



内 容 简 介

本章首先介绍电力拖动系统的一般知识,内容包括动力学方程式、运动规划曲线与传动机构传动比的选择、负载的转矩特性以及稳定性问题;然后,以他励直流电动机组成的电力拖动系统为例,具体讨论直流电力拖动系统的性能以及相关问题,内容涉及直流电力拖动系统的各种起/制动和调速方法与性能;最后,对直流电机的四象限运行状态进行总结。

在工业过程中,为了满足各种生产工艺要求,除了对各种特定的生产机械进行设计外,为生产机械选择恰当的动力源也是至关重要的。这些动力源尽管可以由汽油机、柴油机或液压装置等组成,但绝大多数是由电动机来提供的。通常,将通过电动机拖动生产机械完成一定工艺要求的系统或装置,统称为**电力拖动系统**。图 3.1 给出了典型电力拖动系统的组成框图。

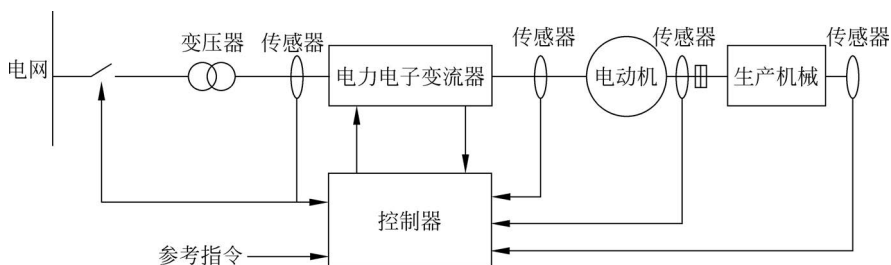


图 3.1 典型电力拖动系统的组成框图

由图 3.1 可见,电力拖动系统一般是由电动机、电力电子变流器、控制器以及生产机械等组成。通过电力电子变流器为电动机提供所需要的电源,由电动机拖动生产机械作旋转或直线运动;通过参考指令设定系统所要求的性能指标,由传感器检测系统各部分的状态,并通过控制器确保所要求的性能指标实现。图 3.1 中,电动机与机械负载之间可以直接或通过传动机构(如减速箱、蜗轮与蜗杆机构等)间接相连。

根据所采用电动机的类型不同,电力拖动系统可进一步分为直流电力拖动系统和交流电力拖动系统,直流电力拖动系统采用的电机是直流电机,而交流电力拖动系统采用的电机则为交流电机。

本章首先介绍电力拖动系统的基本知识,在此基础上,对直流电力拖动系统的相关问题进行讨论。各章节安排如下:3.1节将重点介绍电力拖动系统的动力学方程式以及其中所涉及的多轴系统向单轴系统的折算过程与方法;在电力拖动系统的设计过程中,还需考虑运动规划曲线以及传动机构传动比的合理选择问题,3.2节介绍了相关内容。考虑到电力拖动系统的特性不仅取决于电机的机械特性,而且还与所拖动的负载密切相关。为此,3.3节对各类典型机械负载的转矩特性进行讨论;3.4节给出了电力拖动系统稳定性运行的判别条件;3.5节将重点讨论直流电力拖动系统动态过程的一般分析与计算方法;3.6节~3.8节将以他励直流电动机组成的电力拖动系统为例,对有关直流电力拖动系统的各种启动、调速和制动方法以及其中所涉及的有关问题进行讨论;3.9节将对直流电机的各种形式的供电电源以及相应的直流电力拖动系统作一简要介绍;作为本章的结束部分,3.10节将对直流电机的四象限运行状态以及各类直流电力拖动系统四象限运行时的工作状态进行总结。

3.1 电力拖动系统的动力学方程式

3.1.1 单轴电力拖动系统的动力学方程式

最简单的电力拖动系统是电动机与生产机械同轴,组成所谓的单轴系统,如图3.2所示。单轴系统的动力学方程式可由式(3-1)给出

$$T_{em} - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (3-1)$$

式中, T_L 为负载转矩; J 为转动部分的惯量($\text{kg} \cdot \text{m}^2$),它可以表示为

$$J = m\rho^2 = \frac{G}{g} \frac{D^2}{4} = \frac{GD^2}{4g} \quad (3-2)$$

式中, m 为转动部分的质量(kg); G 为转动部分的重力(N); ρ 为转动部分的平均半径(m); g 为重力加速度, $g=9.80\text{m/s}^2$ 。

考虑到机械角速度 Ω 与转速之间的关系 $\Omega=2\pi n/60$,将其与式(3-2)一同代入式(3-1),得

$$T_{em} - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (3-3)$$

式中, GD^2 为转动部分的飞轮矩($\text{N} \cdot \text{m}^2$)。至于电动机的转子以及其他转动部件的飞轮矩则由相应的产品手册给出。

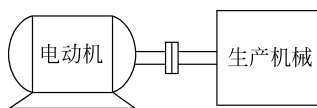


图 3.2 单轴电力拖动系统的示意图

由式(3-3)可见:

(1) 当 $T_{em} = T_L$ 时, $n = \text{常值}$, 即电动机处于恒速状态, 拖动系统稳态运行;

(2) 当 $T_{em} > T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} > 0$, 电机处于加速状态, 拖动系统加速暂态运行;

(3) 当 $T_{em} < T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} < 0$, 电机处于减速状态, 拖动系统减速暂态运行。

必须指出的是, 式(3-1)与式(3-3)中没有出现空载转矩 T_0 , 这样似乎造成了式(3-1)与2.6.2节中介绍的动力学方程式(2-28)不完全一致; 同样, 稳态转矩平衡方程式 $T_{em} = T_L$ 与转矩平衡方程式(2-29)似乎也不一致。在电力拖动系统中, 对 T_0 的处理一般有两种方法, 一是将 T_0 归并于负载转矩, 即 $T_L = T_2 + T_0$, 这样, 无论是在暂态还是稳态情况下, 动力学方程式均一致; 二是将 T_0 归并于驱动转矩, 这样驱动转矩变为 $T_d = T_{em} - T_0$, 相应的暂态动力学方程式变为 $T_d - T_L = J \frac{d\Omega}{dt}$, 稳态为 $T_d = T_L$ 。未加说明, 本书全部采用前一种处理方法。当然, 与电磁转矩 T_{em} 或负载转矩 T_L 相比, 一般情况下 T_0 较小, 实际工程计算中也可以对其忽略不计。

在实际电力拖动系统中, 电机可能正、反转运行; 电机的运行状态也可能由电动机转换为发电状态运行, 则相应的电磁转矩就会由驱动性质变为制动性质, 最终实现电力拖动系统的快速制动。3.10节将指出, 具备电机正、反转运行状态并能实现快速起、制动功能(即电机的电磁转矩可实现驱动、制动之间的相互转换)的系统, 被称为具有四象限运行状态的电力拖动系统。除此之外, 对牵引类负载, 负载转矩也可能由上升过程中的制动性变为下降过程中的驱动性。

针对上述各种情况, 在使用式(3-3)时, 其中的符号须作出相应的变化, 一般按如下电动机惯例选取正方向: 首先取转速 n 的方向为正方向, 对于电磁转矩 T_{em} , 若 T_{em} 与 n 一致(即为驱动性的), 则 T_{em} 取为正; 反之, 若 T_{em} 与 n 方向相反(即 T_{em} 为制动性的), T_{em} 则取为负; 对负载转矩 T_L 而言, 若 T_L 与 n 方向相反(制动性的)则取为正, 方向相同(驱动性的)则取为负。

需要说明的是, 式(3-3)是针对单一电机直接带动生产机械的**单轴拖动系统**的动力学方程式。而对实际的大多数拖动系统而言, 在电机和生产机械之间存在诸如减速箱、皮带等传动机构, 构成了所谓的**多轴拖动系统**。为了简化分析计算, 通常需对多轴拖动系统的有关结构参数和负载进行折算, 最终将多轴系统等效为一单轴系统, 然后再利用式(3-3)进行计算。

3.1.2 多轴电力拖动系统的折算

通常, 电机工作在“高转速、低转矩”输出状态, 而负载则必须运行在“低转速、大转矩”状态, 这就要求在电机和负载之间增加如齿轮箱、蜗轮蜗杆等减速器。**减速器起到了“降低转速、放大(或倍增)转矩”的作用**。对于带齿轮箱、蜗轮蜗杆等减速器的多轴电力拖动系统, 在设计过程中经常要涉及多轴电力拖动系统向单轴拖动系统的折算问题, 现介绍如下。

1. 折算的概念

图 3.3(a)给出了具有三级减速的多轴电力拖动系统示意图,为简化计算,可将其等效为图 3.3(b)所示的单轴系统。为此,需将负载转矩以及惯量等进行折算,折算的原则是确保等效前后系统所传递的功率或系统储存的动能不变。

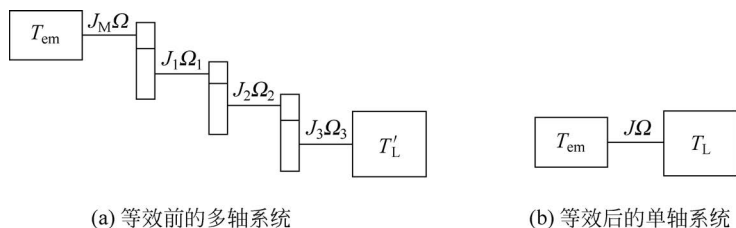


图 3.3 多轴电力拖动系统的简化

2. 折算方法

(1) 机械机构的转矩折算

考虑到传动机构的效率,折算时应考虑功率的传递方向,以确定传动机构的损耗到底是由电机承担还是由生产机械承担。

当电机工作在电动机运行状态时,所有功率都是由电动机提供,此时,功率由电动机流向生产机械,传动机构的损耗自然由电动机承担。按照等效前、后传递功率不变的原则,负载所获得的输出功率为

$$T_L \Omega \eta_t = T'_L \Omega_L$$

于是得折算后的负载转矩为

$$T_L = \frac{T'_L}{\eta_t \left(\frac{\Omega}{\Omega_L} \right)} = \frac{T'_L}{\eta_t \left(\frac{n}{n_L} \right)} = \frac{T'_L}{\eta_t j} \quad (3-4)$$

式中, $j = \frac{n}{n_L}$ 为传动机构总的转速比; Ω_L 为工作机构输出轴的机械角速度; T'_L 为工作机构的实际负载转矩; η_t 为传动机构的总效率。

当电机工作在发电制动状态时,所有功率都是由生产机械提供的,此时,功率由生产机械流向电机,传动机构的损耗自然也是由生产机械承担。按照传递功率不变的原则,于是电机所获得的输出功率为

$$T_L \Omega = T'_L \Omega_L \eta_t$$

于是得折算后的负载转矩为

$$T_L = \frac{T'_L \eta_t}{\left(\frac{\Omega}{\Omega_L} \right)} = \frac{T'_L \eta_t}{j} \quad (3-5)$$

对于由减速箱等组成的传动机构,传递功率的方向改变并不改变传动机构的效率,即无论功率由谁提供,同一传动机构的效率相等。

对多级变速(多级齿轮或皮带轮)传动机构,设每级的转速比为 j_1, j_2, j_3, \dots , 则传

动机构总的转速比为 $j = j_1 \cdot j_2 \cdot j_3 \cdot \dots$; 设每级的传递效率为 $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots$, 则传动机构的总效率为 $\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \dots$ 。一般情况下, 每对齿轮的满载效率为 97.5%~98.5%; 蜗轮蜗杆的满载传动效率为 50%~70%; 整个车床的满载效率为 70%~80%; 刨床的满载效率为 65%~75%。

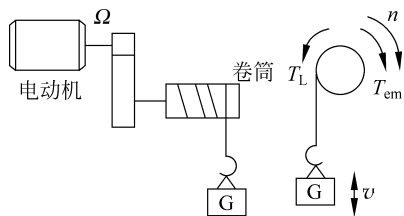


图 3.4 电机拖动起重机负载的示意图

(2) 直线作用力的折算

同负载转矩的折算一样, 对直线作用力的折算也应考虑功率的传递方向。图 3.4 给出了电机拖动起重机负载实现升降运动的示意图。

当电机工作在电动机运行状态实现重物提升时, 考虑到所有功率都是由电动机提供的, 因此功率由电动机流向工作机构, 传动机构的损耗自然由电动机承担。按照传递功率不变原则, 负载所获得的输出功率为

$$T_L \Omega \eta_t = F_L v_L$$

又 $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$, 则上式变为

$$T_L = \frac{60 F_L v_L}{2\pi n \eta_t} = 9.55 \frac{F_L v_L}{n \eta_t} \quad (3-6)$$

式中, v_L 为重物的提升速度; F_L 为重物的直线作用力; η_t 为重物提升时传动机构的效率。

当电机工作在发电制动状态实现重物下放时, 考虑到所有功率都是由工作机构(或重物)提供的, 因此功率由工作机构流向电机, 传动机构的损耗自然由工作机构承担。按照传递功率不变原则, 电机所获得的输出功率为

$$T_L \Omega = F_L v_L \eta'_t$$

将角速度与转速的关系代入上式得

$$T_L = \frac{60 F_L v_L \eta'_t}{2\pi n} = 9.55 \frac{F_L v_L \eta'_t}{n} \quad (3-7)$$

式中, η'_t 为重物下放时传动机构的效率。

重物下放时传动机构的效率 η'_t 与同一重物提升时传动机构的效率 η_t 之间满足下列关系式

$$\eta'_t = 2 - \frac{1}{\eta_t} \quad (3-8)$$

证明如下:

考虑到重物提升与下放时的传动损耗相等, 即 $\Delta p_H = \Delta p_L$, 故有下列关系式。重物提升时, 传动机构的损耗 Δp_H 为

$$\Delta p_H = \frac{F_L v_L}{\eta_t} - F_L v_L$$

重物下降时, 传动机构的损耗 Δp_L 为

$$\Delta p_L = F_L v_L - F_L v_L \eta'_t$$

于是有

$$\frac{1}{\eta_t} - 1 = 1 - \eta'_t$$

从而得式(3-8)。

(3) 惯量与飞轮矩 GD^2 的折算

拖动系统的结构与图 3.3 相同,设电机转子的转动惯量为 J_M ,传动机构各轴的转动惯量分别为 J_1, J_2, J_3, \dots ,工作机构的转动惯量为 J_L ,折算到电机轴上的等效转动惯量为 J (相应的飞轮矩为 GD^2),则按照折算前后系统所储存的动能不变的原则,便有

$$\frac{1}{2}J\Omega^2 = \frac{1}{2}J_M\Omega^2 + \frac{1}{2}J_1\Omega_1^2 + \frac{1}{2}J_2\Omega_2^2 + \dots + \frac{1}{2}J_L\Omega_L^2$$

则折算后的转动惯量为

$$J = J_M + J_1\left(\frac{\Omega_1}{\Omega}\right)^2 + J_2\left(\frac{\Omega_2}{\Omega}\right)^2 + \dots + J_L\left(\frac{\Omega_L}{\Omega}\right)^2 \quad (3-9)$$

将 $J = \frac{GD^2}{4g}$ 代入上式,则折算后的飞轮矩为

$$GD^2 = GD_M^2 + \frac{G_1 D_1^2}{\left(\frac{n}{n_1}\right)^2} + \frac{G_2 D_2^2}{\left(\frac{n}{n_2}\right)^2} + \dots + \frac{G_L D_L^2}{\left(\frac{n}{n_L}\right)^2}$$

即

$$GD^2 = GD_M^2 + \frac{G_1 D_1^2}{j_1^2} + \frac{G_2 D_2^2}{(j_1 j_2)^2} + \dots + \frac{G_L D_L^2}{j^2} \quad (3-10)$$

由式(3-10)可见,在等效的单轴飞轮矩中,占权重最大的为电机自身转子的飞轮矩 GD_M^2 ;而机械轴越远离电机轴,等效的数值越小,即对电机轴的影响越小。

(4) 直线运动的质量折算

对图 3.4 所示的直线运动,设质量为 m_L 的重物折算至电机轴上的转动惯量为 J'_M ,则按照折算前后储存的动能保持不变的原则,有

$$\frac{1}{2}J'_M\Omega^2 = \frac{1}{2}m_L v_L^2$$

将 $J'_M = \frac{(GD_M^2)'}{4g}$ 、 $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ 代入上式,则有

$$(GD_M^2)' = \left(\frac{60}{\pi}\right)^2 \frac{G_L v_L^2}{n^2} = 365 \frac{G_L v_L^2}{n^2} \quad (3-11)$$

通过上述折算,便可以将多轴拖动系统(包括旋转及直线运动)折算为单轴拖动系统。这样,便可借助于单轴拖动系统的动力学方程式对多轴拖动系统的静、动态问题进行分析研究。

例 3-1 图 3.5 为一龙门刨床的主传动机构图,齿轮 1 与电动机轴直接相连,各

齿轮的数据见表 3-1。切削力 $F_z = 9810\text{N}$, 切削速度 $v_z = 43\text{m/min}$, 传动效率 η_c 为 0.8, 齿轮 6 的节距为 20mm, 电动机电枢的飞轮矩为 $230\text{N} \cdot \text{m}^2$, 工作台与机床的摩擦系数为 0.1。试计算:

(1) 折算到电动机轴上的系统总飞轮矩及负载转矩;

(2) 切削时电动机的输出功率;

(3) 空载不切削时当工作台加速度为 2m/s^2 时电动机的转矩。

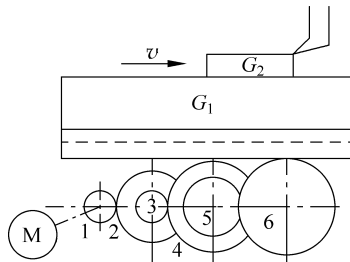


图 3.5 例 3-1 图

表 3-1 传动机构各齿轮的数据

序号	名称	$GD^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$	重量/N	齿数
1	齿轮	8.25		20
2	齿轮	40.20		55
3	齿轮	19.60		38
4	齿轮	56.80		64
5	齿轮	37.30		30
6	齿轮	137.20		78
G_1	工作台		14715	
G_2	工件		9810	

解 (1) 电动机的转速为

$$n = j \cdot n_6 = \frac{Z_2}{Z_1} \frac{Z_4}{Z_3} \frac{Z_6}{Z_5} \frac{v_z}{\pi D_6} = \frac{55}{20} \times \frac{64}{38} \times \frac{78}{30} \times \frac{43}{78 \times 0.02} = 332 (\text{r/min})$$

折算到电动机轴上的系统总飞轮矩为

$$\begin{aligned} GD^2 &= GD_a^2 + GD_1^2 + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{(Z_2/Z_1)^2} + \frac{GD_4^2 + GD_5^2}{(Z_2/Z_1)^2 (Z_4/Z_3)^2} \\ &\quad + \frac{GD_6^2}{(Z_2/Z_1)^2 (Z_4/Z_3)^2 (Z_6/Z_5)^2} + 365 \times \frac{(G_1 + G_2)v_z^2}{n^2} \\ &= 230 + 8.25 + \frac{40.2 + 19.6}{(55/20)^2} + \frac{56.8 + 37.3}{(55/20)^2 (64/38)^2} \\ &\quad + \frac{137.2}{(55/20)^2 (64/38)^2 (78/30)^2} \\ &\quad + 365 \times \frac{(14715 + 9810)(43/60)}{332^2} = 293.19 (\text{N} \cdot \text{m}^2) \end{aligned}$$

折算到电动机轴上的等效负载转矩为

$$\begin{aligned} T_z &= 9.55 \frac{[F + \mu(G_1 + G_2)]v_z}{\eta_c n} \\ &= 9.55 \times \frac{[9810 + (14715 + 9810) \times 0.1](43/60)}{0.8 \times 332} \\ &= 316 (\text{N} \cdot \text{m}) \end{aligned}$$

(2) 切削时电动机的输出功率为

$$P_2 = \frac{T_z n}{9550} = \frac{316 \times 332}{9550} = 11(\text{kW})$$

(3) 空载不切削时,折算到电动机轴上的负载转矩为

$$\begin{aligned} T_{z0} &= 9.55 \times \frac{\mu(G_1 + G_2)v_z}{\eta_c n} \\ &= 9.55 \times \frac{(14715 + 9810) \times 0.1(43/60)}{0.8 \times 332} \\ &= 63.2(\text{N} \cdot \text{m}) \end{aligned}$$

惯性负载转矩为

$$\begin{aligned} \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} &= \frac{GD^2}{375} \frac{Z_2}{Z_1} \frac{Z_4}{Z_3} \frac{Z_6}{Z_5} \frac{dv_z}{dt} \\ &= \frac{293.19}{375} \times \frac{55}{20} \times \frac{64}{38} \times \frac{78}{30} \times \frac{2 \times 60}{78 \times 0.02} \\ &= 724.8(\text{r/min} \cdot \text{s}^{-1}) \end{aligned}$$

则电动机的总负载转矩为

$$T = T_{z0} + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} = 63.2 + 724.8 = 788(\text{N} \cdot \text{m})$$

3.2 运动规划曲线与传动机构最佳传动比的概念[※]

在运动控制系统尤其是伺服系统中,经常要涉及运动规划曲线的选择问题。运动曲线决定了机械负荷移动一定距离时在不同阶段所需要的速度和加速度,由此决定了所需驱动电机的转矩大小。因此,同负载大小一样,运动规划曲线选取的不同,驱动电机的定额也将有所不同。除此之外,选择合适的运动规划曲线也有利于避免对拖动机构的冲击、振动,减少轨迹误差,使运动系统平稳和准确定位。简言之,运动规划曲线与运动系统的平稳性有关。

传动机构的最佳传动比则与电力拖动系统的负载加速度最大化或运动系统的快速性相关联。为了获得最大的负载加速度,实现拖动系统的快速启动、制动,要求负载的转动惯量(折合到电机轴后的数值)必须与电机的转动惯量相匹配。随着各类新型电机如永磁同步电机在拖动系统中的应用增多,电机的惯量已大大降低,造成电机与负载惯量的更大失配,不仅影响了负载的加速度,而且也会引起拖动系统的低频振动和超调等不稳定,选择最佳传动比则是解决这一问题的有效措施。

3.2.1 运动规划曲线

当希望机械轴由A点开始移动至B点结束时,需要生成连接A、B的轨迹,相应

的速度变化曲线又称为**运动规划曲线**。运动规划曲线可以让物体从 A 点出发经平滑加速后进入匀速运动状态,匀速运行一段时间后,又平滑地减速到达 B 点后停止。通常,由运动控制器按照运动规划曲线为每台伺服驱动器分配速度和转矩(或加速度)指令,并由伺服电机完成 AB 之间的运动。

常用的运动规划曲线包括梯形速度曲线(简称**梯形曲线**)(含三角形速度曲线)和 S 形速度曲线(简称**S 曲线**)。

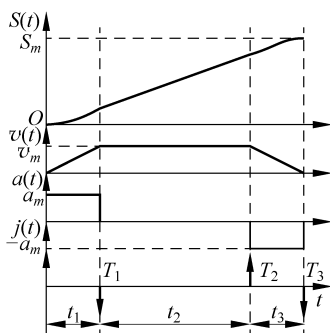


图 3.6 梯形曲线(从上到下:位移、速度、加速度和加加速度曲线)

1. 梯形曲线

梯形曲线的位移、速度、加速度以及加加速度随时间的变化曲线如图 3.6 所示。

由图 3.6 可见,整个梯形曲线可划分为 3 段:加速段 I、恒速段 II 和减速段 III。若已知下列运动参数:机械轴移动的最大距离 S_m ,最大运动速度 v_m ,加速度 a_m ,且假定加速段和减速段对称,则梯形曲线的轨迹可由下列方程计算。

为方便起见,令

$$\begin{cases} T_1 = t_1 \\ T_2 = t_1 + t_2 \\ T_3 = t_1 + t_2 + t_3 \end{cases}$$

(1) 加速段

$$t \in [0, T_1]$$

$$\begin{cases} S(t) = \frac{1}{2} a_m t^2 \\ \dot{S}(t) = a_m t \\ \ddot{S}(t) = a_m \end{cases} \quad (3-12)$$

当 $t = T_1$ 时,由上式得: $S(T_1) = \frac{1}{2} a_m t_1^2$, $v(T_1) = \dot{S}(t_1) = a_m t_1 = v_m$, 加速度段 I 运行所需时间为

$$t_1 = \frac{v_m}{a_m} \quad (3-13)$$

(2) 恒速段

$$t \in [T_1, T_2]$$

$$\begin{cases} S(t) = S(T_1) + v_m(t - T_1) \\ \dot{S}(t) = v_m \\ \ddot{S}(t) = 0 \end{cases} \quad (3-14)$$

当 $t = T_2$ 时,考虑到对称性,由上式得: $S(T_2) = S(T_1) + v_m t_2 = S_m - S(T_1)$, 于是得恒速段 II 运行所需时间为

$$t_2 = \frac{S_m}{v_m} - \frac{v_m}{a_m} \quad (3-15)$$

(3) 减速段

$$t \in [T_2, T_3]$$

$$\begin{cases} S(t) = S(T_2) + v_m(t - T_2) - \frac{1}{2}a_m(t - T_2)^2 \\ \dot{S}(t) = v_m - a_m(t - T_2) \\ \ddot{S}(t) = -a_m \end{cases} \quad (3-16)$$

需要说明的是,梯形速度曲线中的加速度和减速度可以不相等,即加速段和减速段运行所需时间可以不相等,此时,速度曲线变为不对称速度曲线。此外,若恒速段运行所需时间 $t_m = 0$,则上述梯形速度曲线即变为三角形速度曲线。至于不对称速度曲线和三角形速度曲线,其各段运行方程以及所需时间可参考上述过程计算求得。

梯形速度曲线的最大缺点是在各段的切换点(包括起始和终止点)处,加速度是不连续的,且加加速度为无穷大(见图 3.6),这将对拖动系统产生较大冲击。解决冲击问题的方案是采用 S 形速度曲线。

2. S 曲线

S 曲线的位移、速度、加速度以及加加速度随时间的变化曲线如图 3.7 所示。

由图 3.7 可见,整个 S 曲线包括三大区域:加速区、恒速区和减速区。具体轨迹可分为 7 段:加加速度段 I、匀加速度段 II、减加速度段 III、匀速度段 IV、加减速度段 V、匀减速度段 VI 以及减减速度段 VII,各段运行所需时间分别是 $t_1 \sim t_7$ 。由于 S 曲线的加速度是连续的,因此,拖动系统的冲击受到一定限制(即有限的加加速度),从而确保了系统的平稳性。

若已知下列运动参数:机械轴移动的最大距离 S_m ,最大运动速度 v_m ,加速度 a_m ,加加速度为 j_m ,且假定升速段和降速段对称,则 S 曲线的轨迹可由以下方程计算。

为方便起见,令

$$\begin{cases} T_1 = t_1 \\ T_2 = t_1 + t_2 \\ T_3 = t_1 + t_2 + t_3 \\ T_4 = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \\ T_5 = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 \\ T_6 = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 \\ T_7 = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 \end{cases}$$

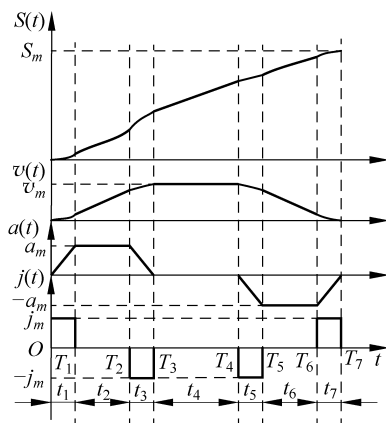


图 3.7 S 曲线(从上到下:位移、速度、加速度和加加速度曲线)

(1) 加速区

(a) $t \in [0, T_1]$

$$\begin{cases} S(t) = \frac{1}{6}j_m t^3 \\ \dot{S}(t) = \frac{1}{2}j_m t^2 \\ \ddot{S}(t) = j_m t \\ S^{(3)}(t) = j_m \end{cases} \quad (3-17)$$

当 $t = T_1$ 时, $S(T_1) = \frac{1}{6}j_m t_1^3$, $v(T_1) = \dot{S}(t_1) = \frac{1}{2}j_m t_1^2$, $a_m = \ddot{S}(t_1) = j_m t_1$, 于是, 加加速度段 I 运行所需时间为

$$t_1 = \frac{a_m}{j_m} \quad (3-18)$$

(b) $t \in [T_1, T_2]$

$$\begin{cases} S(t) = S(T_1) + v(T_1)(t - T_1) + \frac{1}{2}a_m(t - T_1)^2 \\ \dot{S}(t) = v(T_1) + a_m(t - T_1) \\ \ddot{S}(t) = a_m \\ S^{(3)}(t) = 0 \end{cases} \quad (3-19)$$

当 $t = T_2$ 时, $S(T_2) = \frac{1}{6}j_m t_1^3 + \frac{1}{2}j_m t_1^2 t_2 + \frac{1}{2}a_m t_2^2$, $v(T_2) = \dot{S}(T_2) = \frac{1}{2}j_m t_1^2 + a_m t_2$ 。

(c) $t \in [T_2, T_3]$

$$\begin{cases} S(t) = S(T_2) + v(T_2)(t - T_2) + \frac{1}{2}a_m(t - T_2)^2 - \frac{1}{6}j_m(t - T_2)^3 \\ \dot{S}(t) = v(T_2) + a_m(t - T_2) - \frac{1}{2}j_m(t - T_2)^2 \\ \ddot{S}(t) = a_m - j_m(t - T_2) \\ S^{(3)}(t) = -j_m \end{cases} \quad (3-20)$$

当 $t = T_3$ 时,

$$S(T_3) = \frac{1}{6}j_m t_1^3 + \frac{1}{2}j_m t_1^2 t_2 + \frac{1}{2}a_m t_2^2 + \frac{1}{2}j_m t_1^2 t_3 + a_m t_2 t_3 + \frac{1}{2}a_m t_3^2 - \frac{1}{6}j_m t_3^3,$$

$$v(T_3) = \dot{S}(T_3) = \frac{1}{2}j_m t_1^2 + a_m t_2 + a_m t_3 - \frac{1}{2}j_m t_3^2 = v_m$$

考虑到对称性, $t_1 = t_3$, 上式变为

$$t_1 + t_2 = \frac{v_m}{a_m} \quad (3-21)$$

由式(3-21)可得匀加速度段 II 运行所需时间为

$$t_2 = \frac{v_m}{a_m} - t_1 \quad (3-22)$$

(2) 恒速区

(a) $t \in [T_3, T_4]$

$$\begin{cases} S(t) = S(T_3) + v_m(t - T_3) \\ \dot{S}(t) = v_m \\ \ddot{S}(t) = 0 \\ S^{(3)}(t) = 0 \end{cases} \quad (3-23)$$

当 $t = T_4$ 时, 考虑到对称性, 由上式得: $S(T_4) = S(T_3) + v_m t_4 = S_m - S(T_3)$ 。将式(3-18)、式(3-21)代入该式, 则匀速度段IV运行所需时间为

$$t_4 = \frac{S_m - 2S(T_3)}{v_m} = \frac{S_m}{v_m} - \frac{a_m}{j_m} - \frac{v_m}{a_m} \quad (3-24)$$

(3) 减速区

(a) $t \in [T_4, T_5]$

$$\begin{cases} S(t) = S(T_4) + v_m(t - T_4) - \frac{1}{6}j_m(t - T_4)^3 \\ \dot{S}(t) = v_m - \frac{1}{2}j_m(t - T_4)^2 \\ \ddot{S}(t) = -j_m(t - T_4) \\ S^{(3)}(t) = -j_m \end{cases} \quad (3-25)$$

(b) $t \in [T_5, T_6]$

$$\begin{cases} S(t) = S(T_5) + v(T_5)(t - T_5) - \frac{1}{2}a_m(t - T_5)^2 \\ \dot{S}(t) = v(T_5) - a_m(t - T_5) \\ \ddot{S}(t) = -a_m \\ S^{(3)}(t) = 0 \end{cases} \quad (3-26)$$

(b) $t \in [T_6, T_7]$

$$\begin{cases} S(t) = S(T_6) + v(T_6)(t - T_6) - \frac{1}{2}a_m(t - T_6)^2 + \frac{1}{6}j_m(t - T_6)^3 \\ \dot{S}(t) = v(T_6) - a_m(t - T_6) + \frac{1}{2}j_m(t - T_6)^2 \\ \ddot{S}(t) = -a_m + j_m(t - T_6) \\ S^{(3)}(t) = j_m \end{cases} \quad (3-27)$$

利用对称性, 整个 S 曲线轨迹运行所需总时长可根据式(3-18)、式(3-21)和式(3-24)得

$$T = 2(t_1 + t_2 + t_3) + t_4 = \frac{S_m}{v_m} + \frac{v_m}{a_m} + \frac{a_m}{j_m} \quad (3-28)$$

图 3.7 中的运动规划曲线是由加速区、恒速区和减速区组成, 被称为部分 S 曲线。如果整个运动轨迹不包括恒速区, 即 $t_4 = 0$, 则运动轨迹曲线又称为全 S 曲线。

3.2.2 传动机构最佳传动比与惯量匹配的概念

3.1.2 节曾介绍了多轴电力拖动系统的折算问题,对于多轴系统而言,传动机构的传动比(速比)与机械负载的快速性密切相关。为了使机械负载获得最大的加速度,要求电机转子折合至负载侧的惯量与机械负载的惯量相等(该条件又称为**惯量匹配**),而对应于惯量匹配的传动比又称为**最佳传动比**。考虑到旋转和直线运动的不同,现分别就旋转运动和直线运动的最佳传动比推导如下:

1. 旋转运动

对于旋转运动,传动机构的最佳传动比对应于最佳减速比。图 3.8 给出了包括减速机构在内的电力拖动系统作旋转运动时的结构示意图。

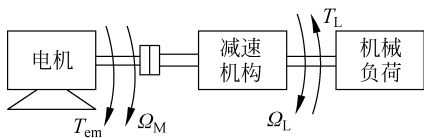


图 3.8 电力拖动系统作旋转运动时的结构示意图

设 J_M 为电机的转子惯量, J_L 为负载的转动惯量, j 为减速机构的总传动比(速比),即

$$j = \frac{\Omega_L}{\Omega_M} = \frac{n_L}{n_M}$$

假定电机的最大电磁转矩为 T_{emax} , 负载侧的角加速度为 a_L , 与 3.1.2 节曾介绍过的多轴电力拖动系统的折算方案略有不同的是, 这里将电机侧的转矩和惯量折算至负载侧。根据折算原则: 确保折算前、后所传递的功率保持不变, $T_{\text{emax}}\Omega_M = T'_{\text{emax}}\Omega_L$, 则折算至负载侧的最大电磁转矩为

$$T'_{\text{emax}} = \left(\frac{\Omega_M}{\Omega_L}\right) T_{\text{emax}} = j T_{\text{emax}} \quad (3-29)$$

按照折算前、后系统所储存的动能保持不变的原则, $\frac{1}{2} J_M \Omega_M^2 = \frac{1}{2} J'_M \Omega_L^2$, 电机转子折算至负载的转动惯量为

$$J'_M = j^2 J_M \quad (3-30)$$

于是, 负载侧的总惯量为

$$J_{\text{total}} = J_L + J'_M = J_L + j^2 J_M \quad (3-31)$$

在电磁转矩 T_{emax} 作用下, 负载所获得的角加速度为

$$a_L = \frac{T'_{\text{emax}}}{J_{\text{total}}} = \frac{j T_{\text{emax}}}{J_L + j^2 J_M} \quad (3-32)$$

上式对传动比 j 求导数, 并令 $da_L/dj = 0$, 便可得最佳传动比。于是有

$$\frac{da_L}{dj} = \frac{(J_L - j^2 J_M) T_{\text{emax}}}{(J_L + j^2 J_M)^2} = 0$$

即

$$J_L = j^2 J_M \quad (3-33)$$

利用上式,得减速机构的最佳传动比为

$$j_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{J_L}{J_M}} \quad (3-34)$$

式(3-33)与式(3-34)表明:当由电机转子折算至负载侧的转动惯量与机械负载的惯量相等(该条件又称为惯量匹配)时,减速机构获得最佳传动比,此时,传动系统的负载获得的加速度最大。换句话说,当满足惯量匹配条件时,一半的电磁转矩用于转子的加速,而另一半电磁转矩用于负载的加速,机械负载的加速度达最大,拖动系统响应最快。

将式(3-34)代入式(3-32)得负载侧的最大角加速度为

$$a_{L\text{max}} = \frac{T_{\text{emax}}}{2\sqrt{J_L J_M}} \quad (3-35)$$

值得说明的是:上述各式是在忽略减速机构自身的转动惯量和减速机构损耗的前提下所得到的结论。对于实际电力拖动系统,除了尽可能按照“惯量匹配”原则外,减速机构还应根据前级传动比小、后级传动比大,以满足折算至电机侧的转动惯量最小的原则以及输出轴转角的误差最小等原则选择传动比。

2. 直线运动

电力拖动系统作直线运动时的结构示意图如 3.9 所示。对于直线运动,传动机构的最佳传动比对应于最佳螺距。关于最佳螺距的推导过程说明如下。

令 v_L 为负载侧直线运动的线速度, m_L 为直线运动的负载质量, λ 为丝杠的螺距。显然,直线运动的线速度为

$$v_L = \frac{n_M \lambda}{60} \quad (3-36)$$

根据折算前、后储存的动能保持不变原则,有

$$\frac{1}{2} J_M \Omega_M^2 = \frac{1}{2} m'_M v_L^2$$

于是,电机侧转子的转动惯量折算至负载侧的质量为

$$m'_M = J_M \left(\frac{\Omega_M}{v_L} \right)^2 \quad (3-37)$$

负载侧的总质量为

$$m_{\text{total}} = m_L + m'_M = m_L + J_M \left(\frac{\Omega_M}{v_L} \right)^2 \quad (3-38)$$

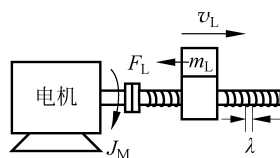


图 3.9 电力拖动系统作直线运动时的结构示意图

由折算前、后功率保持不变的原则,有

$$F'_{\text{emax}} v_L = T_{\text{emax}} \Omega_M$$

于是,负载所获得的电磁力为

$$F'_{\text{emax}} = T_{\text{emax}} \left(\frac{\Omega_M}{v_L} \right)$$

在电磁力 F'_{emax} 作用下,负载所获得的加速度为

$$a_L = \frac{F'_{\text{emax}}}{m_{\text{total}}} = \frac{\left(\frac{\Omega_M}{v_L} \right) T_{\text{emax}}}{m_L + J_M \left(\frac{\Omega_M}{v_L} \right)^2} \quad (3-39)$$

将 $\Omega_M = 2\pi n_M / 60$ 及式(3-36)代入上式得

$$a_L = \frac{2\pi\lambda T_{\text{emax}}}{m_L \lambda^2 + 4\pi^2 J_M} \quad (3-40)$$

式(3-40)对传动比 λ 求导数,并令 $da_L/dj=0$ 便可得最佳螺距为

$$\lambda_{\text{opt}} = 2\pi \sqrt{\frac{J_M}{m_L}} \quad (3-41)$$

值得说明的是,式(3-41)最佳螺距的计算也可以通过“惯量匹配”条件获得。具体过程说明如下。

根据折算前、后储存的动能保持不变原则,可将负载的质量折算至电机侧的惯量,即

$$\frac{1}{2} J'_L \Omega_M^2 = \frac{1}{2} m_M v_L^2$$

于是,折算至电机侧的惯量为

$$J'_L = m_M \left(\frac{v_L}{\Omega_M} \right)^2 \quad (3-42)$$

将 $\Omega_M = 2\pi n_M / 60$ 及式(3-36)代入上式,并根据惯量匹配条件,有

$$J'_L = m_M \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 = J_M \quad (3-43)$$

显然,由式(3-43)便可获得最佳螺距的计算公式,该式与式(3-41)完全相同。

上述分析可得出如下结论:当电力拖动系统作直线运动时,若满足惯性匹配条件,相应丝杠的螺距即为最佳螺距。此时,机械负载所获得的加速度达最大。

3.3 各类生产机械的负载转矩特性

生产机械的负载转矩 T_L 与转速 n 之间的关系 $n=f(T_L)$ 即为生产机械的负载转矩特性,它与电动机的机械特性相对应。

大多数生产机械可归纳为如下三种类型：①恒转矩负载；②风机、泵类负载；③恒功率负载。下面分别对其负载转矩特性介绍如下。

1. 恒转矩负载的转矩特性

恒转矩负载的特点是，负载转矩不受转速变化的影响，在任何转速下，负载转矩总是保持恒定或大致恒定。根据性质的不同，恒转矩负载又有反抗性和位能性恒转矩负载之分，反抗性恒转矩负载的转矩特性如图 3.10 所示，由图 3.10 可见，**反抗性恒转矩负载**的转矩 T_L 与转速 n 的方向总是相反，亦即负载转矩总是阻碍电机的运动。当电机正向运转时，负载转矩阻碍电机正转；当电机反转时，负载转矩阻碍电机反转。根据负载转矩正、负号的规定（见 3.1 节），相应的负载转矩特性位于第 I、III 象限内。实际生产机械如轧钢机、造纸机、皮带传输机、机床的刀架平移机构等由摩擦力产生转矩的负载均属于反抗性恒转矩负载。

位能性恒转矩负载的转矩特性如图 3.11 所示，由图 3.11 可见，位能性恒转矩负载的转矩 T_L 不随转速方向的改变而改变，无论电机正、反转，负载转矩始终为单一方向，按照负载转矩正、负号的规定，相应的负载转矩特性位于第 I、IV 象限内。实际生产机械如电梯、卷扬机、起重机等提升类负载均属于位能性恒转矩负载。

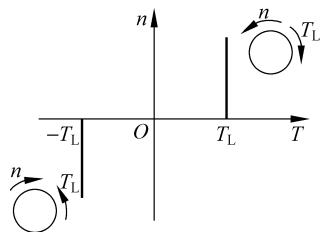


图 3.10 反抗性恒转矩负载的转矩特性

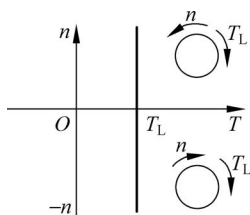


图 3.11 位能性恒转矩负载的转矩特性

2. 风机、泵类负载的转矩特性

风机、泵类负载的特点是负载阻转矩 T_L 与转速 n 的平方大致成正比，即

$$T_L = Kn^2 \quad (3-44)$$

式中， K 为比例系数。图 3.12 给出了通风机类负载的转矩特性，实际生产机械如水泵、油泵以及离心式通风机等其介质（如水、油、空气等）对叶片的阻力基本上与转速的平方成正比。

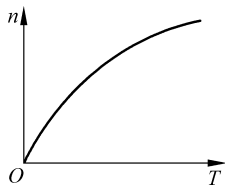


图 3.12 通风机类负载的转矩特性

3. 恒功率负载的转矩特性

对于车床等生产机械，在切削加工过程中，粗加工时切削量大，此时阻转矩较大，电动机多在低速状态下运行；而精加工时，切削量小，阻转矩也小，电动机多在高速状态下运行。这样，负载转矩与转速之间成反比关系，其功率（即转矩与转速的乘

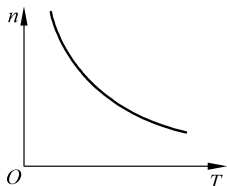


图 3.13 恒功率负载的转矩特性

积)基本保持不变,这类负载属于恒功率负载。此时,

$$T_L = \frac{k}{n}$$

除了车床切削外,对于恒张力卷取机,随着卷取直径增大,张力恒定,力矩增大,线速度不变,相应的角速

度与转速降低,故也属于恒功率负载。

需要说明的是,上述各类负载的特性都是从实际生产机械概括抽象而来的。实际生产机械大都是以某种典型特性为主并兼顾其他典型特性,如实际通风机负载,除了通风机类负载特性之外,考虑到风机的轴承存在一定的摩擦,因而它又兼有附加反抗性恒转矩负载的特点。实际通风机的转矩特性可表示为

$$T_L = T_0 + Kn^2 \quad (3-45)$$

式(3-45)可用图 3.14 所示曲线表示。

再如机床的刀架机构,其平移时以反抗性恒转矩负载特性为主,但考虑到机构刚开始平移时的静摩擦系数大于动摩擦系数,引起低速时的负载阻转矩加大;而平移速度提高时,考虑到油或风的阻力,负载转矩又呈现通风机类负载的特点。实际机床的刀架平移机构的转矩特性如图 3.15 所示。

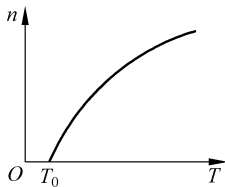


图 3.14 实际通风机负载的转矩特性

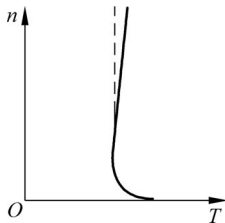


图 3.15 机床刀架平移机构负载的转矩特性

3.4 电力拖动系统的稳定运行条件

前面已对各类直流电动机所能提供的机械特性进行了介绍,同时也了解了各类生产机械的负载转矩特性。在此基础上,就可以进一步讨论,当电动机与生产机械组成电力拖动系统时,电动机与生产机械能否匹配实现稳定运行的问题了。

3.4.1 稳态运行点与稳定运行的概念

对于单轴系统(多轴系统可以折算为单轴系统),既然电机与所拖动的负载同轴,电机与负载以同一转速运行,由电力拖动系统的动力学方程式(3-3)可知,只有当 $T_{em} = T_L$ 时,电力拖动系统才处于稳态运行。因此,若将电动机的机械特性与负载的转矩特性绘制在同一坐标平面上,则两条曲线的交点必为电力拖动系统的稳态运

行点。

图 3.16 给出了他励直流电动机的机械特性和恒转矩负载的转矩特性,这两条曲线的交点 A 即为拖动系统的稳态运行点。当增加负载,使负载的转矩特性由曲线 1 变为曲线 2 时,相应的稳态运行点将由交点 A 变为交点 B,此时转子转速有所下降。

对于处于稳态运行的电力拖动系统,由于要受到各种干扰的影响,如电网电压的波动、负载转矩的变化等,其结果必然使系统偏离原来的稳态运行点。一旦干扰消除,若系统能够恢复到原来的稳态运行点,则称系统是稳定的;若系统无法恢复到原来的稳态运行点则称系统是不稳定的。

以他励直流电动机拖动恒转矩负载为例,设拖动系统正常运行在图 3.17(a)中的 A 点,此时, $T_{em(A)} = T_L = T_A$ 。假若存在某种干扰(如负载转矩减小)使运行点移至 B 点,其结果造成转速上升,此时, $T_{em(B)} = T_L - \Delta T_L$ 。一旦干扰消失后,负载转矩特性将恢复至曲线 1,此时,电磁转矩仍为 $T_{em(B)}$,而负载转矩变为 $T_L = T_A$,很显然, $T_{em(B)} < T_L$,由动力学方程式(3-3)可知,拖动系统自然要减速,于是工作点最终又重新回到 A 点。

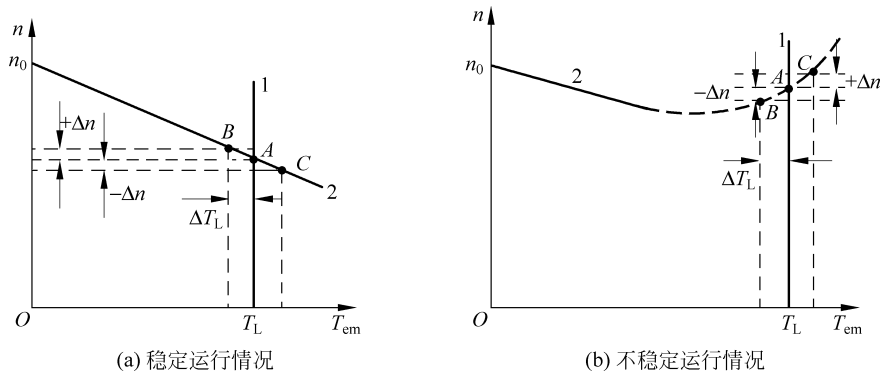


图 3.17 电力拖动系统的稳定运行分析

同样,若存在某种干扰使运行点移至点 C(如负载转矩增加),其结果造成转速下降,此时, $T_{em(C)} = T_L + \Delta T_L$ 。一旦干扰消失后,负载转矩特性恢复至曲线 1,此时,电磁转矩仍为 $T_{em(C)}$,而负载转矩变为 $T_L = T_A$,很显然, $T_{em(C)} > T_L$,由动力学方程式(3-3)可知,系统自然要升速,于是工作点最终又回到 A 点。需要说明的是,在上述过程中,如果转子的转动惯量较小,转速可能会越过 A 点并在 A 点附近振荡,则相应的电磁转矩会在 A 点附近增减,但最终系统会稳定运行在 A 点。按照定义,电力拖动系统是稳定运行的。

假如他励直流电动机拖动的负载较重(见图 3.17(b)),此时,由于电枢反应造成电动机机械特性上翘(参见 2.8.2 节)。若拖动系统正常运行在 A 点,此时, $T_{em(A)} =$

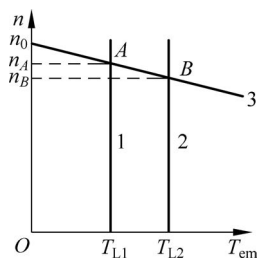


图 3.16 电力拖动系统的稳态运行点

$T_L = T_A$ 。若存在某种干扰使运行点移至 B 点(如负载转矩下降),其结果造成转速下降,此时, $T_{em(B)} = T_L - \Delta T_L$ 。一旦干扰消失后,负载转矩特性将恢复至曲线 1, 由于电磁转矩仍为 $T_{em(B)}$, 而负载转矩变为 $T_L = T_A$, 很显然, $T_{em(B)} < T_L$, 由动力学方程式(3-3)可知, 拖动系统自然要进一步减速, 于是工作点将向远离 B 点和 A 点的方向运行。由于惯性, 系统最终将会停车。

同样, 假若存在某种干扰如负载转矩增加等使运行点移至点 C , 其结果造成转速上升, 此时, $T_{em(C)} = T_L + \Delta T_L$ 。一旦干扰消失后, 负载转矩特性恢复至曲线 1, 此时, 电磁转矩仍为 $T_{em(C)}$, 而负载转矩变为 $T_L = T_A$, 很显然, $T_{em(C)} > T_L$, 由动力学方程式(3-3)可知, 拖动系统将进一步加速, 于是工作点将向远离 C 点和 A 点的方向运行, 最终, 由于转速的不断升高而造成转轴或机械机构的损坏。按照定义, 电力拖动系统是不稳定的。

3.4.2 电力拖动系统的稳定运行条件

通过上述分析可以看出, 对于恒转矩负载, 若希望构成的电力拖动系统是稳定运行的, 电动机必须具有下降的机械特性。对于一般类型的负载, 通过对动力学方程式(3-3)的分析便可以得出电力拖动系统稳定运行的充要条件。现分析如下。

上面提到系统要稳态运行, 电机的机械特性与负载的转矩特性必须有交点, 在交点 A 处有

$$T_{em}(n_A) = T_L(n_A) \quad (3-46)$$

为了判断电力拖动系统在 A 点是否稳定运行, 可将式(3-3)在稳态运行点 A 处线性化, 设转速增量为 Δn , 则将 $n = n_A + \Delta n$ 代入式(3-3), 然后减去式(3-46)便可获得系统线性化的方程为

$$\frac{GD^2}{375} \frac{d(\Delta n)}{dt} = \left. \frac{\partial T_{em}}{\partial n} \right|_{n_A} \Delta n - \left. \frac{\partial T_L}{\partial n} \right|_{n_A} \Delta n = \left(\left. \frac{\partial T_{em}}{\partial n} \right|_{n_A} - \left. \frac{\partial T_L}{\partial n} \right|_{n_A} \right) \Delta n$$

上述微分方程的特征根 λ 由下式给出

$$\frac{GD^2}{375} \lambda = \left. \frac{\partial T_{em}}{\partial n} \right|_{n_A} - \left. \frac{\partial T_L}{\partial n} \right|_{n_A}$$

即

$$\lambda = \left(\left. \frac{\partial T_{em}}{\partial n} \right|_{n_A} - \left. \frac{\partial T_L}{\partial n} \right|_{n_A} \right) / \frac{GD^2}{375}$$

由自动控制理论(或微分方程)的基本知识可知, 若希望系统稳定, 该系统的特征根应位于复平面中的左半平面, 即 $\lambda < 0$ 。于是有

$$\left. \frac{\partial T_{em}}{\partial n} \right|_{n_A} - \left. \frac{\partial T_L}{\partial n} \right|_{n_A} < 0$$

由此获得电力拖动系统稳定性判别的一般结论: 对于一般电力拖动系统, 要想确保系统稳定运行, 除了满足电机的机械特性与负载的转矩特性存在交点 A 外, 在这两

条特性曲线的交点 A 处还必须满足

$$\left. \frac{\partial T_{\text{em}}}{\partial n} \right|_{n_A} < \left. \frac{\partial T_L}{\partial n} \right|_{n_A} \quad (3-47)$$

上述条件的物理意义是：若在电机的机械特性与负载的转矩特性的交点附近转速有所升高，则电磁转矩的增加必须小于负载转矩的增加，只有这样，系统的转速才可能有所下降，最终回到原来的稳定运行点，此时，整个拖动系统是稳定运行的。若电机电磁转矩的增加超过负载转矩的增加，系统必然会进一步加速并脱离系统原来的稳态运行点，最终导致系统不稳定。

3.5 直流电力拖动系统动态过程的一般分析与计算

第2章曾讨论过直流电动机处于稳态运行的分析与计算，但实际的电力拖动系统经常处于从一种稳定运行状态向另一种稳定运行状态转换的过程（如拖动系统的起制动、调速、正反转等过程），我们称这一过程为动态过程（暂态过程）或过渡过程。研究电力拖动系统的动态过程对于寻求解决如何缩短过渡过程的时间以及减少过渡过程的能量损耗，提高劳动生产率，增加系统的抗扰性等问题都具有重要的现实意义。

对电力拖动系统动态过程的研究主要集中在对转速、转矩以及电流在过渡过程中随时间的变化规律，即 $n = f(t)$, $I_a = f(t)$ 或 $T_{\text{em}} = f(t)$ 的讨论，这些规律是正确选择或校验电机及其定额的依据。

要想准确分析、计算电力拖动系统的动态规律，就必须采用电机与拖动负载的动态模型。为此，下面首先介绍有关直流电力拖动系统的各类动态数学模型，然后对直流电力拖动系统动态过程的一般分析计算方法进行讨论。

3.5.1 直流电动机电力拖动系统的动态数学模型

电力拖动系统的动态数学模型是分析计算系统动态行为的基础。同一般系统一样，对直流电力拖动系统而言，动态数学模型主要包括微分方程式、传递函数以及状态空间模型。现分别介绍如下。

1. 直流电动机的微分方程式

为方便起见，将他励直流电动机的动态等效电路（见图 2.27）重画于图 3.18。根据基尔霍夫电压定律，电枢回路的微分方程式可重新写为

$$\begin{cases} u_1(t) = L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R i_a(t) + e_a(t) \\ e_a(t) = C_e \Phi n \end{cases} \quad (3-48)$$

式中， $R = R_a + R_\Omega$ 为电枢回路的总电阻； R_Ω 为电枢回路的外串电阻。

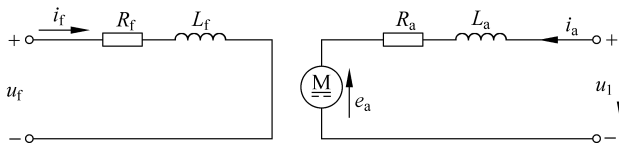


图 3.18 他励直流电动机的动态等效电路

励磁回路的微分方程式可表示为

$$u_f(t) = L_f \frac{di_f}{dt} + R_f i_f \quad (3-49)$$

考虑到黏性阻尼系数 B_1 , 则机械系统的动力学方程式为

$$\begin{cases} J \frac{d\Omega}{dt} + B_1 \Omega = \tau_{em} - T_L \\ \tau_{em} = C_T \Phi i_a \end{cases} \quad (3-50)$$

式中, 机械角速度 $\Omega = 2\pi n/60$ 。

2. 直流电动机的传递函数模型*

在电力拖动控制系统的设计过程中以及在“自动控制原理”和“自动控制系统”课程中, 经常要用到直流电机的传递函数模型, 传递函数模型对于电力拖动系统的分析和综合具有很重要的作用。

考虑到他励直流电动机采用独立的励磁电源供电, 因而可以通过维持磁场不变、单独控制电枢电压对直流电动机进行控制(如对永磁直流电动机的控制), 也可以通过固定电枢电压、单独改变励磁电流实现对直流电动机的控制。控制方式的不同, 相应的传递函数必然也有所不同。下面仅就电枢电压控制方式下直流电动机的传递函数进行介绍。

假定初始条件为零, 对式(3-48)和式(3-50)取拉普拉斯变换得

$$I_a(s) = \frac{U_1(s) - C'_e \Omega(s)}{L_a s + R} \quad (3-51)$$

$$\Omega(s) = \frac{C'_T I_a(s) - T_L(s)}{Js + B_1} \quad (3-52)$$

考虑到励磁电流固定, 上式中的 $C'_e = C_e \Phi 60/2\pi$ 和 $C'_T = C_T \Phi$ 为常数。

利用式(3-51)、式(3-52)便可获得直流电动机的传递函数框图如图 3.19 所示。根据图 3.19 可求出传递函数 $\frac{\Omega(s)}{U_1(s)}$ 和 $\frac{\Omega(s)}{T_L(s)}$ 分别为

$$\left. \frac{\Omega(s)}{U_1(s)} \right|_{T_L=0} = \frac{C'_T}{L_a J s^2 + (L_a B_1 + JR)s + RB_1 + C'_e C'_T} \quad (3-53)$$

$$\left. \frac{\Omega(s)}{T_L(s)} \right|_{U_1=0} = \frac{-(L_a s + R)}{L_a J s^2 + (L_a B_1 + JR)s + RB_1 + C'_e C'_T} \quad (3-54)$$

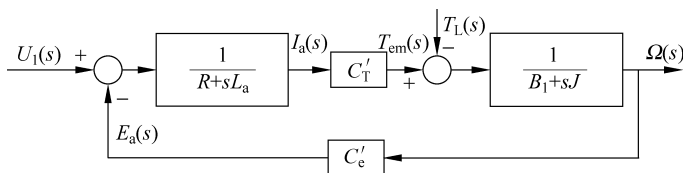


图 3.19 直流电动机的传递函数框图(电枢控制方式)

若忽略黏性阻尼系数 B_1 , 则式(3-53)和式(3-54)可进一步简化为

$$G_{\text{I}}(s) = \frac{\Omega(s)}{U_1(s)} \Big|_{T_L=0} = \frac{1/C'_e}{T_M T_a s^2 + T_M s + 1} \quad (3-55)$$

$$G_{\text{II}}(s) = \frac{\Omega(s)}{T_L(s)} \Big|_{U_1=0} = \frac{(T_a s + 1)R/C'_e C'_T}{T_M T_a s^2 + T_M s + 1} \quad (3-56)$$

其中, $T_a = \frac{L_a}{R}$ 为电枢回路的电磁时间常数; $T_M = \frac{GD^2 R}{375 C_e C_T \Phi^2}$ 定义为电力拖动系统的机电时间常数, T_M 表征了电力拖动系统响应快慢的程度, 与电机的结构参数和整个系统的飞轮矩密切相关。

忽略磁路饱和, 则电枢控制方式下他励直流电动机为线性系统, 利用叠加原理便可求得系统总的响应为

$$\Omega(s) = G_{\text{I}}(s)U_1(s) + G_{\text{II}}(s)T_L(s) \quad (3-57)$$

对上式求拉普拉斯反变换, 便可求出在瞬时电压和负载作用下转速随时间的响应曲线。

3. 直流电动机的状态空间模型*

在电力拖动系统的仿真计算以及后续现代控制理论课程中, 有时需要用到直流电动机的状态空间模型。他励直流电动机的状态空间模型可通过其微分方程或传递函数求得, 这里仅给出了采用微分方程获得他励直流电动机状态空间模型的具体方法。

取 $i_a(t)$ 和 $\Omega(t)$ 为状态变量, 则式(3-48)、式(3-50)可写成如下矩阵方程形式

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ \Omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_a} & -\frac{C'_e}{L_a} \\ \frac{C'_T}{J} & -\frac{B_1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \Omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ T_L \end{bmatrix} \quad (3-58)$$

矩阵方程式(3-58)可用紧凑形式表示为

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} \quad (3-59)$$

其中, $\mathbf{X} = [i_a \quad \Omega]^T$, 为状态变量; $\mathbf{U} = [u_1 \quad T_L]^T$, 为输入向量;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_a} & -\frac{C'_e}{L_a} \\ \frac{C'_T}{J} & -\frac{B_1}{J} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix}$$

3.5.2 直流电力拖动系统动态过程的一般分析计算

考虑到直接利用动态模型对系统动态性能的计算一般需要借助于计算机仿真来完成,但仿真方法的物理概念并不清晰;稳态模型具有物理概念清楚,能直接抓住问题的实质等优点。在工程实际中,通常把动态特性看成是稳态运行点的组合,然后借助于各稳态运行点的稳态特性来讨论系统的动态行为,这种方法的计算精度足以满足工程的需求。事实上,当生产机械的惯量较大,转速升降缓慢时,以稳态取代动态模型的伪暂态分析计算方法与直接使用动态模型进行计算所得到的结果几乎完全相同。为此,本书仍采用以稳态代替动态的传统方法对有关起、制动以及调速问题进行讨论。

众所周知,由于生产机械存在惯量(或飞轮矩)以及电机的电枢、励磁回路存在电感等机械和电磁原因,造成了电力拖动系统状态的改变不可能瞬时完成,而是存在过渡过程。原则上讲,对这一过渡过程的分析应该考虑机电和电磁两方面的因素,但考虑到工程实际和简化计算的需要,通常可将过渡过程分为两种情况进行讨论:①仅考虑机电时间常数的过渡过程分析;②同时考虑机电和电磁时间常数的过渡过程分析。应该讲,第一种情况讨论的是传统电机通过减速机构间接拖动生产机械的应用场合。此时,由于传动机构的机电时间常数较大,导致了电磁时间常数与机电时间常数不在同一数量级上,即电磁时间常数远远小于机电时间常数,因而电磁时间常数可以忽略不计。随着运动控制的发展和新一代负载类型如工业机器人、高速加工数控机床等的问世,出现了所谓无减速机构的“零传动”(即直接驱动)电力拖动系统,如直线电机以及直驱电机(direct-driving,简称DD电机)等组成的电力拖动系统等,这类拖动系统的特点是电磁时间常数与机电时间常数几乎在同一数量级内,对这类拖动系统的过渡过程,就必须按机电时间常数和电磁时间常数同时考虑的情况进行分析。下面对这两种情况下的过渡过程分别进行介绍。

1. 仅考虑机电时间常数的过渡过程分析

假定外加电源电压 U_1 、气隙磁通 Φ 均维持不变,负载具有恒转矩性质,忽略电磁时间常数(即电枢电感 $L_a = 0$)和黏性阻尼系数 B_1 ,初始条件为 $n(t)|_{t=0} = n_A$, $I_a(t)|_{t=0} = I_A$ 。

根据上述假定,将直流电力拖动系统的微分方程式(3-48)和式(3-50)简化为

$$\begin{cases} U_1 = E_a + RI_a = C_e n \Phi + RI_a \\ T_{em} = T_L + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} = C_T \Phi I_a \end{cases} \quad (3-60)$$

式(3-60)中,已用转速取代角速度且飞轮矩取代转动惯量。

现假定系统由某一稳态 A 向另一稳态 B 过渡(见图 3.20(a)),要求计算过渡过程中转速与电枢电流随时间的变化规律,即 $n = f(t)$ 与 $I_a = f(t)$ 。

(1) 电枢电流的变化规律 $I_a = f(t)$

由式(3-60)中的第1个方程得

$$n = \frac{U_1 - RI_a}{C_e \Phi} \quad (3-61)$$

将其代入式(3-60)的第2个方程得

$$I_a = \frac{T_L}{C_T \Phi} - \frac{GD^2 R}{375 C_e C_T \Phi^2} \frac{dI_a}{dt} = I_B - T_M \frac{dI_a}{dt} \quad (3-62)$$

其中, $I_B = \frac{T_L}{C_T \Phi}$ 为对应于 T_L (即 B 点) 的稳态负载电流。式(3-62)可整理为

$$\frac{dI_a}{dt} + \frac{1}{T_M} I_a = \frac{I_B}{T_M}$$

很显然, 在忽略电磁时间常数时, 电力拖动系统呈一阶惯性特征, 其数学模型可用一阶微分方程来描述。

考虑到过渡过程开始时的初始电流和结束时的稳态电流分别为 $I_a(t)|_{t=0} = I_A$ 和 $I_a(t)|_{t \rightarrow \infty} = I_B$, 利用三要素法便可求得电枢电流的变化规律为

$$I_a(t) = I_B + (I_A - I_B) e^{-\frac{t}{T_M}} \quad (3-63)$$

式(3-63)可用图 3.20(b)所示曲线表示。

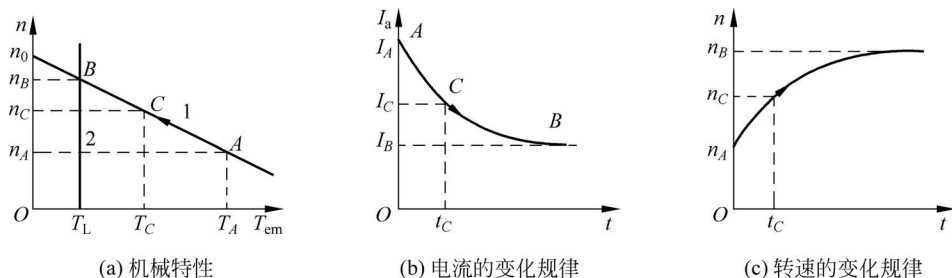


图 3.20 他励直流电动机的过渡过程曲线

(2) 转速的变化规律 $n = f(t)$

将式(3-63)代入式(3-61)得

$$n(t) = \left(\frac{U_1 - RI_B}{C_e \Phi} \right) + \left(\frac{U_1 - RI_A}{C_e \Phi} - \frac{U_1 - RI_B}{C_e \Phi} \right) e^{-\frac{t}{T_M}}$$

即

$$n = n_B + (n_A - n_B) e^{-\frac{t}{T_M}} \quad (3-64)$$

式中, $n_A = \frac{U_1 - RI_A}{C_e \Phi}$ 为过渡过程开始时的稳态转速; $n_B = \frac{U_1 - RI_B}{C_e \Phi}$ 为过渡过程结束时的稳态转速。式(3-64)可用图 3.20(c)所示曲线表示。

(3) 过渡过程的时间计算

对上述用一阶惯性环节描述的电力拖动系统而言,系统从某一稳态完全过渡到另一稳态,理论上讲,所需时间为无穷大。但考虑到当 $t=3T_M$ 时,系统的瞬时值已达到稳态值的 95%; 而当 $t=4T_M$ 时,系统的瞬时值可达稳态值的 98%, 可以认为过渡过程基本结束。因此,工程实际中,一般取 $(3\sim 4)T_M$ 作为一阶惯性环节在整个过渡过程所花费的时间。

利用式(3-63)和式(3-64)便可以计算到达任意点所需时间,具体方法介绍如下。

设 C 为 AB 之间的任意一点(见图 3.20(a)), 假定 C 点的转速值 n_C 已知, 现希望求出拖动系统从起始点 A 到 C 所需要的时间 t_C 。

由式(3-64)可知

$$n_C = n_B + (n_A - n_B)e^{-\frac{t_C}{T_M}}$$

对上式求解得

$$t_C = T_M \ln \frac{n_A - n_B}{n_C - n_B} \quad (3-65)$$

同样,若 C 点的电流 I_C 或转矩 T_C 已知,则分别将其代入相应的表达式,便可求出 t_C , 即

$$t_C = T_M \ln \frac{I_A - I_B}{I_C - I_B} \quad (3-66)$$

$$t_C = T_M \ln \frac{T_A - T_B}{T_C - T_B} \quad (3-67)$$

2. 同时考虑机电和电磁时间常数的过渡过程分析

假定初始条件与仅考虑机电时间常数时基本相同,唯一不同的是增加了电磁时间常数即考虑电枢电感 L_a 的影响。此时,电力拖动系统的暂态平衡方程式可重新整理为

$$\begin{cases} U_1 = RI_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_a = RI_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + C_e n \Phi \\ T_{em} = T_L + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} = C_T \Phi I_a \end{cases} \quad (3-68)$$

现计算过渡过程中转速与电枢电流随时间的变化规律 $n = f(t)$, $I_a = f(t)$ 如下。

由式(3-68)的第 2 式可得

$$I_a - I_B = \frac{GD^2}{375 C_T \Phi} \frac{dn}{dt} \quad (3-69)$$

将式(3-68)的第 1 式减去稳态电势平衡方程式 $U_1 = RI_B + C_e n_B \Phi$ 得

$$L_a \frac{dI_a}{dt} + R(I_a - I_B) + C_e \Phi (n - n_B) = 0$$

将式(3-69)代入上式并整理得

$$T_a T_M \frac{d^2 n}{dt^2} + T_M \frac{dn}{dt} + n = n_B \quad (3-70)$$

式(3-70)即为他励直流电动机拖动系统的一般微分方程,其中, $T_a = \frac{L_a}{R}$ 为电枢回路的电磁时间常数。

式(3-70)对应的特征方程为

$$T_a T_M \lambda^2 + T_M \lambda + 1 = 0$$

相应的特征根为

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2T_a} \pm \frac{1}{2T_a} \sqrt{1 - \frac{4T_a}{T_M}}$$

根据时间常数的大小,现分两种情况进行讨论。

(1) 当 $T_M \geq 4T_a$ 时, $\lambda_{1,2}$ 为一对相异的负实根,即 $\lambda_{1,2} = -\lambda_1, -\lambda_2$, 则微分方程式(3-70)的一般解可表示为

$$n = c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t} + n_B \quad (3-71)$$

式中, c_1, c_2 为待定常数。

将式(3-71)求导,并代入式(3-69)得

$$I_a = I_B + \frac{GD^2}{375C_T \Phi} (c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}) \quad (3-72)$$

将初始条件 $n|_{t=0} = n_A, I_a|_{t=0} = I_A$ 分别代入式(3-71)和式(3-72)得

$$\begin{cases} c_1 + c_2 = n_A - n_B \\ c_1 \lambda_1 + c_2 \lambda_2 = \frac{375C_T \Phi}{GD^2} (I_A - I_B) \end{cases} \quad (3-73)$$

解方程式(3-73)得

$$\begin{cases} c_1 = \frac{\lambda_2 (n_A - n_B)}{\lambda_2 - \lambda_1} - \frac{375C_T \Phi (I_A - I_B)}{GD^2 (\lambda_2 - \lambda_1)} \\ c_2 = -\frac{\lambda_1 (n_A - n_B)}{\lambda_2 - \lambda_1} + \frac{375C_T \Phi (I_A - I_B)}{GD^2 (\lambda_2 - \lambda_1)} \end{cases} \quad (3-74)$$

将式(3-74)所求得的常数分别代入式(3-71)和式(3-72),便可获得过渡过程中的 $n = f(t), I_a = f(t)$, 其中, $n = f(t)$ 可用图 3.21(a) 所示曲线表示。

(2) 当 $T_M < 4T_a$ 时, $\lambda_{1,2}$ 为一对具有负实部的共轭复数根 $\lambda_{1,2} = -\alpha \pm j\omega$, 其中, $\alpha = \frac{1}{2T_a}, \omega = \frac{1}{2T_a} \sqrt{\frac{4T_a}{T_M} - 1}$ 。此时,微分方程式(3-70)的一般解可表示为

$$n = A e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi) + n_B \quad (3-75)$$

式中, A, φ 为待定常数。将式(3-75)求导,并代入式(3-69)得

$$I_a = I_B + \frac{GD^2}{375C_T \Phi} [-\alpha A e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi) + A \omega e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \varphi)] \quad (3-76)$$

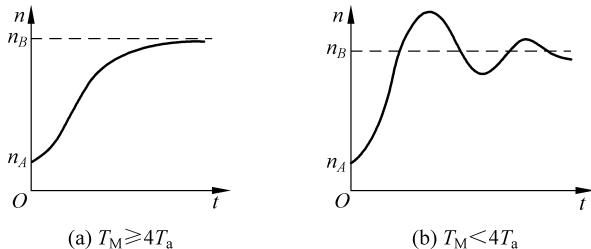


图 3.21 他励直流电动机的过渡过程曲线

将初始条件 $n|_{t=0} = n_A, I_a|_{t=0} = I_A$ 分别代入式(3-75)和式(3-76)得

$$\begin{cases} A \sin \varphi = n_A - n_B \\ -\alpha A \sin \varphi + A \omega \cos \varphi = \frac{375 C_T \Phi}{GD^2} (I_A - I_B) \end{cases} \quad (3-77)$$

将式(3-77)所求得的常数代入式(3-75)和式(3-76),便可获得过渡过程中的 $n = f(t), I_a = f(t)$,其中, $n = f(t)$ 可用图 3.21(b)所示曲线表示。

3.6 直流电动机的起动

1. 对直流电动机起动过程的一般要求

通电后,电动机的转速从零到达稳态转速的过程称为起动过程,对电动机起动过程的基本要求是:①起动转矩应足够大,以确保起动过程所需的时间较短;②起动电流要小;③起动设备应简单、经济与可靠。

从稳态观点看,一方面,直流电动机刚开始起动时转速 $n=0$,相应的感应电势 $E_a = C_e n \Phi = 0$,若外加电压为额定电压 U_N ,考虑到电枢电阻 R_a 很小,则由电压平衡方程式可知,起动电流 $I_{st} = \frac{U_N}{R_a}$ 较大。一般来说,直接起动时该起动电流可达额定电流的 10~20 倍。如此之高的起动电流不仅会造成电机过热并带来换向问题,而且对大、中容量的电机而言,还会产生很大的电流冲击,导致电网电压瞬时下降,从而影响周围其他用电设备的正常运行。为此,起动过程中必须对起动电流加以限制。另一方面,由于起动电流的限制,相应的起动转矩 $T_{st} = C_T \Phi I_{st}$ 将随之减小。

工程实际中,通常要求起动过程中应满足在确保足够起动转矩的前提下尽量减小起动电流。一般情况下,直流电动机起动时须满足:① $I_{st} \leq (2 \sim 2.5) I_N$; ② $T_{st} \geq (1.1 \sim 1.2) T_N$,以确保电机拖动额定负载顺利起动。

2. 起动方法

为了满足起动要求,确保在获得足够大的起动转矩的同时降低起动电流,直流电动机起动时一般应按照如下步骤进行:①首先在励磁绕组中加入额定励磁电流,以建立满载主磁场,确保一旦电枢电流加入所产生的电磁转矩最大,有利于缩短起

动时间；②待主磁场建立之后再加入电枢电压。

直流电动机常用的起动方法有：①电枢回路串电阻起动；②降压起动。现分别介绍如下。

(1) 电枢回路串电阻起动

在传统方案中，直流电动机多采用电枢回路串电阻的方法起动。起动前，励磁绕组中首先加入额定励磁电流，并在电枢回路中串入较大的电枢电阻；在起动过程中，依次逐级切除电枢回路所串联的电阻，直至起动过程结束。对应于这一方案的装置又称为直流电机的人工起动器，图 3.22 给出了直流电机人工起动器的电气原理图。

图 3.22 中，起动器通过手柄使得电源正极与 O 点接触，励磁绕组获得最大励磁电流。此时，继电器 C 吸合；然后，通过手柄使得电源正极与 1 点接触，此时电枢回路中外串电阻最大；逐级平滑切除各级电阻，直至电动机起动过程结束。在直流电机运行过程中，继电器 C 一直处于吸合状态。断电时，电枢电阻逐级释放结束，继电器 C 恢复断开。

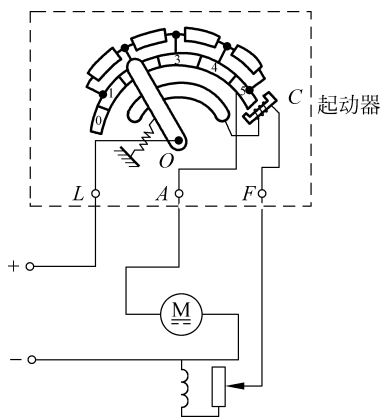


图 3.22 直流电机人工起动器的电气原理图

为了进一步说明电枢回路串电阻的起动过程，图 3.23(a)、(b) 分别给出了他励直流电动机采用两级电阻起动时的电路图和相应的机械特性。其起动过程简单分析如下。

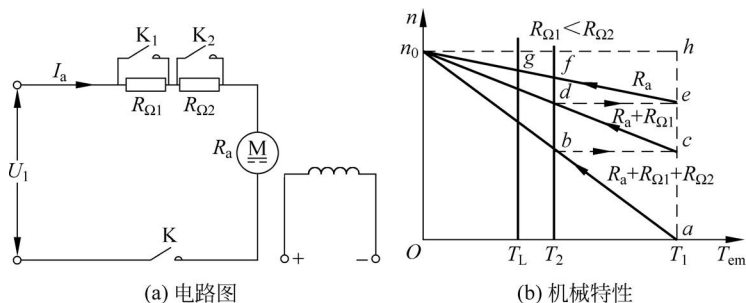


图 3.23 直流电机采用两级电阻起动的机械特性

起动开始时，接触器 K 闭合，起动过程开始，此时，对应于图 3.23(b) 的 a 点。由于 $T_1 > T_L$ ，在 T_1 作用下拖动系统将沿直线 ab 升速；到达 b 点时接触器 K_2 闭合，电阻 $R_{\Omega 2}$ 被短路切除， K_2 闭合瞬间，由于惯性转速 n 来不及变化，运行点由 b 移至 c 点；在 $T_{em(c)} (= T_1)$ 的作用下，系统将沿直线 cd 升速，到达 d 点时接触器 K_1 闭合，电阻 $R_{\Omega 1}$ 被 K_1 短路切除；同样，在 K_1 闭合瞬间，由于惯性转速 n 来不及变化，运行点由 d 移至 e 点；在 $T_{em(e)} (= T_1)$ 的作用下，系统将沿直线 efg 升速至 g 点，此时， $T_{em(g)} = T_L$ ，系统将稳定运行在 g 点，起动过程结束。

(2) 降压起动

尽管电枢回路串联电阻的起动方案成本低、简单可靠,但由于其本身是一种耗能的起动方案,因而目前正处在逐步被淘汰的境地,取而代之的是采用更加可靠、经济运行的降压起动方案。图 3.24 给出了降压起动过程中他励直流电动机的机械特性,其起动过程与电枢回路串电阻起动过程类似,这里不再重复。

降压起动的优点是,起动电流小,起动过程平滑,能量消耗少,因而在直流电力拖动系统中得到广泛采用。降压起动方案的缺点是,需要专门的可调压直流电源,目前多采用相控变流器或直流斩波器来实现。

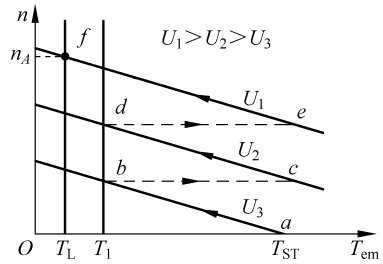


图 3.24 他励直流电动机的降压起动过程

3.7 直流电动机的调速

为了确保产品质量并提高生产率,要求生产机械能够经常在不同的转速场合下运行。对于电力拖动系统而言,系统可以通过生产机械本身实现速度调节如减速机构的换挡等,也可以通过电动机的速度调节满足系统对转速的要求;而大多数电力拖动系统则是通过两者的配合来满足调速要求的。随着各种控制策略的不断完善和先进手段(如微处理器技术、电力电子以及微电子技术等)的采用,生产机械自身结构的复杂性降低,而相应的电气系统的复杂性却在大幅度提高。最终结果是,电力拖动系统的性能以及所加工的产品质量和生产率大幅度提高,而生产机械本身的体积却在不断减小,目前这已成为电力拖动系统发展的必然趋势。一般把具有速度调节功能的电力拖动系统简称为**调速系统**,根据所采用电动机的类型不同,调速系统又可分为**直流调速系统**与**交流调速系统**两大类。

3.7.1 调速系统的性能指标

对于一般调速系统,主要通过如下几个指标评价系统的优劣:①调速范围;②静差率;③调速的平滑性;④原始投资与运行成本。前三项为技术性指标,最后一项为经济性指标,这些指标的具体定义如下。

1. 调速范围

调速范围定义为拖动系统运行的最高转速(或线速度)与最低转速(或线速度)之比,即

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{v_{\max}}{v_{\min}} \quad (3-78)$$

其中, n_{\max} 、 n_{\min} 分别代表最高和最低转速; v_{\max} 、 v_{\min} 分别代表最高和最低线速度。一般电力拖动系统的最高转速受生产机械的机械强度限制, 而最低转速则受系统的稳定性影响。

2. 静差率

静差率又称为**转速变化率**, 它是指拖动系统理想空载到额定负载时的转速变化量与理想空载转速之比的百分数, 即

$$\delta = \frac{n_0 - n_N}{n_0} \times 100\% = \frac{\Delta n_N}{n_0} \times 100\% \quad (3-79)$$

其中, n_0 表示理想空载转速。由式(3-79)可见, 静差率受两个因素影响, 一是转速变化量 Δn_N ; 二是理想空载转速 n_0 。

当 n_0 一定时, 机械特性越硬, 由空载到负载之间的转速变化越小, 则静差率 δ 越小; 图 3.25 中的直线 1、2 分别给出了他励直流电动机的固有机械特性和电枢回路串电阻的人为机械特性。对于恒转矩负载而言, 很显然, 电枢回路串电阻后转速降 Δn 的提高, 导致静差率加大。对实际拖动系统而言, 如果电枢回路外串电阻最大时的 δ 满足要求, 则其余情况下的 δ 自然也满足要求。

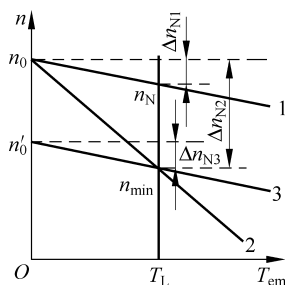


图 3.25 他励直流电动机的机械特性与静差率之间的关系

当机械特性的硬度一定时, 随着理想空载转速 n_0 的提高, 静差率 δ 减小。图 3.25 中的直线 3 为降低电枢电压时他励直流电动机的人为机械特性。对于恒转矩负载而言, 由于空载转速的降低, 导致低速时的静差率 δ 增大。对于电力拖动系统而言, 只要低速时满足 δ 的要求, 高速时的 δ 自然满足要求。因此, 应按照低速进行静差率 δ 的计算。于是有

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_{\max}}{n'_0 - \Delta n_N}$$

又根据式(3-79)可知 $n'_0 = \frac{\Delta n_N}{\delta}$, 将其代入上式得静差率 δ 与调速范围 D 之间的关系为

$$D = \frac{n_{\max} \delta}{\Delta n_N (1 - \delta)} \quad (3-80)$$

可见, 调速范围与静差率之间是相互关联的, 假若低速时的 δ 满足要求, 若采用电枢回路串电阻调速, 则相应的 Δn 较大、调速范围 D 较小, 有可能难以满足调速范围的要求; 若采用调压调速, 则由于 Δn 维持不变, 调速范围自然容易满足要求。换句话说, 与电枢回路串电阻调速方案相比, 调压调速方案可以使系统在更低的转速下稳定运行, 由此可对调速方式与性能指标之间的关系略见一斑。

当然,如果能进一步提高机械特性的硬度,减低 Δn , 便可以获得更宽的调速范围。工程实际中,通过转速闭环控制便可以达到上述目的。有关转速闭环控制系统的内容将在后续课程“电力拖动自动控制系统”中介绍。

3. 调速的平滑性

在调速系统中,经常采用有级和无级来描述系统的调速平滑性,并利用平滑系数来反映调速系统平滑性的优劣。定义平滑系数为相邻两级的转速比,即

$$K = \frac{n_i}{n_{i-1}} \quad (3-81)$$

式中, n_i 与 n_{i-1} 为相邻两级的转速。

上式中, K 越接近于 1, 则平滑性越好。若采用无级调速, 即速度连续可调, 则 $K=1$ 。

4. 原始投资与运行成本

调速系统的经济指标包括设备的原始性一次投资和设备的运行费用, 运行费用主要是指调速过程中的损耗, 通常用效率来衡量, 即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_2}{P_2 + \sum p} \times 100\% \quad (3-82)$$

3.7.2 他励直流电动机常用的调速方法

由转速表达式 $n = \frac{U_1}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e \Phi} I_a$ 可知, 他励直流电动机可以采用下列两种方法调速, 一种是采用降低电枢电压降速, 另一种是降低励磁电流升速(又称为弱磁升速), 两者均可以通过电力电子变流器或相应的电枢或励磁回路串电阻加以实现。下面分别对这两种方法加以讨论。

1. 降低电枢电压降速

(1) 电枢回路串电阻调速

2.8.3 节曾介绍了他励直流电动机电枢回路串电阻时的人为机械特性(见图 2.39), 现将其重新绘制在图 3.26 中。为了说明其在恒转矩负载下的调速特性, 图 3.26 将恒转矩负载的转矩特性 $T = T_L$ 也一同绘制在同一坐标系中。图中, 电动机的机械特性与负载特性的交点 a 、 b 、 c 即为拖动系统的稳定运行点, 所对应的转速分别为 n_1 、 n_2 、 n_3 。由图 3.26 可见, 随着电枢回路的电

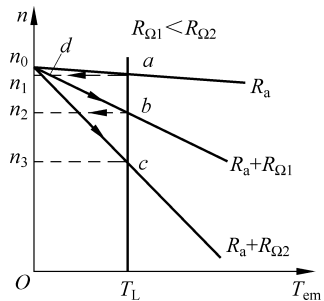


图 3.26 电枢回路串电阻情况下的人为机械特性和负载特性

阻增加,理想空载转速不变,机械特性的硬度变软,导致转速下降。因此,电枢回路串电阻只能在额定转速(又称为基速)以下调速。

考虑到电枢回路串电阻的降压调速过程中,磁通 $\Phi = \Phi_N$ 保持不变,对恒转矩负载 $T = T_L$,由 $T_{em} = C_T \Phi I_a$ 可知,电枢电流保持不变。

电枢回路串电阻的降速过程可解释如下:当电枢回路的电阻由 R_a 突然增至为 $R_1 = R_a + R_{\Omega 1}$ 时,由于机械惯性,转速 n_1 不能突变,拖动系统的运行点由点 a 移至点 d 。由于感应电势 $E_a = C_e n \Phi$ 保持不变,由 $I_a = (U_1 - E_a) / (R_a + R_{\Omega 1})$ 可见,此时 I_a 降低,电磁转矩 T_{em} 减小, $T_{em} < T_L$ 。由动力学方程可知,系统自然要减速。运行点由点 d 沿直线 db 向点 b 移动。由于转速降低,电枢电势 E_a 减小, I_a 增加,导致电磁转矩 $T_{em} = C_T \Phi I_a$ 有所增加,系统将最终稳定运行在 b 点,至此降速过程结束。

电枢回路串电阻调速的经济性指标分析如下:直流电动机的输入功率为

$$P_1 = U_1 I_a = (E_a + R I_a) I_a \quad (3-83)$$

忽略机械耗和铁耗,则根据式(3-83)得电动机的总损耗为

$$\begin{aligned} \Delta p &= I_a^2 R = U_1 I_a - E_a I_a = U_1 I_a \left(1 - \frac{E_a}{U_1}\right) = U_1 I_a \left(1 - \frac{C_e n \Phi}{C_e n_0 \Phi}\right) \\ &= P_1 \left(1 - \frac{n}{n_0}\right) \end{aligned} \quad (3-84)$$

其中, $U_1 = C_e n_0 \Phi$,即电枢电压等于理想空载转速时的反电势。

于是,电机的效率为

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta p}{P_1} = 1 - \left(1 - \frac{n}{n_0}\right) = \frac{n}{n_0} \quad (3-85)$$

由式(3-85)可见,随着转速的下降,电动机的运行效率降低,转速越低,效率越低。因此,电枢回路串电阻调速是一种不经济的调速方法。

(2) 降低电源电压降速

他励直流电动机在降低电源电压情况下的人为机械特性如图 2.40 所示,这里将其重画在图 3.27 中,一同绘制的还有恒转矩负载的转矩特性 $T = T_L$ 。图 3.27 中,电动机的机械特性与负载特性的交点 a 、 b 、 c 即为拖动系统在不同电压下的稳定运行点,所对应的转速分别为 n_N 、 n_1 、 n_2 。

由图 3.27 可见,电动机的转速随着外加电源电压的降低而下降,从而达到降速的目的。由于不同电源电压下的机械特性相互平行,在调速过程中机械特性的硬度保持不变。上一节曾提到,正是由于机械特性的硬度不变,使得降低电源电压的调速比电枢回路串电阻的降压调速具有更宽的调速范围。

同电枢回路串电阻降压一样,考虑到降低电源电压的降速过程中,磁通 $\Phi = \Phi_N$ 保持不变,对

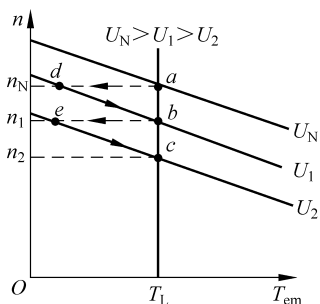


图 3.27 降低电源电压情况下的人为机械特性和负载特性

于恒转矩负载,稳态下的电枢电流自然也保持不变。

降低电源电压的降速过程可解释如下:当电源电压由 U_N 突然降至 U_1 时,由于机械惯性转速来不及变化,运行点将由点 a 瞬间转移至点 d 。此时, d 点的电磁转矩显然小于负载转矩,由动力学方程式知,拖动系统自然要减速,系统的运行点将由点 d 沿直线 db 向点 b 移动。一旦到达 b 点,则 $T_{em(b)} = T_L$,于是系统便稳定运行在 b 点。至此,降速过程结束。

至于降低电源电压降速方案的运行效率仍可按照式(3-85)进行计算。但考虑到这种降压降速方案中的理想空载转速 $n_0 \left(= \frac{U_1}{C_e \Phi} \right)$ 将随电枢电压的降低而变小,而电枢回路串电阻方案中的 $n_0 \left(= \frac{U_N}{C_e \Phi} \right)$ 却保持不变,因而根据式(3-85)可知,当采用上述两种方案将转速 n 降至同一数值时,降低电源电压的降速方案将具有更高的运行效率。

至此可以看出,与电枢回路串电阻降压调速相比,改变电源电压的调速方案不仅具有较宽的调速范围,而且在速度调节的平滑性和经济性或效率方面都具有明显的优势,因而这种调速方案得到了广泛应用。

对于直流调速系统而言,可调压的直流电源可以通过恒速运行的感应电机拖动直流发电机来实现,也可以借助于由电力电子器件组成的电力电子变流器来获得。具体实现方案将在 3.9 节介绍。

2. 弱磁升速

他励直流电动机在弱磁情况下的人为机械特性如图 2.41 所示,这里将其重新绘制在图 3.28 中,并将恒转矩负载的转矩特性也绘制在同一坐标系中。图 3.28 中,电动机的机械特性与负载转矩特性的交点 a 、 b 、 c ,即为拖动系统的稳定运行点,所对应的转速分别为 n_1 、 n_2 、 n_3 。显然,电动机的转速随着励磁电流的减小而升高,从而达到弱磁升速的目的。为了防止磁路过饱和,励磁电流只能在额定励磁电流范围内调节,这就意味着弱磁调速只能在基速(额定转速)以上进行。

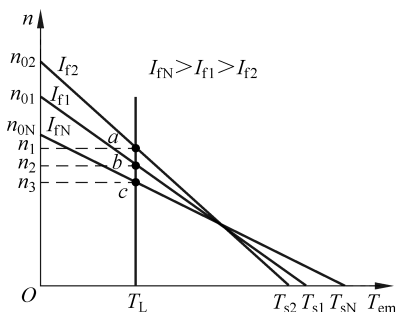


图 3.28 励磁改变情况下的直流电动机人为机械特性和负载特性

对恒转矩负载,由 $T_{em} = C_T \Phi I_a$ 可知,在弱磁升速过程中,电枢电流不再保持不变,而是随着磁通的降低,电枢电流 I_a 与磁通 Φ 成反比增加。

为了说明弱磁升速过程,图 3.29 重新绘出了弱磁升速时的人为机械特性。根据图 3.29,弱磁升速过程可解释如下:忽略励磁回路的时间常数,假定突然降低励磁电压 U_f ,使得励磁磁通由 $\Phi_N (I_{fN})$ 突然降至 $\Phi_1 (I_{f1})$,则由于机械惯性,系统的转速来不及突然变化。由

$I_a = (U_1 - E_a) / R_a = (U_1 - C_e n \Phi) / R_a$ 可见, 电枢电流 I_a 将迅速增大。此时在 $T_{em} = C_T \Phi I_a$ 中, Φ 减小而 I_a 增大。在正常负载范围内, I_a 增大的程度要大于 Φ 减小的程度, 因此电磁转矩会由 $T_{em} = T_L$ 突增至 $T_{em(d)}$, 相应的运行点瞬间由点 a 移至点 d 。此时, 由于 $T_{em(d)} > T_L$, 由动力学方程知系统自然要加速, 运行点由 d 点沿直线 db 向 b 点移动。随着转速的升高和 E_a 的增加, 电枢电流 I_a 和电磁转矩 T_{em} 有所下降, 促使系统最终在 b 点达到新的平衡, 并以 n_b 的转速稳定运行, 此时 $T_{em(b)} = T_L$ 。

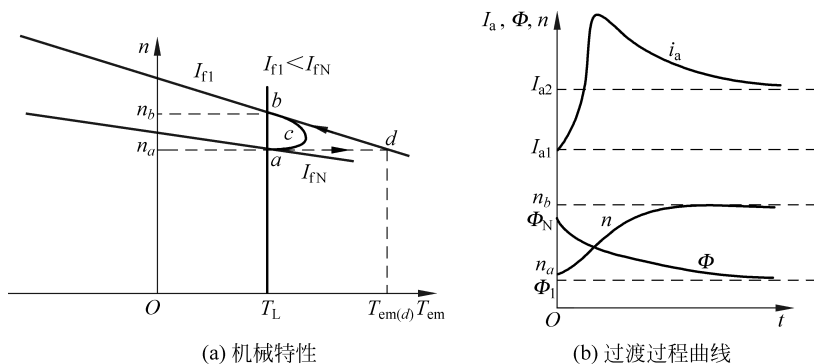


图 3.29 他励直流电动机弱磁升速的过渡过程

以上分析忽略了励磁回路的时间常数, 而实际情况是励磁回路的时间常数较大, 一般不应忽略。若突然降低励磁电压 U_f , 励磁电流 I_f 和磁通 Φ 将不可能立即减小, 其结果是 I_a 和 T_{em} 无法到达 d 点, 动态过程只能沿图 3.29(a) 中的曲线 acb 到达 b 点。励磁回路的时间常数越大, 则过渡过程所用的时间越长。图 3.29(b) 给出了考虑励磁回路时间常数的转速与电枢电流曲线, 很显然, 由 $T_{em} = C_T \Phi I_a$ 可知, 对恒转矩负载, 弱磁升速后, 稳态电枢电流 $I_{a2} > I_{a1}$ 。

对于普通直流电动机, 弱磁调速范围最多为 $D=2$; 而对于专门设计的弱磁调速电机, 其调速范围可达 $D=3\sim 4$, 不过其额定转速较低。

弱磁调速的优点是, 速度的控制是通过功率较小的励磁回路完成的, 控制方便, 能耗小。除此之外, 调速的平滑性也较高。为了获得较高的调速范围, 通常将弱磁升速与额定转速以下的降压调速配合使用。

3.7.3 调速方式与负载类型的配合

调速系统必须满足如下两个准则, 一是在整个调速范围内电动机不能过热, 否则, 电动机因温度过高而损坏其内部绕组或绝缘。为了确保调速过程中电机不至于过热, 对于直流电动机, 调速过程中的电枢电流一般不能超过额定值, 即 $I_a \leq I_N$ 。二是在整个调速范围内电动机的最大负载能力尽可能得到充分利用。所谓最大负载能力是指调速运行中, 在确保电枢电流 $I_a = I_N$ 的前提下, 电动机长期运行所能输出的最大转矩或功率。最大负载能力并不代表电动机的实际输出转矩或功率, 而是反映了其输出的允许值(capability), 调速系统的使用手册中一般都提供该允许值。

为了满足上述两个准则,兼顾电机不至于过温和最大负载能力得以充分发挥,在整个调速范围内电动机的实际电枢电流 I_a 应尽可能等于或接近其额定值 I_N 。考虑到实际运行时,电枢电流 I_a 的大小取决于负载,不同类型的负载必须选择合适的调速方式才能满足上述两个准则。下面就不同调速方式以及调速方式所适合的负载类型分别加以讨论。

1. 调速方式的类型

按调速过程中物理量的变化情况,电力拖动系统的调速方式主要分为两大类,一类是恒转矩调速方式,另一类是恒功率调速方式。

所谓恒转矩调速方式是指,调速过程中,在保持 $I_a = I_N$ 不变的前提下,电动机的电磁转矩保持不变。

3.7.2 节介绍的他励直流电动机电枢回路串电阻和降低电源电压调速就属于恒转矩调速方式。现分析如下。

由于调速过程中, $\Phi = \Phi_N$ 、 $I_a = I_N$ 保持不变,故电磁转矩为

$$T_{em} = C_T \Phi_N I_N = T_N = \text{常数}$$

电机轴上的输出功率为

$$P = \frac{T_{em} \Omega}{1000} = \frac{T_{em}}{1000} \left(\frac{2\pi n}{60} \right) = \frac{T_{em} n}{9550} \propto n$$

由此可见,电枢回路串电阻与降低电源电压的降压调速均属恒转矩调速方式,其轴上允许的输出功率与转速成正比。

所谓恒功率调速方式是指,调速过程中,在保持 $I_a = I_N$ 不变的前提下,电动机的最大电磁功率保持不变。

3.7.2 节介绍的他励直流电动机的弱磁调速即属于恒功率调速方式。现分析如下。

由于调速过程中, $I_a = I_N$ 保持不变,于是有

$$\Phi = \frac{U_N - R_a I_N}{C_e n} = K \frac{1}{n}$$

将上式代入电磁转矩的表达式得

$$T_{em} = C_T \Phi I_N = C_T K \frac{1}{n} I_N = \frac{K'}{n}$$

于是有

$$P = \frac{T_{em} n}{9550} = \frac{K'}{9550} = \text{常数}$$

由此可见,弱磁调速属于恒功率调速方式,其容许的输出转矩与转速成反比。

上述分析表明,基速以下,他励直流电动机采用恒转矩调速方式,而基速以上,则采用恒功率调速方式。图 3.30(a)、(b) 分别给出了他励直流电动机在整个调速过程中的机械特性与最大负载能力曲线。习惯上,最大负载能力用图 3.30(c) 所示的输出转矩、输出功率与转速之间的关系曲线来表示。

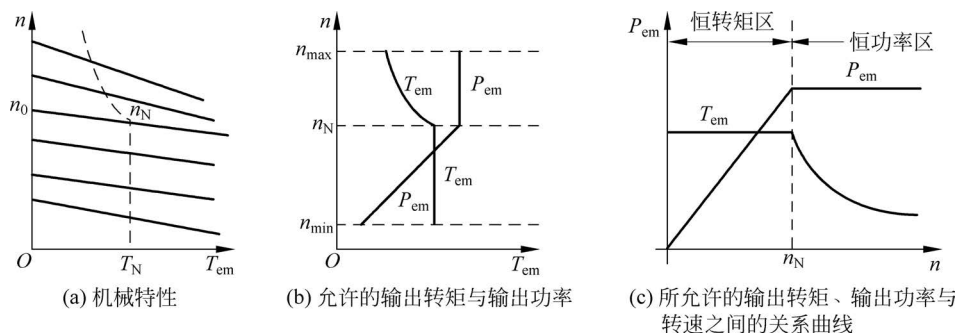


图 3.30 他励直流电动机调速过程中所允许的转矩和功率

2. 调速方式的选择

考虑到生产机械可大致分为恒转矩负载和恒功率负载两种类型(见 3.3 节),为了确保电动机在不过热的前提下最大负载能力得到充分发挥,具有恒转矩负载特点的生产机械应尽可能选择具有恒转矩性质的调速方式,且所选择电动机的额定转矩应大于负载转矩的值;具有恒功率负载特点的生产机械应尽可能选择具有恒功率性质的调速方式,且所选择电动机的额定功率应大于负载功率的值;否则,会造成不必要的转矩和功率浪费。现采用反证法说明如下。

若生产机械具有恒转矩负载特点,而选择具有恒功率性质的调速方式(见图 3.31(a))。为了满足整个调速范围内的负载转矩要求(即 $T_{em} > T_L$),电动机的转矩必须按照高速时的数值选择。此时所选电动机的额定功率为

$$P_N = \frac{T_L n_{max}}{9550} \quad (3-86)$$

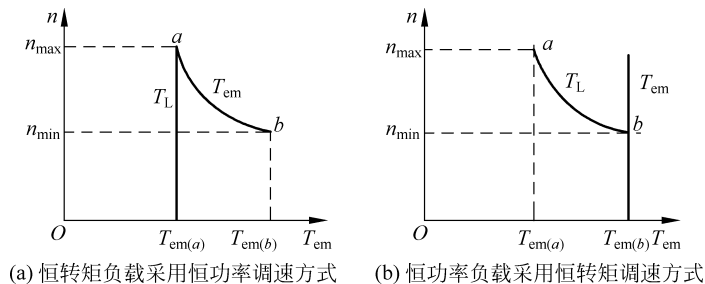


图 3.31 调速方式与负载类型不匹配的说明

当电机运行在低速 $n = n_{min}$ 时,实际负载所需的功率为

$$P_L = \frac{T_L n_{min}}{9550} = \frac{T_L n_{max}}{9550} \frac{n_{min}}{n_{max}} = P_N \frac{1}{D} \quad (3-87)$$

而电动机能够提供的功率仍为 $P_N = DP_L$,这样电动机的功率将有 $(D-1)P_L$ 未得到利用。同时,低速时电磁转矩也有

$$T_{em(b)} - T_{em(a)} = \frac{T_L n_{max}}{n_{min}} - T_L = (D-1)T_L \quad (3-88)$$

未得到使用。综上所述,整个调速范围内最大负载能力未得到充分利用。这说明恒转矩负载不宜采用恒功率调速方式。

同理,若生产机械具有恒功率负载特点,而选择恒转矩性质的调速方式(见图 3.31(b))。为了满足整个调速范围内的负载转矩要求(即 $T_{em} > T_L$),电动机的转矩必须按照低速数值选择,即 $T_N = T_{Lb}$ 。

当电机工作在高速 $n = n_{max}$ 时,电动机所能提供的电磁功率为

$$P_N = \frac{T_N n_{max}}{9550} = \frac{T_{Lb} n_{min}}{9550} \frac{n_{max}}{n_{min}} = DP_L \quad (3-89)$$

由此可见,电动机在高速时所提供的功率为 P_N ,这样,将有 $(D-1)P_L$ 的功率未得到利用。同时,高速时的电磁转矩也有

$$T_N - T_{La} = T_{Lb} - T_{La} = \frac{T_{La} n_{max}}{n_{min}} - T_{La} = (D-1)T_{La} \quad (3-90)$$

未得到使用。综上所述,整个调速范围内最大负载能力未得到充分利用,这说明恒功率负载不宜采用恒转矩调速方式。

对于风机、泵类负载,由于其既非恒转矩负载也非恒功率负载类型,无论是采用恒转矩调速方式还是采用恒功率调速方式,均不可能做到调速方式与负载类型的最佳配合(或匹配)。也许合理的调速方式应是恒转矩与恒功率调速方式的结合,对他励直流电动机而言,可根据上述要求通过调压和弱磁的配合,获得最佳的调速方案。

3.8 他励直流电动机的制动

制动是指电机的电磁转矩与转速方向相反的一种运行状态,在这一运行状态下,电磁转矩将起到抑制系统运动的作用。广义的制动包括利用电磁转矩使得拖动系统尽快停车、减速以及使位能负载获得稳定的下降速度等。

从能量转换角度上看,处于制动状态下的电机从机械轴上获得机械功率,并将其转换为电功率。因此,从这一点上看,电机的制动状态类似于电机运行在发电机状态,但与发电机运行又有本质的区别,主要表现在发电机所获得的机械功率来自原动机;而制动状态下的机械功率则来自拖动系统自身运行时所积累的动能或势能,通过电机将这些机械能转变为电能并回馈至电网或消耗掉,从而利用制动性的电磁转矩加快系统的减速过程。因此,一般情况下,将直流电机的运行状态分为电动机运行、发电机运行和电磁制动三种运行状态。

电磁制动同自由停车以及借助于其他外部制动手段如抱闸(即电磁制动器)等制动方式不同,它是利用电机自身的电磁转矩来实现制动的。在电动机运行状态下,电磁转矩为驱动性的;而一旦希望电机尽快减速或停车,可以改变电磁转矩的方向,使电磁转矩由驱动性变为制动性的转矩。由 $T_{em} = C_T \Phi I_a$ 可知,要完成这一转变,在主磁通 Φ 不变的条件下只需改变电枢电流的方向即可。又由 $E_a = C_e n \Phi$ 知,电机减速过程中转向不变,制动过程中磁场保持不变,因而 E_a 的方向也保持不变。而

电枢电流方向的改变必然导致电磁功率 $P_{em} = E_a I_a$ 改变符号,即电磁功率由电动机运行时的吸收电功率变为发出电功率。这部分电功率可以通过电阻消耗掉,也可以通过电网回收。根据制动过程中电机发出电功率的去向不同以及外部所提供的条件不同,制动可以分为能耗制动、反接制动和回馈制动三种方式。本节主要介绍这三种制动方式的基本思想以及所涉及的电磁过程与机械特性。

3.8.1 能耗制动

所谓**能耗制动**(dynamic braking)是将由机械轴上的动能或势能转换而来的电能通过电枢回路的外串电阻发热消耗掉的一种制动方式,由于机械能转换为电能,电机工作在发电状态,相应的电磁转矩必然为制动性的转矩,与运行方向相反,从而加速制动。

图 3.32 给出了制动前后电机作电动机运行和能耗制动时的接线图,制动前后励磁电流保持不变。

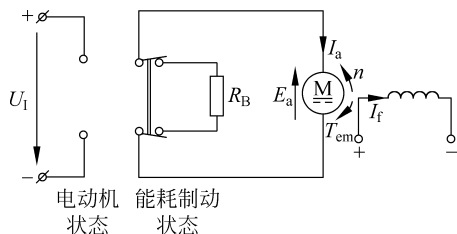


图 3.32 他励直流电机电动机状态与能耗制动状态的接线图

制动前,他励直流电机作电动机运行。保持励磁电流不变,通过单刀双掷开关将外加制动电阻 R_B 串入。制动开始时,由于拖动系统的机械惯性,转速大小和转向保持不变,相应的感应电势 E_a 必然与电动机运行状态时相同。由于外加电压 $U_1 = 0$,则电枢电流和电磁转矩分别为

$$I_{aB} = \frac{U_1 - E_a}{R_a + R_B} = \frac{-E_a}{R_a + R_B} < 0, \quad T_{em} = C_T \Phi I_{aB} < 0 \quad (3-91)$$

由式(3-91)可见,电磁转矩变为制动性转矩,系统减速加快,此时,电机处于发电状态运行,将吸收系统的动能转化为电能,消耗在电枢回路的总电阻($R_B + R_a$)上,能耗制动由此而得名。

根据图 3.32 有

$$P_{em} = E_a I_{aB} = I_{aB}^2 (R_a + R_B) \quad (3-92)$$

式(3-92)表明,由系统动能转换而来的电磁功率将全部消耗在电枢回路的总电阻($R_B + R_a$)上。

1. 能耗制动时电动机的机械特性与制动电阻的选择

在能耗制动过程中,他励直流电动机的机械特性可表示为

$$n = 0 - \frac{R_a + R_B}{C_e C_T \Phi^2} T_{em} = -\beta T_{em} \quad (3-93)$$

式(3-93)可用图 3.33 所示曲线表示,很显然,能耗制动时他励直流电动机的机械特性是一条通过原点且位于第 II 象限的直线。在制动过程中,由于电磁转矩的反向,相应的动力学方程式变为

$$-T_{em} - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} < 0$$

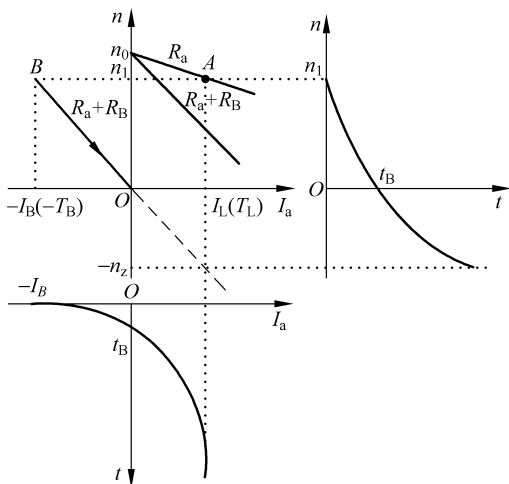


图 3.33 能耗制动时他励直流电动机的机械特性与过渡过程曲线

因此,电机减速较快,工作点将沿机械特性下移,制动转矩也逐渐减小,直至转速为零,电机停车。

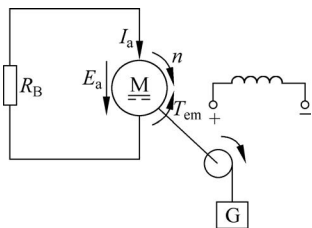


图 3.34 直流电机带位能性负载时的能耗制动情况

若电动机带位能性负载(见图 3.34),则当电机转速降为 0(即机械特性经过原点)时,要想使系统停车,就必须断开电枢回路。否则在位能负载的作用下,电机将反方向加速, n 、 E_a 、 I_a 、 T_{em} 均改变方向,直至 $T_{em} = T_L$ 为止,则拖动系统将最终以 $-n_z$ 稳速下降(见图 3.33 中的虚线)。此时相应能耗制动的机械特性位于第 IV 象限。

由式(3-91)可见,制动电阻 R_B 越小,制动电流 I_{aB} 越大,制动性的电磁转矩越大,制动时间越短。但 R_B 不能太小,否则, I_a (或 T_{em}) 将超过允许值,导致电枢绕组烧坏(或转子损坏)。一般按照最大制动电流不超过 $2I_N$ 来选择制动电阻 R_B ,于是,能耗制动的起始电流为

$$I_B = \frac{E_{aN}}{R_a + R_B} \leq 2I_N$$

即

$$R_B \geq \frac{E_{aN}}{2I_N} - R_a \approx \frac{U_N}{2I_N} - R_a \quad (3-94)$$

2. 能耗制动时他励直流电动机的过渡过程分析

能耗制动时拖动系统的基本关系式可由下式给出

$$\begin{cases} I_a = -\frac{E_a}{R_a + R_B} = -\frac{C_e n \Phi}{R_a + R_B} \\ T_{em} = T_L + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} = C_T \Phi I_a \end{cases} \quad (3-95)$$

将式(3-95)的第1式代入第2式,并整理得

$$T'_M \frac{dn}{dt} + n = -\frac{R_a + R_B}{C_e C_T \Phi^2} T_L \quad (3-96)$$

式中,机电时间常数 $T'_M = \frac{GD^2(R_a + R_B)}{375C_e C_T \Phi^2}$ 。

对于位能性负载,当 $T_{em} = T_L$ 时, $n = -n_z$, 利用式(3-95)的第1式有

$$T_L = C_T \Phi I_L = C_T \Phi \frac{C_e n_z \Phi}{R_a + R_B}$$

将上式代入(3-96)得

$$T'_M \frac{dn}{dt} + n = -n_z \quad (3-97)$$

解式(3-97)得

$$n = -n_z + (n_1 + n_z) e^{-\frac{t}{T'_M}} \quad (3-98)$$

同理

$$i_a(t) = I_L + (-I_B - I_L) e^{-\frac{t}{T'_M}} \quad (3-99)$$

式中, n_1 、 I_B 分别为能耗制动开始时的稳态转速与电枢电流,如图 3.33 所示。

根据式(3-98)和式(3-99)可绘出能耗制动时的过渡过程曲线,如图 3.33 所示。

对于反抗性负载(或位能性负载),若希望在零速时停车,则将 $n = 0$ 代入式(3-98)便可求得制动时间为

$$t_B = T'_M \ln \frac{n_1 + n_z}{n_z} \quad (3-100)$$

对于位能性负载,若希望电机继续反转运行,则全部制动时间为

$$t_B = (3 \sim 4) T'_M \quad (3-101)$$

3.8.2 反接制动

反接制动(plugging)是外加电枢电压反向或在外部条件作用下电枢电势反向,

引起电磁转矩反向的一种制动方式。对反抗性负载,可直接通过外加电枢电压反接实现反接制动;而对于位能性负载,当重物提升时,电机工作在电动机状态,当重物下降时,由于转速的方向改变导致电枢电势反向,此时电机的运行情况同反抗性负载电枢电压反接相同,因而也将其归类于反接制动。下面就对这两种情况分别进行讨论。

1. 电枢反接的反接制动

对于反抗性负载,把正在作正向电动机运行的他励直流电机的外加电枢电压反接,同时在电枢回路中串入限流的反接制动电阻,便可实现反接制动。图 3.35 给出了反接制动时的电气接线图以及各物理量的实际方向。

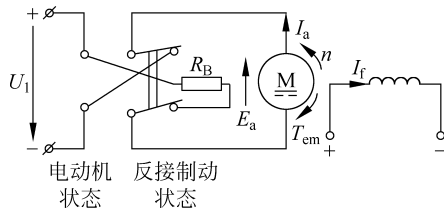


图 3.35 他励直流电机反接制动状态的接线图

制动前,电机作正向电动机运行;若希望拖动系统快速停车或反转,可通过单刀双掷开关将外加电枢电压反向加至电枢两端。为限制电枢电流,电枢回路应串入制动电阻 R_B 。由于外加电枢电压反接, U_1 的符号改变,相应的电枢电流和电磁转矩分别为

$$I_B = \frac{-U - E_a}{R_a + R_B} < 0, \quad T_{em} = C_T \Phi I_B < 0 \quad (3-102)$$

式(3-102)表明,电磁转矩变为制动性转矩,故拖动系统将迅速制动。

由式(3-102)可得

$$|UI_B + E_a I_B| = I_B^2 (R_a + R_B) \quad (3-103)$$

式(3-103)表明,反接制动时外部电源输入的电功率和由系统动能转换而来的电磁功率将全部转变为电枢回路总电阻($R_B + R_a$)的损耗。

(1) 反接制动时电机的机械特性与制动电阻的选择

反接制动过程中电机的机械特性可表示为

$$n = \frac{-U_1}{C_e \Phi} - \frac{(R_a + R_B)}{C_e C_T \Phi^2} T_{em} = -n_0 - \beta T_{em} \quad (3-104)$$

式(3-104)可用图 3.36 所示曲线表示。

很显然,反接制动时电机的机械特性是一条位于第 II 象限的直线。在制动过程中,由于电磁转矩的反向,相应的动力学方程式变为

$$-T_{em} - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} < 0$$

因此,电机很快减速,工作点将沿机械特性下移,制动转矩也逐渐减小,直至转速为

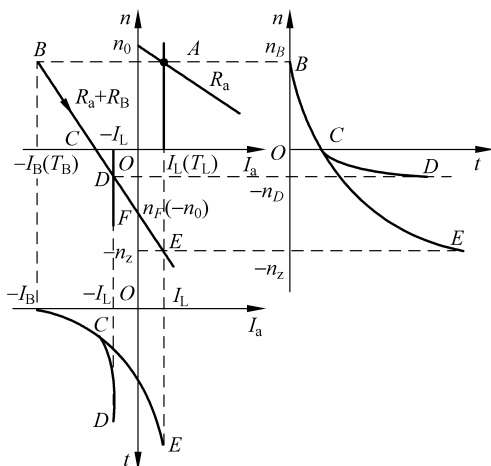


图 3.36 反接制动时直流电机的机械特性

零,电机停车。若电动机带反抗性负载,则当电机转速降为零时(见图 3.36 中的 C 点),要想使系统真正停车,就必须断开电源,否则在反抗性负载的作用下,电机将反方向继续运行,进入第Ⅲ象限。在第Ⅲ象限中,由于转速反向,负载转矩相应地也改变符号,因此拖动系统的动力学方程变为

$$-T_{\text{em}} - (-T_L) = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} < 0$$

电机运行点将沿机械特性下移,电机继续减速,直至 $T_{\text{em}} = T_L$ 。最终,拖动系统以 $-n_D$ 的转速稳定运行在图 3.36 中的 D 点。对于位能性负载,电机将继续反向加速,直至进入第Ⅳ象限,此时,电磁转矩改变符号,负载转矩与第Ⅰ象限相同,拖动系统的动力学方程变为

$$T_{\text{em}} - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} < 0$$

电机将继续减速,直至 $T_{\text{em}} = T_L$,并最终 $-n_z$ 的转速稳定运行在图 3.36 中的 E 点。下一节的分析将表明,电机运行在第Ⅳ象限时实际已进入回馈制动状态。

反接制动时,由于外加电枢电压与反电势顺向串联,电枢电流较大,为了限制该电流,通常在电枢回路中串入较大的制动电阻 R_B 。同能耗制动一样,该制动电阻一般也是按照最大制动电流不超过 $2I_N$ 来选择。于是有

$$I_B = \frac{U_N + E_{aN}}{R_a + R_B} \leq 2I_N$$

式中, I_B 为反接制动的起始电流。

$$R_B \geq \frac{U_N + E_{aN}}{2I_N} - R_a \approx \frac{U_N}{I_N} - R_a \quad (3-105)$$

很显然,反接制动时的制动电阻 R_B 约为能耗制动时的两倍。

(2) 反接制动时他励直流电动机的过渡过程分析

对于反抗性负载,根据图 3.36 可知,若希望系统在反接制动过程中最后停车,则电机的机械特性对应于 BC 段。在这一阶段,拖动系统的动力学方程式为

$$-T_{\text{em}} - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} < 0 \quad (3-106)$$

过渡过程的起始点为 B 点,若负载特性以及其他条件均不变,则系统将最终稳定运行在 E 点。考虑到反抗性负载实际运行时达不到该点,故这一点又称为虚稳定点(即在各种外界条件不变情况下系统可能的稳定点)。利用起始点 B 、虚稳定点 E 以及机械时间常数这三要素,便可获得 BC 段的过渡过程曲线为

$$n(t) = n_E + (n_B - n_E)e^{-\frac{t}{T_M}} = -n_z + (n_A + n_z)e^{-\frac{t}{T_M}} \quad (3-107)$$

$$i_a(t) = i_E + (i_B - i_E)e^{-\frac{t}{T_M}} = I_L + (-I_B - I_L)e^{-\frac{t}{T_M}} \quad (3-108)$$

式中,反接制动时的机电时间常数 $T_M = \frac{GD^2(R_a + R_B)}{375C_e C_T \Phi^2}$ 。将 $n(t) = 0$ 代入式(3-107),得系统由制动初始 B 点至完全停车(对应于 C 点)所需的时间为

$$t_B = T_M \ln \frac{n_A + n_z}{n_z} \quad (3-109)$$

若反接制动在 C 点不停车,亦即在 C 点(见图 3.36)继续闭合,则电机将反转,工作点沿 CD 移动并最终稳定运行在 D 点。这一阶段电机工作在反向电动机运行状态,负载转矩改变方向,相应的动力学方程式变为

$$-T_{\text{em}} + T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} < 0 \quad (3-110)$$

由于负载转矩的改变, CD 段的过渡过程自然发生变化。利用该段的起始点 C 、稳态运行点 D 以及机械时间常数这三要素便可获得系统在 CD 段的过渡过程曲线为

$$n(t) = -n_D + (n_C + n_D)e^{-\frac{t}{T_M}} = -n_D(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}) \quad (3-111)$$

对应 CD 段的时间为

$$t_{FM} = (3 \sim 4)T_M \quad (3-112)$$

对于反抗性负载,拖动系统从作电动机正转运行经反接制动到作反向电动机运行所经过的总时间为式(3-109)与式(3-112)之和。

对于位能性负载,若仅考虑反接制动停车,则 BC 段的过渡过程与反抗性恒转矩负载情况完全相同(见图 3.36),制动时间仍可采用式(3-109)计算。

若反接制动在 C 点不停车,则由于整个制动过程包括停车(BC 段)、反向电动机运行(CF 段)以及回馈制动阶段(FE 段),跨越机械特性的第 II、III、IV 象限。考虑到整个制动阶段外部条件并未发生变化,则过渡过程可以采用统一表达式来描述。由起始点 B 、稳态运行点 E 以及时间常数这三要素得过渡过程曲线为

$$n(t) = n_E + (n_B - n_E)e^{-\frac{t}{T_M}} = -n_z + (n_A + n_z)e^{-\frac{t}{T_M}} \quad (3-113)$$

$$i_a(t) = i_E + (i_B - i_E)e^{-\frac{t}{T_M}} = I_L + (-I_B - I_L)e^{-\frac{t}{T_M}} \quad (3-114)$$

很显然,式(3-113)、式(3-114)与式(3-107)、式(3-108)分别相同。

总的制动时间为

$$t_{FP} = (3 \sim 4) T_M \quad (3-115)$$

2. 转速反向的反接制动

对于位能性负载,当重物提升时,电机工作在电动机状态运行。若希望重物稳定下放,则可通过电枢回路串联较大的电阻达到这一目的。此时,由于转速反向导致感应电势与外加电枢电压方向相同,与感应电势方向不变、外加电压反接时的情况完全相同,因此,这也是一种反接制动。

图 3.37 是他励直流电机带位能性负载反接制动时的电路图。当电机工作在电动机正转运行(提升重物)时,若希望重物稳定下放,可在电枢回路串入较大的电阻 R_Ω 。此时,由于外串电阻较大,电枢电流减小,导致电磁转矩小于负载转矩。由动力学方程式可知,拖动系统必然减速,并在重物作用下反转。一旦电机反转运行,感应电势将反向,它与外加电枢电压顺向串联,从而进入反接制动状态。此时,由于电枢电流加大,相应的电磁转矩增大,直至电磁转矩与负载转矩平衡,拖动系统进入稳态,重物平稳下放。在进入反接制动阶段,拖动系统的动力学方程式变为

$$T_{em} - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \leq 0$$

相应的电枢电流为

$$I_a = \frac{U_1 - (-E_a)}{R_a + R_B} > 0 \quad (3-116)$$

电机的机械特性为

$$n = \frac{U_1}{C_e \Phi} - \frac{(R_a + R_\Omega)}{C_e C_T \Phi^2} T_{em} < 0 \quad (3-117)$$

式(3-117)可用图 3.38 所示曲线表示。

由式(3-116)可得位能性负载反接制动时的功率关系为

$$U_1 I_a + E_a I_a = I_a^2 (R_a + R_B) \quad (3-118)$$

式(3-118)表明,对于位能性负载,反接制动过程中外部电源输入的电功率与由重物势能转换而来的电磁功率全部消耗在电枢回路的电阻上。

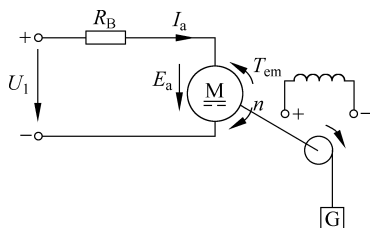


图 3.37 直流电机带位能性负载反接制动时的电路图

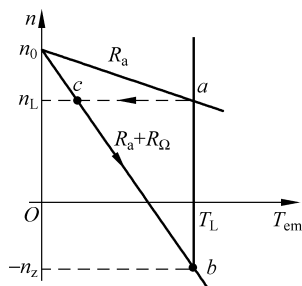


图 3.38 位能性负载反接制动的机械特性

3.8.3 回馈制动

当他励直流电机的实际转速 $n = \frac{E_a}{C_e \Phi}$ 高于理想空载转速 $n_0 = \frac{U_1}{C_e \Phi}$, 亦即感应电

势 E_a 超过电枢电压 U_1 ($E_a > U_1$) 时, 电枢电流 I_a 将改变方向, 电磁转矩由驱动性转变为制动性 ($T_{em} < 0$), 电机将向电网馈电, 故这种运行状态又称为回馈制动状态(也称为再生制动状态, regeneration braking)。

回馈制动时电机的接线同电动机运行状态完全相同, 其电枢电流和机械特性的表达式也完全相同, 所不同的是电机的实际转速超过理想空载转速, 导致 $E_a > U_1$ 。于是当电机正向运行时, 其电枢电流和机械特性分别为

$$I_B = \frac{U_1 - E_a}{R_a + R_\Omega} < 0, \quad T_{em} = C_T \Phi I_B < 0 \quad (3-119)$$

$$n = \frac{U_1}{C_e \Phi} - \frac{(R_a + R_\Omega)}{C_e C_T \Phi^2} T_{em} > n_0 \quad (3-120)$$

当电机反向运行时, 其电枢电流和机械特性分别为

$$I_B = \frac{-U_1 - (-E_a)}{R_a + R_\Omega} > 0, \quad T_{em} = C_T \Phi I_B > 0 \quad (3-121)$$

$$n = \frac{-U_1}{C_e \Phi} - \frac{(R_a + R_\Omega)}{C_e C_T \Phi^2} T_{em} < -n_0 \quad (3-122)$$

式中, R_Ω 为电枢回路的外接电阻。

根据式(3-120)和式(3-122)分别绘出正向回馈制动和反向回馈制动时直流电机的机械特性如图 3.39 所示。

由图 3.39 可以看出, 正、反转回馈制动时的机械特性分别位于第 II、IV 象限, 它们分别是正、反转电动机运行时的机械特性(分别位于第 I、III 象限)的延伸。

回馈制动通常出现在下列三种情况下: ①重物下放过程中; ②降压调速过程中; ③增磁减速过程中。下面分别给予介绍。

1. 重物下放时的回馈制动

图 3.40 为重物下放时直流电机拖动位能性负载反向回馈制动时的接线图及各物理量的实际方向, 很显然, 它属于直流电机反转运行的回馈制动, 其机械特性可用式(3-122)表示。

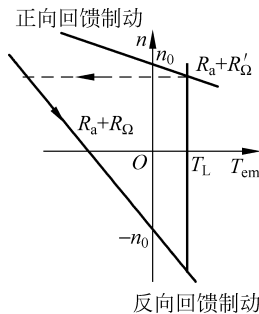


图 3.39 直流电机回馈制动时的机械特性

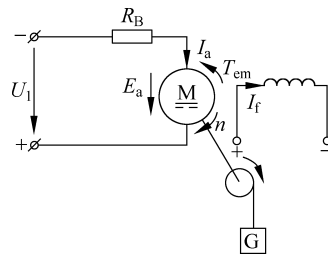


图 3.40 重物下放时直流电机回馈制动时的接线图

在回馈制动过程中,由机械负载拖动电机运行所发出的电功率一部分消耗在电枢回路的电阻上,另一部分回馈至电网。根据式(3-121),上述功率之间的关系可表示为

$$E_a I_B = U_1 I_B + I_B^2 (R_a + R_B) \quad (3-123)$$

由于回馈制动将机械能转变为电能并回馈至电网,因此与其他两种制动方式相比,回馈制动是一种比较经济的制动方式。

2. 降压调速过程中的回馈制动

降压调速时电机的机械特性如图 3.41 所示,由图可见,当电枢电压突然降低时,由于机械惯性转子转速不会突然变化,工作点将由 a 点移至 b 点。在降速过程中,工作点由 b 点沿直线 bc 向 c 点移动。在这一阶段,由于实际转速高于降压后的理想空载转速 n_c ,导致 $E_a > U_1$ 即感应电势大于外加电压,电枢电流 I_a 反向,电磁转矩变为制动性转矩。此时,来自转子的机械势能变为电能回馈至电网。一旦转速低于理想空载转速 n_c ,则电机又恢复到电动机状态运行。其他降速过程与上述分析相同。

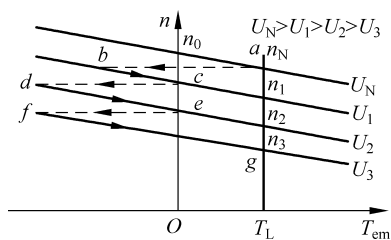


图 3.41 直流电动机降压时的回馈制动特性

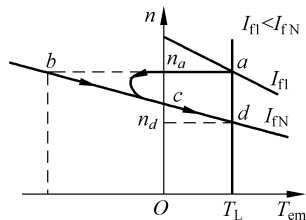


图 3.42 直流电动机增磁时的回馈制动特性

3. 增磁减速过程中的回馈制动

回馈制动也同样发生在弱磁升速的逆过程中,当突然增加励磁时,同样由于转子转速的延缓变化导致降速过程的一段时间内(见图 3.42 中的 bc 段)出现实际转速高于降压后的理想空载转速 n_c 的情况。与降压调速类似,在这一阶段内,电机将把机械能转变为电能,电磁转矩变为制动性的,即进入所谓的回馈制动

状态。

例 3-2 某他励直流电动机的数据为: $P_N = 15\text{kW}$, $U_N = 220\text{V}$, $I_N = 80\text{A}$, $n_N = 1000\text{r/min}$, $R_a = 0.2\Omega$, 电动机拖动位能性恒转矩负载,大小为 $0.8T_N$, 运行在固有机械特性上。

- (1) 停车时采用反接制动,制动转矩为 $2T_N$, 求电枢需串入的电阻值;
- (2) 反接制动到转速为 $0.3n_N$ 时,为了使电动机不至于反转,改换成能耗制动,制动转矩仍为 $2T_N$, 求电枢需串入的电阻值;
- (3) 绘出上述制动停车的机械特性;
- (4) 绘出上述制动停车过程中电动机的 $n=f(t)$ 曲线。

解 (1) 由 $T_{em} = C_T \Phi I_a$ 得制动前电枢电流为

$$I_{a1} = \frac{0.8T_N}{T_N} I_N = 0.8 \times 80 = 64(\text{A})$$

制动前电枢反电势为

$$E_{a1} = U_N - R_a I_{a1} = 220 - 64 \times 0.2 = 207.2(\text{V})$$

反接制动开始时的电枢电流为

$$I_{a2} = \frac{-2T_N}{T_N} I_N = -2 \times 80 = -160(\text{A})$$

又反接制动时: $-U_N = E_{a1} + (R_a + R_B) I_{a2}$, 于是

反接制动电阻为

$$R_B = \frac{-U_N - E_{a1}}{I_{a2}} - R_a = \frac{-220 - 207.2}{-160} - 0.2 = 2.47(\Omega)$$

(2) 电动机的额定电枢电势为

$$E_{aN} = U_N - R_a I_N = 220 - 0.2 \times 80 = 204(\text{V})$$

由 $E_a = C_{en} \Phi$ 得能耗制动前的电枢电势为

$$E_{a2} = \frac{0.3n_N}{n_N} E_{aN} = 0.3 \times 204 = 61.2(\text{V})$$

又能耗制动时: $0 = E_{a2} + (R_a + R'_B) I_{a2}$ 。

制动电阻为

$$R'_B = \frac{-E_{a2}}{I_{a2}} - R_a = \frac{-61.2}{-160} - 0.2 = 0.183(\Omega)$$

(3) 上述停车过程中电机的机械特性如图 3.43(a) 所示, 其中, 反接制动刚开始时的转速为

$$n_1 = \frac{U_N - R_a I_{a1}}{C_e \Phi_N} = \frac{220 - 0.2 \times 64}{0.204} = 1015(\text{r/min})$$

其中, $C_e \Phi_N = \frac{E_{aN}}{n_N} = \frac{204}{1000} = 0.204$ 。反接制动时的稳态转速(虚稳定点)为

$$n_2 = \frac{-U_N - (R_a + R_B) I_{a1}}{C_e \Phi_N} = \frac{-220 - (0.2 + 2.47) \times 64}{0.204} = -1916(\text{r/min})$$

能耗制动时的稳态转速(虚稳定点)为

$$n_3 = \frac{-(R_a + R'_B) I_{a1}}{C_e \Phi_N} = \frac{-(0.2 + 0.183) \times 64}{0.204} = -120(\text{r/min})$$

上述过程电动机的运行轨迹是: $A \rightarrow B \rightarrow E \rightarrow D \rightarrow O$, 其中经过两个过渡过程, 即反接制动过程 $A \rightarrow B \rightarrow E$ 与能耗制动过程 $E \rightarrow D \rightarrow O$ 。

(4) 绘出过渡过程的 $n = f(t)$ 曲线如图 3.43(b) 所示。

例 3-3 一台他励直流电动机的额定数据如下: $P_N = 5.6\text{kW}$, $U_N = 220\text{V}$, $I_N = 31\text{A}$, $n_N = 1000\text{r/min}$, 电枢回路的总电阻为 0.45Ω , 系统的飞轮矩 $GD^2 = 9.8\text{N} \cdot \text{m}^2$, 负载转矩为 $T_L = 49\text{N} \cdot \text{m}$ 。若在额定转速下使电枢绕组反接, 反接制动

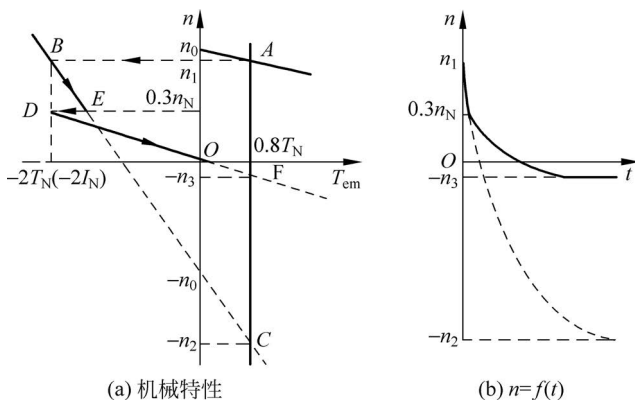


图 3.43 例 3-2 图

的起始电流为 $2I_N$, 试就反抗性负载与位能性负载两种情况分别用 MATLAB 计算:

- (1) 反接制动使转速从额定转速降至零所需的时间;
- (2) 绘出整个反接制动过程(从制动开始至系统反转)的转速 $n = f(t)$ 与电流 $I_a = f(t)$ 曲线。

解 (1) 反接制动使转速从额定转速降至零时所需的时间可参考式(3-109)。

(2) 所绘出的整个制动过程(从制动开始至系统反转)的转速 $n = f(t)$ 与电流 $I_a = f(t)$ 曲线, 如图 3.44 所示。以下为用 MATLAB 编写的源程序(M 文件):

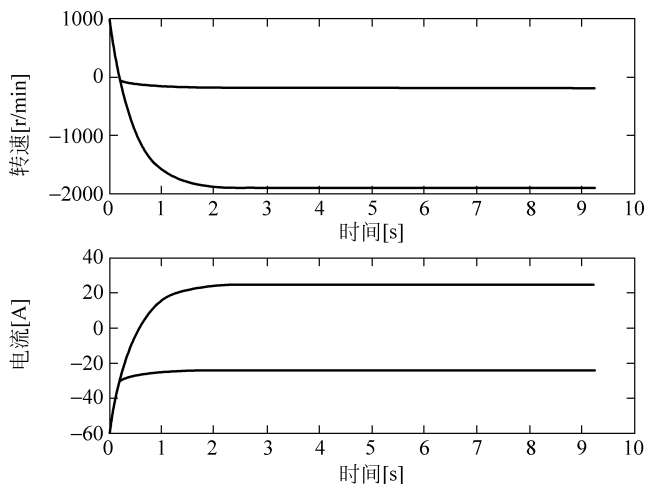


图 3.44 例 3-3 图

```
% Example3-3
%% Draw Transient Curve for DC Machine Drive System
clc
clear
%%% Rated Value and Parameters for Separately Excited DC Motor Drive System
Pn = 5.6 * 1e + 3; Un = 220; In = 31; Nn = 1000; ra = 0.4;
GD2 = 9.8; TL = 49;
% the flux and torque constants
```



```

Cefai = (Un-In * ra)/Nn;
Ctfai = 9.55 * Cefai;
% Calculate resistance value of the applied Resistor
EaN = Cefai * Nn;
Rb = (Un + EaN)/(2 * In);
% time constant of the mechanical-electrical driving system
TM = GD2 * (Rb + ra)/(375 * Cefai * Ctfai);
% Calculate steady-state velocity and current for the potential-energy Load
nz = -Un/Cefai-(Rb + ra) * TL/(Cefai * Ctfai);
Iz = TL/Ctfai;
% Calculate the steady-state velocity for opposed Load
nd = -Un/Cefai-(Rb + ra) * (-TL)/(Cefai * Ctfai);
Id = -Iz;
% calculate the time duration and current from Nn to zero speed
tb = TM * log((Nn + abs(nz))/abs(nz))
ic = Iz + (-2 * In - Iz) * exp(-tb/TM)
% Drawing n = f(t) and Ia = f(t) Curve for Two types Load
for i = 1: 400
    t(i) = 20 * TM * i/400;
% for potential-energy Load
    n1(i) = nz + (Nn - nz) * exp(-t(i)/TM);
    ia1(i) = Iz + (-2 * In - Iz) * exp(-t(i)/TM);
% for opposed Load
    if n1(i) >= 0
        n2(i) = n1(i);
        ia2(i) = ia1(i);
    else
        n2(i) = nd * (1 - exp(-t(i)/TM));
        ia2(i) = Id + (ic - Id) * exp(-t(i)/TM);
    end
end
subplot(2,1,1); plot(t,n1,'-',t,n2,'-')
xlabel('时间[s]'); ylabel('转速[r/min]');
hold on;
subplot(2,1,2); plot(t,ia1,'-',t,ia2,'-')
xlabel('时间[s]'); ylabel('电流[A]');
hold on;
disp('End');

```

3.9 直流电机的供电电源与各种类型的直流电力拖动系统

直流电机需要专门的可控直流电源供电,常用的可控直流电源可分别由直流发电机、相控变流器或直流斩波器构成,由此对应着三种不同类型的直流电力拖动系统:①直流发电机-电动机组成的直流拖动系统;②相控变流器-直流电机组成的直流电力拖动系统;③直流斩波器-直流电机组成的直流电力拖动系统。现分别对其介绍如下。

3.9.1 直流发电机-直流电动机组成的电力拖动系统

由直流发电机-直流电动机组成的直流电力拖动系统简称为 G-M(generator-

motor)系统,它是传统的直流拖动系统常见的结构形式。该类系统由恒速运行的原动机(如柴油机、汽油机以及感应电动机等)拖动直流发电机发电,将化学能或电能转换为直流形式的电能输出,为直流电动机供电。通过改变直流发电机的励磁改变直流电压,调节直流电动机的转速。图 3.45 给出了采用三相感应电动机作为原动机实现这一方案的原理图。

图 3.45 中,三相感应电动机 YM 通过三相电网供电,由其拖动直流发电机 G 恒速运行,直流发电机 G 作为电源为直流电动机 M 的电枢供电。通过调节发电机 G 的励磁电流改变输入直流电动机 M 的电枢电压,实现调压调速。

若工作环境在野外,可以采用汽油机或柴油机作为动力源,取代图 3.45 中的感应电动机,完成上述功能。

上述直流拖动系统的优点是发电机的输出电压平滑,调速系统的稳态性能高;缺点是系统的运行效率低、响应慢,设备的体积大、维护成本高。

自 20 世纪 70 年代以来,随着电力电子器件与技术的迅猛发展,上述由旋转变流机组组成的电力拖动系统方案逐步被由电力电子器件组成静止变流器的拖动系统方案所取代,从而大大改善了系统的性能,降低了系统的体积和重量,提高了系统的可靠性。

根据输入电源交、直流性质的不同,直流拖动系统所采用的静止式电力电子变流器可以分为两大类,一类是由晶闸管组成的相控变流器;另一类是由自控型电力电子器件(如功率三极管、IGBT、MOSFET 等)组成的直流斩波器(或 DC/DC 变换器),相应的直流电力拖动系统分别介绍如下。

3.9.2 相控变流器-直流电机组成的电力拖动系统^{*}

由相控变流器-直流电机组成的直流电力拖动系统简称为 T-M (Thyristor-Motor)系统(又称为 Ward-Leonard 系统),它是目前工业界应用较为广泛的一类直流电力拖动系统。T-M 系统开环结构的组成框图如图 3.46 所示。

图 3.46 中,VT 是由晶闸管组成的相控变流器,它将输入的交流整流成直流电源,为直流电机 M 的电枢绕组供电。GT 为移相触发单元,它将输入的控制电压转变为晶闸管的移相触发脉冲,通过改变控制电压的大小改变移相角(或控制角) α ,从而控制变流器的直流平均电压 U_d (相控变流器由此而得名),由此调节直流电机的转速。F 为直流电机的励磁绕组,其励磁电压

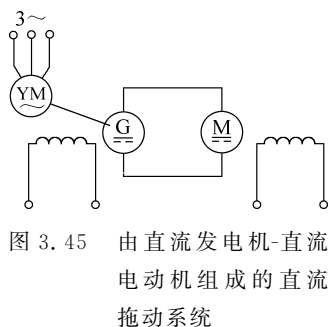


图 3.45 由直流发电机-直流电动机组成的直流拖动系统

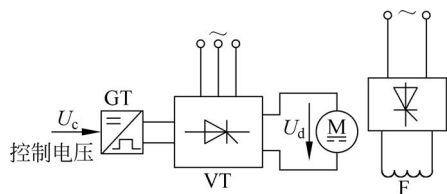


图 3.46 由相控变流器-直流电机组成的直流拖动系统

可由单相交流经可控晶闸管或不可控二极管整流器整流后提供。

有关晶闸管以及相控变流器的详细知识可参阅《电力电子技术》教材,下面仅就相控变流器的调压原理以及相控变流器供电下直流电机的机械特性及其特点作简单介绍。

1. 相控变流器的调压原理

根据电力电子技术,当直流侧电流连续且移相角为 α 时,相控变流器直流侧电压的平均值 U_d 可表示为

$$U_d = U_{d0} \cos\alpha \quad (3-124)$$

其中, $U_{d0} = U_m \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}$, U_m 为 $\alpha=0$ 时整流电压波形的峰值; m 为在交流电源一个周期内直流侧电压的脉波数。对单相全波变流器, $U_m = \sqrt{2}U_2$, $m=2$;对三相半波变流器, $U_m = \sqrt{2}U_2$, $m=3$;对三相全控桥变流器, $U_m = \sqrt{2}U_{21} = \sqrt{6}U_2$, $m=6$ 。

式(3-124)表明,当直流侧电流连续时,改变移相角 α ,相控变流器直流侧的平均电压 U_d 便可按照余弦规律平滑改变。当 $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ 时, $U_d > 0$,变流器的电功率由交

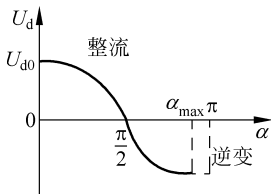


图 3.47 相控变流器的电压控制曲线

流侧流向直流侧,变流器工作在整流状态;当 $\frac{\pi}{2} < \alpha < \alpha_{\max}$ 时, $U_d < 0$,变流器的电功率将改变流向,由直流侧流向交流侧,变流器工作在(有源)逆变状态。图 3.47 给出了相控变流器的电压控制曲线。图 3.47 中,有源逆变状态下的最大控制角 α_{\max} (对应着最小逆变角 β_{\min} , $\beta = \pi - \alpha$)小于 π ,以免逆变失败(或逆变颠覆)。

2. 相控变流器供电下直流电机的机械特性

对于相控变流器供电的直流电机,忽略晶闸管的管压降,根据 KVL 得直流侧回路的电压平衡方程式为

$$\begin{aligned} U_d &= E_a + (R_B + R_a + R_c) I_a \\ &= C_e n \Phi + R_{\Sigma} I_a \end{aligned} \quad (3-125)$$

式(3-125)中, $R_{\Sigma} = R_B + R_a + R_c$ 为整流回路的总电阻,包括整流变压器折合到二次侧的等效电阻 R_B 、直流电机的电枢电阻 R_a 以及相控变流器换流压降所对应的等效电阻 $R_c = \frac{mX_B}{2\pi}$, X_B 为变压器折合到二次侧的等效漏抗。

根据式(3-124)、式(3-125)以及转矩表达式(式(2-16)),得相控变流器供电直流电机的机械特性为

$$n = \frac{U_{d0} \cos\alpha}{C_e \Phi} - \frac{R_{\Sigma}}{C_e C_T \Phi^2} T_{em} \quad (3-126)$$

根据式(3-126)便可绘出电流连续时不同控制角 α 下直流电机的机械特性。图3.48为T-M系统整流状态下电流连续时直流电机的典型机械特性曲线。由图3.48可见,相控变流器供电下直流电机的机械特性与直流发电机组供电时的机械特性类似。通过改变控制角 α ,便可获得一组平行的机械特性,实现电动机的速度调节。

值得说明的是,与直流发电机或蓄电池所产生的平滑直流电压不同,相控变流器所产生的直流电压和电流存在严重的脉动,由此带来一系列问题,如电机内部铁芯的涡流损耗增加、振动、噪音增大、换向恶化以及换向火花严重等现象。为了抑制脉动电流的影响,应该采取如下措施:①直流电机内部定、转子铁芯包括主极及轭部应采用冲片叠压而不是实心结构;②在相控变流器与直流电机电枢绕组之间的回路中串入附加的平波电抗器。

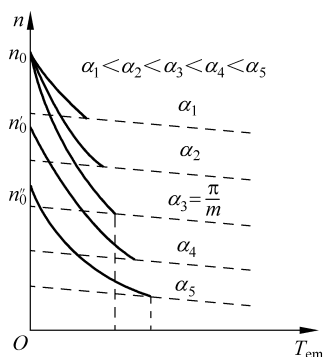


图3.49 电流断续时T-M系统的机械特性

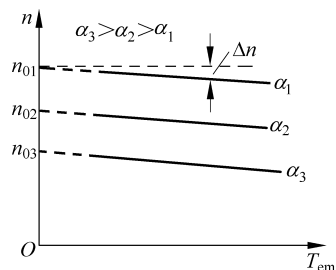


图3.48 电流连续时T-M系统下直流电机的机械特性

此外,对于T-M系统而言,当负载较轻、平波电抗器的储能电感较小时,电枢电流将出现断续(不同于直流发电机或蓄电池供电)。此时,T-M系统整流状态下直流电机的机械特性也与图3.48中的虚线有所不同,呈现如下特点:①理想空载转速比假定电流连续时计算的转速高;②机械特性明显变软,如图3.49所示。鉴于篇幅和教学内容所限,本书不再对其进行解释(有兴趣的读者可参考本书第1版)。

3.9.3 直流斩波器-直流电机组成的电力拖动系统^{*}

与相控变流器采用交流电源供电不同,斩波器采用恒定的直流源(如蓄电池或经过二极管整流后的直流电源)供电,它通过对变流器通断时间的控制将固定直流电压源转换为平均值可调的直流电源,从而实现直流电机的调压调速。图3.50给出了由斩波器-直流电机组成的直流电力拖动系统的开环结构框图及相关波形。图3.50(a)中,VT是由高频开关器件(如功率三极管、IGBT以及MOSFET等)构成的斩波器,它将输入的固定直流电源转换为可调的直流电源,为直流电机的电枢绕组供电;GT为开关器件的驱动控制电路,它将输入控制电压 U_c 与三角波(或锯齿波)进行比较产生开关器件的控制脉冲,从而调节斩波器的占空比,改变输出电压的平均值(见图3.50(b)),最终实现对直流电机的转速控制。

有关高频开关器件以及斩波器的详细知识可参阅《电力电子技术》教材。下面仅就斩波器的调压原理以及斩波器供电下直流电机的机械特性与特点作简单介绍。

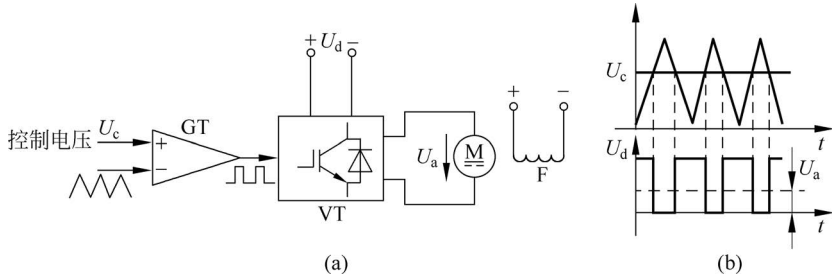


图 3.50 由斩波器-直流电机组成的直流电力拖动系统

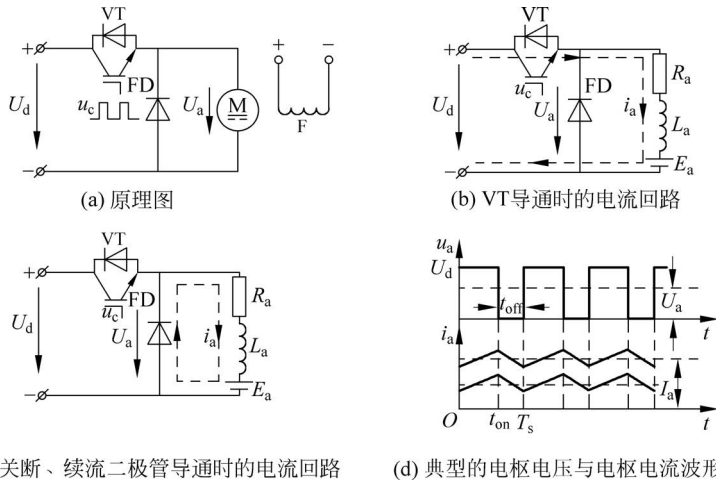
1. 斩波器的调压原理

图 3.51(a)、(b)分别给出了直流斩波器的原理图、电流回路以及电枢电压与电枢电流的波形图。图 3.51 中,利用门极脉冲 u_c 控制开关器件的通断。设斩波器的导通时间为 t_{on} ,关断时间为 t_{off} ,则开关频率为

$$f_s = \frac{1}{t_{on} + t_{off}} = \frac{1}{T_s} \quad (3-127)$$

定义占空比为

$$\rho = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (3-128)$$



(c) VT关断、续流二极管导通时的电流回路 (d) 典型的电枢电压与电枢电流波形

图 3.51 直流斩波器的原理图、导通回路以及电枢电压与电枢电流波形

当主开关器件 VT 处于导通阶段时,若忽略器件的导通压降,则电源电压 U_d 全部加至电枢两端,此时,电枢电流的回路如图 3.51(b)中的虚线所示。当开关器件 VT 关断时,电枢绕组通过二极管 FD 续流,相应的电枢电流的回路如图 3.51(c)中的虚线所示,此时,电机电枢两端的电压为零。如此反复,所获得的输出电压的平均值为

$$U_a = \frac{t_{\text{on}}}{T_s} U_d = \rho U_d \quad (3-129)$$

由式(3-129)可见,改变占空比 ρ 便可以改变电枢两端电压的平均值 U_a ,占空比的改变则可通过控制脉冲 u_c 来实现。因此,斩波器相当于一个直流电压调压器,其调压比取决于占空比 ρ 。

至于占空比 ρ 则具体可以通过如下两种方式加以改变:

(1) 定频调宽法,即保持开关频率不变,而仅改变导通时间,这种调制方式又称为 PWM(pulse width modulation, PWM)控制。

(2) 定宽调频法,即保持导通时间不变,仅改变开关频率。这种调制方式又称为 PFM(pulse frequency modulation, PFM)控制。

两者相比,前者的优点是开关损耗确定,便于变流器主回路的冷却设计,而且由于输出谐波分量一定,输入滤波器也容易实现优化设计。因此,斩波器多采用前者控制,相应的斩波器又称为**直流 PWM 变换器**。

下面进一步分析主开关器件通断过程中的电枢电压与电枢电流波形,图 3.51(d)中,电枢电压波形位于上部,而电枢电流波形位于下部。在电流波形中,上面的波形对应于负载较大的情况,而下面的电流波形则对应于负载较小的情况。两者的电流平均值均取决于负载的具体大小。

假若忽略电枢回路的电阻,由于上述两种情况下的电压平均值相同,因而两者的转速也将完全相同。除此之外,上述两种情况下的电流纹波也将完全相同。现解释如下:

由于忽略电枢回路的电阻,当主开关 VT 导通时,根据 KVL 电枢回路的电压方程为

$$U_d = L_a \frac{di_a}{dt} + E_a \quad \text{或} \quad \frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_a} (U_d - E_a) \quad (3-130)$$

考虑到 U_d 大于 E_a ,故 $di_a/dt > 0$,电流增加(图 3.51(d))。在此阶段,直流电源直接给电机供电,一方面将部分输入的电能转换为机械能输出;另一方面,还有一部分电能被转换为磁场能储藏在电枢电感中,电流增加越大,则磁场储能 $\frac{1}{2} L_a i_a^2$ 越多。

当主开关 VT 关断、续流二极管 FD 导通时,相应的电枢回路的电压方程为

$$0 = L_a \frac{di_a}{dt} + E_a, \quad \text{或} \quad \frac{di_a}{dt} = -\frac{1}{L_a} E_a \quad (3-131)$$

考虑到 $di_a/dt < 0$,故电流减小(见图 3.51(d))。在此阶段,直流电机将电枢电感的储能转换为机械能输出。显然,随着电感储能的释放,电枢电流逐渐减小。

仔细观察式(3-130)、式(3-131)可以看出,电流随时间的变化率 di_a/dt 与电枢电感成反比,而与电枢电流平均值的大小无关。因此,斩波器供电的直流电机的电流纹波与负载大小无关,亦即相对而言轻载时电枢电流的纹波较大。此时,可以通过在斩波器与电枢绕组之间串联平波电感消除电流纹波,以减小转矩脉动。

需要说明的是,上述斩波器方案仅限于输出直流电压低于电源电压的 Buck 型电路。当直流电机的电压高于电源电压时,可采用利用中间电感储能的 Boost 型斩波器电路,具体内容可参阅《电力电子技术》。

2. 斩波器供电下直流电机的机械特性

假定直流电机的转速恒定,定子采用他励磁方式,且激磁磁通保持额定值不变。当电枢电流连续时,在一个开关周期内电枢电压的平均值为 $U_a = \rho U_d$,电枢电流的平均值为 I_a ,平均电磁转矩为 $T_{em} = C_T \Phi I_a$,则斩波器供电下直流电机的机械特性为

$$n = \frac{\rho U_d}{C_e \Phi} - \frac{R_\Sigma I_a}{C_e \Phi} = n_0 - \frac{R_\Sigma}{C_e C_T \Phi^2} T_{em} \quad (3-132)$$

式中,理想空载转速 $n_0 = \rho U_d / (C_e \Phi)$,它与占空比 ρ 成正比。

根据式(3-132)便可绘出斩波器供电下直流电机的机械特性如图 3.52 所示。图 3.52 给出的是斩波器供电下直流电机在第 I、II 象限内的机械特性。当拖动系统轻载时,直流电机的电枢回路将会出现电枢电流断续的情况,此时,式(3-132)将不再成立,其实际机械特性较为复杂。有关轻载时机械特性的特征与相控变流器供电下电流断续时类似,亦即机械特性上翘,理想空载转速升高(见图 3.49)。为了减少电流断续的范围,可采用提高开关频率或在电枢回路中串联平波电感等措施。

总之,斩波器供电下直流电机的控制方案与结论与相控变流器供电情况类似,唯一不同的是斩波器是采用占空比改变输出电压,而相控变流器则是采用移相角控制。

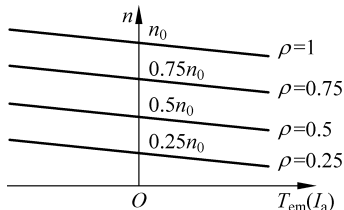


图 3.52 直流 PWM 变换器供电下直流电机的机械特性

3.10 直流电力拖动系统的四象限运行

在有些场合下,要求电力拖动系统能够提供正、反方向运行并能实现正、反方向上的快速制动,具有上述功能的系统,由于其对应电机的机械特性分别位于四个象限,故又称为具有四象限运行的电力拖动系统。

下面首先对具有四象限运行的他励直流电机的机械特性及其各种运行状态进行简要总结。在此基础上,对上一节给出的三类供电方式所对应的直流电力拖动系统在四象限运行时的工作状态作简要介绍。本节最后给出了直流电力拖动系统所能提供的一般机械特性与运行区。

3.10.1 他励直流电机四象限运行时的机械特性及其工作状态

图 3.53 给出了具有四象限运行功能他励直流电机的机械特性及其各种工作状

态。由图 3.53 可见,在四象限运行的直流电力拖动系统中,直流电机对应着四种不同的运行状态,即正转、反转、正转制动及反转制动。当电机处于电动机状态(无论正、反转)时,其电磁转矩 T_{em} 与转速 n 的方向相同,此时,电动机从电网吸收电能并转变为机械能,电磁转矩为驱动性的,从而拖动负载运行。当 $n > 0, T_{em} > 0$ 时,电动机正转运行,机械特性位于第 I 象限(其稳态工作点为 $a、a'$); 当 $n < 0, T_{em} < 0$ 时,电动机反转运行,机械特性位于第 III 象限(其稳态工作点为 $c、c'$)。

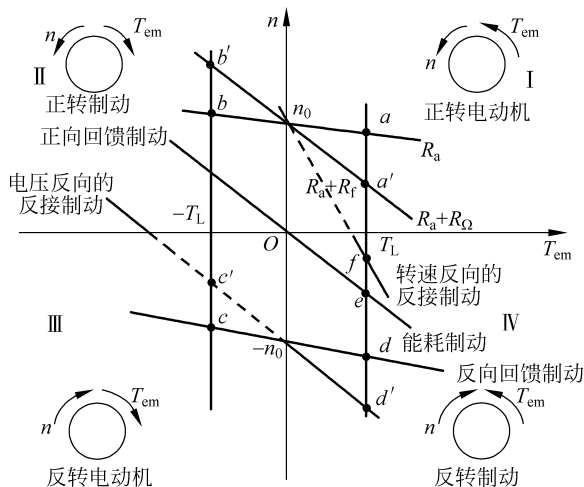


图 3.53 四象限运行的他励直流电机机械特性及其各种运行状态

当电机处于发电制动状态(无论正、反转)运行时,其电磁转矩 T_{em} 与转速 n 的方向相反。此时,电机从转子吸收机械能并转变为电能,电磁转矩为制动性的,旨在使系统快速停车。当 $n > 0, T_{em} < 0$ 时,电机处于正转制动状态,机械特性位于第 II 象限(其稳态工作点为 $b、b'$); 当 $n < 0, T_{em} > 0$ 时,电动机处于反转制动状态,机械特性位于第 IV 象限。相应的制动状态可以是回馈制动(其稳态工作点为 $d、d'$)、反接制动以及能耗制动(其稳态工作点为 e),在回馈制动状态下,电机将吸收由机械能转变而来的电能并回馈至电网,而反接制动和能耗制动则将所获得的电能消耗在电枢回路的电阻($R_a + R_Ω$)上,并最终转变为热能。

此外,图 3.53 还绘出了电枢回路串联大电阻 R_f ,位能性负载工作在转速反向的反接制动时的机械特性,它贯穿于第 I、IV 象限,其稳态工作点为 f 。

3.10.2 各类直流电力拖动系统四象限运行时的工作状态^{*}

1. G-M 系统四象限运行时的工作状态

图 3.54 给出了由直流发电机-直流电动机组成的直流电力拖动系统(G-M 系统)作四象限运行时的工作状态以及功率流向。图 3.54 中,电机 G 作为直流电源为直流电机 M 供电,由直流电机 M 拖动机械负载运行。

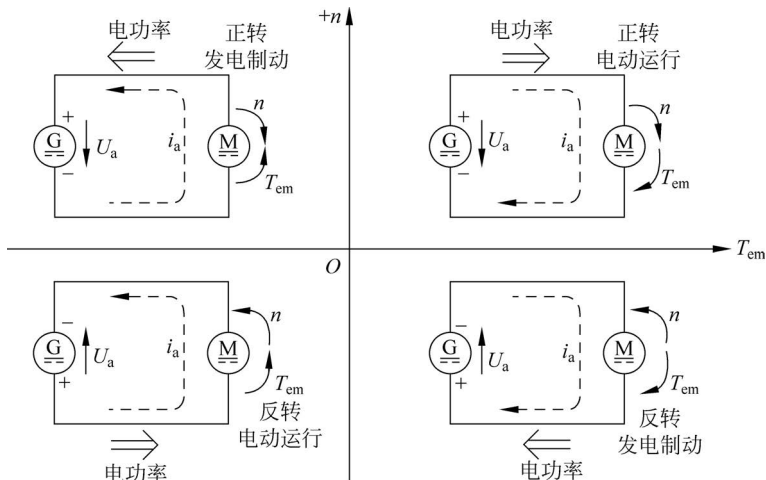


图 3.54 四象限运行时他励直流电机的运行状态及功率流向

对于他励直流电机,当保持励磁电流不变时,转子的转速将取决于外加电枢电压,而转矩则取决于电枢电流。因此,图 3.54 中,当拖动系统运行在上边两个象限时,外加电枢电压为正;当拖动系统运行在下边两个象限运行,则外加电枢电压为负。右边的两个象限对应于正向电流,则左边的两个象限对应于负向电流。当发电机 G 的供电电压 U_a 为正且大于直流电机 M 的反电势 E_a (即 $U_a > E_a$) 时,正向电流流向直流电机 M。直流电机 M 的电磁转矩为驱动转矩,它工作在正向电动机状态,此时,系统运行于第 I 象限,电功率由发电机 G 流向 M (见图 3.54)。

当希望直流电机 M 正转制动或减速时,可调节发电机 G 的励磁以降低其输出电压 U_a ,使得 $U_a < E_a$ 。于是,电枢电流反向,电磁转矩变为制动转矩,而转速由于惯性仍维持正转。此时,直流电机 M 工作在发电制动(或回馈制动)状态,系统运行于第 II 象限,从系统动能转变而来的电能由直流电机 M 流向发电机 G (见图 3.54)。

当希望直流电机 M 反转运行时,可改变发电机 G 的励磁方向或改变拖动其运行的原动机转向,并调节 G 的励磁,使得 $|U_a| > |E_a|$ 。此时,电流由发电机 G 流向直流电机 M,直流电机 M 的电磁转矩为驱动转矩,它工作在反向电动机状态,系统运行于第 III 象限,电功率由发电机 G 流向 M (见图 3.54)。

当希望直流电机 M 反转制动或减速时,可调节发电机 G 的励磁以降低其输出电压 U_a ,使得 $|U_a| < |E_a|$ 。于是,电枢电流反向,电磁转矩变为制动转矩,而转速由于惯性仍维持反转。此时,直流电机 M 工作在发电制动(回馈制动)状态。系统运行于第 IV 象限,从系统动能转变而来的电能由直流电机 M 流向发电机 G (见图 3.54)。

值得说明的是,上述分析过程完全适用于蓄电池供电的直流电力拖动系统。

2. T-M 系统四象限运行时的工作状态

与 G-M 系统或蓄电池供电的直流电力拖动系统不同,仅靠单个相控变流器无法与直流电机构成具有四象限运行功能的系统,其原因是相控变流器所采用的晶闸管

开关器件的单向导电性,单个相控变流器所提供的电流(亦即直流电机的电枢电流)只能是单方向的。考虑到对他励直流电机,当励磁电流保持不变时,电枢电流的方向决定了电磁转矩的正负,因此,相应的直流电机的机械特性也只能位于第 I、IV 象限。换句话说,仅靠单个相控变流器供电的直流电机只能实现正转与反转快速制动,无法完成由电动机运行状态到同一方向的发电制动状态的转换。

要确保在直流电机沿某一方向运行过程中实现该方向的快速制动或确保 T-M 拖动系统沿两个方向均实现快速制动功能(亦即具有四象限运行功能),就需要正、反两组变流器同时供电,使得一组工作在整流状态,同时另一组工作在逆变状态。由正、反两组变流器与直流电机组成的具有四象限运行功能的直流电力拖动系统(T-M 系统)如图 3.55 所示。

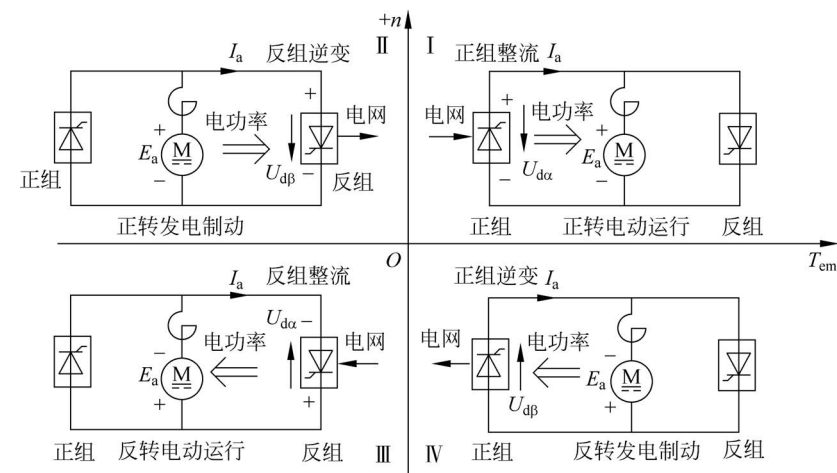


图 3.55 四象限运行时相控变流器与他励直流电机的工作状态及功率流向

图 3.55 中,两组变流器采用反向并联的方式连接。当希望直流电机 M 正转,可调整正组变流器的控制角 α_1 使得 $U_{d\alpha} > E_a$,则回路电流 I_a 由正组变流器流向 M;此时,正组变流器工作在整流状态,向直流电机 M 供电;直流电机 M 的电磁转矩为正向驱动转矩,电机工作在正向电动机状态,电力拖动系统运行在第 I 象限,电功率由电网经正组变流器流向 M,电能转变为动能输出。

当希望直流电机 M 正转制动或减速时,可调节反组变流器的逆变角 β_2 使得 $U_{d\beta} < E_a$ 。于是,电枢电流反向,电磁转矩变为制动转矩,而转速由于惯性仍维持正转,此时,反组变流器工作在逆变状态,直流电机 M 则工作在发电制动(或回馈制动)状态,系统运行于第 II 象限,从系统动能转变而来的电能由直流电机 M 经反组变流器流向电网(见图 3.55),系统的机械能转变为电能。

当希望直流电机 M 反转运行时,可改变反组变流器的控制角 α_2 使得 $|U_{d\alpha}| > |E_a|$,于是,反组变流器向直流电机 M 供电,电枢电流反向,直流电机 M 的电磁转矩为反向驱动转矩。此时,反组变流器工作在整流状态,直流电机工作在反向电动机状态,电力拖动系统运行于第 III 象限,电功率由电网经反组变流器流向 M,电能转变

为动能输出(见图 3.55)。

若希望直流电机 M 反转制动或减速时,可调节正组变流器的逆变角 β_1 使得 $|U_{d\beta}| < |E_a|$ 。于是,电枢电流反向,电磁转矩变为制动转矩,而转速由于惯性仍维持反转。此时,正组变流器工作在逆变状态,直流电机 M 则工作在发电制动(或回馈制动)状态,系统运行于第 IV 象限,从系统动能转变而来的电能由直流电机 M 经正组变流器流向电网,系统的机械能转变为电能(见图 3.55)。

至于正、反组变流器之间存在的环流问题及解决方案,限于篇幅,本书不作介绍,具体内容参阅《运动控制系统》。

3. 斩波器-直流电机系统四象限运行时的工作状态

斩波器-直流电机组成的直流电力拖动系统能否实现四象限运行取决于斩波器的具体结构。根据斩波器结构的不同,由斩波器-直流电机组成的电力拖动系统可分别实现单象限、两象限或四象限运行。

具有实现四象限运行能力的典型斩波器是 H 桥式 PWM 变换器(见图 3.56),由 H 桥式 PWM 变换器-直流电机组成的直流电力拖动系统的四象限运行状态如图 3.57 所示。

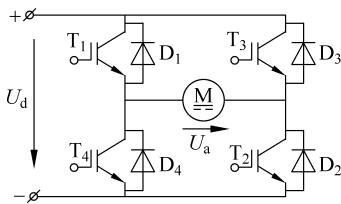


图 3.56 具有四象限运行能力的 H 桥式 PWM 变换器

若希望直流电机 M 正转,可控制主开关 T_1 、 T_2 同时导通,并维持 T_1 、 T_2 同时导通的时间为 t_{on} ,此时,直流电机电枢两端的输入电压 $U_a = U_d$,电枢电流 i_a 增加。然后关断 T_1 、维持 T_2 继续导通,此时,在电枢电感的自感电势作用下,电枢回路通过二极管 D_4 与主开关 T_2 续流,电枢电流减小。一旦续流时间达到 $(T_s - t_{on})$,则使主开关 T_1 重新导通,导通时间仍为 t_{on} 。然后再关断 T_1 ,电枢回路再一次

通过二极管 D_4 与主开关 T_2 续流,……,重复上述过程,并维持开关周期 T_s 不变,调

整占空比 $\left(\rho = \frac{t_{on}}{T_s}\right)$ 便可改变电枢两端电压的平均值(PWM 变换器由此而得名),实

现直流电机 M 的调压调速。上述过程中,由于电枢电流的平均值为正,直流电机 M 的电磁转矩为正向驱动转矩,电机工作在正向电动机状态,电力拖动系统运行在第 I 象限(见图 3.57),电功率由电源流向 M,电能转变为动能输出。

当希望直流电机 M 正转制动,可同时关断主开关 T_1 、 T_2 ,此时,二极管 D_3 、 D_4 将首先续流导通,并迅速降为零。为了使电枢电流反向,可控制 T_4 导通,在反电势 E_a 作用下,电流将通过 T_4 和 D_2 构成回路,并将电枢回路短路。此时,直流电机 M 进入能耗制动状态,系统的机械能将转变为电能并通过焦耳热消耗在电枢回路电阻上。一旦电枢电流达上限值,控制控制 T_4 关断,在电枢的自感电势和反电势的作用下,电枢电流将通过二极管 D_1 、 D_2 流回直流电源(见图 3.57 中的第 II 象限)。此时,直流电机进入再生制动状态,系统的机械能将转变为电能回馈至电源。当电

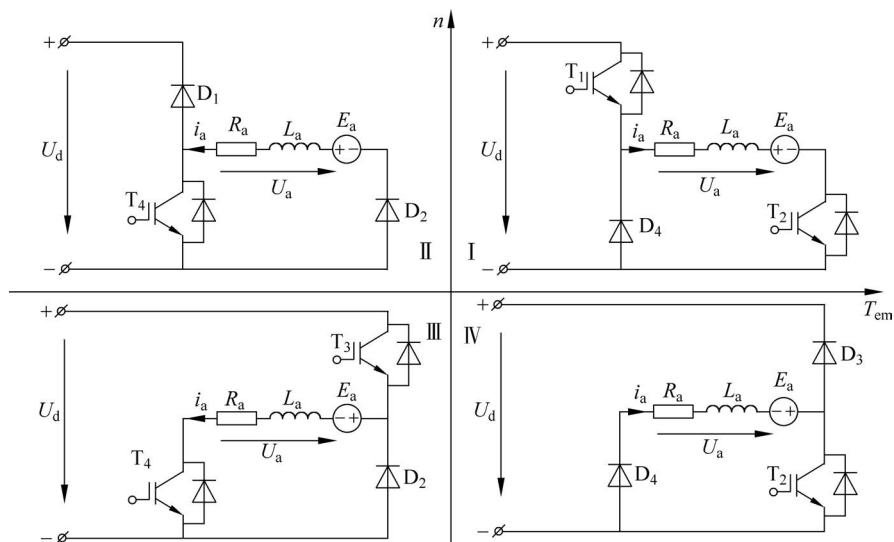


图 3.57 H 桥 PWM 变换器供电直流电机的四象限运行状态

枢电流下降至下限值时,控制 T_4 重新导通,为下一次回馈制动作准备。重复上述过程可以确保在直流侧电势 E_a 低于电源电压 U_a 时直流电机的动能仍能回馈至电源。在 DC/DC 变流器中,这种运行方式又称为 Boost 型升压方式。

若希望直流电机 M 反转,可控制主开关 T_3 、 T_4 同时导通,并维持 T_3 、 T_4 同时导通的时间为 t_{on} ,此时,直流电机电枢两端的输入电压 $U_a = -U_d$,电枢电流 i_a 反向增加。然后关断 T_3 、维持 T_4 继续导通,此时,在电枢电感的自感电势作用下,电枢回路通过二极管 D_2 与主开关 T_4 续流,电枢电流减小。一旦续流时间达到 $(T_s - t_{on})$,则使主开关 T_3 重新导通,导通时间仍为 t_{on} 。然后再关断 T_3 ,电枢回路再一次通过二极管 D_2 与主开关 T_4 续流……重复上述过程,并维持开关周期 T_s 不变,调整占空比 ρ 便可改变电枢电压的平均值,实现直流电机 M 的调压调速。上述过程中,由于电枢电流的平均值为负,直流电机 M 的电磁转矩为反向驱动转矩,电机工作在反向电动机状态。电力拖动系统运行在第 III 象限(见图 3.57),电功率由电源流向 M,电能转变为动能输出。

若希望直流电机 M 反转制动或减速时,可同时关断主开关 T_3 、 T_4 ,此时,二极管 D_1 、 D_2 将首先续流导通,并迅速降为零。为了使电枢电流反向,可控制 T_2 导通。在反电势 E_a 作用下,电流将通过 T_2 和 D_4 构成回路,并将电枢回路短路,此时,直流电机 M 进入能耗制动状态,系统的机械能将转变为电能并通过焦耳热消耗在电枢回路电阻上。一旦电枢电流达上限值,控制 T_2 关断。在电枢的自感电势和反电势的作用下,电枢电流将通过二极管 D_3 、 D_4 流回直流电源(见图 3.57 中的第 IV 象限),此时,直流电机进入再生制动状态,系统的机械能将转变为电能回馈至电源。当电枢电流下降至下限值时,控制 T_2 重新导通,为下一次回馈制动作准备。重复上述过程可以确保在直流侧电势 E_a 低于电源电压 U_a 时直流电机的动能仍能回馈至电源。

3.10.3 直流电力拖动系统四象限运行时转矩与转速的能力曲线及安全运行区

对于他励直流电动机,众所周知,假定励磁电流保持恒定,转子转速则正比于感应电势,因而也就近似正比于电枢两端的外加电压,而电磁转矩则正比于电枢电流。于是,直流电机的机械特性与供电电源的伏安特性(或外特性)相对应,当由供电电源与直流电机两者结合构成具有四象限运行功能的直流电力拖动系统时,受供电电源最大输出电压和电流的限制以及直流电机额定值的限制,直流电力拖动系统存在安全运行区。图 3.58 给出了具有四象限运行能力的直流电力拖动系统的输出转矩与转速的能力曲线和安全运行区。

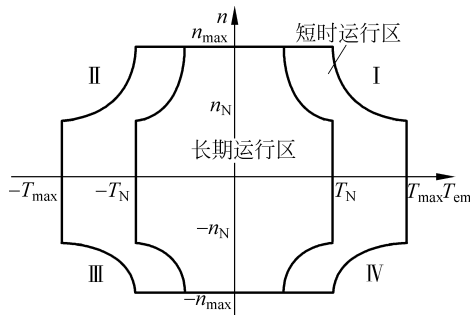


图 3.58 具有四象限运行能力的直流电力拖动系统的输出转矩与转速的能力曲线和安全运行区

图 3.58 反映了直流电力拖动系统的最大负载能力,它是由两组运行范围曲线构成,其中一组表示拖动系统长期工作在额定电流及以下时输出转矩与转速的运行范围曲线,另一组表示拖动系统短时或间歇运行时输出转矩与转速的运行范围曲线,短时运行区主要用于直流电机的加、减速过程。在短时运行区内,最大电流可达额定电流的 2~3 倍。

本章小结

电力拖动系统是指由电动机提供动力拖动生产机械运动的系统,它一般是由电动机、电力电子变流器、控制器以及生产机械等几部分组成,描述该系统运动规律的方程称为电力拖动系统的动力学方程。

在利用动力学方程式时,需注意两个问题:一是转速与转矩正方向的选取问题;二是对多轴运动系统的处理问题。对前者一般按下列正方向规则选取:首先规定转速的方向为正方向,电磁转矩与转速方向相同则为正,反之为负;负载转矩与转速方向相反则为正,反之为负。电磁转矩与负载转矩的代数和决定了 $\frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$ 的正负,从

而决定了系统是加速还是减速。值得一提的是,上述转矩与转速符号的正负与机械特性的象限相对应,对于后者,一般需将多轴系统折算到单轴系统,该单轴通常是指电机的转子轴,折算原则是确保折算前后系统传递的功率(或储存的动能)保持不变,折算时需特别注意运动的动力来自何方。

对于电力拖动系统,除了动力学方程的正确使用之外,还需考虑运动规划曲线以及传动机构传动比的合理选择问题。

运动规划曲线不仅与驱动电机的定额相关,而且也与拖动系统的平稳性密切相关。常用的运动规划曲线包括梯形曲线和S曲线。前者实现简单;后者则运行平滑。

对电力拖动系统而言,不同惯量的生产机械应选取不同转子惯量的驱动电机。为了使生产机械获得最大加速度,驱动电机转子的惯量应与生产机械的惯量满足惯量匹配条件。这就要求作旋转运动时减速机构的传动比应接近最佳传动比,而作直线运动时丝杠的螺距则应尽可能达最佳螺距。

同电动机的机械特性一样,不同类型的负载其转速和转矩之间也存在一定的关系,称这一关系为负载的转矩特性,常见的负载可分为恒转矩性负载、通风机类负载以及恒功率性负载几大类,按照上述正方向规定,其负载转矩特性分别位于不同的象限。

在电力拖动系统中,电动机提供的机械特性和负载的转矩特性必须相互匹配,才能确保拖动系统稳定运行。所谓系统稳定是指当受到外部扰动(如供电电压的波动、负载的改变等)时,系统偏离原来工作点(即电动机的机械特性与负载转矩特性的交点),一旦外部扰动消除,系统将恢复到原来的稳态工作点,若无法恢复到原来的工作点,则系统将不能稳定运行。系统能否稳定是组成电力拖动系统的必要条件,根据电动机的机械特性和负载的转矩特性在稳态工作点A附近的变化率情况即

$$\left. \frac{\partial T_{em}}{\partial n} \right|_{n_A} < \left. \frac{\partial T_L}{\partial n} \right|_{n_A} \quad \text{便可以判别拖动系统是否稳定运行。}$$

除了考虑系统的稳定外,对电力拖动系统特性的研究还包括对拖动系统的起动、制动以及调速等动态过程的分析计算。

为了对电力拖动系统动态过程进行描述,本章给出了直流电动机常用的三种形式的动态数学模型,即微分方程式(或等值电路)、传递函数以及状态空间模型;并利用其中的稳态微分方程对直流电力拖动系统的一般动态过程进行了讨论,分别给出了单独考虑机电时间常数和同时考虑电磁时间常数和机电时间常数两种情况下直流电力拖动系统一般动态过程的结论。

为了突出主要矛盾忽略次要问题,结合工程实际的需要,本章采用了稳态特性分别对直流电机拖动系统的起动、调速以及制动过渡过程的一般方法与结论进行了介绍。

当直流电机拖动负载直接起动时,由于起动瞬间转速为零,电枢电势 $E_a = 0$,外加电压全部加至电枢电阻上,从而造成较大的起动电流。一方面有可能造成电网电压的下降,影响周围设备的正常运行;另一方面较大的起动电流也会引起直流电机自身过热并产生换向问题。为此,直流电动机一般采用电枢回路串电阻起动(或专用起动器)或采用专用供电电源直接降压两种方法进行起动。

由直流机组成的调速系统称为直流调速系统,直流调速系统有两个很重要的指标值得关注,一个是调速范围,另一个是静差率。为了获得较大的调速范围,应尽

量提高调速系统在低速时的静差率(或机械特性的硬度)。常用的调速方法有:①降低电枢电压的降速;②降低励磁电流的弱磁升速。不同的调速方法具有不同的调速范围和静差率,如电枢回路串电阻的降压调速,由于其低速时的机械特性较软,调速范围较窄;而采用专门供电电源的降压调速方法则具有较宽的调速范围。

此外,在调速方案的选择过程中,应特别注意的是调速性质与负载类型的匹配问题。为了确保调速过程中电动机不至于过热、负载能力得到充分发挥,恒转矩负载应选择恒转矩调速方式(如改变电枢电压的调速方案);而恒功率负载则应选择恒功率调速方式(如改变励磁的调速方案)。因此,对直流调速系统而言,一般情况下额定转速(基速)以下采用恒转矩调速,额定转速以上采用恒功率调速。如果调速性质与负载类型不匹配,则电动机的负载能力将得不到充分发挥,引起转矩和功率的很大浪费。

制动是指电机的电磁转矩与转速方向相反的一种运行状态,对于电力拖动系统,为了提高生产率和产品质量,可将电动机自身驱动性的电磁转矩变为制动性的电磁转矩,使电机由电动机运行状态变为发电机运行状态,从而将储藏在系统内部的机械动能或位能转变为电能,这些电能可借助于电阻消耗掉或回馈至电网,最终使拖动系统很快停车或反转。根据这些电能的处理方法不同,直流电机常用制动的方法可分为能耗制动、反接制动和回馈制动。

能耗制动是将电枢回路从电网断开,并将其投入至外接电阻上,这样直流电机的电枢电流反向,相应的电磁转矩自然也反向,由驱动性变为制动性转矩。直流电机由电动机状态运行变为发电机状态运行,将系统储存的动能转换为电能,这些电能被全部消耗在电枢回路的电阻上,相应的机械特性经过坐标原点,贯穿于第II、IV象限。

反接制动是将电枢回路反接或电枢电势反向,使得外加电压 U_1 与电枢电势 E_a 顺向串联,共同产生制动电流 I_a 。由于直流电机工作在发电机运行状态,其电磁转矩自然为制动性的,这样,系统储藏的机械能便转换为电能,消耗在电枢回路的电阻上,相应的机械特性位于第II、IV象限,它们分别是位于第I、III象限电动机运行状态机械特性的延伸。

回馈制动仅发生在系统实际的转速高于理想空载转速的场合下,此时,尽管 E_a 方向不变,但由于 $|E_a| > |U_1|$,故电枢电流改变方向,造成电磁转矩由驱动性变为制动性转矩,直流电机由电动机状态运行变为发电机状态运行,并将来自系统储藏的机械能变为电能回馈至电网。相应的机械特性位于第II、IV象限,它们分别是位于第I、III象限电动机运行状态机械特性的延伸。应该讲,回馈制动是一种最经济节能的制动方法。

通过上述分析可以看出,在工程实际中,直流电机可以作电动机状态运行也可以作发电机状态运行,相应的机械特性也就分布于不同的象限。把能够提供正、反向运动并能实现正、反方向上的快速(再生)制动的电力拖动系统称为具有四象限运行功能的电力拖动系统。根据直流电机供电电源的不同,直流电力拖动系统可分为三大类,即G-M系统、T-M系统以及斩波器供电的直流电力拖动系统,它们各自具有不同的特点。

最后需说明的是,尽管本章介绍的是直流电力拖动系统,但本章的内容具有一般性,其结论不仅适用于直流电力拖动系统,也适用于交流电力拖动系统。

思考题

3.1 图 3.59 中箭头表示转矩与转速的实际方向,试利用电力拖动系统的动力学方程式说明在图中所示的几种情况下,系统可能的运行状态(加速、减速或匀速)。

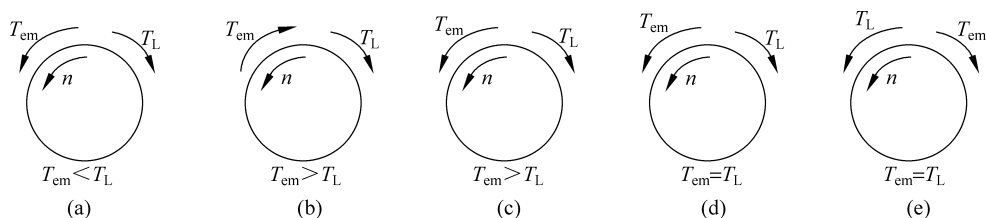


图 3.59 思考题 3.1 图

3.2 在起重机提升重物与下放重物过程中,传动机构的损耗分别是由电动机承担还是由重物势能承担? 提升与下放同一重物时其传动机构的效率一样高吗?

3.3 试指出图 3.60 中电动机的电磁转矩与负载转矩的实际方向(设顺时针方向为转速 n 的正方向)。

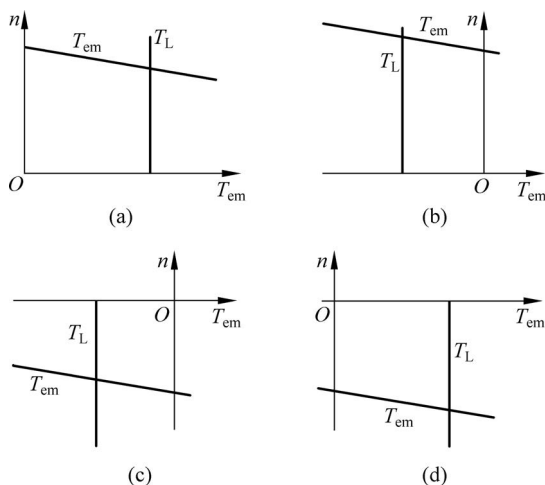


图 3.60 思考题 3.3 图

3.4 根据电力拖动系统的稳定运行条件,试判断图 3.61 中 A、B、C 三点是否为稳定运行点。

3.5 一般他励直流电动机为什么不能直接起动? 采用什么样的起动方法最好?

3.6 他励直流电动机拖动恒转矩负载调速,其机械特性和负载转矩特性如图 3.62 所示,试分析当工作点由 A_1 向 A 点运行过程中,电动机经过哪些不同的运行状态。

3.7 他励直流电动机弱磁升速时,其拖动系统的机电时间常数是否保持不变? 请说明理由。

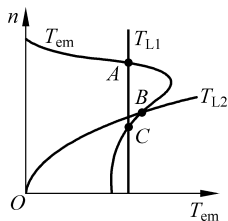


图 3.61 思考题 3.4 图

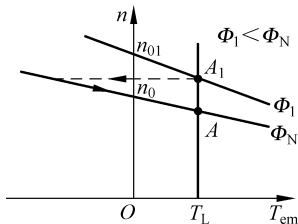


图 3.62 思考题 3.6 图

3.8 一台他励直流电动机拖动卷扬机运行,当电枢回路外接电源电压为额定电压且电枢回路外串电阻拖动重物匀速上升时,突然将外加电源电压的极性颠倒,电动机将最终稳定运行在什么状态?重物是提升还是下放?画出相应的机械特性曲线,并说明其间所经历的运行状态。

3.9 采用弱磁升速的他励直流电动机,为什么在负载转矩较大时不但不能实现弱磁升速,而且还出现弱磁降速的现象?试说明理由。

练习题

3.1 由电动机与卷扬机组成的拖动系统如图 3.4 所示。设重物 $G=4900\text{N}$,当电动机的转速为 $n=980\text{r/min}$ 时,重物的上升速度为 $V=1.5\text{m/s}$,电动机转子的转动惯量为 $J=2\text{kg}\cdot\text{m}^2$,卷筒直径 $D_F=0.4\text{m}$,卷筒的转动惯量 $J_F=1.9\text{kg}\cdot\text{m}^2$,减速机构的转动惯量和钢绳质量可以忽略不计,传动机构的效率 $\eta_c=0.95$ 。试求:

- (1) 使重物匀速上升时电动机转子轴上的输出转矩;
- (2) 整个系统折算到电动机转子轴上的总飞轮矩 GD_2^2 ;
- (3) 使重物以 1m/s^2 的加速度上升时电动机转子轴上的输出转矩。

3.2 某他励直流电动机的额定数据为: $P_N=3\text{kW}$, $U_N=220\text{V}$, $I_N=18\text{A}$, $n_N=1000\text{r/min}$,电枢回路的总电阻为 0.8Ω 。试求:

(1) 为使拖动系统在额定状态下能够能耗制动停机,要求最大制动电流不超过 $2I_N$,求制动电阻值;

(2) 若制动电阻与(1)相同,位能性负载转矩为 $T_L=0.8T_N$,求拖动系统能耗制动后的稳定转速。

3.3 某他励直流电动机, $U_N=220\text{V}$,电枢回路的总电阻为 0.032Ω ,由该电机拖动起重机。当重物上升时, $U=U_N$, $I_a=350\text{A}$, $n_N=795\text{r/min}$ 。若希望将同一重物以 $n_N=300\text{r/min}$ 的转速下放,保持电枢电压和励磁电流不变,问此时电枢回路应串入多大的电阻?

3.4 一台他励直流电动机的额定数据如下: $P_N=30\text{kW}$, $U_N=440\text{V}$, $I_N=75\text{A}$, $n_N=1100\text{r/min}$,电枢回路的总电阻为 0.3Ω 。

(1) 电动机拖动位能性负载在反接时做回馈制动下放, $I_a=50\text{A}$,下放转速为 1200r/min ,问电枢回路应串联多大的电阻?

(2) 若串联同(1)一样的电阻,电动机拖动反抗性负载,负载电流的数值与(1)相

同,求反接制动时,其下放的稳定速度为多少?

(3) 对位能性负载,采用能耗制动,若制动前电机在额定状态下运行,要确保最大制动电流不超过 $2I_N$,制动电阻应选多大?转速为零时,若让拖动系统继续反转,其下放的稳定转速为多少?

3.5 某他励直流电动机的额定数据如下: $P_N = 18.5\text{kW}$, $U_N = 220\text{V}$, $I_N = 103\text{A}$, $n_N = 500\text{r/min}$,电枢回路的总电阻为 0.18Ω ,最高转速应限制在 $n_{\max} = 1500\text{r/min}$ 。电动机拖动生产机械,采用弱磁调速。试分析:

(1) 若拖动系统运行在恒转矩负载($T_L = T_N$)区,当磁通减少至 $\Phi = \frac{1}{3}\Phi_N$ 时,求电动机稳态运行的转速和电枢电流,并说明电动机能否长期运行。

(2) 若拖动系统运行在恒功率负载($P_L = P_N$)区,当磁通减少至 $\Phi = \frac{1}{3}\Phi_N$ 时,求电动机稳态运行的转速和电枢电流,并说明电动机能否长期运行。

3.6 他励直流电动机的数据为: $P_N = 29\text{kW}$, $U_N = 440\text{V}$, $I_N = 76\text{A}$, $n_N = 1000\text{r/min}$,电枢回路的总电阻为 0.376Ω ,忽略空载转矩。

(1) 电动机以转速 500r/min 吊起 $T_L = 0.8T_N$ 的重物,求此时电枢回路应外串的电阻值;

(2) 采用哪几种方法可使负载 $T_L = 0.8T_N$ 以 500r/min 的速度下放?求每种方法电枢回路应串入的电阻值;

(3) 在负载 $T_L = 0.8T_N$ 以 500r/min 吊起时,突然将电枢反接,并使电枢电流不超过额定电流,求系统最终稳定的下放速度;

(4) 试用 MATLAB 绘出上述各种情况下直流电动机的机械特性。

3.7 试用 MATLAB 重新计算例 3.2 的结果,并绘出相应的机械特性和转速曲线。

3.8 一台并励直流电动机的数据为: $P_N = 2.2\text{kW}$, $U_N = 220\text{V}$, $n_N = 1500\text{r/min}$, $\eta_N = 81\%$,电枢回路的总电阻为 1.813Ω ,额定励磁电流 $I_{fN} = 0.414\text{A}$ 。当电动机运行在 1200r/min 时,系统转入能耗制动状态自动停车。

(1) 试问若保证起始制动电流不超过 $2I_N$,电枢回路应串入的电阻值为多少?

(2) 当负载为位能性负载,若负载的总阻力转矩为额定转矩的 0.9 倍。现采用能耗制动方法使电动机以 $n = 220\text{r/min}$ 的转速匀速下放重物,试问所需制动电阻为多少?

3.9 T-M 系统中,已知他励直流电动机的额定转矩为: $P_N = 10\text{kW}$, 220V , $n_N = 1500\text{r/min}$, $\eta_N = 85\%$, $r_a = 0.3\Omega$ 。由三相桥式相控变流器供电,整流器二次侧的线电压为 220V 。设 $I_{a\min} = 10\%I_N$ 为电流连续与断续的分界点。

(1) 试绘出当 $\alpha = \frac{\pi}{6}$ 时他励直流电动机的完整机械特性,要求算出理想的空载转速点以及电流连续与断续分界点的具体数据。

(2) 当 $\beta = \frac{\pi}{6}$ 时,重复(1)的过程。