



执行机构篇

第 2 章

直流伺服电动机

直流伺服电动机，是自动控制系统中应用非常广泛的执行机构。它的转速和输出力矩都与控制电压近似成正比，且动态特性良好，因此，使用起来很方便。

本章首先介绍直流伺服电动机的基本工作原理和结构，重点分析其特性，再介绍其控制方法，然后介绍主要性能指标，最后介绍直流伺服电动机在运动控制系统中的应用。

2.1 直流伺服电动机的原理和结构

直流伺服电动机是一种把电能转换成机械能（转速或力矩）的执行机构，主要分为永磁式和电磁式两种类型。

2.1.1 直流伺服电动机的工作原理

直流伺服电动机工作时，外部输入的直流电通过电刷加在电枢绕组线圈上，电枢绕组线圈在磁场中受到的电磁力，相对转子转轴构成电磁力矩（也称为电磁转矩）。电刷和换向器使得导体在不同磁极下的电流方向不变，从而保证电磁力矩方向保持不变，使电动机能够连续旋转。

其工作原理示意图如图 2-1 所示。

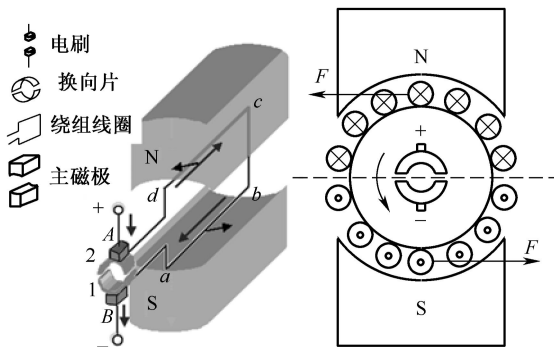


图 2-1 直流伺服电动机基本工作原理

显然，直流伺服电动机电枢绕组线圈内的电流越大，导体所受的电磁力越大，产生的电磁力矩也就越大。如果电枢绕组线圈内的电流方向相反，电磁力和电磁力矩的方向也相反，电动机就会反方向转动。所以，通过控制加在直流伺服电动机电刷上电压的大小和极性，就能够很方便地控制直流伺服电动机的转速（或输出力矩）和转动方向。

2.1.2 直流伺服电动机的结构

直流伺服电动机由定子（固定不动的部分）、转子（转动的部分，也称为电枢）、换向器和机座等组成，其剖面图如图 2-2 所示。转子、换向器的换向片固定在同一个转轴上，转轴则通过轴承支承在基座上。直流伺服电动机的定子有两种，一种是由永久磁铁构成的磁极，另一种是由线圈（一般称为定子励磁绕组）构成的磁极，图 2-2 所示为后者。

构成电磁极的定子由铁芯和励磁绕组构成，如图 2-3 所示。定子冲片与机壳一样同为圆形，冲片是空心的，并制成磁极形状。在上下两个磁极的根部，装有两个励磁绕组。绕组一般用包有绝缘漆的铜线绕制而成，每个绕组有很多匝。两个励磁绕组串联在一起，通上直流电之后，就能产生稳定的电磁场。电磁场的磁通主要集中在磁极之间的圆柱形区域内，而这一区域正好安装着转子。定子可以有多对磁极，如图 2-3（b）所示。多对磁极的情况下，同样通过电刷和换向器使得导体在不同磁极下的电流方向不变，从而保证电磁力矩方向保持不变，使电动机能够连续旋转。

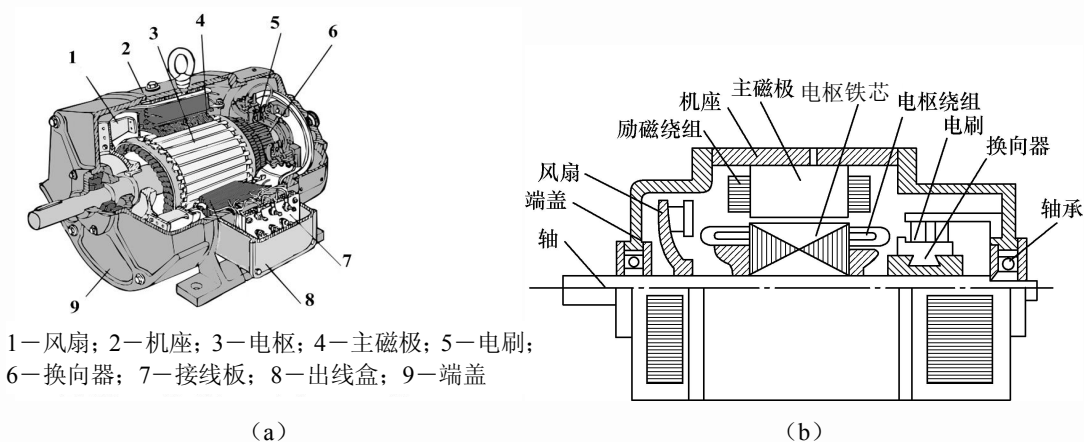


图 2-2 直流伺服电动机结构剖面

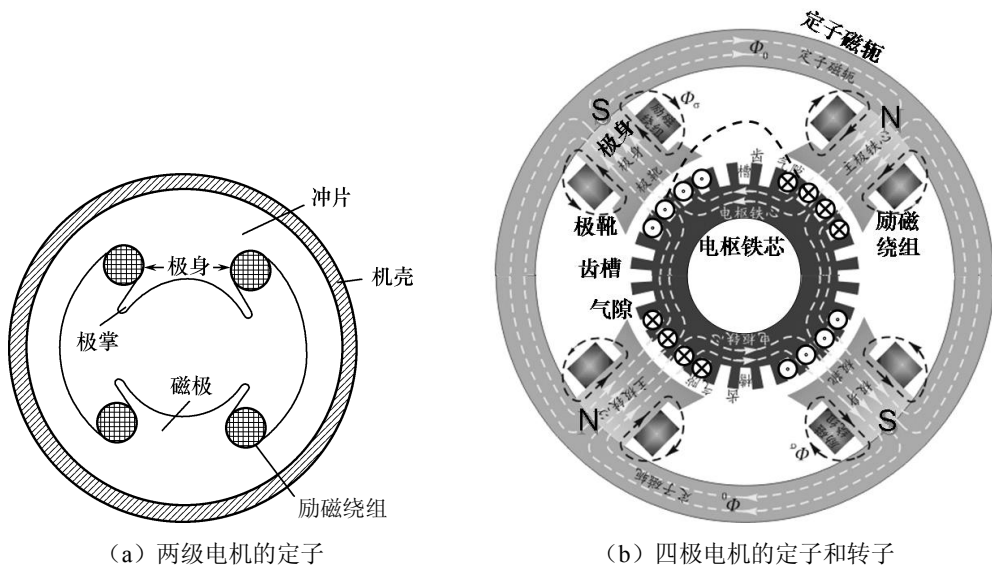


图 2-3 直流伺服电动机定子和转子

换向器由换向片和电刷两大部分组成，换向片一般有多片，电刷也可以有多组。图 2-4 所示左边为换向器结构，右边为电刷。换向片由硬铜片和环形底座构成，底座套在电动机的转轴上。硬铜片嵌装在环形绝缘底座的楔形槽中，相邻的两个铜片之间用薄云母片绝缘。这样，就把一个圆环等分成了多个相互绝缘的导电区域。铜片较高的一部分是接线端，用来焊接转子线圈。电刷的底座固定在电动机的基座上，通过压紧弹簧把电刷压在换向铜片上，使它们之间保持良好接触。电刷一般用石墨制成，通过铜丝辫输出电信号。

转子是电动机的核心部件，转子与定子一样，也是由构成磁路的铁芯（一般称为电枢铁芯）和用于产生感应电势并导电的线圈（一般称为电枢绕组）组成。转子铁芯冲片为圆形，外圈开有很多用于安放电枢绕组的安装槽，如图 2-5（a）所示。

电枢绕组由多个线圈组成，每个线圈称为一个元件。一个元件一般由多匝线圈组成，它的头

和尾分别焊接在相邻的两个换向片上,如图 2-5 (b) 所示。元件的竖直边是有效边,分别嵌装在与冲片相对的两个槽中,如图 2-5 (c) 所示。元件的一条边在安装槽的外侧,另一条边就在安装槽的内侧,槽中的空位用来放置另一个元件,可以保证各元件输出电压相等。

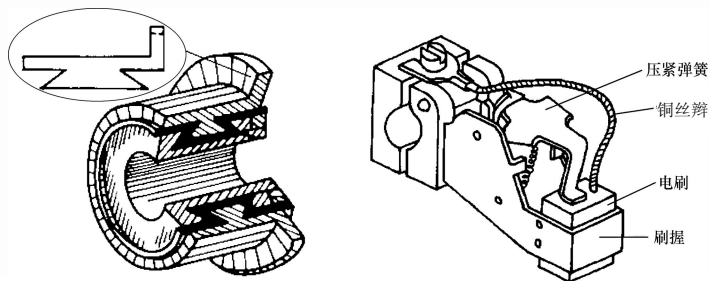


图 2-4 换向器结构

电枢绕组线圈、电枢铁芯、转轴和换向片的位置关系如图 2-5 (d) 所示。

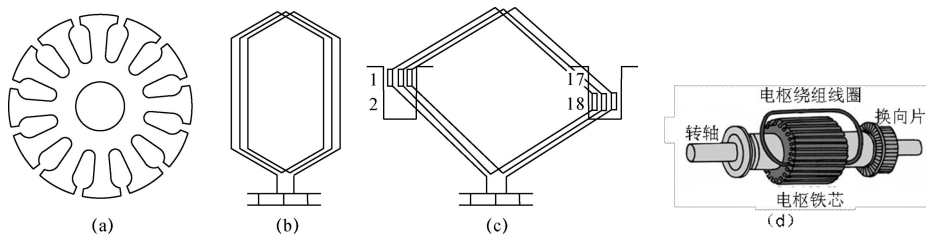


图 2-5 转子冲片及电枢绕组

一个电枢绕组中的各个元件完全相同,通过换向片首尾相连,图 2-6 所示为由 12 个元件构成的电枢绕组展开图。图中,每个元件的头用实线表示,尾用虚线表示,元件号标在头端的有效边左侧。1 号元件的头接在 1 号换向片上,尾(尾端有效边在 7 号元件头端有效边的右侧——用虚线表示)接在 2 号换向片上;2 号元件的头接在 2 号换向片上,与 1 号元件的尾相连,而 2 号元件的尾则接在 3 号换向片上;以此类推。12 个元件对应 12 个换向片,整个电枢绕组通过换向片构成了一个闭合回路。

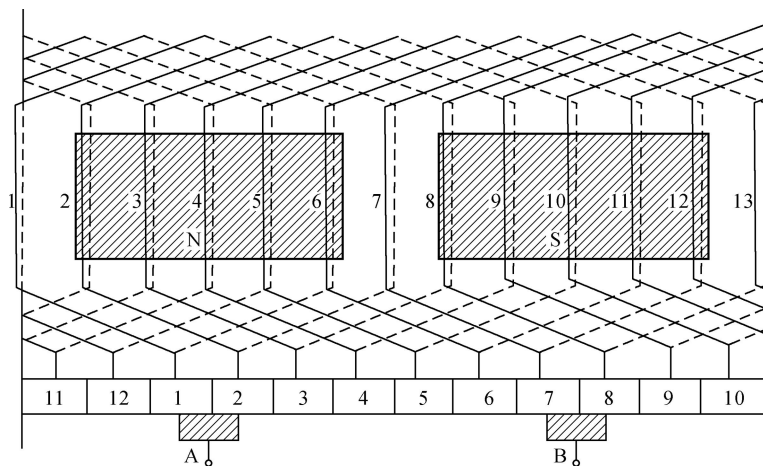


图 2-6 电枢绕组展开图

两只电刷安装在换向片圆周的对称位置，A、B 两只电刷就把电枢绕组环路变成了两个并联支路，其等效电路如图 2-7 所示。

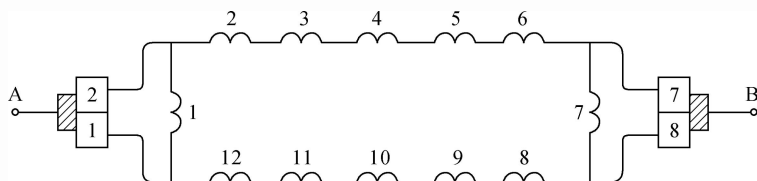


图 2-7 电枢绕组等效电路

电刷 A 同时与 1 号和 2 号换向片接触，把跨接在 1 号和 2 号换向片之间的 1 号元件短接；同样，电刷 B 把元件 7 短接。2~6 号元件串联后，与串联在一起的 8~12 号元件并联。加在电枢绕组上的直流电压，通过电刷形成了两个并联支路。从原理上讲，电枢绕组形成两个并联支路对电动机的工作没有影响，只是在设计电动机时需要考虑此结构特点。

对于单个元件而言，构成该元件的每匝线圈，都是在转子铁芯上对称分布。电动机的工作情况，与前述原理分析时相同，只是相当于多个线圈串联在一起，形成的电磁力矩是这些线圈电磁力矩的总和。

2.2 直流伺服电动机的稳态特性

直流伺服电动机将电能转化成机械能，因此，它是一个机电复合装置，其数学模型也包含电气和机械两个方面。直流伺服电动机的稳态，是指电动机的转速和力矩保持不变的状态。当电动机运行状态发生变化（如调速过程中），转速和力矩会随时间变化，这时，电动机状态就处于动态。直流伺服电动机控制和调节过程，就是从一个稳态转化到另一个稳态的过程，中间经过一个动态变化的过程，也称之为过渡过程。由于稳态时电动机的转速和输出力矩保持不变，因此，从稳态入手分析直流伺服电动机的特性，也是从简单到复杂逐步深入的过程。

2.2.1 直流伺服电动机的稳态基本关系式

直流伺服电动机的特性分析，建立在数学模型的基础上。而数学模型的建立，则需要用到电磁学方面的基础知识。

从直流伺服电动机的基本原理可知，直流伺服电动机的动力来源，是通电导体在磁场中受到的电磁力形成的电磁力矩。如何计算直流伺服电动机的电磁力矩，就是首先要解决的问题。

1. 电磁力矩计算公式

当电枢绕组通上直流电后，绕组中就有电流流过，电枢绕组处在磁场中的所有导体，都会受到电磁力的作用，电枢绕组的电流方向和导体的受力方向（用左手定则判断）如图 2-8 所示。这两个电磁力对转子的转轴构成力矩，称为电磁力矩，这个电磁力矩就是能够使转子转动的动力矩。

设流过电枢绕组单根导体的电流为 i ，导体所在位置的磁感应强度的大小为 B ，导体的有效长度为 l ，则单根导体受到的电磁力 F 的大小为

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

一般来说，转子转到不同位置，所在位置的磁感应强度有所不同，通常取平均磁感应强度来计算转子所受到的电磁力和电磁力矩。

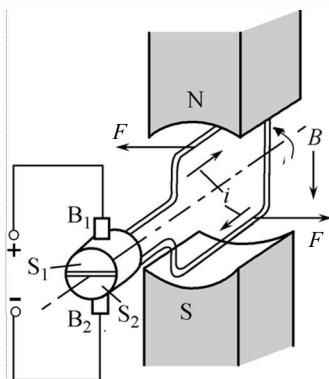


图 2-8 电枢绕组导体受到的电磁力

转子所在空间内定子磁场的磁通称为工作磁通, 通常用 Φ 来表示。由两个磁极 (一对磁极) 形成的磁场, 每个磁极下的工作磁通也等于 Φ 。而磁感应强度的定义为单位面积的磁通量, 因此, 平均磁感应强度的大小, 就等于磁通 Φ 的大小除以工作磁场作用面积。设每一磁极下的弧长 (称为极距) 为 τ , 转子铁芯的长度为 l , 则平均磁感应强度为

$$B_p = \frac{\Phi}{\tau l} \quad (2-2)$$

对于两个磁极形成的磁场, 极距就等于转子等效圆周长的一半, 该圆的半径为电枢绕组到转子转轴中心的平均距离, 其直径用 D 表示。考虑到公式的通用性, 对于由 p 对磁极形成的定子磁场, 每个磁极的极距满足

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \quad (2-3)$$

单根导体形成的电磁力的力臂长度, 等于转子等效圆的半径, 即直径 D 的一半。由此, 可得单根导体构成电磁力矩的计算公式为

$$T_i = B_p l i R = \frac{\Phi}{\tau l} \cdot l i \cdot \frac{D}{2} = \frac{p}{\pi} \Phi i \quad (2-4)$$

电枢绕组受到的电磁力矩, 是所有导体产生的电磁力矩的总和。而由电枢绕组的结构可知, 电枢绕组的支路是并联关系, 因此, 各段导体的电流为支路电流, 它等于电枢绕组回路的总电流除以支路数。

设电枢绕组的总电流为 I_a 、支路对数为 a (前面介绍的电枢绕组有两条并联支路, 其支路对数为 $a=1$, 支路数为 $2a=2$), 电枢绕组的等效圆直径为 D , 电枢绕组的总导体数为 N , 可以得到电磁力矩 T 的计算公式为

$$T = N \cdot \frac{p}{\pi} \cdot \Phi \cdot \frac{I_a}{2a} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \quad (2-5)$$

式中, 磁极对数 p 、电枢绕组的总导体数 N 和支路对数 a , 都是只与电动机结构参数有关的常数, 在电机学中一般用 C_t 来表示, 有

$$C_t = \frac{pN}{2\pi a}, \quad K_t = C_t \Phi = \frac{pN}{2\pi a} \Phi \quad (2-6)$$

磁通为常数时, K_t 为常数, 称为转矩系数或转矩灵敏度, 由此可以得到简化后的电磁力矩计算公式为



$$T = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = C_t \Phi I_a = K_t I_a \quad (2-7)$$

式中, 电磁力矩 T 的单位是牛顿·米 (N·m), 工作磁通 Φ 的单位是韦伯 (Wb), 电枢绕组的总电流为 I_a , 单位是安培 (A)。由公式可以看出, 当工作磁通一定时, 直流伺服电动机产生的电磁力矩与电枢电流成正比。

2. 力矩平衡方程式

在稳态时, 由于直流伺服电动机的转速保持不变, 其转子转轴上的合力矩应该为零, 也就是说, 处于力矩平衡状态。在一般情况下, 作用在转轴上的力矩有 3 个: 一个是电枢绕组产生的电磁力矩 T , 一个是电动机负载产生的阻力矩 T_L , 另一个是转轴上的阻力矩 T_0 (一般包括摩擦力矩和空气阻力矩等), 其中后两个力矩对于电枢绕组产生的动力矩 (电磁力矩) 构成阻力矩。在平衡状态时, 这 3 个力矩满足以下公式——力矩平衡方程式, 即

$$T = T_0 + T_L = T_s \quad (2-8)$$

式中, T_s 为电动机转轴上总的阻力矩。在实际使用时, 通常关心直流伺服电动机输出力矩 T_{out} 的大小, 在稳态时, 力矩平衡方程式也可以写为

$$T_{out} = T - T_0 = T_L \quad (2-9)$$

当直流伺服电动机没有带动负载而转动时, 该状态称为空载状态, 此时, 电枢绕组产生的电磁力矩只需克服转子自身的阻力矩。

3. 感应电势计算公式

直流伺服电动机转子转动时, 电枢绕组导体会切割磁力线, 产生感应电势。用右手定则可以判断出感应电势的方向, 与加在电枢绕组两端的直流电枢电压方向相反 (参看图 2-8), 因此, 这个感应电势称为反电势。

对于单个线圈而言, 上、下两段导体产生的感应电势由于电刷的存在, 构成了两条并联支路, 其感应电势就等于每段导体所产生的感应电势。对于支路导体数为 M 的电枢绕组, 产生的总感应电势就可以用式 (2-10) 计算, 即

$$E_a = MB_p l v \quad (2-10)$$

式中, B_p 为定子工作磁场的平均磁感应强度。

电动机转子的转速一般用每分钟多少转 (r/min) 或每秒多少弧度 (rad/s) 来表示, 设其转子转速为 n (r/min) 或 ω (rad/s), 则导体切割磁力线的线速度为

$$v = \frac{\pi D}{60} n = \frac{D}{2} \omega \quad (2-11)$$

电刷之间每条支路的导体数 M , 与构成电枢回路的总导体数及支路的对数有关, 设电枢绕组的总导体数为 N , 支路对数为 a , 即满足公式

$$M = \frac{N}{2a} \quad (2-12)$$

将式 (2-11)、式 (2-12) 和前面计算电磁力矩用到的式 (2-2) 和式 (2-3) 代入式 (2-10), 整理后可得

$$E_a = \frac{pN}{60a} \Phi n = \frac{pN}{2\pi a} \Phi \omega \quad (2-13)$$

同样, 公式中的磁极对数 p 、电枢绕组总导体数 N 和支路的对数 a , 都是与直流伺服电动机结

构有关的参数, 对于一定的电动机是固定不变的, 一般用 C_e 来表示, 则有

$$C_e = \frac{pN}{60a}, \quad K_e = \frac{pN}{2\pi a} \Phi = \frac{60}{2\pi} C_e \Phi \quad (2-14)$$

磁通为常数时, K_e 为常数, 称为反电势系数。

这样, 就得到了感应电势的计算公式为

$$E_a = C_e \Phi n = K_e \omega \quad (2-15)$$

式中, 感应电势 E_a 的单位是 V, 工作磁通 Φ 的单位是韦伯 (Wb), 转子转速 n 的单位是 r/min。由此公式可以看出, 当定子磁场的工作磁通一定时, 直流伺服电动机电枢绕组所产生的感应电势与转子的转速成正比。

比较与感应电势有关的常数 C_e 计算式 (2-14) 和与电磁力矩有关的常数 C_t 的计算式 (2-6), 可以知道两个常数都与相同的电动机结构参数有关, 磁通为常数时, K_t 、 K_e 为常数, 它们之间的关系为

$$C_e = \frac{2\pi}{60} C_t, \quad K_e = K_t = C_t \Phi = \frac{60}{2\pi} C_e \Phi = \frac{pN}{2\pi a} \Phi \quad (2-16)$$

4. 电压平衡方程式

在稳态时, 直流伺服电动机转子电枢绕组中的电压、电流等参数保持不变。设加在电枢绕组上的直流电压为 U_a , 电枢绕组内的电流为 I_a , 电枢回路的电阻为 R_a , 电枢绕组产生的反电势为 E_a , 则直流伺服电动机的电压平衡方程式为

$$U_a = E_a + I_a R_a \quad (2-17)$$

由式 (2-17) 可以看出, 加在电枢绕组上的直流电压, 除了形成电枢绕组的工作电流消耗的部分外, 其余部分被电枢绕组在转动过程中产生的反电势所平衡。

5. 稳态基本关系式

综上所述, 在直流伺服电动机处于稳态时, 所产生的电磁力矩可以用式 (2-7) 来计算, 电枢绕组产生的反电势用式 (2-15) 计算, 电动机转轴上的力矩满足力矩平衡方程式 (2-8), 而电枢绕组的电压满足电压平衡方程式 (2-17)。也就是说, 在稳态时, 上述 4 个关系式同时满足, 因此, 通常把这 4 个关系式统称为直流伺服电动机的稳态基本关系式, 也称为稳态四大关系式, 即

$$\begin{cases} E_a = C_e \Phi n = K_e \omega \\ U_a = E_a + I_a R_a \\ T = C_t \Phi I_a = K_t I_a \\ T = T_0 + T_L = T_s \end{cases} \quad (2-18)$$

当电动机的参数保持不变且已知时, 对于一定的负载, 可以利用稳态基本关系式, 计算出在一定的电枢电压下, 电动机带动负载匀速转动的转速, 计算顺序为

$$T_L \xrightarrow{T_0} T \xrightarrow{C_t \Phi \text{ 或 } K_t} I_a \xrightarrow{U_a, R_a} E_a \xrightarrow{C_e \Phi \text{ 或 } K_e} n \text{ 或 } \omega$$

显然, 对于相同的负载, 电枢电压 U_a 不同, 电动机转子和负载转动的速度也不同。对于不同的负载, 如果要想得到一定的转速, 需要的电枢电压也不同。

2.2.2 直流伺服电动机的机械特性

在使用直流伺服电动机时, 最关心的是一定的电枢电压能够得到多大的转速, 而在此条件下, 电动机的转速还与负载阻力矩及电动机自身阻力矩的大小有关。因此, 就需要分析转速和阻力矩

之间的关系。稳态时，电动机电磁力矩与总阻力矩相平衡，输出力矩与负载力矩相平衡，因此，通常分析电动机的转速与电磁力矩（或输出力矩）间的关系。

电动机的机械特性，是指在一定的电枢电压条件下，稳态时电动机的转速与电磁力矩（或输出力矩）之间的关系，通常用机械特性曲线来表示。

先来分析电动机自身参数保持不变，且电动机自身不存在阻力矩的理想情况。这时，电动机产生的电磁力矩 T ，其大小就等于负载阻力矩。对稳态基本关系式进行整理，写成转速与负载阻力矩之间的关系，可以得到

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi^2} T \quad (2-19)$$

由式（2-19）可以看出，右边第一项与力矩无关，也就是没有负载时电动机的转速，称为理想空载转速，用 n_0 表示，即有

$$n_0 = \frac{U_a}{C_e \Phi} \quad (2-20)$$

式（2-19）右边第二项，就反映了转速与负载阻力矩的关系，当电动机的参数保持不变时，力矩 T 前面的系数是一个常数，用 k_T 来表示，就可以得到简写后的机械特性公式为

$$n = n_0 - k_T T \quad (2-21)$$

显然，式（2-21）表示的是一条如图 2-9 所示的直线。该直线的斜率为负，表示转速随负载阻力矩的增大而减小。机械特性直线与纵轴（表示转速）的交点，就是理想空载转速；机械特性直线与横轴（表示力矩）的交点，表示转速为零时的力矩，称为堵转力矩，一般用 T_d 表示。根据机械特性的计算公式（2-19）可得

$$T_d = C_t \Phi \frac{U_a}{R_a} \quad (2-22)$$

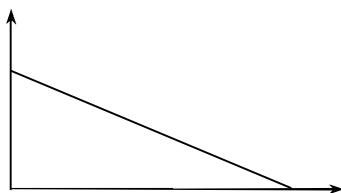


图 2-9 理想情况下的机械特性

当给电枢绕组加上不同的电压时，理想机械特性的斜率保持不变，而理想空载转速则与电枢电压成正比变化。因此，不同电枢电压时的机械特性，是一组平行直线，电枢电压增大，直线向右平移。

当电动机自身存在阻力矩 T_0 时，其输出力矩 T_{out} 就等于电磁力矩 T 与自身阻力矩 T_0 之差，根据式（2-19）可得

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi^2} T = \left(\frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi^2} T_0 \right) - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi^2} T_{out} \quad (2-23)$$

机械特性的斜率不变，而空载转速减小。因此，考虑电动机自身阻力矩时的机械特性，可以由理想情况下的机械特性直线向左平移得到。电动机输出机械特性如图 2-10 所示，其中虚线为理想情况下的机械特性。

在实际使用时,如果想要使电动机带动被控对象按一定转速转动,就要在电动机的两只电刷上施加一定的直流电压。当转轴上出现干扰力矩使阻力矩发生变化时,就会使转速发生变化。稳态情况下,一定的干扰力矩所对应的转速变化量,就是机械特性的斜率,即 $k_1 = \Delta n / \Delta T$ (Δn 为转速变化量, ΔT 为阻力矩变化量)。要想使得自动控制系统的抗干扰能力强,就要保证在一定的阻力矩变化量下,转速的变化量越小越好,也就是要求机械特性的斜率越小(俗称机械特性越硬)越好。从图 2-9 或图 2-10 可以看出,机械特性的斜率越小,特性直线就越接近与横轴平行。

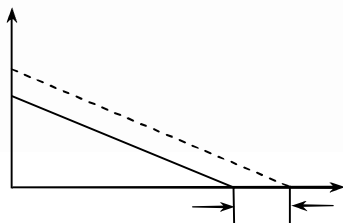


图 2-10 输出机械特性

在实际的自动控制系统中,控制器输出的控制电压,往往通过放大电路进行电压放大和功率放大后,再加入到电动机的电枢绕组上。对电枢回路而言,放大电路就相当于一个有内阻的直流电压源。设放大电路的电压为 U_f , 其内阻为 R_f , 则反映转速与力矩关系的式(2-19)就变为

$$n = \frac{U_f}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R_f}{C_e C_t \Phi^2} T \quad (2-24)$$

由此可以看出,放大电路内阻对机械特性的影响,使得机械特性的斜率变大(俗称机械特性变软),从而使转速控制系统的抗干扰能力减弱。因此,在设计转速控制系统时,应该尽量减小放大电路的内阻。

2.2.3 调节特性

在使用电动机对被控对象进行转速控制时,除了关心电动机的带负载能力(输出力矩)之外,更需要关心转速与加在电枢绕组上的直流电压(一般称为控制电压)的对应关系,这就需要了解电动机的调节特性。

直流伺服电动机的调节特性,是指在负载一定的情况下,转速与控制电压的关系,一般用调节特性曲线来表示。

由式(2-19)可以看出,当电动机自身参数保持不变时,转速与电枢电压和电磁力矩两个因素有关。假设转轴上的阻力矩在负载一定时保持不变,则在稳定状态时,电动机产生的电磁力矩 T 与转轴上的总阻力矩 T_s (电动机自身阻力矩与负载阻力矩之和)相平衡,由此可得,转速 n 与控制电压 U_a 的关系为

$$n = \frac{1}{C_e \Phi} U_a - \frac{R_a T_s}{C_e C_t \Phi^2} = k_U U_a - \frac{R_a T_s}{C_e C_t \Phi^2} \quad (2-25)$$

当控制电压较小时,电动机产生的电磁力矩不足以克服转轴上的总阻力矩,电动机不能带动负载。令式(2-25)中的转速为零,则可以得到电动机刚能克服阻力矩时的最小控制电压——始动电压 U_{a0} , 即

$$U_{a0} = \frac{T_s R_a}{C_t \Phi} \quad (2-26)$$

将式(2-26)代入式(2-25),整理后可得

$$n = k_U (U_a - U_{a0}) \quad (2-27)$$

由式(2-27)可以看出,在转轴总阻力矩保持不变的理想情况下,直流伺服电动机的调节特性是一条不过原点的直线,如图2-11所示。当负载阻力矩不同时,调节特性直线的斜率不变,而始动电压则随负载阻力矩的增大而增大。不同负载情况下的调节特性,是一组平行直线,负载阻力矩越大,直线越向右移,如图2-12所示。

在实际情况下,由于转轴轴承上的摩擦力矩和空气的阻力矩随着转速的升高而增大,因此,在较大的调速范围内,转轴上的总阻力矩不能保持不变,会使得调节特性直线在高速段出现向下弯曲的情况,如图2-13所示,其中虚线表示不考虑阻力矩随转速变化时的调节特性。

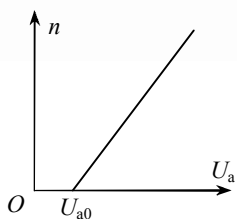


图 2-11 理想调节特性

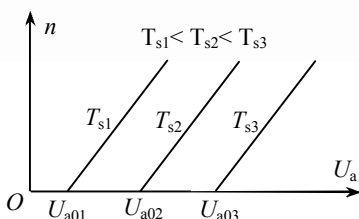


图 2-12 不同负载时的调节特性

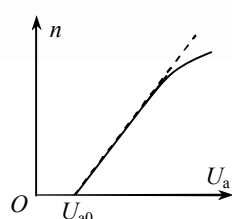


图 2-13 实际调节特性

2.3 直流伺服电动机的动态特性

2.3.1 直流伺服电动机的动态基本关系式

直流伺服电动机之所以会有动态过程,其根本原因是电动机的转动轴上存在的机械惯性,以及电枢回路中存在的电磁惯性。所谓机械惯性,是指转子轴上的力矩发生变化时,转子的转速不能突变,而是要逐步变化。转速的变化率(转速变化的速度,又称为角加速度)与转子轴上的合力矩成正比,与转子轴上的总转动惯量成反比。因此,在转子轴上力矩的动态平衡方程式为

$$T(t) = T_0 + T_L + J \frac{d\omega(t)}{dt} = T_s + J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (2-28)$$

式中,后面带有(t)的物理量表示它随时间变化, $\omega(t)$ 为转子转动的角速度,单位是 rad/s, J 为转子轴上的总转动惯量,单位为牛顿·米·秒² (N·m·s²) 或千克·米² (kg·m²)。

在直流伺服电动机的电枢回路中,由于电枢绕组由线圈组成,具有一定的电感,因此不是纯电阻电路。当电枢回路的电压发生突变(如改变电枢电压对电动机进行调速)时,电枢回路的电流不能突变,而是要逐步变化。这就是电动机的电磁惯性。电枢回路电流的变化率,与电枢回路的总电势成正比,与电枢绕组的电感成反比。因此,电枢回路的动态电压平衡方程式为

$$U_a(t) = E_a(t) + I_a(t)R_a + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} \quad (2-29)$$

式中, L_a 为电枢绕组的电感。动态电压平衡方程式表明,电枢绕组的总电势越大,电枢绕组的电感越小,电枢电流的变化就越快。

无论是在稳态还是动态,感应电势计算公式和电磁力矩计算公式都是一样的,不同的只是动态公式中的变量会随时间变化。因此,就可以得到直流伺服电动机的动态基本关系式(也称为动

态四大关系式):

$$\begin{cases} E_a(t) = C_e \Phi n(t) = K_e \omega(t) \\ U_a(t) = E_a(t) + I_a(t) R_a + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} \\ T(t) = C_T \Phi I_a(t) = K_T I_a(t) \\ T(t) = T_s + J \frac{d\omega(t)}{dt} \end{cases} \quad (2-30)$$

需要说明的是, 直流伺服电动机的动态计算公式 (2-28) 和式 (2-30) 都进行了简化, 均假定电动机转轴上的总阻力矩 T_s 保持不变。实际上, 负载阻力矩往往与转速有关, 进一步的问题在此不做深入讨论。根据简化的动态基本关系式, 可以分析直流伺服电动机的过渡过程与过渡特性 (动态特性)。

2.3.2 直流伺服电动机的过渡过程与过渡特性

1. 过渡过程分析

要控制直流伺服电动机的转速, 采取的方法就是改变加在电枢绕组上的控制电压, 在负载一定的情况下, 达到稳定状态后, 转速就会由调节特性曲线调速前对应的转速, 变化到新的控制电压对应的新的转速。

在电动机构成的调速系统中, 当转速从一个值变为另一个值时, 由于机械惯性引起的转速渐变过程, 称为机械过渡过程。同理, 当电枢电流由原值变为新值时, 由于电磁惯性引起的电流变化过程, 称为电磁过渡过程。在直流伺服电动机的调速过程中, 电磁过渡过程和机械过渡过程同时存在, 但电磁过渡过程所需的时间要比机械过渡过程短得多。

在调速前, 假定电动机带着被控对象以转速 n_1 匀速转动, 现在要把转速增大到 n_2 , 就需要把控制电压增大, 而控制电压的增大可以瞬间完成。当控制电压增大后, 由于转速不能跳变, 根据反电势计算公式, 电枢绕组产生的反电势也不能跳变。这时, 根据电压平衡方程式可知, 电枢绕组中的电流就会逐渐增大。因为电磁过渡过程时间很短, 所以, 电枢绕组内的电流增加的速度很快。根据电磁力矩计算公式可知, 电枢电流的增大, 会使得电磁力矩成比例增大。这样, 电磁力矩就会大于总的阻力矩, 从力矩平衡方程式可以看出, 电动机带着负载转动的转速就会逐渐升高 (转速的变化量与增大的电磁力矩成正比, 与转动部分的转动惯量成反比)。

在转速升高的同时, 电枢绕组的反电势就会成比例增大。在电枢电流增大的过渡过程中, 会使电枢电流的增大速度减慢; 在电流增大的过渡过程结束后, 会使电枢电流减小。随着电枢电流的减小, 电磁力矩减小, 使转速的增大速度减慢。当电磁力矩减小到等于总阻力矩时, 转速等于调速后的值 n_2 且不再增大。这时, 电枢绕组反电势因转速升高而增大的数值, 正好等于增加的那部分电枢电压, 电枢绕组的电流也就不再变化。这样, 电动机进入了新的平衡状态——新的稳态。整个过渡过程, 可以用符号表示如下:

$$U_a \uparrow \xrightarrow{U_a > E_a + I_a R_a} I_a \uparrow \rightarrow T \uparrow \xrightarrow{T > T_s} n \uparrow \rightarrow E_a \uparrow \rightarrow \Delta I_a \downarrow \rightarrow \Delta T \downarrow \xrightarrow{T = T_s} \Delta n \downarrow$$

需要注意的是, 以上分析的过渡过程并不影响电动机的输出特性。在调速过程中, 始终满足动态基本关系式, 且其中随时间变化的量都在变化。但是, 在调速过程结束后, 各物理量之间的关系又与调速前一样, 满足稳态基本关系式。理解的关键包含以下两个方面: 一是负载一定的情况下, 总阻力矩一定, 调速前后的电磁力矩和电枢电流保持不变; 二是调速后转速升高后反电势

的增量, 等于电枢电压(控制电压)的增量。

以上对电动机的调速过程进行定性分析, 在过渡过程中, 转速的变化规律是怎样的? 过渡过程的时间有多长? 这就需把动态基本关系式变换成关于转速的微分方程, 再来分析转速随时间的变化规律。

2. 直流伺服电动机的过渡特性

在实际系统中, 直流伺服电动机转轴上的阻力矩一般都比较小, 而在调速过程中, 电磁力矩主要用来克服转动惯量以改变转速。因此, 为了使分析更简单, 可以忽略阻力矩。这样, 动态基本关系式中的力矩平衡方程式就变为

$$T(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (2-31)$$

$$\text{注意到} \quad T(t) = K_t I_a(t) \quad (2-32)$$

把式(2-32)代入式(2-31)中, 整理后得

$$I_a(t) = \frac{J}{K_t} \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (2-33)$$

再把式(2-33)和反电势的计算公式代入式(2-30)的电压平衡方程式, 并在等式两边同时除以 K_e , 整理后得到关于转速的二阶微分方程:

$$\frac{L_a}{R_a} \cdot \frac{R_a J}{K_e K_t} \frac{d^2\omega(t)}{dt^2} + \frac{R_a J}{K_e K_t} \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = \frac{1}{K_e} \cdot U_a(t) \quad (2-34)$$

式中, L_a 是电枢绕组的电感。转速一阶微分项的系数只与电动机自身的参数和转动部分的转动惯量有关, 是一个不随时间变化的常数, 称为机电时间常数, 一般用 τ_m 来表示, 即有

$$\tau_m = \frac{R_a J}{K_e K_t} \quad (2-35)$$

从式(2-34)可以看出, 转速二阶微分项的系数比一阶微分项系数多乘了 L_a/R_a , 它们也是不随时间变化的常数, 称为电磁时间常数, 一般用 τ_e 表示, 即有

$$\tau_e = \frac{L_a}{R_a} \quad (2-36)$$

在过渡过程中, 加在电枢绕组上的电压 U_a 保持不变。根据公式(2-18)、式(2-20)可知, 式(2-34)右边一项就等于电枢电压 U_a 对应的理想空载转速 n_0 所对应的理想空载角速度 ω_0 。把这一关系与式(2-35)和式(2-36)代入到式(2-34)中, 就得到化简后的微分方程为

$$\tau_e \tau_m \frac{d^2\omega(t)}{dt^2} + \tau_m \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = \omega_0 \quad (2-37)$$

相应的特征方程为

$$\tau_e \tau_m \lambda^2 + \tau_m \lambda + 1 = 0 \quad (2-38)$$

特征方程对应的解为

$$\begin{cases} \lambda_1 = -\frac{1}{2\tau_e} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4\tau_e}{\tau_m}} \right) \\ \lambda_2 = -\frac{1}{2\tau_e} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4\tau_e}{\tau_m}} \right) \end{cases} \quad \left(\tau_m \neq 4\tau_e \text{ 时} \right) \text{ 或 } \lambda = -\frac{1}{2\tau_e} \quad \left(\tau_m = 4\tau_e \text{ 时} \right) \quad (2-39)$$

式中, λ_1 和 λ_2 为式(2-38)表示的特征方程的两个不同的特征根, λ 为式(2-38)表示的特

征方程的两个相同的实特征根。

则微分方程式 (2-37) 的通解为

$$\omega(t) = \omega_0 + C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} \quad (\tau_m \neq \tau_e \text{ 时}) \quad (2-40)$$

或

$$\omega(t) = \omega_0 + C_3 e^{\lambda t} + C_4 t e^{\lambda t} \quad (\tau_m = \tau_e \text{ 时}) \quad (2-41)$$

设在电动机转速为零的情况下, 施加一个控制电压, 把零时刻转速为零这一初始条件代入式 (2-40) 和式 (2-41), 可得

$$C_1 + C_2 + \omega_0 = 0, \quad C_3 + \omega_0 = 0 \quad (2-42)$$

对式 (2-40)、式 (2-41) 进行微分, 并代入零时刻转速的微分等于零 (转速的变化率为零) 这一初始条件, 可得

$$C_1 \lambda_1 + C_2 \lambda_2 = 0, \quad C_3 \lambda + C_4 = 0 \quad (2-43)$$

联立式 (2-43) 和式 (2-42), 可以求出通解中的系数为

$$\begin{cases} C_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \omega_0 \\ C_2 = -\frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \omega_0 \end{cases} \quad \begin{cases} C_3 = -\omega_0 \\ C_4 = \lambda \omega_0 \end{cases} \quad (2-44)$$

将式 (2-44) 代入通解表达式 (2-40) 和式 (2-41), 根据参数 τ_m 、 τ_e 的关系, 可得电动机转速随时间的变化规律如下:

当 $\tau_m > \tau_e$ 时, λ_1 和 λ_2 为两个负实根, 此时有

$$\omega(t) = \omega_0 + \frac{\omega_0}{2\sqrt{1 - \frac{4\tau_e}{\tau_m}}} \left[\left(1 - \sqrt{1 - \frac{4\tau_e}{\tau_m}} \right) e^{\frac{-1}{2\tau_e} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4\tau_e}{\tau_m}} \right) t} - \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4\tau_e}{\tau_m}} \right) e^{\frac{-1}{2\tau_e} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4\tau_e}{\tau_m}} \right) t} \right] \quad (2-45)$$

当 $\tau_m < \tau_e$ 时, λ_1 和 λ_2 为两个共轭虚根, 此时有

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \omega_0 + \frac{\omega_0}{2j\sqrt{\frac{4\tau_e}{\tau_m} - 1}} \left[\left(1 - j\sqrt{\frac{4\tau_e}{\tau_m} - 1} \right) e^{\frac{-1}{2\tau_e} (1 + j\sqrt{\frac{4\tau_e}{\tau_m} - 1}) t} - \left(1 + j\sqrt{\frac{4\tau_e}{\tau_m} - 1} \right) e^{\frac{-1}{2\tau_e} (1 - j\sqrt{\frac{4\tau_e}{\tau_m} - 1}) t} \right] \\ &= \omega_0 + \frac{\omega_0 e^{\frac{-1}{2\tau_e} t}}{2\sqrt{\frac{4\tau_e}{\tau_m} - 1}} \left[\left(-j - \sqrt{\frac{4\tau_e}{\tau_m} - 1} \right) e^{\frac{-j}{2\tau_e} \left(\sqrt{\frac{4\tau_e}{\tau_m} - 1} \right) t} - \left(-j + \sqrt{\frac{4\tau_e}{\tau_m} - 1} \right) e^{\frac{-j}{2\tau_e} \left(\sqrt{\frac{4\tau_e}{\tau_m} - 1} \right) t} \right] \\ &= \omega_0 - \omega_0 e^{\frac{-1}{2\tau_e} t} \left[\cos \left(\frac{1}{2\tau_e} \sqrt{\frac{4\tau_e}{\tau_m} - 1} t \right) + \frac{1}{\sqrt{\frac{4\tau_e}{\tau_m} - 1}} \sin \left(\frac{1}{2\tau_e} \sqrt{\frac{4\tau_e}{\tau_m} - 1} t \right) \right] \end{aligned} \quad (2-46)$$

当 $\tau_m = \tau_e$ 时, λ 为两个相同的负实根, 此时有

$$\omega(t) = \omega_0 - \omega_0 e^{\frac{-1}{2\tau_e} t} - \frac{\omega_0 t}{2\tau_e} e^{\frac{-1}{2\tau_e} t} \quad (2-47)$$

由于反电势与转速成正比, 所以, 过渡过程中反电势的变化规律与转速的变化规律相同。

根据式 (2-33), 结合式 (2-45) ~ (2-47), 可进一步得出上述过渡过程中电枢电流的变化规律。

由于电动机的电磁力矩与电枢电流成正比,则上述过渡过程中电磁力矩的变化规律,与电枢电流的变化规律相同。

当 $\tau_m < 4\tau_e$ 时,由于微分方程的特征根为共轭复数,转速和电枢电流随时间的变化曲线呈振荡特性,如图 2-14 所示。这种情况只有在转动部分的转动惯量很小,且电枢回路电阻也很小时才会出现。一般用于自动控制系统的伺服电动机,即使在空载时也不能满足这个条件(电动机转子本身的转动惯量无法做到足够小)。

当 $\tau_m > 4\tau_e$ 或 $\tau_m = 4\tau_e$ 时,由于微分方程的特征根为负实数,转速和电枢电流随时间的变化曲线呈阻尼特性,无振荡,如图 2-15 所示。

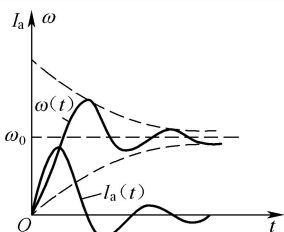


图 2-14 $\tau_m < 4\tau_e$ 时的过渡过程

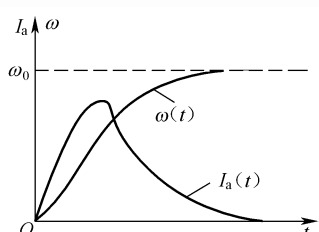


图 2-15 $\tau_m > 4\tau_e$ 或 $\tau_m = 4\tau_e$ 时的过渡过程

在大多数情况下,由于放大电路的内阻与电枢绕组串联,使得电枢回路的总电阻增大,且负载存在一定的转动惯量,一般满足 $\tau_m \gg \tau_e$ 的条件。因此,一般忽略电磁时间常数,把过渡过程中转速变化的微分方程式(2-37)进一步简化,得到一阶微分方程为

$$\tau_m \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = \omega_0 \quad (2-48)$$

这个微分方程的解,就是简化后的转速变化规律,即有

$$\omega(t) = \omega_0 (1 - e^{-\frac{t}{\tau_m}}) \quad (2-49)$$

同理,可得简化后过渡过程中电枢电流的变化规律为

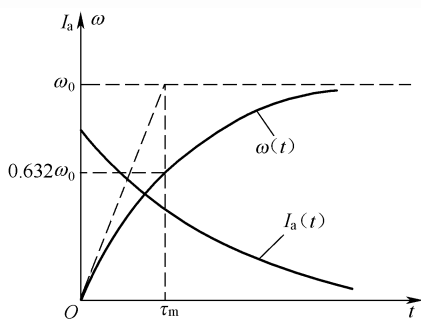
$$I_a(t) = \frac{U_a}{R_a} e^{-\frac{t}{\tau_m}} \quad (2-50)$$

根据式(2-49)和式(2-50),可以得到简化后的转速和电枢电流的变化规律曲线,如图 2-16 所示。当把 $t = \tau_m$ 代入式(2-49),可以得到 $\omega(t) = 0.632\omega_0$ 。所以,在工程上,把电动机在施加额定励磁电压空载运行情况下,加上阶跃的额定控制电压后,转速由零开始达到理想空载转速的 63.2%所需的时间,定义为电动机的机电时间常数。电动机的机电时间常数,一般采用实验方法进行测量,并用实际的空载转速替代理想空载转速。此外,在工程上,还把 $t = 3\tau_m$ 定义为过渡过程所需的时间,这时,电动机的转速约等于空载转速的 95%,可以认为过渡过程基本结束。

直流伺服电动机的动态特性,由电动机本身和被控对象共同决定。在设计自动控制系统时,还可以增加校正网络,来改善整个系统的动态性能。

2.3.3 直流伺服电动机的传递函数与方框图

进行自动控制系统的分析和设计时,通常对微分方程进行拉普拉斯变换,将微分方程转化为代数方程,从而得出各环节输出与输入的函数关系——传递函数。

图 2-16 $\tau_m \gg \tau_e$ 时的过渡过程

对于直流伺服电动机而言, 其输入量是电枢电压, 输出是转速。令 $k=1/K_e$, 再把机电时间常数和电磁时间常数的定义代入式 (2-34), 可以把微分方程改写成

$$\tau_e \tau_m \frac{d^2 \omega(t)}{dt^2} + \tau_m \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = k U_a(t) \quad (2-51)$$

对其进行拉普拉斯变换, 在初始转速为零、初始转速变化率为零的条件下, 得

$$\tau_e \tau_m s^2 \omega(s) + \tau_m s \omega(s) + \omega(s) = k U_a(s) \quad (2-52)$$

由此可得, 直流伺服电动机的传递函数为

$$G_2(s) = \frac{\omega(s)}{U_a(s)} = \frac{k}{\tau_e \tau_m s^2 + \tau_m s + 1} \quad (2-53)$$

显然, 这是一个二阶环节, 对应二阶微分方程。对普通直流伺服电动机而言, 由于电磁时间常数远远小于机电时间常数, 因此, 往往可以忽略电磁时间常数 (即取电磁时间常数为零), 从而得到简化的传递函数表达式为

$$G'_2(s) = \frac{\omega(s)}{U_a(s)} = \frac{k}{(\tau_m s + 1)(\tau_e s + 1)} \quad G_1(s) = \frac{k}{\tau_m s + 1} \quad (2-54)$$

这就是常用的直流伺服电动机的传递函数表达式。其中, $G_1(s)$ 是与一阶微分方程相对应的一阶环节。其中, 需要确定的两个参数, 都可以通过实际测量得到。

传递函数可以用方框图直观地表示输入和输出的关系。式 (2-53)、式 (2-54) 对应的方框图如图 2-17 所示。

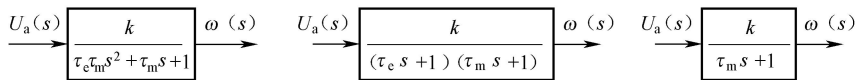


图 2-17 直流伺服电动机二阶环节及简化的一阶环节传递函数方框图

实际上, 可以直接对动态基本关系式 (2-30) 进行拉普拉斯变换, 忽略总阻转矩 T_s , 初始转速为零、初始转速变化率为零的条件下, 得

$$\begin{cases} E_a(s) = K_e \omega(s) \\ U_a(s) = E_a(s) + I_a(s) R_a + L_a s I_a(s) \\ T(s) = K_t I_a(s) \\ T(s) = J s \omega(s) \end{cases} \quad (2-55)$$

如果还考虑电机的转动角, 由 $\frac{d\theta(t)}{dt} = \omega(t)$ 得

$$s\theta(s) = \omega(s) \quad (2-56)$$

式(2-55)和式(2-56)中传递函数对应的方框图如图2-18所示。

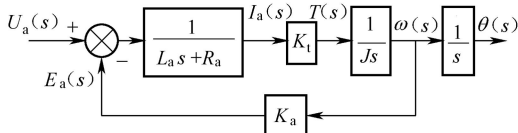


图 2-18 直流伺服电动机传递函数方框图

根据式(2-55),结合式(2-35)、式(2-36)中机电时间常数、电磁时间常数的定义,可以推导出式(2-53)及式(2-54);同样,根据图2-18中直流伺服电动机的方框图,可以推导出图2-17中的二阶环节及简化的一阶环节方框图。

传递函数和方框图是自动控制系统中常用的分析方法。

2.4 直流伺服电动机的控制方法

在使用直流伺服电动机时,需要对它的启动、调速和停转等过程进行必要的控制,还要分析影响电动机工作性能的因素,必要时还需采取适当的补偿措施,从而保证达到对被控对象的控制要求。

2.4.1 直流伺服电动机的启动

直流伺服电动机的启动过程,是指电动机从静止开始转动,达到稳态运行的过程。当在静止状态给电枢绕组施加额定控制电压时,由于电枢绕组中没有反电势,而电枢绕组的电阻都很小,所以,电枢电流会很大,可以达到额定工作电流的10~20倍。大的起动电流除了会对电动机本身(电枢绕组、换向片、电刷)造成损害外,还会对供电电源和供电线路造成不良影响。因此,除了小功率电动机之外,都不能在电枢绕组上直接施加额定控制电压来进行起动。

在启动过程中,为了使电动机和被控对象平稳加速,最好是使加在电枢绕组上的电压逐渐增大。一种方法是让控制电路输出的电压逐渐增大,这种方法在数字控制系统中比较容易实现,对于模拟控制系统,会增加控制电路复杂程度。另一种方法是把控制电路输出的电压看成电源,在连接到电枢绕组的电路上采取相应的措施。直流伺服电动机常用的起动方法是后一种。

典型的启动电路是在电枢绕组回路中串联可调电阻,如图2-19所示。在静止状态,串联到电枢绕组回路中的电阻最大。在起动过程中,逐步减小串联电阻值,就可以使电枢回路中的电流逐渐增大。当电动机进入稳定转动状态时,串联电阻被短接,对电动机的控制不产生影响。

可变电阻值的自动调整,一般通过继电器对分段电阻进行控制的方式完成。

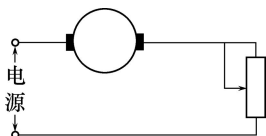


图 2-19 串联可调电阻起动电路

2.4.2 直流伺服电动机的励磁方式

永磁式直流伺服电动机只需要施加控制电压,就可以控制电动机的运行。对于电磁式直流伺服电动机来说,在给电枢绕组施加控制电压的同时,还必须给定子励磁绕组供电。电枢绕组与励磁绕组之间的连接,就存在多种方式,称为直流伺服电动机的励磁方式。常用的励磁方式有他励、串励、并励和复励。

对于要求控制精度较高的直流伺服电动机,一般采用他励方式。

1. 他励方式

直流伺服电动机的励磁绕组和电枢绕组采用不同的电源（或电路）进行供电，加在两个绕组上的电信号可以独立改变，这种连接方式称为他励方式。他励方式是直流伺服电动机最简单的连接方式，前面分析的特性均适用于他励方式。此外，永磁式直流伺服电动机可以看成是他励方式，只不过磁场是由永磁体构成，性能更加稳定、耗电量更少，但功率较大的永磁式电动机价格较贵。

2. 串励方式

直流伺服电动机的励磁绕组和电枢绕组串联后接入控制电路（或电源），这种连接方式称为串励方式，其电路如图 2-20 所示。

串励方式的励磁电流与电枢电流相等且同时变化，而工作磁场的磁通量与励磁电流成正比，这种情况下，电磁力矩和转速就与电流的平方成正比。由此可知，串励方式下电动机的机械特性不再是一条直线，而是机械特性较软的曲线。

由于串励方式电动机的力矩与电流的平方成正比，因此，同样的电枢电流可以得到更大的力矩，有利于电动机的起动。

在使用串励方式时，在负载阻力矩较小时，稳态后电枢电流和励磁电流都会较小，因而此时励磁磁场磁通量较小；当控制电压较大时，必须很高的转速才能产生能够满足电压平衡方程式的反电势，就会使得电动机的转速过高（俗称“飞车”）。因此，串励方式一般用于大负载情况，且不允许空载起动和运行。

3. 并励方式

电枢绕组与励磁绕组并联后接入控制电路（或电源），这种连接方式称为并励方式，其电路如图 2-21 所示。并励方式的励磁磁场只与控制电压有关，而与转速无关。

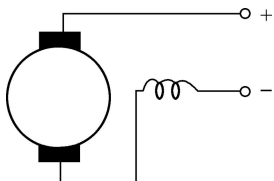


图 2-20 串励方式接线

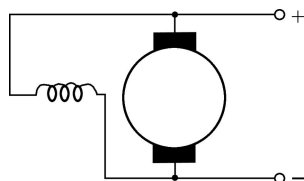


图 2-21 并励方式接线

当输入电压较高时，励磁电流较大，励磁磁场处于饱和状态，输入电压的变化只引起转速的变化，与他励方式没有区别（可以考虑在励磁绕组支路中串联保护电阻）。当输入电压较低时，励磁磁场会因励磁支路电流的减小而减小，使机械特性变软。所以，并励方式适合于高速运行的情况，可使供电线路更加简单。

在采用并励方式的情况下，起动电路电阻应该串联在电枢绕组的支路中，而不能串联在两个并联支路之外；否则，起动电阻会使励磁电流减小，而达不到增大起动力矩的作用。

4. 复励方式

复励方式是串励方式和并励方式的综合，但需要电动机具有两个独立励磁绕组，其线路连接如图 2-22 所示。

复励方式的特性，介于串励方式和并励方式之间，并能够互相取长补短。串励绕组可以增大起动力矩，并增大小转速情况下的励磁磁场；而并励绕组则能够在小负载或空载情况下，增大励磁磁场，防止电动机出现“飞车”现象。

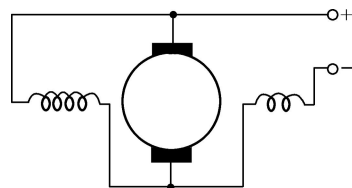


图 2-22 复励方式接线



2.4.3 直流伺服电动机的调速

直流伺服电动机工作在额定励磁条件下的机械特性，称为电动机的固有机械特性。采用不同的连接方式，其机械特性也有所不同。在大多数自动控制系统中，一般采用他励方式。他励方式的调速和改变方向，可以通过改变电枢电压的大小与极性来实现。

对于并励方式，必须单独改变电枢支路的电压极性，来改变转动方向。同时，一般采用在电枢支路中串联调速电阻的方法，来调节电动机的转速。一般在并联电路上施加额定励磁电压，保证工作磁场为额定磁场，再通过串联调速电阻来控制加在电枢绕组上的电压。

2.4.4 直流伺服电动机的制动

要想使直流伺服电动机停止转动，最简单的方法是给电枢绕组断电，即把加在电枢绕组上的电压变为零，使得电动机没有电磁力矩输出。

需要特别注意的是，在他励情况下，不能采用断开励磁电源的方法来使电动机停转。断开励磁电源的初衷，也是想使电动机的电磁力矩变为零。但是，励磁电源断开后，电动机定子还会有剩磁，在电枢绕组仍然施加控制电压时，由于反电势迅速减小，会使得电动机的转速迅速升高，在阻力矩较小时，就会使电动机出现“飞车”现象。

由于电动机的转子和负载具有一定的惯性，其动能将被转轴上的摩擦力矩和空气阻力矩等慢慢消耗，所以，电动机停止转动需要一定的时间。为了使电动机快速停转，就必须采取适当的控制方法。常用的方法有反接制动、能耗制动和降压制动。

1. 反接制动

反接制动是用把加在电枢绕组的电压极性变反的方法，来替代把加在电枢绕组上的电压变为零。这样，能够提供一个与电动机转动方向相反的电磁力矩，来使电动机快速停转。采用这种方法制动效果最好，但为了使得停转过程平稳并不出现反转现象，需要对施加的方向电压进行控制，增加了控制电路的复杂程度。

2. 能耗制动

能耗制动也称为动能制动，其方法是在使电枢电压变成零的同时，把电枢绕组短接或串接一个电阻。这时，电动机就相当于一个带负载的发电机，而输入的能量，就是转动部分的惯性动能。由发电机的原理（参见第7章）可知，电枢电流形成的电磁力矩对于转动部分而言，是一个阻力矩。在转速较高时，感应电势和电枢电流较大，反向电磁力矩（制动力矩）也较大；随着转速的减小，反向电磁力矩也减小，能够平稳停转。

采用能耗制动需要注意的问题有两个方面，一是停转后，应使电路复原，以保证下次能够正常启动；二是当使用放大电路直接进行短接时，放大电路应该允许能够流过较大的反向电流。

3. 降压制动

降压制动就是逐步减小加在电枢绕组上的电压，能够按照需要的规律对整个停转过程进行控制。整个停转控制过程，就是调节控制电压把转速调整到零的过程。在位置随动系统中，通过位置负反馈可以实现这一目的。

2.4.5 直流伺服电动机的工作状态

根据电枢外加电压与反电势的关系、电枢电流大小方向与反电势的关系、电机转速大小方向



与电磁力矩的关系及能量转换关系, 可将直流伺服电动机的工作状态分为 4 种: 电动机状态、发电机状态、能耗制动状态和反接制动状态, 如图 2-23 所示。

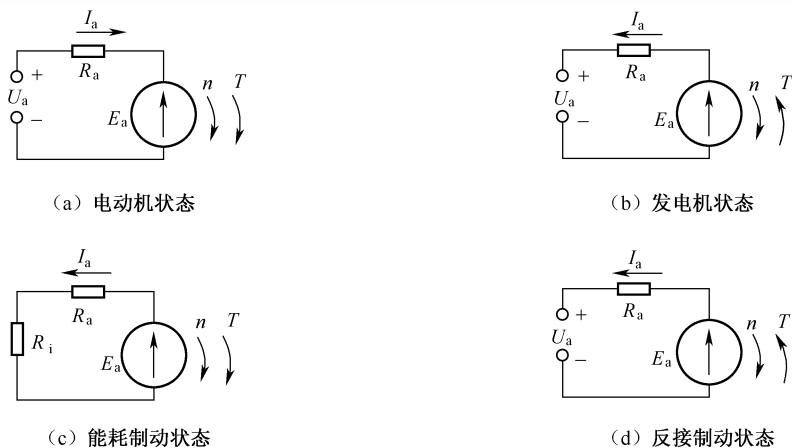


图 2-23 直流伺服电动机的工作状态

1. 电动机状态

电动机状态的特点是:

- (1) 外加电压大于电枢的反电势, 外加电压方向与电枢的反电势方向相反。
- (2) 电枢电流小于堵转电流, 方向与反电势的方向相反。
- (3) 电机转速低于空载转速, 电磁力矩方向与转动方向相同, 小于堵转转矩, 起驱动作用。
- (4) 电能转化为机械能。

电动机状态是直流伺服电动机通常的工作状态。

2. 发电机状态

发电机状态的特点是:

- (1) 外加电压小于电枢的反电势, 外加电压方向与电枢的反电势方向相反。
- (2) 电枢电流方向与反电势的方向相同。
- (3) 电机转速高于空载转速, 电磁力矩方向与转动方向相反, 起制动作用。
- (4) 机械能转化为电能。

当外加电压突然大幅下降 (突然的降压制动时), 或出现与转动方向相同的外力矩, 使转速高于空载转速时, 就会处于发电机状态。

3. 能耗制动状态

能耗制动状态的特点是:

- (1) 外加电压为零, 电枢两端通过电源内阻直接闭合。
- (2) 电枢电流方向与反电势的方向相同。
- (3) 可视为特殊的发电机状态, 电磁力矩方向与转动方向相反, 起制动作用。
- (4) 机械能转化为电能, 电能消耗在电枢回路的电阻上, 成为热损耗。

对直流伺服电动机进行能耗制动时, 就会处于能耗制动状态。

4. 反接制动状态

反接制动状态的特点是:

- (1) 外加电压方向与电枢的反电势方向相同。
- (2) 电枢电流大于堵转电流，方向与外加电压方向、反电势的方向相同。
- (3) 电磁力矩方向与转动方向相反，大于堵转转矩，起制动作用。
- (4) 机械能转化为电能，转化的电能与外加电压的电能均消耗在电枢回路的电阻上，成为热损耗。

对直流伺服电动机进行反接制动时，就会处于反接制动状态。

油电混合动力汽车采用直流伺服电动机，下坡、减速或制动时，电机工作在发电机状态，将机械能转化为电能，从而达到减小能耗节约能源的目的。

2.4.6 影响直流伺服电动机性能的因素

在分析直流伺服电动机特性时，都把工作磁场和电动机的参数看成常数。但在实际情况下，温度的变化，会使得励磁绕组和电枢绕组的电阻发生变化，工作磁场和电枢电流会随温度变化。

此外，电枢绕组中的电流也会引起电枢反应，使工作磁场发生变化。所以，实际使用中的机械特性和调节特性，都会出现非线性。实际机械特性曲线如图 2-24 所示。

在使用直流伺服电动机进行恒速和位置控制时，一般都需要采用速度负反馈和位置负反馈，并加入适当的校正电路来控制电枢电压的变化规律，以保证稳态控制精度和动态性能。

此外，电动机转子的形状对输出特性和动态性能也有一定的影响。一般情况下，适用于高速运行的电动机，转子为细长形状，转动惯量小；输出力矩大、低速性能好的电动机，转子为短粗形（也称为直流力矩电动机）。

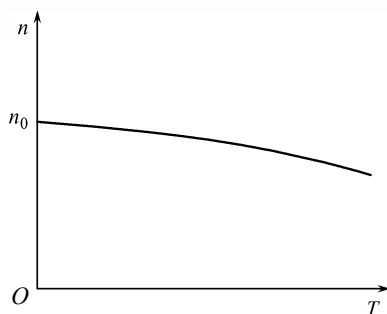


图 2-24 实际机械特性曲线

2.5 直流伺服电动机的性能指标

在实际使用时，需要根据具体的使用要求和电动机的性能指标，来选择适当的电动机。直流伺服电动机的性能指标，通过一定条件下的运行指标给出，一般给出的是额定工作状态下的指标，称为额定值，主要包括电压、电流、功率、转速等。这些额定值一般刻在电动机的铭牌上，因此，额定值也称为铭牌值。

2.5.1 额定电压

额定电压是指在额定运行情况下，加在直流电动机励磁绕组和电枢绕组的直流电压数值，通常用 U_n 来表示（用 U_{nf} 表示额定励磁电压、 U_{na} 表示额定电枢电压），单位为 V。一般情况下，励磁绕组总是施加额定电压；而电枢绕组的电压则是变化的，但最大电压一般不超过额定电枢电压。

2.5.2 额定电流

额定电流是指直流电动机在额定电压下，达到额定输出功率时的励磁电流和电枢电流数值，

通常用 I_n 来表示 (用 U_{nr} 表示额定励磁电压、 U_{na} 表示额定电枢电压), 单位为 A。

励磁绕组施加额定电压, 其工作电流就是额定电流。对于电枢绕组而言, 额定电流就是电动机长期安全运行的最大电流。在使用过程中, 只允许短时间超过额定电流, 否则会使电枢绕组和换向器损坏。

2.5.3 额定功率

额定功率指在额定运行状态下, 直流电动机转轴上输出的机械功率, 通常用 P_n 表示, 单位为瓦特 (W)。

2.5.4 额定转速

额定转速是指电动机在额定电压和额定功率时的转速, 通常用 n_n 来表示, 单位为每分钟的转数 (r/min)。

2.5.5 定额

定额是指保证上述指标的运行方式。定额按照电动机运行的持续时间分为“连续”、“短时”、“断续”3种。“连续”表示电动机可以按上述额定值连续运行, “短时”表示只能按上述额定值在规定的工作时间内短时使用, “断续”则表示短时间重复运行。

2.5.6 额定输出力矩

额定输出力矩是指在额定电压和额定功率时的输出力矩, 通常用 T_n 来表示, 其单位为牛顿·米 (N·m)。

在电动机的铭牌上, 一般不标出额定输出力矩, 这时因为额定输出力矩 T_n , 可以根据电动机的额定功率 P_n 和额定转速 n_n 计算得到。

电动机的额定输出功率 P_n 与额定输出力矩 T_n 和电动机的额定转动角速度 ω_n 成正比, 即有

$$P_n = T_n \omega_n \quad (2-57)$$

把电动机的转动角速度转换成转速, 代入式 (2-57), 整理后得到

$$T_n = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{P_n}{n_n} \quad (2-58)$$

2.6 直流伺服电动机在运动控制中的应用

一般而言, 要对直流伺服电动机进行控制, 需要增加相应的电路来实现电压控制和电流驱动。一般称为控制电路和驱动电路。控制电路通过控制电动机电枢绕组的电压, 来实现电动机起动、停转、转动速度和转动方向的控制; 而驱动部分则提供电枢绕组 (可能还包括励磁绕组) 工作所需要的电流。

直流伺服电动机在运动控制系统中主要有两种基本运动方式: 一种是连续转动, 需要进行转速控制; 另一种是位移运动, 需要进行位置控制。对于一些特殊的位置控制, 如关节采用电动机驱动的机械手抓握物件, 阻转矩变化很大的情况下, 需要对电动机的电磁力矩进行控制。

2.6.1 转速控制

转速控制是指控制被控对象按照预定的转速转动。具体的控制系统原理框图如图 2-25 所示。

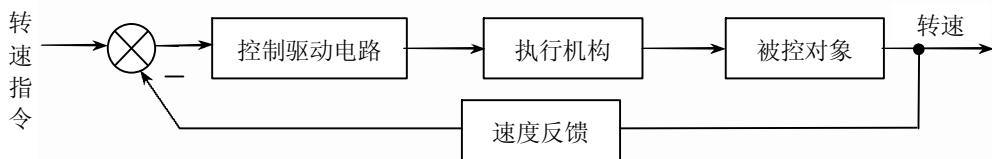


图 2-25 直流伺服电动机转速控制原理框图

转速控制系统也称为调速系统。

图 2-25 中，执行机构为直流伺服电动机，速度反馈部分通常是直流测速发电机（将在第 7 章中介绍）。具体工作原理是：有输入转速指令（一般是一个代表一定转速的直流电压信号，其极性代表转动方向）时，控制驱动电路提供控制电压和电流驱动，直流伺服电动机带动被控对象转动，速度反馈部件测量被控对象的转动速度，由控制电路与转速指令进行比较，使控制电压随误差信号变化。当被控对象达到输入指令所指定的转速时，控制电压保持不变，被控对象按指令速度转动。如果出现干扰使被控对象的转速发生变化时，速度反馈部件能够感受这一转速变化，使控制电压随之改变，对电动机的转速进行调整，使其恢复到原有的转速。

四旋翼飞行器是一种灵活的小型无人飞行器，采用电动机控制 4 个旋翼的转速，改变升力，调整飞行姿态和方向、上升或下降，如图 2-26 所示。



图 2-26 四旋翼飞行器

传统的直流伺服电动机换向器（也称为机械换向器）是一种复杂的机械结构，运行中会产生摩擦和换向火花，影响换向器的使用寿命和电机性能。无刷直流伺服电动机通过电子开关和位置传感器代替电刷和换向器，也称为电子换向式无刷直流伺服电动机，参见第 6 章。四旋翼飞行器一般采用无刷直流伺服电动机。

在控制系统设计与分析中，无刷直流伺服电动机同样有静态的机械特性和调节特性，动态的传递函数模型也可以采用二阶环节或简化的一阶环节。

2.6.2 位置控制

位置控制的工作原理与转速控制基本相同，不同的是输入指令是转角信号，而实现闭环控制的反馈部件相应变成进行位置测量的传感器。

位置控制系统也称为机械位移控制系统。

当输入的转角指令较大时，产生的控制电压信号也较大，执行机构带动被控对象快速转动，

位置传感器输出的位置负反馈电压信号也随被控对象的转动而变化。当位置负反馈电压与指令信号电压相等时,表示被控对象已经跟踪到位,加在执行机构上的电压为零。但是,执行机构和被控对象会由于惯性而不能立即停在稳定位置,而是出现在稳定位置附近的振荡现象。为此,在位置控制系统中,通常引入速度负反馈,可以为系统增加阻尼,提高自动控制系统的稳定性。这样,经典的位置控制系统(又称位置随动系统或位置跟踪系统)的原理框图如图 2-27 所示。

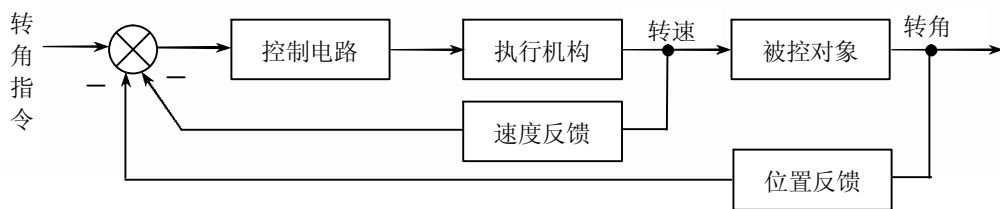


图 2-27 经典位置控制系统原理框图

机器人四肢的控制是典型的机械位移控制,如图 2-28 所示。

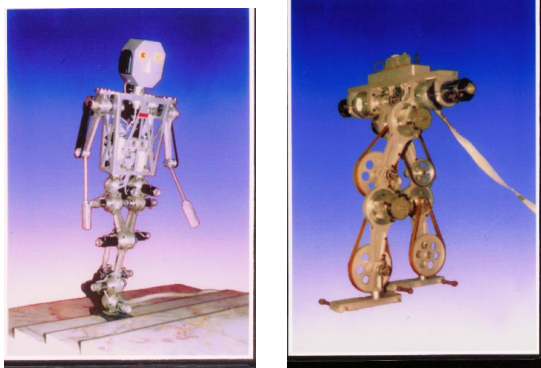


图 2-28 步行机器人

2.6.3 力矩控制

机械手及手指各关节一般采用伺服电动机作为执行机构,抓取物件时,手指力量过小则物体容易滑落,力量过大则会损伤物件,需要通过调整电枢电流控制电动机的电磁力矩实现力反馈控制,此时电动机转速为零,为堵转状态。力矩控制系统需要力反馈传感器(将在第 8 章中介绍)。

机械手抓取物体如图 2-29 所示。

实际上,许多以直流伺服电动机为执行机构的控制系统中,同时需要转速控制、机械位移控制及力矩控制,如机器人抓握球拍打乒乓球,如图 2-30 所示。



图 2-29 机械手抓取物体

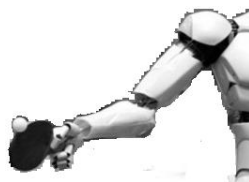


图 2-30 握球拍击球的机械手和机械臂



2.6.4 直流伺服电动机的选用

在选用直流伺服电动机时，首先要根据负载的大小、加速性能的要求等具体情况，同时考虑留有一定的裕量，来确定直流伺服电动机的输出功率，以此作为选择具体电动机的基本依据。

然后，根据选择电动机的性能参数和控制系统的要求，确定控制电路和电流驱动电路的设计指标，据此进行相关的电路设计。同时，还需要考虑相关传感器的选用及相关的信号处理方式。

最后，还应该考虑控制系统的性能要求和使用环境的相关因素，确定需要采用的监测和防护措施，包括过流保护、过压保护、散热、行程控制、故障报警等。

在分析电动机负载时，需要考虑执行机构中机械传动的的影响。典型的机械传动机构有减速箱（齿轮、行星轮、锥齿轮、蜗轮蜗杆等）、带式传动、丝杠、齿轮齿条、偏心轮和传送带等，需要具体分析。

本章小结

直流伺服电动机是利用通电导体在磁场中受到电磁力构成电磁力矩来驱动被控对象。直流伺服电动机工作原理、工作特性、动态过程及动态特性、使用方法及注意事项的分析方法，都根据动态基本关系式来进行。同样，也可以根据动态基本关系式，得到稳态基本关系式。

机械特性和调节特性是直流伺服电动机的固有稳态特性，其动态特性一般采用一阶简化模型，性能指标通常用实验方法测量。

直流伺服电动机一般采用他励方式，通过电枢电压的大小和极性来控制电动机的转速和转动方向。根据不同的负载和使用要求，考虑适当的起动和制动方法。在进行调速和位置控制时，需要使用速度和位置负反馈。

在使用直流伺服电动机时，首先应该根据自动控制系统的具体要求，通过理论计算，选择适当型号的电动机；其次对电动机与被控对象（包括传动机构一起）的特性进行测试，得到相应的性能参数，写出系统的传递函数；再根据自动控制理论，设计合理的控制器和放大电路；最后，还应考虑起动、制动方法和必要的安全防护措施等问题。

思考题与习题

2.1 直流电动机的电磁力矩和电枢电流由什么决定？

2.2 一台他励直流电动机，如果励磁电流和被拖动的负载力矩都不变，而仅仅提高电枢端电压，试问电枢电流、转速变化是怎样的？

2.3 已知一台直流电动机，其额定电压 $U_a=110\text{V}$ ，额定运行时的电枢电流 $I_a=0.4\text{A}$ ，额定负载下的转速 $n=3600\text{r/min}$ ，它的电枢电阻 $R_a=50\ \Omega$ ，空载阻力矩 $T_0=0.015\text{N}\cdot\text{m}$ 。试问该电动机额定负载力矩是多少？

2.4 用一对完全相同的直流电动机组成电动机发电机组，它们的励磁电压均为 110V ，电枢电阻 $R_a=75\ \Omega$ 。已知当发电机不接负载，电动机电枢电压加 110V ，电动机的电枢电流为 0.12A ，绕组的转速为 4500r/min 。试问：

（1）发电机空载时的电枢电压为多少伏？

(2) 电动机的电枢电压仍为 110V, 而发电机接上 $50\ \Omega$ 的负载时, 机组的转速 n 是多大 (设电机阻转矩为恒值)?

2.5 一台直流电动机, 额定转速为 3000r/min。如果电枢电压和励磁电压均为额定值, 试问该电动机是否可在转速 $n=2000\text{r/min}$ 下长期运转? 为什么?

2.6 直流电动机在转轴卡死的情况下能否加电枢电压? 如果加额定电压将会有何后果?

2.7 并励电动机能否用改变电源电压极性的方法来改变电动机的转向?

2.8 当直流伺服电动机电枢电压、励磁电压不变时, 如将负载力矩减少, 试问此时电动机的电枢电流、电磁力矩、转速将怎样变化? 并说明由原来的稳态到达新的稳态的物理过程。

2.9 请用电压平衡方程式解释直流电动机的机械特性为什么是一条下倾的曲线? 为什么放大器内阻越大, 机械特性就越软?

2.10 直流伺服电动机在不带负载时, 其调节特性有无死区? 调节特性死区的大小与哪些因素有关?

2.11 一台直流伺服电动机带动一恒力矩负载 (负载阻力矩不变), 测得始动电压为 4V, 当电枢电压 $U_a=50\text{V}$ 时, 其转速为 1500r/min。若要求转速达到 3000r/min, 试问要加多大的电枢电压?

2.12 已知一台直流伺服电动机的电枢电压 $U_a=110\text{V}$, 空载电流 $I_{a0}=0.055\text{A}$, 空载转速 $n_0=4600\text{r/min}$, 电枢电阻 $R_a=80\ \Omega$ 。试求:

(1) 当电枢电压 $U_a=67.5\text{V}$ 时的理想空载转速 n_0 及堵转力矩 T_d 。

(2) 该电动机若用放大器控制, 放大器内阻 $R_f=80$, 开路电压 $U_f=67.5\text{V}$, 求这时的理想空载转速 n_0 及堵转力矩 T_d 。