



普通高等教育 “十三五” 规划教材

电机学

DIANJIXUE

沈红雷 麻建平 胡中建 主编



 吉林大学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

电机学

主 编 沈红雷 麻建平 胡中建

吉林大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电机学/沈红雷,麻建平,胡中建主编. —长春:
吉林大学出版社, 2016.8
ISBN 978-7-5677-7398-1

I. ①电… II. ①沈… ②麻… ③胡… III. ①电机学
—高等学校—教材 IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 207730 号

书 名:电机学

作 者:沈红雷 麻建平 胡中建 主编

责任编辑:李伟华 责任校对:魏丹丹

吉林大学出版社出版、发行

开本: 787×1092 毫米 1/16

印张: 13.75 字数:310 千字

ISBN 978-7-5677-7398-1

封面设计:孙雪丽

北京文星印刷厂印刷

2016 年 8 月 第 1 版

2016 年 9 月 第 1 次印刷

定价:38.00 元

版权所有 翻印必究

社址:长春市明德路 501 号 邮编:130021

发行部电话:0431-89580028/29

网址:<http://www.jlup.com.cn>

E-mail:jlup@mail.jlu.edu.cn

前言

本书的编写,既考虑到要使学生获得必要的基本理论知识,也充分考虑到普通高等院校教学的实际情况,认真贯彻“理论以够用为度,加强应用,提高分析和解决实际问题的能力”的原则。

本书的编写思路如下:

(1)采用任务驱动式的教材组织方法,将每个知识点分解为典型的任务,以任务为主线,贯穿于整个知识讲解的过程。

(2)注重理论与实践相结合,重在应用。各章列举了大量实例和实践活动,以加深学生对电机与拖动技术的理解。

(3)各章均设置知识拓展等内容,是对课堂内容的加深或对知识的拓展,教师可在教学过程中适当引入课堂教学中。

本书共分为7章,主要内容包括直流电机、直流电机的电力拖动、变压器、三相异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、同步电机、控制电机。

由于受经验、水平和时间限制,书中难免存在不妥之处,真诚希望得到各位读者对本书中错误、缺点和不足之处提出批评和建议。

编 者

目录

第一章	直流电机	1
第一节	直流电机的工作原理	1
第二节	直流电机的基本结构	4
第三节	直流电机的铭牌数据和主要系列	7
第四节	直流电机的磁场与基本公式	9
第五节	直流电动机的工作特性	17
第六节	直流发电机的运行特性	23
本章小结		26
本章习题		27
第二章	直流电机的电力拖动	29
第一节	电力拖动系统的运动方程式	29
第二节	生产机械的负载特性	31
第三节	他励直流电动机的机械特性	33
第四节	直流电动机的启动和反转	35
第五节	他励直流电动机的调速	38
第六节	他励直流电动机的制动	44
本章小结		49
本章习题		50
第三章	变压器	51
第一节	变压器的基本工作原理和结构	51
第二节	单相变压器的空载运行	59
第三节	单相变压器的负载运行	67
第四节	变压器参数的测定	73
第五节	变压器的运行特性	79

第六节 认识三相变压器	85
第七节 变压器的并联运行	90
第八节 其他用途的变压器	94
本章小结	100
本章习题	101
第四章 三相异步电动机	102
第一节 三相异步电动机的工作原理与结构	102
第二节 三相异步电动机的运行原理	108
第三节 三相异步电动机的基本方程式	120
第四节 三相异步电动机的工作特性	124
本章小结	127
本章习题	127
第五章 三相异步电动机的电力拖动	129
第一节 三相异步电动机的机械特性	129
第二节 三相异步电动机的启动	137
第三节 三相异步电动机的制动	145
第四节 三相异步电动机的调速	149
本章小结	160
本章习题	161
第六章 同步电机	162
第一节 同步电机的工作原理和结构	162
第二节 同步发电机	167
第三节 认识同步电动机	175
第四节 同步电动机的调相运行及同步调相机	183
本章小结	184
本章习题	186
第七章 控制电机	187
第一节 伺服电机	187

第二节 测速发电机	192
第三节 步进电动机	197
第四节 旋转变压器	203
本章小结	209
本章习题	211
参考文献	212

第一章

直流电机

直流电机是实现机械能和直流电能相互转换的设备,包括直流发电机和直流电动机,两者具有可逆性。直流电动机最大的优点是其良好的启动和调速性能,能在很宽的范围内平滑经济地调速,且在低速运行特别是启动时具有较大的转矩。缺点是结构复杂、生产成本较高、维护费用高,功率不能做得太大,因而限制了直流电动机应用范围。目前,随着可控硅直流电源的发展,直流电机的应用更加广泛。

第一节 直流电机的工作原理



学习目标

1. 掌握直流发电机的工作原理;
2. 掌握直流电动机的工作原理;
3. 掌握换向器和电刷的作用。

一、直流发电机的工作原理



用两个互相绝缘的半圆环取代两个滑环,并让 A、B 两个电刷分别与两个半圆环相接,即得直流发电机的工作原理示意图,如图 1-1(a)所示。

从内部看, ab 、 cd 两有效边产生的切割电势仍为随时间校正旋规律变化的交变电动势。从外部看,由于 A 刷始终与处于 N 极下的有效边相接, B 刷始终与处于 S 极下的有效边相接,故电流 i 总是由 A 刷流入,从 B 刷流出,即利用两个半圆环与电刷 A、B(最基本的换向

器)将发电机线圈中产生的交流电动势转换成脉动直流电动势,由电刷两端输出,其波形如图 1-1(b)所示。

如果沿着电枢圆周对称放置几个线圈(电枢绕组元件),并按一定规律通过同样片数的换向片连接起来,则外电路可得到一个较小的直流电动势,这就是一台最基本的直流发电机。

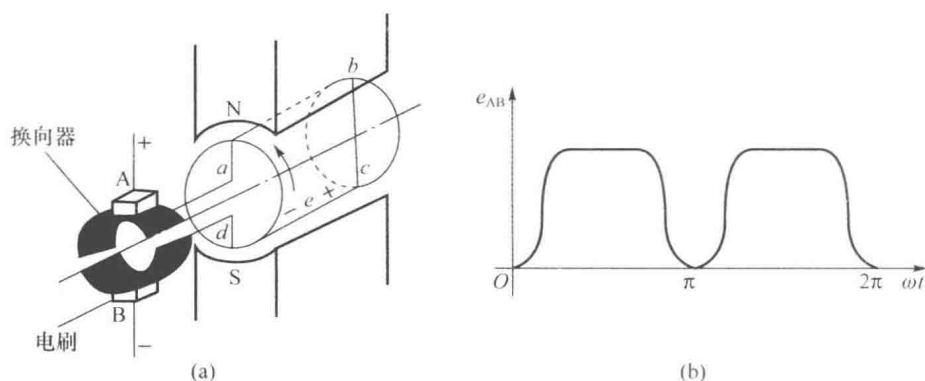


图 1-1 直流发电机原理示意图和电刷间电动势波形

(a)原理示意图;(b)电刷间电动势的波形

二、直流电动机的工作原理

将直流发电机的外力去掉,并将 A、B 刷接到一个直流电源上,则将有一个直流电流 i 由 A 刷流入,从 a 到 b ,再由 c 到 d ,最后经 B 刷回到电源的负端,这就成为一台基本的直流电动机。应注意的是,无论线框的位置如何变,由于换向器的作用,处于 N、S 极下线框的有效边中的电流流向始终是不变的,如图 1-2 所示,如线框转过 180° ,则 cd 边处于 N 极下,电流由 d 流向 c 、 ab 边处在 S 极下,电流由 b 流向 a 。

依据 $F=BIL$ 可知,线框的两有效边将受到电磁力的作用,力的作用方向用左手定则判定,此电磁力对转轴形成一个电磁力矩 T ,在此电磁力矩的作用下,直流电机的线框(即电枢)便将沿最开始的 T 作用方向旋转。

从上述的基本原理可知,直流电动机与直流发电机的结构是相同的,不同的运行状态是由使用条件不同形成的。直流电机工作在发电机状态时,由轴上输入机械能,转变成直流电能,从电枢电路两出线端输出;直流电机工作在电动机状态时,从电枢两接线端输入电能,转变成机械能由转轴输出,二者是可逆的。由此可见,直流电机仅仅是一种能量转换与传递的电气机械。

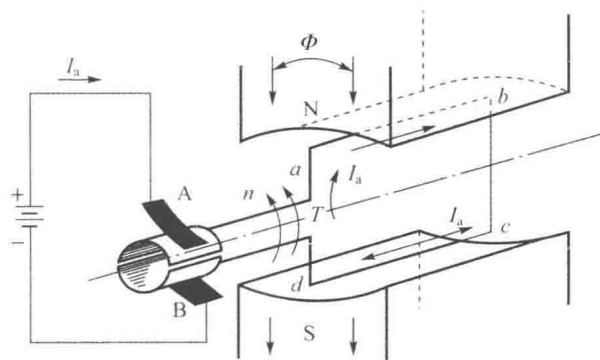


图 1-2 直流电动机的工作原理

三、直流电机的换向



从直流电机的基本工作原理可知,直流电机电枢绕组中的电动势和电流是交变的,只是借助于旋转的换向器和静止的电刷通过机械整流作用,才能使直流发电机在电刷两端获得直流电压,使直流电动机产生恒定的电磁转矩。直流电机在工作中,电枢绕组的每个元件,依次从一条支路经过被电刷短接的过程进入另一条支路,元件中的电流方向,设为 $+i$,变为相反的方向 $-i$,元件中的电流改变方向的过程,称为电流换向,简称换向。

换向不良时,将在电刷和换向器间产生有害的火花,严重时损坏电刷和换向器。改善直流电机换向主要有以下几种方法。

1. 装设换向极

为消除换向元件中电抗电动势和切割电动势对换向的不利影响而采用换向极,其铁芯称为换向极铁芯,换向极设置于N、S主磁极之间几何中性线上,换向绕组与电枢绕组串联,由电枢电流励磁,换向极产生的方向与电枢磁动势方向相反,改善换向。

2. 选用合适的电刷

电刷与换向器接触电阻的存在可降低附加电流,改善换向。直流电机不使用接触电阻小的金属电刷,而采用碳质、石墨质的电刷。但是不能随意选用电阻大的电刷,否则电刷与换向片间的接触电压降增大,换向器发热多,电能损耗大。

3. 补偿绕组

换向极克服了换向元件所在处的电枢反应磁场的影响,除此点之外的电枢反应仍然存在。若其作用很强,则磁极两侧的磁通增减变大会存在各种影响。若极靴部位磁通密度高,该部位下的电枢绕组电压就过高,与其相连的换向片之间会因电压差过大而产生火花。这时,在主磁极的极靴处设置补偿绕组与电枢绕组串联,电枢电流流过补偿绕组,可以完全消

除电枢反应。补偿绕组实际只在大型的直流电机中使用。

4. 移动电刷位置

在小容量未安装换向极的直流电机中,可以将电刷从几何中性线处移开一个适当的角度来改善换向,对于发电机,电刷顺电枢转向移动,对电动机反之。于是,换向元件离开几何中性线进入主磁极,利用主磁极代替换向磁极,达到改善换向的目的。

第二节 直流电机的基本结构



学习目标

1. 掌握直流电机定子的结构;
2. 掌握直流电机转子的结构。

一、直流电机的定子

定子是电机的静止部分,主要用来产生磁场。它主要包括以下几部分。

1. 主磁极

主磁极包括铁芯和励磁绕组两部分。当励磁绕组中通入直流电流后,铁芯中即产生励磁磁通,并在气隙中建立励磁磁场。励磁绕组通常用圆形或矩形的绝缘导线制成一个集中的线圈,套在磁极铁芯外面。主磁极铁芯一般用 $1\sim 1.5\text{mm}$ 厚的低碳钢板冲片叠压铆接而成,主磁极铁芯柱体部分称为极身,靠近气隙一端较宽的部分称为极靴,极靴与极身交接处形成一个突出的肩部,用于支撑住励磁绕组。极靴沿气隙表面成弧形,使磁极下气隙磁通密度分布更合理。整个主磁极用螺杆固定在机座上。直流电机的结构如图1-3所示,图1-4为其正剖面图。

主磁极总是N、S两极成对出现。各主磁极的励磁绕组通常是相互串联连接,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

换向极也由铁芯和绕组构成。中、小容量直流电机的换向极铁芯是用整块钢制成的,大容量直流电机和换向要求高的电机,换向极铁芯用薄钢片叠成。换向极绕组要与电枢绕组串联,因通过的电流大、导线截面较大,匝数较少。换向极装在主磁极之间,换向极的数目一般等于主磁极数,在功率很小的电机中,换向极的数目有时只有主磁极极数的一半,或不装换向极。换向极的作用是改善换向,防止电刷和换向器之间出现过强的火花。

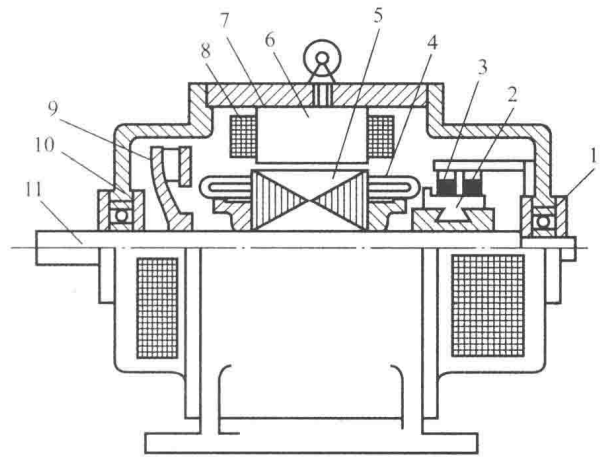


图 1-3 直流电机的结构

1—轴承；2—换向器；3—电刷；4—电枢绕组；5—电枢铁芯；6—磁极；
7—机座；8—励磁绕组；9—风扇；10—端盖；11—轴

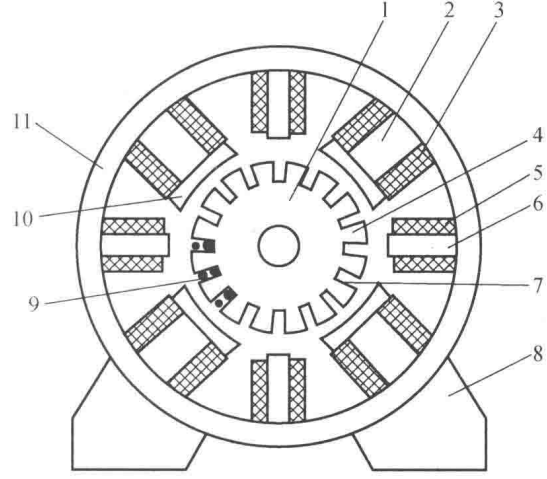


图 1-4 直流电机正剖面图

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

3. 电刷装置

电刷装置由电刷、刷握、压紧弹簧和刷杆等组成。电刷是用碳石墨等做成的导电块，电刷装在刷握的盒内，用压紧弹簧把它压紧在换向器的表面上。压紧弹簧的压力可以调整，保证电刷与换向器表面有良好的滑动接触。刷握固定在刷杆上，刷杆装在刷杆座上，彼此之间绝缘。刷杆座装在端盖或轴承盖上，根据电流的大小，每一刷杆上可以有几个电刷组成的电刷组，电刷组的数目一般等于主磁极数。电刷的作用是与换向器配合引入、引出电流。

4. 机座和端盖

机座一般用铸钢或厚钢板焊接而成。它用来固定主磁极、换向极及端盖，借助底脚将电

机固定于机座上。机座还是磁路的一部分,用于通过磁通的部分称为磁扼。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、直流电机的转子

转子是电机的转动部分,转子的主要作用是感应电动势,产生电磁转矩,使机械能变为电能(发电机)或电能变为机械能(电动机)的枢纽。它主要包括以下几部分。

1. 电枢

电枢包括铁芯和绕组两部分。

(1)电枢铁芯。电枢铁芯一般用 0.5mm 厚的涂有绝缘漆的硅钢片冲片叠成,这样铁芯在主磁场中转动时可以减少磁滞和涡流损耗。铁芯表面有均匀分布的齿和槽,槽中嵌放电枢绕组。电枢铁芯构成磁的通路。电枢铁芯固定在转子支架或转轴上。电枢铁芯冲片如图 1-5 所示。

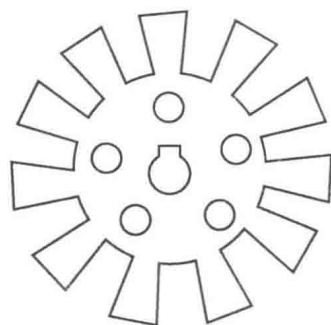


图 1-5 电枢铁芯冲片

(2)电枢绕组。电枢绕组是用绝缘铜线绕制成的线圈按一定规律嵌放到电枢铁芯槽中的,并与换向器作相应的连接。线圈与铁芯之间以及线圈的上、下层之间均要妥善绝缘,用槽楔压紧,再用玻璃丝带或钢丝扎紧。电枢绕组是电机的核心部件,电机工作时在其中产生感应电动势和电磁转矩,实现能量的转换。

2. 换向器

换向器的作用是与电刷配合,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 形钢环和螺纹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片绝缘,换向器的侧剖面如图 1-6 所示。

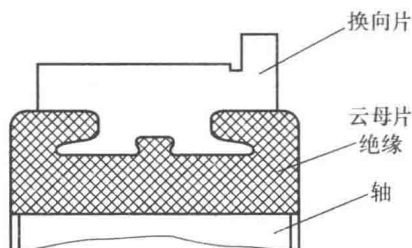


图 1-6 直流电机换向器



注意

换向器由 K 个换向片围成环状,套在转轴上,片与片之间用云母绝缘,它们与轴之间也用绝缘物隔开。运行时换向器的外圆周与电刷保持良好的滑动接触。换向器和电刷的作用是使旋转的元件一个跟一个地改变电流方向,并保证电枢绕组对外的总电势方向不变,作用在电枢绕组上的电磁转矩 T 方向不变。

3. 转轴

转轴上安装电枢和换向器。

4. 气隙

静止的磁极和旋转的电枢之间的间隙称为气隙。在小容量电机中,气隙为 $0.5 \sim 3\text{mm}$ 。气隙数值虽小,但磁阻很大,为电机磁路的主要组成部分。气隙大小对电机运行性能有很大影响。

第三节 直流电机的铭牌数据和主要系列



学习目标

1. 掌握直流电机的铭牌数据;
2. 熟悉直流电机的主要系列。

一、直流电机的铭牌数据



直流电机的铭牌数据主要包括电机型号、额定功率、额定电压、额定电流、额定转速和励磁电流、励磁方式、励磁电压、工作方式、绝缘等级等。此外,还有电机的出厂数据,如出厂编号、出厂日期等。

1. 直流电机的型号

国产电机的型号一般采用大写的汉语拼音字母和阿拉伯数字表示,其中,第一个字符用大写的汉语拼音表示产品系列代号,第二个字符用阿拉伯数字表示设计序号,第三个字符用阿拉伯数字表示机座中心高,第四个字符用阿拉伯数字表示电枢铁芯长度代号,第五个字符用阿拉伯数字表示端盖的代号。例如,型号为 Z4-200-21 的直流电机,Z 是系列(即一般用途直流电动机)代号,4 是设计序号,则是电机中心高,单位为 mm),21 中的 2 是电枢铁芯长度

代号,1 是端盖的代号。

2. 直流电机的额定值

(1)额定功率 P_N 。额定功率是指在规定的条件下,长期运行时的允许输出功率,单位为 W。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,则是指轴上输出的机械功率。

(2)额定电压 U_N 。额定电压是指额定运行状况下,直流发电机的输出电压或直流电动机的输入电压,单位为 V。

(3)额定电流 I_N 。额定电流是指在额定情况下,直流发电机输出或直流电动机输入的电
流,单位为 A。

直流发电机的额定电流为

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} \quad (1-1)$$

直流电动机的额定电流为

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

(4)额定效率 η_N 。额定效率计算式为

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

式中 P_N ——额定(输出)功率;

P_1 ——输入功率。

(5)额定转速 n_N 。额定转速是指在额定功率、额定电压、额定电流时电机的转速,单位为 r/min。

(6)额定励磁电压 U_f 。额定励磁电压是指在额定情况下,励磁绕组所加的电压,单位为 V。

(7)额定励磁电流 I_f 。额定励磁电流是指在额定情况下,通过励磁绕组的电流,单位为 A。

二、直流电机的主要系列



所谓系列电机,就是在应用范围、结构形式、性能水平、生产工艺等方面有共同性,功率按某一系数递增的成批生产的电机。系列化的目的是产品的标准化和通用化。我国直流电机的主要系列如下。

(1)Z₂ 系列。此系列为一般用途的中小型直流电机。

(2)Z 和 Z_F 系列。此系列为一般用途的中大型直流电机,其中“Z”为直流电动机系列,“Z_F”为直流发电机系列。

(3)ZT 系列。此系列为用于恒功率且调速范围较宽的宽调速直流发电机。

(4)ZZJ 系列。此系列为冶金辅助拖动机械用的冶金起重直流电动机,它具有快速启动和承受较大过载能力的特性。



- (5) ZQ 系列。此系列为电力机车、工矿电机车和蓄电池供电的电车用的直流牵引电动机。
- (6) Z—H 系列。此系列为船舶上各种辅机船用直流电动机。
- (7) ZA 系列。此系列用于矿井和易爆气体场合的防爆安全型直流电机。
- (8) Zu 系列。此系列用于龙门刨床的直流电动机。
- (9) Zw 系列。此系列是无槽直流电动机,在快速响应的伺服系统中做执行元件。
- (10) ZLJ 系列。此系列是力矩直流电动机,在伺服系统中做执行元件。
- (11) BFG 系列。此系列是直流三换向片永磁电动机,用于盒式录音机、电动玩具等。

第四节 直流电机的磁场与基本公式



学习目标

1. 掌握直流电机的励磁方式和磁场的形成;
2. 掌握直流电机的感应电动势和电磁转矩公式;
3. 掌握直流电机的基本方程式。

一、直流电机的励磁方式



励磁方式是指主磁极励磁绕组的供电方式与电枢绕组之间的关系,可分为 4 种形式,如图 1-7 所示。

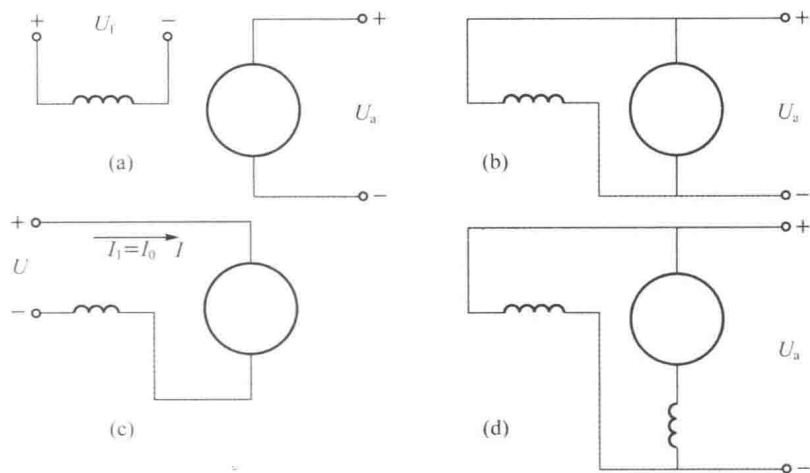


图 1-7 直流电机的励磁方式

(a) 他励; (b) 并励; (c) 串励; (d) 复励

1. 他励

图 1-7(a) 中, 励磁绕组与电枢绕组之间无电的联系, 励磁电压 U_f 由另一个单独直流电源提供。

2. 并励

图 1-7(b) 中, 励磁绕组与电枢绕组接成并联关系, 励磁电压 U_f 与电枢绕组的端电压 U_a 相同, 即 $U_f = U_a = U$ 。

3. 串励

图 1-7(c) 中, 励磁绕组与电枢绕组接成串联关系, 流过电枢绕组的电流 I_a 也就是流过励磁绕组的励磁电流 I_f , 即 $I_f = I_a = I$ 。

4. 复励

图 1-7(d) 中, 励磁绕组分为两部分, 一部分与电枢绕组并联, 另一部分与电枢绕组串联。

当两部分产生的磁通相加时, 称为双复励; 当两部分产生的磁通相减时, 称为差复励。直流电机通常不采用差复励型式。

二、直流电机的磁场

直流电机的磁场是由电机中的各个绕组, 包括励磁绕组、电枢绕组、换向极绕组、补偿绕组等共同产生的, 其中励磁绕组起着主要作用。因此, 先研究只有励磁绕组中有电流, 其他绕组中无电流(即空载)时的磁场情况, 此时的磁场称为空载磁场。

1. 直流电机的空载磁场

(1) 直流电机空载磁场的分布。直流电机空载(发电机与外电路断开, 没有电流输出, 电动机轴上不带机械负载)运行时, 其电枢电流等于零或近似等于零。因而空载磁场可以认为仅仅是励磁电流通过励磁绕组产生的励磁磁通势 F_f 所建立的。

励磁绕组通入电流将建立磁场。铁磁材料的导磁率远比空气大得多, 磁力线绝大部分集中于铁磁材料内, 在直流电机中, 如图 1-8 所示, 从 N 极出来的磁通, 绝大部分经气隙到电枢, 而后再进入 S 极经定子磁扼闭合。与励磁绕组和电枢绕组相连的磁通称为主磁通。还有一小部分磁通, 从磁极出来, 经过气隙即闭合, 这一小部分磁通称为漏磁通。它只与励磁绕组相连, 而不与电枢绕组相连, 因漏磁路的磁阻很大, 故漏磁通仅为主磁通的 15%~20%。

主磁通对应主磁路, 由气隙、电枢的齿槽部分、电枢磁扼、主磁极、定子磁扼 5 部分组成。因此根据磁路定律, 产生空载磁场的励磁磁通势全部降落于气隙和铁磁材料这两大部分之