



高等职业教育城市轨道交通专业系列规划教材

城市轨道交通 车辆电机电器

张 龙 祁冠峰 主编



中国铁道出版社

CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



高等职业教育城市轨道交通专业系列规划教材

城市轨道交通车辆电机电器

张 龙 祁冠峰 主编

郭世明 主审

中 国 铁 道 出 版 社

2011年·北 京

内 容 简 介

本书对城市轨道交通车辆电机电器作了详细的介绍,主要内容包括:直流电机的基本知识和电力拖动;三相交流异步电机基本知识和变频调节;直线电机原理和结构;变压器基本知识;电器基本原理;接触器和继电器及城市轨道交通车辆主型电器等。

本书可作为城市轨道交通车辆专业职业教育教材,也适用于城市轨道交通部门职工培训,以及从事城市轨道交通部门的管理人员、工程技术人员和运用维修人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通车辆电机电器/张龙,祁冠峰主编. —北京:中国铁道出版社,2011.11

ISBN 978-7-113-12830-2

I. ①城… II. ①张… ②祁… III. ①城市铁路—铁路车辆—电机 ②城市铁路—铁路车辆—电气设备 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 181526 号

书 名:城市轨道交通车辆电机电器

作 者:张 龙 祁冠峰 主编

责任编辑:阚济存

电话:010-51873133

电子邮箱:td51873133@163.com

封面设计:冯龙彬

责任校对:胡明锋

责任印制:陆 宁

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

版 次:2011年11月第1版 2011年11月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:11.5 字数:284 千

印 数:1~3 000 册

书 号:ISBN 978-7-113-12830-2

定 价:25.00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,请与本社读者服务部调换。

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

进入 21 世纪,我国城市轨道交通事业方兴未艾。北京、上海、广州、南京、深圳、大连、天津、重庆、武汉、长春、抚顺等城市建成了城市轨道交通,环渤海、长江三角洲和珠江三角洲地区还先后开建城际铁路。截至 2010 年,全国的轨道交通现已有 20 多条线路在运营,里程超过 800 km。我国轨道交通的发展在不到半个世纪的时间里,取得了令世人瞩目的成绩。轨道交通项目的建成,承担了大量的客流,在交通业中逐步发挥了不可替代的作用,占公共交通运量的比重逐年上升。同时,轨道交通解决了交通拥堵问题,提高了居民生活 and 环境质量,对调整城市区域结构和产业布局发挥了突出作用。轨道交通的运营,产生了良好的社会 and 经济效益。我国的城市轨道交通行业步入一个跨越式发展的新阶段,已经成为世界最大的城市轨道交通市场。

本书编写时着力体现以下特点:

1. 侧重基本概念、基本原理、基本结构的阐述,并强调实际应用。
2. 编入了较为成熟的最新技术,取材新颖。
3. 减少繁杂的理论分析、公式推导,力求做到图文并茂、语言规范、深入浅出、通俗易懂。
4. 书中符号、插图采用最新国家标准。

本书由张龙和祁冠峰主编,郭世明主审。具体编写分工为:第一章武军编写,第二章张龙编写,第三章韩惠编写,第四章刘敏军编写,第五章杨瑞柱编写,第六章刘慧编写,第七、八章祁冠峰编写,第九章童巧新编写。

本书在编写过程中引用了部分国内外同类专业教材和北京、上海等地铁公司资料,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,资料匮乏,不足之处恳请各位读者批评指正。

编 者
2011 年 1 月

第一章 直流电机基本知识	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 直流电机的磁场	14
第四节 直流电机的感应电动势和电磁转矩	19
第五节 直流电机的基本方程	21
小 结	24
复习思考题	25
第二章 直流电机的电力拖动	26
第一节 直流电动机的工作特性	26
第二节 直流电动机的启动、反转、调速和制动	28
第三节 直流串励电动机的磁场削弱	32
小 结	34
复习思考题	35
第三章 异步电动机基本知识	36
第一节 异步电动机基本结构	36
第二节 交流绕组的电势和磁势	40
第三节 三相异步电机的工作原理及运行分析	44
第四节 三相异步电动机的启动、反转、调速和制动	52
第五节 单相异步电动机	59
小 结	62
复习思考题	62
第四章 三相异步电动机变频调节	64
第一节 三相异步电动机变频调速的基本原理	64
第二节 异步电动机变频调节的运行方式和特性	69
第三节 异步电动机的恒转矩、恒功率变频调节	72
小 结	73
复习思考题	74
第五章 直线电机	75
第一节 直线电机概述	75
第二节 直线电机结构与工作原理	77
第三节 直线电动机的基本特性	80

第四节 直线电机的应用及发展前景	82
小 结	84
复习思考题	85
第六章 变压器的基本知识	86
第一节 变压器的分类及基本结构	86
第二节 变压器的工作原理及运行分析	90
第三节 变压器的连接组别	97
第四节 其他用途变压器	100
第五节 干式变压器	103
小 结	105
复习思考题	106
第七章 电器基本理论	107
第一节 电器的发热和电动力	107
第二节 电弧理论与灭弧方法	112
第三节 电接触与触头系统	121
第四节 电器的传动装置	131
小 结	135
复习思考题	136
第八章 接触器和继电器	137
第一节 接触器基本知识	137
第二节 常见类型的接触器	140
第三节 继电器基本知识	146
第四节 常见类型的继电器	148
小 结	155
复习思考题	155
第九章 主型电器	157
第一节 断 路 器	157
第二节 受 电 弓	164
第三节 司机控制器	169
小 结	175
复习思考题	175
参考文献	176

第一章 直流电机基本知识

直流电机是直流发电机和直流电动机的总称。本章主要介绍直流电机的基本知识,主要包括直流电机的工作原理及可逆性、直流电机的基本结构、励磁方式及感应电动势和电磁转矩等。

第一节 直流电机基本工作原理

直流电机具有可逆性,既可作直流电动机使用,也可作直流发电机使用。作直流电动机运行时,则将直流电能转换成机械能输出;作直流发电机运行时,将机械能转换成直流电能输出。直流电动机由于具有良好的启动、制动和调速性能,一般用于对启动和调速性能要求较高的场合,例如大型轧钢设备、大型精密机床、矿井卷扬机、城市电车、地铁机车等。通常使用直流电动机作为原动机来拖动工作机械。直流发电机作为直流电源向负载供电。

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。

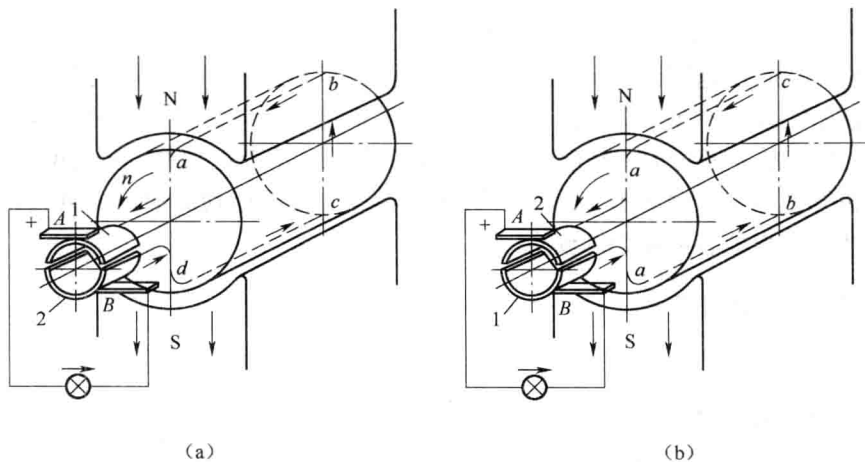


图 1-1 直流电机简单模型图

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、直流电动机工作原理

包括直流电机在内的一切旋转电机, 实际上都是依照两条基本原理制造的。一条是: 导线切割磁通产生感应电动势; 另一条是: 载流导体在磁场中受到电磁力的作用。任何电机都包括磁场部分和电路部分, 任何电机都体现电和磁的相互作用。

图 1-2 所示为两极直流电动机工作原理图。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:

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

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。

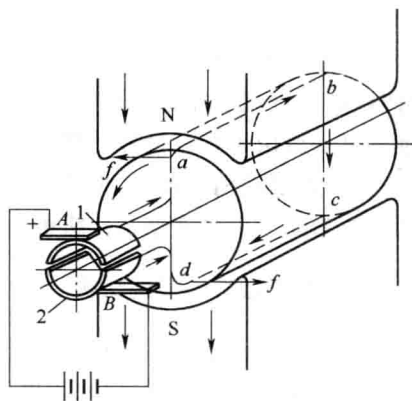


图 1-2 直流电动机工作原理图

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。

三、直流发电机工作原理

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, 感应电动势方向分别为 $b \rightarrow a$, $d \rightarrow c$ 。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,为一单方向的直流动势。

2. 感应电动势的波形

根据电磁感应定律,每根导体产生的感应电势 e 为:

$$e = B_x L v \quad (\text{V}) \quad (1-2)$$

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, $v =$ 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1-3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1-3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动势,如图1-4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。

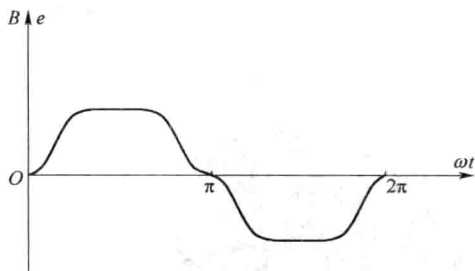


图 1-3 线圈内电动势波形

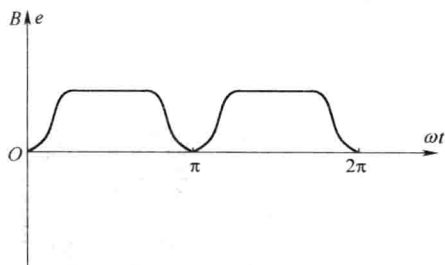


图 1-4 电刷两端的电动势波形

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1-5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%,基本为一直流动势,如图1-6所示。

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为电能。

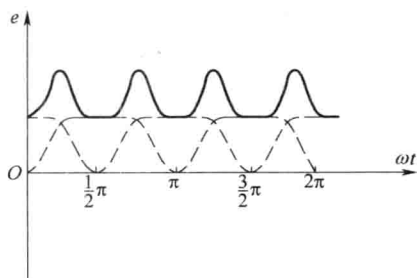


图 1-5 两个线圈换向后的电动势波形

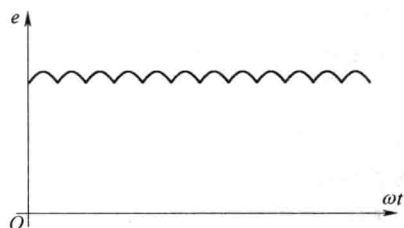


图 1-6 多个线圈电刷两端的电动势波形

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

第二节 直流电机的基本结构

一、直流电机基本结构

直流电机的基本结构如图 1-7 所示。其主要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),气隙是电动机磁路的一部分。由主磁极所建立磁场的磁感应强度在空气隙中按一定的形状分布。气隙虽然很窄,但是它的大小和形状对电机的运行性能有很大的影响。一般中小型电机的空气隙为 $0.7 \sim 5 \text{ mm}$,大型电机为 $5 \sim 10 \text{ mm}$ 。

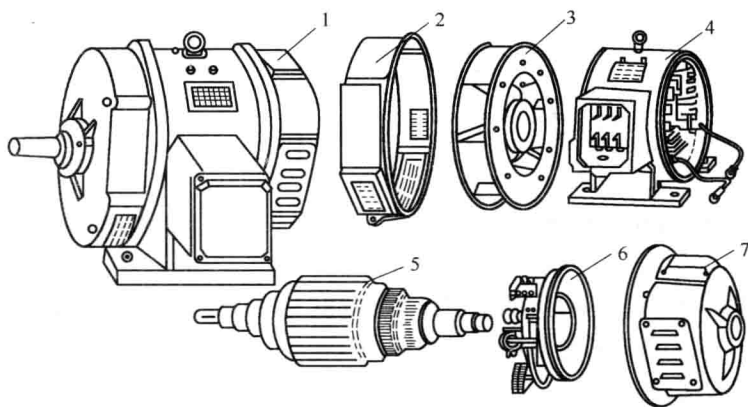


图 1-7 直流电机结构图

1—直流电机总成;2—后端盖;3—通风器;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

主磁极的作用是产生主磁场,结构如图 1-8 所示,由主极铁芯和主极线圈(也就是励磁绕组)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。

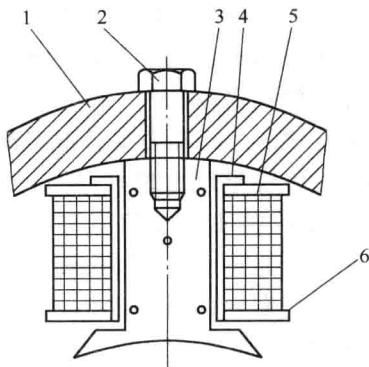


图 1-8 主磁极

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

(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。

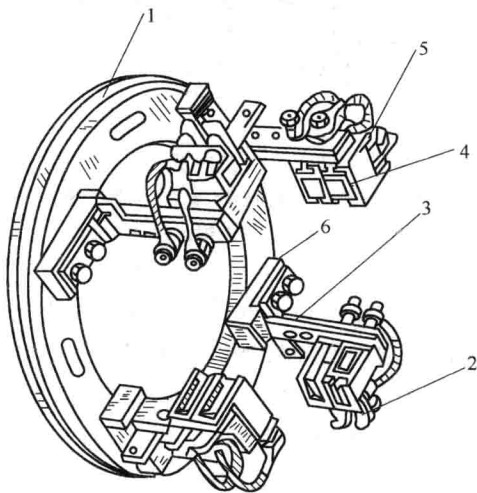


图 1-9 电刷装置

1—刷杆座;2—弹簧;3—刷杆;
4—电刷;5—刷握;6—绝缘件

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。在直流电动机里,电枢绕组中通入电流,在磁场中受到电磁力的作用,使电枢旋转,把电能转换成机械能;在直流发电机里,电枢由原动机拖着旋转,在电枢绕组中就会产生感应电动势,将机械能转换成电能,由于它是直流电机中实现能量转换的“枢纽”,故称为电枢。

(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。

(3) 电枢绕组

电枢绕组的作用是产生感应电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。

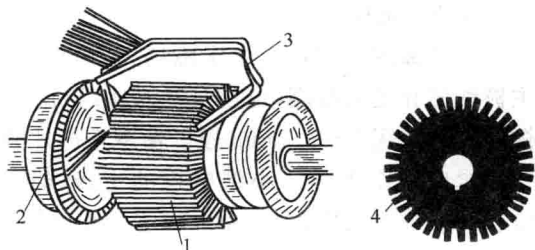


图 1-10 电枢铁芯冲片和铁芯

1—电枢铁芯; 2—换向器; 3—绕组元件; 4—铁芯冲片

(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势整流成电刷两端的直流电势。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。

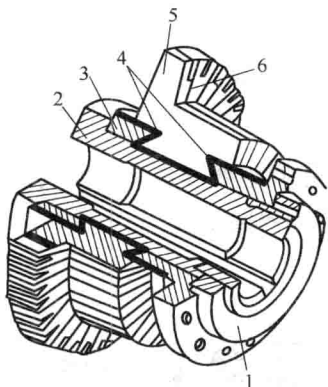


图 1-11 换向器

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、直流电机的电枢绕组

电枢绕组是实现电能和机械能相互转换的枢纽,是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。

1. 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

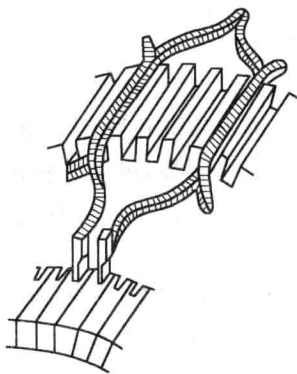


图 1-12 线圈与换向器

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。

(3) 元件数 S 、换向片数 K 、虚槽数 Z_u 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:

$$S = K \quad (1-3)$$

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:

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

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:

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

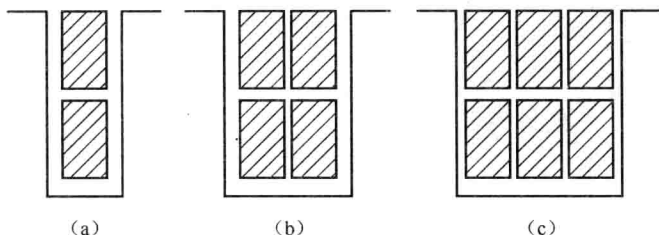


图 1-13 实槽与虚槽

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

(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:

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p} \quad (1-6)$$

以虚槽表示为:

$$\tau = \frac{Z_u}{2p} \quad (1-7)$$

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 1-15 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二个极距,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。

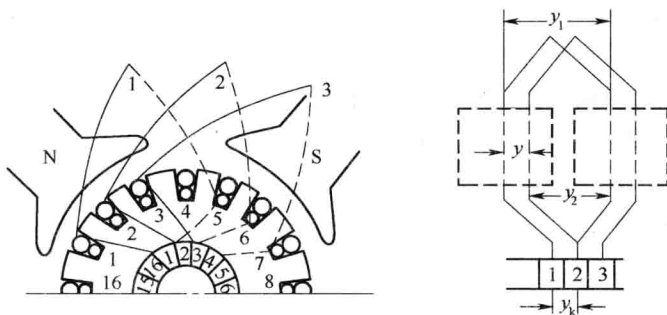


图 1-14 单叠绕组连接规律示意图

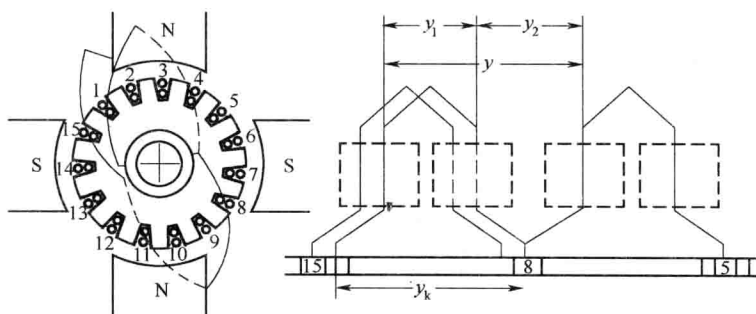


图 1-15 单波绕组连接规律示意图

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 。

a. 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。

$$y_1 = \frac{Z_u}{2p} \pm \epsilon = \text{整数} \quad (1-8)$$

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势, 短距和长距绕组感应电势略小。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。

b. 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)。

c. 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)。以换向片数表示:

$$y_k = y \quad (1-9)$$

d. 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。

$$\text{单叠绕组} \quad y_2 = y_1 - y \quad (1-10)$$

$$\text{单波绕组} \quad y_2 = y - y_1 \quad (1-11)$$

2. 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:

$$y = y_k = \pm 1 \quad (1-12)$$

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

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

$$\text{单叠右行绕组} \quad y = y_k = 1,$$

$$y_2 = y_1 - y = 4 - 1 = 3$$

(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

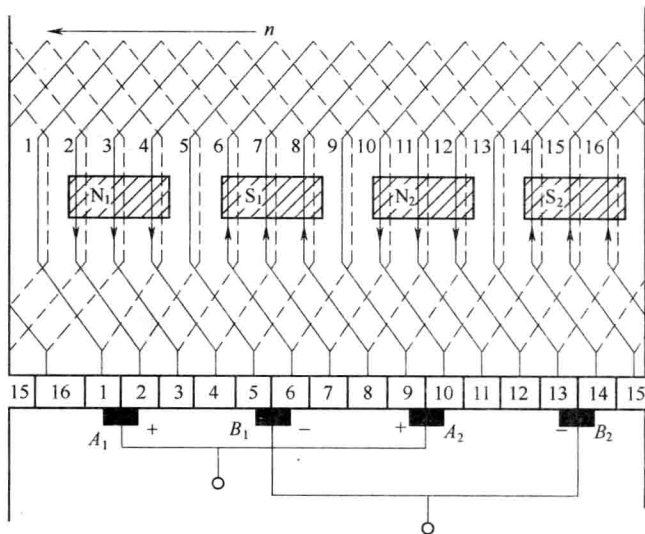


图 1-16 单叠绕组展开图

层,另一边放在 6 号槽的下层,末端接到换向片 3 上;依次连接第三,四……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) 主磁极的位置

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,同时画出主磁极的位置和极性。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 1.5~3 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。

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。

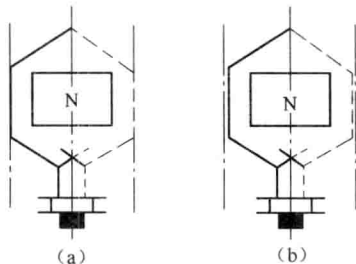


图 1-17 电刷放置法
(a) 整距绕组; (b) 短距绕组

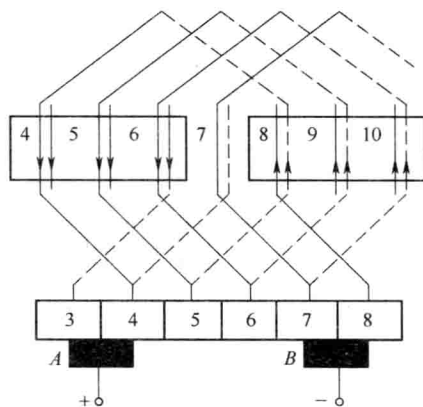


图 1-18 电刷极性

(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:

$$a = p \quad (1-13)$$

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:

$$I_a = 2a \cdot i_a \quad (1-14)$$

(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:

$$y_p = \frac{K}{p} = \frac{K}{a} \quad (1-15)$$

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,然后再嵌放电枢绕组。

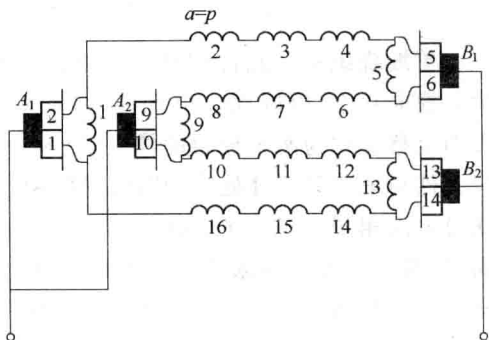


图 1-19 单叠绕组的瞬间电路图



图 1-20 单叠绕组的均压线