



国际电气工程先进技术译丛



WILEY

www.wiley.com

电磁屏蔽 原理与应用

Electromagnetic Shielding

Salvatore Celozzi

(意) Rodolfo Araneo 编著

Giampiero Lovat

郎为民 姜 斌 等译
张云峰 焦 巧



4



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工

-35

电磁屏蔽原理与应用

Salvatore Celozzi

(意) Rodolfo Araneo 编著

Giampiero Lovat

郎为民 姜 斌 等译

张云峰 焦 巧

TN1214
Q364



机械工业出版社

本书围绕如何降低指定区域电磁场电平展开研究,依据 IEC、ISO 和 ITU-T 等标准化组织颁发的最新标准,比较全面和系统地介绍了电磁屏蔽材料、基本配置、屏蔽方法、设计安装和分析技术等方面的知识。本书主要内容包括:屏蔽中的电磁理论、屏蔽材料、屏蔽配置优值系数、分层介质的屏蔽效能、屏蔽分析中的数值方法、平面金属屏的孔缝、壳体、电缆屏蔽、屏蔽组件和安装指南、频率选择性表面、屏蔽设计指南和非常规屏蔽方法,并将静电屏蔽、磁场屏蔽、标准与测量方法以及英文缩略语作为 4 个附录,是迄今为止内容最为全面的电磁屏蔽教材。本书研究了电磁屏蔽领域的最新技术,给出了电磁屏蔽的实用方法,分析了普通电磁屏蔽教材中未涉及的部分内容,并在每章末列出了参考文献,便于读者深入学习。

本书可作为电信和电气工程师以及设备制造商的技术参考书,也可作为工业界和学术界从事电磁屏蔽结构设计与分析的研究人员的培训教材,还可作为高等院校电磁波专业的本科生、研究生教材。

Original English Language Edition Copyright © 2007 by John Wiley Ltd.

All Rights Reserved. This Translation Published Under License.

Simplified Chinese Translation Copyright © 2009 by China Machine Press.

本书简体中文版由机械工业出版社出版,未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有,翻印必究。

本书版权登记号:图字 01-2008-3263 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

电磁屏蔽原理与应用/(意)切洛齐 (Celozzi, S.), (意)阿兰欧 (Araneo, R.), (意)洛瓦特 (Lovat, G.) 编著;郎为民等译. —北京:机械工业出版社, 2009. 10

(国际电气工程先进技术译丛)

Electromagnetic Shielding

ISBN 978-7-111-28560-1

I. 电… II. ①切…②阿…③洛…④郎… III. 电磁屏蔽
IV. TN721.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 190174 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:张俊红 责任编辑:林 桢 版式设计:霍永明

封面设计:马精明 责任校对:樊钟英 责任印制:杨 曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 19.5 印张 · 380 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-28560-1

定价: 88.00 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

社服务中心: (010) 88361066 门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者服务部: (010) 68993821 封面无防伪标均为盗版



关于作者

Salvatore Celozzi博士是罗马大学教授，他已经在各类学术期刊或国际会议论文集中发表约100篇论文，涉及的领域主要包括电磁屏蔽、传输线和印制电路等。他为《IEEE电磁兼容会刊》担任了5年的副主编，并数次荣获IEEE EMC协会颁发的大奖。Rodolfo Araneo博士是罗马大学的副教授，其研究领域包括电磁兼容(EMC)、高速印制电路板、屏蔽和传输线建模的数值技术和分析技术。Giampiero Lovat博士是罗马大学的副研究员，其研究领域包括平面结构泄漏现象、漏波天线与阵列、超材料的波导与辐射、通用周期结构和低频天线的理论和数值研究。



关于本书

本书围绕如何降低指定区域的电磁场电平展开研究，依据IEC、ISO和ITU-T等标准化组织颁发的最新标准，比较全面和系统地介绍了电磁屏蔽材料、基本配置、屏蔽方法、设计安装和分析技术等方面的知识。

主要围绕以下几个方面：

- 电磁屏蔽领域的最新技术
- 电磁屏蔽的实用方法
- 普通电磁屏蔽教材中未涉及的部分内容
- 每章末列出了参考文献，便于读者深入学习

译者的话

随着计算机应用的日益普及，计算机的电磁屏蔽问题更加突出，加上高速化、高灵敏化、高集成化会不可避免地生成宽带噪声，使原来可以忽略的弱小噪声变得不可忽略，内部耦合干扰的剧增使电磁环境更加复杂，电磁干扰更为恶化。

电磁屏蔽是以电磁场理论为基础，包括信息、电工、电子、通信、材料、结构等学科的边缘科学。有资料显示，干扰引起的计算机事故占计算机总事故的90%左右。近年来，仅仅因计算机遭雷击而被破坏的情况就有十几例。同时，计算机作为高速运行的电子设备，又不可避免地向外辐射电磁干扰，对环境中的人体、设备产生干扰或损伤。

我国的电磁屏蔽研究与发达国家相比，起步较晚、差距较大。加入WTO后，国产用电设备要站稳国内市场，进入国际市场，就必须符合相关EMC标准。为了适应市场要求和科学技术的发展，提高我国科技和产品的竞争能力，就必须对电子工程技术人员进行电磁屏蔽技术培训，对在校大学生、研究生进行电磁屏蔽理论和技术的教育，并加强电磁屏蔽技术研究。

本书对降低指定区域电磁场电平可能采取的方案进行了全面研究。在介绍完可用屏蔽材料之后，本书介绍了屏蔽配置的灵敏度、层状介质的屏蔽效能、屏蔽分析的数值方法、平板金属屏蔽的孔径、腔体和电缆屏蔽。这是迄今为止最新的、最全面的电磁屏蔽书籍之一：它研究了电磁屏蔽中一些革新性的技术；给出了一种电磁屏蔽的关键方法；对电磁屏蔽中常被忽略的问题进行了分析；在每一章末包含了相关参考文献，便于读者进行深入研究。本书最后3章讨论了频率选择屏蔽、屏蔽设计流程和屏蔽的非常规方法。对于电信和电子专业工程师，以及工业界和学术界从事电磁屏蔽结构的设计与分析的研究人员来说，本书是一种权威的便捷资源。与同类书相比，本书更加突出系统性、实用性和可操作性，从而弥补了同类书籍存在的诸多不足。

本书由郎为民、姜斌、张云峰、焦巧、刘晶、韩隽、高强翻译。其中，原书前言、第1、2、3、8、9、11、12章、附录C和附录D由郎为民、焦巧主持翻译，第4、5、6、7、10章、附录A和附录B由姜斌、张云峰、刘晶、韩隽、高强主持翻译。通信指挥学院的和湘、王逢东、靳焰、陈波、崔洪峰、丁锐、刘波、郝红、刘璐璐和任殿龙参与了本书部分章节的翻译，刘建国、杨扬、钟京立、毕进南、刘建中、李建军、胡东华、马同兵和熊华等专家教授参与了本书初稿的

IV 电磁屏蔽原理与应用

讨论与修改，朱元诚、李健、徐小涛、项宏宇和张昆绘制了本书的部分图表。华中科技大学的桂良启、刘干、许昌春、熊志强和谢海涛对本书的初稿进行了审校，并更正了不少错误，在此一并向他们表示衷心的感谢。同时，本书是译者在尽量忠实于原书的基础上翻译而成，书中的意见与观点并不代表译者本人及所在单位的意见和观点，这点请广大读者注意。

由于电磁屏蔽技术还在不断完善和深化发展之中，新的标准和应用不断涌现，加之译者水平有限，翻译时间仓促，因而本书翻译中的错漏之处在所难免，恳请各位专家和读者不吝指出。

谨以此书献给我聪明可爱的女儿郎子程！

郎为民

2009 年底

原书前言

本书书名应当修改为《电磁屏蔽简介》，这是因为每一章（每个部分）都可以作为一本书的主题。这样，本书的目标是围绕电磁屏蔽这个复杂变幻的主题，为充分认识此类现象提供一个初步的路线图。

本书共包括 12 章和 4 个附录，我们对这种安排进行简要的解释。为了与本书所属的丛书名称保持一致，我们分别将静电屏蔽和磁场屏蔽作为附录 A 和附录 B。尽管这些讨论可能在第 1 章中出现过，可是我们在做出将静电屏蔽和磁场屏蔽配置作为附录的最终决定时，考虑到这样一个事实，即静电屏蔽和磁场屏蔽已经比较成熟，且对于接触过电磁屏蔽的大多数读者已经比较熟悉。第 3 个附录涵盖了电磁屏蔽标准和测量过程等内容，将其置于本书的末端主要是考虑到与电磁屏蔽主题有关的各类材料极易过时。对于每位工程师来说，标准发展是一个现实问题，电磁屏蔽领域也无法避免。

本书的章节结构如下：首先是关于电磁屏蔽的开场白（第 1 章），然后对传统和现代屏蔽材料进行了详细描述（第 2 章）。第 3 章对适于屏蔽性能定量和对比分析的屏蔽配置优值系数进行了介绍，本章在深入思考的基础上，开启了针对关键问题的讨论（可能是永无止境的讨论）。第 4 章开始讨论电磁屏蔽可用分析方法的核心内容，介绍了入射均匀平面波的层状介质问题，同时对控制方程与传输线方程进行了比较详尽的对比。第 5 章主要介绍了适用于实际屏蔽问题分析的数值方法，其内容既包含了能够解决此类配置问题的可用数值方法数量，又列举了每种数值方法的优缺点，给出了相应实例。第 6 章主要关注屏蔽性能方面的孔径及其效应问题，因为孔径通常被认为屏蔽区域和源区域之间最为重要的耦合路径。本书继续对屏蔽室进行了全面分析，因为屏蔽室通常是一个封闭区域。第 8 章还考虑了电缆这个特例。电缆是优秀教材的一个主题。但是，至少是从原理上，人们可能无须做任何努力，直接选择现有文献来学习，教材中缺少电缆屏蔽内容将是一个严重的缺陷。因此，我们的折衷方法是给出屏蔽电缆最基础的知识。

从概念上讲，电缆既可以看作是一种屏蔽系统，又可以看作是屏蔽配置组件，这是第 9 章研究的内容。这些细节信息要比乍看起来更为重要，且对性能实现的水平起着决定性意义。读者应当经常参考制造商规范，并记住屏蔽组件通常无法直接进行对比，因为使用不同的测试装置会得到不同的测量数据。

最后 3 章包含了一些特色问题，即频率选择屏蔽、屏蔽设计过程和屏蔽的非

VI 电磁屏蔽原理与应用

常规方法，有兴趣的读者会发现需要进行深入研究的领域还很多。

在致谢之前，首先致歉：我们深知，本书无法将该研究和技术领域内所有的作者列举出来。由于篇幅的限制，我们省略了一些与我们观点不同的其他人观点的内容。本书作者们对为我们指出本书遗漏的任何读者表示感激。同时，在本书的后续版本中，我们将在引用参考文献时予以完善。

本书作者们感谢所有从事教育事业的人，感谢那些灌输教育价值、起源及其关系的祖先们，感谢当前哲学文化和科学文化的创始人，感谢电磁领域的先驱，感谢他们中的特殊教育工作者和同事。特别需要指出的是要感激 Paolo Burghignoli 博士的耐力与能力。作者要特别感谢的第一个人是 Motohisa Kanda 博士，与他的友谊鼓励我们关注电磁屏蔽这个特殊课题，并最终导致了本书的诞生。

最后，感谢本丛书的编辑 Chang 博士，激励我们向本辑知名丛书投稿，感谢 Wiley 出版社的编辑人员为提高手稿质量而做出的努力。

Salvatore Celozzi

Rodolfo Araneo

Giampiero Lovat

于意大利罗马

目 录

译者的话
原书前言

第1章 屏蔽中的电磁理论	1
1.1 定义	1
1.2 符号、表示与缩略语	2
1.3 电磁学基础	3
1.3.1 宏观电磁学和麦克斯韦方程	3
1.3.2 本构关系	5
1.3.3 断点与奇异性	8
1.3.4 初始条件与边界条件	9
1.3.5 坡印廷定理与能量考虑	10
1.3.6 基本定理	11
1.3.7 波方程、亥姆霍兹方程、电磁势与格林函数	13
1.4 基本的屏蔽机理	14
1.5 屏蔽结构内部源与外部源及相互关系	15
参考文献	16
第2章 屏蔽材料	17
2.1 标准金属和铁磁性材料	17
2.2 亚铁磁性材料	22
2.3 铁电材料	23
2.4 薄膜和导电涂料	25
2.5 其他适合于电磁屏蔽应用的材料	26
2.5.1 结构材料	26
2.5.2 导电高分子材料	26
2.5.3 导电玻璃和透明材料	27
2.5.4 导电(铁磁和亚铁磁)纸	27
2.6 特殊材料	27

VIII 电磁屏蔽原理与应用

2.6.1 特异材料与手性吸波材料	27
2.6.2 复合材料	29
2.6.3 纳米材料	30
2.6.4 高温超导体	30
参考文献	31
第3章 屏蔽配置优值系数	35
3.1 (局部) 屏蔽效能	35
3.2 全局观点	37
3.3 其他优值系数建议	38
3.4 统计方法	42
3.5 基于能量、面向内容的定义	43
3.6 屏蔽电缆	44
参考文献	44
第4章 分层介质的屏蔽效能	46
4.1 平面电磁波: 定义与性质	46
4.2 入射在平面屏蔽体上的均匀平面波	48
4.2.1 传输线法	48
4.2.2 单一平面屏蔽体	50
4.2.3 多重屏蔽(叠层屏蔽)	54
4.3 垂直入射于柱状屏蔽面的平面波	56
4.4 入射于球状屏蔽体的平面波	61
4.5 将 TL 类比法推广到近场源的限制	62
参考文献	70
第5章 屏蔽分析中的数值方法	72
5.1 有限元法	73
5.2 矩量法	81
5.3 时域有限差分法	90
5.4 有限积分技术	98
5.5 传输线矩阵法	102
5.6 局部元等效电路法	104
5.7 案例研究: 开有矩形缝隙导体屏蔽罩的散射	110

参考文献	113
第 6 章 平面金属屏的孔缝	120
6.1 历史背景	120
6.2 问题陈述	121
6.3 低频率分析: 通过小孔径的传播	122
6.4 小圆孔情况	123
6.5 非小圆孔情况	127
6.6 有限个小圆孔情况	127
6.7 对任意形状孔径的严格分析: 积分方程建立	129
6.8 经验法则	131
参考文献	133
第 7 章 壳体	135
7.1 金属空腔里磁场的模态扩展	135
7.2 理想无源空腔内的谐振	138
7.3 空腔的并矢格林函数	139
7.4 金属内场的激励	141
7.5 空腔壁在有耗损的情况下产生的减幅振荡和品质因数	142
7.6 在完全导电空腔中的孔径	144
7.6.1 小孔径近似问题	144
7.6.2 建立积分方程	146
7.6.3 孔径-空腔的共振	148
7.7 小负载效应	150
7.8 矩形腔体	150
7.8.1 对称性考虑	153
7.9 有圆形孔的矩形腔体的屏蔽效果	154
7.9.1 外部源: 平面波激活	154
7.9.2 内部源: 电偶极子激励和次偶极子激励	158
参考文献	163
第 8 章 电缆屏蔽	165
8.1 管状屏蔽电缆的转移阻抗和孔径效应	166
8.2 转移阻抗和孔径效应之间的关系	170

8.3 实际电缆与配线	171
参考文献	172
第9章 屏蔽组件和安装指南	174
9.1 屏蔽衬垫	174
9.2 屏蔽窗口	176
9.3 电磁吸收器	178
9.4 屏蔽连接器	179
9.5 通风系统	179
9.6 熔丝、开关及其他类似组件	179
参考文献	180
第10章 频率选择性表面	181
10.1 周期结构分析	182
10.1.1 弗洛凯定理和空间谐波	182
10.1.2 一维周期结构上的平面波入射	183
10.1.3 二维周期结构上的平面波入射	184
10.2 高通和低通频率选择性平面	185
10.3 带通和带阻频率选择性平面	189
10.3.1 中心连接单元或 N 极单元	189
10.3.2 环形单元	190
10.3.3 内部实心单元	190
10.3.4 组合单元与分形单元	191
10.4 频率选择性平面设计中的自由度	191
10.5 可重构和主动式频率选择性平面	192
10.6 频率选择性平面以及电路模拟吸收体	193
10.7 频率选择性平面的模型和设计	194
参考文献	196
第11章 屏蔽设计指南	200
11.1 屏蔽需求的建立	200
11.2 对功能断点类型和数量的估计	202
11.3 对屏蔽材料空间限制条件和非电磁特性的估计	202
11.4 屏蔽性能估计	203

参考文献	204
第 12 章 非常规屏蔽方法	205
12.1 有源屏蔽	205
12.2 局部屏蔽	210
12.3 手性吸波屏蔽	212
12.4 超常介质屏蔽	213
参考文献	217
附录	219
附录 A 静电屏蔽	219
A.1 静电学的基本规律	219
A.2 静电工具: 静电势和格林函数	221
A.3 静电屏蔽	224
A.3.1 导电静电屏蔽	225
A.3.2 介质静电屏蔽	228
A.3.3 导电屏蔽中的孔径效应	232
参考文献	234
附录 B 磁场屏蔽	234
B.1 磁场屏蔽机理	235
B.2 计算方法	238
B.3 边值问题	239
B.3.1 球形磁导电屏蔽	239
B.3.2 横向磁场中的圆柱形磁导电屏蔽	244
B.3.3 平行磁场中的圆柱形磁导电屏蔽	247
B.3.4 无限平面	249
B.4 迟滞铁磁屏蔽	261
参考文献	262
附录 C 标准与测量方法	264
C.1 MIL-STD 285 和 IEEE STD-299	266
C.2 NSA 65-6 和 NSA 94-106	270
C.3 ASTM E1851	271
C.4 ASTM D4935	272
C.5 MIL-STD 461E	273

XII 电磁屏蔽原理与应用

C.6 美国联邦法规, 标题 47, 第 15 部分 280

C.7 ANSI/SCTE 48-3 282

C.8 MIL-STD 1377 282

C.9 IEC 标准 284

C.10 ITU-T 建议 288

C.11 车辆标准 290

参考文献 293

附录 D 英文缩略语 296

第 1 章 屏蔽中的电磁理论

在电磁 (Electromagnetic, EM) 场中实现屏蔽是一种非常复杂的, 有时甚至是非常艰巨的任务。原因是多方面的, 因为任何旨在降低指定区域电磁场电平的策略或技术的效果, 通常取决于源点特性、屏蔽结构和屏蔽材料。同时, 由于屏蔽经常发生, 在技术环境中采用了通用项后, 会产生多种不同的定义。在电磁学中, 屏蔽效能 (Shielding Effectiveness, SE) 通常是一个用于对屏蔽性能进行量化的简单参数。但是, 针对给定屏蔽结构的性能测量或评估, 通常会采用多种标准的变种。遗憾的是, 在测量设置阶段, 这些标准的变种都需要特定的条件。因此, 如果源点或系统配置稍有出入, 就会导致测量或评估结果无效。最后, 在实际屏蔽问题的解决方案中经常出现的困难包括: 边界值问题解决方案本身固有的困难, 以及使用数学形式对电磁问题进行描述时出现的困难。

1.1 定义

为了给后续各章奠定坚实的基础, 我们给出一些有用的定义。电磁屏蔽可以定义为^[1]: 住宅、屏幕或其他物体 (通常是导体) 能够大大降低设备或电路的电场或磁场效应的现象。

该定义具有一定的局限性, 因为它实际上假定了“受扰者”的存在。同时, 该定义存在一个认识误区, 即源点和观察点位于屏蔽的两个方向, 且“大大”一词的意义是模糊的, 引入了一种无法接受的任意性。

另一种电磁屏蔽的定义^[2]局限性更大, 其内容是: 通过将至少一个电路放置到电磁导电材料的接地腔体中, 来防止两个电路之间产生电磁耦合。

最为准确的定义需要对屏蔽现象进行全面的描述, 即用于减少电磁场向指定区域穿透的措施。需要注意的是, 在定义屏蔽目的时, 屏蔽形状、屏蔽材料和接地是必不可少的。

通常情况下, 电磁屏蔽代表了改善单个装置、设备或系统电磁兼容性 (Electromagnetic Compatibility, EMC) 的一种方法, 电磁兼容性定义为电子设备或系统在满足工作要求的前提下, 能够运行于预定电磁环境的能力。除了 EMC 之外, 还包括健康等问题, 因而它是一种生态系统。电磁屏蔽也可用于防止敏感信息被截获, 即保证通信的安全性。

电磁屏蔽并不是实现某些目标的唯一手段。某些电磁屏蔽通常可用于降低

设备系统的电磁发射，提高它们对外部电磁场的抗扰度。当用于降低电磁发射源电平或增强受扰方抗扰度两种方法都不可用或不足以保证设备或系统的正常运行时，通常会选择降低源和受扰方（受到干扰或仅存在潜在干扰）之间的耦合。

受扰方的抗扰度一般是通过与传导发射和抗扰度有关的、与电磁屏蔽类似的滤波器来实现。滤波器的主要优点在于它们属于“局部”设备。因此，当需要保护的敏感器件数目有限时，滤波的成本要比屏蔽的成本低得多。使用滤波器的主要缺点在于它仅能够去除与设备特性不同的特性（如传输电平或模式），因而在某些干扰存在时，无法保证系统的正常运行。滤波器存在的另一个严重缺点是无法防止数据检测，或在预防数据检测时效率较低。

总之，设计滤波器要比设计屏蔽简单得多。滤波器的设计人员只需要考虑干扰的电压或电流波形以及输入和输出阻抗值^[3]，而屏蔽的设计人员需要掌握大量的输入信息和约束条件，正如我们将在后续章节中所介绍的。

任何屏蔽的分析都是始于对屏蔽结构的精确研究的^[4-6]。虽然对主要空间区域之间耦合路径的识别通常是微不足道的，但有时非常值得我们研究，尤其是在配置复杂的情况下。屏蔽复杂性与其形状、孔径、最易受影响的组件和源特性等有关。将屏蔽配置分解为几个子系统（每个子系统都比原始系统简单，且子系统之间以有限方式进行交互）是一种非常有用的、发现关键问题并满足和改善整体性能的方法。这种方法假设可以对每个子系统进行分析，且每个子系统的行为独立于其他组件/子系统。例如，在频域中，对于线性系统中的每条耦合路径和每个易受影响的元素，描述转换函数 $T(\omega)$ 与外部源输入 $S(\omega)$ 和受扰方输出 $V(\omega)$ 之间的关系是可能的，即 $V(\omega) = U(\omega) + T(\omega)S(\omega)$ ，其中 $U(\omega)$ 代表存在外部源激励的情况下子系统的输出。当存在多级屏蔽时，转换函数 $T(\omega)$ 是由与每种屏蔽电平有关的转换函数产生的。

通过对上述方法进行归纳，有利于我们理解复杂配置情况下的电磁屏蔽问题。但是，一方面，应当对大多数关键子系统和组件的屏蔽问题给予充分重视；另一方面，也应当对最重要的耦合路径进行重点研究，以解决屏蔽的主要问题，提高屏蔽性能^[7]。在设计背景下，一般方法显然是奏效的。一些参考文献对屏蔽与接地之间的关系进行了分析。

1.2 符号、表示与缩略语

本节将对全书用到的缩略语和符号进行简要归纳，来给出我们采纳的标准。当然，当例外情况出现时，我们将及时提示读者。

标量通常使用斜体来表示（如 V 和 t ），而矢量使用黑斜体来表示（如 e