



教育部高职高专规划教材

交直流调速系统

第三版

● 史国生 主编
赵家璧 主审

教育部高职高专规划教材

交直流调速系统

(第三版)

史国生 主编

赵家璧 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是根据教育部高职高专电类专业规划教材而编写的。本书分三篇。第一篇为直流调速系统和数字控制系统。第二篇为交流调速系统。第三篇为交直流调速系统实验与课程设计。书中详细叙述了各种交直流电力拖动控制系统的工作原理、控制方法实现、机械特性、运行特点及应用场合。所涉及的内容包括单闭环及多环直流调速系统、可逆直流调速系统、PWM 直流调速系统、数字控制系统、交流调压调速系统和串级调速系统、笼式异步电动机变频调速和矢量控制调速系统、无换向器电机调速系统、开关磁阻电机调速系统。

本书根据高职高专的教学要求、特点和本课程新技术的发展,注重结合工业应用选材和新技术介绍;尽量简化理论推导,注重物理概念的阐述与分析;书中配有相关的实例分析,做到学以致用;本书增加了数字控制系统和开关磁阻电动机调速系统等新的调速技术内容,还增加了各章典型控制系统的计算机 MATLAB 仿真实验内容;并安排了实验及课程设计指导书,将实训内容与理论教学内容紧密结合。

本书可作为高职高专电类专业教材,也可作为职业技术学院、电大、中等职业学校电类及相关专业的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

交直流调速系统/史国生主编. —3版. —北京:
化学工业出版社, 2015.6
教育部高职高专规划教材
ISBN 978-7-122-23958-7

I. ①交… II. ①史… III. ①交流调速-高等职业教育-教材②直流调速-高等职业教育-教材 IV.
①TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 099990 号

责任编辑: 张建茹 潘新文
责任校对: 边涛

文字编辑: 云雷
装帧设计: 张辉

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张15 $\frac{3}{4}$ 字数412千字 2015年9月北京第3版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 32.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本书第二版于2006年6月出版以来，连续发行了12次，得到了全国许多高职高专学校师生和广大读者的关心和支持，并提出了许多宝贵意见和建议，在此表示深深的感谢！

为了适应高职高专教育电气控制技术人才培养的要求，《交直流调速系统》第三版的编排仍与第二版相同，第一、二篇的教学内容仍然保持了先直流后交流的调速控制系统介绍，仅对各章的内容进行了修订与调整，使之内容完整，编排合理，概念阐述简明扼要，突出重点，弱化公式推导（部分公式安排在附录中加以推导），强调公式的意义和应用，保留了工业上常用的，能反映现代交直流调速技术的调速系统，对不常用的，控制性能差的或太深的控制系统进行了删减。

由于《交直流调速系统》是一门实践性很强的专业课程，为了使教学内容易于理解，加强对学生实践能力、分析问题和解决问题能力的培养，本书第三篇的第九章中除了保留原有的实验内容，考虑到电类专业学生学习本课程之前有的学习了MATLAB程序设计课程，增加了各章典型控制系统的计算机MATLAB仿真实验内容，以进一步提高对控制系统的动态和稳态的分析与理解。

全书第一、二篇为理论教学内容，按60学时编写（书中有些章节带“*”号，可以根据需要和学时安排选学），第九章实验建议安排20学时（学生有MATLAB基础的可适当选做一些MATLAB仿真实验），课程设计时间以2周为宜。

本书由史国生主编，并编写第七、八章；耿淑琴编写第一、二章；魏连荣编写第三、四章；周渊深编写第五、六、九章。全书由史国生统稿。

本书由东南大学赵家璧教授主审。本书在编写中参阅了部分兄弟院校的教材及国内外文献资料，对原作者表示感谢。

由于编者水平有限，修订时间比较仓促，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2015年1月

目 录

第一篇 直流调速系统和数字控制系统

第一章 单闭环直流调速系统	1	第三章 可逆直流调速系统	50
第一节 直流调速系统的概念	1	第一节 晶闸管-直流电动机可逆调速系统 构成及存在问题	50
第二节 转速负反馈有静差直流调速 系统	6	第二节 有环流可逆调速系统	57
第三节 转速负反馈无静差直流调速 系统	19	第三节 无环流可逆调速系统	60
第四节 其他反馈形式在调速系统中的 应用	23	第四节 直流脉宽调制调速系统	69
本章小结	28	本章小结	82
习题与思考题	29	习题与思考题	83
第二章 多环调速系统	31	第四章 计算机控制的直流调速系统	85
第一节 转速、电流双闭环调速系统	31	第一节 计算机数字控制的主要特点	85
第二节 转速超调的抑制—转速微分负 反馈	36	第二节 计算机数字控制双闭环直流调速 系统的硬件和软件	87
第三节 直流调速系统的工程设计方法	37	第三节 数字调速、数字滤波与数字 PI 调节器	90
第四节 双闭环调速系统的设计	42	第四节 基于连续域工程设计方法的计算机 控制直流调速系统	97
本章小结	47	本章小结	102
习题与思考题	48	习题与思考题	102

第二篇 交流调速系统

第五章 交流调压调速系统和串级调速 系统	103	第四节 正弦脉宽调制 (SPWM) 变频 器及其调速系统	143
第一节 概述	103	第五节 异步电动机矢量控制的变频调速 系统	149
第二节 交流异步电动机调压调速系统	104	本章小结	158
第三节 绕线式异步电动机串级调速 系统	112	习题与思考题	159
本章小结	123	第七章 无换向器电动机调速系统	160
习题与思考题	124	第一节 概述	160
第六章 交流异步电动机变频调速 系统	125	第二节 无换向器电动机的工作原理	161
第一节 变频调速的基本控制方式和机械 特性简介	125	第三节 无换向器电动机的换流	165
第二节 变频器的分类及特点	127	第四节 无换向器电动机的基本特性	168
第三节 交-直-交变频器主电路及其变频 调速系统	133	第五节 无换向器电动机调速系统	170
		本章小结	176
		习题与思考题	177

第三篇 交直流调速系统实验与课程设计

第八章 交直流调速系统实验和仿真 实验	178
--	-----

第一节	交直流调速系统实验概述·····	178			
第二节	交直流调速系统实验内容·····	180			
实验一	晶闸管直流调速系统参数和 环节特性的测定实验·····	180			
实验二	单闭环晶闸管直流调速 系统实验·····	184			
实验三	双闭环晶闸管不可逆直流 调速系统实验·····	187			
实验四	双闭环三相异步电动机 调压调速系统实验·····	190			
实验五	双闭环三相异步电动机 串级调速系统实验·····	192			
	实验六 串联二极管式电流型逆变器- 异步电动机变频调速系统 实验·····	195			
	第三节 交直流调速系统图形化仿真实验 内容·····	198			
	第九章 课程设计指导书 ·····	230			
	第一节 课程设计大纲·····	230			
	第二节 课程设计任务·····	231			
	第三节 课程设计资料·····	233			
附录	V-M 系统的数学模型及校正为典型 II 型系统的调节器类型 ·····	243			
1.1	直流电动机各环节的数学模型·····	243			
1.2	晶闸管触发和整流装置近似处理的 传递函数及动态结构图·····	243			
1.3	校正成典型 II 型系统的调节器类型·····	244			
参考文献	·····	245			

第一篇

直流调速系统和数字控制系统

第一章 单闭环直流调速系统

【内容提要】

本章概述了单闭环直流调速系统的基本概念；介绍了转速负反馈有静差、无静差直流调速系统的组成、工作原理、稳态参数计算和系统的动静态特性，并叙述了限流保护-电流截止负反馈的工作原理；同时也阐述了其他反馈形式在调速系统中的应用。

第一节 直流调速系统的基本概念

一、直流电动机的调速方法

直流电动机具有良好的启、制动性能，适宜于在宽调速范围内平滑调速，在轧钢机、矿井卷扬机、挖掘机、海洋钻机、大型起重机、金属切削机床、造纸机等电力拖动领域中得到了广泛的应用。近年来，交流调速系统发展很快，而直流调速系统在理论和实践上都比较成熟，并且从反馈闭环控制的角度来看，它又是交流调速系统的基础。所以首先应该掌握好直流调速系统。

直流他励电动机转速方程为：

$$n = \frac{E}{K_e \Phi} = \frac{U - IR}{K_e \Phi} \quad (1-1)$$

式中 U ——电枢电压；

I ——电枢电流；

E ——电枢电动势；

R ——电枢回路总电阻；

n ——转速，r/min；

Φ ——励磁磁通；

K_e ——电动机结构决定的电动势系数。

由直流他励电动机转速方程可见，有三种人为改变参量的调速方式，即调节电枢供电电压 U ；减弱励磁磁通 Φ ；改变电枢回路总电阻 R 。

(一) 调节电枢电压调速

从式(1-1)可知，当磁通 Φ 和电阻 R 一定时，改变电枢电压 U ，可以平滑地调节转速 n ，机械特性将上下平移。参见图 1-1。由于受电动机绝缘性能的影响，电枢电压的变

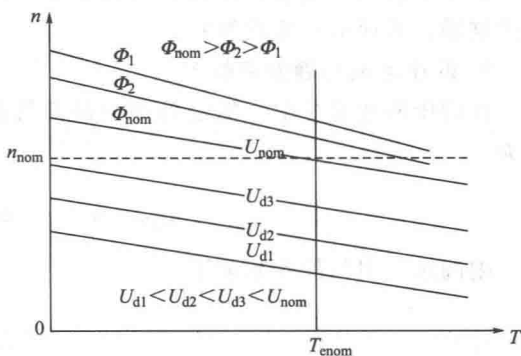


图 1-1 直流他励电动机调压调速和调磁调速时的机械特性

化只能向小于额定电压的方向变化，所以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的限制。因此，对于要求在一定范围内无级平滑调速的系统来说，以调节电枢电压方式为最好，调压调速是调速系统的主要调速方式。

(二) 减弱励磁磁通调速

由式(1-1)可知，当 U 和 R 不变时，减小励磁磁通 Φ （即改变直流他励电动机的励磁电流，考虑到直流电动机额定运行下磁路系统已接近饱和，励磁电流只能向小于额定磁通的方向变化），电动机转速将高于额定转速，其机械特性向上移动，参见图1-1。

减弱磁通调速，电动机最高转速受换向器和机械强度的限制，弱磁调速范围不大。在实际生产中，往往只是配合调压方案，在额定转速以上作小范围的升速。这样，调压与调磁相结合，可以扩大调速范围。

(三) 改变电枢回路电阻调速

改变电枢回路电阻调速，一般是在电枢回路中串接附加电阻，且只能进行有级调速。由于串接附加电阻调速损耗较大，电动机的机械特性较软，一般应用于少数小功率的调速场合。工程上常用的主要是前两种调速方法。

二、直流调速系统的性能指标

不同的生产机械其工艺对电气控制系统具有不同的调速性能指标，概括为静态和动态调速指标。

(一) 静态调速指标

1. 调速范围

电动机在额定负载下，运行的最高转速 n_{\max} 与最低转速 n_{\min} 之比称为调速范围，用 D 表示，即

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (1-2)$$

注意：对非弱磁调速系统，电动机的最高转速 n_{\max} 就是额定转速 n_N 。

2. 静差率

静差率是指电动机稳定运行时，当负载由理想空载增加至额定负载时，对应的转速降落 Δn_N 与理想空载转速 n_0 之比，用 s 表示，一般为百分数，即

$$s = \frac{\Delta n_N}{n_0} \times 100\% = \frac{n_0 - n_N}{n_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

静差率反映了电动机转速受负载变化的影响程度，与机械特性有关，静差率越小，机械特性越硬，转速的稳定性越好。

3. 调速范围与静差率的关系

在调压调速系统中，额定转速为最高转速，静差率为最低转速时的静差率，则最低转速为

$$n_{\min} = n_{0\min} - \Delta n_N = \frac{(1-s)\Delta n_N}{s} \quad (1-4)$$

则调速范围与静差率关系

$$D = \frac{sn_N}{(1-s)\Delta n_N} \quad (1-5)$$

可以看出，当一个系统的机械特性硬度一定时，对静差率要求越高，即静差率越小，允许的调速范围也越小。

(二) 动态调速指标

动态调速性能指标包括跟随性能指标和抗扰性能指标。

1. 跟随性能指标

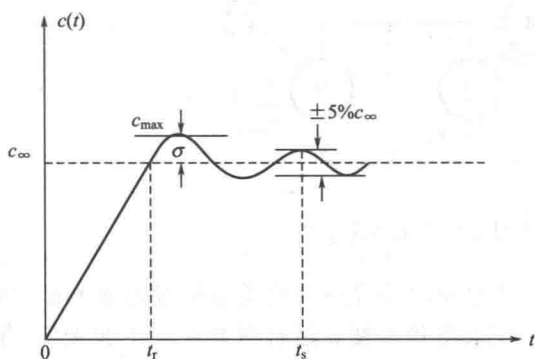
在给定信号（或称参考输入信号） $r(t)$ 作用下，系统输出量 $c(t)$ 的变化情况可用跟随性能指标来描述。通常以输出量的初始值为零、给定信号阶跃变化下的过渡过程作为典型的跟随过程，这时的动态响应又称为阶跃响应。一般希望在阶跃响应中，输出量 $c(t)$ 与其稳态值 c_∞ 的偏差越小越好，达到稳态值的速度越快越好。典型阶跃响应曲线和跟随性能指标关系如图 1-2(a) 所示，其跟随性能指标有如下几种。

(1) 上升时间 t_r 在典型的阶跃响应跟随过程中，输出量从零开始到第一次上升到稳态值 c_∞ 所经过的时间称为上升时间。它表示动态响应的快速性。

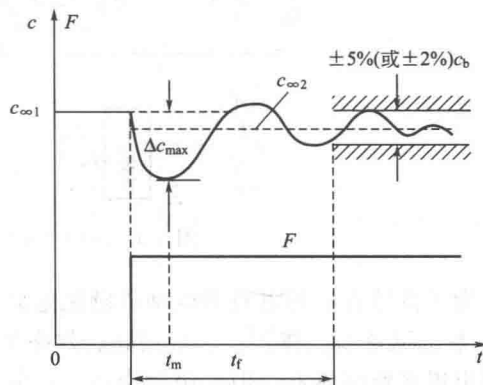
(2) 超调量 $\sigma\%$ 在典型的阶跃响应跟随过程中，输出量超出稳态值的最大偏离量与稳态值之比，用百分数表示，称为超调量。即

$$\sigma\% = \frac{c_{\max} - c_\infty}{c_\infty} \times 100\% \quad (1-6)$$

超调量反应系统的相对稳定性，超调量越小，则相对稳定性越好，即动态响应比较平稳。



(a) 典型阶跃响应曲线和跟随性能指标



(b) 突加扰动的动态过程和抗扰性能指标

图 1-2 跟随性能指标和抗扰性能指标

(3) 调节时间 t_s 一般在阶跃响曲线的稳态值附近，取 $\pm 5\%$ （当精度要求高时取 $\pm 2\%$ ）的范围作为允许误差带，以响应曲线达到并不再超出该误差带所需的最短时间，定义为调节时间，又称为过渡过程时间。它是衡量系统整个调节过程快慢的指标。

2. 动态抗扰性能指标

一般是在系统稳定运行中，突加负载的阶跃扰动后的动态过程作为典型的抗扰过程，与动态抗扰性能指标关系如图 1-2(b) 所示。

(1) 动态降落 $\Delta c_{\max}\%$ 系统稳定运行时，突加一定数值的扰动后引起转速的最大降落值称为动态降落 $\Delta c_{\max}\%$ 。一般用 Δc_{\max} 占输出量原稳态值 $c_{\infty 1}$ 的百分数表示，即 $\Delta c_{\max}/c_{\infty 1} \times 100\%$ 。输出量的动态降落后逐渐恢复，达到新的稳态值 $c_{\infty 2}$ ，它与原稳态值之差 $(c_{\infty 1} - c_{\infty 2})$ 就是系统在扰动下的稳态降落。动态降落一般都大于稳态降落（即静差）。调速系统突加额定负载扰动时的动态降落称为动态速降 $\Delta n_{\max}\%$ 。

(2) 恢复时间 t_f 从阶跃扰动作用开始，到被调量进入离稳态值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 的区域

内为止所需要的时间，定义为恢复时间，如图 1-2(b)。图中 c_b 称作抗扰指标中输出量的基准值，视具体情况选定。

(3) 振荡次数 N 在恢复时间内被调量在稳态值上下摆动的次数，它代表系统稳定性和抗扰能力的强弱。

三、直流调速系统的供电方式

直流调速系统若采用调压调速，必须有一个平滑可调的直流电枢电源。常用的可控直流电枢电源有以下三种：旋转变流机组、静止可控整流器和直流斩波器。

(一) 旋转变流机组

20 世纪 50 年代前，工业生产中的直流调速系统，几乎全都采用旋转式变流机组供电。参见图 1-3。由交流电动机 M （异步电动机或同步电动机）拖动直流发电机 G 实现变流，发电机给需要调速的直流电动机 M 供电。调节发电机的励磁电流 i_f 可改变其输出电压 U ，从而调节直流电动机的转速 n 。这样的调速系统简称为 G-M 系统。如果改变 i_f 的方向，则 U 的极性和 n 的转向都跟着改变，所以 G-M 系统的可逆运行是很容易实现的。

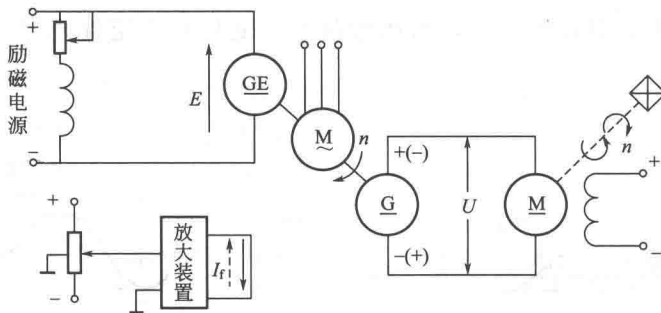


图 1-3 旋转变流机组供电的直流调速系统

为了供给直流发电机和电动机励磁电流，通常专门设置一台直流励磁发电机 GE。因此 G-M 系统设备多、体积大、费用高、效率低、安装维护不便、运行有噪声。20 世纪 50 年代开始出现水银整流器，但水银污染环境，危害人身健康。

(二) 静止可控整流器

从 20 世纪 60 年代起，出现了晶闸管整流装置，它具有效率高、体积小、成本低、无噪声等优点。在控制快速性方面，变流机组是秒级，而晶闸管整流器是毫秒级，这将会大大提高系统的动态性能。晶闸管-直流调速系统，简称 V-M 系统。图 1-4 是最简单的 V-M 系统。电动机 M 是被控对象，转速 n 是被调量，即输出量。晶闸管可控整流器可以是单相、三相或更多相数，半波、全波、半控、全控等类型，通过调节触发电路的移相电压，便可改变整流电压 U_d ，实现平滑调速。

晶闸管整流器也有其缺点，如晶闸管的单向导电性，给系统的可逆运行造成困难。晶闸

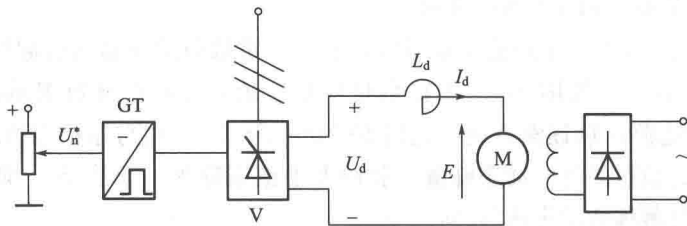


图 1-4 晶闸管-直流调速系统

管元件对过电压、过电流以及过高的 d_u/d_t 和 d_i/d_t 都很敏感,因此晶闸管整流电路设有许多保护环节。当系统处在深调速状态时,晶闸管的导通角很小,使得系统的功率因数很低,并产生较大的谐波电流,引起电网电压畸变,殃及附近的用电设备。若其设备容量在电网中所占比重较大,必须增设无功补偿和谐波滤波装置。

应该说明,晶闸管元件的额定电流是用最大通态平均电流来度量的,电动机的转矩是和整流电流的平均值成正比的。而晶闸管元件和电动机的发热,却和整流电流的平方成正比,亦即与整流电流有效值的平方成正比。因此,当电流断续时,导通角小,同样的平均电流与它对应的有效值要大得多,发热也严重得多。这个特点是在选择晶闸管元件、电机容量、整流电路形式和电抗器必须注意的。

(三) 直流斩波器

在铁路电力机车、城市电车和地铁电机等电力牵引设备上,常采用直流串励或复励电动机,由恒压直流电源供电。晶闸管也可用来控制直流电压,即所谓的直流斩波器,也称直流调压器。参见图 1-5(a)。

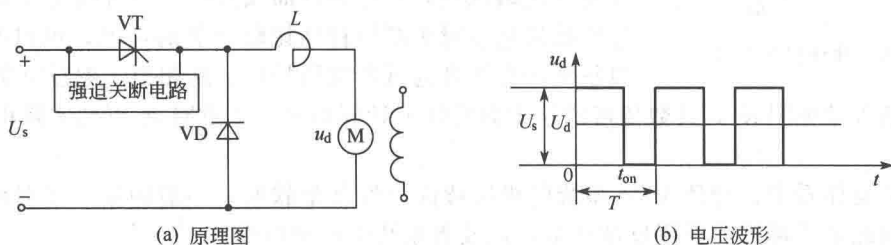


图 1-5 斩波器-电动机系统的原理图和电压波形

在直流斩波器中,晶闸管 VT 工作于开关状态。当 VT 被触发导通时,直流电源电压 U_s 加到电动机上,当 VT 强迫关断时,直流电源与电动机断开,电动机经二极管 VD 续流,两端电压接近于零。如此反复,得电枢端电压 u_d 波形如图 1-5(b)。直流斩波器的平均电压 U_d 可以通过改变晶闸管的导通和关断时间来调节,从而实现转速的调节。若要关断普通晶闸管,必须在阴、阳极间施加反向电压,这就需要附加一种强迫关断电路。受晶闸管的关断时间限制,由普通晶闸管构成的斩波器的开关频率只有 $100 \sim 200\text{Hz}$,因此其输出电流脉动较大,调速范围有限。

20 世纪 70 年代以来,随着可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)、电力场效应管(P-MOSFET)、绝缘栅极双极型晶体管(IGBT)等全控式电力电子器件的迅速发展,由它们构成的斩波器工作频率不断提高。采用全控型器件实行开关控制时,大多采用脉宽调制(PWM)变换器供电的直流调速系统。与晶闸管可控装置相比,PWM 系统具有开关频率高、低速运行稳定、动静态性能优良、效率高等一系列优点。但受到器件容量的限制,直流 PWM 系统目前只限于中、小容量系统。

四、开环 V-M 系统的机械特性

由“电力电子技术”课程知道,当电流连续时 V-M 开环系统机械特性方程式为

$$n = \frac{1}{C_e} (U_{d0} - I_d R) = \frac{1}{C_e} \left(\frac{m}{\pi} E_m \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha - I_d R \right) = n_0 - \Delta n \quad (1-7)$$

式中, $C_e = K_e \Phi$ 为电机在额定磁通下的电动势转速比; n_0 和 Δn 分别为开环调速系统的理想空载转速和稳态速降。

由式(1-7)和图 1-4 可以看出,调节转速给定电压 U_n^* , 即改变了晶闸管触发电路的移

相角 α ，从而调节了晶闸管装置的空载整流电压 U_{d0} ，也就调节了理想空载转速 n_0 。若给定电压 U_n^* 与 U_{d0} 是线性关系，就可以根据工艺要求预先给定出所需的 U_n^* 值。其机械特性如图 1-6 实线部分。由式(1-7)可知，当电动机轴上加机械负载时，电枢回路就产生相应的电流 I_d ，此时即产生 $\Delta n = I_d R / C_e$ 的转速降。 Δn 的大小反映了机械特性的硬度， Δn 越小，硬度越大。显然，由于系统开环运行， Δn 的大小完全取决于电枢回路电阻 R 及所加的负载大小。

另外，由于晶闸管整流装置的输出电压是脉动的，相应的负载电流也是脉动的。当电动机负载较轻或主回路电感量不足的情况下，就造成了电流断续。这时，随着负载电流的减小，反电势急剧升高。使理想空载转速比图 1-6 中的 n_0 高得多，如图 1-6 中虚线所示。由图可见，当电流连续时，特性较硬而且呈线性；电流断续时，特性较软而且呈显著的非线性。一般当主回路电感量足够大时，电机又有一定的空载电流时，近似认为电动机工作在电流连续段内，并把特性曲线与纵轴的直线交点 n_0 作为理想空载转速。对于断续特性比较显著的情况，可以改用另一段较陡的直线来逼近断续段特性。这相当于把总电阻 R 换成

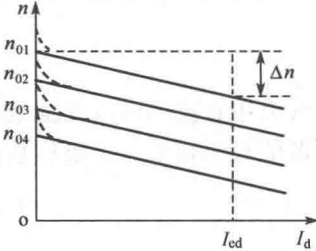


图 1-6 开环机械特性

一个更大的等效电阻 R' ，其数值可以从实测特性上计算出来。严重时 R' 可达实际电阻 R 的几十倍。

这样从总体看来，开环 V-M 系统的机械特性仍然是很软的，一般满足不了对调速系统的要求，因此通常都需要设置反馈环节，以改善系统的机械特性。

第二节 转速负反馈有静差直流调速系统

一、系统的组成及静特性

在自动调速系统中，无论怎样调节， Δn 都无法消除的系统，称为有静差系统。凡是通过适当调节可以使 $\Delta n = 0$ 的系统，称为无静差系统。研究 Δn 的大小对生产机械具有十分重要的意义，因此在调速系统设计中，首先要设法减小 Δn ，甚至为零。根据反馈控制原理，要维持某一物理量基本不变，就应该引入该物理量的负反馈。因此可以引入被控量转速的负反馈，构成转速闭环控制系统。由于系统只有一个转速反馈环，故称为单闭环调速系统。

(一) 系统的组成

为了分析的方便，对系统中的电压、电动势、电流均使用大写字母，在动态分析时，就认为是瞬时值；在稳态分析时，就认为是平均值。由图 1-7 可见，直流电动机有两个独立的电路：一个是电枢回路，另一个是励磁回路。直流电动机各物理量间的基本关系式如下：

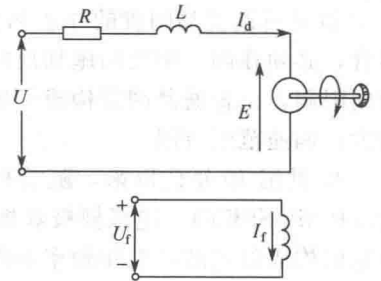


图 1-7 直流电动机电路图

$$U = I_d R + L \frac{dI_d}{dt} + E \quad (1-8)$$

$$T_e = K_m \Phi I_d = C_m I_d \quad (1-9)$$

$$T_e - T_L = J_G \frac{dn}{dt} \left(I_d - I_{dL} = \frac{J_G}{C_m} \frac{dn}{dt} \right) \quad (1-10)$$

$$E = K_e \Phi n = C_e n \quad (1-11)$$

式中 U, I_d ——电动机电枢瞬时电压、电流；

I_{dL} ——负载电流；

R ——电枢电阻；

L ——电枢电感；

T_e ——电磁转矩；

K_m ——转矩常量；

T_L ——负载转矩；

C_m ——电动机额定励磁下的转矩电流比， $N \cdot m/A$ ， $C_m = \frac{30}{\pi} C_e$ ；

C_e ——电动机额定励磁下的电动势转速比， $V \cdot \text{min}/r$ ；

$J_G = GD^2/375$ 称为转速惯量；

GD^2 ——电力拖动运动部分折算到电动机轴上的飞轮惯量， $N \cdot m^2$ 。

由以上公式可知，在平衡状态，电动机的电磁转矩 T_e 的大小主要取决于负载转矩 T_L ，即电枢电流 I_d 的大小，即取决于负载。可见直流调速系统实质上是控制电动机的转矩来完成的。当电动机负载转矩 T_L 发生变化时，直流电动机内部将会有有一个转速自动调节过程以达到新的平衡。若以 T_L 增大为例说明其调节过程，如图 1-8 所示。

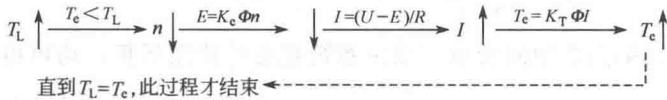


图 1-8 当负载转矩增加时，电动机内部转速调节过程

由于系统的被调量是转速，在电动机轴上安装一台测速发电机 TG，从而引出与转速成正比的负反馈电压 U_n ， U_n 与转速给定电压 U_n^* 比较后，得到偏差电压 ΔU_n ，经放大器 A 放大后产生触发器 GT 的控制电压 U_{ct} ，用以控制电动机的转速。这就组成了转速反馈控制的调速系统，其原理框图参见图 1-9。

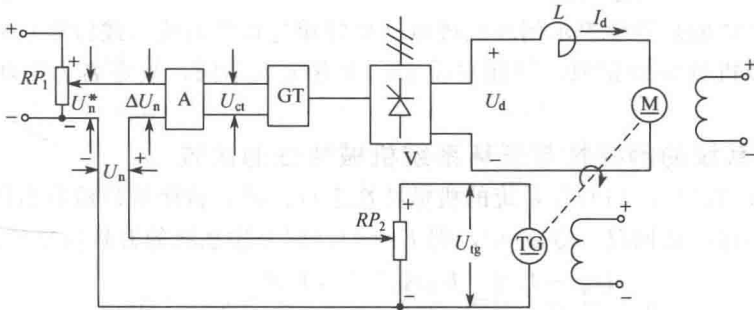


图 1-9 采用转速负反馈的闭环调速系统

(二) 系统的静特性

系统中各环节的稳态输入输出关系如下：

电压比较环节 $\Delta U_n = U_n^* - U_n$

放大器输出 $U_{ct} = K_P \Delta U_n$

晶闸管整流器及触发装置 $U_{d0} = K_s U_{ct}$

V-M 系统开环机械特性 $n = \frac{E}{C_e} = \frac{U_{d0} - I_d R}{C_e}$

转速检测环节 $U_n = \alpha_2 U_{tg} = \alpha_2 C_{etg} n = \alpha n$

式中 K_p ——放大器的电压放大系数；
 K_s ——晶闸管整流器及触发装置的电压放大系数；
 α_2 ——反馈电位器分压比；
 C_{etg} ——测速发电机额定磁通下的电动势速比；
 $\alpha = \alpha_2 C_{etg}$ ——转速反馈系数， $V \cdot \text{min}/r$ 。

其余各量参见图 1-9。

根据以上各环节的稳态输入输出关系，可画出转速负反馈单闭环调速系统的稳态结构图，参见图 1-10。图中各方块内的符号代表该环节的放大系数，也称传递函数。

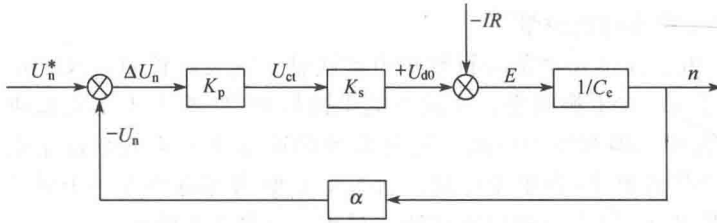


图 1-10 转速负反馈单闭环调速系统稳态结构图

由以上各关系式中消去中间变量，或由系统稳态结构图运算，均可得到系统的静特性方程式

$$n = \frac{K_p K_s U_n^* - I_d R}{C_e (1 + K_p K_s \alpha / C_e)} = \frac{K_p K_s U_n^*}{C_e (1 + K)} - \frac{R I_d}{C_e (1 + K)} = n_{ocl} - \Delta n_{cl} \quad (1-12)$$

式中 K ——闭环系统的开环放大系数， $K = K_p K_s \alpha / C_e$ ，它是系统中各环节放大系数的乘积；

n_{ocl} ——闭环系统的理想空载转速；

Δn_{cl} ——闭环系统的稳态速降。

闭环调速系统的静特性表示闭环系统电动机转速与负载电流（或转矩）的稳态关系，在形式上它与开环机械特性相似，但在本质上二者有很大不同，故定名为闭环系统的“静特性”，以示区别。

二、闭环系统的静特性与开环系统机械特性的比较

将闭环系统的静特性与开环系统的机械特性进行比较，就能清楚地看出闭环控制的优越性。如果断开转速反馈回路（令 $\alpha = 0$ ，则 $K = 0$ ），则上述系统的开环机械特性为：

$$n = \frac{U_{d0} - I_d R}{C_e} = \frac{K_p K_s U_n^*}{C_e} - \frac{I_d R}{C_e} = n_{oop} - \Delta n_{op} \quad (1-13)$$

式中， n_{oop} 和 Δn_{op} 分别为开环系统的理想空载转速和稳态速降。比较式(1-12)和式(1-13)可以得出如下结论。

(1) 闭环系统静特性比开环系统机械特性硬得多。

在同样的负载下，两者的稳态速降分别为：

$$\Delta n_{op} = \frac{R I_d}{C_e}$$

$$\Delta n_{cl} = \frac{R I_d}{C_e (1 + K)}$$

它们的关系是
$$\Delta n_{cl} = \frac{\Delta n_{op}}{1+K} \tag{1-14}$$

显然，当 K 值较大时， Δn_{cl} 比 Δn_{op} 要小得多，也就是说闭环系统的静特性比开环系统的机械特性硬得多。

(2) 闭环系统的静差率比开环系统的静差率小得多。

闭环系统和开环系统的静差率分别为

$$s_{cl} = \frac{\Delta n_{cl}}{n_{0cl}} \quad \text{和} \quad s_{op} = \frac{\Delta n_{op}}{n_{0op}}$$

当 $n_{0cl} = n_{0op}$ 时，则有

$$s_{cl} = s_{op} / (1+K) \tag{1-15}$$

(3) 当要求的静差率一定时，闭环系统的调速范围可以大大提高。

如果电动机的最高转速都是 n_{nom} ，且对最低转速的静差率要求相同，则

开环时
$$D_{op} = \frac{n_{nom}s}{\Delta n_{op}(1-s)}$$

闭环时
$$D_{cl} = \frac{n_{nom}s}{\Delta n_{cl}(1-s)}$$

所以
$$D_{cl} = (1+K)D_{op} \tag{1-16}$$

(4) 要获得上述三条的优点，闭环系统必须设置放大器。

由以上分析可以看出，上述三条优越性是建立在 K 值足够大的基础上的。由系统的开环放大系数 $K = K_p K_s \alpha / C_e$ 表达式可看出，若要增大 K 值，只能增大 K_p 和 α 值，因此必须设置放大器。在开环系统中， U_n^* 是直接作为 U_{ct} 来控制的，因而不需设置放大器；参见图 1-4。而在闭环系统中，引入转速负反馈电压 U_n 后，若要减小 Δn_{cl} ， $\Delta U_n = U_n^* - U_n$ ，就必须压得很低，所以必须设置放大器，才能获得足够的控制电压 U_{ct} 。参见图 1-9。

综上所述，可得出这样的结论：闭环系统可以获得比开环系统硬得多的静特性，且闭环系统的开环放大系数越大，静特性就越硬，在保证一定静差率要求下其调速范围越大，但必须增设转速检测与反馈环节和放大器。

然而，在开环 V-M 系统中， Δn 的大小完全取决于电枢回路电阻 R 及所加的负载大小。闭环系统能减少稳态速降，但不能减小电阻。那么降低稳态速降的实质是什么呢？

在闭环系统中，当电动机的转速 n 由于某种原因（如机械负载转矩的增加）而下降时，系统将同时存在两个调节过程：一个是电动机内部的自动调节过程；另一个则是由于转速负反馈环节作用而使控制电路产生相应变化的自动调节过程。参见图 1-11。

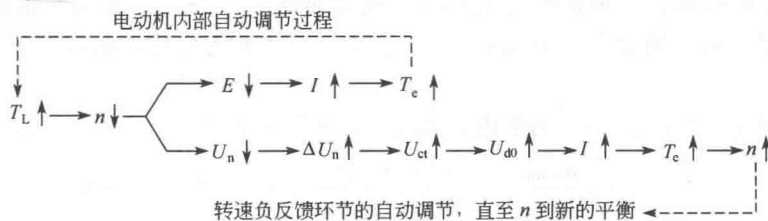


图 1-11 具有转速负反馈的直流调速系统的自动调节过程

由上述调节过程可以看出，电动机内部的调节，主要是通过电动机反电动势 E 下降，使电流增加；而转速负反馈环节，则主要通过反馈闭环控制系统被调量的偏差进行控制的。通过转速负反馈电压 U_n 下降，使偏差电压 ΔU_n 增加，经过放大后 U_{ct} 增大，整流装置输出

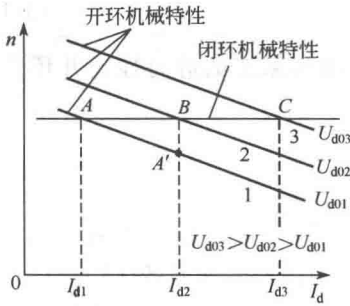


图 1-12 闭环系统静特性与开环系统机械特性的关系

的电压 U_{d0} 上升，电枢电流增加。从而电磁转矩增加，转速回升。直至 $T_L = T_e$ 调节过程才结束。可以看出，闭环调速系统可以大大减少转速降落。

从机械特性上看，参见图 1-12。当负载电流由 I_{d1} 增大到 I_{d2} 时，若为开环系统，仅依靠电动机内部的调节作用，转速将由 n_A 降落到 n'_A （设此时整流输出的电压平均值为 U_{d01} ）。当设置了转速负反馈环节，它将使整流输出电压由 U_{d01} 上升到 U_{d02} ，电动机由机械特性曲线 1 的 A 点过渡到曲线 2 的 B 点上稳定运行。这样，每增加（或减少）一点负载，整流电压就相应的提高（或降低）一点，因而就过渡到另一条机械特性曲线上。闭环系统的

静特性就是在许多开环机械特性上各取一个相应的工作点（如图中的 A、B、C 点），再由这些点集合而成的，因此，闭环系统的静特性比较硬。可见，闭环系统能随负载的变化而自动调节整流电压，从而调节转速。

【例 1-1】 龙门刨床工作台采用 Z₂-93 型直流电动机： $P_{nom} = 60\text{kW}$ 、 $U_{nom} = 220\text{V}$ 、 $I_{nom} = 305\text{A}$ 、 $n_{nom} = 1000\text{r/min}$ 、 $R_a = 0.05\Omega$ 、 $K_s = 30$ ，晶闸管整流器的内阻 $R_{rec} = 0.13\Omega$ ，要求 $D = 20$ ， $s \leq 5\%$ ，问若采用开环 V-M 系统能否满足要求？若采用 $\alpha = 0.015\text{V} \cdot \text{min/r}$ 转速负反馈闭环系统，问放大器的放大系数为多大时才能满足要求？

解：开环系统在额定负载下的转速降落为 $\Delta n_{nom} = \frac{I_{nom}R}{C_e}$

C_e 可由电动机铭牌额定数据求出

$$C_e = \frac{U_{nom} - I_{nom}R_a}{n_{nom}} = \frac{220 - 305 \times 0.05}{1000} = 0.2\text{V} \cdot \text{min/r}$$

所以

$$\Delta n_{nom} = \frac{I_{nom}R}{C_e} = \frac{305 \times (0.05 + 0.13)}{0.2} = 275\text{r/min}$$

高速时静差率

$$s_1 = \frac{\Delta n_{nom}}{n_{nom} + \Delta n_{nom}} = \frac{275}{1000 + 275} = 0.216 = 21.6\%$$

最低速为

$$n_{min} = \frac{n_{nom}}{D} = \frac{1000}{20} = 50$$

此时的静差率

$$s_2 = \frac{\Delta n_{nom}}{n_{min} + \Delta n_{nom}} = \frac{275}{50 + 275} = 0.85 = 85\%$$

由以上计算可以看出，低速时的 s_2 远大于高速时的 s_1 ，并且二者均不能满足小于 5% 的要求，而开环系统本身的稳态速降 $\Delta n_{nom} = I_{nom}R/C_e$ 又不能变化，所以开环系统不能满足要求。

如果要满足 $D = 20$ ， $s \leq 5\%$ 的要求， Δn_{nom} 应该是多少呢？

$$\Delta n_{nom} = \frac{n_{nom}s}{D(1-s)} = \frac{1000 \times 0.05}{20(1-0.05)}\text{r/min} = 2.63\text{r/min}$$

很明显，只有把额定稳态速降从开环系统的 $\Delta n_{op} = 275\text{r/min}$ 降低到 $\Delta n_{cl} = 2.63\text{r/min}$ 以下，才能满足要求。若采用 $\alpha = 0.015\text{V} \cdot \text{min/r}$ 转速负反馈闭环系统，放大器的放大系数由式(1-14) 可得

$$K = \frac{\Delta n_{op}}{\Delta n_{cl}} - 1 = \frac{275}{2.63} - 1 = 103.6$$

