

基于旋转磁场的控制元件概述

3.1 步进电动机

3.1.1 步进电动机的工作原理

1. 步进电动机基本原理

步进电动机是一种将脉冲信号变换成相应的角位移(或线位移)的电磁装置,是一种特殊的电动机。一般电动机都是连续转动的,而步进电动机则有定位和运转两种基本状态,当有脉冲输入时步进电动机一步一步地转动,每给它一个脉冲信号,它就转过一定的角度。步进电动机的角位移量和输入脉冲的个数严格成正比,在时间上与输入脉冲同步,因此只要控制输入脉冲的数量、频率及电动机绕组通电的相序,便可获得所需的转角、转速及转动方向。一个步进电机系统的组成如图 3.1 所示。

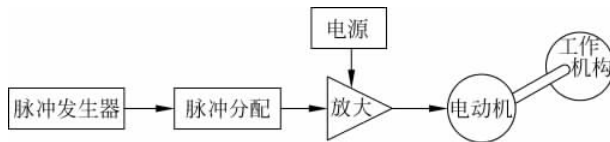


图 3.1 步进电动机系统原理图

根据步进电动机的电流,需要配用大于或等于此电流的驱动器。如果需要低振动或高精度时,可配用细分型驱动器。对于大转矩电动机,尽可能用高电压型驱动器,以获得良好的高速性能。一般由步进电动机驱动器不合理引起的故障现象包括:不工作,丢步(也可能电机力不够),时走时停,大小步,振动大,抖动明显,乱转等。

步进电动机还涉及控制器的设计,因为步进电动机的驱动电路根据控制信号工作,控制信号由单片机(或其他如 PLC(可编程控制器),FPGA(可编程逻辑器件)等)产生。控

制器基本原理作用如下:

(1) 控制换相顺序。通电换相这一过程称为脉冲分配。例如,三相步进电动机的三拍工作方式,其各相通电顺序为 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$,通电控制脉冲必须严格按照这一顺序分别控制 A,B,C,D 相的通断。

(2) 控制步进电动机的转向。如果给定工作方式正序换相通电,步进电动机正转,如果按反序通电换相,则电动机就反转。

(3) 控制步进电动机的速度。如果给步进电动机发一个控制脉冲,它就转一步,再发一个脉冲,它会再转一步。两个脉冲的间隔越短,步进电动机就转得越快。调整单片机发出的脉冲频率,就可以对步进电动机进行调速。

2. 步进电动机的分类

1) 步进电动机按其输出转矩划分

可以分为快速步进电动机和功率步进电动机。快速步进电动机连续工作频率高而输出转矩较小,一般在 $N \cdot \text{cm}$ 级,可以作为控制小型精密机床的工作台(如线切割机床),也可以和液压转矩放大器组成电液脉冲马达去驱动数控机床的工作台,而功率步进电动机的输出转矩就是比较大的 $N \cdot \text{m}$ 级,可以直接去驱动机床的移动部件。

2) 步进电动机按其励磁相数划分

可以分为三相、四相、五相、六相甚至八相。一般来说,随着相数的增加,在相同频率的情况下,每相导通电流的时间增加,各相平均电流会高些,从而使电动机的转速、转矩特性会好些,步距角也小些。但是随着相数的增加,电动机的尺寸就增加,结构也会变得复杂,目前多用 3~6 相的步进电动机。

3) 步进电动机按其工作原理划分

主要有反应式步进电动机(VR)、永磁式步进电动机(PM)、混合式步进电动机(HB)。永磁式步进电动机一般为两相,转矩和体积较小,步进角一般为 7.5° 或 15° 。

反应式步进电动机一般为三相,可实现大转矩输出,步进角一般为 1.5° ,但噪声和振动都很大。反应式步进电动机的转子磁路由软磁材料制成,定子上有多相励磁绕组,利用磁导的变化产生转矩。

混合式步进电动机是指混合了永磁式和反应式的优点。它又分为两相和五相:两相步进角一般为 1.8° 而五相步进角一般为 0.72° ,这种步进电动机的应用最为广泛。目前,在国际上,混合式步进电动机也是最有发展前景的步进电动机,其发展趋势可以总结如下:

(1) 继续沿着小型化的方向发展。随着电动机本身应用领域的拓宽以及各类整机的不断小型化,要求与之配套的电动机也必须越来越小。瑞士 ESCAP 公司最近研制出外径仅 10mm 的步进电动机。

(2) 改圆形电动机为方形电动机。由于电动机采用方形结构,使得转子有可能设计得比圆形大,因而其力矩体积比将大为提高。同样机座号的电动机,方形的力矩比圆形的将提高 30%~40%。

(3) 对电动机进行综合设计,即把转子位置传感器、减速齿轮等和电动机本体综合设计在一起,这样使其能方便地组成一个闭环系统,因而具有更加优越的控制性能。

(4) 向五相和三相电动机方向发展。目前广泛应用的二相和四相电动机,其振动和噪声较大,而五相和三相电动机具有优势。而就这两种电动机而言,五相电动机的驱动电路比三相电动机复杂,因此三相电动机系统的性价比要比五相电动机更好一些。

3.1.2 步进电动机的运行特性

反应式步进电动机是由通电相控制绕组使该相磁极建立磁场,由于转子齿和槽的磁阻(磁导)的差异,当定子齿轴线与转子齿轴线不一致时,磁极对转子齿将产生吸力,进而形成电磁转矩——反应转矩(磁阻转矩),并最终使转子齿轴线转到与定子磁极齿轴线一致的位置,使磁路的磁导最大而磁阻最小。

控制方式:如图 3.2 所示,按照一定的顺序给各项控制绕组轮流通电,将在定转子气隙空间形成步进式磁极轴旋转,转子在反应式电磁转矩的作用下,随之做步进式转动。



图 3.2 步进电动机工作原理

A 相通电,转子齿 1 和转子齿 3 的轴线与定子 A 磁极轴线对齐;断开 A 相接通 B 相:磁场轴线转动,磁阻转矩将使转子按逆时针方向转过 30° ,转子齿 2 和转子齿 4 的轴线与定子 B 极对齐;断开 B 相接通 C 相,转子再转过 30° ,转子齿 1 和转子齿 3 的轴线与 C 极轴线对齐。通电顺序为 A→B→C→A,转子一步步逆时针旋转,通电顺序为 A→C→B→A,转子一步步顺时针旋转。

步进电动机的转动方向取决于控制绕组轮流通电的顺序,而转动速度取决于控制绕组通断电的频率(输入脉冲频率)。

当通电状态完成一个周期时,转子转过一个转子齿距角。每一次通电状态的换接为

拍；完成一个通电状态循环所需要换接的控制绕组相数或通电状态次数称为拍数，记为 N 。步进电动机每改变一次通电状态，转子转过相应的一个角位移，这个角位移称为步距角，即转子每一拍所转过的角度，记为 θ_b 。实际的步进电动机转子齿数很多，定子磁极上带有小齿，这种步进电动机每一步转过的角度很小。

一般步进电动机可按两种基本方式运行：其一，运行拍数等于相数，称为单拍制 ($N=m$)；其二，运行拍数等于相数的 2 倍 ($N=2m$)，称为双拍制。采用双拍制时步距角为单拍制时的一半。

步进电动机既可以做单步运行(按控制指令转过一定的角度)，也可以连续不断地旋转，进行角速度控制。若定义运行拍数为 N ，转子齿数为 Z_r ，当外加一个控制脉冲时，即每一拍，转子将转过一个步距角，相当于整个圆周角的 $1/NZ_r$ ，也就是 $1/NZ_r$ 转。如果控制脉冲的频率为 f ，转子的转速将是 $n=60f/NZ_r$ 。可见，步进电动机的转速将由控制脉冲频率 f 、运行拍数 N 和转子齿数 Z_r 决定。改变脉冲频率可对步进电动机实现调速、快速启动、反转和制动。

3.1.3 步进电动机的技术参数

1. 重要参数

1) 相数

产生不同对极 N、S 磁场的激磁线圈对数，是指电机内部的线圈组数，目前常用的有二相、三相、四相、五相步进电动机。电动机相数不同，其步距角也不同，一般二相电机的步距角为 $0.9^\circ/1.8^\circ$ 、三相的为 $0.75^\circ/1.5^\circ$ 、五相的为 $0.36^\circ/0.72^\circ$ 。在没有细分驱动器时，用户主要靠选择不同相数的步进电动机来满足自己步距角的要求。如果使用细分驱动器，则“相数”将变得没有意义，用户只需在驱动器上改变细分数，就可以改变步距角。目前应用最广泛的是二相和四相，四相电机一般用作二相，五相的成本较高。

2) 拍数

完成一个磁场周期性变化所需的脉冲数或导电状态用 n 表示，也可用 n 来指电动机转过一个齿距角所需脉冲数，以四相电动机为例，四相四拍运行方式即 $AB \rightarrow BC \rightarrow CD \rightarrow DA \rightarrow AB$ ，四相八拍运行方式即 $A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C \rightarrow CD \rightarrow D \rightarrow DA \rightarrow A$ 。

3) 步距角

步距角为对应一个脉冲信号，电动机转子转过的角位移。步距角用 θ 表示， $\theta=360^\circ/(\text{转子齿数} \times \text{运行拍数})$ 。以常规二相、四相，转子齿为 50 齿电动机为例，四拍运行时步距角为 $\theta=360^\circ/(50 \times 4)=1.8^\circ$ (俗称整步)，八拍运行时步距角为 $\theta=360^\circ/(50 \times 8)=0.9^\circ$ (俗称半步)。这个步距角可以称为“电机固有步距角”，它不一定是电动机实际工作时的

真正步距角,真正的步距角和驱动器有关。

4) 定位转矩

定位转矩(DETENT TORQUE)为步进电机在不通电的状态下,电机转子自身的锁定力矩(由磁场齿形的谐波以及机械误差造成的),DETENT TORQUE 在国内没有统一的翻译方式,容易使大家产生误解;由于反应式步进电机的转子不是永磁材料,所以它没有 DETENT TORQUE。

5) 最大静转矩

最大静转矩也叫保持转矩(HOLDING TORQUE),电机在额定静态电的作用下(通电),不做旋转运动时,电机转轴的锁定力矩,即定子锁住转子的力矩。此力矩是衡量电机体积(几何尺寸)的标准,与驱动电压及驱动电源等无关。通常步进电机在低速时的力矩接近保持转矩。由于步进电机的输出力矩随速度的增大而不断衰减,输出功率也随速度的增大而变化,所以保持转矩就成为衡量步进电机最重要的参数之一。例如,当人们说 $2\text{N} \cdot \text{m}$ 的步进电机,在没有特殊说明的情况下是指保持转矩为 $2\text{N} \cdot \text{m}$ 的步进电机。

虽然静转矩与电磁激磁安匝数成正比,与定齿转子间的气隙有关,但过分采用减小气隙、增加激磁安匝的方法来提高静力矩是不可取的,因为这样会造成电机的发热及机械噪音。

静力矩选择的依据是电机工作的负载,而负载可分为惯性负载和摩擦负载两种。单一的惯性负载和单一的摩擦负载是不存在的。直接启动时(一般由低速)两种负载均要考虑,加速启动时主要考虑惯性负载,恒速运行时只需要考虑摩擦负载。一般情况下,静力矩应为摩擦负载的 2.3 倍为好,静力矩一旦选定,电机的机座及长度便能确定下来(几何尺寸)。

2. 步进电动机动态指标

1) 步距角精度

步距角精度为步进电机每转过一个步距角的实际值与理论值的误差。用百分比表示:步距角精度 = 误差 / 步距角 $\times 100\%$ 。不同运行拍数其值不同,四拍运行时应在 5% 之内,八拍运行时应在 15% 以内。一般步进电机的精度为步进角的 $3\% \sim 5\%$,且不累积。

2) 失步

失步是指电机运转时运转的步数,不等于理论上的步数。步进电动机正常工作时,每接收一个控制脉冲就移动一个步距角,即前进一步。若连续地输入控制脉冲,电动机就相应地连续转动。步进电动机失步包括丢步和越步两种情况。丢步时,转子前进的步数小于脉冲数;越步时,转子前进的步数多于脉冲数。一次丢步和越步的步距数等于运行拍数的整数倍。丢步严重时,将使转子停留在一个位置上或围绕一个位置振动。

目前,解决步进电动机失步的方法有:适当减小步进电动机的驱动电流;采用细分驱动方法;采用阻尼方法,包括机械阻尼法。以上方法都能有效消除电动机振荡,避免失步现象发生。

3) 失调角

转子齿轴线偏移定子齿轴线的角度称为失调角,电机运转必存在失调角,由失调角产生的误差,采用细分驱动是不能解决的。

4) 最大空载启动频率

最大空载启动频率是指电机在某种驱动形式、电压及额定电流下,在不加负载的情况下,能够直接启动的最大频率。

5) 最大空载运行频率

最大空载运行频率是指电机在某种驱动形式、电压及额定电流下,电机不带负载的最高转速频率。

6) 运行矩频特性

电机在某种测试条件下测得运行中输出力矩与频率关系的曲线称为运行矩频特性,这是电机诸多动态曲线中最重要的,也是电机选择的根本依据,速度越大,其输出力矩越小,当步进电机转动时,电机各相绕组的电感将形成一个反向电动势;频率越高,反向电动势越大。在它的作用下,电机随频率(或速度)的增大而相电流减小,从而导致力矩下降。

7) 电机的共振点

步进电机均有固定的共振区域。二相、四相感应子式步进电机的共振区一般在 $180\sim 250\text{pps}$ (每秒脉冲数)之间(步距角为 1.8°)或在 400pps 左右(步距角为 0.9°),电机驱动电压越高,电机电流越大,负载越轻,电机体积越小,则共振区向上偏移;反之亦然,为使电机输出电矩大、不失步和整个系统的噪音降低,一般工作点均应偏移共振区较多。

8) 电机正反转控制

当电机绕组通电时序为 $AB\rightarrow BC\rightarrow CD\rightarrow DA$ 为正转,通电时序为 $DA\rightarrow CA\rightarrow BC\rightarrow AB$ 时为反转。最简单的反向是将 $A+$, A 和 $B+$, B 对调即可。

3.1.4 步进电机的选用

1. 步进电机的选择

一般是根据负载选电机,主要是参考步进电机的力矩,此外还涉及电机的转速和额定电流、传动机构、启动的转速和正常运行的转速,另外还有电机的精度。具体如下:

(1) 最大静转矩。首先要计算负载大小(负载有摩擦负载和惯性负载),再确定所选

的电机的最大静转矩,由于步进电机工作时候的力矩要小于最大静转矩,所以选型时往往要留有余量,在安装尺寸受限制而步进电机本身力矩又达不到要求的情况下可考虑选择加减速箱。

(2) 转速。步进电机一般工作中低速范围。每分钟转速不超过 1000 转, (0.9° 时 6666pps), 最好在 1000~3000pps(0.9°) 间使用, 可通过减速装置使其在此范围内工作, 此时电机工作效率高、噪音低。

(3) 引线数。引线数就是电机接线引脚的数目。二相双极型电机是 4 根引线, 二相单极型电机是 5 线或者 6 线的。

(4) 电感。电感的参数一般不是电机的重点参数,但是它和电机有着非常密切的关系,电感通电产生电磁感应才有电磁力。通常电感和驱动电路设计上有关系。

(5) 相电流。选型原则一般遵循先电机再驱动器的原则,这样的情况下,相电流选择范围较大,但相电流影响着电机的性能。电流大,力矩会增大,但电机发热也会增大。如果驱动器先做好了,就得使所选的电机的相电流能与已知驱动器匹配。

(6) 精度。一般是不会有这个问题的,但特殊的用户会用到,比如做仪表的会要求走 1° , 或者对精度要求很高的系统。由于细分驱动器和减速箱的存在,这个问题便很容易得到解决。

(7) 成本。就步进电机而言,例如都是 1.8° 的混合式步进电机,但有的电机的精度不高,或者运行噪声大,振动大,发热大,易失步、越步,寿命短等,所以选择电机时不能选择成本太低的电机。

(8) 应遵循先选电机后选驱动的原则。

2. 步进电机的使用

(1) 步进电机最好不使用整步状态,整步状态时振动大。

(2) 由于历史原因,只有标称为 12V 电压的电机使用 12V 外,其他电机的电压值不是驱动电压值,可根据驱动器选择驱动电压。当然 12V 的电压除 12V 恒压驱动外也可以采用其他驱动电源,不过要考虑温升。

(3) 转动惯量大的负载应选择大机座号的电机。

(4) 电机在较高速或大惯量负载时,一般不在工作速度处启动,而是采用逐渐升频提速,一方面电机不失步,另一方面可以在减少噪音的同时提高停止的定位精度。

(5) 高精度时,应通过机械减速、提高电机速度,或采用高细分数的驱动器来解决,也可以采用五相电机,不过其整个系统的价格较贵,生产厂家少。

(6) 电机不应在振动区内工作,如若必须可通过改变电压、电流或加一些阻尼的方法来解决。

(7) 电机在 600pps(0.9°) 以下工作,应采用小电流、大电感、低电压来驱动。

3.2 交流伺服电机

3.2.1 交流伺服电机的分类

1. 按转动速度分

交流电机按转动速度是否恒定有异步电机和同步电机之分。

异步电动机是基于气隙旋转磁场与转子绕组感应电流相互作用产生电磁转矩而实现能量转换的一种交流电机。异步电动机具有结构简单,制造、使用和维护方便,运行可靠以及质量较小,成本较低等优点。并且,异步电机有较高的运行效率和较好的工作特性,从空载到满载范围内接近恒速运行,能满足大多数工农业生产机械的传动要求。

同步电动机就是在交流电的驱动下,转子与定子的旋转磁场同步运行的电动机。同步电动机的定子和异步电动机的完全一样;但其转子有“凸极式”和“隐极式”两种。凸极式转子的同步电动机结构简单、制造方便,但是机械强度较低,适用于低速运行场合;隐极式同步电动机制造工艺复杂,但机械强度高,适用于高速运行场合。同步电动机的工作特性与所有的电动机一样,同步电动机也具有“可逆行”,即它能按发电机方式运行,也可以按电动机方式运行。

2. 按转子结构分

交流电机按转子结构有鼠笼式和绕线式之分。

鼠笼式转子用铜条安装在转子铁芯槽内,两端用端环焊接,形状像鼠笼,中小型转子一般采用铸铝方式。鼠笼式电机的三相绕组一般来说功率大于 3kW 的都接成角形,而电机功率小于 3kW 的一般都接成星形。鼠笼式电机结构简单、价格低,控制电机运行也相对简单,所以得到了广泛采用。

绕线式转子的绕组和定子绕组相似,三相绕组连接成星形,三根端线连接到装在转轴上的三个铜滑环上,通过一组电刷与外电路相连接。绕线式电动机结构复杂,价格高,控制电机运行相对复杂一些,其应用相对要少一些。但绕线式电动机因为其启动、运行的力矩较大,一般用在重载负荷中。

此外,交流电机按调速方式有变极和固定极数之分;交流电机按用途分有拖动用的电动机以外还有力矩电动机、伺服电动机、测速电动机等;交流电机按电源分有三相电动机,还有单相电动机等。

在微型控制电机中,交流电机主要包括交流伺服电动机、交流测速发电机,前者将电

能转换为机械能,后者将机械能转换为电能,两者在结构上相似,被广泛应用于自动控制系统中。本节主要介绍这两类交流电机。

3.2.2 交流伺服电动机

1. 基本结构

交流伺服电动机是两相异步电动机,要由定子和转子构成。

定子结构与普通异步电动机很相似。定子上绕有两个形式相同并在空间互差 90° 角度的绕组,一个为励磁绕组,另一个为控制绕组,工作时励磁绕组与交流励磁电源 $\dot{U}_f$ 相连,控制绕组加控制信号电压 $\dot{U}_c$,如图 3.3 所示。

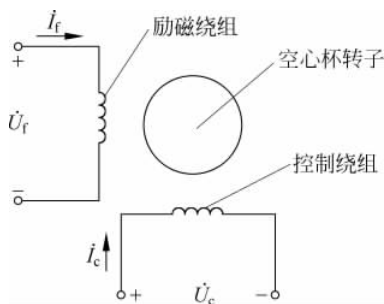


图 3.3 交流伺服电动机原理图

转子的形式有两种,一种是笼式转子,其绕组由高电阻率的材料制成,绕组的电阻较大,笼式转子结构简单,但其转动惯量较大,结构见图 3.4(a)。另一种是空心杯转子,它由非磁性材料制成杯形,可看成是导条数很多的笼式转子,其杯壁很薄,因而其电阻值较大,见图 3.4(b)。转子在内外定子之间的气隙中旋转,因气隙较大而需要较大的励磁电流。空心杯形转子的转动惯量较小,响应迅速。

2. 基本工作原理

圆形磁场产生条件

$$\begin{aligned} \dot{I}_k &= \pm \dot{I}_j, \dot{I}_k = \pm k_z \dot{I}_j \\ \begin{cases} B_k = B_{km} \sin \omega t \\ B_j = B_{jm} \sin(\omega t - 90^\circ) \\ B_{km} = B_{jm} \end{cases} \\ T_{em} &= f(s) \end{aligned}$$

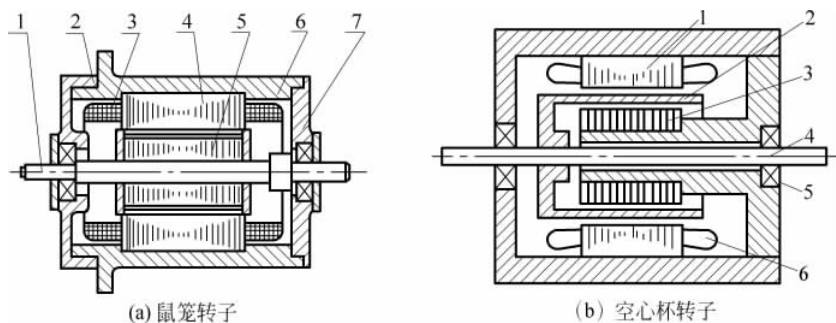


图 3.4 伺服电动机转子结构图

(a) 1—轴；2—前端盖；3—定子绕组；4—定子铁芯；5—转子铁芯；6—外壳；7—后端盖

(b) 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

椭圆形磁场的磁场分解

$$\begin{cases} B_+ = \frac{1+\alpha}{2} B_{jm} \\ B_- = \frac{1-\alpha}{2} B_{jm} \end{cases}$$

当在交流伺服电动机空间互隔 90° 电角度的两相绕组上接上两个在时间上相差 90° 电角度的电源时(见图 3.3),就会在气隙中产生旋转磁场。若电机绕组的极对数是 p ,则旋转磁场的转速 n_s 为

$$n_s = \frac{f}{p} (\text{r/s}) = \frac{60f}{p} (\text{r/min}) \quad (3.1)$$

式中, f 为电源频率(Hz); n_s 常称为同步转速。

我们已经知道异步电动机转子转速 n 总是低于旋转磁场的同步转速 n_s 的。在分析异步电动机特性时,往往不直接使用转速 n 来表示转子的转动速度,而是使用转差率 s , 定义

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Delta n}{n_s} \quad (3.2)$$

转差率 s 是异步电动机中的一个经常要用到的重要物理量。

由式(3.2)可得

$$n = n_s(1 - s) \quad (3.3)$$

转差率越大,转速越低,当 $s=1$ 时, $n=0$,这时转子不动,称为堵转状态。当 $s=0$ 时, $n=n_s$,转子转速等于同步转速,转子与旋转磁场间无相对运动,转子中没有感应电势和感应电流。因此也没有电磁转矩,相当于理想空载情况。当 $s<0$ 时, $n>n_s$,这时异步电机为发电机状态。

式(3.2)的定义适合旋转磁场的旋转方向与转子转向相同的情况。如果两者转向相反,则转差率 s 定义为

$$s = \frac{n_s + n}{n_s} \quad (3.4)$$

因此,当 $s > 1$ 时表示转子的转向与气隙磁场的旋转方向相反。

上述各式中的 n 、 n_s 都理解为转速的绝对值,而 s 是一个没有单位的数。

从产生电磁转矩的原理看,交流伺服电动机与两相异步电动机并无区别。然而,由于交流伺服电动机在自动控制系统中作为执行元件,所以要求转子速度的快慢,能反应控制信号的强弱;转动的方向,能反应控制信号的相位;无控制信号时,它不动;然而它转起来后,如果控制信号消失,它能迅速停止转动。

当交流伺服电动机原来处于静止状态时,如果控制绕组不加控制电压,此时只有励磁绕组通电产生脉振磁势。可以把脉振磁势看成两个圆形旋转磁势。这两个圆形旋转磁势以同样的大小和转速,向相反方向旋转,所建立的正转、反转旋转磁场分别切割鼠笼绕组(或杯形壁)并感应出大小相同、相位相反的电势和电流,这些电流分别与各自的磁场作用产生的转矩也大小相等、方向相反,合成转矩为零,伺服机转子转不起来。一旦控制系统有偏差信号,控制绕组就接受与之相对应的控制电压。一般情况下,电机内部产生的磁场是椭圆形旋转磁场。一个椭圆形旋转磁场可以看成是由两个圆形旋转磁场合成起来的。这两个圆形旋转磁场幅位不等(与原椭圆旋转磁场转向相同的正转磁场大,与原转向相反的反转磁场小),但以相同的速度,向相反方向旋转。它们切割转子绕组感应的电势和电流以及产生的电磁转矩也方向相反、大小不等(正转则大,反转则小),合成转矩不为零,所以伺服电动机就朝着正转磁场的方向转动起来,随着信号的增强,磁场接近圆形,此时正转磁场及其转矩增大,反转磁场及其转矩减小,合成转矩变大,如果负载转矩不变,转子的速度就增加。如果改变控制电压的相位,即移相 180° ,旋转磁场的转向相反,因而产生的合成转矩方向也相反,伺服电动机将反转。若控制信号消失,只有励磁绕组通入电流,伺服机产生的磁场将是脉振磁场。如果是普通的两相异步电动机,它是不会停下来的。但对交流伺服电动机来说,由于转子电阻比较大,它能产生一种制动转矩,使转子很快地停下来。这一点,可用不同转子电阻时的机械特性来说明。图 3.5(a)和图 3.5(b)分别表示转子电阻 $R'_r = 0.5(X_s + X'_r)$ 和 $R'_r = 1.5(X_s + X'_r)$ 时的机械特性(其中, R'_r 和 X'_r 分别为折算到定子边的转子电阻和漏电抗, X_s 为定子漏电抗)。

当 $R'_r = 0.5(X_s + X'_r)$,即临界转差率 s_m (临界转差率就是异步电机的最大转差除以同步转速,即 $s_m = (n_s - n_{\min})/n_s$)为 0.5 时,如果控制信号消失,只有励磁绕组通电,电机产生的磁场是脉振磁场。它可以分解为两个幅值相等、转速相同但转向相反的圆形旋转磁场。曲线 1 和曲线 2 分别代表正转和反转圆形旋转磁场作用下的机械特性。转矩的最大值分别在 $s_{m1} = 0.5$ 和 $s_{m2} = 2 - s_{m1} = 1.5$ 处。曲线 3 代表这两条曲线的合成转矩曲线。

由曲线 3 可知,当 $n=0$,即 $s=1$ 时, $T_{st}=0$,说明交流伺服电动机在脉振磁场作用下不产生启动转矩,不能自行启动。但当 $n \neq 0$ 时, $T_{st} \neq 0$,而且转矩和转速的方向相同,只要该转矩能驱动轴上的负载,它就不会停下来。最后稳定的速度由轴上负载转矩决定,并稳定于图 3.5(a)中的 A 点对应的速度上。

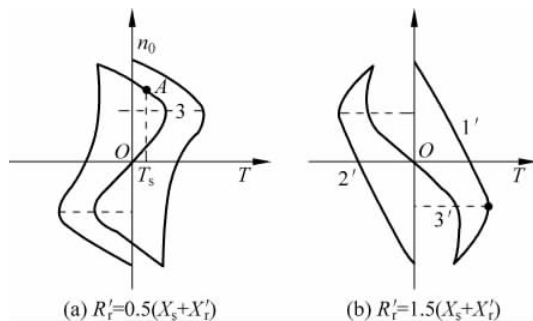


图 3.5 伺服电动机不同转子时的机械特性

如果加大转子电阻,使 $R'_r \gg (X_s + X'_r)$,即 $s_m \geq 1$,则在正转和反转圆形旋转磁场及其合成的脉振磁场作用下的机械特性,可分别用图 3.5(b)中的曲线 $1'$ 、曲线 $2'$ 、曲线 $3'$ 表示,由曲线 $3'$ 可知,此时脉振磁场产生的转矩具有制动性质。也就是说,如果原来交流伺服电动机控制绕组输入控制信号,电动机在圆形或椭圆形磁场作用下产生电磁转矩,其机械特性如图 3.6 中的曲线 1 所示。驱动负载旋转,稳定速度为 n 。如控制信号消失,磁场变为脉振磁场,相应的机械特性为图 3.6 中的曲线 2。由于机械惯性使转速不能突变,所以,运行点由曲线 1 上的 A 点瞬时过渡到曲线 2 上的 B 点。在 B 点和原点之间转矩为负值,在这个转矩的作用下,转子速度迅速降到零。

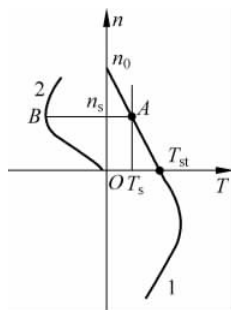


图 3.6 伺服电动机自转现象的消除

由于交流伺服电动机转子电阻设计得比较大,所以,交流伺服电动机控制信号消失后,不会有自转现象。

3. 控制方式

交流伺服电动机励磁绕组的轴线与控制绕组的轴线在空间相差 90° 电角度, 励磁绕组接在恒定电压的单相交流电源上, 当负载转矩一定时, 可以通过调节控制电压的大小或相位来达到改变电机的旋转方向和转速的目的。

(1) 幅值控制。保持控制电压与励磁电压间的相位差 90° 不变, 仅改变控制电压的幅值。这种方法需要有 90° 的两相电源, 但在实际工作中, 很少有 90° 相移的两相电源, 经常利用三相电源相电压和线电压之间的关系来制造两相电源, 见图 3.7(a)。

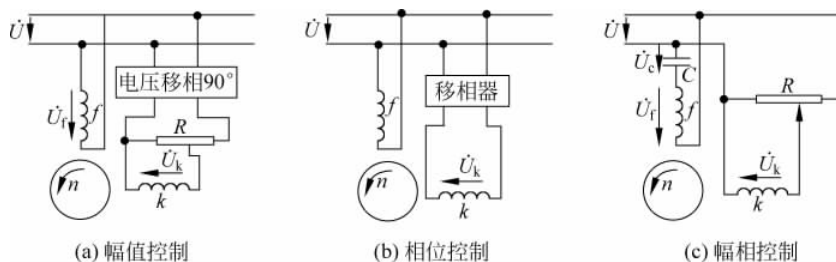


图 3.7 交流伺服电动机控制方式

(2) 相位控制。保持控制电压的幅值不变, 仅改变控制电压与励磁电压间的相位差。这种方法中两相电压相位差角的改变需要一套移相器。这种方法的控制功率较大, 效率较低, 一般很少采用, 见图 3.7(b)。

(3) 幅相控制。同时改变控制电压的幅值和相位。方法是将励磁绕组和控制绕组接在同一单相电源上, 并在其中一相(一般励磁相)电路中串联或并联上一定的电容(移相电容), 使励磁绕组和控制绕组相位差为 90° , 当改变控制绕组电压的大小进行控制时, 两者相位差将随转速的改变而改变。这种方法简单方便、应用广泛, 见图 3.7(c)。

4. 交流伺服电动机静态特性

交流伺服电动机静态特性包括机械特性和控制特性(调节特性)。

机械特性是指在控制电压 U_k 恒定的情况下, 电磁转矩与转速的关系曲线 $T_{em} = f(n)$ 。

控制特性是指在负载转矩 T_l 恒定的情况下, 转速随控制电压的变化曲线 $n = f(U_k)$ 。控制特性可由机械特性曲线用作图法求得, 即在机械特性上作转矩为某一定值的平行于横轴的转轴线, 该转矩线与机械特性曲线有许多交点。找出这些交点对应的转速值和有效信号系数值, 并绘成曲线, 即为该输出转矩下的控制特性曲线。

控制方法不同, 静态特性也有所不同。图 3.8 和图 3.9 分别给出了幅值控制和幅相

控制下的静态特性曲线。

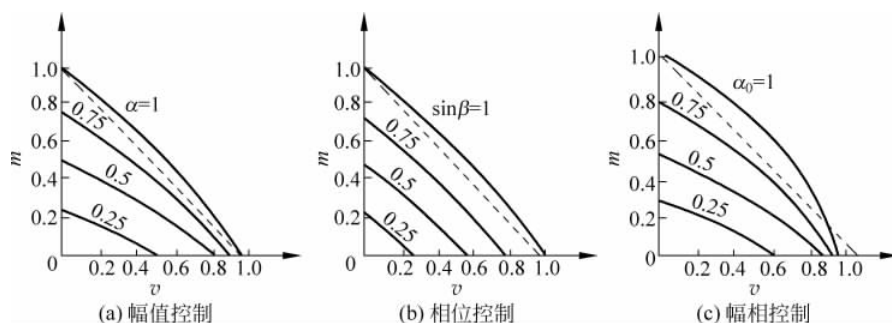


图 3.8 交流伺服电动机机械特性曲线

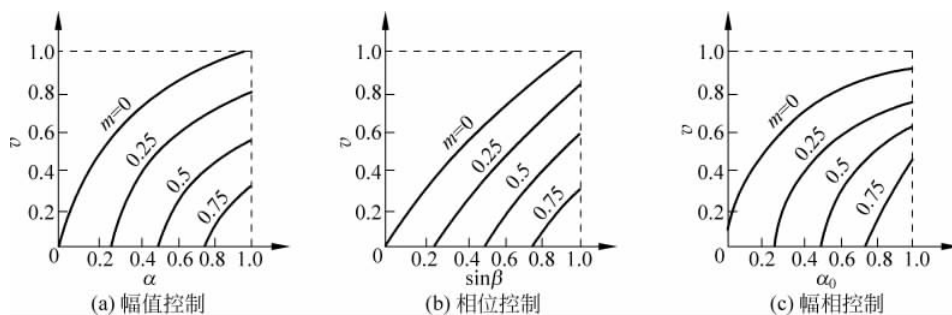


图 3.9 交流伺服电动机控制特性曲线

图 3.8 和图 3.9 中, m 为输出转矩与启动转矩之比; v 为转速与同步转速之比; α 为有效信号系数, 等于控制电压 U_k 与额定控制电压 U_{kN} 之比, 即 $\alpha = U_k/U_{kN}$; β 为控制电压 U_k 与额定控制电压 U_{kN} 的相位差; 在幅相控制方式下, 一般在励磁绕组中串联电容分相, 励磁绕组上的电压不等于额定励磁电压(即电源电压), 而且随着运行情况的变化而变化。通常要求电动机启动时气隙合成磁场为圆形旋转磁场, 按此要求选择电容 C , 这就确定了满足此要求时的控制电压值 U_{k0} , $\alpha_0 = U_{k0}/U_{kN}$ 。

5. 交流伺服电动机一般常识

交流伺服电动机有三个显著特点:

- (1) 启动转矩大。由于转子导体电阻很大, 可使临界转差率 $s_m > 1$, 定子一加上控制电压, 转子立即启动运转。
- (2) 运行范围宽。在转差率从 0~1 的范围内都能稳定运转。
- (3) 无自转现象。控制信号消失后, 电动机旋转不停的现象称为“自转”。自转现象

破坏了伺服性,显然要避免。正常运转的伺服电动机只要失去控制电压后,伺服电动机就处于单相运行状态。由于转子导体电阻足够大,使得总电磁转矩始终是制动性的转矩,当电动机正转时失去 U_k (控制电压),产生的转矩为负 ($0 < s < 1$)。而反转时失去 U_k ,产生的转矩为正 ($1 < s < 2$ 时),不会产生自转现象,可以自行制动,迅速停止运转,这也是交流伺服电动机与异步电动机的重要区别。

不同类型的交流伺服电动机具有不同的特点。笼型转子交流伺服电动机具有励磁电流较小、体积较小、机械强度高等特点;但是低速运行不够平稳,有抖动现象。空心杯形转子交流伺服电动机具有结构简单、维护方便、转动惯量小、运行平滑、噪声小、没有无线电干扰、无抖动现象等优点;但是励磁电流较大,体积也较大,转子易变形,性能上不及直流伺服电动机。

交流伺服电动机适用于 $0.1 \sim 100\text{W}$ 的小功率自动控制系统中,频率有 50Hz 、 400Hz 等多种。电源频率为 50Hz 时,其电压有 36V 、 100V 、 220V 、 380V 数种。当频率为 400Hz 时,电压有 20V 、 36V 、 115V 多种。笼型转子交流伺服电动机产品为 SL 系列。空心杯形转子交流伺服电动机为 SK 系列,用于要求运行平滑的系统中。

6. 交、直流伺服电动机的性能比较

在自动控制系统中,交、直流伺服电动机应用都很广泛,我们对这两类伺服电动机的性能做一下简单的比较,说明其优缺点,以供选用时参考。

1) 机械特性

直流伺服电动机转矩随转速的增加而均匀下降,斜率固定。在不同控制电压下,机械特性曲线是平行的,即机械特性是线性的,而且机械特性为硬特性,负载转矩的变化对转速的影响很小。

交流伺服电动机的机械特性是非线性的,电容移相控制时非线性更为严重,而且斜率随控制电压的变化而变化,这会给系统的稳定和校正带来困难。机械特性很软,低速段更软,负载转矩变化对转速影响很大,而且机械特性软会使阻尼系数减小,时间常数增大,从而降低了系统品质。

2) “自转”现象

直流伺服电动机无“自转”现象。

交流伺服电动机若设计参数选择不当,或制造工艺不良,在单相状态下会产生“自转”而失控。

3) 体积、重量和效率

交流伺服电动机的转子电阻相当大,所以损耗大、效率低,电动机的利用程度差。而且交流伺服电动机通常运行在椭圆形旋转磁场下,反向磁场产生的制动转矩使得电动机输出的有效转矩减小,所以当输出功率相同时,交流伺服电动机比直流伺服电动机的体积

大、重量大、效率低。故交流伺服电动机只适用于小功率系统,功率较大的控制系统普遍采用直流伺服电动机。

4) 结构

直流伺服电动机结构复杂,制造很麻烦,运行时电刷和换向器滑动接触,接触电阻不稳定,会影响电动机运行的稳定,又容易出现火花,给运行和维护带来一定困难。

交流伺服电动机结构简单,维护方便,运行可靠,适宜不易检修的场合使用。

5) 控制装置

直流伺服电动机的控制绕组通常由直流放大器供电,直流放大器比交流放大器结构复杂,且有零点漂移现象,影响系统的稳定性和精度。

3.2.3 交流测速发电机

1. 基本结构

交流测速发电机分同步测速发电机和异步测速发电机,应用较多的是异步测速发电机。交流异步测速发电机在结构上与交流伺服电动机相同,定子上也装有两相绕组。一相绕组是励磁绕组,外加单相交流电源,产生磁场;另一相绕组是输出绕组,它输出与转速 n 成正比的频率与励磁绕组相同的交流电压。转子常采用空心杯转子。

2. 分类

交流测速发电机有空心杯转子异步测速发电机、笼式转子异步测速发电机和同步测速发电机三种。

1) 空心杯转子异步测速发电机

空心杯转子异步测速发电机结构原理如图 3.10 所示,主要由内定子、外定子及在它们之间的气隙中转动的杯形转子所组成。励磁绕组、输出绕组嵌在定子上,彼此在空间相差 90° 电角度。杯形转子是由非磁性材料制成的。由于它的技术性能比其他类型的交流测速发电机优越,结构简单,同时噪声低,无干扰且体积小,因此是目前应用最为广泛的一种交流测速发电机。

2) 笼式转子异步测速发电机

笼式转子异步测速发电机与交流伺服电动机相似,因输出的线性度较差,该类型发电机仅用于要求不高的场合。

3) 同步测速发电机

同步测速发电机以永久磁铁作为转子的交流发电机。由于输出电压和频率随转速同时变化,又不能判别旋转方向,使用不便,在自动控制系统中用得很少,主要供转速的直接

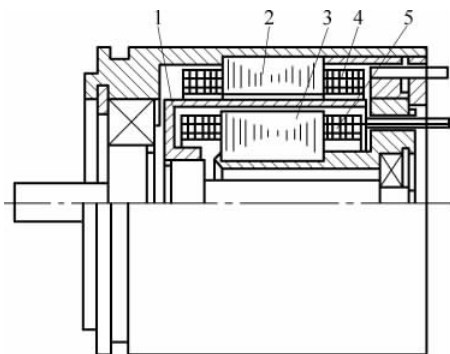


图 3.10 空心杯转子测速发电机结构

1—空心杯转子 2—外定子 3—内定子 4—励磁绕组 5—输出绕组

测量用。

3. 工作原理

异步测速发电机的工作原理可以由图 3.11 来说明。图中 N_1 是励磁绕组, N_2 是输出绕组。由于转子电阻较大, 为分析方便起见, 忽略转子漏抗的影响, 认为感应电流与感应电动势同相位。给励磁绕组 N_1 加频率 f 恒定、电压 U_1 恒定的单相交流电, 测速发电机的气隙中便会生成一个频率为 f 、方向为励磁绕组 N_1 轴线方向 (即 d 轴方向) 的脉振磁动势及相应的脉振磁通, 分别称为励磁磁动势及励磁磁通。

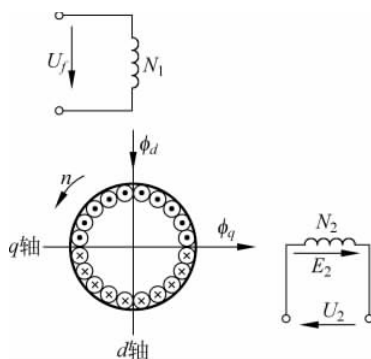


图 3.11 异步测速发电机的原理图

当转子不动时, 励磁磁通在转子绕组中感应出变压器电动势, 变压器电动势在转子绕组中产生电流, 转子电流由 d 轴的一边流入而由另一边流出, 转子电流所生成的磁动势及相应的磁通也是脉振的且沿 d 轴方向, 分别称为转子直轴磁动势及转子直轴磁通。

励磁磁动势与转子直轴磁动势都是沿 d 轴方向脉振的, 两个磁动势合成而产生的磁

通也是沿 d 轴方向脉振的,称为直轴磁通 ϕ_d 。由于直轴磁通 ϕ_d 与输出绕组 N_2 不交链,所以输出绕组没有感应电动势,其输出电压 $U_2=0$ 。

转子旋转时,转子绕组切割直轴磁通 ϕ_d 产生切割电动势 E_q 。由于直轴磁通 ϕ_d 是脉振的,因此切割电动势 E_q 也是交变的,其频率也就是直轴磁通的频率 f ,切割电动势在转子绕组中产生频率相同的交变电流 I_q ,电流 I_q 由 q 轴的一侧流入而由另一侧流出,电流 I_q 形成的磁动势及相应的磁通是沿 q 轴方向以频率脉振的,分别称为交轴磁动势 E_q 及交轴磁通 ϕ_q 。交轴磁通 ϕ_q 与输出绕组 N_2 交链,在输出绕组中感应出频率为 f 的交变电势 E_2 。

以频率 f 交变的切割电动势与其转子绕组所切割的直轴磁通 ϕ_d 、切割速度 n 及由电机本身结构决定的电动势常数 C_e 有关,它的有效值为

$$E_d = C_e \phi_d \cdot n \quad (3.5)$$

以频率 f 交变的输出绕组感应电势,与输出绕组交链的交轴磁通及输出绕组的匝数 N_2 有关,它的有效值 E_2 为

$$E_2 = 4.44 f N_2 \phi_q \quad (3.6)$$

由此看出,当励磁电压 U_f 及频率 f 恒定时有

$$E_2 \propto \phi_q \propto I_q \propto E_q \propto n \quad (3.7)$$

即 E_2 与 n 成正比关系。可见,异步测速发电机可以将其转速值对应地转换成输出电压值。输出电压 U_2 与转速的关系曲线称为输出特性,如图 3.9 所示。实际上,由于存在漏阻抗、负载变化等问题,直轴磁通是变化的,输出电压与转速不是严格的正比关系,输出特性呈现非线性,如图 3.12 所示。

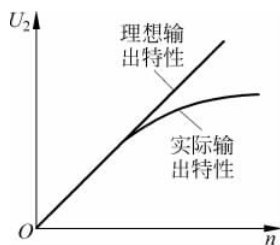


图 3.12 异步测速发电机的输出特性

4. 异步测速发电机负载阻抗特性

异步测速发电机在控制系统中工作时,一般情况下输出绕组所连接的负载阻抗是很大的,所以可以近似地用输出绕组开路的情况进行分析。但倘若负载阻抗不是足够大,负载阻抗对电机的性能就会有影响。

由于异步测速发电机输出电压与负载阻抗之间的函数关系是相当复杂的,所以一般

为了分析方便,假设励磁电压 U_f 不变时,磁通为常数。这样,输出绕组的感应电动势 E_2 仅与转速成正比,当转速不变时,感应电动势 E_2 也为常数。

可以得到异步测速发电机输出电压 U_2 的大小和相位移 φ 与负载阻抗 Z_L 的关系,如图 3.13 所示。

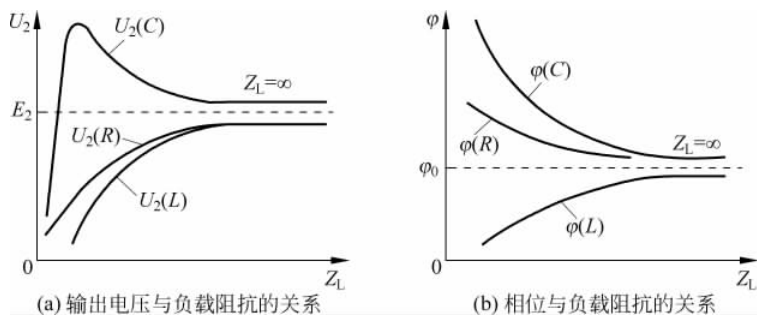


图 3.13 输出电压的大小和相位与负载阻抗的关系

由此可得如下结论:

(1) 当异步测速发电机的转速一定,且负载阻抗足够大时,无论什么性质的负载,即使负载阻抗有变化也不会引起输出电压有明显改变。

(2) 当 $X_C > \frac{R_2^2 + X_2^2}{X_2}$ (X_C 为纯电容负载; R_2 和 X_2 分别为输出绕组的电阻和漏抗)

时,电容负载和电阻负载对输出电压值的影响是相反的。所以,若测速发电机输出绕组接有电阻电容负载时,则负载阻抗的改变对输出电压值的影响可以互补,有可能使输出电压不受负载变化的影响,但却扩大了对相位移的影响。

(3) 若输出绕组接有电阻电感负载,则可获得相位移不受负载阻抗改变的影响,但却扩大了对输出电压值的影响。

在实际中到底选用什么性质的负载,即对输出电压的幅值还是其相位移进行互补,应由系统的要求来决定。一般希望输出电压值不受负载变化的影响,故常采用电阻电容负载。

5. 异步测速发电机误差

(1) 线性误差。转子电流对定子的影响破坏了输出电压与转速应保持的正比关系,从而造成线性误差。为减小误差,首先可增大转子电阻,所以转子用高电阻率材料制成薄壁杯子形状。其次提高电源频率以增加同步转速,减小相对转速,降低测速发电机的最大误差,提高精度。目前,国产异步测速发电机采用 400Hz 的频率。

(2) 相位误差。如不计励磁绕组漏阻抗相转子等效回路漏阻抗,输出电压应与励磁

电压同相位。实际上,由于励磁绕组漏阻抗与转子等效回路漏阻抗的影响,输出电压与励磁电压不同相,造成所谓的相位误差。

(3) 剩余电压。理想的测速发电机,当其转速为零时,输出电压也应为零。而实际上交流异步测速发电机加上励磁电压后,虽然转子静止,但往往会有输出电压,这个电压称为剩余电压,也称零信电压。这使控制系统的准确度大大降低。

产生剩余电压的原因很多,主要有两个方面,其一是制造工艺不良。如内定子椭圆造成磁路不对称、绕组匝间短路以及两相绕组不完全垂直等原因,使励磁绕组与输出绕组之间存在耦合作用;其二是导磁材料的非线性和不均匀,以致产生高次谐波,这些谐波磁场会在输出绕组中感应产生谐波电动势,为此应合理选择导磁材料、提高加工质量、采用补偿绕组和磁路补偿等措施,把剩余电压尽量减小。

3.2.4 交流电动机的应用

1. 交流伺服电动机应用

交流伺服电机在控制系统中常作为执行元件,由其组成的伺服系统,按被控对象不同可分为:速度控制方式,电动机的速度是被控量;位置控制方式,电动机的转角(或直接位移)是被控量;转矩控制方式,电动机的转矩是被控量;混合控制方式,上述多种控制方式的总和。

前两种是通常采用的方式,它们的原理与组成框图如图 3.14 和图 3.15 所示。

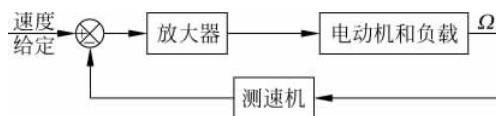


图 3.14 速度控制时的方框图

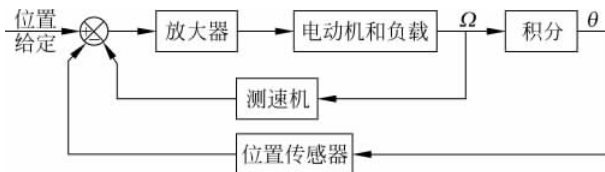


图 3.15 位置控制时的方框图

图 3.16 给出了交流伺服电动机用在自动电焊机中来保持电弧长度稳定的系统原理图。

为保证焊接质量,电弧必须在整个焊接过程中都能稳定地燃烧。当遇到外界干扰(如

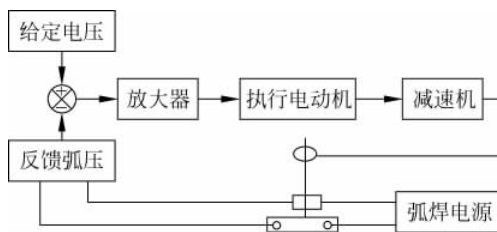


图 3.16 电弧长度稳定系统原理图

坡口尺寸变化,焊接位置变化,电源电压波动等)时,要求电弧长度能自动调节,保持恒定。当电弧长度符合要求时,由于反馈弧压与给定电压相等,偏差信号等于零,交流伺服电动机不转。如果外界干扰使电弧变长或变短时,反馈弧压相应地增大或减小,偏差信号不为零,交流伺服电动机正向或反向旋转,带动焊条使其自动向上或向下移动,从而保持电弧长度稳定。

2. 交流测速发电机应用

交流测速发电机的输出电压与转速成正比,但输出电压的频率也随转速而变化,所以只作指示元件用。

交流测速发电机与直流测速发电机一样,可以作为控制系统中的解算元件,既可作为积分元件,也可用作微分元件。图 3.17 为交流测速发电机作积分运算的原理图。

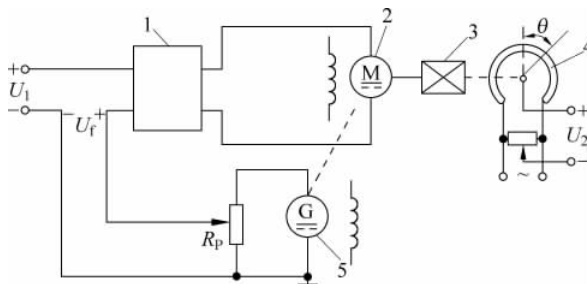


图 3.17 测速发电机作积分运算的原理图

1—放大器 2—直流伺服电动机 3—传动机构 4—电位器 5—测速发电机

U_1 为输入信号,电位器的输出电压 U_2 为输出信号, U_2 与其转角 θ 成正比。当输入信号 $U_1=0$ 时,伺服电动机不转,电位器的转角 $\theta=0$,输出电压 $U_2=0$ 。当施加一个输入信号时,伺服电动机带动测速发电机和电位器转动,将有

$$U_2 = K_1 \theta$$

$$\theta = K_2 \int_0^{t_1} n dt$$

$$U_f = K_3 n \quad (3.8)$$

式中, K_1 、 K_2 、 K_3 为比例常数, 由系统内各环节的结构和参数所决定; n 为伺服电动机转速。

只要放大器的放大倍数足够大, 则

$$U_1 \approx U_f$$

$$U_2 = K_1 \theta = K_1 K_2 \int_0^{t_1} n dt = \frac{K_1 K_2}{K_3} \int_0^{t_1} U_f dt = K \int_0^{t_1} U_1 dt \quad (3.9)$$

可见, 输出电压 U_2 正比于输入电压 U_1 从 0 到 t_1 时间内的积分。

3.2.5 交流电动机的选用

1. 交流伺服电动机的选用

1) 交流伺服电动机的选择

前面根据交、直流伺服电动机性能的对比, 给出了两者的选择依据。下面从结构上讨论交流伺服电动机的选择。

我国生产的交流伺服电动机转子主要有两种基本结构, 即笼形转子和杯形转子。

笼形转子交流伺服电动机的特点是: 气隙小, 在相同的性能指标下, 机械强度高, 耐高温、振动和冲击, 可靠性高, 广泛地用于自动控制系统、随动系统和计算装置中。

杯形转子交流伺服电动机的特点是: 转子轻、惯量小, 摩擦转短小, 快速响应好; 无齿槽, 运行平稳, 噪音低, 灵敏度高; 气隙大, 力能指标低, 电机的尺寸大; 在高温和振动条件下, 容易变形, 用于要求转速平稳的装置, 例如积分网络等。

2) 交流伺服电动机的使用

(1) 移相和移相电容的选择

为了在电机内形成旋转磁场, 要求励磁电压和控制电压之间应有一定的时间相角差。移相有两种方法: 电源移相和电容移相。

电源移相: 三相电源如有中线, 可取相电压(或经变压器降压)作为控制电压, 而用线电压(或经变压器降压)作为励磁电压。这是因为它们的相量互差 90° , 如图 3.18 所示。

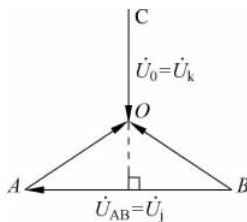


图 3.18 利用相压和线压移相 90° 原理图

三相电源的三个线电压互差 120° 。有时,为了方便就取三相电源的任意两相的线电压使用。这时信号系数虽然比产生圆形旋转磁场时的小一些,但考虑到交流放大器本身的相位差,所以有可能信号系数比产生圆形旋转磁场时的还要大一些。

电容移相:如在控制系统工作的地方只有单相电源,这时常用电容移相。即在励磁电路串联移相电容器 C (见图 3.19(a))。如果移相电容器的电容量选得合适,可使励磁电压和控制电压正好相差 90° 。

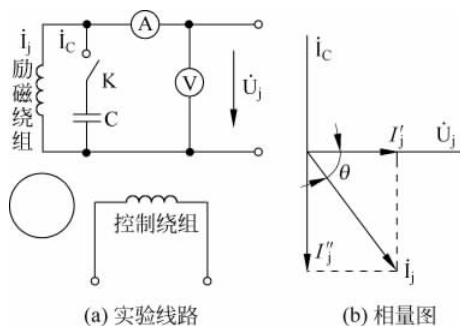


图 3.19 利用相压和线压移相 90° 原理图

如何选择移相电容器的电容量,使励磁电压和控制电压正好相差 90° 呢?可采用下列方法分析计算:

根据图 3.19(b),不难求出移相电容器的电容量:

$$C_0 = \frac{\sin\theta}{2\pi f |Z_j|} \times 10^6 (\mu\text{F}) \quad (3.10)$$

式中, θ 和 $|Z_j|$ 可用图 3.19 所示的实验方法来求。

首先,控制绕组不加电压,转子不动。先断开开关 K ,在励磁绕组上加电压 U_j ,记下电压表和电流表的读数,就可以算出励磁阻抗的模

$$|Z_j| = \frac{U_j}{I_j} \quad (3.11)$$

然后合上 K ,并改变电容量 C ,使电流表的读数最小,记下此时的电流值 $I_{j\min}$ 。

把两次测得的电流值相除,就可以求出励磁阻抗的阻抗角 θ ,这是因为合上开关 K 后,如果流经并联电容器 C 的电流 I_c 完全补偿励磁绕组中的无功电流 I_j'' ,那么,电流表测得的电流就只有电流 I_j' 。此时的相量图如图 3.19(b)所示。由图可见

$$\theta = \arccos \frac{I_j'}{I_j} \quad (3.12)$$

用以上方法测得的电容量都是指转子不动时,为了满足 $\dot{U}_k$ 和 $\dot{U}_j$ 移相 90° 在励磁电路

串联的电容值。如果转速不为零,而是某一转速,电容量就不能满足 $\dot{U}_k$ 和 $\dot{U}_j$ 移相 90° 的要求了,而是随转子速度的变化而变化。不过,这个变化的角度不是很大,只有十几度。

(2) 减小放大器负担问题

在自动控制系统中,交流伺服电动机的控制绕组通常是与伺服放大器的输出端相连接的,控制信号通过放大器放大后,再加到控制绕组中去。控制绕组所需要的控制电流和控制功率都是由放大器供给的。如果前者需要后者提供更大的电流和更多的控制功率,则势必加重放大器的负担,使放大器的体积和重量增大,为此,需要减轻放大器的负担。

从基本电磁关系看交流伺服电动机控制相电路相当于单相变压器(控制绕组为原边绕组,转子绕组为副边绕组)。整个控制相电路相当于电感性负载,控制电流由有功和无功两个分量所组成。其中无功电流加重了伺服放大器的负担。为了减小无功电流,减轻放大器的负担,可在控制绕组两端并联电容器,以提高控制相的功率因数。

在确定补偿无功电流的电容量时,可在控制绕组两端并联一个可变的电容量,让电容量由小到大逐渐增加,观察控制绕组和电容支路并联的总电流,当电流表指示最小值时,此时因电容值即为所需要的电容量。这是最简便的确定方法。

(3) 发热和温升

交流伺服电动机为了满足控制性能(不自转、改善特性的线性度)的要求,转子电阻都设计得比较大,而且,它经常工作在低速段和不对称状态,因而它的损耗就比一般电机要大,发热情况也比较严重。为了保证它的温升不超过允许值,在安装或使用,应注意改善它的散热条件。例如,将电机装在接触面积足够大的金属支架上,并保证通风良好,必要时可用风扇或水冷,与其他的发热源(如变压器)尽量隔开。如上述措施仍不能有效地降低温度,可以考虑换用容量较大的伺服电动机。

2. 交流测速发电机的选用

1) 交流测速发电机的选择

交流异步测速发电机的主要优点是:不需要电刷和换向器,因而结构简单、维护容易、惯量小、无滑动接触,因而输出特性稳定、精度高、摩擦转矩小、不产生无线电干扰,工作可靠,正/反向旋转时,输出电压对称;但缺点是易存在剩余电压和相位误差,负载的大小和性质会影响输出电压的幅值和相位。

在确定采用异步测速发电机后,要在笼形转子和杯形转子异步测速发电机间做一选择。笼形转子异步测速发电机输出特性的斜率大,但特性差、误差大、转子惯量大,一般只用于精度要求不高的系统中。而杯形转子异步测速发电机的精度要高得多,转子惯量也

小,是目前应用最广泛的一种异步测速发电机。

2) 交流测速发电机的使用

(1) 湿度的影响及其补偿办法

温度的变化会使交流测速发电机定子绕组和杯形转子的电阻以及磁性材料的性能发生变化,使输出特性不稳定。例如,当温度升高时,转子电阻增大,因此,输出特性的斜率降低,定子绕组(励磁绕组和输出绕组)电阻的增加,不仅会影响输出电压的大小,还会影响输出电压的相位。

在实际使用中,往往要求温度变化时,输出电压的大小和相位保持一定的稳定性,所以在异步测速发电机的技术指标中,规定了变温误差,亦即温度的变化所引起的输出电压的大小和相位的变化量。除了在设计制造时,选用温度膨胀系数小的材料作为杯形转子,以减小变温误差外,在实际使用时还可以外加温度补偿装置。最简单的方法是在励磁电路、输出电路或同时在两个电路中,串联负温度系数的热敏电阻来补偿温度变化的影响,当温度升高时,热敏电阻的电阻值是减小的。

(2) 励磁电源的影响

异步测速发电机励磁电源电压幅值的不稳定,会直接引起输出电压的不稳定,因而影响输出特性的线性误差;励磁电源频率的变化,不仅影响输出电压的大小,而且,还会影响输出电压的相位。因此,对于那些要求稳定性高,误差小的异步测速发电机(如解算装置中使用的测速发电机),都用单独的电源供电,其电压的幅值和频率不受其他因素的影响,并保持相对的稳定。

(3) 剩余电压的补偿

针对产生剩余电压的不同原因,除了在设计和制造时采取一些必要的措施以外,还可以根据具体情况设计一些外接补偿装置。图 3.20 所示为阻容电桥补偿电路(虚线方框内)。

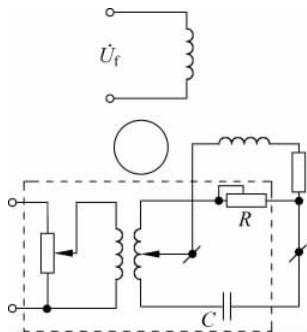


图 3.20 阻容电桥补偿电路

在转子不动时,调整接触调压器和可调电阻的滑动头,使电桥对角线(输出绕组和负载阻抗串联电路)中流过的电流为零,表示此时外接补偿装置产生的补偿电压大小与剩余电压大小相等、相位相反。

3.3 直线电机

直线电机是直接产生直线运动的电动机。它可以看成是旋转电机演化而来的。与旋转电机相对应,直线电机按机种分类可分为直线感应电动机、直线同步电动机、直线直流电动机和其他直线电动机(如直线步进电动机等)。

3.3.1 直线步进电动机

步进电动机由旋转运动转变为线性运动可用几种机械方法完成,包括齿条和齿轮传动及皮带和皮带轮传动以及其他机械连接机构。所有这些设计都需要各种机械零件。完成这个转变的最有效方法是在电机自身内进行。

基本的步进电机是由有磁性的转子铁芯通过与由定子产生的脉动的定子电磁场相互作用而产生转动的。直线电机把旋转运动转变为线性运动,完成这个转变的精密性取决于转子的步进角度和所选方法。线性步进电机,或者称为直线步进电机,首先出现在1968年的第3402308号专利上,是颁发给William Henschke的。从此以后,直线步进电机在许多要求极高的领域有了用武之地。包括制造应用、精密调准和精密流体测量在内的诸多高要求领域。

直线步进电机的基本原理是采用一根螺杆和螺母相啮合,如图3.21所示采取某种方法防止螺杆螺母相对转动,从而使螺杆轴向移动。一般而言,目前有两种实现这种转化的方式,第一种是在电机内置一个带内螺纹的转子,以转子的内螺纹和螺杆相啮合而实现线性运动,第二种是以螺杆作为电机出轴,在电机外部通过一个外部驱动螺母和螺杆相啮合从而实现直线运动。这样做的结果是大大简化了设计,使得在许多应用领域中能够在不安装外部机械联动装置的情况下直接使用直线步进电机进行精密的线性运动。

与螺杆相比,驱动螺杆的螺母显得更为重要,直线步进电机采用的是青铜注塑内螺纹转子,这种综合考虑了物理稳定性和润滑性能的专利产品,在具有低摩擦系数的同时又有相当优异的热膨胀性能。两方面的优异性能,保证了直线步进电机的高寿命。

直线步进电机按其电磁推力的产生机理可以分为变磁阻式和混合式两种。前者结构简单、成本低,缺点是无定位力矩,不宜微步控制,推力仅靠磁路不对称提供,数值偏小,力矩波动大。而混合式直线步进电机在加入稀土永磁材料以后,即使在断电的情况下,永磁



图 3.21 直线电机实物图

体也能够产生一定的锁定力矩,并可保持动子在期望的步距位置上。

3.3.2 直线感应电动机

直线感应电动机又分为平板形单边式、平板形双边式、圆筒形,短定子方式和短转子方式,电源可以是单相或三相。单边式直线感应电动机由定子和动体组成。定子也称为初级,它由冲上齿槽的电工钢片叠压而成,槽里嵌有绕组。动体也称为次级导体,一般是用铜或铝制成的金属板。定子和动体之间有一定的距离,也就是气隙。当定子绕组通入单相或三相交流电时,就产生由下式表达的磁通密度 B ,即 $B = B_0 \cos(\omega t - \pi x / \tau)$, $\omega = 2\pi f$, x 表示定子表面上的距离, τ 表示极矩。

极矩是磁通密度的半波长,也就是等于半个周期长度,磁通密度是 t 的函数也是距离 x 的函数。这种用 t 和 x 作为函数的磁通密度称为行波磁场,这与旋转感应电动机的旋转磁场是同一个原理。如上所述,通入交流电后在定子中产生的磁通,根据楞次定律,在动体的金属板上感应出涡流。设引起涡流的感应电压为 E ,金属板上有电感 L 和电阻 R ,则金属板上的涡流电流为 $I = E / z$,涡流电流和磁通密度将按费来明法则产生连续的推力 F 。有正负推力,但正推力远大于负推力,作用于动体的力主要是正推力,这就是直线感应电动机的工作原理。直线感应电动机的驱动装置可以采用变频器。变频器的输出频率可在控制信号的作用下得到控制,可以进行逻辑控制或闭环控制。变频器输出不同的频率,产生的推力将做相应的变化。由于定子的两个线圈中的频率不同,导致了行波磁场的同步变化,从而使电动机的推力从 0 到最大值做周期性变化。

在直线电动机中,直线感应电动机的应用最广泛,因为它的次级可以是整块均匀的金属材料,即采用实心结构,成本较低,适宜做得较长。

3.3.3 直线电动机的应用

直线电动机凭借高速度、高加速、高精度及行程不受限制等特性在物流系统、工业加工与装配、信息及自动化系统、交通与民用以及军事等领域发挥着十分重要的作用。

直线电动机的主要应用场合：一是应用于自动控制系统，这类应用场合比较多；二是作为长期连续运行的驱动电机；三是应用在需要短时间、短距离内提供巨大的直线运动能的装置中。

直线电机可以在几秒钟内把一架几千千克重的直升机拉到每小时几百千米的速度，它在真空中运行时，其时速可达成千上万千米。在军事上，人们利用它制成各种电磁炮，并试图将它用于导弹、火箭的发射；在工业领域，直线电机被用于生产输送线以及各种横向或垂直运动的一些机械设备中；直线电机除具有高速、大推力的特点以外还具有低速、精细的另一特点。例如，步进直线电机可以做到步距为 $1\mu\text{m}$ 的精度，因此，直线电机又被应用到许多精密的仪器设备中，如计算机的磁头驱动装置、照相机的快门、自动绘图仪、医疗仪器、航天航空仪器、各种自动化仪器设备等。除此之外，直线电机还被用于各种各样的民用装置中，如电动门，电动窗，电动桌、椅的移动，门锁、电动窗帘的开、闭等，尤其在交通运输业中，人们利用直线电机制成了时速达 500km 以上的磁悬浮列车。

直线电机可以认为是旋转电机在结构方面的一种变形，它可以看作是一台旋转电机沿其径向剖开，然后拉平演变而成的。近年来，随着自动控制技术和微型计算机的高速发展，对各类自动控制系统的定位精度提出了更高的要求，在这种情况下，传统的旋转电机再加上一套变换机构组成的直线运动驱动装置，已经远远不能满足现代控制系统的要求，为此，近年来世界上许多国家都在研究、发展和应用直线电机，使得直线电机技术发展速度加快，应用领域越来越广。

直线电机的优点是：结构简单、反应速度快、灵敏度高、随动性好、密封性好、不怕污染、适应性强（由于直线电机本身结构简单，又可做到无接触运行，因此容易密封，各部件用尼龙浸渍后，采用环氧树脂加以涂封，这样它就不怕风吹雨打，或有毒气体和化学药品的侵蚀，在核辐射和液体物质中也能应用）、工作稳定可靠、寿命长（直线电机是一种直接传动的特种电机，可实现无接触传递，故障少，几乎不需要维修，又不怕振动和冲击）、额定值高（直线电机冷却条件好，特别是长次级接近常温状态，因此线负荷和电流密度可以取得很高）、有精密定位和自锁的能力（和控制系统相配合，可做到 0.001mm 的位移精度和自锁能力）。

直线电机能直接产生直线运动，这一点对直线运动机械设计者和使用者有很大的吸引力。不少直线运动的机械是由旋转电机传动的，必须配置由旋转运动变为直线运动的机械传动装置，使得整个装置机构庞大，成本较高和效率较低。采用直线感应电机，不但

省去了机械传动机构,而且可因地制宜地将直线感应电机的初级和次级安放在适当的空间位置或直接作为运动机械的一部分,使整个装置紧凑合理,有时还可以降低成本和提高效率。此外在某些场合,直线感应电机有它独特的应用,是旋转电机所不能替代的。

目前直线电机在世界各国的应用大致可分为物流系统、工业设备、信息与自动化系统、交通与民用、军事及其他,而在物流输送系统中的应用为最多。

我国目前邮政系统的邮包、印刷品的物流分拣、输送线绝大部分通过旋转电机采用链传动或连杆等方式。国外一些发达国家则逐步采用了直线电机驱动的、由计算机控制的新型邮政物流分拣输送系统。如日本东京多摩邮局的大型邮政分拣机;丹麦 CRISPLANT 公司生产的高速包刷分拣机;瑞士、意大利等国的邮袋吊挂推式悬挂机等。与传统的链传动或连杆方式相比,直线电机驱动的物流系统具有高效、低噪、安全可靠、维护方便等优点而获得应用者青睐。我国贵阳普天通信机械厂与浙江大学研制成功的直线电机包刷分拣机,其性能优于国外设备,其价格仅为国外的 $1/3$ 。海关承担着大量物品的进出分拣,过去也和邮政分拣相类似,现在有些海关,如国内深圳海关就采用了由浙江大学提供直线电机驱动的物流分拣线,使用效果很好。

许多行业如电工、电子、机械、化工、医药等生产流水线和装配线,一般常采用钢丝绳或链传动,这些传动方式往往噪声大、速度慢、控制不方便,现在世界上已有不少单位开始采用直线电机驱动,包括一些汽车生产线。在一些新颖的立体化仓库的搬运系统和新型的自动化车库,也开始采用了直线电机,其中采用直线电机的自动化车库是在库地上安装一系列纵向和横向的直线电机初级,而载车板为次级。通过计算机,利用直线电机初次级作用移动汽车进或出。效率和利用率都很高。