



第7章 调节系统的设计 (1)

——2023年春季学期

授课教师： 马 杰 (控制与仿真中心)
霍 鑫 (控制与仿真中心)
马克茂 (控制与仿真中心)
陈松林 (控制与仿真中心)



回顾篇

基本I型系统

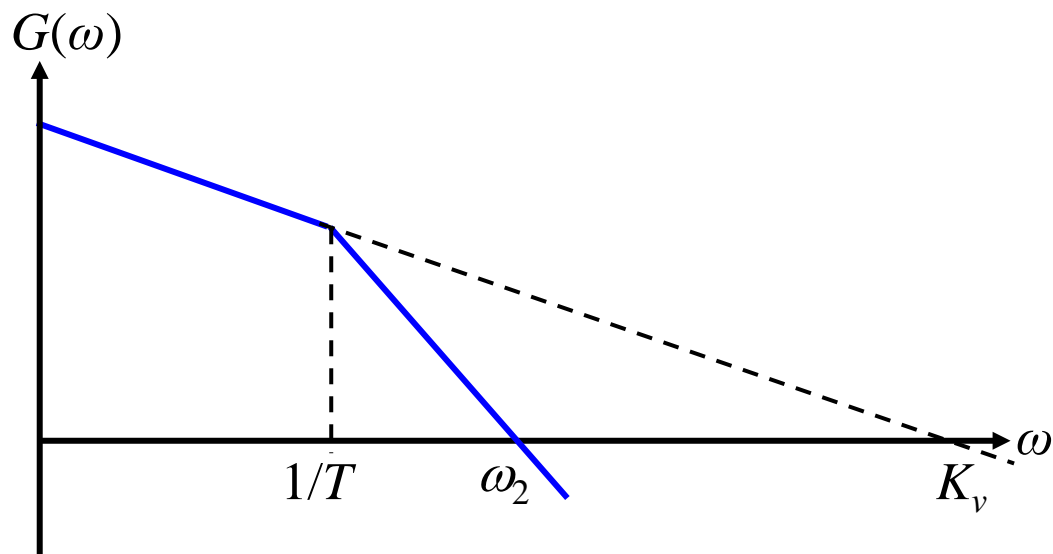
其开环频率特性为

$$G(s) = \frac{K_v}{s(Ts + 1)}$$

$$K = K_v \cdot T$$



$$K = 1$$



局限性：有时带宽和增益不能兼顾！

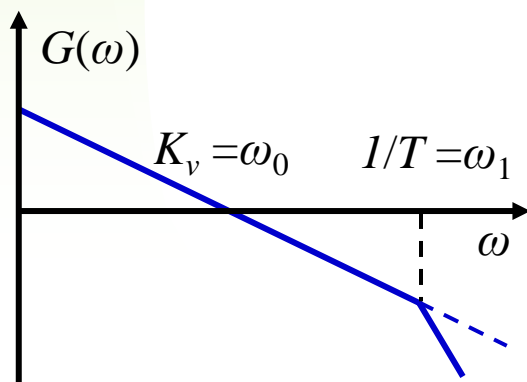


回顾篇

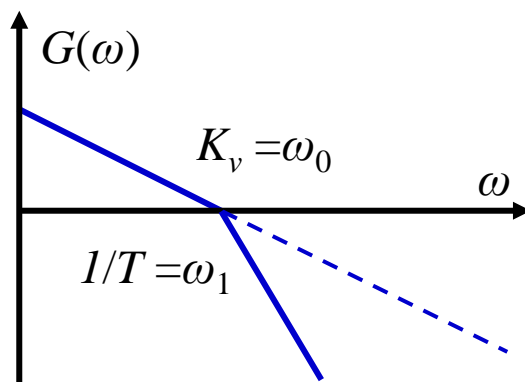
基本I型系统性能关系

$$G(s) = \frac{K_v}{s(Ts + 1)}$$

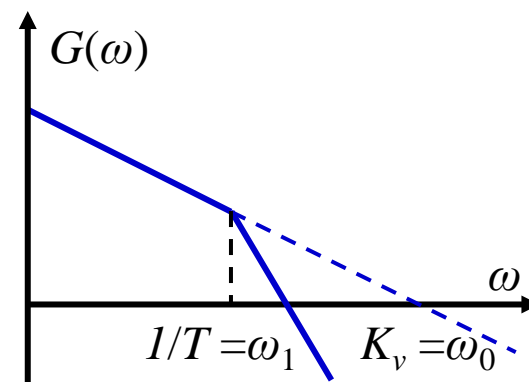
K	0.5	1	2
单位阶跃输入下输出的峰值	1.05	1.15	1.3
阻尼比 $1/2\sqrt{K}$	0.707	0.5	0.35
相位裕度	66°	52°	39°
闭环谐振峰值 M_p	≤ 1	1.15	1.5
闭环等效噪声带宽	$K_v\pi/2$	$K_v\pi/2$	$K_v\pi/2$



$K = 0.5$



$K = 1$



$K = 2$

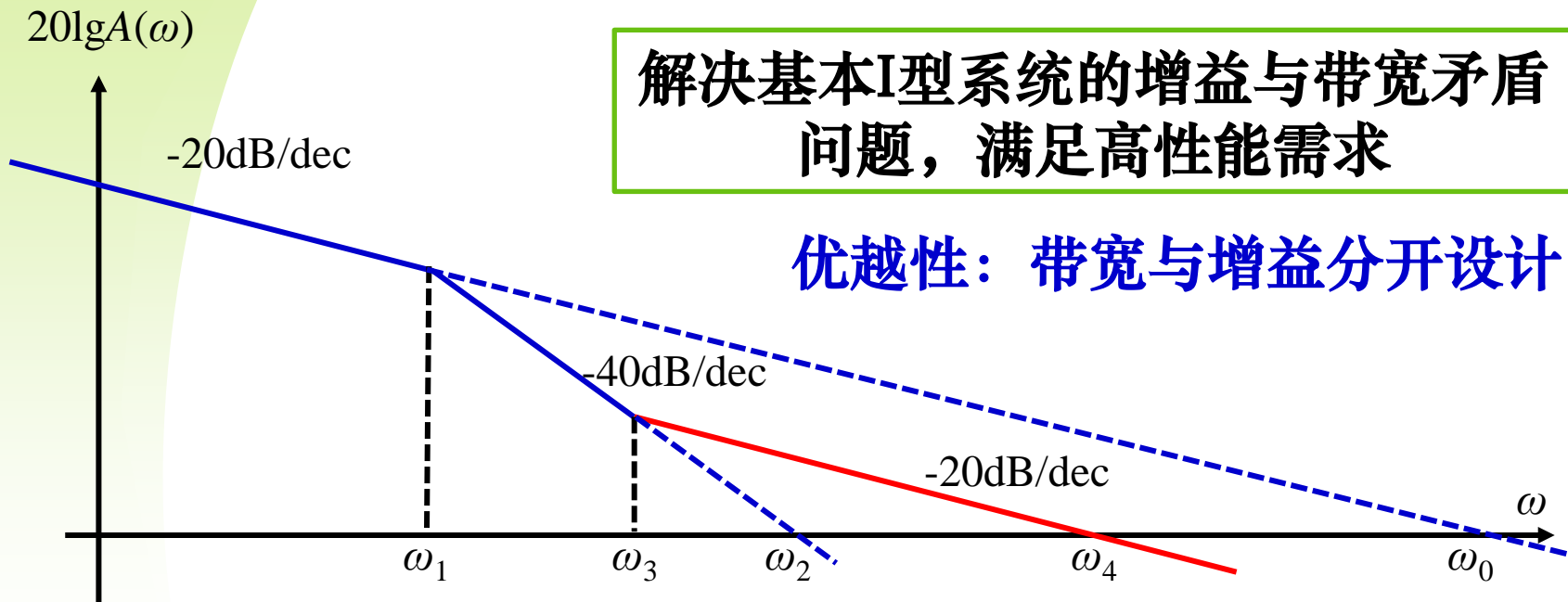


回顾篇

改进I型系统的特点

解决基本I型系统的增益与带宽矛盾问题，满足高性能需求

优越性：带宽与增益分开设计

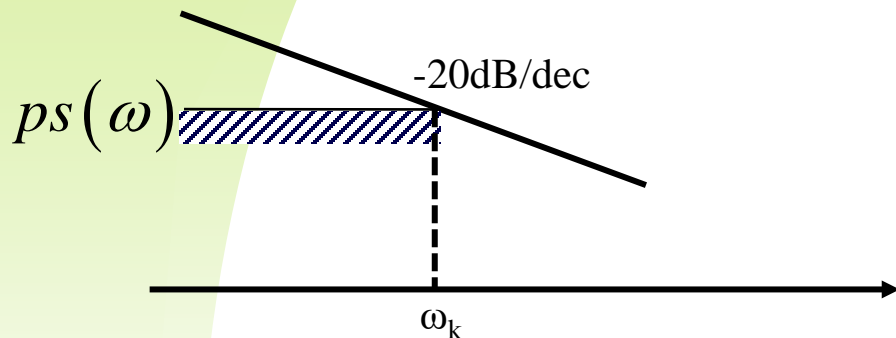


基于期望开环特性的设计方法：设计过程主要是根据性能要求和稳定性要求依次确定增益 ω_0 和转折频率 ω_1 和 ω_3

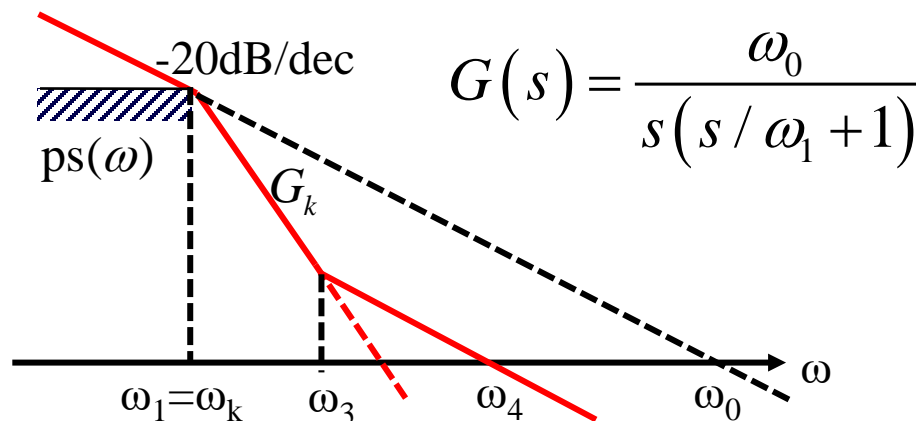


回顾篇

改进I型系统的设计要点



$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = C_0 r(t) + C_1 \frac{dr(t)}{dt} + \frac{C_2}{2!} \frac{d^2 r(t)}{dt^2} + \dots$$

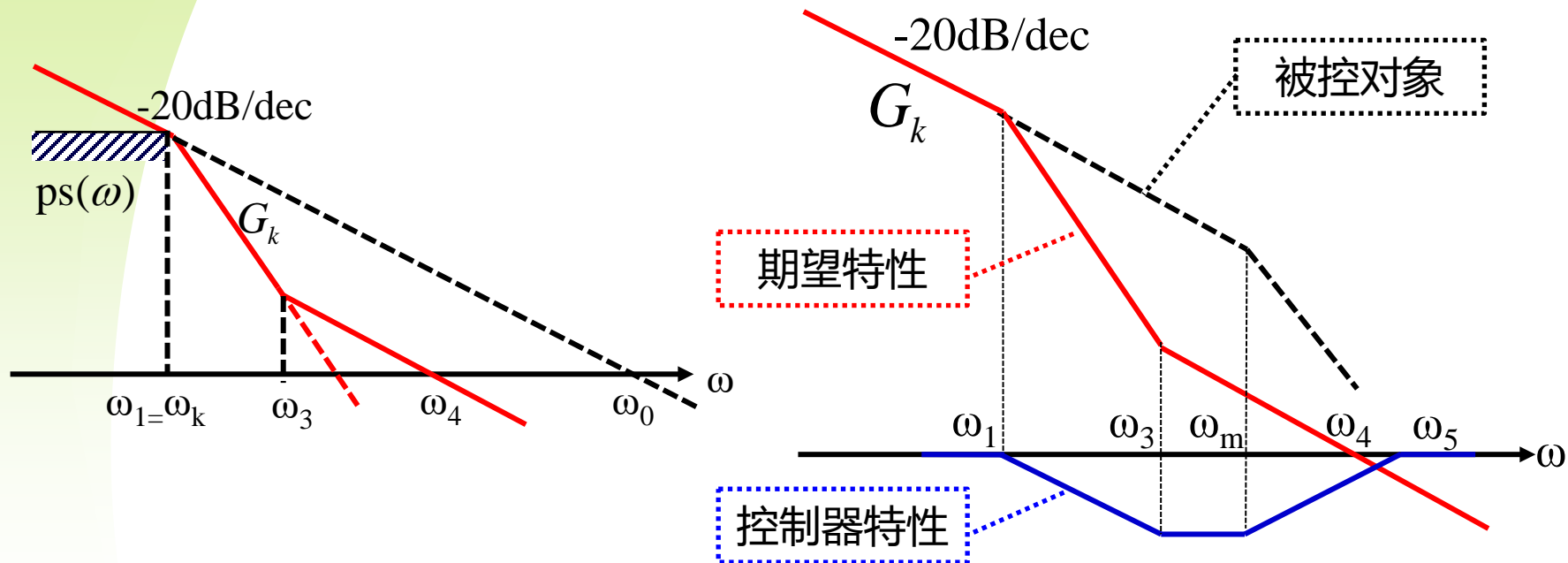


- 根据给定输入信号下的跟踪误差要求，利用动态误差系统法或者频率特性来确定系统的性能界，得到系统增益 ω_0 ；
- 再根据输入信号的频谱或频率（正弦）来确定性能界的宽度，得到第一个转折频率 ω_1 的最小值；
- 然后基于稳定裕度要求，由经验（试凑）确定第二个转折频率 ω_3 ；
- 这样就确定了期望的开环传递函数特性（包含了 $K(s)$ 和 $G(s)$ ）



回顾篇

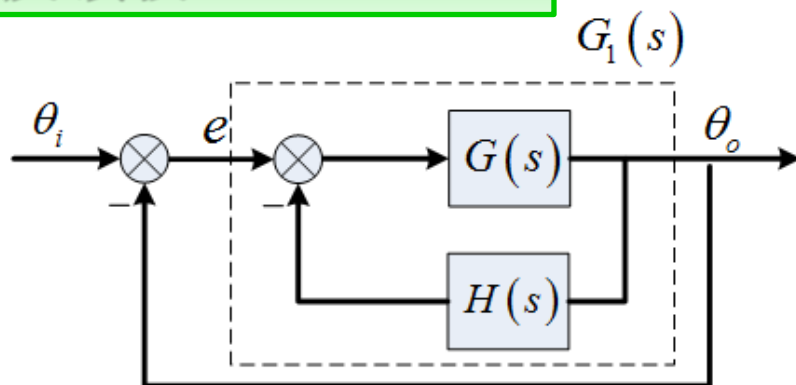
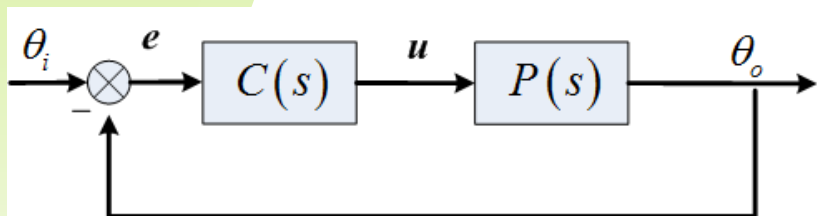
改进I型系统的设计要点



- 一旦系统的期望开环特性确定 (ω_0 , ω_1 和 ω_3)，并且被控对象的特性 $G(s)$ 已知，即可通过做差的方式获得串联校正控制器 $K(s)$ 的传递函数。



串联校正与反馈校正



- 被控对象模型已知，并且模型**摄动小时**，用串联校正；
- 对象模型未知，或者**摄动较大**时，并有输出信号导数可测时用反馈校正更好；

- 反馈校正实现（测速电机和微分网络）；
- 只改变 $GH \gg 1$ 的频率段（可能是中频段或低频段），含微分时，具有高通性；
- 不受对象变化影响，鲁棒性好。

- 反馈回路带来了稳定性问题；
- 测速增加成本，带来误差、延迟和噪声



回顾篇

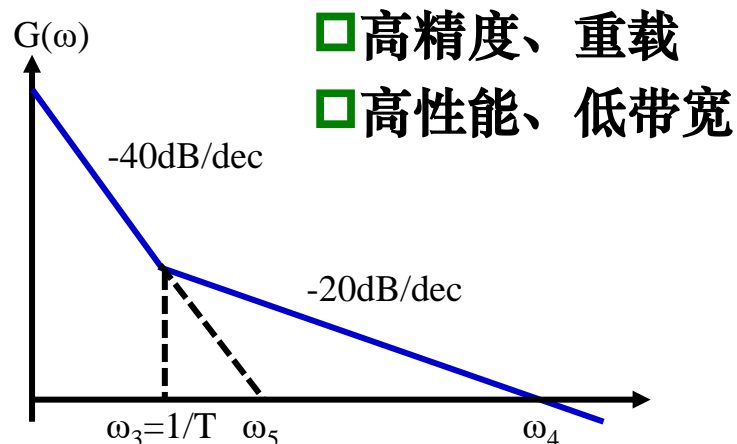
基本II型系统

$$G(s) = K_a \frac{(Ts + 1)}{s^2} \quad K_a = \omega_5^2 = \frac{1}{T} \cdot \omega_4$$

$$K = \omega_4 \cdot T = \omega_4 / \omega_3 = K_a T^2$$

$$1 < K \leq 2$$

设计的主要任务就是根据指标确定 K_a 和（或） T 。



$K = \omega_4 / \omega_3$	1	2
单位阶跃输入下输出的峰值	1.3	1.22
阻尼比	0.5	0.707
等效噪声带宽	$\sqrt{K_a}$	$1.06\sqrt{K_a}$



提升篇

简化

简化

相对小的可以忽略，相对大的能够去除

- 动态误差中的**高阶系数**与低阶系数相比可以忽略（系数小，导数小）
- 建模前，**相对比较小的系数**，如电感，阻尼系数对应的项可以忽略（相对于其他项的作用小），例如： $1/(Js+B) \rightarrow 1/Js$ ；
- 建模后，**相对小的时间常数**可以省略（若时间常数对应的转折频率超出了指令的频谱范围），例如： $1/(\tau_e s+1)(\tau_m s+1) \rightarrow 1/(\tau_m s+1)$ ；
- 传递函数中**分频段简化**，例如：若 $a(s) \gg b(s)$ 则 $a(s)+b(s) \approx a(s)$, $b(s)/a(s) \approx 0$ （低频 $s \rightarrow 0$ ，高频 $s \rightarrow \infty$ ）
- 多回路控制中，如果内回路带宽足够大，带宽内可以有 $G_{in}(s) \approx 1$

简化可以让控制设计的过程变得简单高效

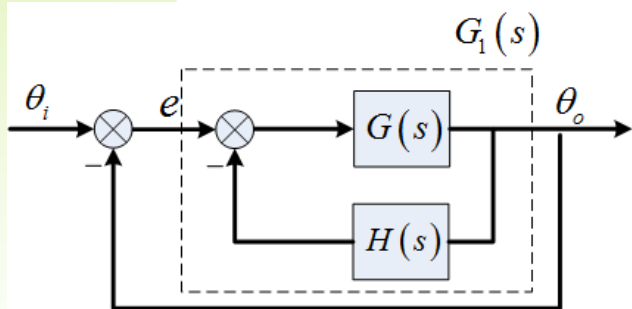


提升篇

为什么控制器设计后要进行校验

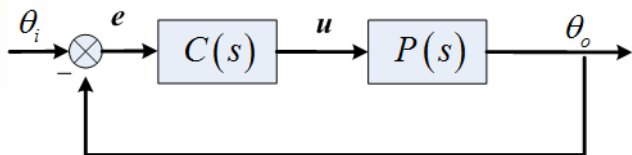
$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = C_0 r(t) + C_1 \frac{dr(t)}{dt} + \frac{C_2}{2!} \frac{d^2 r(t)}{dt^2} + \dots$$

$$e \approx \frac{1}{K_a} \ddot{r}$$



$$\frac{K}{(T_2 s + 1)} \leftarrow \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \Rightarrow \frac{K / T_1}{s(T_2 s + 1)}$$

$$G(s)H(s) \gg 1 \quad \Rightarrow \quad G_1(s) \approx \frac{1}{H(s)}$$



$$|G(j\omega)| = \frac{\theta_o}{e} \approx \frac{\theta_i}{e} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{e}{\theta_i} = \frac{1}{1+G} \approx \frac{1}{G}$$

各种等效简化处理（包括建模误差及简化处理，控制设计过程中的近似），对设计结果都有影响。另外，次要指标也需要验证；



拓展篇

如何成为一名优秀的控制工程师（1）

认知

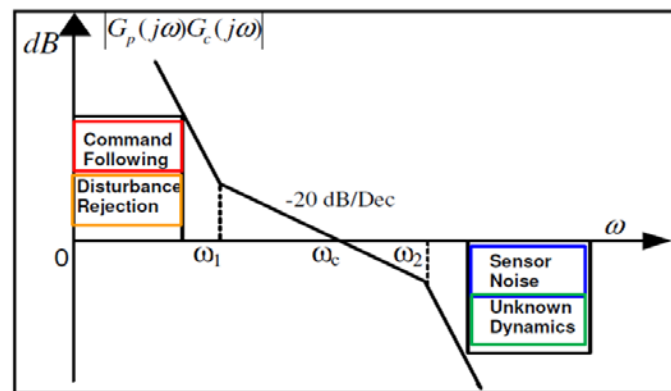
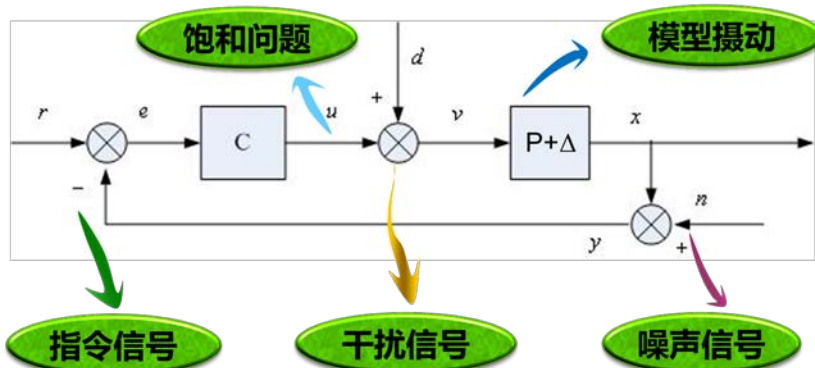
- 能够准确解读各种性能指标（全面性、合理性、可行性、性能/能力）
- 掌握控制理论和方法的能力边界（能分辨哪些是控制能解决的问题）
- 了解影响控制系统性能的各种因素（输入、扰动、噪声、摄动、非线性）
- 充分了解各种约束和限制（低频/高频、时域/频域、理论/现实）
- 善于发现各种可利用的信息（信号/模型、直接/间接、理论/经验）
- 能够准确评判控制系统方案优劣（结构形式、部件选型、控制方法）
- 能够看清给定被控对象特点（线性、干扰、耦合、摄动、谐振）
- 熟悉多种设计方法及其适用条件（开/闭、串/反、PID/DOB/ADRC）



开新篇（知识地图）

在具体系统中如何应用学到的方法

前
18
次
课



知识的应用
一般到特殊

因地制宜
活学活用

伺服系统

调节系统

后
6
次
课



学习目标

本节课需要掌握的内容

- 掌握调节系统的定义和特点;
- 掌握调节系统常用控制规律PID的作用和特点;
- 了解调节系统的类型和特点;
- 掌握几种设计PID控制律的方法。



Contents

- A1 调节系统的特点及控制规律
- A2 调节系统的类型
- A3 PID系统的设计
- A4 过程控制系统的设计



7.1 调节系统的特点及控制规律

7.1.2

调节的定义及特点

7.1.1

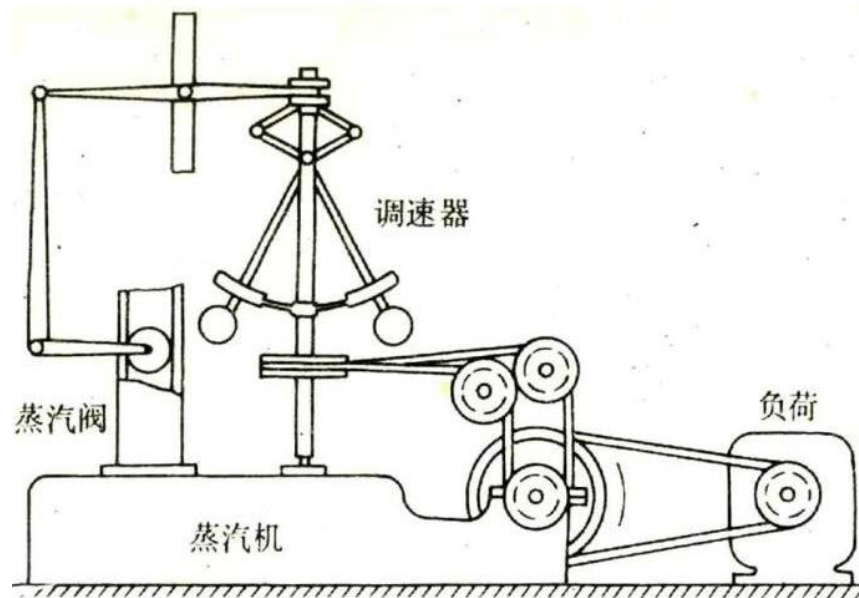
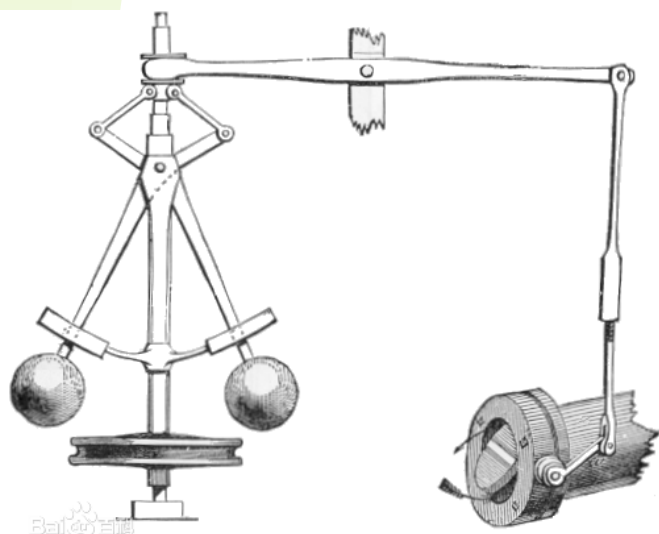
调节系统的控制规律



7.1.1 调节系统的定义及特点

调节系统的定义 | 调节系统的特点

调节系统是将被调量（系统的输出量）保持设定值上的控制系统。



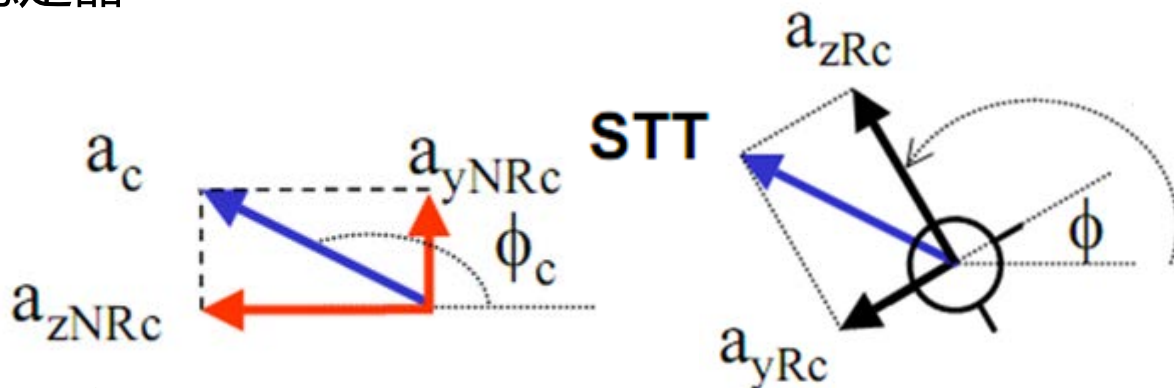


7.1.1 调节系统的定义及特点

调节系统的定义 | 调节系统的特点

调节系统是将被调量（系统的输出量）保持设定值上的控制系统。

- 家用电器
- 电压调节、电流调节
- 航向保持、火炮稳定器
- 工业过程控制
-





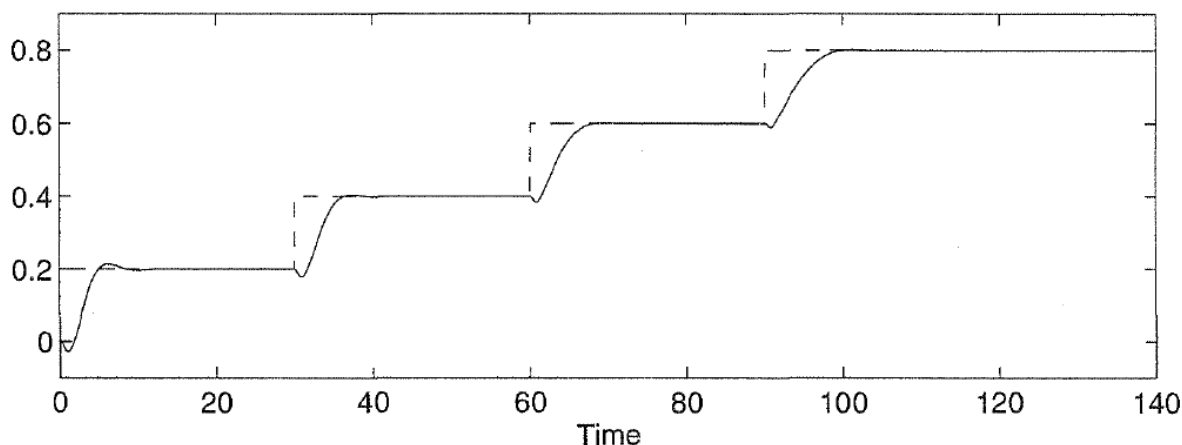
7.1.1 调节系统的定义及特点

调节系统的定义 | 调节系统的特点

- 输出量保持某个设定值
- 通常带宽较窄
- 主要考虑稳定性和抑制扰动

伺服系统:

跟踪参考输入信号，有跟踪误差要求，对增益的数值有确定的要求，当增益与带宽、稳定裕度等指标存在矛盾时，需要进行校正。



调节系统控制输入的形式



7.1 调节系统的特点及控制规律

7.1.1 调节的定义及特点

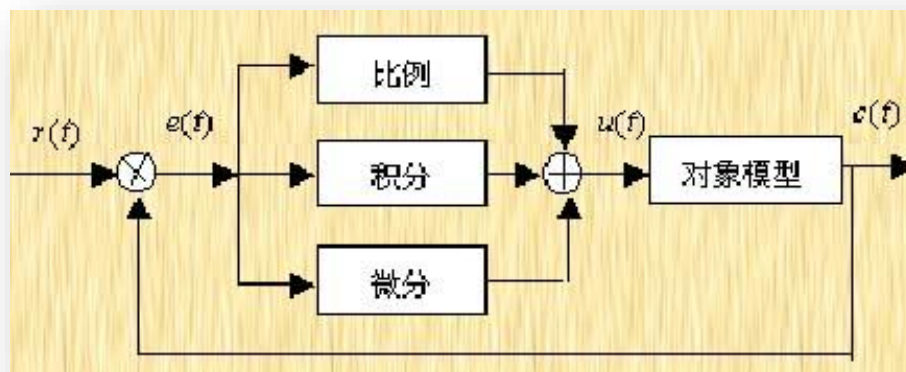
7.1.2 调节系统的控制规律



7.1.2 调节系统的控制规律

常用控制规律 | PID特点 | P的作用 | PD的作用 | I的作用 | PID的作用

- 比例 (P)
- 积分 (I)
- 比例-微分 (PD)
- 比例-积分 (PI)
- 比例-积分-微分 (PID)





为什么没有纯D的控制器

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂



7.1.2 调节系统的控制规律

常用控制规律 | **PID特点** | P的作用 | PD的作用 | I的作用 | PID的作用

- **原理简单**，调参方便，仅三个参数，物理意义清晰；
- **实现方便**，按PID控制规律进行工作的控制器早已商品化，无论是早期用模拟器件实现，还是现在通过计算机编程实现，都非常容易；





7.1.2 调节系统的控制规律

常用控制规律 | PID特点 | **P的作用** | PD的作用 | I的作用 | PID的作用

在控制系统的设计与校正中，PID控制规律的优越性是明显的，它的基本原理却比较简单。基本PID控制规律可描述为

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s$$

这里 K_P 、 K_I 、 K_D 为常数。设计者的问题是如何恰当地组合这些元件或环节，确定连接方式以及它们的参数，以便使系统全面满足所要求的性能指标。

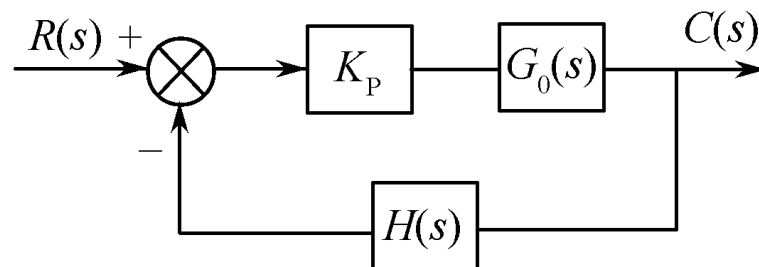


7.1.2 调节系统的控制规律

常用控制规律 | PID特点 | **P的作用** | PD的作用 | I的作用 | PID的作用

比例控制器的传递函数为

$$G_c(s) = K_P$$



式中， K_P 称为比例系数或增益（视情况可设置为正或负）。

比例控制器作用于系统，系统的特征方程

$$D(s) = 1 + K_P G_0(s) H(s) = 0$$



7.1.2 调节系统的控制规律

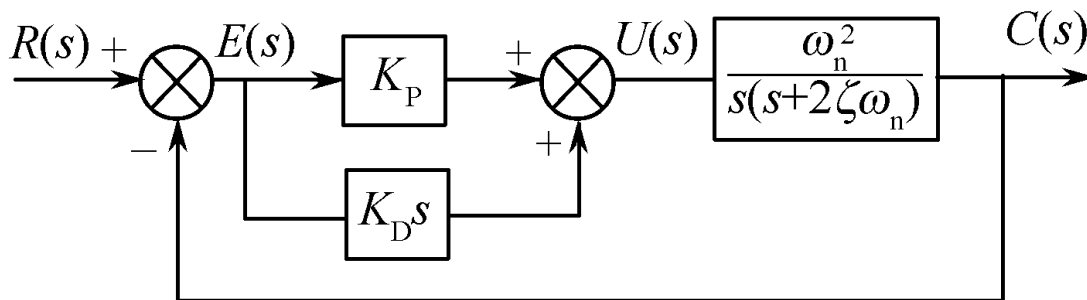
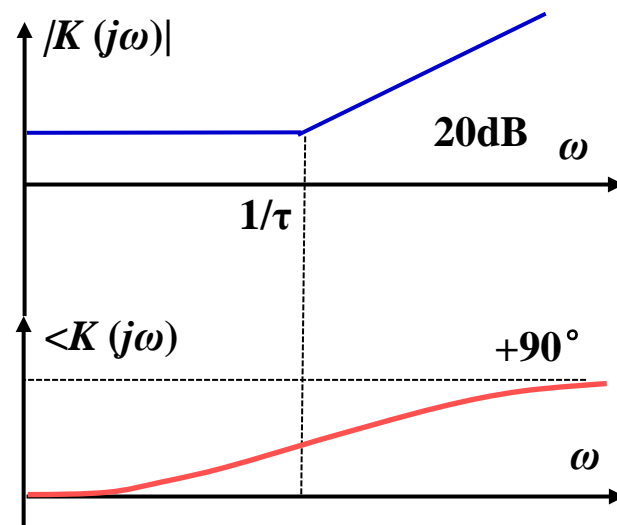
常用控制规律 | PID特点 | P的作用 | **PD的作用** | I的作用 | PID的作用

比例微分控制的传递函数为

$$G_c(s) = K_P + K_D s$$

控制器的输出信号:

$$u(t) = K_P e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt}$$



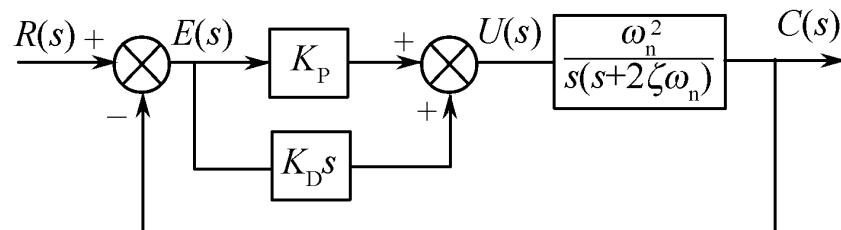


7.1.2 调节系统的控制规律

常用控制规律 | PID特点 | P的作用 | **PD的作用** | I的作用 | PID的作用

原系统的开环传递函数:

$$G_0(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s + 2\zeta\omega_n)}$$



串入PD控制器后系统的开环传函:

$$G(s) = G_c(s)G_0(s) = \frac{\omega_n^2 (K_P + K_D s)}{s(s + 2\zeta\omega_n)}$$

串入PD控制器后系统的闭环传递函数:

$$\frac{G_c(s)G_0(s)}{1+G_c(s)G_0(s)} = \frac{\omega_n^2 (K_P + K_D s)}{s^2 + 2(\zeta + \frac{\omega_n K_D}{2})\omega_n s + \omega_n^2 (K_P)}$$

增大阻尼

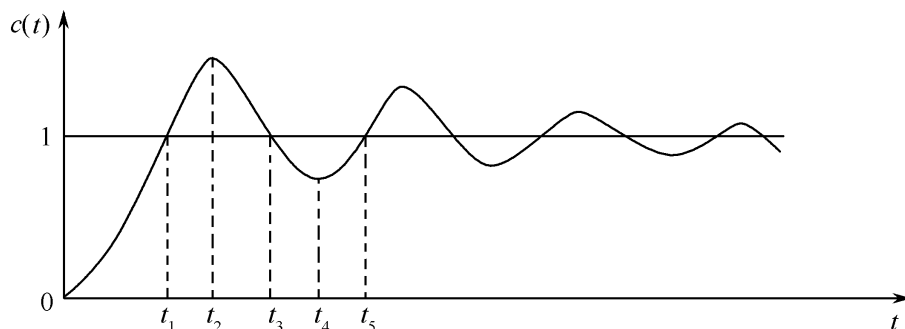
改变带宽



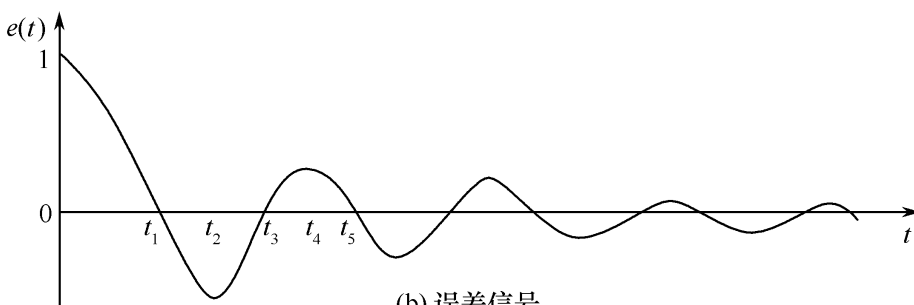
7.1.2 调节系统的控制规律

常用控制规律 | PID特点 | P的作用 | **PD的作用** | I的作用 | PID的作用

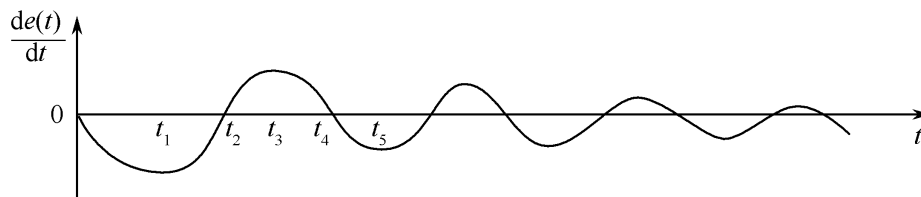
比例和微分作用的波形图



(a) 单位阶跃响应



(b) 误差信号



(c) 误差导数信号

增大比例可以减小稳态误差，提高响应速度，但会增大超调量和增加振荡幅值和次数。

增大微分可以减小振荡和超调，但会减慢响应速度，会使系统对噪声更敏感。

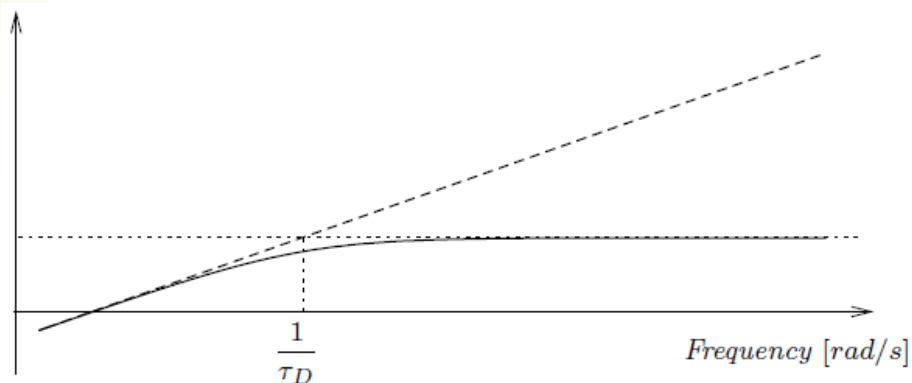


7.1.2 调节系统的控制规律

常用控制规律 | PID特点 | P的作用 | **PD的作用** | I的作用 | PID的作用

微分控制反映误差的变化率，只有当误差随时间变化时，微分作用才会对系统起作用，而对**无变化或缓慢变化的对象作用很弱**，因此微分控制在任何情况下不能单独地与被控对象串联使用，而只能构成PD或PID控制。

另外，微分控制有物理实现问题和放大噪声信号的缺点。



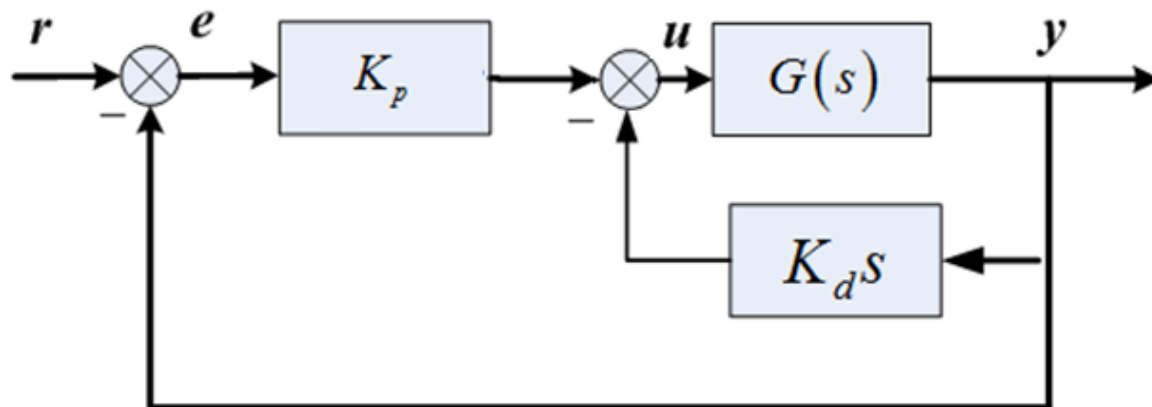
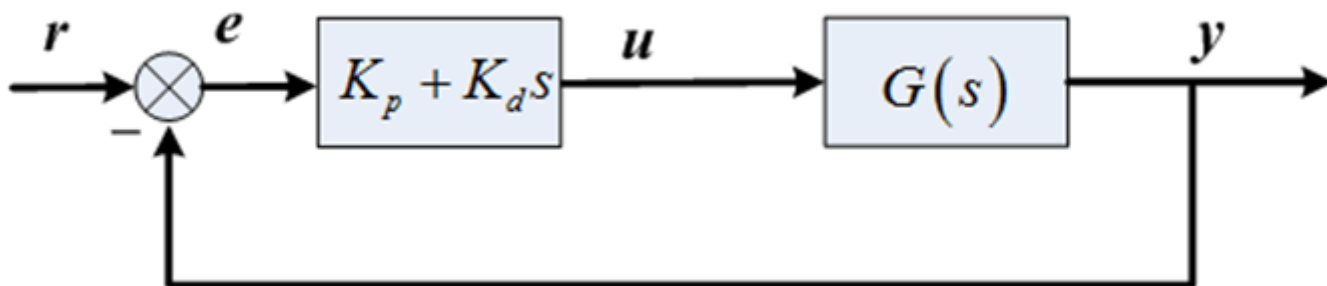
$$\frac{K_D s}{\tau_D s + 1}$$

保证可实现性，降低高频噪声的影响。



7.1.2 调节系统的控制规律

常用控制规律 | PID特点 | P的作用 | **PD的作用** | I的作用 | PID的作用





关于两种结构，下列叙述正确的是

A

两个框图是完全等价的

B

第二种可以用传感器来实现微分

C

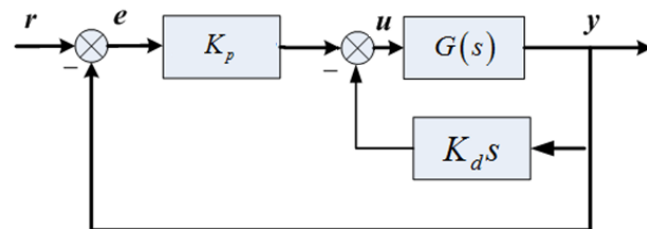
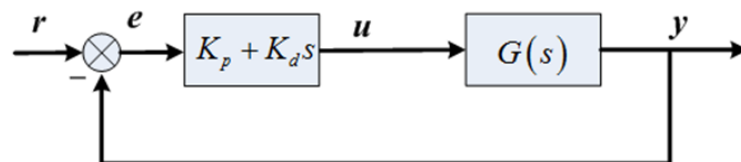
第二种对指令突变不敏感

D

第二种有避免饱和的作用

E

第二种更容易放大噪声



提交



7.1.2 调节系统的控制规律

常用控制规律 | PID特点 | P的作用 | PD的作用 | **I的作用** | PID的作用

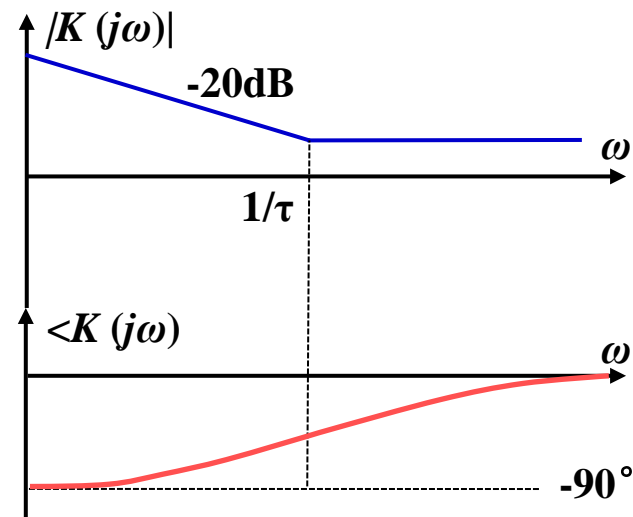
积分控制的传递函数

$$G_c(s) = \frac{K_I}{s}$$

PI控制器的传递函数为

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s} = \frac{K_P(s + K_I / K_P)}{s}$$

I的作用是提高系统的型别，减小系统的静差，还可以降低系统的开环穿越频率，压低系统带宽。





7.1.2 调节系统的控制规律

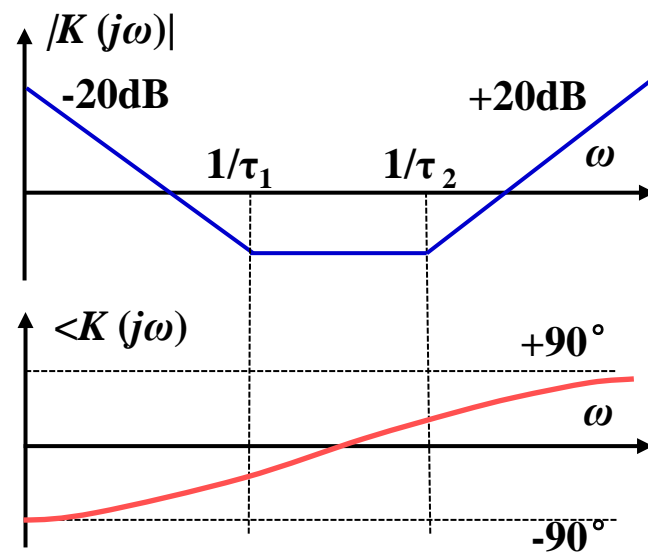
常用控制规律 | PID特点 | P的作用 | PD的作用 | I的作用 | **PID的作用**

PID控制器是比例、积分、微分三种控制作用的叠加，又称为比例-微分-积分校正，其传递函数可表示为

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s$$

可改写为：

$$G_c(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$





7.1.2 调节系统的控制规律

常用控制规律 | PID特点 | P的作用 | PD的作用 | I的作用 | **PID的作用**

$$G_c(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

式中, $T_D = \frac{K_D}{K_P}$ 称为PID控制器的微分时间;

$T_I = \frac{K_P}{K_I}$ 称为PID控制器的积分时间。

实际工业中PID控制器的传递函数为

$$G'_c(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{1 + \tau_D s} \right)$$



7.1.2 调节系统的控制规律

常用控制规律 | PID特点 | P的作用 | PD的作用 | I的作用 | **PID的作用**

例： 对一个三阶对象模型

$$G_o(s) = \frac{1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1}$$

单采用PID控制，用MATLAB分析一下不同参数变化下闭环系统的单位阶跃响应曲线。

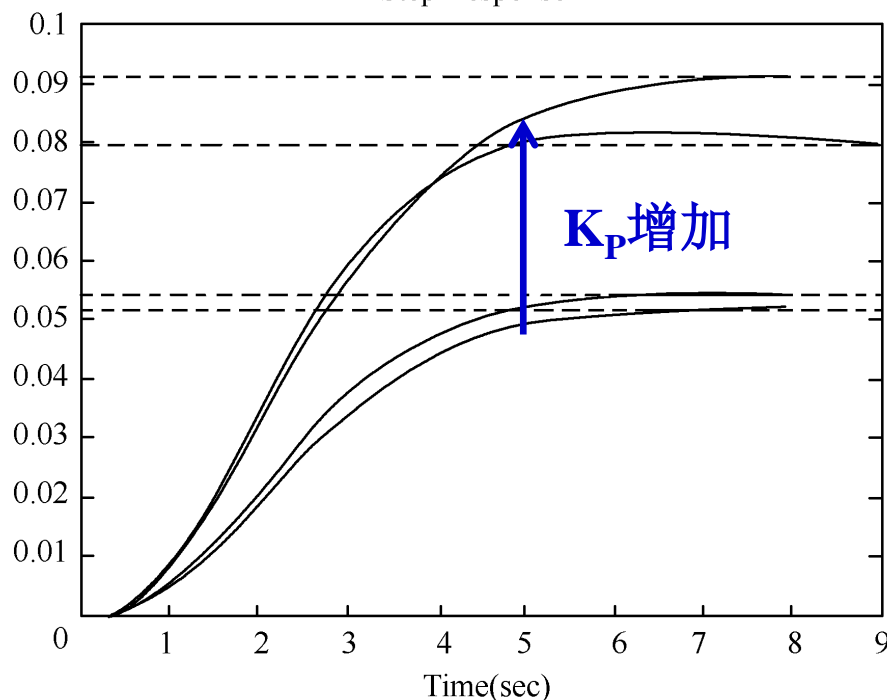


7.1.2 调节系统的控制规律

常用控制规律 | PID特点 | P的作用 | PD的作用 | I的作用 | **PID的作用**

$$G_o(s) = \frac{1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1}$$

Step Response



$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

P控制

随着 K_p 的值增大，系统响应速度也相应增快，但当 K_p 增大到一定值，闭环系统将趋于不稳定。

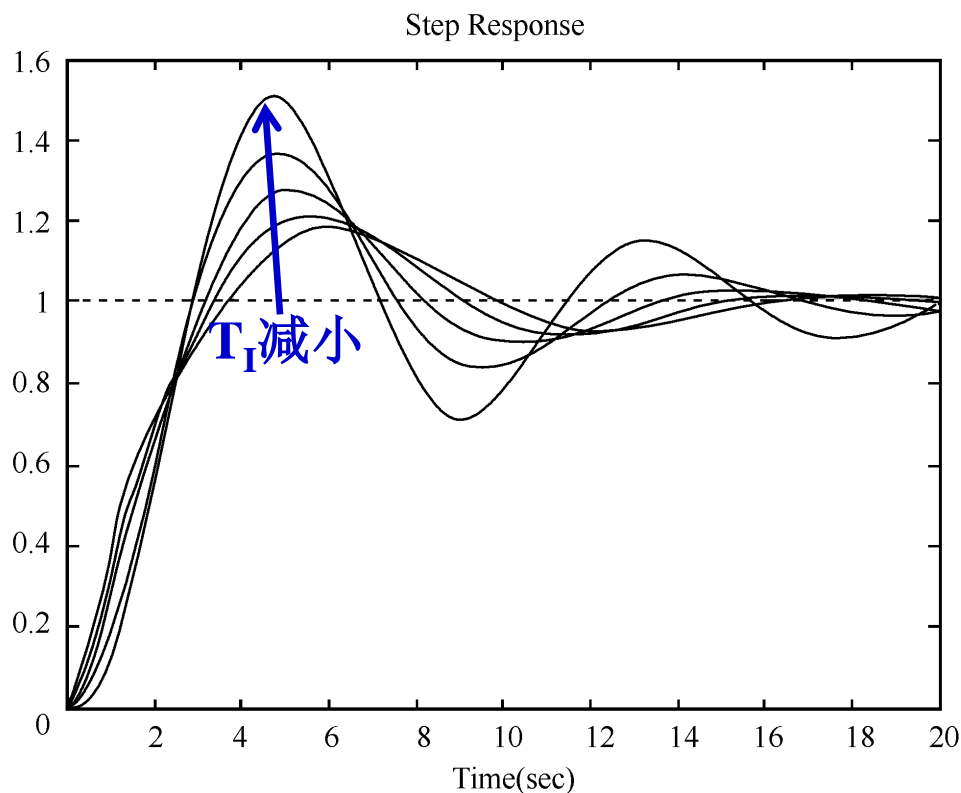


7.1.2 调节系统的控制规律

常用控制规律 | PID特点 | P的作用 | PD的作用 | I的作用 | **PID的作用**

$$G_o(s) = \frac{1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1}$$

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$



PI控制

将 K_p 值固定，采用不同 T_I 值下的闭环系统阶跃响应。随着 T_I 值减小，系统的响应速度将加快，系统的振荡也将加剧。

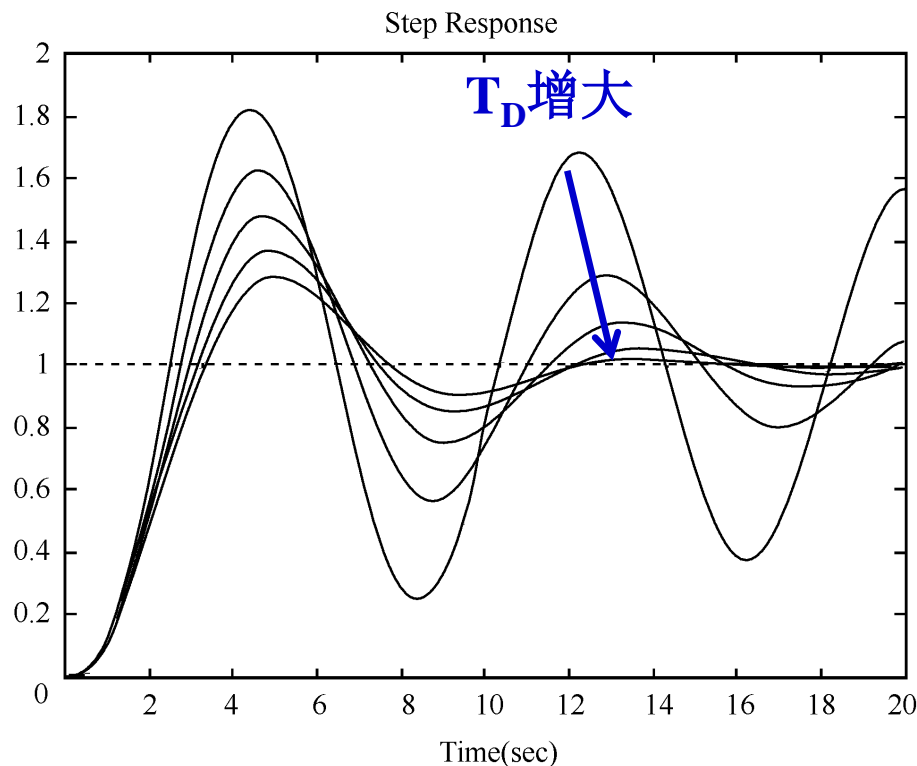


7.1.2 调节系统的控制规律

常用控制规律 | PID特点 | P的作用 | PD的作用 | I的作用 | **PID的作用**

$$G_o(s) = \frac{1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1}$$

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$



PID控制

将 K_p 、 T_I 值固定 $K_p = 1$, $T_I = 1$, 研究 T_D 变化时系统的单位阶跃响应。随着 T_D 值增大, 系统的响应速度将减低, 系统的振荡也将减弱。



Contents

- A1 调节系统的特点及控制规律
- A2 调节系统的类型
- A3 PID系统的设计
- A4 过程控制系统的设计



7.2 调节系统的类型

调节系统类型 | 积分加一阶 | 一阶加延迟 | 特性分析

■ 积分加一阶模型

$$G(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)}$$

■ 一阶加时间延迟

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s}$$

典型对象特性
(与真实对象特性有差异)，主要是为了反映其主要特性以方便分析和设计。

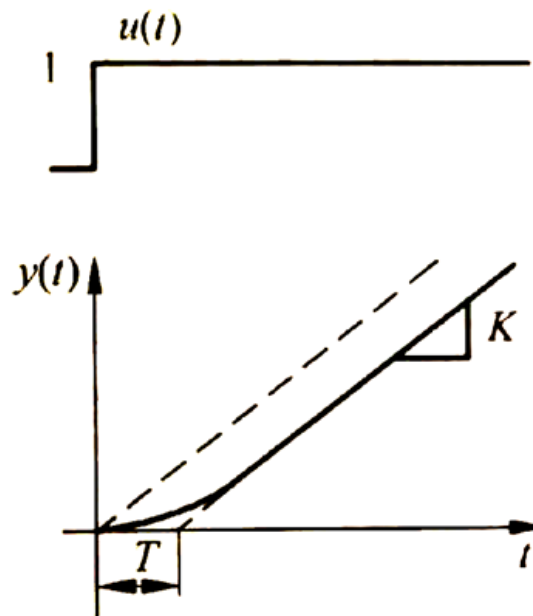
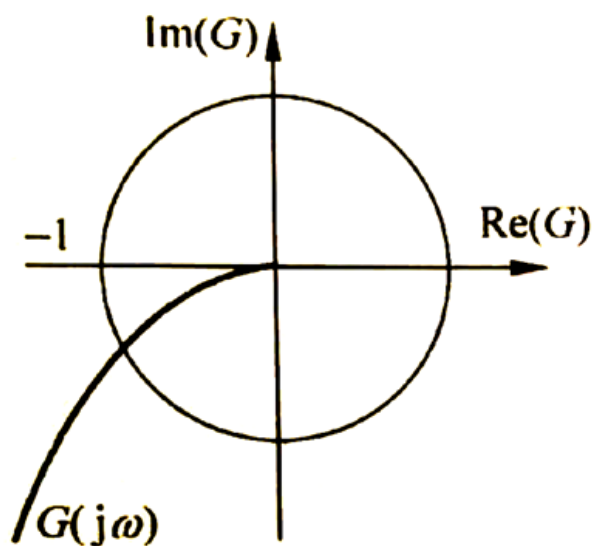


7.2 调节系统的类型

调节系统类型 | 积分加一阶 | 一阶加延迟 | 特性分析

积分加一阶模型

$$G(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)}$$

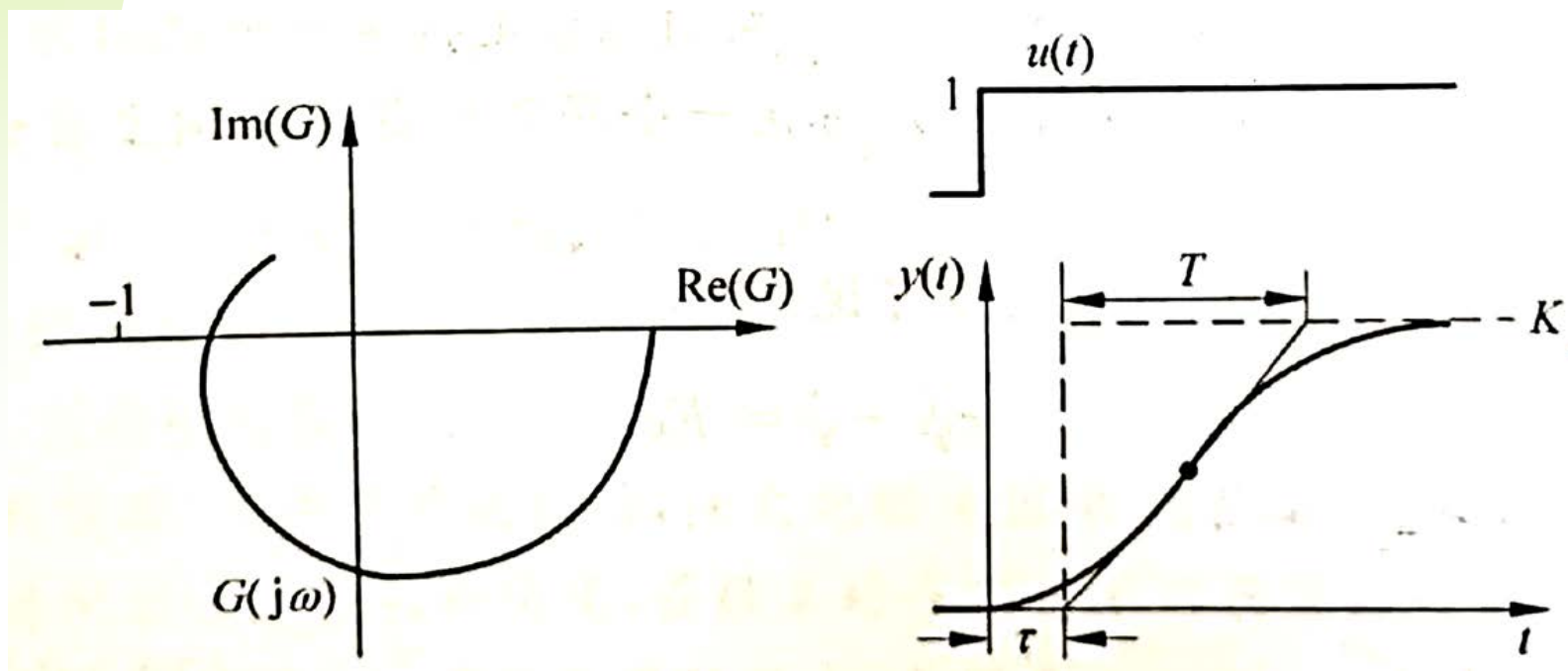




7.2 调节系统的类型

调节系统类型 | 积分加一阶 | **一阶加时延** | 特性分析

- **一阶加时间延迟** $G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s}$





7.2 调节系统的类型

近似

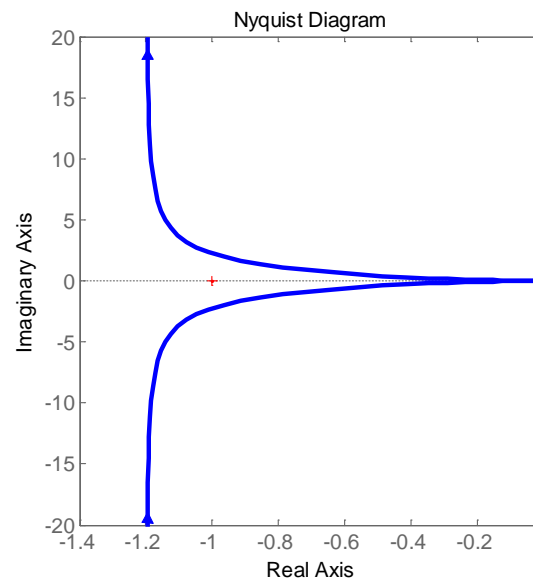
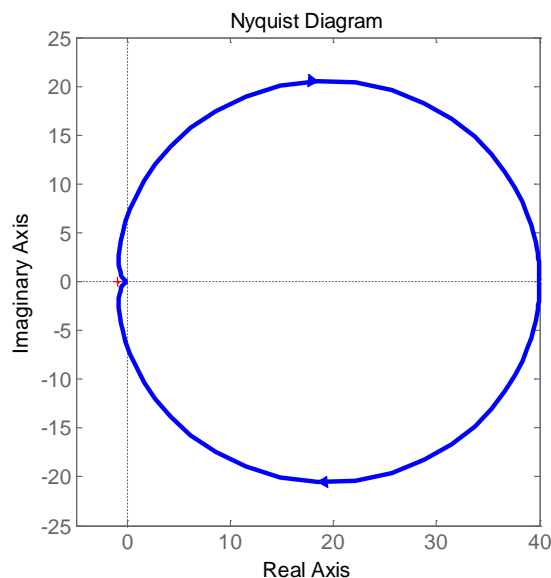
调节系统类型 | 积分加一阶 | 一阶加时延 | 特性分析

$$G(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}, \quad T_1 \gg T_2 \quad \longrightarrow \quad G_1(s) = \frac{K / T_1}{s(T_2s + 1)}$$

$$K = 40$$

$$T_1 = 1$$

$$T_2 = 0.03$$



如果给定系统包含两个极点，只要满足一定条件也可以转换为积分加一阶形式

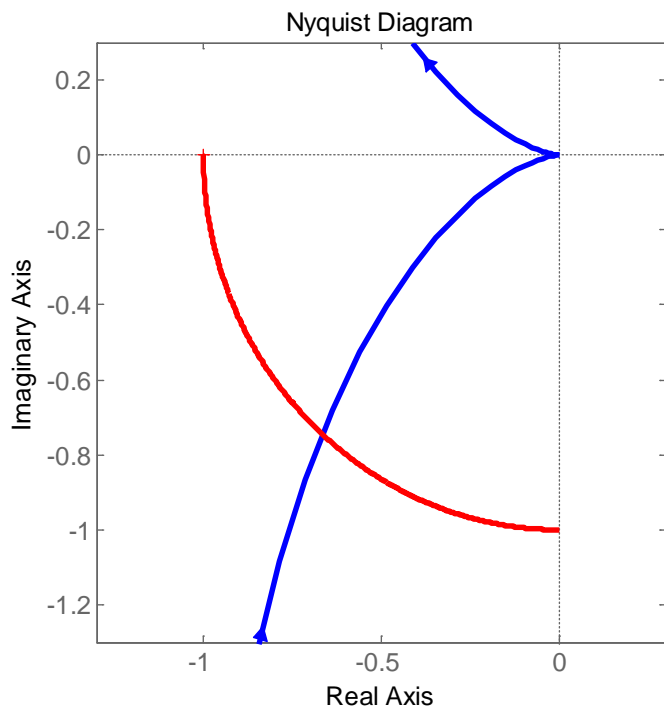


7.2 调节系统的类型

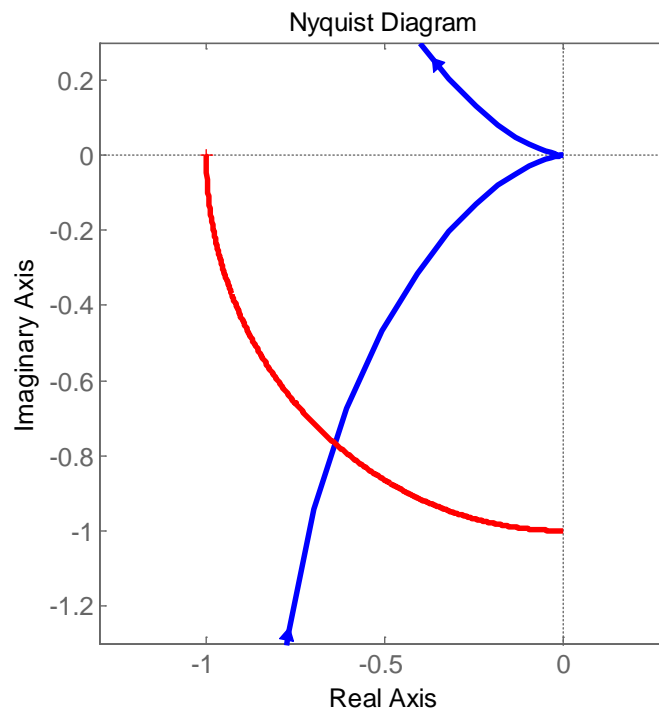
近似

调节系统类型 | 积分加一阶 | 一阶加时延 | 特性分析

$$G_1(s) = \frac{K / T_1}{s(T_2 s + 1)}$$



$$G(s) = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, T_1 \gg T_2$$





Contents

- A1 调节系统的特点及控制规律
- A2 调节系统的类型
- A3 PID系统的设计
- A4 过程控制系统的设计



7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

- **PD控制**：调节系统的阻尼系数
- **PI 控制**：改善系统控制精度

如何选择控制器类型，如何进行参数选取？

具体情况具体分析



7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

■ 例1：航向保持时，船舶自动驾驶仪设计。

设计需要考虑的问题：

- (1) 被控对象类型
- (2) 主要控制问题



主要控制问题是什么？



7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

■ 例1：航向保持时，船舶自动驾驶仪设计。

被控对象：

$$G(s) = \frac{K}{s(\tau s + 1)}$$

航向保持：是指在风、浪和洋流等环境下将船保持在给定的航向下。



7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

■ 例1：航向保持时，船舶自动驾驶仪设计。

对象：
$$G(s) = \frac{K}{s(\tau s + 1)}$$

PD控制：
$$D(s) = K_p + K_d s$$

特征方程：
$$\tau s^2 + (1 + KK_d)s + KK_p = 0$$



$$K_p \rightarrow \omega_n, \quad K_d \rightarrow \xi$$



7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

■ 例1：航向保持时，船舶自动驾驶仪设计。

特征方程： $\tau s^2 + (1 + KK_d)s + KK_p = 0$



$$K_P \rightarrow \omega_n, \quad K_D \rightarrow \xi$$

比例项 K_P ：决定了系统的固有频率，即响应速度；

微分项 K_D ：决定了系统的阻尼系数。

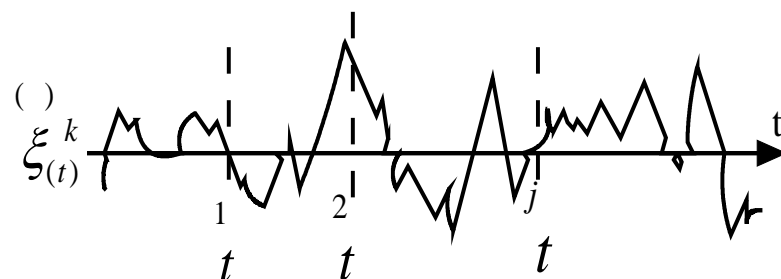


7.3 PID系统的设计

相对

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

分析风和浪等环境因素的影响



- (1) 随机扰动——频谱较高 ($0.05 \sim 0.2\text{Hz}$)，按噪声处理
- (2) 扰动均值——非零力矩扰动，应该再增加积分控制提高精度，减小扰动响应。

为了克服扰动还得用积分，最终的控制器类型为PID



7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

■ 例1：航向保持时，船舶自动驾驶仪设计。

$$\tau s^2 + (1 + KK_d)s + KK_p = 0$$

积分控制：应比较弱，不影响动态设计结果。

$$\tau = 16s, K = 0.07s^{-1}$$

$$\zeta = 0.85$$

$$K_P = 1, K_D = 11.43 \Rightarrow -0.0563 \pm j0.0348$$

$$K_I = 0.005 \Rightarrow \begin{cases} -0.0058 \\ -0.0533 \pm j0.0301 \end{cases}$$



7.3 PID系统的设计

工况

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

■ 例2：火炮稳定器（行进中保持指向稳定）

设计需要考虑的问题：

- (1) 被控对象类型
- (2) 主要控制问题



主要控制问题是什么？调节阻尼, 提高精度？

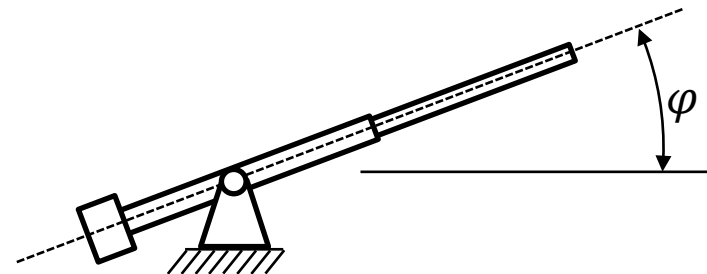


7.3 PID系统的设计

实现

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

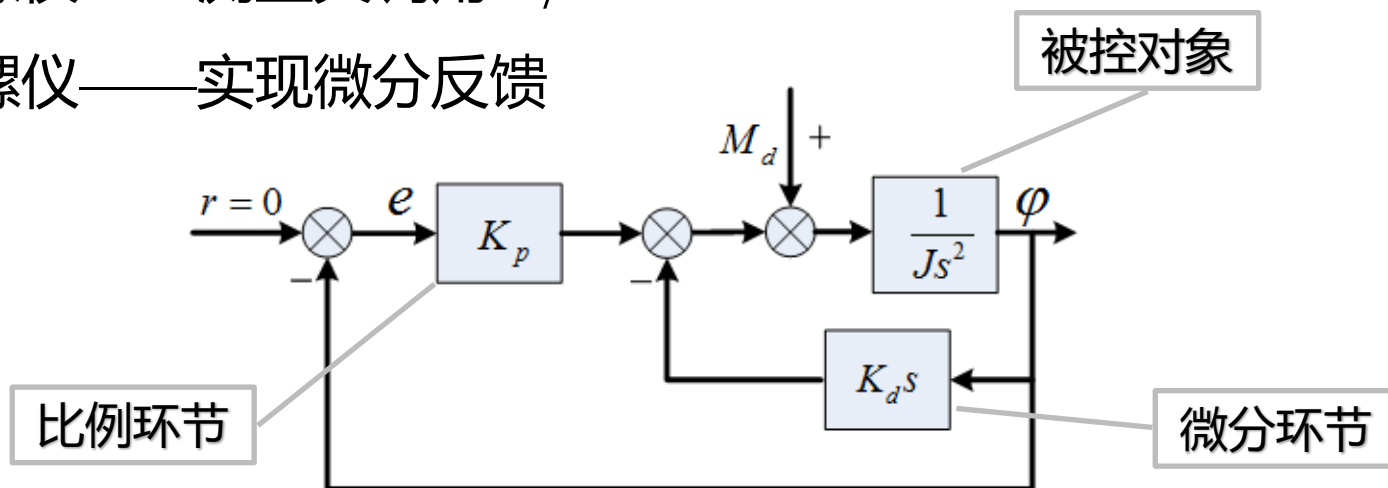
例2：火炮稳定器



对象为双积分串联（电机伺服系统）

角度陀螺仪——测量失调角 $r - \varphi$

速率陀螺仪——实现微分反馈



为什么用比例微分？



7.3 PID系统的设计

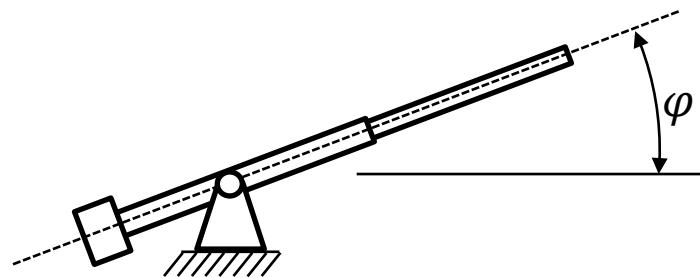
抗扰

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

■ 例2：火炮稳定器

主要控制问题是**稳定和抗扰**

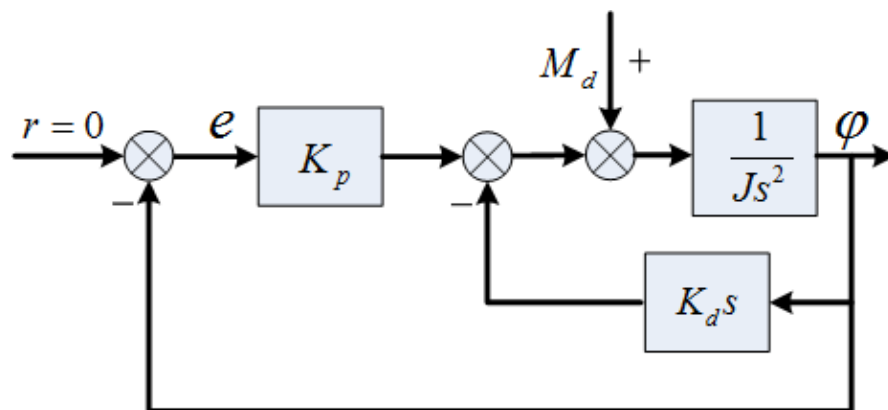
M_d 为外力矩，包括火炮的耳轴与轴承间的**摩擦力矩**、车体振动时，因火炮重心偏离耳轴轴线而引起的**惯性力矩**。



$$\frac{\Phi(s)}{M_d(s)} = \frac{1}{Js^2 + K_d s + K_p}$$

↓

$$\xi = 1$$



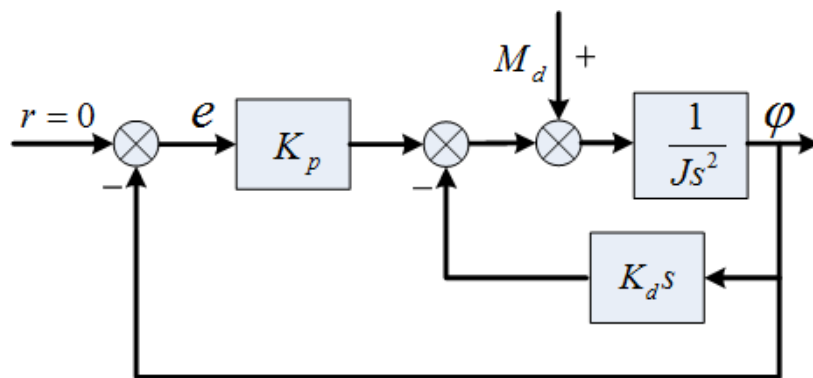


7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

■ 例2：火炮稳定器

若车体振动幅度 $\theta_{\max}=6^\circ$ ，振动周期 $T=1.5\text{s}$ ，即 $\omega_k=4.2\text{rad/s}$ ，设此时外力矩的幅值 $M_{\max}=38\text{kg}\cdot\text{m}$ ，允许炮身强迫振荡的幅值为 $\varphi_{\max}=0.001\text{rad}$



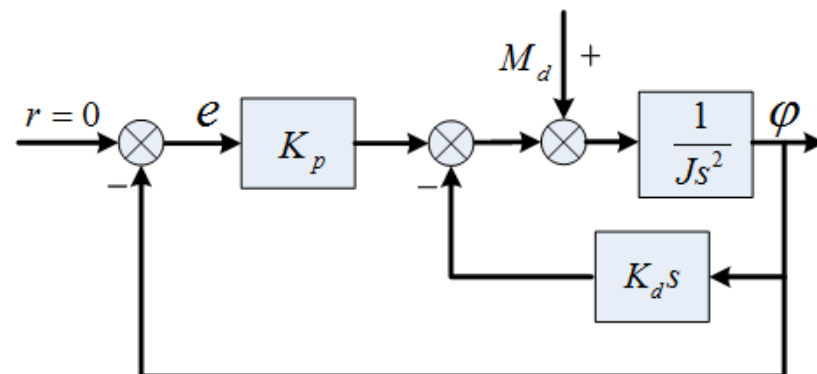
$$\left. \begin{aligned} \frac{\Phi(s)}{M_d(s)} &= \frac{1}{Js^2 + K_d s + K_p} \\ \xi &= 1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow K_d = 2\sqrt{K_p J}$$



7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

例2：火炮稳定器



$$\frac{\varphi_{\max}}{M_{\max}} = \left| \frac{1}{Js^2 + K_d s + K_p} \right|_{s=j\omega_k} = \frac{1}{J\omega_k^2 + K_p} \leq \frac{0.001\text{rad}}{38}$$



$$K_p = 32000\text{kg} \cdot \text{m/rad}$$

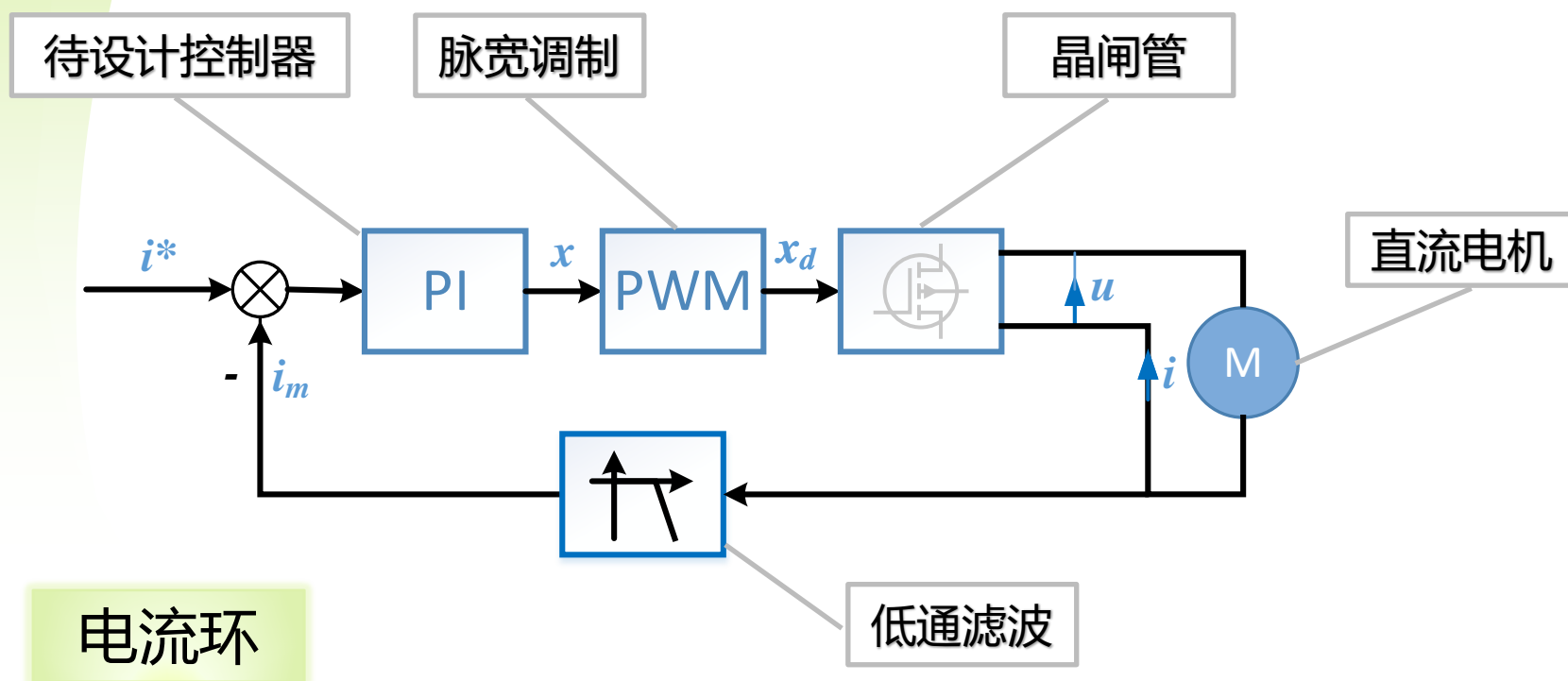
$$\text{隔离度 } \theta_{\max}/\varphi_{\max} \approx 100 = 40\text{dB}$$



7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

例3：电流回路整定（用于电机调速内回路）

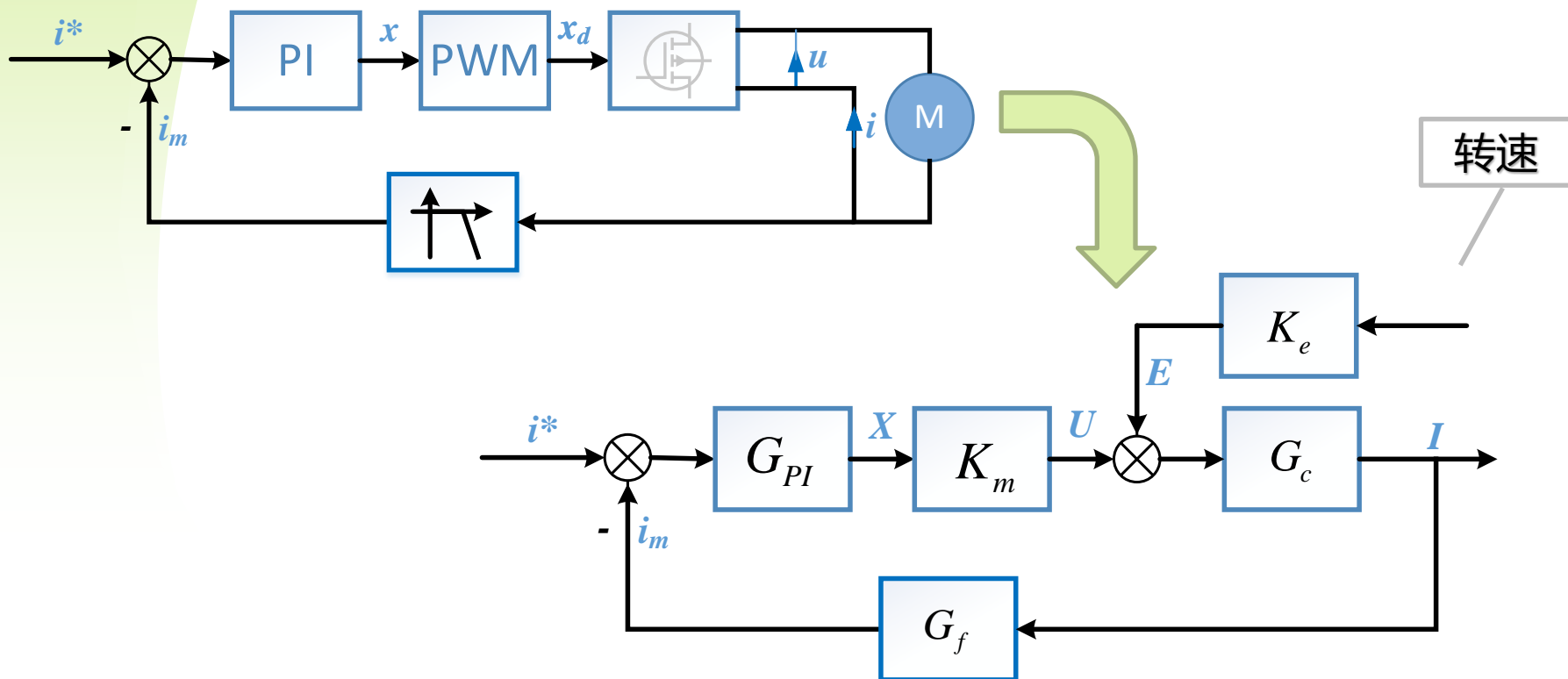




7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

例3：电流回路整定

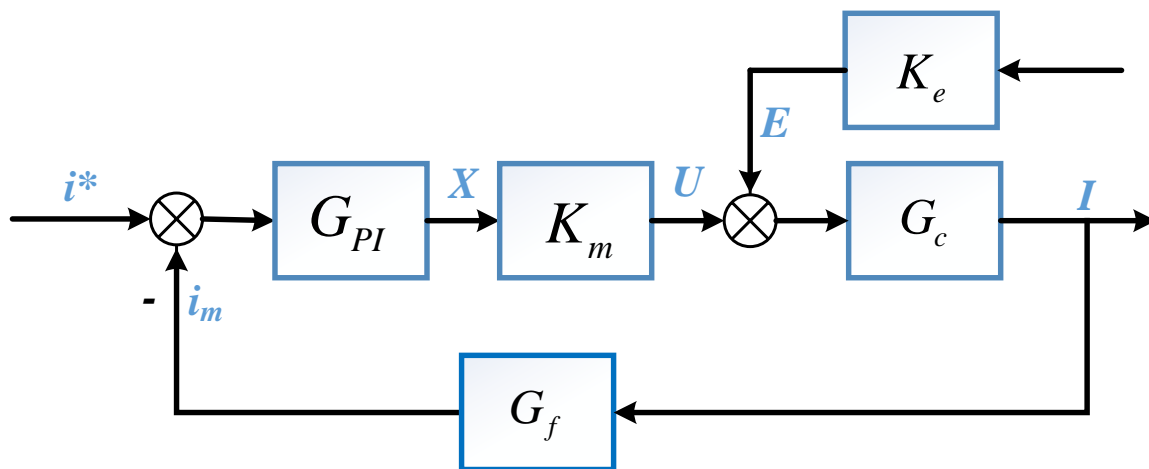




7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

例3：电流回路整定



设计需要考虑的问题：

- (1) 被控对象类型 (2) 主要控制问题



7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

■ 例3：电流回路整定

(1) 被控对象简化

电枢等效传递函数：

$$G_e(s) = \frac{1}{L_a s + R_e}$$

低通滤波器传递函数：

$$G_f(s) = \frac{1}{(T_f s + 1)^2}$$

脉宽调制器及MOSFET电路： $G_2(s) = K_m$



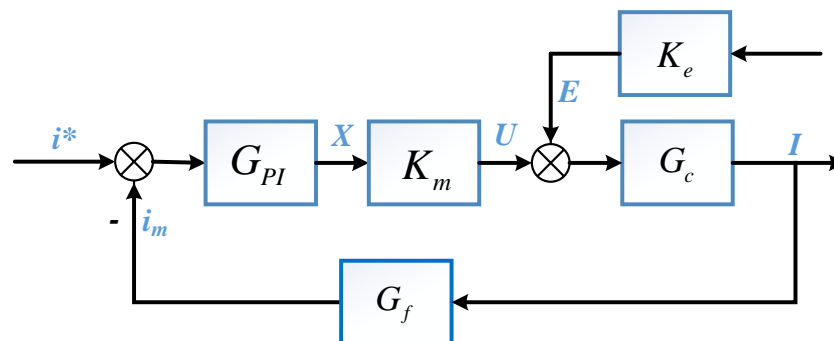
7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

■ 例3：电流回路整定

(2) 主要控制问题

- 反电动势造成的静差
- 脉宽调制带来的高频噪声
- 理想的阶跃响应特性



克服扰动消除静差、压低带宽抑制噪声、同时保证稳定裕度
(压低闭环谐振峰，减小超调量)



7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

■ 例3：电流回路整定

(1) 被控对象简化

$$G(s) = K_m G_e G_f = \frac{K_m}{L_a s + R_e} \frac{1}{(T_f s + 1)^2}$$

$$T_f = 20\mu\text{s}, \quad L_a / R_e = 3.5\text{ms}$$

怎么简化?



7.3 PID系统的设计

相对

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

■ 例3：电流回路整定

(1) 被控对象简化

为什么能去掉高阶项？

$$G(s) = \frac{K_m}{L_a s + R_e} \frac{1}{(T_f s + 1)^2} = \frac{K_m/L_a}{s + R_e/L_a} \frac{1}{(T_{ff}^2 s^2 + 2T_f s + 1)}$$
$$\approx \frac{K_g}{s(T_g s + 1)}$$

$$T_f = 20\mu\text{s}, \quad L_a/R_e = 3.5\text{ms}$$

$$T_g = 2T_f = 40\mu\text{s}, \quad K_g = K_m/L_a = 1.3 \times 10^4 \text{ rad/s}$$



7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

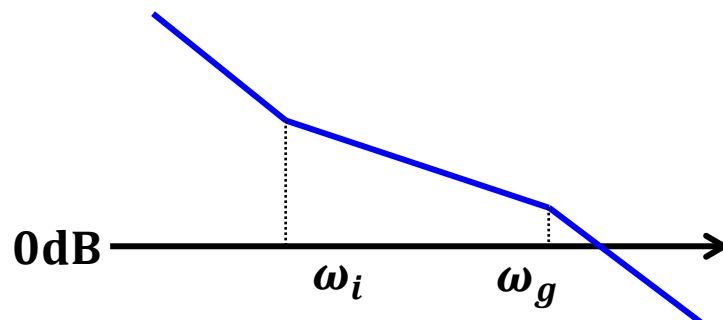
■ 例3：电流回路整定

(2) 控制器设计

保证精度：PI控制器——保证相角裕度

$$G(s) = \frac{K_g}{s(T_g s + 1)}$$
$$K(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$
$$K(s)G(s) = \frac{K_p K_g \omega_g (s + \omega_i)}{s^2 (s + \omega_g)}$$

怎么确定 $\omega_i(\frac{1}{T_i})$ 和 K_p





7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

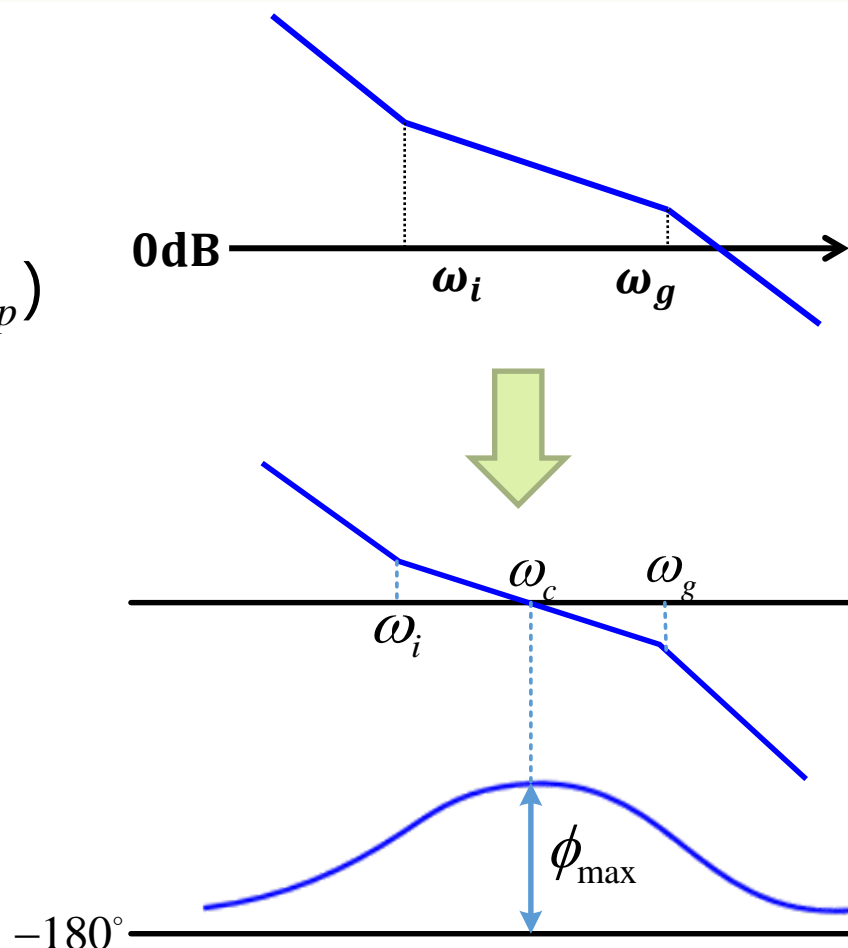
例3：电流回路整定

(2) 控制器 (怎么确定 ω_i 和 K_p)

对称转折频率可获得最大相角裕度

$$\frac{\omega_g}{\omega_c} = \frac{\omega_c}{\omega_i}$$

$$\alpha = \frac{\omega_g}{\omega_i} \quad \omega_c = \frac{\omega_g}{\sqrt{\alpha}}$$





7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

例3：电流回路整定

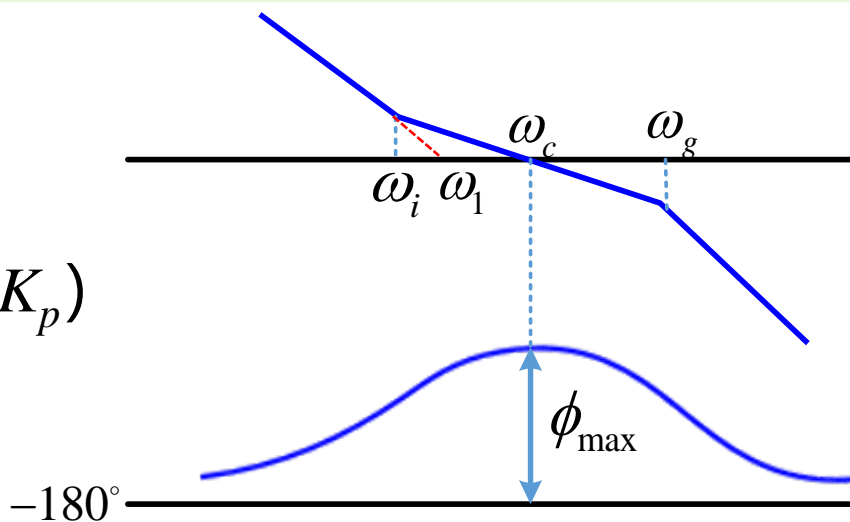
(2) 控制器 (怎么确定 ω_i 和 K_p)

$$K(s)G(s) = \frac{K_p K_g \omega_i (s / \omega_i + 1)}{s^2 (s / \omega_g + 1)}$$



$$\alpha = \frac{\omega_g}{\omega_i}$$

$$\omega_c = \frac{\omega_g}{\sqrt{\alpha}}$$



$$K_p K_g \omega_i = \omega_1^2 = \omega_i \omega_c$$

$$K_p = \frac{\omega_c}{K_g}$$



7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

例3：电流回路整定

(2) 控制器设计

保证相角裕度，怎么确定 ω_i 和 K_p

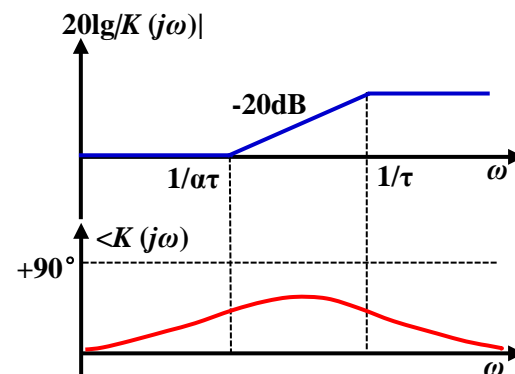
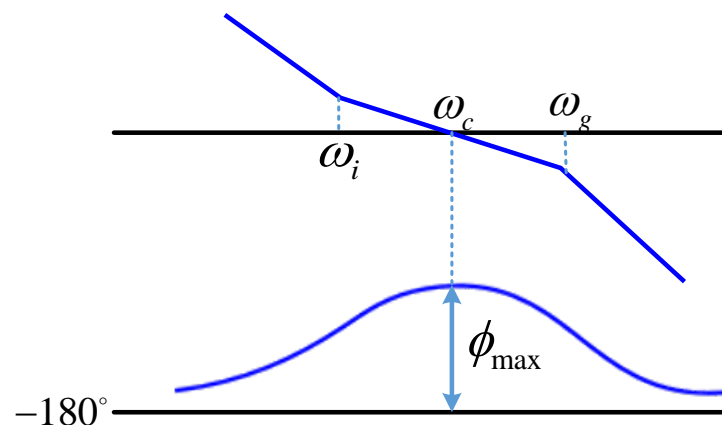
$$\omega_c = \frac{\omega_g}{\sqrt{\alpha}}$$

$$\omega_i = \frac{\omega_g}{\alpha}$$

$$K_p = \frac{\omega_c}{K_g}$$

$$\alpha = \frac{\omega_g}{\omega_i}$$

如何确定 α ?



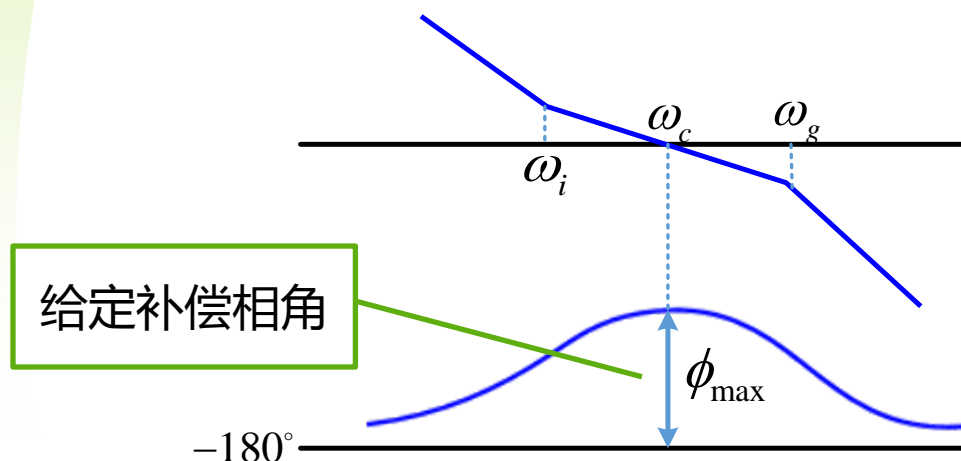


7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

■ 例3：电流回路整定

(2) 控制器（怎么确定 α ）



如何确定 ϕ_m ?

$$\alpha = \left(\frac{1 + \sin \phi_m}{\cos \phi_m} \right)^2$$

$$T_i = \frac{1}{\omega_i} = \frac{\alpha}{\omega_g}$$

$$\omega_c = \frac{\omega_g}{\sqrt{\alpha}}$$

$$K_p = \frac{\omega_c}{K_g}$$



7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

■ 例3：电流回路整定

(2) 控制器（如何用PI控制补偿相角）

$$G(s) = \frac{K_g \omega_g}{s(s + \omega_g)} \quad K(s) = K_p \left(1 + \frac{\omega_i}{s} \right)$$

$$\left. M_p \Rightarrow \phi_m \Rightarrow \alpha \Rightarrow \left. \begin{matrix} T_i (\omega_i) \\ \omega_g \end{matrix} \right\} \Rightarrow \left. \begin{matrix} \omega_c \\ K_g \end{matrix} \right\} \Rightarrow K_p \right.$$

给定 $M_p = 2.3\text{dB}$, $\phi_m = 50^\circ \Rightarrow K_p = 1.095$, $T_i = 0.3\text{ms}$

$$\alpha = \left(\frac{1 + \sin \phi_m}{\cos \phi_m} \right)^2$$



$$T_i = \frac{1}{\omega_i} = \frac{\alpha}{\omega_g}$$

$$\omega_c = \frac{\omega_g}{\sqrt{\alpha}}$$



$$K_p = \frac{\omega_c}{K_g}$$



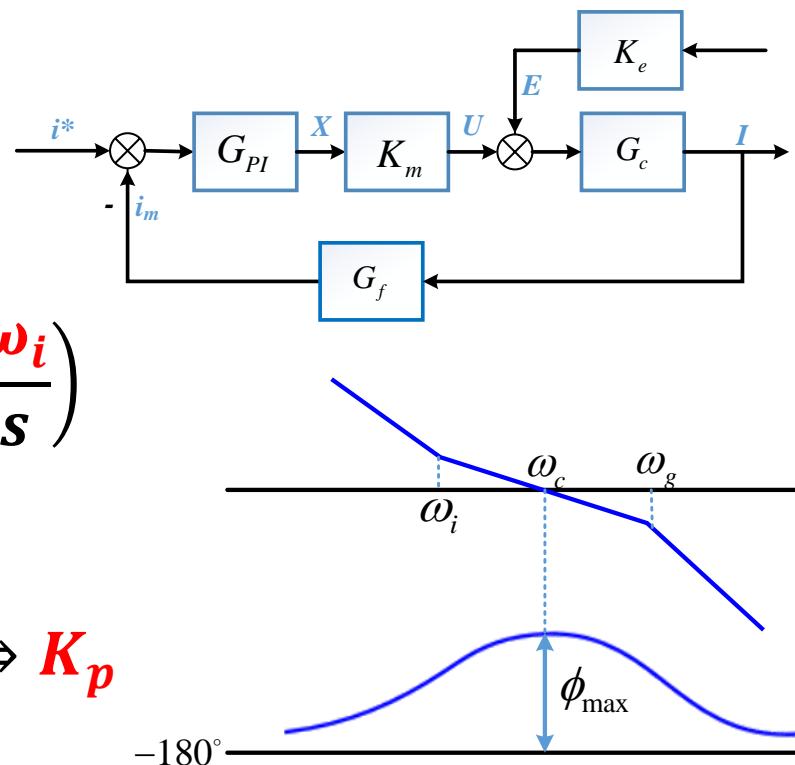
7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

- 压低带宽抑制噪声，克服常值扰动，改善阶跃响应，采用PI控制

$$G(s) = \frac{K_g \omega_g}{s(s + \omega_g)} \quad K(s) = K_p \left(1 + \frac{\omega_i}{s} \right)$$

$$\left. \begin{matrix} M_p \Rightarrow \phi_m \Rightarrow \alpha \Rightarrow T_i(\omega_i) \\ \omega_g \end{matrix} \right\} \Rightarrow \omega_c \left\{ \begin{matrix} K_g \\ K_p \end{matrix} \right.$$



这里明确了 M_p ，用到了转折频率 ω_p 对称于 ω_c 可以获得最大补偿相角的这一隐含条件，最终确定了PI控制器的两个参数



总结

本节课内容回顾

- 调节系统的定义和特点;
- PID的原理和作用, 以基本设计原则;
- 调节系统的两种形式 (一阶加积分, 一阶加延迟)
- 不同对象及需求下PID控制设计原则和参数确定方法;



第21讲课后作业

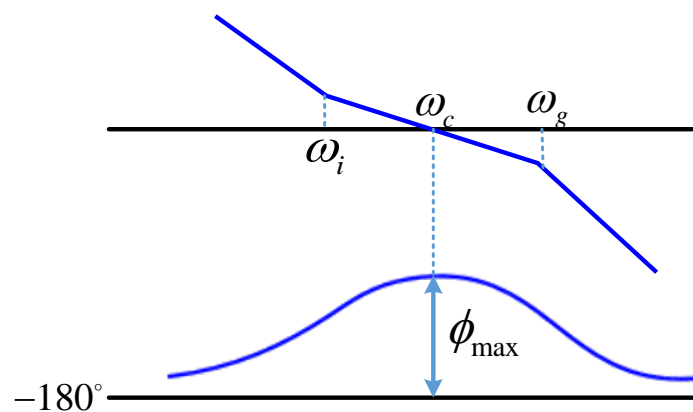
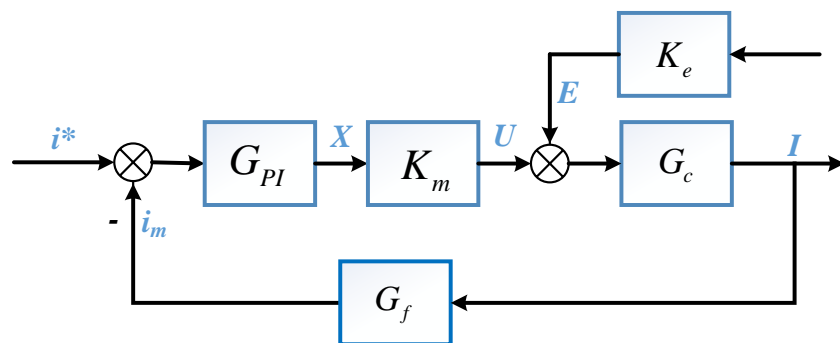
1 必选作业

21-1 设计题：参考例3，修改被控对象参数如下，采用PI控制器，合理设计控制器参数 K_p 和 T_i ，使得相角 ϕ_m 为 45° ，绘制Bode图和阶跃响应曲线。

$$G(s) = \frac{K_g}{s(T_g s + 1)}$$

$$T_g = 10\text{ms}, \quad K_g = 1 \times 10^4 \text{ rad/s}$$

$$K(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$





第21讲课后作业

2 可选作业

- 21.1 从频域和时域不同角度解释PID控制器的功能和作用，通过仿真验证一下PID参数在影响阶跃响应的作用，同时画出Bode图，对比印证，加深理解；
- 21.2 根据本节课内容和教材，回顾扰动分析内容，分析将扰动当高频噪声抑制的原理和具体方法；
- 21.3 分析开环期望特性校正方法的利弊，并给出其适用条件；
- 21.4 从不同的角度（模型特点、指令形式、性能指标、模型辨识方法，控制器设计方法，应用场合等），总结伺服系统和调节系统的联系与区别；
- 21.5 结合课程实例，总结调节系统设计步骤，并总结PI和PD两种控制器的适用条件；



拓展思考

自己总结，无需上交

- a. 控制理论和方法的能力边界（控制不是万能的）；
- b. 每一种控制方法的利与弊（硬币总有正反两面）；
- c. 控制系统中的各种约束与限制（你不能随心所欲）；
- d. 各种方法都有自己的适用条件（看准了再用）
- e. 控制系统设计中的优化问题（处处有优化）；
- f. 哪些是针对信号的，哪些又是针对系统的，如何进行转化（信号与系统）；
- g. 控制系统中的各种性能指标（为什么这么多）；
- h. 控制系统设计中的各种概念和原理给我们的人生启发（你可以控制好人生）；
- i. 控制系统中各种概念的联系与区别（对比才能深刻理解）
- j. 控制系统中主动和被动的的方法（上工治未病）；
- k. 分析仿真和实验，理论与实际的差别（纵然无法解决，也要给出解释）；
- l. 开环与闭环的特性（为什么一定要闭环）；
- m. 控制设计中可用的信息有哪些（信息有多重要）



拓展思考

自己总结，无需上交

- n 反馈的力量，闭环的作用（日用而不知）；
- o 时域和频域的联系与区别（形式不同，本质相通）；
- p 高与低，宽与窄，谁相对于谁（相对与绝对）；
- r 控制系统中的各种非线性及处理方法（对付非线性）；
- s 反馈中的反馈，闭环中的闭环（不同回路实现不同功能）；
- t 特殊到一般，简单到复杂（走上科研创新之路）；
- u 输入、指标和对象（控制设计的三要素）；
- v 控制系统设计中，各种简化方法（大胆简化、小心验证）；
- w 科学与工程，理论与实践，理想与现实（三对概念，三种视角）；



Thank You !