

第 2 章 直流电动机

内容提要

- 直流并（他）励电动机能量转换过程中的三大平衡关系。
- 直流电动机的工作特性、机械特性的特点。
- 直流电动机实现正、反转的方法。
- 直流串励电动机的特点和使用中的注意事项。

2.1 直流电动机的基本方程式

直流电动机的基本方程式是指直流电动机稳定运行时，电路系统的电压平衡方程式；机械系统的转矩平衡方程式；能量转换过程中的功率平衡方程式。

图 2.1 为并励直流电动机示意图，当接通直流电源时，一方面励磁电流 i_f 建立主极磁场，另一方面电枢电流 I_a 又与磁场相互作用而产生电磁转矩 T ，驱动电枢沿 T 方向以转速 n 旋转。负载转矩 T_L 与 n 方向相反，当电枢旋转时，电枢绕组又切割磁场而产生电势 E_a ， E_a 与 I_a 方向相反， E_a 称为反电势。

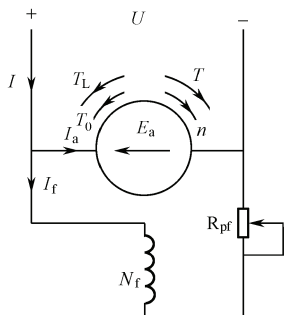


图 2.1 并励直流电动机

2.1.1 电压平衡方程式

根据图 2.1 用基尔霍夫电压定律，可得电压 U 平衡方程式：

$$U = E_a + I_a R_a \tag{2-1}$$

式中， R_a ——电枢绕组直流电阻及电刷与换向器的接触电阻之和；

U ——外加电源电压。

由上式可见，直流电动机中 $E_a < U$ ，这是判定直流电机运行于电动状态的依据（注意：若电机为发电机运行，则 $E_a > U$ ， $U = E_a - I_a R_a$ ）。

2.1.2 功率平衡方程式

1. 并励电动机能量流程图

直流并励电动机稳定运行时，电动机从电网吸收的功率 $P_1 = UI$ ，不可能全部转换成电动机轴上的机械功率，在能量转换中总有一些损耗。从 P_1 中首先应扣除小部分励磁回路的铜耗 P_{Cuf} ($P_{Cuf} = I_f^2 R_f$) 和电枢回路铜耗 P_{Cua} ($P_{Cua} = I_a^2 R_a$)，便得电磁功率 P_M ($P_M = E_a I_a$)，电与磁相互作用全部转换成机械功率：

$$P_M = E_a I_a = \frac{PN}{60a} \Phi n I_a = \frac{PN}{2\pi a} \Phi I_a \frac{2\pi n}{60} = T \omega \tag{2-2}$$

电动机运行时，还应从 P_M 中扣除机械损耗 P_j 和铁耗 P_{Fe} ，剩下的功率才是电动机轴上的输出功率 P_2 ，其能量流程如图 2.2 所示。

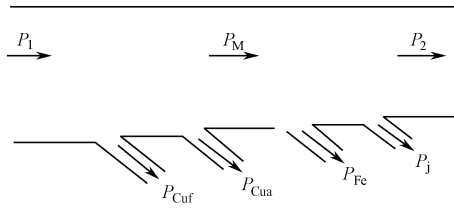


图 2.2 并励电动机能量流程图

2. 并励电动机功率平衡方程式

$$\begin{aligned} P_M &= P_1 - (P_{Cua} + P_{Cuf}) = P_1 - P_{Cu} \\ P_2 &= P_M - P_0 \end{aligned} \quad (2-3)$$

或

$$P_2 = P_1 - \Sigma P \quad (2-4)$$

式中， $\Sigma P = P_{Cua} + P_{Cuf} + P_j + P_{Fe}$ ——并励电动机总损耗；

P_j ——机械损耗，指轴与轴承之间，电刷与换向器之间，旋转电枢与空气之间的阻力产生的损耗；

$P_0 = P_j + P_{Fe}$ ——空载损耗。

2.1.3 转矩平衡方程式

从图 2.1 可见，当电动机稳定运行时，作用在电动机轴上有三个转矩：

(1) 电枢电流与磁场相互作用产生的电磁转矩 T ， T 与转速 n 方向相同，起拖动作用。

(2) 电动机空载阻转矩 T_0 ， T_0 与转速 n 方向相反， T_0 起制动作用。

(3) 电动机轴上的输出转矩 T_2 ，其值与电动机轴上拖动的生产机械负载转矩 T_L 相平衡，即 $T_2 = T_L$ ， T_L 与 n 方向相反， T_L 起制动作用。它们之间的关系为：

$$T = T_2 + T_0 = T_L + T_0 \quad (2-5)$$

由于 T_0 很小，一般 $T_0 \approx (2 \sim 6)\% T_N \approx 0$ ，则：

$$T \approx T_2 = T_L \quad (2-6)$$

上式说明，稳定运行时，电磁转矩 T 与负载转矩 T_L 大小近似相等，方向相反。转矩平衡方程式也可将式 (2-3) 两边同除以 ω ，得：

$$\begin{aligned} \frac{P_M}{\omega} &= \frac{P_2}{\omega} + \frac{P_0}{\omega} \\ T &= T_2 + T_0 \end{aligned}$$

2.2 直流并（他）励电动机的工作特性

并励电动机的励磁绕组 N_f 与电枢绕组 N_a 并接于同一电源上，但因电源电压 U 恒定不

变，这与励磁绕组单独接在另一电源上的效果完全一样，因此，并励电动机与他励电动机性能完全一样。不同的是他励电动机输入电流 I 就是电枢电流 I_a ，而并励电动机应从输入电流 I 中扣除励磁电流 I_f ，剩下才是电枢电流 I_a 。

当直流并励电动机外加电压 $U = U_N = \text{常数}$ ，励磁电流 $I_f = I_{fN} = \text{常数}$ ，电枢回路不外串电阻时，转速 n 、转矩 T 、效率 η 分别与输出功率 P_2 之间的关系，称为工作特性。

2.2.1 转速特性—— $n=f(P_2)$

将 $E_a = C_e \Phi_N n$ 代入电势平衡方程式 $U_N = E_a + I_a R_a$ 中，便得转速特性公式：

$$n = \frac{U_N - I_a R_a}{C_e \Phi_N} = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - I_a \frac{R_a}{C_e \Phi_N} \quad (2-7)$$

在并励电动机中，当负载 (T_L) 增加时， $P_2 \uparrow \rightarrow P_1 \uparrow \rightarrow I_a \uparrow$ ，此时影响电动机转速的因素有：

- (1) $I_a \uparrow$ ，电枢绕组压降 $I_a R_a$ 随之增加，从式 (2-7) 可见， n 趋于下降。
- (2) $I_a \uparrow$ ，与此同时，电枢反应的去磁作用 ($\Phi \downarrow$)，使 n 趋于上升。

一般第 (1) 种因素大于第 (2) 种因素的影响，结果使并励电动机的转速特性为一条微微向下倾斜的曲线，如图 2.3 曲线 1 所示。

2.2.2 转矩特性—— $T=f(p_2)$

根据转矩平衡方程式： $T = T_0 + T_2$ ，一般 T_0 为常数，则：

$$T_2 = \frac{P_2}{2\pi n/60} = 9.55 P_2 / n \quad (2-8)$$

若 n 不变，那么， $T_2 \propto P_2$ ，即 $T_2 = f(P_2)$ 为过原点的一条直线。但实际上，当负载增加， P_2 增加， n 略为下降，故 $T_2 = f(P_2)$ 为一条略为上翘的曲线。在 T_2 曲线上加上 T_0 ，便得 $T = f(P_2)$ 曲线，如图 2.3 曲线 2 所示。

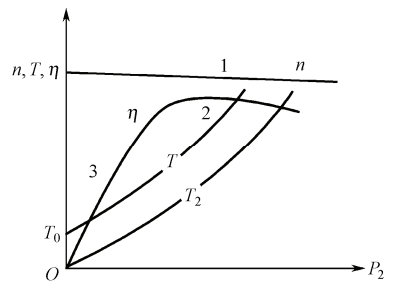


图 2.3 并励电动机工作特性

2.2.3 效率特性—— $\eta = f(P_2)$

根据直流电动机能流图 2.2 所示，可得出直流电动机的效率：

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \left(1 - \frac{\Sigma P}{P_1}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{P_{Fe} + P_j + P_{cua} + P_{cuf}}{UI}\right) \times 100\% \quad (2-9)$$

式中，铁耗 P_{Fe} 和机械损耗 P_j 分别与电机外加电压 U 和转速 n 有关，未带负载就已经存在了，二者之和 ($P_0 = P_{Fe} + P_j$)，称为空载损耗 P_0 ，而与电流无关，在电机正常工作时， n 及 U 变化不大，所以空载损耗又称不变损耗。

当每极磁通不变时， I_f 不变，励磁回路铜耗 P_{cuf} 也不变。电枢回路铜耗 $P_{cua} = I_a^2 R_a$ 与电枢电流 I_a^2 成正比，故铜耗 P_{Cu} 又称可变损耗。其效率特性曲线如图 2.3 曲线 3 所示。

当 P_2 从零逐渐增加， I_a 很小，可变损耗 $I_a^2 R_a$ 很小，可略去不计，电机的损耗仅有不变损耗 P_0 ，且很小，所以效率上升较快。当负载增加 ($P_2 \uparrow$) 到一定值，可变损耗 P_{Cua} 按电

流平方增加($P_{\text{Cua}} \propto I_a^2$), 总损耗 ΣP 上升较快, 效率不仅不增加反而下降., 从图中可见, 曲线中出现了最高效率 η_m 。

用数学的方法可以证明, 出现最高效率的条件是: 可变损耗 P_{Cua} 等于不变损耗 P_0 , 即:

$$P_{\text{Cua}} = P_0 \quad (2-10)$$

电动机的效率是运行性能主要指标之一, 它指出了根据负载大小正确选择电动机容量的原则; 当负载一定时, 若电动机的容量选择过大, 电动机长期轻载运行, 犹如大马拉小车, 效率很低; 若容量选择过小, 电动机长期过载运行, 效率也低, 且长期过载运行会使电动机寿命缩短甚至使电动机烧毁。

2.3 生产机械的负载转矩特性

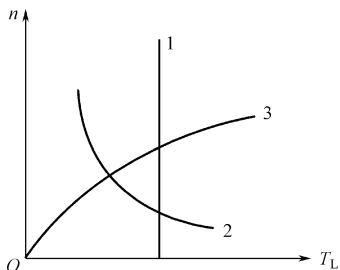
通常把生产机械的转速 n 与负载转矩 T_L 之间的关系, 即 $n = f(T_L)$ 称为生产机械的负载转矩特性。根据生产机械负载特性不同, 大致可分为以下三类。

1. 恒转矩负载

负载转矩 T_L 的大小不随转速 n 而改变, 称为恒转矩负载, 如图 2.4 曲线 1 所示。按负载转矩 T_L 与转速 n 方向之间的关系, 又可分为两类。

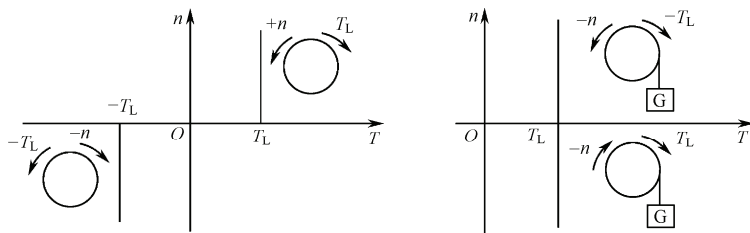
(1) 反抗性恒转矩负载。负载转矩 T_L 的大小不变, 其方向总是阻碍生产机械的运动, 即 T_L 与 n 方向相反。如生产机械的摩擦转矩, 当转动方向改变时, 摩擦转矩也随之反向。 T_L 永远起阻碍作用, 其特性曲线应位于一、三象限, 如图 2.5 (a) 所示。

(2) 位能性恒转矩负载。无论生产机械运动的方向 n 改变与否, 其负载转矩 T_L 的大小和方向始终保持不变, 如起重设备提升重物或下放重物。重物所产生的转矩 T_L 大小、方向均不改变。其特性曲线位于一、四象限, 如图 2.5 (b) 所示。



1—恒转矩负载; 2—恒功率负载; 3—通风机负载

图 2.4 生产机械负载转矩特性



(a) 反抗性恒转矩负载特性

(b) 位能性恒转矩负载特性

图 2.5 反抗性和位能性负载转矩特性

2. 恒功率负载

负载所需的功率 P_L 为一恒定值, 负载转矩 T_L 与转速 n 成反比, 称为恒功率负载。即:

$$P_L = T_L \omega = T_L \frac{2\pi n}{60} = 0.105 T_L n \quad (2-11)$$

例如，车床切削工件，粗加工时切削量大，阻力大，转速低；精加工时，切削量小，转速高。负载功率近似于一定值，如图 2.4 曲线 2 所示。

3. 通风机负载

负载转矩 T_L 的大小与转速 n 的平方成正比 ($T_L \propto n^2$) 的生产机械，即 $T_L = Cn^2$ (C 为常数)，如鼓风机、水泵等的叶片所受到的阻转矩，如图 2.4 曲线 3 所示。

以上是三种典型的负载特性，而实际负载通常是三种典型负载特性的综合。

2.4 直流电动机的机械特性

当直流电动机稳定运行时， $T = T_2 + T_0$ ，由于电动机的输出转矩 T_2 与负载转矩 T_L 大小相等，方向相反 ($T_2 = T_L$)，在忽略空载转矩 T_0 的情况下，电动机的电磁转矩 T 与负载转矩 T_L 平衡，即 $T \approx T_L$ 。当负载发生变化时，要求电磁转矩也随之改变，以达到新的平衡关系，电磁转矩的这一变化过程，其实质就是电动机内部达到新的平衡关系的过程，称为过渡过程，它必将引起电动机转速的变化。

电动机的机械特性是指电动机稳定运行时，电动机转速与转矩的关系 $n = f(T)$ ，它是分析电动机启动、制动、调速和运行的基础。

2.4.1 电动机机械特性方程式

如图 2.6 所示，可得电势平衡方程式：

$$U = E_a + I_a R$$

式中， $R = R_a + R_{pa}$ ——电枢回路总电阻；

R_{pa} ——电枢回路外串调节电阻；

R_{pf} ——励磁回路外串调节电阻。

将 $E_a = C_e \Phi n$ ， $T = C_T \Phi I_a$ 分别代入上式得：

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - I_a \frac{R}{C_e \Phi} \quad (2-12)$$

或

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - T \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} = n_0 - \beta T = n_0 - \Delta n \quad (2-13)$$

式中， n_0 ——理想空载转速，即电动机没有任何制动转矩 ($T_L + T_0 = 0$) 时，电动机的转速。实际运行中空载转矩 T_0 始终是存在的，因此，电动机本身的力量永远达不到 n_0 ，故称理想空载转速；

$\beta = R / C_e C_T \Phi^2$ ——直线方程的斜率；

$\Delta n = n_0 - n_N$ ——电动机带负载后的转速降。

一般 $\frac{\Delta n}{n_N} \times 100\% = \frac{n_0 - n_N}{n_N} \times 100\% \approx (3 \sim 8)\%$ ，从式 (2-13) 可见， β 越大，机械特性越软。

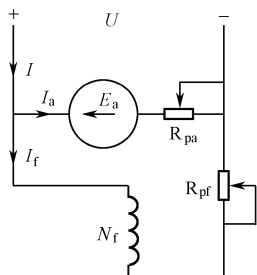


图 2.6 并励电动机电路图

2.4.2 固有机械特性

当并励电动机 $U = U_N$, $\Phi = \Phi_N$, 且电枢回路不外串电阻 ($R_{pa} = 0$), $R = R_a$ 时, 其方程为:

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

式 (2-14) 称为固有机特性方程式, 由此而作出的特性曲线称为固有机特性曲线, 如图 2.7 所示。其特点是:

(1) 对于任何一台直流电动机, 只有唯一的一条固有机特性曲线。

(2) 由于电枢回路无外串电阻, R_a 很小, 则 β 很小, 那么 Δn 很小, 因此它是一条微微下降的直线, 所以固有机特性曲线属于硬特性。

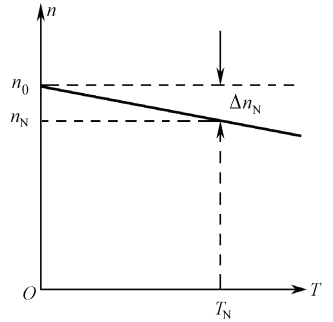


图 2.7 并励电动机固有机特性

2.4.3 人为机械特性

将式 (2-13) 中的 R 、 U 、 Φ 三个参数, 保持两个参数不变, 人为地改变其中一个参数所得到的机械特性, 称为人为机械特性。

1. 电枢回路串电阻 R_{pa} 的人为机械特性

当 $U = U_N$ 、 $\Phi = \Phi_N$ 时, 电枢回路串入调节电阻 R_{pa} 的人为机械特性方程式为:

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

将方程式中 R_{pa} 值作多次改变, 可得到一组不同斜率的人为机械特性曲线, 如图 2.8 所示。

其特点:

(1) 串入电阻 R_{pa} 增大或减小 ($R_{pa} \uparrow$ 或 $R_{pa} \downarrow$), 理想空载转速 n_0 不变。

(2) 串入电阻 R_{pa} 越大, β 越大, 转速降落 Δn 越大, 特性越软, 当负载发生变化时, 稳定性越差。

(3) 串入电阻 R_{pa} 越大, 电枢电流 I_a 流过 R_{pa} 产生的损耗越大。

电枢回路串电阻的机械特性曲线是直流电动机启动、调速、制动的基础。

2. 改变电源电压的人为机械特性

将图 2.6 中 R_{pa} 调至零, 且将并励改为他励, 得图 2.9 所示。由于电动机受绝缘强度的限制, 电枢电压一般以额定电压 U_N 为上限, 因此, 只能从 U_N 往下进行降压 ($U \downarrow$), 当 $\Phi = \Phi_N$, $R = R_a$ 时, $U \downarrow$, 其人为机械特性方程为:

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

当 U 多次改变时, 可得一组与固有机特性平行的人为机械特性曲线, 如图 2.10 所示。其特点:

(1) 理想空载转速 n_0 与电源电压成正比 ($n_0 \propto U$)。

(2) U 改变, β 不变, Δn 不变, 特性曲线互相平行。

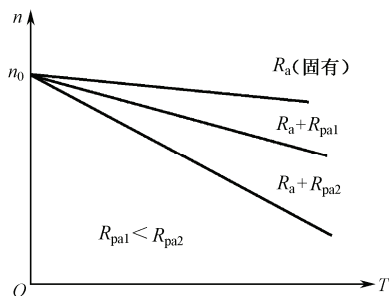


图 2.8 并励电动机串入不同 R_{pa} 的人为机械特性

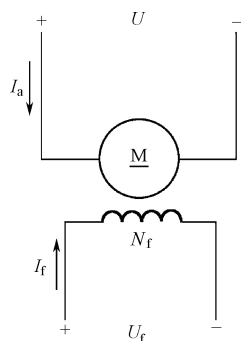


图 2.9 他励电动机接线图

(3) 当 $T = C$ 时, 降低电压 U , 可使电动机转速 n 降低。

3. 减弱磁通 Φ 时的人为机械特性

如图 2.6 所示, 当 $U = U_N$, 电枢回路不串接电阻 ($R_{pa} = 0$), $R = R_a$ 时, 改变磁通 Φ 的人为机械特性方程为:

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

由于设计电机磁路已接近饱和, 因此, 一般磁通从 Φ_N 开始减弱。它通过调节 $R_{pf} \uparrow \rightarrow I_f \downarrow \rightarrow \Phi \downarrow$ 来实现。不同磁通 Φ 值的人为机械特性曲线如图 2.11 所示。

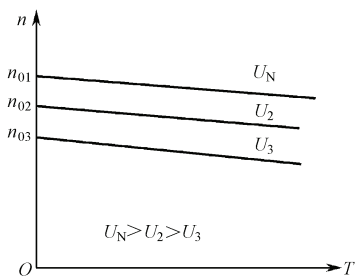


图 2.10 他励电动机不同电压的人为特性

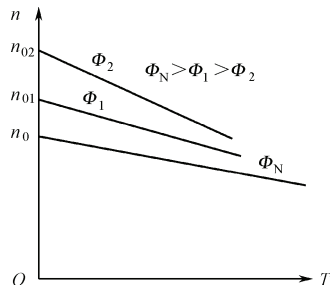


图 2.11 并励电动机不同磁通的人为机械特性

不同 Φ 值特性曲线的特点:

- (1) 理想空载转速 n_0 与磁通 Φ 成反比, 即当 $\Phi \downarrow \rightarrow n_0 \uparrow$ 。
- (2) 磁通 $\Phi \downarrow \rightarrow \beta \uparrow$, 且 β 与 Φ^2 成反比, 曲线变软。
- (3) 一般 $\Phi \downarrow \rightarrow n \uparrow$, 由于受机械强度的限制, 磁通 Φ 不能下降太多。

2.4.4 直流电动机的正、反转

许多生产机械常需要电动机能正、反转, 如龙门刨床工作台的往复运动。我们知道, 直流电动机的转向 n 是由转矩 T 方向决定的, 而 $T = C_T \Phi_N I_a$, 因此改变转矩的方法有两种。

(1) 保持电枢绕组两端电压 U 极性 (I_a 方向) 不变, 将励磁绕组反接 (即改变 I_f 方向, 达到改变 Φ 的方向)。

(2) 保持励磁绕组两端电压极性不变, (即 Φ 方向不变), 将电枢绕组反接 (即改变 I_a

方向), 旋转方向改变。若同时既改变 Φ 方向, 又改变 I_a 方向, 则电动机转向维持不变。

在并励电动机中, 励磁绕组 N_f 匝数多, 电感大, 在励磁绕组反接瞬间将产生较大的自感电势, 极易将励磁绕组和电器设备绝缘击穿。同时, 由于剩磁的原因, 建立反向磁通较缓慢, 拖延了反转时间, 故以上方法 (1) 较少采用, 而一般采用电枢反接来实现反转, 如图 2.12 所示。正转时 KM_1 闭合, KM_2 断开; 反转时 KM_2 闭合, KM_1 断开, 励磁电流 I_f 方向始终不变。

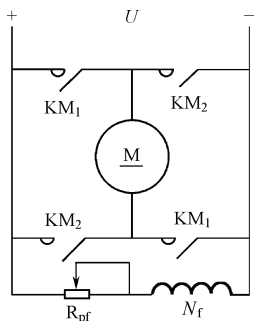


图 2.12 直流并励电动机正、反转电路图

2.5 直流串励电动机

2.5.1 串励电动机的接线与特点

1. 接线

直流串励电动机的励磁绕组 N_f 与电枢绕组 N_a 串联, 如图 2.13 所示。

2. 特点

(1) $I = I_a = I_f$ 。由于励磁电流 I_f 就是电枢电流, 所以串励电动机励磁绕组导线粗, 匝数少。

(2) 串励电动机的磁通 Φ 随电枢电流 I_a 而变化, 因此 Φ 与 I_a 的关系可用磁化曲线表示。

由于磁化曲线难以用准确的数学式来表达, 因此, 可将它分为磁路不饱和区 (曲线 a 点以下) 与磁路饱和区 (曲线 a 点以上) 两段来加以讨论, 如图 2.14 所示。

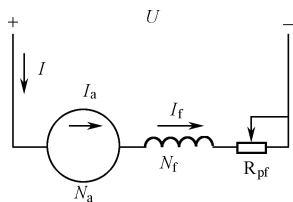


图 2.13 串励电动机接线图

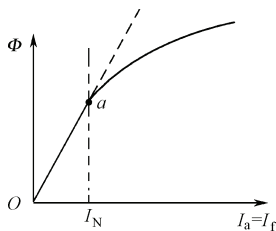


图 2.14 串励电动机磁化曲线

① 当磁路不饱和时的电势平衡方程式和转矩。

当磁路不饱和时:

$$\Phi \propto I_a$$

即

$$\Phi = K_f I_a \quad (2-18)$$

电压平衡方程式为:

$$U = E_a + I_a R \quad (2-19)$$

式中, $R = R_a + r_f + R_{pf}$;

K_f —常数。

电磁转矩为：

$$T = C_T \Phi I_a = C_T K_f I_a^2 = C'_T I_a^2 \quad (2-20)$$

可见，磁路不饱和时， $T \propto I_a^2$ 。串励电动机具有较大的启动转矩 T_s ，过载能力强，可用于重载启动场合，特别适用于电力机车。

② 当磁路饱和时， Φ 变化很小 ($\Phi \approx$ 常数)，则

$$T = C_T \Phi I_a$$

即

$$T \propto I_a \quad (2-21)$$

(3) 若改变电枢电流 I_a 方向，则 Φ 方向改变， T 、 n 方向不变，所以串励电动机可交、直流两用。

2.5.2 串励电动机机械特性

当串励电动机磁路不饱和（轻载时），因为

$$\Phi = K_f I_a$$

$$T = C_T \Phi I_a = C_T K_f I_a^2 = C'_T I_a^2$$

所以

$$I_a = \sqrt{\frac{T}{C'_T}} \quad (2-22)$$

将式(2-18)、式(2-22)代入机械特性方程：

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - I_a \frac{R}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e K_f I_a} - I_a \frac{R}{C_e K_f I_a} = \frac{U}{C'_e I_a} - \frac{R}{C'_e} = \frac{U \sqrt{C'_T}}{C'_e \sqrt{T}} - B = \frac{A}{\sqrt{T}} - B \quad (2-23)$$

式中， $A = U \sqrt{C'_T} / C'_e$ ——常数；

$B = R / C'_e$ ——常数。

从式(2-23)可见，当串励电动机轻载时，即磁路不饱和， n 与 \sqrt{T} 成反比，即 T 增大， n 迅速下降，机械特性为一双曲线，如图2.15中曲线1的 a 点以上部分所示。

当串励电动机重负载时，即磁路饱和， Φ 随 I_a 增大而增加很少，见图2.14， Φ 可近似认为是常数，其机械特性为一向下倾斜的直线，与并励电动机特性相似，如图2.15中曲线1的 a 点以下部分所示。

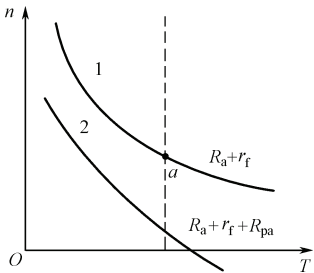


图2.15 串励电动机机械特性

综上所述，串励电动机的机械特性的特点：

- (1) 负载增加，即 I_a 增加， Φ 增加， T 增加而转速 n 迅速减小，机械特性为一软特性。
- (2) 当串励电动机电枢外串电阻越大，特性越软。
- (3) 当串励电动机理想空载时， $I_a = 0$ ， $\Phi = 0$ ， $T_L = 0$ ，则 n_0 为无穷大，但实际上电动机总是存在很小的剩磁，则空载转速 n_0 可达 $(5 \sim 6)n_N$ ，俗称“飞速”（飞车）现象，将造成电机和传动机构损坏。

因此，串励电动机绝不允许空载启动和空载运行，通常要求所带负载转矩 T_L 不得小于 $1/4$ 额定转矩 T_N ，且电动机与生产机械之间不得用皮带或链条连接，以免打滑或断裂造成

空载运行而发生事故，电动机与生产机械之间一般采用直轴或齿轮连接，这在生产中应特别注意。

本章小结

1. 直流电机电动运行时， T 与 n 方向相同， T 起拖动作用， I_a 与 E_a 方向相反， $U > E_a$ 。平衡方程式为： $U = E_a + I_a R_a$ ， $T = T_2 + T_0$ ， $P_1 = P_2 + \Sigma P$ ， $P_2 = P_M - P_0$ 。

2. 并励电动机的工作特性： $U = U_N$ 、 $I_f = I_{fN}$ 、 $R = R_a$ 时， $n = f(P_2)$ 、 $T = f(P_2)$ 、 $\eta = f(P_2)$ 的关系。

3. 直流电动机机械特性：当 U 、 R 、 Φ 均为常数时，转速 n 与转矩 T 的关系 $n = f(T)$ ，机械特性方程式为：

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - T \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} \text{ 或 } n = \frac{U}{C_e \Phi} - I_a \frac{R}{C_e \Phi}$$

4. 固有机械特性：是指 $U = U_N$ ， $I_f = I_{fN}$ ， $R = R_a$ 时， $n = f(T)$ 的关系。人为机械特性指 U 、 R 、 Φ 三个参数保持其中两个不变，改变其中任一参数时， $n = f(T)$ 的关系。所以人为机械特性有三种，对于任何一台电动机而言固有机械特性曲线只有唯一的一条，而人为机械特性曲线则有无限多条。

5. 直流电动机实现反转有两种方法：一种是保持 I_a 方向不变，改变 Φ 的方向（将励磁绕组反接）。另一种是保持 Φ 方向不变，改变电枢电流 I_a 方向（将电枢绕组反接）。

6. 串励电动机的机械特性很软，它有较大的启动转矩和过载能力，广泛地用于电力机车中。但它空载时将出现“飞车”现象，因此，轴上所拖动的负载不得小于 $\frac{1}{4} T_N$ 。

习 题 2

一、填空题

2.1 直流电动机基本方程式是指直流电动机稳定运行时电路系统的_____方程式，机械系统的_____方程式，能量转换系统的_____方程式。

2.2 直流并励电动机的损耗有_____、_____、_____和_____四种。直流电动机发生最高效率的条件是：_____ = _____。

2.3 根据生产机械负载不同，大致可分为三类：_____负载，_____负载，_____负载。

2.4 直流电动机当 $U = U_N$ ， $\Phi = \Phi_N$ ，若在电枢回路串入电阻 R_{pa} 越大，则_____不变，斜率 β _____，稳定性_____，损耗_____。

2.5 直流电动机当 $\Phi = \Phi_N$ ， $R = R_a$ ，若改变电源电压 U (U 越小)，则 $n_0 \propto$ _____， β _____， Δn _____。

2.6 直流电动机当 $U = U_N$ ， $R = R_a$ ，若减弱磁通 Φ ， Φ 越小，则 n_0 _____， β 与 Φ^2 _____， n _____。

2.7 直流电动机实现反转有_____和_____两种方法，其中_____方法常被采用。

2.8 直流串励电动机 I _____ I_a _____ I_f ，当磁路不饱和时， T 与_____平方成正比；当磁路饱和时， T 与_____成正比。

2.9 直流串励电动机有较大的_____，常用于_____中；但不允许_____启动和

运行，否则将造成_____。

2.10 直流电机工作于电动状态时，作用在电机转轴上有三个转矩，分别是_____，起_____作用；_____起_____作用；_____起_____作用。

二、选择题

2.11 直流电动机转速特性是一条（ ）的曲线。

- A. 微微上升 B. 微微下降 C. 与横轴平行

2.12 直流电动机的不变损耗是（ ）。

- A. $P_2 + P_j$ B. $P_{Fe} + P_j$ C. $P_{Cu} + P_{Fe}$

2.13 直流电机工作在电动状态时，其电压与电势的关系为（ ）。

- A. $U = E_a$ B. $U < E_a$ C. $U > E_a$

2.14 直流电动机发生最高效率的条件是（ ）。

- A. $P_{Cua} = P_0$ B. $P_{Cua} < P_0$ C. $P_{Cua} > P_0$

2.15 在直流电动机中，磁通 Φ 随电枢电流 I_a 而变化的电动机是（ ）。

- A. 直流并励电动机 B. 直流他励电动机 C. 直流串励电动机

2.16 直流电动机人为机械特性曲线与固有机械特性曲线平行，它是（ ）的人为机械特性。

- A. 电枢回路串电阻 B. 降低电源电压 C. 减弱磁通

2.17 直流串励电动机与生产机械可以采用（ ）连接。

- A. 皮带 B. 直轴 C. 链条

2.18 直流电动机固有机械特性曲线有（ ）条。

- A. 1 B. 2 C. 无限

2.19 直流并励电动机改变旋转方向，常采用的方法是（ ）。

- A. 励磁绕组反接 B. 电枢反接 C. 励磁绕组、电枢同时反接

三、判断题（正确的打√，错误的打×）

2.20 位能性负载 T_L 方向始终随 n 方向变化。（ ）

2.21 反抗性负载 T_L 方向始终随 n 方向变化。（ ）

2.22 直流并励电动机当负载增加时，转速必将迅速下降。（ ）

2.23 直流电机工作在电动状态下，电磁转矩 T 与转速 n 的方向始终相同。（ ）

2.24 直流并励电动机实际空载转速等于理想空载转速。（ ）

2.25 一台接在直流电源上的并励电动机，把电源两个端头对调，电动机就要反转。（ ）

2.26 直流串励电动机负载运行时，要求所带负载转矩不得小于 $(1/4)T_N$ 。（ ）

2.27 直流串励电动机转速不正常，经检查，发现电动机轻载运行，此时采用增大电枢回路电阻的方法，以达到增大负载电阻的目的。（ ）

2.28 一台直流并励电动机带额定负载运行，且在保持其他条件不变的情况下，若在励磁回路串入一定电阻，则电动机不会过载，其温升也不会超过额定值。（ ）

四、问答题

2.29 什么是直流电动机的工作特性？

2.30 什么是直流电动机固有机械特性？人为机械特性有什么特点？一台电动机有几条人为机械特性？

2.31 直流串励电动机有哪些特点？使用中应注意哪些问题？

2.32 直流电动机实现反转有哪些方法？画出直流并励电动机正、反转接线图。

2.33 常用生产机械的负载转矩特性有哪几种?

2.34 为什么串励电动机不能在空载下启动或运行?

五、计算题

2.35 一台并励直流电机并接于 220V 直流电网运行, 已知支路对数 $a=1$, 磁极对数 $P=2$, 电枢总导体数 $N=372$ 根, 额定转速 $n_N=1500\text{r/min}$, 每极磁通 $\Phi=1.1\times 10^{-2}\text{Wb}$, 电枢回路总电阻 $R_a=0.2\Omega$, 励磁回路总电阻 $R_f=120\Omega$, 铁耗 $P_{Fe}=362\text{W}$, 机械损耗 $P_j=240\text{W}$, 试求:

- (1) 此电机是发电机还是电动机运行状态?
- (2) 电机的电磁转矩 T 。
- (3) 输入功率 P_1 和效率 η 。

2.36 一台并励电动机, $P_N=17\text{kW}$, $U_N=220\text{V}$, $n_N=3000\text{r/min}$, 励磁回路电阻 $R_f=181.5\Omega$, 电枢电阻 $R_a=0.144\Omega$, $I_N=88.9\text{A}$ 。试求: 在额定负载时, 电枢回路串入电阻 $R_{pa}=0.15\Omega$ 阻时的转速 n 。

2.37 一台并励电动机在 $U_N=220\text{V}$, $I_N=80\text{A}$ 情况下运行, 电枢回路电阻 $R_a=0.1\Omega$, 励磁回路电阻 $R_f=90\Omega$, 额定效率 $\eta_N=0.86$, 试求:

- (1) 额定输入功率 P_1 。
- (2) 额定输出功率 P_2 。
- (3) 总损耗 ΣP 。
- (4) 励磁回路铜耗 P_{Cuf} 。
- (5) 电枢回路铜耗 P_{Cua} 。
- (6) 机械损耗和铁耗之和 P_0 。

2.38 一台并励直流电动机额定功率 $P_N=15\text{kW}$, 额定电压 $U_N=220\text{V}$ 。额定电流 $I_N=80\text{A}$, 额定转速 $n_N=900\text{r/min}$, 电枢电阻 $R_a=0.3\Omega$, 励磁回路总电阻 $R_f=100\Omega$ 。试求:

- (1) 电动机刚接上电源瞬时的电枢电流 I_a 。
- (2) 额定输入功率 P_{1N} 。
- (3) 理想空载转速 n_0 。
- (4) 额定效率 η_N 。
- (5) 空载转矩 T_0 。
- (6) 额定输出转矩 T_{2N} 。
- (7) 额定电磁转矩 T_N 。