

机械工业部统编

电机与变压器

机械类技工学校教改教材

机械工业出版社

机械类技工学校教改教材

电机与变压器

机械工业部 统编

机械工业出版社

本书内容包括：直流电机的基本原理与结构，直流发电机，直流电动机，变压器原理与结构，变压器的联结与并联运行，特种变压器，三相异步电动机基本知识，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。

本书主要适用于技工学校维修电工、电机修理工及电工等工种使用，也可供职业中专、职业高中同类工种或中级技术工人培训使用。

电机与变压器

机械工业部 统编

*

责任编辑：边萌 版式设计：张世琴

封面设计：姚毅 责任校对：刘志文

责任印制：何全君

*

机械工业出版社出版（北京市百万庄大街22号）

邮政编码：100037

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

三河市宏达印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787mm×1092mm¹/₁₆·印张 8·字数 186千字

1999年5月第1版第1次印刷

印数 0001—3000 定价：12.00元

*

ISBN 7-111-06516-6/TM·755（课）

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、68326677-2527

机 械 工 业 部

技工学校教材编审领导小组

(排名不分先后)

组长 郝广发
组员 于新民 董无岸 梁忠杰 常国忠
李清国 沈天宝 王文堂 刘亚琴
李超群

机械行业技术学校专业教学指导委员会名单

(排名不分先后)

切削加工类专业

主任委员 梁志杰
秘 书 李长江
副主任委员 周裕成 李翠萍 张云福
委 员 刘冠华 吴秀峰 杨克信 徐红增
陈之乾 李东光 邹纪堂 王文久
朱兴培 张世光 李正中 曹 雁
王浩清

钳 工 类 专 业

主任委员 常国忠
秘 书 陈之乾
副主任委员 孟宪水 钱建国
委 员 程宗义 王渭武 孟宪纲 陈继琨
董国栋 肖海英 阎同谱 张立铨
徐佐翥 徐 时 杨建敏 茹常有
孙炎瞳

热 加 工 类 专 业

主任委员 沈天宝
副主任委员 缪承伟 王志昌
委 员 苗家鸿 葛永顺 刘万远 王克伟
杨世增 韩荣祥 朱嘉英 柳吉荣
李万义

「焊工类专业」

主任委员	姜方辉				
秘 书	李清国				
副主任委员	朱康民	郁良芳			
委 员	张济朴	梅启钟	麻 潭	邹尚利	
	雒庆桐	王书梅			

电工与仪表类专业

主任委员	王文堂				
秘 书	王雨榕				
副主任委员	薛慎伟	孙荣成			
委 员	李 丽	周惠临	梁保生	刘彬文	
	张裕坤	兰家富	董桂桥		

轴 承 类 专 业

(略)

前 言

机械工业技工学校学习借鉴德国职业教育“双元制”的经验,结合我国国情,在车、钳、铣、铸、焊、冷作6个专业范围内开展“2:1”教学改革,15年来成果显著。毕业生的综合职业素质,特别是职业技能和从业适应能力有了明显的提高,普遍受到企业和其他用人单位的欢迎。教改教材也得到了广泛的好评。

1997年,机械行业技工学校专业教学指导委员会认真总结“2:1”教改经验,吸收各方面的意见和建议,依据机械工业部、劳动部颁发的机械工业《工人技术等级标准》和《职业技能鉴定规范》,以及劳动部印发的《技工学校专业目录》,对《机械类技工学校教学计划、教学大纲》和教改教材中的文化、理论课教材进行了修订、修改。同时,为适应技工学校教学改革进一步发展的需要,由行业电工仪表类专业教学指导委员会组织有关学校,依据新修订的电气安装维修类专业(包括企业供电和电气维修两个专业,简称电工专业)教学计划、教学大纲,编写了机械类技工学校电工专业理论课教改教材《电工数学》、《电工基础》、《电子技术基础》、《机械常识与识图》、《微机与应用》、《电机与变压器》、《电力拖动与控制》、《电工仪表与测量》、《输配电与安全技术》等9种,与已经出版的电工专业生产实习教材《电工技能培训理论》、《电工技能培训图册》相配套,形成了一套完整的、具有鲜明的教学改革特色的技工学校电工专业教材。新教材注意了贯彻最新国家标准,采用法定计量单位、最新电工名词术语和图形符号。根据教学大纲的要求,本套教材同时适用于初中生三年制和高中生两年制教学使用。

在编写过程中,尽管我们虚心学习各种不同版本同类教材的优点,力求编写出一套比较好的、更加实用的教材,但是由于种种条件的限制,教材中还是会存在这样或那样的问题,恳切希望专家和广大读者批评指正。

本书绪论、第十、十一章由王军编写,第一、二、三章由姚永乐编写,第四、五、六章由徐熙寅编写,第七、八、九章由王冬絮编写。全书由王军主编,由李东光主审,刘长仁协审。

机械行业技工学校
电工仪表类专业教学指导委员会

目 录

前言		第七节 变压器的空载试验和短路试验	40
绪论	1	第八节 变压器的损耗和效率	43
第一章 直流电机的基本知识	2	第九节 三相变压器的构成及变压器铭牌	44
第一节 直流电机的基本原理	2	复习题	47
第二节 直流电机的基本结构	3	第五章 变压器的联结与并联运行	49
第三节 直流电机的铭牌及额定值的意义	5	第一节 变压器绕组的极性及其判定	49
第四节 直流电机的电枢绕组	6	第二节 三相变压器的联结及其组别	51
第五节 直流电机的电枢电动势、电磁功率及电磁转矩	9	第三节 三相变压器的并联运行	55
第六节 直流电机的分类	12	复习题	56
第七节 直流电机的电枢反应及换向	13	第六章 特种变压器	58
复习题	15	第一节 自耦变压器	58
第二章 直流发电机	16	第二节 电焊变压器	60
第一节 并励发电机的空载特性	16	第三节 小型单相变压器的重绕及改绕	61
第二节 并励发电机电动势的建立	17	复习题	66
第三节 直流发电机的功率、转矩及电动势平衡方程式	17	第七章 三相异步电动机	67
第四节 并励发电机的外特性	19	第一节 三相异步电动机及其铭牌	67
第五节 复励发电机	20	第二节 三相异步电动机的旋转磁场及工作原理	70
第六节 直流电焊机	21	第三节 转差率以及转子各量与转差率的关系	74
复习题	22	第四节 三相异步电动机的工作特性	76
第三章 直流电动机	23	第五节 三相异步电动机的起动和调速	79
第一节 直流电动机的功率、转矩、电动势平衡方程式	23	第六节 异步电动机的反转和制动	85
第二节 并励与串励直流电动机的机械特性	24	第七节 电磁调速异步电动机	87
第三节 直流电动机的起动	26	复习题	88
第四节 单相串励电动机	27	第八章 三相异步电动机绕组	90
第五节 国产直流电动机简介	28	第一节 概述	90
复习题	29	第二节 三相单层绕组	91
第四章 电力变压器	30	第三节 三相双层绕组	94
第一节 变压器的原理	30	第四节 单、双层混合绕组	96
第二节 变压器的结构	31	第五节 三相绕组端部接线图例	98
第三节 变压器的空载运行	35	复习题	100
第四节 变压器的负载运行	37	第九章 单相异步电动机	101
第五节 变压器的阻抗变换作用	39	第一节 单相异步电动机原理	101
第六节 变压器的外特性	40	第二节 单相电容与电阻起动电动机	102
		第三节 单相罩极异步电动机	103

第四节 单相异步电动机定子绕组	104	方法	111
第五节 单相异步电动机的反转和调速 ...	106	复习题	113
第六节 单相异步电动机的常见故障	107	第十一章 特种电机	114
复习题	108	第一节 伺服电动机	114
第十章 同步电机	109	第二节 交磁电机扩大机	115
第一节 同步电机的基本结构及励磁 方式	109	第三节 测速发电机	117
第二节 同步发电机的并联运行	111	第四节 步进电动机	118
第三节 同步电动机的工作原理及起动 方法		复习题	119

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设备中，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，电机也起着日益重要的作用。

近年来，随着人民生活水平的提高，各种民用电机也在日益蓬勃地发展着。

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。

我国电机制造工业的发展情况：

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 直流电机的基本原理

一、直流发电机的基本原理

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，线圈两端分别联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。换向器上压着电刷，线圈通过电刷与外电路相联。

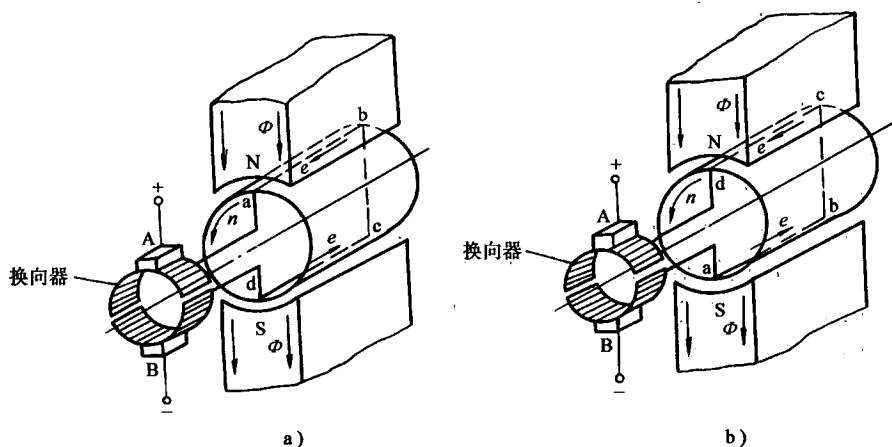


图 1-1 直流发电机原理图

当线圈随着电枢逆时针旋转时，导线切割磁力线，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，两线圈边的电流方向正好与图 1-1a 中的相反。

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。

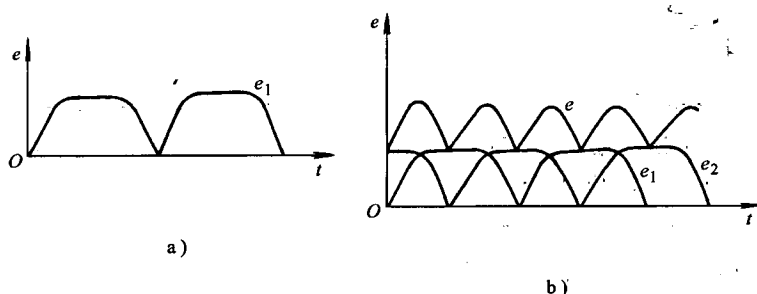


图 1-2 直流发电机电动势波形图

二、直流电动机的基本原理

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。当线圈两边分别转入另一磁极下时,它们所接触的电刷也已改变,线圈中电流方向与原来相反,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

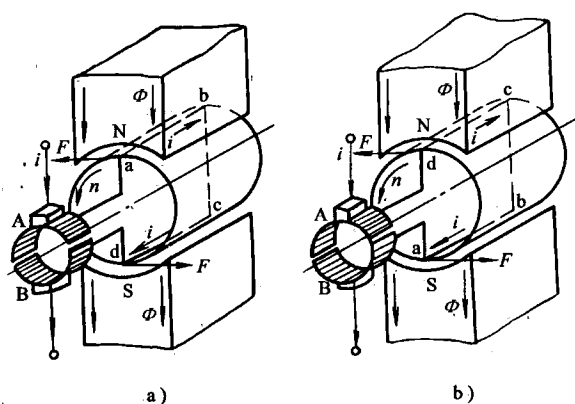


图 1-3 直流电动机原理图

总是从电刷向线圈流入,而处于S极下的线圈边内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。

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)、换向磁极、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, 见图 1-5。

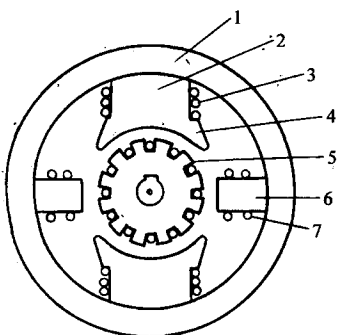


图 1-4 两极直流电机截面示意图

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

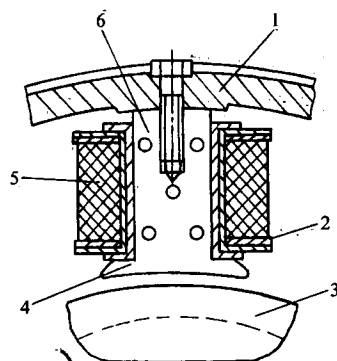


图 1-5 主磁极装配

1—机座 2—框架 3—电枢
4—极掌 5—励磁绕组 6—极身

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。

2. 换向磁极 换向磁极又叫附加磁极或间极, 它的作用是为了改善直流电机的换向。换向磁极安装在相邻的两主磁极之间, 也是由磁极铁心和套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, 作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, 来把外电路与电枢绕组联接起来。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联接起来而构成的。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联。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。

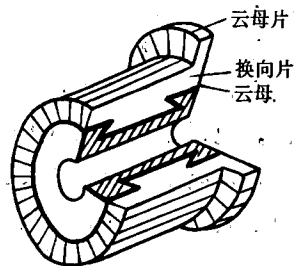


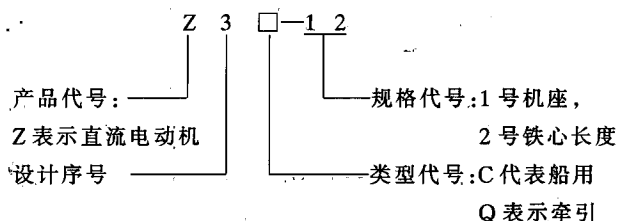
图 1-6 直流电机的换向器

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

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

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

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

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。

对于电机，还有温升的问题，即指电机工作时，允许发热程度比环境温度高出的数值。

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，应根据负载要求合理选择。

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联接起来的，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，只起联接作用，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_y 表示总的虚槽数，用 Q 表示实槽数，于是有

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

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联接起来的，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

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

式中 τ_p ——极距；

Q_y ——虚槽数；

p ——磁极对数。

4. 节距 见图 1-10。

(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

$$Y_1 = (Q_y / 2p) \pm \epsilon \quad (1-4)$$

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，但长节距端部联线较多，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。

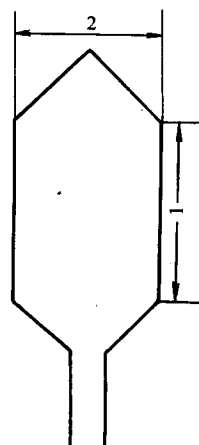


图 1-8 绕组元件的图形符号

1—有效边 2—端部

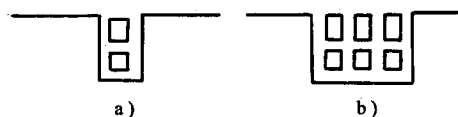


图 1-9 实槽与虚槽

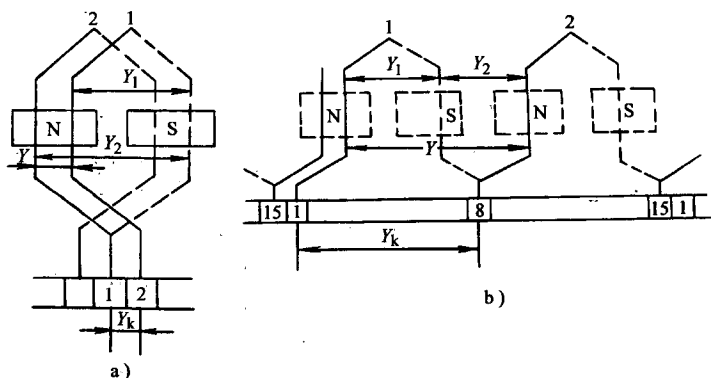


图 1-10 直流电机的绕组节距

a) 单叠绕组 b) 单波绕组

(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) 换向器节距 表示每一绕组元件的两端所联接的两片换向片间的距离叫换向器节距 Y_k ，用换向片数来表示。换向器节距 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 $2p=4$ ， $Q_y=S=k=16$ 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

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

合成节距 Y 和换向器节距 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。为了能联出形状对称的元件，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. 确定绕组元件的联接 由第 1 换向片经第 1 槽上层（实线），联到第 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 槽上层联接，然后再联到第

6 槽下层, 回到第 3 换向片。按此规律联接; 最后 16 号上层边联到 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来, 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。

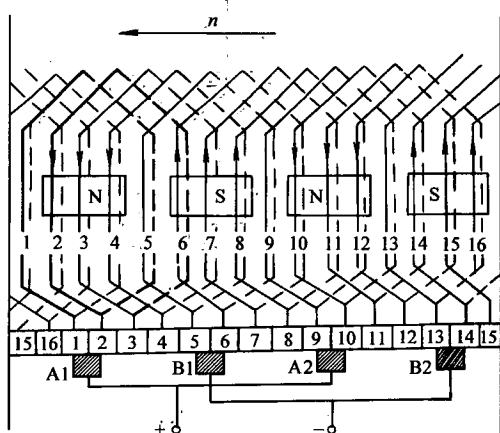


图 1-11 单叠绕组展开图

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 各元件的联接顺序, 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

$$a = p$$

由于单叠绕组每个支路的导体均处在不同的磁极下, 各磁极的气隙不完全相等, 各磁极的磁通也会稍许不同, 因此造成各支路的感应电动势也就不完全相等, 从而在各支路中出现环流。环流会使各支路电流不相等, 使某些电刷负载过大, 加大火花等级。

为了解决环流, 可以在各支路上选取等位点 (电位相等的点), 用导线在换向片间联接起来, 如图 1-11 中 1 与 9 槽、2 与 10 槽……等, 都是两两对应的等位点, 把它们对应的换向片 1 与 9、2 与 10 等用导线联接起来, 这样环流通过联接线而不经电刷, 减小了换向火花。这些联接线叫均压线。

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 又由下式确定:

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

式中 Y ——合成节距;

Y_k ——换向器节距;

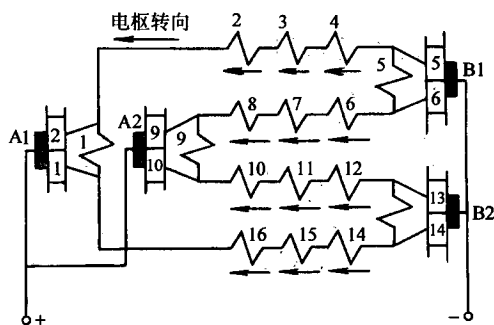


图 1-12 单叠绕组的并联支路图

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 $2p=4$ ， $Q_Y = S = 15$ 的直流电机为例，说明它左行单波绕组展开图的画法。

首先，应计算出各节距，即

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

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

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

其次，磁极、电刷的位置及绕组的联接方法等，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，组成一个并联支路；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 1-14 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。

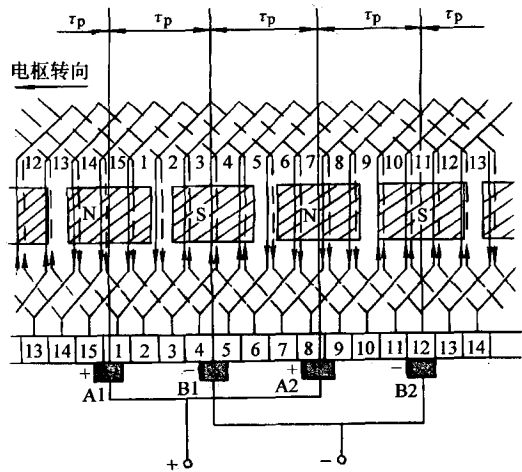


图 1-13 单波绕组展开图

在单波绕组的两条并联支路中，一条支路串接了全部 S 极下的元件（元件下层边在 N 极下），另一条支路串接了全部 N 极下的元件（元件下层边在 S 极下）。所以，磁场分布的不对称，对两支路影响相同，不会引起两支路电动势的不平衡，故不需要均压线。

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，但是每个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，再乘上一个支路里总的导体数，就计算出电枢电动势，用 E_a 表示。