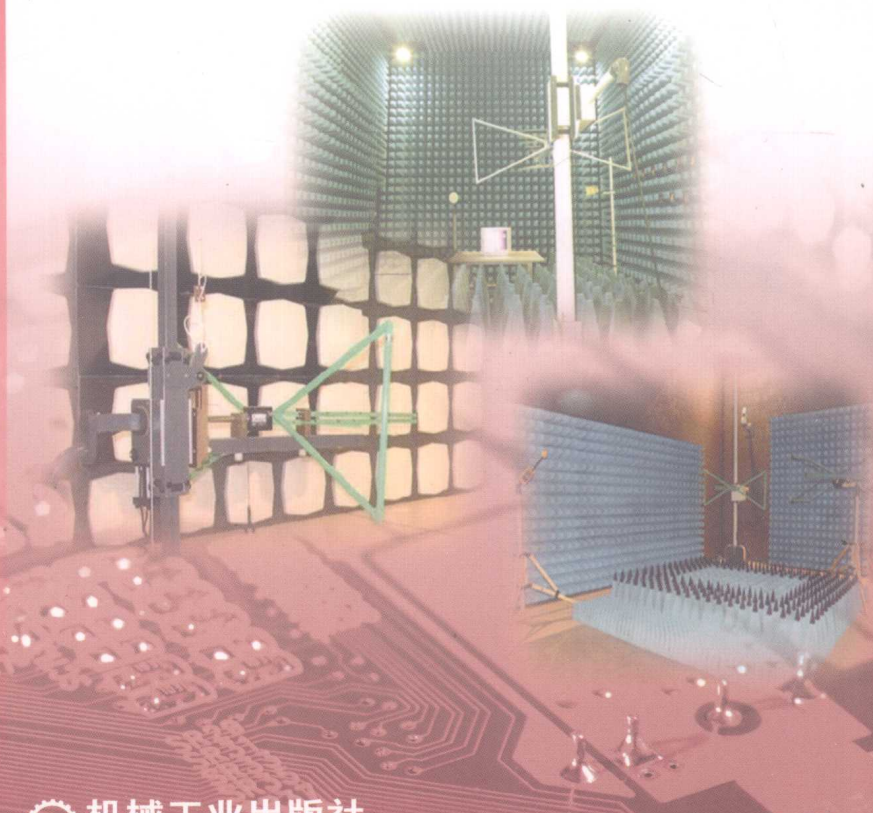
普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

DIANQI
XINXILEI

电磁兼容工程 入门教程

赵 阳 主 编

黄学军 陈 昊 副主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

电磁兼容工程入门教程

主 编：赵 阳 (南京师范大学)
副主编：黄学军 (苏州泰思特电子科技有限公司)
陈 昊 (中国矿业大学)
参 编：See Kye Yak (新加坡南洋理工大学)
邱晓晖 (南京邮电大学)
李世锦 (南京师范大学)
姜宁秋 (南京师范大学)
蔡 骏 (苏州泰思特电子科技有限公司)



机械工业出版社

随着电气与电子技术的飞跃发展,产品的电磁兼容(EMC)性正越来越广泛地受到设计师和工程技术人员的关注和重视。

本书分电磁兼容工程基础、电磁兼容工程应用实例分析和电磁兼容教学实验三篇,共8章。内容包括:电磁兼容导论、电磁干扰噪声抑制基础、电磁干扰噪声诊断技术、抗电磁干扰基础、电磁干扰噪声抑制实例分析、抗电磁干扰应用实例分析、电磁兼容教学实验设计以及电磁兼容工程系列教学实验等。

本书主要作为电气与电子类专业的本科学生教学用书,也可以作为电气、电子工程师进行EMC培训和学习的教材或参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容工程入门教程/赵阳主编. —北京:机械工业出版社, 2008. 12
普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材
ISBN 978-7-111-24343-4

I. 电… II. 赵… III. 电磁兼容性-高等学校-教材
IV. TN03

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第194380号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:闫晓宇 版式设计:霍永明 责任校对:姚培新
封面设计:张静 责任印制:洪汉军
北京汇林印务有限公司印刷
2009年2月第1版·第1次印刷
184mm×260mm·9.75印张·243千字
0 001—3 000册
标准书号:ISBN 978-7-111-24343-4
定价:19.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294
购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话:(010) 88379727
封面无防伪标均为盗版

前 言

电磁兼容学科是一门综合性交叉学科，与很多学科相互渗透、结合，是自然科学和工程学的结合，其理论基础宽广，工程实践综合性强，也是电力、电气、电子和其他相关行业从业工程师必须掌握的基础知识和基本技术。

随着电气与电子技术的飞跃发展，产品的电磁兼容（EMC）性正越来越广泛地受到设计师和工程技术人员的关注和重视。为了满足符合性测试的要求或保障设备的稳定性与可靠性，需要设计人员对系统进行完备的 EMC 设计。

本书旨在让初学者对电磁兼容有一个总体认识，内容从实际工程需要出发，结合了电类专业特点，覆盖面广，叙述由浅入深、浅显易懂，图文并茂，具有较强的实用性和可选性。本书分电磁兼容工程基础、电磁兼容工程应用实例分析和电磁兼容教学实验三篇，共 8 章，内容包括：电磁兼容导论、电磁干扰（EMI）噪声抑制基础、电磁干扰（EMI）噪声诊断技术、抗电磁干扰（EMS）基础、电磁干扰噪声抑制实例分析以及抗电磁干扰应用实例分析，最后介绍电磁兼容教学实验设计和电磁兼容工程系列教学实验，这也成为本书的特色与亮点。

本书主要作为高等院校电气与电子类专业学生的教学用书，也可作为电气、电子工程技术人员进行 EMC 培训和学习的教材或参考书，或供电气、电子产品的设计师、测试工程师作为工作参考资料。

本书作为教材的特色如下：

- 1) 建议使用本书的教学课程设置在 30~40 学时。
- 2) 本书知识全面，基础理论部分层次性强，条理清楚，内容由浅入深，无过多的理论推导与分析，适于入门教学。
- 3) 本书工程性强，对电磁兼容相关技术进行了精选，并融入了一些专业前沿最新发展动向和作者的部分研究成果。
- 4) 本书设置了 5 个系列教学实验，内容涵盖传导性 EMI、辐射性 EMI 和抗电磁干扰（EMS）三大部分的主要内容，让学生能够通过工程性很强的应用实例分析和实践动手性很强的开放性教学实验，直观而有效地掌握电磁兼容的基础理论知识，提高工程实践能力。

本书主要由南京师范大学电磁兼容研究室赵阳博士、苏州泰思特电子科技有限公司黄学军先生与中国矿业大学陈昊教授合作完成。赵阳担任主编，黄学军、陈昊任副主编，共同负责全书的整理和统稿工作。新加坡南洋理工大学 See Kye Yak 教授、南京邮电大学邱晓晖老师、南京师范大学李世锦和姜宁秋老师以及苏州泰思特电子科技有限公司蔡骏总工程师分别编写了本书中的相应章节。本书作者多年来一直从事电磁兼容的教学和研究工作，成果众多。书中提出的工程方法大多是作者多年来实践得出的结果，简单易行，适宜于工程应用。

在本书编写过程中，孙焱、尹海平、罗永超和陆婉泉等研究生做了大量的文字输入和校对工作，在此表示感谢。

IV 电磁兼容工程入门教程

在本书完稿之际，对书中参考文献的作者一并表示感谢。

同时感谢南京师范大学教材出版基金对本书的资助。

由于时间仓促，水平有限，书中难免有不妥和漏误之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2008 年 10 月于南京

目 录

前言

第一篇 电磁兼容工程基础

第1章 电磁兼容导论	1	2.3.3 辐射噪声抑制	49
1.1 电磁兼容工程概述	1	第3章 电磁干扰噪声诊断技术	52
1.1.1 电磁兼容工程基本概念与术语	1	3.1 传导性电磁干扰噪声诊断技术	52
1.1.2 电磁兼容工程设计	3	3.1.1 传导性电磁干扰噪声诊断原理	52
1.1.3 电磁兼容标准	5	3.1.2 噪声智能诊断技术	61
1.1.4 消除电磁干扰的常用方法	7	3.2 辐射性电磁干扰噪声诊断技术	63
1.2 电磁兼容分析预备知识	8	3.2.1 基于电压测量的辐射噪声诊断方法	63
1.2.1 分贝与电磁兼容中常用的物理量单位	8	3.2.2 基于电流测量的辐射噪声诊断方法	65
1.2.2 电磁场辐射基础	10	第4章 抗电磁干扰基础	72
1.2.3 噪声信号与电路仿真分析基础	13	4.1 抗电磁干扰概述	72
第2章 电磁干扰噪声抑制基础	17	4.1.1 抗电磁干扰的定义与描述	72
2.1 电磁干扰噪声耦合路径	17	4.1.2 抗电磁干扰的分类与分析	72
2.1.1 传导干扰噪声耦合方式	17	4.1.3 脉冲电磁干扰抗扰度	72
2.1.2 电磁辐射耦合	18	4.2 EMS 测量方法	73
2.2 传导性电磁干扰噪声抑制技术	20	4.2.1 静电放电测试	73
2.2.1 接地	20	4.2.2 瞬变脉冲群干扰测试	76
2.2.2 滤波	29	4.3 提高电磁抗干扰能力的方法	79
2.2.3 电源去耦	35	4.3.1 瞬变脉冲群干扰的抑制	79
2.3 辐射性电磁干扰噪声抑制技术	40	4.3.2 电源系统的防雷电过电压(浪涌)保护	81
2.3.1 屏蔽	40	4.3.3 静电放电的防护	82
2.3.2 辐射噪声产生机理	48		

第二篇 电磁兼容工程应用实例分析

第5章 电磁干扰噪声抑制实例分析	86	5.2 辐射性电磁干扰噪声抑制实例分析	99
5.1 传导性电磁干扰噪声抑制实例分析	86	5.2.1 PCB 布局对噪声的影响	99
5.1.1 传导性电磁干扰噪声诊断	86	5.2.2 共模辐射噪声抑制	104
5.1.2 EMI 滤波器设计	91	5.3 电磁干扰噪声抑制技术新进展	108
5.1.3 噪声源内阻抗的测定	95	5.3.1 EMI 噪声源建模	108
		5.3.2 EMI 噪声抑制技术与经济性一体化解决方案	112

第6章 抗电磁干扰应用实例分析	117
6.1 抗静电干扰实例	117
6.1.1 ESD 强迫损坏技术实例	117

6.1.2 汽车 CAN 总线控制系统的 抗静电干扰实例	117
6.2 瞬变脉冲群抗干扰实例	121

第三篇 电磁兼容教学实验

第7章 电磁兼容教学实验设计	123
7.1 实验仪器及设备	123
7.1.1 频谱分析仪	123
7.1.2 线阻抗稳定网络	126
7.1.3 传导性电磁干扰噪声分析仪	126
7.1.4 静电放电发生器	127
7.1.5 射频探头	128
7.2 传导性电磁干扰教学实验设计	129
7.2.1 电磁兼容基础概念回顾	129
7.2.2 线阻抗稳定网络	130
7.2.3 传导性电磁干扰诊断与抑制 原理图	130
7.2.4 开关电源传导电磁干扰噪声 产生机理实验设计	131
7.3 辐射性电磁干扰教学实验设计	134

7.3.1 研究差模辐射的性质、特征	134
7.3.2 研究共模辐射的性质、特征	135
7.4 抗电磁干扰教学实验设计	135
7.4.1 静电放电的形成及干扰机理	135
7.4.2 静电放电实验设计	137

第8章 电磁兼容工程系列教学

实验	138
8.1 传导电磁干扰噪声分离网络特 性实验	138
8.2 传导性电磁干扰噪声测试实验	141
8.3 电力电子设备传导电磁干扰噪声 形成机理实验	143
8.4 辐射性电磁干扰噪声测试原理实验	145
8.5 静电放电原理实验	146
参考文献	148

第一篇 电磁兼容工程基础

第 1 章 电磁兼容导论

1.1 电磁兼容工程概述

1.1.1 电磁兼容工程基本概念与术语

1. 电磁兼容发展简史

在第二次世界大战期间，随着电子设备尤其是无线电收发设备、导航设备以及雷达的大量使用，飞行器上各种电子设备之间发生干扰的例子开始增多。通过在当时还并不拥挤的频谱上对发射频率进行重新分配，或将电缆远离噪声发射源，通常就可以很容易地解决干扰问题。由于当时电子元件的密度（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, Electromagnetic Interference）问题，可以在逐个排查的基础上很容易地实现干扰的修正。但是，随着高密度电子元件的发明，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，干扰问题显著增加。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。

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，所以从数字计算机到电子打字机的民用电子产品生产商都对电磁兼容（EMC, Electromagnetic Compatibility）学科产生了浓厚兴趣。

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，详细说明了用于确定潜在的 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 规范是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，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。

这些规范使得 EMC 已经成为电子产品市场准入的一个关键因素。如果在特定国家，产品不符合其规范，就不得在该国销售。也就是说功能上完全得以实现的产品，只要不符合电磁兼容规范的要求，用户也无法购买。

我国电磁兼容工作起步较晚，20 世纪 70 年代才逐渐发展起来。

2. 电磁兼容与电磁干扰主要术语

带宽 (Bandwidth): 一个接收机响应信号的上升 3dB 点和下降 3dB 点之间的频率间隔。

共模 (CM, Common Mode): 在两根或多根导线中，流经所有导线的电流都是同极性的。

共模抑制比 (CMRR, Common-Mode Rejection Ratio): 衡量运算放大器对共模电压抑制能力的参数。

耦合路径 (Coupling Path): 传导或辐射路径。干扰能量通过该路径从干扰源传输到被干扰对象。

串扰 (串音) (Crosstalk): 被干扰电缆上从邻近干扰源电缆耦合的电压与该邻近电缆上的电压之比。单位为分贝 (dB)。

差模 (DM, Differential Mode): 在导线对上极性相反的电压或电流。

电磁兼容 (EMC, Electromagnetic Compatibility): 一种条件，在此条件下一组中的几台设备互相不干扰也不干扰它们所处的环境。

电磁干扰 (EMI, Electromagnetic Interference): 与电磁兼容恰恰相反。

远场区 (Far Field): 即指信号源距测量点有 $1/6$ 波长以上时的辐射场。也称为平面波。

近场区 (Near Field): 在此辐射场中，测量点与电磁干扰源的距离小于 $1/6$ 波长。

灵敏度 (Sensitivity): 当模拟电路中的噪声为有限带宽白噪声时，当 $S = N$ 时对应的输入信号值，在该值以下，电路没有响应信号输出或其输出信号可忽略。

3. 电磁兼容概念

(1) 电磁干扰

电磁干扰是电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的下降。电磁骚扰仅仅是电磁现象，它可能引起设备性能的降级或损害，但不一定已经形成后果。而电磁干扰是由电磁骚扰引起的后果，通常人们在分析电磁干扰问题时常常是与电磁骚扰联系在一起讨论，或统称为电磁干扰。

(2) 电磁干扰源的分类

电磁干扰的分类可以有多种分法，例如，按传播途径分，有传导干扰和辐射干扰，其中传导干扰的传输性质有电耦合、磁耦合及电磁耦合；按辐射干扰的传输性质分，有近场区感应耦合和远场区辐射耦合；按频带分，有窄带干扰和宽带干扰；按干扰频率范围分，可细分为 5 种；按实施干扰者的主观意向分，可分为有意干扰源和无意干扰源；按干扰源性质分，有自然干扰和人为干扰等。

(3) 电磁干扰的三要素

所有的电磁干扰都是由 3 个基本要素组合而产生的，它们是电磁干扰源、对该干扰能量敏感的设备、将电磁干扰源传输到敏感设备的媒介（即传输通道或耦合途径，如图 1-1 所示）。

相应地，抑制所有电磁干扰的方法也应从这三要素着手解决。

- 1) 电磁干扰源：指产生电磁干扰的任何元件、器件、设备、系统或自然现象。
- 2) 耦合途径（或称传输通道）：指将电磁干扰能量传输到受干扰设备的通道或媒介。
- 3) 敏感设备：指受到电磁干扰影响，或者说对电磁干扰发生响应的设备。

(4) 电磁兼容的含义

电磁兼容（EMC）一般指电气及电子设备在共同的电磁环境中能执行各自功能的共存状态，即要求在同一电磁环境中的上述各种设备都能正常工作又互不干扰，达到“兼容”状态。换句话说，

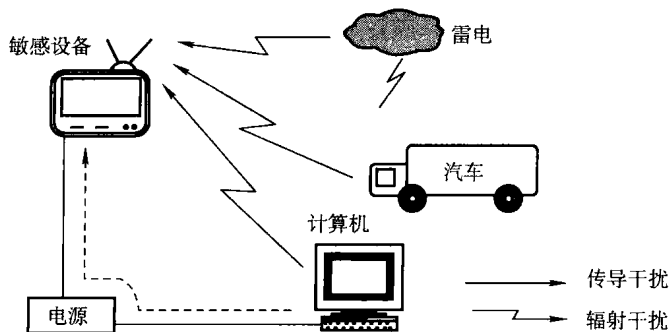


图 1-1 电磁干扰源作用于敏感设备耦合途径

说，电磁兼容是指电子线路、设备、系统相互不影响，从电磁角度具有相容性的状态。相容性包括设备内电路模块之间的相容性、设备之间的相容性。进一步讲，电磁兼容学是研究在有限的空间、有限的时间、有限的频谱资源条件下，各种用电设备或系统（广义上还包括生物体）如何共存，并不致引起性能降级的一门学科。电磁兼容的理论基础涉及数学、电磁场理论、电路基础、信号分析等学科与技术，其应用范围又几乎涉及到所有用电领域。在电磁兼容领域中，我们所面对的研究对象（主要指电磁噪声）无论时域特性还是频域特性都十分复杂。此外，研究对象的频谱范围非常宽，使得电路中集中参数与分布参数、近场与远场、传导与辐射都同时存在并必须予以全面考虑。因此，国际上制定了大量的技术标准，对这些物理现象形成了统一的评价标准，并使用统一实现设备或系统电磁兼容的技术要求，对测量设备与设施的特性以及测量方法等均予以严格的规定。

1.1.2 电磁兼容工程设计

1. 电磁兼容设计

为了保证一个电子设备或系统具有良好的电磁兼容性，在新产品的设计阶段就应当首先进行 EMC 设计，而不是到样机试验阶段乃至到现场试验阶段，发现了 EMI 问题以后才采取措施。因为对一个设计工程师来说，在新产品的全开发过程（设计—试验—批量生产）中，越是到后面阶段，可以用来抑制噪声、降低干扰的手段就越少，因而为此所付的代价也越高。这一关系可用图 1-2 加以形象地说明。

通常，EMC 设计（包括事先采用必要的抑制 EMI 措施）成本只占总开发成本的 5% 左右，如果人们在产品初期就进行 EMC 设计的话，只要适当地选择元器件和材料，在每台售出设备上因之附加的元件成本通常很少，在批量生产情况下，甚至可以忽略不计。所以，任何电子产品在设计初期，首先进行 EMC 设计是十分必要的。

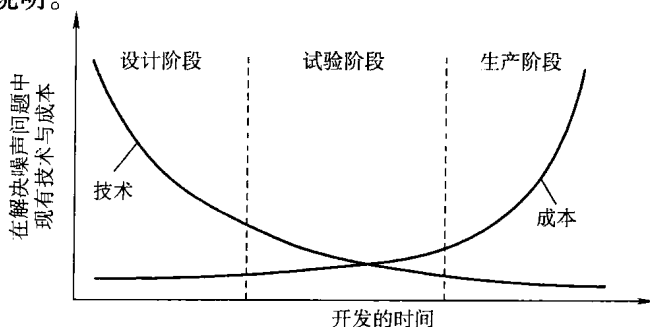


图 1-2 电磁兼容性设计成本和采用的技术手段在开发过程各阶段的关系

众所周知,构成电磁干扰有3个要素,即:干扰源(噪声)、噪声的耦合途径及噪声接收器(被干扰设备)。因此,电磁兼容设计的任务概括起来就是:削弱干扰源的能量,隔离或减弱噪声耦合途径及提高设备对电磁干扰的抵抗能力。

2. 电磁兼容性分析方法

按其发展过程,通常分为3种方法:即问题解决法、规范法和系统法。

(1) 问题解决法

该方法是解决电磁兼容问题的早期方法,首先按常规设计建立系统,然后再对现场实验中出现的电磁干扰问题,设法予以解决。由于系统已安装完工,要解决电磁干扰问题比较困难,为了解决问题可能需要进行大量的拆卸,甚至要重新设计,而对于大规模集成电路更有可能要严重地破坏其电路板。因此问题解决法是一种非常冒险的方法,而且这种头痛医头、脚痛医脚的方法是不能从根本上解决电磁干扰问题的。

(2) 规范法

规范法是比较问题解决法较为合理的一种方法,该方法是按现行电磁兼容标准(国家标准或军用标准)所规定的极限值来进行计算,使组成系统的每个设备或子系统均符合所规定的标准,并按标准所规定的试验设备和实验方法核实它们与规范中规定极限值的一致性。该方法可在系统实验前对系统的电磁兼容提供一些预见性。主要缺点在于既有可能过度设计,同时谋求解决的问题又不一定是真正存在的问题。

(3) 系统法

系统法是近几年兴起的一种设计方法,它在产品的初始设计阶段对产品中每一个可能影响产品电磁兼容性的元器件、模块及线路建立数学模型,利用计算机辅助设计工具对其电磁兼容性进行分析预测和控制分配,从而为整个产品的满足要求打下良好基础。这种方法通常在正式产品完成之前解决90%的电磁兼容问题。

3. 电磁兼容设计方法

在设备或系统设计的初始阶段,同时进行电磁兼容设计,把电磁兼容的大部分问题在设计定型之前,可得到最好的费效比。如果等到生产阶段再去解决,非但在技术上带来很大的难度,而且会造成人力、财力和时间的极大浪费。其费效比如图1-3所示。

电磁兼容设计的基本方法是指标分配和功能分块设计,也就是首先要根据有关的标准(国际、国家、行业、特殊标准等)把整体电磁兼容指标逐级分配到各功能块上,细化成系统级、设备级、电路级和元件级的指标。然后,按照要实现的功能和电磁兼容指标进行电磁兼容设计,例如,按电路或设备要实现的功能,按干扰源的类型,按干扰传播的渠道以及按敏感设备的特性等。

电磁兼容设计的具体内容包括:①分析系统所处的电磁环境;②选择频谱及频率;③制定电磁兼容要求与控制计划;④设备及电路的电磁兼容设计。

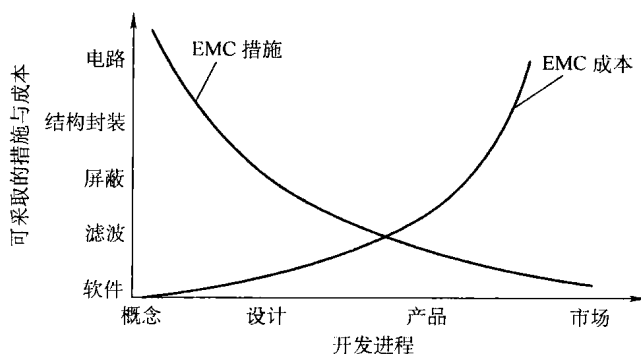


图 1-3 产品开发进程中可采取的 EMC 措施的费效比

电磁兼容设计的主要参数包括：①敏感度门限和干扰允许值；②电磁干扰安全系数；③敏感度阈值；④失效干扰电平；⑤费效比。

电磁兼容设计的要点包括：

(1) 抑制电磁干扰源的设计要点

- 1) 尽量去掉对设备工作用处不大的潜在干扰源，减少干扰源的个数。
- 2) 恰当选择元器件和线路的工作模式。尽量使设备工作在特性曲线的线性区域，以使谐波成分降低。
- 3) 对有用的电磁发射或信号输出也要进行功率限制和频带控制。
- 4) 合理选择发射天线的类型和高度，不盲目追求覆盖面积和信号强度。
- 5) 合理选择数字信号的脉冲形状，不盲目追求脉冲的上升速度和幅度。
- 6) 控制电弧放电，尽量选用工作电平低、有触点保护的开关或继电器，选择加工精密的电机。
- 7) 应用良好的接地来抑制接地干扰、地环路干扰和高频噪声。

(2) 抑制干扰源的设计要点

- 1) 把携带电磁噪声的元件和导线与连接敏感元件的连接线隔离。
- 2) 缩短干扰耦合路径，宜使携带高频信号或噪声的导线尽量短，必要时使用屏蔽线或加屏蔽套。
- 3) 注意布线和结构件的天线效应，对于通过电场耦合的辐射干扰、尽量减小电路的阻抗。而对于磁场耦合的辐射，则尽量增加电路的阻抗。
- 4) 应用屏蔽等技术隔离或减少辐射路径电磁干扰，应用滤波器、脉冲吸收器、隔离变压器和光电耦合器等滤除或减少传导途径的电磁干扰。

(3) 对敏感设备的设计要点

- 1) 对于电磁干扰源的各种防护措施，一般也同样适用于敏感设备。
- 2) 在设计中尽量少用低电平器件，也不盲目选择高速器件。

4. 电磁兼容设计优点

适当的 EMC 设计的主要优点在于：①为了使产品满足强制要求而必须进行元器件使用限制和重新设计所带来的附加成本最小（将产品成本最小化）；②保证研发产品的上市进度（将研发进程延误最小化）；③确保产品在其使用环境中，在不可避免地存在外部噪声的情况下，能够令人满意地工作。

1.1.3 电磁兼容标准

大多数的电子电气设备、电路和系统，都会有意或者无意地发射电磁能量。这种发射能构成电磁干扰。同时，许多现代电子装置、电路和设备能够响应这种电磁干扰或者受其影响。我们所面临的情形中，各种设备既是罪犯又是受害者。这个问题在现代半导体器件和 VLSI 电路中变得更加严重，在电磁干扰下，它们容易发生故障甚至完全损坏，因为这些设备对于电磁干扰的抗扰度阈值相对较低。与电磁发射（构成电磁干扰）以及设备、子系统和器件抗电磁干扰（电磁兼容）有关的问题，在无线广播、通信、控制、信息技术产品、仪器、计算机、电能的生产和传输中经常出现。

作为确保电磁兼容性的实际度量措施，各种设备的设计和性能标准不断的演化，不同的机构也在不断发布各种相关标准。这些标准的目标是对不同的设备制定合理的电磁发射电平

的限值以及抗扰度限值。电磁干扰或者电磁兼容常常涉及弱的信号或者干扰电平，测试流程要求在极低功率时的精确测量。另外，不同的测试流程或者不同的测试仪器会带来不同的测试结果，尽管差异性可能较小。因此，谨慎定义测试流程和测试仪器是十分必要的。相应地，标准也会规定测量电磁（干扰）发射和抗扰度的测试流程和仪器。相同的仪器在不同的测试地点测试会显现出显著的差异，为了避免这一领域的困难，在这方面我们必须给予充分的注意。

对电磁干扰和电磁兼容的测试和评估包括以下方面的测量和兼容：

- 1) 传导发射（CE）。
- 2) 辐射发射（RE）。
- 3) 传导发射的敏感度/抗扰度（CS）。
- 4) 辐射发射的敏感度/抗扰度（RS）。

这些测试涵盖了窄带和宽带发射。窄带测试处理连续波（CW）模式的发射和干扰。宽带测试涉及如静电放电、浪涌和其他实际遇到的类似瞬态情况。

（1）FCC 标准

美国联邦通信委员会（FCC）负责促进和保证美国涉及无线电广播和传播设施的各种法规能有效执行。FCC 也肩负着对各种电子电气装置设备的电磁发射控制规范化的任务。这些规范文件在电信联邦法规中颁布。FCC 已经对无线电频率装置和设备的电磁发射（无意和有意的辐射）的限值进行了规定。

（2）CISPR 标准

我们指出的以欧洲为基础的国际无线电干扰特别委员会（CISPR）自 20 世纪 30 年代就积极地致力于发展 EMI/EMC 方面的国际标准，并且被国际电工委员会（IEC）公布。CISPR/IEC 的成就是国际性的，不仅涉及欧盟国家，也包括其他的非欧盟国家，例如澳大利亚、加拿大、印度、日本、韩国和美国。表 1-1 中给出了 IEC/CISPR 关于 EMI/EMC 的文件。

表 1-1 关于 EMI/EMC 的 IEC/CISPR 的标准

主 题	标 准
通用	CISPR7B, CISPR8B, CISPR10
测量流程和仪器使用	CISPR16, CISPR17, CISPR19, CISPR20, CISPR8B, 8C, CISPR11, CISPR12, CISPR13, CISPR14, CISPR15, CISPR18—1, 2, 3, CISPR20
性能限制	CISPR9, CISPR11, CISPR12, CISPR13, CISPR14, CISPR15, CISPR18—3, CISPR21, CISPR22

测试和评估方法和 ANSI/IEEE 标准一样，IEC/CISPR 文档和标准仅仅是建议。它让参与的国家和其他国家决定建议中的哪部分在它们国家实行和如何实行。后面章节的测试平台和测试流程的描述大体上能够和相应 IEC/CISPR 标准中的测试一致。在需要严格遵循标准的时候，参考相应的标准，按照列出的细节和流程去操作是十分必要的。

（3）GB 标准

我国对电磁干扰防护及兼容标准的制定和建立也十分重视，因为标准化是科学管理的重要组成部分，也是组织现代化生产，促进技术进步与发达国家进行技术交流的技术依据。

我国首份 EMC 标准，是由原第一机械工业部于 1966 年颁发的部标 JB854—66《船用电气设备工业无线电干扰端子电压测量方法及允许值》。20 世纪 70 年代后期，由原国家标准

局主持成立了无线电干扰标准化工作组。1983年10月31日颁布了首份EMC国家标准GB3907—1983《工业无线电干扰基本测量方法》。之后又相继颁发了GB4343—1984《电动工具、家用电器和类似器具无线电干扰特性的测量方法和允许值》、GB4365—1984《无线电干扰名词术语》、GB4859—1984《电气设备抗干扰特性的基本测量方法》等30余项国家标准。这些标准的基本依据是IEC/CISPR标准、IEC/TC77或IEC/TC65制定的有关标准。1986年正式成立由国家技术监督局领导的全国无线电干扰标准化技术委员会，挂靠在上海电器科学研究所，由该所负责EMC标准的宣传贯彻工作。

后来，根据国内工作需要，又先后成立了与IEC/CISPR/A. B. C. D. E. F. G. 分会相对应的分技术委员会，还专门成立了S分会。目前共有8个分会。

1.1.4 消除电磁干扰的常用方法

常用的消除电磁干扰的方法很多，其中主要有：屏蔽，接地，平衡，隔离，搭接滤波，屏蔽。

(1) 接地

接地是电子设备工作所必需的技术措施。同时接地也引入接地阻抗及地回路干扰，事实证明接地设计对各种干扰的影响是很大的。因此，电磁兼容领域中，接地技术至关重要，其中包括接地点的选择，电路组合接地的设计和抑制接地干扰措施的合理应用等。静电屏蔽的必要条件是屏蔽体接地。为了同时屏蔽磁场和高频电场，也应将屏蔽体接地。而电磁屏蔽则是用屏蔽体阻止电磁波在空间传播的一种措施，为了避免因电磁感应引起屏蔽效能下降，屏蔽体也应接地。同时，为了避免地电压在屏蔽体内造成干扰，还应当单点接地。

(2) 平衡

平衡电路是指双线电路中的两根导线与连接到这两根导线的电路，对地或其他导线都有相同的阻抗。平衡的目的在于使这两根导线所感应的噪声相等。在这种情况下噪声是一个纵向或共模的信号，因而可以在负载上自行对消，这是抑制共模干扰的一种有效方法。

(3) 隔离

隔离是抑制干扰耦合的技术措施，它包括电路的空间隔离和电位隔离。电路的空间隔离是减少电路简单电磁耦合的最简单而有效的方法。所谓的电位隔离是指两个或多个系统的电路去耦，以及基准电位不同的电路之间的绝缘。电位隔离主要用于抑制两回路电位相差较大的耦合，例如信号回路与功率回路的耦合。

电位隔离的典型方法是电信号转换成其他物理量，通常将磁场或光辐射作为中间变量，有时也采用液动或气动系统。

(4) 搭接

搭接是导体间的低阻抗连接。只有良好的搭接才能使电路完成其设计功能，使干扰的各种抑制措施得以发挥作用，而不良搭接将向电路引入各种电磁干扰。因此，在电磁兼容设计中必须考虑搭接技术，以保证搭接的有效性及其长久性。

(5) 滤波

滤波是压缩信号回路干扰频谱的一种方法。当干扰频谱成分不同于有用信号频带时，可用滤波器将干扰信号滤去。滤波器对于那些与有用信号频率不同的干扰信号有很强的抑制作用，借助滤波器可明显减少传导性干扰的电平。若滤波器把有用信号和干扰信号隔离越完善，它对减少有用信号回路内的干扰信号的效果就更好。因此，恰当地设计、选择和正确地使用滤波器对抑制干扰是非常重要的。滤波是一种抑制传导干扰的方法，例如在电源输入端

接上滤波器,可以抑制来自电网的噪声对电源本身的侵害,也可以抑制由开关电源产生并向电网反馈的干扰。电源滤波器作为抑制电源线传导干扰的重要单元,在设备或系统的电磁兼容设计中具有极其重要的作用。它不仅可抑制传输线上的传导干扰,同时对传输线上的辐射发射也具有显著的抑制效果。在滤波电路中,选用穿心电容、三端电容、铁氧体磁环,能够改善电路的滤波特性。适当地设计或选择合适的滤波器,并正确地安装滤波器是抗干扰技术的重要组成部分,具体措施如下。

1) 在交流电输入端加装电源滤波器。所有电源滤波器都必须接地(厂家特别说明允许不接地的除外),因为滤波器的共模旁路电容必须在接地时才起作用。一般的接地方法是除了将滤波器与金属外壳相接之外,还要用较粗的导线将滤波器外壳与设备的接地点相连。接地阻抗越低滤波效果越好。滤波器尽量安装在近电源入口处。滤波器的输入及输出端要尽量远离,避免干扰信号从输入端直接耦合到输出端。

2) 在电源输出端加输出滤波器。加装高频电容,加大输出滤波电感的电感量及滤波电容的容量,可以抑制差模噪声。如果把多个电容并联,则效果会更好。

(6) 屏蔽

屏蔽是解决电磁兼容问题的重要且有效的手段之一。其目的是切断电磁波的传播途径。大部分电磁兼容问题都可以通过电磁屏蔽来解决,并且用电磁屏蔽的方法解决电磁干扰问题不会影响电路的正常工作。屏蔽是通过各种屏蔽材料吸收及反射外来电磁能量来防止外来干扰的侵入或将设备辐射的能量限制在一定的区域内,以防止干扰其他设备。屏蔽不仅对辐射干扰具有良好的抑制效果,而且对静电干扰和干扰的电容性耦合、电感性耦合均有明显的抑制效果。实际工程设计中,应在必须保证良好的通风散热要求的条件下,实现良好的电磁屏蔽。

(7) 对消和限幅

当干扰的幅度很大时,要采用干扰的对消电路、消隐电路及限幅电路等抑制措施。

(8) 其他抑制措施

共模干扰有源抑制技术是一种从噪声源采取措施来抑制共模干扰的方法。这种方法的思路是设法从主电路中取出一个与导致 EMI 的主要开关电压波形完全反相的补偿 EMI 噪声电压,并用它去平衡原开关电压的影响。

软开关技术的应用有助于电磁干扰的降低,这是因为功率 MOSFET、IGBT 在零电压情况下导通和零电流情况下关断,且快速恢复二极管也是软关断的,可以减小功率电路中功率器件的 di/dt 和 dv/dt ,从而可以减小 EMI 电平,通过实验证明软开关技术只在抑制纹波的高次谐波上有一定效果。

在高频变压器的一次、二次侧,开关管的 C、E 极间以及在输出整流二极管上加装 RC 吸收网络也可以抑制一定的电磁干扰。除上述措施外,还有电路去耦,阻尼、阻抗匹配,合理布线和捆扎,以及各种抑制干扰的电路或器件等。

1.2 电磁兼容分析预备知识

1.2.1 分贝与电磁兼容中常用的物理量单位

EMC 问题中主要感兴趣的量就是传导发射电压(以伏(V)为单位)、电流(以安培

(A) 为单位) 和辐射发射电场 (以伏每米 (V/m) 为单位)、磁场 (以安培每米 (A/m) 为单位)。与这些主要量相联系的就是以瓦特 (W) 为单位的功率和以瓦特每平方米 (W/m²) 为单位的功率密度。这些量的取值范围相当大, 例如电场值可以从 1 μV/m 直到 200 V/m, 这意味着其幅值的动态范围达到了 8 个数量级 (10⁸)。因为在 EMC 领域中以这些单位表示量的宽范围是很常见的, 所以 EMC 单位用分贝 (dB) 来表示。分贝有压缩数据的特点, 如 10⁸ 的电压范围是 160 dB。用 dB 来表示这些量也有其他一些原因。为了在 EMC 领域中有有效, 必须能够表达并且熟练使用这些用 dB 来表示的单位。当以 dB 为单位来表示时, 使各种不同的 EMC 单位概念化也是很重。如图 1-4 所示的放大器电路中, 由开路电压 U_s 和源电阻 R_s 组成源。

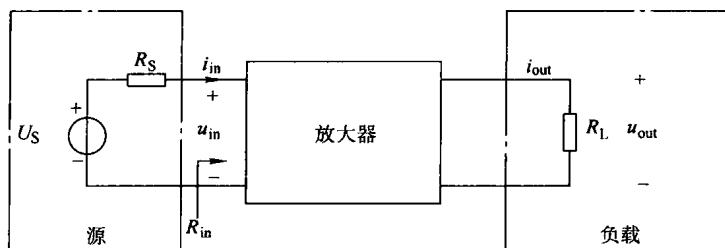


图 1-4 分贝 (dB) 的定义和使用举例说明

以 dB 表示的功率增益定义为

$$\text{功率增益} = 10 \lg \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)$$

用 dB 为单位定义的电压增益和电流增益为

$$\text{电压增益} = 20 \lg \left(\frac{u_{out}}{u_{in}} \right)$$

$$\text{电流增益} = 20 \lg \left(\frac{i_{out}}{i_{in}} \right)$$

总之, 以 dB 为单位的两个量的比值由下列各式给出:

$$\text{功率} = 10 \lg \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \text{dB} \quad (1-1)$$

$$\text{电压} = 10 \lg \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \text{dB} \quad (1-2)$$

$$\text{电流} = 10 \lg \left(\frac{i_2}{i_1} \right) \text{dB} \quad (1-3)$$

注意分贝值是两个量的比值。绝对功率电平、电压电平或者电流电平以 dB 来表示时是以相同的单位量为参考的。例如, 电压通常相对于 1 μV 表示为 dBμV:

$$U_{\text{dB}\mu\text{V}} = 20 \lg \left(\frac{U_{\mu\text{V}}}{1 \mu\text{V}} \right) \text{dB}\mu\text{V} \quad (1-4)$$

功率也可以用 dBmW (高于 1mW 的 dB 数) 或更常用 dBm 来表示如下

$$P_{\text{dBmW}} = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{mW}}}{1 \text{mW}} \right) \text{dBmW} \quad (1-5)$$

注意, 单位命名的方式都遵循电流和电压的单位名称, 除了非常常见的以 dBm 表示的高于 1mW 的 dB 数。

1.2.2 电磁场辐射基础

1. 辐射的概念

众所周知, 电磁场以一定的速度传播, 叫做电磁波。理论和实验证明: 电场和磁场从源开始, 可以在空间中传播很远, 这种现象被称为电磁辐射。某点电磁场取决于该点到源的距离, 在近场区域 (主要是感应场), 它的能量可以在电磁场和源之间转移, 也可以在源和周围空间转移; 在远场 (主要是辐射场), 空间传播的能量不能够转移反馈到源。

部分关于电磁辐射公式:

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ 或 } \lambda = \frac{V}{f}, \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

式中, c 为光速; f 为电磁波频率; λ 为波长; β 为相位传播常数。

2. 偶极子辐射场

(1) 电偶极子辐射场

图 1-5a 所示为小直流元 $I d \vec{l}$ ($dl \ll \lambda$), 矢量磁势

$$\vec{A} = \vec{e}_z \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I e^{-jkr}}{r} dz = \vec{A}_z$$

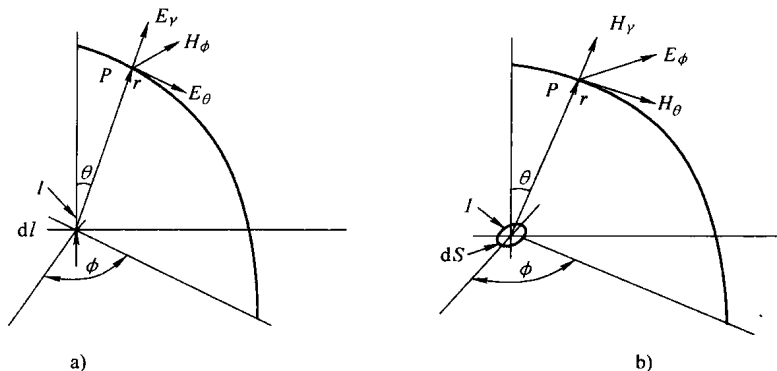


图 1-5 偶极子产生的辐射场

a) 短直导线源 b) 小环形电流源

依据

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A}$$

因此

$$H_\phi = \frac{I d l k^2}{4\pi} \left[\frac{-1}{j(kr)} + \frac{1}{(kr)^2} \right] \sin\theta e^{-jkr} \quad (1-6)$$