



教育部高职高专规划教材

交直流调速系统

● 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

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·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

交直流调速系统/史国生主编. —北京: 化学工业出版社, 2002.1
教育部高职高专规划教材
ISBN 7-5025-3606-X

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 093719 号

教育部高职高专规划教材

交直流调速系统

史国生 主编

赵家璧 主审

责任编辑: 张建茹 王丽娜

责任校对: 陶燕华

封面设计: 郑小红

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010)64918013

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

*

新华书店北京发行所经销

北京市燕山印刷厂印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 21 字数 526 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3606-X/G·963

定 价: 30.00 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,充分吸取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用性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性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

前 言

根据教育部《关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》精神,为满足高职高专电类相关专业教学基础建设的需要,在教育部高教司和教育部高职教育教学指导委员会的关心和指导下,全国石油和化工高职教育教学指导委员会广泛开展调研,多次召开高职高专电类教材研讨会,组织编写了20本面向21世纪的高职高专电类专业系列教材,供工业电气化技术、工业企业电气化、工业电气自动化、应用电子技术、机电应用技术及工业仪表自动化、计算机应用技术等相关专业使用。

本套教材立足高职高专教育人才培养目标,遵循主动适应社会发展需要、突出应用性和针对性、加强实践能力培养的原则,组织编写了专业基础课程的理论教材和与之配套的实训教材。实训教材集实验、设计与实习、技能训练与应用能力培养为一体,体系新颖,内容可选择性强。同时提出实训硬件的标准配置和最低配置,以方便各校选用。

由于本套教材的整体策划,从而保证了专业基础课与专业课内容的衔接,理论教材与实训教材的配套,体现了专业的系统性和完整性。力求每本教材的讲述深入浅出,将知识点与能力点紧密结合,注重培养学生的工程应用能力和解决现场实际问题的能力。

本教材根据当前交直流调速技术的发展趋势,注重反映工业中新的调速技术、新的调速系统,将交直流调速系统融合在一本教材中,并加大了交流调速内容的比例,使教材内容面向工程实际,面向当今控制技术,力求具有实用性、先进性和系统性,能体现高职高专教育培养生产第一线应用型人才的要求。

全书分为三篇,第一篇为直流调速系统和随动系统,共四章;第二篇为交流调速系统,共四章;第三篇为实践教学内容,共二章;第九章为实验指导书;第十章为课程设计指导书。第一、二篇为理论教学内容,按80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,课程设计时间以2周为宜。

本教材内容选材合理,理论联系实际,强调工程应用,根据工程现场要求进行内容取舍。具有如下特点:①每章开头有内容提要,章尾有小结和习题;②本着实用的原则,尽量简化理论推导,注重物理概念的阐述与分析;③主要的理论教学内容都配有相关的实例分析,做到学以致用;④增加了开关磁阻电动机调速系统等新的调速技术内容;⑤书中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。

本书由史国生任主编,并编写第七、八章及课程设计指导书。耿书琴编写第一、二章;魏连荣编写第三、四章;周渊深编写第五、六章及实验指导书。全书由史国生统稿。

本书由东南大学赵家璧教授主审,他对本教材提出了许多建设性的意见,在此表示诚挚的谢意。本书在编写过程中参阅了部分兄弟院校的教材及国内外文献资料,对原作者也一并致谢。

由于编者水平有限和编写时间比较仓促,书中疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2001年9月

内 容 提 要

本书分三篇。第一篇为直流调速系统和随动系统。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、实现方法、机械特性、运行特点及适用场合。所涉及的系统包括单环及多环直流调速、可逆直流调速、PWM直流调速、位置随动（伺服）系统、交流调压调速、串级调速、笼式异步电动机的变频调速、矢量控制调速、无换向器电机调速、开关磁阻电机调速等。

本教材内容选材合理，理论联系实际，根据工程现场要求进行内容取舍。尽量简化理论推导，注重物理概念的阐述与分析；并配有相关的实例分析，做到学以致用；书中增加了开关磁阻电动机调速系统等新技术内容；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及相关专业教材，也可作为电大、中等专业学校电类专业的教材或工程技术人员的参考用书。

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 直流调速系统和随动系统

第一章 单闭环直流调速系统	8	习题与思考题	70
第一节 直流调速系统的基本概念	8	第三章 可逆直流调速系统	72
第二节 转速负反馈有静差直流调速系统	12	第一节 晶闸管-直流电动机调速系统的可逆运行方案	72
第三节 转速负反馈无静差直流调速系统	26	第二节 有环流可逆调速系统	79
第四节 其他反馈形式在调速系统中的应用	31	第三节 无环流可逆调速系统	86
本章小结	36	第四节 直流脉宽调制调速系统	97
习题与思考题	37	本章小结	110
第二章 多环调速系统	40	习题与思考题	111
第一节 转速、电流双闭环调速系统	40	第四章 位置随动系统	113
第二节 转速超调的抑制——转速微分负反馈	45	第一节 概述	113
第三节 多环调速系统	47	第二节 位置随动系统的位置检测和位置驱动	117
第四节 直流调速系统的工程设计方法	49	第三节 位置随动系统的控制方案和控制性能	127
第五节 单闭环调速系统的设计	58	第四节 位置随动系统的特殊问题	136
第六节 双闭环调速系统的设计	62	本章小结	144
本章小结	69	习题与思考题	145

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	147	第三节 交-直-交变频器及其变频调速系统	191
第一节 概述	147	第四节 正弦波脉宽调制 (SPWM) 变频器及其调速系统	206
第二节 交流异步电动机调压调速系统	149	第五节 异步电动机矢量控制的变频调速系统	219
第三节 绕线式异步电动机串级调速系统	161	本章小结	228
本章小结	179	习题与思考题	230
习题与思考题	179	第七章 无换向器电动机调速系统	231
第六章 交流笼式异步电动机变频调速系统	181	第一节 概述	231
第一节 变频调速的基本控制方式和机械特性	181	第二节 无换向器电动机的工作原理	232
第二节 变频器的分类与特点	186	第三节 无换向器电动机的换流	237
		第四节 无换向器电动机的基本特性	239
		第五节 无换向器电动机调速系统	243

本章小结	249
习题与思考题	250
第八章 开关磁阻电动机调速系统	251
第一节 概述	251
第二节 开关磁阻电动机	258

第三节 控制方式	269
第四节 控制器	277
第五节 开关磁阻电动机调速系统实例	285
本章小结	290
习题与思考题	291

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	292
第一节 交直流调速系统实验概述	292
第二节 交直流调速系统实验内容	294
实验一 晶闸管直流调速系统参数和环节特性的测定实验	294
实验二 单闭环晶闸管直流调速系统实验	298
实验三 双闭环晶闸管不可逆直流调速系统实验	301
实验四 双闭环三相异步电动机调压调速	

系统实验	304
实验五 双闭环三相异步电动机串级调速系统实验	307
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	310

第十章 课程设计指导书	314
第一节 课程设计大纲	314
第二节 课程设计任务	315
第三节 课程设计资料	317
参考文献	328

绪 论

一、电力拖动控制技术的发展

在现代工业中,为了实现各种生产工艺过程的要求,需要采用各种各样的生产机械,这些生产机械大多采用电动机拖动。多数生产机械的任务是将电能转换为机械能,以机械运动的形式来完成各种工艺要求。随着工艺技术的不断发展,各种生产机械根据其工艺特点,对生产机械和拖动的电动机也不断提出各种不同的要求,有的要求电动机能迅速启动、制动和反转;有的要求多台电动机之间的转速按一定的比例协调运动;有的要求电动机达到极慢的稳速运动;有的要求电动机启、制动平稳,并能准确地停止在给定的位置。上述这些不同的工艺要求,都是靠电动机及其控制系统和机械传动装置实现的。可见各种拖动系统都是通过控制转速(更本质地说,是控制电动机的转矩)来实现的,因此,调速控制技术是最基本的电力拖动控制技术。

电力拖动控制技术是一门以被控电动机的转速为研究对象,根据生产工艺的各种要求,应用自动控制理论建立交直流调速控制系统,使生产过程实现自动化的自动控制学科。

电力拖动控制技术主要包括直流调速控制技术、交流调速控制技术和计算机控制技术三个方面。

1. 直流调速控制技术发展概况

由于直流调速控制系统具有良好的启制动、正反转及调速等性能,目前在调速领域中仍占主要地位。按供电方式,它可分交流机组供电、水银整流供电和晶闸管供电三类,相应的技术指标列于表 0-1。

表 0-1 直流调速控制系统的三种供电方式

供电方式	调速效率	响应时间/s	功率放大倍数
交流机组	0.79	1	10
水银整流器	0.84	10^{-3}	10^3
晶闸管整流器	0.89	10^{-3}	10^5

从表 0-1 看出,晶闸管供电的直流调速控制系统具有良好的技术经济指标。因此,在国内外已取代了其他两种供电方式。目前,我国的直流调速控制主要在以下几个方面进行着研究。

① 提高调速的单机容量。我国现有最大单机容量为 7000kW,国外单机容量已达 14500kW。

② 提高电力电子器件的生产水平,增加品种。20 世纪 50 年代末出现的无自关断能力的半控型普通晶闸管是第一代电力电子器件。70 年代以后,出现了能自关断的全控型器件,如电力晶体管(GTR)、门极可关断晶闸管(GTO)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、电力场效应管(MOSFET)、静电感应晶体管(SIT)和静电感应晶闸管(SITH)等称之为第二代电力电子器件,使得变流器结构变得简单、紧凑。80 年代以后,出现了电力集成电路

(PIC)，属于第三代电力电子器件，在 PIC 中，不仅含有主电路的器件，而且把驱动电路以及过压、过流保护、电流检测甚至温度自动控制等电路都集成在一起，形成一个整体。当今，电力电子器件正在向大功率化、高频化、模块化、智能化发展。

电力电子器件的发展情况可大致归纳成表 0-2。

表 0-2 电力电子器件发展简表

第一代 半控器件	第二代 自关断器件			第三代 电力集成电路
硅整流二极管 (SR) 晶闸管(SCR): 普通、快速、双向、逆导、 高频、光控等	电 流 控 制	电 场 控 制		功率集成电路(PIC) 种类很多
	电力晶体管(GTR)	静电感应晶体管 (SIT)	场效应晶体管(MOS- FET)绝缘栅极双极型晶 体管(IGBT)	
	门极可关断晶闸管 (GTO)	静电感应晶闸管 (SITH)	MOS 控制晶 闸 管 (MCT)	

③ 提高控制单元水平。目前国内使用较多的仍是小规模集成运放和组件构成的交直流调速控制系统，触发装置甚至仍是分立元件的，相当于国外第二代产品。目前，国外的第四代产品以微处理机为基础，具有控制、监视、保护、诊断及自复原等多种功能。

2. 交流调速控制技术概况

由于直流电动机的机械换向存在一些问题，如最大供电电压受到限制，机械强度也限制了转速的进一步提高，结构形式不适应于腐蚀性、易爆性和含尘气体的特殊场合。因此人们转向研究结构简单、运行可靠、便于维护、价格低廉的交流异步电动机的调速系统（长期以来由于它的控制比较复杂和调速性能差、装置价格高、效率低而未能得到推广）。自从微处理机出现后，国外在绕线式转子异步电动机串级调速、无换向器电动机调速、笼式异步电动机的矢量控制以及脉宽调制（简称 PWM）技术方面，都已获得了重大突破与发展，进入了工业应用阶段。尤其是 20 世纪 70 年代后不断涌现出新型电力电子器件，变频技术获得了日新月异的发展，使得交流调速性能可以与直流调速相媲美，目前，交流调速逐步取代直流调速已成为明显的发展趋势。特别是“节能型”交流调速控制技术，已得到很快的发展。在过去大量应用的所谓不变速传动系统中，有相当一部分是风机、水泵压缩机等传动系统，这类系统约占工业电力拖动总量的一半。其中有些并不是真的不需要变速，只是由于过去的交流电动机都不能调速，因而不得不依赖挡板和阀门来调节流量，同时也消耗了大量的电能。如果换成交流调速系统，则消耗在挡板、阀门上的功率就可以节省下来，每台至少约可节能 10% 以上，总的节能效果是很可观的。

在交流电动机的控制策略方面，20 世纪 70 年代初出现了交流电动机的矢量控制原理，为高性能交流调速控制奠定了理论基础，实现像直流电动机那样对磁场和转矩的解耦控制。矢量控制理论的提出和成功应用，开创了用交流调速系统代替直流调速系统的时代。80 年代掀起了交流调速热，矢量控制理论进一步完善和发展，一些新的控制策略和方法相继提出并被采用，例如“直接转矩控制”就是 80 年代中期提出的又一交流调速控制技术，直接转矩控制利用观察器观察电动机的电磁转矩和定子磁链，不需要进行复杂的坐标变换，采用闭环控制，直接控制电磁转矩和定子磁链，系统更加简单，控制更加直接，受到各国学者的重视。

近 10 年来，各国学者正致力于无速度传感器控制系统的研究，利用检测定子电压、电

流等容易测量的物理量进行速度估算,以取代速度传感器。由于无速度传感器控制技术不需要检测硬件,也免去了传感器带来的环境适应性、安装维护等麻烦,提高了系统可靠性,降低了成本,因而引起了广泛兴趣。

随着现代控制理论的发展,交流调速控制技术方兴未艾,非线性解耦控制、人工神经网络、自适应控制、模糊控制等各种智能控制策略正在不断涌现,展现出更为广阔的前景,必将进一步推动交流调速控制技术的发展。

3. 计算机控制技术概况

为实现综合自动化,国外在集散型计算机控制系统方面已有定型成套装置。对复杂的电气自动化系统进行在线实时控制,技术已过关,尤其是单片机的出现给控制带来了很多方便之处。实现非线性控制比模拟电路更加方便、可靠,参数调节容易。目前的发展方向是大型化和智能化。当前在研究具有区域管理级、车间管理级、监控级及过程控制级的四级计算机控制系统。在过程控制级发展了分散-微型化系统。

此外,由于计算机控制技术的发展,实时运行的图形功能比较强,对控制过程的参数和状态可以从图形中得到比较直观的了解,便于对系统进行在线监控与管理。

总之,随着计算机控制技术的不断发展,使交直流调速控制系统的控制性能有了迅速的提高。

二、交直流调速系统的分类

随着科学技术的不断发展,交直流调速系统的应用越来越广泛,几乎遍及国民经济和国防事业的一切部门。按生产机械要求控制的物理量来分类,交直流调速控制系统可分为:

① 速度控制系统,即调速控制系统。例如发动机的转速调节,磁带的速度调节等等。调速控制系统又可分为直流调速和交流调速两种,又常称为直流传动系统和交流传动系统。

② 位置控制系统,即位置随动(伺服)系统。例如液面位置的控制,雷达方位角的控制,火炮角位置的控制,机械加工中的轨迹控制等等。

③ 张力控制系统。例如在加工各种带材和线材的过程中,必须保持一定的卷进卷出张力,才能使带材卷得紧而齐,线材拉得粗细均匀而不断。

④ 多电机同步控制系统。即整个系统中有多个传动点,每个传动点由一个电动机拖动单元拖动,组成了多单元同步控制系统。系统中各单元应能同时按规定的速比稳速运行,并有良好的统调、单调性。系统对启、制动要求一般不高,启动时,一般缓慢均匀协调升速,制动时要求停车迅速协调。

三、交直流调速控制系统的技术指标

各类不同的生产机械,由于其具体的生产工艺过程不同,对控制系统的性能指标要求也是不同的。但归纳起来有以下三个方面。

(1) 调速 在一定的范围内实现有级或无级地调节转速。调速系统的转向若要求正、反转,则为可逆调速系统,若只要求单向运转,则为不可逆调速系统。

(2) 稳速 以一定的精度在要求的转速上稳定运行,在各种可能的扰动下不允许有过大的转速波动,以确保产品质量。

(3) 加、减速 对于频繁启、制动的设备要求尽可能快地加、减速,以提高生产效率;不宜经受剧烈速度变化的机械则要求启、制动尽可能地平稳。

上述三方面要求，可具体转化为调速系统的稳态和动态两方面的性能指标。

(一) 稳态性能指标

所谓稳态性能指标是指系统稳定运行时的性能指标，例如：调速系统稳定运行时的调速范围和静差率；位置随动系统的定位精度和速度跟踪精度；张力控制系统的稳态张力误差等等。下面具体介绍调速系统中的稳态指标，其他系统的稳态指标在以后章节中具体介绍。

1. 调速范围

交直流调速控制系统的调速范围是指电动机在额定负载下，运行的最高转速与最低转速之比，用 D 表示，即

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (0-1)$$

对于调压调速系统来说，电动机的最高转速 $n_{\max}$ 等于其额定转速 n_{nom} 。 D 越大，说明系统的调速范围越宽。对于少数负载很轻的机械，例如磨床，也可以用实际负载时的转速来定义调速范围。

根据这个指标的大小，交直流调速控制系统可分为：(1) $D < 3$ ，为调速范围小的系统；(2) $3 \leq D < 50$ ，为调速范围中等的系统；(3) $D \geq 50$ ，为宽调速范围的系统。现代交直流调速控制系统的调速范围可以做到 $D \geq 10000$ 。

2. 静差率

当系统在某一转速下运行时，负载由理想空载增加到额定值所引起的额定转速降落 Δn_{nom} ，与理想空载转速 n_0 之比，称为静差率，用 s 表示，即

$$s = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{n_0} = \frac{n_0 - n_{\text{nom}}}{n_0}$$

或用百分数表示

$$s = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{n_0} \times 100\% \quad (0-2)$$

静差率是用来表示负载转矩变化时电动机转速变化的程度，它与机械特性的硬度有关，特性越硬，静差率越小，转速稳定度越高。

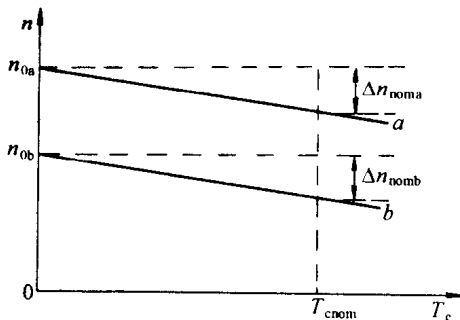


图 0-1 不同转速下的静差率

然而静差率和机械特性硬度又是有区别的。图 0-1 的两条特性线 a 和 b 为调压调速系统的机械特性，两者的硬度相同，即额定速降 $\Delta n_{\text{noma}} = \Delta n_{\text{nomb}}$ ；但它们的静差率却不同，其原因是理想空载转速不相同。根据式 (0-2) 的定义，由于 $n_{0a} > n_{0b}$ ，所以 $s_a < s_b$ 。这就是说，对于同样硬度的特性，理想空载转速越低，静差率越大，转速的相对稳定度也越差。在一个交直流调速系统中，如果能满足最低转速运行时静差率 s 的要求，则大于最低转速下的静差率一般都能满足要求。所以，一般所提静差率的要求是指系统最低

速时所能达到的指标。

调速范围和静差率这两项指标是相互联系的，例如，额定负载时的转速降落 $\Delta n_{\text{nom}} = 50 \text{ r/min}$ ，当理想空载转速 $n_0 = 1000 \text{ r/min}$ 时，转速降落占 5%；当 $n_0 = 500 \text{ r/min}$ 时，转速降落占 10%；当 $n_0 = 50 \text{ r/min}$ 时，转速降落占到 100%，电动机就停止了。由此可见，离开

了对静差率的要求, 调速范围便失去了意义。也就是说, 一个调速系统的调速范围, 是指在最低转速时满足静差率要求下所能达到的最大范围。脱离了对静差率的要求, 任何调压调速系统都可以得到极高的调速范围; 脱离了调速范围, 要满足要求的静差率也就容易得多。

3. D 、 S 、 Δn_{nom} 之间的关系

调速系统的静差率是指系统最低转速时的静差率, 即

$$s = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{n_{0\text{min}}}$$

于是有

$$n_{\text{min}} = n_{0\text{min}} - \Delta n_{\text{nom}} = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{s} - \Delta n_{\text{nom}} = \frac{1-s}{s} \Delta n_{\text{nom}}$$

代入调速范围的表达式 $D = \frac{n_{\text{max}}}{n_{\text{min}}}$, 得

$$D = \frac{sn_{\text{nom}}}{\Delta n_{\text{nom}}(1-s)} \quad (0-3)$$

式 (0-3) 表示调速范围, 静差率和额定转速降之间所应当满足的关系。对于同一个调速系统, 它的特性硬度或 Δn_{nom} 值是一定的, 因此由式 (0-3) 可见, 如果对静差率 s 的要求越小, 系统能够达到的调速范围越小。

例如, 某调速系统的额定转速 $n_{\text{nom}} = 1450 \text{ r/min}$, 额定速降 $\Delta n_{\text{nom}} = 80 \text{ r/min}$, 当要求静差率 $s \leq 25\%$ 时, 系统能达到的调速范围是

$$D = \frac{sn_{\text{nom}}}{\Delta n_{\text{nom}}(1-s)} = \frac{0.25 \times 1450}{80 \times (1-0.25)} = 6.04$$

如果要求 $s \leq 15\%$, 则调速范围只有

$$D = \frac{sn_{\text{nom}}}{\Delta n_{\text{nom}}(1-s)} = \frac{0.15 \times 1450}{80 \times (1-0.15)} = 3.20$$

当对 D 、 s 都提出一定要求时, 为了满足要求, 就必须使 Δn_{nom} 小于某一个值。可见调速要解决的问题就是如何减少转速降落。

4. 调速平滑性

交直流调速系统的调速平滑性是在调速时用相邻转速之比来表示的。无级调速时, 该比值接近于 1, 即转速可以连续平滑调节。

(二) 动态性能指标

交直流调速控制系统在动态过程中的指标称为动态性能指标。由于实际系统存在着电磁和机械惯性, 因此, 当转速调节时总有一个动态过程。衡量交直流调速控制系统的动态性能可分为跟随性能指标和抗扰性能指标两类。

1. 跟随性能指标

交直流调速控制系统一般在给定阶跃信号作用下, 系统输出在零初始条件下的响应过程来表示系统对给定输入的典型跟随过程, 如图 0-2 所示。其主要跟随性能指标如下。

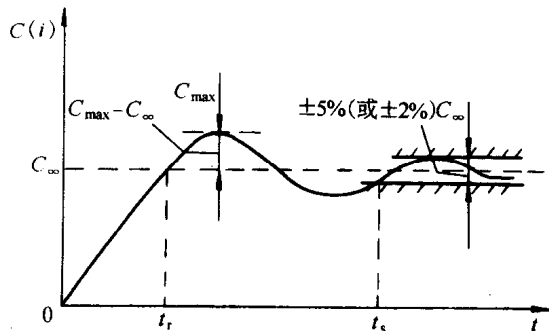


图 0-2 阶跃响应曲线和跟随性能指标

(1) 上升时间 t_r 在阶跃响应过程中, 输出量从零开始, 第一次上升到稳态值 C_{∞} 所经历的时间称为上升时间, 它反映系统动态响应的快速性。

(2) 超调量 σ 在阶跃响应过程中, 输出量超出稳态值的最大偏差与稳态值之比的百分值, 称为超调量, 即

$$\sigma \% = \frac{C_{\max} - C_{\infty}}{C_{\infty}} \times 100 \% \quad (0-4)$$

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

(3) 调节时间 t_s 在阶跃响应过程中, 输出衰减到与稳态值之差进入 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 的允许误差范围之内所需的最小时间, 称为调节时间, 又称为过渡过程时间。调节时间是用来衡量系统整个调节过程的快慢的, 调节时间 t_s 越小, 系统响应的快速性越好。

在实际系统中, 快速性和稳定性往往是相互矛盾的。减小了超调量往往就延长了过渡过程; 加快过渡过程却又增大了超调量。对于一般要求的系统, 可以根据生产工艺的要求, 哪一方面的性能是主要的, 就以哪一方面为主。对于特殊要求的较高性能的系统, 还可以考虑

采用一些综合性的优化性能指标。本书只讨论前者。这对于大多数的控制系统的设计和調整来说, 已经足够了。

2. 抗扰性能指标

控制系统在稳态运行中, 由于电动机负载的变化, 电网电压的波动等干扰因素的影响, 都会引起输出量的变化, 经历一段动态过程后, 系统总能达到新的稳态。这一恢复过程就是系统的抗扰过程。一般以系统稳定运行中突加一个使输出量降低的扰动以后的过渡过程作为典型的抗扰过程, 如图 0-3 所示。抗扰性能指标定义如下。

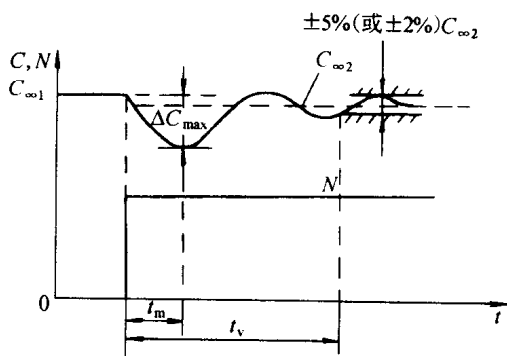


图 0-3 突加扰动的动态过程和抗扰性能指标

(1) 动态降落 $\Delta C_{\max} \%$ 系统稳定运行时, 突加一个扰动量 N , 在过渡过程中引起输出的最大降落值 $\Delta C_{\max}$ 称为动态降落, 一般用输出量原稳态值 $C_{\infty 1}$ 的百分数表示, 即

$$\Delta C_{\max} \% = \frac{\Delta C_{\max}}{C_{\infty 1}} \times 100 \%$$

当输出量在动态降落后又恢复到新的稳态值 $C_{\infty 2}$ 时, 偏差 $C_{\infty 1} - C_{\infty 2}$ 表示系统在该扰动作用下的稳态降落, 动态降落一般都大于稳态降落。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_v 从阶跃扰动作用开始, 到输出量恢复到与新稳态值 $C_{\infty 2}$ 之差进入某基准值 C_b 的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 范围之内所需的时间, 称为恢复时间 t_v , 如图 0-3 所示。其中 C_b 称为抗扰指标中输出量的基准值。之所以用 C_b 作为基准值而不用稳态值作为基准值, 是因为动态速降很小, 倘若动态速降小于 5% , 则按进入的 $\pm 5\%$ 范围来定义的恢复时间只能为零, 因而没有意义了。 C_b 值应视具体系统而定。一般来说, 阶跃扰动下输出量的动态降落越小, 恢复时间越短, 系统的抗扰能力越强。

实际控制系统对于各种动态指标的要求各异。例如, 可逆轧钢机需要连续正反向轧制钢材多次, 因而对系统的动态跟随性能和抗扰能要求都较高; 而一般不可逆的调速系统则主要

要求有一定的抗扰性能，跟随性能好坏问题不大。数控机床的加工轨迹控制和仿形机床的跟踪控制要求有较严格的跟随性能；而雷达天线随动系统则对跟随性能和抗扰性能都有一定的要求。一般来说，调速系统的动态指标以抗扰性能为主，而随动系统的动态指标则以跟随性能为主。

第一篇

直流调速系统和随动系统

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 为电枢电压； E 为电枢电动势； R 为电枢回路总电阻； n 为转速，单位 r/min ； Φ 为励磁磁通； K_e 为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，如图 1-1 所示。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) 减弱激磁磁通调速

由式 (1-1) 可知, 当 U 和 R 不变时, 减小激磁磁通 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, 如图 1-1 所示。

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。

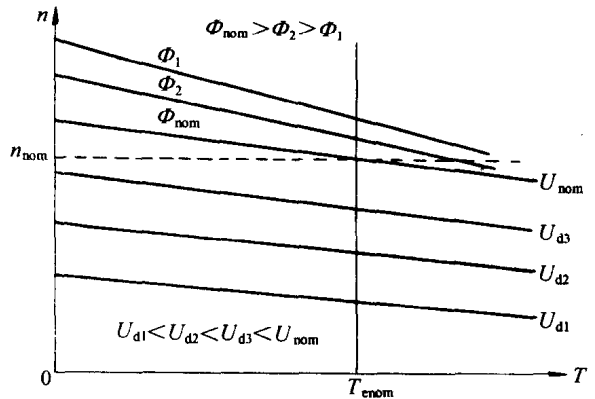


图 1-1 直流他励电动机调压调速和调磁调速时的机械特性

(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 年代以前, 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。如图 1-2 所示。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

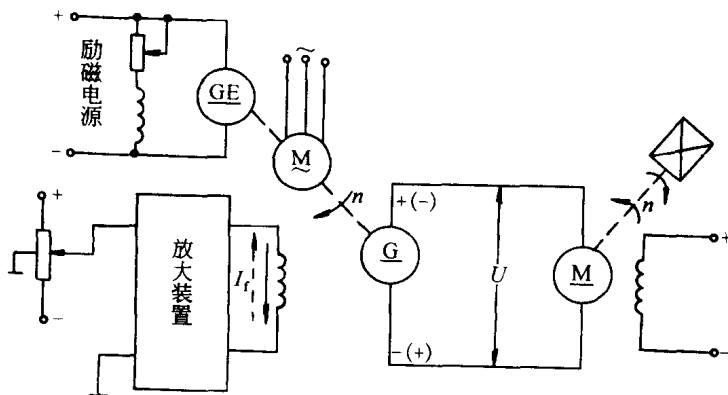


图 1-2 旋转变流机组供电的直流调速系统