



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
(高职高专教育)

交直流传动控制系统

(第3版)

钱 平 主 编



高等教育出版社
Higher Education Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

(高职高专教育)

交直流传动控制系统

(第3版)

钱平 主编

孙国琴 胡春慧 副主编

汤天浩 主审

高等教育出版社

内容提要

本书是根据教育部制定的高职高专电气信息类专业人才培养目标要求编写而成的。近几年来,相关的科学技术已经取得了很大进步,电力电子变换器主要被功率开关器件所取代,变换技术主要以脉宽调制(PWM)为主;直流调速被交流调速取代已成不争的事实,交流调速技术进展较大,无刷直流永磁电动机的应用领域不断拓宽,本书针对这些技术发展进行了修订。

在内容上,本书包括直流调速控制系统和交流调速控制系统两部分。主要内容有直流调速系统、直流脉宽调速控制系统、位置随动系统、交流调压调速和串级调速、异步电动机变频调速系统、无刷直流电动机控制系统以及交直流电动机的微机控制等,同时本书还包括实验指导。

本书可作为应用型本科院校、高职高专等院校电气技术、工业电气自动化及机电自动化等专业的教材,也可供相关工程师和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

交直流传动控制系统/钱平主编.—3版.—北京:
高等教育出版社,2009.11
ISBN 978-7-04-027893-4

I.交… II.钱… III.交直流传动-控制系统-高等
学校:技术学校-教材 IV.TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 167295 号

策划编辑	孙 薇	责任编辑	唐笑慧	封面设计	张雨微	责任绘图	尹 莉
版式设计	马敬茹	责任校对	张 颖	责任印制	朱学忠		

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	咨询电话	400-810-0598
邮政编码	100120	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	河北省财政厅票证文印中心		http://www.landaco.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×1092 1/16	版 次	2001 年 7 月第 1 版
印 张	17		2009 年 11 月第 3 版
字 数	410 000	印 次	2009 年 11 月第 1 次印刷
		定 价	22.10 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。
版权所有 侵权必究
物料号 27893-00

前 言

本书是为了适应电气传动技术飞速发展的需要,更好地培养 21 世纪的应用性电气传动技术人才,根据教育部高职高专电类规划教材研讨会审定的教学大纲编写的。

“交直流传动控制系统”课程是电气技术、工业电气自动化及机电自动化等专业的重要专业课之一。近几年来,相关的科学技术已经取得了很大进步,电力电子变换器主要被功率开关器件所取代,变换技术主要以脉宽调制(PWM)为主,交流调速技术进展较大,无刷直流永磁电动机的应用领域不断拓宽,本书针对这些技术发展进行了修订。

本书内容的选取及编写尽量体现高职高专院校培养工业、工程生产第一线高等工程技术应用性人才的要求,舍弃了现有各类教材中较为陈旧的内容,重点阐述了直流调速系统、直流脉宽调速控制系统、位置随动系统、交流调压调速和串级调速、异步电动机变频调速系统、无刷直流电动机控制系统以及交直流电动机的微机控制等,并纳入实验指导书,加强了实践性环节的训练。

本书第 2、9、10 章由胡春慧编写,第 5、6 章由孙国琴编写,其余各章由钱平编写。李宁、江敏参与了编写工作。钱平担任主编并负责全书的统稿和编写组织工作。

上海海事大学汤天浩教授对全部书稿进行了认真的审阅,并提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中参考了许多相关图书和论文资料,并且引用了参考文献中相关章节内容,在此表示感谢。

由于编者水平有限,错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2009 年 8 月

目 录

第1章 绪论	1	特点	35
1.1 直流电动机调速技术概况	1	2.3.2 转速、电流双闭环调速系统的	
1.2 交流电动机调速技术概况	2	工作原理	36
1.2.1 交流异步电动机发展趋势	2	练习题	42
1.2.2 永磁同步电动机发展趋势	3	第3章 直流脉宽调速控制系统	44
1.3 交直流电动机调速数字控制		3.1 概述	44
系统概况	4	3.1.1 脉宽调制的理论	44
1.4 电动机控制技术发展趋势	5	3.1.2 不可逆 PWM 变换器	45
1.4.1 智能化	5	3.1.3 可逆 PWM 变换器	48
1.4.2 模块化	5	3.1.4 PWM 伺服系统的开环机械	
1.4.3 网络化	6	特性	52
1.4.4 微型化	6	3.2 PWM 调速系统的控制电路	53
1.4.5 通用化	6	3.2.1 脉宽调制器	53
1.4.6 从故障诊断到预测性维护	6	3.2.2 集成 PWM 控制器	54
1.4.7 一体化和集成化	6	练习题	64
1.4.8 其他动向	6	第4章 位置随动系统	66
1.5 本课程的任务	6	4.1 概述	66
练习题	7	4.2 位置信号检测装置	67
第2章 直流调速系统	8	4.2.1 自整角机(BS)	68
2.1 概述	8	4.2.2 旋转变压器(BR)	70
2.1.1 调速的定义	8	4.2.3 感应同步器(BIS)	72
2.1.2 直流电动机的调速方法	8	4.2.4 光电编码盘	73
2.1.3 调速指标	9	4.2.5 磁尺	75
2.1.4 V-M 系统的直流电动机开环		4.3 位置随动系统的基本类型	77
调速及特性	12	4.3.1 转角跟随式位置随动系统	77
2.2 单闭环直流调速系统的组成		4.3.2 脉冲-相位调制式位置随动	
及其特性	15	系统	78
2.2.1 单闭环有静差调速系统	16	4.4 位置随动系统的数字控制	80
2.2.2 单闭环调速系统的稳态特性	16	4.4.1 数字式位置随动系统	80
2.2.3 单闭环调速系统的动态特性	22	4.4.2 L290/L291/L292 三芯片直流	
2.2.4 单闭环无静差调速系统	27	电动机位置随动控制系统	82
2.3 双闭环直流调速系统分析与		4.5 位置随动系统的应用举例	87
设计	35	4.5.1 压下螺钉位置控制(APC)	87
2.3.1 转速、电流双闭环调速系统的		4.5.2 PC 控制飞剪小车位置随动	

系统	88	6.4 交流电动机矢量控制系统	124
练习题	89	6.4.1 矢量控制的基本概念	124
第 5 章 交流调压调速和串级调速	90	6.4.2 矢量控制系统	128
5.1 概述	90	练习题	130
5.1.1 交流电动机的调速方法及其 分类	90	第 7 章 无刷直流电动机控制系统	131
5.1.2 交流调速系统的应用	92	7.1 无刷直流电动机的组成结构 和工作原理	132
5.2 闭环控制的异步电动机的调压 系统	92	7.2 无刷直流电动机的基本公式 和数学模型	139
5.2.1 调压调速的工作原理	92	7.3 无刷直流电动机的转矩波动	141
5.2.2 交流调压器	94	7.4 无刷直流电动机的驱动控制	143
5.2.3 调压调速系统的组成及特性	95	7.5 无位置传感器的无刷直流电 动机的驱动控制	151
5.2.4 调压调速的功率损耗	97	7.6 无刷直流电动机驱动控制的 专用芯片介绍	153
5.3 绕线转子异步电动机的串级 调速系统	99	7.7 基于 DSPIC30F2010 的无刷 直流电动机控制	155
5.3.1 串级调速系统原理及基本 类型	99	7.7.1 DSPIC30F2010 特性和部分 功能模块简介	155
5.3.2 双闭环控制的串级调速 系统	102	7.7.2 基于 DSPIC30F2010 的无刷 直流电动机控制硬件设计	164
练习题	103	练习题	173
第 6 章 异步电动机变频调速系统	104	第 8 章 交直流电动机的微机控制	175
6.1 变频调速基本原理	104	8.1 概述	175
6.1.1 变频调速基本原理	104	8.2 交直流传动系统转速的数字 检测	177
6.1.2 变频器分类及主回路结构	106	8.3 交直流传动系统主要控制 环节的微机实现	180
6.1.3 逆变器工作原理	107	8.3.1 函数发生器	180
6.2 脉宽调制(PWM)控制技术	109	8.3.2 数字控制器	183
6.2.1 正弦波脉宽调制(SPWM) 控制技术	109	8.3.3 坐标变换器	187
6.2.2 电流滞环跟踪 PWM 控制 技术	113	8.3.4 数字滤波器	190
6.2.3 电压空间矢量 PWM 控制 技术	115	8.4 直流脉宽调制调速系统的 微机实现	194
6.3 异步电动机变压变频调速 系统	118	8.4.1 系统的硬件结构	195
6.3.1 异步电动机变压变频的机械 特性	118	8.4.2 系统的软件结构	198
6.3.2 转速开环的异步电动机变压 变频调速系统	121	8.5 位置随动系统的微机实现	201
6.3.3 转速闭环的转差频率控制的 系统	122	8.5.1 硬件总体结构	201
		8.5.2 控制电路主要结构	202

8.5.3 数模转换的特点	203	10.1 交流调压调速控制系统性能 的测试	237
8.5.4 绝对位置的获取	203	10.2 交流变频调速控制系统性能 的测试	240
8.5.5 位置随动系统的软件设计	204	10.2.1 异步电动机 SPWM 与电压 空间矢量变频调速系统	240
8.6 基于 DSP 的全数字直流位置 随动系统	205	10.2.2 交流变频调速装置参数 设定与运行	244
8.7 由 8098 单片机实现的 SPWM 变频调速系统	208	10.2.3 交流变频调速装置的闭环 运行	249
练习题	212	10.2.4 基于 DSP 的矢量变换控制 与直接转矩控制变频调速 系统	251
第 9 章 直流调速系统基础实验指导	213	10.3 通用变频器的运用	254
9.1 直流调速控制系统性能测试 ..	213	10.3.1 变频器的面板操作及主要 参数设定	254
9.1.1 晶闸管(SCR)直流调速系统 参数和环节特性的测定	213	10.3.2 异步电动机的制动及 变频器控制端子的使用	254
9.1.2 单闭环直流调速系统性能的 研究	219	10.3.3 简易 PLC 运转模式选择	256
9.2 双闭环不可逆直流调速系统 的特性测试	221	10.3.4 自动车床主轴运转控制	257
9.3 直流脉宽调速控制系统的 性能测试	224	附录 台达 VFD-M 系列变频器特点 及规格	259
9.3.1 双闭环可逆直流脉宽调速 系统	224	参考文献	261
9.3.2 微机控制的全数字直流调速 装置的参数设定与运行	229		
9.3.3 直流控制系统的仿真	233		
第 10 章 交流调速基础实验指导	237		

第 1 章

绪 论

1.1 直流电动机调速技术概况

调速控制系统是通过对电动机的控制将电能与机械能进行转换,并且控制工作机械按给定的运动规律运行的装置。用直流电动机作为原动机的传动方式称为直流调速。由于直流调速系统具有良好的起制动、正反转及调速等性能,特别是混合动力及纯电动汽车的推广和中小型风力发电机的使用,使得永磁无刷等直流电动机目前在传动领域中仍占重要地位。虽然交流电动机的调速控制技术发展很快,但就其闭环控制的机理来说,直流电动机的调速与控制理论和实现都是交流电动机调速控制的基础。从根本上说,由于直流电动机电枢和磁场能独立进行激励,而且转速和输出转矩的描述是对可控电压(或电流)激励的线性函数,因此,容易实现各种直流电动机调速控制系统,也容易实现对目标的控制“最佳化”。这也就是直流电动机长期主导调速领域的原因。晶闸管供电的直流调速系统具有良好的技术经济指标,目前国内大功率的调速系统还是沿用晶闸管电动机传动结构,由于晶闸管存在控制的非线性及较低的功率因数等缺点,难于实现高精度、宽范围的速度控制。随着全控型功率器件 GTO、GTR、P-MOSFET、IGBT 和 MCT 等的使用,利用这种有自关断能力的器件可取消原来普通晶闸管系统必需的换相电路,从而简化了电路结构,提高了效率,提高了工作频率,降低了噪声,也缩小了电力电子装置的体积和质量。谐波成分大、功率因数差的相控变流器逐步由斩波器或脉冲宽度调制型(PWM)变流器所代替,明显地扩大了电动机控制的调速范围,提高了调速精度,改善了快速性、效率和功率因数。PWM 电源逐步取代晶闸管相控式可控功率电源,成为可控直流电源的主流。

节能降耗是国际社会发展面临的一项挑战,已经成为国际社会的一项极为紧迫的任务。我国也将该项工作作为经济和社会发展的一项长远战略方针,已经成立了以国务院总理为组长的协调小组,指导和监督各级政府部门节能降耗工作的开展。提高电动机产品的效率,推广高效永磁电动机、机电一体化电动机、智能化电动机产品,广泛采用变频调速技术和大力推广以总线控制技术为代表的系统节能技术,是 21 世纪电动机行业产品发展的必然趋势。

1.2 交流电动机调速技术概况

由于传统直流电动机存在机械换向问题,其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,结构的影响使其不适合工作在易腐蚀、易爆和有烟尘的特殊场合。交流电动机一直受到人们的重视,它体积小、重量轻、没有电刷和换向器、转动惯量小、制造简单、结构牢固、工作可靠、易于维修,由于长期以来一直没有理想的调速方案,因此只被应用于恒速拖动领域。晶闸管的出现使交流电动机调速的发展出现了一个飞跃,使得采用半导体变流技术的交流调速得以实现。但由于以前的交流电动机调速系统的控制比较复杂、调速性能差、装置价格高、效率低,使交流调速未能大规模推广。微处理器出现后,国外在绕线转子异步电动机串级调速、无换向器电动机调速、笼型异步电动机的矢量控制以及脉冲宽度调制(PWM)技术方面,都已获得重大突破与发展,且进入工业应用阶段。目前(大功率半导体器件、大规模集成电路)交流电动机调速系统已具备了较宽的调速范围、较高的稳态精度、较快的动态响应、较高的工作效率以及可以四象限运行等优异性能,其静、动态特性均可以与直流电动机调速系统相媲美。可以说,在中大功率传动领域,交流调速已取代直流调速。特别是“节能型”交流调速技术已得到很快发展。在过去大量应用的所谓不变速拖动系统中,有相当一部分是风机、水泵等拖动系统,这类负载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不能调速,因而不得不依赖挡板和阀门来调节,同时也消耗大量的电能。采用交流电动机调速来改变风量或流量的话,效率会大大提高。从各方面来看,改造恒速电动机为交流调速电动机,每台可节能约20%以上,节能效益是很可观的。

1.2.1 交流异步电动机发展趋势

全封闭低压笼型三相大功率异步电动机作为动力机械,在大型工业装备场合存在巨大市场需求,特别是随着我国大力发展电力建设以及高效变频调速传动系统的推广应用,使低压大功率电动机拥有较大市场需求。目前此类设备主要依靠进口。长期以来,我国全封闭低压笼型三相异步电动机的最大功率为315 kW,超过此功率的一般采用3 kV、6 kV、10 kV的高压电动机。但高压电动机制造成本高,使用维护及配套设施要求高;在需要使用变频调速节能的场合,因高压变频器价格相对低压变频器要高很多,使其应用受到限制;此外,相同功率电动机的效率,低压电动机也明显高于高压电动机。因此,迫切需要开发低压大功率电动机以满足市场需求,填补我国在这一领域的空白。中型电动机采用全散热筋结构、散嵌绕组替代成形绕组等一直是中小型电动机领域研究的重点,也是国家电动机工业制造水平的标志。从20世纪90年代起,随着科学技术的进步以及新材料、新工艺的快速发展,国外在中大型电动机小型化、中型电动机采用全散热筋结构等方面的研究获得了成功并已进入推广应用阶段。与以往的箱式结构相比,采用全散热筋结构的电动机在相同功率等级下体积小、功率大。低压电动机机座号已从H355往上延伸至H450、H500,功率从315 kW逐步扩展至1 000 kW。机座结构从中型电动机必须采用的箱式结构发展到与小电动机一样的全散热筋式结构。另外,在国内压缩机和冷冻机配套电动机中,功率要

求越来越大,但体积要求却越来越严格。

在我国现有的产品规格中,虽然已经有 Y3、YX3 等新一代电动机产品问世,但 Y 系列和 Y2 系列仍占据着大多数市场份额,甚至还有一些企业在生产 JO2 等老系列产品。随着我国电动机产品出口量的逐渐增加,越来越多的企业面临出口高效电动机的竞争,这就使得国内生产企业更加重视电动机效率。从目前来看,出口高效电动机主要应符合美国 NEMA 标准和欧盟 EFF 效率分级以及其他地区的几类标准。

1.2.2 永磁同步电动机发展趋势

目前永磁电动机正向大功率化(超高速、高转矩)、多功能化和微型化方向发展。在一定的电动机体积下,要提高电动机的额定功率就必须大幅度提高电动机的转速。稀土永磁电动机不需要励磁绕组,结构比较简单,磁场部分没有发热源,不需要冷却装置,材料的矫顽力高,气隙长度可以取较大值,从而使大幅度提高转速成为可能。目前已试制出每分钟二三万转的电动机,正在研制每分钟几十万转的电动机。在高温、高真空度或狭小空间等特殊使用场合,难以使用传统电动机,而稀土永磁电动机(钕钴永磁)可耐高温,且体积小,能满足这些特殊要求。在宇航设备、宇宙空间的机械手、原子能设备的检查机器人和半导体制造装置等特殊装备内工作的电动机,需要使用高温电动机和高真空电动机。

国内外十分重视开发实用的电动汽车解决大气污染问题。对于电动汽车用电动机,既要求体积小、重量轻、效率高,又要求在高温和严酷条件下可靠运行。目前发展趋势之一是在车轮轮箍中置入外转子稀土永磁电动机,以直接驱动电动汽车或电车。

稀土永磁无刷直流电动机的应用日益广泛,目前的趋势是将逆变器装入电动机内,使系统整体小型化。稀土永磁电动机具有体积小、转子温度低、温升值不大的特性,因而装入逆变器是有可能的。

与异步电动机相比,永磁同步电动机不需要无功励磁电流,可以显著提高功率因数(可达到 1,甚至容性),减少了定子电流和定子电阻损耗,进而可以因总损耗降低而减少风扇的损耗(换用小容量电动机甚至可以去掉风扇),从而使其效率比同规格异步电动机提高 2~8 个百分点。永磁同步电动机在 25%~120% 额定负载范围均可保持较高的效率和功率因数,轻载运行的节能效果更为显著。此类电动机一般都在转子上设置起动绕组,具有在某一频率和电压下直接起动的能力,目前主要应用于石油工业、纺织化纤工业、陶瓷玻璃工业以及年运行时间长的风机、水泵等场合。

钕铁硼永磁材料具有较高的最大磁能积,能制成超薄型的永磁体,从而使过去难以做到的超微型和低惯量电动机得以实现。日本东芝公司开发的起动转矩为 $2 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}$ 、转速为 100 000 r/min 的微型永磁电动机,外径为 3 mm,长为 5 mm。该电动机经进一步改造后,已制成外径为 0.8 mm、长为 1.2 mm 的世界上最小永磁电动机。

总之,随着稀土永磁材料的迅速发展以及电力电子和微机控制技术的进步,尤其是纳米晶复合永磁材料的出现,将稀土永磁电动机的研究与发展推向了新的阶段。目前,稀土永磁电动机的单台容量已超过 1 000 kW,最高转速已超过 300 000 r/min,最低转速低于 0.01 r/min,最小电动机的外径只有 0.8 mm、长仅 1.2 mm。此外,打印机、计算机、家用电器、医疗设备、移动电话等对

永磁电动机的需求正日益增加。

目前,世界钕铁硼永磁材料和永磁电动机的生产逐渐向我国转移,我国正成为世界钕铁硼永磁材料和永磁电动机的制造和应用中心。

1.3 交直流电动机调速数字控制系统概况

电动机及其控制在国民经济中起着重要作用。无论是工农业生产、交通运输、国防宇航、医疗卫生、商务与办公设备、风力发电,还是日常生活中的家用电器等,都大量地使用各种各样的电动机。电动机既可作为电能生产的手段,也是电能应用的主要形式。据资料统计,我国生产的电能约 60% 用于电动机。

一般电动机是指常见的交流电动机、直流电动机,还有交直流两用的通用电动机。一般用途的电动机将电能转换成机械能,向被驱动的机械提供动力来源。它们除了作为机电能量转换的一个部件外,实际上,相当一部分电动机在应用时还需要对其进行起停、正反转、制动以及速度控制和某些保护等控制,通常将这些控制纳入“电气传动”范畴。

随着电力电子技术的进步,特别是微型计算机(简称微机)技术应用、新型控制策略出现,改变着电动机控制、电气传动的面貌,发展到了“运动控制”新阶段。

运动控制(Motion Control)是近 10 多年来在国际上流行的一个新的技术术语,通常是指在复杂条件下将预定的控制方案、规划指令转变成期望的机械运动。运动控制系统使被控机械运动实现精确的位置控制、速度控制、加速度控制、转矩或力的控制,以及这些被控机械量的综合控制。按照使用动力源的不同,运动控制可分为气动、液动和电动三大类。电气运动控制由于更容易实现与微型计算机的接口,以及具有其他明显的优点,因而在中小功率的运动控制系统中,电气运动控制体现了控制电动机技术、传感器技术、电力电子技术、微电子技术、自动控制技术和嵌入式微机应用技术的最新发展成就。由于微处理器和传感器的作用,赋予系统以智能,故又称为智能运动控制。运动控制作为一门多学科交叉的技术,每种技术出现的新进展都使它向前迈进一步,其技术进步日新月异。

电气传动经历了从恒速到调速、从低性能到高性能、从单机独立传动到多机综合协调传动的发展过程。基于反馈控制理论,由模拟电子电路构成,以直流调速为代表的连续控制系统的发展,改变了电气传动的面貌。然而,连续控制系统中由模拟电路组成的 PID 调节器,由于校正参数不便调整,且一经确定后便不易改变,因而对控制对象的适应能力差,难于实现各种新的控制策略和控制方法。用模拟控制装置对交流电动机进行控制,就更难满足要求。此外,模拟电路对状态量的检测精度不高,使连续控制系统的控制性能不易提高,模拟式元器件集成度不高,也使硬件结构复杂,影响控制装置的可靠性。由于上述原因,连续控制系统制约了电气传动,特别是交流调速的发展。

随着微电子技术的发展,嵌入式微处理器功能的不断提高以及电力电子技术、计算机控制技术的发展,电气传动领域出现了以嵌入式微处理器为核心的数字控制系统。微处理器的采用不仅极大地推动了作为研究热点的交流调速的迅猛发展,也给直流调速的发展注入了新的活力,使电气传动进入了更新的发展阶段。

微电子技术的发展对电动机控制技术的发展影响也是极大的,为了适应电子机械高性能、小型化、低成本和高可靠性的要求,从 20 世纪 80 年代初开始,各国半导体厂商不断开发各种功率集成电路,并已在许多领域得到越来越广泛的应用。功率集成电路是电力电子技术和微电子集成技术的结合,用来控制电动机运动的电子控制驱动系统,包括前级的微功率控制电路部分和末级的功率驱动部分。前级控制电路容易实现集成化,它们通常是模拟-数字混合集成电路。对于小功率系统,末级功率驱动电路也已集成化,称之为功率集成电路。它将高电压、大电流、大功率的多个半导体开关器件做在同一个芯片上,有些同时还将逻辑、控制、检测、自诊断、保护电路集成在同一个芯片上或一个混合模块里,从而使功率器件注入了智能,故又称为智能功率集成电路。有一些更大规模的功率集成电路把整个控制器和驱动器都集成在一起,用一片集成电路就能控制一台甚至多台电动机。由分立单元电路向专用集成电路发展,不但给电动机控制带来极大方便,使得体积缩小、成本降低、性能改善、调整简便,而且可大大提高系统的可靠性和抗干扰能力,从而深受用户的欢迎。

1.4 电动机控制技术发展趋势

电动机控制技术是电动机技术、电力电子技术、传感器技术、微电子技术、自动控制技术等学科的交叉应用技术。这些学科的发展促进了运动控制技术的发展,给由控制器、功率驱动装置和电动机三部分组成的运动控制技术带来了巨大的变化和影响。电动机运动控制系统构成要素的发展,必将极大地提高整个运动控制系统的性能。现在的运动控制系统是包含多种学科的技术领域,总的发展趋势是智能化、模块化、网络化、微型化、通用化等。

1.4.1 智能化

智能化是指在控制理论的基础上,吸收人工智能、运筹学、计算机科学、模糊数学、心理学、生理学和混沌动力学等新思想、新方法,模拟人类智能,使它具有判断推理、逻辑思维、自主决策等能力,以求得到更高的控制目标。

1.4.2 模块化

电动机驱动控制产品种类和生产厂家繁多,研制和开发具有标准机械接口、电气接口、动力接口、环境接口的电动机驱动控制产品单元是一项十分复杂的事,需要制定各项标准。模块化对电气产品的标准化、系列化带来的好处是可以肯定的。无论是对生产标准电动机驱动控制产品单元的企业还是对生产电动机驱动控制产品的企业,模块化将给生产电动机驱动控制产品的企业带来美好的前程。

1.4.3 网络化

网络的普及使基于网络的各种远程控制和监视技术方兴未艾。而远程控制的终端设备本身就是电动机驱动控制产品。因此,电动机驱动控制产品无疑正朝着网络化的方向发展。

1.4.4 微型化

电动机驱动控制产品向微型机器和微观领域发展,并向微米、纳米级发展。微电动机驱动控制产品体积小、耗能少、运动灵活,在生物医疗、军事、信息等方面具有不可比拟的优势。

1.4.5 通用化

通用型驱动器配置有大量的参数和丰富的菜单功能,便于用户在不改变硬件配置的条件下方便地设置多种控制方式驱动不同类型的电动机。

1.4.6 从故障诊断到预测性维护

随着机器安全标准的不断发展,传统的故障诊断和保护技术已经落伍,最新的产品嵌入了预测性维护技术,使人们通过 Internet 便可及时了解重要技术参数的动态趋势,并采取预防性措施。

1.4.7 一体化和集成化

电动机、反馈、控制、驱动、通信的纵向一体化已成为当前小功率伺服系统的发展方向。这种集成了驱动和通信的电动机称为智能化电动机(Smart Motor),集成了运动控制和通信的驱动器称为智能化伺服驱动器。电动机、驱动和控制的集成,使三者从设计、制造,到运行、维护更紧密地融为一体。

1.4.8 其他动向

包括绿色化、发热抑制、静音化、清洁技术等。

1.5 本课程的任务

本课程的任务是使读者在掌握交直流调速控制系统的基本组成原理的同时,能结合工程实际,根据生产工艺所提出的技术指标来组成和选择电动机控制系统,在闭环控制的基础上,能合

理、正确地选择和整定系统静、动态参数。在功率可控电源和控制电路的实现上,既要掌握目前的普及应用技术和正在发展的新技术,也要掌握模拟电路、微处理器、智能功率集成电路以及目前应用广泛的各类器件的功能及由它们组成的系统。能从工程实用的角度提出问题、分析问题和解决问题,通过本课程的学习,能胜任对电气传动控制系统的选择、使用、维护、管理的工作。

练习题

- 1-1 交直流电动机调速系统能解决什么问题?
- 1-2 交直流电动机调速系统的特性、结构如何?
- 1-3 交直流电动机调速系统的发展前景怎样?
- 1-4 学习本课程的任务有哪些?

第 2 章

直流调速系统

2.1 概述

在电力拖动调速系统中,由于直流电动机具有良好的起动、制动和调速性能,长久以来被广泛应用。早期是由交流电动机拖动直流发电机(G)给直流电动机(M)供电,通过调节发电机的励磁电流以改变其输出电压,达到直流电动机调速目的。这种调速系统简称 G-M 系统,但这种系统需要两台与直流电动机容量相当的电机,因此设备多,体积大,费用高,噪声大,维护不方便。为克服这些缺点,开始采用水银整流供电,以静止变流装置替代旋转机组供电。随着半导体技术的发展,更为经济可靠、性能优越的晶闸管变流器出现了,由晶闸管变流器(VT)向电动机(M)供电的系统简称 V-M 系统。随着 GTO、GTR、P-MOSFET、IGBT 大功率模块等全控式电力电子器件的功率驱动装置的发展,直流脉冲宽度调制(PWM)型的调速系统的应用越来越广。

2.1.1 调速的定义

所谓调速,是指在某一具体负载情况下,通过改变电动机或电源参数的方法,使机械特性曲线得以改变,从而使电动机转速发生变化或保持不变。即调速包含两方面:其一,在一定范围内“变速”,如图 2.1.1 所示,当电动机负载不变时,转速可由 n_a 变到 n_b 或 n_c 。其二,保持“稳速”,在某一转速下运行的生产机械受到外界干扰(如负载增加),为了保证电动机工作转速不受干扰的影响而下降,需要进行稳速,使转速接近或等于原来的转速,如图 2.1.1 所示中的 n_d 即为负载由 T_{L1} 增加至 T_{L2} 后的电动机转速,与 n_a 基本一致。

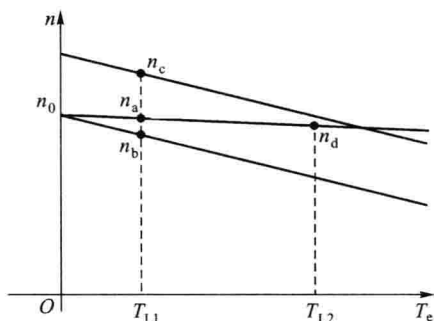


图 2.1.1 调速与 $n=f(T)$ 的关系

2.1.2 直流电动机的调速方法

直流电动机转速表达式为

$$n = \frac{U - I_a R}{K_e \Phi} = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{R}{K_e K_m \Phi^2} T_e = n_0 - \Delta n \quad (2.1.1)$$

式中, n 为电动机转速 (r/min); U 为电枢电压 (V); I_a 为电枢电流 (A); R 为电枢回路电阻 (Ω); Φ 为励磁磁通 (Wb); K_e 为电动机结构决定的电动势常数。

由式 (2.1.1) 可知, 直流电动机有 3 种调速方法:

- ① 调节电枢电压 U 。
- ② 调节励磁磁通 Φ 。
- ③ 改变电枢附加电阻 R_Ω 。

3 种调速方法的机械特性如图 2.1.2 所示。

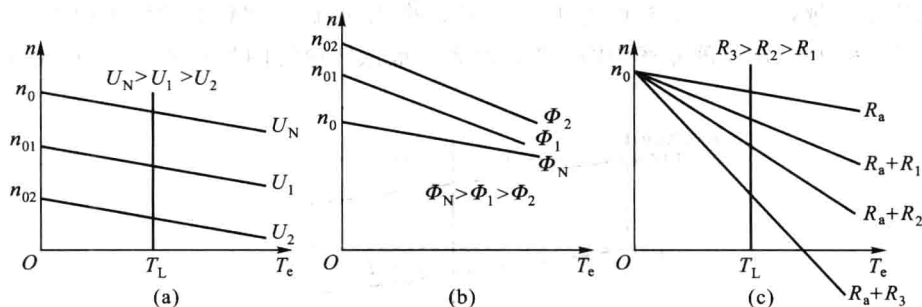


图 2.1.2 直流电动机人为机械特性曲线

改变电枢电压 U 所得的机械特性是一组平行变化的曲线, 如图 2.1.2(a) 所示。采用此种方法, 一般在额定转速以下调速, 最低转速取决于电动机低速时的稳定性。此调速方法具有调速范围宽、机械特性硬、动态性能好的特点。通过连续改变电枢电压实现无级平滑调速, 是目前主要的调速方法之一。

直流电动机在额定磁通下运行时, 磁路已接近饱和, 若降低励磁回路供电电压 (电流), 可减弱磁通实现升速, 特性曲线如图 2.1.2(b) 所示。采用此种方法, 一般以额定转速为最低转速, 最高转速受电动机换向条件和电枢机械强度的限制, 所以调速范围较小, 需与调压调速方法结合, 以扩大调速范围。

改变电枢电阻即在电枢回路串接不同的附加电阻, 以调节转速。观察图 2.1.2(c) 可发现, 外接电阻越大, 电阻功耗越大, 特性越软, 稳定性越差, 是有级调速。此法在实际中已很少应用。

2.1.3 调速指标

不同的生产机械, 其工艺要求电气控制系统具有不同的调速性能指标, 概括为静态和动态调速指标。

1. 静态调速指标

(1) 调速范围

电动机在额定负载下, 运行的最高转速 $n_{\max}$ 与最低转速 $n_{\min}$ 之比称为调速范围, 用 D 表示, 即

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (2.1.2)$$

注意:对非弱磁的调速系统,电动机的最高转速 $n_{\max}$ 即为额定转速 n_N 。

(2) 静差率

静差率是指电动机稳定运行时,当负载由理想空载增加至额定负载时,对应的转速降落 Δn_N 与理想空载转速 n_0 之比,用百分数表示为

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

静差率反映了电动机转速受负载变化的影响程度,它与机械特性相关,特性越硬,静差率越小,转速的稳定性越好。但并非机械特性一致,静差率相同,还与理想空载转速相关。如图2.1.3所示,A点静差率1%,B点静差率10%,那么能满足最低转速时的静差率,其他转速时也必然能满足。

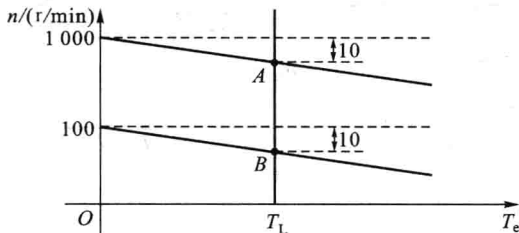


图 2.1.3 不同转速下的静差率

(3) 调速范围与静差率的关系

在调压调速系统中,额定转速为最高转速,静差率为最低转速时的静差率,则最低转速

$$\begin{aligned} n_{\min} &= n_{0\min} - \Delta n_N = \frac{\Delta n_N}{s} - \Delta n_N \\ &= \frac{(1-s) \Delta n_N}{s} \end{aligned}$$

则调速范围与静差率满足下列关系式

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_N s}{(1-s) \Delta n_N} \quad (2.1.3)$$

由以上公式可知,当一个调速系统机械特性硬度 (Δn_N) 一定时,对静差率要求越高,即静差率越小,允许的调速范围也越小。

例 2.1.1 一个直流电动机调速系统额定转速 $n_N = 1\,430\text{ r/min}$, 额定转速降落 $\Delta n_N = 125\text{ r/min}$ 。求:

(1) 要求 $s \leq 0.3$, 允许的调速范围为多少?

(2) 当最低允许转速为 500 r/min 时, s 、 D 各为多少?

解: (1) 调速范围

$$D = \frac{n_N s}{(1-s) \Delta n_N} = \frac{1\,430 \times 0.3}{(1-0.3) \times 125} = 4.9$$