



高等专科学校教学用书

GAODENG
ZHUANKE
XUEXIAO
JIAOXUE
YONGSHU

电机拖动基础

冶金工业出版社

高等专科学校教学用书

电机拖动基础

吉林电气化专科学校 杨宗豹 主编

冶金工业出版社

(京)新登字036号

高等专科学校教学用书

电机拖动基础

吉林电气化专科学校 杨宗豹 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩阳院北巷 39 号)

新华书店总店科技发行所发行

河北香河县第二印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 22 1/2 字数 535 千字

1987 年 6 月第一版 1992 年 4 月第三次印刷

印数 16,701~22,700 册

ISBN 7-5024-0667-0

TP·32 (课) 定价 5.75 元

前 言

本书是根据高等专科学校工业电气自动化专业招收高中毕业生、学制为三年的教学计划和《电机拖动基础》课程教学大纲编写的。

全书分为四篇十四章，主要内容包括：直流电机及拖动、变压器、交流电动机及拖动、控制电机和电动机容量的选择等四大部分。本书的任务是介绍各种常用电机的主要结构、工作原理和运行特性，较深入地分析交直流电动机的机械特性，起制动和调速过程以及有关计算，最后扼要地介绍电动机容量选择的基本知识和控制用微电机的工作原理等。为便于学生复习和自学，每章末附有思考题和习题，并附有参考答案。

本书在编写过程中，参考了1979年由杨宗豹主编的中专《电机及电力拖动》教材。在此基础上，加强了基本理论和基本知识的阐述，并适当地加深加宽，充分注意了专科与中专及大学本科的不同特点。

考虑到工厂和矿山各部门对本课程具体内容的要求并不完全相同，因此除教学大纲规定编写的基本内容外，还增添了少量供选学的内容，这部分内容用标题上加“*”表示。

本书可作为高等专科学校工业电气自动化专业的教材，亦可供职工大学和从事电气传动、自动控制等工作的工程技术人员参考。在编写过程中，注意了教材的分层次叙述，经适当删减，亦可供中等专业学校选用。

本书由杨宗豹同志主编。第七章由周培仁同志编写，第十二章由廖贤润同志编写，其余各章由杨宗豹编写。本书由吉林电气化专科学校电机教研室廖贤润、贾景贵、孙殿忠、王铁光和宋印海等同志负责审稿。他们对本书提出了许多宝贵意见，在此谨表示衷心感谢。

由于编者水平所限，书中缺点和错误在所难免，热忱希望读者批评指正

编 者

一九八六年十月

目 录

绪论	1
----	---

第一篇 直流电机及拖动

第一章 直流电机基本原理	3
第一节 直流电机的工作原理	3
第二节 直流电机的主要结构	5
第三节 直流电机的铭牌和系列	7
习题一	8
第四节 电枢绕组	8
第五节 直流电机的空载磁场	15
第六节 电枢绕组感应电动势	16
习题二	18
第七节 直流电机的电枢反应	19
第八节 电磁转矩和电磁功率	23
习题三	25
第二章 直流电机运行特性	26
第一节 直流电机的损耗	26
第二节 直流电机的基本方程	27
第三节 直流发电机特性	31
习题四	35
第四节 直流电动机工作特性	36
第五节 直流电机的换向	42
习题五	49
第三章 直流电机电力拖动基础	52
第一节 拖动系统的运动方程	52
第二节 工作机构转矩和飞轮转矩的折算	54
第三节 生产机械的负载特性	58
第四节 他励直流电动机的机械特性	60
第五节 电力拖动系统稳定运行	67
习题六	68
第四章 他励电动机起动和制动	71
第一节 他励电动机的起动	71
第二节 他励电动机的制动	75
第三节 各种制动方法的比较	81
习题七	82
第五章 他励电动机的调速	84
第一节 调速要求和调速方法	84
第二节 改变电枢串联电阻调速	85

第三节	改变电动机的磁通调速	87
第四节	改变电枢电压调速	88
第五节	发电机-电动机组	90
习题八		94
第六章	电力拖动的过渡过程	96
第一节	他励电动机过渡过程的数学分析	96
第二节	他励电动机起动过渡过程	98
第三节	他励电动机制动的过渡过程	102
第四节	他励电动机考虑电枢电感的起动过渡过程	106
• 第五节	$F-D$ 系统电动机起动过渡过程	112
习题九		114

第二篇 变 压 器

第七章	变压器	115
第一节	变压器的种类与结构	115
第二节	单相变压器的空载运行	120
第三节	变压器的有载运行	126
第四节	变压器参数测定	131
第五节	变压器运行特性	136
习题十		140
第六节	三相变压器	143
第七节	变压器并联运行及特殊变压器	152
习题十一		171

第三篇 交流电动机及拖动

第八章	三相异步电动机的基本原理	175
第一节	异步电动机旋转原理	175
第二节	异步电动机结构的主要部件	178
第三节	交流电机绕组	182
第四节	交流绕组磁势	190
第五节	交流绕组电动势	200
• 第六节	异步电动机重绕简易计算	204
习题十二		209
第九章	异步电动机的运行分析	212
第一节	异步电动机负载时的物理情况	212
第二节	等值电路和相量图	217
第三节	异步电动机的功率与转矩	220
第四节	工作特性及参数测定	223
第五节	三相异步电动机的机械特性	228
习题十三		234
第十章	异步电动机的起动和制动	237
第一节	鼠笼式电动机的起动	237

第二节 绕线式电动机的起动	244
第三节 深槽及双鼠笼电动机	252
第四节 异步电动机反接和再生制动	254
第五节 异步电动机能耗制动	261
第六节 异步电动机起制动过程能量损耗	265
第七节 小结	267
习题十四	268
第十一章 异步电动机的调速	271
第一节 改变电动机的磁极对数调速	271
第二节 改变电源频率调速	273
第三节 在转子电路中接入变阻器调速	275
第四节 转子电路引入附加电动势调速	277
●第五节 改变定子电压调速	280
第六节 电磁滑差离合器调速	281
习题十五	284
第十二章 其它交流电动机	286
第一节 单相异步电动机	286
第二节 同步电动机结构和工作原理	291
第三节 同步电动机的电压方程和相量图	292
第四节 同步电动机电磁转矩及功角特性	294
第五节 同步电动机的励磁调节和V形曲线	298
第六节 同步电动机的起动	301
●第七节 三相并励换向器式电动机	304
●第八节 无换向器电动机	307
习题十六	310
第四篇 控制电机和电动机容量的选择	
第十三章 控制用微型电机	311
第一节 伺服电动机	311
第二节 测速发电机	316
●第三节 旋转变压器	321
第四节 自整角机	326
第五节 步进电动机	329
习题十七	331
第十四章 电动机容量的选择	332
第一节 电动机的发热和冷却	332
第二节 长期恒定负载运行时电动机容量的选择	336
第三节 长期变动负载运行时电动机容量的选择	338
第四节 短时负载运行时电动机容量的选择	343
第五节 重复短时工作制电动机容量的选择	345
第六节 鼠笼型电动机允许接电次数的确定	350
习题十八	351
主要参考资料	352

绪 论

《电机拖动基础》包括电机学原理及电力拖动原理两部分基本内容。

今天,电能已成为工农业生产中最主要的能量形式。在电能的生产、变换、传输、分配、使用等环节中,各种电机和变压器,担负着主要任务。

电机拖动(又称电力拖动)的根本任务是将电能转换成各种生产机械所需要的机械能,它已成为现代工业企业中最广泛采用的拖动方式。它具有许多其它拖动方式(如蒸汽机、内燃机、水轮机等)无法比拟的优点,主要有:

(1) 电机拖动效率高,与生产机械连接方便;

(2) 电动机的种类和型号多,具有各种各样的运行特性,可以满足不同类型生产机械的要求;

(3) 电机拖动装置参数的检测、信号的变换与传送都比较方便,易于组成完善的反馈控制系统,易于实现最优控制;

(4) 可以实行远距离测量和控制,便于集中管理,便于实现生产过程自动化。

随着科学技术的发展,现代电力拖动系统已和由各种控制元件组成的自动控制系统紧密地联系在一起。如自动起动、制动、调速,在负载和外部条件变化的情况下自动保持电动机转速恒定,按事先给定的程序或外部条件自动改变运行速度等。电子计算机的应用更进一步赋予电力拖动系统自寻最佳运行规律、自动适应运行条件变化的能力。然而,不论现代自动电力拖动系统的结构如何复杂,拖动生产机械的各类电动机仍然是电力拖动系统完成机电能量转换的主要元件,是控制的对象。

《电机拖动基础》是工业电气自动化专业的一门主要的专业基础课,它具有电机学中最基本的内容,同时又是电机学基本理论的进一步应用。它包括直流电机原理、直流电机拖动基础、变压器、交流电机原理、交流电机拖动基础、控制用微电机和电动机容量选择等七部分。本课程的任务是使学生从运行的观点了解各类电机的基本结构、工作原理和运行特性,进而掌握正确使用和维护电机正常运行的基本技能;熟练掌握电动机在各种运行状态下能量关系的计算,起制动和调速的计算;了解电力拖动系统过渡过程的基本特征,改善过渡过程的途径,选择拖动系统电动机的基本原则等。为进一步学习后续专业课程打好基础。

本课程既带有基础课性质,又兼有专业课性质。它是一门运用基础电工理论来解决实际工程问题的课程。因此,在学习过程中,要联系物理学中电磁理论和电路基本理论,弄清各种定义、定律和公式的含义,它们所表达的实际电磁过程和机电过程。同时,还必须掌握分析问题的方法。

学习必须坚持理论与实践相结合的原则,因此一定数量的习题、实习和实验都是重要的、必不可少的教学环节,必须认真对待。

第一篇 直流电机及拖动

第一章 直流电机基本原理

直流电机包括直流电动机和直流发电机。直流电动机和交流电动机比较，它的主要优点是调速范围广，而且平滑性、经济性较好，起动性能良好。这些性能对某些生产机械的拖动来说，是十分重要的。例如大型可逆式轧钢机、矿井卷扬机、电力机车、大型电铲和大型吊车等，大都采用直流电动机拖动。

直流发电机过去是工业用直流电的主要电源，广泛地用在电解、电镀、蓄电池充电设备中，也用作同步电机的励磁机和直流电动机的电源。近年来，由于可控硅的应用日益广泛，大有取代直流发电机的趋势。

第一节 直流电机的工作原理

一、直流发电机的工作原理

在电工基础课程中，我们已经知道，在磁场中运动的导体将产生感应电动势。交流和直流发电机就是这个电磁感应定律实际应用的一个例子。

图 1-1 表示一台两极交流发电机的工作原理简图。固定部分简称定子，主要是由两个磁极组成，由它产生磁场；转动部分简称转子，又叫做电枢。在转子上面绕有线圈 $abcd$ 。线圈的两端和固定于转轴上的两个滑环相连接，滑环与静止的电刷 A B 滑动接触，通过电刷与外电路的负载接通。

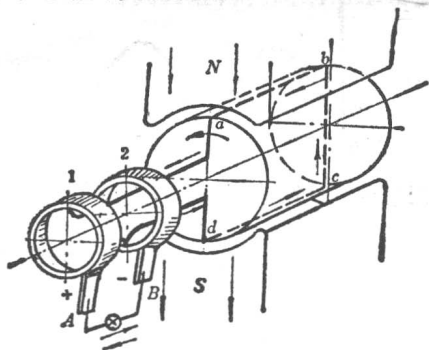


图 1-1 交流电机工作原理图

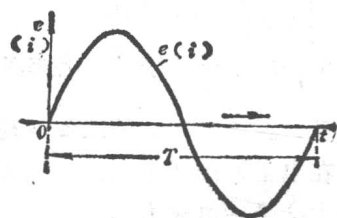


图 1-2 线圈中电动势的波形

如果发电机被原动机拖动，沿逆时针方向旋转并保持恒定的转速，用右手定则可以判定，导线 ab 切割磁力线产生的感应电动势的方向是由 b 到 a ，而导线 cd 中电动势的方向则由 d 到 c 。这样外电路在此瞬时的电流应从滑环 1 经过电刷 A 流出，而后再经过电刷 B 流入滑环 2。电流流出的电刷 A 具有高电位，即具有正极性，用“+”号表示；电流流入的电刷 B 则为低电位，即具有负极性，以“-”号表示。

当电枢旋转 180° 后， ab 与 cd 位置互换。由于导线所处磁场极性已改变，所以导线中

电动势的方向也跟着改变。又因为电刷A经过滑环1始终和导线ab的a端相连，而电刷B经过滑环2始终和cd中d端相连，所以电刷的极性 & 外电路电流的方向也就随之改变了。这种发出交流电的发电机叫做交流发电机。假若沿电枢圆周磁通密度是按正弦规律分布的，则电枢旋转一周时，感应电动势随时间变化的曲线如图1-2所示。

要想在外电路得到固定方向的直流电流，必须在导线电动势方向要改变的瞬间，及时改变导线和外电路的连接。图1-3所示的换向器，就是根据这个设想而装置的。线圈abcd的两端，分别接到换向器的两个半圆形铜片1和2上，这两个铜片叫换向片。换向片间通常是用云母绝缘的。

当线圈转至图1-3所示的位置，和换向片1接触的电刷A为正极性（因为此时和电刷A接触的导线ab处在N极下），同时电刷B为负极性。电枢旋转180°后，电刷A不再经过换向片1与导线ab相连，而是经过换向片2和已转到N极下的导线cd相连了，所以电刷A仍为正极性，同理电刷B仍为负极性。这样虽然导线中的电动势是交变的，但是通过换向器及时改变导线与电刷（即外电路）的连接，使得电刷A不再固定地和导线ab相接触，而是固定地和N极下的导线相接触，B刷则固定地和S极下的导线相接触。因为在一定的磁极下，导线中电动势方向是一定的，所以电刷A和B的极性也就是一定的了。这就是直流发电机的工作原理。这时电刷两端电压的波形如图1-4所示。由该图可见，电动势的方向虽然不变，但它的大小却在零和最大值之间脉动。这种简单的直流发电机电压波动太大，而且电压也很低。为此实际的直流发电机线圈数和相应的换向片都是很多的。关于电枢绕组的连接规律在本章第四节详细讨论。

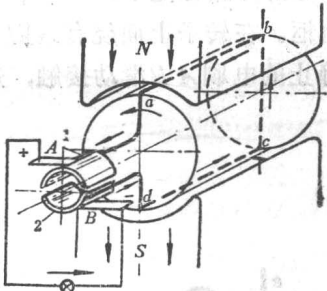


图 1-3 直流发电机工作原理图

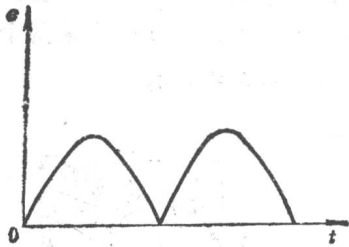


图 1-4 一个线圈的脉动电动势波形

二、直流电动机的工作原理

在电工基础课中，已经知道通有电流的导体在磁场中会受到电磁力作用。直流电动机就是这个电磁力定律实际应用的一个例子。

如图1-5所示，直流电动机的电枢线圈接到直流电源上，电刷A接到电源的正端，电刷B接到电源的负端。这时电流从电刷A流入电枢的线圈，然后从电刷B流出。在图1-5所示的位置时，在N极下导线电流是由a到b，根据左手定则可知导线ab受力的方向向左；而导线cd受力的方向是向右的。两个电磁力对转轴所形成的电磁转矩使电动机逆时

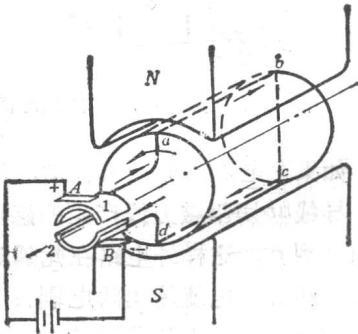


图 1-5 直流电动机工作原理图

针旋转。

当线圈转过 180° ，导线 ab 转到 S 极下，导线 cd 则转到 N 极下。由于这时导线的电流方向已改变为由 d 到 c 和 b 到 a ，因此电磁转矩的方向仍然是逆时针的。这样，就使得电机一直旋转下去。和发电机一样，直流电动机通过换向器作用，使正电刷 A 始终和 N 极下导线相连，负电刷 B 则和 S 极下导线相连。由于在一定的磁极下的导线电流方向始终保持不变，所以电机的转矩和旋转方向保持不变。

第二节 直流电机的主要结构

我们讨论电机结构的主要目的，是要了解电机各主要部件的名称、作用、形状、使用的材料及它们是怎样组装起来的。只有对主要部件的结构有清楚的概念，才能更好地理解电机抽象的电磁理论。

电机的结构是由以下几方面的要求来确定的，首先是电磁方面的要求。电机能产生足够强的磁场，感应出一定的电动势。通过一定的电流，产生一定的电磁转矩，并要求有一定的绝缘强度。其次，在机械方面要求电机能传递一定的转矩并保持机械上的坚固、稳定。此外，电机的结构要满足冷却的要求，保证温升不过高。还要考虑节约能源和材料，制造工艺简单，便于检修，性能良好和运行可靠等。

直流电动机和发电机在结构上没有什么差别。只是由于外部条件不同，得到相反的能量转换过程：发电机是将机械能转换为电能；电动机是将电能转换为机械能。

直流电机由定子和转子（电枢）两大部分组成。定子和转子之间的间隙叫做空气隙。定子的作用是产生磁场和作为电机机械的支撑，它由主磁极、换向极、机座、端盖和轴承等组成。电刷装置也固定在定子上。电枢是用来产生电动势和电磁转矩实现能量转换的。它由电枢铁心、电枢绕组、换向器和转轴等组成。用以加强电机通风冷却的风扇也装在电机轴上。直流电机的结构径向剖面示意图如图1-6所示，它的实际轴向剖面结构如图1-7所示。

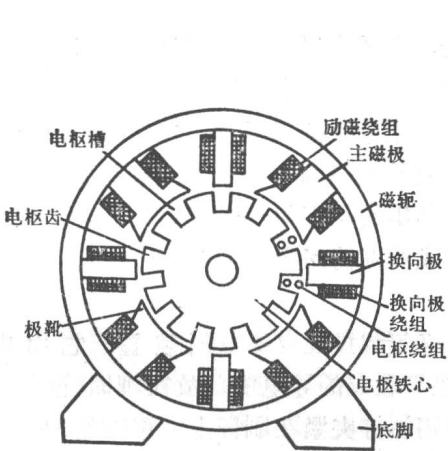


图 1-6 直流电机径向剖面

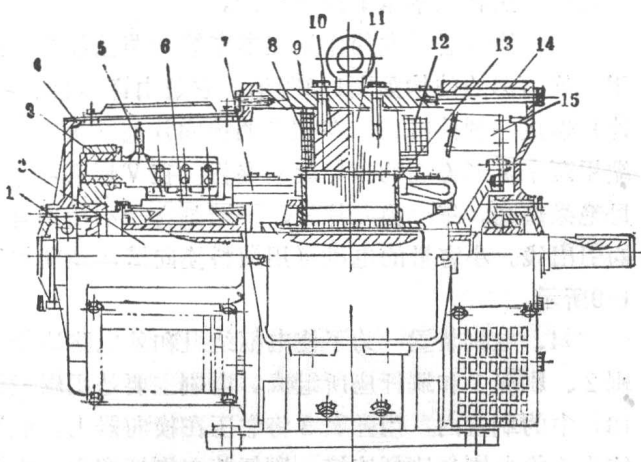


图 1-7 Z_2-9 型直流电机轴向结构剖面

1—轴承；2—轴；3—刷架；4—前端盖；5—电刷；6—换向器；7—电枢绕组；8—换向极绕组；9—机座；10—换向极铁心；11—主极铁心；12—主极绕组；13—电枢铁心；14—后端盖；15—风扇。

下面分别介绍几个主要部件的构造和作用。

一、定子

1. 主磁极 主磁极的作用是产生主磁通。它由铁心和励磁绕组所组成。主磁极铁心包括极身和极掌(又叫极靴)两部分。主磁极铁心一般由1~1.5毫米厚的钢板冲片迭压而成。磁极用螺钉固定在磁轭上。磁极上套的线圈叫励磁绕组。线圈用绝缘铜线绕成。线圈和磁极间用绝缘纸和腊布或云母绝缘起来。各主磁极的线圈一般都是串联起来的。各磁极上线圈的连接应保证相邻磁极的极性按N极和S极交错依次排列。为了改善气隙中磁通密度的分布,磁极下的极掌较极身宽。这样还可使励磁绕组牢固地套在磁极上。

2. 换向磁极 在两个相邻的主磁极之间有一个小的磁极,构造与主磁极相似,这就是换向磁极。它的作用是为了改善换向将在第二章第五节讨论。

3. 机座 机座一方面用来固定主磁极、换向极和端盖等部件;另一方面作为电机磁路的一部分。其导磁部分叫做磁轭,磁轭下部的支撑部分叫做底脚,用来将电机固定在基础上。机座一般用铸钢或厚钢板减弯成圆筒形焊接而成,以保证良好的导磁性能和机械强度。

二、转子

1. 电枢铁心 电枢铁心的作用是通过主磁通和安放电枢绕组。当电枢在磁场中旋转时,铁心将产生涡流和磁滞损耗。为了减少损耗,提高电机的效率,电枢铁心一般用0.5毫米的硅钢冲片迭成。为了加强通风冷却,电枢铁心冲有轴向通风孔。较大容量电机的铁心沿轴向分成几段,每段长4~10厘米,在相邻两段间留有径向通风沟。

2. 电枢绕组 它是电机的重要部分,其作用是产生感应电动势,通过电流并产生电磁转矩,使电机实现能量转换。它由绝缘导线绕成线圈后,嵌入电枢铁心的槽内。线圈与铁心之间以及上下层线圈边之间必须妥善地绝缘。为了防止电枢旋转时产生的离心力使绕组甩出,绕组嵌入槽内后,要用槽楔压紧;绕组伸出槽外的端接部分用无纬玻璃丝或非磁性钢丝扎紧在绕组支架上。绕组线圈的端接头按一定的规律焊接在各换向片上。电枢绕组的连接方法将在本章第四节讨论。

3. 换向器 它的作用在本章第一节已经介绍过,简单来说,它起到机械整流的作用。换向器的结构如图1-8所示,它是由许多带有鸽尾形、径向剖面为梯形的铜片(换向片)迭成一圆筒组成。在相邻的换向片间都垫有0.6~1毫米厚的云母片。在整个圆筒的两端用两个V形截面的钢环紧紧夹住。在V形钢环和换向片组成的圆筒之间也垫以V形的云母绝缘垫圈。每一换向片上,一端刻有一小槽或有一凸出的小铜片,以便焊接绕组各线圈的引出线。小容量的电机可用塑料换向器,换向片组成的圆筒用塑料浇铸在一起,如图1-9所示。

4. 电刷装置 为了使电枢绕组和外电路连接,必须装设固定的电刷装置。它由电刷2、刷握1和刷杆座所组成。电刷主要是用碳-石墨等做成的导电块,放在刷握(见图1-10)中的刷盒内,用弹簧3将它压在换向器上。刷握用螺钉夹紧在刷杆上,用铜丝编成的绞线4将电刷和刷杆连接,刷杆装在刷杆座上,它们之间是绝缘的。根据电流的大小,每一刷杆由几个电刷组成电刷组。刷杆的数目一般等于主磁极的数目。各电刷杆在换向器圆周上的距离是相等的。同极性各刷杆上的导线用汇流条接在一起。刷杆座应能转动,用以调整电刷的位置。中小容量电机的刷杆座装在端盖上。

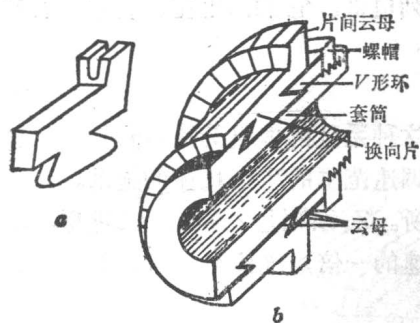


图 1-8 换向片和换向器
a—换向片；b—换向器

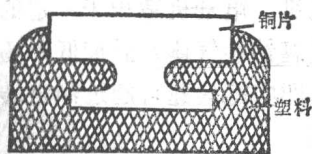


图 1-9 塑料换向器

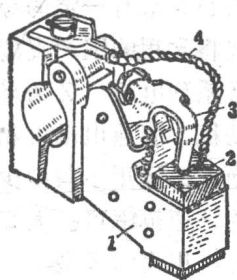


图 1-10 刷握和电刷

第三节 直流电机的铭牌和系列

一、铭牌及额定值

为了保证电机安全而有效地运行，电机制造厂都对它出产的电机的工作条件加以规定。电机按制造工厂规定的条件工作时的情况，叫做额定工作情况。表征电机额定工作情况的各种数据叫做额定值。这些数据都列在电机的铭牌上，如表1-1所示。

表 1-1 电机的铭牌

直 流 电 动 机			
型 号	Z ₂ -42	励磁方式	他 励
功 率	4 千瓦	励磁电压	220伏
电 压	220伏	励磁电流	0.63安
电 流	22.7安	定 额	连 续
转 速	1500转/分	温 升	80℃
出品号数	× × × ×	出厂日期	年 月

例如，铭牌上标出的型号ZO₂-42，“ZO”表示系列名称，“2”表示第二次设计。横线后数字：第一位数字“4”表示机座号，第二位数字“2”表示铁心长短。

铭牌上标出的功率是指电机在额定工作时输出的功率，又称为额定容量，单位为千瓦(kW)。对发电机来说，额定容量 P_e 是指出线端输出的电功率，它等于额定电压 U_e 和额定电流 I_e 的乘积，即 $P_e = U_e I_e \times 10^{-3} \text{ kW}$ 。对电动机来说，额定容量是指轴上输出的机械功率。它等于额定电压和电流的乘积再乘上该电机额定工作时的效率，即 $P_e = \eta_e U_e I_e \times 10^{-3} \text{ kW}$ 。

电机在实际运行时，各数值可能与额定值有所不同。例如输出的功率，将由负载的大小决定。若运行时的输出功率恰好等于额定值，称为满载；超过额定值运行，称为过载；反之，若小于额定值运行，则称为欠载。过载会使电机过热，降低电机的使用寿命，甚至损坏电机。但电机长期欠载运行，则浪费设备容量和降低电机效率。故一般要求电机尽可能按额定值运行。

二、国产直流电机系列

为了满足各行各业对电机的不同要求，将电机制成不同型号的系列。所谓系列，就是

指结构和形状基本相似，而容量按一定比例递增的一系列电机。它们的电压、转速、机座号和铁心长都有一定的等级。

现将常用的国产直流电机系列简介如下：

Z系列电机 Z为直流电机汉语拼音第一个字母。这种系列的电机为通风防护式，包括电动机、变速电动机和发电机。电动机适用于一定的调速范围的生产机械的拖动。采用A级绝缘，运用于灰尘少、无腐蚀性气体及温度低的场所。Z₂系列是Z系列的改进型，电动机的调速范围可扩大2倍，即实际转速可超过额定转速的一倍，绝缘分E级、B级和F级三种，用途同Z型。

ZO和ZO₂系列是封闭式结构。ZO₂系列是ZO系列的改进，用于灰尘多但无腐蚀性气体的场所。

ZJF、ZF₂和ZJD、ZD₂系列属于大中容量的直流发电机(F)和电动机(D)。电动机主要用于需要广泛调速，具有较大的过载能力的场所，如高炉卷扬机、轧钢机、电铲、大型机床及矿山竖井升降机等。

ZZ和ZZK，ZZJ₂系列主要用于起重和冶金机械中的直流电动机。型号中第二个字母Z代表起重，K代表高速，J代表冶金。

ZQ、ZQD和ZQF系列直流牵引电机主要用于电力机车，型号中的字母Q代表牵引。

ZKG系列直流电动机是适应可控硅整流电源的中型直流电动机。

习 题 一

1. 直流电机由哪些主要部件组成？它们有什么作用？一般用什么材料制成？
2. 直流电机的换向器在发电机和电动机中，各起到什么作用？为什么？
3. 一台直流发电机，其额定功率 $P_e = 7.5\text{kW}$ ， $U_e = 230\text{V}$ 。求该发电机的额定电流？
〔答案〕 $I_e = 32.6\text{A}$ 。
4. 一台直流电动机，其额定电压 $U_e = 220\text{V}$ ，额定电流 $I_e = 400\text{A}$ ，额定运行时的效率 $\eta_e = 91\%$ 。求该电机额定容量？
〔答案〕 $P_e = 80\text{kW}$ 。
5. 试判断下列情况时，直流发电机电刷两端电压性质（交流还是直流）：
(1) 磁极固定，电刷与电枢以同样速度旋转；
(2) 电枢固定，电刷与磁极以同样速度旋转。

第四节 电 枢 绕 组

电枢绕组是直流电机主要的部件，感应电动势、电流和电磁力的产生，机械能和电能的相互转换都在这里进行。电枢绕组的结构对电机最基本的参数和性能都有影响。电枢绕组也是比较容易出现故障的地方，它将直接影响到电机的正常运行。因此，对从事电机维护与检修人员来说，对电枢绕组的结构和绕制规律应有比较清楚的了解。

合理设计的电枢绕组应满足以下要求：(1) 感应出规定的电动势，能够承受规定的电流；(2) 线圈材料要得到充分的利用，尽可能节省能源和有色金属材料；(3) 力求结构和制造工艺简单，运行安全可靠等。由于直流电机的容量和电压等级不同，绕组的形式有多种，但最基本的有两种，即单迭和单波绕组。本节只介绍这两种绕组。

当我们仔细观察直流电机已绕制好的电枢绕组时，可以发现它是由许多个完全相同的线圈所组成。这些线圈是组成绕组的单元，叫绕组元件。每个元件有两个嵌在电枢槽内的元件边，如图1-11所示。处在槽内能切割磁通，感生电动势的直线部分叫做有效边；在槽外不感生电动势，仅起连接作用的称为端接部分。

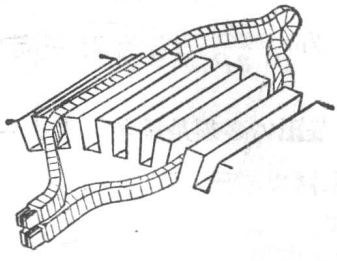


图 1-11 绕组元件在槽中的位置

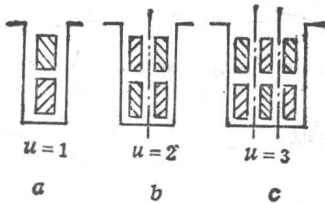


图 1-12 实槽与虚槽

为了工艺上的方便，直流电机电枢绕组多采用双层绕组。每个元件的一边放在一个槽内，占着槽的上层；另一边则放在另一槽内，占着槽的下层。相邻的槽内将同样放着另一绕组元件，依次排列下去，直到填满所有的槽为止。绕组元件是由一匝或多匝导线绕成，几个千瓦以下的小电机一般采用绝缘的圆导线；电流较大的电机一般用矩形截面的扁导线。

因为在有些电机中，每槽上下层各放一个元件的有效边，这样每槽就有两个有效边。在这些电机中，元件总数和槽总数是相等的。但在大多数直流电机中，电枢铁心有时不能开太多的槽，故只能在每个槽的上、下层放置四个、六个或更多的元件边，如图1-12所示。为了计算和作图编号方便，我们把每槽每层元件边数 $u=1$ （见图1-12a）的槽作为单元槽，称为虚槽，把每个含有 $2u$ 个元件边（相当于含有 u 个元件）的实槽看作 u 个虚槽。设 Z_v 为虚槽数， Z 为实槽数， S 为元件数，则有

$$Z_v = uZ = S \tag{1-1}$$

我们还注意到每个元件的头尾各接到不同的两个换向片上，而每个换向片上接到不同的两个元件的引线，即前一元件的尾和后一元件的头同接到一个换向片上。这样，每对应一个元件，就应该有一个换向片。所以，换向片数 K ，元件数 S 和虚槽数 Z_v 是相等的，即

$$K = S = Z_v \tag{1-2}$$

下面分别讨论单迭绕组和单波绕组的绕法及支路的结构。

一、单迭绕组

我们从实际的绕组出发来探索它的规律。图1-13为单迭绕组的部分放射图，它的展开图如图1-14所示。展开图是把电枢沿轴向切开，并把电枢表面展开在一平面上获得的绕组图形。由图1-14可知，单迭绕组绕法的基本特点是：每个元件头和尾各接在相邻的两换向片上。

1. 绕组节距 为了正确地把各个元件及相应的换向片按一定规律连接起来，必须求出绕组节距，它包括下列内容：

(1) 换向器节距 y_H 它是每一元件的头和尾所连接的两个换向片之间的跨距，用换向片数来表示。

根据单迭绕组的特点，如图1-14所示，得到单迭绕组换向器节距为

$$y_H = 1 \tag{1-3}$$

(2) 第一节距 y_1 指同一元件的两个有效边在电枢上的跨距, 以虚槽数来表示。为了使元件的电动势为最大, 要求节距 y_1 应等于或接近于一个极距 τ 。当 $y_1=\tau$ 时 (图1-15), 叫全节距绕组; 当 $y_1<\tau$ 时, 叫短节距绕组; 当 $y_1>\tau$ 时, 叫长节距绕组。一般只采用全节距或短节距。因为长节距绕组电动势较全节距小, 而端接部分较长, 用铜量较多, 只是在特殊情况下采用。极距 τ 的跨距以虚槽计算, 应为 $\tau=\frac{Z_x}{2P}$ 。它有时不等于整数, 例如

$Z_x=18, 2P=4$, 则 $\tau=\frac{18}{4}=4\frac{1}{2}$ 。因为第一节距 y_1 必须是整数, 在这种情况下, $y_1\neq\tau$, 而应取

$$y_1=\frac{Z_x}{2P}\mp\varepsilon=\text{整数} \tag{1-4}$$

式中 ε 是用来使 y_1 凑成整数的分数。

例1 某电机磁极数 $2P=4$, 电枢的实槽数 $Z=33$, 每层元件边数 $u=3$, 求绕组元件第一节距 y_1 。

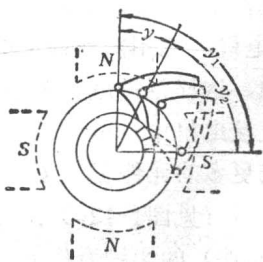


图 1-13 单选绕组元件放射图

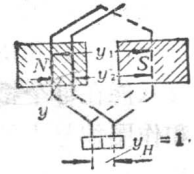


图 1-14 单选绕组元件展开图

解 极距

$$\tau=\frac{Z_x}{2P}=\frac{uZ}{2P}=\frac{3\times 33}{4}=24\frac{3}{4}$$

现取 $y_1=24\left(\varepsilon=-\frac{3}{4}\right)$ 比较合理。因为以实槽计算 $y_1=\frac{24}{3}=8$ (整数), 可以做成同槽式元件。即把同槽的三个元件包扎在一起 (图1-16), 简化下线工艺。如取 $y_1=25$ 虚槽, 下层边将不能同在一实槽, 而变为异槽式, 下线较麻烦。

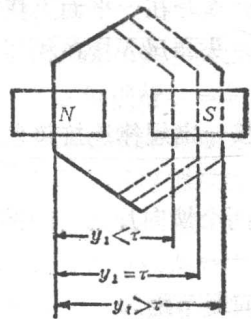


图 1-15 不同节距的线圈

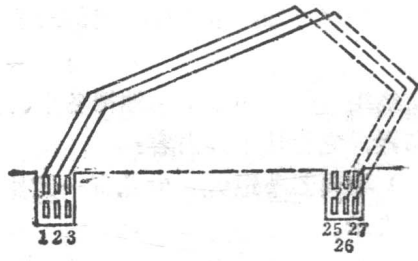


图 1-16 同槽式元件