

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

§ 1.2 均匀无耗长线的工作状态

四、均匀无耗长线的工作状态

所谓工作状态，即指长线终端接不同负载时，电压、电流波沿线的分布状态，有三种：端接无反射（匹配）负载的行波工作状态，端接全反射负载的驻波工作状态及部分反射（不匹配负载）的行驻波状态。

1、行波工作状态(无反射情况)

由反射系数公式可以得到传输线上无反射波的条件为 $Z_L = Z_0$ ，则可得到行波状态时沿线电压和电流的表达式为

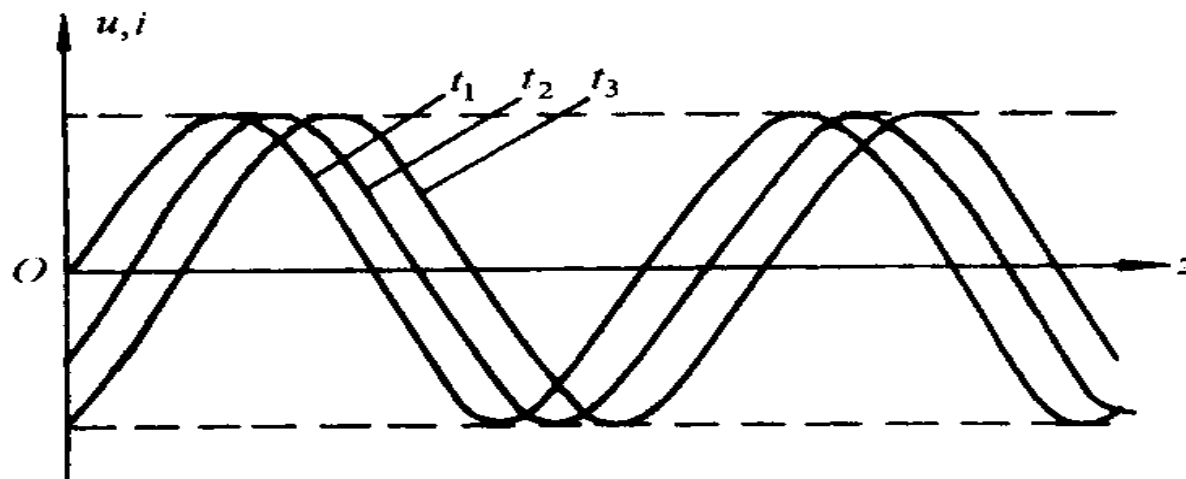
$$\begin{cases} U(z) = U_i e^{-j\beta z} \\ I(z) = I_i e^{-j\beta z} = \frac{U_i}{Z_0} e^{-j\beta z} \end{cases}$$

电压、电流的瞬时值表示式为

$$\begin{cases} u(z, t) = |U_i| \cos(\omega t - \beta z + \varphi_1) \\ i(z, t) = \frac{|U_i|}{Z_0} \cos(\omega t - \beta z + \varphi_1) \end{cases}$$

§ 1.2 均匀无耗长线的工作状态

根据上述关系式作出的电压、电流行波的瞬时分布和振幅分布曲线如图所示。



由 $Z_L = Z_0$ ，则可得：

$$Z_{in}(z) = Z_0, \quad \Gamma(z) = 0, \quad \rho = 1$$

此时负载吸收的功率为

$$P_L = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[U(z)I(z)^*] = \frac{1}{2} \frac{|U_{i1}|^2}{Z_0}$$

该式表明：由源馈送到长线的能量，全部被负载吸收。

§ 1.2 均匀无耗长线的工作状态

2. 驻波工作状态

长线终端短路、开路或端接纯电抗负载时，由于 $|\Gamma_L|=1$ ，所以入射波在终端都将被全反射。入射波与反射波叠加，沿线形成驻波分布，驻波比 $\rho=\infty$ 。

(1) 终端短路($Z_L=0, \Gamma_L=-1$)

因 $Z_L=0$ ，则有 $U_2=0$ ，即可得到沿线电压、电流分布表达式为：

$$\begin{cases} U(z') = jI_2 Z_0 \sin \beta z' = j2U_{i2} \sin \beta z' \\ I(z') = I_2 \cos \beta z' = 2I_{i2} \cos \beta z' \end{cases}$$

沿线电压和电流的瞬时值表示式为

$$\begin{cases} u(z', t) = 2|U_{i2}| \sin \beta z' \cos(\omega t + \varphi_2 + \frac{\pi}{2}) \\ i(z', t) = 2|I_{i2}| \cos \beta z' \cos(\omega t + \varphi_2) \end{cases}$$

§ 1.2 均匀无耗长线的工作状态

沿线电压、电流的振幅值

$$\begin{cases} |U(z')| = 2|U_{2i}|\sin \beta z' \\ |I(z')| = 2|I_{2i}|\cos \beta z' \end{cases}$$

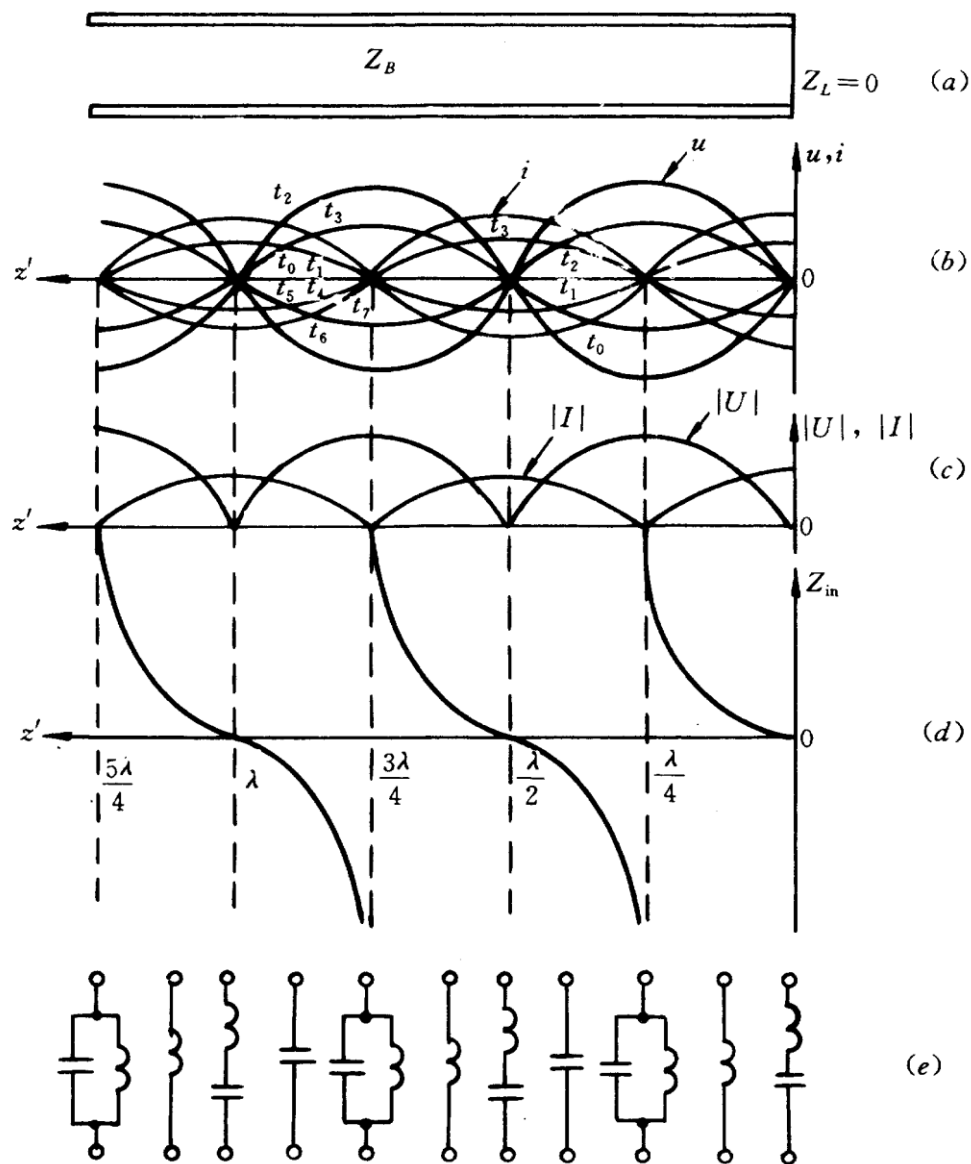
线上任意一点的输入阻抗为

$$Z_{in}(z') = jZ_0 \tan \beta z' = jX_{in}$$

沿线电压、电流、及阻抗分布分别如图所示。

由图可见，瞬时电压或电流在某个固定位置上随时间 t 作正弦或余弦变化，而在某一个时刻 t 时随距离 z 作余弦或正弦变化，即瞬时电压和电流的时间相位差和空间相位差均为 $\pi/2$ ，这表明传输线上没有功率的传输。在离终端距离 $z'=\lambda/4$ 的奇数倍处，电压振幅值永远最大，电流振幅值永远为零，称为电压的波腹点和电流的波节点；而在 $z'=\lambda/2$ 的整数倍处，电压为波节点和电流为波腹点。

§ 1.2 均匀无耗长线的工作状态



§ 1.2 均匀无耗长线的工作状态

(2) 终端开路($Z_L=\infty, \Gamma_L=1$)

可得终端开路时沿线电压、电流分布的表达式为

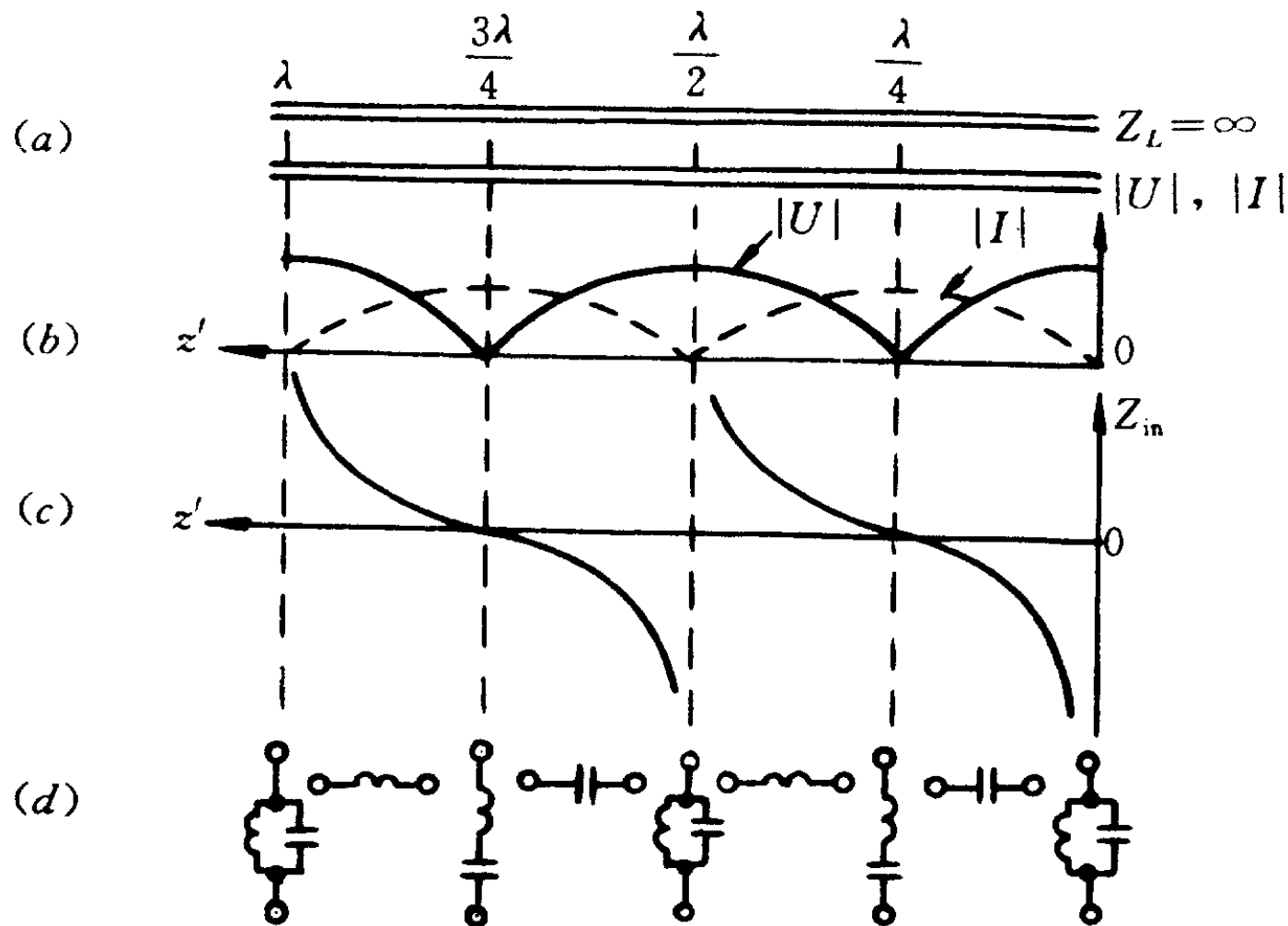
$$\begin{cases} U(z') = 2U_{2i} \cos \beta z' \\ I(z') = j2I_{2i} \sin \beta z' \end{cases}$$

上面两式相比,可得沿线阻抗分布的表达式

$$Z_{in}(z') = -jZ_0 \operatorname{ctg} \beta z'$$

终端开路时沿线电压、电流振幅值和阻抗的分布如图所示。由图可见终端为电压波腹点、电流波节点,阻抗为无穷大。和终端短路的情况相比,可以得到这样一个**结论**:只要将终端短路的传输线上电压、电流及阻抗分布从终端开始去掉 $\lambda/4$ 线长,余下线上的分布即为终端开路的传输线上沿线电压、电流及阻抗分布。

§ 1.2 均匀无耗长线的工作状态



§ 1.2 均匀无耗长线的工作状态

(3) 终端接纯电抗负载

当终端接纯电抗负载 jX 时，其终端反射系数为：

$$\Gamma_L = \frac{jX - Z_0}{jX + Z_0} = \frac{X^2 - Z_0^2}{X^2 + Z_0^2} + j \frac{2Z_0X}{X^2 + Z_0^2} = e^{j\varphi_L}$$

$|\Gamma_L|=1$ ， $\varphi_L \neq 0$ 或 π ，终端产生全反射，沿线呈驻波分布，不是波节点也不是波腹点

当 $Z_L=jX$ ， $X>0$ 为感抗时，则 $|\Gamma_L|=1$ ， $0<\varphi_L<\pi$ ，

由于一段长度 $l<\lambda_p/4$ 的短路线的输入阻抗是一纯电感，因此可将端接的纯电感负载用一段长度为 l_0 （ $<\lambda_p/4$ ）的短路线代替， l_0 的值由 $X=Z_0\tan\beta l_0$ 得：

$$l_0 = \frac{\lambda_p}{2\pi} \arctan\left(\frac{X}{Z_0}\right)$$

§ 1.2 均匀无耗长线的工作状态

这样由短路线的电压、电流和阻抗分布截去 l_0 长就可得到端接纯电感负载时沿线的电压、电流和阻抗分布，如图所示。此时在终端既不是波腹点，也不是波节点，但**离开终端第一个出现的必是电压波腹、电流波节**。

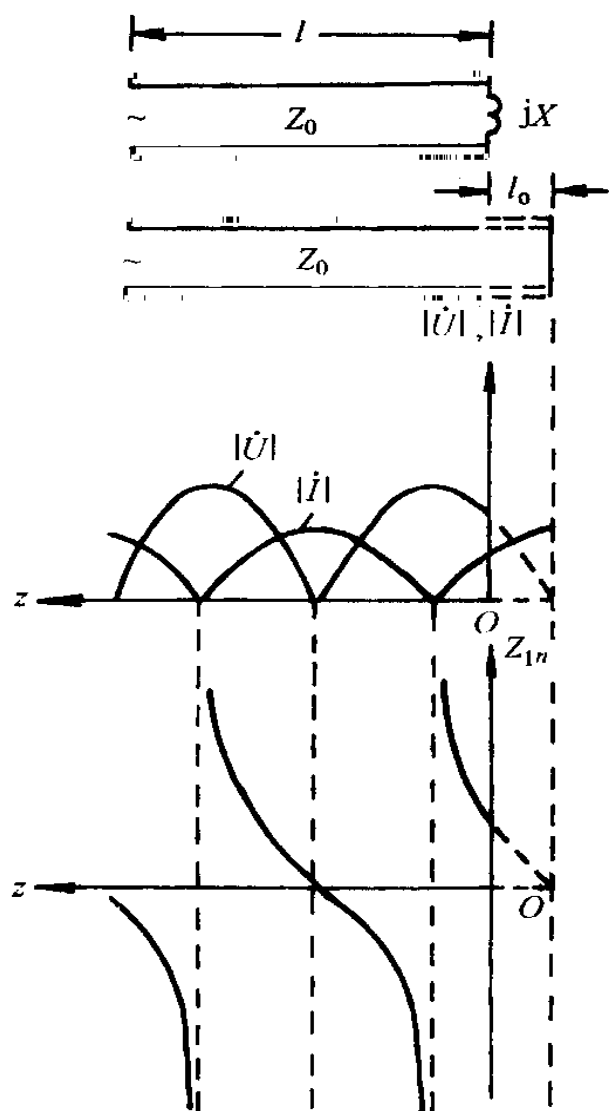
当 $Z_L = -jX$ ， $X > 0$ 为容抗时，则 $|\Gamma_L| = 1$ ， $\pi < \varphi_L < 2\pi$ ，

由于一段长度 $l < \lambda_p/4$ 的开路线的输入阻抗是一纯电容，因此可将端接的纯电容负载用一段长度为 l_0 （ $< \lambda_p/4$ ）的开路线代替， l_0 的值由 $X = Z_0 \cot \beta l_0$ 得：

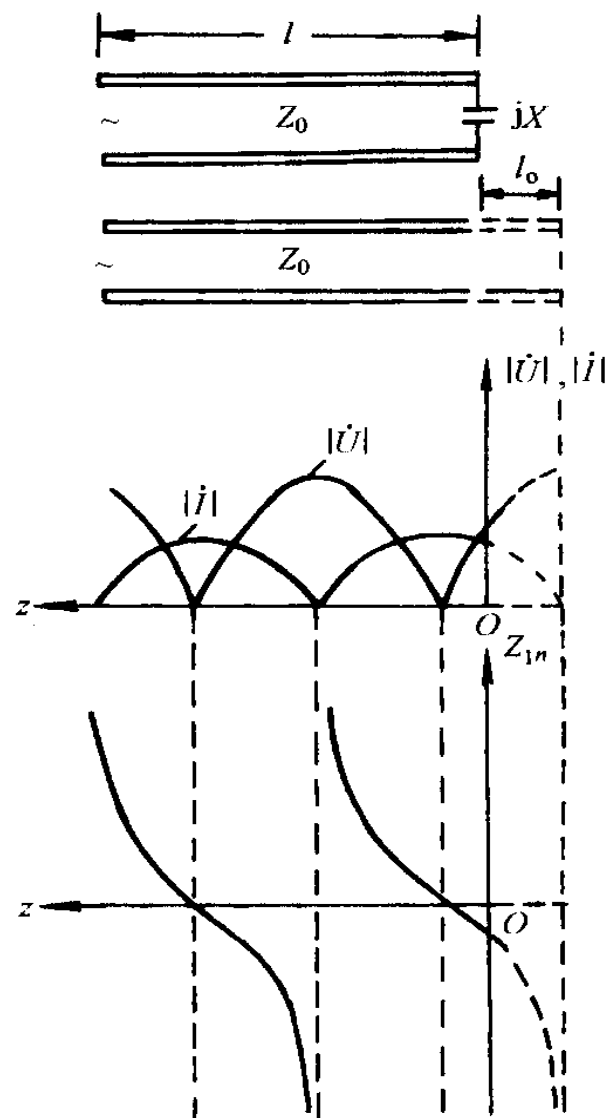
$$l_0 = \frac{\lambda_p}{2\pi} \arctan \left(\frac{Z_0}{X} \right)$$

这样由开路线的电压、电流和阻抗分布截去 l_0 长就可得到端接纯电容负载时沿线的电压、电流和阻抗分布，如图所示。此时在终端仍取不到波腹或波节，但**离开终端第一个出现的必是电压波节、电流波腹**。

§ 1.2 均匀无耗长线的工作状态



(a) 终端接感性负载



(b) 终端接容性负载

§ 1.2 均匀无耗长线的工作状态

综上所述，均匀无耗长线终端无论是短路、开路，还是端接纯电抗负载，终端均产生**全反射**，沿线电压、电流呈驻波分布，其特点如下：

① 沿线电压、电流的振幅是位置的函数，具有固定不变的波腹和波节点，两相邻波腹（或波节）点之间的距离为 $\lambda_p/2$ ，相邻波腹和波节点之间的距离为 $\lambda_p/4$ 。

短路线终端为电压波节、电流波腹点；

开路线终端为电压波腹、电流波节；

接纯电感负载时，离开终端第一个是电压波腹点；

接纯电容负载时，离开终端第一个出现的是电压波节。

② 沿线同一位置的电压与电流之间相位相差 $\pi/2$ ，所以驻波状态只有能量的贮存，没有能量的传输。

③ 电压或电流波节点两侧的各点相位相反，相邻两波节点之间各点的相位相同。

④ 传输线的输入阻抗为纯电抗，且随频率和长度变化；在频率一定时，不同长度的驻波线分别等效为电感、电容，串联谐振电路和并联谐振电路。