

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS



# 电力拖动基础

DIANLI TUODONG JICHU

李浚源 秦忆 周永鹏

华中理工大学出版社

TM921

L32

# 电力拖动基础

李浚源 秦 忆 周永鹏

华中理工大学出版社

# 第一章 直流电动机原理

直流电机是一种实现直流电功率与机械功率之间相互转换的电磁机械，包括直流电动机和直流发电机两类。用于将直流电功率转换为机械功率的直流电机，称为直流电动机；反之，用于将机械功率转换为直流电功率的直流电机，称为直流发电机。随着现代电力电子技术的发展和电力变流技术的进步，直流发电机的应用领域已经很小，但由于直流电动机在控制性能方面的优势，在本世纪 70 年代以前的很长一段时期内，一些控制要求较高的工作机械如数控机床，轧钢机械，高级造纸机等，几乎无一例外地均采用直流电动机作为拖动电动机，这种情况近年来虽因交流电动机控制技术的巨大进步已有很程度的改变，但迄今为止，直流电动机在近代工业中的地位仍然十分重要。

本章介绍直流电动机的工作原理、结构特征和运行特性。

## § 1-1 直流电动机的基本工作原理、基本结构和额定数据

### 一、直流电动机的基本原理

物理学曾给出了两个重要公式：

$$e = Blv \quad (1-1)$$

$$F = Bli \quad (1-2)$$

式(1-1)的含义是：有效长度为  $l$  的导体以线速度  $v$  在磁通密度为  $B$  的磁场中运动时，导体内将产生感应电动势  $e$ ，若  $B$ 、 $l$ 、 $v$  三者空间相互垂直，则  $e$  的大小等于三者的乘积，方向由右手定则确定。此式可视为以磁场  $B$  为媒介实现机械量  $v$  到电量  $e$  之间转换关系的数学描述，是发电机工作的基础，电工理论中称之为发电机原理。式(1-2)的含义是：将有效长度为  $l$  并载有电流  $i$  的导体置于磁通密度为  $B$  的磁场中，导体会受到电磁力  $F$  的作用，若  $B$  与  $l$  相互垂直，则  $F$  的大小等于三者的乘积，方向由左手定则确定，此式可视为以磁场  $B$  为媒介实现电量  $i$  到机械量  $F$  之间转换关系的数学描述，是电动机工作的基础，电工理论中称之为电动机原理。

根据上述原理设计的一台直流电机物理模型如图 1-1 所示。图中，N 和 S 是一对安装在固定支架上的磁极，称为主磁极。主磁极与联接它们的磁轭一道构成电机的固定部分，称为定子。N、S 极之间装有一带转轴的圆柱铁心，转轴上装有两相互绝缘的铜片，称为换向片，圆柱铁心上装有一定匝数的线圈  $abcd$ ，线圈的两出线端分别联接在两换向片上。圆柱形铁心、线圈和换向片的整体构成电机的旋转部分，称为转子或电枢，线圈  $abcd$  称为电枢绕组元件，简称绕组元件。换向片与固定在定子上的两只电刷 A 和 B 以滑动接触方式相联，将旋转的绕组元件和固定的外部电路可靠地联接在一起。主磁极与圆柱形铁心之间

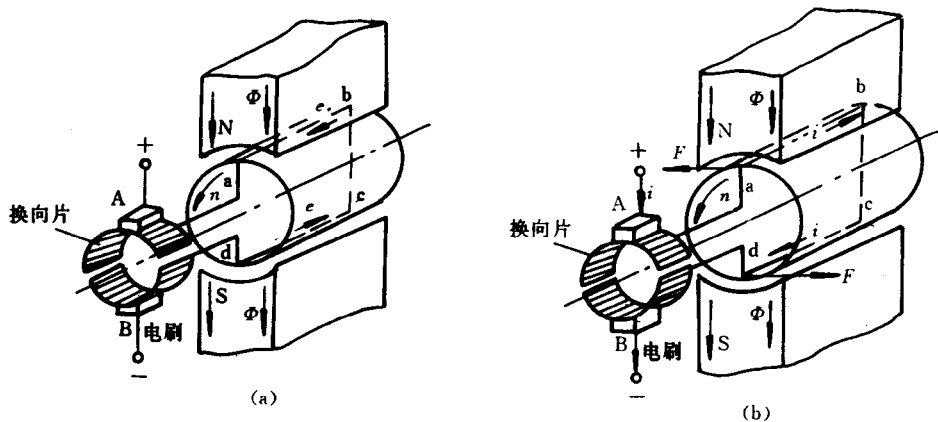


图 1-1 直流电机的物理模型

(a) 发电机; (b) 电动机

的空气隙称为气隙。

若这台模型电机的电枢由一台原动机拖动恒速旋转，令元件边  $ab$  和  $cd$  交替地在  $N$ 、 $S$  极下运动，则由式(1-1)可知，元件边  $ab$  和  $cd$  中都将感应产生一定幅值和频率的交流电动势  $e$ ，但由于电刷和换向片的作用，两电刷间的输出电压为直流电压。在图 1-1(a)所示的电枢转向下，电刷  $A$  上的电压极性恒为正，电刷  $B$  上的电压极性恒为负。若在两电刷间联接一电负载，如一定阻值的电阻，则电机将有一定的直流电功率输出，从而实现了机械功率到电功率之间的转换，此时模型电机作直流发电机运行。

同为这台模型电机，若将其两电刷端  $A$  和  $B$  接入直流电源，令直流电流经电刷和换向片进入绕组元件，则由式(1-2)可知，此时每个元件边都将受到电磁力  $F$  的作用，在图 1-1(b)所示的电源极性下， $F$  产生的电磁转矩  $T$  将推动电枢沿逆时针方向旋转，此时元件边虽交替轮换经过每一磁极下，但由于电刷和换向片的作用，每个磁极下的元件边中电流方向固定不变，因而  $F$  和  $T$  的作用方向亦不变，可以推动着电枢以一定转速持续运转。如果电机的转轴上带有机机械负载，则轴上将有一定的机械功率输出，从而实现了电功率到机械功率之间的转换，此时的模型电机作直流电动机运行。

可见，直流发电机和直流电动机结构上无本质区别，电机实现机电能量转换的过程是可逆的。同一台直流电机，既可作直流发电机运行，也可作直流电动机运行，关键在于输入功率的性质。

进一步考察上述工作过程还可看出，当电机投入运行后，发电机原理和电动机原理总是同时出现的。当直流发电机向外部电路输出电功率时，处于主磁极下的绕组元件边必然变为载流导体并产生电磁转矩，其作用方向与发电机电枢的旋转方向相反，发电机中称为反转矩。正是由于反转矩对原动机拖动转矩的平衡作用，发电机转速才得以稳定在一定数值上，机电能量转换过程方能正常运行。同样，当电动机从轴上输出机械功率时，绕组元件边在主磁极下运动必然产生感应电动势，其作用方向与元件边中的电流方向相反，电动机中称之为反电动势。正是由于反电动势对外部电源电压的平衡作用，才得以将绕组元件中的电流限制在一定的数值上，从而也限制了电动机电磁转矩，使其与外部负载转矩保持平衡状态，机电能量转换过程才能正常进行。直流电机中发电机原理和电动机原理的这种

不可分离的关系，是电机实现机电能量转换的基础，也是正确理解电机运行中各种机电现象的关键。

## 二、直流电动机的基本结构

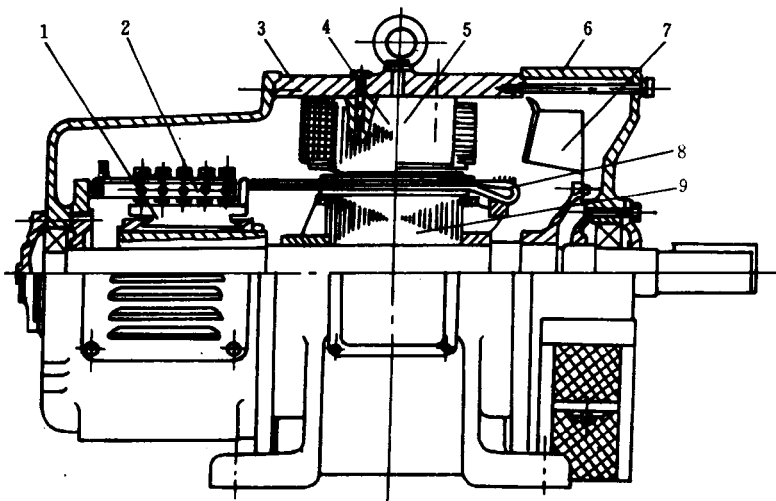


图 1-2 直流电动机结构示意图

和模型电机一样，直流电动机由静止的定子和旋转的转子两部分构成。定子包括基座、主磁极、换向极、电刷装置等部件；转子包括电枢铁心、电枢绕组、换向器以及风扇叶、转轴等部件。下面就其中的主要部件作简要的说明。

### 1. 主磁极

主磁极又称主极。普通直流电动机的主磁极是一块铁心上套着励磁绕组的电磁铁，直流伺服电动机的主磁极则用永久磁铁制成。其作用是建立作为机电能量转换媒介的主极磁场。

### 2. 电枢绕组

电枢绕组是由绕组元件通过换向片按一定规律联接成的特殊电路，为电动机中最重要的电路部件。

### 3. 电枢铁心

电枢铁心用于安放电枢绕组元件，是电动机磁路的一部分。因它的主极磁场中旋转，为减小磁滞、涡流损耗，故用涂有绝缘漆的硅钢片叠压而成。

### 4. 换向器

换向器由许多相互绝缘的铜质换向片组成，固定在电枢转轴上随电枢一道旋转。在直

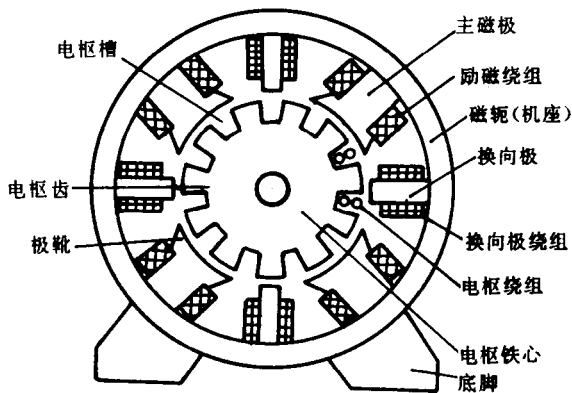


图 1-3 直流电动机剖面示意图

流发电机中，其作用是将绕组元件内的交流感应电动势整流为电刷间的直流电压；在直流电动机中，则是将外部直流电源输入电枢的直流电流逆变为绕组元件中的交流电流，从而保证各主磁极下的绕组元件边中电流方向固定不变，使电动机得以建立固定方向的电磁转矩。

### 5. 换向极

换向极是一块铁心上套着换向极绕组的电磁铁，安装在定子的两个主磁极之间，其作用是改善电枢绕组元件的换向条件。换向极绕组与电枢绕组串联联接。

### 6. 电刷装置

电刷装置包括电刷及其固紧机构。电刷是一种以石墨为主要材料的导电块，通过压力弹簧与换向器保持一定的接触压力，以减小接触电阻，保证电枢绕组电路的通畅。

### 7. 机座

机座是电动机的机械支撑，又是电动机磁路的一部分，通常由铸钢铸成或由钢板焊接而成。

## 三、直流电动机的额定数据

为保证直流电动机处于最合理的运行状态，制造厂家在每台电动机出厂前，都根据国家标准和运行技术要求规定了电动机的额定工作情况，简称额定工况。电动机在额定工况下的运行数据称为额定数据，并标注在每台电动机的铭牌上，也称为铭牌数据，主要包括：

- 额定电压  $U_N$ ，系指额定工况下加在电动机电枢绕组上的工作电压，单位为 V 或 kV。
- 额定电流  $I_N$ ，系指电动机在额定工况下长期运行时的最大电枢电流，单位为 A。
- 额定功率  $P_N$ ，系指额定工况下电动机转轴上允许长期输出的最大机械功率，单位为 kW 或 W，且

$$P_N = U_N I_N \eta_N \quad (1-3)$$

式中， $\eta_N$ ——额定工况下直流电动机的工作效率。

- 额定转速  $n_N$ ，系指额定工况下电动机的运行速度，单位为 r/min。

根据直流电动机的额定功率和额定转速，可计算出额定工况下电动机轴上的输出转矩  $T_N$ ，称为额定转矩

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} \quad (1-4)$$

式中， $P_N$  的单位为 kW； $T_N$  的单位为 N·m； $n_N$  的单位为 r/min。

## § 1-2 直流电动机的结构特征与工作特征

直流电动机的作用决定了它的结构，每部分结构都有它的特殊工作状态和特殊功能，或称为工作特征。由于直流电动机和直流发电机可视为同一台直流电机的两种不同运行状态，因而直流电动机的这些特征均适用于直流发电机。

# 一、主磁极与主极磁场

前面已经指出，直流电动机的主磁极通常是一块套装着励磁绕组的电磁铁，当励磁绕组中有励磁电流通过时，即产生主极磁通势并建立主极磁场。图 1-4 为一台 4 磁极直流电动机主极磁场示意图，图中，带箭头的虚线表示磁感应线的路径和方向，磁感应线的绝大部分从 N 极出发，穿过其极靴下的空气隙进入电枢铁心，到达相邻的 S 极下，并再次穿过空气隙进入相邻的 S 极，经定子磁轭构成闭合回路。若设一个主磁极上励磁绕组的匝数为  $N_f$ ，设绕组中的励磁电流为  $I_f$ ，依磁路欧姆定律，有

$$2F_0 = \Phi_0 R_m \tag{1-5}$$

式中， $F_0$ ——一个主磁极的励磁磁通势，单位为 A；

$\Phi_0$ ——一个主磁极的主磁通量，单位为 Wb；

$R_m$ ——主磁极磁感应线所经路径上的总磁阻，单位为  $\Omega$ 。

式(1-5)给出了  $F_0$  与  $\Phi_0$  间的函数关系，其函数图形称为直流电动机的磁化曲线，如图 1-5 所示，这是一条具有一定饱和特性的曲线。注意，因磁路上有空气隙，电动机的磁化曲线并不是电动机铁心的磁化曲线。

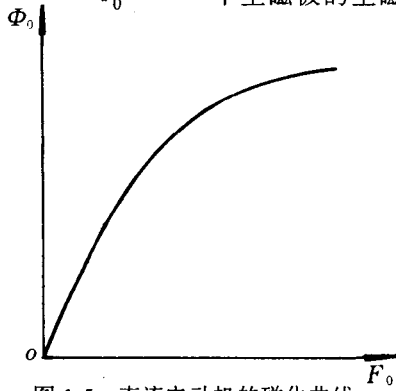


图 1-5 直流电动机的磁化曲线

由于主极磁路结构上的特点，每条磁感应线所经路径的磁阻不尽相同，电枢表面各点的磁通密度也因此不同。若不考虑铁心的磁阻，则  $R_m$  的大小完全取决于磁路上空气隙的长度。在极靴下，空气隙长度最短，故磁阻最小，磁通密度最高；而在极靴以外的空间，气隙长度显著增加，磁阻增大，磁通密度明显下降，并在两极分界处下降为零。图 1-6 所示为一台两磁极电动机主磁通磁感应线的空间分布图。电机学中，称通过电枢表面磁通密度  $B=0$  处的电枢径向轴线为磁场中性线或物理中性线，而称与主磁极轴线正交的电枢径向轴线为几何中性线。图 1-6 表明，仅存在主极磁通势时，物理中性线与几何中性线

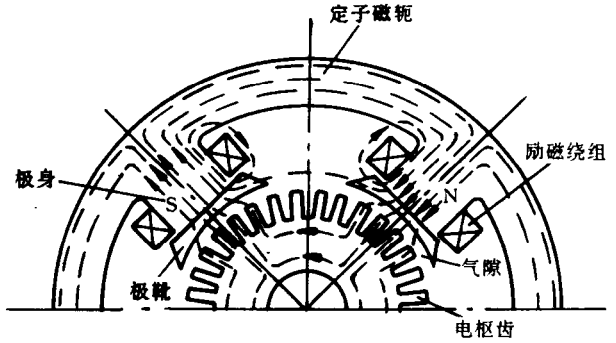


图 1-4 主极磁场示意图

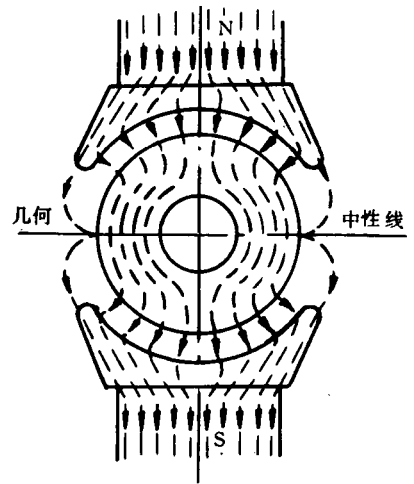


图 1-6 主极磁场分布图

重合。如将电动机沿转轴方向剖开展平，则一对主磁极下磁通密度  $B$  沿电枢表面的空间分布曲线如图 1-7 所示。图中取磁感应线穿出电枢表面处的  $B$  为正。相邻两主磁极轴线间的距离称为极距，记作  $\tau$ ，它也是一个主磁极极下空间的宽度。两个极距相当于  $2\pi$  电弧度。

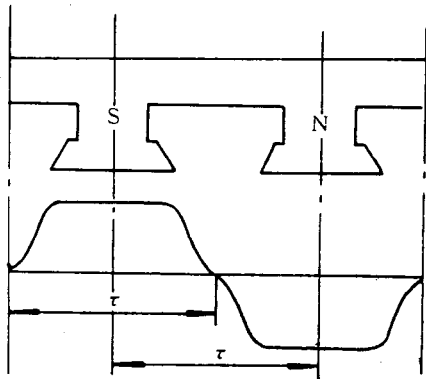


图 1-7 磁通密度的空间分布曲线

## 二、电枢绕组

实际直流电动机的电枢绕组是由一组分布在电枢铁心表面的绕组元件通过换向器按特定规律连接而成的特殊电路。以下介绍电枢绕组的结构特征及两种常用的电枢绕组——单叠绕组和单波绕组。

### (一) 电枢绕组的结构特征

由式(1-2)可知，当图 1-1 所示模型电机的绕组元件中电流为常数时，元件边所受电磁力  $F$  的大小仅决定于元件边所在空间位置上磁通密度  $B$  的高低。当电枢匀速旋转时， $F$  随时间的变化规律应与  $B$  的空间分布规律一致，但由于电刷与换向片的作用， $F$  的作用方向固定，设为正。由  $F$  建立的电磁转矩  $T_1$  如图 1-8(b)所示，为便于比较，图 1-8(a)中绘出了对应的磁通密度分布曲线。从图 1-8(b)中不难看出，此时的  $T_1$  不仅数值很小，且极不稳定，因而无法使用。为提高电磁转矩的大小和减小其脉动，必须增加绕组元件的数目并采用合理的联接方式。下面以具有一对磁极和 6 个绕组元件的直流电动机模型为例说明电枢绕组的结构特征。

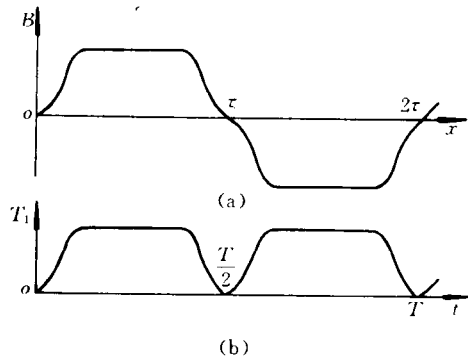


图 1-8  $B=f(x)$ 与  $T_1=f(t)$ 的对应关系

(a)  $B=f(x)$ ; (b)  $T_1=f(t)$

( $T$ ——电磁转矩脉动周期)

图 1-9(a)所示为 6 绕组元件的布置图。电枢铁心表面均匀地开有 6 个槽，绕组元件分两层嵌放在槽中。设上层边为  $i$ ，下层边为  $i'$  ( $i=1, 2, \dots, 6$ )，同一绕组元件的两元件边在电枢表面跨过的距离称为元件的跨距，记作  $y_1$ 。为保证元件边上所受电磁力方向一致，要求同一元件的两元件边任何瞬间都应处于不同极性的主磁极下，即要求  $y_1 \approx \tau$ 。

图 1-9(b)为显示 6 绕组元件联接规律的绕组展开图。根据电动机原理，为保证作用于所有元件边上的电磁力  $F$  方向一致，绕组元件的联接必须使处于同一极性磁极下的所有元件边中的电流方向一致，不同极性磁极下的元件边中的电流方向相反，图 1-9(b)所示即为满足这一要求的一种元件联接方式。图中，上层元件边及其端接部分用实线表示，下层元件边及其端接部分用虚线表示。



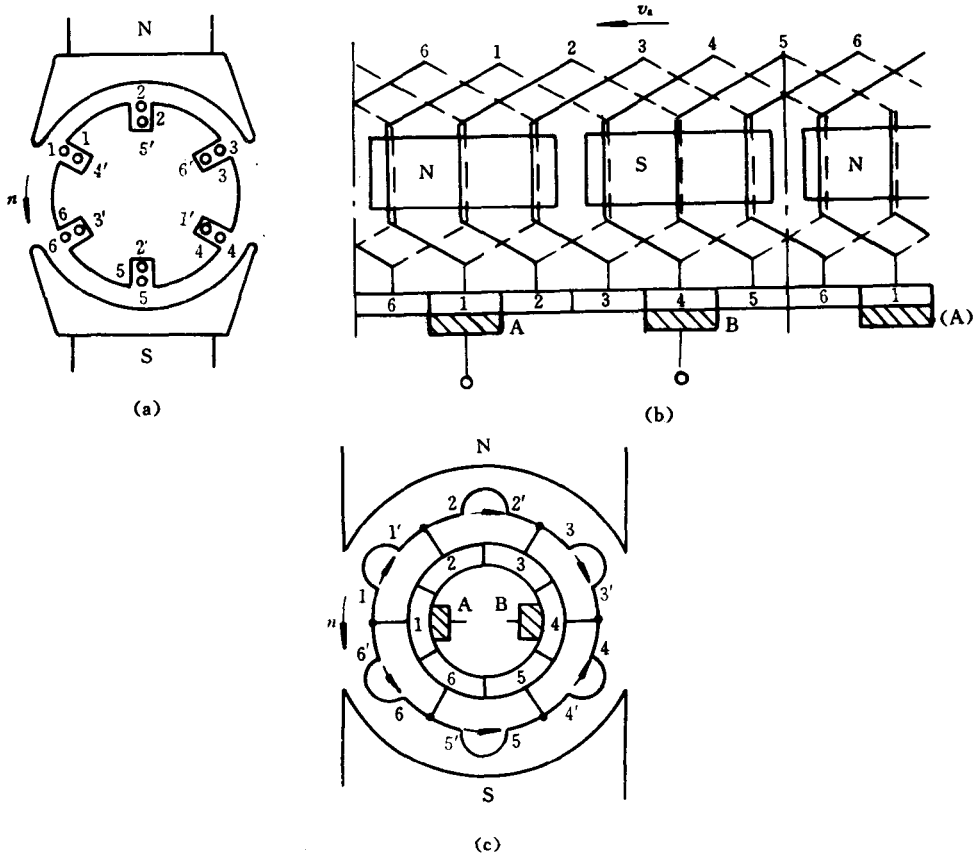


图 1-9 6 个绕组元件构成的电枢绕组图

(a) 绕组元件布置图； (b) 绕组展开图； (c) 绕组元件原理接线图

图 1-9(c)是根据图 1-9(b)绘出的原理接线图。图中，6 个上层边的出线端称为元件的首端，分别标为 1~6，6 个下层边的出线端称为元件的末端，分别标为 1'~6'。由图中可清楚地看出电枢绕组电路的结构特征为：

- 在电枢内部，各绕组元件依次首—末端相联，每一联接点与一换向片相接，因各换向片之间是相互绝缘的，故在取去电刷后，电枢绕组自成一闭合回路；

- 在电刷两端，上述闭合回路被分割成两条并联的支路，为保证同一极性磁极下的元件边中电流方向相同，电刷必须放置在主磁极轴线通过的换向片上，简称电刷放在主磁极轴线上，如图 1-9(b)所示，此时同一支路中绕组元件的上层边均处在同一主磁极下；

- 电路是对称的，每绕组元件的出线端都可作为支路的输出端通过换向片与电刷相联，因此，不论电枢旋转到什么位置，“同一支路中绕组元件的上层边均处在同一主磁极下”的结

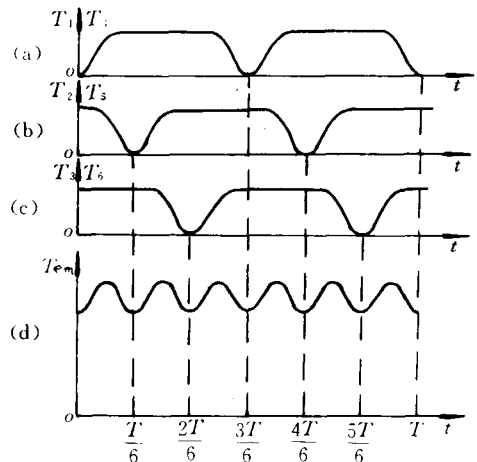


图 1-10 6 个绕组元件各自建立的电磁转矩 (a~c)及其合成电磁转矩(d)

论不变。

图 1-10 为上述 6 绕组元件电动机的电磁转矩曲线。由于各元件在电枢表面依次相距  $\frac{\pi}{3}$  电弧度, 即  $\frac{T}{6}$ , 所以各绕组元件产生的电磁转矩  $T_1 \sim T_6$  过零的时刻也依次相差  $\frac{T}{6}$ , 如图 1-10(a)~(c)所示, 此处  $T$  为一个绕组元件旋转  $2\pi$  电弧度所需的时间。电动机的电磁转矩  $T_{em}$  则等于各绕组元件建立的电磁转矩之和, 如图 1-10(d)所示。与图 1-8(b)相比, 转矩的数值和稳定性均有所增大。若绕组元件数进一步增加, 电磁转矩的数值还可进一步提高, 转矩脉动亦可进一步减小。可见, 为提高电动机的运行性能, 绕组元件数应尽可能多一些, 但增加绕组元件数必须相应增加电枢槽数, 而槽数过多将使电枢齿变窄, 齿的机械强度降低。为克服这一矛盾, 实际电机中常采用一个槽中嵌放  $u$  个上层边和  $u$  个下层边的安装方式, 以保证既增加电枢绕组元件数又不致过分降低电枢齿的强度。一个上层边和一个下层边所占有的位置称为一个虚槽。

## (二) 单叠绕组与单波绕组

单叠绕组和单波绕组是直流电动机中最常用的两种绕组, 它们除具有电枢绕组共有的电路结构特征外, 又因绕组元件串接顺序不同而各有其自身的特点。

### 1. 单叠绕组

单叠绕组因所有绕组元件的端接部分按元件的串联顺序依次搭接在一起而得名, 各绕组元件按其在电枢表面的排列顺序依次串联成一闭合回路。若主磁极对数为  $p$ , 电刷放在主磁极轴线上, 则此闭合回路被分割成  $2p$  条并联支路, 每条支路中绕组元件的上层边恒处于同一主磁极下。图 1-9(b)实际上是一幅主磁极对数  $p=1$ 、电枢槽数  $Z$ =绕组元件数  $S=6$  的单叠绕组展开图。图 1-11 所示则为一套  $p=2, Z=S=16$  的单叠绕组, 图中, 16 个绕组元件按其在电枢表面上的排列顺序依次首末端相联, 自成一闭合回路。如在 4 个主磁极轴线上分别安设 4 只电刷, 并按图 1-11(a)的方式将其联接在一起, 在图中所示瞬间, 上层边分别处于  $N_1$  极下的 2、3、4 号元件,  $S_1$  极下的 6、7、8 号元件,  $N_2$  极下的 10、11、12 号元

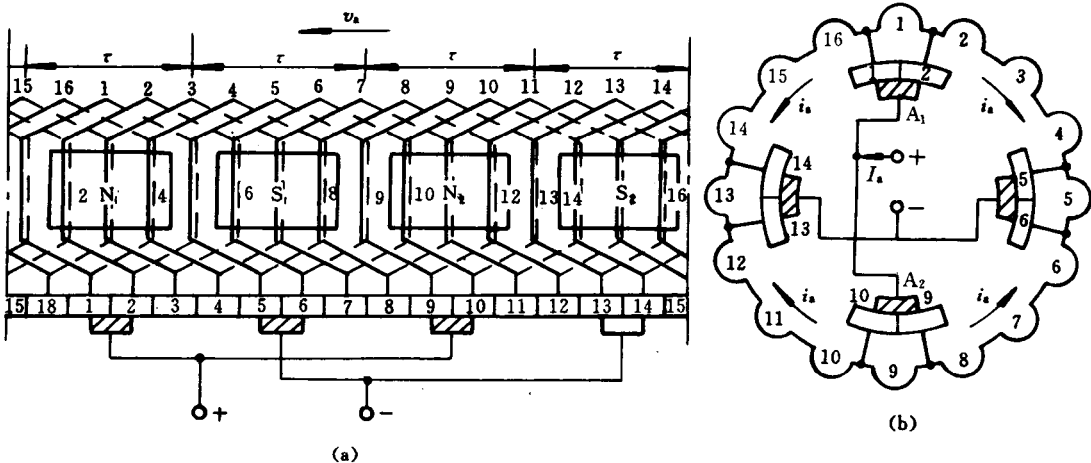


图 1-11  $p=2, Z=S=16$  单叠绕组图

(a) 展开图; (b) 原理电路图

件和  $S_2$  极下的 14、15、16 号元件被分别串联成 4 条支路，而 1、5、9、13 号元件则处于被电刷短接的状态。特别注意被短接的 4 个元件其元件边都处于几何中性线上。

图 1-11(b)表明单叠绕组尚具有如下特征：

● 由于上层边在每个主磁极下的元件被串联成一条支路，故绕组的并联支路对数  $a$  恒等于主磁极对数  $p$ ：

$$a=p \quad (1-6)$$

● 电枢绕组总电流  $I_a$  为：

$$I_a=2ai_a \quad (1-7)$$

式中， $i_a$ ——一条支路中的电流，亦即一个绕组元件中的电流； $I_a$  简称为电枢电流。

## 2. 单波绕组

单波绕组因绕组元件的串联电路在绕组展开图中呈波浪形分布而得名。与单叠绕组不同，单波绕组首-末端相联的两绕组元件不是相邻而是空间相距两个极距，串联电路在沿电枢表面绕行一周后，电路的起点前移或后移一个换向片再继续下一周的绕行，如图 1-12 所示。如此继续，直到将全部绕组元件串联成一闭合回路为止。

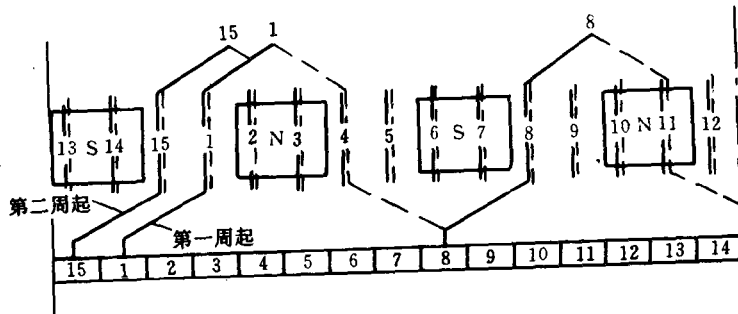


图 1-12 单波绕组联接规律

图 1-13 是一幅  $2p=4$ ， $Z=S=13$  的单波绕组展开图。如果分别在 4 个主磁极的轴线上安放 4 把电刷，则此闭合回路被分割为两条并联支路，其中，所有上层边处于 N 及 S 极下的元件分别处于两条支路中，被电刷短接的元件其元件边亦均处于几何中性线上。图 1-14 是该单波绕组的原理电路图，它清楚地显示出单波绕组尚具有如下特征：

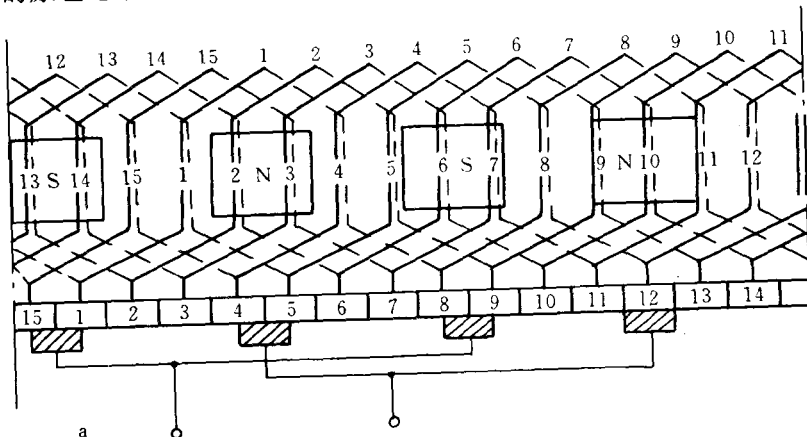


图 1-13  $2p=4$ ， $Z=S=15$  单波绕组展开图

- 并联支路只有两条而与主磁极对数无关，即

$$a=1 \quad (1-8)$$

- 相应地，电枢电流  $I_a$  与支路电流  $i_a$  的关系为

$$I_a = 2i_a \quad (1-9)$$

### 三、电枢反应

当电枢电流为零时，直流电动机内仅存在主极磁通势  $F_0$  建立的主极磁场，当电枢绕组中有电流通过时，电动机内出现由电枢电流建立的电枢磁通势  $F_a$ ， $F_a$  对电动机内磁场的影响，称为电枢反应。

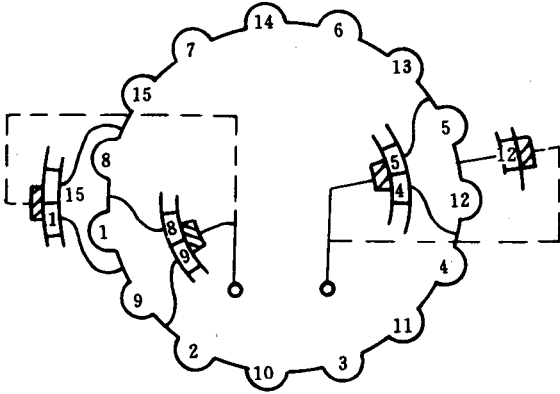


图 1-14 单波绕组原理电路图

应。

为说明电枢反应产生的后果，首先需明确  $F_a$  的性质。从关于电枢绕组的讨论中可以看出，电枢绕组的结构特征保证了任何瞬间每个主磁极下的元件边中电流方向固定不变。因此，虽然电枢是旋转的，但各电枢导体所载电流在电枢表面的分布则是静止的，电机学中称这种形似静止实则旋转的载流导体为伪静止导体。当电刷放在主磁极轴线上时，电枢表面载流导体中电流的分布如图 1-15 所示。由此可知  $F_a$  具有如下性质：

- 它在空间是静止的；
- 空间位置与  $F_0$  正交。

图 1-15 中将电刷画在几何中性线上，是因为当电刷放在主磁极轴线上时，该处正是与电刷直接相联的绕组元件边所在的位置，同时也直观地显示出电刷位置确定了电枢表面电流分布的分界线。

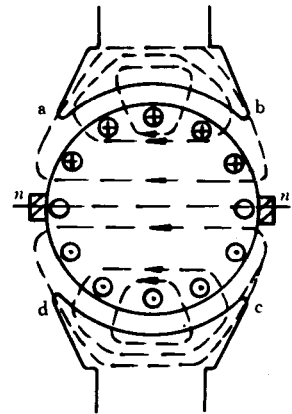


图 1-15 电枢磁场分布图

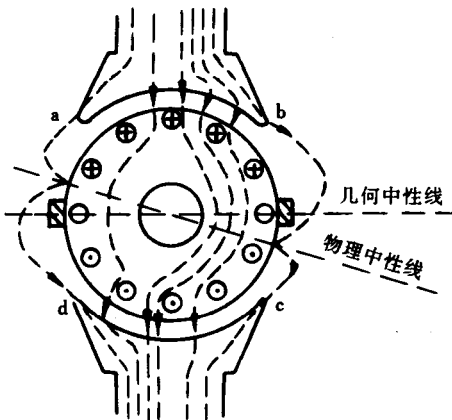


图 1-16 电动机带负载时的磁场分布图

明确了  $F_a$  的性质，就不难看出它所产生的影响。由于  $F_a$  的存在，电动机内的磁场将由  $F_a$  与  $F_0$  的合成磁通势建立，磁场分布如图 1-16 所示。与图 1-6 对比后可看出，电枢反应产生的直接后果是使本来对称于主磁极轴线的磁场产生了扭曲，磁场中性线产生偏移而不再与几何中性线重合。同时，磁场的扭曲使图 1-16 中主磁极极尖 b、d 附近的磁通密度增加，而使极尖 a、c 附近的磁通密度下降，但铁心的饱和特性将使局部的磁通量增加值小于另一局部磁通量的减小值，致使每极总磁通量随电枢电流的增加而下降，这表明，电枢反应具有去磁作用，并使每极磁通量的大小与电枢电流相关。这种

相关关系将造成电动机机械特性曲线上翘，导致电力拖动系统运行不稳定，也增加了电动机电磁转矩控制上的困难。

如果电刷因某种意外的原因偏离了主磁极轴线，则每极磁通量受电枢电流的影响将更严重。以电刷逆电动机旋转方向移动 $\beta$ 角为例，此时电枢表面电流的分布情况如图 1-17(a)所示。若设图 1-17(b)所示部分载流导体产生的交轴电枢磁通势为  $F_{aq}$ ，设图 1-17(c)所示部分载流导体产生的直轴电枢磁通势为  $F_{ad}$ ，则由于  $F_{ad}$  直接作用于  $F_0$  的方向上，其去磁作用极大地增加了每极磁通量与电枢电流的相关程度，从而进一步增加了电动机电磁转矩控制的困难。

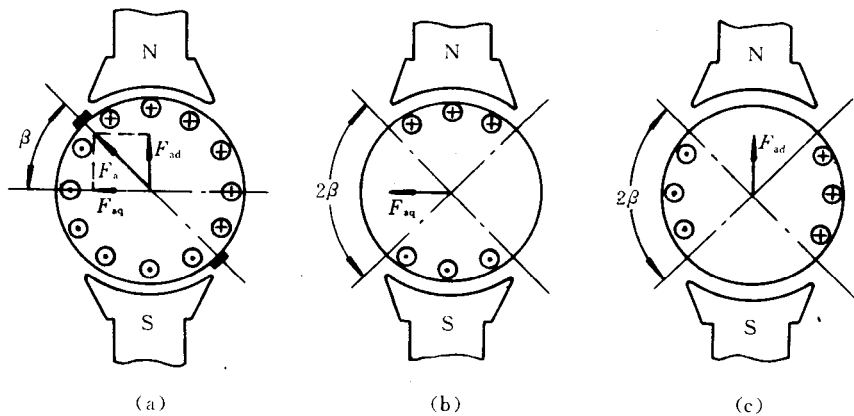


图 1-17 电刷偏离主磁极轴线时的电枢磁通势

#### 四、换向

由电枢绕组的结构特征可知，当电枢铁心带动绕组元件旋转时，各并联支路的绕组元件依次轮换，每一瞬间都有若干绕组元件从一条支路进入另一条支路，其中的电流方向也相应地发生了改变。这种绕组元件中电流改变方向的过程，在直流电动机中称为换向。

换向是直流电动机运行中最薄弱的环节。换向不良的后果是电刷下出现有害的火花。火花超过规定的限度就会损坏电刷和换向器。换向还决定着直流电动机的电流过载能力。保持良好的换向，乃是保证直流电动机正常运行的必要条件之一。

直流电动机的换向过程相当复杂，以下只对其中有关的电磁现象作简要介绍。

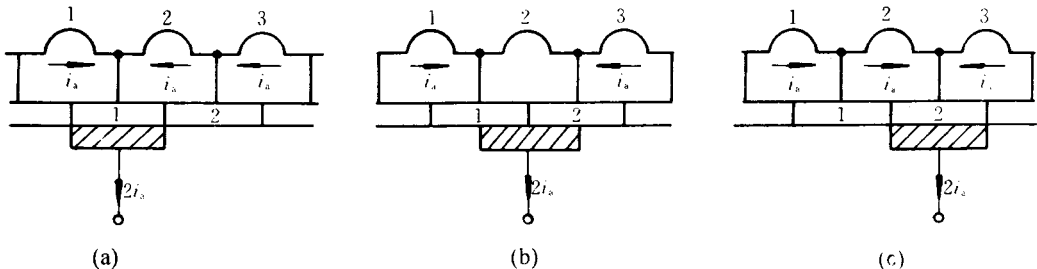


图 1-18 绕组元件的换向过程

(a) 换向前；(b) 换向中；(c) 换向后

图 1-18 是电枢绕组的一个局部电路，它描述了元件 2 由图中右侧支路经电刷进入左侧支路的换向过程。由图中看出，换向元件经过电刷时被电刷短接，并在进入左侧支路后恢复正常，而换向片 1、2 和电刷则可视作短接开关的两个触点。前面已经指出，被电刷短接的换向元件其两元件边均位于几何中性线上，若不考虑电枢反应的作用，则此处磁通密度为零，换向元件中的速度电动势亦为零，因而换向元件的短接与断开均无短路电流条件下进行，电刷下不会出现电磁性火花。但由于电枢反应使磁场扭曲，几何中性线上的磁通密度实际上不为零，因而换向元件中不可避免地会出现速度电动势  $e_s$ 。同时，换向过程中电流的变化也将在换向元件内感应产生自感电动势  $e_L$  和互感电动势  $e_M$ ，因而破坏了换向元件在无短路电流时经过电刷的条件，造成电刷下出现电磁性火花。可见， $e_s$ 、 $e_L$  和  $e_M$  是产生电磁性火花的根源，而这些电动势的大小均与电枢电流的大小有关。针对这一特点，目前改善换向的最常用方法是在电动机定子上加装换向极，

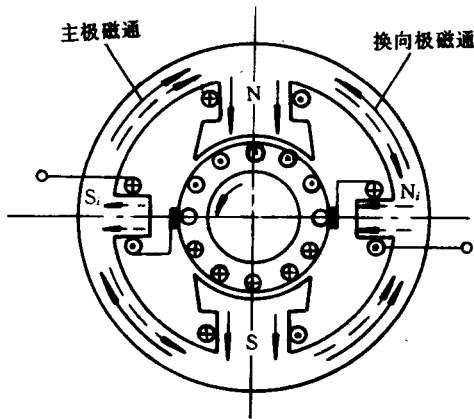


图 1-19 换向极安装示意图

如图 1-19 所示。换向极励磁绕组与电枢绕组串联以利用电枢电流励磁，所产生的磁通势大小与电枢电流成正比，方向与电枢磁通势相反。换向极磁通势在抵消电枢磁通势之后应有剩余，用于在换向元件的元件边中建立一定大小的速度电动势以抵消  $e_L$  和  $e_M$  的影响，最终达到使换向元件中合成电动势为零的目的，从而实现无火花换向。目前功率在 1kW 以上的直流电动机均装有换向极。

换向产生的火花还直接限制了直流电动机的过载能力。当电动机承受冲击性负载时，电枢电流允许短时间超出其额定值，即过载运行。此时  $e_s$ 、 $e_L$  和  $e_M$  亦随之增大，这些电动势之和有可能将与换向元件相联的两换向片间的空气隙击穿，产生所谓电位差火花。而在变化率极高的冲击性电枢电流作用下，换向极磁通可能因铁心涡流的阻尼作用跟不上电枢电流的变化，使换向极暂时失去作用，导致电刷下出现很强的电磁性火花。在最不利的情况下，上述两种火花汇合在一起，形成一条环绕整个换向器的电弧，称为环火，这是直流电动机运行中最严重的故障。为绝对避免环火的出现，必须对直流电动机短时冲击电流的最大值  $I_{am}$  作出严格的规定，并以  $I_{am}$  与额定电流  $I_N$  之比的方式给出，称为直流电动机的电流过载倍数，记作

$$\lambda_i = \frac{I_{am}}{I_N} \quad (1-10)$$

不同型式直流电动机的  $\lambda_i$  值可从电动机产品目录中查到。

## 五、励磁方式

励磁方式系指直流电动机主磁极励磁绕组的供电方式，它对直流电动机的运行特性影响极大。按励磁绕组与电枢绕组间的不同联接方式，直流电动机的励磁方式分为他励式、串励式和复励式三类，如图 1-20 所示。

他励式直流电动机的主磁极励磁绕组由独立的直流电源供电，如图 1-20(a)所示。当励磁绕组和电枢绕组是两条独立的并联支路时，励磁绕组与电枢绕组也可由同一电源供电，如图 1-20(b)所示。两种供电情况下励磁电流的大小均与电枢电流  $I_a$  无关。这类励磁方式下的励磁绕组称为他励绕组。

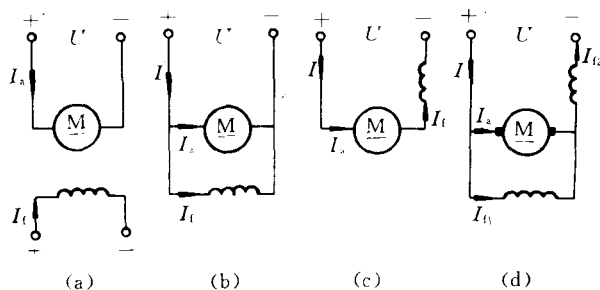


图 1-20 直流电动机的励磁方式

(a)、(b) 他励式；(c) 串励式；(d) 复励式

串励式直流电动机的主磁极励磁绕组与电枢绕组串联，励磁电流就是电枢电流，这类励磁方式下的励磁绕组称为串励绕组，如图 1-20(c)所示。

复励式直流电动机的主磁极励磁绕组包括他励绕组与串励绕组两部分。若两部分励磁绕组建立的磁通势是相加的，则这种电动机称为积复励式直流电动机；若磁通势是相减的，则称为差复励式直流电动机。

### § 1-3 电磁转矩与电枢电动势

电机在实现机电能量转换的过程中，电磁转矩和电枢电动势起着重要作用，以下给出它们的解析表达式。

#### 一、电磁转矩

因电动机内磁场分布的不均匀性，处在电枢表面各处的元件边所受电磁力的大小各不相同，今设电枢表面某处的磁通密度为  $B_x$ ，并考虑到磁感应线总是垂直进入和穿出电枢铁心表面，即电枢表面每一处的  $B_x$  恒与此处的电枢导体垂直，故位于此处的元件边所受电磁力的大小应为

$$F_x = B_x l i_a \quad (1-11)$$

由  $F_x$  建立的电磁转矩则为

$$T_x = F_x \frac{D_a}{2} = (B_x l i_a) \frac{D_a}{2} \quad (1-12)$$

式中， $D_a$ ——电枢平均直径。

假定导体均匀分布于电枢表面，其总数为  $N$ ，则沿电枢表面单位弧长内的导体总数应为  $\frac{N}{\pi D_a}$ ，位于区段  $dx$  内的导体所产生的电磁转矩应为

$$dT = (B_x l i_a \frac{D_a}{2}) \frac{N}{\pi D_a} dx \quad (1-13)$$

对式(1-13)在一个极距  $\tau$  内积分, 可得一个主磁极下的全部导体所建立的电磁转矩为

$$T_\tau = \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} dT = \frac{N i_a}{2\pi} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} B_x l dx \quad (1-14)$$

注意式(1-14)等号右边的  $\int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} B_x l dx$  为一个主磁极下的总磁通量  $\Phi$ , 又因  $I_a = 2a i_a$ , 故式(1-14)

可改写为

$$T_\tau = \frac{N}{4\pi a} \Phi I_a \quad (1-15)$$

若电动机有  $p$  对极, 则其电磁转矩  $T_{em}$  应为

$$T_{em} = 2p T_\tau = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \quad (1-16)$$

设

$$K_T = \frac{pN}{2\pi a} \quad (1-17)$$

则

$$T_{em} = K_T \Phi I_a \quad (1-18)$$

此式即为电磁转矩的解析表达式。式中,  $\Phi$  单位为 Wb,  $I_a$  单位为 A,  $T_{em}$  单位为 N·m。

对于他励式直流电动机, 因  $\Phi = \text{常数}$ , 故式(1-18)又可表为

$$T_{em} = C_T I_a \quad (1-19)$$

式中,  $C_T = K_T \Phi$  称为他励式直流电动机的转矩系数。

## 二、电枢电动势

电枢电动势系指电动机运行中电枢绕组两输出端上的总感应电动势, 它是一条并联支路中各串联绕组元件内感应电动势的总和。

因电动机内磁场分布的不均匀性, 同一瞬间各绕组元件边内感应电动势的大小亦各不相同。但当任一元件边旋转过一个极距  $\tau$  的距离时, 元件所交链磁通的变化量  $\Delta\Phi$  均等于  $2\Phi$ , 故各元件内感应电动势的平均值应相等。设电枢转速为  $n$ , 则以电弧度计算的电枢角速度  $\omega = p \frac{2\pi n}{60}$ , 电枢转过一个极距所需的时间  $\Delta t = \frac{\pi}{\omega} = \frac{60}{2pn}$ 。如每个元件的匝数为  $N_s$ ,

则依电磁感应定律, 一个元件边转过一个极距  $\tau$  后元件内感应电动势的平均值应为

$$E_{av} = N_s \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = N_s \frac{4\Phi}{60} pn \quad (1-20)$$

若设电枢绕组的总绕组元件数为  $S$ , 则每条并联支路中的串联元件数为  $\frac{S}{2a}$ , 因而电枢电动势  $E_a$  应为

$$E_a = \frac{S}{2a} N_s \frac{4\Phi}{60} pn \quad (1-21)$$



注意式中  $2N_s S = N$  为分布在电枢表面的总导体数，故式(1-21)又可写成

$$E_a = \frac{pN}{60a} \Phi \quad (1-22)$$

设

$$K_e = \frac{pN}{60a} \quad (1-23)$$

最后得

$$E_a = K_e \Phi n \quad (1-24)$$

此式即为电枢电动势的解析表达式。由于  $E_a$  在电动机中的方向与支路电流方向相反，故亦称电枢反电动势。式中， $\Phi$  单位为 Wb， $n$  单位为 r/min， $E_a$  单位为 V。

对于他励式直流电动机，因  $\Phi = \text{常数}$ ，故式(1-24)亦可表为

$$E_a = C_e n \quad (1-25)$$

式中， $C_e = K_e \Phi$ ——电动机的电动势系数。

由式(1-17)和式(1-23)知

$$\frac{K_T}{K_e} = \frac{C_T}{C_e} = \frac{60}{2\pi} = 9.55 \quad (1-26)$$

## § 1-4 电动势平衡方程与功率平衡方程

以下用图 1-21 所示电路代表一台他励式直流电动机。图中的圆代表电动机电枢， $f$  代表励磁电路， $U$  为电动机供电电源电压，也是励磁绕组的电源电压， $I_a$  为电枢电流， $E_a$  为电枢反电动势， $I_f$  为励磁电流， $R_a$  为电枢绕组电路的电阻。各电量的正方向与电动机正常运行状态下的实际方向一致，如图 1-21 所示。这种正方向的确定方法称为电动机惯例，据此可写出稳态下电枢电路的电动势平衡方程式为

$$U = E_a + I_a R_a \quad (1-27)$$

对式(1-27)等号两边同乘以  $I_a$ ，得直流电动机运行中的功率平衡方程式为

$$UI_a = E_a I_a + I_a^2 R_a \quad (1-28)$$

在图 1-21 所示正方向下， $UI_a$  为正，代表外部直流电源向电动机输送电功率  $P_1$ ； $E_a I_a$  也为正，代表  $E_a$  从电源方面吸收电功率，称为电磁功率  $P_{em}$ ； $I_a^2 R_a$  为电枢绕组内的铜耗  $P_{Cu}$ 。其中，电磁功率  $E_a I_a$  通过电动机全部转换为机械功率：

$$P_{em} = E_a I_a = C_e n \frac{T_{em}}{C_T} = \frac{T_{em} n}{9.55} = T_{em} \Omega \quad (1-29)$$

式中， $\Omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{n}{9.55}$ ——电枢的机械角速度。

式(1-29)等号右边所代表的正是电动机轴上的全部机械功率  $P_M$ 。由于电动机运行中即使不带任何机械负载，其自身也要消耗一部分机械功率，包括电枢铁心内的磁滞涡流损耗

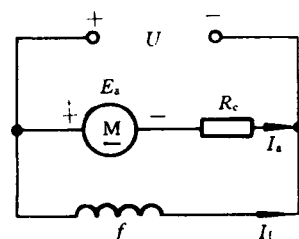


图 1-21 他励式直流电动机的原理电路图