

第一章 直流电机

随着经济社会的不断发展,电能的应用遍布各行各业,而电机担负着电能的生产、传输、分配及应用等重要任务,是在现代化工业生产过程中不可缺少的主要设备。要想掌握电机的工作原理和特性,就必须了解其基本结构。

直流电机是直流电能和机械能相互转换的旋转电机。根据能量转换方向的不同,直流电机可分为直流发电机和直流电动机两大类。直流发电机将机械能转换为电能,直流电动机将电能转换为机械能。

本章主要介绍直流电机的基本工作原理、结构和运行特性。

第一节 直流电机的基本工作原理

一、直流发电机的工作原理

直流发电机通常由外部机械装置拖动其旋转,以此产生电能输出。

直流发电机的工作原理如图 1-1 所示。图中 N、S 表示磁极,在电机工作时磁极固定不动,称为定子。*abcd* 表示固定在可旋转导磁圆柱体上的线圈,在发电机工作时,线圈连同导磁圆柱体由原动机带动不断旋转,所以它们称为直流电机的转子(电枢)。线圈的首末端 *a*、*d* 分别连接到两个相互绝缘并可随线圈一同转动的导电片上,该导电片称为换向片。图中 A、B 表示电刷,电刷与外电路连接,在电机工作时固定不动。在定子和转子之间有一定的间隙存在,称为气隙。

直流发电机基于电磁感应定律工作,即在磁感应强度为 B 的磁场中,若导体做切割磁力线运动,则在导体内部产生感应电动势。若 B 、 l 、 v 三者相互垂直,则感应电动势 e 为

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

式中, B 为磁感应强度, T; l 为导体长度, m; v 为导体切割磁力线的速度, m/s; e 为导体的感应电动势, V, e 的方向由右手定则确定。

如图 1-1 (a) 所示,当线圈按逆时针方向运动时,线圈 *ab* 边在 N 极范围内,产生的感应电动势方向从 *b* 到 *a*;线圈 *cd* 边在 S 极范围内,产生的感应电动势方向从 *d* 到 *c*。



微课
直流发电机的工作
原理

从整个线圈来看，感应电动势的方向是 $d-c-b-a$ 。因此，与线圈 a 端连接的电刷 A 处于正电位，而与线圈 d 端连接的电刷 B 处于负电位。

如图 1-1 (b) 所示，当线圈旋转 180° 以后， ab 边转到 S 极范围内， cd 边就转到 N 极范围内。此时用右手定则判断可知，线圈 cd 边产生的感应电动势方向是从 c 到 d ，线圈 ab 边产生的感应电动势方向是从 a 到 b 。由于电刷固定不动，因此，与线圈 d 端连接的电刷 A 的电位仍为正，与线圈 a 端连接的电刷 B 的电位仍为负。

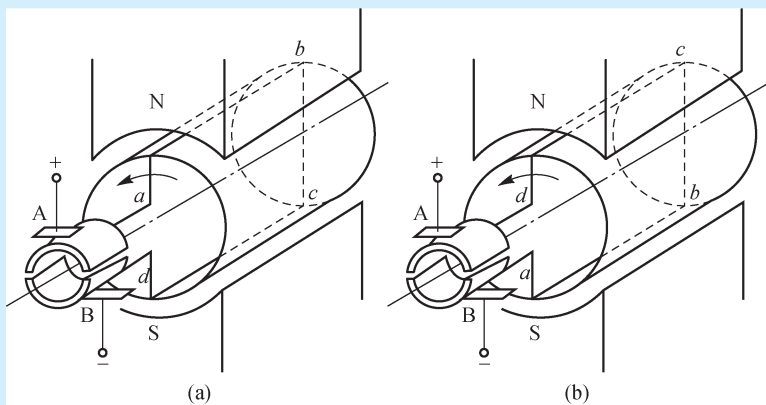


图 1-1 直流发电机的工作原理示意图

由此可知，当线圈不停旋转时，电刷 A 始终是正电位，电刷 B 始终是负电位。因此，由两电刷引出的是具有恒定方向的电动势，即直流电动势。

实际的直流发电机的电枢是根据实际应用情况配有多匝线圈的，线圈分布于电枢铁心表面的不同位置，并按照一定规律连接起来，构成电机的电枢绕组。相应地，换向片的数量要根据线圈匝数的多少来确定。磁极也是根据实际需要将 N、S 极交替放置多对，相应地，电刷的个数要根据磁极的个数来确定。

二、直流电动机的工作原理

直流电动机基于电磁力定律工作，即通电导体在磁场中会受到电磁力的作用，当磁力线与导体中电流的方向相互垂直时，作用在通电导体上的电磁力 F 的大小为

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

式中， B 为磁感应强度， T ； l 为导体长度， m ； I 为载流导体中流过的电流， A ； F 为电磁力， N ， F 的方向由左手定则确定。

如果直流电机的转子不用原动机拖动，而把它的电刷 A、B 接在电压为 U 的直流电源上，此时线圈中将有电流通过。

如图 1-2 (a) 所示, 电刷 A 是正电位, B 是负电位。在 N 极范围内, 线圈 ab 中的电流从 a 到 b ; 在 S 极范围内, 线圈 cd 中的电流从 c 到 d 。根据电磁力定律, 线圈 ab 边受到向左的电磁力, cd 边受到向右的电磁力。由于磁场是均匀的, 导体中流过的电流也相同, 因此, 线圈 ab 边和 cd 边所受电磁力的大小相等, 方向相反, 于是线圈按逆时针方向转动。

如图 1-2 (b) 所示, 当线圈转过 180° 后, 线圈 ab 与 cd 的位置调换, 但由于电刷和换向片的作用, 线圈 ab 中的电流从 b 到 a , 线圈 cd 中的电流从 d 到 c 。根据电磁力定律, 线圈 ab 边受到向右的电磁力, cd 边受到向左的电磁力, 线圈仍然按逆时针方向转动。可见, 虽然导体中的电流是交变的, 但线圈的旋转方向始终不变。

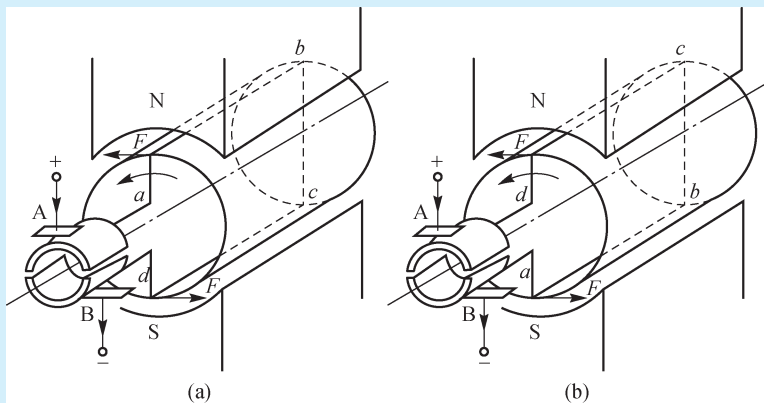


图 1-2 直流电动机的工作原理示意图

与直流发电机一样, 实际的直流电动机的电枢并非单一线圈, 磁极也并非一对。

三、直流电机的可逆性原理

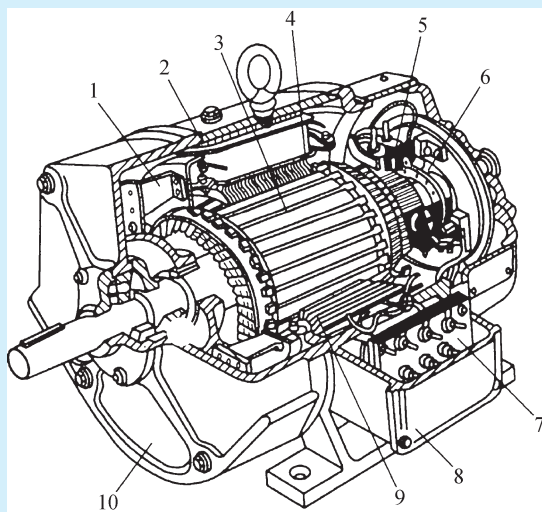
由前面的分析可知, 一台直流电机理论上既可以作为电动机运行, 也可以作为发电机运行, 只是前提条件不同。当直流电机的电刷 A、B 接在电压为 U 的直流电源上时, 电机运行在电动机状态, 线圈按一定方向不停旋转, 通过齿轮或皮带等机构拖动负载工作, 把电能转换为机械能; 当用原动机拖动直流电机的电枢时, 电机运行在发电机状态, 两电刷引出的是具有恒定方向的电动势, 负载上得到的是具有恒定方向的电压和电流, 从而把机械能转换为电能。

在电机理论中, 一台电机既能做电动机运行又能做发电机运行的原理称为可逆性原理。

第二节 直流电机的基本结构和铭牌

一、直流电机的基本结构

直流电机的基本结构都是相同的，主要由静止部分和旋转部分构成，在静止部分和旋转部分之间要有一定的气隙，其中静止部分称为定子，旋转部分称为转子。图 1-3 所示为直流电机的结构。



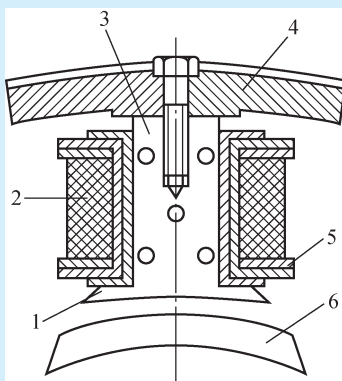
1—风扇；2—机座；3—电枢；4—主磁极；5—刷架；6—换向器；
7—接线板；8—接线盒；9—换向极；10—端盖。

图 1-3 直流电机的结构

1. 定子部分

直流电机的定子部分主要由主磁极、换向极、机座和电刷装置组成。

(1) 主磁极。主磁极一般由主磁极铁心和主磁极绕组（励磁绕组）组成，其作用是在定子和转子之间的气隙中建立主磁场，使电枢绕组在此磁场的作用下产生感应电动势和电磁转矩。主磁极铁心柱体称为极身；靠近气隙一端较宽的部分称为极靴，极靴的主要作用是使气隙磁通密度分布均匀，并与极身一起支撑励磁绕组。为了尽可能地减小涡流损耗和磁滞损耗，主磁极铁心一般由 1~1.5 mm 厚的低碳钢板叠压而成，整个磁极用螺钉固定在机座上。直流电机主磁极的结构如图 1-4 所示。



1—极靴；2—励磁绕组；3—极身；4—机座；5—框架；6—转子。

图 1-4 直流电机主磁极的结构

(2) 换向极。换向极主要由铁心和绕组组成，装在电机两主磁极之间的几何中心线上，又称附加极，其主要作用是改善电机的换向性能。一般电机容量超过 1 kW 时应安装换向极。

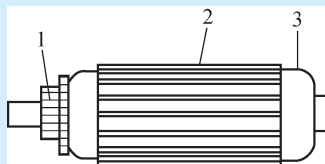
(3) 机座。机座通常由铸钢和厚钢板焊接而成，其主要作用有两个：一是作为电机磁路的一部分；二是用来固定主磁极、换向极及端盖等部件，起机械支承的作用。

(4) 电刷装置。电刷装置是直流电机重要的组成部分，其作用是将旋转的电枢绕组与固定不动的外电路相连接，并与换向器相配合，把电枢中的交变电流变成电刷上的直流，或是将电刷上的直流变成电枢上的交流。

2. 转子部分

直流电机的转子主要由电枢铁心、电枢绕组和换向器组成，如图 1-5 所示。

(1) 电枢铁心。电枢铁心是电机主磁路的一部分，主要用来嵌放电枢绕组。由于电机运行时电枢与气隙磁场间的相对运动将引起磁滞及涡流损耗，因此，为了减小损耗，电枢铁心通常用两面涂有厚度为 0.5 mm 的绝缘漆的硅钢片叠压而成，并固定在转子支架或转轴上。



1—换向器；2—电枢铁心；3—电枢绕组。

图 1-5 直流电机的转子

(2) 电枢绕组。电枢绕组是直流电机的主要电路部分，由许多按一定规律连接的绝缘线圈（导线）组成。其主要作用是产生感应电动势和电磁转矩，是实现机械能与电能互相转换的重要部件。

在电机中每一个线圈为一个元件。根据连接规律的不同，电枢绕组可分为单叠绕

组、复叠绕组、单波绕组和复波绕组等，电机中常见的绕组连接方式是单叠绕组和单波绕组。

① 单叠绕组。单叠绕组的特点是元件的首尾两端分别接到相邻的两个换向片上，并且前一个元件的尾端与后一个元件的首端接在同一个换向片上，如图 1-6 所示。

在图 1-6 中，元件的上层边（首端）用实线表示，元件的下层边（尾端）用虚线表示，元件两条边的间距称为第一节距，用 y_1 表示；连接在同一个换向片上的两个元件中，第一个元件的下层边与第二个元件的上层边之间的距离称为第二节距，用 y_2 表示；一个元件的首尾两端所连接的两个换向片之间的距离称为换向节距，用 y_k 表示；连接在同一个换向片上的两个元件对应边之间的距离（即第一个元件的上层边与第二个元件的上层边之间的距离）称为合成节距，用 y 表示。通常，单叠绕组的换向节距为 1。

极间距是一个磁极在电枢表面的空间距离，用 τ 表示。一般用电枢槽数 Z 计算极间距，即

$$\tau = \frac{Z}{2p} \quad (1-3)$$

式中， Z 为电枢槽数； p 为极对数。

② 单波绕组。单波绕组的特点是把磁场中位置差不多对应的元件连接起来，元件所连接的换向片相隔较远，如图 1-7 所示。

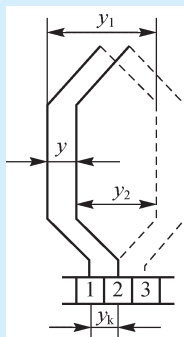


图 1-6 单叠绕组

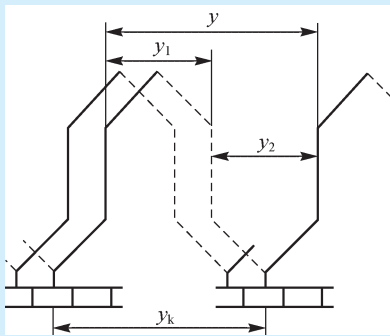


图 1-7 单波绕组

(3) 换向器。换向器由许多燕尾形状的铜质换向片与片间云母片组成圆筒形状套在钢套筒上，最后用螺母压紧构成。其主要作用是与电刷一起将直流电动机输入的直流电流转换为电枢绕组内的交变电流，或将直流发电机电枢绕组中的交变电动势转换为直流电动势，向外电路输出直流电。

二、直流电机的铭牌数据

电机制造厂按照国家标准,根据电机的设计和试验数据,规定了电机的正常运行状态和条件,称为额定运行情况。表征电机额定运行情况的各种数据称为额定值。额定值一般都标注在电机的铭牌上,所以也称为铭牌数据,它是正确合理使用电机的依据。除了电机的额定值以外,电机的铭牌上一般还标有电机的工作方式、绝缘等级、防护等级,以及电机的产品型号、出厂编号、出厂日期等。

常见的电机的铭牌上标有以下数据:

1. 额定功率 P_N

额定功率指电机在额定状态下运行时电机的输出功率,单位为kW。对于发电机而言,额定功率指的是发电机电刷间输出的电功率,它等于额定电压 U_N 与额定电流 I_N 的乘积,即 $P_N=U_N I_N$;对于电动机而言,额定功率指的是电机轴上所输出的机械功率,它等于额定电压与额定电流的乘积再乘以电机的机械效率 η_N ,即 $P_N=U_N I_N \eta_N$ 。

2. 额定电压 U_N

额定电压指电机在额定状态下运行时电枢出线端的平均电压,单位为V。对于发电机而言,额定电压指的是输出电压;对于电动机而言,额定电压指的是输入电压。

3. 额定电流 I_N

额定电流指电机在额定电压下,运行于额定功率时对应的电流值,单位为A。

4. 额定转速 n_N

额定转速指电机在额定功率下运行时对应额定转矩下的转速,单位为r/min。

5. 励磁方式

励磁方式是指直流电机的励磁绕组与其电枢绕组的连接方式。根据不同的连接方式分类,常见的直流电机的励磁方式有他励、并励、复励和串励等,如图1-8所示。

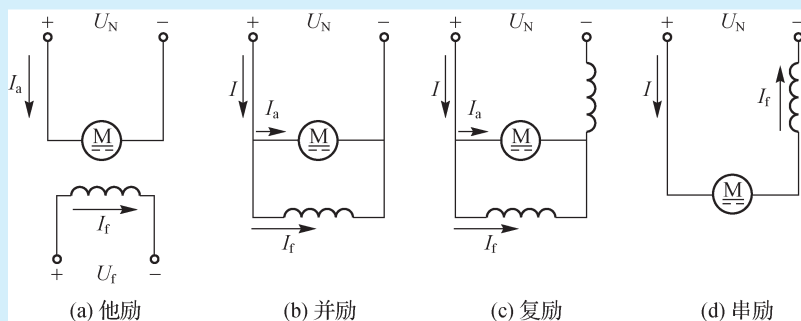


图 1-8 直流电机的励磁方式

6. 额定励磁电流 I_{fN}

额定励磁电流表示对应于额定电压、额定电流、额定转速及额定功率时的励磁电流,

单位为 A。

7. 工作方式

电机一般有三种工作方式，即 S1（连续工作制）、S2（短时工作制）、S3（断续周期工作制）。

8. 绝缘等级

电机允许达到的最高温度是由电机使用绝缘材料的耐热程度决定的，绝缘材料的耐热程度称为绝缘等级。不同的绝缘材料，其最高允许温度不同。电机中常用的绝缘材料分五个等级：A、E、B、F、H，其中 A 级绝缘耐热程度最差，H 级绝缘耐热程度最强。

9. 防护等级

防护等级是以字母 IP 和其后面的两位数表示的。IP 为国际防护的英文缩写。IP 后面第一位数字代表第一种防护形式（防尘）的等级，共分七个等级。第二位数字代表第二种防护形式（防水）的等级，共分九个等级。数字越大，表示防护的能力越强。

第三节 直流电机的电枢电动势、电磁转矩和电磁功率

一、直流电机的电枢电动势

电机旋转时，电枢绕组切割主磁场产生的感应电动势称为电枢电动势。它是指直流电机电枢绕组上正、负电刷间产生的感应电动势。当元件数目较多时，任何瞬时构成的支路情况是相同的，且每个导体都分布在具有相同极性的磁极下，故可先求出每个导体感应电动势的平均值，再乘以电枢导体总数即为电枢电动势。

由电磁感应定律知，每个导体中的感应电动势为

$$e_p = B_p l v \quad (1-4)$$

式中， B_p 为平均气隙磁通密度，T。

每极磁通的表达式为

$$\Phi = B_p l \tau \quad (1-5)$$

式中， Φ 为磁通，Wb； τ 为极间距，mm。

线速度的表达式为

$$v = \frac{2p\tau n}{60} \quad (1-6)$$

式中， p 为磁极对数； n 为电枢转速，r/min。

将式(1-5)和式(1-6)代入式(1-4), 得

$$e_p = \frac{2p\Phi n}{60} \quad (1-7)$$

由上面的分析可知, 电枢电动势的表达式为

$$E_a = \frac{N}{2a} \cdot e_p = \frac{pN}{60a} \Phi n = C_e \Phi n \quad (1-8)$$

式中, a 为电枢绕组并联支路对数; N 为电枢导体总数; C_e 为电动势常数, $C_e = \frac{pN}{60a}$ 。

式(1-8)表明, 直流电机的电枢电动势 E_a 的大小与磁通 Φ 和转速 n 的乘积成正比, 通过改变磁通或转速可以改变电枢电动势的大小。

二、直流电机的电磁转矩

通电的电枢在气隙磁场中产生电磁力, 而电磁转矩是由电磁力产生的。由于电枢绕组中各元件产生的电磁转矩同向, 因此, 可以先求出每个导体的平均电磁力及电磁转矩, 再乘以电枢导体总数即为总电磁转矩。

每个导体在磁场中所受电磁力的大小为

$$F_p = \frac{B_p I_a}{2a} \quad (1-9)$$

式中, I_a 为电枢电流, A。

每个导体的电磁转矩(单位 $N \cdot m$) 为

$$T_p = F_p \cdot \frac{D}{2} \quad (1-10)$$

式中, D 为电枢铁心直径, $D = \frac{2p\tau}{\pi}$, mm。

式(1-10)左右两端同时乘以电枢导体总数 N 可得总电磁转矩, 即

$$T_{em} = N \cdot F_p \cdot \frac{D}{2} \quad (1-11)$$

将式(1-5)和式(1-9)代入式(1-11)可得电机电磁转矩的表达式为

$$T_{em} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = C_T \Phi I_a \quad (1-12)$$

式中, C_T 为转矩常数, $C_T = \frac{pN}{2\pi a}$ 。

通常, 总电磁转矩 T_{em} 与磁通 Φ 、电枢电流 I_a 成正比。转矩常数 C_T 与电动势常数 C_e 。

之间的关系为

$$C_T = 9.55C_e \quad (1-13)$$

三、直流电机的电磁功率

由动力学可知，机械功率为转矩与角速度的乘积。同样，对于直流电机而言，电磁功率为电磁转矩 T_{em} 与转子角速度 Ω 的乘积，它反映了直流电机机电能量转换的功率。

根据式 (1-8) 和式 (1-12) 可求得电磁功率为

$$P_{em} = T_{em}\Omega = C_T\Phi I_a\Omega = \frac{pN}{2\pi a}\Phi \frac{2\pi n}{60}I_a = \frac{pN}{60a}\Phi nI_a = E_a I_a \quad (1-14)$$

式 (1-14) 给出了电磁功率在电气和机械两个方面的不同表达形式，它符合能量守恒定律。其物理意义是：对于直流发电机而言，从原动机所吸收的机械功率 $T_{em}\Omega$ 全部转换为电功率 $E_a I_a$ 输出；对于直流电动机而言，从电源所吸收的电功率 $E_a I_a$ 全部转换为机械功率 $T_{em}\Omega$ 输出。

第四节 直流电动机的运行原理

直流电动机在进行机电能量转换时，必须要有能反映其内部电磁转换过程和内外的机电能量转换过程的方程式，即基本平衡方程式。基本平衡方程式主要有电动势平衡方程式、功率平衡方程式、转矩平衡方程式。在写基本平衡方程式前应定好各参量的方向，通常可以任意规定。一旦定好后所有的方程式都应按参考方向进行计算，一般按图 1-9 所示的参考方向规定，各参量的方向与规定的参考方向一致时为正，反之为负。

一、电动势平衡方程式

由基尔霍夫定律可知电枢回路的电动势平衡方程为

$$U = E_a + I_a R_a \quad (1-15)$$

式中， U 为电枢两端的电压，V； R_a 为电枢电阻， Ω 。

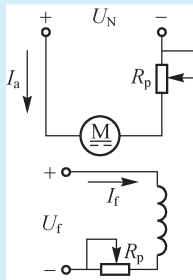


图 1-9 电动机参考方向的规定

二、功率平衡方程式

将式(1-15)两边同时乘以电枢电流 I_a , 得电源输入功率为

$$P_1 = P_{em} + P_{Cu} \quad (1-16)$$

式中, P_1 为电源输入功率, W; P_{em} 为电磁功率, W; P_{Cu} 为电枢回路绕组电阻及电刷与换向器表面接触电阻上的损耗, 称为铜损耗, W。

通常, 电磁功率 P_{em} 可表示为

$$P_{em} = P_2 + P_0 \quad (1-17)$$

式中, P_2 为直流电动机输出机械功率, W; P_0 为空载损耗, W。

空载损耗 P_0 可表示为

$$P_0 = P_{mec} + P_{Fe} + P_{add} \quad (1-18)$$

式中, P_{mec} 为机械摩擦损耗, W; P_{Fe} 为铁损耗, W; P_{add} 为附加损耗, W。

由式(1-16)、式(1-17)和式(1-18)可得

$$P_1 = P_2 + P_{Cu} + P_{mec} + P_{Fe} + P_{add} = P_2 + \Sigma P \quad (1-19)$$

式中, ΣP 为总损耗, $\Sigma P = P_{Cu} + P_{mec} + P_{Fe} + P_{add}$, W。

由此可得直流电动机的效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P} \times 100\% \quad (1-20)$$

三、转矩平衡方程式

将式(1-17)两边同时除以角速度 Ω , 得转矩平衡方程式为

$$T_{em} = T_2 + T_0 \quad (1-21)$$

式中, T_{em} 为电磁转矩, N·m; T_2 为电动机的输出机械转矩, N·m; T_0 为空载转矩, N·m。

第五节 直流电动机的换向

直流电机在使用过程中最常出现的问题是换向不良, 因此, 解决换向不良就成为直流电机保养和维修最主要的任务。良好换向的前提是电刷与换向器之间稳定的滑动接触, 主要是保持换向器氧化膜动态平衡, 为此必须满足必要的机械、电气条件和适当的物理、化学因素。当必要的机械、电气条件不能满足, 或物理、化学因素要改变时, 由于氧化膜动态平衡的改变, 滑动接触变得不稳定, 就会产生换向火花。

一、换向火花产生的原因

产生换向火花的原因可以归结为下面几个方面。

1. 电磁原因

如果换向元件内的合成电势不等于零，根据电磁理论，换向元件中产生的附加换向电流就会造成电刷前后刷边电流密度分布不均匀，电刷与换向片接触或脱离时，元件内换向附加电流并未为零，元件内的电磁能会以火花形式释放出来。延迟换向火花产生在后刷边；超越换向火花产生在前刷边。

电枢绕组开焊或片间（匝间）短路都会造成电路上的不对称，也将造成严重火花。

当电枢绕组为不对称多重绕组时，由于支路间的电势不对称，在换向元件中产生一个脉动电势，将产生空载火花，负载时将加大。

电刷不在几何中心线上时，如换向元件进入主极区，换向元件因切割主磁通，将产生空载火花。

2. 机械原因

换向器表面工作状态不良，如换向器突片或变形、片间云母片突出、换向器表面粗糙、电枢动平衡不好和电机振动等都将造成电刷与换向器之间无法保持稳定接触，从而产生火花。电刷和刷握的工作状态不良，如电刷与刷握的间隙不合适，电刷压力不均匀、过大或过小，电刷材质不合适和刷握结构形式不合适等，都将影响滑动接触，也将产生火花。

3. 电机负载与周围环境

当电机严重过载时，由于电抗电势增加，换向极磁路饱和，电刷电流密度过大，换向火花将加大。冲击性负载、电流变化率过高将导致换向极磁通滞后，造成换向困难而产生火花。

湿度太高或太低、温度过高或过低、周围存在油雾或有害性气体和含尘量过高等都会导致氧化膜平衡的破坏，无法形成正常氧化膜而影响正常滑动接触，进而产生火花。

总之，产生换向火花的因素很多，而很多因素又是相互影响的。在分析和检查换向火花产生原因时，必须根据实际运行条件来加以区分，以针对性地解决。这里主要给出了与换向器和电刷有关的问题的分析及解决方法。

二、换向器的保养与维修方法

换向火花产生的原因是多种多样的，必须在复杂众多的因素中，找到主要原因，针对性地排除故障，恢复正常的换向。寻找换向恶化的原因，通常称换向条件正常化检查，是直流电机换向事故处理的最常用方法。其原理是：一台直流电机在刚投入运行或过去一直运行，换向一直是正常的，而在以后运行过程中，换向逐渐变坏或突然恶化，说明电机在换向恶化前，其运行状态、滑动接触、电机结构和各部件工作情况是正常的。在

电机运行过程中，某些部件的工作状态发生了改变，从而破坏了滑动接触，改变了正常的换向状态，从而导致换向的恶化。如果通过各种检查项目，对影响电机换向的机械电气条件和物理化学因素进行全面检查和调整，使其能恢复原来的正常状态，则换向也能恢复正常。

换向正常化检查是采用不同的检查方法，寻找换向事故原因并排除故障，通常包括下面几个项目。

1. 换向器片间电阻测量

当电枢绕组发生断线、开焊、匝间短路，或换向器发生升高片断裂、片间短路时，造成电磁上的不对称，将产生换向火花。测量片间电阻就能发现电机是否存在上述故障。

片间电阻测量通常采用压降法，也可以采用专用片间电阻测量仪。

用压降法测量片间电阻时，把相等的测量电流依次通入两个相邻换向片，并用毫伏表测量通电两换向片间的电压。如果电枢绕组和换向器的焊接是良好的，没有短路开焊或断线，则全部换向器片间电压应该相等（非全均压出现很小变化）。片间电阻测量的最大值或最小值与平均值之比，误差应不大于5%。测量结果如不符合上述标准，说明电枢绕组和换向器存在开焊或短路，则故障点所在的换向器片间电阻与平均值之间出现较大差别，可以确定故障所在部位和性质。

如果电枢绕组是混合绕组（蛙绕组），由于在换向片之间构成了复杂的等值电路，当绕组与换向器之间有一处焊接不良或开焊时，片间电阻即出现以极对数为周期的正弦变化，其中最高峰值即为故障所在位置。相反，当绕组和片间有短路点时，片间电阻变化的最低点即为故障所在位置。

2. 换向器摆度检查

换向器在长期运行后，云母材料中有机物的挥发产生收缩、紧固件的松动等使整体结构松弛而片间压力降低，产生变形和突片。当换向器变形或偏心时，在运行时将使电刷跳动，滑动接触稳定性受到干扰，产生机械性火花，严重时火花加大，换向器表面出现烧伤和氧化膜破坏，导致换向恶化。高速电机和多重路绕组电机的换向，对于换向器变形更为敏感。

当电机换向火花较大，而且发现电刷跳动现象时，必须检查换向器摆度。

（1）换向器摆度测量。换向器摆度测量通常有以下两种方法。

① 在低速运行或盘车时，可用千分表直接测量。在千分表的端头上套一个绝缘套，千分表座最好是磁吸式的，吸牢在铁板制成的机座上。根据电机盘车时千分表指针的摆动范围和换向器对应部位，即可测得换向器摆度和确定突片位置。

② 对于无法盘车和非低速运行的电机，换向器的摆度可用测振仪来测量。先将测振仪进行校准，在测振探头——拾振器的探杆上套一个绝缘套，可手持或用套圈固定拾振器，使之接触电刷压板或刷握的压指，即可从测振仪读得换向器摆度。如果将测振仪的输出接至示波器或记录器，即可读得变形数值并观察振动波形。

用测振仪测得的换向器摆度有时会有一定误差，这是由于电机在高速转动时，电刷的起伏幅度中，不仅有换向器的摆度，还包括了电刷的惯性跳动。

(2) 允许摆度。在测量摆度时，应区分是换向器原因，还是凸片（或凹片）原因。当换向器由于变形和偏心造成摆度时，在电机旋转时，摆度是逐渐过渡的，换向片之间径向的变化梯度较小，电刷的随从性较好。由凸片（或凹片）造成的换向器摆度，其换向片局部位置在半径方向的变化梯度较大，电刷随从性不好，易引起电刷跳动，对滑动接触的影响较大。

当换向器摆度超过额定值时，换向器必须进行车削。

3. 换向器表面工作状态的检查

换向器表面工作状态是保持良好滑动接触的重要因素之一。换向火花较大时，必须检查换向器表面状态，换向器云母片质量不好、云母片突出、换向片倒棱不直均会引起换向火花；换向器表面出现条纹、斑纹也会使换向火花加大；云母沟中积存碳粉和换向片挤铜产生铜毛刺会产生换向火花和闪络。如果发现上述现象，必须立即清理换向器表面，使其工作状态恢复正常。

有害的换向火花会造成换向器表面烧伤，除一般烧伤外，有时会出现有规律的烧伤。通常烧伤的规律有重路数型、极距型、槽距型等，这时必须分析换向火花产生的电磁原因，找出问题并加以解决。

三、电刷的保养与维修方法

1. 电刷中性面的检查

直流电机电刷中性面位置，一般应严格限制在主磁极几何中心线上，对于大型电机、可逆运行电机和高速电机尤其如此。因为当电刷偏离主极中性面时，换向将发生超前或延迟。纵轴电枢会使电机的外特性发生变化，对可逆运行电机来说，两个转向下转速不同，外特性不同，两个转向的换向强弱也不同。在电刷偏离中性面位置较大时，由于换向元件进入主极磁通区，电机将产生空载火花。

电刷中性面检查方法如下：将全部电刷筛起，在励磁绕组出线端上连接一组蓄电池和一个刀闸开关，再用毫伏表依次测量相隔一个极距的换向片，当切断和闭合开关时，毫伏表上指针将要摆动，毫伏表读数最小位置所对应换向片位置，即为电刷中性面的位置。

在中性面确定后，将刷架或刷杆座圈固定螺钉松开，使刷握中心线与中性面对正，此时再紧固固定螺钉，并用漆在机座与刷上做好标志。

应该注意的是中性面检查应在刷距、极距调整后进行，以减少误差。

2. 刷距、极距和气隙的检查与调整

直流电机各排电刷之间的距离、主极之间和换向极之间的距离应力求相等。因为刷距和极距不等会造成各排电刷下被短路的元件在磁场中的位置不一样，换向极磁场和换

向元件电抗电势波形不重合，造成电磁上的不对称，各个刷架下火花不等会使电机换向不正常。

(1) 刷距的检查与调整。刷距误差通常为 $\pm 0.5 \text{ mm}$ ，一般用铺纸等方法来检查和调整，方法如下：首先将电机上一排刷架电刷位置调整好，使这排电刷边缘正好与一个换向片边缘相重合，然后在换向器表面铺一张纸，在接缝处做好搭接标记后取下，将纸以极数进行等分。画好等分线后，再铺在换向器上，使调整好刷杆和刷握垫片，使每个刷架刷握中电刷的边缘正好压在一条等分线上，再将全部电刷落下，电刷边缘与等分的距离就是刷距等分的误差。如将全部电刷按等分线调整，则可纠正刷距误差。应该注意，在调整刷杆和刷握垫片时，应使刷握离换向器表面距离符合要求。

(2) 极距的检查和调整。由于磁极固定螺钉在运行后松动，极距分布将出现误差，极距允许误差为 $\pm 0.75 \text{ mm}$ 。极距较准确的测量一般采用磁极极靴上画中心线，再用游标卡尺和卡钳等进行测量。当电机装配完后，电枢不能抽出的情况下，可以用卡钳测量极靴边缘之间的距离，也可以测量出极距等分误差。

(3) 气隙的检查与调整。直流电机各主极和各换向极与电枢间隙 (δ) 必须均等，如气隙不均，则各极下磁阻不等，在相同的励磁磁势下磁通量不相等，在部分刷架下火花就会较大。同时，由于主极下磁通量不等，还将出现电枢绕组内环流和单边磁拉力，当电机运行后，由于机座变形、轴承磨损等原因，均会出现气隙不均问题。

为使定子和电枢间的气隙沿圆周各点保持均匀，设计规定允许误差如下：当 $\delta \leq 3 \text{ mm}$ 时，允许误差为 $\pm 10\%$ ；当 $\delta > 3 \text{ mm}$ 时，允许误差为 $\pm 5\%$ 。

气隙的测量可采用塞尺进行。在对气隙进行测量时，极靴和电枢表面的漆膜必须刮去，测量处必须直接接触电枢和极靴叠片。此外，对于大中型直流电机，要防止铁心圆度不准确和转轴弯曲造成气隙值偏差。为得到准确的气隙平均值，应将转子位置每次盘车 90° ，共测量 4 次。

3. 电刷与刷握工作性能的检查

(1) 电刷弹簧压力的调整。合适的电刷压力是保持滑动接触的重要条件：电刷压力过小，造成电刷跳动和接触压降不稳定；压力过大则可能造成电刷机械磨损增加，换向器温升增高，电刷压力不均匀，会造成各电刷之间电流分布不均和个别电刷的火花。

电刷弹簧压力一般应保持在 $16\sim 24 \text{ kPa}$ ，而且电刷间的压力差不超过 $\pm 10\%$ 。电刷的压力与电刷材质和换向器表面圆周速度有关，应合理选定。

电刷弹簧压力测定方法如下：用弹簧秤在电刷提起方向钩起电刷压指，在电刷下垫一纸片，当纸片能被轻轻拉出时，弹簧秤的读数就是电刷弹簧压力。

(2) 刷握间隙的检查。电刷与刷握的配合应保持合适间隙并应符合一定公差。间隙过大，电刷在刷握内晃动，影响接触的稳定，有时还产生“啃边”现象；间隙过小，影响电刷在刷握内的自由滑动，甚至被“卡死”。

(3) 刷握离换向器表面距离的检查。由于刷架和刷握固定螺钉的变形，刷握离换向

器表面距离将会发生变化。刷握离换向器表面距离应保持在 (2.5 ± 0.5) mm 范围内。

刷握离换向器表面距离与电刷应保持一定，这与防止振动有很大关系。双斜刷握与换向器表面距离还会影响电刷宽度，当距离过大时，电刷将产生“顶角”，影响工作。刷握距离可用厚度为 2~3 mm 的绝缘板进行检查，当距离超过允许值时，可用 2.5 mm 厚绝缘板垫在刷握下，作为调整基准进行调整。

(4) 电刷材质和镜面检查。电刷型号是否符合要求，镜面是否出现异常，在换向火花较大时必须检查。电刷是构成滑动接触的主要部件，电刷材质和工作状态对换向影响很大，若电刷牌号不合适或工作状态不正常，将影响滑动接触，或造成换向恶化。

不同型号的电刷最好不要混用。电刷镜面在换向正常时是平滑光亮的。换向火花较大时，就会出现雾状和灼痕。当电刷中含有碳化硅和金刚砂等杂质时，镜面中会出现白色斑点或在旋转方向留下细沟。湿度过大或有酸性气体，电刷表面将出现镀铜现象。

技能训练 直流电机的参数测定

1. 实训目的

(1) 掌握直流电机参数的测定方法，用伏安法测量直流电机的冷态电枢回路电阻和励磁回路电阻。

(2) 进一步加深对直流电机两个回路的理解。

2. 实训工具和仪表

(1) 直流电机：220 V，12.4 A，1 500 r/min。

(2) 滑动变阻器：300 Ω ，3 A。

(3) 电压表：300 V/75 V。

(4) 直流电流表：30 A。

(5) 功率表：5 A，300 V。

(6) 转速计：测量转速。

(7) 导线若干，开关，电叉。

3. 实训方法和步骤

(1) 伏安法测直流电机电枢绕组冷态电阻。图 1-10 为实验接线图，具体步骤如下。

① 按实验接线图将各元器件可靠连接。测量电枢绕组时，不接入励磁绕组。

② 测量室温和电机铁心温度并记录，两者比较确认电机处于冷态。

③ 将滑动变阻器 R 调至最大值，然后接通电源，调节 R 使实验电流为变阻器额定电流 (3 A)，测量此时绕组的电压值和电流值，并记录于表 1-1 中。

④ 将绕组旋转 120° 机械角，重复测量一次并记录，之后再将绕组旋转 120° 测量一次并记录。

(2) 伏安法测直流电机励磁绕组冷态电阻。图 1-11 为实验接线图，具体步骤如下。

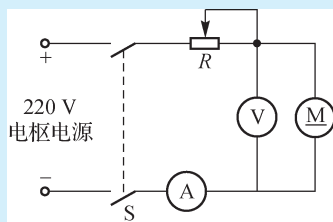


图 1-10 伏安法测直流电机电枢绕组冷态电阻

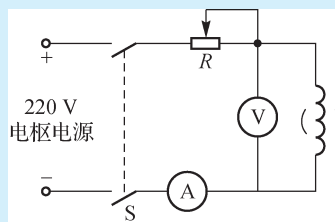


图 1-11 伏安法测直流电机励磁绕组冷态电阻

- ① 按实验接线图将各元器件可靠连接。测量励磁绕组时，不接入电枢绕组。
- ② 将滑动变阻器 R 调至最大值，然后接通电源，调节滑动变阻器 R 使实验电流接近励磁电流额定值，测量此时绕组电压值和电流值，并记录于表 1-2 中。

4. 实验数据记录

将实验数据记录于表 1-1 和表 1-2 中。

表 1-1 伏安法测直流电机电枢绕组冷态电阻记录表格

序 号	电枢电压 /V	电枢电流 /A	电枢电阻 / Ω
1			
2			
3			

表 1-2 伏安法测直流电机励磁绕组冷态电阻记录表格

序 号	励磁电压 /V	励磁电流 /A	励磁电阻 / Ω
1			
2			
3			

5. 注意事项

- (1) 在测量直流电机冷态电枢电阻时，为防止因实验电流过大而引起绕组的温度上升，应调节滑动变阻器使实验电流不超过电机额定电流的 10%。
- (2) 测试过程中应高度重视人身安全，一定要在确认无人触碰裸露导线、接线端子的情况下方能合闸供电。当要改接导线或进行其他涉电操作时，首先应断开电源。
- (3) 注意保护设备、仪器不受损害，接线完毕后应仔细检查，防止错接漏接，严格按照设备、仪器操作规程进行操作，严禁擅自改变测量方案，严禁进行不熟悉的操作。

思考与练习

1. 直流电机的基本结构主要包括哪两大部分？它们的作用主要是什么？
2. 一台直流电动机额定功率 $P_N=180\text{ kW}$ ，额定电压 $U_N=230\text{ V}$ ，效率 $\eta_N=89.5\%$ ，求额定输入功率和额定电流。
3. 为什么一台直流电机既可以作为电动机运行，又可以作为发电机运行？
4. 已知某直流电动机的额定功率 $P_N=240\text{ kW}$ ，额定电压 $U_N=460\text{ V}$ ，额定转速 $n_N=600\text{ r/min}$ ，试求该电动机的额定电流。
5. 已知某直流发电机的额定功率 $P_N=10\text{ kW}$ ，额定电压 $U_N=230\text{ V}$ ，额定转速 $n_N=2\ 850\text{ r/min}$ ，效率 $\eta_N=85\%$ ，求它的额定电流及额定负载时的输入功率。
6. 如何判断直流电机是运行于发电机状态还是电动机状态？其能量转换关系如何？
7. 为什么直流电机的电枢中的电流是交变电流？直流电机的换向器是如何将交变电流转换成电刷上的直流电的？