

东南大学微波与射频电路实验

实 验 报 告

学号：04022212

姓名：钟源

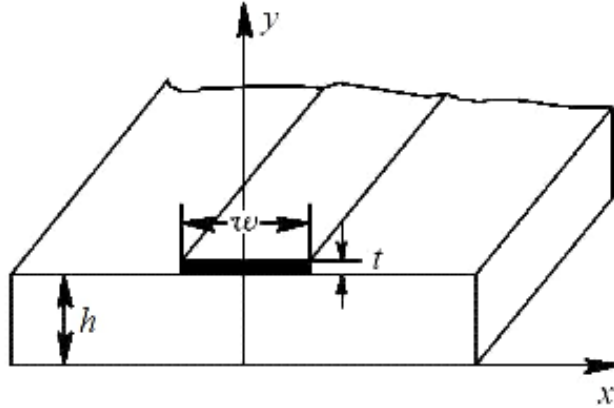
2024 年 11 月 30 日

实验六 微带线的分析和设计

一、实验目的

掌握微带线的基本设计原理，通过定量分析微带线特性阻抗和有效介电常数与物理尺寸的关系，理解微带线宽度、介质厚度和金属厚度对特性阻抗和有效介电常数的影响。

二、实验原理



1. 写出导带厚度为零时微带线特性阻抗、有效介电常数的表达式：

$$\text{空气微带的特性阻抗为 } Z_0^a = \begin{cases} 59.952 \ln \left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right), & \frac{w}{h} \leq 1 \\ \frac{119.904\pi}{\left(\frac{w}{h} + 2.42 - \frac{0.44h}{w} + \left(1 - \frac{h}{w}\right)^6 \right)}, & \frac{w}{h} > 1 \end{cases}$$

$$\text{等效介电常数为 } \varepsilon_e = 1 + q(\varepsilon_r - 1)$$

$$\text{微带线的特性阻抗为 } Z_0 = \frac{Z_0^a}{\sqrt{\varepsilon_e}}$$

$$\text{其中，填充因子为 } q = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{12h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}} + 0.041 \left(1 - \frac{w}{h}\right)^2 \right], & \frac{w}{h} \leq 1 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{12h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}}, & \frac{w}{h} > 1 \end{cases}$$

2. 写出导带厚度为 t 时微带线特性阻抗、有效介电常数的表达式：

$$\text{空气微带的特性阻抗为 } Z_0^a = \begin{cases} 59.952 \ln \left(\frac{8h}{w_e} + \frac{w_e}{4h} \right), & \frac{w_e}{h} \leq 1 \\ \frac{119.904\pi}{\left(\frac{w_e}{h} + 2.42 - \frac{0.44h}{w_e} + \left(1 - \frac{h}{w_e} \right)^6 \right)}, & \frac{w_e}{h} > 1 \end{cases}$$

等效介电常数为 $\varepsilon_e = 1 + q(\varepsilon_r - 1)$

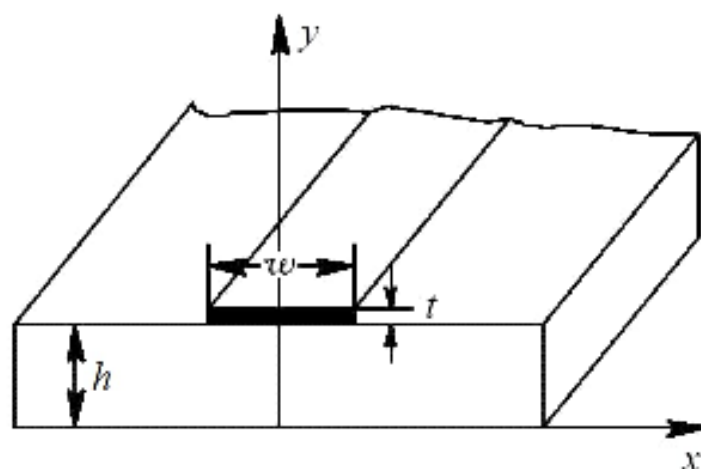
微带线的特性阻抗为 $Z_0 = \frac{Z_0^a}{\sqrt{\varepsilon_e}}$

$$\text{其中，填充因子为 } q = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{12h}{w_e} \right)^{-\frac{1}{2}} + 0.041 \left(1 - \frac{w_e}{h} \right)^2 \right], & \frac{w_e}{h} \leq 1 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{12h}{w_e} \right)^{-\frac{1}{2}}, & \frac{w_e}{h} > 1 \end{cases}$$

使用 w_e 的原因是当导带厚度不为 0 时，导带的边缘电容增大，相当于导带的等效宽度增加。当 $t < h$ ， $t < \frac{w}{2}$ 时相应的修正公式为

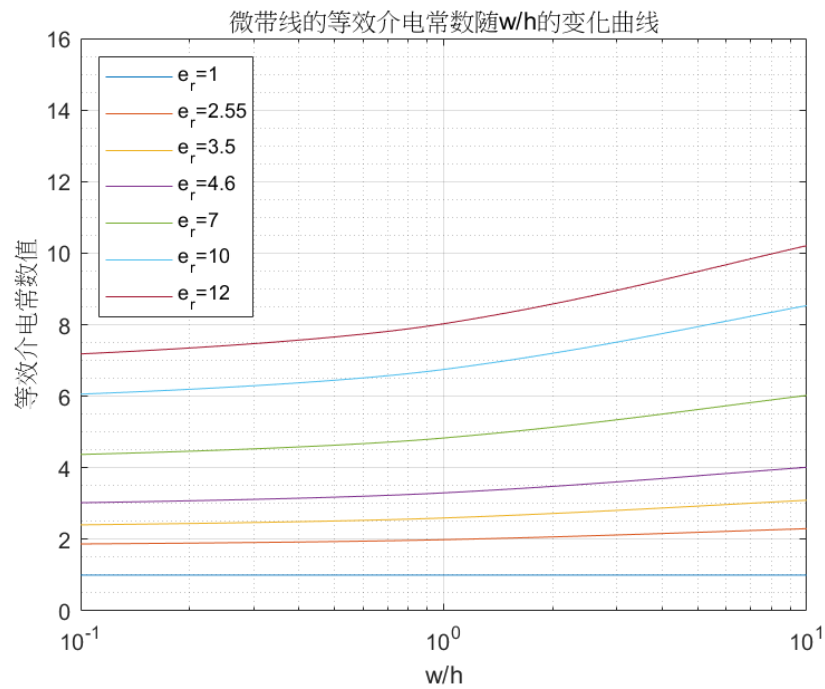
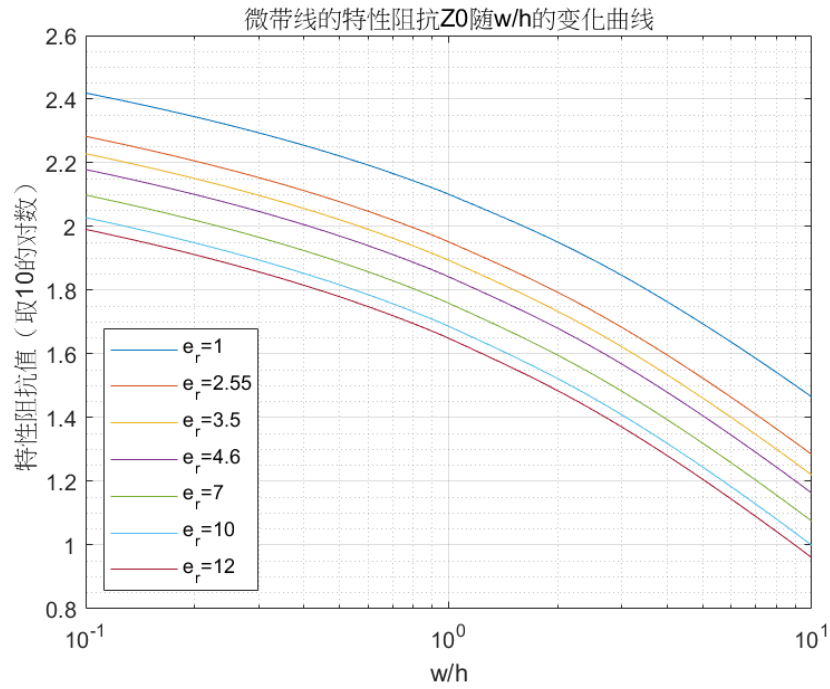
$$\frac{w_e}{h} = \begin{cases} \frac{w}{h} + \frac{t}{\pi h} \left(1 + \ln \left(\frac{2h}{t} \right) \right), & \frac{w}{h} \geq \frac{1}{2\pi} \\ \frac{w}{h} + \frac{t}{\pi h} \left(1 + \ln \left(\frac{4\pi w}{t} \right) \right), & \frac{w}{h} \leq \frac{1}{2\pi} \end{cases}$$

三、实验内容

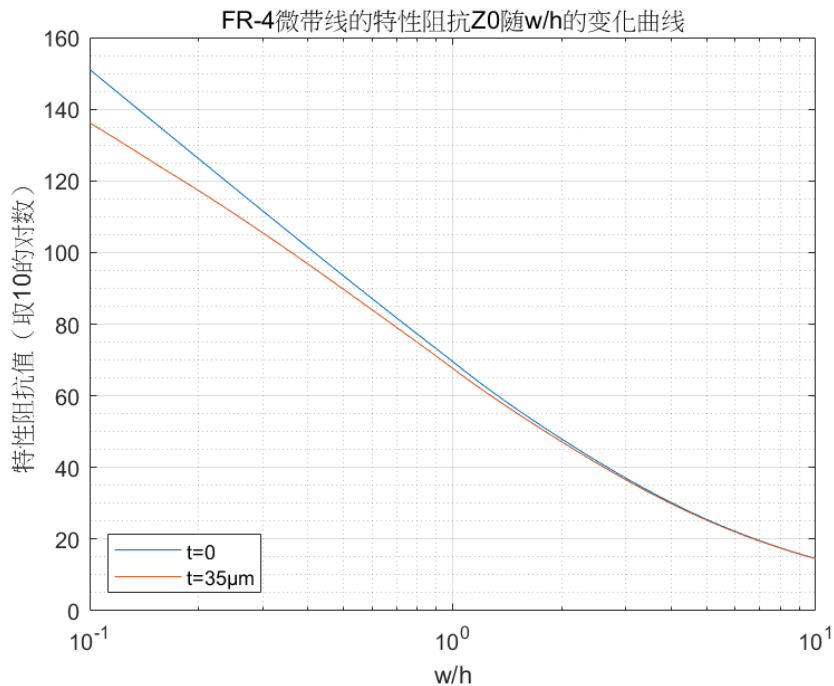


实验任务：已知电路板材相对介电常数的取值点[1; 2.55; 3.5; 4.6; 7; 10; 12]，微带线的宽度和电路板厚比值 w/h 的取值范围为[0.1-10]。

1. 针对不同的介电常数，采用 **matlab** 软件绘制微带线的特性阻抗 Z_0 随 w/h 的变化曲线、有效介电常数随 w/h 的变化曲线。（自变量 w/h 轴为对数刻度，参变量为介电常数。）



- 针对常用的高频电路板材 FR-4(相对介电常数 4.6), 厚度 $h=1\text{mm}$, 利用 matlab 软件仿真微带线金属厚度 $t=0$ 和 $t=35\mu\text{m}$ 时特性阻抗的差异并说明原因。绘制两种不同金属厚度条件下特性阻抗 Z_0 随 w/h 变化的曲线。



3. 针对常用的高频电路板材 FR-4（相对介电常数 4.6），厚度 $h=1\text{mm}$ ，微带线金属厚度为 0，分别设计特性阻抗为 50Ω 和 100Ω 的微带线，计算其带线宽度 w ；当两种微带线的电长度都为 90° 时，分别计算其在中心频率为 1GHz 时对应的物理长度。

	$Z_0=50\Omega$	$Z_0=100\Omega$
导带宽度 w	1.8492	0.4197
物理长度 l	40.3335	42.2193

(注明：两者均以 mm 为单位)

4. 如果用高频电路板材 FR-4（相对介电常数 4.6）微带线实现四分之一波长匹配电路，计算微带线物理长度时，请回答：

1) 相波长 λ_g 应采用以下三种方式中的哪一种？

- $\lambda_g = \lambda_0$ ，其中 λ_0 为工作频率电磁波真空中的波长
- $\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r}$ ， $\epsilon_r = 4.6$
- $\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_e}$ ， ϵ_e 为有效介电常数

答：相波长 λ_g 应采用 $\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_e}$ 。

2) 请用数学表达式说明：如果采用其它两种不正确的方式，电路的频响将分别发生什么变化？

答：一段长度为 l 的传输线的等效电长度为 $\theta = \beta l = \frac{2\pi l}{\lambda} = \frac{2\pi lf}{v_p}$ 。不管取用何种传输线，当需要实现分支匹配时，该传输线的等效输入阻抗为 $Z_{in}(l) = Z_0 \frac{Z_1 \cos(\beta l) + jZ_0 \sin(\beta l)}{Z_0 \cos(\beta l) + jZ_1 \sin(\beta l)}$ ，其中 Z_0 为微带线的特性阻抗。需要使 $Z_{in}(L) = Z_0$ ，因此传输线（即微带线）的等效电长度 θ_L 是一个定值，即 $\frac{\pi}{2}$ 的倍数。

由于 $\lambda_0 > \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_e}} > \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$ ，故当 $\lambda_g = \lambda_0$ 时，取用的物理长度 L 偏大，因此达到相同频率特性时的频率偏小，频率特性曲线左移；当 $\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$ 时，取用的物理长度 L 偏小，因此达到相同频率特性时的频率偏大，频率特性曲线右移。

四、实验结果分析与总结

请总结（微带线特性阻抗、相波长和有效介电常数）与（物理尺寸和介质的介电常数）之间关系的一般规律

- 1) 当宽度与高度的比值 (w/h) 保持不变时，微带线的特性阻抗会随着相对介电常数 ϵ_r 的增加而减小；在相对介电常数 ϵ_r 保持不变的情况下，微带线的特性阻抗会随着宽度与高度比值 (w/h) 的增加而减小。
- 2) 当相对介电常数 ϵ_r 保持不变时，如果微带线的特性阻抗增加，则意味着宽度与高度比值 (w/h) 减小，特别是在高度 h 固定的情况下，宽度 w 会减小。
- 3) 此外，当宽度与高度的比值 (w/h) 保持不变时，微带线的等效介电常数 ϵ_e 会随着相对介电常数 ϵ_r 的增加而增大。而在相对介电常数 ϵ_r 保持不变的情况下，微带线的等效介电常数 ϵ_e 会随着宽度与高度比值 (w/h) 的增加而减小。

五、附件（程序清单）

```
clear;clc;
```

• 题 (1)

```
%%%%%%%%%%%%%%实验条件%%%%%%%%%%%%%%  
wh=logspace(-1,1);%logspace(a,b)生成一个由在  $10^a$  和  $10^b$  ( $10$  的  $N$  次幂)  
之间的 50 个对数间距点组成的行向量  $y$ 。logspace 函数对于创建频率向量特别有用。  
e_r=[1 2.55 3.5 4.6 7 10 12];  
t=0;
```

```

h=0.001;%h 取 1mm
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%初始化%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Z01=zeros(1,length(wh));
Z02=zeros(1,length(wh));
Z03=zeros(1,length(wh));
Z04=zeros(1,length(wh));
Z05=zeros(1,length(wh));
Z06=zeros(1,length(wh));
Z07=zeros(1,length(wh));
eps_eff1=zeros(1,length(wh));
eps_eff2=zeros(1,length(wh));
eps_eff3=zeros(1,length(wh));
eps_eff4=zeros(1,length(wh));
eps_eff5=zeros(1,length(wh));
eps_eff6=zeros(1,length(wh));
eps_eff7=zeros(1,length(wh));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%计算特性阻抗和有效介电常数%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for i=1:length(wh)
    [Z01(i),eps_eff1(i)]=Z0cal_mstrip(wh(i),e_r(1),t,h);
    [Z02(i),eps_eff2(i)]=Z0cal_mstrip(wh(i),e_r(2),t,h);
    [Z03(i),eps_eff3(i)]=Z0cal_mstrip(wh(i),e_r(3),t,h);
    [Z04(i),eps_eff4(i)]=Z0cal_mstrip(wh(i),e_r(4),t,h);
    [Z05(i),eps_eff5(i)]=Z0cal_mstrip(wh(i),e_r(5),t,h);
    [Z06(i),eps_eff6(i)]=Z0cal_mstrip(wh(i),e_r(6),t,h);
    [Z07(i),eps_eff7(i)]=Z0cal_mstrip(wh(i),e_r(7),t,h);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%绘制图像%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(1);
semilogx(wh,log10(Z01),wh,log10(Z02),wh,log10(Z03),wh,log10(Z04),wh,log10(Z05),wh,log10(Z06),wh,log10(Z07));
title('微带线的特性阻抗 Z0 随 w/h 的变化曲线');
xlabel('w/h');
ylabel('特性阻抗值（取 10 的对数）');
lgd=legend('e_r=1','e_r=2.55','e_r=3.5','e_r=4.6','e_r=7','e_r=10','e_r=12');
lgd.Location = 'southwest';
grid on; grid minor;

figure(2);
semilogx(wh,eps_eff1,wh,eps_eff2,wh,eps_eff3,wh,eps_eff4,wh,eps_eff5,wh,eps_eff6,wh,eps_eff7);
lgd=legend('e_r=1','e_r=2.55','e_r=3.5','e_r=4.6','e_r=7','e_r=10','e_r=12');
lgd.Location = 'northwest';
ylim([0 16]);
title('微带线的等效介电常数随 w/h 的变化曲线');
xlabel('w/h');
ylabel('等效介电常数值');
grid on; grid minor;

```

• 题 (2)

```
%%%%%%%%%%%%实验条件%%%%%%%%%
t1=0;
t2=35*1e-6;
h=0.001;
er_FR4=4.6;
%%%%%%%%%%%%初始化%%%%%%%%%
Z08=zeros(1,length(wh));
Z09=zeros(1,length(wh));
eps_eff8=zeros(1,length(wh));
eps_eff9=zeros(1,length(wh));
%%%%%%%%%%%%计算特性阻抗和有效介电常数%%%%%%%%%
for i=1:length(wh)
    [Z08(i),eps_eff8]=Z0cal_mstrip(wh(i),er_FR4,t1,h);
    [Z09(i),eps_eff9]=Z0cal_mstrip(wh(i),er_FR4,t2,h);
end
%%%%%%%%%%%%绘制图像%%%%%%%%%
figure(3)
semilogx(wh,Z08,wh,Z09);
title('FR-4 微带线的特性阻抗 Z0 随 w/h 的变化曲线');
xlabel('w/h');
ylabel('特性阻抗值 (取 10 的对数)');
lgd=legend('t=0','t=35μm');
lgd.Location = 'southwest';
grid on; grid minor;
```

• 题 (3)

```
%%%%%%%%%%%%计算导带宽度和物理长度%%%%%%%%%
lamda0=300000000/1000000000;% 波长
wh1=whcal_mstrip(50,er_FR4);
w1=wh1*h*1000;
[Z010,eps_eff10]=Z0cal_mstrip(wh1,er_FR4,0,h);
L1=lamda0/sqrt(eps_eff10)/4;% 由电长度得到物理长度
wh2=whcal_mstrip(100,er_FR4);
w2=wh2*h*1000;
[Z011,eps_eff11]=Z0cal_mstrip(wh2,er_FR4,0,h);
L2=lamda0/sqrt(eps_eff11)/4;% 由电长度得到物理长度
%%%%%%%%%%%%绘制表格%%%%%%%%%
fig=figure;
data={w1,w2;L1,L2};
Table= uitable('Data', data, ...
    'ColumnName', {'Z_0=50 欧姆','Z_0=100 欧姆'}, ... % 设置列名
    'RowName',{'导带宽度 w','物理长度 l'}, ... % 设置表格的位置和大小
    'Position', [20 200 240 60]);
```

- 函数 Z0cal_mstrip, 用于计算微带线的特性阻抗和有效介电常数

```

function [Z0,eps_eff]=Z0cal_mstrip(wh,er,t,h)
%%%%%%导带厚度 t 为 0 的情况%%%%%%%%
if t==0
    if wh<=1
        Z0a=59.952.*log(8*wh.^(-1)+0.25.*wh);
        q=0.5+0.5*((1+12.*wh.^(-1)).^(-0.5)+0.041*(1-wh).^2);
        eps_eff=1+q.*(er-1);
        Z0=Z0a/sqrt(eps_eff);
    else
        Z0a=119.904*pi./(wh+2.42-0.44.*wh.^(-1)+(1-wh.^(-1)).^6);
        q=0.5+0.5*((1+12.*wh.^(-1)).^(-0.5));
        eps_eff=1+q.*(er-1);
        Z0=Z0a/sqrt(eps_eff);
    end
    %%%%%导带厚度 t 不为 0 的情况%%%%%%%%
else
    %we/h 的修正公式
    if wh>=1/2/pi
        wh1=wh+t/pi/h.*(1+log(2*h/t));
    else
        wh1=wh+t/pi/h.*(1+log(4*pi*wh*h/t));
    end

    if wh1<=1
        Z0a=59.952.*log(8*wh1.^(-1)+0.25.*wh1);
        q=0.5+0.5*((1+12.*wh1.^(-1)).^(-0.5)+0.041*(1-wh1).^2);
        eps_eff=1+q.*(er-1);
        Z0=Z0a/sqrt(eps_eff);
    else
        Z0a=119.904*pi./(wh1+2.42-0.44.*wh1.^(-1)+(1-wh1.^(-1)).^6);
        q=0.5+0.5*((1+12.*wh1.^(-1)).^(-0.5));
        eps_eff=1+q.*(er-1);
        Z0=Z0a/sqrt(eps_eff);
    end
end
end
end

```

- 函数 whcal_mstrip，由特性阻抗和相对介电长度设计出需要的宽长比

```

function wh = whcal_mstrip(Z0,er)
if Z0>44-2*er

A=Z0.*sqrt(2.*(er+1))/119.9+(er-1)./2./(er+1).*(log(pi/2)+log(4/pi)./er);
    wh=1./(exp(A)./8-1/4./exp(A));
else
    B=59.95*pi*pi./Z0./sqrt(er);

```



```
wh=2/pi.*(B-1-log(2.*B-1))+(er-1)/pi./er.*(log(B-10.293-0.517./er));  
end  
end
```