

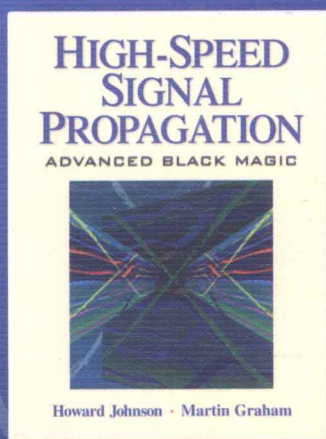
国外电子与通信教材系列

PEARSON

霍华德·约翰逊

高速信号传输

High-Speed Signal Propagation
Advanced Black Magic



[美] Howard Johnson 著
Martin Graham

邓晖译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

高速信号传输

High-Speed Signal Propagation
Advanced Black Magic

[美] Howard Johnson Martin Graham 著
邓 晖 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是高速信号传输应用领域享誉国际的经典教材与工具书。高速数字设计重在研究基本的电路结构，而高速信号传输则重在研究传输线如何达到其速度和距离的极限问题。全书共 13 章，内容涉及不同传输线参数的基本理论，包括趋肤效应、邻近效应、介质损耗和表面粗糙度，以及适用于所有导体媒质的通用频域响应模型；由频域传递函数计算时域波形；特殊传输媒质，包括单端 PCB 引线、差分媒质、通用建筑布线标准、非屏蔽双绞线对、150 Ω 屏蔽双绞线对、同轴电缆及光纤；时钟分布的各种问题；采用 Spice 模型和 IBIS 模型进行仿真的限制。

本书是作者从事高速信号传输实践工作的经验和体会，可作为电子工程相关方向高年级本科生和研究生的教材，也可作为从事高速数字电路设计、高速 PCB 设计的工程师和技术人员的必备工具书。

Authorized translation from the English, entitled *High-Speed Signal Propagation, Advanced Black Magic*, 9780130844088 by Howard Johnson, Martin Graham, published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright © 2003 by Pearson Education, Inc.

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

Chinese simplified language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD. and PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY, Copyright © 2012.

本书中文简体字翻译版由 Pearson Education（培生教育出版集团）授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 Pearson Education（培生教育出版集团）激光防伪标签，无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字：01-2003-1039

图书在版编目（CIP）数据

高速信号传输/（美）约翰逊（Johnson, H.）著；邓晖译. —北京：电子工业出版社，2012.5

书名原文：High-Speed Signal Propagation, Advanced Black Magic

（国外电子与通信教材系列）

ISBN 978-7-121-16757-7

I. ①高… II. ①约… ②邓… III. ①信号传输—高等学校—教材 IV. ①TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 070077 号

策划编辑：马 岚

责任编辑：谭海平（tan02@phei.com.cn）

印 刷：

装 订：北京中新伟业印刷有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1 092 1/16 印张：31 字数：853 千字

印 次：2012 年 5 月第 1 次印刷

定 价：79.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授

“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择和自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

- | | | |
|-----|------------|---|
| 主任 | 吴佑寿 | 中国工程院院士、清华大学教授 |
| 副主任 | 林金桐
杨千里 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师
总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长
中国通信学会常务理事、博士生导师 |
| 委员 | 林孝康 | 清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员 |
| | 徐安士 | 北京大学教授、博士生导师、电子学系主任 |
| | 樊昌信 | 西安电子科技大学教授、博士生导师
中国通信学会理事、IEEE 会士 |
| | 程时昕 | 东南大学教授、博士生导师 |
| | 郁道银 | 天津大学副校长、教授、博士生导师
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员 |
| | 阮秋琦 | 北京交通大学教授、博士生导师
计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长
国务院学位委员会学科评议组成员 |
| | 张晓林 | 北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员
中国电子学会常务理事 |
| | 郑宝玉 | 南京邮电大学副校长、教授、博士生导师
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 朱世华 | 西安交通大学副校长、教授、博士生导师
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员 |
| | 彭启琮 | 电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员 |
| | 毛军发 | 上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 赵尔沅 | 北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任 |
| | 钟允若 | 原邮电科学研究院副院长、总工程师 |
| | 刘 彩 | 中国通信学会副理事长兼秘书长，教授级高工
信息产业部通信科技委副主任 |
| | 杜振民 | 电子工业出版社原副社长 |
| | 王志功 | 东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长
教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员 |
| | 张中兆 | 哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长 |
| | 范平志 | 西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长 |

译者序

本书是 Howard Johnson 博士继《高速数字设计》一书之后，积 30 余年数字设计理论与设计经验的又一力作。《高速数字设计》一书偏重于实际数字设计工程方法及常规速度数字设计的实现，而本书则为高端数字设计人员进行极高速、超长距离设计提供指导。本书不仅一如既往地承袭了作者与工程设计实际紧密结合的特有风格，而且对速度极高、距离极长之后，电磁信号在现有的各类典型收发导波结构及系统中出现的一些物理现象建立了分析模型，详尽地分析了其对数字通信的影响，配备了精心选择和特别设计的实例。因此，本书不仅为高端设计人员提供了实用的设计经验和设计方法，而且为读者解决数字设计中可能不断出现的新问题奠定了良好的基础，这也是本书吸引人的主要特色。

本书将物理理论与工程实际完美结合，不仅对数字设计领域的高级设计人员有实际指导作用，而且对信号完整性的科研人员提供了极有价值的参考。同时，与《高速数字设计》一书一起，构成了初级数字设计人员学习的完整材料。

值得一提的是，作者的写作风格不仅如他自己所说，非常实用，而且运用了一些日常生活中的现象，极为形象地解释了很多难于理解和记忆的电磁现象，非常风趣，令人印象深刻，可以让读者在愉悦中理解和牢记某些复杂枯燥的物理问题。

本书的系统、详尽、完整和实用，在数字设计领域是很难见到的。所以也要感谢出版社编辑的慧眼识珠，使我们有机会接触并学习国际先进的数字设计技术。

作者在其个人网站上提供了勘误表和对一些问题的深入解释。有兴趣的读者可以很方便地进一步学习，或者与作者本人进行即时交流。

尽管译者在电磁场与微波技术领域从事研究与教学工作二十余年，所在的北京航空航天大学在本领域有着多年的丰富实践经验和理论积淀，特别是在微波测量领域理论与实践所取得的丰硕研究成果，都为本书的翻译提供了良好的基础和条件，但仍很难涵盖本书涉及的所有相关内容，一定存在错误和疏漏，欢迎读者批评指正。

尽管本书的翻译工作主要由译者一人承担，但自始至终都得到了家人及出版社编辑人员的充分理解、鼓励和支持，译者在此表示衷心的感谢。译者联系方式：dh19@buaa.edu.cn。

前 言

作者序

欢迎并感谢读者对本书的关注。本书是为熟练的数字设计人员提供的一本高级参考书，为他们进行极高速超长距离传输设计提供指导。

如果读者准备进行更快更远的传输设计，那么本书确有帮助，读者会发现书中提供了很多有实用价值的建议。

本书凝结了我多年来作为快速以太网及千兆以太网项目标准的技术主编所积累的经验与心血，希望这两项技术为读者的生活带来的是愉快和享受。本书所给出的许多模型及概念在这两个项目及其他许多项目中，都起到了实质性的作用。现在，我希望能把这些告诉你们。

在阅读本书的过程中，希望读者能够像我的技术指导 Martin Graham 对待我那样，将知识与周围的人分享，比如与同事、上司分享。当然，最重要的还是自己要尽可能从中受益。如果本书能够促使读者对哪怕是只有一个实验测试过程有了更好的理解，也说明读者已经具有了解决问题的正确思路。

我还想对一些人说的是，能够在课堂和讲座中为你们讲授并一同工作，我很开心。此外，我还要特别感谢那些花时间与我分享他们的想法、思虑、梦想及问题的所有人。我一直都很愿意聆听实际工程人员的实际经验。

祝读者下一次的设计顺利。欢迎通过网站 www.sigcon.com 与我交流。

Howard Johnson 博士

本书涉及的内容

印制电路板

- 速度和传输距离上限的确定
- RC 与 LC 模型传输
- 趋肤效应及介质损耗设计曲线和方程
- 邻近效应
- 表面粗糙度
- 非 TEM 模式传输
- 阶跃响应
- 偏置的影响

差分信号传输

- 边缘耦合差分对与宽边耦合差分对
- 弯折的影响
- 线对间斜变
- 差分引线的几何阻抗
- 串扰
- 辐射

柜间连接

- 同轴电缆
- 双绞线电缆
- 光纤
- 均衡器
- LAN 常用的建筑布线

时钟分布

- 对时钟的特殊要求
- 时钟重复器
- 多站时钟分布
- 时钟抖动
- 时钟源的功率过滤

仿真

- 频域仿真方法
- Spice 和 IBIS 的应用

本书的组织方式

本书的每一章都讨论与高速信号传输相关的一个特定主题，可以按照任意次序阅读。

第1章和第2章讨论各类传输线参数，包括趋肤效应、邻近效应、介质损耗及表面粗糙度的物理意义。

第3章推导出一个适用于所有导体媒质的通用频域响应模型。

第4章讨论如何从频域传递函数计算时域波形。

第5章到第11章讨论特殊传输媒质，包括单端PCB引线、差分媒质、通用的建筑布线标准、非屏蔽双绞线对、150Ω屏蔽双绞线对、同轴电缆及光纤。

第12章讨论时钟分布的各种相关问题。

第13章讨论Spice和IBIS仿真方法的局限性。

阅读本书需要的基础知识

了解线性系统的频域描述。未经过模拟电路原理正规培训的读者，仍然可以学会使用本书中的公式和实例。系统学习了一年线性电路原理基础的读者，可以借助于本书进行更深层次的学习。

与已出版的《高速数字设计》一书的关系

本书与Prentice-Hall公司1993年出版的、由Johnson和Graham合著的《高速数字设计》^①一书涉及的内容不同，可以同时或者独立使用。

前面出版的《高速数字设计》一书，广泛地讨论了高速中的一些现象，对印制电路板上存在的振铃、串扰、接地回弹、源噪声进行了分析，由于这些效应很容易理解和学习，所以主要偏重于基本电路结构。该书中，将芯片封装、示波器探头及功率系统视为高速数字产品。

而本书更专注于讨论速度和传输距离在上限附近的相关问题。当读者需要将信号传得更快和更远时，应该参考本书。

《高速数字设计》与《高速信号传输》一起构成高速数字技术人员的完整参考书。

那些已经熟悉我其他书籍的读者可能会发现本书的相似之处，那也是我一直尽力希望呈现出来的，即基于长期实践经验而来的实用性。

致谢

有很多人曾经通过电子邮件或在我的研讨会上面对面花时间与我探讨高速信号传输问题。这些探讨激发了我对本书中这些内容进行研究，我也收集了其中的一部分作为本书中的内容，在此深表谢意。

下面这些朋友对本书中讨论的一些特殊概念和问题有贡献(按字母顺序排列): Sal Aguinaga、James C. Bach、Eric V. Berger、Raymond Bullington、Doug Butler、Tim Canales、Bruce Carsten、Code Cubitt、Dave Cuthbert、Bill Daskalakis、Martin Graham、Paul Greene、Gary Griffin、Bob Haller、John Lehew、John Lin、Raymond P. Meixner、Craig Miller、Mitch Morey、Dan Nitzan、Bhavesh Patel、Dipak Patel、Jim Rautio、Ravi、Boris Shusterman、Kevin Slattery、Bob Stroupe、Bill Stutz和Fabrizio Zanella，感谢你们花时间进行了有益的探讨。

还要特别感谢那些自愿对本书各方面进行艰苦校读的人员，他们耐心的工作帮助发现了书中的很多错误，还提出了许多新的观点，让我进一步展开分析。这些工作无疑使本书更为有用。这些人员包括(按字母顺序排列): Aquanet公司的Jacob Ben Ary、Easystreet公司的Greg Dermer、Lecroy公司的Steve Ems、Nortel公司的Alexandre Guterman、Juniper公司的Valery Kugel、牛津大

^① 本书已由电子工业出版社2010年引进翻译出版，书号为978-7-121-10470-1。

学的Will Moore教授、Agilent公司的Jose Moreira、思科公司的Gopa Parameswaran、Mentor Graphics公司的Bob Ross、Nortel公司的Bert Simonovich、Cypress公司的Palani Subbiah, 以及Nortel公司的Geoff Thompson。

Prentice-Hall公司的编辑Bernard Goodwin、Nicholas Radhuber和Carol J. Lallier在本书漫长的编撰过程中表现出了良好的职业水准, 谢谢他们的耐心。

感谢我的助手 Jennifer Epps 在本书编写与出版过程中高度的责任心和精益求精精神。

本书中所有的引文承蒙《EDN》杂志及《PC 设计》杂志的许可, 前者是 Penton 媒体公司电子设计杂志分部 Reed 商务信息的一本出版物, 后者是 UP 媒体集团的一本出版物。本文中在每一篇引用文章的开头都做了说明。

Graphics 公司技术指导、EIA IBIS 公开论坛前主持 Bob Ross, 为第 13 章中的 IBIS 建模撰写了详细的未来发展分析。第 12 章中关于减小发射辐射的内容由 Bruce Archambeault 编写, 我只是做了编辑。第 5 章中许多过孔结构的电容仿真是由 Ansoft 公司的 Brad Cole 和 Matt Hudale 完成的。同时感谢思科公司的 Gopa Parameswaran 对过孔电容进行的仿真, 尽管本书的最终版本中未采用这些内容。2000 年 10 月, Steve 和 Robert 对我的牧场进行了访问, 这次访问启发了我对非 TEM 传输模式的兴趣。Wideband 公司的 Roger Billings 是目前通过刺线绳传输数据的世界最快记录保持者 (参见第 2 章)。

在 Accelerant Networks 公司工作的 Jeff Sonntag 第一个引起我注意到背板性能是如何随温度变化的 (讨论见第 5 章), 还要感谢同在 Accelerant Networks 公司工作的 Jim Tavacoli 为我提供了第 3 章中关于工作状态自适应均衡的清晰照片。

与 Michael King、Ed Sayre 和 Doug Smith 进行的大量讨论使我受益良多。

我在加州伯克利的技术导师 Martin Graham 博士在过去的 20 年中始终给予我支持、鼓励和技术上的帮助, 也是他首先指导我分析传输线衰减的一般特性及其随频率的变化。谢谢您, Martin。

感谢我妻子 Liz 对我的理解, 感谢你照顾我生活的方方面面, 使我有时间完成本书的工作。

本书中所有仍然存在的错误都是我造成的, 与帮过我的人均无关。

Prentice-Hall 公司采纳本书中的内容, 认为来源可靠。但 Prentice-Hall 公司与作者都不保证这些内容完整精确, 不对由此引起的失败、失误及损失负责。

关于书中符号标度的说明

除了一些常用的印制电路板尺寸采用了英制单位外, 本书均采用米作为长度单位。变量名和通用函数名使用斜体。常数、计数及特殊的公认函数使用普通字体 [如 $f(x)=1+\sin x$], 矩阵及向量场量使用粗斜体。

作者联系方式

无论是认为书中内容有问题, 还是仅仅只想就传输线原理进行更为细致的讨论, 读者都可以通过我的电子邮箱 howiej@sigcon.com 找到住在华盛顿州 Twisp 小镇附近山上农场里的我。

如果读者想随时了解高速信号的最新进展, 请访问我的网站 www.sigcon.com。我在网站里放有许多关于高速数字现象的文章以及我公共讲座的日程, 而且我还在不断更新。如果读者希望读到更多关于信号完整性的论题, 请签名索要我的简报。此外, 网页上有本书的勘误表。

Howard Johnson 博士: 1993 年于 Prentice-Hall 公司出版《高速数字设计》; 1996 年于 Prentice-Hall 公司《快速以太网: 互联网的曙光》, 并担任《EDN》杂志“信号完整性”专栏作者。他经常在牛津大学及世界各地组织数字工程师专题研讨。

符号表

单位和特殊常数

Ω	电阻单位; 1 安培电流流过 1 欧姆电阻产生的电压为 1 伏特
S	电导的国际单位, 西门子, 等于 $1/\Omega$ 。在有些旧文献中被称为姆欧, 用 Ω 的颠倒向下的符号表示
c	真空中的光速, 等于 2.998×10^8 m/s
ϵ_0	自由空间的介电常数, 8.854×10^{-12} F/m
μ_0	自由空间的磁导率, $4\pi \times 10^{-7}$ H/m
j	-1 的平方根

时域变量与频域变量

ω	频率 (rad/s)
ω_{LE}	集总参数模式的上限频率 (rad/s)
ω_{LC}	LC 模式的起始频率 (rad/s)
ω_{δ}	趋肤效应的起始频率 (rad/s)
ω_{rough}	粗糙度效应的起始频率 (rad/s)
ω_{λ}	非 TEM 波导模式的起始频率 (rad/s)
δ	趋肤深度 (总是频率的函数)
$i(t)$	随时间变化的电流
$I(\omega)$	电流波形的傅里叶变换或拉普拉斯变换
$v(t)$	随时间变化的电压
$V(\omega)$	电压波形的傅里叶变换或拉普拉斯变换

传输线参数

R	每米传输线串联电阻
L	每米传输线串联电感
G	每米传输线并联电导
C	每米传输线并联电容
z	每米传输线串联阻抗, 含 z_i 和 z_e (复数)
z_i	每米传输线内串联电阻, 与陷入导体内部的磁通对应, 代表导体内的功率耗散
z_e	每米传输线外串联电阻, 与导体周围外部的磁通对应, 代表导体周围外部的功率耗散; z_e 的实部基本上表明该结构的辐射阻抗
L_i	每米传输线内电感, 与陷入导体内部的磁通对应
L_e	每米传输线外电感, 与导体周围外部的磁通对应
R_i	每米传输线内电阻, 代表导体内的功率耗散
y	每米传输线并联电导 (复数)
θ	复介电常数实部与虚部构成的角度 (rad), 等于 $-\epsilon''/\epsilon'$ 的反正切, 角度很小时, $\tan\theta$ 常称为电介质材料的损耗角正切, 等于复介电常数虚部与实部之比, 即 $\theta \approx \tan\theta = -\epsilon''/\epsilon'$

(续表)

Z_c	传输线的特性阻抗, 是频率的函数。有时, 为了强调特性阻抗随频率变化的特性, 也会用 $Z_c(\omega)$ 表示特性阻抗。变量 Z_0 表示某特定频率处的特性阻抗值, 是一个常数 (例如在 $Z_0 = 50 \Omega$ 中)
v	传输速度, 有时表示电压
R_{DC}	导体的直流电阻
w	引线宽度
h	引线与最近的参考面间距
t	引线厚度
b	(带状线) 参考面间距
s	两根引线内面间的间距
r	圆线半径
p	导体圆周长
a	导体截面积

交流传输线在频率 ω_0 处的参数

ω_0	计算交流传输线参数的频点 (rad/s)。假设该频率高于 LC 模式及趋肤效应模式起始频率, 但低于高阶波导模式的起始频率
R_0	频率 ω_0 处的交流电阻
L_0	频率 ω_0 处的串联电感
C_0	并联电容
θ_0	频率 ω_0 处复介电常数实部与虚部构成的角度, 大小等于频率 ω_0 处 $-\varepsilon''/\varepsilon'$ 的反正切, 角度很小时, $\theta \approx \tan \theta = -\varepsilon''/\varepsilon'$
Z_0	传输线在特定频率 ω_0 处的特性阻抗。变量 Z_0 是一个常数 (例如在 $Z_0 = 50 \Omega$ 中)。有时, 为了强调特性阻抗随频率变化的特性, 也会用 $Z_c(\omega)$ 表示特性阻抗
v_0	频率 ω_0 处的传输速度 (群延迟的倒数)

材料参数

ε	介电常数 (通常为复数)
ε'	$\varepsilon \triangleq \varepsilon' - j\varepsilon''$ 的实部
ε''	$\varepsilon \triangleq \varepsilon' - j\varepsilon''$ 的虚部的相反数
ε_r	相对介电常数, 定义为 $\varepsilon/\varepsilon_0$ (通常是复数)
χ_e	电极化率, $\chi_e = \varepsilon_r - 1$ (通常是复数)
μ	磁导率 (通常是复数, 单位为 H/m)
σ	体积电导率 (S/m)。用于普通线铜: $\sigma = 5.80 \times 10^7$ S/m; 用于 PCB 引线电沉积铜 (纯铜): $\sigma = 5.98 \times 10^7$ S/m; 用于普通线铝: $\sigma = 3.77 \times 10^7$ S/m; 电沉积铝 (纯铝): $\sigma = 6.29 \times 10^7$ S/m; (纯) 银: $\sigma = 5.80 \times 10^7$ S/m; SAE 1045 钢: $\sigma = 1.16 \times 10^6$ S/m; 不锈钢: $\sigma = 1.16 \times 10^6$ S/m (变化范围很大); (纯) 镍: $\sigma = 1.16 \times 10^7$ S/m。注: 由于钢合金的成分差别很大, 普通钢的磁导率为 100~10 000, 有时超过 10 000。磁导率的这种大范围变化造成材料的趋肤深度变化剧烈, 因而材料电阻率也是剧烈变化的
ρ	体积电阻率 (σ 的倒数, 单位为 $\Omega\cdot\text{m}$)
η	波阻抗 (Ω), 即材料中平面波电场强度与磁场强度之比

一般性符号

l	结构的长度。
ρ	上升沿或下降沿的长度。
$t_{10\%-90\%}$	10%到 90%上升时间或下降时间。
V_{CC}	数字逻辑的供电电压。

目 录

第 1 章 基础知识	1
1.1 线性时不变集总参数电路的阻抗	1
1.2 功率比	2
1.3 比例变换准则	3
1.3.1 物理尺寸比例变换	4
1.3.2 功率比例变换	6
1.3.3 时间比例变换	6
1.3.4 恒定电压时的阻抗比例变换	8
1.3.5 介电常数比例变换	9
1.3.6 磁导率比例变换	10
1.4 谐振的概念	11
1.5 数字输入下线性系统最大响应	15
第 2 章 传输线的参数	20
2.1 电报方程	21
2.1.1 刺线的优良工作特性	23
2.1.2 电流连续性原理及信号的返回电流	24
2.2 电报方程	26
2.2.1 特性阻抗 Z_c	26
2.2.2 特性阻抗的变化	28
2.2.3 阻抗 Z_c 与参数 R 、 L 、 G 、 C 的关系	28
2.2.4 传播常数 γ	30
2.2.5 传播常数 γ 与参数 R 、 L 、 G 、 C 的关系	31
2.3 理想传输线	32
2.4 直流电阻	36
2.5 直流电导	38
2.6 趋肤效应	38
2.6.1 趋肤效应的产生	38
2.6.2 导体内的涡流	40
2.6.3 串联电阻的高低频近似	41
2.7 趋肤效应电感	43
2.8 内阻抗的计算	43
2.8.1 内阻抗的实际模型	46
2.8.2 矩形截面导体	47

2.9	趋肤效应的同心环模型	48
2.9.1	趋肤效应模型	49
2.9.2	关于趋肤效应模型的讨论	50
2.10	邻近效应	51
2.10.1	邻近因子	52
2.10.2	同轴电缆的邻近效应	54
2.10.3	微带线与带状线电路的邻近效应	54
2.10.4	邻近效应总结	54
2.11	表面粗糙效应	57
2.11.1	表面粗糙产生的严重后果	57
2.11.2	粗糙效应的起始频率	58
2.11.3	PCB 材料的粗糙度	59
2.11.4	控制粗糙度的方法	59
2.12	电介质效应	60
2.12.1	介质损耗角正切	63
2.12.2	混合物的介电常数	63
2.12.3	混合物的损耗角正切	64
2.12.4	填充因子未知时损耗角正切的计算	66
2.12.5	因果性与网络函数的关系	66
2.12.6	根据测得的损耗角正切计算 $ \epsilon_r $	69
2.12.7	Kramers-Kronig 公式	72
2.12.8	复磁导率	72
2.13	返回路径的串联阻抗	73
2.14	片上慢波模式	74
第 3 章	性能区域	76
3.1	信号传输模型	76
3.2	性能区域的划分	80
3.3	相关的数学基础知识: 输入阻抗与传递函数	83
3.4	集总参数元件区	84
3.4.1	集总参数特性区域的边界	85
3.4.2	Π 形电路模型	86
3.4.3	集总参数特性区域 H 函数的泰勒级数近似	87
3.4.4	集总参数特性区域的输入阻抗	87
3.4.5	集总参数特性区域的传递函数	89
3.4.6	集总参数特性区域的阶跃响应	91
3.5	RC 特性区域	93
3.5.1	RC 特性区域的边界	93
3.5.2	RC 特性区域的输入阻抗	94
3.5.3	RC 特性区域的特性阻抗	94
3.5.4	RC 区域的一般特性	95
3.5.5	RC 特性区域的传播常数	97

3.5.6	RC 特性区域的传输函数	97
3.5.7	RC 区域单位阶跃响应	98
3.5.8	距离与速度间折中 (RC 特性区域)	99
3.5.9	阶跃响应的闭式结果 (RC 特性区域)	99
3.5.10	Elmore 延迟估计 (RC 区域)	99
3.6	LC 特性区域 (恒定损耗区)	103
3.6.1	LC 特性区域的边界	103
3.6.2	特性阻抗 (LC 区域)	104
3.6.3	TDR 测量中串联电阻的影响	105
3.6.4	传播常数 (LC 特性区域)	108
3.6.5	LC 特性区域的强谐振	109
3.6.6	LC 传输线的端接	111
3.6.7	速度与距离的折中	114
3.6.8	混合工作模式 (LC 与 RC 两个特性区域)	114
3.7	趋肤效应区域	115
3.7.1	趋肤效应区域的边界	115
3.7.2	趋肤效应区域的特性阻抗	116
3.7.3	趋肤效应对 TDR 测量响应的影响	117
3.7.4	趋肤效应区域的传播常数	117
3.7.5	趋肤效应区的强谐振	120
3.7.6	趋肤效应区的阶跃响应	121
3.7.7	趋肤效应区距离与速度的折中	124
3.8	介质损耗区域	125
3.8.1	介质损耗区域的边界	125
3.8.2	介质损耗区域的特性阻抗	126
3.8.3	介质损耗对 TDR 测量的影响	128
3.8.4	介质损耗区域的传播常数	128
3.8.5	介质损耗区的强谐振	131
3.8.6	介质损耗区的阶跃响应	132
3.8.7	介质损耗区距离与速度的折中	135
3.9	波导色散区域	135
3.10	各区域间临界点小结	136
3.11	传输媒质的等效原则	138
3.12	铜质传输线的比例变换	141
3.13	多模光纤的比例变换	144
3.14	线性均衡: 长底板引线举例	144
3.15	自适应均衡在增速网络收发器中的应用	147
第 4 章	频域建模	149
4.1	非线性分析	149
4.2	离散傅里叶变换	150
4.3	离散时间映射	151

4.4	FFT 的其他限制	152
4.5	FFT 程序输出的归一化	153
4.6	常用的傅里叶变换对	154
4.7	欠采样的影响	155
4.8	频域仿真的实现	156
4.9	常见问题	158
4.9.1	总传输延迟过大引起波形移出时间窗的影响	158
4.9.2	任意数据序列的变换	158
4.9.3	时域波形的移位	158
4.9.4	复杂系统的建模	159
4.9.5	差分模型	159
4.10	FFT 程序输出的校核	159
第 5 章 PCB (印制电路板) 线		161
5.1	PCB 信号传输	162
5.1.1	特性阻抗与延迟	162
5.1.2	阻抗效应	162
5.1.3	介质效应	169
5.1.4	趋肤效应与介质损耗效应的混合作用	177
5.1.5	非 TEM 模式	178
5.2	传输距离的限制	182
5.3	PCB 噪声与干扰	186
5.3.1	PCB 的反射	186
5.3.2	PCB 串扰	200
5.4	PCB 连接器	205
5.4.1	串扰的产生	205
5.4.2	净通孔的影响	207
5.4.3	接头的测量	208
5.4.4	锥削形过渡	209
5.4.5	跨立式接头	211
5.4.6	电缆屏蔽层的接地	212
5.5	过孔建模	213
5.5.1	过孔的增量参数	213
5.5.2	过孔的三种模型	215
5.5.3	悬置过孔	216
5.5.4	电容值	217
5.5.5	电感值	222
5.6	片上互连发展前景展望	227
第 6 章 差分信号		229
6.1	单端电路	229
6.2	双线电路	233

6.3	差分信号传输	234
6.4	差模与共模电压、电流	237
6.5	差分和共模速度	238
6.6	共模平衡	238
6.7	共模范围	239
6.8	差模与共模的转换	239
6.9	差模阻抗	240
6.9.1	奇模阻抗与无耦合阻抗间的关系	242
6.9.2	为什么奇模阻抗总小于无耦合阻抗	242
6.9.3	差分反射	243
6.10	PCB 结构	243
6.10.1	差分(微带)线的阻抗	244
6.10.2	边缘耦合带状线	246
6.10.3	线对中引线分开的情形	252
6.10.4	宽边耦合带状线	253
6.11	PCB 的一些应用	257
6.11.1	与外部的平衡差分传输媒质进行匹配连接	257
6.11.2	抑制地弹噪声	257
6.11.3	使用差分信号传输方式减少电磁干扰(EMI)	258
6.11.4	抑制接头中的噪声	259
6.11.5	减小时钟倾斜失真	260
6.11.6	本地串扰的抑制	261
6.11.7	关于传输线的一本较好参考书	263
6.11.8	差分时钟	263
6.11.9	差分结构的终端	264
6.11.10	差分 U 形弯	266
6.11.11	布线引起的斜变	267
6.11.12	减小斜变的方法	268
6.12	机柜间的互连	269
6.12.1	带状双绞线电缆	270
6.12.2	防止大的接地偏移	271
6.12.3	抗外部射频干扰特性	272
6.12.4	差分接收机对趋肤效应损耗和其他高频损耗有更好的耐受性	273
6.13	LVDS 信号	274
6.13.1	输出电平	275
6.13.2	共模输出	275
6.13.3	共模噪声容限	275
6.13.4	差模噪声容限	276
6.13.5	迟滞现象	276
6.13.6	阻抗控制	276
6.13.7	引线的辐射	278