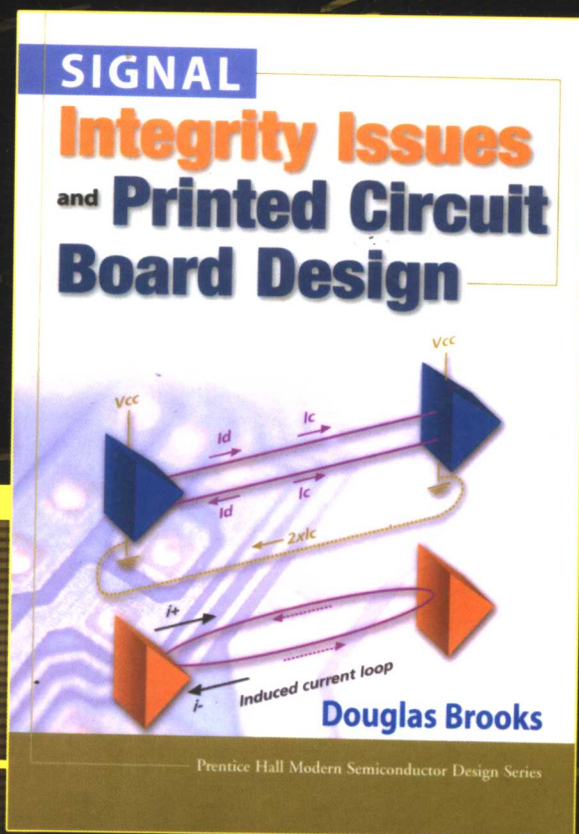


# 信号完整性问题 和印制电路板设计

## Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Design

(美) Douglas Brooks 著  
刘雷波 赵岩 译



机械工业出版社  
China Machine Press



电子与电气工程丛书

# 信号完整性问题 和印制电路板设计

Signal Integrity Issues and  
Printed Circuit Board Design

(美) Douglas Brooks 著

刘雷波 赵岩 译



机械工业出版社  
China Machine Press

本书是论述印制电路板设计与信号完整性分析的理论和工程实践的一部全面性著作。本书从印制电路板的基本原理出发,介绍电路设计的基本概念、理论和技巧,并在此基础上,详细讨论信号完整性的问题,涵盖信号完整性中电磁干扰、串扰、传输线及反射和功率器件去耦等各个方面。

本书适合作为电子与通信工程及其相关专业的教材。对于那些从事软件开发、集成电路设计、系统设计的工程技术人员来说也是一本很好的参考书。

Authorized translation from the English language edition entitled *Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Design* by Douglas Brooks, published by Pearson Education, Inc, publishing as Prentice Hall, PTR (ISBN 0-13-141884-X), Copyright © 2003 by Que.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanic, including photocopying, recording, or by any information storage retrieval system, without permission of Pearson Education, Inc.

Chinese simplified language edition published by China Machine Press.

Copyright © 2005 by China Machine Press.

本书中文简体字版由美国Pearson Education培生教育出版集团授权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:01-2004-5166

#### 图书在版编目(CIP)数据

信号完整性问题和印制电路板设计/(美)布鲁克斯(Brooks, D.)著;刘雷波等译. -北京:机械工业出版社,2005.8

(电子与电气工程丛书)

书名原文:Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Design

ISBN 7-111-16792-9

I. 信… II. ①布… ②刘… III. ①信号分析 ②印制电路-设计 IV. ①TN911.6 ②TN410.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第029626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:傅志红 赵俐

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

2005年8月第1版第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·14印张

印数:0 001-4 000册

定价:32.00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

本书从印制电路板的基本原理出发,介绍了电路设计的基本概念、理论和技巧。在此基础上,详细讨论了印制电路板的负面效应——信号完整性的问题,涵盖了信号完整性中电磁干扰、串扰、传输线及反射和功率器件去耦等各个具体方面。本书是一部论述印制电路板设计与信号完整性分析的理论和工程实践的全面著作。它是作者在长期从事教学和工程设计的经验基础上编写的。书中介绍的各种技术对于广大电子工程师顺利完成印制电路板的设计具有指导性的价值。

本书适于作为相关专业一年级研究生课程或电路与系统设计高级课程的教材。本书对于从事软件开发、集成电路设计、系统设计的人员来说也是一本很好的参考书。

本书译稿主要由清华大学微电子学研究所的刘雷波博士和清华大学电子工程系的赵岩翻译。此外,非常感谢机械工业出版社华章分社在组织出版和编辑工作中所给予的支持。

由于译者水平有限,中译本中难免有错误与不妥之处,恳请读者批评指正。

### 译者简介

刘雷波,清华大学微电子学研究所助理研究员,博士。1999年毕业于清华大学电子工程系无线电技术与信息系统专业,获学士学位。2004年毕业于清华大学微电子学研究所集成电路设计专业,获博士学位。2004年9月在清华大学微电子学研究所参加工作至今。主笔撰写的论文《A VLSI Architecture of JPEG2000 Encoder》已在国际集成电路领域权威期刊《IEEE Journal of Solid-State Circuit》上全文刊登。主要的研究领域包括:音频视频信号处理、超大规模集成电路设计、数字信号处理在安全领域的应用、图像压缩技术等。已发表论文10余篇,申请专利3项。

赵岩,1998年9月~2002年6月就读于中南大学应用电子技术专业,获工学学士学位;2002年9月~2005年6月就读于清华大学电路与系统专业,获工学硕士学位。主要研究方向为嵌入式微处理器的设计、SOC设计等。

译者

2005年3月30日于清华园青年公寓

# 前言

## 我是怎样开始写这本书的

在多年的职业生涯中，写作已经成为我的业余爱好，我也曾在大学教过几年书。自从1991年涉足印制电路板（Printed Circuit Board）设计这个行业后，我写了几篇文章，并陆续发表在《Printed Circuit Design》杂志上。后来，Pete Waddell要求我作为他的撰稿人之一参加1997年举行的PCB West的新闻发布会。在那以后，我曾半开玩笑地问他能否让我参加第二年秋天的PCB East，他的回答是：“如果你能主持一个研讨会，那当然可以了。”

就这样，我开始写这本书。

那年秋天我出席了“电路噪声和EMI控制”研讨会。我有两个目的：一是想给这个多年来让我受益匪浅的行业做点贡献；二是我非常想去波士顿，因为这是我一直都乐于访问的城市。很快，我又提议并参加了几个不同的研讨会。

我们几个人被认为是研讨会圈子里的“常客”。我们中多数人都很欣赏对方的成就，并且彼此尊重，参加对方举办的会议，相互学习。几年过后，我意识到我们所举办的信号完整性研讨会一直在讲电容和电感耦合、旁路电容器引线电感引起的抗谐振阻抗峰值等等内容，可是大多数的会议参加者都没有技术背景。他们连什么是电容都不知道，更别说什么是抗谐振峰值了。

这导致了电工技术里“一日培训课程”的发展。我们把它称作“面向无技术背景工程师的电工技术培训”，当然具体的名称每次都会有所不同。我本来还想在名称中加上“面向在第一次学习时没有学会的工程师”，但是Pete不让我这么做（可能他有很好的理由）。我不知道怎样才能礼貌地把这些话说出来，可是我知道有很多工程师在学校时并没有学好EMI和磁场耦合这些知识，并且在他们的大学课程中几乎没有涉及在电路板设计中的实际工程问题的课程。需要阅读这本书的人比我们能以彬彬有礼的方式邀请来的人更多。

偶尔有人问我，我们是否需要继续举办这样的研讨会和写这些书。随着越来越多的电子器件被封装到芯片中，设计电路板的问题最终是否会消失？越来越高的电路集成度是否会使PCB变得过时？

这是个很好的问题。在研究集成电路时我第一次听到它。当研究微处理器时我也听到了它。每次在系统级的集成有突破时，我们会听到它。我的答案很简单，印制电路板的重要性在未来不会消失，就像它的重要性在过去并没有消失一样。总会需要在某种物质的表面把器件相互连接起来。

## 致谢

很多人以各种方式为这本书做出了贡献。这些年来不论是写文章还是开研讨会，和Pete Waddell及其团队的合作都很成功。非常感谢我所认识的这个领域中的众多杰出人物，我们相互学习并一起度过了许多美好的时光。像Glenn Wells和Gary Ferrari等人，对这个领域发展和培养新的设计者给予了很多鼓励。尤其是Glenn，他在我们的行业似乎无处不在——他出现在

课堂里和研讨会上，为发展计划能筹集更多资金而在大学管理者的办公室里拍桌子，他会见Top Gun奖的角逐者，并协调Top Gun计划。我很荣幸与他结为朋友，并感谢他在本书写作的各个环节中给予的帮助。

我的合作者，Dave Graves（他自己就是Top Gun奖的获得者），这些年来他对我所准备的研讨会材料和文章初稿的审阅是无价的。当我最先写出东西的时候，总是第一个拿给他看。记不清有多少次在得到他“我理解不了，你想说什么？”的回答后，我又重新返工。正因为有了他的审阅和支持（还有无数其他的贡献），我的工作才会做得更好。

我同样要感谢Mentor Graphic、HyperLynx（现在是Mentor的一部分）、Polar Instruments三家公司这些年来对我的文章和研讨会活动的慷慨支持。他们不仅提供了软件使用的许可权，并且对我提供随时所需的技术支持。我对他们所提供的从不施加任何限制的支持深表感谢。

在写这本书时，我乐在其中。现在把它写完了，我却百感交集。不过有些人是“真的”高兴这个项目总算是完成了，尤其是我没有任何技术背景的妻子。她曾经很奇怪我这么忙到底是为什么，但是现在她很高兴，因为我终于可以和她交流、谈论其他的事情了。

最后，感谢Prentice Hall出版公司的Bernard Goodwin决定出版这本书。在同Bernard Goodwin和Wil Mara一起为正式出版准备手稿的过程中，我学到了很多。希望读者能够理解，我们的这一切努力都是值得的。

## 相关网页

UltraCAD的网站是<http://www.ultracad.com>，读者可以在这里找到很多关于电路板设计的资料和信息。

这个网站内容包括：

- 我在过去的7年中所写的文章
- 与电路板设计有关的技术笔记和设计笔记
- 帮助电路板设计者解决复杂问题的5个免费的计算器软件
- 举办讲座的信息

本书的支持/修改信息也在这个网站上。

# 目 录

译者序  
前言

## 第一部分 基本概念

第1章 电子学概念 .....	1
1.1 电流 .....	1
1.2 电荷 .....	2
1.3 电压 .....	3
1.4 直流电压和电流与交流电压和电流 .....	3
1.5 谐波 .....	5
1.6 交流电压或交流电流的测量 .....	6
1.7 频率、上升/下降时间和周期 .....	7
1.8 频率的度量 .....	9
1.9 复合波形(傅里叶分析) .....	9
1.10 本章说明 .....	12
第2章 传播时间 .....	14
2.1 传播速度 .....	14
2.2 传播时间 .....	14
2.3 走线的布局与信号传播 .....	15
2.4 电路时序问题 .....	16
2.5 波长 .....	18
第3章 电子元件 .....	20
3.1 3种最基本的元件 .....	20
3.2 电阻 .....	20
3.3 欧姆定律 .....	21
3.4 电容 .....	23
3.5 电荷的存储 .....	25
3.6 电容量计算公式 .....	26
3.7 电容的作用 .....	26
3.8 电感 .....	27
3.9 关于电感的公式 .....	29
3.10 充电和放电电流 .....	30
3.11 谐振 .....	32
第4章 电压和电流的改变与时间常数 .....	33
4.1 电压和电流通过电阻的变化 .....	33

4.2 电压和电流通过电容的变化 .....	33
4.3 电压和电流通过电感的变化 .....	34
4.4 几个有趣的电感电路的动态特性 .....	36
4.5 时间常数 .....	37
4.6 对充放电方程的说明 .....	40
第5章 电阻 .....	41
5.1 基尔霍夫定律 .....	41
5.2 串联电阻 .....	42
5.3 并联电阻 .....	43
5.4 分压器 .....	44
5.5 放大器反馈以及增益 .....	45
5.6 功率 .....	46
5.7 等效电路 .....	47
5.8 功率曲线 .....	48
5.9 电源 .....	49
5.10 电导 .....	50
第6章 电抗 .....	51
6.1 容抗 .....	51
6.2 感抗 .....	53
6.3 应用于电抗的欧姆定律 .....	53
6.4 串联LC电路 .....	54
6.5 并联LC电路 .....	56
6.6 谐振 .....	58
6.7 极点和零点 .....	61
6.8 电纳 .....	63
第7章 阻抗和相移 .....	64
7.1 阻抗 .....	64
7.2 频率的影响 .....	67
7.3 另一个RC电路的例子 .....	68
7.4 经典RC滤波器 .....	69
7.5 阻抗的组合方式 .....	70
7.6 谐振和Q值 .....	70
7.7 串联RLC电路 .....	72
7.8 谐振时的串联RLC电路 .....	73
7.9 导纳 .....	74

7.10 本章说明 .....	75
-----------------	----

## 第二部分 信号完整性问题

第8章 信号完整性概述 .....	77
-------------------	----

第9章 电磁干扰 .....	81
----------------	----

9.1 背景 .....	81
--------------	----

9.2 磁场及其相互抵消 .....	81
--------------------	----

9.3 一些基本事实 .....	82
------------------	----

9.4 信号耦合 .....	82
----------------	----

9.5 回路面积 .....	83
----------------	----

9.6 短截线 .....	87
---------------	----

9.7 共模 .....	88
--------------	----

9.8 20-H准则 .....	90
------------------	----

9.9 桩栅栏(法拉第屏蔽) .....	91
----------------------	----

第10章 反射与传输线 .....	92
-------------------	----

10.1 通信模型 .....	92
-----------------	----

10.2 传输线 .....	93
----------------	----

10.3 关键长度 .....	95
-----------------	----

10.4 反射系数 .....	96
-----------------	----

10.5 观察反射 .....	97
-----------------	----

10.6 确定走线的阻抗 .....	97
--------------------	----

10.7 终端匹配技术 .....	101
-------------------	-----

10.8 一些设计问题 .....	104
-------------------	-----

10.9 短截线 .....	106
----------------	-----

10.10 Z <sub>0</sub> 的绝对值和相对值 .....	106
-------------------------------------	-----

10.11 本章说明 .....	107
------------------	-----

第11章 传输线仿真 .....	110
------------------	-----

11.1 基本的仿真 .....	110
------------------	-----

11.2 串联终端匹配 .....	114
-------------------	-----

11.3 布局问题 .....	115
-----------------	-----

11.4 走线分支或Y型分支 .....	117
----------------------	-----

第12章 串扰 .....	119
---------------	-----

12.1 前向串扰与后向串扰 .....	119
----------------------	-----

12.2 估计串扰 .....	122
-----------------	-----

12.3 设计时需要考虑的问题 .....	125
-----------------------	-----

第13章 串扰的仿真 .....	127
------------------	-----

13.1 基本模型 .....	127
-----------------	-----

13.2 添加非耦合的区域 .....	129
---------------------	-----

13.3 长度的影响 .....	130
------------------	-----

13.4 带状线 .....	131
----------------	-----

13.5 用终端匹配的带状线 .....	131
----------------------	-----

13.6 更为实际的例子 .....	133
--------------------	-----

13.7 小结 .....	134
---------------	-----

第14章 差分走线以及阻抗 .....	135
---------------------	-----

14.1 背景 .....	135
---------------	-----

14.2 设计规则 .....	138
-----------------	-----

14.3 差分仿真 .....	142
-----------------	-----

14.4 计算差分阻抗 .....	144
-------------------	-----

第15章 旁路电容与去耦系统 .....	147
----------------------	-----

15.1 传统方法 .....	147
-----------------	-----

15.2 电源系统的阻抗方法 .....	151
----------------------	-----

15.3 小结 .....	161
---------------	-----

第16章 电源系统 .....	162
-----------------	-----

16.1 电源电压 .....	162
-----------------	-----

16.2 为什么需要电源层 .....	163
---------------------	-----

16.3 采用参考层的设计策略 .....	163
-----------------------	-----

16.4 设计规则 .....	165
-----------------	-----

16.5 分层 .....	167
---------------	-----

16.6 结论 .....	168
---------------	-----

第17章 有损传输线和眼图 .....	169
---------------------	-----

17.1 有损传输线 .....	169
------------------	-----

17.2 有损传输线模型 .....	170
--------------------	-----

17.3 眼图 .....	171
---------------	-----

17.4 均衡 .....	173
---------------	-----

17.5 小结 .....	174
---------------	-----

## 第三部分 附录和术语表

附录A UltraCAD的方波仿真软件 .....	175
---------------------------	-----

附录B 电感器的的工作原理 .....	177
---------------------	-----

附录C 对数 .....	185
--------------	-----

附录D 相移的仿真 .....	188
-----------------	-----

附录E 复数的运算 .....	191
-----------------	-----

附录F 传输线仿真软件 .....	197
-------------------	-----

附录G 回波演示 .....	198
----------------	-----

附录H UltraCAD的免费计算软件 .....	199
---------------------------	-----

附录I TDR和VNA .....	202
-------------------	-----

附录J 走线的直角拐角 .....	207
-------------------	-----

术语表 .....	209
-----------	-----



# 第一部分 基本概念

描述正负电荷的库仑定律（1785年）使Charles Augustin de Coulomb（查尔斯·奥古斯丁·德·库仑）闻名于世。在从那时起到James Clerk Maxwell（詹姆斯·克拉克·麦克斯韦）发表著名的麦克斯韦方程（1873年）的一个世纪中，电子学得到了迅速的发展。本书的这一部分内容涵盖了电子学的基本概念，从最基本的定义（电子的流动形成电流）入手，一直到阻抗是幅值和相移的复函数。其间我们将讨论许多基本问题，包括电阻、电容和电感的本质，它们的各种组合，波形的基本概念，简单电路和时间常数等。当然目的不是要让读者成为一名工程师，那样的话这些内容还远远不够。我们的目的是给出一些背景知识，以便读者能够理解在第二部分中所讨论的概念。

## 第1章 电子学概念

### 1.1 电流

电子的流动形成电流。

这是一句至理名言。但是它的简洁掩盖了它的重要性和意义。几乎每一个电子学中的基本定义都是建立在它之上，并且几乎每一个信号完整性中的问题也都可以在电子的流动中找到理论依据，尤其是当电子流动快速变化时。如果让我指出本书中两个最重要的概念，这将是其中之一（另外一个欧姆定律）。

现在我们来了解一下什么是电子。在20世纪初，人们提出了一种原子模型，这种原子模型由包含质子和中子的原子核以及一层或多层的电子外壳所构成（见图1-1）。因为它形似一颗中心恒星，周围环绕着几个行星，所以这种模型叫做行星模型。质子带正电，电子带负电。因为净电荷必须是零（在一个稳定的状态下），所以原子中质子的数量和电子的数量必然相等。原子的原子序数表示原子核中质子的个数（同样也是电子的个数），原子量表示原子核中质子和中子的个数之和。

我们用图描述电子在外壳或轨道上环绕原子核作圆周。每一壳层都有所能容纳的最大电子数量，比如说最内层最多只能容纳两个电子。当某一层或轨道被填满后，电子开始占据外面的一层（实际上，这些层更像能量状态而不是物理位置，但是我们不知道怎样才能清楚的把能量状态用图描绘出来）。这样，最基本的元素氢有1个质子和1个电子，它的原子序数是1，电子存在于最内层。氦元素有2个质子，2个电子，原子序数是2。它的电子完全填满位于最内层的轨道。锂的原子序数是3，有3个质子和3个电子，3个电子中的2个占据最内层，第3个占据第2层。

如果读者对元素周期表很熟悉，那么应该知道把元素归类的方法之一是根据元素的最外层电子数。直觉告诉我们，金、银、铜等金属都是良好的导体。我们或许会问是什么使这3

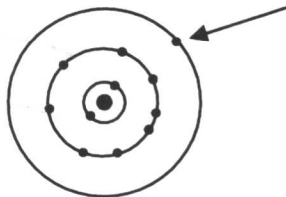


图1-1 原子的行星模型

种元素变得如此特殊。这3种元素恰好都具有的性质是 (a) 它们都是金属；(b) 它们在常温下都是固体；(c) 它们在原子的最外层都只有一个电子。

我们可以想像一下，只有一个电子在原子核微弱的作用力下在最外层旋转，因此很容易在外力的作用下脱离轨道的情景。注意同性电荷相互排斥，异性电荷相互吸引。如果一个外来的电子靠近最外层只有一个电子的原子达到某种距离时，它将很容易驱逐原子最外层的电子并取代此电子的位置。

现在，假设我们有一束铜原子延绵在一条导线上。在这条线的一端“放”一个电子（可能通过电池）。这个电子会驱逐属于第一个原子的最外层电子，并取代其位置。被驱逐的电子现在成了自由电子，然后会前进并取代下一个原子的外层电子，如此重复下去。当我们考察最终到达导线另一端的最后一个铜原子时，如果这个原子的电子被取代了，那么必须得有个地方接收此电子。如果我们把线的两端都连到了电池上，这最后一个电子将流回电池。如果我们没有把线的两端连接到电池上，最后一个电子将无处可去。由于没有容纳它的地方，这个过程将立即中止，没有电流产生。

以上的简要描述说明了3点：

1. 电子的运动形成电流。

2. 必须有接纳电流的地方。也就是说，它必须在一个环路中流动。如果在线的另一端没有连接，最后一个电子将无处可去。电子会立即聚集起来并阻止任何其他电子流入导线。只有在在线的两端都有连接的情况下，电子才会在线中流动起来。

3. 电池拥有在一端提供电子，同时使另一端缺少相应数量电子的化学过程。这样，只要能在另一端接收到一个电子，电池就能在线的一端推动电子流动。

一个普遍的误解是认为，进入线一端的电子和从另一端出来的电子是同一个电子。从上面的描述可以看出，这是不正确的。一个电子穿越一条导线可能要花费很长的时间（甚至要几个小时）。做个类比，有一条很长的通车隧道，许多同样的汽车排在里面要通过它。当一辆汽车进入隧道时，另一辆（同样的）汽车离开隧道。我们可以用每单位时间内通过的汽车数来衡量流速。每次一辆车进入，就有一辆车离开。但是同一辆车从进入到最后出现在隧道另一端可能要花费很长的时间。

事实上，上面两种描述都不是很准确。电子不是从一个原子到另一个原子的移动。它们在驱逐并取代另一个电子之前可能跨越了几个原子（见图1-2）。在结晶铜中，一个电子所走过的总的平均长度大约是4个原子。

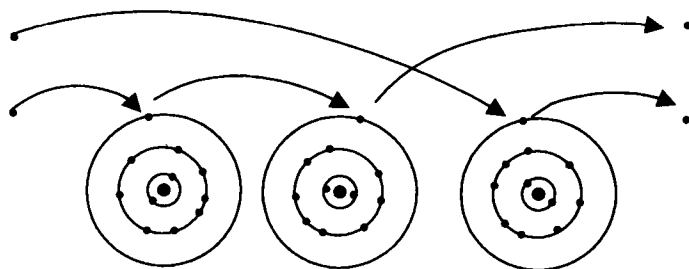


图1-2 电子可以驱逐并取代临近原子的外层电子

## 1.2 电荷

电荷的基本度量单位是库仑（以Charles Augustin de Coulomb命名。本章末尾列出了对电

子学发展做出重要贡献的人的姓名和生卒年月列表，参见此列表中的说明)。1库仑(C)定义为 $6.25 \times 10^{18}$ 个电子所带的电荷总量。1安培(A)电流(以Andre Marie Ampere命名)定义为在1s的时间内流过1C的电荷。这样，1A的电流就是 $6.25 \times 10^{18}$ 个电子在1s内通过某一点。这是电子学的核心定义，其他内容都来源于它(参见本章末尾的定义小结)。

电荷是有极性的。电子带有负电荷，质子带有正电荷。但电荷同样是一个相对的概念。获得正电荷的另一个途径是使电子短缺或者减少电子的数目(后面我们将学到，当电子流到电容的一个极板时，另一个极板将流失电子。这样一个极板相对另外一个极板将带有正电荷，但是相对第3个带有更少电子的极板，这两个极板都带有负电荷)。库仑定律说明同性电荷相互排斥，异性电荷相互吸引，它们之间的作用力和电荷间的距离的平方成反比。比如两个电子将会相互排斥。

### 1.3 电压

电压是一种力。它导致电子的流动(电流)。我们很容易想到的是电荷的聚集产生电压。比如有聚成一团的电子球，每一个电子都带有负电荷，它们会产生试图将它们彼此分开的力(因为同性电荷相互排斥)。力的大小(电压)和聚集在一起的电子数量直接相关。

我们常常用水压进行类比来帮助我们形象地理解电压和电流。假设水从一条普通的浇花水管中流过，它只会从管的末端向外流出很短的距离，这和电流从导线中流过类似。水管中只有很小的压力，主要来自摩擦。水管越粗，摩擦力越小，水从水管的另一头流出的距离就越近。

如果把拇指放在水管的端口，这样就阻止了(像阻抗一样)水的流动。拇指和水的相互作用产生了压力，这和电压的产生类似。阻挡产生更小的水流(更小的电流)，但是压力增加使水从管口喷出更远。

用拇指盖住管口的3/4。水流(电流)变得更小，但是由于压力(电压)增加，水流(电流)从另一端喷出得更远。如果我们试图用拇指把管口全部盖住的话，那么很有可能做不到这一点。我们中很少有人在手和拇指上有足够的力量来抵挡住水的压力。

这个例子直观地指出阻抗(拇指)、电流(水流)和电压(压力)之间的关系。增加阻抗将导致电流的减小或者电压的增加。

电压是电流背后的“推动力”。我们只有很少的几种方法可以提供电压源。一种方法是通过化学反应在电池的阴极提供电子，同时在阳极造成电子的短缺。这种电荷的差值就会产生力，我们称之为电压。如果我们在电池的阴极和阳极之间接入电路，电流就会试图从这个电路上流过。另一种产生电压的方法是通过改变磁场能量来“产生”移动电子的力(发电机或者变压器所使用的原理)。我们可以在诸如电容器之类的东西上暂时存储能量(电压)。燃料电池、光电池和热电偶能把其他形式的能量转换成电压或者电流。我们走过地毯时偶尔也会产生电压(静电)。

我们通常认为高电压是危险的而低电压是安全的。但是这并不总是正确的。有时在博览会演出或者在魔术表演时，一些设备会给我们100万伏的高压电击而不造成伤害!而如果我们偶然把12V汽车电池的两个电极短接的话，可能会被严重烧伤。危险的是功率，是电压和电流的共同作用效果，而不只是电压本身。

### 1.4 直流电压和电流与交流电压和电流

我们通常认为电流和电压不是直流(DC)就是交流(AC)。至少在一个相对的时间内，直流电压会保持一个稳定的值，直流电流也以一个恒定的值流向一个恒定的方向。交流电压

和电流随时间发生变化。我们经常认为这些变化都是往一个方向的，正的电压或者电流向相反的方向变化，变成负电压、负电流，然后又变回去，再次成为原来的方向。不过也不是必须这样。比如说交流电压可以仅仅是从一个正电平变到另一个正电平。我们同样认为这些变化是周期性的，或者是重复的。但这些变化也可以是随机的（参见本章末尾关于电子流动方向的说明）。

图1-3绘出两个典型的交流波形。它们是正弦波，是分析电子电路的基础。信号先增大到正的峰值，然后幅值开始减小直到它穿过横轴。这时，信号开始朝相反方向变化成为负值。它继续增长到负方向的峰值，然后幅值又开始减小直到它穿过横轴，并再次反向。信号以这样的方式无限地循环下去。

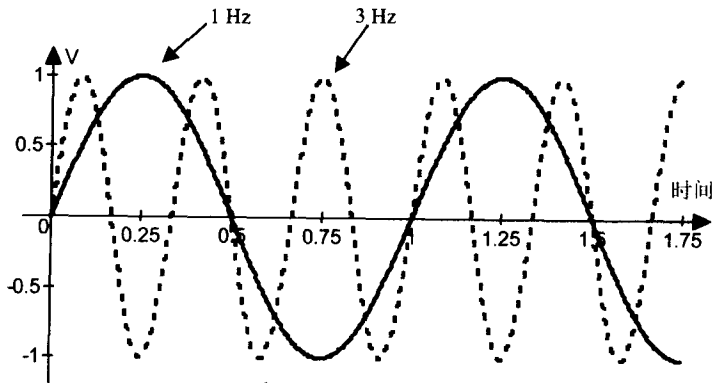


图1-3 两个典型的正弦电压波形

最简单的正弦电压波形的公式是

$$V = A \times \sin(360 \times f \times t)$$

其中 $A$ 是波形的振幅， $360$ 是一个周期的度数， $f$ 是用赫兹（Hz，每秒的周期数）表示的波形频率， $t$ 是以秒为单位的时间值。

交流波形用3个量来表征：频率（ $f$ ）、振幅（ $A$ ）和相位（ $\Theta$ ）。这样，描述简单电压波形更通用的公式为

$$V = A \times \sin(360 \times f \times t + \Theta)$$

读者也许还记得高中几何里面讲过的知识，正弦波和余弦波可以相互平移 $90^\circ$ 得到。也就是说， $\sin(x) = \cos(x - 90)$ ，或者 $\sin(x + 90) = \cos(x)$ 。我们说余弦波比正弦波提前了 $90^\circ$ （正弦波要到 $90^\circ$ 以后才会达到余弦波的值）。在这种情况下，我们说余弦波超前正弦波 $90^\circ$ ，或者正弦波滞后余弦波 $90^\circ$ （见图1-4）。在此图中，正弦波和余弦波之间的相移 $\Theta$ 是 $90^\circ$ 。在第7章我们将会看到，相移是阻抗中的重要概念。

相移 $\Theta$ 是一个相对值。所以我们在使用这种类似的公式时需要知道我们选中的参考点在哪里。我们常常把电路中的驱动电压或者驱动电流信号的相位选为参考相位（它的 $\Theta = 0$ ），当然也不总是这样。然后我们会说其他电压和电流相对这个参考信号相位偏移了多少。

正弦波相对横轴是对称的。所以，尽管它有一个峰值（图1-4中峰值为 $A = 1.0$ ）和峰-峰值（图1-4中等于 $2.0$ ，从 $-1.0$ 到 $1.0$ ），它在时间轴上的平均值是 $0$ 。

正弦（三角函数）波是自然界中真实存在的波形。一个弹跳的球可以用这种波来描述；海洋的潮汐运动可以用这种波的组合来描述；行星环绕恒星的运动可以用这种波形描述；交

流电流可以用它们来描述。数学中的微积分可以完美地处理这种波形。问题是，在我们的电路中，信号的形状并不总是用这些波形来描述的（至少不是直接用它们来描述的）。例如，时钟方波不是三角函数波，图1-5中所示的简单音频波形也肯定不是周期性的。

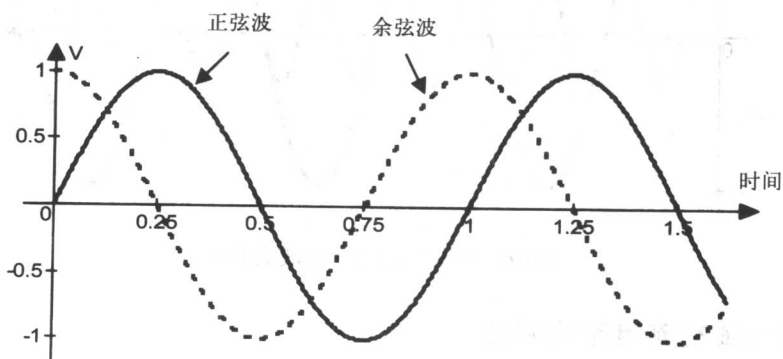


图1-4 1Hz的余弦波超前1Hz的正弦波 $90^\circ$

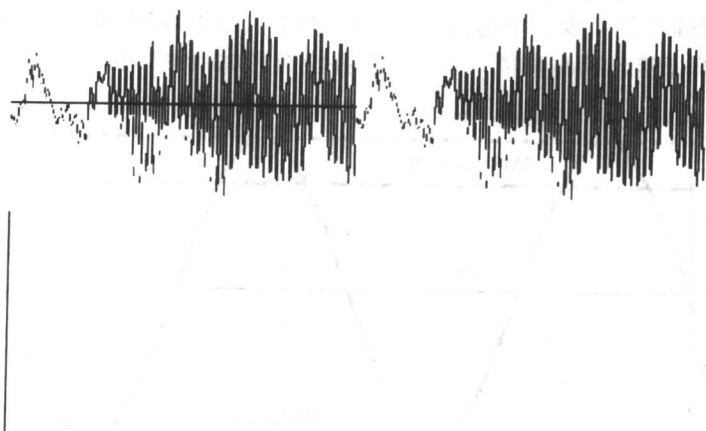


图1-5 非周期性的音频波形图

## 1.5 谐波

假设某信号有一个特定的频率，并且其波形表示为

$$V = \sin(x)$$

其中 $x$ 表示频率。

如果另外一个信号能用 $V = \sin(2x)$ 表示，那么它的频率是第一个信号频率的2倍，而信号 $V = \sin(3x)$ 的频率是第一个信号频率的3倍。图1-6描述的是某一个信号和它的3次谐波（3次谐波的幅值小于基波的幅值）。

由此得出，用 $V = \sin(nx)$ 描述的信号波形，它的频率是信号 $V = \sin(x)$ 频率的 $n$ 倍。如果这些波形相互之间有关系（比如波形 $\sin(nx)$ 是由 $\sin(x)$ 产生的，或者它们都是由某一个相同的信号源所产生的），那么这样的波形叫做谐波。谐波的频率是基波频率的倍数。在这里，信号 $\sin(nx)$ 叫做基波信号 $\sin(x)$ 的 $n$ 次谐波。在后面的章节中，谐波是一个很重要的概念。

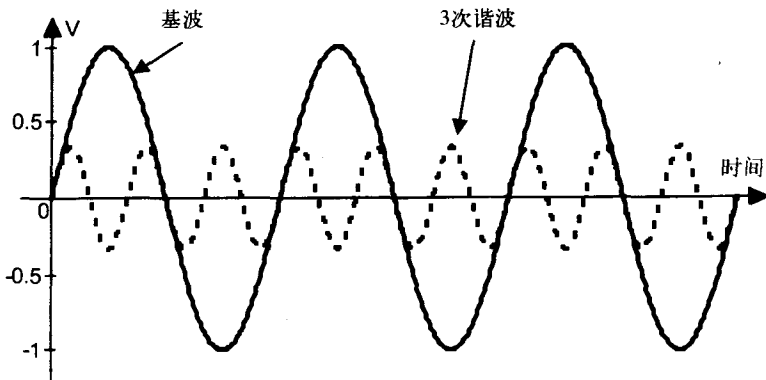


图1-6 基波和它的3次谐波的波形

## 1.6 交流电压或交流电流的测量

直流电压和直流电流可以直接进行测量。观察到的值就是所要测量的值。测量交流波形则完全不同。假设波形围绕0周期性变化（沿横轴变化，见图1-7）。我们不能使用平均值作为测量值，因为不管峰值是多少，平均值永远是0。峰值（在图1-7中是1.0V）和峰-峰值（在图1-7中是2.0V）同样不能作为测量值，因为它们并没有考虑到波形的“形状”。

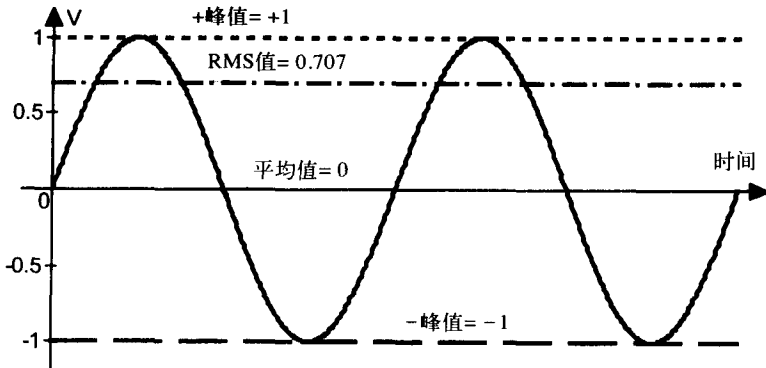


图1-7 RMS值和其他测量值的关系

实际上，我们使用RMS值来表征交流波形的测量值。RMS是均方根（Root-Mean-Square）的缩写。在概念上，我们可以通过以下几个步骤得到RMS值：先把波形分成很多小部分，然后（a）把每一部分波形的幅值都进行平方；（b）对这些平方值求和，并求平均值；（c）把得到的平均值开方。从数学角度，一个波形的RMS值可以表示为

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \sin^2(n)} \quad (1-1)$$

图1-7中所示的正弦波的峰值是1.0V，计算得到它的RMS值是0.707V。总的来说，正弦波或者余弦波的RMS值是其峰值的0.707倍。所以，家用的117V交流电的峰值是 $117/0.707 = 165.5\text{V}$ ，它的峰-峰值是331V。

任意波形的RMS值是和功率相关的。假设图1-7中的正弦波电压加在一个电阻上，RMS值就是能在电阻上产生相同功率（即热量）的直流电压值。这样，0.707V的直流电压在电阻上

产生的热量和 $\pm 1.0V$ 的正弦波产生的热量是相等的。

但是这个0.707只是正弦波的RMS值。其他波形的RMS值是多少呢？如果波形是随机的，RMS值又该是多少呢？仔细观察图1-5所示的音频波形，它看上去完全是随机的。我们应该如何测量它的RMS值呢？

简单的交流电表只有在所测量的交流信号是正弦波时才是准确的。这些电表通常先把交流波形整流，然后进行校准，以便输出的值是信号峰值的一部分，或者是整流后波形平均值的一部分。但是这种技术只有在已知被测波形是正弦波时才是有效的。事实上，测量非正弦波的真实RMS值也只有两种基本的方法。以前，所谓的能测量“真实”RMS值的电表经常是把被测电压加在电阻上并测量产生的热量，由此来推测RMS值。近来，随着微处理器计算能力的提高，我们可以使用基于微处理器的仪器真正按照式(1-1)进行计算来得到RMS值。

即使是在今天，那些没有明确声明可以测量“真实”RMS值的电表很可能也只是在被测波形是正弦波时才能够准确地对交流电压进行测量。

## 1.7 频率、上升/下降时间和周期

频率是指电流周期的波形在某个单位时间内（通常是1s）重复的次数。在图1-3中，虚线图形就比实线波形的频率要高。如果图中横轴表示的是秒，那么实线波形的频率是每秒1个周期（或者1Hz），虚线波形的频率是3Hz。现在我们看到的电路板都工作在几百MHz（每秒几百万个周期），有时甚至更高。这意味着交流电压或者电流在周期性地往复，或者变化方向，每秒要变化几百万次！

人们普遍认为在高速系统设计中需要考虑的关键问题是频率，其实这是误解。我们将在本书中学到，上升时间才是最关键的因素。图1-8描述了两个波形，一个是正弦波，一个是方波（方波是我们所期望的时钟波形）。这两个波形有相同的频率，但是它们的上升时间大不相同。

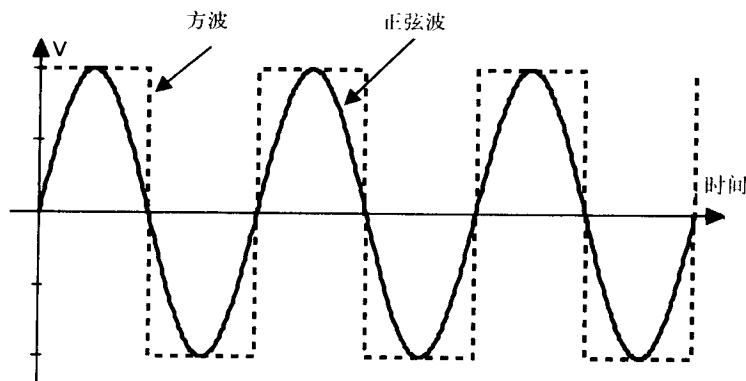


图1-8 频率和上升时间

上升时间一般定义为从波形的10%处上升到90%处所需要的时间（图1-9）。也有的定义是规定从20%处到80%处。用完全相同的方式定义下降时间，即从波形的90%处下降到10%处所需要的时间。如果沿着图1-9中脉冲信号的上升边叠加一个正弦波，那么可知此信号的上升时间大约是正弦波一个周期的1/3。

一个信号周期（ $\tau$ ）的时间长度是 $1/f$ ，其中 $f$ 是频率。所以频率为1 MHz（每秒1百万周期）的正弦波的周期是百万分之一秒，即 $1\mu s$ 或者 $1000ns$ 。这个正弦波的上升时间大约是周期的

1/3，即大约是333 ns。

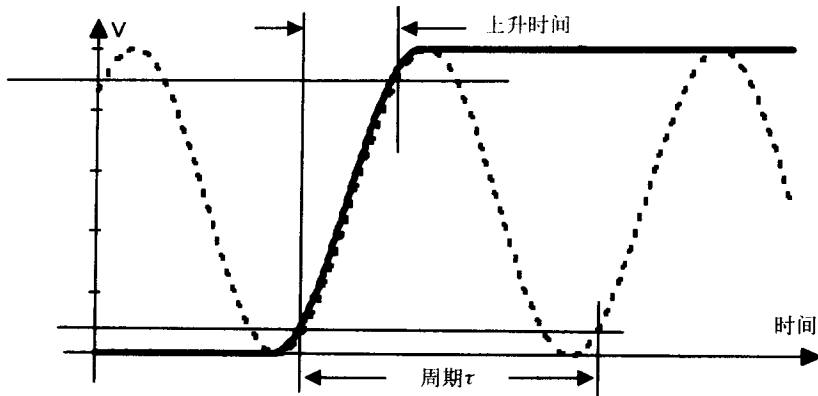


图1-9 脉冲信号的上升时间大约是基本正弦波周期的30%

读者或许会问，为什么采用幅值的10%到90%这个范围来定义上升时间，而不是0%到100%呢？为什么有的定义使用的是从幅值的20%到80%这个范围呢？我可以给出这样一个也许不甚满意的答案：几乎所有的开关器件都遵从图1-9中的上升沿所描述的开关特性，但是在最初和最末的一段时间会有很大的不同。比如，有一种类型的器件能很快达到幅值的100%，而另一种器件达到这个幅值后又会上滑，并且有时不能达到100%（我们把这种情况叫做渐近地达到100%）。开关器件在它们变化的起始和结束阶段可能有很大不同，但是其变化的主体部分却是非常相似的。因此，我们使用10%到90%这个变化范围来描述上升时间，以便对比不同器件的特性。由于有的器件的起始部分和结束部分比其他器件要“宽”一些，或者为了用于“精确观测技术”（20%到80%要比10%到90%短，从而显得更快），有些定义使用的是20%到80%这个范围。

假设我们在某电路中需要一个变化很快的电压或者电流，比如需要电流在1ns之内从0mA变化到10mA。我们可以用“电流变化和时间变化之比”或者 $\Delta I/\Delta t$ （其中 $\Delta$ 代表变化量）来表示。如果我们考虑 $\Delta I/\Delta t$ 的关系，并考虑当 $\Delta t$ 是一个特别小的时间间隔时，就可以在数学上用 $dI/dt$ 来表示 $\Delta I/\Delta t$ 。 $dI/dt$ 是一个微分表达式，表示当时间变化为无限小时，电流变化与时间变化之比。在高速电路中， $dt$ 可以等于信号的上升（或者下降）时间。在后面我们将看到，正是这个 $dI/dt$ 引出了信号完整性的问题。

在工业界，我们常常简单地使用上升时间来描述对一个电路的要求。读者应该知道下降时间是同样重要的。两者中快的一个更为重要，所以当看到“上升时间”时，要想到“上升时间和下降时间中哪一个更快”。

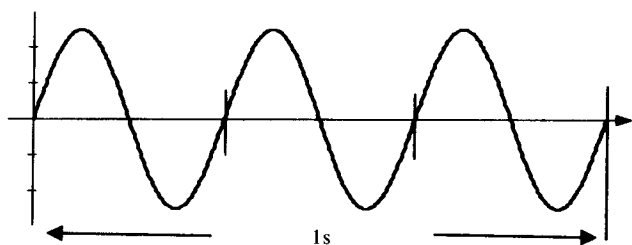
## 1.8 频率的度量

事实上我们有3种方法来度量或者说来描述频率。最常用的一种是每秒有多少个周期，即Hz，用符号“ $f$ ”来表示。图1-10中波形的频率是3Hz，即 $f = 3$ 。这是频率最常用的度量方式。我们也可以用在1s内波形所经过的角度来描述频率。正弦波在1个周期内经过 $360^\circ$ ，所以在3个周期内它将完成 $360^\circ \times 3$ 或者 $1080^\circ$ 变化。可以说，图1-10中的波形的频率是 $360 \times f$ 度/秒或者 $1080$ 度/秒。总的来说，我们可以用 $360 \times f$ 度/秒来描述频率。不过我们几乎从来没有用过这种频率表示方法。

但是我们使用一种与此相关的角频率度量方法。我们从把圆周角分割成弧度开始。1弧度



(rad) 是圆周上长度等于半径的弧与圆心构成的角 (图1-11)。在圆周上取一段长度等于半径的弧, 看从这段曲线的起点到终点所对应角度是多少, 这个角度定义为1 rad。



周期	1	2	3 = $f$
角度	360	720	1080 = $360 \times f$
弧度	$2\pi$	$4\pi$	$6\pi = 2\pi f = \omega$

图1-10 度量频率的另一种方法

圆的周长是  $2\pi r$ , 其中  $r$  是半径。所以如果要问一个圆周 ( $360^\circ$ ) 是多少弧度, 答案是:

$$\text{周长/半径} = 2\pi r/r = 2\pi$$

所以  $2\pi$  rad 构成了一个圆周 ( $360^\circ$ )。

由于  $360^\circ$  等于  $2\pi$ , 所以正弦波在1s的时间内变化了  $2\pi f$  rad。这是我们在电子学中经常使用的度量频率的方法。如式 (1-2) 所示, 它用符号  $\omega$  表示。

$$\omega = 2\pi f \quad (1-2)$$

这种度量方法叫做角频率, 广泛应用在电子学的公式中。它表示正弦波在1s的时间内变化了多少弧度。

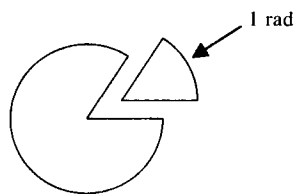


图1-11 1 rad 的定义

## 1.9 复合波形 (傅里叶分析)

在本书后面的讲述中, 读者将发现在我们的电路板上和各种设计中, 只需要关心3种类型的无源元件: 电阻、电容和电感。每一种类型的元件都会给电流提供一种阻抗。对电阻而言, 这个阻抗值只与电阻的大小有关。但是对电容和电感而言, 其阻抗是元件大小和通过此元件的信号频率的函数。比如, 电感的阻抗在下列情况下会增大: (a) 它的大小增大; (b) 信号频率变大 (我们将在第5章和第6章中详细讨论这个问题)。

一个被大家广为接受, 但是并没有明确阐述的观点, 就是一般地理解这里所说的频率是某个单一频率的正弦波, 而不是某种很复杂的波形。所以, 当我们说电路的阻抗在1MHz是某个值时, 我们指的是1MHz的正弦波, 而不是其他波形, 比如说1MHz方波。这就意味着只有对特定的频率和特定的波形 (正弦波), 我们才能用最基本的公式来分析电路的性能。这带来了一个有趣的问题, 当存在复合波形时, 工程师们是怎样分析电路的呢?

如果要全面深入地回答这个问题, 那么就超出本书的范围了。不过在这里, 我还是给出分析电路时所使用的最基本方法, 这样读者在理解最基本的方法之后, 就可以理解当我们讨论高速电路设计时所涉及的一些问题。

傅里叶定理是电子学中一个非常重要的定理, 很多更高级的分析都建立在它的基础之上。

**傅里叶定理:** 任何信号或者波形, 不管它的性质如何, 也不管它是怎样产生的, 都可以