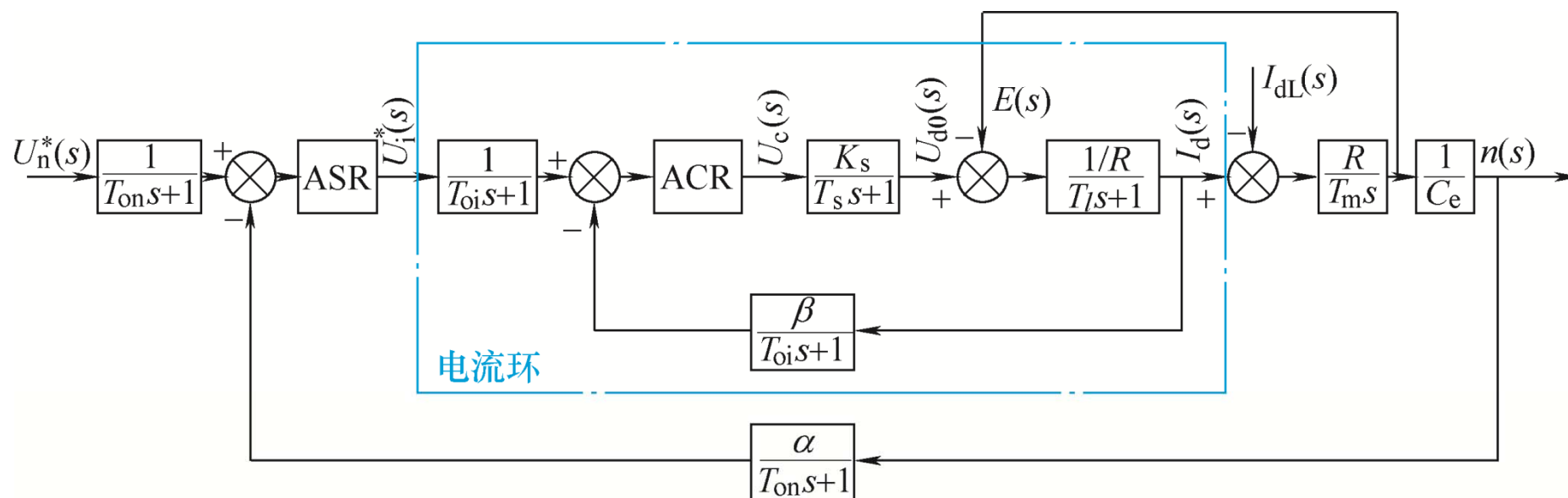


### 4.3.4 按工程设计方法设计转速、电流反馈控制直流调速系统的调节器



$T_{oi}$ ——电流反馈滤波时间常数；  $T_{on}$ ——转速反馈滤波时间常数

图4-20 双闭环调速系统的动态结构图

---

# 双闭环调节器设计

- 两个调节器，应当先设计哪一个？
  - 依据什么标准来设计？
  - 每个调节器两个参数，怎么设计？
-

#### 4.3.4 按工程设计方法设计转速、电流反馈控制直流调速系统的调节器

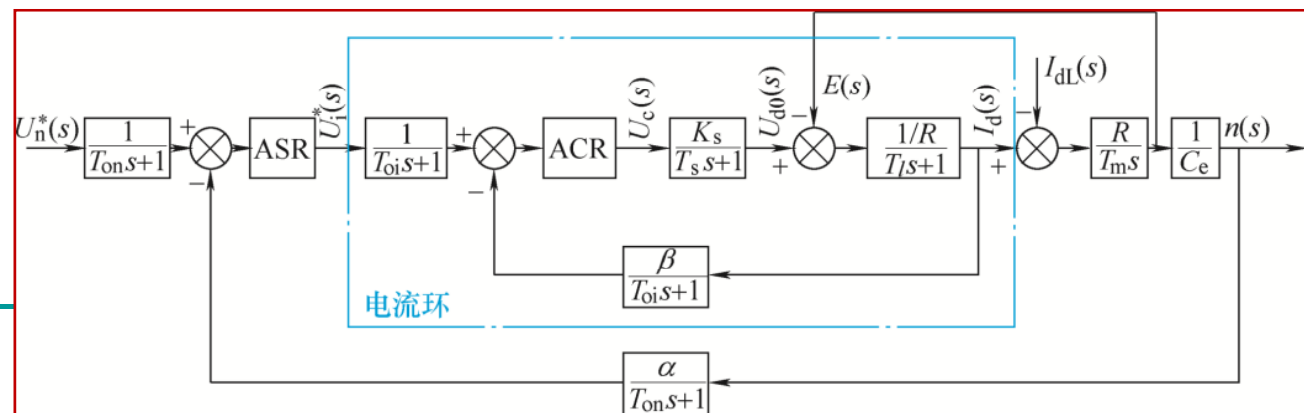
- 先内环后外环。
- 先从电流环（内环）开始，工程简化
- 根据电流环的控制要求确定把它校正成哪一类典型系统，
- 按照控制对象确定电流调节器的类型，按动态性能指标要求确定电流调节器的参数。
- 电流环设计完成后，把电流环等效成转速环（外环）中的一个环节，再用同样的方法设计转速环。

# 1. 电流调节器的设计

- 反电动势与电流反馈的作用相互交叉，相对电流变化，是一种变化缓慢的扰动。
- 在按动态性能设计电流环时，可以暂不考虑反电动势变化的动态影响， $\Delta E \approx 0$ 。
- 忽略反电动势对电流环作用的近似条件是

$$\omega_{ci} \geq 3\sqrt{\frac{1}{T_m T_l}} \quad (4-49)$$

式中 $\omega_{ci}$ ——电流环开环频率特性的截止频率。



# 1. 电流调节器的设计

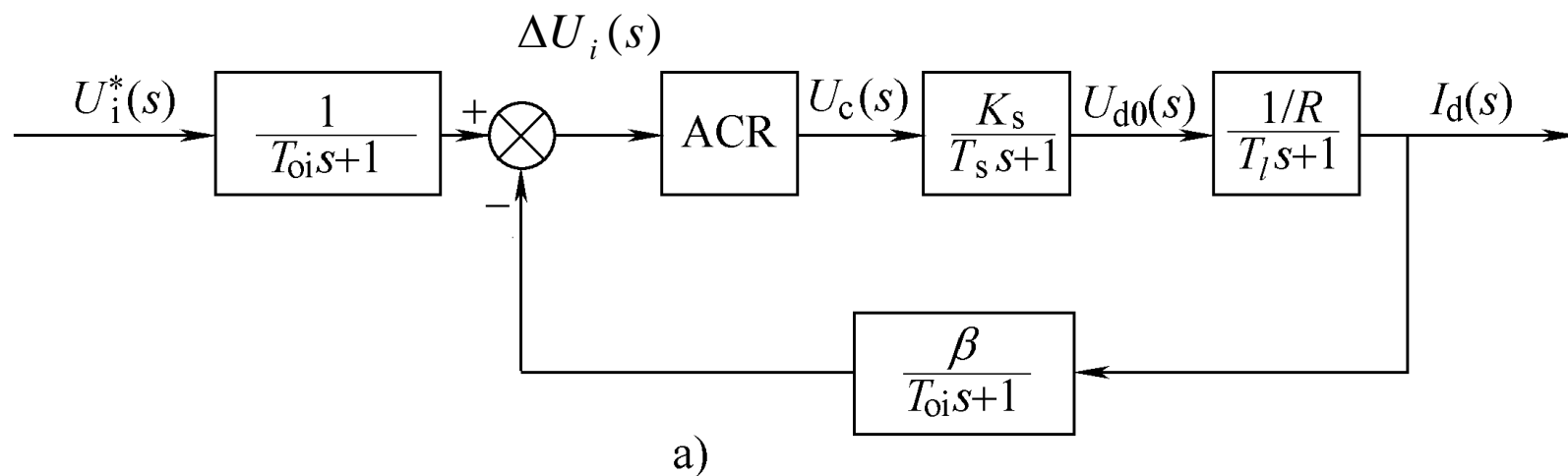


图4-21 电流环的动态结构图及其化简  
(a) 忽略反电动势的动态影响

$$\Delta U_i(s) = U_i^*(s) \cdot \frac{1}{T_{oi}s+1} - I_d(s) \cdot \frac{\beta}{T_{oi}s+1}$$

- 把给定滤波和反馈滤波同时等效地移到环内前向通道上，再把给定信号改成  $\frac{u_i^*(s)}{\beta}$ ，则电流环便等效成单位负反馈系统。

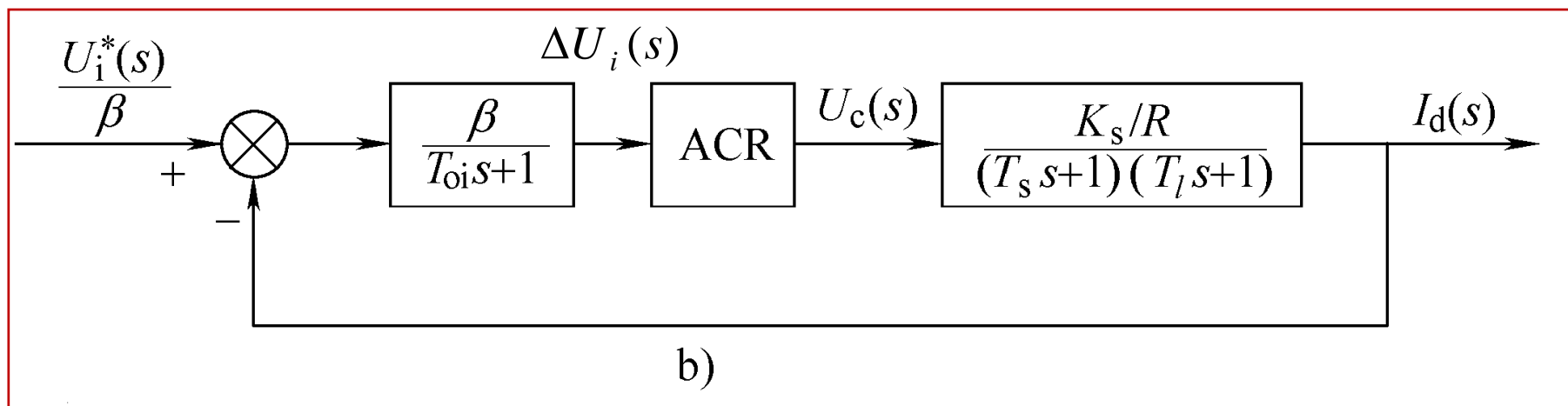


图4-21 电流环的动态结构图及其化简  
(b) 等效成单位负反馈系统

$$\Delta U_i(s) = \frac{U_i^*(s)}{\beta} \cdot \frac{\beta}{T_{oi}s + 1} - I_d(s) \cdot \frac{\beta}{T_{oi}s + 1} = U_i^*(s) \cdot \frac{1}{T_{oi}s + 1} - I_d(s) \cdot \frac{\beta}{T_{oi}s + 1}$$

- $T_s$  和  $T_{oi}$  一般都比  $T_l$  小得多，可以近似为一个惯性环节，其时间常数为

$$T_{\Sigma i} = T_s + T_{oi} \quad (4-50)$$

- 简化的近似条件为  $\omega_{ci} \leq \frac{1}{3} \sqrt{\frac{1}{T_s T_{oi}}}$  (4-51)

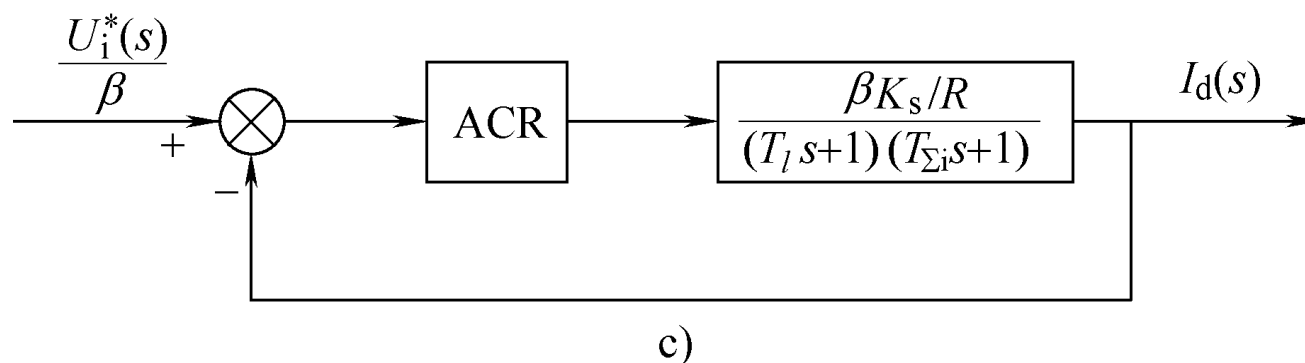
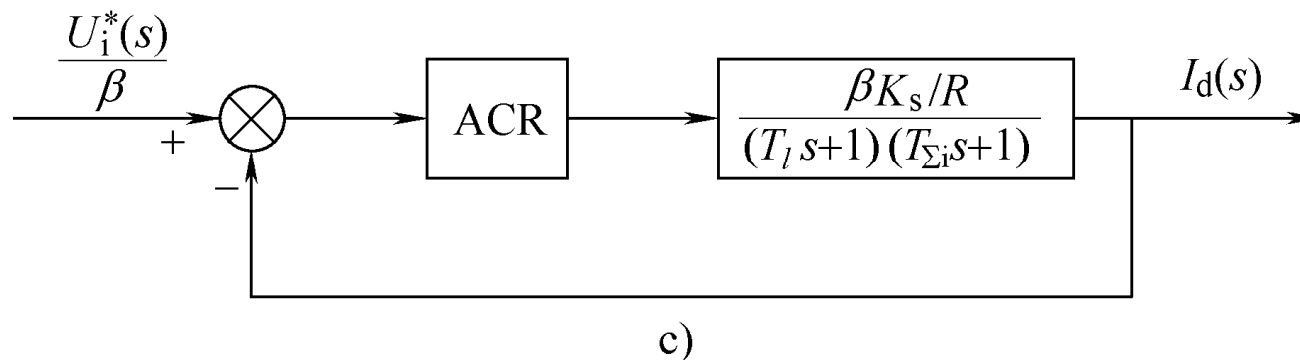


图4-21 电流环的动态结构图及其化简  
(c) 小惯性环节近似处理

# 典型系统的选择



- 从稳态要求上看：

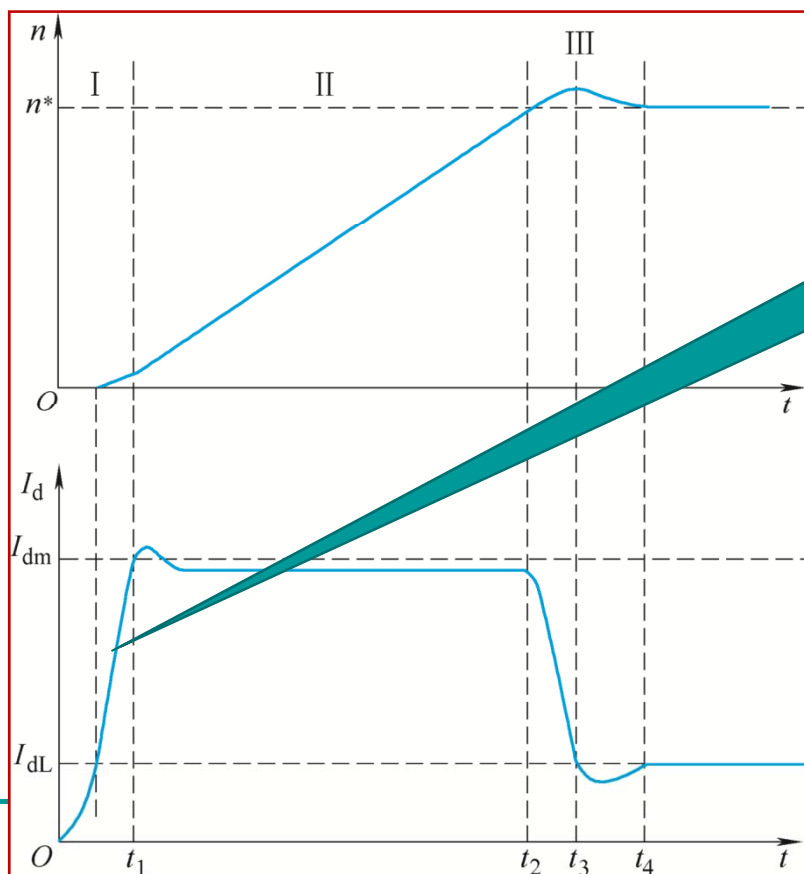
电流无静差----ACR有一个积分环节----采用典型I型系统。

- 从稳态要求上看：

电流环以跟随性能为主，要求超调量小，应选用典型I型系统。



## ■ 按照典型I 型系统设计电流调节器



电流快速建立，  
超调小

## A. 典型系统的选择：采用 I 型系统

### ■ 电流调节器选择：PI型的电流调节器，

$$W_{\text{ACR}}(s) = \frac{K_i(\tau_i s + 1)}{\tau_i s} \quad (4-52)$$

$K_i$  — 电流调节器的比例系数；

$\tau_i$  — 电流调节器的超前时间常数。

### ■ 电流环开环传递函数

$$W_{\text{opi}}(s) = \frac{K_i(\tau_i s + 1)}{\tau_i s} \frac{\beta K_s / R}{(T_l s + 1)(T_{\Sigma i} s + 1)} \quad (4-53)$$

- 因为  $T_i \gg T_{\Sigma i}$ ，选择  $\tau_i = T_i$ ，为提高快速性，用调节器零点消去控制对象中大的时间常数极点，

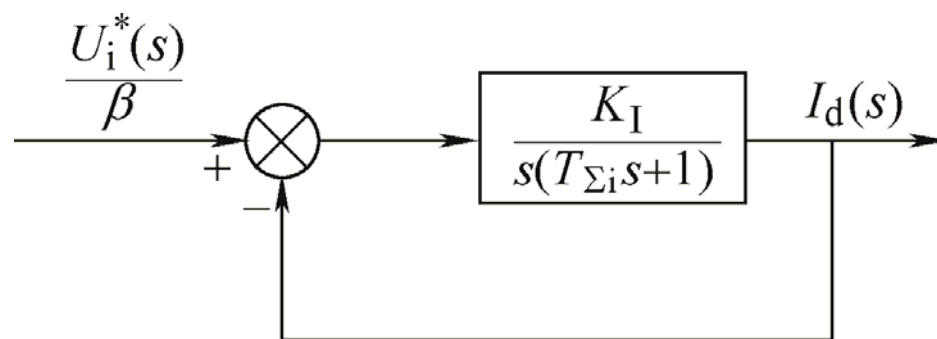
$$W_{opi}(s) = \frac{K_i \beta K_s / R}{\tau_i s (T_{\Sigma i} s + 1)} = \frac{K_I}{s (T_{\Sigma i} s + 1)} \quad (4-54)$$

- 希望电流超调量  $\sigma_i \leq 5\%$ ，选  $\xi = 0.707$ ， $K_I T_{\Sigma i} = 0.5$ ，则

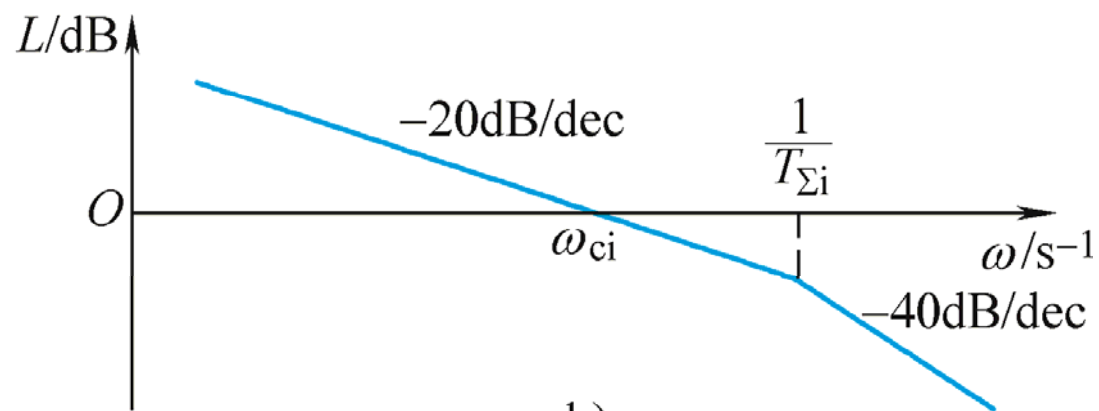
$$K_I = \omega_{ci} = \frac{1}{2T_{\Sigma i}} \quad (4-55)$$

$$K_i = \frac{T_l R}{2K_s \beta T_{\Sigma i}} = \frac{L}{2K_s \beta T_{\Sigma i}} \quad (4-56)$$

图4-22 校正成典型I型系统的电流环  
(a) 动态结构图 (b) 开环对数幅频特性



a)



b)

## 电流环工程设计需要校验的近似条件

- 电力电子（或PWM）变换器传递函数的近似处理

$$\omega_{ci} \leq \frac{1}{3T_s}$$

- 忽略反电动势 $E$ 变化对电流环动态影响的近似处理

$$\omega_{ci} \geq 3\sqrt{\frac{1}{T_m T_l}}$$

- 电流环小时间常数近似处理

$$\omega_{ci} \leq \frac{1}{3}\sqrt{\frac{1}{T_s T_{oi}}}$$

# 电流调节器的实现

## ■ 模拟式电流调节器电路

$$K_i = \frac{R_i}{R_0} \quad (4-57)$$

$$\tau_i = R_i C_i \quad (4-58)$$

$$T_{oi} = \frac{1}{4} R_0 C_{oi} \quad (4-59)$$

$U_i^*$ —电流给定电压；

$-\beta I_d$ —电流负反馈电压；

$U_c$ —电力电子变换器的控制电压。

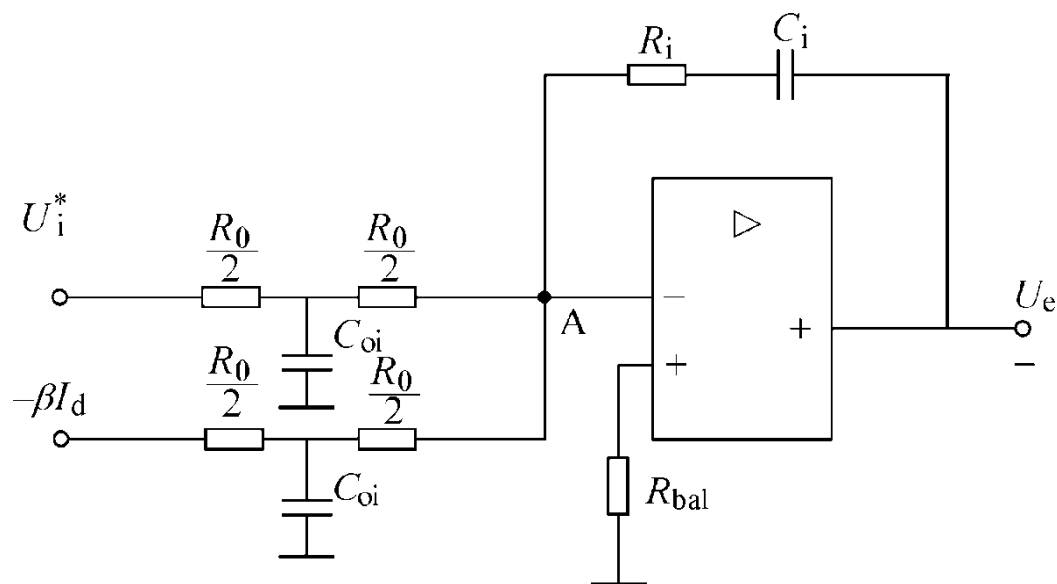


图4-23 含给定滤波与反馈滤波的  
PI型电流调节器

## 例题4-1

- 某PWM变换器供电的双闭环直流调速系统，开关频率为8kHz，与3.4节所用电机相同，电机型号为Z4-132-1，基本数据如下：
- 直流电动机：400V，52.2A，2610r/min， $=0.1459\text{V}\cdot\text{min/r}$ ，允许过载倍数=1.5；
- PWM变换器放大系数： $=107.5$ ；（这是按照理想情况计算的电压放大系数。三相整流输出的最大直流电压为537V，最大控制电压最大为5V，因此， $538/5=107.5$ ）

- 电枢回路总电阻:  $R = 0.368\Omega$  ;
- 时间常数:  $T_l = 0.0144s$ ,  $T_m = 0.18s$ ;
- 电流反馈系数:  $\beta = 0.1277V/A$  ( $\approx 10V / 1.5I_N$ )
- 设计要求 按照典型 I 型系统设计电流调节器, 要求电流超调量。
- 调节器, 要求电流超调量  $\sigma_i \leq 5\%$



解

1) 确定时间常数

- PWM变换器滞后时间常数 $T_s=0.000125s$ 。
- 电流滤波时间常数：为滤除PWM纹波应有
- $\frac{1}{T_{oi}} = \left(\frac{1}{5} \sim \frac{1}{10}\right) \frac{1}{T_{PWM}}$  ,  $T_{oi}=0.0006s$ 。
- 电流环小时间常数之和，按小时间常数近似处理，取 $T_{\Sigma i}=T_s+T_{oi}=0.000725s$ 。

## 2) 选择电流调节器结构

- 要求 $\sigma_i \leq 5\%$ ，并保证稳态电流无差，按典型I型系统设计电流调节器。用PI型电流调节器。
- 检查对电源电压的抗扰性能：

$$\frac{T_l}{T_{\Sigma i}} = \frac{0.0144}{0.000725} = 19.86$$

参看表4-2的典型I型系统动态抗扰性能，各项指标都是可以接受的。

### 3) 计算电流调节器参数

- 电流调节器超前时间常数:  $\tau_i = T_I = 0.0144\text{s}$ 。
- 电流环开环增益: 取  $K_I T_{\Sigma i} = 0.5$ ,

$$K_I = \frac{0.5}{T_{\Sigma i}} = \frac{0.5}{0.000725} = 689.655\text{s}^{-1}$$

- ACR的比例系数为

$$K_i = \frac{K_I \tau_i R}{K_s \beta} = \frac{689.655 \times 0.0144 \times 0.368}{107.5 \times 0.1277} = 0.266$$

#### 4) 校验近似条件

■ 电流环截止频率 $\omega_{ci}=K_I=689.655s^{-1}$

##### (1) 校验PWM变换器传递函数的近似条件

$$\frac{1}{3T_s} = \frac{1}{3 \times 0.000125} = 2666.7 \text{ s}^{-1} > \omega_{ci}$$

##### (2) 校验忽略反电动势变化对电流环动态影响的条件

$$3\sqrt{\frac{1}{T_m T_l}} = 3 \times \sqrt{\frac{1}{0.18 \times 0.0144}} = 58.93 \text{ s}^{-1} < \omega_{ci}$$

##### (3) 校验电流环小时间常数近似处理条件

$$\frac{1}{3}\sqrt{\frac{1}{T_s T_{oi}}} = \frac{1}{3} \times \sqrt{\frac{1}{0.000125 \times 0.0006}} = 1217.16 \text{ s}^{-1} > \omega_{ci}$$

## 5) 计算调节器电阻和电容

- 取  $R_0 = 390k\Omega$
- $R_i = K_i R_0 = 0.266 \times 390 \times 10^3 = 103.7k\Omega$  , 取  **$100k\Omega$**
- $C_i = \frac{\tau_i}{R_i} = \frac{0.0144}{100 \times 10^3} = 0.144 \times 10^{-6} F = 0.144\mu F$  取  **$0.15\mu F$**
- $C_{oi} = \frac{4T_{oi}}{R_0} = \frac{4 \times 0.0006}{390 \times 10^3} = 6.15 \times 10^{-9} F = 6150pF$  取  **$6800pF$**

电流环可以达到的动态跟随性能指标为  $\sigma_i = 4.3\% < 5\%$

## 例题4-2

- 某双闭环调速系统，采用三相 桥式整流电路，其基本数据如下：
- 直流电动机：  $U_N=220\text{V}$ ，  $I_N=308\text{A}$ ，  $n_N=1000\text{r/min}$ ，  $C_e=0.196\text{V}\cdot\text{min/r}$ ， 允许过载倍数  $\lambda=1.5$ 。
- 触发器整流环节的放大系数：  $K_s=35$ ， 滞后时间常数  $T_s=0.0017\text{s}$ ；

- 电枢回路总电阻:  $R=0.18\Omega$  ;
- 电磁时间常数:  $T_1=0.012s$ ;
- 机电时间常数:  $T_m=0.12s$ ;
- 反馈滤波时间常数:  $T_{oi}=0.0025s, T_{on}=0.015s$ ;
- 额定转速时的给定电压:  $U_{nm}^*=10V$ ;
- 调节器饱和输出电压:  $U_{im}^* = U_{cm} = 10V$ ;

- 
- 系统的稳态指标：无静差；
  - 系统的动态指标：电流超调量  $\rho_i \leq 5\%$ 。
  - ◆ 试求：
    - ◆ （1）转速、电流反馈系数；
    - ◆ （2）设计电流调节器并计算其电路参数（不必校验近似条件）。
-



解：

◆ (1) 参数计算

1) 转速反馈系数

$$\alpha = U_{nm}^* / n_N = 10 / 1000 = 0.01 \text{ V} \cdot \text{min/r}$$

2) 电流反馈系数

$$\beta = U_{im}^* / (\lambda \times I_N) = 10 / (1.5 \times 308) = 0.022 \text{ V/A}$$

◆ (2) 选择电流调节器结构

设计成典型 I 型系统，采用PI调节器

传递函数为  $W_{ACR}(s) = K_i \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s}$

### ◆ (3) 选择电流调节器参数

积分时间常数:  $\tau_i = T_1 = 0.012s$

电流环小时间常数:

$$T_{\Sigma i} = T_s + T_{oi} = 0.0017 + 0.0025 = 0.0042 s$$

为满足电流超调量  $s_i \leq 5\%$  的要求, 取  $K_I T_{\Sigma i} = 0.5$

则:  $K_I = (1/2 \times T_{\Sigma}) = (1/2 \times 0.0042) = 119.05s^{-1}$

电流调节器比例系数  $K_i$  为:

$$K_i = K_I \times \tau \times /(\beta \times K_s)$$

$$= 119.05 \times 0.012 \times 0.18 / (0.022 \times 35) = 0.334$$

---

◆ (4) 计算调节器的电阻和电容

取调节器输入电阻  $R_0=40\text{K}$  , 则

$$R_i = K_i \times R_0 = 0.334 \times 40 = 13.36 \text{ K}$$

$$C_i = \tau_i / R_i = 0.012 \times 10^6 / (13.36 \times 10^3) = 0.90 \text{ uF}$$

$$C_{oi} = 4T_{oi} / R_0 = 4 \times 0.0025 \times 10^6 / (40 \times 10^3) = 0.25 \text{ uF}$$

---