



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

WEITE DIANJI JI XITONG

微特电机及系统

程明主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

WEITE DIANJI JI XITONG

微特电机及系统

主 编 程 明
编 写 林明耀 张润和
主 审 周 鄂 辜承林



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

Electrical Engineering



内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

全书共分十一章，主要内容包括绪论、伺服电动机与伺服系统、测速发电机、步进电动机、自整角机、旋转变压器、永磁无刷直流电动机、单相交流串励电动机、双凸极电机驱动系统、直线电动机和超声波电动机。每章末附有小结、思考题与习题。本书注意吸收最新技术成果，使教材内容更加充实和先进。

本书可作为普通高等学校电气信息类专业的教材，也可作为其他相关专业研究生的教学参考书或高职高专教材，还可作为工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

微特电机及系统/程明主编. —北京: 中国电力出版社, 2008. 3

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5083-6720-0

I. 微… II. 程… III. 电机—高等学校—教材
IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 015460 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 http://jc.cepp.com.cn)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 3 月第一版 2008 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16 印张 388 千字

定价 24.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

《普通高等教育“十五”规划教材 微特电机及系统》一书自2004年10月出版以来,深受广大读者好评,国内数十所高校都选用了本教材,并于2007年被评为“全国电力行业精品教材”和“江苏省高等学校精品教材”。受中国电力出版社和东南大学推荐,本教材于2006年入选普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

原书在编写时,编者假定读者已经掌握电机学的一般基础知识。因此,在分析微特电机原理和特性时,尽量以电机学的理论为依据。全书共十一章,除第一章绪论外,第二~第六章分别为伺服电动机与伺服系统、测速发电机、步进电动机、自整角机和旋转变压器,属传统“控制电机”的基本内容,第七~十一章分别为永磁无刷直流电动机、单相交流串励电动机、双凸极电机驱动系统、直线电动机和超声波电动机,是相对较新或较为特殊的电机。在使用教材时,可根据学时数多少和专业要求,合理取舍。

为适应教学改革和教材建设的需要,及时地对教材内容进行修改和充实,编者根据各兄弟院校近年来在教学实践中反映的意见和建议,对《微特电机及系统》一书进行了修订。本次修订的基本原则是,保持教材的原有特色,总体结构基本不变,重点是充实和改进教材内容,试图达到如下目标:①吸收最新技术成果,使教材内容更加充实和先进;②进一步提高图文质量,论述和分析更为准确,条理更加清楚,便于教学;③适应工程教育专业认证和人才国际互认的需要;④为构建可持续发展的人才培养体系与知识框架服务。

原书由东南大学程明教授主编,东南大学林明耀教授和内蒙古工业大学张润和教授参加编写,具体分工是:第一、六、九、十一章和附录由程明执笔,第二、七、八章由林明耀执笔,第三、四、五、十章由张润和执笔。全书由程明统稿,由东南大学周鸷教授主审。

本书各章节的修订均由原执笔者完成,全书由程明统稿,由华中科技大学辜承林教授主审。

书中引用了大量相关资料和研究成果,并吸收了兄弟院校任课教师提出的宝贵意见和建议,谨在此致以衷心的感谢。

在本书编写过程中,得到了东南大学电气工程学院以及内蒙古工业大学有关领导和同志的热情支持和鼓励,东南大学电机学科的研究生金晓华、周昕、黄建辉、王运良、曹永娟、葛善斌、郑许峰、顾卫刚,内蒙古工业大学田桂珍老师等协助绘制部分插图和查阅部分资料,东南大学花为博士协助制作了多媒体课件,石斌博士阅读了超声波电动机一章书稿,提出了不少有益的意见,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中难免存在一些疏漏和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2007年9月

目 录

前言	1
第一章 绪论 (Introduction)	1
第一节 微特电机的基本用途	1
第二节 微特电机的分类	2
第三节 微特电机的基本要求	4
第四节 微特电机的发展概况和发展趋势	5
第五节 如何学习“微特电机及系统”这门课程	6
第二章 伺服电动机与伺服系统 (Servo Motor and Servo System)	8
第一节 概述	8
第二节 直流伺服电动机	8
第三节 直流力矩电动机	15
第四节 交流异步伺服电动机	19
第五节 交流同步伺服电动机	35
第六节 数字化交流伺服系统	41
第七节 伺服电动机应用举例	44
小结	46
思考题与习题	47
第三章 测速发电机 (Tachogenerator)	49
第一节 概述	49
第二节 直流测速发电机	49
第三节 交流异步测速发电机	55
第四节 其他型式的测速发电机	64
第五节 测速发电机应用举例	66
小结	69
思考题与习题	69
第四章 步进电动机 (Stepping Motor)	71
第一节 概述	71
第二节 反应式步进电动机的结构及工作原理	71
第三节 反应式步进电动机的静态特性	76
第四节 反应式步进电动机的动态特性	79
第五节 其他型式的步进电动机	85
第六节 步进电动机的驱动电源	88
第七节 步进电动机的控制与应用	94
小结	96

思考题与习题	97
第五章 自整角机 (Selsyn)	99
第一节 概述	99
第二节 力矩式自整角机	100
第三节 控制式自整角机	108
第四节 差动式自整角机	111
第五节 其他型式的自整角机	114
第六节 多台自整角接收机的并联运行	117
第七节 自整角机应用举例	118
小结	120
思考题与习题	120
第六章 旋转变压器 (Resolver)	122
第一节 概述	122
第二节 正余弦旋转变压器	123
第三节 线性旋转变压器	128
第四节 旋转变压器的误差及其改进措施	130
第五节 双通道测角系统与多极旋转变压器	132
第六节 感应移相器	134
第七节 感应同步器	136
第八节 数字式旋转变压器	140
第九节 旋转变压器产品的选择与使用	143
第十节 旋转变压器应用举例	144
小结	146
思考题与习题	147
第七章 永磁无刷直流电动机 (Permanent Magnet Brushless DC Motor)	148
第一节 概述	148
第二节 永磁无刷直流电动机的基本结构和工作原理	148
第三节 永磁无刷直流电动机的运行特性	153
第四节 永磁无刷直流电动机的控制方法	156
第五节 专用集成驱动电路介绍	165
第六节 应用举例	167
小结	170
思考题与习题	170
第八章 单相交流串励电动机 (Single Phase Series Motor)	171
第一节 概述	171
第二节 单相串励电动机的基本结构和工作原理	171
第三节 单相串励电动机的工作特性	174
第四节 单相串励电动机的调速	178
第五节 单相串励电动机产生的干扰及其抑制措施	179

第六节 单相串励电动机的应用	181
小结	181
思考题与习题	181
第九章 双凸极电机驱动系统 (Doubly Salient Motor Drive)	182
第一节 概述	182
第二节 开关磁阻电机的结构与工作原理	182
第三节 开关磁阻电机控制系统	187
第四节 双凸极永磁电机的结构与工作原理	193
第五节 双凸极永磁电机控制系统	197
第六节 双凸极电机驱动系统应用举例	200
小结	202
思考题与习题	202
第十章 直线电动机 (Linear Motor)	204
第一节 概述	204
第二节 直线感应电动机	204
第三节 直线直流电动机	210
第四节 直线和平面步进电动机	212
第五节 直线电动机应用举例	215
小结	216
思考题与习题	217
第十一章 超声波电动机 (Ultrasonic Motor)	218
第一节 概述	218
第二节 超声波电机的运动形成机理	219
第三节 环形行波型超声波电机的结构与工作原理	221
第四节 行波型超声波电机的速度控制	224
第五节 行波型超声波电机的驱动电路	227
第六节 其他类型超声波电机	228
第七节 超声波电机应用举例	232
小结	234
思考题与习题	235
附录	236
附录一 主要符号表	236
附录二 控制微电机型号命名方法	237
附录三 控制微电机产品名称代号	238
附录四 控制微电机性能参数代号	242
附录五 驱动微电机型号命名方法	245
参考文献	246

第一章 绪 论

(Introduction)

第一节 微特电机的基本用途

微特电机尚无统一、明确的定义,通常指的是结构、性能、用途或原理等与常规电机不同,且体积和输出功率较小的微型电机和特种精密电机,一般其外径不大于130mm,输出功率从数百毫瓦到数百瓦。但是随着技术的发展和应用领域的扩大,微特电机的体积和输出功率都已突破了这些范围,现在有的特种电机的功率做到了10kW甚至更大,并出现了直径达1.1m的旋转变压器。

现代微特电机技术融合了电机、计算机、电力电子、自动控制、精密机械、新材料和新工艺等多种高新技术,是现代武器装备自动化、工业自动化、办公自动化和家庭生活自动化等不可缺少的重要技术。随着电子技术、计算机技术和控制技术的迅速发展,以及电子信息产品的广泛应用,一方面,电子信息产品已成为微特电机的主要应用领域;另一方面,微特电机的技术要求亦与电子技术紧密相联,日益显示出机电一体化趋势。特别是集成驱动器和微处理器在微特电机驱动与控制中的推广应用,使微特电机向集成化、智能化方向发展,从而改变了微特电机作为元件使用的传统概念,确立了微特电机作为一个小系统的设计、生产和使用的新概念,标志着微特电机发展已进入一个新阶段,这正是本书定名的原因。

微特电机在国民经济各个领域中的应用十分广泛,主要有以下几个方面。

(1) 航空航天:在航天领域,卫星天线的展开和偏转,飞行器的姿态控制,太阳能电池阵翼驱动,宇航员空调系统以及卫星照相机等,都需要高精度的微特电机来驱动。比如,天线展开系统要求转矩大、转速低,为了减小质量、缩小体积,采用高速无刷直流电动机与行星减速器组成一体。又如太空飞船的电源是太阳能电池阵,为了获得最大能源,要求太阳能电池阵翼正对太阳,这就要求电机不断地调整阵翼的方向,常以步进电动机为动力。而在飞机上,发动机起动,起落架收放,水平舵、方向舵、襟翼、副翼的操纵等,均是由特种电动机来完成的。

(2) 现代军事装备:在现代军事装备中,微特电机已成为不可缺少的重要元件或子系统。火炮自动瞄准、飞机军舰自动导航、导弹遥测遥控、雷达自动定位等均需采用由伺服电动机、测速发电机、自整角机等构成的随动系统。据有关资料介绍,一艘潜艇仅导航仪表配套设备就用90多台控制电机,一个自动火炮系统要用60多台电机,一枚导弹也要用60多台电机。例如,在导弹发射装置中的瞄准机,需对高低和方向两个方面进行自动瞄准,这就需要两套由伺服电动机为主构成的随动系统。高低机与方向机的机械负载不同,前者伺服电动机的功率较后者大。目前,发射装置用伺服电动机一般采用带有测速发电机的直流电动机,输出功率为10kW及以下,最大不超过100kW。以SA-2地空导弹发射用伺服电动机为例,其高低机用电动机功率为3.2kW,方向机用伺服电机功率为1.6kW,两者转速相同。

(3) 现代工业:机器人,机床加工过程自动控制与显示,阀门遥控,自动记录仪表,轧

钢机自动控制, 纺织、印染、造纸机的匀速控制等, 均大量使用不同类型、不同规格的微特电机。据统计, 一座 1513m^3 的高炉要用电机 40 多台。

(4) 信息与电子产品: 随着信息技术的快速发展, 电子信息产品近年来得到了广泛的应用, 并已成为微特电机的重要应用领域之一, 所用微特电机约占 29%。这些应用包括计算机存储器、打印机、扫描仪、数控绘图机、传真机、激光视盘、复印机、移动通信等。例如, 在移动式手机和 BP 传呼机中, 广泛采用带有偏振头的空心杯式直流电动机, 产生偏心振动, 提醒使用者接听来电。由于手机的体积愈来愈小, 质量愈来愈轻, 所以电机也做得愈发轻巧, 外径只有 4mm 左右, 质量仅 1.2~5.4g。

(5) 现代交通运输: 随着经济的高速发展和人民生活水平的提高, 交通运输车辆, 特别是家庭汽车的数量近年来有了飞速增长, 从而使汽车用微特电机在数量、品种和结构上都发生了很大变化。据统计, 每辆普通汽车至少用 15 台微特电机, 高级轿车要用 40~50 台微特电机, 豪华型轿车则配有 70~80 台电机。目前, 世界范围内汽车用微特电机已占到微特电机总量的 13% 左右。我国各种汽车用微特电机产量已超过 6000 万台。

(6) 现代农业: 水位自动显示、水坝闸门自动开闭、鱼群探测等也都少不了微特电机。

(7) 日常生活: 随着人们物质生活和文化生活水平的提高, 微特电机在日常生活中的应用范围日益扩大。例如, 高层建筑的自动电梯、医疗设备、录音录像设备、变频空调、全自动洗衣机等, 都是依靠新型高性能微特电机来驱动控制的。

第二节 微特电机的分类

微特电机的种类很多, 亦有不同的分类方法。根据微特电机的用途, 可以将其分为驱动用微特电机和控制用微特电机两大类。

一、驱动用微特电机

驱动用微特电机主要用来驱动各种机构、仪表以及家用电器等, 通常是单独使用。根据这类电机的原理和结构, 又可作如图 1-1 所示的分类。

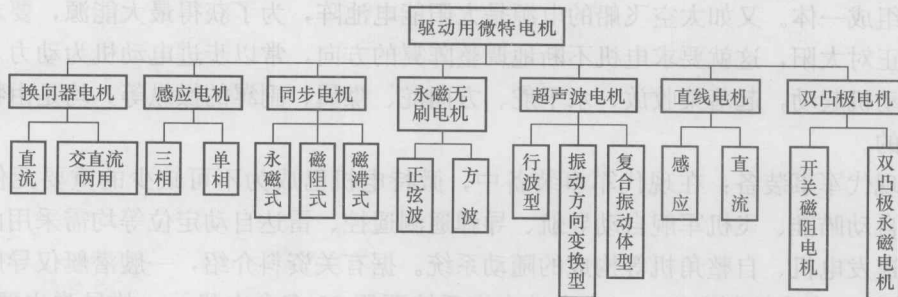


图 1-1 驱动用微特电机分类

由于受使用场合的限制, 驱动用交流微特电机一般都是单相的。

二、控制用微特电机

根据控制用微特电机在自动控制系统中的功能, 可作如下分类:

(1) 伺服电动机 (Servo Motor)。它的功能是将输入的电信号 (控制电压) 转变为机械信

号(转速或转角)输出。根据电信号的不同,又可分为直流伺服电动机和交流伺服电动机。

(2) 测速发电机(Tachogenerator)。它的功能是将机械转速转变为电信号(输出端电压)输出,所以属于发电机类型。按照输出电压的不同,又分为直流测速发电机和交流测速发电机。

(3) 旋转变压器(Resolver)。它的功能是将机械转角信号转变为电压信号输出。根据输出电压与转角的函数关系,又可分为正余弦旋转变压器,线性旋转变压器,以及感应移相器和感应同步器等。

(4) 自整角机(Selsyn)。它的功能是对机械信号(转角或转速)进行传递、测量或指示。根据功能的不同,它又可分为力矩式自整角机、控制式自整角机等。自整角机通常是两台或多台组合使用。

(5) 步进电动机(Stepping Motor)。它的功能是将数字脉冲电信号转变为机械信号(转角或转速)。根据结构和工作原理,可以分为反应式、永磁式、混合式步进电动机等。

控制用微特电机较详细的分类如图 1-2 所示。

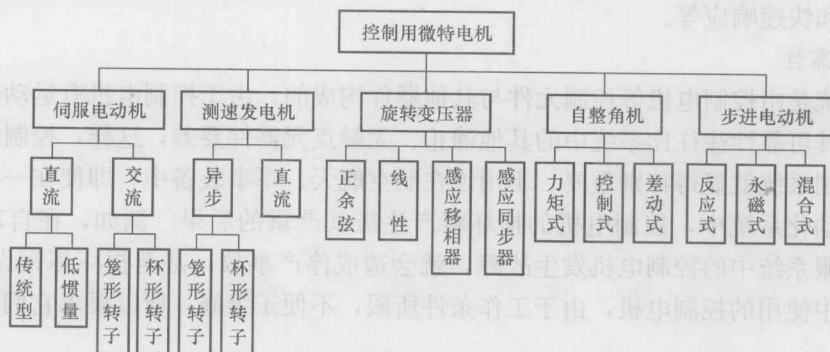


图 1-2 控制用微特电机分类

根据在控制系统中的作用,又可将控制用微特电机分为测量元件(信号元件)和执行元件(功率元件)。测量元件包括旋转变压器,交、直流测速发电机,自整角机等,它们能够将转角、转角差和转速等机械信号转换为电信号;执行元件主要有交、直流伺服电动机,步进电动机,力矩电机等,它们的任务是将电信号转换成轴上的角位移或角速度以及直线位移和线速度,并带动控制对象运动。图 1-3 所示为一个伺服系统的框图,通过它可以显示控制用微特电机在现代自动控制系统中的重要作用。

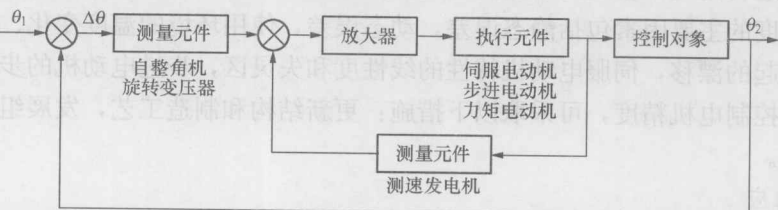


图 1-3 伺服系统框图

需要指出的是,有一些电机既可作驱动用,也可作控制用。例如,永磁无刷电机可以单独用来驱动很大的负载,也可以与控制线路构成高精度伺服系统。另外,在某些应用中的微

特电机同时兼有驱动和控制的双重功能,很难简单地将它说成是驱动电机或控制电机,电动车中的电机就是典型的例子,它在完成基本驱动功能的同时,要接受智能控制器的控制,使电机运行在最佳状态,达到能耗最小,单次充电的行驶里程最长。因此,上述对驱动用微特电机与控制用微特电机的分类是相对的,不是绝对的,目的是便于掌握和了解微特电机的基本用途和主要类型。

第三节 微特电机的基本要求

驱动用微特电机的主要任务是转换能量,因此,对它的要求与一般动力用电机的要求类似,希望能量转换效率高,结构简单,使用方便,容易维护,坚固耐用,体积小,重量轻,价格低等。

控制用微特电机在自动控制系统中的主要任务不是能量转换,而是完成信号的传递和转换,其性能的好坏将直接影响整个控制系统的工作性能。因此,对它的要求主要是高可靠性、高精度和快速响应等。

1. 高可靠性

控制系统是由控制电机等控制元件与其他器件构成的,由于控制电机有运动部分甚至有滑动接触,其可靠性往往比系统中的其他静止、无触点元器件要差,这样,控制电机的可靠性对整个控制系统就显得特别重要。不用说在航空航天、军事装备中,即使在一些现代化的大型工业自动化系统中,控制电机的损坏将产生极其严重的后果。例如,在自动化炼钢厂中,一旦伺服系统中的控制电机发生故障,就会造成停产事故,甚至损坏炼钢设备。此外,在核反应堆中使用的控制电机,由于工作条件所限,不便于维修,所以要求它们能够长期可靠地工作。

提高控制电机可靠性的首要措施是采用无刷电机方案。尽管无刷电机的成本较高,但它寿命长(可达20000h),不需经常维护,电磁干扰小,不会发生由电火花引起的可燃性气体爆炸等事故,使系统的可靠性大大提高。其次是采用容错和冗余技术。

2. 高精度

所谓精度,是指实际特性与理想特性之间的差异。差异越小,则精度越高。在各种军事装备、无线电导航、无线电定位、位置显示、自动记录、远程控制等系统中,对精度要求越来越高,相应地对系统所使用的控制电机的精度也提出了更高、更新的要求。例如,测量、转换或传递转角时,精度要求较高的是角分甚至角秒级;线性位移要求达到 μm 级。影响控制电机精度的主要因素包括静态误差,动态误差,使用环境的温度变化、电源频率和电压变化等所引起的漂移,伺服电动机特性的线性度和失灵区,步进电动机的步距精度等。

为了提高控制电机精度,可采取以下措施:更新结构和制造工艺,发展组合电机,研制新原理电机等。

3. 快速响应

由于自动控制系统中主令信号变化很快,所以要求控制电机(特别是作为执行元件的控制电机,如同服电动机)能对信号作出快速响应。而电机的转动部分有惯量,控制电机又多为电磁元件,有电感,这些都要影响控制电机的响应速度。表征响应速度的主要指标是机电时间常数和灵敏度。这些都直接影响系统的动态性能。为保证控制系统的快速响应,控制电

机应尽量减小其电气和机械时间常数。

第四节 微特电机的发展概况和发展趋势

国际上,微特电机是从20世纪30年代开始,应工业自动化、科学技术和军事装备的发展需要而迅速发展起来的一门技术。到20世纪40年代以后,逐步形成了自整角机,旋转变压器,交、直流伺服电动机,交、直流测速发电机等基本系列。20世纪60年代以后,由于电子技术、宇宙航行等科学技术的飞速发展和自动控制系统的不断完善,对微特电机的精度和可靠性又提出了更高的要求,在原有基础上又系列生产出多极自整角机、多极旋转变压器、无刷直流伺服电动机等新机种。

我国微特电机工业始于20世纪50年代初,至今大致经历了四个发展阶段。

(1) 起步阶段(1950~1965年):主要是仿制前苏联的产品,在全国设立了一些研究所和一批微特电机的生产厂。

(2) 自行发展阶段(1966~1978年):基本上形成了独立的、相当于国际20世纪60年代水平的微特电机工业体系,这期间自行设计了10多类新系列微特电机,行业内跨部门编制和修订了一些国家标准和国家军用标准。这一阶段我国微特电机的应用范围主要是军事和工业领域,产品大多数是按照国家指令性计划生产,企业的产品分工比较明确,其经济自主权和计划自主权很少,企业基本上在计划经济体制下运行。

(3) 初步壮大阶段(1979~1989年):这一阶段是我国改革开放的初期,经济建设逐步加快,微特电机的需求量越来越大,为适应形势的需要,先后从国外引进各类微特电机生产线60多条及其相应技术,从而使我国微特电机的生产制造水平和规模化生产能力有了空前的提高。1988年,微特电机生产企业已发展到200多家,产品规格1500余种,年产微特电机达到1亿台。

(4) 快速发展阶段(1990年至今):这一时期的显著特点是三资企业和民营企业得到迅速发展,打破了国营企业一统天下的局面,微特电机生产企业有上千家。随着大批合资企业和独资企业进入我国,微特电机的生产技术水平也随之有了一定提高。与此同时,还研制开发了开关磁阻电机、超声波电机、双凸极永磁电机等微特电机新品种。

我国微特电机工业经过50多年的发展,在技术水平、产品性能、规格品种、生产规模等方面都取得了长足的进步,但是,与国外先进水平相比还存在着一定的差距。其主要差距表现在品种少、比功率(W/kg)小、寿命短、精度低、质量不稳定、可靠性差等方面,这些都有待于今后努力赶上。

近年来,随着科学技术的发展和控制系统的不断更新,对微特电机的要求越来越高,同时,新技术、新材料、新工艺的应用,推动了微特电机的发展,出现了一些新的发展趋势,大致有以下几个方面。

1) 无刷化。为了提高微特电机的可靠性,除了在电机结构上不断改进,使其能长期可靠地运行外,国际上一直致力于发展各种无刷电机,经过近20年的研制开发,取得了显著成果,如无刷直流电机,无刷自整角机,无刷旋转变压器等,许多电机已进入商品化生产。

2) 微型化。由于电子信息技术的快速发展和广泛应用,一方面要求微特电机向微型化方向发展,以适应电子产品日益微型化的需要,另一方面也为微特电机的微型化创造了条

件。微特电机的微型化,不仅指它的质量和体积,还指它的功率消耗。在现代电子信息产品中(如手机),电机往往是耗电量最大的元件之一。而在宇宙航行系统中,通常以燃料电池或太阳能电池供电,所有电气元件的耗电量受到严格限制。在高空飞行中,飞行物质量每增加1kg,每小时就要多耗100kg左右的燃料。因此,微特电机的微型化是目前迫切需要解决的问题。

为了使电机微型化,通常采取改进设计,简化结构,采用新材料、新工艺等措施。目前,已有公司推出了外径仅0.8mm,轴长1.2mm,重量仅4mg的微型电动机,可以在人的血管中穿行。

3) 集成化。集成化是指借助近代微电子和计算机技术成就,将微特电机、变速器、传感器以及控制器等集成为一体,形成新一代电动伺服系统,亦称电子电动机,从而可明显提高系统的精度和可靠性。

4) 永磁化。随着微特电机向微、薄、轻化、无刷化和电子化的方向发展,永磁材料在微特电机中的普遍应用已是必然趋势。特别是,我国稀土资源丰富,约占世界稀土储量的四分之三,所研制生产的钕铁硼(Nd-Fe-B)永磁体的最大磁能积已达 $318.4\text{kJ}/\text{m}^3$,处于国际先进水平,为我国永磁电机的发展提供了良好条件。

5) 智能化。微特电机智能化是指在其控制单元中采用可编程控制器,实现电机速度和位置的自适应调整与控制。20世纪80年代初,单片机首先在步进电机逻辑控制中应用,现在已推广到各类电机。目前已发展到16~32位单片机芯片。智能化的发展,改变了微特电机作为元件使用的传统概念,确立了微特电机作为一个小系统的设计、生产和使用的新概念,标志着微特电机发展已进入一个新阶段。

6) 新原理、新结构电机。随着新原理、新技术、新材料的发展,电机在很多方面突破了传统的观念。近年来,利用科学技术的最新成果,已研制出一些新型电机。例如,利用“逆压电效应”研制出超声波电动机;利用“霍尔效应”研制出霍尔效应自整角机;开关磁阻电机(Switched Reluctance Motor,简称SR电机)以及在此基础上发展起来的双凸极永磁电机(Doubly Salient Permanent Magnet Motor,简称DSPM电机)等。此外,还有静电电动机、电介质电动机、磁致伸缩电机、仿生电机等。这类微特电机的发展,已经不再局限于传统的电磁理论,而将与其他学科相互结合,相互渗透,成为一门多学科交叉的边缘学科。这方面的研究工作尚待进一步深入。

第五节 如何学习“微特电机及系统”这门课程

“微特电机及系统”课程的任务是学习和掌握主要特种电机和控制电机的基本原理、分析理论、基本性能和使用方法,与此同时,巩固、加深和拓宽“电机学”所学过的理论和知识。微特电机种类很多,可以列举出数十种。随着科学技术的迅猛发展,各种新型电机以及应用于电机的新技术更是层出不穷。因此,读者不可能从该课程中学习所有类型的微特电机,只能加强微特电机基本理论和分析研究方法的学习,掌握电机内部的基本矛盾,并注意了解微特电机发展的最新趋势,从而在遇到新技术、新问题时,有通过自学去掌握、驾驭的能力。

多数微特电机的原理都建立在基本电磁规律基础之上,因此,各种电机在基本特性上有

许多共同之处，但它们各自又具有与众不同的特点。读者在学习时要抓住主要矛盾，集中精力掌握基本规律和主要理论，将各种电机联系起来，在分析与掌握一些共同规律的同时，注意每种电机所具有的特殊性质。

对于电气工程及其自动化、自动化等专业的学生来说，今后的主要任务是使用微特电机，所以，要学习微特电机的特性和使用方法。而电机之所以有各种特性的根本原因在于电机本身的内部矛盾，使用时的条件只是外因。因此，读者要通过学习电机的基本原理，了解电机内部的基本矛盾，从而正确而主动地掌握微特电机的使用方法。

直流伺服电动机

一、直流伺服电动机

直流伺服电动机(DC Servo Motor)可分直流有刷电动机和直流无刷电动机两大类。

(一) 直流有刷电动机

直流有刷电动机结构简单，运行可靠，调速性能好，但电刷和换向器之间存在电火花，易产生电磁干扰，且维护较麻烦。直流无刷电动机结构复杂，运行可靠，调速性能好，且无电刷和换向器，维护简单，但成本较高。

第二章 伺服电动机与伺服系统 (Servo Motor and Servo System)

第一节 概 述

伺服电动机 (Servo Motor) 也称为执行电动机, 它将电压信号转变为电机转轴的角速度或角位移输出。输入的电压信号又称为控制信号或控制电压。在自动控制系统中, 伺服电动机作执行元件。

根据使用电源性质的不同, 伺服电动机分为直流伺服电动机和交流伺服电动机两大类, 其中交流伺服电动机又可分为异步伺服电动机和同步伺服电动机。直流伺服电动机的基本结构、工作原理及内部电磁关系和普通的直流电动机相同, 其输出功率一般为 $0.1 \sim 100\text{W}$, 常用的为 30W 以下。异步伺服电动机通常为笼型转子两相伺服电动机和空心杯形转子两相伺服电动机。同步伺服电动机包括永磁式同步电动机、磁阻式同步电动机和磁滞式同步电动机。

近年来, 伺服电动机的应用日益广泛, 对它的要求也越来越高。新材料和新技术的应用, 使伺服电动机的性能有了很大的提高。如空心杯电枢直流伺服电动机、盘式电枢直流伺服电动机和无槽电枢直流伺服电动机的应用, 大大改善了系统的动态响应。

伺服电动机的种类多, 应用场合也各不相同, 但概括起来, 自动控制系统对伺服电动机的要求包括以下几个方面:

- (1) 调速范围宽。改变控制电压, 要求伺服电动机的转速在宽广的范围内连续调节。
- (2) 机械特性和调节特性为线性。伺服电动机的机械特性, 指控制电压一定时转速随转矩变化的关系; 调节特性是在一定的负载转矩下, 电动机稳态转速随控制电压变化的关系。线性的机械特性和调节特性有利于提高控制系统的精度。
- (3) 无“自转”现象。伺服电动机在控制电压消失后, 应立即停转。
- (4) 动态响应快。伺服电动机的机电时间常数要小, 而它的堵转转矩要大, 转动惯量要小, 改变控制电压时电机的转速能快速响应。

另外, 还有其他一些要求, 如要求伺服电动机具有较小的控制功率, 以减小控制器的尺寸等。

第二节 直流伺服电动机

一、结构和分类

按结构, 直流伺服电动机 (DC Servo Motor) 可分为传统型和低惯量型两大类。

(一) 传统型直流伺服电动机

传统型直流伺服电动机的结构形式与普通直流电动机相同, 只是它的容量和体积要小得多。它由定子和转子两部分组成。按励磁方式它又可以分为电磁式和永磁式两种。电磁式直流伺服电动机的定子铁心通常由硅钢片冲制叠压而成, 定子冲片形状如图 2-1 所示。励磁

绕组直接绕制在磁极铁心上。永磁式直流伺服电动机的定子上安装由永磁磁钢制成的磁极，经充磁后产生气隙磁场。

电磁式和永磁式直流伺服电动机的转子铁心由硅钢片冲制叠压而成，在转子冲片的外圆周上开有均布的齿槽，在槽中嵌入电枢绕组，通过换向器和电刷与外电路相连。

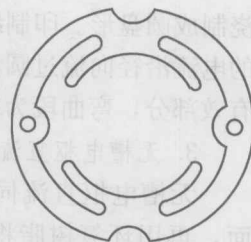


图 2-1 电磁式直流伺服电动机的定子冲片

(二) 低惯量直流伺服电动机

相对于传统型直流伺服电动机，低惯量直流伺服电动机的机电时间常数小，大大改善了电机的动态特性。常见的低惯量直流伺服电动机有空心杯形转子直流伺服电动机、盘式电枢直流伺服电动机和无槽电枢直流伺服电动机。

1. 空心杯形转子直流伺服电动机

图 2-2 所示为空心杯形转子直流伺服电动机的结构简图。其定子部分包括一个外定子和一个内定子。外定子可以由永久磁钢制成，也可以是通常的电磁式结构。内定子由软磁材料制成，以减小磁路的磁阻，仅作为主磁路的一部分。空心杯形转子上的电枢绕组，可以采用印制绕组，也可先绕成单个成型绕组，然后将它们沿圆周的轴向排列成空心杯形，再用环氧树脂固化。电枢绕组的端侧与换向器相连，由电刷引出。空心杯转子直接固定在转轴上，在内、外定子的气隙中旋转。

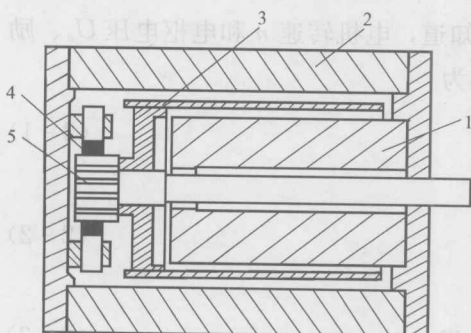


图 2-2 空心杯形转子直流伺服电动机结构简图

1—内定子；2—外定子；3—空心杯电枢；
4—电刷；5—换向器

也有内定子采用永久磁钢制成，外定子采用软磁材料的结构，这时外定子为主磁路的一部分。这种结构形式称为内磁场式，与上面介绍的外磁场式在原理上相同。

2. 盘式电枢直流伺服电动机

图 2-3 所示为盘式电枢直流伺服电动机结构图。其定子由永久磁钢和前后软磁铁组成，磁钢放置在圆盘的一侧，并产生轴向磁场，它的极数比较多，一般制成 6 极、8 极或 10 极。在磁钢和另一侧的软铁之间放置盘式电枢绕组。电枢绕组可以是绕线式绕组或印制绕组。绕线式绕组先绕制成单个绕组元件，并将绕好的全部绕组元件沿圆周径向排列，再用环氧树脂

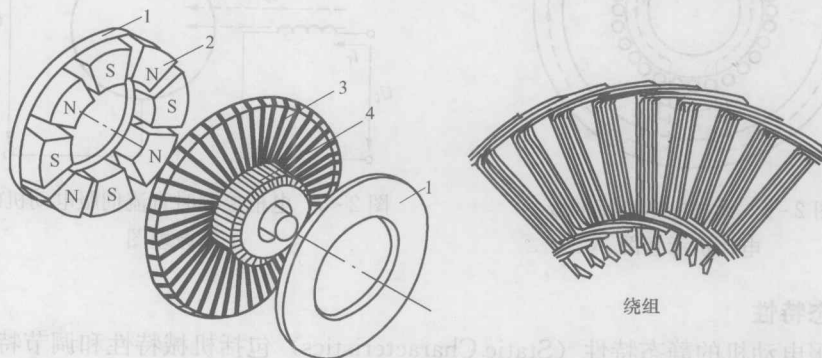


图 2-3 盘式电枢直流伺服电动机结构图

1—软磁铁；2—磁钢；3—电枢绕组；4—换向器

浇制成圆盘形。印制绕组采用制造印制电路板相类似的工艺制成。盘形电枢上的电枢绕组中的电流沿径向流过圆盘表面，并与轴向磁通相互作用产生电磁转矩。因此，绕组的径向段为有效部分，弯曲段为端接部分。

3. 无槽电枢直流伺服电动机

无槽电枢直流伺服电动机的电枢铁心上不开槽，电枢绕组直接排列在铁心圆周表面，再用环氧树脂将它和电枢铁心固化成一个整体，如图 2-4 所示。这种电机的转动惯量和电枢绕组的电感比前面介绍的两种无铁心转子的电机要大些，动态性能也比它们差。

二、控制方法

对于直流电动机，略去电刷接触压降，由电机学知道，电机转速 n 和电枢电压 U_a 、励磁磁通 Φ 、电枢电流 I_a 、电枢绕组电阻 R_a 之间的关系为

$$n = \frac{U_a - I_a R_a}{C_e \Phi} \quad (2-1)$$

电枢电流 I_a 和电磁转矩 T_e 的关系为

$$T_e = C_T \Phi I_a \quad (2-2)$$

将式 (2-2) 代入式 (2-1) 得

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_T C_e \Phi^2} T_e \quad (2-3)$$

式中， C_e 和 C_T 分别为直流电机的电动势常数和转矩常数。

由式 (2-3) 可知，在电磁转矩不变的情况下，改变电枢电压 U_a 或励磁磁通 Φ ，都可以控制电机的转速。通过改变电枢电压来控制电机转速的方法称为电枢控制；用调节磁通来控制转速的方法称为磁极控制。

由于实际应用中，直流伺服电动机主要采用电枢控制方式，下面仅对电枢控制时直流伺服电动机的特性进行分析。图 2-5 所示为电枢控制时直流伺服电动机的原理图。

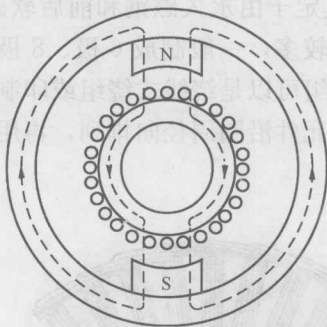


图 2-4 无槽电枢直流伺服电动机示意图

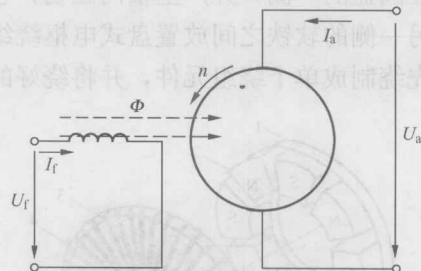


图 2-5 电枢控制时直流伺服电动机的工作原理图

三、静态特性

直流伺服电动机的静态特性 (Static Characteristics) 包括机械特性和调节特性。为了简化分析，可作如下假定：

- (1) 电机磁路不饱和；