

铁路职业教育铁道部规划教材

电力机车电机

DIANLIJICHEDIANJI

TIELU ZHIYE JIAOYU TIEDAOBU GUIHUA JIAOCAI

张 龙 主编

高职

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



铁路职业教育铁道部规划教材

(高 职)

电力机车电机

张 龙 主 编

郭世明 主 审

中国铁道出版社

2008年·北 京

内 容 简 介

本书为铁路职业教育铁道部铁路高职教育规划教材,是根据电力机车驾驶及电力机车检修专业教学计划,并参照铁路职业技能鉴定规范,结合电力机车运用、检修生产实际编写的。全书系统介绍了直流电机基本知识、直流和脉流牵引电动机的特性、换向、通风冷却和基本结构;变压器基本知识、电力机车用主变压器和平波电抗器的运行特点、基本结构;异步电动机的基本知识、机车用三相交流牵引电动机的原理及构成;电力机车上用到的异步劈相机、交流辅助电动机的运行原理、基本构成;最后简要介绍了电力机车电机的维护保养。

本书为高等职业院校电力机车驾驶和电力机车检修专业的教材,也可作为普通中等职业学校电力机车专业的教材,还可作为电力机务段有关运用、检修人员的岗位培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

电力机车电机/张龙主编. —北京:中国铁道出版社,2008.1

铁路职业教育铁道部规划教材. 高职

ISBN 978-7-113-08532-2

I. 电… II. 张… III. 电力机车-电机-高等学校:

技术学校-教材 IV. U264.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 006382 号

书 名:电力机车电机

作 者:张 龙 主编

责任编辑:赵 静

电话:010-51873133

E-mail:td73133@sina.com

封面设计:陈东山

责任印制:金洪泽

出版发行:中国铁道出版社(北京市宣武区右安门西街8号,100054)

印 刷:河北新华印刷二厂

版 次:2008年1月第1版 2008年1月第1次印刷

开 本:787mm×1092mm 1/16 印张:15.25 字数:380千

书 号:ISBN 978-7-113-08532-2/U·2159

定 价:29.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

电 话:市电(010)51873170 路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504 路电(021)73187

前 言

本书为铁路职业教育铁道部规划教材,是根据铁路高职教育电力机车驾驶专业及电力机车检修专业教学计划“电力机车电机”课程教学大纲,并结合电力机车电机运用、检修生产实际编写的。

“电力机车电机”是电力机车运用与检修专业的一门主干专业课程,主要讲授电力机车上应用的各种电机的基本原理、结构特点、工作特性、技术参数等,具体结构以韶山₄改型、韶山₆型电力机车应用的各种电机为典型产品介绍。本书是“电力机车电机”课程的理论教材,教学大纲中的实践教学由各校根据设备状况编写相应的指导书,以达到全面培养学生能力的目标。

本书在编写中力图体现以下特色:

1. 结合实际。教材紧扣教学大纲基本要求,结合当前高等职业教育教学现状,理论知识以“必需、够用”为度,突出学生对所学知识的应用能力。
2. 内容适当。教材既反映我国当前电力机车的运用与检修的现状,以交-直传动的韶山₄改型、韶山₆型电力机车应用到的各种电机为典型产品,也注意引入新技术、新知识,适当介绍交流传动电力机车中应用到的三相异步交流牵引电动机。
3. 有利自学。教材减少了繁杂的理论分析、公式推导,力求做到图文并茂、语言规范、深入浅出、通俗易懂。以突出教学重点,满足自学的需求。

本书由太原铁路机械学校张龙主编,西南交通大学郭世明主审。太原铁路机械学校潘丽云编写第一章,张龙编写第二、三、四、五章;郑州铁路职业技术学院高伟编写第六、七章;广州铁道职业技术学院童巧新编写第八、九章;西安铁路职业技术学院武军编写第十、十一章。本书在编写过程中,得到铁路机车专业教学指导委员会的支持;得到株洲电力机车有限公司、大同电力机车有限责任公司、湖东电力机务段等单位 and 铁路职业教育界同仁的帮助,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,缺陷和不当之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者
2007 年 12 月

目 录

第一章 直流电机的基本知识	1
第一节 直流电机基本工作原理	1
第二节 直流电机的基本结构	4
第三节 直流电机的电枢绕组	7
第四节 直流电机的磁场	13
第五节 直流电机的感应电动势和电磁转矩	19
第六节 直流电机的基本方程	21
第七节 直流发电机的运行特性	23
小 结	29
复习思考题	29
第二章 直流牵引电动机的特性	31
第一节 牵引电动机的一般概念	31
第二节 直流牵引电动机的工作特性	35
第三节 各种励磁方式直流牵引电动机的特性分析	38
第四节 直流牵引电动机的启动、反转、调速和制动	41
第五节 直流串励牵引电动机的磁场削弱	45
小 结	48
复习思考题	49
第三章 直流牵引电动机的换向及通风冷却	50
第一节 换向的基本概念	50
第二节 产生火花的原因	54
第三节 改善直流牵引电动机换向的方法	58
第四节 换向器上的环火	60
第五节 牵引电动机的发热和通风冷却	64
小 结	70
复习思考题	70
第四章 脉流牵引电动机	72
第一节 脉流牵引电动机的电磁特点	72
第二节 脉流牵引电动机的换向特点	74
第三节 改善脉流牵引电动机换向的方法	77
小 结	80
复习思考题	81
第五章 脉流牵引电动机的结构	82
第一节 牵引电动机的定额和额定数据	82
第二节 牵引电动机常用的电工材料及绝缘结构	85
第三节 脉流牵引电动机的基本结构	88
第四节 典型脉流牵引电动机的结构特点	98

小 结	110
复习思考题	111
第六章 变压器基本知识	112
第一节 变压器的基本结构、分类及铭牌	112
第二节 变压器的工作原理及运行分析	117
第三节 单相变压器的连接组别	127
第四节 其他用途变压器	129
小 结	132
复习思考题	133
第七章 主变压器及平波电抗器	135
第一节 主变压器的基本结构	135
第二节 典型主变压器的结构特点	144
第三节 平波电抗器	148
小 结	151
复习思考题	152
第八章 异步电动机基本知识	153
第一节 异步电动机的基本结构、分类及铭牌	153
第二节 交流绕组	157
第三节 交流绕组的电动势和磁势	166
第四节 三相异步电机工作原理及运行分析	168
第五节 三相异步电动机的启动、反转、调速和制动	176
第六节 单相异步电动机	183
小 结	185
复习思考题	186
第九章 三相交流异步牵引电动机	188
第一节 三相交流牵引电动机概述	188
第二节 异步牵引电动机变频调速的基本原理	191
第三节 异步牵引电动机运行的方式和特性	200
第四节 机车牵引中异步牵引电动机的特性调节	209
第五节 典型三相交流异步牵引电动机的结构特点	212
小 结	216
复习思考题	216
第十章 交流辅助电机	217
第一节 交流辅助电机的工作特点	217
第二节 异步劈相机工作原理	218
第三节 典型电力机车的辅助电机	223
小 结	229
复习思考题	229
第十一章 电力机车电机的维护保养	230
第一节 牵引电动机的维护保养	230
第二节 主变压器的维护保养	234
第三节 辅助电机的维护保养	234
小 结	236
复习思考题	236
参考文献	237

第一章

直流电机的基本知识

直流电机是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启动转矩等突出优点，仍广泛应用于对启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、电梯、轧钢机等拖动电机。由于电力电子技术的迅猛发展，作为直流电源的直流发电机已逐步被晶闸管整流装置所替代。

本章介绍直流电机的工作原理和基本结构；分析直流电机的磁路系统、电路系统和电磁过程；导出感应电动势和电磁转矩的一般计算方法；得出直流电机在不同运行状态时的各种平衡方程式和运行特性。

第一节 直流电机基本工作原理

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

图 1-1 所示为一台直流电机简单模型图。N、S 为定子上固定不动的两个主磁极，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。

在两个主磁极 N、S 之间装有一个可以转动的、由铁磁材料制成的圆柱体，圆柱体表面嵌

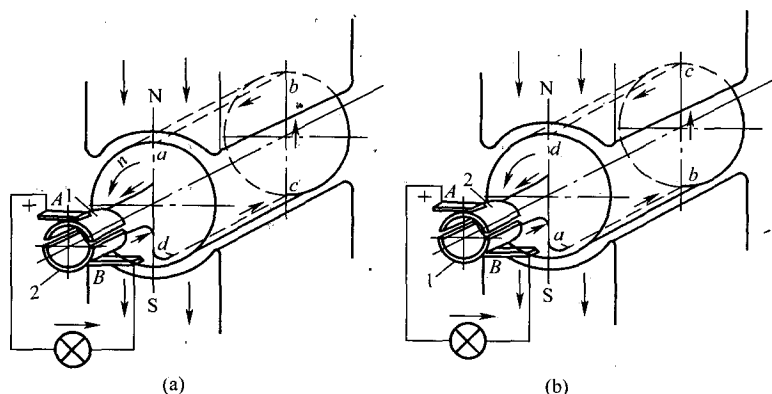


图 1-1 直流电机简单模型

有一线圈 $abcd$ (称为电枢绕组), 线圈首末两端分别连接到两个弧形铜片 (称为换向片) 上。换向片之间用绝缘材料构成一整体, 称为换向器, 它固定在转轴上 (但与转轴绝缘), 随转轴一起转动, 整个转动部分称为电枢。为了接通电枢内电路和外电路, 在定子上装有两个固定不动的电刷 A 和 B , 并压在换向器上, 与其滑动接触。

二、直流发电机的工作原理

1. 感应电动势的产生

当直流发电机的电枢被原动机拖动, 并以恒速 v 逆时针方向旋转时, 如图 1-1(a) 所示, 线圈两个有效边 ab 和 cd 将切割磁力线, 而感应产生电动势 e 。其方向用右手定则确定, 导体 ab 位于 N 极下, 导体 cd 位于 S 极下, 产生电动势方向分别为 $b \rightarrow a, d \rightarrow c$ 。若接通外电路, 电流从换向片 1 $\rightarrow A \rightarrow$ 负载 $\rightarrow B \rightarrow$ 换向片 2。电流从电刷 A 流出, 具有正极性, 用“+”表示; 从电刷 B 流入, 具有负极性, 用“-”表示。

当电枢转过 90° 时, 线圈有效边 ab 和 cd 转到 N, S 极之间的几何中心线上, 此处磁密为零, 故这一瞬时感应电动势为零。

当电枢转过 180° 时, 导体 ab 和 cd 及换向片 1、2 位置互换, 如图 1-1(b) 所示。导体 ab 位于 S 极下, 导体 cd 位于 N 极下, 线圈两个有效边产生的感应电动势方向分别为 $a \rightarrow b, c \rightarrow d$, 电动势方向恰与开始瞬时相反。外电路中流过的电流从换向片 2 $\rightarrow A \rightarrow$ 负载 $\rightarrow B \rightarrow$ 换向片 1。由此可见, 电刷 $A(B)$ 始终与转到 $N(S)$ 极下的有效边所连接的换向片接触, 故电刷极性始终不变, A 为“+”, B 为“-”。

由以上分析可知, 线圈内部为一交变电动势, 但电刷引出的电动势方向始终不变, 为一单方向的直流电动势。

2. 电动势的波形

根据电磁感应定律, 每根导体产生的感应电动势 e 为

$$e = B_x L v \quad (\text{V}) \quad (1-1)$$

式中 B_x ——导体所在位置的磁通密度, T ;

L ——导体切割磁力线的有效长度, m ;

v ——导体切割磁力线的线速度, m/s 。

要想知道电动势的波形, 先得找出磁密的波形, 前已设电枢以恒速 v 旋转, $v = \text{常数}$, L 在电机中不变, 则 $e \propto B_x$, 即导体电动势随时间的变化规律与气隙磁密的分布规律相同。设想将电枢从外圆某一点沿轴切开, 把圆周拉成一直线作为横坐标, 纵坐标表示磁密, 而绘出的 B_x 分布曲线如图 1-2 所示, 为一梯形波。由于 $e \propto B_x$, 电动势波形与磁密波形可用同一曲线表示, 只需换一坐标即可得到线圈内部交变电动势波形, 如图 1-2 所示。

通过电刷和换向器的作用, 及时地将线圈内的交变电动势转换成电刷两端单方向的直流电动势, 如图 1-3 所示, 但它是一个大小在零和最大值之间变化的脉振电动势。

对于图 1-1 所示的直流电机简单模型图, 由于电枢上只嵌放了一个线圈, 所以感应电动势数值小, 波动大。为了减小电动势的脉动, 实际电机中, 电枢上放置许多线圈组成电枢绕组, 这些线圈均匀分布在电枢表面, 并按一定规律连接起来。图 1-4 表示一台两极直流电机, 电枢上嵌有在空间互差 90° 的两个线圈产生的电动势波形, 由图可见, 其脉动程度大大减小了。实践证明,

若每极下线圈边数大于 8, 电动势脉动的幅值将小于 1%, 基本为一直流电动势, 如图 1-5 所示。

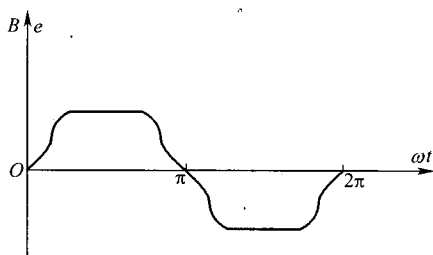


图 1-2 线圈内电动势波形

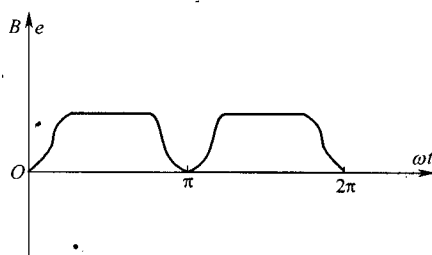


图 1-3 电刷两端的电动势波形

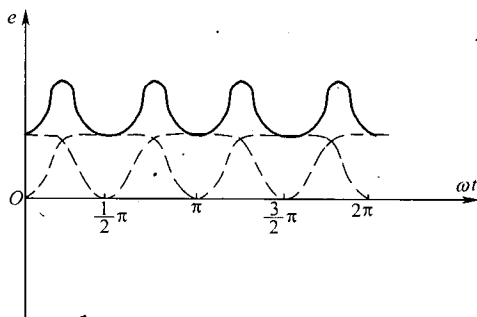


图 1-4 两个线圈换向后的电动势波形

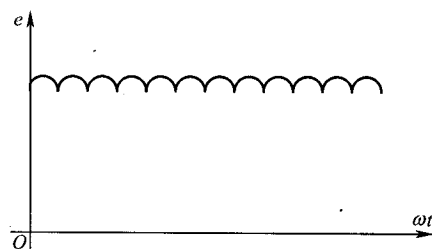


图 1-5 多个线圈电刷两端的电动势波形

3. 直流发电机产生的电磁转矩

当直流发电机电刷两端获得直流电动势后, 若接上负载, 便有一电流流过线圈, 电流 i 与电动势 e 的方向相同。同时, 载流导体在磁场中必然产生一电磁力 f , 其方向用左手定则确定。电磁力对转轴形成一电磁转矩 T , T 与电枢旋转的方向相反, 起到了阻碍作用, 故称为阻转矩。直流电机要维持发电状态, 原动机就必须输入机械能克服电磁转矩 T , 正是这种不断的克服, 实现了将机械能转换成电能。

三、直流电动机的工作原理

图 1-6 所示为两极直流电动机工作原理图。直流电动机结构与直流发电机相同, 不同的是电刷 A 、 B 外接一直流电源。图示瞬时电流的流向为 $+$ $\rightarrow$ A $\rightarrow$ 换向片 1 $\rightarrow$ a $\rightarrow$ b $\rightarrow$ c $\rightarrow$ d $\rightarrow$ 换向片 2 $\rightarrow$ B $\rightarrow$ $-$ 。根据电磁力定律, 载流导体 ab 、 cd 都将受到电磁力 f 的作用, 其大小为

$$f = B_x Li \quad (\text{N}) \quad (1-2)$$

式中 i ——导体中流过的电流, A 。

导体所受电磁力的方向用左手定则确定, 在此瞬时, ab 位于 N 极下, 受力方向从右向左, cd 位于 S 极下, 受力方向从左向右, 电磁力对转轴便形成一电磁转矩 T 。在 T 的作用下, 电枢便逆时针旋转起来。

当电枢转过 90° , 电刷不与换向片接触, 而与换向片间的绝缘片相接触, 此时线圈中没有电流流过, $i = 0$, 故电磁转矩 $T = 0$ 。但由于机械惯性的作用, 电枢仍能转过一个角度, 电刷 A 、 B 又将分别与换向片 2、1 接触。线圈中又

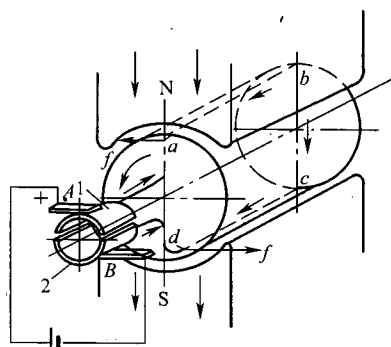


图 1-6 直流电动机工作原理图

有电流 i 流过,此时,导体 ab 、 cd 中电流改变了方向,即为 $b \rightarrow a$, $d \rightarrow c$,且导体 ab 转到 S 极下, ab 所受的电磁力 f 方向从左向右, cd 转到 N 极下, cd 所受的电磁力 f 方向从右向左。因此,线圈仍然受到逆时针方向电磁转矩的作用,电枢始终保持同一方向旋转。

在直流电动机中,电刷两端虽然加的是直流电源,但在电刷和换向器的作用下,线圈内部却变成了交流电,从而产生了单方向的电磁转矩,驱动电机持续旋转。同时,旋转的线圈中也将感应产生电动势 e ,其方向与线圈中电流方向相反,故称为反电动势。直流电动机若要维持继续旋转,外加电压就必须高于反电动势,才能不断地克服反电动势而流入电流,正是这种不断克服,实现了将电能转换成为机械能。

由此可见,直流电机具有可逆性,即一台直流电机既可作发电机运行,也可作电动机运行。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 直流电机的基本结构

一、直流电机的基本结构

直流电机由静止的定子和旋转的转子两大部分组成,在定子和转子之间有一定大小的间隙(称气隙),如图 1-7 所示。

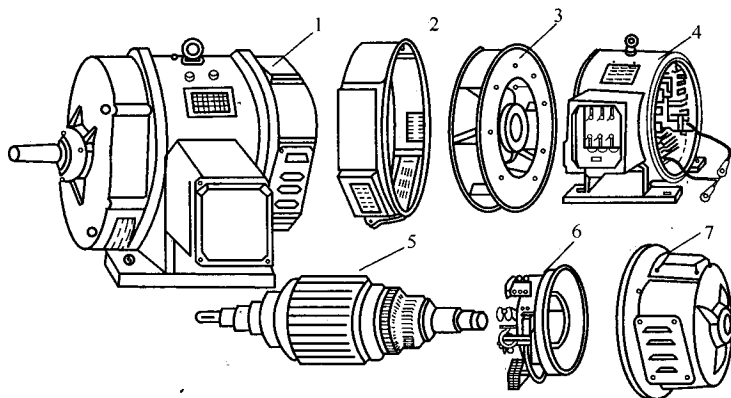


图 1-7 直流电机结构

1—直流电机总成;2—后端盖;3—通风机;4—定子总成;

5—转子(电枢)总成;6—电刷装置;7—前端盖

1. 定子

直流电机定子的作用是产生磁场和作为电机的机械支撑。主要由机座、主磁极、换向极和电刷装置等组成。

(1) 机座

机座兼起机械支撑和导磁磁路两个作用。它既用来作为安装电机所有零件的外壳,又是联系各磁极的导磁铁轭。机座通常为铸钢件,也有采用钢板焊接而成的。对于换向要求较高的电机,可采用叠片结构的机座。

(2) 主磁极

主磁极如图 1-8 所示,由主极铁芯和主极线圈两部分组成。主极铁芯一般用 1~1.5 mm 厚的薄钢板冲片叠压后再用铆钉铆紧成一个整体。小型电机的主极线圈用绝缘铜线(或铝线)绕制而成,大中型电机主极线圈用扁铜线绕制,并进行绝缘处理,然后套在主极铁芯外面。整个主磁极用螺钉固定在机座内壁。

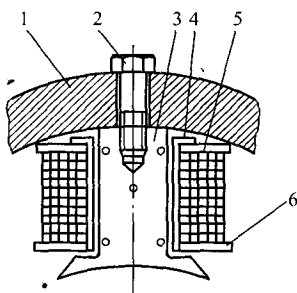


图 1-8 主磁极

1—机座;2—主极螺钉;3—主极铁芯;
4—框架;5—主极绕组;6—绝缘垫衬

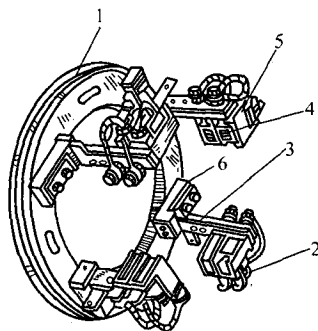


图 1-9 电刷装置

1—刷杆座;2—弹簧;3—刷杆;
4—电刷;5—刷握;6—绝缘件

(3) 换向极

换向极又称为附加极,它装在两个主极之间,用来改善直流电机的换向。换向极由换向极铁芯和换向极线圈构成。换向极铁芯大多用整块钢加工而成。但在整流电源供电的功率较大电机中,为了更好地改善电机换向,换向极铁芯也采用叠片结构。换向极线圈与主极线圈一样也是用圆铜线或扁铜线绕制而成,经绝缘处理后套在换向极铁芯上,最后用螺钉将换向极固定在机座内壁。

(4) 电刷装置

电刷装置的作用是通过电刷与换向器表面的滑动接触,把转动的电枢绕组与外电路相连。电刷装置一般由电刷、刷握、刷杆、刷杆座等部分组成,如图 1-9 所示。电刷一般用石墨粉压制而成。电刷放在刷握内,用弹簧压紧在换向器上,刷握固定在刷杆上,刷杆装在刷杆座上,成为一个整体部件。

2. 转子

转子又称电枢,主要由转轴、电枢铁芯、电枢绕组和换向器等组成。

(1) 转轴

转轴的作用是用来传递转矩,一般用合金钢锻压而成。

(2) 电枢铁芯

电枢铁芯是电机磁路的一部分,也是承受电磁力作用的部件。当电枢在磁场中旋转时,在电枢铁芯中将产生涡流和磁滞损耗,为了减小这些损耗的影响,电枢铁芯通常用 0.5 mm 厚的电工钢片叠压而成,电枢铁芯固定在转子支架或转轴上。电枢铁芯冲片如图 1-10 所示,沿铁芯外圈均匀地分布有槽,在槽内嵌放电枢绕组。

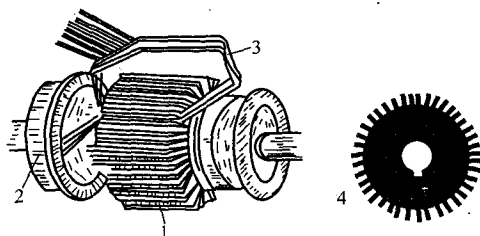


图 1-10 电枢铁芯冲片和铁芯

1—电枢铁芯;2—换向器;3—绕组元件;4—铁芯冲片

(3) 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。电枢绕组通常都用圆形或矩形截面的导线绕制而成,再按一定规律嵌放在电枢槽内,上下层之间以及电枢绕组与铁芯之间都要妥善地绝缘。为了防止离心力将绕组甩出槽外,槽口处需用槽楔将绕组压紧,伸出槽外的绕组端接部分用无纬玻璃丝带绑紧。绕组端头则按一定规律嵌放在换向器铜片的升高片槽内,并用锡焊或氩弧焊焊牢。

(4) 换向器

换向器的作用是机械整流,即在直流电动机中,它将外加的直流电流逆变成绕组内的交流电流;在直流发电机中,它将绕组内的交流电动势整流成电刷两端的直流电动势。换向器的结构如图1-11所示。换向器由许多换向片组成,换向片间用云母片绝缘。换向片凸起的一端称升高片,用以与电枢绕组端头相连,换向片下部作成燕尾形,利用换向器套筒、V形压圈及螺旋压圈将换向片、云母片紧固成一个整体。在换向片与换向器套筒、压圈之间用V形云母环绝缘,最后将换向器压装在转轴上。

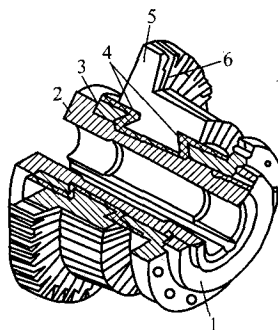


图 1-11 换向器

- 1—螺旋压圈;2—换向器套筒;
3—V形压圈;4—V形云母环;
5—换向铜片;6—云母片

二、直流电机的额定值

每一台电机都有一块铭牌,上面标注各种额定数据,简要介绍这台电机的型号、规格、性能,是用户合理选择和正确使用电机的依据。

根据国家标准要求设计和试验所得的一组反映电机性能的主要数据,称为电机的额定值。

1. 额定功率 P_N

指电机按规定的工作方式运行时,所能提供的输出功率。作为发电机额定功率是指接线端子处的输出功率;作为电动机额定功率是指电动机转轴的有效机械功率,单位为千瓦(kW)。额定功率、额定电压和额定电流的关系为:

$$\text{发电机} \quad P_N = U_N I_N \quad (1-3)$$

$$\text{电动机} \quad P_N = U_N I_N \eta_N \quad (1-4)$$

2. 额定电压 U_N

指在额定输出时电机接线端子间的电压,单位为伏(V)。

3. 额定电流 I_N

指电机按照规定的工作方式运行时,电机绕组允许流过的最大安全电流,单位为安(A)。

4. 额定转速 n_N

指电机在额定电压、额定电流和额定输出功率时,电机的旋转速度,单位为转/分(r/min)。

此外,还有工作方式、励磁方式、额定励磁电压、额定温升、额定效率 η_N 等。

额定值是选用或使用电机的主要依据,一般希望电机按额定值运行。但实际上,电机运行时的各种数据可能与额定值不同,它们由负载的大小来确定。若电机的电流正好等于额定值,称为满载运行;若电机的电流超过额定值,称为过载运行;若比额定值小得多,称为轻载运行。长期过载运行将使电机过热,降低电机寿命甚至损坏;长期轻载运行使电机的容量不能充分利用。两种情况都将降低电机的效率,都是不经济的。故在选择电机时,应根据负载的要求,尽可能使电机运行在额定值附近。

第三节 直流电机的电枢绕组

电枢绕组是实现电能和机械能相互转换的枢纽,为直流电机重要部件之一,绕组的形式与电机的性能、寿命和效率有很大的关系。研究直流电机电枢绕组,主要是找出绕组元件相互之间和元件与换向器之间的连接规律。不同类型的电枢绕组,具有不同的连接规律。直流电机的电枢绕组分为单叠绕组、复叠绕组、单波绕组、复波绕组等几种类型。本节仅讨论应用较广泛又具有代表性的单叠绕组和单波绕组。

一、电枢绕组概述

1. 对电枢绕组的要求

电枢绕组是由许多形状相同的线圈,按一定规律连接起来的总称。对于电枢绕组,要求一定的导体数,应能产生较大的电动势;通过一定大小的电流能产生足够大的电磁转矩。同时,应尽量节省有色金属和绝缘材料。并要求结构简单,运行安全可靠。

2. 绕组元件

绕组元件是用绝缘铜导线绕制成的线圈,这些线圈是组成电枢绕组的基本单元,故称为绕组元件。一个元件有两个有效边,其中一个有效边嵌放在某个槽的上层(称为上元件边),另一个有效边嵌放在另一个槽的下层(称为下元件边),元件的首末端分别接于两个换向片上,如图 1-12 所示。元件在铁芯槽内的部分称为有效部分,槽外两端仅起连接作用,称为端节部分。

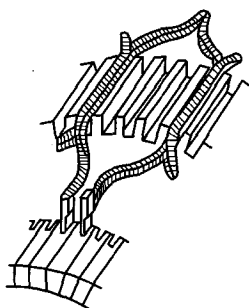


图 1-12 线圈与换向器

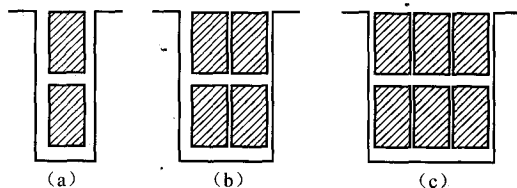


图 1-13 实槽与虚槽

(a) $u=1$; (b) $u=2$; (c) $u=3$

3. 元件数 S 、换向片数 K 、虚槽数 Z_a 之间的关系

每个元件均有首末两端,而每个换向片总是焊接着一个元件的末端和另一个元件的首端,因此,元件数与换向片数相等,即

$$S=K \quad (1-5)$$

若每一个实槽内嵌放上、下两个有效边,则称为一个单元槽或一个虚槽。但有些电机,一个实槽内上、下层常并列嵌放多个元件边,如图 1-13 所示。这时,电枢总的虚槽数为

$$Z_a=uZ \quad (1-6)$$

式中 Z ——电枢铁芯实槽数;

u ——一个实槽内所包含的虚槽数。

于是,可得 S 、 K 、 Z_u 的关系为

$$S = K = Z_u = uZ \quad (1-7)$$

4. 极距 τ

电枢表面圆周上相邻两主磁极之间的距离,以长度表示为

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p} \quad (1-8)$$

以虚槽表示为

$$\tau = \frac{Z_u}{2p} \quad (1-9)$$

式中 D_a ——电枢外径;

p ——主磁极对数。

5. 绕组的形式和节距

(1) 绕组的基本形式

直流电机的电枢绕组最基本的有单叠绕组和单波绕组两大类,图 1-14 所示为单叠绕组的连接规律示意图。由图可见,单叠绕组的相邻绕组元件在电枢表面仅差一个槽,单个绕组元件的首端和末端之间相邻一个换向片。例如图中第一绕组元件从 N 极出发,绕到相邻的 S 极,通过换向器与 N 极下的第二绕组元件串联,直到所有的绕组元件都串联起来为止。

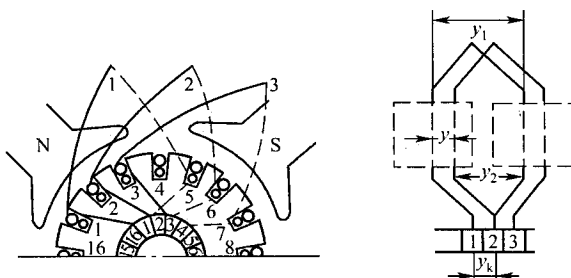


图 1-14 单叠绕组连接规律示意图

图 1-15 所示为单波绕组的连接规律示意图。由图可见,单波绕组的相邻绕组元件相隔约为两个极距,第二绕组元件与第一绕组元件处在相同极性的两个磁极下,单个绕组元件的首端与末端相隔约为两个极距。若电机有 p 对磁极,则连接 p 个元件后才回到出发元件的邻近,并相隔一个槽,以便第二周继续绕下去,直到所有的绕组元件都串联起来为止。

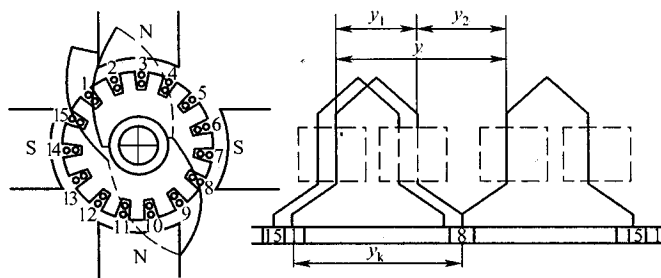


图 1-15 单波绕组连接规律示意图

(2) 绕组的节距

各种绕组在电枢和换向器上的连接规律,由绕组的节距来确定。直流电机的节距有线圈

节距(又称第一节距) y_1 ,合成节距 y ,换向器节距 y_k 和后节距(又称第二节距) y_2 。

①线圈节距 y_1

线圈节距 y_1 是指同元件两有效边在电枢表面所跨过的距离(参见图 1-14),一般以虚槽数表示。

$$y_1 = \frac{Z_v}{2p} \pm \epsilon = \text{整数} \quad (1-10)$$

式中, ϵ 是用来把 y_1 凑成整数的一个小数。当 $\epsilon=0$ 时, $y_1=\tau$,为整距绕组;当 ϵ 取“-”号时, $y_1<\tau$,为短距绕组;当 ϵ 取“+”号时, $y_1>\tau$,为长距绕组。整距绕组可获得最大感应电动势,短距和长距绕组感应电动势略小。由于短距绕组比长距绕组能节省端部材料,同时短距绕组对换向有利,所以一般采用短距绕组。

②合成节距 y

合成节距 y 是指相连接的两个绕组元件的对应边在电枢表面所跨过的距离(参见图 1-14)。

③换向器节距 y_k

换向器节距 y_k 是指同一个绕组元件首末端所连接两换向片之间在换向器表面所跨过的距离(参见图 1-14)。以合成节距表示:

$$y_k = y \quad (1-11)$$

④后节距 y_2

后节距 y_2 是指相串联的两元件中,第一元件的下层有效边与所连接的第二元件的上层有效边之间在电枢表面所跨过的距离(参见图 1-14)。其值取决于 y_1 和 y ,并与绕组的类型有关。

$$\text{单叠绕组} \quad y_2 = y_1 - y \quad (1-12)$$

$$\text{单波绕组} \quad y_2 = y - y_1 \quad (1-13)$$

二、单叠绕组

单叠绕组的同一元件首末两端分别与相邻两换向片相接,第一只元件的末端与第二只元件的首端接在同一换向片上。两只相互串联的元件总是后一只紧叠在前一只上面,故称为叠绕组。其特征为

$$y = y_k \pm 1 \quad (1-14)$$

式中,取“+”为右行绕组,取“-”为左行绕组,左行绕组端部交叉,一般不予采用。

为进一步分析单叠绕组的连接方法和特点,现以 $Z=S=K=16, 2p=4$ 为例,绕制一单叠右行绕组。

1. 计算节距

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \epsilon = \frac{16}{4} \pm 0 = 4, \text{为整距绕组};$$

$$y = y_k = 1, \text{为单叠右行绕组};$$

$$y_2 = y_1 - y = 4 - 1 = 3。$$

2. 绕组展开图

根据求得的各种节距,可画出绕组展开图。先将电枢表面展开成平面,并将电枢槽、电枢元件及换向片编号。其中元件及换向片号与其上层边所在槽号相同,电枢槽号和换向片号之间的相对位置,用如下方法确定:为了使元件的端接对称,应使每一元件所接的两个换向片的

分界线与其轴线重合。

图 1-16 所示为单叠右行绕组展开图,图中元件上层边画成实线,下层边画成虚线。第一元件的首端接在换向片 1 上,它的一边放在 1 号槽的上层,另一边放在 5 号槽的下层($y_1 = 4$),末端接在换向片 2 上($y_k = 1$);第二元件的首端接到换向片 2 上,它的一边放在 2 号槽的上层,另一边放在 6 号槽的下层,末端接到换向片 3 上;依次连接第三,第四……直到第十六元件。第十六元件的末端又接到换向片 1 上,组成一个闭合回路。

3. 主极位置

为了确定电枢绕组中感应电动势的方向,需假定电枢的转向,同时画出主极的位置和极性。电机主极在圆周上是对称均匀分布的,极靴宽度一般为 $0.6 \sim 0.7\tau$ 。在展开图上对称均匀划分极距,并在每极距内画上磁极并假设极性, N 极表示磁力线方向进入纸面, S 极表示磁力线方向离开纸面。根据右手定则,可以确定各导体中感应电动势的方向,用元件边上的箭头表示,在 N 极下的元件边中电动势方向均向下;在 S 极下元件边中的电动势方向均向上。由于几何中心线处的磁密为零,故此处元件边中电动势为零,即 1、5、9、13 号元件中电动势为零。因此,电枢电动势的分界线是磁场的分界线。

4. 电刷位置和极性

电刷在换向器上的位置是根据空载时在正负电刷之间能获得最大电动势这一原则来确定的。为了获得最大电动势,电刷应与电动势为零的电枢元件所连接的换向片相接触。

电动势为零的元件所处的位置,用下述方法判断:若是整距绕组($y_1 = \tau$),如图 1-17(a)所示,当两元件边位于几何中心线时,元件电动势为零,此时,元件轴线与主极轴线重合。如果是短距绕组($y_1 < \tau$),如图 1-17(b)所示,当元件轴线与主极轴线重合时,两元件边不在几何中心线上,而处在同一极性下左右对称,此时,两元件边电动势大小和方向都相同,互相抵消,元件电动势也为零。由此可见,只要元件的轴线与主极轴线重合,感应电动势即为零。此时,元件所接的两个换向片的分界线与主极轴线重合,所以电刷必须放在主极轴线下的换向片上。对应一个主极,便可放置一组电刷。本例中 $2p = 4$,则应有四组电刷。电刷的宽度通常等于换向片宽度的 $1.5 \sim 3$ 倍。在分析电机电枢绕组时,为简便起见,电刷只画成一个换向片宽。

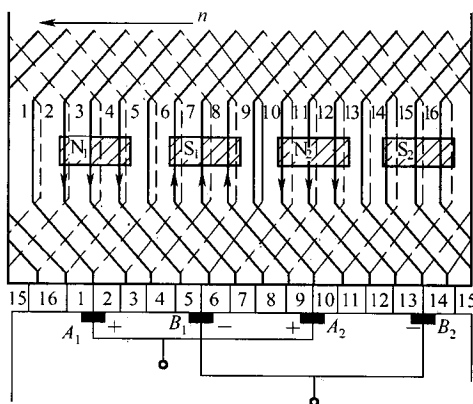


图 1-16 单叠绕组展开图

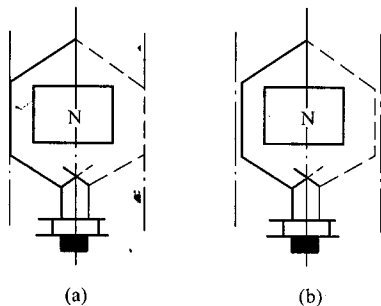


图 1-17 电刷放置法

(a)整距绕组;(b)短距绕组

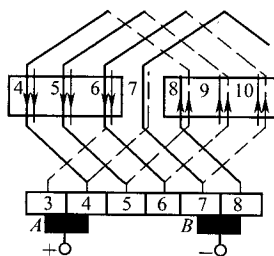


图 1-18 电刷极性

电刷的极性由线圈内电动势的方向来确定,当电枢转向和主极极性一定时,通过换向片跨接在任何两相邻电刷间的元件中电动势方向是一定的,因此电刷的极性固定不变。图 1-18 中 A 电刷为正, B 电刷为负。电机中将同极性电刷相连后引出正负两接线端。

5. 并联支路数

将图 1-16 中的元件依次连接,可得单叠绕组的瞬间电路图,如图 1-19 所示。由图可见,有四条支路并联于正负电刷之间。每一支路都是由上层边处在同一主极下的元件串联而成,一个主极对应一条支路,则单叠绕组的并联支路数恒等于电机的主极数。所以支路对数 a 等于主极对数 p ,即

$$a = p \quad (1-15)$$

电枢旋转时,各元件的位置随着移动,构成各支路的元件在交替更换,由于电刷位置是固定的,所以组成一条支路的元件数不变,感应电动势大小不变,从电刷外面看绕组时,永远是一个具有 $2a$ 条并联支路的电路。

电刷两端接通负载或电源时,产生电枢电流,由于电刷两侧的感应电动势方向相反,则电刷两侧的电流方向相反,所以电枢电流的分界线是电刷。

单叠绕组的电枢电动势 E_a 等于一条支路的电动势,电枢电流 I_a 等于各支路电流 i_a 之和,即

$$I_a = 2a \cdot i_a \quad (1-16)$$

6. 单叠绕组的均压线

在多级 ($2p > 2$) 电机的单叠绕组中,各支路的元件边处在不同的磁极下,如果各极下的气隙、磁通量都相等,电机运行正常,这是理想的情况。但实际上由于磁性材料不均匀,磁路的磁阻可能有所不同;或者由于制造上的偏差(如铸件中的气孔、安装时的误差);或者由于运行造成的原因(如轴承磨损使气隙不均匀)等都会导致各极磁通量不相等。因此即使绕组排列的完全对称(绕组每对支路中的对应元件在磁场中所处的位置相同),也会使各支路中感应电动势有所不同,从而在绕组中引起环流。该环流的数值仅受支路电阻和接触电阻的限制,而这些电阻值都很小,所以较小的电动势不平衡就会产生相当大的环流。当电枢带负载后,各并联支路的电流也将严重的不对称。环流的存在使电机损耗加大,更重要的是环流加重了某些电刷的负载,恶化了换向条件,很容易在电刷下发生危害电机运行的火花。

为了在一定程度上消除环流的不良影响,可将电枢绕组中理论上电位相等的点用均压线连接起来,如图 1-20 所示。实际电机的均压线 ($a-b$) 是连接在对应的换向片上,所以均压线节距 y_p 可用一对极内的换向片数表示,并且由于在单叠绕组中, $p=a$, 所以:

$$y_p = \frac{K}{p} = \frac{K}{a} \quad (1-17)$$

上例中 $2p=4, Z=S=K=16, y_p = \frac{K}{p} = \frac{16}{2} = 8$, 即换向片 1-9, 2-10, 3-11……间都可连接

均压线。如每个换向片上都连接均压线,共有 $\frac{K}{a} = \frac{16}{2} = 8$ 根,称为全额均压线。一般电机,可以采用 $1/2$ 或 $1/3$ 的全额均压线。

均压线可制成与电枢绕组端部同样形状,包上与电枢绕组同等级的绝缘,然后按照均压线节距接到换向片上。均压线放置位置如图 1-21 所示,将均压线接在换向片上后绑扎固定,然

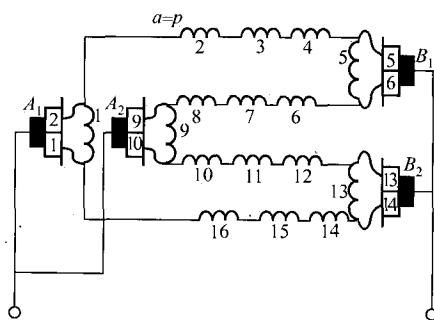


图 1-19 单叠绕组的瞬间电路图