

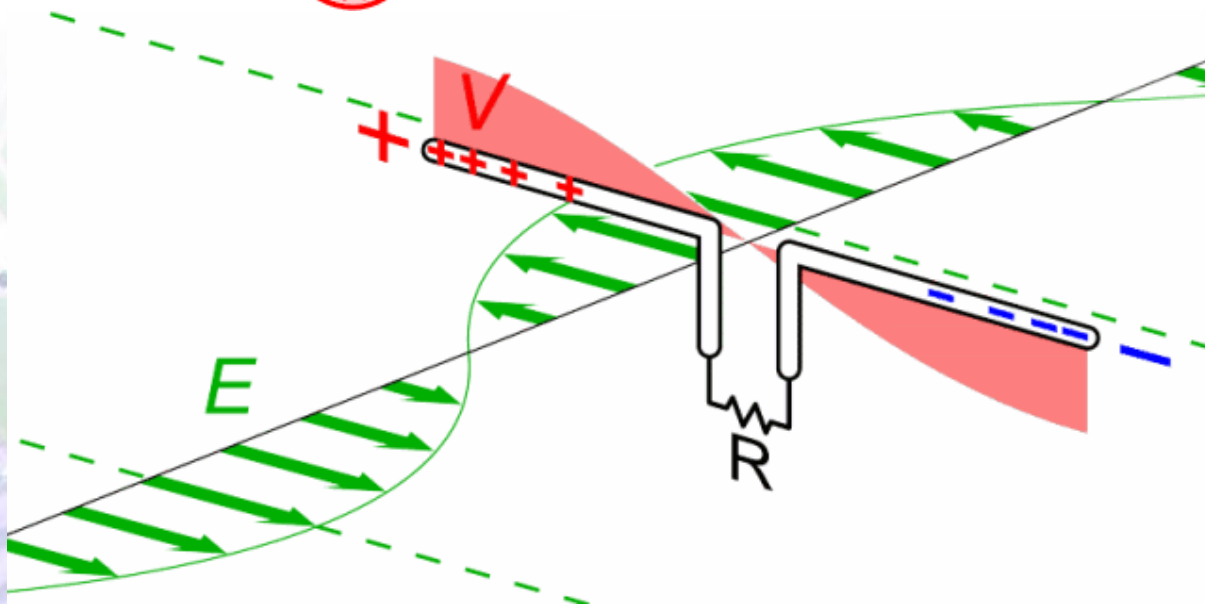
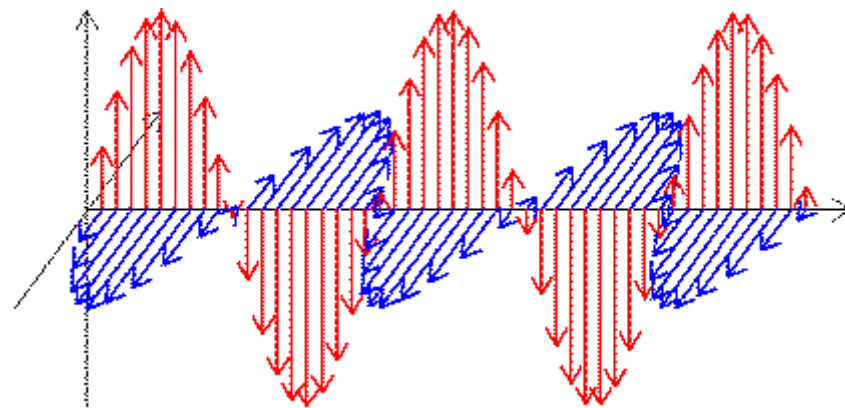
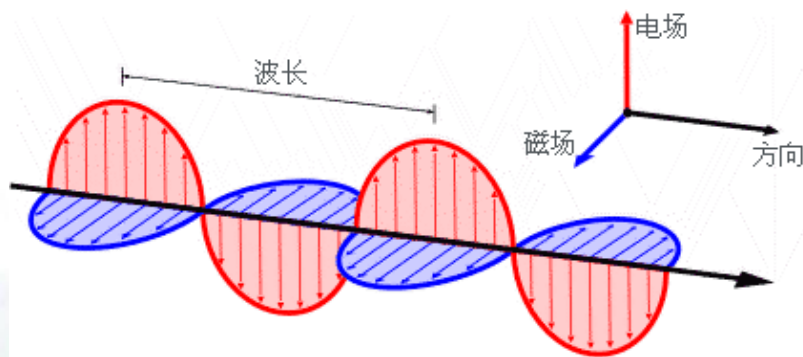
# 第一章 无源元件 (Passive Component)

⌚ 射频传输特征

⌚ R、L、C的高频等效分布参数电路

# 基础知识回顾

## ➤ 电磁波传播示意图



天线上电流方向的变化，产生了变化的电场

## 1.2 量纲和单位

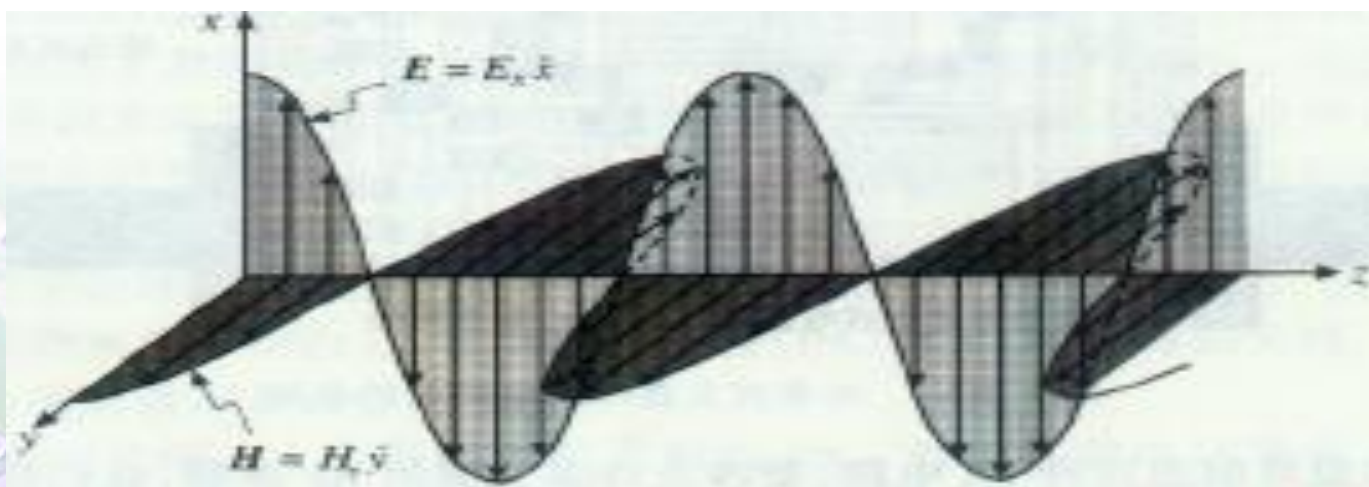
为了理解频率上限，在自由空间，向正  $z$  方向传播的平面电磁波为：

$$E_x = E_{0x} \cos(\omega t - \beta z) \quad \text{V/m}$$

是x方向的电场矢量

$$H_y = H_{0y} \cos(\omega t - \beta z) \quad \text{A/m}$$

是y方向的磁场矢量



$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

传播常数

平面电磁波的主要性质：

1. 电磁波是横波，E和H都与传播方向垂直；
2. E和H互相垂直，且同相位。

## 1.2 量纲和单位

电场和磁场分量的比值就是本征阻抗（波阻抗）：

$$Z_0 = E_x / H_y = \sqrt{\mu / \varepsilon} = \sqrt{(\mu_0 \mu_r) / (\varepsilon_0 \varepsilon_r)} = 377 \Omega \sqrt{\mu_r / \varepsilon_r}$$

其中磁导率 $\mu$ 和介电常数 $\varepsilon$ 与材料有关， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (\text{H/m})$ ， $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} (\text{F/m})$ ， $\mu_r$ 和 $\varepsilon_r$ 为相对值。

在波的传播方向上，单位距离空间相位 $kz$ 的变化称为相位常数（传播常数）：

$$\beta = k = \omega \sqrt{\mu \varepsilon}$$

空间相位 $kz$ 变化 $2\pi$ 所经过的距离称为波长： $\lambda = 2\pi / \beta$

正弦波的等相位面传播的速度称为相速度。

$\because \omega t - \beta z = \text{常数}$ ，故  $\omega dt - \beta dz = 0$

$$\therefore \text{TEM波相速: } v_p = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{\beta} = \lambda f = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} \quad \text{m/s} \quad (1.3)$$

# 基础知识回顾

## ➤ 基尔霍夫电压电流定律

- 在集总电路中，任何时刻，对任一节点，所有流出节点的支路电流的代数和恒等于零。
- 在集总电路中，任何时刻，沿任一回路，所有支路电压的代数和恒等于零。
- 常规电路中， $R$ 与 $f$ 无关， $X_C = 1/j\omega C$ ， $X_L = j\omega L$



# 射频传输特征

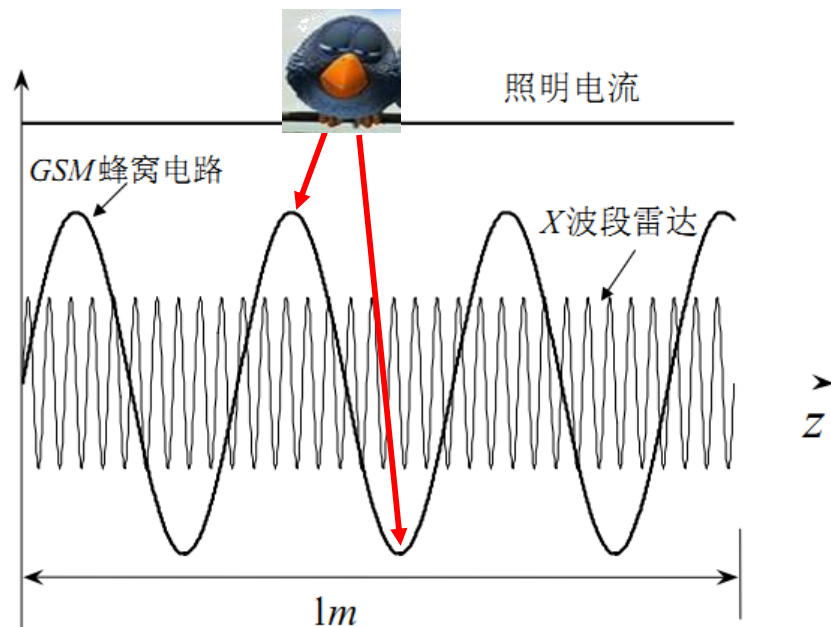


高压线是裸露的，没有绝缘层

$f_1 = 50 \text{ Hz}$  (照明交流电)

$f_2 = 1 \text{ GHz}$  (GSM蜂窝电路)

$f_3 = 10 \text{ GHz}$  (X波段雷达)



$$\lambda_1 = \frac{c}{f_1} = \frac{3 \times 10^8}{50} = 6 \times 10^6 \text{ m} = 6000 \text{ km}$$

$$\lambda_2 = \frac{c}{f_2} = \frac{3 \times 10^8}{1 \times 10^9} = 0.3 \text{ m} = 30 \text{ cm}$$

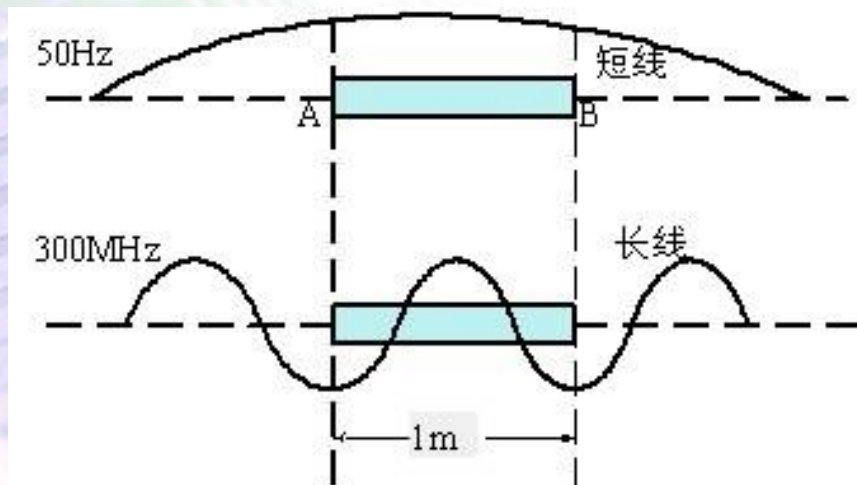
$$\lambda_3 = \frac{c}{f_3} = \frac{3 \times 10^8}{10 \times 10^9} = 0.03 \text{ m} = 3 \text{ cm}$$

# 射频传输特征

## ◆ U、I是位置与时间的函数

- 微波波段（ $f=10\text{GHz}$ ,  $\lambda=3\text{cm}$ , 则在 $l=3\text{cm}$ ）线上U、I不可以近似为一样大。 $\lambda < l$ （长线），分布参数电路。
- 低频电路中（50周市电： $\lambda=6000\text{km}$ , 线上任一点的电压、电流近似为一样，绕地球一圈只有七个波长） $\lambda \gg l$ （短线），集中参数电路。

## 长线和短线



长线上电压的波动现象明显

短线上电压的波动现象可忽略

# 射频传输特征

## ➤ 集总参数电路

- 在低频电路中，常常认为电场能量全部集中在电容器中，磁场能量全部集中在电感器中，只有电阻元件消耗电磁能量。由这些**集中参数元件**组成的电路称为**集总参数电路**。

## ➤ 分布参数电路

- 当频率提高到其波长和电路的几何尺寸可相比拟时，电场能量和磁场能量的分布空间很难分开，而且电路元件连接线的**分布参数效应**不可忽略，这种电路称为**分布参数电路**。

### 结论：

- 当**波长和分立元件的尺寸可比拟**时，分布效应不可忽略。
- 在高频应用时，**电磁波的特性开始取代基尔霍夫电压电流定律**而占主导地位。



# 射频传输特征

## ◆ 趋肤效应

导线的直流电阻:  $R_{DC} = l / (\pi a^2 \sigma_{\text{cond}})$

例: 半径  $r_0 = 2\text{mm}$  铜线的单位长度的直流电阻  $R_{DC}$

$$R_{DC} = \frac{l}{\pi r_0^2 \sigma_{Cu}} = \frac{l}{3.14 \times (2 \times 10^{-3})^2 \times 64.5 \times 10^6} = 1.23 \times 10^{-3} \Omega/\text{m}$$

$f = 10\text{GHz}$  时该铜线单位长度的损耗  $R$ :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma_{\text{cond}}}} = \frac{1}{\sqrt{3.14 \times 10 \times 10^9 \times 260 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 64.5 \times 10^6}} = 3.89 \times 10^{-8} \text{m}$$

$$R \approx \frac{a}{2\delta} R_{DC} = \frac{2 \times 10^{-3}}{2 \times 3.89 \times 10^{-8}} \times 1.23 \times 10^{-3} = 31.6 \Omega/\text{m} \quad \boxed{R/R_{DC} \approx 25690}$$

# 射频传输特征

## ◆ 趋肤效应

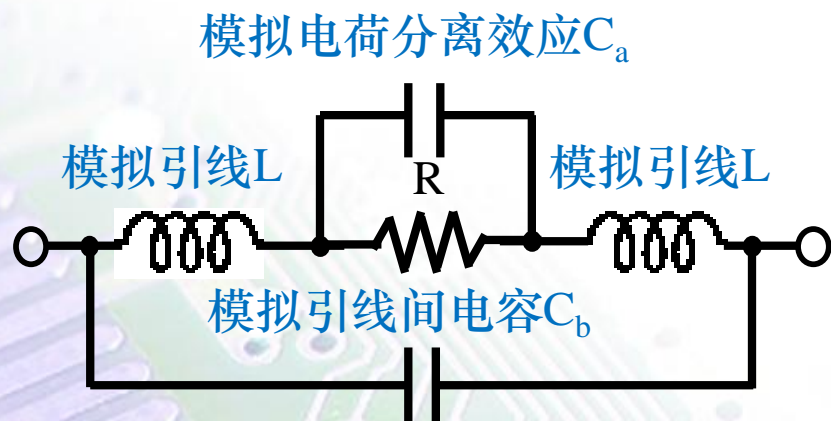
- 对DC信号，传导电流流过整个导体横截面
- 在AC时，交变的载流子形成交变磁场，该磁场又感应一个电场，与该电场相关联的电流密度与原始的电流相反，在中心感应最强，所以导体中心的电阻最大，**随着频率的提高，电流趋向于导体外表——趋肤效应**

导体损耗不可忽略！

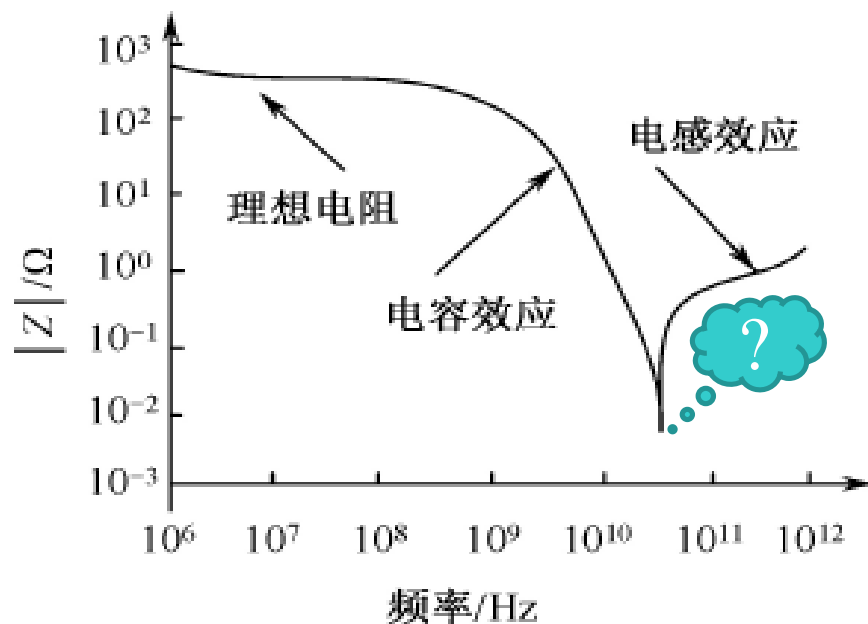
# R、L、C的高频等效分布参数电路

**电阻、电容和电感**是最为常见的三种无源元件，广泛应用于射频/微波电路设计中。在频率较低的情况下，这些元件可近似为理想元件，而在射频/微波频段，必须考虑这些元件的寄生参数效应。

## 电阻



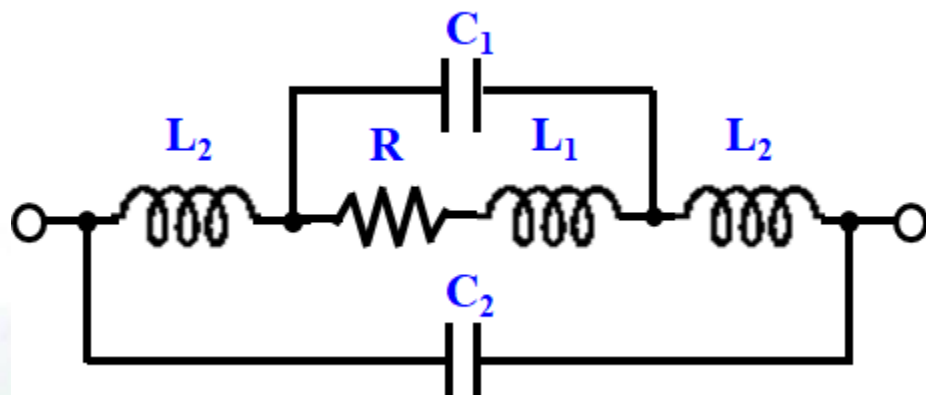
高频电阻等效电路表示法



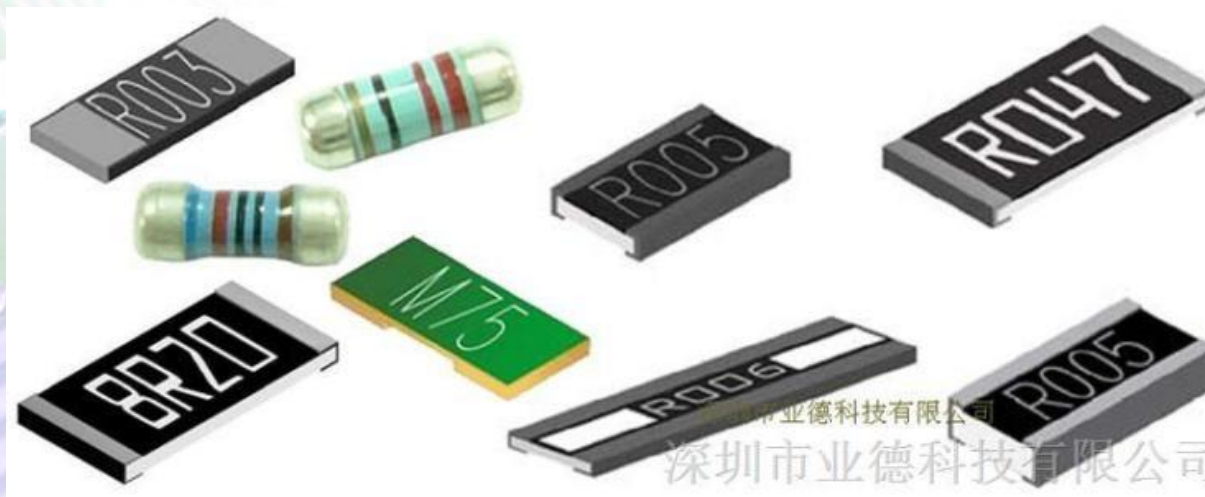
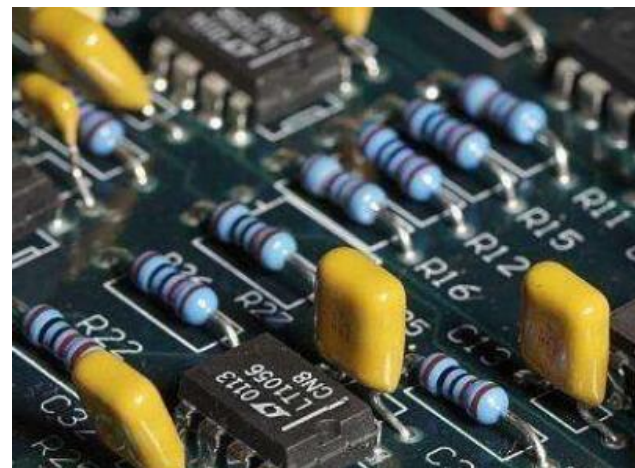
500Ω金属膜电阻与频率的关系



# R、L、C的高频等效分布参数电路



高频线绕电阻等效电路表示法

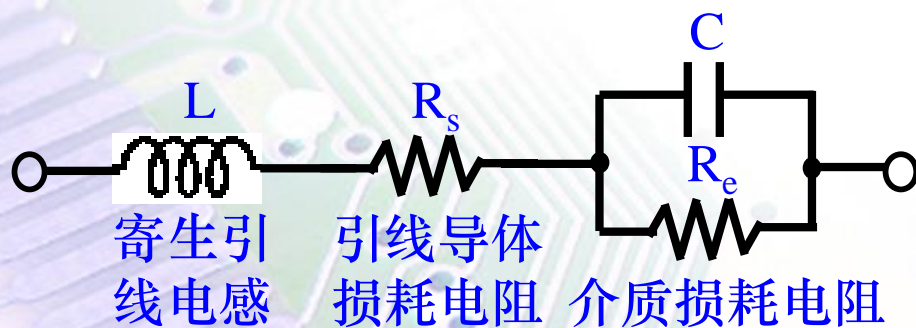
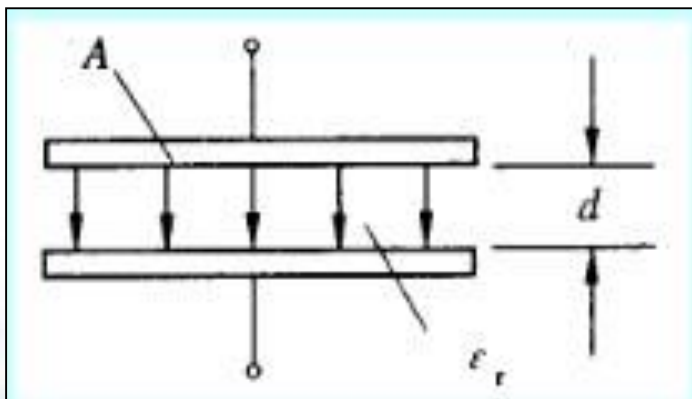


深圳市业德科技有限公司  
深圳市业德科技有限公司

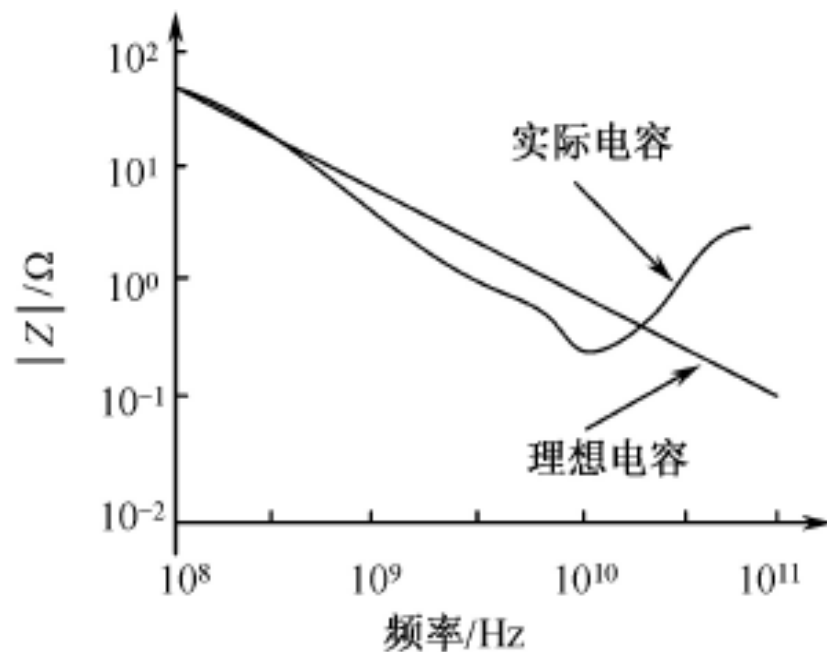


# R、L、C的高频等效分布参数电路

## 电容



高频电容的等效电路



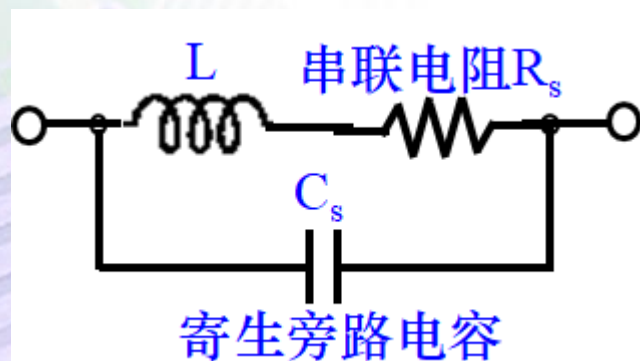
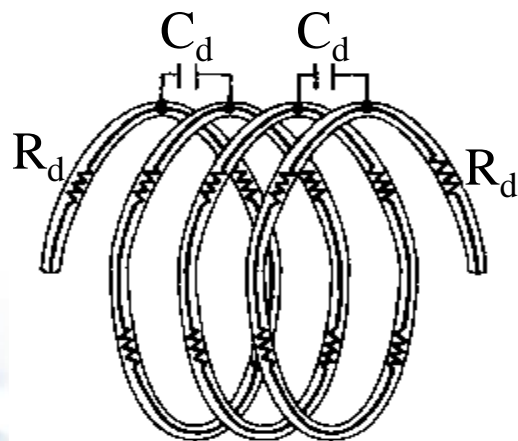
47pF电容的阻抗绝对值与频率的关系



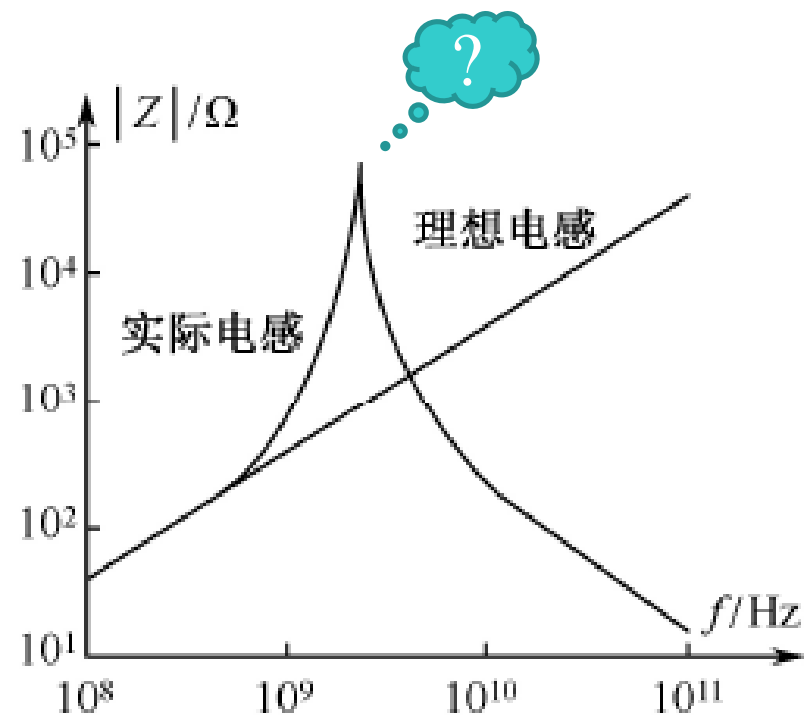


# R、L、C的高频等效分布参数电路

## 电感

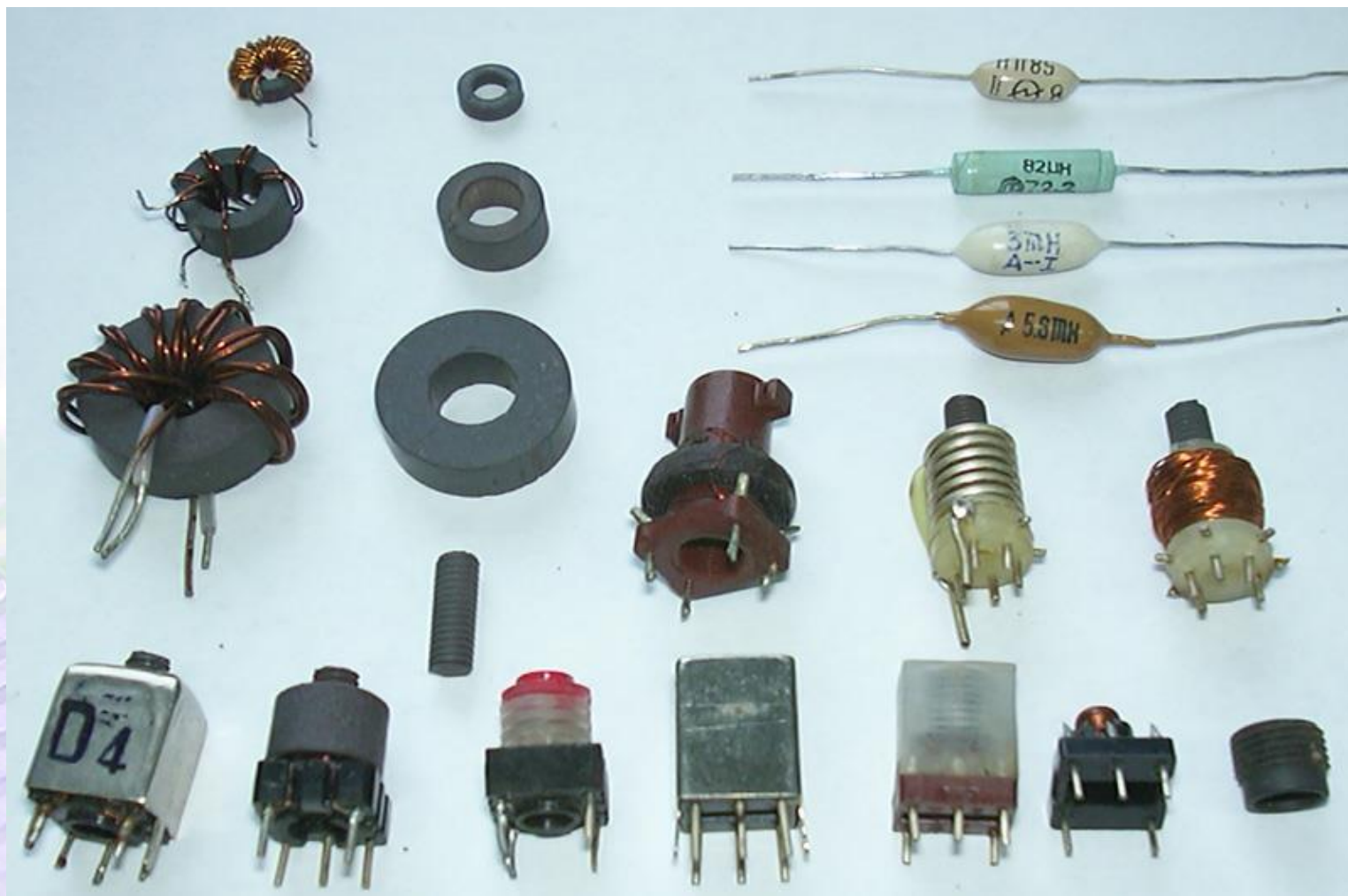


高频电感的等效电路



扼流圈阻抗绝对值随频率的变化关系

# R、L、C的高频等效分布参数电路

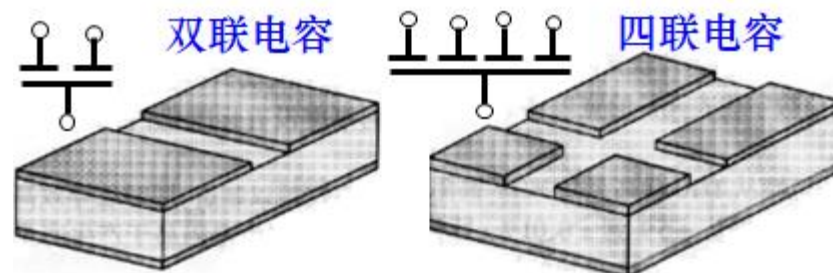
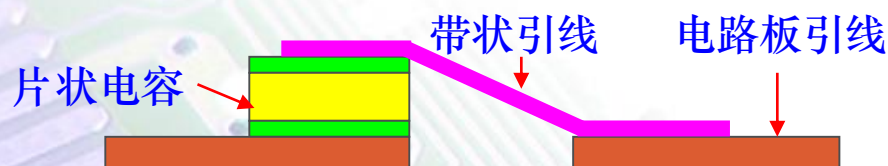


# R、L、C的高频等效分布参数电路

## 片状电阻

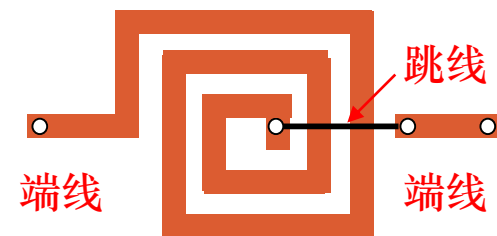
几何形状	尺寸代码	长( $l$ ) mil	宽( $w$ ) mil
	0402	40	20
	0603	60	30
	0805	80	50
	1206	120	60
	1218	120	180

## 片状电容

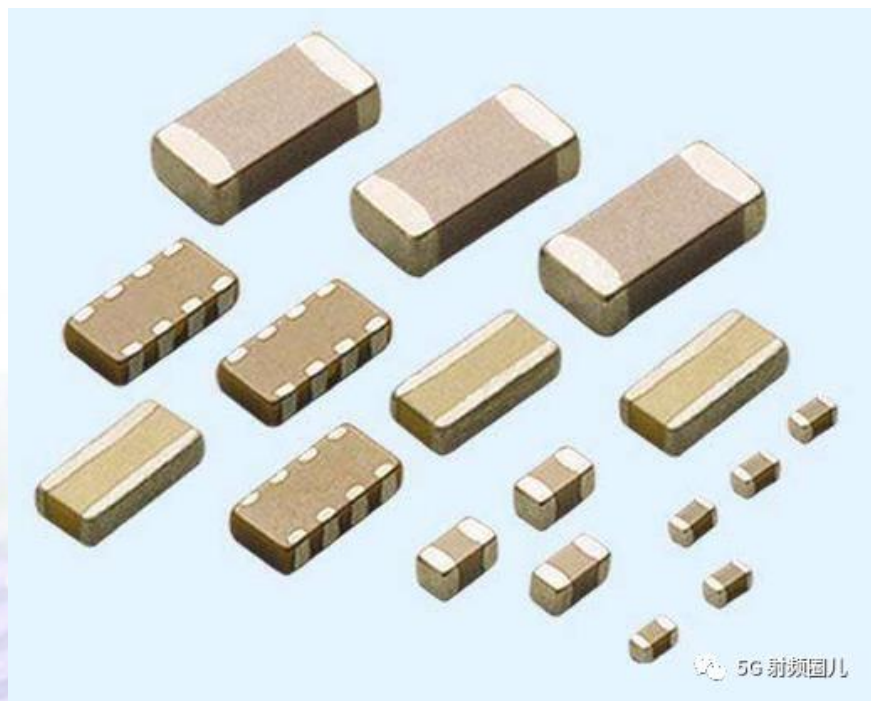


## 片状电感

最通用的表面安装电感仍采用线绕线圈，对厚度受到严格限制的电路采用扁平线圈。

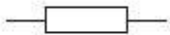
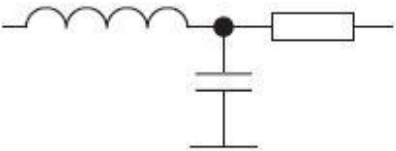


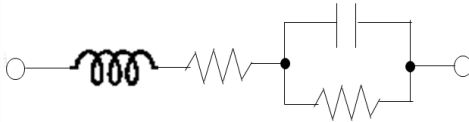
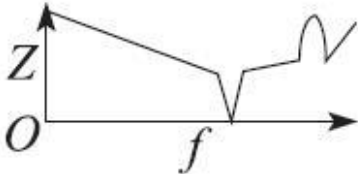

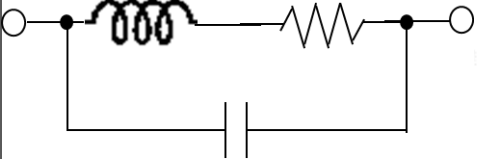
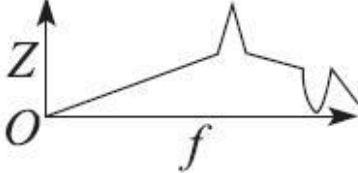
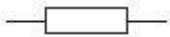
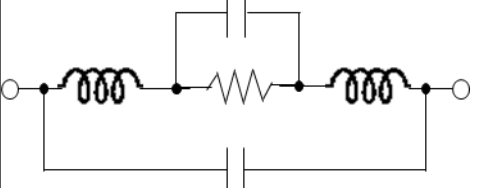
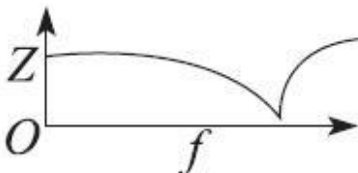








# R、L、C的高频等效分布参数电路

元件	低频等效电路	高频等效电路	射频响应
导线			
电容器			
电感器			
电阻器			

# 课堂测试

- 1、微波射频传输的特征有？（与低频比）
- 2、射频通信系统的主要部件有？
- 3、给出电容的射频分布参数等效电路。
- 4、微波的频率范围是？波长为？

例题1.1、1.3~1.5自学

## 本章小结

- 射频基本量纲（频率、频谱、相速度、传播常数等）；
- 射频收发系统基本结构；
- 射频无源器件的射频等效电路（R、L、C）；
- 理解电尺寸（长线和短线），集总参数和分布参数。

作业：

1-1、1-3、1-5、1-6、1-10