



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

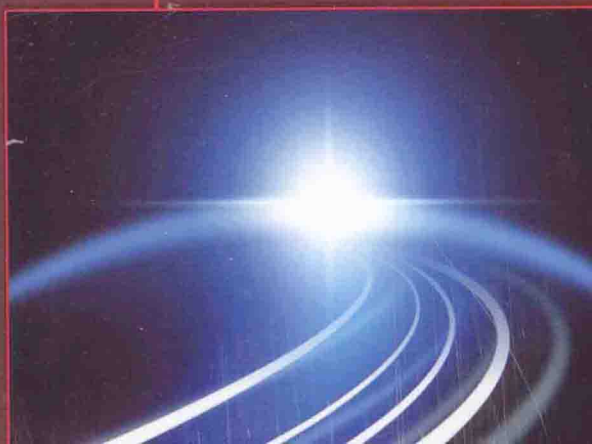
设备设计与系统集成的电磁兼容

Electromagnetic Compatibility for Device Design and System Integration

[德] Karl-Heinz Gonschorek 著
Ralf Vick
杨自佑 崔强 译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

设备设计与系统集成的 电磁兼容

[德] Karl-Heinz Gonschorek 著
Ralf Vick
杨自佑 崔强 译



机械工业出版社

Translation from the English language edition:
Electromagnetic Compatibility for Device Design and System Integration
by Karl-Heinz Gonschorek and Ralf Vick
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009
Springer is part of Springer Science + Business Media
All Rights Reserved.

本书中文简体翻译版授权由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发行本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记图字: 01-2011-5306 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

设备设计与系统集成的电磁兼容/ (德) 亨氏, (德) 维克著; 杨自佑, 崔强译. —北京: 机械工业出版社, 2014. 10

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Electromagnetic compatibility for device design and system integration

ISBN 978-7-111-47739-6

I. ①设… II. ①亨…②维…③杨…④崔… III. ①电磁兼容性 IV. ①TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 192691 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: 王 欢 责任编辑: 王 欢

版式设计: 霍永明 责任校对: 樊钟英

封面设计: 马精明 责任印制: 李 洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2014 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 19.5 印张 · 426 千字

0001—2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-47739-6

定价: 99.00 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

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmpl1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

本书详细讲述了设备级和系统级的电磁兼容设计理论，作者通过应用对策、不同的途径和方法、图表曲线、经验法则、背景理论以及计算机工具，来帮助读者解决电磁不兼容的问题。全书共分 11 章，内容包括：编著缘由与内容概述，对电压、电流、场和阻抗的思考，电场，磁场，电磁场，干扰模型，系统内的措施，大气噪声、电磁环境和限值，EMC 工程和分析，场计算的数值计算方法以及抗扰度试验的模型。为了便于读者加深对实际问题解决方法的理解，每章都附有习题和实际案例。

本书可供电子电气产品的设计人员、电磁兼容工程师和系统集成设计人员使用，也可作为高等学校工科电子信息和通信类专业研究生的教材。

译者序

随着电子科学技术的发展,几乎所有的电子电气产品都含有集成电路(Integrate Circuit, IC)和印制电路板(Printed Circuit Board, PCB),这就会涉及电磁兼容性(Electro-Magnetic Compatibility, EMC)的问题。世界上的不同国家也都制定了各自的电磁兼容法规和标准(军用和民用),对在其地域范围内销售的产品都要强制符合这些法规和标准。因此,EMC是必须要求的产品指标之一。

Karl-Heinz Gonschorek 教授和 Ralf Vick 教授编著的本书英文版《Electromagnetic Compatibility for Device Design and System Integration》,详细讲述了设备级和系统级的电磁兼容设计理论,作者通过应用对策、不同的途径和方法、图表曲线、经验法则、背景理论以及计算机工具,以帮助读者解决电磁不兼容的问题。全书共分11章,内容包括:编著缘由与内容概述,对电压、电流、场和阻抗的思考,电场,磁场,电磁场,干扰模型,系统内的措施,大气噪声、电磁环境和限值,EMC工程和分析,场计算的数值技术以及抗扰度试验的模型。为了便于读者加深对实际问题解决方法的理解,每章都附有习题和实际案例。

本书可作为电子电气产品的设计人员、电磁兼容工程师和系统集成设计人员使用,也可作为高等学校工科电子信息与通信类专业研究生的教材。

杨自佑、崔强参加了本书的翻译工作,并由崔强博士完成了全书的统稿和审校工作。在本书翻译的过程中,得到了北京邮电大学吕英华教授的指导和机械工业出版社王欢编辑的支持。译者在此表示诚挚的感谢。此外,译者还要特别感谢机械工业出版社对我们的厚爱和信任,把此书交予我们翻译。由于译者水平有限,翻译时间紧,书中的不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

译者

2014年8月

目 录

译者序

第 1 章 编著缘由与内容概述	1
1.1 如何获得本书的软件程序	4
1.2 如何获得本书中的插图	4
第 2 章 对电压、电流、场和阻抗的思考	5
第 3 章 电场	12
3.1 电场的效应及其计算	13
第 4 章 磁场	18
4.1 磁场的效应	18
4.2 单芯和多芯电缆磁场强度的计算	19
4.3 Geofol 变压器的磁场	21
4.4 细导线的任意布置产生的泄漏场	21
4.4.1 四导体布置的磁场	22
4.4.2 绞合电缆的磁场	22
4.4.3 使用程序 STRAYF 进行磁场计算的实例	24
4.4.4 绞合电缆的磁场特性	26
第 5 章 电磁场	28
5.1 电磁波的特性	28
5.2 电磁场的效应	31
5.3 基本偶极子	34
5.3.1 距离的转换	38
5.3.2 场阻抗	41
5.4 天线的有效高度、有效面积和辐射电阻	43
5.5 口面天线电场强度的估算	47
5.5.1 远场区的功率密度和电场强度	48
5.5.2 近场区的功率密度和电场强度	49
5.5.3 程序 APERTUR 简述	50
5.5.4 程序 SAFEDIST 简述	50

第 6 章 干扰模型	53
6.1 电流耦合	57
6.1.1 解决电流耦合干扰的措施	59
6.2 容性耦合	60
6.2.1 减小容性耦合的措施	62
6.3 感性耦合	63
6.3.1 磁去耦	64
6.3.2 多芯电缆有效互感的定义	65
6.3.3 减小感性耦合的措施	67
6.4 电磁耦合	69
6.4.1 减小电磁耦合的措施	70
6.4.2 $\lambda/2$ 耦合模型	70
6.4.3 关于评估电磁耦合的一些说明	72
第 7 章 系统内的措施	78
7.1 有关接地、屏蔽、布线和滤波的一些说明	79
7.1.1 接地	79
7.1.2 屏蔽	80
7.1.3 布线	80
7.1.4 滤波	83
7.2 电场屏蔽——屏蔽网	89
7.3 磁场屏蔽	91
7.3.1 静磁场和其低频磁场的屏蔽	91
7.3.2 中频磁场的屏蔽	96
7.3.3 两平行板屏蔽交变磁场	96
7.3.4 空心球体屏蔽磁场	97
7.3.5 空心圆柱体屏蔽横向磁场	97
7.3.6 空心圆柱体屏蔽纵向磁场	97
7.4 谢昆诺夫屏蔽理论简介	99
7.4.1 程序 SHIELD 的源代码	102
7.5 泄漏、开孔、腔体谐振	102
7.5.1 泄露、信号穿透	103
7.5.2 低频谐振和腔体谐振	108
7.6 电缆耦合和电缆的转移阻抗	111
7.6.1 电缆耦合	111
7.6.2 非绞合/绞合的两导体电缆的耦合	112
7.6.3 屏蔽电缆的耦合	114
7.6.4 电缆屏蔽层与设备输入端的连接	130

第 8 章 大气噪声、电磁环境和限值	135
8.1 大气噪声源和电磁环境	135
8.2 限值的转换	143
8.2.1 距离的转换	143
8.2.2 电场与磁场的相互转换	145
第 9 章 EMC 工程和分析	148
9.1 复杂系统的设计阶段	149
9.1.1 概念阶段	149
9.1.2 技术设计阶段	150
9.1.3 构建和制造阶段	151
9.2 EMC 试验计划	152
9.3 进行分析	158
第 10 章 场计算的数值计算方法	162
10.1 选择合适的数值计算方法	164
10.2 合理性检查	167
10.3 实例分析	173
10.3.1 轿车中谐振的研究	173
10.3.2 电介质材料对印制电路板辐射的影响	173
10.3.3 移动电话的辐射	174
10.3.4 护卫舰的电磁场	176
10.4 数值方法的使用指南	177
10.5 应用：天线耦合	180
10.5.1 N 端口理论综述	180
10.5.2 双端口的参数	180
10.5.3 天线耦合的计算	181
10.5.4 程序 MATCH 的源代码	184
第 11 章 抗扰度试验的模型	186
11.1 标准化的抗扰度试验方法	186
11.2 建模抗扰度的统计方法	188
11.2.1 故障概率	189
11.3 故障频率函数	191
11.3.1 抗扰度试验结果的解释	192
11.4 时变抗扰度	193
11.4.1 建模	193
11.4.2 单片机设备的抗扰度	197

附录	200
附录 A1 圆柱导体布置的电场	200
A1.1 电位系数和部分电容	200
A1.2 接地平面上的水平导体	201
A1.2.1 程序 HCOND 的源代码	206
A1.3 接地平面上的垂直导体	206
A1.3.1 程序 VROD 的源代码	209
附录 A2 漏磁场	209
A2.1 低漏磁场的电缆安装	209
A2.1.1 单芯电缆 (本书 4.2 节图 4.2 中的情形 a)	209
A2.1.2 具有一个正向导体和一个返回导体的电缆 (本书 4.2 节图 4.2 中的情形 b)	210
A2.1.3 具有两个正向导体和两个返回导体的电缆 (本书 4.2 节图 4.2 中的情形 c_1)	210
A2.1.4 公共接地平面上正向导体和返回导体的布置 (本书 4.2 节图 4.2 中的情形 c_2)	211
A2.1.5 四个正向导体和四个反向导体的布置 (本书 4.2 节图 4.2 中的情形 d)	212
A2.2 估计漏磁场的计算机程序	212
A2.2.1 有限长导线的场	212
A2.2.2 单层线圈的场	214
A2.2.3 考虑相位关系	217
A2.2.4 程序 STRAYF 的源代码	218
附录 A3 自感和互感	218
A3.1 y 轴上的有限长导体和 xy 平面上的梯形区域之间的互感	219
A3.2 线段在 xy 平面所围区域的分解	220
A3.3 空间中任意导体环路的处理	221
A3.4 具有横向距离的两个圆环之间的互感	222
A3.5 程序 MUTUAL 的源代码	223
附录 A4 基本偶极子	223
A4.1 赫兹偶极子	223
A4.1.1 估算一般情况的场强分量	224
A4.1.2 时谐激励的解	225
A4.2 电流环 (环天线)	227
A4.3 波阻抗的比较	232
附录 A5 极化椭圆	232
A5.1 二维情况 ($E_z = 0$)	233
A5.2 三维情况-时域解	235
A5.2.1 极化椭圆平面的一些考虑	236
A5.3 三维情况-频域解	240
附录 A6 集肤效应和谢昆诺夫理论	241

A6.1 半无限大导电空间中的集肤效应	242
A6.1.1 圆柱导体内的强集肤效应	243
A6.1.2 圆柱导体内的弱集肤效应	243
A6.2 谢昆诺夫屏蔽理论	244
A6.2.1 概述	244
A6.2.2 必要的公式	244
A6.2.3 屏蔽机理	245
A6.2.4 屏蔽效能	246
A6.2.5 谢昆诺夫理论的简单应用	246
A6.2.6 图示确定屏蔽效能的程序	247
A6.2.7 误差估算	250
A6.2.8 总结	251
附录 A7 系统 EMC 设计指导的示例	251
A7.1 接地	252
A7.2 系统滤波	253
A7.3 屏蔽	253
A7.4 布线	253
附录 A8 印制电路板的布线和设备结构设计的 EMC 规则	256
附录 A9 便于应用的计算电缆转移阻抗的程序	261
A9.1 使用示波器计算电压比	264
A9.2 使用网络分析仪计算电压比	265
附录 A10 导体/结构的电容和电感	269
附录 A11 电磁不兼容现象的报告	275
附录 A12 习题答案	278
附录 A13 物理常量和转换关系	287
A13.1 物理单位和常量	287
A13.2 压力单位的转换	288
A13.3 能量单位的转换	289
A13.4 电量和磁量的相互转换	289
A13.5 转换为对数数量	290
A13.6 缩略语	290
附录 A14 参考文献	292
名词术语	295

第 1 章 编著缘由与内容概述

原书作者在电磁兼容 (EMC) 领域已工作了 30 多年, 其间发表了大量有关干扰、解决干扰的对策以及电磁场数值计算等方面的论文。此后, 逐渐形成一个愿望: 就是想将原书作者的全部 EMC 工作经验、有效的分析方法和有关干扰问题方面的解决措施等信息资料编成一部较全面的专著。于是就在 2003 ~ 2004 年进行了这项编著工作, 并于 2005 年出版发行了本书的德文版。后来, 原书作者与同事和出版商进行的一些讨论, 启发了出版本书英文版的愿望。此外, 如所期待的, 这些讨论也建议原书作者对本书某些章节的内容作出修改。主要修改了两个方: 一是扩充程序列表; 二是有关滤波器的章节。

有关程序列表, 原书作者最初的愿望是全部包含在本书中。现在虽已经删去, 但它们仍可以在原书作者的网页上获得, 并且该网页所囊括的程序中有更多的应用实例。然而本书仅保留了部分非常少的程序列表。

关于滤波章节, 大家一致认为对巴特沃兹 (Butterworth) 滤波器的理论讲述应简明, 并应更多地讲述必要的 EMC 特性。因此, 有关 EMC 特性的内容就扩展了, 更多地从 EMC 的角度来说明元件特性, 并从符合 EMC 安装方面提出建议。

鉴于上述的说明, 所以本书的英文版不是德文原版《EMV für Geräteentwickler und Systemintegratoren》的单纯翻译, 而是希望进一步的扩充和完善。不过还是有 90% 以上的内容来自德文原版。

哪一位青年科学家没有发表过论文, 或是在学术讨论会上介绍自己研究成果的经历呢? 这些始终都是他们为之自豪的。此后, 他们在寻觅对文章的赞许或批评的过程中, 是否明白读者回馈只是例外而不是惯例呢? 然而尽管如此, 作者还是会非常认真和热情地准备下一篇论文、下一项研究或是下一个研究成果的介绍。

所以, 编著本书的想法缘自将作者过去的各种出版物和研究成果的演示文本加以总结概括进行编写; 并尽可能在本书中说明作者在 EMC 分析、系统 EMC 的计划和确定抗干扰措施工作中获得的经验方面, 三者间有那些内在联系和依从关系。

在着手编写本书的过程中, 作者明显感觉到个人的经验始终是有限的。因此, 为了编写一本综合性的 EMC 著作, 许多问题的解决方案必须从其他的 EMC 文章和书籍中获得并加以修改以符合预知的概念。此外, 也考虑了其他专家的建议。因此, 在这里作者感谢澳大利亚珀斯市西澳大利亚电信研究所 (Western Australian Telecommunication Research Institution, WATRI) 的专家们, 特别是 Schlagenhauser 博士以及德国汉堡理工大学 (Hamburg University of Technology) 的 Singer 教授。他们慷慨无私地为作者提供了图片资料, 自己的想法和问题的解决方案或他们的研究成果。

作者最初的想法是打算把自己的 EMC 工作经验作为本书的主要内容, 但很快就明白所提供的解决方案必须作适当的修改, 以便于那些试图解决类似问题或正在寻求看起

来无法解释的现象的答案的工程师们所理解和接受。

作者并不想让本书成为讲述 EMC 基本内容的入门书。相反地,是想让本书能对从事研发、制造电气和电子产品及系统的有经验的工程师们有所帮助和启发。此外,本书还能对计划新项目的 EMC 和解决实际的干扰案例提供帮助,同时也能对那些明显不兼容问题的分析提供理论支持,但主要是帮助找出解决问题的方法。

所以,本书打算成为工程师们的“EMC 助手”,书中将综合应用对策、途径和方法、图表曲线、经验法则、背景理论以及计算机工具,以便帮助工程师们解决电磁不兼容的问题。

使用分析方法代替反复试验解决干扰问题时,需要深入地理解干扰问题的物理背景。所以,本书附录讲述物理基础知识的同时,加入了必要的数学知识,目的是使本书的内容在完备性、必要性和精准性之间能够平衡兼顾。阅读本书时,读者会发现很多资料是熟知和学习过的电磁技术。留心的读者会发现基本偶极子在作者给出的物理图片中起着特殊的作用。同时也很明显的是,作者的 EMC 经验主要是系统级的,然而对于设备和电路板级的 EMC 问题,也考虑了其他专家有价值的经验。

通常,人们期待电磁兼容书籍能够给出解决具体问题的办法,可能的话,最好还能够给出适合读者的特定问题的解决办法。但由于不兼容问题之广泛犹如电磁技术及其应用种类繁多一样,因此任何书籍都不能满足这个要求。相比之下,作为 EMC 教科书能够满足以下两个要求:第一,它可以阐明和解释一定数量的 EMC 基本措施,这些措施包括抑制敏感度和发射,它们是制造的设备或系统不产生干扰的基础。作者把接地作为例子(它也是高频时提供低电位的措施),因为大约有 98% 的干扰案例是与接地不良或者与问题不相匹配的接地有关。第二,作为 EMC 教科书要能够解释物理量之间的关系和背景信息,可以帮助读者理解电磁耦合现象。例如,电压为什么与电场强度有关,电流为什么与磁场强度有关。对于 EMC 来说,它比其他的物理学科更适合用“已知的敌人并不是真正的敌人!”这句话来描述。把这句格言转用到 EMC,则可以非常确信地说:“如果已知干扰源,就可以很容易地找到出现不兼容的原因,那么干扰的抑制和消除就不是真正的大问题!”

已有的一些电磁兼容书籍认为,只须知道和使用一些公式和规则就足以很好地处理干扰问题,如加装电磁屏蔽消除辐射问题或者使用滤波器解决传导干扰问题。那些易读和使读者感到它是 EMC 专家所写的书一般来说价值不大。它们只是让读者初步认识干扰问题和解决问题的办法,或者进一步说是不能给出具体解决办法的。

本书首先讨论了以下现象:电流、电压和具有波阻抗的场是携带有用信号的电磁量;这些现象的次生效应,会产生电磁不兼容的问题。例如,一个电路的有用信号会成为另一个电路的干扰信号,常常是因为在传输该信息时,两个电路需要共用电源。

基于这个原因,在接下来的第 2 章,讲述的重点是不同类型的电磁场,它同时也是关于 EMC 思考的导论。通常,将电磁场技术分为电场(第 3 章),磁场(第 4 章)和电磁场,这对处理 EMC 问题是非常适合的。传播、产生(无用)信号的能力及抑制干扰的措施很大程度上取决于场的类型和它的特性。第 6 章讨论了干扰模型,其中研究了场的耦合问题。第 7 章讲述了减小耦合的措施和对策(系统内的措施)。

虽然本书有意识地省略了有关标准化实际内容的一章,但是在本书相应需要的地方会提到有关标准和法规的要求并作出必要的解释。由电磁不兼容引起的重大事故和损害经常用来证明 EMC 措施的必要性。毋须夸大,电磁兼容工作内容的 90% 是与满足法规要求的发射限值有关的。第 8 章的目的是引入规定限值的原理。先从自然噪声源开始讨论,并考虑需要特许批准的无线电业务的要求,非常详细地讨论了辐射发射的限值。然而在限值方面,民用所考虑的和军用所考虑的之间存在很大的差异似乎是必然的。

第 9 章介绍了设计步骤的顺序,这已经被证明是合理的和经济的,尤其是对于具有天线的复杂系统的电磁兼容计划。但在新设备的研发过程中,要引入这种系统的 EMC 计划法,将会是一种琐碎的工作。

书中特殊的一章(第 10 章)是专门用来讨论电磁场的数值分析和耦合的仿真软件。该章简短地介绍了具有仿真软件数学背景的有用程序。但一般说来此章并不是电磁场数值计算的概论。它的目的是帮助初学者使用现代仿真软件 and 选择正确的仿真方法来分析特定的问题。本章的重点在于应用。其目的是表明,如果合适的分析程序能正确应用的话,将是非常强大的工具。同时这里给出了经济应用的提示。

为了使读者熟悉电磁场的数值分析,书中还给出了一些具有参考答案的例子。选择的这些例子与实际应用具有一定的联系。想使用书中给出的软件的用户,可以向作者索要商业软件程序包的名字和来源。用户应当基于给定的例子,通过变化参数经过时间来熟悉软件,但不应仅限于此。用户应相信自己所使用的程序。Singer 教授和 Brüns 博士已经很好地完成了非常强大的程序包 CONCEPT 的演示版本。读者可以从作者的网站上下载。

敏感度试验的讨论和重要性,以及本书一位作者的专业经验,构成了处理这些问题的完整而又特殊的一章(即第 11 章)。基于概率论,所讨论的内容和相关公式能够表明现代电路和设备对脉冲型干扰信号抗扰度的置信区间。此外,本章还讨论了敏感度与时间相关的现象。

有关扩展公式的推导和图已移到附录中。此外,附录还包括了系统的 EMC 设计指导,它是读者特定项目指南的基础。

自然地,书里给出的内容是本书作者的自我展示。另一方面,若本书有助于较好地分析或者解决那些不管是假设的或者真实的各种干扰情况,那么这就达到了本书的目的。

在着手本书英文版时,Vick 教授也成为主要作者之一,因此也承担了本书的主要工作。

2009 年春天于德国德累斯顿
Karl H. Gonschorek
Ralf Vick

附注:本书中,数字尽可能的使用美国符号;这意味着使用小数点来代替德国常用的逗号。应记住的是,在某些地方这些符号可能没有进行变化。此外,还要说明的是,频率、阻抗和电量的缩写还是使用德国的符号,如 1GHz 代替 1Gc。

致谢:作者要特别感谢英国诺丁汉大学的 Mark Panitz 先生,他为本书英文版作了

大量的文字润色工作。

1.1 如何获得本书的软件程序

在出版本书德文版时,就曾打算附加书中软件程序的 CD(光盘)。不单是因为软件程序较短的适用性和不同的计算机操作系统,而是诸多原因导致被忽视。

如前所述,由德国汉堡理工大学的 Singer 教授和 Brüns 博士编写的 CONCEPT 程序是一种实用而功能强大的演示版本(Demo-Version)软件。

书中的其他程序软件,是由本书其中一位作者在他从事专业工作期间编写的。使用的编程语言是 Power-Basic,但这些程序并不一定是最优化的。本书中每个章节的信息都是充分完备的,对现代计算机资源的应用有着丰富经验的用户能编写出各自的满足其工作需要和兴趣爱好的程序。在大多数情况下,用户通过使用 Mathematica 或相似程序能够很快地得到具有演示图形的满意结果。同时也必须承认,工程师在实际工作中可能更希望使用现成和可靠的程序,而不需要去学习编程或使用数学软件。为了满足这方面的需要,上述程序可从作者的网站上得到。该网站可提供三种选择:

- 1) 以 Power-Basic 编写的源代码,但不包括 CONCEPT;
- 2) 在“Windows”中能执行的程序单元,可从主页 <http://www.ovgu.de/vick/emcbook.html> 下载;
- 3) 同时也可以获得源代码和能执行的完整程序的 CD(光盘),但这可能要预付 12 欧元。

1.2 如何获得本书中的插图

由于印刷上的限制,本书中的所有插图(原理图、草图和图片)是用黑白颜色印刷的。如果读者希望得到彩色版的插图,可从作者处得到。

由于 Springer 出版社的允许,本书中所有插图的 TIF 格式文件都可从网址 <http://www.ovgu.de/vick/emcbook.html> 上下载。因此,凡出于教育等目的,本书的读者都可获得现成的插图。然而,作者要求引用时注明插图源自本书。

第2章 对电压、电流、场和阻抗的思考

为了使设备或系统满足 EMC, 就必须采取一些措施。采取这些措施是为了电路的布局 and 印制电路板 (PCB) 的设计。它们包括设备内部元器件和导线的合理布排, 以及扩展到制定一些系统构造时的设计准则。这些措施包括应用接地、滤波和屏蔽准则, 以及进行与问题相匹配的导线和电缆的布线。此外, 还可能包括系统内设备的布排和安装位置的设计计划。这些孤立的有时甚至看似无关的单个措施, 如果读者能记住下面的一些电磁学的基础知识, 那么就能将它们综合起来, 灵活地应用到产品设计中。

- 电荷会产生电场, 而电场又会对其他电荷产生作用力。这些作用力能使自由电荷产生运动。

- 运动的电荷 (电流) 会产生磁场, 而磁场又会对其他的运动电荷 (电流) 产生作用力。时变电流产生的时变场能对静电荷产生作用力。这种效应称为“感应”, 能产生感应电压。

- 电场和磁场在时间和空间上的变化彼此相关。时变场以电磁波的形式传播。

上述的电荷特性是客观存在必须接受的。一般来说, 为了消除某些常见干扰, 只有以下几种方法:

- 必须抑制不用作信号的电流。
- 必须减小无用电流以使它对其他系统的影响可以忽略。
- 必须激励额外的电流, 使其产生的场能抵消已有的场。

最后一点在 EMC 措施中具有特别的意义, 因为屏蔽效能、接地平面的影响, 以及具有低泄漏场电缆布线的有效性都与这个原理有关。

电压: 所有电磁问题的出发点都是落在基本电荷上。其量值为 $e = -1.609 \times 10^{-19} \text{C}$ 。单个基本电荷是如此的小 (一个电子的半径为 $3.4 \times 10^{-21} \text{m}$), 以致于 10^6 个基本电荷聚在一起才可视为一个点电荷 Q 。基本电荷或电子的质量为 $9.14 \times 10^{-31} \text{kg}$ 。

两个点电荷之间的相互作用力可以用矢量表示为

$$\vec{F} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon r^2} \vec{e}_r \quad (2.1)$$

如果两个点电荷的极性相反, 则它们之间的作用力是互吸的。但如果极性相同, 则它们之间的作用力是互斥的。假定将一个电荷, 如 Q_2 , 定义为试验电荷, 那么将式 (2.1) 中得出的作用力除以试验电荷的量值, 就可导出一个新的物理量, 称为电场强度 E , 即

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_2} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon r^2} \vec{e}_r \quad (2.2)$$

电场强度: 电场强度是静止电荷上每单位电荷所受到的作用力。当存在电场强度时, 就会在电荷上产生作用力, 从而引起其移动。

要把两个大小相等, 极性相反的电荷分开一定的距离, 就需要在这个距离上施加一个作用力。换句话说, 就是需要一定的能量。当释放这两个电荷时, 它们就会运动而发生碰撞再次获得能量。因此, 电荷在电场强度矢量方向上的移动会获得能量。把获得的能量与试验电荷联系起来, 就可得到电位。空间中两点之间的电位差 (从位置 1 移动到位置 2) 称为电压。因此, 电压是给定电场工作电位大小的度量。这也与 EMC 有关:

如果在两个电极之间连接一个电压源, 会使这两个电极及无关的金属结构上的电荷移动, 直至每个电极和每个金属部分都能达到等电位。这样的叙述等于是说“金属表面的切向电场强度等于零!”。

如果电压的极性由正变为负 (在此假定为正弦变化), 则电荷极性也必须遵循这样的变化。在所有的电极和金属结构上, 电荷会出现移动, 就产生了规定的电流流动。如果电压的变化非常快, 则电荷将不能跟随这个变化 (从对一个慢交变场的静态考虑过渡到高频场的变化)。

在 EMC 领域, 考虑从静态场或稳定场过渡到高频场特性的界限值定义为

$$l = \lambda/10 \quad (\text{结构尺寸 } l = 1/10 \text{ 的波长}) \quad (2.3)$$

如果所研究的结构尺寸小于所考虑的最小波长 (最高频率对应的波长) 的 $1/10$, 就能采用静态场或稳定场的方法和条件。在此, 我们取一个 $30\text{cm} \times 20\text{cm}$ 的计算机的主板作为例子, 如果假设其时钟频率为 400MHz , 那么就必须研究这个主板产生的高频问题。

电流: 每一个电荷的移动称为电流。如果每秒有 6.3×10^{18} 个电子 (载流子) 通过导线的横截面, 那么就定义该电流为 1A 。单个载流子根据它们自身的极性吸引或者排斥其他的载流子。此外, 这时会出现另外一种力的效应作用在移动电荷上:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.4)$$

式中, q ——移动速度为 v 的电荷;

B ——磁通密度, 如由别的电流产生。

认识电流的第一个途径是电流可产生磁场强度, 对于非磁性材料, 由式 $B = \mu H$, 可以很容易地将磁场强度 H 转换成磁通密度 B 。

此外, 对于一些简单的结构, 磁场强度可用安培定律计算:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = I \quad (2.5)$$

在此, 重要的特性是电流都会产生磁场, 反过来磁场又会对其他移动电荷产生作用力。仅结构完全对称的封闭金属屏蔽体, 其周围空间不会存在电场或磁场。

为了将电能或信息通过电磁的方式从一处传输到另一处, 就需要采用电压或电流。因此, 要想避开电场或磁场的存在似乎是不可能的 (除非在特殊的情况下, 如完全对称全屏蔽的同轴电缆)。有鉴于此, EMC 的任务就不能是消除所需要的电流或电压, 而是为它们的传输规定一些地方和路径, 目的是使其对其他电路的影响足够小。

为了在这一点上对电流作出完整的说明, 应当提及除了传导电流以外, 也还存在运流电流 (即位移电流), 它们是脱离了金属导体而存在的一种电流。这些电流通常并不是 EMC 关心的主要问题。此外, 电流环路也可通过位移电流形成闭合回路, 而位移电

流通常是因电介质材料中存在时变电场时产生的。

阻抗：若将环路或电路某点的电压除以其产生的电流，就可得到该点的输入阻抗。阻抗由实部和虚部组成。实部用于描述电路损耗的大小，虚部用于度量电路或环路中与电压或电流有关的场。阻抗的虚部可能呈容性，随着频率的增加其量值减小；或者可能呈感性，随着频率的增加其量值增大。

通常，电流总是流过电阻最小的路径。如果我们也考虑复阻抗的情况，就可以将这个原理扩展为，电流总是流过阻抗最小的路径。

在 EMC 领域，这个简单的原理有着特别的意义。如果出现了干扰并且已知干扰源，那么要减小干扰就必须找出干扰的耦合路径或电流的通路。若想到电流总是流过阻抗最小的路径的原理，则上述任务就可简化为寻找这条传输路径。在这样的分析中，不仅必须考虑电路中的分立元器件，而且还要考虑电流也可通过寄生的电场或磁场形成闭合回路。此外，分析中也必须考虑这些寄生场的有效阻抗。

下面引入第一个例子用来例证电流的特性。在导电平面（有损耗）的上方放置一根总长度为 1.2m，直径为 1mm 的圆柱导体（材料为铜）。该导体的结构是在其长度的中心处弯成 90°。要计算的是导电平面上的表面电流和等值的返回电流。其布置如图 2.1 所示。驱动电压位于导体和接地平面之间，放置在导体的左端，信号发生器的源阻抗为 50Ω。导体的右端直接与导电平面相连。

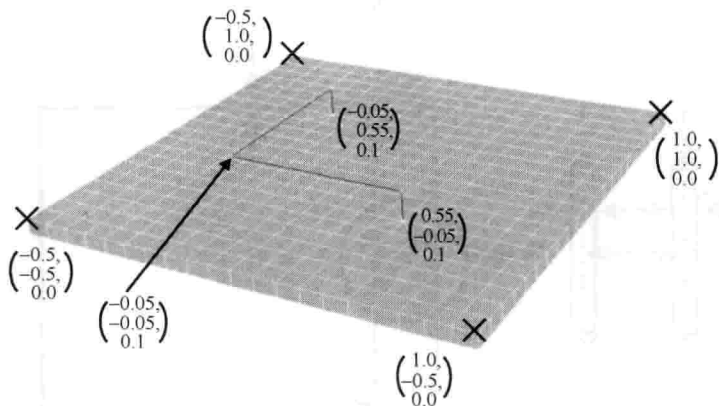


图 2.1 导电平面上根弯折导体的布置

图 2.2 给出了当驱动信号的频率为 1kHz、10kHz、100kHz 及 1MHz 时，导电平面上的表面电流的分布情况。图中很明确地表明，当信号频率为 1kHz 时，从导体的短路右端到信号馈入点的表面电流的流向为直线路径。在此频率时，该路径具有最小的阻抗。当频率为 10kHz 时，可以看出电流路径稍微偏向导体的走向。而当频率为 100kHz 时，电流几乎完全沿着导线的路径。若考虑导体自感的话，可以推测别的路径都有较高的阻抗。

下面给出第二个例子，也可以用解析法进行分析，目的是清楚地表明场的集中效应。图 2.3 所示的布置，是由一根 240Ω 的两导体组成，其返回导体的两端直接与地相