



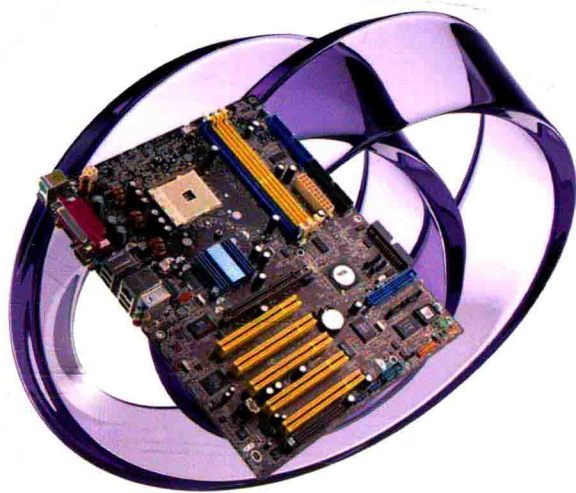
全国技工院校“十二五”系列规划教材·高级工
中国机械工业教育协会推荐教材

直流调速技术

(任务驱动模式)

◎ 王建 徐洪亮 主编

Zhiliu Tiaosu Jishu



免费下载

www.cmpedu.com



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

全国技工院校“十二五”系列规划教材·高级工
中国机械工业教育协会推荐教材

直流调速技术

(任务驱动模式)

主 编	王 建	徐洪亮			
副主编	张 宏	徐小明			
参 编	杨 军	姚满庆	祁鸣书	魏志强	刘喜华
	李 瑄	姚 凌	孙 胜	徐洪恩	宋永昌
	寇 爽	李金镯	郝新虎		邢晓莉
主 审	雷云涛				



机械工业出版社

《直流调速技术》是技师学院、高级技工学校电工类专业通用教材。本书涵盖了初中起点和高中起点高级工专业基础课程内容,主要包括:直流调速技术基础,直流调速系统的开环控制,直流调速系统的单闭环控制,直流调速系统的双闭环控制和可逆直流调速系统的工作原理、安装、调试与维修。

本书可作为技工院校、职业院校电工及相关专业的一体化教材,也可作为高级维修电工的培训用书,还可供广大电气技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

直流调速技术:任务驱动模式/王建,徐洪亮主编. —北京:机械工业出版社,2014.2

全国技工院校“十二五”系列规划教材·高级工

ISBN 978-7-111-45571-4

I. ①直… II. ①王…②徐… III. ①直流调速—技工学校—教材
IV. ①TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第016328号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:陈玉芝 林运鑫 责任编辑:张利萍

版式设计:常天培 责任校对:刘怡丹

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2014年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·13印张·315千字

0 001—3 000

标准书号:ISBN 978-7-111-45571-4

定价:29.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

全国技工院校“十二五”系列规划教材 编审委员会

顾问：郝广发

主任：陈晓明 李奇 季连海

副主任：（按姓氏笔画排序）

丁建庆	王臣	刘启中	刘亚琴	刘治伟	李长江
李京平	李俊玲	李晓庆	李晓毅	佟伟	沈炳生
陈建文	徐美刚	黄志	章振周	董宁	景平利
曾剑	魏葳				

委员：（按姓氏笔画排序）

于新秋	王军	王珂	王小波	王占林	王良优
王志珍	王栋玉	王洪章	王惠民	孔令刚	卢镇光
白鹏	乔本新	朱泉	许红平	汤建江	刘军
刘大力	刘永祥	刘志怀	毕晓峰	李华	李成飞
李成延	李志刚	李国诚	吴岭	何立辉	汪哲能
宋燕琴	陈光华	陈志军	张迎	张卫军	张廷彩
张敬柱	林仕发	孟广斌	孟利华	荆宏智	姜方辉
贾维亮	袁红	阎新波	展同军	黄樱	黄锋章
董旭梅	谢蔚明	雷自南	鲍伟	潘有崇	薛军

总策划：李俊玲 张敬柱 荆宏智



序

“十二五”期间，加速转变生产方式，调整产业结构，将是我国国民经济和社会发展的重中之重。而要完成这种转变和调整，就必须有一大批高素质的技能型人才作为后盾。根据《国家中长期人才发展规划纲要（2010—2020年）》的要求，至2020年，我国高技能人才占技能劳动者的比例将由2008年的24.4%上升到28%（目前一些经济发达国家的这个比例已达到40%）。可以预见，作为高技能人才培养重要组成部分的高级技工教育，在未来的10年必将会迎来一个高速发展的黄金期。近几年来，各职业院校都在积极开展高级工培养的试点工作，并取得了较好的效果。但由于起步较晚，课程体系、教学模式都还有待完善与提高，教材建设也相对滞后，至今还没有一套适合高级技工教育快速发展需要的成体系、高质量的教材。即使一些专业（工种）有高级工教材也不是很完善，或是内容陈旧、实用性不强，或是形式单一、无法突出高技能人才培养的特色，更没有形成合理的体系。因此，开发一套体系完整、特色鲜明、适合理论实践一体化教学、反映企业最新技术与工艺的高级工教材，就成为高级技工教育亟待解决的课题。

鉴于高级技工教材短缺的现状，机械工业出版社与中国机械工业教育协会从2010年10月开始，组织相关人员，采用走访、问卷调查、座谈等方式，对全国有代表性的机电行业企业、部分省市的职业院校进行了历时6个月的深入调研。对目前企业对高级工的知识、技能要求，各学校高级工教育教学现状、教学和课程改革情况以及对教材的需求等有了比较清晰的认识。在此基础上，他们紧紧依托行业优势，以为企业输送满足其岗位需求的合格人才为最终目标，组织了行业和技能教育方面的专家精心规划了教材书目，对编写内容、编写模式等进行了深入探讨，形成了本系列教材的基本编写框架。为保证教材的编写质量、编写队伍的专业性和权威性，2011年5月，他们面向全国技工院校公开征稿，共收到来自全国22个省（直辖市）的110多所学校的600多份申报材料。组织专家对作者及教材编写大纲进行了严格评审，决定首批启动编写机械加工制造类专业、电工电子类专业、汽车检测与维修专业、计算机技术相关专业教材以及部分公共基础课教材等，共计80余种。

本套教材的编写指导思想明确，坚持以达到国家职业技能鉴定标准和就业能力为目标，以各专业的工作内容为主线，以工作任务为引领，由浅入深，循序渐进，精简理论，突出核心技能与实操能力，使理论与实践融为一体，充分体现“教、学、做合一”的教学思想，致力于构建符合当前教学改革方向的，以培养应用型、技术型、创新型人才为目标的教材体系。

本套教材重点突出了如下三个特色：一是“新”字当头，即体系新、模式新、内容新。

体系新是把教材以学科体系为主转变为以专业技术体系为主；模式新是把教材传统章节模式转变为以工作过程的项目为主；内容新是教材充分反映了新材料、新工艺、新技术、新方法。二是注重科学性。教材从体系、模式到内容符合教学规律，符合国内外制造技术水平实际情况。在具体任务和实例的选取上，突出先进性、实用性和典型性，便于组织教学，以提高学生的学习效率。三是体现普适性。由于当前高级工生源既有中职毕业生，又有高中生，各自学制也不同，还要考虑到在职人群，教材内容安排上尽量照顾到了不同的求学者，适用面比较广泛。

此外，本套教材还配备了电子教学课件，以及相应的习题集，实验、实习教程，现场操作视频等，初步实现教材的立体化。

我相信，本套教材的编辑出版，对深化职业技术教育改革，提高高级工培养的质量，都会起到积极的作用。在此，我谨向各位作者和所在单位及为这套教材出力的学者表示衷心的感谢。

原机械工业部教育司副司长
中国机械工业教育协会高级顾问

郝广发

前言

根据《国家中长期教育改革和发展规划纲要》（2010—2020 年）的要求，在“十二五”期间，要构建灵活开放的现代职业教育体系，培养适应现代化建设需求的高素质劳动者和高技能人才。

为加快培养一大批具备职业道德、职业技能和就业创业能力的高技能人才，针对电气自动化设备安装与维修、机电一体化专业的教学要求，我们编写了本书。主要内容包括：项目一介绍了直流调速技术基础，项目二介绍了直流调速系统的开环控制，项目三介绍了直流调速系统的单闭环控制，项目四介绍了直流调速系统的双闭环控制，项目五介绍了可逆直流调速系统。

在本书的编写过程中，贯彻了“理论服务于技能，突出技能培养”的原则，把编写重点放在以下几个方面：

第一，根据电工类专业毕业生所从事职业的实际需要，合理确定学生应具备的能力结构与知识结构，以够用、使用为原则，坚持以能力为本位的教学理念，强调基本技能的培养。

第二，以项目式教学的方式实现理论知识与技能训练相结合，以任务驱动模式导入教学内容，使教材内容更加符合学生的认知规律，易于激发学生的学习兴趣。

第三，努力贯彻国家关于职业资格证书与学生证书并重、职业资格证书制度与国家就业制度相衔接的政策精神，力求使教材内容涵盖有关国家职业标准的知识和技能要求。同时，在教材编写过程中，严格贯彻了国家有关技术标准。

第四，精选教学任务，每个任务都有其明确的教学目的，并针对各自教学目的展开相关知识介绍及训练步骤，且给出了每个任务的任务评分表，以供教学参考。同时，针对每个任务还设置了相应的巩固与提高练习，以便学生切实掌握相关知识与技能。

本书由王建、徐洪亮任主编，张宏、徐小明任副主编，参加编写的还有：杨军、姚满庆、祁鸣书、魏志强、刘喜华、刘日晨、李瑄、姚凌、孙胜、徐洪恩、宋永昌、邢晓莉、寇爽、李金镒、郝新虎。全书由雷云涛主审。

由于编者水平有限，错误在所难免，恳请使用本书的师生和读者提出宝贵的意见。

编者

目录

序	
前言	
项目一 直流调速技术基础	1
项目二 直流调速系统的开环控制	30
项目三 直流调速系统的单闭环控制	59
任务一 有静差转速负反馈直流调速系统的装调与维修	59
任务二 电压负反馈直流调速系统的装调与维修	80
任务三 带电流截止负反馈的电压负反馈调速系统的装调与维修	97
任务四 直流调速系统保护环节的装调与维修	110
任务五 无静差转速负反馈直流调速系统的装调与维修	130
项目四 直流调速系统的双闭环控制	142
项目五 可逆直流调速系统	169
参考文献	196

项目一 直流调速技术基础

知识目标：1. 熟悉直流电动机调速的基本方法。

2. 掌握直流调速系统的组成和分类。

3. 掌握直流调速系统的技术指标和工作原理。

技能目标：1. 认识直流调速柜的结构及组成。

2. 掌握直流调速系统简单的调试操作。

任务描述

直流电动机的调速是为了满足工作机械对不同转速的需要，而人为地对电动机转速进行控制。直流电动机具有良好的启动、制动性能，适宜于大范围内平滑调速，在需要调速的高性能可控电力拖动领域中得到了广泛的应用。本任务主要学习直流调速技术的基础知识，认识晶闸管直流调速系统，能进行简单的操作等。

相关知识

一、直流电动机调速方案

直流调速系统多数采用他励直流电动机，他励直流电动机的转速公式为

$$n = \frac{U_d - I_d (R_d + R)}{C_e \Phi} = \frac{U_d}{C_e \Phi} - \frac{R_d + R}{C_e \Phi} I_d = n_0 - \Delta n \quad (1-1)$$

式中 n ——电动机转速；

n_0 ——电动机理想空载转速；

U_d ——电动机电枢电压；

I_d ——电动机电枢电流；

R_d ——电动机电枢电阻；

R ——电动机电枢回路串联附加电阻；

C_e ——电动机的电动势常数（由电动机结构决定）；

Φ ——电动机的励磁磁通；

Δn ——转速降。

由此可知，直流电动机的调速方案有以下三种：

1. 改变电动机的电枢电压 U_d 调速（简称调压调速）

改变电动机电枢电压 U_d 时，理想空载转速 n_0 也改变，当电枢电流（负载电流） I_d 不变

时，转速降 Δn 不变，机械特性的硬度不变，其机械特性曲线是一簇以 U_d 为参数的平行线。改变电动机电枢电压，其机械特性基本上是平行地上下移动，如图 1-1 所示。

调压调速在整个调速范围内均有较大硬度，调速范围较宽。由于受电动机绕组绝缘性能等因素影响，电压的变化只能小于额定电压，因而这种调速方案只用于电动机额定转速以下的调速。在恒定磁通时，调压调速属于恒转矩调速。

2. 改变电动机的励磁磁通 Φ 调速（简称调磁调速）

改变电动机励磁回路的励磁电压大小（或在励磁回路中改变串联附加电阻的大小）可改变励磁电流的大小，从而改变励磁磁通而实现调速目的。由于直流电动机磁通在额定值时，其铁心已接近饱和，增加磁通的余地很小，因而改变磁通的调速方式主要用减弱磁通 Φ 来升速。由式（1-1）可知，理想空载转速 n_0 与磁通 Φ 成反比，减弱磁通 Φ 时，理想空载转速 n_0 增加，转速降 Δn 增加，机械特性变软，如图 1-2 所示。

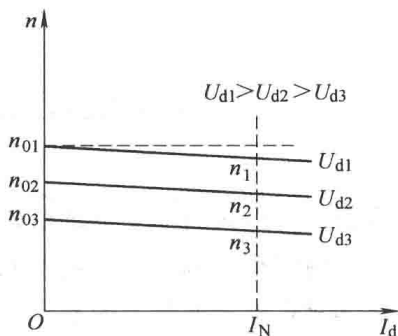


图 1-1 改变电枢电压的机械特性

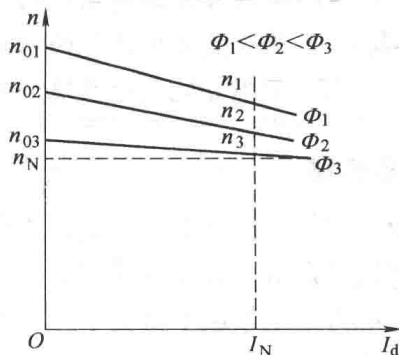


图 1-2 改变励磁磁通的机械特性

这种调速方案属于恒功率调速。调磁调速的调速范围不大，一般是配合调压调速，在电动机额定转速以上采用。将调压调速和调磁调速结合起来则构成调压调磁复合调速系统，可得到更大的调速范围，额定转速以下采用调压调速，额定转速以上采用调磁调速。

3. 改变电动机的电枢回路串联附加电阻调速

由式（1-1）可知，当电枢回路串联附加电阻 R 增加时，在一定负载下，转速降 Δn 增加，电动机转速降低从而实现调速目的。实质上该调速方案是利用电枢电流 I_d 在 $(R_d + R)$ 上的电压降不同，转速降 Δn 不同而得到不同的转速，其机械特性如图 1-3 所示。

改变电枢回路串联附加电阻调速是有级调速，机械特性软，转矩受负载影响大，轻载和重载时转速不同。另外，该调速方案中调速电阻长期运行损耗大，经济性差，目前已很少采用。

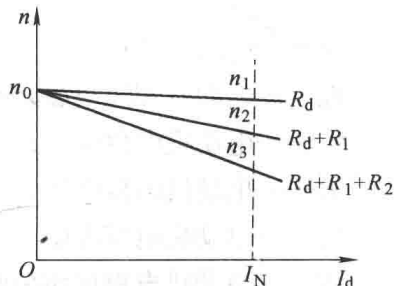


图 1-3 改变电枢回路串联附加电阻的机械特性

由以上分析可知，上述三种调速方案中，调压调速是直流电动机的主要调速方案，应用最广泛；调磁调速通常配合调压调速组成调压调磁复合调速方案。三种调速方法的控制特点见表 1-1。

表 1-1 三种调速方法的控制特点

项目	改变电枢回路串联电阻	改变励磁磁通	改变电枢电压
实现方法	在直流电动机的电枢回路中串联一只调速变阻器来实现调速	改变励磁电流的大小来实现调速	使用可变直流电源来实现调速
电路图			
特点	特性: 1) 设备简单, 投资少, 只需增加电阻和切换开关, 操作方便。小功率电动机中用得较多, 如电力机车等 2) 属于恒转矩调速方式, 转速只能由额定转速往下调 3) 只能分级调速, 调速平滑性差 4) 低速时, 机械特性很软, 转速受负载影响变化大, 电能损耗大, 经济性能差	1) 调速在励磁回路中进行, 功率较小, 故能量损失小, 控制方便 2) 速度变化比较平滑, 但转速只能往上调, 不能在额定转速以下进行调节 3) 调速范围较窄, 在磁通减少太多时, 由于电枢磁场对主磁场的影响加大, 会使电动机火花增大、换向困难 4) 在减少励磁调速时, 如负载转矩不变, 电枢电流必然增大, 要防止电流太大带来的问题, 如发热、打火等	1) 调速范围宽广, 可以从低速一直调到额定转速, 速度变化平滑, 通常称为无级调速 2) 调速过程中没有能量损耗, 且调速的稳定性较好 3) 转速只能由额定转速往低调, 不能超过额定转速 (因端电压不能超过额定电压) 4) 所需设备较复杂, 成本较高

二、直流电动机调压调速系统的主要方式

在调压调速方案中, 目前主要有发电机 - 电动机 (G - M) 系统、晶闸管 - 电动机 (V - M) 系统及直流斩波和脉宽调速系统三种方式。

1. 发电机 - 电动机 (G - M) 系统

该系统主要由直流发电机 G 和直流电动机 M 组成, 如图 1-4 所示。

直流发电机 G 由原动机 M (交流异步电动机或同步电动机) 拖动, Φ_G 、 Φ_M 分别是发电机和电动机励磁回路的磁通。改变发电机励磁回路的磁通 Φ_G , 即改变发电机的输出电压 U_G 也就改变了直流电动机电枢电压 U_d , 从而实现调压调速的目的。

该系统的机械特性如图 1-5 所示, 其机械特性曲线是一簇相互平行的直线, 特性比较硬。

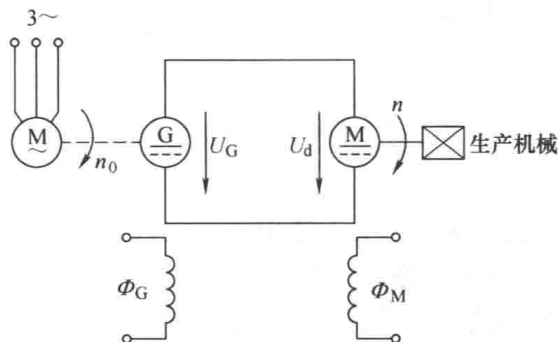


图 1-4 发电机 - 电动机 (G - M) 系统原理图

实际应用中多采用图 1-6 所示的带电机扩大机的发电机 - 电动机调速系统。

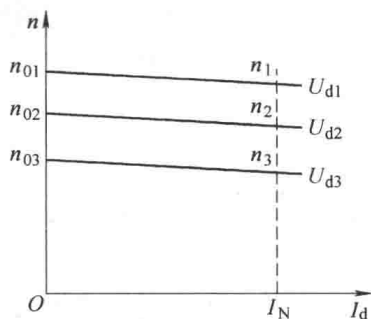


图 1-5 G-M 系统的机械特性

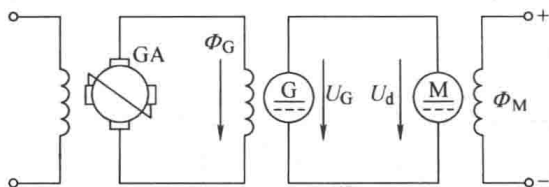


图 1-6 带电机扩大机的发电机 - 电动机调速系统

图中电机扩大机 GA 作为励磁机向发电机励磁绕组供电。改变电机扩大机的控制电压，也就改变电机扩大机的电压，改变发电机励磁电流（磁通 Φ_G ），改变发电机输出电压（改变电动机电枢电压）从而实现调压调速的目的。发电机 - 电动机系统具有调速范围较宽、特性硬、调速平滑、调速性能较好等优点。但发电机 - 电动机系统存在设备占地面积大、能耗高、效率低、运行噪声大、维修工作量大等缺点。随着晶闸管 - 电动机系统的出现和应用，现已逐步被晶闸管 - 电动机系统所代替。尽管如此，发电机 - 电动机系统目前仍在一些设备（如龙门刨床）中使用。

2. 晶闸管 - 电动机（V-M）系统

该系统主要由晶闸管变流装置 V 和直流电动机 M 组成，如图 1-7 所示。通过改变转速给定电压 U_{gn} 来改变晶闸管变流装置触发延迟角 α ，即改变了晶闸管的导通角 θ 的大小，进而改变晶闸管变流装置输出电压 U_d 的大小，达到改变直流电动机转速的目的，其机械特性如图 1-8 所示。

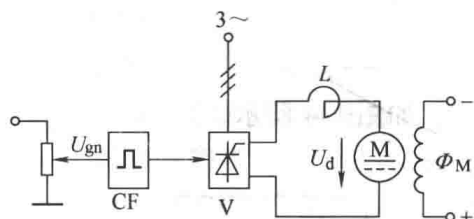


图 1-7 晶闸管 - 电动机系统

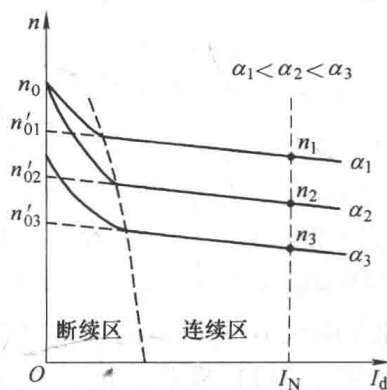


图 1-8 V-M 系统的机械特性

由图 1-8 可见，在电流连续区，该特性曲线亦是一簇互相平行的直线，与发电机 - 电动机（G-M）系统的机械特性相似。晶闸管 - 电动机（V-M）系统与上述发电机 - 电动机系统相比较，具有控制灵敏、响应快、占地面积小、能耗低、效率高、噪声小、维护方便等优点，得到了广泛应用。目前，直流电动机调速系统绝大部分都采用晶闸管 - 电动机系统。

但晶闸管-电动机系统也存在功率因数低,产生高次谐波引起电网电压、电流波形畸变以及晶闸管过载,过电流能力差等问题,使用中应引起足够重视。

3. 直流斩波和脉宽调速系统

在干线铁道电力机车、工矿电力机车、城市有轨和无轨电车、地铁电力机车、电动自行车、新能源电动汽车等电力牵引设备上,常采用恒定直流电源(蓄电池或不可控整流电源)供电,驱动串励或复励直流电动机运行。目前利用现代电力电子器件(如 GTR、GTO、MOSFET 和 IGBT 等)的通断控制,将固定直流电压变为可调的平均直流电压进行直流电动机的调速。这种采用单管控制的电路,称为直流斩波;若保持周期不变,用微处理器的数字输出控制开关器件的通断时间,称为脉宽调制(PWM)。PWM 直流调速系统具有以下优点:

- 1) 主电路简单,需要的功率器件少。
- 2) 开关频率高,电流连续并且谐波少,使电动机转矩脉动小、发热少。
- 3) 低速性能好,稳速性能高,调速范围宽。
- 4) 转速调节迅速,动态性能好,抗干扰能力强。
- 5) 器件工作在开关状态,损耗小,装置的效率较高。

6) 与 V-M 系统相比,PWM 直流调速系统采用不可控整流电路,其从电网侧看进去的设备功率因数较高。

基于以上优点,同时随着微型计算机控制技术的飞速发展,脉宽调制变换器的性能有了较大的提高,应用也逐步扩大,是直流调速系统的一个重要发展方向。

三、直流调速系统的基本组成及常用术语

1. 直流调速系统的基本组成

直流调速系统的基本组成框图如图 1-9 所示。

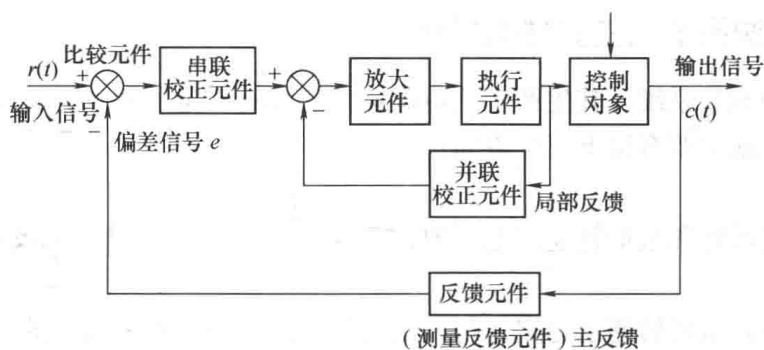


图 1-9 直流调速系统的基本组成框图

直流调速系统按其具体用途的不同,可以有各式各样的结构形式,但是从原理上来看,直流调速系统是由一些具有不同功能的基本元件组成的。图 1-9 所示的典型直流调速系统的框图中各元件的作用如下:

测量反馈元件:用以测量被控量,并将其转换成与输入量同类的物理量后,再反馈至输入端以作比较。

比较元件:用来比较输入信号与反馈信号。

放大元件：将微弱的信号作线性放大，并产生反映两者差值的偏差信号。

校正元件：按某种函数规律变换控制信号，以利于改善系统的动态品质或静态性能。

执行元件：根据偏差信号的性质执行相应的控制作用，以便使被控量按期望值变化。

控制对象：又称为被控对象或受控对象，通常是指生产过程中需要进行控制的生产机械或生产过程。出现在被控对象中需要控制的物理量称为被控量。

图中串联校正元件和并联校正元件是为了改善系统的控制性能而引入的校正环节。

2. 直流调速系统中的常用术语

直流调速系统中的常用术语如下：

【输入信号】：又称为参考输入，通常是指给定值，它是控制着输出量变化规律的指令信号。

【输出信号】：被控对象中要求按某种规律变化的物理量，又称为被控量，它与输入量之间保持一定的函数关系。

【反馈信号】：取自系统（或元件）输出端并反向送回系统（或元件）输入端的信号。反馈有主反馈和局部反馈、正反馈和负反馈之分。

【偏差信号】：参考输入与主反馈信号之差。偏差信号简称偏差，其实质是从输入端定义的误差信号。

【误差信号】：系统输出量的实际值与期望值之差，简称误差，其实质是从输出端定义的误差信号。显然，在单位反馈（反馈信号不经放大直接送入比较元件）的情况下误差值也就是偏差值，两者是相等的。

【扰动信号】：简称扰动或干扰，它与控制作用相反，是一种不希望的、能破坏系统输出规律的不利因素。扰动信号既可来自系统内部，又可来自系统外部，前者称为内部扰动，后者称为外部扰动。

四、直流调速系统的主要性能指标

对于任何一个调速系统，其生产工艺对调速性能都有一定的要求，总体来说，对于调速系统转速控制的要求主要有以下三个方面：

（1）调速

在一定的最高转速和最低转速的范围内，分挡（有级）或平滑（无级）调节转速。

（2）稳速

以一定的精度在所需转速上稳定运行，在各种干扰下不允许有过大的转速波动，以确保产品质量。

（3）加、减速

频繁起、制动的设备要求加、减速尽量快，以提高生产效率；不宜经受剧烈速度变化的机械设备则要求起、制动尽量平稳。

直流调速系统的主要性能指标是衡量调速性能好坏的标准，亦是直流调速系统设计和实际运行中考核的主要指标。直流调速系统的主要性能指标包括静态性能指标和动态性能指标两部分。

1. 主要静态性能指标

1) 调速范围 D 。调速范围 D 是指电动机在额定负载下，电动机的最高转速 $n_{\max}$ 与最低

转速 $n_{\min}$ 之比, 即

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

对于少数负载很轻的机械设备 (如精密机床), 最高转速 $n_{\max}$ 和最低转速 $n_{\min}$ 时的负载可另作规定。

2) 转差率 s 。转差率 s 是指电动机在某一转速下运行时, 负载由理想空载增加到额定负载时所产生的转速降 Δn_N 与理想空载转速 n_0 之比, 常用百分数表示, 即

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

由式 (1-3) 可知, 转差率 s 与机械特性硬度以及理想空载转速 n_0 有关。机械特性越硬, 转差率 s 越小。同样硬度的机械特性, 理想空载转速越低, 转差率 s 越大。在调压调速系统中, 同一电动机在不同转速运行时, 其额定转速降 Δn_N 是相同的, 但理想空载转速 n_0 则不同, 因而电动机在不同转速运行时的转差率不同。高速时转差率 s 小, 低速时转差率 s 大。所以对一个系统所提的转差率要求, 主要是对最低转速的转差率要求, 最低转速时转差率能满足要求, 高速时就不成问题了。

3) 调速的平滑性。在一定范围内调速的级数越多, 调速就越平滑, 相邻两级转速之比称为平滑系数 ϕ , 即

$$\phi = \frac{n_i}{n_{i-1}}$$

ϕ 值越接近 1, 平滑性越好, 当 $\phi = 1$ 时, 称为无级调速。

4) D 、 s 、 Δn_N 之间的关系。在调压调速中, $n_{\max}$ 等于电动机的额定转速, 即

$$n_{\max} = n_N$$

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

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

$$s = \frac{\Delta n_N}{n_{0\min}}, \quad n_{0\min} = \frac{\Delta n_N}{s}$$

所以

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

式 (1-4) 表示了调速范围 D 、转差率 s 和静态转速降 Δn_N 三者之间的关系。 n_N 可由电动机出厂数据给出, D 和 s 由生产实际要求确定。当系统的特性硬度一定 (Δn_N 一定) 时, 如要求转差率 s 越小, 则调速范围 D 也就越小; 反之, 要求 D 和 s 一定时, 那么静态转速降 Δn_N 就必须小于某一值。即

$$n = \frac{KU_{\text{gn}}}{C_e \Phi} - \frac{R_n + R_d}{C_e \Phi} I_d \quad (1-5)$$

【例 1-1】 已知某一龙门刨床工作台直流调压调速系统, 直流电动机参数为 $P_N = 60\text{kW}$, $U_N = 220\text{V}$, $I_N = 305\text{A}$, $n_N = 1000\text{r/min}$, 电枢电阻 $R_d = 0.05\Omega$, 要求的调速范围

$D=20$ ，试求：

(1) 高速和最低转速时的转差率 s_1 和 s_2 ；

(2) 转差率 $s \leq 5\%$ ，对应的转速降 Δn_N 。

解：(1) 求最低转速时的转差率 s 。

C_e 为电动机的电动势常数，可由电动机出厂铭牌数据求出，即

$$C_e = \frac{U_N - I_N R_d}{n_N} = \frac{220\text{V} - 305 \times 0.05\text{V}}{1000\text{r/min}} = 0.2\text{V}/(\text{r/min})$$

额定负载下电枢电阻 R_d 引起的转速降为

$$\Delta n_N = \frac{I_N R_d}{C_e} = \frac{305 \times 0.05}{0.2} \text{r/min} = 76.25\text{r/min}$$

最低转速时的转差率 s_2 为

$$s_2 = \frac{\Delta n_N}{n_{02}} \times 100\% = \frac{\Delta n_N}{n_{\min} + \Delta n_N} \times 100\% = \frac{76.25}{\frac{1000}{20} + 76.25} \times 100\% = \frac{76.25}{50 + 76.25} \times 100\% = 60.4\%$$

高速时的转差率 s_1 为

$$s_1 = \frac{\Delta n_N}{n_{01}} \times 100\% = \frac{\Delta n_N}{n_{\max} + \Delta n_N} \times 100\% = \frac{76.25}{1000 + 76.25} \times 100\% = 7\%$$

(2) $D=20$ ， $s \leq 5\%$ 时：

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

由以上计算可知，最低转速时的转差率 s_2 远远大于高速（额定转速）时的转差率 s_1 ，只要最低转速时的转差率 s_2 满足要求，高速时的转差率 s_1 肯定满足要求。如系统要满足 $D=20$ ， $s \leq 5\%$ 的要求，必须采用闭环控制系统，使 Δn_N 从 76.25r/min 减小到 2.63r/min 。

2. 主要动态性能指标

动态性能指标是指在给定控制信号和扰动信号作用下，控制系统输出在动态响应中的各项指标。理想的控制系统能对该给定控制信号的变化不失真地准确跟踪，具有很好的跟随性，同时对扰动信号具有很强的抗扰性，不受扰动的影响。因此，动态性能指标分为给定控制信号和扰动信号作用下两类性能指标。

(1) 给定控制信号作用下的动态性能指标

对直流调速系统来说，一般采用单位阶跃给定控制信号作用下系统输出响应的上升时间 t_r 、调节时间（亦称过渡过程时间）和超调量 σ （%）来衡量系统对给定控制信号作用下的动态性能指标。系统在单位阶跃给定控制信号作用下的动态响应曲线如图 1-10 所示。

1) 上升时间 t_r 。上升时间是从加上阶跃给定控制信号的時刻起到系统输出量第一次达到稳态值所需的时间。

2) 调节时间 t_T （亦称过渡过程时间）。调节时间是从加上阶跃给定控制信号的時刻起到系统输出量进入（并且不再超出）其稳态值的 $\pm (2 \sim 5)\%$ 允许误差范围之内所需的最短时间。

3) 超调量 σ 。超调量 σ 是指在动态过程中系统输出量超过其稳态值的最大偏差与稳态

值之比，通常用百分数表示，即

$$\sigma = \frac{Y(t_m) - Y(\infty)}{Y(\infty)} \times 100\%$$

超调量 σ 用来表征系统的相对稳定性，超调量 σ 小表示系统的稳定性好。 t_r 小表示系统快速性越好。这两者往往是互相矛盾的，减小了超调量 σ ，就导致 t_r 增加，也就延长了过渡过程时间。反之，加快过渡过程时间，减小 t_r ，却又增加了超调量 σ 。实际应用中，应根据工艺的要求选择合适参数指标。

4) 振荡次数。振荡次数是指在调节时间内，输出值在稳态值上下摆动的次数。

(2) 扰动信号作用下的动态性能指标

对直流调速系统来说一般采用突加阶跃扰动作用下的系统输出响应的最大动态速降、恢复时间 t_s 来衡量系统对扰动响应的动态性能指标。系统在突加阶跃扰动作用下的动态响应曲线如图 1-11 所示。

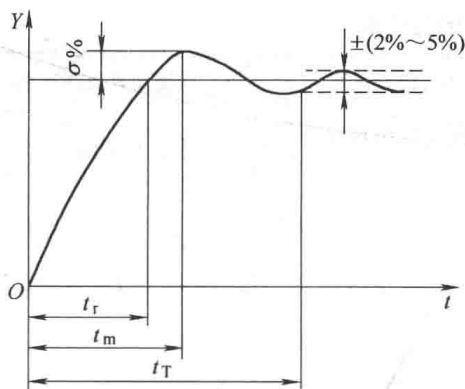


图 1-10 单位阶跃给定控制信号作用下的动态响应曲线

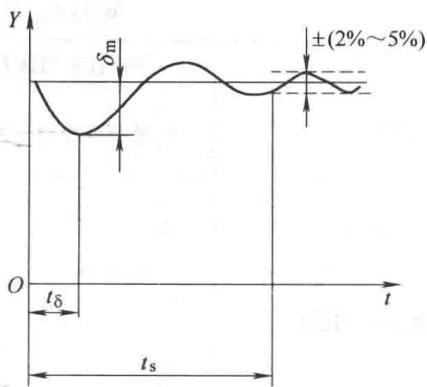


图 1-11 突加阶跃扰动作用下的动态响应曲线

1) 最大动态速降。最大动态速降是在突加阶跃扰动作用下，系统的输出响应的最大动态速降，常用百分数表示，即

$$\delta_m = \frac{Y(\infty) - Y(t_\delta)}{Y(\infty)} \times 100\%$$

2) 恢复时间 t_s 。 t_s 是从加上突加阶跃扰动的时刻起到系统输出量进入原稳态值的 $Y(0)$ 的 95% ~ 98% 范围内 [与稳态值之差 $\pm (2\% \sim 5\%)$] 所需的最短时间。最大动态速降越小，恢复时间 t_s 越小，说明系统的抗扰能力越强。

五、晶闸管 - 直流电动机调速系统的分类

在以上三种调压调速用的可控直流电源中，工业上应用最为典型的是晶闸管 - 电动机调速系统。通过分析晶闸管 - 电动机调速系统，可以系统地了解自动控制理论的基本思路和调速系统的各项性能指标。

1. 按控制方法分类

晶闸管 - 电动机调速系统从控制方法上可以分为三种。

(1) 开环直流调速系统