



欢迎来到高电压工程课
请进入雨课堂

清华大学电机系

2024春《高电压工程》第十三讲

梁曦东

2024-5-31

序、第一版前言、第二版前言

绪 论

高压输电的发展；中国电力工业的现状与展望
高电压、高场强下的特殊问题；高电压下的特殊现象及其应用

第一章气体放电过程的分析**核心概念：**

碰撞电离、自持放电、汤逊放电、巴申定律、电晕放电、电子崩、流注、先导、极性效应、长间隙放电

第二章不同电压形式下空气的绝缘特性**核心概念：**

高场强与高电压、非均匀场、电场分布的调整、雷电与操作冲击电压、50%放电电压、伏秒特性、空气的电气强度、高真空绝缘、SF₆绝缘

第三章高压外绝缘及沿面放电**核心概念：**

大气条件修正、高压绝缘子、外绝缘、沿面放电、滑闪放电、污秽放电、憎水性迁移、硅橡胶有机外绝缘

第四章液体、固体电介质的电气性能核心概念：

电介质、极化、电导与损耗、小桥击穿、电击穿、热击穿、电化学击穿、老化、累积效应、空间电荷、油纸绝缘、电介质中的电场

第五章绝缘检测与诊断核心概念：

绝缘检测与监测、绝缘诊断、耐压试验、非破坏性试验、绝缘电阻、泄漏电流、 $\tan\delta$ 、西林电桥、局部放电、气相色谱

第六章高电压和冲击大电流的产生核心概念：

试验变压器、串级试验变压器、容性试品电压升高、高压谐振试验设备、倍压直流和串级直流、纹波因数、冲击电压发生器、并联充电与串联放电、波前电阻与放电电阻、冲击电流发生器

第七章高电压的测量核心概念：

标准测量系统与认可测量系统、扩展不确定度、测量球隙、电阻分压器、电容分压器、阻容分压器、匹配阻抗、阶跃响应、反击、屏蔽与抗干扰

第八章传输线的波过程**核心概念**：

波阻抗、折反射系数、电压全反射与电流全反射、波通过并联电容与串联电感、**集中参数与分布参数**

第九章雷电过电压及其防护**核心概念**：

雷电参数、雷电定位系统、避雷针与避雷线、避雷器、接地装置、接地阻抗、感应过电压、耐雷水平、雷击跳闸率

第十章操作过电压与绝缘配合**核心概念**：

操作过电压的倍数、断路器的分断与关合、重合闸、空载线路合闸过电压、切除空载线路过电压、特快速瞬态过电压、合闸电阻、绝缘配合、基本冲击绝缘水平BIL

附录A：电力设备的耐受电压值

附录B：国内外部分高电压实验室的参数



第8章 传输线的波过程

8.1 波过程与波阻抗

8.2 波的折射、反射与衰减、变形

8.3 波通过并联电容与串联电感

本章核心概念：

波过程、波阻抗、折反射系数、电压全反射与电流全反射、
波通过并联电容与串联电感、集中参数与分布参数



8.1 波过程与波阻抗

《高电压工程》从输电线路及电力设备过电压防护的角度，研究、学习电磁波沿导线传播的波过程。

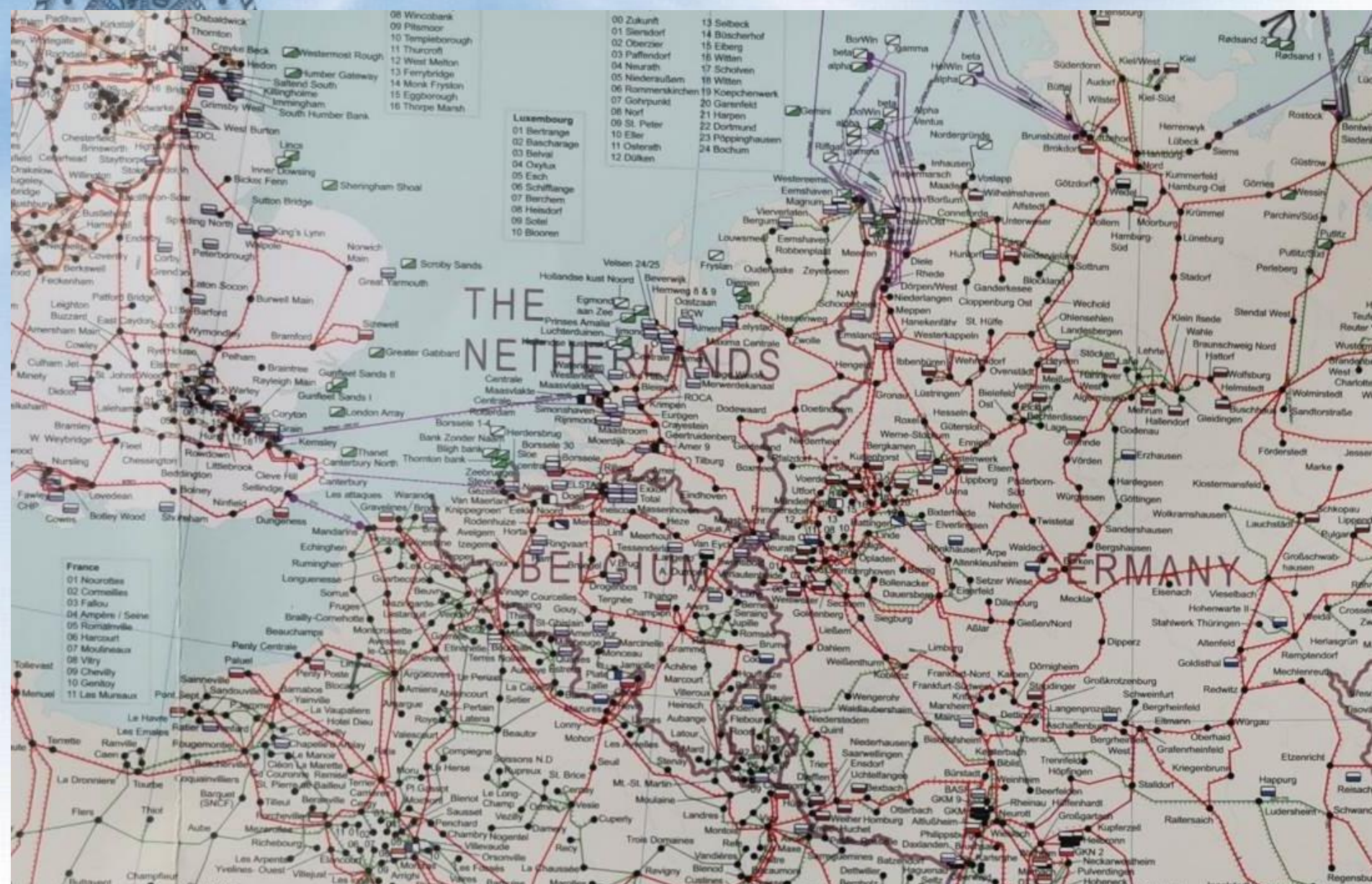
电力系统在运行中，除了有长期的工作电压之外，还会出现幅值大大超过工作电压的各种过电压。对电力设备绝缘受到的考验来说，需要研究在该设备上出现的过电压幅值及持续时间。

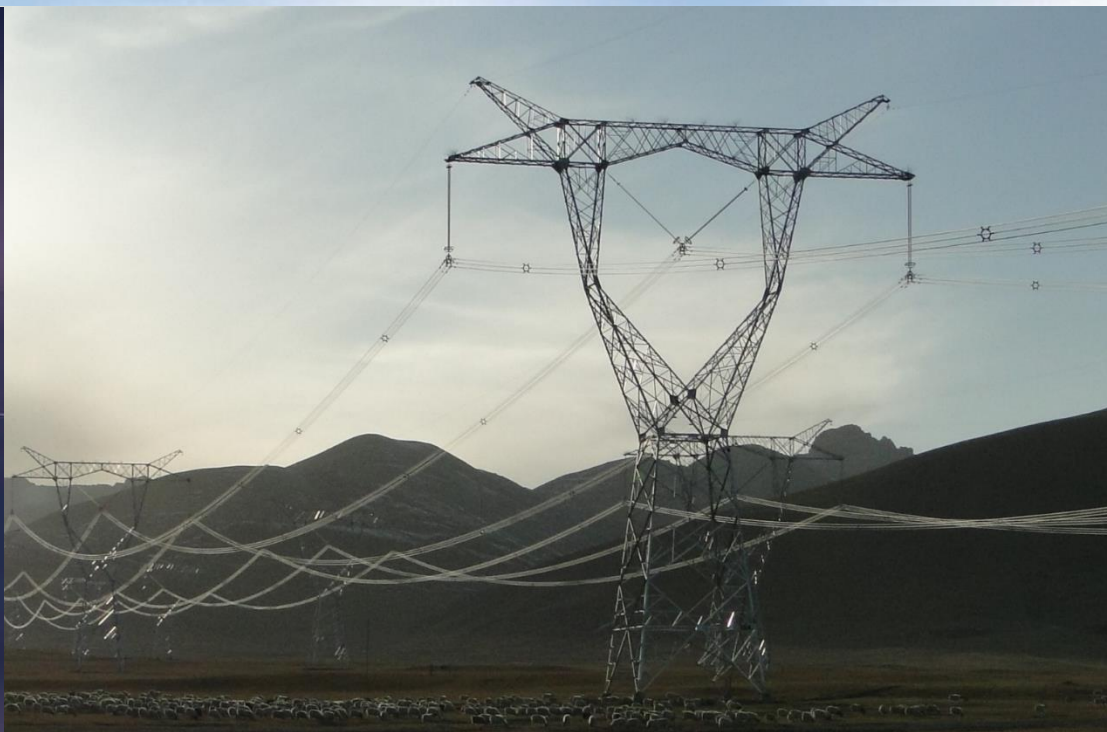
电力系统的过电压从其形成的原因可分为外部过电压与内部过电压。前者主要指雷电过电压，后者可分为操作过电压与暂时过电压。

雷电过电压持续时间极短，操作过电压一般持续时间在0.1秒以内；暂时过电压包括工频电压升高及谐振过电压，持续时间比操作过电压长。

雷电过电压与操作过电压都是冲击电压 impulse voltage。

雷击电网某处时，影响范围多大？电网其他部分何时产生过电压？幅值多高？





雷击电网某处时，影响范围会有多大？电网其他部分何时会产生过电压？过电压幅值会有多高？



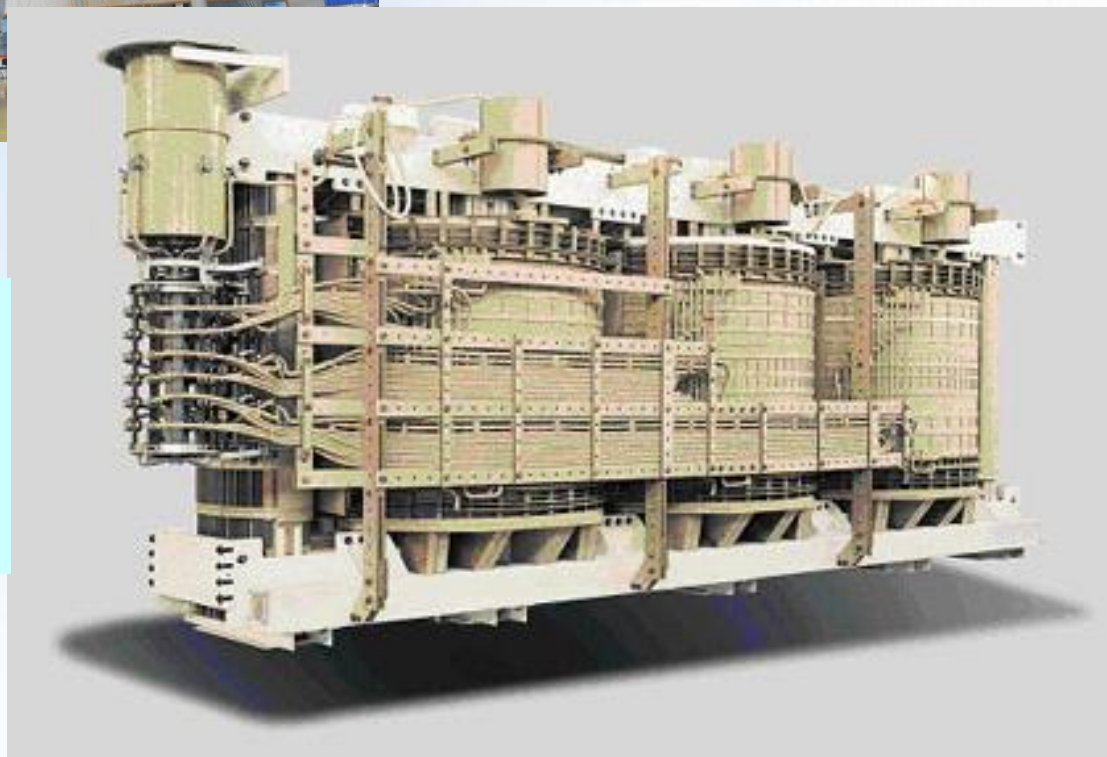


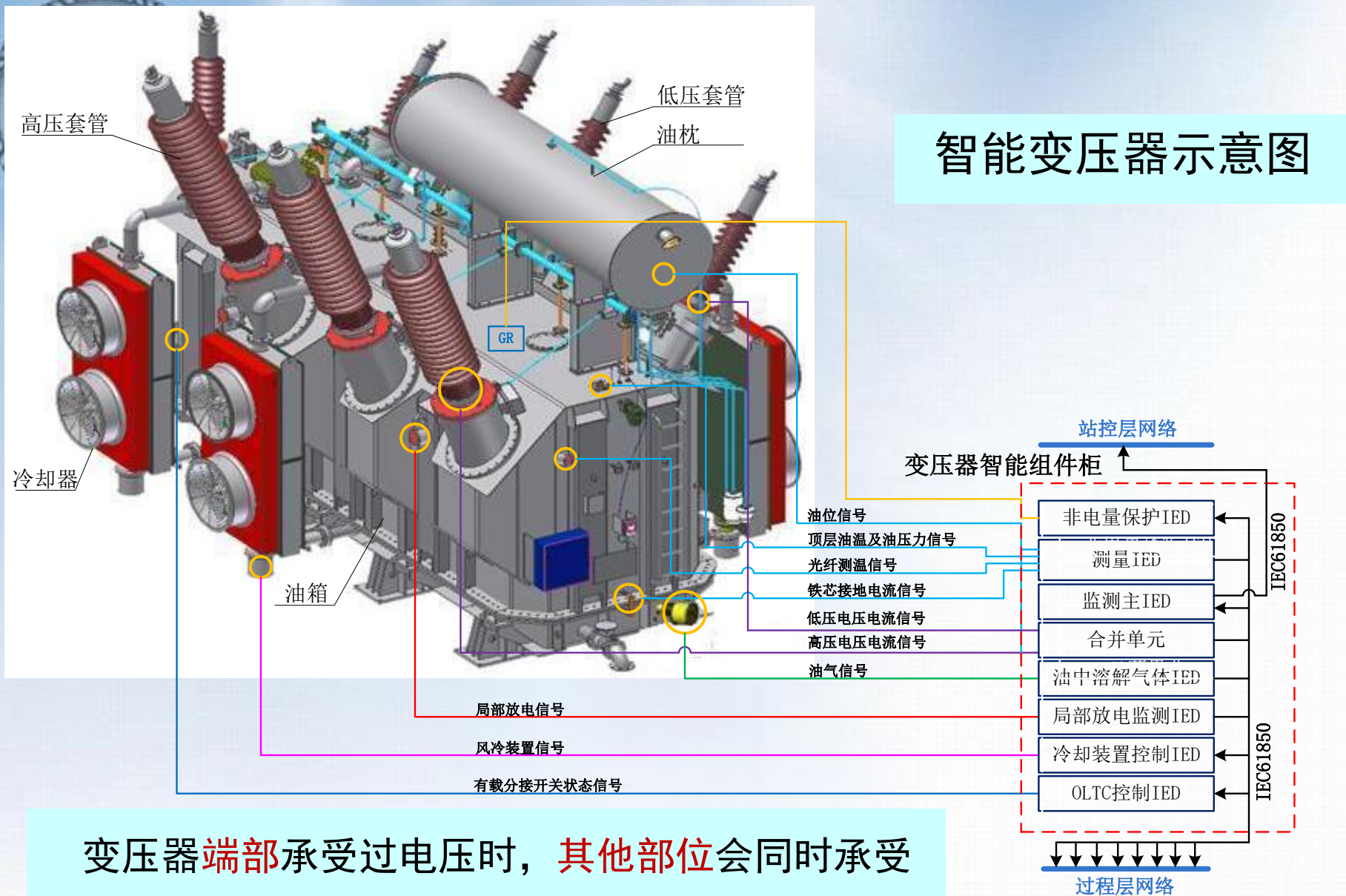
变电站某处产生过电压时其他部分有过电压吗？会各处都产生相同的过电压吗？



打开外壳
的电力变压器

变压器端部承受过电压时，
其他部位会同时承受过电压吗？
会承受相同幅值的过电压吗？





变压器端部承受过电压时，其他部位会同时承受过电压吗？会承受相同幅值的过电压吗？

架空线、电缆线、发电机变压器绕组在面临冲击电压时，冲击电压的上升沿(或下降沿)对应的波长已经与线路或绕组的长度相当了（波长与高压设备或元件的尺寸可以相比）。

在这种情况下，同一时刻线路或绕组各点电压、电流不再相同；每一点的电压、电流也随时间在不断变化。

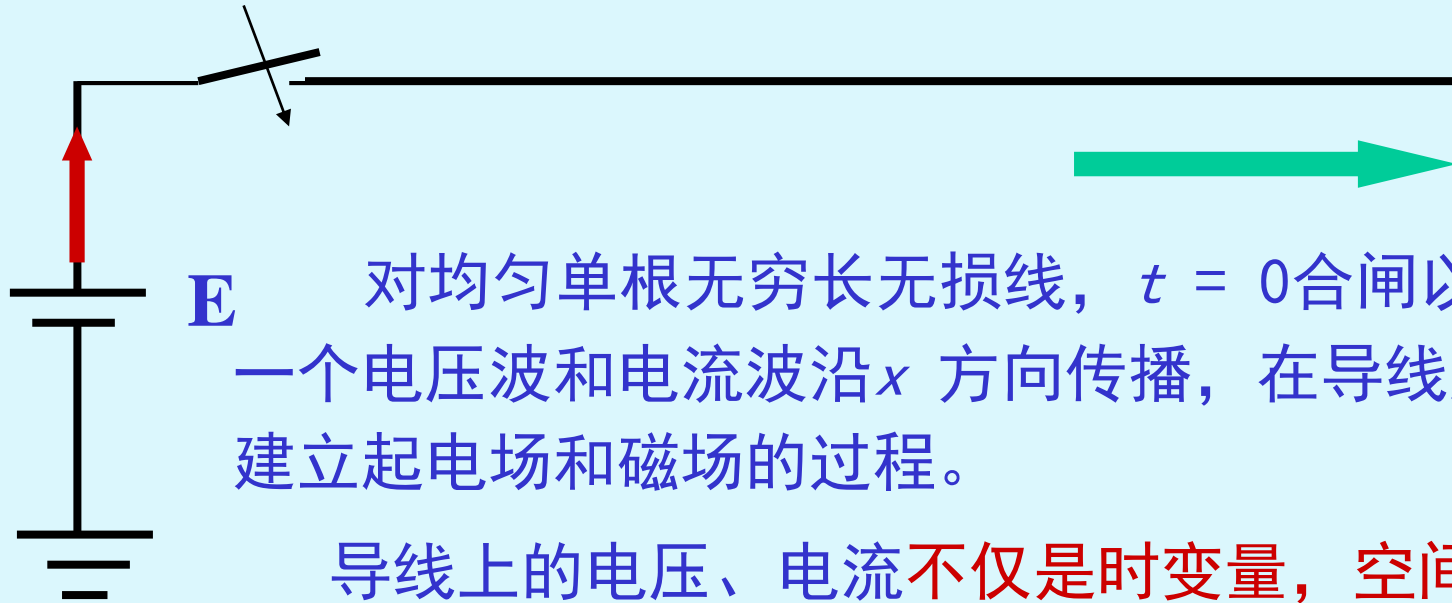
$$\left\{ \begin{array}{l} u = u(x, t) \\ i = i(x, t) \end{array} \right.$$

因此，对架空线、电缆线、变压器及电机的绕组上电压、电流的分析，都应按分布参数电路来分析，分布参数电路中的电磁暂态过程属于电磁波的传播过程，简称波过程。

波过程的分析 and 计算是过电压和绝缘配合的理论基础。

对整个电力系统来说，研究这些冲击波在系统中的传播，以及在传播过程中的折射、反射、衰减、变形等情况，目的是更好地研究在各设备上，以及在设备内部各部位出现的过电压幅值和持续时间，以便更好地研究电力设备过电压保护的原理和措施。

分布参数电路的波过程

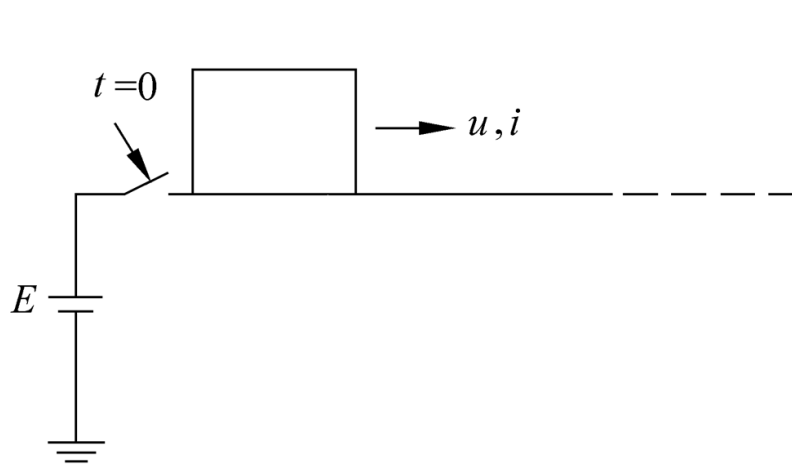


对均匀单根无穷长无损线， $t = 0$ 合闸以后，有一个电压波和电流波沿 x 方向传播，在导线周围逐步建立起电场和磁场的过程。

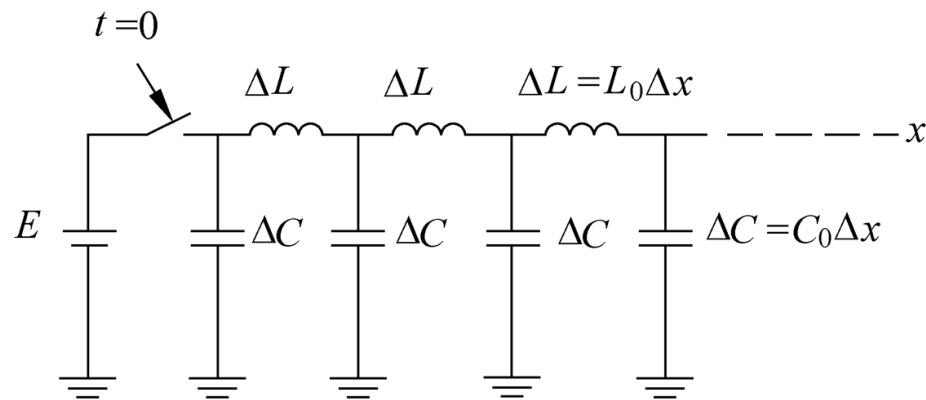
导线上的电压、电流不仅是时变量，空间上各点同一时刻的电压电流也不一样， $i = i(x, t)$, $u = u(x, t)$

同一时刻、同一地点、
同一方向、同一个波的
电压与电流之比

$$\text{波阻抗 } Z = \sqrt{L_0/C_0} = u_f/i_f = -u_b/i_b$$



(a)



(b)

单根无损线上的波过程

(a) 单根无损线首段合闸于 E; (b) 等效电路

设单位长度线路的电感和电容分别为 L_0 和 C_0 ，在某一时刻电磁波到达 x 点，则长度为 x 的导线电容为 C_0x ，此电容充电到 $u=E$ ，即获得电荷 C_0xu ，这些电荷是在 t 时间内经电流波 i 传送过来的，

$$C_0x \cdot u = i \cdot t$$

另一方面在 t 时间内，长度为 x 的导线上已有电流 i ，电感为 L_0x ，产生的磁链为 L_0xi ，这些磁链是在 t 时间内建立的，导线上的感应电势为

$$u = L_0x \cdot i / t$$

从 $C_0 x \cdot u = i \cdot t$ 和 $u = L_0 x \cdot i / t$ 中消去 t , 可得传输线上,
同一时刻、同一地点、同一方向、同一个波的电压与电流之比,
称为该传输线的波阻抗 $Z = u/i = \sqrt{L_0/C_0} = u_f/i_f = -u_b/i_b$

对架空线路

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2h}{r}}$$

$$L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{r}$$

$$Z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \frac{2h}{r} = 60 \ln \frac{2h}{r}, \text{ 单位为 } \Omega$$

一般单导线的线路, $Z \approx 500\Omega$; 冲击电压下线路电晕使 C_0 增大, $Z \approx 400\Omega$; 分裂导线等效半径更大, $Z \approx 300\Omega$ 。

波阻抗虽有电阻的量纲, 但与集中参数电阻有本质的不同 (哪些不同? ……)

波的传播有方向 (前行、反行)

从 $C_0 x \cdot u = i \cdot t$ 和 $u = L_0 x \cdot i / t$ 中消去 t , 可得传输线上,
同一时刻、同一地点、同一方向、同一个波的电压与电流之比,
称为该传输线的波阻抗 $Z = u/i = \sqrt{L_0/C_0} = u_f/i_f = -u_b/i_b$

从上述两式也可得电磁波传播速度 v

$$v = \frac{x}{t} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \times 10^8 \text{ (m/s)}$$

对电缆线路, 磁通集中在电缆芯和外部接地铅套护层之间, 芯线与外套之间距离比架空线小很多。

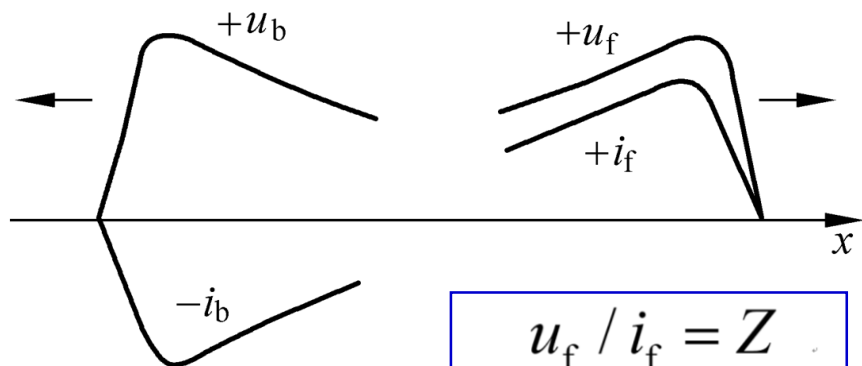
因此电缆的波阻抗比架空线小很多,

电缆用电介质 $\epsilon_r \approx 4$, 电磁波传播的波速仅为架空线路的一半

传输线上不仅有前行的电压波 u_f 、电流波 i_f ，还有反射回来的反行电压波 u_b 及电流波 i_b ，线路上任意一点的电压与电流均为前行的电压波、电流波与反行的电压波、电流波的叠加，即

$$\begin{cases} u(x,t) = u_f + u_b \\ i(x,t) = i_f + i_b \end{cases}$$

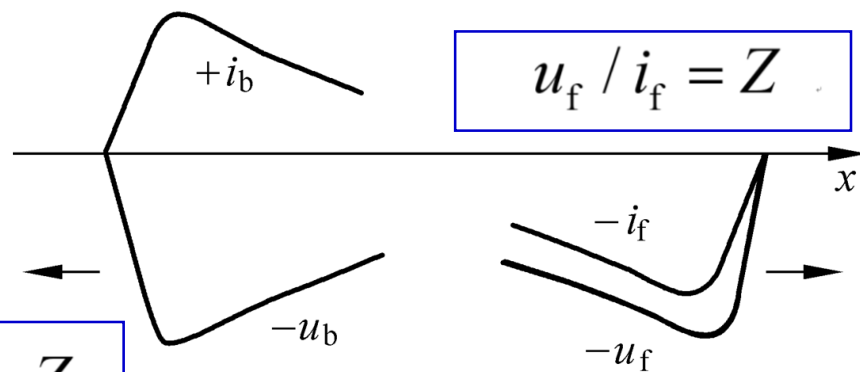
规定电压波 u_f ， u_b 的正负号只决定于导线对地电容上电荷的正负号，与运动方向无关，并规定沿 x 正方向运动的与正电荷对应的电流波为正方向。



$$u_b / i_b = -Z$$

$$u_b / i_b = -Z$$

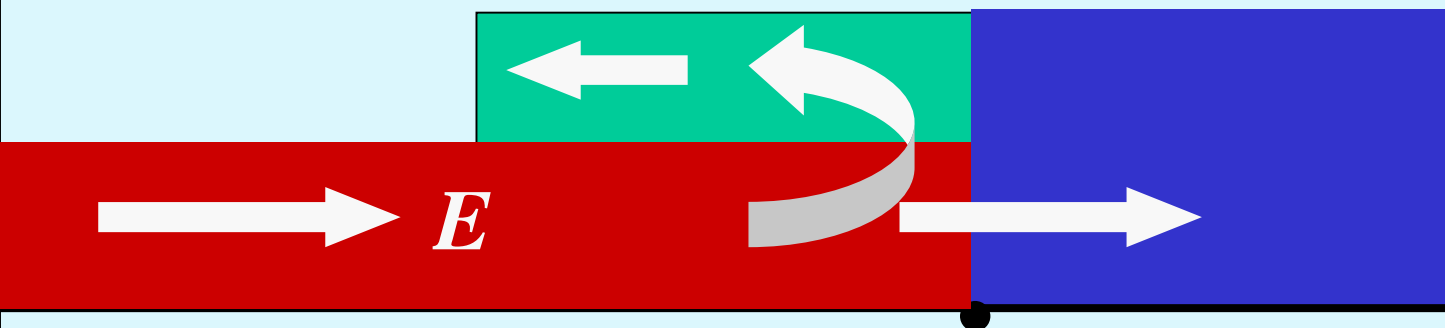
$$\begin{aligned} u_f / i_f &= Z \\ u_b / i_b &= -Z \end{aligned}$$



8.2 波的折射、反射与衰减、变形

波通过波阻抗有变化的节点A，会产生折反射。

若 $Z_1 < Z_2$ 折反射的结果是在两条线路上均得到更高的电压
在两条线路上均得到更低的电流



Z_1

A

Z_2

节点两侧电压相等，电流相等！ $u_{1f} + u_{1b} = u_{2f}$, $i_{1f} + i_{1b} = i_{2f}$

引入 $u_f/i_f = Z$, $u_b/i_b = -Z$, 于是可得

$u_{2f} = \alpha u_{1f}$, $u_{1b} = \beta u_{1f}$, 其中

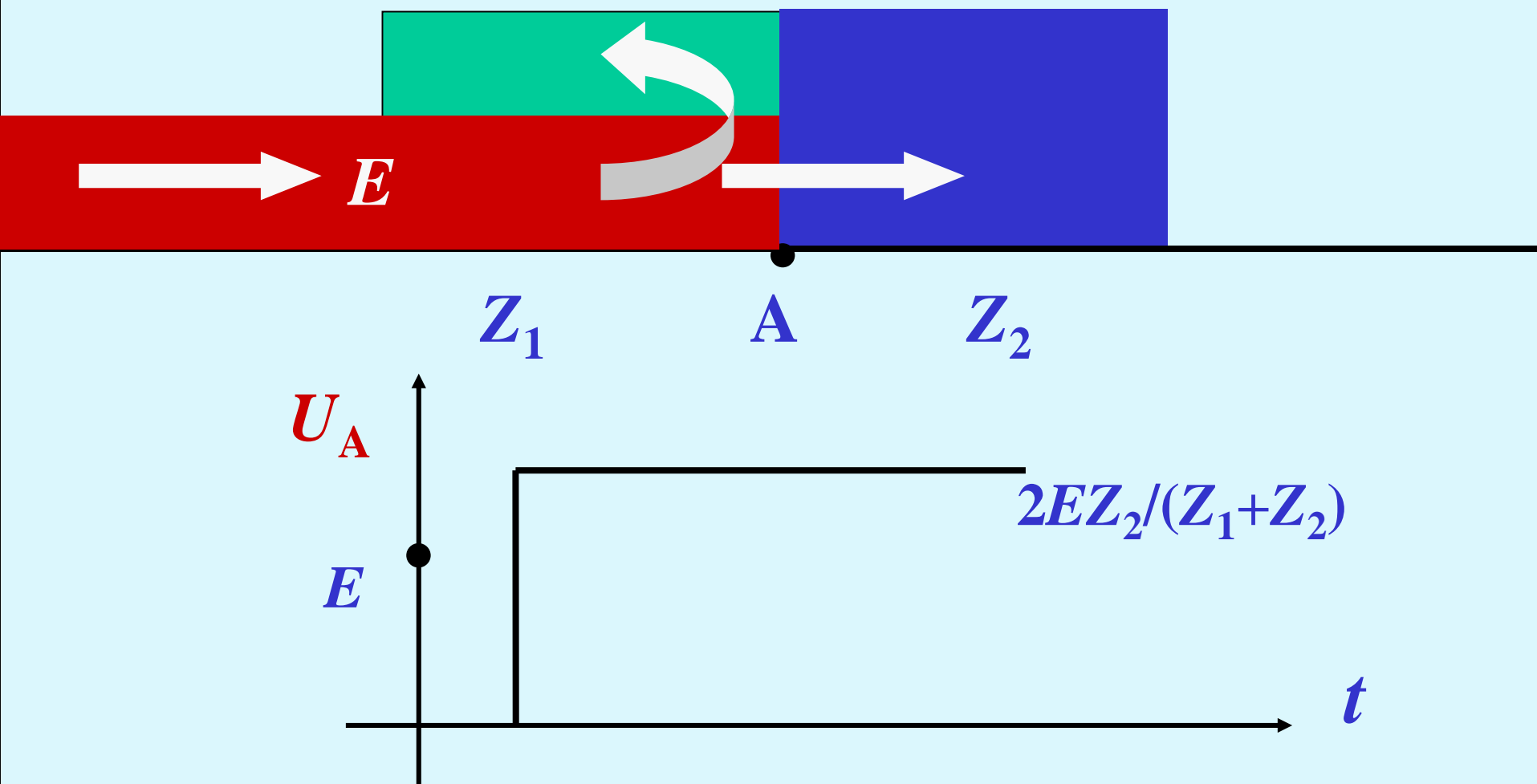
折射系数 $\alpha = 2Z_2/(Z_1 + Z_2)$

反射系数 $\beta = (Z_2 - Z_1)/(Z_1 + Z_2)$, $\alpha = 1 + \beta$

8.2 波的折射、反射与衰减、变形

波通过波阻抗有变化的节点A，会产生折反射。

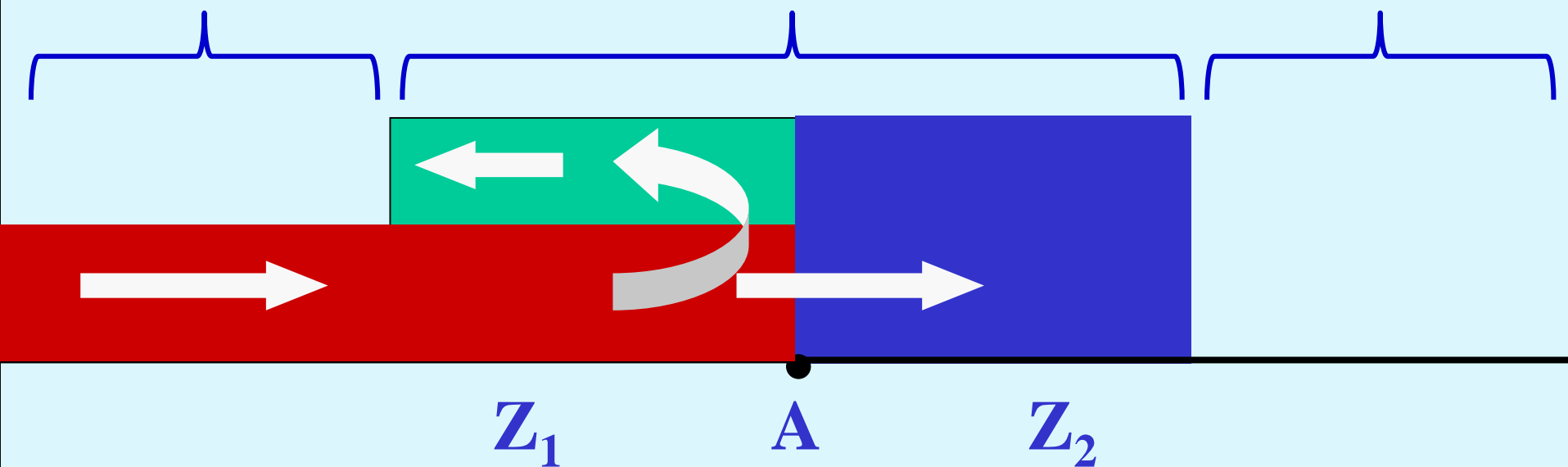
若 $Z_1 < Z_2$ 折反射的结果是在两条线路上均得到更高的电压
在两条线路上均得到更低的电流



8.2 波的折射、反射与衰减、变形

波通过波阻抗有变化的节点A，会产生折反射。

若 $Z_1 < Z_2$ 折反射的结果是在两条线路上均得到更高的电压



$$u_{2f} = \alpha u_{1f} = u_{1f} + u_{1b} > u_{1f}$$

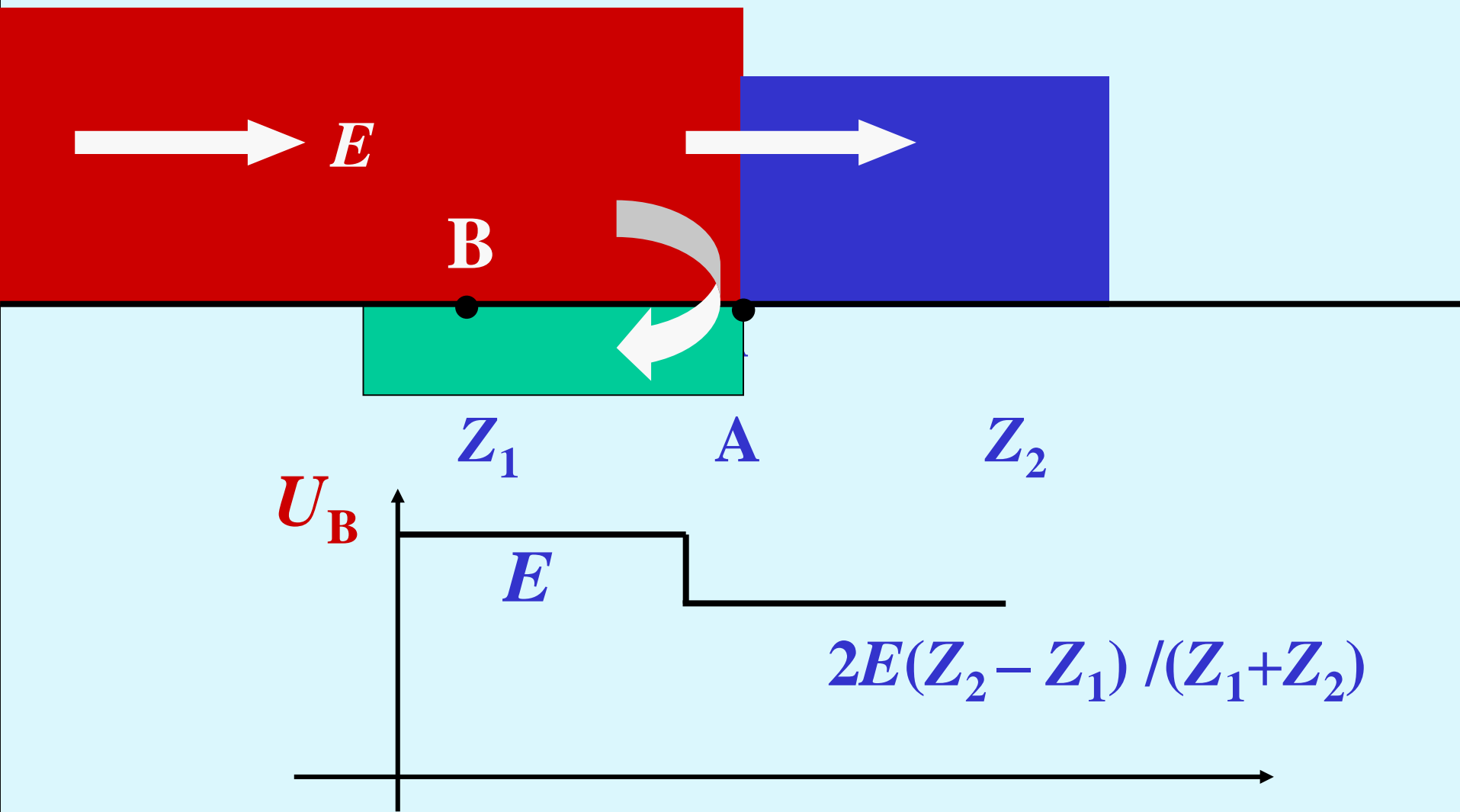
$$u_{1b} = \beta u_{1f}$$

在前行波(线路2)和反行波(线路1)所到之处都得到更小的电流

$$i_{2f} = i_{1f} + i_{1b} < i_{1f}$$

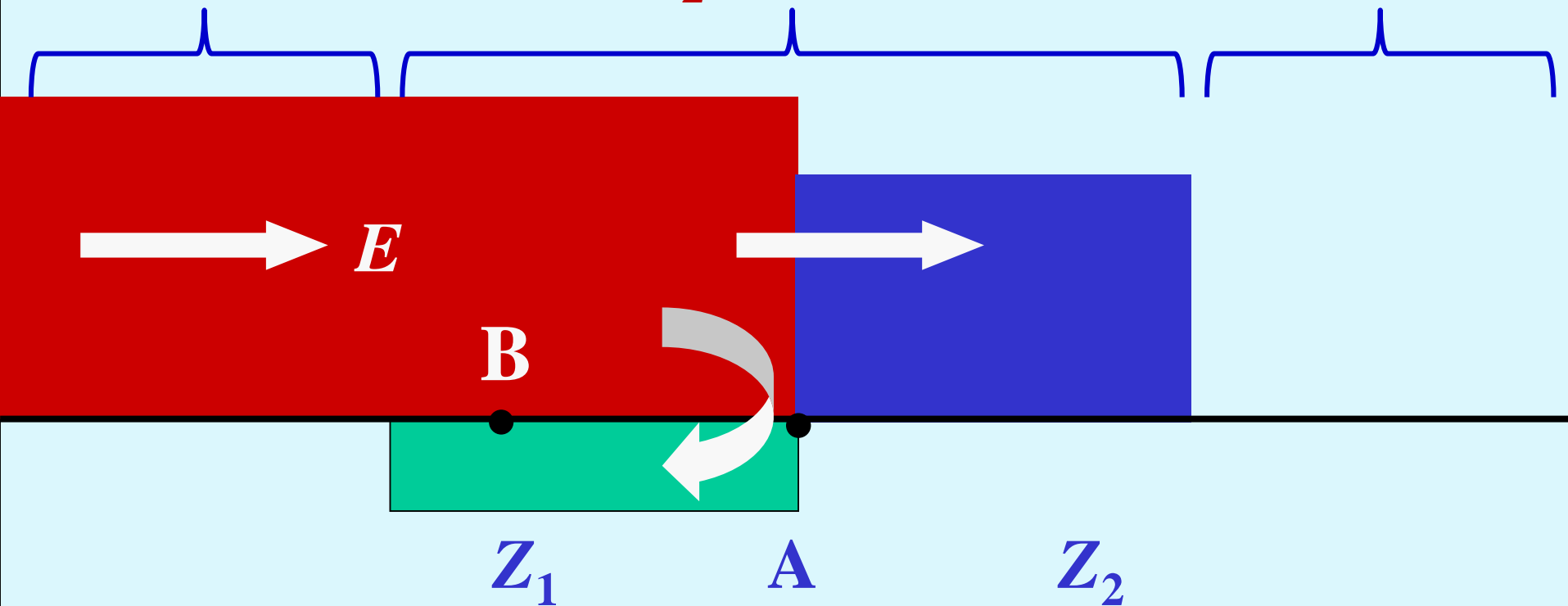
8.2 波的折射、反射与衰减、变形

波通过节点A，若 $Z_1 > Z_2$ 在两条线路上都得到更低的电压



8.2 波的折射、反射与衰减、变形

波通过节点A，若 $Z_1 > Z_2$ 在两条线路上都得到更低的电压



$$u_{2f} = u_{1f} + u_{1b} < u_{1f}$$

在前行波(线路1)和反行波(线路2)所到之处都得到更大的电流

$$i_{2f} = i_{1f} + i_{1b} > i_{1f}$$

8.2 波的折射、反射与衰减、变形

- 当电磁波的波长与线路或设备的尺寸可比时，必须关注线路上或设备中存在电磁波的传播过程，
 - 此时线路上或设备中的电压、电流不仅是时间的函数，还是空间的函数。必须按照分布参数来处理
-
- 分布参数的线路或设备，线路或设备上的不同点在同一瞬间的电压(或电流)不再相等（空间的函数）
 - 同一点在不同时刻的电压(或电流)也不相等（时间的函数）

- 电磁波在导线中传播时，电压电流的比例即为导线的波阻抗
- 电磁波传过波阻抗不同的线路时，会在节点处发生折射和反射过程
- 折射系数 $\alpha = 2Z_2/(Z_1+Z_2)$ ；反射系数 $\beta = (Z_2-Z_1)/(Z_1+Z_2)$
- 节点处的折反射系数与电磁波的传播方向有关

- 电磁波经过分布参数长线与集中参数阻抗时，节点处的电压电流仍然可以用折反射系数来计算
- 如果节点处不止一条传输线或集中负载，则 Z_2 按并联处理。从波的传输角度很好理解

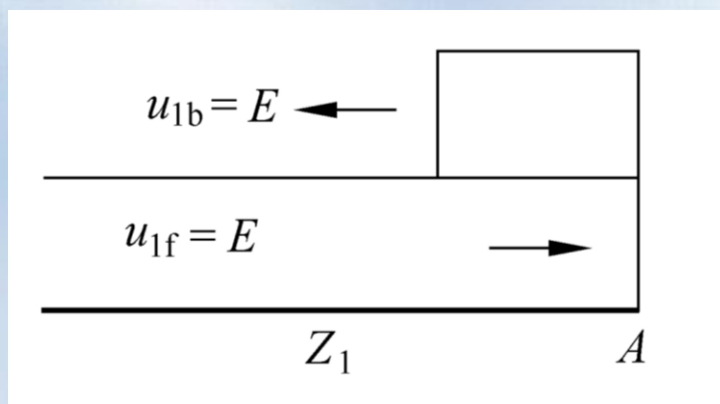
- 电磁波经过无损的集中参数电容与电感时，也会发生折反射
- 电磁波经过有损线时，还会发生波的衰减与变形

折射系数 $\alpha = 2Z_2/(Z_1+Z_2)$; 反射系数 $\beta = (Z_2-Z_1)/(Z_1+Z_2)$

末端开路时的折反射

Z_2 无穷大, $\alpha = 2$ $\beta = 1$

$u_{1b} = u_{1f}$ “电压全反射”

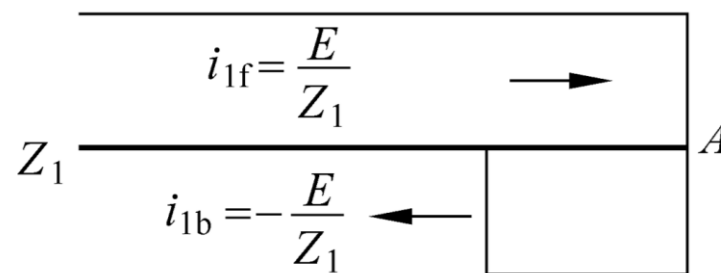


反射波电压等于入射波电压 $u_{1b} = u_{1f}$, 即反射波所到之处, 电压幅值翻倍

入射波电流、反射波电流可按照 $u_f/i_f = Z$ 和 $u_b/i_b = -Z$

计算得到反射波电流 $i_{1b} = -i_{1f}$

反射波电流等于负的入射波电流, 于是在反射波所到之处, 电流为零



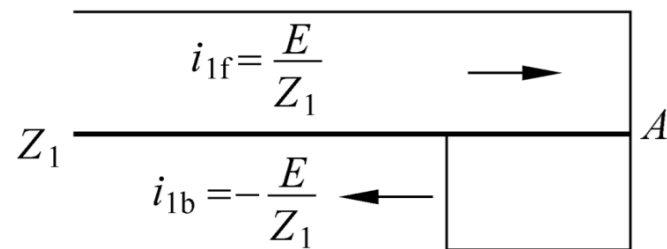
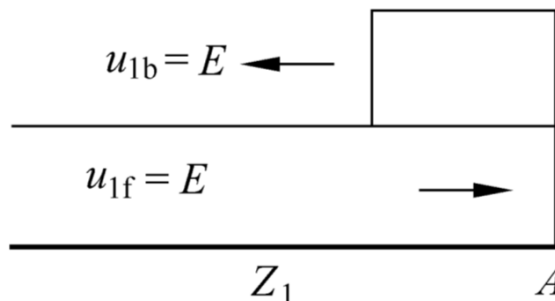
折射系数 $\alpha = 2Z_2/(Z_1+Z_2)$; 反射系数 $\beta = (Z_2-Z_1)/(Z_1+Z_2)$

末端开路时的折反射

$$Z_2 = \infty, \alpha = 2, \beta = 1$$

$$u_{1b} = u_{1f}$$

电压全反射



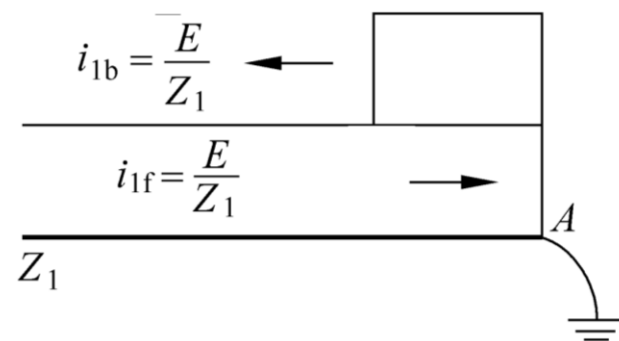
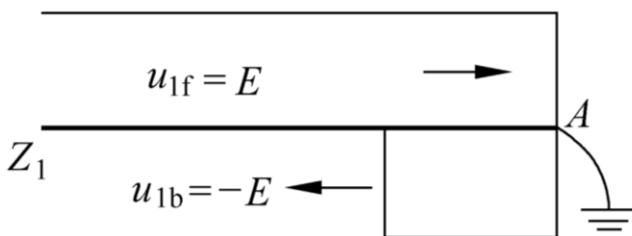
反射波所到之处，电压翻倍，电流降为零

末端短路时的折反射

$$Z_2 = 0, \alpha = 0, \beta = -1$$

$$i_{1b} = i_{1f}$$

电流全反射

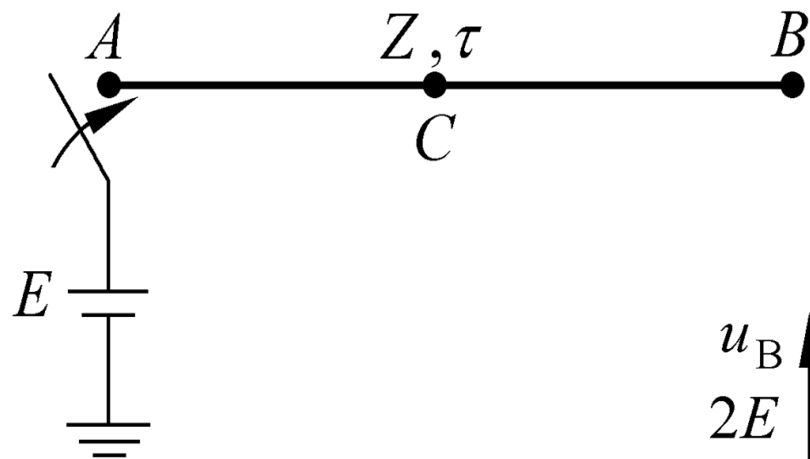


反射波所到之处，电压降为零，电流翻倍

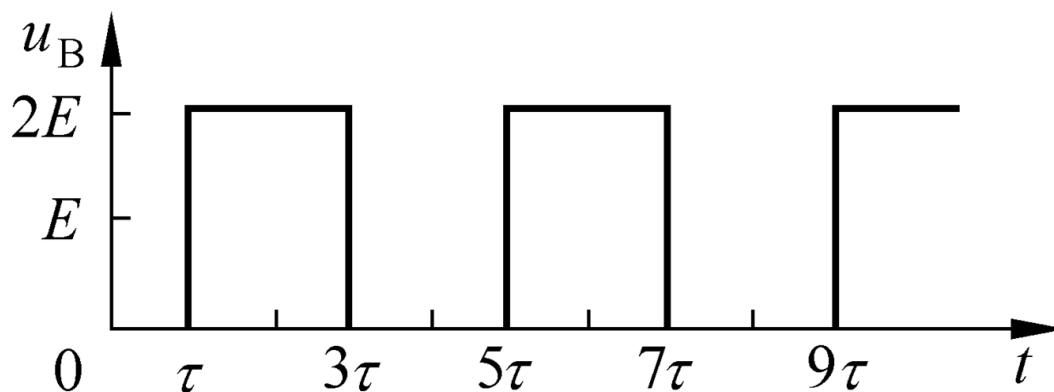
折反射例题：

例· 直流电源 E 在 $t = 0$ 时合闸于长度为 l 的空载线路，求线路末端 B 点的电压波形。

解：设 τ 为电磁波流过长度为 l 的线路时所需的时间。



线路中间 C 点的电压、电流波形是什么样的？



折反射例题：

例题：波阻抗 $Z_1=300\ \Omega$ ，波速 $v_1=300\text{m}/\mu\text{s}$ 的无损长线连接到波阻抗 $Z_2=75\ \Omega$ ，波速 $v_2=150\text{m}/\mu\text{s}$ ，长度 300m 的电缆首端 A 点，电缆末端 B 点连接到波阻抗 $Z_3=425\ \Omega$ ，波速 $v_3=300\text{m}/\mu\text{s}$ 的无损长线，如图 1 所示。幅值 $E=1000\ \text{kV}$ 的无穷长直角波在 $t=0$ 时刻到达 A 点。

请画出 $t \leq 8\mu\text{s}$ 内 A 、 B 两点电压随时间变化的波形 $u_A(t)$ 、 $u_B(t)$ ，以及 $t = 8\mu\text{s}$ 时刻沿无损线及电缆段电压的空间分布示意图。

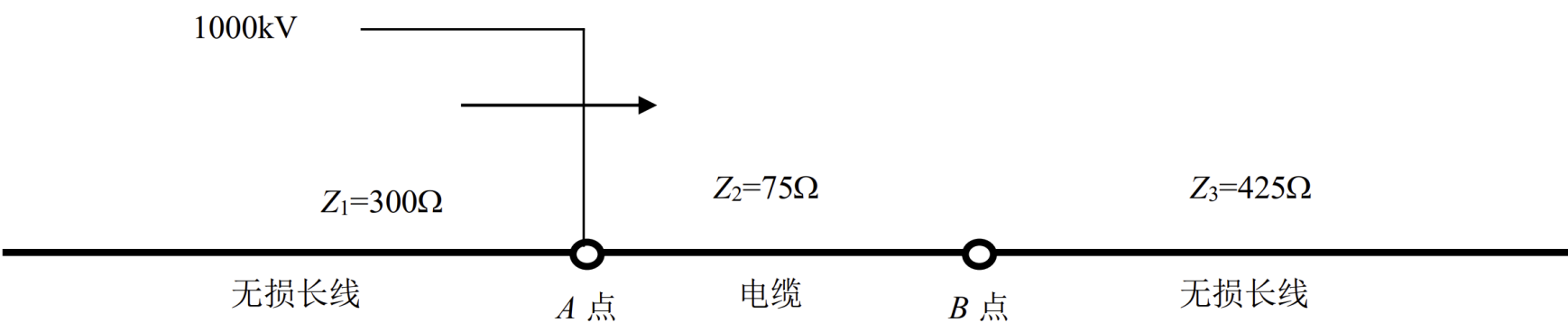


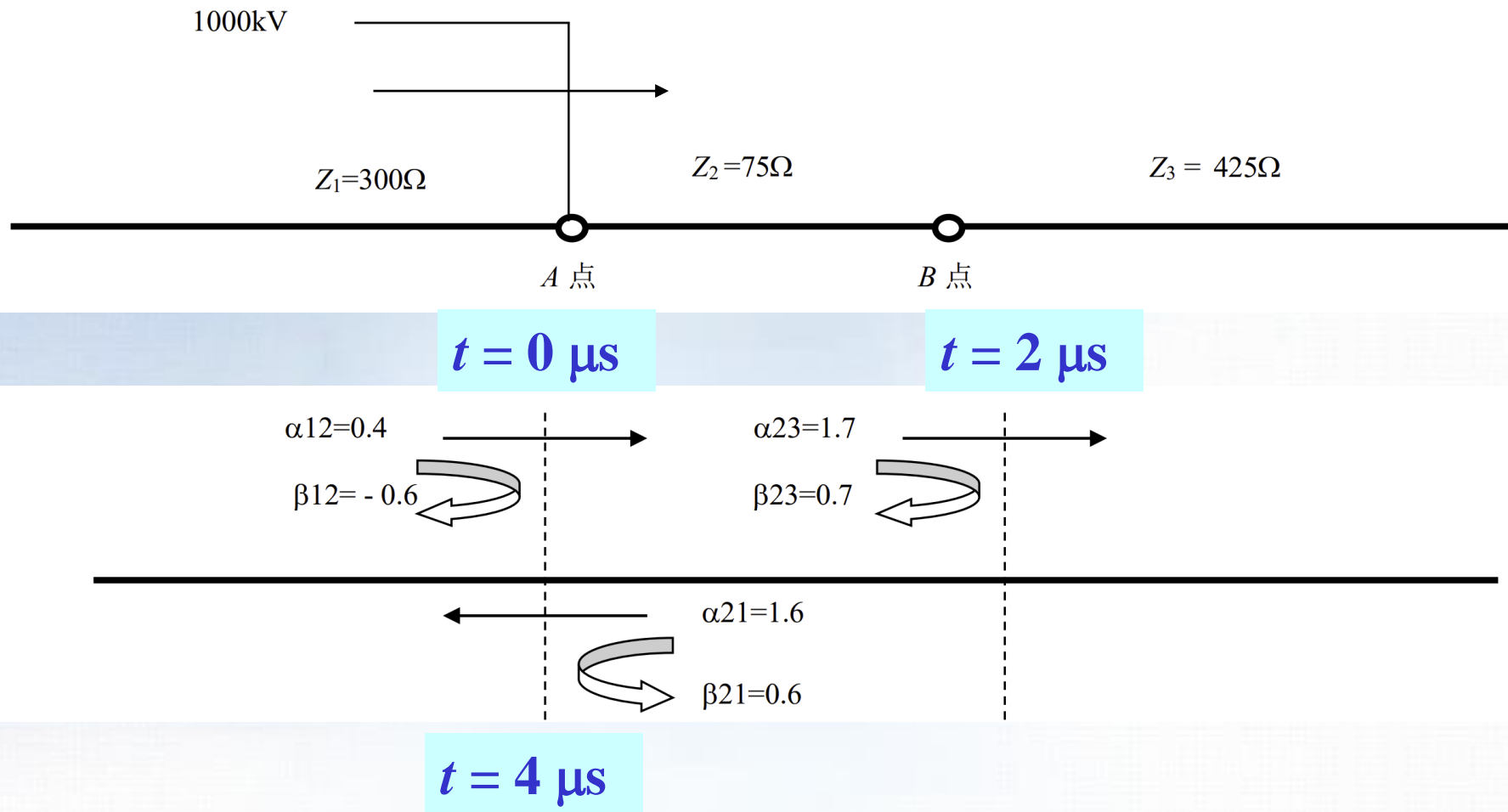
图 1

折反射例题：

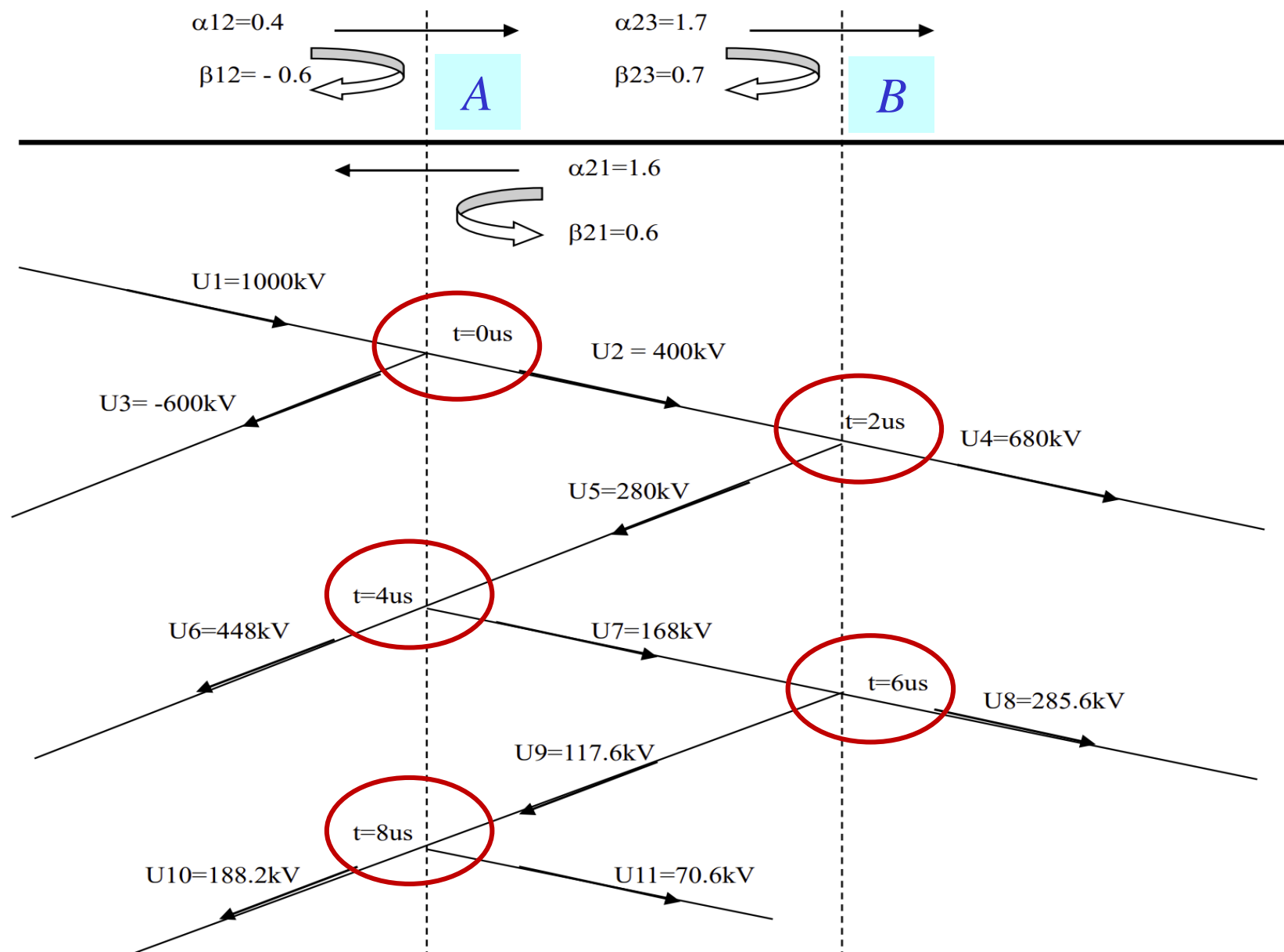
解：

$$\text{折射系数 } \alpha = 2Z_2 / (Z_1 + Z_2)$$

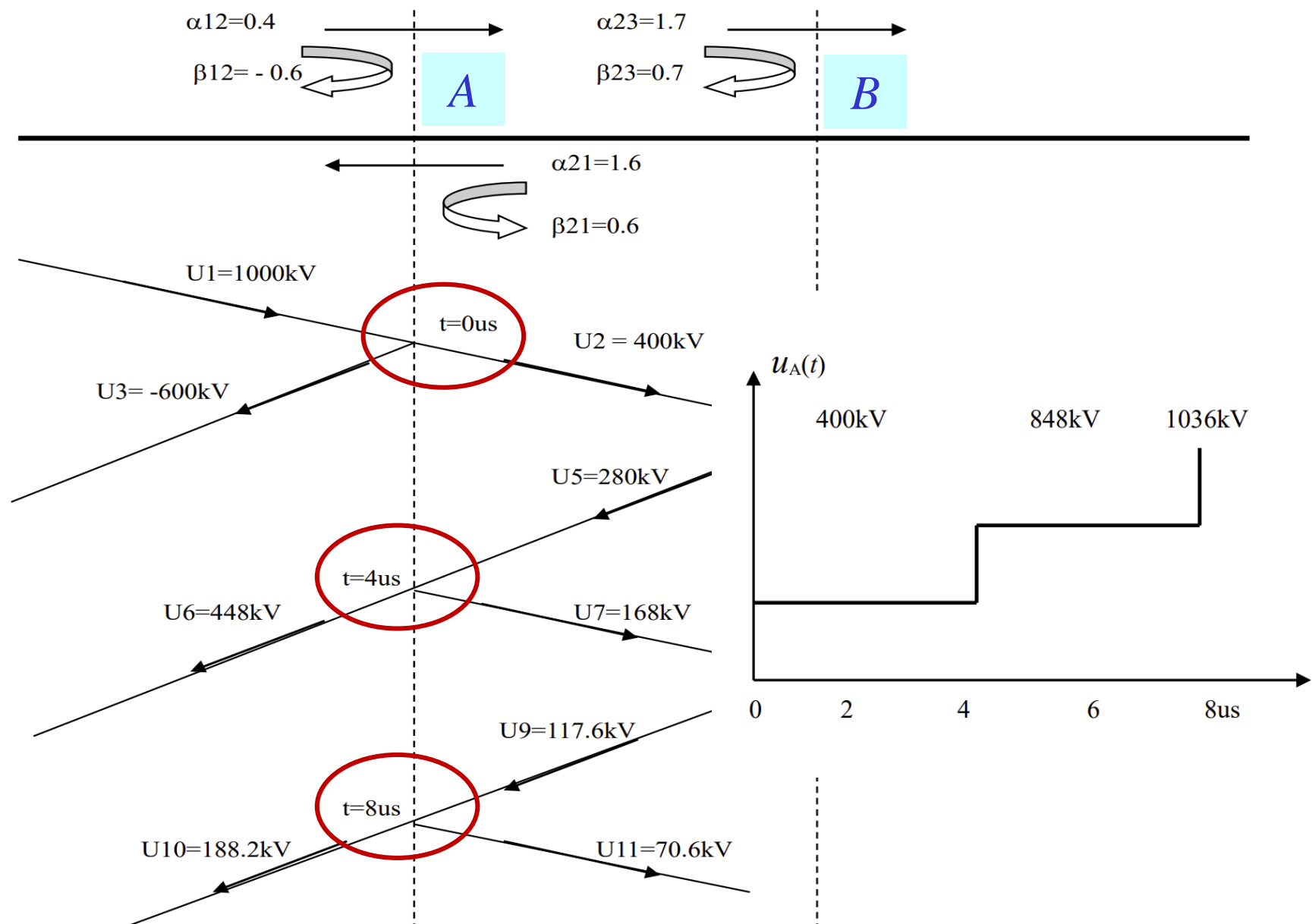
$$\text{反射系数 } \beta = (Z_2 - Z_1) / (Z_1 + Z_2), \quad \alpha = 1 + \beta$$



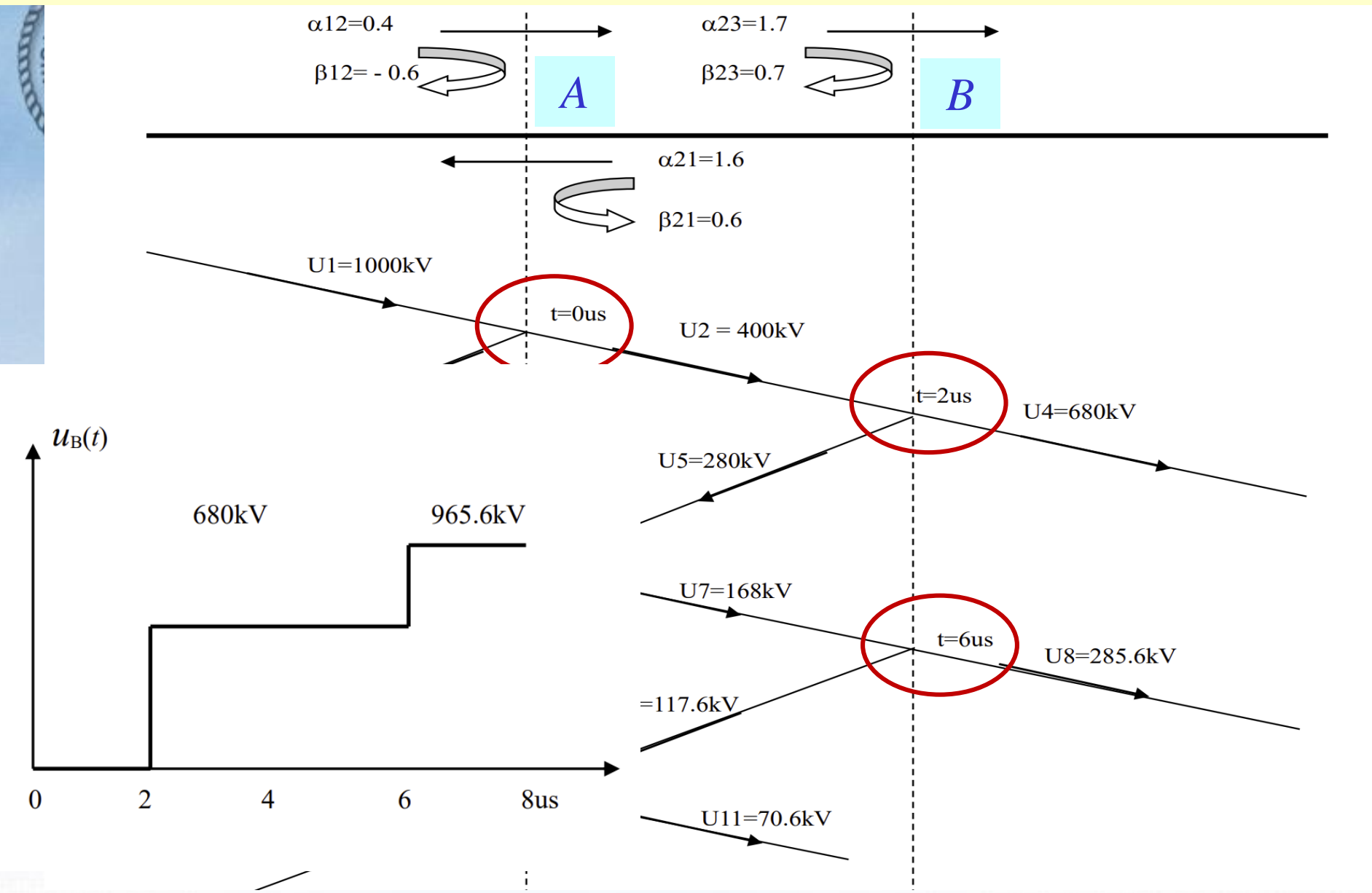
折反射例题：



折反射例题：

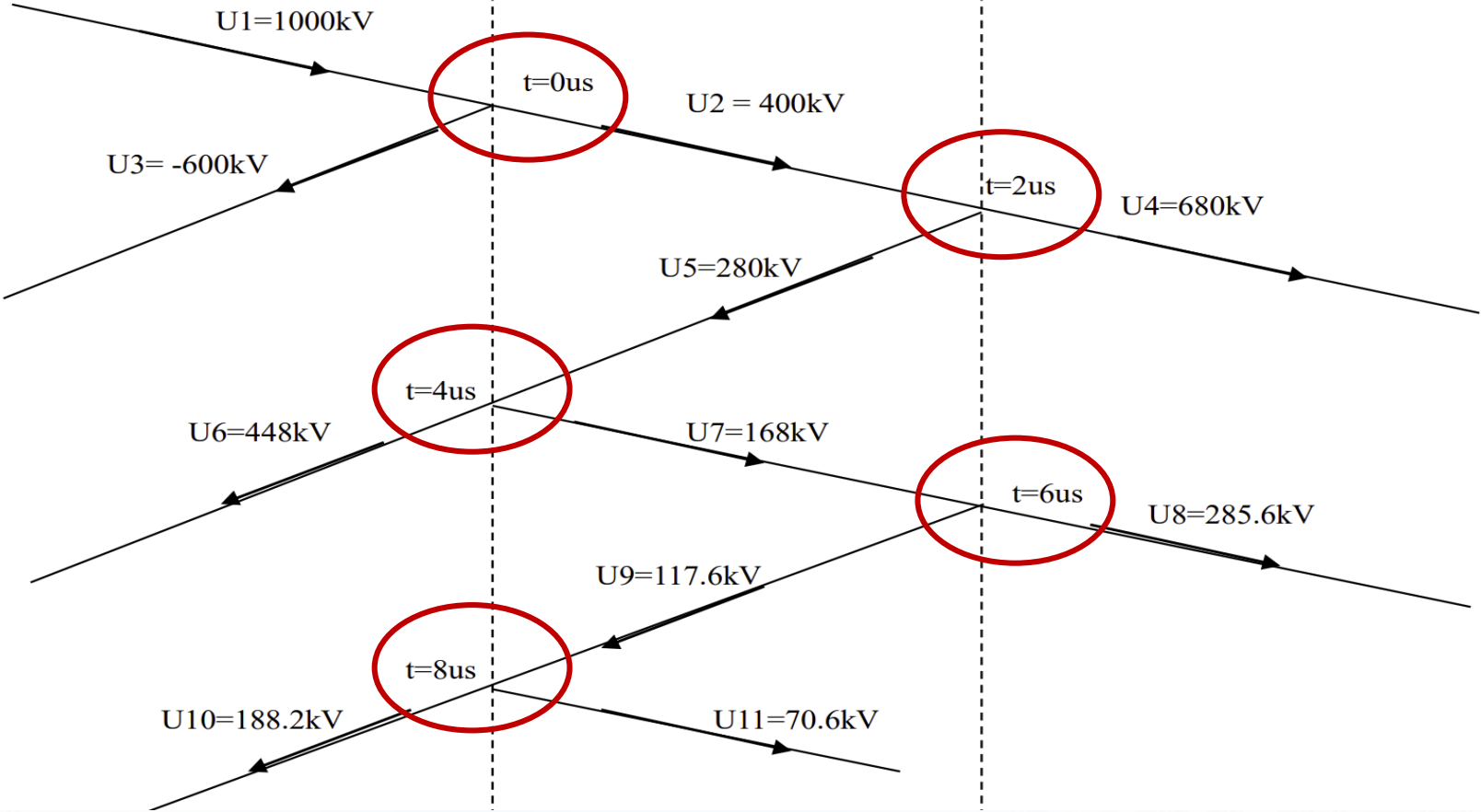
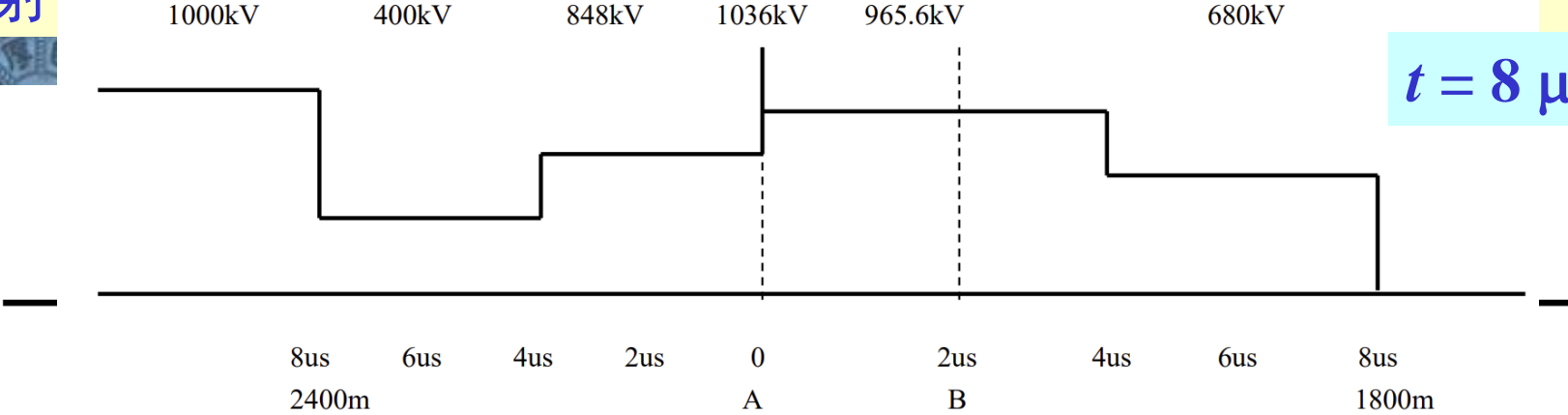


折反射例题：



折反射

$t = 8 \mu s$



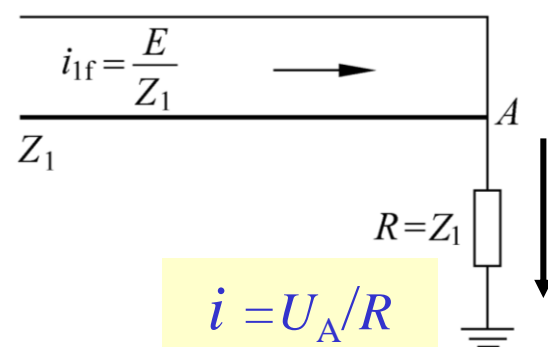
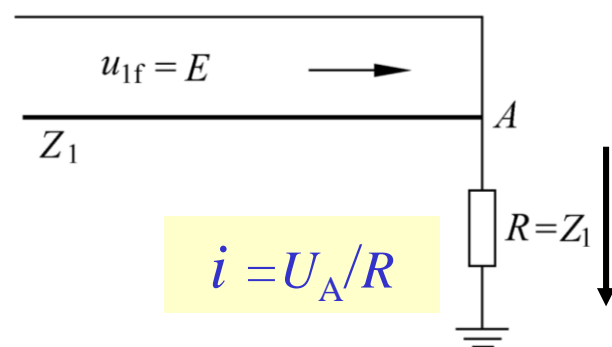
折射系数 $\alpha = 2Z_2/(Z_1+Z_2)$; 反射系数 $\beta = (Z_2-Z_1)/(Z_1+Z_2)$

电磁波传播经过波阻抗不同的线路节点时，会在节点处产生折反射，从而在节点两侧的线路上产生前行波、反行波。

上述推导出的折反射系数，不仅适用于分布式参数的无损长线，也同样适用于分析电磁波从无损长线到集中参数元件的折反射过程。电磁波经过集中参数电阻时，电阻会发热消耗能量

末端接集中参数
负载时的折反射

末端匹配时，
 $Z_2=Z_1=R$, $\alpha=1$, $\beta=0$

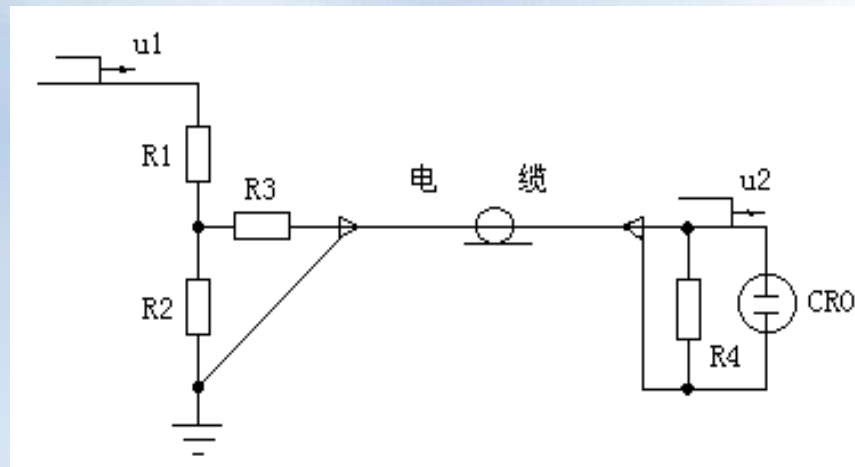


末端接集中参数负载，但 $R \neq Z_1$ 时，将在节点处发生折反射，同时电阻发热在冲击高电压测量时，很强调测量电缆两段的“匹配”！

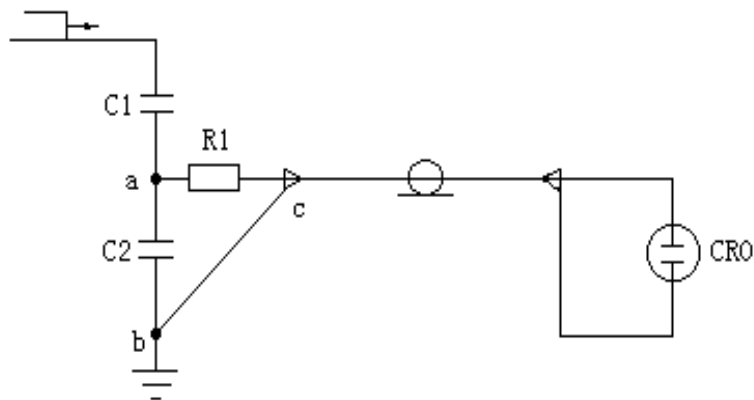
基本概念比做题更重要！在传输线的波过程体现的非常典型

从折反射的角度看
冲击电压分压器低压臂的
阻抗匹配

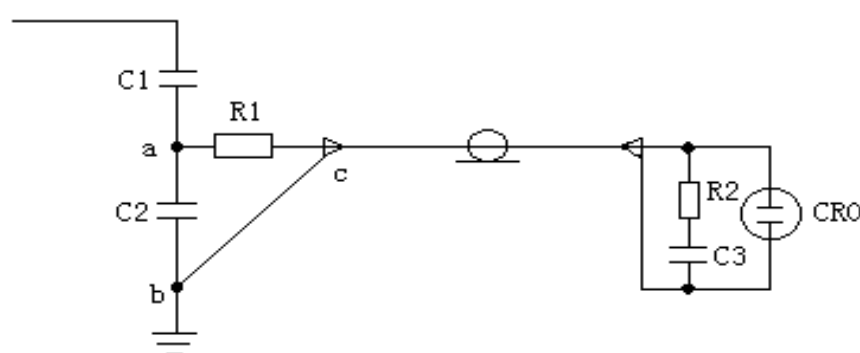
- 电阻分压器与电容分压器
- 首端匹配、首末端匹配



(1) 电阻分压器测冲击电压
首末端匹配的测量回路



(2) 电容分压器测冲击电压
同轴电缆仅首端匹配的测量回路



(3) 电容分压器测冲击电压
同轴电缆首末端匹配的测量回路

电阻分压器测量电缆的阻抗匹配

● 电缆首末端的阻抗匹配

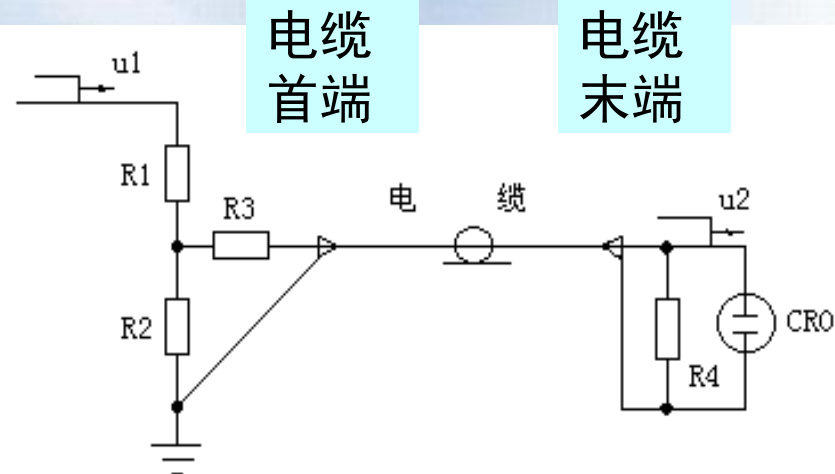
✓ 电缆的波阻抗 Z 大多为 50Ω , 75Ω

✓ 阻抗匹配: 不产生折返射

• R_1 和 R_2 分别为高低压臂电阻

• R_4 为末端匹配电阻, $R_4 = \text{电缆波阻抗} Z$

• R_3 为首端匹配电阻, $R_2 + R_3 = Z$



冲击电压的电阻分压器测量回路

● **末端匹配:** 冲击电压波从分压器进入电缆, 到达电缆末端时不发生折反射, 要求从电缆末端向右看出去的阻抗等于电缆波阻抗, 即 $R_4 = Z$

● **首端匹配:** 冲击电压波从电缆末端返回首端时, 不发生折反射, 要求从电缆首端向左看出去的阻抗等于电缆波阻抗, 即 $R_2 + R_3 = Z$

电阻分压器测量电缆的阻抗匹配

- 电缆首末端的阻抗匹配

- ✓ 电缆的波阻抗 Z 大多为 50Ω , 75Ω

- ✓ 阻抗匹配：不产生折返射

- R_1 和 R_2 分别为高低压臂电阻

- R_4 为末端匹配电阻, $R_4 = \text{电缆波阻抗} Z$

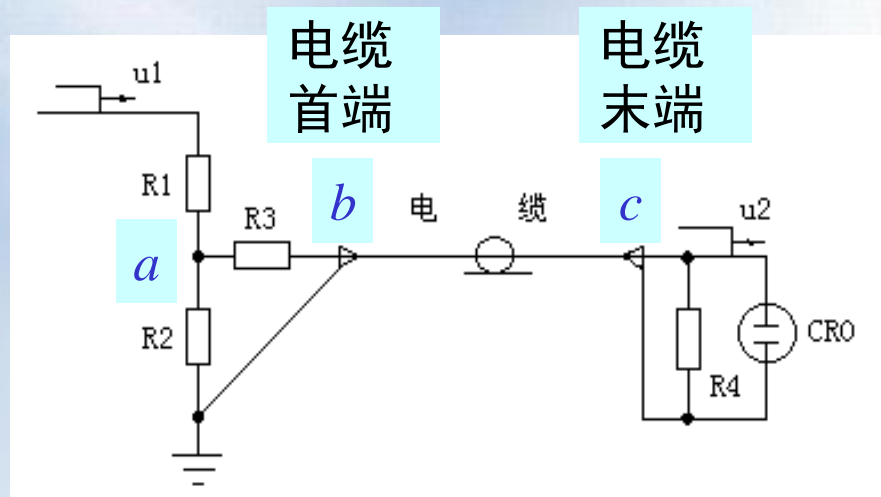
- R_3 为首端匹配电阻, $R_2 + R_3 = Z$

- 分压比

$t=0$ 时的分压比称作初始分压比

$t \rightarrow \infty$ 时的分压比称作稳态分压比

当测量阶跃波时, 该电路的初始分压比和稳态分压比相等



冲击电压的电阻分压器测量回路

- ✓ 总分压比 K : 高压端输入电压 u_1 与示波器两端的电压 u_2 之间的比值

$$K = [(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2] / R_2 R_4$$

- ✓ 首末端匹配: 若 K 值太大, 可改为仅首端或末端用电阻匹配

- ✓ 电缆芯电阻: 电缆较长时, 在末端匹配时, 需计入电缆芯电阻的分压作用

电容分压器测量电缆的阻抗匹配

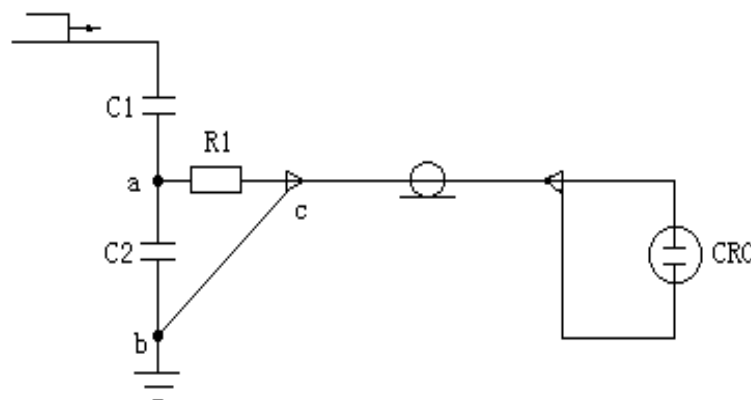
● 同轴电缆仅首端匹配的测量回路

- 进入波波幅：施加阶跃电压的初瞬，进入电缆的波幅为

$$U_1[C_1/(C_1+C_2)][Z/(Z+R_1)]$$
$$=C_1U_1/[2\cdot(C_1+C_2)] \quad (\text{需匹配, 取 } R_1=Z)$$

➤ 初始的波过程

- ✓ 进入电缆的波幅: $C_1U_1/[2\cdot(C_1+C_2)]$
- ✓ 电缆末端为示波器输入端，输入阻抗甚高，输入电容很小，可以看为开路
- ✓ 故进入的电压波到末端有一正的反射波迭加到入射波上，示波器获得的电压为 $C_1U_1/(C_1+C_2)$



同轴电缆仅首端匹配的测量回路 $R_1=Z$

- ✓ 等到反射波运行到电缆首端，由于 C_2 较大而 R_1 已经与电缆波阻抗相匹配，故在首端无再次的反射波

➤ 初始分压比: $K_1=(C_1+C_2)/C_1$

➤ 似稳状态

- ✓ 波在电缆中运行两倍行程的时间 2τ 后，可看作达到似稳状态
- ✓ 此时电缆被看作为是一个电容 C_0 ，故当 $t \geq 2\tau$ 时， $K_2=(C_1+C_2+C_0)/C_1$

电容分压器测量电缆的阻抗匹配

➤ 初始分压比: $K_1 = (C_1 + C_2) / C_1$

➤ 似稳状态分压比:

$$K_2 = (C_1 + C_2 + C_0) / C_1$$

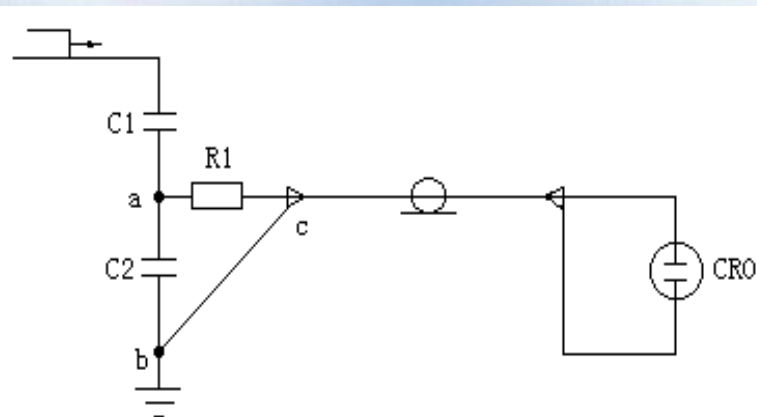
分压比大，测到的电压就低

➤ 电压过冲问题

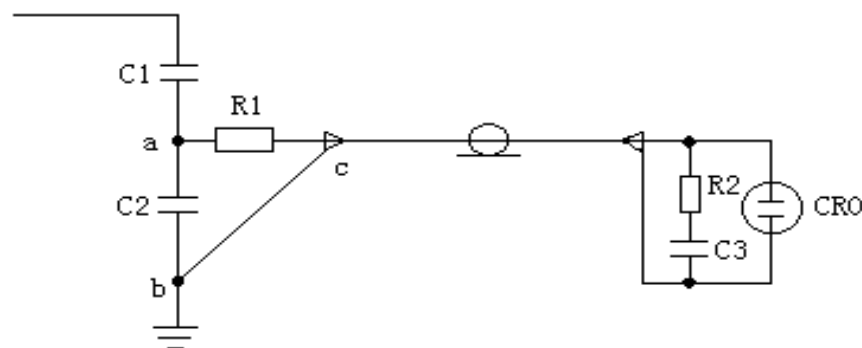
✓ K_1 与 K_2 有些差异，同轴电缆将引起电压误差，与 $C_0 / (C_1 + C_2) \approx C_0 / C_2$ 有关

✓ 对于短的或中等长度的电缆，以及高 C_2 值，即高分压比的情况，此过冲的作用甚微，可以忽略

✓ 误差解决的办法：电容分压器应用于测量暂态电压的现场试验时，常需用较长的电缆，此时可以采用早年由F. G. Burch提出的接线图：同轴电缆两端匹配的测量回路，这样可以消除电压误差问题



同轴电缆仅首端匹配的测量回路 $R_1 = Z$



电容分压器测冲击电压
同轴电缆首末端匹配的测量回路
 $C_1 + C_2 = C_3 + C_0$, $R_1 = R_2 = Z$

● 同轴电缆两端匹配的测量回路

➤ 在此回路中选择： $C_1 + C_2 = C_3 + C_0$ ， $R_1 = R_2 = Z$

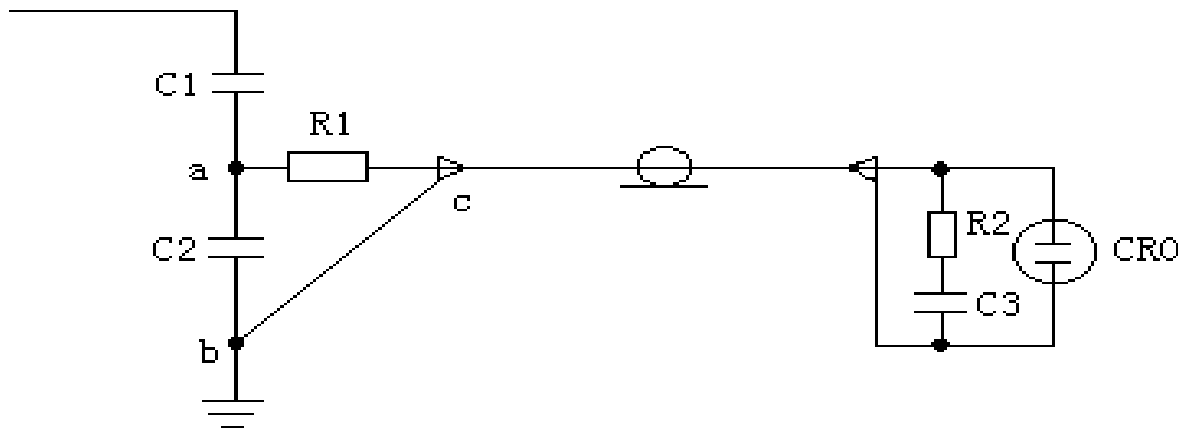
➤ 初始分压比： $t = 0^+$ 时，分压比

$$K_1 = \frac{U_1}{[C_1 U_1 / (C_1 + C_2)] [Z / (R_1 + Z)]} = 2(C_1 + C_2) / C_1$$

➤ 似稳态分压比： $t \geq 2\tau$ 时，分压比

$$K_2 = (C_1 + C_2 + C_3 + C_0) / C_1 = 2(C_1 + C_2) / C_1 \quad C_2、C_3、C_0 \text{ 为并联关系}$$

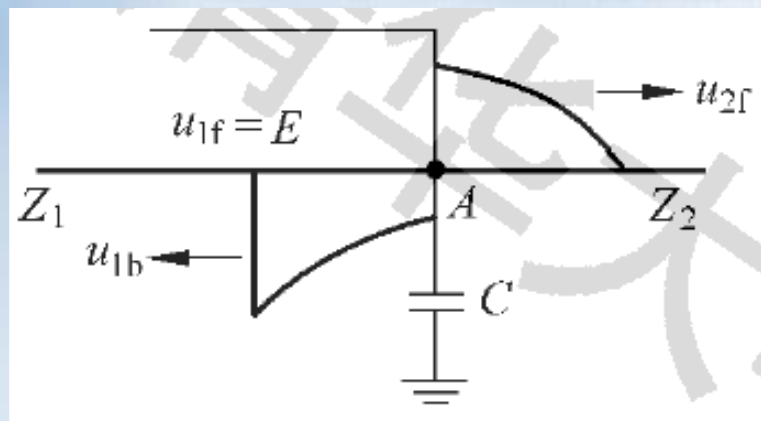
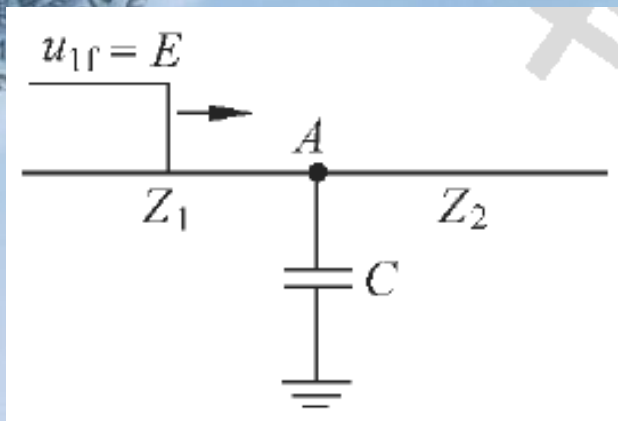
初始和似稳态分压比相同



电容分压器测冲击电压
同轴电缆首末端匹配的测量回路

$$C_1 + C_2 = C_3 + C_0, \quad R_1 = R_2 = Z$$

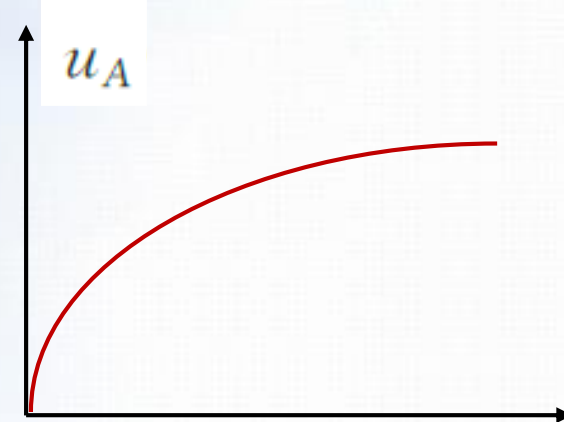
8.3 波通过并联电容与串联电感



$$u_A(t) = \alpha E (1 - e^{-\frac{t}{T}}) = u_{2f}(t)$$

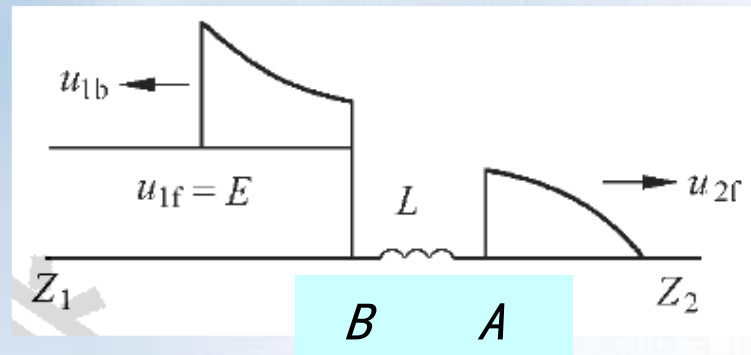
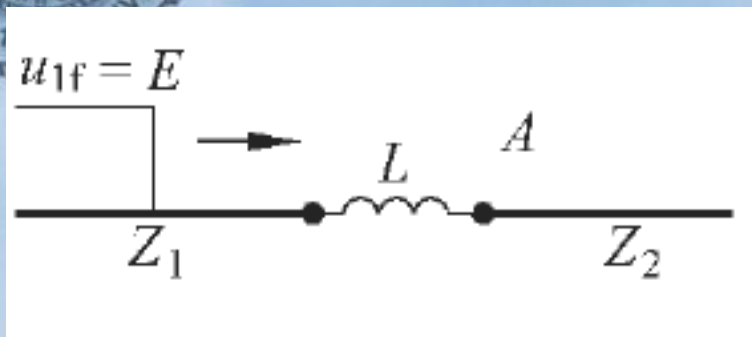
$$\text{其中, } \alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}; \quad T = C \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$\left(\frac{du_A}{dt} \right)_{\max} = \left. \frac{du_A(t)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{\alpha E}{T} = \frac{2E}{Z_1 C}$$



由于并联电容C的存在, Z_2 上前行电压波的陡度大为下降, 电压幅值不受影响

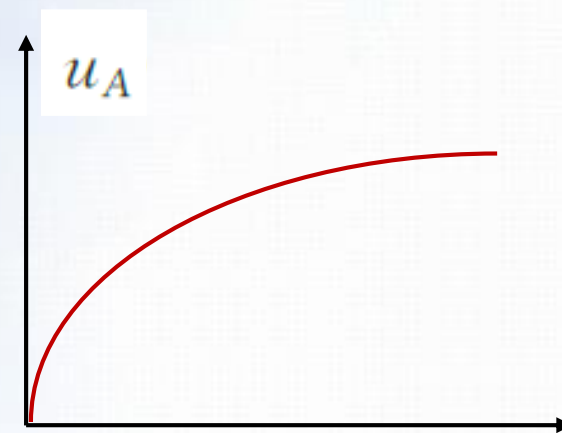
8.3 波通过并联电容与串联电感



$$u_A(t) = \alpha E (1 - e^{-\frac{t}{T}}) = u_{2f}(t)$$

$$\text{其中, } \alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}; \quad T = \frac{L}{Z_1 + Z_2}$$

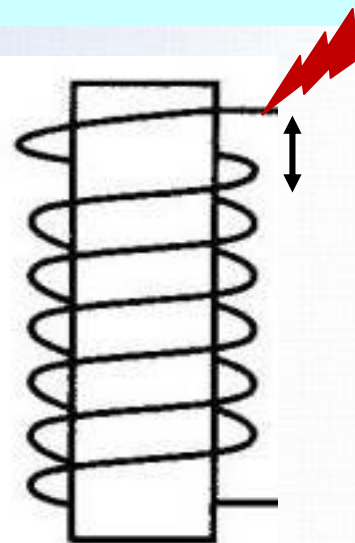
$$\left(\frac{du_A(t)}{dt} \right)_{\max} = \left. \frac{du_A(t)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{\alpha E}{T} = \frac{2EZ_2}{L}$$



由于串联电感 L 的存在, Z_2 上前行电压波的陡度大为下降, 电压幅值不受影响

例题：幅值为100kV的直角波，沿波阻抗 $Z = 50\Omega$ 的电缆侵入发电机绕组。绕组每匝长度 $l = 3\text{m}$ ，波沿绕组传播的波速 $v = 6 \times 10^7 \text{ m/s}$ 。匝间绝缘的允许电压为600V。求保护匝间绝缘所需要的给发电机并联的电容值 C 为多少？

分析：电机绕组的匝间电容很小，在冲击波下可以看成具有一定波阻抗的导线。波沿绕组行进一匝，则匝间电压 $u = al / v$ 。其中 l 为一匝的长度， v 为波速m/s， a 为侵入波波头陡度kV/ μs 。电机制造完成后， l 、 v 不会再变，所以必须限制来波的陡度 a 。



解：最大允许来波陡度可 $(du/dt)_{\max}$ 可分解为 $(du/dx)_{\max} \times (dx/dt)$ 。

$$(du/dt)_{\max} = (du/dx)_{\max} \times (dx/dt) = (600\text{V}/3\text{m}) \times (6 \times 10^7 \text{m/s}) = 12\text{kV}/\mu\text{s}。$$

则所需电容量为

$$C = 2E / [Z^*(du/dt)_{\max}] = 2 \times 100\text{kV} / (50 \Omega \times 12\text{kV}/\mu\text{s}) = 0.33 \mu\text{F}$$