

国家精品课程/ 国家精品资源共享课程/ 国家级精品教材

国家级十一(二)五规划教材/ 教育部自动化专业教学指导委员会牵头规划系列教材

控制系统仿真与CAD

# 第五章 线性系统的计算机辅助分析

## 线性系统的频域分析 (上)

Frequency Domain Analysis of Linear Control Systems (I)



主讲：薛定宇教授



# 线性系统频域分析

## ➤ 频域分析

- Bell 实验室，Nyquist 1932，反馈放大器稳定性
- Bode、Nichols 提出的新图形方法

## ➤ 主要内容

- 单变量系统的频域分析
- 利用频率特性分析系统的稳定性
- 系统的幅值裕度和相位裕度
- 多变量系统的频域分析



# 单变量系统的频域分析

- 用  $j\omega$  取代  $s$  , 则  $G(j\omega)$  为复数增益
- 三种表示方法
  - 实部和虚部  $G(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega)$   
实部与虚部关系曲线即为 Nyquist 图  
Nyquist 图的缺陷：无对应频率信息
  - 幅值与相位  $G(j\omega) = A(\omega)e^{-j\phi(\omega)}$   
横轴对数坐标 rad/s , 纵轴分贝、度 , Bode 图
  - 幅值与相位关系 , Nichols 图 , 缺失频率信息
- 离散系统的频域响应

$$z = e^{j\omega T}$$



# 系统的 Nyquist 图

## ➤ Nyquist 曲线绘制

`nyquist(G)`

`nyquist(G, { $\omega_m$ ,  $\omega_M$ })`

`nyquist(G,  $\omega$ )`

`[R, I,  $\omega$ ] = nyquist(G)`

`nyquist(G1, '- ', G2, '-.b', G3, ':r')`

## ➤ grid 命令绘制等 M 和等 N 圆



Harry Nyquist (1889–1976)



# 系统的 Bode 图与 Nichols 图

## ➤ Bode 图绘制

$\text{bode}(G), \text{bode}(G, \{\omega_m, \omega_M\})$

$\text{bode}(G, \omega)$

$[A, \phi, \omega] = \text{bode}(G)$

$\text{bode}(G_1, '- ', G_2, '-.b', G_3, ':r')$

## ➤ Nichols 图由 $\text{nichols}()$ 函数绘制

➤ Nathaniel B. Nichols (1914–1997)

## ➤ 可以同样处理连续、离散、延迟、多变量系统，格式不变



Hendrik Wade Bode (1905-1982)



## 例5-36 系统的频域分析

➤ 开环传递函数  $G(s) = \frac{s+8}{s(s^2+0.2s+4)(s+1)(s+3)}$

➤ Nyquist 曲线绘制



```
>> s=tf('s');
```

```
G=(s+8)/(s*(s^2+0.2*s+4)*(s+1)*(s+3));
```

```
nyquist(G), grid
```



```
>> ylim([-1.5 1.5])
```

➤ MATLAB 曲线特色  $\omega \in (-\infty, \infty)$

➤ 读取频率信息；频率范围



## 例5-37 其他频域响应曲线

### ➤ Bode 图绘制



```
>> bode(G)
```

### ➤ 快捷菜单读取特性

### ➤ Nichols 图的绘制



```
>> nichols(G), grid
```

### ➤ 用鼠标读取频率信息

### ➤ 弥补了传统 Nichols 图的不同





## 例5-38 离散化模型与连续模型比较

- 对下面模型离散化， $T=0.1$

$$G(s) = \frac{s+8}{s(s^2+0.2s+4)(s+1)(s+3)}$$

- MATLAB 求解



```
>> s=tf('s'); G=(s+8)/(s*(s^2+0.2*s+4)*(s+1)*(s+3));  
G1=c2d(G,0.1); bode(G,G1)
```

- 不同采样周期的离散模型 Bode 图



```
>> bode(G), hold on;  
for T=[0.1:0.2:1], bode(c2d(G,T)); end
```






## 例5-36 离散系统频域分析

➤ 离散系统 ,  $T = 0.1$

$$G(z) = \frac{0.2(0.3124z^3 - 0.5743z^2 + 0.3879z - 0.0889)}{z^4 - 3.233z^3 + 3.9869z^2 - 2.2209z + 0.4723}$$

➤ Nyquist 图与 Nichols 图

```
 >> num=0.2*[0.3124 -0.5743 0.3879 -0.0889];  
den=[1 -3.233 3.9869 -2.2209 0.4723];  
G=tf(num,den,'Ts',0.1); nyquist(G); grid
```

```
 >> nichols(G), grid
```



## 例5-37 连续延迟系统Nyquist图

### ➤ 延迟系统模型

$$G(s) = \frac{1}{s+1} e^{-2s}$$

### ➤ MATLAB 求解

➤ 不直接绘图，由nyquist() 函数得到数据

➤ 选择密集的频率点，得出光滑曲线



```
>> G=tf(1,[1 1],'ioDelay',2);  
w=logspace(-1,4,2000);  
[x,y]=nyquist(G,w); plot(x(:),y(:))
```



# 系统频域分析小结

- 系统频域响应数据的表示方法
  - Bode图 bode
  - Nyquist图 nyquist
  - Nichols图 Nichols
- 延迟模型的频域响应

