

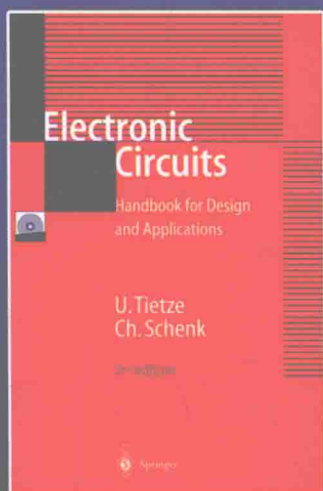
国外电子与通信教材系列

 Springer

# 电子电路设计 原理与应用(第二版)

## (卷III 通信电路)

**Electronic Circuits: Handbook  
for Design and Applications, Second Edition**



Ulrich Tietze

[德] Christoph Schenk 著  
Eberhard Gamm

李 离 瞿安连 译

 中国工信出版集团



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

# 电子电路设计原理与应用

(第二版)

(卷III 通信电路)

**Electronic Circuits Handbook for Design and Applications, Second Edition**

[德] Ulrich Tietze Christoph Schenk Eberhard Gamm 著

李 离 瞿安连 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

原德文畅销书 *Halbleiter-Schaltungstechnik* (《半导体电路技术》) 是学生、工程师和科学工作者而写作的, 内容包括了电子电路设计的所有主要方面, 其宗旨是帮助读者通晓实际应用的电路, 并进而有能力自己设计电路。该书德文版自 1969 年以来已发行了 14 版, 其中的第 12 版内容已全部译为英文, 为德文版完整英文译本的第 2 版, 并以 *Electronic Circuits: Handbook for Design and Applications* 为书名出版。本中文译本译自上述英文译本的第 2 版。为适应不同读者的需求, 中文译本分为 3 卷出版。其中, 卷 I 为器件模型和基本电路, 卷 II 为应用电路, 卷 III 为通信电路。

本书既可作为高等学校电子科学与技术、电子信息工程、自动化及仪器仪表等专业本科生和研究生有关电子电路方面的教科书或参考资料, 也可以作为上述领域工程技术人员的参考书。

Translation from the English language edition *Electronic Circuits: Handbook for Design and Applications*, Second Edition by U. Tietze, Ch. Schenk, E. Gamm.

Copyright © 2008 Springer -Verlag Berlin Heidelberg. Springer London is a part of Springer Science + Business Media.

All Rights Reserved.

Authorized Simplified Chinese language edition by Publishing House of Electronics Industry. Copyright © 2013.

本书中文简体字翻译版由 Springer-Verlag Berlin Heidelberg 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。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2012-3040

### 图书在版编目(CIP)数据

电子电路设计原理与应用: 第二版. 卷 III, 通信电路/(德)蒂泽 (Tietze, U.), (德)申克 (Schenk, C.), (德)伽姆 (Gamm, E.) 著; 李离 瞿安连译. —北京: 电子工业出版社, 2016.4

书名原文: *Electronic Circuits: Handbook for Design and Application*, Second Edition

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-28427-4

I. ①电… II. ①蒂… ②申… ③伽… ④李… ⑤瞿… III. ①电子电路—高等学校—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 057156 号

策划编辑: 陈晓莉

责任编辑: 陈晓莉

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

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: 787×1092 1/16 印张: 14.75 字数: 378 千字

版 次: 2016 年 4 月第 1 版 (原著第 2 版)

印 次: 2016 年 4 月第 1 次印刷

定 价: 49.00 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 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

# 本书原作者的中文版前言

## Preface

The purpose of this book is to help the reader to understand off the shelf circuits and to design his or her own circuitry. The book is written for students, practicing engineers, and scientists. It covers the fundamentals of digital and optoelectronic circuits. The book is a translation of parts of the 12<sup>th</sup> edition of the German bestseller *Halbleiter-Schaltungstechnik*.

The chapters dealing with digital circuit design begin with a description of *latching circuits* for pulse shaping and simple pulse generation. A discussion of *combinatorial circuits* follows, with an introduction to computational algebra for the formal description and the methods for simplifying Boolean equations. The internal circuitry of commercially available gates is then explained and the most common combinational circuits are presented.

*Sequential circuits* begin with the internal construction and the behavior of flip-flops and the systematic design of state diagrams. The most common sequential logic circuits are presented together with their implementation using PLDs and FPGAs. The designs of digital circuits are rounded off with a chapter on *semiconductor memories*. Here the most common variants are described and compared regarding their function and internal structure.

A chapter on *optoelectronic components* and circuits complemented the Chinese edition. Here particularly the methods for numerical and alphanumeric display are explained.

We hope that our chapter on amplifiers and communication circuits will soon be included in the Chinese translation, where we see the special strength of our book. Our homepage [www.tietze-schenk.com](http://www.tietze-schenk.com) offers updates, supplements and design examples. We encourage you to use our email address [mail@tietze-schenk.com](mailto:mail@tietze-schenk.com) for feedback and comments.

Erlangen, May 2013

Ulrich Tietze, Christoph Schenk, Eberhard Gamm

## 中文版前言译文

本书面向学生、从业工程师和科学工作者，旨在帮助他们了解现有电路，并进而设计自己的电路。原书中还包括数字电路和光电子电路的基础知识。本书译自德文畅销书 *Halbleiter-Schaltungstechnik* 第 12 版中的部分内容。

关于数字电路设计的章节，首先讨论了用于脉冲整形和简单脉冲产生的锁存电路。接着引入逻辑描述的代数运算，通过化简布尔方程的方法，来进行组合逻辑电路的讨论。然后，对一些市场流行的逻辑门内部电路进行了说明，并介绍了一些最通用的组合逻辑电路。

时序电路首先从触发器的内部结构和性能，以及状态图的系统化设计入手，然后介绍最常用的时序逻辑电路，以及如何利用 PLD 和 FPGA 实现这些时序逻辑电路。数字电路设计以半导体存储器一章作为结束，其中介绍了最常用的几种存储电路形式，并比较了它们的功能和内部结构。

若收入光电子元件与电路一章将会使中文译本更为完整，这一章特别介绍了数字和字母的显示方法。

我们期盼有关放大器和通信电路部分的中文译本尽快出版，从中我们将看到这本书的非凡影响力。我们的主页 [www.tietze-schenk.com](http://www.tietze-schenk.com) 提供着不断更新的资料、补遗以及设计示例。我们的 E-mail 地址是 [mail@tietze-schenk.com](mailto:mail@tietze-schenk.com)，欢迎大家通过 E-mail 反馈信息和意见。

乌利希·蒂泽，克里斯多夫·申克，艾伯哈特·伽姆

2013 年 5 月

于 埃朗根（德国）

# 译者前言

《电子电路设计原理与应用》的德文原版 *Halbleiter-Schaltungstechnik* (《半导体电路技术》)自 1969 年第一版问世以来,到 2013 年已发行了 14 版,作者为乌利希·蒂泽(Ulrich Tietze)、克里斯多夫·申克(Christoph Schenk)和艾伯哈特·伽姆(Eberhard Gamm)。该书历经 40 多年的不断修订,紧跟了电子技术的进步,在欧美一直畅销不衰。纵观全书有如下特点。

## 1. 重视基础

本书虽然没有对最基础的半导体物理进行讨论,但涉及基本电路分析时都用了较大篇幅,并在讨论中不回避数学推导。例如,对晶体管和基本放大电路均以大信号传输、小信号模型、频率响应和带宽、噪声,以及信号失真等五方面进行基本原理的分析,且视角和方法独特,考虑问题周到细致。对这些基本问题的掌握,将有助于正确应用集成电路构成性能优良的电子系统,做出创新性工作。此外,由于集成电路制造工艺的发展,以及设计方法学和设计工具的进步,越来越多的电路和系统设计工程师可能也会涉及集成电路本身的设计,所以深入了解集成电路内部结构原理和分析方法是有前瞻意义的。

## 2. 强调工程应用

为使读者尽快掌握电子技术应用,在第一部分的基础篇,对每一种基本电路都先从原理出发,并在量化分析的基础上推导模型的简化和工程近似的方法,然后用非常接近实际的典型数据(非真实数据)作为计算示例。在介绍典型集成电路时,特别注重于输入、输出特性的分析,这也是为了便于在工程设计中解决不同集成电路设计以及集成芯片之间的互连匹配问题。本书第二部分,用了多达 13 章的篇幅专门讨论电子电路在各方面的工程应用,其中包含大量特定功能模块的分析、设计实例。这些经实践考验过的电路,也许只要稍做修改就能应用到读者自己的电子设计中去。本书第三部分为通信电路,涉及基本理论、发射机与接收机、无源元件、高频放大器和混频器等内容,紧密结合通信电子电路应用的新进展进行了讨论。

## 3. 内容丰富

本书所讨论的内容涉及有关电子电路的几乎所有问题。书中给出了数百个电路计算示例和设计实例,包含 1771 幅图示说明和大量芯片参数的列表比较。全书内容全面,确如英文第二版的副标题: *Handbook for Design and Applications* 所示,可以作为电子电路设计和应用的手册。

历史上该书曾有俄文译本两版(1982 和 2007),波兰文译本三版(1976、1987 和 1996),匈牙利文译本三版(1974、1981 和 1990),西班牙文译本一版(1983)。英文译本共有三版:1978、1991 和 2008。其中,1978 年版以 *Advanced Electronic Circuits* 为书名出版,只包含了该书的第二部分;2008 年英文版书名为 *Electronic Circuits Handbook for Design and Applications*,译自德文第 12 版,为德文版完整英译的第 2 版。

*Halbleiter-Schaltungstechnik* 第 5 版曾于 1984 年在未经版权授权的情况下翻译为中文,以《高级电子电路》为书名出版。时光已历近 30 年,我们认为有必要将该书更新的版本介绍给我国的读者。

遗憾的是译者不通德文,本中文译本的翻译不得不以 2008 年英译本第 2 版为基础,并参照 2010 年的德文 13 版做了部分订正。由于原书厚达 1543 页,为适应不同读者的需求,中文译本分为 3 卷出版。其中卷 I 摘取了原书第一部分的核心:第 1~5 章,主要是特色明显的器件特性、结构、模型和基本电路的论述。原书第 6~10 章为数字电路,因为我国现行数字电路

教材一般都讨论得更为详细，并且这几章内容与本书其他各章相关性不大，故决定舍去不译。中文译本卷Ⅱ的内容与原书第二部分对应，主要介绍电子电路的应用，但删除了其中特色不甚突出的有关光电子元件的第23章。卷Ⅲ的内容对应原书第三部分，为通信电路，内容较新，全部译出。此外，为节省篇幅，本书还略去了附录和索引。全部章节号均按中文译本的取舍分卷重新排列。

本书可作为高等学校电子科学与技术、电子信息工程、自动化及仪器仪表等专业本科生和研究生有关电子电路方面的教科书或参考资料，也可以作为上述领域工程技术人员的参考书。

参加本书翻译工作的有张林（卷Ⅰ的第1、第3、第5章）、邓天平（卷Ⅰ的第2章和卷Ⅱ全部）、张浩（卷Ⅰ的第4章）和李离（卷Ⅲ全部），瞿安连审译并统一整理了全部书稿。

感谢电子工业出版社高等教育分社的领导和编辑们对本书翻译动议的支持到购买版权、编辑和发行所做的努力，感谢谭海平社长的关心和陈晓莉编审细致入微的工作，感谢绘图员重绘了全部图表。没有大家的努力，本中文译本今天能够付梓是难以想象的。

由于译者学术水平和英语水平有限，译文肯定存在未发现的失误或不当之处，敬请读者给予批评指正。

瞿安连

2016年2月于华中科技大学

# 全书总目录

## 卷 I 器件模型和基本电路

- 第 1 章 二极管
- 第 2 章 双极型晶体管
- 第 3 章 场效应晶体管
- 第 4 章 放大器
- 第 5 章 运算放大器

## 卷 II 应用电路

- 第 1 章 运算放大器的应用
- 第 2 章 受控源和阻抗变换器
- 第 3 章 有源滤波器
- 第 4 章 信号产生器
- 第 5 章 功率放大器
- 第 6 章 电源电路
- 第 7 章 模拟开关和采样—保持电路
- 第 8 章 数模和模数转换器
- 第 9 章 数字滤波器
- 第 10 章 测量电路
- 第 11 章 传感器和测量系统
- 第 12 章 电子控制系统

## 卷 III 通信电路

- 第 1 章 基础知识
- 第 2 章 发射机和接收机
- 第 3 章 无源元件
- 第 4 章 高频放大器
- 第 5 章 混频器



# 目 录

## 卷III 通信电路

第 1 章 基础知识	1
1.1 通信系统	1
1.2 传输信道	3
1.2.1 有线电缆	3
1.2.2 无线通信	11
1.2.3 光纤通信线路	16
1.2.4 几种传输信道的比较	19
1.3 反射系数和 $S$ 参数	20
1.3.1 波参数	20
1.3.2 反射系数	21
1.3.3 波源	26
1.3.4 $S$ 参数	27
1.4 调制方式	34
1.4.1 幅度调制	36
1.4.2 频率调制	43
1.4.3 数字调制方式	49
1.5 通信信道的多路复用和分组	63
1.5.1 多路复用操作	63
1.5.2 双工运行	69
参考文献	69
第 2 章 发射机和接收机	71
2.1 发射机	71
2.1.1 模拟方式调制的发射机	71
2.1.2 数字方式调制的发射机	75
2.1.3 本机振荡频率的产生	76
2.2 接收机	77
2.2.1 直接检波式接收机	78
2.2.2 超外差式接收机	78
2.2.3 增益控制	83
2.2.4 接收机的动态范围	88
2.2.5 数字方式调制的接收机	93
参考文献	105

第3章 无源元件	106
3.1 高频等效电路	106
3.1.1 电阻器	106
3.1.2 电感器	108
3.1.3 电容器	110
3.2 滤波器	111
3.2.1 LC 滤波器	111
3.2.2 介质滤波器	116
3.2.3 声表面波滤波器	117
3.3 阻抗变换电路	120
3.3.1 阻抗匹配	121
3.3.2 耦合	128
3.4 功率分路器和桥接岔路	130
3.4.1 功率分路器	131
3.4.2 桥接岔路	132
参考文献	135
第4章 高频放大器	136
4.1 集成高频放大器	136
4.1.1 阻抗匹配	136
4.1.2 噪声系数	139
4.2 用分立晶体管构成高频放大器	141
4.2.1 广义分立晶体管	141
4.2.2 设置工作点(偏置)	142
4.2.3 对单级放大器进行阻抗匹配	145
4.2.4 多级放大器中的阻抗匹配	151
4.2.5 对反向传输的抵消	152
4.2.6 改善阻抗匹配的特殊电路	154
4.2.7 噪声	156
4.3 宽频带放大器	158
4.3.1 宽频带放大器的原理	158
4.3.2 宽频带放大器的设计	160
4.4 功率增益	162
4.4.1 直接功率增益	163
4.4.2 插入增益	164
4.4.3 传输增益	165
4.4.4 资用功率增益	165
4.4.5 各种增益定义的比较	166
4.4.6 在双侧阻抗匹配下的增益	166
4.4.7 晶体管的最大功率增益	167
参考文献	169

第5章 混频器	170
5.1 理想混频器的工作原理	170
5.1.1 升频转换混频器	171
5.1.2 降频转换混频器	171
5.2 实际混频器的工作原理	173
5.2.1 加法混频	173
5.2.2 乘法混频	180
5.3 二极管混频器	184
5.3.1 非平衡二极管混频器	184
5.3.2 单平衡二极管混频器	193
5.3.3 双平衡二极管混频器	195
5.3.4 实际应用的二极管混频器	200
5.4 晶体管混频器	202
5.4.1 单平衡混频器	202
5.4.2 双平衡混频器（吉尔伯特混频器）	212
参考文献	222
本书的主要符号	223

# 第1章 基础知识

## 1.1 通信系统

如今,通信系统与电力系统一样,已成为人们日常生活的一部分。除了归类于传统有线系统的模拟电话和归类于经典无线系统的模拟广播与电视之外,还有无数更加现代化的通信系统,如综合业务数字网(Integrated Services Digital Network, ISDN)电话、无绳电话及移动电话、经有线宽带网或卫星传输的广播与电视、计算机的调制解调器、无线鼠标及键盘、车库门的无线开启装置、将启动装置集成在车钥匙中的汽车遥控锁等。此外还有如互联网那样,由各种不同系统利用特定的网络协议组合起来的混合系统。

如果传输系统在其传输信道的接口应用了调制,那么它就是一种通信系统。根据这一判定准则,通信工程应当理解为调制方式的理论。相反,那些不存在调制的传输系统[诸如 V.24 和 SCSI (Small Computer System Interface) 一类的计算机接口]只是规定了直接将信号越过较长距离传输的专用线路和驱动器。因此,通信系统的特征是:在发送端使用调制器,并对应地在接收端使用解调器。

图 1.1 所示为模拟通信和数字通信系统的组成部分;各部分按从上到下的顺序构成发送机,按从下至上的顺序组成接收机。发送机与接收机之间的传输媒介称为信道,它可以是有线电缆,也可以是带发射天线和接收天线的无线线路。

在模拟系统中,需要传送的有用信号  $s(t)$  直接提供给模拟调制器。调制器的输出信号经发送放大器放大后送至信道。大多数模拟调制器能产生所期望的发送频率的信号,在这种情况下,发送放大器仅由一级或多级级联的放大器组成。而在其他情况下,调制器会产生一个中频信号,然后须用包含在发送放大器中的混频器将中频转换成发送频率。信道会造成信号衰减,在无线传输线路中可能高达 150 dB (例如,将  $1\text{kW}=10^3\text{W}$  的发送功率衰减至  $1\text{pW}=10^{-12}\text{W}$  的接收功率)。在极端情况下,接收信号功率只是略高于无法避免的热噪声功率。在接收端,接收放大器应将信号放大到足以满足解调器工作的大小。因为到发送机的距离会变化,这就需要增益控制,以确保即使接收信号电平变化很大时,仍能有稳定的信号电平送达解调器。在多路复用的无线和有线系统中,接收放大器还必须进行频率选择,将所期望的输入信号与毗邻频率区域的信号分离。这里,不但要用一些滤波器,而且还要用一或两个混频器来完成频率转换。最终,模拟解调器从所选放大信号中产生接收的有用信号  $r(t)$ 。

数字通信系统含有模拟通信系统的所有组成部分,只是其调制器和解调器具有数字化设计结构,并通过数模(DA)或模数(AD)转换器连接到放大器。有时将这些转换器视为调制器或解调器不可缺少的组成部分而不再单独标示出来;在这种情况下,数字调制器含有数字输入和模拟输出,而数字解调器则含有模拟输入和数字输出。于是,这些对应于模拟系统的各个组成部分也能适用于数字系统了。数字系统在发送机中增加了信道编码电路,其中还引入冗余位,这些冗余位可以是校验位、奇偶位、校验和的方式,或者是一个特定代码的方式,它们在接收机中用于纠错。有些系统还另外运用信源编码与信源解码,以减少所传输的数据量。信源编

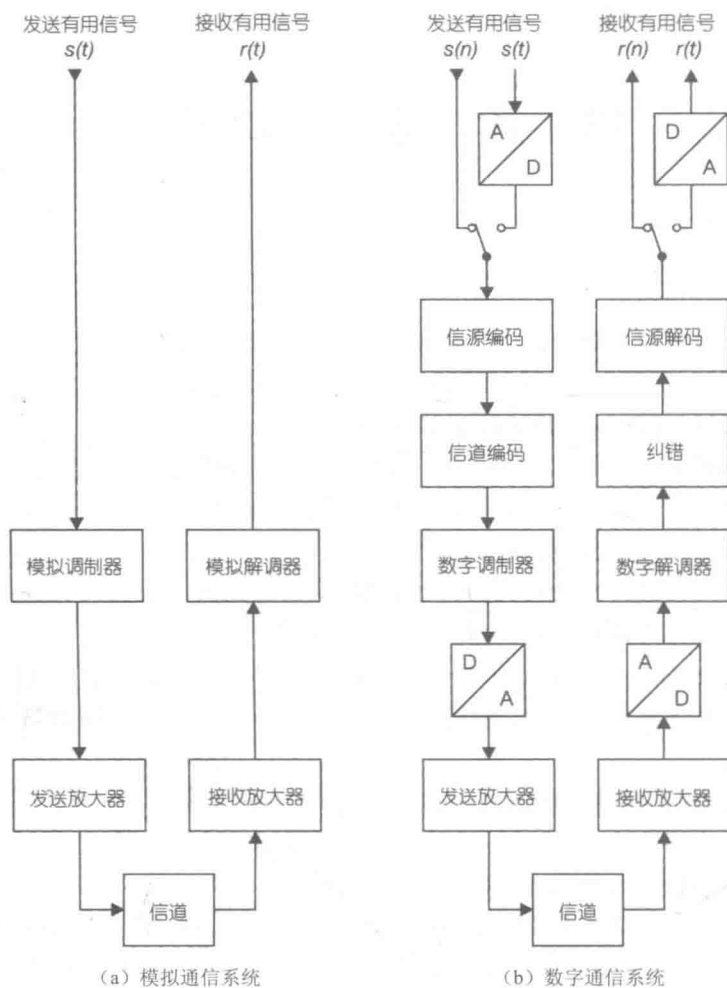


图 1.1 通信系统的组成部分

码技术通常不是无损传输，即信号在解码过程中并不能精确重构。然而，信源编码技术以生理学研究成果为基础，确定了人类视听器官难以觉察到的语音或图像信号中的某些部分。这种方法已成为发送数字信号  $s(n)$  和接收数字信号  $r(n)$  的标准。为了传送模拟信号，要求在发送端和接收端配置附加转换器，例如数字电话就是如此：所传送的有用信号  $s(t)$  源自于麦克风，而收到的有用信号  $r(t)$  再用扬声器复现。

与数字系统相比，模拟系统的部件较少，通常比相应数字系统部件的设计更简单。模拟系统的一项不足之处在于，信号传输过程中带来的噪声和其他干扰不可能再从信号中分离出去，因而导致信噪比急剧下降，尤其是远距离信号传输。此外，模拟调制方式不能充分利用有效带宽；为了达到高性能的传输，接收机输入端要求相对更高的信噪比。

数字系统采用的调制方法复杂，相比模拟系统，可得到明显更高的带宽利用率。只要不超过一定的幅值，噪声和其他干扰就能通过解调器的阈值鉴别彻底消除。如果超过特定幅值，则会做出初始的误差估计；如果出错率低于一定限度，上述误差可通过纠错方法加以修正。这样，即使接收输入端的信噪比很低，数字系统也能提供近乎理想的信号传输性能。随着新系统的不断引入导致传输频率资源短缺，因此，借助较复杂的调制方法以更好地利用带宽也就成为非常重要的问题。

图 1.2 对模拟和数字通信系统最重要的特性进行了比较，其中也包括数字系统具有的共同优点，如低漂移特性和校准的简单性。有些特性相互重叠：例如，数字系统较高的带宽利用率是因调制方法更复杂所致，而接收输入端对信噪比的要求较低则可允许降低发射功率。

特征	模拟	数字
电路复杂度	低	高
带宽利用率	差	好~很好
调制方法的复杂度	低	高
接收输入端的信噪比要求	高	低
发送功率要求	高	低
传输性能：		
低信噪比条件下	差	很高
高信噪比条件下	高	理想
算术运算精度	差	高~理想
温度漂移	有	无
老化漂移	有	无
制造中校准过程的复杂度	高	低

图 1.2 模拟和数字通信系统的特性

## 1.2 传输信道

下面按工业应用的先后顺序来讨论传输信道：**有线电缆、无线线路和光纤**。尽管技术上存在差异，但是所有类型的信道都有一个共同点，即都是基于电磁波进行传输。

### 1.2.1 有线电缆

通信系统主要使用**同轴电缆**和**双芯线**。图 1.3 所示为这两种电缆及其电场电力线  $E$  和磁场磁力线  $H$  的截面图，以及它们的特征尺度。同轴电缆是一种**屏蔽线**，因为电磁场被约束在内导体和外导体之间的空间内，因此可以消除它对相邻元件的影响<sup>①</sup>。与同轴电缆不同，由于存在电容耦合(电场)和电感耦合(磁场)，**无屏蔽的双芯线**所传输的信号可能辐射进入相邻元件或其他无屏蔽的平行电缆，这一现象称为**串扰**。

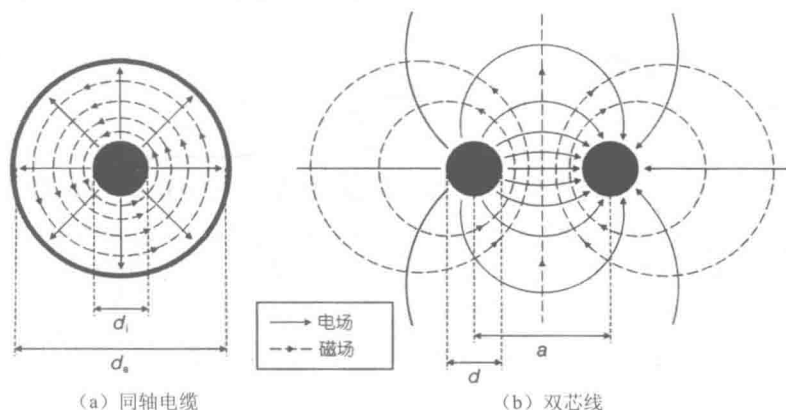


图 1.3 通信电缆的截面图及其电力线和磁力线

<sup>①</sup> 实际应用中的许多同轴电缆的外导体并不是完全密封的，因此电缆外部也存在微弱电磁场。

同轴电缆内外导体之间充满以导体为中心的绝缘介质，介质材料通常为聚四氟乙烯（ $\epsilon_r=2.05$ ）或聚苯乙烯（ $\epsilon_r=2.5$ ）。双芯线的两根导线分别有聚乙烯包层，然后导线与包层或绞合在一起，或以带状并在一起。

### 场特性阻抗和传播速度

电磁波传播中电场与磁场强度之比定义为场特性阻抗  $Z_F$ ，由麦克斯韦方程组<sup>[1.1]</sup>可得

$$Z_F = \frac{|E|}{|H|} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = 120\pi\Omega \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \stackrel{\mu_r=1}{=} \frac{120\pi\Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{377\Omega}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

由于电缆通常不含磁性材料，故可假设  $\mu_r=1$ 。场传播速度为

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \stackrel{\mu_r=1}{=} \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.1)$$

其中， $c_0 = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，为光在真空中的传播速度。对于介电常数在  $\epsilon_r \approx 2 \sim 2.5$  的常用电介质来说，场传播速度大约为  $2 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，即光速的三分之二。

### 传输线特性阻抗

电磁波传播中电压与电流之比定义为传输线特性阻抗  $Z_W$ 。从导体1至导体2，沿电力线积分可确定电压，沿磁力线积分可确定电流，从而计算出  $Z_W$ <sup>[1.1]</sup>：

$$V = \int_1^2 E dr, \quad I = \oint H dr$$

由此导出

$$Z_W = \frac{V}{I} = Z_F k_G = Z_F \begin{cases} \frac{1}{2\pi} \ln \frac{d_a}{d_i} & \text{同轴电缆} \\ \frac{1}{\pi} \ln \left( \frac{a}{d} \sqrt{\left(\frac{a}{d}\right)^2 - 1} \right) & \text{双芯线} \end{cases}$$

传输线特性阻抗由场特性阻抗  $Z_F$  和表达传输线的几何因子  $k_G$  表征，代入  $Z_F$  可得

$$Z_W = \begin{cases} \frac{60\Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{d_a}{d_i} & \text{同轴电缆} \\ \frac{120\Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left( \frac{a}{d} \sqrt{\left(\frac{a}{d}\right)^2 - 1} \right) & \text{双芯线} \end{cases} \quad (1.2)$$

在实际应用中，同轴电缆常用的特性阻抗为  $Z_W = 50\Omega$ （例如  $\epsilon_r = 2.05$ ， $d_i = 2.6 \text{ mm}$ ， $d_a = 8.6 \text{ mm}$ ）和  $Z_W = 75\Omega$ ，双绞线则为  $Z_W = 110\Omega$ 。双芯线的特性阻抗  $Z_W$  的计算较为困难，因为电磁场同时存在于电缆包层内部（ $\epsilon_r > 1$ ）和周边空间（ $\epsilon_r = 1$ ），必须在式（1.2）中使用  $\epsilon_r$  的实际作用值，因此只能通过电磁场仿真或通过实际测量来确定。

传输线特性阻抗不是一种呈现出欧姆特性的电阻，所以不可能用欧姆表或阻抗计来测量，它仅仅描述电磁波电压与电流之间的比值。稍后，读者将了解到传输线中一般存在两个电磁波：以  $V_f = Z_W I_f$  表达的入射波（正向波）和以  $V_r = Z_W I_r$  表达的反射波。利用等式  $V = V_f + V_r$  及  $I = I_f - I_r$ ，可计算出两导体间的电压  $V$ （可测量），以及流经电缆的电流  $I$ 。

实际当中，传输线特性阻抗这一参数通常简称为特性阻抗，而省去前面的“传输线”3个

字。它经常以符号  $Z_L$  或  $Z_0$  来表达, 其中  $Z$  表示复阻抗, 不过有时也使用符号  $R_w$ 、 $R_L$  和  $R_0$ 。

### 传输方程

一小段传输电缆可以用 4 个元件组成的等效电路来描述 (参见图 1.4), 这里, 需要应用下列 4 个单位长度参数<sup>[1.1]</sup>:

——单位长度电感  $L'$ : 表示单位长度储存在磁场中的能量, 单位为 H/m。

——单位长度电容  $C'$ : 表示单位长度储存在电场中的能量, 单位为 F/m。

——单位长度电阻  $R'$ : 用来衡量导体中的电阻损耗, 单位为  $\Omega/m$ 。在低频情况下该参数相当于导体的直流电阻; 当频率在大约 10 kHz 以上时, 因存在电流位移 (集肤效应), 该值与频率的平方根成正比增大, 即  $R' \sim \sqrt{f}$ , 这将导致衰耗随频率的增高而加剧。

——单位长度漏电  $G'$ : 用来衡量介质的绝缘电导和极化损失, 单位为 S/m。绝缘电导通常小到可以忽略的程度, 而极化损失则与频率成正比增大, 即  $G' \sim f$ , 但在工程应用中一般低于前述电阻损耗。

根据图 1.4, 可计算出电压和电流

$$V_2 = V_1 - (R'dz + j\omega L'dz)I_1$$

$$I_2 = I_1 - (G'dz + j\omega C'dz)V_2$$

代入

$$V_2 = V_1 + dV, \quad I_2 = I_1 + dI$$

并以  $dz$  除之, 然后进行极限转换

$$dz \rightarrow 0, \quad V_1 \rightarrow V_2 = V, \quad I_1 \rightarrow I_2 = I$$

导出

$$\frac{dV}{dz} = -(R' + j\omega L')I \tag{1.3}$$

$$\frac{dI}{dz} = -(G' + j\omega C')V \tag{1.4}$$

将式 (1.3) 对  $z$  求导, 然后将式 (1.4) 代入, 于是得到传递方程

$$\frac{d^2V}{dz^2} = (R' + j\omega L')(G' + j\omega C')V = \gamma_L^2 V \tag{1.5}$$

该方程的通解为

$$V(z) = V_1 e^{-\gamma_L z} + V_2 e^{\gamma_L z} \tag{1.6}$$

且传播常数

$$\gamma_L = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \tag{1.7}$$

对于低损耗的传输线, 即使频率在较低的 kHz 范围, 下列条件仍然成立:  $j\omega L' \gg R'$ ,  $j\omega C' \gg G'$ 。

因此, 传播常数<sup>[1.1]</sup>为

$$\gamma_L \approx \underbrace{\frac{R'}{2} \sqrt{\frac{C'}{L'}} + \frac{G'}{2} \sqrt{\frac{L'}{C'}}}_{\alpha_L} + j \underbrace{\omega \sqrt{L'C'}}_{\beta_L} \tag{1.8}$$

其中,  $\alpha_L$  为衰减常数;  $\beta_L$  为相位常数。在无损耗电缆 ( $R' = G' = 0$ ) 中, 衰减常数为零。

为作进一步说明, 取时间函数

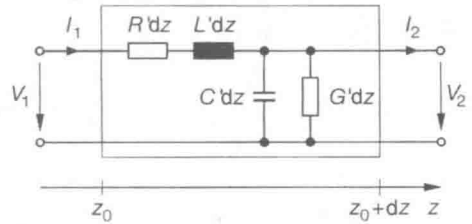


图 1.4 长度为  $dz$  的一小段传输电缆的等效电路



$$\begin{aligned}
 u(t, z) &= \operatorname{Re}\{V(z)e^{j\omega t}\} \stackrel{\text{式 (1.6)}}{=} \operatorname{Re}\{V_f e^{j\omega t - \gamma_L z} + V_r e^{j\omega t + \gamma_L z}\} \\
 &= \underbrace{|V_f| e^{-\alpha_L z} \cos(\omega t - \beta_L z + \varphi_f)}_{\text{正向波}} + \underbrace{|V_r| e^{\alpha_L z} \cos(\omega t + \beta_L z + \varphi_r)}_{\text{反射波}} \\
 &= u_f(t, z) + u_r(t, z)
 \end{aligned}$$

它由正向波  $u_f(t, z)$  和反射波  $u_r(t, z)$  构成。图 1.5 所示为这两个波在给定时间  $t_0$ ，以及四分之一周期之后的波形。可以看出，两个波以相反的方向传播，并且在其传播方向上逐渐衰减。传播速度  $v$  可由余弦函数最大值的位移量来确定。就正向波而言，下式成立

$$\omega t - \beta_L z + \varphi_f = 0 \quad \Rightarrow \quad \boxed{v = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{\beta_L} = \frac{1}{\sqrt{L'C'}}} \quad (1.9)$$

对于反射波来说，其传播速度的绝对值与正向波相同，但符号相反；这再一次表明，两个波以相反的方向传播。波长  $\lambda$  对应于两个相邻最大值之间的距离，这就要求余弦函数的幅角中由  $z$  决定的部分要跨越  $2\pi$  范围

$$\beta_L \lambda = 2\pi \quad \Rightarrow \quad \boxed{\lambda = \frac{2\pi}{\beta_L} = \frac{1}{f\sqrt{L'C'}} = \frac{v}{f}} \quad (1.10)$$

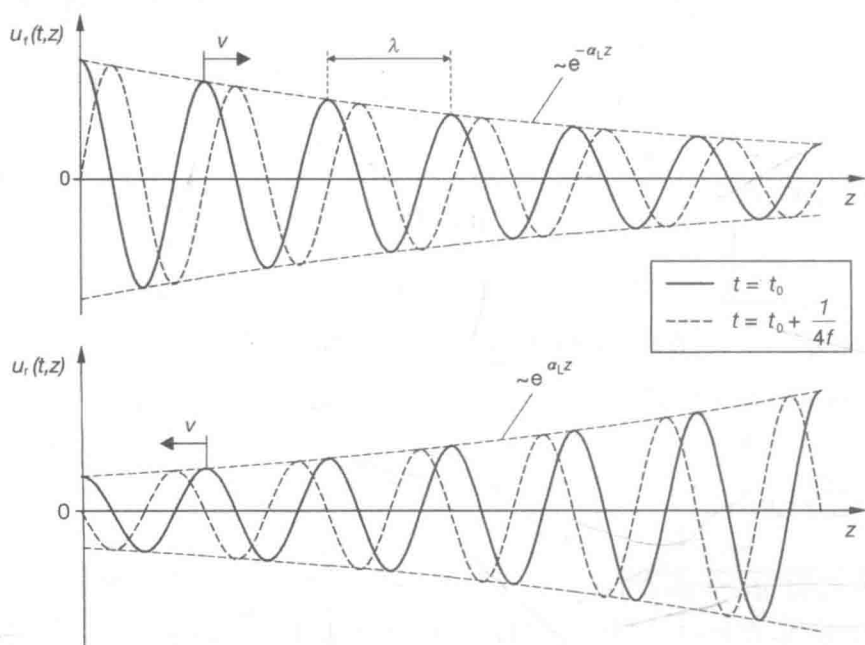


图 1.5 给定时间  $t_0$  以及四分之一周期之后传输线上的正向波(上)和反射波(下)

为计算传输线上的电流  $I$ ，利用式 (1.3) 对  $I$  求解，将式 (1.6) 所表达的  $V$  值代入

$$\begin{aligned}
 I &= -\frac{1}{R' + j\omega L'} \frac{dV}{dz} = -\frac{1}{R' + j\omega L'} (-\gamma_L V_f e^{-\gamma_L z} + \gamma_L V_r e^{\gamma_L z}) \\
 &= \sqrt{\frac{G' + j\omega C'}{R' + j\omega L'}} (V_f e^{-\gamma_L z} - V_r e^{\gamma_L z})
 \end{aligned}$$