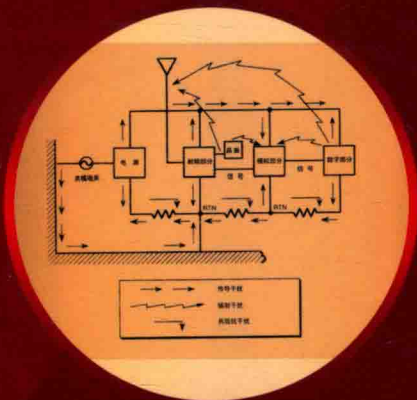


CRC Press
Taylor & Francis Group



(原书第3版)

电磁兼容 原理与应用

——方法、分析、电路、测量

[加拿大] 大卫·A. 韦斯顿 (David A. Weston) 著

杨自佑 等译

Electromagnetic
Methods, Analysis, Circuits, Compatibility
and Measurement **Third Edition**

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

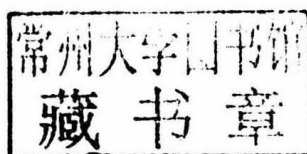
电磁兼容原理与应用

——方法、分析、电路、测量

(原书第3版)

Electromagnetic Compatibility:
Methods, Analysis, Circuits, and Measurement
Third Edition

[加拿大] 大卫·A. 韦斯顿 (David A. Weston) 著
杨自佑 彭 聪 陈 倩 黄敏超 夏俊杰 译



机械工业出版社

Electromagnetic Compatibility: Methods, Analysis, Circuits, and Measurement, Third Edition by David A. Weston ISBN9781482299502

Copyright © 2017 by CRC Press

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved. 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, CRC 出版公司出版, 并经其授权翻译出版, 版权所有, 侵权必究。

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. 本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版并只限在中国大陆地区销售, 未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis Sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2017-5176 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

电磁兼容原理与应用: 方法、分析、电路、测量: 原书第 3 版/(加) 大卫·A. 韦斯顿 (David A. Weston) 著; 杨自佑等译. —北京: 机械工业出版社, 2019.9

书名原文: Electromagnetic Compatibility: Methods, Analysis, Circuits, and Measurement, Third Edition

ISBN 978-7-111-63499-7

I. ①电… II. ①大… ②杨… III. ①电磁兼容性 IV. ①TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 171885 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: 罗莉 责任编辑: 罗莉

责任校对: 樊钟英 封面设计: 马精明

责任印制: 张博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2020 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·68.25 印张·4 插页·1702 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-63499-7

定价: 298.00 元

电话服务

网络服务

客服电话: 010-88361066 机工官网: www.cmpbook.com

010-88379833 机工官博: weibo.com/cmp1952

010-68326294 金书网: www.golden-book.com

封底无防伪标均为盗版 机工教育服务网: www.cmpedu.com

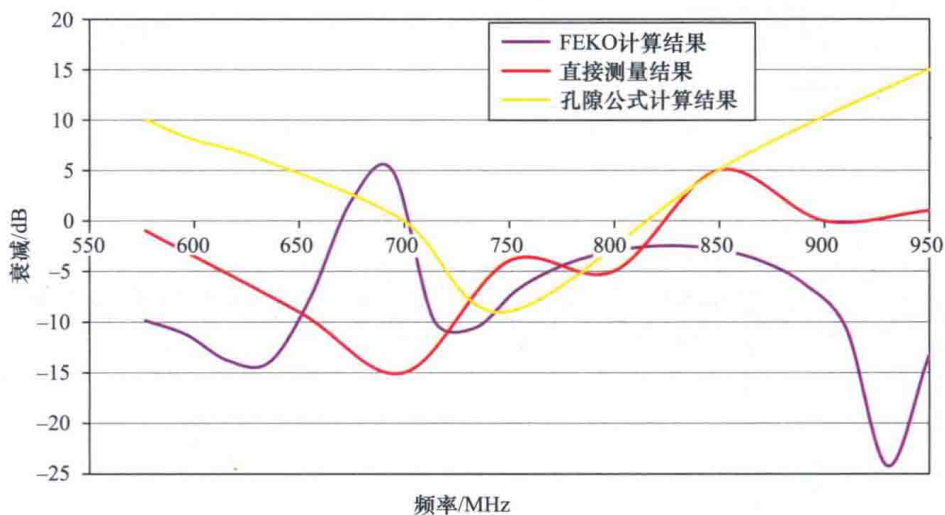


图 6-81 从 577~950MHz, 具有 200mm × 30mm 孔隙, 尺寸为 540mm × 370mm × 330mm 屏蔽铜外壳的中心处, FEKO, 直接测量和孔隙耦合公式的衰减结果比较。孔隙耦合公式的损耗系数为 0.2

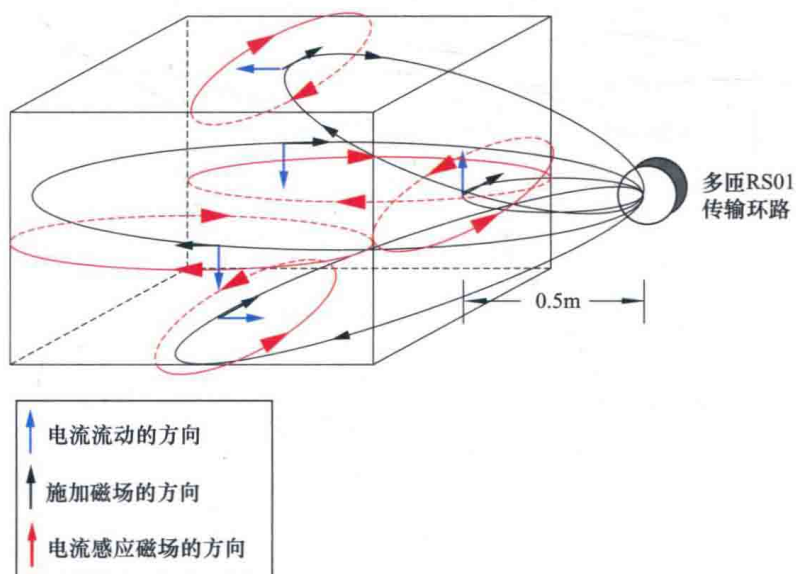


图 6-95 入射在外壳上的磁场线和由外壳上的电流引起的磁场

自由场中6.8m导线的NEC预测电流，行波入射辐照

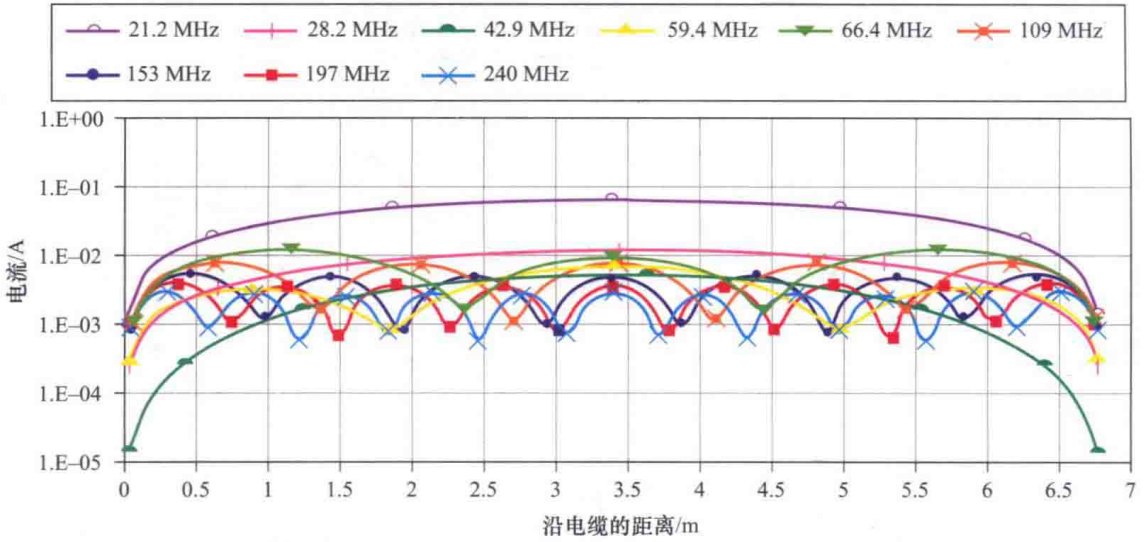


图 7-72 在关注的频率上的编织导线的电流

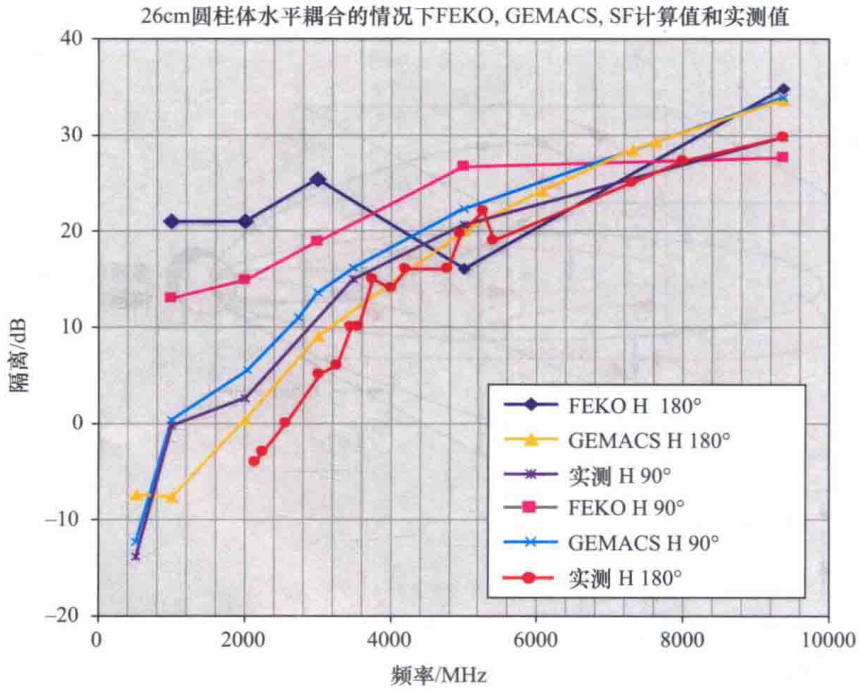


图 10-20 在 26cm 圆柱体上的水平隔离度

(资料来源: Weston, D.A., Comparison of techniques for prediction of and measurement of antenna to antenna coupling on an aircraft, EMC Europe, York, U.K. © 2011, IEEE)

曲线经过一次平滑处理后, PCB印刷线相对辐射发射的比较
(C-连接器; L-负载; GMC-接地平面更靠近)

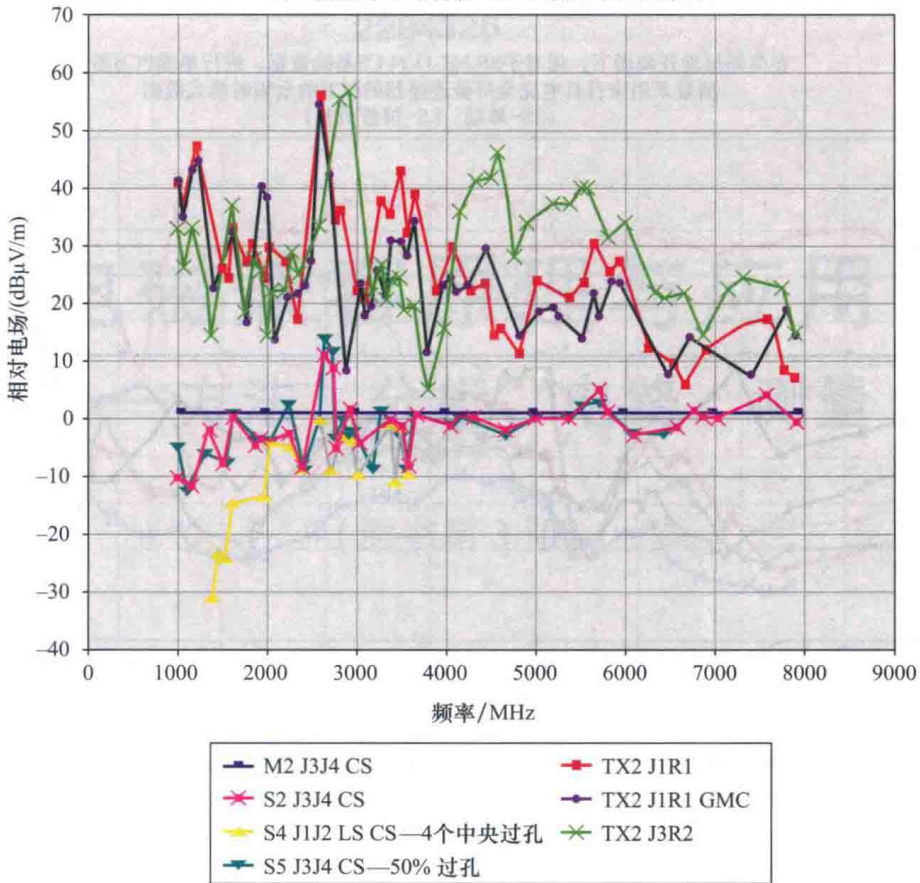


图 11-40 1~8GHz 100Ω 差分阻抗测试中, 差分带状线和差分微带线 (镜像平面) 的辐射发射。归一化到 M2 J3/J4

传输线PCB无附加电缆辐射电场的比较(标准开阔场测试)
GMC, 接地平面更加靠近

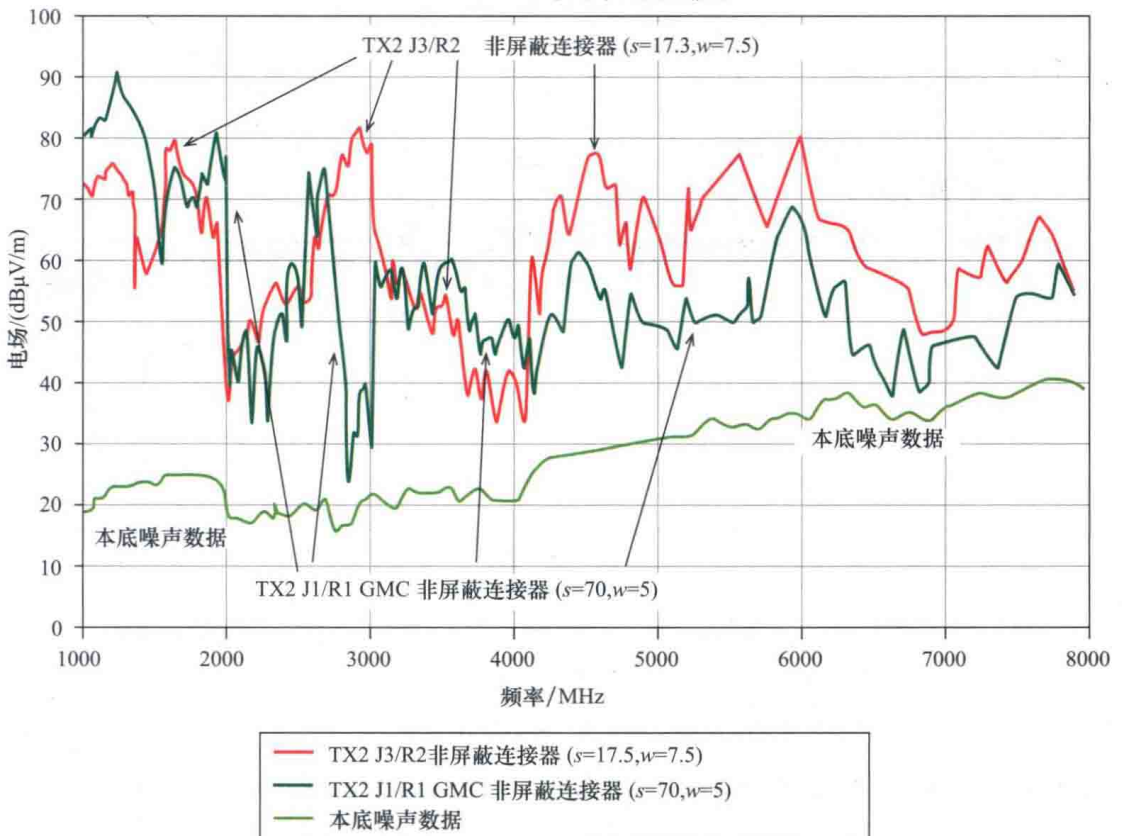


图 11-43 传输线 PCB 对比: 1~8GHz

在高频标准开阔场下，相对于SS M1 J3/J4 CS基线数据，进行单端PCB测量
 测量采用来自具有完全屏蔽连接器的PCB的全辐射模式数据
 (SS-单端；LS-屏蔽负载)

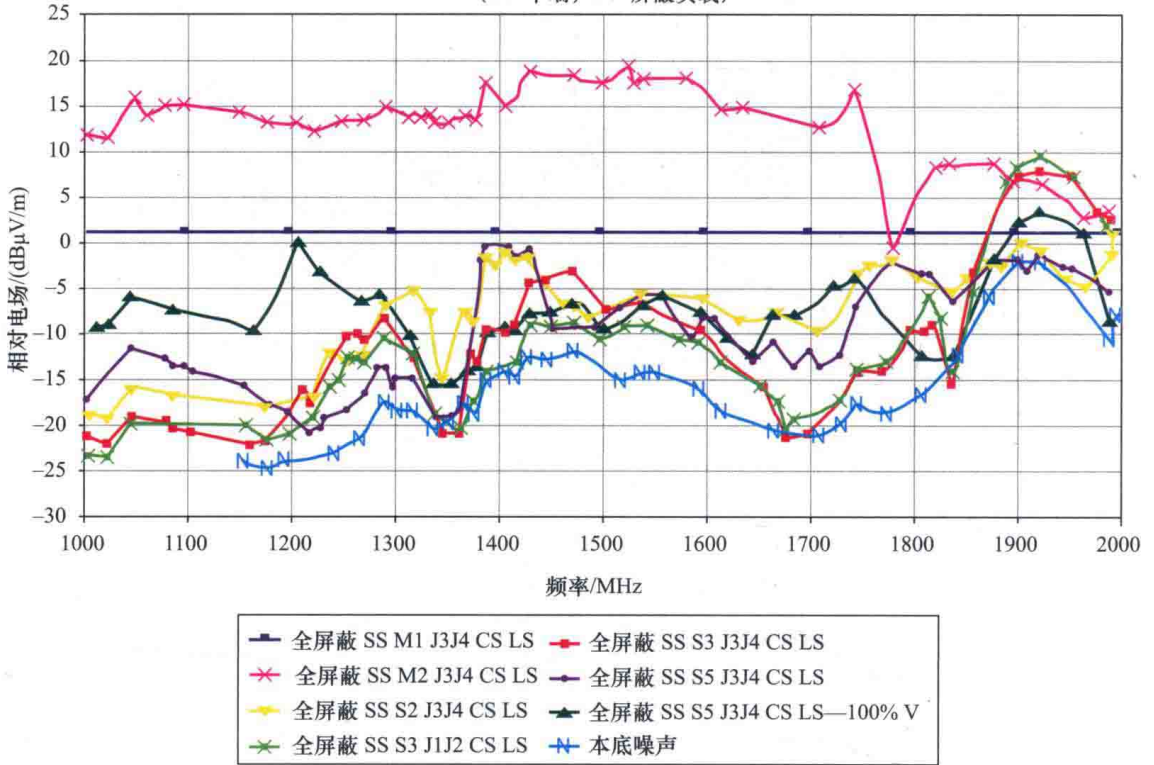


图 11-59 相对于 SS M1 J3/J4, PCB 旋转, 不同单端带状线 PCB 的比较

在高频标准开阔场下，相对于SS M1 J3/J4 CS基线数据，进行单端PCB测量
 测量采用来自具有完全屏蔽连接器的PCB的全辐射模式数据
 (SS-单端；LS-屏蔽负载)

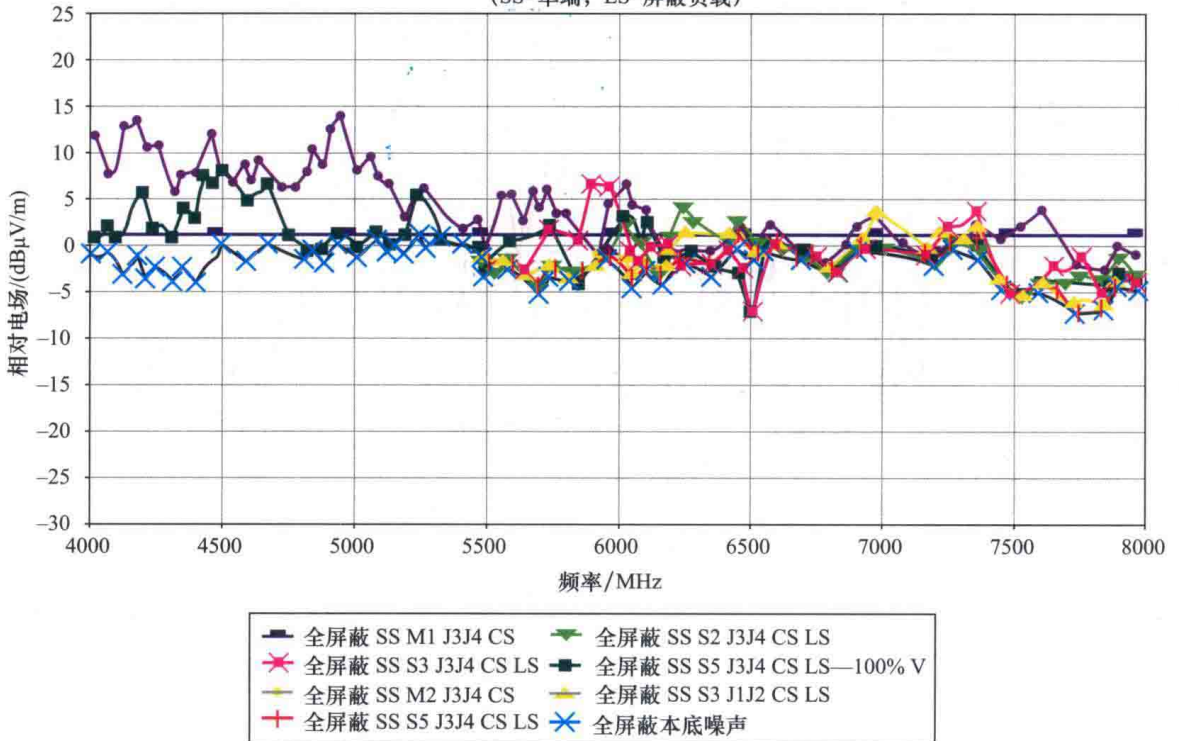


图 11-62 PCB 旋转, 负载和连接器屏蔽不良的情况下不同单端带状线 PCB 相对于 SS M1 J3/J4 的比较

本书的主要内容包括电磁兼容（EMC）的基本概念和原理，各种电磁干扰产生的机理和模型，减少干扰及提高抗扰度的方法，电磁场的生物效应与人体暴露限值，系统的 EMC 和天线耦合的分析，电磁干扰（EMI）的预估技术和计算机电磁建模的方法，以及各种民用与军用 EMC 标准的限值要求和测试方法。书中还提供了 69 个电路层级的 EMI 固化（EMI Hardening）解决方案，1130 个插图和表格，包括丰富的器件数据资料以及它们的正确安装和应用方法。本书的阐述从 EMC 技术的工程应用角度出发，所讨论问题的思路清晰，图文并茂，内容丰富、翔实、具体，便于实际应用。此外，本书还提供了一些可供选用的 EMI 诊断技术和费效比优良的解决方案，是一本非常实用的参考书。

本书适合从事电气和电子产品研发、设计、制造、质量管理、检测与维修工作的工程技术人员使用，也可供科研院所、检测机构、大型工程项目等专业技术人员作为 EMC 分析、测试和设计的参考书，还可作为电气与电子工程、精密仪器、通信和计算机技术、生物医学工程、人工智能等专业师生的教学参考书。

译者序

自20世纪90年代始,在通信和计算机技术的发展带动下,信息技术(Information Technology, IT)和互联网技术(Internet Technology, iT)有了突飞猛进的发展。在21世纪的近20年来,航空航天技术(Aeronautic and Astronautic Technology, AT)、机器人技术(Robot Technology, RT)、物联网(Internet of Things, IoT)、人工智能(Artificial Intelligence, AI)、自动驾驶(Autonomous Driving, AD)等一大批高新技术如雨后春笋般地涌现问世。

然而,上述这一切高科技创新技术无一不是与各种电磁波在自由空间的辐射和线缆间的传导及相互耦合等现象相联系着的。换言之,无论传统技术还是当代高新技术,各种电子电气装置、设备、系统和设施在运行中,对外界既不能产生过强的“干扰电平”,而同时又要能承受外界一定强度的“敏感度电平”,即它们的“干扰与抗干扰”性能之间应该能够相互兼容。为了解决上述兼容问题,大约从20世纪80年代开始,逐渐形成了一门新的技术学科——电磁兼容(Electromagnetic Compatibility, EMC)。目前,电磁兼容技术研究的频率范围是0~400GHz。

电磁兼容是一门理论性和实践性都很强的技术学科。要解决实际的电磁兼容问题,不仅需要自身理论的发展与指导,更需要那些能切实排除上述各种装备中出现的干扰与抗干扰的措施、方法、经验等实际手段。这是从事电磁兼容工作应遵循的原则。

基于这样的理念和原则,译者认为加拿大著名的电磁兼容资深专家David A. Weston的著作*Electromagnetic Compatibility: Principles and Applications, 2nd edition*是一本非常值得推荐的电磁兼容优秀书籍,该书由杨自佑、王守三(美籍华裔教授)翻译,并在2006年由机械工业出版社组织翻译出版发行,获得从事电磁兼容技术工作读者的普遍欢迎。为此,在该书修订和扩充内容的第3版*Electromagnetic Compatibility: Methods, Analysis, Circuits, and Measurement, Third Edition*于2017年在美国发行后,机械工业出版社决定再次进行组织翻译。

正如原书第3版原序言中所说的,第3版修改和更新了原书第1版、第2版中65%以上的内容,包括对原书中计算机建模程序的再审定,补充了印制电路板(PCB)层级的串扰计算方法,第5章中补充了许多有关信号滤波器和电源滤波器的设计方法,第10章中补充了关于天线与天线之间的耦合分析,在第9章中提供了全新的民用与军用电磁干扰(EMI)的测试方法和要求。此外,还收录了壳体缝隙耦合,通用串行总线(USB)及以太网(Ethernet)的连接器和电缆屏蔽方面的数据资料。

本书的主要内容包括EMC的基本概念和原理,各种电磁干扰(Electromagnetic Interference, EMI)产生的机理和模型,减少干扰及提高抗扰度的方法,电磁场的生物效应与人体暴露限值,系统的EMC和天线耦合的分析,EMI的预估技术和计算机电磁建模的方法,以

及各种民用与军用 EMC 标准的限值要求和测试方法。书中还提供了 69 个电路层级的 EMI 固化 (EMI Hardening) 解决方案, 1130 个插图和表格, 包括丰富的器件数据资料以及它们的正确安装和应用方法。本书的阐述从 EMC 技术的工程应用角度出发, 所讨论问题的思路清晰, 图文并茂, 内容丰富、翔实、具体, 便于实际应用。此外, 本书还提供了一些可供选用的 EMI 诊断技术和费效比优良的解决方案, 是一本非常实用的参考书。

本书适合从事电气和电子产品研发、设计、制造、质量管理、检测与维修工作的工程技术人员使用, 也可供科研院所、检测机构、大型工程项目等专业技术人员作为 EMC 分析、测试和设计的参考书, 还可作为电气与电子工程、精密仪器、通信和计算机技术、生物医学工程、人工智能等专业师生的教学参考书。

本书翻译工作由长期从事 EMC 工作的五人翻译团队完成。全书共有 12 章。其中杨自佑翻译原书序言、全书目录、第 1~3 章; 彭聪翻译第 7 章和第 12 章; 陈倩翻译第 6 章和第 8 章; 黄敏超翻译第 5 章和第 11 章; 夏俊杰翻译第 4 章; 第 9 章和第 10 章的翻译由团队成员共同完成。全书译稿由杨自佑、彭聪负责审阅、修改、定稿。彭聪还负责全部翻译稿的版面布局和一些插图、表格的排列工作。此外, 为了方便读者阅读和理解书中的电磁兼容术语、标准化组织和机构等缩写词的含义, 杨自佑和彭聪还编写了缩略语表。

译者对机械工业出版社一贯、长期、积极支持 EMC 书籍的出版工作表示由衷的感谢!

由于 EMC 技术发展迅速, 加之译者水平有限, 书中错误和不妥之处, 敬请专家、读者不吝赐教。

译者谨序

原 书 序

本书的第3版，对第1版和第2版的内容进行了修改和更新，增加了65%以上的内容，其中包括：重新审定了原书中的计算机建模程序，补充了印制电路板（PCB）层级的串扰计算方法；第5章中补充了许多有关信号滤波器与电源滤波器的设计方法；第10章中补充了关于天线与天线之间的耦合分析；第9章提供了全新的民用和军用方面的电磁干扰（EMI）的测试方法和要求。此外，还收录了壳体缝隙耦合，通用串行总线（USB）及以太网（Ethernet）的连接器和电缆屏蔽方面的数据资料。所有的电子和电气设备都是潜在的EMI源。同样地，这些设备在某些电磁环境电平下也可能达不到设计性能。EMI产生问题的范围囊括了从简单的杂扰（如电信设备的静电干扰）或数字设备误比特率（Bit Error Rates）的增加一直到异常灾祸的发生（例如爆炸装置受到干扰而意外爆炸）。

使设备和系统达到电磁兼容的方法是首先对其运行所处的电磁环境进行评估（这种电磁环境评估通常是依据相应的标准或技术要求来进行的），然后再进行设计和制造，使这些设备和系统能在预定的工作环境中工作而自身不产生EMI。

本书的读者对象是那些负责产品设计的工程师和系统工程师、技术专家、技术人员，或者是从事设计、维护和制定规范的那些工程经理。这些规范可以确保设备满足EMC要求在给定的电磁环境下安全运行。

许多工程师往往都没有射频（RF）方面的经验。然而，运行中的数控设备或开关电源设备往往就是一个RF系统。因此，想要理解EMC就必须了解元器件和简单辐射体的高频特性以及电波理论。

为了使设计师在建造设备和系统时既考虑EMC，又不至于过度设计，本书将讲解EMI预估技术。这是因为如果在设计研发过程中达到EMC，可以避免在产品量产后为了解决EMI问题而产生的额外成本以及项目延迟。此外，鉴于EMI问题是普遍存在的现象，本书还提供了一些可供选用的EMI诊断技术和费效比优良的解决方案。

本书讨论了在给定的电磁环境中预期可能出现的典型的EMI源及其辐射发射和传导发射的特性，还探讨了减少电磁发射和降低设备对EMI敏感度的方法。有一些EMI/EMC书籍中的方程在理论上是完美的，但是它们往往并不能用来解决实际的EMI/EMC问题。大家会发现本书中的所有方程在EMI预估和EMC设计中极为实用。而且在大多数情况下，它们都经过了测量验证。读者可以从www.emcconsultinginc.com网站上免费获得关于包括壳体缝隙耦合、天线对天线耦合的预估方面的计算机程序。在大多数情况下，理论都是经过测量数据实证过的。当出现异常的情况时，本书也给出了一些最可能的原因。本书也提供了大量的参考文献，供读者对某个领域中的问题做进一步研究时使用。此外，全书中的预估和案例研究中都给出了如何应用这些方程的实例。所有的电波和电路理论在实际应用中都会受到物体尺

寸和工作频率的限制，其中也包括寄生元件的影响。对于这些限制，本书也都做了分析。

对于那些让 EMC 背负“黑色魔法”名声的明显反常现象，例如，在进行 EMC 检测时，当加了屏蔽、滤波器或接地之后，EMI 发射电平或 EMS 敏感度反而增加的现象，本书也做了解释。导致这些明显无法解释的结果的主要原因是因为我们对其基础理论尚没有理解透彻。本书中所采用的写作方法是强调对于理论的理解，重点要放在其在 EMC 设计和 EMI 解决方案的实际实现中的实用性，包括后续的实施和维护。

本书目的是使书中所包含的信息具有实际的应用价值或是用以加深对于 EMC 原理的理解。例如，计算或公布衰减或屏蔽效能的数据，除了用于解释问题之外，几乎无用。因此，上述计算或数据必须结合在给定的环境中预计可能的最坏情况下的辐射或传导噪声电平来使用。所以必须对达成预期衰减或屏蔽效果的限制因素加以考虑。而后就可以预估对施加在系统或电路上的噪声电平或抗扰度电平进行预估了。其目的是避免那种简单化的食谱式方法的固有缺点，并将数学知识限制在实践工程师或技术员能理解使用的范围内。

书中还介绍了使用标准电子测量设备的实用而简单的测量技术。这些测量技术很适用于设备的 EMI 诊断测量以及对那些必须满足商用标准如 FCC、DO-160、EN 及军用/航空航天标准 MIL-STD-461 等 EMC 要求的设备做“快速查验”。同时也介绍了进行认证和合格 EMC 测试时，采用精密复杂的设备进行校正测量的技术和可能遇到的错误。

编著本书的基础是著者在 EMC 咨询方面的经验以及 12 年来所举办的 1~4 天的 EMC 专题研讨会的课程笔记。本书也解答了研讨会的与会者和客户们所提出的许多问题。

感谢 David Viljoen 先生，他为本书的第 1 版做了大量的工作，没有他的贡献，本书就不可能有今天的样子。

对于本书第 3 版的问世，我也要感谢 Jennifer Gale 和 Kerri McDougal 所做的研发工作和撰写的报告，本书中叙述的所有测量软件和分析软件都是 Lorne Kelly 编写的，也要感谢 Robert Gray 杰出的绘图和审查。还要特别感谢 Calvin Gale 以他的奉献精神和高学术水平完成了最近所有的研发任务及他对本书编写中的章节布局、内容写作及 EM 软件的使用和编辑所做的考虑。最后，我要特别感谢答应为本书提供图表的组织机构，尤其是加拿大航天局。

David A. Weston

目 录

译者序

原书序

第 1 章 电磁兼容	1
1.1 电磁干扰简介	1
1.1.1 电磁干扰产生的影响	1
1.1.2 电磁干扰的耦合方式	2
1.1.3 总结	2
1.2 电磁干扰规范简述	4
1.2.1 军用规范	5
1.2.2 商用规范	5
1.2.3 非管制的设备	5
1.3 电磁环境概述	5
1.3.1 自然电磁噪声源	6
1.3.2 人为电磁噪声源	8
1.4 工业、科学和医疗设备	8
1.4.1 FCC18 部分	8
1.4.2 从工业设备测得的场强	9
1.4.3 由高压输电线路和其附近的电场和磁场产生的干扰	11
1.5 车辆、荧光灯、微波炉的噪声和家庭及办公室里的磁场干扰	17
1.6 医院的电磁环境	19
1.7 有意发射器	20
1.8 低功率有意辐射体	21
1.9 高功率有意辐射体	24
1.10 电源线的传导噪声	25
参考文献	26
第 2 章 电场与磁场、近场与远场、辐射体、感受器、天线	28
2.1 静态场和准静态场	29
2.1.1 直流电场	29
2.1.2 直流磁场	29
2.1.3 双绞线	30
2.1.4 由环路产生的直流场和准静态场	33

2.2 导线上和自由空间中的电波	34
2.2.1 辐射	35
2.2.2 电流元辐射体	37
2.2.3 电流环路	38
2.2.4 球面波	38
2.2.5 环路的接收性能	39
2.2.6 双绞线产生的远场辐射	44
2.3 辐射功率	45
2.4 测量单位	48
2.5 天线的接收性能	49
2.5.1 功率密度转换为电场强度	49
2.5.2 根据天线增益将功率密度转换为电场强度	49
2.5.3 天线系数	50
2.5.4 孤立导线/电缆的接收性能	57
2.5.5 作为测量设备和用于电磁兼容性预估的单极子天线	58
2.6 简单易做的电场天线和磁场天线	63
2.6.1 屏蔽环形天线	63
2.6.2 平衡环形天线	64
2.6.3 蝶形电场天线	66
2.6.4 单极子天线	68
2.6.5 调谐偶极子天线	68
2.6.6 螺旋天线	68
2.6.7 小型螺旋天线	72
2.6.8 0.1~1000MHz 磁场探头	73
2.6.9 校准	73
2.7 非电离电磁场的暴露安全限值	82
2.7.1 对人体的临床研究	83
2.7.2 加拿大的限值	83
2.7.3 美国标准	84
2.7.4 欧洲和其他标准	87
2.7.5 ICNIRP、CENELEC、IRPA 和 CEU 限值	88
2.7.6 电磁场电平的测量	88
2.7.7 直流 (DC) 场和工频场 (Power Frequency Field)	89
2.8 计算机程序	90
2.8.1 计算导线辐射的计算机程序	90
2.8.2 用于计算电场/磁场耦合到导线/电缆中的电流的计算机程序	93
参考文献	98

第3章 典型的噪声源及其辐射和传导发射特性	100
3.1 噪声源简介	100
3.1.1 单脉冲和周期性脉冲产生的谐波相关噪声	100
3.1.2 阶跃函数的频谱占有率	109
3.2 傅里叶变换法和计算机程序	110
3.3 案例分析 3.1: 由 DC-DC 变换器产生的噪声电平	110
3.3.1 通用测试配置和方法	111
3.3.2 根据输入功率测试结果对 +24V/-24V 变换器的传导发射 (CE102) 和 辐射发射 (RE102) 情况小结	112
3.3.3 在 24V-5V 变换器输出端的差模和共模传导噪声	114
3.3.4 变换器输出功率的辐射发射	116
3.4 发射机产生的噪声	127
参考文献	128
第4章 PCB 印制线、导线、电缆间的串扰和电磁耦合	129
4.1 串扰和电磁耦合简介	129
4.2 导线和电缆间的容性串扰和电场耦合	131
4.3 导线和电缆间的感性串扰和磁场耦合	137
4.4 感性串扰和容性串扰的合成	146
4.4.1 运用接地平面上方的 PCB 印制线和导线的特性阻抗预估串扰	147
4.4.2 双绞线、交叉绞合双绞线、屏蔽双绞线和带状电缆中的串扰	150
4.4.3 相对于干扰源上升时间有长传输延迟的导线串扰	153
4.4.4 计算串扰的计算机程序	155
4.4.5 PCB 印制线之间的串扰和 PCB 上器件间的耦合	162
4.4.6 电磁耦合	182
4.4.7 评价屏蔽和非屏蔽电缆 (导线) 对电缆 (导线) 间耦合的计算机程序	183
参考文献	190
第5章 元器件, 减小发射的方法及抗扰度	191
5.1 元器件	191
5.1.1 电磁兼容使用的元器件简述	191
5.1.2 导线、PCB 的印制线和接地平面的阻抗	191
5.1.3 一般布线导则	197
5.1.4 电路分类	197
5.1.5 布线隔离	197
5.1.6 内部单元/设备的布线	197
5.1.7 外部单元/设备的布线	198
5.1.8 导线屏蔽	198

5.1.9	射频屏蔽	198
5.1.10	用于控制发射和提高抗扰度的元器件	199
5.2	电源滤波器	242
5.2.1	定制设计的滤波器	254
5.2.2	带谐振电容器的共模滤波器	259
5.2.3	满足航天要求的电源滤波器	262
5.2.4	滤波器的低频和高频元件的分置	263
5.2.5	案例分析 5.1: 滤波器设计	264
5.2.6	案例分析 3.1 (续)	267
5.2.7	交流电源滤波器	269
5.2.8	输出电源滤波器	270
5.3	信号滤波器	271
5.3.1	有源滤波器	272
5.3.2	无源滤波器	273
5.3.3	微波滤波器	274
5.3.4	PCB 微波滤波器	276
5.3.5	连接器型滤波器	278
5.3.6	低频无源高通、低通、陷波和带通滤波器	280
5.3.7	滤波器设计实例	283
5.3.8	商用滤波器	284
5.3.9	案例分析 5.2	285
5.3.10	滤波连接器	286
5.4	减小发射的方法	288
5.4.1	信号和电源的生成特性	288
5.4.2	电路拓扑	289
5.4.3	储能电容器和去耦电容器	290
5.4.4	散热片	290
5.4.5	电路布局	290
5.5	噪声抗扰度	292
5.5.1	接口电路噪声抗扰度	292
5.5.2	接收器和驱动器	294
5.5.3	典型集成电路对噪声和抗扰度试验电平响应	306
5.5.4	数字逻辑电路的噪声抗扰度	307
5.5.5	模拟视频和射频电路间的噪声和抗扰度	313
5.6	噪声源和噪声电平	320
5.6.1	射频和无线电	321
5.6.2	屏蔽	322
5.6.3	射频接地	324
5.6.4	滤波	326

5.7 减小辐射发射的方法	328
5.8 瞬态脉冲防护	328
5.8.1 瞬态保护器件	329
5.9 雷击防护	332
5.10 静电防护	341
5.11 电磁脉冲防护	344
参考文献	345
第6章 电磁屏蔽	346
6.1 反射、吸收和屏蔽效能	346
6.1.1 理想导体的反射	346
6.1.2 传输线理论应用于屏蔽	347
6.1.3 金属阻抗、趋肤深度、壁垒阻抗	347
6.1.4 实际导体的反射	349
6.1.5 电磁波的吸收	350
6.1.6 再反射的修正	350
6.2 屏蔽效能	351
6.2.1 使用屏蔽效能公式的注意事项	358
6.3 新型屏蔽材料：导电漆和热塑性塑料、塑料涂层和胶水	360
6.3.1 导电涂层的磁屏蔽效能	365
6.3.2 屏蔽效能和表面电阻率之间的相关性	370
6.3.3 导电涂层的电场屏蔽效能	371
6.3.4 导电涂层塑料外壳和铝在满足 MIL-STD-461 标准要求方面的对比	373
6.3.5 塑料涂层外壳与金属外壳的测试	375
6.3.6 外壳类型	376
6.3.7 测试的执行	376
6.3.8 导电布	386
6.3.9 用铝箔屏蔽的医院房间	387
6.3.10 有缝隙的外壳对平面波的屏蔽效能	390
6.3.11 有缝隙的外壳的电场耦合机理	391
6.3.12 容积 1m×0.7m×1m、厚 0.075mm 的铝箔外壳内部电场的预测	391
6.3.13 预测外壳内部的电场	392
6.3.14 无缝隙的小外壳对电场和平面波的屏蔽	394
6.3.15 导电布服装	396
6.3.16 导电黏合剂和吸波材料	398
6.4 缝隙、接合处、通风口和其他孔隙	399
6.4.1 透过薄材料上孔隙的电场耦合	399
6.4.2 孔隙耦合的测量值与参考文献 [9] 中的公式和 FEKO 程序计算值的比较	407
6.4.3 厚型材料中的波导低截止效应	417