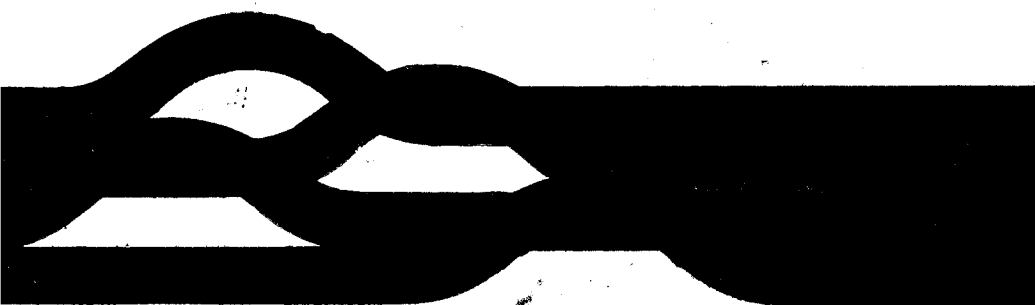


有线通信 传输工程

李既平 高新民 编著 邱守键 审



YOUXIAN TONGXIN CHUANSHU GONGCHENG



RENMIN YOUDIAN CHUBANSHE

内 容 提 要

本书从理论上分析有线通信工程实践中的各种传输现象和规律,阐述提高传输质量的技术措施。全书共分五章,包括两大部分:第一部分(第一、二章)从理论上分析传输线(金属回路和光学纤维)的传输特性,第二部分(第三、四、五章)突出理论在实践中的指导作用,叙述各种传输回路间的干扰现象及其解决途径。理论明晰,紧密结合工程实践。

本书可作为大专院校通信专业的教学参考书,也可供有关工程技术人员阅读。

有线通信传输工程

李既平 高新民 编著

邱守隍 审

•

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

•

开本: 850×1168 1/32

1988年12月第一版

印张: 13 16/32 页数: 216

1988年12月河北第1次印刷

字数: 358千字

印数: 1—1500册

ISBN7-115—03711—6/TN·127

定价: 2.75 元

前 言

传输媒介是通信系统中的关键环节，没有它就根本不可能实现最基本的电通信，而没有由优良的传输媒介所构成的传输系统，也不可能实现满意的通信。在有线传输系统中，设备的主体便是由导电金属构成的传输线以及由不导电介质构成的光学波导——光纤线路。

有线传输工程是一种在系统的理论原则指导下的生产实践。作为一个线路工程师，必须尽可能深入而广泛地掌握有关传输的基本理论，才能正确而迅速地分析处理工程实践中出现的各种技术问题，实现信息的高标准传输。特别是近十年来，我国的传输线路已经从明线为主逐步向对称电缆和同轴电缆过渡，在一级电路中，利用电缆传输线的已占有相当大的比重；在一些大中城市和经济比较发达的地区，也已经和正在积极建设能传输大容量信息的光缆线路。在这些传输线上传输的信号，除了传统的模拟信号以外已出现了数字信号，由计算机处理的用户数据通信网已在我国开始出现。在这一形势下，迫切要求国内线路工作者迅速更新和提高自己的专业知识。

本书便是为帮助线路工程技术人员实现上述目的而编写的。在编写过程中，作者努力结合自己长期从事通信线路工程设计、施工、维护和教学方面的经验，尽可能做到基本理论、数学推导和工程实践密切结合，从实用角度上阐述信号传输过程中的各种现象，又从理论的高度上分析各种解决传输质量问题的技术措施。

本书共分五章。第一章由高新民同志执笔，其余四章由李既平同志执笔。全书经邮电部电信总局高级工程师邱守镭同志审阅，对本书提出了不少宝贵的意见，在此，表示深切地感谢。

由于作者水平有限，对书中的缺点和不妥之处，尚希读者不吝指正。

作者 1988年于南京邮电学院

目 录

第一章 金属导线的传输特性	(1)
第一节 传输线的基本分析方法.....	(1)
第二节 传输线的传输方程式.....	(4)
第三节 明线回路的传输特性.....	(23)
第四节 对称电缆回路的传输特性.....	(42)
第五节 同轴回路的传输特性.....	(63)
第六节 通信线路传输特性的测试.....	(98)
附 录 双曲线函数的特性及关系式.....	(125)
参考文献.....	(127)
第二章 光纤的传光原理及传输特性概论	(128)
第一节 光纤传输的特点.....	(130)
第二节 光纤的构造及类型.....	(133)
第三节 平面波斜向入射到不同介质交界面的分析.....	(139)
第四节 光纤传光原理.....	(157)
第五节 光纤传输中的模式.....	(165)
第六节 光纤的传输特性及测试.....	(176)
附录2-1 通信光缆型号表示说明	(207)
附录2-2 光纤主要技术参数	(209)
附录2-3 光缆结构尺寸表	(212)
附录2-4 光缆A端截面图	(214)
参考文献.....	(218)
第三章 明线回路间的串音和交叉	(219)
第一节 对称回路间的电磁耦合.....	(219)
第二节 串音的一般概念.....	(226)
第三节 无交叉回路间的串音.....	(242)

第四节	明线交叉中有关名词的概念·····	(250)
第五节	有交叉回路间的直接近端串音·····	(254)
第六节	有交叉回路间的远端串音·····	(268)
第七节	明线回路间的串音标准·····	(288)
参考文献·····		(290)
第四章	对称电缆回路间的串音和平衡·····	(291)
第一节	对称电缆回路间的耦合参数·····	(291)
第二节	音频对称电缆的平衡·····	(308)
第三节	高频对称电缆回路间的串音和平衡·····	(324)
第四节	对称电缆回路间的串音标准·····	(393)
参考文献·····		(397)
第五章	同轴电缆回路间的串音·····	(399)
第一节	同轴回路间产生串音的物理过程·····	(399)
第二节	同轴回路间的耦合参数·····	(401)
第三节	同轴回路间的 A_0 和 A_z ·····	(406)
第四节	同轴回路间的串音测试·····	(413)
第五节	同轴电缆耦合阻抗测试·····	(416)
第六节	同轴回路间的串音标准·····	(420)
参考文献·····		(425)

第一章 金属导线的传输特性

传输线是指从一点到另一点传输电信号的一种设备。这一设备引导着表现信息内容和能量的电磁波沿着它延伸的方向前进，故传输线又称为导线。

根据所传输的电磁波的场型，传输线又可分为传输横电磁波（TEM波）的传输线和传输高阶型电磁波的传输线。

所谓横电磁波是指该电磁波的电场和磁场的分量都与传输方向相垂直，在传输方向上既无电场分量也无磁场分量，大家熟悉的平面电磁波就是这类波。传输这类波型的传输线主要有架空明线回路、对称电缆回路和同轴电缆回路，其特点是这些回路均由两根互相绝缘的导体组成。

所谓高阶型的电磁波是指在传输方向上只有电场分量的横磁波（TM波）或只有磁场分量的横电波（TE波），以及在传输方向上电场分量和磁场分量均有的混合波（EH波或HE波）。金属波导管和光导纤维都是传输这类电磁波的传输线。

第一节 传输线的基本分析方法

传输线传输特性的分析方法通常有两种：

其一是用电磁场理论。它是从马氏方程出发得出满足边界条件的波动方程，从而获得传输线上电场和磁场的表示式，进而分析传输线的传输特性。这种方法既适用于金属波导管和光导纤维，也适用于二线传输线（即架空明线回路、对称电缆回路以及同轴电缆回路等）。尽管因马氏方程中场的向量转换成三维空间的标量后，将得到六个微分方程式，使分析起来比较复杂，但它能做到论述严

谨、概念清楚，故仍被推崇为一种主要的根本的方法。本书在讨论二线传输线的传输参数以及讨论光导纤维时，均将借助这一方法。

其二是用电路的理论，它是利用正弦稳态的条件下，“场”和“路”之间存在的对应关系，将电磁场的问题转化为电路的问题来处理，从而既简化了分析方法又有利于直观理解，但是它只适用于二线传输线，而且这传输线将是一个具有分布参数的电路。

所谓分布参数电路是相对于集总参数电路而言的。

大家知道，集总参数电路的特点主要表现在电磁场能量是集中在电路的各个元件内，而且电磁状态传输的持续时间与电磁状态本身变化的时间相比要小得多，因而可以不考虑持续时间，这就是说，集总参数电路的电压（电流）仅是时间的函数，不随空间坐标的变化而变化。从而电压和电流可分别用下式表示

$$\begin{aligned}u_R &= iR & i_R &= \frac{u}{R} \\ u_L &= L \frac{di}{dt} & i_L &= \frac{1}{L} \int u dt \\ u_C &= \frac{1}{C} \int i dt & i_C &= C \frac{du}{dt}\end{aligned}$$

分布参数的电路是指该电路中的电压（电流）不仅是时间的函数，而且随空间坐标的变化而变化，即电磁波在该电路中传输时必须考虑时间和空间的关系。

对传输线来讲，由于导体以及导体间的绝缘都不是理想的材料，故必然出现反映纵向损耗的电阻 R 和横向损耗的电导 G ，与此同时，由于导体间存在着电场以及相互交连的磁通量，故也具有电容 C 和电感 L 等物理量。这些物理量是沿线均匀分布的，通常用单位长度（每公里）的数值来表示。显然，这样一个长度，电磁状态传输的持续时间已不能忽略，因此若要用集总参数的概念来分析，则研究的长度只能为 dx 的小段传输线，因为只有这种短的传输线，其电阻、电感、电容及电导才能看成是集总参数，其电压（电流）

才能仅是时间的函数而与长度无关。但实际的通信线路都是比较长的，研究时必须理解为由无限多个 dx 长的小段传输线链接而成的电路。

区别传输线是集总参数电路还是分布参数电路，表面上看是与线的绝对长度有关，实际上还要从电气上来考虑，它是一个相对的概念。要依导线长度与信号波长的相对大小而定。也就是说与传输的信号频率有关。

众所周知，波长与频率的关系为

$$\lambda = \frac{v_p}{f} \quad (1-1)$$

故当传输速度 v_p 为一定值时，频率愈高，则波长愈短。

当传输信号的频率 $f=100\text{kHz}$ 时，若设其 $v_p=3\times 10^5\text{km/s}$ ，则该信号的波长 $\lambda=3\text{km}$ ，这时长度为 20km 的线路可称长线。但对频率为 50Hz 的电力线而言，其波长 $\lambda=6000\text{km}$ ，这时 20km 长的线路便只能作为短线了。

上述概念可从图1-1获得更形象的解释。图1-1(a)中的 AB 线段长度相对于信号波长来讲是很短的，线段 AB 上同一时刻的电压(或电流)大小和方向可认为是相等的，这说明电压(或电流)仅是时间的函数而不是距离的函数，因此可认为线段 AB 对该频率而言可以看作一个集总参数的电路。如果频率升高，如图1-1(b)，这时 AB 段内各点同一瞬间的电压(或电流)的大小和相位都有很大的不

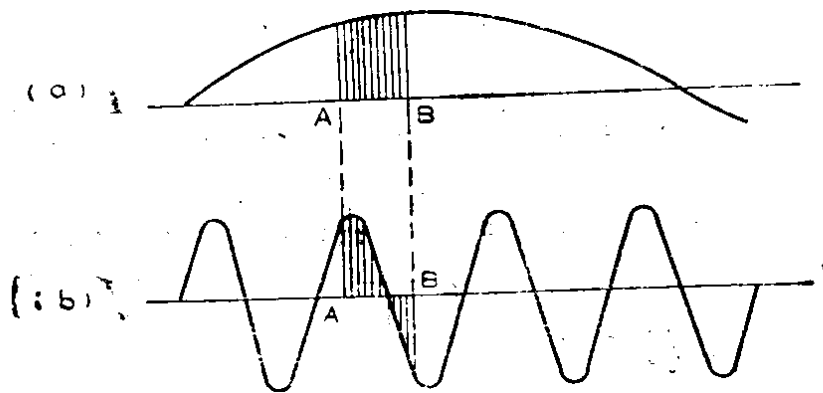


图 1-1 正弦电压(或电流)沿线相位变化

同，说明此时电压（或电流）不仅是时间函数，同时又是距离的函数，因此线段AB就应该看作是分布参数的传输线了。

传输线根据其结构的一致性程度，又可分为均匀传输线和不均匀传输线。当组成回路的两导体，其几何形状、相对位置、及周围介质在整个长度上保持不变者称为均匀传输线，否则称为不均匀传输线。在讨论这类问题时，若只提“传输线”，则都是指均匀传输线而言。

第二节 传输线的传输方程式

一、传输线的等效电路

对分布参数的传输线进行分析时，按照前节介绍的方法，将传输线看成是无限多个 dx 长的微小线段链接而成，由于传输线是均匀的，故在 dx 长的微小线段上电阻、电容、电感和电导的数值分别为 Rdx 、 Cdx 、 Ldx 和 Gdx 。由此可得 dx 小段的等效电路如图1-2所示。在这等效的单元电路中，由于线段的电气长度很短，故可作为集总参数电路。

二、传输方程式的建立

设某二线传输线，其长度为 l ，始端信号源的电势为 E ，内阻为 Z_i ，终端负载为 Z_l 。在距始端为 x 处取一 dx 段，用倒L形网络作

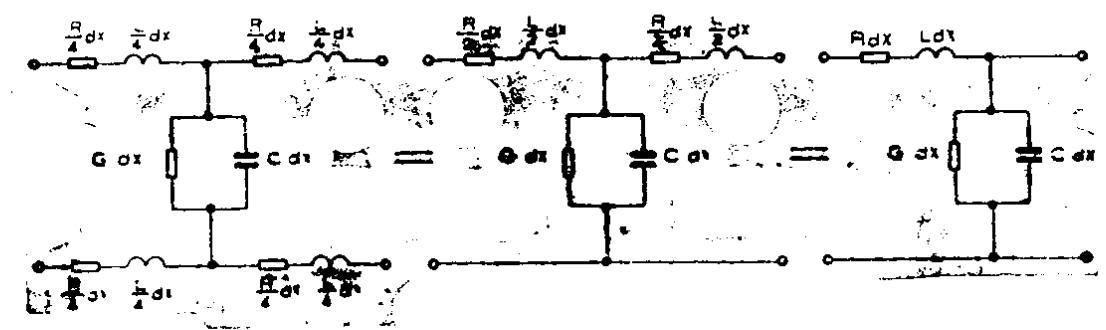


图 1-2 一个微小传输线段的等效电路

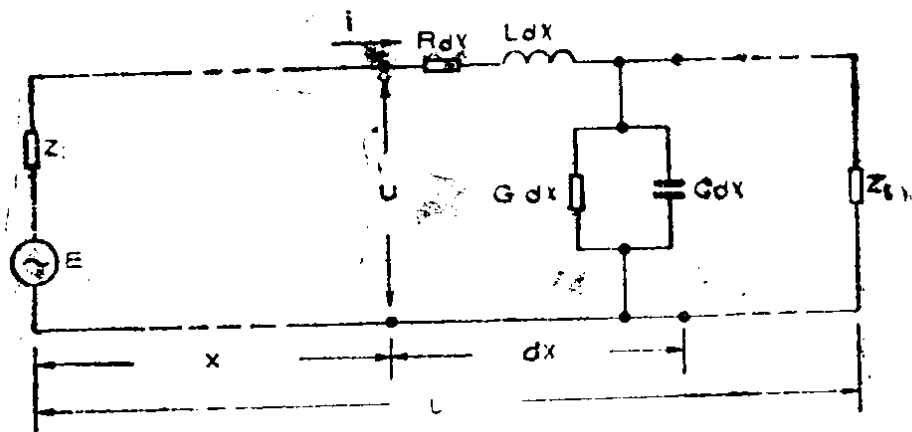


图 1-3 传输线及其中的一个微分段

为它的等效电路（也可用T形或 π 形）如图1-3所示。图中：

$$i = i(x, t)$$

$$u = u(x, t)$$

电流 i 和电压 u 经过 dx 段后，必然发生变化，当只考虑空间变化的影响时，则电压、电流沿传输方向在 dx 段的变化分别为

$$\text{电压: } -\frac{\partial u}{\partial x} dx \quad \text{电流: } -\frac{\partial i}{\partial x} dx$$

这一变化量的出现，对电压来讲是串联支路的电压降形成的；对电流来讲是并联支路的漏电流形成的，由此可得

$$-\frac{\partial u}{\partial x} dx = R dx \cdot i + L dx \frac{\partial i}{\partial t} \quad (1-2)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} dx = G dx \cdot u + C dx \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1-3)$$

消去 dx 后得

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (1-4)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = Gu + C \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1-5)$$

式 (1-4) 和式 (1-5) 即为均匀传输线的传输方程式。可以看出，传输线上的电压和电流既是时间 t 的函数又是空间 l 的函数，而且一个量的时间变化形成另一个量的空间变化，这本身就是一种

波动的概念，故这一方程又称为传输线的波动方程。式中的负号说明电压和电流沿传输方向均随距离 x 的增长而减小。

三、传输正弦信号时，传输方程式的稳态解

1. 传输正弦信号时的传输方程式

信息的表现形式，通常可分为模拟信号和数字信号。这两种信号的波形可以是规则的，也可以是不规则的，但理论和实践证明，不论什么样波形的信号，都可分解成一系列不同频率的正弦波，波形的不同，包含的频率成分也不同。因此这里提出正弦波的传输方程式是有普遍意义的。

当信号是正弦波时，式 (1-4) 和式 (1-5) 中的瞬间电压和电流值可改写成复数形式，即

$$u \rightarrow u(x, t) \rightarrow U_x e^{j\omega t}$$

$$i \rightarrow i(x, t) \rightarrow I_x e^{j\omega t}$$

式中， U_x 和 I_x 分别表示传输线上距始端为 x 处电压、电流的复数值。将这一关系代入式 (1-4) 和式 (1-5)，经过整理即得

$$-\frac{\partial U_x}{\partial x} = (R + j\omega L)I_x \quad (1-6)$$

$$-\frac{\partial I_x}{\partial x} = (G + j\omega C)U_x \quad (1-7)$$

由于 U_x 和 I_x 仅是距离 x 的函数，而与时间无关，故上述偏微分方程可改写成微分方程

$$-\frac{dU_x}{dx} = (R + j\omega L)I_x \quad (1-8)$$

$$-\frac{dI_x}{dx} = (G + j\omega C)U_x \quad (1-9)$$

该式即为传输正弦波时的传输方程式。

2. 方程式的通解

式 (1-8) 和式 (1-9) 两个微分方程式，由于都是具有两个未

知数，故必须给予处理，使每个方程仅含一个未知数，其处理方法如下：

将式(1-8)和式(1-9)分别对 x 微分，再分别代入式(1-9)和式(1-8)即得

$$-\frac{d^2 U_z}{dx^2} = \gamma^2 U_z \quad (1-10)$$

$$\frac{d^2 I_z}{dx^2} = \gamma^2 I_z \quad (1-11)$$

式中

$$\gamma = \sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)} \quad (1-12)$$

式(1-10)和式(1-11)系二阶常系数微分方程，其通解分别为

$$U_z = A_1 e^{\gamma z} + A_2 e^{-\gamma z} \quad (1-13)$$

$$I_z = B_1 e^{\gamma z} + B_2 e^{-\gamma z} \quad (1-14)$$

该通解有待定系数四个，故需进一步整理，使式(1-14)与式(1-13)具有相同的待定系数。

将式(1-13)对 x 微分后和式(1-14)一并代入式(1-8)，即得

$$A_2 \gamma e^{-\gamma z} - A_1 \gamma e^{\gamma z} = (R+j\omega L)(B_1 e^{\gamma z} + B_2 e^{-\gamma z}) \quad (1-15)$$

故得

$$B_1 = \frac{-A_1 \gamma}{R+j\omega L} \quad (1-16)$$

$$B_2 = \frac{A_2 \gamma}{R+j\omega L} \quad (1-17)$$

则式(1-14)可写成

$$I_z = -\frac{\gamma}{R+j\omega L} A_1 e^{\gamma z} + \frac{\gamma}{R+j\omega L} A_2 e^{-\gamma z}$$

由于

$$\gamma = \sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)}$$

即得

$$I_s = -\frac{A_1}{\sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}}e^{rs} + \frac{A_2}{\sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}}e^{-rs} \quad (1-18)$$

令

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} \quad (1-19)$$

则得

$$I_s = -\frac{A_1}{Z_0}e^{rs} + \frac{A_2}{Z_0}e^{-rs} \quad (1-20)$$

式(1-13)和式(1-20)分别为式(1-10)和式(1-11)两方程的通解, 其待定系数 A_1 和 A_2 可由下面相关的边界条件确定。

(1) 已知始端的电压电流分别为 U_0 、 I_0 时的解。即已知 $x=0$ 处 $U_s=U_0$, $I_s=I_0$ 。将这一关系代入式(1-13)和式(1-20), 即得

$$A_1 = \frac{1}{2}(U_0 - I_0 Z_0)$$

$$A_2 = \frac{1}{2}(U_0 + I_0 Z_0)$$

则式(1-13)和式(1-20)可分别写成

$$U_s = \frac{1}{2}(U_0 + I_0 Z_0)e^{-rs} + \frac{1}{2}(U_0 - I_0 Z_0)e^{rs} \quad (1-21)$$

$$I_s = \frac{1}{2Z_0}(U_0 + I_0 Z_0)e^{-rs} - \frac{1}{2}(U_0 - I_0 Z_0)e^{rs} \quad (1-22)$$

上式是在已知始端电压和电流的条件下的传输方程式, 通过该方程式即可获得沿线各点电压和电流分布的情况。这一形式是属于“指数型”, 它也可用“双曲线型”表示。根据

$$\operatorname{sh} x = \frac{1}{2}(e^x - e^{-x})$$

$$\operatorname{ch} x = \frac{1}{2}(e^x + e^{-x})$$

即得

$$U_s = U_0 \operatorname{ch} \gamma x - I_0 Z_c \operatorname{sh} \gamma x \quad (1-23)$$

$$I_s = I_0 \operatorname{ch} \gamma x - \frac{U_0}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma x \quad (1-24)$$

(2) 已知终端的电压和电流分别为 U_l 和 I_l 时的解。即已知 $x=l$ 处 $U_s = U_l$, $I_s = I_l$ 。将这一关系代入式 (1-13) 和式 (1-20), 可得

$$A_1 = \frac{1}{2}(U_l - I_l Z_c) e^{-\gamma l}$$

$$A_2 = \frac{1}{2}(U_l + I_l Z_c) e^{\gamma l}$$

则式 (1-13) 和式 (1-20) 可分别写成

$$U_s = \frac{1}{2}(U_l + I_l Z_c) e^{\gamma(l-x)} + \frac{1}{2}(U_l - I_l Z_c) e^{-\gamma(l-x)} \quad (1-25)$$

$$I_s = \frac{1}{2Z_c}(U_l + I_l Z_c) e^{\gamma(l-x)} - \frac{1}{2Z_c}(U_l - I_l Z_c) e^{-\gamma(l-x)} \quad (1-26)$$

其双曲线型为

$$U_s = U_l \operatorname{ch} \gamma(l-x) + I_l Z_c \operatorname{sh} \gamma(l-x) \quad (1-27)$$

$$I_s = I_l \operatorname{ch} \gamma(l-x) + \frac{U_l}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma(l-x) \quad (1-28)$$

由于上式是用终端的已知条件获得的方程式, 故通常将衡量距离的参考点 (即坐标原点) 改为终端, 这时令 $y=l-x$, 则上述方程可分别改写为

$$U_s = \frac{1}{2}(U_l + I_l Z_c) e^{\gamma y} + \frac{1}{2}(U_l - I_l Z_c) e^{-\gamma y} \quad (1-29)$$

$$I_s = \frac{1}{2Z_c}(U_l + I_l Z_c) e^{\gamma y} - \frac{1}{2Z_c}(U_l - I_l Z_c) e^{-\gamma y} \quad (1-30)$$

以及

$$U_y = U_l \cosh \gamma y + I_l Z_c \sinh \gamma y \quad (1-31)$$

$$I_y = I_l \cosh \gamma y + \frac{U_l}{Z_c} \sinh \gamma y \quad (1-32)$$

式中, U_y 、 I_y 分别表示传输线上距终端为 y 处电压、电流的复数值。

四、传输方程稳态解的分析

从上面获得的传输方程式稳态解中, 可以得到下面一些规律和概念。

1. 沿线各点电压 (电流) 的分布不仅是 x 的函数, 且与物理量 γ 、 Z_c 、 U_o 、 I_o (或 U_l 、 I_l) 以及负载 Z_l 有关。

2. 对 γ 的认识:

(1) γ 的含义:

γ 在方程式中直接表明信号电压 (电流) 是怎样按指数规律变化的, 故称为传输常数。它是个复数, 通常可表示为

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

其中, α : 实部, 它影响信号幅度的变化, 称为“固有衰减常数”单位为 Np/km 。 β : 虚部, 它影响信号相位的变化称为“固有相移常数”, 单位为 rad/km 。

(2) α 、 β 与 R 、 L 、 C 、 G 的关系:

因为 $\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

由此可得

$$|\gamma| = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} = \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)}$$

故

$$\alpha^2 + \beta^2 = \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)}$$

又由于

$$\gamma^2 = \alpha^2 - \beta^2 + j2\alpha\beta = (R + j\omega L)(G + j\omega C)$$

故

$$\alpha^2 - \beta^2 = RG - \omega^2 LC$$

由此即得

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \{ \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} + (RG - \omega^2 LC) \}} \quad (1-33)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} \{ \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} - (RG - \omega^2 LC) \}} \quad (1-34)$$

(3) α 、 β 与频率 f 的关系,

① $f = 0$ 时, 则

$$\begin{cases} \alpha = \sqrt{RG} \\ \beta = 0 \end{cases} \quad (1-35)$$

② 当传输的频率满足下面的关系式

$$R \gg \omega L$$

$$G \ll \omega C$$

时, 则 $\gamma = \sqrt{j\omega CR} = \sqrt{\omega RC} e^{j\frac{\pi}{4}} = \sqrt{\frac{\omega RC}{2}} + j \sqrt{\frac{\omega RC}{2}}$

故得

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega RC}{2}} \quad (1-36)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega RC}{2}} \quad (1-37)$$

③ 当传输频率满足 $\frac{\omega L}{R} > 5$ 及 $\frac{\omega C}{G} > 5$ 的条件时, 可运用近似计算公式。因当 $a \gg b$ 时

$$(a+b)^{\frac{1}{2}} \approx a^{\frac{1}{2}} + a^{-\frac{1}{2}} \frac{b}{2}$$

则

$$\gamma = (j\omega L + R)^{\frac{1}{2}} (j\omega C + G)^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left[(j\omega L)^{\frac{1}{2}} + \frac{R}{2}(j\omega L)^{-\frac{1}{2}} \right] \left[(j\omega C)^{\frac{1}{2}} + \frac{G}{2}(j\omega C)^{-\frac{1}{2}} \right]$$

展开该式后，由于 RG 乘积的数值较小，可予忽略，则得

$$\gamma = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} + j\omega \sqrt{LC}$$

故得

$$\begin{cases} \alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} & (1-38) \\ \beta = \omega \sqrt{LC} & (1-39) \end{cases}$$

通过上面的讨论，对传输参数 γ 归纳出下面几点认识：

(a)它是反映传输线对信号传输产生影响的一个参数，描述信号在传输线上的变化规律，该参数与传输线的 R 、 L 、 C 、 G 以及信号的频率有关。

(b)它是一个复数，实部称为固有衰减常数，它是影响信号幅度的物理量，单位为 Np/km ，虚部称为固有相移常数，它是影响信号相移的物理量，单位为 rad/km 。

(c)固有衰减的频率特性如图1-4所示。它的数值随频率增加而逐渐增加，并逐步趋近于 $\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$ 。

(d)固有相移的频率特性如图1-5所示。它也随频率增加而加大，但低频部分变化率较大，高频时呈线性增加，变化率趋于常数。

3. 对入射波和反射波的认识：

从稳态解的表示式中可以看出，不论电压波或电流波一般均由两个分量合成。

其一是含 $e^{-\gamma z}$ 或 $e^{\gamma y}$ 项的电压（电流）波，由于

$$e^{-\gamma z} = e^{-\alpha z} e^{-j\beta z}$$

$$e^{\gamma y} = e^{\alpha y} e^{j\beta y}$$

因此当信号自始端输入后，该项电压（电流）波随着距始端的距离