

研究生教材

ANALYSIS OF  
MULTICONDUCTOR TRANSMISSION LINES  
2ND EDITION

# 多导体传输线分析

(第二版)

[美]克莱顿 R. 保罗 著

杨晓宪 郑涛 译

张保会 审校



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

013046166

TN81  
03

**ANALYSIS OF  
MULTICONDUCTOR TRANSMISSION LINES  
2ND EDITION**

# 多导体传输线分析

(第二版)

[美]克莱顿 R. 保罗 著  
杨晓宪 郑涛 译  
张保会 审校



北航

C1652916



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

TN81  
03

01305810

## 内 容 提 要

本书共分为13章。第1章至第5章讨论了多导体传输线(MTL)使用的背景和基本原理,介绍了双导体和多导体传输线单位长度参数的解析计算和数值计算方法。第6章和第7章分别讨论了传输线方程的频域解,包括双导体和多导体传输线。第8章和第9章分别介绍了双导体和多导体传输线方程的时域解,包括时域频域变换(TDFD)法和时域有限差分(FDTD)法。另外,还讨论了递归卷积算法和MOR技术。它们包含了迄今为止关于这方面研究的最新进展。第10章给出了均匀介质中3导体无耗传输线的解析解。第11章和第12章研究在入射场激励下,双导体和多导体传输线的频域和时域解。它们的要点是将均匀平面波激励视为远方天线或者雷击激励。第13章讨论了传输线网络互联,例如具有分支电缆的情形。

本书可作为高等院校电气工程专业的大学高年级学生或研究生多导体传输线(MTL)分析方面的教材,也可以作为相关专业工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

多导体传输线分析:第2版/(美)保罗(Paul, C. R.)著;  
杨晓亮,郑涛译. —北京:中国电力出版社,2013.2

书名原文:Analysis of multiconductor transmission lines,  
2nd Edition

研究生教材

ISBN 978-7-5123-3959-0

I. ①多… II. ①保…②杨…③郑… III. ①导体—传输线—研  
究—研究生—教材 IV. ①TN811

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第003744号

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2012-4712号

Copyright©2008 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved. Authorized translation from the English language edition, entitled *Analysis of Multiconductor Transmission Lines 2nd Edition*, ISBN 978-0-470-13154-1, by Clayton R. Paul, published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2013年5月第一版 2013年5月北京第一次印刷  
787毫米×1092毫米 16开本 32.75印张 800千字  
定价 86.00元

### 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

## 译者序

在电气工程和电子工程领域,多导体传输线是一类很重要的电气结构,用以导行电磁波。高压输配电线路、电力电缆、通信电缆、计算机网络以及各种类型的印制电路板(PCB)等,都是多导体传输线物理实现的实例。

一般而言,多导体传输线的结构是不平衡的,在电气上是耦合系统。不平衡耦合系统的求解难度远远大于平衡耦合系统。例如,对于三相平衡的输电线路,我们常用对称分量法、卡伦鲍尔变换或者序分量法进行解耦。然而,对于同塔多回,例如同塔两回以上的输电线路,采用上述解耦方法进行故障分析时,将可能产生不可接受的误差。事实上,EMTP的一些仿真结果已经表明,对于同塔多回的输电线路结构,能够满足序分量法要求的平衡条件在实际中并不典型。因此,需要建立更具普适性的传输线模型。又如,暂态量行波保护具有快速、灵敏、配合简单的特点,是极具潜力的一类继电保护类型。故障行波的能量主要集中在百 kHz 数量级,在这个频率范围,故障线路上的行波传输和识别分析无疑必须纳入传输线研究的范畴。再如,电力线通信是以电力线作为通信信道的一种通信方式,通信信号的频率依据应用范围的不同,从数十 kHz 直至 30MHz,它的通信信道的研究同样涉及传输线模式传播的问题。因此,对于电气工程专业而言,从工频、中频到高频,从单相、三相到多相,多导体传输线方面的知识都是不可或缺的。在电子工程领域,正如本书所阐明的,随着海量和高速数据以及信号传输需求的增加,多导体传输线的使用(PCB是一种典型的传输线结构)也变得更加普遍,由此产生的串扰将会引起信号的衰减、时间延迟以及其他效应,破坏信号的完整性,导致传输性能的下降。信号完整性正在变成影响高速数字系统性能的一个关键问题。这些都将涉及传输线方面的专门知识。

本书旨在研究多导体传输线。目前,国内尚未见有全面系统地分析多导体传输线的专著公开出版。基于研究领域的不同,多导体传输线的内容虽然在不同的教材和技术文献中常有涉及,但侧重点往往各异,有时难免不产生“盲人摸象”之虞。本书英文原版作者 Clayton R. Paul 教授是国际电磁学界权威,IEEE 会士。在本书中,作者详细讨论了有关多导体传输线方面的内容,包括传输线方程的导出、传输线的单位长度参数、传输线方程的频域和时域解、传输线的入射场激励以及传输线网络等。作者从电磁场基本理论入手,基于横向电磁波(TEM)假设,导出了传输线方程,给出了传输线方程的限定条件。详细讨论了传输线单位长度参数的计算问题。除了常用的柱状圆形横截面的导体(导线)之外,还给出了利用矩量技术(MoM)、有限差分法以及有限元法,计算具有矩形横截面导体构成的多导体传输线单位长度参数的数值计算方法。利用相似变换方法,讨论了多导体

传输线方程的解耦问题，给出了频域中几类常见传输线结构的模式解。作者还用整整一章的篇幅，介绍了 3 导体传输线的解析解，它对于分析传输线有关参数、电源电压等是如何影响求解的结果、深刻理解多导体传输线的一般特性是十分有益的。在传输线方程的时域解中，详细讨论了时域频域变换法 (TDFD)。对于电气工程专业的学生掌握电子系统的设计而言，这是一个非常实用的方法。同时，还介绍了宏模型和模型降阶法 (MOR)，例如递归卷积、复跳频 (CFH)、Pade 法、渐近波形展开 (AWE)、向量拟合 (VF) 以及综合集总电路模型等流行方法，它们包含了迄今为止关于传输线研究方面的最新进展。在入射场激励中，着重讨论了均匀平面波的激励问题。并且，结合实例，详细讨论了传输线网络的一般计算方法，给出了串扰电压的计算结果。

本书物理脉络清晰、概念描述严谨，体现了大家的学术风范。对问题的研究高屋建瓴，深入浅出，适宜自学。另外，书中还给出了包括从电缆到 PCB 的大量实验结果以及 FORTRAN 计算程序，可以实现所讨论的所有计算技术。

本书由杨晓宪和郑涛翻译。杨晓宪翻译了前言和第 1 章至第 10 章，并对全书进行了统稿。郑涛翻译了第 11 章至第 13 章以及附录部分，并对书中给出的大部分 FORTRAN 程序和 PSPICE 实例利用 MATLAB 进行了验证。西安交通大学电气学院博士生导师张保会教授对全书进行了审校。由于本书涉及的专业面较宽，限于我们的水平及经验，难免产生谬误之处，责任当然由译者负责。

译者

2013 年 2 月

## 原著前言

这是本书的第二版。它旨在面向电气工程（EE）专业的高年级学生或研究生，作为多导体传输线（Multiconductor Transmission Lines, MTL）分析方面的教科书，也可以作为相关专业工程技术人员的参考书。MTL 通常是指一组由  $n+1$  个平行导体组成的传输线结构，用于在两点或者更多点之间（例如电源和负载之间）传输信号。MTL 中电磁波传播的主导模式是横向电磁波（Transverse Electromagnetic, TEM）模式。在 TEM 模式中，导体周围的电场和磁场分别位于传输线轴线的横向正交平面上。MTL 结构具有的导波能力从直流直到电磁波的波长与传输线的横截面尺度大致在相同数量级的频率范围。在更高频率时，高阶传播模式与 TEM 模式共存。此时，其他类型的波导结构（例如波导管和天线）是在电源和负载间传输信号更为实用的结构。TEM 模式的波导结构有许多方面的应用。高压输电线路传输的是 60Hz 正弦波。然而，除了这个低频电力信号之外，在线路上还可能存在着其他信号所产生的高频分量。例如，当线路上发生故障或者线路上的开关断开和重新闭合时，线路上传输的信号波形中将出现高频频谱成分。在飞机、轮船和车辆等的现代电子系统中，常采用电缆传送电力或信号，这些电缆将大量的导线集束在一起，以保持整洁和节省空间。围绕着这些导线的电磁场相互影响并在相邻电路上产生感应电压，通常称之为串扰。串扰将引起连接在电缆末端的电路性能的下降。串扰电压的计算将是本书的主要内容之一。

存在着许多其他类似的传输线结构，印制电路板（PCB）是其中之一。它由平面绝缘介质板及敷设在板上的矩形横截面导体（导电脊）构成，用于数字元器件以及模拟元器件之间的相互连接。对于这些 PCB，串扰将会引起所传输的信号出现衰减、时间延迟以及其他效应，导致性能下降。在今天的高速数字电路中，信号衰减、时间延迟以及串扰等将对电路性能产生重要的影响。因此，理解和计算这些效应是十分重要的。今天，数字系统是构成电子系统的主要形式，毫无疑问，未来将由数字系统主导。系统的时钟速度和数据传输速率正在以惊人的速度提高。今天的个人计算机的时钟速度已经达到 3GHz 数量级。这些高速数字波形的频谱已经扩展到低 GHz 级频率范围。它意味着，串扰和非意图的辐射发射已经对数字系统的性能产生了严重的影响，这在十多年前是不可想象的。毫无疑问，未来这个问题将愈加突出。15 年以前，在数字信号的最高主要频率下，许多连接信号的导体，例如导线和 PCB 导电脊足以视为电气短线，因此这些互连导体的相互影响通常可以忽略。今天，大多数 PCB 导电脊的分析必须按照传输线来处理。在数字系统的设计中，传输线的匹配问题也不再是无足轻重，它们的分布参数性质不再可以被忽略。因此，对于

数字设计工程师而言，需要理解传输线的概念和掌握设计原理。本书的目标是研究多导体传输线方程求解的各种方法，探索和理解传输线上波传播的一般规律。

传统上，对于电气工程（EE）专业，由具有均匀横截面的两个平行导体组成的传输线分析是一门基础课程。在引入数字计算机工程课程之前，所有 EE 的大学生都要求完成有关双导体传输线的课程。然而，由于计算机课程的引入，4 年制大学生的学位课程被安排得很满。在许多 EE 的课程安排中，传输线课程即使开设，也是被安排在高级技术选修课程中。遗憾的是，随着高速数字应用技术的发展，要求所有 EE 大学生必须具备传输线方面的专业知识。另外，随着高速和海量数据以及信号传输需求的增加，由多于两个导体组成的多导体传输线（MTL）的使用也变得更加普遍。信号的完整性（传输线对于信号传输的影响）正在变成影响高速数字系统性能的一个关键问题。本书希望填补在 EE 课程的结构安排中关于传输线内容方面的空缺。

本书是前版关于 MTL 分析的第 2 版。书中的内容已经重新编写，以适应作为面向大学高年级学生或者研究生关于传输线方面的教科书。第一版中，双导体传输线和 MTL 安排在同一章里。在这一版中，对于每一个分析的专题，例如单位长度参数、频域分析、时域分析，以及入射场激励等，在分析了双导体传输线之后，紧接着就在下一章研究相应的 MTL 的情形。这种安排允许授课教师将讲授重点放在双导体传输线或者 MTL 方面，也可以全部讲授。除了细节上更加冗长之外，MTL 的分析与双导体传输线非常一致。而且，借助于矩阵符号和技术，我们能够将大多数 MTL 问题直接表征为相应的双导体传输线问题。因此，将双导体传输线与 MTL 分成独立的章节，对于同一个专题，在研究双导体传输线后紧接着研究 MTL 的情形，更容易理解 MTL 的实质。

这一版除了在结构安排上按照上述方式重组之外，在内容上也包含了自 13 年前本书第一版出版以来，在传输线分析方法上取得的重要进展。数字技术事实上已经覆盖了整个电子领域。在这些数字系统中，时钟和数据传输速率以惊人的速度加速提高，它意味着沿着这些相互连接的导线传输的信号频谱正在扩展，在某些高端服务器中，已经达到 20 GHz 数量级。同时在这些系统中，也产生了更大的信号内联结构。在 13 年以前，从传输线效应的观点看，这些结构对于信号之间的交互作用的影响是微不足道的，然而在今天却成为影响系统性能的关键性问题。这些内联结构的传输线效应已不再能忽略。另外，内联结构的数目和密度也在戏剧般的增加，因此也给这些效应的分析带来严重的计算问题。对于具有高密度内联结构系统的时域分析，目前流行的趋势是采用宏模型和模型降阶法（Model Order Reduction, MOR）。从端口的观点看，宏模型可以简洁地描述这些内联结构，但是需要确定它们的传输函数。典型的，内联结构的传输函数存在着大量极点，它表现为非常高阶的 Laplace 变换变量  $s$  的多项式之比。流行的分析方法集中在 MOR 法。MOR 法寻求大幅度地降低这些传输函数主导极点的阶数，从而简化分析。MOR 法，例如递归卷积、复跳频（Complex Frequency Hopping, CFH）、Pade 法、渐近波形展开（Asymptotic Waveform Expansion, AWE）、向量拟合（Vector Fitting, VF）以及综合集总电路模型等是可供选择的流行方法。第 8 章和第 9 章分别讨论了双导体传输线和 MTL 的时域分析，它们包含了迄今为止关于这方面研究的最新进展。

本书这一版分为 13 章，而第一版仅仅有 8 章。作者强烈认为，在教授学生的过程中，将教材按照逻辑关系组织和采用严谨的表述形式，也许是至关重要的，这种逻辑上的严谨性是本书的重要特点之一。第 1 章讨论了 MTL 使用的背景和基本原理，TEM 传播模式的一般性质。利用几种方法导出了双导体传输线的传输线方程。讨论了各种类型的 MTL（均匀、无损耗、均匀介质）以及它们在使用 TEM 模型时的限定条件。本章在第二版中增加了一个重要的内容：关于时域频域变换方法的讨论。对于希望 EE 专业的学生具备设计电子系统的能力而言，这个方法是极为有效的。对于一个线性系统而言，如具有线性终端的 MTL 结构，时域频域变换方法提供了一个非常有用的时域分析方法。它将周期性或非周期性的输入信号分解成它的傅里叶频谱分量，计算出系统的频域传输函数，令信号通过系统，然后在时域将其重新组合，得到系统最终的时域输出。这个方法允许直接处理导体和周围介质的频率相关性损耗。正如我们将要看到的，在直接求解传输线方程的时域解时，这些频率相关损耗将使得问题变得非常复杂。

第 2 章和第 3 章分别推导了双导体传输线和 MTL 的传输线方程。在这些方程中，均考虑了单位长度参数的一般性质。

第 4 章推导了双导体传输线的单位长度参数，包括电感、电容、电阻和电导。第 5 章则是类似的 MTL 单位长度参数的推导。在这两章中，详细讨论了这些重要的单位长度参数的数值计算方法。

第 6 章和第 7 章分别讨论了双导体传输线和 MTL 传输线方程的频域解。在第 6 章中，关于双导体传输线分析的内容已较第一版大大扩充，现在已经列为常规的教学内容。

第 8 章和第 9 章分别讨论了双导体传输线和 MTL 的时域分析。同样，在第 8 章中，关于双导体传输线的时域分析内容较第一版也有很大扩充，现在已经作为常规的大学教学内容。另外，在第 8 章中，增加了关于在高速数字电路内联结构中实现信号完整性（Signal Integrity, SI）方法的讨论。除了时域频域变换（Time-Domain to Frequency-Domain transformation, TDFD）方法以外，还讨论了时域有限差分（Finite-Difference, Time-Domain, FDTD）求解方法。这两种方法都允许包含频率相关损耗。第 8 章中，还详细讨论了递归卷积算法和 MOR 技术，例如 Pade 逼近法。在第 9 章关于 MTL 的时域分析中，详细讨论了 MOR 方法，例如广义特征线法、Pade 法、渐近波形展开法、复跳频法，以及向量拟合法等。另外，第 9 章还包括了利用 FDTD 求解动态终端的内容。

第 10 章给出了均匀介质中 3 导体无耗传输线的符号解或者解析解。也许这是唯一可以根据解析计算获得闭式解的 MTL 结构。虽然其中的内容已经重新修订，本章与第一版中的内容实质上是相同的。

第 11 章研究了在入射场激励下，双导体传输线的频域和时域解。第 12 章则是针对 MTL 的情形。它们的要点是将均匀平面波激励视为远方天线或者雷击激励。

最后，第 13 章讨论了传输线网络互联，如具有分支电缆的情形。因为双导体传输线和 MTL 的分析方法没有太大的不同，因此没有必要将它们分为两章进行讨论。

附录 A 中包含了大量的 FORTRAN 计算程序，它可以实现本书中讨论的所有计算技术。本书还给出了包括从电缆到 PCB 的大量实验结果，除了可以加深感性认识外，还可



以与理论计算的结果相比较。程序计算代码可以从 Wiley 网站下载，网址是 [ftp://ftp.wiley.com/public/sci\\_tech\\_med/multiconductor\\_transmission/](ftp://ftp.wiley.com/public/sci_tech_med/multiconductor_transmission/)。

附录 B 在这一版中是新增的。它简要而全面地介绍了 SPICE/PSPICE 电路分析程序。

作者的许多同事对本书的修订工作作出了积极的贡献。作者衷心地感谢 Antonio Orlandi 教授和 Frederick M. Tesche 以及后来的 Albert A. Smith Jr.，他们对本书提出了许多深刻而有意义的见解。

**克莱顿 R. 保罗**

**梅肯, 乔治亚**

## 本书献给那些对动物给予仁慈和同情心的人们

一个真正有道德的人应该不遗余力地帮助他所能帮助的所有生命，而不应该伤害任何有生命的东西。

Albert Schweitzer

我们不应每日只祈求上帝的祝福和怜悯，而对与我们共同生存的生物却没有给予基本的同情。

Gandhi

人心可以通过一个人对动物的态度来判断。

Immanuel Kant

## 目 录

译者序

原著前言

<b>1 概述</b> .....	1
1.1 多导体传输线结构的实例 .....	4
1.2 TEM 传播模式的特性 .....	6
1.3 传输线方程概述 .....	11
1.3.1 TEM 传播模式下电压和电流的定义和唯一性 .....	12
1.3.2 单位长度参数的定义 .....	13
1.3.3 由横向电磁场方程导出传输线方程 .....	17
1.3.4 单位长度参数的性质 .....	19
1.4 传输线的类型 .....	20
1.4.1 传输线的均匀与非均匀 .....	20
1.4.2 介质的均匀与非均匀 .....	22
1.4.3 传输线的有耗与无耗 .....	22
1.5 传输线方程公式的应用限制 .....	23
1.5.1 高阶模式 .....	23
1.5.1.1 无限、平行平面传输线 .....	23
1.5.1.2 同轴传输线 .....	27
1.5.1.3 双导线传输线 .....	28
1.5.2 传输线电流与天线电流 .....	28
1.6 时域与频域 .....	29
1.6.1 傅里叶级数和傅里叶变换 .....	30
1.6.2 数字波形的频谱和带宽 .....	32
1.6.3 使用傅里叶方法和叠加原理计算具有线性终端传输线的时域响应 .....	34
习题 .....	36
参考文献 .....	41
<b>2 双导体传输线方程</b> .....	44
2.1 积分形式的麦克斯韦方程导出传输线方程 .....	44

2.2	单位长度等值电路导出传输线方程	47
2.3	单位长度参数的性质	48
2.4	频率相关损耗	48
2.4.1	频域单位长度阻抗 $\hat{z}(\omega)$ 和导纳 $\hat{y}(\omega)$ 的特性	49
	习题	52
	参考文献	54
<b>3</b>	<b>多导体传输线方程</b>	<b>55</b>
3.1	积分形式的麦克斯韦方程导出多导体传输线方程	55
3.2	单位长度等值电路导出多导体传输线方程	60
3.3	MTL 方程概要	61
3.4	频率相关损耗	62
3.5	单位长度参数矩阵 <b>L</b> 、 <b>C</b> 、 <b>G</b> 的性质	63
	习题	67
	参考文献	67
<b>4</b>	<b>双导体传输线单位长度参数</b>	<b>68</b>
4.1	单位长度参数 $l$ 、 $c$ 和 $g$ 的定义	68
4.2	柱状、圆形横截面的导体 (导线)	69
4.2.1	导线的基本子问题	69
4.2.1.1	镜像法	73
4.2.2	导线类传输线单位长度的电感和电容	73
4.2.3	导线类传输线单位长度的电导和电阻	79
4.3	矩形横截面的传输线 (PCB 导电脊)	87
4.3.1	PCB 类传输线单位长度的电感和电容	87
4.3.2	PCB 类传输线单位长度的电导和电阻	90
	习题	95
	参考文献	96
<b>5</b>	<b>多导体传输线单位长度参数</b>	<b>99</b>
5.1	单位长度参数矩阵 <b>L</b> 、 <b>C</b> 和 <b>G</b> 的定义	99
5.1.1	广义电容矩阵 $\mathcal{C}$	103
5.2	柱状、圆形横截面 (导线) 的多导体传输线	106
5.2.1	均匀介质中导线的宽间隔近似	106
5.2.1.1	$n+1$ 根导线	106
5.2.1.2	位于无限理想导电平面以上的 $n$ 根导线	107
5.2.1.3	置于圆柱状理想导电外壳中的 $n$ 根导线	107
5.2.2	一般情形时的数值方法	108
5.2.2.1	非均匀电介质的应用	111
5.2.3	计算结果: 带状电缆	115

5.3	矩形横截面导体构成的多导体传输线 .....	117
5.3.1	矩量 (Method of Moments MoM) 技术 .....	117
5.3.1.1	印制电路板的应用 .....	122
5.3.1.2	耦合微带线的应用 .....	129
5.3.1.3	耦合带状线的应用 .....	134
5.4	有限差分技术 .....	137
5.5	有限元技术 .....	140
	习题 .....	145
	参考文献 .....	146
<b>6</b>	<b>双导体传输线的频域分析 .....</b>	<b>148</b>
6.1	频域传输线方程 .....	148
6.2	无耗传输线的通解 .....	149
6.2.1	反射系数和输入阻抗 .....	150
6.2.2	终端电压和电流的解 .....	152
6.2.3	无耗传输线的 SPICE (PSPICE) 求解 .....	154
6.2.4	电压和电流作为传输线上位置的函数 .....	156
6.2.5	匹配和电压驻波比 VSWR .....	158
6.2.6	无耗传输线上的功率流 .....	158
6.3	有耗传输线的通解 .....	159
6.3.1	低耗线近似 .....	161
6.4	传输线集总电路近似模型 .....	164
6.5	传输线的双端口表征 .....	168
6.5.1	链参数 .....	168
6.5.2	突变非均匀传输线的链参数矩阵近似 .....	170
6.5.3	Z 和 Y 参数 .....	171
	习题 .....	173
<b>7</b>	<b>多导体传输线的频域分析 .....</b>	<b>176</b>
7.1	频域多导体传输线方程 .....	176
7.2	$n+1$ 导体传输线的通解 .....	177
7.2.1	MTL 方程通过相似变换解耦 .....	177
7.2.2	各类传输线的解 .....	181
7.2.2.1	置于有耗、均匀介质中的理想导体 .....	182
7.2.2.2	置于有耗、均匀介质中的有耗导体 .....	183
7.2.2.3	置于无耗、非均匀介质中的理想导体 .....	185
7.2.2.4	一般情况: 置于有耗、非均匀介质中的有耗导体 .....	186
7.2.2.5	循环对称结构 .....	186
7.3	结合终端条件 .....	190

7.3.1	广义戴维南等值	190
7.3.2	广义诺顿等值	191
7.3.3	混合形式	192
7.4	集总电路近似形式	193
7.5	$2n$ 端口表征	195
7.5.1	频域 MTL 方程的状态变量方程类比	195
7.5.2	传输线的 $2n$ 端口链参数矩阵表征	197
7.5.3	链参数矩阵的性质	198
7.5.4	非均匀传输线的链参数矩阵近似	201
7.5.5	阻抗和导纳参数矩阵特性	201
7.6	功率流和反射系数矩阵	204
7.7	计算实例和实验结果	207
7.7.1	带状电缆	207
7.7.2	印制电路板	209
	习题	212
	参考文献	214
<b>8</b>	<b>双导体传输线时域分析</b>	<b>216</b>
8.1	无耗传输线的解	217
8.1.1	波形跟踪和反射系数	217
8.1.2	级数解和差分算子	225
8.1.3	特征线法和传输线双端口模型	228
8.1.4	无耗传输线的 SPICE (PSPICE) 解	231
8.1.5	拉普拉斯变换解	233
8.1.5.1	具有容性和感性负载的传输线	234
8.1.6	传输线的集总电路近似模型	236
8.1.6.1	在时域中传输线何时可以视为电气短线	237
8.1.7	时域频域 (TDFD) 变换法	238
8.1.8	时域有限差分 (FDTD) 法	240
8.1.8.1	魔幻时间步长	244
8.1.9	信号完整性匹配	249
8.1.9.1	何时需要匹配	251
8.1.9.2	传输线的不连续效应	252
8.2	损耗处理	258
8.2.1	频率相关损耗的表征	259
8.2.1.1	介质中的损耗	259
8.2.1.2	导体损耗和集肤效应损耗	260
8.2.1.3	频率相关损耗的卷积	263

8.2.2	时域频域 (TDFD) 变换法	267
8.2.3	时域有限差分 (FDTD) 法	267
8.2.3.1	包含频率无关的损耗	267
8.2.3.2	包含频率相关的损耗	269
8.2.3.3	函数的 Prony 表征法	272
8.2.3.4	递归卷积	275
8.2.3.5	一个实例: 高损耗传输线	277
8.2.3.6	FDTD 误差的修正	280
8.2.4	集总参数电路近似	283
8.2.5	传输线宏模型建模	285
8.2.6	Pade 法表征时域中频率相关函数	287
	习题	292
	参考文献	297
<b>9</b>	<b>多导体传输线时域分析</b>	<b>300</b>
9.1	无耗传输线的解	300
9.1.1	MTL 的递归解	300
9.1.2	MTL 方程的解耦	303
9.1.2.1	均匀介质中的无耗传输线	305
9.1.2.2	非均匀介质中的无耗传输线	306
9.1.2.3	使用 SPICE 程序结合终端条件	307
9.1.3	集总电路近似形式	311
9.1.4	时域频域 (TDFD) 变换法	312
9.1.5	时域有限差分 (FDTD) 法	312
9.1.5.1	在 FDTD 分析中包含动态和/或非线性终端	313
9.2	损耗处理	317
9.2.1	时域频域 (TDFD) 变换法	319
9.2.2	集总电路近似形式	319
9.2.3	时域有限差分 (FDTD) 法	319
9.2.4	有耗 MTL 的广义特征线法	320
9.2.5	模型降阶方法	327
9.2.5.1	矩阵指数的 Pade 逼近	328
9.2.5.2	渐近波形估计 (AWE)	330
9.2.5.3	复跳频 (CFH)	331
9.2.5.4	向量拟合	332
9.3	计算和实验结果	335
9.3.1	带状电缆	336
9.3.2	印制电路板	339

习题 .....	342
参考文献 .....	345
<b>10 3 导体传输线的解析 (符号) 解 .....</b>	<b>349</b>
10.1 均匀介质中频域的解析解 .....	352
10.1.1 电感性和电容性耦合 .....	356
10.1.2 共模阻抗耦合 .....	357
10.2 均匀介质中时域的解析解 .....	359
10.2.1 直接解 .....	360
10.2.2 弱耦合传输线 .....	362
10.2.3 电感性和电容性耦合 .....	363
10.2.4 共模阻抗耦合 .....	365
10.3 计算和实验结果 .....	366
10.3.1 3 导线带状电缆 .....	366
10.3.2 3 导体印制电路板 .....	368
习题 .....	370
参考文献 .....	372
<b>11 入射场激励的双导体传输线 .....</b>	<b>373</b>
11.1 入射场激励的传输线方程的导出 .....	373
11.1.1 电源的等值形式 .....	377
11.2 频域解 .....	377
11.2.1 传输线方程的解 .....	378
11.2.2 激励源的简化形式 .....	381
11.2.3 结合传输线终端 .....	383
11.2.4 传输线的均匀平面波激励 .....	386
11.2.4.1 几个特例 .....	388
11.2.4.2 位于接地平面以上的单个导体 .....	391
11.2.5 矩量法计算结果的比较 .....	393
11.3 时域解 .....	396
11.3.1 拉普拉斯变换法 .....	396
11.3.2 传输线的均匀平面波激励 .....	400
11.3.3 SPICE 等值电路 .....	403
11.3.4 时域频域 (TDFD) 变换法 .....	404
11.3.5 时域有限差分 (FDTD) 法 .....	406
11.3.6 计算结果 .....	410
习题 .....	413
参考文献 .....	413



<b>12 入射场激励的多导体传输线</b> .....	415
12.1 入射场激励的多导体传输线方程的导出 .....	415
12.1.1 激励源的等效形式 .....	419
12.2 频域解 .....	421
12.2.1 MTL 方程的解 .....	422
12.2.2 激励源的简化形式 .....	422
12.2.3 结合终端条件的解 .....	425
12.2.3.1 均匀介质中的无耗传输线 .....	426
12.2.4 集总参数电路的近似形式 .....	428
12.2.5 均匀平面波激励的传输线 .....	428
12.3 时域解 .....	432
12.3.1 多导体传输线方程的解耦 .....	433
12.3.2 SPICE 等值电路 .....	437
12.3.3 集总参数电路近似形式 .....	440
12.3.4 时域频域 (TDFD) 变换法 .....	441
12.3.5 时域有限差分 (FDTD) 法 .....	442
12.4 计算结果 .....	445
习题 .....	448
参考文献 .....	448
<b>13 传输线网络</b> .....	450
13.1 无耗传输线网络的 SPICE 模型 .....	451
13.2 集总参数电路近似模型 .....	453
13.3 $2n$ 端口导纳参数或阻抗参数模型 .....	454
13.4 BLT 方程 .....	462
13.5 时域行波直接解 .....	468
13.6 多导体传输线分析方法归纳 .....	471
习题 .....	472
参考文献 .....	472
作者关于传输线方面的出版物 .....	474
<b>附录 A 计算机程序介绍</b> .....	482
A.1 单位长度参数计算程序 .....	483
A.1.1 宽间隔导线类导体: WIDSEF. FOR .....	483
A.1.2 带状电缆: RIBBON. FOR .....	484
A.1.3 印制电路板: PCB. FOR .....	486
A.1.4 耦合微带线结构: MSTRP. FOR .....	487
A.1.5 耦合带状线结构 .....	489
A.2 频域分析 .....	489