



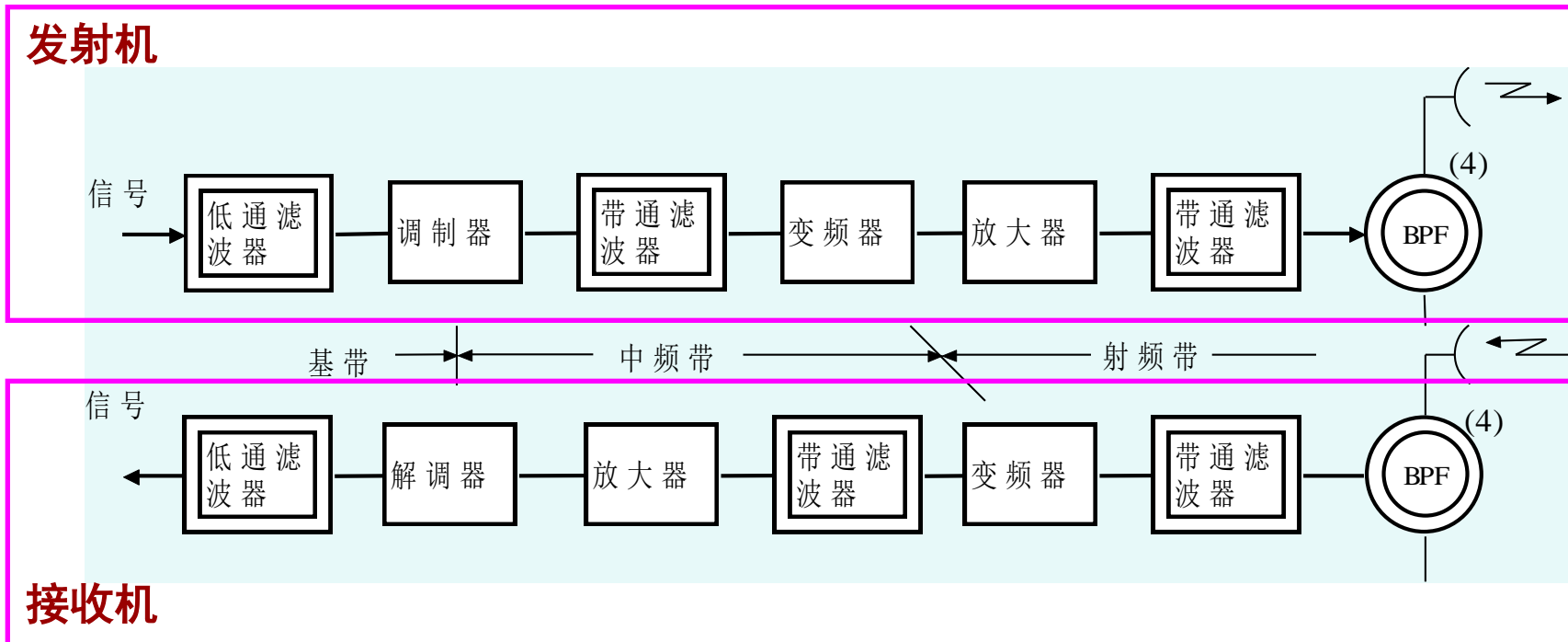
## 微波技术与天线

# 微波技术的应用



# 教学安排及方式

## 完整的通信系统:



# 教学安排及方式

◆ 总学时 48 学时，讲课 46 学时，习题课 2 学时

- 一、绪论(2学时)
- 二、传输线理论(14学时)
- 三、微波网络及元件(10学时)
- 四、天线(14学时)
- 五、电波传播(6学时)

◆ 参考资料

- [1] 王新稳等.《微波技术与天线》，电子工业出版社，2006。
- [2] 廖承恩.《微波技术基础》，西安电子科大出版社，1994。
- [3] 魏文元等.《天线原理》.国防工业出版社,1985。
- [4] 王元坤.《电波传播概论》，北京：国防工业出版社，1984。
- [5] Henry L. Berton著，顾金星 南亲良 王尔为 译，现代无线通信系统电波传播，电子工业出版社，2001.1

◆ 考试：闭卷。

# 绪 论

- ◆ 1、微波及其特点
- ◆ 2、研究对象及应用
- ◆ 3、微波的发展简史回顾

## 一、微波及其特点

### 1、微波的概念

目前把波长为  $1\text{m} \sim 0.1\text{mm}$  的电磁波称为微波 (microwave)。

其对应的频率在  $300\text{MHz} \sim 3000\text{GHz}$ , 微波是指波长很短的波。

微波波段分为:

分米波段 ( B . dm ) ( 频率从  $300 \sim 3000\text{MHz}$  )、

厘米波段 ( B . cm ) ( 频率从  $3 \sim 30\text{GHz}$  )、

毫米波段 ( B . mm ) ( 频率从  $30 \sim 300\text{GHz}$  )

亚毫米波段 ( 频率从  $300 \sim 3000\text{GHz}$  )。

在微波技术中, 常用英文字母来表示更为详细的微波分波段。

# 绪 论

表1 国际无线电频谱的波段划分

波段号数	符号 (中译名)		频率范围 (下限除外, 上限包括在内)	相当米制划分	波段缩写
4	VLF (甚低频)		3 至30 kHz	万 米 波	B·Mam
5	LF (低频)		30至300 kHz	千 米 波	B·Km
6	MF (中频)		300至3000 kHz	百 米 波	B·hm
7	HF (高频)		3 至30 MHz	十 米 波	B·dam
8	VHF (甚高频)		30至300 MHz	米 波	B·m
9	微 波	UHF (超高频)	300至3000 MHz	分米波 (十分之一米波)	B·am
10		SHF (特高频)	3 至30 GHz	厘米波 (百分之一米波)	B·cm
11		EHF (极高频)	30至300 GHz	毫米波 (千分之一米波)	B·mm
12		超极高频	300至3000 GHz	亚毫米波 (万分之一米波)	



**表 0-1 常用微波分波段代号**

波段代号	标称波长(cm)	频率范围(GHz)	波长范围(cm)
L	22	1~2	30~15
S	10	2~4	15~7.5
C	5	4~8	7.5~3.75
X	3	8~12	3.75~2.5
Ku	2	12~18	2.5~1.67
K	1.25	18~27	1.67~1.11
Ka	0.8	27~40	1.11~0.75
U	0.6	40~60	0.75~0.5
V	0.4	60~80	0.5~0.375
W	0.3	80~100	0.375~0.3



波 段	频率范围 (GHz)
UHF	0.3~1.12
L	1.12~1.7
LS	1.7~2.6
S	2.6~3.95
C	3.95~5.85
XC	5.85~8.2
X	8.2~12.4
Ku	12.4~18.0
K	18.0~26.5
Ka	26.5~40.0
Q	33.0~50.0
U	40.0~60.0
M	50.0~75.0
E	60.0~90.0
F	90.0~140.0
G	140.0~220.0
R	220.0~325.0

**2、特点：**介于超短波和红外线之间，波长很短

★**似光性：**具有反射、直线传播、集束性

★**似声性：**波导；喇叭天线和缝隙天线；微波谐振腔

★**分析方法的独特性：**场与波传输分析方法

★**共渡性：**微波电真空器件。

★**穿透性：**可穿透云、雾、雪；电离层；地表层；生物体等；

★**宽频带性：**传输信息多

★**热效性：**可使物体发热

★**散射特性：**向除入射方向之外的其它方向散射。

★**非电离性：**不会破坏化学键。

## 二、研究对象及应用

**对象：**微波技术研究的是微波信号的产生、放大、传输、接收、控制、测量、使用的方法。

**应用：**如雷达与通信

导弹跟踪雷达、炮火瞄准雷达、气象探测雷达和机场管制雷达等。

微波波段的信息量巨大，被广泛应用于各种通信业务中，例如微波多路通信、微波中继通信、散射通信、移动通信和卫星通信等。

## 三、微波的发展简史

其发展过程大致可分为三个阶段

·1940年以前为第一阶段，是实验室早期研究阶段，主要研究微波产生的方法。

·1940年至1945年为第二阶段，是微波技术迅速发展并应用于实际的阶段。在此阶段大多数微波电子器件都产生了，并采用了波导和空腔谐振器。

·1945年以后为第三阶段，是微波技术广泛发展和应用的阶段。

开辟了新波段，扩展了应用范围新的边缘科学领域：射电天文学、射电气象学等；

建立了一整套微波电子学理论；

1965年以后，向固体化、小型化方向发展。

**表 0-3 微波技术的发展简表**

传输线	双线 同轴传输线 → 波导传输线 → 带状微带线 → 介质波导 → 鳍线波导传输线
振荡器	微波电真空器件 → 微波半导体器件 → 多管合成器件
电路形式	波导电路 → 微带电路 → 混合集成电路 → 单片集成电路
研究的波段	分米波段 → 厘米波段 → 毫米波段 → 亚毫米波段

**标志性事件：1943年制造出第一台微波雷达，工作波长：10cm。**

**研究新波段：太赫兹波段**

**ISM：2.4GHz**

**水分子谐振频率：2.45GHz**

# 第一章 传输线理论

- ◆ § 1.1 传输线方程及其解
- ◆ § 1.2 均匀无耗长线的工作状态
- ◆ § 1.3 圆图及阻抗匹配
- ◆ § 1.4 波导与同轴线
- ◆ § 1.5 平面传输线

## § 1.1 传输线方程及其解

### 一、微波传输线的概念

**微波传输线**是用以传输微波信息和能量的各种形式的传输系统的总称。

它的作用是引导电磁波沿一定方向传输，因此又称为**导波系统**，其所导引的电磁波被称为**导行波**。

一般将截面尺寸、形状、媒质分布、材料及边界条件均不变的导波系统称为规则导波系统，又称为**均匀传输线**。

把导行波传播的方向称为纵向，垂直于导波传播的方向称为横向。无纵向电磁场分量的电磁波称为横电磁波，即**TEM波**。

传输线本身的不连续性可以构成各种形式的微波无源元器件，这些元器件和均匀传输线、有源元器件及天线一起构成**微波系统**。

## § 1.1 传输线方程及其解

### 二、微波传输线的分类

可以分为三种类型：

第一类是双导体传输线，它由两根或两根以上平行导体构成，因其传输的电磁波是横电磁波（TEM波）或准TEM波，故又称为**TEM波传输线**，主要包括平行双线、同轴线、带状线和微带线等，如图 1- 1(a)所示。

第二类是均匀填充介质的金属波导管，因电磁波在管内传播，故称为**波导**，因其传输的是横电（TE）波或横磁（TM）波，都是色散波，所以又称其为**色散波传输线**。主要包括矩形波导、圆波导、脊形波导和椭圆波导等，如图 1- 1(b)所示。

第三类是**介质传输线**，因电磁波沿传输线表面传播，故称为**表面波传输线**，因其传输的是TE和TM波的混合波，它也是色散波传输线。主要包括介质波导、 镜像线和单根表面波传输线等，如图 1 - 1(c)所示。



# § 1.1 传输线方程及其解

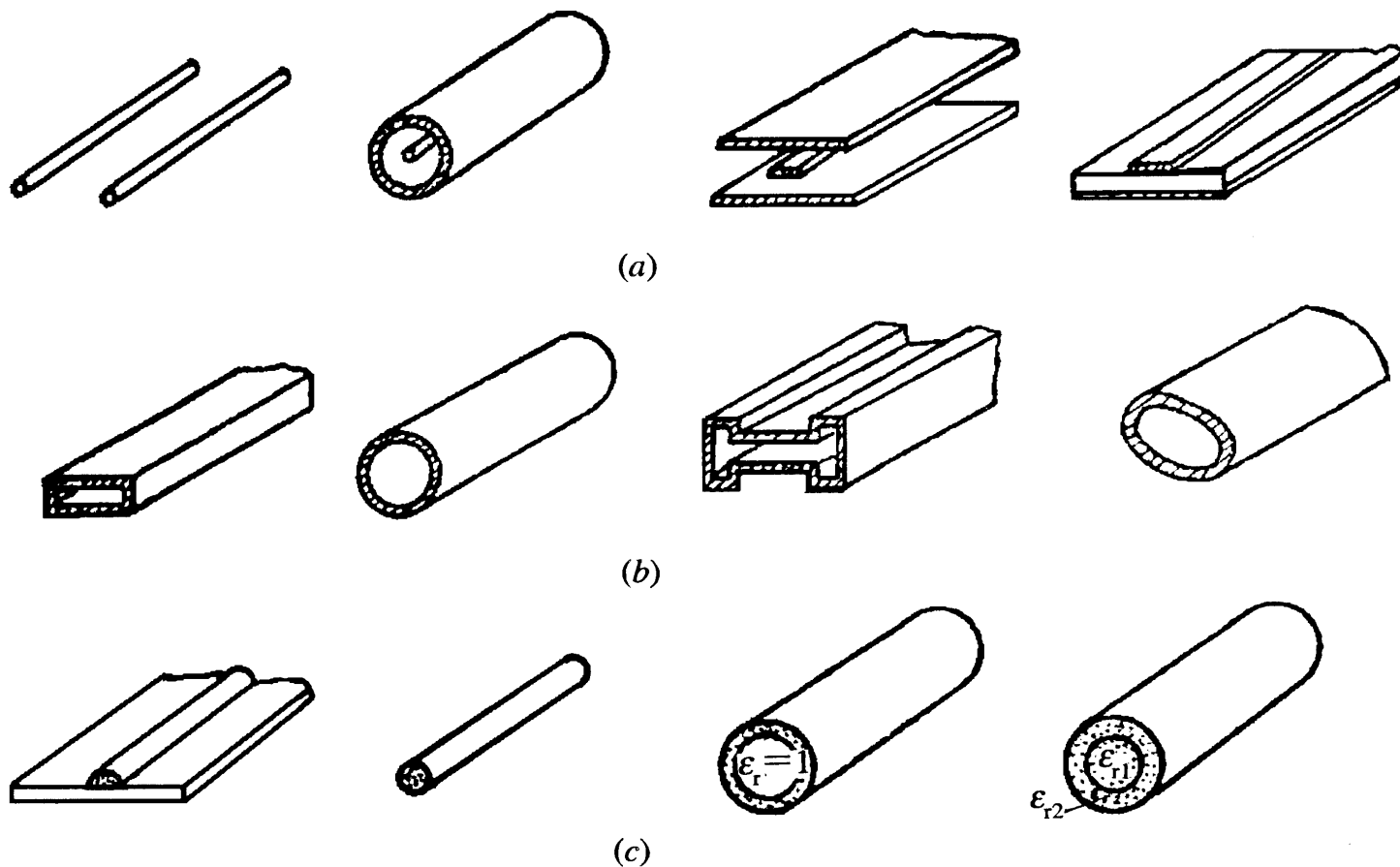


图 1-1 各种微波传输线

## § 1.1 传输线方程及其解

### 三、传输特性分析方法：

分析电磁波沿传输线的传播特性的方法有2种：

#### 1、“场”分析方法

从麦克斯韦方程出发，结合边界条件，求解电磁场的波动方程，场的时空变化规律等。是色散波传输系统的根本分析方法；

#### 2、“路”分析方法

将传输线当成分布参数电路处理。基于基尔霍夫定律，求电流和电压时空变化规律。TEM波传输线多用此方法分析。

## § 1.1 传输线方程及其解

### 四、分布参数电路的模型

#### 1、长线的概念

当传输线的横向尺寸比信号波长小得多，而轴向尺寸远比信号波长大时，可将传输线看成一维分布参数电路。其几何长度 $l$ 与其上工作波长 $\lambda$ 的比值(即 $l / \lambda$ )称为传输线的**电长度**。

在微波波段工作的各种传输线，其上传输的电磁波的波长很短，传输线的几何长度比信号波长还长或者可以相比拟，所以传输线又称为长线。一般认为当 $l > 0.1\lambda$ 时可看成长线。

传输线理论又称为长线理论。

## § 1.1 传输线方程及其解

在低频或信号波长远大于传输线实际长度的电子设备中，传输线(此时为电路元件之间的连接线)本身分布参数所引起的效应完全可以忽略不计，而把电路当作**集总**参数电路来处理。

但当频率很高时，传输线的实际长度可与信号波长相比拟甚至更长时，传输线上的电压和电流将不仅是时间的函数同时还是距离的函数，其上电压、电流和阻抗等物理量的变化规律就不能再沿用集总参数电路理论而必须用传输线理论来研究。

根据传输线上的分布参数是否均匀分布，可将传输线分为均匀传输线和不均匀传输线。本章主要讨论**均匀传输线**。

## § 1.1 传输线方程及其解

### 2、分布参数电路的模型

由电磁场理论知，当高频信号通过传输线时将产生如下分布参数效应：

由于电流流过导线路使导线发热这表明导线本身具有**分布电阻 ( $R_1$ )**；

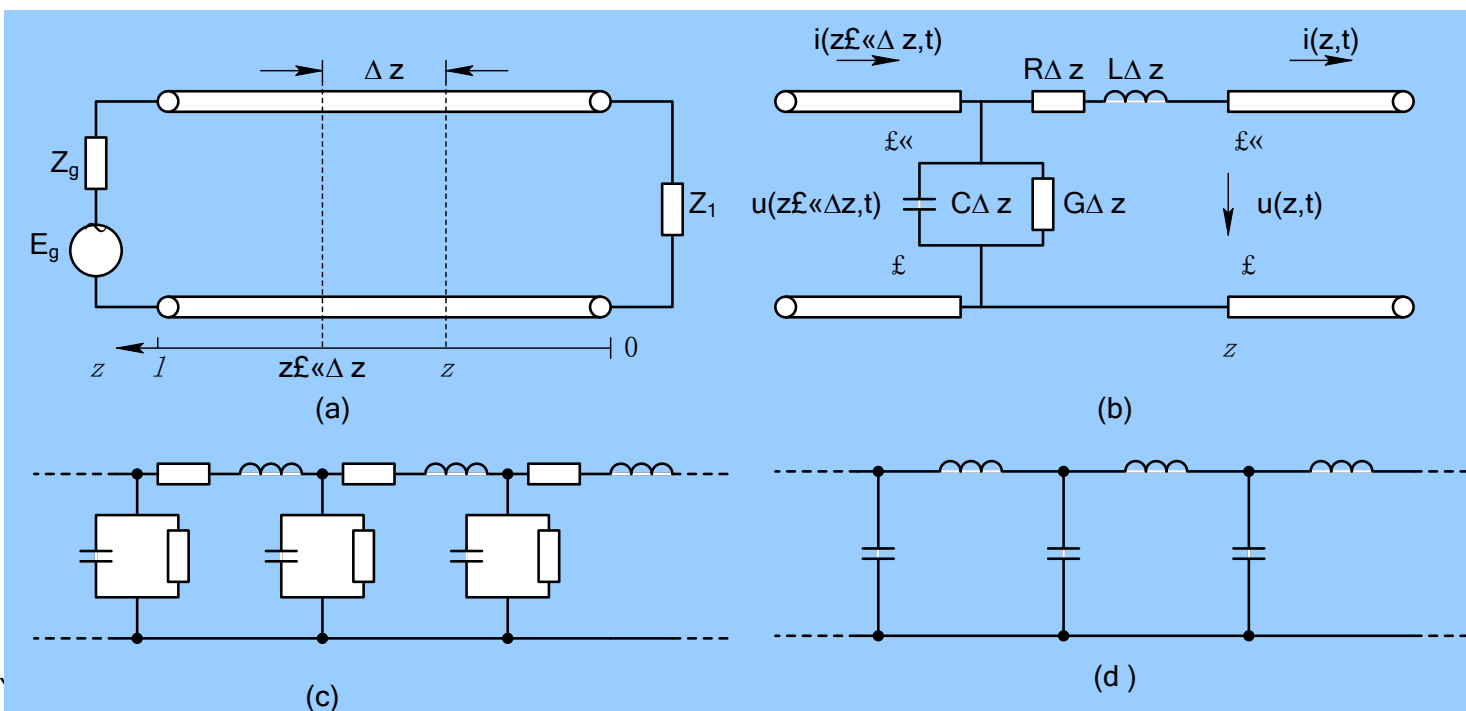
由于导线间绝缘不完善而存在漏电流这表明导线间处处有**分布漏电导 ( $G_1$ )**；

由于导线中通过电流，周围将有磁场因而导线上存在**分布电感 ( $L_1$ )**的效应；

又由于导线间有电压，导线间便有电场，于是导线间存在**分布电容 ( $C_1$ )**的效应。

## § 1.1 传输线方程及其解

连接源和负载的**TEM**传输线电路如图(a)所示。利用分布参数的概念，将均匀长线划分为许多无限小的线段 $\Delta z$  ( $\Delta z \ll \lambda$ )，则每一个小线元可看成集总参数电路，其上有电阻 $R\Delta z$ 、电感 $L\Delta z$ 、电容 $C\Delta z$ 和漏电导 $G\Delta z$ ，于是得到其等效电路如图(b)所示。此即为传输线的电路模型；线元等效为集总元件构成的 $\Gamma$ 型网络，实际的传输线则表示成各线元等效网络的级联，如图(c)、(d)所示。

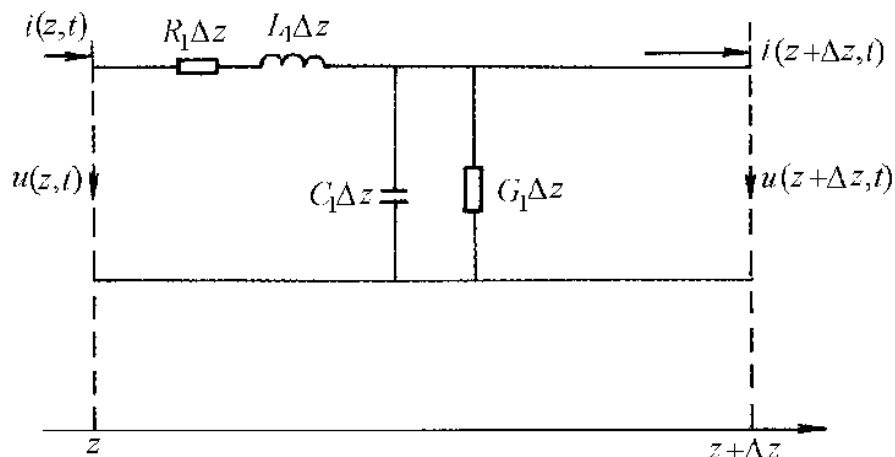


# § 1.1 传输线方程及其解

## 四、长线方程及其解

### 1、传输线方程

把传输线用图所示的电路等效，则根据基尔霍夫电压、电流定律，线元 $\Delta z$ 段上电压、电流的变化为：



$$\begin{cases} -u(z + \Delta z, t) + u(z, t) = \left[ Ri(z, t) + L \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} \right] \Delta z \\ -i(z + \Delta z, t) + i(z, t) = \left[ Gu(z + \Delta z, t) + C \frac{\partial u(z + \Delta z, t)}{\partial t} \right] \Delta z \end{cases}$$

对上两式两边同除 $\Delta z$ ，  
 并取 $\Delta z \rightarrow 0$ 的极限有：

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial z} = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial z} = Gu + C \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases} \quad (1-1)$$

称为一般均匀传输线方程，也叫**电报方程**。

## § 1.1 传输线方程及其解

如果我们着重研究时谐(正弦或余弦)变化的情况, 有

$$\begin{cases} u(z, t) = R_e [U(z)e^{j\omega t}] \\ i(z, t) = R_e [I(z)e^{j\omega t}] \end{cases}$$

式中,  $U(z)$ 、 $I(z)$ 只与 $z$ 有关, 表示在传输线 $z$ 处的电压或电流的有效复值。代入(1-1)式可得时谐传输线方程:

$$\begin{aligned} -\frac{dU}{dz} &= (R + j\omega L)I = ZI \\ -\frac{dI}{dz} &= (G + j\omega C)U = YU \end{aligned} \tag{1-2}$$

式中 $Z$ 、 $Y$ 分别称为传输线单位长度的串联阻抗和并联导纳。



## § 1.1 传输线方程及其解

### 2、均匀传输线方程的通解

如果长线的分布参数沿线均匀分布，不随位置变化，则称其为均匀传输线。（1-2）式两边对 $z$ 再求一次微分并将（1-2）式代入得

$$\begin{aligned} \frac{d^2 U}{dz^2} = -Z \frac{dI}{dz} & \quad \frac{d^2 U}{dz^2} - \gamma^2 U = 0 \\ \frac{d^2 I}{dz^2} = -Y \frac{dU}{dz} & \quad \frac{d^2 I}{dz^2} - \gamma^2 I = 0 \end{aligned} \quad \xrightarrow{\text{将 (1-2) 式代入}} \quad (1-3)$$

这就是均匀长线电压和电流的波动方程。其中  $\gamma^2 = ZY$

其通解为：

$$\begin{aligned} U(z) &= A_1 e^{-\gamma z} + A_2 e^{\gamma z} \\ I(z) &= \frac{1}{Z_0} (A_1 e^{-\gamma z} - A_2 e^{\gamma z}) \end{aligned} \quad (1-4)$$

## § 1.1 传输线方程及其解

其中： $\gamma = \sqrt{ZY} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta$

$$Z_0 = \frac{Z}{\gamma} = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

对于一般长线  $Z_0$  和  $\gamma$  都是复数，其中  $Z_0$  具有阻抗量纲，称为传输线的**特性阻抗**， $\gamma$  称为长线的**传播常数**，其实部称为**衰减常数**，虚部称为**相移常数**。

把  $\gamma = \alpha + j\beta$  代入上式中的指数项中有：

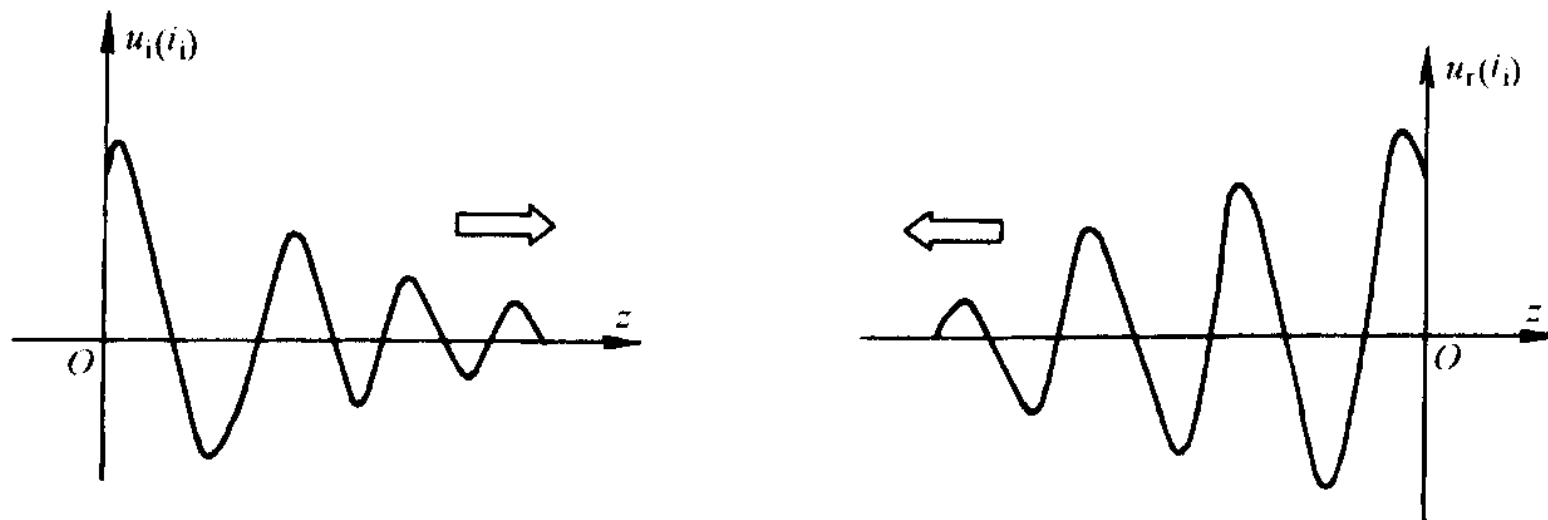
$$e^{\gamma z} = e^{\alpha z} \cdot e^{j\beta z} \quad e^{-\gamma z} = e^{-\alpha z} \cdot e^{-j\beta z}$$

可知： $e^{-j\beta z}$  项为离开源向负载方向传输的波，称为入射波，

用下标  $i$  表示；而  $e^{j\beta z}$  项为离开负载端向电源方向传输的波，称为反射波，用下标  $r$  表示。可见，传输线上的电压与电流是以波的形式出现的，都是入射波与反射波的叠加。

## § 1.1 传输线方程及其解

当  $Z_0$  为实数时，电压入射波与电流入射波相位相同，电压反射波与电流反射波相位相反，沿线入射波与反射波的瞬时分布如图所示。



## § 1.1 传输线方程及其解

### 3、均匀传输线方程的定解

式(1-4)中的积分常数 $A_1$ 、 $A_2$ 可由传输线的端接条件确定，下面分别讨论长线始端或终端电压、电流已知时，传输线方程的定解。

#### (1) 已知始端条件的解

设已知 $z=0$ 时， $U(0) = U_1$ ， $I(0) = I_1$ ，代入(1-4)式解得

$$A_1 = \frac{U_1 + I_1 Z_0}{2}, \quad A_2 = \frac{U_1 - I_1 Z_0}{2}, \quad \text{整理后可得:}$$

$$\left. \begin{aligned} U(z) &= \frac{U_1 + I_1 Z_0}{2} e^{-\gamma z} + \frac{U_1 - I_1 Z_0}{2} e^{\gamma z} \\ I(z) &= \frac{U_1 + I_1 Z_0}{2 Z_0} e^{-\gamma z} - \frac{U_1 - I_1 Z_0}{2 Z_0} e^{\gamma z} \end{aligned} \right\}$$

用双曲函数表示:

$$\left. \begin{aligned} U(z) &= U_1 \operatorname{ch} \gamma z - I_1 Z_0 \operatorname{sh} \gamma z \\ I(z) &= -U_1 \frac{\operatorname{sh} \gamma z}{Z_0} + I_1 \operatorname{ch} \gamma z \end{aligned} \right\}$$

## § 1.1 传输线方程及其解

### (2) 已知终端条件的解

设已知  $z = l$  时,  $U(l) = U_2$ ,  $I(l) = I_2$  代入(1-4)式解得

$$A_1 = \frac{U_2 + I_2 Z_0}{2} e^{\gamma l}, \quad A_2 = \frac{U_2 - I_2 Z_0}{2} e^{-\gamma l}, \quad \text{代入整理并代换变量:}$$

$$\left. \begin{aligned} U(z') &= \frac{U_2 + I_2 Z_0}{2} e^{\gamma z'} + \frac{U_2 - I_2 Z_0}{2} e^{-\gamma z'} \\ I(z') &= \frac{U_2 + I_2 Z_0}{2 Z_0} e^{\gamma z'} - \frac{U_2 - I_2 Z_0}{2 Z_0} e^{-\gamma z'} \end{aligned} \right\}$$

其中  $z' = l - z$ , 表示以终端作为起点。

## § 1.1 传输线方程及其解

上式也可写为:

$$\left. \begin{aligned} U(z') &= U_{i2} e^{\gamma z'} + U_{r2} e^{-\gamma z'} = U_i(z') + U_r(z') \\ I(z') &= \frac{U_{i2}}{Z_0} e^{\gamma z'} - \frac{U_{r2}}{Z_0} e^{-\gamma z'} = I_i(z') + I_r(z') \end{aligned} \right\}$$

式中,  $U_i(z')$ 、 $I_i(z') = \frac{U_i(z')}{Z_0}$  表示的是  $z'$  点的人射电压、电流波,  $U_r(z')$ 、 $I_r(z') = -\frac{U_r(z')}{Z_0}$  表示的是  $z'$  点的反射电压、电流波。

也可表示成双曲函数的形式:

$$\left. \begin{aligned} U(z') &= U_2 \operatorname{ch} \gamma z' + Z_0 I_2 \operatorname{sh} \gamma z' \\ I(z') &= \frac{U_2}{Z_0} \operatorname{sh} \gamma z' + I_2 \operatorname{ch} \gamma z' \end{aligned} \right\}$$

# § 1.1 传输线方程及其解

◆作业

P.78: 1, 2, 4