

项目 4 控制电动机

在各类自动控制系统、遥控和解算装置中，需要用到大量的各种各样的元件。控制电动机就是其中的重要元件之一。它属于机电元件，在系统中具有执行、检测和解算的功能。虽然从基本原理来说，控制电动机与普通旋转电动机没有本质上的差别，但后者着重于对电动机的力学性能指标方面的要求，而前者则着重于对特性、高精度和快速响应方面的要求，满足系统对它提出的要求。

控制电动机已经成为现代工业自动化系统、现代科学技术和现代军事装备中不可缺少的重要元件。它的应用范围非常广泛，例如，机床加工过程的自动控制和自动显示，舰船方向舵的自动操纵，飞机的自动驾驶，阀门的遥控，以及机器人、电子计算机、自动记录仪表、医疗设备、录音录像设备等的自动控制系统。

任务 1 伺服电动机及其应用

“伺服”一词源于希腊语“奴隶”。人们想把“伺服电动机”当个得心应手的驯服工具，服从控制信号的要求而动作。在信号到来之前，转子静止不动；信号到来之后，转子立即转动；当信号消失，转子能即时自行停转。由于它的“伺服”性能，因此而得名——伺服电动机。

伺服电动机又称执行电动机，在自动控制系统中作为执行元件，它能把接受到的电压信号转换为电动机转轴上的机械角位移或角速度的变化，具有服从控制信号的要求而动作的功能。

根据实际应用，自动控制系统对伺服电动机一般有如下要求：调速范围宽、快速响应性能好、灵敏度要高以及无自转现象。

伺服电动机按控制电压来分，可分为直流伺服电动机和交流伺服电动机两大类。

一、任务目标

- (1) 掌握伺服电动机的结构、类型。
- (2) 掌握伺服电动机的工作原理。
- (3) 掌握伺服电动机的各种应用，能进行伺服电动机的相关操作。

二、任务引导

1. 直流伺服电动机

直流伺服电动机是指使用直流电源的伺服电动机。

(1) 结构和类型

直流伺服电动机的结构和一般直流电动机相同，只是其转子做得细长，以减小转动惯量，因此它的容量和体积都很小，实际上就是一台微型直流他励电动机，其常见外形如

图 4-1 所示。



图 4-1 直流伺服电动机

直流伺服电动机分传统型和低惯量型两大类。

① 传统型直流伺服电动机。传统型直流伺服电动机是由定子、转子（电枢）、电刷和换向器四大部分组成的，按励磁方式（产生磁场的方式）不同可分为永磁式和电磁式两种直流伺服电动机。永磁式电动机的磁极是永久磁铁；电磁式电动机的磁极是电磁铁，磁极外面套着励磁绕组。以上两种传统式电动机的转子（电枢）铁芯均由硅钢片冲制叠压而成，在转子冲片的外圆周上开有均匀分布的齿和槽，在转子槽中放置电枢绕组，并经换向器、电刷与外电路相连，如图 4-2 所示。

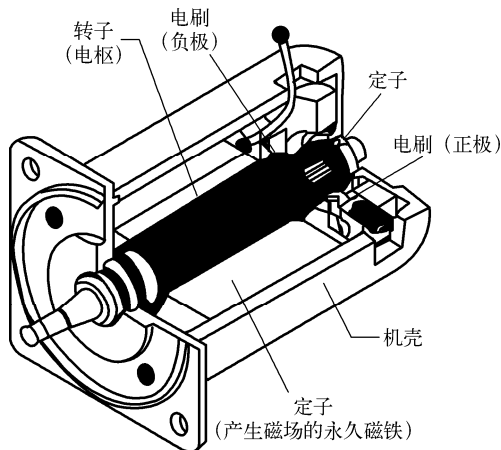
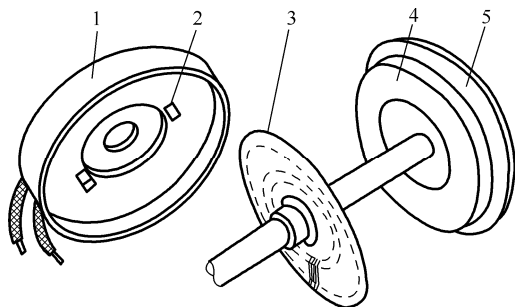


图 4-2 传统型直流伺服电动机结构示意图

② 低惯量型直流伺服电动机。低惯量型直流伺服电动机的明显特点是转子轻，转动惯量小，快速响应好。按照电枢形式的不同，低惯量直流伺服电动机分为盘形电枢直流伺服电动机、空心杯电枢永磁式直流伺服电动机及无槽电枢直流伺服电动机。

- 盘形电枢直流伺服电动机。盘形电枢直流伺服电动机的结构如图 4-3 所示。它的定子是由永久磁钢和前后磁轭组成的，转轴上装有圆盘。电动机的气隙位于圆盘的两侧，圆盘上有电枢绕组，绕组可分为印制绕组和绕线盘式绕组两种形式，这种结构的电动机基本作用原理未变，但却大大降低了电动机的转动惯量和电枢绕组的电感。

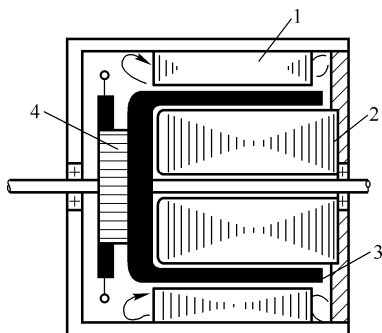


1—前盖；2—电刷；3—盘形电枢；4—磁钢；5—后盖

图 4-3 盘形电枢直流伺服电动机的结构示意图

- 空心杯电枢永磁式直流伺服电动机。直流电动机转子电枢铁芯的作用主要是减小主磁路的磁阻，其次是固定电枢绕组。如将电枢绕组和电枢铁芯在机械上分离，电枢绕组在模具上绕成后用玻璃丝带和环氧树脂胶合成一杯形体，杯底中心固定有电动机转轴。电枢铁芯为有中心孔的圆筒，一端固定在电动机的端盖上，称为内定子。杯形绕组的轴穿过内定子中心孔，通过轴承放置在两侧端盖上，其结构如图 4-4 所示。杯形转子在内、外定子间的气隙中旋转。可见其基本作用原理未变，但转轴的转动惯量大大降低；电枢绕组两侧均为气隙，其电感也大为减小，均有利于改善动态特性。

如果电动机为永磁电动机，则磁极亦可放在内定子上，外定子只作为主磁路的一部分。此种形式称为内磁场式空心杯转子电动机。



1—外定子（磁轭和磁极）；2—内定子；3—杯形转子；4—换向器

图 4-4 空心杯转子伺服电动机结构示意图

- 无槽电枢直流伺服电动机。无槽电枢直流伺服电动机的结构如图 4-5 所示。电枢铁芯为光滑圆柱体，其上不开槽，电枢绕组直接排列在铁芯表面，再用环氧树脂把它与电枢铁芯粘成一个整体，定子磁极可以采用永久磁铁做成，也可以采用电磁式结构。这种电动机的转动惯量和电枢电感都比杯形或圆盘形电枢大，因而动态性能较差。

(2) 工作原理

直流伺服电动机工作原理与普通的直流电动机相同。直流伺服电动机有两个独立的电路：电枢回路和励磁回路。工作时一个用于接电源，另一个用于接收控制信号。如果磁极采

用永久磁铁，则它只有一个控制回路（电枢绕组）用以接收电气信号。因此直流伺服电动机的控制方式有两种：电枢控制和磁场控制。

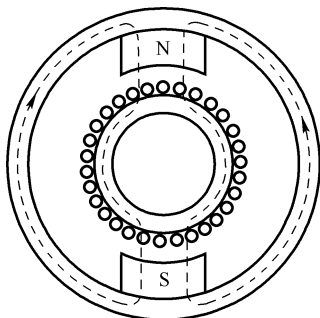


图 4-5 无槽电枢直流伺服电动机结构简图

所谓电枢控制是指励磁绕组加额定励磁电压 U_f ，电枢加控制电压 U ，当负载恒定时，改变电枢电压的大小和极性，同直流电动机一样，伺服电动机的转速和转向随之改变。磁场控制是指励磁绕组加控制电压，而电枢绕组加额定电压，同样，改变励磁电压的大小和极性，也可使电动机的转速和转向改变。由于电枢控制方式的特性好，电枢回路的电感小而响应迅速，因此自动控制系统中多采用电枢控制。电枢控制的接线图如图 4-6 所示。

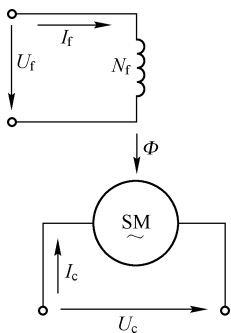


图 4-6 电枢控制接线图

图 4-7 (a) 所示的是直流伺服电动机的机械特性，所谓机械特性是指励磁电压 U_f 恒定，电枢绕组上的控制电压 U 为定值时，伺服电动机转速 n 与电磁转矩 T 之间的函数关系，即 $n=f(T)$ 。

从图 4-7 (a) 所示的机械特性可以看出：

- 其机械特性是线性的。
- 在控制电压 U_c 一定的情况下，转速越高，电磁转矩越小。
- 当控制电压为不同值时，机械特性为一组平行线。

图 4-7 (b) 所示的是直流伺服电动机的调节特性，所谓调节特性是指电磁转矩一定时，伺服电动机转速随控制系数 α 变化的关系，即与电枢的控制电压 U_c 的变化关系 $n=f(\alpha)$ 。

其调节特性也是线性的。在负载转矩一定时，控制电压 U_c 大，转速就高，转速与控制电压成正比，当 $U_c=0$ 时， $n=0$ ，电动机停转，无自转现象，所以直流伺服电动机的可控性

好。调节特性曲线与横坐标的交点，表示在一定负载转矩时电动机的起动电压。当负载转矩一定时，伺服电动机若想顺利起动，控制电压应大于相应的起动电压；反之，控制电压小于相对应的起动电压，由于电动机的电磁转矩小于负载转矩，伺服电动机就不能正常起动。所以，调节特性曲线的横坐标从原点到起动电压点的这一段范围，称为某一负载转矩时伺服电动机的失灵区。显然，失灵区的大小与负载转矩成正比。

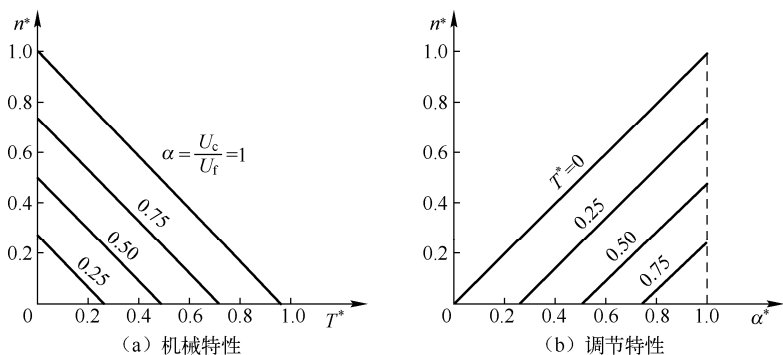


图 4-7 直流伺服电动机电枢控制的特性

注： α —信号系数， $a = \frac{U_c}{U_f}$ ； n^* —转速相对值， $n^* = \frac{n}{n_B}$ ， n_B 为转速基值； T^* —转矩相对值， $T^* = \frac{T}{T_B}$ ， T_B 为转矩基值。

由以上分析可知，电枢控制直流伺服电动机的机械特性和调节特性曲线都是一组平行的直线，这是直流伺服电动机突出的优点。但上述结论是在理想假设的条件下得到的，实际直流伺服电动机的特性曲线是一组接近直线的曲线。

直流伺服电动机的优点除了机械性能曲线是线性的之外，还包括速度调节范围宽而且平滑，起动转矩大，无自转现象，反应也相当灵敏，与同容量的交流伺服电动机相比，体积和重量可减小到原来的 $1/2 \sim 1/4$ 。其缺点是由于存在换向器和电刷的滑动接触，常因接触不良而影响运行的稳定性，电刷火花会产生干扰。

2. 交流伺服电动机

交流伺服电动机是指使用交流电源的伺服电动机。

(1) 结构和类型

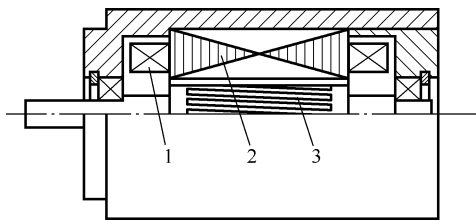
交流伺服电动机的外形如图 4-8 所示。



图 4-8 交流伺服电动机

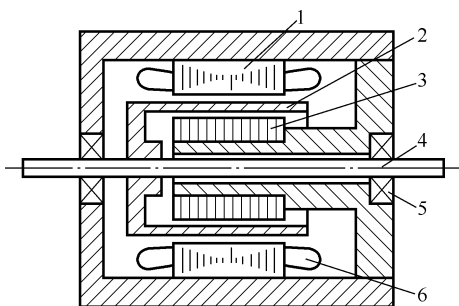
交流伺服电动机的结构主要由定子和转子构成。定子铁芯通常用硅钢片叠压而成，定子铁芯表面的槽内嵌有两相绕组，其中一相绕组是励磁绕组，另一相绕组是控制绕组，两相绕组在空间位置上互差 90° 电角度。从定子绕组看，交流伺服电动机实质上是一个“两相异步电动机”。

转子结构型式主要有两种：笼型转子和空心杯转子，如图 4-9、图 4-10 所示。



1—定子绕组；2—定子铁芯；3—鼠笼转子

图 4-9 笼型转子交流伺服电动机



1—外定子铁芯；2—杯形转子；3—内定子铁芯；4—转轴；5—轴承；6—定子绕组

图 4-10 空心杯转子交流伺服电动机

笼型转子，结构简单，其绕组由高电阻率的材料制成（如黄铜、青铜等），如图 4-11 所示，也可采用铸铝转子，绕组的电阻比一般的异步电动机大得多，因此起动电流小而起动转矩较大。为了使伺服电动机对输入信号有较高的灵敏度，必须尽量减小转子的转动惯量，所以转子通常做得细长。由于转子回路的电阻增大，使得交流伺服电动机的特性曲线变软，从而消除自转现象。

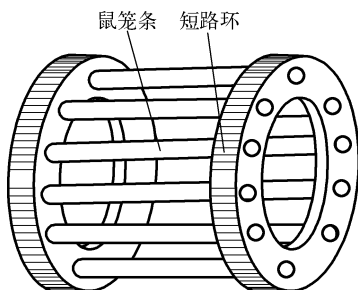


图 4-11 笼型转子绕组

近年来，为了进一步提高伺服电动机的快速反应性，采用如图 4-10 所示的空心杯型转子，其定子分内外两个部分，均用硅钢片叠成。外定子和一般感应电动机一样，并且在定子

子上装有空间上互差 90° 电角度的两相绕组，还有一个内定子，内定子是由硅钢片叠压而成的圆柱体，通常内定子上无绕组，只是代替笼型转子铁芯作为磁路的一部分，作用是减少主磁通磁路的磁阻。在内外定子之间有一个细长的、装在转轴上的空心杯形转子，杯形转子通常用非磁性材料青铜或铝合金制成，壁很薄，一般只有 $0.2\sim 0.8\text{mm}$ ，因而具有较大的转子电阻和很小的转动惯量。杯形转子可以在内外定子间的气隙中自由旋转，电动机依靠杯形转子内感应的涡流与气隙磁场作用而产生电磁转矩。可见，杯形转子交流伺服电动机的优点为转动惯量小，摩擦转矩小，因此快速响应好；另外，由于转子上无齿槽，所以运行平稳，无抖动，噪声小。其缺点是由于这种结构的电动机的气隙较大，因此空载励磁电流也较大，致使电动机的功率因数较低，效率也较低，它的体积和容量要比同容量的笼形伺服电动机大得多。目前我国生产的这种伺服电动机的型号为 SK，这种伺服电动机主要用于要求低噪声及低速平稳运行的某些系统中。

(2) 工作原理

图 4-12 是交流伺服电动机的原理图，图中当励磁绕组通入额定的励磁电压 U_f ，而控制绕组接入从伺服放大器输出的控制电压 U_c ，两绕组在空间上互差 90° 电角度，且励磁电压 U_f 和控制电压 U_c 频率相同。根据旋转磁场的理论，若控制绕组加上的控制电压 U_c 为 0V 时（即无控制电压），所产生的是脉振磁通势，所建立的是脉振磁场，电动机无起动转矩；在图 4-12 所示交流伺服电动机原理图中，当控制绕组加上的控制电压 $U_c \neq 0\text{V}$ ，两相绕组的电流在气隙中建立一个旋转磁场，如 i_c 与 i_f 相位差为 90° 时，且大小相等，则为圆形旋转磁场，如控制电流与励磁电流的相位不同时，建立起椭圆形旋转磁场，不管是圆形旋转磁场还是椭圆形旋转磁场，都将产生起动力矩，使电动机旋转起来，如图 4-12 所示。一旦控制电压 $U_c=0$ ，则仅有励磁电压作用，电动机工作在单相脉振磁场下，由单相异步电动机工作原理可知，伺服电动机仍会像一般单相异步电动机那样按原转动方向旋转，即出现失控现象，我们把这种因失控而自行旋转的现象称为自转。自转现象是不符合自动控制系统的要求的，必须避免。为了达到此目的，可以通过增加转子电阻的办法来消除“自转”。

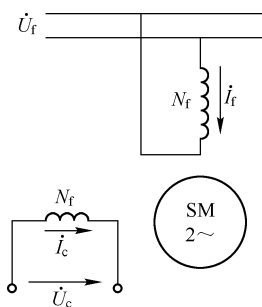


图 4-12 交流伺服电动机原理图

(3) 控制方式

对于两相运行的异步电动机，若在两相对称绕组中外施两相对称电压，便可得到圆形旋转磁场。反之，若两相电压幅值不同，或者相位差不是 90° 电角度，则得到的便是椭圆形的旋转磁场。

交流伺服电动机运行时，控制绕组所加的控制电压 U_c 是变化的。一般来说，得到的是椭圆形旋转磁场，并由此产生电磁转矩而使电动机旋转。若改变控制电压的幅值或改变控制

电压与励磁电压之间的相位角，都能使电动机气隙中旋转磁场的椭圆度发生变化，从而改变了电磁转矩的大小。所以当负载转矩一定时，通过调节控制电压的大小或相位可达到改变电动机转速的目的。因此，交流伺服电动机的控制方式有以下三种：

① 幅值控制。如图 4-13 所示，幅值控制通过改变控制电压 \dot{U}_c 的大小来控制电动机的转速，此时控制电压 \dot{U}_c 与励磁电压 \dot{U}_f 之间的相位差始终保持 90° 电角度。若控制绕组的额定电压 $\dot{U}_{cN} = \dot{U}_f$ ，那么控制信号的大小可表示 $U_c = \alpha_c U_{cN}$ ， α_c 称为有效信号系数，那么以 U_{cN} 为基值，即有效信号系数为

$$\alpha_c = \frac{U_c}{U_{cN}} \quad (4-1)$$

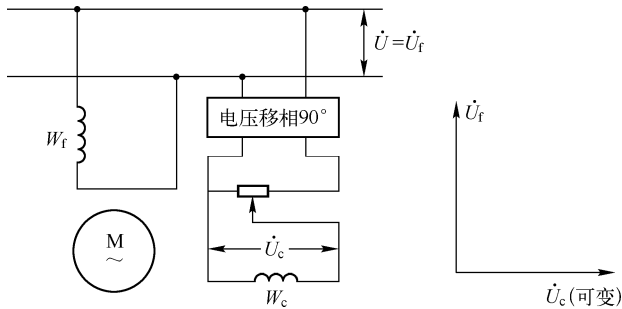


图 4-13 幅值控制接线图及向量图

U_c 为实际控制电压； U_{cN} 为额定控制电压，当控制电压 U_c 在 $0 \sim U_{cN}$ 之间变化时，有效信号系数 α_c 在 $0 \sim 1$ 变化。

因此当有效信号系数 $\alpha_c = 1$ 时，控制电压 \dot{U}_c 与 \dot{U}_f 的幅值相等，相位相差 90° 电角度，且两绕组空间相差 90° 电角度。此时所产生的气隙磁通势为圆形旋转磁通势，产生的电磁转矩最大；当 $\alpha_c < 1$ 时，控制电压小于励磁电压的幅值，所建立的气隙磁场为椭圆形旋转磁场，产生的电磁转矩减小。 α_c 越小，气隙磁场的椭圆度越大，产生的电磁转矩越小，电动机转速越慢，在 $\alpha_c = 0$ 时，控制信号消失，气隙磁场为脉振磁场，电动机不转或停转。

② 相位控制。相位控制是通过改变控制电压 \dot{U}_c 与励磁电压 \dot{U}_f 之间的相位差来实现对电动机转速和转向的控制的，而控制电压的幅值保持不变。

如图 4-14 所示，励磁绕组直接接到交流电源上，而控制绕组经移相器后接到同一交流电压上， \dot{U}_c 与 \dot{U}_f 的频率相同。而 \dot{U}_c 相位通过移相器可以改变，从而改变两者之间的相位差 β ， $\sin \beta$ 称为相位控制的信号系数。改变 \dot{U}_c 与 \dot{U}_f 相位差 β 的大小，可以改变电动机的转速，还可以改变电动机的转向：将交流伺服电动机的控制电压 \dot{U}_c 的相位改变 180° 电角度时（即极性对换），若原来的控制绕组内的电流 \dot{I}_c 超前于励磁电流 \dot{I}_f ，相位改变 180° 电角度后， \dot{I}_c 反而滞后于 \dot{I}_f ，从而电动机气隙磁场的旋转方向与原来相反，从而使交流伺服电动机反转。相位控制的机械特性和调节特性与幅值控制相似，也是非线性的。

当相位角为零时，即 U_c 与 U_f 同相位，相当于单相励磁，电动机气隙中产生脉振磁场，电动机停转。这种控制方法因调节相位比较复杂，一般很少被采用。

③ 幅值—相位控制（电容控制）。幅值—相位控制是指控制电压的幅值和相位同时改变来控制伺服电动机的转速。幅值—相位控制的接线图如图 4-15 所示。励磁绕组通过串联一

个移相电容后接到交流电源上，控制绕组通过分压电阻接在同一电源上。这样，励磁绕组的电压不再等于电源电压，也不与电源电压同相。当调节分压电阻改变控制电压 U_c 幅值时，由于转子绕组的耦合作用，励磁绕组的电流 I_f 发生变化，使励磁绕组的电压 U_f 和电容 C 上的电压也随之变化。这就是说，控制电压 U_c 和励磁电压 U_f 大小及它们之间的相位角也都随之改变，从而伺服电动机转速受控变化。所以若控制电压 $U_c=0$ ，电动机仅有励磁绕组单相通电，则产生制动电磁转矩，电动机停转。这是一种幅值和相位的复合控制方式。这种控制方式实质是利用串联电容来分相的。

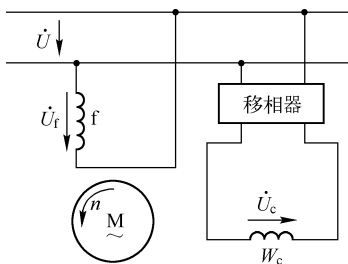


图 4-14 相位控制接线图

幅度—相位控制线路简单，不需要复杂的移相装置，只需电容进行分相，具有线路简单、成本低廉、输出功率较大的优点，因而成为使用最多的控制方式。

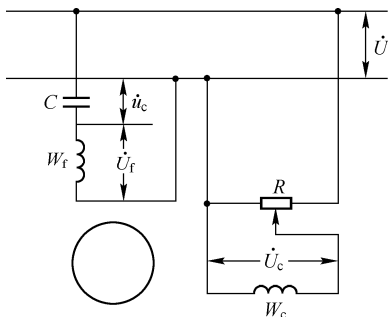


图 4-15 幅值—相位控制的接线图

三、任务实施

1. 用伏安法测直流伺服电机电枢的直流电阻

(1) 按图 4-16 所示接线，电阻 R 用屏上 4 个 900Ω 串联共 3600Ω 阻值。

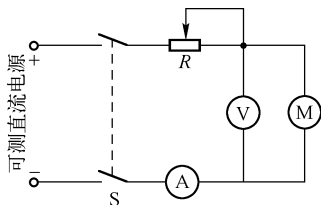


图 4-16 测电枢绕组直流电阻接线图

(5) 调节可调直流电源电压为 $U=160\text{V}$, 调节 R_{Ω} , 保持电动机励磁电流的额定电流 $I_f=I_{fN}$, 调节涡流测功机使 $I_a=1\text{A}$, 再调节涡流测功机给定调节旋钮卸载一直到空载, 其间记录 7~8 组数据于表 4-3 中。

表 4-3

 $U=160\text{V}$ $I_f=I_{fN}=\text{_____mA}$

$N/(\text{r}/\text{min})$								
I_a/A								
$T/\text{N}\cdot\text{m}$								

(6) 调节可调直流电源电压为 $U=110\text{V}$, 调节 R_{Ω} , 保持电动机励磁电流的额定电流 $I_f=I_{fN}$, 调节涡流测功机使 $I_a=0.8\text{A}$, 再调节涡流测功机一直到空载, 其间记录 7~8 组数据于表 4-4 中。

表 4-4

 $U=110\text{V}$ $I_f=I_{fN}=\text{_____mA}$

$N/(\text{r}/\text{min})$								
I_a/A								
$T/\text{N}\cdot\text{m}$								

3. 测定空载始动电压和检查空载转速的不稳定性

保持电动机输出转矩 $T=0$, 调节直流伺服电动机电枢电压, 起动电动机, 把电枢电压调至最小后, 直至 $n=0\text{r}/\text{min}$, 再慢慢增大电枢电压, 使电枢电压从零缓慢上升, 直至转速开始连续转动, 此时的电压即为空载始动电压。

(1) 正、反向各测量三次, 取其平均值作为该电动机始动电压, 将数据记录于表 4-5 中。

表 4-5

 $I_f=I_{fN}=\text{_____mA}$ $T=0$

次 数	1	2	3	平均
正向 U_a/V				
反向 U_a/V				

(2) 正(反)转空载转速的不对称性

正(反)转空载转速不对称性计算公式为

$$\text{正(反)转空载转速不对称性} = \frac{\text{正(反)向空载转速} - \text{平均转速}}{\text{平均转速}} \times 100\% \quad (4-3)$$

其中, $\text{平均转速} = \frac{\text{正向空载转速} - \text{反向空载转速}}{2}$

注: 正(反)转空载转速的不对称性应 $\leq 3\%$ 。

四、技能考核

1. 考核任务

每 3~4 位学生为一组, 在规定时间内完成以上实验, 计算相关参数。

2. 考核要求及评分标准

(1) 实验所用设备（见表 4-6）

表 4-6 实验所用设备

序号	型 号	名 称	数 量	备 注
1	HK01	电源控制屏	1 件	
2	HK02	实验桌	1 件	
3	HK03	涡流测功系统导轨	1 件	
4	DJ25	直流电动机	1 件	
9		记忆示波器	1 件	自 备

(2) 考核内容及评分标准（见表 4-7）

表 4-7 考核内容及评分标准

序号	考核内容	配分	评分标准
1	直流伺服电动机电枢的直流电阻	20	线路连接正确 5 分 实验操作正确 5 分 数据记录精确 5 分 正确分析数据得出结论 5 分
2	直流伺服电动机的机械特性实验	60	线路连接正确 10 分 实验操作正确 10 分 数据记录精确 10 分 正确分析数据得出结论 30 分
3	空载始动电压和检查空载转速的不稳定性实验	20	线路连接正确 5 分 实验操作正确 5 分 数据记录精确 5 分 正确分析数据得出结论 5 分

五、知识拓展

1. 产品型号

交流伺服电动机的型号由机座号、产品代号、频率代号及性能参数序号等几位组成，示例如图 4-18 所示。

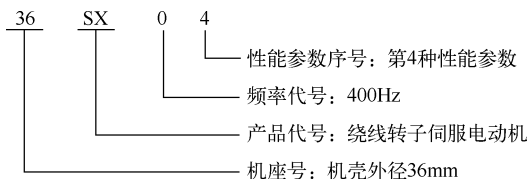


图 4-18 产品型号示例

交流伺服电动机产品代号说明如下。

SL：鼠笼型转子两相交流伺服电动机。

SK：空心杯转子两相交流伺服电动机。

SX：绕线型转子两相交流伺服电动机。

2. 主要性能指标

(1) 空载始动电压 U_{S0}

在额定励磁电压和空载的情况下，使转子在任意位置开始连续转动所需的最小控制电压

定义为空载始动电压 U_{S0} ，通过以额定控制电压的百分比来表示。 U_{S0} 越小，表示伺服电动机的灵敏度越高。一般 U_{S0} 要求不大于额定控制电压的 3%~4%；使用于精密仪器仪表中的两相伺服电动机，有时要求不大于额定控制电压的 1%。

(2) 机械特性的非线性度 k_m

在额定励磁电压下，任意控制电压时的实际机械特性与线性机械特性在电磁转矩 $T=T_d/2$ 时的转速偏差 Δn 与空载转速 n_0 (对称状态时) 之比的百分数，定义为机械特性非线性度，即

$$k_m = \frac{\Delta n}{n_0} \times 100\% \tag{4-4}$$

机械特性的非线性度如图 4-19 所示。

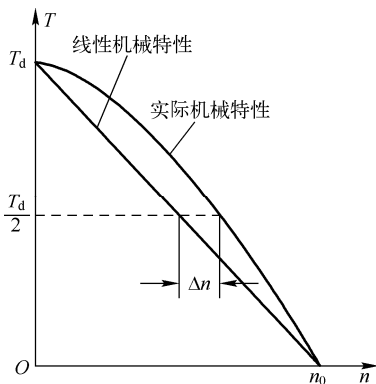


图 4-19 机械特性的非线性度

(3) 调节特性的非线性度 k_v

在额定励磁电压和空载情况下，当 $\alpha_c=0.7$ 时，实际调节特性与线性调节特性的转速偏差 Δn 与 $\alpha_c=1$ 时的空载转速 n_0 之比的百分数，定义为调节特性非线性度，即

$$k_v = \frac{\Delta n}{n_0} \times 100\% \tag{4-5}$$

调节特性的非线性度如图 4-20 所示。

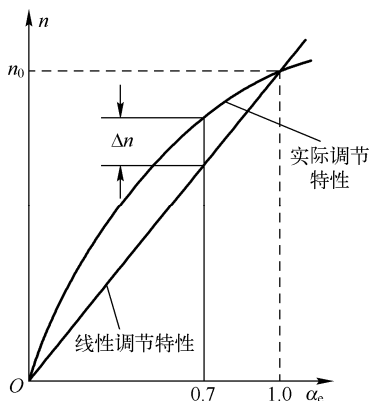


图 4-20 调节特性的非线性度

(4) 堵转特性的非线性度 k_d

在额定励磁电压下，实际堵转特性与线性堵转特性的最大转矩偏差与信号系数等于 1 时的堵转转矩之比值的百分数，定义为堵转特性非线性度，即

$$k_d = \frac{(\Delta T_{d0})_{\max}}{T_{d0}} \times 100\% \quad (4-6)$$

堵转特性的非线性度如图 4-21 所示。

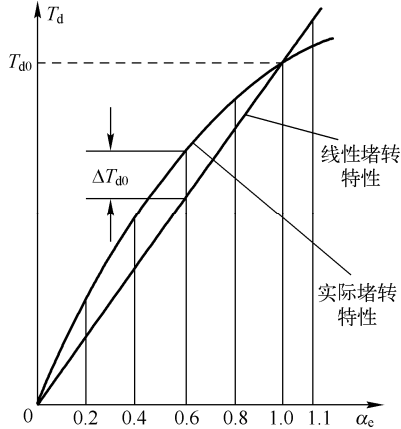


图 4-21 堵转特性的非线性度

以上这几种特性的非线性度越小，特性曲线越接近直线，系统的动态误差就越小，工作就越准确，一般要求 $k_m \leq 10\% \sim 20\%$ ， $k_v \leq 20\% \sim 25\%$ ， $k_d \leq \pm 5\%$ 。

(5) 机电时间常数 τ_j

当转子电阻相当大时，交流伺服电动机的机械特性接近于直线。如果把 $\alpha_e = 1$ 时的机械特性近似地用一条直线来代替，如图 4-22 中虚线所示，那么与这条线性机械特性相对应的机电时间常数就与直流伺服电动机机电时间常数表达式相同，即

$$\tau_j = \frac{J\omega_0}{T_{d0}} \quad (4-7)$$

式中， J ——转子的转动惯量。

ω_0 ——对称状态下，伺服电动机空载运行时的角速度。

T_{d0} ——对称状态下的堵转转矩。

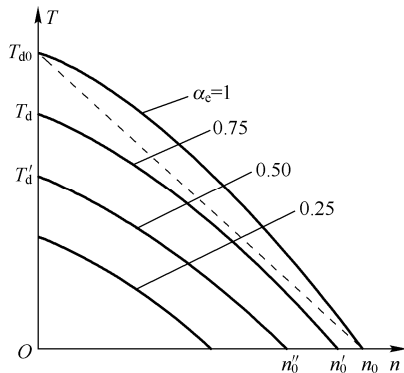


图 4-22 不同信号系数 α_e 时的机械特性

实际运行中, 伺服电动机经常运行在不对称状态下, 即有效信号系数不等于 1 的情况下, 由图 4-22 可知, 随着有效信号系数的减小, 机械特性上的空载转速与堵转转矩的比值随之增大, 即

$$\frac{n_0}{T_{d0}} < \frac{n'_0}{T'_d} < \frac{n''_0}{T''_d}$$

因而随着有效信号系数的减小, 相应的时间常数也随着增大, 即

$$\tau_j < \tau'_j < \tau''_j$$

使用中要根据实际情况, 考验有效信号系数的大致变化范围, 来选取机电时间常数。

由式(4-7)可知, 机电时间常数与转子惯量成正比, 与堵转转矩成反比。因此交流伺服电动机为了减小机电时间常数, 提高电动机的快速反应性, 往往把转子做得细长, 在电动机起动时, 控制励磁绕组所加电压与控制绕组所加电压成 90° 。

练习题

1. 比较交流、直流伺服电动机的优缺点。
2. 比较交流伺服电动机与单相异步电动机的异同。
3. 交流伺服电动机在结构上和一般交流异步电动机有何异同点? 分析交流伺服电动机在不同的信号系数(幅值控制)时, 电动机磁场的变化。
4. 什么是伺服电动机的自转现象? 如何消除?
5. 交流伺服电动机的控制方式有哪些? 分别调节哪个物理量来实现?
6. 什么是交流伺服电动机的机械特性?
7. 简述交流伺服电动机的磁场与单相异步电动机磁场的区别。

任务 2 步进电动机及其应用

步进电动机又称脉冲电动机, 是数字控制系统中的一种重要的执行元件。步进电动机是利用电磁铁原理将电脉冲信号转换成相应角位移的控制电动机。每输入一个脉冲, 电动机就转动一个角度或前进一步, 其输出的角位移或线位移与输入脉冲数成正比, 转速与脉冲频率成正比。在负载能力范围内, 这些关系将不受电源电压、负载、环境、温度等因素的影响, 还可在很宽的范围内实现调速, 快速起动、制动和反转。

随着数字技术和电子计算机的发展, 步进电动机的控制更加简便、灵活和智能化。现已广泛用于各种数控机床、绘图机、自动化仪表、计算机外设, 数、模变换等数字控制系统中作为元件。

一、任务目标

- (1) 掌握步进电动机的结构、类型。
- (2) 掌握步进电动机的工作原理。
- (3) 掌握步进电动机的各种应用, 能进行步进电动机的相关操作。

二、任务引导

1. 步进电动机的分类及结构

步进电动机的种类繁多，按运行方式可分为旋转型和直线型，通常使用的多为旋转型，旋转型步进电动机又有反应式（磁阻式）、永磁式和感应式三种。其中反应式步进电动机用得比较普遍，结构也较简单，所以下面以反应式步进电动机为代表介绍步进电动机的结构和工作原理。

反应式步进电动机又称为磁阻式步进电动机，其典型结构如图 4-23 所示。图 4-23 (a) 是一台四相电动机，定子铁芯由硅钢片叠成，定子上有 8 个磁极（大齿），每个磁极上又有许多小齿。四相反应式步进电动机共有 4 套定子控制绕组，绕在径向相对的两个磁极上，一套绕组为一相。转子也是由叠片铁芯构成的，沿圆周有很多小齿，转子上没有绕组。根据工作要求，定子磁极上小齿的齿距和转子上小齿的齿距必须相等，而且转子的齿数有一定的限制。图中转子齿数为 50 个，定子每个磁极上小齿数为 5 个。

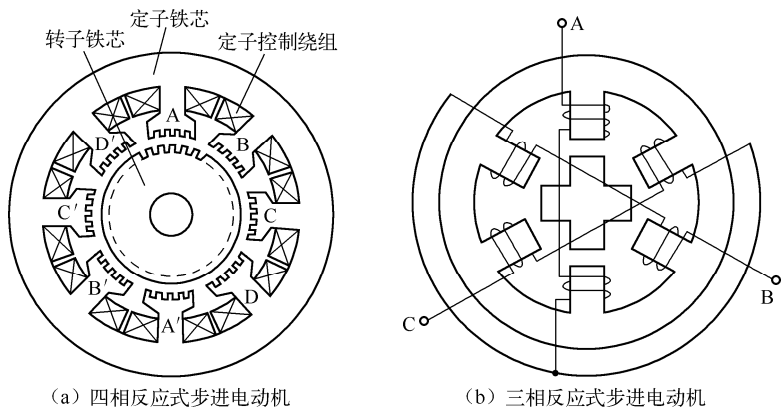


图 4-23 反应式步进电动机典型结构

2. 步进电动机的工作原理

反应式步进电动机的工作原理是利用凸极转子横轴磁阻与直轴磁阻之差所引起的反应转矩而转动的。为了便于说清问题，以最简单的三相反应式步进电动机为例来介绍。

反应式步进电动机的运行方式有：三相单三拍运行、三相单双六拍运行及双三拍运行。

(1) 三相单三拍通电方式的基本原理

设 A 相首先通电（B、C 两相不通电），产生 A-A' 轴线方向的磁通，并通过转子形成闭合回路。这时 A、A' 极就成为电磁铁的 N、S 极。在磁场的作用下，转子总是力图转到磁阻最小的位置，也就是要转到转子的齿对齐 A、A' 极的位置，如图 4-24 (a) 所示；接着 B 相通电（A、C 两相不通电），转子便顺时针方向转过 30° ，它的齿和 B、B' 极对齐，如图 4-24 (b) 所示。断开 B 相，接通 C 相，则转子再转过 30° ，使转子齿 1 和 3 的轴线与 C 极轴线对齐。如此按 A-B-C-A……顺序不断接通和断开控制绕组，转子就会一步一步地按顺时针方向连续转动，如图 4-24 所示。如上述电动机通电次序改为 A-C-B-A……则电动机转向相反，变为按逆时针方向转动。显然，电动机的转速取决于各控制绕组通电和断电的频率（即输入的脉冲频率），旋转方向取决于控制绕组轮流通电的顺序。

这种按 A-B-C-A……方式运行的称为三相单三拍运行。所谓“三相”，是指此步进电动机具有三相定子绕组；“单”是指每次只有一相绕组通电；“三拍”指三次换接为一个循环，第四次换接重复第一次的情况。

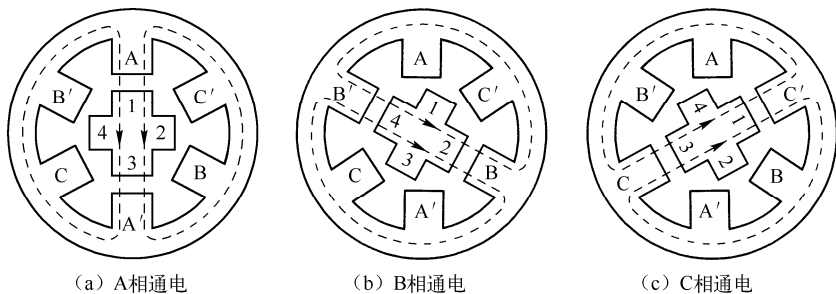


图 4-24 三相单三拍运行

(2) 三相单双六拍通电方式的基本原理

设 A 相首先通电，转子齿与定子 A、A' 对齐，如图 4-25 (a) 所示。然后在 A 相继续通电的情况下接通 B 相。这时定子 B、B' 极对转子齿 2、4 产生磁拉力，使转子按顺时针方向转动，但是 A、A' 极继续拉住转子齿 1、3，因此，转子转到两个磁拉力平衡位置为止。这时转子的位置如图 4-25 (b) 所示，即转子从图 4-25 (a) 所示位置顺时针转过了 15°。接着 A 相断电，B 相继续通电。这时转子齿 2、4 和定子 B、B' 极对齐，如图 4-25 (c) 所示，转子从图 4-25 所示 (c) 的位置又转过了 15°，其位置如图 4-25 (d) 所示。这样，按照通电方式为 A-AB-B-BC-C-CA-A……的顺序轮流通电，则转子便按顺时针方向一步一步地转动，步距角为 15°。电流换接 6 次，磁场旋转一周，转子前进了一个齿距角。这种通电方式称为单双六拍方式。

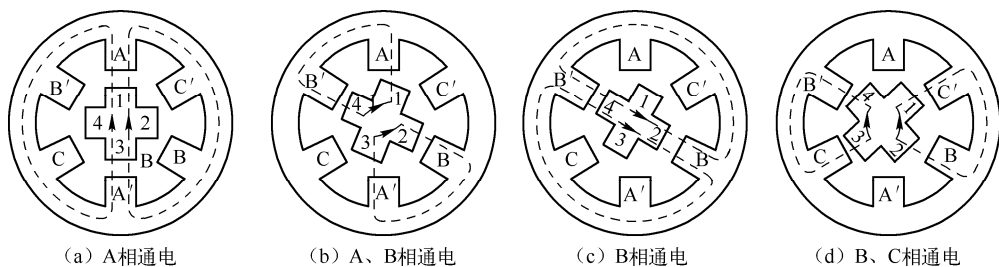


图 4-25 三相单三拍运行

(3) 双三拍通电方式的基本原理

如果每次都是两相通电，即按 AB-BC-CA-AB……的顺序通电，则称为双三拍方式，如图 4-25 (b)、图 4-25 (d) 所示，步距角也是 30°。因此，采用单三拍和双三拍方式时转子每走三步前进一个齿距角，每走一步前进三分之一齿距角；采用六拍方式时，转子每走 6 步前进一个齿距角，每走一步前进六分之一齿距角。因此步距角 θ 可用下式计算：

$$\theta = 360^\circ / Z_R \times m \times C \tag{4-8}$$

式中， Z_R 是转子齿数； m 是相数； C 是通电系数，常用三相单三拍通电方式时，系数为 1，采用三相单双六拍通电方式时，系数为 2。

为了提高工作精度，就要求步距角很小。由式 (4-8) 可见，要减小步距角可以增加转

子的齿数，如图 4-23 (a) 所示。也可以增加拍数、相数，但相数越多，电源及电动机的结构也越复杂。反应式步进电动机一般做到六相，个别的也有八相或更多相数。对同一相数既可以采用单拍制，也可采用单双六拍制。采用单双六拍制时步距角减小一半。所以一台步进电动机可有两个步距角，如 $1.5^\circ / 0.75^\circ$ 、 $3^\circ / 1.5^\circ$ 等。

反应式步进电动机可以按特定指令进行角度控制，也可以进行速度控制。角度控制时，每输入一个脉冲，定子绕组就换接一次，输出轴就转过一个角度，其步数与脉冲数一致，输出轴转动的角位移量与输入脉冲数成正比。速度控制时，送入步进电动机的是连续脉冲，各相绕组不断地轮流通电，步进电动机连续运转，它的转速与脉冲频率成正比，如式 (4-9) 所示

$$n = \frac{60f}{Z_R N} \quad (\text{r/min}) \quad (4-9)$$

式中， f 为控制脉冲的频率，即每秒输入的脉冲数。

三、任务实施

此任务按图 4-26 所示接线。

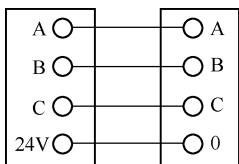


图 4-26 步进电动机实验接线图

1. 单步运行状态

接通电源，将控制系统设置于单步运行状态或复位后，按“执行”键，步进电动机走一步距角，绕组相应的发光管发亮，再不断地按“执行”键，步进电动机转子也不断作步进运动。改变电动机的转向，电动机作反向步进运动。

2. 角位移和脉冲数的关系

控制系统接通电源，设置好预置步数，按“执行”键，电动机运转，观察并记录电动机偏转角度，再重置另一数值，按“执行”键，观察并记录电动机偏转角度于表 4-8、表 4-9 中，并利用公式计算电动机偏转角度，判断其与实际值是否一致。

表 4-8 电动机偏转角度 (1)

步数=_____步

序号	实际电动机偏转角度	理论电动机偏转角度

表 4-9 电动机偏转角度 (2)

步数=_____步

序号	实际电动机偏转角度	理论电动机偏转角度

3. 定子绕组中电流和频率的关系

在步进电动机电源的输出端串接一只直流电流表（注意+、-端）使步进电动机连续运转，由低到高逐渐改变步进电动机的频率，读取并记录 5~6 组电流表的平均值、频率值于表 4-10 中，观察示波器波形，并作好记录。

表 4-10 定子绕组中电流和频率的关系

序号								
f/Hz								
I/A								

4. 平均转速和脉冲频率的关系

接通电源，将电动机设为三相单三拍连续运转的状态下。先设定步进电动机运行的步数 N ，最好为 120 的整数倍。利用控制屏上定时兼报警记录仪记录时间 t （单位：分钟），具体的操作方法为：复位键时钟按钮弹出，开始计时，复位键时钟按钮被按下，停止计时。改变速度调节旋钮，测量频率 f 与对应的转速 n ，即 $n=f(f)$ 。记录 5~6 组数据于表 4-11 中。

表 4-11 平均转速和脉冲频率的关系

序号								
f/Hz								
$n/(\text{r}/\text{min})$								

四、技能考核

1. 考核任务

每 3~4 位学生为一组，完成以上实验，计算相关参数。

2. 考核要求及评分标准

(1) 实验所用设备（见表 4-12）

表 4-12 实验所用设备

序号	型号	名称	数量	备注
1	HK01	电源控制屏	1 件	
2	HK02	实验桌	1 件	
3	HK03	涡流测功系统导轨	1 件	
4	HK54	步进电动机控制箱	1 件	
5	HK54	步进电动机	1 件	
6		弹性联轴器、堵转手柄及圆盘	1 套	
7		双踪示波器	1 台	自备

(2) 考核内容及评分标准（见表 4-13）

表 4-13 考核内容及评分标准

序号	考核内容	配分	评分标准
1	单步运行状态 (含正、反向操作)	20	线路连接正确 5 分 试验操作正确 5 分 正确分析现象得出结论 10 分
2	角位移和脉冲数的关系	35	线路连接正确 5 分 试验操作正确 10 分 数据记录精确 10 分 正确分析数据得出结论 10 分
3	定子绕组中电流和频率的关系	25	线路连接正确 5 分 试验操作正确 5 分 数据记录精确 5 分 正确分析数据得出结论 10 分
4	平均转速和脉冲频率的关系	20	线路连接正确 5 分 试验操作正确 5 分 数据记录精确 5 分 正确分析数据得出结论 5 分

五、知识拓展

近年来, 数字技术和电子计算机的迅速发展为步进电动机的应用开辟了广阔的前景。目前, 我国已较多地将步进电动机用于机械加工的数控机床中, 在绘图机、轧钢机的自动控制以及自动记录仪表和数模变换等方面也得到很多应用。

下面以数控机床中的步进电动机为例, 介绍步进电动机的应用。

在现代工业中, 如果要求加工的机械零件形状复杂, 数量多, 精度高, 利用人工操作不仅劳动强度大, 生产效率低, 而且难以达到所要求的精度。例如, 图 4-27 所示的是铣床加工复杂零件劈锥, 形状比较复杂, 精度要求比较高, 用普通机床或仿形机床加工都是有困难的; 通常用坐标镗床一点一点地加工, 然后进行人工修整, 这样耗费的时间就太长了。

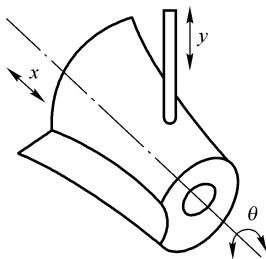


图 4-27 铣床加工复杂零件劈锥

为了缩短生产周期, 提高生产效率, 可用程序控制铣床进行加工。铣床需要做以下 3 种动作:

- ① 铣刀作径向移动 (Y 方向)。
- ② 工件以轴为中心作旋转 (θ 方向)。
- ③ 工件沿轴向移动 (X 方向)。

为了达到精度要求, 对这 3 种动作必须非常准确地进行控制。数字程序控制铣床就是可以准确地进行自动控制的机床。在数控铣床中, 上面 3 个方向的动作分别由 3 个步进电动机即 Y 方向步进电动机, X 方向步进电动机, θ 方向步进电动机来拖动, 每一个方向步进电动机都由电脉冲控制。加工零件时, 根据零件加工的要求和加工的工序编制计算机程序语