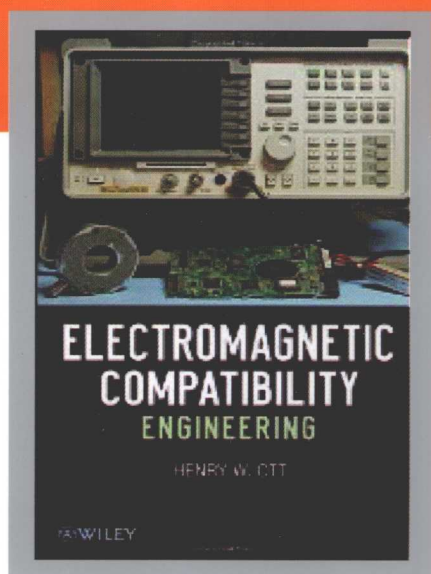


信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列

Electromagnetic Compatibility Engineering

电磁兼容工程

Henry W. Ott 著
邹澎 等 译



清华大学出版社

013037721

TN03-43

10

信息技术和电气工程学科国际知名教材

Electromagnetic Compatibility Engineering

电磁兼容工程

Henry W. Ott 著

邹澎 等 译



TN03-43
10

清华大学出版社



北航

C1645629

127780810

Electromagnetic Compatibility Engineering by Henry W. Ott

978-0-470-18930-6

Copyright © 2009 by John Wiley & Sons, inc., Hoboken, New Jersey.

Published simultaneously in Canada.

All Rights Reserved. This translation published under license. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2010-8137

本书封面贴有 John Wiley & Sons 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

版权所有, 侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容工程/(美)奥特(Ott, H. W.)著; 邹澎等译. --北京: 清华大学出版社, 2013. 5
(信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列)

ISBN 978-7-302-31776-0

I. ①电… II. ①奥… ②邹… III. ①电磁兼容性—教材 IV. ①TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 069839 号

责任编辑: 文 怡

封面设计: 常雪影

责任校对: 李建庄

责任印制: 李红英

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175

邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者: 清华大学印刷厂

装 订 者: 三河市漂源装订厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm

印 张: 34.5

字 数: 860 千字

版 次: 2013 年 5 月第 1 版

印 次: 2013 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 1~3000

定 价: 79.00 元

产品编号: 038407-01

序言



《Electromagnetic Compatibility Engineering》是我以前的著作《Noise Reduction Techniques in Electronic Systems》的第三版,不仅更换了书名,书中的内容更有较多的变化。原来 12 章中的 9 章内容是完全重写的,还增加了 6 个新的章节和两个附录,超过 600 页是新加的和修订过的内容(包括 342 幅新图)。大部分的新内容是关于电磁兼容工程理论的实践应用,这些内容基于我 20 多年来从事电磁兼容咨询工作和电磁兼容培训的教学经验。

电磁兼容性和符合性的问题是设计工程师面对的较困难和令人沮丧的问题,大部分工程师不能很好地解决这些问题,是因为在学校通常没有讲授这些课程。通常是通过反复尝试和错误来解决 EMC 的问题,人们很少或并不理解其中的理论知识,这是非常耗时的,结果也常常是令人不满意的。这种状况令人遗憾,因为涉及的大部分理论是简单的,而且能够使用基础物理知识来解释,本书试图纠正这种状况。

这本书主要面向那些涉及电子设备或系统设计的工程师,他们要面对电磁兼容性和符合性问题。本书要处理电磁兼容工程实际问题,包括发射和抗扰性。本书中的概念适用于从音频以下到 GHz 的模拟和数字电路。在讲究成本效益的 EMC 设计中,强调的是数学计算量和复杂性要最小。读者应获得电子设备设计中必需的知识,也就是适应电磁环境,符合国内、国际 EMC 规范。

本书可以作为高年级和继续教育电磁兼容课程的教科书,在本书的结尾有 251 道习题供学生练习,相应的答案在附录 F 中。

本书分为两部分:第一部分是 EMC 理论,从第 1 章到第 10 章。第二部分是 EMC 应用,从第 11 章到第 18 章。另外,本书有 6 个附录的补充信息。

本书内容的组织如下:第 1 章介绍电磁兼容概念和美国以及国际 EMC 标准,包括欧盟的标准、FCC 标准和美国的军用标准。第 2 章讨论电场和磁场通过电缆耦合和串扰以及电缆屏蔽和接地。第 3 章涵盖安全性、电源、信号和硬件/系统接地。

第 4 章讨论平衡和滤波,以及差分放大器和低频模拟电路去耦合。第 5 章介绍无源器件,涵盖影响器件性能的非理想特性,除了电阻器、电容器和电感器,还包含铁氧体磁珠、导体和传输线。第 6 章详细分析金属薄层、塑料外导体涂层的屏蔽效果以及孔径对屏蔽效果的影响。

第 7 章涉及继电器和开关的接点保护。第 8 章和第 9 章讨论器件和有源设备中的内部噪声源。第 8 章涉及内在噪声源,如热噪声源和散粒噪声源。第 9 章涉及有源设备中的噪声源。

第 10、11 和 12 章是有关数字电路的电磁兼容问题。第 10 章研究数字电路接地,包括接地阻抗和数字逻辑电流怎样流动的讨论。第 11 章讨论数字电路电源分布和去耦合。第 12 章涉及数字电路辐射机制,包括共模和差模机制。

第 13 章涉及交流和直流电源线上的传导发射以及开关电源和变速电机驱动器的 EMC 问题。第 14 章涉及射频和瞬时抗扰性以及电磁环境的讨论。第 15 章涉及电子产品设计中的静电放电防护问题,重点讨论包括机械、电子和软件设计三管齐下方法的重要性。

第 16 章涉及不经常被讨论的印刷电路板布线和叠层问题。第 17 章讨论复合信号印刷电路板中分区、接地和布线的困难问题。

最后一章(第 18 章)是 EMC 预测量,这是在产品开发实验室使用简单而又便宜的试验设备能做的测量,可以测量产品的 EMC 性能。

每一章的最后都有一个讨论重点内容总结以及供读者复习的许多习题。对于那些希望得到本课题更多信息的读者,每章后都有一个参考文献目录和深入阅读文献目录。

6 个附录中提供了补充信息,附录 A 是关于分贝,附录 B 是使得你的产品发射最大化的 10 种最好的方法,附录 C 推导薄屏蔽层中磁场的多次反射方程。

附录 D,“偶极子入门”简单地、有见解和直观地讨论偶极子天线如何工作。如果一个产品能接受或辐射电磁能,这就是天线。因此,理解一些基本的天线理论对所有的工程师,特别是 EMC 工程师是有帮助的。

附录 E 解释了重要的但不好理解的部分电感理论,附录 F 提供了每章末尾问题的答案。

我要向所有对《Noise Reduction Techniques in Electronic Systems》发表评论的人,向所有鼓励我撰写《Electromagnetic Compatibility Engineering》的人表示感谢和赞赏。我特别感谢 John Celli Bob, German, Dr. Clayton Paul, Mark Steffka 和 Jim Brown,他们对书稿的主要章节有见解深刻的评论,他们给予鼓励,并和我们对许多 EMC 课题开展卓有成效的讨论。《Electromagnetic Compatibility Engineering》因为他们更精彩。

部分书稿也用于 Mark Steffka 在 Michigan-Dearborn 大学 2007 和 2008 学期电磁兼容课程的讲授,我衷心感谢这两个班的学生,收到他们大量的评论和建议(其中许多被编入本书),特别是他们对一些问题的建议也被收录。我还要感谢 James Styles,我和 Mark Steffka 都认为他提出了非常有用的评论。

最后,我感谢所有花费时间检查该书稿各章节的同事,他们给出了有益的评论和建议。

关于 EMC 规范的附加技术信息和更新信息,以及本书的勘误表在 Henry Ott Consultants 网站 www.hottconsultants.com 可以查看。

Henry W. Ott

利文斯通,新泽西州

2009 年 1 月 11 日

译者序



《Electromagnetic Compatibility Engineering》是 Henry W. Ott 在其以前的著作《Noise Reduction Techniques in Electronic Systems》第 2 版的基础上补充大量内容后出版的新书。原来 12 章中的 9 章内容是完全重写的,还增加了 6 个新的章节和 2 个附录。本书内容全面,既有理论分析,也有应用技术,本书的第 1 部分是电磁兼容理论,第 2 部分是电磁兼容应用。

本书对理论分析和应用技术讲得很具体,实用性很强。例如关于电缆与机箱的屏蔽及屏蔽层的端接方法,无源器件和有源器件的噪声分析,对差模辐射、共模辐射及抑制措施的分析,去耦效果的定量研究,触点保护技术,静电防护技术,对 PCB 板迹线上信号的返回电流路径的分析及 PCB 板上槽和缝隙的处理方法,PCB 板上的数字电流分析及模拟地和数字地的处理方法,多层 PCB 板上的电磁兼容技术,EMC 预测量,部分电感的计算及接地面电感的测量等。

虽然近几年国内已经出现了很多电磁兼容教材和专著,但是对于经常要面对产品的电磁兼容认证问题,要处理许多实际电磁兼容问题的系统设计工程师和电路设计工程师来说,本书仍不失为一本不可多得的参考资料。本书也可以作为电子类、电工类、通信、检测技术、仪器仪表等专业研究生、本科高年级学生的教材及相关行业的培训教材。

在翻译本书的过程中,除了纠正已公布的勘误表中的错误以外,也纠正了一些没有列入勘误表中的错误,使书中介绍的概念和方法更加准确。本书将中文书刊中一些不常用的单位符号收录在附录 G 中。

本书的第 1 章、第 2 章由周晓平副教授翻译,第 3 章、第 4 章、第 10~14 章由马力博士翻译,第 5~9 章由杨明珊教授翻译,第 15~17 章、附录 A~E 由刘黎刚博士翻译,邹澎教授翻译了第 18 章、索引并审校全书。

译者水平有限,读者若发现本书中有错误和不当之处,恳请指出或提出修正的意见,请发到以下邮箱:zzuzp@zzu.edu.cn。

编 者

2013 年 2 月

译者简介



邹澎, 郑州大学信息工程学院教授, 河南省电磁检测工程技术研究中心主任, 河南省电磁计量和电磁兼容检测专业委员会副主任, 河南省电工技术学会常务理事。主要从事电磁场与电磁波理论、电磁兼容和电磁环境的研究。已出版专著和教材《电磁场与电磁波》、《电磁兼容原理、技术和应用》、《环境电磁场测量》等。

杨明珊, 博士, 郑州大学信息工程学院教授。

周晓平, 郑州大学信息工程学院副教授。

马力, 博士, 郑州大学信息工程学院讲师。

刘黎刚, 郑州大学信息工程学院讲师, 北京航空航天大学在读博士。

目 录



第 1 部分 电磁兼容理论

第 1 章 电磁兼容	3
1.1 引言	3
1.2 噪声和干扰	3
1.3 电磁兼容性设计	3
1.4 工程文件和电磁兼容	5
1.5 美国的 EMC 规则	5
1.5.1 FCC 法规	5
1.5.2 FCC 第 15 部分,子部分 B	6
1.5.3 发射	8
1.5.4 管理程序	10
1.5.5 敏感度	12
1.5.6 医疗设备	12
1.5.7 电信	13
1.5.8 汽车	13
1.6 加拿大的 EMC 要求	13
1.7 欧盟的 EMC 要求	14
1.7.1 发射要求	14
1.7.2 谐波和闪烁	15
1.7.3 抗扰度要求	16
1.7.4 指令和标准	16
1.8 国际协调	18
1.9 军用标准	19
1.10 航空电子技术	20
1.11 监管过程	20
1.12 典型噪声路径	21
1.13 噪声耦合方法	22
1.13.1 传导耦合噪声	22

1.13.2 共阻抗耦合	22
1.13.3 电场和磁场耦合	22
1.14 其他噪声源	23
1.14.1 电池作用	23
1.14.2 电解作用	24
1.14.3 摩擦起电效应	24
1.14.4 导体运动	24
1.15 使用网络理论	24
总结	26
习题	27
参考文献	28
深入阅读	29
第2章 布线	30
2.1 电容耦合	30
2.2 屏蔽对电容耦合的影响	32
2.3 电感耦合	34
2.4 互感的计算	36
2.5 屏蔽对磁耦合的影响	37
2.5.1 屏蔽层与内导体之间的磁耦合	38
2.5.2 磁耦合——裸线对屏蔽导体	40
2.6 屏蔽防止磁场辐射	41
2.7 接收器对磁场的屏蔽	43
2.8 公共阻抗屏蔽耦合	43
2.9 实验数据	44
2.10 选择性屏蔽示例	46
2.11 屏蔽转移阻抗	47
2.12 同轴电缆和双绞线	48
2.13 编织屏蔽层	49
2.14 螺旋屏蔽	50
2.15 屏蔽层端接	52
2.15.1 辫线(猪尾巴线)	52
2.15.2 电缆屏蔽层接地	54
2.16 带状电缆	58
2.17 电长电缆	59
总结	60
习题	60
参考文献	63
深入阅读	63

第 3 章 接地	65
3.1 交流配电和安全接地	66
3.1.1 进线口	66
3.1.2 分支电路	67
3.1.3 噪声控制	68
3.1.4 大地地	69
3.1.5 单独接地	70
3.1.6 独立派生系统	71
3.1.7 接地神话	72
3.2 信号地	72
3.2.1 单点接地系统	75
3.2.2 多点接地系统	77
3.2.3 共阻抗耦合	77
3.2.4 混合接地	78
3.2.5 底盘接地	79
3.3 设备/系统接地	79
3.3.1 孤立系统	80
3.3.2 集群系统	80
3.3.3 分布式系统	84
3.4 接地环路	85
3.5 共模扼流圈的低频分析	88
3.6 共模扼流圈的高频分析	90
3.7 电路的单一接地参考	91
总结	92
习题	92
参考文献	93
深入阅读	93
第 4 章 平衡和滤波	94
4.1 平衡	94
4.1.1 共模抑制比	96
4.1.2 电缆平衡	98
4.1.3 系统平衡	98
4.1.4 平衡负载	99
4.2 滤波	103
4.2.1 共模滤波器	103
4.2.2 滤波器中的寄生效应	105
4.3 电源去耦	106
4.3.1 低频模拟电路去耦	109

4.3.2 放大器去耦	111
4.4 驱动电容性负载	111
4.5 系统带宽	113
4.6 调制和编码	113
总结	113
习题	114
参考文献	115
深入阅读	115
第5章 无源器件	116
5.1 电容器	116
5.1.1 电解电容器	117
5.1.2 薄膜电容器	118
5.1.3 云母和陶瓷电容器	118
5.1.4 穿心电容器	119
5.1.5 并联电容器	120
5.2 电感器	121
5.3 变压器	121
5.4 电阻器	123
5.5 导线	124
5.5.1 圆导线的电感	124
5.5.2 矩形截面导线的电感	125
5.5.3 圆导线的电阻	125
5.5.4 矩形截面导线的电阻	126
5.6 传输线	127
5.6.1 特性阻抗	129
5.6.2 传播常数	131
5.6.3 高频损耗	131
5.6.4 C 、 L 和 ϵ_r 的关系	133
5.6.5 最后的思考	133
5.7 铁氧体	134
总结	138
习题	139
参考文献	140
深入阅读	141
第6章 屏蔽	142
6.1 近场和远场	142
6.2 特性阻抗和波阻抗	144
6.3 屏蔽效能	145

6.4 吸收损耗	146
6.5 反射损耗	149
6.5.1 平面波的反射损耗	150
6.5.2 近区场的反射损耗	151
6.5.3 电场的反射损耗	152
6.5.4 磁场的反射损耗	152
6.5.5 反射损耗的通用方程	153
6.5.6 薄屏蔽层内的多重反射	153
6.6 综合吸收损耗和反射损耗	154
6.6.1 平面波	154
6.6.2 电场	154
6.6.3 磁场	155
6.7 屏蔽方程小结	155
6.8 用磁性材料屏蔽	156
6.9 实验数据	158
6.10 孔隙	159
6.10.1 多孔隙	162
6.10.2 接缝	163
6.10.3 转移阻抗	165
6.11 低于截止频率的波导	167
6.12 导电衬垫	168
6.12.1 不同金属的连接	168
6.12.2 导电衬垫的安装	169
6.13 “理想”屏蔽	171
6.14 导电窗口	171
6.14.1 透明导电涂层	172
6.14.2 金属丝网屏	172
6.14.3 窗口的安装	172
6.15 导电涂层	172
6.15.1 导电涂料	173
6.15.2 火焰/电弧喷涂	173
6.15.3 真空金属化涂层	173
6.15.4 化学镀	174
6.15.5 金属箔衬层	174
6.15.6 填充塑料	174
6.16 内部屏蔽	175
6.17 空腔谐振	176
6.18 屏蔽接地	176
总结	177
习题	178

参考文献	178
深入阅读	179
第7章 触点保护	180
7.1 辉光放电	180
7.2 金属蒸气或电弧放电	181
7.3 交流电路与直流电路	182
7.4 触点材料	182
7.5 触点容量	183
7.6 具有高浪涌电流的负载	183
7.7 电感性负载	184
7.8 触点保护基础	185
7.9 电感性负载的暂态抑制	187
7.10 电感负载的触点保护网络	189
7.10.1 C 网络	189
7.10.2 R-C 网络	189
7.10.3 R-C-D 网络	190
7.11 晶体管开关控制的电感性负载	191
7.12 电阻性负载触点保护	191
7.13 触点保护选择指南	192
7.14 举例	192
总结	193
习题	193
参考文献	194
深入阅读	194
第8章 固有噪声源	195
8.1 热噪声	195
8.2 热噪声的特征	197
8.3 等效噪声带宽	199
8.4 散粒噪声	201
8.5 接触噪声	201
8.6 爆米花噪声	202
8.7 噪声电压叠加	202
8.8 随机噪声测量	203
总结	204
习题	204
参考文献	205
深入阅读	205

第 9 章 有源器件噪声	206
9.1 噪声系数	206
9.2 噪声系数的测量	207
9.2.1 单频法	207
9.2.2 噪声二极管法	208
9.3 计算 S/N 比值和从噪声系数计算输入噪声电压	209
9.4 噪声电压和电流模型	210
9.5 V_n 和 I_n 的测量	211
9.6 从 V_n - I_n 计算噪声系数和信噪比	212
9.7 最佳源电阻	213
9.8 噪声系数的级联	214
9.9 噪声温度	216
9.10 双极型晶体管噪声	216
9.10.1 晶体管噪声系数	217
9.10.2 晶体管的 V_n - I_n	218
9.11 场效应晶体管噪声	219
9.11.1 FET 噪声系数	219
9.11.2 FET 噪声的 V_n - I_n 表示方法	220
9.12 运算放大器的噪声	220
9.12.1 描述运算放大器噪声的方法	222
9.12.2 运算放大器噪声系数	222
总结	223
习题	224
参考文献	225
深入阅读	225
第 10 章 数字电路接地	226
10.1 频域和时域	226
10.2 模拟和数字电路	227
10.3 数字逻辑噪声	227
10.4 内部噪声源	227
10.5 数字电路接地噪声	229
10.5.1 使电感最小化	229
10.5.2 互感	230
10.5.3 实用的数字电路接地系统	231
10.5.4 环路面积	233
10.6 接地面电流分布和阻抗	234
10.6.1 参考面电流分布	234
10.6.2 接地面阻抗	238

10.6.3 接地面电压	243
10.6.4 终端效应	244
10.7 数字逻辑电流的流动	246
10.7.1 微带线	247
10.7.2 带状线	248
10.7.3 数字电路电流流动小结	250
总结	250
习题	251
参考文献	252
深入阅读	252

第 2 部分 电磁兼容应用

第 11 章 数字电路的配电	255
11.1 电源去耦	255
11.2 瞬态电源电流	256
11.2.1 瞬态负载电流	256
11.2.2 动态内部电流	257
11.2.3 瞬态电流的傅里叶频谱	257
11.2.4 总瞬态电流	258
11.3 去耦电容	259
11.4 有效的去耦策略	261
11.4.1 多个去耦电容	262
11.4.2 相同值的多个电容	262
11.4.3 两种不同值的多个电容	264
11.4.4 许多不同值的多个电容	265
11.4.5 目标阻抗	266
11.4.6 嵌入式 PCB 电容	268
11.4.7 电源隔离	271
11.5 去耦对辐射发射的影响	272
11.6 去耦电容的型号和大小	273
11.7 去耦电容的布设和安装	274
11.8 大容量去耦电容	275
11.9 电源输入滤波器	276
总结	276
习题	276
参考文献	277
深入阅读	278

第 12 章 数字电路辐射	279
12.1 差模辐射	280
12.1.1 环面积	281
12.1.2 环电流	281
12.1.3 傅里叶级数	281
12.1.4 辐射发射包络	283
12.2 控制差模辐射	284
12.2.1 电路板的布设	284
12.2.2 抵消环路	285
12.2.3 抖动时钟	286
12.3 共模辐射	287
12.4 控制共模辐射	289
12.4.1 共模电压	290
12.4.2 电缆滤波和屏蔽	290
12.4.3 分离的 I/O 地	292
12.4.4 共模辐射问题的处理	294
总结	294
习题	295
参考文献	295
深入阅读	296
第 13 章 传导发射	297
13.1 电源线阻抗	297
13.2 开关电源	299
13.2.1 共模发射	300
13.2.2 差模发射	302
13.2.3 DC-DC 变换器	306
13.2.4 整流二极管噪声	306
13.3 电源线滤波器	307
13.3.1 共模滤波	308
13.3.2 差模滤波	308
13.3.3 泄露电感	309
13.3.4 滤波器的安装	311
13.3.5 具有集成电源线滤波器的电源	312
13.3.6 高频噪声	313
13.4 初级到次级的共模耦合	314
13.5 频率抖动	315
13.6 电源的不稳定性	315
13.7 磁场发射	316

13.8	变速电机驱动器	318
13.9	谐波抑制	322
13.9.1	感性输入滤波器	322
13.9.2	有源功率因数校正	322
13.9.3	交流线路电抗器	323
总结		324
习题		325
参考文献		325
深入阅读		326
第14章	射频和瞬态抗扰度	327
14.1	性能标准	327
14.2	射频抗扰度	327
14.2.1	射频环境	328
14.2.2	音频检波	329
14.2.3	RFI 缓解技术	329
14.3	瞬态抗扰度	334
14.3.1	静电放电	335
14.3.2	电快速瞬变	335
14.3.3	雷电浪涌	335
14.3.4	瞬态抑制网络	336
14.3.5	信号线抑制	337
14.3.6	高速信号线的保护	339
14.3.7	电源线瞬态抑制	340
14.3.8	混合保护网络	343
14.4	电源线骚扰	344
小结		346
习题		347
参考文献		348
深入阅读		349
第15章	静电放电	350
15.1	静电的产生	350
15.1.1	感应起电	352
15.1.2	能量存储	353
15.2	人体模型	354
15.3	静电泄漏	355
15.4	设备设计中的静电放电防护	357
15.5	防止静电放电进入	358
15.5.1	金属机壳	359