

高等职业技术教育机电类专业规划教材

# 电机与电气控制

主 编 何巨兰

副主编 丁明军

参 编 陈 涛 戴一平 杨龙武

主 审 翁彪年

机械工业出版社

本书是针对高等职业教育的特点，根据编者多年职教和实践经验编写的。全书共八章，包括直流电动机、变压器、异步电动机、控制电机以及电机的维护及故障分析；电气控制电路常用低压电器、继电器—接触器电气控制电路、可程序控制器（PLC）及应用和微电脑控制技术及应用。

本书在内容编写上突破原来的教学体系，力求取材新颖，拓展应用范围，对电气控制电路的运行、维护、常见故障进行了分析，并对电动机和变压器的维护、常见故障进行了讨论。本书以必需、够用为原则，减少理论推导，由浅入深，突出应用能力的培养。

本书适用于高职电气类专业、机电类专业以及相关专业的教材，也可供从事相关工作的专业人员，特别是维修人员自学阅读。

## 图书在版编目（CIP）数据

电机与电气控制 / 何巨兰主编. —北京：机械工业出版社，2003.11

高等职业技术教育机电类专业规划教材

ISBN 7-111-13474-5

I. 电... II. 何... III. ①电机学—高等学校：技术学校—教材②电气控制—高等学校：技术学校—教材 IV. ①TM3②TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2003）第 107086 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：王玉鑫 版式设计：冉晓华 责任校对：姚培新

封面设计：张静 责任印制：闫焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·17 印张·1 插页·426 千字

0 001—4 000 册

定价：24.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话（010）68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

# 高等职业技术教育机电类专业教材编委会

名誉主任委员	严雪怡 刘际远		
主任委员	上海电机技术高等专科学校	孙兴旺	副校长
副主任委员	福建高级工业专门学校	黄森彬	副校长
	南京机械高等专科学校	左健民	副校长
	陕西工业职业技术学院	翟 轰	校 长
	湘潭机电高等专科学校	曾家驹	副校长
	包头职业技术学院	李俊梅	副校长
	无锡职业技术学院	韩亚平	调研员
	浙江机电职工大学	管 平	副校长
	机械工业出版社教材编辑室	林 松	主 任
	(排名不分先后)		
委员单位	邢台职业技术学院		
	湖南工业职业技术学院		
	(等 26 所院校)		

# 前 言

本书是高等职业技术学院机电类“电机与电气控制”课程的教学用书，也可作为成人高校的教学用书和广大工程技术人员的自学用书。

本书是根据目前高等职业教育的特点，将电机原理、电力拖动基础与电气控制的知识有机地融为一体，在学完电工基础等课程后进行授课。

在编写此书时，我们注重多门学科知识的前后衔接，着眼于职业教育的重点是应用，删除了繁琐的数学推导，并将各种电机、电器和控制电路的维护、常见故障的分析一一列出，意在培养学生分析问题和解决问题的能力。各章内容力求深入浅出、通俗易懂。

本书由何巨兰担任主编，并编写第一、三、四章；丁明军担任副主编，并编写第五、六章；陈涛编写第二章；戴一平编写第七章；杨龙武编写第八章。

本书由翁彪年任主审，胡幸鸣和赵双全对全书的编写提出了宝贵的意见，在此表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，恳请读者提出宝贵意见。

编者

2003年9月

# 目 录

前言	思考题和习题	93	
第一章 直流电机	1	第四章 控制电机	95
第一节 直流电机的基本原理与结构	1	第一节 伺服电动机	95
第二节 直流电机的电磁转矩和感应电动势	7	第二节 测速发电机	101
第三节 直流电动机的运行分析与机械特性	9	第三节 步进电动机	104
第四节 电力拖动的基础知识	13	第四节 自整角机和旋转变压器	109
第五节 他励直流电动机的起动、反转和制动	16	思考题和习题	112
第六节 他励直流电动机的调速	19	第五章 电气控制电路中常用的低压电器	113
思考题和习题	21	第一节 低压电器的基础知识	113
第二章 变压器	23	第二节 刀开关和隔离器	120
第一节 变压器的工作原理和结构	23	第三节 主令电器	121
第二节 单相变压器的运行分析	28	第四节 接触器	124
第三节 三相变压器	36	第五节 熔断器	128
第四节 自耦变压器	39	第六节 继电器	131
第五节 电力变压器运行维护和常见故障分析	40	第七节 低压断路器	137
思考题和习题	43	第八节 电磁执行机构	140
第三章 异步电动机	44	思考题和习题	143
第一节 三相异步电动机的结构与工作原理	44	第六章 继电器—接触器电气控制电路	144
第二节 三相异步电动机的定子绕组和感应电动势	50	第一节 电气原理图	144
第三节 三相异步电动机的运行分析	57	第二节 继电器—接触器电气控制电路的基本环节	145
第四节 三相异步电动机的功率和转矩	62	第三节 常用机床电气控制电路	155
第五节 三相异步电动机的机械特性	65	第四节 组合机床电气控制电路	177
第六节 三相异步电动机的起动	68	第五节 起重设备电气控制电路	186
第七节 三相异步电动机的调速	75	第六节 电气控制系统故障查找与检修方法	197
第八节 三相异步电动机的反转与制动	80	思考题和习题	201
第九节 单相异步电动机	84	第七章 可编程序控制器 (PLC) 及应用	203
第十节 异步电动机的运行维护和故障分析	89	第一节 小型可编程序控制器简介	203
		第二节 可编程序控制器的硬件系统	207

第三节 可编程序控制器的指令系统 .....	212	第二节 数控机床微电脑控制系统 .....	252
第四节 可编程序控制器的应用 .....	230	第三节 空调微电脑控制电路 .....	258
思考题和习题 .....	244	思考题和习题 .....	264
第八章 微电脑控制技术及应用 .....	246	参考文献 .....	265
第一节 单片机控制电路的构成 .....	246		

# 第一章 直流电机

直流电机是实现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，直流电机结构复杂、成本高，运行维护较困难。但直流电动机具有良好的调速性能、较大的起动转矩和过载能力等很多优点，在起动和调速要求较高的生产机械如大型机床、轧钢机、电力机车、起重机、船舶、造纸及纺织行业的机械中，仍得到广泛应用。由于电力电子技术的迅速发展，作为直流电源的直流发电机已逐步被晶闸管整流装置所取代。

本章主要分析直流电机的基本工作原理、结构，并着重研究直流电动机的电力拖动特性。

## 第一节 直流电机的基本原理与结构

### 一、直流电机的基本工作原理

#### 1. 直流发电机的基本工作原理

直流发电机的工作原理可以用一个简单的模型来说明，如图 1-1 所示。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）， $abcd$  是安装在旋转圆柱体（导磁材料制成的）上的一个线圈，整个旋转部分称为转子或电枢。线圈两端分别接到两个相互绝缘的换向铜片 1 和 2 上。这两个换向片就构成了最简单的换向器。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。

当原动机拖着电枢以速度  $v$  在磁场中逆时针旋转时，根据电磁感应原理，线圈  $ab$  边和  $cd$  边切割磁力线产生感应电动势，其方向用右手定则确定。在图中所示的位置上，线圈的  $ab$  边处于 N 极下，产生的感应电动势从  $b$  指向  $a$ ；线圈的  $cd$  边处于 S 极下，产生的感应电动势从  $d$  指向  $c$ 。从整个线圈来看，感应电动势的方向为  $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ ；反之，当  $ab$  边转到 S 极下， $cd$  边转到 N 极下时，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。

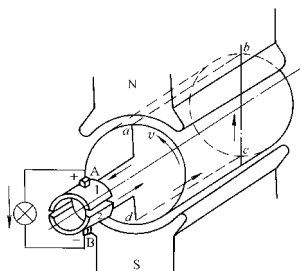


图 1-1 直流发电机的工作原理模型

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。在图 1-1 所示瞬间，线圈的  $ab$  边处于 N 极下，电动势的方向从  $b$  向  $a$  引到电刷 A，所以电刷 A 的极性为正。当线圈转过  $180^\circ$ ，线圈  $ab$  边与  $cd$  边互换位置，使  $cd$  边处于 N 极下时，于是  $cd$  边与电刷 A 接触，其电动势的方向是从  $c$  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 的极性总是为负。进一步观察可以发现，电刷 A 总是与旋转到 N 极下的导体接触，所以电刷 A 总是正极性。而电刷 B 总是与旋转到 S 极下的导体接触，所以电刷 B 总是负极性，故在电刷 A、B 之间得到的是脉动直流电动势。当电枢上的线圈足够多时，合成的感应电动势将是较为平滑的直流电动势。

**例 1-1** 如果图 1-1 中直流发电机顺时针旋转，电刷两端的电动势极性有何变化？还有什么因素会引起同样的变化？

**解** 在图 1-1 所示位置，当直流发电机顺时针旋转时，用右手定则判定线圈中感应电动势的方向为  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ ，通过换向片与电刷的滑动接触，则电刷 B 极性为正，电刷 A 极性为负。所以，改变直流发电机电枢旋转方向可以改变输出电动势的极性。

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发生改变。

## 2. 直流电动机的工作原理

直流电动机的工作原理模型与直流发电机相类似，如图 1-2 所示，不同的是电刷 A、B 两端外接直流电源  $U$ 。在图示的位置，电流从电源的正极经电刷 A 与换向片 1 流入电动机线圈，然后再经换向片 2 与电刷 B 流回电源的负极，线圈中电流的方向为  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 。根据电磁力定律，线圈边  $ab$  与  $cd$  在磁场中分别受到电磁力  $f$  的作用，其方向可用左手定则确定，如图 1-2 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  $ab$  边转到 S 极下、 $cd$  边转到 N 极下时，若电流方向不变，则电磁力的方向发生变化，电动机将顺时针旋转。所以当线圈转到另一极面下时电流方向必须改变，这样导体所受的电磁力方向才能不变，从而保持电动机沿着一个固定的方向旋转。

如何才能使导体中的电流方向改变呢？这个任务仍然由换向器来完成。从图 1-2 中可以看出，原来电刷 A 通过换向片 1 与经过 N 极面下的导体  $ab$  相连，电枢旋转  $180^\circ$  后电刷 A 通过换向片 2 与经过 N 极面下的导体  $cd$  相连；原来电刷 B 通过换向片 2 与经过 S 极面下的导体  $cd$  相连，现在电刷 B 通过换向片 1 与经过 S 极面下的导体  $ab$  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，电枢仍按逆时针方向旋转。

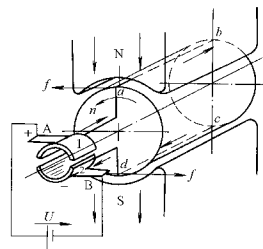


图 1-2 直流电动机工作原理模型

综上所述，不论是直流发电机还是直流电动机，换向器可以使电刷 A 始终与经过 N 极面下的导体相连，电刷 B 始终与经过 S 极面下的导体相连。通过换向器和电刷的作用，把直流发电机电枢线圈中的交变电动势整流成电刷间的直流电动势；把直流电动机电刷间的直流电流转变成线圈内的交变电流，以确保电动机沿恒定方向旋转。所以换向器是直流电机中改变电流方向的关键部件。

**例 1-2** 电动机拖动的生产设备常常需要作正转和反转的运动，例如龙门刨床工作台的往复运动和电力机车的前行和倒退等，这就要求电动机能正转和反转。图 1-2 所示的直流电动机怎样才能顺时针旋转呢？

**解** 电动机顺时针旋转需要获得一个顺时针方向的转矩，由左手定则可知电磁力的方向

取决于磁场极性和导体中电流的方向，所以直流电动机获得反转的方法有两个：一是改变磁场极性；二是改变电源电压的极性使流过导体的电流方向改变。应该注意的是，两者只能改变其一，否则直流电动机的转向不会改变。

## 二、直流电机的基本结构

直流电机的结构由两个主要部分组成：一是静止部分——称为定子，主要用来建立磁场。二是转动部分——称为转子或电枢，是机械能变为电能或电能变为机械能的枢纽。在定转子之间，有一定的间隙，称为气隙。图 1-3 所示为直流电机的主要部件图，图 1-4 所示为直流电机剖面图。

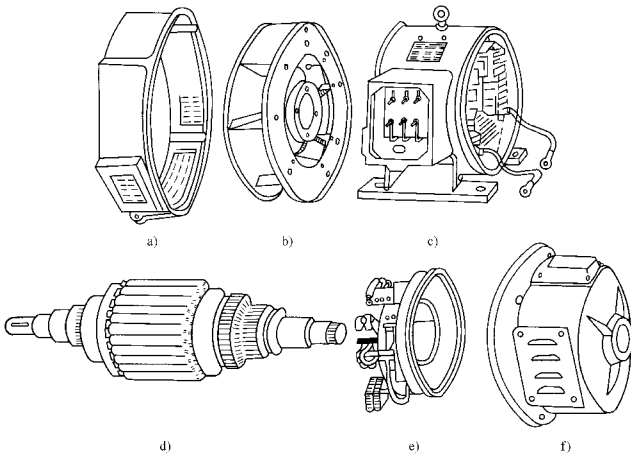


图 1-3 直流电机主要部件图

a) 前端盖 b) 风扇 c) 定子 d) 转子 e) 电刷装置 f) 后端盖

### 1. 定子部分

(1) 主磁极 主磁极由磁极铁心和励磁绕组构成。当励磁绕组中通入直流电流后，铁心中即产生励磁磁通，并在气隙中建立磁场。励磁绕组是用绝缘铜线绕制的线圈，套在磁极铁心外面。磁极铁心一般用厚度为  $1 \sim 1.5\text{mm}$  的低碳钢板冲片叠压铆接而成。磁极极靴沿气隙表面成弧形，使极下气隙磁通密度分布更接近正弦波。主磁极总是 N、S 两极成对出现。各主磁极的励磁绕组相互串联连接，连接时要能保证相邻磁极的极性按 N、S 交替排列。

(2) 换向极 换向极也是由铁心和换向极绕组构成。当换向极绕组通入直流电流时，它所形成的磁场对电枢磁场产生影响，目的是为了改善换向，使电刷与换向片之间火花减小。换向极绕组总是与电枢绕组串联。

(3) 电刷装置 电刷将旋转的电枢与固定不动的外电路相连，把直流电流引入或将直流感应电动势引出。因此，它与换向器之间既要有紧密的接触，又要有良好的相对滑动。直流

电机中用一套电刷装置来保证它的作用。电刷装置由电刷及弹簧、刷握、刷杆座等组成。电刷用石墨做成的导电块放置在刷盒内，用弹簧压紧在换向器上。一般电刷组数与主磁极极数相等，电刷装置在换向器表面应对称分布，并且可以移动，用以调整电刷在换向器上的位置。图 1-5 所示为电刷装置结构图。

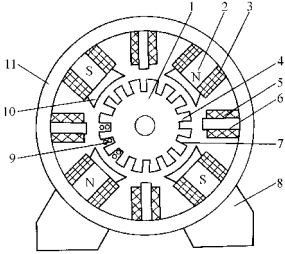


图 1-4 直流电机的剖面示意图

1—电枢铁心 2—主磁极 3—励磁绕组 4—电枢齿  
5—换向极绕组 6—换向极铁心 7—电枢槽 8—底座  
9—电枢绕组 10—极掌(极靴) 11—机座(磁轭)

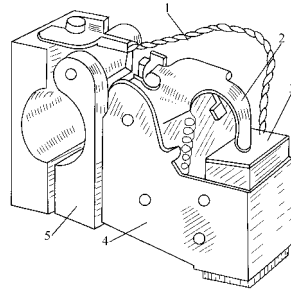


图 1-5 电刷装置结构图

1—铜丝辫 2—压紧弹簧 3—电刷  
4—刷握 5—刷杆座

## 2. 转子部分

(1) 电枢铁心 电枢铁心是主磁路的一部分，同时也要安放电枢绕组。由于电机运行时，电枢与气隙磁场之间有相对运动，交变的磁通会在铁心中产生涡流和磁滞损耗。为了减少损耗，电枢铁心通常用厚度为 0.5mm 且表面涂绝缘的圆形硅钢冲片叠压而成。冲片圆周表面均匀地冲有许多齿和槽，槽内可安放电枢绕组。

(2) 电枢绕组 电枢绕组是直流电机电路的主要组成部分，它是产生感应电动势和流过电流而产生电磁转矩，从而实现机电能量转换的重要部件。电枢绕组由许多个线圈（或称为绕组元件）按一定的规律连接而成。线圈通常用高强度聚酯漆包线绕制而成，一个线圈边嵌入某个槽中的上层，另一个线圈边则嵌入另一槽的下层，如图 1-6 所示。绕组元件与铁心槽之间以及上、下层线圈边之间相互绝缘。槽口处沿轴向打入绝缘竹片或环氧酚醛玻璃布板制成的槽楔将线圈压紧以防止线圈在运行时飞出。绕组元件的两个端头按一定的规律焊接在换向片上。电枢绕组的连接规律参见其他书籍。

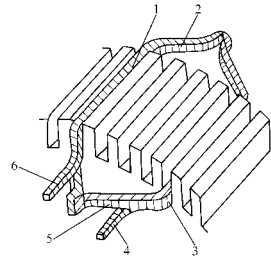


图 1-6 绕组元件在槽内安放示意图

1—上层线圈边 2、5—端接部分 3—下层线圈边 4—线圈尾端 6—线圈首端

(3) 换向器 换向器是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，每片换向片的一端有突出的部分，上面铣有线槽，供电枢绕组引出端焊接所用。所有换向片均放置在与它配合的具有燕尾状槽的金属套筒内，然后用 V 形钢环和螺旋压圈将换向片和套筒紧固成一体。换向片组与套筒、V 形钢环之间均要用

云母环绝缘,如图 1-7 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,这种塑料热压成形紧固的换向器,工艺简单,称为塑料换向器。

### 3. 气隙

气隙是电机磁路的重要部分。它的路径虽然很短,一般小型电机的气隙为 0.7~5mm,大型电机为 5~10mm 左右,但由于气隙磁阻远大于铁心磁阻,对电机性能有很大的影响。在拆装直流电机时应予以重视。

### 三、直流电机的铭牌数据

每一台电机上都有一块铭牌,上面标出的数据称为额定值。这是电机制造厂家按照国家标准和该电机的特定情况规定该电机额定运行状态时的各种运行数据,是用户选用、安装、使用和维修电机时的依据。如果用户使用时负载功率远小于额定值,称为轻载,电机能持续正常运行,但效率降低,不经济。如果电机运行时负载功率超出了额定值,称为过载,将缩短电机的使用寿命甚至可能损坏电机。所以应

根据负载条件合理选用电机,使其接近额定值才经济合理,同时又可以保证电机可靠地工作,并且具有优良的运行性能。表 1-1 所示为一台直流电动机的铭牌数据。

表 1-1 直流电动机铭牌

型 号	Z2-72	励磁方式	并 励
功 率	22kW	励磁电压	220V
电 压	220V	励磁电流	2.06A
电 流	116A	定 额	连续
转 速	1500r/min	温 升	80°C
出品号数	×××××	出厂日期	××××年×月

×××电机厂

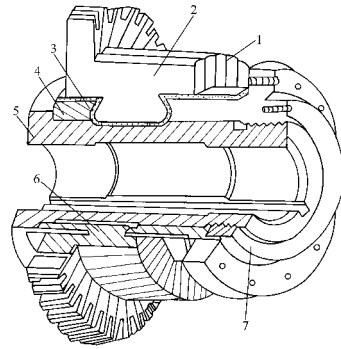
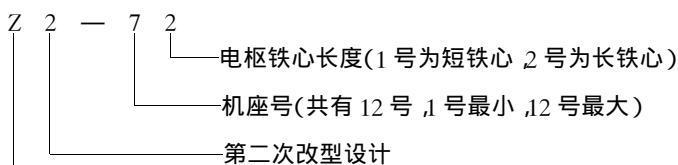


图 1-7 直流电机换向器

1—云母片 2—换向片 3—V形云母套筒 4—V形钢环 5—钢套 6—绝缘套筒 7—螺旋压圈

### 1. 电机型号

型号表明该电机所属的系列及其主要特点。掌握了电机型号,就可以从有关的手册及资料中查出该电机的技术数据。



此为试读,需要完整PDF请到 [www.longbook.com](http://www.longbook.com) 一般用途的防护式直流电机

## 2. 额定值

(1) 额定功率  $P_N$   $P_N$  (kW) 是指在规定的条件下, 长期运行允许输出的功率。对于发电机来说, 是指正负电刷之间输出的电功率; 对于电动机来说, 则是指轴上输出的机械功率。

(2) 额定电压  $U_N$   $U_N$  (V) 对发电机来说, 是指在额定电流下输出额定功率时的端电压; 对电动机来说, 是指所规定的正常工作时, 加在电动机两端的电源电压。

(3) 额定电流  $I_N$   $I_N$  (A) 是直流电机正常工作时, 输出或输入的最大电流值。

对于发电机来说, 三个额定值之间的关系为

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

对于电动机来说, 三个额定值之间的关系为

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

额定效率为

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_1} \times 100\% \quad (1-3)$$

(4) 额定转速  $n_N$   $n_N$  (r/min) 是指电机在上述各项均为额定值时的运行转速。

(5) 额定温升 是指电机允许发热的温升限度, 温升高低与电机使用的绝缘材料的绝缘等级有关, 电机的允许温升与绝缘等级的关系如表 1-2 所示。

表 1-2 电机允许温升与绝缘耐热等级的关系

绝缘耐热等级	A	E	B	F	H	C
绝缘材料的允许温度 / °C	105	120	130	155	180	180 以上
电机的允许温升 / °C	60	75	80	100	125	125 以上

例 1-3 一台直流电动机,  $P_N = 17\text{kW}$ ,  $U_N = 220\text{V}$ ,  $n_N = 1500\text{r/min}$ ,  $\eta_N = 83\%$ 。求其额定电流和额定负载时的输入功率。

解

由式 (1-2) 得 
$$I_N = \frac{P_N}{U_N \eta_N} = \frac{17 \times 10^3}{220 \times 0.83} \text{A} = 93.1 \text{A}$$

输入功率 
$$P_1 = U_N I_N = (220 \times 93.1) \text{W} = 20482 \text{W} = 20.48 \text{kW}$$

## 3. 励磁方式

直流电机在进行能量转换时, 都以气隙中的磁场作为媒介。除了采用磁钢制成主磁极的永磁式直流电机以外, 直流电机都是在励磁绕组中通以励磁电流  $I_f$  产生磁场的。励磁绕组获得电流的方式称作励磁方式。

直流电机的运行性能与其励磁方式有着密切的关系。励磁方式分为:

(1) 他励 励磁绕组的电流由单独的电源供给, 如图 1-8a 所示。

(2) 并励 励磁绕组与电枢绕组并联, 如图 1-8b 所示。

(3) 串励 励磁绕组与电枢绕组串联, 如图 1-8c 所示。

(4) 复励 励磁绕组分为两部分, 一部分与电枢绕组并联, 是主要部分; 另一部分与电枢绕组串联, 如图 1-8d 所示。两部分励磁绕组的磁通势方向相同时称为积复励; 方向相反则称为差复励。

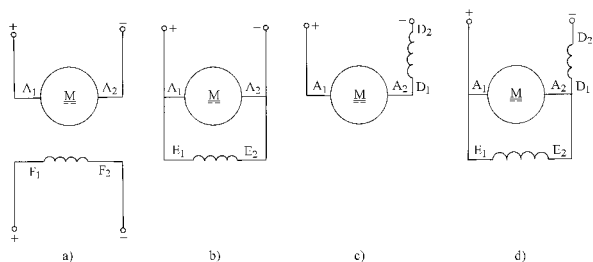


图 1-8 直流电机的励磁方式

a) 他励 b) 并励 c) 串励 d) 复励

注：图中各绕组两端的符号为国家规定的出线端标志，  
下标“1”是首端，为正极；下标“2”是末端，为负极。

例 1-4 在图 1-9a 中画出并励直流电动机的实际接线图。（ $B_1 - B_2$  为换向极绕组）

解 换向极绕组与电枢绕组串联，励磁绕组与电枢绕组并联后接直流电源，如图 1-9b 所示。

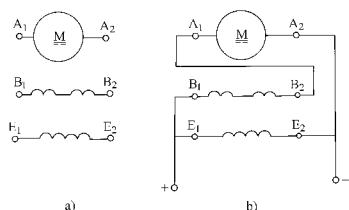


图 1-9 并励直流电动机各绕组接线图

a) 各绕组图 b) 接线图

## 第二节 直流电机的电磁转矩和感应电动势

直流电动机在电枢绕组中通入直流电流，与磁场相互作用产生电磁力并形成电磁转矩，使电动机旋转。直流发电机工作时，电枢绕组导体切割磁场产生感应电动势。

### 一、电磁转矩 $T$

由电磁力定律知，电枢绕组每一根载流导体（线圈有效边）所受的平均电磁力为  $f = Bli$ ，对于给定的电机，磁感应强度  $B$  与每极的磁通  $\Phi$  成正比；每根导体中的电流  $i$  与从电刷流入（或流出）的电枢电流  $I_a$  成正比；导线长度  $l$  在电机制成后是个常量。因此电磁转

矩  $T$  与电磁力  $f$  成正比, 电磁转矩的大小可表示为

$$T = C_T \Phi I_a \quad (1-4)$$

式中  $C_T$ ——转矩系数,  $C_T = pN / (2\pi a)$ ;

$p$ ——电机的磁极对数;

$N$ ——电枢绕组总导体根数;

$a$ ——电枢绕组的并联支路对数 ( $C_T$  大小取决于电机的结构, 即在制成的电机中  $p$ 、 $N$ 、 $a$  均为定值);

$\Phi$ ——每极磁通 (Wb), 当电枢电流的单位为 A 时, 电磁转矩单位为  $N \cdot m$ 。

式 (1-4) 表明对已制成的电机, 电磁转矩  $T$  正比于每极磁通  $\Phi$  和电枢电流  $I_a$ 。当每极磁通恒定时, 电枢电流越大, 电磁转矩也越大。当电枢电流一定时, 每极磁通越大, 电磁转矩也越大。

## 二、电枢电动势 $E_a$

根据电磁感应定律, 电枢绕组中每根导体的感应电动势为  $e = Blv$ 。对于给定的电机, 电枢绕组的电动势与每根导体的电动势成正比, 导体切割磁场的线速度  $v$  与电机转速  $n$  成正比。因此, 电枢电动势大小可用下式表示:

$$E_a = C_e \Phi n \quad (1-5)$$

式中  $C_e$ ——称为电动势系数,  $C_e = pN / (60a)$ 。

当每极磁通  $\Phi$  的单位为 Wb, 转速  $n$  的单位为  $r/min$  时, 电枢电动势的单位为 V。

由式 (1-5) 可知, 对已制成的电机, 电枢电动势  $E_a$  正比于每极磁通  $\Phi$  和电机转速  $n$ 。

转矩系数  $C_T$  与电动势系数  $C_e$  之间有固定的比值关系, 为

$$\frac{C_T}{C_e} = \left( \frac{pN}{2\pi a} \right) / \left( \frac{pN}{60a} \right) = \frac{60}{2\pi} = 9.55$$

即

$$C_T = 9.55 C_e \quad (1-6)$$

**例 1-5** 一台直流发电机,  $2p=4$ , 电枢绕组的并联支路对数  $a=2$ , 电枢绕组总导体数  $N=216$  根, 额定转速  $n_N=1460 r/min$ , 每极磁通  $\Phi=2.2 \times 10^{-2} Wb$ 。求: 1) 此发电机的感应电动势; 2) 若此发电机作为电动机使用, 当电枢电流为  $800A$  时, 能产生的电磁转矩有多大?

解 电动势系数 
$$C_e = \frac{pN}{60a} = \frac{2 \times 216}{60 \times 2} = 3.6$$

$$E_a = C_e \Phi n = 3.6 \times 2.2 \times 10^{-2} \times 1460 V = 115.6 V$$

转矩系数 
$$C_T = 9.55 C_e = 9.55 \times 3.6 = 34.4$$

$$T = C_T \Phi I_a = 34.4 \times 2.2 \times 10^{-2} \times 800 N \cdot m = 605 N \cdot m$$

## 三、直流电机的能量转换——电磁功率 $P_{em}$

电磁转矩和感应电动势是直流电机的基本物理量, 并在直流电机的机电能量转换中具有重要意义。我们以电动机为例, 来说明机电能量转换的原理。

直流电动机在将电能转换为机械能的过程中, 遵循能量守恒的规律, 即电动机输入的电能与输出的机械能以及在能量转换过程中产生的损耗之间要保持平衡关系。当直流电动机在电源电压的作用下, 将电流通入电枢绕组, 载流导体受到电磁转矩的作用从而使电动机旋转。而当电动机旋转起来后, 电枢绕组导体切割磁力线, 产生感应电动势, 用右手定则可判

断其方向与输入电流方向相反。这意味着此电枢电动势是反电动势，它阻碍电流流入电枢导体。所以，直流电动机要正常工作，施加的电源电压就必须克服（大于）反电动势的阻碍作用，把电流灌入电动机。由此可知，电枢电动势作为反电动势来吸收电源的电功率，并通过电磁感应的作用将其转换为机械功率。这部分电功率称为电磁功率，用  $P_{em}$  表示，即

$$P_{em} = E_a I_a \quad (1-7)$$

根据电枢电动势表达式 (1-5) 和 旋转角速度  $\Omega = 2\pi n / 60$ ，式 (1-7) 可写为

$$P_{em} = E_a I_a = C_e \Phi n I_a = \frac{pN}{60a} \Phi n I_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \frac{2\pi n}{60} = T\Omega \quad (1-8)$$

从力学可知，转矩  $T$  和旋转角速度  $\Omega$  的乘积为机械功率表示方法。上式说明，电功率属性的电磁功率  $E_a I_a$  转换为机械功率属性的电磁功率  $T\Omega$ 。通过以上分析，我们知道，电动机的反电动势  $E_a$  在机电能量转换过程中起着关键性的作用，是机电能量转换得以实现的必要因素。由于有了反电动势  $E_a$ ，电动机才能不断地从直流电源吸取电功率，并通过电磁感应的作用将其转换成机械功率输出。电磁功率是联系机械量和电磁量的桥梁，在电磁量与机械量的计算中有很重要的意义。

### 第三节 直流电动机的运行分析与机械特性

#### 一、直流电动机的基本方程式

直流电动机的基本方程式是指直流电动机稳定运行时电路系统的电动势平衡方程式、机械系统的转矩平衡方程式以及能量转换过程中的功率平衡方程式。这些方程式反映了直流电动机内部的电磁过程，表达了电动机内外的机电能量转换关系，说明了直流电动机的运行原理。

以他励直流电动机为例。图 1-10 所示为一台他励直流电动机结构示意图和电路图，各物理量的正方向按惯例标注在图上。电枢电动势  $E_a$  是反电动势，与电枢电流方向相反，电磁转矩  $T$  是拖动转矩，与转速  $n$  的方向一致，负载转矩  $T_L$  与转速方向相反，是制动转矩。

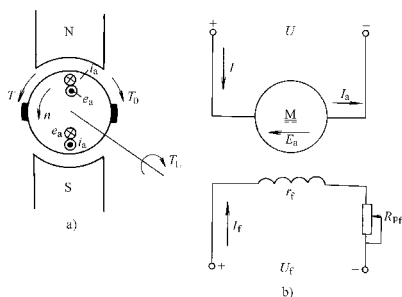


图 1-10 他励直流电动机  
a) 结构示意图 b) 电路图

#### 1. 电动势平衡方程式

根据电路的基尔霍夫定律可以写出电枢回路的电动势平衡方程式

$$U = E_a + I_a R_a \quad (1-9)$$

式中  $R_a$ ——电枢回路中总电阻， $R_a$

$$= r_a + 2\Delta U_b / I_a ;$$

$r_a$ ——电枢回路中电枢绕组、串励绕组、换向极绕组及补偿绕组的电阻之和；

$\Delta U_b$ ——正负电刷总的接触电压降。对一般的碳刷或石墨电刷而言，一对电刷的接触电压降为 2V。

$I_a = I$ ， $I$  为负载电流或称为输入电流，若是并励电动机，则  $I_a = I - I_f$ 。

## 2. 功率平衡方程式

电动机不能将输入的电功率全部转换成机械功率，在转换过程中总有一部分能量消耗在电机内部，称为电机损耗。它包括机械损耗、铁心损耗、铜损耗和附加损耗。

(1) 机械损耗  $p_m$  不论是发电机还是电动机，当电机转动时，必须克服摩擦阻力，如轴与轴承的摩擦阻力，电刷与换向器的摩擦阻力，以及电枢旋转部分与空气的摩擦阻力（包括风扇的通风阻力）等。这些机械阻力消耗的功率统称为机械损耗。

(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。

机械损耗  $p_m$  和铁心损耗  $p_{Fe}$ ，在直流电动机已经转动起来，但尚未带负载时就存在，即空载时就已经存在。因此，这两种损耗合起来又称为空载损耗  $p_0$ ，即  $p_0 = p_m + p_{Fe}$ 。

(3) 铜耗  $p_{Cu}$  当直流电动机运行时，电枢回路和励磁回路中都有电流流过，在绕组电阻上产生的损耗叫铜耗。

$$\text{电枢回路铜耗 } p_{Cua} \quad p_{Cua} = I_a^2 R_a$$

$$\text{励磁回路的铜耗 } p_f \quad p_f = U_f I_f = I_f^2 (r_f + R_{pf})$$

式中  $r_f$ ——励磁绕组电阻；

$R_{pf}$ ——励磁回路串入的调节电阻。

(4) 附加损耗  $p_s$  又叫杂散损耗，其值很难计算和测定，一般取  $(0.5\% \sim 1\%) P_N$ 。

综上所述，电机总损耗  $\Sigma p$  为

$$\Sigma p = p_m + p_{Fe} + p_{Cu} + p_s \quad (1-10)$$

当他励直流电动机接上电源时，电枢绕组中流过电流  $I_a$ ，电源向电动机输入的电功率为  $P_1 = UI = UI_a$ ，将式 (1-9) 代入得

$$P_1 = (E_a + I_a R_a) I_a = E_a I_a + I_a^2 R_a$$

$$P_1 = P_{em} + p_{Cua} \quad (1-11)$$

上式说明，输入的电功率一小部分被电枢绕组消耗，绝大部分作为电磁功率转换成了机械功率。从上面分析可知：当电机转动后，还要克服各类摩擦引起的机械损耗  $p_m$ 、电枢的铁心损耗  $p_{Fe}$ ，以及附加损耗  $p_s$ ，所以电动机转换出来的机械功率，一部分消耗在机械和铁心损耗上，大部分从电动机轴上输出，故输出的机械功率为

$$P_2 = P_{em} - p_{Fe} - p_m - p_s \quad (1-12)$$

忽略附加损耗  $p_s$ ，则

$$P_2 = P_{em} - p_{Fe} - p_m = P_{em} - p_0 \quad (1-13)$$

合并 (1-11) 式和 (1-13) 式，得

$$P_2 = P_1 - p_{Cua} - p_0 = P_1 - \Sigma p \quad (1-14)$$

他励电动机的励磁铜耗由其他电源提供。而并励电动机的励磁铜耗由同一电源提供，所以并励电动机的功率平衡方程式中还应包括励磁铜耗。

直流电动机的效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_2}{P_2 + \sum p} \times 100\%$$

一般中小型直流电机的效率在 75% ~ 85% 之间, 大型直流电机的效率在 85% ~ 94% 之间。

他励直流电动机的功率平衡关系可以用功率流程图形象地表示, 如图 1-11 所示。

### 3. 转矩平衡方程式

将式 (1-13) 的等号两边同除以电动机的机械角速度  $\omega$ , 可得转矩平衡方程式

$$\frac{P_2}{\Omega} = \frac{P_{em}}{\Omega} - \frac{p_0}{\Omega}$$

即  $T_2 = T - T_0$  或  $T = T_2 + T_0$  (1-15)

式中  $T_2$ ——电动机轴上输出的机械转矩 (N·m)。它与电动机轴上所带的负载转矩  $T_L$  相平衡, 即两者大小相等  $T_2 = T_L$ , 方向相反。

$T_0$ ——电动机的空载转矩。由于空载转矩的数值仅为电动机额定转矩的 (2~5)% , 所以在重载和额定负载下常忽略不计, 即  $T \approx T_2$ 。

电动机输出转矩的表达式又可写为

$$T_2 = \frac{P_2}{\Omega} = \frac{P_2}{2\pi n / 60} = 9.55 \frac{P_2}{n} \quad (1-16)$$

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

$$T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N}$$

**例 1-6** 一台他励直流电机接在 220V 电网上运行, 已知,  $a = 1$ ,  $p = 2$ ,  $N = 372$ 。  $n = 1500 \text{ r/min}$ ,  $\Phi = 1.1 \times 10^{-2} \text{ Wb}$ ,  $R_a = 0.208 \Omega$ ,  $p_{Fe} = 362 \text{ W}$ ,  $p_m = 204 \text{ W}$ 。求: 1) 此电机是发电机运行还是电动机运行? 2) 电磁转矩、输入功率和效率各是多少?

解 1) 判断一台电机是何种运行状态, 可比较电枢电动势和端电压的大小, 即

$$E_a = \frac{pN}{60a} \Phi n = \left( \frac{2 \times 372}{60 \times 1} \times 1.1 \times 10^{-2} \times 1500 \right) \text{ V} = 204.6 \text{ V}$$

因为  $U > E_a$ , 故此电机是电动机运行状态。

2) 求  $T$ 、 $P_1$  和  $\eta$

根据  $U = E_a + I_a R_a$

$$\text{则 } I_a = \frac{(U - E_a)}{R_a} = \frac{(220 - 204.6)}{0.208} \text{ A} = 74 \text{ A}$$

$$\text{电磁转矩 } T = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = \left( \frac{2 \times 372}{2 \times \pi \times 1} \times 1.1 \times 10^{-2} \times 74 \right) \text{ N}\cdot\text{m} = 96.38 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$\text{输入功率 } P_1 = UI = UI_a = (220 \times 74) \text{ W} = 16280 \text{ W} = 16.28 \text{ kW}$$

$$\text{输出功率 } P_2 = P_{em} - p_{Fe} - p_m = E_a I_a - p_{Fe} - p_m$$

$$= (204.6 \times 74 - 362 - 204) \text{ W} = 14574 \text{ W} = 14.57 \text{ kW}$$

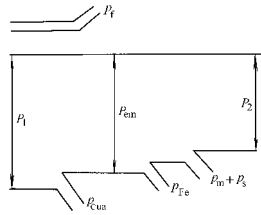


图 1-11 他励直流电动机功率流程图