

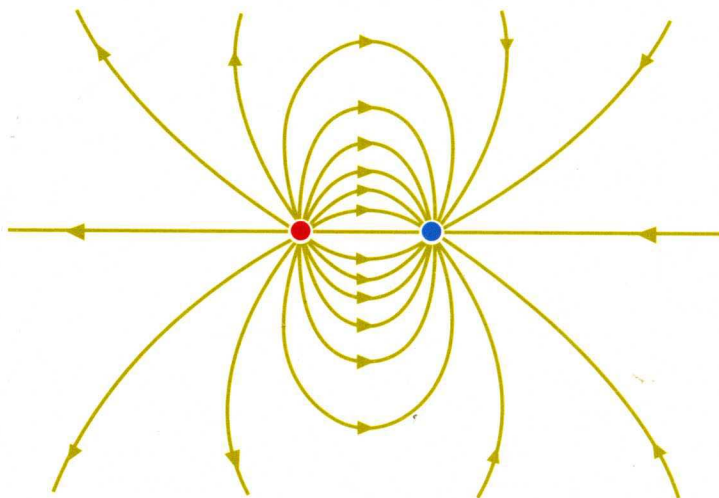
全面升级，系统论述电磁兼容、接地、屏蔽、干扰与噪声问题的  
必备工具书！

畅销全球的IEEE名著！

WILEY

清华

开发者书库



Grounding and Shielding: Circuits and Interference  
Fifth Edition

# 接地与屏蔽技术

## 电路与干扰

(原书第5版)

Ralph Morrison 著

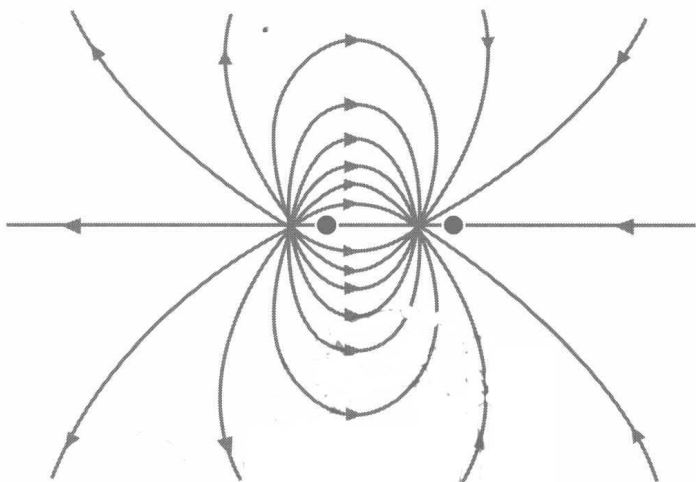
李献 王艳玲 译



清华大学出版社

清华

开发者书库



Grounding and Shielding: Circuits and Interference  
Fifth Edition

# 接地与屏蔽技术

## 电路与干扰

(原书第5版)

Ralph Morrison 著

李献 王艳玲 译

清华大学出版社  
北京

Grounding and Shielding: Circuits and Interference, Fifth Edition

Ralph Morrison

ISBN: 9780470097724

Copyright © 2007 by John Wiley & Sons, Limited. All rights reserved.

Copyright © 2015 by John Wiley & Sons Limited and Tsinghua University Press. All rights reserved.

All Rights Reserved. Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Tsinghua University Press Limited and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

本书封面贴有 John Wiley & Sons 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号 图字:01-2014-6628

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

接地与屏蔽技术:电路与干扰:第5版/(美)莫里森(Morrison,R.)著;李献,王艳玲译.一北京:清华大学出版社,2016

(清华开发者书库)

书名原文:Grounding and Shielding: Circuits and Interference, Fifth Edition

ISBN 978-7-302-40577-1

I. ①接… II. ①莫… ②李… ③王… III. ①接地保护装置 ②屏蔽 IV. ①TM774  
②TN721.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 144696 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:白蕾

责任印制:宋林

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](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印刷者:北京鑫丰华彩印有限公司

装订者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:186mm×240mm 印 张:11.5

字 数:194千字

版 次:2016年3月第1版

印 次:2016年3月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:49.00元

产品编号:057587-01

# 译者序

## FOREWORD

---

现在,随着数字时钟频率的不断提高,各种电子系统的干扰变得越来越严重。如何正确处理电子系统中的接地和屏蔽是电子系统设计中面临的迫切需要解决的问题。

作者从基本的物理学知识出发,分析了电子系统设计中电路理论所没有涉及的表现电路的几何信息。分析了各种电子系统中的接地及屏蔽方法。第1章介绍了电压与电容。第2章介绍了电子系统中涉及的磁现象。第3章介绍了公用电源及设备地。第4章介绍了不同的模拟电路中的屏蔽及接地问题。第5章介绍了电子系统中辐射的分析和处理方法。第6章介绍了电子系统中的硬件、各种电缆及其屏蔽。第7章介绍了数字电路中的各种干扰及其屏蔽措施。第8章介绍了各种特殊的地平面及硬件设施。

本书包含电子设计中的各种主题,如设施中电源配送,模拟和数字电路混合,高速时钟的电路板布线和符合辐射和敏感性标准。本书注重电子系统干扰屏蔽和接地的实践,十分适合用作高校电子工程、电气工程、自动化以及工程技术类相关专业的参考教材,还可用作电子系统设计人员的参考书。本书的最大特点如下:

- 内容新颖:从物理学出发分析了电路设计中电磁干扰及辐射的产生。
- 覆盖面广:包含了各种模拟和数字电路中的干扰、辐射的分析,电子系统中的变压器的屏蔽,各种传输线、辐射和印刷电路设计的方法及技巧。
- 实用性强:一步一步引导人们建立一个无噪声的仪器系统,减小或消除大系统噪声的方法。
- 可读性强:简单实用地解释了物理场,每个章节的总结性结论便于读者的理解和记忆。

本书由李献和王艳玲共同翻译完成，由李献负责全书的统稿工作。对于本书的出版，我们首先要感谢清华大学出版社的盛东亮老师和其他编辑人员，是他们的努力促成了本书的顺利翻译与出版发行，使读者能够通过本书分析电子系统设计中出现的各种干扰及其正确处理方法，掌握电子系统中的正确接地方法。同时也感谢王厚生、刘建华、昌坤等对于本书的核对与检查。

在本书的翻译过程中，我们力求忠实于原著，但由于译者技术和翻译水平有限，很多词句或许把握不够准确，导致书中难免存在各种翻译不足，敬请读者批评指正，以便在后期修改完善。译者邮箱是 [lcsmam@163.com](mailto:lcsmam@163.com)，敬请赐教。

译 者

2016年1月于北京

# 前言

## PREFACE

---

本书第1版出版于1967年,第4版出版于1997年。很难想象十年过去之后,我需要同样的题材做第5次修订。第5版是完全重写,因为我想以不同的次序来表达观点,并展示在主持研讨会和担任顾问时获得的新的领悟。例如,增加了一些印刷电路板设计的内容,这个主题只在第5版能接触到。同时也删除了一些不相关的内容。

本书主要面向那些对现实世界中电子设备感兴趣的工程技术人员。新的工程师能够很容易读懂这本书的内容,虽然他们可能还没有认识到接地与屏蔽技术的重要性或者为什么某些内容非常重要。模拟、数字或者电源工程师和电路设计者遇到一些相关问题时,就将意识到需要了解干扰及其所有的表现。本书内容大多涉及数学公式,但是也不需要去理解所有的公式。

我的电子学职业生涯开始于真空管。我至今仍记得第一个硅二极管和第一个晶体管。我也记得,那时认为固态器件工作频率达到10MHz是不可能的……如此多的不可能。今天,逻辑设计者正在考虑的时钟频率已达到24GHz。而我相信这必将能够实现。

在我的早年,工作内容是处理低电平模拟信号,那时我发现了物理学背景的重要性。这是让我写本书第1版的原因。今天,当我看到数字设计的问题或设备布线,我再次认识到物理学在理解电气设计中的重要性。有许多新的技术领域需要讨论,这是我撰写第5版的原因。本书开始于一些非常基础的物理学。我希望读者不要跳过这部分内容,因为这是后面内容的基础。

有一些观点是我想在本书强调的。

第一,原理图或者电路图只是粗糙的计划或框架;只是为电路分析提供了基础,

但不能表现任何的几何信息。例如，器件大小和方向信息丢失正如引线长度和引线形式，当电路变得更复杂时这个几何体更关键。

第二，所有器件是场运转的，电容器储存电场能，电感器储存磁场能，晶体管中要求场在半导体材料中，变压器工作中既有电场也有磁场——电路中的导体是引导这些场到各种器件中。

第三，器件中的场意味着场能量的出现，我们在电路中使用导体的目的是移动这个场周围的能量。在吉赫兹中尝试这样做不简单，理解传输线理论是理解所有电路从直流到 100GHz 中能量是如何流动的关键。

第四，合格的工程只是折中，没有完美的方案。重点是用可用的材料并以经济的方式来解决。我们常常期待从电路符号中得到更多，其实这些符号只是设计的开始。

我想感谢以下这些人，他们的帮助使得本书的顺利出版成为可能。我妻子 Elizabeth 是个作家，我从她的评论中收获很多。我要感谢我的编辑 George Telecki，他认识到了这本书的需求，并给我鼓励。非常感谢 Henry Ott 和 Rick Hartley，他们提供了重要支持。我也同样感谢飞思卡尔公司的 Dan Beeker，他认识到工程师继续教育需要，并提供了技术支持。

希望本书可以提供给读者有用的观点，并有助于解决问题。也希望这本书中的方法可以引入高校教学系统中去——我感觉有强烈的需求。我进一步希望那些同意我的观点的即将从事学术工作的读者作出应有的响应。

更多的感谢给予那些曾经购买过本书早期版本的读者。我也相信你们通过阅读第 5 版可以收获更多。

Ralph Morrison  
于加利福尼亚州

# 目录

## CONTENTS

---

<b>第 1 章 电压与电容</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 电荷与电子 .....	3
1.3 电力场 .....	4
1.4 场的表述 .....	4
1.5 电压定义 .....	6
1.6 等势面 .....	7
1.7 两平行板导体间的电力场 .....	8
1.8 电场分布图 .....	9
1.9 电场中的储能 .....	12
1.10 电介质 .....	13
1.11 $D$ 场 .....	14
1.12 电容 .....	15
1.13 互容 .....	16
1.14 位移电流 .....	17
1.15 电容器中储存的能量 .....	18
1.16 电场中的力 .....	19
1.17 电容器 .....	19
<b>第 2 章 磁学</b> .....	21
2.1 磁场 .....	21



2.2	毕奥-萨伐尔定律 .....	22
2.3	螺线管 .....	23
2.4	法拉第定律与感应场 .....	23
2.5	电感 .....	25
2.6	电感中的储能 .....	25
2.7	空间中的磁场能量 .....	27
2.8	磁路 .....	28
2.9	带气隙的磁路 .....	30
2.10	小电感器 .....	31
2.11	自感和互感 .....	31
2.12	变压器的作用 .....	32
2.13	磁滞和磁导率 .....	35
2.14	涡流 .....	36
2.15	电能的传输 .....	37
2.16	坡印亭矢量 .....	38
2.17	传输线概述 .....	39
2.18	传输线的运行 .....	40
2.19	传输线场形式 .....	41
2.20	干扰场 .....	43
<b>第3章 公用电源及设备地 .....</b>		<b>45</b>
3.1	引言 .....	45
3.2	发展 .....	45
3.3	术语 .....	46
3.4	大地作为导体 .....	47
3.5	中性线与大地连接 .....	48
3.6	地电势差 .....	49
3.7	场耦合到电源导体 .....	50

3.8	中性线导体 .....	51
3.9	变压器 $K$ 因子 .....	52
3.10	非接地电源 .....	53
3.11	电源要求 .....	53
3.12	大地电源电流 .....	54
3.13	线路滤波器 .....	55
3.14	隔离地 .....	55
3.15	设备地——一些更多的历史 .....	57
3.16	闪电 .....	58
3.17	闪电和设施 .....	59
<b>第 4 章 模拟电路 .....</b>		<b>61</b>
4.1	引言 .....	61
4.2	仪器仪表 .....	61
4.3	发展 .....	63
4.4	基本屏蔽壳 .....	63
4.5	外壳和公用电源 .....	66
4.6	两地问题 .....	67
4.7	设备和两地问题 .....	68
4.8	应变计仪器 .....	70
4.9	浮动应变计 .....	72
4.10	热偶 .....	73
4.11	基本低增益差分放大器 .....	73
4.12	电源变压器屏蔽 .....	75
4.13	校准和干扰 .....	77
4.14	超过 100 kHz 的保护屏蔽 .....	77
4.15	模拟电路中的信号流动路径 .....	78
4.16	并联有源器件 .....	79

4.17	反馈稳定性 .....	79
4.18	反馈理论 .....	80
4.19	输出负载和电路稳定性 .....	81
4.20	功率级周围的反馈 .....	82
4.21	恒流环 .....	83
4.22	滤波器和混叠误差 .....	83
4.23	隔离和 DC/DC 变换器 .....	84
4.24	电荷变换器 .....	86
4.25	保护环 .....	88
4.26	热偶效应 .....	88
4.27	保护开关 .....	89
4.28	数字控制 .....	89
<b>第 5 章 辐射 .....</b>		<b>91</b>
5.1	处理辐射和敏感性 .....	91
5.2	什么是辐射 .....	92
5.3	偶极子天线 .....	95
5.4	波阻抗 .....	95
5.5	场强和天线增益 .....	96
5.6	环路产生的辐射 .....	98
5.7	$E$ 场耦合到环路 .....	99
5.8	正弦波分析的要点 .....	100
5.9	脉冲和方波的近似计算 .....	100
5.10	从印刷电路板产生的辐射 .....	104
5.11	嗅探器和天线 .....	104
5.12	太阳磁场风暴 .....	105
5.13	地球辐射 .....	106

第 6 章 硬件 .....	107
6.1 带屏蔽箔电缆 .....	107
6.2 同轴电缆 .....	108
6.3 低噪声电缆 .....	110
6.4 传输阻抗 .....	110
6.5 波导 .....	112
6.6 地平面上方的电磁场 .....	113
6.7 集肤效应 .....	113
6.8 每方形电阻 .....	114
6.9 场和导体 .....	116
6.10 导电外壳 .....	117
6.11 感应场穿过外壳壁的耦合 .....	117
6.12 在导电表面的场能量的反射和吸收 .....	119
6.13 独立孔 .....	119
6.14 倚赖孔 .....	120
6.15 蜂窝 .....	121
6.16 穿透场总结 .....	122
6.17 电源线路滤波器 .....	122
6.18 带后罩连接器 .....	124
6.19 场 $H$ 耦合 .....	125
6.20 垫圈 .....	126
6.21 金属簧片屏蔽条 .....	127
6.22 玻璃孔 .....	127
6.23 大型晶体管保护 .....	127
6.24 表面安装元器件 .....	128
6.25 辐射测试仪 .....	129

<b>第7章 数字电子</b> .....	130
7.1 引言 .....	130
7.2 电路板材料 .....	132
7.3 双面电路板 .....	132
7.4 多层电路板 .....	133
7.5 地平面和数字电路板 .....	135
7.6 时钟逻辑 .....	137
7.7 单一逻辑信号的传输 .....	139
7.8 去耦电容器 .....	142
7.9 电源平面 .....	144
7.10 地和电源平面的电容 .....	145
7.11 使用过孔 .....	146
7.12 作为传输线的去耦电容器 .....	147
7.13 特征阻抗控制 .....	149
7.14 数字电路板的辐射 .....	150
7.15 测量问题——地弹 .....	151
7.16 高时钟速率 .....	152
7.17 平衡信号传输 .....	153
7.18 带状电缆和连接器 .....	154
7.19 子板 .....	155
7.20 模拟和数字电路混合 .....	155
7.21 光电隔离 .....	156
7.22 镀金 .....	156
7.23 GHz 注意事项 .....	157
<b>第8章 硬件设施</b> .....	158
8.1 地平面 .....	158

8.2 使用纵梁的接地平面设备 .....	159
8.3 其他地平面 .....	161
8.4 地平面和远程站点 .....	161
8.5 扩展地平面 .....	162
8.6 单独引出电源 .....	162
8.7 浪涌保护 .....	164
8.8 隔离变压器 .....	165
8.9 屏蔽室 .....	166
8.10 电机控制器 .....	167
8.11 一个真实的事例 .....	169
<b>参考文献</b> .....	170

## 1.1 引言

电路是如何工作的？一种回答是利用基尔霍夫定理对正弦电路进行分析的；另一种是采用逻辑电路的状态分析。这些回复只是整个答案的一小部分。完整的答案隐藏在如大山深处般的细节之中。本书将对这些非电路方式的细节进行分析。我们采用这种新的方式是因为电路图及电路理论的本质特征必须撇开这些密切相关的细节而独立存在。这些细节对高频电路及小信号电路的性能非常重要。当涉及辐射、干扰及灵敏性时同样重要。线型、连接次序、元件方向及引线布置也常常是关键细节。我喜欢称这些细节为“电路几何”。这些几何细节与电路如何正常工作密切相关。几何形状在模拟电路、电源电路，特别是数字电路中时钟频率的上升沿中是一个未解决的议题。

当一个电路开始实施时，我们理应对这许多的细节进行分析。元件之间大部分是通过带状或者筒状的铜连接。元件焊接在孔型的焊盘或者铜焊盘上。印刷电路板的各层之间的走线通过孔连接起来。毫无疑问，这些就是电路设计中的细节。更多微妙特性的细节包括走线的宽度、地平面或者环氧板的介电常数。大多数情况下，我们不会对所做的事情产生疑问，原因是我们倾向于可接受的惯例。电路以这种方式构造就可以工作，我们又何必要做一些改变？

想当然做事情并不总是一个优秀的工程师。值得注意的是，过去 20 年间，数字

电路的时钟频率从 1 MHz 发展到 1GHz。时钟频率幅值增长了 3 个数量级。想象一下当汽车的速度达到现在的 3 个数量级时会是怎样的情景。这就是 600 mph 或者是喷气式飞机的速度。即使汽车的速度增加到适当的程度将会需要我们大范围地改变城市道路,更不用说扩大司机的培训范围。

电子学中,速度的增加没有构成安全隐患。但是,电路性能的差别应该充分了解。经常的情况是速度增加的影响没有被认识到,直到下一代的设计开始实施。要想了解这些影响,需要理解基本的原理。我们将要调查的这些细节不是以电路图或原理图的形式。我们将考虑这许多细节对电路性能的影响。

电子器件常常利用本地电网取电。基于安全的原因,电源装置必须接地到电网中的一个电力导线上。电子器件装置与电源连接而且要共享同样的地线,这样的结果导致了干扰的产生。后面的章节将会讨论电源与电路性能的关系。

电路图只是电路设计的计划或结构。电路理论描述了电路的基本性能。电路符号只是问题的一部分,它们只是复杂目标的必须且简单的描述。每一个电容都有一个串联电阻及电感。每一个电感都有一个串联电阻及并联的电容。这些考虑的因素只是整个过程的开端。例如,高频时介电常数是是非线性的。对于磁性材料,磁导率随着频率的增加而下降。因此电路符号只能表达有限的信息。更进一步,我们没有用来表达集肤效应、传输时间,辐射或者电流线路的电路符号。电路图中的直线在实际的电路中可能是一个非常复杂的路径。总之,电路图几乎没有物理结构的信息。这就限制了我們了解实际工作状况的机会。

许多电路及系统的性能与它们的构造密切相关。模拟电路的设计是这样的,计算机的设计也是这样的。我经常谈论到:电气连接是否是一个问题?重要的是连接的组成,在模拟电路中重要的是知道屏蔽是接地的而不单单是接地。一个典型的问题是,一个电路板的地平面如何与包围的机箱相连?这个问题的答案并不能从电路图中得到。我们将在数字电路章节中讨论这个问题(第 7 章)。

在本书中,一个重复讨论的主题就是信号及电源在电路中是如何传输的。这种方式将会引导我们理解许多常常理解得不是很准确的问题。为了讨论电源及信号的传输,电场和磁场必须先进行讨论。讨论之前,我们先介绍电子。不要失望。花费在物理学上的时间将会使我们更容易理解本书后面章节中的观点。



## 1.2 电荷与电子

电路理论可以让我们得到一组互相连接的元件的电路电压及其流动的电流。对于RLC电路(电阻-电感-电容)的分析可以直接利用基尔霍夫定理。我想讨论这个问题采用另一种方式。为了理解电路性能更多细微的方面,我将采用基本的物理学去解释许多易于忽略的细节。我们的起点看起来有点遥远,但是请继续阅读。首先我们讨论原子。

原子由原子核与围绕它的电子组成。质子和中子组成原子核。电子具有负电荷,它的电量与原子核中质子带的正电荷电量相等。中性原子中的正负电荷的电量绝对相等。每一电子层电子数量是固定且有限的。最外层的电子数量包含了原子的许多特性。举个例子,铜原子最外层电子数量为1。最外层电子具有很好的可移动性从而参与电气活动。因为质子相对来说质量很重而且有外层的电子屏蔽,所以在电子学中我们认为它们没有直接参与电气活动。

分子由共享最外层电子的不同原子绑定在一起。对于绝缘体来说,绑定限制了最外层电子的可移动性。典型的绝缘材料有尼龙、空气、环氧树脂或者玻璃。如果两种绝缘材料在一起摩擦,例如丝绸布和橡胶棒,最外层电子移动性的不同将会引起一些电子从橡胶棒转移到丝绸布。在这种情况下,丝绸布所带的电子称为负电荷体。橡胶棒所带的电荷为正电荷。我们称呼与负电荷相应的电荷为正电荷。实际上正电荷的产生是由于原子核中的不能移动的质子与最外层的电子不一致而造成的。失去负电荷正如假设正电荷在绝缘体的表面。

通过实验可以证实,在带电体之间有自然力的存在。如果一个带电体排斥另一个,实际情况是这与电场有关系。如果你记得物理课程,这些力可以用丝线悬挂的带电小球来验证。这里给很轻的小球上带上电荷可以看到这些小球之间相互吸引或排斥。

上面涉及的任何实验的电子数量是极其少的。为了证实这个观点我想引用理查德·费因曼的著述。如果两个人站立相距数英寸,它们所带电荷数为自己身体的1%情况下相互之间的斥力有多大呢?大概相当于几英镑?更多!是否大于它们的