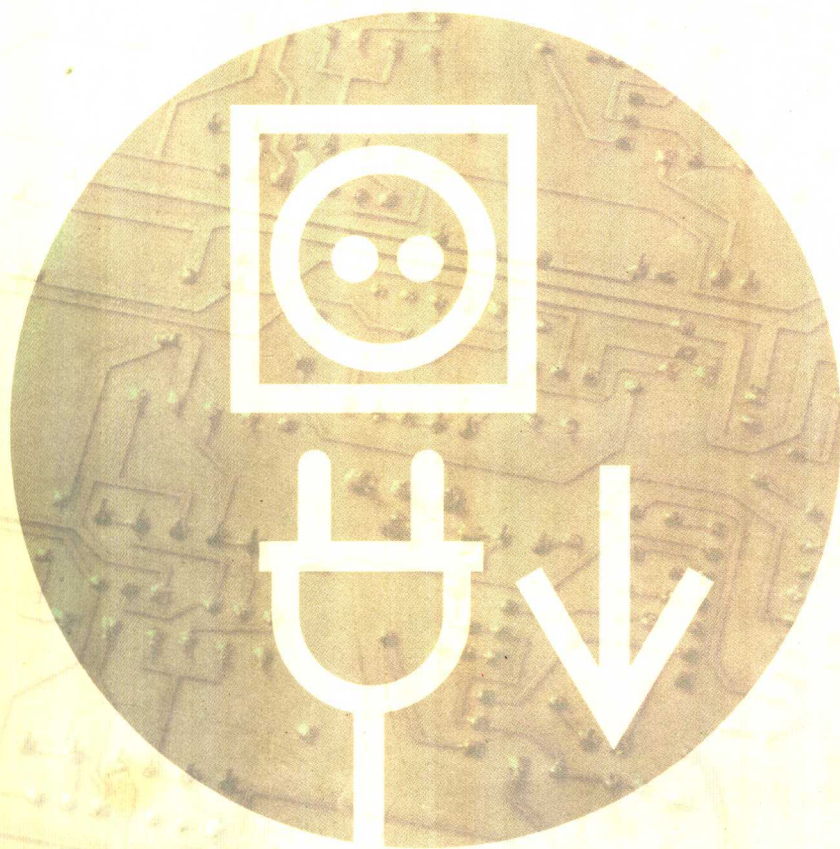


全国高等职业技术学院电工类专业教材

QUANGUO GAODENG ZHIYE JISHU YUANXIAO DIANGONGLEI ZHUANYE JIAOCAI

电机原理与维修

DIANJI YUANLI YU WEIXIU



中国劳动社会保障出版社

全国高等职业院校电工类专业教材

电机原理与维修

劳动和社会保障部教材办公室组织编写

中国劳动社会保障出版社

图书在版编目(CIP)数据

电机原理与维修/秦虹主编. —北京:中国劳动社会保障出版社, 2004

全国高等职业技术学院电工类专业教材

ISBN 7-5045-4281-4

I. 电… II. 秦… III. ①电机学 ②电机-维修 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 010178 号

中国劳动社会保障出版社出版发行

(北京市惠新东街 1 号 邮政编码: 100029)

出 版 人: 张梦欣

*

新华书店经销

北京印刷二厂印刷 河北三佳集团装订厂装订

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20.25 印张 504 千字

2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月第 1 次印刷

印数: 5000 册

定价: 29.00 元

读者服务部电话: 010-64929211

发行部电话: 010-64911190

出版社网址: <http://www.class.com.cn>

版权专有 侵权必究

举报电话: 010-64911344

前言

为贯彻落实《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》，推进高等职业技术教育更好地适应经济结构调整、科技进步和劳动力市场的需要，推动高等职业院校实施职业资格证书制度，加快高技能人才的培养，劳动和社会保障部教材办公室在充分调研和论证的基础上，组织编写了高等职业院校系列教材。从2004年起，陆续推出数控类、电工类、模具设计与制造、电子商务、电子类、烹饪类专业教材，并将根据需要不断开发新的教材，逐步建立起覆盖高等职业院校主要专业的教材体系。

在高等职业院校系列教材的编写过程中，我们始终坚持了以下几个原则：一是坚持高技能人才的培养方向，从职业（岗位）分析入手，强调教材的实用性；二是紧密结合高职院校、技师学院、高级技校的教学实际情况，同时，坚持以国家职业资格标准为依据，力求使教材内容覆盖职业技能鉴定的各项要求；三是突出教材的时代感，力求较多地引进新知识、新技术、新工艺、新方法等方面的内容，较全面地反映行业的技术发展趋势；四是打破传统的教材编写模式，树立以学生为主体的教学理念，力求教材编写有所创新，使教材易教易学，为师生所乐用。

电工类专业教材主要包括《电工基础》《电子技术》《工程制图》《电气测量》《电气管理知识》《数控技术》《单片机原理与接口技术》《可编程控制技术》《工厂电气控制技术》《自动控制技术》《工厂变配电技术》《电机原理与维修》《变频技术》《高级维修电工基本技能训练》《高级维修电工专业技能训练》《高级维修电工综合技能训练》《高级电工技能训练》《电气设备安装技术》《高电压技术（2005年出版）》等，可供高职院校、技师学院、高级技校电气维修、企业供电等专业使用。教材的编写参照了《维修电工》以及其他相关的国家职业标准，有些教材还配套出版了习题册。

在上述教材编写过程中，我们得到有关省市劳动和社会保障部门、教育部门，以及高等职业院校、技师学院、高级技校的大力支持，在此表示衷心的感谢。同时，我们恳切希望广大读者对教材提出宝贵的意见和建议，以便修订时加以完善。

劳动和社会保障部教材办公室

2004年2月

简介

本书为全国高等职业院校电气维修专业教材，供各类高职院校、技师学院、高级技校相关专业使用。主要内容有：直流电机、变压器、异步电机、同步电机、特种电机、电机维修和电机试验等。

本书也可用于高级技术人才培养。

本书由秦虹主编，林嵩、高建强参加编写；刘万钧审稿。

目录

绪论	(1)
第一章 直流电机	(3)
§ 1—1 直流电机的结构与工作原理	(3)
§ 1—2 直流电机的电枢绕组	(9)
§ 1—3 直流电机的电枢感应电动势和电磁转矩	(17)
§ 1—4 直流电机的电枢反应	(19)
§ 1—5 直流电机的换向	(25)
§ 1—6 直流电动机的机械特性	(29)
§ 1—7 直流电动机的启动与制动	(32)
§ 1—8 直流电动机的调速	(37)
习题	(42)
第二章 变压器	(44)
§ 2—1 变压器的基本工作原理和结构	(45)
§ 2—2 变压器的空载运行和负载运行	(51)
§ 2—3 变压器的工作特性	(60)
§ 2—4 三相变压器	(63)
§ 2—5 其他变压器	(72)
习题	(78)
第三章 异步电机	(80)
§ 3—1 三相异步电动机的结构与工作原理	(80)
§ 3—2 三相异步电动机的定子绕组	(87)
§ 3—3 异步电动机运行时的电磁关系	(97)
§ 3—4 三相异步电动机的功率和电磁转矩	(104)
§ 3—5 三相异步电动机的机械特性	(106)
§ 3—6 三相异步电动机的启动、制动与调速	(112)
§ 3—7 三相异步电动机的工作特性	(120)
§ 3—8 多速异步电动机的定子绕组	(121)
习题	(125)

第四章 同步电机	(127)
§ 4—1 同步发电机的工作原理和结构	(127)
§ 4—2 同步发电机的功率调整	(132)
§ 4—3 同步电动机的电枢反应	(135)
§ 4—4 同步电动机的功角特性和矩角特性	(138)
§ 4—5 同步电动机的运行特性	(140)
§ 4—6 同步电动机的启动	(142)
§ 4—7 其他同步电动机	(143)
习题	(146)
第五章 特种电机	(148)
§ 5—1 交流换向器电动机	(148)
§ 5—2 电磁调速异步电动机	(152)
§ 5—3 伺服电动机	(156)
§ 5—4 步进电动机	(165)
§ 5—5 测速发电机	(172)
§ 5—6 旋转变压器	(176)
§ 5—7 自整角机	(179)
§ 5—8 直线电机	(184)
§ 5—9 盘式电动机	(187)
习题	(191)
第六章 电机维修	(193)
§ 6—1 电机维护	(193)
§ 6—2 电机机械故障检修	(201)
§ 6—3 电机绕组故障检修	(213)
§ 6—4 交流电机绕组的重绕及简易计算	(230)
§ 6—5 直流电机电枢绕组重绕	(243)
§ 6—6 小型单相变压器的故障检修及重绕	(253)
§ 6—7 同步电动机及特种电机修理	(261)
习题	(287)
第七章 电机试验	(288)
§ 7—1 电机试验标准及试验项目	(288)
§ 7—2 交流电机试验	(295)
§ 7—3 直流电机试验	(298)
§ 7—4 变压器试验	(302)
习题	(308)
附录	(310)

绪 论

一、电机在国民经济中的作用

在国民经济生产中，电机工业是机械工业的一个重要组成部分。电机是机电一体化中机和电的结合部分，是机电一体化的一个很重要的基础，电机被称为电气化的心脏。它对国民经济的发展有着重要的作用，并随着国民经济和科学技术的发展而不断发展。

电机的发展又与电能的发展紧密地联系在一起。电能是现今社会一种最主要的能源，是现代工业、农业、交通运输、科学技术和日常生活等各方面最常用的一种能源。这主要是由于它的生产、传输、分配、使用控制及能量转换较为方便。电机是与电能的生产、传输和使用有关的一种最重要的能量转换设备，它不仅是工业、农业和交通运输业的重要设备，而且也越来越广泛地应用于日常生活中的各类家电上。

电机、变压器是电力工业的主要设备之一。在发电厂，发电机将原始能源（如热力、水力、化学能、核能、风力、太阳能等），即一次能源转换为生产和生活中可使用的电能，又称二次能源。变电站的作用是经济地传输和分配电能。在远距离传输电能前，升压变压器把大型发电机输出的低压交流电转换成高压交流电；而在供给用户使用前，还必须把来自高压输电网的电能经过降压变压器降压后才能安全使用。由此可见，在电能的生产、传输和分配过程中，发电机和变压器起着重要的作用。

在电能的应用中，电动机也起着重要的作用。在机械工业、冶金工业、化学工业、交通运输及日常生活等各方面，电动机将电能转换成机械能，为各种工作机械提供动力。一个自动控制系统中往往会用到多个不同的电机（包括各种控制电机），一个现代化工厂拥有几百台至几万台电机是很平常的事。随着大功率半导体器件、大规模集成电路的发展和计算机技术的应用，电机的品种、质量和性能都有了进一步地提高，以全数字式的三相永磁同步电机伺服系统、三相异步电机伺服系统和直流电机伺服系统为代表的新型电机拖动系统的出现，带动了数控机床、工业机器人、交通运输、航空航天及家用电器等一系列高质量、高性能的以电机来拖动的机电一体化的高科技产品的迅速发展。综上所述，电机将在国民经济发展中发挥越来越重要的作用。

二、电机的发展概况

在电学和磁学分别发展的基础上，出现了电动机的雏形。从印刷工人出身的科学家法拉第发现载流导体在磁场内受力的现象起，一直到 1882 年，早期直流电机经过了在励磁、绕组、电枢结构上的不断完善及理论上不断完善的发展过程，励磁绕组由永磁改为电流励磁，他励改为自励；电枢由凸极改为环形，再发展到鼓形，后又改进为叠片铁心；绕组由集中到环形分布，后又发展到鼓形电枢绕组。大约在同一时期（1832 年），交流电机也出现了。但是直到 1870 年，由于直流输变电困难和直流电机的换向火花问题变得越来越突出，才促使交流电机有所发展。不同于直流电机的发展过程，交流电机的发展与旋转磁场理论的发展是

同步进行的。到 1891 年, 和现代三相电力系统(由电机及变压器等组成)很相近的应用实例已制成。此后, 交流三相制在电力工业中逐步占据主导地位, 交流电机的理论、材料、工艺及性能发展异常迅猛, 与此有关的电力工业(发电、输电、配电等)、机械加工工业、电镀电解、电焊等技术、自动化仪表、自控技术及通信技术等相继获得迅速发展。

20 世纪以来, 由于工业、军工的需要和对电机内部电磁、发热等过程的理论研究的深入, 加上电机新原理、新材料、新工艺的发展, 使电机在很多方面突破了传统的概念。近几年来, 国外结合科学技术的最新成就, 已研制出一些新原理、新结构的电机, 如利用“霍尔效应”相继研制出霍尔效应的自整角机、旋转变压器和霍尔效应无刷直流测速发电机; 利用“压电逆效应”研制出压电直线步进电机, 其步距可达到 $0.1 \sim 5 \mu\text{m}$; 利用“介质极化”研制出驻极体电机; 利用“磁性体的自旋再排列”研制出光电机。由此可见, 电机的发展已经不再限于一般的电磁理论, 而将与其他学科相互结合, 相互促进, 成为一门多学科互相渗透的边缘学科。

近几十年来, 我国的电机工业同国民经济中的其他各部门一样, 也得到了迅速的发展, 建立了我国自己的电机工业体系, 制定了电机的国家标准, 并能制造各种类型的电机、变压器, 以及成套的大、中型火力、水力发电设备, 如 $30\text{MV} \cdot \text{A}$ 的大型电力变压器等。

三、本课程的任务、要求和学习方式

通过本课程的学习, 使学生在原来的基础上进一步全面了解各种交、直流电机(包括特种电机)和变压器的基本理论和运行性能; 掌握各种电机和变压器的常见故障的分析、判断和处理, 拓宽电机和变压器的相关知识, 提高其分析、应用的综合能力, 也为后续课程的学习, 为今后从事电机和变压器设备的安装、维护、检修等工种, 打下良好的基础。由于本课程包含的内容多, 这里, 提供几点学习方法供大家参考。

1. 掌握分析问题的方法

在本课程中, 所涉及的电机类型较多, 如果将每一种电机作为一个独立的、新的内容来学, 就会感觉到学习任务太重, 如果在学习过程中能够掌握研究问题的方法, 找出各类电机的共性及个性, 就会学得轻松、应用自如。如三相异步电机的原理和变压器的原理有很多共同的部分, 最后的数学模型也非常类似, 只要掌握了分析问题的方法, 就可较容易地掌握这两部分的内容。

2. 要理解公式所表达的物理概念

本课程的公式较多, 如果孤立地、单独地去记忆不同公式中所表达的各物理量之间的数量关系不是易事, 必须理解公式所表达的物理概念。如直流电机的感应电动势公式 $E_a = C_e \Phi n$ 和电磁转矩公式 $T_{em} = C_T \Phi I_a$, 这两个公式看起来很简单, 暂时记忆也较容易, 而时间长了, 很容易出错。如果理解了公式所表示的物理意义: 感应电动势是导体在磁场中切割磁力线所产生的, 必然与磁场和切割速度成正比; 电磁转矩是载流导体在磁场的作用下所产生的, 其大小必须与磁场的强弱和电流的大小成正比。这样就很容易记住公式中各物理量之间的相互关系了。

3. 要理解课程的特性

本课程理论性和实践性均较强, 考虑到学生已有一定的理论和实践知识, 本教材从工程的视角, 从使用与维修的角度叙述, 注重物理概念, 掌握电磁关系、机电能量转换关系, 不涉及过多、过深的数学推导。学生在学习过程中, 要注意把握学习重点。

电机是用来进行机电能量转换的电气设备。直流电机的作用是将直流电能转换为机械能或者将机械能转换为直流电能。将直流电能转换为机械能的叫做直流电动机，将机械能转换为直流电能的叫做直流发电机。

直流电动机具有调速性能好、过载系数大、控制性能好等优点，在调速性能要求较高的场所，如在金属切削机床、轧钢机、电机车、造纸和纺织等设备上，直流电动机都得到较为广泛的应用。直流发电机主要用作各种直流电源。由于电力电子学的发展，直流发电机正在逐步被晶闸管整流装置所取代，因此，本章主要分析直流电动机的原理、结构和运行性能。

§ 1—1 直流电机的结构与工作原理

一、直流电机的结构

直流电机进行能量转换，必须有磁场以及与磁场耦合的线圈，磁场与线圈之间还必须有相对运动。因此，直流电机由静止部分和转动部分组成。静止部分称为定子，包括主磁极、换向极、电刷装置和机座等主要部件。转动部分称为转子。直流电机的转子通常称为电枢，它主要由电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等部件组成。图 1—1 所示为直流电机的结构图。下面对直流电机的主要部件作简要介绍。

1. 定子部分

(1) 主磁极 主磁极的作用是产生主磁场，以便电枢在此磁场中转动而产生感应电动势。主磁场有两种形式：永久磁铁和电磁铁。绝大部分直流电机采用电磁铁。电磁铁由主磁极铁心和励磁绕组组成，如图 1—2 所示。主磁极铁心一般由 1~1.5 mm 厚的钢板冲片叠压而成。绕制好的励磁绕组套在铁心外面，整个磁极用螺钉固定在机座上。主磁极总是成对出现的，各主磁极上的绕组连接时要能保证相邻磁极的极性按 N 极和 S 极依次排列。为了减少气隙中有效磁通的磁阻，改善气隙磁通密度的分布波形，磁极下的极掌（或称极靴）较极身宽，这样也可以使励磁绕组牢牢地套在磁极上。

(2) 换向极 换向极是用来改善直流电机换向的，减小电机运行时电刷与换向器之间可能产生的火花。换向极装在容量大于 1 kW 的直流电机的两主磁极之间，也是由换向极铁心

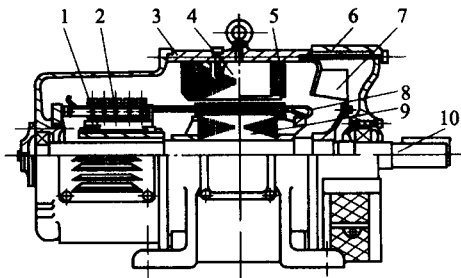


图 1—1 直流电机的结构

- 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 10—转轴

和换向极绕组组成，如图 1—3 所示。一般换向极铁心用整块钢板加工而成，也可用 1.5 mm 的钢板叠压而成。换向极绕组套在换向极铁心上，与电枢绕组串联。一般换向极的数量与主磁极相同，在小功率的直流电机中，也有所装置的换向极数为主磁极的一半，或不装换向极。

(3) 机座 电机定子部分的外壳称为机座。机座通常由铸钢或厚钢板焊成。它有两个作用，一是用来固定主磁极、换向极和端盖，并固定和支撑整个电机；二是作为电机磁路的一部分，构成磁极之间磁的通路。机座中有磁通经过的部分称为磁轭。

(4) 电刷装置 电刷的作用是将旋转的电枢与固定不动的外电路相连，把直流电压或直流电流引入或引出。因此，它与换向片既要有紧密的接触，又要有良好的相对滑动。电机中常用一套电刷装置来保证它的作用。电刷装置由电刷、弹簧、刷握、刷杆及刷杆座等组成。电刷是用石墨等制成的导电块，放置在刷盒内，用弹簧将它压紧在换向器上，刷握固定在刷杆上。容量大的电机，可在同一刷杆上并排安装一组刷握和电刷。一般刷杆数与主磁极数相等。由于电刷有正、负极之分，因此刷杆必须与刷杆座绝缘。电刷组在换向器表面应对称分布，刷杆座可与端盖或机座相连接。整个电刷装置可以移动，用以调整电刷在换向器上的位置。图 1—4 所示为电刷装置结构图。

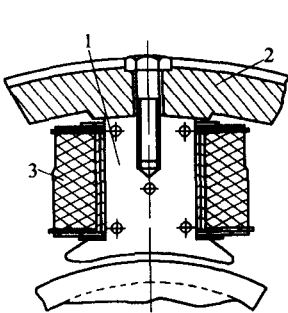


图 1—2 主磁极的结构
1—主磁极铁心 2—机座
3—励磁绕组

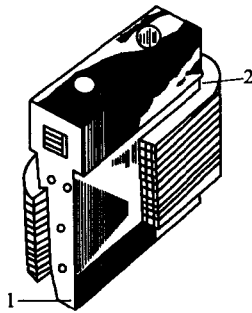


图 1—3 换向极的结构
1—换向极铁心
2—换向极绕组

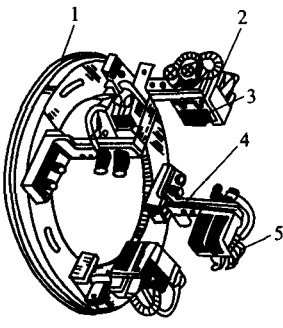


图 1—4 电刷装置的结构
1—刷杆座 2—刷握 3—电刷
4—刷杆 5—压力弹簧

2. 转子部分

(1) 电枢铁心 电枢铁心是主磁路的一部分，同时要安放电枢绕组。由于电机运行时，电枢与气隙磁场间有相对运动，铁心中也会产生感应电动势而出现涡流和磁滞损耗。为了减少损耗，电枢铁心通常由 0.5 mm 厚的表面绝缘的硅钢片经冲压叠装而成。冲片圆周外缘均匀地冲有许多齿和槽，槽内可安放电枢绕组，有的冲片上还冲有许多圆孔，以形成改善散热的轴向通风孔，图 1—5 所示为电枢铁心冲片的形状和电枢铁心主体图。电机容量较大时，电枢铁心的圆柱体还可分隔成几段，每段间隔 10 mm 左右，以形成径向的通风道。

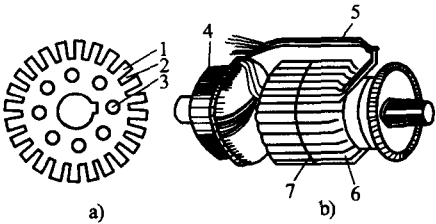


图 1—5 电枢铁心
a) 电枢铁心冲片 b) 转子主体
1—齿 2—槽 3—轴向通风孔 4—换向器
5—电枢绕组元件 6—电枢铁心 7—径向通风道

(2) 电枢绕组 电枢绕组是直流电机电路的主要组成部分，它的作用是产生感应电动势或通过流过的电流产生电磁转矩，实现机电能量转换。电枢绕组由许多线圈按一定的规律连接而成。这种线圈通常用高强度聚酯漆包线绕制而成，绕制好的绕组或成型绕组放置在铁心槽内，放置在铁心槽内的直线部分在电机运转时将产生感应电动势，称为元件的有效部分，绕组元件的一条有效边嵌入某个槽中的上层，另一有效边则嵌入另一槽中的下层，如图 1—6 所示。在电枢槽两端把有效部分连接起来的部分称为端接部分，端接部分仅起连接作用，在电机运行过程中不产生感应电动势。绕组与铁心槽之间及上、下层有效边之间均绝缘，如图 1—7 所示。槽口处沿轴向打入绝缘竹片或用环氧酚醛玻璃布板制成的槽楔，将线圈压紧并防止它在运行时飞出。同样，端接线也要用玻璃带扎紧。线圈的两个端头按一定的规律焊接在换向片上。

(3) 换向器 换向器的作用是与电刷一起将直流电动机输入的直流电流转换成电枢绕组内的交变电流，或是将直流发电机电枢绕组中的交变电动势转换成输出的直流电压。

换向器是一个由许多燕尾状的梯形铜片间隔云母片绝缘排列而成的圆柱体。每片换向片一端有高出的部分，上面铣有线槽，供电枢绕组引出端焊接用。所有换向片均放置在与它配合的具有燕尾槽的金属套筒内，然后用 V 形钢环和螺纹压圈将换向片和套筒紧固成一个整体。换向片组与套筒、V 形钢环之间均要用云母环绝缘，如图 1—8 所示。这样的换向器称为金属套筒式换向器。现代小型直流电机已广泛采用热压塑料代替金属套筒，这种塑料热压成型紧固的换向器，称为塑料换向器。

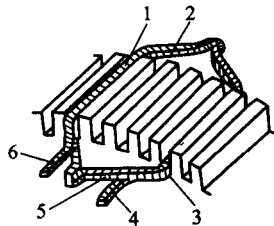


图 1—6 线圈在槽内的安放示意图

1—上层有效边 2、5—端接部分
3—下层有效边 4—线圈尾端
6—线圈首端

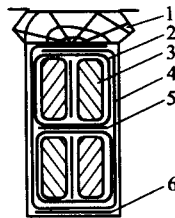


图 1—7 电枢槽内的绝缘

1—槽楔 2—线圈绝缘 3—导体
4—槽绝缘 5—层间绝缘
6—槽底绝缘

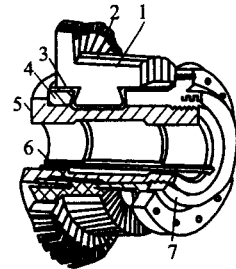


图 1—8 直流电机的换向器

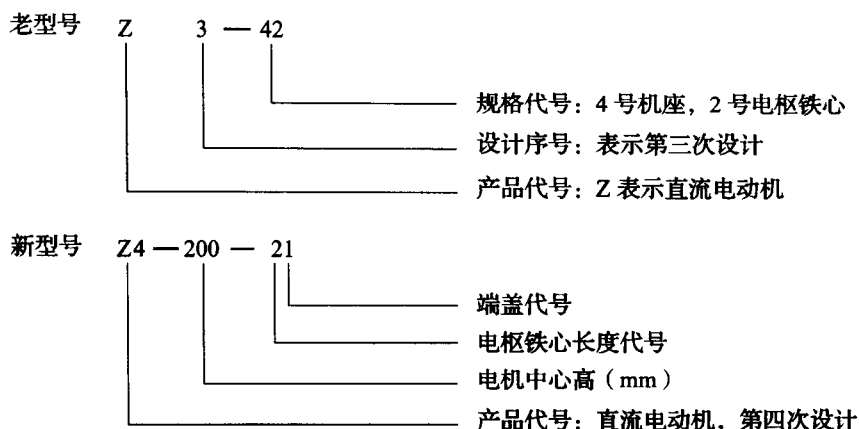
1—换向片 2—云母片
3—燕尾槽云母套筒 4—V 形钢环
5—钢套 6—绝缘套筒 7—螺纹压圈

二、直流电机的铭牌及连接方式

铭牌钉在电机机座的外表面上，上面标明电机的主要额定数据及电机产品数据，供使用者使用时参考。铭牌数据主要包括：电机型号、电机额定功率、额定电压、额定电流、额定转速和励磁电流及励磁方式等，此外还有电机的出产数据，如出厂编号、出厂日期等。

1. 电机型号

电机型号表示电机的结构和使用特点，国产电机的型号一般用大写的汉语拼音字母和阿拉伯数字表示，其格式为：第一部分字符用大写的汉语拼音表示产品代号；第二部分字符用阿拉伯数字表示设计序号；第三部分字符是机座代号，用阿拉伯数字表示；第四部分字符表示电枢铁心长度代号，用阿拉伯数字表示。现以老型号 Z3—42 及新型号 Z4—200—21 为例说明如下：



常见产品代号有：

Z 系列：一般用途直流电动机。

ZJ 系列：精密机床用直流电动机。

ZT 系列：广调速直流电动机。

ZQ 系列：直流牵引电动机。

ZH 系列：船用直流电动机。

ZA 系列：防爆安全型直流电动机。

ZKJ 系列：挖掘机用直流电动机。

ZZJ 系列：冶金起重直流电动机。

2. 额定功率 P_N

是指在额定条件下电机所能供给的功率。额定功率对电动机和发电机的含义是不同的。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；对于发电机额定功率是指电刷间输出的额定电功率。额定功率的单位为 kW。

3. 额定电压 U_N

是指额定运行条件下，电机出线端的工作电压。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。额定电压的单位为 V 或 kV。

4. 额定电流 I_N

是指电机在额定电压情况下，运行于额定功率的电流。对于电动机，是指在额定运行时从电源输入的电流；对于发电机，是指额定运行时供给负载的输出电流。额定电流的单位为 A 或 kA。

5. 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。额定转速的单位为 r/min。

6. 额定励磁电流 I_{fN}

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。

7. 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，直流电机可分为他励式和自励式两种，自励式又可分为并励、串励、复励三种。各励磁方式如图 1—9 所示。

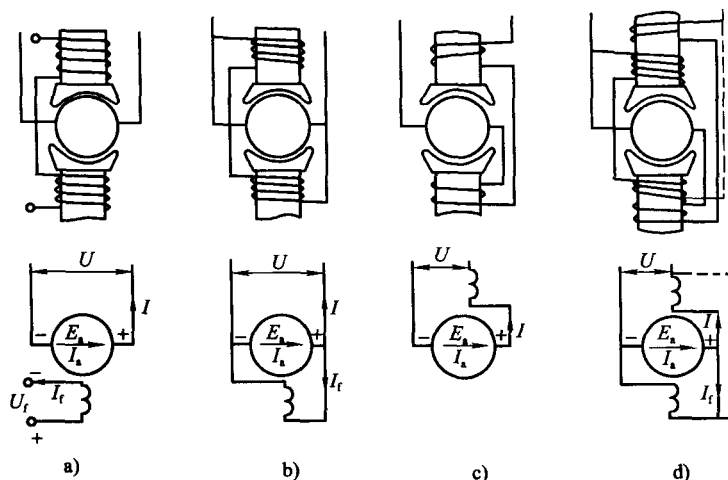


图 1—9 直流电机不同励磁方式的电路示意图

a) 他励式 b) 并励式 c) 串励式 d) 复励式

三、直流电机的工作原理

1. 直流发电机的工作原理

直流发电机的工作原理是基于电磁感应原理，在磁感应强度为 B_x 的磁场中，一根长度为 l 的导体以匀速 v 作垂直切割磁力线的运动时，在导体中产生感应电动势，其值的大小按法拉第定律来计算，即

$$e = B_x lv \quad (1-1)$$

图 1—10 为直流发电机的工作原理模型。图中 N、S 是一对固定不动的磁极（可以是永久磁铁，也可以是电磁铁）， $abcd$ 是安装在可以转动的圆柱体（导磁材料制成的）上的一个线圈（整个转动部分称为转子或电枢），线圈两端分别接到两个相互绝缘的半圆形铜环（称为换向片，这两个换向片就构成了最简单的换向器）1 和 2 上，换向片分别与固定不动的电刷 A 和 B 保持滑动接触，这样，旋转着的线圈可以通过换向片、电刷与外电路接通。

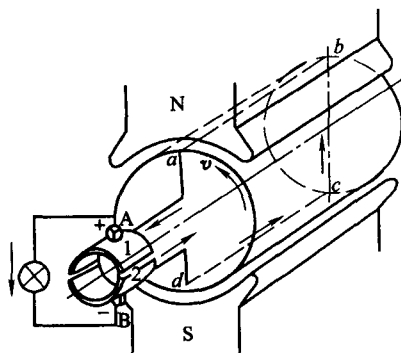


图 1—10 直流发电机的工作原理模型

当原动机拖着电枢以一定的速度在磁场中逆时针旋转时，根据电磁感应原理，线圈边 ab 和 cd 切割磁力线产生感应电动势，其方向用右手定则确定。如图 1—10 所示，线圈的 cd 边处于 S 极时，产生的感应电动势从 d 指向 c 。从整个线圈来看，电动势的方向为 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ ；反之，当 ab 边转到 S 极、 cd 边转到 N 极时，每个边的感应电动势方向都要随之改变，于是，整个线圈的感应电动势方向变为 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 。所以线圈中的感应电动势是交变的。假设磁场在电枢圆周上按正弦规律分布，即 $B_x = B_m \sin \alpha$ ，则

$$e = B_x lv = B_m lv \sin \alpha \quad (1-2)$$

表明线圈中的感应电动势按正弦规律变化。

那么，如何在电刷上得到直流电动势呢？这就要靠换向器的作用了。如图 1—10 所示，瞬间线圈的 ab 边处于 N 极时，电动势的方向从 b 指向 a 引到电刷 A，所以电刷 A 的极性为正。当线圈转过 180° ，线圈 ab 边与 cd 边互换位置，使 cd 边处于 N 极时，于是 cd 边与电刷 A 接触，其电动势的方向是从 c 指向 d 引到电刷 A，电刷 A 的极性仍为正。同理可分析出电刷 B 的极性为负。进一步观察可以发现，电刷 A 总是与旋转到 N 极的导体接触，所以电刷 A 总是正极性；而电刷 B 总是与旋转到 S 极的导体接触，所以电刷 B 总是负极性。故在电刷 A、B 之间得到如图 1—11 所示的直流电动势。

由右手定则可知，决定感应电动势方向的因素有两个：一是导体运动方向（电枢转向），二是磁场极性。所以，改变磁场的极性也可使直流发电机电刷两端输出的电动势极性改变。

显然，图 1—11 所示的直流发电机模型的输出电动势波形脉动幅度太大。如果在电枢圆周内均匀分布 4 个线圈，这些线圈的出线端接在 4 个换向片上，并构成闭合回路，则电刷两端的电动势为 4 个线圈电动势的叠加，其波形如图 1—12 所示，可见电动势的脉动幅度已大为减小。依次类推，电枢上分布的线圈越多，电动势的脉动幅度越小。所以，在实际发电机中，有许多线圈均匀分布在发电机转子表面，它们按一定规律连接起来，构成电枢绕组（详见本章第二节）。



图 1—11 一个线圈时电刷两端电动势的波形

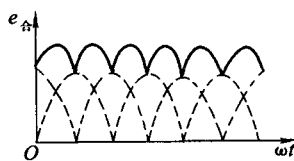


图 1—12 4 个线圈均匀分布时电刷两端的电动势波形

2. 直流电动机的工作原理

直流电动机的工作原理是基于电磁力定律，若磁场 B_x 与导体互相垂直，且导体中通以电流 i ，则作用于载流导体上的电磁力 f 为

$$f = B_x li \quad (1-3)$$

图 1—13 是直流电动机的工作原理模型。电刷 A、B 两端加直流电压 U ，电流从电源的正极流出，经过电刷 A 与换向片 1 而流入电动机线圈，电流方向为 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ ，然后再经过换向片 2 与电刷 B 流回电源的负极。根据电磁力定律，线圈边 ab 与 cd 在磁场中分别受到电磁力的作用，其方向可用左手定则确定，如图 1—13 所示。此电磁力形成的电磁转矩，使电动机逆时针方向旋转。当线圈边 ab 转到 S 极、 cd 转到 N 极时，流经线圈的电流方向必须改变，这样导体所受的电磁力方向才能不变，从而保持电动机转向不变。

如何才能使导体中的电流方向改变呢？这个任务将由换向器来完成。从图 1—13 中可以看出，原来电刷 A 通过换向片 1 与转到 N 极的导体 ab 相连；现在电刷 A 通过换向片 2 与转到 N 极的导体 cd 相连，电

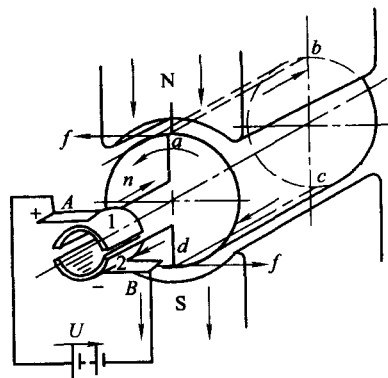


图 1—13 直流电动机的工作原理模型

刷 B 通过换向片 1 与转到 S 极的导体 ab 相连。线圈中的电流方向改为 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ ，用左手定则判断电磁力和电磁转矩的方向未变，电枢仍逆时针方向旋转。

综上所述可知，不论是直流发电机还是直流电动机，换向器可以使正电刷 A 始终与转到 N 极的导体相连，负电刷 B 始终与转到 S 极的导体相连，故电刷之间的电压是直流电，而线圈内部的电流则是交变的，所以换向器是直流电机中换向的关键部件。通过换向器和电刷的作用，把直流发电机线圈中的交变电动势整流成电刷间方向不变的直流电动势；把直流电动机电刷间的直流电流变成线圈内的交变电流，确保电动机以恒定方向旋转。

§ 1—2 直流电机的电枢绕组

在实际电机中，电枢绕组是由许多分布在转子表面的绕组元件（线圈）按一定的规律连接而成的。根据连接规律的不同，电枢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 5 种形式。

电枢绕组是一个很重要的部件，其结构和制造工艺复杂，电机中绝大部分的铜和绝缘材料都用在电枢绕组上，它是运行中最容易发生故障的部位。直流电机对电枢绕组的要求是：在保证产生足够大的感生电动势和电磁转矩的前提下，要尽可能地节约有色金属和绝缘材料，并且要求结构简单，运行可靠，散热性良好。

一、电枢绕组的基本知识

电枢绕组是由结构和形状相同的绕组元件（线圈）组成，线圈有单匝、多匝之分，分别如图 1—14a、图 1—14b 所示。不论单匝或多匝线圈，它的两个边分别放在不同的槽中（见图 1—6），用来产生电动势和电磁转矩，故称为线圈有效边。而处于槽外的部分，仅起连接作用，称为端接部分。线圈的两个端头称为首端和尾端。电枢绕组大都为双层绕组，将一个线圈的有效边放在槽的上层，称为上层边（用实线表示）；另一个有效边放在有一定距离的另一槽的下层，称为下层边（用虚线表示）。

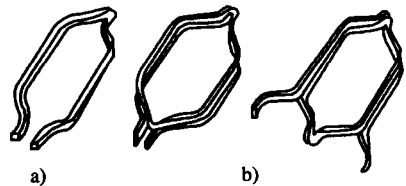


图 1—14 线圈的结构
a) 单匝线圈 b) 多匝线圈

电枢绕组的线圈数和换向片数、槽数之间存在相应的关系：因为每一个线圈有两个边，而每一换向片总是把一个线圈的尾端与紧跟的另一个线圈的首端焊接在一起，因此，线圈数与换向片数相等；如果电枢铁心的每个槽内只安排一个上层边和一个下层边（称为一个单元槽），这样，线圈数又与单元槽数相等。但是，有些电机在一个槽里的上层和下层往往都并列楔放着多个线圈有效边。以图 1—7 为例，槽中上、下层各楔放着两个线圈的有效边，这样，一个槽实际起着两个单元槽的作用，称之为一个实槽包含两个虚槽，即实槽中单元槽数 $u=2$ 。由此可知，一台直流电机的线圈数 S 与换向片数 K 、虚槽数 Z_u 、实槽 Z 、每槽单元槽数 u 之间有如下关系：

$$S = K = Z_u = uZ \quad (1-4)$$

为了正确地把各元件安放入电枢槽内,并且和相应的换向片按一定的规律连接起来,需要先了解绕组的基本术语。

1. 极距 τ

所谓极距,就是一个磁极在电枢圆周所占的弧长,如果用字母 τ 来表示极距,用 D_a 表示电枢直径, p 表示磁极对数,则

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p}$$

通常用一个磁极在电枢表面所占的虚槽数来表示极距,即

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

2. 绕组节距

绕组元件在槽内安放位置及其与换向片之间的连接规律,由以下4种节距确定:

(1) 第一节距 y_1 第一节距是指一个线圈两个有效边之间在电枢表面上的跨距,以虚槽数表示,如图1—15所示。由于线圈边要放入槽内,所以 y_1 应是整数。而为了让绕组能感生出最大电动势,应使 y_1 接近或等于极距 τ ,即

$$y_1 = \frac{Z_u}{2p} + \epsilon \quad (1-6)$$

式中, ϵ 是使 y_1 凑成整数的一个小数。若 $\epsilon < 0$, 则 $y_1 < \tau$, 称为短距绕组; 若 $\epsilon = 0$, 则 $y_1 = \tau$, 称为整距绕组; 若 $\epsilon > 0$, 则 $y_1 > \tau$, 称为长距绕组。为了节省铜线及工艺上方便,一般采用短距或整距绕组。

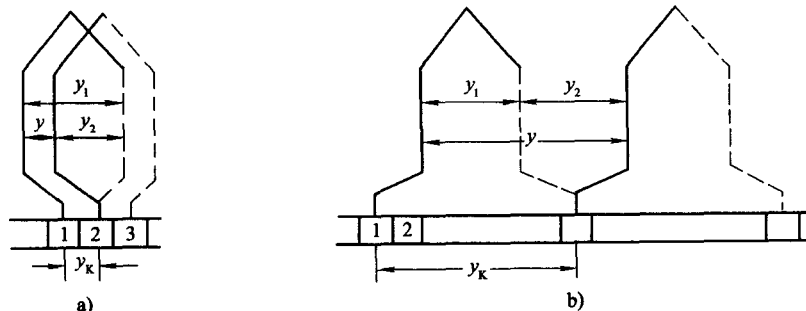


图1—15 绕组画法和节距

a) 单叠绕组 b) 单波绕组

(2) 第二节距 y_2 它是指相串联的两个相邻线圈中,第一个线圈的下层边与第二个线圈的上层边之间的距离。 y_2 用虚槽数表示,如图1—15所示。

(3) 换向片节距 y_k 它是指线圈的两端所连接的换向片之间的距离,用该线圈跨过的换向片数来表示,如图1—15所示。

(4) 合成节距 y 它是指相串联的两个相邻线圈对应的有效边之间的距离,用虚槽数来表示。从图1—15可知:

$$y = y_k = \begin{cases} y_1 - y_2 & (\text{叠绕组}) \\ y_1 + y_2 & (\text{波绕组}) \end{cases}$$

二、叠绕组

叠绕组分为单叠绕组和复叠绕组。它们因其端部依次重叠排列而称为叠绕组。