

高等职业技术教育“十三五”规划教材——铁道机车类

电力机车电机

DIANLI JICHE DIANJI

付娟 林辉◎主编



高等职业技术教育“十三五”规划教材——铁道机车类

电力机车电机

付 娟 林 辉 主 编
刘芳璇 副主编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内容简介

本书为高等职业技术教育铁道机车（电力机车驾驶与电力机车检修）专业教材，全书共分七章，主要包括：直流电机的基本知识，脉流牵引电机的结构、特性、起动、调速和制动；变压器的基本知识，牵引变压器的结构和特性；异步电机的基本知识，交流牵引电机的结构、特性、起动、调速和制动；单相电机、辅助电机的基本结构 and 应用。本书还介绍了直流牵引电机、牵引变压器、交流牵引电机及辅助电机的检修和维护，并简单介绍了控制电机的结构和工作原理。

本书除作为高等职业院校专业教材外，还可作为成人教育、职工培训教材，以及司机提职考试培训用书及有关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

电力机车电机 / 付娟，林辉主编. —成都：西南
交通大学出版社，2016.8
高等职业技术教育“十三五”规划教材. 铁道机车类
ISBN 978-7-5643-4806-9

I. ①电… II. ①付… ②林… III. ①电力机车—电
机—高等职业教育—教材 IV. ①U264.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 165656 号

高等职业技术教育“十三五”规划教材——铁道机车类

电力机车电机

付娟 林辉 主编

责任编辑 孟苏成

封面设计 严春艳

出版发行 西南交通大学出版社
（四川省成都市二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼）

发行部电话 028-87600564 028-87600533

邮政编码 610031

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

印刷 成都中铁二局永经堂印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm×260 mm

印张 15.75

字数 392 千

版次 2016 年 8 月第 1 版

印次 2016 年 8 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-4806-9

定 价 38.00 元

课件咨询电话：028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话：028-87600562

前 言

根据《铁路 2020 年中长期发展规划》中的牵引动力发展目标，结合我国目前铁路牵引动力的实际情况，本教材以和谐型电力机车采用的三相交流牵引电机为主，兼顾韶山型电力机车的脉流牵引电机，主要介绍脉流牵引电机、牵引变压器、交流牵引电机的结构及工作原理，分析脉流牵引电机、交流牵引电机的工作特性和机械特性，阐述脉流牵引电动机、交流牵引电动机的起动、调速和制动方法；此外，还介绍了变压器的特性和参数测定方法，单相电机、辅助电机和控制电机的基本结构及应用，以及直流牵引电机、牵引变压器、交流牵引电机、辅助电机的检修和维护方法。

教材以理论知识“必需、够用”为度，减少了繁杂的理论分析、公式推导，突出学生对所学知识的应用能力。在编写过程中借鉴国内外优秀教材的做法，多采用图、表、实例等方式呈现知识点，努力让学生明白“是什么，如何做”。在编写格式上章前有概述，阐明学习目标；章后有小结，梳理知识结构；附有复习思考题，以便于学生自主学习。

本书由西安铁路职业技术学院付娟、林辉任主编，刘芳璇任副主编。参加编写的有西安铁路职业技术学院付娟（绪论，第一章）、侯艳（第二章）、刘芳璇（第三章）、林辉（第四章）、王晓琴（第五章）、丁洪芬（第六章），西安铁路局机务处纪涛（第七章）。本书在编写过程中得到宝鸡机车检修段雷鑫工程师、大同地方铁路罗川工程师的支持，在此表示衷心感谢。

本书由西安铁路局职教处邢永红工程师主审。主审在审阅过程中提出了许多宝贵意见和建议，在此表示衷心感谢。

由于编者水平所限，书中难免有疏漏和不足之处，殷切希望读者批评指正。

编 者

2016 年 4 月

目 录

第一章 直流电机的结构及运行	1
第一节 直流电机的工作原理	1
第二节 直流电机的结构	3
第三节 直流电机的磁场、电动势和电磁转矩	8
第四节 直流电机的基本方程	13
第五节 直流电动机的工作特性和机械特性	16
第六节 直流电动机的起动、调速、反转与制动	19
第七节 直流电机的换向	24
第八节 脉流牵引电动机概述	28
第九节 脉流牵引电动机的基本结构及特点	32
本章小结	47
复习思考题	48
第二章 牵引变压器的结构及运行	50
第一节 变压器的基本结构、分类和铭牌	50
第二节 变压器的工作原理及运行分析	56
第三节 变压器的等效电路和参数测定	60
第四节 变压器的连接组别及特性分析	64
第五节 自耦变压器和互感器	67
第六节 牵引变压器的特点及基本结构	71
第七节 TBQ 系列牵引变压器的基本结构	78
第八节 JQFP 系列牵引变压器的主要结构	83
本章小结	87
复习思考题	88
第三章 三相异步电动机基本知识	90
第一节 异步电动机的基本结构、分类及铭牌	90
第二节 交流绕组的结构和展开图	96
第三节 交流绕组的电势和磁势	108
第四节 三相异步电动机的工作原理及基本方程	111
第五节 三相异步电动机的运行特性和机械特性	119
第六节 三相异步电动机的起动、反转、调速和制动	123
本章小结	134
复习思考题	135

第四章 三相交流异步牵引电动机	137
第一节 三相交流牵引电机概述	137
第二节 异步牵引电动机变频调速的基本原理	141
第三节 异步牵引电动机运行的方式和特性	150
第四节 机车牵引中异步牵引电动机的特性调节	157
第五节 典型三相交流异步牵引电机的结构特点	160
本章小结	175
复习思考题	177
第五章 交流辅助电机	178
第一节 交流辅助电机概述	178
第二节 单相异步电动机	179
第三节 异步劈相机	186
第四节 直-交型电力机车的辅助电机	191
第五节 交-直-交型电力机车的辅助电机	200
本章小结	207
复习思考题	207
第六章 特种电机	208
第一节 直线电机	208
第二节 同步电机	213
第三节 微型同步电动机	217
第四节 开关磁阻电机	220
本章小结	223
复习思考题	225
第七章 电力机车电机的维护保养	226
第一节 脉流牵引电机的维护保养	226
第二节 主变压器的检修及维护保养	230
第三节 交流牵引电机检修及维护保养	232
第四节 辅助电机的检修及维护保养	239
本章小结	245
复习思考题	246
参考文献	247

第一章 直流电机的结构及运行

直流电机是应用电磁感应原理进行能量转换（将电能和机械能相互转换）的旋转电机之一。将机械能转换为直流电能的是直流发电机；将直流电能转换为机械能的是直流电动机。与交流电机相比较，直流电机结构复杂、运行维护困难、成本高。但直流电动机具有宽广的调速范围，较强的过载能力和较大的起动转矩等突出优点，仍广泛应用于对起动和调速要求较高的生产机械中，如电力机车、内燃机车、工矿机车、城市电车等的拖动电机。通过本章学习，应达到以下目标：

- （1）掌握直流电机、脉流牵引电机的基本结构和工作原理。
- （2）掌握直流电机的转矩、电势表达式，熟悉直流电机的基本方程。
- （3）熟悉直流电动机的起动、调速、反转和制动方法。
- （4）了解直流电动机的工作特性和机械特性。
- （5）了解直流电机的换向过程，掌握改善直流电机换向的方法。

第一节 直流电机的工作原理

直流电机是直流发电机和直流电动机的总称。直流电机具有可逆性，既可作直流发电机使用，也可作直流电动机使用。作直流发电机使用时，将机械能转换成直流电能输出；作直流电动机使用时，则将直流电能转换成机械能输出。

一、直流电机的模型结构

直流发电机的物理模型如图 1.1 所示。图中 N、S 为固定不动的主磁极，主磁极可以采用永久磁铁，也可以采用电磁铁。在电磁铁的励磁线圈上通以方向不变的直流电流，便形成一定极性的磁极。线圈 abcd 固定在可旋转导磁圆柱体上，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以随线圈一同转动的导电片上，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。

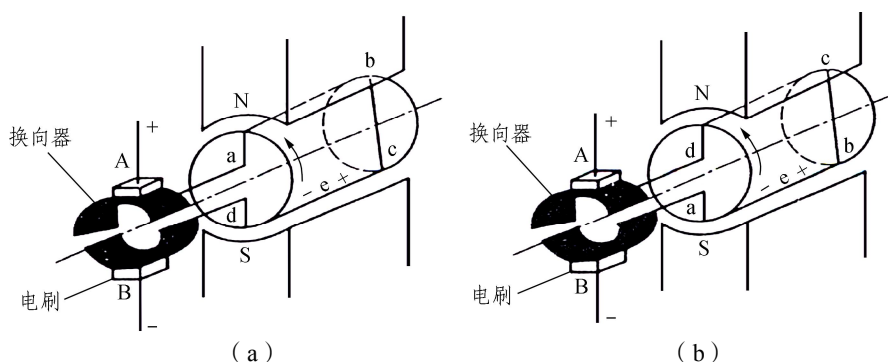


图 1.1 直流发电机模型

二、直流发电机的工作原理

在直流发电机的模型中，当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，在线圈 $abcd$ 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 1.1 (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。此时，电刷 A 的极性为正，电刷 B 的极性为负。

当线圈旋转 180° 后，如图 1.1 (b)，导体 ab 在 S 极下，导体 cd 则在 N 极下。此时，导体中的感应电动势方向发生改变，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 接触的换向片换到与电刷 A 接触，因此电刷 A 的极性仍为正，电刷 B 的极性仍为负。从图 1.1 中可以看出，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，在电刷两端可获得直流电动势。

由以上分析可知，在电枢线圈内部为一交变电势，但电刷两端引出的电势方向始终不变，为一单方向的直流电势。

三、直流电动机的工作原理

把直流电源接到电刷 A 、 B 上，电刷 A 接电源的正极，电刷 B 接电源的负极，电枢线圈中将有电流流过，如图 1.2 (a) 所示。

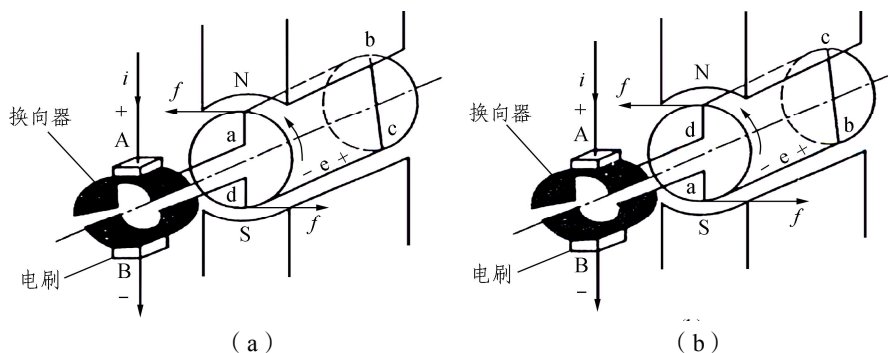


图 1.2 直流电动机的模型

在图 1.2 (a) 中, 线圈的 ab 边位于 N 极下, 线圈的 cd 边位于 S 极下, 载流导体在磁场中受到电磁力的作用, 其受力方向由左手定则确定。导体 ab 受力方向为从右向左, 导体 cd 受力方向为从左到右。导体所受电磁力对轴产生一转矩, 这种由于电磁作用产生的转矩称为电磁转矩, 电磁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 1.2 (b) 所示位置时, 位于 N 极下的导体 ab 转到 S 极下, 导体 ab 受力方向为从左向右; 而位于 S 极下的导体 cd 转到 N 极下, 导体 cd 受力方向为从右向左, 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。

由以上分析可知, 在电枢线圈中流通的电流为交变的, 但 N 极下的导体受力方向和 S 极下导体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。

图 1.1 所示为直流电机的简单模型, 实际直流电机的电枢根据具体情况需要有多个线圈。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。

四、电机的可逆原理

任何一台电机既可作发电机运行, 也可作电动机运行, 这一性质称为电机的可逆原理。直流电机也具有可逆性, 当输入机械转矩将机械能转换成电能时, 电机作发电机运行; 当输入直流电流产生电磁转矩, 将电能转换成机械能时, 电机作电动机运行。例如电力机车在牵引工况时, 牵引电机作电动机运行, 产生牵引力; 在制动工况时, 牵引电机作发电机运行, 将机车和列车的动能转换成电能, 产生制动力对机车进行电气制动。

第二节 直流电机的结构

直流电动机和直流发电机的结构基本相同, 都具有旋转部分和静止部分。旋转部分称为转子, 静止部分称为定子, 在定子和转子之间存在着空气隙。小型直流电动机的结构如图 1.3 所示, 其剖面结构如图 1.4 所示。

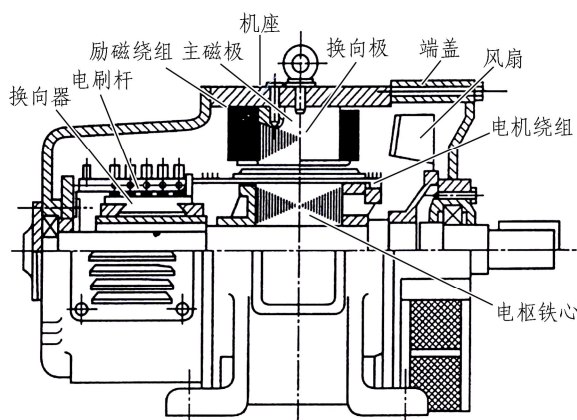


图 1.3 小型直流电动机的结构

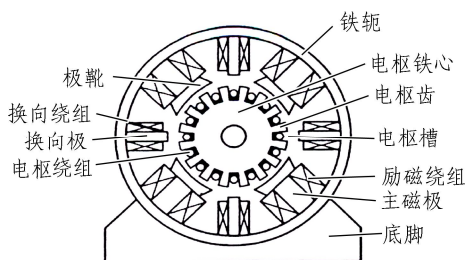


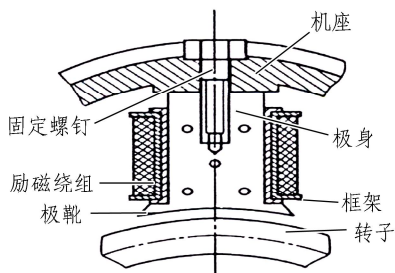
图 1.4 小型直流电动机的剖面结构

一、定子部分

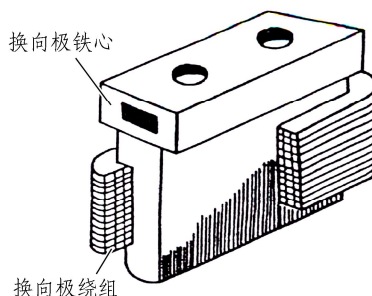
定子的作用，在电磁方面是产生磁场和构成磁路，在机械方面是整个电机的机械支撑。定子由主磁极、机座、换向极、电刷装置、端盖和轴承等组成。

1. 主磁极

主磁极简称主极，其作用是产生主磁场。主磁极由主磁极铁心和励磁绕组构成，其结构如图 1.5 (a) 所示。为了减小涡流损耗，主磁极铁心采用 1.0 ~ 1.5 mm 厚的低碳钢板冲制而成，再用铆钉把冲片铆紧成一个整体。小型电机的励磁绕组用绝缘铜线（或铝线）绕制而成，大中型电机励磁绕组用扁铜线绕制，并进行绝缘处理，然后套在主极铁心外面。整个主磁极用螺钉固定在机座内壁。



(a) 主磁极结构



(b) 换向极结构

图 1.5 直流电机主磁极和换向极结构

2. 机座

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的，该种机座能同时起到导磁和机械支撑作用。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。

3. 换向极

换向极又称为附加极，其结构如图 1.5 (b) 所示，换向极安装在相邻的两个主磁极之间，

用螺钉固定在机座上。换向极用来改善直流电机的换向，一般电机容量超过 1 kW 时均应安装换向极。

换向极由换向极铁心和换向极线圈组成。换向极铁心大多采用整块钢加工而成，但在脉流牵引电机中，为了更好地改善电机换向，换向极铁心也采用厚 1 ~ 1.5 mm 厚钢板或硅钢片叠成。换向极线圈采用圆铜线或扁铜线绕制而成，经绝缘处理后套在换向极铁心上，所有的换向极线圈串联后称为换向绕组，换向绕组与电枢绕组串联。换向极数目一般与主极数目相同，但在功率很小的直流电机中，只装主极数一半的换向极或不装换向极。

4. 电刷装置

电刷装置的作用是通过电刷和旋转的换向器表面的滑动接触，把转动的电枢绕组与外电路连接起来。电刷装置一般由电刷、刷握、刷杆、刷杆座和汇流条组成，电刷的结构如图 1.6 所示。

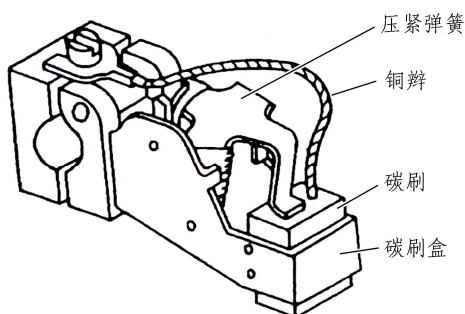


图 1.6 电刷结构

电刷是用石墨制成的导电块，放在刷握内，用弹簧以一定的压力将它压在换向器的表面。刷握用螺钉夹紧在刷杆上，刷杆装在一个可以转动的刷杆座上，成为一个整体部件。刷杆与刷杆座之间应绝缘，以免正、负电刷短路。

5. 端 盖

电机中的端盖主要起支撑作用。端盖固定在机座上，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

转子又称电枢，是电机的转动部分，其作用是产生感应电动势和电磁转矩，从而实现能量的转换，转子由电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴、轴承和风扇组成。

1. 电枢铁心

电枢铁心的作用是通过磁通和嵌放电枢绕组。图 1.7 所示为小型直流电机的电枢冲片形

状和电枢铁心装配图。在电枢铁心冲片上冲有放置电枢绕组的电枢槽、轴孔和通风孔。

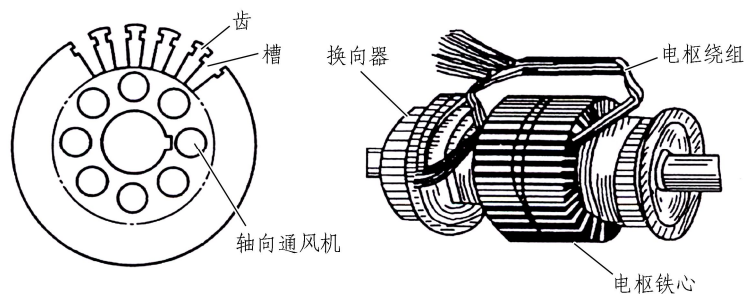


图 1.7 电枢冲片和电枢铁心装配图

为减小电机旋转时，铁心中的磁通方向发生变化引起的磁滞损耗和涡流损耗，电枢铁心用 0.35 mm 或 0.5 mm 厚的硅钢片叠成，叠片两面涂有绝缘漆。铁心叠片沿轴向叠装，中小型电机的电枢铁心通常直接压装在轴上；在大型电机中，由于转子直径较大，电枢铁心压装在套于轴上的转子支架上。

2. 电枢绕组

电枢绕组的作用是产生感应电动势和通过电流产生电磁转矩，实现机电能量转换。它是直流电机的主要电路部分。

电机的每一个线圈称为一个元件，多个元件有规律地连接起来形成电枢绕组。电枢绕组放置在电枢铁心的槽内，其直线部分在电机运转时产生感应电动势，称为元件的有效部分；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。

电枢绕组用圆铜线或矩形截面铜导线制成，铜线的截面面积决定于线圈中通过电流的大小。为了防止线圈在离心力作用下甩出，在槽口处用槽楔将线圈边封在槽内，线圈伸出槽外的端接部分，用热固性无纬玻璃丝带或非磁性钢丝扎紧。槽楔可用竹片或酚醛玻璃布板制成。

电枢绕组根据连接规律的不同，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。下面介绍绕组的基本知识。

1) 元 件

线圈是构成绕组的基本单元，又称绕组元件（线圈单元），元件分为单匝和多匝两种。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，其中一根称为首端，另一根称为末端。

直流电机的电枢绕组放置在电枢铁心上的槽内，通常采用双层绕组，沿槽深方向每槽有两个元件边，为了避免各线圈互相交叠，每一元件有一个有效边放在槽的上层，称为上层边；另一有效边放在另一槽的下层，称为下层边。与上层边相连的出线端称为始端，与下层边相连的出线端称为末端。图 1.8 所示为元件在槽内的放置情况。

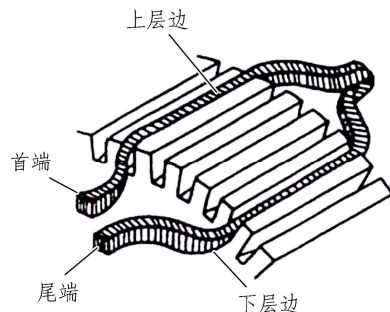


图 1.8 线圈元件边在槽内的放置情况

2) 极 距

相邻两个主磁极轴线沿电枢表面之间的距离称为极距，用 τ 表示。可用下式计算

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p} \quad (1.1)$$

式中 D_a ——电枢外径；
 p ——主磁极对数。

3) 叠绕组和波绕组

叠绕组是指串联的两个元件总是后一个元件端接部分紧贴在前一个元件端接部分，整个绕组成折叠式进行。交-直型电力机车采用单叠绕组。波绕组是指把相隔约为一对极距的同极性磁场下的相应元件串联起来，像波浪似地前进。直流电机的绕组如图 1.9 所示。

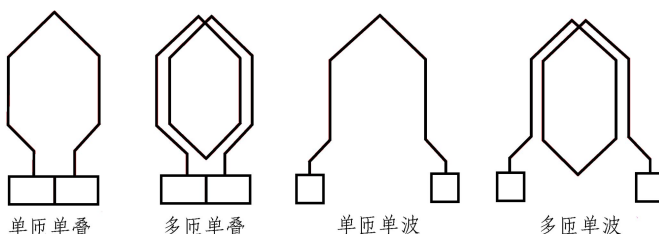


图 1.9 直流电机的绕组

3. 换向器

换向器又称为整流子。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。换向器结构如图 1.10 所示。换向器是由换向片组合而成，是直流电机的关键部件，也是最薄弱的部分。

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。换向片的底部做成燕尾形状，换向片的燕尾部分嵌在含有云母绝缘的 V 形钢环内，拼成圆筒形套入钢套筒上，相邻的两换向片间以 0.6 ~ 1.2 mm 的云母片作为绝缘，最后用螺旋压圈压紧。换向器固定在转轴的一端。换向片靠近电枢绕组一端的部分与绕组引出线相焊接。

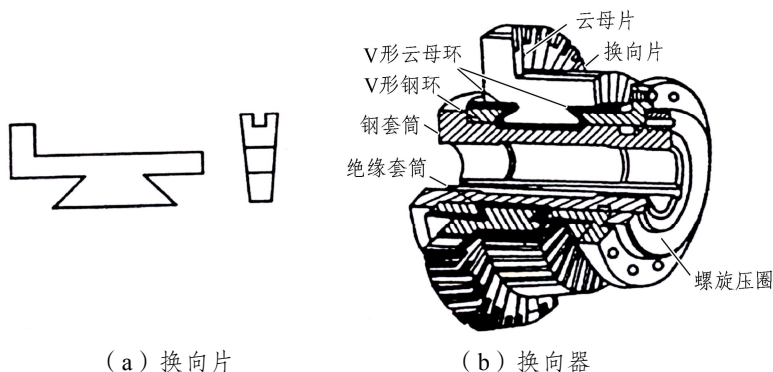


图 1.10 换向器结构

4. 转 轴

转轴起转子旋转的支撑作用，需有一定的机械强度和刚度，一般用圆钢制成。

三、空气隙

主极极靴和电枢间的间隙称为空气隙，简称气隙。气隙既保证了电机的安全运行，又是磁路的重要组成部分。由于空气磁阻远大于铁磁物质的磁阻，而电机的能量转换是依靠气隙磁通为媒介进行的，所以气隙的大小和形状对电机的性能有很大影响。

直流电机的气隙是不均匀的。极靴中部气隙较小，两侧气隙逐渐扩大，极尖处气隙最大。小型电机气隙为 $1 \sim 3 \text{ mm}$ ；大型电机气隙可达 $10 \sim 12 \text{ mm}$ 。

第三节 直流电机的磁场、电动势和电磁转矩

从直流电机基本工作原理的分析可知，发电机将机械能转换为电能，电动机将电能转换为机械能，其必要条件之一是必须具有气隙磁通。因此，必须在直流电机主磁极的励磁绕组中通以励磁电流来产生磁势，以产生气隙磁通，使电枢绕组切割气隙磁通而产生感应电势；或者由电枢电流与气隙磁通相互作用而产生电磁转矩，从而实现机电能量的转换。

一、直流电机的励磁方式

直流电机中有两种基本绕组，即励磁绕组和电枢绕组。励磁绕组和电枢绕组之间的连接方式称为励磁方式，不同励磁方式的直流电机，其特性有很大的差异，故选择励磁方式是选择直流电机的重要依据。

直流电机的励磁方式可分为他励、并励、串励、复励 4 类，如图 1.11 所示。

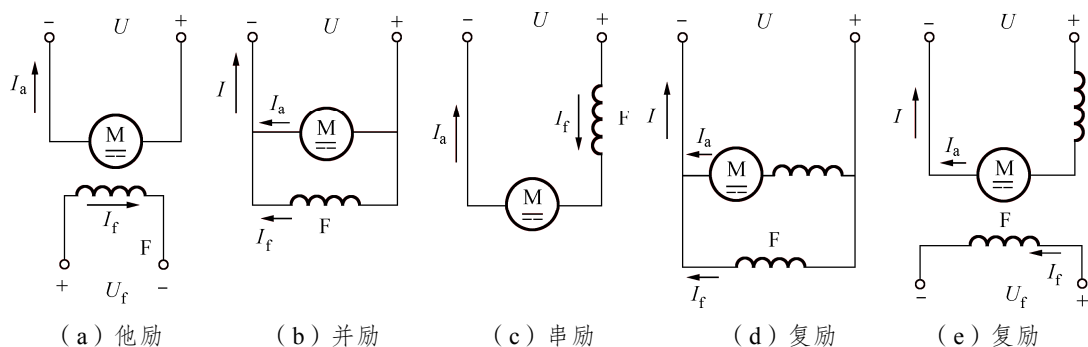


图 1.11 直流电机按励磁方式分类

1. 他励电机

他励直流电机的励磁绕组和电枢绕组分别由两个不同的电源供电，这两个电源的电压可以相同，也可以不同，如图 1.11 (a) 所示。励磁电流 I_f 的大小决定于励磁电源的电压和励磁回路的电阻，与电机的电枢电压及负载基本无关。用永久磁铁作主磁极的电机可当作他励电机。

2. 并励电机

并励直流电机的励磁绕组和电枢绕组并联，由同一电源供电，其接线如图 1.11 (b) 所示。励磁电流一般为额定电流的 5%，要产生足够大的磁通，需要有较多的匝数，所以并励绕组匝数多，导线较细。并励式直流电动机一般用于恒压系统。中小型直流电机多为并励式。

3. 串励电机

串励直流电机的励磁绕组与电枢绕组串联，如图 1.11 (c) 所示。励磁电流与电枢电流相同，数值较大，因此，串励绕组匝数很少，导线较粗。串励式直流电动机常用于要求很大起动转矩且转速允许有较大变化的负载。

4. 复励电机

复励电机至少有两个绕组励磁，其中之一是串励绕组，其他为他励（或并励）绕组，如图 1.11 (d)、(e) 所示。通常他励（或并励）绕组起主要作用，串励绕组起辅助作用。若串励绕组和他励（或并励）绕组的磁势方向相同，称为积复励，多用于要求起动转矩较大，转速变化不大的负载。若串励绕组和并励（或他励）绕组的磁势方向相反，称为差复励。差复励式直流电动机一般用于起动转矩小，而要求转速平稳的小型恒压驱动系统中。

直流电机各类绕组接线后，其引出线的端头要加以标记，各绕组线端的符号见表 1.1 所示。注脚“1”是始端，为正极；“2”是末端，为负极。

表 1.1 直流电机各绕组线端的符号

绕组名称	电枢绕组	换向极绕组	补偿绕组	串励绕组	并励绕组	他励绕组
线端名称	A ₁ A ₂	B ₁ B ₂	C ₁ C ₂	D ₁ D ₂	E ₁ E ₂	F ₁ F ₂

二、直流电机中的磁场

1. 空载时直流电机中的磁场

直流电机空载时，电枢电流几乎为零，只有励磁绕组中存在电流。因此，空载时电机的气隙磁场由励磁绕组的电流产生。

根据磁通路径的不同，将其分为主磁通和漏磁通。主磁通同时匝链着励磁绕组和电枢绕

组，是实现能量转换的关键。主磁通磁路的空气隙较小，磁阻较小。漏磁通只与励磁绕组或电枢绕组匝链，漏磁通磁路的空气隙较大，磁阻较大。所以，在同样的磁势作用下，漏磁通要比主磁通小得多。一般电机的主极漏磁通为主磁通的 15% ~ 20%。

2. 电枢磁场

直流电机带有负载时，电枢绕组中有电流通过，电枢绕组的电流也会产生磁场，称为电枢磁场。

电枢磁场沿电枢表面的分布情况，与电枢电流的分布情况有关。在直流电机中，电枢电流的分界线是电刷，在电刷轴线两侧对称分布，所以电枢磁场的分布情况与电刷的位置有关。

3. 电枢反应

直流电机带上负载运行后，电枢里有电流流过，电枢电流产生电枢磁场，电枢磁场的出现能对主极磁场产生影响，这种影响称为电枢反应。

三、直流电机的电枢电动势

电枢电动势是指直流电机正、负电刷之间的感应电动势，也就是每个支路里的感应电动势。当电机的气隙中有磁场存在，且电枢旋转使电枢导体切割磁力线时，在电枢绕组中会产生感应电动势。

每条电枢支路所含的元件数是相等的，而每个支路里的元件都是分布在同极性下的不同位置上。先求出一根导体在一个极距范围内切割气隙磁通密度的平均感应电动势，再乘上一个支路里总的导体数，就是电枢电动势。

设电枢绕组线圈数为 S ，一个线圈的匝数为 N_a ，则电枢导体总数 N 为

$$N = 2SN_a \quad (1.2)$$

每一支路中串联的导体数为 $\frac{N}{2a}$ ， a 为并联支路对数。

主极极距为 τ ，导体在磁场中轴向有效长度为 L ，每极磁通为 Φ ，则平均气隙磁密 B_{av} 为

$$B_{av} = \frac{\Phi}{L\tau} \quad (1.3)$$

导体的平均电势 e_{av} 为

$$e_{av} = B_{av} \cdot L \cdot v \quad (1.4)$$

式中， v 为电枢表面线速度，若电机转速为 n ，电枢直径为 D_a ，主极数为 $2p$ ，电枢表面周长 $\pi D_a = 2p\tau$ ，则

$$v = \frac{2p\tau n}{60} \quad (1.5)$$

因此，支路电势即电机的感应电势为

$$E_a = \frac{N}{2a} e_{av} = \frac{N}{2a} \cdot \frac{\Phi}{\tau L} \cdot L \cdot \frac{2p\tau n}{60} = \frac{pN}{60a} \cdot \Phi \cdot n = C_e \Phi n \quad (1.6)$$

式中 Φ ——每极磁通量 (Wb);

n ——电机转速 (r/min);

C_e ——电机电势常数, $C_e = \frac{pN}{60a}$ 。

对于给定的电机, p 、 N 、 a 均为定值, 所以, C_e 是一个常数。

式 (1.6) 表明直流电机的感应电动势与电机结构、气隙磁通和电机转速有关。当电机制造好以后, 与电机结构有关的常数 C_e 不再变化, 因此电枢电动势仅与气隙磁通和转速有关, 改变转速和磁通均可改变电枢电动势的大小。

四、直流电机的电磁转矩

电枢绕组通过电流时, 在磁场中将受到电磁力的作用, 电磁力在电枢轴上产生的转矩称电磁转矩。电磁转矩的大小, 可根据电磁力定律求得。

电枢绕组的支路电流为 i_a 时, 作用在任一根导体上的平均电磁力 f_{av} 为

$$f_{av} = B_{av} \cdot L \cdot i_a \quad (1.7)$$

导体产生的电磁转矩为

$$T_{av} = f_{av} \frac{D_a}{2} \quad (1.8)$$

由于每极下导体的电流方向相同, 故同一极下各导体产生的电磁转矩方向相同, 相邻极下的磁场和导体电流方向同时相反, 转矩方向保持不变。因此, 电磁转矩 T 应为电枢表面所有导体产生的 f_{av} 之和, 即

$$T = f_{av} \frac{D_a}{2} N = B_{av} \cdot L \cdot i_a \cdot \frac{D_a}{2} \cdot N = \frac{\Phi}{\tau L} \cdot L \cdot \frac{I_a}{2a} \cdot \frac{p\tau}{\pi} \cdot N = \frac{pN}{2\pi a} \cdot \Phi \cdot I_a = C_T \Phi I_a \quad (1.9)$$

式中 I_a ——电枢电流 (A), $I_a = 2ai_a$;

C_T ——电机转矩常数, $C_T = \frac{pN}{2\pi a}$ 。

对于已制成的电机, p 、 N 、 a 均为定值, 所以, C_T 也是一个常数。