



高等轨道交通
系列教材

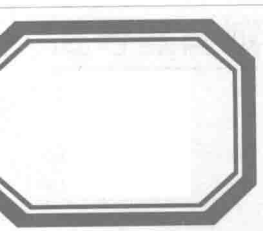
GUIDAO JIAOTONG CHELIANG
DIANJI JIANXIU YU WEIHU

轨道交通车辆 电机检修与维护

张秀平 / 主 编



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>



轨道交通车辆电机检修与维护

张秀平 主 编
高邓波 副主编
张龙 谢家的 主 审

内 容 简 介

本书根据电力机车驾驶与检修、城市轨道交通车辆驾驶及检修专业电机课程标准,并参照铁路职业技能鉴定规范,结合电力机车运用、检修和城市轨道交通车辆运用、检修生产实际编写。

全书分为三个项目,直流电机检修与维护、变压器的保养与维护 and 异步电机检修。以工作任务为载体,以工作过程为导向重构课程,包括 SS₁ 电力机车牵引电机、大功率和谐号机车牵引电机、和谐号动车组牵引电机、地铁车辆牵引电机维修保养;还包括电力机车用主变压器及平波电抗器的结构特点和保养。本书的内容编排有利于理论实践一体化教学。

本书可作为高职高专轨道交通车辆类专业或中职相关专业使用,还可作为机务段、动车段及地铁车辆厂有关运用、检修人员的培训教材。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

轨道交通车辆电机检修与维护 / 张秀平主编. — 北京: 北京交通大学出版社, 2012. 8

(高等教育城市轨道交通系列教材)

ISBN 978 - 7 - 5121 - 1137 - 0

I. ①轨… II. ①张… III. ①轻轨车辆—电机—车辆检修—职业教育—教材 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 195920 号

责任编辑: 陈跃琴 特邀编辑: 宋英杰

出版发行: 北京交通大学出版社

电话: 010 - 51686414

地 址: 北京市海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编: 100044

印 刷 者: 北京瑞达方舟印务有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185 × 260 印张: 14.75 字数: 368 千字

版 次: 2012 年 7 月第 1 版 2012 年 7 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 5121 - 1137 - 0/U · 108

印 数: 1 ~ 2500 册 定价: 32.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010 - 51686043, 51686008; 传真: 010 - 62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前 言

本书根据电力机车驾驶与检修、城市轨道交通车辆驾驶及检修专业电机课程标准，并参照铁路职业技能鉴定规范，结合电力机车运用、检修和城市轨道交通车辆运用、检修生产实际编写而成。

“轨道交通车辆电机检修与维护”是电力机车专业与城市轨道交通车辆专业的一门专业基础课，目标是让学生掌握轨道交通车辆使用的直流电机、变压器、交流异步电机构造原理与维护的工艺过程，它以机械工学、电工电子技术及应用等课程的学习为基础，也是进一步学习轨道交通车辆构造与维修、城市轨道交通运用与规章课程的基础。

《轨道交通车辆电机检修与维护》依据完成工作任务的需要设置内容，其总体设计思路是把课程分为三个项目，分别是直流电机检修与维护、变压器的保养与维护 and 异步电机检修。教材内容突出对学生职业能力的培养，理论知识的选取紧紧围绕工作任务完成的需要来进行，同时又充分考虑现代高等职业教育对理论知识学习的需要，并融合了相关资格证书对知识、技能和态度的要求。

本书由广州铁路职业技术学院张秀平主编，广州铁路职业技术学院高邓波副主编；太原铁路机械学校张龙、广州铁路职业技术学院谢家的任主审。高邓波编写任务 1.1 ~ 任务 1.5；邱晓欢编写任务 1.6、任务 2.1 ~ 任务 2.2、任务 3.6；张秀平编写任务 3.1 ~ 任务 3.5。本书在编写过程中得到广州机务段劳孟老师和广州地铁公司、深圳地铁公司有关人员的大力帮助，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

2012 年 7 月

目 录

项目一 直流电机检修与维护.....	1
任务 1.1 直流电机认知及运行	1
任务 1.2 直流电机电枢绕组的嵌线与联接	9
任务 1.3 直流电机的特性	19
任务 1.4 直流电机运用	35
任务 1.5 直流电机的换向与通风冷却	49
任务 1.6 ZD115 型牵引电机特点及维护保养	84
项目二 变压器的保养与维护.....	104
任务 2.1 变压器的认知及运行	104
任务 2.2 TBQ19 - 8668/25 型主变压器、TXP13 平波电抗器的结构特点与检修 维护	126
项目三 异步电机检修.....	139
任务 3.1 三相异步电机基础	139
任务 3.2 异步电机运行	167
任务 3.3 交流牵引传动系统	180
任务 3.4 地铁列车牵引电机维护保养	210
任务 3.5 和谐号动车组牵引电机	218
任务 3.6 电力机车交流辅助电机运用保养	221
参考文献.....	230

项目一

直流电机检修与维护

学习目标

1. 掌握直流电机的基本原理、结构、电磁关系、运行特性、控制方法、改善换向和通风冷却方法。
2. 掌握直流牵引电机检修与维护的工艺和流程。

任务 1.1 直流电机认知及运行

学习目标

一、知识目标

- (1) 掌握直流电机的基本结构、额定值。
- (2) 掌握直流电机的基本工作原理。

二、能力目标

1. 专业能力

- (1) 小组合作能完成小型直流电机拆装。
- (2) 小组合作能进行小型直流电机的检修并完成实训报告。

2. 方法能力

- (1) 能收集与课程学习相关的信息。
- (2) 能使用各种信息资源完成学习与实训任务。
- (3) 实训结束后能对实训过程和结果进行反思和评价。

3. 社会能力

- (1) 能与小组成员进行愉快有效的合作。
- (2) 能遵守各项规章制度并具有高度的责任感。
- (3) 能吃苦耐劳、热爱劳动，一丝不苟地工作。

相关知识

1.1.1 直流电机的结构

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。

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 1-1 所示。

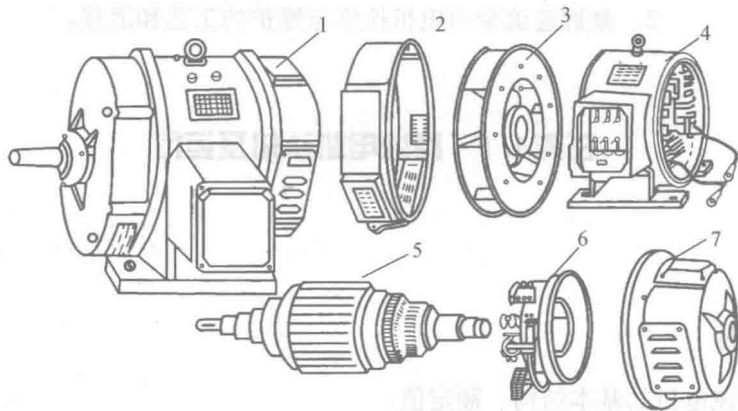


图 1-1 直流电机结构

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

主磁极如图 1-2 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，成为一个整体。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。

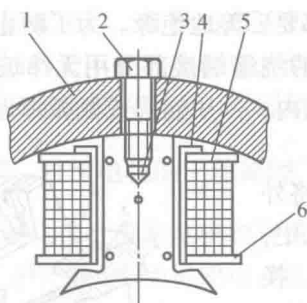


图 1-2 主磁极

- 1—机座; 2—主极螺钉; 3—主极铁芯;
4—框架; 5—主极线圈; 6—绝缘垫衬

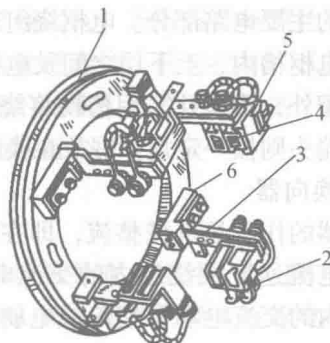


图 1-3 电刷装置

- 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, 它装在两个主磁极之间, 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 1-3 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。电枢铁芯冲片和铁芯如图 1-4 所示, 沿铁芯外圈均匀地分布有槽, 在槽内嵌放电枢绕组。

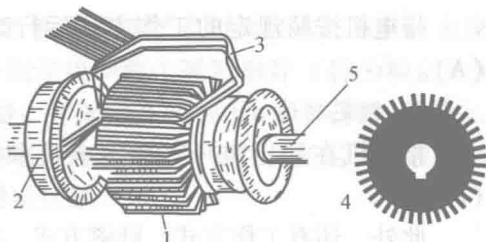


图 1-4 电枢铁芯冲片和铁芯

- 1—电枢铁芯; 2—换向器;
3—电枢绕组; 4—铁芯冲片; 5—转轴

(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 1-5 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，换向片下部做成燕尾形，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。

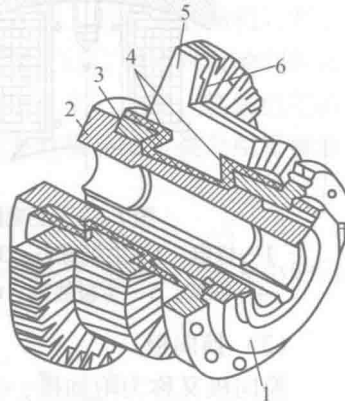


图 1-5 换向器

- 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)。

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。

额定功率、额定电压和额定电流的关系为：

发电机
$$P_N = U_N I_N \tag{1-1}$$

电动机
$$P_N = U_N I_N \eta_N \tag{1-2}$$

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;若电机的电流比额定值小得多,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;长期轻载运行将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。

1.1.2 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。作为直流发电机使用时,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

如图1-6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。

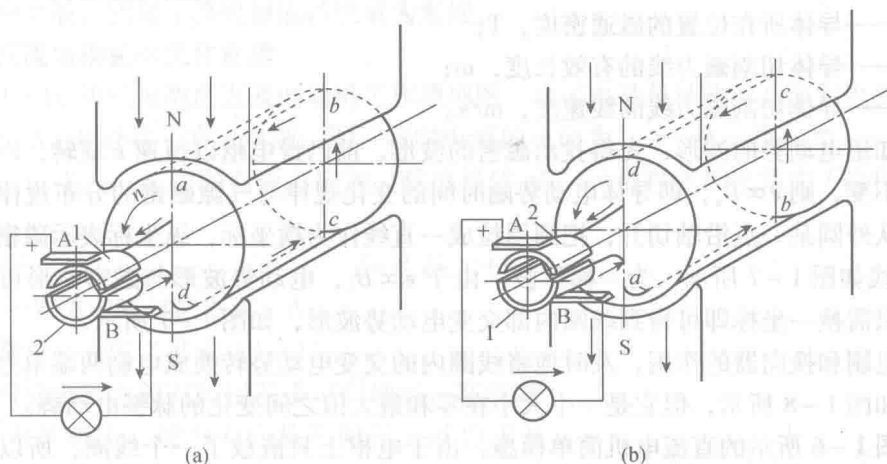


图1-6 直流电机简单模型图

A, B—电刷; 1, 2—换向片

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1-6(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, 电流流向为: 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 1-6 (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流向为: 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

$$e = B_x L v \quad (\text{V}) \quad (1-3)$$

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, 绘出的 B_x 分布曲线如图 1-7 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 1-7 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 1-8 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 1-6 所示的直流电机简单模型, 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 1-9 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 1-9 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 1-10 所示。

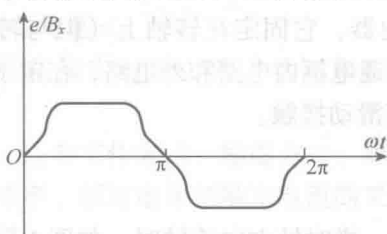


图 1-7 线圈内电动势/磁密波形

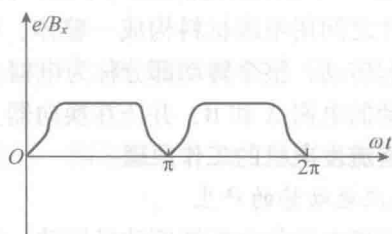


图 1-8 电刷两端的电动势波形

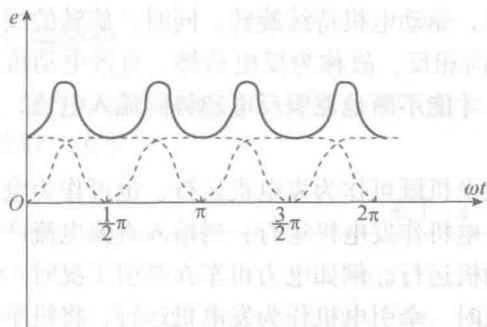


图 1-9 两个线圈产生的电动势波形

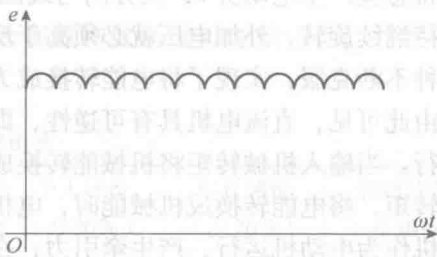


图 1-10 多个线圈产生的电动势波形

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。直流发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。

三、直流电动机的工作原理

如图 1-11 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

$$f = B_x Li \quad (\text{N}) \quad (1-4)$$

式中: i ——导体中流过的电流, A;

其他符号——定义见式 (1-3)。

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。

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

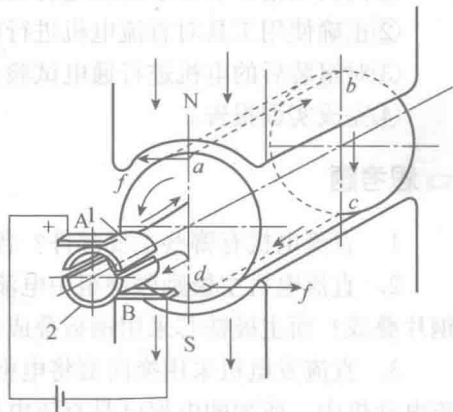


图 1-11 两极直流电动机工作原理图

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。直流电动机若要保持继续旋转,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为发电机运行,也可作为电动机运行。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,电机作为电动机运行。例如电力机车在牵引工况时,牵引电机作为电动机运行,产生牵引力;在制动工况时,牵引电机作为发电机运行,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。

实训 直流电机的拆装与检修

实施过程如下:

- (1) 安全教育;
- (2) 准备各种实训设备(见表1-1),请填写表中空白部分。

表1-1 实训设备表

序号	设备名称	规格	数量
1	直流电机		
2	测量仪表		
3	检修工具		
4	配件和耗材		

(3) 实训任务:

- ①按实训指导书要求正确进行直流电机的拆装;
- ②正确使用工具对直流电机进行检修;
- ③对组装后的电机进行通电试验;
- ④完成实训报告。

思考题

1. 直流电机有哪些主要部件?各起什么作用?
2. 直流电机主极励磁绕组中电流是直流,主磁通方向不变,为什么电枢铁芯采用电工钢片叠成?而主极铁芯采用钢板叠成?电机定子铁耗中有无磁滞和涡流损失?
3. 直流发电机采用换向器将电枢元件中的交流感应电动势整流成直流电压输出,在直流电动机中,所加的电枢已是直流电压,为什么还要有换向器?
4. 用什么方法可改变直流发电机输出电压的方向?用什么方法可改变直流电动机的转向?
5. 分析直流电动机和直流发电机的工作原理。

任务评价

任务完成后根据表 1-2 所列项目由个人、小组长和教师分别进行考核评价,并将考核分数填入表中。

表 1-2 任务考核评价表

评价项目	子项目	个人评价 (占 30%)	组长评价 (占 20%)	教师评价 (占 50%)
专业能力 (50 分)	解答理论问题 (25 分)			
	解决实际问题 (25 分)			
方法能力 (20 分)	获取理论与实践相关信息 (10 分)			
	完成任务后的自我总结评价 (10 分)			
社会能力 (30 分)	与同学和谐相处、协作完成任务 (10 分)			
	遵守纪律、一丝不苟、爱岗敬业 (10 分)			
	遵守安全规程 (10 分)			
小计				
签名				

任务 1.2 直流电机电枢绕组的嵌线与联接

学习目标

一、知识目标

- (1) 掌握直流电机电枢绕组的相关概念、联接形式。
- (2) 掌握绕组展开图的绘制方法。
- (3) 掌握单叠绕组与单波绕组的联接规律。

二、能力目标

1. 专业能力

- (1) 小组合作能完成直流电机电枢绕组的绕线与安装。
- (2) 小组合作能绘制直流电机的单叠绕组展开图。

2. 方法能力

- (1) 能收集与课程学习相关的信息。
- (2) 能使用各种信息资源完成学习与实训任务。
- (3) 实训结束后能对实训过程和结果进行反思和评价。

3. 社会能力

- (1) 能与小组成员进行愉快有效的合作。

(2) 能遵守各项规章制度并具有高度的责任感。

(3) 能吃苦耐劳、热爱劳动，一丝不苟地工作。

相关知识

1.2.1 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绕组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。本部分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。

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

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

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

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

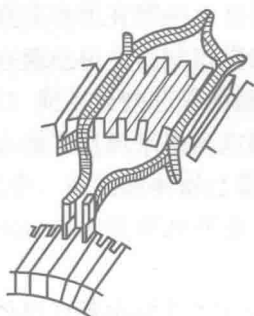


图 1-12 绕组元件与换向器

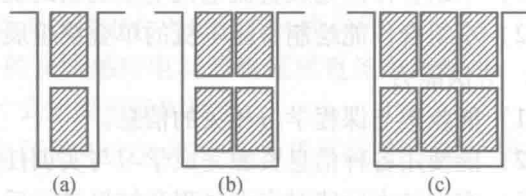


图 1-13 实槽与虚槽

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

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

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，如图 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。

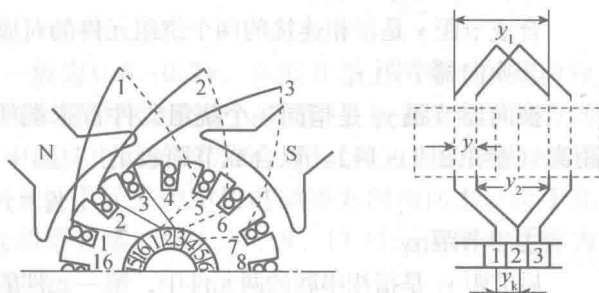


图 1-14 单叠绕组连接规律示意图

如图 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。

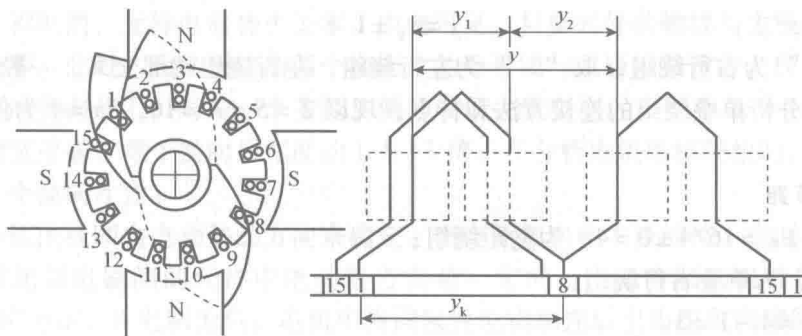


图 1-15 单波绕组连接规律示意图

(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。

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

式中, ε 是用来把 y_1 凑成整数的一个小数。当 $\varepsilon=0$ 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,短距绕组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

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

$$y = y_k = 1, \text{为单叠右行绕组};$$

$$y_2 = y_1 - y = 4 - 1 = 3。$$

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