

高电压技术

屠幼萍

 +80795842, 13691145432

 typ@ncepubj.edu.cn



华北电力大学
North China Electric Power University

高电压与电磁兼容技术研究所
High Voltage & Electromagnetic Compatibility Laboratory





第二篇

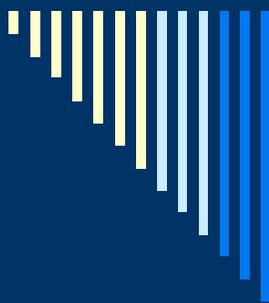
电力系统过电压及保护



第 12 讲

线路和绕组中的波过程

- 无损耗单导线线路中的波过程
- 行波的折射与反射
- 行波通过串联电感和并联电容
- 行波的多次折、反射
- 无损平行多导线系统中的波过程
- 冲击电晕对线路波过程的影响

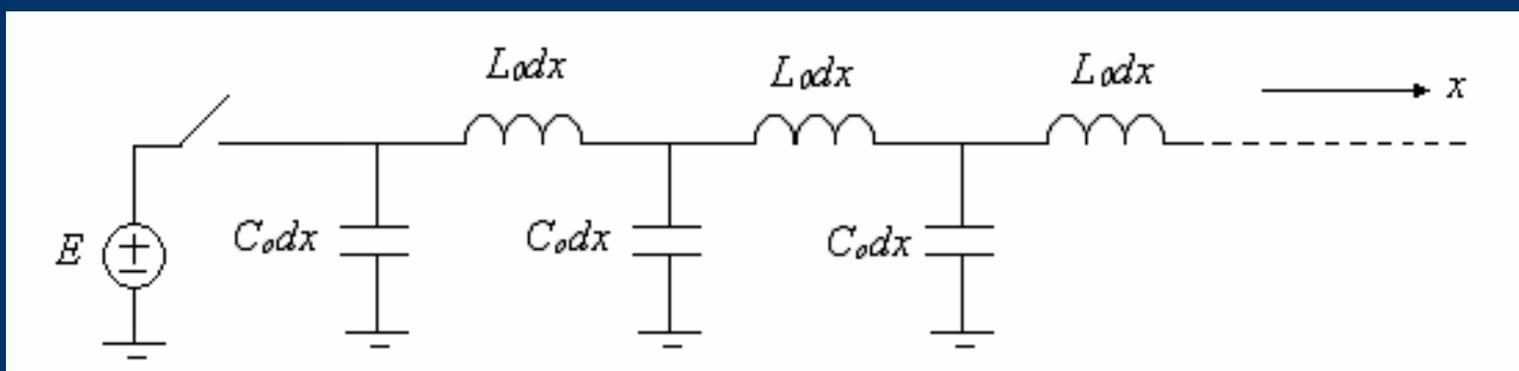


第一节 无损耗单导线 线路中的波过程

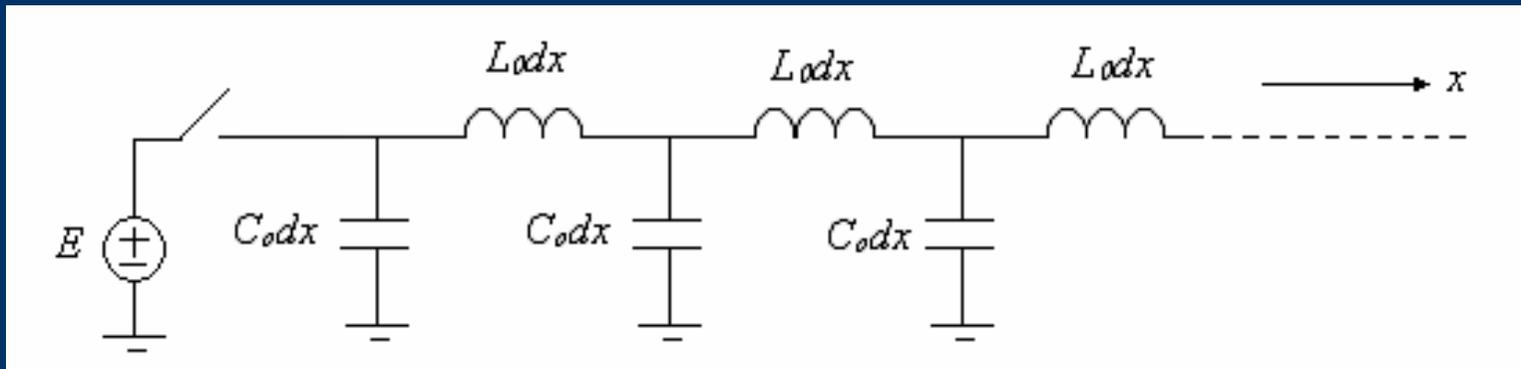
- 波过程的物理概念
- 波动方程及其解
- 前行波和反行波
- 波阻抗与波速

第一节 无损耗单导线线路中的波过程

1. 波过程的物理概念



- 电源向电容充电，在导线周围建立起电场，靠近电源的电容立即充电，并向相邻的电容放电



- 由于电感作用，较远处电容需一段时间才能充上一定的电荷，电压波以某速度沿线路 x 传播
- 随着线路电容的充放电，将有电流流过导线的电感，在导线周围建立起磁场。电流波以同样速度沿 x 方向流动

1. 波过程的物理概念

- 电压波和电流波沿线路的流动，实际上就是电磁波沿线路的传播过程
- 电压波和电流波的关系

$$\frac{u}{i} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = Z$$

- 电流波和电压波沿导线的传播过程实际上就是电磁能量传播的过程

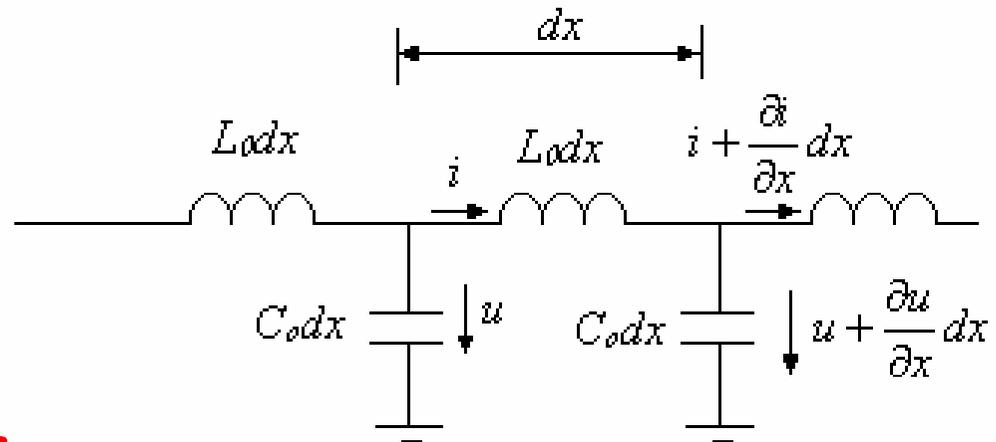
$$\frac{1}{2}(vL_0) \cdot i^2 = \frac{1}{2}(vC_0) \cdot u^2$$

2. 波动方程及其解

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} u = L_0 dx \frac{\partial i}{\partial t} + u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \\ i = C_0 dx \frac{\partial u}{\partial t} + i + \frac{\partial i}{\partial x} dx \end{cases}$$



2. 波动方程及其解

采用运算微积求解：拉氏变换

$$u(x,t) \Leftrightarrow U(x,p), i(x,t) \Leftrightarrow I(x,p)$$

$$\begin{cases} \frac{d^2 U(x,p)}{dx^2} = L_0 C_0 p^2 U(x,p) \\ \frac{d^2 I(x,p)}{dx^2} = L_0 C_0 p^2 I(x,p) \end{cases}$$

二阶齐次线性
常微分方程

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \begin{cases} U(x,p) = U_q(p)e^{-\frac{p}{v}x} + U_f(p)e^{\frac{p}{v}x} \\ I(x,p) = I_q(p)e^{-\frac{p}{v}x} + I_f(p)e^{\frac{p}{v}x} \end{cases}$$

$U_q(p)$ 、 $U_f(p)$

$I_q(p)$ 、 $I_f(p)$

由初始和边界条件确定

2. 波动方程及其解

根据拉氏变换的延迟定理

$$f(t) \Leftrightarrow F(p) \xrightarrow{\text{red arrow}} F(p)e^{-p\tau} \Leftrightarrow f(t-\tau)$$

$$\begin{cases} u(x,t) = u_q\left(t - \frac{x}{v}\right) + u_f\left(t + \frac{x}{v}\right) \\ i(x,t) = i_q\left(t - \frac{x}{v}\right) + i_f\left(t + \frac{x}{v}\right) \end{cases}$$

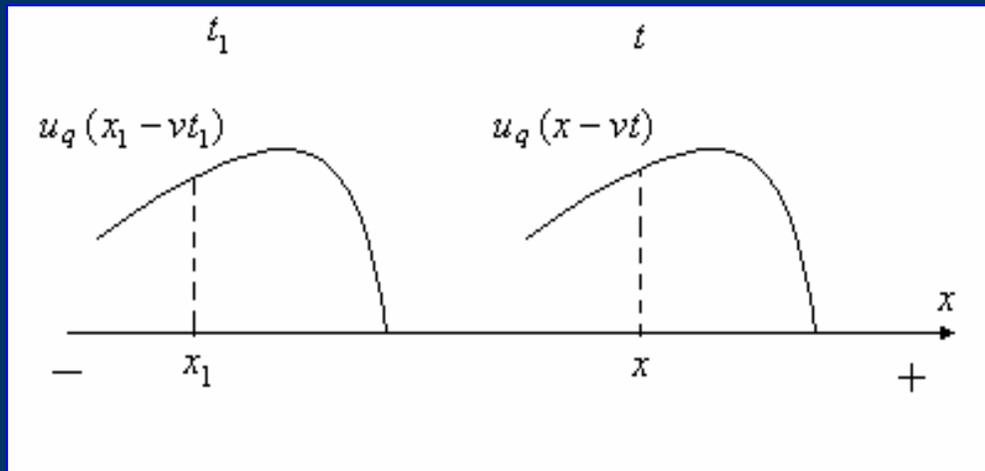
变量置换

$$\begin{cases} u(x,t) = u_q(x-vt) + u_f(x+vt) \\ i(x,t) = i_q(x-vt) + i_f(x+vt) \end{cases}$$

3. 前行波和反行波

电压波的分量之一： $u_q(x-vt)$ \longrightarrow 前行波

观察者由任一时间 t_1 开始，从任一点 x_1 出发，沿 x 方向以速度 v 运动



$$\frac{dx}{dt} = v$$

$$x - vt = [x_1 + v(t - t_1)] - vt = x_1 - vt_1 = \text{常数}$$

3. 前行波和反行波

电压波的分量之二： $u_f(x+vt)$  反行波

值不变， t 增加，以速度 v 向 x 反方向运动

$$x+vt = [x_1 - v(t-t_1)] + vt = x_1 + vt_1 = \text{常数}$$

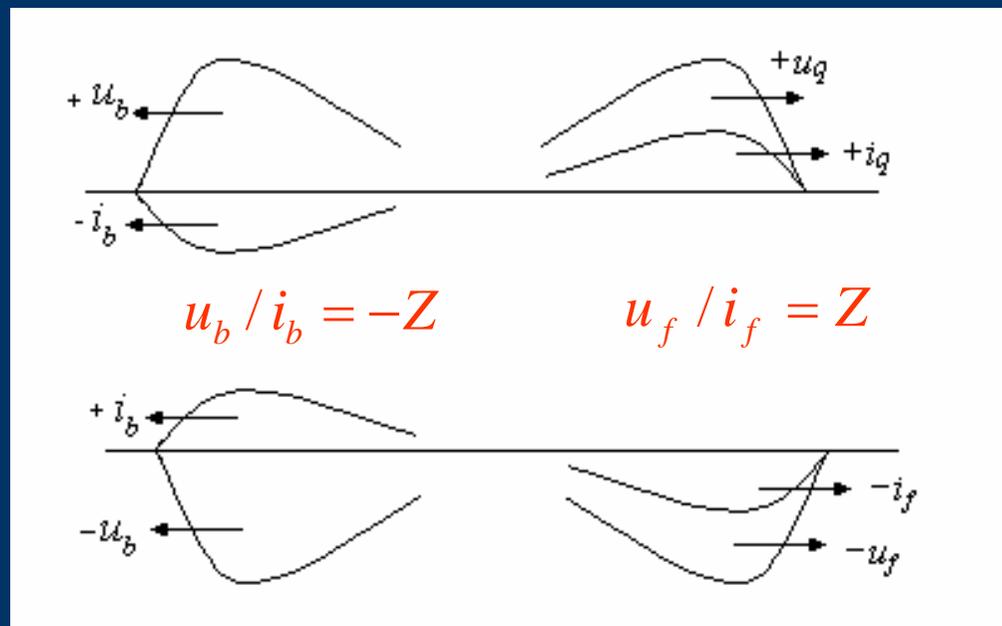
$$u = u_q + u_f$$

$$i = i_q + i_f$$

3. 前行波和反行波

电压波和电流波的关系

- 电压波与电流波通过波阻抗 Z 相互联系
- 电压波符号只与地电容电荷的符号有关
- 电流波符号由电荷符号和运动方向决定



$$\begin{cases} U(x, p) = U_q(p)e^{-\frac{p}{v}x} + U_f(p)e^{\frac{p}{v}x} \\ I(x, p) = I_q(p)e^{-\frac{p}{v}x} + I_f(p)e^{\frac{p}{v}x} \end{cases}$$

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$\frac{dU(x, p)}{dx} = -\frac{p}{v}U_q(p)e^{-\frac{p}{v}x} + \frac{p}{v}U_f(p)e^{\frac{p}{v}x} \longrightarrow -\frac{\partial U(x, p)}{\partial x} = pL_0 I(x, p)$$

$$I(x, p) = \frac{1}{vL_0}U_q(p)e^{-\frac{p}{v}x} - \frac{1}{vL_0}U_f(p)e^{\frac{p}{v}x}$$

$$\left. \begin{aligned} I_q(p)e^{-\frac{p}{v}x} &= \frac{1}{vL_0}U_q e^{-\frac{p}{v}x} \\ I_f(p)e^{\frac{p}{v}x} &= -\frac{1}{vL_0}U_f e^{\frac{p}{v}x} \end{aligned} \right\}$$

拉氏反变换

$$z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$$

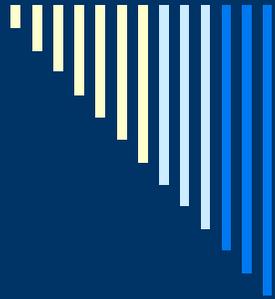
$$\begin{cases} i_q(x - \frac{x}{v}) = \frac{1}{z}u_q(t - \frac{x}{v}) \\ i_f(x + \frac{x}{v}) = -\frac{1}{z}u_f(t + \frac{x}{v}) \end{cases}$$

4. 波阻抗与波速

波阻抗 Z ：表示同一方向传播的电压波与电流波之间的比例大小

- 不同方向的行波， Z 前面有正负号
- Z 只与单位长度的电感和电容有关，与线路长度无关
- 既有前行波，又有反行波时

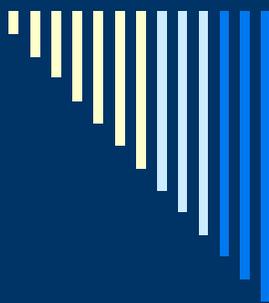
$$\frac{u}{i} = \frac{u_q + u_f}{i_q + i_f} = Z \frac{u_q + u_f}{u_q - u_f} \neq Z$$



第 12 讲

线路和绕组中的波过程

- 无损耗单导线线路中的波过程
- 行波的折射与反射
- 行波通过串联电感和并联电容
- 行波的多次折、反射
- 无损平行多导线系统中的波过程
- 冲击电晕对线路波过程的影响



第二节 波的折射和反射

- 行波的折、反射规律
- 几个特例
- 集中参数等值电路——彼得逊法则

第二节 波的折射和反射

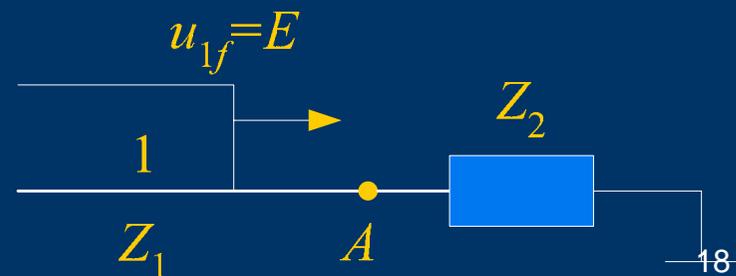
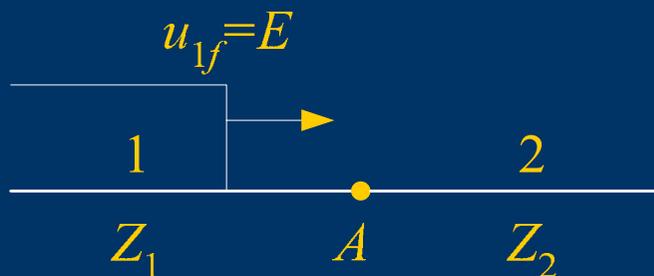
1. 行波的折、反射规律

原因：参数突然改变

边界条件：在节点A只有一个电压和电流

$$\begin{cases} u_{1q} + u_{1f} = u_{2q} \\ i_{1q} + i_{1f} = i_{2q} \end{cases} \quad \begin{aligned} u_{2q} &= \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E = \alpha_u E \\ u_{1f} &= \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} E = \beta_u E \end{aligned}$$

$$\alpha_u = 1 + \beta_u$$

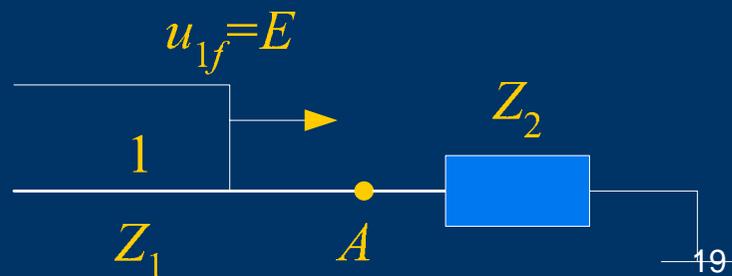
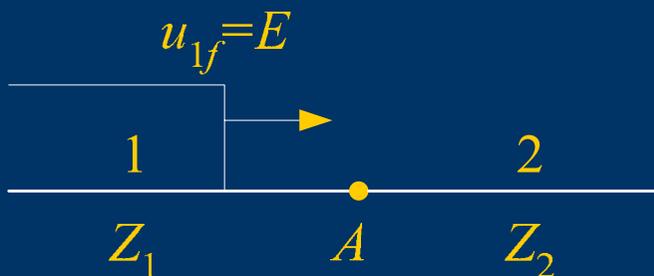


第二节 波的折射和反射

1. 行波的折、反射规律

$$\begin{cases} u_{1q} + u_{1f} = u_{2q} \\ i_{1q} + i_{1f} = i_{2q} \end{cases} \quad \begin{cases} i_{2q} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} E = \alpha_i E \\ u_{1f} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} E = \beta_i E \end{cases}$$

$$\alpha_i = 1 + \beta_i$$



第二节 波的折射和反射

2. 几个特例

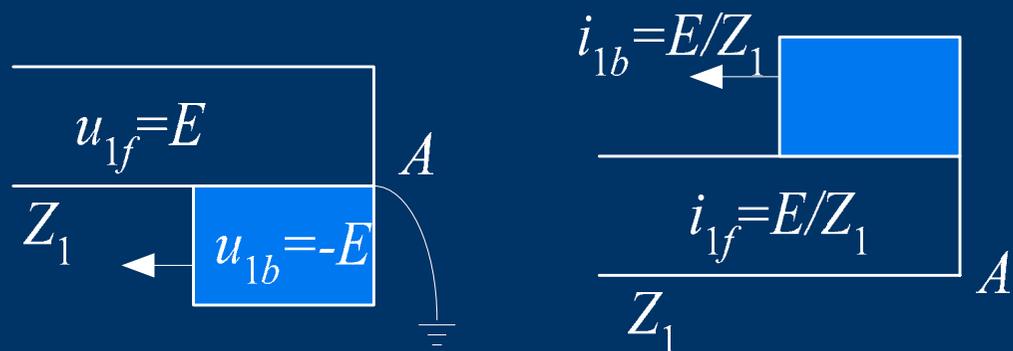
■ 末端开路



- 电压折射系数=2，反射系数 =1
- 能量角度解释： $P_2=0$ ，全部能量反射回去，使线路上反射波到达的范围，单位长度总能量等于入射波能量的2倍，反射波到达后线路电流为零，磁场能量也为零，全部能量都储存在电场

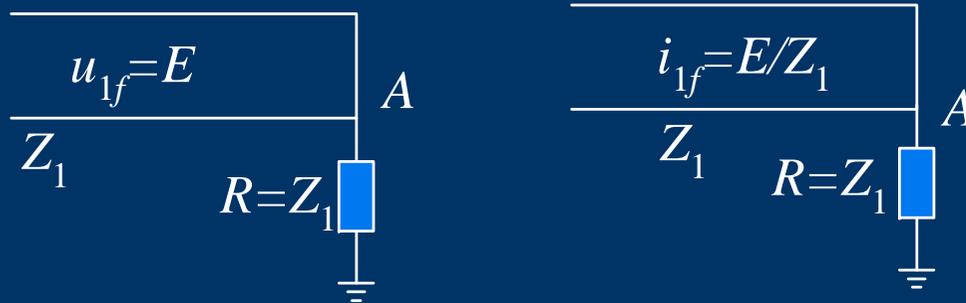
2. 几个特例

■ 线路末端短路



- 折射系数=0，反射系数=-1
- 能量角度解释：因为线路末端接地短路，入射波到达末段后，全部能量反射回去成为磁场能量，电流增加1倍

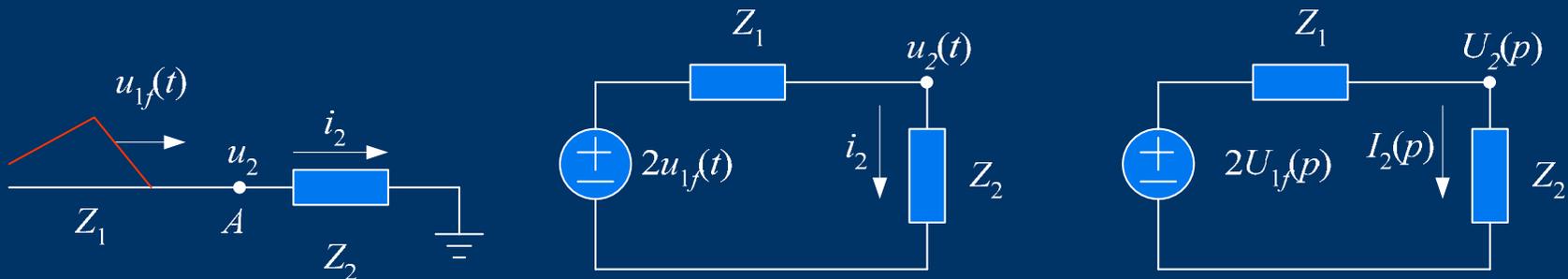
■ 线路末端接有负载电阻 $R=Z_1$



- 折射系数=1，反射系数=0
- 相当于线路末端接于另一波阻抗相同的线路，波到达末端后无反射
- 两种情况的物理意义相同吗？

3. 集中参数等值电路（彼得逊法则）

$$\begin{cases} u_{1f}(t) + u_{1b}(t) = u_2(t) \\ i_{1f}(t) + i_{1b}(t) = i_2(t) \\ i_{1f}(t) = u_{1f}(t) / Z, i_{1b}(t) = -u_{1b}(t) / Z \end{cases}$$
$$\rightarrow 2u_{1f}(t) = u_2(t) + Zi_2(t)$$



适用范围：入射波必须沿分布参数线路传播而来，和节点相连的线路必须无穷长

彼得逊法则

将分布参数电路波过程用集中参数等值电路表示：

线路波阻抗 Z_1 用数值相等的集中参数电阻来代替

线路入射电压波的两倍作为等值电压源

在实际中会遇到电流源的情况，如雷电流的作用，通过电路变换即可得到其等值电路

[例] 如图 6 (a) 所示, 变电所母线上接有 n 条线路, 每条线路的波阻抗为 Z 。当一条线路落雷, 有雷电压 $u(t)$ 侵入变电所时, 求母线上的电压 $u_2(t)$ 。

解: 根据彼德逊法则, 可得下图所示的等值计算电路

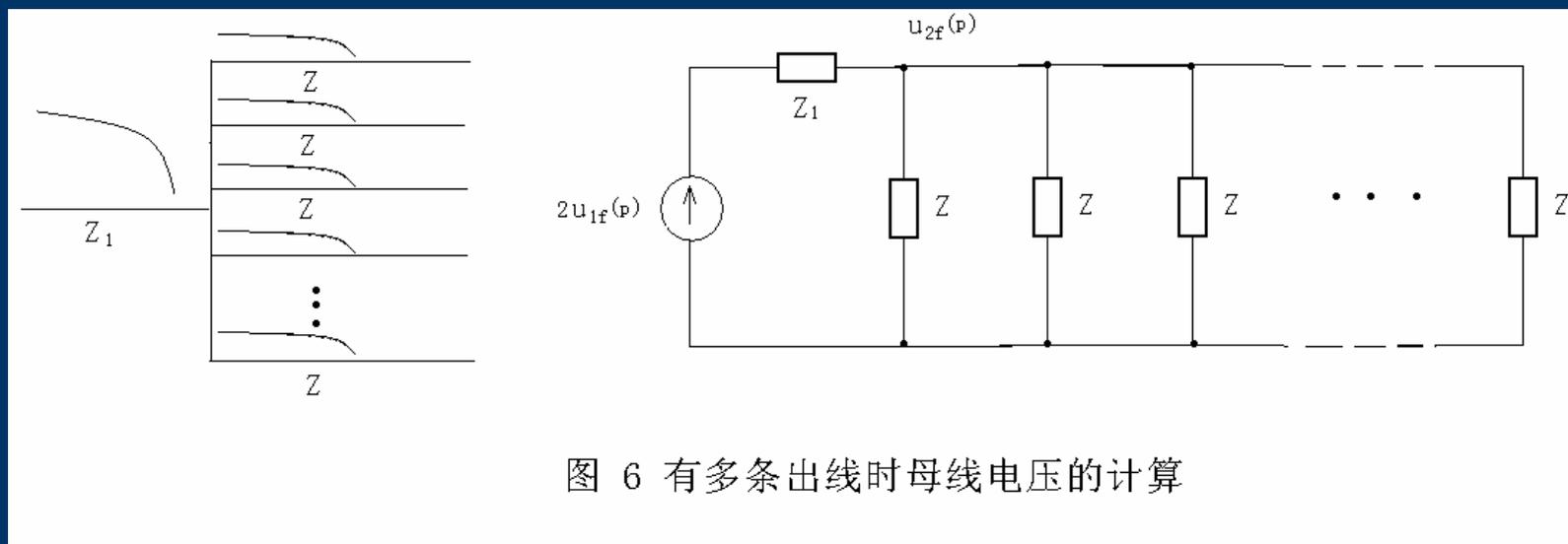


图 6 有多条出线时母线电压的计算

$$u_2(t) = 2u(t) \frac{\frac{Z}{n-1}}{Z + \frac{Z}{n-1}} = \frac{2u(t)}{n}$$

连接在母线上的线路越多, 母线上的过电压愈低。这对降低变电所的雷电过电压水平有利



第 12 讲

线路和绕组中的波过程

- 无损耗单导线线路中的波过程
- 行波的折射与反射
- 行波通过串联电感和并联电容
- 行波的多次折、反射
- 无损平行多导线系统中的波过程
- 冲击电晕对线路波过程的影响

第三节 行波经过串联电感和并联电容

载波通讯用的高频扼流线圈、无功补偿电感、电容式电压互感器、电气设备的入口电容、无功补偿电容等等

分析采用无限长的直角波：得到直角波作用下的波过程，采用丢阿摩尔(Duhamel)积分计算任意波形电压下的波过程



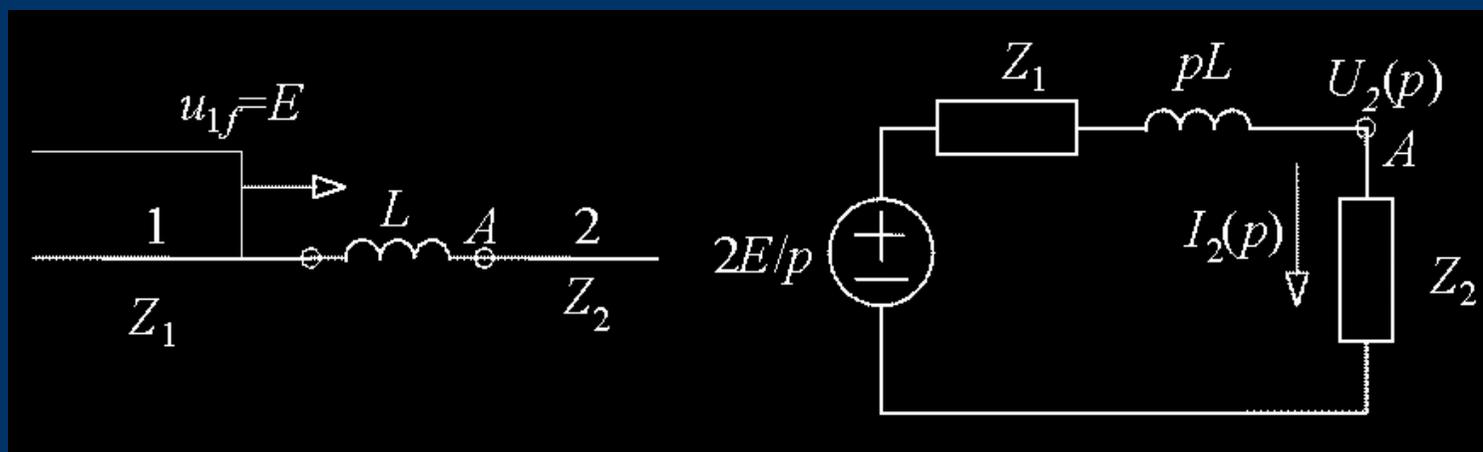
第三节

行波经过串联电感和并联电容

- 直角波经过串联电感和并联电容
- 丢阿摩尔 (Duhamel) 积分
- 平顶斜角波经过串联电感和并联电容

1. 直角波经过串联电感和并联电容

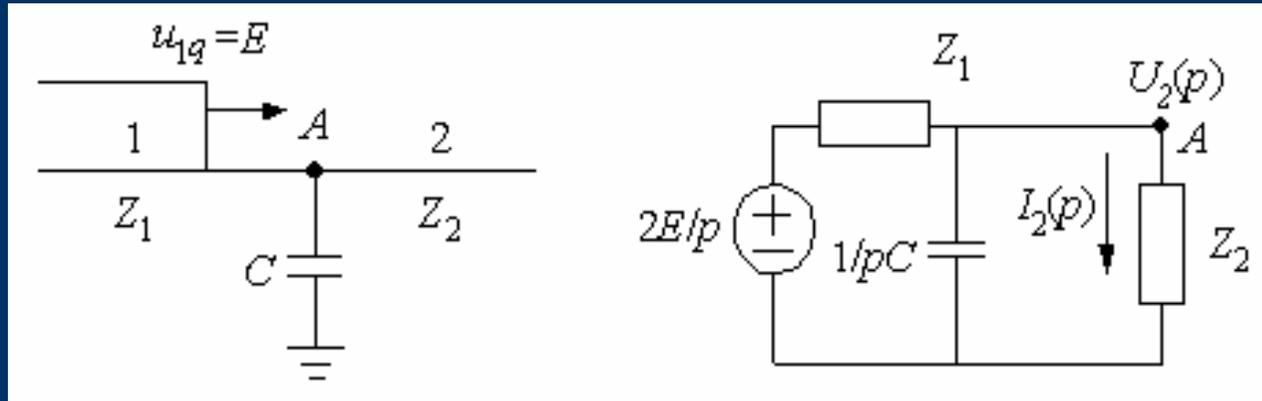
■ 经过串联电感



$$U_2(p) = \frac{2E}{p} \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2 + pL}$$
$$= \alpha E \frac{1}{T_L} \frac{1}{p(p + \frac{1}{T_L})}$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \\ T_L &= \frac{L}{Z_1 + Z_2} \end{aligned} \right\}$$

■ 经过并联电容



$$U_2(p) = \frac{2E}{p} \frac{Z_2 // \frac{1}{pC}}{Z_1 + Z_2 // \frac{1}{pC}}$$

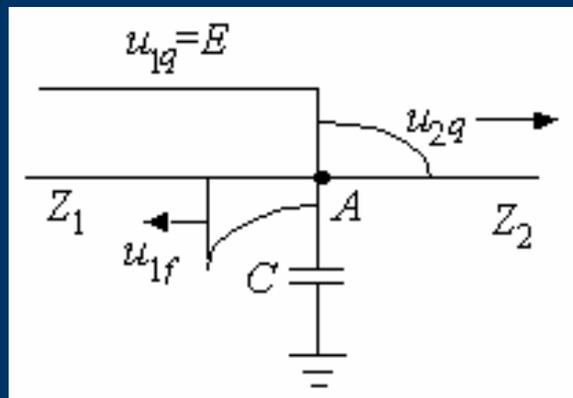
$$= \alpha E \frac{1}{T_c} \frac{1}{p(p + \frac{1}{T_c})}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha &= \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \\ T_c &= C \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \end{aligned} \right.$$

- 并联电容和串联电感两种情况具有完全相同的形式，通过反变换可以得到形式相同的节点电压的时域解为

$$u_{2q}(t) = \alpha E(1 - e^{-t/T}) \quad u_{1f} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} E - \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E e^{-t/T}$$

对电容： $T = T_C$ ； 对电感： $T = T_L$



$t = 0$ $U_{1f} = -E$ ， 降低波的陡度

$$t \rightarrow \infty \quad U_{1f} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} E$$

电容相当于开路, 不存在

$$t \rightarrow \infty \quad U_{2q} = \alpha E$$

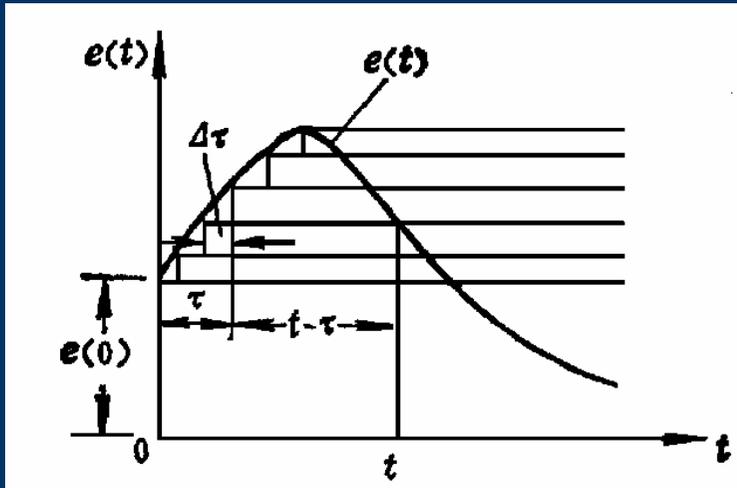
■ 最大陡度发生在 $t=0$ 时刻

$$u_2(t) = \alpha E(1 - e^{-t/T})$$

$$\left. \frac{du_2}{dt} \right|_{t=0} = \frac{2E}{Z_1 C} \quad \left. \frac{du_2}{dt} \right|_{t=0} = \frac{2EZ_2}{L}$$

- 只要增加电容或电感就可以将限制侵入波的陡度
- 在无穷长的直角波作用下，电容和电感对最终的稳态值没有影响，因为直流电压作用下，电容相当于开路、电感相当于短路

2. 丢阿摩尔（Duhamel）积分



- 将一任意波形分解为时间间隔为的大量阶跃波函数
- 分别求出各阶跃函数的解后叠加而得到总的结果

数学表达式:

$$u = e(0)y(t) + \int_0^t e'(\tau)y(t-\tau)d\tau$$

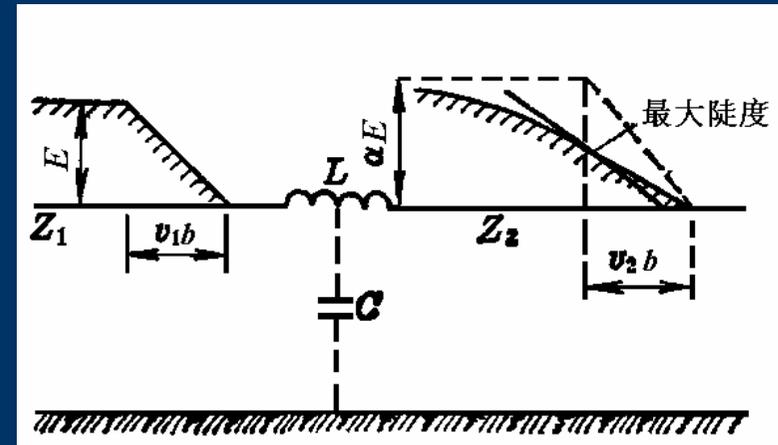
$e(t)$: 任意电压波形

$y(t)$: 单位阶跃函数的解

3. 平顶斜角波经过电容和电感

$$u = e(0)y(t) + \int_0^t e'(\tau)y(t-\tau)d\tau$$

波头时间为 b 、幅值为 E 的斜角波通过电感或旁过电容



- 先求出线路在斜角波 $u_1 = E t / b$ 作用下的解

$$u_2(t) = \int_0^t \frac{E}{b} \alpha \left(1 - e^{-\frac{t-\tau}{T}} \right) d\tau = \frac{E}{b} \alpha \left(t - T + T e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

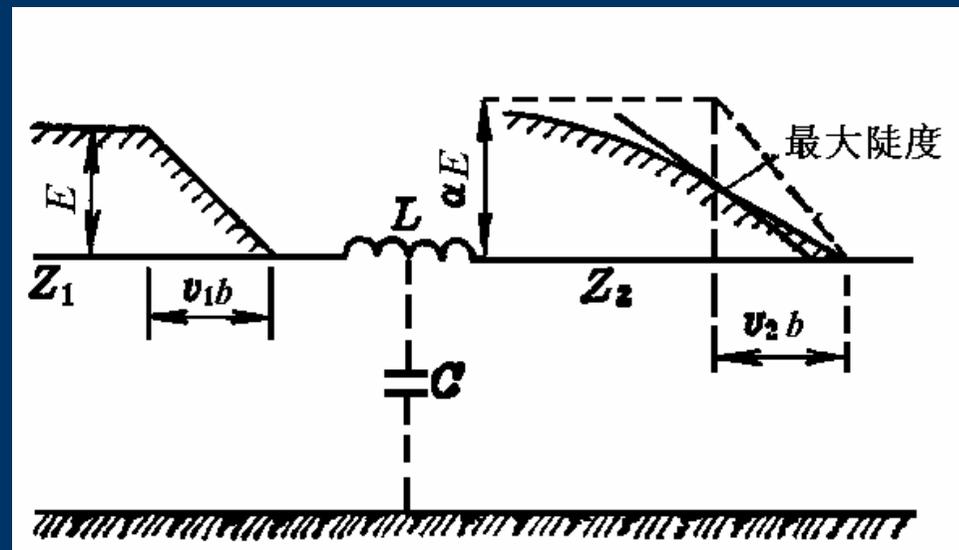
- 再将波头时间为 b 、幅值为 E 的斜角波分解为两个极性相反、且在时间上相差 b 的斜角波

$$t \leq b, \quad u_2(t) = \frac{E}{b} \alpha \left(t - T + T e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

$$t \geq b, \quad u_2(t) = \frac{E}{b} \alpha \left[b + T e^{-\frac{t}{T}} \left(1 - e^{-\frac{b}{T}} \right) \right]$$

折射波的最大陡度出现在
在 $t=b$ 时刻，其值为

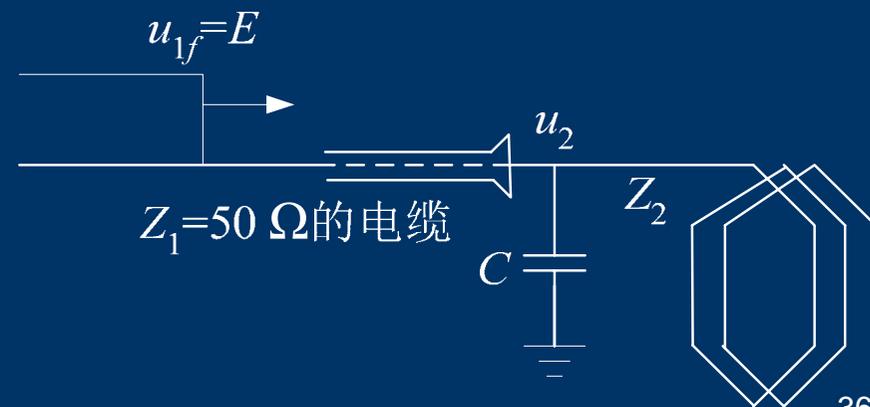
$$\left. \frac{du_2}{dt} \right|_{\max} = \frac{E}{b} \alpha \left(1 - e^{-\frac{b}{T}} \right)$$

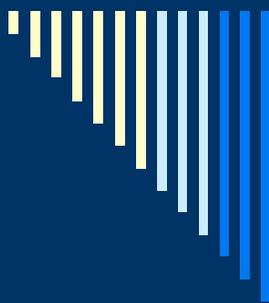


【例】幅值 $E=100\text{kV}$ 的直角波，发电机绕组 $Z_2=800\ \Omega$ ，绕组每匝长度为 3m ，匝间绝缘耐压为 600V ，绕组中波的传播速度 $v=6\times 10^7\text{m/s}$ 。求用并联电容器来保护匝间绝缘时所需的电容值

$$\left(\frac{du_2}{dt}\right)_{\max} = \left(\frac{du_2}{dx}\right)_{\max} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{600}{3} \times 6 \times 10^7 = 12 \times 10^9 \text{ V/s}$$

$$C = \frac{2E}{Z_1 \left(\frac{du_2}{dt}\right)_{\max}} = \frac{2 \times 10^5}{50 \times 12 \times 10^9} = 0.33 \mu\text{F}$$





第12讲

线路和绕组中的波过程

- 无损耗单导线线路中的波过程
- 行波的折射与反射
- 行波通过串联电感和并联电容
- **行波的多次折、反射**
- 无损平行多导线系统中的波过程
- 冲击电晕对线路波过程的影响

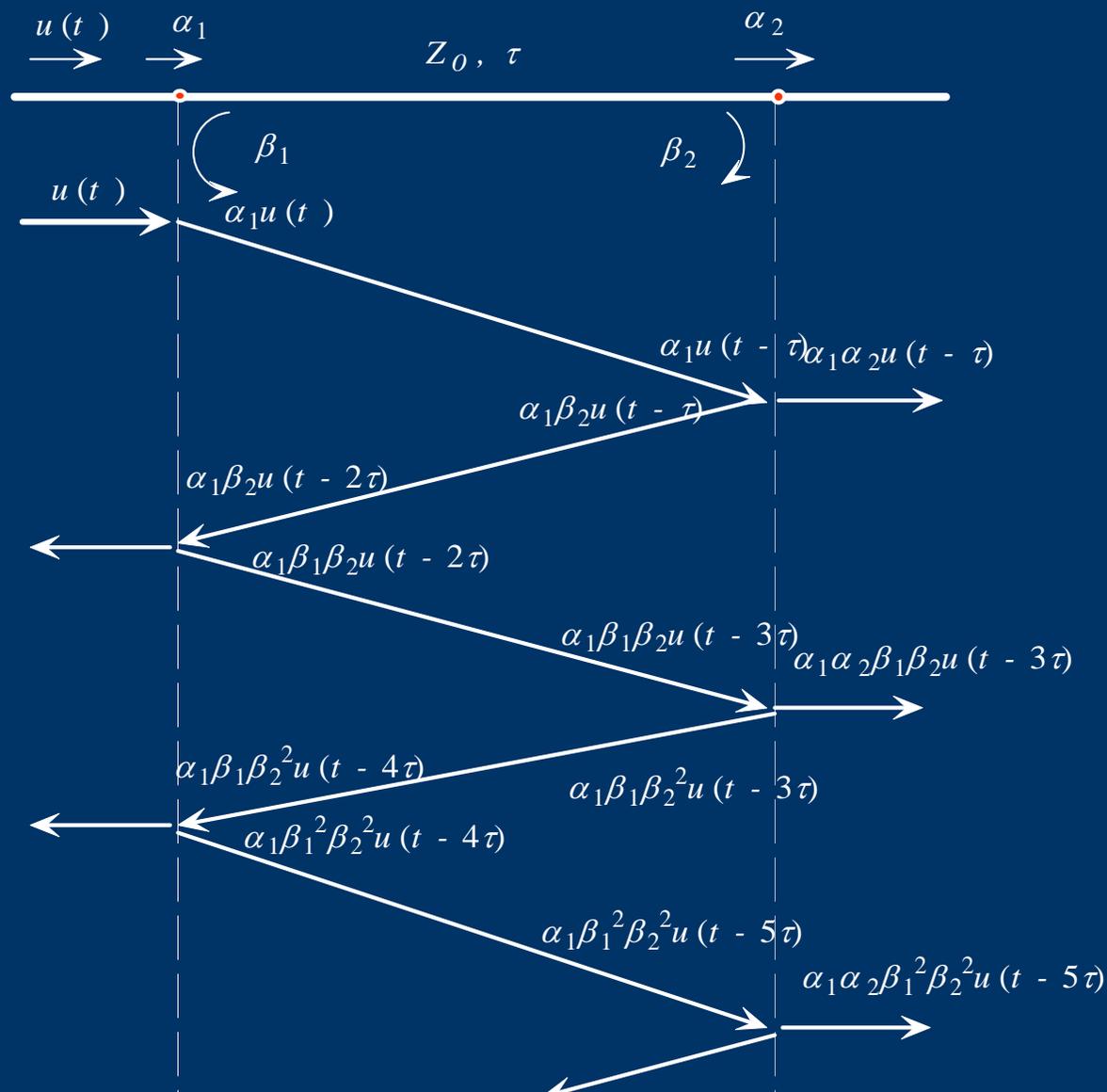
第四节 波的多次折反射

$$\alpha_1 = \frac{2Z_0}{Z_1 + Z_0}$$

$$\alpha_2 = \frac{2Z_2}{Z_0 + Z_2}$$

$$\beta_1 = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}$$

$$\beta_2 = \frac{Z_2 - Z_0}{Z_2 + Z_0}$$



以波到达节点1的时间为起点，相邻的前后两个折射波相差 2τ

$$u_2(t) = \alpha_1\alpha_2 u_2(t-\tau) + \alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2 u_2(t-3\tau) + \alpha_1\alpha_2(\beta_1\beta_2)^2 u_2(t-5\tau) \\ + \cdots + \alpha_1\alpha_2(\beta_1\beta_2)^{n-1} u_2[t-2(n-1)\tau]$$

$$u_2 = E\alpha_1\alpha_2 [1 + \beta_1\beta_2 + (\beta_1\beta_2)^2 + \cdots + (\beta_1\beta_2)^{n-1}] \\ = E\alpha_1\alpha_2 \frac{1 - (\beta_1\beta_2)^n}{1 - \beta_1\beta_2}$$

$$t \rightarrow \infty \quad (\beta_1\beta_2)^n \rightarrow 0$$

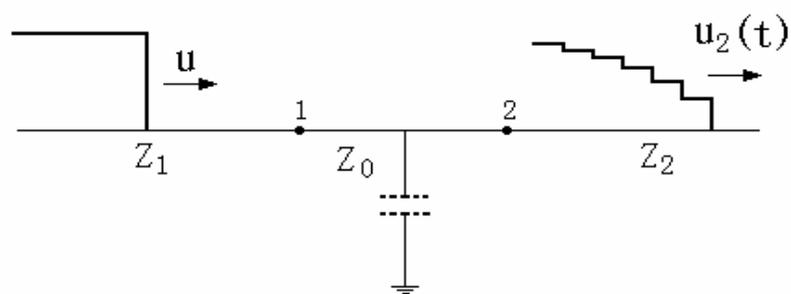
$$U_2 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E = \alpha_{12} E$$

线段 Z_0 的存在对线段 Z_2 上的前行波的最终幅值没有影响

线段 Z_0 的存在对线段 Z_2 上的前行波的波形有影响

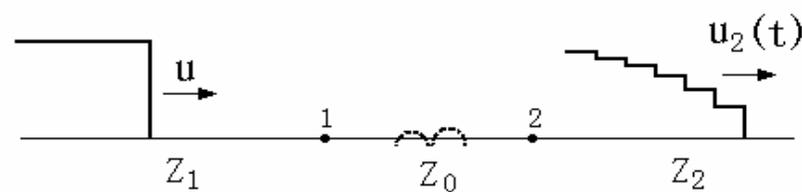
线段 Z_0 的存在对线段 Z_2 上的前行波波形的影响

$$\beta_1 > 0, \beta_2 > 0, \alpha_1 < 1, \alpha_2 > 1$$



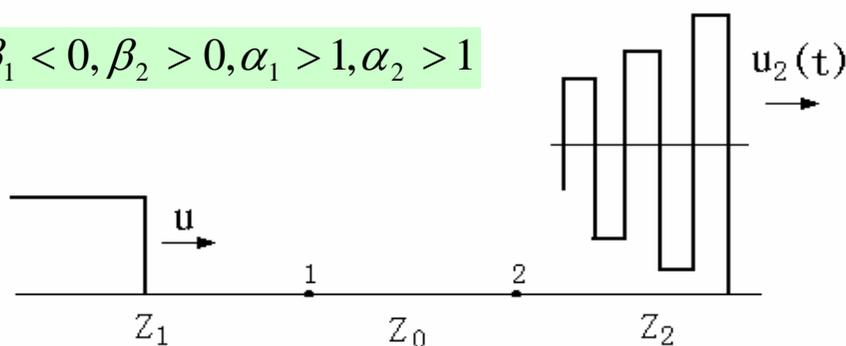
(a) $Z_1 > Z_0, Z_2 > Z_0$

$$\beta_1 < 0, \beta_2 < 0, \alpha_1 > 1, \alpha_2 < 1$$



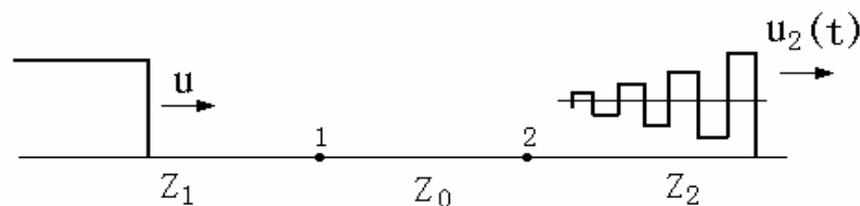
(b) $Z_1 < Z_0, Z_2 < Z_0$

$$\beta_1 < 0, \beta_2 > 0, \alpha_1 > 1, \alpha_2 > 1$$



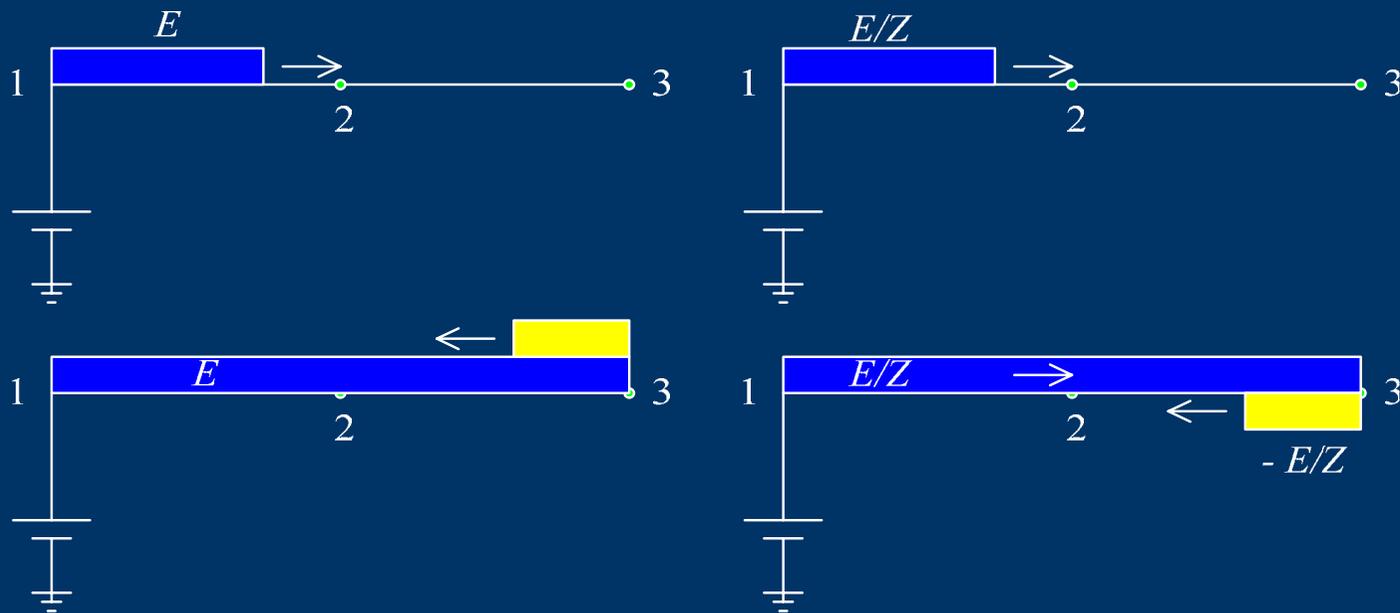
(c) $Z_1 < Z_0 < Z_2$

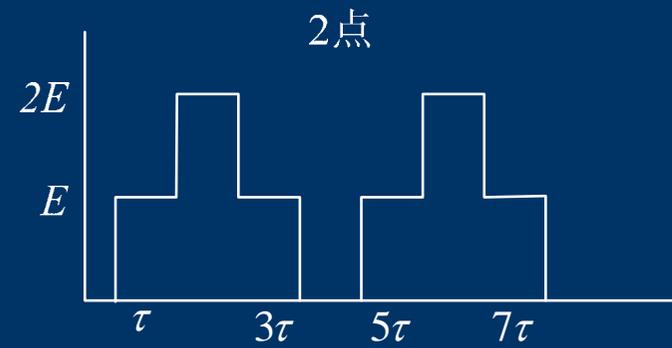
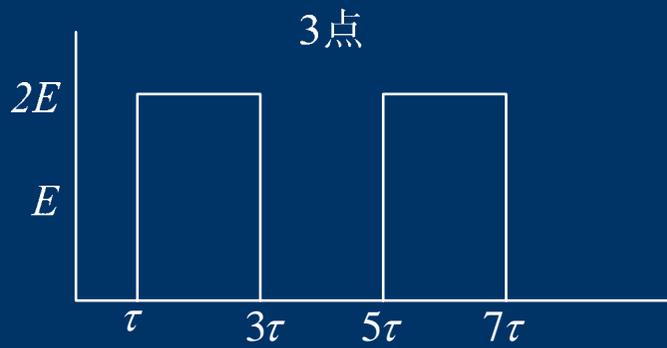
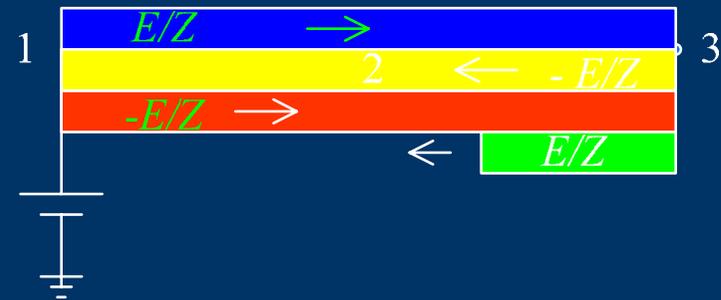
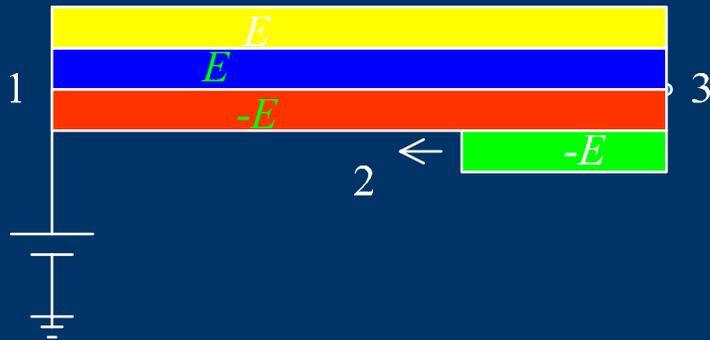
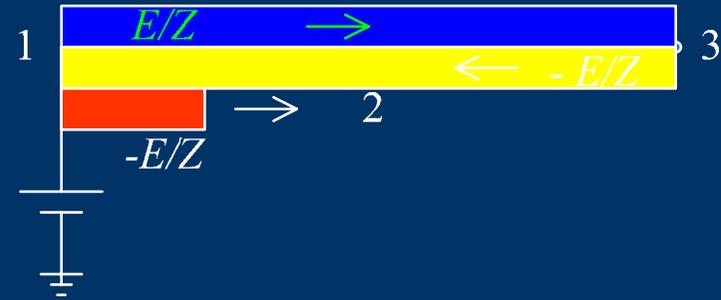
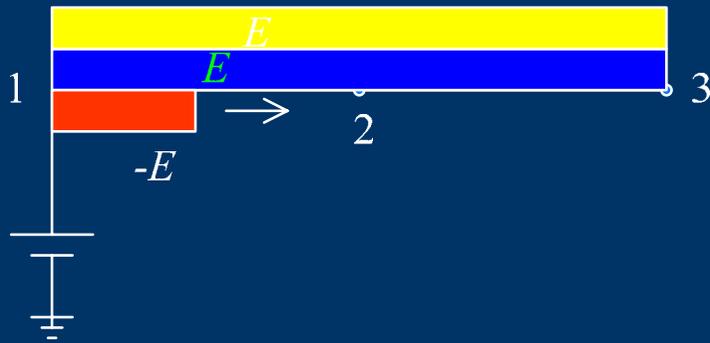
$$\beta_1 > 0, \beta_2 < 0, \alpha_1 < 1, \alpha_2 < 1$$

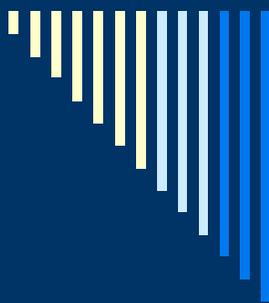


(d) $Z_1 > Z_0 > Z_2$

例题：直流电源合闸于空载长线，求末端和中点电压







第12讲

线路和绕组中的波过程

- 无损耗单导线线路中的波过程
- 行波的折射与反射
- 行波通过串联电感和并联电容
- 行波的多次折、反射
- 无损平行多导线系统中的波过程
- 冲击电晕对线路波过程的影响

第五节 波在平行多导线系统中的传播

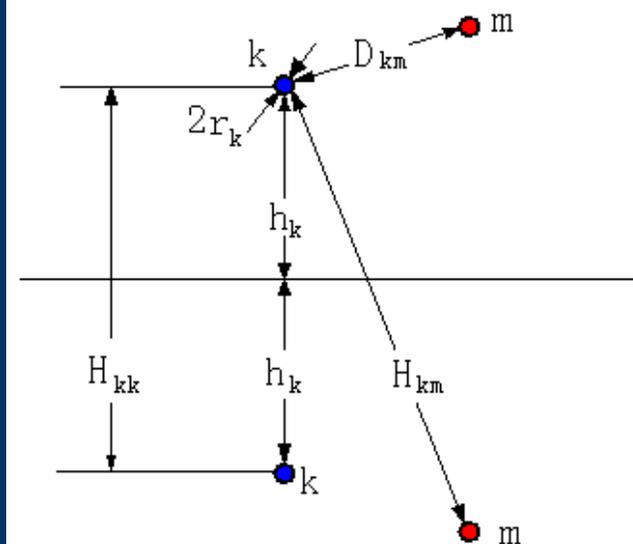
- n 根平行导线，其静电方程为静电方程

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= P_{11}q_1 + P_{12}q_2 + \cdots + P_{1n}q_n \\ u_2 &= P_{21}q_1 + P_{22}q_2 + \cdots + P_{2n}q_n \\ &\cdots \cdots \\ u_n &= P_{n1}q_1 + P_{n2}q_2 + \cdots + P_{nn}q_n \end{aligned} \right\}$$

$$U = PQ$$

$$\left. \begin{aligned} P_{kk} &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{H_{kk}}{r_k} \\ P_{km} &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{H_{km}}{D_{km}} \end{aligned} \right\}$$

电位系数



- 引入波速 v ，各导线中的波具有同一传播速度 v （等于光速），导线中的电流可由单位长度上的电荷 q 的运动求得

$$q_k v = i_k \text{ 为第 } k \text{ 根导线中的电流}$$

$$U = PQ$$



$$U = Zi$$

$$Z_{kk} = \frac{p_{kk}}{v} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \frac{H_{kk}}{r_k}$$

$$Z_{km} = \frac{p_{km}}{v} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \frac{H_{km}}{D_{km}}$$

平行多导线系统的电压方程

■ 平行多导线系统的波过程

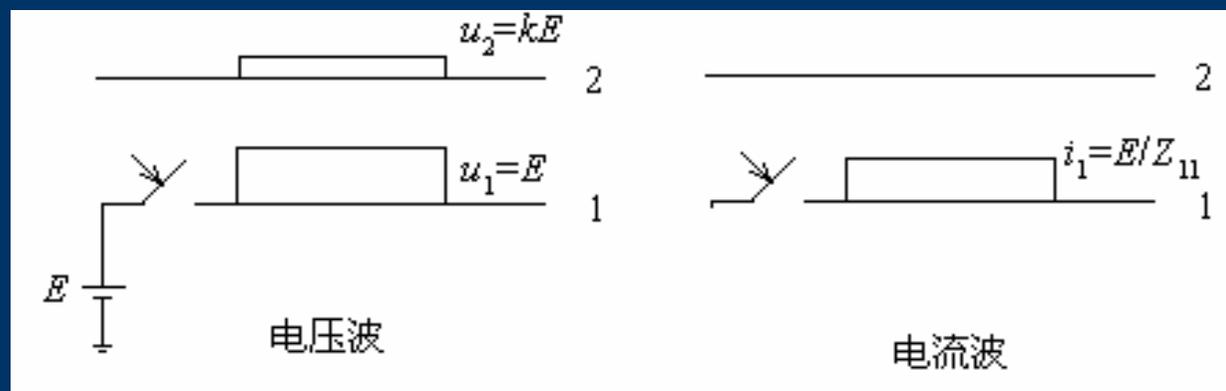
若线路中同时存在前行波 u_q i_q 和反行波 u_f i_f

$$\left. \begin{aligned} u &= u_q + u_f \\ i &= i_q + i_f \\ u_q &= Zi_q \\ u_f &= -Zi_f \end{aligned} \right\}$$

根据不同的具体边界条件，应用以上各式就可以求解平行多导线系统的波过程

■ 平行多导线的耦合系数

导线1对导线2的耦合系数 <1



当开关合闸直流电源 E 后，**导线1**上出现的前行波 $u_1 = E$ 。在对地绝缘的**导线2**上虽然没有电流，但由于它处在导线1电磁波的电磁场内，也会感应产生电压波

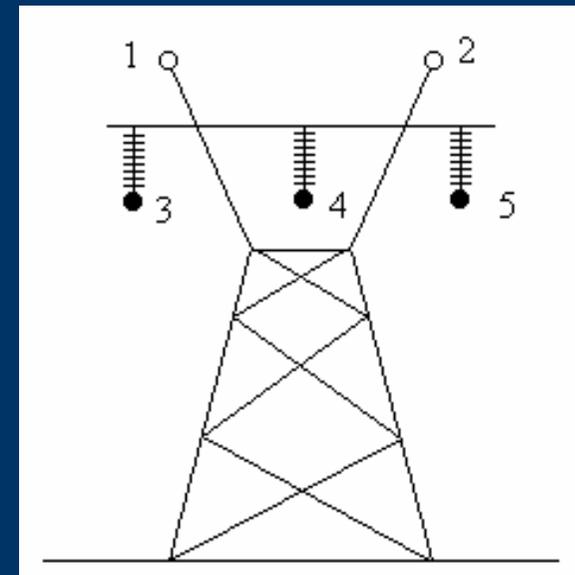
$$\left. \begin{aligned} u_1 &= Z_{11}i_1 + Z_{12}i_2 \\ u_2 &= Z_{21}i_1 + Z_{22}i_2 \end{aligned} \right\} \longrightarrow \left. \begin{aligned} u_1 &= Z_{11}i_1 \\ u_2 &= Z_{12}i_1 \end{aligned} \right\}$$

$$u_2 = \frac{Z_{12}}{Z_{11}} u_1 = k u_1 = k E$$

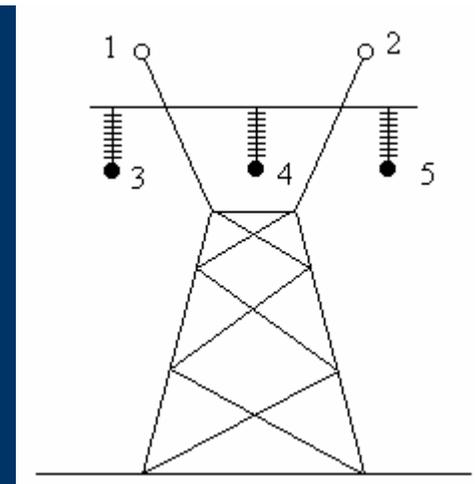
平行多导线的耦合系数 $k = \frac{Z_{12}}{Z_{11}}$

- 随导线之间距离的减小而增大，两根导线越靠近，其耦合系数越大
- 耦合系数是输电线路防雷计算的一个重要参数
- 由于耦合作用，当导线1上有电压波作用时，导线1、2之间的电位差不再等于E，而是比E小
- 导线之间的耦合系数越大，其电位差越小，这对线路防雷是有利的

$$u_1 - u_2 = (1 - k)E < E$$



[例] 如图所示输电线路采用两根避雷线，他们通过金属杆塔彼此连接，要求计算雷击塔顶时避雷线1、2对导线3 的耦合系数



已知 Z_{11} Z_{22} Z_{12} Z_{13} Z_{23}

$$Z_{11} = Z_{21} \quad Z_{13} = Z_{31} \quad Z_{23} = Z_{32}$$

解: 列出避雷线1、2和导线3的电压方程

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= Z_{11}i_1 + Z_{12}i_2 + Z_{13}i_3 \\ u_2 &= Z_{21}i_1 + Z_{22}i_2 + Z_{23}i_3 \\ u_3 &= Z_{31}i_1 + Z_{32}i_2 + Z_{33}i_3 \end{aligned} \right\} \xrightarrow{i_3 = 0} \begin{cases} u_1 = (Z_{11} + Z_{12})i_1 \\ u_3 = (Z_{13} + Z_{23})i_1 \end{cases}$$

避雷线1、2对导线3 的耦合系数为

$$k_{1,2-3} = \frac{u_3}{u_1} = \frac{Z_{13} + Z_{23}}{Z_{11} + Z_{12}} = \frac{k_{13} + k_{23}}{1 + k_{12}}$$



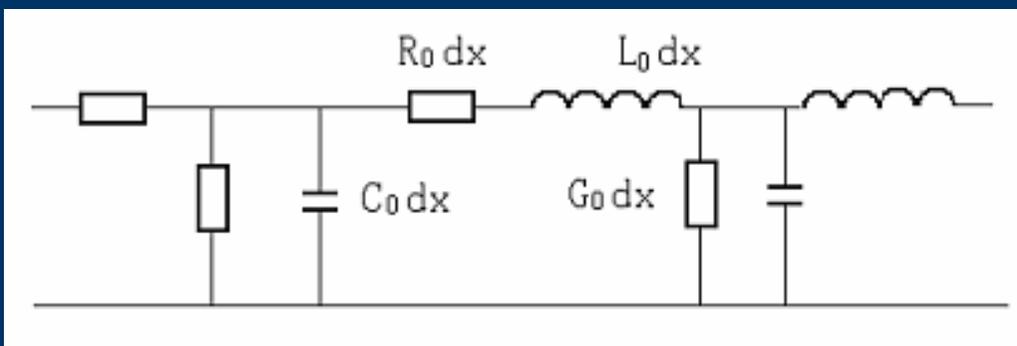
第 12 讲

线路和绕组中的波过程

- 无损耗单导线线路中的波过程
- 行波的折射与反射
- 行波通过串联电感和并联电容
- 行波的多次折、反射
- 无损平行多导线系统中的波过程
- 冲击电晕对线路波过程的影响

第六节 冲击电晕引起波的衰变和变形

■ 波沿导线传播时的衰减和变形



导线电阻

线路对地电导的损耗

➤ 只有衰减, 不会变形的条件

$$\frac{R_0}{G_0} = \frac{L_0}{C_0}, \text{ 或 } \frac{R_0}{L_0} = \frac{G_0}{C_0} = \delta$$

$$\frac{\frac{1}{2} L_0 i^2}{\frac{1}{2} C_0 u^2} = \frac{R_0 i^2 t}{G_0 u^2 t}$$

不致引起波传播过程中电能与磁能的相互交换,
电磁波只是逐渐衰减而不致变形

第六节 冲击电晕引起波的衰变和变形

➤ 电压波和电流波的形式为

$$\begin{cases} u(x,t) = e^{\delta t} (u_f + u_b) \\ i(x,t) = \frac{1}{Z} e^{\delta t} (u_f - u_b) \end{cases}$$

实际中输电线路并不满足无变形条件，因此波在传播过程中不仅会衰减，还会变形

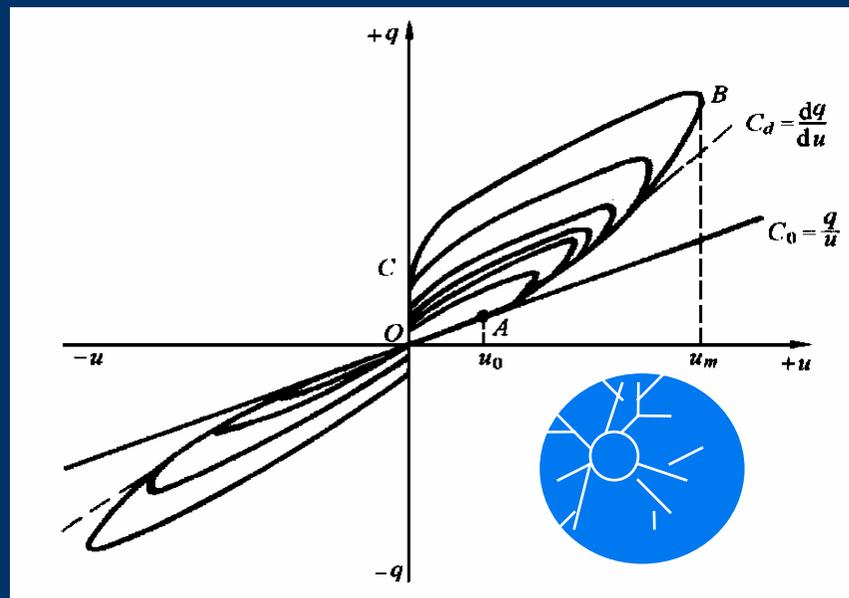
第六节 冲击电晕引起波的衰变和变形

■ 冲击电晕对波过程的影响

➤ 冲击电晕伏库特性 研究与计算波衰减变形的基础

$$q = f(u)$$

波传播过程中，导线上的冲击电压瞬时值 u 与导线上及其周围电晕套内的总电荷 q 的关系



现行规程计算**负极性**伏库特性经验公式

$$q = C_0 u \cdot 1.32 \left(1 + \frac{2u}{h} \right)$$

比较通用的伏库特性

$$\frac{q}{q_0} = A + B \left(\frac{u}{u_0} \right)^{\frac{4}{3}}$$

正极性: $A=0$ $B=1.02$

负极性: $A=0.15$ $B=0.85$

➤ 电晕电路的波动方程

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= \frac{\partial \psi}{\partial t} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = C_d \frac{\partial u}{\partial t} \end{aligned} \right\}$$

$$C_d = \frac{dq}{du} = MC_0 \left(\frac{u}{u_0} \right)^{\frac{1}{3}}$$

M 常数, 正极性时, $M=1.35$
负极性时, $M=1.13$

动态电容

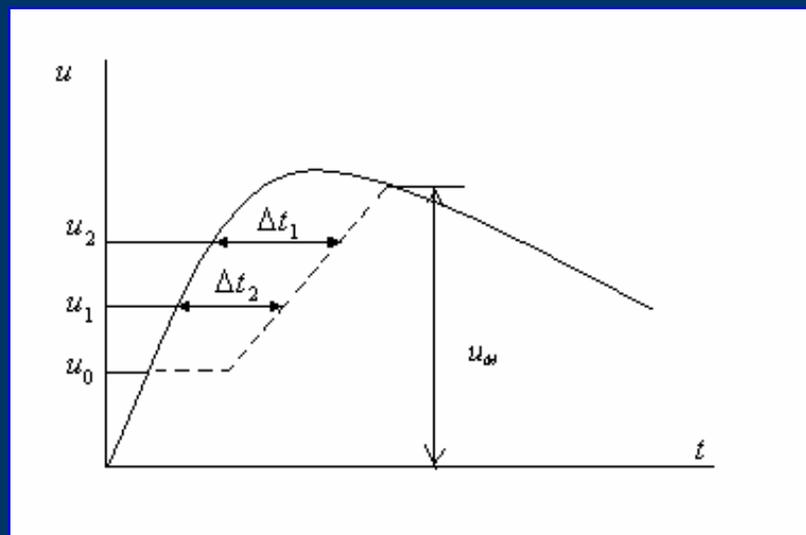
➤ 计及电晕损耗时的波速度

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_d}} < c$$

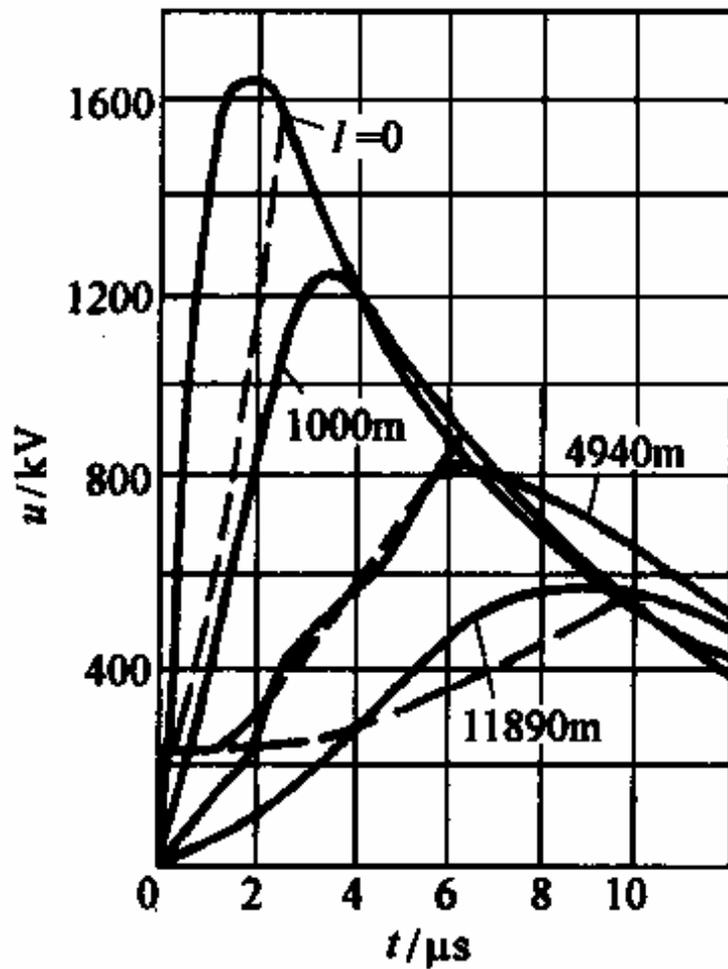
➤ 波经过传播距离 l 后的时延为

$$\Delta t = \frac{l}{v_c} - \frac{l}{c} = 3.33 \left(D_6 \sqrt{\frac{u}{u_0}} - 1 \right) l$$

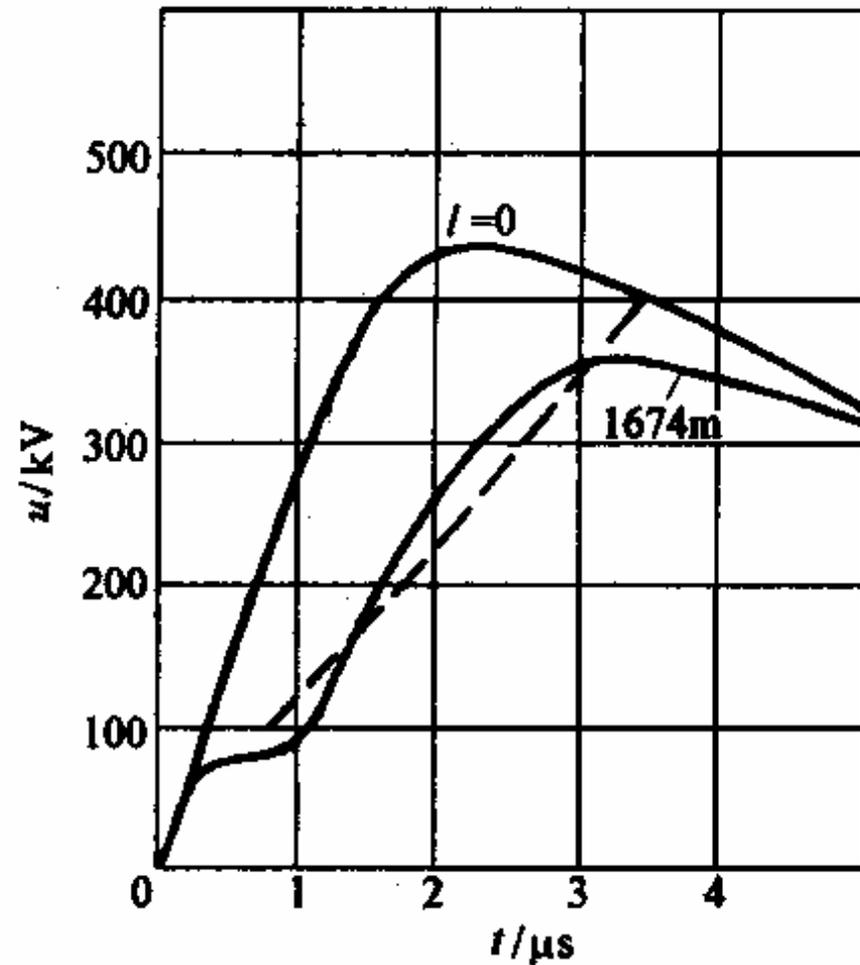
D 为常数，正极性时为1.17
负极性时为1.06



冲击电晕引起波的衰变和变形



(a)



(b)

第六节 冲击电晕引起波的衰变和变形

■ 冲击电晕对波过程的影响

➤ 冲击电晕使导线间的耦合系数增大



发生电晕后在导线周围积聚起空间电荷，好像增大了导线半径，导线的自波阻抗减小，耦合系数增大

电晕使导线间的耦合系数随电压瞬时值而变化，电压越高，耦合系数越大

工程上的冲击电晕时的耦合系数

$$k = k_i k_0$$

电晕校正系数 $k_i = 1.1 \sim 1.5$

➤ 冲击电晕对导线波阻抗的影响

发生冲击电晕后，动态波阻抗为

$$Z_d = \frac{du}{di} = \sqrt{\frac{L_0}{C_d}} \quad \longrightarrow \quad di = \sqrt{\frac{C_d}{L_0}} du$$

$$C_d = \frac{dq}{du} = MC_0 \left(\frac{u}{u_0}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \longrightarrow \quad i = \int_0^u \sqrt{\frac{C_d}{L_0}} du$$

考虑冲击电晕
影响后单导线
的等值波阻抗
降低20~30%

$$Z_c = \frac{u}{i} = \frac{Z_0}{\frac{u_0}{u} \left(1 - \frac{6\sqrt{M}}{7}\right) + \frac{6\sqrt{M}}{7} \sqrt[6]{\frac{u_0}{u}}}$$

谢谢!

Q & A

屠幼萍



高电压与电磁兼容研究所



80795842 13691145432



typ@ncepu.edu.cn