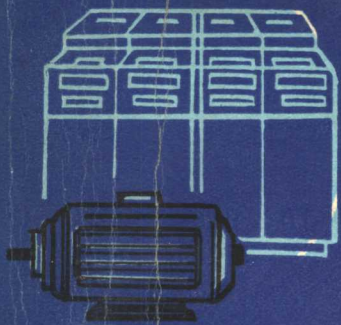
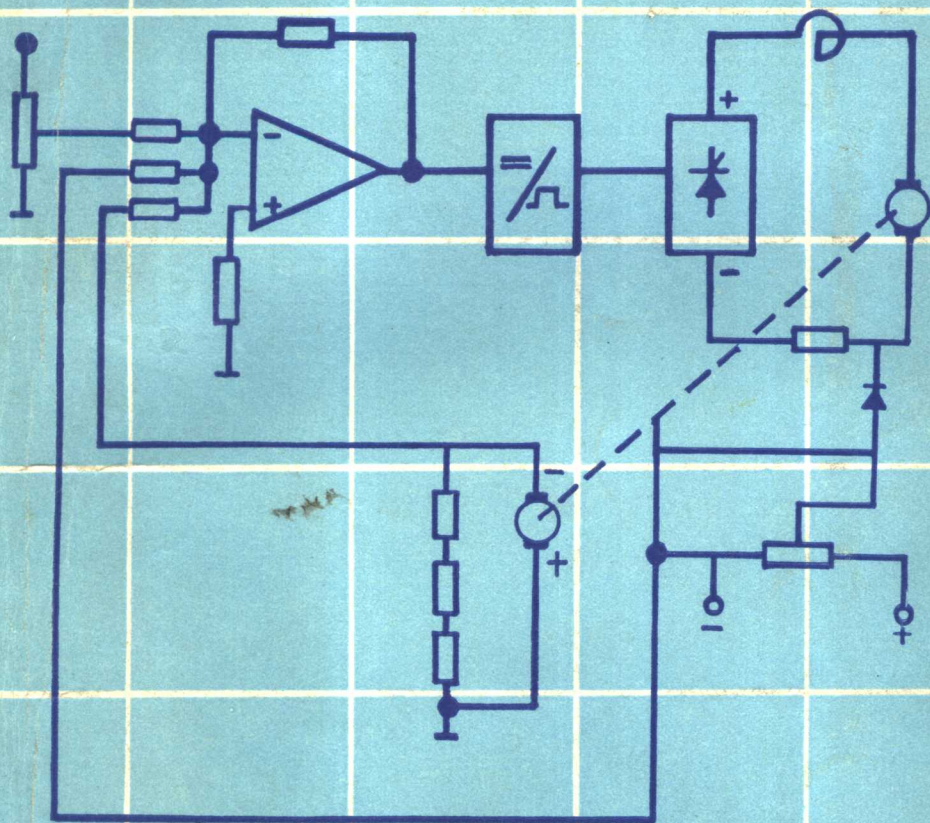




自动控制系统

职工高等学校试用教材



上海科学技术文献出版社

职工高等学校试用教材

自 动 控 制 系 统

郭伯农 陆德浩
葛渝生 胡文瑾 编

上海科学技术文献出版社

职工高等学校试用教材
自动控制系统

*

上海科学技术文献出版社出版
(上海市武康路2号)

总发行所上海发行所发行
上海商务印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 19.5 字数 486,000

1986年7月第1版 1986年7月第1次印刷

印数: 1—7,900

书号: 15192·455 定价: 3.60元

《科技新书目》120-207

前 言

随着科学技术的迅速发展,自动控制系统已经越来越成为我国四化建设中不可缺少的重要工具和手段。不论是民用工业还是国防工业,不论是普通生产工艺还是尖端技术都可应用自动控制系统。因此,作为一个工业自动化的专业技术人员,掌握自动控制系统的原理及工程实践方法是十分必要的。

自动控制技术的发展,取决于两大支柱。其一是控制元器件和装置的更新换代。执行元件从直流电机到交流电机;大功率控制元件从旋转的电机型转速控制器到静止的磁放大器,再演变为大功率电子器件——晶闸管电路;调节器从分列式电子管放大器到集成运算放大器组成的PID调节器,当前又为微型计算机所代替。

器件的革新带来自动控制系统的迅速进步;装置体积不断缩小;静动态指标不断提高,无论是精度、快速性还是稳定性均有长足的改善。

其二是控制理论的发展。要设计一个复杂而性能先进的闭环控制系统须掌握控制理论。经典控制理论中的系统综合方法,基本上是以对数频率特性为依据而形成的,近年来又发展了基于系统的典型规范形式的工程设计方法,更为简捷实用。现代控制理论中的状态反馈及线性调节器的设计理论解决了任意配置极点的问题,虽然受到具体技术条件的限制,但确实在进一步提高系统的动态性能方面,引起了设计方法的改革,特别适用于阶数较高和变量较多的系统。

器件和理论的发展并不是孤立地进行而是相互促进、互为依靠的。例如工程设计方法是由于集成PID调节器的大量应用而发展起来的。而现代控制理论中的最佳调节器,则往往需用微型计算机才能实现。

本书是成人高校工业自动化专业(或电气自动化专业)的主要专业课教材。重点介绍各种直流调速系统的构成原理、设计方法和实际应用。所采用的元器件均为晶闸管和集成运算放大器。为了拓宽知识领域,引入较新发展成果,本书亦以相当篇幅,对交流电机调速系统和微机控制系统,在原理上作了概要的介绍,可以有选择地进行学习。

为了体现成人大专院校的教学特点,本书安排了较多的例题、思考题,以利学生自学。在实例方面,也考虑了各种行业的应用。

全书共分六章,建议可按下表进度进行教学:

章 次	内 容	教 时
第一章	晶闸管-电动机单闭环直流调速系统	12
第二章	较复杂的不可逆直流调速系统	19
第三章	晶闸管-电动机可逆调速系统	15
第四章	直流电机调速系统实例	7
第五章	交流电动机调速系统	} 任选一章 17
第六章	微型计算机控制系统	

(共计)70

(其中第四章可供自学,也可另行选取实例进行补充。)

本书第一章、第三章由上海第二工业大学葛渝生编写;第二章、第四章由上海卢湾区教育局郭伯农编写;第五章由卢湾区业余大学陆德浩编写;第六章特邀上海交通大学胡文瑾副教授编写。

本书承上海工业大学陈伯时副教授、夏新顺副教授和上海第二工业大学杜正秋副教授审稿。陈伯时副教授担任主审。在此表示诚挚的感谢。

编写第四章时曾引用上海冶金专科学校、上海第三钢铁厂职工大学的毕业设计资料,在此一并表示感谢。本书不当之处敬请指正。

编 者

一九八六年五月

科技新书目: 120-207
书 号: 15192 · 455
定 价: 3.60 元

目 录

第一章 晶闸管-电动机单闭环直流调速系统	1
§ 1-1 直流调速系统概述	1
一、直流他激电动机无级调速的方式	1
二、调速系统的主要技术指标	2
§ 1-2 转速负反馈有静差自动调速系统	4
一、转速负反馈自动调速系统的工作原理及静特性	4
二、开环系统和闭环系统的比较	7
三、有差自动调速系统的基本特征	9
§ 1-3 转速负反馈无静差自动调速系统	11
一、积分调节器	11
二、比例积分调节器	13
§ 1-4 自动调速系统的限流保护——电流截止负反馈	17
一、问题的提出	17
二、电流负反馈截止环节	17
三、带电流截止负反馈的调速系统的实际线路	18
§ 1-5 电压负反馈和电流正反馈自动调速系统	20
一、电压负反馈调速系统	20
二、电压负反馈加电流正反馈自动调速系统	22
§ 1-6 单闭环调速系统的动态分析	27
一、转速负反馈单闭环调速系统的动态结构图和闭环传递函数	27
二、单闭环有差调速系统的稳定性分析	32
三、动态校正	35
小结	39
例题	40
习题	42
第二章 较复杂的不可逆直流拖动系统	45
§ 2-1 基本原理的引述	45
一、从单闭环系统的不足谈起	45
二、从单闭环到多闭环	46
§ 2-2 直流电动机的多环调速系统	47
一、直流电动机的数学模型再讨论	47
二、速度、电流双闭环调速系统	48
三、三闭环调速系统	55
§ 2-3 其他形式的直流调速系统结构特点	60

一、进一步提高动态抗扰指标——扰动补偿	60
二、扩大调速范围——磁场调节系统	62
三、斜坡型起动——给定积分器	64
§ 2-4 多环系统的动态设计方法	69
一、动态性能指标	69
二、动态设计的一般叙述	72
三、典型特性	72
四、根据典型预期特性来进行设计的原则	81
§ 2-5 利用工程设计方法进行直流电机调速系统的动态设计	90
一、电流环的设计	90
二、内环等效传递函数	95
三、速度环的设计	97
四、双闭环直流调速系统的动态设计全程序	99
小结	103
例题	103
习题	110
第三章 晶闸管-电动机可逆调速系统	112
§ 3-1 晶闸管-电动机系统可逆线路的形式	112
一、电枢可逆线路	112
二、磁场可逆线路	113
三、电枢可逆与磁场可逆两种方案的比较	114
§ 3-2 晶闸管-电动机可逆系统的工作状态	115
一、直流电动机和晶闸管整流装置的两种工作状态	115
二、单组晶闸管-电动机系统带位势性负载时的整流与逆变状态	116
三、两组晶闸管-电动机系统的工作状态	117
§ 3-3 两组晶闸管可逆系统中的环流及其控制	118
一、反并联线路中的静态环流和动态环流	119
二、环流的二重性及对环流的控制方法	121
§ 3-4 有环流可逆调速系统	122
一、自然环流可逆系统	122
二、给定环流和可控环流的可逆调速系统	126
§ 3-5 逻辑无环流可逆调速系统	130
一、可逆系统对逻辑装置的基本要求	131
二、无环流逻辑装置	132
三、限制换向时电流冲击的环节	138
四、逻辑控制的无环流可逆系统的优缺点	140
§ 3-6 错位无环流可逆调速系统	141
一、错位控制原理(静态环流的消除)	141
二、具有电压内环的错位无环流可逆调速系统	142

三、电源电压波动的影响	146
四、错位选触无环流系统	146
小结	147
例题	148
习题	151
第四章 直流电动机调速系统实例	152
§ 4-1 小容量晶闸管直流调速系统实例——横臂钻床直流调速系统	152
一、横臂钻床电气传动对电气控制的要求	152
二、主回路方案的确定及元件选择	152
三、触发电路	154
四、控制系统各环节分析	154
五、系统静特性和动特性的分析	155
§ 4-2 错位无环流可逆调速系统实例	159
一、主回路介绍	159
二、单元说明	161
§ 4-3 张力控制系统实例	179
一、张力控制的基本原理	179
二、直接法张力控制原理	180
三、设计实例	182
四、控制回路主要单元的选择	183
第五章 交流电动机调速系统	187
§ 5-1 晶闸管控制的交流调速系统的发展概况	187
§ 5-2 交流调压调速系统	188
一、异步电动机调压调速系统的基本原理	188
二、常用的定子调压主回路	188
三、调压调速系统的组成及特性分析	197
四、应用举例	202
五、滑差电动机调速系统	206
§ 5-3 绕线型转子电动机的串级调速系统	210
一、串级调速的原理	210
二、串级调速系统的组成及其特性	211
三、应用举例	218
§ 5-4 异步电动机的变频调速系统	220
一、概述	220
二、异步电动机变频调速的几种控制方法	221
三、常用逆变器的工作原理	224
四、电压型与电流型变频器	236
五、异步电动机变频调速系统	238
六、脉宽调制(PWM)型逆变器	244

小结	248
思考题	250
第六章 微型计算机控制系统	252
§ 6-1 概论	252
一、计算机控制的一般概念	252
二、微机实时控制系统的组成	253
§ 6-2 过程通道和数据采集系统	253
一、概述	253
二、A/D 转换技术	254
三、单片 A/D 转换器与微处理器的接口	254
四、数据采集系统	257
五、D/A 转换技术	261
六、过程通道的抗干扰措施	264
七、数字滤波方法	265
§ 6-3 数字 PID 控制算法	268
一、准连续 PID 控制算法	268
二、对 PID 算法的改进	270
三、PID 调节器参数选择	273
四、采样周期的选择	274
§ 6-4 数字控制器直接设计方法	276
一、参数最优化的低阶控制算法	276
二、用根轨迹法分析二阶离散系统	278
§ 6-5 微型机控制系统设计的一般步骤	283
一、确定控制任务	283
二、选择微处理器的外围设备	283
三、建立数学模型, 确定控制算法	284
四、系统总体方案设计	284
五、微型计算机控制系统设计	285
六、微型计算机控制系统应用实例	286
小结	292
习题	292
附录 I 主回路电流测量单元	293
附录 II 直流电压检测单元	295
附录 III 转速测量单元	296
常用符号表	300
参考文献	304

第一章 晶闸管-电动机单闭环 直流调速系统

目前在许多工业部门所应用的电力拖动系统中,例如轧钢机及其辅助机械、金属切削机床、造纸机、矿井卷扬机、大型起重机等等,它们的电力拖动设备仍然采用着直流拖动系统。这是因为这些生产机械为满足生产工艺的要求需要其拖动电动机的转速调节范围大,调速精度高,还要有良好的起制动性能等,而直流电动机比起交流电动机,在调速性能和起制动性能方面优越得多,再加入必要的反馈环节,组成闭环的直流调速系统后,就能够满足这些生产机械的工艺要求,因而直流调速系统至今仍在上述部门中占统治地位。

直流调速系统有电机扩大机调速系统、磁放大器调速系统和离子拖动系统、晶闸管调速系统等。随着晶闸管技术的发展,晶闸管整流装置在经济性和可靠性以及技术性能等方面都优越于前三者,所以在新的调速系统中日益广泛地应用晶闸管调速系统。

§ 1-1 直流调速系统概述

一、直流他激电动机无级调速的方式

(一)改变电动机励磁磁通使其速度改变。这种调速方式只能在电动机的额定转速以上调速,其转速调节的上限受到电机在高速时换向恶化及电机机械强度的限制,因此调节范围不大。

(二)改变电动机供电电压使其速度改变(简称“调压调速”)。由于受电机绕组绝缘性能的影响,电压的变化只能小于额定电压,因此这种调速方式只能在电动机额定转速以下调速,其转速调节的下限受低速时运转不稳定性限制。低速时,供电电压小、主回路电压降所占的百分数相应增大,当负载稍有变化对转速的影响就较大,甚至当负载增加时发生堵转现象。

调磁调速和调压调速时电动机的机械特性如图 1-1 所示。

改变电动机供电电压需要有专门的可控电源,例如发电机或晶闸管整流装置等。以直流发电机作为直流电动机的供电电源,调节发电机激磁电压或调节发电机激磁绕组串联电阻大小改变其激磁电流,从而改变了电动机的供电电压,使电动机转速变化。发电机-电动机系统(简称 F-D 系统)和电机扩大机调速系统(简称 JF-D 系统)均属此种类型。F-D 系统的原理

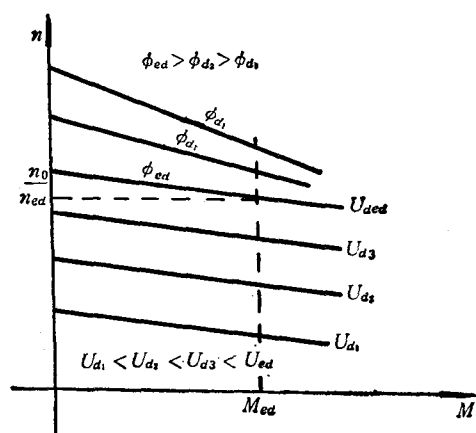


图 1-1 直流他激电动机调压调速和调磁调速时机械特性

其中 ϕ_{ed} —额定磁通 U_{ed} —额定电压
 M_{ed} —额定转矩

• 1 •

图如图 1-2 所示。这类系统旋转部分多，必须有发电机激磁机和带动它们的原动机等，笨重累赘，安装耗时，而且安装须打地基，设备占地面积大，噪音大，维护不便，效率低。

改变晶闸管的控制角 α 可调整整流装置的整流电压，从而改变了电动机的供电电压，使电动机转速改变。晶闸管-电动机调速系统（简称 KZ-D 系统）就属这种类型，其原理图如图 1-3 所示。这类系统体积小，无噪音，效率高，快速性好，所以得到了日益广泛的应用。

二、调速系统的主要技术指标

（一）调速范围

是指系统在额定负载时最高转速与最低转速之比。可用下式表示：

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

式中 $n_{\max}$ 指系统在额定负载时的最高转速，一般在调压调速系统中 $n_{\max} = n_{ed}$ （额定转速）； $n_{\min}$ 指系统在额定负载时的最低转速。

（二）静差率

指电机在某一转速下运行时，负载由理想空载到额定负载时的转速降落 Δn_{ed} 与理想空载转速 n_0 之比。可用下式表示：

$$S = \frac{\Delta n_{ed}}{n_0} \quad (1-2)$$

或

$$S\% = \frac{\Delta n_{ed}}{n_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

电动机在不同转速运行时的静差率不一样，由于在调压调速中，同一个电机无论在何种速度下运转，其额定转速降落是一样的，但不同速度时其理想空载转速不同。如图 1-4 所示。由式(1-2)可见，低速时 S 大，高速时 S 小，所以一般提静差率的要求是指最低速时能达到的，低速能达到，高速时就不成问题了。

静差率是根据生产机械工艺要求提出的，该指标对产品数量和质量有很大影响。若随负载增加，电机转速下降很多就会降低生产设备

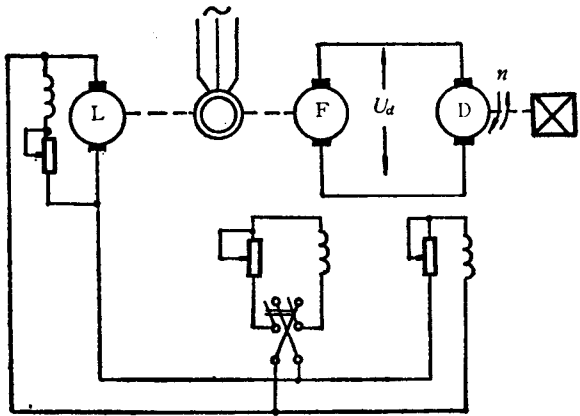


图 1-2 F-D 系统原理图

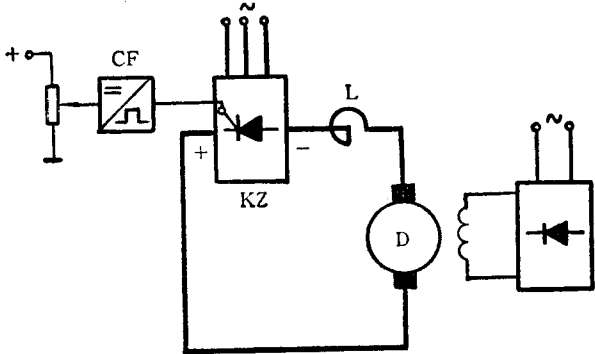


图 1-3 KZ-D 系统原理图

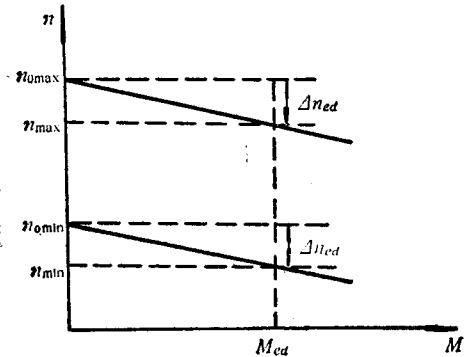


图 1-4 不同转速下的机械特性

的生产能力,也会影响产品质量,这种情况发生在金属切削机床,就会影响工件表面的光洁度,发生在连轧机中甚至不能正常工作。

调速范围和静差率这二项指标是相互联系的,若要求拖动系统调速范围很大而静差率很小则愈难实现。

不同的生产机械对 D 和 S 的要求不同,例如龙门刨床 $D=20\sim40$, $S\leq 0.05$; 热连轧机 $D=3\sim10$, $S\leq 0.01$; 造纸机 $D=3\sim20$, $S=0.01\sim 0.001$ 。

(三)调速范围和静差率的关系

已知

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}}$$

$$n_{\max} = n_{ed}$$

由图 1-4 可见

$$n_{\min} = n_{0\min} - \Delta n_{ed}$$

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

由式

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

则

$$D = \frac{n_{ed}}{\frac{\Delta n_{ed}}{S} - \Delta n_{ed}} = \frac{n_{ed} \cdot S}{\Delta n_{ed}(1-S)} \quad (1-4)$$

上式表示了 D 、 S 、 n_{ed} 之间的关系, n_{ed} 一般由电动机铭牌数据给出, D 和 S 由生产实际要求确定。当系统的 Δn_{ed} 一定时,如要求 S 愈小则能达到的调速范围 D 就愈小。反之若要求 D 和 S 是一定的,那么 Δn_{ed} 就必须小于某一值。可见调速系统要求解决的问题就是如何减小由于负载引起的转速降落。

[例题 1-1] 已知某 KZ-D 系统,直流电动机参数为: $P_{ed}=60\text{ kW}$, $U_{ed}=220\text{ V}$, $I_{ed}=305\text{ A}$, $n_{ed}=1000\text{ r/min}$, $R_s=0.05\Omega$ 。晶闸管整流装置内阻 R_n 为 0.13Ω 要求 $D=20$, $S\leq 0.05$, 问若采用开环的 KZ-D 系统能否满足要求?

解: 开环系统在额定负载下的转速降落为

$$\Delta n_{ed} = \frac{I_{ed} R_s}{C_e}$$

C_e 为电动机的电势常数,可由电机铭牌数据求出

$$C_e = \frac{U_{ed} - I_{ed} R_s}{n_{ed}} = \frac{220 - 305 \times 0.05}{1000} = 0.2\text{ V/(r/min)}$$

$$\therefore \Delta n_{ed} = \frac{305 \times (0.05 + 0.13)}{0.2} = 275\text{ r/min}$$

高速时的

$$S_1 = \frac{\Delta n_{ed}}{n_{01}} = \frac{275}{100 + 275} = 0.216$$

最低速为

$$n_{\min} = \frac{\Delta n_{ed}}{D} = \frac{1000}{20} = 50\text{ r/min}$$

此时

$$S_2 = \frac{\Delta n_{ed}}{n_{02}} = \frac{275}{50 + 275} = 0.85$$

由以上计算可看到低速时 S_2 远远大于高速时的 S_1 , 而高速时的 S_1 已不能满足小于 0.05 的要求, 低速时就更不行了, 所以开环系统不能满足要求。

若要满足 D 和 S 要求那么 Δn_{ed} 应为多少呢?

$$\text{由 } D = \frac{n_{ed}S}{\Delta n_{ed}(1-S)} \text{ 式得 } \Delta n_{ed} = \frac{n_{ed}S}{D(1-S)} = \frac{1000 \times 0.05}{20(1-0.05)} = 2.6 \text{ r/min}$$

开环系统的 $\Delta n_{ed} = 275 \text{ r/min}$, 已由系统参数决定, 不可能减小, 为满足 D 和 S 的要求, Δn_{ed} 应该等于或小于 2.6 r/min , 开环系统不能满足该项要求。必须采用闭环系统才能达到指标。

【思考题】 什么叫调速范围? 什么叫静差率? 调速范围与静态速降和最小静差率有什么关系?

§ 1-2 转速负反馈有静差自动调速系统

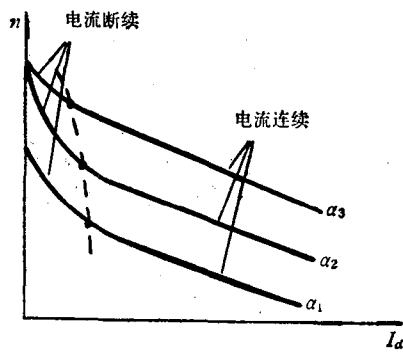
由上节所述可知, 开环的 KZ-D 系统不能满足较高的调速指标的要求, 因为开环系统工作时, 当给定电压 U_g 不变时, 控制角 α 是固定不变的, 整流器输出电压 U_d 也就不变, 这时系统具有一条相应的机械特性。当电流连续时此段机械特性是直线, 如图 1-5 所示。其特性方程式如下:

$$n = \frac{U_{d\max} \cos \alpha - I_d R_2}{C_e} = \frac{U_d - I_d R_2}{C_e} = n_0 - \Delta n \quad (1-5)$$

$U_{d\max} \cos \alpha$ 为理想空载时的整流电压

R_2 为电枢回路总电阻, $R_2 = R_s + R_n$ 其中 R_n 为整流装置的内阻。

当负载增加时, $I_d R_2$ 增加, 使得加在电动机电枢二端的电压 U_D 减小, 因此转速下降。



下降的大小由这条机械特性决定。

当负载电流减小到一定时, 出现电流断续现象, 此时机械特性不是直线而呈显著的非线性, 大大变软, (见图 1-5) 上述公式不再适用。但一般在主回路中所串电感足够大, 而且电动机本身还有一定的空载电流, 可以近似认为电机工作在电流连续区, 以后讨论问题都是在假定电流是连续的前提下进行的。

一、转速负反馈自动调速系统的工作原理及静特性

当负载增大转速下降以后, 若能将此转速的变化变换成电压再反送到输入端去, 从而自动改变控制角 α , 提高晶闸管整流装置的输出电压 U_d , 以补偿由于负载增加所引起的电枢回路电压降 $I_d R_2$ 的增加, 进而使电动机转速有一定回升, 这样就能减小电动机的转速降落, 达到扩大调速范围的目的。

图 1-6 为具有转速负反馈的闭环调速系统原理图。该系统的被调节量是转速, 利用测速发电机将转速大小转换为电压, 测速发电机与电动机同轴联结(或经齿轮联结)其电压与电动机转速成正比, 即 $E_{SF} = C_{esF} n$, C_{esF} 为测速发电机的电势常数。将 E_{SF} 经过电位器分压后引出与它成正比的反馈电压 U_f 去和恒定的给定电压比较。放大器的输入就是给定电压与反馈电压之差即 $\Delta U = U_g - U_f$ 。

(一) 系统工作原理(即转速自动调节过程)

系统在某一规定转速下, 有相应的一个恒定的给定电压, 当电动机负载增加时, 电枢回路压降 $I_d R_2$ 增加, 转速下降, 则反馈电压 U_f 下降, $\Delta U = U_g - U_f$ 增加, 放大器输出电压 U_K

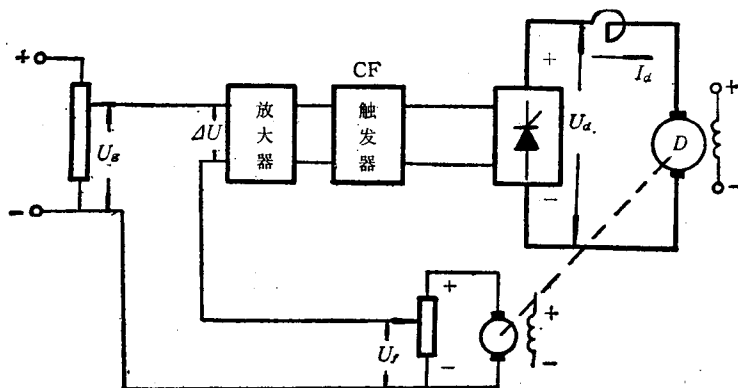


图 1-6 转速负反馈自动调速系统原理图

增加,使控制角 α 减小,则晶闸管整流器输出电压 U_d 增加,电动机转速便作相应的回升,从而维持转速基本不变。此过程可简述为:

$M_{fe} \uparrow \rightarrow I_d \uparrow \rightarrow I_d R_s \uparrow \rightarrow n_0 \downarrow \rightarrow U_f \downarrow \rightarrow \Delta U \uparrow \rightarrow \alpha \downarrow \rightarrow U_d \uparrow \rightarrow n \uparrow$ 。若负载减小则各量反向变化,自动调节过程仍一样。

由图 1-7 所示的机械特性来说明自动调节后的情况。

1, 2, 3, 4, 是一组不同 U_d 之下的开环机械特性。设当负载电流为 I_{d1} 时电机运行在机械特性 1 的点 A 上,当负载增加为 I_{d2} 时,若为开环系统,由于 U_d 不变, U_d 不会变,则转速将由 A 点沿着机械特性 1 下降至 B' 点, Δn 大。但是在闭环系统中由于自动调节的作用 U_d 会增加,由 U_{d1} 变为 U_{d2} 特性也相应地变为 2,使转速下降又回升,最后稳定在机械特性 2 的点 B 上,随着负载不断增加, u_d 也会相应增加相应的稳定工作点为 C、D 等,将这些点连起来就成为 ABCD 直线,它就是系统的静特性,显然它比开环的机械特性要硬,转速降落 Δn 小。

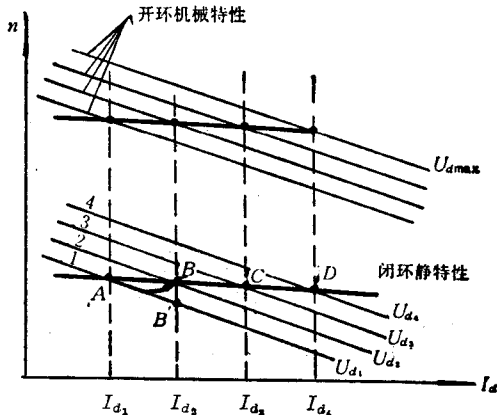


图 1-7 闭环系统静特性和开环机械特性的关系

电机运行在高速时,调节作用有一个限度,即当负载增加到一定值后,系统已工作在最小的 α 角上,此后负载再增加, α 不会再改变,也就是没有调节作用,系统相当于运行在开环状态。因此为保证系统在高速的额定负载时仍有正常的调节作用,在设计整流变压器的副边电压时,就应适当选得大些。控制角也不能按零度为极限来计算,一般不可逆系统取 $\alpha_{\min} = 10^\circ \sim 15^\circ$ 。另外再考虑电网电压波动等因素,在要求不太精确的情况下,变压器副边相电压 U_2 可由式 $U_2 = (1.2 \sim 1.5) \frac{U_{ad}}{A}$ 来确定,式中 U_{ad} 是电动机的额定电压, A 是控制角 $\alpha = 0$ 时整流电压平均值与变压器副边相电压有效值之比,对于三相零式 A 为 1.17, 三相桥式 A 为 2.34。

(二)比例调节器

一般的自动调速系统中都有放大器,它可以增强系统的调节作用,放大器的放大系数愈大,系统的调节作用就愈强,系统静特性愈硬,静态转速降落愈小。根据实际要求不同,过去

常选用单管直流放大器或差动式多级直流放大器，但目前却普遍采用半导体集成电路直流运算放大器。在直流放大器的反馈网络中接入不同的阻抗，就可以实现信号的组合和各种运算。这种能对输入信号进行运算使输出按一定调节规律变化的运算放大器，就称为调节器。在转速负反馈有静差自动调速系统中用的就是比例调节器。

比例调节器的原理图和输入输出特性由图 1-8(a) 和 (b) 表示。在放大器的输入回路中接入电阻 R_0 ，反馈回路中接入电阻 R_1 ，由于放大器的开环放大系数通常是很大的，一般在 10^4 以上，而放大器的输出电压一般却在十几伏以下，所以可以认为 A 点的电位近似于零，常把 A 点称为“虚地”。而流入放大器的电流也认为近似为零，即 $I_0 = I_1$ ，而 $I_0 = \frac{U_{sr}}{R_0}$ ， $I_1 = \frac{U_{so}}{R_1}$ ，这样 $U_{so} = \frac{R_1}{R_0} U_{sr}$ (1-6) (式中没有考虑输入和输出的反相关系)。由式可知放大器的输出电压与输入电压成正比，所以叫比例调节器。

$K_p = \frac{R_1}{R_0}$ 称为放大器的放大系数。改变 R_1 的大小可以方便地改变放大器的放大系数。

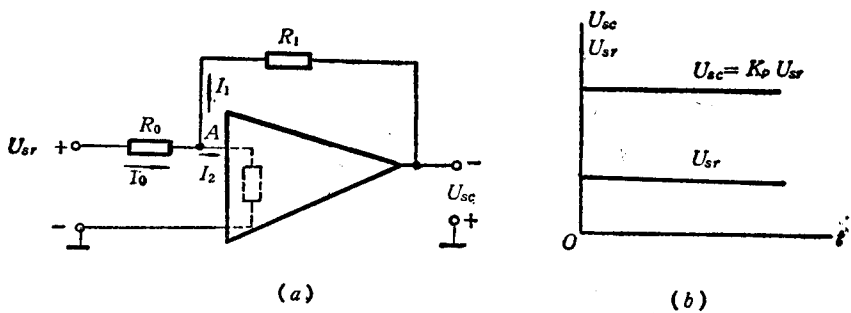


图 1-8 比例调节器

(a) 原理图

(b) 输入输出特性

在自动调速系统中，放大器往往需要综合好几个信号，例如给定电压与反馈电压等，采用运算放大器可以方便地实现信号的综合(相加、相减等)，如图 1-9 所示，即比例调节器的减法运算，输入信号是 U_g 和 U_f ，两者极性相反，根据比例调节器的原理可得 $I_1 = I_{01} - I_{02}$

$$\frac{U_{so}}{R_1} = \frac{U_g}{R_0} - \frac{U_f}{R_0}$$

$$U_{so} = \frac{R_1}{R_0} (U_g - U_f) = K_p (U_g - U_f) \quad (1-7)$$

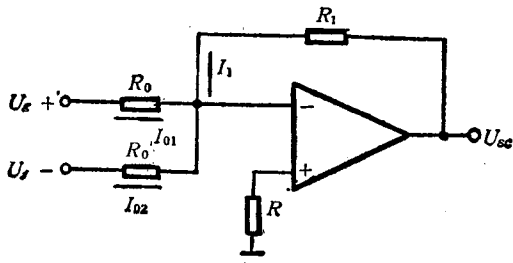


图 1-9 比例调节器的减法运算

可以看出，加在比例调节器输入端的给定、反馈等信号是电流迭加、并联输入的，各输入信号是共地的，所以它与一般晶体管放大器的电压迭加、串联输入方式相比，调整方便，而且引起干扰的可能性比较小。

(三) 静特性方程

用分析法和结构图法都可以求出系统的静特性方程，但都必须有如下假定：

1. 各环节的输入输出关系都是线性的。
2. 系统的开环机械特性全为连续段。

3. 忽略直流电源和电位器的等效内阻。

(1) 分析法: 先依次列写组成系统各环节的静态方程, 再消去中间变量, 最后得出系统的静特性方程。

转速负反馈自动调速系统各环节的静态方程如下:

电压比较环节

$$\Delta u = U_g - U_f$$

放大器

$$U_k = K_p \Delta u \quad K_p \text{ 是放大器的放大系数}$$

触发器及晶闸管整流装置

$$U_d = K_s U_k \quad K_s \text{ 为触发器及整流器电压放大系数}$$

电动机

$$n = \frac{U_d}{C_e} - \frac{I_d R_s}{C_e}$$

测速发电机

$$U_f = \alpha' C_{ssF} n = \alpha_n n$$

α' 为反馈电位器分压比

α_n 为转速反馈系数 $\alpha_n = \alpha' C_{ssF}$ 单位是 $V \cdot \min/r$

从上述各式消去中间变量, 整理后即得出转速负反馈自动调速系统的静特性方程

$$n = \frac{K_p K_s U_g - I_d R_s}{C_e (1 + K_p K_s \alpha_n / C_e)} = \frac{K_p K_s}{C_e (1 + K)} U_g - \frac{I_d R_s}{C_e (1 + K)} \quad (1-8)$$

$K = K_p K_s \alpha_n / C_e$ 称为闭环系统的开环放大系数。

(2) 结构图法:

由上述各环节的静态方程可以画出系统的静态结构图。如图 1-10a 所示, 图中各方块中的符号是该环节的放大系数。 U_g 是给定量, $I_d R_s$ 为干扰量, 可将它们看作独立的输入量, 如图 1-10b 和 c, 因为假定系统是线性系统, 所以可运用迭加原理分别求出各输入量对被调量 n 的作用方程, 最后将各方程相加, 就得出系统的静特性, 与 (1-8) 式相同。

二、开环系统和闭环系统的比较

开环系统的机械特性:

$$n = \frac{U_d}{C_e} - \frac{I_d R_s}{C_e} = \frac{K_p K_s}{C_e} U_g - \frac{I_d R_s}{C_e} = n_{0k} - \Delta n_k$$

闭环系统的静特性:

$$n = \frac{K_p K_s}{C_e (1 + K)} U_g - \frac{I_d R_s}{C_e (1 + K)} = n_{0b} - \Delta n_b$$

从上二个方程可以看到:

(一) 闭环系统静特性比开环系统机械特性硬。

两者在同样负载扰动下的转速降落分别为 $\Delta n_k = \frac{I_d R_s}{C_e}$ 和 $\Delta n_b = \frac{I_d R_s}{C_e (1 + K)}$ Δn_b 比 Δn_k 小, 二者关系为

$$\Delta n_b = \frac{1}{1 + K} \Delta n_k \quad (1-9)$$

(二) 闭环后系统的静差率减小

调节 U_g 可将 n_{0b} 调整到与 n_{0k} 相同, 此时开环系统与闭环系统的静差率 S 分别为 $S_k = \frac{\Delta n_k}{n_{0k}}$ 和 $S_b = \frac{\Delta n_b}{n_{0b}}$ 因为已经使 n_{0k} 与 n_{0b} 相等, 所以