

自动控制实践B——2022年春季学期

第六章 伺服系统的设计（1）

授课教师：董广忠（ Assoc. Prof. ）

哈尔滨工业大学（深圳），HITsz
机电工程与自动化学院 SMEA





课程 安排

1

伺服系统的数学模型

2

I型系统

1

II型系统

2

伺服系统的校正





6.1 伺服系统的数学模型



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

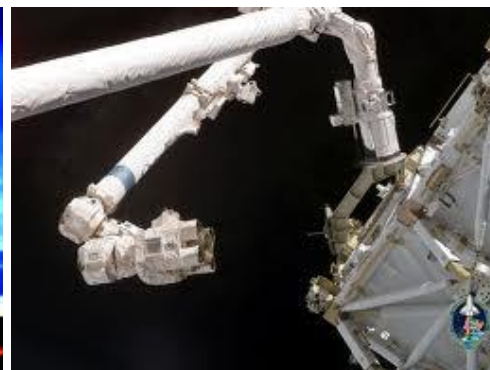




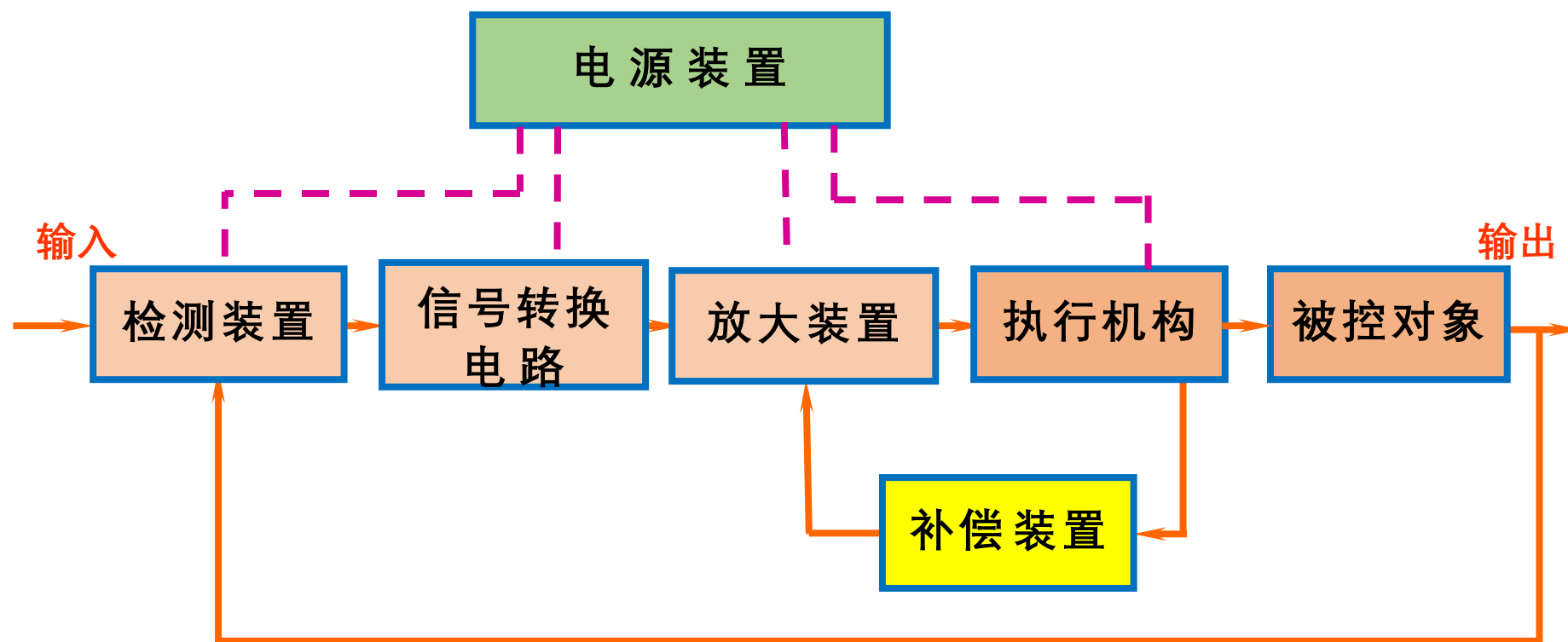
◆ 伺服系统的定义

伺服系统(servomechanism)又称随动系统，是用来**精确**地跟随或复现某个过程的**反馈控制系统**。

伺服系统是使被控对象的位置、方位、状态等输出被控量能够跟随输入目标(或给定值)的任意变化的自动控制系统，一般指位置跟踪系统。伺服系统设计时要满足跟踪精度的要求。



◆ 伺服系统的基本组成





◆ 伺服系统的分类

- 从系统组成元件的性质来看，有**电气**伺服系统、**液压**伺服系统、**电气-液压**伺服系统、**气动**伺服系统等；
- 从系统输出量的物理性质来看，有速度或加速度伺服系统和位置伺服系统等；
- 从系统中所包含的元件特性和信号作用特点来看，有**模拟式**伺服系统和**数字式**伺服系统；
- 从系统的结构特点来看，有开环伺服系统、闭环伺服系统，闭环伺服系统包括**单回路**伺服系统、**多回路**伺服系统。





◆ 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**快速响应性**：

- ★ **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
- ★ **节能高**
- ★ **被控对象均在做机械运动**





6.1 伺服系统的数学模型



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





◆ 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扩展到了气动控制、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。





◆ 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。





◆ 伺服系统的发展

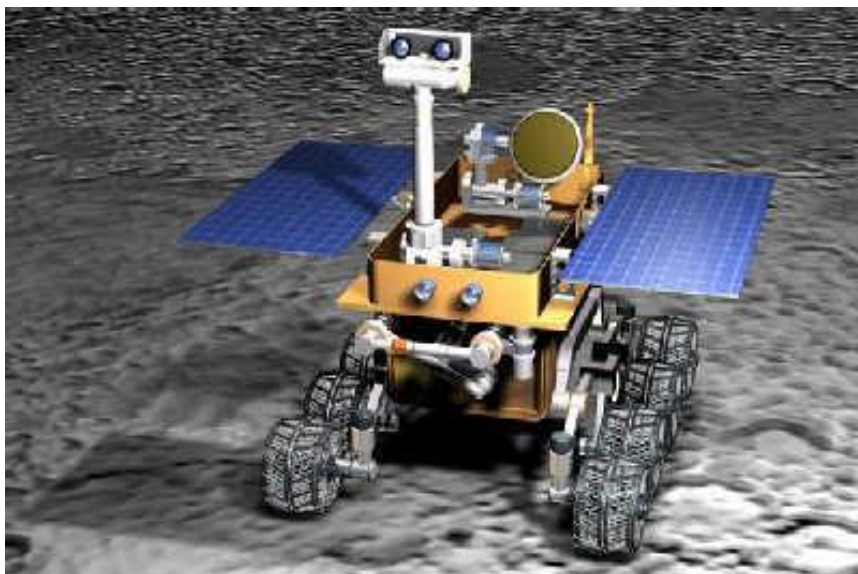
电机伺服系统出现的时间较晚：

- 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。



◆ 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。



◆ 伺服系统的应用



导弹制导控制系统



雷达天线伺服系统



光刻机



无人驾驶



硬盘控制系统



◆ 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 伺服系统的数学模型



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 伺服系统的数学模型



◆ 伺服系统的数学模型

加上负载惯量和阻尼的电动机（或液压马达）的方程式。

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

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

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

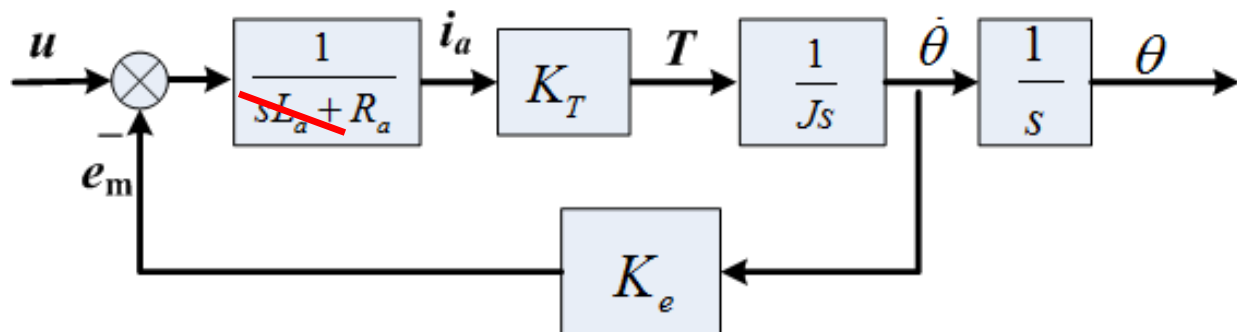
$f = 0$

$L_a = 0$

忽略电感、阻尼

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

直流电机框图



$$D = K_T K_e / R_a \quad \text{电气阻尼}$$

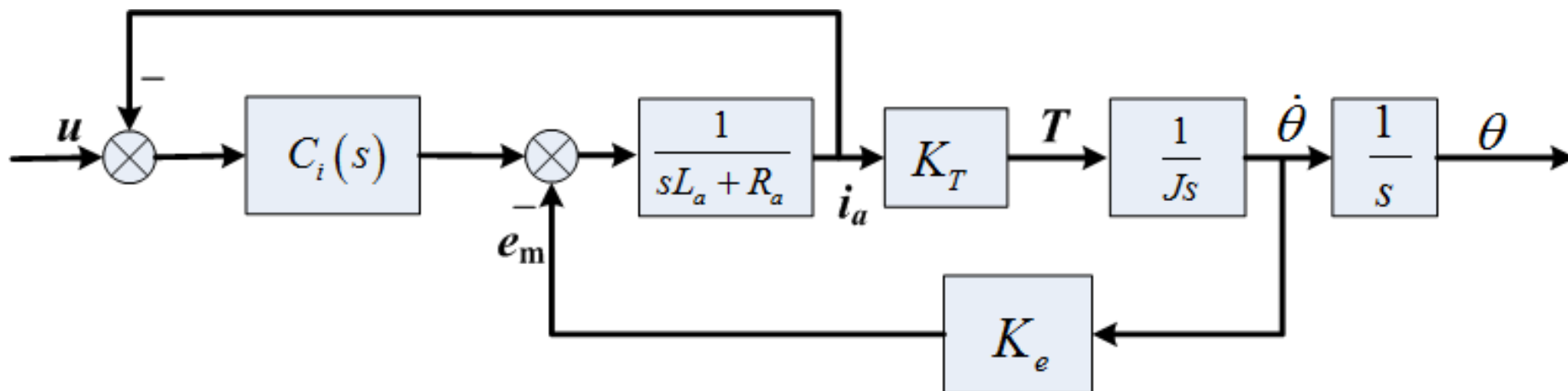
$$T_m = J / D \quad \text{机电时间常数}$$

$$K_m = 1 / K_e$$



◆ 伺服系统的数学模型

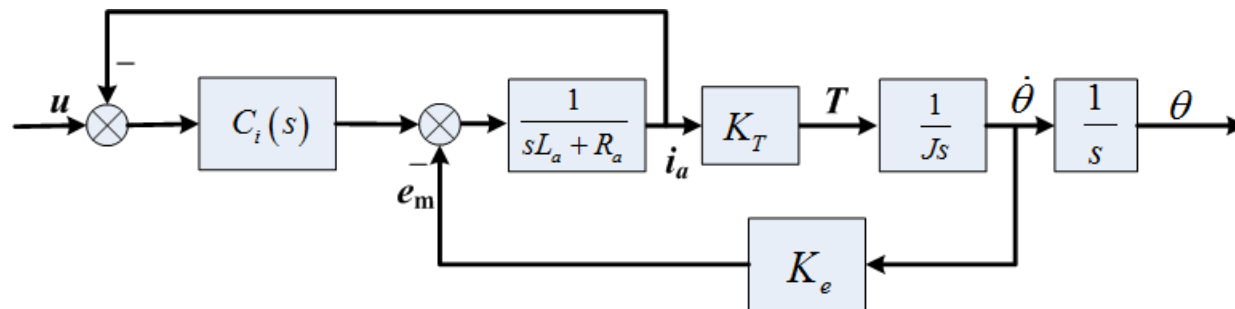
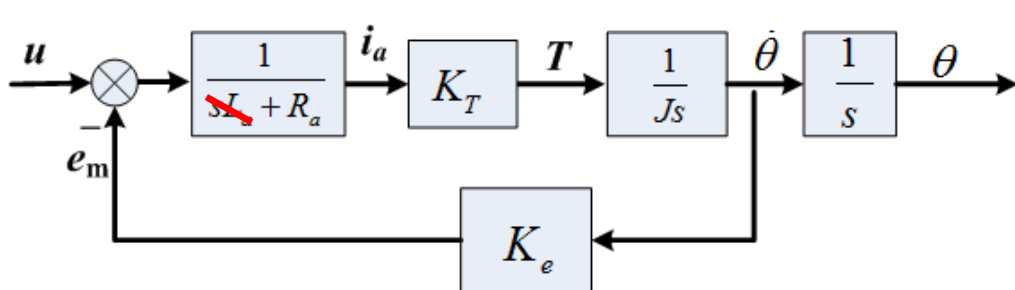
$$\frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{K_T}{Js^2}$$



带电流负反馈的直流电机框图

◆ 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，电机的传递函数中有两个积分环节。伺服系统的特点：
伺服系统的数学模型一定有积分环节。





课程 安排

1

伺服系统的数学模型

2

I型系统

1

II型系统

2

伺服系统的校正





6.2 I型系统



6.2.1

基本I型系统

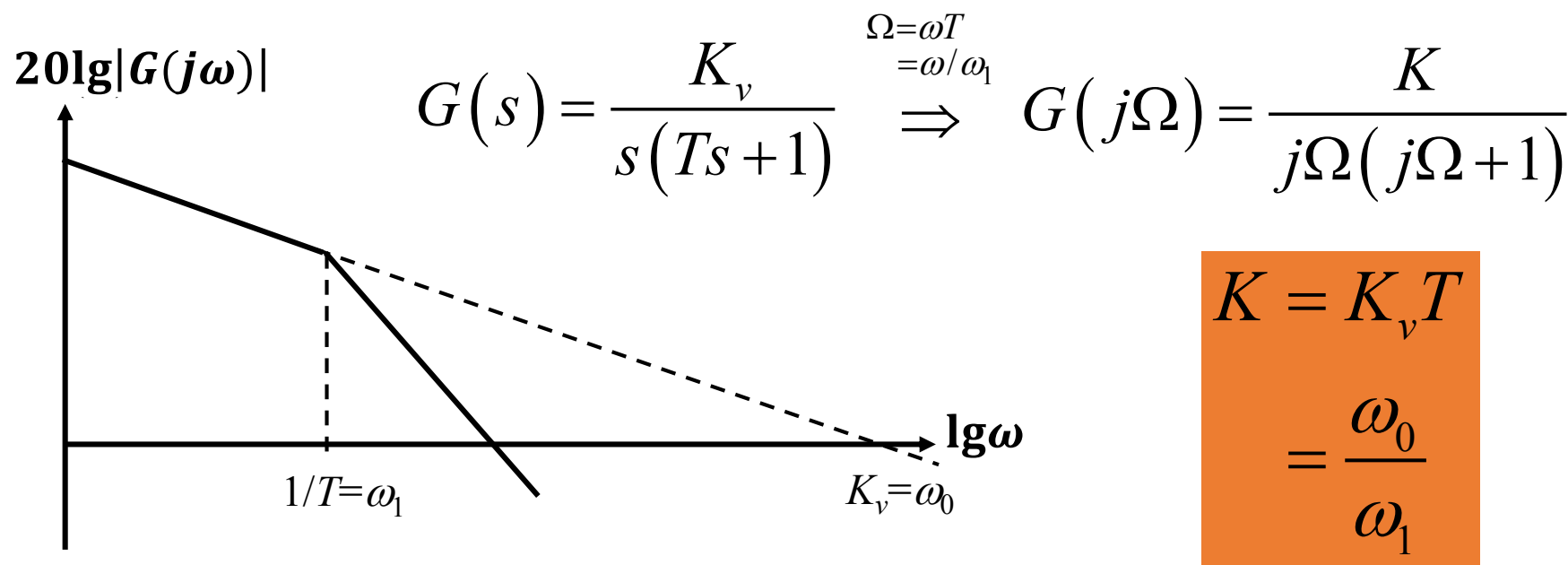
6.2.2

改进I型系统



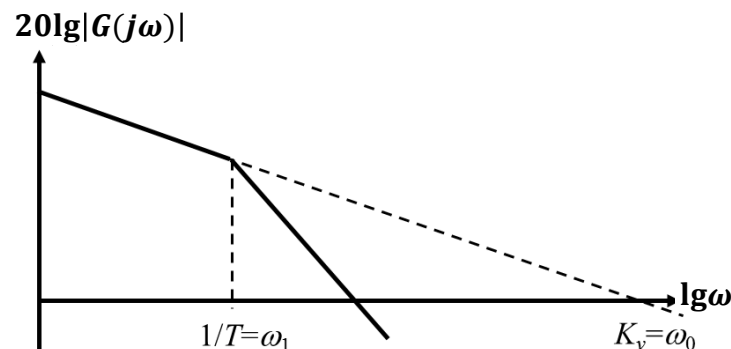
◆ 基本I型系统

指只有一个转折频率的I型系统，其开环频率特性为



◆ 基本I型系统

$$G(j\Omega) = \frac{K}{j\Omega(j\Omega + 1)}$$



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

$$\Omega = \omega T = \frac{\omega}{\omega_1}$$

闭环频率特性: $G_c(j\Omega) = \frac{G(j\Omega)}{1 + G(j\Omega)} = \frac{K}{(j\Omega)^2 + j\Omega + K}$

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 $\zeta = \frac{1}{2\sqrt{K}}$	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

$$\frac{1}{2} \leq K \leq 1$$



6.2 I型系统



◆ 基本I型系统

传递函数:

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

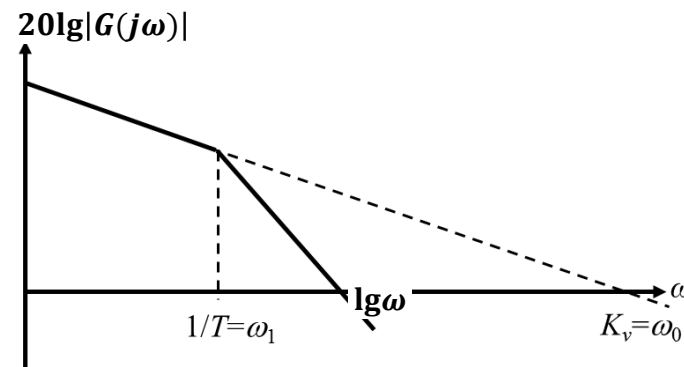
$$G_{en}(s) = \frac{K_v}{Ts^2 + s + K_v}$$

等效噪声带宽: (表4-1)

$$\omega_{BN} = \frac{\pi}{2} K_v = \frac{\pi}{2} \omega_0$$

$$\frac{1}{2} \leq K \leq 1$$

$$K = 1 \Leftrightarrow \omega_0 = \omega_1$$



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

$$\Omega = \omega T = \frac{\omega}{\omega_1}$$

一阶系统: $G(s) = \frac{K_v}{s}$, $G_{en}(s) = \frac{1}{T_1 s + 1}$

等效噪声带宽: $\omega_{BN} = \frac{\pi}{2} \frac{1}{T_1}$, $T_1 = \frac{1}{K_v}$

为抑制可能的高频噪声，纯积分被控对象应引入惯性环节使之成为基本I型系统！

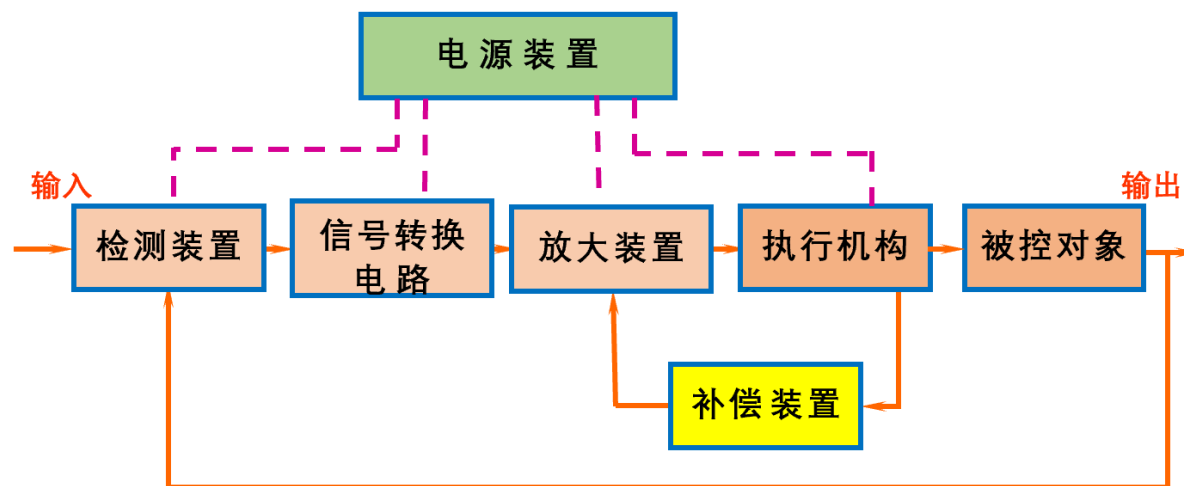


◆ 伺服系统

伺服系统，即随动系统，是用来精确地跟随或复现某个过程的反馈控制系统，一般指位置跟踪系统。伺服系统的被控对象均在**做机械运动**，设计时要满足**跟踪精度**的要求（静态指标和动态性能）。

系统的结构：

开环伺服系统、闭环伺服系统；闭环伺服系统包括单回路伺服系统、多回路伺服系统。



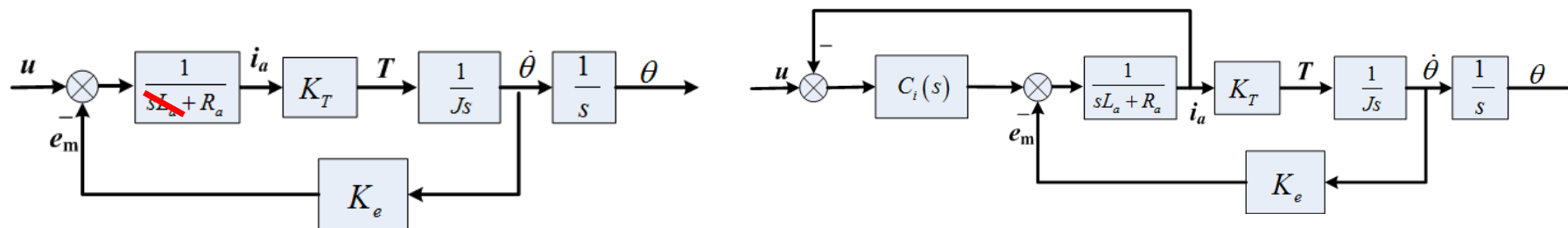
◆ 伺服系统的数学模型

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

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

伺服系统的特点：

伺服系统的数学模型一定有积分环节。





◆ 基本I型系统

$$\frac{1}{2} \leq K \leq 1$$

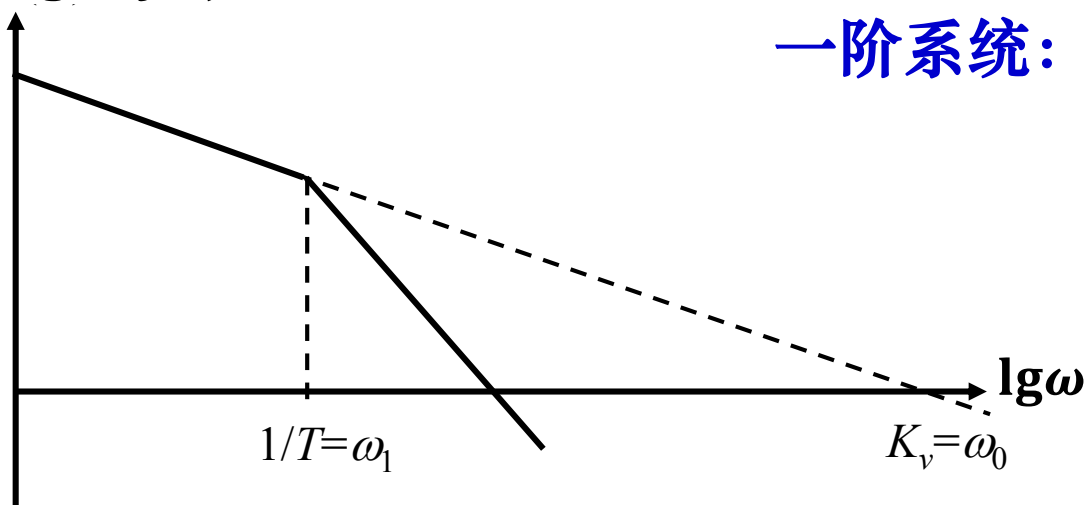
$$K = K_v T = \frac{\omega_0}{\omega_1}$$

$$G(s) = \frac{K_v}{s(Ts + 1)} \xrightarrow[\omega/\omega_1]{\Omega = \omega T} G(j\Omega) = \frac{K}{j\Omega(j\Omega + 1)}$$

$$G_{en}(s) = \frac{K_v}{Ts^2 + s + K_v} \quad \omega_{BN} = \frac{\pi}{2} K_v = \frac{\pi}{2} \omega_0$$

$$K = 1 \Leftrightarrow \omega_0 = \omega_1$$

$20\lg|G(j\omega)|$

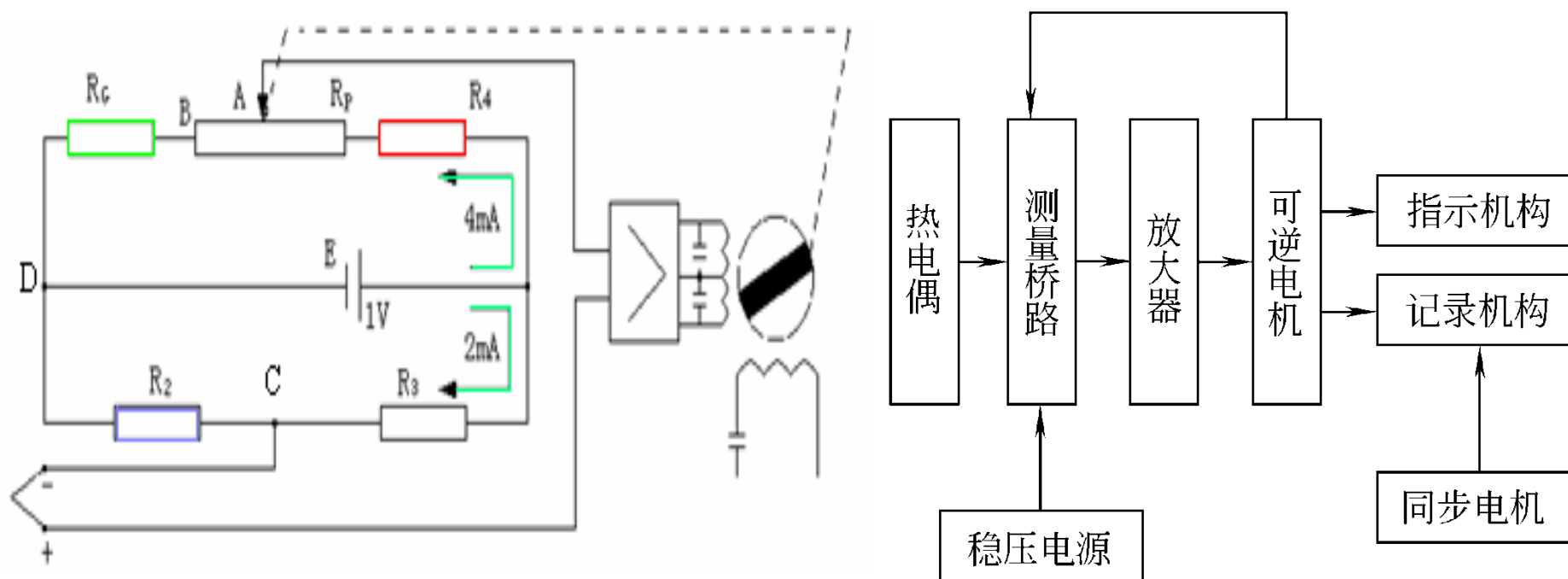


一阶系统: $G(s) = \frac{K_v}{s}, G_{en}(s) = \frac{1}{T_1 s + 1}$

$$\omega_{BN} = \frac{\pi}{2} \frac{1}{T_1}, T_1 = \frac{1}{K_v}$$

增加一个转折频率，将其变为基本I型系统！

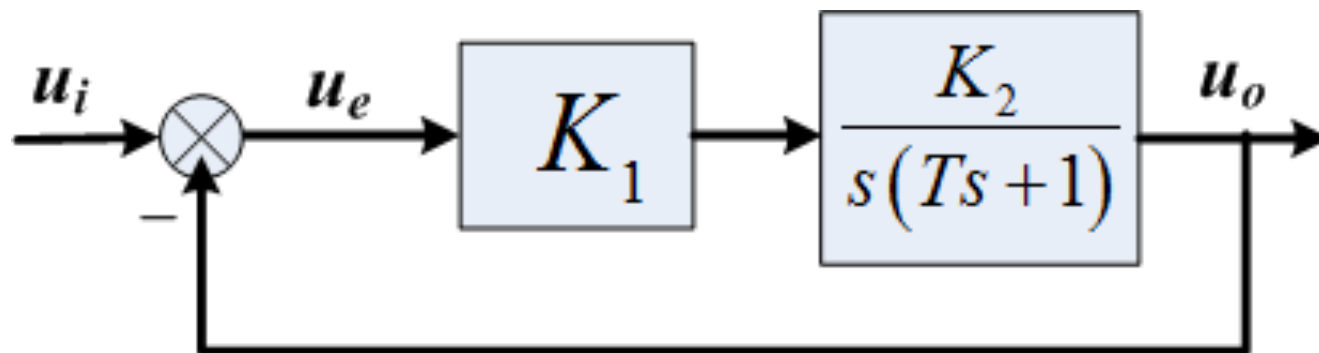
◆ 例1：仪表随动系统



电子电位差计-测量和记录温度

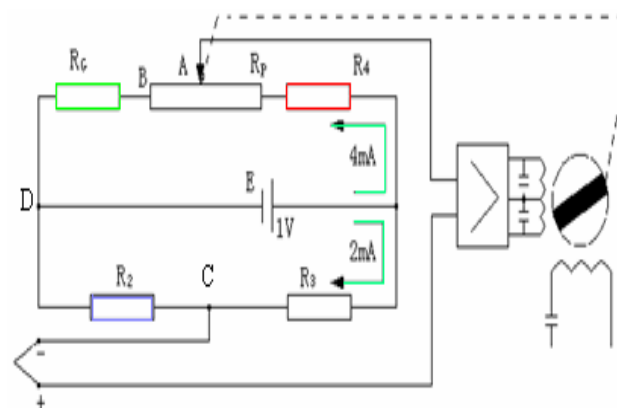
◆ 例1：仪表随动系统

$$K = K_v \cdot T$$



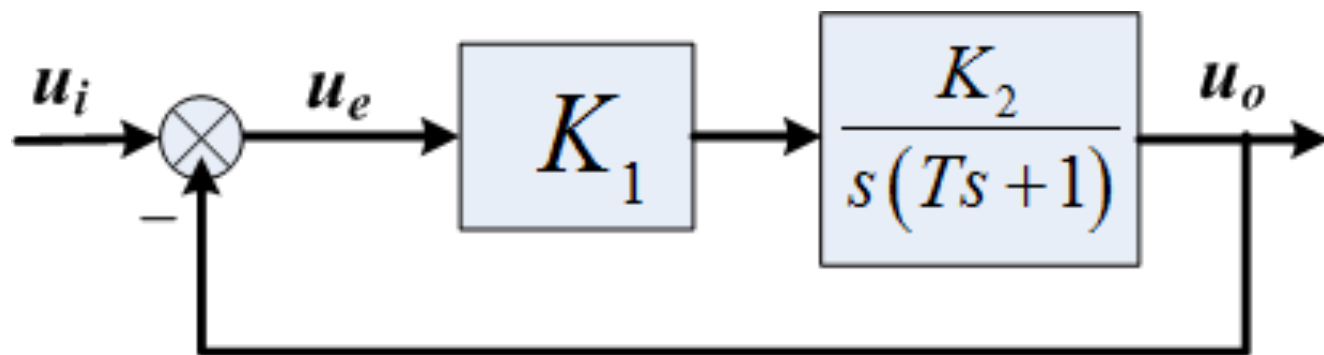
控制系统设计步骤：

- 1、输入信号——温度对应的热电势（阶跃信号）
- 2、精度需求——无静差
- 3、控制器设计——比例控制



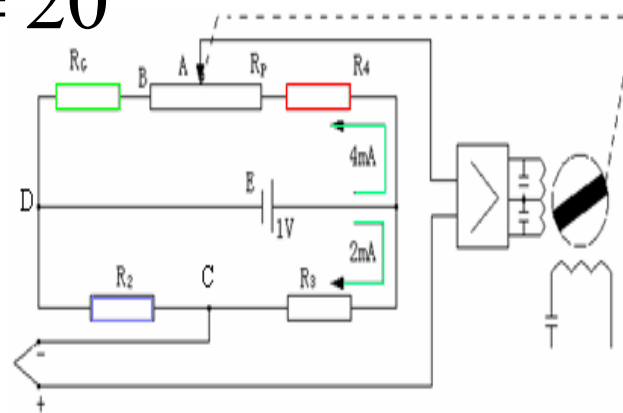
◆ 例1：仪表随动系统

$$K = K_v \cdot T$$



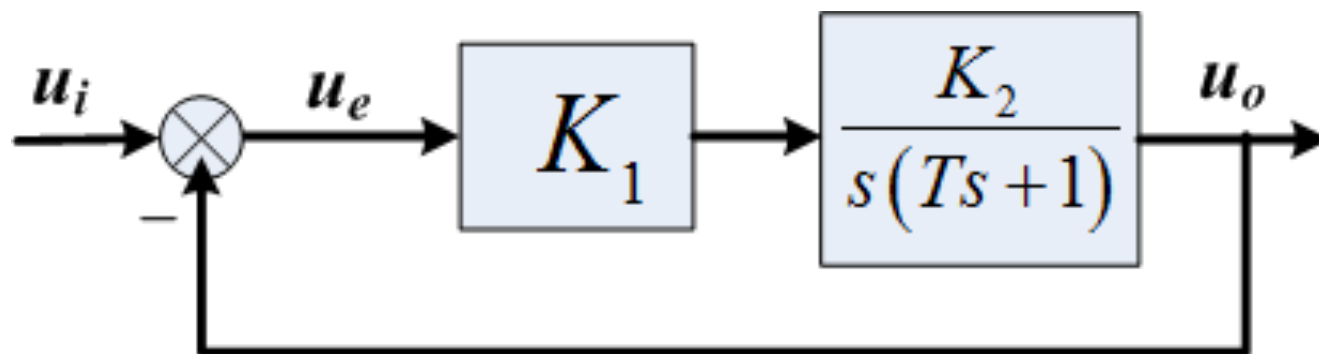
$$K = K_v T = 1, T = 0.05s \longrightarrow K_v = \frac{1}{T} = 20$$

$$K_v = K_1 K_2 \longrightarrow K_1 = \frac{K_v}{K_2} = \frac{20}{K_2}$$

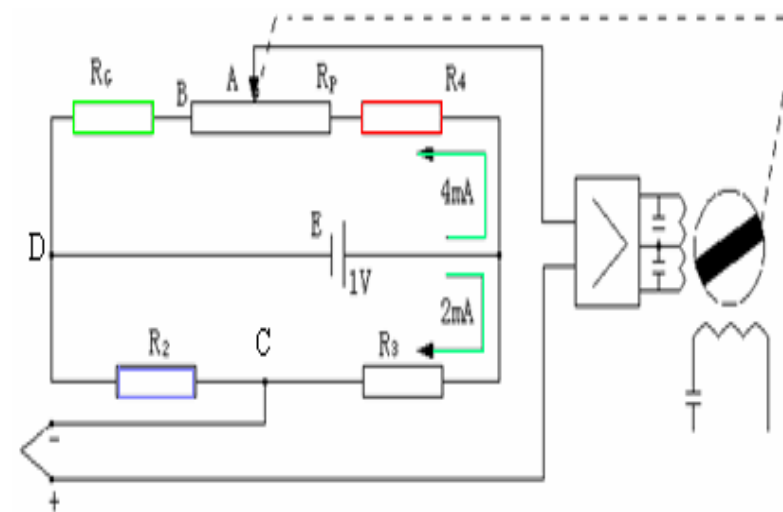


◆ 例1：仪表随动系统

$$K=1 \Leftrightarrow \omega_0 = \omega_1$$



这是一个典型的不带校正装置的仪表随动系统，电机的参数已定，系统的增益，即带宽已不容选择。考虑到典型输入信号，虽然系统的增益不大，但也能满足要求。



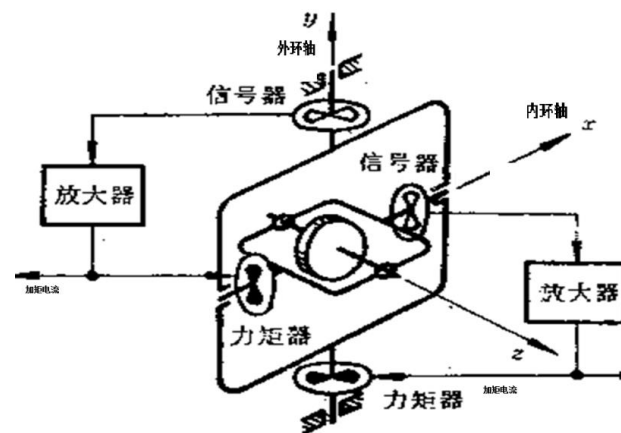
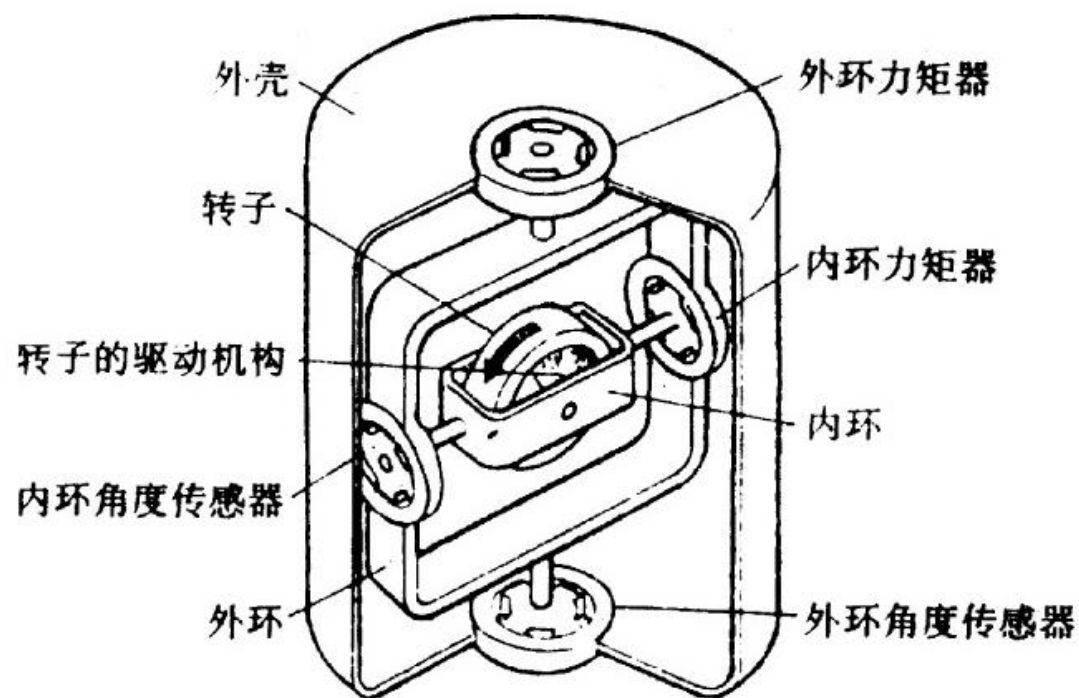
◆ 例2：陀螺力反馈测漂回路的设计

Step 1:工作原理分析

$$\frac{d\vec{H}}{dt} = \vec{M}, d\vec{H} = H d\theta_{fy}$$

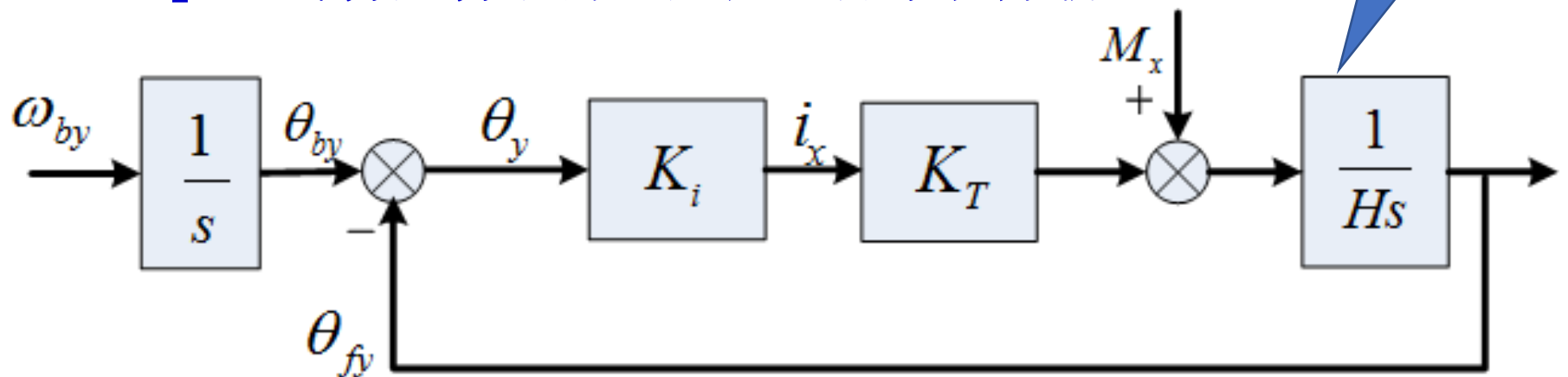


$$\frac{\theta_{fy}(s)}{M(s)} = \frac{1}{Hs}$$



◆ 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



力矩与转角
之间的关系

力反馈测漂回路

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

ω_{by} —— 壳体相对于惯性空间转速

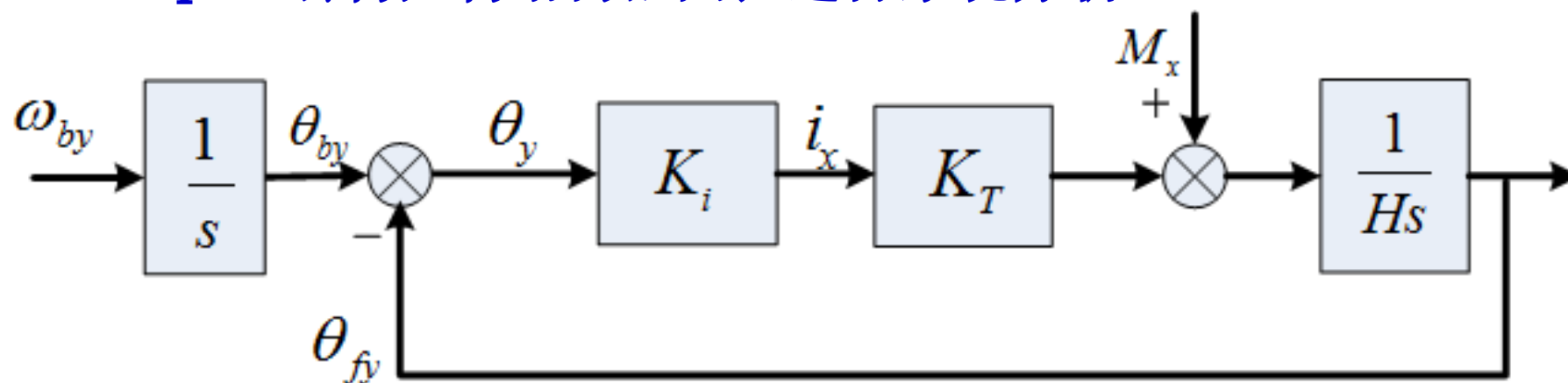
θ_{fy} —— \vec{H} 相对于惯性空间的转角

θ_y —— \vec{H} 相对于壳体的转角



◆ 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



力反馈测漂回路

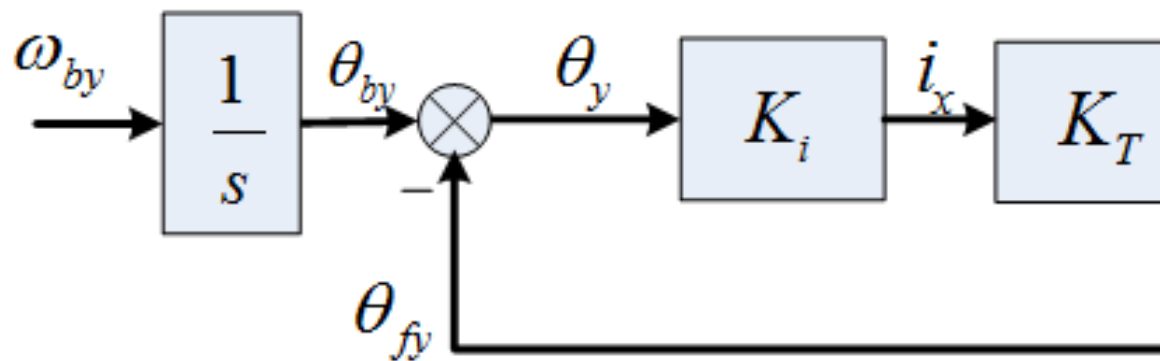
输入信号——地球转速 ω_{by} 引起的陀螺漂移比干扰力矩 M_x 引起的陀螺漂移高出1000倍，因此系统的失调角跟踪误差主要是由地速分量 ω_{by} 引起的。

◆ 例2：陀螺力反馈测漂回路的

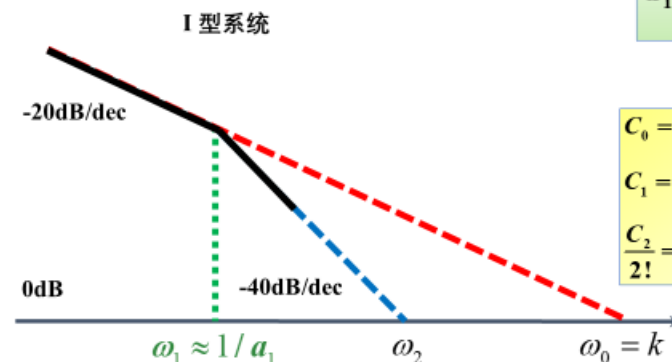
3.1.2 误差系数

三、动态误差系数——图解法（I型系统）

Step 3:明确指标要求，确定控制器



力反馈测漂回路



$$G_1(s) = \frac{k}{s} \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + 1}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + 1}$$

$$\begin{aligned} C_0 &= 0 \\ C_1 &= \frac{1}{k} \\ \frac{C_2}{2!} &= \frac{a_1 - b_1}{k} - \frac{1}{k^2} \approx \frac{a_1}{k} \end{aligned}$$

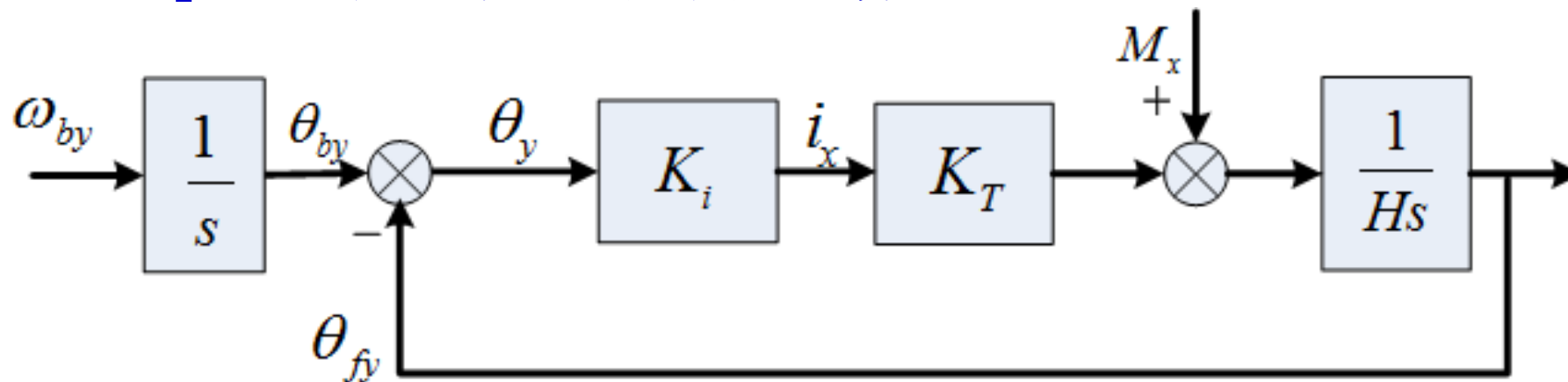
$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{k} = \frac{1}{\omega_0} \\ \frac{C_2}{2!} &\approx \frac{a_1}{k} = \frac{1}{\omega_1 \omega_0} = \left(\frac{1}{\omega_2} \right)^2 \end{aligned}$$

$$\frac{k}{s} \cdot \frac{1}{a_1 s} = \frac{\omega_0 \omega_1}{s^2}$$

精度指标——在恒定转速下，失调角不大于1″，即 $\max \left\{ \left| \theta_y \right| \right\} \leq 1'' \Big|_{\max \{ \omega_{by} \}}$
 $\max \{ \omega_{by} \} = 15^\circ / \text{h}$
 $\longrightarrow K_v = 15 \text{ s}^{-1}$

◆ 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

$$K_v = \frac{K_i K_T}{H}$$




$$K_i = \frac{K_v H}{K_T} \approx 1.5 \text{mA}/(^{\circ})$$

$$H = 4 \times 10^4 \text{g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}$$

$$K_T = 2 \text{g} \cdot \text{cm}/\text{mA}$$

$$K_v = 15 \text{s}^{-1}$$

传感器系数：1mV/($^{\circ}$)  1.5mA/mV



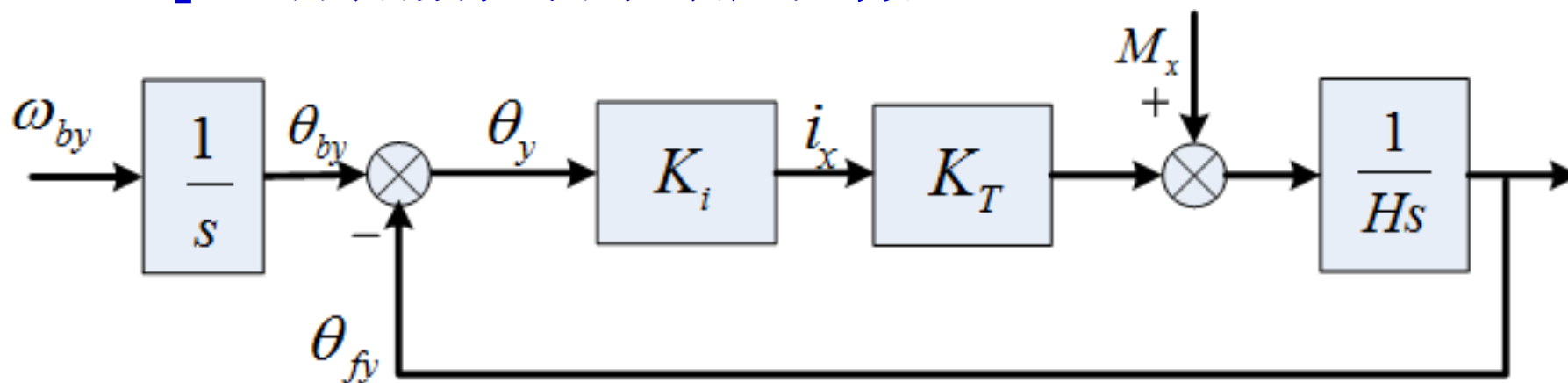
6.2 I型系统



◆ 例2：陀螺力反馈测漂回路的设计

$$K = 1 \Leftrightarrow \omega_0 = \omega_1$$

Step 3:明确指标要求，确定控制器



力反馈测漂回路

开环传递函数 $G(s) = \frac{K_v}{s}$

改进!





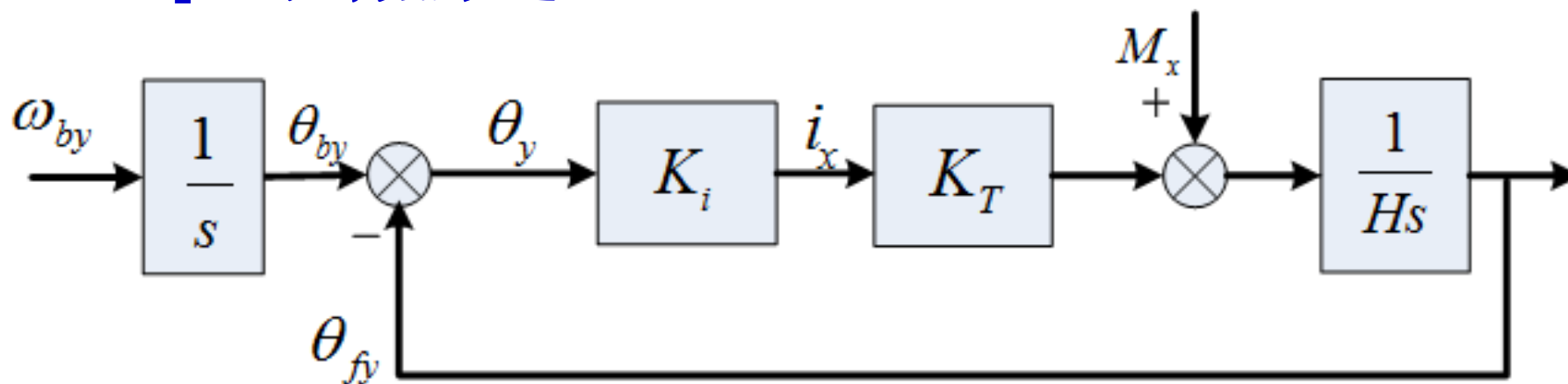
6.2 I型系统



◆ 例2：陀螺力反馈测漂回路的设计

$$K = 1 \Leftrightarrow \omega_0 = \omega_1$$

Step 4: 控制器改进。



力反馈测漂回路

开环传递函数: $G(s) = \frac{K_v}{s}$ \Rightarrow 开环传递函数增加一个转折频率!

$$K = 1 = K_v \cdot T \Rightarrow G(s) = \frac{K_v}{s} \cdot \frac{1}{(Ts + 1)}, \quad T = \frac{1}{K_v}$$

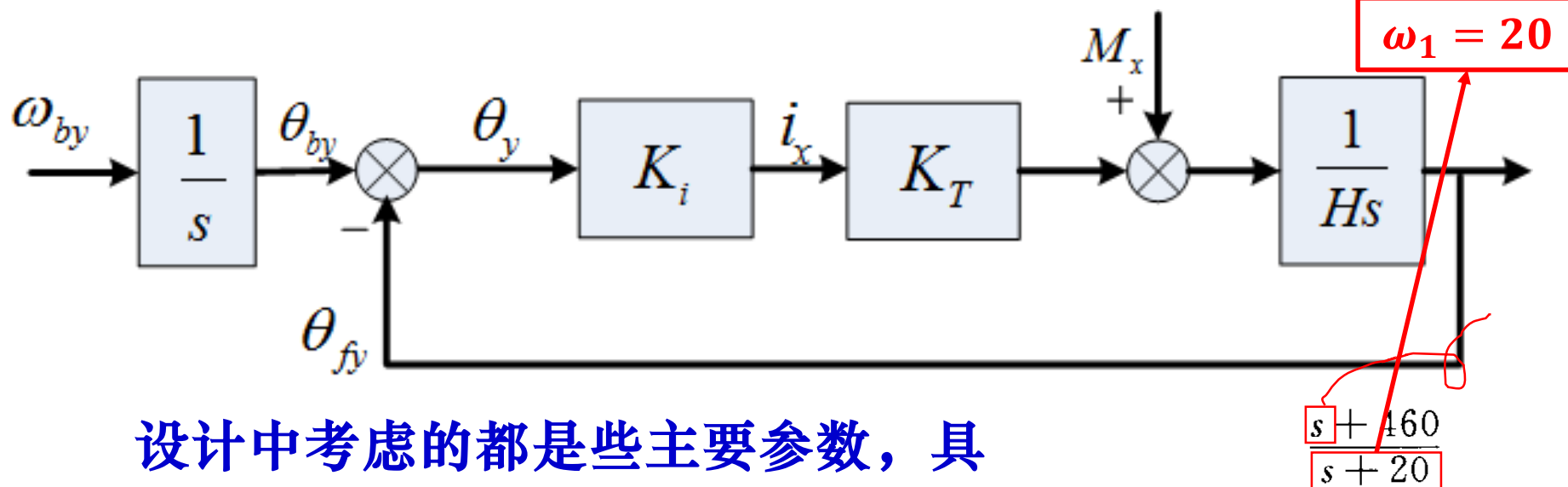


◆ 例2：陀螺力反馈测漂回路的设计

$$K = 1 \Leftrightarrow \omega_0 = \omega_1$$

$$K_v = \omega_0 = 15$$

$$\omega_1 = 20$$



设计中考虑的都是些主要参数，具体线路中还有很多小时间常数没有考虑，但这些时间常数较主要的时间常数小一个数量级，不影响系统总的性能。

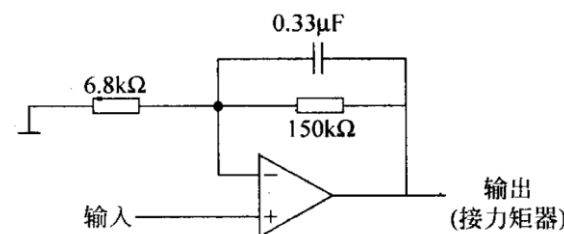


图 7-8 力反馈回路的校正网络



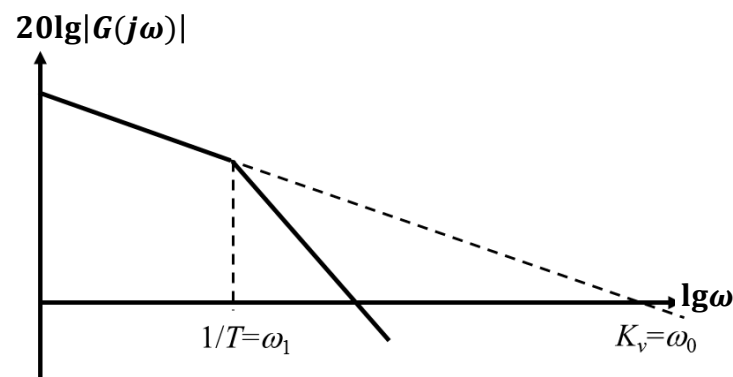
◆ 基本I型系统小结

$$K = 1 \Leftrightarrow \omega_0 = \omega_1$$

基本I型系统中只考虑了参数 K ，带宽与参数 K 的大小无关，提高增益则必然导致带宽增大，而带宽由于鲁棒稳定性的考虑而受到限制。

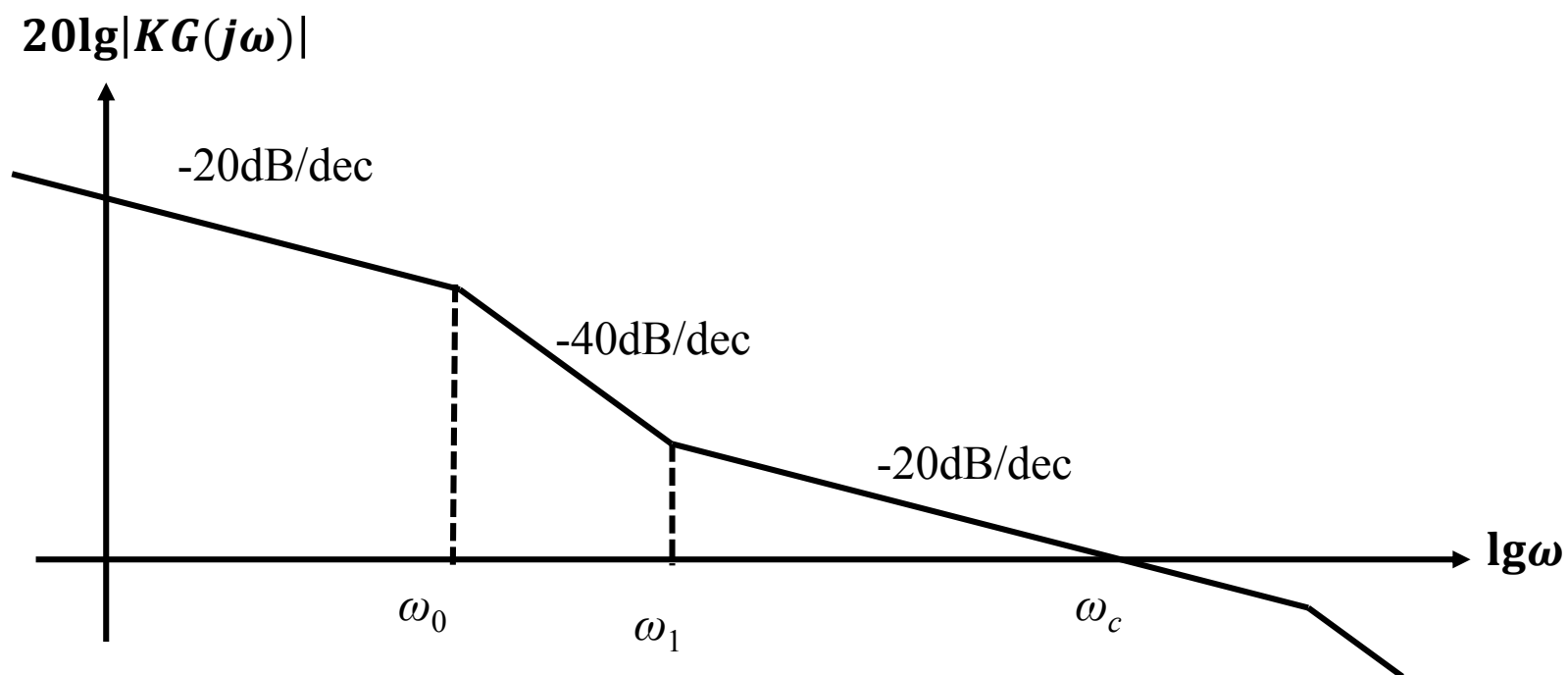
由于基本I型系统的增益较低，有些情况下不能满足跟踪精度要求。

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





◆ 改进I型系统





Thanks for your attention!
