

独立电力系统及其 电力电子装置的电磁兼容

马伟明 张磊 孟进 / 著



科学出版社
www.sciencep.com

独立电力系统及其电力电子 装置的电磁兼容

马伟明 张 磊 孟 进 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书总结了作者十多年来对独立电力系统电磁兼容的研究成果,并吸收了近年来国内外关于电磁兼容性研究的成果,针对从事该领域工作的实际需要,对电力电子装置及其构成的独立电力系统电磁兼容性的各方面问题作了较全面、系统、深入的描述,重点阐述了传导 EMI 的测量、电力电子设备和系统中的传导 EMI 分析与 EMI 抑制、系统级电磁兼容性分析与建模及系统级电磁兼容性故障诊断等。本书通过大量实例来说明实际干扰的情况及消除办法,特别是系统级电磁兼容分析中关于干扰源的描述和干扰途径的确定等,是涉及独立电力系统及其电力电子装置中电磁兼容性各个方面的一部专著。

本书适用于高等院校和科研机构中从事电磁兼容和电力电子教学与研究工作的教师、研究生、本科生及相关领域的工程技术人员。

图书在版编目 (CIP) 数据

独立电力系统及其电力电子装置的电磁兼容/马伟明,张磊,孟进著.

—北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-019878-5

I. 独… II. ①马…②张…③孟… III. ①电力系统-电磁兼容性②电力装置-电子设备-电磁兼容性 IV. TM71

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 136534 号

责任编辑:姚庆爽 于宏丽/责任校对:陈玉凤

责任印制:刘士平/封面设计:陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年9月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2007年9月第一次印刷 印张: 19 1/4

印数: 1—3 000 字数: 377 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

前 言

随着大功率电力电子器件的发展,电力电子装置在国民经济和国防建设的诸多领域应用越来越广泛,尤其是由电力电子装置构成的各种独立电力系统应用日趋普及。由于该类装置及系统中的电磁干扰主要为传导干扰,从事该领域研究的技术人员普遍遇到的一个技术难题就是传导干扰的定量预测与有效抑制问题。实际上,人们在日常使用或测试电力电子装置及其构成的系统时,在发现其电磁干扰(EMI)之前,往往不太重视电磁兼容(EMC)问题的存在。等到问题出现并影响使用之后,才采用 EMC 校正装置加以抑制。通常为此增添了经费开支,也难于获得令人满意的效果。

近十余年来,越来越多的技术人员致力于 EMC 问题的研究,在许多杂志和学术研讨会上发表了不少与 EMC 相关的论文,从不同角度探寻 EMI 的作用机理、影响因素和抑制方法。为了尽早地确认和解决 EMI 问题,电力电子设备与系统的设计、开发、生产和使用等方面的技术人员希望掌握设备与系统级电磁干扰分析方法及一些实用噪声削减技术,特别是由电力电子装置组成的独立电力系统中电磁干扰的描述、分析及系统的 EMC 设计方法。为了适应这些需求,本书系统地总结了作者十多年来对独立电力系统 EMC 的研究成果,特别是关于设备级和系统级电磁兼容分析中干扰源和干扰途径的分析方法与建模技术,以及电磁兼容性故障诊断等成果;并收集了国内外一些有关电力电子设备中 EMC 成果,如 Laszio Tihanyi 关于 EMC 滤波器的设计及瞬变干扰能量计算等成果,希望能对广大工程技术人员有所帮助。

本书是我与张磊副教授和孟进博士的合作成果,尤其是张磊副教授为本书的整理与编写倾注了大量的心血,提出了许多建设性意见。在本书写作的全过程中得到同事赵治华教授的大力帮助,他为书中公式的检验做了大量深入细致的工作;潘启军博士参与了全书的校对工作,特别是在面电流测量方法的描述等方面做出了贡献;此外科学出版社为本书的出版做了大量细致的工作,在此谨致衷心的感谢。

本书得到了国家自然科学基金委员会电力系统电磁兼容创新研究群体科学基金的资助,在此表示由衷的感谢。

由于作者的学术水平和实际经验都有限,不当之处在所难免,殷切希望广大读者批评指正。

马伟明
海军工程大学

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 电磁兼容的定义	1
1.2 电磁兼容的标准化进程	2
1.3 电磁兼容的研究领域	4
1.4 电力电子系统中电磁兼容研究的发展	6
1.5 本书的内容安排	6
第 2 章 电磁干扰描述	8
2.1 常见的电磁干扰源及其特性	8
2.1.1 自然干扰源	8
2.1.2 人为干扰源	9
2.2 电磁干扰的作用途径及分析方法	10
2.2.1 传导干扰	11
2.2.2 辐射干扰	12
2.3 电磁干扰的分类	13
2.3.1 按频率成分进行分类	13
2.3.2 按干扰性质分类	15
2.3.3 按传输方式分类	17
第 3 章 传导电磁干扰的测量	18
3.1 信号的频域和时域特征	18
3.2 EMC 标准中常用的基本单位	19
3.3 电磁兼容测试中常用的仪器	21
3.3.1 EMI 接收机	21
3.3.2 频谱分析仪	23
3.3.3 信号源和功率放大器	24
3.3.4 测量附属设备	24
3.4 干扰电压测量	26
3.4.1 差模干扰电压测量	29
3.4.2 共模干扰电压测量	30
3.4.3 干扰电压测量时的一些问题	32

3.5 干扰电流测量	32
3.5.1 电流探头	32
3.5.2 退耦电容	33
3.5.3 功率吸收钳	35
3.6 面电流测量方法	35
3.6.1 感应线圈测量方法	35
3.6.2 表面磁场测量方法	36
3.7 脉冲类干扰的测量	38
3.7.1 脉冲类干扰的参数	38
3.7.2 瞬变脉冲强度的测量	39
第4章 常见电力电子设备的电磁干扰	41
4.1 电力电子电路中的 EMI	41
4.1.1 电力半导体器件产生的 EMI	41
4.1.2 电力电子电路中的电磁干扰	43
4.1.3 脉冲类信号的频谱估算	46
4.2 整流电路产生的 EMI 预测	53
4.2.1 可控整流电路产生的 EMI 计算	53
4.2.2 高频整流电路产生的 EMI	67
4.3 斩波器产生的 EMI	78
4.3.1 斩波器电磁干扰模型	78
4.3.2 IGBT 开关暂态建模	80
4.4 逆变器产生的 EMI 分析	85
4.4.1 逆变器干扰源的开关函数描述	85
4.4.2 PWM 逆变器干扰计算方法	87
第5章 电力电子系统的传导干扰分析	88
5.1 系统电磁干扰的分析方法	88
5.2 多整流器系统中的传导干扰预测	90
5.2.1 多个相控整流器系统的干扰预测	90
5.2.2 多 PWM 高频整流器系统的干扰预测	93
5.3 电力推进（整流-逆变-电动机）系统的电磁干扰分析	95
5.3.1 系统结构	95
5.3.2 逆变系统干扰源计算	96
5.3.3 差模干扰等效电路	97
5.3.4 共模干扰等效电路	101
5.4 开关电源系统传导干扰分析	106
5.4.1 干扰耦合通道辨识	107

5.4.2 基本干扰耦合模型	113
第6章 抑制电磁干扰的措施	118
6.1 对电磁干扰源采取的抑制措施	118
6.1.1 继电器系统的噪声抑制	118
6.1.2 电力半导体开关的噪声抑制	123
6.1.3 变压器的屏蔽	124
6.1.4 电容滤波	126
6.1.5 其他减小干扰发射的办法	129
6.2 滤波元件和滤波电路	132
6.2.1 滤波元件的选择与设计	132
6.2.2 滤波电路的选择与测量	137
6.3 EMI 滤波器的设计	154
6.3.1 按插入损耗设计 EMI 滤波器	154
6.3.2 最坏情况插入损耗的计算	162
6.3.3 阻抗不匹配时的设计	164
6.3.4 EMI 滤波器元件高频特性的影响	172
6.3.5 EMI 滤波器的布置	173
第7章 电磁敏感度分析	176
7.1 电磁干扰源的等效与 EMS 测试信号	176
7.1.1 浪涌电压	176
7.1.2 IEC 规定的 EMS 测试信号	179
7.1.3 GJB 中规定的 EMS 测试信号	187
7.2 系统内部的 EMI 耦合及其抑制技术	189
7.2.1 公共阻抗耦合	189
7.2.2 电磁场耦合	194
7.2.3 电磁耦合抑制方法	199
7.3 瞬变干扰能量计算	209
7.3.1 拉普拉斯变换中根的计算方法	210
7.3.2 脉冲类干扰的能量计算公式	214
7.3.3 能量密度函数的绘制和应用	222
第8章 系统电磁兼容性分析与建模	233
8.1 系统电磁兼容性分析概述	233
8.1.1 电磁兼容分析方法	234
8.1.2 电磁兼容模型描述	235
8.2 系统电磁兼容性的仿真分析	237
8.2.1 电磁兼容预测分析的步骤和作用	237
8.2.2 系统电磁兼容性分析原理框图	238

8.3 系统电磁兼容性分析中的建模技术	240
8.3.1 EMI 源的建模	240
8.3.2 接地系统建模分析	252
8.3.3 电磁耦合计算模型	259
8.4 系统电磁兼容分析中的简化	271
8.4.1 灵敏度应用于 EMI 研究	272
8.4.2 干扰灵敏度的概念	273
8.4.3 用灵敏度方法建立 EMI 模型	274
第 9 章 系统电磁兼容性故障诊断	284
9.1 概述	284
9.2 电磁兼容故障诊断方法	285
9.3 电磁兼容故障诊断实例	289
9.3.1 隐性故障诊断举例	289
9.3.2 显性故障诊断举例	291
参考文献	295
附录	297
附录一 主要符号表	297
附录二 缩略术语表	298

第 1 章 概 述

随着现代科学技术的发展,各种电子、电气设备获得了越来越广泛的应用,而这些设备的正常工作都离不开电源,电源通常都是通过电力电子设备进行电能变换后得到的。早期人们只关注设备所实现的功能,而没有考虑过设备所带来的负面影响。近几十年来,这些负面影响越来越严重,有些已经成为国际化的问题,因此有必要去研究它们,以减少或消除这些不良影响。

电磁环境污染就是这样一个问题。实际运行中的电子、电气设备大多伴随着电磁能量的转换,高密度、宽频段的电磁信号构成了复杂的电磁环境,强电磁干扰信号会妨碍电气、电子设备的正常运行。复杂的电磁环境对电子系统提出了更为严峻的要求,即如何提高现代电子、电气设备或系统在复杂电磁环境中的生存能力,保证设备的正常运行。由此产生了电磁兼容性的概念,并形成了一门新的学科——电磁兼容。本章将介绍电磁兼容的定义、电磁兼容的标准化进程、电磁兼容的研究发展概况等。

1.1 电磁兼容的定义

电磁兼容 (electromagnetic compatibility, EMC) 直译为电磁兼容性。按国标 GB4365 的说明,当 EMC 指设备或系统的性能参数时,称为“电磁兼容性”,而当 EMC 是指一门学科、一个领域时,则应称为“电磁兼容”。通常为了书写方便,并不对其加以区别,而是统称为电磁兼容。

按 GJB72—1985《电磁干扰与电磁兼容性术语》中的定义,电磁兼容性是指“设备(系统、分系统)在共同的电磁环境中能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(系统、分系统)因受其电磁发射而导致或遭受不允许的降级”。这里电磁环境电平是指受试设备不通电时,在规定的实验地点和时间内,存在于周围空间的辐射和电网内传导信号及噪声的量值,它们是由人为及自然干扰源的电磁能量共同形成的。从以上电磁兼容的定义中可以看出,电磁兼容包括两方面的内容,一方面设备(系统、分系统)能够在规定的电磁环境下正常工作,即需要满足电磁敏感性 (electromagnetic sensitivity, EMS) 要求,另一方面设备(系统、分系统)本身产生的电磁干扰 (electromagnetic interference, EMI) 也不能干扰其他设备的工作,即需要满足电磁发

射 (electromagnetic emission, EME) 要求。相应地, 电磁兼容的研究也包括这两方面的研究, 并可以进一步按干扰传播方式划分, 如图 1-1 所示。

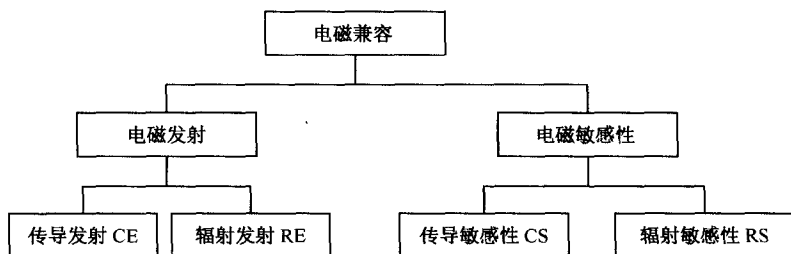


图 1-1 电磁兼容性的研究

1.2 电磁兼容的标准化进程

电磁兼容研究最早是从研究电磁干扰开始的, 起源可以追溯到 19 世纪末, 伴随着无线电通信产生。1881 年, 英国科学家 Heaviside 写了《论干扰》一文, 是早期研究干扰的重要文献, 随后在德国、英国都有人研究了通信系统中的干扰问题。到了 20 世纪 20 年代, 随着无线电广播技术的发展, 人们发现广播对通信的干扰日益严重, 同时接收广播时也常常受到一些其他设备的干扰。几个发达国家首先意识到了控制电磁干扰问题的重要性, 决定成立专门的委员会以控制无线电广播中的干扰。为此, IEC (国际电工委员会) 和 UIR (国际广播联盟) 1934 年在巴黎组建了一个特别委员会——国际无线电干扰特别委员会 (CISPR) 以研究无线电干扰的测量方法、测量仪器及所允许的限值。CISPR 的成立标志着人们开始系统地研究电磁干扰和抗干扰问题。CISPR 成立的初衷是要保护无线电广播免受干扰, 故最初只在广播频段内 (160~1605kHz) 发展了一系列的测试方法, 制造了相应的测试仪器, 并通过出版物的形式规定了这一范围内的干扰限值。在第二次世界大战中, CISPR 停止了技术工作, 但在战争中军队大量使用了军用通信设备与雷达设备, 由于这些设备的工作频率超出了正常的无线电广播频率, 从而推动了军用标准的发展, 并将电磁兼容所关心的频率上限提高到了 20MHz。第二次世界大战后, 随着航天技术和卫星技术的发展, 到 20 世纪 60 年代, 电磁兼容所关心的频率上限进一步扩展到了 1GHz。CISPR 则在第二次世界大战后重建, 并在 1973 年进行了重组。对车辆、家电、电动工具、工科医 (工业、科技、医疗) 设备、高压设备等的电磁干扰测量方法及限值提出了一系列标准 (包括射频辐射和传导), 其涉及的频率范围为 9kHz~18GHz。20 世纪 70 年代后, 随着半导体器件的广泛使用, 对于干净电源的要求变得更加严格了,

即需要控制电网上的电磁干扰,为此 IEC 专门成立了 TC77 分会以研究电网上的干扰。这样从频率上来说,对电磁干扰的研究就向下扩展到了工频的范围。

起初人们认为电磁兼容研究的根本工作就是制定电磁干扰的测量方法标准和确定国际通用的电磁噪声限制标准。但到了 20 世纪 40 年代初期,为了解决军用设备的干扰问题,保证设备和系统的高可靠性,人们开始研究抗扰度,并提出了电磁兼容性的概念,从而使电磁兼容研究从单纯的排除干扰逐步发展成为从理论上、技术上全面控制用电设备在其电磁环境中正常工作能力保证的系统工程,进而使电磁兼容成为一门新兴的综合性学科。1967 年美军标 MIL-STD-462 “EMI 特性测量方法”及 1968 年 MIL-STD-461 “控制电磁干扰的电磁发射和敏感度要求”的发布标志着电磁兼容研究进入了一个新的阶段。民用设备的敏感性研究方面则起步较晚。直到 20 世纪 60 年代后期,晶体管和集成电路的大量应用使得民用设备不断向小型化和集成化方向发展,人们才认识到不能仅仅靠控制干扰来达到电磁兼容,还必须要求设备具有一定的抗干扰能力,即设备必须达到敏感性要求,为此 IEC 中的 TC65 (工业过程测量与控制设备专业委员会)工作组从 1979 年就开始研究了工业过程测量与控制设备的电磁敏感度要求及测试方法,并在 1984 年提出了 IEC801 标准。90 年代,它与 TC77 委员会合作,在 IEC801 标准基础上建立了 IEC61000-4 标准。

从国际范围看,电磁兼容标准的制定已经历了 60 多年的发展历程,包括基础标准、通用标准及产品类标准等,已基本形成了一个完整的标准体系,如图 1-2 所示。其中基础标准只就环境、试验方法、试验仪器等给出定义和描述,不涉及具体产品,也不给出限值或判据,但其中定义的术语和方法是编制其他各级电磁兼容标准的基础。属于基础标准的有 IEC50 (161) 《电磁兼容性术语》、

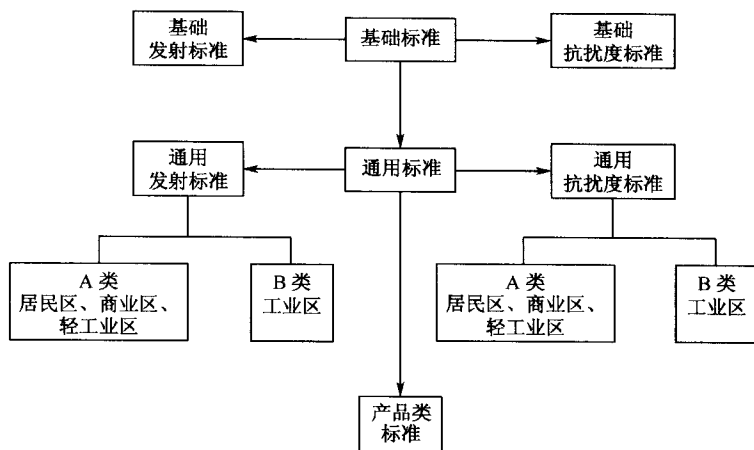


图 1-2 国际电磁兼容标准体系

基础性发射标准 CISPR16《无线电干扰和抗扰度测量》等。

通用标准对给定环境中的所有产品提出一系列最低的电磁兼容性要求或限值。如 IEC61000-6 系列标准就属于通用标准, 其中

IEC61000-6-1: 住宅、商业和轻工业环境的抗扰度要求;

IEC61000-6-2: 工业环境的抗扰度要求;

IEC61000-6-3: 住宅、商业和轻工业环境的发射标准;

IEC61000-6-4: 工业环境的发射标准。

产品类标准是针对特定的产品类别, 规定了对这些产品的电磁兼容性要求及测量方法。如 CISPR 出版物大部分都是属于产品类标准, 如 CISPR20《声音和电视广播接收机及有关设备抗扰度的测量方法和限值》等。

国内从 20 世纪 80 年代起也开始陆续建立了相应的电磁兼容标准。首先是军工部门在 1982 年参照美军标 MIL-STD-461B 和 MIL-STD-462B 开始制定我军标准, 并于 1986 年颁布了三军通用标准 GJB151—1986 和 GJB152—1986。随后国家质量技术监督总局于 1985 年成立了全国无线电干扰标准化技术委员会, 并参照 CISPR 和 IEC 标准陆续制定了相应的行业标准和国家标准。目前我国的电磁兼容标准大部分都跟踪了国际标准, 如 CISPR 出版物已大部分转化成为了我国的国家标准, 而 1997 年制定了新的军用标准 GJB151A—1997 和 GJB152A—1997 则参照了美军标 MIL-STD-461D 和 MIL-STD-462D。这些标准的颁布制定, 为我国产品出口到国际市场奠定了电磁兼容方面的基础, 也为提高我国的电磁兼容水平、改善电磁环境创造了条件。

1.3 电磁兼容的研究领域

电磁兼容经过长期的发展, 研究的内容已从最早的简单的制定标准发展成为研究各类干扰特性的综合性学科, 研究领域也从早期的通信系统扩展到几乎所有现代工业, 如电力、电源、通信、交通、计算机、军工、医疗等。但作为一门学科, 无论在哪个领域研究电磁兼容, 都可以概括为以下八个研究方向。

1. 电磁干扰特性及其传播途径的研究

电磁干扰源多种多样, 包括强电磁脉冲 (EMP)、雷电及静电放电 (ESD)、浪涌、乱真及谐波等, 它们可以通过寄生参数耦合、电磁辐射、导线传输等各种方式传播。为了控制电磁干扰, 就必须弄清干扰的特性和它的传播方式。如干扰是属窄带干扰还是宽带干扰, 是连续的还是瞬变的, 是通过传导传播还是通过辐射传播等。

2. 电磁干扰抑制技术的研究

干扰抑制就是采用各种措施从电路、结构、工艺和安装等方面抑制电磁干扰。如对各种屏蔽、滤波、接地技术的研究、新型防护材料的研制等都属于干扰抑制技术的研究。

3. 电磁兼容性设计的研究

这里电磁兼容性设计指的是电磁兼容性费效比的综合分析,所谓费效比分析就是对采取的各种电磁兼容性措施进行成本和效能的分析比较。

4. 电磁兼容性分析与预测方法的研究

采用何种途径来分析预测系统的电磁兼容性。目前电磁兼容性分析与预测的主要方法有缩比模型法、经验法及计算机仿真法及综合分析法等。

5. 电磁兼容性测试和实施方法的研究

由于电磁环境很复杂、频率范围宽、不同的电磁干扰特性又各不相同,电磁兼容性测试不但项目繁多,而且还在不断地深化和扩展中。这就要求对电磁兼容性的测试方法进行研究以不断改进和完善测试技术,还包括各种电磁传感器、探头和天线的研究。

6. 电磁兼容规范和标准的研究

电磁兼容规范、标准是电磁兼容性设计的主要依据。通过制定规范、标准来控制设备和系统的电磁发射和敏感度,从而使系统和设备相互干扰的可能性大大下降,达到防患于未然。

7. 电磁兼容频谱利用的研究

无线电频谱是一个有限的资源,如何合理利用无线电频谱,防止频谱污染,已引起各国的高度重视。为了有效地管理和合理使用频谱,无论是在国际还是在国内,现在都已有了专门的管理机构。

8. 电磁危害的研究

电磁干扰除影响系统和设备的正常工作外,严重的电磁干扰还可能损坏设备。另外,电磁干扰对人体健康也会造成有害的影响,因此电磁危害的研究也属于电磁兼容性研究范畴。例如,电磁环境和生物效应、数字电路和计算机泄露等的研究。其中,最基本的研究就是对电磁干扰特性的研究,只有知道了干扰的特

性才能分析其危害并采取相应的措施抑制干扰。

1.4 电力电子系统中电磁兼容研究的发展

虽然很早就已开始了电磁兼容的研究工作,然而大部分工作都集中于通信系统中的辐射干扰。在早期研究中,主要的电磁干扰源是一些大功率的电机及一些机动车辆的点火装置,故电磁兼容的研究对象也是针对这些装置的。到了20世纪70年代,电力电子装置被广泛使用以替换以前的汞弧整流器,人们才开始注意到电力电子系统中的电磁干扰问题。进入20世纪80年代后,随着电力电子技术的发展,功率器件集成化、集成电路功率化,出现了各种新型电力电子器件,同时电力电子设备的开关频率越来越高,功率越来越大,控制线路也越来越复杂。目前电力电子设备中开关器件的 du/dt 已达每微秒数十千伏, di/dt 也已达每微秒数千安,开关的工作频率也已达到了数十千赫兹。若不采取措施,电力电子设备带来的传导和辐射干扰将严重影响电网的供电品质,因此自20世纪90年代中期起,世界各国都对电子产品的EMC制定了强制性标准,如欧共体规定的从1996年1月1日起实施的《欧共体成员国关于电磁兼容法律性指令》等,各国学者也开始对电力电子系统中干扰的产生机理、抑制方法、干扰测量等进行了研究。

相对于国外的研究而言,国内的电磁兼容研究主要集中在一些测试技术及抑制措施上面,对电力电子系统的电磁兼容研究起步较晚,直到20世纪90年代才开始。

尽管国内外学者在研究电力电子系统中的噪声源、EMI抑制技术、仿真和建模及EMI测量方面进行了许多研究,并取得了一些成果,但由于影响系统电磁兼容的因素很多并且电力电子技术仍在不断发展,研究成果还远未达到实用化地步,并且大多数研究都是针对特定的电力电子装置而开展的,不具有普遍的适用性。因此,从事电力电子技术研究的人员还往往需要自己解决面临的电磁干扰问题。本书就是从电磁兼容工程实践中择其要点,为工程技术人员提供一个通用的处理电力电子系统电磁兼容问题的准则与方法。

1.5 本书的内容安排

本书重点讨论了独立电力系统中电力电子装置中的干扰计算,并介绍了如何分析和解决独立电力电子系统中的电磁兼容。全书内容共分9章,首先在第1~3章介绍了电磁兼容的发展、电磁干扰源的描述、干扰的耦合通道及电磁兼容的测量等一些基础知识,然后第4、5章详细介绍了如何预测和分析电力电子系统

中的电磁干扰，第6章则介绍了在电力电子系统中抑制干扰时所要考虑的问题，第7章介绍了电磁敏感度的相关知识，第8、9章介绍了如何从系统的角度来分析和解决电磁兼容问题。

第 2 章 电磁干扰描述

在电磁兼容中，核心问题就是研究电磁干扰及其传播特性，只有了解了干扰的特性，才能进一步考虑系统的电磁兼容性。本章在 2.1 节中介绍了常见的电磁干扰源，然后在 2.2 节中介绍了电磁干扰的传播途径，并重点介绍了传导干扰分析的基本方法，在 2.3 节中则详细介绍了电力电子系统中常见的干扰类型。

2.1 常见的电磁干扰源及其特性

干扰源、传播途径及敏感设备是解决电磁兼容问题的三个要素，熟悉和了解常见的干扰源是发现和解决电磁干扰问题的基础。按干扰源的产生方式，可分为自然干扰源和人为干扰源两大类。

2.1.1 自然干扰源

自然干扰源是指自然界固有的与人的活动无关的电磁干扰现象。自然干扰源主要来源于以下几种自然现象。

(1) 来自银河系的电磁噪声。在银河系中，一些天体或天体附近会产生大量的电磁辐射，称为射电星，这些天体就是很强的电磁噪声源，但来自银河系的电磁噪声一般不会干扰地球表面的装置、设备或系统。

(2) 来自太阳系的电磁干扰。太阳系也常常发生强烈的电磁现象，太阳及太阳系的行星都会发出辐射产生强烈的电磁干扰。例如，太阳黑子爆发、日辉等都会产生严重的电磁干扰，严重的太阳黑子爆发会导致地球表面的磁暴，造成地球上的无线通信阻断。这些电磁现象干扰的对象主要是通过卫星传送的通信和广播。

(3) 来自大气层。闪电是产生于大气层中频繁的并且是强烈的电磁干扰源，可分为云闪（云间放电）和地闪（云对大地放电）两种。由于云闪的高度在数千米至万米，因此危害远小于地闪。一般地闪都是多次放电的，第一次放电的发展速度为 $1.5 \times 10^4 \sim 14 \times 10^4 \text{ km/s}$ ，放电时间在 $50 \sim 100 \mu\text{s}$ ，电流可达 $100 \sim 200 \text{ kA}$ ，第二次放电一般不超过 30 kA ，这样大的电流无论是直接形成的电磁噪声或是在附近导线上感应出的浪涌都是很强的电磁干扰源，其频谱可以包含由低频起到甚高频的全部频率。

大气层中的其他自然现象也会形成电磁干扰源，如沙暴会由于干燥的沙粒互

相摩擦而携带电荷，并不断地放电而形成电磁噪声。

(4) 热噪声。热噪声是指处于一定热力学状态下的导体中所出现的无规则电起伏，它是由导体中自由电子的无规则运动引起的。热噪声的平均值和瞬时值都无法测量，但其均方值可以确定，电阻热噪声均方电压可写为

$$U_n^2 = 4kTRB \quad (2-1)$$

式中： $k=1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 为玻尔兹曼常量； T 为绝对温度 (K)； R 为电阻的数值 (Ω)； B 为测量系统的等效噪声带宽 (Hz)。

其他气体放电噪声、有源器件（如真空管、晶体管）散弹噪声也有类似性质。

2.1.2 人为干扰源

所谓的人为干扰源是指由于人类的工业和社会活动所产生的电磁干扰。人为的电磁干扰源原本主要存在于工业、交通环境中，但近年来随着电力电子技术和信息技术的发展，在家庭、医院等环境中也出现了许多的人为干扰源。常见的人为干扰源有以下几种。

(1) 高压电力系统。包括架空高压输电线路和高压设备，其电磁噪声主要来自于：导线表面对空气的电晕放电、绝缘子的非正常放电、接触不良处的火花。

(2) 电力牵引系统。包括电气化铁道、轻轨铁道、城市无轨电车及其他各种类型的电动车等，这类系统中不仅机车内部的电力电子设备会产生干扰，同时当机车运动时，其受电弓在电网导线上滑动，也会产生很强的电磁噪声。

(3) 汽车点火系统。各种内燃机的点火系统都是很强的电磁干扰源。点火时产生前沿很陡的电脉冲，宽度为 1ns 至数百纳秒，该脉冲具有很宽的频谱，在 30~300MHz 的频带内干扰最强。这些电脉冲会沿着车内的高电压导线或“分电盘”等部件传导并向外辐射。

(4) 通信、广播、定位等大功率无线电发射设备。这些大功率设备本身就是通过发射电磁能量来传送信息的，因此本系统的有用信号对于其他系统就可能是干扰信号。由于这些设备的发射功率很强，因此很容易对周围装置、设备或系统造成干扰，也有可能对周围的生物体产生危害。

(5) 工科医（射频）设备。工科医设备，是指有意产生无线电频率能量，对其加以利用并不希望发射的设备。工业设备主要有感应加热设备中的高频电炉、高频热合机等，还包括高频焊接等；科研用射频设备在我国还不是主要的电磁干扰源；医疗设备则包括从短波到微波的各种电疗设备以及高频手术刀等，主要影响医院内电子医疗设备的正常工作。

(6) 家用电器、电动工具与电气照明。由于 CISPR 一直将这一类设备划归其 F 分会管理，出于历史的原因，这一类设备在电磁兼容标准中常被归为一类，