

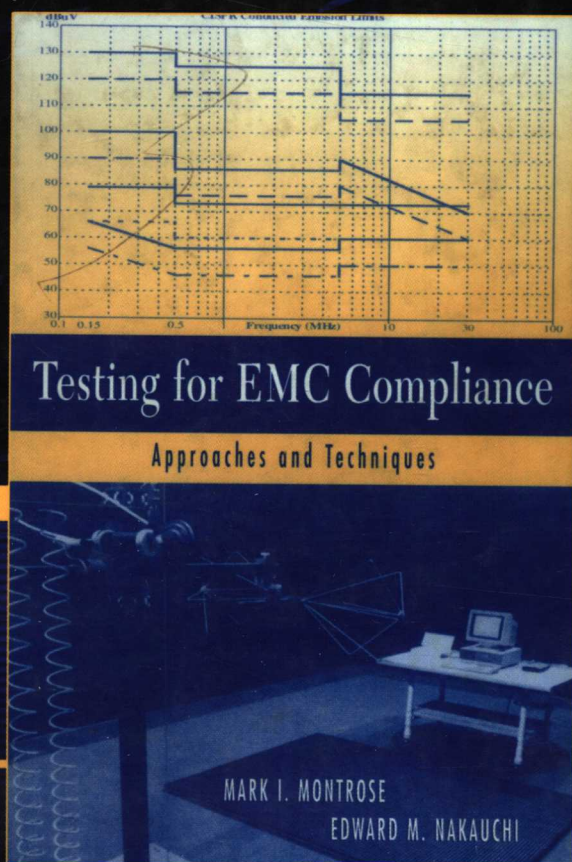
电磁兼容的 测试方法与技术

Testing for EMC Compliance

Approaches and Techniques

(美) Mark I. Montrose 编著
Edward M. Nakauchi

游佰强 周建华 等译



电子与电气工程丛书

TN03/31

2008

电磁兼容的 测试方法与技术

Testing for EMC Compliance

Approaches and Techniques

(美) Mark I. Montrose
Edward M. Nakauchi 编著

游佰强 周建华 等译



机械工业出版社
China Machine Press

本书涵盖了EMC相关领域和电磁场理论等基础知识,系统分析了解决各类EMC/EMI具体问题的方法和防护措施,并提供相关试验的步骤、仪器的使用和制作等方面的详细指导。书中的大量素材均源于科研生产的一线资料,也包括作者自己多年的宝贵经验,读者可在本书中学习到大量应用工程概念和基本原理相结合的系列实用技术。

本书适合高等院校信息技术、电气及自动化、机电一体化等专业的高年级本科生、研究生作教材,也可作为工程技术人员继续教育的培训教材。

Mark I. Montrose, Edward M. Nakauchi: *Testing for EMC Compliance: Approaches and Techniques* (ISBN: 0-471-43308-X).

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

Copyright © 2004 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, 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:01-2004-6541

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容的测试方法与技术/(美)蒙特罗斯(Montrose, M. I.), (美)纳考奇(Nakauchi, E. M.)著;游佰强等译. -北京:机械工业出版社, 2007.10

(电子与电气工程丛书)

书名原文: *Testing for EMC Compliance: Approaches and Techniques*

ISBN 978-7-111-21644-5

I. 电… II. ①蒙… ②纳… ③游… III. 电磁兼容性-测试 IV. TN03

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第147838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:秦燕梅

北京诚信伟业印刷有限公司印刷 · 新华书店北京发行所发行

2008年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm · 19印张

定价:39.00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

本书是美国EMC (Electromagnetic Compatibility, 电磁兼容) 著名专家Mark I. Montrose和Edward M. Nakauchi撰写的有关电磁兼容方面的新书译本。与国内读者已经熟悉的Mark I. Montrose关于PCB设计、EMC和EMI方面的系列专著及文献风格一致,《电磁兼容的测试方法与技术》一书以严谨、简明、通俗易懂和实用的手法,将现代科学发展中日益突出的EMC和EMI (Electromagnetic Interference, 电磁干扰) 问题分析得淋漓尽致,很好地填补了纯理论与实际测试之间的空白,阐明了EMC和EMI中有关“为什么”、“该做什么”、“如何做”等方面的问题。本书涵盖了EMC相关领域和电磁场理论等基础知识,系统分析了解决各类EMC/EMI具体问题的方法和防护措施,并提供相关测试实验的步骤、仪器的使用 and 制作等方面的详细指导。书中的大量素材均源于科研生产的一线资料,也包括作者自己多年的宝贵经验,读者可在本书中学习到大量应用工程概念和基本原理相结合的系列实用技术。

原书的写作目的是提供第一手数据给第一线的测试工程师、设计开发人员和技术人员参考。本书适合信息技术、电气及自动化、信息系统可靠性工程、机电一体化等专业的师生参考使用,也特别适合以上各领域的工程技术人员作为继续教育的培训教材,从事科研和工程项目的相关人员也可将其作为电磁兼容性分析、测试和设计的参考手册。

非常感谢机械工业出版社在原著出版不久即委托本人翻译,使我及时得到了这本优秀书籍,在翻译和工作过程中也得到了非常大的收益。由本人主笔翻译的内容包括原书的第1章至第7章并审阅了其余章节,周建华副教授翻译了原书的第8章、第9章和附录并审校了全书,陈浩和张羽参与了原书第9章和附录的翻译。由于EMC涉及的内容非常丰富,翻译过程中难免会有许多不尽人意之处,希望读者多提宝贵意见。

游佰强

2007年1月于厦门大学

译者简介

游佰强：副教授，硕士生导师，中国电子学会高级会员，福建省通信学会科普委员会委员。现任厦门大学信息科学与技术学院近代通信实验室主任、光波技术研究所副所长。

1982年1月本科毕业于电子科技大学，1987年获得电磁波研究方向工学硕士，曾留学访问德国、日本和印度尼西亚等国家。1987年进入高校工作，先后在西安交通大学、厦门大学担任教学科研工作，曾特聘为印度尼西亚大学世界银行本科教学质量创优QUE项目助理。目前全面承担电磁场与电磁波、微波技术基础与实验、天线与电波传播、光通信技术、电磁波及其应用基础（双语）、高等电磁场理论（研究生）等系列课程教学和实验教学工作，负责厦门大学985一期（行动计划）微波通信实验室、近代通信技术实验室的建设工作，合作主持福建省精品课程《微波技术基础与实验》、厦门大学精品课程《电磁场理论》，主持完成厦门大学CAI重点项目1项，参与完成CAI项目多项。曾获厦门大学、西安交通大学优秀教师称号，每年教学工作考核均在200%左右（近600学时/年），连续3年在厦门大学考核均为优秀。游教授注重教学与科研相结合，目前从事光通信技术、RF微波/通信/电子材料与器件的科研和教学，“七五”、“八五”期间作为主要成员参加了国家863、国家自然科学基金重大和重点项目5项，已在国内外期刊和国际会议上发表论文40多篇。目前参与国家、省和学校科研项目6项，主持省自然科学基金和省科技重点项目各1项。

前 言

写这本书的原因在于当前公开刊物中，电磁兼容性和管理兼容的主题缺少一个EMC的特殊结合面这一事实——如何有效地既进行发射测试又进行抗扰度测试，以及“如果”产品已经设计、制造出来，随后却未通过EMC测试，那时该做些什么。

本书提供了第一手数据给第一线的工程师，无论是受过教育的还是有经验的。虽然本书着重于信息技术、电信、工业科学和医疗领域中EMC测试技术的应用，但也涉及其他领域中的应用。那些从事EMC工作的工程师虽已掌握了EMC的相关知识，但书中关于仪器、探头和测试技术的综合评论，总是有一些新的知识需要学习。此外，本书对非EMC工程师也有很好的参考价值。

回顾现有的关于EMC工程应用的出版物，可以注意到作者一般都集中在产品设计的理念或工程阶段上，很少涉及制造后（出问题后）的阶段，或者讨论只适合大学生利用高等数学来学习电磁场所用到的知识。比如，某些书简略地覆盖一个主题，而另一些则非常详细地分析关于一个重要特殊领域的课题。涉及EMC测试的书一般只描述测试环境、装置和步骤，没有解释或分析，而是直接引用标准本身。为此，我们从许多渠道收集信息，以及个人的经验，并将这些汇总成有关EMC的诊断和故障检测的综合参考资料。

目前许多在EMC领域工作的工程师缺乏实际工作经验，不能为用户圆满解决问题，使得用户不得不自己解决问题。

许多工程师为了使产品通过一致性试验花费了大量时间，但由于方法不当，发射级别只降低了1 dB或2 dB。本书介绍了正确的故障检修方式，故障检修既是一门技术又是一门艺术，必须花费更多的时间来学习。有许多公司未通过一次试验就决定去租借试验设备，试图在室内解决问题，以节省时间和成本，但最后的花费可能远远超过租借设备的成本。

本书面向的读者是从事设计、开发或测试电子系统的工程师和技术人员，这些工程师大都致力于开发模拟、数字或系统级的产品。但不论从事哪个方面，所有设计者都必须根据市场需求来开发产品。比起系统集成，工程师更关注产品的性能。通常系统集成由产品工程师、机械工程师或其他技术人员负责，而EMC工程师一般负责产品设计的最后一个环节。这时设计工程师必须考虑产品设计的其他方面，比如印刷电路板的布局和生产、封套和电缆组件、电磁场从电路板转移到底盘和/或个案结构的方式的认识，既有内部的又有外部的互连。在实验室工作的工程师和技术人员很可能在最后的工作阶段发现有价值的信息。

在使用探测器探头去搜索信号或问题区域之前，需要基本了解关于场的传播，虽然利用探头可以迅速地确定辐射/传导能源来自何处，但往往由于缺乏正确的解决方法而不能解决问题。

基于上述原因，本书讲述了以下主要内容。第1章涉及电磁场兼容性、要求的概念、基本的定义、关于产品测试的总体看法，以及将在后面章节中展开的测试方法。第2章介绍不同类型的电磁场和静态场，以及这些场是如何传播的，分析了共模和差模连同组件之间的耦合机理，这一章的内容是本书其余部分的基础。第3章详细叙述不同类型的普通测量设备，这些设备既可用于EMC的测试又可用于其故障检测，但测试必须在固定地点进行。第4章提供普遍使

用的各种不同设备的信息。第5章提供有关各种类型传感器的指导和信息,传感器既用来测量发射又可为抗扰度测试注入射频能量,知道对一个特殊应用要用哪种传感器对于测试和故障检修都很有用。分析所有形式的传导试验,既有发射又有抗扰度。第6章介绍基本的传导试验步骤和方法论,第7章在第6章的基础上介绍了辐射测试和抗扰度,以及测试产品与如何正确运行的内容及两者的区别。第8章提供了对检修和应该如何分析这种工程场所连同可能出现的问题的知识。第9章是本书的核心,它将前面所有的章节联系起来,利用传统的和非传统的方法详述了测试的过程和产生的故障。实验室工作人员和缺乏经验的工程师可以将本章作为参考,同时可以学习到新的技术。附录A说明了如何自制简单的探头和传感器。附录B是该书的重要部分,采用国际标准,介绍了多种EMC试验的步骤。

本书旨在以一种易于理解和实现的形式介绍应用工程概念的基本原理和技术。本书的最后介绍了麦克斯韦方程、更深入的电路理论及其技术、场的传播和数值建模/模拟。在每一章最后的参考部分和参考书目都提供了一个涉及EMC其他方面的清单,这些资料为研究EMC相关领域的人员提供了指导。

本书没有讨论诸如应该做多少测试来确保与EMC指示的达到符合兼容,或者如何详细地进行EMC试验类的问题。有关测试的特定信息可以从试验标准本身和从提供的参考资料获得,这里没有详述试验标准,因为每个产品的认证许可不同,并且试验要求经常会改变。

本书讨论的主题包括:

- 1) 辐射和传导的发射;
- 2) 辐射和传导抗扰度;
- 3) 静电放电;
- 4) 快速瞬变现象/脉冲群;
- 5) 电涌;
- 6) 低频电力线磁场;
- 7) 交流电源下陷、跌落、谐波和闪烁。

作为EMC顾问,我们的工作重点是推荐在高技术产品的设计和测试中以最小成本进行测试,实现抑制方法以节省经费,增强性能、可靠性,并获得发射和抗扰度要求的初步符合兼容。随着电子技术的不断发展,电子行业提供了很多机会让我们参与高层次的设计,在产品设计中纳米技术正在迅速推广。产品开发更注重有效性、市场性,而管理兼容总是强制性的。如果在5个月内设计和建立高技术系统,然后再花另外6个月来通过常规要求,这将导致它们失去竞争优势;相反那些采用EMC技术的公司将在生产力和资金回收上达到最优。

Mark I. Montrose

Edward M. Nakauchi

Santa Clara, California

Westminister, California

2004年1月

致 谢

将这本书献给我引以自豪、善解人意的家人，他们毫无怨言地忍受了我所有的错误和缺点。对于我的妻子Linda和我的孩子们Michael、Caryn和Pamela，他们总是在询问“我做的是什麼？”我希望你们现在都已知道我做的是什麼。除了我的家人，我还幸运地拥有许多给予了我极大鼓励的朋友们，特别是Michael Oliver，一位年轻有才华的同事；Sharilyn Bratton，他洋溢着无比的热情，鼓舞着我们的精神；在G&M Compliance公司工作的“小伙子们”，Thomas、Paul、Carlos、Rob、Greg和Marciela。我要对Eddie Pavlu 表示重谢，你曾在我非常困难的时期作为朋友陪伴我。还要对W. Michael King，作为我的老朋友和多年来的伟大导师，表示万分感谢。最后，非常感谢评审们所花费的时间和所做出的贡献，他们利用个人时间对本书提出了许多有益的建议。

E. M. N.

我想对Bill Kimmel和Daryl Gerke表示感谢。他们对初稿的技术评阅确保了精确性并提供了有关结构和格式上的评注，这些专家帮助我们确保该书以适当的内容面向适宜的读者对象。

对Elya Joffe，我致以最深的谢意，他曾以细密梳理的方式极其仔细地阅览过该资料，并在检查我写作风格时提供了“大量的”反馈意见来确保技术精度，他使我将精力集中在达到该书的写作目标连同表述的专业方式上，对此我非常感激。

向W. Michael King 致以特别的谢意，Michael不仅仅是我的导师还是我的朋友。没有Michael，我将不可能获得让我不仅成为一位顾问而且成为一位工程师的知识，在这个迅速改变的领域中有能力去以不同于其他人的方式观察事物，以及去传达以前从未研究过的或发表过的复杂概念。

我要对我的家人给予最特别的感谢，包括我的妻子Margaret及我的两个十几岁的孩子Maralena 和Matthew。如同与我以前三本书和让我满世界频繁奔跑的顾问工作一样，他们对我写作热情的理解是令人感动的，长时间在电脑前工作的需要使那里成为了我的常用办公地点，为此我非常感谢他们的理解和支持。

M. I. M.

关于作者

Mark I. Montrose 在管理兼容、电磁兼容和产品安全性的领域有25年以上的经验，他广泛地参与过关于信息技术设备（ITE）以及工业、科学和医疗（ISM）设备的设计、测试和认证。他驰骋在符合兼容的国际舞台，包括针对轻工业设备、民用设备和重工业设备的欧洲EMC、机械和低压指示。除了他的顾问工作外，Montrose先生拥有由欧洲竞争团体核定的EMC测试实验室，并由NARTE授权。

Montrose毕业于加利福尼亚工业州立大学（1979），获得电气工程的理学学士学位和计算机科学的理学学士学位，在加利福尼亚州的Santa Clara大学获得工程管理硕士学位。

Montrose是IEEE EMC协会理事会和IEEE出版社的一名成员、IEEE的高级会员，以及美国无线电传播联盟会（ARRL）的终身会员，有业余额外种类许可证K6WJ。另外，他曾是IEEE EMC协会一位著名的演讲者（1999—2000）、TC-8（产品安全技术委员会）的理事、IEEE EMC协会内的TC-10（信号完整性）和TC-11（毫微技术）的创始人、IEEE毫微技术理事会的地方利益集团主席和IEEE产品安全工程协会的共同创始人和第一任会长，他还是dB协会的一名成员。

在针对高技术产品的电磁兼容性（EMC）和信号完整性、印刷电路板（PCB）设计及EMC理论的领域中，他撰写了大量的论文，并在北美、欧洲及亚洲的国际EMC研讨会和学术讨论会上发表。Montrose是美国和亚洲几所大学的兼职教授，给全世界的团体客户提供PCB设计和布局的研究会。

Montrose编写了几本教科书，包括由Wiley和IEEE出版社出版的《EMC and the Printed Circuit Board——Design, Theory and Layout Made Simple》，1999年（翻译成中文和日文），以及《Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance——A Handbook for Designers》，2000年。另外，他是电子封装手册中第6章的著者，此手册于2000年由CRC和IEEE出版社共同出版。

Edward M. Nakauchi 在Northrop大学和哥伦比亚太平洋大学分别获得了理学学士学位和硕士学位，他在模拟、电力和数字设计领域已有30多年的经验。在过去的20多年里，他为军事/航空公司和商业音响/计算机/医疗公司把大部分时间都花在了EMI/EMC/EMP和ESD的领域上。他发表了大量各种有关EMI/EMC/EMP/ESD主题的技术论文和杂志文章并出席了相关的研讨会，他通过加利福尼亚大学伊尔文外延程序讲授EMI课程。Nakauchi曾是美国军队的屏蔽设计指导手册的主要作者，并曾是空军空间导弹司令部有关其用户现货供应程序的EMI顾问，他参与完成过的一些系统是航天飞机、全球定位卫星、迪斯尼乐园的飞溅山/火箭棒和B-2轰炸机。他是一位NARTE认证过的EMC/ESD工程师，在IEEE中有高级会员资格。Nakauchi还活跃于支持教育事业，作为一名辅导教师给高中生教机器人技术和电子学。

目 录

译者序	
译者简介	
前言	
致谢	
关于作者	
第1章 引言	1
1.1 电磁兼容的必要性	1
1.2 定义	2
1.3 干扰的本质	4
1.4 产品测试综述	4
1.4.1 测试环境	4
1.4.2 自兼容性	6
1.4.3 实测数据的有效性	6
1.4.4 辐射测试期间的问题	7
1.5 时域与频域分析	8
1.6 电磁兼容试验方法	10
1.6.1 开拓测试和诊断	10
1.6.2 兼容性和预兼容性测试	10
参考文献	11
第2章 电场、磁场和静态场	12
2.1 电场与磁场之间的关系	12
2.2 噪声耦合的方法	15
2.2.1 公共阻抗耦合	16
2.2.2 电磁场耦合	17
2.2.3 传导耦合	18
2.2.4 辐射耦合——磁场效应	18
2.2.5 辐射耦合——电场效应	20
2.2.6 辐射和传导组合的耦合	20
2.3 共模电流与差模电流	21
2.3.1 差模电流	21
2.3.2 共模电流	22
2.3.3 有关差模和共模电流之间差异的例子	22
2.3.4 由差模电流产生的辐射	24
2.3.5 共模辐射	25
2.3.6 差模和共模能量间的转换	26
2.4 静态场	27
2.4.1 静电放电波形	27
2.4.2 摩擦电序	28
2.4.3 静电故障的故障模式	28
参考文献	31
第3章 仪器的使用	32
3.1 时域分析仪(示波器)	32
3.2 频域分析仪	37
3.2.1 频谱分析仪	38
3.2.2 接收机	43
3.3 预兼容与兼容分析仪	44
3.4 相干分析仪	46
3.4.1 相干分析仪的特性	47
3.4.2 相干因子	47
参考文献	50
第4章 测试设备	51
4.1 开阔区域测试场地	51
4.1.1 对OATS的要求	52
4.1.2 试验体系——系统、电源和电缆的互连	56
4.1.3 操作条件	60
4.1.4 测量注意事项	62
4.1.5 备用测试场地	62
4.2 暗室	63
4.2.1 电波暗室	63
4.2.2 网屏室/屏蔽室	68
4.2.3 混响室	70
4.3 单元	72
4.3.1 TEM单元	72
4.3.2 GTEM单元	73
参考文献	74
第5章 探头、天线和支持设备	75
5.1 探头、天线和支持设备的需求	75
5.2 电压探头	76
5.3 电流探头	76
5.3.1 电流探头的详细说明	78

5.3.2 使用电流探头时的局限性	81	7.1.4 正式EMC合格测试	147
5.4 LISN/AMN (AC电源)	82	7.1.5 仪器误差	149
5.5 CDN (数据和信号线)	85	7.1.6 系统和装置的现场测试	149
5.6 吸收钳	86	7.2 抗扰度/敏感度试验	151
5.7 大电流注入——探头和插入夹钳	89	7.2.1 辐射抗扰度	151
5.8 基本探头类型——近场和封闭场	91	7.2.2 静电放电	154
5.9 嗅探器探头	94	7.2.3 电源频率磁场干扰	162
5.9.1 近场探头	94	参考文献	165
5.9.2 商用探头	95	第8章 故障检修的一般方法	167
5.10 差模探头	96	8.1 一般系统的测试及故障检修	167
5.11 自制探头	98	8.1.1 发射测试	168
5.12 替代故障检修装置	98	8.1.2 抗扰度测试	169
5.13 远场天线	99	8.1.3 现场测试	170
参考文献	103	8.2 在测试和故障检修期间潜在的问题	171
第6章 传导测试	104	8.3 测试和故障检修的问题	174
6.1 传导电流的概述	104	8.3.1 发射测试和故障检修的系统方法	175
6.1.1 导线和电缆上的共模与差模电流	105	8.3.2 抗扰度测试和故障检修的系统方法	176
6.1.2 传导发射的耦合路径	106	8.3.3 探测和定位故障的系统方法	177
6.1.3 耦合发射测试的要求	107	8.3.4 进行EMC试验的最低要求	179
6.2 进行传导电流测试	108	8.4 系统测量的重现性	180
6.2.1 在实验室或工程师办公室中的工程研究	108	8.5 投产后的意外故障	182
6.2.2 测试环境	108	8.6 对于故障检修的创造性处理方法 (个案研究)	182
6.3 传导发射测试 (交流电源)	108	参考文献	183
6.3.1 传导发射测试过程中的潜在问题	109	第9章 现场故障检修方法	184
6.3.2 系统和装置的现场试验	110	9.1 快速修理和解决方法	184
6.4 抗扰度/敏感性试验	110	9.1.1 传导问题的解决方法	185
6.4.1 电快速瞬变和脉冲群测试	111	9.1.2 辐射问题的解决方法	189
6.4.2 电涌	115	9.1.3 串扰的解决方法	191
6.4.3 传导射频电流的抗扰度	119	9.2 简化的故障检修技术	192
6.4.4 交流电源瞬时跌落、信号下陷和中断	127	9.2.1 “普通挥手和直立挥手”技术	192
6.4.5 电源谐波	131	9.2.2 “失效系统”技术	193
6.4.6 电压波动和闪烁	139	9.2.3 “电缆断开”技术	193
参考文献	141	9.2.4 “粘手指”调试工具	194
第7章 辐射测试	143	9.2.5 “笔式故障诊断”工具	194
7.1 辐射测试实施	143	9.2.6 “冷冻喷雾剂”工具	195
7.1.1 在实验室或工程师办公室中的工程研究	145	9.2.7 “电缆段”方法	195
7.1.2 预符合兼容测试	145	9.2.8 无线控制赛车的诊断传感器	195
7.1.3 预符合兼容性分析	146	9.2.9 用于1 GHz以上信号的“易拉罐无线天线”	197

9.3 利用探头的测试和故障检修	197	确定	211
9.3.1 探头在抗扰度测试和故障检修中 的应用	197	9.4.6 电快速瞬变脉冲群 (EFT/B) 发生 器的另一种用途	212
9.3.2 电缆和互连上射频电流的差动式 测量	200	9.4.7 信号完整性的观察	212
9.3.3 共模传导噪声的开关电源效应	201	9.5 系统级故障检修	213
9.3.4 分立元件的诊断工具	203	9.5.1 切换电源——测量磁场耦合	213
9.3.5 镊子探头	203	9.5.2 使用铁氧体磁芯时的潜在问 题——辐射发射增强	214
9.3.6 微型高分辨探头	204	9.5.3 测量材料和外壳的屏蔽有效性	215
9.3.7 替代辐射发射测试的电流探头	205	9.5.4 测试设备中的高频噪声电流效应	217
9.3.8 外壳谐振和屏蔽有效性	206	9.5.5 测量外壳接合口上的噪声电压	219
9.4 交替故障检修技术	207	9.6 周围环境的消除或抑制	220
9.4.1 示波器在调试信号完整性波形和 辐射发射中的应用	207	9.7 印刷电路板的诊断扫描仪	222
9.4.2 廉价接收器在发射测试中的使用	209	参考文献	225
9.4.3 业余无线电发射机在抗扰度测试 中的使用	210	附录A 自制探头、天线及其使用技术	226
9.4.4 标注为传导发射问题的辐射问题	211	附录B 试验步骤	242
9.4.5 传导发射噪声是差模还是共模的		术语表	280
		参考书目	288

第1章 引言

1.1 电磁兼容的必要性

电气和电子产品时常不可预测地产生射频能量，每台数字设备都存在对其他电气装置造成无意识干扰的可能性。在生活的每个方面都会用到电气产品，例如提供通信、各种形式的娱乐、非常舒适的生活方式（运输工具、日常用品、公用设施、休闲用具），以及支持生命的电子设备等。在上述各项中，通信系统及生命支持电子设备对于可能存在的、无意识的射频能量源产生的干扰最为敏感。

对电磁兼容性控制的需求在不断增长。如设计方案的正确应用可以确保可靠的工作，使责任风险最小化，缩减设计时间表能有助于满足常规的需求。考虑到EMC所有方面的最佳时机是在初期设计阶段，这要比画出第一个电路图、写出软件程序中第一个指令或画出机械底盘的轮廓要早得多。如果希望产品出货日期早一些，则管理层也必须考虑EMC问题。

在北美，20世纪30年代为了应对通信系统的干扰问题，美国国会颁布了1934年的通信法令，并建立美国联邦通信委员会（FCC）来监督执行和维护这项法令。

电磁干扰在二战期间也是一个问题，当时采用的术语是射频干扰（Radio-Frequency Interference, RFI）。随后制订了通信发射机和接收机及雷达系统的频谱特征规格（spectrum signature），不过对于这两类系统（通信和雷达系统）规定频谱特征规格的想法直到50年代才得到应用。由于军方对设备尺寸和价格的掌控，所以多数高技术电子系统处于不稳定的运行状态。

朝鲜战争后多数电磁兼容性的工作没有分门别类，除非它涉及特殊战术或战略系统，例如弹道导弹、轰炸机及类似的军事和侦察设备。电磁干扰（EMI）会议在20世纪50年代中期开始召开，期间提出了还未归类的信息。在这段时间，军方工程师的信号组织及美国空军建立了强大的在研系列项目，这些项目涉及EMI、RFI及EMC的相关领域。

在20世纪60年代，美国国家航空航天管理局（National Aeronautical and Space Administration, NASA）开始启动电磁干扰控制项目，用于其火箭发射及太空系统研究项目中。政府机构及私人公司也开始涉及抗电磁干扰辐射和屏蔽设备的研究，这些设备包括安全系统、教堂风琴、高保真放大器等，所有这些设备都是基于模拟系统的。由于远程预警系统（DEW）在线雷达出现了问题，这项工作的推动也引起了美国空军的关注。

随着越来越多地为消费系统开发数字逻辑设备，电磁干扰逐渐得到广泛的关注。起初在家用电器中进行了电磁干扰方面的定性研究，这些家用电器包括电视机、放大器、调幅/调频收音机（AM/FM radio）、医疗设备、收音机和录像机等产品。相对而言，这些产品早期很少为数字的，但正变得越来越多，模拟系统与数字系统相比更易受到电磁干扰问题的影响。

在20世纪70年代后期，与电磁兼容性相关的问题也成为其他产品的问题，这些产品包括家用娱乐系统（电视、录像机、摄像机）、个人电脑、通信设备、带有数字特性的家用电器、智能运输系统、复杂的商业电子设备、控制系统、音频和视频显示设备以及大量其他设备。

在这个阶段, 公众开始意识到电磁兼容性及其带来的一系列疑难问题。

在公众逐渐关心居住区域内数字设备产生的电磁干扰后, 美国联邦通讯委员会 (FCC) 在20世纪70年代中后期开始为个人电脑及类似设备发布了辐射标准。在欧洲, 对电磁兼容性的关注始于第二次世界大战期间, 特别是在德国电气工程师协会论坛中。欧洲最初考虑电磁兼容性问题先于美国通信学会很多年, 其中一个原因反映了在市场方面对政府法规作用的不同态度, 电磁兼容性标准89/336/EEC简化并缩小了北大西洋公约组织 (North Atlantic Treaty Organization, NATO) 的各类标准之间的差别。

由于个人计算机蕴涵着巨大市场, 商业实体开始涉足到电磁兼容性领域中来, 如今几乎所有设备无论是否需要都已经数字化了。

电子设备的重点现在已经从模拟转移到数字化, 另一个推动数字化设备成为规范设备的因素是在数字化早期, 普遍认为数字设备“不容易受到”电磁干扰。由于这个观点, 所以当商业界得知数字设备实际上会受影响并导致被破坏时感到震惊。

然而在出现了患者治疗和诊断电子设备相关问题的报告时, 食品和药物管理部门 (FDA) 才认识到了电磁干扰产生的威胁。当欧盟 (European Union, EU) 通过其电磁兼容性标准89/336/EEC强制规定辐射和抗扰度要求时, 电磁兼容性问题才得到关注。另一个对电磁兼容性起推动作用的是电子学在功率转换、传输及控制系统中起到越来越重要的作用, 在此类系统中机电系统曾经是首选。一般看来, 普通民众仅在过去20多年内开始不得不处理电磁兼容性问题, 而军方、北大西洋公约组织和射频工程师则从一开始就一直在处理这个问题。

1.2 定义

以下术语及概念贯穿全书, 详细的术语表附在本书的最后。

电磁兼容性 (Electromagnetic Compatibility, EMC)。电气和电子系统、设备及其装置正常工作在规定的安安全极限范围内和指定的电磁环境中, 既能够达到设计水平或性能又具有不遭受或不会造成不可接受的电磁干扰方面危害的能力。[美国国家标准学会 American National Standards Institute (ANSI) C64.14-1992]。

电磁干扰 (Electromagnetic Interference, EMI)。破坏性的电磁 (EM) 能量从一个电子设备通过辐射或传导 (或两者) 途径传输到另外一个设备的过程。在通常情形下, 此项特别指 RF 信号; 然而, 是在整个 EM 谱上观测 EMI。

射频 (Radio Frequency, RF)。包含通信常用频段相干电磁辐射能量的频率范围, 大致范围从 9 kHz 到 300 GHz, 该能量可伴随着电子设备的运行发射出来。射频的发射通常有两种基本机理:

辐射发射 (Radiated Emissions)。通过某种媒质以电磁场的形式传播 RF 能量分量。尽管 RF 能量通常是通过自由空间传播的, 但其他形式的场传输也可能存在。

传导发射 (Conducted Emissions)。通过某种媒质以传输波的形式传播射频能量分量, 一般是通过导线或互连的电缆。线传导干扰 (line-conducted interference) 指的是在电源线或交流电源输入电缆中的 RF 能量, 传导信号正如导波一样进行传输。

敏感度 (Susceptibility)。放置在电磁干扰环境中的装置或系统有可能受到电磁干扰影响或破坏, 敏感度是对这种趋势的一个相对量度, 它是因抗扰度欠佳引起的。

抗扰度 (Immunity)。装置或系统在维持预定性能水平时抵抗电磁干扰能力的相对量度。

静电放电 (Electrostatic Discharge, ESD)。处于不同静电电位的导体之间由于接近或直接

接触而产生的电荷传输,此项以高压脉冲观测到,该脉冲有可能引起敏感性器件的损坏或部分功能丧失。

辐射抗扰度 (Radiated Immunity)。产品抵抗通过自由空间传播的电磁能量的相对能力。

传导抗扰度 (Conducted Immunity)。产品抵抗通过外接电缆、电源线、输入输出 (I/O) 互连产生的电磁能量的相对能力。

安全防护 (Containment)。一种防止RF能量溢出封闭壳体的过程,一般通过将产品屏蔽在一个金属封闭壳体(法拉第屏蔽盒或高斯结构)内或通过使用一个带有RF导电涂层的塑料外罩来完成。反过来说,安全防护也可以防止RF能量进入封闭体。

抑制 (Suppression)。不依赖于其他方式(诸如金属屏蔽或底盘)减小或消除RF能量的过程。抑制可能包括屏蔽以及滤波。

电压探头 (Voltage Probe)。测量传输线中电压的转换器。这种探头含有一个串联电阻、一个直流 (direct-current, DC) 隔断电容,以及一个提供低阻抗输入到接收器的电感。这种探头被用于传输线的直接连接中且不会受当前电流大小的影响。

电流探头 (Current Probe)。测量传输线中电流大小的传感器。这种探头由一个磁性环状材料构成,此环能够检测环路中出现的磁通大小并将测量到的磁场显示到接收器上。

嗅探器 (Sniffer Probe)。用于隔离或定位RF辐射能量的小传感器。通过电磁场耦合,由于测量过程只是相对的,所以测量的校准问题没必要考虑。

场效应晶体管探测器 (Field Effect Transistor Probe, FET Probe)。高输入阻抗传感器。用于测量传输线中的待测信号,不增加电容性负载或影响传输波的性能。

频谱分析仪 (Spectrum Analyzer)。主要用来显示输入信号功率的分配随频率函数变化的仪器。频谱分析仪在通过重复扫描感兴趣的频段并显示测试信号所有分量来分析电波波形特性中非常有用。

示波器 (Oscilloscope)。主要用来观测一个或多个快速变化的、作为时间函数的电量瞬时值的仪器。

相关分析仪 (Correlation Analyzer)。类似于频谱分析仪,但带有两个频率和时间互相同步的输入,这个功能可用于对输入信号分析的数字信号处理器。

线路阻抗稳定性网络 (Line Impedance Stabilization Network, LISN)。在待测仪器的电源负载中嵌入的网络,在给定频段内为测量干扰电压提供一个指定的负载阻抗,并且可以在此频段内隔离仪器与电源。也定义为“人工电源网络”。

天线 (Antenna)。用于发射或接收电磁信号或功率的装置,应设计成最大程度地耦合电磁场。

双锥形天线 (Biconical)。由两个具有同轴、同顶点的圆锥形导体组成的天线,并在顶点处激励或与接收机连接。

对数周期天线 (Log Periodic)。具有阻抗和辐射特性按频率对数函数周期性重复的几何结构的一组天线。

双对数天线 (Bilog)。将双锥天线和对数周期性天线的属性以及电磁特性组合为一个装置的单个天线。

环形天线 (Loop)。一种线圈状的天线,对磁场敏感且对电场免疫。垂直于环路平面的磁场分量在线圈上产生电压,根据法拉第定律其正比于频率。

喇叭式天线 (Horn)。具有喇叭式结构的辐射或接收设备。通常用于频率高于1 GHz的场合。

1.3 干扰的本质

电磁兼容问题可归为两类：内部的和外部的。内部的一类是信号沿着传输路径退化的结果，除了场在内部部件之间的耦合以外（例如电源对磁盘驱动器的耦合），还包括实际电路之间的耦合（即串扰）。

外部的交互作用可分为发射和抗扰度两个方面，发射是由时钟或其他周期性信号的谐波产生的，排除途径主要是将周期性信号限制在尽可能小的范围内，并截断对外部路径的寄生耦合。

对于像静电放电（ESD）或射频干扰（RFI）这类外部影响的敏感性与传播场有关，该场耦合到输入/输出连线，而后传输到单元内部再到达屏蔽壳体。主要的接收者是传输线、关键装置以及敏感的相邻路线，特别是那些以边沿触发部件终结的路线。

当对产品或设计进行电磁兼容分析时，需要考虑5种主要因素^[1]：

- 1) 频率。在频谱中何处可以观察到这个问题？
- 2) 幅度。多强的源能量等级、多大的电压会引起有害干扰？
- 3) 时间。是连续的（周期信号）还是仅存在于几个操作循环中（例如磁盘的写操作或网络突发传输时）？
- 4) 阻抗。发射机和接收机的阻抗如何？传输体系的线间阻抗如何？（线间距离影响到波阻抗）
- 5) 尺寸。引起发射被观测到的辐射设备（或器件组）的物理尺寸是多少？射频电流将产生电磁场，该场会通过底架中等于工作波长或“上升时间距离”的有效部分的裂缝泄露出外壳。例如，在印刷电路板（PCB）上的传送路线长度与射频电流的传输路径有直接关系。类似的例子有系统上的外接电缆，其系统物理上尺寸与传播场的波长相同。

无论何时处理电磁干扰问题，记住这些基于产品应用的明细表是有益处的，理解这5个事项将使许多电磁干扰如何存在的谜题清晰化，应用这5种考虑提醒人们：一种设计方法在某些场合是合适的而在另外一些场合却不合适。例如单点接地对于低频（如音频）应用是极好的，但是完全不适于射频信号，这存在于大部分电磁干扰问题中。工程师可能忽视了这一点而在所有产品设计中采用单点接地，没有意识到其他更为复杂的问题会由于这种接地方式而产生。

在设计一个产品的印刷电路板（PCB）时，涉及到射频电流。电流优先于电压考虑是出于简单的原因：电流总在一个或多个闭合电路中流动。引导或掌控这个电流按系统正常运转要求的工作方式流动是有利的，为了控制电流流经的路径，必须提供一个低阻抗的射频返回路径返回到能量源。应当使干扰电流改道远离负载或易受害电路，对于从电源到负载需要一个高阻抗路径的应用，应该考虑到返回电流行进的所有可能路径。^[2, 3]

1.4 产品测试综述

为了在产品测试和故障检测内容上得到满意的结果，人们必须了解系统是如何工作的，以及所测得的数据是否有效和精确连同可能出现的仪器故障都要一起考虑。

1.4.1 测试环境

当打算诊断电磁兼容事件时，产品放置的位置可能在引起故障或防止该故障发生中起到重要的作用。对于未放置在电磁兼容控制区域的产品，环境可能会对其造成影响，诊断技术可能很难实施。对于这种状况，由于起因可能归结于无关的源，很难确定是否有兼容性问题

存在于不同的系统间或某个特定单元内部中。测试产品或故障诊断的第一步是确定不期望的场是由传导还是辐射机理产生的。

在工业环境中进行测试的最大困难是放置在近邻地方的另一个产品可能无法加以区分,或该产品存在同样的问题,这些系统可能是由不同厂家制造的。典型的例子是办公室充斥了许多个人电脑及网络设备,如果安装在布线室中的主要网络集线器恰好带有功能上的问题或电磁干扰的问题,就可能不切实际地拆除该网络集线器并将其退回厂家维修。问题可能并非网络集线器,而是由于大量工作于相近频率的电脑引起的复杂辐射事件。这些电脑是问题根源,但网络集线器可能被误判。这种情形最多是很难诊断,但是通过相干分析仪就有可能进行诊断了。

另一个例子属于个人计算机的问题。有很多桌面型和膝上型电脑的厂家,都有B级辐射发射的认证。某一个卖方可能高度兼容而另一个却不太兼容,对于由单个公司销售的相同系列内的不同型号电脑也是这样。如果试图将不同系统集合在一起组成一个体系,一个假定兼容的系统可能在功能和常规兼容性方面引起显著的问题。只要将不同的设备放置到相同的环境中,就会引发电磁干扰问题。

在欧洲,欧洲议会已经颁布了法令:法令上要求电气设备必须满足辐射和抗扰度的防护标准。当设备遵守测试标准时,就给它贴上一个图标:符合欧洲标准(Conformity European, CE)。CE兼容部件标记的事实并非意味着这些部件功能与其他子系统兼容,并使得整个系统兼容。此外,CE标志的产品仅代表可能已在最佳情形的配置中进行了测试,而非安装在最坏情况的底架或环境中。

下列的隐患提供了对上述兼容性产品问题的进一步思考:

1) 尽管部件上贴有CE标签,它们可能并没有事先进行电磁兼容方面的测试或验证,符合标准可能是针对低电压或其他指标。

2) 兼容测试结果以及相应的说明文件可能并非可信,特别是对于测试精度方面。

3) 元件或附件可能并没有对应于合适的标准正确地进行测量,鉴于对实际测试报告的疑问,人们可能发现在测试装置或测试数据中的明显问题来自于不同的配置,而非来自于报告描述的那些内容。

4) 即使产品做了正确的测试,测试体系可能不是在最恶劣情形下或者与安装手册中明确描述的不符。让所有电缆均连到工作在最恶劣情形模式中的系统之后,必须关注产品使用的环境。数据必须真实地呈现互连电缆适当终结的情况,而不是仅悬挂在待测仪器(equipment under test, EUT)上。当将一个系统安置在这种隐患下,可能会有明显的电磁干扰问题。

5) 提供给测试室的大多数单元没有合适的连接电缆和安装说明。

6) 部件通常仅强调在某些环境下的兼容特性,这些环境可能并非适合于最终用户需求。一个典型的例子就是使用按重工业应用来做测试的装配,而非安装在一个住宅环境中。

7) 在通过验证后,可能还会对产品进行更改,而没有重新测试来确保延续的一致性,只是假设所做的更改对电磁兼容性没有影响。没有质量控制体系来检验所有产品复制精确,硅部件的压模收缩就是一个例子。

8) 购买者有可能错误地用伪劣部件代替合法部件,或者如果是通过分销商购买则在不知供货商改变的情况下这样做了,仓库中可能将好的部件和差的部件混放在一起。

9) 购买带有质量保证书的产品并不意味着获得了完善的售后服务,购买良好信誉的产品并非意味着在多数欧洲范围内得到保障,特别是在最终用户的应用还未进行测试时。