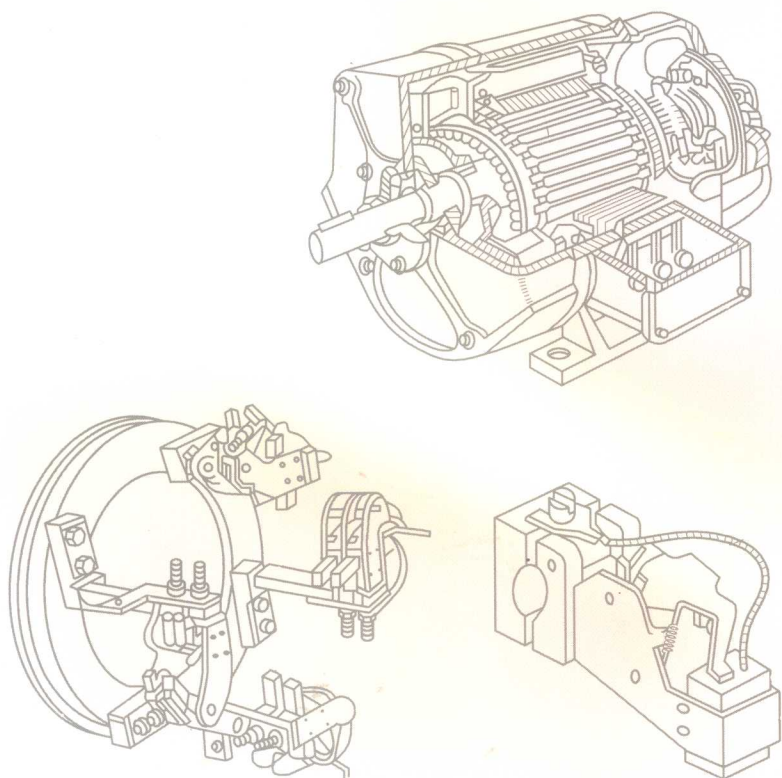


中国煤炭教育协会
教学与教材
建设委员会

中等职业教育规划教材
中国煤炭教育协会职业教育教学与教材建设委员会审定

矿山电机拖动与控制

● 主 编 梁南丁



煤炭工业出版社

中等职业教育规划教材
中国煤炭教育协会职业教育教学与教材建设委员会审定

矿山电机拖动与控制

主 编 梁南丁
副主编 钟 诚
参 编 董德明 郭建华 郭 娜
张会娜 李宏慧 王立亚

煤炭工业出版社

·北 京·

图书在版编目 (CIP) 数据

矿山电机拖动与控制/梁南丁主编. —北京: 煤炭工业出版社, 2009. 7

中等职业教育规划教材

ISBN 978 - 7 - 5020 - 3448 - 1

I. 矿… II. 梁… III. ①矿山 - 电机 - 电力传动 - 专业学校 - 教材②矿山 - 电机 - 控制系统 - 专业学校 - 教材
IV. TD614

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 004075 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
北京房山宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 18 插页 3
字数 421 千字 印数 1—5,000
2009 年 7 月第 1 版 2009 年 7 月第 1 次印刷
社内编号 6253 定价 36.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

内 容 提 要

本书根据教育部批准执行的《中等职业学校矿山机电专业技能型紧缺人才培养指导方案》的要求编写，内容包括：直流电动机、变压器、交流异步电动机、常用低压电器、电气控制系统的基本控制电路、矿山固定机械设备的电气控制，以及矿山运输设备的电气控制等。

本书是中等职业教育规划教材，可作为中等职业学校矿山机电专业的教材或参考资料，也可作为工矿企业从事矿山电气控制的工程技术人员、技术工人的培训教材和参考书。

煤炭中等专业教育分专业教学与教材建设委员会

(煤矿机电类专业)

主 任 何富贤

副主任 何全茂 刘秀艳 郭 雨 卢芳革

委 员 (按姓氏笔画排序)

王纪风 王国文 王瑞捧 田树钰 关书安 刘英才
刘胜利 朱庆华 余升平 吴文亮 李 佳 陆 红
姜宏勋 郝敬豪 钟 诚 潘连彪 魏 良 魏晋文

前 言

为贯彻《教育部办公厅、国家安全生产监督管理总局办公厅、中国煤炭工业协会关于实施职业院校煤炭行业技能型紧缺人才培养培训工程的通知》（教职成厅〔2008〕4号）精神，加快煤炭专业技能型人才的培养，满足煤炭行业发展对人才的迫切需求，依托煤炭职业学（院）校建立煤炭行业技能型人才培养培训基地，培养面向煤矿生产企业一线，具有与本专业岗位群相适应的文化水平和良好的职业道德，了解矿山企业生产的全过程，掌握本专业的基本专业知识和技能，具有从事矿山机电设备的生产运行、维护检修的中级技能型人才，中国煤炭教育协会组织煤炭职业学（院）校专家、学者编写了机电工程配套系列教材。

《矿山电机拖动与控制》一书是矿山机电专业中等职业教育规划教材中的一本，可作为中等职业学校机电专业矿山电机拖动与控制课程教学用书，也可作为在职人员培养提高的培训教材。

本书由河南平顶山工业职业技术学院梁南丁主编并统稿；江苏徐州机电工程学校钟诚任副主编，其编写了第三章；河南平顶山工业职业技术学院张会娜编写了第一章；河南平顶山工业职业技术学院董德明编写了第二章；张会娜、王立亚合编第七章；宁夏第一工业学校郭建华编写了第四章；河南工程技术学校郭娜编写了第五章；河南平顶山工业职业技术学院梁南丁、王春莹、李宏慧合编第六章。

本书在编写过程中得到河南平顶山煤业集团公司及各生产厂矿的大力支持，在此表示衷心地感谢。

中国煤炭教育协会职业教育
教学与教材建设委员会
2009年7月

目 次

第一章 直流电机	1
第一节 直流电机的工作原理与结构	1
第二节 直流电机的磁场	9
第三节 直流电机的感应电动势和电磁转矩	15
第四节 直流电动机的工作特性	16
第二章 变压器	21
第一节 变压器的工作原理与结构	21
第二节 变压器的运行原理	25
第三节 变压器的运行特性	37
第四节 三相变压器	39
第五节 其他用途的变压器	46
第三章 交流异步电动机	53
第一节 基本工作原理与结构	53
第二节 交流异步电动机的机械特性	57
第三节 三相异步电动机的启动	60
第四节 交流异步电动机的制动	61
第五节 交流异步电动机的调速	64
第四章 常用低压电器	70
第一节 低压电器的基础知识	70
第二节 接触器	75
第三节 控制继电器	78
第四节 熔断器	90
第五节 手动电器及主令电器	95
第六节 自动开关	106
第七节 自整角机	111
第五章 电气控制系统的基本控制电路	114
第一节 电气制图及电气控制系统图	114
第二节 三相鼠笼型异步电动机全压启动控制电路	120

第三节	三相鼠笼型异步电动机减压启动控制电路·····	124
第四节	绕线型异步电动机启动控制电路·····	129
第五节	三相异步电动机制动控制电路·····	135
第六节	同步电动机的启动控制电路·····	140
第七节	直流电动机的启动和制动控制电路·····	143
第六章	矿山固定机械设备的电气控制·····	148
第一节	矿井通风、压气、排水设备的电气控制·····	148
第二节	矿井提升设备的电气控制·····	183
第七章	矿山运输设备的电气控制·····	214
第一节	矿山运输设备概述·····	214
第二节	矿用输送机的软启动方式和电气设备的选择·····	215
第三节	钢丝绳芯带式输送机电气控制·····	224
第四节	钢丝绳牵引带式输送机电气控制·····	232
第五节	矿用电机车电气设备及其控制·····	255
参考文献	·····	277

第一章 直流电机

第一节 直流电机的工作原理与结构

一、直流电机的工作原理

直流电机的工作原理是基于电磁感应定律和电磁力定律，即绕组切割磁力线产生感应电动势和绕组电流在磁场中受力而产生电磁转矩。

1. 直流发电机的工作原理

图 1-1 所示为直流发电机的物理模型，N 和 S 是一对固定的磁极，为直流电机的定子。磁极之间有一个可以转动的铁质圆柱体，称为电枢铁芯。abcd 是固定在铁芯表面的电枢线圈，线圈和铁质圆柱体是直流电机可转动部分，称为电机转子。线圈的首末端 a、d 分别接到相互绝缘的两个弧形铜片上，弧形铜片称为换向片，它们的组合体称为换向器。在换向器上放置固定不动而与换向片滑动接触的电刷 A 和 B，线圈 abcd 通过换向器和电刷接通外电路。在定子与转子间有间隙存在，称为空气隙，简称气隙。

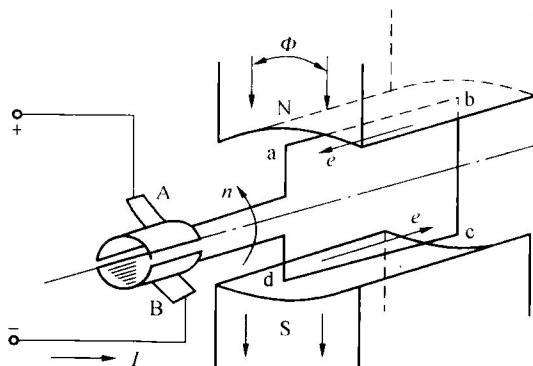


图 1-1 直流发电机的工作原理

在模型中，当有原动机拖动转子以一定的转速逆时针旋转时，根据电磁感应定律可知，导体 ab 和 cd 分别切割 N 极和 S 极下的磁感应线，将产生感应电动势。感应电动势的方向用右手定则确定：导体 ab 在 N 极下，感应电动势的方向由 b 指向 a；导体 cd 在 S 极下，感应电动势的方向由 d 指向 c，所以电刷 A 为正极性，电刷 B 为负极性。当线圈旋转 180° 后，导体 cd 转至 N 极下，感应电动势的方向由 c 指向 d，电刷 A 与 d 所连换向片接触，仍为正极性；导体 ab 转至 S 极下，感应电动势的方向变为由 a 指向 b，电刷 B 与 a 所连换向片接触，仍为负极性。

由上述分析可知，虽然直流发电机电枢线圈中的感应电动势的方向是交变的，但通过换向器和电刷的作用，电刷 A 的极性总为正，而电刷 B 的极性总为负。在电刷两端可获

得方向不变的直流电动势。

实际直流发电机的线圈分布于电枢铁芯表面的不同位置上，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。

2. 直流电动机的工作原理

若把电刷 A、B 接到直流电源上，电刷 A 接电源的正极，电刷 B 接电源的负极，则线圈 abcd 中将有电流流过。此时，模型作直流电动机运行。

如图 1-2a 所示，在导体 ab 中，电流由 a 流向 b；在导体 cd 中，电流由 c 流向 d。载流导体 ab 位于 N 极下，cd 位于 S 极下，均处于 N 和 S 极之间的磁场中，导体受到电磁力的作用。电磁力的方向用左手定则确定，该电磁力与转子半径之积即为电磁转矩，转矩的方向为逆时针方向，使整个电枢逆时针方向旋转。当电枢旋转 180°，导体 cd 转到 N 极下，cd 中的电流变为由 d 流向 c；导体 ab 转到 S 极下，ab 中的电流变为由 b 流向 a，如图 1-2b 所示。用左手定则判别可知，电磁转矩的方向仍是逆时针方向，线圈在此转矩作用下继续按逆时针方向旋转。

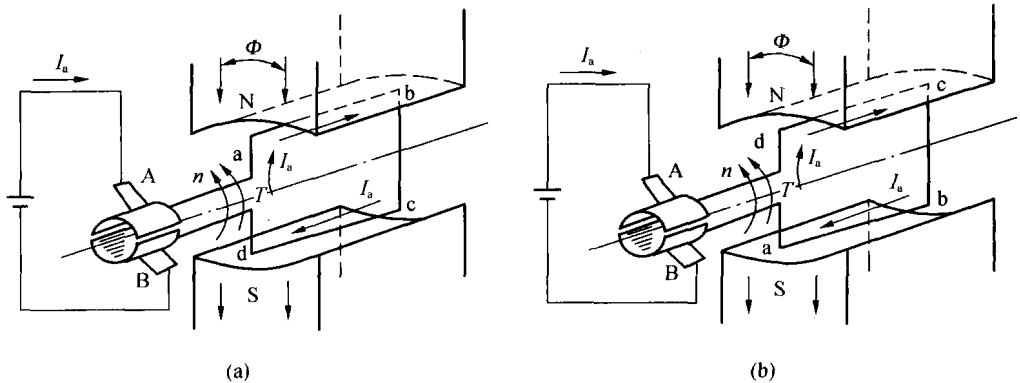


图 1-2 直流电动机的工作原理

由上述分析可知，虽然导体中流过的电流为交变的，但由于换向器和电刷的作用，N 极下的导体受力方向和 S 极下的导体受力方向并未发生变化，电枢产生的电磁转矩的方向恒定不变，电动机在此方向不变的转矩作用下转动。

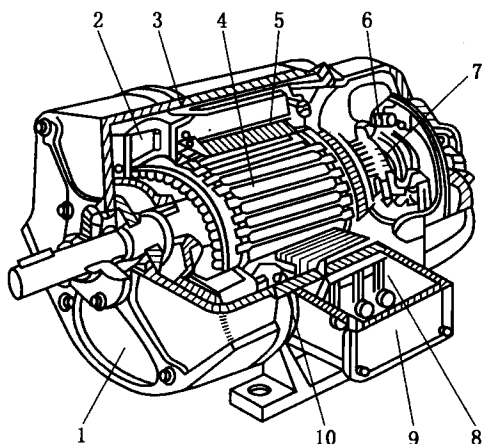
同直流发电机相同，实际直流电动机的电枢并非单一线圈，电枢圆周上均匀地嵌放许多线圈，相应的换向器由许多换向片组成，磁极也并非一对。

二、直流电机的结构

直流电动机和直流发电机在主要结构上基本相同，都由定子和转子两大部分组成。常用的中小型直流电机结构及其组成部件如图 1-3 和图 1-4 所示。直流电机主要由定子、转子、电刷装置、端盖、轴承、通风冷却系统等部件组成。

1. 定子

定子由机座、主磁极、换向极、电枢和励磁线圈等组成，其剖面结构如图 1-5 所示。它的主要作用是产生主磁场和作电机的机械支架。



1—端盖；2—风扇；3—机座；4—电枢；5—主磁极；6—刷架；
7—换向器；8—接线板；9—出线盒；10—换向磁极

图 1-3 直流电机基本结构

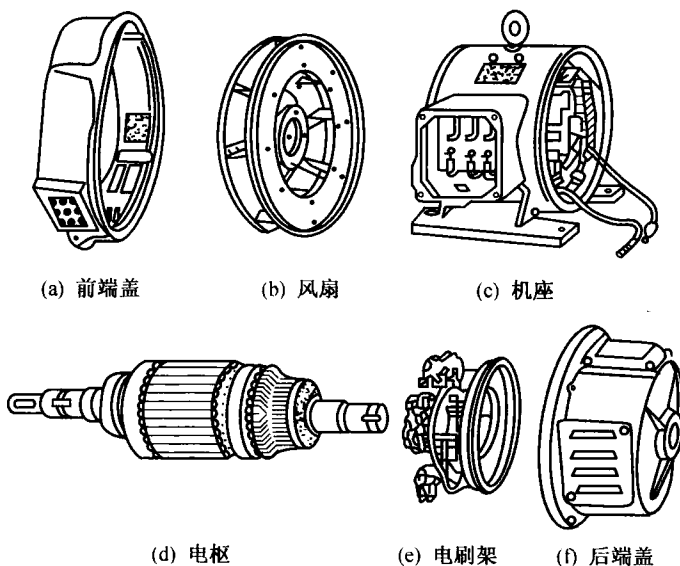
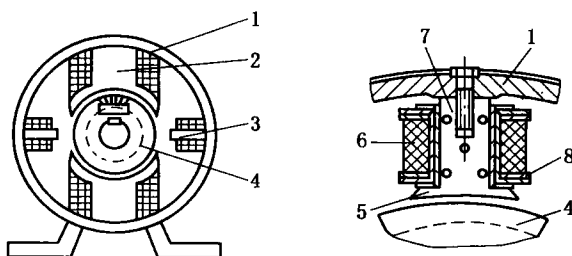


图 1-4 直流电机的组成部件



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

图 1-5 直流电机定子剖面结构

1) 主磁极

主磁极的作用是产生气隙磁场。主磁极由铁芯和励磁绕组两部分组成，通过螺钉固定在机座上，如图 1-5 所示。

为减小涡流损耗，主磁极铁芯通常用 1~1.5mm 厚的钢板冲片叠压铆紧而成，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。极靴的作用是使气隙磁场分布比较理想，同时对励磁绕组也起支撑作用。

励磁绕组是用来产生主磁通的，由绝缘铜线绕制而成。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

两相邻主磁极之间的小磁极称为换向极，又称附加极或间极，其作用是改善直流电机的换向，减小电机运行时电刷与换向器之间可能产生的火花。换向极由换向极铁芯和换向极绕组组成。换向极的铁芯比主磁极的铁芯简单，一般用整块钢板制成，在其上放置换向极绕组。换向极的数目与主磁极数目相等。

3) 机座

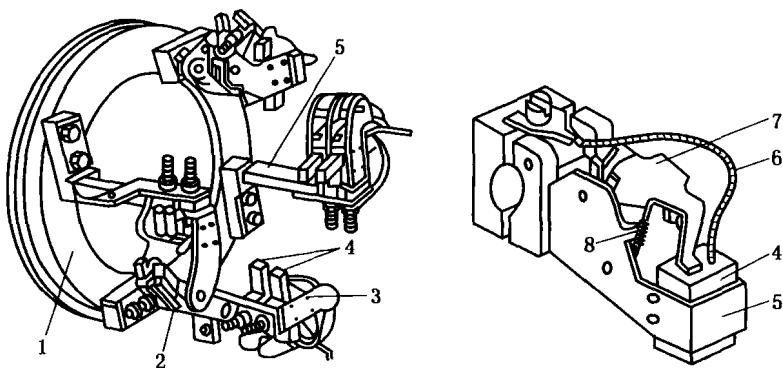
机座一般为铸钢件或由钢板焊接而成，具有足够的机械强度和良好的导磁性能。机座一方面用来固定主磁极、换向极和端盖，对整个电机起支撑和固定作用；另一方面也是电机主磁路的一部分，用于构成磁极之间的通路。磁通通过的部分称为磁轭。

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

4) 电刷装置

电刷装置是直流电机的重要组成部分，主要用于引入或引出直流电压和直流电流，通过该装置把电机电枢中的电流与外部电路相连或把外部电源与电机电枢相连。

电刷装置主要由电刷、刷握、刷杆、刷杆座及压紧弹簧片等组成。电刷一般由导电耐磨的石墨材料制成，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，如图 1-6 所示。刷握固定在刷杆上，刷杆固定在圆环形的刷杆座上，相互之间绝缘。刷杆座装在端盖或轴承内盖上，可以转动调整电刷在换向器表面上的位置，调好以后加以固定。刷辫的作用是将电流从电刷引入或引出。



1—刷杆座；2—弹簧压板；3—刷杆；4—电刷；5—刷握；6—刷辫；7—压指；8—弹簧

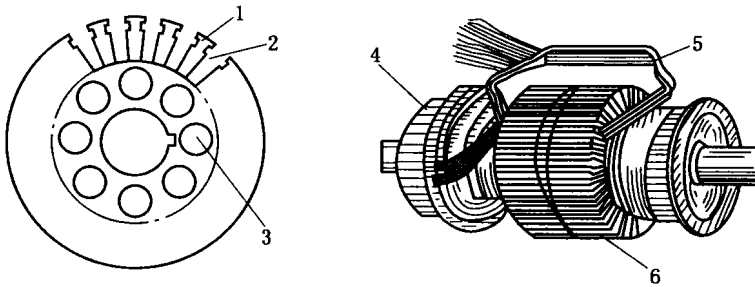
图 1-6 电刷装置

2. 转子

转子，又称电枢，主要由电枢铁芯、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等组成。它的作用是产生电磁转矩或感应电动势，实现机电能量的转换。

1) 电枢铁芯

电枢铁芯是直流电机主磁路的一部分，对放置在其上的电枢绕组起支撑作用。为了减小涡流和磁滞损耗，电枢铁芯常采用 $0.35 \sim 0.5\text{mm}$ 厚的相互绝缘的硅钢片冲制叠压而成。有时为了加强电机冷却，在电枢铁芯上冲制轴向通风孔，在较大型电机的电枢铁芯上还布置有径向通风槽，用通风槽将铁芯沿轴向分成数段。电枢铁芯沿圆周方向有均匀分布的槽用以嵌放电枢绕组，电枢铁芯及冲片形状如图1-7所示。

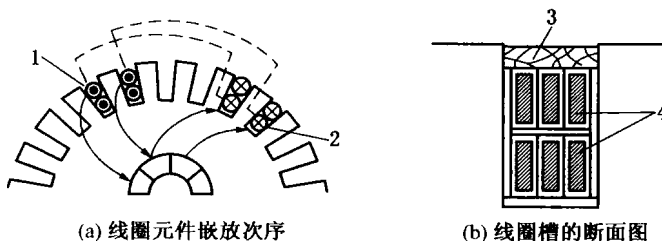


1—齿；2—槽；3—轴向通风孔；4—换向器；5—电枢绕组；6—电枢铁芯

图1-7 电枢冲片和电枢铁芯

2) 电枢绕组

电枢绕组是电机产生电磁转矩或感应电动势，进行能量变换的关键部件。电枢线圈用绝缘的圆铜线或扁铜线绕制成一定的形状，放置于电枢铁芯槽中（线圈与槽之间有槽绝缘），并用非磁性槽楔封口，线圈的出线端按一定规律与换向器的换向片相连，构成电枢绕组。直流电机的电枢绕组多为双层绕组，线圈分上、下两层嵌入铁芯槽内，上、下层之间有层间绝缘，如图1-8所示。



1—上层边；2—下层边；3—槽楔；4—元件边

图1-8 元件边在槽内的放置情况

电枢线圈的边是产生感应电动势或电磁转矩的有效元件，简称元件，元件数用 S 表示。每个元件的首尾端按一定规律与换向片连接，使电枢绕组形成一个闭合绕组。电枢绕

组每个元件的匝数 N 可以是单匝，也可以是多匝。按照元件首尾端与换向片连接规律的不同，电枢绕组可分为叠绕组和波绕组，叠绕组又有单叠和复叠之分，波绕组也有单波和复波之分，如图 1-9 所示。

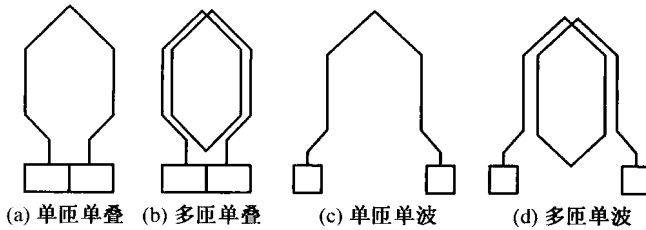


图 1-9 直流电机的绕组

单叠绕组和单波绕组是直流电机电枢绕组的基本形式，由于篇幅有限，本书只对单叠绕组作详细说明。下面先介绍绕组中常用的基本知识。

每一个元件有两个元件边，每片换向片又总是接一个元件的上层边和另一个元件的下层边，所以元件数 S 总等于换向片数 K ，即 $S = K$ 。每一个元件有两个元件边，而每个电枢槽分上、下两层嵌放两个元件边，所以元件数 S 又等于槽数 Z ，即 $S = Z$ 。对于小容量电机，电枢直径小，电枢铁芯外圆不宜开太多槽时，往往在一个槽的上层和下层各放 u 个元件边，即把一个实槽当成 u 个虚槽使用。虚槽数 Z_u 与实槽数 Z 之间的关系为 $Z_u = uZ = S = K$ 。为分析方便起见，本书中均设 $u = 1$ 。

表征电枢绕组元件本身和元件之间连接规律的数据为节距，直流电机电枢绕组的节距有第一节距 y_1 、第二节距 y_2 、合成节距 y 和换向器节距 y_k 共 4 种，如图 1-10 所示。

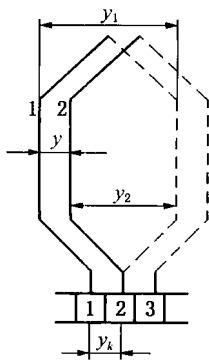


图 1-10 电枢绕组的节距

极距 τ ：一个磁极在电枢圆周上所跨的距离；

第一节距 y_1 ：元件的两条边在电枢表面所跨的距离，用两条边所跨的槽数表示；

第二节距 y_2 ：第一个元件的下层边与直接相连的第二个元件的上层边之间在电枢圆周上的距离，用槽数表示；

合成节距 y ：直接相连的两个元件的对应边在电枢圆周上的距离，用槽数表示；

换向器节距 y_k ：一个元件的首尾两端所接的两个换向片在换向器圆周上所跨的距离，用换向片数表示。

叠绕组是后一元件的端接部分紧叠在前一元件的端接部分上。单叠绕组的换向器节距和合成节距均为 1，即 $y = y_k = 1$ ，如图 1-10 所示。单叠绕组的连接特点是元件的首尾两端分别接到相邻的两个换向片上，并且前一元件的尾端与后一元件的首端接在同一换向片上。在图 1-10 中，上层元件边用实线表示，下层元件边用虚线表示，所有相邻元件依次串联，形成一个闭合回路。下面举例说明单叠绕组的连接规律和特点。

一台直流电机， $Z = S = K = 16$ ， $2p = 4$ ，接成单叠绕组。假想把电枢从某一齿的中间沿轴向切开展成平面，所得绕组连接图形称为绕组展开图，如图 1-11 所示。保持图 1-

11 中各元件的连接顺序不变，将此瞬间不与电刷接触的换向片省去不画，可以得到图 1-12 所示的并联支路图。对照图 1-11 和图 1-12 可以看出，单叠绕组的连接规律是将同一磁极下的各个元件串联起来组成一条支路。所以，单叠绕组的并联支路对数 a 总等于极对数 p ，即 $a = p$ 。

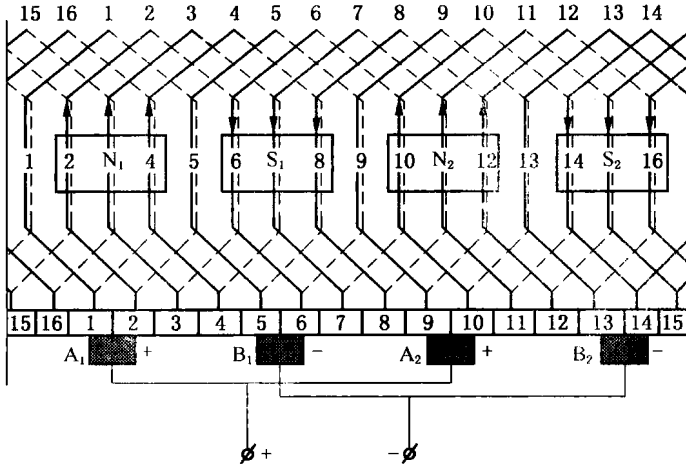


图 1-11 $Z = 16, 2p = 4$ 单叠绕组展开图

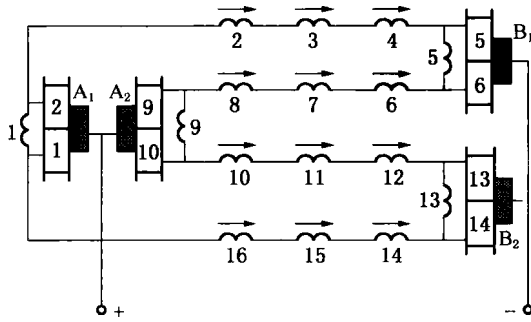
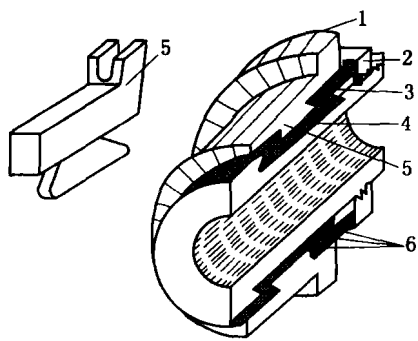


图 1-12 与图 1-11 相对应的并联支路图

单叠绕组的特点是：在同一主磁极下的各元件串联起来组成一条支路，并联支路对数等于极对数；电刷数等于主磁极数；当元件形状左右对称，电刷在换向器表面的位置对准磁极中心线时，正、负电刷间的感应电动势最大，被电刷短路元件中的感应电动势最小；电枢电流等于各并联支路电流之和。

3) 换向器

换向器是由许多换向片组成的圆柱体，换向片之间用云母隔开，彼此绝缘，其结构如图 1-13 所示。对于直流电动机，换向器配以电刷，能将外加直流电源转换为绕组中的交变电流，使电机旋转起来；对于直流发电机，换向器配以电刷，能将电枢绕组中的交变电动势转变为直流电动势，向外部输出供给负载。换向器固定在转轴的一端，换向片靠近电



1—片间云母；2—锁紧螺母；3—V形环；
4—套筒；5—换向片；6—云母绝缘

图 1-13 钢制换向器

枢绕组一端的部分与绕组引出线相焊接。

4) 转轴

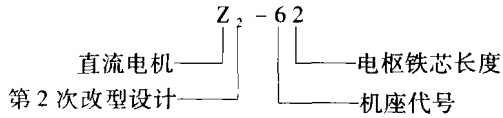
转轴一般用圆钢加工而成，有一定的机械强度和刚度，起支撑转子旋转的作用。

3. 铭牌

直流电机机座的外表面上钉有铭牌，用于标明电机主要额定数据及电机产品数据，供使用者使用时参考。铭牌上的数据主要有电机型号，电机额定功率、额定电压、额定电流、额定转速和额定励磁电流及励磁方式等。

电机的产品型号表示电机的结构和使用特点。国产电机的型号由汉语拼音字母和阿拉伯数字组成，其

格式为：第一部分用大写的汉语拼音字母表示产品代号，第二部分用阿拉伯数字表示设计序号，第三部分用阿拉伯数字表示机座代号，第四部分用阿拉伯数字表示电枢铁芯长度代号。



型号为 $Z_2 - 62$ 的直流电机是一台机座代号为 6、电枢铁芯为长铁芯的第 2 次改型设计的直流电机。机座代号表示直流电机电枢铁芯外直径的大小，共有 1~9 个机座代号，机座代号数越大，直径越大。电枢铁芯长度分为短铁芯和长铁芯两种：1 表示短铁芯，2 表示长铁芯。第一部分字符的含义如下：

- Z 系列 一般用途直流电机
- ZJ 系列 精密机床用直流电机
- ZT 系列 广调速直流电机
- ZQ 系列 直流牵引电机
- ZH 系列 船用直流电机
- ZA 系列 防爆安全型直流电机
- ZKJ 系列 挖掘机用直流电机
- ZZJ 系列 冶金起重机用直流电机
- ZU 系列 龙门刨床用直流电机
- ZW 系列 无槽直流电机，用于快速响应的伺服系统中
- ZLJ 系列 力矩直流电机，在位置或速度伺服系统中作执行元件

电机铭牌上所标的数据称为额定数据，主要有下列几项：

额定功率 P_N ：在额定条件下电机所能供给的功率，单位为千瓦 (kW)。对于电动机，额定功率是指电动机轴上输出的机械功率；对于发电机，额定功率是指电枢出线端输出的电功率。

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

额定电流 I_N ：电机在额定电压情况下，运行于额定功率时所对应的电流值，单位为安（A）。

额定转速 n_N ：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，单位为转/分（r/min）。

额定励磁电流 I_N ：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，单位为安（A）。

励磁方式：直流电机的励磁线圈与其电枢线圈的连接方式。根据二者连接方式不同，直流电机励磁有他励、并励、串励和复励等方式。

此外，电机的铭牌上还标有其他数据，如励磁电压、出厂日期、出厂编号等。

直流电机运行时，若各个物理量均为额定值，则称电机运行于额定状态，也称为满载运行。若电机的运行电流小于额定电流，称为欠载运行；若电机的运行电流大于额定电流，则称为过载运行。电机长期欠载运行会使电机的额定功率不能全部发挥作用，造成浪费；长期过载运行则会引起电机过热损坏，缩短电机的使用寿命；电机运行于额定状态或额定状态附近时，电机的运行效率和工作性能最好。因此，根据负载选择电机时，最好使电机接近于满载运行。

第二节 直流电机的磁场

由直流电机基本工作原理可知，直流电机无论是作发电机运行还是作电动机运行，其气隙都必须具有一定强度的磁场。为此，在介绍直流电机的运行原理之前，先对直流电机中磁场的产生及分布规律等加以分析。

一、直流电机的励磁方式

除了永磁式直流电机以外，直流电机一般都是在定子主磁极励磁绕组中通以励磁电流产生磁场的。励磁电流产生的磁场称为主磁场，又称励磁磁场。对于不同的励磁方式，直流电机的运行特性有很大差异。按励磁绕组的供电方式不同，直流电机可以分成4种。

1. 他励直流电机

他励直流电机的励磁绕组与电枢绕组无连接关系，由其他直流电源供电，如图1-14a所示。永磁式直流电机因其励磁磁场与电枢电流无关，也可看做是他励直流电机。

2. 并励直流电机

并励直流电机的励磁绕组与电枢绕组并联，励磁绕组的供电电压与电枢绕组端电压相同，如图1-14b所示。

以上两类电机的励磁绕组的导线细而匝数多，励磁电流只有电机额定电流的1%~5%。

3. 串励直流电机

串励直流电机的励磁绕组与电枢绕组串联，励磁电流与电枢电流相同，励磁绕组的导线粗而匝数较少，如图1-14c所示。

4. 复励直流电机

复励直流电机的主磁极上套有两套励磁绕组：一套与电枢绕组并联，称为并励绕组；