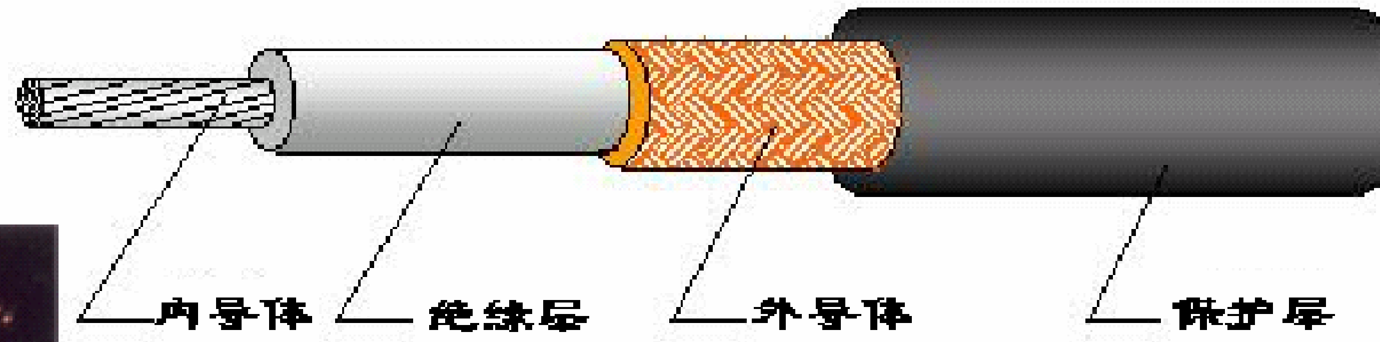
第3章 微波传输线

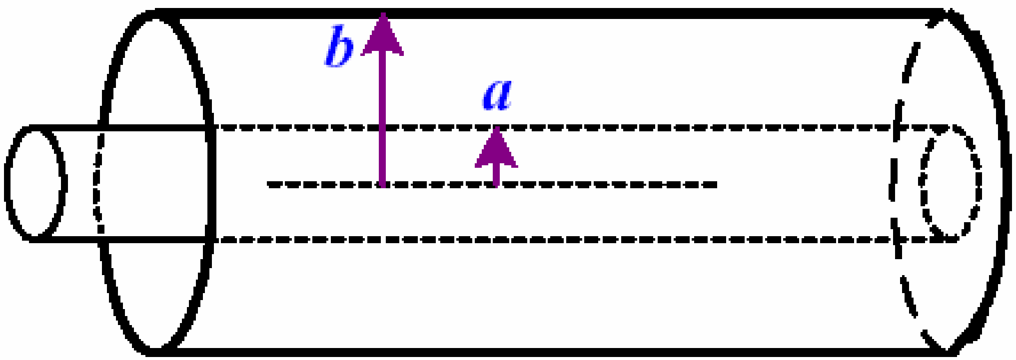
- 3.1 TEM，TE和TM波的一般解
- 3.2 矩形金属波导
- 3.3 圆波导
- 3.4 同轴线的高次模及单模传输
- 3.5 带状线和微带
- 3.6 介质波导

3.4 同轴线的高次模及单模传输

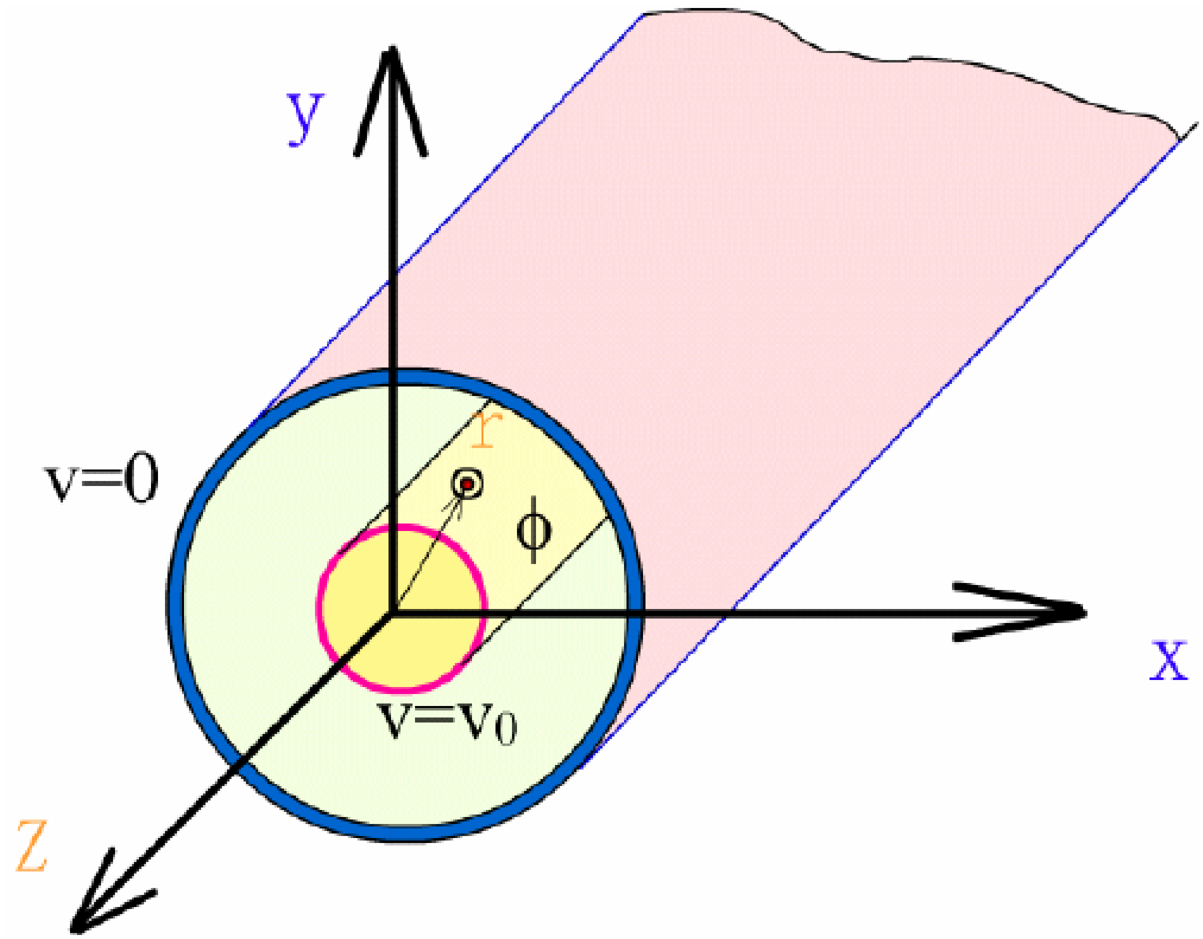
组成　　理想导体　　　　理想介质

（均匀的）、理想同心圆柱体





坐标



同轴线结构及其坐标系

电磁场分布情况

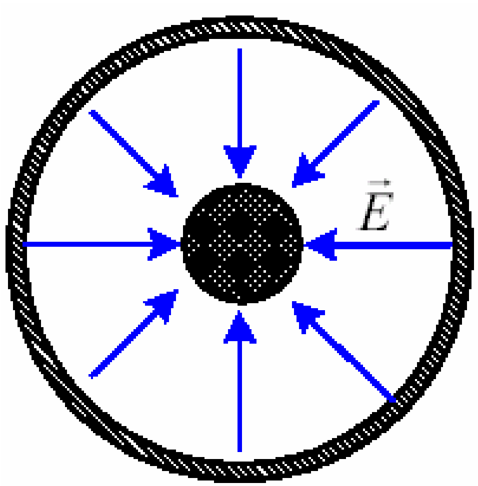
$$\boldsymbol{E}=\boldsymbol{E}_0 e^{-jkz}=\frac{V_0}{\ln(b/a)}\frac{\boldsymbol{e}_r}{r}e^{-jkz}$$

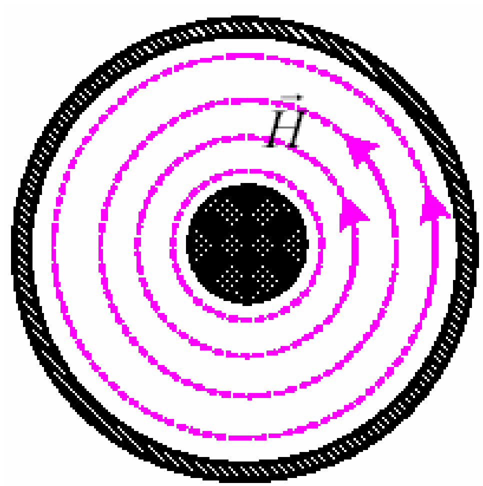
都分布在横截面上是TEM波

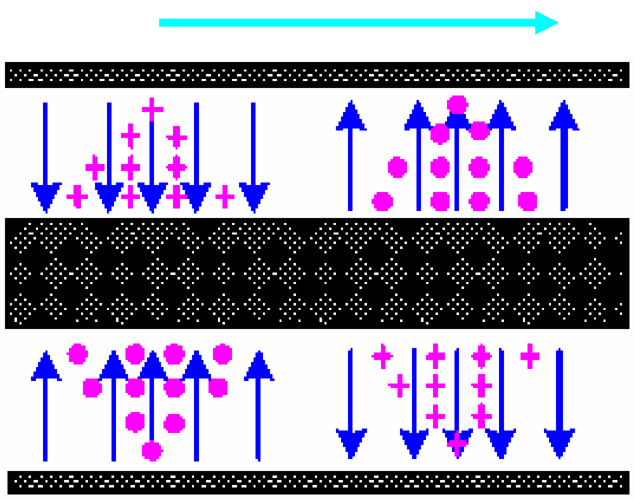
$$\boldsymbol{H}=\boldsymbol{e}_z\times\frac{\boldsymbol{E}}{\eta}=\frac{V_0}{\ln(b/a)}\frac{1}{\eta}\frac{\boldsymbol{e}_\phi}{r}e^{-jkz}$$

分析随各坐标变化情况

$$\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H}$$







金属的表面电流 $\boldsymbol{J}_S = \boldsymbol{e}_n \times \boldsymbol{H}$ 单位：A/m

内导体的外表面 $\boldsymbol{J}_{S1} = \boldsymbol{e}_r \times \boldsymbol{H}\big|_{r=a} = \cdots$ 方向：轴向

不能太细，否则面电流太大，易烧坏

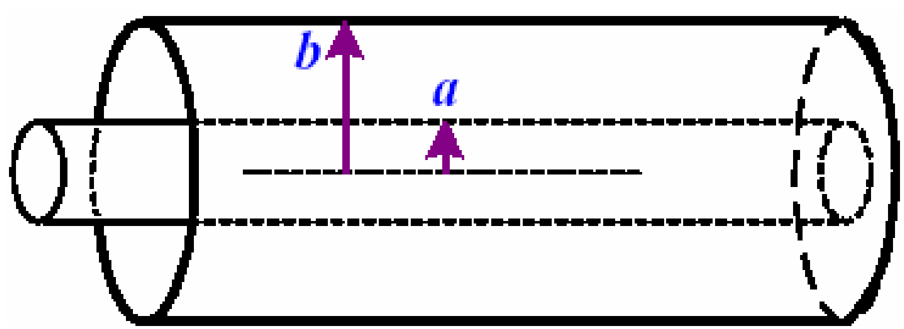
外导体的内表面 $\boldsymbol{J}_{S2} = \left(-\boldsymbol{e}_r\right) \times \boldsymbol{H}\big|_{r=b} = \cdots$ 方向：反轴向

功率流：$P = \dfrac{1}{2}\mathrm{Re}\left(\int_a^b \left(\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H}^*\right) \cdot d\boldsymbol{S}\right)$ $\quad dS = \left(2\pi r\right) \cdot dr$

求特征阻抗：

法一：基本定理

法二：已有的结论



特征阻抗：

$$\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi$$

法一：定义法

$$I = \oint_C H_\phi dl = \frac{2\pi E_0 a}{\eta} e^{-j\beta z}$$

$$U = \int_a^b E_r dr = E_0 a \ln\left(\frac{b}{a}\right) e^{-j\beta z}$$

$$Z_0 = \frac{U}{I} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad \Omega$$

法二：已有的结论

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \sqrt{\frac{\dfrac{\mu_0}{2\pi}\ln\left(\dfrac{b}{a}\right)}{2\pi\varepsilon \dfrac{1}{\ln\left(\dfrac{b}{a}\right)}}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad \Omega$$

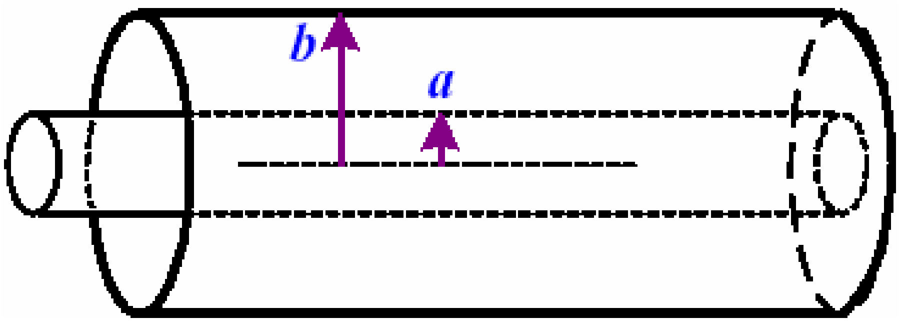
常用传输线特性阻抗：50ohm、75ohm

50ohm → 示波器探头

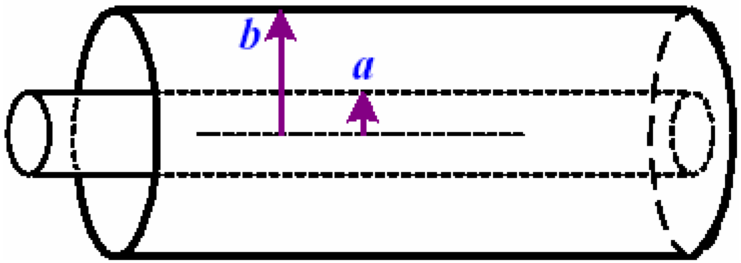
75ohm → 视频电缆

例1:

同轴传输线内外半径分别为3cm、6cm，中间填充空气，求 单位长度电感、单位长度电容、传输线特性阻抗



例1:



同轴传输线内外半径分别为3cm、6cm，中间填充空气，求 单位长度电感、单位长度电容、传输线特性阻抗

$$L_0=\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\left(\frac{b}{a}\right)=\frac{4\pi\times10^{-7}}{2\pi}\ln\left(\frac{6}{3}\right)=1.386\times10^{-7}\,h/m$$

$$C_0=2\pi\varepsilon_0\frac{1}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}=2\pi\times\frac{10^{-9}}{36\pi\ln\left(\frac{6}{3}\right)}=0.08\times10^{-9}\,f/m$$

$$Z_0=\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\ln\left(\frac{b}{a}\right)=\frac{120\pi}{2\pi}\ln\left(\frac{6}{3}\right)=41.59\Omega$$

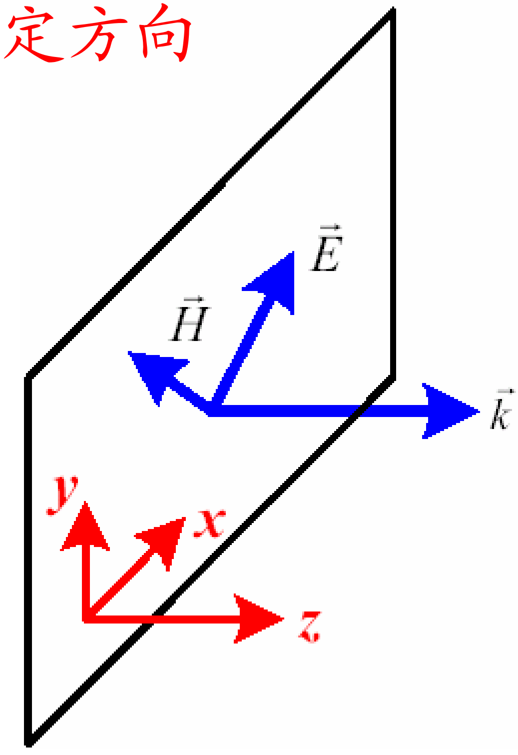
同轴线中的高阶模

背景知识

（1）TEM波 $Z_{TEM}=\dfrac{E_x}{H_y}=\sqrt{\dfrac{\mu}{\varepsilon}}=\eta$ $\dfrac{E_y}{H_x}=-Z_{TEM}$

$$\boldsymbol{H}=\frac{1}{Z_{TEM}}\left(\boldsymbol{e}_z\times\boldsymbol{E}\right)$$

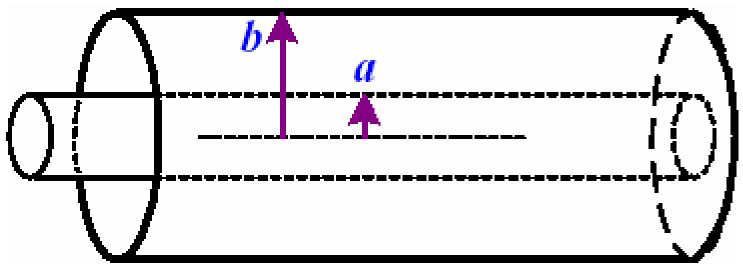
根据右手法则确定方向



相速（波传播的速度）= 光速

$$v_{pTEM}=\frac{\omega}{\beta}=\frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}$$

思考



TEM波

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_0 e^{-jkz}$$

功率

$$\boldsymbol{P}_1 = \frac{1}{2}\boldsymbol{E}_0^2$$

与完全相同的TEM波

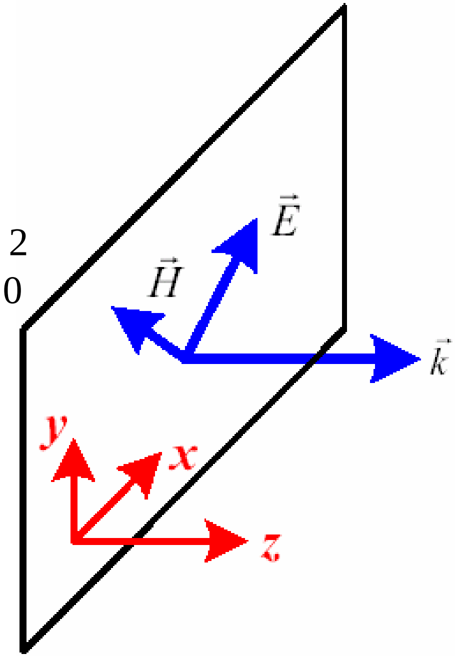
$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_0 e^{-jkz}$$

$$\boldsymbol{P}_2 = \frac{1}{2}\boldsymbol{E}_0^2$$

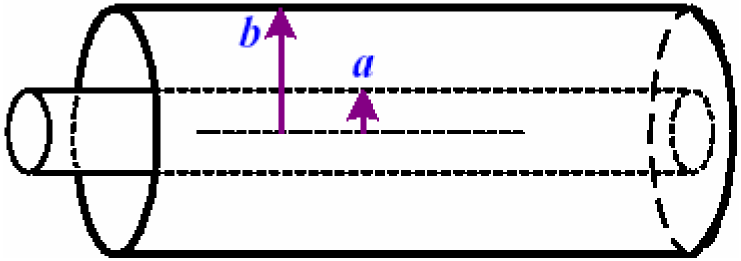
同时进入同轴线中传输合成

$$\boldsymbol{E} = 2\boldsymbol{E}_0 e^{-jkz}$$

$$\boldsymbol{P}_a = \frac{4}{2}\boldsymbol{E}_0^2$$



思考



TEM波

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_0 e^{-jkz}$$

功率

$$\boldsymbol{P}_1 = \frac{1}{2}\boldsymbol{E}_0^2$$

与振幅方向相反的TEM波

$$\boldsymbol{E} = -\boldsymbol{E}_0 e^{-jkz}$$

$$\boldsymbol{P}_2 = \frac{1}{2}\boldsymbol{E}_0^2$$

同时进入同轴线中传输合成

$$\boldsymbol{E} = 0$$

$$\boldsymbol{P}_a = 0$$

能量哪里去了？

同轴线中的高阶模

背景知识

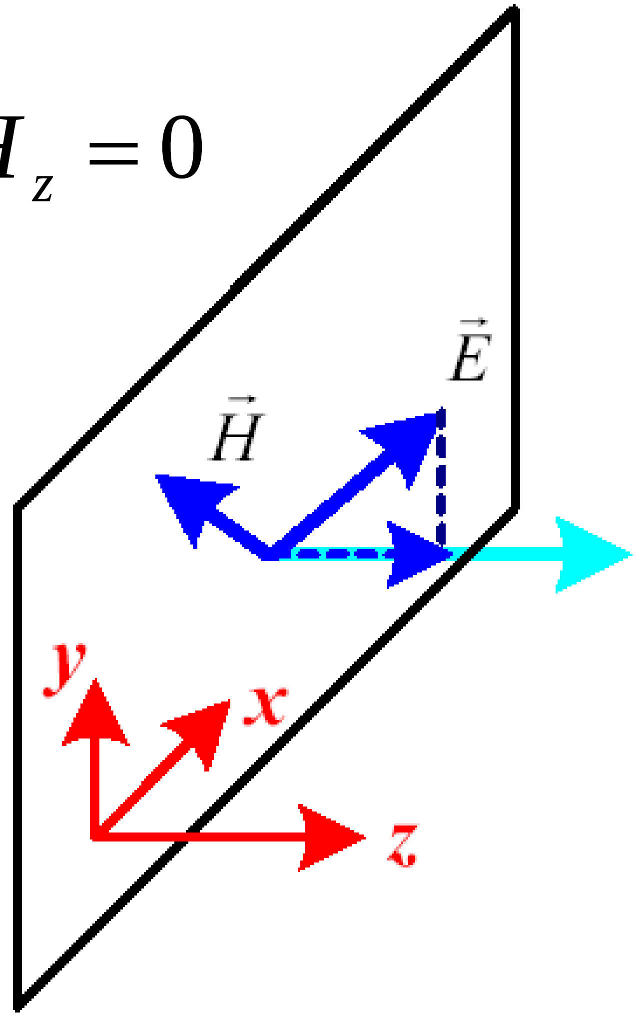
（2）TM波

e波

特点：传播方向上无磁场分量 $H_z = 0$

$$Z_{TM} = \frac{E_x}{H_y} = -\frac{E_y}{H_x} = \frac{T}{j\omega\varepsilon} = \frac{\alpha + j\beta}{j\omega\varepsilon}$$

$$\boldsymbol{H} = \frac{1}{Z_{TM}}\left(\boldsymbol{e}_z \times \boldsymbol{E}\right)$$



可选坐标H//y

同轴线中的高阶模

背景知识

（3）TE波

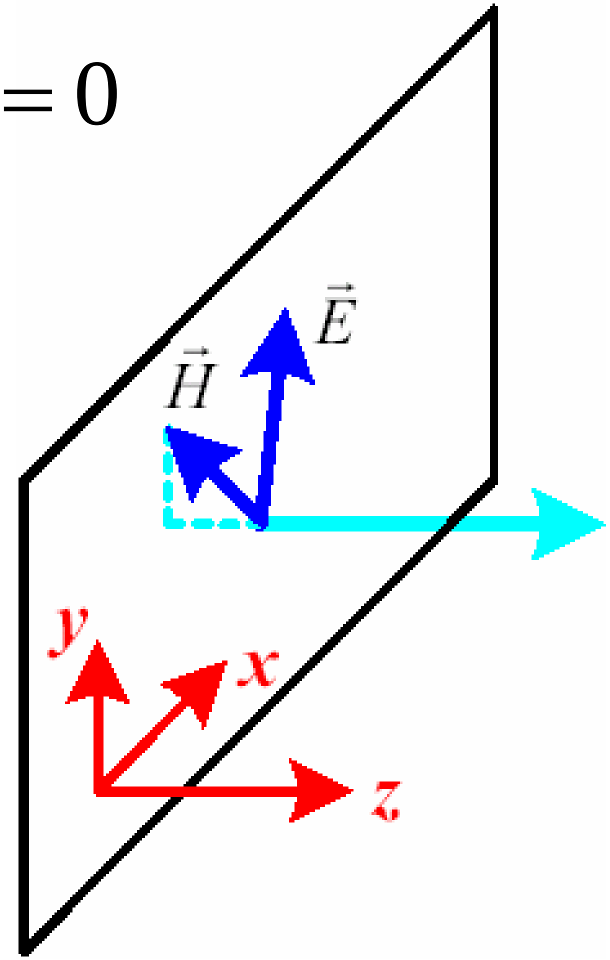
h波

特点：传播方向上无电场分量 $E_z = 0$

$$Z_{TE} = \frac{E_x}{H_y} = -\frac{E_y}{H_x} = \frac{j\omega\mu}{T} =$$

选择坐标系

$$\boldsymbol{E} = -Z_{TE}\left(\boldsymbol{e}_z \times \boldsymbol{H}\right)$$



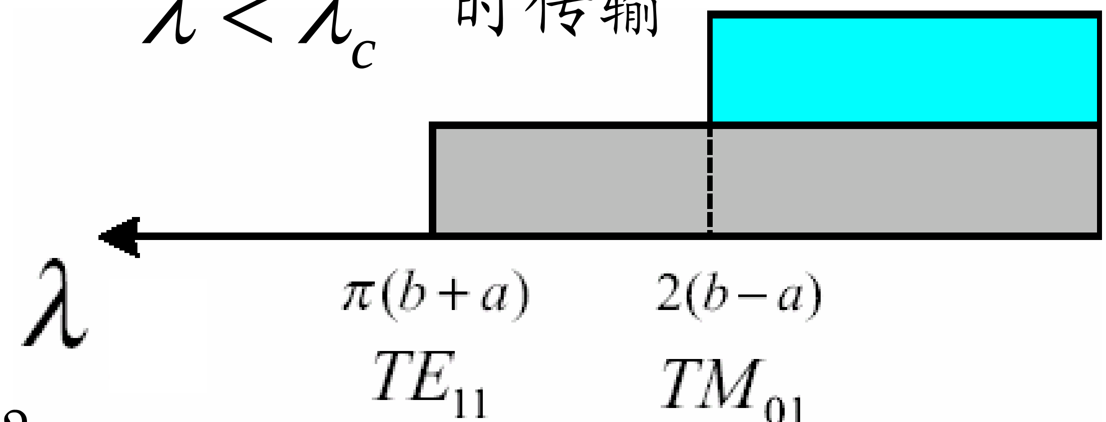
同轴线中的高阶模　出现条件：足够高频率

TM模　高阶模中最低次模　TM_{01}　截止波长　$\lambda_c \approx 2(b-a)$

TE模　TE_{11}　$\lambda_c \approx \pi(b+a)$

波导的高通特性：　$\lambda < \lambda_c$　时传输

第一高次模：　TE_{11}



同轴线的单模传输条件？

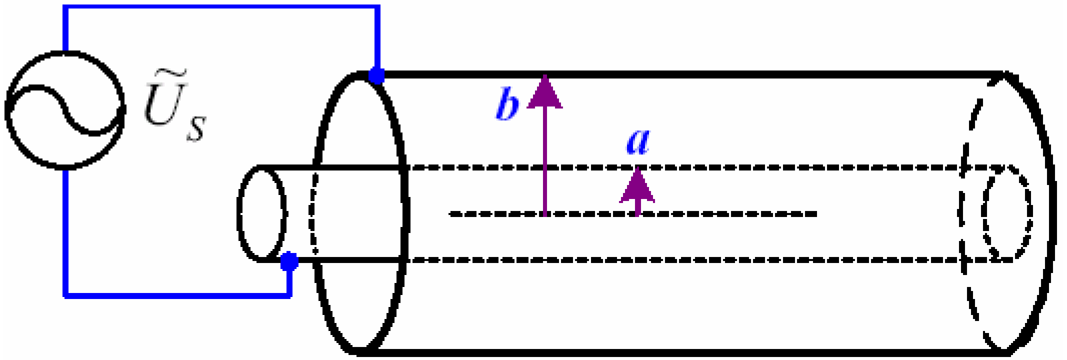
同轴线设计

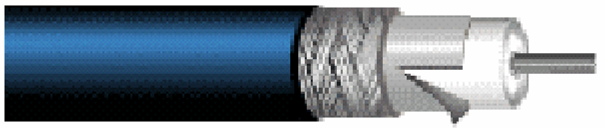
设计目标

1、Single Mode 单模传输

2、Minimal Attenuation 最小衰减

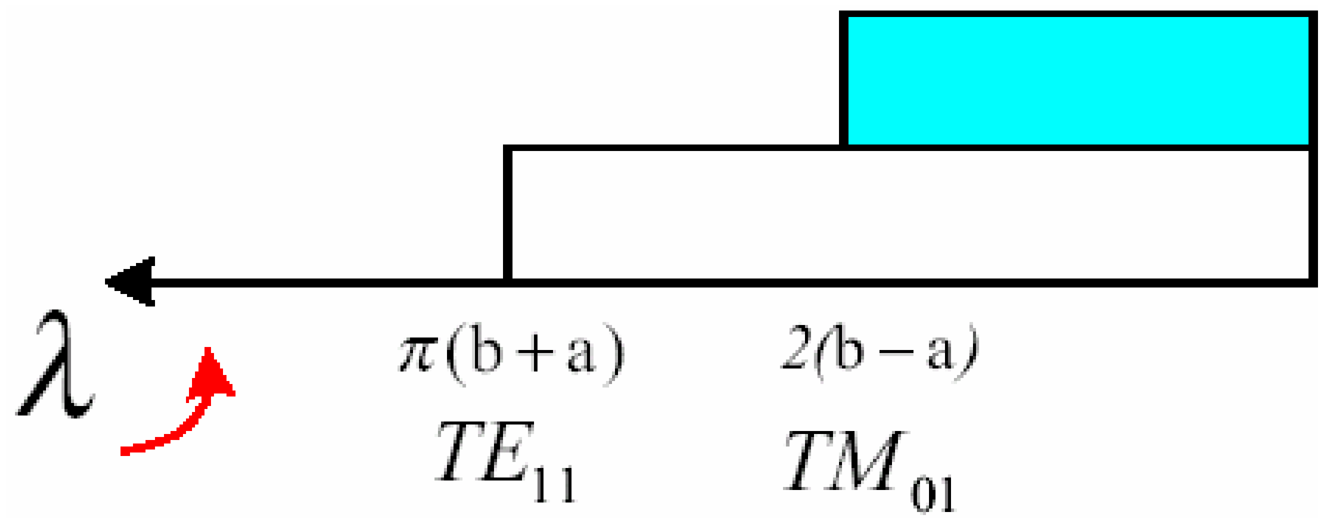
3、Maximal Endure Voltage 最大击穿电压





单模传输 Single Mode

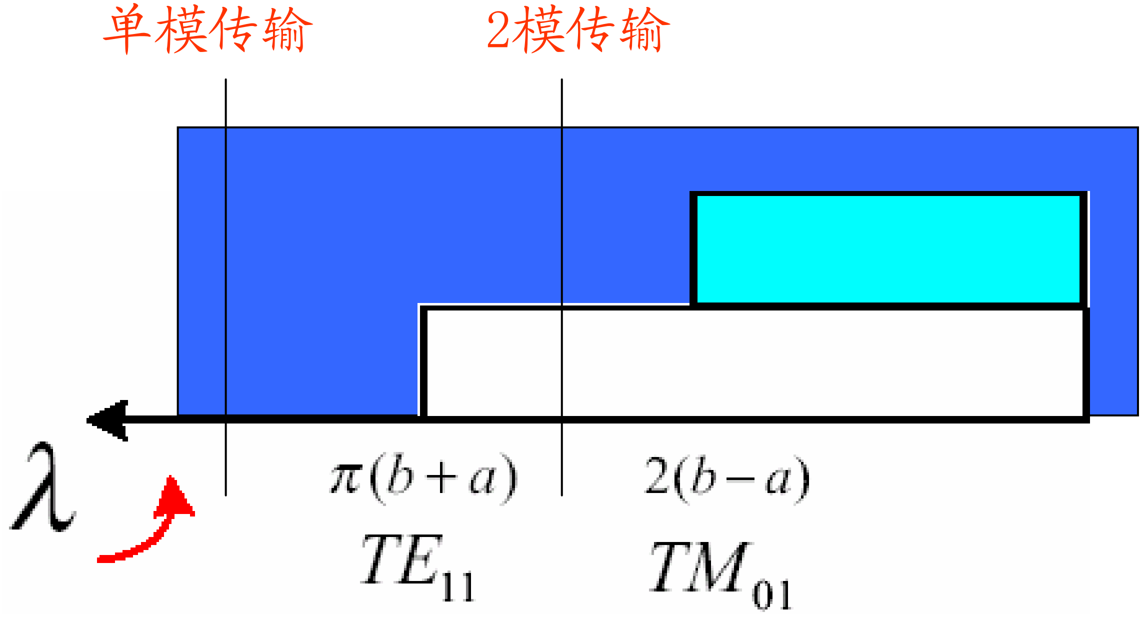
$\lambda > \lambda_{TE11}$ 时到底能不能传输



单模传输

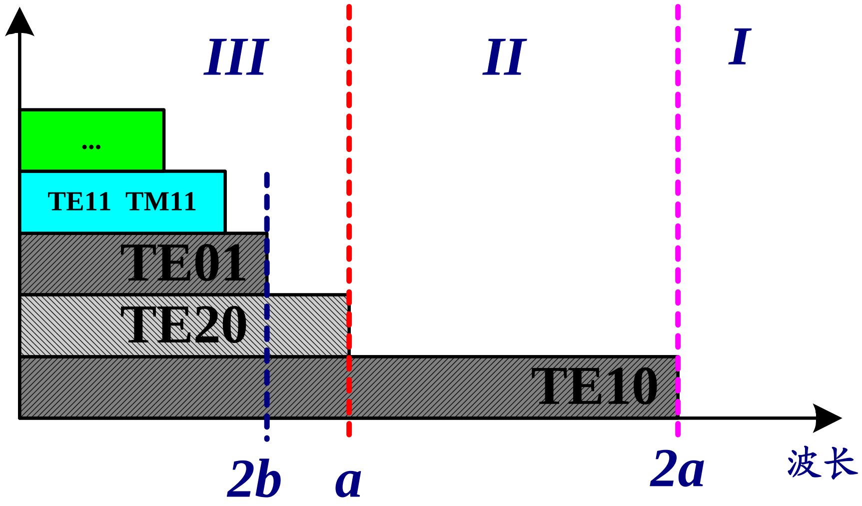
同轴线是双导体能传TEM波

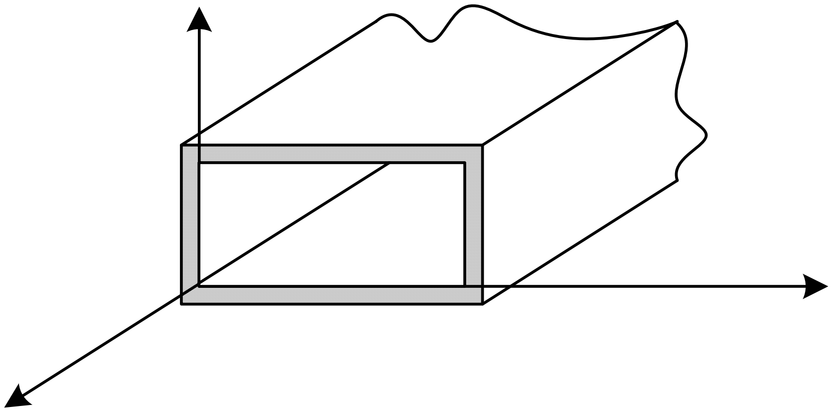
TEM波是同轴线基模



单模传输

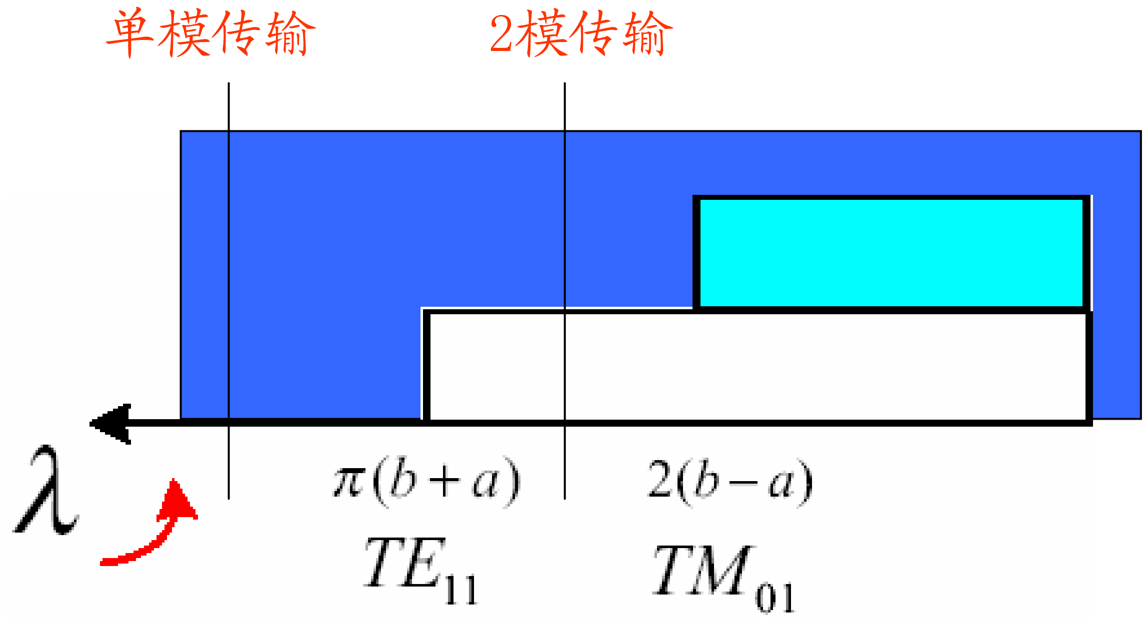
波导(单导体)：单模传输条件

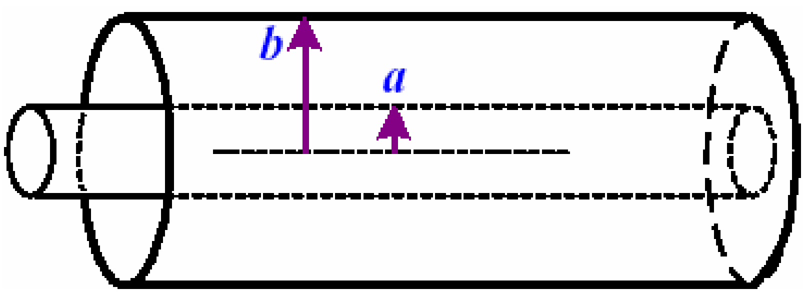




单模传输

同轴线（双导体）：单模传输条件





单模传输条件：与波导不同

最大传输功率--最小衰减

传输损耗 = 导体衰减 + 介质损耗

设理想介质无损耗

这里我们考虑：导体衰减

导体衰减

$$\alpha_c \approx \frac{R_0}{2Z_0} = \frac{R_S\left(\frac{1}{2\pi a}+\frac{1}{2\pi b}\right)}{2\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon}}\ln\left(\frac{b}{a}\right)} = \cdots \qquad (NP/m)$$

导体外径不变情况下求极值

$$\frac{R_S}{2\pi a} * 1$$

最大传输功率--最小衰减

导体衰减

$$\alpha_c \approx \frac{R_0}{2Z_0} = \frac{R_S\left(\frac{1}{2\pi a}+\frac{1}{2\pi b}\right)}{2\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon}}\ln\left(\frac{b}{a}\right)} = \cdots \qquad (NP/m)$$

导体外径不变求极值:

$$\frac{d\alpha_c}{da} = 0 \Rightarrow \frac{b}{a} \approx 3.6$$

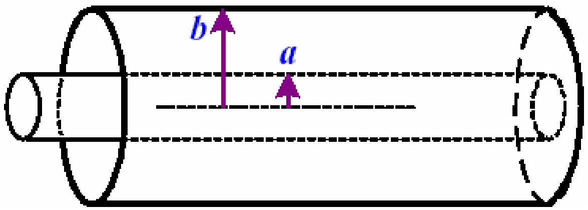
空气同轴波导:

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi}120\pi\ln(3.6) = 77 \quad (\Omega)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \sqrt{\frac{\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\left(\frac{b}{a}\right)}{2\pi\varepsilon\frac{1}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon}}\ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

最大耐压--最大击穿电压

$$P=\frac{1}{2}\mathrm{Re}\left(\int_S\left(\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H}^*\right)\cdot d\boldsymbol{S}\right)=\cdots=\frac{\pi E_0^2a^2}{\eta}\ln\left(\frac{b}{a}\right)$$



$$\because E_0=\frac{|U_s|}{a\ln\left(\frac{b}{a}\right)}\qquad P=\frac{\pi|U_s|^2}{\eta\ln\left(\frac{b}{a}\right)}$$

若知：最大击穿电压 $V_{MAX}\quad\rightarrow\quad E_{MAX}$

$$P_m=\frac{\pi E_{MAX}^2a^2}{\eta}\ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

$$\int_S\left(\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H}^*\right)\cdot d\boldsymbol{S}=\int_a^b\left(\boldsymbol{e}_rE\times\boldsymbol{e}_\phi H\right)\cdot\boldsymbol{e}_z2\pi dr$$

$$V_{MAX}=E_{MAX}a\ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

$$\boldsymbol{E}=\boldsymbol{E}_0e^{-jkz}=\frac{V_0}{\ln(b/a)}\frac{\boldsymbol{e}_r}{r}e^{-jkz}\qquad\boldsymbol{H}=\boldsymbol{e}_z\times\frac{\boldsymbol{E}}{\eta}=\frac{V_0}{\ln(b/a)}\frac{1}{\eta}\frac{\boldsymbol{e}_\phi}{r}e^{-jkz}$$

最大耐压--最大击穿电压

若知：最大击穿电压

$$P_m = \frac{\pi E_{MAX}^2 a^2}{\eta} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

导体外径不变求极值：

$$\frac{dP_m}{da} = 0 \Rightarrow \frac{b}{a} \approx 1.65$$

空气同轴波导：

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi} 120\pi \ln(1.65) = 30 \quad (\Omega)$$

小结

最小损耗 $\frac{b}{a} \approx 3.6$

最大耐压 $\frac{b}{a} \approx 1.65$

折中 $\frac{b}{a} = 2.3$

对应空气同轴波导: $Z_0 = 50 \quad (\Omega)$

例2

在f=1GHz时同轴线参数为：L_0=250nH/m, C_0=95pF/m, R_0=0.06ohm/m， G = 0。求:

衰减系数 α

相移常数 β

相速度 v_p

相对介电常数 ε_r

输入功率为500W，传输10m的功率损耗

f=1GHz

$$\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \rightarrow (120\pi) \qquad \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \rightarrow (Z_0)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} \rightarrow (c) \qquad \frac{1}{\sqrt{L_0C_0}} \rightarrow (v_p)$$

例2

L_0=250nH/m, C_0=95pF/m, R_0=0.06ohm/m, G = 0

解: $\omega L_0 = 2\pi fL_0 = 1570.8 ohm/m$ $\omega C_0 = 2\pi fC_0 = 596.6\times10^{-3}/ohm\cdot m$

因此 $\omega L_0 >> R_0, \omega C_0 >> G$ 所以 $Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = 51.3 ohm$

衰减系数 $\alpha = \frac{R_0}{2Z_0} = 5.85\times10^{-4} Np/m = 5.08\times10^{-3} dB/m$

相移常数 $\beta = \omega\sqrt{L_0C_0} = 30.6 rad/m$

例2

L_0=250nH/m, C_0=95pF/m, R_0=0. 06ohm/m， G = 0

$\alpha = 5.85\times10^{-4}\,Np/m$　　　$\beta = 30.6rad/m$

相速度　$v_p = \dfrac{1}{\sqrt{L_0C_0}} = 2.05\times10^{8}\,m/s$

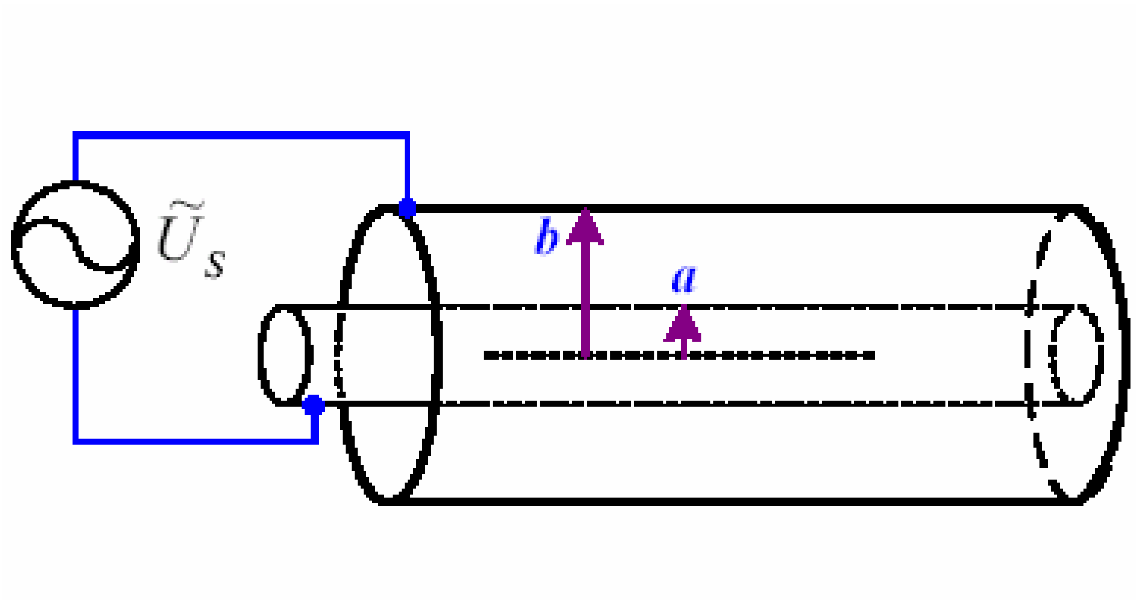
相对介电常数　根据 $c = \sqrt{\varepsilon_r}\,v_p$　所以　$\varepsilon_r = (c/v_p)^2 = 2.14$

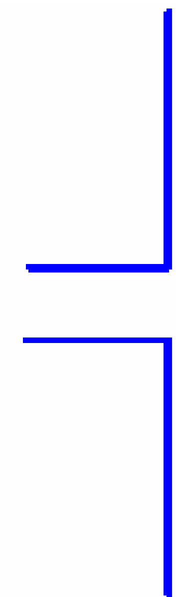
输入功率为500W，传输10m的功率损耗

$P_{loss} = P_{in}\left(1 - e^{-2\alpha l}\right)$　由于 αl 的值很小， 采用级数展开方式

$= P_{in}\times 2\alpha l = 5.85watts$　　　衰减1％， 损耗较小

同轴线不平衡特性



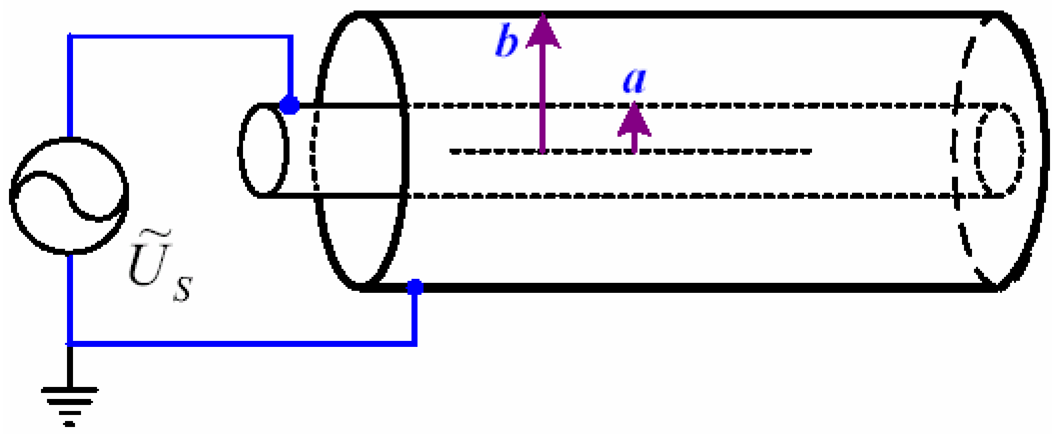


如何判断同轴线是不是平衡线

不平衡同轴线

1、特点

内外导体电压相对于地不相反（如下图，一端接地）



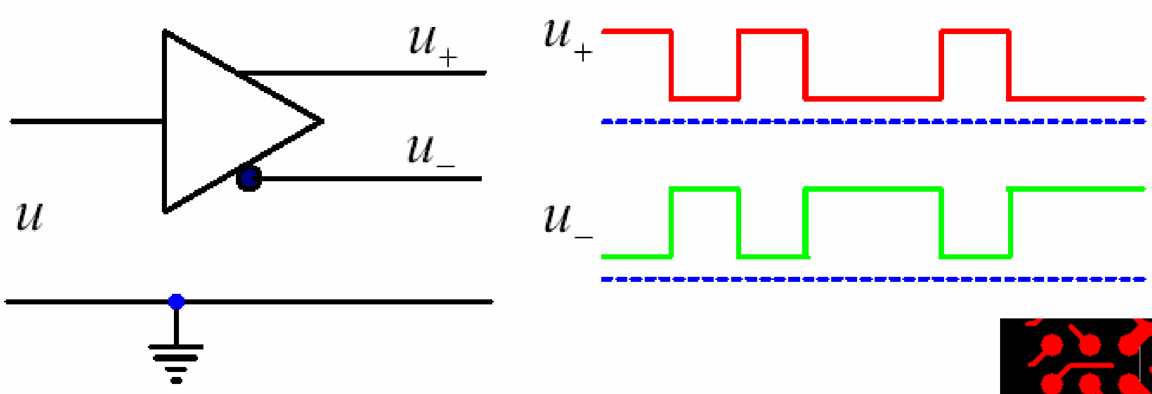
2、用途:

CATV电缆、示波器连接器

平衡同轴线

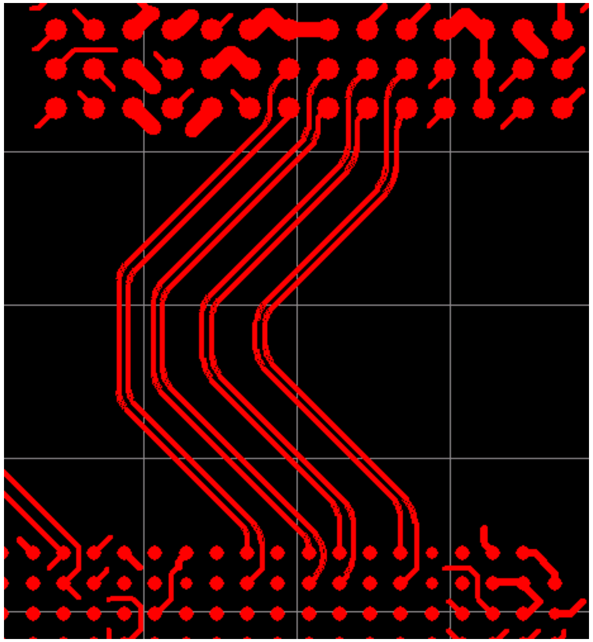
1、特点

内外导体电压相对于地相反（如下图）

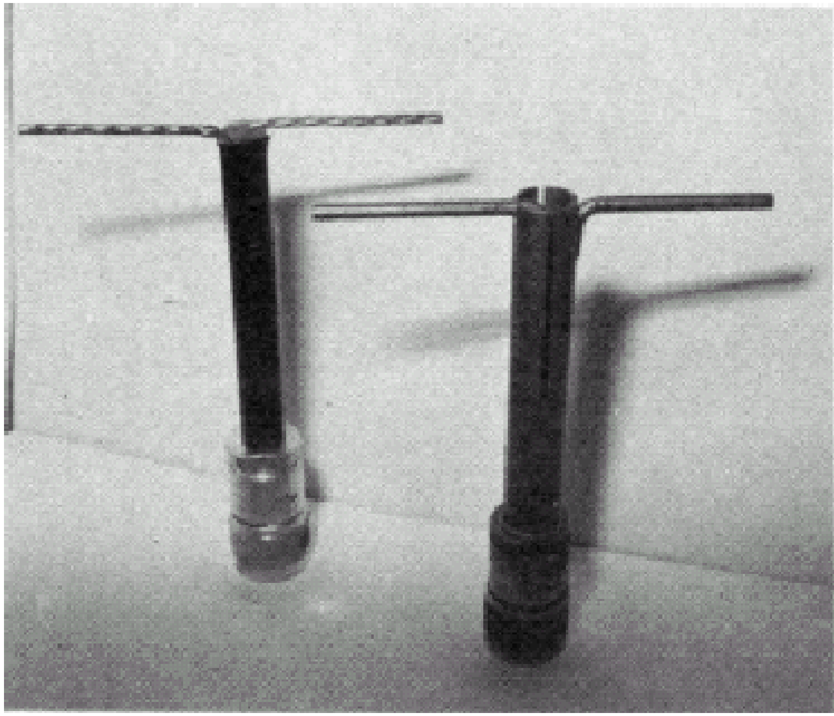


2、用途：差分信号

高速数据通信、差分放大器



平衡同轴线 $\xleftrightarrow{\text{转换}}$ 不平衡同轴线

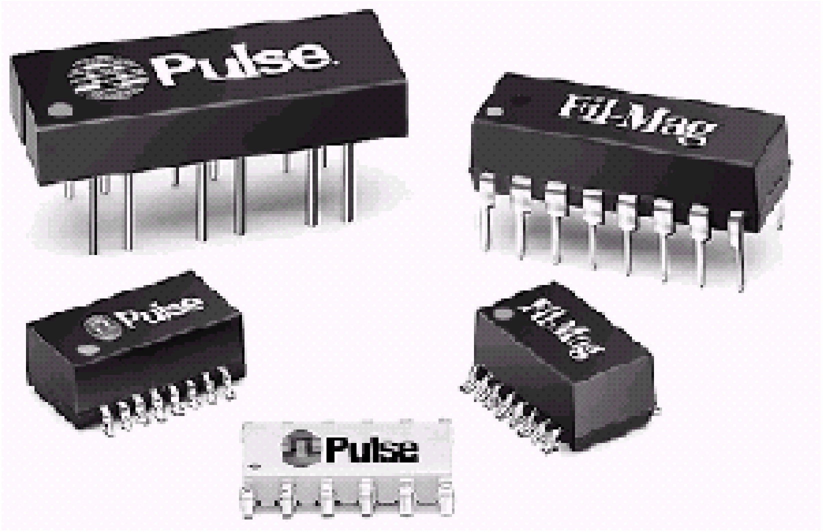


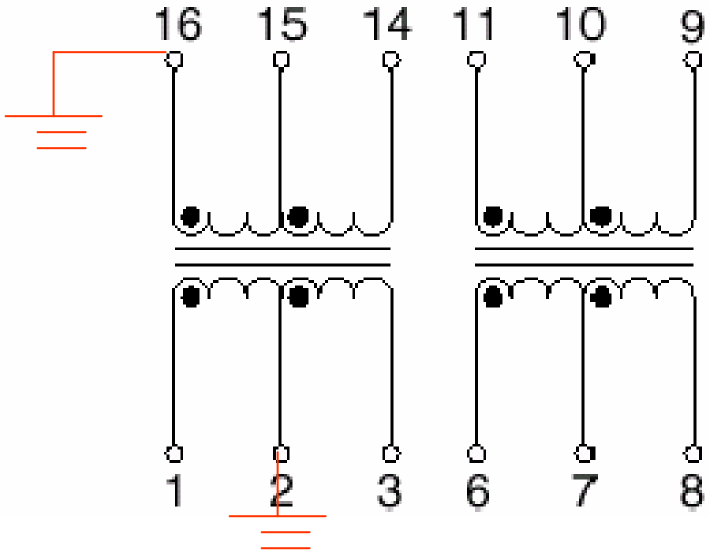
平衡同轴线 $\xleftrightarrow{\text{转换}}$ 不平衡同轴线

1、 失配 – 匹配

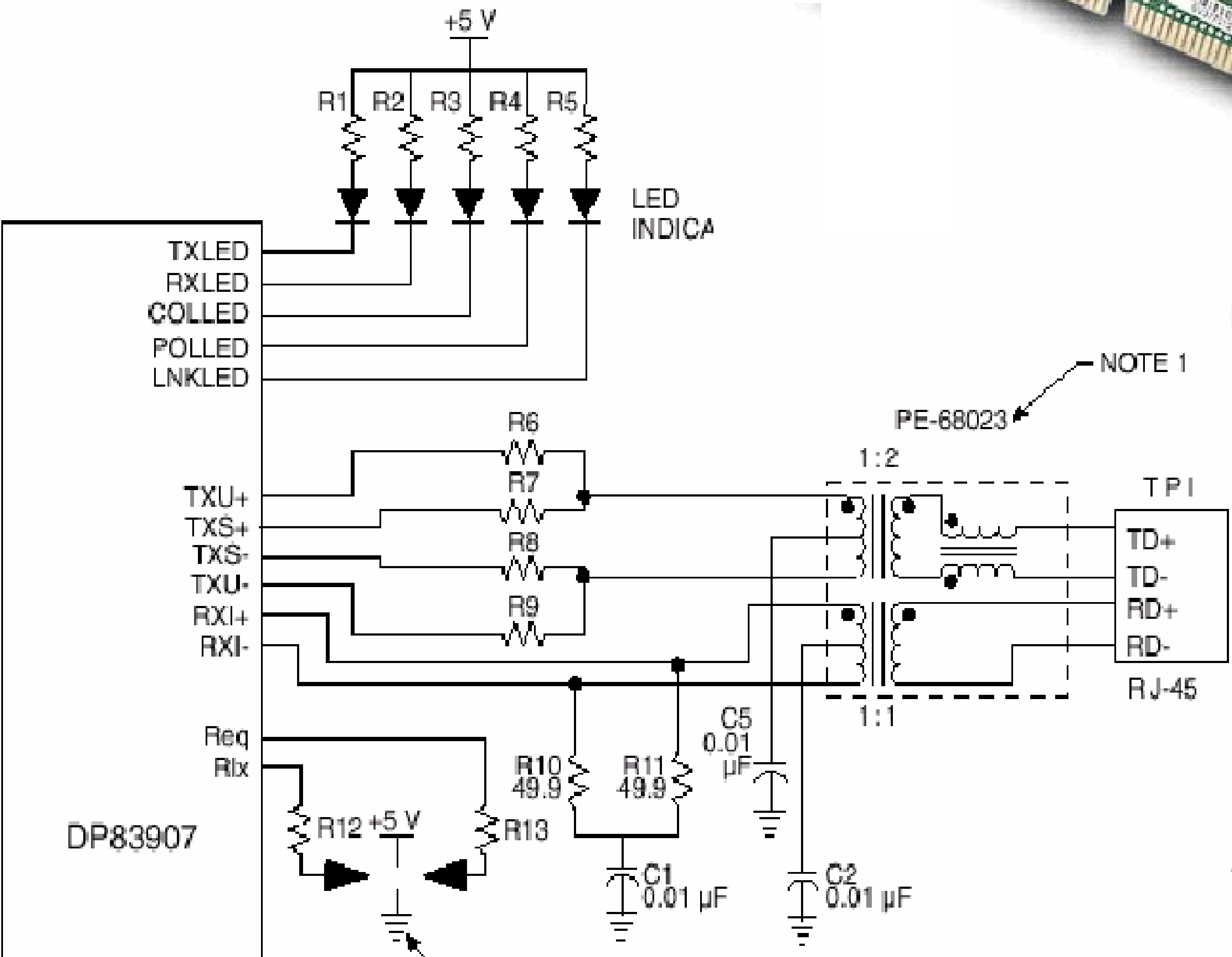
2、平衡 – 不平衡转换器

例：网卡中的变压器：平衡与不平衡转换



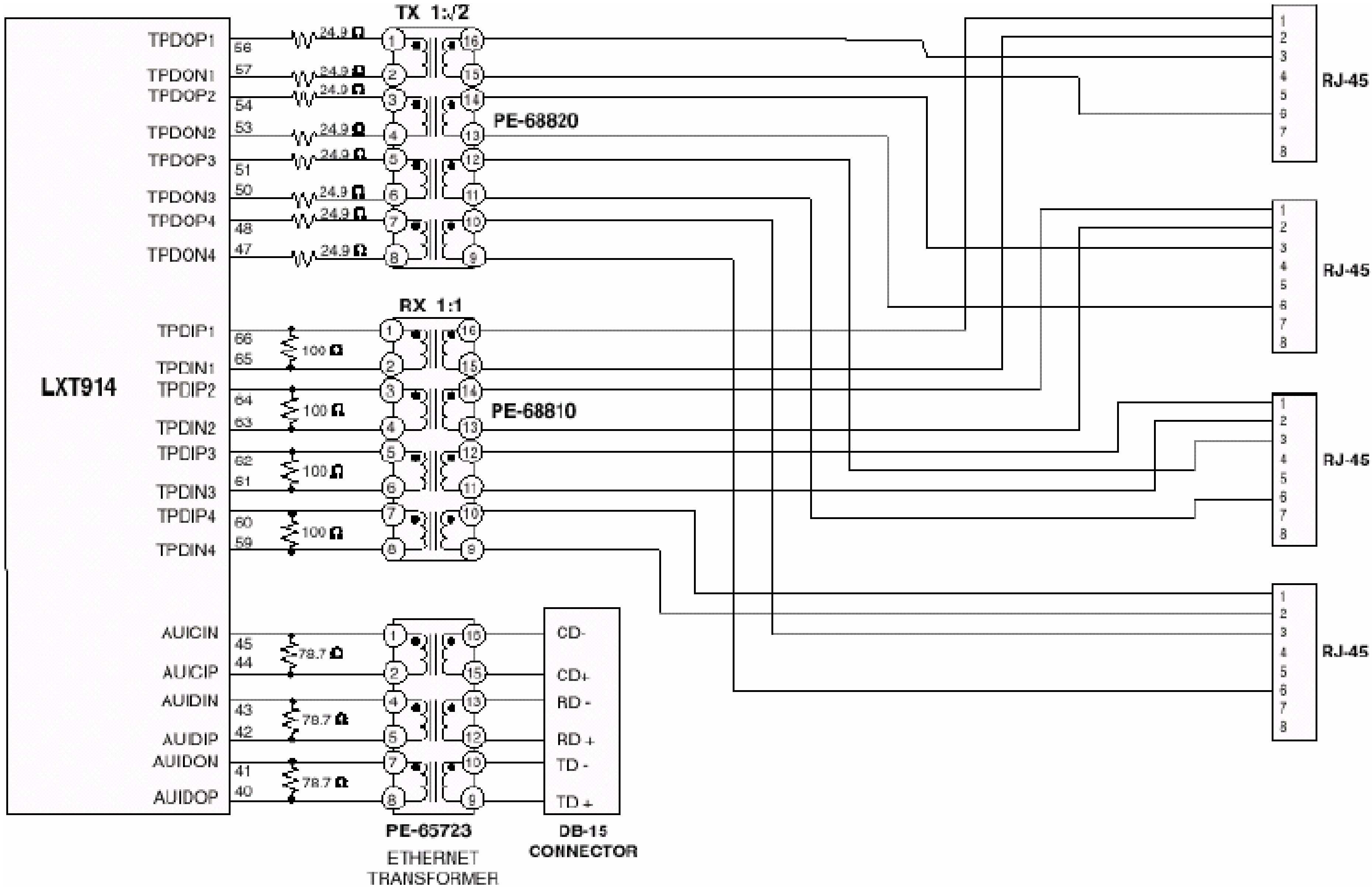


网线、网卡



+5 V
R1
R2
R3
R4
R5
LED
INDICA
TXLED
RXLED
COLLED
POLLED
LNKLED
NOTE 1
PE-68023
R6
1:2
R7
TPI
TXU+
TXS+
TXS-
TXU-
RXI+
RXI-
R8
R9
TD+
TD-
RD+
RD-
RJ-45
1:1
C5
0.01
μF
Req
Rlx
R10
49.9
R11
49.9
R12
+5 V
R13
DP83907
C1
0.01 μF
C2
0.01 μF

4端口HUB


TX 1:√2
RX 1:1
LXT914
TPDOP1
TPDON1
TPDOP2
TPDON2
TPDOP3
TPDON3
TPDOP4
TPDON4
TPDIP1
TPDIN1
TPDIP2
TPDIN2
TPDIP3
TPDIN3
TPDIP4
TPDIN4
AUICIN
AUICIP
AUIDIN
AUIDIP
AUIDON
AUIDOP
24.9 Ω
100 Ω
78.7 Ω
PE-68820
PE-68810
PE-65723
ETHERNET TRANSFORMER
CD-
CD+
RD -
RD +
TD -
TD +
DB-15 CONNECTOR
RJ-45
RJ-45
RJ-45
RJ-45

RF Band转换器