

微波电路分析与 计算机辅助设计

吕善伟 刘人杰●●●●●

●●●王百锁 苏东林 编译

北京航空航天大学出版社



微波电路分析与计算 机辅助设计

吕善伟 刘人杰 编译
王百锁 苏东林

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书叙述了微波电路的分析和综合。全书共有五章,包括传输线基本特性;常用微波传输线;拉普拉斯方程的数值解;集总参数与分布参数匹配技术;传输线电路元部件。书中比较详细地介绍了电磁理论问题的一些数值解法,给出30个用BASIC语言设计的计算机程序,提供了一套有力的CAD工具,可在大多数微型计算机系统上运行。每个程序都有运算实例供用户自检参考。

本书可作为高等院校无线电技术和微波专业的教材或教学参考书,对有关工程技术人员也有很好的参考价值。

微波电路分析与计算机辅助设计

WEIBO DIANLU FENXI YU JISUANJI FUZHU SHEJI

吕善伟 刘人杰 编译

王百锁 苏东林

责任编辑 杨昌竹

*

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经售

朝阳科普印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张: 15.25字数: 409千字

1990年12月第一版

1990年12月第一次印刷

印数: 2000册

定价 4.70元

ISBN 7-81012-217-7/TN·014

前 言

本书介绍了集总参数与分布参数电路的各种技术,包括必备的基本理论知识。书中内容比较详细,能够帮助读者分析与综合简单的和复杂的微波电路,阐述的方式便于在实际场合得以实现。循序渐进地介绍微波电路各方面的基础知识,直至用于子系统的元部件设计及新型电路元件的分析设计。内容安排有很大的灵活性,各部分自给自足、自成体系、独立成章,便于读者自由地选读各自需要的有关章节。本书目的之一旨在鼓励自学,为此给出许多实际问题的解答,以举例的形式说明一些关键公式的用法,同时也能获得一些有参考价值的典型数据。书中比较详细地介绍了电磁理论问题的一些数值解法,提倡计算机辅助设计(CAD),给出30个用BASIC语言设计的计算机程序,提供了一套有力的CAD工具,可在大多数小型微型计算机系统上运行,每个程序都有运算实例供用户自检参考。书中尽管提倡CAD,但通篇始终强调了手工设计,有益于掌握基本概念和方法,又能促进CAD的发展。每一章的最后都附有主要参考书目和文献以及对它们的短评。

全书有五章正文和四个附录。第一章阐述传输线基本特性,介绍传输线特性阻抗、基本常数、等效模型、馈电端阻抗以及驻波等。第二章介绍常用传输线,包括同轴线、矩形波导、圆形波导、带状线、微带线,以及耦合带状线和耦合微带线。第三章是拉普拉斯方程的简单数值求解,讨论拉普拉斯方程的有限差分形式及其快速解法,包括单一介质的均匀和非均匀栅格、曲线边界、圆柱坐标形式及混合介质的情况;线电容的计算;孤立和耦合微带线的计算实例;蒙特·卡罗(Monte Carlo)法、有限元法、边界元法、

矩量法；高斯方程及其应用。第四章为集总与分布参数阻抗匹配结构和技术，介绍普通的与压缩的史密斯图，集总参数匹配电路， $\lambda/4$ 和 $\lambda/2$ 传输线段的特性，调配支节，用电压—电流传输矩阵与散射参量分析网络的级联问题。第五章传输线电路，研究集总参数与分布参数的滤波器设计，阻抗渐变匹配电路，分支线耦合器， 180° 混合桥路（或称Rat Race桥路），功率分配/合成电路，混合正交（Lange）耦合器。附录A外赋数学函数，附录B给出常用的双曲线函数公式，附录C是n阶切比雪夫（Chebyshev）和巴特沃兹（Butterworth）滤波器的相位和时延响应公式，附录D列出了20个计算机程序名称及其功能。

本书是在V.F.Fusco所著的Microwave Circuits Analysis and Computer-aided Design(1987)一书基础上编译而成的。除了增添一些新内容外，基本上保持了原书的系统。

吕善伟编译第一、二章并统校了全书；王百锁编译第三章；苏东林编译第四章，唐洪珍参加了初稿工作；刘人杰编译第五章和附录。受水平和时间的限制，书中难免欠妥和错误之处，恳请读者指正。

编译者

1990年4月

目 录

第一章 传输线基本特性	(1)
1.1 特性阻抗.....	(1)
1.2 传输线基本常数.....	(4)
1.3 传输线段的集总参数电路等效模型.....	(12)
1.4 馈电端阻抗.....	(14)
1.5 短路和开路终端.....	(19)
1.6 驻波.....	(21)
1.7 电阻和电抗终端.....	(23)
本章计算机程序.....	(29)
参考文献.....	(40)
第二章 常用传输线	(42)
2.1 引言.....	(42)
2.2 同轴线.....	(42)
2.3 矩形波导.....	(52)
2.4 圆形波导.....	(59)
2.5 带状线.....	(62)
2.6 微带线.....	(66)
2.7 偶模和奇模激励.....	(73)
2.7.1 耦合带状线.....	(75)
2.7.2 耦合微带线.....	(76)
本章计算机程序.....	(81)
参考文献.....	(109)

第三章 拉普拉斯方程的数值解.....(112)

3.1 引言.....(112)

3.1.1 拉普拉斯方程.....(113)

3.2 拉普拉斯方程的有限差分形式.....(115)

3.2.1 一种介质, 均匀网格.....(115)

3.2.2 一种介质, 非均匀网格.....(122)

3.2.3 一种介质, 曲线边界.....(125)

3.2.4 一种介质, 圆柱坐标系.....(126)

3.2.5 复合介质.....(129)

3.2.6 有限差分方程的快速解法.....(132)

3.3 传输线电容的计算.....(139)

3.4 微带线举例.....(141)

3.4.1 单线计算.....(141)

3.4.2 耦合线计算.....(141)

3.5 蒙特卡罗 (Monte Carlo) 法.....(143)

3.6 高斯定律及其用.....(147)

3.7 矩量法.....(150)

3.7.1 矩量法的基本原理.....(150)

3.7.2 导线上的电荷分布.....(159)

3.7.3 导板上的电荷分布.....(161)

3.7.4 平板电容器.....(164)

3.8 有限元法.....(169)

3.8.1 函数和泛函.....(169)

3.8.2 有限元法的基本原理.....(173)

3.8.3 二维场域中的有限元法.....(181)

3.9 边界元法.....(192)

3.9.1 自由空间中的格林函数.....(192)

3.9.2 边界元法的基本原理.....(197)

3.9.3 二维区域中的边界元法.....(200)

本章计算机程序	(221)
参考文献	(236)
第四章 集总参数和分布参数阻抗匹配技术	(239)
4.1 史密斯圆图与阻抗匹配	(239)
4.1.1 导纳圆图	(247)
4.2 压缩的史密斯图	(257)
4.3 集总参数匹配电路	(262)
4.3.1 L型匹配电路	(263)
4.3.2 电抗匹配电路	(265)
4.3.3 衰减器设计	(277)
4.4 $\lambda_0/2$ 和 $\lambda_0/4$ 传输线段的性质	(285)
4.5 可调支节线	(297)
4.6 级联网络参数计算	(306)
4.6.1 ABCD矩阵	(307)
4.6.2 电路元件的ABCD表达式	(309)
4.6.3 散射参数	(319)
本章计算机程序	(331)
参考文献	(353)
第五章 传输线电路	(355)
5.1 集总参数滤波器设计	(355)
5.1.1 集总参数高通滤波器	(367)
5.1.2 低通原型到带通的变换	(369)
5.1.3 频率变换	(373)
5.2 低通分布参数滤波电路	(377)
5.2.1 不连续性效应	(386)
5.3 分布参数高通滤波器设计	(388)
5.4 分布参数带通滤波器设计	(391)
5.5 宽带四分之一波长变换器	(409)

5.6 阻抗匹配渐变器·····	(413)
5.7 分支线耦合器·····	(417)
5.8 环形波导桥或 180° 混合波导桥·····	(423)
5.9 功率分配器与合成器·····	(429)
5.10 混合 90° 相移 (LANGE) 耦合器·····	(435)
本章计算机程序·····	(442)
参考文献·····	(467)
附录A 外赋数学函数 ·····	(471)
附录B 双曲函数 ·····	(472)
附录C n阶切比雪夫和巴特沃兹滤波器的相位和 时延响应 ·····	(473)
附录D 计算机程序索引 ·····	(475)

第一章 传输线基本特性

我们可以把传输线看成是一个电路元件，以电磁波形式把能量从一处转移到另一处。传输线可划分为平衡的与不平衡的两大类型。相对于固定的参考电位（通常以大地为参考电位）而言，平衡传输线有两条携带信号的导线，用以传递电磁波，不平衡传输线有一根导体携带信号而另一导体是大地。例如，平板双线属于平衡传输线，同轴线属于不平衡传输线。在第二章中将讨论几种常用的平衡与不平衡传输线。

从零赫兹的直流到数十万千兆赫的光波范围，都采用了各种不同类型的传输线，传输线的结构形式取决于工作频段和应用场合。铜线一般在频率低的音频范围使用，铜导体与介质构造的传输线在VHF、UHF和微波频段应用，由塑料或玻璃之类固态介质材料制造的传输线用来传输光波。经过精心开发，能够利用传输线设计和构造诸如滤波器和阻抗匹配网络等有用的电路部件。

频率等于和低于10MHz的波长等于和大于30米，电容、电感等标准电子元件几何尺寸的典型数据为数厘米，远小于30米，这时采用集总参数电路。换句话说，电路几何尺寸与激励信号的波长相比可以忽略不计时，采用集总参数电路。然而随着信号频率的增加，激励信号波长与电路元件尺寸可比拟时，必须采用分布参数电路技术，这种技术与集总参数电路设计方法不同，必须研究适合设计分布参数类型电路的规则。电子元件尺寸大约不大于二十分之一信号波长时，可作为集总参数与分布参数电路之间的分界线。

1.1 特性阻抗

可以把传输线看成是一对导引信号的导体，用这种最简单的

形式研究它的一些特点。就描述传输线某些特性而言，这两条导体呈现为串联阻抗和损耗。描述传输线特性的一个简便方法是应用传统的无源电路元件的集总电路表示形式，如图1.1所示。

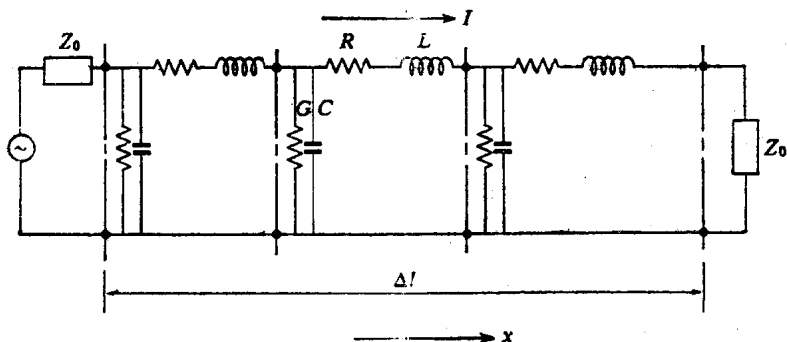


图1.1 传输线的集总参数等效电路

这里把长度为 Δl 的无限短线段用三节集总参数电路来代替，每一节包括一个串联损耗电阻 R 、一个并联损耗电导 G 、一个串联电感 L 和一个并联电容 C ， R 假定代表铜的损耗、 G 表示介质支撑结构的损耗、 L 和 C 代表线段中能量储存。所有这些元件参数均以单位长度计算的，例如串联损耗元件 R 规定为每米长的电阻值。图1.1中下面的一条导线代表返回信号源的路径，假设为零阻抗，线段的两个终端点接有阻抗 Z_0 代替后面的传输线。

假如研究一对无限长的导线，以某种方式在沿线等间距的点上测量电压和电流（见图1.2），则

$$\frac{V_1}{I_1} = \frac{V_2}{I_2} = \dots = \frac{V_k}{I_k} = \text{常数} = Z_0 \Omega$$

这是传输线的特性阻抗，记为 Z_0 。倘若传输线为无限长，则 V/I 始终等于相同的值 Z_0 。一般情况下， Z_0 为复数并随频率而变化。在图1.1中抽出包括一个串联阻抗和一个并联导纳的集总参数节，重绘于图1.3的 L 型网络。

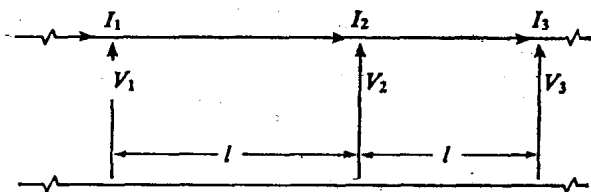


图1.2 均匀传输线

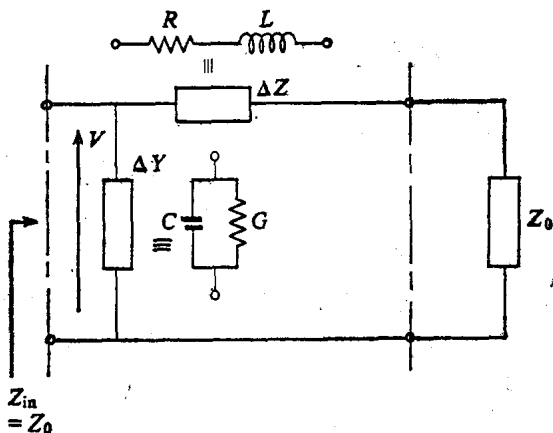


图1.3 等效传输线特性阻抗

利用图1.3所示的L型网络，根据电路理论进行推导，略去 $\Delta Z \Delta Y$ 二阶小，求得输入阻抗为

$$Z_{in} = Z_0 = \frac{(Z_0 + \Delta Z)1/\Delta Y}{Z_0 + \Delta Z + 1/\Delta Y} = \frac{Z_0 + \Delta Z}{1 + Z_0 \Delta Y} \Delta Y, \Delta Z \rightarrow 0$$

由上式解得 Z_0 为

$$Z_0 = \left(\frac{\Delta Z}{\Delta Y} \right)^{1/2}$$

式中 $\Delta Z = R + j\omega L$ 及 $\Delta Y = G + j\omega C$ ，于是

$$Z_0 = \left(\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C} \right)^{1/2} \Omega \quad (1.1)$$

这是一个基本的重要表达式，它把传输线的集总参数电路模型与被等效的原始传输线特性阻抗常数联系起来了。

频率很低 ω 趋于零时，式(1.1)变成

$$Z_0 = \left(\frac{R}{G} \right)^{1/2} \Omega \quad (1.2)$$

对于高频 $\omega L \gg R$ 及 $\omega C \gg G$ ，则

$$Z_0 = \left(\frac{L}{C} \right)^{1/2} \Omega \quad (1.3)$$

由于大多数传输线电路设计是在高频情况下进行的，因此常用式(1.3)取代式(1.1)。如果传输线损耗很小，把它略去不计是适宜的。损耗可忽略不计的传输线叫做无损传输线，损耗不能忽略的传输线称为有损耗线。

例1.1 特性阻抗为 50Ω 的无损传输线，自电感为 $0.08\mu\text{H}/\text{m}$ 。计算该线4m长的电容。

解 传输线是无损耗的，因此

$$R = 0; \quad G = \infty$$

所以

$$Z_0 = \left(\frac{L}{C} \right)^{1/2} \rightarrow C = \frac{L}{Z_0^2} = \frac{0.08 \times 10^{-8}}{50 \times 50} = 32\text{pF}/\text{m}$$

则4m长线的总电容为

$$C_{\text{TOT}} = 4 \times 32 \times 10^{-12} = 128\text{pF}$$

这个电容值会限制该电缆的高频响应。

1.2 传输线基本常数

在前一节中，介绍了特性阻抗的概念，根据一段增量长度的均匀传输线的集总参数等效模型（见图1.1）导出了特性阻抗表达式。利用前一节中图1.1还能定义一些其它重要的传输线参

数。第一个参数叫作传播系数或传播常数 γ 。

在图1.1中，一个集总参数节的电压降为

$$\Delta V = -I(R + j\omega L)\Delta x$$

其中 Δx 是由集总参数节表达的传输增量长度， R 和 L 规定为每单位长度的电阻和电感。以 Δx 除上式两边得

$$\frac{\Delta V}{\Delta x} = -(R + j\omega L)I \quad (1.4)$$

当 Δx 趋于零时，方程(1.4)变成

$$\frac{dV}{dx} = -(R + j\omega L)I \quad (1.5)$$

类似地，对于集总参数节的并联臂有

$$\Delta I = -(G + j\omega C)V\Delta x$$

于是当 $\Delta x \rightarrow 0$ 时，对上式取极限得

$$\frac{dI}{dx} = -(G + j\omega C)V \quad (1.6)$$

对方程(1.5)取导数并把式(1.6)代入，我们得到

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = (R + j\omega L)(G + j\omega C)V$$

该式可以写成如下形式

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = \gamma^2 V \quad (1.7)$$

其中 $\gamma = [(R + j\omega L)(G + j\omega C)]^{1/2}$ ，叫做传播常数或传播系数。

通常把传播系数表示成复数形式

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (1.8)$$

其中 α 表示每单位长度传输线的衰减， β 为每单位长度的相位移。

下面将更加详细地讨论 α 和 β 这两个常数。

我们观察一下方程(1.7)，它是一个二阶微分方程，因此对

应固定频率其解为

$$V(x) = A \exp(-\gamma x) + B \exp(+\gamma x) \quad (1.9)$$

方程(1.9)表示传输线传输两个行波, 一个向 $+x$ 方向传输的行波 $\exp(-\gamma x)$ 而另一个是向 $-x$ 方向行进的行波 $\exp(+\gamma x)$; 常数 A 和 B 分别代表在 $x=0$ 处的正向及反向波的振幅和相位。为了确定 A 和 B , 以振幅为 V_{in} 的正弦波在 $x=0$ 处激励无限长传输线, 讨论在线的终端出现的情况。如果线上存在电阻元件, 则跨接在线上任何电压在 $x=\infty$ 处衰减到0, 此时方程(1.9)变成

$$\begin{aligned} 0 &= A \exp(-\gamma \infty) + B \exp(+\gamma \infty) \\ &= A(0) + B(\text{大数值}) \end{aligned}$$

这意味着 B 一定等于0。

对于传输线的激励端, $x=0$, 电压为 V_{in} , 式(1.9)简化为

$$V_{in} = A \exp(-\gamma \cdot 0) + 0 = A$$

把已得到的常数 A 和 B 代至方程(1.9), 最后获得

$$V(x) = V_{in} \exp(-\gamma x)$$

下面较详细地讨论传播系数 γ 。利用式(1.8)的规定, $\gamma = \alpha + j\beta$, 则有

$$V(x) = V_{in} \exp(-\alpha x) \exp(-j\beta x) \quad (1.10)$$

首先讨论衰减常数 α 。从图1.2能够看出, 对于每单位长度损耗相等的有损耗传输线, 沿线电压

$$\begin{aligned} V_2 &= kV_1 \\ V_3 &= kV_2 \\ &\vdots \\ V_{n+1} &= kV_n \end{aligned}$$

式中 k 为小于1的值, 代表有损耗线的衰减; 对于无损耗传输线 k 等于1。现在由于传输线特性阻抗等于常数, 于是

$$\frac{V_n}{I_n} = \frac{V_{n+1}}{I_{n+1}}$$

而对于有损耗传输线, $V_{n+1} = kV_n$, 则有

$$\frac{V_n}{I_n} = \frac{kV_n}{I_{n+1}} \rightarrow I_{n+1} = kI_n$$

上式意味着

$$\frac{V_1}{I_1} = \frac{V_2}{kI_1} = \frac{V_3}{k^2I_1} = \dots = \frac{V_{n+1}}{k^nI_1} = Z_0$$

故最后得到

$$V_{n+1} = V_1 k^n \quad (1.11)$$

一般通过取自然对数以紧凑的形式来表达方程式 (1.11) 这时

$$\log_e \left(\frac{V_{n+1}}{V_1} \right) = n \log_e k$$

在式 (1.10) 中取 $k = \exp(-\alpha x)$, 得到有用的结果

$$\log_e \left(\frac{V_{n+1}}{V_1} \right) = -n\alpha x$$

其中 $n\alpha x$ 为传输线总衰减, 单位是奈培 (Np)。为了说明单位奈培与普遍熟悉的单位分贝的关系, 下面继续讨论衰减问题。

假设由传输线馈送到负载的功率记为 P_L , 在馈电端馈入到传输线的功率记为 P_{in} , 则传输线衰减的分贝数定义为

$$\text{衰减 (dB)} = 10 \log_{10} \frac{P_L}{P_{in}}$$

而功率与电压和电流的振幅的关系为

$$P_L = V_L I_L \text{ 及 } P_{in} = V_{in} I_{in}$$

所以

$$\frac{P_L}{P_{in}} = \frac{V_L}{V_{in}} \frac{I_L}{I_{in}}$$

在前面以奈培为单位讨论衰减时, 曾导出

$$\exp(-\alpha x) = k^n = \frac{V_{n+1}}{V_1} = \frac{V_L}{V_{in}}$$

其中假定传输线第 $(n+1)$ 节接到负载上，第一节接于输入端。

用电流能够写出类似的表达式

$$\exp(-\alpha x) = k^n = \frac{I_{n+1}}{I_1} = \frac{I_L}{I_{in}}$$

把以上两式相乘，我们得到

$$\frac{P_L}{P_{in}} = \frac{V_L I_L}{V_{in} I_{in}} = \exp(-2\alpha x)$$

这就意味着

$$\begin{aligned} \text{衰减 (dB)} &= 10 \log_{10} [\exp(-2\alpha x)] \\ &= -20\alpha x \log_{10} [\exp(1)] \\ &= -8.686\alpha x \end{aligned}$$

这个表达式把度量衰减的单位奈培 (N_P) 和分贝 (dB) 联系起来了，显然

$$1N_P = 8.686 \text{ dB}$$

根据衰减常数的含义，我们可以看出式 (1.10) 相当于

$$V(x) = V_{in} \cdot (\text{随长度的衰减量}) \cdot \exp(-j\beta x)$$

现在讨论 $\exp(j\beta x)$ 。参考图1.1并忽略传输线的任何损耗。

取电流 I 为参考，在一个增量段 Δx 的电感上电压降为 $j\omega L I \Delta x$ ，同时在 Z_0 上的电压降为 $I Z_0$ ，这两个电压之间的相位角为 $\Delta\beta$ ， $\Delta\beta$ 可由简单的几何关系（见图1.4）求出

$$\Delta\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L I \Delta x}{I Z_0} \right)$$

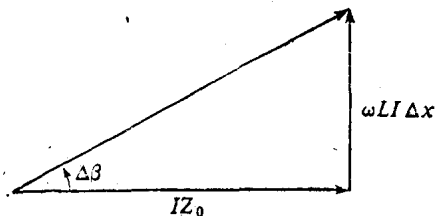


图1.4 理想集总参数线的相角图