



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

Electric Machinery and Electric Drivers

电机原理 与电力拖动

范国伟 主编

李定 副主编



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



21 世纪高

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

力化规划教材

E lectric Machinery and Electric Drivers

电机原理 与电力拖动

范国伟 主编

李定 副主编

人 民 邮 电 出 版 社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

电机原理与电力拖动 / 范国伟主编. — 北京: 人民邮电出版社, 2012.9
21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材
ISBN 978-7-115-28237-8

I. ①电… II. ①范… III. ①电机学—高等学校—教材
②电力传动—高等学校—教材 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第169365号

内 容 提 要

本书针对工程应用型教学改革和就业的需要,对现有的课程进行有机整合后编写而成。主要内容有直流电机、电力拖动系统的动力学、直流电动机的电力拖动、变压器、三相异步电动机的基本原理、三相异步电动机的电力拖动、同步电动机、控制电机及其他用途电动机、电力拖动系统中电动机的选择、电机与拖动实训等。本书的编写采取实用的方式,内容以必需、够用为度,减少了原有课程教学内容中重复的部分。本书的特点是讲述透彻,深入浅出,通俗易懂,便于教学。

本书可以作为高等院校自动化、工业电气工程及自动化、测控技术与仪器、数控应用技术、机械设计制造及其自动化、材料成型及控制工程、机电一体化等专业相关课程的教材,也可作为电工技师和职工岗位培训教材,还可供有关工程技术人员参考使用。

本书配有电子教案,需要者请与人民邮电出版社教育出版营销部联系,免费提供。

21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

电机原理与电力拖动

-
- ◆ 主 编 范国伟
副 主 编 李 定
责任编辑 李海涛
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市海波印务有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 18.75 2012 年 9 月第 1 版
字数: 462 千字 2012 年 9 月河北第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-28237-8

定价: 38.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

前 言

进入 21 世纪以来,电机在国民经济中起着举足轻重的作用。在电能的生产、变换、传输、分配、使用等环节中,各种电机和变压器担负着主要任务。在电力工业中,发电机和变压器是电站和变配电所的主要设备;在工农业生产中,大量应用电动机去拖动各种生产机械进行生产。随着电机理论和技术与电力电子技术、微电子技术、计算机技术和控制理论等学科不断发展和相互渗透,许多新技术、新方法的涌现使得传统电机学与电力拖动领域发生了革命性的变革。

随着科学技术的发展,现代电力拖动系统已由各种控制元件组成的制动控制系统紧密地联系在一起,如自动启动、制动、调速,在负载和外部条件变换的情况下自动保持电动机转速恒定,按事先给定的程序或外部条件自动改变运行速度等。电子计算机的应用更进一步赋予电力拖动系统自寻最佳运行规律、自动适应运行条件变化的能力。然而,不论现代自动电力拖动系统的结构如何复杂,拖动生产机械的各类电动机仍然是电力拖动系统完成机电能量转换的主要元件,是控制的对象。

电机拖动基础包括电机学原理及电力拖动原理两部分,它是工业电气自动化等专业的一门主要的专业基础课,它具有电机学中最基本的内容,同时又是电机学基本理论的进一步应用。它包括直流电机及拖动基础、变压器、交流电机及拖动基础、控制用微电机和电动机容量选择等部分。本课程的任务是使学生从运行的观点了解各类电机的基本结构、工作原理和运行特性,进而掌握正确使用和维护电机正常运行的基本技能;熟练掌握电动机在各种运行状态下能量关系的计算,起制动和调速的计算;了解电力拖动系统过渡过程的基本特征,改善过渡过程的途径,选择拖动系统电动机的基本原则等,为进一步学习后续专业课程打好基础。

本课程既带有基础课性质,又有专业课特点。它是一门运用基础电工理论来解决实际工程问题的课程。因此,在学习过程中,要联系物理学和电工基础课程中有关的电磁理论和电路基本理论,弄清各种定义、定律和公式的含义,它们所表达的实际电磁过程和机电过程。必须在学习过程中养成自学和独立思考的习惯,逐步掌握分析问题的方法。因此,必须重视并及时完成必要的思考题和作业题。

学习本课程要坚持理论与实践相结合的原则,必须进行必要的实训和生产实习。通过实训,对交直流电机的工作特性及机械特性的性质、基本原理和理论计算加以验证;进行独立的实验操作,学会测定各种电机的工作特性、电力拖动的机械特性及电机参数的方法,掌握正确操作电机运行的方法。实训前要预习实验指导书和课程有关理论,明确实训目的要求、操作步骤、实验线路及仪表正确使用方法等。实训过程中,要注意观察、分析及判断。要认真完成实训报告,通过操作,逐步提高实验技能和熟练程度。通过实训密切理论与实验相结合,培养严谨、求实的科学工作作风。

本书是为了培养高等院校工程应用型专业人才编写的规划教材。全书共分 10 章,主要内容包括直流电机、电力拖动系统的动力学、直流电动机的电力拖动、变压器、三相异步电动

机的基本原理、三相异步电动机的电力拖动、同步电动机、控制电机及其他用途电动机、电力拖动系统中电动机的选择、电机与拖动实训等。学生通过理论学习和技能实训练习,应掌握简单交直流电动机的基本工作原理和分析方法。通过技能训练,提高学生对电动机实际操作的综合能力,使他们具备电专业高素质劳动者和机电工程技术所必需的电动机基本知识与基本技能,为学习专业知识和职业技能,提高全面素质,增强适应岗位变化的能力和继续学习的能力打下一定的基础。

电机与电力拖动是一门理论和实践紧密结合的课程,本书在编写过程中从高等教育培养应用型人才这一目标出发,以电机与电力拖动课程教学基本要求为依据,以应用为目的,以必需、够用为度,尽量降低专业理论的重心。以突出实际应用,培养技能为教学重点,由浅入深、循序渐进地介绍有关电工电子以及应用方面的基础知识,着眼于学生在应用能力方面的培养,突出重点、分散难点,力求使读者一看就懂、一学就会。本书每章前都配有学习目标,每章后也都安排了相应的适量思考题。同时,在第10章中编写了10个技能训练,突出课程的应用性、实践性、针对性和有效性。

本书可作为高等院校自动化专业、电气工程及其自动化专业、测控技术与仪器专业数控应用技术专业、机械设计制造及其自动化专业、材料成型及控制工程专业、机电一体化等专业的教材,也可作为电工技师和职工岗位培训教材,还可供有关工程技术人员参考使用。

本书由安徽工业大学范国伟老师任主编,李定博士任副主编,方炜博士和王伟硕士及中冶华天马鞍山钢铁设计院范翀技师参加了编写。安徽职业技术学院程周教授审阅了全书,做了很多重要的修改与补充。在本书编写的过程中,得到安徽工业大学电气信息学院和工商学院、安徽职业技术学院的大力支持,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,加上时间仓促,书中难免存在疏漏之处,恳请使用本书的老师和同学批评指正。

编 者

2012年5月

目 录

第 1 章 直流电机	1	4.3 变压器的负载运行	112
1.1 直流电机的基本结构	1	4.4 变压器参数的测定	116
1.2 直流电机的工作原理	6	4.5 三相变压器	117
1.3 直流电机的电枢绕组和感应电势	8	4.6 其他用途变压器	123
1.4 直流电机的电枢反应和换向	18	4.7 变压器的运行维护及故障处理	127
1.5 直流发电机的运行特性	26	小结	129
1.6 直流电动机的运行特性	32	习题	130
1.7 诊断直流电动机运行中出现的问题	39	第 5 章 三相异步电动机的基本	
小结	48	原理	132
习题	49	5.1 三相异步电动机的基本原理和结构	132
第 2 章 电力拖动系统的动力学	52	5.2 三相异步电动机的绕组与感应	
2.1 电力拖动系统的运动方程式	52	电动势	135
2.2 多轴系统负载转矩和转动惯量的折算	53	5.3 三相异步电动机的磁动势	139
2.3 生产机械的负载转矩特性	58	5.4 三相异步电动机的等效电路	146
2.4 电力拖动系统稳定运行条件	60	5.5 三相异步电动机的参数测定	156
小结	63	5.6 三相异步电动机的工作特性	158
习题	63	5.7 三相异步电动机故障判断和处理	159
第 3 章 直流电动机的电力拖动	67	小结	162
3.1 直流电动机的机械特性	67	习题	162
3.2 他励直流电动机的起动	73	第 6 章 三相异步电动机的电力	
3.3 他励直流电动机的制动	78	拖动	164
3.4 他励直流电动机的速度调节	83	6.1 三相异步电动机的机械特性	164
3.5 直流电动机电力拖动的过渡过程	90	6.2 三相异步电动机的起动	172
小结	96	6.3 三相异步电动机的制动	177
习题	97	6.4 三相异步电动机的调速	182
第 4 章 变压器	101	小结	191
4.1 变压器的工作原理和结构	101	习题	191
4.2 变压器的空载运行	108	第 7 章 同步电动机	196
		7.1 同步电机的基本结构和工作原理	196

7.2 同步电动机的功率因数调节	200	9.3 选择电动机容量的基本效验方法	245
7.3 同步电动机的电力拖动	202	小结	249
小结	205	习题	249
习题	206	第 10 章 电机及拖动实训	252
第 8 章 控制电机及其他用途		10.1 直流电动机的参数测定	255
电动机	208	10.2 变压器参数的测定	257
8.1 测速发电机	208	10.3 三相异步电动机的参数测定	261
8.2 伺服电动机	210	10.4 他励直流电动机机械特性测定	268
8.3 步进电动机	212	10.5 三相异步电动机机械特性测定	271
8.4 自整角机	214	10.6 直流发电机实训	275
8.5 旋转变压器	217	10.7 三相变压器实训	278
8.6 单相异步电动机	222	10.8 三相笼型异步电动机实训	281
8.7 无刷直流电动机	224	10.9 三相同步电动机实训	285
8.8 直流力矩电动机	227	10.10 三相同步发电机实训	287
8.9 直线电动机	229	附录 A 实训室使用电机规格	289
小结	232	附录 B 实训中测量的物理量及测量	
习题	233	方法	291
第 9 章 电力拖动系统中电动机的		附录 C 发电机和电动机之间铭牌	
选择	235	值的换算	293
9.1 电动机的发热与工作方式	235		
9.2 电动机容量选择的基本知识	240		

第1章 直流电机

直流电动机具有良好的起动、制动和调速性能，能够快速地进行起动、制动，正转、反转，能在十分宽广的范围内平滑而经济地调节速度。因此，在一些要求较高的电力拖动系统中，得到了广泛的应用。例如，在一些机床、轧钢机、电气牵引机车、汽车和起重机设备中，都采用了直流电动机拖动。目前，虽然交流变频调速正在发展，在一些领域中已经取代了直流拖动系统，但直流电动机的应用仍占有一定的比例。

1.1 直流电机的基本结构

直流电动机虽然比三相交流异步电动机结构复杂，维修也不便，但由于它的调速性能较好和起动转矩较大，因此，对调速要求较高的生产机械或者需要较大起动转矩的生产机械往往采用直流电动机驱动。

直流电动机的优点如下。

- ① 调速性能好，调速范围广，易于平滑调节。
- ② 起动、制动转矩大，易于快速起动、停车。
- ③ 易于控制。

直流电动机的应用范围如下。

- ① 轧钢机、电气机车、中大型龙门刨床、矿山竖井提升机以及起重设备等调速范围大的大型设备。
- ② 用蓄电池做电源的地方，如汽车、拖拉机等。

1. 直流电动机的构造

直流电机由定子和转子（又称为电枢）两大部分组成。直流电机运行时静止不动的部分称为定子，其主要作用是产生磁场。定子由机座、主磁极、换向级、端盖、轴承和电刷装置等组成。运行时转动的部分称为转子，其主要作用是产生电磁转矩和感应电动势，是直流电机进行机电能量转换的枢纽，所以通常又称为电枢。转子由转轴、电枢铁心、电枢绕组、换向器、散热风扇等组成。装配后的电机如图 1-1 所示。直流电机的纵向剖视图如图 1-2 所示。

（1）定子

- ① 主磁极。主磁极的作用是产生气隙磁场。主磁极由主磁极铁心和励磁绕组两部分组成。

铁心一般用薄钢片冲压叠装而成，分为极身和极靴两部分，上面套励磁绕组的部分称为极身，下面扩宽的部分称为极靴，极靴宽于极身，既可以调整气隙中磁场的分布，又便于固定励磁绕组。励磁绕组用绝缘铜线绕制而成，套在主磁极铁心上。整个主磁极用螺钉固定在机座上，如图 1-3 所示。

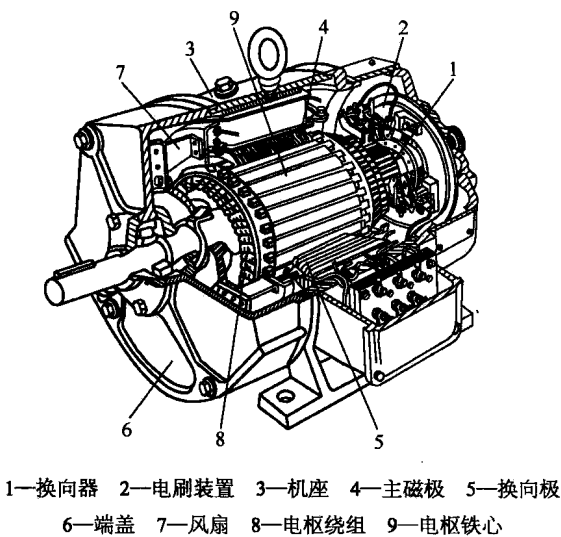
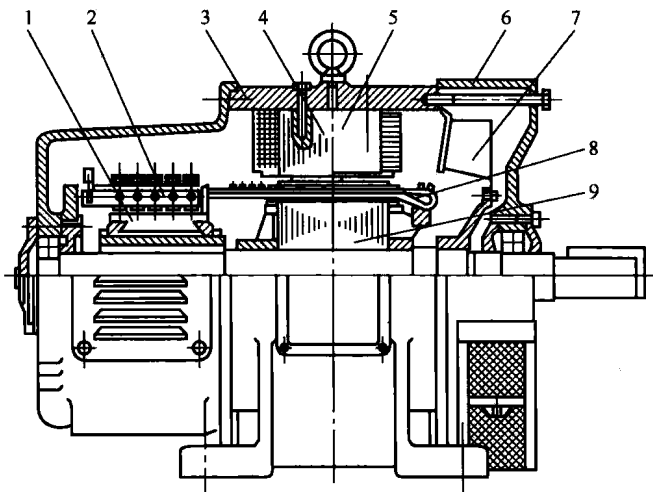


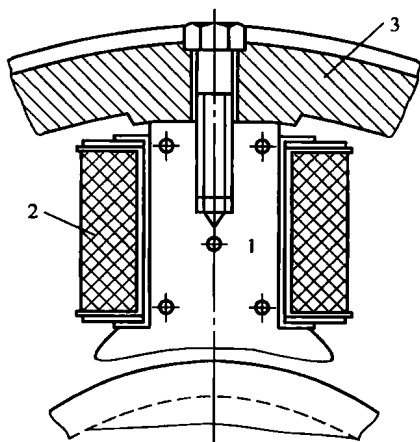
图 1-1 直流电机装配结构图



1—换向器 2—电刷装置 3—机座 4—主磁极 5—换向极
6—端盖 7—风扇 8—电枢绕组 9—电枢铁心

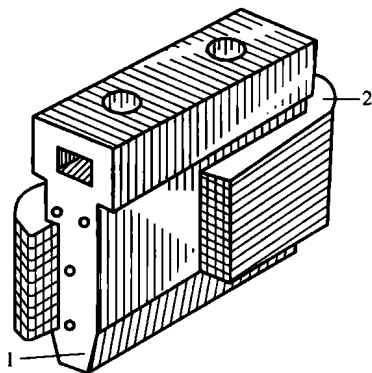
图 1-2 直流电机纵剖视图

② 换向极。换向极的作用是改善换向，减少电机运行时电刷与换向器之间可能产生的电火花，一般装在两个相邻主磁极之间，由换向极铁心和换向绕组组成，如图 1-4 所示。换向极绕组用绝缘铜导线绕制而成，套在换向极铁心上，换向极的数目与主磁极相等。



1—主磁极 2—励磁绕组 3—机座

图 1-3 主磁极的结构

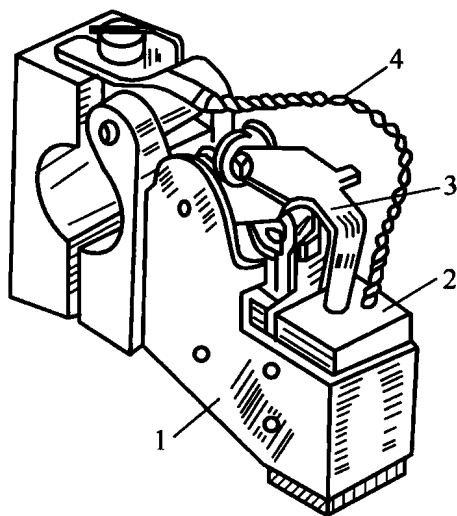


1—换向极铁心 2—换向极绕组

图 1-4 换向极

③ 机座。电动机定子的外壳称为机座，见图 1-2 中的 3。机座的作用有两个：一是用来固定主磁极、换向极和端盖，并支撑和固定整个电机；二是机座本身也是磁路的一部分，借以构成磁极之间磁的通路，磁通通过的部分称为磁轭。为保证机座具有足够的机械强度和良好的导磁性能，一般为铸钢或由钢板弯制焊接而成。

④ 电刷装置。电刷装置是用来通入和引出直流电流的，如图 1-5 所示。电刷装置由电刷、刷握、刷杆、刷杆座等组成。电刷放在刷握内，用弹簧压紧，使电刷与换向器之间有良好的滑动接触。刷握固定在刷杆上，刷杆绝缘装在圆环形的刷杆座上，刷杆座装在端盖或轴承盖盖上，圆周位置可以调整后固定。



1—刷握 2—电刷 3—压紧弹簧 4—刷辨

图 1-5 电刷装置

(2) 转子（电枢）

转子由电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等组成，如图 1-6 (b) 所示。

① 电枢铁心。电枢铁心是主磁路的主要部分，电枢铁心上冲有槽孔，槽内嵌放电枢绕组。一般电枢铁心采用由 0.5mm 厚的硅钢片冲槽叠压而成（冲槽硅钢片的形状如图 1-6 (a) 所示），以降低电机运行时在电枢铁心中产生的涡流损耗和磁滞损耗。叠成的铁心固定在转轴上。电枢铁心的外圆开有电枢槽，槽内嵌放电枢绕组。

② 电枢绕组。电枢绕组的作用是产生电磁转矩和感应电动势，是直流电机进行机电能量转换的关键部件。它是由许多绕组元件按一定规律连接而成，绕组采用高强度漆包线或玻璃丝包扁铜线绕成，不同线圈的绕组元件分上下两层嵌放在电枢槽内，线圈与铁心之间以及上下两层线圈之间都必须妥善绝缘。为防止离心将线圈边甩出槽外，槽口用槽楔固定，如图 1-7 所示。绕组元件线圈伸出槽外的端接部分用热固性无纬玻璃带进行绑扎。

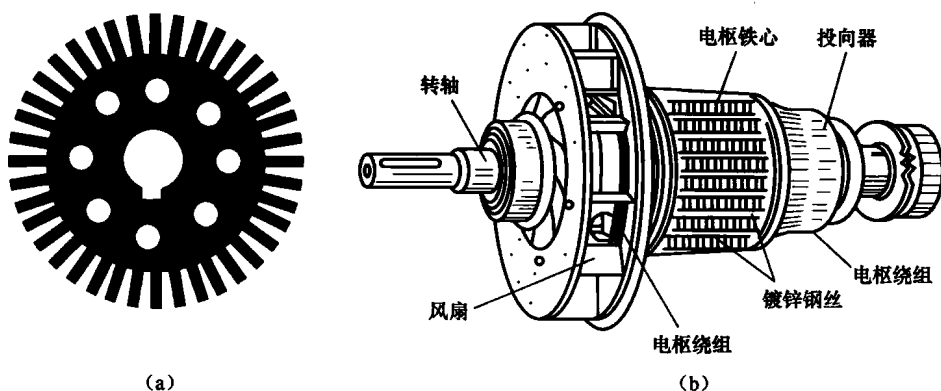


图 1-6 转子结构图

③ 换向器。电枢绕组的一端装有换向器，换向器由许多铜质换向片组成一个圆柱体，换向片之间用云母绝缘。换向器是直流电动机的重要构造特征，它通过与电刷的摩擦接触，将两个电刷之间固定极性的直流电流变换成为绕组内部的交流电流，以便形成固定方向的电磁转矩；而在直流发电机中，换向器配以电刷，能将电枢绕组感应产生的交变电动势转换为正、负电刷上引出的直流电动势。换向片紧固通常如图 1-8 所示，换向片的下部做成燕尾形，两端用钢制 V 形套筒和 V 形云母环固定，再用螺母锁紧。

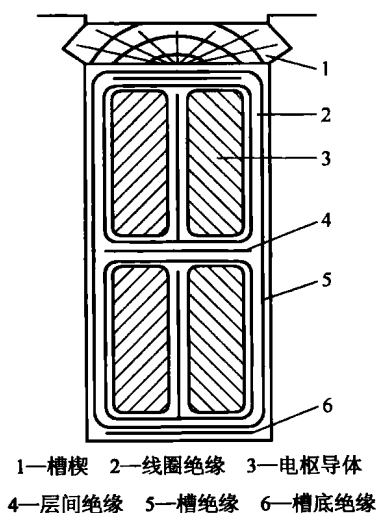


图 1-7 电枢槽结构图

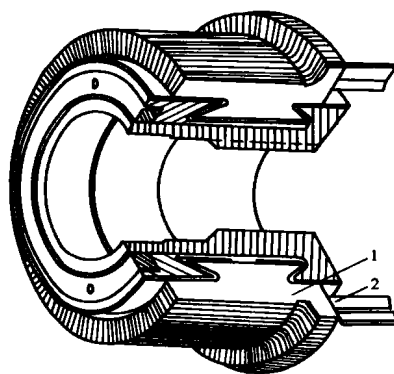


图 1-8 换向器结构

④ 转轴。转轴起着转子旋转的支撑作用，需要有一定的机械强度和刚度，一般用圆钢加工而成。

2. 直流电机的分类

直流电机按照励磁方式可分为他励电动机、并励电动机、串励电动机和复励电动机 4 种，如图 1-9 所示。

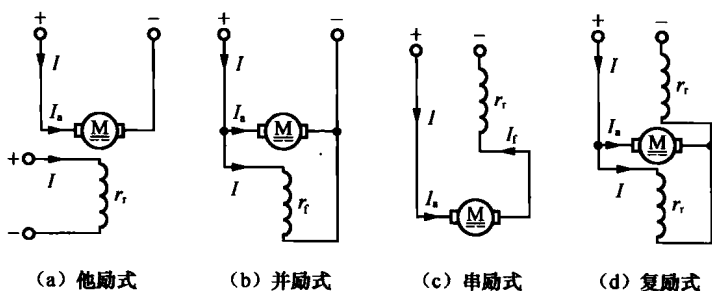


图 1-9 直流电机的分类

(1) 他励电动机

如图 1-9 (a) 所示, 他励电动机是一种电枢绕组和励磁绕组分别由两个直流电源供电的电动机。他励式电动机构造比较复杂, 一般用于对调速范围要求很宽的重型机床等设备中。

(2) 并励电动机

如图 1-9 (b) 所示, 并励电动机的励磁绕组和电枢绕组并联, 由同一个直流电源供电。励磁绕组匝数较多, 导线截面较细, 电阻较大, 励磁电流只为电枢电流的一小部分。并励式电动机在外加电压一定的情况下, 励磁电流产生的磁通将保持恒定不变。起动转矩大, 负载变动时转速比较稳定, 转速调节方便, 调速范围大。

(3) 串励电动机

如图 1-9 (c) 所示, 串励电动机的励磁绕组与电枢绕组串联, 用同一个直流电源供电。励磁电流与电枢电流相等。电枢电流较大, 所以励磁绕组的导线截面较大, 匝数较少。串励式电动机的转速随转矩的增加, 呈显著下降的软特性, 特别适用于起重设备。

(4) 复励电动机

如图 1-9 (d) 所示, 复励电动机有两个励磁绕组, 一个与电枢并联, 另一个与电枢串联。当两励磁绕组产生的磁通方向相同时, 磁通可以相加, 这种电动机称为积复励电动机。当两励磁绕组产生的磁通方向相反时, 合成磁通为两磁通之差, 这种电动机称为差复励电动机。积复励电动机的电磁转矩变化速度较快, 负载变化时能够有效克服电枢电流的冲击, 比并励式电动机的性能优越, 主要用于负载力矩有突然变化的场合。差复励电动机具有负载变化时转速几乎不变的特性, 常用于要求转速稳定的机械中。

3. 直流电机的额定值

电机制造厂家按照国家标准, 根据电机的设计和试验数据而规定的每台电机的主要性能指标称为电机的额定值。额定值一般在电机的铭牌上或产品说明书上。

直流电动机的额定值主要有以下几项。

(1) 额定功率 P_N

额定功率是指电机按照规定的工作方式运行时所能提供的输出功率。对于电动机来说, 额定功率是指转轴上输出的机械功率; 对于发电机来说, 额定功率是指电刷端输出的电功率。单位为 kW (千瓦)。

(2) 额定电压 U_N

额定电压是电机电枢绕组能够安全工作的最大外加电压或输出电压, 单位为 V (伏)。

(3) 额定电流 I_N

额定电流是电机按照规定的工作方式运行时，电枢绕组允许流过的最大电流，单位为 A (安培)。

(4) 额定转速 n_N

额定转速是指电机在额定电压、额定电流和输出额定功率的情况下运行时，电机的旋转速度，单位为 r/min (转/分)。

额定值一般标在电机的铭牌上，又称为铭牌数据。还有一些额定值，如额定转矩 T_N 、额定效率 η_N 等，不一定标在铭牌上，可查产品说明书或由铭牌上的数据计算得到。

额定功率与额定电压和额定电流之间有如下关系：

$$\text{直流电动机} \quad P_N = U_N I_N \eta_N \times 10^3 \text{ kW}$$

$$\text{直流发电机} \quad P_N = U_N I_N \times 10^3 \text{ kW}$$

直流电机运行时，如果各个物理量均为额定值，就称电机工作在额定运行状态，亦称为满载运行。在额定运行状态下，电机利用充分，运行可靠，并且具有良好的性能。如果电机的电枢电流小于额定电流，称为欠载运行；电机的电枢电流大于额定电流，称为过载运行。欠载运行，电机利用不充分，效率低；过载运行，易引起电机过热损坏。

1.2 直流电机的工作原理

直流电动机是从电枢端输入直流电流，将电能转换成机械能从转轴上输出。

1. 直流电动机的工作原理

直流电动机是根据通电导体在磁场内受力而运动的原理制成的。如图 1-10 (a) 所示，接通直流电压 U 时，直流电流为从 ab 边流入， cd 边流出，由于 ab 边处于 N 极之下， cd 边处于 S 极之下，由左手定则可知线圈受到电磁力而形成一个逆时针方向的电磁转矩 T ，使电枢绕组绕轴线方向逆时针转动。当电枢转动半周后，如图 1-10 (b) 所示， ab 边处于 S 极之下，而 cd 边处于 N 极之下。由于采用了电刷和换向器装置，此时电枢中的直流电流方向变为从 dc 边流入，从 ba 边流出。电枢仍受到一个逆时针方向的电磁转矩 T 的作用，继续绕轴线方向逆时针转动。

由此可见：直流电动机在外加直流电压的作用下，从电枢端输入直流电流，借助于换向器和电枢的作用，使直流电动机电枢绕组流过方向交换变化的电流，载流导体在磁场中将受电磁力的作用，从而使电枢产生的电磁转矩的方向恒定不变，确保直流电动机朝确定的方向连续旋转。这就是直流电动机的工作原理。

实际的直流电动机，电枢圆周上均匀地嵌放许多线圈，相应地换向器由许多换向片组成，使电枢线圈所产生的总的电磁转矩足够大而且比较均匀，电动机的转速也就比较均匀。

2. 直流发电机的工作原理

直流发电机的模型与直流电动机的模型相同，不同的是外加机械力（如水力发电机利用水的冲力）拖动电枢朝一个方向（如逆时针方向）旋转，如图 1-11 (a) 所示。这时导体 ab

和 cd 分别切割 N 极和 S 极下的磁力线，感应产生电动势，电动势的方向用右手定则确定。可知导体 ab 中电动势的方向由 b 指向 a ，导体 cd 中电动势的方向由 d 指向 c ，在一个串联回路中是相互叠加的，形成电刷 A 为电源正极，电刷 B 为电源负极。电枢转过 180° 后，导体 cd 与导体 ab 交换位置，但电刷的正负极性不变，如图 1-11 (b) 所示。可见，同直流电动机一样，直流发电机电枢线圈中的感应电动势的方向也是交变的，而通过换向器和电刷的整流作用，在电刷 A 、 B 上输出的电动势是极性不变的直流电动势。在电刷 A 、 B 之间接上负载，发电机就能向负载供给直流电能。这就是直流发电机的基本工作原理。

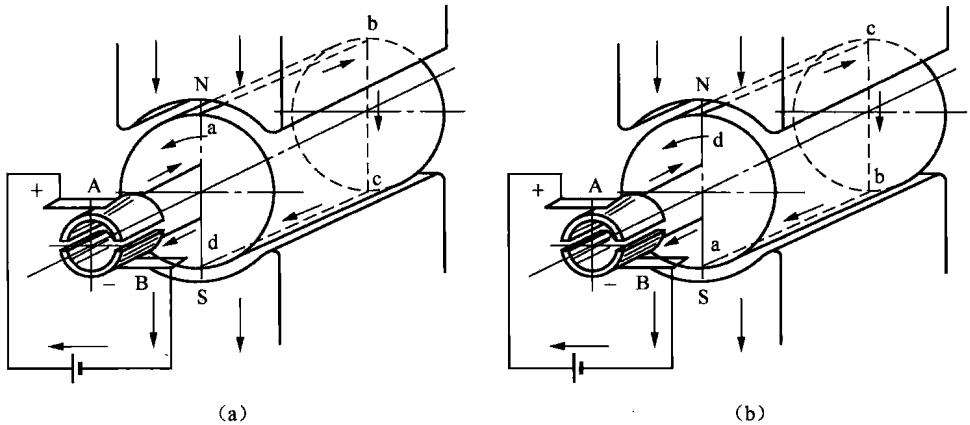


图 1-10 直流电动机原理图

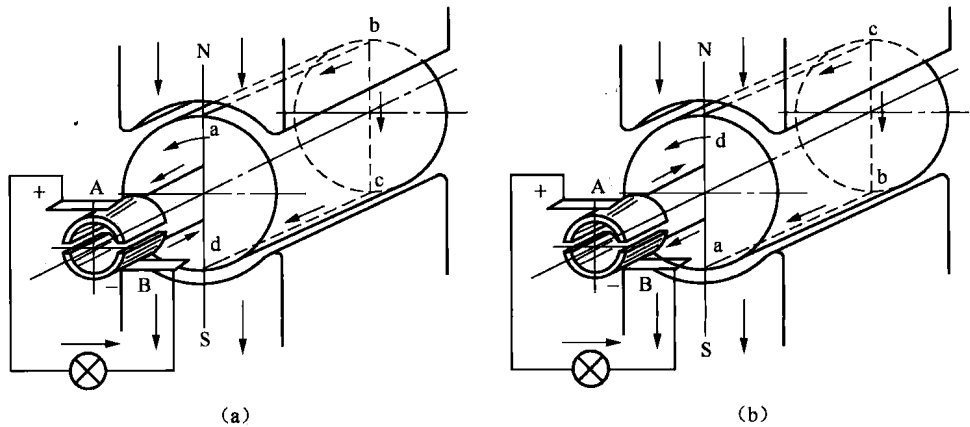


图 1-11 直流发电机的工作原理示意图

3. 电机的可逆原理

从以上分析可以看出：一台直流电机原则上可以作为电动机运行，也可以作为发电机运行，取决于外界输入能量的不同形式。将直流电流施加于电刷，输入电能，电机能将电能转换为机械能，拖动生产机械旋转，作电动机运行；如用原动机拖动直流电机的电枢旋转，输入机械能，电机能将机械能转换为直流电能，从电刷端引出直流电动势，作发电机运行。同一台电机，既能作电动机运行，又能作发电机运行的原理，称为电机的可逆原理。

从上面可以看到：通过直流电动机的电刷输入的是直流电流，而经过换向器流到转子绕组的电流却是交替变化的。这样变化的目的是载流转子绕组与定子的恒定磁场之间产生的电

磁力始终朝着一个方向转动, 便能够带动生产机械输出机械转矩。

另外, 为何称直流电机的转子为电枢呢? 因为直流电机的转子是机电能量转换的枢纽。直流电动机输入电能到转子绕组, 转换成机械能从转轴输出带动生产机械; 若是直流发电机即是输入机械能转动转子绕组, 切割定子磁场的磁感应线产生感应电动势输出电能。

1.3 直流电机的电枢绕组和感应电势

电枢绕组是电机的重要部件, 它不仅在电机的能量转换方面是必不可少的, 而且在结构上也是比较复杂的。电机中绝大部分的铜和绝缘材料都用在电枢绕组上。电机运行时, 绕组也是比较容易发生故障的部分。因此, 了解电机的电枢绕组, 掌握它的特点和连接规律, 对深入地认识和正确地使用电机都是十分重要的。

直流电机的结构设计原理是, 为了减少或消除直流电机输出电压的脉动并提高输出电压值, 实际电机的电枢绕组是由若干个分布在电枢表面、结构完全相同的绕组元件, 按一定规律排列和连接而成的。在了解和掌握绕组嵌置和连接的基本规律时必须从绕组的基本单元(即绕组元件)开始。

1. 电枢绕组的基本单元

电枢绕组的形式很多, 但常用的有两种基本形式, 即单叠绕组和单波绕组。因而绕组元件也有两种形式。图 1-12 (a)、(b) 所示分别为单叠绕组和单波绕组的绕组元件。

由图 1-12 可见, 所谓绕组元件就是两端分别和两个换向片相连接的单匝或多匝线圈。每一个元件有两个放在电枢槽内能切割磁通而感应电势的有效边, 称为元件边。元件在槽外的部分不切割磁通、因而不感应电势, 仅作为连接线用, 称为端接。为了便于嵌线, 每个元件的一个元件边放在某一槽的上层(称为上元件边), 另一个元件边放在另一槽的下层(称为下元件边), 如图 1-13 所示。绘图时, 为了清楚起见, 将上元件边及共端接部分用实线表示, 下元件边及共端接部分用虚线表示。

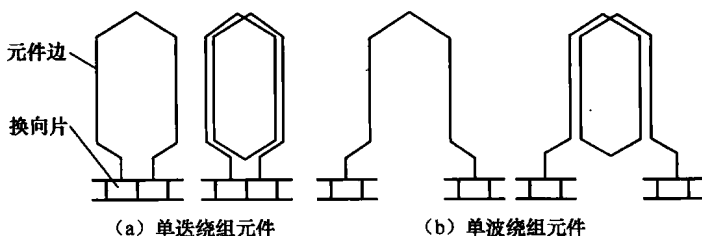


图 1-12 电枢绕组的绕组元件

为了把绕组元件按一定规律嵌置在槽内并与换向片正确地连接, 首先必须确定绕组元件在电枢表面上的几何关系, 通常用所谓绕组的“节距”来确定。图 1-14 表示叠绕组元件的嵌置与连接方法, 并用它说明绕组节距的意义。

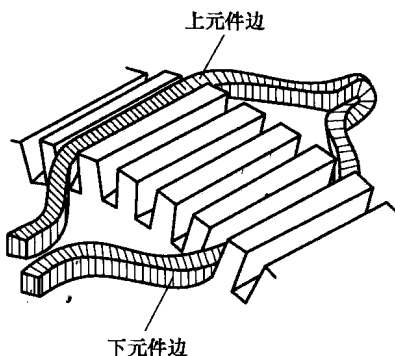


图 1-13 电枢绕组元件在槽内的嵌置示意图

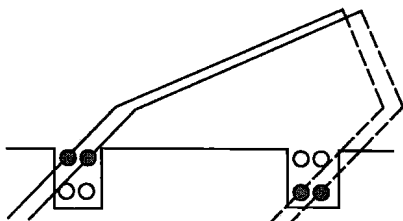


图 1-14 单迭绕组元件连接示意图

(1) 第一节距 y_1

每一个元件的两个元件边在电枢表面上所跨的距离称为绕组的第一节距，通常用所跨的槽数表示。为了使元件两个边的电势相加，即为了使得每个元件感应电势尽可能的大，第一节距 y_1 应等于或接近于一个极距 τ （相邻两个磁极轴线之间的距离）。当 $y_1 = \tau$ 时，称为全距绕组；当 $y_1 < \tau$ 时，称为短距绕组；当 $y_1 > \tau$ 时，称为长距绕组。一般的直流电机采用全距或短距绕组，如图 1-15 所示。全距时 y_1 可用下式表示：

$$y_1 = \tau = \frac{Z}{2p} \quad (1-1)$$

式中： τ ——两个磁极轴线之间的距离；

Z ——电枢的槽数；

p ——电机的磁极对数。

有时 Z 不一定能被 $2p$ 整除，而在嵌线时 y_1 又必须为整数，因此第一节距的通用表达式应为

$$y_1 = \tau = \frac{Z}{2p} \mp e = \text{整数} \quad (1-2)$$

式中 e 为一个小于 1 的分数，用以把 y_1 凑成整数。

(2) 第二节距 y_2

连接在同一换向片上的两个元件中，第一个元件的下元件边到第二个元件的上元件边之间在电枢表面上的距离，也用相距的槽数表示。在叠绕组中， y_2 为负值；在波绕组中， y_2 为正值。

(3) 合成节距 y

直接串联在一起的两个元件的对应元件边在电枢表面上的距离，也用相距的槽数表示，且有

$$y = y_1 + y_2 \quad (1-3)$$

(4) 换向器节距 y_k

每一个元件的两端所连的两个换向片在换向器（由所有换向片构成的整体）表面上的距离，用所跨的换向片数表示。由图 1-15 (a) 合成节距 y 和换向器节距 y_k 总是相等的，即

$$y_k = y \quad (1-4)$$

上面所介绍的是叠绕组元件的嵌置及其节距。至于波绕组元件则可用图 1-15 (b) 予以说明。

波绕组的特点是每个绕组元件的两端所接的换向片相隔较远，互相串联的两个元件也相隔较远，连接成整体后的绕组像波浪形，因而称为波绕组。

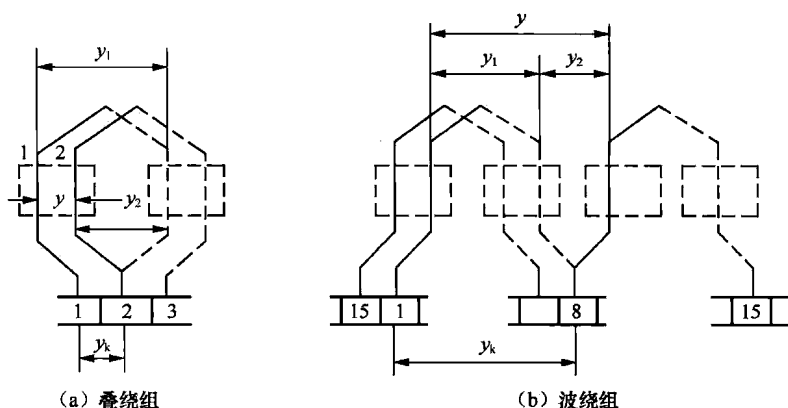


图 1-15 绕组的节距

波绕组的“节距”，其意义与叠绕组相同。它的第一节距与叠绕组一样，要求接近于极距 τ 。为了保证紧相串联元件中的电势同方向，两相邻串联元件的对应边应处在同极性的磁极下。所以合成节距 y 应接近等于按槽数计算的一对磁极的距离，而相应的换向器节距 y_k 也应接近等于按换向片数计算的一对磁极的距离，即 $y=y_k \approx 2\tau$ 。 y 和 y_k 不能等于 2τ ，因为当 $y=2\tau$ 时，由出发点开始，串联 S 个元件而绕电枢一周之后，就会回到出发点而闭合，以致绕组无法继续绕下去。如果绕组从某一换向片出发，沿电枢圆周和换向器绕一周后恰好回到原来出发的那个换向片相邻的一片上，则可由此再绕第二周、第三周……最后把全部元件串联完毕并与最初的出发点相接构成一个闭合绕组。故要求 y_k 值满足下列关系：

$$py_k = K \mp 1 \quad (1-5)$$

或

$$y_k = y = \frac{k \mp 1}{p} = \text{整数} \quad (1-6)$$

式中 K 为换向片数。式(1-6)是波绕组一个重要的关系式。当式中取“-”号时，绕组绕电枢和换向器一周之后，回到原来出发的换向片的左边一片上，称为左行绕组。当式中取“+”号时，绕组绕电枢和换向器一周之后，回到原来出发的换向片右边的一片上，称为右行绕组。

综上所述，可以确定如下的有关波绕组节距的关系式：

$$\text{第一节距: } y_1 = \tau = \frac{Z}{2p} \mp e = \text{整数}$$

$$\text{第二节距: } y_2 = y - y_1$$

$$\text{换向器节距: } y_k = y = \frac{k \mp 1}{p} = \text{整数}$$

从上述可见，叠绕组和波绕组都有左行绕组和右行绕组，两者在理论上并无区别。在实际应用中，为了节省用铜量，叠绕组经常采用右行，而波绕组则常采用左行，这样所用的连接线较短。

按照绕组的连接方法，直流电机的电枢绕组可分为5种形式：① 单叠绕组；② 复叠绕组；③ 单波绕组；④ 复波绕组；⑤ 混合绕组（即叠绕和波绕混合）。各种绕组的特征在于连接规律不同。其中单叠和单波绕组是最基本的。从掌握直流机电枢绕组的构成方法、