

电 机 学

杨 长 能 编

重 庆 大 学 出 版 社

内 容 提 要

本书内容包括:直流电机,变压器,三相异步电动机,单相异步电动机,同步电动机,控制电机。从应用角度出发,介绍了各种电机的基本结构、工作原理、内部电磁过程、工作特性以及基本的试验方法和使用方法等。内容重点突出,概念清楚,深入浅出,各章附有小结及大量例题、思考题与习题,便于自学。

本书适用于高等工科院校工业电气自动化专业以及电气类专业的师生使用,也可供电气工程技术人員参考。



重庆大学出版社出版发行
新华书店经销
重庆大学印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:18.25 字数:455千
1994年1月第1版 1996年7月第2次印刷

印数:3001—7000

标准书号: ISBN 7-5624-0452-6 定价:14.80元
TM-28

(川)新登字 020 号

前 言

本书是根据全国高等工业学校自动化专业类《电机及拖动基础》教学大纲中电机学部分的要求编写的。此外,还根据该大纲中电力拖动基础部分另编了一本《电力拖动基础》(重庆大学出版社1989年1月出版)。将《电机学》和《电力拖动基础》分开,可以使两部分内容更加系统,每一部分内容前后部分之间的联系更加紧密,同时使用也比较灵活。

本书共分6章,内容包括:直流电机,变压器,三相异步电动机,单相异步电动机,同步电动机,控制电机。每一章最后一节为小结,章后附有较多的思考题及习题,以帮助读者更好地理解 and 掌握各章的主要内容。全部内容的讲授约需80~90学时。

由于电机学是一门重要的专业基础课,因此在内容的选择上,既要重视基础理论、基本原理、基本概念和基本方法,又要注意到专业的针对性。本书除介绍普通电机以外,还介绍自动控制中常用的控制电机。普通电机中又以介绍电动机和变压器为主,发电机为辅。本书从应用角度出发,着重介绍电机的基本结构、工作原理、内部电磁过程、工作特性以及基本的试验方法和使用方法等。编写时,力求重点突出,概念清楚,深入浅出,便于自学,同时又结合专业,使内容少而精。

本书可作为普通高等工业学校和成人高校工业电气自动化以及电气类专业的教材及教学参考用书,也可供电气工程技术人員参考。

由于编者水平有限,书中难免有不少缺点错误,恳请读者批评指正。

编 者

1993年11月

目 录

绪论.....	1
第一章 直流电机.....	1
§ 1-1 直流电机的结构、铭牌数据及主要系列.....	1
§ 1-2 直流电机的基本工作原理.....	5
§ 1-3 直流电机的电枢绕组.....	8
§ 1-4 直流电机的磁场.....	16
§ 1-5 直流电动机.....	24
§ 1-6 直流发电机.....	33
§ 1-7 直流电机的换向.....	39
§ 1-8 小结.....	44
思考题.....	48
习题.....	49
第二章 变压器.....	53
§ 2-1 变压器的用途与分类.....	53
§ 2-2 变压器的结构及铭牌数据.....	54
§ 2-3 单相变压器的空载运行.....	58
§ 2-4 单相变压器的负载运行.....	63
§ 2-5 变压器参数的测定.....	68
§ 2-6 变压器的运行特性.....	73
§ 2-7 三相变压器.....	76
§ 2-8 自耦变压器.....	89
§ 2-9 仪用互感器.....	94
§ 2-10 小结.....	97
思考题.....	102
习题.....	105
第三章 三相异步电动机.....	111
§ 3-1 三相异步电动机的结构、铭牌数据及主要系列.....	111
§ 3-2 三相异步电动机的基本工作原理.....	116
§ 3-3 三相异步电动机的定子绕组.....	120
§ 3-4 三相异步电动机的定子磁势及磁场.....	129
§ 3-5 转子不动时的异步电动机.....	143
§ 3-6 转子旋转时的异步电动机.....	150
§ 3-7 三相异步电动机的功率及转矩.....	158
§ 3-8 三相异步电动机的工作特性及机械特性.....	161

§ 3-9 三相异步电动机参数的测定	168
§ 3-10 小结	170
思考题	175
习题	176
第四章 单相异步电动机	179
§ 4-1 单相异步电动机的工作原理	179
§ 4-2 单相异步电动机的类型	185
§ 4-3 三相异步电动机的单相运行	189
§ 4-4 小结	191
思考题	192
习题	192
第五章 同步电动机	194
§ 5-1 同步电动机的结构、铭牌数据及主要系列	194
§ 5-2 同步电动机的基本工作原理	196
§ 5-3 同步电动机的电势平衡方程式及相量图矢量图	196
§ 5-4 同步电动机的功率平衡及功角和矩角特性	202
§ 5-5 同步电动机的励磁调节及V形曲线	208
§ 5-6 同步电动机的起动	212
§ 5-7 同步电动机与异步电动机的比较	216
§ 5-8 小结	216
思考题	218
习题	218
第六章 控制电机	220
§ 6-1 概述	220
§ 6-2 伺服电动机	221
§ 6-3 测速发电机	233
§ 6-4 自整角机	242
§ 6-5 旋转变压器	251
§ 6-6 步进电动机	257
§ 6-7 小结	267
思考题与习题	271
习题答案	275
主要参考书目	279

第一章 直流电机

§ 1-1 直流电机的结构、铭牌数据及主要系列

一、直流电机的结构

任何旋转电机都具备静止和转动两大部分,静止部分称为定子,转动部分称为转子。定子和转子的结构因电机而异。图 1-1 是直流电机的结构图,图 1-2 是直流电机的剖面图。现对各主要部件的结构及其作用简述如下:

1. 定子

直流电机定子的作用是产生磁场并作为电机的机械支撑。由主磁极、换向极、机座和电刷装置等组成。

(1)主磁极 主磁极又称主极,它的作用是产生直流电机的主磁场。绝大多数直流电机的主磁极都是电磁铁,由直流电流励磁,因此它由铁心和励磁绕组两部分组成,如图 1-3 所示。主极铁心是用 1~1.5mm 厚的钢板冲片叠压紧固而成,上面较窄的部分叫极身,下面较宽的部分叫极靴,其作用是使主磁极磁通密度沿极下气隙空间尽可能均匀地分布。励磁绕组套在铁心外面,整个磁极用螺钉固定在机座上。各主极上的励磁绕组大多采用串联连接,以保证每极励磁电流相等。各励磁绕组的连接应保证通过励磁电流时,相邻磁极的极性相反,即相邻磁极的极性呈 N 极 S 极交替排列。

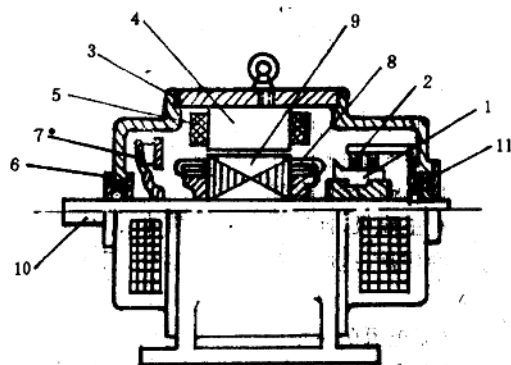


图 1-1 直流电机结构图

- 1—换向器 2—电刷装置 3—机座 4—主磁极
5—励磁绕组 6—端盖 7—风扇 8—电枢绕组
9—电枢铁心 10—轴 11—轴承

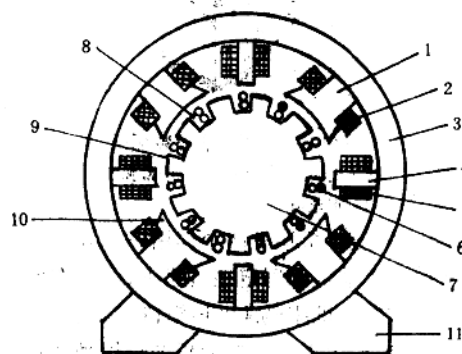


图 1-2 直流电机剖面图

- 1—主磁极 2—励磁绕组 3—磁轭(机座)
4—换向极 5—换向极绕组 6—电枢绕组
7—电枢铁心 8—电枢槽 9—电枢齿
10—极靴 11—底脚

某些小直流电机的主磁极由永久磁铁制成,其磁场很弱,这种电机叫做永磁直流电机。

(2)换向极 换向极又称附加极或间极,它安装在两个主极之间,其作用是改善电机的换

向。换向极也是由铁心和绕组两部分组成,如图 1-4 所示。换向极铁心的形状比主极简单,一般都由整块钢板加工而成。换向绕组和电枢绕组串联,其匝数少而导线较粗。

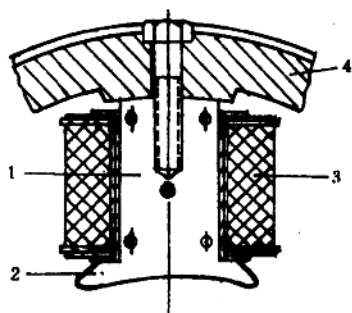


图 1-3 主磁极

1—铁心 2—极靴 3—励磁绕组 4—机座

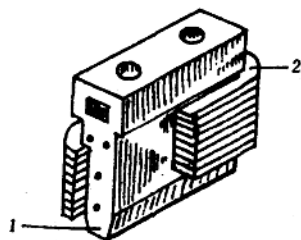


图 1-4 换向极

1—换向极铁心 2—换向极绕组

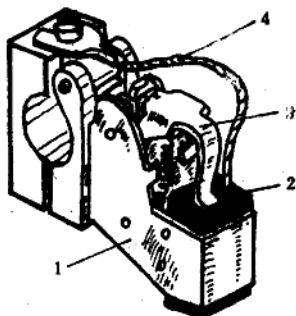


图 1-5 电刷及刷握装配图

1—刷握 2—电刷 3—压紧弹簧
4—铜丝辫

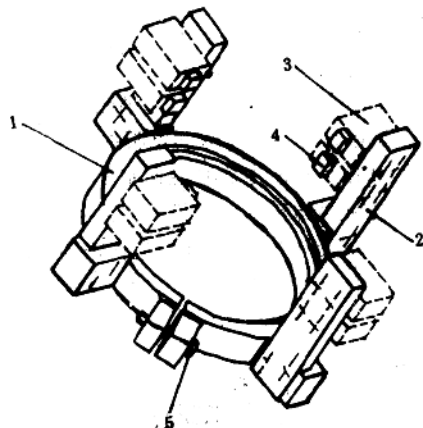


图 1-6 直流电机的座圈装置

1—换向器(刷握座) 2—刷握 3—电刷
4—电刷 5—把紧螺钉

(3)机座 机座有两个作用,一是起机械支撑作用,主磁极、换向极以及支撑中、小型电机转子的两个端盖都固定在机座上;另一作用是起导磁的作用,是电机磁路的一部分,因此又叫做定子磁轭。机座通常由铸钢铸成或由钢板焊成。

(4)电刷装置 电刷装置的作用是把直流电压、直流电流引入或引出。它主要由电刷、刷握、刷杆及刷杆座组成。图 1-5 是一个电刷及刷握的装配图。电刷是以石墨为主要材料制成的导电块,安放在刷握内,并由压紧弹簧压紧在转子的换向器表面上,在电刷上嵌有铜丝辫,用以引入、引出电压和电流。刷握用螺钉压紧在刷杆上,刷杆的数目与电机主极数目一样多,刷杆在换向器外表面上沿圆周方向均匀分布。全部刷杆都装在一个可以转动的圆座(称为刷杆座)上,如图 1-6 所示。当转动这个圆座时,就可以调整刷杆在换向器外表面上的相对位置。当把位置调整好后,便用螺钉将它固定在电机的端盖上。

2. 转子

直流电机的转子通常称为电枢,它的作用是产生感应电势和电磁转矩。它由电枢铁心、电枢绕组、换向器、轴和风扇等组成。

(1)电枢铁心 电枢铁心有两个作用:一是嵌放电枢绕组;另一作用是作为电机主磁路的一部分。由于它和主磁场间有相对运动,因此为了减小铁心内的涡流损耗与磁滞损耗,电枢铁心由涂有绝缘的0.5mm厚的硅钢片叠压而成,然后固定在转轴上。电枢铁心上的槽是为了嵌放电枢绕组的。图1-7是电枢铁心冲片及电枢铁心装配图(轴上还装了换向器)。

(2)电枢绕组 电枢绕组是直流电机的主要电路部分,其作用是产生感应电势和电磁转矩,它是电机实现机电能量转换的关键部件。电枢绕组由绕组元件组成,绕组元件由铜线或铝线预先绕制而成,放在电枢铁心槽中,如图1-7(b)所示。元件与铁心之间互相绝缘,然后用槽楔压紧,再用钢丝或玻璃丝带扎紧,以防止离心力将绕组甩出槽外。元件的两个出线端分别接在换向器的两块换向片上,并通过换向片将各个元件按一定规律联接起来,就构成了电枢绕组。

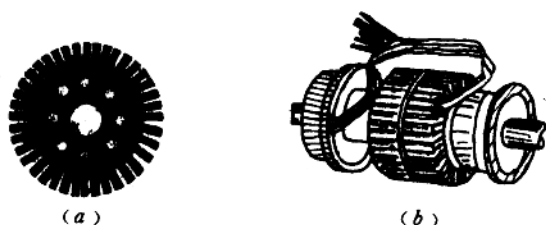


图 1-7 电枢铁心冲片和铁心
(a)电枢铁心冲片 (b)电枢铁心

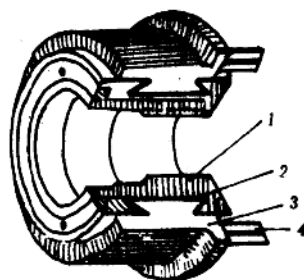


图 1-8 换向器
1—V形套筒 2—云母环
3—换向片 4—连接片

(3)换向器 在直流发电机中,换向器的作用是将电枢绕组中的交流电势整流成电刷上的直流电势;在直流电动机中,换向器的作用是将外部直流电源所提供的直流电流变换为电枢绕组内的交流电流,保证电动机能产生恒定方向的转矩(见直流电机的基本工作原理)。换向器由许多换向片组成,换向片之间常用云母绝缘。换向器的结构如图1-8所示。

二、直流电机的铭牌数据

为了保证电机的可靠运行和具有良好的性能而对有关的物理量所规定的的数据,称为电机的额定数据或额定值。这些数据都标明在电机的铭牌上,所以又称为电机的铭牌数据。

直流电机的铭牌数据主要有:

- (1)额定功率(或称额定容量) $P_N(\text{kW})$;
- (2)额定电压 $U_N(\text{V})$;
- (3)额定电流 $I_N(\text{A})$;
- (4)额定转速 $n_n(\text{r/min})$;
- (5)额定励磁电压 $U_f(\text{V})$;
- (6)额定励磁电流 $I_f(\text{A})$;

(7)励磁方式。

电机的额定效率通常不标在铭牌上,但可在产品手册或样本中查到。

必须注意到,额定功率是指电机的额定输出功率,对发电机来说,是指电刷上输出的电功率;对电动机来说,是指轴上输出的机械功率,因此直流发电机的额定功率为:

$$P_e = U_e I_e \quad (1-1)$$

而直流电动机的额定功率为

$$P_e = U_e I_e \eta_e \quad (1-2)$$

式中, η_e 是直流电动机的效率。它是直流电动机额定输出功率 P_e (机械功率) 与额定输入功率 $U_e I_e$ (电功率) 之比。

额定数据是电机运行的基本数据。直流电机运行时,若各物理量的实际值都等于额定值,称为满载运行,或叫做额定运行状态。在额定运行状态下工作,电机能可靠地运行,并具有良好的性能。

实际运行中,电机不一定总工作在额定状态。如果流过电机的电流小于额定电流,称为欠载运行;超过额定电流,称为过载运行。长期欠载或过载运行都不好。长期欠载,电机得不到充分利用,且运行效率不高,浪费能量;长期过载,电机可能因过热而损坏。

例 1-1 一台 Z_2 系列发电机,其部分数据如下: $P_e = 180 \text{ kW}$, $U_e = 230 \text{ V}$, $\eta_e = 89.5\%$,求该发电机的额定输入功率 P_1 及额定电流。

解 额定输入功率

$$P_1 = \frac{P_e}{\eta_e} = \frac{180}{0.895} = 201.12 \text{ (kW)}$$

额定电流

$$I_e = \frac{P_e}{U_e} = \frac{180 \times 10^3}{230} = 782.6 \text{ (A)}$$

例 1-2 一台 Z_2 系列电动机,其部分数据如下: $P_e = 100 \text{ kW}$, $U_e = 220 \text{ V}$, $\eta_e = 89\%$,求该电动机的额定输入功率 P_1 及额定电流 I_e 。

解 额定输入功率

$$P_1 = \frac{P_e}{\eta_e} = \frac{100}{0.89} = 112.36 \text{ (kW)}$$

额定电流

$$I_e = \frac{P_1}{U_e} = \frac{112.36 \times 10^3}{220} = 510.73 \text{ (A)}$$

或

$$I_e = \frac{P_e}{U_e \eta_e} = \frac{100 \times 10^3}{220 \times 0.89} = 510.73 \text{ (A)}$$

三、直流电机的主要系列

我国生产的直流电机,按照容量大小,结构型式,应用范围,性能水平等的不同,有以下主要的产品系列:

Z_2 系列小型直流电机。包括发电机和电动机;为一般用途,即应用于非湿热带地区、非多尘或无有害气体的场所,非严重过载或冲击性过载要求的情况下。

Z_3 系列小型直流电机。是在 Z_2 系列后试制成功的新产品,包括发电机和电动机,为一般用途,可代替 Z_2 系列小型直流电机。

ZD 和 ZF 系列大、中型直流电机。ZD 是直流电动机系列,ZF 是直流发电机系列,为一般用途。

关于直流电机的大小,通常是以额定功率和额定转速来划分的。因为电机几何尺寸的大小决定于转矩的大小;而转矩的大小又与电机额定功率和额定转速之比成正比。我国规定:

1500r/min、功率为 200kW 及以下的称为小型直流电机;

1500r/min、功率为 200kW 以上到 1000r/min、功率为 1250kW 及以下的称为中型直流电机。

1000r/min 及以下、功率为 1250kW 以上的称为大型直流电机。

以上介绍的 Z_2 、 Z_3 、ZD 和 ZF 系列均为一般用途的直流电机。以下几种系列是特殊用途的直流电机,又称专用直流电机。

ZZY 系列和 ZZJ₂ 系列是起重冶金用直流电动机。

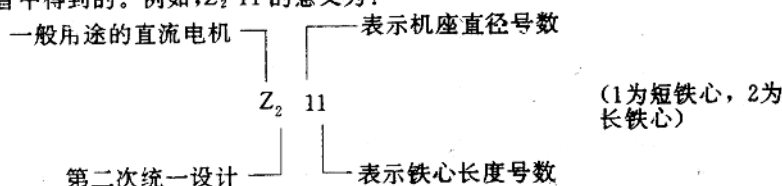
ZHC2 系列是充电用直流发电机。

ZG 系列是辊道用直流发电机。

ZBD、ZBF 系列是龙门刨床用直流电机组。

还有其它一些专用直流电机的系列。各种系列的功率等级、转速等级、电压等级、绝缘等级、通风方式及结构型式等在电机产品样本上都可查到,这里就不再介绍了。

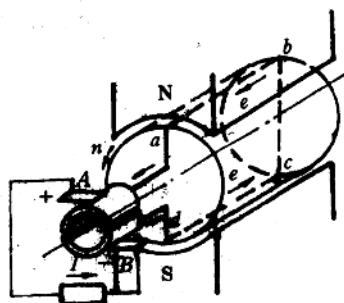
每一种电机产品都有一个型号,国产电机产品的型号一般采用大写印刷体的汉语拼音字母和阿拉伯数字表示,其中汉语拼音字母是根据电机的全名称选择有代表意义的汉字,再从该汉字的拼音中得到的。例如, Z_2 -11 的意义为:



又如, Z_2 -112 为 11 号机座、长铁心。

§ 1-2 直流电机的工作原理

直流电机的实际结构是复杂的,为了阐明其基本工作原理,我们将实际的直流电机简化成图 1-9 所示的物理模型。图中 N、S 代表主磁极,可以转动的圆柱体代表电枢,上面的线圈 $abcd$ 代表电枢绕组元件,并假设电枢绕组由一个元件组成,元件的两端分别与两块换向片相联,换向片间互相绝缘,这两块互相绝缘的换向片就构成一个最简单的换向器。换向器装在轴上,和电枢一起旋转,换向器又与两个固定不动的电刷 A、B 相接触,通过电刷、换向器可以把电枢绕组 $abcd$ 与外部电路相联接。



一、直流发电机的基本工作原理

当直流电机作为直流发电机使用时,其电枢是被原动机拖动以转速 n 旋转的,而与电刷相联的外部电路则是发电机的负载(如图 1-9 所示)。

图 1-9 直流发电机工作原理示意图

当原动机拖动电枢以某一速度 n 逆时针方向旋转时,根据电磁感应定律,线圈 $abcd$ 就会切割磁力线而产生感应电势。由于磁力线、导体和运动方向三者互相垂直,则在每根导体中感应电势的大小为

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

式中 B_x ——导体所在处的磁通密度,简称磁密(T);

l ——导体 ab 或 cd 的长度(m);

v ——导体 ab 或 cd 切割磁力线的线速度(m/s)。

感应电势的方向,用右手定则确定。把右手手掌伸开,大拇指与其余四指垂直,如图 1-10 所示,让掌心迎向磁力线,大拇指指向导体切割磁力线的运动方向,则其余四指的指向就是导体中感应电势的方向。不难确定,在图 1-9 所示瞬间导体 ab 中感应电势 e 的实际方向是由 b 指向 a ,而导体 cd 中感应电势 e 的实际方向是由 d 指向 c 。也就是说,在该瞬间,线圈 $abcd$ 感应电势的实际方向是从电刷 B 沿 $dcba$ 至电刷 A 。由于电势的实际方向是从低电位指向高电位,或者说是从“-”电位指向“+”电位,因此电刷 A 呈“+”电位,而电刷 B 呈“-”电位。当电枢逆时针转过 180° 时,导体 ab 与 cd 互换了位置,即导体 ab 转到原来 cd 的位置; cd 转到原来 ab 的位置。根据右手定则确定,在该瞬间,线圈 ab 感应电势的实际方向是由 a 指向 b ,而线圈 cd 感应电势的实际方向是由 c 指向 d 。也就是说,在该瞬间,线圈 $abcd$ 感应电势的实际方向是从电刷 B 沿 $abcd$ 至电刷 A 。线圈感应电势的实际方向恰好与原来相反,但电刷 A 仍然是“+”电位,电刷 B 仍然是“-”电位。

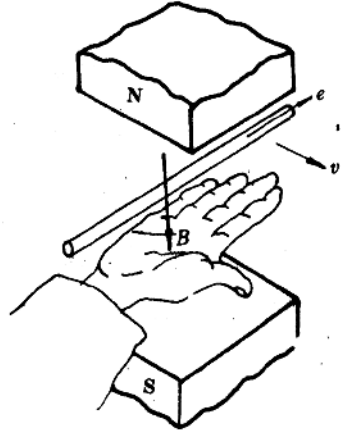


图 1-10 用右手定则确定感应电势的方向

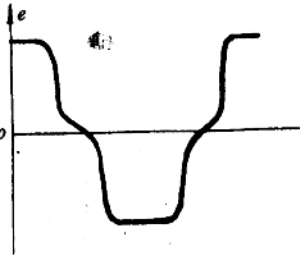


图 1-11 导线和线圈中感应的交流电势

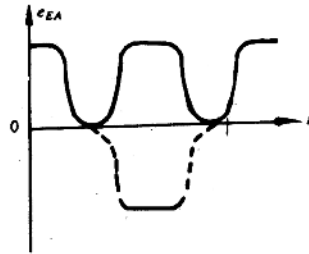


图 1-12 电刷之间的电势

假设线圈感应电势的方向沿 $dcba$ 为正,沿 $abcd$ 方向为负,则当电枢逆时针方向旋转时,导体和线圈 $abcd$ 的感应电势将正、负交替变化,是一个交流电势,如图 1-11 所示。线圈每转过一对磁极,交流电势变化一个周期。但是,由于换向器的换向作用,电刷 A 总是和处于 N 极下的线圈边相联,在逆时针转向下,无论电枢转到什么位置,其极性恒为正;而电刷 B 总是和处于 S 极下的线圈边相联,在逆时针转向下,无论电枢转到什么位置,其极性恒为负。因此,电刷 A 与 B 之间的电势方向始终是不变的。但由于在主磁极下沿电枢圆周表面各处的磁通密度大小不同,导线和线圈中感应电势的大小随时间而变化,因此电刷 A 、 B 之间的电势是方向不变

而大小变化的脉振电势,如图 1-12 实线所示。使用中,要求直流发电机能发出平衡的电势,为此,实际的直流电机,电枢上要装许多个线圈,各线圈分布在电枢表面上的不同位置,它们之间按一定规律互相联接起来。如果线圈数和换向片数越多,电刷间的电势就越接近直流电势了。此时,若在电刷 A 、 B 之间接上一定大小的负载,则负载上将流过一个直流电流 I ,并产生一定大小的直流输出功率,从而实现了将原动机从轴上输入的机械功率转变为电机输出的电功率。

二、直流电动机的工作原理

直流电机作为直流电动机使用时,其电刷 A 、 B 上接上一直流电源,使电枢线圈中有电流通过(如图 1-13 所示)。根据毕-萨电磁力定律,载流导体 ab 、 cd 在磁场中将受到电磁力的作用。由于磁力线与导体垂直,则作用在每根导体上的电磁力为

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

式中 B_x ——导体所在处的磁通密度(T)。

i ——流过导体中的电流(A)。

导体受力的方向,用左手定则确定。把左手手掌伸开,大拇指与其余四指垂直,如图 1-14 所示,让掌心迎向磁力线,四指指向导体中电流的方向,则大拇指的指向就是导体受力的方向。不难确定,在图 1-13 所示的瞬间,电流方向是 $A \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow B$,则导体 ab 、 cd 受力 f 的方向如图所示。这个力对转轴所产生的转矩称为电

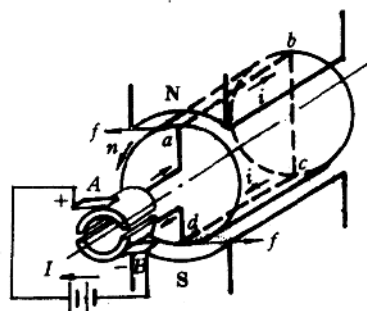


图 1-13 直流电动机工作原理示意图

磁转矩,它等于力 f 与转子半径的乘积。在图 1-13 所示瞬间,电磁转矩为逆时针方向。当电机转子在电磁转矩作用下逆时针转过 180° 时,导体 ab 、 cd 的位置互换,使得导体所处的磁极极性相反了。但是由于换向器的换向作用,使得导体中电流的方向也跟着改变,此时的电流方向是 $A \rightarrow d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a \rightarrow B$,导体 ab 、 cd 受力 f 的方向仍不变,电磁转矩仍然是逆时针方向,如果电磁转矩能克服电枢上的阻转矩(例如由摩擦引起的阻转矩以及负载转矩),则电枢便以某一转速 n 逆时针方向旋转。

可见,当直流电机电刷 A 、 B 上接上一定极性的直流电源时,通过电刷的电流方向始终不变(即始终由 A 流入,由 B 流出),但由于换向器的换向作用,使电枢线圈和导体中的电流方向是交变的,因而使得每根导体所产生的电磁转矩的方向固定不变。电机在方向固定的电磁转矩作用下便可以持续运转,并从轴上输出一定大小的机械功率,从而实现了将直流电源输入的电功率转变为转轴上输出的机械功率。

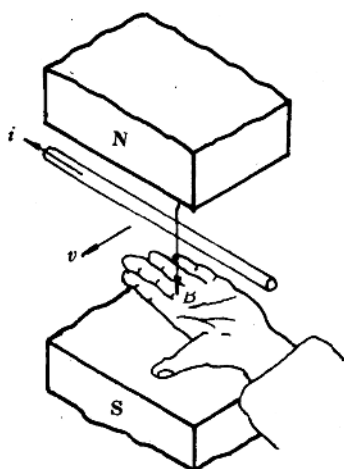


图 1-14 用左手定则确定电磁力的方向

三、直流电机的可逆性

从上面直流电机基本工作原理的分析可知,对于同一台直流电机,在原动机拖动下,可以从电刷输出直流电势,供给负载直流电能,从而实现了将轴上输入的机械能转换为电机输出的电能的过程,成为直流发电机。而如果在电机的电刷上接上直流电源,可以产生一定方向的电磁转矩,带动轴上的机械运转,从而实现了将输入的直流电能转换为轴上输出的机械能的过程,成为直流电动机。这就是说,同一台直流电机在不同的外界条件下,可以作为发电机运行,也可作为电动机运行。这就是直流电机的可逆性。

§ 1-3 直流电机的电枢绕组

如前所述,电枢绕组是直流电机的主要电路部分。它的作用是产生感应电势和产生电磁转矩。当电枢在磁场中旋转时,电枢绕组能产生感应电势;当电枢绕组中有电流流过时,在磁场的作用下又会产生电磁转矩。可见,电枢绕组是实现机电能量转换的枢纽,这就是“电枢”名字的由来。

一、简单绕组

实际的电枢绕组是由均匀嵌放在电枢表面槽内的许多线圈按一定规律联接而成的。为了便于分析电枢绕组的构成原则。现把实际的电枢绕组简化成如图 1-15 所示的简单绕组。该绕组只有 4 个线圈(1-2, 3-4, 5-6, 7-8),每个槽内只放一个线圈边,叫做单层绕组。换向器由四块换向片组成。

1. 电枢绕组构成的原则

由图 1-15 可见,构成电枢绕组的每个线圈的出线端(头、尾)各联到一块换向片上,各个线圈通过换向片联成一个闭合绕组。即:

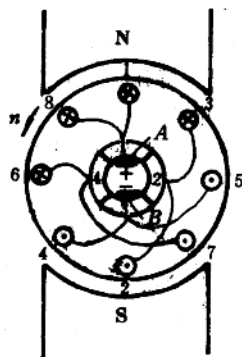
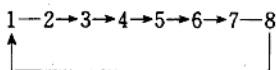


图 1-15 简单绕组

所以直流电机的电枢绕组是一个闭合绕组,这是直流电机电枢绕组构成的基本原则。

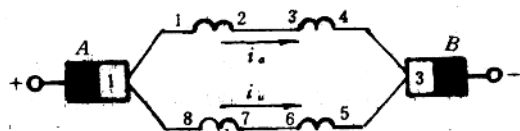


图 1-16 简单绕组的电路图

但从电刷两端看,整个电枢绕组通过电刷又分成几条并联支路。在图 1-15 所示瞬间,设直流电机作电动机运行,则当电刷上加以直流电压(A+, B-)后,电流从正电刷 A 流入,分两条支路流回负电刷 B;一条从线圈边 1 流入,2 流出,再从 3 流入,4 流出;另一条从线圈

边 8 流入,7 流出,再从 6 流入,5 流出。这时电枢绕组的电路图如图 1-16 所示。

2. 对线圈(元件)的要求

线圈是构成电枢绕组的基本单元,因此又称为元件。为了使元件中的电势尽可能大一些,要求每一元件的两个元件边间的距离应接近或等于极距 τ (即每个主磁极所占据的距离,用在电枢圆周上所分得的弧长表示),如图 1-17 所示。图中, $\tau=4$ 槽,元件 1 的两元件边 1、1'间的距离等于极距,即等于 4 槽。电机中,相邻两磁极之间的分界线叫做几何中性线。在几何中性线处的磁场为零。

二、绕组的基本型式

直流电机电枢绕组有两种基本型式:单叠绕组、单波绕组。在直流电机中,任何一种电枢绕组都是由这两种基本型式组成的。

实际的电枢绕组与简单绕组的构成原则是相同的,区别仅在于:

- (1)实际电枢绕组的元件数及换向片数较多;
- (2)实际电枢绕组一般都采用双层绕组,

即一个元件的两边分别放在不同槽的上层和下层,每个槽内有上、下两层元件边,如图 1-18 和图 1-19 所示。元件在槽外的部分不切割磁通,因而不感应电势,仅作为连接线用,称为端接部分。在元件头、尾一端的端接部分叫做前端接部分;在元件另一端的端接部分叫做后端接部分。在双层绕组中槽数 Z = 元件数 S = 换向片数 K 。

每一种电枢绕组的联接规律,通常用绕组的节距来表示。所谓节距,是指被联接的两个元件边或换向片之间的距离。直流电机的电枢绕组有四个节距,现以图 1-20 为例说明。图中,元件的上层边用实线表示,下层边用虚线表示。

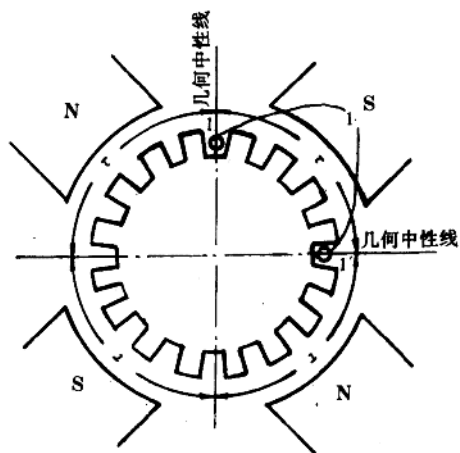


图 1-17 极距 τ 及元件边的跨距

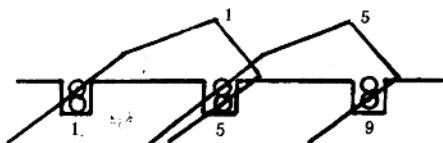


图 1-18 双层绕组示意图

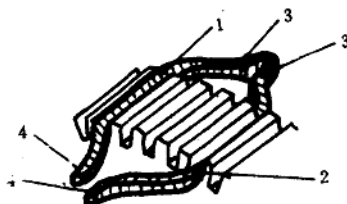


图 1-19 元件边在槽内的放置情况

- 1—上层元件边 2—下层元件边
3—后端接部分 4—前端接部分

(1)第一节距 y_1 ——一个元件两个元件边(即上、下层边)的跨距,以槽数表示。

前面讲过,一个元件两个元件边的跨距应等于或接近于极距 τ ,设电机的极对数为 p ,

则

$$\tau = \frac{Z}{2p} \quad (\text{槽}) \quad (1-5)$$

$$\therefore y_1 = \frac{Z}{2p} \mp \epsilon = \text{整数} \quad (1-6)$$

ϵ 为使 y_1 凑成整数的一个分数。

如 $y_1 = \tau$ (即 $y_1 = \frac{Z}{2p}$)，则称为整距元件。由整距元件构成的绕组称为整距绕组。

如 $y_1 < \tau$ (即 $y_1 = \frac{Z}{2p} - \epsilon$)，则称为短距元件。由短距元件构成的绕组称为短距绕组。

如 $y_1 > \tau$ (即 $y_1 = \frac{Z}{2p} + \epsilon$)，则称为长距元件。由长距元件构成的绕组称为长距绕组。

长距绕组由于端接部分较长，用铜量较多，一般不采用。

(2) 第二节距 y_2 ——互相联接的前一元件的下层边与后一元件的上层边间的跨距，以槽数表示。

(3) 合成节距 y ——互相联接的前后两个元件对应边间的跨距，以槽数表示。

(4) 换向节距 y_K ——每一元件头、尾端所联接的两换向片间的跨距，以换向片数表示。

(一) 单叠绕组

单叠绕组的元件形状，如图 1-21 所示。一个元件边只有一根导线的叫做单匝元件，一个元件边有多根导线的叫做多匝元件。

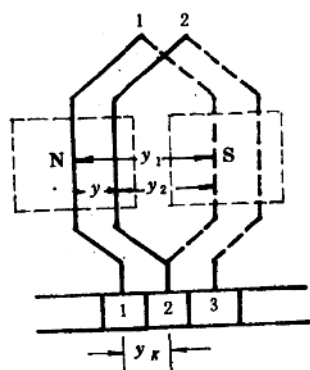


图 1-20 绕组的节距

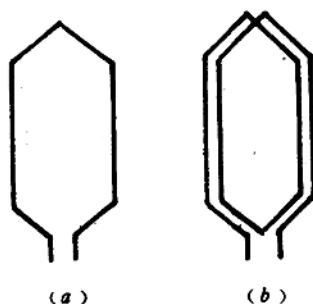


图 1-21 单叠绕组元件

(a) 单匝绕组 (b) 多匝元件

1. 单叠绕组的节距

单叠绕组元件联接的特点是，每一元件的头、尾接到两块相邻的换向片上，互相联接的前后两个元件的对应边位于相邻的槽内，如图 1-20 所示。因此

$$y_K = 1, \quad y = 1 \quad (1-7)$$

$$\text{即} \quad y = y_K = 1 \quad (1-7)$$

$$\text{而} \quad y_2 = y_1 - y = y_1 - 1 \quad (1-8)$$

由图 1-20 可见，元件按其电枢槽中的排列次序依次串联，使元件的端接部分依次搭叠在一起，故称这种绕组为单叠绕组。

2. 单叠绕组的展开图

绕组展开图就是将电枢表面从某一齿中间沿轴向切开并展成平面的图形。通过展开图来分析绕组的联接情况,可以更加直观,更加清楚。下面将通过一个实例来说明绕组展开图的画法。

设绕组数据为:极对数 $p=2$, $Z=S=K=16$,试绘制单叠绕组展开图。

绕组元件的联接规律,是通过节距来确定的。因此,要绘制绕组展开图,首先要计算绕组的节距

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \mp \epsilon = \frac{16}{2 \times 2} = 4 \quad \left(\text{其中 } \tau = \frac{Z}{2p} = 4 \right)$$

$$y = y_K = 1$$

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

根据绕组的节距,便可绘出绕组展开图。其步骤是:

(1)画出全部槽内的元件边(上层边画实线,下层边画虚线),并将元件边所在的槽编号,如图 1-22 所示。

(2)根据 y_1 和 y_K ,先画出一号元件以及该元件所联接的两块换向片,然后画出其余全部换向片(绘制时应使元件上层边所在的槽号与元件编号、元件上层边所联接的换向片的编号一致)。



图 1-22 将元件边所在的槽编号

1号元件的上层边放在1号槽。因 $y_1=4$,故1号元件的下层边应放在5号槽。因 $y_K=1$,故1号元件上、下层边应分别接在1、2号换向片上。在确定换向片与元件之间的相对位置时,应使1号元件的轴线与其所接的1、2号换向片之间的中线(即分界线)重合。1号元件的轴线在3号槽中心线上,因此1、2号换向片的分界线也应在3号槽中心线上。确定了1、2号换向片的位置后,可按照换向片的宽度和槽宽一致的画法,画出1、2号换向片;按照元件对称的画法画出1号元件的端接部分,然后再画出其余全部换向片,并依序编号,如图 1-23 所示。

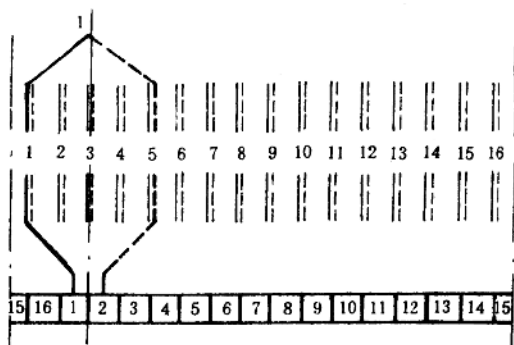


图 1-23 1号元件及换向片编号

(3)画出其余的全部元件,并将元件编号。单叠绕组的元件是按其在电枢槽中的排列次序串联起来的。因此,元件的联接顺序应是 $1-2-3 \cdots 16-1$ 。全部元件通过换向片联接成一个闭合回路,如图 1-24 所示。

(4)画主磁极 主磁极与电枢绕组的相对位置随电枢旋转而变。因此,主磁极的位置原则上可以任意选定。设某一瞬间,磁极 N_1 的轴线正好与1号元件的轴线重合,即正好在3号槽的中心线上,然后根据 $\tau=4$ 槽,便可画出其余磁极的轴线(分别位于7

号、11号、15号槽的中心线上),如图 1-24 所示,每个主磁极的宽度原则上也可任意画,但为了清楚起见,通常取极距 τ 的 0.7 倍。

(5)画电刷 由于电枢是旋转的,因此每一元件在经过电刷时,都将被电刷短路,为了使短路元件的感应电势等于或接近于零,应使它的两个元件边位于或接近于几何中性线上。因此,当元件的几何尺寸对称时,电刷应放在主磁极轴线上(如图 1-24 所示)。电刷宽度原则上也可任意画,但通常画成与换向片等宽(实际电机的电刷宽度通常是换向片宽的 1.5~3 倍)。画出电刷后,将同极性电刷(位于同极性磁极下的电刷)相联,然后引出+、-极性端(如图 1-24 所示)。电刷在换向器表面上的位置,虽然在主磁极轴线上,但被电刷短路的元件边却位于几何中性线上。为了简单,习惯上称为电刷位于几何中性线上,就是指被电刷短路的元件边位于几何中性线上。

3. 单叠绕组的元件联接次序

根据绕组的节距,可以画出如图 1-25 所示的单叠绕组各元件的联接次序。1 号元件的上层边位于 1 号槽,经过 $y_1=4$ 接到 5 号槽的下层元件边,然后再经过 $y_2=3$ 接到 2 号元件的上层边,以此类推,从左到右将所有元件依次联接起来。从 1 号元件的上层边开始,最后又回到 1 号元件的上层边,整个绕组构成了一个闭合回路。

4. 单叠绕组的电路图

根据绕组的展开图及元件联接次序,可画图 1-24 所示瞬间的绕组电路图,如图 1-26 所示。画绕组电路图的步骤是:

(1)按照元件联接次序,将全部元件联成一个闭合回路。

(2)根据电刷位置,画出与电刷相接触的换向片以及被电刷短路的元件。在图 1-24 所示瞬间,被电刷短路的元件是 1、5、9、13 号元件。

(3)联接相同极性的电刷,引出+、-极性端。

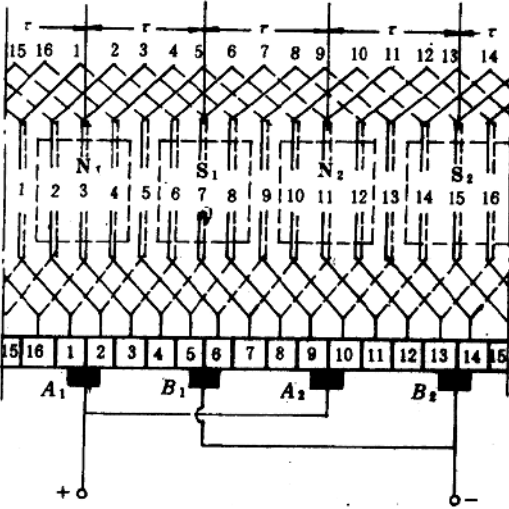


图 1-24 单叠绕组展开图($2p=4, S=K=16$)

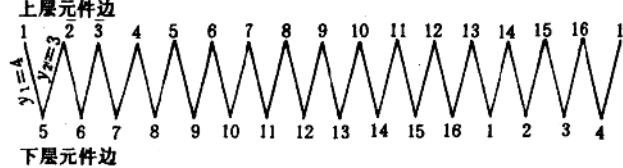


图 1-25 单叠绕组的元件联接次序

由图 1-26 可知,从电刷两端看,电枢绕组由几条并联支路构成。被电刷短路的元件不参加构成支路。对照图 1-24 可以看出,磁极 N_1 下的元件 2、3、4,磁极 S_1 下的元件 6、7、8,磁极 N_2 下的元件 10、11、12,磁极 S_2 下的元件 14、15、16 分别各构成一条支路,也就是说,同一磁极下的元件构成一条支路。因此,单叠绕组的并联支路数等于磁极数,则并联支路对数 a 等于磁极对数 p ,即