



普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

Electrical towage
control systems

电力拖动 自动控制系统

© 周渊深 陈涛 朱希荣 宋永英 等 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

013031783

TM921.5-43

47

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十二五”规划教材

电力拖动自动控制系统

周渊深 陈 涛 朱希荣 宋永英 许开其 周玉琴 编著



TM921.5-43

47



机械工业出版社



北航

C1636565

本书是一本将交直流调速技术和 MATLAB 仿真技术有机结合在一起的新颖教材。书中精简了传统的调速技术内容,重点介绍典型的直流和交流调速系统。本书加强了调速系统的实验内容,丰富了仿真实验和实物实验的内容,以满足应用型本科院校的教学需要。本书遵循理论和实际相结合的原则,具有如下特点:①典型的调速系统都配有相关的仿真实验和实物实验,做到学以致用;②书中安排了课程设计大纲、任务书、指导书和相关的资料,将实践内容与理论教学内容紧密结合;③本书采用基于调速系统原理框图的图形化仿真技术,其仿真方法与实物实验方法相似,仿真效果好;④每章开头有内容提要,章尾有习题。第3、6、7章的 MATLAB 仿真实验及课程设计内容等可发邮件到 zys62@126.com(或 yaxin_w74@126.com)索取。

全书共分7章,包括直流调速系统的基本原理与方法、直流调速系统的动态分析与设计、直流调速系统的 MATLAB 仿真以及实验与实训、交流调速系统的基本原理与方法、矢量控制的高性能异步电动机变频调速系统、交流调速系统的 MATLAB 仿真以及实验与实训、交直流调速系统课程设计。

本书可作为应用型本科学校的电气工程及其自动化、自动化、机械设计制造及其自动化等专业,以及高职高专、继续教育等学校的电气技术、工业电气自动化、机电一体化技术等专业学生的教材,也可作为电气爱好者和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电力拖动自动控制系统 / 周渊深等编著. —北京:机械工业出版社,2013.2
普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-40411-8

I. ①电… II. ①周… III. ①电力传动—自动控制系统—高等学校—教材②自动控制系统—系统仿真—软件包—高等学校—教材 IV. ①TP273②TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 273017 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:王雅新 责任编辑:王雅新
版式设计:霍永明 责任校对:闫玥红 丁丽丽
封面设计:张静 责任印制:乔宇
北京汇林印务有限公司印刷
2013年3月第1版第1次印刷
184mm×260mm·20.75印张·513千字
标准书号:ISBN 978-7-111-40411-8
定价:39.00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

封面防伪标均为盗版

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十二五”规划教材

编审委员会委员名单

主任委员：刘国荣

副主任委员：

张德江 梁景凯 张元 袁德成 焦斌
吕进 胡国文 刘启中 汤天浩 黄家善
钱平 王保家

委员（按姓氏笔画排序）：

丁元明 马修水 王再英 王军 叶树江
孙晓云 朱一纶 张立臣 李先允 李秀娟
李海富 杨宁 陈志新 周渊深 尚丽萍
罗文广 罗印升 罗兵 范立南 娄国焕
赵巧娥 项新建 徐建英 郭伟 高亮
韩成浩 蔡子亮 樊立萍 穆向阳

前 言

本书根据应用型本科教学要求而编写，主要介绍典型的直流和交流调速系统，以及调速系统的仿真技术。本书针对应用型本科学生的特点，在内容上做到理论和实际相结合，强调工程应用，具有如下特点：

- 1) 典型的调速系统配有相关的仿真实验和实物实验，做到学以致用。
- 2) 书中安排的课程设计大纲、任务书、指导书和相关的设计资料，将实践内容与理论教学内容紧密结合。
- 3) 为了加强实践教学，本书利用作者早期的科研成果，采用基于调速系统原理框图的图形化仿真技术，完成了交直流调速系统中典型系统的仿真实验。该仿真方法与实物实验方法相似，仿真效果好，简单易学，好理解。

本书除绪论外，分为7章：第1章直流调速系统的基本原理与方法，介绍典型的直流调速系统，以研究直流可控电源为线索讨论调速系统的主电路；在熟悉常用反馈检测装置的基础上，按照系统由简单到复杂的发展过程，介绍开环直流调速系统、单闭环直流调速系统、转速电流双闭环直流调速系统、可逆直流调速系统和脉宽（PWM-M）直流调速系统；着重介绍各种闭环控制系统的建立和系统的工程实现，学习分析调速系统的基本方法。本章按照调速系统不断改进和完善的过程编排内容。第2章直流调速系统的动态分析与设计，首先介绍传统的频率域对数频率特性（Bode图）设计方法，然后重点介绍简洁的直流调速系统的工程设计方法。第3章直流调速系统的MATLAB仿真以及实验与实训，采用较新的MATLAB7.6版仿真软件，针对前述介绍的各种典型直流调速系统，运用面向调速系统原理框图的图形化仿真技术进行仿真实验；基于与课程相关的教学实验设备，介绍实物实验技术；适当进行直流调速系统的实例分析。第4章交流调速系统的基本原理与方法，介绍交流调压调速系统、串级调速系统和传统的变频调速系统，注重与直流调速系统进行对比分析；分别讨论了三种系统所涉及的晶闸管交流调压电源、串级调速系统的转子整流器和晶闸管有源逆变电源、变频调速系统使用的变频电源。第5章矢量控制的高性能异步电动机变频调速系统，重点介绍异步电动机高性能的矢量控制技术、矢量控制变频调速系统及其调节器的设计方法。第6章交流调速系统的MATLAB仿真以及实验与实训，应用MATLAB仿真软件，采用面向调速系统原理框图的图形化仿真技术，对各种典型的交流调速系统进行仿真实验；利用相关的教学实验设备进行实物实验；进行交流调速系统的实例分析。第7章交直流调速系统课程设计，根据交直流调速系统实践性强的特点，安排专业课程设计；给出课程设计大纲和课程设计任务书模板，提供基本的课程设计指导书和相关的设计资料，将实训内容与理论教学内容紧密结合。

本书按64学时理论教学内容编写。仿真实验可由学生在课后时间借助计算机自行完成；实物实验可结合课程教学安排10~12学时进行，建议完成5个实验项目；复杂

和综合性实验可安排的专业实习中进行。课程设计时间以2~3周为宜。

本书是一本将交直流调速技术和MATLAB仿真技术以及实验与实训有机结合在一起的教材,通观全书,实践教学内容占了相当篇幅。本书第3、6章的仿真实验、实物实验和实例分析以及第7章的课程设计内容都具有典型性和独立操作性,具体内容可发邮件到zys62@126.com(或yaxin_w74@126.com)索取。

本书由江苏淮海工学院周渊深教授编写绪论和第2章;河南工程学院陈涛老师编写第1章;淮海工学院朱希荣副教授编写第4、5章;宋永英、许开其、周渊深编写3、6、7章,其中,淮海工学院宋永英高级实验师和江苏省溧阳市电子电器设备厂的许开其高级工程师编写实验和课程设计指导书并对全部实物实验进行了试做,周渊深和宋永英完成仿真实验的调试和相关内容的编写;周玉琴老师绘制本书插图。全书由周渊深统稿。

在编写本书的过程中参阅和引用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。

由于作者水平有限和编写时间比较仓促,书中的疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

目 录

前言	
绪论	1
第 1 章 直流调速系统的基本原理与方法	6
1.1 直流调速系统的基本概念	6
1.1.1 直流电动机的调速方法	6
1.1.2 直流调速系统的基本结构	7
1.1.3 直流调速系统主电路中的可控直流电源	8
1.1.4 直流调速系统控制电路中的转速、电流、电压测量方法	19
1.2 单闭环直流调速系统	24
1.2.1 开环 V-M 系统及其存在的问题	24
1.2.2 单闭环转速负反馈有静差直流调速系统	26
1.2.3 单闭环转速负反馈直流调速系统的限流保护	34
1.2.4 电压负反馈直流调速系统	37
1.2.5 转速负反馈无静差直流调速系统	38
1.3 转速电流双闭环直流调速系统	42
1.3.1 理想起动及其实现	42
1.3.2 转速电流双闭环直流调速系统的组成及工作原理	43
1.3.3 双闭环直流调速系统的稳态结构图、静特性及稳态参数计算	44
1.3.4 双闭环直流调速系统的起动特性	45
1.3.5 双闭环直流调速系统动态性能的改进——转速微分负反馈	46
1.4 脉宽直流调速系统	47
1.4.1 PWM-M 系统概述	47
1.4.2 PWM 变换器和 PWM-M 系统开环机械特性	48
1.4.3 PWM-M 直流调速系统	49
1.5 可逆直流调速系统	49
1.5.1 可逆运行及可逆电路	49
1.5.2 可逆直流调速系统中的环流分析	52
1.5.3 有环流可逆直流调速系统	55
1.5.4 无环流可逆直流调速系统	60
习题与思考题	65
第 2 章 直流调速系统的动态分析与设计	68
2.1 单闭环直流调速系统的动态分析	68
2.1.1 单闭环直流调速系统的动态数学模型	68
2.1.2 单闭环直流调速系统的动态分析——稳定性分析和比例积分调节器串联校正	72
2.2 双闭环直流调速系统的动态分析	75
2.3 工程设计方法及其在双闭环直流调速系统中的应用	77
2.3.1 调速系统的工程设计方法	77
2.3.2 工程设计方法在双闭环直流调速系统中的应用	91
习题与思考题	102
第 3 章 直流调速系统的 MATLAB 仿真以及实验与实训	104
3.1 直流调速系统的 MATLAB 仿真实验	104
3.1.1 晶闸管开环和单闭环直流调速系统的 MATLAB 仿真实验	104
3.1.2 晶闸管双闭环直流调速系统的 MATLAB 仿真实验	120
3.1.3 晶闸管三闭环直流调速系统的 MATLAB 仿真实验	123
3.1.4 晶闸管可逆直流调速系统的	

MATLAB 仿真实验	128	功率因数	193
3.1.5 脉宽直流调速系统的 MATLAB 仿真实验	140	4.4 异步电动机变频调速系统	195
3.2 直流调速系统的实验	152	4.4.1 变频调速系统的基本控制方式 和机械特性	195
3.2.1 调速系统实验概述	152	4.4.2 变频调速系统中的变频电源	200
3.2.2 实验装置认识及其调试 方法实验	153	4.4.3 晶闸管变频调速系统	212
3.2.3 晶闸管直流调速系统参数和 环节特性的测定实验	157	4.4.4 脉宽调制的异步电动机变频 调速系统	216
3.2.4 双闭环晶闸管不可逆直流 调速系统实验	161	习题与思考题	222
3.2.5 逻辑无环流可逆直流调速 系统实验	164	第 5 章 矢量控制的高性能异步电动机 变频调速系统	224
3.2.6 直流脉宽调制 PWM 调速 系统实验	168	5.1 直流电动机和异步电动机的电磁 转矩和矢量控制的基本原理	224
3.3 直流调速系统的实例分析	171	5.1.1 直流电动机和异步电动机的 电磁转矩	224
3.3.1 小容量有静差直流调速 系统实例	171	5.1.2 矢量控制的基本原理	224
3.3.2 双极式 PWM-M 双闭环可逆 直流调速系统实例	174	5.2 矢量坐标变换及变换矩阵	226
习题与思考题	176	5.3 异步电动机在不同坐标系的 数学模型	231
第 4 章 交流调速系统的基本 原理与方法	177	5.3.1 异步电动机在静止坐标系的 数学模型	231
4.1 交流调速系统概述	177	5.3.2 异步电动机在 d-q 同步旋转 坐标系的数学模型	234
4.1.1 交流调速系统的特点	177	5.3.3 异步电动机在 d-q 定向坐标系的 数学模型和特点	235
4.1.2 交流调速系统的分类	177	5.4 异步电动机转子磁链观测器	238
4.2 异步电动机交流调压调速系统	178	5.4.1 转子磁链的直接检测	239
4.2.1 异步电动机交流调压调速的 原理和方法	178	5.4.2 转子磁链的间接检测	239
4.2.2 交流调压调速系统中的交流 调压电源	180	5.5 异步电动机的无速度传感器技术	241
4.2.3 交流调压调速系统的闭环控制	181	5.6 矢量控制的变频调速系统	244
4.3 绕线转子异步电动机串级调速系统	183	5.7 异步电动机的交-交变频调速 技术	247
4.3.1 串级调速的原理	183	5.7.1 异步电动机的定子电流控制	247
4.3.2 串级调速系统主电路中的 电源问题	185	5.7.2 异步电动机交-交变频调速 系统的基本结构	249
4.3.3 串级调速系统的调速特性和 机械特性	186	5.7.3 基于“工程设计方法”的 调节器设计	251
4.3.4 串级调速系统的双闭环控制	190	习题与思考题	256
4.3.5 串级调速系统的效率和			

第 6 章 交流调速系统的 MATLAB	实验	291
仿真以及实验与实训		257
6.1 交流调速系统的 MATLAB	6.3 交流调速系统的实例分析	295
仿真实验	6.3.1 异步电动机调压调速系统	
6.1.1 交流调压调速系统和串级调速	实例	295
系统的 MATLAB 仿真实验	6.3.2 异步电动机串级调速系统	
257	实例	296
6.1.2 异步电动机变频调速系统的	习题与思考题	300
MATLAB 仿真实验	第 7 章 交直流调速系统课程设计	302
265	7.1 课程设计大纲	302
6.2 交流调速系统的实物实验	7.2 课程设计任务书	303
6.2.1 双闭环三相异步电动机调压	7.3 课程设计资料	305
调速系统实验	7.3.1 晶闸管整流电源的设计指导	305
282	7.3.2 常用元器件资料	317
6.2.2 双闭环三相异步电动机串级	参考文献	323
调速系统实验		
285		
6.2.3 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		
288		
6.2.4 正弦脉宽调制变频调速系统		

绪 论

1. 电力拖动控制技术的发展

现代工业生产中，各种生产工艺的实现大多采用电动机拖动生产机械来完成。随着生产工艺要求的提高，对生产机械和拖动的电动机也提出更高的要求：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；有的要求电动机起、制动平稳，并能准确地停止在给定的位置。而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和交流调速控制技术。

2. 交直流调速控制技术的发展概况

(1) 直流调速控制技术发展概况

直流调速系统的主要优点在于调速范围广、静差率小、稳定性好以及具有良好的动态性能。在高性能的拖动技术领域，相当长时期内几乎都采用直流电力拖动系统。按供电方式不同，它可分为交流拖动的直流发电机的旋转变流机组供电、汞整流器供电、相控整流器供电和脉宽调制（PWM）变换器供电等类型。

目前，我国直流调速控制技术的发展趋势主要有以下几个方面：

- 1) 提高调速系统的单机容量。
- 2) 提高电力电子器件的生产水平，使变流器结构变得简单、紧凑。
- 3) 提高控制单元水平，使其具有控制、监视、保护、诊断及自修复等多种功能。

(2) 交流调速控制技术发展概况

交流电动机自 1885 年出现后，由于一直没有理想的调速方案，因而只被应用于恒速拖动领域。20 世纪 70 年代后，矢量控制、直接转矩控制、无速度传感器等交流调速控制技术的发展方兴未艾，各种智能控制策略不断涌现，展现出更为广阔的应用前景，必将进一步推动交流调速控制技术的发展。

3. 控制系统的计算机仿真

控制系统的计算机仿真是一门涉及控制理论、计算数学与计算机技术的综合性新型学科，它是以控制系统的数学模型为基础、以计算机为工具、对系统进行实验研究的一种方法。系统仿真就是用模型（即物理模型或数学模型）代替实际系统进行实验和研究。由于计算机仿真能够为各种实验提供方便、廉价、灵活可靠的数学模型，因此，凡是要用模型进行实验的，几乎都可以用计算机仿真来研究被仿真系统的工作特点、选择最佳参数和设计最合理的系统方案。随着计算机技术的发展，计算机仿真越来越多地取代纯物理仿真，为控制系统的分析、计算、研究、综合设计以及自动控制系统的计算机辅助教学提供了快速、经济、科学及有效的手段。

目前,较流行的控制系统仿真软件是 MATLAB,传统的仿真方法是以控制系统的传递函数为基础,使用 MATLAB 的 Simulink 工具箱对其进行计算机仿真研究。本教材应用一种面向控制系统原理框图、使用 SimPower System 工具箱进行调速系统仿真的新方法。

4. 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。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以下类型:

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。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。

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。系统对起、制动要求一般不高,起动时,一般缓慢均匀协调升速,制动时要求停车迅速协调。

5. 调速控制系统的技术指标

不同的生产机械,因生产工艺的不同,对控制系统的性能指标要求也有所不同,归纳起来有下列三个方面:

1) 调速:在一定的最高转速和最低转速范围内,有级或无级地调节转速;

2) 稳速:以一定的精度在要求的转速上稳定运行,不因各种可能的外来扰动(负载变化、电网电压波动等)而产生过大的转速波动,以确保产品质量;

3) 加、减速控制:对频繁起、制动的设备要求尽可能快地加、减速,缩短起、制动时间,以提高生产效率;对不宜经受剧烈速度变化的机械,则要求起、制动尽可能的平稳。

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。

(1) 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等。下面具体介绍调速系统中的稳态性能指标。

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, 称作静差率, 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。

然而静差率和机械特性硬度又是有区别的。如图 0-1 所示, a 和 b 为两个调压调速系统的机械特性, 两者的硬度相同, 即额定转速降 $\Delta n_{n,a} = \Delta n_{n,b}$; 但它们的静差率却不同, 其原因是理想空载转速不同。根据式 (0-2) 的定义, 由于 $n_{0a} > n_{0b}$, 因此 $s_a < s_b$ 。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, 如果能满足最低速时的静差率要求, 则大于最低速时的静差率一般都能满足要求。所以, 一般所提的静差率要求, 都是指系统在最低速时的静差率指标。

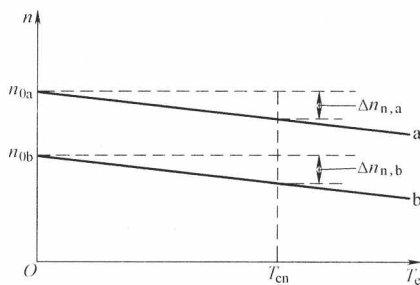


图 0-1 不同转速下的静差率

调速范围和静差率这两项指标是相互联系的。例如, 若额定负载时的额定转速降 $\Delta n_{\text{nom}} = 50\text{r/min}$, 则: 当理想空载转速 $n_0 = 1000\text{r/min}$ 时, 转速降占 5%; 当 $n_0 = 500\text{r/min}$ 时, 转速降占 10%; 当 $n_0 = 50\text{r/min}$ 时, 转速降占到 100%, 电动机就停止转动了。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, 是指在最低速时满足静差率要求下系统所能达到的最大调速范围。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, 静差率要满足要求也就容易得多了。

3) D 、 s 和 Δn_{nom} 之间的关系。因为调速系统的静差率是指系统工作在最低速时的静差率, 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

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

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, 如果要求的静差率 s 越小, 则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 $n_{\text{nom}} = 1450\text{r/min}$, 额定转速降 $\Delta n_{\text{nom}} = 80\text{r/min}$, 当要求静差率 $s \leq 25\%$ 时, 系统能达到的调速范围是

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

如果要求 $s \leq 15\%$ ，则调速范围只有

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

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。

(2) 动态性能指标

交直流调速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，转速调节时总有一个动态过程。衡量交直流调速系统动态性能的指标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。交直流调速系统的跟随性能指标一般用零初始条件下系统对阶跃输入信号的输出响应过程来表示，系统的阶跃响应曲线和跟随过程如图 0-2 所示。主要跟随性能指标如下：

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，它反映了系统动态响应的快速性。

② 超调量 $\sigma\%$ ：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

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

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，动态响应越平稳。

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快慢的，调节时间 t_s 越小，系统响应的快速性越好。

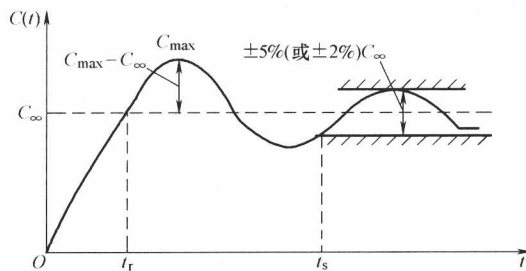


图 0-2 阶跃响应曲线和跟随过程

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时间；缩短了过渡过程时间却又增大了超调量。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。

2) 抗扰性能指标。当控制系统在稳定运行过程中受到电动机负载变化、电网电压波动等干扰因素的影响时，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。系统稳定运行中突加一个使输出量降低的扰动以后的动态过程和抗扰过程如图 0-3 所示。主要抗扰性能指标如下：

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量的最大降落值称为动态降落，一般用输出量原稳态值 $C_{\infty 1}$ 的百分数表示，即

$$\Delta C_{\max} \% = \frac{\Delta C_{\max}}{C_{\infty 1}} \times 100\% \quad (0-5)$$

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。

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 $C_{\infty 2}$ 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。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。

t_m 的含义见图中标注。

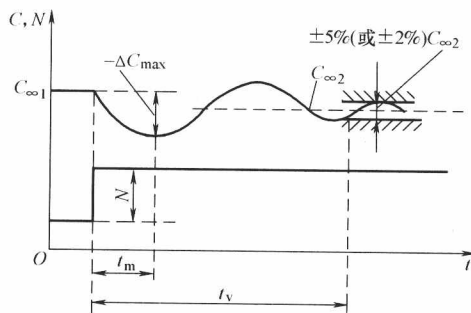


图 0-3 突加扰动的动态过程和抗扰过程

实际控制系统对于各种动态性能指标的要求各异。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性能要求都较高；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，调速系统的动态性能指标以抗扰性能为主，而随动系统的动态性能指标则以跟随性能为主。

第 1 章 直流调速系统的基本原理与方法

本章概述直流调速系统的基本概念和基本组成。在此基础上从最简单的开环系统入手，系统地介绍转速负反馈有静差和无静差调速系统、电压负反馈调速系统、转速电流双闭环调速系统以及可逆调速系统的组成、工作原理、稳态分析及稳态参数计算；叙述限流保护——电流截止负反馈的工作原理；简述转速微分负反馈对转速超调的抑制。

1.1 直流调速系统的基本概念

直流电动机具有良好的运行和控制特性，长期以来，直流调速系统在调速领域一直占据着垄断地位。虽然近年来交流调速系统发展很快，并有望取代直流调速系统，但就目前而言，直流调速仍然是自动调速系统的主要形式，在许多工业部门，如轧钢、矿山采掘、纺织、造纸等需要高性能调速的场合仍有着广泛的应用。而且由于直流调速系统在理论和实践方面都比较成熟，从控制技术的角度来看，它又是交流调速系统的基础，因此，首先着重讨论直流调速系统是十分必要的。

1.1.1 直流电动机的调速方法

1. 直流他励电动机供电原理框图

直流他励电动机供电原理框图如图 1-1 所示。

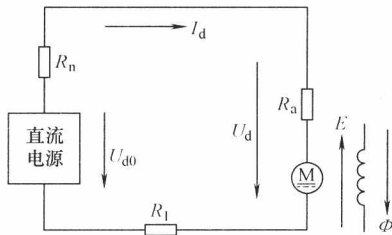


图 1-1 直流他励电动机供电原理框图

2. 直流他励电动机电气方程

由图 1-1 可得直流他励电动机的有关电气方程如下：

$$\begin{aligned} U_{d0} &= E + I_d(R_n + R_a + R_1) \\ &= E + I_d R \\ E &= C_e n = K_e \Phi n \\ n &= \frac{E}{K_e \Phi} = \frac{U_{d0} - I_d R}{K_e \Phi} = \frac{U_d - I_d R_a}{K_e \Phi} \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中， U_{d0} 为电枢供电直流电源的空载电压； U_d 为电枢电压； E 为电枢电动势； R 为电枢回路总电阻， $R = R_n + R_a + R_1$ ； R_n 为直流电源内阻； R_a 为电枢电阻； R_1 为线路或外接电阻； n

为转速，单位为 r/min ； Φ 为励磁磁通； C_e 为电动机的电动势转速比， $C_e = K_e \Phi$ ； K_e 为由电动机结构决定的电动势系数。

3. 直流他励电动机的调速方法

由直流他励电动机转速方程可见，有三种调节转速的方法，即调节电枢供电电压 U_{d0} 、减弱励磁磁通 Φ 和改变电枢回路总电阻 R 。

(1) 调节电枢供电电压的调速

从式 (1-1) 可知，当磁通 Φ 和电阻 R 一定时，改变电枢供电电压 U_{d0} ，可以平滑地调节转速 n ，机械特性将上下平移，如图 1-2 所示。由于受电动机绝缘性能的影响，电枢电压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。对于要求在一定范围内无级平滑调速的系统来说，以调节电枢供电电压方式为最好，因此调压调速也是调速系统的主要调速方式。

(2) 减弱励磁磁通的调速

减弱励磁磁通的调速也称弱磁调速，由式 (1-1) 可知，当 U_{d0} 和 R 不变时，减小 Φ （考虑到直流电动机额定运行时，磁路已接近磁饱和，因此励磁磁通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，机械特性如图 1-2 中虚线以上部分所示。

由于弱磁调速是在额定转速以上调速，电动机最高转速受换向器和机械强度的限制，其调速范围不可能太大。在实际生产中，往往只是配合调压调速，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。

(3) 改变电枢回路电阻的调速

改变电枢回路电阻的调速一般是在电枢回路中串接附加电阻，该调速方法损耗较大，只能进行有级调速，电动机的人为机械特性比固有特性软，通常只用于少数小功率场合。

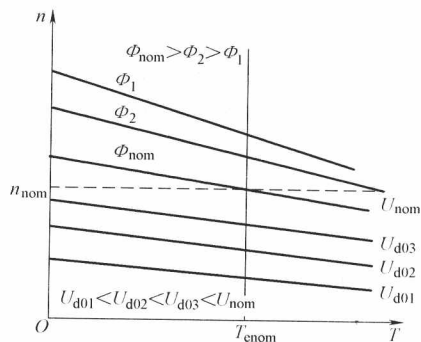


图 1-2 直流他励电动机调压调速和弱磁调速时的机械特性

1.1.2 直流调速系统的基本结构

直流调速系统是以直流电动机作为原动机拖动生产机械运动的一种传动系统。直流调速系统的基本结构如图 1-3 所示，一般由电源、变流器、电动机、控制器、传感器和负载（生产机械）组成。

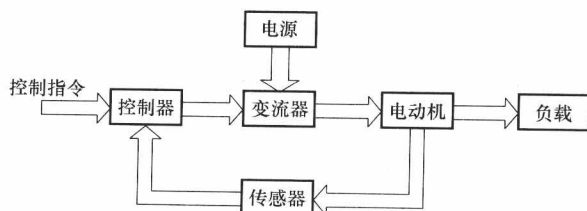


图 1-3 直流调速系统的基本结构

直流调速系统的基本工作原理是，将控制指令（如速度给定指令）和传感器采集的反馈检测信号（如速度、电流和电压等）经过一定的处理，作为控制器的输入；控制器按一定的控制算法进行运算并输出相应的控制信号，控制变流器改变输入到电动机的电源电压等参数，使电动机改变转速；再由电动机驱动负载按照相应的控制要求运动。

根据图 1-3 所示系统的基本结构可以看出，直流调速系统由下列几部分组成：

1. 系统主电路

直流调速系统的主电路由电源、变流器、直流电动机等部件组成。直流电动机的控制是通过改变其供电电源来实现的。例如，改变直流电动机电枢电压或励磁电压的方向可以控制电动机的正反转；改变电枢电压或励磁电流的大小可以实现电动机的调速等。

当电源是交流电源时，为了给直流电动机供电，变流器应该采用整流器；当电源是直流电源时，为了改变提供给直流电动机电枢供电电压的大小，变流器通常采用直流斩波器或脉宽调制变换器。

2. 系统控制电路

直流调速系统的控制电路由控制指令装置、控制器、反馈信号检测装置等部件组成。

1) 控制指令装置是产生控制系统工作的给定信号的部件。对直流调速系统而言，它发出速度给定信号。

2) 反馈信号检测装置是构成反馈系统的重要部件。根据反馈控制原理，需要实时检测调速控制系统的各种状态，如电压、电流、转矩或转速等，因此，研究系统状态检测方法是提高其控制性能的重要课题。

3) 控制策略和控制器的设计。任何自动控制系统的核心都是对控制方法的研究和控制策略的选择，调速系统也不例外，因此，研发或选择适当的控制方法或策略是实现自动速度控制系统时所面对的主要问题。

1.1.3 直流调速系统主电路中的可控直流电源

实现直流调压调速，首先要有一个平滑可调的直流电源。常用的可调直流电源有以下三种：

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

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

3) 直流斩波器或脉宽调制变换器。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直流平均电压。

采用旋转式变流机组给直流调速系统供电，如图 1-4 所示。由交流电动机 M_1 拖动直流发电机 G 发电，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。

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。

随着 20 世纪 50 年代晶闸管的问世，从 60 年代开始，晶闸管控制的相控整流器逐渐取代了旋转变流机组，使直流调速系统产生了重大变革。相控整流器由工频交流电源供电，通过改变触发延迟角 α 的大小来控制输出直流电压，使得其响应时间在毫秒级，比旋转变流