



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

测控执行器 及其应用

王昌明 何云峰 包建东 章启成 编著

国家级规划教材

作者权威,学术领先

面向21世纪教学改革

全国优秀出版社倾力打造



国防工业出版社

National Defense Industry Press

TH86
128
12

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

测控执行器及其应用

主 编 南京理工大学 王昌明
副主编 南京理工大学 何云峰 包建东 章启成
参 编 南京审计学院 胡作进

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书主要阐述了机电测控系统中常用的各类测控元件的主要工作原理、特性、结构及选用方法。其中包括直流电机、交流电机、同步电机、步进电机、变压器、角度编码器及自整角机、变送器、常用低压电器、液压执行器和气动执行器等。为了便于读者学习和掌握本书的主要内容,书中给出了大量的具有参考价值的工程应用实例和习题及思考题。

本书可作为普通高等院校测控技术、精密仪器及机械、机械设计及自动化、机电一体化及相关专业的教材或参考书,亦可供研究生、教师及相关工程技术人员自学或参考。

图书在版编目(CIP)数据

测控执行器及其应用 / 王昌明主编. —北京:国防工业出版社, 2008.8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 05782 - 9

I. 测... II. 王... III. 工程测量 - 执行器 - 高等学校 - 教材 IV. TH86

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 080031 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 17 1/4 字数 400 千字

2008 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 39.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

本书编写的原则是:根据《测控执行器及其应用》教学大纲要求的知识点,遵循普遍到特殊、共性到个性的原则,以便读者更好地对教学内容进行理解和掌握。为便于读者自学,力求在内容上深入浅出、突出物理概念,同时考虑到在有限篇幅内增加更多信息量。

本书共分11章。第1章绪论,阐明了测控执行器的作用及学好本课程的意义;第2章介绍了直流电机的工作原理、特性及选用方法;第3章介绍了常用交流电机的工作原理、特性及选用方法;第4章介绍了同步电机的工作原理、使用特性等;第5章阐述了步进电机的工作原理及相应的控制与驱动方法;第6章综述了常用变压器的工作原理、特性、选择与使用方法;第7章简明介绍了角度编码器及自整角机的分类、性能及使用方法;第8章介绍了变送器的的工作原理、性能特性及选用方法;第9章概述了常用低压电器如刀开关、转换开关、自动开关、熔断器、主令电器、接触器和继电器等的工作原理和使用方法;第10章介绍了齿轮马达、叶片马达、柱塞马达、摆动液压马达和液压缸等液压执行器的工作原理、特性及使用方法;第11章介绍了气缸、摆动式气动执行器和气马达等气动执行器的工作原理、特性及使用方法。为便于学习,各章末均附有相关的习题与思考题。

全书由南京理工大学机械工程学院王昌明、何云峰、包建东、章启成和南京审计学院的胡作进编写,王昌明教授任主编。在编著过程中得到了有关领导及同事的大力支持,在此编者对他们的工作表示衷心感谢。同时编者在编写本书的过程中参阅了许多文献,在此谨向参考文献的作者表示感谢。

限于编者的水平,加之编写时间仓促,书中难免有不妥和错误之处,敬请广大读者不吝批评指正。

编 者

目 录

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 测控执行器的特点	2
1.3 常用测控执行器发展趋势	4
1.4 本书的内容和特点	5
习题与思考题	6
第2章 直流电机	7
2.1 概述	7
2.2 直流电机基本知识	7
2.3 直流电动机的启动与反转	24
2.4 直流电动机的调速方法	27
2.5 直流电机的参数选择	31
2.6 直流测速发电机	32
2.7 直流伺服电动机	34
2.8 直流电机的应用与维护	38
习题与思考题	41
第3章 交流电机	43
3.1 概述	43
3.2 交流电机的基本原理及分类	43
3.3 交流电机铭牌参数	44
3.4 交流异步电动机	45
3.5 交流电动机的驱动及控制	66
3.6 交流电机的应用及其维护	68
习题与思考题	73
第4章 同步电机	75
4.1 概述	75
4.2 同步电机的分类、基本结构及工作过程	75

4.3	同步电机的电磁关系	78
4.4	同步发电机的特性与应用	80
4.5	同步电动机的特性与应用	88
4.6	磁阻式同步电动机	93
	习题与思考题	96
第5章	步进电机	98
5.1	概述	98
5.2	步进电机的工作原理	98
5.3	步进电机的运行与特性	100
5.4	步进电机的驱动及控制	107
5.5	步进电机的参数选择	115
5.6	步进电机的应用	116
	习题与思考题	118
第6章	常用变压器	120
6.1	概述	120
6.2	常用变压器工作原理及分类	120
6.3	单相变压器运行特性及选用	122
6.4	常用变压器简介	134
	习题与思考题	153
第7章	角度编码器及自整角机	155
7.1	概述	155
7.2	常用角度编码器	155
7.3	常用自整角机	159
7.4	自整角机的应用实例	164
	习题与思考题	165
第8章	变送器	167
8.1	概述	167
8.2	变送器的参数选择	167
8.3	物位液位和流量变送器	170
8.4	压力、差压变送器	176
8.5	温度变送器	183
	习题与思考题	189

第9章 常用低压电器	190
9.1 刀开关和转换开关	190
9.2 自动开关	192
9.3 熔断器	194
9.4 主令电器	196
9.5 接触器	199
9.6 继电器	202
习题与思考题	210
第10章 液压执行器	211
10.1 概述	211
10.2 齿轮马达	216
10.3 叶片马达	228
10.4 柱塞马达	231
10.5 摆动液压马达	234
10.6 液压缸	235
10.7 液压执行器应用实例	239
习题与思考题	241
第11章 气动执行器	243
11.1 概述	243
11.2 气阀	244
11.3 气缸	256
11.4 摆动式气缸	261
11.5 气马达	263
11.6 其它气动执行器	264
11.7 气动执行器应用实例	267
习题与思考题	269
参考文献	270

第1章 绪 论

1.1 概 述

电机、电器及液、气执行器对国民经济和建设起着重要的作用,随着社会的不断进步,不仅各行各业对其要求不断提高,需求越来越大,而且普通居民对其应用也越来越普及,它们已经逐渐进入普通居民的日常生活和工作生产之中,可见其发展同国民经济和科学技术的发展有着密切的联系。

相对于其它能源,由于电能的生产和变换比较经济,传输和分配比较容易,使用和控制比较方便,因而电能已成为现代最主要的能源。而电能的生产、变换、传输、分配、使用和控制都离不开电机、电器。在电力工业中,发电机和变压器是电站和变电所的主要设备。在工厂里,大量应用各种电动机拖动和各种生产机械,一个现代化的工厂需要各种系列的多台电机。在交通运输业中,随着城市交通和电气铁路的发展,也需要大量牵引电机。在自动控制系统中则大量应用各种各样的小巧灵敏的控制电机作为检测、放大、变换、校正、执行和解算元件。在各种电器设备中,大量应用如接触器、继电器、熔断器、行程开关等控制电器组成各种电器控制系统。控制电机在自动控制系统中起着十分重要的作用,是必不可少的元件,控制电机性能的好坏将直接影响控制系统的性能。在各类测控系统中,也大量使用各种控制电机、变送器、液气执行器等。因此,工程技术人员必须熟悉控制电机、电器等常用执行器件的原理、性能和正确的使用方法。只有这样,才能正确选用和使用好各种元件。

自从1820年,奥斯特发现了电流在磁场中的机械力,随后安培总结了这一现象,电动机的雏形就出现在实验室了。同样,自1831年法拉第提出了电磁感应定律后,各种各样的发电机雏形也相继出现了。但是当时所提出的电机远远不同于现代的构造,从目前的眼光来看,它更像是一种仪器。由于电灯的发明,发电机有了工业上的用途,直流发电机找到了发展的基础,这时交流单相发电机也已经出现,为了扩大供电区域,使有可能集中发电,形成中央发电站,激发了变压器的出现和发展。但是直到19世纪末叶,工业上的主要动力还是来自蒸气机和水轮机。

液压传动相对机械传动来说,是一门新的技术,利用液压传动这种方式来作功是从1795年英国制成第一台水压机开始的,至今已有200余年的历史。然而,液压传动直到20世纪30年代才真正推广使用。液压传动是以流体为工作介质,包括液压和液力传动。液压传动是利用液体的压力能进行能量传递、转换和控制的一种传动形式。该传动具有很多优点,在国民经济中得到了广泛的应用。如在工业机械中的液压挖掘机、液压装载机、推土机、液压铲运机等;在起重运输机械的轮胎吊、集装箱正面吊运机、皮带运输机等;在矿山机械中的凿岩机、开采机、破碎机、提升机和液压支架等;在建筑机械中的打桩机、

液压千斤顶、平地机、混凝土泵车和回转窑液压系统等;在农业机械中的联合收割机、拖拉机和农机悬挂系统等;在冶金机械中的电炉炉顶及电极升降机、轧钢机和压力机等;在轻工机械中的打包机、注塑机、校直机、造纸机和橡胶硫化机等;在汽车机械中的平板车、高空作业车和汽车中的转向器及减震器等;在机床工业中的磨床、车床、龙门刨床和铣床等;在军事工业中的火炮瞄准系统、坦克火炮控制系统和战略飞行器控制系统等;在船舶及海洋工业中的舰船舵机液压系统、工程船舶、舱盖启闭液压系统和海洋石油钻探平台等。

在第二次世界大战期间,由于军事工业需要反应快、精度高、功率大的液压传动装置而推动了液压技术的发展。战后,液压技术迅速转向民用,在机床、工程机械、农业机械、汽车等行业中逐步得到推广。20 世纪 60 年代以后,随着原子能、空间技术、计算机技术的发展,液压技术也得到了很大发展,并渗透到各个工业领域中。当前液压技术正向高压、高速、大功率、高效率、低噪声、长寿命、高度集成化、复合化、小型化以及轻巧化等方向发展;同时,新型液压元件和液压系统的计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助测试(CAT)、计算机直接控制、机电一体化技术、计算机仿真和优化设计技术、可靠性技术及污染控制等方面,也是当前液压技术发展和研究的方向。

人们利用空气的能量完成各种工作的历史可追溯到远古,但作为气动技术应用的雏形,大约开始于 1776 年 John Wilkinson 发明能产生 1 个大气压左右压强的空气压缩机。1880 年人们第一次利用气缸做成气动刹车装置,将它成功地用到火车的制动上。20 世纪 30 年代初,气动技术成功地应用于自动门的开闭及各种机械的辅助动作上。进入 60 年代尤其是 70 年代初,随着工业机械化和自动化的发展,气动技术才广泛应用在生产自动化的各个领域,形成现代气动技术。如在汽车制造业,现代汽车制造工厂的生产线,尤其主要工艺的焊接生产线,几乎无一例外地采用了气动技术;在半导体电子及家电业,在彩电、冰箱等家用电器产品的装配生产线上,在半导体芯片、印制电路等各种电子产品的装配线上,不仅可以看到各种大小不一、形状不同的气缸、气爪,还可以看到许多灵巧的真空吸盘将一般气爪很难抓起的显像管、纸箱等物品轻轻地吸住,运送到指定位置上;在机器人技术领域,如装配机器人、喷漆机器人、搬运机器人以及爬墙、焊接机器人等都采用了气动技术。

1.2 测控执行器的特点

常用测控执行器包括电机、电器及液气执行器等多种元器件。

电机的种类很多,分类方法也很多。如:按运动方式分,静止的有变压器,运动的有直线电机和旋转电机,直线和旋转电机继续按电源性质分,又有直流电机和交流电机两种,而交流电机按运行速度与电源频率的关系,又可分为异步电机和同步电机两大类。

以上分类方法从理论体系上讲是合理的,也是大部分电机学教材编写的框架。但从习惯角度,人们还普遍接受另一种按功能分类的方法,具体是:

- (1) 发电机:生产电能的装置,将机械能转换成电能。
- (2) 电动机:即各种执行马达,将电能转换成机械能以驱动负载。
- (3) 控制电动机:在控制系统中作为执行元件、检测元件、校正元件使用,如交、直流

伺服电动机、测速发电机、自整角机、旋转变压器等。

(4) 变压器、变频器、交流器和移相等：用来改变电压、频率、电流和相位等参量的装置。

当电机作为动力源使用时，主要任务是转换能量，其突出问题是如何提高能量转换的效率，这对发电机和电动机都是十分重要的。控制电机在自动控制系统中主要是完成控制信号的传递变换，而能量转换是次要的，因此，对控制电机的要求是运行可靠、动作迅速、精度高和对环境的适应能力强等。在某些场合（如航空电机和卫星上的电机）则要求体积小、重量轻、耗电少，因而各种微特电机得到迅速发展。

电器的种类也很多，通常按其工作电压以交流 1000V、直流 1200V 为界，划分为高压电器和低压电器。低压电器按其控制对象又可分为电器控制系统用的和电力系统用的电器。

液压执行元件主要有齿轮马达、叶片马达、柱塞马达、摆动液压马达、液压缸和液压阀等。液压传动与电气及机械传动相比有如下优点：

(1) 可在运行过程中方便地实现大范围的无级调速，调速范围可达 1000:1。

(2) 液压传动装置的重量轻、结构紧凑、惯性小，其体积重量只有同等功能电动机的 12% 左右，这是由于液压系统中的压力可比电枢磁场中单位面积上的磁力大 30 倍 ~ 40 倍。由此，液压传动易实现快速启动、制动及频繁换向，每分钟的换向次数可达 500 次（左右摆动）、1000 次（往复移动）。

(3) 由于液压传动是以密闭回路上的静压力来传递力的，属柔性传动，这使液压元件的安装位置有很大的灵活性。

(4) 利用安全阀便可实现过载保护。

(5) 可借助各种阀实现自动控制，若用电、液联合控制，还可实现遥控。

(6) 液压元件易实现标准化、系列化和通用化，便于设计、制造和扩大应用。

液压传动也有如下缺点：

(1) 漏油是很棘手的问题，这不仅会污染环境，甚至会造成事故。为解决此问题，必须使液压系统高度集成化，并注意高效密封装置及适宜的工作介质的研制。

(2) 噪声大。近年来各国都在研制低噪声液压泵及管道消声器等，以降低液压系统的噪声。

(3) 由于液压油的黏度随油温而变，这会引起液压执行机构的运动特性发生变化，故其不宜在很高或很低的温度条件下工作。

(4) 液压元件的精度高，造价高。使用、维修要求有一定的专业知识和较高的技术水平。

(5) 液压元件中的小孔、缝隙容易堵塞，因此必须特别注意油液的过滤。系统的故障不易排除。现各国都在研制各种故障诊断仪，以期能及早发现和排除故障，防止重大事故。

气动元件主要有气缸、摆动式气缸执行器、气马达、气阀及一些其它气动执行器。气动技术与其它传动和控制方式相比，其主要优缺点如下。

优点：

(1) 气动装置结构简单、轻便、安装维护简单。压力等级低，故使用安全。

(2) 工作介质是取之不尽、用之不竭的空气,空气本身不花钱。排气处理简单,不污染环境,成本低。

(3) 输出力及工作速度的调节非常容易。气缸动作速度一般为 $(50 \sim 500) \text{ mm/s}$,比液压和电气方式的动作速度快。

(4) 可靠性高,使用寿命长。电器元件的有效动作次数约为数百万次,而 SMC 的一般电磁阀的寿命大于 3000 万次,小型阀超过 1 亿次。

(5) 利用空气的可压缩性,可贮存能量,实现集中供气。可短时间释放能量,以获得间歇运动中的高速响应。可实现缓冲,对冲击负载和过负载有较强的适应能力。在一定条件下,可使气动装置有自保持能力。

(6) 全气动控制具有防火、防爆、耐潮的能力。与液压方式相比,气动方式可在高温场合使用。

(7) 由于空气流动损失小,压缩空气可集中供应,远距离输送。

缺点:

(1) 气动装置的信号传递速度限制在声速范围之内,所以它的工作频率和响应速度远不如电子装置,并且信号要产生较大失真和延迟,也不便于构成十分复杂的回路,但这个缺点对工业生产过程不会造成困难。

(2) 空气的压缩性大于液压油的压缩性,因此在闭环系统中液压传动的动作迅速,响应能力又优于气动系统;对于开环系统工作速度的稳定性也以液压传动为佳。

(3) 气动传动的效率比液压传动还要低。

(4) 气动传动出力不如液压传动的大。

无论电机、液、气元件,还是书中介绍的变送器,它们都可归为测控元件,而测控元件与测控系统是局部与整体的关系。一方面,测控元件的性能和作用要服从整个系统对它的要求,测控元件性能的好坏要看它能否满足系统的要求。另一方面,测控元件的性能又直接制约了整个测控系统的性能。测控元件性能不佳或使用不当,整个系统的性能就无法提高,测控元件的发展又可以推动测控系统的发展。因此,对从事测控工作的工程技术人员,不但要了解测控系统的整体,以及系统中各个元件的相互关系,而且必须熟悉系统中各个元件。只有这样,才有可能合理地使用各种元件,设计出性能优良的测控系统。

1.3 常用测控执行器发展趋势

电机发明至今,已有近 200 年的历史。电机学科已发展成为一个比较成熟的学科,电机工业已成为近代社会的支柱产业之一。

人们预测,超导技术的广泛应用将使社会生产发生新的飞跃,同时也使电力工业在 21 世纪的发展面临难得的机遇和巨大的挑战。客观来说,电机发展到现在已经取得了非常了不起的成就,其单机容量的进一步增大、效率和功率密度(容量体积比)的进一步提高似乎只有也只能寄希望于超导技术的实用化发展,并期望由此带动电机结构和运行控制理论与实践的重大突破。目前,容量为 1000kVA 的高温超导变压器已经试制成功,高温超导发电机和电动机也都在研制之中。可以说,高温超导电机的工业化、实用化进程将

是 21 世纪科学技术进步的重要内容之一。

新型、特种电机仍将是与新原理、新结构、新材料、新工业、新方法联系最密切、发展最活跃、也最富想象力的学科分支,并将进一步深入渗透到人类生产和生活的所有领域之中,智能化电机或智能化电力传动的概念已经提出并被人们所接受。这种智能化包含两方面内容:①系统所具有的控制能力和学习能力;②电机的容错运行能力,即要求研制所谓容错型电机。容错型电机基本要求就是以安全为前提,允许电机在故障和误操作情况下的容错运行,直至故障消除或系统自动控制恢复。这对于传统电机运行观念,无疑是一个严峻挑战。

与国外先进水平比较,我国的液压元件和气动元件,尤其是气动逻辑元件,还有较大的差距。今后应加强元件的耐压能力、使用寿命、工作噪声、防漏等方面研究,以保证元件向复合化、集成化、精密化、微型化及标准化的方向发展。元件成本的降低,功能及质量的提高,将会促进液压及气动技术在各工业部门中得到更加广泛的应用。

1.4 本书的内容和特点

本书阐述了测控系统中常用的各类测控元件的主要工作原理、运动特性及其选用方法。其中包括直流电机、交流电机、同步电机、变压器、变送器、角度编码器及其自整角机、常用低压电器、液压执行器和气动执行器等。书中给出了大量具有参考价值的应用实例。

本书作为高等院校测控及相近专业本科生的基础课教材,主要对各类典型的电磁元件及液、气执行器的基本原理、简单结构、工作特性、使用方法和应用实例等作了简单介绍。其中主要以应用为主,在学习中应充分理解其中的主要理论、基本规律,掌握它们的使用方法和运行特点。

本书理论性和系统性较强,根据电磁元件和液、气执行元件的机理和性能对其电磁现象和机械现象进行了综合分析和理论研究,所以学习时应特别注意对数学、物理、电路、电子技术基础等基本理论的综合应用,建立一个系统和完善的知识体系,并注意遴选问题、分析问题和解决问题的方法,以后遇到类似问题应能触类旁通、举一反三。

本书在内容的编写上遵循从普遍到特殊,从共性到个性,以便读者对其内容的理解和学习。另外增加了一些元件在各种控制系统中的应用实例。为了拓展该书的应用领域,拓宽学生的知识面,还增加了液、气执行器两部分内容,增加了本书的工程实用性,读者可从本书中获得大量执行器的具体应用方法。学习时读者应充分理解,并加强实验,增强自己的动手能力,切忌囫圇吞枣、生搬硬套。

根据测控技术类专业的需要,本课程着重讲述各种控制电机、变送器和常用的低压控制电器以及一些常用的液、气执行器件。为了扩大学生的知识面,在讲清基本工作原理的基础上,对使用中的一些主要问题也作了简要介绍。

尽管电机、电器的种类很多,但其工作原理均遵循一些基本电磁定律,因而它们之间有许多共同之处,当然它们也各有自己的特点。因此,在学习时要注意运用辩证的观点,着重分析和掌握一些共同的规律,从而将各种电机、电器有机地联系起来。这样,也就能区分它们各自所具有的特殊性质。

习题与思考题

- 1.1 简述各种执行元件的分类。
- 1.2 试举出一两个身边应用各种执行元件的例子。

第2章 直流电机

2.1 概述

直流电机是人类最早发明和使用的一种电机,包括直流发电机和直流电动机两大类。发电机将机械能转换为电能,电动机将电能转换为机械能去带动负载。发电机和电动机实际上是直流电机的两种工作状态。因此,发电机和电动机的基本工作原理、结构和内在关系有许多共同之处。由于直流电动机具有良好的启动和调速特性,所以被广泛地应用于轧钢机、电力机车、精密机床、矿山卷扬机以及各种自动控制系统中。直流发电机作为各种直流电源,如直流电动机的电源;同步发电机的励磁和以直流为主的飞机上有着重要地位。

2.2 直流电机基本知识

2.2.1 直流电机的分类

直流电机按结构形式可分为开启式、防护式、封闭式和防爆式几种;按容量大小可分为小型、中型和大型直流电机;按励磁方式可分为他励、并励、串励和复励四种。

2.2.2 基本工作原理

1. 直流发电机的工作原理

图2-2-1(a)是最简单的直流发电机模型,有两个在空间固定的永久磁铁,分别为N极和S极,在磁极中间,有一铁制圆柱体,称为电枢铁芯。它与磁极之间的间隙称为气隙。安装在电枢铁芯表面的导体ab和cd组成了电枢绕组,它的首末两端分别连接到两个圆弧形铜片上,这两个互相绝缘的铜片构成了换向器,它随电枢铁芯一起旋转。为了把电枢绕组和外电路接通,安装了两个电刷A和B,电刷是固定不动的。

图2-2-1中的方向假设原动机拖动转子(电枢铁芯等)逆时针恒速旋转,这时,导体切割磁通,产生感应电动势。根据右手定则可知,在图2-2-1(b)中,ab中电动势方向为流出纸面(用 $\odot$ 表示),cd中电动势方向为流进纸面(用 $\oplus$ 表示),组成线圈,a点高电位,d点低电位。这时电刷A、B分别通过换向片与a、d端相连,所以电动势的方向A为+,B为-。转过 180° 后,到达图2-2-1(c)所示位置,ab在S极下,电动势方向为 $\oplus$,cd在N极下,电动势方向为 $\odot$,所以d点为高电位,a点为低电位,这时电刷A、B分别与d、a相连,所以电动势方向仍然是A+,B-。由此可知,虽然线圈中电动势是交变的,但电刷A、B极性恒定,可产生直流电压和直流电流。

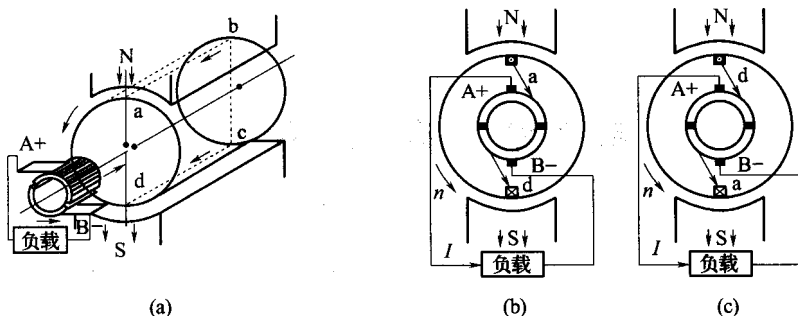


图 2-2-1 直流发电机的基本原理

当电刷上不接电源时,用原动机拖动电枢以恒速 n 逆时针旋转,则线圈边 ab 和 cd 分别切割不同磁极(N 和 S)下的磁力线而产生感应电动势。由右手定则判定,如图 2-2-1 (b)所示位置, N 极下导体中感应电动势的方向由 b 到 a , S 极下导体中感应电动势的方向由 d 到 c 。则每根导体中感应电动势的瞬时值为

$$e_i = B_x l v \quad (2-2-1)$$

式中, B_x 为导体所处位置的气隙磁通密度 (Wb/m^2); l 为导体的有效长度(近似为电枢铁芯长度),单位为 m ; v 为导体切割磁力线的线速度 (m/s)。

对已制成的电机, l 为定值,若 n 恒定,则 v 亦为常值,有

$$v = \frac{\pi D n}{60} \quad (2-2-2)$$

式中, D 为电枢直径 (m); n 为电枢每分钟旋转的周数 (r/min)。

2. 直流电动机的工作原理

直流电动机结构与直流发电机一样。在图 2-2-2(a)中,在电刷 A 、 B 间外接直流电源,极性为 $A+$ 、 $B-$, ab 中电流方向为流进纸面,用 $\oplus$ 表示; cd 中电流方各为流出纸面,用 $\odot$ 表示。由左手定则可知,电磁力矩为逆时针方向。转过 180° 后到图 2-2-2(b)所示位置,这时 cd 转到 N 极下,但电刷 A 、 B 经换向片分别与 d 、 a 相连,所以 cd 中电流为 $\oplus$, ab 中电流为 $\odot$,电磁转矩仍为逆时针方向,电机在直流电源作用下可产生恒向转矩,拖动负载工作。

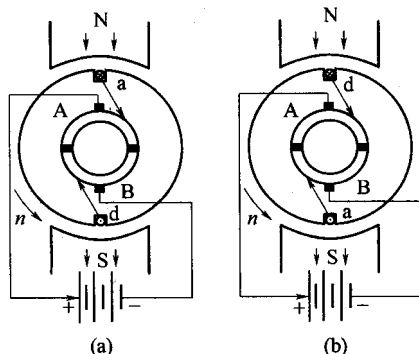


图 2-2-2 直流电动机的基本工作原理

2.2.3 直流电机的结构

直流发电机和电动机的工作原理类同,基本结构也大致相同。直流电机主要由定子和转子两大部分组成。定子用来产生磁场并作为旋转部分的机械支撑,它包括主磁极、机壳、电刷组件等。转子由电枢铁芯、电枢绕组、换向器、电刷、转轴等组成,其结构示意图如图 2-2-3 所示。

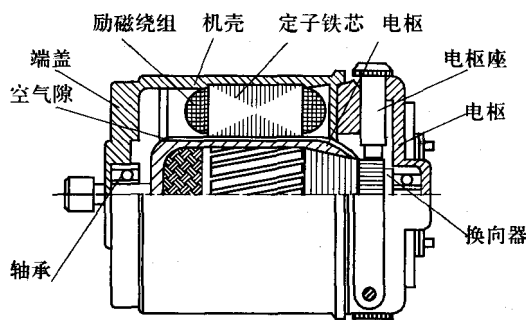


图 2-2-3 直流电机结构示意图

1. 定子主要部件

下面对各主要部件作简要介绍。

(1) 机壳 直流电机的机壳由壳体和端盖构成。壳体是磁路的一部分,称作定子磁轭,一般用低碳钢或电工钢制成,磁极、换向器就安装在上面。有些直流电机的机壳用金属材料单独制造,磁轭压装在机壳之中,机壳只起固定零部件的作用。

(2) 主磁极 直流电机多数主磁极是由磁极铁芯和套在上面的励磁绕组构成。为了减小磁极工作表面的铁损耗,主磁极铁芯用电工钢片叠装成一个整体,并固定在机壳上。主磁极铁芯的几何形状与气隙磁场分布规律有密切关系,通常设计成“靴子”形状,称作极靴或极掌。当励磁绕组中有直流电流时,在气隙中产生极性(N 极和 S 极)交替排列的主极磁场,磁场个数总是成对出现。小型直流电机的主磁极多是由永久磁极制成。

(3) 电刷组件 电刷架经绝缘后固定在壳体或端盖上,在刷架上的刷盒中放置电刷,电刷被弹簧压在换向器表面上,保证两者之间有良好的滑动接触。电刷的种类有碳刷、金属石墨电刷和电石墨电刷。

2. 转子主要部件

(1) 电枢铁芯 为了减小涡流和磁滞损耗,电枢铁芯用 2mm~5mm 厚的硅钢片冲制后叠压而成,冲片形状如图 2-2-4 所示。铁芯上的槽是安放绕组用的,电枢铁芯也是磁路的一部分。由于转子旋转时电枢铁芯也切割磁通,因而会产生涡流损耗。为减小涡流损耗,铁芯冲片要涂绝缘漆或采取其它绝缘措施,作为片间绝缘。

(2) 电枢绕组 电枢绕组是先将带有绝缘的导线制作成元件并嵌入槽内,然后将元件的两个端头按照一定的规律接到换向器上。为防止电枢旋转时导线受离心力从槽口甩出,槽口还插有非金属的槽楔,如图 2-2-5 所示。

(3) 换向器和电刷 换向器由许多换向片叠装而成,换向片用耐磨、强度高、导电好的铜合金制造,片间用云母绝缘,各换向片和电枢绕组元件相连接。常用的换向器有金属

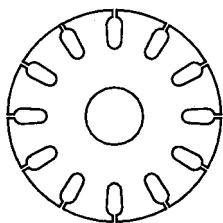


图 2-2-4 电枢铁芯外形图

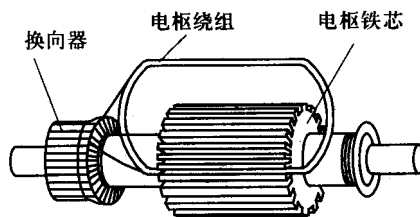


图 2-2-5 电枢绕组

套筒式和塑料式。电刷放在电刷座中,用弹簧将它压在换向器上,使之与换向器有良好的滑动接触。

2.2.4 直流电机的励磁方式

直流电机的主磁极上套着励磁绕组,励磁绕组中通入直流后建立的磁场称为励磁磁场。励磁方式是指励磁绕组如何连接及如何获取励磁电流。虽然励磁所需的功率只有电机额定功率的 1% ~ 3%,但励磁方式却对直流电机的运行性能有着非常大的影响。

直流电机的励磁方式分以下几种。

(1) 他励 励磁绕组与电枢回路各自分开,励磁绕组由独立的直流电源供电,如图 2-2-6(a)所示。

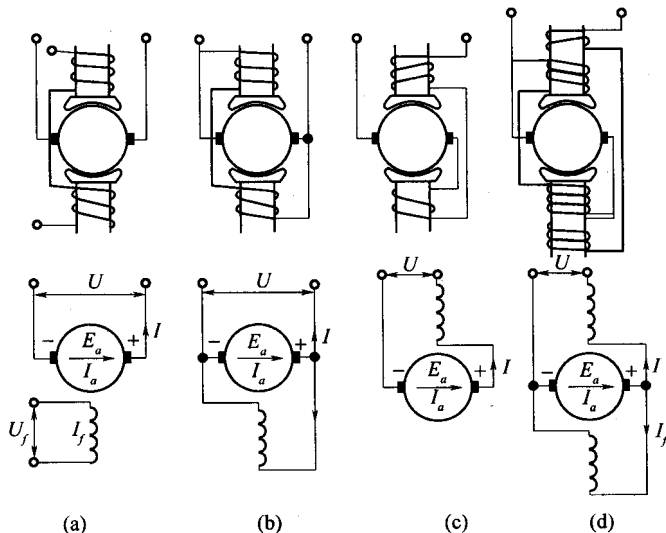


图 2-2-6 直流电机的励磁方式

(a) 他励; (b) 并励; (c) 串励; (d) 复励。

(2) 并励 励磁绕组与电枢绕组并联,如图 2-2-6(b)所示。励磁绕组上所加的电压就是电枢电路两端的电压。

(3) 串励 励磁绕组与电枢绕组串联,如图 2-2-6(c)所示。一般情况下其励磁电流等于电枢电流,但若有调节电阻与励磁绕组并联,则励磁电流为电枢电流的一部分。

(4) 复励 复励直流电机的主磁极上装有两个励磁绕组:一个与电枢回路并联,称为并励绕组;另一个与电枢绕组串联,称为串励绕组,如图 2-2-6(d)所示。通常串励绕组