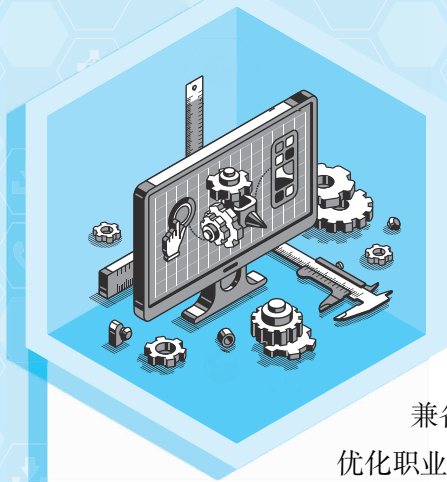


PREFACE 前言



党的二十大报告对教育的新思想：为党和国家培养造就大批德才兼备的高素质、高技能人才，大力推进职普融通、产教融合、科教融汇，优化职业教育类型定位。为响应二十大关于职业教育以服务为宗旨、促进就业为导向的新理念，适应现代先进制造业相关专业对电动机、变压器的需求，编者编写了本书。本书针对学生就业及社会需求，突出专业特色，着重专业基础知识和技能应用，内容体现综合性和项目化。

本书为活页式教材，其特点如下：

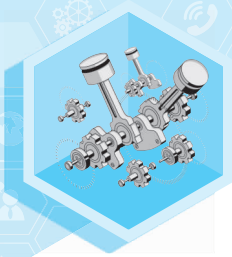
1. 集电动机、变压器理论知识、控制装调、维护检修于一体。结合高等职业教育特色，以工厂车间机电设备为载体，并增加了电机在新能源汽车上的应用及超声波电机等特种电机的应用，突出岗位技能和证书考核。本书采用项目化组织教学内容，形成新的一体化的教学模式。

2. 形式突出“活”，采用活页式装订。知识点根据电动机技术的发展，灵活调整，技能点根据岗位要求设置，任务实施通过问题引领进行，激发学生学习兴趣。书中开发“学习笔记”模块，学生在理论知识、技能点学习后及时总结，以笔记的形式呈现，总结得失，提出见解与建议。

3. 应用面广。考虑到目前高等职业教育生源的多元化、立足于生产一线的需要和动手能力的提高，按照“必需、实用、够用”的原则，力求做到“简明、易懂、适度、能用”的要求。在内容取舍上，注意先进性与实用性，以及知识面广阔性的同时，适度降低重心，不强调理论分析，淡化公式推导，注重工程应用。并通过课后“小知识”的形式让学生学习现代变压器、电动机相关的新技术、新材料、新工艺、新规范。

4. 每个项目开头提出素质、知识、能力三维学习目标，重难点、证书考核点，以明确学习每个项目所应该达到的要求。“任务实施”以试题、讨论等内容引导学生有目的有步骤地进行学习。学习结束通过考核评价检测学生学习效果，并适量增加生产现场可能遇到的使用和维护方面的知识，如电动机在具体应用场合的维护与检修。

5. 在内容安排上，采取突出重点、兼顾知识面的原则，着重培养学生的创新能力，不但向学生介绍电动机的基本原理、控制方法，实践操作过程，而且注意对思政教育的提升。项目学习过程中思政元素潜移默化，项目最后设置思政小课堂，增加车间一线电动机业默默奉献的劳模案例，强化思政教育，通过讲述各技术领域的劳模、大国重器，把吃苦耐劳、甘心一线、热于奉献、敢于创新、精益求精等专业工匠精神和爱国爱岗、民族大义、理想信念、社会责任等家国情怀融入课堂教学，体现了德技双修的职业教育理念。



6. 配套丰富的信息化资源,包括电子教案与课件,微视频,案例,同步练习题库,仿真软件,绘图软件等信息化资源,以帮助学生掌握和巩固教学内容,实训指导部分见本书配套的电子资源微视频,包括电动机拆装内容,电动机控制线路设计,性能参数测试等,以便对学生进行技能训练导学。

本书编者均为多年从事电机与拖动课程教学并主持或参与该课程教学改革研究、教学技能大赛的教师。驻马店职业技术学院王海彦、李留柱任主编,驻马店职业技术学院晁红芬、刘慧君任副主编,国能驻马店热电有限公司高级工程师张世峰参编。其后王海彦负责项目一、项目二的编写,李留柱负责项目三、项目六的编写,晁红芬负责项目四的编写,刘慧君负责项目五的编写,张世峰负责实验项目的核验。

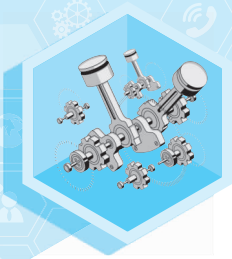
在本书的编写过程中,编者参考了大量教材及技术资料,在此对相关作者一并表示衷心感谢。由于编者水平有限,书中难免存在疏漏之处,欢迎广大读者批评指正。

编者



CONTENTS 目录

项目一 电动搬运车电动机的运行维护与检修	1
任务一 直流电动机的认知	2
任务二 直流电动机的控制电路装调	22
任务三 电动搬运车电动机的日常维护与检修	43
项目二 变压器的运行维护与检修	56
任务一 变压器的认知	57
任务二 变压器的运用与维护	77
项目三 机床主轴电动机的运行维护与检修	100
任务一 三相异步电动机的认知	100
任务二 车床主轴电动机的控制电路装调	117
任务三 车床主轴电动机的日常维护	138
项目四 通风系统电动机的运行维护与检修	149
任务一 单相异步电动机的认知	150
任务二 通风机电动机的调速、反转与检修	164
项目五 电动汽车永磁同步电动机的运行与维护	175
任务一 新能源汽车电动机的认知	175
任务二 永磁同步电动机的更换与检测	183



项目六 其他特种电动机的运行与维护 195

附录 218

参考文献 222

项目一

电动搬运车电动机的运行维护与检修

项目内容简介

电动搬运车作为一种无污染的绿色交通工具,可以通过简单的电动力来解决存在已久的空气污染问题。电动搬运车是运载货物的纯电动车型的总称,是以蓄电池为动力源,电机为驱动装置,为解决厂区、城乡、矿区、社区等小范围内货物运输问题而设计的一种现代化环保车型。

直流电动机作为电动搬运车的“心脏”,具有优良的启动、制动和调速性能,所以在电气传动系统中,尤其是对启动和调速性能要求较高的生产机械,一般都用直流电动机进行拖动。故不仅电动搬运车采用直流电动机为驱动装置,大型机床、电力机车、轧钢机、船舶机械等大型设备都采用直流电动机作为原动机。本项目以车间电动搬运车为载体,介绍直流电动机的结构原理、运行特性、电力拖动基础、起跑停控制,以及维护与检修方法等。

案 例

车间搬运小车(见图 1-1)多采用蓄电池作为动力源,采用直流电动机作为驱动装置,通过齿轮传动驱动车辆行走,通过液压传动推动油缸上下运动,起升货叉和货物。



图 1-1 车间搬运小车



案例
车间搬运小车

由于该车的行走与起升都是电动的,驾驶方式为站驾式,转向操作为舵把式,所以它具有省力、效率高、货物运行平稳、操作简单、安全可靠、噪声小、无污染等特点。

任务一 直流电动机的认知

任务内容描述

本任务学习直流电动机的工作原理、结构组成、绕组绕制方式和运行特性。让学生对直流电动机有一个初步的认识,初探直流电动机,培养学生对电动机学习的兴趣。作为一名电气控制技术人员必须熟悉直流电动机的结构原理、性能特点,以及电动机运行过程中复杂的电磁关系带给电动机的影响,进而能够正确熟练地操作和使用直流电动机。

学习目标

素质目标:

1. 由直流电动机在国民生产中的重要地位,培养学生的民族自豪感和使命感;
2. 由电动机的制造技术,培养学生对科技改变未来的认同感,端正科学态度,提高科学素养;
3. 通过实训操作,培养学生的劳动意识、精益求精的工匠态度。

知识目标:

1. 了解电动机相关电磁原理;
2. 掌握直流电动机的结构原理、铭牌数据;
3. 理解直流电动机的电磁关系、工作特性;
4. 掌握直流电动机的拆装顺序。

能力目标:

1. 能够正确阐述直流电动机的工作原理、内部结构组成;
2. 正确识读直流电动机的铭牌数据;
3. 能够分析直流电动机的工作特性;
4. 能够正确拆装直流电动机。

重、难点及电工证考点

重点:1. 直流电动机的结构、原理;2. 直流电动机的拆装与检测。

难点:1. 直流电动机的原理分析;2. 直流电动机的正确拆装。

电工证考点:1. 电动机拆装、测试工具的使用;2. 直流电动机的拆装调试。

学习准备

1. 多媒体教室、一体化教室、电动机拖动实训车间;



2. 直流电动机发展过程中的一些典型案例,如技术革新、工程应用等。试了解中国制造的优、缺点,重点分析国内外电机能效标准履行、技术开发、创新能力、工艺水平等方面差异;
3. 电动机拆装工具的功能、使用等。

计划与实施

1. 每组派代表介绍本组搜索到的资料;
2. 完成课堂学习任务,掌握相关知识点、技能点;
3. 完成课中操作及测试活动;
4. 学生派代表总结本组课堂学习情况,采用小组成员轮换制汇报;
5. 完成评价反馈任务。

评价反馈

一、测试题目

(一)简答题

1. 直流电动机由哪些主要部件构成?各部分的主要作用是什么?工作原理是什么?
2. 直流电动机中为何要用电刷和换向器?它们有何作用?
3. 直流电动机的励磁方式有哪几种?试画电路图。
4. 直流电动机中存在哪些能量损耗?哪些因素会影响电机发热?电动机与发电机的功率传递有何不同?

(二)计算题

一台并励直流电动机的额定数据如下: $P_N=17\text{ kW}$, $U_N=220\text{ V}$, $n_N=3\ 000\text{ r/min}$, $I_N=88.9\text{ A}$, $R_a=0.114\ \Omega$,励磁电阻 $R_f=181.5\ \Omega$,忽略电枢反应。试求:

- (1)电动机的额定输出转矩。
- (2)额定负载时的电磁转矩。
- (3)额定负载时的效率。

(三)拓展题

收集资料,写出直流电动机的拆装步骤、检测使用工具,写出一到两种电动机检测的智能化工具或设备,如绕组绕制设备等,叙述其工作原理及使用方法。

二、学习笔记

记录直流电动机相关等自主学习情况(如新型材料、绕线技术、新型制造工艺等)



三、学习评价

评价项目	指标内容	优秀、良好、合格、差			建议和改进
		自评	互评	教师评价	
分项评价	有无参与课前学习,学习是否深入				
	直流电动机的发展现状是否了解				
	直流电动机的结构原理是否掌握				
	直流电动机的拆装过程是否掌握				
	直流电动机的安装检测是否掌握				
	是否完成拓展题任务				
	课堂上是否积极参与师生间、小组间互动				
	是否执行了 8S 管理规定				
总评(优秀、良好、合格、差)					


相关知识

一、电动机的发展

1831 年法拉第创造了第一部感应发电机的模型,1834 年雅可比发明了功率为 15 W 的棒状铁心电动机,1836 年达文波特首先尝试用电动机驱动机械,1845 年惠斯通用电磁铁替代永久磁铁制成第一台电磁铁发电机,1866 年西门子制成第一台使用电磁铁的自激式发电机,1878 年出现了铁心开槽法,有槽铁心和鼓形绕组的结构一直沿用至今,1880 年爱迪生制造了名为“巨象”的大型直流发电机,1882 年英国人高登制造了大型两相交流发电机,1888 年俄国人制成一台三相交流单鼠笼式异步电动机,1891 年布洛在瑞士制造出高压油浸变压器,使远距离高压输电成为现实。

我国电机的生产和应用起步很晚,但发展迅速。1949 年全国总装机 184.83 万千瓦,为全国为数不多的电机修理厂。1958 年上海电机厂造出世界上第一台双水内冷发电机。1999 年中科院电工所、东方电机厂合作用蒸发冷却改装成功李家峡 400 MW 水轮发电机。2003 年总装机量已达 3.9 亿千瓦,为 1949 年的 211 倍。此时,形成了以上海、哈尔滨及四川东方三大发电设备制造集团为骨干的制造企业群。2009 年,上海电气科学研究所组织电机行业内几十家电机厂,开发出超高效稀土永磁高效节能 YE3 系列电机,该电机在 YX3 系列基础上进行改进,可直接启动、变频调速、功率因数接近 1、电流小、节约输配电容量、延长电机整体运行寿命,非常适合纺织、风机、水泵、压缩机等使用。2015 年中国自主研发新型高速永磁牵引电机交付成功,每年可节约 60 亿度电。2022 年 8 月工信部、发改委、环境部联合发文《工业领域碳达峰实施方案》,重点推广稀土永磁无心电机、特大功率高压变频变压器、三角形立体卷铁心结构变压器等新型节能设备。在产品结构和品种方面,由于节约能源的需要和满足新型产业产品配套的需求,特殊专用派生系列产品将会有更大的发展。如高效永磁同步电动机,与可再生能源和风能、太阳能、潮汐能、燃气等新能源发电配套的发电机都将得到快速发展。另外,中型高低压电动机、高压大功率潜水电泵需要量也急速增长。



二、电机分析中常用的电磁定律及材料

1. 电磁基本物理量

(1) 磁通密度 B

磁通密度简称磁密,又称磁感应强度,用 B 表示,单位为特斯拉 (T)。磁感应强度用来描述磁场的强弱。它是一个矢量,其方向用安培定则判别。安培定则又称右手螺旋定则,是表示电流和电流激发磁场的磁感线方向间关系的定则。通电直导线中的安培定则(安培定则一):用右手握住通电直导线,让拇指指向直导线中电流方向,那么四指指向就是通电导线周围磁场的方向;通电螺线管中的安培定则(安培定则二):用右手握住通电螺线管,让四指指向 i 电流的方向,那么拇指所指的那一端是通电螺线管的 N 极。用安培定则判别出的磁力线的方向就是磁感应强度的方向,如图 1-2 所示。

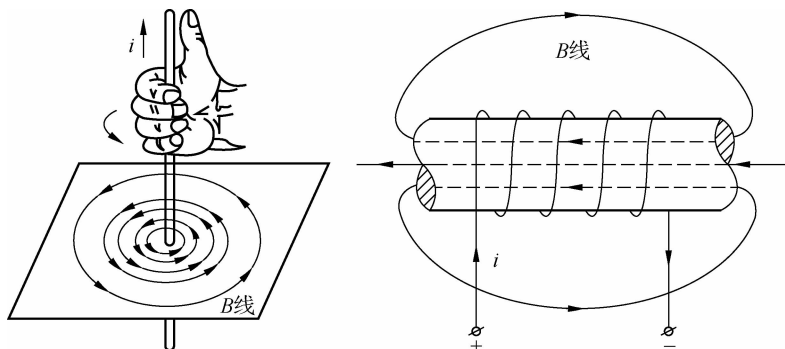


图 1-2 右手螺旋定则

(2) 磁通量 Φ

磁场的强弱也可以用磁力线的疏密来表示。穿过某一截面 S 的磁力线总数或者磁感应强度的通量称为磁通量,用 Φ 表示,单位为韦伯(Wb)。即

$$\Phi = \int_S B \cdot dS \quad (1-1)$$

对于均匀磁场,若 B 与 S 垂直,则 $\Phi=BS$ 。

(3) 磁场强度 H

磁场强度 H 是表征磁场性质的一个基本物理量,是一个矢量。其与磁场密度的关系为: $B=\mu H$ 。 μ 为磁导率,反映了磁性材料的导磁能力,真空的磁导率为 $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}$ H/m,一般而言铁磁材料的 $\mu\gg\mu_0$ 。

2. 基本电磁定律

(1) 电生磁的基本定律——安培环路定律

安培环路定律描述通电导体所产生的磁场与导体内部电流之间的关系。在稳恒磁场中,磁场强度 H 沿任何闭合路径的线积分,等于此闭合路径所包围的各个电流的代数和。这个结论称为安培环路定理。公式如下

$$\oint_L H \cdot dl = \sum i_k = Ni \quad (1-2)$$

若闭合磁力线上 H 处处相等,则上式变为 $HL=Ni$ 。

(2)磁生电的基本定律——法拉第电磁感应定律

变化的磁场会产生电场,使导体中产生感应电势,这就是电磁感应现象。感应电势和磁场之间符合法拉第电磁感应定律。在电机中,电磁感应现象主要表现在以下两个方面:一方面导体与磁场有相对运动,导体切割磁力线时,导体内产生感应电势,称为切割电势。另一方面线圈中磁通变化时,线圈中产生感应电势,称为感应电势,或者变压器电势。感应电势与磁场、导体运动速度之间符合右手定则。通电导体在磁场中所受的电磁力、电流与磁场之间符合左手定则。切割电势 e 如图 1-3 所示, $e=Blv$,其中 l 为导体长度, v 为导体切割磁力线的速度。电磁力 f_{em} 如图 1-4 所示, $f_{em}=Bil$,其中 i 为导体中的电流。

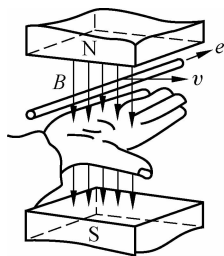


图 1-3 右手定则

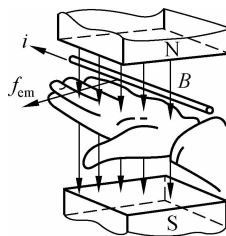


图 1-4 左手定则

3. 常用铁磁材料及其特性

在电机和变压器中,磁路由铁磁材料组成的。铁磁材料一般采用铁或铁与钴、钨、镍和铝等组成的合金材料。电机(变压器)都是以磁场为媒介实现机电能量的转换或变换的。为了减小电机磁路中的磁阻,以获得一定励磁磁势下较强的磁场,从而降低电机或变压器的体积和成本,一方面在电机中广泛使用导磁性能良好的铁磁材料,另一方面充分利用已有铁磁材料的特性并选择合适的工作点也很重要。

铁磁材料具有三个显著特性,即高导磁性、磁滞性和磁饱和性。铁磁材料的磁化如图 1-5 所示,磁滞回线如图 1-6 所示。鉴于磁饱和性特点,同时考虑铁心的利用率,为确保不增加励磁磁势而获得最大的磁通,通常把电机或变压器的工作点选在磁化曲线的 c 点附近,如图 1-7 所示。

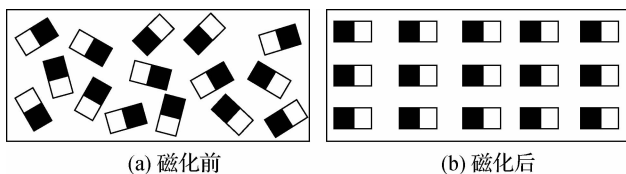


图 1-5 铁磁材料的磁化

对于铁磁材料,当外加磁场强度 H 增加到一定数值时,所产生的磁感应强度 B 将增加缓慢,这种现象称为磁饱和性。磁饱和性现象表明,铁磁材料组成的磁路为非线性磁路,其磁导率 μ 随激励的变化而改变,相应的等效电感 L 减小,磁路越饱和,磁导率 μ 越低,磁导热系数 Δ 和等效电感 L 越小。

铁磁材料中的铁损耗包括磁滞损耗和涡流损耗,磁滞损耗通过磁滞回线表现其特点,涡流现象如图 1-8 所示。

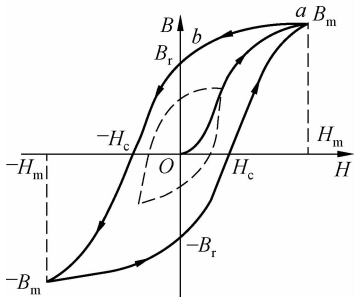


图 1-6 磁滞回线

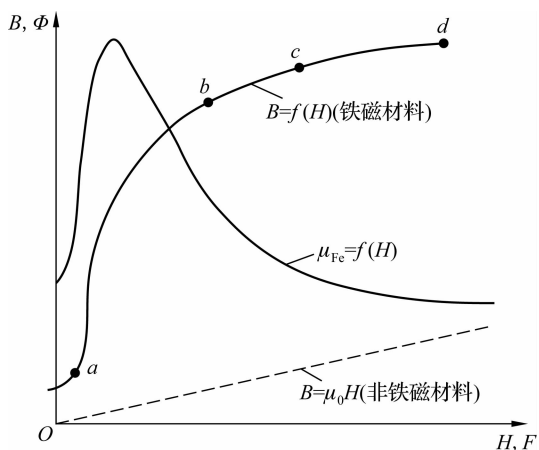


图 1-7 铁磁材料与非铁磁材料的磁化曲线

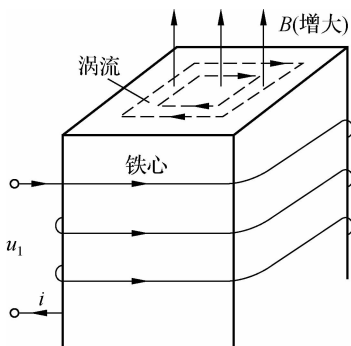


图 1-8 铁磁材料涡流现象

思考:电机中涉及哪些基本电磁定律?试说明它们在电机中的作用。铁心中的磁滞损耗和涡流损耗如何产生?与哪些因素有关?

4. 绝缘材料的耐热等级

电机常用绝缘材料及耐热等级见表 1-1[参见《旋转电机整体结构的防护等级(IP 代码)分级》(GB/T 4942—2021)]。

表 1-1 绝缘材料及耐热等级

耐热等级	原标志	绝缘材料
90	Y	棉纱丝绸、天然丝、纸及其制品、木材、再生纤维等
105	A	浸渍过的 Y 级绝缘材料、Q 型漆包线、黄漆绸、丁腈橡胶、有机玻璃及油性沥青漆等
120	E	QQ、QA、QAN 型漆包线, 聚酯薄膜, 聚酯薄膜玻璃漆布复合箔, 热固性聚酯树脂, 三聚氰胺甲醛树脂, 热固性合成树脂胶, 纸层压制品及棉纤维层压制品等
130	B	QZ、QZN 型漆包线, 玻璃纤维, 石棉层压制品, 聚酯薄膜玻璃漆布复合箔, 聚酯无纺布-聚酯薄膜-聚酯无纺布复合箔(DMD), 环氧酚醛层压玻璃布板, 热固性合成树脂胶, 氨基醇酸绝缘漆, 环氧树脂绝缘漆及油改性合成树脂漆等



续表

耐热等级	原标志	绝缘材料
155	F	QZY 型漆包线, 聚芳纤维纸薄膜复合箔, 绝缘漆处理的玻璃纤维和石棉制品, 云母制品和硅有机制品, 耐热优良的醇酸、环氧、热固性聚酯树脂, 有机硅绝缘胶及环氧树脂无溶剂漆等
180	H	无机物填料塑料、硅有机橡胶、聚芳纤维纸薄膜复合箔及有机硅环氧层压玻璃布板等
200		QY 型漆包线、聚酰亚胺薄膜、聚四氟乙烯薄膜、聚酰亚胺层压玻璃布板、石英、陶瓷及玻璃等
220		NHM 绝缘纸
250		玻璃丝带

一般电机多采用 E 级或 B 级绝缘, 如国产 Y 系列异步电动机采用 B 级绝缘。一些有特殊耐热要求的电机(如起重及冶金用电动机), 常采用 F 级或 H 级绝缘。

三、直流电机的特点与用途

1. 直流电机的特点

直流电机(direct current machine)是通以直流电流的旋转电机, 是电能和机械能相互转换的设备。直流电机当作电动机运行时是直流电动机, 将电能转换为机械能; 当作发电机运行时是直流发电机, 将机械能转换为电能。直流电机的主要特点是调速性能好, 启动转矩大, 尤其是他励直流电机通过调节励磁电流可以得到需求的高、低转速和大、小转矩。但直流电机内部转子绕组中为交流电, 因此需要换向器, 结构相对复杂, 制造成本高。

2. 直流电机的用途

直流电机是采用直流电源(如干电池、蓄电池等)的电机, 不仅可以用在低电压要求的电路中, 如计算机、风扇、收录机等小型家电, 还可以作为原动机带动各种生产机械工作, 向负载输出机械能。在许多工业部门, 如大型轧钢设备、大型精密机床、矿井卷扬机、市内电车、电缆设备等严格要求电机转速一致的地方等, 通常都采用直流电机作为原动机来拖动工作机械。在控制系统中也常用直流电机如步进电机、伺服电机等。

四、直流电机的原理、结构与铭牌

直流电机分为直流电动机和直流发电机。按励磁方式的不同, 直流电动机可分为他励电动机和自励电动机, 自励电动机又分为并励直流电动机、串励直流电动机和复励直流电动机三种, 如图 1-9 所示。

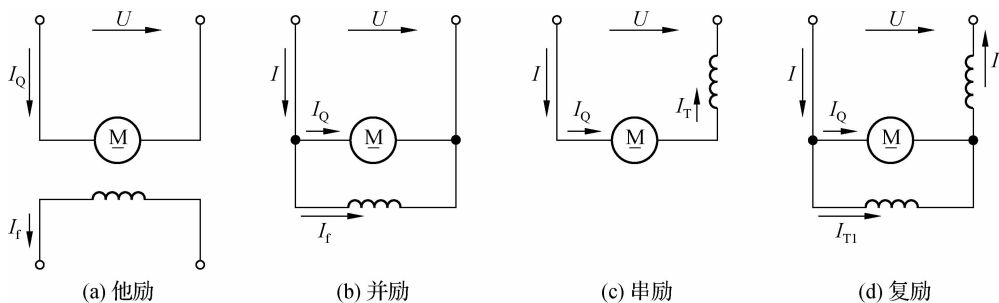


图 1-9 直流电动机的励磁方式



1. 直流电动机的工作原理

图 1-10 所示为一台简单的两极直流电动机的模型。在图 1-10 中, N 和 S 为一对固定的磁极, 磁极之间有一个可以旋转的铁质圆柱体, 称为电枢铁心, 磁极与电枢铁心之间的缝隙称为空气隙。电枢铁心表面固定一个用绝缘导体构成的电枢线圈, 线圈的两端分别接到两个相互绝缘的弧形铜片, 弧形铜片称为换向片, 换向片组合在一起称为换向器。在换向器上放置固定不动而与换向片转动接触的电刷, 线圈通过换向器和电刷接通外电路。

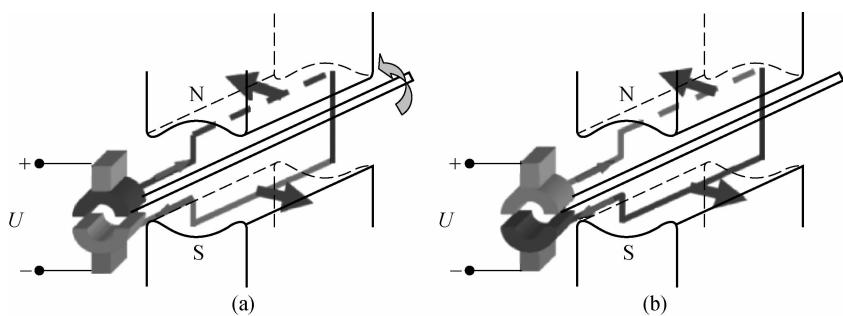


图 1-10 直流电动机的模型

除容量很小的电动机是用永磁磁铁做成磁极外, 容量较大的一些电动机, 磁场都是由直流励磁电流通过绕在磁极铁心上的励磁绕组产生的。在实际电动机中, 电枢绕组嵌放在铁心槽内, 电枢绕组中的电流称为电枢电流。电枢铁心、电枢绕组和换向器组合在一起称为电枢。

当直流电源通过电刷向电枢绕组供电时, 电枢表面处在 N 极下的电枢绕组内可以流过相同方向的电流, 根据左手定则导体将受到逆时针方向的力矩作用; 电枢表面处在 S 极下绕组内也流过相同方向的电流, 同样根据左手定则导体也将受到逆时针方向的力矩作用。如图 1-10(a) 所示。当电枢转过 180° 后, 如图 1-10(b) 所示, 原位于 S 极下的绕组旋转至 N 极下, 通过碳刷、换向器, N 极下电枢绕组内电流进行换向, 这样任一旋转至 N 极下线圈始终保持相同的电流方向, 此时位于 S 极下的绕组电流也进行换向保持同方向。这样整个电枢绕组即转子将按逆时针旋转, 输入的直流电能就转换成转子轴上输出的机械能。

2. 直流发电机的工作原理

直流发电机的工作原理基于电磁感应定律。电磁感应定律指出, 在均匀磁场中, 当导体切割磁感应线时, 导体中就有感应电动势产生。

对于长度一定的导体来说, 导体中感应电动势的大小由导体所在处的磁感应强度和导体切割磁场的速度所决定, 而感应电动势的方向可由右手定则来确定。

图 1-11 所示为一台直流发电机的模型。直流发电机的模型与直流电动机相同, 不同的是电刷上不加直流电压, 而是用原动机拖动电枢朝一个方向旋转。直流发电机的工作原理就是把电枢线圈中感应产生的交变电动势, 靠换向器配合电刷的换向作用, 使之从电刷端引出时变为直流电动势。因为电刷 A 通过换向片所引出的电动势始终是切割 N 极磁力线的线圈边中的电动势, 所以电刷 A 始终有正极性。同样道理, 电刷 B 始终有负极性。所以电刷端能引出方向不变但大小变化的脉动电动势。



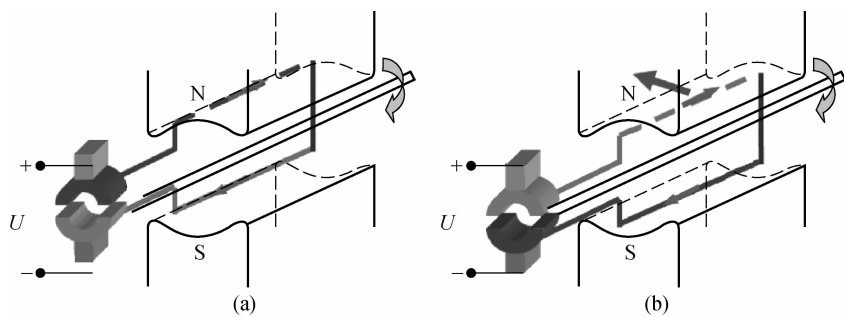


图 1-11 直流发电机的模型

由此可以看出,一台电机原则上既能作为电动机运行,也可作为发电机运行。将直流电源加上电刷,向电枢内输入电能,电机将电能转换为机械能,拖动生产机械旋转,电机作为电动机运行;如用原动机拖动直流电机的电枢旋转,输入机械能,电机将机械能转换为直流电能,从电刷上引出直流电动势,电机作为发电机运行。同一台电机,既能作为电动机运行又能作为发电机运行的原理,称为电机的可逆原理。

3. 直流电动机的结构

直流电动机主要由静止部分和旋转部分组成。静止部分称为定子,旋转部分称为转子,在定子和转子之间存在着空气隙。直流电动机的结构如图 1-12 所示。

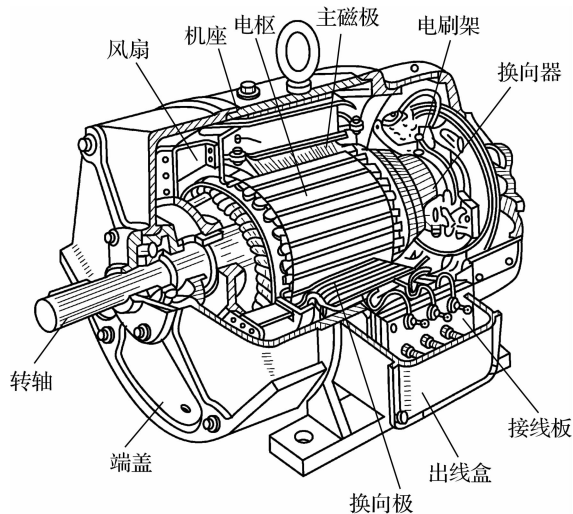


图 1-12 直流电动机的结构



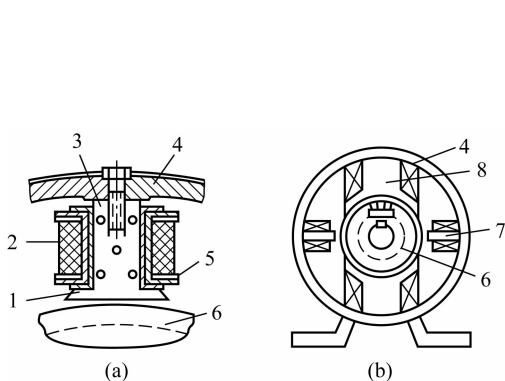
微课
直流电动机的结构

(1) 定子部分

定子是电动机中固定不动的部件,直流电动机的定子由主磁极、换向极、机座、端盖、轴承和电刷装置等部件组成,其作用是产生磁场和做机械支承。直流电动机的定子结构如图 1-13 所示。

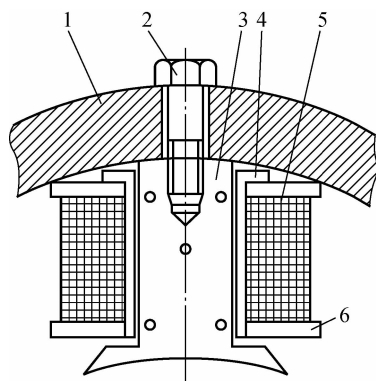
① 主磁极

主磁极也称主极,其作用是产生一个恒定的主磁场。主磁极由主极铁心和主极绕组(励磁绕组)两部分组成,如图 1-14 所示。



1—极靴；2—励磁线圈；3—极身；4—机座；
5—框架；6—电枢；7—主极；8—换向极。

图 1-13 直流电动机的定子结构



1—机座；2—主极螺钉；3—主极铁心；4—框架；
5—主极绕组；6—绝缘衬垫。

图 1-14 主磁极

②换向极

两相邻主磁极之间的小磁极称为换向极[见图 1-13(b)]。换向极的作用是改善换向,减少电动机运行时电刷与换向器之间可能产生的火花。换向极由换向极铁心和换向极绕组组成。换向极铁心一般用整块钢制成,对换向性能要求较高的直流电动机,换向极铁心可用钢板冲压而成。功率很小的直流电动机中,换向极的数目也可以小于主极数目,或不装换向极。

③机座

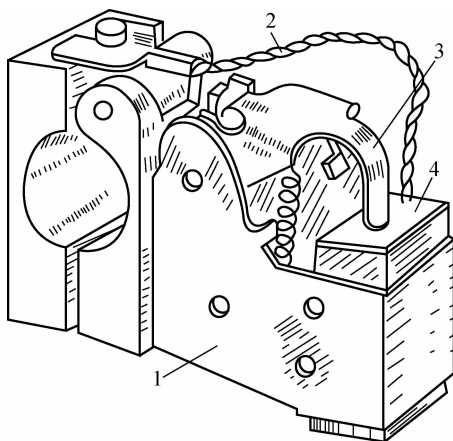
机座[见图 1-13(b)]是电动机定子部分的外壳,由铸铁或铸钢等材料制成。一方面,机座起导磁作用,为主磁极磁场提供磁路;另一方面,机座起机械支承和保护作用。

④端盖

机座的两边各有一个端盖,它的中心部分装有轴承,用来支承转子,电刷架也固定在端盖上。

⑤电刷装置

电刷装置由碳刷、碳刷盒和压紧弹簧等部分组成,如图 1-15 所示。电刷的作用有两个:一是把转动的电枢与外电路相连;二是与换向器配合作用获得直流电压。



1—刷握；2—铜丝辫；3—压紧弹簧；4—电刷块(石墨材料)。

图 1-15 电刷装置



(2) 转子

电动机转动的部件称为转子,直流电动机的转子又称电枢,它的作用是通过磁通和嵌放电枢绕组。在电动机中,电枢绕组通电后受到电磁力的作用,形成输出转矩;在发电机中,电枢绕组切割磁力线,产生感应电动势。直流电动机的转子结构如图 1-16 所示。

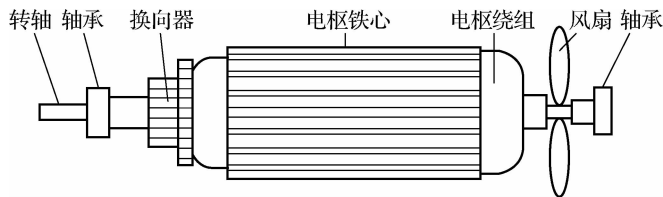


图 1-16 直流电动机的转子结构

① 电枢铁心

电枢铁心是主磁路的一部分,同时对放置在其上的电枢绕组起支承作用。为减少电机旋转时铁心中的磁通方向发生变化引起的磁滞损耗和涡流损耗,电枢铁心通常用 0.5 mm 厚的低硅硅钢片或冷轧硅钢片冲压成形。为减少损耗而在硅钢片的两侧涂绝缘漆,为放置绕组而在硅钢片中冲出转子槽。冲制好的硅钢片叠装成电枢铁心。直流电动机的电枢铁心如图 1-17 所示。

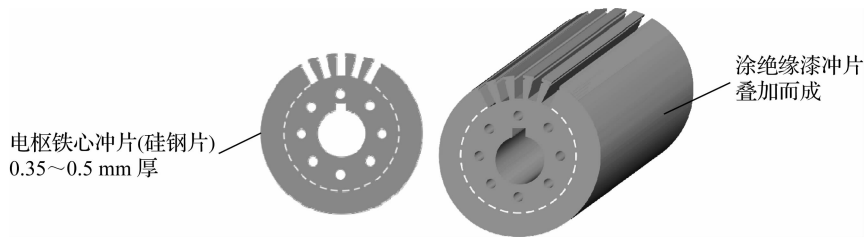


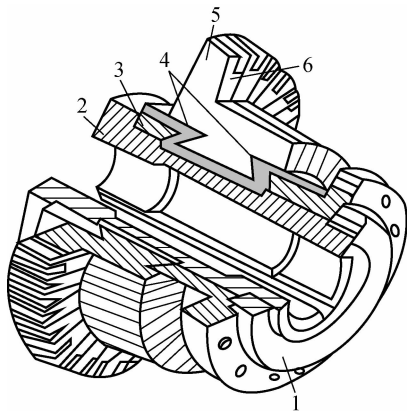
图 1-17 直流电动机的电枢铁心

② 电枢绕组

电枢绕组是直流电动机的重要组成部分。绕组由带绝缘体的导体绕制而成,小型电动机常采用铜导线绕制绕组,大中型电动机常采用成型绕组。电枢线圈按一定规律连接形成,用于产生感应电动势和通过电流,实现机电能量的转换。

③ 换向器

在直流电动机中,换向器配以电刷,将外加直流电流转换成电枢绕组中的交变电流,使电磁转矩的方向恒定不变;在直流发电机中,换向器配以电刷,将电枢绕组中感应产生的交流电动势转换为正、负电刷上引出的直流电动势。换向器常采用导电性能好、硬度大、耐磨性能好的紫铜或铜合金制成,由许多燕尾状的铜片间隔绝缘云母片而成,如图 1-18 所示。



1—螺旋压圈; 2—换向器套筒; 3—V形压圈;
4—V形云母环; 5—换向铜片; 6—云母片。

图 1-18 换向器的结构



4. 直流电动机的铭牌

每台直流电动机都有一块铭牌,上面标注各种额定数据,简要介绍直流电动机的型号、规格和性能,是用户合理选择和正确使用电动机的依据。根据国家标准要求设计和试验所得的一组反映电动机性能的主要数据称为直流电动机的额定值。

以表 1-2 所示直流电动机铭牌明细为例,介绍各项目含义。

表 1-2 直流电动机铭牌明细

直流电动机					
型号	Z4—200—21	标准编号	GB/T 6109	冷却方式	IC06
额定功率	5.5 kW	励磁方式	他励	工作制	S1
额定电压	440 V	励磁电压	180 V	绝缘等级	F
额定电流	14.7 A	励磁功率	320 W	防护等级	IP21S
额定转速	2 950 r/min	弱磁转速	4 000 r/min	重量	××kg
出品编号	××××	出品日期	××年×月	整流器编号	
××××电动机厂					

(1) 电动机型号

Z4—200—21 直流电机型号,Z 是系列(即一般用途直流电动机)代号,200 是电机中心高(mm),21 中的 2 是电枢铁心长度代号,1 是端盖的代号。

电机系列化的目的是促进产品的标准化和通用化。我国电机的主要系列代号及含义如下:

Z 系列——一般用途直流电动机(Z2、Z3、Z4 等系列)。

Z 和 ZF 系列——一般用途的中大型直流电机,其中“Z”为直流电动机系列,“ZF”为直流发电机系列。

ZT 系列——用于恒功率且调速范围较宽的宽调速直流发电机。

ZZJ 系列——冶金辅助拖动机械用的冶金起重直流电动机,它具有启动快速和能承受较大过载的特性。

ZLJ 系列——力矩直流电动机,在伺服系统中做执行元件。

BFG 系列——直流三换向片永磁电动机,用于盒式录音机、电动玩具等。

(2) 额定功率

在直流电动机中, P_N 是指输出的机械功率的额定值,在直流发电机中, P_N 是指输出的电功率的额定值。在直流电动机中额定功率为

$$P_N = U_N I_N \eta_N \quad (1-3)$$

式中: U_N 为额定输入电压; I_N 为额定输入电流; η_N 为额定效率。

(3) 最高转速

最高转速是 Z4 系列直流电动机铭牌中特有的一个数据,是指电动机采用弱磁调速时,高于额定转速的最高转速,电动机的机械强度将会受损。所以很多厂家的铭牌上常把最高转速标注为弱磁转速,如表 1-2 所示铭牌的弱磁(最高)转速为 4 000 r/min。

(4) 冷却方式

电动机运行时,各种损耗会有热能产生,需要进行相应的冷却。根据《旋转电机冷却方



法》(GB/T 1993—1993)、IEC34—6 标准,Z4 系列电动机的冷却方式有 IC06(自带鼓风机的外通风),也可为 IC17(冷空气进口为管道,出口为百叶窗排风)。

(5) 绝缘等级

电动机的绝缘等级高低决定了绝缘材料的耐热允许温度,从而决定电动机的允许温升。Z4 系列电动机的绝缘等级是 F,耐热等级为 155。

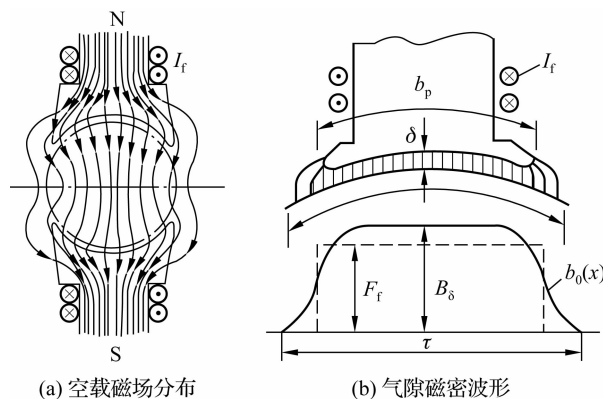
五、直流电动机的基本理论

1. 直流电动机的电枢反应

直流电动机的磁场是由电动机中的各个绕组,包括励磁绕组、电枢绕组、换向绕组、补偿绕组等共同产生的,其中励磁绕组起主要作用。

(1) 直流电动机的空载磁场

直流电动机的空载磁场是指电机与外电路断开,没有电流输出,电动机轴上不带机械负载运行,电枢电流等于零或近似于零时的磁场。因而空载磁场可以认为仅仅是励磁电流通过励磁绕组产生的励磁磁通势所建立的主磁场。图 1-19 所示为直流电动机的空载磁场分布与气隙磁密波形,其中 I_f 为励磁电流, F_f 为磁动势, τ 为极距, B_δ 为磁感应强度, δ 为磁导率, $b_\delta(x)$ 为空载气隙磁密沿电枢外圆分布函数。分析可知直流电动机空载气隙磁密是平顶波。



微课
直流电动机的电枢反应

图 1-19 直流电动机的空载磁场分布和气隙磁密波形

(2) 直流电动机负载的电枢反应磁场

直流电动机负载后的电枢电流所产生的磁场,称为电枢磁场。电枢磁场对主磁场的影响称为电枢反应。直流电动机的空载磁场即主磁场如图 1-20(a)所示,电枢磁场如图 1-20(b)所示,电机运行磁场即合成磁场如图 1-20(c)所示。

电枢反应的结果如图 1-20(c)所示。一是使气隙磁场畸变,一极尖磁场加强,另一极尖磁场减弱。二是去磁效应,由于磁场饱和,每一磁极的两个极尖磁通的增加量与减少量不相等,减少量大于增加量,从而使总磁通量有所减小。明显表现在:原来的几何中性线 $n-n$ 处的磁感应强度不等于零,磁感应强度为零的位置即电磁物理中性线 $m-m$ 逆旋转方向移动一角度(电动机),物理中性线与几何中性线不再重合。电枢电流越大,电枢磁场越强,电枢反应的影响就越大,物理中性线偏移的角度也就越大,这样会给电动机的换向带来困难。

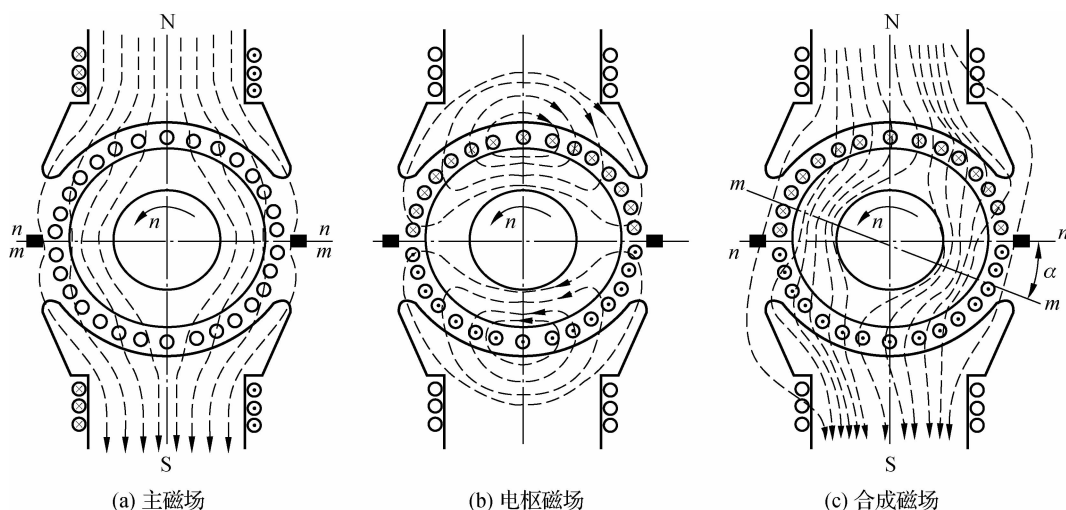


图 1-20 直流电动机的磁场分布

2. 直流电动机的电枢电动势和电磁转矩

(1) 直流电动机的电枢电动势

电枢旋转时,主磁场在电枢绕组中感应的电动势,称为电枢电动势 E_a 。直流发电机的电枢电动势为电源电动势(与电枢电流同方向),直流电动机的电枢电动势为电源电动势反电势(与电枢电流反方向)。直流电动机电枢电动势 E_a 可表示为

$$E_a = \frac{pN}{60a} \Phi n = C_e \Phi n \quad (1-4)$$

式中: Φ 为电枢绕组每极每相磁通量; n 为电机转速; C_e 为电机的结构常数(电动势常数), $C_e = \frac{pN}{60a}$; p 为磁极对数; N 为电枢导体总数; a 为电枢绕组并联支路对数。

(2) 直流电动机的电磁转矩

电枢绕组中有电枢电流 I_a 流过时,在磁场内受电磁力的作用,该力与电枢铁心半径之积称为电磁转矩 T_{em} 。计算公式如下:

$$T_{em} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = C_T \Phi I_a \quad (1-5)$$

式中: $C_T = \frac{pN}{2\pi a} = 9.55C_e$ 为电机的结构常数(转矩常数); p 为磁极对数; N 为电枢导体总数; a 为电枢绕组并联支路对数。

直流电动机的电磁转矩所表现出来的性质,发电机中电磁转矩起制动(与转速方向相反)作用,电动机电磁转矩起驱动(与转速方向相同)作用。直流电动机的电磁转矩 T_{em} 与转速 n 及轴上输出功率 P 之间的关系为 $T_{em} = 9\,550 \frac{P}{n}$ 。

3. 直流电动机的损耗、功率、转矩与基本方程式

电机是进行能量变换的装置,因而功率关系是电机中的最基本的物理关系。电机在运行过程中,存在输入功率、输出功率和各种损耗,它们之间的关系满足能量守恒定律。在能量转换过程中,电机中的能量损耗并没有消失,而是转换成热能使电机发热。



(1) 直流电机的损耗

直流电机的损耗按其性质可分为机械损耗、铁心损耗、铜损耗和附加损耗四种。

① 机械损耗 P_m

不论是发电机还是电动机,当电机转动时,必须先克服摩擦阻力,因此产生机械损耗。机械损耗包括轴与轴承摩擦损耗、电刷与换向器摩擦损耗,以及电枢旋转部分与空气的摩擦损耗等。这些损耗与转速高低有关。

② 铁心损耗 P_{Fe}

当直流电机旋转时,电枢铁心中因磁场反复变化而产生的磁滞损耗和涡流损耗称为铁心损耗,简称铁损耗。机械损耗和铁心损耗合起来又称空载损耗 P_0 。因为这两种损耗在直流电动机转起来但还没有带负载时,就已经存在了。

$$P_0 = P_{Fe} + P_m \quad (1-6)$$

③ 铜损耗 P_{Cu}

当直流电机运行时,在电枢回路和励磁回路中都有电流流过,因此在绕组电阻上产生了损耗,称为铜损耗。

电枢回路的铜损耗 P_{Cua} 包括以下几项:电枢绕组铜损耗;与电枢绕组串联的串励绕组、换向极绕组及补偿绕组的铜损耗;电刷与换向器的接触电阻上的铜损耗。励磁回路的铜损耗 P_{Cuf} 很小,而且是一个不变的值,一般把它归入不变损耗范畴。

不论发电机还是电动机,电枢电流都随负载的变化而变化,因而电机中的电枢铜损耗又称可变损耗。电机的机械损耗和励磁一定时的铁损耗只与转速有关,当电机的转速变化不大时,由机械损耗和铁心损耗合成的空载损耗是基本不变的,故空载损耗又称不变损耗。

④ 附加损耗 P_{ad}

附加损耗又称杂散损耗。对于直流电机,这种损耗是由于电枢铁心表面有齿槽存在,使气隙磁通大小脉振和左右摇摆,在铁心中引起的铁损耗和换向电流产生的铜损耗等。这些损耗是难以精确计算的,一般占额定功率的 $0.005 \sim 0.01$ 。对有补偿绕组的电动机,附加损耗可取为 $0.5\%P_N$;而对无补偿绕组的电动机,附加损耗可取 $1\%P_N$ 。

电机总损耗 $\sum P$ 为

$$\sum P = P_{Cu} + P_{Fe} + P_{ad} + P_m = P_{Cu} + P_0 + P_{ad} \quad (1-7)$$

(2) 直流电动机的功率

他励直流电动机接上电源时,电枢绕组流过电流,电源向电动机输入的电功率为

$$P_1 = UI = UI_a = (E_a + I_a R_a) I_a = E_a I_a + I_a^2 R_a = P_{em} + P_{Cua} \quad (1-8)$$

上式表明:输入的电功率有很小一部分被电枢绕组消耗(铜损耗),而大部分作为电磁功率转换成了机械功率。从上面的分析可知:当电动机转动时,还要克服各类摩擦引起的机械损耗、铁心损耗以及附加损耗,所以电磁功率转变出来的机械功率,一小部分消耗在机械损耗和铁心损耗上,大部分从电动机轴上输出,故电动机输出的机械功率为

$$P_2 = P_{em} - P_{Fe} - P_m = P_{em} - P_0 \quad (1-9)$$

若忽略附加损耗,则输出机械功率为

$$\begin{aligned} P_2 &= P_{em} - P_{Fe} - P_m = P_{em} - P_0 \\ &= P_1 - P_{Cua} - P_0 \\ &= P_1 - \sum P \end{aligned}$$



微课
直流电动机的能量转换



则直流电动机的效率为

$$\eta = \frac{p_2}{p_1} \times 100\% = \frac{p_2}{p_2 + \sum p} \times 100\% \quad (1-10)$$

一般中小型直流电动机的效率在 75%~85% 之间,大型直流电动机的效率在 85%~94% 之间。他励直流电动机的功率平衡关系可用功率流程图来表示,如图 1-21 所示。

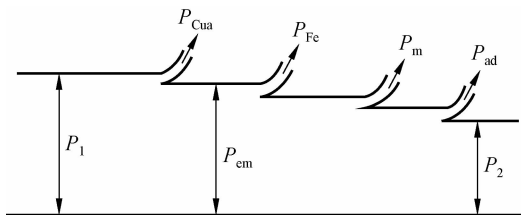


图 1-21 他励直流电动机功率流程图

(3) 直流电动机的转矩

经过上述分析可知,要使直流电动机处于稳定运行状态,即转速恒定,就必须使加在电动机轴上的所有转矩保持平衡。而电动机稳定运行时作用在电动机轴上的转矩有三个:一个是电磁转矩 T ,方向与转速 n 相同,为拖动转矩或驱动转矩;一个是电动机空载转矩 T_0 ,即电动机空载运行时的阻转矩,方向总与转速 n 方向相反,为制动转矩;还有一个是轴上所带生产机械的负载转矩 T_L ,即电动机轴上的输出转矩,也可视为制动转矩。因此,可得电动机稳定运行时的转矩平衡关系式为

$$T = T_L + T_0 \quad (1-11)$$

即拖动转矩等于总的制动转矩。

但是,由于空载转矩 T_0 的数值仅为电动机额定转矩的 2%~5%,因此在重载或额定负载下常忽略不计,而电动机轴上输出的机械转矩 T_2 与电动机轴上所带的负载转矩 T_L 相平衡,即 $T_2 = T_L$,则由式 $T = T_2 + T_0$ 可得电动机输出转矩的常用计算公式如下

$$T_2 = \frac{P_2}{2\pi n/60} = 9.55 \frac{P_2}{n} \quad (1-12)$$

在额定情况下 $P_2 = P_N, T_2 = T_N, n = n_N$,则

$$T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N} \quad (1-13)$$

(4) 直流电动机的基本方程式

在列出直流电动机的基本方程之前,应规定好电动机各物理量的正方向,如图 1-22 所示。

由基尔霍夫定律可知,在电动机电枢电路中存在如下回路电压方程式:

$$U = E_a + I_a R_a \quad (1-14)$$

式中: U 为电源电压; E_a 为电枢电动势; I_a 为电枢电流; R_a 为电枢电阻。

直流电动机的转矩平衡方程式为

$$T_{em} = T_0 + T_L \quad (1-15)$$

式中: T_0 为直流电动机的空载转矩; T_L 为直流电动机的负载转矩。

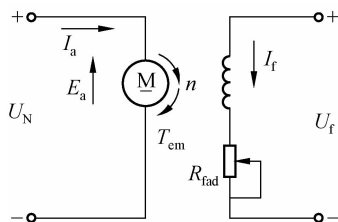


图 1-22 他励直流电动机电路图



4. 直流电机的工作特性

直流电动机的工作特性是指供给电动机额定电压 U_N 、额定励磁电流 I_{fN} 时,转速、转矩及效率与负载电流之间的关系。这三个关系分别称为电动机的转速特性、转矩特性和效率特性。

(1) 他励(并励)直流电动机的工作特性

① 转速特性。他励直流电动机的转速特性可以表示为 $n=f(I_a)$, 即

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e \Phi} I_a \quad (1-16)$$

式(1-16)即为转速特性表达式。忽略电枢反应的去磁作用,转速与负载电流按线性关系变化。当电枢电流 I_a 增加时,转速有所下降,如图 1-23 所示。

② 转矩特性。当 $U=U_N, I=I_{fN}$ 时, $T_{em}=f(I_a)$ 的关系称为直流电动机的转矩特性。根据直流电动机的电磁转矩公式可得电动机的转矩特性表达式如下

$$T_{em} = C_T \Phi I_a \quad (1-17)$$

由式(1-17)可以看出:若忽略电机的电枢反应影响,电磁转矩与电枢电流成正比;若考虑电枢反应的影响,则主磁通略下降,电磁转矩上升的速度比电流的上升速度慢些,曲线斜率略下降。

③ 效率特性。当 $U=U_N, I=I_{fN}$ 时, $\eta=f(I_a)$ 之间的关系称为直流电动机的效率特性,效率特性方程可表示为

$$\eta = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = 1 - \frac{P_0 + R_a I_a^2}{U_N I_a} \quad (1-18)$$

从前面的叙述可知,空载损耗为不变损耗,不随负载电流变化,当负载电流较小时效率较低,输入功率大部分消耗在空载损耗上,负载电流增大,效率也增大,输入的功率大部分消耗在机械负载上,但当负载电流增大到一定程度时铜损快速增大,此时效率又变小,如图 1-24 所示。

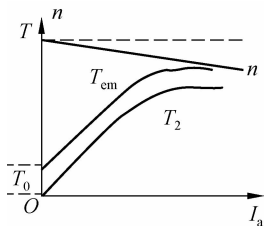


图 1-23 他励(并励)直流电动机
转速、转矩特性曲线

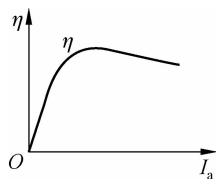


图 1-24 他励(并励)直流电动机
效率特性曲线

(2) 串励直流电动机的工作特性

串励直流电动机的励磁绕组与电枢绕组串联,当电枢电流即负载电流较小时,电机磁路不饱和,每极气隙磁通与励磁电流呈线性关系。当电枢电流较大时,电机磁路饱和,主磁通基本不再随励磁电流的变化而变化。因此,串励直流电动机的转速特性、转矩特性和效率特性需分段分析讨论。

当负载电流较小时,电机磁路不饱和,每极气隙磁通与励磁电流呈线性关系。即

$$\Phi = k_f I_f = k_f I_a \quad (1-19)$$



式中: k_f 为比例系数。

根据上述分析, 串励直流电动机的转速特性可写为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a I_a}{C_e \Phi} = \frac{U_N}{k_f C_e I_a} - \frac{R_a + R_f}{k_f C_e} \quad (1-20)$$

当负载电流为零时, 电机转速趋于无穷大, 所以串励电动机不宜轻载或空载运行。转矩特性可写为

$$T_{cm} = C_T \Phi I_a = k_f C_T I_a^2 \quad (1-21)$$

当负载电流较大时, 磁路饱和, 串励电动机的工作特性与他励电动机相同。串励直流电动机工作特性曲线如图 1-25 所示。

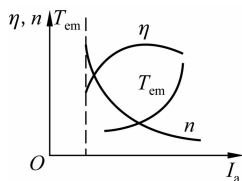


图 1-25 串励直流电动机工作特性曲线

小知识

电动机铁心新型材料

非晶合金又称金属玻璃, 是一种软磁性能优异的绿色工程材料。非晶合金的生产从热钢液到薄带成品一次成形, 省掉了一般冷轧金属制造工艺中的许多中间工序, 大大节约了能源。据推算, 生产 1 kg 非晶合金带材比生产同质量的冷轧硅钢片可节约 1 L 石油。非晶合金和传统的硅钢相比, 具有更高的电阻率和更薄的带材厚度, 所以用作铁心材料时可以将铁心损耗降低 70% ~ 90%。由于非晶合金材料的低损耗特性, 非晶合金已经在变压器和磁传感器等领域得到了广泛应用。

思考: 电动搬运车、轨道车为什么常使用串励直流电动机? 串励直流电动机的特点是什么?



技能训练

技能训练 1-1 直流电动机的基本测量

1. 实训目的

- (1) 学习电动机实验的基本要求与安全操作注意事项。
- (2) 认识在直流电动机实验中所用的电动机、仪表、变阻器等组件及其使用方法。
- (3) 掌握他励电动机(即并励电动机按他励方式)的接线、伏安法测电枢电阻以及电机启动、改变转向的方法。

2. 实训设备

实训设备见表 1-3。

表 1-3 实训设备清单

序号	型号	名称	数量
1	M17	导轨、测速机构	1 台
2	M01	复励直流发电机	1 台
3	M02	并励直流电动机	1 台
4	EM-06	直流数字电压、毫安、安培表	1 件
5	EM-03	可调电阻箱	1 件
6	EM-05	波形测试及开关板	1 件
7	EM-04	三相可调电阻器	1 件



3. 实训内容和步骤

(1) 认识实验台

认识电动机及电气技术实验装置各面板及使用方法,教师讲解电动机实验的基本要求、安全操作和注意事项。

(2) 用伏安法测电枢的直流电阻

步骤:

①按图 1-26 所示接线,电阻 R 用 EM-03 上 $1\ 800\ \Omega$ 并调至最大。A 表选用 EM-06 直流、毫安、安培表,量程选用 5 A 挡。

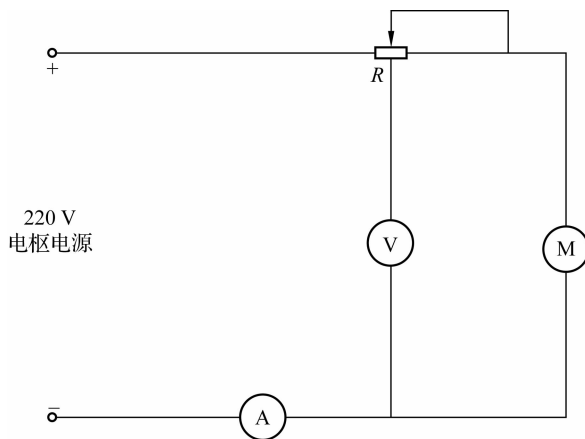


图 1-26 测电枢绕组直流电阻接线图

②接电枢电源,并调至 220 V。调节 R ,使 A 表为 0.2 A,测电动机电枢两端电压 U 和电流 I 。将电动机分别旋转三分之一和三分之二周,同样测取 U 、 I 三组数据列于表 1-4 中。

③增大 R 使电流分别达到 0.15 A 和 0.1 A,用同样的方法测取六组数据列于表 1-4 中。取三次测量的平均值作为实际冷态电阻值

$$R_a = \frac{1}{3}(R_{a1} + R_{a2} + R_{a3})$$

表 1-4 用伏安法测电枢的直流电阻数据记录表 室温 _____ °C

序号	U/V	I/A	$R(\text{平均})/\Omega$		R_a/Ω	$R_{a\text{ref}}/\Omega$
1			$R_{a11} =$	$R_{a1} =$		
			$R_{a12} =$			
			$R_{a13} =$			
2			$R_{a21} =$	$R_{a2} =$		
			$R_{a22} =$			
			$R_{a23} =$			
3			$R_{a31} =$	$R_{a3} =$		
			$R_{a32} =$			
			$R_{a33} =$			