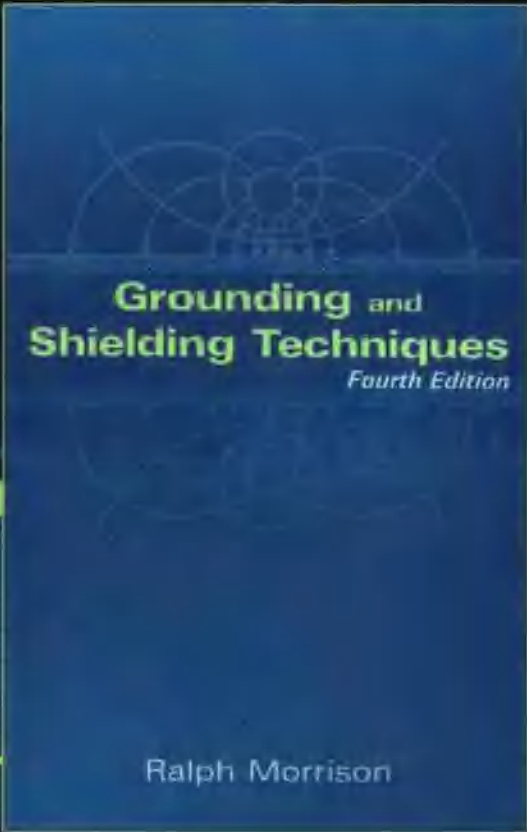


接地与屏蔽技术

(原书第4版)

**Grounding
and
Shielding
Techniques**
(Fourth Edition)

(美) Ralph Morrison 著
陈志雨 宋海峰 龚莉媛 译



**Grounding and
Shielding Techniques**
Fourth Edition

Ralph Morrison

电子与电气工程丛书

接地与屏蔽技术

(原书第4版)

Grounding and Shielding Techniques (Fourth Edition)

(美) Ralph Morrison 著

陈志雨 宋海峰 龚莉媛 译



机械工业出版社
China Machine Press

本书专门讲解如何解决数字时代电路的噪声问题和干扰问题,内容涉及物理、电路、电工、电力、无线电通信、微波、仪表、传感器等各方面的专业知识,讨论与设备变压器与硬件变压器相联系的问题,以及滤波设施和硬件、多重屏蔽变压器等内容,是电磁兼容领域一本非常实用的专著。

本书作者对物理概念有着独特和深入的理解,在不列出复杂的数学公式的前提下深入浅出地解释很多物理现象,介绍了大量作者的实践体会、方法和技巧,对于技术人员有着极好的参考价值。本书也适合作为高等院校相关课程的参考用书。

Ralph Morrison: Grounding and Shielding Techniques, Fourth Edition (ISBN: 0-471-24518-6)

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

Copyright © 1998 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved.

本书中文简体字版由约翰·威利父子公司授权机械工业出版社独家出版。未经许可出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

本书版权登记号:图字:01-2004-6188

图书在版编目(CIP)数据

接地与屏蔽技术(原书第4版)/(美)莫里森(Morrison, R.)著;陈志雨,宋海峰,龚莉媛译. -北京:机械工业出版社,2006.6

(电子与电气工程丛书)

书名原文:Grounding and Shielding Techniques, Fourth Edition

ISBN 7-111-19022-X

I. 接… II. ①莫… ②陈… ③宋… ④龚… 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(2006)第039611号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街22号 邮政编码 100037)

责任编辑:范运年 李洁

北京诚信伟业印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2006年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·9.5印张

定价:19.00元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线:(010) 68326294

译者序

受机械工业出版社委托，我们尽最大努力翻译了美国著名电磁兼容专家 Ralph Morrison 所著的这本书，期望能将本书所包含的独特的概念、观念、解释方法以及实用的经验技巧介绍给国内电磁兼容领域的同行们。

本书第1版出版至今已近40年，令人赞叹的是这40年来本书多次再版，这本身就可以说明本书的经典性和实用性。在电磁干扰已成为电子领域越来越受关注的命题的今天，本书的内容也变得越来越受欢迎。本书最大的两个特点是：1) 对物理概念有独特和深透的理解，并能在不列出复杂的数学公式的前提下深入浅出地解释很多物理现象；2) 有大量来自实践的体会、方法和技巧的介绍，这些都是作者几十年来丰富经验的结晶。本书的第4版是作者为适应当今高频、高速的电子世界而重写的，因此在这个时候翻译这本书是非常适时的。

由于译者学识有限，加上本书涉及的知识面很宽，包含物理、电路、电工、电力、无线电通信、微波、仪表以及传感器等各方面非常全面的专业知识，因此尽管我们竭尽全力，译文中仍难免会出现错误，希望读者将发现的错误及不明之处及时通知我们，以便在修订时予以改正。参加本书翻译工作的有陈志雨、宋海峰、龚莉媛。具体分工为：第1、2、5章由宋海峰翻译，第3、4、6章由龚莉媛翻译，陈志雨负责第7、8、9、10、11章翻译及全书的统稿和校核。

感谢机械工业出版社华章分社对本书翻译工作的支持，特别感谢审阅人给我们的初译稿提出了大量中肯的意见。最后，对有关的编辑、校对、排版人员的工作表示衷心的感谢。

陈志雨
2006年2月于北京

译者简介

陈志雨，1945年生，广东省广州市人，中国科学院电子学研究所研究员，中国电子学会电磁兼容分会委员。1968年毕业于北京大学物理系，1981年毕业于中国科学院研究生院无线电物理专业。长期从事电磁波辐射与传播、电磁场理论、电磁测量和电磁兼容等方面的理论与实验研究工作。主持完成过多个国家自然科学基金项目及其他科研项目。曾获中国科学院自然科学一等奖一项，并在国内外学术刊物上发表论文60余篇。

2000年后，主要研究方向转入电磁兼容领域，主要研究内容有GTEM室的辐射与反演理论、做辐射EMI测试的理论与方法、场线耦合理论、共模辐射、开关电源电磁兼容问题等。

第 4 版前言

自本书第 3 版出版以来已经 11 年了。在这期间，电子工业获得了惊人的发展。发展的方向包括数字处理、高速通信、大量数据存储等。这种变化将模拟世界带入与高速操作紧密联系的阶段。模拟设计被包含在硬件中而其必须满足辐射和敏感性标准。通常，对于设计者而言，元件距离太近又会产生新的设计问题。

在写作本书第 3 版时，作者认识到需要说明一些有关高频的问题，但现在看来论述还是太少，还是很不够。这种情况激励我重写了整本书。本书第 1 版强调的是静电问题，那是在 1967 年。到 1997 年，已经是电磁世界了，于是第 4 版就要面对这个事实。

事实上，许多问题可以通过只考虑静电过程来解决。本书的编写也考虑到这一事实。第 5、6 章论述问题时并不要求读者理解辐射或敏感度。注意，这些章节都遵循场的论述，场是如何产生的以及如何进入设备的。这里用简单的形式阐述了物理原理，并描述事情是怎样以及为何会这样的。有了坚实的基础后，读者应该能够理解接地层在 PC 板或计算机设备中是如何发挥作用的。

本书第 1 版强调的电路理论概念对处理很多干扰问题是很不够的。元件的大小及其在电路中的位置和连接顺序都很重要。这一概念在今天还是对的，但需要引入更多的物理概念。增加的物理概念也很简单，并与实际问题相联系。

电源问题涉及硬件的各个方面。本书第 4 版中将扩展讨论与设备变压器以及硬件变压器相关的问题。我们还将就设备和硬件变压器的滤波问题展开讨论。同时，对仪表中多重屏蔽的讨论略做了调整使之更容易理解。目前，要强调摆脱昂贵的变压器。电子学已进展到这一步，以限制变压器的使用来降低成本和重量是可行并实用的办法。我将在本书中详细讨论这一新出现的课题。

令人欣慰的是，本书在这么多年中还保持着生命力。30 年确实是很长的时间，特别是在电子学领域中。我的早期实践经验使我写了本书第 1 版。这本书的出版以及相应的咨询、教学活动使我增加了对这个领域的理解。本书第 4 版将反映这些经历。对一个课题的教学有助于排除了许多悬而未决的问题。

我不担心工程师们会问我什么问题，因为我觉得经过这些年的实践，自己已经理解了问题的本质。一旦正确地鉴别了问题，大部分解释都会变得非常简单。有多重问题出现时，我必须做大量的探索。大部分的探索与理解什么是正确问题有关。很多工程师在描述他们的问题时会遇到困惑。我必须首先找出什么是有关的以及什么是无关的，同时必须找出方法来勾画出其正确的轮廓。经验最终会使工程师分辨

出各种因素，但这需要花费时间。问题常常在项目的最后突然出现，这对改变方案或做实验很不利。而这个时候工程师们常常去参加一个课程学习班。当我给出一个会破坏其整个思路的答案时，工程师们会不高兴。另外一个挑战是找到一个走出困境的方法。通常这时给咨询顾问打电话寻求帮助是一个较好的办法。

这本书必须是实用的。要承认，所有电现象早已在 19 世纪都被解释过了，寻找新的物理机制或新的法则不是正确的方法。放弃误解并不是一件容易的事情，我们个人的解释常常是我们对抗现实的保护伞。当我们的理解受到挑战时，我们往往觉得很脆弱，这本书正是提出了某些挑战。这需要读者研究事实，发现真理，并用找出的结果去解决下一个问题。我惟一的希望就是本书会对读者有所帮助。

Ralph Morrison
Eureka, California
1997 年 12 月

目 录

译者序		
译者简介		
第4版前言		
第1章 静电学	1	
1.1 引言	1	
1.2 低频信号定义	2	
1.3 电荷	3	
1.4 电荷之间的力	3	
1.5 电场	3	
1.6 电荷分布的电场	4	
1.7 电压的概念	4	
1.8 电压梯度	5	
1.9 带电体的球形导体	6	
1.10 电容	6	
1.11 位移场 D	7	
1.12 场的表达式	7	
1.13 难点	8	
1.14 MKS 单位制	9	
1.15 球壳上的电荷	10	
1.16 大地平面	11	
1.17 典型电荷分布	11	
1.18 圆柱表面	12	
1.19 平行板电容器	13	
1.20 电场能量	14	
1.21 自电容和互电容	15	
1.22 互电容的例子	15	
1.23 电场概念的重要性	16	
1.24 一个有效的工具	16	
第2章 磁学	17	
2.1 引言	17	
2.2 力线和通量	17	
2.3 B 场	18	
2.4 H 场	18	
2.5 法拉第定律	19	
2.6 磁路	20	
2.7 变压器	21	
2.8 磁滞现象——磁性材料	22	
2.9 电感	23	
2.10 螺线管的电感	24	
2.11 磁场中的能量	24	
2.12 磁学单位	24	
2.13 漏电感	25	
2.14 音频变压器	26	
2.15 磁暴	27	
2.16 飞行器的势	27	
2.17 E 场与 H 场共存	27	
2.18 场和元件	27	
2.19 孤立导体的电感	28	
第3章 信号与功率传输	29	
3.1 引言	29	
3.2 传输线	29	
3.3 传输线终端	30	
3.4 传输线场	31	
3.5 地平面	33	
3.6 同轴传输线	34	
3.7 正弦波和传输线	34	
3.8 终端	36	
3.9 玻印廷矢量	36	
3.10 辐射	37	
3.11 电偶极子的辐射	38	
3.12 电流环的辐射	38	
3.13 有效辐射功率	40	
第4章 场和导体	41	
4.1 引言	41	

VII

4.2 方块的电阻	41	6.12 低噪声电缆	74
4.3 反射	43	6.13 电路中的电抗耦合	74
4.4 趋肤效应	43	6.14 保护环	75
4.5 屏蔽效能	44	第7章 公共阻抗耦合	77
4.6 孔径	44	7.1 引言	77
4.7 独立孔径和非独立孔径	45	7.2 放大器公共阻抗	77
4.8 闭合孔径	45	7.3 应变仪激励电源	78
4.9 截止波导	46	7.4 激励电源的变压器屏蔽	80
4.10 场进入屏蔽罩评述	46	7.5 星形连接	81
4.11 场与电路的耦合	47	7.6 中性线作为公共阻抗	82
4.12 室内的场	48	7.7 大地作为公共阻抗	83
4.13 共模与常模	49	7.8 前向参考放大器	84
第5章 静电屏蔽——I	51	7.9 驱动功率级(独立输出)	85
5.1 引言	51	第8章 电路设计	87
5.2 “盒子”中的电路	51	8.1 引言	87
5.3 一个导体外部接地	53	8.2 共模抑制——后调制	87
5.4 规则	54	8.3 共模衰减器	88
5.5 变压器的连接	55	8.4 高输入阻抗电路	89
5.6 变压器单屏蔽	56	8.5 平衡激励源	91
5.7 三屏蔽方法	57	8.6 电荷放大器	92
5.8 单端仪器	58	8.7 电荷放大器及校准	93
5.9 单端信号源	59	8.8 校准保护	94
5.10 平衡信号源	59	8.9 滤波模拟信号	94
5.11 两地问题	60	8.10 交流放大器	95
5.12 基本仪器问题	61	8.11 抑制电路	96
5.13 差分放大器	62	8.12 开关调节器	97
第6章 静电屏蔽——II	65	8.13 离线开关	98
6.1 屏蔽低频信号	65	8.14 安装开关晶体管或FET	98
6.2 屏蔽单端信号	66	8.15 并联有源元件	100
6.3 屏蔽平衡源	67	8.16 医疗问题	100
6.4 悬浮电路	67	8.17 疯牛问题	101
6.5 屏蔽接地的不平衡电路	68	第9章 公用电力	103
6.6 屏蔽电子设备	69	9.1 引言	103
6.7 屏蔽仪器放大器	70	9.2 接地平面	103
6.8 驱动屏蔽体	71	9.3 接地平面的单点接地	104
6.9 模拟输入电缆	72	9.4 机柜作为接地平面	105
6.10 铝箔屏蔽体	73	9.5 接地平面的延伸	105
6.11 排扰线	73	9.6 大地作为接地平面	106

9.7 孤立的地	106	10.10 同轴线的高频传输	119
9.8 隔高的分支电源	107	10.11 电缆转移阻抗	120
9.9 电力隔离变压器	107	10.12 电缆屏蔽体端接	121
9.10 计算机电力中心	109	10.13 触点继电器测试	122
9.11 电源线滤波器	109	10.14 接合	122
9.12 设备电源滤波器	110	10.15 高频功率传输	123
9.13 瞬态功率负载	110	10.16 混合模拟与数字信号	123
9.14 控制器	111	10.17 检漏器	123
9.15 瞬态保护	111	10.18 屏蔽室	124
9.16 不接地电源	112	10.19 屏蔽室电源滤波器	124
9.17 NEC 和电源连接	112	10.20 屏蔽室的接地	125
9.18 弯曲磁场	113	10.21 屏蔽室设计	125
第 10 章 高频设计	115	10.22 屏蔽室的使用	126
10.1 引言	115	第 11 章 脉冲与阶跃函数	127
10.2 印制电路板	115	11.1 引言	127
10.3 PC 板接地平面	116	11.2 方波的谱	127
10.4 PC 板传输线	116	11.3 单个事件的谱	129
10.5 PC 板与辐射	117	11.4 一个有价值的计算工具	130
10.6 PC 板去耦电容	117	11.5 ESD (静电放电)	130
10.7 PC 板——接地平面与 电源平面	118	11.6 ESD 防护	131
10.8 PC 板——带状电缆	118	11.7 ESD 及其特征	131
10.9 高频传输及开放电缆	119	11.8 ESD 测试	132
		索引	133

第1章 静 电 学

1.1 引言

电磁干扰控制的问题是一个一直困扰工程师们的问题。接地与屏蔽这些词语似乎是给大部分工程师解决困难的建议。然而，仅是这些词语并不能解决问题。提供找到解决问题方法所必需的洞察力正是本书的希望所在。工程师们遇到困难时常常依靠自己过去的经验或别人的经验去寻求解决方法，而常常结果是失败的，并导致大量的试验和错误。工程师们常常苦于如何将原因和效果相联系，从而得到一些解释问题性质的奇异逻辑。

模拟电路的设计者从经验可以知道，如果有一个金属盒包围着电路并连接电源公共点或者是信号公共点，那么这个电路不容易遭受到噪声干扰。设计者同时也知道，如果这些接地点连接到水管或者电源的中性线，有时候也能够减少噪声。但对这种耦合的性质或者为什么噪声会被减少的道理并不总是很清楚。常常得到的结论是：一个好的接地能够解决很多问题。于是就产生了各种各样的接地棒或者接地网，这些棒或者网被连到大地。对这些发生现象的真实理解并不能通过简单的试验得到。

1

以下这个问题常常被提出：为什么设备必须全部都接大地？答案就是一个：安全。问题是从设备供电电源的使用开始的。对提供雷电防护系统而言把电源系统接地是必要的。在三相系统中，中性线接大地。在单相系统中，其中一根导线也接大地。接地点取在进户线口或配电变压器次级。接大地的准则是经过精心设计的，而且它是美国国家电气规范（NEC）的一部分。如果没有这个接地连接，闪电就够顺着电源的导体进入设备，而且跳到管道系统到达大地，造成火灾或安全方面的危害。

安全问题涉及到所有设备的金属上。如果电源的火线接触到任何建筑物的金属上，很明显就有电击的可能。如果这类短路发生，那么电源电路肯定是开路的。这就意味着设备里而的所有金属体必须被连在一起。单独接地是不合适的，因为很难得到小于 $5\ \Omega$ 的电阻。两个接地导体之间的电阻应该是 $10\ \Omega$ 。在 $120\ \text{V}$ 的电路中，故障电流一般是 $12\ \text{A}$ ，这肯定是在电路的额定值之内。两件事情是很明显的，电源系统必须接入大地，而且所有设备里面的金属体都必须连在一起并连到电源系统中。在任何一个设备中的金属架都被认为是接地电极系统。

找到一块好的地或最好的地，或者避免使用别人在用的地是一项奇特的工作，甚至这些正在被使用的名词不适合用于工程中。比如干净的地、安静的地或者安全的地等词语，是某些失败引起的产物，它们往往是在误导而不是在帮助工程师。它

们意味着地的质量很难被保证。这些词语主张用电路方法解决问题。而在大部分的情况下，这些问题只能通过考虑导电路的几何形状才能够解决。

为了避免困难，经常给设备设计非常精巧的接地方案。但涉及到整体设施时，这种方案就很难实施了，除非设施在全部的使用寿命中保持恒定不变。而当设施需要被更新时，最大的问题就出现了。这时是沿用旧的理念，还是会有一个更好的办法呢？这是一个很严肃的课题，因为设备的扩展更新包括更换更加先进和更高速率的部件，并且相应的费用也是昂贵的。高速意味着更宽的带宽，和更高几率的辐射及相应的干扰。由此我们也会质疑：旧的接地方案对更新后的设备也许并不是最合适的。

2

大部分电子与电气工程师接受的教育都是电路理论。电流流过导体时，有电压和电流源，在电容器和电感器中有能量储存。有很好的数学方法提供任何给定电路问题的解。在高等课程中，还有一些数学方法可处理非正弦信号激励的线性电路。学生也接触过分布参数网络的课程，但往往很快就忘记了。

随着数字器件和软件的激增及计算机技术的发展，就几乎没有时间去强调这些电气现象的物理机理了。现在物理常常以数学的方法来进行教学。一些课题，比如辐射、天线、传输线理论、还包括麦克斯韦方程、边值问题和矢量计算等只有简单的论述。于是很少能给学生提供这些课题内容和真实世界中干扰控制问题的联系。

干扰控制的课题（接地与屏蔽）可以用基础物理来解释。这些课题不能单独用电路理论来解决。电路理论的概念和符号是无价的，因为没有另外的工具可替代。但是同时必须理解，符号并不就意味着电子元件。电路理论中很少论述结构的几何形状，而几何结构正是理解干扰现象的核心。关键是使读者通过这本书能够对这些问题越来越清楚。

很多专题都不能用电路理论来对待。这些例子包括雷电现象、微波传输、天线辐射、配电系统噪声、越肤效应、屏蔽效能、孔缝穿透等等。这些过程都和干扰有关，而物理提供了解释这些过程的惟一工具。正是这个理由，本书必须从电磁现象的基础开始。这些概念远远比解决某些特定的问题的能力更重要。出于这个原因，数学的方法在本书不采用。

如果读者能够耐心的从阅读基本概念开始，干扰控制（接地与屏蔽）的整个课题将会变得非常清楚。改变一些老的习惯和固有的概念是很困难的，而正是通过这样的改变新的观点才能够被树立。

1.2 低频信号定义

3

信号低频的人为定义一般是低于 100 kHz 的信号。对光学来说可能 10 GHz 都被认为是低频信号，而在电子学中，干扰往往同时与电场和磁场的耦合相联系。如果频率足够低，磁场的耦合通常被忽略。但是有一些磁场也可以引起麻烦，例如包

括 (a) 电力变压器附近, (b) 带有大电流的或者甚低频率传输系统的导体附近。有很多课题是可以不涉及磁场来处理的, 这就是用 100 kHz 定义的理由。我们将从考虑静电现象开始, 很多干扰的机理可以从物理的一个领域来理解。

1.3 电荷

电荷的基本单位是库仑。如果在导体的一个固定点中 1 秒钟通过的电荷是 1 C (库仑), 这个电流就称为 1 A (安培)。库仑是个很大的单位, 需要 6.28×10^{18} 个电子才能够形成 1 C 的电荷, 而造成导体中电流的电子的数目与其相比仅仅是很小的一部分, 哪怕电流是 100 000 A 时仍是如此。符号 Q 常常用以表示电荷。

1.4 电荷之间的力

各种各样的试验可以演示带电物体之间存在吸引力和排斥力。尽管力看起来出现在两个物体之间, 但其实存在两个电荷之间。如果两个物体上都有超量的电子, 那么这两个物体都带有负电荷, 于是这两个物体将会互相排斥。如果两个物体的电子被除去, 它们就称为带有正电荷, 它们也互相排斥。实验证明带有相反电荷的物体之间是互相吸引的, 这些力是物体捕获的或者是在物体中的电荷作用的结果。

两个小的带电物体间的静电力 f 正比于这两个物体上的电荷 Q, 反比于它们之间的距离 r 的平方。不带单位的数学表达式如下:

$$f = \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (1)$$

如果电荷是同号的, 那么正的乘积表示排斥力。

两个带电物体之间的力是它们所在媒质的函数。这些力在真空中最大, 力的减小与媒质介电常数 k 有关。两个媒质中带电物体之间的力是:

$$f = \frac{Q_1 Q_2}{k r^2} \quad (2)$$

其中 Q_1 和 Q_2 是物体上的电荷, r 是它们之间的距离。力实际是发生在电荷之间的, 但由于电荷不能离开物体, 所以这个力看起来就发生在物体之间了。

1.5 电场

带电物体之间的相互作用引出了电场的概念。电场通常以连接相反电荷之间的线来表示。1 根线从 1 个电荷单位引出。电场有一种依赖于电荷分布的图形, 这种电场图形可以通过微小的探测电荷测得。探测电荷必须足够小, 以至于它不会对被

探测电场产生影响。作用于探测电荷上的力能够度量出电场的强度，该力的方向与电场的方向一致，表示电场的线平行于力的方向。空间内任意一点的场的强度和方向确定了电场。在任意点上具有强度和方向的场称为矢量场，代表电场的线称为力线或电通量线，电场或E场是一种力场。

假设一个电荷 Q 放置在位于真空中的导体球上，产生的力场可以表示为一系列自球心放射出的直线（如图 1-1 所示）。电荷均匀分布在这个孤立的导体球的表面。力线实际上垂直终止于球表面。这些线放射出去并终止于位于无穷远处带电量相反的电荷上。而在现实中，这些力线终止于位于一定距离处的其他导体上。

5

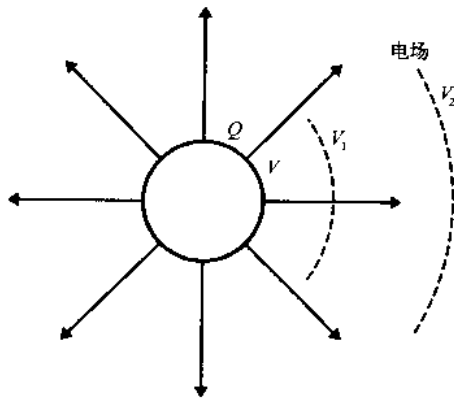


图 1-1 在带电球周围表示电场的力线

电场用字母 E 表示， E 场的强度由下式给出：

$$E = \frac{Q_1}{kr^2} \quad (3)$$

其中 Q_1 为球体的带电量， r 为到球心的距离， k 代表介电常数。在这种情况下，电场线就是一些放射状的线，作用于单位探测电荷的力可由公式 (3) 求出。

1.6 电荷分布的电场

在一个系统内，每个带电体都会相互独立地对电场产生贡献。空间中每一点的力场是所有源产生的力之和。因为每一个电荷所产生力的方向可能是不同的，因此整个电场是由每个电荷所产生电场的矢量叠加。电场的三维形状颇为复杂，较难用数学描述。在本书中仅需要理解概念，而不去推导线力或场强在空间中任意一点的方程。

1.7 电压的概念

假如单位探测电荷在电场中移动，一定会有功施加于这一系统。假设作用于

1 cm 跨距上的力是 1 dyn (达因)[⊖], 那么在力的方向上移动 1 cm 所需要做的功为 1 erg (尔格)[⊖]。

不涉及单位系统的情况下, 理解电压的定义是十分必要的。电压差是指在两点之间移动单位电荷所做的功。在一般情况下, 如果这两点分别在相互独立的导体上, 那么在这两点之间移动单位电荷所做的功等于这两点之间的电压差, 这个电压差可以通过伏特计来测量。需要强调的一点是, 电压是一个场的概念。为标准化目的的电压的测量需要一个标准单元或一个约瑟夫森结, 但这又是另外的课题了。

现在引出一个重要的问题。电压差代表了电荷的分布, 这是因为电压差不能独立于电场而存在。在一个导电系统中, 电场意味着在导体上一定存在电荷分布。而根据电路理论, 并不能给出电压存在时的电荷分布图。

移动一个单位电荷通过势差 (电压) 所做的功与把一桶水倒进水桶所做的功是相似的。提每桶水所做的功显示了这桶水所需要增加的势能。这个例子表明, 在重力场中做功。把 1 lb 水提升 20 ft 需要做 20 ft·lbf 的功[⊕], 所增加的势能并不依赖于提桶的路径。当移动一个单位电荷时, 情况也是类似的。测量到的电压与电荷所移动的路径是无关的。在电路中, 电压也叫做电势差, 这种表达与带电系统的势能存储相关。在这两个电场和重力场的例子中, 作用于系统的功并不依赖于所经过的路径。这两种场都叫做保守场。

1.8 电压梯度

在一给定点处, 山的陡度是它的势梯度的量度。这一陡度可以量度为垂直移动单位距离时势能的增加, 移动的方向对应于最陡上升方向。

在电场的例子中, 当探测电荷 Q 在电场 E 中移动时, 系统的势能随着电荷的移动而变化。如果移动的方向沿着电场线的方向, 那么增加的势能是最大的。类似地, 电势梯度可以通过在电场方向上每移动单位距离所增加的势能来量度。梯度 G 可以简单定义为电压变化量与单位移动距离的比:

$$G = \frac{\Delta V}{\Delta x} \quad (4)$$

解出 ΔV , 我们得到:

$$\Delta V = \frac{\text{功}}{\text{单位电荷}} = \left[\frac{\text{力}}{\text{单位电荷}} \right] \Delta x = G \Delta x \quad (5)$$

很明显 G 与 E 的定义式相等, 这意味着 E 是电势的梯度。更准确的为:

⊖ 1 dyn = 10^{-5} N

⊖ 1 erg = 10^{-7} J

⊖ 1 ft = 0.304 m, 1 lb = 0.453 kg

$$E = \frac{dV}{dx} = \text{grad} V \quad (6)$$

这里 x 在最大变化的方向上。

1.9 带电荷的球形导体

能够想到的最简单的系统是带电导体球。电荷之间的相互作用使电荷均匀地分布在球体的表面。假如在导体球内部存在电荷，那么由于电荷之间的相互作用将使这些电荷移动。由于没有电流流动，那么惟一可被接受的结论就是在球体表面的电荷是静止的。所有的作用力都垂直于球体表面，并且电荷不能跳入空间。电场的任意切线方向都能导致一个表面电流，而这不可能存在于静态环境中。这就意味着电力线都是垂直于球体表面的。假如有电流流动，那么情况是完全不同的。

在球外任意一点的电场表达式为：

$$E = \frac{Q}{kr^2} \quad (7)$$

在上式中， Q 是球上的电荷量， r 代表球外任意一点到球中心的距离， k 是介电常数。电场力把一个单位电荷从无穷远处移动到距离 r 处所做的功可以用下面力和距离的积分来求解：

$$W = - \int_{\infty}^r \frac{Q}{kr^2} dr = \frac{Q}{kr} \quad (8)$$

假设无穷远处的电势为 0，那么球表面上的电势是：

$$V = W = \frac{Q}{kr} \quad (9)$$

8 上式中， r 代表球的半径。

1.10 电容

一个系统在给定电压下存储电荷的能力可以用电容来描述。存储电荷的能力严格说来是一个导体几何形状的事情。具有电容并不一定需要电荷出现。

对刚刚讨论过的球体来说，球体表面上电荷与电压的比代表球体的自电容。这个比为：

$$C = \frac{Q}{V} = kR \quad (10)$$

一个两倍半径的球可以存储相同电压下两倍的电荷量。下面我们讨论单位的时候，应用上面的公式可以计算出地球的电容。

1.11 位移场 D

引入另一个向量场——位移场是非常方便的。这个向量场只与电荷量有关而与介电常数无关。在球体情况下，球体外任意一点的 D 场可以通过下面的方程给出：

$$D = \frac{Q}{r^2} \quad (11)$$

从上式中可以看出 D 和 E 之间的关系为：

$$D = kE \quad (12)$$

当电荷分布是已知的时候，首先想到的就是求位移场 D ，然后根据电介质的排列来求解电场 E 。而当电压是已知的时候，最好是先求电场 E ，然后应用电介质值来求位移场 D 。需要注意的一点是：除非在电介质边界有电荷分布，否则位移场 D 在电介质边界则是连续的。但对 E 场来说不是这样，在电介质边界处 E 场将发生突变。

9

1.12 场的表达式

在带电导体周围空间的任意点都存在静态电场 E 。电场 E 可以通过连接各式各样电荷的力线来表示。这些力线或电通线开始于正电荷终止于负电荷。从一个带电导体上引出的力线的数目是与其电荷数量成比例的。应用大量的线来描述场而给出有用的力场图也是可以的。图 1-1 显示的就是一个简单的带电球体周围放射状的场的描述。

静态电场 E 的另一种表示方法包含流线管。这些流管必须覆盖导体之间的所有空间。对于一个简单的球体来说，离开球体表面的流管一定向不断远离球体表面的方向扩张。这种扩张是随着放射距离的增加而场强不断减弱的一种量度。

电通密度是穿过空间一单位面积的电通量（线的数目）。在图 1-2 中，距离球体中心半径为 r_1 处的通量管是四条射线之间的部分。通量管切割此处球体的面积是 S_1 。而在距离 r_2 处，通量通道切割此处球体的面积是 S_2 。 S_2 是一更大球体表面的部分。

10

图 1-2 反映出了通量的定义，其定义式为：

$$dN = DdS \quad (13)$$

在上式中： dN 是通量元， D 是指同一点处的位移场， dS 是指表面面积元。当这一概念应用到图 1-1 中的球上时，可以得到一个重要定理。离开球表面的总通量可以通过积分进行求解。因为 D 总是垂直于球表面，则下面的积分为：

$$\int_S DdS = 4\pi r^2 D = N \quad (14)$$