

# 电力拖动自动控制系统 ——运动控制系统

---

第3篇

\*第10章

伺服系统

# 伺服系统

---

- 伺服（**Servo**）意味着“伺候”和“服从”。
- 广义的伺服系统是精确地跟踪或复现某个给定过程的控制系统，也可称作随动系统。

# 伺服系统

---

- 狭义伺服系统又称位置随动系统，其被控制量（输出量）是负载机械空间位置的线位移或角位移，当位置给定量（输入量）作任意变化时，系统的主要任务是使输出量快速而准确地复现给定量的变化。

# 内 容 提 要

---

- 伺服系统的特征及组成
- 伺服系统控制对象的数学模型
- 伺服系统的设计

# 10.1 伺服系统的特征及组成

---

- 伺服系统的功能是使输出快速而准确地复现给定，对伺服系统具有如下的基本要求：
  - (1) 稳定性好 伺服系统在给定输入和外界干扰下，能在短暂的过渡过程后，达到新的平衡状态，或者恢复到原先的平衡状态。

# 10.1.1 伺服系统的基本要求及特征

---

- (2) 精度高** 伺服系统的精度是指输出量跟随给定值的精确程度，如精密加工的数控机床，要求很高的定位精度。
- (3) 动态响应快** 动态响应是伺服系统重要的动态性能指标，要求系统对给定的跟随速度足够快、超调小，甚至要求无超调。

# 10.1.1 伺服系统的基本要求及特征

---

**(4) 抗扰动能力强** 在各种扰动作用时，系统输出动态变化小，恢复时间快，振荡次数少，甚至要求无振荡。

# 伺服系统的特征

---

- 必须具备高精度的传感器，能准确地给出输出量的电信号。
- 功率放大器以及控制系统都必须是可逆的。
- 足够大的调速范围及足够强的低速带载性能。
- 快速的响应能力和较强的抗干扰能力。



## 10.1.2 伺服系统的组成

---

- 伺服系统由伺服电动机、功率驱动器、控制器和传感器四大部分组成。
- 除了位置传感器外，可能还需要电压、电流和速度传感器。

# 10.1.2 伺服系统的组成

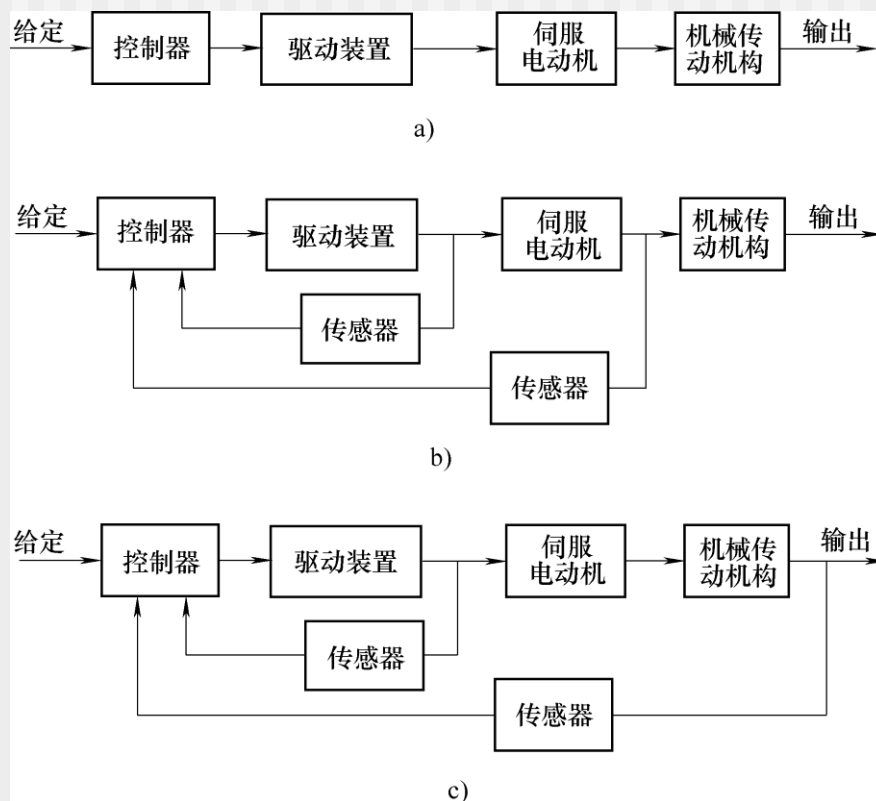


图10 -1 位置伺服系统结构示意图

**A)** 开环系统 **b)** 半闭环系统 **c)** 全闭环系统

# 10.1.2 伺服系统的组成

---

- 伺服电动机

- 小功率伺服系统：永磁式伺服电机；
- 大功率伺服系统：电励磁直流或交流伺服电机；

- 功率驱动器

- 功率放大，常用IGBT等构成的PWM变换器；

- 控制器

- 运行控制算法；
- 模拟式向数字式发展；

# 10.1.2 伺服系统的组成

## ● 位置传感器

- **电位器**：最简单的位移-电压传感器，直接给出电压信号，但滑臂和电阻间有滑动接触，容易磨损和接触不良，可靠性差；
- **基于电磁感应原理的位置传感器**：旋转变压器，感应同步器等，可靠性和精度都较好；
- **光电编码器**：增量式和绝对式，直接输出数字式电脉冲信号；
- **磁性编码器**：直接输出数字式电脉冲信号，环境适应能力强，但制成高分辨率有一定困难。

# 10.1.2 伺服系统的组成

- 绝对式编码器：若干个同心圆构成码道，码道的道数与二进制的位数相同，有固定的零点。码盘的一周总计数为 $N = 2^n$ ， $n$ 为码道数。

## （1）二进制码盘

- ❑ 码道从外到里按二进制刻制，外层为最低位，内层为最高位；
- ❑ 光电管排列不齐或特性不一致导致读取时高位偏移，

# 10.1.2 伺服系统的组成

- 光电编码器中的绝对式编码器

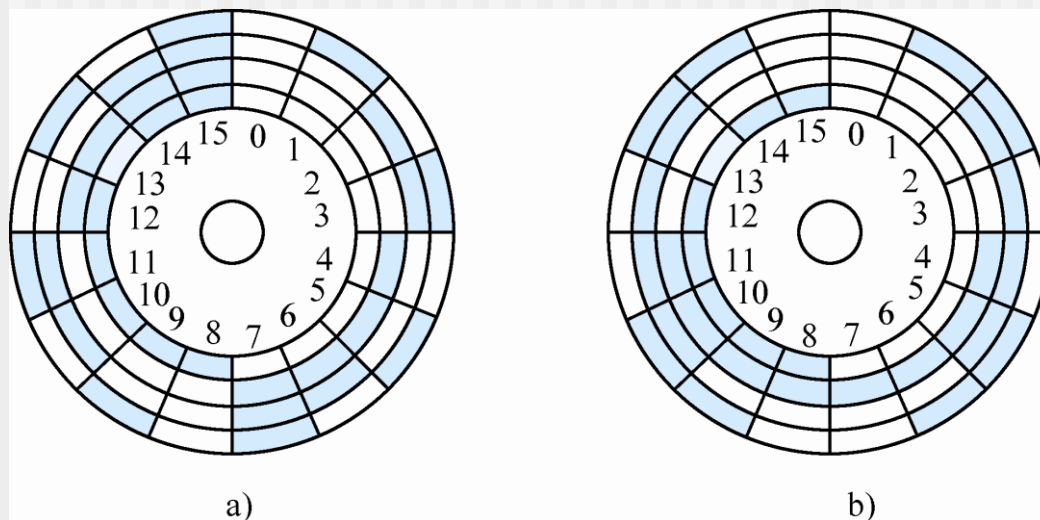


图10 -2 绝对值式编码器的码盘  
a) 二进制码盘    b) 循环码码盘

## 10.1.3 伺服系统的性能指标

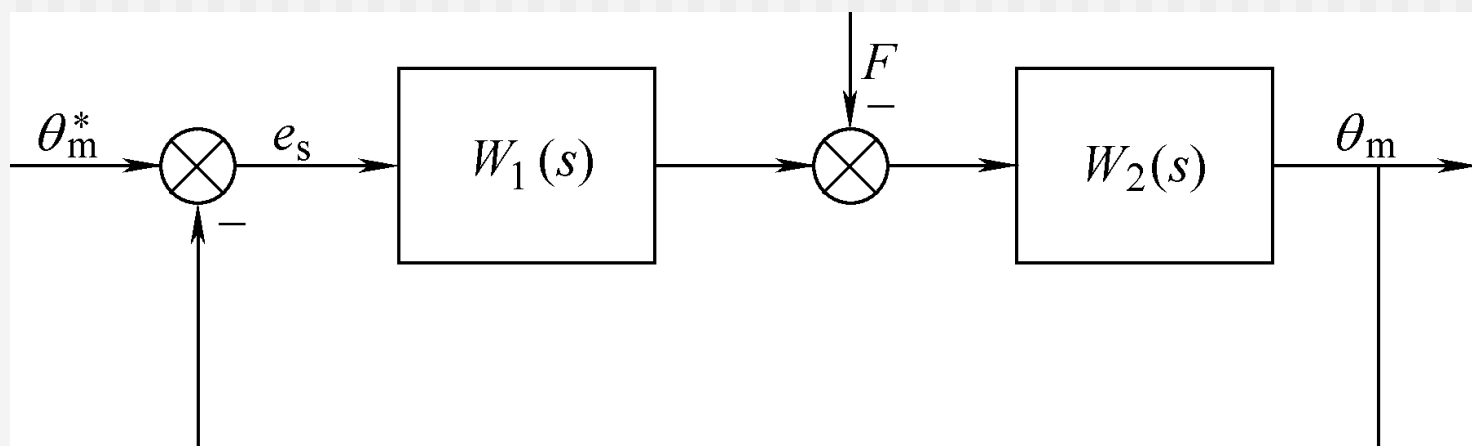


图10 -3 线性位置伺服系统一般动态结构图

## 10.1.3 伺服系统的性能指标

---

- 伺服系统实际位置与目标值之间的误差，称作系统的稳态跟踪误差。
- 由系统结构和参数决定的稳态跟踪误差可分为三类：位置误差、速度误差和加速度误差。
- 伺服系统在动态调节过程中性能指标称为动态性能指标，如超调量、跟随速度及时间、调节时间、振荡次数、抗扰动能力等。



## 10.1.3 伺服系统的性能指标

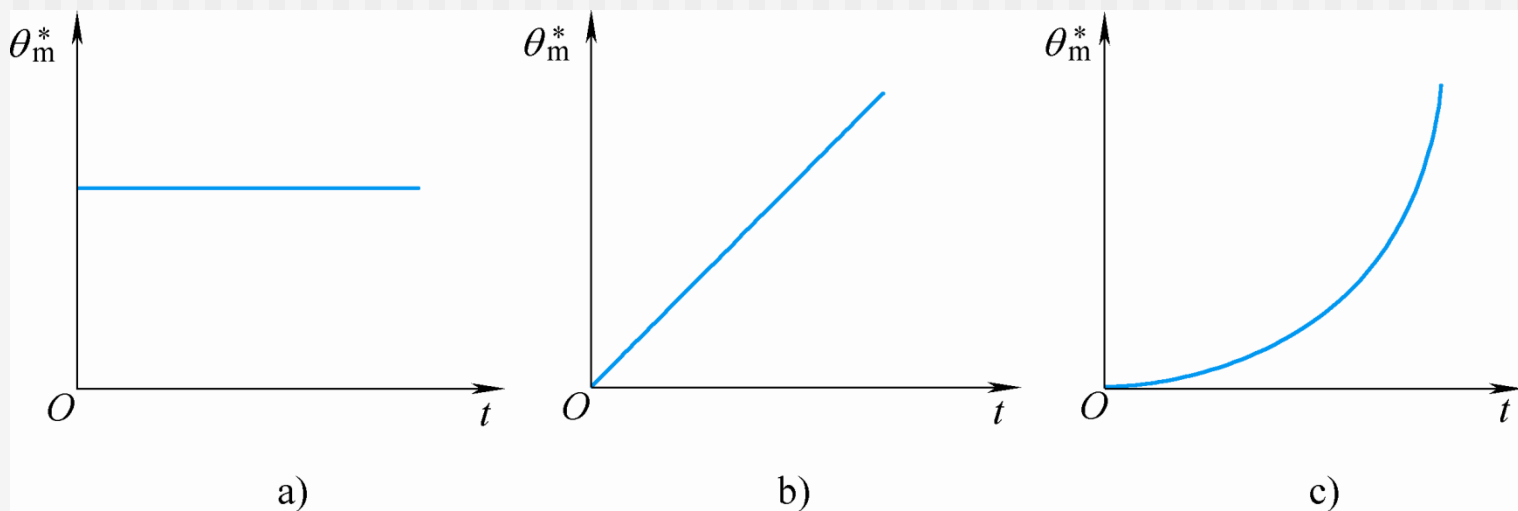


图10 -4 位置伺服系统的典型输入信号

**a)** 位置阶跃输入      **b)** 速度输入      **c)** 加速度输入

## 10.1.3 伺服系统的性能指标

- 伺服系统在三种单位输入信号的作用下给定稳态误差

给定稳态误差  $e_{sr}$

系统类型 \ 输入信号 给定误差	单位阶跃输入 $\theta_m^*(s) = \frac{1}{s}$	单位速度输入 $\theta_m^*(s) = \frac{1}{s^2}$	单位加速度输入 $\theta_m^*(s) = \frac{1}{s^3}$
I 型系统	0	$\frac{1}{K}$	$\infty$
II 型系统	0	0	$\frac{1}{K}$

## 10.2 伺服系统控制对象的数学模型

---

- 根据伺服电动机的种类，伺服系统可分为直流和交流两大类。
- 伺服系统控制对象包括伺服电动机、驱动装置和机械传动机构。

# 10.2.1 直流伺服系统控制对象的数学模型

---

- 直流伺服系统的执行元件为直流伺服电动机，中、小功率的伺服系统采用直流永磁伺服电动机，当功率较大时，也可采用电励磁的直流伺服电动机。
- 直流无刷电动机与直流电动机有相同的控制特性，也可归入直流伺服系统。

# 10.2.1 直流伺服系统控制对象的数学模型

- 直流伺服电动机的状态方程

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}T_e - \frac{1}{J}T_L$$

$$\frac{dI_d}{dt} = -\frac{R_\Sigma}{L_\Sigma}I_d - \frac{1}{L_\Sigma}E + \frac{1}{L_\Sigma}U_{d0}$$

- 机械传动机构的状态方程

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \frac{\omega}{j}$$

# 10.2.1 直流伺服系统控制对象的数学模型

---

- 驱动装置的近似等效传递函数

$$\frac{K_s}{T_s s + 1}$$

- 状态方程

$$\frac{dU_{d0}}{dt} = -\frac{1}{T_s} U_{d0} + \frac{K_s}{T_s} u_c$$

# 10.2.1 直流伺服系统控制对象的数学模型

- 控制对象的数学模型

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \frac{\omega}{j}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{C_T}{J} I_d - \frac{1}{J} T_L$$

$$\frac{dI_d}{dt} = -\frac{1}{T_l} I_d - \frac{C_e}{L_\Sigma} \omega + \frac{1}{L_\Sigma} U_{d0}$$

$$\frac{dU_{d0}}{dt} = -\frac{1}{T_s} U_{d0} + \frac{K_s}{T_s} u_c$$

# 10.2.1 直流伺服系统控制对象的数学模型

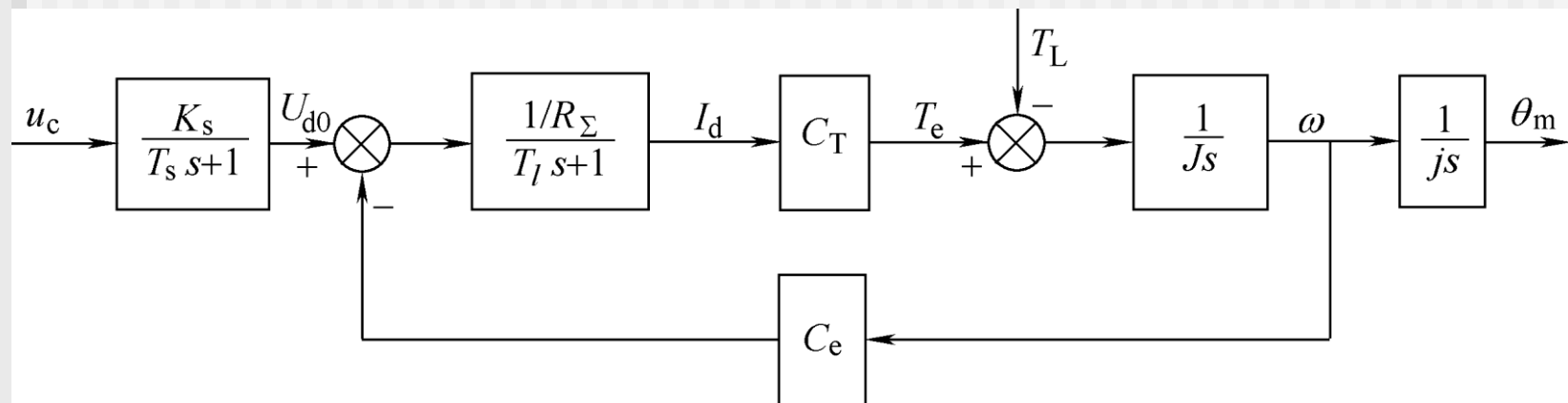


图10 -5直流伺服系统控制对象结构图



# 10.2.1 直流伺服系统控制对象的数学模型

- 采用电流闭环后，电流环的等效传递函数为惯性环节，故带有电流闭环控制的对象数学模型为

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \frac{\omega}{j}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{C_T}{J} I_d - \frac{1}{J} T_L$$

$$\frac{dI_d}{dt} = -\frac{1}{T_i} I_d + \frac{1}{T_i} I_d^*$$

# 10.2.1 直流伺服系统控制对象的数学模型

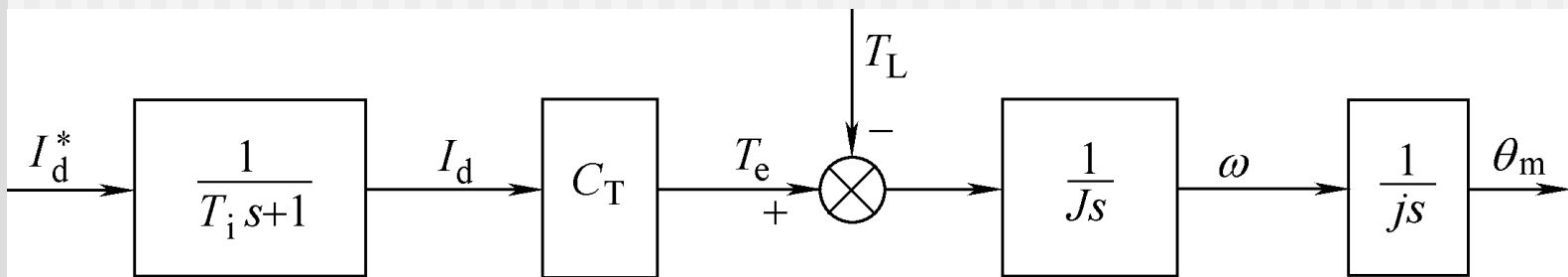


图10 -6 带有电流闭环控制的对象结构图

# 10.2.2 交流伺服系统控制对象的数学模型

- 用交流伺服电动机作为伺服系统的执行电动机，称作交流伺服系统。
- 常用的交流伺服电动机有三相异步电动机、永磁式同步电动机和磁阻式步进电动机等，也可用电励磁的同步伺服电动机。
- 无论是异步电动机，还是同步电动机，经过矢量变换、磁链定向和电流闭环控制均可等效为电流控制的直流电动机。

# 10.2.2 交流伺服系统控制对象的数学模型

- 异步电动机按转子磁链定向的数学模型为

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{n_p^2 L_m}{J L_r} i_{st} \psi_r - \frac{n_p}{J} T_L$$

$$\frac{d\psi_r}{dt} = -\frac{1}{T_r} \psi_r + \frac{L_m}{T_r} i_{sm}$$

$$\frac{di_{sm}}{dt} = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r} \psi_r - \frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r^2} i_{sm} + \omega_1 i_{st} + \frac{u_{sm}}{\sigma L_s}$$

$$\frac{di_{st}}{dt} = -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega \psi_r - \frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r^2} i_{st} - \omega_1 i_{sm} + \frac{u_{st}}{\sigma L_s}$$

## 10.2.2 交流伺服系统控制对象的数学模型

- 采用电流闭环控制后，对象的数学模型为

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \frac{\omega}{j}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{C_T}{J} i_{st} - \frac{1}{J} T_L$$

$$\frac{di_{st}}{dt} = -\frac{1}{T_i} \dot{i}_{st} + \frac{1}{T_i} \dot{i}_{st}^*$$

## 10.2.2 交流伺服系统控制对象的数学模型

---

- $C_T$  为包含磁链作用在内的转矩系数，电流转矩分量相当于直流电动机的电枢电流，电流闭环控制的交流伺服电动机结构图与直流电动机相仿。
- 对于同步伺服电动机也可得到相同结论，不重复论述。

# 10.2.2 交流伺服系统控制对象的数学模型

---

- 采用电流闭环控制后，交流伺服系统与直流伺服系统具有相同的控制对象数学模型。
- 称作在电流闭环控制下交、直流伺服系统控制对象的统一模型。
- 用相同的方法设计交流或直流伺服系统。

## 10.3 伺服系统的设计

---

- 伺服系统的结构因系统的具体要求而异，对于闭环伺服控制系统，常用串联校正或并联校正方式进行动态性能的调整。



## 10.3 伺服系统的设计

---

- 校正装置串联配置在前向通道的校正方式称为串联校正，一般把串联校正单元称作调节器，所以又称为调节器校正。
- 若校正装置与前向通道并行，则称为并联校正；信号流向与前向通道相同时，称作前馈校正；信号流向与前向通道相反时，则称作反馈校正。

# 10.3.1 调节器校正及其传递函数

---

- 常用的调节器有比例—微分（**PD**）调节器、比例—积分（**PI**）调节器以及比例—积分—微分（**PID**）调节器，设计中可根据实际伺服系统的特征进行选择。

# PD调节器校正

---

- 在系统的前向通道上串联**PD**调节器校正装置，可以使相位超前，以抵消惯性环节和积分环节使相位滞后而产生的不良后果。
- **PD**调节器的传递函数为

$$W_{PD}(s) = K_p(1 + \tau_d s)$$

# PI调节器校正

---

- 如果系统的稳态性能满足要求，并有一定的稳定裕量，而稳态误差较大，则可以用**PI**调节器进行校正。
- **PI**调节器的传递函数为

$$W_{PI}(s) = K_p \left( \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \right)$$

# PID调节器校正

- 将**PD**串联校正和**PI**串联校正联合使用，构成**PID**调节器。
- 如果合理设计则可以综合改善伺服系统的动态和静态特性。
- **PID**串联校正装置的传递函数为

$$W_{PID}(s) = K_p \frac{(\tau_i s + 1)(\tau_d s + 1)}{\tau_i s}$$

## 10.3.2单环位置伺服系统

---

- 对于直流伺服电动机可以采用单位置环控制方式，直接设计位置调节器**APR**。
- 为了避免在过渡过程中电流冲击过大，应采用电流截止反馈保护，或者选择允许过载倍数比较高的伺服电动机。

## 10.3.2 单环位置伺服系统

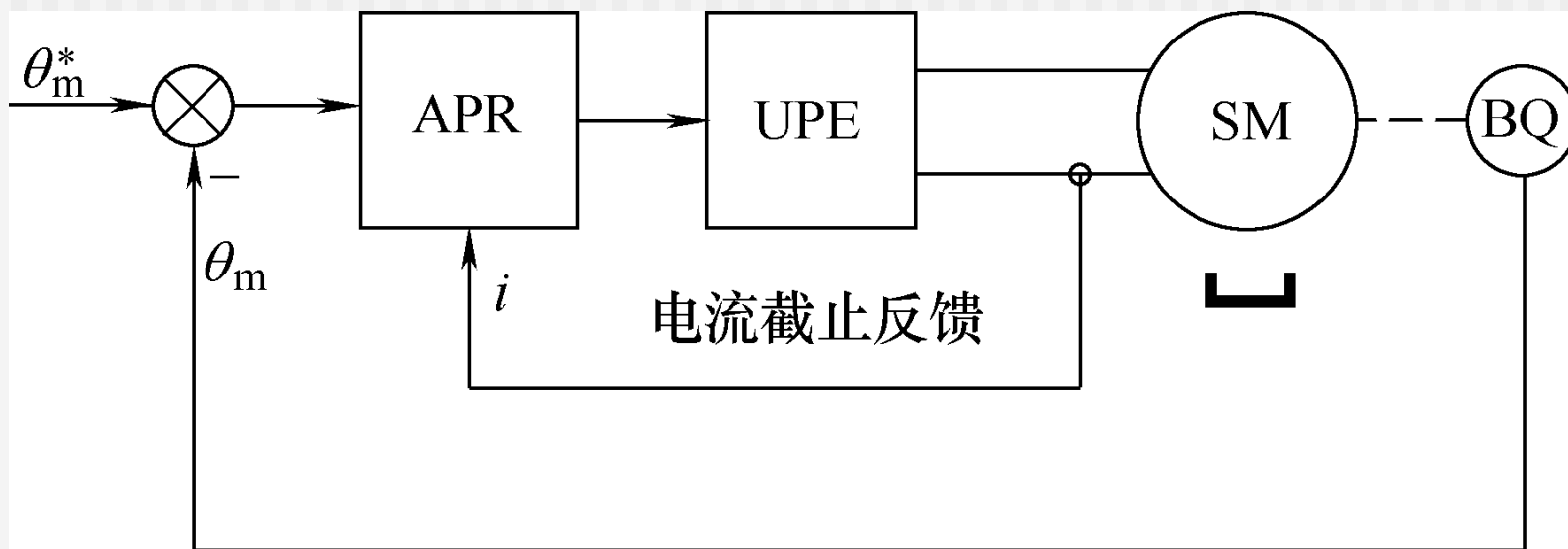


图10 -7 单环位置伺服系统

**APR**—位置调节器    **UPE**—驱动装置

**SM**—直流伺服电动机    **BQ**—位置传感器

## 10.3.2 单环位置伺服系统

- 忽略负载转矩，直流伺服系统控制对象传递函数为

$$W_{obj}(s) = \frac{K_s / (jC_e)}{s(T_s s + 1)(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}$$

- 机电时间常数  $T_m = \frac{R_\Sigma J}{C_T C_e}$



## 10.3.2 单环位置伺服系统

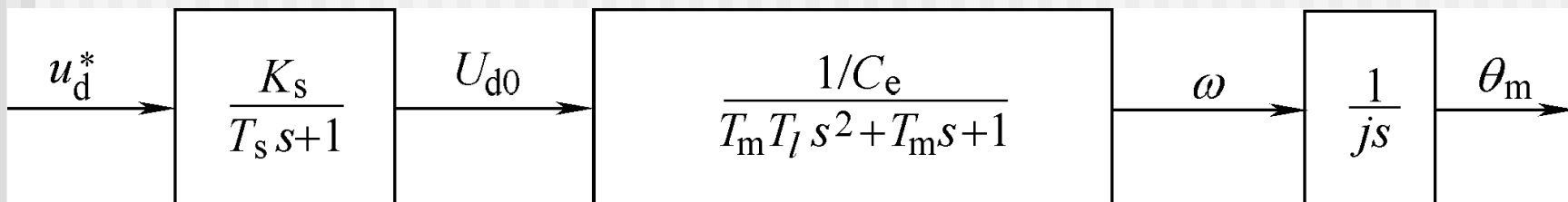


图10 -8 直流伺服系统控制对象结构图

- 采用**PD**调节器，其传递函数为

$$W_{APR}(s) = W_{PD}(s) = K_p (1 + \tau_d s)$$

## 10.3.2 单环位置伺服系统

---

- 伺服系统开环传递函数

$$W_{\theta op}(s) = \frac{K_{\theta}(\tau_d s + 1)}{s(T_s s + 1)(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}$$

- 系统开环放大系数

$$K_{\theta} = \frac{K_p K_s}{jC_e}$$

## 10.3.2 单环位置伺服系统

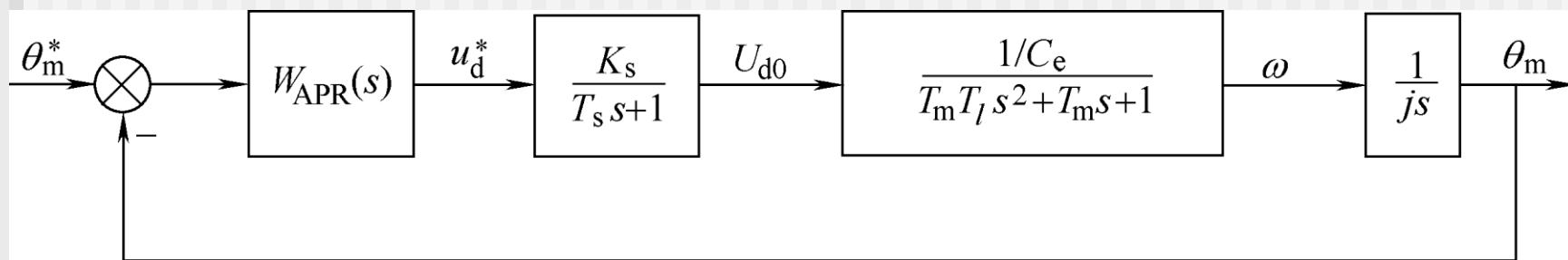


图10 -9 单位位置环控制直流伺服系统结构图

$$T_m > 4T_l \quad T_m T_l s^2 + T_m s + 1 = (T_1 s + 1)(T_2 s + 1)$$

$$T_1 \geq T_2 > T_s$$

## 10.3.2 单环位置伺服系统

---

- 用系统的开环零点消去惯性时间常数最大的开环极点，以加快系统的响应过程。
- 系统的开环传递函数

$$W_{\theta op}(s) = \frac{K_{\theta}}{s(T_s s + 1)(T_2 s + 1)}$$

## 10.3.2 单环位置伺服系统

---

- 伺服系统的闭环传递函数

$$W_{\theta cl}(s) = \frac{K_{\theta}}{T_s T_2 s^3 + (T_s + T_2) s^2 + s + K_{\theta}}$$

- 闭环传递函数的特征方程式

$$T_s T_2 s^3 + (T_s + T_2) s^2 + s + K_{\theta} = 0$$

## 10.3.2 单环位置伺服系统

- 用Routh稳定判据，为保证系统稳定，须使

$$K_{\theta} < \frac{T_s + T_2}{T_s T_2}$$

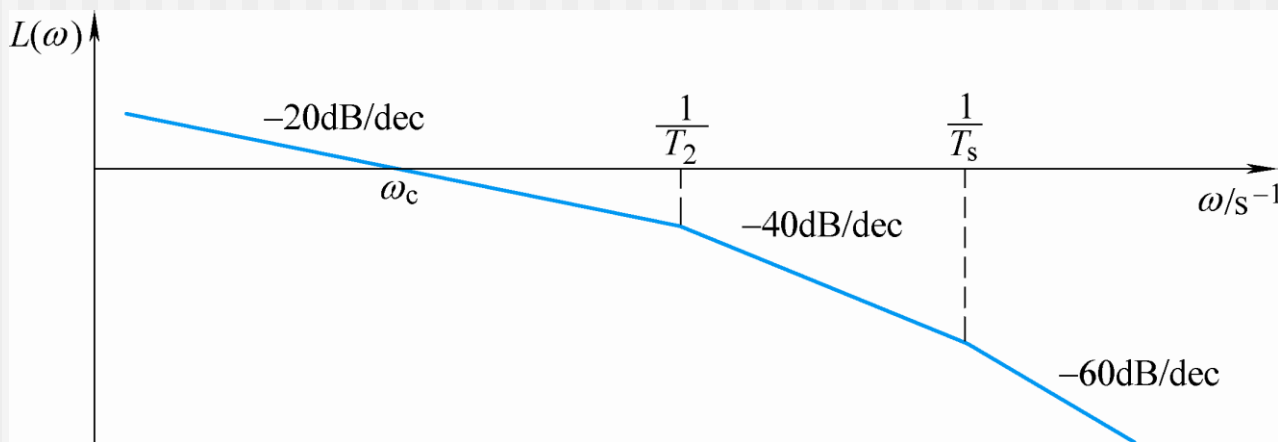


图10 -10 单位位置环伺服系统开环传递函数对数幅频特性

## 10.3.3 双环伺服系统

---

- 在电流闭环控制的基础上，设计位置调节器，构成位置伺服系统，位置调节器的输出限幅是电流的最大值。
- 以直流伺服系统为例，对于交流伺服系统也适用，只须对伺服电动机和驱动装置应作相应的改动。

## 10.3.3 双环伺服系统

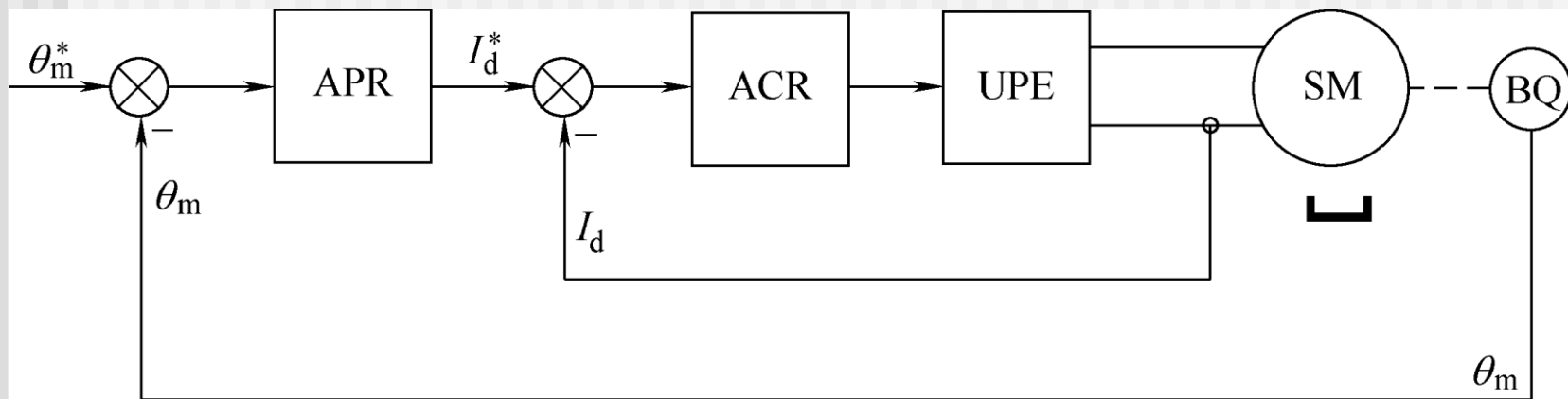


图10 -11 双环位置伺服系统



## 10.3.3 双环伺服系统

- 忽略负载转矩时，带有电流闭环控制对象的传递函数为

$$W_{obj}(s) = \frac{C_T / (jJ)}{s^2 (T_i s + 1)}$$

- 为了消除负载扰动引起的静差，APR选用PI调节器，其传递函数

$$W_{APR}(s) = W_{PI}(s) = K_p \left( \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \right)$$

## 10.3.3 双环伺服系统

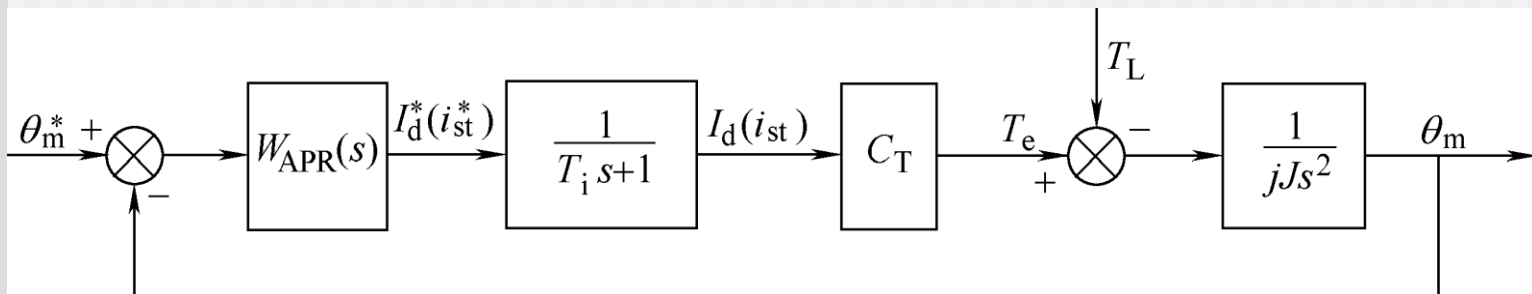


图10 -12 双环位置伺服系统结构图

## 10.3.3 双环伺服系统

---

- 系统的开环传递函数为

$$W_{\theta op}(s) = \frac{K_p(\tau_i s + 1)}{\tau_i s} \frac{C_T / (jJ)}{s^2 (T_i s + 1)} = \frac{K_\theta(\tau_i s + 1)}{s^3 (T_i s + 1)}$$

- 系统的开环放大系数

$$K_\theta = \frac{K_p C_T}{jJ \tau_i}$$

## 10.3.3 双环伺服系统

---

- 伺服系统的闭环传递函数为

$$W_{\theta cl}(s) = \frac{K_{\theta}(\tau_i s + 1)}{T_i s^4 + s^3 + K_{\theta} \tau_i s + K_{\theta}}$$

- 特征方程式

$$T_i s^4 + s^3 + K_{\theta} \tau_i s + K_{\theta} = 0$$

## 10.3.3 双环伺服系统

---

- 伺服系统的闭环传递函数为

$$W_{\theta cl}(s) = \frac{K_{\theta}(\tau_i s + 1)}{T_i s^4 + s^3 + K_{\theta} \tau_i s + K_{\theta}}$$

- 特征方程式

$$T_i s^4 + s^3 + K_{\theta} \tau_i s + K_{\theta} = 0$$

- 特征方程式未出现s的二次项，由Routh稳定判据可知，系统不稳定。

## 10.3.3 双环伺服系统

- 将APR改用PID调节器，其传递函数

$$W_{APR}(s) = W_{PID}(s) = K_p \frac{(\tau_i s + 1)(\tau_d s + 1)}{\tau_i s}$$

- 伺服系统的开环传递函数

$$W_{\theta op}(s) = \frac{K_p (\tau_i s + 1)(\tau_d s + 1)}{\tau_i s} \frac{C_T / (jJ)}{s^2 (T_i s + 1)} = \frac{K_\theta (\tau_i s + 1)(\tau_d s + 1)}{s^3 (T_i s + 1)}$$

## 10.3.3 双环伺服系统

---

- 闭环传递函数

$$W_{\theta cl}(s) = \frac{K_{\theta}(\tau_i s + 1)(\tau_d s + 1)}{T_i s^4 + s^3 + K_{\theta} \tau_i \tau_d s^2 + K_{\theta}(\tau_i + \tau_d)s + K_{\theta}}$$

- 系统特征方程式

$$T_i s^4 + s^3 + K_{\theta} \tau_i \tau_d s^2 + K_{\theta}(\tau_i + \tau_d)s + K_{\theta} = 0$$

## 10.3.3 双环伺服系统

---

- 由Routh稳定判据求得系统稳定的条件

$$\begin{cases} \tau_i \tau_d > T_i (\tau_i + \tau_d) \\ K_\theta (\tau_i + \tau_d) (\tau_i \tau_d - T_i (\tau_i + \tau_d)) > 1 \end{cases}$$



## 10.3.3 双环伺服系统

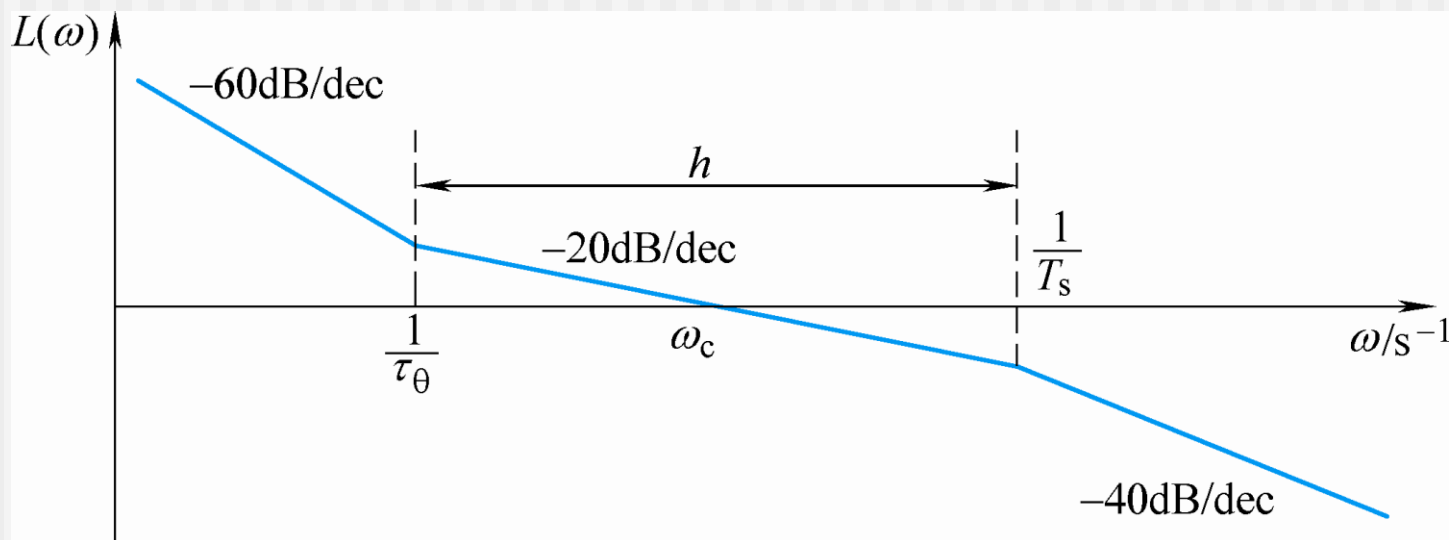


图10 -13 采用PID控制的双环控制伺服系统开环传递函数对数幅频特性

## 10.3.3 双环伺服系统

- 若APR仍采用PI调节器，可在位置反馈的基础上，再加上微分负反馈，即转速负反馈。

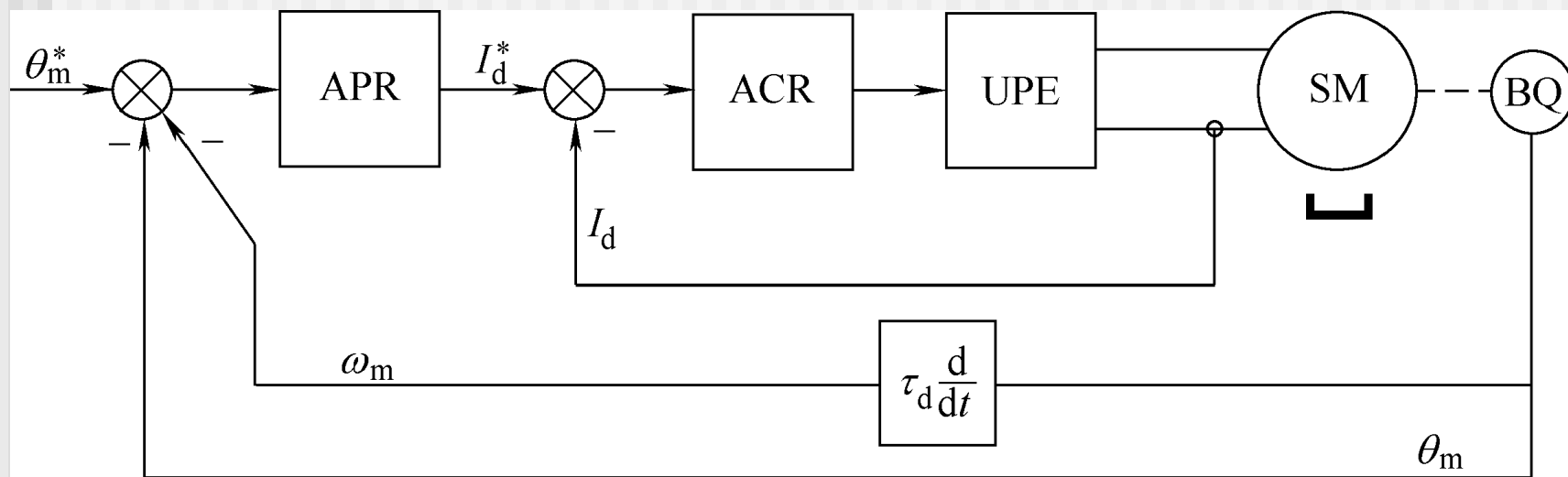


图10 -14 带有微分负反馈的伺服系统

## 10.3.3 双环伺服系统

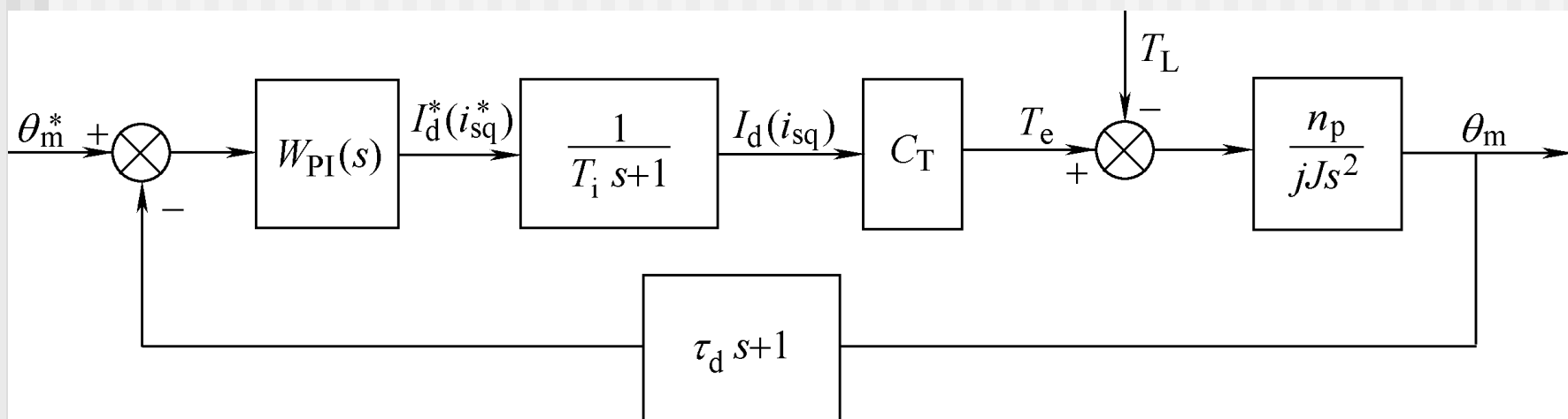


图10 -15 带有微分负反馈的伺服系统结构图

## 10.3.4三环伺服系统

- 在调速系统的基础上，再设一个位置环，形成三环控制的位置伺服系统。

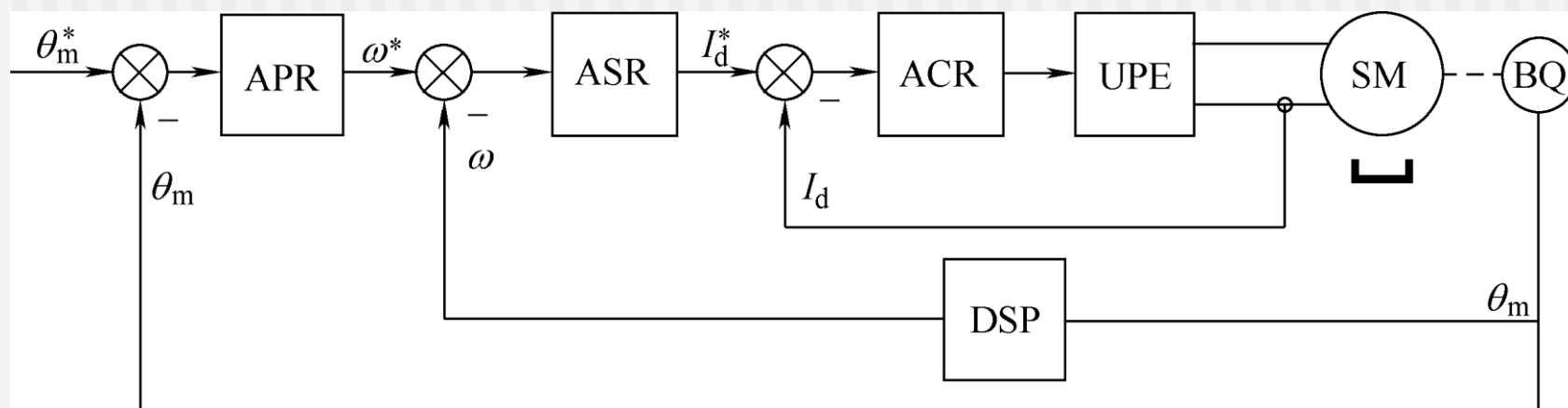


图10 -16 三环位置伺服系统

APR—位置调节器 ASR—转速调节器 ACR—电流调节器  
BQ—光电位置传感器 DSP—数字转速信号形成环节

## 10.3.4 三环伺服系统

- 直流转速闭环控制系统按典型II型系统设计，开环传递函数

$$W_{nop}(s) = \frac{K_N(\tau_n s + 1)}{s^2(T_{\Sigma n} s + 1)}$$

- 矢量控制系统开环传递函数

$$W_{nop}(s) = \frac{k_n C_T (\tau_n s + 1) / J}{\tau_n s^2 (T_i s + 1)} = \frac{K_N (\tau_n s + 1)}{s^2 (T_i s + 1)}$$

- 两者结构相同。

## 10.3.4 三环伺服系统

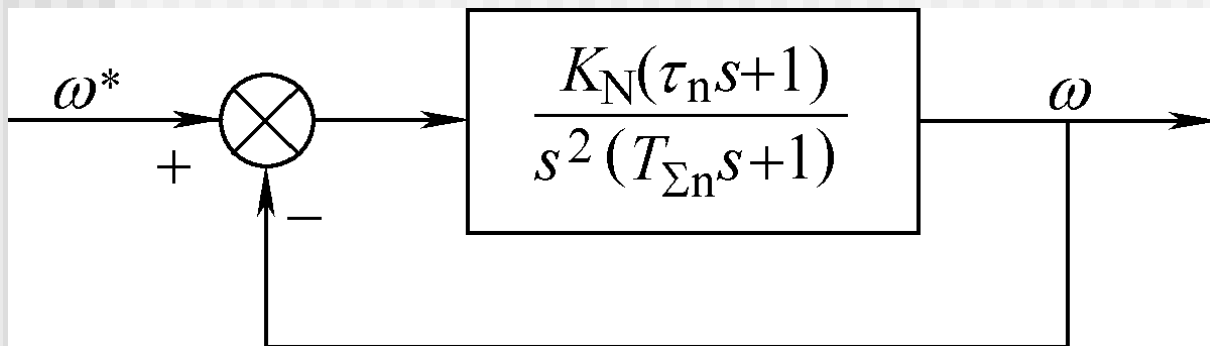


图10 -17 直流转速环结构图

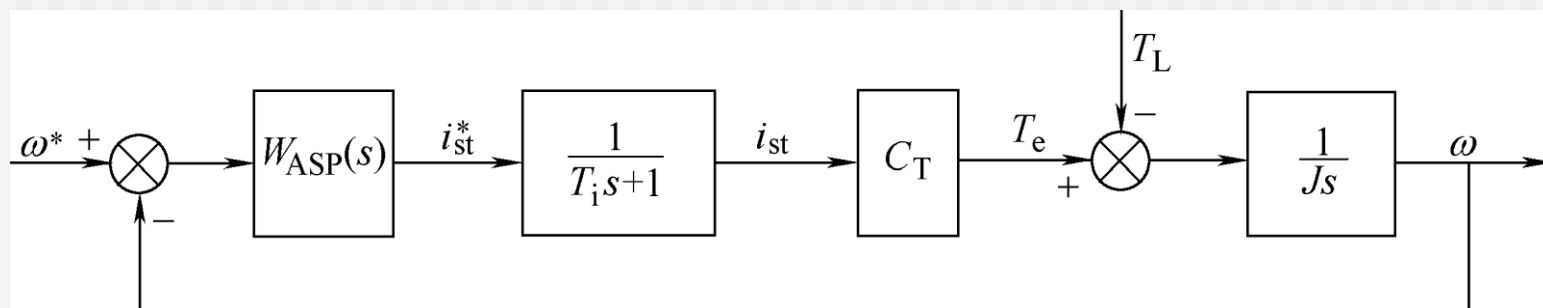


图10 -18 矢量控制系统结构示意图

## 10.3.4 三环伺服系统

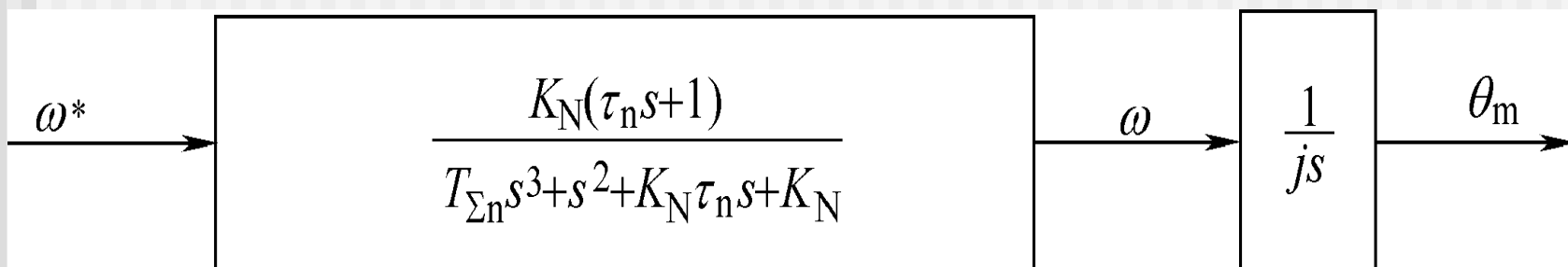


图10 -19 位置环的控制对象结构图

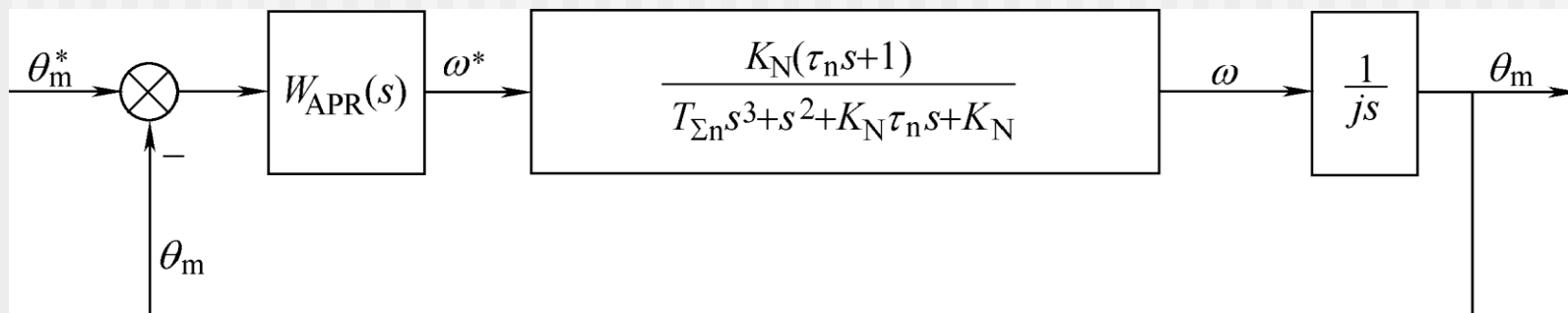


图10 -20 位置闭环控制结构图

## 10.3.4 三环伺服系统

- 位置环控制对象的传递函数

$$W_{\theta obj}(s) = \frac{\theta_m(s)}{\omega^*(s)} = \frac{K_N(\tau_n s + 1) / j}{s(T_{\Sigma n} s^3 + s^2 + K_N \tau_n s + K_N)}$$

- 开环传递函数

$$W_{\theta op}(s) = W_{APR}(s) \frac{K_N(\tau_n s + 1) / j}{s(T_{\Sigma n} s^3 + s^2 + K_N \tau_n s + K_N)}$$



## 10.3.4三环伺服系统

- APR选用P调节器就可实现稳态无静差，则系统的开环传递函数

$$\begin{aligned} W_{\theta op}(s) &= \frac{K_p K_N (\tau_n s + 1) / j}{s(T_{\Sigma n} s^3 + s^2 + K_N \tau_n s + K_N)} \\ &= \frac{K_\theta (\tau_n s + 1)}{s(T_{\Sigma n} s^3 + s^2 + K_N \tau_n s + K_N)} \end{aligned}$$

- 开环放大系数

$$K_\theta = \frac{K_p K_N}{j}$$

## 10.3.4三环伺服系统

- 伺服系统的闭环传递函数

$$W_{\theta L}(s) = \frac{K_{\theta}(\tau_n s + 1)}{T_{\Sigma n} s^4 + s^3 + K_N \tau_n s^2 + (K_N + K_{\theta} \tau_n) s + K_{\theta}}$$

- 特征方程式

$$T_{\Sigma n} s^4 + s^3 + K_N \tau_n s^2 + (K_N + K_{\theta} \tau_n) s + K_{\theta} = 0$$

## 10.3.4 三环伺服系统

- 用Routh稳定判据，可求得系统的稳定条件

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{\theta} < \frac{K_N(\tau_n - T_{\Sigma n})}{T_{\Sigma n}\tau_n} \\ -T_{\Sigma n}\tau_n^2 K_{\theta}^2 + (\tau_n^2 K_N - 2T_{\Sigma n}K_N\tau_n - 1)K_{\theta} + K_N^2(\tau_n - T_{\Sigma n}) > 0 \end{array} \right.$$

## 10.3.5 复合控制的伺服系统

- 从给定信号直接引出开环的前馈控制，和闭环的反馈控制一起，构成复合控制系统

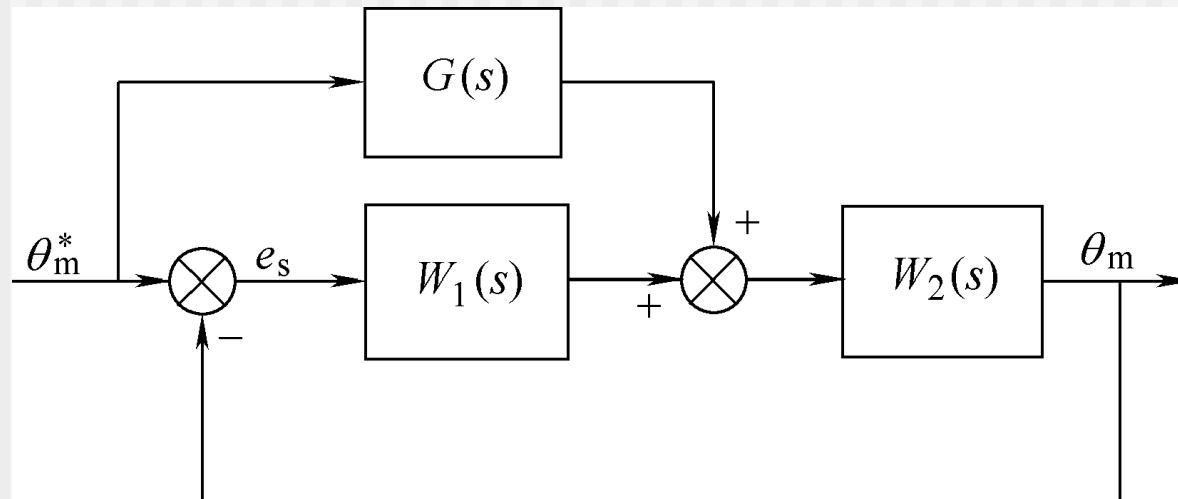


图10 -21 复合控制位置伺服系统的结构原理图

## 10.3.5 复合控制的伺服系统

---

- 前馈控制器的传递函数选为

$$G(s) = \frac{1}{W_2(s)}$$

- 得到

$$\frac{\theta_m(s)}{\theta_m^*(s)} = 1$$

## 10.3.5 复合控制的伺服系统

---

- 理想的复合控制随动系统的输出量能够完全复现给定输入量，其稳态和动态的给定误差都为零。
- 系统对给定输入实现了“完全不变性”。
- 需要引入输入信号的各阶导数作为前馈控制信号，但同时会引入高频干扰信号，严重时将破坏系统的稳定性，这时不得不再加上滤波环节。