

电磁兼容工程与应用丛书

电磁兼容机理 分析方法与应对策略

赵 阳 李世锦 窦爱玉 邱晓晖 著



科学出版社

电磁兼容工程与应用丛书

电磁兼容机理分析方法 与应对策略

赵 阳 李世锦 窦爱玉 邱晓晖 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

全书分为电磁兼容机理分析和电磁兼容应对策略两篇。第一篇包括基于频域分析的传导电磁干扰和辐射电磁干扰的基本理论和基础知识,以及基于时域分析的电磁干扰噪声源定位和辐射源溯源的基本原理和基本方法。同时对常见电磁干扰抗扰度问题进行了分析。第二篇对常见电磁兼容问题,包括传导电磁干扰问题、静电放电抗扰度问题及其他电磁抗扰度问题进行案例分析并提供解决方案。

本书体系完整、可读性强且工程应用特色鲜明,可作为高校相关专业本科和研究生的学习科研用书,也可供相关科研院所、公司、培训机构等从事电磁兼容技术研究的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容机理分析方法与应对策略/赵阳等著. —北京:科学出版社, 2016

电磁兼容工程与应用丛书

ISBN 978-7-03-051367-0

I. ①电… II. ①赵… III. ①电磁兼容性 IV. ① TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016) 第 319670 号

责任编辑:惠 雪 曾佳佳 / 责任校对:刘亚琦

责任印制:张 倩 / 封面设计:许 瑞

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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 12 月第 一 版 开本:720 × 1000 1/16

2016 年 12 月第一次印刷 印张:19

字数:383 000

定价:99.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

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一个交叉学科,其理论基础宽广,工程实践综合性强,也是电力、电子和其他相关从业工程师必须掌握的基础知识和技术。

随着电气与电子技术的飞跃发展,产品的电磁兼容(EMC)性测试和应对方法正受到越来越多的电子、电气工程师和广大工程技术人员的关注和重视。为了保障设备的稳定性与可靠性以及符合电磁兼容性测试的要求,需要设计人员对系统进行完备的 EMC 设计与测试。

我国的电磁兼容性研究与国际上科学技术发达的国家相比,起步较晚,差距较大。目前,国产用电设备和电气、电子产品要站稳国内市场和进入国际市场,就必须通过产品的电磁兼容性强制检测,并符合检验标准,因此有必要对在校大学生和广大的电气与电子工程技术人员进行电磁兼容性的理论和技术教育。但长期以来,国内在 EMC 方面的技术参考资料还不全面,对于在校大学生和广大设计人员来说,有特色、系统性强、理论与工程实践紧密结合的 EMC 教材和参考资料尚不多见。本书正是基于这一目的而撰写的,主要作为电气与电子类专业的研究生、电气与电子工程师进行 EMC 培训和学习的教材或参考资料。

本书分为电磁兼容问题机理分析和电磁兼容问题应对策略两篇,内容包括:电磁兼容基础、传导电磁干扰机理分析方法与应对策略、基于频域分析的辐射电磁干扰问题机理分析、辐射电磁干扰机理分析方法与应对策略、基于时域的电磁干扰辐射源溯源分析、电磁抗扰度问题机理分析、传导电磁干扰问题应对策略、辐射电磁干扰问题应对策略、静电放电抗扰度问题应对策略,以及其他电磁抗扰度问题应对策略。

本书为多位作者结合自己的最新研究成果及电磁兼容专业理论,并从解决实际工程问题出发撰写而成的。其特色主要体现在如下方面。

- (1) 应用了最新的电磁兼容机理分析方法;
- (2) 以大量实际案例体现了电磁兼容机理分析方法的工程实用性与可行性;
- (3) 测试方法结合了作者自己最新的研究成果,可操作性强,理论可靠,技术可行。

本书由南京师范大学赵阳教授主持编写并负责全书的统稿。赵阳教授编写了第 1、3、5 章;南京师范大学李世锦老师编写了第 7、8 章;南京师范大学泰州学院窦爱玉老师编写了第 2、4、6、9 章;南京邮电大学邱晓晖教授编写了第 10 章。在

本书编写过程中，张杨、夏欢、邱忠梅、童瑞婷和丁锦辉等研究生做了大量的文字输入和校对工作，在此表示感谢；另外对为本书编辑工作付出大量心血的科学出版社编辑表示感谢。

在本书完稿之际，对书中参考文献的作者一并表示感谢。

由于时间仓促，作者水平有限，书中难免有不当或疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2016 年 9 月

目 录

前言

第一篇 电磁兼容机理分析

第 1 章 电磁兼容基础	3
1.1 电磁兼容发展历史与现状	3
1.2 电磁兼容专业术语	4
1.3 电磁兼容标准	5
参考文献	7
第 2 章 传导电磁干扰机理分析方法与应对策略	8
2.1 传导电磁干扰机理诊断	8
2.1.1 传导电磁干扰噪声定义	8
2.1.2 线路阻抗稳定网络特性与校准	8
2.1.3 共模/差模噪声机理特性	16
2.1.4 传导电磁干扰噪声提取方法	20
2.2 噪声源内阻抗提取	28
2.2.1 插入损耗法	28
2.2.2 双电流探头法	30
2.2.3 单电流探头法	33
2.2.4 散射参数法	35
2.2.5 双阻抗校准法和麦夸尔特法	36
2.2.6 综合特性对比分析	40
2.3 传导电磁干扰应对策略	41
2.3.1 电源/接地	41
2.3.2 EMI 滤波器	53
2.3.3 传导 EMI 滤波器特征建模	60
2.3.4 串扰	65
2.3.5 PCB 线路阻抗失配	68
2.4 现代信号分析技术在传导 EMI 噪声中的应用	69
2.4.1 盲源分离原理	70

2.4.2 盲源信号分离算法在传导 EMI 噪声诊断中的应用	72
2.4.3 实验结果	73
参考文献	75
第 3 章 基于频域分析的辐射电磁干扰问题机理分析	77
3.1 辐射电磁干扰噪声机理	77
3.1.1 辐射 EMI 噪声产生机理	77
3.1.2 PCB 辐射单元模型	79
3.1.3 辐射 EMI 噪声诊断	82
3.2 辐射电磁干扰噪声源建模	84
3.2.1 芯片级噪声源干扰模型	84
3.2.2 线缆类噪声源干扰模型	87
3.2.3 设备结构的噪声源干扰模型	88
3.3 辐射电磁干扰噪声源重构	89
3.3.1 PCB 辐射电磁干扰重构的电压驱动模型	89
3.3.2 PCB 辐射电磁干扰重构的电流驱动模型	92
3.3.3 分布电容及辐射线缆输入电容修正方法	94
3.3.4 辐射线缆共模电流的全波分析模型及阻抗修正方法	96
3.3.5 辐射电磁干扰噪声抑制	103
3.3.6 辐射电磁干扰噪声分析流程	105
参考文献	106
第 4 章 辐射电磁干扰机理分析方法与应对策略	107
4.1 辐射电磁干扰预估	107
4.1.1 基于射频电流探头的辐射电磁干扰预估方法	107
4.1.2 基于射频电压探头的辐射电磁干扰预估方法	110
4.1.3 基于 GTEM 小室的辐射电磁干扰预估方法	111
4.1.4 基于盲信号处理技术的辐射电磁干扰预估方法	121
4.2 辐射电磁干扰应对策略	124
4.2.1 因接地不良引起的辐射电磁干扰抑制方法	124
4.2.2 因信号大环路引起的辐射 EMI 噪声抑制方法	125
4.2.3 因串扰引起的辐射噪声	126
4.2.4 因传输线缆引起的辐射噪声	128
4.2.5 因阻抗失配引起的辐射噪声	129
参考文献	131
第 5 章 基于时域的电磁干扰辐射源溯源分析	133
5.1 溯源分析算法	133

5.1.1 辐射源信号的时域-频域描述	133
5.1.2 时频分析原理	136
5.2 辐射源溯源的时频分析方法	137
5.2.1 溯源方法原理	137
5.2.2 溯源方法描述	138
5.2.3 溯源方法实现	139
5.3 辐射噪声溯源方法特性研究	140
5.3.1 模拟实验	140
5.3.2 溯源方法应用	151
参考文献	154
第 6 章 电磁抗扰度问题机理分析	155
6.1 静电放电抗扰度 (ESD) 问题分析	155
6.1.1 静电放电形成机理及危害分析	155
6.1.2 ESD 防护中的过冲电压模型与应用	165
6.1.3 ESD 防护中的负载阻抗匹配与应用	169
6.1.4 结论	183
6.2 电快速瞬变脉冲群抗扰度 (EFT) 问题分析	183
6.2.1 EFT 机理与危害分析	183
6.2.2 执行标准与测试方法	186
6.2.3 EFT 干扰问题应对策略	191
6.3 其他电磁抗扰度问题分析	194
6.3.1 射频电磁场抗扰度 (RS) 问题机理	194
6.3.2 浪涌 (冲击) 抗扰度问题分析	208
参考文献	217

第二篇 电磁兼容应对策略

第 7 章 传导电磁干扰问题应对策略	221
7.1 智能电网行业产品传导干扰问题应对策略	221
7.1.1 行业背景及测试标准	221
7.1.2 某型单相电表的传导干扰问题应对策略	221
7.1.3 某型电力集中器的传导干扰问题应对策略	226
7.2 医疗电子行业产品传导干扰问题应对策略	231
7.2.1 行业背景及测试标准	231
7.2.2 某型电子助视器的传导干扰问题应对策略	232

7.3 家用电器行业产品传导干扰问题应对策略	236
7.3.1 行业背景及测试标准	236
7.3.2 某型液晶显示器的传导干扰问题应对策略	236
参考文献	240
第 8 章 辐射电磁干扰问题应对策略	241
8.1 智能电网行业产品辐射干扰问题应对策略	241
8.1.1 行业背景及测试标准	241
8.1.2 某型单相电表的辐射干扰问题应对策略	241
8.2 医疗电子行业产品辐射干扰问题应对策略	246
8.2.1 行业背景及测试标准	246
8.2.2 某型医疗电子助视器的辐射干扰问题应对策略	247
8.2.3 电磁兼容整改措施	249
8.2.4 某型生物刺激反馈仪的辐射干扰问题应对策略	250
8.3 计量电子行业产品辐射干扰问题应对策略	255
8.3.1 行业背景及测试标准	255
8.3.2 某型商用刷卡机的辐射干扰问题应对策略	255
参考文献	260
第 9 章 静电放电抗扰度问题应对策略	261
9.1 医疗电子行业产品静电放电抗扰度问题应对策略	261
9.1.1 行业背景及测试标准	261
9.1.2 某型高频电刀的静电放电抗扰度问题应对策略	263
9.1.3 某型激光治疗仪的静电放电抗扰度问题应对策略	266
9.2 智能电网行业产品静电放电抗扰度问题应对策略	269
9.2.1 行业背景及测试标准	269
9.2.2 某型电力集中器的 ESD 抗扰度问题应对策略	270
9.3 轨道交通行业静电放电抗扰度问题应对策略	274
9.3.1 行业背景及测试标准	274
9.3.2 某型车载辅助电源的 ESD 抗扰度问题应对策略	275
参考文献	279
第 10 章 其他电磁抗扰度问题应对策略	280
10.1 医疗电子行业产品其他电磁抗扰度问题应对策略	280
10.1.1 行业背景及测试标准	280
10.1.2 某型高频电刀的 EFT 抗扰度问题应对策略	282
10.1.3 某型激光治疗仪的 EFT 抗扰度问题应对策略	285
10.1.4 某型高频电刀的浪涌 (冲击) 抗扰度问题应对策略	287

10.2 计量电子行业产品其他电磁抗扰度问题应对策略	289
10.2.1 行业背景及测试标准	289
10.2.2 某型皮带秤的 EFT 抗扰度问题应对策略	291
参考文献	293

第一篇

电磁兼容机理分析

第 1 章 电磁兼容基础

1.1 电磁兼容发展历史与现状

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,使得飞行器上的无线电收发设备和导航设备之间的干扰开始增多。当时电子器件的密度(主要是电子真空管)远小于今天的,通过在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。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,60 年代发明的集成电路(IC)和 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。

由于干扰有线和无线通信的数字系统日益增多,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”,以减少 EMI 问题。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,所以激起了从数字计算机到电子打字机的民用电子产品生产商们对电磁兼容(EMC)学科的浓厚兴趣。

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。该委员会发布了一份文件,详细说明用于确定潜在的 EMI 发射的测量设备。CISPR 在第二次世界大战结束后于 1946 年在伦敦重新召开会议。随后的多次会议出版了各种技术出版物,讨论测量技术,建议发射限定值。

这些规范使得 EMC^[1,2]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,它就不得在该国销售。也就是说功能上完全得以实现的产品,只要不符合规范要求,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,并陆续颁布了一些 EMC 设计要求、测试方法等国家标准和国家军用标准^[3,4],但具体的设计规范仍很缺乏。电磁兼容工作渗透到每一个电气电子系统及设备中,只有通过总体设

计部门管理协调,才能解决电磁兼容性问题。

1.2 电磁兼容专业术语

电磁兼容(electromagnetic compatibility, EMC) 是指设备或系统在其电磁环境中按照要求工作,并且不对周围的其他设备或系统产生具有破坏性的电磁噪声的能力。由此可得,EMC 涵括了两方面的内容:一方面,是指设备在执行其职能时,对周围任何其他设备或机器的电磁干扰须保持在一定的限值之下,不能超过该限值;另一方面,是指设备具有一定抗扰度(电磁敏感性),即能在一定程度上抵抗周围其他任何电子设备对其产生的电磁干扰。

如图 1-1 所示,电磁兼容 (EMC) 包括电磁干扰 (electromagnetic interference, EMI) 及电磁敏感度 (electromagnetic susceptibility, EMS) 两部分:EMI,指设备或系统在正常运行的过程中所产生影响其他设备或系统的电磁噪声;EMS,指设备或系统在正常运行的过程中不受周围电磁环境中电磁噪声影响的能力。

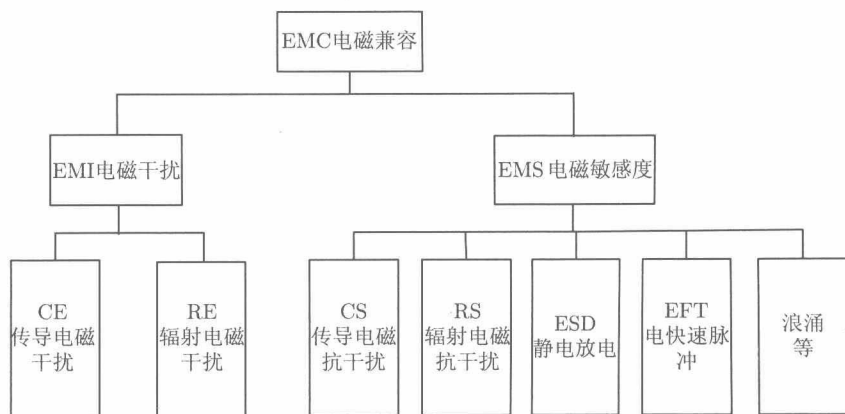


图 1-1 电磁兼容概念图

根据电磁干扰传播路径的不同,电磁干扰可分为:传导电磁干扰 (conducted EMI), 又称传导电磁发射;辐射电磁干扰 (radiated EMI), 又称辐射电磁发射。进一步,传导 EMI 噪声还可以分为共模干扰噪声 (common mode noise, 存在于相线与地线、中线与地线间) 以及差模干扰噪声 (differential mode noise, 存在于相线与中线间)。辐射 EMI 噪声在空间中以电磁波的形式传播,同样大致可以分为共模辐射噪声以及差模辐射噪声。与此同时,电磁兼容三要素是指干扰源、耦合路径 (或传输路径) 以及敏感设备 (图 1-2)。干扰源是指发射电磁干扰噪声的元件、设备等;耦合路径 (传输路径) 是指将电磁干扰能量耦合到敏感设备的媒介,包括线缆、空

间等；敏感设备是指在电磁环境中被电磁干扰，影响正常工作的设备。电磁兼容三要素是所有电磁干扰产生都必须同时具备的三个条件。

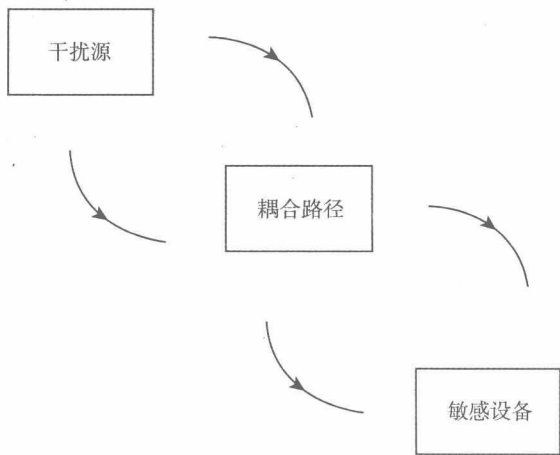


图 1-2 电磁兼容三要素

根据试验方法不同，电磁敏感性分为射频场感应的传导干扰抗扰度试验 (immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields test)、射频电磁场辐射抗扰度试验 (radiated radio-frequency electromagnetic field immunity test)、静电放电抗扰度试验 (electrostatic discharge immunity test)、电快速瞬变脉冲群抗扰度试验 (electrical fast transient/burst immunity test)、浪涌 (冲击) 抗扰度试验 (surge immunity test) 等。

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超大规模集成电路 (VLSI) 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地演化，不同的机构也在不断发布各种相关标准。这些标准的目的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地点测试会显现出显著的差异，为了解决这一领域的困难，在这方面我们必须给予充分的关注。

1. FCC 标准

美国联邦通信委员会 (FCC) 负责促进和保证美国各种涉及无线电广播和传播设施的法规能有效执行，FCC 也负责对各种电子电气装置设备的电磁发射控制的规范化，这在电信联邦法规中颁布。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

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 年代就积极地从事于发展 EMC 方面的国际标准，并且被国际电工委员会 (IEC) 公布。IEC/CISPR 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 CISPR 关于 EMC 的文件。

表 1-1 关于 EMC 的 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

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 年颁发的机械工业部标准 JB 854—1966《船用电气设备工业无线电干扰端子电压测量方法与允许值》。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 GB/T 3907—1983《工业无线电干扰基本测量方法》。之后又相继颁布了 GB 4343—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》、GB 4365—1984《无线电干扰名词术语》、

GB 4859—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, 这些标准基本是依据 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。

参考文献

- [1] 高攸纲. 电磁兼容总论. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001.
- [2] 白同云, 吕晓德. 电磁兼容设计. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001.
- [3] 赖祖武. 电磁干扰防护与电磁兼容. 北京: 中国原子能出版社, 1993.
- [4] 邱焱, 肖雳. 电磁兼容标准与认证. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001.