



# 第1章 控制系统的输入条件分析

——2019年春季学期

授课教师：马 杰（控制与仿真中心）

罗 晶（控制科学与工程系）

马克茂（控制与仿真中心）

陈松林（控制与仿真中心）



**哈尔滨工业大学控制与仿真中心**



# 控制系统设计流程复习

## 需求分析

从控制角度分析，确定被控量，工作条件，各种约束和限制，分析理解具体的功能和性能指标要求，或者能够提出合理的性能指标（量化）。

## 方案设计

**结构方案：**清楚不同方案带来的特殊控制问题；  
**驱动和传动方案：**了解不同方案给控制引入的非线性因素（摩擦、间隙、死区、饱和、滞后等）；  
**测量方案：**要考虑测量方式，量程、精度、分辨率等参数，以及引入的噪声、非线性、滞后等；  
**控制方案：**考虑速度、字长、采样周期、实时性等；

## 系统实现

单个部件测试，硬件设计避免干扰，软件算法精度



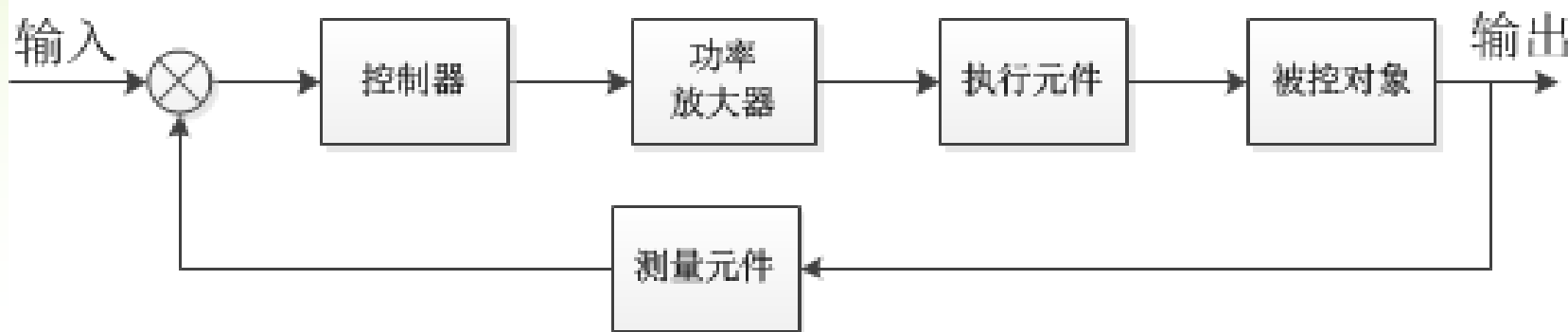
# 控制系统设计流程复习

- 数学建模** 科学和实验建模，进行降阶、简化、非线性处理、不确定性描述等。通过实验或计算获取模型参数；
- 控制设计** 根据建立模型的特点，选取合适的控制理论或方法来进行控制器设计（考虑方法的适用范围，复杂性、性能等）
- 仿真验证** 搭建仿真框图，用最原始的模型对控制算法进行验证（可以用频域和时域的方法）
- 系统调试** 将算法编程实现，根据测试结果对控制器结构和参数进行修改和调整，直至满足指标要求。正式的指标测试一般采用外部的仪器设备进行。
- 指标测试**



# 前言

**控制系统的性能 (performance) 是指系统在实际工作时的误差大小，具体设计时可以用不同的评价指标。**





# 前言

## 稳态性能指标

- ◆ 静态误差 $e_s$ (角度or长度)
- ◆ 速度误差 $e_v$ (角速度or线速度)
- ◆ 最大跟踪误差 $e_m$ (角度or长度)
- ◆ 最低平稳跟踪角速度 $\Omega_{\min}$
- ◆ 最大跟踪角速度 $\Omega_{\max}$
- ◆ 最大跟踪角加速度 $a_{\max}$

## 伺服系统的性能指标和技术要求

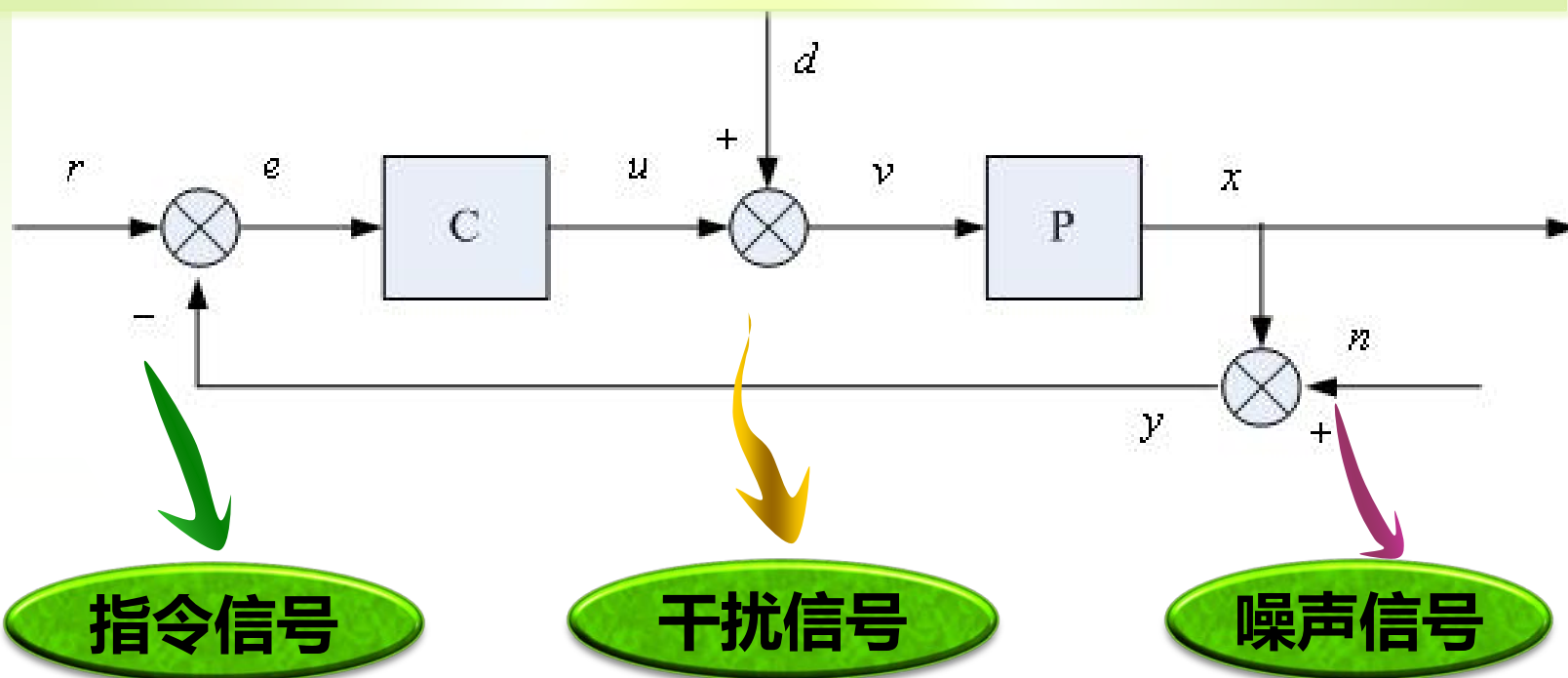
## 动态性能指标

- ◆ 时域指标(最大超调量 $\sigma\%$ , 过渡过程时间 $t_s$ , 振荡次数)
- ◆ 频域指标(最大振荡 $M_r$ , 系统频宽 $\omega_b$ )
- ◆ 承扰能力disturbance rejection (系统动态过程中的最大误差 $e_t$ , 过渡过程时间 $t_{fs}$ )
- ◆ 鲁棒性robustness



# 前言

为保证控制系统的性能 (performance)，在进行控制系统设计之前，必须明确**期望的输出性能**和**输入条件**。





# 输入条件分析内容

A1

输入信号和跟踪误差

A2

噪声和它引起的误差

A3

扰动响应



## 1.1 输入信号和跟踪误差

1.1.1

**输入信号的分析**

1.1.2

**静态误差系数和动态误差系数**

1.1.3

**跟踪误差的计算及在控制系统设计中的应用**





## 1.1.1 输入信号的分析

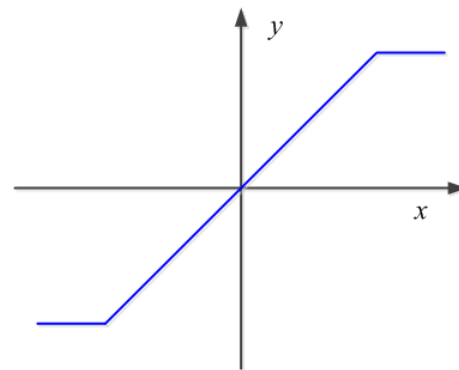
### 为什么要进行分析?

线性系统理论——不考虑输入信号的幅值大小

实际系统中——执行器都有功率的限制

系统能达到的性能与输入信号相关

在实际系统设计时，必须清楚输入信号的特性，并以此来作为控制系统设计的依据！

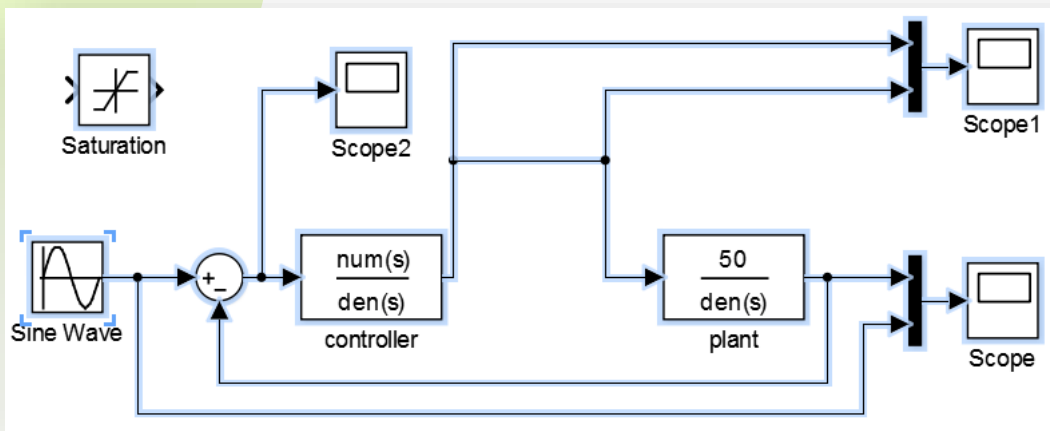


饱和特性



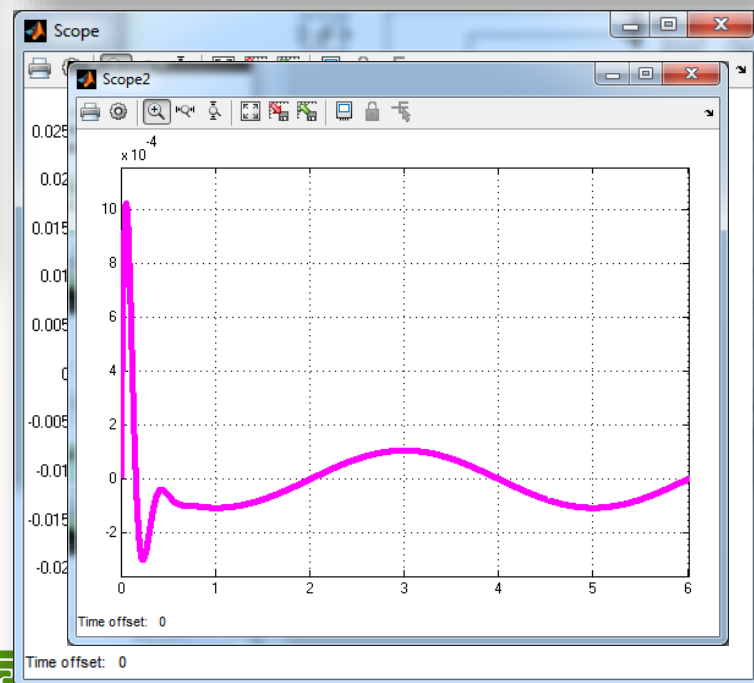
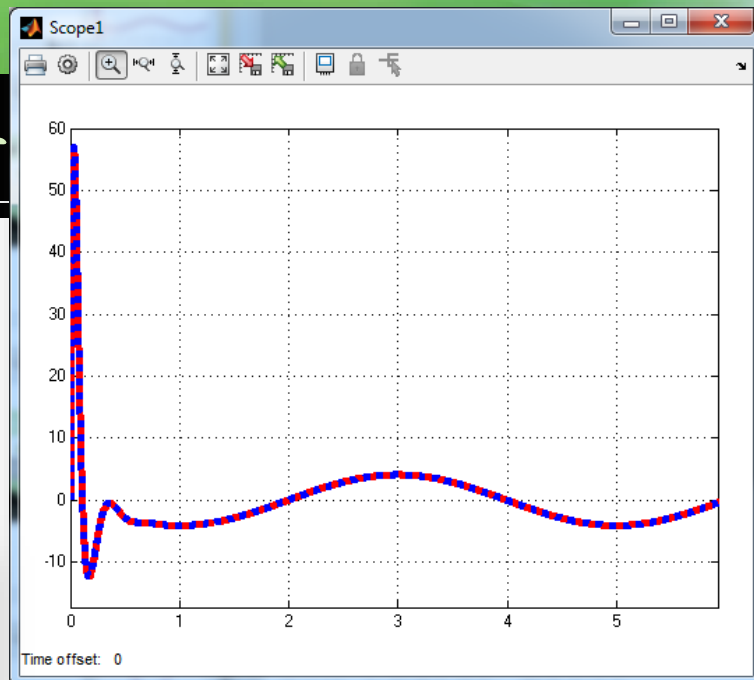
## 1.1.1 输入信号

### 无饱和环节



指令频率0.25Hz 幅值0.02

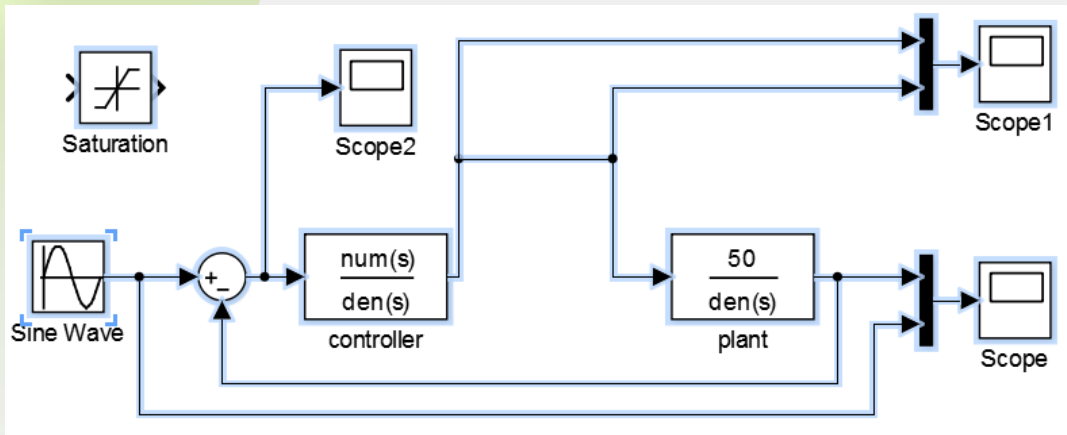
最大控制量60, , 最大偏差0.001



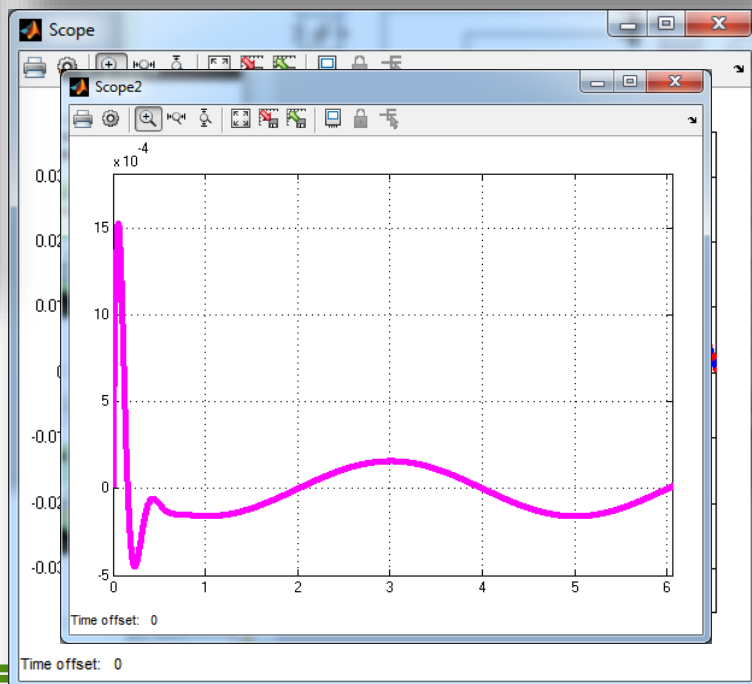
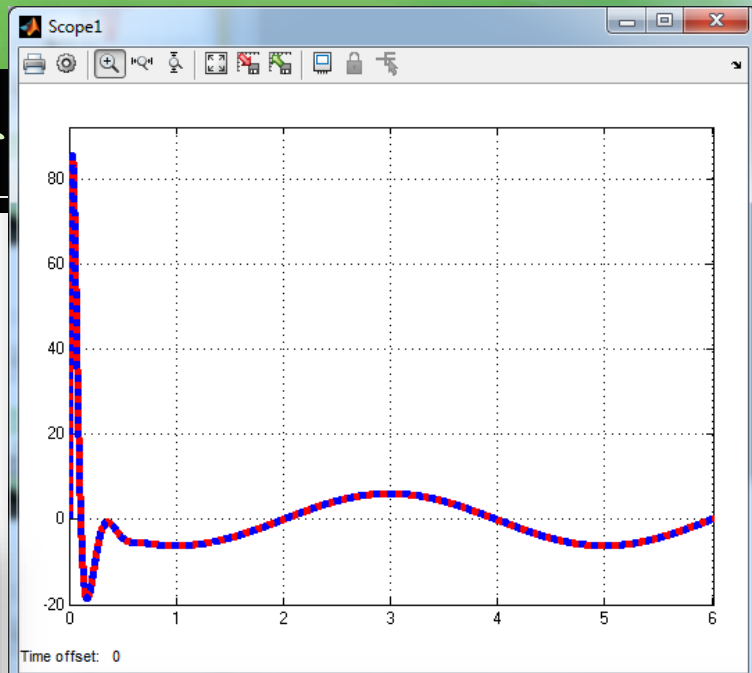


## 1.1.1 输入信号

### 无饱和环节

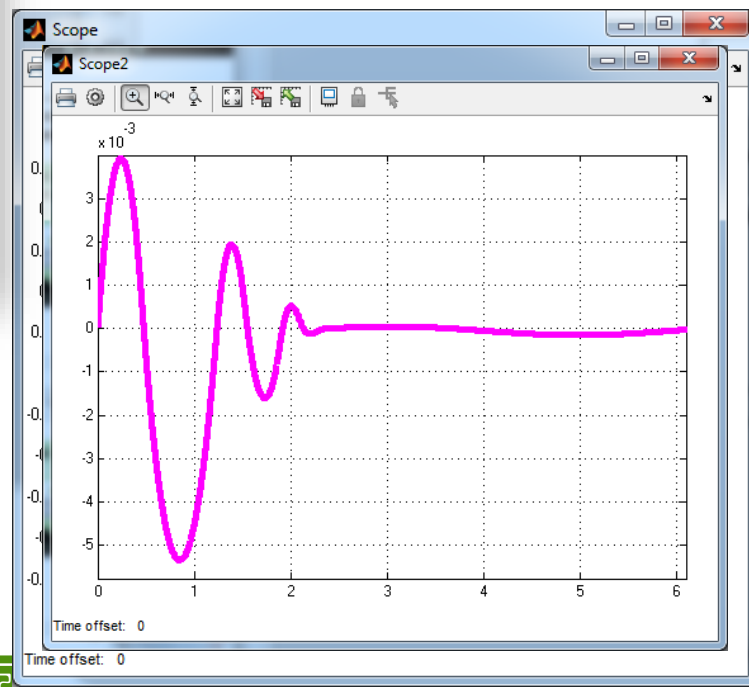


输入0.25Hz 幅值0.03,  
最大控制量80, 最大偏差0.0015





## 有饱和环节



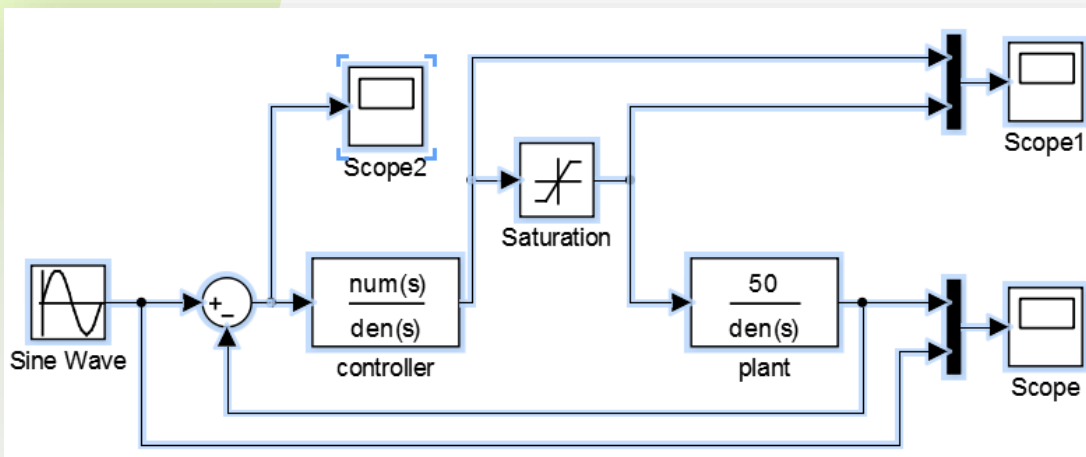
指令频率0.25Hz 幅值0.02

最大控制量200, , 最大偏差0.04

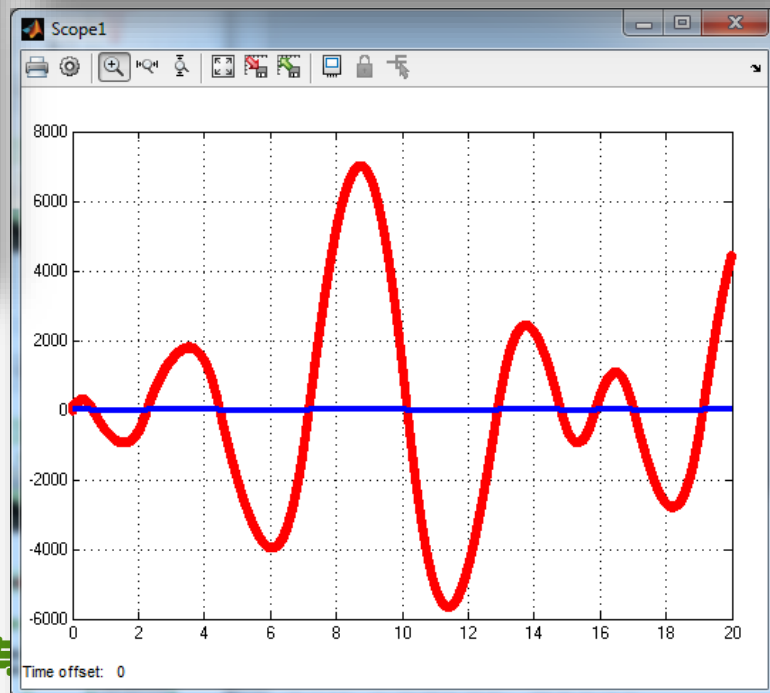
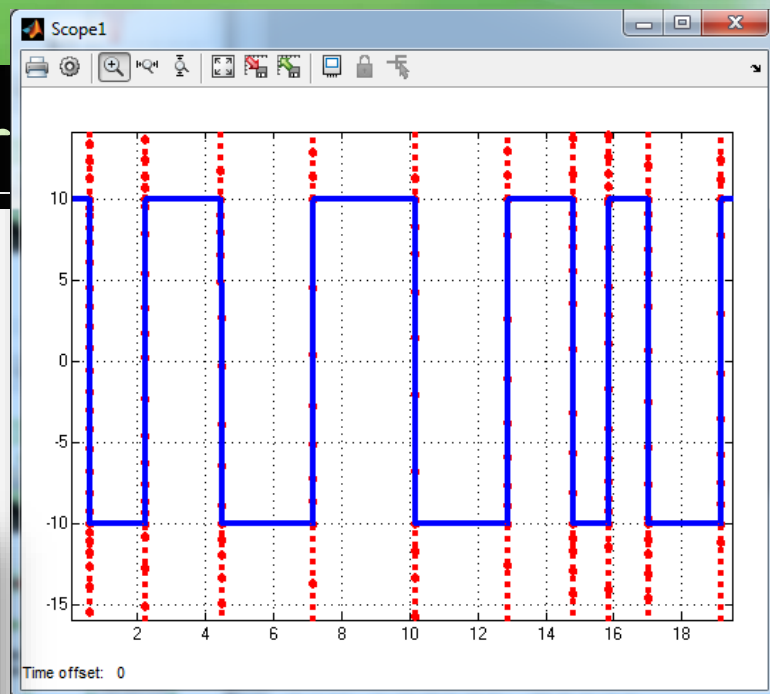


## 1.1.1 输入信号

### 有饱和环节

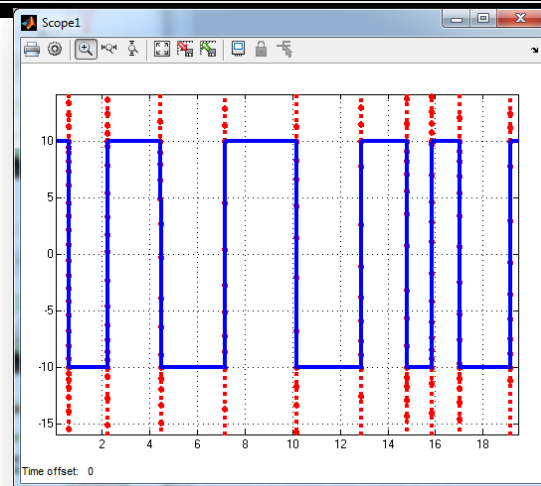
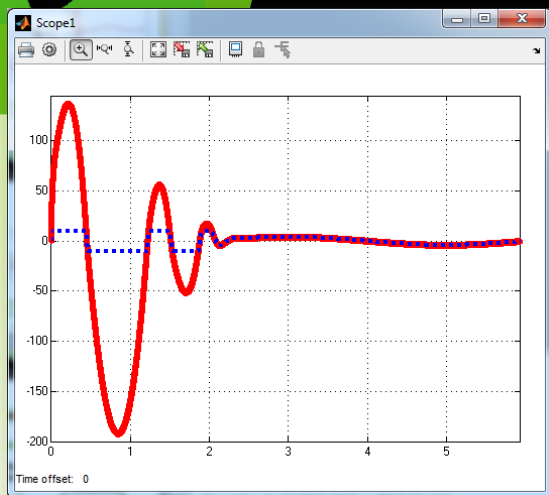


指令频率0.25Hz 幅值0.03,  
最大控制量7000, 不稳定

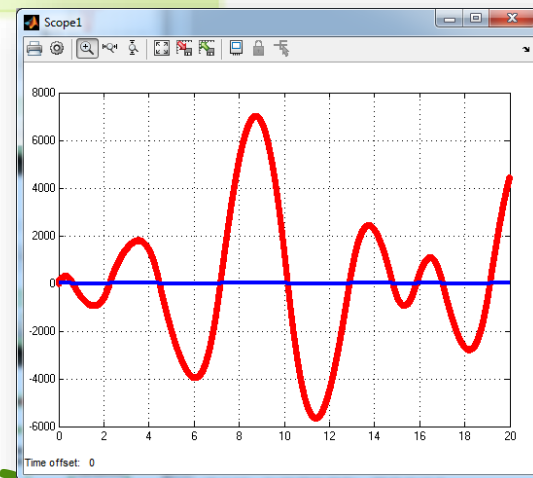
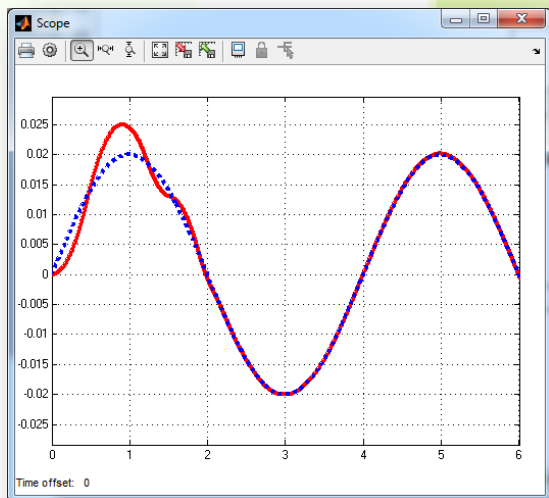




## 1.1.1 输入信号的分析



如何解决这一问题？





## 1.1.1 输入信号的分析

### 分析什么？分析的目的？

#### 分析典型输入信号的作用：



根据典型输入信号的幅值、变化率及二阶或高阶导数确定元件的参数；



根据典型输入信号的幅值、变化率及二阶或高阶导数计算跟踪误差，进行控制设计；



确定输入信号的频带以及系统的带宽。



## 1.1.1 输入信号的分析

### 如何进行分析?

系统设计时，一般选**典型信号**作为理想的输入来进行分析。

1

典型信号根据系统  
预定执行的任务来  
确定。

2

在确定典型输入信  
号时总是要对实际  
情况做一些简化，  
以便于分析和计算  
。



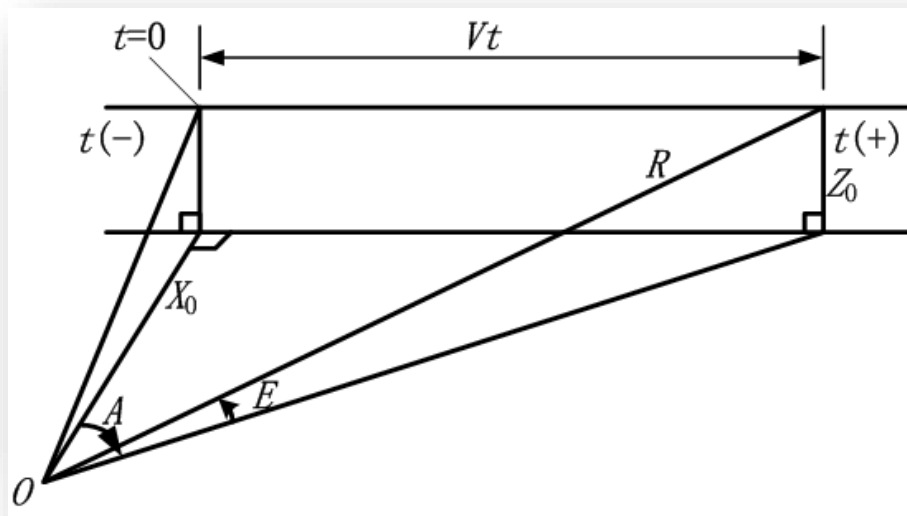


## 1.1.1 输入信号的分析

### 例1.1 跟踪直线飞行目标伺服系统的输入

1

#### 工作原理分析（雷达、激光武器）



假设目标做等高、等速直线飞行  
分析跟踪系统的方位角和俯仰角的变化规律



## 1.1.1 输入信号的分析

### 例1.1 跟踪直线飞行目标时间伺服系统的输入

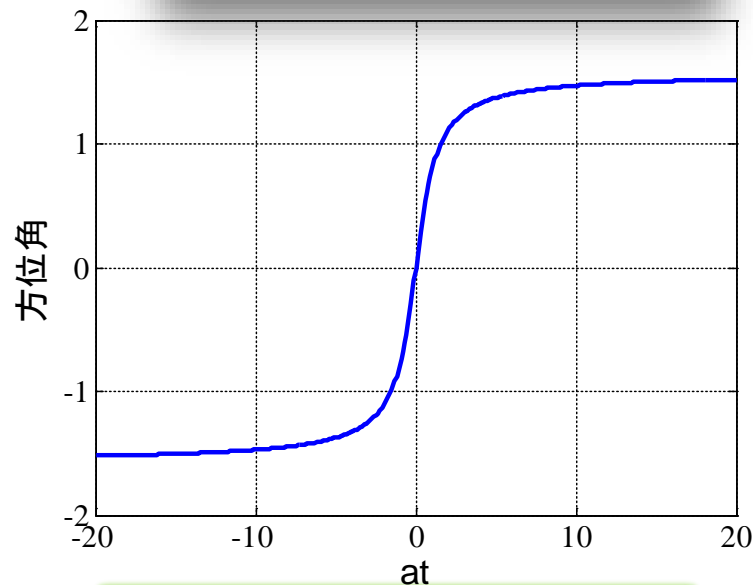
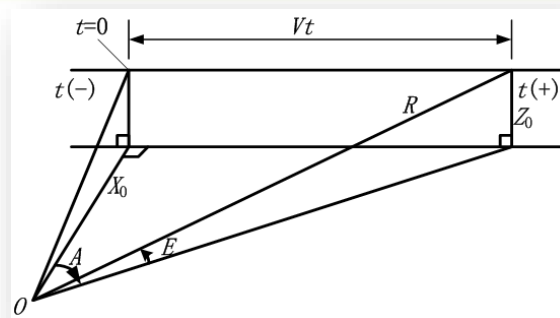
2

#### 输入信号特性分析

$$A = \arctan \frac{Vt}{X_0} = \arctan(at), \quad a = \frac{V}{X_0}$$

$$\frac{dA}{dt} = a \cos^2 A$$

$$\frac{dA^2}{dt} = -a^2 \sin 2A \cos^2 A$$



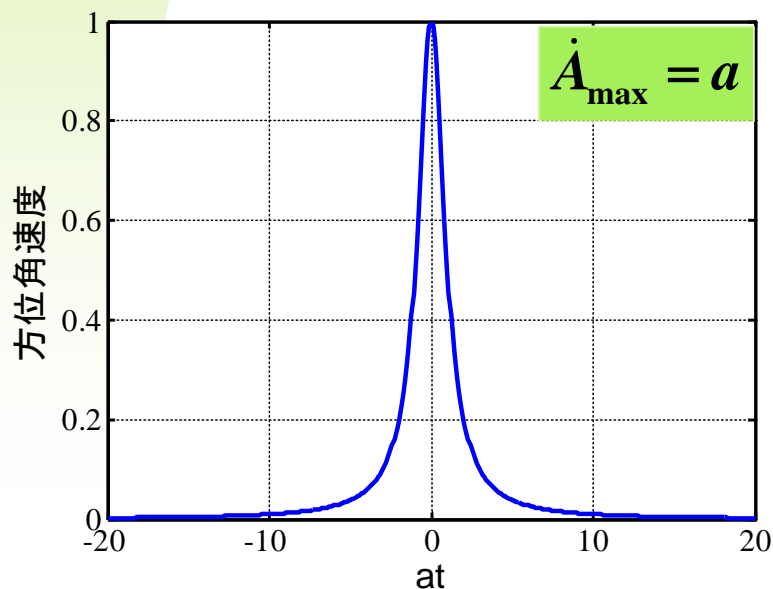
方位角变化曲线



## 1.1.1 输入信号的分析

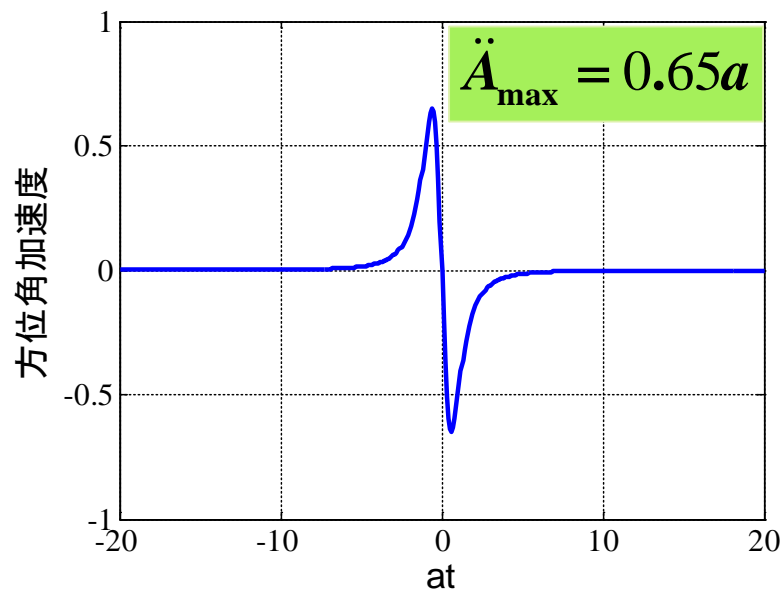
### 例1.1 跟踪直线飞行目标时伺服系统的输入

$$\frac{dA}{dt} = a \cos A$$



方位角速度曲线 ( $a=1$ )

$$\frac{d^2A}{dt^2} = -a^2 \sin 2A \cos^2 A$$



方位角加速度曲线 ( $a=1$ )



## 1.1.1 输入信号的分析

### 例1.1 跟踪直线飞行目标伺服系统的输入

3

#### 部件选择

- 驱动电机的额定速度和力矩；
- 传感器的量程和其它参数  
(最大速度等)。

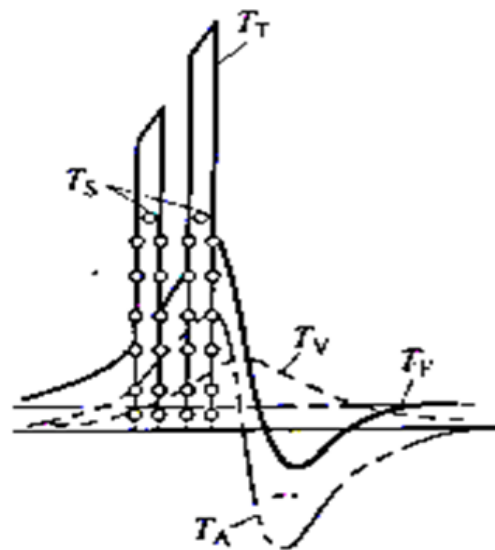


图 3-5 跟踪过程的力矩分量

$T_A$ —加速度力矩； $T_V$ —速度力矩； $T_F$ —摩擦力矩；  
 $T_S$ —冲击力矩； $T_T$ —总负载力矩

加速度力矩、速度力矩、摩擦力矩、冲击力矩、偏载力矩



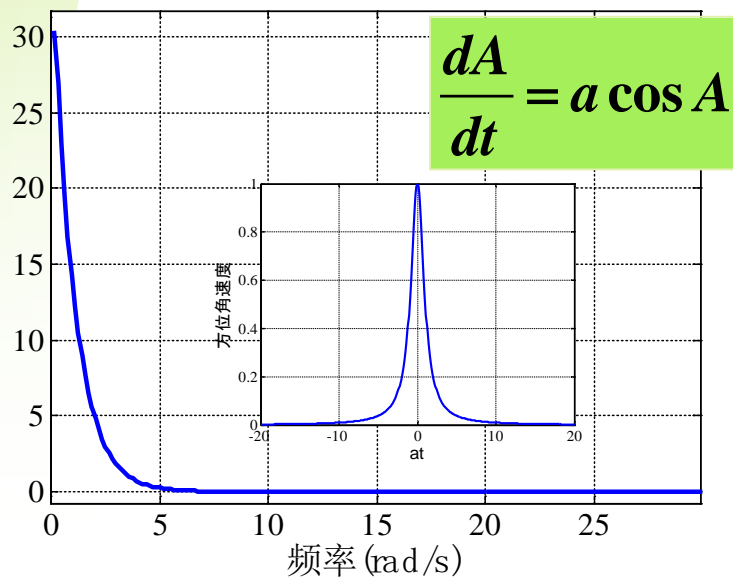
## 1.1.1 输入信号的分析

### 例1.1 跟踪直线飞行目标伺服系统的输入

4

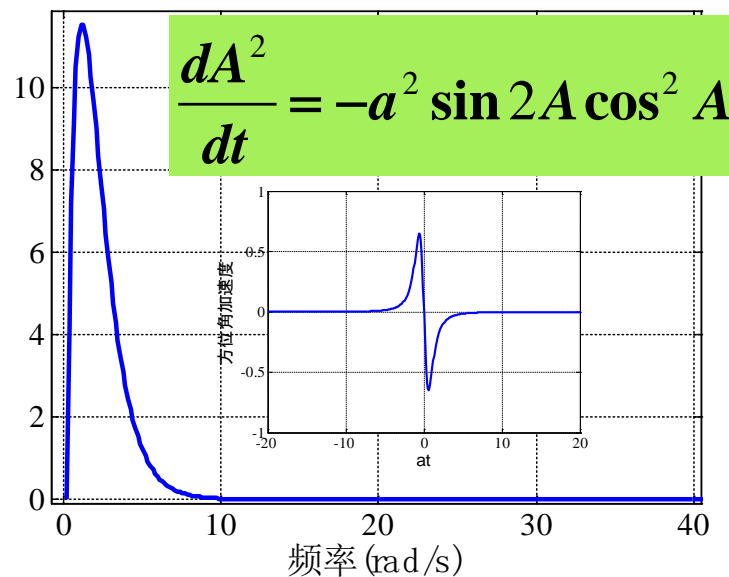
#### 频谱分析

方位角速度频谱特性



方位角速度频率特性

方位角加速度频谱特性



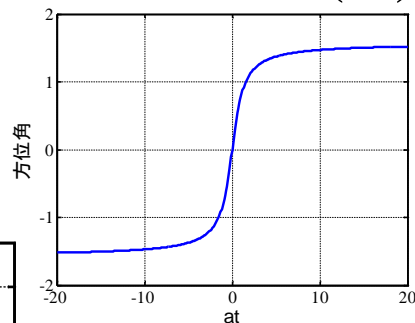
方位角加速度频率特性



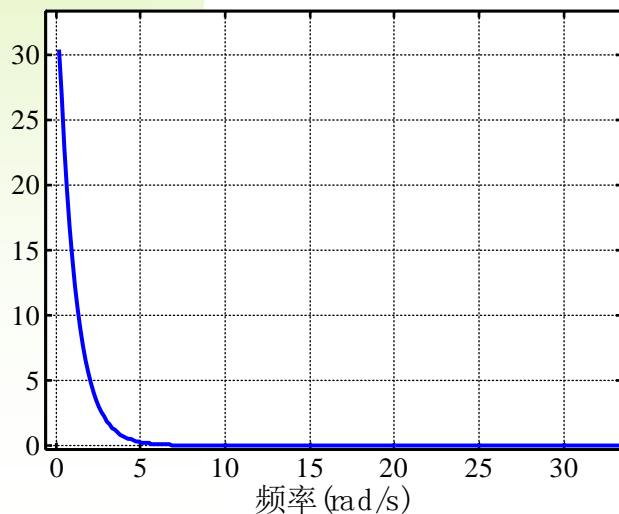
## 1.1.1 输入信号的分析

### 例1.1 跟踪直线飞行目标伺服系统的输入

$$A = \arctan(at)$$

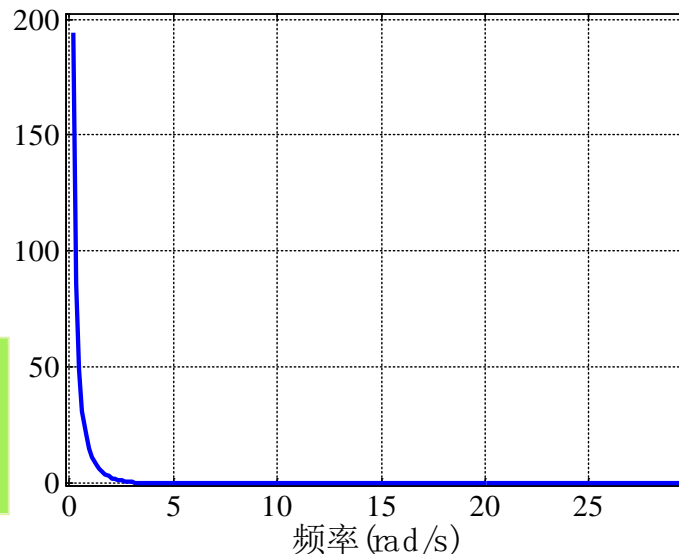


方位角速度频谱特性



方位角速度频率特性

方位角频谱特性



方位角的频率特性

$$|A(j\omega)| = \frac{|\dot{A}(j\omega)|}{\omega}$$

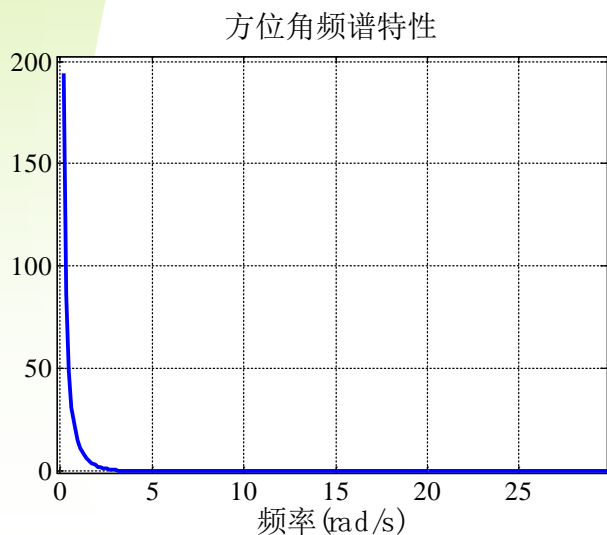


## 1.1.1 输入信号的分析

### 例1.1 跟踪直线飞行目标伺服系统的输入

4

#### 频谱分析



方位角典型输入信号的带宽  
为 $1.57\text{rad/s}$   $0.25\text{Hz}$

- 可以确定执行器件和传感器的带宽；
- 用于被控对象的模型化简；
- 用于确定闭环系统的带宽

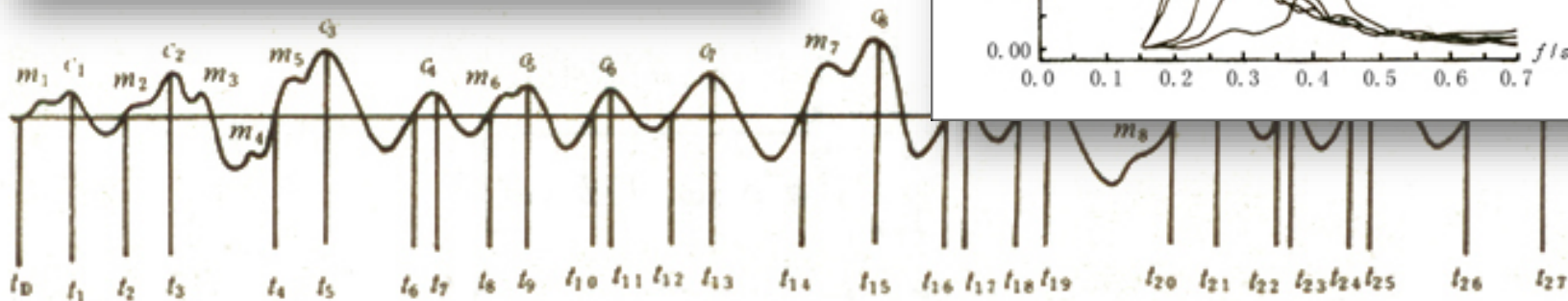
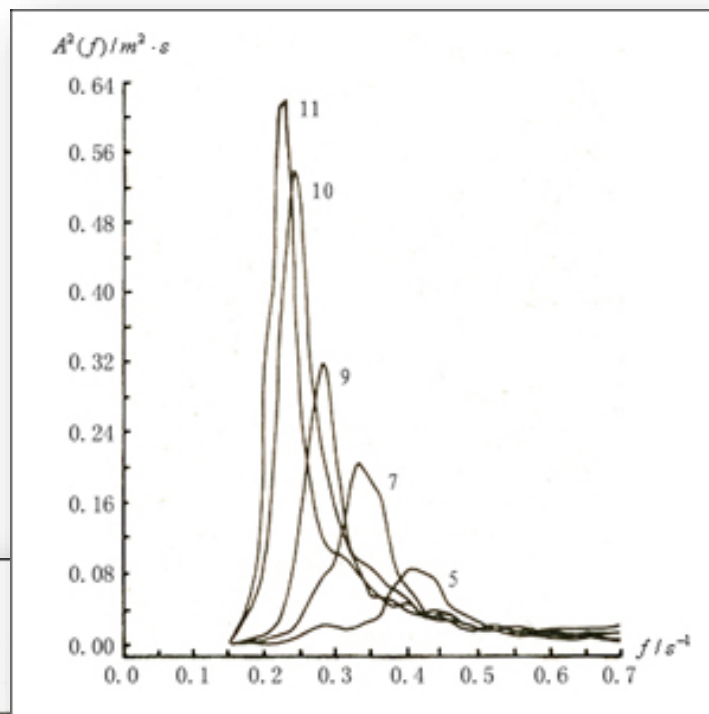
方位角的频率特性





## 1.1.1 输入信号的分析

### 例1.2 舰用随动系统的输入信号（克服海浪并跟踪目标）







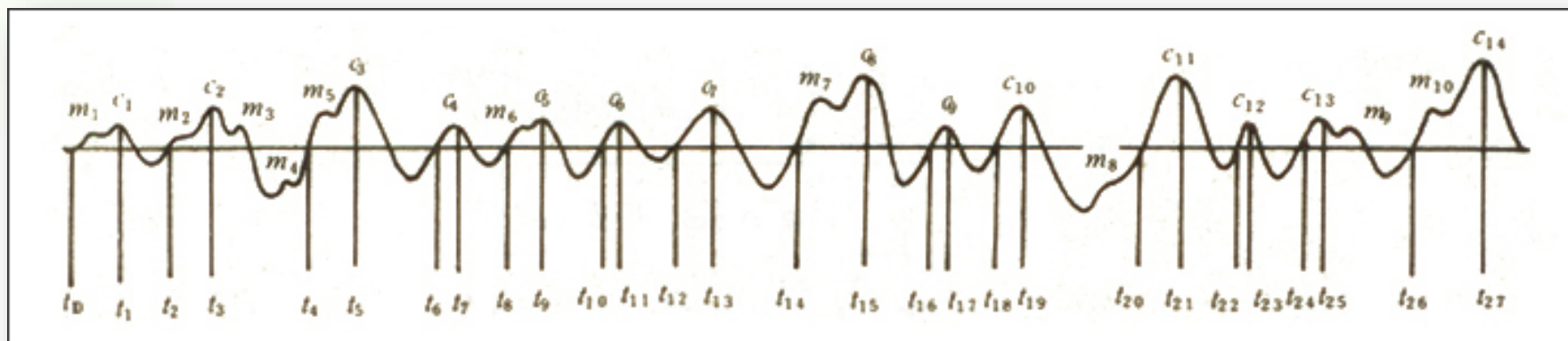
## 1.1.1 输入信号的分析

### 例1.2 舰用随动系统的输入信号（克服海浪并跟踪目标）

有些典型信号是测得的，并没有解析表达式，**如何处理进行分析？**



采用差分 and 离散DFT





Thank You !



**哈尔滨工业大学控制与仿真中心**