



第 6 章 伺服系统的设计

——Part 1

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）

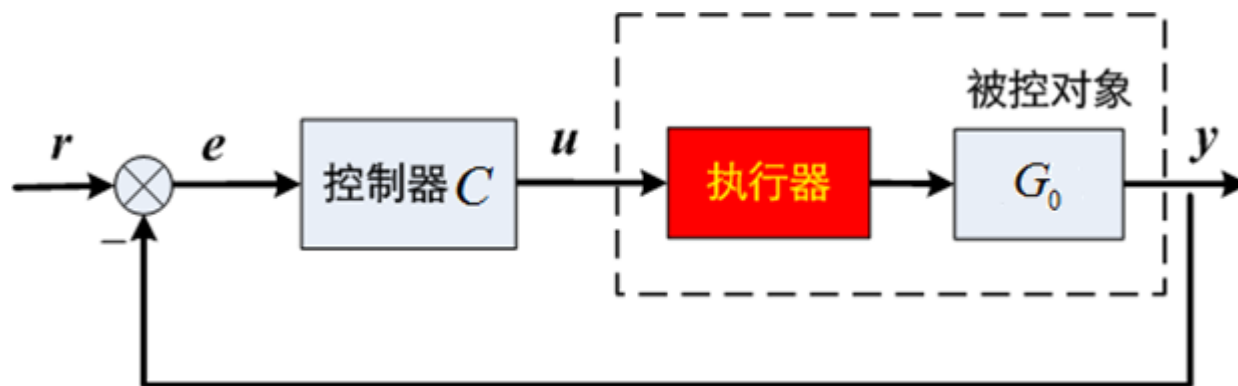
陈松林（控制与仿真中心）



上一节内容回顾

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；**
阀门的开合不能超过全开或全闭等。



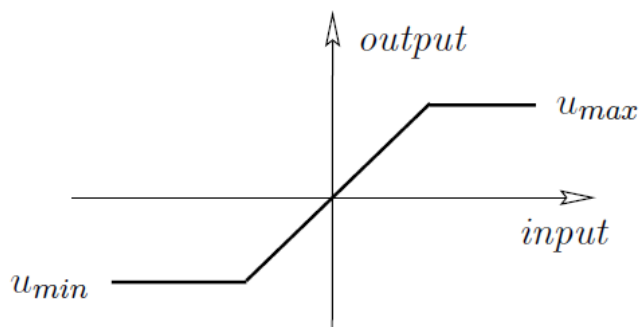
当控制量达到执行器的极限（幅值极限或变化速率极限）
时，**反馈回路失效，系统将运行于开环状态。**



上一节内容回顾

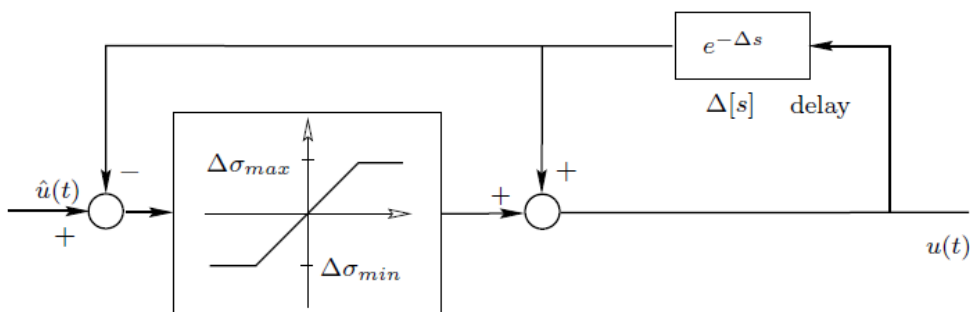
执行器约束模型

• 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

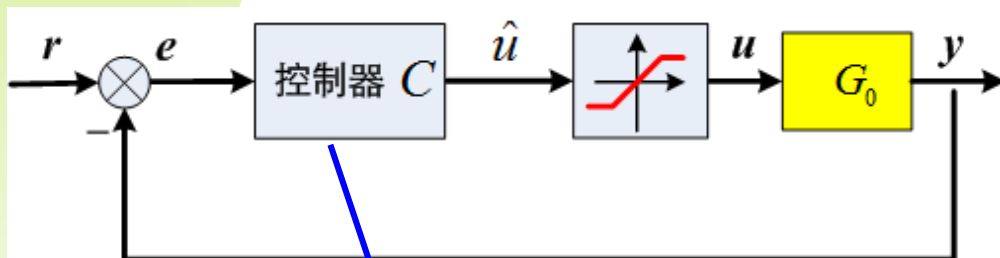


$$\dot{u}(t) = \text{Sat}\langle \dot{\hat{u}}(t) \rangle \triangleq \begin{cases} \sigma_{\max} & \text{if } \dot{\hat{u}}(t) > \sigma_{\max}, \\ \dot{\hat{u}}(t) & \text{if } \sigma_{\min} \leq \dot{\hat{u}}(t) \leq \sigma_{\max}, \\ \sigma_{\min} & \text{if } \dot{\hat{u}}(t) < \sigma_{\min}. \end{cases}$$



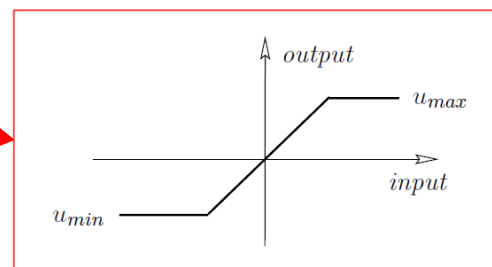
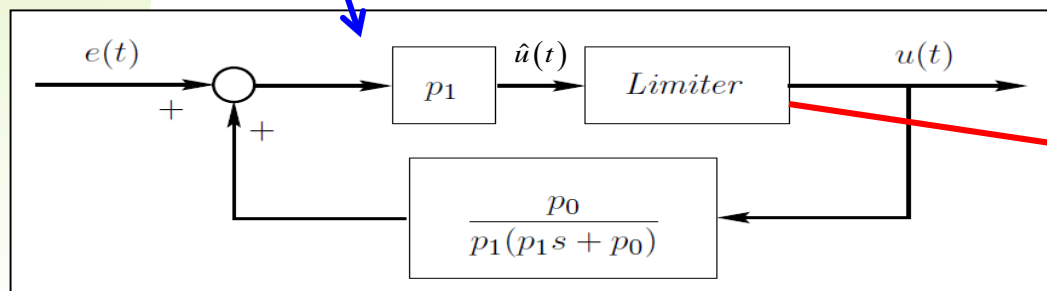
上一节内容回顾

PI控制器的Anti-Windup设计



线性工作范围内的传递函数

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



饱和并不一定都是积分引起的，而且很多控制器中并不一定存在积分项，对于一般的控制器，如何进行Anti-Windup设计？



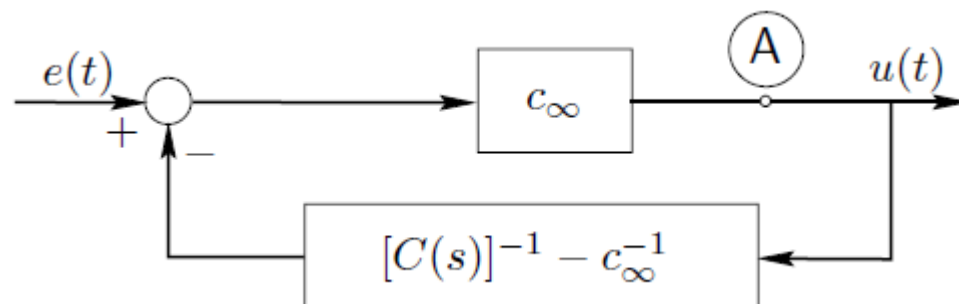
上一节内容回顾

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。

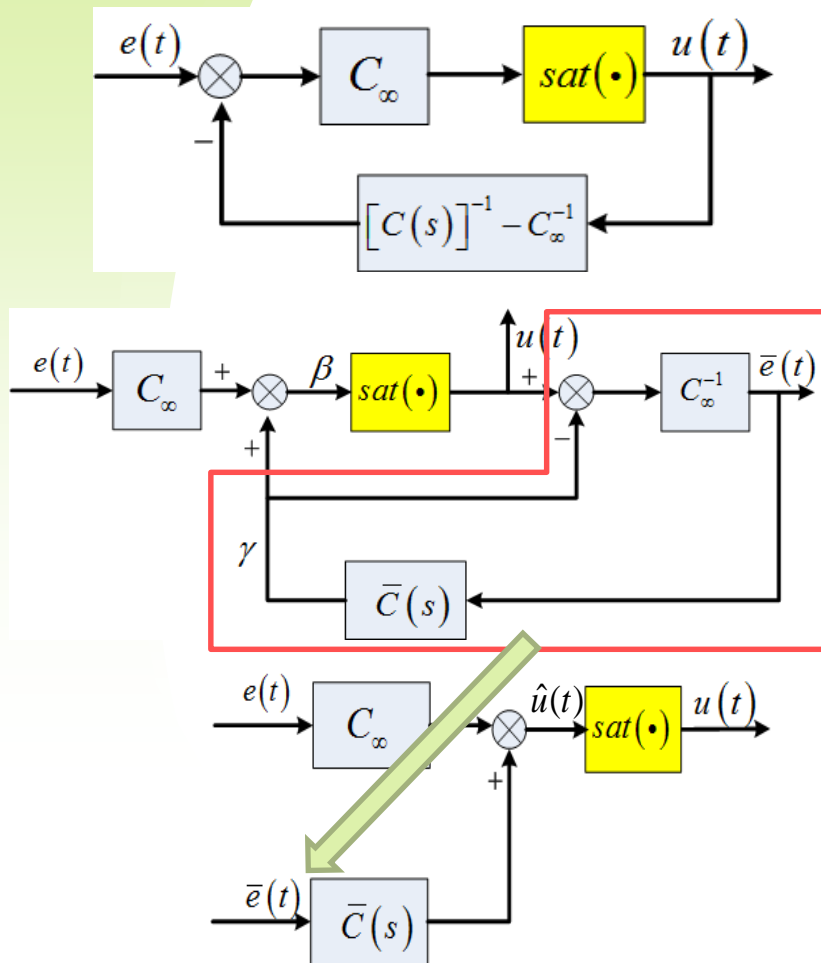
设计策略：

- (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。



上一节内容回顾

Anti-Windup设计思想

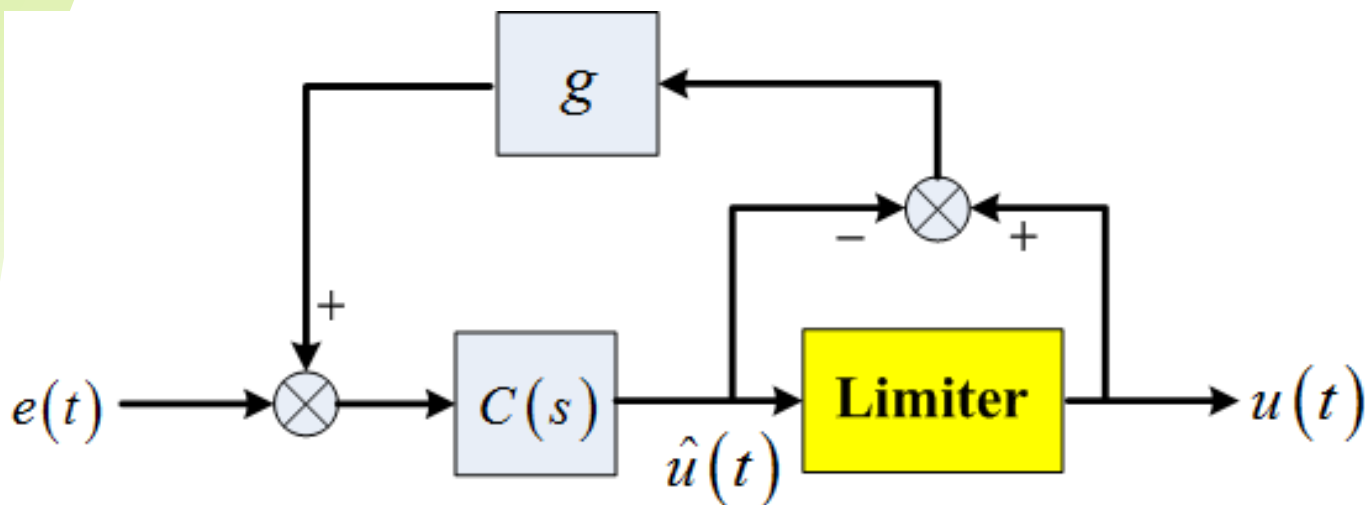


Anti-Windup 设计，从原理上可以理解为，**用实际的控制量来调节控制器的输入**，也就是**误差 $e(t)$** ，使其能够始终保证 $\hat{u}(t) = u(t)$ ，这样能够有效避免系统进入深度饱和，而且在误差变号后，快速退出饱和。



上一节内容回顾

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



上一节内容回顾

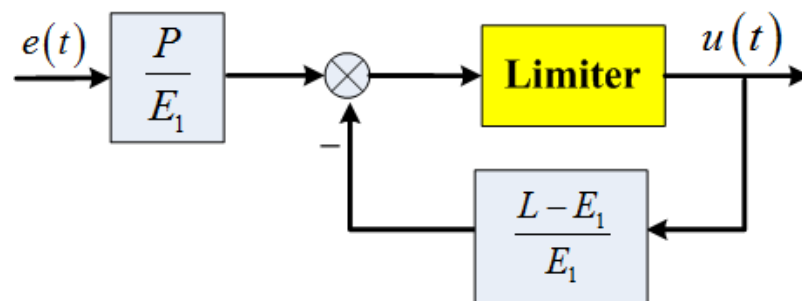
Anti-Windup的一般形式——第二种

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、
⋮



上一节内容回顾

Anti-Windup内容带来的启发

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，再逐渐弱化假设，甚至去除假设的过程。

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

⋮





Contents

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，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若干类别进行讲解，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

本节课需要掌握的内容

- 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

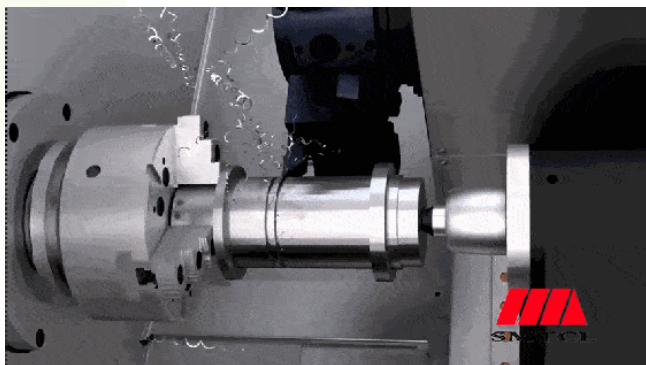
伺服系统的数学模型



5.1.1 伺服系统的定义及特点

◆ 伺服系统的定义

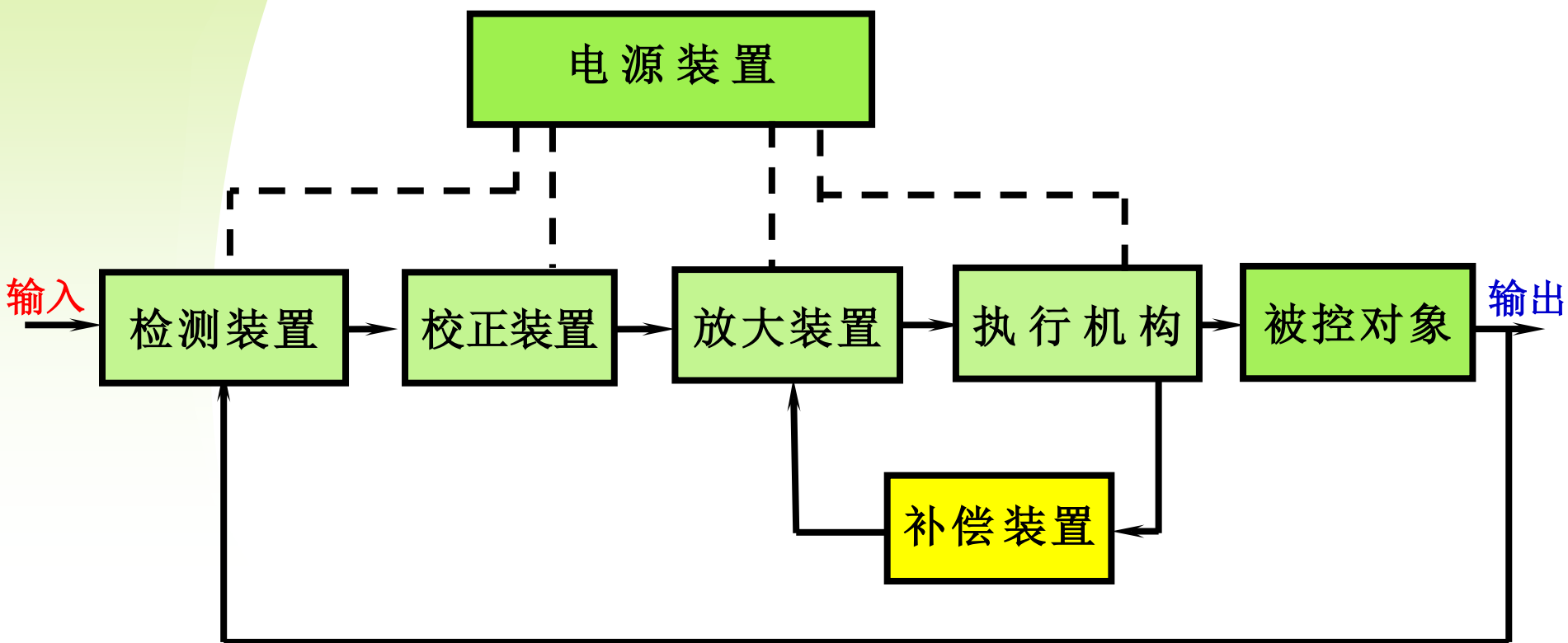
伺服系统是用来控制被控对象的某种状态，使其能自动地、连续地、精确地复现输入信号的变化规律的控制系统。





6.1.1 伺服系统的定义及特点

◆ 伺服系统的基本组成





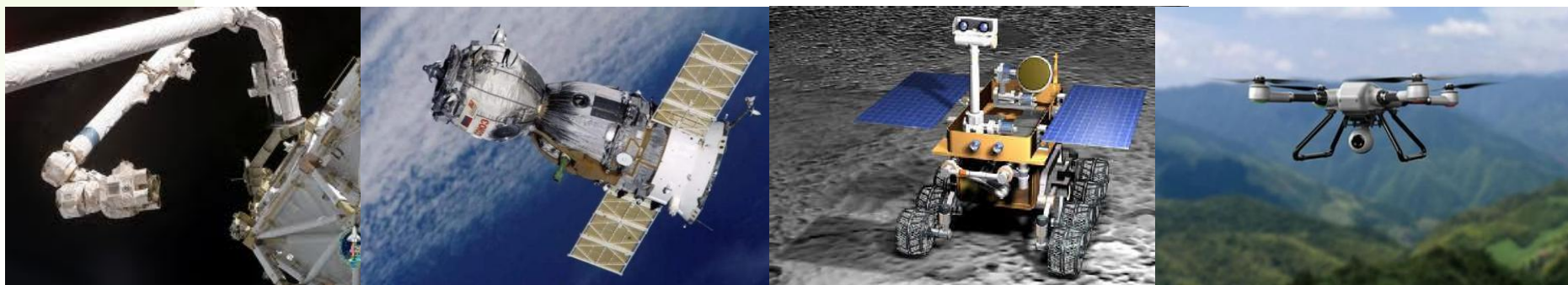
5.1.1 伺服系统的定义及特点

◆ 伺服系统的分类

被控量：位置、速度、加速度、力矩等

执行器：电机伺服系统、液压伺服系统等

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

◆ 伺服系统的特点

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；
- ★ 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

◆ 伺服系统的发展

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

◆ 伺服系统的发展

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

◆ 伺服系统的发展

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

◆ 伺服系统的发展

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。



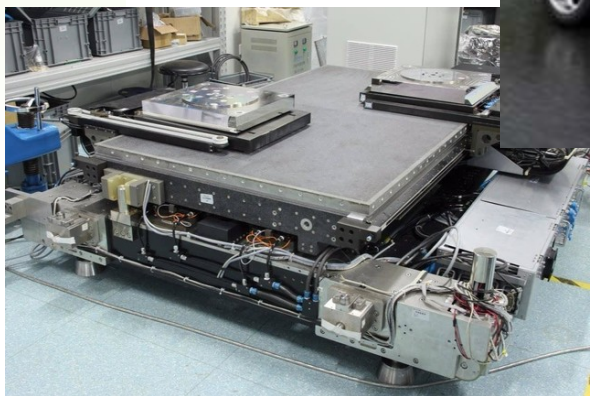


6.1.2 伺服系统的发展

◆ 伺服系统的应用



导弹制导控制系统



光刻机



无人驾驶



雷达天线伺服系统



硬盘控制系统



6.1.2 伺服系统的发展

◆ 伺服系统的发展趋势

- ◆ 交流化
- ◆ 全数字化
- ◆ 采用新型电力电子半导体器件
- ◆ 高度集成化
- ◆ 智能化
- ◆ 模块化和网络化



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

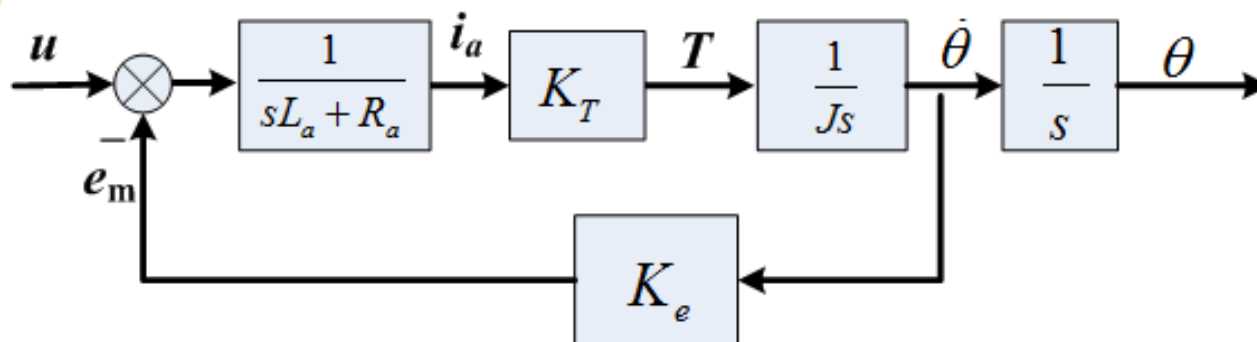
6.1.3

伺服系统的数学模型



6.1.3 伺服系统的数学模型

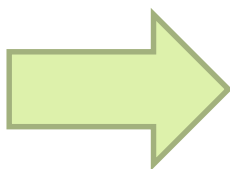
◆ 伺服系统的数学模型（直流电机）



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

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

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



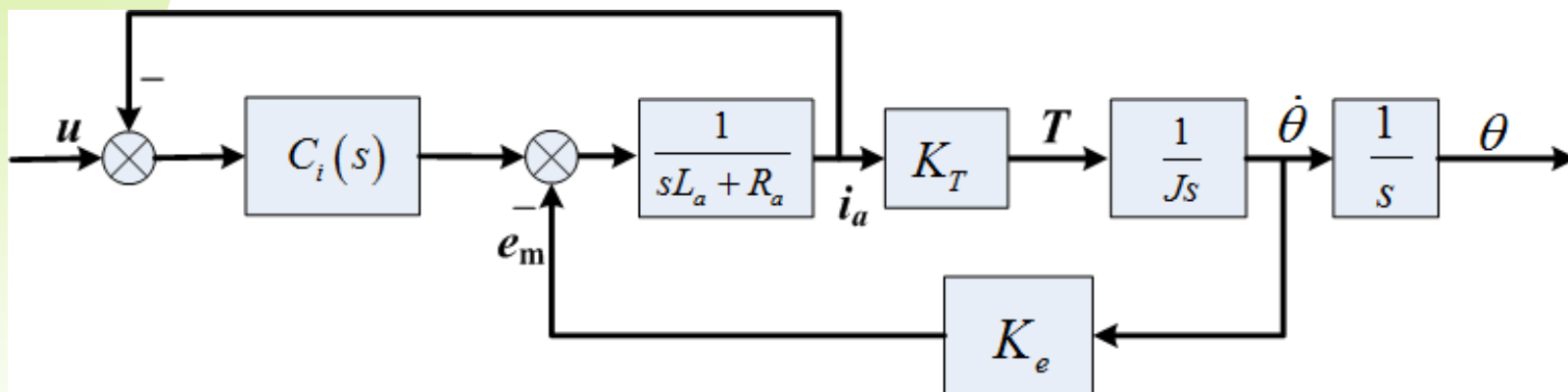
$$\frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{K_T / R_a}{s(Js + K_T K_e / R_a)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)}$$

直流电机框图



6.1.3 伺服系统的数学模型

◆ 伺服系统的数学模型



带电流反馈的直流电机框图

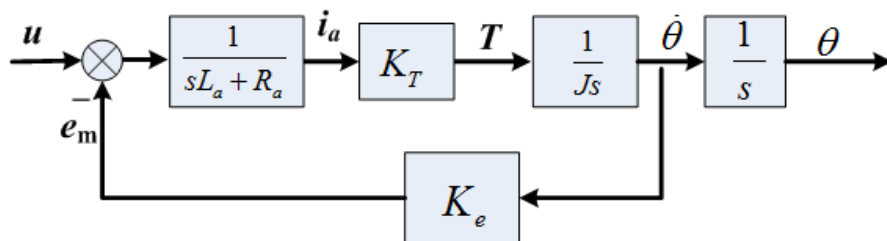
$$\frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{K_T}{Js^2}$$



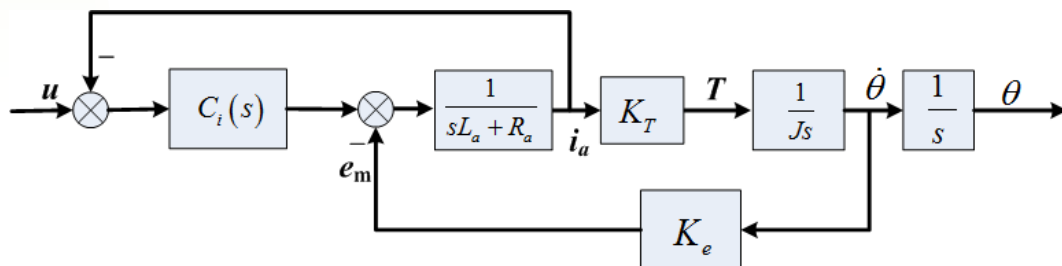
6.1.3 伺服系统的数学模型

◆ 伺服系统数学模型的特点

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。**



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



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



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I型系统的形式

基本I型系统是指只有一个转折频率的系统，传递函数为

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

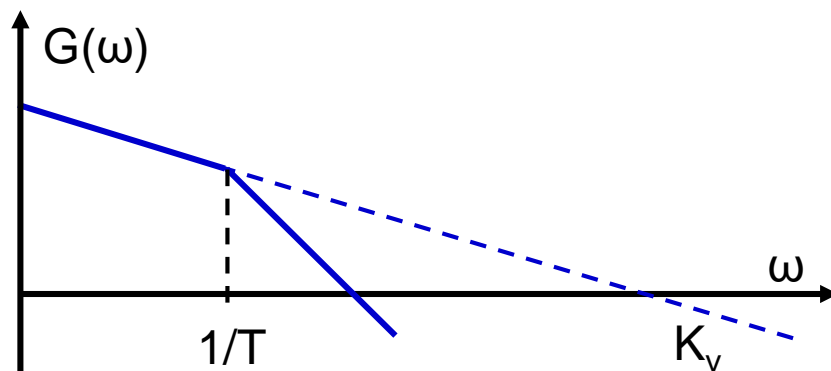
频率特性为 $G(j\omega) = \frac{K_v}{j\omega(j\omega T + 1)} = \frac{K_v T}{j\omega T(j\omega T + 1)} = \frac{K}{j\Omega(j\Omega + 1)}$

其中

$$\Omega = \omega T$$

$$K = K_v T$$

K 为无量纲增益

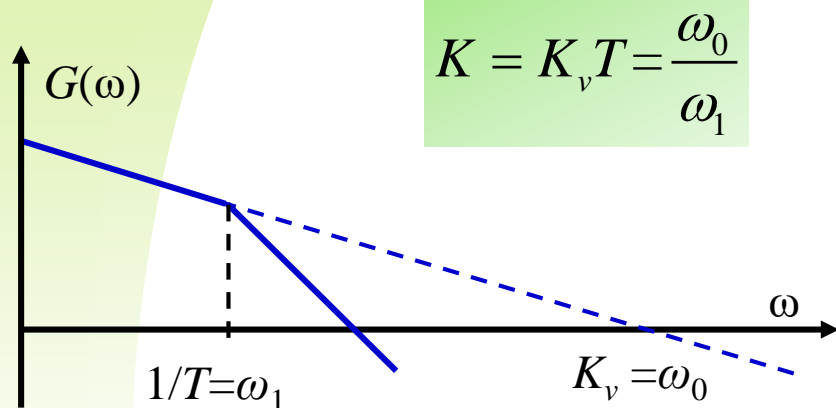




6.2.1 基本I型系统

◆ K 与系统性能的关系

闭环频率特性



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

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

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

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

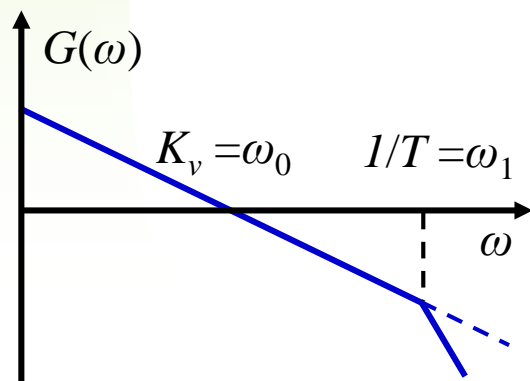


6.2.1 基本I型系统

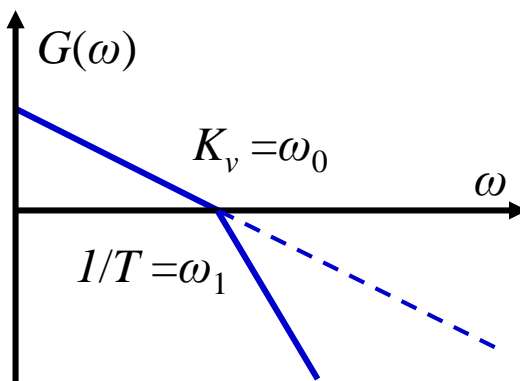
◆K与系统性能的关系

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

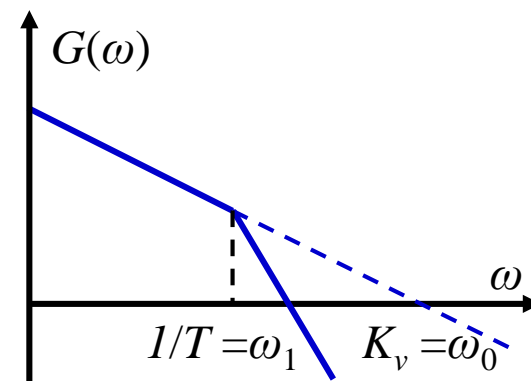
K	0.5	1	2
单位阶跃输入下输出的峰值	1.05	1.15	1.3
阻尼比 $1/2\sqrt{K}$	0.707	0.5	0.35
相位裕度	66°	52°	39°
闭环谐振峰值 M_p	≤ 1	1.15	1.5



$K = 0.5$



$K = 1$

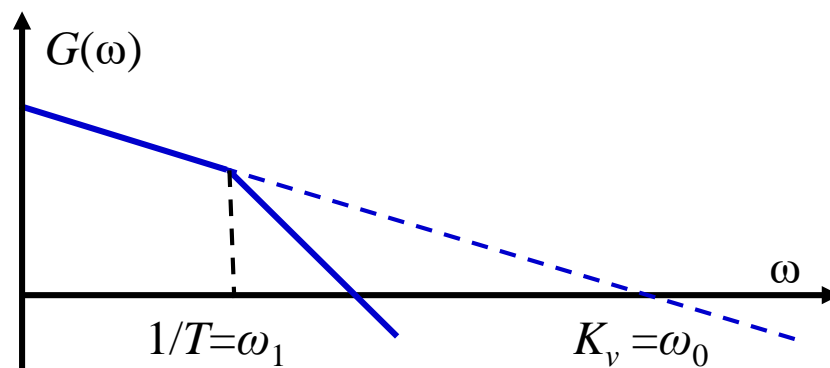


$K = 2$



6.2.1 基本I型系统

◆ 等效噪声带宽



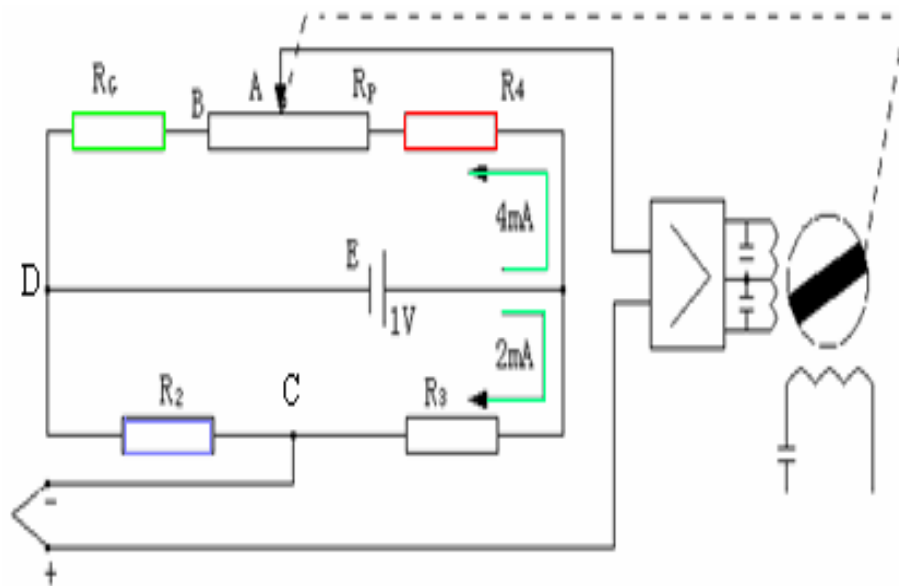
基本I型系统开环: $G(s) = \frac{K_v}{s(Ts + 1)}$ 一阶系统开环: $G(s) = \frac{1}{Ts + 1}$

等效噪声带宽: $\omega_{BN} = \frac{\pi}{2} K_v$ 等效噪声带宽: $\omega_{BN} = \frac{\pi}{2} \frac{1}{T}$

等效噪声带宽只与 K_v 有关，与 K 无关，综合来看 $K=1$ 较为理想，所以对于基本I型系统，通常通过设计来满足 $K=1$



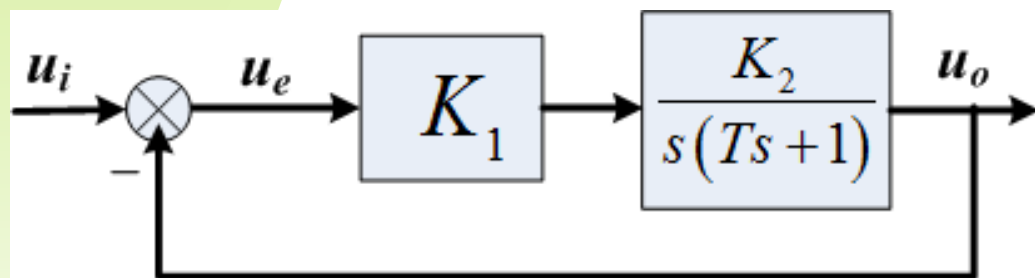
仪表用于指示和记录热电偶测得的温度变化，仪表指针随温度变化而变化，该功能由电机、电桥和放大器等部件实现。这是一个典型的随动系统。



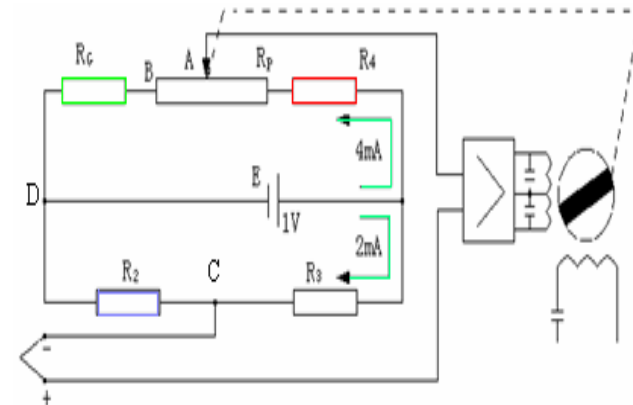


6.2.1 基本I型系统

◆ 例1：仪表随动系统



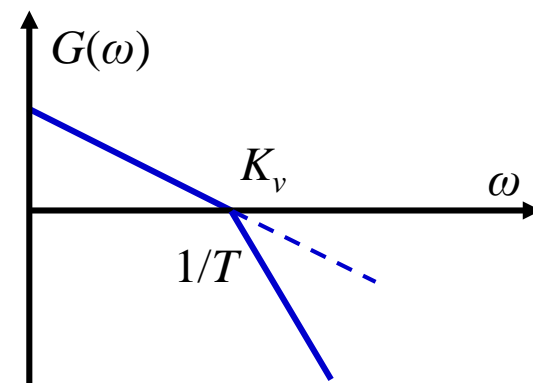
已知 $T = 0.05s$



$$K = K_v \cdot T$$

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

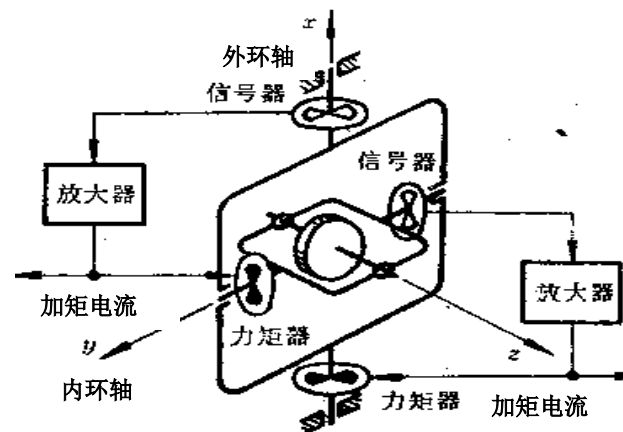
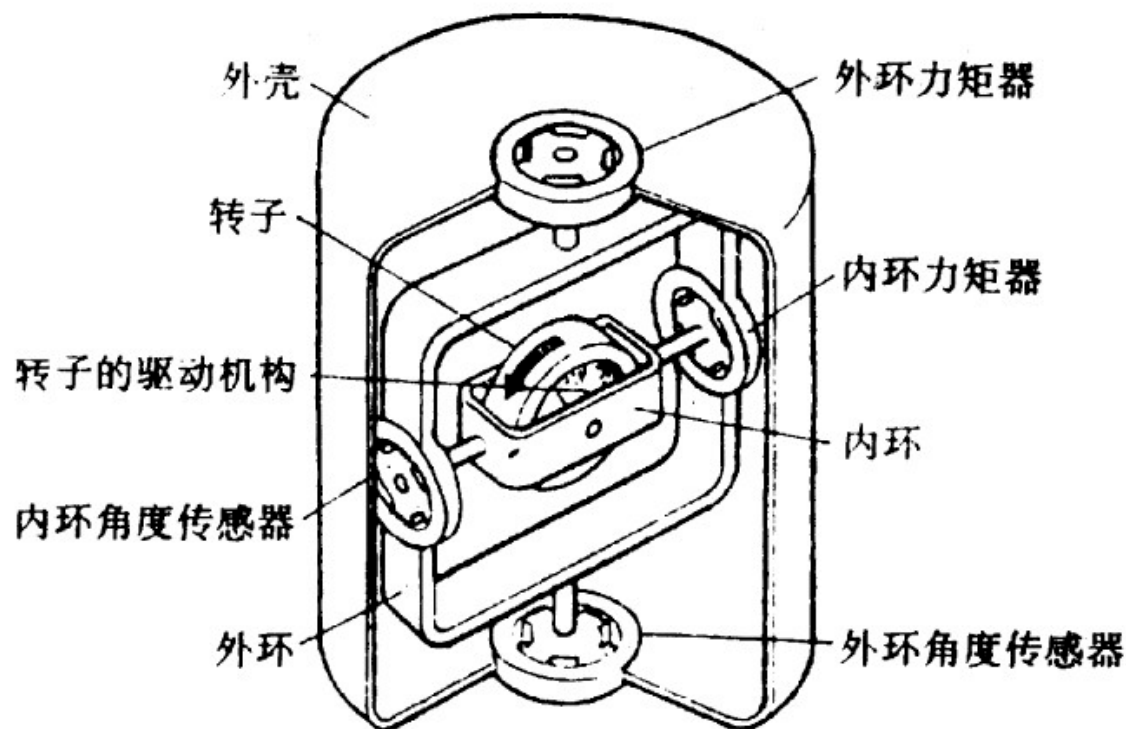
$$K_v = K_1 K_2 \quad \Rightarrow \quad K_1 = \frac{K_v}{K_2} = \frac{20}{K_2}$$





6.2.1 基本I型系统

◆ 例2：陀螺力反馈测漂回路的设计



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

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

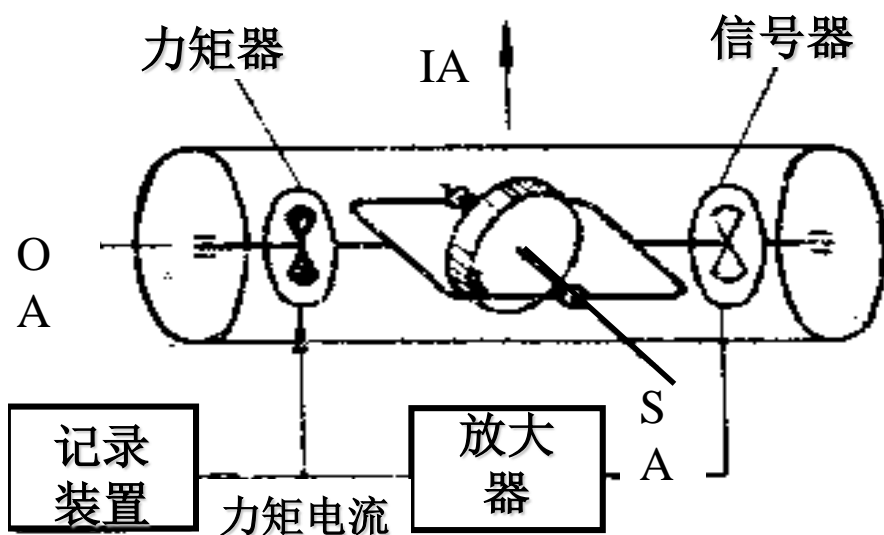
通过角位置偏差来测量陀螺的漂移，进而生成力矩器指令，驱动框架运动来消除偏差，这是典型的随动系统。



6.2.1 基本I型系统

◆ 例2：陀螺力反馈测漂回路的设计

Step 1: 工作原理分析



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



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

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

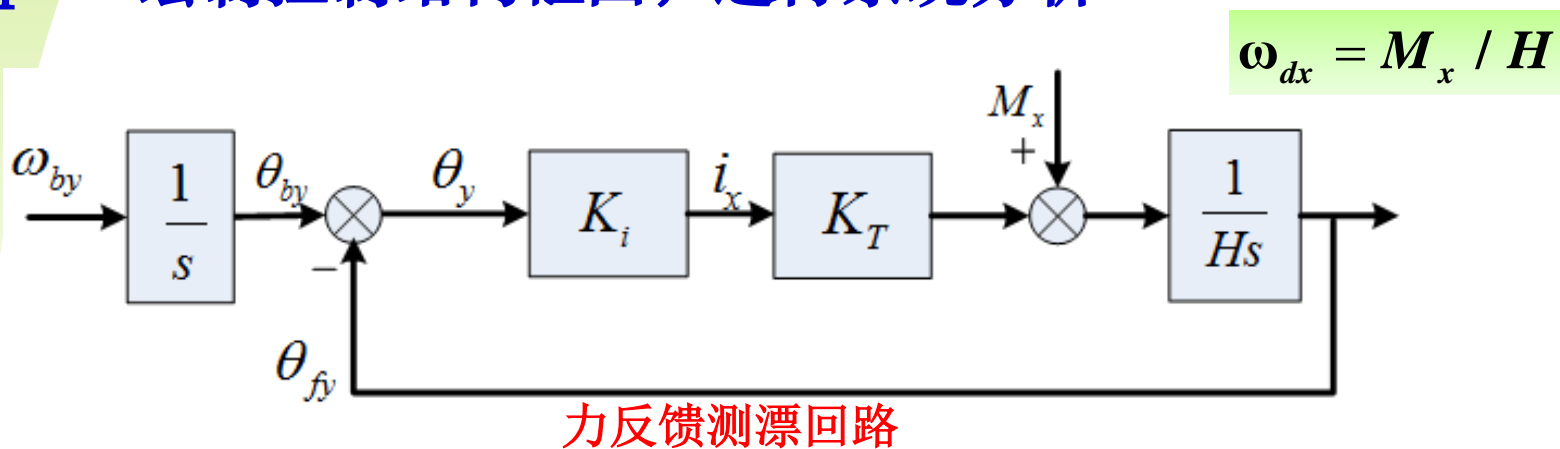
一方面要消除摩擦等干扰力矩引起的漂移，另一方面要消除地球自转引起的漂移。



6.2.1 基本I型系统

◆ 例2：陀螺力反馈测漂回路的设计

Step 2: 绘制控制结构框图，进行系统分析



控制系统设计步骤

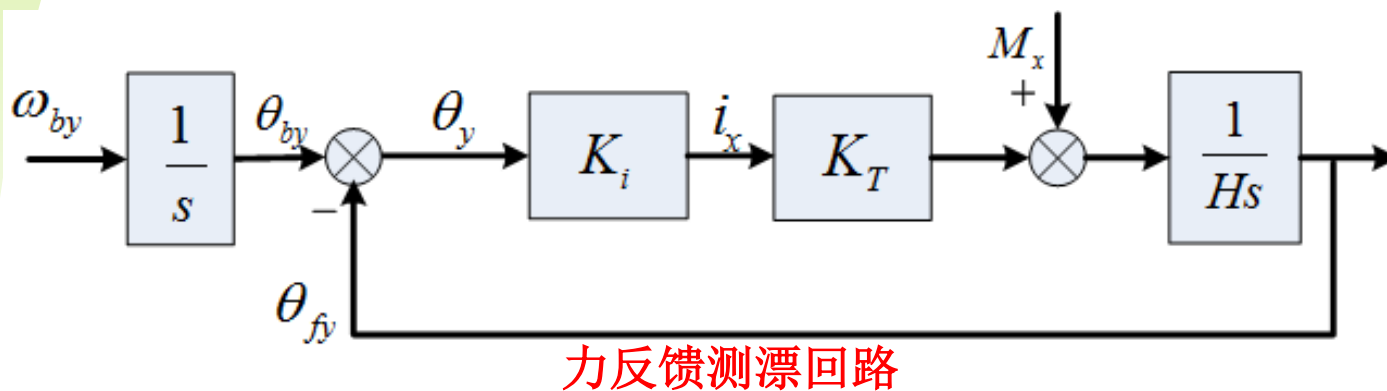
- 1、输入信号——地球转速 ω_{by} 和力矩器干扰力矩 M_x
- 2、精度需求——在恒定转速下，失调角不大于 $1''$
- 3、控制器设计



6.2.1 基本I型系统

◆ 例2：陀螺力反馈测漂回路的设计

Step 2: 绘制控制结构框图，进行系统分析



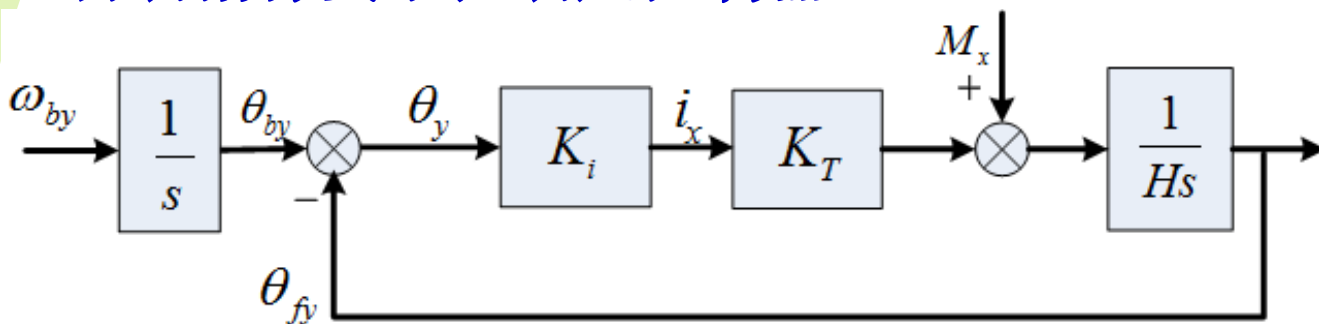
输入信号——地球转速 ω_{by} 引起的陀螺漂移比力矩器干扰力矩 M_x 引起的陀螺漂移高出1000倍， M_x 引起的失调角误差可通过闭环得以抑制，不必单独考虑。



6.2.1 基本I型系统

◆ 例2：陀螺力反馈测漂回路的设计

Step 3:明确指标要求，确定控制器



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 $1''$

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

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

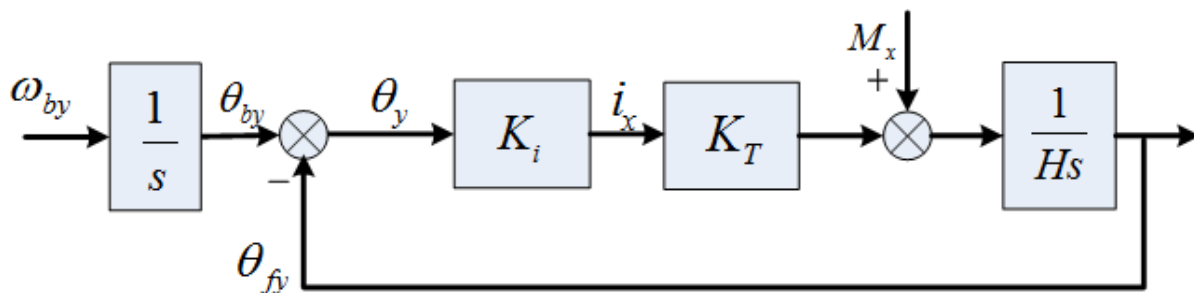
$$K_i = 3 \times 10^5 \text{ mA} / ''$$



6.2.1 基本I型系统

◆ 例2：陀螺力反馈测漂回路的设计

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

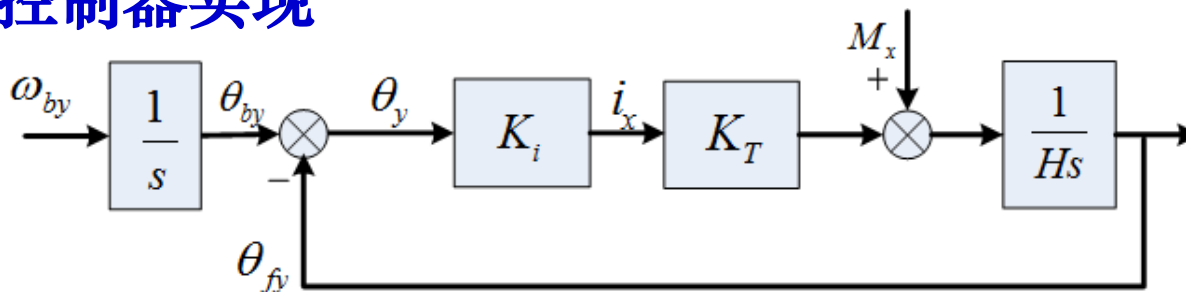
开环传递函数 $G(s) = \frac{K_v}{s}$ $G'(s) = \frac{1}{Ts + 1}$



6.2.1 基本I型系统

◆ 例2：陀螺力反馈测漂回路的设计

Step 4: 控制器实现

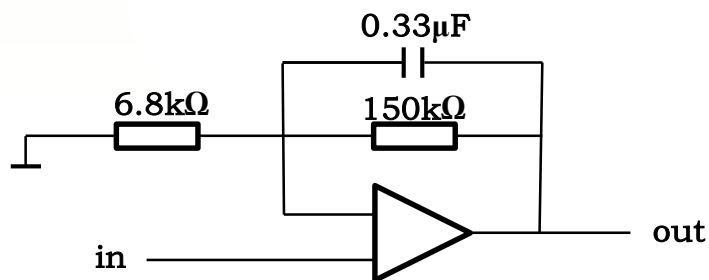


力反馈测漂回路

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

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

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



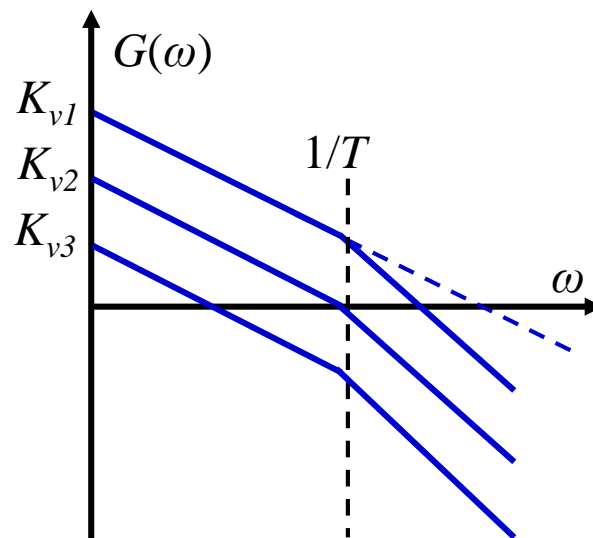
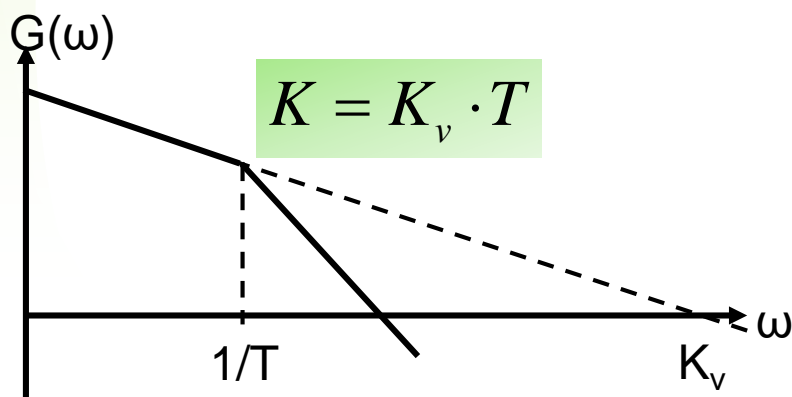
$$G'(s) = \frac{s + 460}{s + 20}$$



6.2.1 基本I型系统

◆ 基本I型系统小结

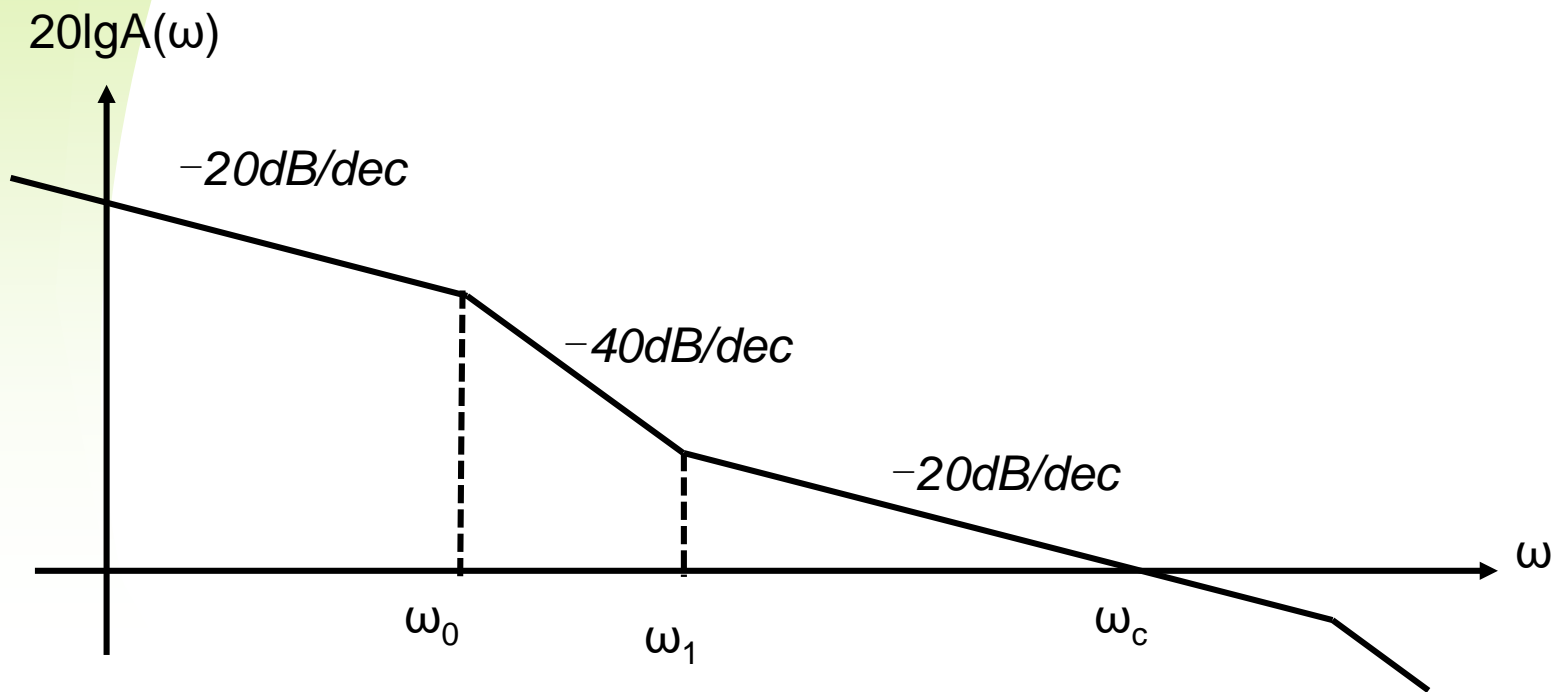
基本I型系统只考虑参数 K ，带宽与参数 K 的大小无关，由于基本I型系统的增益较低，往往不能满足跟踪精度要求。





6.2.2 改进I型系统

◆ 改进I型系统





Thank You !



哈尔滨工业大学控制与仿真中心