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

刘　松　主编

清华大学出版社
北　京

需要全本请访问 www.ertongbook.com

出版说明

高职高专教育是我国高等教育的重要组成部分，担负着为国家培养并输送生产、建设、管理、服务第一线高素质技术应用型人才的重任。

进入21世纪后，高职高专教育的改革和发展呈现出前所未有的发展势头，学生规模已占我国高等教育的半壁江山，成为我国高等教育的一支重要的生力军；办学理念上，“以就业为导向”成为高等职业教育改革与发展的主旋律。近两年来，教育部召开了三次产学研交流会，并启动四个专业的“国家技能型紧缺人才培养项目”，同时成立了35所示范性软件职业技术学院，进行两年制教学改革试点。这些举措都表明国家正在推动高职高专教育进行深层次的重大改革，向培养生产、服务第一线真正需要的应用型人才的方向发展。

为了顺应当前我国高职高专教育的发展形势，配合高职高专院校的教学改革和教材建设，进一步提高我国高职高专教育教材质量，在教育部的指导下，清华大学出版社组织出版了“21世纪高职高专规划教材”。

为推动规划教材的建设，清华大学出版社组织并成立了“高职高专教育教材编审委员会”，旨在对清华版的全国性高职高专教材及教材选题进行评审，并向清华大学出版社推荐各院校办学特色鲜明、内容质量优秀的教材选题。教材选题由个人或各院校推荐，经编审委员会认真评审，最后由清华大学出版社出版。编审委员会的成员皆来源于教改成效大、办学特色鲜明、师资实力强的高职高专院校、普通高校以及著名企业，教材的编写者和审定者都是从事高职高专教育第一线的骨干教师和专家。

编审委员会根据教育部最新文件和政策，规划教材体系，比如部分专业的两年制教材；“以就业为导向”，以“专业技能体系”为主，突出人才培养的实践性、应用性的原则，重新组织系列课程的教材结构，整合课程体系；按照教育部制定的“高职高专教育基础课程教学基本要求”，教材的基础理论以“必要、够用”为度，突出基础理论的应用和实践技能的培养。

本套规划教材的编写原则如下：

（1）根据岗位群设置教材系列，并成立系列教材编审委员会；

（2）由编审委员会规划教材、评审教材；

（3）重点课程进行立体化建设，突出案例式教学体系，加强实训教材的出版，完善教学服务体系；

（4）教材编写者由具有丰富教学经验和多年实践经历的教师共同组成，建立“双师

型”编者体系。

本套规划教材涵盖了公共基础课、计算机、电子信息、机械、经济管理以及服务等大类的主要课程，包括专业基础课和专业主干课。目前已经规划的教材系列名称如下：

- 公共基础课

公共基础课系列

- 计算机类

计算机基础教育系列
计算机专业基础系列
计算机应用系列
网络专业系列
软件专业系列
电子商务专业系列

- 电子信息类

电子信息基础系列
微电子技术系列
通信技术系列
电气、自动化、应用电子技术系列

- 机械类

机械基础系列
机械设计与制造专业系列
数控技术系列
模具设计与制造系列

- 经济管理类

经济管理基础系列
市场营销系列
财务会计系列
企业管理系列
物流管理系列
财政金融系列
国际商务系列

- 服务类

艺术设计系列

本套规划教材的系列名称根据学科基础和岗位群方向设置，为各高职高专院校提供“自助餐”形式的教材。各院校在选择课程需要的教材时，专业课程可以根据岗位群选择系列；专业基础课程可以根据学科方向选择各类的基础课系列。例如，数控技术方向的专业课程可以在“数控技术系列”选择；数控技术专业需要的基础课程，属于计算机类课程的可以在“计算机基础教育系列”和“计算机应用系列”选择，属于机械类课程的可以在“机械基础系列”选择，属于电子信息类课程的可以在“电子信息基础系列”选择。依此类推。

为方便教师授课和学生学习，清华大学出版社正在建设本套教材的教学服务体系。本套教材先期选择重点课程和专业主干课程，进行立体化教材建设：加强多媒体教学课件或电子教案、素材库、学习盘、学习指导书等形式的制作和出版，开发网络课程。学校在选用教材时，可通过邮件或电话与我们联系获取相关服务，并通过与各院校的密切交流，使其日臻完善。

高职高专教育正处于新一轮改革时期，从专业设置、课程体系建设到教材编写，依然是新课题。希望各高职高专院校在教学实践中积极提出意见和建议，并向我们推荐优秀选题。反馈意见请发送到 E-mail：gzgz@tup.tsinghua.edu.cn。清华大学出版社将对已出版的教材不断地修订、完善，提高教材质量，完善教材服务体系，为我国的高职高专教育出版优秀的高质量的教材。

高职高专教育教材编审委员会

前　言

《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

目　录

电力拖动自动控制系统

绪论…… 1

第 1 章　自动控制系统的静态特性…… 6

1.1　调速系统的基本概念 …… 6
1.1.1　转速控制的要求和调速指标…… 6
1.1.2　开环调速系统的性能和存在的问题…… 9
1.2　转速负反馈自动调速系统…… 11
1.2.1　闭环调速系统组成及工作原理 …… 11
1.2.2　闭环调速系统静特性方程 …… 13
1.2.3　开环系统机械特性和闭环系统静特性的比较 …… 18
1.2.4　反馈控制系统的基本特征 …… 19
1.3　转速负反馈调速系统的稳态参数计算…… 22
1.3.1　设定系统数据 …… 22
1.3.2　稳态参数计算 …… 23
1.4　单环控制系统的限流保护——电流截止负反馈…… 25
1.4.1　转速负反馈系统的问题 …… 25
1.4.2　引入电流负反馈 …… 26
1.4.3　带有电流截止环节的电流负反馈 …… 28
1.5　静态无差调速系统…… 36
1.5.1　实现无静差的原理 …… 36
1.5.2　无静差系统的调节过程 …… 38
1.5.3　无静差调速系统的静特性 …… 40
1.6　自动调速系统的检测装置…… 40
1.6.1　测速发电机 …… 41
1.6.2　电流检测装置 …… 41

需要全本请访问 www.ertongbook.com

1.7 小结…… 45
1.8 习题…… 46

第 2 章 自动控制系统的动态特性 …… 48

2.1 反馈控制闭环直流调速系统的数学模型…… 48
2.1.1 额定励磁下直流电动机的传递函数 …… 48
2.1.2 晶闸管触发和整流装置的传递函数 …… 50
2.1.3 调节器和测速发电机的传递函数 …… 53
2.1.4 闭环直流调速系统的数学模型和传递函数 …… 54
2.2 系统的稳定与动态校正…… 55
2.2.1 闭环直流调速系统的稳定条件 …… 56
2.2.2 动态校正方法 …… 57
2.3 稳态抗扰误差分析…… 62
2.3.1 比例控制系统的稳态抗扰误差 …… 63
2.3.2 积分控制系统的稳态抗扰误差 …… 64
2.3.3 比例积分控制系统的稳态抗扰误差 …… 65
2.3.4 稳态抗扰误差与系统结构的关系 …… 66
2.4 无静差直流调速系统举例…… 66
2.5 给定积分器及其作用…… 68
2.5.1 给定积分器的作用及意义 …… 68
2.5.2 给定积分器的工作原理 …… 69
2.6 小结…… 72
2.7 习题…… 72

第 3 章 晶闸管直流电动机调速系统及其工程设计 …… 73

3.1 转速、电流双闭环直流调速系统 …… 73
3.1.1 转速、电流双闭环直流调速系统的形成…… 73
3.1.2 双闭环直流调速系统的稳态分析 …… 76
3.2 双闭环直流调速系统的起动过程…… 78
3.2.1 双闭环直流调速系统的动态数学模型 …… 78
3.2.2 双闭环直流调速系统的起动过程 …… 79
3.2.3 起动过程的特点 …… 82
3.2.4 动态性能及调节器的作用 …… 83
3.3 工程设计方法…… 84

3.3.1　工程设计方法遵循的原则与步骤 …… 84
3.3.2　典型Ⅰ型系统 …… 85
3.3.3　典型Ⅱ型系统 …… 91
3.3.4　非典型系统的典型化 …… 96
3.4　双闭环直流调速系统的工程设计 …… 100
3.4.1　电流调节器设计 …… 101
3.4.2　转速调节器设计 …… 105
3.4.3　转速调节器退饱和时的转速超调量 …… 109
3.5　设计举例 …… 114
3.5.1　设计实例 …… 114
3.5.2　调速系统的并联微分校正 …… 117
3.6　其他多环控制的直流调速系统 …… 120
3.6.1　带电流变化率内环的三环调速系统 …… 120
3.6.2　弱磁控制的直流调速系统 …… 121
3.7　小结 …… 124
3.8　习题 …… 125

第 4 章　$\alpha=\beta$ 配合控制的有环流可逆直流调速系统 …… 128

4.1　晶闸管-电动机系统的可逆线路 …… 128
4.1.1　电枢反接可逆线路 …… 128
4.1.2　励磁反接可逆线路 …… 129
4.2　两组晶闸管可逆线路中的环流 …… 130
4.2.1　环流及其种类 …… 130
4.2.2　直流环流与配合控制 …… 131
4.2.3　交流环流及其抑制措施 …… 133
4.2.4　动态环流 …… 135
4.3　$\alpha=\beta$ 工作制调速系统及制动过程分析 …… 135
4.3.1　系统组成原理 …… 135
4.3.2　系统制动过程分析 …… 137
4.4　其他可逆直流调速系统 …… 143
4.4.1　给定环流和可控环流的可逆系统 …… 143
4.4.2　无环流的可逆系统 …… 143
4.5　小结 …… 146
4.6　习题 …… 147

第 5 章　直流脉宽调速系统 …… 148

5.1　**脉宽调制变换器** …… 148
5.1.1　**不可逆 PWM 变换器** …… 148
5.1.2　**可逆 PWM 变换器** …… 151
5.2　**脉宽调速系统的稳态分析** …… 155
5.2.1　**脉宽调速系统的开环机械特性** …… 155
5.2.2　**电流脉动波形与最大脉动量** …… 157
5.2.3　**转速脉动波形与最大脉动量** …… 160
5.3　**双闭环直流脉宽调速控制系统** …… 163
5.3.1　**脉宽调制器** …… 164
5.3.2　**逻辑延时环节** …… 165
5.3.3　**直流脉宽调速系统的数学模型** …… 166
5.4　**滤波电容与泵升电压的限制** …… 167
5.5　**小结** …… 168
5.6　**习题** …… 168

第 6 章　交流异步电动机转差功率消耗型调速系统 …… 170

6.1　**交流异步电动机调压调速系统** …… 171
6.1.1　**交流异步电动机调压调速原理** …… 171
6.1.2　**交流异步电动机调压调速方法** …… 172
6.1.3　**晶闸管三相交流调压电路** …… 173
6.1.4　**闭环控制的调压调速系统及其静特性** …… 175
6.1.5　**闭环控制的调压调速系统动态特性** …… 176
6.2　**电磁转差离合器调速系统** …… 178
6.2.1　**电磁转差离合器的基本结构和工作原理** …… 178
6.2.2　**电磁转差离合器调速系统的组成及机械特性** …… 179
6.3　**小结** …… 180
6.4　**习题** …… 181

第 7 章　交流异步电动机转差功率回馈型调速系统 …… 182

7.1　**异步电动机串级调速原理及其基本类型** …… 182
7.1.1　**异步电动机串级调速原理** …… 182
7.1.2　**串级调速的各种运行状态及功率传递关系** …… 183

7.1.3　串级调速系统的基本类型…… 185
7.2　串级调速系统的调速特性和机械特性 …… 188
7.2.1　串级调速系统转子整流电路的工作特性…… 188
7.2.2　串级调速系统的调速特性…… 189
7.2.3　串级调速系统的机械特性…… 191
7.3　转速、电流双闭环串级调速系统…… 194
7.3.1　转速、电流双闭环串级调速系统的组成 …… 194
7.3.2　双闭环串级调速系统的动态数学模型…… 195
7.3.3　双闭环串级调速系统调节器的设计…… 197
7.4　串级调速系统的功率特性 …… 197
7.4.1　串级调速系统的功率流程…… 198
7.4.2　串级调速系统的效率…… 199
7.4.3　串级调速系统的功率因数…… 200
7.5　双馈调速系统 …… 201
7.5.1　双馈调速系统的工作原理…… 201
7.5.2　双馈调速系统的再生制动…… 202
7.5.3　双馈调速系统的特点…… 202
7.6　小结 …… 202
7.7　习题 …… 203

第 8 章　交流异步电动机转差功率不变型调速系统…… 204

8.1　交流异步电动机变频调速基础 …… 204
8.1.1　变频调速的基本控制方式…… 204
8.1.2　变频调速的机械特性…… 206
8.1.3　变频器的分类及特点…… 211
8.1.4　变频器的工作原理…… 216
8.2　交-直-交变频调速系统 …… 218
8.2.1　交-直-交电压型变频调速系统 …… 218
8.2.2　交-直-交电流型变频调速系统 …… 220
8.2.3　转差频率控制的转速闭环变频调速系统…… 223
8.3　SPWM 变频调速系统 …… 227
8.3.1　正弦波脉宽调制变频器…… 227
8.3.2　SPWM 变频调速系统 …… 230
8.4　异步电动机矢量变换控制 …… 234

8.4.1 异步电动机矢量变换控制的工作原理…… 234
8.4.2 矢量变换运算规律及实现…… 236
8.4.3 异步电动机的数学模型及其矢量变换…… 242
8.4.4 异步电动机矢量变换控制基本方程式…… 251
8.4.5 磁链开环、转差型矢量控制的交-直-交电流源变频调速系统 …… 253
8.5 通用变频器的选择及使用 …… 255
8.5.1 通用变频器的构成及主要功能…… 255
8.5.2 通用变频器及外部设备选择…… 257
8.5.3 通用变频器的安装、接线、调试和使用方法…… 260
8.6 小结 …… 264
8.7 习题 …… 265
教学实验…… 266
参考文献…… 305

绪　论

什么是电力拖动？目前主要应用在哪些领域？发展概况如何？对这些问题的初步说明将使读者对电力拖动自动控制系统有一个大致的了解。而本教材的编写指导思想和基本内容说明则有助于读者更好地学习这门课程。

1. 电力拖动在国民经济中的作用

电力拖动近年来又被称为电气传动，就是以电动机作为原动机驱动生产机械。电力拖动控制系统，或简称电力拖动系统，是将电能转变为机械能的系统的总称，用以完成生产机械的起动、停止、速度调节等任务，以满足各种生产工艺过程的要求。而电力拖动自动控制系统则是为了更合理地使用电动机，自动地对电动机进行控制，使被拖动的机械按照某种预定的要求运行。国际电工委员会将电力拖动归入“运动控制”范畴。

电力拖动控制系统由电动机、控制装置以及被拖动的生产机械组成。其主要特点是功率范围极大，单个设备的功率可从几毫瓦到几百兆瓦；调速范围极宽，转速从每分钟几转到每分钟几十万转，在无变速机构的情况下调速范围可达 1∶10000；适用范围极广，几乎适用于任何工作环境与各种各样的负载。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、航空航天等行业以及日常生活中。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。据统计，电力拖动系统的用电量占我国总发电量的 60％以上。据预测，从 2000 年至 2010 年间，我国电力拖动产品的市场需求量年增长率约为 15％，市场前景广阔。因此，电力拖动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及能源、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。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

2. 电力拖动发展概况

电力拖动可分为不调速和调速两大类。按照电动机的类型不同，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先后在19世纪诞生，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、快速起动和制动、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(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一代，其特征是以晶闸管及其相控变流技术为代表，人们称第一代为整流器时代。1980年以后进入以大功率晶体管(GTR)、可关断晶闸管(GTO)等自关断电力电子器件及逆变技术为代表的第二代，有人称其为逆变时代。1990年以后进入以复合电力电子器件及变频技术为代表的第三代，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(IGBT)。第三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接点控制，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年以后出现电动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接点控制。其特点是利用了直流电动机的转速与输入电压有着简单的比例关系的原理，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十万分之一，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。可以断言，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来切换主电路，达到控制电动机起动、制动和有级调速的目的。例如Y/△起动器、变极对数调速、电抗或自耦降压起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、经济性及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，但它是以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(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(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 提出了直接转矩控制理论，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作一个整体，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。

微处理机引入控制系统，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(DSP)，再到 32～64 位的精简指令集计算机(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，

首先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。

3. 本教材的内容简介和使用说明

全书共分 8 章，主要讨论直流调速和交流调速两部分问题。前 5 章为直流调速部分，后 3 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、可逆及脉宽调制(PWM)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、回馈型及不变型系统，重点介绍 SPWM 变频器和矢量变换控制的概念，最后介绍通用变频器的选择和使用方法。

第 1 章和第 2 章，主要讨论自动控制系统的静态特性和动态特性，重点内容放在基本理论和概念上。第 3 章和第 4 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 5 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，形成直流脉宽调速系统(PWM 调速系统)。第 6 章，交流异步电动机转差功率消耗型调速系统，全部转差功率都变成热能的形式消耗掉。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。但这类系统结构最简单，所以还有一定的应用场合。第 7 章，交流异步电动机转差功率回馈型调速系统，转差功率的一部分消耗掉，大部分则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 8 章，交流异步电动机转差功率不变型调速系统，即变压变频调速系统。本书对变压变频调速系统给予了充分的重视，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。本章重点研究正弦波脉宽调制法和矢量变换控制理论。

本书的主体内容是：直流调速系统静态、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；交流异步电动机的串级调速、变压变频调速的正弦波脉宽调制、矢量控制概念和通用变频器应用等。

本教材是在以往教材的基础上编写的，突出精而不贪多，用而不贪论，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，不再保留直流电动机拖动中较陈旧的内容，增加了通用变频器的选择与使

用方法。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。

本教材的课内教学时数为 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。在学习本课程前，读者应具备“电机拖动动力学基础”、“自动控制原理”和“电力电子技术”等方面的知识。

第 1 章

自动控制系统的静态特性

从本章起至第 4 章，重点讨论模拟控制的晶闸管直流调速系统。这种系统目前已经发展成熟，系统的快速性、可靠性和经济性都比较好，而且在设计、调整、运行等方面的经验也比较丰富，所以应用非常广泛；此外，直流自动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。例如金属切削机床、轧钢机、造纸机、纺织机械、提升机械等。

精密机床要求加工精度达到百分之几毫米甚至几微米。重型铣床的进给机构需要在很宽的范围内调速，快速移动时速度可达到 600mm/min，而精加工时速度只有 2mm/min，最高速度和最低速度之比竟有 300 倍；点位式数控机床要求定位精度达到几微米，速度跟踪误差约低于定位精度的 1/2；在轧钢工业中，年产数百万吨钢锭的现代化初轧机，其轧辊电动机容量高达几千千瓦，并且频繁地起动、停车、正转、反转，在 1s 之内连续完成从正转到反转的全过程；轧制薄钢带的高速冷轧机速度最高时达到 37m/s 以上，而成品厚度误差不大于 1%；在造纸工业中，日产新闻纸 400t 以上的高速造纸机，抄纸速度达到 1000m/min，要求稳速误差小于±0.01%等。

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，其目的是为了保证产品质量。

（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、减速则是动态方面要求。

2. 调速指标

为了进行定量分析，针对调速和稳速两项要求，定义了两个主要指标，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，用 S 表示，即

$$S = \frac{\Delta n_N}{n_0} \tag{1-1}$$

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。

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)有关静差率 S 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，当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%，

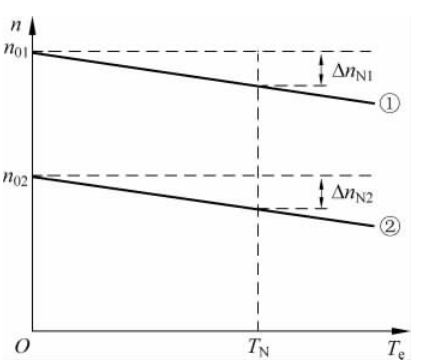


图 1-1　不同转速下的静差率

需要全本请访问 www.ertongbook.com