



高等院校电子信息与电气学科特色教材

控制电机与特种电机

孙冠群 蔡慧 李璟 等编著



清华大学出版社



高等院校电子信息与电气学科特色教材

控制电机与特种电机

孙冠群 蔡慧 李璟 等编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统论述了控制电机与特种电机的原理、应用与发展。全书共分 11 章,包括绪论、测速发电机、自整角机、旋转变压器、伺服电动机及其控制、步进电动机及其控制、永磁无刷直流电动机及其控制、开关磁阻电动机及其控制、直线电动机、盘式电动机、超声波电动机。重点介绍电机及其系统构成与工作原理、电动机本体特性分析、控制策略与系统应用等,并给出了相关控制系统中使用的工程实例。全书各章给出了思考题与习题,并在附录中给出了两个课程设计,以便教学使用。

本书可供高等院校电气工程及其自动化、自动化、机械电子工程等专业的本科生作为教材或参考书使用,也可供科研院所、相关企业从事电气自动化技术工作的工程技术人员参考使用。

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

控制电机与特种电机/孙冠群,蔡慧,李璟等编著. —北京:清华大学出版社,2012.12
(高等院校电子信息与电气学科特色教材)

ISBN 978-7-302-29460-3

I. ①控… II. ①孙… ②蔡… ③李… III. ①微型控制电机—高等学校—教材 IV. ①TM383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 162558 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:常雪影

责任校对:梁毅

责任印制:沈露

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

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:22.5 字 数:557 千字

版 次:2012 年 12 月第 1 版 印 次:2012 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:36.00 元

产品编号:042787-01

出版说明

随着我国高等教育逐步实现大众化以及产业结构的进一步调整,社会对人才的需求出现了层次化和多样化的变化,这反映到高等学校的定位与教学要求中,必然带来教学内容的差异化和教学方式的多样性。而电子信息与电气学科作为当今发展最快的学科之一,突出办学特色,培养有竞争力、有适应性的人才很多高等院校的迫切任务。高等教育如何不断适应现代电子信息与电气技术的发展,培养合格的电子信息与电气学科人才,已成为教育改革中的热点问题之一。

目前我国电类学科高等教育的教学中仍然存在很多问题,例如在课程设置和教学实践中,学科分立,缺乏和谐与连通;局部知识过深、过细、过难,缺乏整体性、前沿性和发展性;教学内容与学生的背景知识相比显得过于陈旧;教学与实践环节脱节,知识型教学多于研究型教学,所培养的电子信息与电气学科人才还不能很好地满足社会的需求,等等。为了适应 21 世纪人才培养的需要,很多高校在电子信息与电气学科专业建设和课程建设方面都做了大量工作,包括国家级、省级、校级精品课的建设等,充分体现了各个高校重点专业的特色,也同时体现了地域差异对人才培养所产生的影响,从而形成各校自身的特色。许多一线教师在多年教学与科研方面已经积累了大量的经验,将他们的成果转化为教材的形式,向全国其他院校推广,对于深化我国高等学校的教学改革是一件非常有意义的事。

为了配合全国高校培育有特色的精品课程和教材,清华大学出版社在大量调查研究的基础之上,在教育部相关教学指导委员会的指导下,决定规划、出版一套“高等院校电子信息与电气学科特色教材”,系列教材将涵盖通信工程、电子信息工程、电子科学与技术、自动化、电气工程、光电信息工程、微电子学、信息安全等电子信息与电气学科,包括基础课程、专业主干课程、专业课程、实验实践类课程等多个方面。本套教材注重立体化配套,除主教材之外,还将配套教师用 CAI 课件、习题及习题解答、实验指导等辅助教学资源。

由于各地区、各学校的办学特色、培养目标和教学要求均有不同,所以对特色教材的理解也不尽一致,我们恳切希望大家在使用本套教材的

过程中,及时给我们提出批评和改进意见,以便我们做好教材的修订改版工作,使其日趋完善。相信经过大家的共同努力,这套教材一定能成为特色鲜明、质量上乘的优秀教材,同时,我们也欢迎有丰富教学和创新实践经验的优秀教师能够加入到本丛书的编写工作中来!

清华大学出版社

高等院校电子信息与电气学科特色教材编委会

联系人:盛东亮 shengdl@tup.tsinghua.edu.cn

前言

电力电子技术、控制技术、信号处理技术、微电子技术、材料技术以及计算机技术的飞速发展带动了现代电机技术的发展,推动了新型电机的产生,拓宽了电机的应用领域,并将电机技术与电力电子、控制理论、数字信号处理、计算机技术等融为一体。在传统电机之外的控制电机与特种电机,已不能用传统的电机概念来理解。

本书在传统电机的结构、原理、电磁关系、特性与应用等基础知识之上,对控制电机与特种电机展开论述。一些控制电机和特种电机本体与其控制系统已经密不可分,本书将电机与控制合二为一,突出这部分电机的控制系统知识。另外,本书也特别强调应用及实例,力求达到理论与实践相结合,为学生在以后的实际工作中能灵活应用、合理选择、正确使用电机打下良好基础。

本书共分11章,主要涉及10种系列的控制电机或特种电机的原理、电磁关系、特性、控制方法、系统应用等的內容。包括绪论、测速发电机、自整角机、旋转变压器、伺服电动机及其控制、步进电动机及其控制、永磁无刷直流电动机及其控制、开关磁阻电动机及其控制、直线电动机、盘式电动机、超声波电动机,书末还附有两个课程设计供选择。为了便于教学,在保持全书系统性和完整性的同时,各章又自成体系,各校完全可以根据课时安排有选择性地讲授。

本书获中国计量学院重点建设教材项目资助,全书由中国计量学院孙冠群(第1、8、10、11章及附录)、蔡慧(第3、4、9章)、李璟(第5、6章)、金英连(第7章)、孙丽宏(第2章)共同编著,其中孙冠群担任全书统稿工作。特别指出的是,于少娟、曹金亮、智泽英、左龙、丁伟等多位老师为本书的出版作出了历史性的贡献。另外,中国计量学院的王斌锐和郭振武、中国北车永济新时速电机电器有限责任公司的张黎锁与薛小东、运城学院的戴斌等也提出了宝贵的意见和建议,在此谨向他们表示诚挚的感谢。

由于作者水平所限,书中难免存在错误,欢迎广大读者批评指正。

编著者

目 录

| | |
|----------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 控制电机、特种电机和传统电机的区别 | 1 |
| 1.2 控制电机与特种电机的种类 | 2 |
| 1.3 控制电机与特种电机的应用 | 2 |
| 1.4 控制电机、特种电机与其控制系统的关系 | 3 |
| 第 2 章 测速发电机 | 4 |
| 2.1 直流测速发电机 | 4 |
| 2.1.1 直流测速发电机的形式 | 4 |
| 2.1.2 直流测速发电机的输出特性 | 5 |
| 2.1.3 直流测速发电机误差原因及分析 | 6 |
| 2.2 交流异步测速发电机 | 11 |
| 2.2.1 交流异步测速发电机的结构与工作原理 | 11 |
| 2.2.2 交流异步测速发电机的输出特性 | 12 |
| 2.2.3 交流异步测速发电机的主要技术指标 | 13 |
| 2.3 测速发电机的应用 | 15 |
| 2.3.1 位置伺服控制系统的速度阻尼及校正 | 15 |
| 2.3.2 转速自动调节系统 | 16 |
| 2.3.3 自动控制系统的解算 | 16 |
| 本章小结 | 18 |
| 思考题与习题 | 18 |
| 第 3 章 自整角机 | 20 |
| 3.1 自整角机的分类和结构 | 20 |
| 3.1.1 自整角机的分类 | 20 |
| 3.1.2 自整角机的结构 | 22 |
| 3.2 控制式自整角机 | 24 |
| 3.2.1 控制式自整角机的工作原理 | 24 |
| 3.2.2 带有差动发送机的控制式自整角机的工作原理 | 29 |
| 3.3 力矩式自整角机 | 30 |
| 3.3.1 力矩式自整角机的工作原理 | 30 |
| 3.3.2 阻尼绕组 | 34 |
| 3.3.3 力矩式自整角机的应用 | 34 |

| | | |
|------------|------------------------|-----------|
| 3.4 | 自整角机的选择与使用 | 35 |
| 3.4.1 | 自整角机的特点 | 35 |
| 3.4.2 | 自整机的选用 | 36 |
| 3.4.3 | 使用注意事项 | 36 |
| 3.5 | 自整角机测控系统应用举例 | 36 |
| 3.5.1 | 雷达方位角测量系统组成 | 37 |
| 3.5.2 | 自整角机的测角与控制 | 37 |
| 3.5.3 | 轴角/数字转换电路的硬件设计 | 38 |
| 3.5.4 | 软件设计 | 40 |
| | 本章小结 | 40 |
| | 思考题与习题 | 40 |
| 第4章 | 旋转变压器 | 42 |
| 4.1 | 旋转变压器的类型和用途 | 42 |
| 4.2 | 正余弦旋转变压器 | 44 |
| 4.2.1 | 正余弦旋转变压器的结构 | 44 |
| 4.2.2 | 正余弦旋转变压器的工作原理 | 46 |
| 4.2.3 | 正余弦旋转变压器补偿方法 | 50 |
| 4.3 | 线性旋转变压器 | 53 |
| 4.3.1 | 线性旋转变压器的结构 | 53 |
| 4.3.2 | 线性旋转变压器的工作原理 | 53 |
| 4.4 | 旋转变压器的使用 | 54 |
| 4.4.1 | 工作方式 | 54 |
| 4.4.2 | 旋转变压器的选择和使用 | 56 |
| 4.4.3 | 旋转变压器的误差 | 57 |
| 4.5 | 旋转变压器的应用举例 | 58 |
| 4.5.1 | 旋转变压器在角度测量系统中的应用 | 58 |
| 4.5.2 | 旋转变压器在解算装置中的应用 | 62 |
| | 本章小结 | 66 |
| | 思考题与习题 | 67 |
| 第5章 | 伺服电动机及其控制 | 68 |
| 5.1 | 伺服电动机简介 | 70 |
| 5.2 | 直流伺服电动机及其控制 | 71 |
| 5.2.1 | 直流伺服电动机的结构和分类 | 71 |
| 5.2.2 | 直流伺服电动机的控制方式 | 74 |
| 5.2.3 | 直流伺服电动机的稳态特性 | 74 |
| 5.2.4 | 直流伺服控制技术 | 76 |
| 5.3 | 直流伺服电动机的应用 | 81 |

| | | |
|--------------|----------------------|------------|
| 5.3.1 | 在位置控制系统中的应用 | 81 |
| 5.3.2 | 在速度控制系统中的应用 | 82 |
| 5.3.3 | 在混合控制系统中的应用 | 82 |
| 5.3.4 | 在张力控制系统中的应用 | 83 |
| 5.3.5 | 在自动检测装置中的应用 | 84 |
| 5.3.6 | 在温度控制系统中的应用 | 84 |
| 5.3.7 | 基于微处理器的直流伺服电动机系统 | 85 |
| 5.4 | 异步伺服电动机及其控制 | 89 |
| 5.4.1 | 异步伺服电动机的结构与分类 | 89 |
| 5.4.2 | 异步伺服电动机的运行原理及分析 | 90 |
| 5.4.3 | 异步伺服电动机的静态特性 | 97 |
| 5.4.4 | 异步伺服电动机和直流伺服电动机的性能比较 | 99 |
| 5.5 | 异步伺服电动机的应用 | 101 |
| 5.5.1 | 在位置控制系统中的作用 | 101 |
| 5.5.2 | 在检测装置中的应用 | 102 |
| 5.5.3 | 在计算装置中的应用 | 102 |
| 5.5.4 | 在增量运动的控制系统中的应用 | 103 |
| 5.6 | 永磁同步伺服电动机及其控制 | 103 |
| 5.6.1 | 永磁同步伺服电动机的结构与分类 | 104 |
| 5.6.2 | 永磁同步伺服电动机的工作原理 | 108 |
| 5.6.3 | 永磁同步伺服电动机的稳态性能 | 109 |
| 5.6.4 | 永磁同步伺服电动机的控制 | 113 |
| 5.6.5 | 永磁同步伺服电动机的矢量控制策略 | 121 |
| 5.7 | 永磁同步伺服电动机的应用 | 124 |
| 5.7.1 | 永磁同步电动机伺服系统的设计 | 124 |
| 5.7.2 | 伺服控制中相关控制策略 | 129 |
| 5.7.3 | 永磁同步伺服电动机的 DSP 控制电路 | 137 |
| | 本章小结 | 147 |
| | 思考题与习题 | 148 |
| 第 6 章 | 步进电动机及其控制 | 151 |
| 6.1 | 步进电动机的分类及结构 | 152 |
| 6.1.1 | 步进电动机的分类 | 152 |
| 6.1.2 | 步进电动机的结构 | 153 |
| 6.2 | 反应式步进电动机的工作原理 | 155 |
| 6.2.1 | 通电方式分析 | 155 |
| 6.2.2 | 小步距角步进电动机 | 157 |
| 6.2.3 | 步进电动机的基本特点 | 159 |
| 6.3 | 反应式步进电动机的运行特性 | 160 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 6.3.1 | 静态运行特性 | 160 |
| 6.3.2 | 动态运行特性 | 166 |
| 6.3.3 | 主要性能指标 | 173 |
| 6.4 | 步进电动机的驱动控制 | 173 |
| 6.4.1 | 驱动控制器 | 174 |
| 6.4.2 | 功率驱动电路 | 175 |
| 6.5 | 步进电动机的控制及应用 | 181 |
| 6.5.1 | 步进电动机的控制 | 181 |
| 6.5.2 | 步进电动机的应用 | 182 |
| | 本章小结 | 184 |
| | 思考题与习题 | 185 |
| 第 7 章 | 永磁无刷直流电动机及其控制 | 187 |
| 7.1 | 永磁无刷直流电动机的基本结构和工作原理 | 187 |
| 7.1.1 | 永磁无刷直流电动机的基本结构 | 187 |
| 7.1.2 | 永磁无刷直流电动机的工作原理 | 189 |
| 7.2 | 永磁无刷直流电动机的运行特性 | 190 |
| 7.2.1 | 永磁无刷直流电动机的基本方程 | 190 |
| 7.2.2 | 永磁无刷直流电动机特性分析 | 193 |
| 7.3 | 永磁无刷直流电动机的控制方法 | 194 |
| 7.3.1 | 最简控制方式 | 194 |
| 7.3.2 | 调压控制方式 | 195 |
| 7.3.3 | 电流滞环 PWM 控制方式 | 195 |
| 7.3.4 | 无刷直流电动机的四象限运行控制过程 | 196 |
| 7.4 | 永磁无刷直流电动机的无位置传感器控制 | 197 |
| 7.4.1 | 基于反电动势过零点的转子位置检测 | 198 |
| 7.4.2 | 续流二极管法 | 199 |
| 7.4.3 | 基于反电动势积分的转子位置检测 | 200 |
| 7.4.4 | 基于反电动势三次谐波的转子位置检测 | 200 |
| 7.4.5 | 状态观测器法 | 201 |
| 7.4.6 | 基于磁链函数的转子位置检测方法 | 201 |
| 7.5 | 永磁无刷直流电动机专用驱动控制集成电路 | 202 |
| 7.5.1 | MC33035 | 202 |
| 7.5.2 | EC302 | 208 |
| 7.6 | 基于 TMS320F2812 DSP 的永磁无刷直流电动机控制系统 | 214 |
| 7.6.1 | 控制器方案设计 | 214 |
| 7.6.2 | 控制器硬件设计 | 215 |
| 7.6.3 | 控制器软件设计 | 222 |
| 7.6.4 | 系统应用软件总体结构 | 225 |

| | |
|--------------------------------|------------|
| 7.6.5 控制器系统控制策略 | 227 |
| 7.7 永磁无刷直流电动机控制系统的应用与发展 | 234 |
| 本章小结 | 235 |
| 思考题与习题 | 236 |
| 第 8 章 开关磁阻电动机及其控制 | 237 |
| 8.1 开关磁阻电动机驱动控制系统构成与工作原理 | 240 |
| 8.1.1 SRD 系统的基本构成 | 240 |
| 8.1.2 SR 电动机的运行原理 | 242 |
| 8.1.3 SRD 系统与其他系统的比较 | 243 |
| 8.2 开关磁阻电动机的控制方式 | 245 |
| 8.2.1 SR 电动机的数学模型 | 246 |
| 8.2.2 SRD 系统的调速控制方式 | 248 |
| 8.2.3 基于模糊控制算法的系统控制方式 | 251 |
| 8.3 SRD 系统功率变换器 | 254 |
| 8.3.1 主电路与主开关电力电子器件形式介绍 | 254 |
| 8.3.2 SRD 功率变换器设计实例 | 256 |
| 8.4 开关磁阻电动机控制器 | 261 |
| 8.4.1 控制器硬件设计 | 261 |
| 8.4.2 SRD 系统软件设计 | 268 |
| 8.5 开关磁阻发电机 | 275 |
| 8.5.1 开关磁阻发电机的运行原理 | 276 |
| 8.5.2 开关磁阻发电机系统的构成 | 277 |
| 8.5.3 开关磁阻发电机的控制策略 | 278 |
| 8.6 开关磁阻电动机及其控制的发展 | 278 |
| 本章小结 | 279 |
| 思考题与习题 | 279 |
| 第 9 章 直线电动机 | 281 |
| 9.1 直线电动机的基本结构 | 283 |
| 9.2 直线感应电动机 | 286 |
| 9.2.1 旋转电机的基本工作原理 | 286 |
| 9.2.2 直线感应电动机的基本工作原理 | 286 |
| 9.3 直线直流电动机 | 288 |
| 9.3.1 永磁式直线直流电动机 | 288 |
| 9.3.2 电磁式直线直流电动机 | 289 |
| 9.4 直线同步电动机 | 289 |
| 9.5 直线步进电动机 | 290 |
| 9.6 直线电动机的应用 | 292 |

| | | |
|---------------|----------------------|------------|
| 9.6.1 | 作为直线运动的执行元件 | 292 |
| 9.6.2 | 用于机械加工产品 | 292 |
| 9.6.3 | 用于信息自动化产品 | 293 |
| 9.6.4 | 用于长距离的直线传输装置 | 295 |
| 9.6.5 | 用于高速磁悬浮列车 | 296 |
| 本章小结 | | 298 |
| 思考题与习题 | | 299 |
| 第 10 章 | 盘式电动机 | 300 |
| 10.1 | 盘式电动机概况 | 300 |
| 10.2 | 盘式直流电动机 | 301 |
| 10.2.1 | 盘式直流电动机的结构特点 | 301 |
| 10.2.2 | 盘式直流电动机的基本电磁关系 | 303 |
| 10.3 | 盘式同步电动机 | 304 |
| 10.4 | 盘式电动机的发展 | 307 |
| 本章小结 | | 310 |
| 思考题与习题 | | 310 |
| 第 11 章 | 超声波电动机 | 311 |
| 11.1 | 超声波电动机概述 | 311 |
| 11.1.1 | 超声波电动机发展历史 | 312 |
| 11.1.2 | 超声波电动机的特点 | 313 |
| 11.1.3 | 超声波电动机的分类 | 315 |
| 11.2 | 行波型超声波电动机 | 315 |
| 11.2.1 | 行波型超声波电动机的结构特点 | 315 |
| 11.2.2 | 行波型超声波电动机的运行机理 | 316 |
| 11.2.3 | 行波型超声波电动机的驱动控制 | 319 |
| 11.3 | 超声波电动机的应用 | 322 |
| 11.4 | 超声波电动机的发展 | 325 |
| 本章小结 | | 326 |
| 思考题与习题 | | 327 |
| 附录 A | 课程设计 | 328 |
| A.1 | 步进电动机驱动系统设计 | 328 |
| A.1.1 | 设计背景 | 328 |
| A.1.2 | 设计要求 | 328 |
| A.1.3 | 设计原理 | 328 |
| A.1.4 | 分组说明 | 331 |
| A.1.5 | 设计报告说明 | 331 |

| | |
|------------------------------|------------|
| A.2 永磁无刷直流电动机控制系统设计 | 331 |
| A.2.1 设计背景 | 331 |
| A.2.2 设计要求 | 332 |
| A.2.3 设计原理 | 332 |
| A.2.4 分组说明 | 335 |
| A.2.5 设计报告说明 | 336 |
| 附录 B 部分思考题与习题答案 | 337 |
| 参考文献 | 341 |

第1章

绪 论

通过对电机学或电机与拖动课程的先期学习,我们掌握了传统电机的结构、原理、电磁关系、特性与应用等基础知识,本书将对传统电机之外的控制电机与特种电机展开讨论。

与传统感应电机、同步电机、直流电机和变压器相比,在工作原理、励磁方式、技术性能或功能以及在结构上有较大特点的电机可以统称为特种电机,包括大学机电类专业中设置的控制电机课程中包含的主要电机种类。随着电机应用领域的扩展,越来越多的新颖特种电机逐步产生并成功应用,因此有必要在大学中讲授这些电机中的典型代表。

1.1 控制电机、特种电机和传统电机的区别

在各类自动化系统中,需要用到大量的各种各样的元件,控制电机就是其中的重要元件之一。它属于机电元件,在系统中具有执行、检测和解算的功能。虽然从基本原理来说,控制电机与普通传统旋转电机没有本质上的差别,但后者着重于对电机的能力指标方面的要求,而前者着重于对特性、高精度和快速响应方面的要求,满足系统对它提出的要求。

一般来说,与传统电机相比,在工作原理、结构、性能或设计方法上有较大特点的电机都属于特种电机的范畴。

(1) 从工作原理来看,有些特种电机已经突破了传统电机理论的范畴。例如,超声波电动机,不是以磁场为媒介进行机电能量转换的电磁装置,而是利用驱动部分(压电陶瓷元件的超声波振动)和移动部分之间的动摩擦力而获得运转力的一种新原理电机。

(2) 即使在传统电机理论的范畴内,许多电机的工作原理也具有较大的特殊性,可以称之为特种电机。例如,步进电机是将数字脉冲信号转换为机械角位移和线性位移的电机,采用高性能永磁体后制成永磁混合式步进电动机,并采用先进的控制技术,其技术指标和动态特性有明显的改进和提高。开关磁阻电机是一种机电一体化的新型电机,在电机发明之后的100多年来,磁阻电机的效率、功率因数和功率密度都很低,长期以来只能用作微型电动机,而磁阻电机与电力电子器件相结合构成的开关磁阻电机,其功率密度与普通异步电机相近,可在很宽的运行范围内保持高效率,系统总成本低于同功率的其他传动系统,目前国内最高已有400kW的产品出售。

(3) 从结构来看,除了传统的径向磁场旋转电机之外,还出现了许多特殊结构电机。例如,直线电机、盘式电机(横向磁场)等。

从以上的介绍可以看出,除了典型的通用直流电机、异步电机、同步电机、静止变压器等之外,其他类型的电机都可以归为特种电机的行列,这就意味着,控制电机也可以列为特种电机的序列。但是,由于控制电机的称呼历史较长,在我国高等教育自动化类专业的教学中,一直以来是一门不可或缺的课程。在这里,我们习惯上称控制电机之外的非传统电机为

特种电机,控制电机定义为自动化系统中常用的微型特种电机。

1.2 控制电机与特种电机的种类

与传统电机相比,控制电机和特种电机的特点还表现在种类繁多(目前约有 5000 多个品种)和功能多样化上,而且还在不断产生功能特殊、性能优越的新颖电机,因此不论从原理和结构,还是从功能和使用等方面对其进行严格的分类都是比较困难的。通常情况下,根据上一节的定义,控制电机一般包括直流测速发电机、直流伺服电动机、交流异步伺服电动机、旋转变压器、自整角机、步进电动机、直线电机等;特种电机包括开关磁阻电动机、永磁无刷直流电动机、交流永磁同步伺服电动机、盘式电机、超声波电机等。依用途而定,部分永磁无刷直流电动机、交流永磁同步伺服电动机可以划为控制电机的范畴。

本书在后续讲授过程中,将不再特别强调到底是属于控制电机还是所谓特种电机的范畴,这并没有多大意义,重要的是通过本书,将传统电机之外的常用的特殊电机及其控制系统一一介绍给读者。

1.3 控制电机与特种电机的应用

控制电机已经成为现代工业自动化系统、现代科学技术和现代军事装备中不可缺少的重要元件。它的应用范围非常广泛,例如,自动化生产线中的机械手、火炮和雷达的自动定位、船舶方向舵的自动操纵、飞机的自动驾驶、遥远目标位置的显示、机床加工过程的自动控制和自动显示、阀门的遥控以及电子计算机、自动记录仪表、医疗设备、录音录像设备等的自动控制系统。

特种电机技术综合了电机、计算机、新材料、控制理论等多项高新技术,其应用遍及军事、航空航天、工农业生产、日常生活的各个领域。

(1) 工业控制自动化领域。随着现代工业的自动化、信息化,各类控制电机与特种电机被越来越广泛地应用,尤其以数字化形式为控制方式的现代混合式步进电动机、交流伺服电动机、直线伺服电机等。

(2) 信息处理领域。信息产业在国内外都受到高度重视并获得高速发展,信息技术设备中需要的微电机全世界需求量每年约 15 亿台(套)。这类电机绝大部分是精密永磁无刷电动机、精密步进电动机等。

(3) 交通运输领域。目前,在高级汽车中,为了控制燃料和改善乘车感觉以及显示有关装置状态的需要,要使用 40~50 台电动机,而豪华轿车上的电机可多达 80 台,汽车电器配套电机主要为永磁直流电机、无刷直流电机等。作为 21 世纪的绿色交通工具,电动汽车在各国受到普遍的重视,电动车辆驱动用电机主要是无刷直流电动机、开关磁阻电动机、永磁同步电动机等,这类电机的发展趋势是高效率、高出力、智能化。此外,特种电机在机车驱动、轮船推进中也得到了广泛应用,例如,直线电机用于磁悬浮列车、地铁的驱动已经在我国进入商业应用阶段。

(4) 家用电器领域。目前,工业化国家一般家庭中约用到 35 台以上特种电机。为了满足用户越来越高的要求和适应信息时代发展的需要,实现家电产品节能化、舒适化、网络化、

智能化,甚至提出了网络家电(或信息家电)的概念,家电的更新换代的周期很短,对其配套的电机提出了高效率、低噪声、低振动、低价格、可调速和智能化的要求。无刷直流电动机、开关磁阻电动机等新兴的机电一体化产品正逐步替代传统的单相异步电动机。

(5) 高档消费品领域。VCD 和 DVD 视盘等音响设备的配套电机主要为印刷绕组电机、绕线盘式电机等,摄像机、数码照相机等高档电子消费产品需要量大,产品更新换代快,也是微特电机的主要应用领域之一,这类电机属于精密型、制造加工难度大,尤其进入数字化后,对电机提出了更苛刻的要求。

(6) 电气传动领域。工农业生产的各个部门都离不开电气传动系统,在要求速度控制与位置控制(伺服)的场合,特种电机的应用越来越广泛。例如,开关磁阻电机、无刷直流电机、功率步进电机、宽调速直流电机在数控机床、自动生产线、机器人等领域的应用。

(7) 特种用途,包括各种飞行器、探测器、自动化武器装备、医疗设备等。这类电机多为特殊电机或新型电机,包括从原理上、结构上和运行方式上都不同于一般电磁原理的电机,主要为低速同步电动机、谐波电动机、有限转角电动机、超声波电动机、微波电动机、电容式电动机、静电电动机等。

1.4 控制电机、特种电机与其控制系统的关系

不管是控制电机还是特种电机,与普通圆柱式交直流电机相比,它们都有其各自特殊性,其中相当部分的电机需要借助于控制器的控制来发挥作用,例如,开关磁阻电机没有位置信号的信息电机将无法运转,步进电机若无脉冲信号不能步进,无刷直流电机、永磁交流同步电机等没有转子位置的信号将不能如期发挥其作用等。控制电机、特种电机与其控制系统是密不可分的,单独认识电机本体而不能理解其控制原理,是不完整的,可以说脱离系统来单独谈这些电机是没有实际意义的。

在早期,由于用于电机控制的器件、控制理论等的滞后,严重影响了这些电机的性能、技术与推广应用。而随着新型电力电子器件的不断涌现,电机控制技术飞速发展,而微处理器的应用促进了模拟控制系统向数字控制系统的转化,数字化控制技术使得电机控制所需的复杂算法得以实现,大大简化了硬件设计,降低了成本,提高了精度。特别是最近几年,工业控制的功能模块或专用芯片不断涌现,例如,美国的 AD 公司和 TI 公司都推出了用于电动机调速的数字信号处理器(DSP),它将一系列外围设备如模/数转换器(A/D)、脉宽调制发生器(PWM)和 DSP 集成在一起,为电机控制提供了一个理想的解决方案。以开关磁阻电机控制为例,其常用的控制方法是电流模拟滞环控制和电压 PWM 调速控制。过去这种电压 PWM 控制策略都是通过分散的模拟器件实现的,因此系统往往是电流开环,电流的大小和波形都缺乏相应的控制,最终影响整个系统的运行性能。数字信号处理技术的快速发展以及高速、高集成度的电机控制专用 DSP 芯片的出现,不仅为开关磁阻电机的数字电流控制提供了强有力的支持,而且在电压 PWM 控制的基础上引入电流闭环,实现了数字化,从而使得电流以最小的偏差逼近目标值,对提高电机出力、效率,降低电机噪声和转矩脉动有很大作用。

因此,无论是新型电机,还是传统的控制电机或特种电机提高性能时,控制系统俨然已经成为电机的不可或缺的一部分。本书中对部分电机的控制系统也进行了详细介绍。

第 2 章

测速发电机

测速发电机(tachogenerator)是自控系统的常用元件,是一种检测机械转速的电磁装置。测速发电机的转轴和被测对象的转轴用联轴器连接在一起,可以把输入的机械转速信号转换成电压信号输出,输出电压与输入的转速成正比关系(如图 2-1 所示),用于测量旋转体的转速,亦可作为速度信号的传送器。在自动控制系统和计算装置中一般作为测速元件、校正元件、解算元件和角加速度信号元件等。

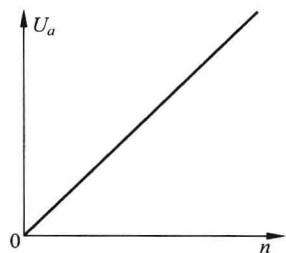


图 2-1 测速发电机输出电压与输入的转速的关系

自动控制系统对测速发电机的要求,主要是精确度高、灵敏度高、可靠性高等,具体有以下 6 点。

- (1) 输出电压与转速保持良好的线性关系;
- (2) 剩余电压(转速为零时的输出电压)要小;
- (3) 输出电压的极性或相位能反映被测对象的转向;
- (4) 温度变化对输出特性的影响小;
- (5) 输出电压的斜率大,即转速变化所引起的输出电压的变化要大;
- (6) 摩擦转矩和惯性要小。

此外,还要求它的体积小、重量轻、结构简单、工作可靠、对无线电通信的干扰小、噪声小等。

在实际应用中,不同的自动控制系统对测速发电机的性能要求各有所侧重。例如,作解算元件时,对线性误差、温度误差和剩余电压等都要求较高,一般允许在千分之几到万分之几的范围内,但对输出电压的斜率要求却不高;作校正元件时,对线性误差等精度指标的要求不高,而要求输出电压的斜率要大。

测速发电机按输出信号的形式,可分为直流测速发电机和交流测速发电机两大类。

2.1 直流测速发电机

2.1.1

直流测速发电机的形式

直流测速发电机实际上是一种微型直流发电机,按励磁方式可分为以下两种形式。

(1) 电磁式直流测速发电机。表示符号如图 2-2(a)所示。定子常为二极,励磁绕组由外部直流电源供电,通电时产生磁场。目前,我国生产的 ZCF 系列直流测速发电机为电磁式,实物如图 2-3 所示。