



教育部高职高专规划教材

交直流调速系统

第 二 版

● 史国生 主编
赵家璧 主审



化学工业出版社
教材出版中心

教育部高职高专规划教材

交直流调速系统

第 二 版

史国生 主编
赵家璧 主审



化学工业出版社
教材出版中心

· 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。第三篇为实践教学内容。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。

本教材(第二版)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;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. —2版. —北京:化学工业出版社, 2006.3

教育部高职高专规划教材

ISBN 7-5025-8465-X

I. 交… II. 史… III. ①直流电机-调速-高等学校: 技术学院-教材②交流电机-调速-高等学校: 技术学院-教材
IV. ①TM330.12②TM340.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 025637 号

教育部高职高专规划教材

交直流调速系统

第二版

史国生 主编

赵家璧 主审

责任编辑:张建茹 王丽娜

文字编辑:廉 静

责任校对:战河红

封面设计:关 飞

*

化学工业出版社
教材出版中心 出版发行

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市振南印刷有限责任公司印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 16½ 字数 430 千字

2006 年 6 月第 2 版 2006 年 6 月北京第 5 次印刷

ISBN 7-5025-8465-X

定 价:29.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

出版说明

高职高专教材建设工作是整个高职高专教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、有关学校和出版社的共同努力下,各地先后出版了一些高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育专门课课程基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。这500种教材中,专门课(专业基础课、专业理论与专业能力课)教材将占很高的比例。专门课教材建设在很大程度上影响着高职高专教学质量。专门课教材是按照《培养规格》的要求,在对有关专业的人才培养模式和教学内容体系改革进行充分调查研究和论证的基础上,充分汲取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的。这套教材充分体现了高等职业教育的应用特色和能力本位,调整了新世纪人才必须具备的文化基础和技术基础,突出了人才的创新素质和创新能力的培养。在有关课程开发委员会组织下,专门课教材建设得到了举办高职高专教育的广大院校的积极支持。我们计划先用2~3年的时间,在继承原有高职高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验,解决新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专规划教材,从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

本套教材适用于各级各类举办高职高专教育的院校使用。希望各用书学校积极选用这批经过系统论证、严格审查、正式出版的规划教材,并组织本校教师以对事业的责任感对教材教学开展研究工作,不断推动规划教材建设工作的发展与提高。

教育部高等教育司

2001年4月3日

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	第一节 晶闸管-直流电动机可逆调速系统	
第一节 直流调速系统的基本概念	1	构成及存在问题	54
第二节 转速负反馈有静差直流调速系统	4	第二节 有环流可逆调速系统	61
第三节 转速负反馈无静差直流调速系统	18	第三节 无环流可逆调速系统	67
第四节 其他反馈形式在调速系统中的		第四节 直流脉宽调制调速系统	75
应用	22	本章小结	88
本章小结	28	习题与思考题	89
习题与思考题	28	第四章 计算机控制的直流调速系统	90
第二章 多环调速系统	31	第一节 计算机数字控制的主要特点	90
第一节 转速、电流双闭环调速系统	31	第二节 计算机数字控制双闭环直流调速	
第二节 转速超调的抑制——转速微分		系统的硬件和软件	92
负反馈	36	第三节 数字测速、数字滤波与数字 PI	
第三节 直流调速系统的工程设计方法	37	调节器	95
第四节 双闭环调速系统的设计	46	第四节 基于连续域工程设计方法的计算机	
本章小结	51	控制直流调速系统	101
习题与思考题	52	本章小结	108
第三章 可逆直流调速系统	54	习题与思考题	108

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		本章小结	169
系统	110	习题与思考题	170
第一节 概述	110	第七章 无换向器电动机调速系统	171
第二节 交流异步电动机调压调速系统	111	第一节 概述	171
第三节 绕线式异步电动机串级调速		第二节 无换向器电动机的工作原理	172
系统	120	第三节 无换向器电动机的换流	176
本章小结	132	第四节 无换向器电动机的基本特性	179
习题与思考题	132	第五节 无换向器电动机调速系统	181
第六章 交流异步电动机变频调速		本章小结	187
系统	134	习题与思考题	188
第一节 变频调速的基本控制方式和机械		第八章 开关磁阻电动机调速系统	189
特性	134	第一节 概述	189
第二节 变频器的分类及特点	138	第二节 开关磁阻电动机	196
第三节 交-直-交变频器主电路及其变频		第三节 控制方式	205
调速系统	142	第四节 控制器	213
第四节 正弦波脉宽调制变频器及其调速		第五节 开关磁阻电动机调速系统实例	219
系统	154	本章小结	224
第五节 异步电动机矢量控制的变频调速		习题与思考题	225
系统	161		

第三篇 交直流调速系统实验与课程设计

第九章 交直流调速系统实验	226	系统实验	236
第一节 交直流调速系统实验概述	226	实验五 双闭环三相异步电动机串级调速	
第二节 交直流调速系统实验内容	228	系统实验	238
实验一 晶闸管直流调速系统参数和环节		实验六 串联二极管式电流型逆变器-异步	
特性的测定实验	228	电动机变频调速系统实验	241
实验二 单闭环晶闸管直流调速系统		第十章 课程设计指导书	244
实验	231	第一节 课程设计大纲	244
实验三 双闭环晶闸管不可逆直流调速系		第二节 课程设计任务	245
统实验	234	第三节 课程设计资料	247
实验四 双闭环三相异步电动机调压调速			
参考文献			256

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

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) 调节电枢供电电压调速

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

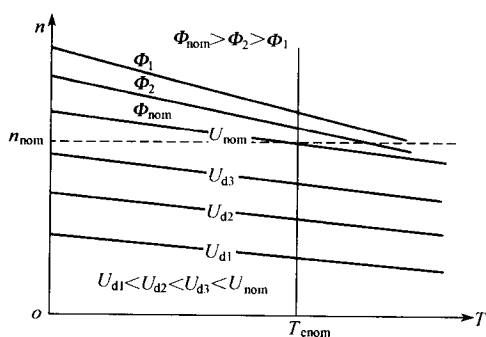


图 1-1 直流他励电动机调压调速和调磁调速时的机械特性

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, 损耗较大, 且只能进行有级调速, 电动机的机械特性较软, 一般应用于少数小功率场合。工程上常用的主要是前两种调速方法。

二、直流调速系统的供电方式

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。

(1) 旋转变流机组 用交流电动机和直流发电机组成机组, 以获得可调的直流电压。

(2) 静止可控整流器 用静止的可控整流器, 如晶闸管可控整流器, 以获得可调的直流电压。

(3) 直流斩波器和脉宽调制变换器 用恒定直流电源或不可控整流电源供电, 利用直流斩波器或脉宽调制变换器产生可变的平均电压。

(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 1-2。由交流电动机 (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。

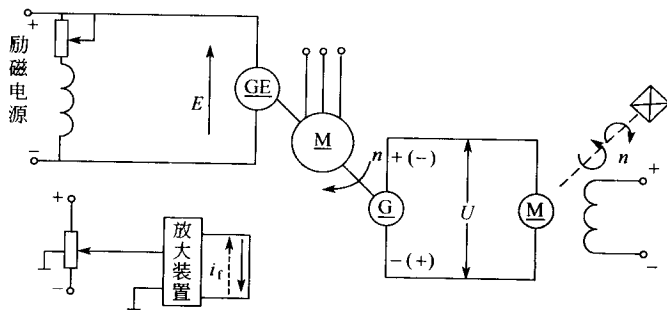


图 1-2 旋转变流机组供电的直流调速系统

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, 危害人类身体健康。

(二) 静止可控整流器

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, 其中, 晶闸管可控整流器的功率放大倍数在 10^4 以上, 其门极电流可以直接用晶体三极管来控制。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 1-3 是最简单的 V-M 系统。电动机 M 是被控对象, 转速 n 是被测量, 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。

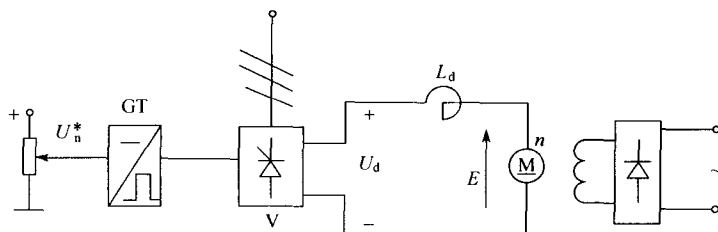


图 1-3 晶闸管-直流调速系统

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。晶闸管元件对过电压、过电流以及过高的 du/dt 和 di/dt 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例较大, 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、电动机容量、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、城市电车和地铁电动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 1-4 (a)。

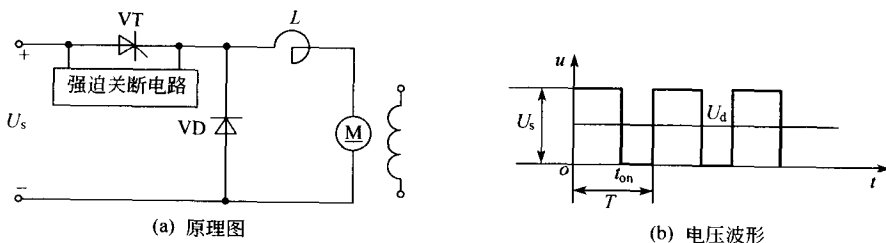


图 1-4 斩波器-电动机系统的原理图和电压波形

在直流斩波器中, 晶闸管工作于开关状态。当 VT 被触发导通时, 直流电源电压 U 加到电动机上, 当 VT 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, 得电枢端电压波形如图 1-4 (b)。直流斩波器的平均电压可以通过改

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 100~200Hz,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可达 1~4kHz,甚至达 20kHz。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。

三、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

$$n = \frac{1}{C_e} (U_{d0} - I_d R) = \frac{1}{C_e} \left(\frac{m}{\pi} E_m \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha - I_d R \right) = n_0 - \Delta n \quad (1-2)$$

式中 C_e ——电动机在额定磁通下的电动势转速比, $C_e = K_e \Phi$;

n_0 、 Δn ——开环调速系统的理想空载转速和稳态速降。

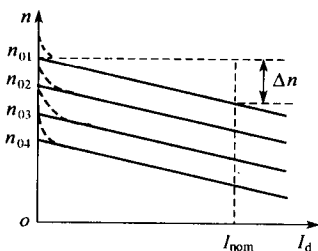


图 1-5 开环机械特性

由式 (1-2) 和图 1-3 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 U_n^* 值, 以便确定所需的转速值, 所以常常称 U_n^* 为转速给定值。其机械特性如图 1-5 实线部分。由式 (1-2) 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 1-5 中的 n_0 高得多, 如图 1-5 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, 电动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。

1. 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 1-6 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

$$U = I_d R + L \frac{dI_d}{dt} + E \quad (1-3)$$

$$T_e = K_m \Phi I_d = C_m I_d \quad (1-4)$$

$$T_e - T_L = J_G \frac{dn}{dt} \left(I_d - I_{dL} = \frac{J_G}{C_m} \times \frac{dn}{dt} \right) \quad (1-5)$$

$$E = K_e \Phi n = C_e n \quad (1-6)$$

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, $V \cdot \min/r$;

J_G ——转速惯量, $J_G = GD^2/375$;

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 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 1-7 所示。

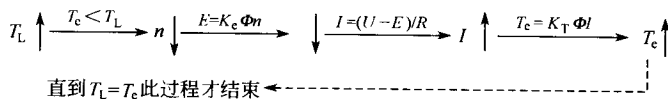


图 1-7 当负载转矩增加时,电动机内部转速调节过程

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 1-8。

2. 系统的静特性

系统中各环节的稳态输入输出关系如下

$$\text{电压比较环节} \quad \Delta U_n = U_n^* - U_n$$

$$\text{放大器} \quad U_{ct} = K_p \Delta U_n$$

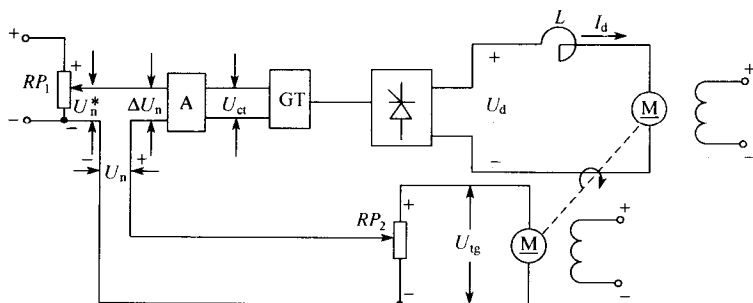


图 1-8 采用转速负反馈的闭环调速系统

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；

α ——转速反馈系数， $V \cdot \min/r$ ， $\alpha = \alpha_2 C_{etg}$ 。

其余各量参见图 1-8。

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 1-9。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。

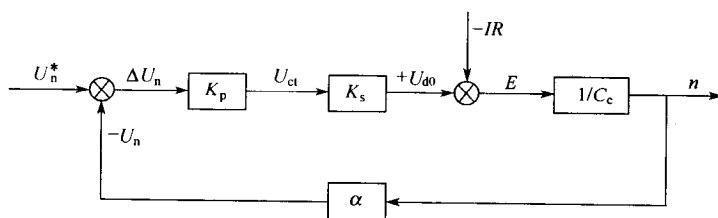


图 1-9 转速负反馈单闭环调速系统稳态结构图

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

$$n = \frac{K_p K_s U_n^* - I_d R}{C_e (1 + K_p K_s \alpha / C_e)} = \frac{K_p K_s U_n^*}{C_e (1 + K)} - \frac{R I_d}{C_e (1 + K)} = n_{0cl} - \Delta n_{cl} \quad (1-7)$$

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

n_{0cl} ——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

$$n = \frac{U_{d0} - I_d R}{C_e} = \frac{K_p K_s U_n^*}{C_e} - \frac{I_d R}{C_e} = n_{0op} - \Delta n_{op} \quad (1-8)$$

式中, n_{0op} 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(1-7)和式(1-8)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

$$\Delta n_{cl} = \frac{\Delta n_{op}}{1+K} \quad (1-9)$$

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

$$s_{cl} = s_{op} / (1+K) \quad (1-10)$$

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

$$D_{cl} = (1+K) D_{op} \quad (1-11)$$

④ 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。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^* 直接作为 U_{cl} 来控制,因而不需设置放大器;参见图1-3。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_{cl} 。参见图1-8。

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。闭环系统能减小稳态速降,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1-10。

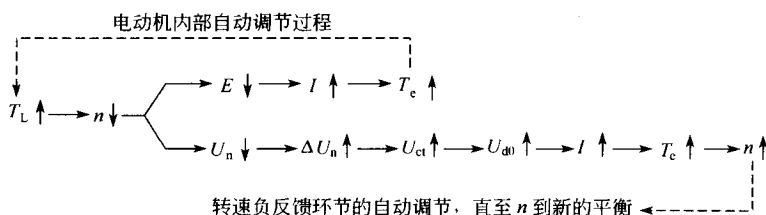


图 1-10 具有转速负反馈的直流调速系统的自动调节过程

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。

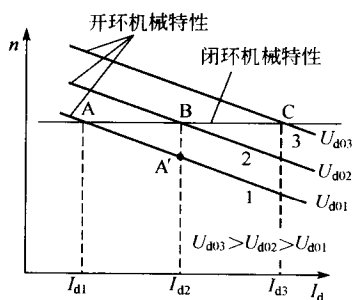


图 1-11 闭环系统静特性与开环系统机械特性的关系

从机械特性上看，参见图 1-11。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_B （设此时整流输出的电压平均值为 U_{d01} ）。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，整流电压就相应地提高（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： $P_{\text{nom}} = 60\text{kW}$ 、 $U_{\text{nom}} = 220\text{V}$ 、 $I_{\text{nom}} = 305\text{A}$ 、 $n_{\text{nom}} = 1000\text{r/min}$ 、 $R_a = 0.05\Omega$ 、 $K_s = 30$ ，晶闸管整流器的内阻 $R_{\text{rec}} = 0.13\Omega$ ，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

$$\Delta n_{\text{nom}} = \frac{I_{\text{nom}} R}{C_e}$$

C_e 可由电动机铭牌额定数据求出

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

所以

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

$$\text{高速时静差率 } s_1 = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{n_{\text{nom}} + \Delta n_{\text{nom}}} = \frac{275}{1000 + 275} = 0.216 = 21.6\%$$

$$\text{最低速为 } n_{\text{min}} = \frac{n_{\text{nom}}}{D} = \frac{1000}{20} = 50$$

$$\text{此时的静差率 } s_2 = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{n_{\text{min}} + \Delta n_{\text{nom}}} = \frac{275}{50 + 275} = 0.85 = 85\%$$

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 $\Delta n_{\text{nom}} = I_{\text{nom}} R / C_e$ 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?

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

很明显, 只有把额定稳态速降从开环系统的 $\Delta n_{\text{op}} = 275 \text{ r/min}$ 降低到 $\Delta n_{\text{cl}} = 2.63 \text{ r/min}$ 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 (1-9) 得

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

$$K_p = \frac{K}{K_s \alpha / C_e} = \frac{103.6}{30 \times 0.015 / 0.2} = 46$$

可见只要放大器的放大系数大于或等于 46, 转速负反馈闭环系统就能满足要求。

三、反馈控制规律

转速闭环调速系统是一种基本的反馈控制系统, 它具有以下四个基本特征, 也就是反馈控制的基本规律。

(一) 有静差

采用比例放大器的反馈控制系统是有静差的。从前面对静特性的分析中可以看出, 闭环系统的稳态速降为

$$\Delta n_{\text{cl}} = \frac{RI_d}{C_e(1+K)} \quad (1-12)$$

只有当 $K = \infty$ 时才能使 $\Delta n_{\text{cl}} = 0$, 即实现无静差。实际上不可能获得无穷大的 K 值, 况且过大的 K 值将导致系统不稳定。

从控制作用上看, 放大器输出的控制电压 U_{ct} 与转速偏差电压 ΔU_n 成正比, 如果实现无静差, $\Delta n_{\text{cl}} = 0$, 则转速偏差电压 $\Delta U_n = 0$, $U_{\text{ct}} = 0$, 控制系统就不能产生控制作用, 系统将停止工作。所以这种系统是以偏差存在为前提的, 反馈环节只是检测偏差, 减小偏差, 而不能消除偏差, 因此它是有静差系统。

(二) 被调量紧紧跟随给定量变化

在转速负反馈调速系统中, 改变给定电压 U_n^* , 转速就随之跟着变化。因此, 对于反馈控制系统, 被调量总是紧紧跟随着给定信号变化的。

(三) 闭环系统对包围在环内的一切主通道上的扰动作用都能有效抑制

当给定电压 U_n^* 不变时, 把引起被调量转速发生变化的所有因素称为扰动。上面只讨论了负载变化引起稳态速降。实际上, 引起转速变化的因素还有很多, 如交流电源电压波动, 电动机励磁电流的变化, 放大器放大系数的漂移, 由温度变化引起的主电路电阻的变化等。图 1-12 画出了各种扰动作用, 其中代表电流 I_d 的箭头表示负载扰动, 其他指向各方框的箭头分别表示会引起该环节放大系数变化的扰动作用。此图清楚地表明: 反馈环内且作用在控制系统主通道上的各种扰动, 最终都要影响被调量转速的变化, 而且都会被检测环节检测出来, 通过反馈控制作用减小它们对转速的影响。

抗扰性能是反馈闭环控制系统最突出的特征。根据这一特征, 在设计系统时, 一般只考虑其中最主要的扰动, 如在调速系统中只考虑负载扰动, 按照抑制负载扰动的要求进行设计, 则其他扰动的影响也就必然会受到抑制。

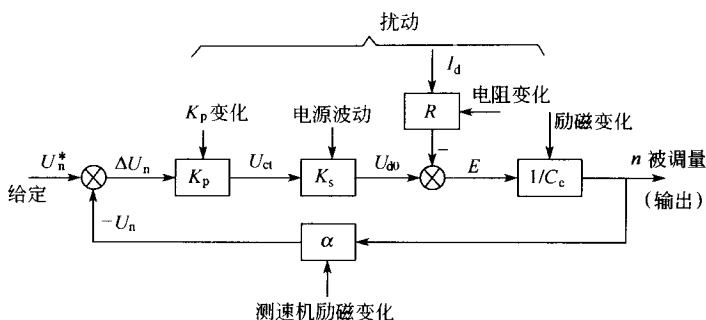


图 1-12 反馈控制系统给定作用和扰动作用

(四) 反馈控制系统对于给定电源和检测装置中的扰动是无法抑制的

由于被调量转速紧紧跟随给定电压的变化，当给定电源发生不应有的波动，转速也随之变化。反馈控制系统无法鉴别是正常的调节还是不应有的波动，因此高精度的调速系统需要更高精度的稳压电源。

另外，反馈控制系统也无法抑制由于反馈检测环节本身的误差引起被调量的偏差。如图 1-12 中测速发电机的励磁发生变化，则转速反馈电压 U_n 必然改变，通过系统的反馈调节，反而使转速离开了原应保持的数值。此外，测速发电机输出电压中的纹波，由于制造和安装不良造成转子和定子间的偏心等，都会给系统带来周期性的干扰。为此，高精度的系统还必须有高精度的反馈检测元件作保证。

四、系统的稳态参数计算

设计有静差调速系统，首先必须进行系统静特性参数计算，以确定系统的构成，即围绕着如何满足稳态指标——调速范围 D 和静差率 s 进行，并通过动态校正使系统满足要求。下面以一个具体的直流调速系统说明系统稳态参数计算。

【例 1-2】 如图 1-13 所示的直流调速系统，根据下面给定的技术数据，对系统进行静态参数计算。已知数据如下。

① 电动机：额定数据为 $P_{\text{nom}} = 10\text{kW}$ 、 $U_{\text{nom}} = 220\text{V}$ 、 $I_{\text{nom}} = 55\text{A}$ 、 $n_{\text{nom}} = 1000\text{r/min}$ ，电枢电阻 $R_a = 0.5\Omega$ 。

② 晶闸管装置：三相全控桥式整流电路，整流变压器 Y/Y 接法，二次线电压 $U_{21} = 230\text{V}$ ，触发整流环节的放大系数 $K_s = 44$ 。

③ KZ-D 系统：主回路总电阻 $R = 1.0\Omega$ 。

测速发电机 ZYS 231/110 型永磁式直流测速发电机，额定数据 $P_{\text{nom}} = 23.1\text{W}$ 、 $U_{\text{nom}} = 110\text{V}$ 、 $I_{\text{nom}} = 0.21\text{A}$ 、 $n_{\text{nom}} = 1900\text{r/min}$ 。生产机械要求调速范围 $D = 10$ 静差率 $s \leq 5\%$ 。

【解】 (1) 为了满足 $D = 10$ ， $s \leq 5\%$ ，额定负载时调速系统的稳态速降应为

$$\Delta n_{\text{cl}} \leq \frac{n_{\text{nom}} s}{D(1-s)} = \frac{1000 \times 0.05}{10 \times (1-0.05)} \text{r/min} = 5.26 \text{r/min}$$

(2) 根据 Δn_{cl} ，确定系统的开环放大系数 K

$$K \geq \frac{I_{\text{nom}} R}{C_e \Delta n_{\text{cl}}} - 1 = \frac{55 \times 1.0}{0.1925 \times 5.26} - 1 = 53.3$$

$$C_e = \frac{U_{\text{nom}} - I_{\text{nom}} R_a}{n_{\text{nom}}} = \frac{220 - 55 \times 0.5}{1000} \text{V} \cdot \text{min/r} = 0.1925 \text{V} \cdot \text{min/r}$$

(3) 计算测速反馈环节的参数

测速反馈系数 α 包含测速发电机的电动势转速比 C_{etg} 和电位器 RP_2 的分压系数 α_2 ，即

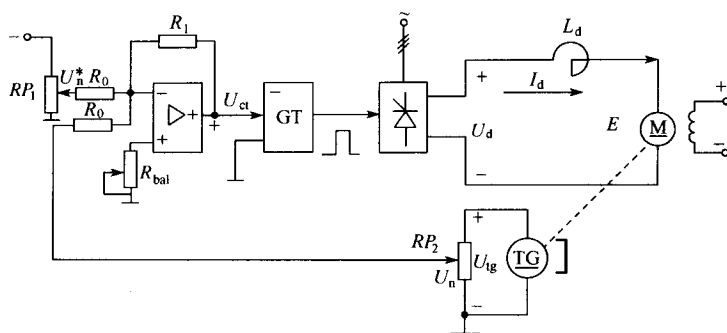


图 1-13 反馈控制有静差调速系统原理图

$$\alpha = \alpha_2 C_{etg}$$

根据测速发电机的数据, $C_{etg} = \frac{110}{1900} \text{ V} \cdot \text{min/r} \approx 0.0579 \text{ V} \cdot \text{min/r}$

本系统直流稳压电源为 15V, 最大转速给定为 12V 时, 对应电动机的额定转速, 即 $U_n^* = 12\text{V}$ 时, $n = 1000 \text{ r/min}$ 。测速发电机与电动机直接硬轴连接。

当系统处于稳态时, 近似认为 $U_n^* \approx U_n$, 则

$$\alpha \approx \frac{U_n^*}{n_{nom}} = \frac{12}{1000} \text{ V} \cdot \text{min/r} = 0.012 \text{ V} \cdot \text{min/r}$$

$$\alpha_2 = \frac{\alpha}{C_{etg}} = \frac{0.012}{0.0579} \approx 0.2$$

电位器 RP_2 的选择方法如下: 当测速发电机输出最高电压时, 其电流约为额定值的 20%, 这样, 测速发电机电枢压降对检测信号的线性度影响较小, 则

$$R_{RP_2} \approx \frac{C_{etg} n_{nom}}{0.2 I_{nom}} = \frac{0.0579 \times 1000}{0.2 \times 0.21} \Omega \approx 1379 \Omega$$

此时 RP_2 所消耗的功率为

$$P_{RP_2} = C_{etg} n_{nom} \times 0.2 I_{nom} = 0.0579 \times 1000 \times 0.2 \times 0.21 \text{ W} \approx 2.43 \text{ W}$$

为了使电位器不过热, 实选功率应为消耗功率的一倍以上, 故选 RP_2 为 10W、1.5k Ω 的可调电位器。

(4) 计算放大器的电压放大系数

$$K_p = \frac{K C_e}{\alpha K_s} = \frac{53.3 \times 0.1925}{0.012 \times 44} \approx 19.43$$

实取 $K_p = 20$ 。

如果取放大器输入电阻 $R_0 = 20 \text{ k}\Omega$, 则 $R_1 = K_p R_0 = 20 \times 20 \text{ k}\Omega = 400 \text{ k}\Omega$ 。

五、限流保护—电流截止负反馈

(一) 问题的提出

从上面的转速负反馈闭环调速系统讨论中可以看出, 闭环控制已解决了转速调节问题, 但是这样的系统还不能付诸实用, 为什么呢?

众所周知, 直流电动机全压启动时会产生很大的冲击电流, 这不仅对电动机换向不利, 对过载能力低的晶闸管来说也是不允许的。对转速负反馈的闭环调速系统突加给定电压时, 由于机械惯性, 转速不可能立即建立起来, 反馈电压仍为零, 加在调节器上的输入偏差电压 $\Delta U_n = U_n^*$, 几乎是其稳态工作值的 $1 + K$ 倍。由于调节器和触发装置的惯性都很小, 整流电压 U_d 立即达到最高值。电枢电流远远超过允许值。因此, 必须采取措施限制系统启动时