

## 第一章 直流电机的结构及运行

直流电机是应用电磁感应原理进行能量转换（将电能和机械能相互转换）的旋转电机之一。与交流电机相比较，直流电机结构复杂、运行维护困难、成本高。但直流电动机具有宽广的调速范围，较强的过载能力和较大的起动转矩等优点，广泛应用于对起动和调速要求较高的生产机械中，如电力机车、内燃机车、工矿机车、城市电车等的拖动电机。通过本章学习，应达到以下目标：

- （1）掌握直流电机、脉流牵引电机的基本结构和工作原理。
- （2）掌握直流电动机的转矩、电势表达式，熟悉直流电机的基本方程。
- （3）熟悉直流电动机的起动、调速、反转和制动方法。
- （4）了解直流电动机的工作特性和机械特性。
- （5）了解直流电机的换向过程，掌握改善直流电机换向的方法。

### 第一节 直流电机的工作原理

直流电机是直流发电机和直流电动机的总称。直流电机具有可逆性，既可作直流发电机使用，也可作直流电动机使用。作直流发电机使用时，将机械能转换成直流电能输出；作直流电动机使用时，则将直流电能转换成机械能输出。

#### 一、直流电机的模型结构

直流发电机的物理模型如图 1.1 所示。图中 N、S 为固定不动的主磁极，主磁极可以采用永久磁铁，也可以采用电磁铁。在电磁铁的励磁线圈上通以方向不变的直流电流，便形成一定极性的磁极。线圈 abcd 固定在可旋转导磁圆柱体上，线圈连同导磁圆柱体是直流电机可转动部分，称为电机转子（又称电枢）。线圈的首末端 a、d 连接到两个相互绝缘并可以随线圈一同转动的导电片上，该导电片称为换向片。转子线圈与外电路的连接是通过放置在换向片上固定不动的电刷进行的。在定子与转子间有间隙存在，称为空气隙，简称气隙。

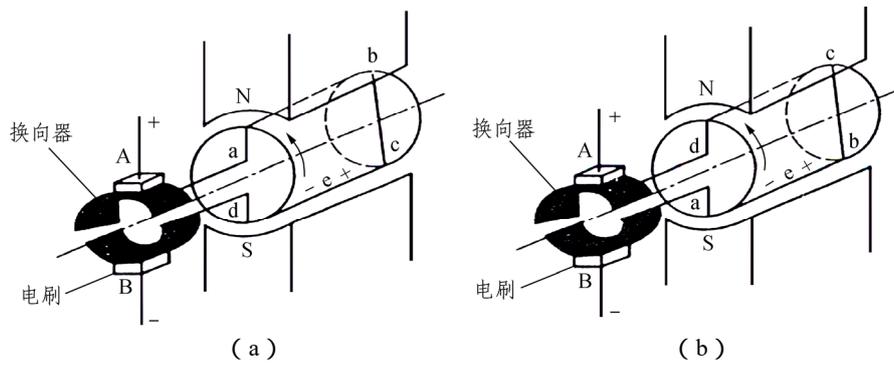


图 1.1 直流发电机模型

## 二、直流发电机的工作原理

在直流发电机的模型中，当原动机拖动转子以一定的转速逆时针旋转时，根据电磁感应定律可知，在线圈  $abcd$  中将产生感应电动势。

导体中感应电动势的方向可用右手定则确定。在逆时针旋转情况下，如图 1.1 (a) 所示导体  $ab$  在  $N$  极下，感应电动势的极性为  $a$  点高电位， $b$  点低电位；导体  $cd$  在  $S$  极下，感应电动势的极性为  $c$  点高电位， $d$  点低电位。此时，电刷  $A$  的极性为正，电刷  $B$  的极性为负。

当线圈旋转  $180^\circ$  后，如图 1.1 (b)，导体  $ab$  在  $S$  极下，导体  $cd$  则在  $N$  极下。此时，导体中的感应电动势方向发生改变，由于原来与电刷  $A$  接触的换向片已经与电刷  $B$  接触，而与电刷  $B$  接触的换向片换到与电刷  $A$  接触，因此电刷  $A$  的极性仍为正，电刷  $B$  的极性仍为负。从图 1.1 中可以看出，和电刷  $A$  接触的导体总是位于  $N$  极下，和电刷  $B$  接触的导体总是位于  $S$  极下，因此电刷  $A$  的极性总为正，而电刷  $B$  的极性总为负，在电刷两端可获得直流电动势。

由以上分析可知，在电枢线圈内部为一交变电势，但电刷两端引出的电势方向始终不变，为一单方向的直流电势。

## 三、直流电动机的工作原理

把直流电源接到电刷  $A$ 、 $B$  上，电刷  $A$  接电源的正极，电刷  $B$  接电源的负极，电枢线圈中将有电流流过，如图 1.2 (a) 所示。

在图 1.2 (a) 中，线圈的  $ab$  边位于  $N$  极下，线圈的  $cd$  边位于  $S$  极下，载流导体在磁场中受到电磁力的作用，其受力方向由左手定则确定。导体  $ab$  受力方向为从右向左，导体  $cd$  受力方向为从左到右。导体所受电磁力对轴产生一转矩，这种由于电磁作用产生的转矩称为电磁转矩，电磁转矩的方向为逆时针。当电磁转矩大于阻力转矩时，线圈按逆时针方向旋转。当电枢旋转到图 1.2 (b) 所示位置时，位于  $N$  极下的导体  $ab$  转到  $S$  极下，导体  $ab$  受力方向为从左向右；而位于  $S$  极下的导体  $cd$  转到  $N$  极下，导体  $cd$  受力方向为从右向左，该转矩的方向仍为逆时针方向，线圈在此转矩作用下继续按逆时针方向旋转。

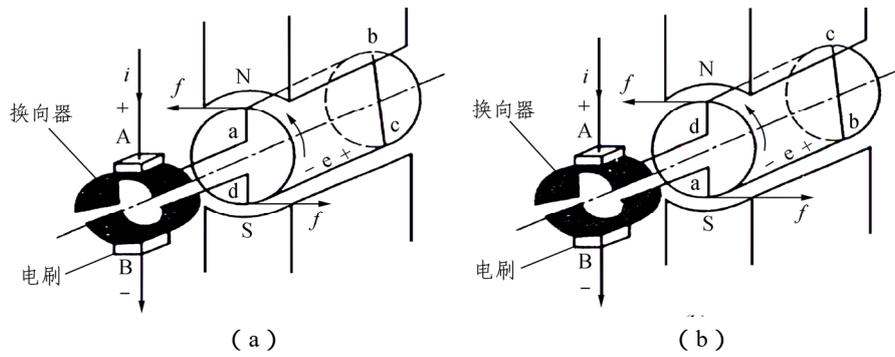


图 1.2 直流电动机的模型

由以上分析可知，在电枢线圈中流通的电流为交变的，但 N 极下的导体受力方向和 S 极下导体受力的方向并未发生变化，电动机在此方向不变的转矩作用下转动。

图 1.1 所示为直流发电机的简单模型，实际直流发电机的电枢根据具体应用需要有多个线圈。线圈分布于电枢铁心表面的不同位置上，并按照一定的规律连接起来，构成电机的电枢绕组。磁极也是根据需要 N、S 极交替放置。

#### 四、电机的可逆原理

任何一台电机既可作发电机运行，也可作电动机运行，这一性质称为电机的可逆原理。直流电机也具有可逆性，当输入机械转矩将机械能转换成电能时，电机作发电机运行；当输入直流电流产生电磁转矩，将电能转换成机械能时，电机作电动机运行。例如电力机车在牵引工况时，牵引电机作电动机运行，产生牵引力；在制动工况时，牵引电机作发电机运行，将机车和列车的动能转换成电能，产生制动力对机车进行电气制动。

## 第二节 直流电机的结构

直流电动机和直流发电机的结构基本相同，都具有旋转部分和静止部分。旋转部分称为转子，静止部分称为定子，在定子和转子之间存在着空气隙。小型直流电机的结构如图 1.3 所示，其剖面结构如图 1.4 所示。

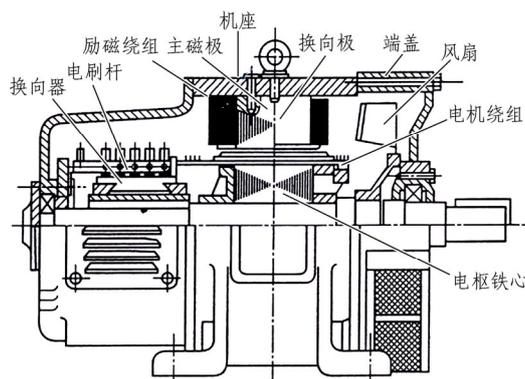


图 1.3 小型直流电机的结构

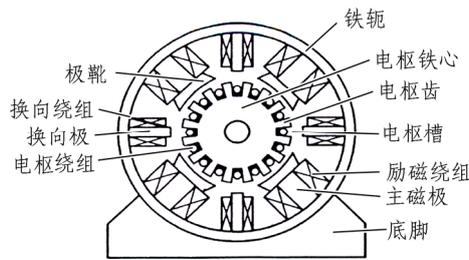


图 1.4 小型直流电机的剖面结构

## 一、定子部分

定子的作用，在电磁方面是产生磁场和构成磁路，在机械方面是整个电机的机械支撑。定子由主磁极、机座、换向极、电刷装置、端盖和轴承等组成。

### 1. 主磁极

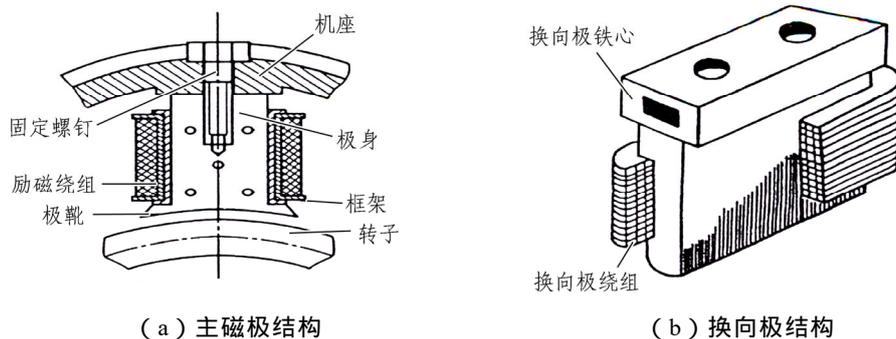
主磁极简称主极，其作用是产生主磁场。主磁极由主磁极铁心和励磁绕组构成，其结构如图 1.5 (a) 所示。为了减小涡流损耗，主磁极铁心采用 1.0~1.5 mm 厚的低碳钢板冲制而成，再用铆钉把冲片铆紧成一个整体。小型电机的励磁绕组用绝缘铜线（或铝线）绕制而成，大中型电机励磁绕组用扁铜线绕制，并进行绝缘处理，然后套在主极铁心外面。整个主磁极用螺钉固定在机座内壁。

### 2. 机座

直流电机的机座有两种形式，一种为整体机座，另一种为叠片机座。整体机座是用导磁效果较好的铸钢材料制成的，该种机座能同时起到导磁和机械支撑作用。叠片机座是用薄钢板冲片叠压成定子铁轭，再把定子铁轭固定在一个专起支撑作用的机座里，这样定子铁轭和机座是分开的，机座只起支撑作用，可用普通钢板制成。

### 3. 换向极

换向极又称为附加极，其结构如图 1.5 (b) 所示，换向极安装在相邻的两个主磁极之间，用螺钉固定在机座上。换向极用来改善直流电机的换向，一般电机容量超过 1 kW 时均应安装换向极。



(a) 主磁极结构

(b) 换向极结构

图 1.5 直流电机主磁极和换向极结构

换向极由换向极铁心和换向极线圈组成。换向极铁心大多采用整块钢加工而成，但在脉流牵引电机中，为了更好地改善电机换向，换向极铁心也采用厚 1 ~ 1.5 mm 厚钢板或硅钢片叠成。换向极线圈采用圆铜线或扁铜线绕制而成，经绝缘处理后套在换向极铁心上，所有的换向极线圈串联后称为换向绕组，换向绕组与电枢绕组串联。换向极数目一般与主极数目相同，但在功率很小的直流电机中，只装主极数一半的换向极或不装换向极。

#### 4. 电刷装置

电刷装置的作用是通过电刷和旋转的换向器表面的滑动接触，把转动的电枢绕组与外电路连接起来。电刷装置一般由电刷、刷握、刷杆、刷杆座和汇流条组成，电刷结构如图 1.6 所示。

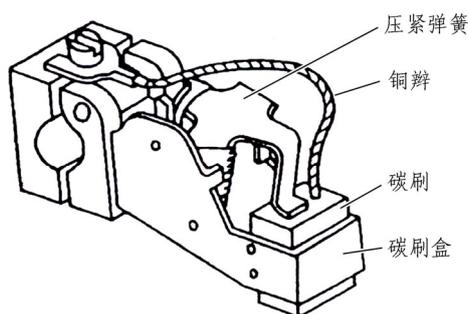


图 1.6 电刷结构

电刷是用石墨制成的导电块，放在刷握内，用弹簧以一定的压力将它压在换向器的表面。刷握用螺钉夹紧在刷杆上，刷杆装在一个可以转动的刷杆座上，成为一个整体部件。刷杆与刷杆座之间应绝缘，以避免正、负电刷短路。

#### 5. 端盖

电机中的端盖主要起支撑作用。端盖固定在机座上，其上放置轴承支撑直流电机的转轴，使直流电机能够旋转。

## 二、转子部分

转子又称电枢，是电机的转动部分，其作用是产生感应电动势和电磁转矩，从而实现能量的转换，转子由电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴、轴承和风扇组成。

#### 1. 电枢铁心

电枢铁心的作用是通过磁通和嵌放电枢绕组。图 1.7 所示为小型直流电机的电枢冲片形状和电枢铁心装配图。在电枢铁心冲片上冲有放置电枢绕组的电枢槽、轴孔和通风孔。

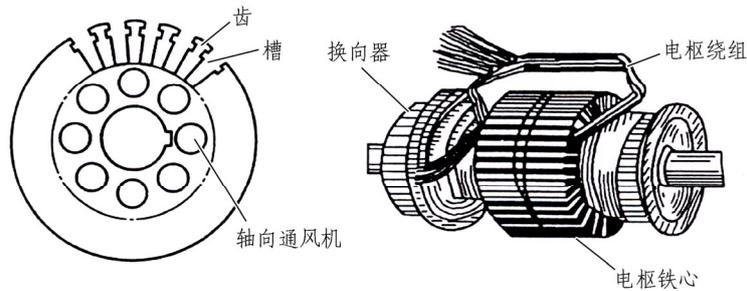


图 1.7 电枢冲片和电枢铁心装配图

为减小电机旋转时，铁心中的磁通方向发生变化引起的磁滞损耗和涡流损耗，电枢铁心用 0.35 mm 或 0.5 mm 厚的硅钢片叠成，叠片两面涂有绝缘漆。铁心叠片沿轴向叠装，中小型电机的电枢铁心通常直接压装在轴上；在大型电机中，由于转子直径较大，电枢铁心压装在套于轴上的转子支架上。

## 2. 电枢绕组

电枢绕组的作用是产生感应电动势和通过电流产生电磁转矩，实现机电能量转换。它是直流电机的主要电路部分。

电机的每一个线圈称为一个元件，多个元件有规律地连接起来形成电枢绕组。电枢绕组放置在电枢铁心的槽内，其直线部分在电机运转时产生感应电动势，称为元件的有效部分；把有效部分连接起来的部分称为端接部分，端接部分仅起连接作用，在电机运行过程中不产生感应电动势。

电枢绕组用圆铜线或矩形截面铜导线制成，铜线的截面面积决定于线圈中通过电流的大小。为了防止线圈在离心力作用下甩出，在槽口处用槽楔将线圈边封在槽内，线圈伸出槽外的端接部分，用热固性无纬玻璃丝带或非磁性钢丝扎紧。槽楔可用竹片或酚醛玻璃布板制成。

电枢绕组根据连接规律的不同，可分为单叠绕组、单波绕组、复叠绕组、复波绕组及混合绕组等几种形式。下面介绍绕组的基本知识。

### 1) 元 件

线圈是构成绕组的基本单元，又称绕组元件（线圈单元），元件分为单匝和多匝两种。每一个元件不管是单匝还是多匝，均引出两根线与换向片相连，其中一根称为首端，另一根称为末端。

直流电机的电枢绕组放置在电枢铁心上的槽内，通常采用双层绕组，沿槽深方向每槽有两个元件边，为了避免各线圈互相交叠，每一元件有一个有效边放在槽的上层，称为上层边；另一有效边放在另一槽的下层，称为下层边。与上层边相连的出线端称为始端，与下层边相连的出线端称为末端。图 1.8 所示为元件在槽内的放置情况。

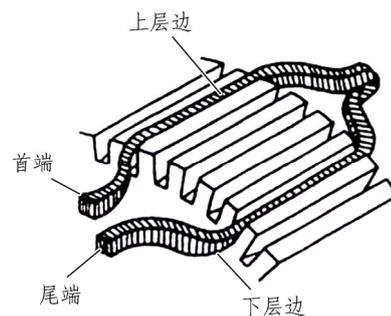


图 1.8 线圈元件边在槽内的放置情况

2) 极 距

相邻两个主磁极轴线沿电枢表面之间的距离称为极距，用  $\tau$  表示。可用下式计算

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p} \tag{1.1}$$

式中  $D_a$  ——电枢外径；  
 $p$  ——主磁极对数。

3) 叠绕组和波绕组

叠绕组是指串联的两个元件总是后一个元件端接部分紧贴在前一个元件端接部分，整个绕组成折叠式进行。波绕组是指把相隔约为一对极距的同极性磁场下的相应元件串联起来，像波浪似的前进。直流电机的绕组如图 1.9 所示。

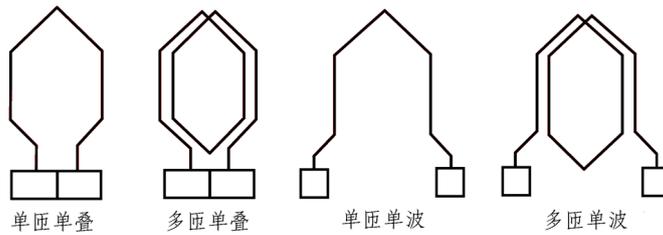
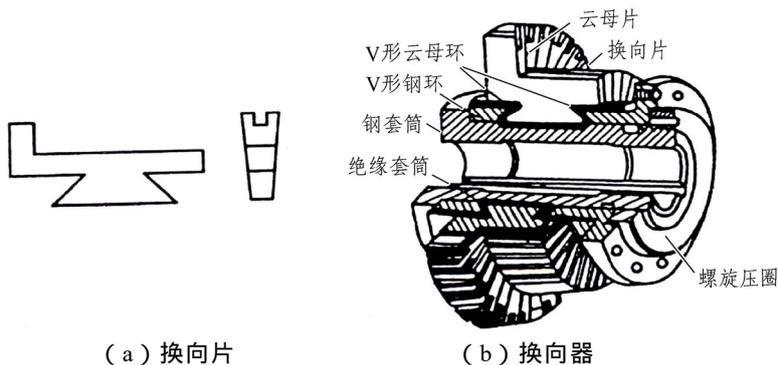


图 1.9 直流电机的绕组

在直流电机的极对数、元件数以及导体截面积相同的情况下，单叠绕组并联支路对数等于主磁极对数，并联支路数多，每条支路的元件数少，支路感应电动势较低，允许流过的电枢电流较大，适用于较低电压、较大电流的直流电机。交-直型电力机车采用单叠绕组，而对于单波绕组，支路对数与主磁极对数无关且永远等于 1，每个支路里的元件数较多，支路感应电动势较高，允许通过的电枢电流较小，适用于较高电压，较小电枢电流的直流电压。

3. 换向器

换向器又称为整流子。对于发电机，换向器的作用是把电枢绕组中的交变电动势转变为直流电动势向外部输出直流电压。对于电动机，它是把外界供给的直流电流转变为绕组中的交变电流以使电机旋转。换向器结构如图 1.10 所示。换向器是由换向片组合而成，是直流电机的关键部件，也是最薄弱的部分。



(a) 换向片

(b) 换向器

图 1.10 换向器结构

换向器采用导电性能好、硬度大、耐磨性能好的紫铜或铜合金制成。换向片的底部做成燕尾形状，换向片的燕尾部分嵌在含有云母绝缘的 V 形钢环内，拼成圆筒形套入钢套筒上，相邻的两换向片间以 0.6 ~ 1.2 mm 的云母片作为绝缘，最后用螺旋压圈压紧。换向器固定在转轴的一端。换向片靠近电枢绕组一端的部分与绕组引出线相焊接。

#### 4. 转 轴

转轴起转子旋转的支撑作用，需有一定的机械强度和刚度，一般用圆钢制成。

### 三、空气隙

主极极靴和电枢间的间隙称为空气隙，简称气隙。气隙既保证了电机的安全运行，又是磁路的重要组成部分。由于空气磁阻远大于铁磁物质的磁阻，而电机的能量转换是依靠气隙磁通为媒介进行的，所以气隙的大小和形状对电机的性能有很大影响。

直流电机的气隙是不均匀的。极靴中部气隙较小，两侧气隙逐渐扩大，极尖处气隙最大。小型电机气隙为 1 ~ 3 mm；大型电机气隙可达 10 ~ 12 mm。

## 第三节 直流电机的磁场、电动势和电磁转矩

从直流电机基本工作原理的分析可知，发电机将机械能转换为电能，电动机将电能转换为机械能，其必要条件之一是必须具有气隙磁通。因此，必须在直流电机主磁极的励磁绕组中通以励磁电流来产生磁势，以产生气隙磁通，使电枢绕组切割气隙磁通而产生感应电势；或者由电枢电流与气隙磁通相互作用而产生电磁转矩，从而实现机电能量的转换。

### 一、直流电机的励磁方式

直流电机中有两种基本绕组，即励磁绕组和电枢绕组。励磁绕组和电枢绕组之间的连接方式称为励磁方式，不同励磁方式的直流电机，其特性有很大的差异，选择励磁方式是选择直流电机的重要依据。

直流电机的励磁方式可分为他励、并励、串励、复励 4 类，如图 1.11 所示。

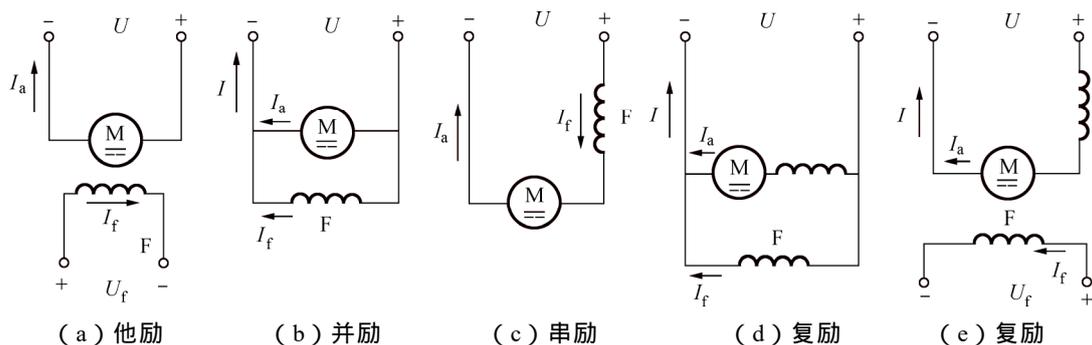


图 1.11 直流电机按励磁方式分类