

21世纪高职高专规划教材 电气、自动化、应用电子技术系列

刘松 主编

电力拖动自动控制系统

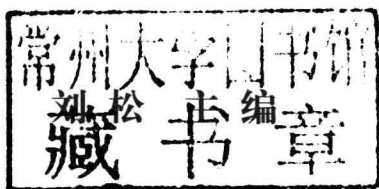
(第2版)

清华大学出版社

21世纪高职高专规划教材 电气、自动化、应用电子技术系列

电力拖动自动控制系统

(第2版)



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书详细介绍了直、交流电动机调速系统的理论及应用,强调重点。内容主要包括直流调速系统的静、动态特性分析,晶闸管直流电动机不可逆与可逆调速系统,自动控制系统的工程设计方法,直流脉宽调速系统,交流调压调速系统,绕线式异步电动机串级调速系统,交流电动机变频调速系统,异步电动机矢量变换控制系统和异步电动机直接转矩控制等。对有关直、交流电动机调速的内容进行了筛选,遵循“少而精”的原则,从实际问题出发,侧重完整的系统原理分析与工程设计。每章含有小结和习题,最后给出部分实验的实验指导。

本书可作为工业电气自动化专业、电气工程及自动化专业、自动化专业或其他相近专业高职高专教材,也可供相关工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电力拖动自动控制系统/刘松主编.--2版.--北京:清华大学出版社,2014

21世纪高职高专规划教材.电气、自动化、应用电子技术系列

ISBN 978-7-302-33977-9

I. ①电… II. ①刘… III. ①电力传动—自动控制系统—高等职业教育—教材 IV. ①TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第227642号

责任编辑:王剑乔

封面设计:傅瑞学

责任校对:刘静

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京市清华园胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:16.75 字 数:386千字

版 次:2006年5月第1版 2014年1月第2版 印 次:2014年1月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:36.00元

产品编号:051170-01

第1版前言

电力拖动自动控制系统(第2版)

《电力拖动自动控制系统》是工业电气及自动化专业的重要课程之一。本书主要依据工业电气及自动化专业对自动控制系统课程的基本要求,结合教育培养目标编写的。在吸收有关教材的长处及本领域新技术内容的基础上,注重课程内容的整合、精选,突出重点,将直流、交流拖动系统整合在一起编写,力图打破“高不成,低不就”的局面。在适当阐述理论的基础上,将重点放在工程应用及实际系统的分析上,以提高处理实际问题的能力。

本书共分8章,第1、2、3、4、5章为直流调速系统及其应用,第6、7、8章为交流调速系统及其应用。工程设计方法包含在第3章讨论,而通用变频器选择与使用则并入第8章介绍。

本书由刘松担任主编。其中第1章~第5章以及绪论部分由刘松编写,第6章和第7章由赵双元编写,第8章由刘松、赵双元共同编写,教学实验由孙振龙、于会敏编写。

辽宁科技学院胡学林教授对本书的编写工作提出了许多有益的建议;姜连志副教授参与了本书的提纲拟定和讨论;胡君臣、谷跃文帮助编者做了许多具体工作。在此,谨向上述人员和书后所有参考文献的作者表示衷心的感谢!

本书的顺利出版,还要感谢辽宁科技学院高玮副教授和白霞副教授给予的大力支持和帮助。

在本书的编写过程中,力求把握实际的教学特点,遵循“少而精,够用为度”的原则。尝试“讲清楚了多少”,不追求“看到了多少”。但是我们深感这个步伐迈得还不够大。“说得好不如做得好,想得出来未必做得出来”。由于作者的水平所限,书中的错误和不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2005年12月

前 言

电力拖动自动控制系统(第2版)

“电力拖动自动控制系统”是工业电气及自动化专业的重要专业课程。系统掌握拖动系统的调速知识及其实用技术,对于电气工程类学生是十分重要的。本书第1版于2006年出版。根据多年教学实践经验基础和更新的科研与技术成果,再次优化“重基础、重应用、内容新”的体系,决定对此书进行修订再版。本书继续强调注重课程内容的整合、精选,突出重点,在适当阐述理论的同时,重点放在工程应用实际系统的分析上,帮助读者理解掌握主要理论,提高处理实际问题的能力。

在总体内容上,本书和第1版一样,分为直流拖动控制系统和交流拖动控制系统两部分。原直流调速部分由5章缩减为4章,交流调速部分则由3章增加到5章,意在跟进技术进步与实际工程需要。全书共分9章,第1、2、3、4章为直流调速系统及其应用,第5、6、7、8、9章为交流调速系统及其应用。矢量变换控制系统单独成为第8章,新增第9章为直接转矩控制技术。原第3章、第4章和第5章内容基本不变,改为第2章、第3章和第4章,教学实验部分仍然保留。直流调速部分修改了部分内容。交流调速部分则是在教学实践的基础上,结合当前交流调速发展形势,重新编选和改写而成。

本书第6章和第7章由赵二元编写,教学实验由孙振龙、于会敏编写,其他各章及内容全部由刘松编写,有较大部分内容是根据多年的教学讲义讲稿改写而成。

在此,谨向参加编写的老师和书后所有参考文献的作者表示衷心的感谢!

在这次修订再版过程中,仍然遵循“少而精,够用为度”的原则,重视新技术、新应用。尝试“讲清楚多少”,不追求“看到多少”。加强“应用型”人才培养的理论基础和实践能力。

由于作者水平和能力有限,错误和不妥在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2013年10月

目 录

电力拖动自动控制系统(第2版)

绪论	1
第1章 直流调速系统特性分析	5
1.1 调速系统的基本概念	5
1.1.1 转速控制的要求和调速指标	5
1.1.2 开环调速系统的性能和存在问题	7
1.2 转速负反馈自动调速系统	9
1.2.1 闭环调速系统组成及工作原理	9
1.2.2 闭环调速系统静特性方程	11
1.2.3 开环系统机械特性和闭环系统静特性的比较	14
1.2.4 反馈控制系统的基本特征	16
1.3 转速负反馈调速系统的稳态参数计算	18
1.3.1 设定系统数据	19
1.3.2 稳态参数计算	19
1.4 单环控制系统的限流保护——电流截止负反馈	21
1.4.1 转速负反馈系统的问题	21
1.4.2 带有电流截止环节的电流负反馈	21
1.5 静态无差调速系统	29
1.5.1 实现无静差的原理	29
1.5.2 无静差系统的调节过程	31
1.5.3 无静差调速系统的静特性	32
1.5.4 无静差直流调速系统举例	33
1.6 闭环直流调速系统的数学模型	34
1.6.1 额定励磁下直流电动机的传递函数	35
1.6.2 晶闸管触发和整流装置的传递函数	36
1.6.3 调节器和测速发电机的传递函数	38
1.6.4 闭环直流调速系统的数学模型和传递函数	39

1.6.5	闭环直流调速系统的稳定条件	40
1.7	自动调速系统的检测装置	41
1.7.1	测速发电机	41
1.7.2	电流检测装置	42
1.8	小结	45
1.9	习题	45
第2章	晶闸管直流电动机调速系统及其工程设计	47
2.1	转速、电流双闭环直流调速系统	47
2.1.1	转速、电流双闭环直流调速系统的形成	47
2.1.2	双闭环直流调速系统的稳态分析	50
2.2	双闭环直流调速系统的启动过程	52
2.2.1	双闭环直流调速系统的动态数学模型	52
2.2.2	双闭环直流调速系统的启动过程	52
2.2.3	启动过程的特点	55
2.2.4	动态性能及调节器的作用	56
2.3	工程设计方法	57
2.3.1	工程设计方法遵循的原则与步骤	57
2.3.2	典型 I 型系统	58
2.3.3	典型 II 型系统	63
2.3.4	非典型系统的典型化	67
2.4	双闭环直流调速系统的工程设计	71
2.4.1	电流调节器设计	72
2.4.2	转速调节器设计	75
2.4.3	转速调节器退饱和时的转速超调量	79
2.5	设计举例	83
2.5.1	设计实例	83
2.5.2	调速系统的并联微分校正	85
2.6	其他多环控制的直流调速系统	88
2.6.1	带电流变化率内环的三环调速系统	88
2.6.2	弱磁控制的直流调速系统	89
2.7	小结	92
2.8	习题	92
第3章	$\alpha = \beta$ 配合控制的有环流可逆直流调速系统	95
3.1	晶闸管-电动机系统的可逆线路	95
3.1.1	电枢反接可逆线路	95
3.1.2	励磁反接可逆线路	96

3.2	两组晶闸管可逆线路中的环流	97
3.2.1	环流及其种类	97
3.2.2	直流环流与配合控制	98
3.2.3	交流环流及其抑制措施	99
3.2.4	动态环流	101
3.3	$\alpha=\beta$ 工作制调速系统及制动过程分析	101
3.3.1	系统组成原理	101
3.3.2	系统制动过程分析	103
3.4	其他可逆直流调速系统	108
3.4.1	给定环流和可控环流的可逆系统	108
3.4.2	无环流的可逆系统	109
3.5	小结	111
3.6	习题	112
第4章	直流脉宽调速系统	113
4.1	脉宽调制变换器	113
4.1.1	不可逆 PWM 变换器	113
4.1.2	可逆 PWM 变换器	116
4.2	脉宽调速系统的稳态分析	119
4.2.1	脉宽调速系统的开环机械特性	119
4.2.2	电流脉动波形与最大脉动量	121
4.2.3	转速脉动波形与最大脉动量	124
4.3	双闭环直流脉宽调速控制系统	126
4.3.1	脉宽调制器	127
4.3.2	逻辑延时环节	128
4.3.3	直流脉宽调速系统的数学模型	128
4.4	滤波电容与泵升电压的限制	129
4.5	小结	130
4.6	习题	130
第5章	交流异步电动机调压调速系统	131
5.1	异步电动机调压调速原理	131
5.2	晶闸管三相交流调压电路	133
5.3	其他常用三相交流调压电路简介	136
5.4	闭环控制的调压调速系统及其静特性	137
5.4.1	转速负反馈闭环控制的调压调速系统静特性	137
5.4.2	转速负反馈闭环控制的调压调速系统动态特性	138
5.5	小结	140

5.6	习题	140
第6章	绕线式异步电动机串级调速系统	141
6.1	串级调速的原理和装置	141
6.1.1	串级调速的原理	141
6.1.2	串级调速的各种运行状态及功率传递方向	142
6.1.3	串级调速系统的基本装置	143
6.2	串级调速系统的调速特性和机械特性	146
6.2.1	串级调速系统转子整流电路的工作特性	146
6.2.2	串级调速系统的调速特性	147
6.2.3	串级调速系统的机械特性	149
6.3	串级调速系统的功率特性	151
6.4	转速、电流双闭环串级调速系统	154
6.4.1	转速、电流双闭环串级调速系统的组成	155
6.4.2	双闭环串级调速系统的动态数学模型	155
6.4.3	双闭环串级调速系统调节器的设计	157
6.4.4	双闭环串级调速系统设计的特殊问题	159
6.5	双馈调速系统	161
6.6	小结	162
6.7	习题	163
第7章	交流异步电动机变频调速系统	164
7.1	异步电动机变频调速原理	164
7.1.1	恒磁通控制方式	165
7.1.2	恒电压控制方式	167
7.1.3	恒电流控制方式	168
7.2	变频电源	169
7.2.1	变频电源的分类	169
7.2.2	脉冲宽度调制型(SPWM)变频器	173
7.3	SPWM变频调速系统	177
7.4	通用变频器的选择及使用	180
7.4.1	通用变频器的构成及主要功能	180
7.4.2	通用变频器及外部设备选择	181
7.4.3	通用变频器的安装、接线、调试和使用方法	184
7.5	小结	187
7.6	习题	188
第8章	异步电动机矢量变换控制系统	189
8.1	异步电动机矢量变换控制的工作原理	189

8.1.1	矢量变换控制的基本概念	189
8.1.2	矢量变换控制系统的构想	191
8.2	矢量变换运算规律及实现	191
8.2.1	在功率不变条件下的坐标系变换矩阵	191
8.2.2	三相/二相变换(3/2变换)	192
8.2.3	二相/二相旋转坐标系转换(2s/2r变换)	195
8.2.4	三相静止坐标系到任意二相旋转坐标系的变换(3s/2r)	196
8.2.5	直角坐标/极坐标变换(K/P变换)	197
8.3	异步电动机的数学模型及其矢量变换	197
8.3.1	异步电动机的数学模型	197
8.3.2	异步电动机数学模型的矢量变换	201
8.4	异步电动机矢量变换控制基本方程式	205
8.4.1	磁通控制基本方程式	205
8.4.2	转矩控制基本方程式	206
8.5	磁链开环、转差型矢量控制的交-直-交电流源变频调速系统	207
8.5.1	系统原理及特点	207
8.5.2	关于转子磁链闭环	208
8.6	小结	209
8.7	习题	210
第9章	异步电动机直接转矩控制	211
9.1	直接转矩控制概述	211
9.1.1	直接转矩控制系统的特点	211
9.1.2	直接转矩控制系统的原理	212
9.1.3	直接转矩控制系统和矢量控制系统的比较	215
9.2	直接转矩控制中定子磁链观测模型的切换	216
9.2.1	磁链模型	216
9.2.2	$U-n$ 模型	217
9.3	全数字异步电动机直接转矩控制系统	218
9.3.1	系统硬件结构	218
9.3.2	定子磁链控制与转矩控制	219
9.4	小结	221
9.5	习题	221
教学实验		222
参考文献		256

在现代工业企业中,绝大多数工作机械的运行是由电动机拖动的,因而掌握拖动系统的调速知识,对于从事工程技术工作,特别是电气工程类人员,是十分重要的。电力拖动又被称为电气传动,是以电动机的转矩和转速为控制对象,按生产机械的工艺要求进行电动机转速(或位置)控制的自动化系统。根据在完成电能—机械能的转换过程中所采用的执行部件——直流电动机或交流电动机的不同,工程上通常把电力拖动分为直流传动和交流传动两部分。国际电工委员会将电力拖动归入“运动控制”范畴。电气传动与国民经济、人民生活有着密切的联系并起着重要的作用,广泛用于冶金、机械、轻工、矿山、港口、石化、航空航天等各个行业以及日常生活之中。它既有轧钢机、起重机、泵、风机、精密机床等大型调速系统,也有空调机、电冰箱、洗衣机等小容量调速系统,是国民经济中充满活力的基础技术和高新技术,它的发展和进步已成为更经济地使用材料、能源、提高劳动生产率的合理手段,成为促进国民经济不断发展的重要因素,成为国家现代化的重要标志之一。正确使用电力拖动控制系统并使之进一步向前发展,对国民经济建设具有十分重要的现实意义。

1. 电力拖动发展概况

电力拖动可分为不调速和调速两大类。按照电动机类型的不同,电力拖动又分为直流与交流拖动两大类。直流电力拖动与交流电力拖动在 19 世纪先后诞生,当时的电力拖动系统是不调速系统。随着社会化大生产的不断发展,生产制造技术越来越复杂,对生产工艺的要求也越来越高,这就要求生产机械能够在工作速度、快速启动和制动、正反转运行等方面具有较好的运行性能,从而推动了电动机的调速技术不断向前发展。需要指出的是,电力拖动与自动控制关系密切,用来调速的控制装置主要是各种电力电子变流器,它为电动机提供可控的直流或交流电源,并成为弱电控制强电的媒介。电力电子技术的前身是汞弧整流器、晶闸管变流技术。1957 年,晶闸管(Silicon Controlled Rectifier, SCR)的诞生标志着电力电子技术的问世。1960—1980 年为电力电子技术第 1 代,其特征是以晶闸管及其相控变流技术为代表,人们称第一代整流器时代。1980 年以后,进入大功率晶体管(Giant Transistor, GTR)、可关断晶闸管(Gate Turn-off Thyristor, GTO)等自关断电力电子器件及逆变技术为代表的第 2 代,有人称其为逆变时代。1990 年以后,进入复合电力电子器件及变频技术为代表的第 3 代,复合器件具有快速关断、工作频率高等特点,其典型代表是绝缘栅双极晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)及其应

用。第3代变频技术和变频器得到了空前发展,故称其为变频时代。21世纪将进入电力电子智能化时代,其特点是电力电子器件进一步采用微电子集成电路技术,实现电力电子器件和装置的智能化。电力电子技术的进步有力地推动了电力拖动自动控制系统的发展。

直流电动机具有良好的调速性能和转矩控制性能,其直流拖动在工业生产中应用较早并沿用至今。早期直流拖动采用有触点控制,通过开关设备切换直流电动机电枢或磁场回路电阻实现有级调速。1930年以后,出现电机放大器控制的旋转变流机组供电给直流电动机(简称G-M系统),以后又出现了磁放大器和汞弧整流器供电等,实现了直流拖动的无触点控制。其特点是利用直流电动机的转速与输入电压有简单比例关系的原理,通过调节直流发电机的励磁电流或汞弧整流器的触发相位来获得可变的直流电压供给直流电动机,从而方便地实现调速。但这种调速方法被后来的晶闸管可控整流器供电的直流调速系统所取代,至今已不再使用。1957年晶闸管问世后,采用晶闸管相控装置的可变直流电源一直在直流调速系统中占主导地位。由于电力电子技术与器件的进步和晶闸管系统具有的良好动态性能,使直流调速系统的快速性、可靠性和经济性不断提高,在20世纪相当长的一段时间内成为调速传动的主流。今天正在逐步推广应用的微机控制的全数字直流调速系统具有高精度、宽范围的调速控制,代表着直流电力拖动的发展方向。直流调速之所以经历多年发展仍在工业生产中得到广泛应用,关键在于它能以简单的手段达到较高的性能指标。例如高精度稳速系统的稳速精度达数10万分之一,宽调速系统的调速比达1:10000以上,快速响应系统的响应时间已缩短到几毫秒以下。然而由于直流电动机本身带有电刷和换向器,成为限制自身发展的主要缺陷,导致其生产成本高、制造工艺复杂、运行维护工作量大,加之机械换向困难,其最大供电电压与机械强度均有限,所以直流电动机的单机容量、转速的提高以及使用环境都受到限制,很难向高速和大容量方向发展。近年来其发展速度明显滞后于交流调速系统。可以期待,直流调速系统最终将被交流调速系统所取代。

交流电动机,特别是鼠笼式异步电动机,因其结构简单、运行可靠、价格低廉、维修方便而被广泛应用。几乎所有不调速的拖动场合都采用交流电动机。尽管从1930年开始,人们就致力于交流调速的研究,然而主要局限于利用开关设备切换主电路,达到控制电动机启动、制动和有级调速的目的。例如Y/ Δ 启动器、变极对数调速、电抗或自耦降压启动以及绕线转子异步电动机转子回路串电阻的有级调速。交流调速进展缓慢的主要原因是决定电动机转速调节主要因素的交流电源频率的改变和电动机转矩控制都是极为困难的,使交流调速的稳定性、可靠性、经济性、效率均不能满足生产要求。后来发展起来的调压调频控制只控制了电动机的气隙磁通,而不能调节转矩;转差频率控制能够在一定程度上控制电动机的转矩,但它是基于电动机的稳态方程为基础设计的,并不能真正控制动态过程中的转矩。随着电力电子技术、计算机技术的不断发展和电力电子器件的更新换代,变频调速技术获得了飞速发展。今天由全控型高频率开关器件组成的脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)逆变器取代了晶闸管构成的方波形逆变器,而且正弦波脉宽调制(Sinusoidal PWM, SPWM)逆变器及其芯片也得到了普遍的应用,增强和扩展了变频器的功能和应用范围。与此同时,交流电动机的控制技术也得到了突破性进展,能

够有效地控制转矩,使电动机的转速得到快速响应。1971年德国西门子公司 F. Blaschke 提出的矢量变换控制原理解决了交流电动机的转矩控制问题,实现了交流电动机调速控制理论的第一次质的飞跃。其理论是以转子磁链这一旋转空间矢量为参考坐标,利用坐标变换实现定子电流励磁分量与转矩分量之间的解耦,使交流电动机能像直流电动机一样分别对励磁分量与转矩分量进行独立控制,获得像直流电动机一样良好的动态性能。1985年德国鲁尔大学 M. Depenbrock 提出直接转矩控制理论,1987年又把该理论推广到弱磁调速范围。其特点是将电动机与逆变器看做一个整体,采用空间电压矢量分析方法在定子坐标系进行磁通、转矩的计算,通过磁通跟踪型 PWM 逆变器的开关状态直接控制转矩。直接转矩控制去掉了矢量变换的复杂计算,便于实现全数字化,是一种具有较高动、静态性能的交流调速方法。随着现代化控制理论的发展,交流电动机控制技术的发展方兴未艾,非线性控制、自适应控制、智能控制等各种新的控制策略正在不断涌现和完善,展现出更为广阔的应用前景。

微处理器引入控制系统,促进了模拟控制系统向数字控制系统的转化。从 8~16 位的单片机,到 16~32 位的数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP),再到 32~64 位的精简指令集计算机(Reduced Instruction Set Computing, RISC),位数增多,运算速度加快,控制能力增强。例如,以 32 位 RISC 芯片为基础的数字控制模板能够实现各种算法,Windows 操作系统的引入将使可自由设计图形编程的控制技术有很大发展。数字化技术使复杂的电动机控制技术得以实现,简化了硬件,降低了成本,提高了控制精度,拓宽了交流调速的应用领域。主要表现在节能调速技术的发展,从根本上改变了风机、水泵等调速系统过去因交流电动机不调速而依赖挡板和阀门来调节流量的状况。这类拖动系统几乎占工业电力拖动控制系统总量的一半,采用交流调速后,每台风机、水泵可节能 20%,其经济效益相当可观。其次对特大容量、极高转速负载的拖动,交流调速弥补了直流调速的不足。可以预计,高性能交流调速系统的发展必将取代直流调速系统,成为电力拖动领域中的主要力量。

当前,随着电力电子器件及变频技术发展和控制技术的提高,今后电机的发展动向是:①无换向器电动机代替直流电动机;②某些场合部分双馈电机将代替同步电机;③发挥稀土资源优势,大力发展永磁电机;④发展新型合理结构的异步电动机;⑤发展智能化电机,实现电子—电动机的机电一体化产品。

2. 本教材内容简介和使用说明

全书共分 9 章,主要讨论直流调速和交流调速两部分问题。前 4 章为直流调速部分,后 5 章为交流调速部分。基本控制原理与方法以直流调速系统为基础。直流调速部分以控制规律为主线,由单闭环、双闭环、不可逆、可逆及直流斩波技术的顺序论述,内容包括自动控制系统的静、动态特性分析,晶闸管直流电动机系统及工程设计方法;交流部分以转差功率为主线,分别讨论转差功率消耗型系统交流调压、转差功率回馈型系统串级调速(双馈)及转差功率不变型各种系统,重点介绍 SPWM 变频器和矢量变换控制,最后介绍异步电动机直接转矩控制。

第 1 章主要讨论直流调速系统特性分析(静态特性和动态特性),重点内容放在基本理论和概念上。第 2 章和第 3 章主要讨论晶闸管直流电动机调速系统,重点内容是转速、

电流双闭环直流调速系统的分析和工程设计方法。直流自动调速系统闭环反馈控制的理论及工程设计方法同时也是分析、研究交流自动调速系统的基础,因此论述较为细致。第4章主要讨论用恒定直流电源或不控整流电源供电,利用直流斩波器和脉宽调制变换器产生可变平均电压的若干问题,形成直流PWM调速系统。第5章为交流调压调速系统,该系统的全部转差功率都变成热能形式被消耗,这类调速系统的效率较低,而且它是以增加转差功率的消耗来换取转速的降低(恒转矩负载时),越向下调速,效率越低。但是这类系统结构最简单,也有一定的应用场合。第6章为绕线式异步电动机串级调速系统,即转差功率回馈型调速系统,消耗掉转差功率的一部分,大部分通过变流装置回馈电网或转化为机械能予以利用,转速越低时回收的功率也越多。本章主要介绍交流异步电动机的串级调速原理及节能等问题。第7~9章为交流电动机变频调速系统、矢量变换控制系统和直接转矩控制系统,其转差功率均不变。本书对这部分内容给予了充分的重视,是由于这类系统有着非常广阔的发展前景,在许多场合正在取代直流调速系统。重点研究SPWM和矢量变换控制理论等。

本书的主体内容是:直流调速系统静、动态特性的基本概念;转速、电流双闭环直流调速系统及工程设计; $\alpha=\beta$ 配合控制工作制;直流脉宽调速;交流异步电动机调压调速和串级调速、变压变频调速及SPWM、矢量变换控制和直接转矩控制概念等。

本教材是在以往教材的基础上,有利于学生自学而编写的。本着“少而精、够用、适度、实用”的原则,突出精而不贪多,突出用而不贪论,突出新而不贪深,以控制规律为主线,由简入繁、由低及高地循序深入,从满足生产工艺要求出发,逐步深入地认识各种系统。

在本书中,基本控制理论始终贯穿于应用系统之中,紧扣重点主线。重新整理了有关问题分析、讨论的文字语言段落,使语言叙述和讲解尽可能照应不同层次的读者,使问题的论述与说明能就简从易和清晰流畅,重点之处尽可能分析得深入和细致。每章含有小结和习题,对全章的要点和重点进行总结和复习,方便教学和自学。

本教材的课内教学为60~70学时(包含实验,每项实验2学时),课程设置学时较少的院校,课堂教学内容可适当删减。

本课程是工业电气自动化专业的主要专业课程之一。在学习本课程前,读者应具备电机拖动力学基础、自动控制原理、电力电子技术和计算机控制等方面的知识。

直流调速系统特性分析

从本章起至第 4 章,重点讨论模拟控制的直流调速系统。这种系统目前已经发展成熟,在设计、调整、运行等方面的经验丰富,系统的快速性、可靠性和经济性都比较好,应用仍然广泛。同时,直流调速系统闭环反馈控制的理论及工程设计方法又是交流调速系统分析、设计的基础,所以首先研究清楚直流调速系统的理论很有意义。

1.1 调速系统的基本概念

1.1.1 转速控制的要求和调速指标

很多生产机械依据生产工艺要求,都需要对速度进行控制,同时对速度的变化有严格的限制。所有这些对生产机电设备的技术要求,都可以转化为电力拖动控制系统的静态或动态性能指标,而这些指标恰好是用来评价调速系统的性能或者作为系统设计时的依据。

1. 对转速控制的要求

归纳起来,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范围内,有级或无级地调节转速,以便获取各种工作运行速度。

(2) 稳速

以一定的精度在所需转速上稳定运行,应尽可能不受干扰的影响,其目的是保证产品质量。

(3) 加、减速

增加或降低速度时,过渡过程要尽可能短,起、制动过程应尽可能平稳。频繁起、制动的设备过渡过程快,可以提高生产率,而平稳则有利于不宜经受剧烈速度变化的机械。

前两项要求,调速和稳速是静态方面的,而后一项,加、减速则是动态方面的要求。

2. 静态调速指标

为了进行定量分析,针对调速和稳速两项要求,定义了两个静态指标,叫做“调速范围”和“静差率”。这两个指标又合称为调速系统的静态性能指标。

(1) 静差率 S (又称静差度或转速变化率)

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对应的转速降落 Δn_N (额定转速降落又简称额定速降)与理想空载转速 n_0 之比,称作静差率 S ,即

$$S = \frac{\Delta n_N}{n_0} \quad (1-1)$$

或用百分数表示为

$$S = \frac{\Delta n_N}{n_0} \times 100\%$$

显然,静差率是用来衡量调速系统在负载变化下转速的稳定度的,它和机械特性的硬度有关,特性越硬,静差率就越小,转速的稳定度就越高。

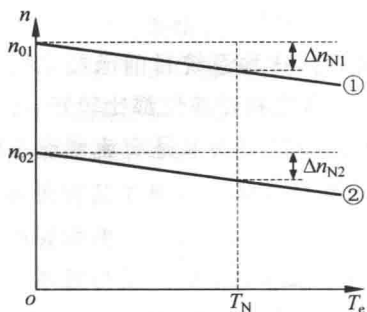


图 1-1 不同转速下的静差率

然而静差率和机械特性硬度又是有区别的。一般调压调速系统在不同转速下的机械特性是互相平行的,如图 1-1 中的特性①和②,两者的硬度相同,额定速降 $\Delta n_{N1} = \Delta n_{N2}$,但它们的静差率却不同,因为理想空载转速不一样。根据式(1-1)的定义,由于 $n_{01} > n_{02}$,所以 $S_1 < S_2$ 。这就是说,对于同样硬度的特性,理想空载转速越低时,静差率越大,转速的相对稳定度也就越差。很显然,静差率愈小愈好。当转速从 1000r/min 降落 10r/min, S 为 1%; 从 100r/min 同样降落 10r/min, S 就为 10%; 如果 n_0 只有 10r/min,再降落 10r/min,

S 就是 100%,这时转速已经降为零,电动机停止转动,稳定度最差。

在生产机械调速时,为了保证转速的稳定性,要求 S 应不大于某一允许值。由于低速时 S 较大,因此最低转速 n_{\max} 受到允许静差率的限制。换句话说,在调速的整个范围内,只有最大的静差率也满足了转速稳定度的要求,系统才是合格的。

(2) 调速范围 D

电动机在额定负载下调速时,允许的最高转速 n_{\max} 与最低转速 n_{\min} 之比叫做调速范围,用 D 表示,即

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

式中: n_{\max} 受电动机换向条件及机械强度的限制,一般取电动机额定转速 n_N ,即 $n_{\max} = n_N$; n_{\min} 在上面讨论过,要受相对稳定性也就是受允许静差率(最大静差率)的限制。

调速范围和静差率两项指标不是彼此孤立的。一个调速系统的调速范围,是指在最低速时还能满足所需静差率的转速可调范围。脱离了对静差率的要求,任何调速系统都可以获得极高的调速范围,因为 n_{\min} 可以取很小的值,甚至为 0,但这样没有实际意义;反之,脱离了调速范围,要满足静差率的要求也很容易,因为可以把运行速度尽可能提高,这同样没有意义。

各种生产机械,由于工艺要求不同,对电力传动系统的调速范围和静差率要求也不一样。表 1-1 给出了几种生产机械所要求的 D 、 S 值。

表 1-1 常见生产机械所需要的 D 、 S 值

生产机械	调速范围 D	静差率 S
热连轧机	3~10	≤ 0.01
冷连轧机	≥ 15	≤ 0.02
金属切削机床主传动	2~30	$\leq 0.05 \sim 0.1$
金属切削机床进给传动	5~200	$\leq 0.05 \sim 0.1$
造纸机	3~20	$\leq 0.01 \sim 0.001$
精密仪表车床	60	≤ 0.05

3. 调速范围、静差率和额定速降之间的关系

由上面分析可知,在电力传动调速系统中,同时要求调速范围大,静差率小,它们之间相互矛盾。这是自动控制系统要解决的一个问题。我们通过数学表达式将它们联系起来。

由式(1-2),有

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_N}{n_{0\min} - \Delta n_N} \quad (1-3)$$

式中: n_N 为电动机的额定转速; $n_{0\min}$ 为最低速时的理想空载转速; Δn_N 为由理想空载增加到额定负载时所对应的转速降落,简称额定速降。

再由式(1-1),最低速时的静差率(对应系统的最大静差率)为

$$S = \frac{\Delta n_N}{n_{0\min}}$$

于是

$$n_{0\min} = \frac{\Delta n_N}{S}$$

代入式(1-3)并整理,可得

$$D = \frac{n_N S}{\Delta n_N (1 - S)} \quad (1-4)$$

式(1-4)表示调速范围、静差率和额定速降之间所应满足的关系。对于同一个调速系统,它的特性硬度是一定的,即 Δn_N 值一定,额定转速 n_N 又属于常数,由式(1-4)可见,如果对静差率的要求越严,即要求 S 越小时,系统能够允许的调速范围也越小。

关于动态指标,将在后续内容中再行分析。

【例 1-1】 某调速系统电动机额定转速 $n_N = 1430 \text{r/min}$, 额定速降 $\Delta n_N = 115 \text{r/min}$, 当要求静差率 $S \leq 30\%$ 时,允许的调速范围为多少? 若要求 $S \leq 20\%$, 则调速范围又是多少?

解: 当要求静差率 $S \leq 30\%$ 时,有

$$D = \frac{n_N S}{\Delta n_N (1 - S)} = \frac{1430 \times 0.3}{115(1 - 0.3)} = 5.3$$

如果要求 $S \leq 20\%$, 则调速范围只有

$$D = \frac{n_N S}{\Delta n_N (1 - S)} = \frac{1430 \times 0.2}{115(1 - 0.2)} = 3.1$$

1.1.2 开环调速系统的性能和存在问题

图 1-2 是开环的晶闸管可控整流器供电的直流调速系统(V-M 系统)原理图。图 1-2