

3.1 实验目的

- (1) 了解转速单闭环直流调速系统的原理、组成及各主要单元部件的工作原理；
- (2) 学习转速闭环系统的调试方法，建立闭环控制的概念；
- (3) 学习电流截止保护环节的测试方法；
- (4) 掌握单闭环直流调速系统的开环机械特性与闭环静特性的测定方法。

3.2 实验原理

3.2.1 转速单闭环直流调速系统的组成及工作原理

转速单闭环直流调速实验系统原理框图如图 3.1 所示。

在转速单闭环直流调速实验系统中，主电路为晶闸管可控整流器，通

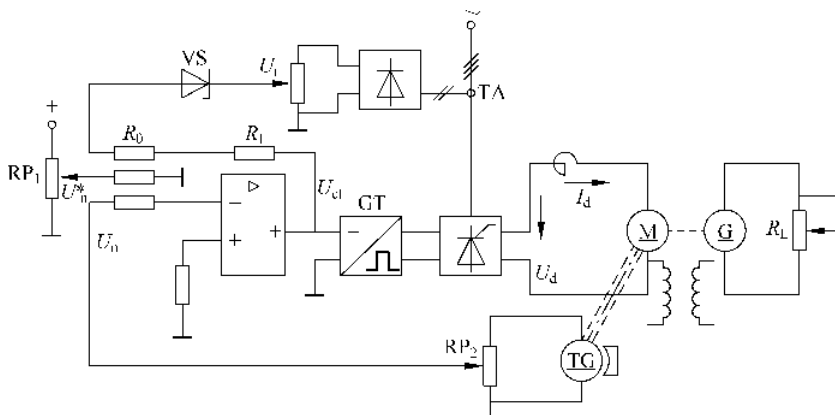


图 3.1 转速单闭环直流调速实验系统原理框图

过调节触发装置 (GT) 的控制电压 U_{ct} , 移动触发脉冲的相位, 即可改变整流输出电压平均值 U_d 的大小, 从而调节直流电动机的电枢电压, 实现电动机转速 n 的平滑调节。

转速闭环系统中的反馈信号, 取自与电动机同轴安装的测速发电机 (TG), 经过电位器分压, 引出与被调量转速成正比的负反馈电压 U_n 。将其与系统给定信号 U_n^* 相比较后得到转速偏差电压 ΔU_n , 经过调节器的调节作用产生控制电压 U_{ct} , 用以控制可控整流器输出电压。

调节器由运算放大器及相应的外围器件构成, 采用比例控制 (P 控制) 方式。即

$$U_{ct} = K_P \cdot \Delta U_n \quad (3-1)$$

式中, K_P 为比例放大系数; ΔU_n 为转速偏差电压。

在采用比例调节器控制的自动控制系统中, 输入偏差是维系系统运行的基础。因此, 图 3.1 所示的系统中必然存在稳态转速的输出静差, 属于有静差调速系统。

为了解决单闭环调速系统的起动和堵转时电枢电流 I_d 过大的问题, 系统中设置了自动限制电流过大的环节——电流截止负反馈保护环节。采用此种方法, 当电枢电流大到一定程度时接入电流负反馈以限制电流, 而电流正常时仅有转速负反馈起作用控制转速。其具体实现方法和反馈整定方法如 3.2.3 节中所述。

3.2.2 转速单闭环直流调速系统的特性

转速单闭环直流调速系统的稳态性能由静特性方程描述。根据图 3.1 所示, 带电流截止反馈环节的转速负反馈直流调速系统中各环节的稳态关系如下:

$$\text{电压比较环节} \quad \Delta U_n = U_n^* - U_n - (I_d \cdot \beta - U_{com})$$

$$\text{比例调节器} \quad U_{ct} = K_P \cdot \Delta U_n$$

$$\text{晶闸管可控整流器} \quad U_{d0} = K_S \cdot U_{ct}$$

$$\text{直流电动机} \quad n = \frac{U_{d0} - I_d R}{C_e}$$

$$\text{速度反馈环节} \quad U_n = \alpha \cdot n$$

以上各式中, K_S 是电力电子变换器的电压放大系数; α 是转速反馈系数, 单位为 $V \cdot \min/r$; β 是电流反馈系数, 单位为 V/A ; U_{d0} 是电力电子变换器的理想空载输出电压, 单位为 V ; R 是电枢回路总电阻。

根据数学迭代运算可推导出, 转速单闭环有静差直流调速系统的闭环静特性为

$$n = \frac{K_P K_S U_n^*}{C_e (1 + K)} - \frac{R I_d}{C_e (1 + K)} = n_{0cl} - \Delta n_{cl}$$

式中, 闭环系统的开环放大系数为

$$K = \frac{K_P K_S \alpha}{C_e} \quad (3-2)$$

带电流截止负反馈环节的转速单闭环直流调速系统静特性方程为

$$n = \frac{K_P K_S (U_n^* + U_{com})}{C_e (1 + K)} - \frac{(R + K_P K_S \beta) I_d}{C_e (1 + K)} \quad (3-3)$$

转速单闭环直流调速系统的开环机械特性为

$$n = \frac{U_{d0} - I_d R}{C_e} = \frac{K_P K_S U_n^*}{C_e} - \frac{R I_d}{C_e} = n_{0op} - \Delta n_{op} \quad (3-4)$$

将式(3-3)与式(3-4)相比较,可知采用转速单闭环控制的系统可以获得比转速开环控制系统更好的稳态性能。当出现电流过大,超过一定门限值时,电流负反馈控制的引入,将会造成稳态速降增大,影响系统的稳态特性。

在系统性能测定中,主要通过测定开环控制调速系统的机械特性和转速单闭环调速系统的静特性实现稳态性能测试;系统的动态特性测定包括跟随性能测定和抗扰性能测定两部分。对于转速单闭环调速系统,通常以电动机的起动过程为例,对其动态跟随性能进行定性观察。

3.2.3 电流截止负反馈环节

如图 3.1 所示,电流截止负反馈环节的实现在主电路中可控整流器的交流输入端接入交流互感器 TA。该互感器检测出的交流电流信号与电枢回路电流存在对应关系,经整流、电阻分压后得到电流反馈信号 U_i 。

采用稳压管(VS)的击穿电压作为电流截止的比较电压信号,当电枢电流超过截止电流时,电流反馈电压信号高于稳压管的击穿电压,电流负反馈信号接入调节器输入端,抵消一部分给定电压,则调节器的输出电压 U_{ct} 减小,可控整流器的输出电压下降,达到限制电流的目的。反之,当电枢电流小于截止电流时,系统中只存在转速反馈控制。

在电流截止负反馈环节参数设计中,起动电流或堵转电流 I_{dbl} 应小于电动机允许的最大电流,一般取

$$I_{dbl} = (1.5 \sim 2) I_{nom} \quad (3-5)$$

式中, I_{nom} 为直流电动机的额定电流,单位为 A。

从提高调速系统的稳态性能的角度,希望稳态运行范围足够大,截止电流 I_{der} 应大于电机的额定电流,一般取

$$I_{der} \geq (1.1 \sim 1.2) I_{nom} \quad (3-6)$$

截止电流对应的比较电压

$$U_{com} = \beta I_{der} \quad (3-7)$$

3.3 实验内容

(1) 转速单闭环直流调速系统单元环节测定:

- ① 调节器单元测定;
- ② 电流检测单元测定;

- ③ 速度反馈单元测定。
- (2) 直流调速开环系统机械特性测定。
- (3) 转速单闭环直流调速系统静特性测定。
- (4) 电流截止负反馈环节整定与下垂特性测试。
- (5) 转速单闭环直流调速系统起动过程动态特性观测。

3.4 实验器材

- (1) 晶闸管可控整流装置；
- (2) 直流电动机(带测速发电机)-发电机组；
- (3) 双踪示波器；
- (4) 万用表；
- (5) 转速表。

3.5 实验方案及方法

实验教学内容与方法是相辅相成的,没有科学的、可以实现的实验方法,实验内容则变为纸上谈兵。对于一个自动控制系统的实验与调试,一般的调试方法是先部件(单元)后系统。即先将各单元的特性调试正常,然后才能组成系统,也就是由局部到整体。在进行系统调试时,一般是先开环后闭环。

在闭环系统调试时,首先在开环系统运行条件下整定闭环需要的反馈信号大小与极性;然后在将系统连接成闭环系统运行时,首先判断闭环系统工作是否正常。判断的方法是:闭环系统的被控量是否跟随给定量变化。若出现被控量失控情况,则说明系统闭环不正常。闭环不正常通常有两方面的原因:其一可能是反馈信号极性不正确;其二,可能是线路连接有问题,看似闭环,实则开环,从而导致闭环工作不正常。在闭环正常的条件下,若给定量与被控量不满足对应的数量关系,还需要进行反馈信号的精确整定。方法是:将给定信号调节为一个数值,通过调节反馈信号,使被控量与给定信号满足对应的数量关系。

3.5.1 转速单闭环实验系统构建及单元环节测定

如图 3.1 构建的转速单闭环实验系统,其中可控整流环节特性测定方法请参阅 2.5.2 节中的相关内容。

1. 调节器单元测定

调节器由集成运算放大器及外围电阻、电容器件构成。运算放大器一般选择抑制自激振荡性能较好的器件,可省去消振电路。调节器测试主要是输入输出特性测

试。调节器测试电路参考图 3.1。

(1) 调节器调零: 将运算放大器调整为低放大倍数的比例调节器, 反馈输入端 U_n 接地, 调节运算放大器的调零电位器, 使给定输入端 U_n^* 为零时, 调节器的输出电压 U_{ct} 为零。

(2) 调节器输入输出特性测试: 将比例调节器的反馈输入端 U_n 接地, 给定输入 U_n^* 调节为不同电压值, 测试并记录调节器输出电压 U_{ct} 值。记录 U_n^* 、 U_{ct} 若干组数据, 根据测量数据观测输入输出特性是否为线性。然后将比例调节器的两个输入端分别加入正、负不同的电压值, 其中一个输入端的电压值保持不变, 改变另一个输入端的电压值, 测试并记录调节器的输出电压 U_{ct} 的大小与极性。记录 U_n^* 、 U_n 、 ΔU_n 、 U_{ct} 若干组数据, 根据测量数据观测比例调节器输出电压与输入偏差电压的线性关系以及输入输出电压的极性。

在测试过程中, 由于运算放大器输出饱和电压值一般小于运算放大器的电源电压值, 因此进行调节器的输入输出特性测试时, 输入电压的大小要根据电源电压值及比例系数进行选择, 一般避免其输出电压瞬时进入饱和状态。

2. 电流检测单元

电流检测信号由可控整流器的交流侧电流互感器 TA 检测, 经整流、电阻分压后输出 U_i , 如图 3.1 所示。令移相控制电压 U_{ct} 初值在零位, 缓慢调节 U_{ct} , 使可控整流器输出电压小于或等于电动机额定电压, 保持不变。参照图 3.1 调节发电机电枢回路电阻 R_L , 改变发电机输出负载电流 I_L , 使流过电机电枢回路的电流 I_d 改变, 测试并记录电流检测输出端电压数值 U_i 与 I_d 的若干组数据, 观测 U_i 与 I_d 的线性关系。

3. 速度检测单元

速度检测单元测试电路参考图 3.1。电动机速度检测信号由与电动机同轴连接的永磁式测速发电机 GT 输出对应转速的电动势, 经电位器分压后输出速度检测信号 U_n 。

电动机、发电机的励磁绕组加入额定励磁电压或电流。令移相控制电压 U_{ct} 初值在零位, 缓慢调节 U_{ct} , 使可控整流器输出电压等于电动机额定电压, 电动机的电枢电流 I_d 等于额定电流 I_{nom} , 电动机的转速为额定转速 n_{nom} , 测试并记录对应的转速反馈输出端 U_n 数值, 然后逐步减小 U_{ct} 值, 整流输出电压及电动机的转速随之降低, 测试并记录不同转速 n 对应的转速反馈电压值 U_n 。

3.5.2 直流调速开环系统机械特性测定

直流调速开环系统机械特性测试电路如图 3.2 所示, 开环系统主要由可控整流环节与直流电动机机组构成, 电动机、发电机的励磁绕组加入额定励磁电压或电流。

令移相控制电压 U_{ct} 初值在零位, 使电动机空载运行, 此时电枢电流 I_d 为空载电

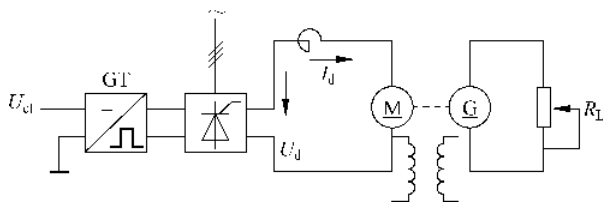


图 3.2 开环调速系统测试电路

流。缓慢调节移相控制电压 U_{ct} ，可控整流电压增加，使电动机的转速为额定转速 n_{nom} ，此点作为基准点。测试一条机械特性，须保持 U_{ct} 不变，然后调节发电机回路的负载电阻 R_L ，增大电动机电枢电流 I_d 至额定电流 I_{nom} ，用转速表测试并记录不同电枢电流 I_d 对应的电动机转速 n 值。改变 U_{ct} 值，用同样的方法可测取多条机械特性。

3.5.3 转速单闭环直流调速系统静特性测定

1. 转速闭环系统调试

在开环控制系统运行状态下，缓慢调节移相控制电压 U_{ct} ，使电动机的转速逐步升到额定转速，调节速度检测单元电位器 RP_2 ，使速度反馈信号 U_n 等于 U_{nmax} （即最大转速给定电压），此时的反馈量整定为粗整定。

系统闭环调试，参照图 3.1，不考虑电流截止负反馈作用，将转速给定信号 U_n^* 、转速反馈信号 U_n 接入调节器，调节器的比例系数按计算参数整定，调节器输出作为触发器的移相控制信号 U_{ct} ，连接可控整流器及直流电动机机组，构成转速闭环系统。

缓慢调节转速给定电压 U_n^* ，电动机的转速同步缓慢增长，无振荡现象，可判断系统闭环正常。

转速反馈量精整定，缓慢调节转速给定电压至 U_{nmax}^* ，调节转速反馈电位器 RP_2 ，使电动机达到额定转速 n_{nom} ，测量此时的转速反馈电压 U_n ，计算出转速反馈系数 α 。

2. 转速闭环系统静特性测定

电动机空载运行，调节转速给定电压 U_n^* 至电动机达到额定转速 n_{nom} ，此点作为基准点（注意与开环机械特性的基准点相同）。保持 U_n^* 不变，逐步减小发电机回路负载电阻 R_L ，增大电动机电枢电流 I_d 至额定电流 I_{nom} ，测试并记录不同电枢电流 I_d 对应的电动机转速 n 值。

3.5.4 电流截止负反馈环节整定与下垂特性测定

电流截止负反馈环节测试电路参考图 3.1。图中电流反馈回路中的稳压管按理论计算的比较电压选择其击穿电压，电流截止反馈支路接入调节器输入端，构成带电流截止负反馈的转速单闭环直流调速系统。

1. 下垂特性测定

缓慢调节转速给定电压 U_n^* , 使整流输出电压等于电动机的额定电压, 电动机的转速等于额定转速, 逐步减小发电机回路的负载电阻 R_L , 使电动机电枢回路电流等于或稍大于截止电流 I_{der} 时, 观测整流输出电压及电动机转速应有下降趋势, 说明电流截止负反馈工作正常。以此点作为基准点, 继续减小发电机回路的负载电阻 R_L 至电动机堵转, 观测并记录不同电枢电流对应的电动机转速值, 测定下垂特性。

2. 静特性测定

以电动机空载电流及对应的转速值作为基准点, 观测并记录电动机电枢电流 I_d 从空载电流到截止电流 I_{der} 以及堵转电流 I_{dbl} 时对应的转速 n 值, 测定带电流截止负反馈转速单闭环直流调速系统的完整静特性。

3.5.5 转速单闭环直流调速系统起动过程动态特性观测

在电流截止保护环节工作正常的情况下, 施加转速给定阶跃信号, 用示波器观测并记录电动机起动过程中电流(反馈电压 U_i)与转速(反馈电压 U_n)的波形。

3.6 实验报告

(1) 根据测试数据绘出单闭环直流调速系统可控整流环节输入输出特性, 分析此环节是否为线性关系。

(2) 根据测试数据绘出单闭环直流调速系统开环机械特性与闭环静特性曲线, 对两条特性曲线进行比较, 试分析开环系统静差产生的原因以及闭环系统减小误差的本质。

(3) 总结电流截止负反馈环节的作用及参数计算、整定方法。

(4) 根据单闭环直流调速系统起动过程动态特性曲线, 分析系统的起动特性。

3.7 注意事项

(1) 三相主电源连线时需注意相控整流电路不可接错相序。

(2) 直流调速开环系统情况下, 系统尚未加入限流保护环节, 移相控制电压 U_{ct} 只能加斜坡输入信号, 即缓慢调节移相控制电压 U_{ct} , 不能加阶跃输入信号。

(3) 电流检测单元测试时, 电动机负载的励磁绕组加入额定励磁电流, 电动机在旋转状态下测试电动机电枢电流, 比较安全。若电动机的励磁绕组不通电, 则电动机在不旋转状态下测试电枢电流时, 须注意观察整流器输出电压数值应很低, 否则会造成电枢电流过大。

(4) 注意系统控制电路与主电路之间信号的电气隔离措施。

4.1 实验目的

- (1) 了解转速、电流双闭环控制在调速系统中的作用；
- (2) 学习双闭环调速系统的调试方法；
- (3) 掌握双闭环调速系统动态性能的测试方法；
- (4) 了解调节器参数对系统动态性能的影响。

4.2 实验原理

4.2.1 转速、电流双闭环直流调速系统的组成及工作原理

转速、电流双闭环直流调速实验系统原理框图如图 4.1 所示。

实验系统中主电路 U_{PE} 采用晶闸管可控整流器为直流电动机提供可
变直流电压。控制单元中以转速调节器(ASR)为核心构成转速闭环；以
电流调节器(ACR)为核心构成电流闭环，转速外环和电流内环相互嵌套。
闭环系统的反馈系数如下：

电流反馈系数

$$\beta = \frac{U_i}{I_d} \quad (\text{V/A}) \quad (4-1)$$

转速反馈系数

$$\alpha = \frac{U_n}{n} \quad (\text{V} \cdot \text{min/r}) \quad (4-2)$$

为了获得良好的静、动态性能，转速和电流两个调节器均采用比例积
分(PI)控制方式，即

$$U_c = \frac{R_1}{R_0} \Delta U_n + \frac{1}{R_0 C_1} \int \Delta U_n dt = K_P \Delta U_n + \frac{1}{\tau} \int \Delta U_n dt \quad (4-3)$$

式中， $K_P = R_1/R_0$ ，是 PI 调节器比例部分的放大系数； $\tau = R_0 \cdot C_1$ ，是 PI 调

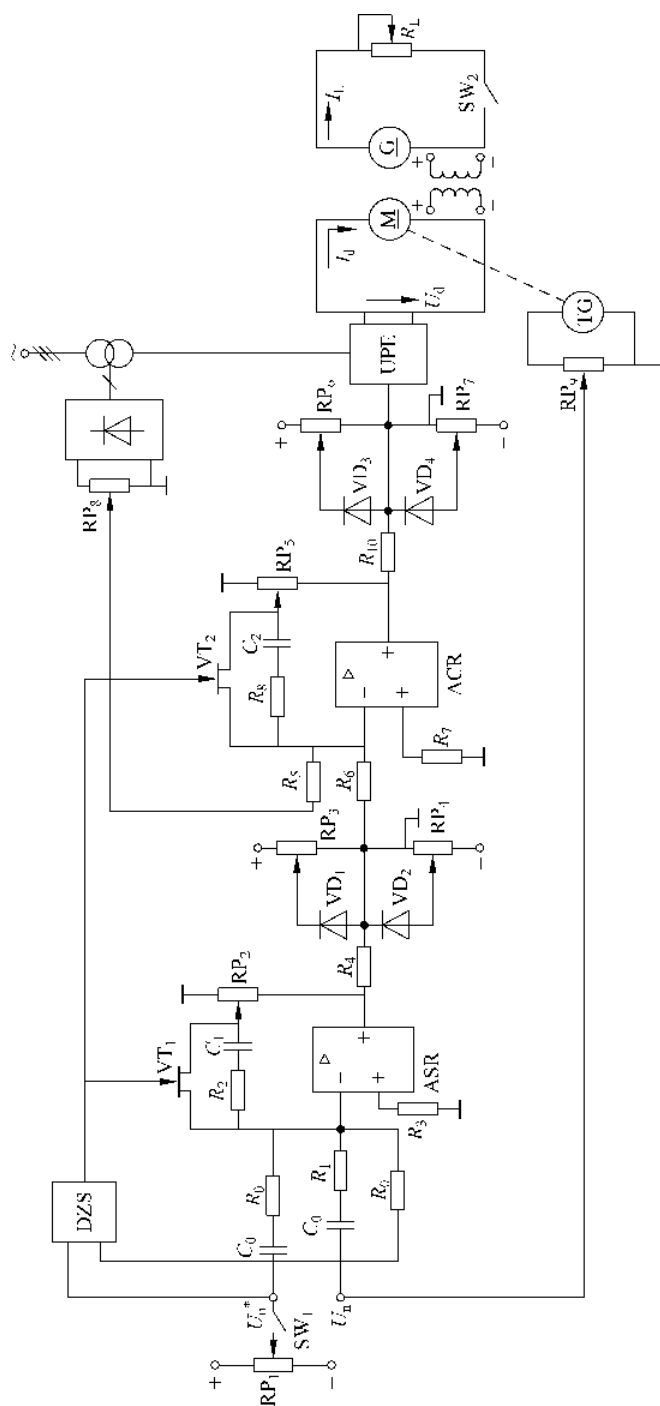


图 4.1 转速、电流双闭环直流调速系统实验原理框图

节器的积分时间常数。

比例积分控制综合了比例控制和积分控制两种规律的优点,比例部分能迅速响应控制作用,积分部分则最终消除稳态偏差。当电动机的稳态转速与给定转速一致时,转速偏差信号为零,在积分控制作用下仍能保持系统稳定运行。

转速和电流调节器均由运算放大器及外围元件组成,如图4.1所示。图中,ASR的输出由二极管 VD_1 、 VD_2 和电位器 RP_3 、 RP_4 组成正负限幅可调的限幅电路;ACR的输出限幅电路同理。ASR的反馈输入端由 C_0 、 R_1 组成反馈微分校正网络,有助于抑制振荡,减少超调。 R_2 、 C_1 组成速度环串联校正网络,场效应管 VT_1 、 VT_2 为零速封锁(DZS)电路控制,当DZS输出为0V时 VT_1 、 VT_2 导通,将调节器反馈网络短接而封锁;当DZS输出为-15V时, VT_1 、 VT_2 夹断,调节器投入工作。 RP_2 、 RP_5 为ASR、ACR放大系数调节电位器。

转速调节器的输出限幅电压 U_{im}^* 决定电流给定电压的最大值;电流调节器的输出限幅电压 U_{ctm} 限制了可控整流器的最大输出电压 U_{d0m} 。

转速调节器的限幅值

$$U_{im}^* = \beta \cdot I_{dm} \quad (4-4)$$

式中

$$I_{dm} = (1.5 \sim 2) I_{nom}$$

电流调节器的限幅值

$$U_{ctm} = \frac{U_{d0m}}{K_s} \quad (4-5)$$

式中

$$U_{d0m} = \frac{n_{nom} + I_{dm} R}{K_s}$$

双闭环调速系统的静特性在负载电流小于 I_{dm} 时表现为转速无静差,只有转速负反馈起主要调节作用;当负载电流达到 I_{dm} 后,转速调节器为饱和状态,电流调节器起主要调节作用,系统表现为电流无静差,实现过电流的自动保护。

双闭环系统的静特性表达式为

$$n = \frac{U_n^*}{\alpha} = n_0 \quad (4-6)$$

4.2.2 双闭环直流调速系统的动态特性及性能指标

转速、电流双闭环直流调速系统的动态特性主要包括动态跟随特性与动态抗扰特性两方面。其中系统中直流电动机的起动过程分析是反映系统跟随性能的典型示例。在大多数工况下,在转速小于等于额定转速时,ASR始终处于饱和限幅状态,电动机电枢电流上升到最大电流 I_{dm} ,ACR进行调节维持恒流起动,双闭环系统表现为电流单闭环调节系统;当转速大于额定转速时,ASR退出饱和,起主导调节作用,ACR起电流跟随调节作用,直至系统进入稳态运行。描述系统跟随性能的主要动态指标包括转速超调量 σ_n 、电流超调量 σ_i 、过渡过程时间或称调节时间 t_s 。

对于正常运行的转速、电流双闭环直流调速系统而言,可以有效抑制的外部扰

动主要包括负载扰动、电网电压扰动。其中对于负载扰动可以依赖于转速调节的作用加以抑制；对于电网电压扰动则仅仅通过电流内环的快速调节作用即可以实现抑制。在扰动作用后，闭环系统的调节性能以最大动态转速降 $\Delta n_{\max}$ 和恢复时间 t_v 作为主要抗扰性能指标。

4.2.3 双闭环直流调速系统各调节器的工程设计

转速、电流双闭环调速系统两个调节器的参数对于系统的动态性能起着重要的作用，图 4.2 所示为双闭环系统动态结构图。调节器的设计采用基于频率校正法的工程设计方法，通常电流调节器的设计考虑跟随性能要求，按照典型 I 型系统选择 ACR 的结构与参数；转速调节器的设计考虑抗扰性能要求，按照典型 II 型系统选择 ASR 的结构与参数。

图 4.2 中 T_s 是可控整流环节延迟时间常数，转速、电流双闭环直流调速系统调节器工程设计方法的详细叙述请参阅参考文献[1]中的相关内容。

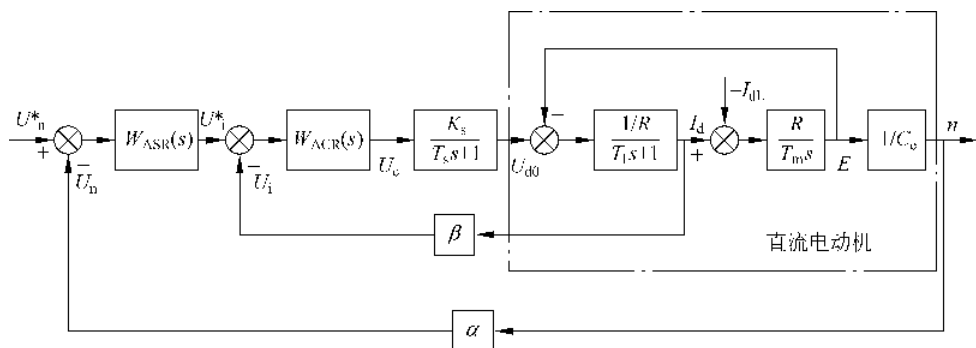


图 4.2 转速、电流双闭环调速系统动态结构图

4.3 实验内容

(1) 双闭环直流调速系统的实验系统构建及单元、环节测定：

- ① 可控整流环节；
- ② 调节器单元；
- ③ 电流与转速检测单元。

(2) 直流调速系统开环机械特性测定。

(3) 转速电流双闭环系统调试。

(4) 转速电流双闭环调速系统动态特性测试。