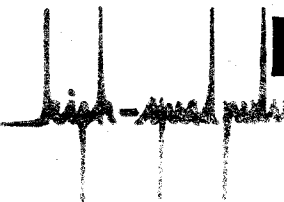


何小艇 编著



高速脉冲技术

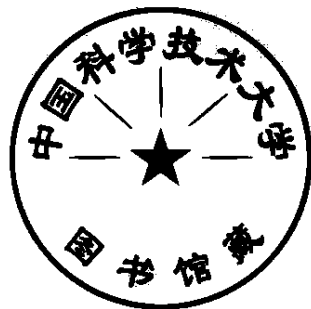


浙江大学出版社

内 容 提 要

本书系统地阐述了宽度为纳秒乃至皮秒量级的高速脉冲的产生、传输和测量(尤其是传输与产生)等问题,它较深入地分析了包括匹配、反射、交扰在内的一系列传输线效应,并给出了传输线暂态的分析方法;较详细地介绍了使用阶跃管、隧道管、雪崩管、俘越管及各种常用的超高速大规模集成电路产生高速脉冲的各种电路。同时特别注意用基本原理来解决工程实现上的各种问题。最后还就高速脉冲技术所涉及的主要测量仪器和测量技术,以及高速脉冲在通信、数据处理和计算机等领域中的应用等问题进行了讨论。

本书可作为大专院校电子类、电器类及仪器仪表等专业的学生及研究生的教材。也可供从事通信、雷达、电子对抗、仪器仪表及计算机硬件等方面工作的工程技术人员参考。



高 速 脉 冲 技 术

何小艇 编 著

责任编辑 方 敏

浙江大学出版社出版

浙江大学印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

开本: 850×1168 1/32 印张: 12.8125 字数: 321千字

1990年10月第1版 1990年10月第1次印刷

印数: 0001~2000

ISBN 7-308-00625-5/TP·042 定价: 3.25元

前 言

高速脉冲技术是研究纳秒以至皮秒量级的高速脉冲的产生、传输和测量等问题的一门学科，它是随着现代社会对于信息的高速传输和处理的需要而发展起来的。近十余年来，通信、雷达、电子对抗和计算机硬件等领域的重要发展趋向之一就是实现实时控制和数据的实时处理。例如，现代社会最迫切的需要之一是各种信息网系统的建立，像军事上的C³I系统、国家的经济信息网、气象信息网及各种局部网。它们包括高速的传真通讯、高比特率的数据传输（信道数据率约由384Kb/s到1.5Mb/s）、视频会议（32—400Mb/s），而远程中继光纤通信预计到90年代将达到几十吉比特率的数据率。又如，巨型计算机的发展将使指令周期达到30纳秒以下，为了实现高速运算，不仅在计算机之间的联网连接上要达到上述的高数据率，而且在计算机与其外部设备之间的连接，甚至计算机内部的连接也要采用高数据率的光纤。雷达技术的发展则要求能够在微波频率上直接实现数字信号处理。无疑，这些都要以高速脉冲技术为基础。此外，时域电磁学（包括时域计量学）是一门新兴的很有发展前途的学科，高速脉冲技术也是时域电磁学的重要基础之一。

高速脉冲技术是以低频脉冲技术为基础的，但它有了质的飞跃，其中最主要的就是必须用微波技术的观点来处理各种器件、电路和系统问题，其中包括超高速集成电路的设计。可以毫不夸张地说，任何一个高数据率系统的建立，除了系统设计师的努力

外，还必须要有脉冲技术、微波技术和半导体集成电路与器件三方面人员的通力合作。本书就是试图在这三方面技术人员之间建立起一个桥梁，使之在这方面有共同的语言。

本书共有四章，在编写中力求应用基本理论解决工程应用中的实际问题。第一章是高速脉冲的传输，包括在传输线中的传输以及在自由空间和有耗介质中的传输。作者在这里提出了自己的分析传输线暂态的瞬时值等效电路法，它克服了目前应用的反射系数法及图解法的局限性，为分析无耗传输线的各种暂态应用及进行计算机模拟提供了一个数学模型，成为分析带有传输线的高速脉冲电路的有力工具，并贯穿于全书的各章节中。第二章是高速脉冲的产生。在介绍各种高速脉冲产生电路的工作原理、设计与系统参数选择时，遵照理论联系实际、理论指导实践的原则，给出了许多实际电路的实验结果及使用注意事项，力求对工程应用有指导意义。此外，还搜集了尽可能多的较为新颖的实用高速脉冲电路，但在内容的安排上又注意了系统性，不使本书成为一本电路集锦。在第三章中介绍了有关高速脉冲的测量问题，较详细地讨论了取样示波器和时域反射测量装置。第四章扼要介绍了高速脉冲技术在各个领域中的应用，帮助读者开拓视界，了解高速脉冲技术的发展方向。本书力图全面反映近20年来高速脉冲技术领域的成果与成就，为读者进一步研究高速脉冲技术提供尽量多的线索。

参加本书编写的有强伯涵同志（第一章第二节、第四章），沙济彰同志（第二章第二节部分内容和第二章第五节），其余章节由何小艇同志编写，全书由何小艇同志整理定稿。章守苗同志为第二章第七节提供了大量数据和资料，在编写中作者还引用了浙江大学无线电系学生的专题实验报告的内容及数据。

在本书编写过程中还得到了西北电讯工程学院胡征教授、保铮教授，浙江大学无线电系姚庆栋教授、荆仁杰教授的积极支持

及指导，在此谨致衷心的感谢。

由于我们水平不高，书中难免有不少错误和欠妥之处，殷切希望读者批评指正。

编 者

1986年8月于杭州六和塔

目 录

第一章 高速脉冲的传输	1
§1-1 高速脉冲在传输线中的传输	1
§1-1-1 传输线基本概念	2
§1-1-2 瞬时值等效电路及其应用	27
§1-1-3 匹配	55
§1-1-4 交扰	79
§1-1-5 传输线变压器	99
§1-1-6 超导传输线	121
§1-2 高速脉冲在自由空间及有耗介质中的辐射、 传播与散射	124
§1-2-1 概述	124
§1-2-2 高速脉冲在自由空间中的辐射	125
§1-2-3 高速脉冲的传播和散射	134
附录1-A 不匹配传输线充电输出端电压变化规律推导	141
附录1-B 瞬时值等效电路的推导	144
附录1-C 耦合微带线微分方程组求解	147
参考文献	149
第二章 高速脉冲的产生	153
§2-1 隧道二极管脉冲产生电路	154

§2-1-1	隧道二极管的原理及特性·····	154
§2-1-2	隧道二极管脉冲产生电路·····	158
§2-2	雪崩晶体三极管脉冲产生电路·····	165
§2-2-1	雪崩晶体三极管的原理及特性·····	165
§2-2-2	雪崩晶体三极管小功率电路·····	175
§2-2-3	雪崩晶体三极管大功率电路·····	177
§2-2-4	雪崩晶体三极管的工程筛选与动态测试·····	186
§2-3	阶跃恢复二极管脉冲产生电路·····	188
§2-3-1	阶跃恢复二极管的原理及特性·····	188
§2-3-2	阶跃恢复二极管脉冲产生电路·····	194
§2-4	俘越二极管脉冲产生电路·····	201
§2-4-1	俘越二极管的原理及特性·····	201
§2-4-2	俘越二极管脉冲产生电路·····	207
§2-5	大功率亚纳秒脉冲产生电路·····	210
§2-5-1	赫芝发生器·····	210
§2-5-2	皮秒光电脉冲产生器·····	216
§2-6	双向负阻晶体管脉冲产生电路·····	223
§2-6-1	双向负阻晶体管的原理及特性·····	223
§2-6-2	双向负阻晶体管脉冲产生电路·····	225
§2-7	射极耦合逻辑(ECL)脉冲产生电路·····	232
§2-7-1	ECL集成电路特点及特性·····	232
§2-7-2	ECL脉冲产生电路·····	232
§2-8	转移电子器件逻辑电路·····	239
§2-8-1	转移电子器件基本性能及其应用·····	240
§2-8-2	转移电子器件逻辑电路·····	242
§2-9	超导逻辑集成电路·····	244
§2-10	砷化镓集成电路·····	246
参考文献 ·····		250

第三章 高速脉冲的测量 255

§3-1 宽带示波器.....	259
§3-1-1 示波管.....	263
§3-1-2 宽带集成放大系统.....	266
§3-1-3 探头.....	275
§3-1-4 扫描系统.....	279
§3-2 取样示波器.....	285
§3-2-1 取样示波器基本原理.....	286
§3-2-2 垂直偏转系统.....	294
§3-2-3 等效时间顺序取样水平偏转系统.....	307
§3-2-4 工作方式介绍.....	310
§3-2-5 取样门.....	317
§3-2-6 光电结合取样示波器.....	334
§3-2-7 皮秒波形的测量.....	336
§3-3 时域反射测量.....	339
§3-3-1 测量原理.....	340
§3-3-2 测量装置及测量方法.....	352
§3-3-3 TDR的应用.....	360
§3-3-4 时域自动网络分析仪 (TDANA)	365
附录3-A 公式(3.3.12)的推导	367
附录3-B 系统最小上升时间的限制的分析	368
参考文献.....	370

第四章 高速脉冲的应用 373

§4-1 高速脉冲在高信息率系统中的应用.....	373
§4-1-1 高速数字通信.....	373
§4-1-2 雷达.....	381

§4-1-3 计算机.....	382
§4-1-4 线路设计和布局中的几个问题.....	383
§4-2 时域特征分析.....	388
§4-3 探地雷达.....	394
§4-4 其它应用.....	397
参考文献	398

第一章 高速脉冲的传输

对于高速脉冲电路而言，其基本内容首先应是高速脉冲的产生，然后才是高速脉冲的传输。但是为什么把高速脉冲的传输放在第一章来介绍呢？这是因为在高速脉冲产生电路中还要用到有关高速脉冲传输的理论及技术。所以高速脉冲的传输就成为高速脉冲技术的基础。

传输高速脉冲的媒质有传输线、自由空间和有耗介质。虽然人们常常遇到的是高速脉冲在传输线中的传输，但后两种媒质在时域电磁学中却有着重要的地位。如在空间目标识别、通信、探地雷达等应用中都与高速脉冲在自由空间及有耗介质中的传播特性有着紧密联系。由于高速脉冲在传输线、自由空间和有耗介质中的传播特性大不相同，所以必须分析加以介绍。

§1-1 高速脉冲在传输线中的传输

我们知道，纳秒、皮秒高速脉冲的频谱分量可扩展到千兆赫以上，此时几厘米长的导线都必须考虑成传输线。因此传输线在高速脉冲技术中占有非常重要的地位。从某种意义上来讲，高速脉冲电路就是高速器件和传输线。

本节首先介绍传输线的基本概念，然后介绍传输线暂态的各种分析方法以及对于匹配、反射、干扰等具体问题的分析与解决办法。最后介绍传输线变压器的原理和设计原则以及超导传输线基本原理。

§1-1-1 传输线基本概念

一 正弦信号激励下的稳态解

常用的传输线形式有双导线、单线、同轴线、微带、介质带以及双绞线等，它们的结构如图1.1.1所示。我们可用图1.1.2的电路来表示它们。由于在高速脉冲信号中高频成分的波长 λ 与传

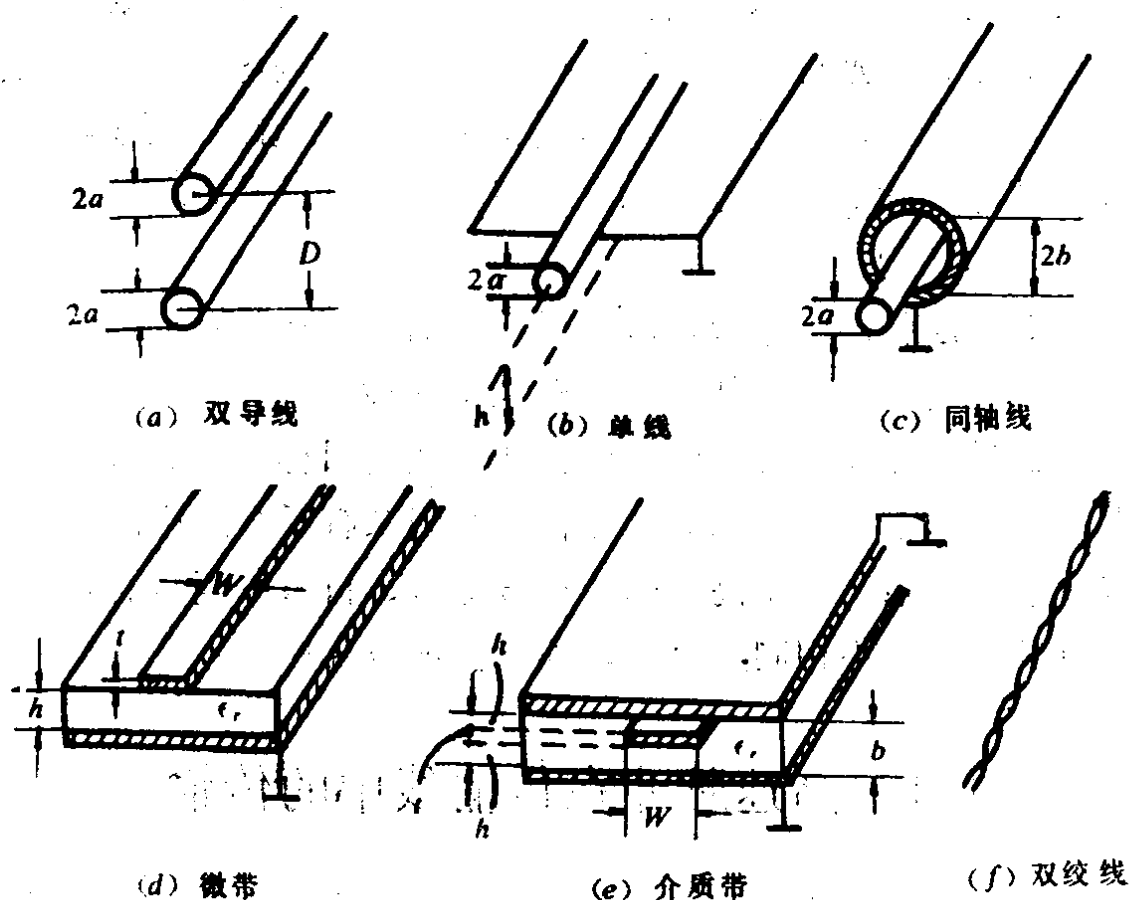


图1.1.1 各种传输线的结构

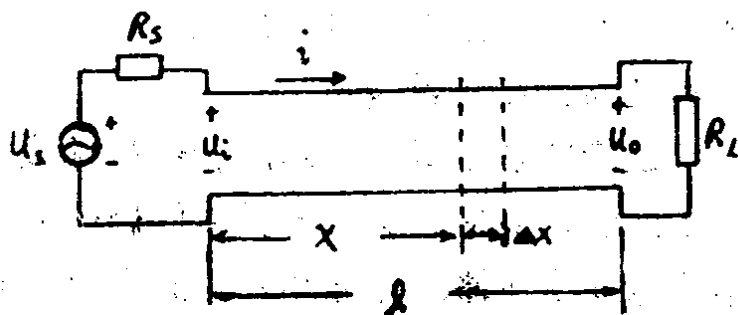


图1.1.2 传输线示意图

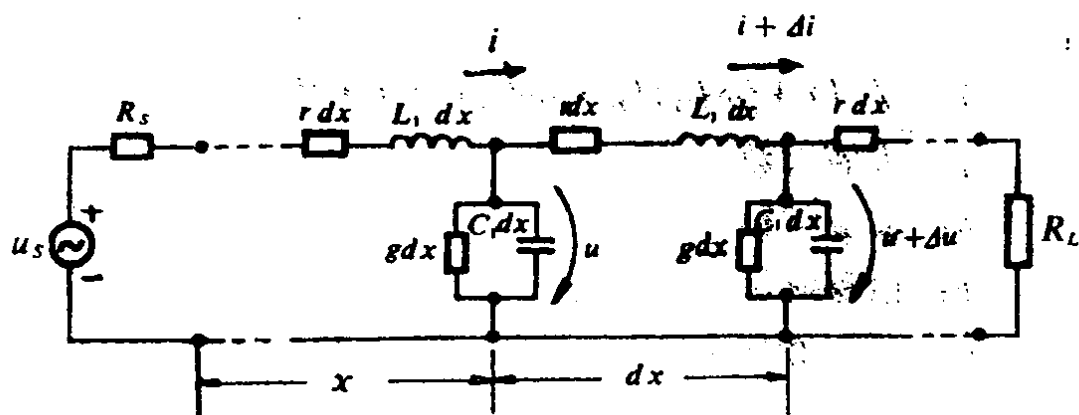


图1.1.3 传输线等效电路

输线长 l 可相比拟, 因此, 传输线上的电压及电流都是时间和位置的函数。这样必须把传输线等效成分布参数系统, 如图 1.1.3 所示。图中 r 、 L_1 、 C_1 、 g 分别代表传输线单位长度的分布电阻、电感、电容及电导。由此可列出表征传输线特性的微分方程式 (略去高阶导数):

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = ri + L_1 \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = gu + C_1 \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases} \quad (1.1.1)$$

式中负号表示线上电压、电流在沿正 x 方向传输时是减小的, 这就是电报方程。如果信号源是正弦信号, 则电报方程可用电压、电流复数有效值来表示:

$$\begin{cases} -\frac{d\dot{U}}{dx} = (r + j\omega L_1)\dot{I} \\ -\frac{d\dot{I}}{dx} = (g + j\omega C_1)\dot{U} \end{cases} \quad (1.1.2)$$

经化简可得

$$\begin{cases} \frac{d^2 \dot{U}}{dx^2} = \gamma^2 \dot{U} \\ \frac{d^2 \dot{I}}{dx^2} = \gamma^2 \dot{I} \end{cases} \quad (1.1.3)$$

式中

$$\gamma = \sqrt{(r + j\omega L_1)(g + j\omega C_1)} = \alpha + j\beta$$

γ : 传播常数

α : 衰减常数

β : 相移常数

ω : 信号角频率

一般情况下, 由于传输线的长度较短或信号频率不是非常高, 故可忽略传输线的损耗, 即 $r \rightarrow 0$, $g \rightarrow 0$, $\gamma = j\beta$ 。则(1.1.3)式的解如下:

$$\begin{cases} \dot{U} = A_1 e^{-j\beta x} + A_2 e^{j\beta x} \\ \dot{I} = \frac{1}{Z_0} (A_1 e^{-j\beta x} - A_2 e^{j\beta x}) \end{cases} \quad (1.1.4)$$

式中

$$\beta = \omega \sqrt{L_1 C_1}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad \text{特性阻抗}$$

由于高速脉冲电路中的连线一般不会太长, 故可近似地认为高速脉冲电路中用的传输线是无耗线。根据(1.1.4)式可得出以下几点结论:

(1) 方程式 $\dot{U} = A_1 e^{-j\beta x} + A_2 e^{j\beta x}$ 中的第一项表示一个幅值为 A_1 的电压波, 其相位随着 x 的增大而滞后。这说明它是一个向负载方向传播的电压波, 称为入射电压波。第二项表示一个幅值为 A_2 、向电源方向传播的电压波, 称为反射电压波。两者的传播速度相同, 都用相速来表示。任一点的入射波相位 φ

$$\varphi = \omega t - \beta x$$

则

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{d}{dt} (\omega t - \beta x)$$

对等相位点而言, φ 为常数, $\frac{d\varphi}{dt} = 0$ 。由此可得相速 v_φ 为

$$v_\varphi = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (1.1.5)$$

(2) 方程式 $\dot{I} = \frac{1}{Z_0} (A_1 e^{-i\beta x} - A_2 e^{i\beta x})$ 中的第一项表示入射电流波, 幅值为 A_1/Z_0 。第二项是反射电流波, 幅值为 A_2/Z_0 , 前面的负号表示与假设的电流正方向相反。电流波的相速也是 v_φ 。

(3) 为了说明问题方便, 对于线上任一点的电压波和电流波, 我们常用下式来表示

$$\begin{cases} \dot{U} = \dot{U}_+ + \dot{U}_- \\ \dot{I} = \dot{I}_+ + \dot{I}_- \end{cases} \quad (1.1.6)$$

式中

$$\frac{\dot{U}_+}{\dot{I}_+} = Z_0, \quad \frac{\dot{U}_-}{\dot{I}_-} = -Z_0$$

其中负号表示 $\dot{I}$ 传播方向与假设的电流正方向相反, 并不表示负阻抗。

(4) 无耗传输线的基本参数

• 相速 v_φ

$$v_\varphi = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}, \text{ 以后均简写成 } v$$

对于处于均匀介质中的传输线, 相速 v 还可以表示成

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \mu_r \epsilon_r}} \quad (1.1.7)$$

式中

μ_r : 相对磁导率

ϵ_r : 相对介电常数

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (\text{H/m})$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} (\text{F/m})$$

将 μ_0 、 ϵ_0 代入(1.1.7)式, 可得

$$v = c_0 \frac{1}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (1.1.8)$$

式中 $c_0 = 3 \times 10^8 (\text{m/s})$ 为真空中光速

还可以用电压波或电流波在传输线上单位长度传播延迟时间 T_d 表示相速,

$$T_d = \frac{1}{v} = \sqrt{L_1 C_1} = 3.3(\mu_r \epsilon_r)^{1/2} \text{ (ns/m)} \quad (1.1.9)$$

• 波长 λ

任意时刻传输线上同相点间的最短距离, $\beta\lambda = 2\pi$ 。则

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{L_1 C_1}} = v/f \quad (1.1.10)$$

式中 f : 信号频率

• 特性阻抗 Z_0

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}, \text{ 为纯电阻}$$

下面给出六种传输线的基本参数:

a) 双导线

$$\begin{cases} L_1 = (4 \ln D/a + \mu_r) \times 10^{-7} & (\text{H/m}) \\ C_1 = \frac{\epsilon_r}{3.6 \ln D/a} \times 10^{-10} & (\text{F/m}) \\ Z_0 = 120 \left(\frac{\mu_r}{\epsilon_r} \right)^{1/2} \ln D/a & (\Omega) \\ T_d = 3.3(\mu_r \epsilon_r)^{1/2} & (\text{ns/m}) \end{cases} \quad (1.1.11)$$

b) 单线

$$\begin{cases} Z_0 = 60 \left(\frac{\mu_r}{\epsilon_r} \right)^{1/2} \ln(2h/a) & (\Omega) \\ T_d = 3.3(\mu_r \epsilon_r)^{1/2} & (\text{ns/m}) \end{cases} \quad (1.1.12)$$

c) 同轴线

$$\begin{cases} L_1 = 2\mu_r \ln b/a \times 10^{-7} & (\text{H/m}) \\ C_1 = \frac{\epsilon_r}{1.8 \ln b/a} \times 10^{-10} & (\text{F/m}) \\ Z_0 = 60 \left(\frac{\mu_r}{\epsilon_r} \right)^{1/2} \ln b/a & (\Omega) \\ T_d = 3.3(\mu_r \epsilon_r)^{1/2} & (\text{ns/m}) \end{cases} \quad (1.1.13)$$

d) 微带

$$\begin{cases} Z_0 = \frac{87}{(\epsilon_r + 1.41)^{1/2}} \ln \left(\frac{5.98h}{0.8W + t} \right) & (\Omega) \\ \text{适用范围: } W/h = (0.1 \sim 3.0), \epsilon_r = (1 \sim 15) \\ \text{误差: } \pm 5\% \\ T_d = 3.3(\mu_r \epsilon_e)^{1/2} & (1.1.14) \\ \text{式中 } \epsilon_e: \text{有效相对介电常数} \\ \epsilon_e \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10h}{W} \right)^{-1/2} \\ \approx (\epsilon_r + 1)/2 \end{cases}$$

c) 介质带

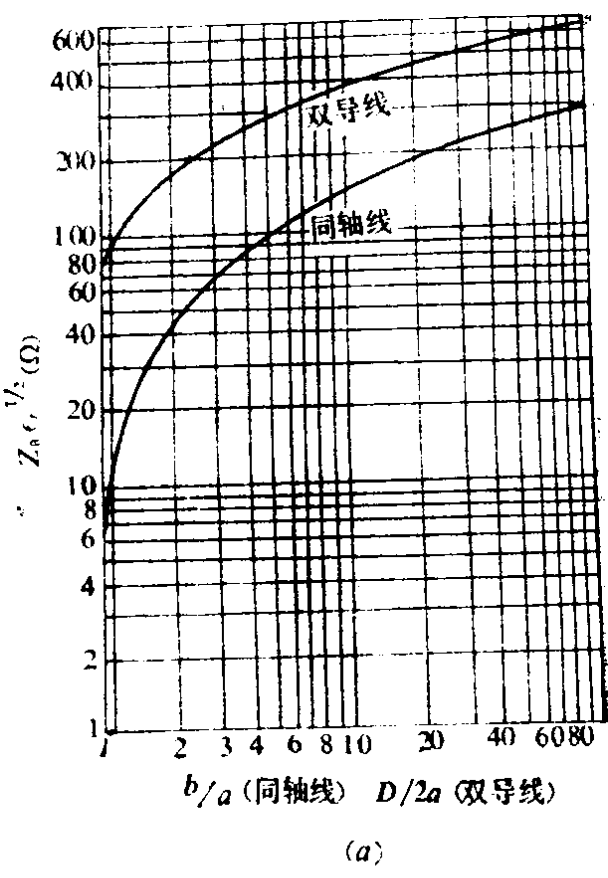
$$\left\{ \begin{array}{l} Z_0 = 60 \left(\frac{\mu_r}{\epsilon_r} \right)^{1/2} \ln \frac{4b}{0.67\pi W [0.8 + (\frac{t}{W})]} \quad (\Omega) \\ \text{适用范围: } \frac{W}{(b-t)} < 0.35, \quad t/b < 0.25 \quad (1.1.15) \\ \text{误差: } \pm 5\% \\ T_d = 3.3(\mu_r \epsilon_r)^{1/2} \quad (\text{ns/m}) \end{array} \right.$$

f) 双绞线

视双线绞合情况及导线直径而定，一般使用24~28号薄绝缘线，每隔一厘米绞合一次，其特性阻抗 $Z_0 \approx 100 \Omega$ 。绞花越密， Z_0 越小。

$$T_d = 3.3(\mu_r \epsilon_r)^{1/2} \quad (\text{ns/m}) \quad (1.1.16)$$

下面给出各种形式传输线参数随结构尺寸变化的曲线，如图1.1.4所示。



同轴线、双导线特性阻抗与尺寸的变化关系