

教育“十一五”国家级规划教材
教育“十三五”规划教材

电磁兼容 原理、技术及应用

Principle, Technology and
Application of Electromagnetic Compatibility

◎ 梁振光 编

第2版



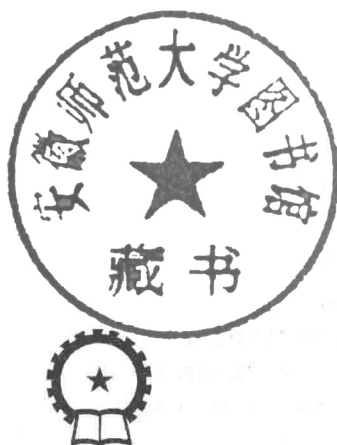
机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高等教育“十一五”国家级规划教材
通高等教育“十三五”规划教材

电磁兼容原理、技术及应用

第2版

梁振光 编
谭震宇 曹瑞基 主审



机械工业出版社

为适应当前日益突出的电磁干扰问题和电磁兼容标准的强制实施,满足电气工程专业大学生及工程技术人员对电磁兼容知识和技术的需求,本书从电磁兼容的基本概念和简单模型入手,讲解电磁兼容原理及技术,使读者建立起电磁兼容的概念,掌握其基本原理,熟悉其基本技术,抓住其中的要点,了解电磁兼容标准、强制认证要求以及电磁兼容在电气、电子产品设计中的应用,为解决电磁兼容方面的问题提供一定的指导。全书共10章。第1、2章介绍了电磁兼容的概况,并讲述电磁兼容的基本原理;第3、4、5、6章讲解了屏蔽、滤波、接地及瞬态骚扰抑制等电磁兼容基本技术;第7、8章介绍了电磁兼容标准、试验、测量方法,以及电磁干扰的诊断问题;第9章简单介绍了电子设备、电力电子装置和电力系统中的电磁兼容问题;第10章介绍了五个有助于理解电磁兼容原理的实验。

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,适合电气工程专业的师生使用。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的教师登录 www.cmpedu.com 注册下载。

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容原理、技术及应用/梁振光编.—2版.—北京:机械工业出版社,2017.9

普通高等教育“十一五”国家级规划教材 普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-57748-5

I. ①电… II. ①梁… III. ①电磁兼容性—高等学校—教材 IV. ①TN03

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第198995号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:贡克勤 责任编辑:贡克勤 徐凡

责任校对:杜雨霏 封面设计:张静

责任印制:李飞

北京铭成印刷有限公司印刷

2017年9月第2版第1次印刷

184mm×260mm·10印张·239千字

标准书号:ISBN 978-7-111-57748-5

定价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

21 世纪电力系统及其自动化规划教材

编 委 会

主任委员：熊信银

副主任委员：尹项根 韩学山 李庚银 刘宪林

李 扬 陈少华 贡克勤 杨德先（兼秘书）

委 员：（以姓氏笔画排序）

尹项根	毛承雄	车仁飞	文明浩	文劲宇
叶俊杰	刘学东	刘宪林	孙丰奇	许 珉
李 扬	李庚银	吴耀武	陆继明	张 利
张 波	杨国旺	杨宛辉	杨淑英	杨德先
陈 卫	陈少华	罗 毅	房俊龙	易长松
赵书强	赵玉林	赵丽平	姜素华	栗 然
盛四清	常鲜戎	梁振光	韩学山	游志成
熊信银	蔡金锭	魏 萍		

前 言

随着电气、电子设备的广泛应用，电磁干扰问题越来越突出。由于它妨碍产品的正常运行、影响人们的健康，许多国家对产品的电磁兼容性都做了强制性要求。在我国，随着3C认证的广泛实施及各行业对产品电磁兼容认证要求的增多，解决好电磁兼容问题成为一项重要而且必要的任务。

电磁兼容学科是一门新兴的综合性学科，一些高等院校对本科生开设了“电磁兼容”课程。但本科生学习、掌握“电磁兼容”课程有一定难度，一方面，电磁兼容涉及多学科理论，需要一定的前期课程；另一方面，电磁兼容技术具有很强的实践性，本科生往往缺乏实践经验。本书从电磁兼容的基本概念和简单物理模型入手，并结合具体实例讲解电磁兼容原理及技术，尽量避免高深的理论分析和烦琐的公式推导，目的是使大学生建立起电磁兼容的概念，掌握电磁兼容的原理，熟悉其基本技术，了解电磁兼容标准、强制认证要求以及电磁兼容在电气、电子产品设计中的应用，为今后从事产品设计等提供电磁兼容方面的指导，或为从事电磁兼容研究打下基础，而限于专门的电磁兼容工程师。

本书第2版是编者在第1版基础上，补充传输线和信号完整性及串扰一节和电磁兼容实验一章，并修正了第1版书中错误的基础上形成的。全书共10章，第1、2章介绍了电磁兼容的概况，并讲述电磁兼容的基本原理；第3、4、5、6章讲解了屏蔽、滤波、接地及瞬态骚扰抑制等电磁兼容基本技术；第7、8章介绍了电磁兼容标准、试验、测量方法，以及电磁干扰的诊断问题；第9章简单介绍了电子设备、电力电子装置和电力系统中的电磁兼容问题；第10章介绍了五个有助于理解电磁兼容原理的实验。

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，可作为高等院校电气工程专业及其他相关专业的本科生教材，也可作为电气、电子等相关专业工程技术人员的培训教材或参考书。本书配有电子课件可供教学使用。

由于编者水平有限，加之电磁兼容学科内容十分丰富，本书中定有不妥和错误之处，欢迎读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 电磁兼容的发展	1
1.2 电磁兼容学科的主要研究内容	2
1.3 电磁兼容设计方法	4
1.4 电磁兼容课程的特点	5
思考题	6
第2章 电磁兼容基本原理	8
2.1 电磁兼容的基本概念	8
2.1.1 有关电磁兼容的定义	8
2.1.2 电磁干扰三要素	9
2.2 电磁骚扰源	10
2.2.1 电磁骚扰的一般分类	10
2.2.2 自然骚扰源	10
2.2.3 人为骚扰源	11
2.2.4 时域和频域	13
2.3 电磁骚扰的传播	14
2.3.1 电流流通路径	14
2.3.2 传导耦合	15
2.3.3 磁场耦合	17
2.3.4 电场耦合	19
2.3.5 辐射耦合	20
2.4 传输线和信号完整性及串扰	26
2.4.1 传输线方程	27
2.4.2 时域解	27
2.4.3 频域解	31
2.4.4 信号完整性	31
2.4.5 串扰	35
2.5 保证电磁兼容性的方法	37
2.6 小结	38
思考题	39
第3章 屏蔽	41
3.1 屏蔽原理	41
3.1.1 自屏蔽	41
3.1.2 电场屏蔽	42
3.1.3 磁场屏蔽	44
3.1.4 电磁场屏蔽	45
3.2 屏蔽效能	46
3.2.1 完整屏蔽体的屏蔽效能	46
3.2.2 屏蔽体不完整对屏蔽效果的影响	49
3.3 屏蔽体设计	51
3.3.1 屏蔽体设计原则	51
3.3.2 屏蔽体设计中的处理方法	52
3.4 小结	57
思考题	57
第4章 滤波	59
4.1 滤波器的特性	59
4.2 反射式滤波器	60
4.3 吸收式滤波器	61
4.4 电磁干扰滤波器	62
4.4.1 EMI 滤波器的基本电路结构	63
4.4.2 EMI 滤波器的阻抗匹配问题	63
4.5 电源线滤波器	64
4.6 元件非理想特性的影响	66
4.7 小结	68
思考题	68
第5章 接地及搭接	70
5.1 接地的概念	70
5.2 安全接地	71
5.3 干扰控制接地	72
5.3.1 浮地	73
5.3.2 单点接地	73
5.3.3 多点接地	74
5.3.4 混合接地	75
5.4 屏蔽层接地	76
5.5 搭接	78

5.6 小结	79	思考题	111
思考题	79	第9章 电磁兼容应用	112
第6章 瞬态骚扰抑制	80	9.1 电子设备的电磁兼容	112
6.1 电网中的传导骚扰	80	9.1.1 电子线路的设计	112
6.2 开关操作骚扰及其抑制	80	9.1.2 印制电路板上的电磁兼容	114
6.2.1 开关断开过程中瞬态骚扰的形成	80	9.1.3 设备内部的布线	117
6.2.2 开关操作瞬态骚扰的抑制	81	9.1.4 设备机壳的屏蔽处理	119
6.3 机电装置的电磁骚扰及抑制	83	9.2 电力电子装置的电磁兼容	120
6.4 浪涌及其抑制	84	9.2.1 谐波	120
6.5 静电放电防护	86	9.2.2 电磁兼容	124
6.6 小结	87	9.3 电力系统中的电磁兼容	128
思考题	88	9.3.1 电力系统中的骚扰源	129
第7章 电磁兼容标准与测量	89	9.3.2 电力系统电磁骚扰的耦合途径	129
7.1 电磁兼容标准及强制性产品认证	89	9.3.3 电磁骚扰的抑制	129
7.1.1 主要的 EMC 国际组织及 EMC 标准	89	9.3.4 电力系统设备的电磁抗扰性	130
7.1.2 世界各国的 EMC 标准	91	9.3.5 电力系统谐波	131
7.1.3 我国的 EMC 标准	91	9.3.6 输变电系统的电磁环境	133
7.1.4 EMC 标准体系	92	9.4 小结	134
7.1.5 产品的电磁兼容认证	93	思考题	135
7.2 电磁兼容测量	96	第10章 电磁兼容实验	136
7.2.1 电磁兼容测量的主要仪器和设备	96	10.1 最小阻抗路径实验	136
7.2.2 电磁兼容测量的基本方法	98	10.2 自屏蔽实验	137
7.2.3 常用的产品抗扰度试验	101	10.3 电场屏蔽实验	138
7.3 小结	103	10.4 磁场屏蔽实验	139
思考题	103	10.5 滤波实验	140
第8章 电磁干扰诊断及电磁兼容	104	10.6 小结	141
8.1 电磁干扰诊断思路	104	附录	142
8.2 电磁干扰诊断测量	105	附录 A 现行的电磁兼容国家标准 一览表	142
8.3 电磁发射诊断	106	附录 B 实施电磁兼容认证产品目录 (第一批)	150
8.4 电磁抗扰度诊断	107	参考文献	152
8.5 工作现场的电磁兼容问题	108		
8.6 小结	110		

第1章 绪 论

内 容 提 要

本章是电磁兼容的导引, 主要介绍电磁兼容的发展, 以及它主要研究的内容、设计方法及电磁兼容课程的特点, 使读者对电磁兼容有一个总体的了解。

电磁兼容有两层含义: 对于设备或系统的性能指标来说, 是指“电磁兼容性”(Electromagnetic Compatibility, EMC); 作为一门学科来说, 则为“电磁兼容(学)”。电磁兼容及电磁干扰抑制技术是随着无线电广播、通信技术的发展而逐步成长起来的。事实上, 电磁干扰是与所有电气、电子设备相伴随的, 且随着电子技术、计算机技术及电力电子技术的广泛应用, 各种电气、电子设备的电磁干扰问题越来越突出。电气、电子设备产生更多的电磁干扰信号, 同时其遭受电磁干扰的机率也大大增加, 因此, 电磁兼容越来越重要, 它已不局限于广播、通信领域及军事用途, 而是扩展到工业、民用等各个领域。

电磁干扰的危害主要体现在两个方面: 一是电气、电子设备的相互影响; 二是电磁污染对人体的影响。电磁干扰信号作用于电气、电子设备或系统及其内部电路, 产生电磁干扰, 影响设备或系统运行的安全性和可靠性, 降低了设备或系统的工作性能。据统计, 干扰引起的电气、电子设备的事故占总事故的 90% 左右。由于电磁干扰引起事故的例子很多, 20 世纪 70 年代在美国就曾出现两起恶性事故: 有一个钢铁厂, 由于起吊熔融钢水包的天车控制电路受到电磁干扰, 以至使一包钢水被完全失控地倾倒在车间的地面上, 并且造成了人员的伤亡; 一个带有生物电控制假肢的残疾人, 驾驶一辆摩托车, 途经高压输电线下方, 由于假肢控制电路受到干扰使摩托车失控, 导致悲剧发生。我国曾报道过广东白云机场附近由于寻呼台林立, 导致客机不敢起飞和降落。电磁污染对人体健康的影响, 近年来日益引起人们的重视, 不断有调查、研究显示环境电磁污染对人体的危害, 如过量的微波辐射, 可能造成人体若干种组织和器官的急性损伤, 如头痛、恶心、目眩, 彻夜失眠、辐射局部烧灼感等, 工频电磁场会引起神经衰弱和记忆力减退。

世界各国对电气、电子设备的电磁兼容性均制定了一系列限定标准, 欧盟自 1996 年 1 月起已强制执行 EMC 标准, 凡不符合其 EMC 标准的产品, 不准进入其市场。我国自 2003 年 8 月 1 日起强制执行的中国强制认证 (China Compulsory Certification), 也包含了对产品电磁兼容性的要求。

因此, 加强电磁兼容研究及应用具有重要意义, 它可以提高电气、电子设备工作的可靠性; 保障人身和某些特殊材料的安全; 保证产品满足强制的电磁兼容标准要求。

1.1 电磁兼容的发展

人们很早就发现了电磁干扰现象。1864 年麦克斯韦总结出电磁场理论, 这为认识和研

究电磁干扰现象奠定了理论基础。1881年英国科学家希维赛德发表了“论干扰”的文章,标志着研究干扰问题的开端。1888年赫兹成功地接收到电磁波,验证了麦克斯韦的电磁场理论,并从此开始了电磁干扰的实验研究。1889年英国邮电部门研究了通信干扰问题,使干扰问题的研究开始着眼于工程实际问题。

20世纪以来,随着通信、广播等的发展,人们逐渐认识到需要对各种电磁干扰进行控制,工业发达国家成立了国家及国际间的组织,如德国电气工程师协会、国际电工委员会(IEC)、国际无线电干扰特别委员会(CISPR)等,在世界范围内开始有组织地对电磁干扰问题进行研究。为了解决干扰问题、保证设备或系统的高可靠性,20世纪40年代初,人们提出了电磁兼容性的概念。1944年,德国电气工程师协会制定了世界上第一个电磁兼容性规范VDE 0878,美国则在1945年颁布了最早的军用规范JAN-I-225。

在研究、控制电磁干扰的过程中,人们逐步了解和掌握了电磁干扰产生的原因、干扰的性质、干扰的传播途径及耦合机理,系统地提出了抑制干扰的技术措施,制定了电磁兼容的系列标准和规范,建立了电磁兼容试验和测量体系,解决了电磁兼容分析、设计及预测的一系列理论和技术问题。电磁干扰问题也由单纯排除干扰,逐步发展成在理论上和技术上全面考虑电气、电子设备及其电磁环境的系统工程,电磁兼容成为新兴的综合性学科。

20世纪70年代,电磁兼容学科已非常活跃,国际性电磁兼容学术会议每年都召开,美国电气电子工程师协会(IEEE)的权威杂志专门设立了EMC分册,美国学者B. E. 凯瑟撰写了《电磁兼容原理》专著,美国国防部编辑出版了各种电磁兼容性手册,广泛应用于工程设计。到20世纪80年代,美国、德国、日本、前苏联、法国等经济发达国家在电磁兼容研究和应用方面已达到了很高的水平,涉及电磁兼容标准和规范、设计、分析预测、试验测量、技术培训和管理等,研制出高精度的电磁发射及电磁敏感度自动测试系统,开发出多种系统内和系统间的电磁兼容性分析和预测软件,开发研制出多种抑制电磁干扰的新材料和新工艺。电磁兼容设计已成为产品设计中保证产品可靠性的重要一环。20世纪90年代,电磁兼容已从事后检测发展到预先分析评估、预先检验。电磁兼容工程师必须与产品设计师、制造商等专家共同合作,在方案的设计阶段就开展有针对性的预测分析工作。产品电磁兼容性标准及认证已由单个国家发展到地区或贸易联盟。

在我国,电磁兼容的研究起步较晚,但发展很快。20世纪80年代初开始研究并制定国家级和行业级的电磁兼容性标准和规范,国内电磁兼容组织纷纷成立,学术活动频繁开展。1987年召开了第一届全国电磁兼容性学术会议,1990年在北京第一次成功举办了电磁兼容性国际学术会议,它标志着我国的电磁兼容开始参与世界交流。

20世纪90年代以来,随着国民经济和高科技的迅速发展,电磁兼容技术受到格外重视,航空、航天、通信、电子、电力等部门投入了大量的人力、财力,建立了一批电磁兼容试验测试中心,引进了许多先进的电磁发射及电磁敏感度自动测试系统和试验设备;在电磁兼容工程设计和预测分析方面也开展了一系列研究,并逐渐投入实际应用;制定了一系列的电磁兼容标准,并已进入实施阶段。

1.2 电磁兼容学科的主要研究内容

电磁兼容研究的目的是为了消除或降低自然的和人为的电磁干扰,减少其危害,提高设

备或系统的抗电磁干扰能力,保证设备或系统的电磁兼容性。电磁兼容研究的内容很多,主要包括:

1. 电磁干扰特性及其传播机理

为了解决电磁干扰问题,首先必须了解电磁干扰的特性和它的传播机理,然后才能有针对性地采取相应对策加以抑制。因此,研究电磁干扰特性及其传播耦合理论是电磁兼容学科最基本的任务之一。

2. 电磁危害及电磁频谱管理

电磁辐射被列为继水污染、空气污染、噪声污染和环境污染之后的第五种公害,称为电磁污染。它表现为射频辐射、核电磁脉冲、静电放电等对人身健康的危害、对设备或系统的破坏及对其安全性和可靠性的影响。了解电磁污染的危害有助于采取各种措施解决它。同时,电磁频谱是一个有限的环境资源,如被污染或被侵占将会使电磁兼容的实施遇到困难。为此,必须由专门的机构(国际电信联盟)来加以管理,我国则由中国无线电管理委员会分配和协调无线电频段。有效地管理、合理地利用电磁频谱是电磁兼容的一项必要内容。

3. 电磁干扰的工程分析方法及控制技术

电气、电子设备或系统种类多样、结构复杂,必须设计出一套行之有效的方法来处理工程中常见的各种典型电磁干扰问题,而典型问题的分析方法也可用于分析更复杂的情况,它有助于快速识别其干扰机理。屏蔽、滤波、接地及合理布局等是抑制干扰的基本措施,但在工程实践中往往存在功能、质量等与成本的矛盾,必须权衡利弊寻找最合理的措施来满足电磁兼容性要求。电磁兼容控制技术一直在不断发展,新材料、新工艺的出现为电磁兼容控制技术提供了新的措施。因此,电磁兼容控制技术始终是电磁兼容学科中最活跃的课题。

4. 电磁兼容的设计方法

对于工程设计,很重要的一项就是要考虑费效比,产品的电磁兼容设计也是如此。在产品的设计、试制和生产过程中,产品设计初期解决电磁兼容问题,成本低、控制措施易实现,而到了后期再去发现和解决,则成本会大大增加,且难以实现。因此,费效比的综合考虑是电磁兼容性设计中的一项重要内容。电磁兼容性设计与设备或系统的功能设计不同,它往往要在功能设计方案基础上进行,需要电磁兼容工程师和系统工程师密切配合,反复协调,把电磁兼容设计作为系统工程的一部分来进行,以达到其设计目的。

5. 电磁兼容性测量和试验技术

电磁兼容性测量和试验是一项非常重要的工作,它是产品电磁兼容性的最终考核手段,并且应当贯穿于产品开发、试制的整个过程中。电磁干扰特性及电磁环境复杂,频率范围宽,电磁兼容性测试项目较多,随着技术的进步,对电磁兼容性要求不断提高,需要不断改进测量技术、更新测量设备。要进行电磁兼容性试验,需要研制多种信号源以及装置产生传导和辐射的模拟干扰信号,开发各种试验、测量装置,并使其自动化程度不断提高。因此,高精度的电磁发射及电磁敏感度自动测试系统的研制、开发及其在工程实践中的应用,是电磁兼容学科研究的重要内容。

6. 电磁兼容性标准和工程管理

电磁兼容性标准是电磁兼容设计和试验的依据。通过制定标准和规范来控制电气设备或系统的电磁发射和电磁敏感度,使设备或系统间相互干扰的几率下降,保证其可靠运行。标

准规定的试验测试方法和限值要合理,符合国家的科技发展水平及综合实力,既保证设备的安全可靠运行,又不造成人力、物力的浪费,这需要通过大量的实验和数据分析研究。

为了保证设备或系统在其寿命期内都有效且经济地实现电磁兼容性要求,必须实施电磁兼容性管理、建立管理系统,并使其有效运转,应用系统工程的方法,实施全面管理。电磁兼容管理的基本职能是计划、组织、监督、控制和指导。管理的对象是研制、生产和使用过程中与电磁兼容性有关的全部活动。因此,电磁兼容性管理要有全面的计划,从工程管理的较高层次抓起,建立工程管理协调网络和工作程序,确立各阶段的电磁兼容工作目标,突出重点,提高工作的有效性。

7. 电磁兼容分析和预测

电磁兼容分析和预测是合理的电磁兼容性设计的基础。由于系统一旦建成后,要修改设计、重新调整布局代价很高,因此,在系统设计开始阶段就应开展电磁兼容性分析和预测,通过电磁干扰的预测,对可能存在的干扰进行定量的估计和模拟,保证系统建成后能保持兼容,同时,又要避免采取过多的防护措施,以免造成浪费。

电磁兼容分析和预测的方法是采用计算机数字仿真技术,将各种电磁干扰特性、传播函数和敏感度特性等用数学模型描述,编制成程序,然后根据预测对象的具体状态运行预测程序,以获得潜在的电磁干扰计算结果。预测方法在发达国家已普遍采用,并被实践证明是行之有效的,因此,研究预测数学模型、建立输入参数数据库、提高预测准确度等已成为电磁兼容学科关于预测分析技术深入发展的基本内容。

8. 电磁脉冲及其防护

电磁脉冲(Electromagnetic Pulse, EMP)是十分严重的电磁干扰源,其频谱覆盖范围很宽(从甚低频到几百 MHz)、场强很大(电场强度可达 40kV/m)、作用范围很广(达数千 km),天线、输电线、电缆线及各种屏蔽壳体等都会被其感应产生强大的脉冲射频电流,如进入设备内部将产生严重的干扰甚至使设备遭到破坏。因此,电磁脉冲的干扰及其防护问题受到广泛的重视。

电磁脉冲分为环境电磁脉冲和系统电磁脉冲,可对卫星、航天器、雷达、广播通信等造成严重的影响,因此,电磁脉冲干扰及其防护已成为近年来电磁兼容学科的一个重要研究内容。

1.3 电磁兼容设计方法

在电磁兼容的发展过程中,为保证设备或系统的电磁兼容性,电磁兼容设计方法先后经历了3个阶段。

1. 问题解决法

问题解决法是先研制设备,然后针对调试中出现的电磁干扰问题,采用各种电磁干扰抑制技术加以解决。因为设备已经研制出来了,再解决电磁干扰问题已经很困难,因而它是一种落后且冒险的方法。为了解决出现的问题,可能要进行大量的拆卸和修改,甚至重新设计,因此,会造成人力、财力的浪费,延误系统的研制时间,并且会致使系统的性能下降。在发达国家,这种方法延续到20世纪50年代,而在我国,许多制造厂商目前仍停留在这一阶段。

2. 规范法

规范法是按颁布的电磁兼容性标准和规范进行设备或系统的设计制造。由于在设计中已经采取了一定的措施,因而可以在一定程度上防止出现电磁干扰问题,比问题解决法合理。在美国,这种方法较为普及,从20世纪60年代一直延续到80年代。由于标准和规范不是针对某个具体设备或系统制定的,因此,用规范法解决的问题不一定是真正存在的问题。由于规范是建立在电磁兼容实践经验的基础上,而不是电磁干扰分析和预测的结果,故为保证安全可靠往往会留有较大的裕度,致使系统成本增加。

3. 系统法

系统法是利用计算机软件对某一特定系统的设计方案进行电磁兼容性分析和预测。系统法从设计开始就预测和分析设备或系统的电磁兼容性,并在设备或系统设计、制造、组装和试验过程中不断对其电磁兼容性进行预测分析,若预测结果显示存在不兼容或设计裕度太大,则修改设计然后再进行预测,直至预测结果表明设计完全合理,才进行硬件生产。系统法是电磁兼容设计的趋势。

系统法的核心是对电磁干扰的分析和预测,目前,美国、英国等发达国家均建立了完善的、多功能的电磁兼容性预测程序库与数据库,几乎可对各种主要的电磁兼容性问题进行预测。

目前使用的预测方法主要包括分级筛选法(包括幅度筛选和频率筛选)、详细预测和性能分析等。在干扰数量很大的情况下首先进行幅度筛选,将少数强干扰从大量弱干扰中分离开来,排除明显的非干扰,只对少数强干扰进行进一步的频率筛选;考虑发射和接收设备的频率间隔等信号特性,对幅度筛选阶段所得干扰的安全裕度进行修正,排除修正后安全裕度小于阈值电平的干扰组;经频率筛选后保留的干扰发生干扰的可能性很大,必须进一步进行详细分析,考虑时间、距离、方向等因素,对产生电磁干扰的时间相关性、极化匹配、天线增益等方面进行更详细计算,确定最终干扰概率分布;最后进行性能分析,将预测干扰电平与性能标准联系起来。

1.4 电磁兼容课程的特点

电磁兼容学科是一门新兴的综合性学科,理论体系还在不断发展和完善过程中。它涉及的基础知识比较广,有一定的难度,需要初学者认清其特点,尽快入门。

1. 电磁兼容以电磁场理论为基础

电磁兼容研究电磁干扰的规律及抑制措施,而大部分电磁干扰是以“电磁场”的形式出现并相互作用,对其分析必然要采用电磁场理论的方法和结论,许多电磁兼容分析和计算都以电磁场计算公式为基础,经过简化和演绎而形成,因此,电磁兼容原理是以电磁场理论为基础的。许多专业的学生和工程技术人员没有系统地学习电磁场理论,在学习掌握电磁兼容原理时会有一定困难。

2. 电磁兼容是一门综合性边缘学科

电磁兼容学科涵盖几乎所有的现代工业领域,如电力、能源、通信、交通、金融、计算机、航空、军工、医疗等,涉及多学科知识,如数学、电磁场理论、天线与电波传播、电路

理论、信号分析、通信理论、材料科学及生物医学等，是一门综合性的边缘学科。因此，掌握电磁兼容需要多学科知识基础。

3. 电磁兼容实践性较强

电磁兼容是一门实践性很强的应用学科，特别重视实践经验和技能，因干扰的确定、抑制技术的选择、参数选取很大程度上取决于设计者的经验、水平，要掌握并灵活运用电磁兼容技术需要设计者不断地去实践，积累经验。

4. 大量引用无线电技术的概念和术语

电磁兼容是从无线电技术的抗电磁干扰问题开始发展起来的，随着电子技术的飞速发展和广泛应用，其已不再局限于无线电领域，而是面向所有的电气、电子设备或系统，但其理论大量沿用了无线电技术的概念和术语。例如，电气设备对骚扰信号的响应称为“敏感”，导线和导线间的相互耦合有时称为“串扰”等。这些概念和术语，对于电气、控制等专业的学生都十分生疏，需要理解和掌握其物理本质。

5. 计量单位的特殊性

电磁兼容性工程中最常用的度量单位是分贝（dB）。在电学和电工技术中，功率 P 、电压 U 、电流 I 单位一般都用 W、V、A，而在电磁兼容性工程中却以 dBW、dBV、dBA 等单位，这会使初学者在定量分析时感到生疏和困惑。

对于两个功率的比值 P_2/P_1 ，用分贝表示时为 $10\lg(P_2/P_1)$ ；对于两个电压的比值 U_2/U_1 ，用分贝表示时为 $20\lg(U_2/U_1)$ ；对于两个电流的比值 I_2/I_1 ，用分贝表示时为 $20\lg(I_2/I_1)$ 。用分贝表示，有两方面的便利：一是由于当阻抗恒定时功率正比于电压或电流的二次方，因而将功率、电压或电流比值用分贝表示时其结果是相等的，即 $10\lg(P_2/P_1) = 10\lg(U_2/U_1)^2 = 20\lg(U_2/U_1) = 10\lg(I_2/I_1)^2 = 20\lg(I_2/I_1)$ ；二是当不同比值的数量级相差悬殊时，其分贝值的变化范围不大，常介于 $-100 \sim +100$ 之间。

在电磁兼容性工程中，功率、电压、电流用分贝表示时，其单位换算关系有 $P_{\text{dBW}} = 10\lg P$ ， $P_{\text{dBm}} = P_{\text{dBmW}} = 10\lg(P/10^{-3})$ ， $U_{\text{dBV}} = 20\lg U$ ， $U_{\text{dBmV}} = 20\lg(U/10^{-3})$ ， $U_{\text{dB}\mu\text{V}} = 20\lg(U/10^{-6})$ ， $I_{\text{dBA}} = 20\lg I$ ， $I_{\text{dBmA}} = 20\lg(I/10^{-3})$ ， $I_{\text{dB}\mu\text{A}} = 20\lg(I/10^{-6})$ 等。例如 $1\text{mW} = 0\text{dBm}$ 、 $2\text{mW} = 3\text{dBm}$ 、 $3\text{mW} = 5\text{dBm}$ 、 $2\mu\text{V} = 6\text{dB}\mu\text{V}$ 、 $3\mu\text{V} = 10\text{dB}\mu\text{V}$ 、 $\sqrt{2}\mu\text{A} = 3\text{dB}\mu\text{A}$ 、 $0.5\mu\text{A} = -6\text{dB}\mu\text{A}$ 、 $10\mu\text{A} = 20\text{dB}\mu\text{A}$ 。不同单位的换算还有 $P_{\text{dBmW}} = P_{\text{dBW}} + 30$ ， $U_{\text{dBmV}} = U_{\text{dBV}} + 60$ ， $U_{\text{dB}\mu\text{V}} = U_{\text{dBV}} + 120$ 等；如果负载为 50Ω ，则 $P = U^2/50$ ，电压与功率的换算有 $U_{\text{dBV}} = P_{\text{dBW}} + 17$ ， $U_{\text{dBV}} = P_{\text{dBm}} - 13$ ， $U_{\text{dB}\mu\text{V}} = P_{\text{dBm}} + 107$ 等。

思 考 题

1. 为什么要对产品进行电磁兼容设计？
2. 电磁干扰有什么危害？
3. 电磁兼容学科的研究主要涉及哪些内容？
4. 电磁兼容设计方法经历了哪几个阶段？
5. 学好电磁兼容课程应注意其哪些特点？
6. 在电磁兼容领域，为什么总是用分贝（dB）的单位描述？
7. 将下列功率比值转换为分贝：

2:1, 3:1, 4:1, 5:1, 6:1, 7:1, 8:1, 9:1, 10:1, 20:1, 30:1, 100:1, 1000000:1。

8. 将下列电压比值转换为分贝:

2:1, 3:1, 4:1, 5:1, 6:1, 7:1, 8:1, 9:1, 10:1, 20:1, 30:1, 100:1, 1000000:1。

9. 将下列电压、电流或功率分别换算成 $\text{dB}\mu\text{V}$ 、 $\text{dB}\mu\text{A}$ 或 dBm :

0.1V, 23mV, 670 μV , 1mA, 21 μA , 48mW, 1 μW 。

10. 假定负载为 50Ω , 将如下量值转换为伏特:

26 $\text{dB}\mu\text{V}$, -40 $\text{dB}\mu\text{V}$, 0 dBm , 3 dBm , -10 dBm 。

第2章 电磁兼容基本原理

内 容 提 要

本章是全书的重点,也是学习后续章节的基础。首先,给出了电磁兼容中的几个定义,讲解构成电磁干扰的三要素,介绍了各种电磁骚扰源,然后,重点分析电磁骚扰的传播机理、影响因素及抑制方法,最后,简单介绍保证电磁兼容性的方法。

2.1 电磁兼容的基本概念

2.1.1 有关电磁兼容的定义

电磁兼容性 (Electromagnetic Compatibility, EMC), 按国家标准 GB/T 4365—2003《电工术语 电磁兼容》的定义: 设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。

国际电工委员会 (IEC) 的定义: 电磁兼容是设备的一种能力, 设备在其电磁环境中能完成它的功能, 而不至于在其环境中产生不允许的干扰。

美国电气电子工程师学会 (IEEE) 的定义: 一个装置能在其所处的电磁环境中满意地工作, 同时又不向该环境及同一环境中的其他装置排放超过允许范围的电磁扰动。

上述 3 个电磁兼容的定义虽措辞不同但反映的都是设备或系统承受电磁骚扰时能正常工作, 同时又不产生超过规定限值的电磁骚扰。

电磁兼容 (学): 有关电磁兼容性研究和应用的学科称为电磁兼容 (学)。该学科的内容十分广泛, 几乎涉及各个行业部门, 如电力、电子、通信、交通、航空航天、国防工业、医疗等, 与工业生产、人民生活密切相关, 实用性很强。电磁兼容学科涉及的理论基础包括数学、电路和电磁场理论、信号分析、通信理论、材料科学和生物医学等, 是一门综合性的边缘学科。

电磁环境 (Electromagnetic Environment): 存在于给定场所的所有电磁现象的总和。

电磁噪声 (Electromagnetic Noise): 一种明显不传递信息的时变电磁现象, 它可能与有用信号叠加或组合。电磁噪声通常是脉动的或随机的, 但也可以是周期的。

无用信号 (Unwanted Signal, Undesired Signal): 可能损害有用信号接收的信号。

电磁骚扰 (Electromagnetic Disturbance): 可能引起装置、设备或系统性能降低或对有生命、无生命物质产生损害作用的电磁现象。电磁骚扰可以是电磁噪声、无用信号或有用信号, 也可以是传播媒介自身的变化。

电磁干扰 (Electromagnetic Interference, EMI): 由电磁骚扰引起的设备、系统或传播通道的性能下降。电磁骚扰和电磁干扰这两个术语经常容易混淆, 其实它们是同一事物的两个

不同侧面,前者是指电磁能量的发射过程,后者则强调电磁骚扰造成的结果。

性能降级 (Degradation of Performance): 装置、设备或系统的工作性能与正常性能的非期望偏差。

抗扰性 (Immunity of Disturbance): 装置、设备或系统面临电磁骚扰而不降低运行性能的能力。

电磁敏感性 (Electromagnetic Susceptibility, EMS): 在存在电磁骚扰的情况下,装置、设备或系统不能避免性能降低的能力。抗扰性与电磁敏感性是同一性能的正反两方面的不同说法,敏感性高则意味着抗扰性低。

(时变量的) 电平 (Level of a Time Varying Quantity): 用规定方式在规定时间间隔内求得的诸如功率或场参数等时变量的平均值或加权值。电平可用对数来表示,例如相对于某一参考值的分贝数。

发射电平 (Emission Level): 用规定方法测得的由特定装置、设备或系统发射的某给定电磁骚扰电平。

抗扰性电平 (Immunity Level): 将某给定电磁骚扰施加于某一装置、设备或系统而其仍能正常工作并保持所需性能等级时的最大骚扰电平。

电磁兼容电平 (Electromagnetic Compatibility Level): 预期加在工作于指定条件的装置、设备或系统上的规定的最大电磁骚扰电平。

发射限值 (Emission Limit): 规定的电磁骚扰源的最大发射电平。

抗扰性限值 (Immunity Limit): 规定的最小抗扰性电平。

骚扰限值 (Limit of Disturbance): 对应于规定测量方法的最大电磁骚扰允许电平。

干扰限值 (Limit of Interference): 电磁骚扰使装置、设备或系统最大允许的性能降低。

发射裕量 (Emission Margin): 装置、设备或系统的电磁兼容电平与发射限值之间的差值。

抗扰性裕量 (Immunity Margin): 装置、设备或系统的抗扰性限值与电磁兼容电平之间的差值。

兼容性裕量 (Compatibility Margin): 装置、设备或系统的抗扰性电平与骚扰源的发射限值之间的差值。发射电平、抗扰性电平、兼容性电平和发射限值等的关系如图 2-1 所示。

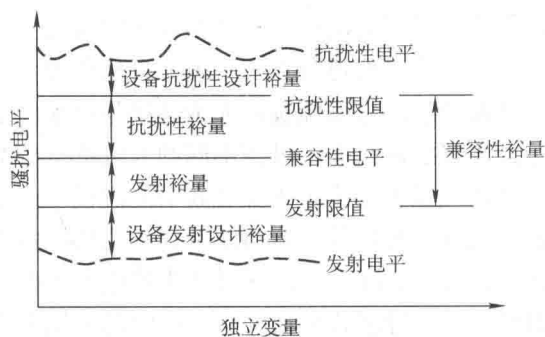


图 2-1 各电平之间的关系

2.1.2 电磁干扰三要素

电磁兼容是研究电磁干扰问题。在任何系统中,要形成电磁干扰必须具备 3 个基本条件(见图 2-2),即骚扰源,对骚扰敏感的接收单元,把能量从骚扰源耦合到接收单元的传输通道,称为电磁干扰三要素。

我们在工作、生活中观察到的各种干扰现象,都可以归



图 2-2 电磁干扰三要素

结出上述三个要素。下面列举一些例子,如在 CRT 显示器旁使用手机,显示器的图像会受到影响,这里手机是骚扰源,CRT 显示器是敏感单元,耦合通道是空间辐射;驾驶汽车经过高压输电线附近时,车载收音机中会听到干扰噪声,这里输电线是骚扰源,收音机是敏感单元,耦合通道是空间电场或磁场(取决于收音机的接收天线结构);在家里使用吸尘器时,电视图像上出现雪花,这里吸尘器中的电动机是骚扰源,电视机是敏感单元,耦合通道是通过电源线的传导;车间内投入大的负载引起计算机重启,这里投运负载是骚扰源、计算机是敏感单元,耦合通道是通过电源线的传导。对于任何一个干扰现象必然存在电磁干扰三要素,且三要素缺一不可。

电路受干扰的程度可用下式描述:

$$S = \frac{WC}{I} \quad (2-1)$$

式中, S 为电路受干扰的程度; W 为骚扰源的强度; C 为骚扰源通过某种途径到达被干扰处的耦合因素; I 为被干扰电路的抗干扰性能。

在系统设计、制造、安装和调试中,消除三要素中的任何一个因素,干扰即可消除。因此,电磁兼容设计的基本出发点就在于破坏上述 3 个条件中的任何一个或几个。

2.2 电磁骚扰源

2.2.1 电磁骚扰的一般分类

电磁场存在于宇宙中,电磁骚扰无处不在,要找出影响最大、威胁最严重的电磁骚扰,并对其进行特定的防范,使之不致影响设备、系统的正常运行。

电磁骚扰一般可分为两大类:自然骚扰和人为骚扰。自然骚扰是指来源于自然现象而非人工装置产生的电磁骚扰;人为骚扰是指来源于人工装置的电磁骚扰。

人为骚扰源很多,可按不同的方法进行分类。按其属性可分为功能性骚扰和非功能性骚扰。功能性骚扰是指设备实现其功能过程中产生的有用电磁能量对其他设备造成的干扰,如广播、电视、通信等;非功能性骚扰是指设备在实现自身功能的同时伴随产生或附加产生的副作用,如开关闭合或切断时产生的电弧放电干扰。按电磁骚扰耦合方式可分为传导骚扰和辐射骚扰。传导骚扰是指经导线传输的无用电磁能量,辐射骚扰是指从电子设备或其连接线泄漏到空间的无用电磁能量,这些能量如被接收则形成干扰。按骚扰波形可分为连续波、周期脉冲波和非周期脉冲波。按电磁骚扰信号的频谱宽度可分为宽带骚扰和窄带骚扰。骚扰信号的带宽大于指定接收器带宽的称为宽带骚扰源,反之称为窄带骚扰源。根据骚扰信号的频率范围可分为甚低频骚扰(30Hz 以下)、工频与音频骚扰(50Hz 及其谐波)、载频骚扰(10~300kHz)、射频及视频骚扰(300kHz~300MHz)、微波骚扰(300MHz~100GHz)。

2.2.2 自然骚扰源

自然骚扰源,是由于大自然现象所造成的各种骚扰源,包括大气噪声源、天电噪声源和热噪声源等。大气噪声源包括雷电放电和局部自然骚扰源。天电噪声源包括太阳噪声和宇宙噪声。