

中等职业技术教育规划教材

王 军 主编

电机与变压器

中 国 机 械 工 业 教 育 协 会
全 国 职 业 培 训 教 学 工 作 指 导 委 员 会 编
机 电 专 业 委 员 会



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



中等职业技术教育规划教材

电机与变压器

中国机械工业教育协会

全国职业培训教学工作指导委员会 编

机电专业委员会

主 编 王 军

责任编辑 (CIP) 自录图注注图



机械工业出版社

本书为适应中等职业学校机电类专业教学改革需要而编写，是电气维修专业的技术理论课教材。主要内容有：直流电机的基本原理与结构、直流发电机、直流电动机、变压器的原理与结构、变压器的联结与并联运行、特种变压器及变压器类产品、三相异步电动机的基本知识、三相异步电动机的旋转磁场及工作原理、三相异步电动机绕组、单相异步电动机、同步电机以及特种电机。

本教材可供技工学校、中等职业技术学校使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机与变压器/王军主编. —北京: 机械工业出版社,
2004.6

中等职业技术教育规划教材

ISBN 7-111-14634-4

I. 电... II. 王... III. ①电机—专业学校—教材
②变压器—专业学校—教材 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 054245 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 荆宏智

责任编辑: 王振国 版式设计: 霍永明 责任校对: 王 欣

封面设计: 姚 毅 责任印制: 李 妍

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm $1/16$ ·8.5 印张·206 千字

定价: 14.00 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

中等职业技术教育规划教材书目

机床切削加工专业

机械制图 *

公差与配合 *

机械基础 *

机械加工常识 *

金属切削原理与刀具 *

电工与电子技术基础 *

数控机床编程与操作 *

切削加工工艺与技能训练

数控机床加工专业

机械制图 *

公差与配合 *

机械基础 *

机械加工常识 *

金属切削原理与刀具 *

电工与电子技术基础 *

数控机床编程与操作 *

数控机床操作训练

机械设备维修专业

机械制图 *

公差与配合 *

机械基础 *

机械加工常识 *

电工与电子技术基础 *

液压与气动

金属切削机床

机修钳工工艺与技能训练

模具制造与维修专业

机械制图 *

公差与配合 *

机械基础 *

电工与电子技术基础 *

模具材料与热处理

模具 CAD/CAM

冲压与注塑成形工艺

模具钳工工艺与技能训练

机械加工操作基本训练

电气维修专业

电工基础

电子技术基础

电机与变压器

电工仪表与测量

机械常识与识图

维修电工技能训练

电力拖动控制与技能训练

注：带 * 号的教材为各专业通用的教材。

前言

“中等职业技术教育规划教材”

编审委员会名单

主任 郝广发

副主任 周学奎 刘亚琴 李超群 何阳春 林爱平 李长江 付捷

委员 (按姓氏笔画排序)

于平 王珂 王军 王洪琳 付元胜 付志达 刘大力

(常务) 刘家保 许炳鑫 孙国庆 李木杰 李稳贤 李鸿仁

李涛 何月秋 杨柳青 (常务) 杨耀双 杨君伟 张跃英

林青 周建惠 赵杰士 (常务) 郝晶卉 荆宏智 (常务)

贾恒旦 黄国雄 董桂桥 (常务) 曾立星 甄国令

本书主编 王军

参编 姚永乐 徐熙寅 孙雅范 李君

本书主审 马高原

参审 康晓斌 李富国

前 言

为贯彻落实“全国职业教育工作会议”精神,克服原有的教材专业设置落后,缺乏新的专业和复合专业,技术内容比较陈旧,理论课内容偏深、偏难的弊端,更好地满足中等职业技术教育教学改革的需要,中国机械工业教育协会和全国职业培训教学工作指导委员会机电专业委员会联合组织编写了这套适合新形势的中等职业技术教育规划教材。首批所选五个专业为机床切削加工、机械设备维修、模具制造与维修、数控机床加工、电气维修。本套教材的编写指导思想是:贯彻党的教育方针,依据《劳动法》、《职业教育法》的规定和《国家职业标准》的要求,更新教学内容,突出技能训练,强化创新能力的培养,以培养具备较宽理论基础和复合型技能的人才,使培养的人才适应科技进步、经济发展和市场的需要。其宗旨是:促职业教育改革,助技能人才培养。

为实现这一宗旨,中国机械工业教育协会和全国职业培训教学工作指导委员会机电专业委员会联合组织了 30 多所高、中级技工学校参加了首批五个专业教学计划、教学大纲的制定和教材的编审工作。各学校对新教材的专业选择、课程设置、学时安排、教学计划和教学大纲的制定、教材定位、编写方式等,参照《国家职业标准》相关工种中级工的要求和各校实际,经过三次会议进行了广泛的讨论和充分论证,首先完成了教学计划和教学大纲的制定和审定工作。在教材的编写过程中,贯彻了“简明、实用、够用”的原则,反映了新知识、新技术、新工艺和新方法,体现了科学性、实用性、代表性和先进性,正确处理了理论知识与技能的关系。同时通过对原有教材进行评价,针对其不足并在编写过程中进行了改进,以充分反映学校的实际需要。新教材的价值在于兼顾了学生学习真本领与达到职业技能鉴定考试两种要求。综上所述,本套教材具有以下特色:

- 1) 职业性 专业设置参照有关专业目录,并根据职业发展变化和社会实际需求确定。
 - 2) 科学性 教学内容与现代科学技术发展和先进技术装备、技术水平相适应,体现了科学性和先进性。
 - 3) 实践性 重视实践性教学环节,加强了技能训练和生产实习教学,努力实现产教结合。
 - 4) 衔接性 与企业培训和其他类型教育相沟通,与国家职业资格证书体系相衔接。
 - 5) 实用性 教学内容符合职业标准及企业生产实际需要,有利于培养实用型人才。
- 与本教材配套的还有相应教材的习题集。

本套教材的编写工作得到了各学校领导的重视和支持,参加教材编审的人员均为各校的教学骨干,保证了本套教材能够按计划有序地进行,并为编好教材提供了良好的技术保证,在此对各个学校的支持表示感谢。

本书的具体编写分工如下:第一章~第三章由姚永乐编写,第四章~第六章由徐熙寅编写,第七章~第九章由孙雅范编写,第十章、第十一章由李君编写。全书由王军主编,由马高原主审,康晓斌、李富国参审。

由于时间和编者水平有限,书中难免存在某些缺点或错误,敬请读者批评指正。

中国机械工业教育协会
全国职业培训教学工作指导委员会
机电专业委员会

目 录

前言

绪论 1

第一章 直流电机的基本知识 2

第一节 直流电机的基本工作原理 2

第二节 直流电机的基本结构 3

第三节 直流电机的铭牌及额定值的意义 5

第四节 直流电机的电枢绕组 6

第五节 直流电机的电枢电动势、电磁功率及电磁转矩 9

第六节 直流电机的分类 11

第七节 直流电机的电枢反应及换向 13

复习思考题 15

第二章 直流发电机 18

第一节 并励发电机的空载特性 18

第二节 并励发电机电动势的建立 19

第三节 直流发电机的功率、转矩及电动势平衡方程式 19

第四节 并励发电机的外特性 21

第五节 复励发电机 22

第六节 直流电焊机 23

复习思考题 24

第三章 直流电动机 26

第一节 直流电动机的功率、转矩、电动势平衡方程式 26

第二节 并励与串励直流电动机的机械特性 27

第三节 直流电动机的起动 29

第四节 单相串励电动机 30

第五节 国产直流电动机简介 31

复习思考题 31

第四章 电力变压器 33

第一节 变压器的原理 33

第二节 变压器的结构 35

第三节 变压器的空载运行 39

第四节 变压器的负载运行 41

第五节 变压器的阻抗变换作用 42

第六节 变压器的外特性 43

第七节 变压器的空载试验和短路试验 44

第八节 变压器的损耗和效率 46

第九节 三相变压器的构成及变压器铭牌 48

复习思考题 51

第五章 变压器的联结与并联运行 53

第一节 变压器绕组的极性及其判定 53

第二节 三相变压器的联结及其组别 54

第三节 三相变压器的并联运行 58

复习思考题 60

第六章 特种变压器及变压器类产品 61

第一节 自耦变压器 61

第二节 电焊变压器 63

第三节 整流变压器 64

第四节 小型单相变压器的重绕及改绕 66

第五节 变压器类产品	71	第一节 单相异步电动机工作	
复习思考题	72	原理	109
第七章 三相异步电动机	73	第二节 单相电容与电阻起动电	
第一节 三相异步电动机的结构及其		动机	110
铭牌	73	第三节 单相罩极异步电动机	112
第二节 三相异步电动机的旋转磁场		第四节 单相异步电动机定子	
及工作原理	77	绕组	113
第三节 转差率及转子各量与转差率		第五节 单相异步电动机的反转	
的关系	80	和调速	114
第四节 三相异步电动机的工作		第六节 单相异步电动机的常见	
特性	83	故障	115
第五节 三相异步电动机的起动		复习思考题	116
和调速	87	第十章 同步电机	117
第六节 三相异步电动机的反转		第一节 同步电机的基本结构及励磁	
和制动	93	方式	117
第七节 电磁调速异步电动机	95	第二节 同步发电机的并联运行	119
复习思考题	96	第三节 同步电动机的工作原理及起	
第八章 三相异步电动机绕组	98	动方法	119
第一节 概述	98	复习思考题	121
第二节 三相单层绕组	99	第十一章 特种电机	122
第三节 三相双层绕组	103	第一节 伺服电动机	122
第四节 单双层混合绕组	105	第二节 交磁电机扩大机	123
第五节 三相绕组端部接线图例	107	第三节 测速发电机	125
复习思考题	108	第四节 步进电动机	126
第九章 单相异步电动机	109	复习思考题	127
第一节 单相异步电动机的结构及其			
铭牌	109		
第二节 单相异步电动机的旋转磁场			
及工作原理	110		
第三节 转差率及转子各量与转差率			
的关系	110		
第四节 单相异步电动机的工作			
特性	111		
第五节 单相异步电动机的起动			
和调速	111		
第六节 单相异步电动机的反转			
和制动	112		
第七节 电磁调速异步电动机	112		
复习思考题	113		

绪 论

由于电能的生产、传输、分配、控制等方面都很方便，因而在人类生活中获得了日益广泛的应用。目前世界各国都利用电能作为能量转换的中间环节，即首先将其他形式的能量转换成强大的、集中的电能，随后再将电能根据人们的需要转换成其他形式的能量加以利用，作为与电能有关的能量转换装置的电机，不论在工农业生产、交通运输、国防航空以及日常生活等方面，都是十分重要的设备。

在电力工业中，就目前来说，能够大量生产电能的仍然是以电磁感应为基本原理的电机。在各工厂企业中，各种工作母机、起重机、轧钢机、鼓风机、各种机床的母机等生产设备，都需要电机作为原动机。随着农业技术改造的发展，排灌、脱粒、碾米、饲料粉碎等各种农业机械中，也日益广泛地应用着电动机。此外在国防、文教、医疗以及交通运输等各项事业中，电机也起着十分重要的作用。

近年来，随着人民生活水平的提高，各种电机在家用电器中的应用越来越普遍。随着工农业生产及科学事业的发展，电机的种类越来越多。但按照运行方式来分类，可以把它们归并为：

- (1) 将机械能转换成电能——发电机。
- (2) 将电能转换成机械能——电动机。
- (3) 将电能转换成电能。
- 1) 具有不同的电压——变压器。
- 2) 具有不同的频率——变频器。
- 3) 具有不同的相数——变相机。
- (4) 在自动调节系统中起控制作用——控制电机。

如果按照电流性质的不同，电机又可以分为下面两大类：

- (1) 应用于直流电系统的电机——直流电机。
- (2) 应用于交流电系统的电机——交流电机。

按照标准定义，变压器并不是电动机，但由于变压器基本理论的分析方法与感应电动机极为类似，因此把它们归在一起来讲解，这样可以使理论研究工作方便而有条理。

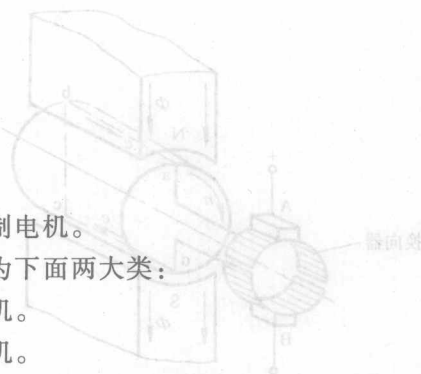
我国电机制造业的发展情况：

解放前生产的最大发电机为 200kW，交流电动机为 132kW。

解放后，1958 年我国研制成功世界上第一台 12MW 双水内冷汽轮发电机。1974 年制成 300MW 双水内冷汽轮发电机。

1987 年制成 600MW 定子水内冷、转子氢内冷大型汽轮发电机。

目前，正在进行设计、试制 1000MW 巨型发电设备。关于电力变压器，已能生产 330~500kV 电压等级，单台容量达 550MV·A。这些产品均已接近当前世界先进水平。三峡电站标志着我国水力发电设备制造能力已进入了世界先进行列。



第一章 直流电机的基本知识

直流电机是机械能和直流电能互相转换的旋转机械装置。将机械能转变为直流电能的电机称为直流发电机，将直流电能转变为机械能的电机称为直流电动机。

在工业生产中，某些方面需要直流电源，例如：电解、电镀、蓄电池充电等等，直流发电机可为它们提供电源。

直流电动机的起动转矩大，而且调速性能好，因此，对调速要求较高的生产机械，例如：龙门刨床、镗床、轧钢机等，或需要较大起动转矩的生产机械，如电车、起重机械等，常用直流电动机拖动。

第一节 直流电机的工作原理

一、直流发电机的基本工作原理

图 1-1 是直流发电机的原理图。在静止的磁极 N、S 之间，有一个能转动的圆柱形铁心，叫电枢，其上绕着一匝线圈，线圈两端分别连接在两个相互绝缘的半圆形铜片上，这半圆形铜片叫换向片，这些换向片组成换向器。换向器上压着静止不动的电刷，线圈通过电刷与外电路相连。

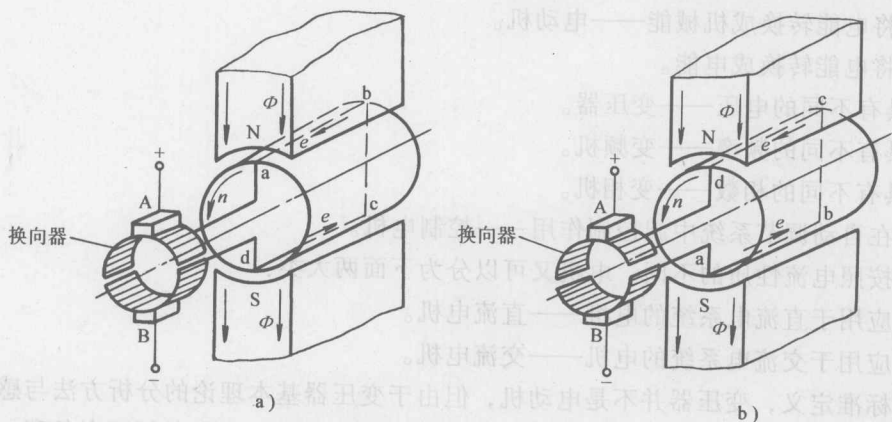


图 1-1 直流发电机工作原理图

当线圈随着电枢逆时针旋转时，线圈切割磁力线，产生感应电动势，在图 1-1a 所示瞬间，ab 边位于 N 极下，cd 边位于 S 极下，感应电动势如图所示，电流从电刷 A 流出，从电刷 B 流入，A 为正极，B 为负极。

当电枢转过 90° 时，线圈两边位于磁场物理中性面上，这时不切割磁力线，感应电动势为零，电刷同时接触两个换向片，线圈被短接，但线圈中无电流。

线圈转过物理中性面后，ab 边位于 S 极下，cd 边位于 N 极下，如图 1-1b 所示。这时感应电动势的方向为从 a 到 b 及从 c 到 d，线圈两边中的电流方向正好与图 1-1a 所示情况相

反。观察两图可看出,处于N极下的线圈边,电流总是从线圈流向外电路,而处于S极下的线圈边,电流总是从外电路流向线圈里。由于电刷A总是与N极下的线圈边相接,电刷B总是与S极下的线圈边相接,所以,A总是正极,B总是负极。这样,通过电刷与换向器,就把线圈中交变的感应电动势,变为对外电路来说方向恒定不变的电动势。

外电路获得的电动势方向虽然不变,但数值却在零与最大值之间变化,波形如图1-2a所示,这样的电动势不符合实际要求。为了减小电动势的波动,在电枢上可以增加线圈数和换向片数,通过这些线圈的电动势的叠加,可以使波动程度降低。图1-2b是两个线圈的电动势的叠加,所得波形的波动程度已显著降低。实际应用中的直流电机,线圈数是很多,电动势的波动很小,可以认为是恒定不变的直流电动势。

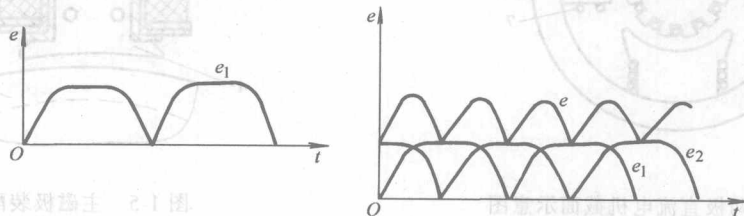


图 1-2 直流发电机电动势波形图

二、直流电动机的工作原理

图1-3是直流电动机的原理图。把电刷A、B接上直流电源,电流从A流入线圈,从B流出,用左手定则可判断出,线圈ab边受力向左,cd边受力向右,形成一个转矩,使电枢逆时针转动,如图1-3a所示。当线圈两边分别转到另一磁极下时,它们所接触的电刷也已改变,线圈中电流的方向与原来相反,如图1-3b所示,用左手定则可判断出,ab边受力向右,cd边受力向左,电枢仍按逆时针转动。这样,通过电刷与换向器,使得处于N极下的线圈边内的电流总是从电刷向线圈流入,而处于S极下的线圈边内的电流总是从线圈向电刷流出,从而使电枢总是获得逆时针转动的转矩,而保持转动方向不变。

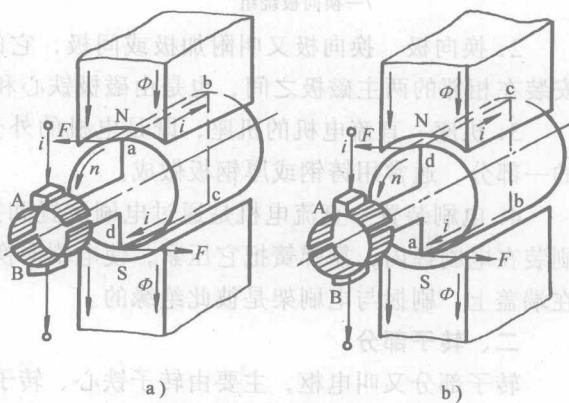


图 1-3 直流电动机原理图

第二节 直流电机的基本结构

直流电机的结构主要由两部分组成:定子部分(静止的)和转子部分(旋转的)。

一、定子

定子主要有主磁极(极心、极掌)、换向极、机座、电刷(图中未画)等装置,如图1-4所示。

1. 主磁极 主磁极的作用是产生主磁场,它由磁极铁心和励磁绕组组成,如图

1-5 所示。

磁极铁心由极身和极掌两部分组成，极身上套装励磁绕组，而极掌的作用是为了使电机空气隙中磁感应强度的分布较为均匀，并挡住励磁绕组。主磁极铁心用硅钢片或薄钢板铆制而成。

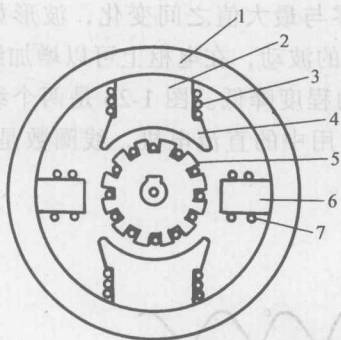


图 1-4 两极直流电机截面示意图

- 1—机座 2—极心 3—励磁绕组
4—极掌 5—电枢 6—换向极
7—换向极绕组

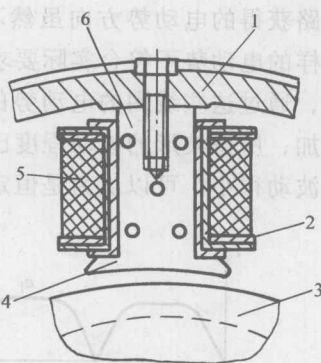


图 1-5 主磁极装配

- 1—机座 2—框架
3—电枢 4—极掌
5—励磁绕组 6—极身

2. 换向极 换向极又叫附加极或间极，它的作用是为了改善直流电机的换向。换向极安装在相邻的两主磁极之间，也是由磁极铁心和套装在铁心上的绕组组成。

3. 机座 直流电机的机座，既是电机的外壳，起保护和机械支撑作用，也是电机磁路的一部分，通常用铸钢或厚钢板做成。

4. 电刷装置 直流电机是通过电刷装置和换向器，把外电路与电枢绕组连接起来。电刷装在电刷握内，靠弹簧把它压紧，使电刷同换向器保持良好的接触。刷握通过电刷架固定在端盖上，刷握与电刷架是彼此绝缘的。

二、转子部分

转子部分又叫电枢，主要由转子铁心、转子绕组、换向器等组成。

1. 转子铁心 转子铁心是由许多形状相同的硅钢片叠制而成的圆柱体，表面均匀分布着与轴向平行的槽，用来嵌放转子绕组。转子铁心是直流电机主磁路的一部分。

2. 转子绕组 转子绕组是由带绝缘的导线绕成线圈，嵌放在转子铁心的槽内，再把各个线圈按照一定规律连接起来而构成的。它的主要作用是产生感应电动势和流过电流，实现直流电机的能量转换。

3. 换向器 换向器由许多相互绝缘的换向片组成，每个换向片都与转子绕组的一个线圈相连。通过换向器来实现与电刷的配合，实现直流电机的功能，如图 1-6 所示。

三、其他部件

电机的其他部件有端盖、轴承、风扇、接线板、出线盒等。

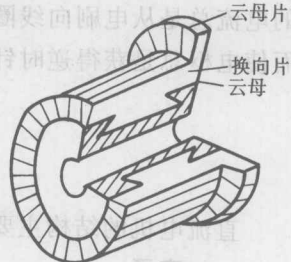


图 1-6 直流电机的

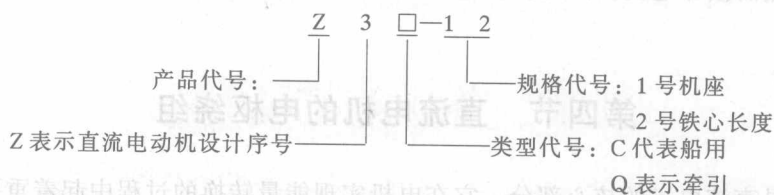
换向器

第三节 直流电机的铭牌及额定值的意义

每台直流电机的外壳上都有一个铭牌，上面标有该电机的额定数据，作为正确使用该电机的依据。

图 1-7 是直流电机的铭牌，主要额定值意义如下。

一、型号



直 流 电 动 机			
型 号		励磁方式	
额定功率		励磁电压	
额定电压		励磁电流	
额定电流		定 额	
额定转速		绝缘等级	
标准编号		重 量	
出品编号		出厂日期	
中 华 人 民 共 和 国			
× × × 电机厂制造			

图 1-7 直流电机铭牌

二、额定功率 P_N

是指电机的输出功率，对发电机是指输出的电功率；对电动机，是指输出的机械功率。

三、额定电压 U_N

对发电机来说，是指在额定电流下，输出额定功率时的输出电压；对电动机来说，是指电源的电压。

四、额定电流 I_N

对发电机来说，是指输出额定功率时，输出的电流；对电动机来说，是指输出额定功率时，输入的电流。

五、额定转速 n_N

对于发电机，指发电机在额定励磁电流下，输出额定电压时的转速；对于电动机，是指电动机在额定电压下，输出额定功率时的转速。

六、励磁方式

直流电机的励磁方式有他励、并励、串励及复励等。

七、励磁电压和励磁电流

直流电机励磁绕组为产生主磁通所需的电压就是励磁电压，所需的电流就是励磁电流。

八、定额

指电机按额定值工作时，可以持续运行的时间和顺序，分为连续定额、短时定额和断续

定额。

还有一些额定工作情况下的数据并没有标在铭牌上，但它们也是额定值。如电机额定运行状态下的效率 η_N (%)、转矩 T_N (N·m)、温升 τ_N (°C) 等。

直流电机运行时，若各个物理量都与它的额定值相同，则电机处于额定运行状态。在额定运行状态，电机能可靠地运行，并具有良好的性能。如果流过电机的电流小于额定电流，则称为轻载运行；超过额定电流，则称为过载运行。轻载运行时效率低，浪费能量；过载运行时可能因过热而损坏电机。因此，在选择电机时，应根据负载要求尽量让电机运行在额定值附近。

第四节 直流电机的电枢绕组

电枢绕组是直流电机的核心部分，它在电机实现能量转换的过程中起着重要作用。

一、常用概念

1. 绕组元件 电枢绕组是由许多个线圈以一定的规律连接起来的，每个线圈的两端分别接在两个换向片上，这样的线圈就叫绕组元件，元件的符号如图 1-8 所示。元件可以是单匝线圈，也可由多匝绕成，其中嵌放在槽中的两直线部分叫有效边，而两边弯曲部分，只起连接作用，叫端部。电枢绕组所有的元件数用 S 来表示。

2. 实槽与虚槽 在电枢表面实际存在的槽，叫实槽。在一个实槽中，往往并排嵌放几个元件边，我们把一个上层边和一个下层边看成一个虚槽。一个实槽中的虚槽数等于该实槽中并列的上层边（或下层边）的元件数，用 u 表示。如图 1-9b 所示，一个实槽中放了 3 组元件上下层边，所以虚槽数是 3，即 $u = 3$ 。如果用 Q_r 表示总的虚槽数，用 Q 表示实槽数，于是有

$$Q_r = uQ = S \quad (1-1)$$

因为同一个元件的两端接在两个换向片上，而各元件之间又是靠换向片彼此连接起来的，每个换向片上有两个元件的一端，所以有

$$K = S \quad (1-2)$$

式中 k ——换向片数；

S ——元件数。

3. 极距 一个磁极在电枢表面所占的距离称为极距。用虚槽数表示为

$$\tau_p = Q_r / 2p \quad (1-3)$$

式中 τ_p ——极距；

Q_r ——虚槽数；

p ——磁极对数。

4. 节距 如图 1-10 所示。

(1) 第一节距 同一个元件两个有效边之间的距离，用 Y_1 来表示。 Y_1 可用下式决定

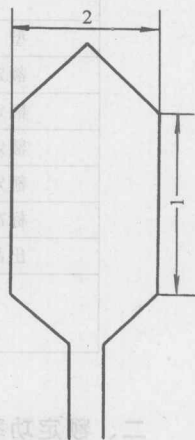


图 1-8 绕组元件的图形符号

1—有效边

2—端部

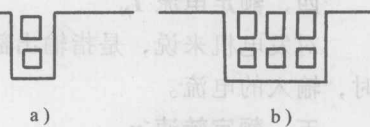


图 1-9 实槽与虚槽

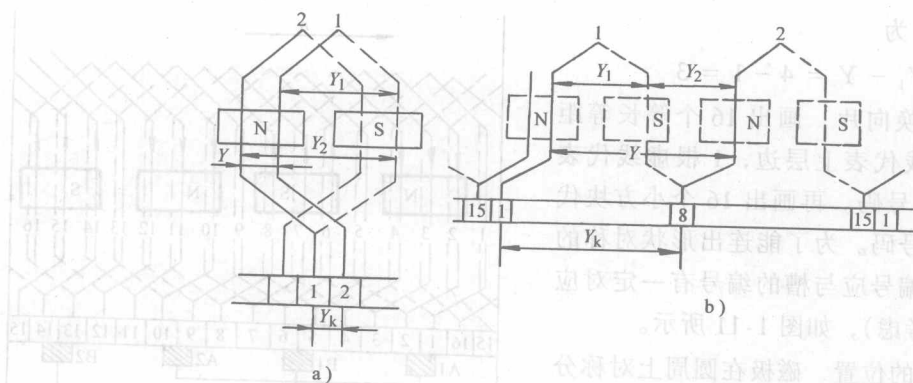


图 1-10 直流电机的绕组节距

a) 单叠绕组 b) 单波绕组

$$Y_1 = \frac{Q_r}{2p} \pm \epsilon \quad (1-4)$$

式中 ϵ ——用来使 Y_1 为整数的参数, ϵ 为零时, 为全节距; ϵ 取负值时, 为短节距; ϵ 取正值时, 为长节距。

采用全节距时, 得到的感应电动势最大, 而短节距和长节距, 都可改善电机换向, 但长节距端部连线较多, 需用铜线较多, 所以多采用短节距。

(2) 第二节距 前一元件的下层边到与它串联的第二元件的上层边之间的距离叫第二节距, 用 Y_2 来表示。

(3) 合成节距 两个串联在一起的绕组元件, 其对应边之间的距离叫合成节距, 用 Y 表示。

(4) 换向节距 表示每一绕组元件的两端所连接的两片换向片间的距离叫换向节距 Y_k , 用换向片数来表示。换向节距 Y_k 与合成节距之间的关系为

$$Y = Y_k \quad (1-5)$$

二、单叠绕组

单叠绕组就是绕组元件的首端和尾端分别接到相邻的两片换向片上, 前一元件的尾端与第二元件的首端接在同一换向片上, 依次叠放而成, 而且 $Y = Y_k = \pm 1$ 。当 $Y = Y_k = +1$ 时, 绕组为右行; 取 -1 时, 绕组为左行。左行绕组每个元件的首端和末端交叉, 用铜较多, 不常采用。

下面以一台极数 $2p = 4$, $Q_r = S = k = 16$ 的直流电机为例, 说明它右行单叠绕组展开图的画法。

1. 计算节距

第一节距 Y_1 , 由式 (1-4) 得

$$Y_1 = \frac{Q_r}{2p} \pm \epsilon = \frac{16}{4} = 4$$

合成节距 Y 和换向节距 Y_k

$$Y = Y_k = 1$$

第二节距 Y_2 为

$$Y_2 = Y_1 - Y = 4 - 1 = 3$$

2. 画虚槽和换向片 画出 16 个等长等距的虚槽 (1 根实线代表上层边, 1 根虚线代表下层边), 并标上号码。再画出 16 个小方块代表换向片, 标上号码。为了能连出形状对称的元件, 换向片的编号应与槽的编号有一定对应关系 (由 Y_1 来考虑), 如图 1-11 所示。

3. 确定磁极的位置 磁极在圆周上对称分布, 而且 N、S 极间隔排列, 每个磁极的宽度大约等于 0.7 倍的极距。

4. 确定绕组元件的连接 由第 1 换向片经第 1 槽上层 (实线), 连到第 5 槽下层虚线 (因 $Y=4$), 然后回到换向片 2 (因 $Y_k=1$), 第 2 换向片与第 2 槽上层连接, 然后再连到第 6 槽下层, 回到第 3 换向片。按此规律连接, 最后 16 号上层边连到 4 号下层边, 回到 1 号换向片。

5. 确定每个元件边里导体感应电动势的方向 从图 1-11 所示瞬间, 1、5、9、13 四个元件正好位于两个主磁极的中间, 该处气隙磁密为零, 所以不产生感应电动势, 其余的元件可根据电磁感应定律的右手定则判断出它们的感应电动势的方向, N 极下导体的电动势方向是向下的; S 极是向上的。

6. 安放电刷 在直流电机里, 电刷对数与磁极对数一样多。电刷要与中性面的元件引出端的换向片相接。由于元件的几何形状对称, 因此把电刷的中心线对准主极的中心线, 就能满足要求。根据各绕组元件中感应电动势的方向, 可确定电刷极性, 如图 1-11 所示。该电机作发电机运行, 则 A1 和 A2 为正电刷, B1、B2 为负电刷。

至此, 单叠绕组展开图已完成。下面我们看看单叠绕组的并联支路图。按照图 1-11 各元件的连接顺序, 可以得到如图 1-12 所示的并联支路图。可见, 单叠绕组并联支路数 a 等于磁极对数 p , 即

$$a = p$$

三、单波绕组

单波绕组的基本特点是绕组元件两端, 分别接到相隔较远的两个换向片上, 而且互相串联的两个元件也相隔较远, 看起来呈波浪状, 如图 1-10 所示。

由图可以看出, $Y = Y_1 + Y_2$, 而单波绕组中, Y 又由式 (1-6) 确定。

$$Y = Y_k = \frac{k \pm 1}{p} \quad (1-6)$$

式中 Y ——合成节距;

Y_k ——换向节距;

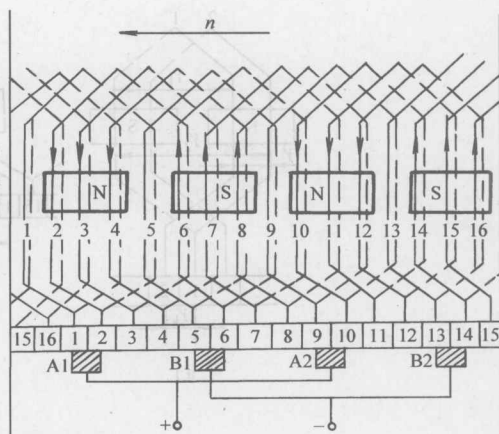


图 1-11 单叠绕组展开图

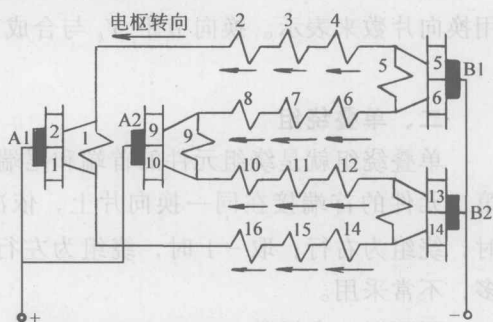


图 1-12 单叠绕组的并联支路图

k ——换向片数；

p ——磁极对数。

在单波绕组中，相串联的两元件要使电流方向一致，必须处在相邻的两对磁极下，整个电机有 p 对磁极，那么串联 p 个元件后，正好绕圆周一周，回到起始换向片相邻位置的换向片上， $Y = Y_k = \frac{k-1}{p}$ 时，落在起始换向片左侧一片上，叫左行绕组； $Y = Y_k = \frac{k+1}{p}$ 时，落在右侧一片上，叫右行绕组。因右行绕组前端部伸出线交叉，用铜较多，故很少采用。

下面以一台极数 $2p=4$ ， $Q_r=S=15$ 的直流电机为例，说明左行单波绕组展开图的画法。

首先，应计算出各节距，即

$$Y_1 = \frac{Q_r}{2p} \pm \epsilon = \frac{15}{4} + \frac{1}{4} = 4$$

$$Y = Y_k = \frac{k-1}{p} = (15-1)/2 = 7$$

$$Y_2 = Y - Y_1 = 7 - 4 = 3$$

其次，磁极、电刷的位置及绕组的连接方法等，都与单叠绕组相同，展开图如图 1-13 所示。

单波绕组是把所有 N 极下的全部元件串联起来，组成一条并联支路；把所有 S 极下的全部元件串联起来，组成另一条并联支路，如图 1-13 所示。单波绕组的并联支路只有两条， $a=1$ ，而与磁极对数无关。

因单波绕组只有两条并联支路，理论上只需要两个电刷就可工作。但实际上，为了减小电刷上的电流密度，同时改善电机换向，仍然采用全额电刷，电刷杆数等于极数。

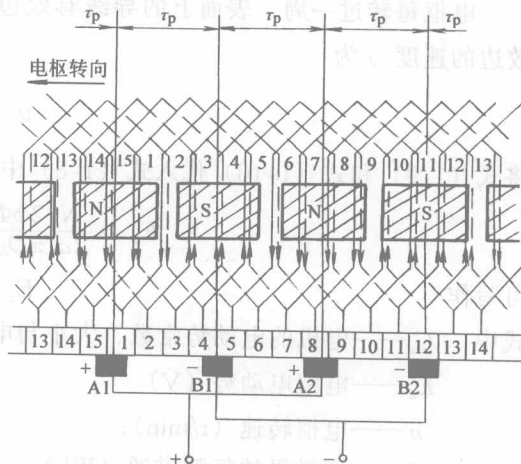


图 1-13 单波绕组展开图

第五节 直流电机的电枢电动势、电磁功率及电磁转矩

一、电枢电动势

电枢电动势是电枢绕组的感应电动势，也就是电枢绕组每条并联支路里的感应电动势。

当电机旋转时，每个元件都在运动着，其感应电动势的大小和方向都在变化着，但是每条支路里在任何瞬间所含元件数是相等的，保持一个动态平衡。这样，我们求出一根导体在一个极距范围下切割磁力线的平均感应电动势，再乘上一条支路里总的导体数，就计算出电枢电动势，用 E_a 表示。

一根导体中平均感应电动势为

$$e_{av} = B_{av}lv \quad (1-7)$$

式中 B_{av} ——一个极下气隙磁密的平均值；

l ——导线的有效长度；

v ——导线的运动速度。