

高职高专电气自动化技术专业规划教材

GAOZHI GAOZHUAN DIANQI ZIDONGHUA JISHU ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI



电机与拖动

刘保录 张 池 主 编
马铁信 田红宾 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

高职高专电气自动化技术专业规划教材
GAOZHI GAOZHUAN DIANQI ZIDONGHUA JISHU ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI



电机与拖动

主 编	刘保录	张 池
副主编	马铁信	田红宾
编 写	陈迎松	
主 审	胡幸鸣	



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为高职高专电气自动化技术专业规划教材。

全书共分九章, 主要内容包括绪论直流电机原理、直流电动机的电力拖动、变压器、三相异步交流电动机、三相异步电动机的电力拖动、单相异步电动机、同步电动机、控制电机和电力拖动系统中电动机的选择。附录内容包括电机中常用的磁物理量与基本定律, 电机常见故障分析与运行规程。每章安排有思考题与习题及单元检测题。

本书可作为高职高专电气自动化技术、供用电技术等专业的专业基础课教材, 也可作为成人教育教材, 还可作为工程技术人员及广大读者的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机与拖动/刘保录, 张池主编. —北京: 中国电力出版社, 2009

高职高专电气自动化技术专业规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 9090 - 1

I. 电… II. ①刘…②张… III. ①电机—高等学校: 技术学校—教材②电力传动—高等学校: 技术学校—教材 IV. TM3 TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 113516 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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 8 月第一版 2009 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13 印张 312 千字

定价 21.00 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

高职高专电气自动化技术专业规划教材

编 委 会

主 任 吕景泉

副主任 狄建雄 凌艺春 谭有广 周乐挺 郝汉琪

秘书长 李兆春

委 员 (按姓氏笔画排序)

丁学恭 马伯华 王 燕 王 薇 王永红

刘玉娟 刘玉梅 刘保录 孙成普 孙忠献

何 颖 何首贤 张 池 张永飞 张学亮

张跃东 李方园 陆锦军 陈 赵 姚永刚

姚庆文 郭 健 钱金法 常文平 韩 莉

前言

本书是为高职高专自动化等非电机专业编写的教材,全面阐述了这些专业所需的电机与电力拖动的基本理论和基础知识。本书在体系上突出三相异步电动机的应用,理论知识以应用为目的,必须、够用为度,删除繁琐的数学推导,使公式推导从简,注重物理意义的分析和应用。

全书内容包括绪论、直流电机原理、直流电动机的电力拖动、变压器、三相异步交流电动机、三相异步电动机的电力拖动、单相异步电动机、同步电动机、控制电机,电力拖动系统中电动机的选择及附录 I、II。

本书在编写过程中,按照专业教学的要求,在内容的选择 and 问题的阐述方面作了一些新的探索;在内容上兼顾了当前科学技术的发展和我国的实际情况,注重高职高专教学改革的特点,同时也考虑了后续课程对本课程的要求,以更好地为专业培养目标服务;在问题的阐述方面则力求做到叙述简明、概念清晰、突出重点;侧重于基本原理和基本概念的阐述,并强调基本理论的实际应用,教材取材力求新颖,阐述循序渐进,降低了理论难度,但仍保持教学内容的系统性、连贯性和相对稳定性,力求深入浅出,通俗易懂,便于教学。

本书充分考虑到学生已有基础知识及自学能力,鼓励学生勤于思考,掌握分析问题、解决问题的能力。针对各章内容中的重点和难点,精心编写了大量的例题、思考题与习题及单元检测题,能很好地引导学生掌握本课程的主要理论,培养学生解决工程实际问题的能力。

本书可作为高职高专专业院校、成人高校、民办高校、电大等同类院校电气自动化技术、电气技术、供用电技术、机电一体化、数控技术等专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

本书绪论及第五、七章由兰州工业高等专科学校刘保录编写,第六、八章由漯河职业技术学院张池编写、第三章及附录由兰州工业高等专科学校马铁信编写,第四、九章由河南职业技术学院田红宾编写,第一、二章由漯河职业技术学院陈迎松编写,全书由刘保录统稿。

本书由浙江机电职业技术学院胡幸鸣主审,并提出了许多宝贵的意见,在此深表谢意。

由于作者水平有限,书中缺点和错误之处在所难免,对于书中的漏误与不足,恳请读者批评指正。

编者

2009年6月

目 录

前言

绪论	1
第一章 直流电机原理	3
第一节 直流电机的基本工作原理	3
第二节 直流电机的结构和额定值	5
第三节 直流电机的电枢绕组及磁场	9
第四节 直流电机的电势、转矩及基本方程	17
第五节 直流电机换向的改善	18
本章小结	20
思考题与习题	21
单元检测题	21
第二章 直流电动机的电力拖动	24
第一节 电力拖动系统的基础	24
第二节 他励直流电动机的机械特性	26
第三节 他励直流电动机的起动	29
第四节 他励直流电动机的反转与制动	30
第五节 他励直流电动机的调速	32
本章小结	36
思考题与习题	38
单元检测题	38
第三章 变压器	41
第一节 变压器的工作原理与基本结构	41
第二节 变压器的空载运行	46
第三节 变压器的负载运行	50
第四节 变压器的标么值	55
第五节 变压器参数的测定	57
第六节 变压器的运行性能	59
第七节 三相变压器	62
第八节 变压器的并联运行	68
第九节 其他特殊用途变压器	70
本章小结	75
思考题与习题	76
单元检测题	77

第四章 三相异步交流电动机	80
第一节 三相异步电动机工作原理	80
第二节 三相异步电动机的基本结构与铭牌	83
第三节 三相异步电动机的定子绕组	89
第四节 异步电动机的空载运行	94
第五节 三相异步电动机的负载运行	97
第六节 异步电动机的功率和电磁转矩	101
第七节 异步电动机的工作特性	103
第八节 三相异步电动机的参数测定	104
本章小结	106
思考题与习题	106
单元检测题	107
第五章 三相异步电动机的电力拖动	110
第一节 三相异步电动机的机械特性	110
第二节 三相异步电动机的起动	113
第三节 三相异步电动机的制动	119
第四节 三相异步电动机的调速	124
第五节 电磁调速异步电动机	131
本章小结	133
思考题与习题	134
单元检测题	136
第六章 单相异步电动机	138
第一节 单相异步电动机的基本结构和工作原理	138
第二节 单相异步电动机的起动、反转及调速	140
本章小结	143
思考题与习题	144
第七章 同步电动机	146
第一节 同步电动机的基本结构及工作原理	146
第二节 同步电动机的电动势方程和相量图	148
第三节 同步电动机的功率平衡和转矩及功角特性	149
第四节 同步电动机的功率因数调节和 V 形曲线	152
第五节 同步电动机的起动	154
本章小结	155
思考题与习题	156
单元检测题	156
第八章 控制电机	158
第一节 伺服电动机	158
第二节 测速发电机	162
第三节 自整角机	165

第四节 旋转变压器·····	168
第五节 步进电动机·····	171
本章小结·····	175
思考题与习题·····	176
第九章 电力拖动系统中电动机的选择 ·····	178
第一节 电动机的工作制分类·····	178
第二节 电动机容量的选择方法·····	179
第三节 电动机种类、型式、电压、转速的选择·····	183
本章小结·····	184
思考题与习题·····	184
附录 I 电机中常用的磁物理量与基本定律 ·····	186
第一节 磁场的基本物理量·····	186
第二节 电机中常用的基本电磁定律·····	188
第三节 铁磁材料及铁心线圈·····	189
附录 II 电动机常见故障诊断与运行规程 ·····	192
参考文献 ·····	198

绪 论

一、电机及拖动在国民经济中的作用

电能是现代主要的能源,在工农业生产、交通运输、国防工业、信息产业及日常生活中的应用越来越广泛。而电机是与电能的生产、传输分配和使用紧密相关的能量转换装置。电力拖动系统是现代化生产过程中,实现各种生产过程电气化、自动化必不可少的传动系统。

人类早期使用的原动力是畜力、水力和风力,后来发明了蒸汽机、柴油机、汽油机,19世纪发明了电机,电机是以电磁感应和电磁力定律为基本工作原理进行电能的传递或机电能量转换的机械装置。由于电能有以下优点:

- (1) 电能可以大量生产,集中管理。
- (2) 电能的传输和分配比较方便。
- (3) 电能容易实现远距离控制,经济运行。

因此,电力拖动广泛应用于国民经济各领域。由于电动机的效率高、种类和规格多、具有各种良好的特性,电力拖动易于操作和控制,可以实现自动控制和远距离控制,所以电动机的应用越来越广泛,现在绝大部分生产机械都采用电动机进行拖动,即用电动机作为原动机,如各种机床、轧制生产线、电力机车、风机、水泵、电动工具乃至家用电器等,数不胜数。

随着自动化程度的不断提高,自动控制技术得到空前的发展,出现了各种各样的控制电机,在文教、医疗卫生、信息产业及日常生活中电机的应用将会愈加广泛。

二、电机的主要类型

电能易于转换、传输、分配和控制,是现代能源的主要形式。电机的型式和种类很多,但其工作原理都是基于电磁感应定律和电磁力定律。电动机运转需要电能,电能主要由发电机产生,为了经济地传输和分配电能,需要变压器。电机的分类方法很多,按功能进行分类,可分为:

- (1) 发电机:将机械能转换为电能。
- (2) 电动机:将电能转换为机械能。
- (3) 变压器:将电能变换为不同电压等级的电能。
- (4) 控制电机:作为控制系统中的元件。

发电机把机械能转化为电能,而电能的生产集中在火力、水力、核能和风力发电厂进行。为了减少输电中的能量损失,远距离输电均采用高电压形式,电厂发出的电能经变压器升压,然后经高压输电线路送达目的地后,再经变压器降压供给用户。电能转换为机械能主要由电动机来完成。

三、电力拖动系统的组成

在现代化工业生产过程中,为了实现各种生产工艺过程,需要使用各种各样的生产机械。各种生产机械的运转,一般采用电动机来拖动,这种用电动机作为原动机来拖动生产机

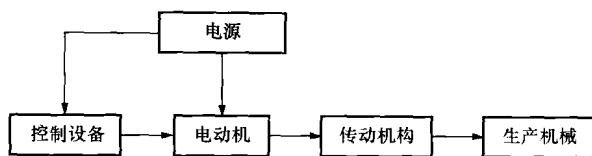


图 0-1 电力拖动系统的组成

械运行的系统，称为电力拖动系统。电力拖动系统通常由电动机、传动机构、生产机械、控制设备和电源五个部分组成，如图 0-1 所示。

电动机把电能转换成机械能，通过传动机构（或直接）驱动生产机械工作。传动机构是把电动机的运动经过中间变速或变换运动方式后，再传给生产机械（有些情况下，电动机直接拖动生产机械，而不需要传动机构）。生产机械是执行某一生产任务的机械设备，是电力拖动的对象。控制设备由各种控制元器件组成，用以控制电动机，从而实现了对生产机械的控制。为了向电动机及电气控制设备供电，电源是不可缺少的。

按照电动机种类的不同，电力拖动分为直流电动机拖动和交流电动机拖动两大类。

四、教材内容与课程性质

“电机与拖动”是把电机学和电力拖动基础两门课程有机结合而成的一门课程。在工业自动化专业与电气工程及其自动化专业中，电机与拖动是一门十分重要的专业基础课或技术基础课，它在整个专业教学计划中起着承前启后的作用，是后续课程“自动控制原理”、“工厂电气控制设备”、“电力拖动自动控制系统”、“电力电子技术”等课程的重要基础。它主要研究电机拖动系统的基本理论问题，分析研究直流电机、变压器、异步电动机和同步电动机的简单结构、原理、基本电磁关系和运行特性；并联系生产实际，从生产机械工作的要求出发，重点介绍交直流拖动系统的动静态运行特性，为学习后续专业课打下坚实基础。因此，课程既具有较强的基础性，又带有专业性。

因此，在学习过程中应注意以下几点：

（1）要学好本课程，必须掌握扎实的电路与磁路知识；注重理论联系实际，加强实验、实践性环节的学习。

（2）要有工程概念，学会抓主要矛盾，电机是电、磁、力、热等的综合体，相互联系、相互制约，需综合考虑，实际应用中通常采用工程问题的分析方法作近似处理。

（3）注意学习方法，重视能力培养；重点掌握基本概念、基本理论、基本方法的学习，加深对物理概念和基本电磁关系的理解，切忌死记或脱离物理概念而记数学公式。

直流电机原理

本章主要介绍直流电机的基本结构、工作原理以及绕组的构成；讨论直流电机的感应电动势的产生条件、性质、方向和电磁转矩；最后讲述了改善换向的措施。

旋转电机是一种机电能量转换的装置，把电能转换为机械能的称为电动机；把机械能转换为电能的称为发电机。电流有交、直流之分，所以旋转电机也有直流电机与交流电机两大类。直流电动机的调速性能好、起动转矩较大。

第一节 直流电机的基本工作原理

直流电机分为直流电动机和直流发电机两大类。直流电机的工作原理可以通过直流电机的模型加以说明。

一、直流电机的模型结构

图 1-1 所示为直流电机的物理模型。在图 1-1 中，N、S 为磁极，磁极固定不动，称为直流电机的定子。abcd 是固定在可旋转导磁圆柱体上的线圈，线圈连同导磁圆柱体是直流电机可转动部分，称为电机转子（又称电枢）。线圈的首末端 a、d 连接到两个相互绝缘并可随线圈一同转动的电片，该导电片称为换向片。转子线圈与外电路的连接是通过放置在换向片上固定不动的电刷进行的。在定子与转子间有间隙存在，称为空气隙，简称气隙。

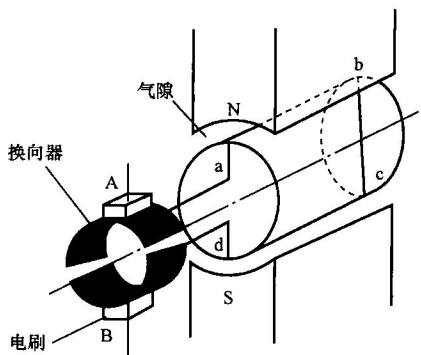


图 1-1 直流电机的物理模型

二、直流发电机基本工作原理

直流发电机工作时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。

在图 1-2 所示直流发电机的工作原理示意图中，当有原动机拖动转子以一定的转速逆时针旋转时，根据电磁感应定律，线圈 abcd 中将产生感应电动势。导体中感应电动势的方向可用右手定则确定。在逆时针旋转情况下，如图 1-2 (a) 所示，导体 ab 在 N 极下，感应电动势的极性为 a 点高电位、b 点低电位；导体 cd 在 S 极下，感应电动势的极性为 c 点高电位、d 点低电位，在此状态下电刷 A 的极性为正，电刷 B 的极性为负。如图 1-2 (b) 所示，当线圈旋转 180°，导体 ab 在 S 极下时，感应电动势的极性为 a 点低电位、b 点高电位，而导体 cd 在 N 极下，感应电动势的极性为 c 点低电位、d 点高电位，此时虽然导体中的感应电动势方向已改变，但由于原来与电刷 A 接触的换向片已经与电刷 B 接触，而与电刷 B 接触的换向片同时换到与电刷 A 接触，电刷 A 的极性仍为正，电刷 B 的极性仍为负。

从图 1-2 中可看出，和电刷 A 接触的导体总是位于 N 极下，和电刷 B 接触的导体总是

位于 S 极下，因此电刷 A 的极性总为正，而电刷 B 的极性总为负，在电刷的两端可获得直流电动势。

实际直流发电机的电枢是根据实际应用情况需要有多多个线圈。线圈分布于电枢铁心表面的不同位置上，并按照一定的规律连接起来，构成电机的电枢绕组。磁极也是根据需要 N、S 极交替放置多对。

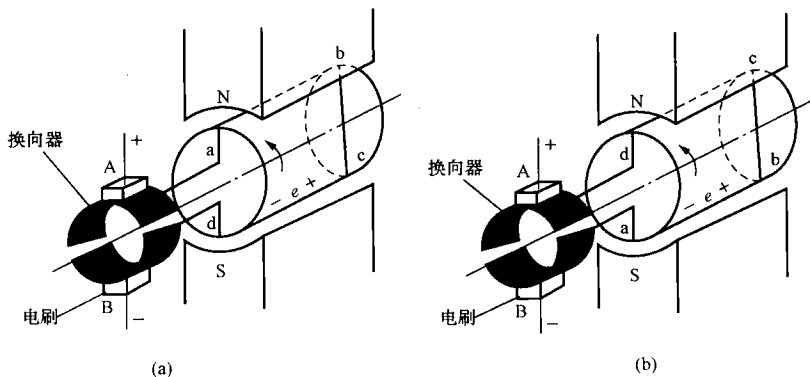


图 1-2 直流发电机的工作原理示意图

三、直流电动机基本工作原理

直流电动机的工作原理建立在毕-萨电磁定律的基础上。

图 1-3 所示为载流导体在磁场内受到的电磁力，若磁场与载流导体互相垂直，作用在导体上的电磁力为

$$f = BIl \quad (1-1)$$

式中， B 为导体所在处的磁通密度， Wb/m^2 ； l 为导体 ab 或 cd 的有效长度， m ； I 为导体中流过的电流， A ； f 为电磁力， N 。

电磁力 f 的方向可用左手定则判定。

图 1-4 所示为直流电动机的工作原理示意图，把电刷 A、B 接到一直流电源上，电刷 A 接电源的正极，电刷 B 接电源的负极，此时在电枢线圈将有电流流过。在图 1-4 (a) 所示的情况下，位于 N 极下的导体 ab 受力方向从右向左，而位于 S 极下的导体 cd 受力方向从

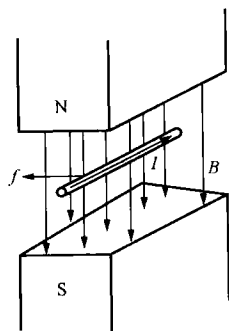


图 1-3 载流导体在磁场内受到的电磁力

左向右。该电磁力与转子半径之积即为电磁力矩，该转矩的方向为逆时针。当电磁转矩大于阻力矩时，线圈按逆时针方向旋转。当电枢旋转到图 1-4 (b) 所示位置时，原位于 S 极下的导体 cd 转到 N 极下，其受力方向变为从右向左；而原位于 N 极下的导体 ab 转到 S 极下，导体 ab 受力方向变为从左向右，该转矩的方向仍为逆时针方向，线圈在此转矩作用下继续按逆时针方向旋转。这样虽然导体中流通的电流为交变的，但 N 极下的导体所受力的方向和 S 极下的导体所受力的方向并未发生变化，电动机在此方向不变的转矩作用下转动。

同直流发电机相同，实际的直流电动机的电枢并非单一线圈，磁极也并非一对。

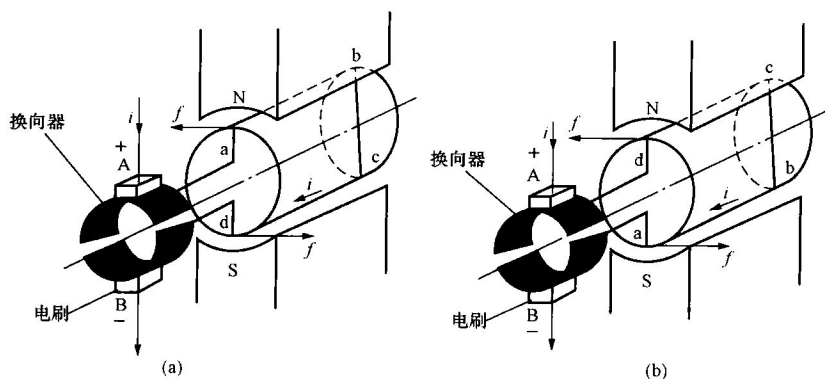


图 1-4 直流电动机的工作原理示意图

四、电机的可逆原理

从上述基本电磁情况来看：在直流电机的两电刷端上，加上直流电压，将电能输入电枢，机械能从电机轴上输出，将电能转换成机械能而成为电动机；如用原动机拖动直流电机的电枢，而电刷上不加直流电压，则电刷端可以引出直流电动势作为直流电源，可输出电能而成为发电机。同一台电机，能作电动机或作发电机运行的这种原理，在电机理论中称为可逆原理。

第二节 直流电机的结构和额定值

一、直流电机的结构

直流电机可作为电动机运行，也可作为发电机运行。其结构基本是相同的，即都有可旋转部分和静止部分。可旋转部分称为转子，静止部分称为定子。小型直流电机的结构如图 1-5 所示，其剖面结构如图 1-6 所示。

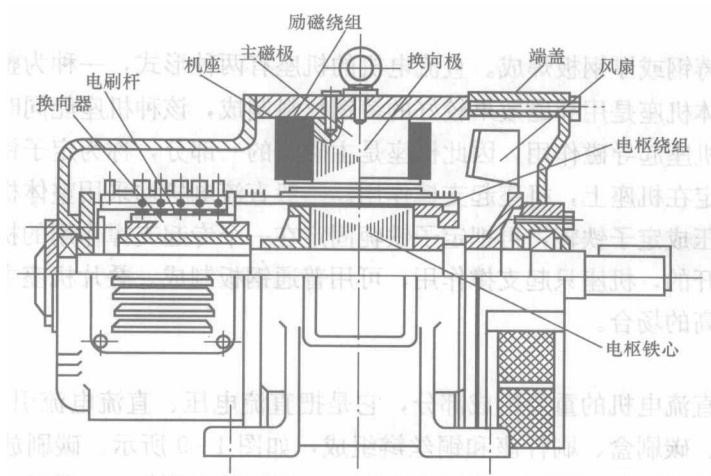


图 1-5 小型直流电机的结构

(一) 定子部分

定子主要由主磁极、换向极、机座、电刷装置和端盖组成。

1. 主磁极

主磁极的作用是产生恒定、有一定空间分布形状的气隙磁通密度。主磁极由主磁极铁心和放置在铁心上的励磁绕组构成。主磁极铁心分成极身和极靴，极靴的作用是使气隙磁通密度的空间分布均匀并减小气隙磁组，同时极靴对励磁绕组也起支撑作用。为减小涡流损耗，主磁极铁心用 1.0~1.5mm 厚的低碳钢板冲成一定形状，用铆钉把冲片铆紧，然后固定在机座上。主磁极上的线圈是用来产生主磁通的，称为励磁绕组。主磁极的结构如图 1-7 所示。

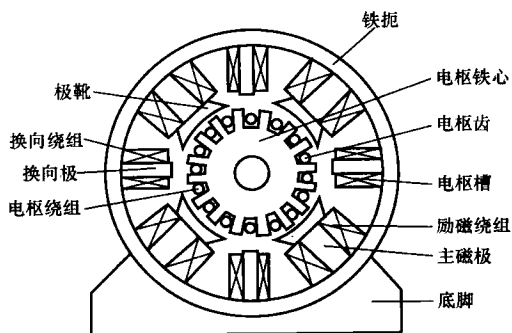


图 1-6 小型直流电机的剖面图

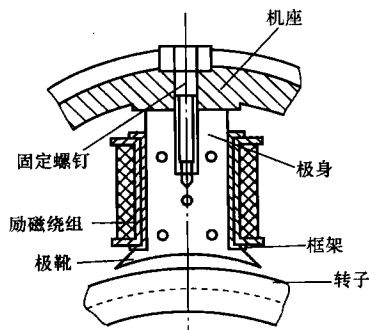


图 1-7 直流电机主磁极结构

当给励磁绕组通入直流电时，各主磁极均产生一定极性，相邻两主磁极的极性是 N、S 交替出现的。

2. 换向极

换向极又称附加极或间极，其结构如图 1-8 所示，其作用是改善换向。换向极的铁心比主磁极的简单，一般用整块钢板制成，在其上放置换向极绕组，换向极安装在相邻的两主磁极之间。换向极绕组与电枢绕组串联。

3. 机座

机座通常由铸钢或厚钢板焊成。直流电机的机座有两种形式，一种为整体机座，另一种为叠片机座。整体机座是用导磁效果较好的铸钢材料制成，该种机座能同时起到导磁和机械支撑作用。由于机座起导磁作用，因此机座是主磁路的一部分，称为定子铁轭。主磁极、换向极及端盖均固定在机座上，机座起支撑作用。一般直流电机均采用整体机座。叠片机座是用薄钢板冲片叠压成定子铁轭，再把定子铁轭固定在一个专起支撑作用的机座里，这样定子铁轭和机座是分开的，机座只起支撑作用，可用普通钢板制成。叠片机座主要用于磁通变化快、调速范围较高的场合。

4. 电刷装置

电刷装置是直流电机的重要组成部分，它是把直流电压、直流电流引入或引出的装置。电刷装置由碳刷、碳刷盒、刷杆座和铜丝辫组成，如图 1-9 所示。碳刷放在碳刷盒内，用压紧弹簧压紧在换向器上，碳刷盒固定在刷杆上，刷杆装在刷架上，彼此之间都绝缘。刷架装在端盖或轴承内盖上，调整好位置以后，将它固定。

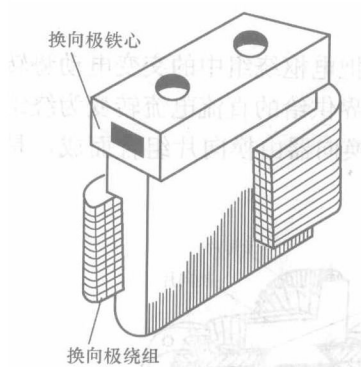


图 1-8 换向极结构

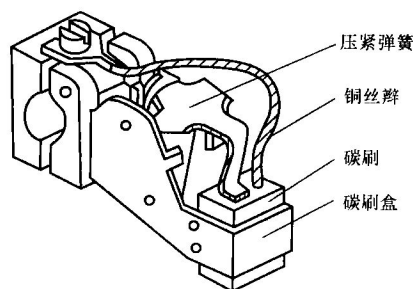


图 1-9 电刷的结构

5. 端盖

电机中的端盖主要起支撑作用。端盖固定于机座上，其上放置轴承支撑直流电机的转轴，使直流电机能够旋转。

(二) 转子部分

直流电机的转子是电机的转动部分，由电枢铁心、电枢绕组、换向器、电机转轴和轴承等部分组成。

1. 电枢铁心

电枢铁心有两个用途，一个是作为主磁路的主要部分，另一个是嵌放电枢绕组。为减小当电机旋转时铁心中的磁通方向发生变化引起磁滞损耗和涡流损耗，电枢铁心通常采用 0.5mm 厚的低硅钢片或冷轧硅钢片冲压成型，为减小损耗在硅钢片两侧涂绝缘漆，为放置绕组在硅钢片上冲出转子槽。冲好的硅钢片叠装成电枢铁心。图 1-10 所示小型直流电机的电枢冲片形状和电枢铁心装配图。

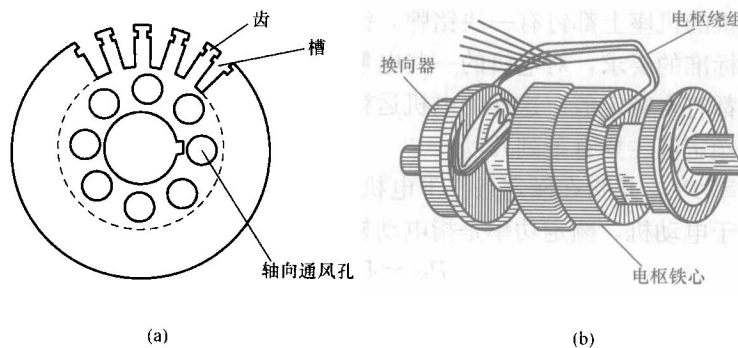


图 1-10 小型直流电机的电枢冲片形状和电枢铁心装配图
(a) 电枢冲片形状；(b) 电枢铁心装配图

2. 电枢绕组

电枢绕组是由许多按一定规律连接的线圈组成，是直流电机的主要电路部分。对于小型电机通常采用铜导线绕制，对于大中型电机常采用成型线圈。绕制好的绕组或成型绕组放置在电枢铁心的槽内。

3. 换向器

换向器又叫整流子。对于发电机，换向器的作用是把电枢绕组中的交变电动势转变为直流电动势向外部输出直流电压；对于电动机，它是把外界供给的直流电流转变为绕组中的交变电流以使电机旋转。换向器的结构如图 1-11 所示。换向器由换向片组合而成，是直流电机的关键部件，也是最薄弱的部分。

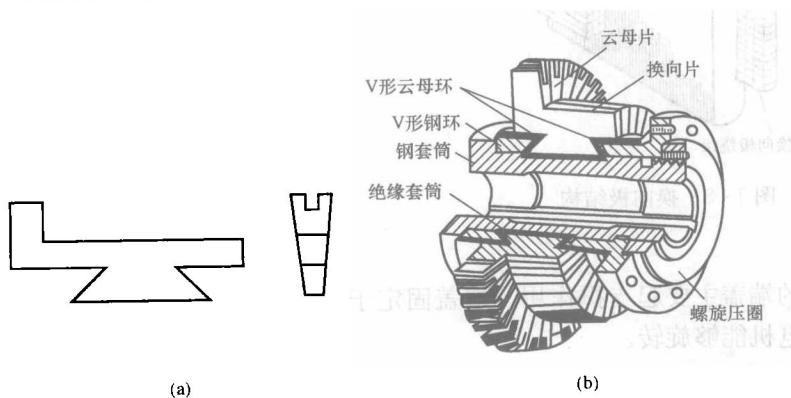


图 1-11 换向器的结构
(a) 换向片；(b) 换向器

换向器采用导电性能好、硬度大、耐磨性能好的紫铜或铜合金制成。换向片的底部作成燕尾形状，各换向片拼成圆筒形套入钢套筒上，相邻换向片间以 0.6~1.2mm 厚的云母片作为绝缘，换向片下部的燕尾嵌在两端的 V 形钢环内，换向片与 V 形云母片绝缘，最后用螺旋压圈压紧。换向器固定在转轴的一端。

二、直流电机的额定值

每台直流电机的机座上都钉有一块铭牌。铭牌上标注的数据叫做额定值。额定值是由电机制造厂按国家标准的要求，对电机的一些电量或机械量所规定的数值。若电机运行时，这些电量和机械量都符合额定值，这样的电机运行情况称为额定运行。

直流电机的额定值主要有以下几项：

(1) 额定功率 P_N ：是指在额定条件下电机所能输出的功率。额定功率对电动机和发电机是不同的。对于电动机，额定功率是指电动机轴上输出的额定机械功率，即

$$P_N = U_N I_N \eta \quad (1-2)$$

式中， η 为电动机的额定效率。

对于发电机，额定功率是指电刷间输出的额定电功率，即

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

额定功率的单位为 kW。

(2) 额定电压 U_N ：是指在额定运行条件下，电机出线端的平均电压。对于电动机是指输入额定电压，对于发电机是指输出额定电压。电压的单位为 V。

(3) 额定电流 I_N ：是指电机在额定电压情况下，运行于额定功率，此时的电流值为电机的额定电流。电流的单位为 A。

(4) 额定转速 n_N ：是指对应于额定电压、额定电流，电机运行于额定功率时所对应的

转速。转速的单位为 r/min 。

(5) 额定励磁电流 I_N ：是指对应于额定电压、额定电流、额定转速及额定功率时的励磁电流。

(6) 励磁方式：是指直流电机的励磁线圈与其电枢线圈的连接方式。根据电枢线圈与励磁线圈的连接方式不同，直流电机励磁有并励、串励和复励等方式。

在电机运行时，若所有的物理量均与其额定值相同，则称电机运行于额定状态。若电机的运行电流小于额定电流，称电机为欠载运行；若电机的运行电流大于额定电流，则称电机为过载运行。电机长期欠载运行使电机的额定功率不能全部发挥作用，造成浪费；长期过载运行会缩短电机的使用寿命，因此长期过载和欠载都不好。电机最好运行于额定状态或额定状态附近，此时电机的运行效率、工作性能等均比较好。

第三节 直流电机的电枢绕组及磁场

电枢绕组是直流电机的核心部分。电枢绕组放置在电机的转子上，它实现电能与机械能的转换。即电动机由电能转换成机械能，发电机由机械能转换成电能。

电枢绕组是由多个形状相同的绕组元件，按照一定的规律连接起来组成的。根据连接规律的不同，绕组可分为单叠绕组、单波绕组、复叠绕组、复波绕组及混合绕组等几种形式。

一、绕组中常用的基本知识

元件：称构成绕组的线圈为绕组的元件，元件分单匝和多匝两种。

元件的首末端：每一个元件不管是单匝还是多匝，均引出两根线与换向片相连，其中一根叫首端，另一根叫末端。

极距：相邻主磁极间的距离称为极距。极距用 τ 表示，其计算式为

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p} \quad (1-4)$$

式中， D_a 为电枢铁心外直径； p 为直流电机磁极对数。

若极距用槽数表示，则

$$\tau = \frac{Z}{2p} \quad (1-5)$$

式中， Z 为机电枢槽数。

叠绕组：是指相串联的后一个元件端接部分紧叠在前一个元件端接部分的上面。

波绕组：是指相串联的两个元件像波浪似的前进。

图 1-12 所示为直流电机绕组中的叠绕组、波绕组、单匝元件及多匝元件。

节距：是指被连接的两个元件边或换向片之间的距离，节距用跨过的元件边数或换向片数表示。节距又分为第一节距、第二节距、合成节距和换向节距四种。

第一节距：一个元件的两个有效边在电枢表面跨过的元件边数称为第一节距。第一节距用 y_1 表示。

第二节距：连至同一换向片上的两个元件中第一个元件的下层边与第二个元件的上层边之间的距离。第二节距用 y_2 表示。