

第一章 直流电机基础

第一节 直流电机基本工作原理

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，它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、直流电机模型结构

图 1.1 所示为直流电机简单模型图。N、S 为定子上固定不动的两个主磁极，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。

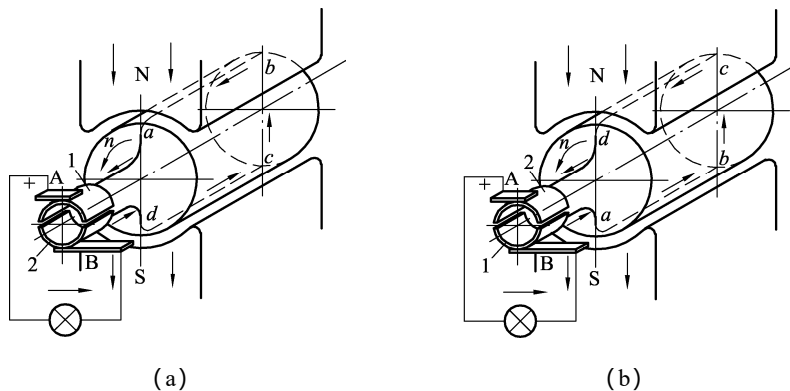


图 1.1 直流电机简单模型图

在两个主磁极 N、S 之间装有一个可以转动的、由铁磁材料制成的圆柱体；圆柱体表面嵌有一线圈 $abcd$ （称为电枢绕组），线圈首末两端分别连接到两个弧形铜片（称为换向

片)上。换向片及间隙中的绝缘材料构成一个整体,称为换向器,它固定在转轴上(但与转轴绝缘)并随转轴一起转动,整个转动部分称为电枢。为了接通电枢内电路和外电路,在定子上装有两个固定不动的电刷 A 和 B,并压在换向器上,与其保持滑动接触。

二、直流发电机工作原理

1. 感应电动势的产生

当直流发电机的电枢被原动机拖动,并以恒速 v 逆时针方向旋转时,如图 1.1 (a) 所示。线圈两个有效边 ab 和 cd 将切割磁力线而感应产生电动势 e , 其方向用右手定则确定。导体 ab 位于 N 极下,导体 cd 位于 S 极下,感应电动势方向分别为 $b \rightarrow a$, $d \rightarrow c$ 。若接通外电路,电流从“换向片 1 \rightarrow A \rightarrow 负载 \rightarrow B \rightarrow 换向片 2”。电流从电刷 A 流出,具有正极性,用“+”表示;从电刷 B 流入,具有负极性,用“-”表示。

当电枢转过 90° 时,线圈有效边 ab 和 cd 转到 N、S 极之间的几何中心线上,此处磁密为零,故此时瞬时感应电动势为零。

当电枢转过 180° 时,导体 ab 和 cd 及换向片 1、2 位置互换,如图 1.1 (b) 所示。导体 ab 位于 S 极下,导体 cd 位于 N 极下,线圈两个有效边产生的感应电动势方向分别为 $a \rightarrow b$, $c \rightarrow d$, 电势方向恰与开始瞬时相反。外电路中流过的电流从“换向片 2 \rightarrow A \rightarrow 负载 \rightarrow B \rightarrow 换向片 1”。由此可见,电刷 A (B) 始终与转到 N (S) 极下的有效边所连接的换向片接触,故电刷极性始终不变, A 为“+”, B 为“-”。

由以上分析可知,线圈内部为一交变电动势,但电刷引出的电动势方向始终不变,为一单方向的直流电动势。

2. 感应电动势的波形

根据电磁感应定律，每根导体产生的感应电势 e （单位为伏特）为：

$$e = B_x Lv \quad (1.1)$$

式中 B_x ——导体所在位置的磁通密度 (T)；

L ——导体切割磁力线的有效长度 (m)；

v ——导体切割磁力线的线速度 (m/s)。

要想知道电动势的波形，先得找出磁密的波形，前已设电枢以恒速 v 旋转， v 为常数， L 在电机中不变，则 $e \propto B_x$ ，即导体电动势随时间的变化规律与气隙磁密的分布规律相同。设想将电枢从外圆某一点沿轴切开，把圆周拉成一直线作为横坐标，纵坐标表示磁密，而绘出的 B_x 分布曲线如图 1.2 所示，为一梯形波。由于 $e \propto B_x$ ，电动势波形与磁密波形可用同一曲线表示，只需换一坐标即可得到线圈内部交变电动势波形，如图 1.2 所示。

通过电刷和换向器的作用，及时地将线圈内的交变电动势转换成电刷两端单方向的直流电动势，如图 1.3 所示，但它是一个大小在零和最大值之间变化的脉振电动势。

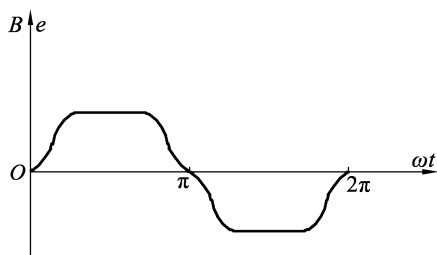


图 1.2 线圈内电动势波形

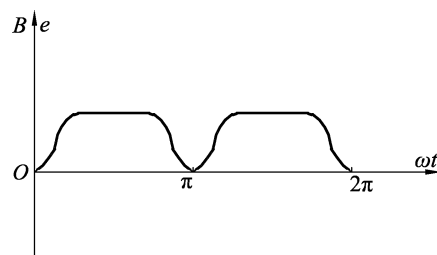


图 1.3 电刷两端的电动势波形

对于图 1.1 所示的直流电机简单模型图，由于电枢上只嵌放了一个线圈，所以感应电动势数值小，波动大。为了减小电动势的脉动，实际电机中，电枢上放置许多线圈组成电

枢绕组，这些线圈均匀分布在电枢表面，并按一定规律连接起来。图 1.4 表示一台两极直流电机，电枢上嵌有在空间互差 90° 的两个线圈产生的电动势波形，由图可见，其脉动程度大大减小了。实践证明，若每极下线圈边数大于 8，电动势脉动的幅值将小于 1%，基本为一直流电动势，如图 1.5 所示。

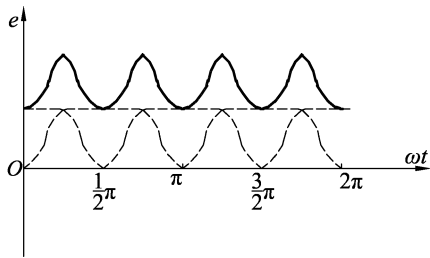


图 1.4 两个线圈换向后的电动势波形

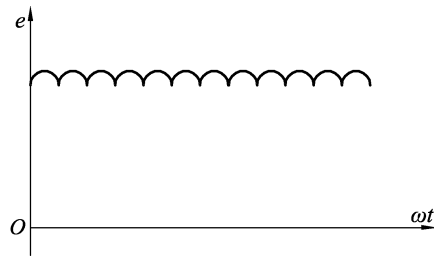


图 1.5 多个线圈电刷两端的电动势波形

3. 直流发电机产生的电磁转矩

当直流发电机电刷两端获得直流电动势后，若接上负载，便有一电流流过线圈，电流 i 与电动势 e 的方向相同。同时，载流导体在磁场中必然产生一电磁力 f ，其方向用左手定则确定。电磁力对转轴形成一电磁转矩 T ， T 与电枢旋转的方向相反，起到了阻碍作用，故称为阻转矩。直流电机要维持发电状态，原动机就必须输入机械能克服电磁转矩 T ，正是这种不断的克服，实现了将机械能转换成为电能。

三、直流电动机工作原理

图 1.6 所示为两极直流电动机工作原理图。直流电动机结构与直流发电机相同，不同的是电刷 A、B 外接一直流电源。图示瞬时电流的流向为“+ → A → 换向片 1 → a → b → c → d → 换向片 2 → B → -”。根据电磁力定律，载流导体 ab 、 cd 都将受到电磁力 f 的作用，其大小为：

$$f = B_x Li \quad (1.2)$$

式中 i ——导体中流过的电流 (A)。

导体所受电磁力的方向用左手定则确定，在初期瞬时， ab 位于 N 极下，受力方向从右向左， cd 位于 S 极下，受力方向从左向右，电磁力对转轴便形成一电磁转矩 T 。在 T 的作用下，电枢便逆时针旋转起来。

当电枢转过 90° ，电刷不与换向片接触，而与换向片间的绝缘片相接触，此时线圈中没有电流流过， $i = 0$ ，故电磁转矩 $T = 0$ 。但由于惯性，电枢仍能转过一个角度，电刷 A、B 则又将分别与换向片 2、1 接触。线圈中又有电流 i 流过，此时，导体 ab 、 cd 中电流改变了方向，即为 $b \rightarrow a$ ， $d \rightarrow c$ ，且导体 ab 转到 S 极下， ab 所受的电磁力 f 方向从左向右， cd 转到 N 极下， cd 所受的电磁力 f 方向从右向左。因此，线圈仍然受到逆时针方向电磁转矩的作用，电枢始终保持同一方向旋转。

在直流电动机中，电刷两端虽然加的是直流电源，但在电刷和换向器的作用下，线圈内部却变成了交流电，从而产生了单方向的电磁转矩，驱动电机持续旋转。同时，旋转的

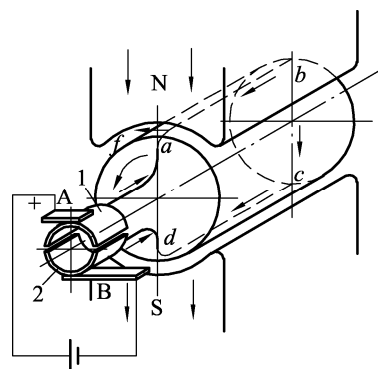


图 1.6 直流电动机工作原理图

线圈中也将感应产生电动势 e ，其方向与线圈中电流方向相反，故称为反电动势。直流电动机若要维持继续旋转，外加电压就必须高于反电动势，才能不断地克服反电动势而流入电流，正是这种“不断克服”，实现了将电能转换成为机械能。

由此可见，直流电机具有可逆性，即一台直流电机既可作发电机运行，也可作电动机运行。当输入机械转矩将机械能转换成电能时，电机作为发电机运行；当输入直流电流产生电磁转矩，将电能转换成机械能时，电机作为电动机运行。

第二节 直流电机基本结构

一、直流电机的额定值

每一台电机都有一块铭牌，上面标注着各种额定数据，以简要地介绍这台电机的型号、规格、性能。铭牌是用户合理选择和正确使用电机的依据。

根据国家标准要求设计和试验所得的一组反映电机性能的主要数据，称为电机的额定值。

1. 额定功率 P_N

它指电机按规定的工作方式运行时，所能提供的输出功率。发电机的额定功率是指接线端子处的输出功率；电动机的额定功率是指电动机转轴的有效机械功率，单位为千瓦(kW)。额定功率、额定电压和额定电流的关系为：

$$\text{发电机} \quad P_N = U_N I_N \quad (1.3)$$

$$\text{电动机} \quad P_N = U_N I_N \eta_N \quad (1.4)$$

2. 额定电压 U_N

它指在额定输出时电机接线端子间的电压，单位为伏 (V)。

3. 额定电流 I_N

它指电机按照规定的工作方式运行时，电机绕组允许流过的最大安全电流，单位为安 (A)。

4. 额定转速 n_N

它指电机在额定电压、额定电流和额定输出功率时，电机的旋转速度，单位为转/分 (r/min)。

此外，还有工作方式、励磁方式、额定励磁电压、额定温升、额定效率 η_N 等。

额定值是选用或使用电机的主要依据，一般希望电机按额定值运行。但实际上，电机运行时的各种数据可能与额定值不同，它们由负载的大小来确定。若电机的电流正好等于额定值，称为满载运行；若电机的电流超过额定值，称为过载运行；若比额定值小得多，称为轻载运行。长期过载运行将使电机过热，降低电机寿命甚至造成损坏；长期轻载运行又使得电机的容量不能充分利用。这两种情况都将降低电机的效率，都是不经济的，故在选择电机时，应根据负载的情况，尽可能使电机运行在额定值附近。

二、直流电机基本结构

直流电机由静止的定子和旋转的转子两大部分组成，在定子和转子之间有一定大小的间隙（称气隙），如图 1.7 所示。

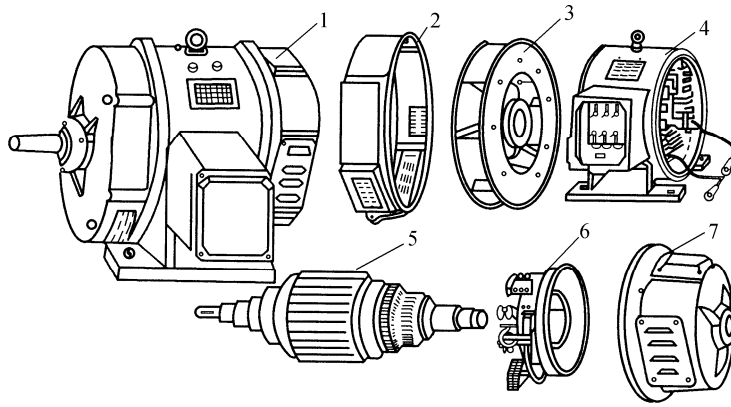


图 1.7 直流电机结构图

1—直流电机总成；2—后端盖；3—通风器；4—定子总成；5—转子（电枢）总成；
6—电刷装置；7—前端盖

1. 定 子

直流电机定子的作用是产生磁场和作为电机的机械支撑，主要由机座、主磁极、换向极和电刷装置等组成。

1) 机 座

机座兼起机械支撑和导磁磁路两个作用。它既用来作为安装电机所有零件的外壳，又是联系各磁极的导磁铁轭。机座通常为铸钢件，也有采用钢板焊接而成的。对于换向要求较高的电机，可采用叠片结构的机座。

2) 主磁极

主磁极如图 1.8 所示，由主极铁心和主极线圈两部分组成。主极铁心一般用 1~1.5 mm 厚的薄钢板冲片叠压后再用铆钉铆紧成一个整体。小型电机的主极线圈用绝缘铜线（或铝线）绕制而成，大中型电机主极线圈用扁铜线绕制，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。

3) 换向极

换向极又称为附加极，它装在两个主极之间，用来改善直流电机的换向。换向极由换向极铁心和换向极线圈构成。换向极铁心大多用整块钢加工而成。但在整流电源供电的功率较大电机中，为了更好地改善电机换向，换向极铁心也采用叠片结构。换向极线圈与主极线圈一样也是用圆铜线或扁铜线绕制而成后，经绝缘处理再套在换向极铁心上，最后用螺钉将换向极固定在机座内壁。

4) 电刷装置

电刷装置的作用是通过电刷与换向器表面的滑动接触，把转动的电枢绕组与外电路相连。电刷装置一般由电刷、刷握、刷杆、刷杆座等部分组成，如图 1.9 所示。电刷一般用石墨粉压制而成。电刷放在刷握内，用弹簧压紧在换向器上，刷握固定在刷杆上，刷杆装在刷杆座上，成为一个整体部件。

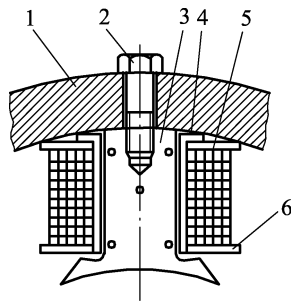


图 1.8 主磁极

1—机座；2—主极螺钉；3—主极铁心；4—框架；
5—主极绕组；6—绝缘垫衬

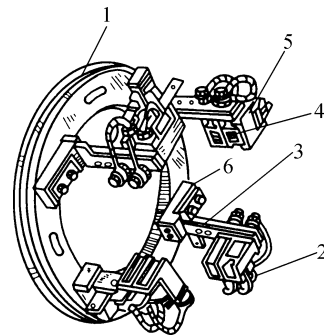


图 1.9 电刷装置

1—刷杆座；2—弹簧；3—刷杆；4—电刷；
5—刷握；6—绝缘件

2. 转 子

转子又称电枢，主要由转轴、电枢铁心、电枢绕组和换向器等组成。

1) 转 轴

转轴的作用是用来传递转矩的，一般用合金钢锻压而成。

2) 电枢铁心

电枢铁心是电机磁路的一部分，也是承受电磁力作用的部件。当电枢在磁场中旋转时，在电枢铁心中将产生涡流和磁滞损耗，为了减小这些损耗的影响，电枢铁心通常用 0.5 mm 厚的电工钢片叠压而成，电枢铁心固定在转子支架或转轴上。电枢铁心冲片如图 1.10 所示，沿铁心外圈均匀分布有槽，在槽内嵌放电枢绕组。

3) 电枢绕组

电枢绕组的作用是产生感应电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。电枢绕组通常都用圆形或矩形截面的导线绕制而成，再按一定规律嵌放在电枢槽内，上下层之间以及电枢绕组与铁心之间都要妥善地绝缘。为了防止离心力将绕组甩出槽外，槽口处需用槽楔将绕组压紧，伸出槽外的绕组端接部分用无纬玻璃丝带绑紧。绕组端头则按一定规律嵌放在换向器铜片的升高片槽内，并用锡焊或氩弧焊焊牢。

4) 换向器

换向器的作用是机械整流，即在直流电动机中，它将外加的直流电流逆变成绕组内的交流电流；在直流发电机中，它将绕组内的交流电势整流成电刷两端的直流电势。换向器的结构如图 1.11 所示。换向器由许多换向片组成，换向片间用云母片绝缘。换向片凸起的一端称升高片，用以与电枢绕组端头相连；换向片下部做成燕尾形，利用换向器套筒、V 形压圈及螺旋压圈将换向片、云母片紧固成一个整体。在换向片与换向器套筒、压圈之间用 V 形云母片绝缘，最后将换向器压装在转轴上。