

# 第一章 直流电机

直流电机是一种通过磁场的耦合作用实现机械能与直流电能相互转换的旋转式机械，包括直流发电机和直流电动机。将机械能转换为电能的是直流发电机，将电能转换为机械能的是直流电动机。

与交流电机相比，直流电机结构复杂，成本高，运行维护较困难。但直流电动机调速性能好，启动转矩大，过载能力强，在启动和调速要求较高的场合，仍获得广泛应用。作为直流电源的直流发电机虽已逐步被晶闸管整流装置所取代，但在电镀、电解行业中仍被继续使用。

## 第一节 直流电机的基本原理与基本结构

直流电机是根据导体切割磁感线产生感应电动势和载流导体在磁场中受到电磁力的作用这两条基本原理制造的。因此，从结构上看，任何电机都包括磁路和电路两部分；从原理上讲，任何电机都体现了电和磁的相互作用。

### 一、直流电机的工作原理

#### (一) 直流发电机工作原理

图 1-1 所示两极直流发电机模型，可说明直流发电机的基本工作原理。图中，N、S 是一对固定不动的磁极。磁极可以由永久磁铁制成，但通常是在磁极铁心上绕制励磁绕组，在励磁绕组中通入直流电流，即可产生 N、S 极。在 N、S 磁极之间装有由铁磁性物质构成的圆柱体，在圆柱体外表面的槽中嵌放了线圈

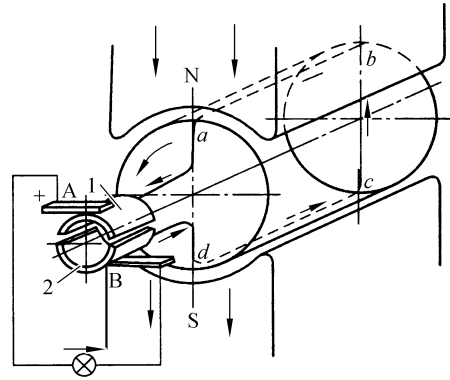


图 1-1 直流发电机工作原理示意图

圈  $abcd$ ，整个圆柱体可在磁极内部旋转。整个转动部分称为转子或电枢。电枢线圈  $abcd$  的两端分别与固定在轴上相互绝缘的两个半圆铜环相连接，这两个半圆铜环称为换向片，即构成了简单的换向器。换向器通过静止不动的电刷 A 和 B，将电枢线圈与外电路接通。

电枢由原动机拖动，以恒定转速按逆时针方向旋转，转速为  $n$  ( r/min )。若导体的有效长度为  $l$ ，线速度为  $v$ ，导体所在位置的磁感应强度为  $B$ ，根据电磁感应定律，则每根导体的感应电动势为  $e = Blv$ ，其方向可用右手定则确定。当线圈有效边  $ab$  和  $cd$  切割磁感线时，便在其中产生感应电动势。如图 1-1 所示瞬间，导体  $ab$  中的电动势方向由  $b$  指向  $a$ ，导体  $cd$  中的电动势则由  $d$  指向  $c$ ，从整个线圈来看，电动势的方向为  $d$  指向  $a$ ，故外电路中的电流自换向片 1 流至电刷 A，经过负载，流至电刷 B 和换向片 2，进入线圈。此时，电流流出处的电刷 A 为正电位，用“+”表示；电流流入线圈处的电刷 B 为负电位，用“-”表示。电刷 A 为正极，电刷 B 为负极。

电枢旋转  $180^\circ$  后，导体  $ab$  和  $cd$  以及换向片 1 和 2 的位置同时互换，电刷 A 通过换向片 2 与导体  $cd$  相连接。此时，由于导体  $cd$  取代了原来  $ab$  所在的位置，即转到 N 极下，改变了原来的电流方向，即由  $c$  指向  $d$ ，所以电刷 A 的极性仍然为正。同时，电刷 B 通过换向

片 1 与导体  $ab$  相连接，而导体  $ab$  此时已转到 S 极下，也改变了原来电流方向，由  $a$  指向  $b$ ，因此，电刷 B 的极性仍然为负。通过换向器和电刷的作用，及时地改变线圈与外电路的连接，可使线圈产生的交变电动势变为电刷两端方向恒定的电动势，保持外电路中的电流按一定方向流动。实际的发动机，通常由多个线圈按一定规律连接构成电枢绕组。

## (二) 直流电动机工作原理

图 1-2 所示为直流电动机工作原理示意图，其基本结构与发电机完全相同，只是将直流电源接至电刷两端。当电刷 A 接至电源的正极，电刷 B 接至电源的负极时，电流将从电源正极流出，经过电刷 A、换向片 1、线圈  $abcd$  到换向片 2 和电刷 B，最后回到负极。根据电磁力定律，

载流导体在磁场中受电磁力的作用，其方向由左手定则确定。图 1-2 中，导体  $ab$  所受电磁力方向向左，而导体  $cd$  所受电磁力的方向向右，这样就产生了一个转矩。在转矩的作用下，电枢便按逆时针方向旋转起来。当电枢从图 1-2 所示的位置转过  $90^\circ$  时，线

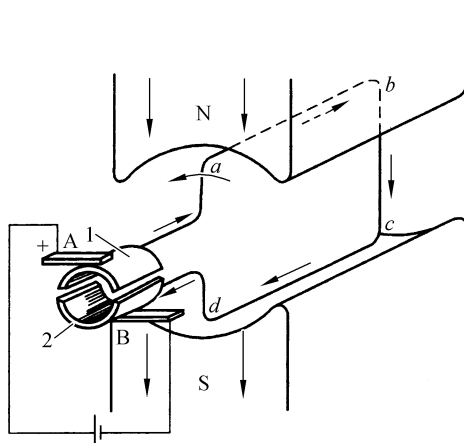


图 1-2 直流电动机工作原理示意图

圈磁感应强度为零，因而使电枢旋转的转矩消失，但由于机械惯性，电枢仍能转过一个角度，使电刷 A、B 分别与换向片 2、1 接触，于是线圈中又有电流流过。此时电流从正极流出，经过电刷 A、换向片 2、线圈到换向片 1 和电刷 B，最后回到电源负极。此时导体  $ab$  中的电流改变了方向，并且导体  $ab$  已由 N 极下转到 S 极下，其所受电磁力方向向右，同时，处于 N 极下的导体  $cd$  所受的电磁力方向向左，因此，在转矩的作用下，电枢继续沿着逆时针方向旋

转。这样，电枢便一直旋转下去，这就是直流电动机的基本原理。

由此可知：直流电机既可作为发电机运行，也可作为电动机运行，这就是直流电机的可逆原理。如果原动机拖动电枢旋转，通过电磁感应，便将机械能转换为电能，供给负载，这就是发电机；如果由外部电源给电机提供电能，由于载流导体在磁场中的作用产生电磁力，建立电磁转矩，拖动负载转动，又成为电动机了。

## 二、直流电机的基本结构

直流电机由定子（固定不动）与电枢（旋转）两大部分组成。定子与电枢之间有空隙，称为气隙。直流电机的结构示意图如图 1-3 所示。

### （一）定子部分

定子是直流电机的静止部分，主要由主磁极、换向磁极、机座、端盖与电刷装置等组成。

#### 1. 主磁极

主磁极由磁极铁心和励磁绕组组成。磁极铁心由

1~1.5 mm 厚的低碳钢板冲片叠压铆接而成。在励磁

线圈中通入直流电流后，便产生主磁场。主磁极可以有一对、两对或者多对，它是用螺栓固定在机座上的。

#### 2. 换向磁极

换向磁极由铁心和换向磁极绕组组成，位于两主磁极之间，是比较小的磁极。其作用是

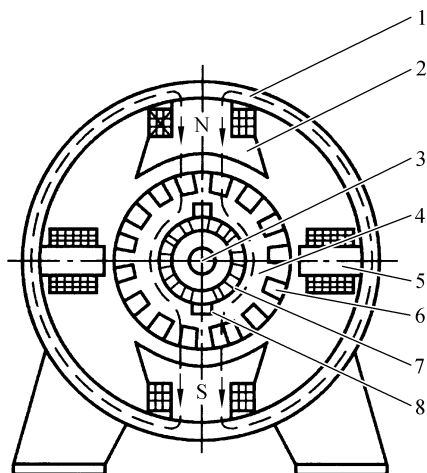


图 1-3 直流电机的结构示意图

1—机座；2—主磁极；3—转轴；4—铁心；  
5—换向磁极；6—电枢绕组；7—换向器；

8—电刷

产生附加磁场，以改善电机的换向条件，减小电刷与换向片之间的火花。换向磁极绕组总是与电枢绕组串联，其匝数少，导线粗。换向磁极铁心通常都用厚钢板叠制而成。在小功率的直流电机中也有不装换向磁极的。

### 3. 机座

机座由铸钢或厚钢板制成，是电机的支架，用来安装主磁极和换向磁极等部件。它既是电机的固定部分，又是电机磁路的一部分。

### 4. 端盖

在机座的两边各有一个端盖，端盖的中心处装有轴承，用以支持转子的转轴。端盖上还固定有电刷架，利用弹簧把电刷压在转子的换向器上。

### 5. 电刷装置

电刷与换向器配合可以把转动的电枢绕组和外电路连接，并把电枢绕组中的交流量转变成电刷端的直流量。

## (二) 电枢部分

直流电机的转子又被称为电枢，主要由电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等组成。

### 1. 电枢铁心

电枢铁心通常用 0.5 mm 厚、表面涂有绝缘物的硅钢片叠压而成。其表面均匀开槽，用来嵌放电枢绕组。电枢铁心也是直流电机磁路的一部分。

### 2. 电枢绕组

电枢绕组由许多相同的线圈组成，按一定规律嵌放在电枢铁心的槽内，并与换向器连接，其作用是产生感应电动势和电磁转矩。

### 3. 换向器

换向器又称整流子，是直流电机的特有装置。它由许多楔形铜片组成，片间用云母或者其他垫片绝缘。其外观呈圆柱形，装在转轴上。每一换向铜片按一定规律与电枢绕组的线圈连接。在换向器的表面紧压着电刷，使旋转的电枢绕组与静止的外电路相通，其作用是将直流电动机输入的直流电流转换成电枢绕组内的交变电流，进而产生恒定方向的电磁转矩，或者将直流发电机电枢绕组中的交变电动势转换成输出的直流电压。

### (三) 气 隙

气隙是电机磁路的重要部分。转子要旋转，定子与转子之间必须要有气隙，称为工作气隙。气隙路径虽短（对于小型电机一般为 0.5 ~ 5 mm，对于大型电机一般为 5 ~ 10 mm），但由于气隙磁阻远大于铁心磁阻，其对电机性能有很大影响。

## 三、直流电机的铭牌

电机制造厂按一定标准及技术条件要求，规定的电机高效长期稳定运行的经济技术参数，称为电机的额定值。每台直流电机的机座上都有一个铭牌，其上标有电机型号和各项额定值，用以表示电机的主要性能和使用条件。

### 1. 电机型号

型号表明了电机的系列及主要特点。知道了电机的型号，便可从相关手册及资料中查出该电机的有关技术数据。

直流电机应用广泛，型号很多。我国的直流电机的主要系列有：

Z 系列：一般用途的直流电动机。

ZF 系列：一般用途的直流发电机。

ZTD 系列：电梯用直流电动机。

ZZJ 系列：冶金及起重用直流电动机。

ZQ 系列：直流牵引电动机。

Z-H 系列：船用直流电动机。

ZA 系列：防爆安全用电动机。

## 2. 额定功率 $P_N$

额定功率指电机在额定运行状况下的输出功率。对于发电机，额定功率是指输出电功率，

$P_N = U_N I_N$ ；对于电动机，额定功率是指轴上输出的机械功率， $P_N = U_N I_N \eta_N$ 。

## 3. 额定电压 $U_N$

额定电压指额定运行状况下，直流发电机的输出电压或直流电动机的输入电压。

## 4. 额定电流 $I_N$

额定电流指额定电压和额定负载下允许电机长期输入（电动机）或输出（发电机）的电流。

## 5. 额定转速 $n_N$

额定转速指电动机在额定电压和额定负载下的旋转速度。

## 6. 电动机额定效率 $\eta_N$

电动机额定效率指直流电动机额定输出功率  $P_N$  与电动机额定输入功率  $P_1 = U_N I_N$  比值的

百分数。

此外，铭牌上还标有励磁方式、额定励磁电压、额定励磁电流和绝缘等级等参数。

## 第二节 直流电动机电枢绕组的感应电动势和电磁转矩

### 一、电枢绕组的感应电动势

电枢绕组的感应电动势是指电动机正、负电刷之间的电动势，它等于一个支路中所有串联导体感应电动势之和。当电枢转动时，电枢绕组中的导体在不断切割磁感线，因此每根载流导体中将产生感应电动势，其大小平均值为  $E = Blv$ ，其方向由右手定则确定。磁感应强度  $B$  与每极磁通  $\Phi$  成正比，导体的运动速度  $v$  与电枢的转速  $n$  成正比，而导体的有效长度和绕组匝数都是常数，因此直流电动机两电刷间总的电枢电动势的大小为

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

式中  $C_e$ ——与电动机结构有关的一常数，称为电动势系数；

$\Phi$ ——每极磁通 ( Wb )；

$n$ ——电动机转速 ( r/min )；

$E_a$ ——电枢电动势 ( V )。

由此可知，直流电动机在旋转时，电枢电动势  $E_a$  的大小与每极磁通  $\Phi$  和电动机转速  $n$  的乘积成正比，它的方向与电枢电流方向相反，在电路中起着限制电流的作用。

### 二、电磁转矩



根据电磁力定律，载流导体在磁场中受到电磁力的作用。每根载流导体在磁场中所受电磁力平均值为  $F = BIl$ 。对于给定的电动机，在线性磁路中，磁感应强度  $B$  与每个磁极的磁通  $\Phi$  成正比，电磁力  $F$  与电枢电流  $I$  成正比，而导线在磁极磁场中的有效长度  $l$  及转子半径等都是固定的，仅取决于电动机的结构，因此直流电动机的电磁转矩  $T$  的大小可表示为

$$T = C_T \Phi I_a \quad (1-2)$$

式中  $C_T$ ——与电动机结构有关的常数，称为转矩系数；

$\Phi$ ——每极磁通 ( Wb )；

$I_a$ ——电枢电流 ( A )；

$T$ ——电磁转矩 ( N·m )。

由式 ( 1-2 ) 可知，直流电动机的电磁转矩  $T$  与每极磁通  $\Phi$  和电枢电流  $I_a$  的乘积成正比。电磁转矩的方向由左手定则决定。直流发电机的电磁转矩是制动性转矩，其方向与电机旋转方向相反；直流电动机的电磁转矩是拖动性转矩，其方向与电机旋转方向相同。

### 三、电磁功率

如果原动机带动直流发电机的电枢旋转，则电枢绕组切割气隙磁场而产生感应电动势  $E_a$ 。在感应电动势  $E_a$  的作用下形成电枢电流  $I_a$ ，其方向与感应电动势  $E_a$  相同。显然  $I_a$  与  $E_a$  的乘积表示发电机的总电功率，称为电磁功率  $P_{em}$ 。

$$P_{em} = E_a I_a = C_e \Phi n I_a = \frac{pN}{60a} \Phi n I_a = \frac{pN}{60a} \Phi I_a \times \frac{2\pi n}{60} = T \Omega \quad (1-3)$$

式中  $a$ ——支路对数；

$\Omega$ ——角速度 ( rad/s )；

$N$ ——总导体数。

由式 ( 1-3 ) 可知，机械性质的功率  $T\Omega$  与电性质的功率  $E_a I_a$  相等，表明发电机把这部分机械功率转变为电功率。

### 第三节 他励电动机的运行原理与机械特性

图 1-4 所示为一台他励直流电动机的结构示意图和电路图。电枢电动势  $E_a$  为反电动势，与电枢电流  $I_a$  方向相反；电磁转矩  $T$  为拖动转矩，方向与电动机转子的旋转方向一致； $T_L$  为负载转矩； $T_0$  为空载转矩，方向与转子的旋转方向相反。

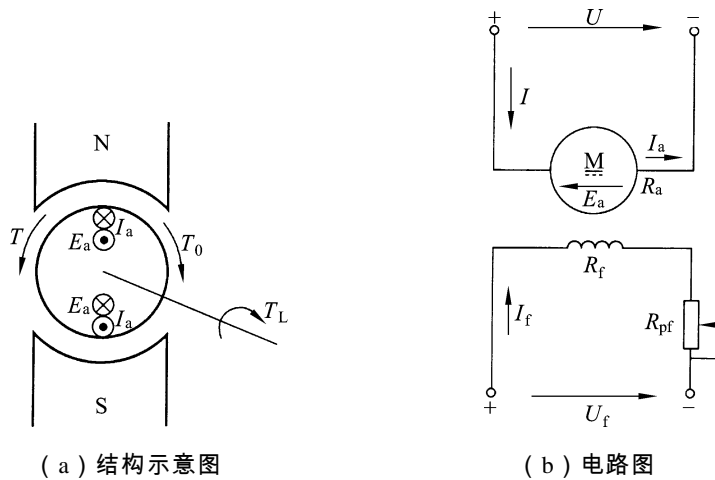


图 1-4 他励直流电动机结构示意图和电路图

#### 一、直流电机的励磁方式

直流电机的励磁绕组的供电方式称为励磁方式。直流电机按励磁绕组与电枢绕组连接方式的不同分为他励直流电机、并励直流电机、串励直流电机与复励直流电机四种，如图 1-5 所示。

图 1-5 ( a ) 所示为他励直流电机，励磁绕组与电枢绕组分别用两个独立的直流电源供电；

图 1-5 (b) 所示为并励直流电机，励磁绕组与电枢绕组并联，由同一直流电源供电；图 1-5 (c) 所示为串励直流电机，励磁绕组与电枢绕组串联；图 1-5 (d) 所示为复励直流电机，既有并励绕组，又有串励绕组。直流电机的并励绕组一般电流较小，导线细，匝数较多；串励绕组的电流较大，导线较粗，匝数较少，因而不难辨别。

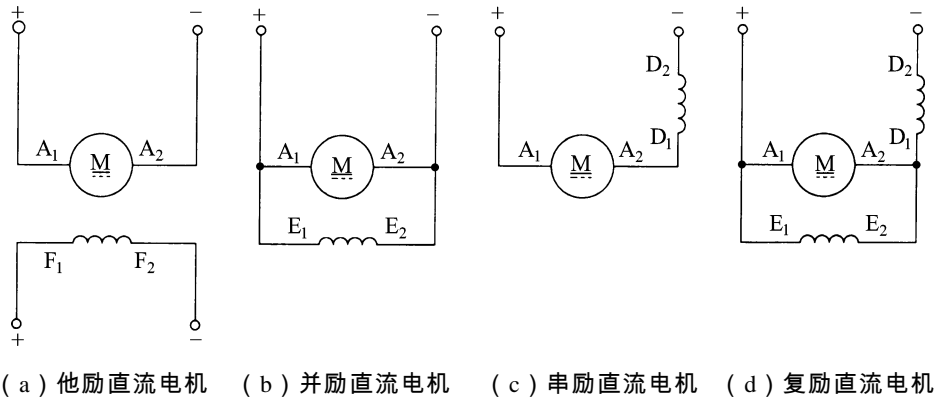


图 1-5 直流电机的励磁方式

## 二、直流电动机的基本方程式

直流电动机的基本方程式包括直流电动机稳定运行时电路系统的电动势平衡方程式，机械系统的转矩平衡方程式和能量转换过程中的功率平衡方程式。这些方程式反映了直流电动机内部的电磁过程，也表达了电动机内外的机电能量转换，说明了直流电动机的运行原理。

### (一) 电动势平衡方程式

由基尔霍夫定律可知，在电动机电枢电路中存在回路电压方程式如下：

$$U = E + I_a R_a \quad (1-4)$$

式中  $U$  ——电枢电压 (V)；

$I_a$  ——电枢电流 (A)；

$R_a$  ——电枢回路中的内电阻 (  $\Omega$  )。

## (二) 功率平衡方程式

直流电动机的输入电功率是不可能全被转换成机械功率的，因为在转换的过程中存在着各种损耗。它们按性质可分为机械损耗  $P_m$ 、铁心损耗  $P_{Fe}$ 、铜损耗  $P_{Cu}$  和附加损耗  $P_s$  四种。

(1) 机械损耗  $P_m$ ：电动机旋转时，必须克服摩擦阻力，因此产生机械损耗。其中有轴与轴承摩擦损耗，电刷与换向器摩擦损耗，以及转动部分与空气的摩擦损耗等。

(2) 铁心损耗  $P_{Fe}$ ：当直流电动机旋转时，电枢铁心因其磁场反复变化而产生的磁滞损耗和涡流损耗称为铁心损耗。

上述机械损耗  $P_m$  和铁心损耗  $P_{Fe}$  在直流电动机转起来，尚未带负载时就存在，故上述两种损耗之和称为空载损耗  $P_0$ ，即  $P_0 = P_m + P_{Fe}$ 。

由于机械损耗  $P_m$  与铁心损耗  $P_{Fe}$  都会产生与旋转方向相反的制动转矩，该转矩将抵消一部分拖动转矩，因此这个制动转矩称为空载转矩  $T_0$ 。

(3) 铜损耗  $P_{Cu}$ ：当直流电动机运行时，在电枢回路和励磁回路中都有电流流过，因此在绕组电阻上产生的损耗称为铜损耗，简称铜耗。

(4) 附加损耗  $P_s$ ：又称杂散损耗，其值很难计算和测定，一般取 ( 0.5% ~ 1% )  $P_N$ 。

由此可知，直流电动机的总损耗  $\sum P$  为

$$\sum P = P_m + P_{Fe} + P_{Cu} + P_s \quad (1-5)$$

当他励直流电动机接上电源时，电枢绕组中流过的电流为  $I_a$ ，电源向电动机输入的功率为

$$P_1 = UI = UI_a = (E_a + I_a R_a) I_a = E_a I_a + I_a^2 R_a = P_{em} + P_{Cu} \quad (1-6)$$

上式表明：输入的电功率一部分被电枢绕组消耗（电枢铜耗），一部分作为电磁功率  $P_{em}$ 。

从以上分析可知，电动机旋转后，还要克服各类摩擦引起的机械损耗  $P_m$ 、电枢铁心损耗  $P_{Fe}$ ，以及附加损耗  $P_s$ ，但大部分功率从电动机轴上输出，故电动机输出的机械功率为

$$P_2 = P_{em} - P_{Fe} - P_m - P_s \quad (1-7)$$

若忽略附加损耗，则输出机械功率  $P_2$  为

$$\begin{aligned} P_2 &= P_{em} - P_{Fe} - P_m = P_{em} - P_0 \\ &= P_1 - P_{Cua} - P_0 = P_1 - \sum P \end{aligned} \quad (1-8)$$

则直流电动机的效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_2}{P_2 + \sum P} \times 100\% \quad (1-9)$$

一般中小型直流电动机的效率为 75% ~ 85%，大型直流电动机的效率为 85% ~ 94%。他

励直流电动机的功率平衡关系可用功率流程图来表示，如图 1-6 所示。

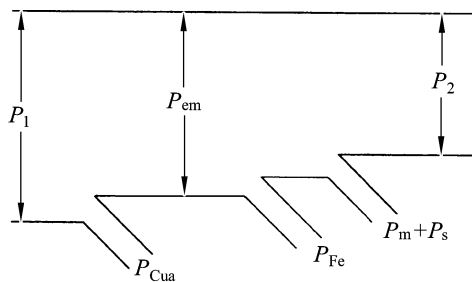


图 1-6 他励直流电动机功率流程图

### (三) 转矩平衡方程式

对直流电动机来说，电磁转矩是拖动性质的转矩，与负载转矩  $T_L$  和空载转矩  $T_0$  相平衡，即

$$T = T_L + T_0 \quad (1-10)$$

式中  $T$  —— 电动机的电磁转矩 (N·m)；

$T_L$  —— 电动机轴上输出的机械转矩 (负载转矩)；

$T_0$ ——空载转矩 ( N·m )。

由于空载转矩  $T_0$  仅为电动机额定转矩的 2% ~ 5% ,所以在重载或额定负载下常忽略不计 ,  
则负载转矩  $T_L$  近似与电磁转矩  $T$  相等。

### 三、他励直流电动机的机械特性

直流电动机的机械特性是指在稳定运行情况下 , 电动机的转速  $n$  与机械负载转矩  $T_L$  之间的关系 , 即  $n = f(T_L)$ 。机械特性表明了电动机转速因外部负载变化而变化的情况。由于电动机电磁转矩  $T$  近似等于负载转矩  $T_L$  , 故  $n = f(T_L)$  常写成  $n = f(T)$ 。机械特性是电动机的主要特性 , 是分析电动机启动、反转、调速和制动的重要工具。

#### (一) 他励直流电动机机械特性方程式

由他励直流电动机电动势平衡方程式

$$U = E_a + I_a (R_a + R_{pa}) = E_a + I_a R \quad (1-11)$$

式中  $R_{pa}$  ——电枢回路外串电阻 (  $\Omega$  );

$R$  ——电枢回路总电阻 (  $\Omega$  )。

以及  $E_a = C_e \Phi n$  , 可得

$$n = \frac{U - I_a R}{C_e \Phi}$$

再由  $T = C_T \Phi I_a$  , 得  $I_a = T / C_T \Phi$  , 最终可得机械特性方程 :

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} T \quad (1-12)$$

当  $U$ 、 $R$ 、 $\Phi$  数值不变时，转速  $n$  与电磁转矩  $T$  为线性关系，其机械特性曲线如图 1-7 所示。

由图可知，式 (1-12) 还可以写成

$$n = n_0 - \beta T = n_0 - \Delta n \quad (1-13)$$

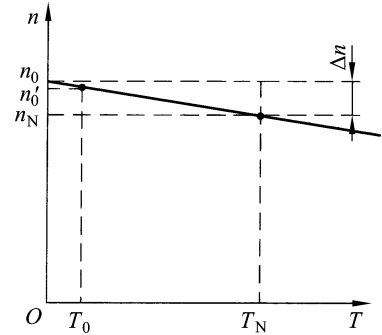
式中  $n_0$  —— 电磁转矩  $T = 0$  时的转速，称为理想空载转速，

$n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$  (r/min)。实际上电动机空载运行时，由于  $T = T_0 \neq 0$ ，所以实际空载转速  $n'_0$  略小于理想空载转速  $n_0$ 。

$\beta$  —— 机械特性的斜率， $\beta = \frac{R}{C_e C_T \Phi^2}$ 。在同一  $n_0$  下， $\beta$  值较小时，转速随电磁转矩的变化较小，称此机械特性为硬特性； $\beta$  值越大，表明直线倾斜得越厉害，机械特性为软特性。

$\Delta n$  —— 转速降， $\Delta n = \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} T$  (r/min)。当电动机负载变化时，如  $T_L$  增大，则电动机转速下降，电动机的电磁转矩  $T$  也随之增大，直至新的稳定工作点，此时转速降  $\Delta n$  也增大，且斜率  $\beta$  越大，转速下降越快。

图 1-7 他励直流电动机机械特性



## (二) 他励直流电动机的固有机械特性

他励直流电动机在电源电压、磁通为额定值，电枢回路未接附加电阻  $R_{pa}$  时的机械特性称为固有机械特性，其特性方程为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T \quad (1-14)$$

由于电枢绕组的电阻  $R_a$  阻值很小，因此  $\Delta n$  很小，固有机械特性为硬特性。

## (三) 他励直流电动机的人为机械特性

人为地改变电动机气隙磁通  $\Phi$ 、电源电压  $U$  和电枢回路串联电阻  $R_{pa}$  等参数，获得的机械特性称为人为机械特性。

### 1. 电枢回路串联电阻 $R_{pa}$ 时的人为特性

电枢回路串联电阻  $R_{pa}$  时的人为机械特性方程为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_{pa}}{C_e C_T \Phi_N^2} T \quad (1-15)$$

与固有机械特性相比，电枢回路串联电阻  $R_{pa}$  时的人为机械特性的特点为：

(1) 理想空载转速  $n_0$  保持不变。

(2) 机械特性的斜率  $\beta$  随  $R_{pa}$  的增大而增大，特性曲线变软。图 1-8 所示为不同  $R_{pa}$  时的人为机械特性曲线。从图中可以看出，改变电阻  $R_{pa}$  的大小，可以使电动机的转速发生变化，因此电枢回路串联电阻可用于调速。

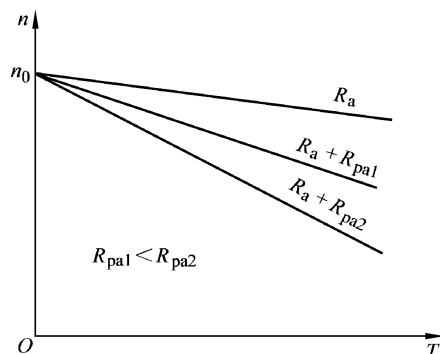


图 1-8 他励直流电动机电枢回路串联电阻时的人为机械特性

### 2. 改变电源电压时的人为机械特性

当  $\Phi = \Phi_N$ ，电枢回路不串联电阻，即  $R_{pa} = 0$  时，改变电源电压的人为机械特性方程为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T \quad (1-16)$$

由于受到绝缘强度的限制，电源电压只能从电动机额定电压  $U_N$  向下调节。与固有机机械特性相比，改变电源电压时的人为机械特性的特点为：

(1) 理想空载转速  $n_0$  正比于电压  $U$ ， $U$  下降时， $n_0$  成正比例减小。

(2) 特性曲线斜率  $\beta$  不变。图 1-9 所示为调节电压时的一组人为机械特性曲线，它是一组平行直线。因此，降低电源电压也可用于调速，且  $U$  值越低，转速越低。

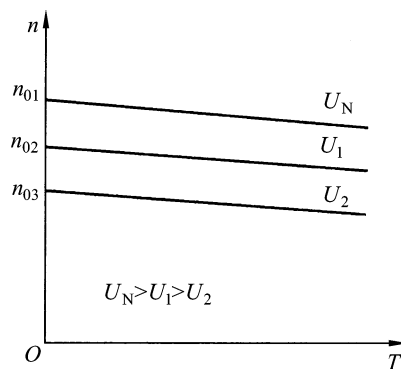


图 1-9 他励直流电动机在改变电源电压时的人为机械特性

### 3. 改变磁通时的人为机械特性

保持电动机的电枢电压  $U = U_N$ ，电枢回路不串联电阻，即  $R_{pa} = 0$ ，此时改变磁通，则人为机械特性方程为



$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T \quad (1-17)$$

由于在设计电动机时， $\Phi_N$  处于磁化曲线的膝部，接近饱和段，因此，磁通只可从  $\Phi_N$  往下调节，也就是调节励磁回路串联的可变电阻  $R_{pf}$  使其增大，从而减小励磁电流  $I_f$ ，进而减小磁通  $\Phi$ 。与固有机机械特性相比，改变磁通时的人为机械特性的特点是

- (1) 理想空载转速与磁通成反比，磁通  $\Phi$  减小， $n_0$  升高。
- (2) 斜率  $\beta$  与磁通的二次方成反比，磁通减小使斜率增大。

图 1-10 所示为改变磁通时他励直流电动机的人为机械特性曲线。随着  $\Phi$  减小， $n_0$  升高，曲线斜率变大。若用于调速，则  $\Phi$  越小，转速越高。

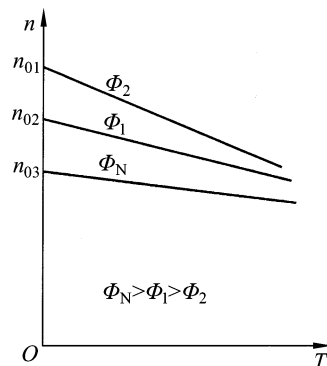


图 1-10 他励直流电动机在改变磁通时的人为机械特性

#### 第四节 他励直流电动机的启动和制动

电动机的启动和制动特性是衡量电动机运行性能的一项重要指标。特别是有些生产机械，例如可逆式轧钢机、高炉进料的卷扬机、龙门刨床等，经常进行正反转，拖动这些生产机械的电动机也就需要频繁地启动和制动。因此，了解电动机的启动和制动特性是十分必要的。

要评价电动机的启动和制动性能，首先要对电动机启动和制动的物理过程进行分析，以便了解启动和制动过程中电流和转矩的变化规律，然后才能正确地选择启动与制动方法。

##### 一、他励直流电动机的启动

他励直流电动机从静止状态转动起来叫作启动，其达到某一稳态转速的过程，叫作启动过程。生产机械对直流电动机的启动要求是：启动转矩  $T_{st}$  足够大，因为只有  $T_{st}$  大于负载转矩  $T_L$  时，电动机方可顺利启动；启动电流  $I_{st}$  不可太大；启动设备操作方便，启动时间短，运行