

高等学校教学用书

自动控制系统

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



冶金工业出版社

高等学校教学用书

自动控制系统

东北工学院 李世卿 主编

冶金工业出版社

高等学校教学用书

自动控制系统

东北工学院 李世卿 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 17 字数 403 千字

1987年11月第一版 1987年11月第一次印刷

印数00,001~10,100册

统一书号: 15062·4641 定价2.80元

ISBN 7-5024-0053-2/TP·3

前 言

本书是根据工业电气自动化专业《自动控制系统》教学大纲编写的。

全书以可控硅调速系统为主要内容,着重讨论电力拖动的反馈控制系统。全书共分六章:第一章介绍可控硅直流调速系统的基本概念、组成原则和典型环节;第二章介绍广泛通用的双环调速系统和带磁场控制的调速系统;第三章介绍电力拖动自动控制系统的常用工程设计方法;第四章介绍自动控制可逆调速系统;第五章介绍电力拖动自动控制系统若干专题;第六章介绍位置随动系统。

本书由东北工学院自动控制系李世卿主编,参加编写的还有蒋风元(第一,二,五章)、王立平(第三章)和刘兴浦(第四章)。

吉林工业大学王殿芳、中南工业大学许琨、武汉钢铁学院王恒兴、鞍山钢铁学院蔡春寿、包头钢铁学院丁红、华东冶金学院周谦芝、沈阳工业学院李俊友、上海冶金专科学校余人杰、锦州工学院崔润植、沈阳黄金专科学校杨卫国等同志对本书原稿进行了认真的审阅并提出了很多宝贵意见,在此向上述单位和同志致以由衷的谢意。

本书为工科院校工业电气自动化专业及其它相近学校和专业的教学用书,同时也可作为厂矿、设计和研究单位有关专业工程技术人员的自学读本。

由于编者水平有限,缺点和错误在所难免,恳请各位读者批评指正。

编 者
一九八七.二

目 录

第一章 单闭环直流调速系统

§ 1-1 可控硅供电的直流调速系统	1
一、直流调速系统概述	1
二、可控硅直流调速系统的调速方式	3
三、可控硅直流调速系统的机械特性	3
四、典型生产机械对调速系统的控制要求及调速指标	4
§ 1-2 转速反馈单闭环直流调速系统	6
一、系统的工作原理及其静特性	7
二、转速闭环调速系统的基本性质	11
三、转速闭环调速系统的动态模型及稳定性分析	13
§ 1-3 带电流截止环节的单闭环调速系统	17
一、调速系统的限流保护	17
二、带有电流负反馈截止环节的调速系统	20
§ 1-4 带有电压负反馈和电流正反馈的调速系统	23
§ 1-5 无静差调速系统	24
一、采用积分 (I) 调节器的单闭环无静差调速系统	24
二、采用比例积分 (PI) 调节器的单闭环无静差调速系统	26
§ 1-6 自动调速系统中的检测环节及调节器	31
一、直流测速发电机	32
二、电流检测环节	33
三、电压检测环节	38
四、调节器	40
习题	44

第二章 双闭环直流调速系统及磁场控制

§ 2-1 快速系统与最佳过渡过程的基本概念	46
一、最大电流约束条件下的最佳起动过程	46
二、最佳制动过程	48
三、电流填充系数的概念	49
§ 2-2 转速、电流双闭环调速系统	49
一、转速、电流双闭环调速系统的组成	49
二、转速、电流双闭环调速系统的工作原理及其静特性	50
三、双闭环调速系统的动态特性	52
四、双闭环调速系统实例	57
§ 2-3 直流电动机磁场控制系统	59
一、直流电动机磁场控制系统	59
二、最大值选择器及其应用	63
三、最大电流限制	64

* § 2-4 磁场控制系统的动态分析	66
一、双闭环非独立磁场控制系统的动态结构图	66
二、电动机磁场回路的涡流及磁化曲线的非线性影响	68
三、磁场模拟环节	70
四、磁通函数发生器	70
习题	76

第三章 自动控制系统的动态参数工程设计方法

§ 3-1 工程设计的基本方法	78
一、工程设计的方法与步骤	78
二、控制系统的性能指标	78
§ 3-2 二阶典型系统	80
一、二阶典型系统	80
二、二阶典型系统抗扰性能分析	83
§ 3-3 三阶典型系统	86
一、对称三阶典型系统	87
二、对称三阶系统抗扰性能分析	90
三、谐振峰值最小的三阶典型系统	93
§ 3-4 调速系统的调节器串联校正和工程设计的近似处理	98
一、工程设计中的近似处理	98
二、调速系统的调节器串联校正	102
§ 3-5 双闭环调速系统的串联校正	105
一、电流环的设计	105
二、转速环的设计	109
§ 3-6 转速调节器饱和和非线性对起动过程的影响及设计举例	112
一、双闭环调速系统转速调节器饱和和限幅对起动的影响	112
二、双闭环调速系统设计举例	114
§ 3-7 并联微分校正的工程设计方法	116
一、并联校正系统的传递函数和近似幅频特性	116
二、三阶典型系统并联校正	118
三、三阶典型系统并联校正举例	123
§ 3-8 自控控制系统的计算机仿真	125
习题	130

第四章 可逆调速系统

§ 4-1 可控硅直流调速系统可逆运行方案	132
一、实现可逆运行的方式	132
二、电枢可逆系统和磁场可逆系统的比较	134
§ 4-2 电枢反并联可逆电路中的环流	134
一、直流环流的处理	134
二、可逆电路中的脉动环流	135

§ 4-3 有环流电枢可逆直流调速系统	138
一、自然环流系统	138
二、交叉反馈的可控环流系统	144
三、可逆调速系统的运行状态及过渡特性	148
§ 4-4 逻辑控制的无环流电枢可逆调速系统	150
一、逻辑控制无环流电枢可逆调速系统的方案及特点	150
二、无环流系统对逻辑装置的要求	153
三、无环流逻辑装置的一般结构	154
四、逻辑选触无环流可逆系统	161
五、逻辑无环流系统的改进方案	167
*六、有准备切换的逻辑无环流系统	168
§ 4-5 错位无环流电枢可逆调速系统	173
一、错位控制原理与静态环流的消除	173
二、错位无环流系统的结构和电压内环的作用	175
三、错位选触无环流系统	185
* § 4-6 磁场可逆调速系统	186
一、磁场可逆调速系统的工作原理及其特点	187
二、磁场可逆系统控制回路工作原理	189
三、各种工作状态的分析	193
习题	197

第五章 可控硅直流调速系统的若干问题

§ 5-1 转速自适应调节	200
§ 5-2 电枢电流断续及电枢电流自适应调节	204
一、电枢电流断续对被控对象参数的影响	205
二、电流自适应调节器	208
§ 5-3 具有电流变化率限制的多环调速系统	210
§ 5-4 具有电压控制的多环调速系统	215
§ 5-5 带负载观测器、补偿器的双环调速系统	218
一、复合控制系统及不变性原理的基本概念	218
二、具有外扰观测器、补偿器的双环调速系统	219
§ 5-6 机械轴偏心问题	225

第六章 位置随动系统

§ 6-1 位置随动系统的构成和基本类型	229
§ 6-2 位置随动系统的部件	231
一、自整角机测角电路	231
二、旋转变压器测角电路	234
三、感应同步器	235
四、相敏整流放大器	237
五、PWM功率放大器	237

六、伺服电动机	241
§ 6-3 自整角机随动系统.....	242
一、典型输入信号	242
二、随动系统的典型结构	243
三、随动系统的稳态偏差	243
四、稳态品质因数	245
五、扰动输入对稳态偏差的影响	246
六、随动系统的动态校正	247
§ 6-4 脉冲相位随动系统.....	252
一、简介	252
二、主要部件工作原理	254
三、脉冲相位随动系统几种工作制	260
四、脉冲相位随动系统的动态分析	262
习题	263

第一章 单闭环直流调速系统

本章首先讨论直流调速系统的控制要求、静态调速指标、系统组成、典型环节以及调速系统的基本控制规律等问题,为深入讨论典型直流调速系统奠定基础。

§ 1-1 可控硅供电的直流调速系统

一、直流调速系统概述

目前我国工业的各个部门,对调速性能要求较高的各类生产机械已普遍采用直流传动系统。伴随着半导体变流技术和电子技术的发展,直流传动系统中的可控变流设备也随之不断地更新换代:四十年代的可控变流装置是旋转变流机组,即发电机-电动机系统。它由交流原动机(同步机或异步机)带动直流发电机发电,其输出的直流电压直接控制需要调速的直流电动机。通过调节发电机励磁电流大小,就能方便地改变发电机的输出电压,从而可以连续调节电动机的转速;改变发电机励磁电流方向,可以改变发电机输出电压极性,以实现电动机正、反转可逆运行。这种系统常用交磁放大机作为功率放大器直接对发电机励磁绕组供电,所以又称为放大机控制的发电机-电动机系统(简称为ZKK-F-D系统),其系统框图如图1-1所示。

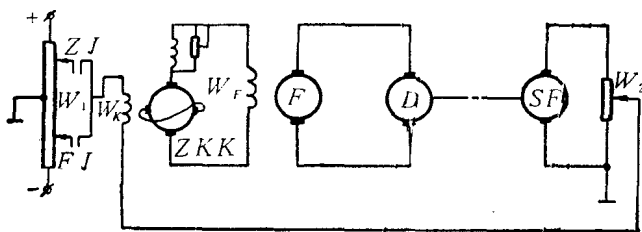


图 1-1 ZKK-F-D系统原理线路

F —直流发电机; ZKK —交磁放大机 (又称电机扩大机); D —直流电动机; SF —直流测速发电机; W_F —发电机励磁绕组; W_K —交磁放大机控制绕组; W_1 —转速给定电位计; W_2 —转速反馈电位计

转速给定信号通过继电器接点 (ZJ 、 FJ) 取自转速给定电位计 W_1 , 转速反馈信号取自直流测速发电机负载电位计 W_2 。将转速给定信号与转速反馈信号进行比较, 其偏差电压加到 ZKK 的控制绕组 W_K 上, 经 ZKK 放大之后的输出电压, 加到发电机的励磁绕组 W_F 上, 这样便组成了转速闭环调节的 $ZKK-F-D$ 系统。

这种系统包含两台与调速电动机容量相当的旋转电机和放大机组，因而设备多、占地大、效率低、运行费用高，安装须打地基，运行有噪音，维护不方便。尽管如此，目前还沿用着相当数量的这种机组供电的调速系统。

五十年代开始采用水银整流器作为可控变流装置，用静止的变流器取代了旋转的变流机组。但由于水银严重污染环境、危害人身健康，因而在五十年代末期它又被相继出现的可控硅（大功率半导体器件）变流装置取代了。由可控硅变流装置直接给直流电动机供电的调速系统，称为可控硅直流调速系统（以下简称KZ-D系统），如图1-2所示。

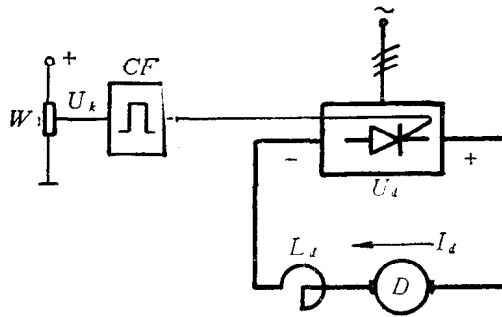


图 1-2 可控硅直流调速系统 (KZ-D系统)

CF—触发器； W_1 —转速给定电位计

KZ-D系统的基本工作原理是：控制电压信号 U_k 的变化，来改变触发器输出脉冲的相位，从而改变整流电压 U_d 大小，实现直流电动机的平滑调速。KZ-D与F-D系统相比，具有下列一些优点：

1. 可控硅变流装置的功率放大倍数在 10^4 以上，比机组放大倍数(10)高三个数量级。
2. 可控硅调速系统的响应速度为毫秒级；机组系统的响应速度为秒级。响应的快速性也高三个数量级。
3. KZ-D系统比F-D系统效率高。表1-1是KZ-D系统(三相全控桥式不可逆系统)的综合效率；表1-2是F-D系统的综合效率。
4. KZ-D系统不仅运行费用低，而且机电设备投资费用也低。

表 1-1 可控硅供电系统的效率

效 率 (%)	功 率 (kW)		
	100	500	1000
电源变压器	98	98.5	98.5
可控硅供电装置	97	97.5	98
直流电动机	91	93	94
其它(配线电缆等)	98	98	98
综 合 效 率	85	88	89

表 1-2 电动发电机组的效率

效 率 (%)	功 率 (kW)		
	100	500	1000
交流电动机	90	93	94
直流发电机	90	93	93.5
直流电动机	91	93	94
控制装置	96	97	98
其它(配线电缆等)	97	97	97
综 合 效 率	69	76	79

5. $KZ-D$ 系统无噪音、无磨损、体积小、重量轻、节约占地、可靠性好、维护方便等。

综上所述,可控硅直流调速系统不仅在经济性和可靠性上有所提高,而且在技术性能方面也显示出很大的优越性,因而在世界各主要工业国家已得到普遍应用。我国自行设计的可控硅直传动装置已经有标准化、系列化产品。装置的最大容量已达7000kW(千瓦),直传动用的可控硅装置每年生产近5000台左右,约21万千瓦;装置的年增长率为14%(参考81年变流行业的统计数据)。由此看出,可控硅调速系统在电气传动领域必将得到进一步的推广使用。

二、可控硅直流调速系统的调速方式

由可控硅直流调速系统原理线路图(图1-2)看出,整流装置输出的直流脉动电压直接加在平波电抗器 L_d 和电动机电枢两端。当电枢电流保持连续,系统处于稳态运行时,其电压平衡方程式为:

$$U_{d0} = E + I_d R_E \quad (1-1)$$

式中 U_{d0} ——空载整流电压;

E ——电动机反电势, $E = C_e \Phi n$;

I_d ——电动机电枢电流;

R_E ——电枢回路总电阻,

$$R_E = \frac{x_e \cdot m}{2\pi} + R_T + R_{Ld} + R_D$$

$\frac{x_e \cdot m}{2\pi}$ ——整流变压器漏抗 x_e 引起的换向压降对应的等效电阻;

三相零式整流电路时, $m=3$;

三相全控桥式整流电路时, $m=6$;

R_T ——整流变压器绕组折合到副边的等效电阻;

R_{Ld} ——平波电抗器电阻;

R_D ——电动机电枢电阻。

将 $E = C_e \Phi n$ 代入(1-1)式,经整理可得电动机转速

$$n = \frac{U_{d0} - I_d \cdot R_E}{C_e \Phi} \quad (1-2)$$

由(1-2)式可见, $KZ-D$ 系统有两种调速方式:

1. 保持电动机磁场为额定值,改变电枢两端电压,实现电动机恒转矩调速。

2. 电动机端电压为额定值,减弱电动机磁场(即减 Φ),实现电动机恒功率调速。

第一种调速方式,可以实现基速以下的无级调速;第二种调速方式,可以实现基速以上的无级调速。其中以第一种调速方式最为常见,一般情况下它能达到的调速范围为4~8;第二种调速方式虽然也能平滑调速,但调速范围不大(普通电动机弱磁调速范围最多为2,特殊电动机为3~4),往往与第一种调速方式配合使用,在基速以上作小范围升速。

在主电路中串电阻的调速方式,由于电阻本身消耗电能,所以一般已很少采用。下面将以调压、弱磁两种调速方式进行讨论。

三、可控硅直流调速系统的机械特性

可控硅开环直流调速系统（见图1-2），在电枢电流连续情况下的机械特性方程式为

$$n = \frac{U_{d0} - I_d R_\Sigma}{C_e \Phi} = n_0 - \Delta n_k \quad (1-3)$$

式中 $U_{d0} = AU_2 \cos \alpha$ 。三相零式整流电路 $A=1.17$ ；三相全控桥式整流电路 $A=2.34$ ； U_2 为整流变压器相电压有效值。

$$n_0 = \frac{AU_2 \cos \alpha}{C_e \Phi} \text{——对应某一 } \alpha \text{ 角下的理想空载转速；}$$

$$\Delta n_k = \frac{I_d R_\Sigma}{C_e \Phi} \text{——} KZ\text{-}D \text{ 系统的开环转速降。}$$

由（1-3）式得出 $KZ\text{-}D$ 开环系统的机械特性曲线，如图1-3所示。

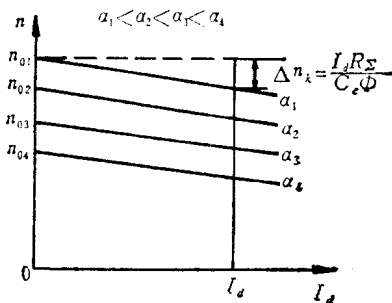


图 1-3 电枢电流连续时， $KZ\text{-}D$ 开环系统的机械特性

由此可见，在电流连续情况下 $KZ\text{-}D$ 开环系统的机械特性和 $F\text{-}D$ 系统的机械特性完全相似。保持移相角 α 不变，转速随着负载增加而下降，其转速降 Δn_k 是由电枢回路的电阻压降 $I_d R_\Sigma$ 引起的。不同移相角（ $\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3$ ）时的机械特性是一族平行的直线。一般在分析调速系统时，认为主电路电感已足够大，机械特性完全按线性特性考虑。电流断续情况将作为特殊问题在第五章讨论。

四、典型生产机械对调速系统的控制要求及调速指标

根据各类型生产机械对调速系统提出的控制要求，一般可以概括为静态和动态调速指标。静态调速指标，要求电力拖动自动控制系统能在最高转速和最低转速的范围内调节转速，并且要求在不同转速下工作时，速度稳定。动态调速指标要求系统起动、制动快而平稳；稳定在某一转速上运行时，尽量少受负载变化、电源电压波动等因素的影响。

调速系统的静态品质好坏，可用下述的两个指标衡量：

1. 调速范围

生产机械要求电动机在额定负载时提供的最高转速 $n_{\max}$ 与最低转速 $n_{\min}$ 之比叫作调速范围，通常表示为：

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (1-4)$$

对于不弱磁的调速系统来说，电动机的最高转速 $n_{\max}$ 就是额定转速 n_{ed} 。

2. 静差率

调速系统的静差率是指电动机在稳态工作时，负载由零增至额定时，对应的静态转速

降与理想空载转速之比：

$$S = \frac{\Delta n_{ed}}{n_0}$$

图1-4给出KZ-D系统的调速特性。其最高理想空载转速 n_{0max} 与最低理想空载转速 n_{0min} 时的静差率分别为： $S_1 = \frac{\Delta n_{ed}}{n_{0max}}$ ； $S_2 = \frac{\Delta n_{ed}}{n_{0min}}$ ；调速范围 $D = \frac{n_1}{n_2}$ 。

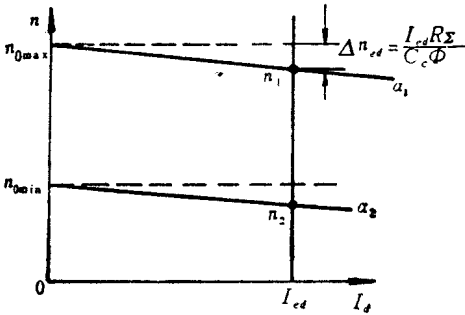


图 1-4 KZ-D系统的调速特性

调速范围 D 和静差率 S 两项技术指标通常称作静态指标。但必须指出，设计时要求的静差率系指低速时的静差率。显然 $S_1 < S_2$ ，它表明如果低速时的静差率 S_2 能满足设计要求，则高速时的静差率 S_1 自然就能更好地满足要求了。

如果系统的静差率 S 值很小或近似为零，则表明调速系统在增加负载时电动机转速几乎不变，即静态速降 Δn_{ed} 近似为零（理想的静态指标）。

根据上述分析，静差率应表示为

$$S = \frac{\Delta n_{ed}}{n_{0min}}$$

由于实际生产中各类生产机械的工艺要求不同，因而对调速系统提出的静态技术指标（ D 与 S ）也往往有所不同。表1-3给出了一般常见的几种典型生产机械的静态调速指标，以供参考。

表 1-3 常见典型生产机械要求的 D 和 S 值

生产机械类型	调 速 范 围 D	静 差 率 S
热连轧机	3~10	$S < 0.01 \sim 0.005$
冷连轧机	> 15	$S < 0.02$
机床主传动	2~4	0.05~0.1
机床进给系统	5~200	
造纸机	3~20	0.01~0.001
龙门刨床	20~40	≤ 0.05

调速系统的调速范围 D 和静差率 S 以及静态转速降 Δn_{ed} 是相互关联的，它们之间满足下列关系式：

$$D = \frac{n_{max}}{n_{min}} = \frac{n_{ed}}{n_{0min} - \Delta n_{ed}}$$

$$= \frac{n_{ed}}{n_{0min} \left(1 - \frac{\Delta n_{ed}}{n_{0min}} \right)} = \frac{S n_{ed}}{\Delta n_{ed} (1 - S)} \quad (1-5)$$

式中 n_{ed} ——电动机额定转速；

S ——额定负载时，最低速静差率；

Δn_{ed} ——额定负载时的静态速降。

(1-5) 式表明，当电动机的额定转速 n_{ed} 和静差率 S 给定以后，只有设法减小静态速降 Δn_{ed} ，才能进一步扩大调速范围 D 。那么采取什么措施才能减小系统的静态速降 Δn_{ed} 呢？这正是下面要研究的主要问题。

由于 $KZ-D$ 开环系统主回路总电阻 R_Σ 和电动机参数 I_{ed} 、 $C_e \Phi$ 一般都是不变的常数，所以额定负载时的静态速降 $\Delta n_{ed} = \frac{R_\Sigma \cdot I_{ed}}{C_e \Phi}$ 是无法减小的，因而 $KZ-D$ 开环系统能提供的调速范围很小。例如某一 $KZ-D$ 开环调速系统，电动机额定转速 $n_{ed} = 1450 \text{ rpm}$ ，额定负载时的静态速降 $\Delta n_{ed} = 115 \text{ rpm}$ ，当要求静差率 $S = 0.2$ 时，其调速范围是：

$$D_k = \frac{1450 \times 0.2}{115 \times (1 - 0.2)} = 3.15$$

当要求静差率 $S = 0.1$ 时， $D_k = 1.4$ 。由此可见，要求调速系统的稳态精度越高（即要求 S 值越小），则 $KZ-D$ 开环系统的调速范围就越小，因而 $KZ-D$ 开环系统的实际应用受到了一定的限制。

必须强调，调速系统的两个静态指标 D 与 S 必须联系在一起，才能表示系统的静态品质。单独谈调速范围 D 或静差率 S 都没有实际意义。在实际设计某一调速系统时，往往是除考虑静态调速指标外，有时还要求满足一定的动态性能指标。所谓动态技术指标是指调速系统在给定信号和扰动信号作用下系统的动态过程品质。静态与动态指标综合到一起，才能概括出一个调速系统的性能指标（详细分析见第三章）。

综上所述，开环调速系统在满足静差率要求下能够达到的调速范围很小，为进一步扩大调速范围，必须设法减小静态速降。按反馈控制原理构成转速闭环系统是减小或消除静态速降的一个有效途径。转速反馈闭环是调速系统的基本反馈形式。

§ 1-2 转速反馈单闭环直流调速系统

在 $KZ-D$ 开环调速系统的基础上，按反馈控制原理，只要增加一个转速检测环节，从中取出电动机转速反馈信号 U_{fn} ，该信号再与转速给定信号 U_{on} 相比较，其偏差信号 $\Delta U_n = U_{on} - U_{fn}$ 送入比例调节器，经放大之后的输出信号 U_k ，即可控制整流电压大小以及电动机转速。转速负反馈单环调速系统的框图如图 1-5 所示。

转速检测环节一般是在电动机轴上安装的一台直流测速发电机 SF ，它的电势 E_{SF} 与电动机转速 n 成正比，即 $E_{SF} = C_{SF} \cdot n$ 。式中 C_{SF} 为直流测速发电机电势常数。直流测速发电机电势加在电位计 W_2 上，由电位计 W_2 上取出与转速 n 成正比的电压信号 U_{fn} ，即 $U_{fn} = \alpha n$ ， α 为转速反馈系数。 U_{fn} 的极性与转速给定信号 U_{on} 相反，以满足负反馈闭环关系。系统中的调节器由线性集成电路运算放大器组成。现以比例调节器为例进行讨论，转速闭环调速系统的原理线路如图 1-6 所示。

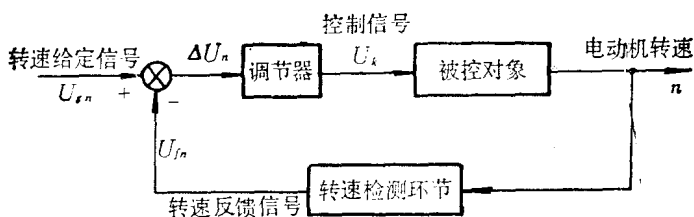


图 1-5 转速反馈单环调速系统

U_{gn} —转速给定电压信号； U_k —控制电压信号； U_{fn} —转速反馈电压信号； n —电动机转速； ΔU_n —转速偏差电压信号

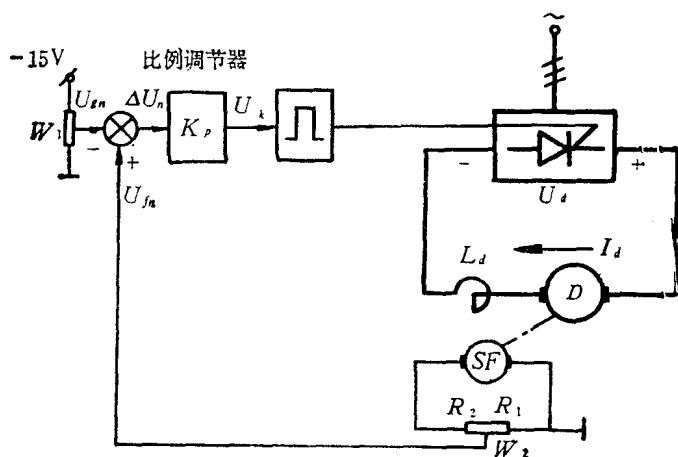


图 1-6 转速闭环调速系统原理线路图

一、系统的工作原理及其静特性

由转速给定电位计 W_1 取不同的分压信号 U_{gn} 就可以得到不同的阶跃转速给定。电位计 W_1 一般由直流稳压电源供电，以保证转速给定信号的精度。将 U_{gn} 与 U_{fn} 信号进行比较，便得到转速偏差电压信号 $\Delta U_n = U_{gn} - U_{fn}$ ，该偏差信号经比例调节器放大 K_p 倍后，变换成控制电压信号 U_k ，从而去控制脉冲移相角、整流电压和电动机转速的变化。改变转速给定 U_{gn} 大小，就能改变电动机转速，实现平滑调速。

由图1-6看出，转速负反馈闭环的可控硅调速系统是由一些典型环节组成的，所以首先要确定系统各个环节输入、输出的静态关系。在此基础上建立系统的静特性方程式，以讨论系统的静特性。

系统中的典型环节以及它们的静态输入、输出关系为

1. 电压比较环节： $\Delta U_n = U_{gn} - U_{fn}$ ；
2. 比例调节器： $U_k = K_p \Delta U_n$ ；
3. 触发器及可控硅变流装置： $U_{d0} = K_s U_k$ ；
4. 转速检测环节： $U_{fn} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} C_{SF} n = \alpha n$ ， $\alpha = \frac{R_1}{R_1 + R_2} C_{SF}$ ；
5. $KZ-D$ 系统稳态时主电路电压平衡方程式：

$$E = U_{d0} - I_d R_\Sigma, \quad n = \frac{U_{d0} - I_d R_\Sigma}{C_e \Phi}$$

以上各式中: K_p ——比例调节器的比例放大倍数;

K_s ——可控硅变流装置的电压放大倍数;

α ——转速反馈系数。

根据以上各环节的静态输入、输出关系, 画出转速闭环系统的静态结构图, 如图1-7所示。

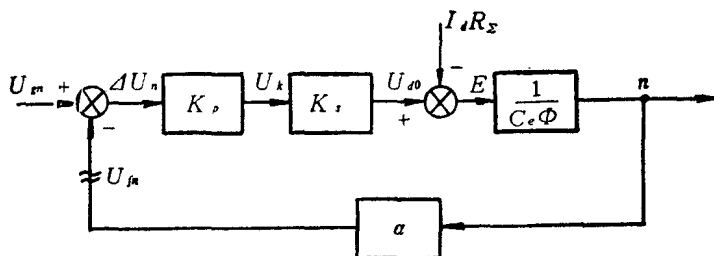


图 1-7 转速闭环系统静态结构图

由系统静态结构图导出:

$$U_{d0} = K_p K_s (U_{gn} - U_{fn}) = K_p K_s (U_{gn} - \alpha n)$$

$$n = \frac{K_p K_s U_{gn} - K_p K_s \alpha n - I_d R_\Sigma}{C_e \Phi}$$

$$n = \frac{K_p K_s U_{gn}}{C_e \Phi (1 + K)} - \frac{R_\Sigma I_d}{C_e \Phi (1 + K)} = n_{0k} - \Delta n_k \quad (1-6)$$

式中 $K = K_p \cdot K_s \cdot \alpha \cdot \frac{1}{C_e \Phi}$ ——闭环系统的开环放大倍数 (即开环增益)。

(1-6) 式为转速闭环系统的静特性方程式。闭环系统的开环放大倍数 K 是系统各环节放大倍数的乘积。静特性方程式表示, 系统闭环后电动机转速与负载电流的静态 (稳态) 关系。它与 $KZ-D$ 开环系统的机械特性方程式虽然在形式上相同, 但两者的含义却有本质上的不同。

比较一下 $KZ-D$ 闭环系统的静特性方程式与其开环系统的机械特性方程式的区别, 就能看到闭环控制的突出优点。如果把图1-7所示的转速闭环系统的反馈回路断开, 就变成了 $KZ-D$ 开环系统, 其机械特性方程式为

$$n = \frac{U_{d0} - I_d R_\Sigma}{C_e \Phi} = \frac{K_p K_s U_{gn}}{C_e \Phi} - \frac{I_d R_\Sigma}{C_e \Phi} = n_{0k} - \Delta n_k \quad (1-7)$$

式中 n_{0k} ——开环系统的理想空载转速;

$$\Delta n_k = \frac{I_d R_\Sigma}{C_e \Phi} \text{——开环系统的静态速降;}$$

(1-6) 式中 n_{0k} ——闭环系统的理想空载转速;

$$\Delta n_k = \frac{I_d R_\Sigma}{C_e \Phi (1 + K)} \text{——闭环系统的静态速降。}$$

如果使闭环系统的理想空载转速 n_{0b} 与开环系统的理想空载转速 n_{0k} 完全相等, 即 $n_{0b} = n_{0k}$, 在负载相同时, 则转速闭环系统的静态速降可以表示为:

$$\Delta n_b = \frac{I_d R_\Sigma}{C_e \Phi (1+K)} = \frac{\Delta n_k}{1+K} \quad (1-8)$$

(1-8) 式表明, 转速闭环后将使同一负载下的静态速降减小到原来开环系统的静态速降的 $\frac{1}{1+K}$ 倍, 使闭环系统的静特性比开环系统的机械特性硬度大大提高, 见图 1-8。

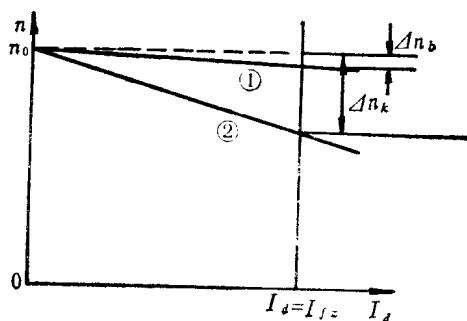


图 1-8 闭环系统静特性①与开环系统机械特性②比较

如果电动机最高转速是额定转速 n_{ed} , 对静差率要求为 S , 则闭环系统的调速范围:

$$D_b = \frac{n_{ed} S}{\Delta n_b (1-S)} = \frac{n_{ed} S}{\frac{\Delta n_k}{1+K} (1-S)} = (1+K) D_k \quad (1-9)$$

式中 $D_k = \frac{n_{ed} S}{\Delta n_k (1+S)}。$

(1-9) 式表明, 当电动机最高转速和要求的静差率相同时, 闭环系统的调速范围为开环系统的调速范围的 $(1+K)$ 倍。由此可见, 提高闭环系统的开环放大倍数 K 是减小系统静态速降, 扩大调速范围的有效措施。系统的开环放大倍数 K 越大, 静态速降就越

小, 在同样静差率下, 其调速范围就越宽。从系统的开环放大倍数 $K = K_p \cdot K_i \cdot \alpha \cdot \frac{1}{C_e \Phi}$

表达式看出, 若想增大系统开环放大倍数, 只有增大比例调节器的放大倍数 K_p 值和转速反馈系数 α ($\alpha \leq 1$) 值。触发及可控硅变流装置的电压放大倍数 K_i 值和电动机放大系数

$\frac{1}{C_e \Phi}$ 在系统中一般被视为常数。

静特性参数计算举例:

已知某一转速闭环系统如图 1-9 所示。

1. 直流电动机技术数据: $P_{ed} = 45 \text{ kW}$, $U_{ed} = 220 \text{ V}$, $I_{ed} = 226 \text{ A}$, $n_{ed} = 1750 \text{ rpm}$, 电枢电阻 $R_d = 0.04 \Omega$ 。

2. $KZ-D$ 系统电枢回路总电阻 $R_\Sigma = 0.1 \Omega$ 。

3. 可控硅变流装置的移相控制信号 U_k 在 $0 \sim 7 \text{ V}$ 范围内调节时, 对应的整流电压 U_d 在 $0 \sim 250 \text{ V}$ 范围内变化。