

直流电机原理

电机专业

上海机械学院

1979. 1.

主 要 符 号 表

A	电负荷	R_a	电枢绕组电阻
a	绕组的支路对数	R_c	换向极绕组电阻
B	磁通密度	R_{fz}	负载电阻
B_{av}	平均磁通密度	R_{re}	调节电阻
C	换向片数	R_{sr}	串激绕组电阻
D_a	电枢外径	ΣR	电枢回路总电阻
E_a	电枢绕组的感应电动势	S	元件数
e_c	旋转电动势	T	电磁转矩
e_r	电抗电动势	t	时间
E_o	空载电动势	T_c	换向周期
F	力	T_J	惯性转矩
F_a	电枢磁动势	T_{st}	起动转矩
F_o	一对磁极的空载磁动势	T_o	空载转矩
H	磁场强度	T_2	输出转矩
I_a	电枢电流	U_f	激磁电压
i_a	电枢支路电流	U_N	额定电压
i_c	换向电流	U_o	空载电压
I_f	激磁电流	ΔU	电压调整率
I_N	额定电流	ΔU_b	一对电刷的接触电压降
I_{st}	起动电流	v	速度
K_σ	漏磁系数	v_c	换向器圆周速度
N	总导体数	W_f	每个磁极激磁线圈的匝数
n	转速	y	绕组的合成节距
n_N	额定转速	y_c	换向器节距
n_o	空载转速	y_{eqc}	均压线节距
Δn_N	转速调整率	y_1	绕组的第一节距
P	功率	y_2	绕组的第二节距
p	极对数	Z	槽数
P_{Cu}	铜耗	Z_v	虚槽数
P_f	激磁回路损耗	δ	气隙长度
P_{Fe}	铁耗	η	效率
P_{fw}	机械损耗	μ_0	真空的磁导率
P_M	电磁功率	Φ	每极磁通
P_N	额定功率	Φ_s	主磁通
P_o	空载损耗	Φ_l	漏磁通
P_1	输入功率	Ω	机械角速度
P_2	输出功率	Ω_o	空载时机械角速度

目 录

第一章 直流电机的一般介绍

§ 1—1 直流电机的用途	1
§ 1—2 直流电机的结构	1
§ 1—3 直流电机的工作原理	3
§ 1—4 直流电机的系列和铭牌	7
小结	8
习题	9

第二章 直流电机的电枢绕组

§ 2—1 电枢绕组的一般介绍	10
§ 2—2 单叠绕组	12
§ 2—3 复叠绕组	15
§ 2—4 单波绕组	17
§ 2—5 复波绕组	21
§ 2—6 电枢绕组的均压线	23
§ 2—7 混合绕组(蛙形绕组)	28
§ 2—8 电枢电动势的计算公式	30
小结	32
习题	33

第三章 直流电机的激磁和磁化曲线

§ 3—1 主磁极激磁绕组的激磁方式	35
§ 3—2 激磁绕组的联接	36
§ 3—3 激磁电流所产生的磁通及其磁路	37
§ 3—4 电机的磁化曲线	38
小结	39
习题	40

第四章 直流电动机

§ 4—1 电枢磁动势对主磁极磁场的影响(电枢反应)	41
§ 4—2 电磁转矩和电磁功率	45

§ 4—3	损耗	47
§ 4—4	功率、转矩和电压的平衡规律	48
§ 4—5	并激电动机的起动	50
§ 4—6	并激电动机的特性	53
§ 4—7	并激电动机的调速	56
§ 4—8	串激电动机	61
§ 4—9	复激电动机	62
§ 4—10	直流电动机的制动	64
§ 4—11	直流电动机的可控硅供电	67
	小结	69
	习题	71

第五章 直流发电机

§ 5—1	并发电机的空载运行	73
§ 5—2	并发电机的负载运行	77
§ 5—3	复激发电机	80
	小结	81
	习题	81

第六章 换 向

§ 6—1	火花及其产生原因	83
§ 6—2	换向的电磁理论	86
§ 6—3	改善换向的方法	91
§ 6—4	环火及补偿绕组	95
	小结	97

第一章 直流电机的一般介绍

§ 1—1 直流电机的用途

直流电机包括直流电动机和直流发电机。

直流电动机是把直流电源所供给的电能转化为机械能的机器用，以拖动机械负载。直流电动机常用在纺织、印染、造纸、机床、起重、高炉、铲掘、轧钢等行业的各种工业设备中，在交通运输业方面用以牵引电力机车和城市电车等。此外，直流电动机在船舶、航空以及国防工业等国民经济部门也有广泛的应用。直流电动机之所以能够得到相当广泛的应用，主要的原因是：它能够在宽广的范围内方便而又经济地实现调速；具有较高的过载能力和较大的起动转矩、制动转矩；适宜于频繁起动和经常反转的场合；可制造成具有不同的调速范围、不同的转速特性和不同的动态特性。这些优点是三相交流异步电动机所不能比拟的。

直流发电机是将机械能转换成电能的机器，它是工业上的一种直流电源，常作为直流电动机的电源、交流同步发电机的激磁电源、电解电镀工业的电源和电讯设备的电源等。

直流电机消耗有色金属较多，制造工艺比较复杂，维护比较困难，所以它的使用场合和容量提高受到一定的限制。

近几年来，由于半导体技术的迅速发展，在不少场合下已采用可控硅整流电源来取代直流发电机。直流电动机采用可控硅整流电源供电后，可使调速更为方便，这将促使直流电动机的应用范围不断扩大。

§ 1—2 直流电机的结构

直流电机的结构是在不断发展的，这里只介绍直流电机的基本结构和几个主要零部件的构造和作用。

直流电动机和直流发电机在结构上没有什么差别。如果不考虑某些性能的特殊要求，一台直流电动机只要变更外部条件，就可以作为直流发电机运行，反之亦是一样。

直流电机由静止的定子和旋转的电枢两大部分组成，在定子和电枢之间存在着间隙。定子的作用是产生主磁场和作为磁路的组成部分，同时是整个电机的机械上的支撑。它由主磁极、换向极、机座、端盖和轴承等组成；静止的电刷装置也固定在定子上。电枢是用来感应电动势，产生电磁转矩从而实现能量转换。它由电枢铁心、电枢绕组、换向器和轴等组成；用以加强电机冷却的风扇也装在电机轴上。直流电机的结构示意图见图 1—1 和图 1—2。

下面介绍几个主要零部件的构造和作用。

1. 主磁极：一般中小型电机均采用电磁铁作为主磁极。主磁极的铁心用 1.5 毫米厚的钢板冲片叠压而成，它的外面套有用绝缘铝线（或铜线）预先绕制好的激磁绕组。当激磁绕

图1—1 直流电机横剖面示意图

3. 机座：机座一方面是用来固定主磁极、换向极和端盖等，并借助于底脚将电机固定在基墩上；另一方面是作为电机磁路的一部分。机座的导磁部分又称为磁轭。机座一般用铸钢或钢板焊接做成，以保证其具有良好的导磁和机械性能。

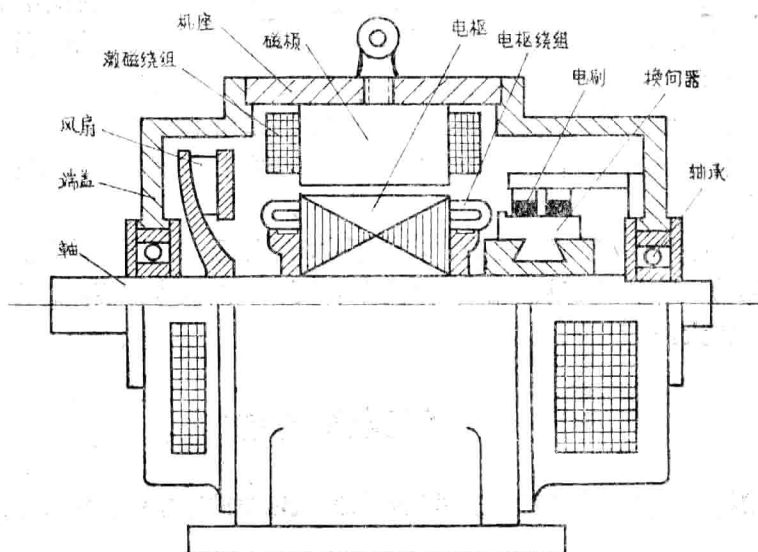


图1—2 直流电机纵剖面示意图

4. 电枢铁心：电枢铁心也是主磁通的磁路组成部分。电枢铁心的外圆表面具有均匀分布的槽，槽内嵌放电枢绕组。为了减少铁心的涡流损耗，电枢铁心用厚度为0.5毫米、涂过绝缘漆的硅钢片冲片叠压而成。为了加强电机的冷却，电枢铁心上具有轴向通风孔；较大容量的电机还有径向通风沟，这时电枢铁心沿轴向分成数段，每段长4—10厘米，各段间空出10毫米作为通风沟。

5. 电枢绕组：电枢绕组是用来感应电动势和通过电流，使电机能够实现能量转换。它由绝缘铜线绕成线圈后嵌入电枢铁心的槽中。线圈与铁心之间以及上下层线圈之间必须妥善绝缘。为了防止电枢旋转时电枢绕组由于离心力的作用而甩出来，绕组在槽内部分用胶木

(或竹料)制成的槽楔锁住,有时再用环氧酚醛无纬玻璃丝带或钢丝捆扎,而伸出槽外的端接部分用环氧酚醛无纬玻璃丝带或钢丝扎紧在绕组支架上。绕组的端接头按一定的规律焊接在各个换向片上。

6. 换向器:换向器的作用是将电枢绕组中感应的交流电动势转换成电刷间的直流电动势;或把外面通入电刷的直流电流转换成电枢绕组中所需要的交流电流。换向器的形式很多,在中小型电机中最常用的有金属套筒式换向器(如图1—3 a所示)和塑料换向器(如图1—3 b所示)。换向器的导电部分是由许多楔形的、相互绝缘的铜质换向片围成的圆柱体,它用塑料(塑料换向器)或套筒(套筒式换向器)固紧。套筒式换向器的套筒和换向片之间用云母套筒绝缘。

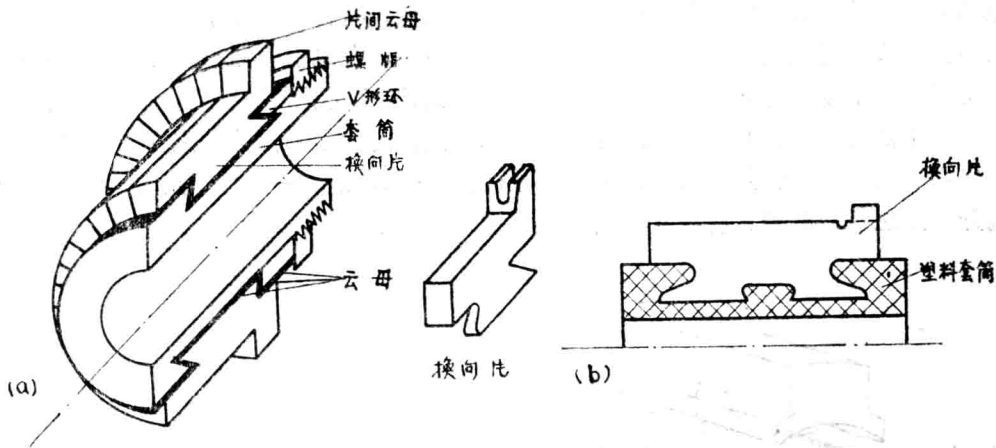


图1—3 换向器和换向片

7. 电刷装置:电刷装置的作用是使固定的电刷和旋转的换向器间保持滑动接触。电刷装置由电刷、刷握、刷杆和刷杆座等零件组成,如图1—4所示。电刷放在刷握中的刷盒内,用弹簧将它压在换向器上,电刷上的铜丝辫是起导电的作用。刷握固定在刷杆上,刷杆装在刷杆座上,它们彼此间是绝缘的。中小容量电机的刷杆座装在端盖或轴承内盖上。对电刷具有恒压的刷握装置如图1—4所示,这种装置目前正在普及采用。

上面的初步认识还不能解决本质问题,认识还有待于深化。我们必须把对电机结构的感性认识提高到理性认识,才能深刻地理解电机和能动地改造电机。以后各章将逐步解决这个问题。

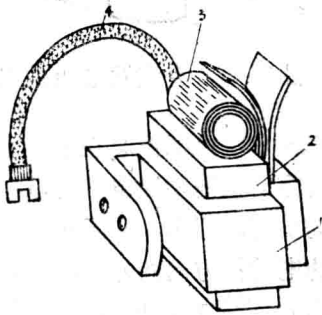


图1—4 恒压刷握装置

1.刷握2.电刷3.压紧弹簧4.铜丝辫

§ 1—3 直流电机的工作原理

一、简单直流发电机的运转原理

毛主席教导我们:“抓着了世界的规律性的认识,必须把它再回到改造世界的实践中去,

再回到生产的实践、革命的阶级斗争和民族斗争的实践以及科学实验的实践中去”。在以前学过的课程中，我们已经知道了在磁场中运动的导线会感应电动势的客观规律——电磁感应定律。这个规律已为广大劳动人民广泛地应用到生产实践和科学实验的实践中去，直流发电机就是实际应用的例子。

图 1—5 是一台最简单的二极直流发电机。N、S 表示定子上的两个主磁极；电枢的主体是一个圆柱形铁心，在定子内旋转；铁心上固定着线圈 $ab—cd$ ，这就是电枢绕组；线圈两端分别联接到两个铜的半环，这就是换向器，它和电枢固定在同一根轴上（图上未画出来）；电刷压在这个换向器上，其本身固定在定子上。换向器和电刷之间可以相对滑动，组成一对滑动触头，因此，当电枢旋转时，线圈所感应的电动势可以从电刷引出来。

电机的磁通从 N 极流出，经过气隙垂直地进入电枢，再在 S 极面下垂直地穿出电枢，通过空气隙到 S 极，再经过机座回到 N 极，形成闭合回路。在电枢表面磁密沿圆周的分布如图 1—6 所示。图中横座标 α 表示线圈位置， $\alpha = 0$ 表示线圈处于水平位置， $\alpha = 90^\circ$ 表示线圈处于图 1—5 中的位置。在 α 为 $0—\pi$ （或 $\pi—2\pi$ ）范围内的中间部分，磁密 B 较大，而且均匀，这是由于这部分位于主磁极极面下的缘故；在 $0—\pi$ （或 $\pi—2\pi$ ）范围内的两边部分，由于离开了主磁极，磁密 B 将随着远离主磁极而越来越小。

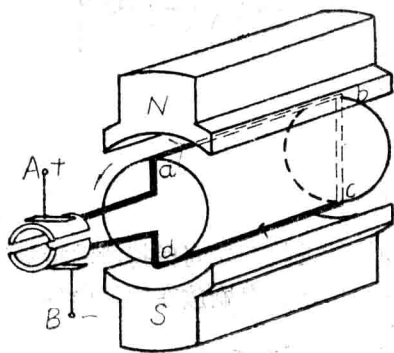


图1—5 直流发电机的工作原理图

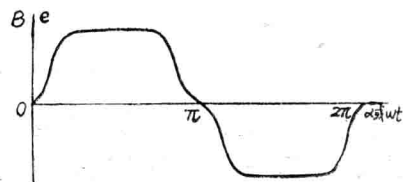


图1—6 直流电机中气隙磁密分布或导体电动势波形

直流发电机工作原理中最主要的问题是如何能发生直流电动势。现在我们来进行分析。用一台原动机拖动发电机的电枢旋转，在线圈 $ab—cd$ 内就会感应电动势。如果使电枢逆时针方向旋转，那末，在图 1—5 所示的位置， ab 段导线切割 N 极下的磁通，按照右手定则，所感应的电动势方向向外（指向 a ）， cd 段导线切割 S 极下的磁通，所感应的电动势方向向内（指向 c ）。此时电刷 A 为正极，B 为负极。当电枢转了半圈时， ab 段导线到 S 极下， cd 段导线到 N 极下，它们所感应的电动势的方向恰好和前面的情况相反。但是，这时电刷 A 和导线 cd 相联，它的极性仍然是正，电刷 B 和导线 ab 相联，它的极性仍然是负。这样，随着电枢不停地旋转，尽管线圈 $ab—cd$ 中电动势的方向交替变化，是交流的，由于换向器的作用，使电刷 A 总是和处在 N 极下的导线相联，电刷 B 总是和处在 S 极下的导线相联，它们的极性始终不变，电刷间的电动势是直流的。于是，通过换向器就把线圈内的交流电动势变成了直流电动势。

现在,我们进一步来讨论,电枢在各个不同的位置时,电刷上电动势的数量是怎样计算的。由于电机的磁通、导线和运动方向三者是相互垂直的,并且在导线长度为 l 的范围内磁密是相同的,因此导线电动势的大小可按下式进行计算

$$e = Blv \text{ 伏} \quad (1-1)$$

式中 B 是磁密,单位是韦伯/米²; l 是导线长度,单位是米; v 是导线切割磁场的速度,单位是米/秒。

电机一经制造好后, l 是不变的, v 在电机稳定运行时也是不变的,因此, e 的大小正比于 B 。所以,导体内感应电动势依时间而变化的规律与气隙磁密在电枢圆周上的分布规律相同。在实际电机中,气隙磁密在圆周上的分布如图1-6所示,故导体内感应电动势 e 依时间而变化的规律也是一样。图中 ω 表示角速度,单位是弧度/秒,所以横座标 ωt 就是在时间为 t 时的线圈位置 α 。由于通过换向器后电刷A、B的极性不变,故电刷端所得的电动势将如图1-7所示。由图1-7可见,正负电刷之间的电动势在最大值与零之间脉动,这种电动势称为脉动电动势。

还必须指出,以上所讲的电刷极性保持不变,是在磁力线的方向不变(即主磁极的极性不变)及线圈的运动方向不变的前提下而言的。在实际使用直流发电机时,如需要改变电刷引出端的极性,则只要改变主磁极极性或改变原动机的转向即可。

二、简单直流电动机的运转原理

在以前学过的课程中,我们已经知道了通电导线在磁场中会受到作用力这一客观规律。直流电动机就是这个规律实际应用的例子。

图1-8是一台最简单的二极直流电动机,它和上面讲过的直流发电机在结构上是一样的。

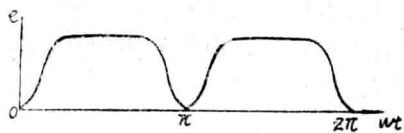


图1-7 两刷之间的电动势波形

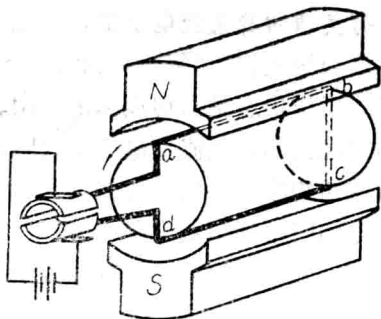


图1-8 直流电动机的工作原理图

直流电动机工作原理中最主要的问题是如何产生转矩,拖动负载使之连续旋转。下面我们来进行分析。当电刷接到直流电源时,电流将通过一个电刷到换向器的一个半环,然后流经电枢绕组到换向器的另一个半环和另一个电刷,最后回到电源。在图1-8所示的位置,电流在导体 ab 段从 a 流到 b ,根据左手定则,可知导体受力的方向向左,电流在导体 cd 段从 c 流到 d ,导体受力的方向向右,所以电枢就按照逆时针的方向旋转起来。当电枢从图1-8所示位置转过 90° 时,电刷与半环脱离,绕组中没有电流通过,因此绕组上的作用力消失。

但惯性的作用还会使绕组转过一个角度，这样，电刷又与半环接触，绕组中又有电流通过，但绕组的电流方向却改变了。导线ab段转到S极面下，电流从b流到a，受力方向向右，导线cd段旋转到N极面下，电流从d流到c，受力方向向左，因此，电枢仍按逆时针方向旋转。载流导体在磁场中所受到的力称为电磁力，由于电机内磁通和电流的方向是相互垂直的，并且在导线长度 l 的范围内磁密是相同的，因此电磁力的大小可按下式进行计算

$$F = BIl \text{ 牛顿} \quad (1-2)$$

式中： F 是电磁力，单位是牛顿； B 是导体所处位置的磁密，单位是韦/米²； l 是有效导体长，单位是米； I 是通过导体的电流，单位是安培。而

$$1 \text{ 牛顿} = \frac{1}{9.81} \text{ 公斤力} \quad (1-3)$$

电磁力乘以电枢半径称为电磁转矩。通过换向器的作用，使处于N或S极面下的导体中的电流方向不因电枢旋转而变更，因此产生的电磁力是单向的，从而电枢的转向是不变的，这就是简单直流电动机运转的原理。在实际使用电动机时，如果需要改变电动机的转向，则只要改变电枢电流的方向或主磁极的磁场方向即可。

前面所讲的简单直流发电机和直流电动机，与实际的直流电机的差别在于：电枢线圈不止一只，而有很多只串联起来，其目的是为了增大电动势或电磁转矩，同时，这也是充分利用了电枢的空间位置。随着电枢上线圈的增多，换向片数也要增多。换向片数的增多，可以使直流电动势的脉动减少，改善了电动势的质量。为什么换向片数的增加能够改善直流电动势的波形呢？这问题将放在电枢绕组一章内说明。这些差别只影响到数量上的增减，而不涉及到本质上的改变。所以用单个线圈的简单电机足以说明其工作原理。

三、有负载时的直流电机工作原理

毛主席教导我们：“每一事物的运动都和它的周围其他事物互相联系着和互相影响着”。直流电机的工作状态是密切地和电、磁、机械转矩等因素互相联系互相影响的。

前面已经提到，直流发电机运行时，必须外施一个机械转矩(由原动机提供)，使发电机依这个机械转矩的方向旋转起来，这样才能使电机内部的电枢绕组切割主磁极磁通而感应电动势。在电刷间接通负载电阻(如电灯)后，线圈中就有电流通过，电流的方向是和感应电动势的方向相一致的。这个载流导体处于主磁极的磁场下，当然要受到电磁力的作用。根据左手定则，电磁转矩的方向恰和旋转方向相反。这就是说，发电机在负载下运行，电磁转矩和机械转矩是同时存在的，并且是相互排斥的。如果电磁转矩增大(也就是输出的电流增大)，那末机械转矩也要相应地增大，以克服电磁转矩，使发电机继续旋转运行。电流流过外电路的电阻，有电功率输出，而外施的机械转矩对发电机做了功，就有机功率输入。因此，电功率是由机械功率通过电机转换过来的，不是凭空产生的。

前面也已经提到，直流电动机运行时，必须外施一个直流电源于电机的电刷上，于是就有电流经过换向器送入电枢线圈内。载流导体处于主磁极的磁场中就产生电磁转矩，拖动机械负载旋转。只要电动机拖动机械负载，就同时会有电磁转矩和机械转矩(阻转矩)，两者是相互排斥的。如果机械的阻转矩增大，则电磁转矩也要相应地增大(也就是输入的要

相应地增大)，以克服机械转矩使电动机继续旋转运行。电动机一经转动起来，电枢绕组就要切割主磁极磁通感应电动势。电动势的方向依右手定则决定，恰和输入电流的方向相反。这个电动势称为反电动势。外施（输入）电流经过这个反电动势，吸收了电能，吸收的电能并不是贮藏起来，而是转换成机械能。

所以，无论是直流发电机或直流电动机，只要在负载下运行，电磁转矩和机械转矩总是同时存在的，并且始终是相互排斥的，组成一对矛盾。在一定条件下，机械转矩处于主导地位，机械转矩克服了电磁转矩，从而将机械能转换成电能，这时电机作为发电机运行；在另外的一定条件下，电磁转矩处于主导地位，电磁转矩克服了机械转矩，从而将电能转换成机械能，这时电机作为电动机运行。电枢绕组切割磁通感应电动势和载流导体在主磁极磁场中产生电磁转矩，这两个作用同时存在于电动机和发电机的内部。毛主席教导我们：“唯物辩证法认为外因是变化的条件，内因是变化的根据，外因通过内因而起作用”。要完成机电能量的转换，内因是电机本身存在着的电磁转矩和机械转矩这一对矛盾，但是到底是从电能转换为机械能还是从机械能转换为电能，就要以外因作为条件，决定于这一对矛盾中哪一个侧面是矛盾的主要方面。

§ 1—4 直流电机的系列和铭牌

为了满足各行工业中不同的运行要求，电机制造成不同型号的系列。所谓系列就是指电机的结构和形状基本相似，电压、转速、机座号、铁心长度和安装尺寸等都有一定的标准等级，而电机的功率按一定比例递增。电机型号是以一个或几个拉丁字母表示它的型式和使用范围。我国小型直流电机一部分系列的型号说明如下：

系列名称	功率范围	使用情况	字母含义
Z2	0.4~200千瓦	一般工作情况	Z(直)2(第二次改型设计)
ZH	3~30千瓦	电镀电解的电源	Z(直)H(解)
Z2C	0.4~200千瓦	船舶电力拖动或恒压供电	Z(直)2(第二次改型设计)C(船用)
ZZYH	3~32千瓦	船舶起重设备用	Z(直)ZY(起重)H(船用)
ZZY	3~32千瓦	起重机、行车、冶金用传动	Z(直)Z(起重)Y(冶金)
ZXQ	1.35~4千瓦	蓄电池车牵引电动机	Z(直)X(蓄)Q(牵引)
ZTD	15~21.6千瓦	载客电梯用	Z(直)T(梯)D(电动机)

其它还有不少型号，不一一列举。各种型号的详细规格、技术指标、安装尺寸及有关说明可参阅产品说明书。

每台制造好的电机在机座上都有一块铭牌，上面标注各种数据，如图1—9所示。铭牌中型号Z2—42的含义是：Z表示直流电机，Z后面的数字2表示第二次改型设计，“—”后面第一个数字4表示机座号，第二个数字表示电枢铁心长度的等级。铭牌上的功率是指在额定运行情况下的输出功率，对发电机是指出线端输出的电功率（它等于铭牌上的电压和电流的乘积），对电动机是指轴上输出的机械功率（它等于铭牌上的电压和电流的乘积，再乘以该电机的效率）。铭牌上的电压、电流、和转速等项都是指电机在额定运行时的数据，即额定值。

额定功率是表示电机在实现能量转换时正常允许的出力大小。它是电机运行的基本依据，但是并不限制电机只能在额定功率下运行。实际的负载可以与额定功率有所出入，但不宜相差太大。一般说来，负载过小则浪费设备容量；负载过大则降低电机寿命或损坏电机；不论负载过小或过大，都会使电机性能变坏。因此我们必须熟悉铭牌上的数据，以保证安全、合理地使用电机。

直 流 电 动 机			
型 号	Z 2—42	激磁方式	他 激
功 率	4 瓩	激磁电压	220 伏
电 压	220 伏	激磁电流	0.63安培
电 流	22.7 安培	定 额	连 续
转 速	1500转/分	温 升	80℃
出品号数	× × × ×	出品日期	×年×月
× × 电 机 厂			

图1—9 电机的铭牌

小 结

直流电机由于它具有优越的性能，在社会主义建设中起着重要的作用，但是由于换向器的存在，在使用上受到一定限制。随着国民经济的不断发展，将促使直流电机无论在结构上、性能上和技术经济指标上不断改进。

直流电机的基本结构可分为静止的部分（称为定子）和旋转的部分（称为电枢）。在定子和电枢之间存在着空气隙。主磁极、电枢和换向器是直流电机最基本的三大部件，对它们的结构特点和作用应有所了解。

直流电机的工作原理是基于导体在磁场中运动产生感应电动势和载流导体在磁场中产生电磁力这两个基本定律。换向器的作用使一组电刷总是和N极下的电枢导线相联，另一组电刷总是和S极下的电枢导线相联。于是作为发电机运行时，便把电枢绕组中感应的交流电动势转换成电刷间的直流电动势；作为电动机运行时，使电枢导体中的电流方向在N极下和S极下相反，而且固定不变，从而产生单向转矩。

了解直流电机的铭牌数据，才能安全、正确和合理地使用电机。

习 题

1. 如何从直流电机在我国社会主义建设中所起的作用来理解发展直流电机的重要意义？
2. 直流电机由哪些主要零部件组成？它们的功用如何？
3. 直流发电机是如何发出电动势的？电枢绕组中的交流电动势是如何变成电刷间的直流电动势的？能量是如何转换的？
4. 直流电动机是如何产生单向转矩的？能量是如何转换的？
5. 直流发电机和直流电动机的额定功率是指什么？一台直流电机在运行中，它的功率多大将由什么来决定？
6. 为什么说在使用一台直流电机时，首先必须熟悉铭牌上的数据？

第二章 直流电机的电枢绕组

§ 2—1 电枢绕组的一般介绍

电枢绕组就是电枢上的很多线圈联接起来的总称，它的作用是：当它在磁场中旋转时产生感应电动势；当它载有电流时，在磁场的作用下产生转矩。这两个作用不论在发电机运行或电动机运行时都同时存在，以完成机电能量的转换，所以电枢绕组是电机的主要部件。本章主要讨论电枢线圈之间、线圈和换向片之间的联接规律和感应电动势的计算方法。

根据实践需要，对电枢绕组的要求是：

- 1、满足设计时所给定的条件，如能够感应出给定的电动势，能够承受给定的电流；
- 2、材料要得到充分的利用；
- 3、保证换向良好（参见第六章）。

由于设计直流电机时所给定的电动势和电流可以差别很大，因此电枢线圈联接的规律（即绕组的形式）也有好几种，可分为单叠绕组、复叠绕组、单波绕组、复波绕组和混合绕组等，以适应不同的要求。其中单叠绕组和单波绕组是最基本的，掌握了这两种绕组的联接规律后，熟悉其他类型的绕组就比较容易了。

直流电机电枢绕组虽有其一定的复杂性，但只要“从中找出规律性的东西”后就能够掌握它。

当我们仔细观察直流电机的绕组时，可以发现所有的线圈都安放在电枢外缘，一个线圈由一匝或多匝绕成，每个线圈有二个边嵌在不同的电枢槽内，处在槽内的、能与主磁极磁通作用的线圈边称为有效边，处在槽外仅作联接作用的那部分线圈称为端接。线圈的一个有效边处于N极下，另一个有效边处于S极下，两个边之间的距离基本上等于一个磁极的距离（简称极距），这样能使两个线圈边所感应的电动势或产生的转矩相加起来，材料得到充分利用。每个线圈有二个接头，接到不同的二个换向片上，这样的线圈称为绕组元件。每个绕组元件的两个元件边，一个放在某一槽的上层，一个放在另一个槽的下层，做成双层绕组，如图2—1所示。每个换向片上接有两个属于不同元件的接头，所以换向片数和绕组元件数是相等的。设换向片数为C，元件数为S，则有

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

有些电机中，元件数等于槽数，这时每槽上下层各放一个元件边。在工厂实际生产中，往往一个槽内每层放有 u 个（如 $u = 3$ ）元件边，我们称此种情形为一个实际槽内有 u 个虚槽，如图2—2所示。在计算或作图时，我们是以虚槽来编号的。设 Z 为槽数， Z_v 为虚槽数， u 为槽内每层的元件边数，则有

$$Z_v = uZ \quad (2-2)$$

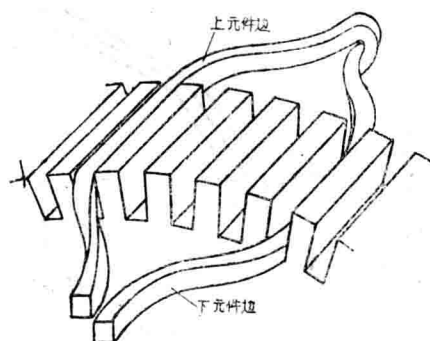


图2—1 电枢绕组元件在槽内的放置

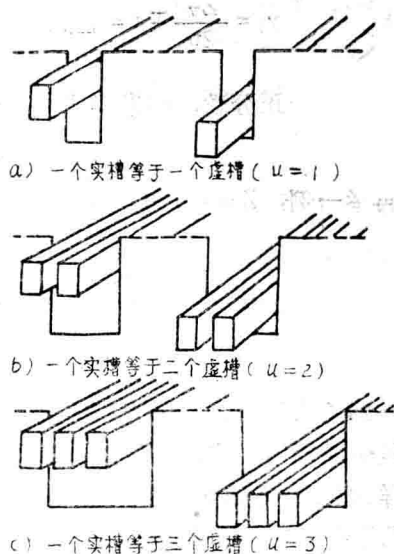


图2—2 每槽每层嵌有 u 个元件边的示意图

一个虚槽内有二个元件边，一个元件也有二个元件边，所以虚槽数等于元件数，即

$$Z_v = S$$

(2-3)

为了能简单明确地说明绕组的联接规律，我们还必须了解几个名称的含义。

1、第一节距（亦称后节距） y_1 ： y_1 是同一元件二个元件边所跨的虚槽数，如图2—3所示。前面已经提到，它应近似地等于一个极距。设

p 为极对数，则以虚槽数计的极距为 $\frac{Z_v}{2p}$ ，所以

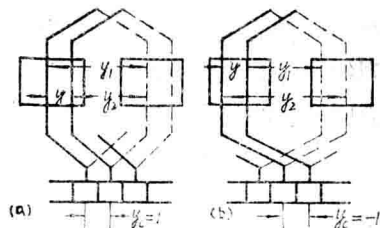
$$y_1 \approx \frac{Z_v}{2p}。$$

例如： $Z = 16$ ， $u = 1$ ， $2p = 4$ ，则 $y_1 = \frac{Z_v}{2p} = \frac{16}{4} = 4$ 。即线圈节距为1—5（跨距从第一槽到第五槽），这时称整距绕组。

又如： $Z = 33$ ， $u = 1$ ， $2p = 4$ ，则 $y_1 = \frac{Z_v}{2p} = \frac{33}{4} = 8\frac{1}{4}$ 。

由于 y_1 不能等于分数，故取 $y_1 = 8$ ，即线圈节距1—9，这时称为短距绕组。当然我们也可以取 $y_1 = 9$ ，即取线圈节距1—10，这时称为长距绕组。长距绕组浪费端接部分的铜线，一般是不采用的。

一般来说：当 $\frac{Z_v}{2p} \neq \text{整数时}$ ，



a) 右行绕组 b) 左行绕组

图2—3 单叠绕组元件在电枢上串联情况

$$y_1 = \frac{Z_v}{2p} \mp \varepsilon = \text{整数} \quad (2-4)$$

式中 ε 是一个正分数，用来凑成 y_1 是与 $\frac{Z_v}{2p}$ 相接近的整数，取“-”号为短距，取“+”号为长距。

再举一例： $Z = 33$ ， $u = 3$ ， $2p = 4$ ，则

$$y_1 = \frac{uZ}{2p} = \frac{3 \times 33}{4} = 24 \frac{3}{4}$$

取 $y_1 = 24$ （虚槽数）。因为在绝大部分情况下，线圈都是做成同槽式的，就是说，每个元件的形状都是一样，把 u 个（如 $u = 3$ ）元件看成一个大线圈，它的两边各嵌在一个槽内，如图2—4所示。这样， y_1 就应取 u 的倍数，所以 y_1 不能取25或26。

必须注意：在工厂里所指的线圈节距，即俗称线圈开挡，是指二个元件边所跨的实槽数。

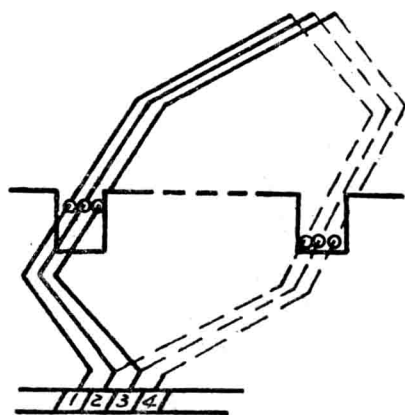


图2—4 同槽式绕组

2、第二节距（亦称前节距） y_2 ： y_2 是第一元件的下元件边到与它相串联的第二元件的上元件边所跨的虚槽数，如图2—3所示。

3、合成节距 y ： y 是相串联的两个元件的对应边所跨的虚槽数，如图2—3所示。

4、换向器节距 y_c ： y_c 是每一元件首尾端所联的两换向片之间的跨距，用换向片数来表示。从图2—3可见：

$$y = y_c \quad (2-5)$$

这是因为相串联的两元件的对应边既然相差 y 个虚槽，它们对应的端头也差 y 个虚槽，再由于第一元件的尾端和与它相串联的第二元件的首端是联在一起的，故第一元件的首尾端在联接到换向片时也差 y 个虚槽，根据 $Z_v = C$ ，并且元件的端头和换向片是依次顺序联接，所以它们所联接的换向片间的跨距也差 y 个，这就是 y_c 。

§ 2—2 单叠绕组

单叠绕组的联接规律是：第一个元件的尾端和第二个元件的首端通过换向片联在一起，并且第二个元件就放在第一个元件隔壁的虚槽内，即移过一个虚槽，“紧叠”在第一个元件上，依此类推，直至最后一个元件的尾端与第一元件的首端通过最后一块换向片联在一起，使整个绕组形成一个闭合的回路。所以单叠绕组的联接规律是：

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= \frac{Z_v}{2p} \mp \varepsilon \\ y &= y_c = \pm 1 \\ y_2 &= y_1 - y \end{aligned} \right\} \quad (2-6)$$

单叠绕组有右行 ($y_c = 1$) 和左行 ($y_c = -1$) 两种, 如图2—3所示, 它们在原理上完全一样。但是左行绕组在换向器侧的端接部分相互交叉, 用铜较多, 一般不采用。

现在举一个简单的例子来说明单叠绕组的联接法、电刷放置法和并联支路数, 从而说明其特点。

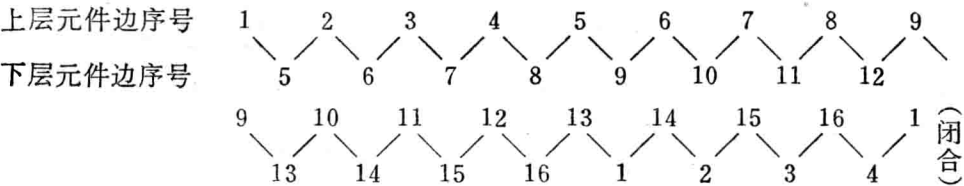
例如, 已知 $Z = 16$ 、 $u = 1$ 、 $2p = 4$, 要求绕成右行单叠绕组。

$$y_1 = \frac{Z_v}{2p} \mp \varepsilon = \frac{16}{4} = 4$$

$$y = y_c = 1$$

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

元件联接顺序如下表:



其展开图如图2—5所示。展开图是假设把电枢从某一齿中间沿轴向切开而展开成的一个平面绕组联接图。图2—5中磁极是在绕组的上面, 图上方的箭头表示电枢绕组旋转的方向, 导体上的箭头表示感应电动势的方向, 在两主磁极中间的地方是中性区域, 处在中性区域的元件不会感应电动势, 或不会产生电磁力, 因为那里没有磁通。上面一排编号是虚槽或元件的编号, 下面一排是换向片的编号。

现在让我们从换向片1起按元件1、2、3…的顺序循行。元件1的上下层边正处在中性区域, 从感应电动势的角度来看, 它们的感应电动势为零。元件2、3、4的电动势的方向是往下, 逆着我们循行的方向。元件5不感应电动势, 元件6、7、8的电动势的方向往上, 顺着我们循行的方向。从元件9开始的情况和从元件1开始的情况一样。如此循行下去, 到元件16的下层边回到换向片1上, 绕组自行闭合。据此可画出元件的电路图, 如图2—6所示。

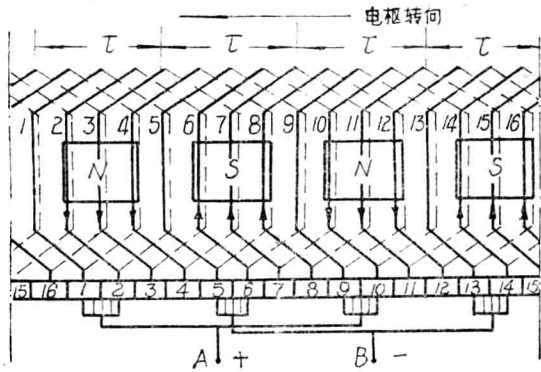


图2—5 单叠绕组展开图

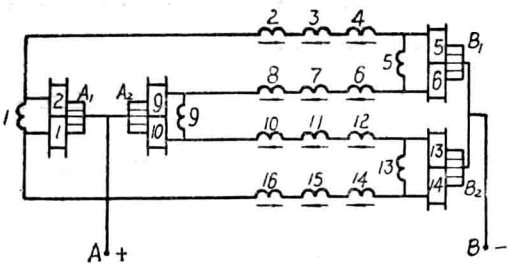


图2—6 单叠绕组电路图之一