



第 6 章 伺服系统的设计 (1)

——2023年春季学期

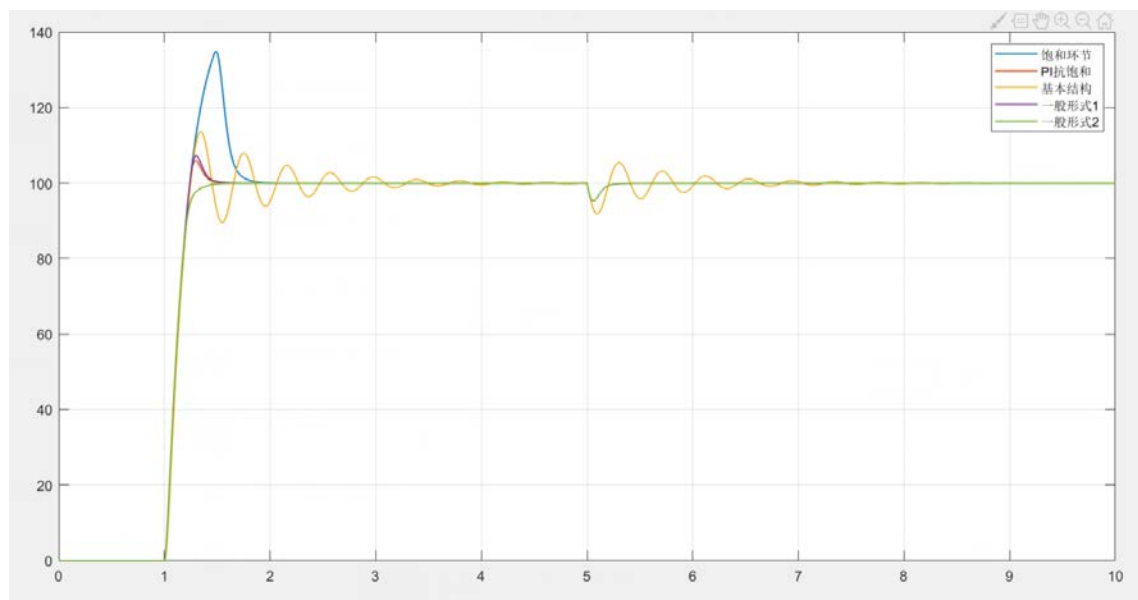
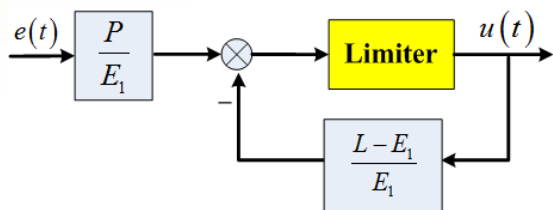
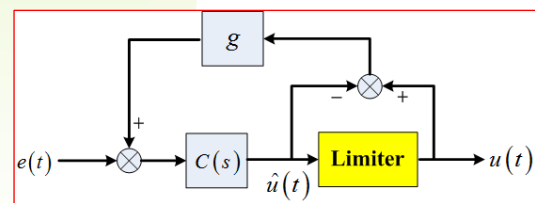
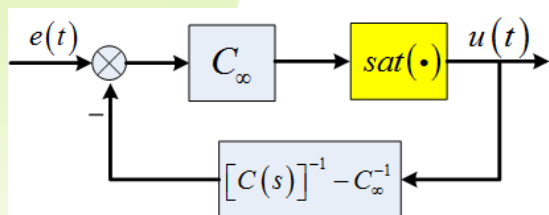
授课教师： 马 杰 (控制与仿真中心)
霍 鑫 (控制与仿真中心)
马克茂 (控制与仿真中心)
陈松林 (控制与仿真中心)



作业篇

到底哪种方法更好?

a 积分器抗饱和设计



根据你的仿真结果，你认为哪种方法更好?

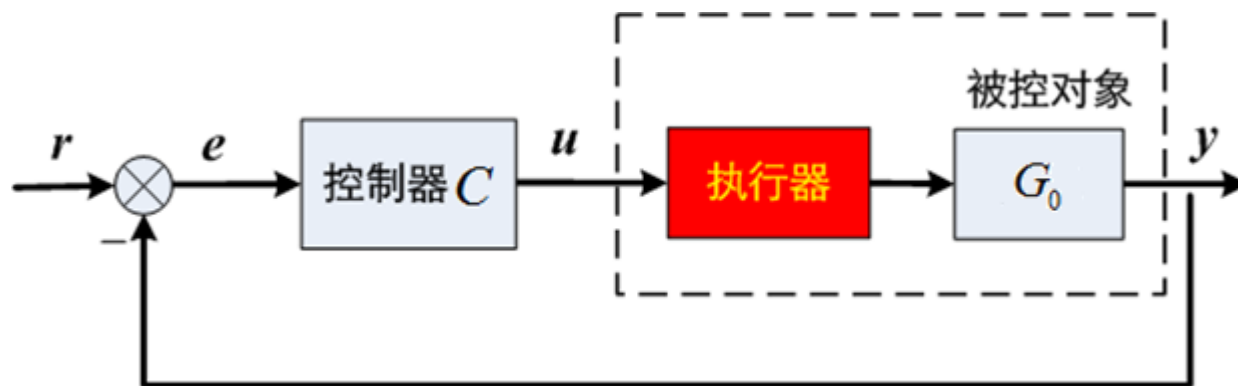
特定信号，特定参数，特定控制器，特定系统下的仿真对比并不全面



回顾篇

执行器约束问题

执行器存在一些典型的限制：**电机最大转速限制、峰值力矩限制；阀门的全开时截面积有限等。**



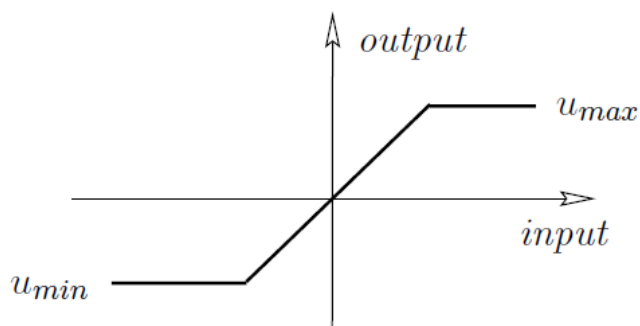
当控制量达到执行器的极限（幅值极限或变化速率极限）时，**反馈回路失效，系统将运行于开环状态。**



回顾篇

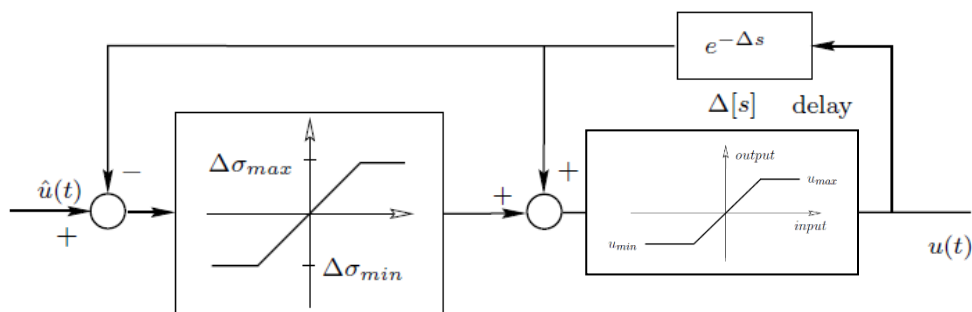
执行器约束模型

• 执行器饱和模型



$$u(t) = \text{Sat}\langle \hat{u}(t) \rangle \triangleq \begin{cases} u_{\max} & \text{if } \hat{u}(t) > u_{\max}, \\ \hat{u}(t) & \text{if } u_{\min} \leq \hat{u}(t) \leq u_{\max}, \\ u_{\min} & \text{if } \hat{u}(t) < u_{\min}. \end{cases}$$

• 执行器转换速率限制模型

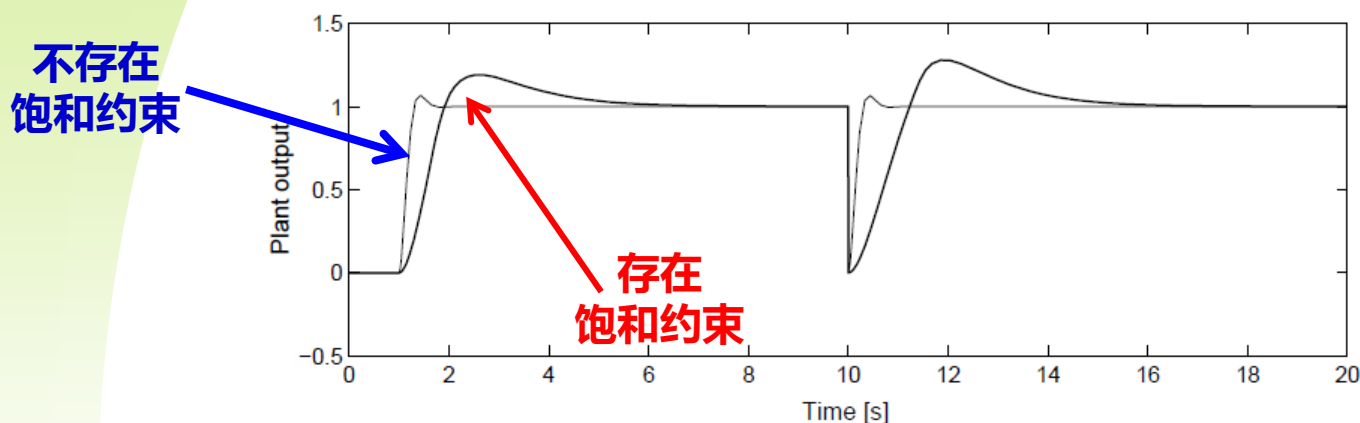


$$\dot{u}(t) = \text{Sat}\langle \dot{\hat{u}}(t) \rangle \triangleq \begin{cases} \sigma_{\max} & \text{if } \dot{\hat{u}}(t) > \sigma_{\max}, \\ \dot{\hat{u}}(t) & \text{if } \sigma_{\min} \leq \dot{\hat{u}}(t) \leq \sigma_{\max}, \\ \sigma_{\min} & \text{if } \dot{\hat{u}}(t) < \sigma_{\min}. \end{cases}$$



回顾篇

积分器的Windup问题



◆ 执行器约束的解决办法

- (1) 做好选型，保证执行器在典型工况下不会饱和（事先分析计算）
- (2) 调整控制器的设计（降低增益，带宽，避免使用积分）
- (3) 抗饱和设计，应对约束（避免系统进入深度饱和）



回顾篇

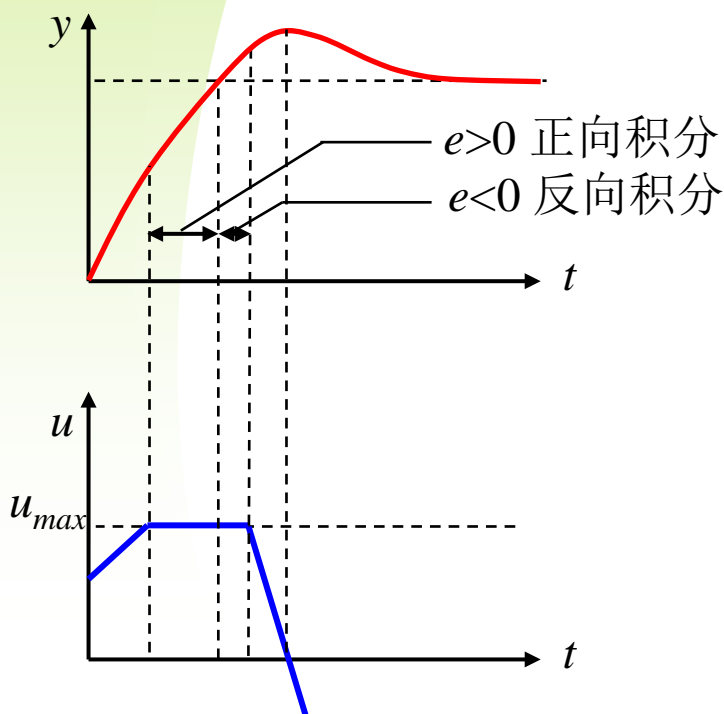
积分器的抗饱和设计

➤ 积分分离法

- **方法：** $|e| >$ 设定限值时，改用纯P调节
- **作用：** 既不会积分饱和又能在小偏差时利用积分作用消除偏差

➤ 遇限削弱积分法

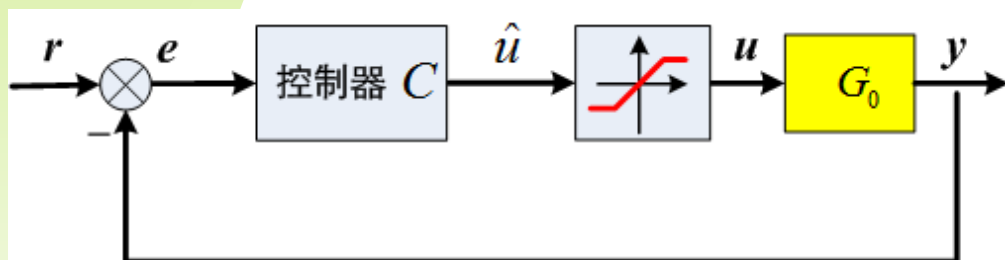
- **方法：** $u_I >$ 设定限值时，只累加负偏差，反之亦然
- **作用：** 可避免控制量长时间停留在饱和区





回顾篇

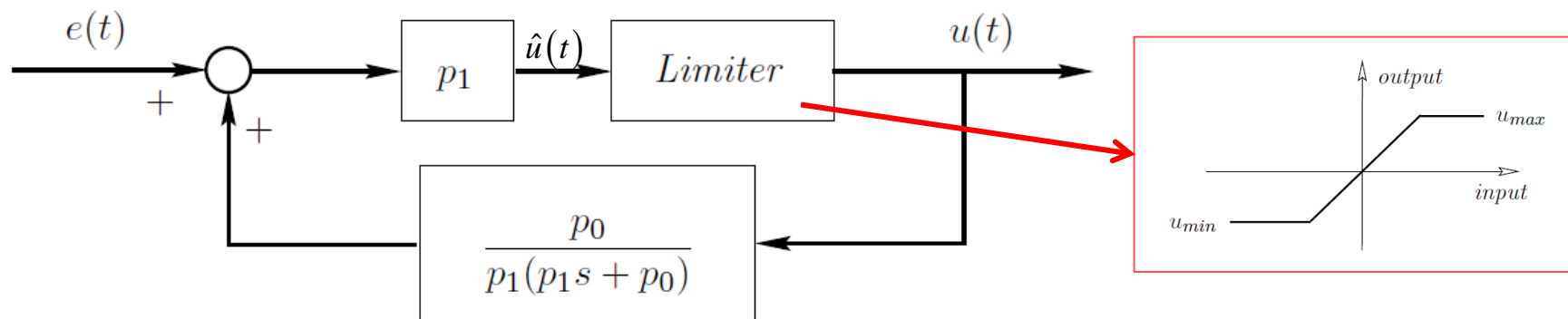
PI控制器的Anti-Windup设计



线性工作范围内的传递函数

$$C(s) = \frac{p_1 s + p_0}{s}$$

- 在线性工作范围内，实现比例+积分的作用，性能保持不变
- 而达到约束边界时，切除了积分作用，避免了Windup

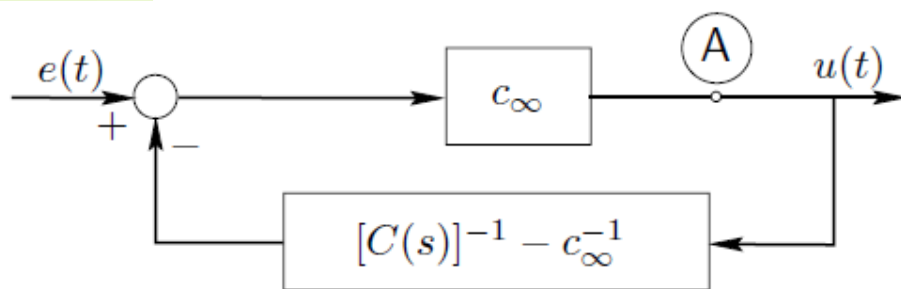




回顾篇

双正则的最小相位控制器的Anti-Windup设计

假设控制器是双正则的最小相位系统，将其分解为比例项和严格正则项： $C(s) = c_\infty + \bar{C}(s)$



$$\begin{aligned}\frac{U(s)}{E(s)} &= \frac{c_\infty}{1 + ([C(s)]^{-1} - c_\infty^{-1})c_\infty} \\ &= \frac{c_\infty}{[C(s)]^{-1}c_\infty} \\ &= C(s)\end{aligned}$$

严格正则的最小相位控制器可通过适当添加远离虚轴的最小相位零点变为双正则的形式。

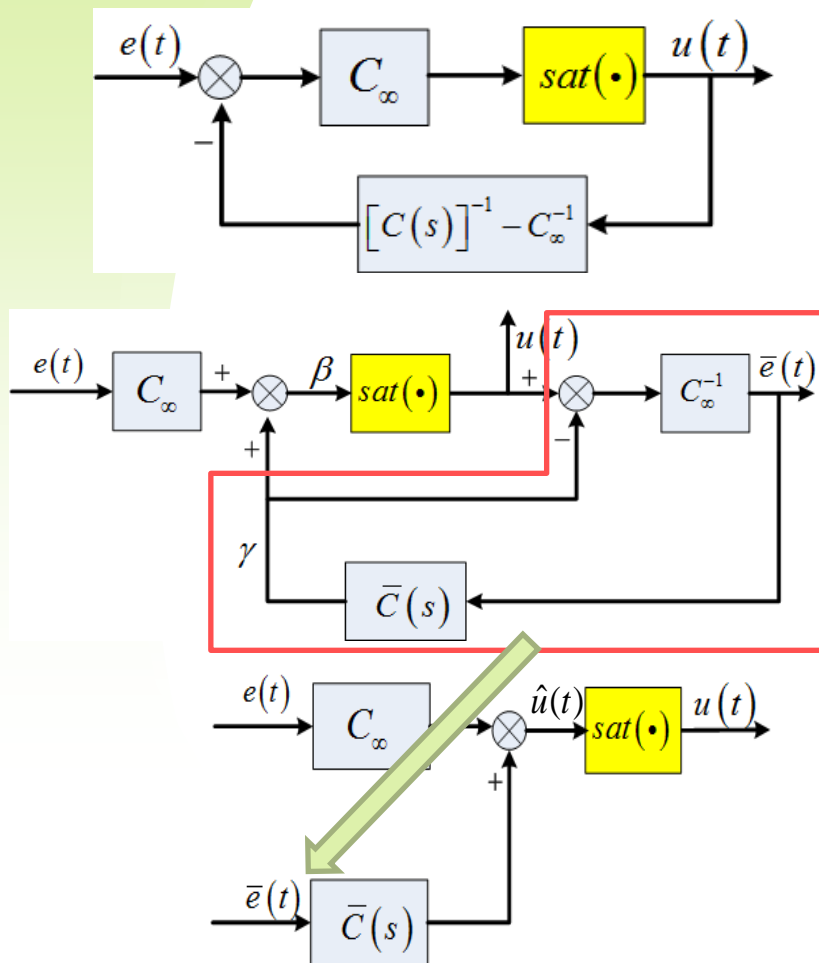
设计策略：

- (1) 控制器的动态由对象的实际输入信号来驱动；
- (2) 由对象的实际输入信号驱动时，控制器的动态是稳定的。



回顾篇

Anti-Windup设计思想

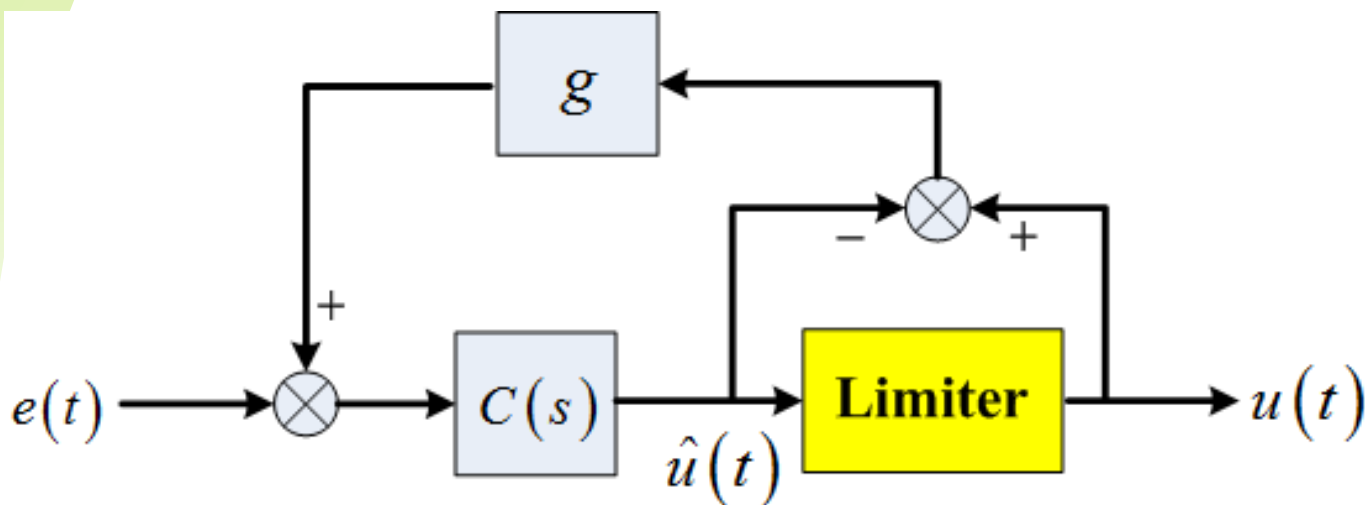


Anti-Windup 设计，从原理上可以理解为，**用实际的控制量来调节控制器的输入**，也就是**误差 $e(t)$** ，使其能够始终保证 $\hat{u}(t) = u(t)$ ，这样能够有效避免系统进入深度饱和，而且在误差变号后，快速退出饱和。



回顾篇

Anti-Windup的一般形式——第一种



Anti-Windup 控制器控制器的一般形式——第一种

g : 静态增益
控制器无双正则、最小相位需求



回顾篇

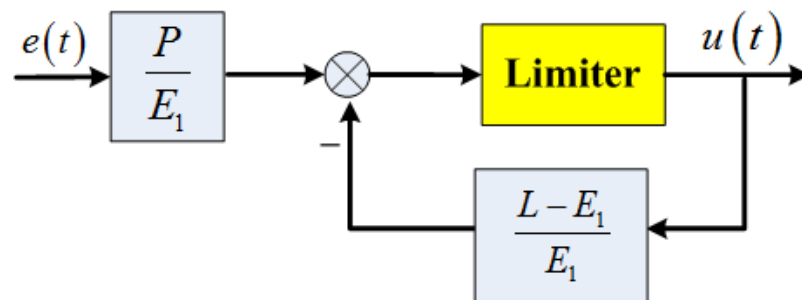
Anti-Windup的一般形式——第二种

控制器 $C(s) = \frac{P(s)}{L(s)}$ ，其中 $L(s) = s^n + l_{n-1}s^{n-1} + \dots + l_0$
 $P(s) = p_n s^n + p_{n-1}s^{n-1} + \dots + p_0$

闭环极点 $s = -\alpha_i \quad i = 1 \dots N > n$

$E_1(s)$ 为 n 阶（与 $L(s)$ 的阶次相同）
的首一的Hurwitz多项式：

$$E_1 = (s + \alpha_{m_1})(s + \alpha_{m_2}) \cdots (s + \alpha_{m_n})$$



Anti-Windup一般形式——第二种

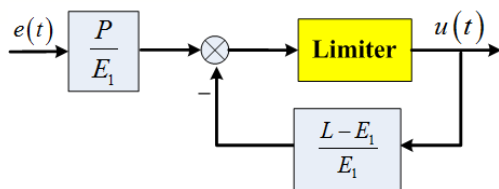
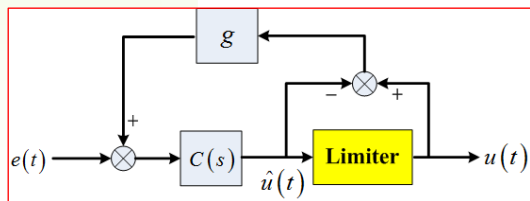
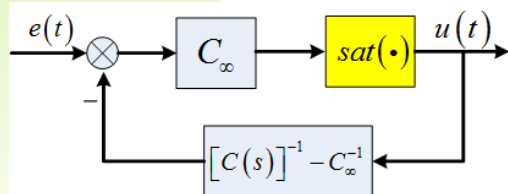
无限制条件，适用于：
非最小相位控制器、
不稳定控制器、
⋮



提升篇

Anti-Windup设计为学术创新提供了一个很好的范例

科学研究往往是一个从特殊到一般，从简单到复杂的过程。是一个先限定前提、提出假设以方便研究，得到初步结果，再逐渐弱化假设，甚至去除假设，再得到更具一般性结果的过程。



PI控制器anti-Windup



双正则，最小相位控制器anti-Windup



无限制条件，非最小相位控制器、不稳定控制器

⋮



由你来设计



关于Anti-Windup设计的几点说明

- **原因**：执行器都有功率限制，系统的各种输入、对象、控制器都与系统饱和相关；
- **思想**：利用被控对象的实际输入或者饱和特性信息来调节控制器的输入来避免饱和（反馈的再次应用）；
- **原则**：线性区不改变原有控制器的特性，饱和区保证期望输出不超过上下界；
- **好处**：从阶跃响应上看，上升时间基本不变，超调大幅降低，有效避免系统因饱和出现失稳；
- **弊端**：需要获得饱和特性或者执行器的实际输出，带来设计和实现上的复杂性（器件，代码），实际时还要保证回路的稳定性；
- **应用**：饱和问题突出的系统才需要考虑Anti-Windup设计；包含积分控制器一般标配抗饱和设计；对于比例控制，指令比较单一的系统一般不需要；
- **其他**：饱和环节是非线性环节，系统的特性与输入幅值大小有关，有时会起到减小超调的作用；饱和不严重的时候，抗饱和设计可能根本看不到效果；



抗饱和的几种设计思路（多一个视角就多一种方法）

控制器的 Anti-Windup设计（分离设计，不改变线性区原控制器特性）

- PI控制器：积分分离，预限削弱，衰减记忆法，积分变增益
- 双正则，最小相位控制器的anti-Windup
- 无限制条件，非最小相位控制器、不稳定控制

抗饱和控制器设计（整体设计，性能和抗饱和同时考虑）

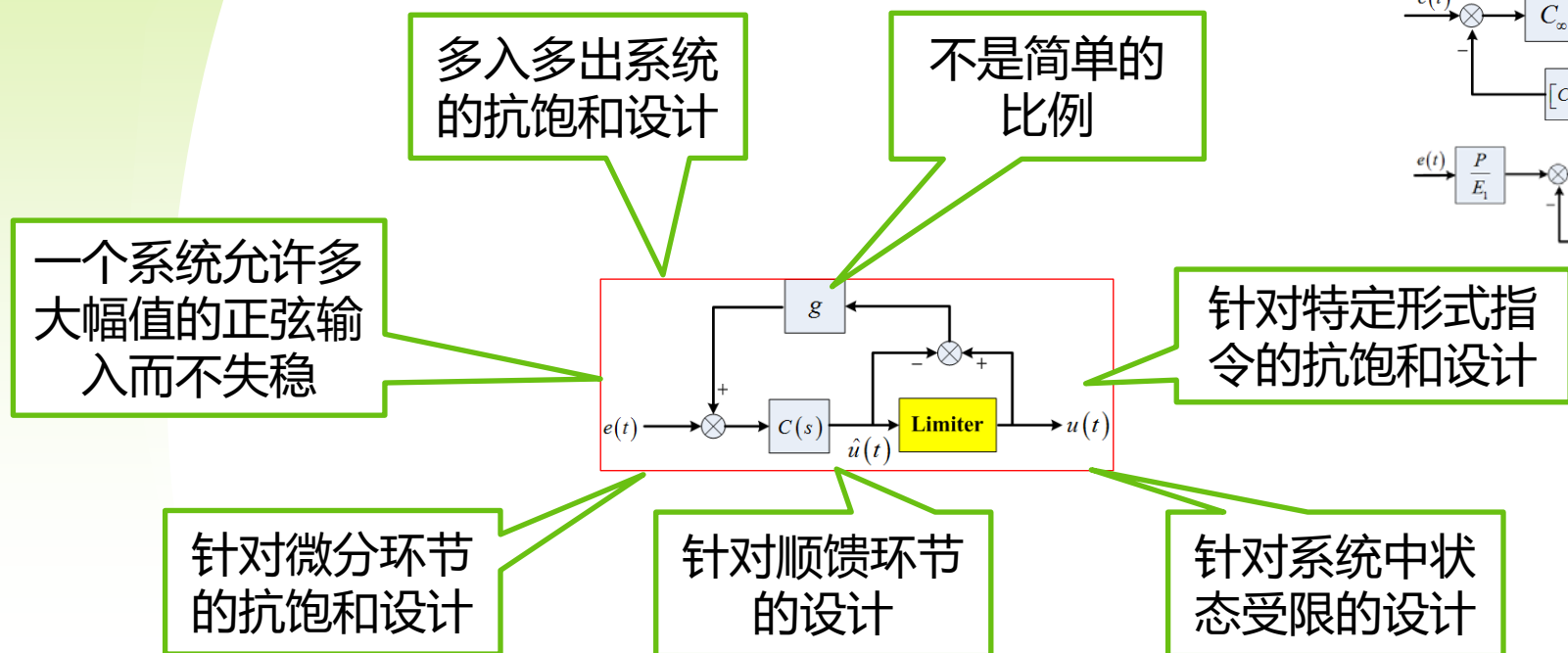
- 最优控制，预测控制，滑模控制，棒棒控制
- 变增益控制（ADRC非线性函数），切换控制

在指令上想办法，引入指令滤波或者指令规划（平滑阶跃等不连续指令）



控制理论中的创新思路（从学习到创造，从输入到输出）

借鉴抗饱和设计思路，看看还有多少值得继续研究的问题



带着创新的视角去学习，学习的过程就会充满乐趣
带着科研的渴望去备考，复习的动力就会更加充足



拓展篇

解决人生的饱和的问题

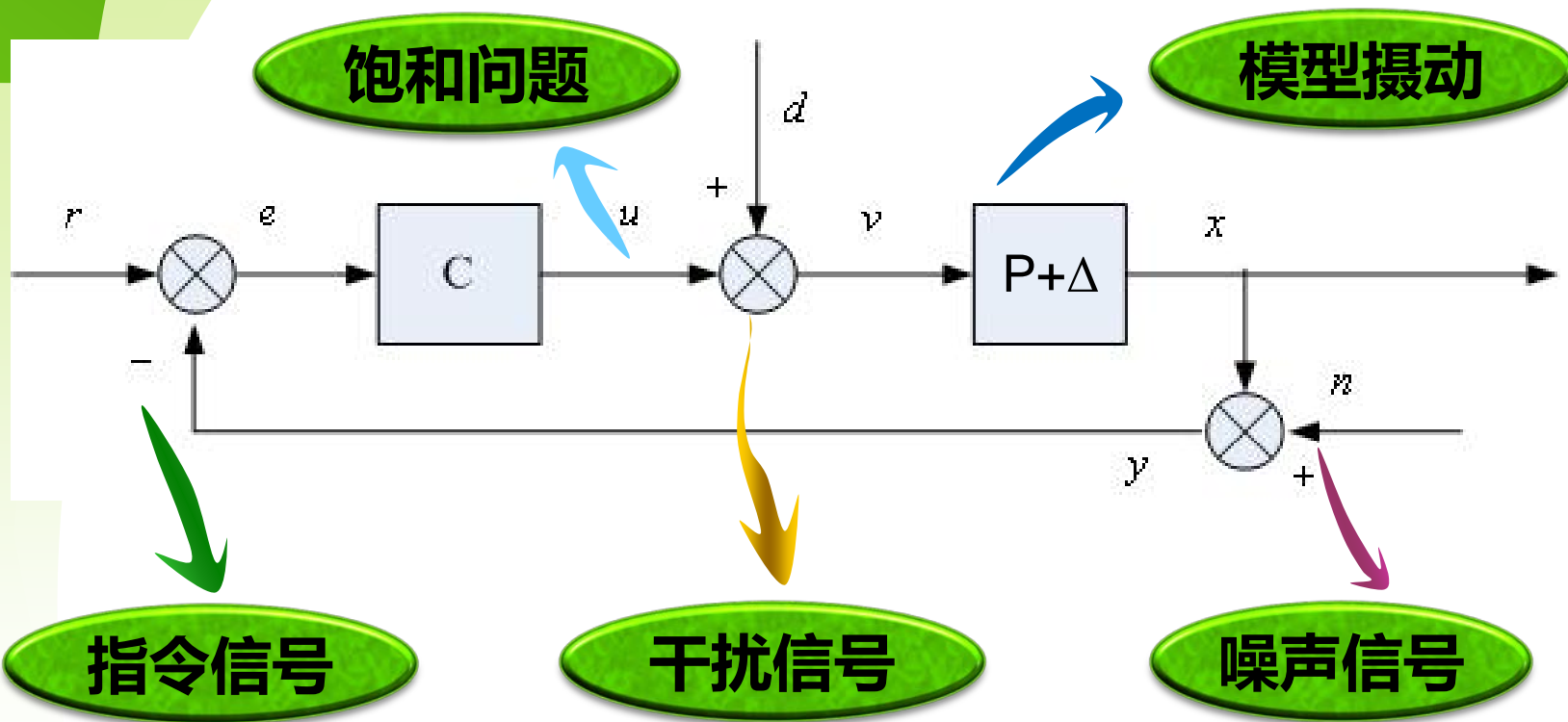
- 善于观察和调整自己的状态，避免进入或尽快退出饱和状态
- 只做最重要的事情（减小扰动和噪声的影响）
- 不断提升能力（改造执行器）
- 持续改进效率（改进控制方法）
- 拆分目标（指令规划）



目标与能力匹配——战略



总结篇



$$G_{xr} = \frac{PC}{1+PC}$$

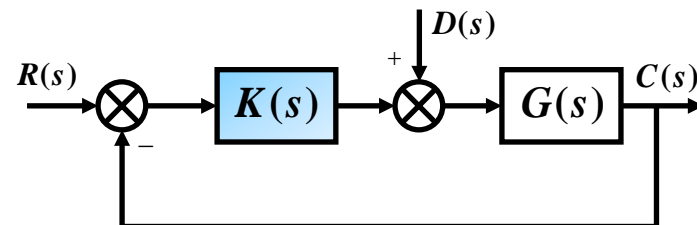
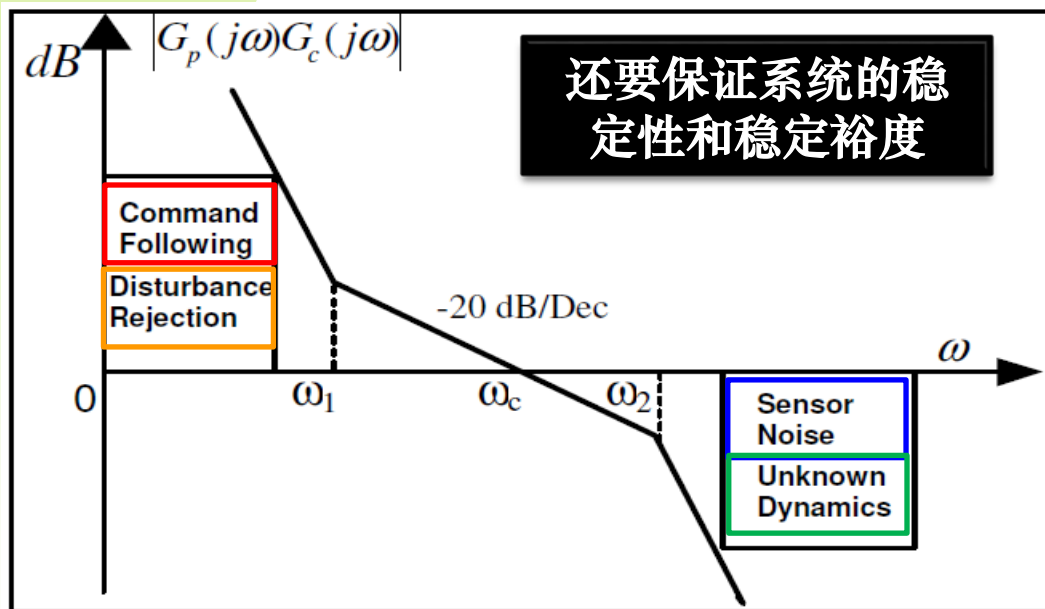
$$G_{xd} = \frac{P}{1+PC}$$

$$G_{xn} = \frac{-PC}{1+PC}$$



总结篇

控制系统设计的思想和原则



道

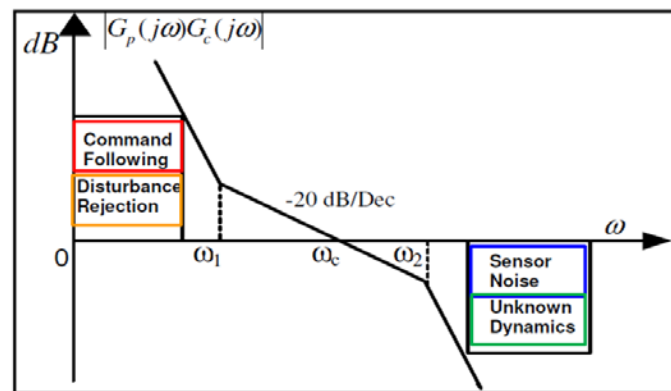
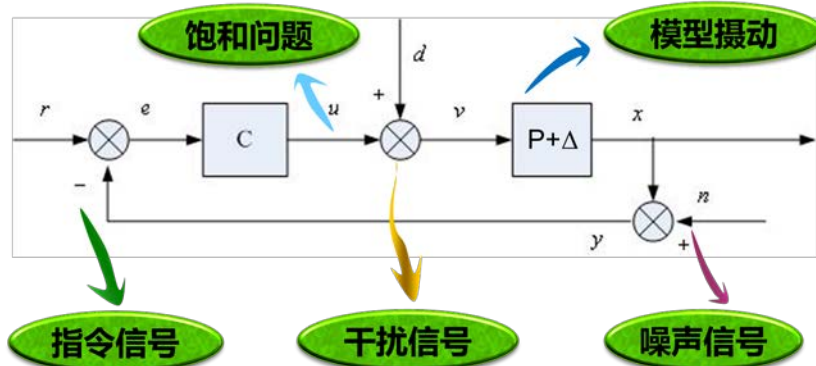
- **指令跟踪**对系统低频的斜率和增益提出了要求;
- **扰动抑制**对干扰作用点之前的特性提出了要求;
- **噪声抑制**对系统的带宽和高频特性提出了要求;
- **不确定性**对系统的带宽和高频特性提出了要求;
- **饱和特性**对控制器型别增益和带宽提出了要求;



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



前言

前面各章节我们重点介绍了控制系统的设计流程、控制系统设计的输入条件分析，控制系统设计的约束与限制，总结出了控制系统的设计基本思想和原则。

接下来我们将常见的控制系统分成两大类分别进行讲解，中间会应用得到前面的原则、方法和结果，同时会针对系统的自身特点给出不同的分析和设计方法。



学习目标

新内容需要掌握的知识要点

- 了解伺服系统的**特点**;
- 掌握伺服系统的**基本模型**;
- 掌握**基本I型伺服系统**的结构和特点;
- 掌握基本I型伺服系统的**控制设计**的要点;



主要内容

- A1 伺服系统的介绍
- A2 I型系统
- A3 II型系统
- A4 伺服系统的校正



6.1 伺服系统介绍

6.1.1

伺服系统的定义及特点

6.1.2

伺服系统的发展历史

6.1.3

伺服系统的数学模型



关于伺服系统，下面那个叙述正确

A

速度控制系统一定是伺服系统

B

伺服系统一定是运动控制系统

C

伺服系统一般控制要稳，响应要快，精度要高

D

伺服系统的指令一般是连续变化的

E

伺服系统的带宽要求都很高

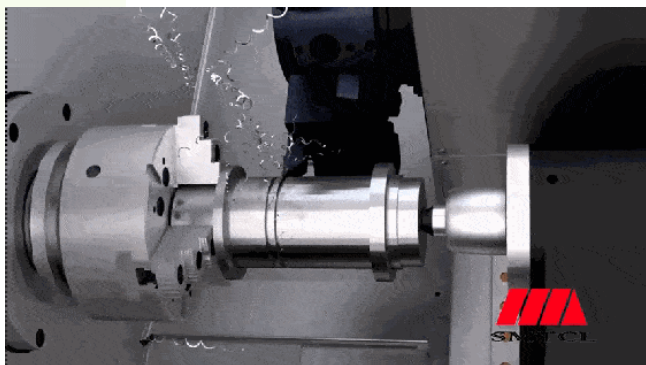
提交



5.1.1 伺服系统的定义及特点

定义 | 组成 | 分类 | 特点

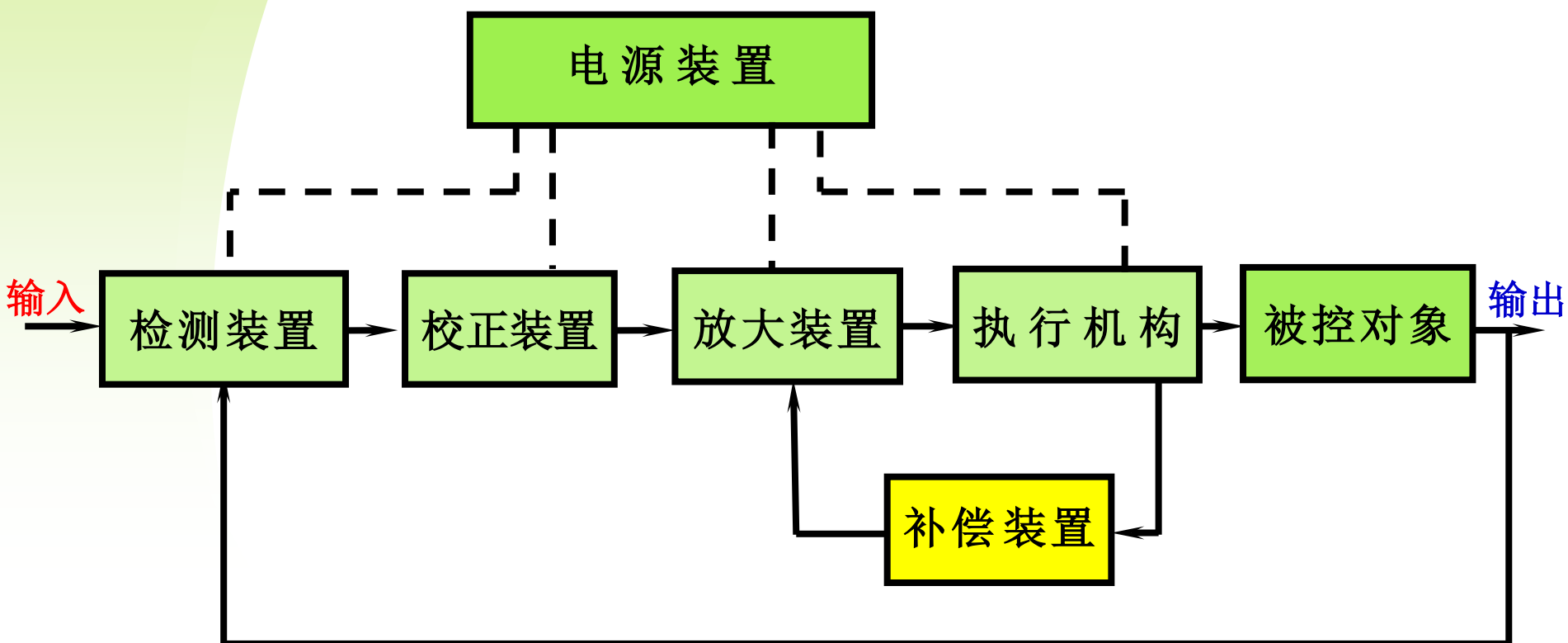
伺服系统是用来控制被控对象的某种状态，使其能自动地、连续地、精确地**复现输入信号的变化规律**的控制系统。





6.1.1 伺服系统的定义及特点

定义 | 组成 | 分类 | 特点





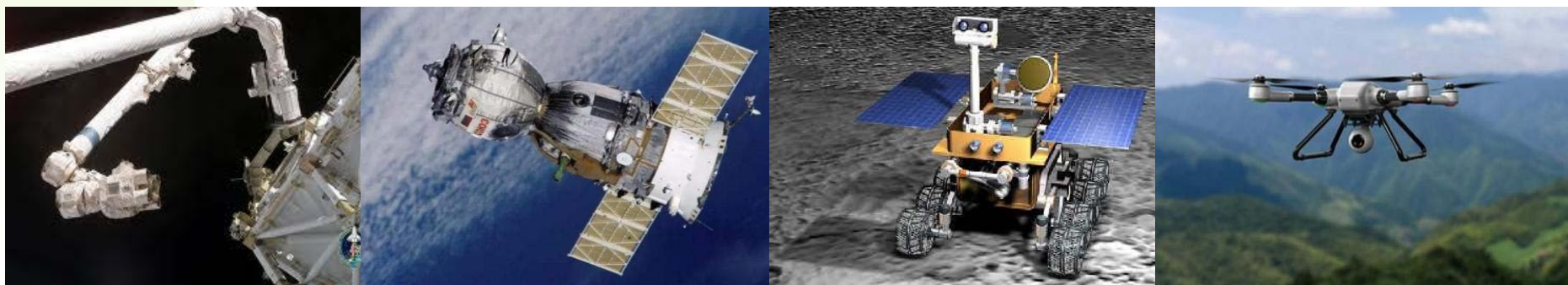
5.1.1 伺服系统的定义及特点

定义|组成|**分类**|特点

被控量：位置、速度、加速度、力矩等

执行器：电机、液压、气动、智能材料等

用 途：机器人、车床、卫星、无人车（无人机）等



开环/闭环；开关/连续；数字式/模拟式；单回路/多回路；
直接/间接；单自由度/多自由度；



6.1.1 伺服系统的定义及特点

定义|组成|分类|特点

对伺服系统的基本要求有稳定性、精准性和快速性。

- 稳定性好，稳定裕度大；
- 精度高：如光盘的定位精度到微米级(在很大程度上取决于检测装置的分辨率和精度)
- 快速响应性好：过渡过程时间短，秒级甚至更小
- 节能性好，安全性高；
- 控制对象一般都要做机械运动。



6.1 伺服系统的介绍

6.1.1

伺服系统的定义及特点

6.1.2

伺服系统的发展

6.1.3

伺服系统的数学模型



6.1.2 伺服系统的发展

发展历史 | 应用领域 | 发展趋势

最初的伺服控制应用于**液压**系统，然后随着**气动**元件和**电机**技术的发展逐渐进入了气动控制、电机控制领域。

- 在 20 世纪初，**机械液压伺服系统**已经出现在海军舰艇的操舵装置和飞机上的液压助力器中。
- 1934 年 Hertz 提出了一种可以精确跟踪变化的输入信号的**伺服机构**，形成了用于位置控制的伺服系统概念。
- 在二战期间，出现了使用滑阀的电液伺服系统。随后产生了各种**电液伺服阀**，使得液压伺服系统的响应性和控制精度大幅提升，在武器自动化和工业自动化中得到广泛应用。



6.1.2 伺服系统的发展

发展历史 | 应用领域 | 发展趋势

在气动伺服研究方面，

- 美国 Shearer 等人在 1956 年首次将**气动伺服机构**应用航天飞行器及导弹的姿态和飞行稳定控制中。
- 1979 年，德国亚琛工业大学的 W. Backe 教授研制出了第一个**气动伺服阀**，由于仿照液压伺服阀设计，性能不佳，未能推广应用。直到 FESTO 等公司的成熟**电气伺服阀**的研制成功，气动伺服技术才得以迅速发展。



6.1.2 伺服系统的发展

发展历史 | 应用领域 | 发展趋势

电机伺服系统出现的时间较晚，

- 最初的驱动电机为**步进电机**，并且使用**开环控制**。
- 直到 20 世纪 80 年代以后，随着微处理器技术、大功率高性能半导体器件和永磁材料制造工艺的发展，**交流伺服电机**逐渐取代步进电机成为电机控制的主导产品，使用编码器反馈闭环控制极大的提高了系统的控制精度和稳定性。



6.1.2 伺服系统的发展

发展历史 | 应用领域 | 发展趋势

由于交流伺服系统具有诸多优点，上世纪 90 年代引入中国后快速发展，已经广泛应用于航空航天、国防工业、生产自动化等领域，成为工业自动化的基础技术之一。



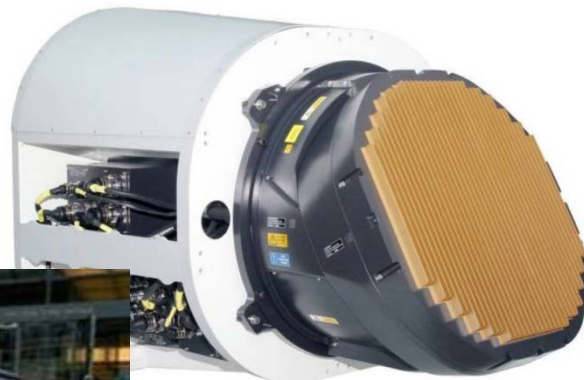


6.1.2 伺服系统的发展

发展历史 | 应用领域 | 发展趋势



导弹制导控制系统



雷达天线伺服系统



无人驾驶



光刻机



硬盘控制系统



6.1.2 伺服系统的发展

发展历史 | 应用领域 | 发展趋势

- 交流化
- 全数字化
- 器件新型化（智能材料）
- 高度集成化（驱动控制一体，舵机）
- 智能化（智能控制，运行监控）
- 模块化和网络化（总线化）
- CPS化（物联网）



6.1.2 伺服系统的发展

控制与仿真中心研制的各类伺服系统（学生是创新研发的主力）





6.1 伺服系统的介绍

6.1.1

伺服系统的定义及特点

6.1.2

伺服系统的发展

6.1.3

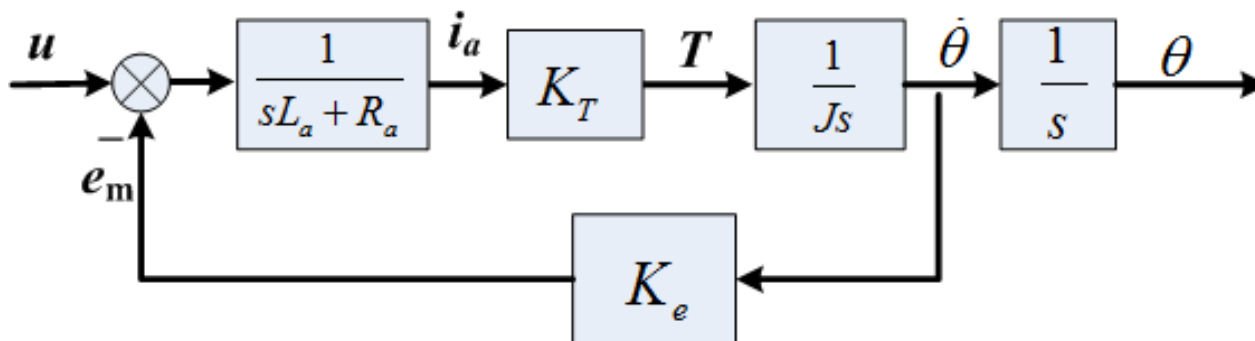
伺服系统的数学模型



6.1.3 伺服系统的数学模型

简化

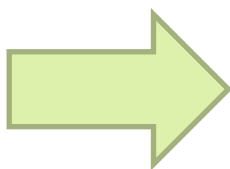
数学模型 | 特点分析



$$u = e_m + i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt}$$

$$T = K_T i_a = J \ddot{\theta} + B \dot{\theta}$$

$$e_m = K_e \dot{\theta}$$



$$\frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{K_T / R_a}{s(Js + K_T K_e / R_a)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)}$$

对不对

怎么解释?

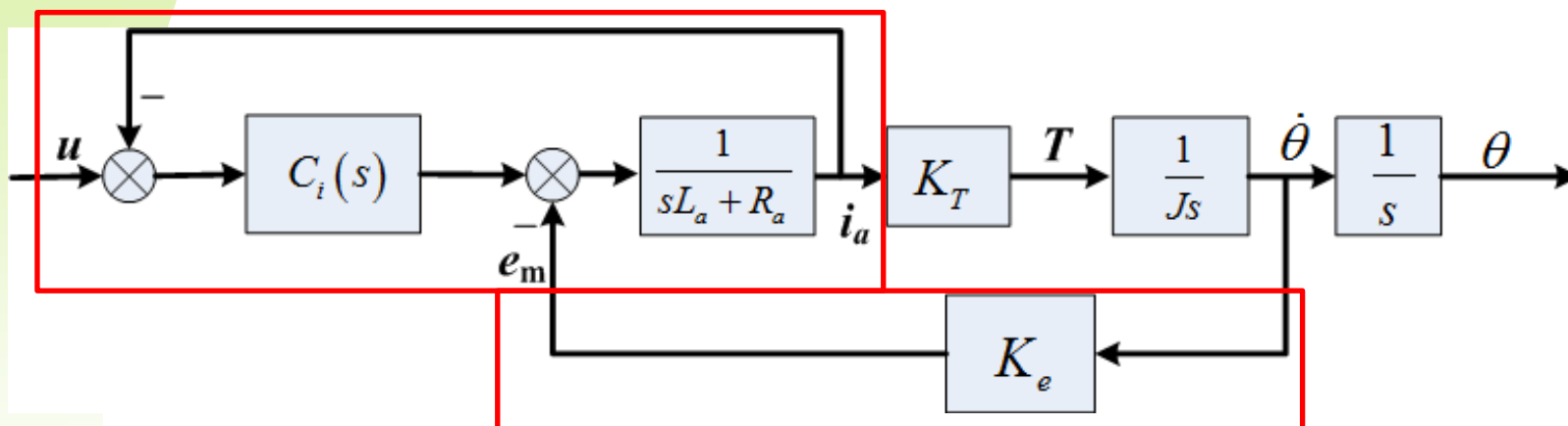
直流电机框图



6.1.3 伺服系统的数学模型

简化

数学模型 | 特点分析



带电流反馈的直流电机框图

对不对

$$\frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{K_T}{Js^2}$$

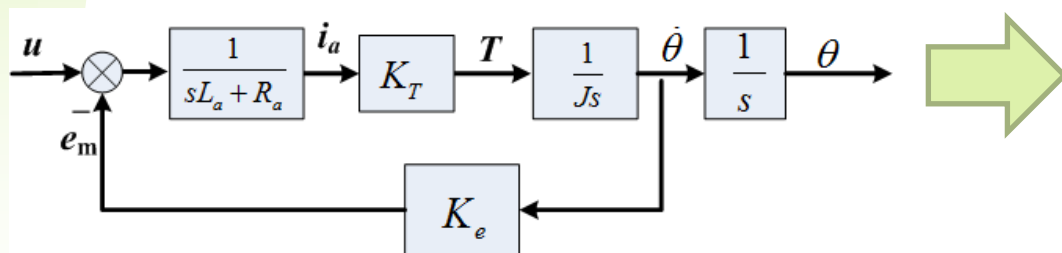
怎么解释?



6.1.3 伺服系统的数学模型

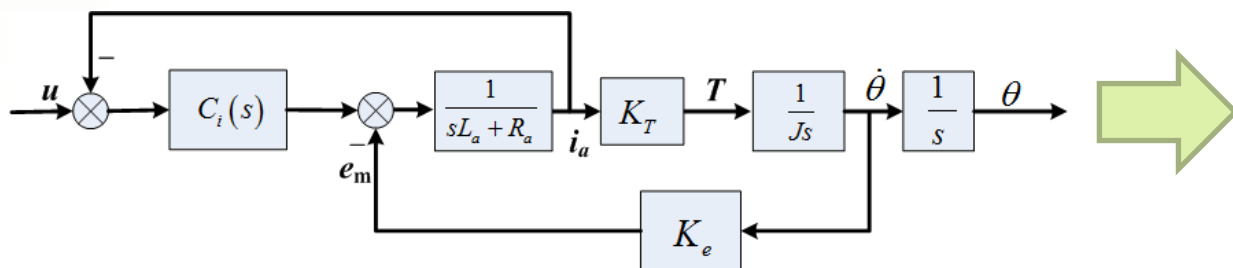
数学模型 | 特点分析

电压源控制下电机的传递函数有一个积分环节，电流源控制下的电机的传递函数中有两个积分环节。这就是伺服系统的特点——位置伺服系统的数学模型**一定有积分环节**。



$$\frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)}$$

$$\frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)(T_e s + 1)}$$



$$\frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{K_T}{Js^2}$$

$$\frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{K_T / B}{s(\tau_m s + 1)}$$



主要内容

A1

伺服系统的介绍

A2

I型系统

A3

II型系统

A4

伺服系统的校正



6.2 I型系统

6.2.1 基本 I 型系统

6.2.2 改进 I 型系统



6.2.1 基本I型系统

基本形式 | 性能关系 | 示例分析 | 总结

基本I型系统是指只有一个转折频率的系统，传递函数为

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

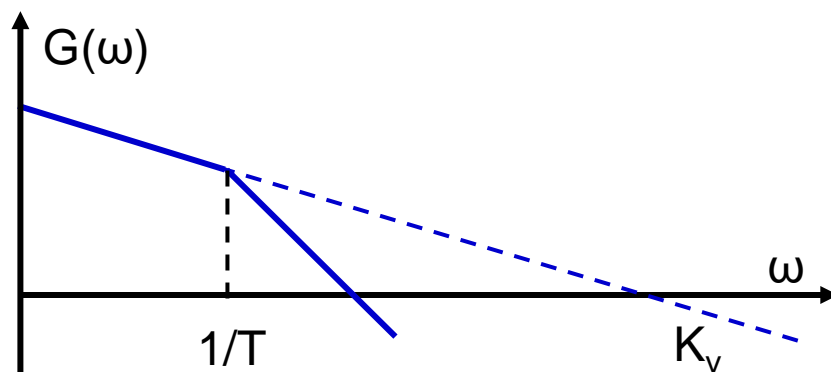
频率特性为 $G(j\omega) = \frac{K_v}{j\omega(j\omega T + 1)} = \frac{K_v T}{j\omega T(j\omega T + 1)} = \frac{K}{j\Omega(j\Omega + 1)}$

其中

$$\Omega = \omega T$$

$$K = K_v T$$

K 为无量纲增益

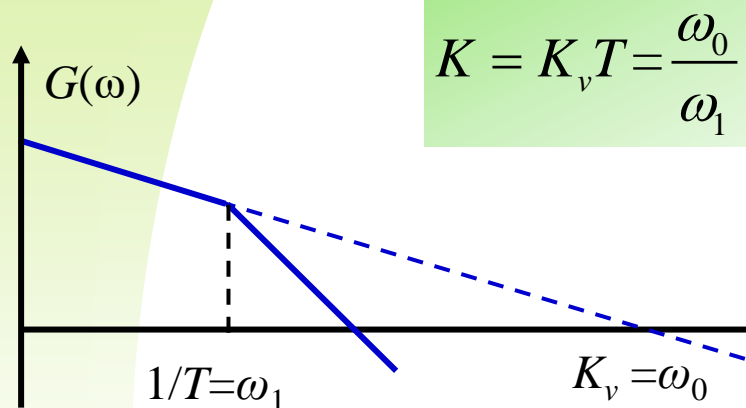




6.2.1 基本I型系统

基本形式 | 性能关系 | 示例分析 | 总结

闭环频率特性



$$\Phi(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)} = \frac{K_v / T}{s^2 + s/T + K_v / T}$$

$$\Phi(s_\Omega) = \frac{K}{s_\Omega^2 + s_\Omega + K} \Big|_{s_\Omega = sT}$$

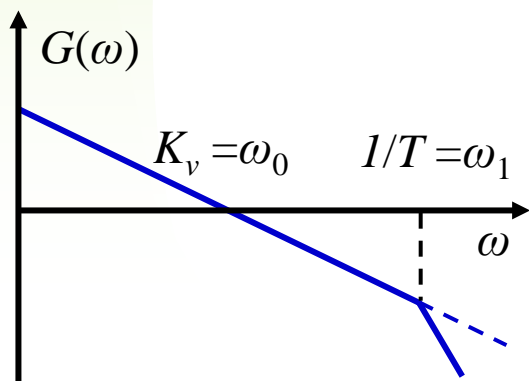
K	0.5	1	2
单位阶跃输入下输出的峰值	1.05	1.15	1.3
阻尼比 $1 / 2\sqrt{K}$	0.707	0.5	0.35
相位裕度	66°	52°	39°
闭环谐振峰值 M_p	≤ 1	1.15	1.5



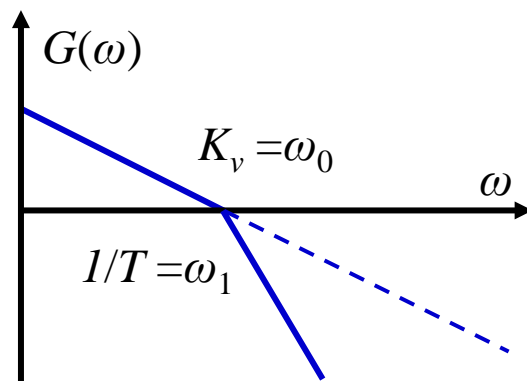
6.2.1 基本I型系统

基本形式 | 性能关系 | 示例分析 | 总结

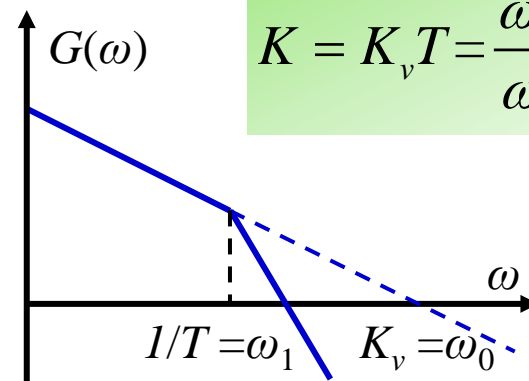
K	0.5	1	2
单位阶跃输入下输出的峰值	1.05	1.15	1.3
阻尼比 $1/2\sqrt{K}$	0.707	0.5	0.35
相位裕度	66°	52°	39°
闭环谐振峰值 M_p	≤ 1	1.15	1.5



$K = 0.5$



$K = 1$



$K = 2$

$$K = K_v T = \frac{\omega_0}{\omega_1}$$



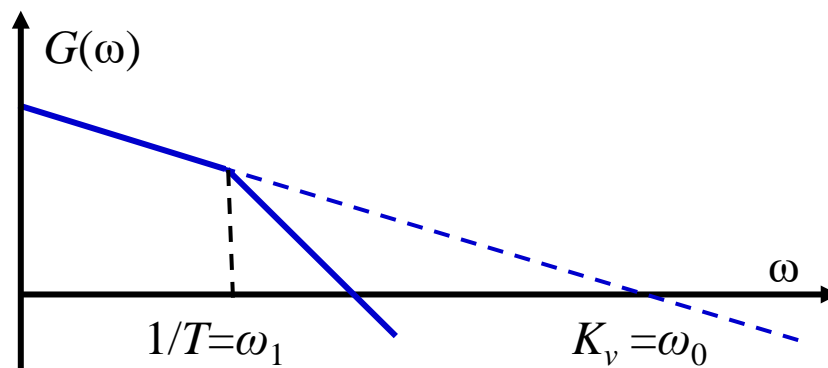
6.2.1 基本I型系统

基本形式 | 性能关系 | 示例分析 | 总结

➤ 等效噪声带宽

基本I型系统开环:

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



闭环系统的等效噪声带宽:

$$\omega_{BN} = \frac{\pi}{2} K_v$$

等效噪声带宽只与 K_v 有关, 而不由 K 直接决定, 综合所有指标来看 $K=1$ 较为理想, 所以对于基本 I 型系统, 通常可以按照 $K=1$ 设计。(即使为了压低等效噪声带宽, K_v 必须很小, 只要 T 可设计也能实现 $K=1$)

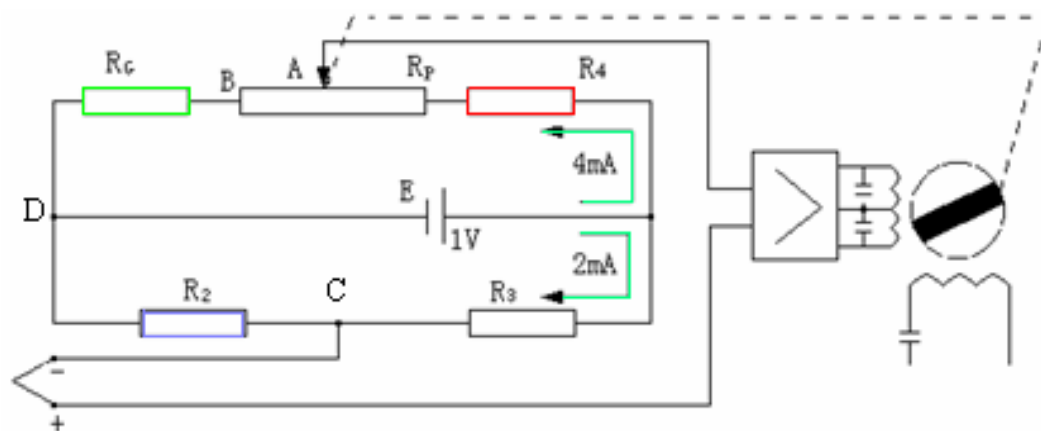
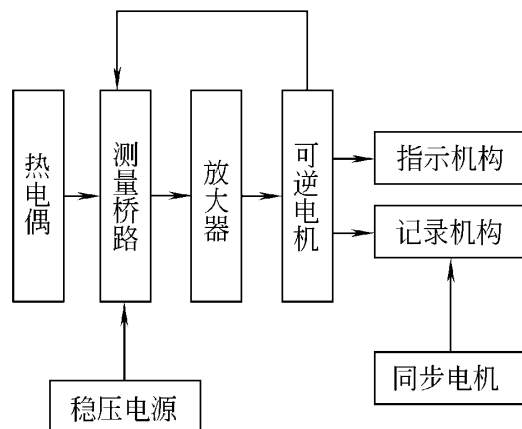
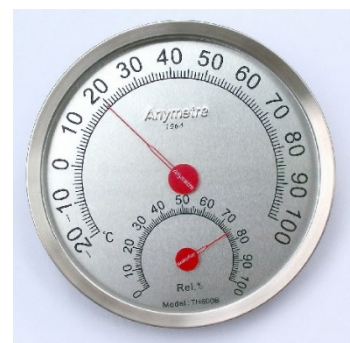


6.2.1 基本I型系统

基本形式 | 性能关系 | 示例分析 | 总结

◆ 例1：仪表随动系统（温度指示） 这个系统应该如何设计？

仪表用于指示和记录热电偶测得的温度变化，
仪表指针随温度变化，该功能由电机、电桥和
放大器等部件实现。这是一个典型的随动系统。

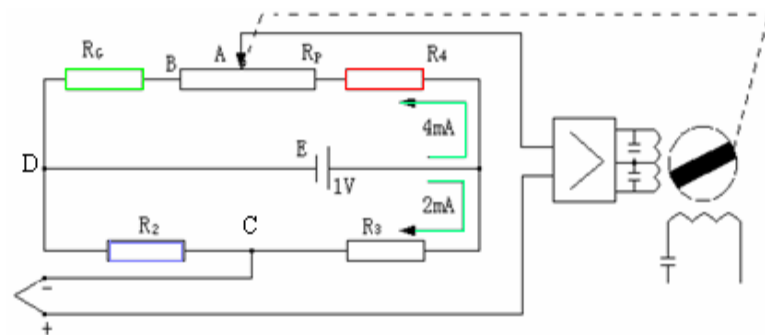
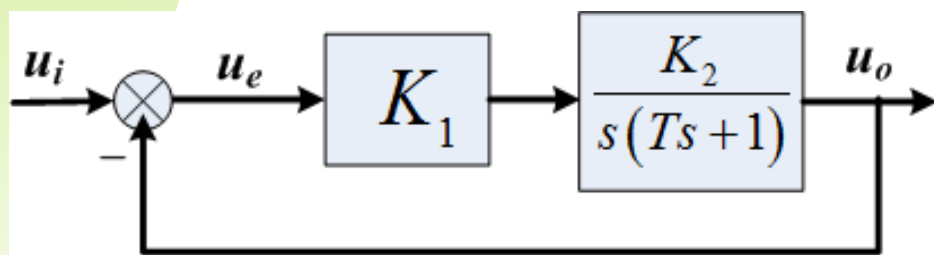




6.2.1 基本I型系统

基本形式 | 性能关系 | 示例分析 | 总结

◆ 例1：仪表随动系统

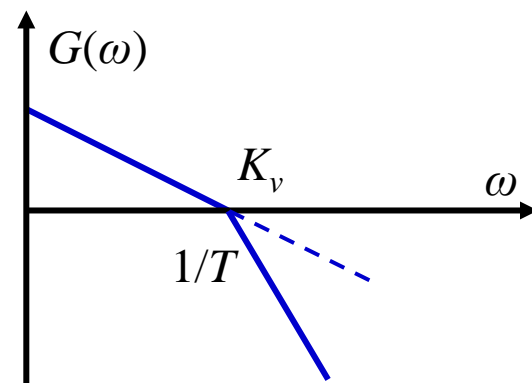


已知 $T = 0.05s$

$$K = K_v \cdot T$$

$$K = K_v T = 1 \quad \Rightarrow \quad K_v = \frac{1}{T} = 20$$

$$K_v = K_1 K_2 \quad \Rightarrow \quad K_1 = \frac{K_v}{K_2} = \frac{20}{K_2}$$

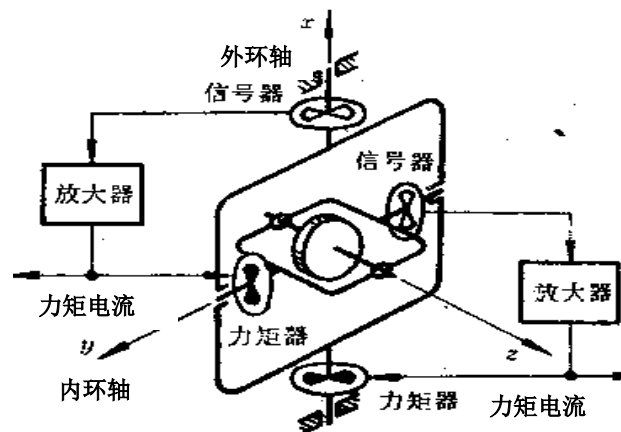
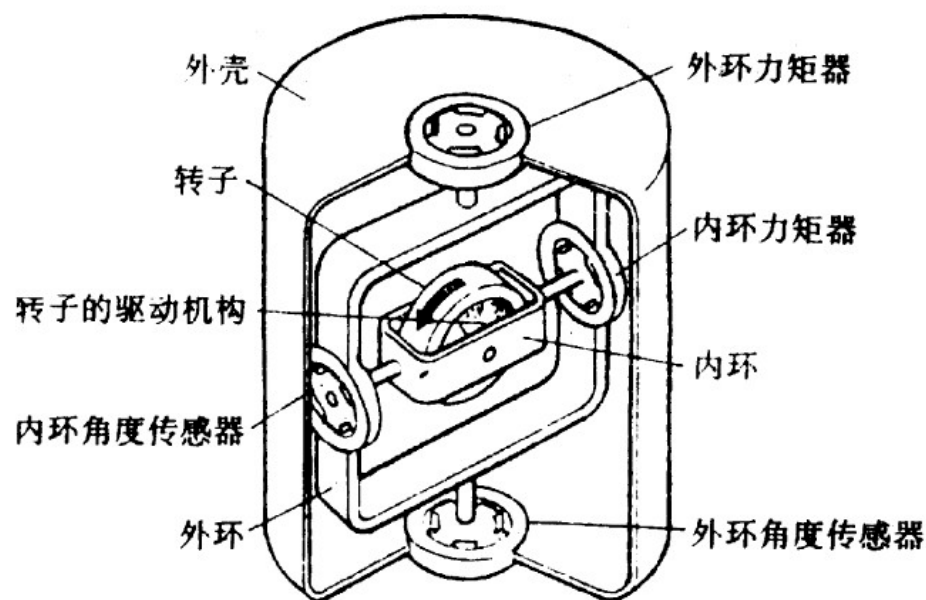




6.2.1 基本I型系统

基本形式 | 性能关系 | 示例分析 | 总结

◆ 例2：陀螺力反馈测漂回路的设计



$$K_M I_{Bx} = \omega_{iy} H + M_b$$

$$\omega_d = \frac{M_b}{H} = K_M I_{Bx} / H - \omega_{iy}$$

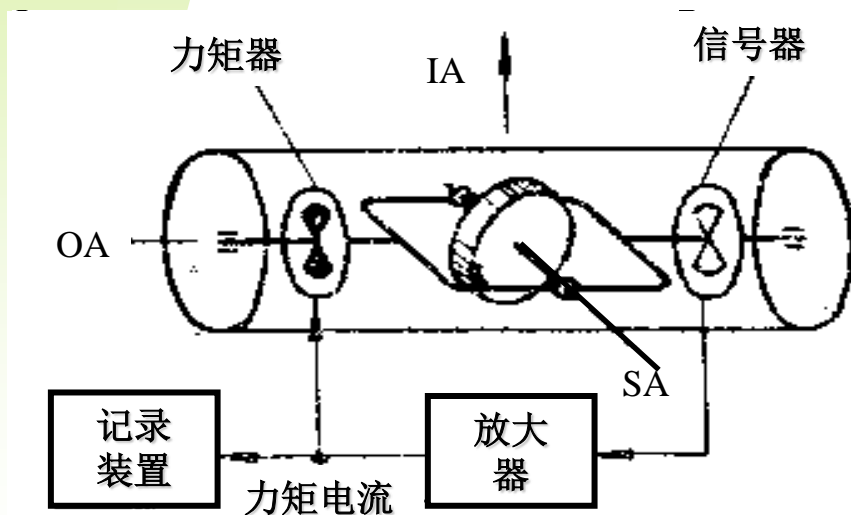
通过角位置偏差来测量陀螺的漂移，进而生成力矩器指令，驱动框架运动来消除偏差，这是典型的随动系统。



6.2.1 基本I型系统

基本形式 | 性能关系 | 示例分析 | 总结

Step 1: 工作原理分析



$$\omega_d = \sqrt{\omega_{dx}^2 + \omega_{dy}^2}$$



$$K_M I_{Bx} = \omega_{iy} H + M_b$$

$$\omega_d = \frac{M_b}{H} = K_M I_{Bx} / H - \omega_{iy}$$

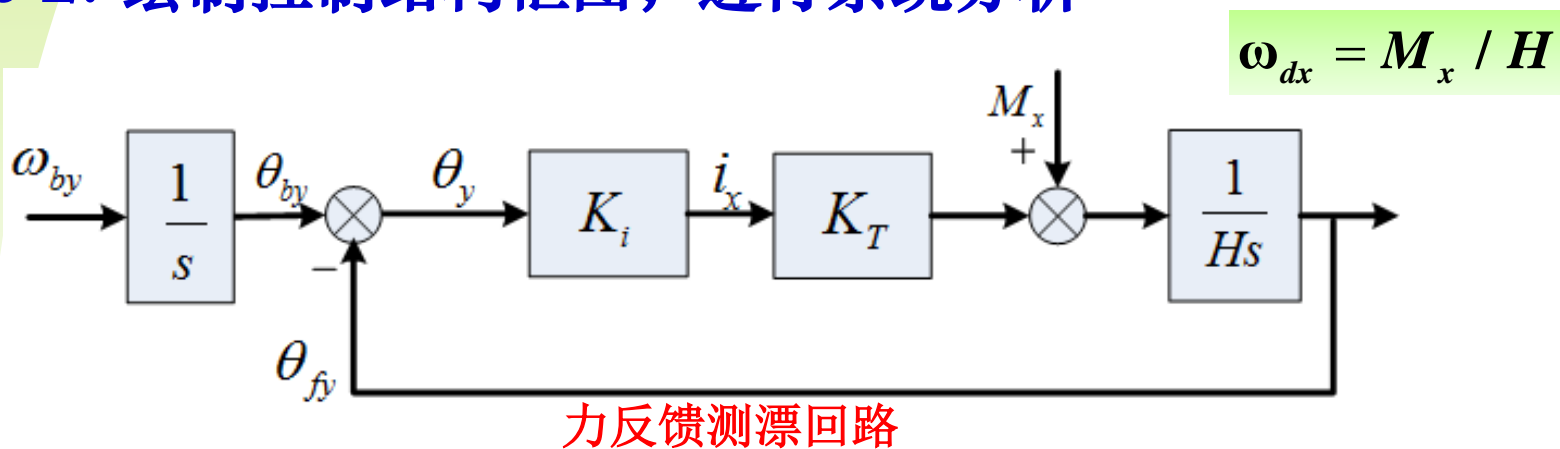
一方面要消除摩擦等干扰力矩引起的漂移，另一方面要消除地球自转引起的漂移。



6.2.1 基本I型系统

基本形式 | 性能关系 | 示例分析 | 总结

Step 2: 绘制控制结构框图，进行系统分析



控制系统设计步骤

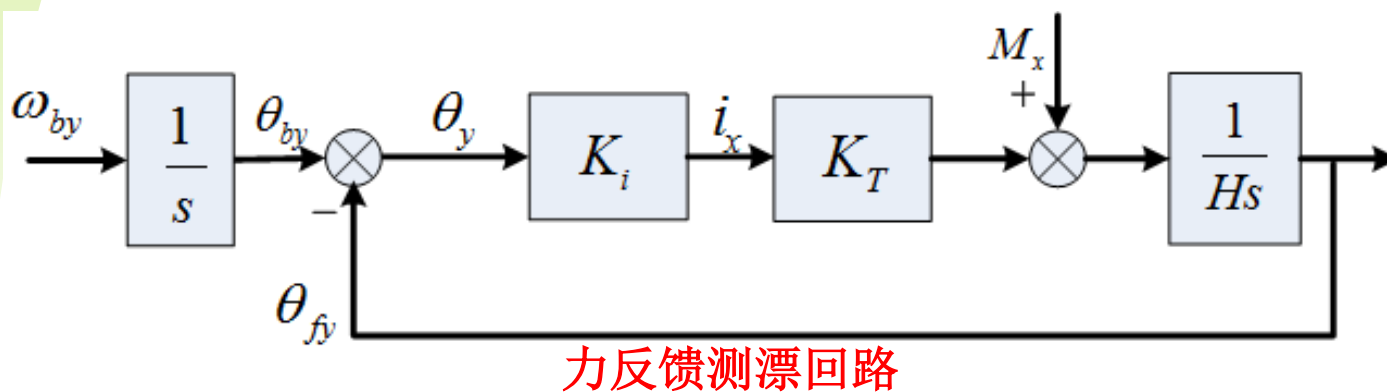
- 1、输入信号——地球转速 ω_{by} 和干扰力矩 M_x
- 2、精度需求——在恒定转速下，失调角不大于 $1''$
- 3、控制器设计



6.2.1 基本I型系统

基本形式 | 性能关系 | 示例分析 | 总结

Step 2: 绘制控制结构框图，进行系统分析



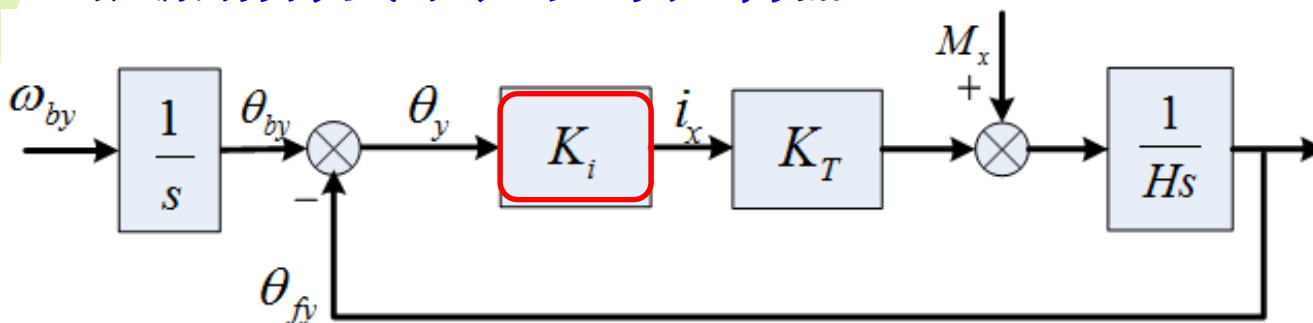
输入信号——地球转速 ω_{by} 引起的陀螺漂移比力矩器干扰力矩 M_x 引起的陀螺漂移高出1000倍， M_x 引起的失调角误差可通过闭环得以抑制，不必单独考虑。



6.2.1 基本I型系统

基本形式 | 性能关系 | 示例分析 | 总结

Step 3: 根据指标要求, 设计控制器



力反馈测漂回路

指标: 地球自转时速 $15^\circ/\text{h}$ 条件下, 系统的失调角不大于 $1''$

$$e(t) \approx \frac{1}{K_v} \dot{r} \quad \Rightarrow \quad K_v \geq \frac{\dot{r}_{\max}}{e_{\max}} = 15\text{s}^{-1}$$

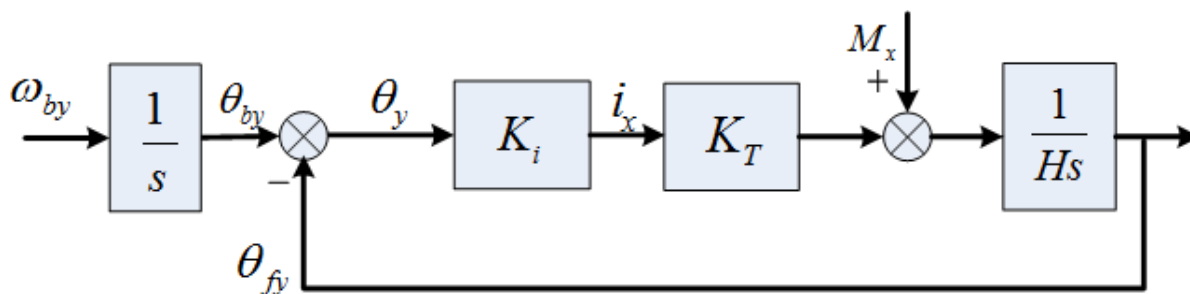
$$K_v = \frac{K_i K_T}{H} \quad \xrightarrow[H = 4 \times 10^4 \text{ g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}]{K_T = 2 \text{ g} \cdot \text{cm}/\text{mA}} \quad K_i = 3 \times 10^5 \text{ mA} / \text{rad} = 1.45 \text{ mA}/(")$$



6.2.1 基本I型系统

基本形式 | 性能关系 | 示例分析 | 总结

Step 3: 明确指标要求, 确定控制器



力反馈测漂回路

设计: 应将其校正成基本I型系统, 应增加一个转折频率

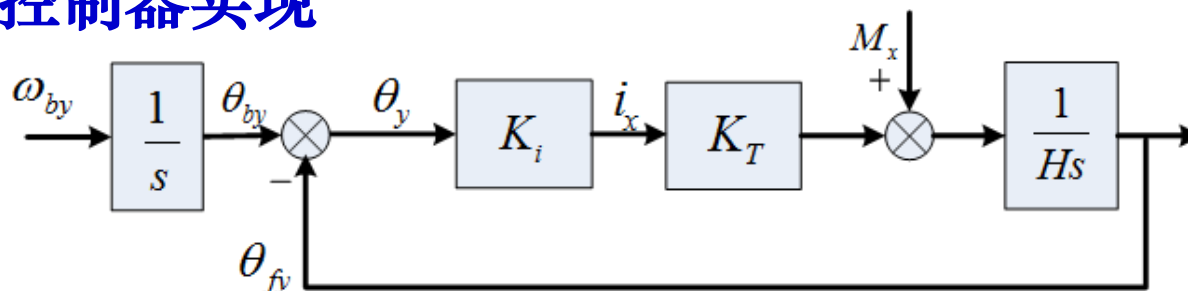
开环传递函数 $G(s) = \frac{K_v}{s}$ $G'(s) = \frac{1}{Ts + 1}$



6.2.1 基本I型系统

基本形式 | 性能关系 | 示例分析 | 总结

Step 4: 控制器实现

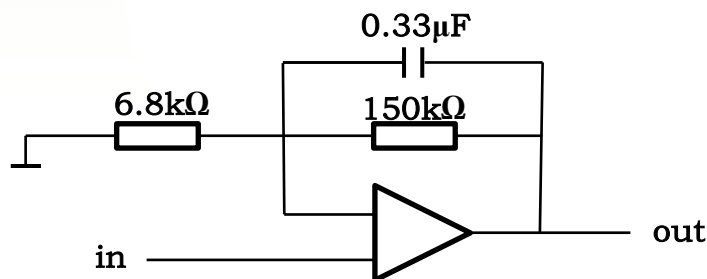


力反馈测漂回路

设计：为成为基本I型系统，应在回路中增加一个转折频率15rad/s

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

$$K = 1 = K_v \cdot T$$



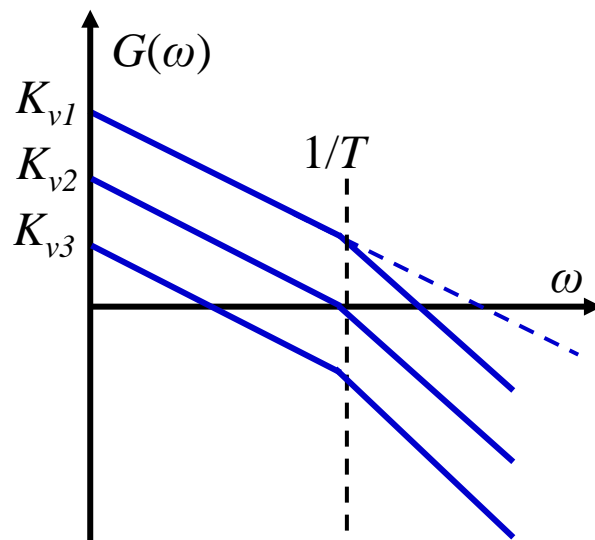
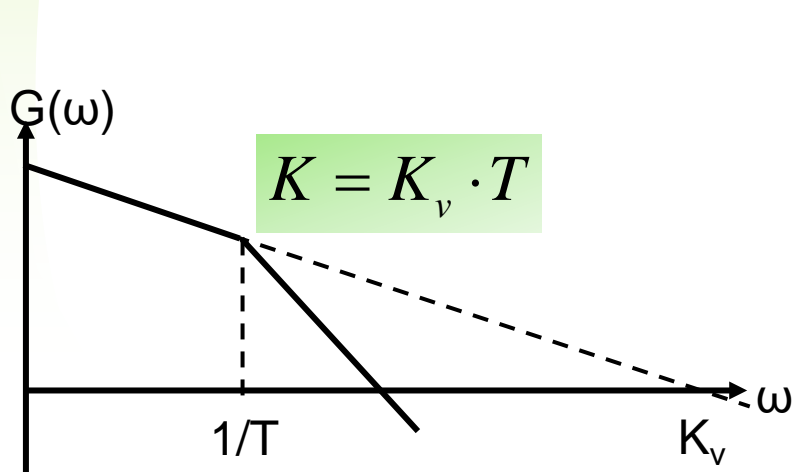
$$G'(s) = \frac{s + 460}{s + 20}$$



6.2.1 基本I型系统

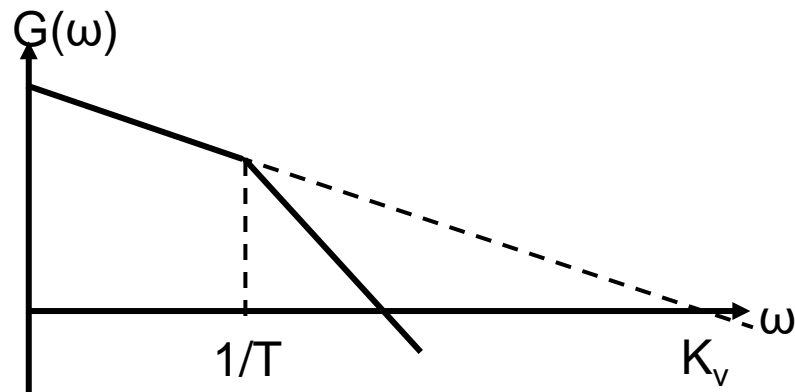
基本形式 | 性能关系 | 示例分析 | 总结

基本 I 型系统只考虑参数 K ，带宽与参数 K 的大小无关，由于基本 I 型系统的结构形式限制，性能往往不能满足跟踪精度要求。





如何提升基本I型性能?



正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂



总结

本节课内容回顾

- 给出了伺服系统的定义；
- 介绍了伺服系统的发展历史和一些实例；
- 推导了伺服系统的两种模型；
- 讲解了基本I型系统的特点及设计方法，设计时只要考虑一个参数就决定了系统的性能。

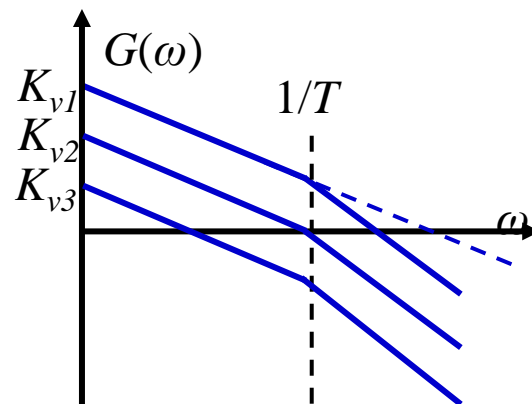


第19次 课后作业

1 必选作业

1 仿真题：对于下面的给定系统，按照下表来设置 $K=K_vT$ ，通过仿真和Bode图绘制，验证下述表格中的数据。

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



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	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



第19次 课后作业

2 可选作业

- 19.1 举出几个课上未介绍的伺服系统，分析一下他们的典型指令形式和可能的指标要求；
- 19.2 举出几个利用闭环控制来实现驱动或测量的功能例子（考虑一些传感器和执行器）；
- 19.3 分析课程中的建模、分析和设计中涉及到的各种简化方法，总结其中的一般原则；
- 19.4 梳理课上所讲Anti-Windup拓展创新思路，看看是否还能想到其他的研究思路；
- 19.5 饱和有时能减小超调，噪声能加快响应速度，干扰有时能够减小误差，摄动有时能提高性能等，你能理解这些现象吗？能找到类似的例子吗？



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（怎样对付非线性）；
- s 反馈中的反馈，闭环中的闭环（只要有用就可以嵌套着使用）；
- t 特殊到一般，简单到复杂（走上科研创新之路）；



Thank You !



哈尔滨工业大学控制与仿真中心