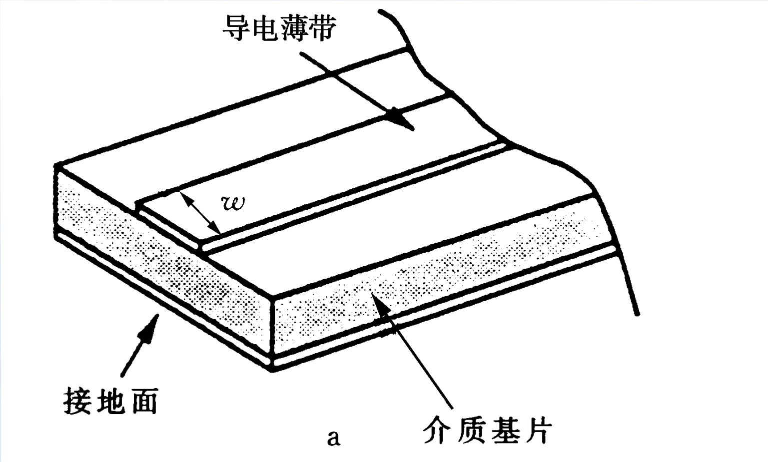
电磁场与电磁波

第20讲(2)

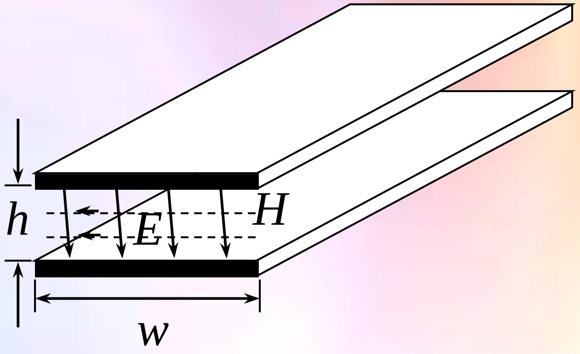
1.耦合微带线的奇、偶模分析
2.耦合微带线的耦合效应

TEM模近似下的微带线

实际微带线



用TEM模近似的平行平板波导

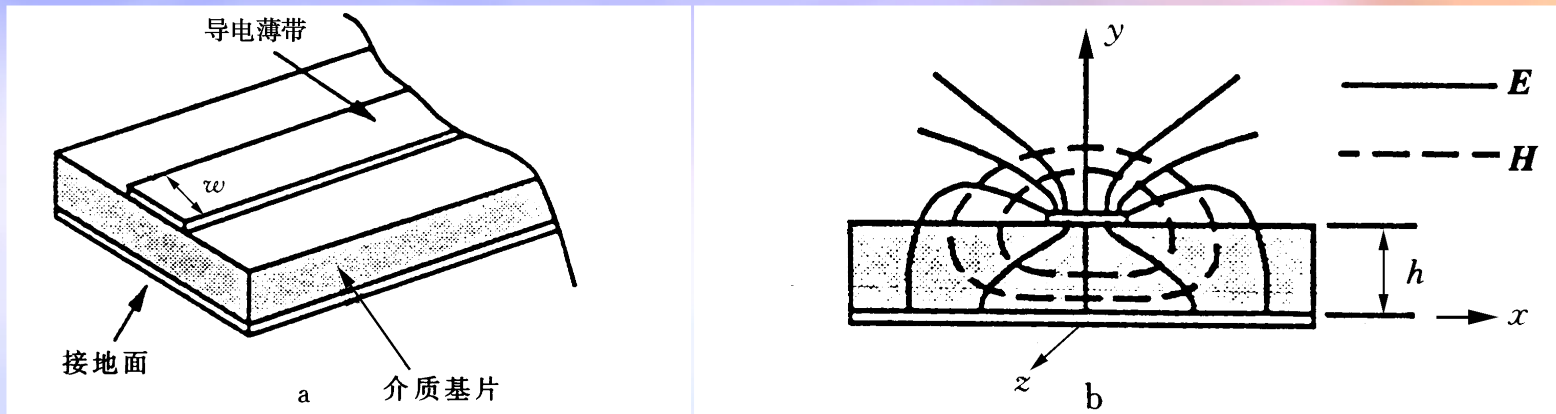


TEM模近似下微带线的特征参数

$$R' = \frac{2R_s}{w} \qquad G' = \frac{\sigma w}{h} \qquad L' = \frac{\mu h}{w} \qquad C' = \frac{\varepsilon w}{h}$$

$$k = \omega\sqrt{L'C'} = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} \qquad v_p = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \qquad Z_c = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\frac{h}{w}$$

介质填充不均匀导致微带线不支持纯TEM工作



交界面电场切向分量连续

$$E_x^{\mathrm{d}}=E_x^{\mathrm{a}}\;\underset{\underbrace{\nabla\times\boldsymbol{H}=\mathrm{j}\omega\varepsilon_0\varepsilon_{\mathrm{r}}\,\boldsymbol{E}}}{\Longrightarrow}\;(\nabla\times\boldsymbol{H})_x^{\mathrm{d}}=\varepsilon_{\mathrm{r}}(\nabla\times\boldsymbol{H})_x^{\mathrm{a}}$$

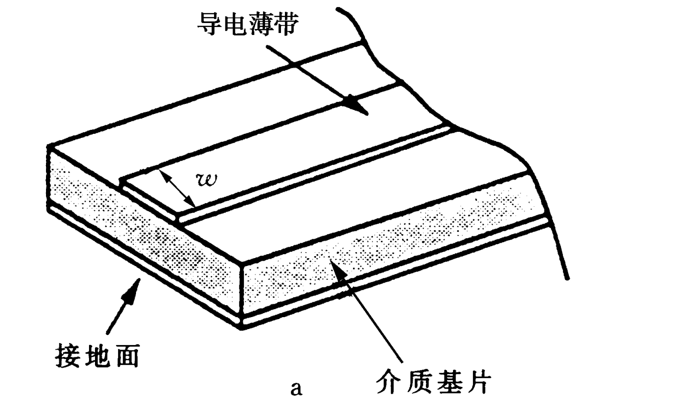
应用介质和空气分界面磁场法向分量连续条件

$$\varepsilon_{\mathrm{r}}\left(\frac{\partial H_z}{\partial y}\right)^{\mathrm{a}}-\left(\frac{\partial H_z}{\partial y}\right)^{\mathrm{d}}=(\varepsilon_{\mathrm{r}}-1)\frac{\partial H_y}{\partial z}$$

因为$\varepsilon_{\mathrm{r}}\neq1$，$H_{\mathrm{y}}\neq0$，所以式左边为非零量，这只有当$H_{\mathrm{z}}\neq0$才能满足。
同样，从介质与空气交界面磁场的切向分量连续导致$E_{\mathrm{z}}\neq0$。

准TEM模近似下的微带线

不考虑微带线的色散，即假设微带线的传播常数k与频率ω呈线性关系



$$k=\omega\sqrt{\mu\varepsilon_{\mathrm{e}}}=\omega\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{re}}\varepsilon_0\mu_0}=k_0\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{re}}}$$

$\varepsilon_{\mathrm{re}}$的物理意义是：当微带线等效为平行板波导并为相对介电常数$\varepsilon_{\mathrm{re}}$的介质填充时，该平行平板波导的相速即微带线的相速。

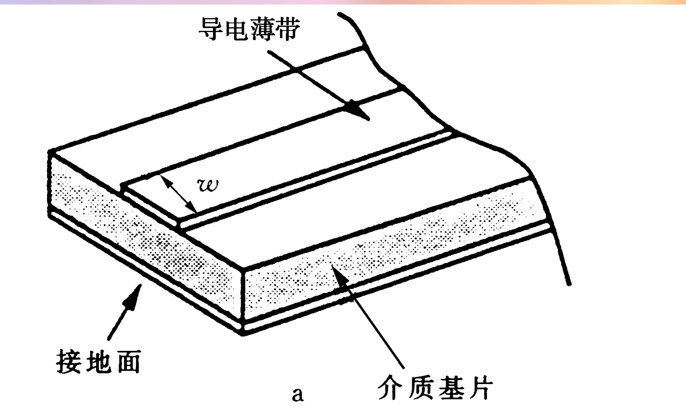
$$v_{\mathrm{p}}=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{e}}\mu_0}}=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{re}}\varepsilon_0\mu_0}}=\frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{re}}}}$$

准TEM模近似下，微带线的色散特性归结为求有效相对介电常数

$$\varepsilon_{\mathrm{re}}=\frac{\varepsilon_{\mathrm{r}}+1}{2}+\frac{\varepsilon_{\mathrm{r}}-1}{2}F(w/h)$$

$$F(w/h)=\begin{cases}(1+12h/w)^{-1/2}+0.04(1-w/h)^2 & (w/h\le 1)\\ (1+12h/w)^{-1/2} & (w/h\ge 1)\end{cases}$$

准TEM模近似下的微带线



特征阻抗 $$Z_e=\frac{\eta_0}{2\pi\sqrt{\varepsilon_{re}}}\ln\left(\frac{8h}{w}+0.25\frac{w}{h}\right)\qquad\left(\frac{w}{h}\le 1\right)$$

$$Z_e=\frac{\eta_0}{\sqrt{\varepsilon_{re}}}\left\{\frac{w}{h}+1.393+0.67\ln\left(\frac{w}{h}+1.44\right)\right\}^{-1}\qquad\left(\frac{w}{h}\ge 1\right)$$

式中，$\eta_0=\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}=120\pi\ \Omega$

微带线综合：由Z_e、ε_{re}及介质基片相对介电常数ε_r，确定微带线相对尺寸w/h

当 $Z_e\sqrt{\varepsilon_{re}}\ge 89.91$ ，也就是$A>1.52$时

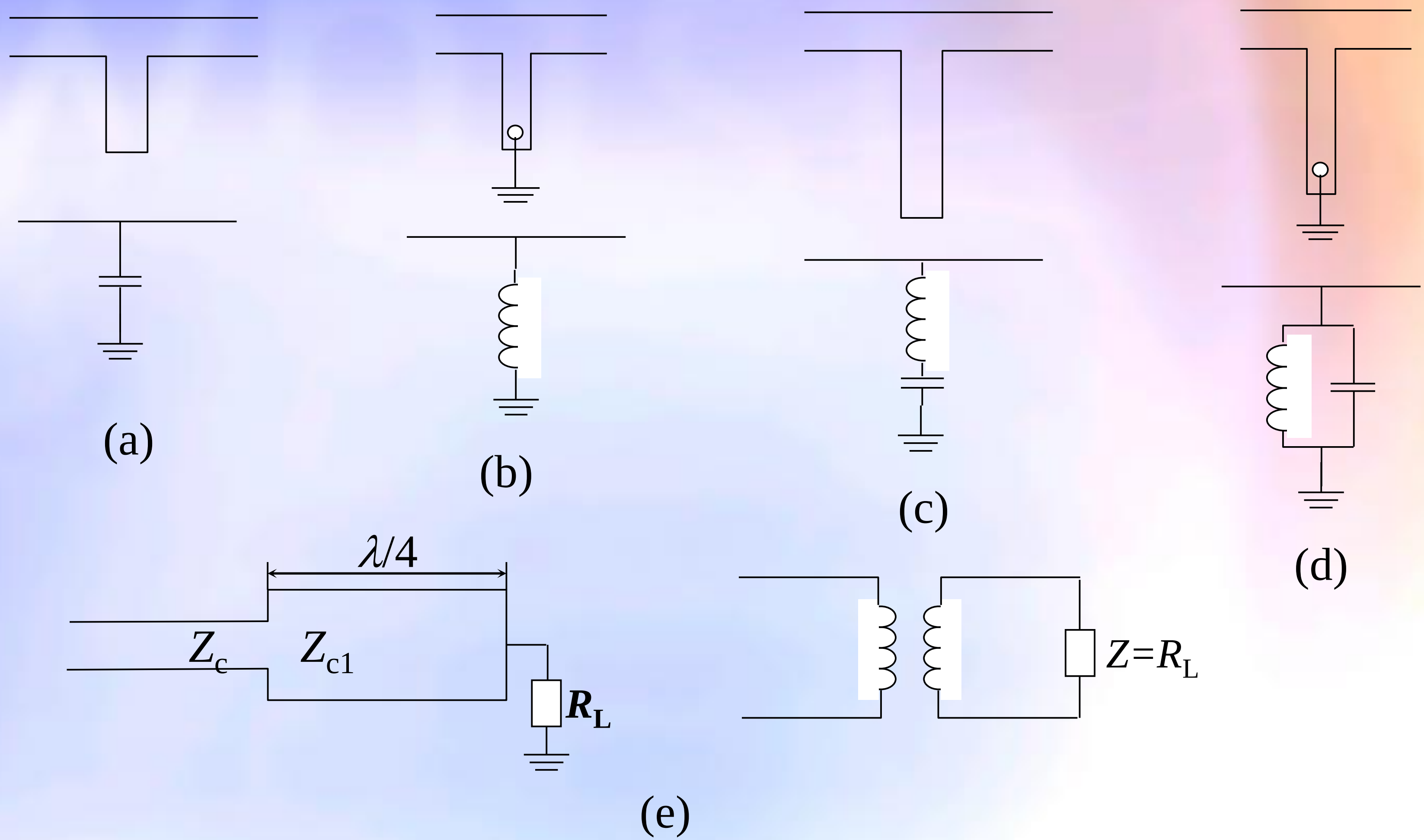
$$\frac{w}{h}=\frac{8\exp(A)}{\exp(2A)-2}$$

当 $Z_e\sqrt{\varepsilon_{re}}<89.91$ ， 也就是$A<1.52$时

$$\frac{w}{h}=\frac{2}{\pi}\left\{B-1-\ln(2B-1)+\frac{\varepsilon_r-1}{2\varepsilon_r}\left[\ln(B-1)+0.39-\frac{0.61}{\varepsilon_r}\right]\right\}$$

$$A=\frac{Z_e}{60}\left(\frac{\varepsilon_r+1}{2}\right)^{1/2}+\frac{\varepsilon_r-1}{\varepsilon_r+1}\left(0.23+\frac{0.11}{\varepsilon_r}\right)\qquad B=\frac{60\pi^2}{Z_e\sqrt{\varepsilon_r}}$$

基于微带线的电路元件

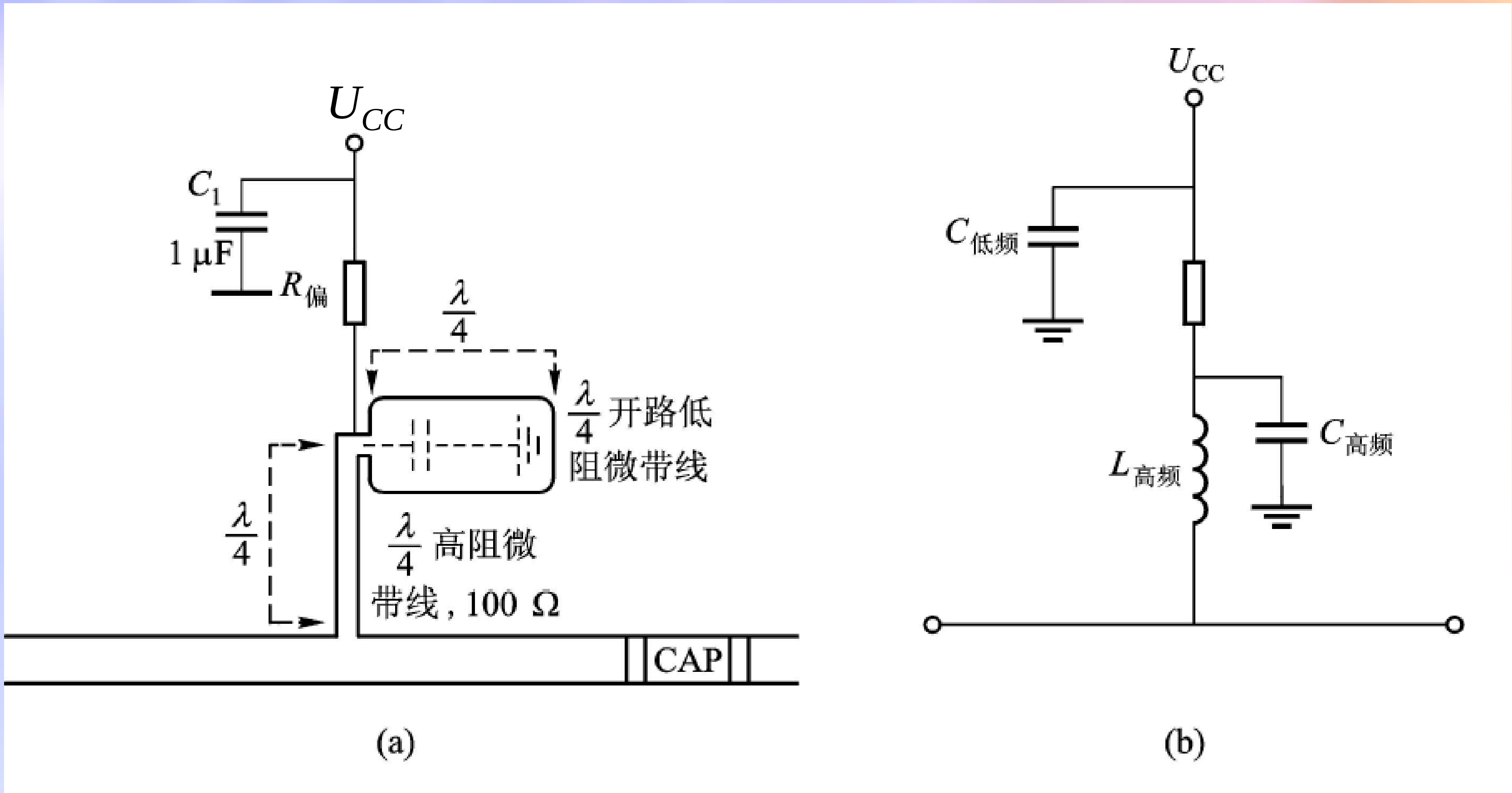


微带电路元件

(a) 长度小于$\lambda/4$的开路微带线　　(b) 长度小于$\lambda/4$的短路微带线

(c) $\lambda/4$开路微带线　　(d) $\lambda/4$短路微带线　　(e) $\lambda/4$变换器

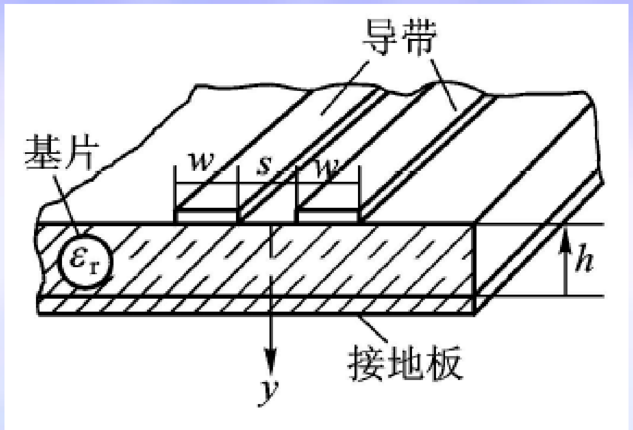
基于微带线的偏置电路

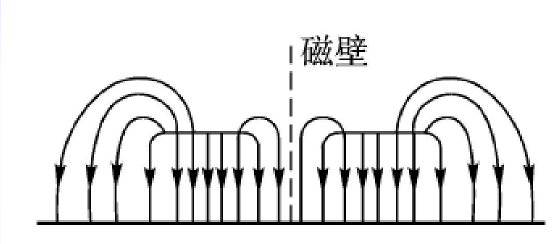


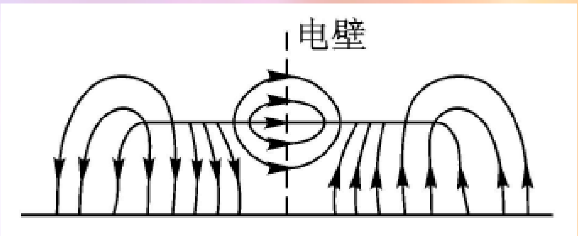
直流偏置去耦电路

（a）基于微带线的偏置电路　（b）基于集总元件的偏置电路

耦合微带线







(a)耦合微带线　　(b)偶模场分布　　(c)奇模场分布

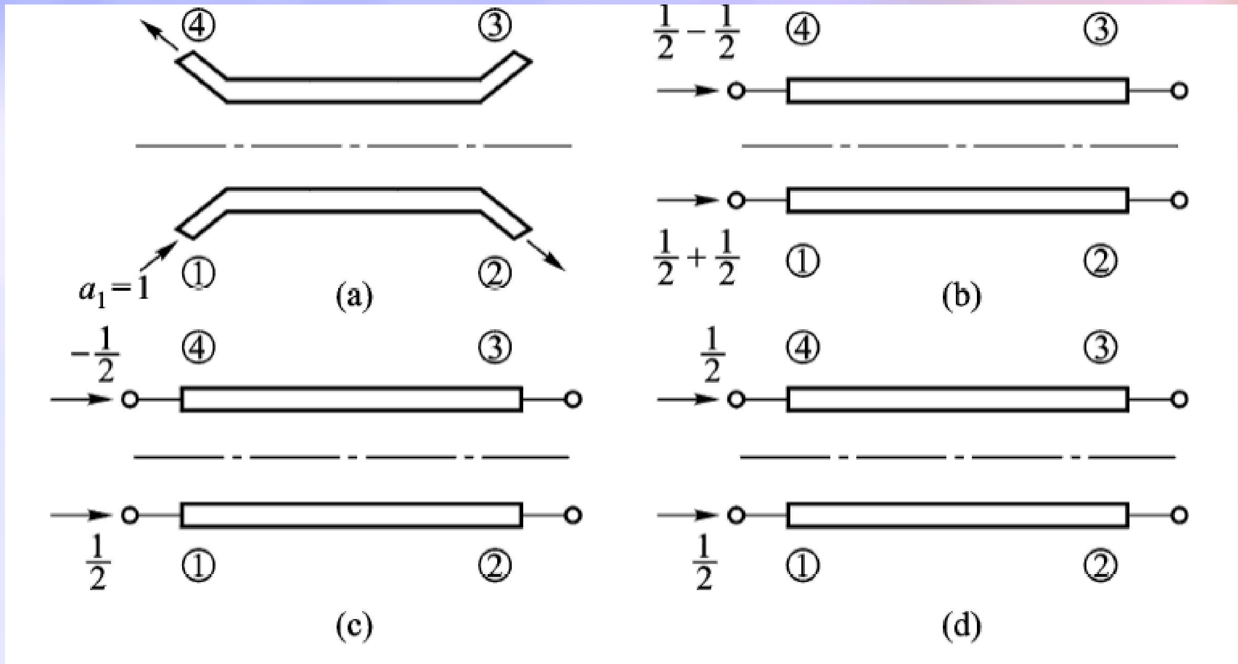
偶对称模式：对于$x = 0$对称面是偶对称的，两微带线中所传输的电场沿 y 轴方向同为正值。

奇对称模式：对于$x = 0$对称面是奇对称的，两个微带线中所传输的电场沿y轴方向一个为正，另一个为负。

对于偶对称模式，在$x = 0$ 对称面上，磁场的切向分量为零，电力线平行于对称面，对称面可等效为“磁壁”，相当于开路。

对于奇对称模式，对称面上电场的切向分量为零，对称面可等效为“电壁”，相当于短路。奇模和偶模的特征阻抗、色散或有效介电常数都是有区别的。

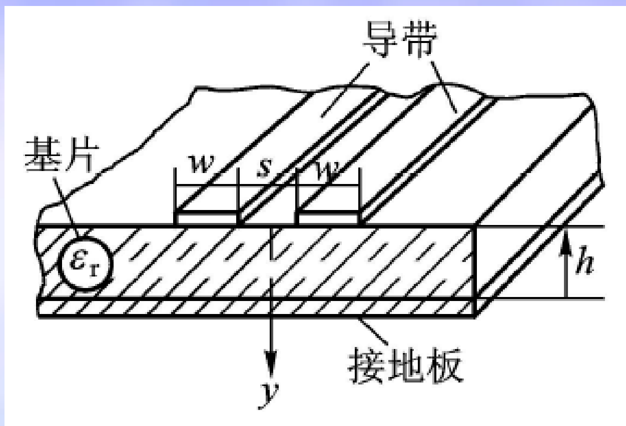
耦合微带线的奇、偶模分析

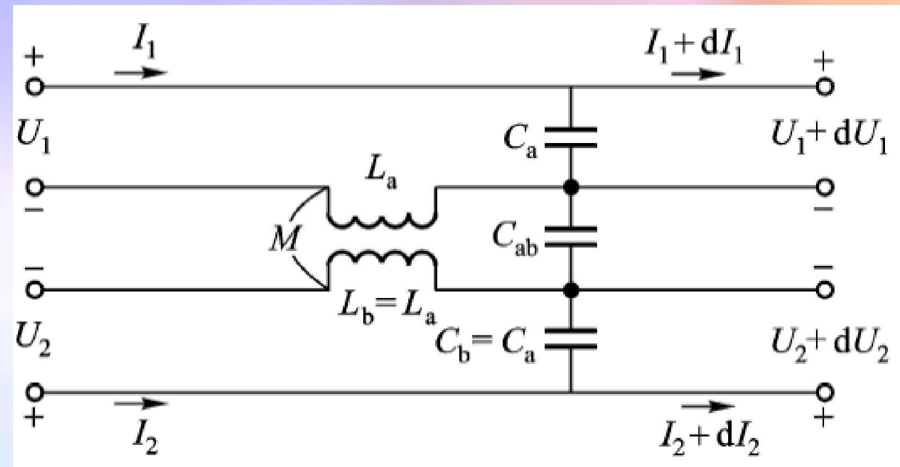


对称耦合微带线激励的分解
(a)对称耦合微带线　（b）非对称电压激励
（c）等幅反相电压激励　（d）等幅同相电压激励

图(b)表示该对称耦合微带线端口①为1*V*的电压激励，图(c)表示该耦合线被等幅反相电压激励，它将在两根导带上激起数量相等、符号相反的电荷分布，故是奇对称激励，图(d)表示该耦合线被等幅同相电压激励，是偶对称激励。显然，图(c)、(d)所示的奇模激励、偶模激励的组合就是图(b)。因此对图（b)激励的耦合微带线的分析就转变为图(c)、(d)表示的奇模、偶模激励微带线的分析。

耦合微带线的等效电路与方程





电路方程

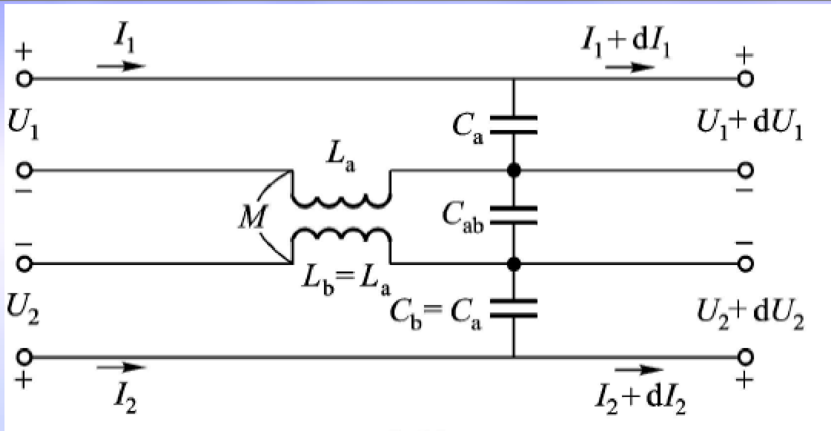
$$\left.\begin{aligned}
-\frac{\mathrm{d}U_1}{\mathrm{d}z} &= \mathrm{j}\omega L I_1 + \mathrm{j}\omega L_{\mathrm{ab}} I_2 \\
-\frac{\mathrm{d}U_2}{\mathrm{d}z} &= \mathrm{j}\omega L_{\mathrm{ab}} I_1 + \mathrm{j}\omega L I_2 \\
-\frac{\mathrm{d}I_1}{\mathrm{d}z} &= \mathrm{j}\omega C U_1 - \mathrm{j}\omega C_{\mathrm{ab}} U_2 \\
-\frac{\mathrm{d}I_2}{\mathrm{d}z} &= -\mathrm{j}\omega C_{\mathrm{ab}} U_1 + \mathrm{j}\omega C U_2
\end{aligned}\right\}$$

对称耦合微带线

$$C_a = C_b, \quad L_a = L_b, \quad L_{ab} = M$$

式中，$L = L_a$与$C = C_a + C_{ab}$分别表示另一根耦合线存在时的单线分布电感和分布电容。

耦合微带线的等效电路与方程



$$\left.\begin{aligned}-\frac{\mathrm{d}U_1}{\mathrm{d}z}&=\mathrm{j}\omega LI_1+\mathrm{j}\omega L_{ab}I_2\\-\frac{\mathrm{d}U_2}{\mathrm{d}z}&=\mathrm{j}\omega L_{ab}I_1+\mathrm{j}\omega LI_2\\-\frac{\mathrm{d}I_1}{\mathrm{d}z}&=\mathrm{j}\omega CU_1-\mathrm{j}\omega C_{ab}U_2\\-\frac{\mathrm{d}I_2}{\mathrm{d}z}&=-\mathrm{j}\omega C_{ab}U_1+\mathrm{j}\omega CU_2\end{aligned}\right\}$$

$$\left.\begin{aligned}U_e+U_o&=U_1\\U_e-U_o&=U_2\end{aligned}\right\}\quad\left.\begin{aligned}U_e&=(U_1+U_2)/2\\U_o&=(U_1-U_2)/2\end{aligned}\right\}$$

分解为偶模激励方程与奇模激励方程

定义$K_L=L_{ab}/L$与$K_C=C_{ab}/C$

偶模激励

$$U_1=U_2=U_e,\quad I_1=I_2=I_e$$

$$\left.\begin{aligned}-\frac{\mathrm{d}U_e}{\mathrm{d}z}&=\mathrm{j}\omega L(1+K_L)I_e\\-\frac{\mathrm{d}I_e}{\mathrm{d}z}&=\mathrm{j}\omega C(1-K_C)U_e\end{aligned}\right\}$$

奇模激励

$$U_1=-U_2=U_o,\quad I_1=-I_2=I_o$$

$$\left.\begin{aligned}-\frac{\mathrm{d}U_o}{\mathrm{d}z}&=\mathrm{j}\omega L(1-K_L)I_o\\-\frac{\mathrm{d}I_o}{\mathrm{d}z}&=\mathrm{j}\omega C(1+K_C)U_o\end{aligned}\right\}$$

耦合微带线偶模与奇模的特征参数

偶模

$$k_{\mathrm{e}} = \omega\sqrt{LC\left(1+K_L\right)\left(1-K_C\right)}$$

$$\boldsymbol{v}_{\mathrm{pe}} = \frac{\omega}{k_{\mathrm{e}}} = \frac{1}{\sqrt{LC\left(1+K_L\right)\left(1-K_C\right)}}$$

$$Z_{0\mathrm{e}} = \frac{1}{\boldsymbol{v}_{\mathrm{pe}}C_{0\mathrm{e}}} = \sqrt{\frac{L\left(1+K_L\right)}{C\left(1-K_C\right)}}$$

奇模

$$k_{\mathrm{o}} = \omega\sqrt{LC\left(1-K_L\right)\left(1+K_C\right)}$$

$$\mathrm{v}_{\mathrm{po}} = \frac{\omega}{k_{\mathrm{o}}} = \frac{1}{\sqrt{LC\left(1-K_L\right)\left(1+K_C\right)}}$$

$$Z_{0\mathrm{o}} = \frac{1}{\mathrm{v}_{\mathrm{po}}C_{0\mathrm{o}}} = \sqrt{\frac{L\left(1-K_L\right)}{C\left(1+K_C\right)}}$$

$$K_L = L_{\mathrm{ab}}/L \text{与} K_C = C_{\mathrm{ab}}/C$$

$C_{0\mathrm{e}} = C$（$1-K_C$）$=C_{\mathrm{a}}$

$$C_{0\mathrm{o}} = C\left(1+K_C\right) = C_{\mathrm{a}} + 2C_{\mathrm{ab}}$$

偶模场沿耦合线的传播，与特征阻抗为$Z_{0\mathrm{e}}$、传播常数为k_{e}(或相速 $v_{\mathrm{pe}} = \omega/k_{\mathrm{e}}$)的传输线上电磁波的传播等效；同样，奇模场沿耦合线的传播，就等效于沿特征阻抗为$Z_{0\mathrm{o}}$、传播常数为k_{o}(或相速 $v_{\mathrm{po}} = \omega/k_{\mathrm{o}}$)的传输线上电磁波的传播。$Z_{0\mathrm{e}}$、k_{e}(或有效介电常数$\varepsilon_{\mathrm{ee}}$)、$Z_{0\mathrm{o}}$、$k_{\mathrm{o}}$(或有效介电常数$\varepsilon_{\mathrm{eo}}$)就是描述耦合微带线的四个特征参数。

第21讲复习

复习要点

- 由于介质填充的不均匀，微带线不支持纯TEM模，微带线传播的是准TEM模。微带线的工程分析都应用准TEM模近似。
- 耦合微带线任何一种激励都可分解成奇模与偶模激励的组合，因此对耦合微带线的分析可简化到对偶模、奇模激励问题的分析，这就是耦合微带线的奇、偶模分析。

复习范围

6.7

帮助理解的多媒体演示：MMS21