

随动系统执行电动机

5.1 随动系统执行电动机的特征与分类

在自动控制系统中,执行电动机作为执行元件,把输入的电信号转换成电动机轴上的角位移或角速度输出。在随动系统中,执行电动机又称伺服电动机,是随动系统的一个重要组成部分,工作在随动系统的末端,与被控对象相联接,根据输入信号来控制驱动被控对象。

5.1.1 直流伺服电动机的特征及分类

直流伺服电动机是指使用直流电源的伺服电动机。直流伺服电动机有传统式、小惯量、宽调速三大类。按励磁方式分为他励、串励和并励 3 种基本形式。直流他励电动机按控制方式分电枢控制和磁场控制两大类。其中,电枢控制直流他励电动机易获得较平直的机械特性,如图 5-1 所示,有较宽的调速范围。

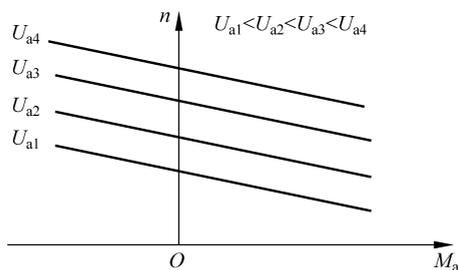


图 5-1 电枢控制直流他励电动机机械特性

直流他励电动机的磁场控制,又分电枢电压保持不变和电枢电流不变两种,但调速范围和调节特性的线性度均远不如电枢控制。

1. 小惯量高速直流伺服电动机

直流他励伺服电动机的应用历史最长,在 20 世纪 60 年代末出现了两种高性能的小惯

量高速直流伺服电动机,分别为小惯量无槽电枢直流伺服电动机和空心杯电枢直流伺服电动机。

小惯量无槽电枢直流伺服电动机的优点如下:

- (1) 转子转动惯量小,是普通电动机的 $1/10$,电磁时间常数小,反应快;
- (2) 转矩惯量比大,且过载能力强,最大转矩可比额定转矩大 10 倍;
- (3) 低速性能好,转矩波动小,线性度好,摩擦小。

作为随动系统的执行元件,高速小惯量电动机还存在一些缺点,如由于其转速高,作为随动系统的执行电动机仍需减速器,故齿轮间隙给系统带来的种种不利因素依然存在,特别对于舰载、机载、车载陀螺稳定随动系统;由于电动机本身转动惯量小,负载转动惯量在系统总转动惯量中占较大比例,当所驱动负载的尺寸与重量改变时,负载转动惯量可能发生变化,从而影响系统的动态性能(这个问题称为惯量匹配问题)。

小惯量无槽电枢直流伺服电动机是一种大功率直流伺服电动机,主要用于需要快速动作、功率较大的随动系统,如雷达天线的驱动、自行火炮、导弹发射架的驱动、计算机外围设备以及数控机床等方面。但由于存在电枢铁心,故在实现快速动作的电子设备中,它的转动惯量太大。

空心杯电枢直流伺服电动机不同于无槽电枢直流伺服电动机,是一种转动惯量更小的直流伺服电动机,被称为超低惯量伺服电动机。其特点如下:

- (1) 低转动惯量,起动时间常数小,可达 1ms 以下,角加速度可达 10^6rad/s^2 ;
- (2) 灵敏度高,快速性能好,速度调节方便;
- (3) 损耗小、效率高;
- (4) 由于绕组在气隙中均匀分布,不存在齿槽效应,所以转矩波动小,低速运转平稳,噪声很小;
- (5) 绕组的散热条件好,其电流密度可取到 30A/mm^2 ;
- (6) 转子无铁心,电枢电感很小,因此换向性能好,几乎不产生火花,大大提高了使用寿命。

空心杯形电枢直流伺服电动机在国外已系列化生产,输出功率从零点几瓦到几千瓦,多用于高精度的随动系统及测量装置等设备,如电视摄像机、各种录像机、X-Y 函数记录仪、数控机床等机电一体化设备中。目前,国产空心杯电枢直流伺服电动机可为仪表随动系统配套。

2. 低速大扭矩宽调速电动机

低速大扭矩宽调速电动机是相对于前面的小惯量电动机而言的,大扭矩宽调速电动机具有下列特点:

- (1) 高的转矩-转动惯量比,能够提供极高的加速度,实现快速响应;
- (2) 高的热容量,使电动机在自然冷却全封闭的条件下,仍能长时间过载;
- (3) 电动机所具有的高转矩和低速特性使得它与机床丝杠很容易直接耦合。这样不仅解决了齿轮减速器的间隙给系统带来的不利影响,而且从负载端看,电动机惯量折算到负载端的系数为 1,而不是像高速电动机传动比为 i 时折算关系为 i^2 倍,所以总系统的转矩惯量比值不一定降低,系统仍能有较高的动态性能。

(4) 由于优选电刷的材料,并采用增大电刷接触面积的方式,使得电动机在大的加速度和过载情况下,仍能有良好的换向。

(5) 电动机采用耐高温的 H 级绝缘材料,且具有足够的机械强度,以保证有长的寿命和高的可靠性。

(6) 采用能承受重载荷的轴和轴承,使得电动机在加、减速和低速大转矩时能承受最大峰值转矩。

(7) 电动机内安装有高精度和高可靠性的反馈元件——脉冲编码器或多极旋转变压器和低纹波测速发电机。

总之,大扭矩宽调速电动机具有许多优点,近年来在高精度数控机床和工业机器人等数字随动系统中获得了越来越广泛的应用。

5.1.2 交流伺服电动机的特征及分类

在调速性能要求较高的场合,直流电动机的调速系统一直占据主导地位。但直流电动机也存在如下一些固有的缺点:

(1) 电刷和换向器易磨损,需要经常维护;

(2) 换向器换向时会产生火花,使电动机的最高速度受到限制,也使应用环境受到限制;

(3) 结构复杂,制造困难,所用钢铁材料消耗大,制造成本高。

交流伺服电动机特别是笼型感应电动机,没有上述缺点。且其转子惯量较直流电动机小,使得动态响应更好,在同样的体积下,可达到更高的电动机转速。

交流电动机是采用交流电驱动的电动机。按其工作原理的不同,交流电动机主要可以分为同步电动机(SM)和异步电动机两大类。固定的电网频率下,电动机转子的转速随负载大小而改变的电动机称为异步电动机,其转速与电网频率无严格不变的对应关系,通常用它作为一般电动机使用。而同步电动机是指在固定的电网频率下,电动机转子以固定不变的转速旋转,其转速在工作范围内与负载的大小无关。同步电动机的最大特点是恒速运转,其速度不随负载变化而改变,如果负载大于电动机的最大运行转矩,则电动机会立即堵转停止,且不发热。因此它常被用于需要恒速运转的场合。

1. 异步交流伺服电动机

异步交流伺服电动机是交流感应电动机,它有三相和单相之分,也有笼型和线绕式之分,通常多用笼型三相感应电动机。其结构简单,与同容量的直流电动机相比,质量轻 1/2,价格仅为直流电动机的 1/3。其缺点是不能经济地实现范围很广的平滑调速,必须从电网吸收滞后的励磁电流,因而令电网功率因素变坏。这种鼠笼转子的异步型交流伺服电动机简称为异步交流伺服电动机。

2. 同步交流伺服电动机

同步交流伺服电动机虽较感应电动机复杂,但比直流电动机简单。它的定子与感应电动机一样,都在定子上装有对称的三相绕组;而转子却不同,按不同的转子结构又分电磁式及非电磁式两大类。非电磁式又分为磁滞式、永磁式和反应式多种,其中磁滞式和反应式同步电动机存在效率低、功率因素差、制造容量不大等缺点。

数字随动系统较多采用永磁式同步电动机。与电磁式相比,永磁式的优点是结构简单、运行可靠、效率高;缺点是体积大、启动特性欠佳。但永磁式同步电动机采用稀土类磁铁后,比直流电动机外形尺寸约小 1/2,质量轻 60%,转子惯量减到直流电动机的 1/5。它与异步电动机相比,由于采用了永久磁铁励磁,消除了励磁损耗及有关的杂散损耗,所以效率高;又因为没有电磁式同步电动机所需的集电环和电刷等,其机械可靠性与感应(异步)电动机相同,而功率因数却大大高于异步电动机,从而使永磁同步电动机的体积比异步电动机小。这是因为在低速时,感应(异步)电动机由于功率因素低,输出同样的有功功率时,它的视在功率却要大得多,而电动机主要尺寸是根据视在功率而定的。

总之,交流伺服电动机要比直流伺服电动机好一些,因为它是正弦波控制的,转矩脉动小。但直流随动系统比较简单、便宜。随着永磁材料制造工艺的不断完善,再加上合理的磁极、磁路及电动机结构设计,使新一代的交流伺服电动机的性能大大提高。交流伺服电动机按照容量可以分为超小型、小容量型、中容量型和大容量型。超小容量型的功率范围为 10~20W,小容量型的功率范围为 30~750W,中容量型的功率范围为 300~15kW,大容量型的功率范围为 22~55kW。伺服电动机的供电电压范围为 100~400V(单相/三相)。

5.1.3 两相异步电动机

两相异步电动机在几十瓦以内的小功率随动系统和调速系统中被广泛应用。控制方式分幅值控制、相位控制和幅相控制 3 种。幅值控制是指控制电压的相位与激磁电压相差 90° ,以控制电压的幅值作为控制量。相位控制则是保持控制电压的幅值不变,通过调节控制电压相位达到控制的。幅相控制则是同时调节幅值和相位达到控制的目的。幅值控制易于实现而应用广泛,相位控制电路复杂且应用比较少。如图 5-2(a)所示为单相电源供电的两相异步电动机幅值控制时的机械特性;如图 5-2(b)所示为两相电源供电的两相异步电动机幅值控制时的机械特性。

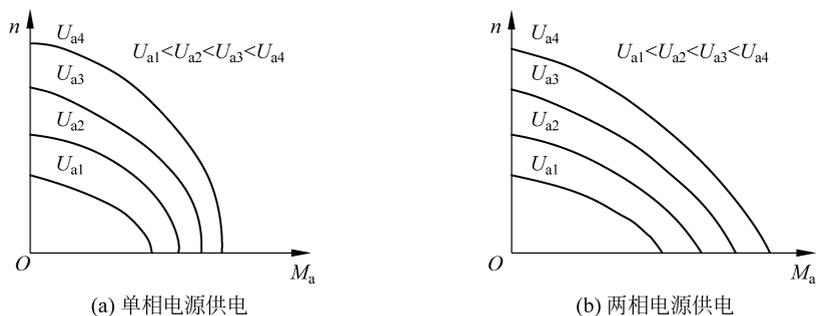


图 5-2 两相异步电动机幅值控制机械特性

两相异步电动机具有较宽的调速范围,本身摩擦力矩小,比较灵敏。具有杯形转子的两相异步电动机转动惯量小,因而快速响应特性好,常见于仪表随动系统中。

5.1.4 三相异步电动机

三相异步电动机控制方式有多种,如变频调速、变电压调速、串级调速、脉冲调速等。变

频调速可获得比较平直的机械特性,调速范围比较宽,目前已得到广泛应用。但该调速方法控制线路复杂。工业中常利用晶闸管实现变压调速和串级调速,但只适用于线绕式转子的异步电动机。变压调速和串级调速的机械特性分别如图 5-3(a)和(b)所示,它们均在单向调速时采用,低速性能差且调速范围不宽。

与同功率的直流相比,三相异步电动机的体积小、重量轻、价格便宜、维护简单。

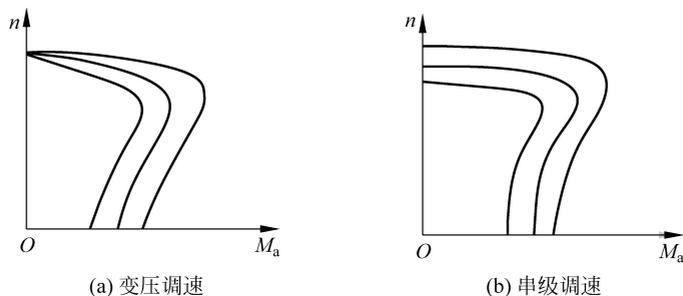


图 5-3 三相异步电动机变电压调速和串级调速机械特性

5.1.5 步进电动机

步进电动机是将电脉冲信号转变为角位移或线位移的开环控制元件,是机电一体化中的关键控制元件之一,广泛应用在各种自动化控制系统中。

步进电动机与普通电动机的不同之处是,步进电动机接受脉冲信号的控制,依靠环形分配器的电子开关器件,通过功率放大器使励磁绕组按照顺序轮流接通直流电源。由于励磁绕组在空间中按一定的规律排列,直流电源轮流接通后,就会在空间形成一种阶跃变化的旋转磁场,使转子步进式转动,随着脉冲频率的增高,转速就会增大。在非超载的情况下,电动机的转速、停止的位置只取决于脉冲信号的频率和脉冲数,而不受负载变化的影响,即给电动机加一个脉冲信号,电动机则转过一个步距角。这一线性关系的存在,加上步进电动机只有周期性的误差而无累积误差等特点,使得在速度、位置等控制领域用步进电动机来控制变得非常简单。

随着微型计算机控制技术的发展,用计算机控制步进电动机已逐步取代原来的采用分立元件或者集成电路的控制,并成为一种必然的发展趋势,且控制方式更加灵活多样。

现在比较常用的步进电动机包括反应式步进电动机(Variable Reluctance, VR)、永磁式步进电动机(Permanent Magnet, PM)、混合式步进电动机(Hybrid Stepping, HS)等。

反应式步进电动机也称为感应式、磁滞式或磁阻式步进电动机,其转子磁路由软磁材料制成,定子上有多相励磁绕组,定子、转子周边均匀分布小齿和槽,通电后利用磁导的变化产生转矩,因其结构简单而得到最多的应用。一般步进电动机以相数又可分为二相电动机、三相电动机、四相电动机、五相电动机等,结构简单、成本低、步距角小(最小可到 $10'$),可实现大转矩输出,断电时无定位转矩,启动和运行频率较高。但动态性能差、效率低、发热大,可靠性难保证。

永磁式步进电动机的转子由永磁材料组成,上有多相励磁绕组,转子的极数与定子的极数相同,定子、转子周边均无小齿和槽。通电后利用永磁体与定子电流磁场相互作用产生转矩。一般为二相或四相电动机。其特点是动态性能好、输出力矩小、步距角大(如 7.5° 、 15° 、

22.5°等),断电时有定位转矩,启动和运行频率较低,精度差。

混合式步进电动机也称为永磁反应式或永磁感应式步进电动机,综合了反应式和永磁式步进电动机的优点,定子上有多相励磁绕组,转子为永磁材料,定子、转子均有多个小齿和槽以提高精度,其特点是动态性能好,输出力矩大、步距角较永磁式小(一般为 1.8°),断电时无定位转矩,启动和运行频率较高。但结构复杂,成本相对较高。

考虑精度和成本,两相混合式步进电动机应用最广,其性价比最高。

步进电动机具有以下特点:

- (1) 可以用数字信号直接进行开环控制,整个系统简单、价廉;
- (2) 位移与输入脉冲信号数相对应,步距误差不长期积累,可以组成结构较为简单而又具有一定精度的开环控制系统,也可在要求更高精度时组成闭环控制系统;
- (3) 无刷,电动机本体部件少,可靠性高;
- (4) 易于启动、停止、正反转及变速,响应性也好;
- (5) 停止时,可有自锁能力;
- (6) 步距角选择范围大,可在几十角分至 180° 范围内选择。在小步距情况下,通常可以在超低速下高转矩稳定运行,且可以不经减速器直接驱动负载;
- (7) 速度可在相当宽范围内平滑调节。同时可以用一台控制器控制几台步进电动机,并可使它们完全同步运行;
- (8) 步进电动机带惯性负载的能力较差;
- (9) 由于存在失步和共振,步进电动机的加减速方法根据利用状态的不同而变得复杂化;
- (10) 不能直接使用普通的交直流电源驱动。

5.1.6 力矩电动机

力矩电动机分直流和交流两种,它在原理上与他励式直流电动机和两相异步电动机一样,只是在结构和性能方面有所不同,比较适合于低速调速系统,甚至可长期工作于堵转状态而只输出力矩,因此它可以直接与控制对象相连而不需减速装置。

5.1.7 无刷直流电动机

无刷直流电动机有别于传统的有刷电动机。传统的有刷电动机是用电刷作为换向器,而无刷直流电动机则改用电子线路方法向三相线圈绕组分时供电,用脉宽调速变频调速表控制电动机的转速,用单片机来检测转子的瞬时位置及速度,然后控制电动机的驱动电路,以此来实现电动机的运转。无刷直流电动机实际上是交流电动机,因此在后面将它归为交流伺服电动机进行介绍。

无刷直流电动机的优点是机械特性和调节特性的线性度好、堵转转矩大、控制方法简单,且没有换向器和电刷;其缺点是转矩小,效率低。无刷直流电动机广泛应用于数控机床、线切割机、加工机床、缝纫机、包装机械、印刷机械、封切机、纺织机、焊接机械等民用行业,而且还应用在电子工业、信息产业、国防工业、航空航天等领域。

5.2 直流伺服电动机

在直流随动系统中,直流伺服电动机需满足高精度、宽调速范围、具有足够的负载能力、高运动稳定性和快速的响应速度等要求,且在工业和国防上要求大功率直流电动机组成随动系统。因此,直流伺服电动机不同一般的直流电动机,应具有起动转矩大、调速范围宽、机械特性和调速特性好、控制方便等特点。小惯量直流伺服电动机、大惯量宽调速直流伺服电动机在随动系统中广泛应用。

5.2.1 大惯量宽调速直流伺服电动机

直流伺服电动机的结构主要包括 3 个部分:

(1) 定子——用于产生磁极磁场。根据产生磁场的方式,直流伺服电动机可分为永磁式和他励式。永磁式磁极由永磁材料制成,他励式磁极由冲压硅钢片叠压而成,外绕线圈通以直流电流便产生恒定磁场。

(2) 转子——又称为电枢,由硅钢片叠压而成,表面嵌有线圈,通以直流电时,在定子磁场作用下产生带动负载旋转的电磁转矩。

(3) 电刷与换向片——为使所产生的电磁转矩保持恒定方向,转子能沿固定方向均匀地连续旋转,电刷与外加直流电源相接,换向片与电枢导体相接。

1. 宽调速直流伺服电动机的结构

永磁式大惯量宽调速直流伺服电动机由带齿槽的转子、嵌有永久磁体的定子、电刷和低纹波测速机等构成。增加转子齿槽数和换向片数及使齿槽均匀分布,可减小转矩的波动,使电动机在低速下仍能平稳运行。定子上的永磁体磁性材料主要有铝镍钴、陶瓷铁氧体和稀土钴 3 种,性能最好的是稀土钴,价格最低的是陶瓷铁氧体。采用优质的电刷材料,加大电刷的接触面积,改进轴和轴承的结构,增强其刚度,可较好地解决高速换向问题,以提高电动机的工作转速。这类电动机采用了内装式低纹波(纹波系数一般在 2% 以下)的测速发电机,测速发电机的输出电压作为速度环的反馈信号,组成高增益速度环,以使电动机在较宽的速度范围内平稳运转。除测速发电机外,还可以在电动机内部安装位置检测元件,如旋转变压器、脉冲编码器等。

2. 宽调速直流伺服电动机的工作原理

宽调速直流伺服电动机的工作原理与一般直流电动机的工作原理是完全相同,他励直流电动机转子上的载流导体(即电枢绕组),在定子磁场中受到电磁转矩 M 的作用,使电动机转子旋转。

1) 直流伺服电动机的工作原理

如图 5-4 所示为宽调速直流伺服电动机的工作原理图。由于电刷和换向器的作用,使得转子绕组中的任何一根导体,只要一转过中性线,由定子 S 极下的范围进入定子 N 极下的范围,那么这根导体上的电流一定要反向;反之,导体由定子 N 极下的范围进入定子 S 极下的范围时,导体上的电流也要反向。因此,转子总磁势的方向始终与中性线的方向重合,

也就是与定子磁势正交。转子磁场与定子磁场相互作用产生了电动机的电磁转矩,从而使电动机转动。

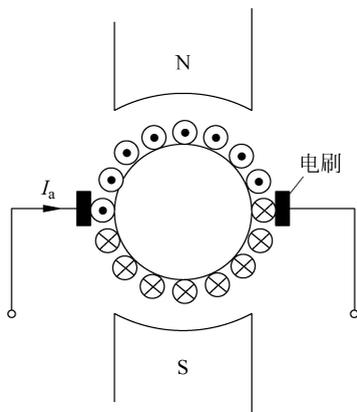


图 5-4 直流伺服电动机的工作原理

2) 直流伺服电动机转矩平衡方程式

直流伺服电动机的电磁转矩为

$$M_a = k_M I_a \quad (5-1)$$

式中, k_M ——电动机的转矩系数($k_M = C_M \Phi$);

I_a ——电动机的电枢电流。

当电动机带着负载匀速旋转时,它的输出转矩应与负载转矩相等。但是,电动机本身的机械摩擦(如轴承的摩擦、电刷和换向器的摩擦等)、电枢铁心中的涡流和磁滞损耗都会引起阻转矩,此阻转矩用 M_0 表示。这样,电动机的输出转矩 M 就等于电磁转矩 M_a 减去电动机本身的阻转矩 M_0 。所以,当电动机克服负载转矩 M_L 匀速旋转时,则有电磁转矩平衡方程式

$$M = M_a - M_0 = M_L \quad (5-2)$$

若将电动机本身的阻转矩和负载转矩合在一起称为总阻转矩 M_s , 即

$$M_s = M_0 + M_L \quad (5-3)$$

则转矩平衡方程式可写成

$$M_a = M_s \quad (5-4)$$

它表示在稳态运行时,电动机的电磁转矩和电动机轴上的总阻转矩相互平衡。

在实际使用中,电动机经常运行在转速变化的情况下,例如,启动、停转或反转。因此,也必须考虑转速变化时的转矩平衡关系。当电动机的转速改变时,转动部分的转动惯量将产生惯性转矩 M_J ,

$$M_J = J \frac{d\omega}{dt}$$

式中, J ——负载和电动机转动部分的转动惯量;

ω ——电动机的角速度。

电动机轴上的转矩平衡方程式为

$$M_a - M_s = J \frac{d\omega}{dt} \quad (5-5)$$

由上式可知,当电磁转矩 M_a 大于总阻转矩 M_s 时, $\frac{d\omega}{dt} > 0$, 表示电动机在加速; 当电磁转矩 M_a 小于 M_s 时, $\frac{d\omega}{dt} < 0$, 表示电动机在减速。

3) 直流伺服电动机的电压平衡方程式

如上所述,根据电动机的负载情况和转矩平衡方程式,可以确定电动机的电磁转矩的大小,但此时还不能确定电动机的转速。要确定电动机的转速,还需了解电动机内部的电磁规律以及电动机与外部的联系。

当电枢在电磁转矩的作用下转动后,电枢导体还要切割磁力线,产生感应电动势。感应电动势的方向与电流方向相反,它有阻止电流流入电枢绕组的作用,因此,是一种反电动势 E , 可以用下式表示

$$E = k_e n \quad (5-6)$$

式中, n —— 电枢的转速, r/min;

k_e —— 电势系数 ($k_e = C_e \Phi$)。

规定电动机各电量的方向如图 5-5 所示。

外加电压为 U_a 时,电压平衡方程为

$$U_a = E + I_a R_a \quad (5-7)$$

式中, U_a —— 电枢的电压;

I_a —— 电动机电枢的电流;

R_a —— 电枢的电阻。

4) 直流伺服电动机转速与转矩的关系

如果把式(5-6)代入式(5-7),可得到电枢电流 I_a 为

$$I_a = \frac{U_a - k_e n}{R_a} \quad (5-8)$$

由上式可知,直流伺服电动机和一般直流电动机不一样,它的电流不仅取决于外加电压和自身电阻,而且取决于与转速成正比的反电动势。

将式(5-8)代入式(5-1),得

$$n = \frac{U_a}{k_e} - \frac{R_a}{k_e k_M} M_a \quad (5-9)$$

式(5-9)称为电动机的机械特性,它描述了电动机的转速与转矩之间的关系。

当电动机没有负载转矩,且没有空载损耗的理想状态时,应有 $M_a = 0$ 。因此,电枢电流 $I_a = 0$, 端电压 U_a 等于反电动势 E , 转速 n 即为理想空载转速, $n_0 = U_a / k_e$ 。

$\Delta n = \frac{R_a}{k_e k_M} \Delta M_a$ 称为转速降落。

当 $n = 0$ 时,有 $M_a = \frac{U_a k_M}{R_a}$, 此时的电磁转矩称为堵转转矩,用 M_d 表示。

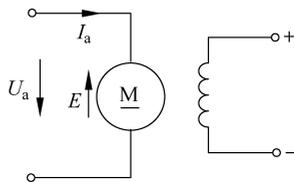


图 5-5 直流伺服电动机等效电路图

如图 5-6 所示是直流伺服电动机的机械特性曲线, $K = \frac{\Delta n}{\Delta M_a}$ 是机械特性的斜率。 K 大, 则对应于某一转矩变化 ΔM_a , 转速的变化 Δn 也大, 说明电动机的机械特性软; 反之 K 小, 则机械特性硬。

5) 直流伺服电动机的调速方式

从式(5-9)的直流电动机机械特性可知, 有 3 种方法调节电动机的转速:

- (1) 改变电枢电压 U_a , 此方法调速范围较大, 直流伺服电动机常用此方法调速。
- (2) 改变磁通量 Φ (即改变 k_e 的值)。
- (3) 在电枢回路中串联调节电阻 R_t , 此时有

$$n = \frac{U_a - I_a(R_a + R_t)}{k_e} \quad (5-10)$$

由式(5-10)可知, 在电枢回路中串联电阻的办法只能调低转速, 而电阻上的损耗较大, 所以这种办法并不经济, 仅用于较少的场合。

对于直流伺服电动机, 只能采用改变电枢电压的方式来调速, 这种调速方式宜获得较平直的机械特性和较宽的调速范围, 如图 5-1 所示。这种调速方式也称为恒转矩调速。在这种调速方式下, 电动机的最高工作转速不能超过其额定转速, 也就是说, 电动机的转速, 只能从额定转速往下调。

一般习惯于用调速范围 D 来表示电动机及其速度控制系统的调速能力, 调速范围是指

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}}$$

式中, n_{\max} ——电动机及速度控制系统所能提供的最高转速;

n_{\min} ——电动机及速度控制系统所能提供的最低转速。

3. 直流伺服电动机的主要技术参数

FB 系列直流伺服电动机的主要技术参数如表 5-1 所示。

表 5-1 FB 系列直流伺服电动机的主要技术参数

| 型号 | FB4 | FB8 | FB11 | FB15 | FB25 |
|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 输出功率(kW) | 0.4 | 0.8 | 1.1 | 1.4 | 2.5 |
| 额定转矩(N·m) | 2.7 | 5.4 | 11.8 | 17.6 | 34.3 |
| 最大转矩(N·m) | 23 | 47 | 94 | 154 | 309 |
| 额定转速(r/min) | 2000 | 2000 | 1500 | 1500 | 1000 |
| 转动惯量(kg·m ²) | 0.0026 | 0.0046 | 0.015 | 0.019 | 0.032 |
| 机电时间常数(ms) | 20 | 13 | 19 | 15.2 | 8.5 |

5.2.2 小惯量直流伺服电动机

宽调速直流伺服电动机是在维持一般直流电动机较大转动惯量的前提下, 用尽量提高转矩的方法来改善其动态特性, 而小惯量直流伺服电动机是从减小电动机的转动惯量来提

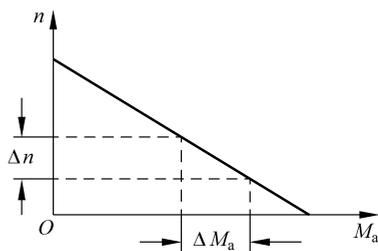


图 5-6 直流伺服电动机的机械特性曲线

高电动机的快速响应性。

1. 小惯量直流伺服电动机的结构

小惯量直流伺服电动机由一般的直流电动机发展而来,但其结构与一般直流电动机不同。

小惯量直流伺服电动机转子是光滑无槽的铁芯,电枢绕组直接用环氧无绵玻璃丝带包扎,并用绝缘黏合剂直接把线圈粘在铁芯表面,且转子长而直径小,其结构如图 5-7 所示。一般直流电动机由于磁通受到齿截面的限制,其电枢不能很小,而小惯量直流电动机的电枢没有齿和槽,不存在轭部磁密的限制,这样对同样的磁通量来说,磁路截面(即电枢直径与长度乘积)就可缩小。由于电动机转动惯量和转子直径的平方成正比,所以细长的电枢可以得到较小的转动惯量。

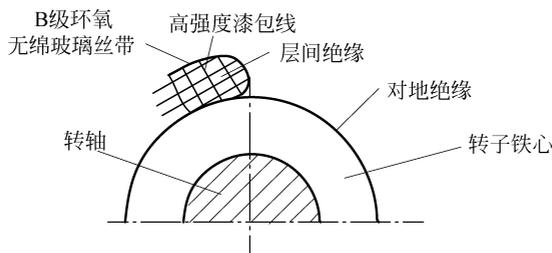


图 5-7 小惯量直流伺服电动机转子

小惯量直流伺服电动机定子的结构采用方形截面,如图 5-8 所示,增大了励磁线圈放置的有效面积。但由于是无槽结构,气隙较大,励磁线圈匝数较大,故损耗大,发热厉害。为此采取的措施是在极间安放船型挡风板以增加风压,使之带走较多的热量,且线圈外不进行包扎而成裸体。

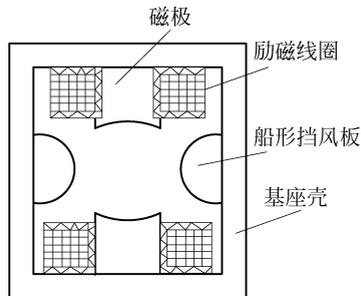


图 5-8 小惯量直流伺服电动机定子

2. 小惯量直流伺服电动机的主要技术参数

GZ 系列小惯量直流伺服电动机的主要技术参数见如表 5-2 所示。

表 5-2 GZ 系列小惯量直流伺服电动机的主要技术参数

| 型号 项目 | GZ13 | GZ25 | GZ50 | GZ100 | GZ160 | GZ240 | GZ320 |
|-------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 额定功率(kW) | 0.4 | 0.75 | 1.5 | 3 | 3.5 | 7.5 | 10 |
| 额定力矩(10N·m) | 13 | 25 | 50 | 100 | 180 | 240 | 320 |

续表

| 项目 | 型号 | GZ13 | GZ25 | GZ50 | GZ100 | GZ160 | GZ240 | GZ320 |
|---------------------------------------|-------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| | 额定转速(r/min) | | 3000 | 3000 | 3000 | 3000 | 3000 | 3000 |
| 额定电压(V) | 电枢 | 60 | 160 | 180 | 180 | 220 | 160 | 160 |
| | 励磁 | — | 190 | 180 | 180 | 220 | 190 | 190 |
| 额定电流(A) | 电枢 | 8.2 | 5.5 | 9.5 | 10 | 28 | 52 | 68 |
| | 励磁 | — | 0.53 | 1.35 | 2 | 0.05 | 1.25 | 2.5 |
| 转动惯量($10\text{kg}\cdot\text{cm}^2$) | | 14 | 80 | 70 | 150 | 400 | 1400 | 1600 |

5.3 交流伺服电动机

直流伺服电动机由于存在机械换向器和电刷,降低了电动机运行的可靠性,因此维护和保养不便。而交流异步电动机由于结构简单、成本低廉、无电刷磨损、维修方便,被认为是一种理想的伺服电动机,但调速问题一直没有得到经济合理的解决。近十年来,由于调频等调速方法发展很快,使其调速范围和成本与宽调速直流伺服电动机接近,因此,交流伺服电动机以其良好的控制性能和高可靠性在数控机床等工业领域得到了越来越广泛的应用。

5.3.1 交流伺服电动机的基本结构

交流伺服电动机的基本结构如图 5-9 所示。定子上放置三相对称绕组,而转子则是永磁体,一般采用稀土磁钢制成,故称为稀土永磁电动机。

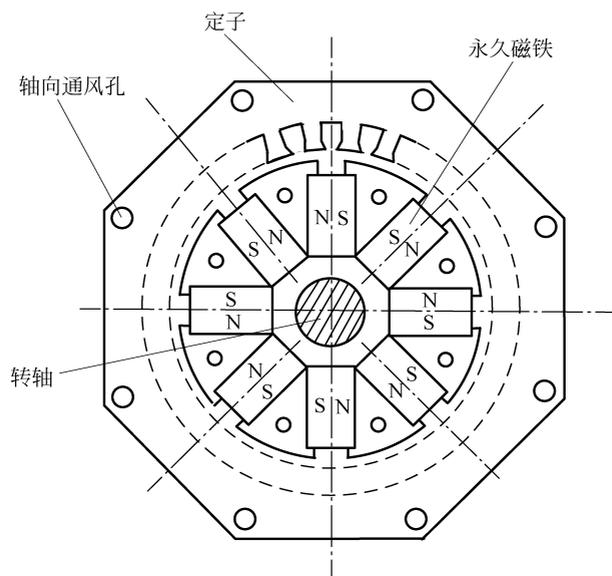


图 5-9 交流伺服电动机的基本结构

根据交流伺服电动机的基本结构,可以这样来理解:交流伺服电动机与直流伺服电动机比较,不过将定子与转子的位置进行互换,即将直流伺服电动机的永磁定子变为交流伺服电动机的永磁转子,而直流伺服电动机的转子绕组变为交流伺服电动机的定子绕组。这样互换的结果是省去了机械换向器和电刷,取而代之的是电子换向器或逆变器。

交流伺服电动机的驱动原理为:伺服电动机内部的转子是永磁铁,驱动器控制的 U/V/W 三相电形成电磁场,转子在此磁场的作用下转动,同时电动机自带的编码器反馈信号给驱动器,驱动器根据反馈值与目标值进行比较,调整转子转动的角度。下面主要介绍无刷直流电动机(BDCM)和正弦永磁同步电动机(YMSM)。

5.3.2 无刷直流电动机

1. 无刷直流电动机的结构

无刷直流电动机通常是由电动机本体、转子位置传感器和电子开关电路 3 部分组成。

电动机本体由定子和转子构成,其电枢放置在定子上,转子为永磁体。它的电枢绕组为多相绕组,一般为三相,可接成星形或三角形。各相绕组分别与电子换向器电路中的晶体管开关连接,如图 5-10 所示。

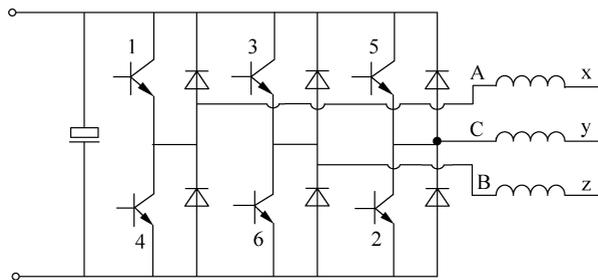


图 5-10 电子换向器与绕组连接

在无刷直流电动机的转子轴上装有转子位置检测器、测速发电机和光电脉冲编码器。位置传感器的作用是检测转子磁场相对于定子绕组的位置,并在确定的相对位置上发出信号,控制功率放大元件,使定子绕组中的电流进行切换。无刷直流电动机在通电后,电枢绕组在位置传感器信号的控制下,根据转子的位置不断使定子绕组换流,使定子绕组产生一个步进式的旋转磁场,在该旋转磁场的作用下,永磁转子就连续不断地旋转起来。

转子位置检测器有多种类型,但其输出信号均为图 5-11 所示的 3 路方波。

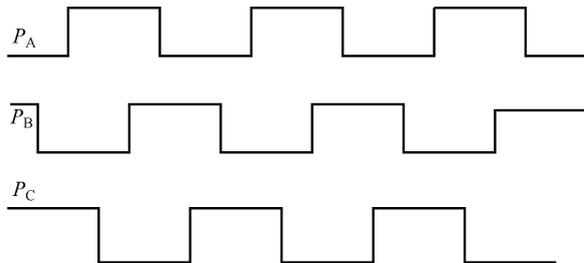


图 5-11 转子位置检测器输出的信号波形

电子换向器正是根据这3路信号对电动机进行换向。也就是说,电子换向器中的晶体管开关的导通与截止是由 P_A 、 P_B 、 P_C 这3路信号决定的。

测速发电机的输出信号用于速度反馈;而光电脉冲编码器的信号送入计算机控制装置,用于位置反馈。

2. 转子位置检测器

转子位置检测器有多种不同的结构形式,大致可分为如下几种:

1) 光电式

光电式转子位置检测器是利用光束与转子位置角之间的对应关系,按规定的顺序照射光电元件,由此发出电信号使电子换向器中相应的晶体管导通,去控制定子绕组依次换流。如图5-12所示的一种光电位置传感器,它将一个带有小孔的光屏蔽罩和转轴连接在一起,并随转子绕一固定光源旋转。安装在对应于定子绕组确定位置上的硅光电池受到光束的照射时,发出电信号,从而检测出定子绕组需要进行换流的确切位置。

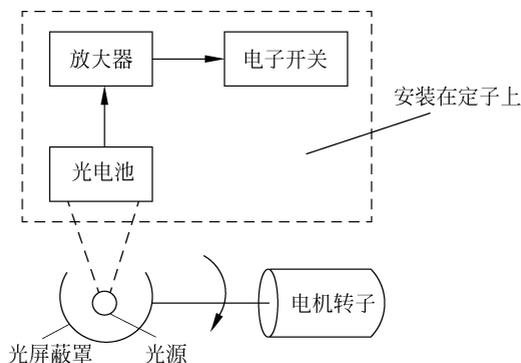


图 5-12 光电位置传感器

2) 电磁式

电磁式位置检测器的原理如图5-13所示。它由定子和转子两部分组成,定子铁心和转子上的扇形部分(即图中的 a_r 部分)均由高导磁材料制成。在定子铁心上也有与电动机定子绕组相对应的相数,每相的一端均嵌有输入线圈,并在输入线圈中外接高频励磁电压,每相的另一端嵌有输出线圈 W_a 、 W_b 、 W_c 。位置检测器的转子与电动机的转子同轴安装。当位置检测器转子的扇形部分转到使定子某相的输入线圈和输出线圈相耦合的位置时,该相输出线圈有电压信号输出,而其余未耦合相的输出线圈无电压信号输出。利用输出的电压信号,就可检测出电动机定子绕组需要进行换流的确切位置。

3) 接近开关式

接近开关式位置检测器是由一个和电动机同轴旋转的金属扇形盘和一个接近开关的电路组成。如图5-14所示为接近开关的电路原理图。

接近开关电路中的电感线圈 L_1 、 L_2 、 L_3 为耦合线圈,放置在对应于电动机定子绕组的各换流处。当与转子同轴旋转的金属扇形盘离开电感线圈 L_2 时,振荡电路以一定的频率振荡, L_1 线圈两端就有输出电压。反之,当与转子同轴旋转的金属扇形盘接近电感线圈 L_2 时,因 L_2 线圈的品质因素值下降,振荡器停振,则 L_1 线圈输出电压为零,直到金属扇形盘

离开 L_2 线圈时,振荡器便立即恢复工作,相应地使 L_1 两端又有输出电压。因此,随着转子位置角的不断变化,接近开关电路按一定顺序改变它的输出电压。利用输出电压信号可检测出电动机定子绕组需要进行换流的确切位置。

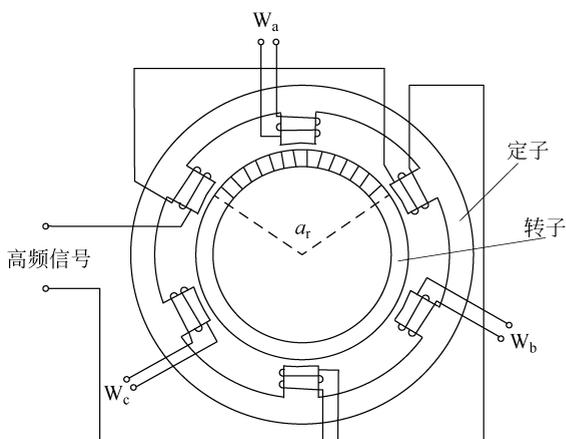


图 5-13 电磁式位转子位置检测器

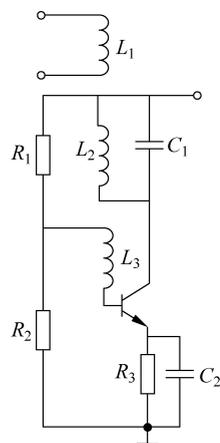


图 5-14 接近开关式转子位置检测器

3. 无刷直流电动机的工作原理

无刷直流电动机相当于 3 个换向片的直流电动机,只不过换向是由晶体管完成,因此,电枢绕组及变流器静止不动,而磁极旋转。无刷直流电动机与有刷直流电动机的对比电路如图 5-15 所示,其工作原理如图 5-16 所示,图 5-16(a)为直流电动机电枢沿逆时针方向依次转过 60° 的 3 个不同位置。根据运动的相对性,可认为电枢不动,磁极和电刷向相反的顺时针方向依次转过 60° ,但在电枢中各导体的电流仍与图 5-16(a)的流向相同,如图 5-16(b)所示。现进一步用晶体管“开关”取代机械换向器,如图 5-16(c)所示,只要依次使晶体管按 6、1-1、2-2、3-3、4……的顺序导通,则磁极(转子)也会依次转过 60° 。下面从磁场的变化来分析电动机的旋转情况。当晶体管 6 和晶体管 1 导通时,电流从电源的正极晶体管 1 \rightarrow A 相绕组 \rightarrow B 相绕组 \rightarrow 晶体管 6 \rightarrow 电源负极而形成回路,此时定子磁势 F_a 垂直于 C 相绕组轴线,如图 5-16(c)的左图所示。此时转子磁极的磁势为 F_r ,则转子磁场 F_r 与定子磁场 F_a 的夹角为 120° ,所以转子沿顺时针方向旋转。当转子转到 F_{r1} 位置时, F_{r1} 与 F_a 的夹角为

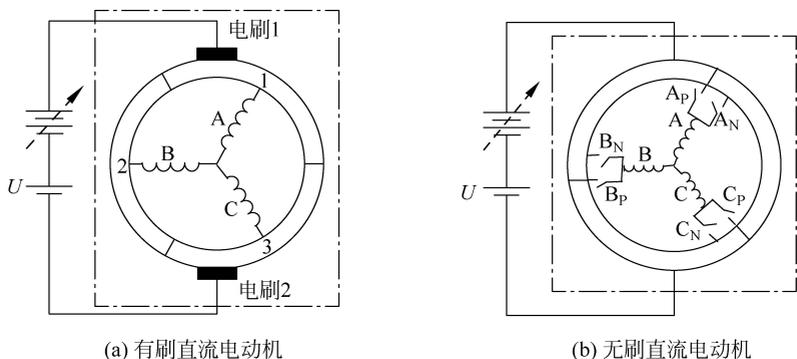
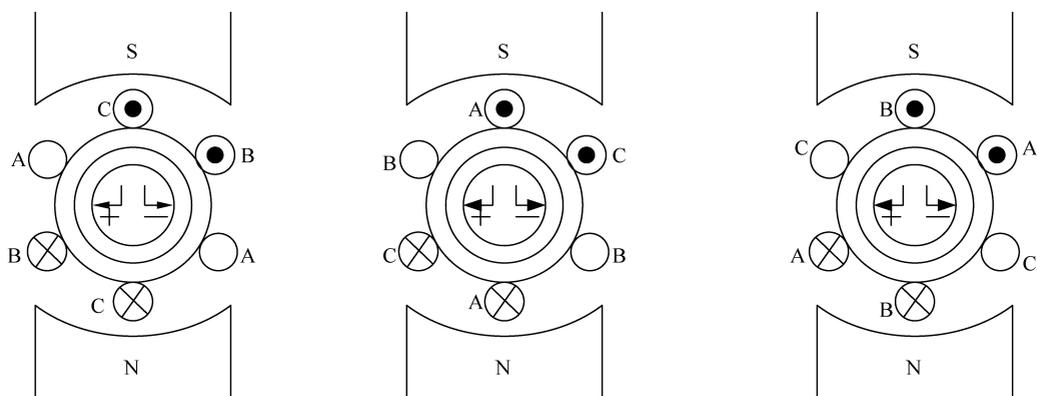
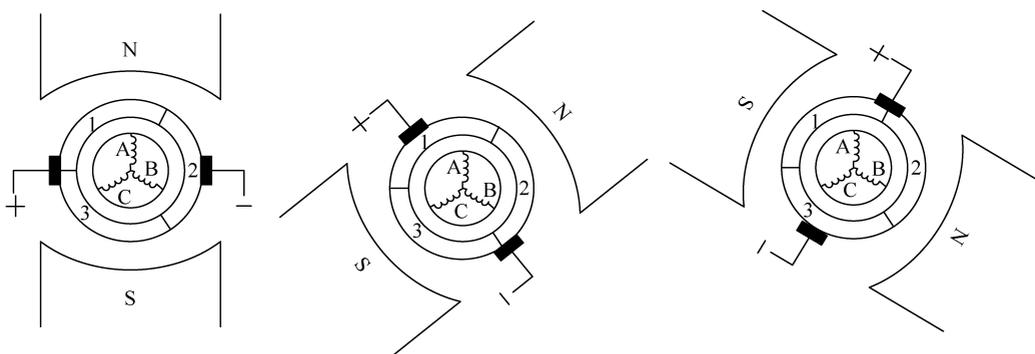


图 5-15 无刷直流电动机与有刷直流电动机的对比电路

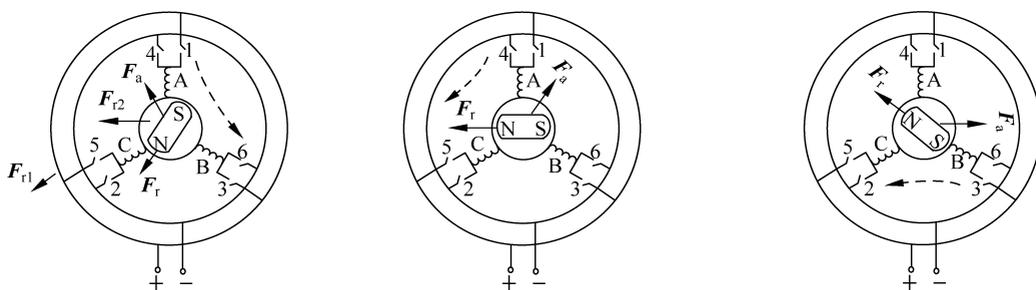
90°, 电动机的电磁转矩最大, 转子继续转动。当转子转到 F_{r2} 位置时, F_{r2} 与 F_a 的夹角为 60°, 这时通过控制电路使晶体管 2 导通, 同时晶体管 6 截止, 电枢电流转换为从电源正极 → 晶体管 1 → A 相 → C 相 → 晶体管 2 → 电源负极形成回路, 此时 F_a 转过 60°, 如图 5-16(c) 的中图所示, 而 F_r 与 F_a 的夹角又变为 120°。如此重复进行, F_r 与 F_a 的夹角始终在 60°~120° 范围内变化, 则电动机转子连续转动。



(a) 直流电机电枢沿逆时针方向依次转过 60°



(b) 电枢不动, 磁极和电刷向相反的顺时针方向依次转过 60°



(c) 用晶体管“开关”取代机械换向器

图 5-16 从直流电动机到无刷直流电动机的转化

电动机正转、反转时,晶体管的导通情况和电枢绕组的电流方向见表 5-3 和表 5-4。

表 5-3 正转时电枢绕组的电流方向和晶体管的导通顺序

| 时间(电角度) | 0° | | 120° | | 240° | |
|------------|-----|-----|------|-----|------|-----|
| 电枢绕组电流方向 | A→B | A→C | B→C | B→A | C→A | C→B |
| (+)侧导通的晶体管 | 1 | | 3 | | 5 | |
| (-)侧导通的晶体管 | 6 | 2 | | 4 | | 6 |

表 5-4 反转时电枢绕组的电流方向和晶体管的导通顺序

| 时间(电角度) | 0° | | 120° | | 240° | |
|------------|-----|-----|------|-----|------|-----|
| 电枢绕组电流方向 | A→B | A→C | B→C | B→A | C→A | C→B |
| (+)侧导通的晶体管 | 1 | 5 | | 3 | | 1 |
| (-)侧导通的晶体管 | 6 | | 4 | | 2 | |

从表 5-3 和表 5-4 中可以看出,每转过 60°电角度就有一只晶体管换流。为此要求随着转子的旋转,周期性地导通或关断相应的晶体管,才能使定子磁场和转子磁场保持同步。但这里的定子磁场是以“跳跃”方式旋转。

电动机中电磁转矩是定子、转子磁场相互作用而产生的,若略去铁心磁饱和的影响,可用下式计算

$$M_a = k_M |F_a| |F_r| \sin\theta_{ar} \quad (5-11)$$

式中, k_M ——电磁转矩常数;

F_a ——定子磁势;

F_r ——转子磁势;

θ_{ar} ——定子和转子磁势之间的夹角。

在无刷直流电动机中,由于定子磁势和转子磁势之间的夹角在 60°~120°周期性地变化,所以电磁转矩也是脉动的,如图 5-17 所示。

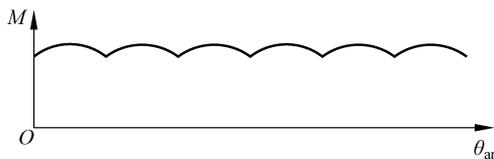


图 5-17 电动机转矩的波动

5.3.3 正弦永磁同步电动机

1. 正弦永磁同步电动机的基本结构

正弦波永磁同步电动机的结构与无刷直流电动机基本相同。其转子也是永磁体(一般用稀土碳钢制成),定子上对称地安装着三相绕组。永磁同步电动机的气隙磁场是按正弦波分布的,因此,在定子绕组中具有正弦波反电动势。

在永磁同步电动机的转子轴上装有测速发电机,其输出信号可用于速度反馈。

在转子轴上还装有转子位置检测器,它能精确地测出电动机转子的绝对转角位置。因

此,一般采用绝对式脉冲编码器或旋转变压器作为位置检测器。位置检测器输出的检测信号有两种用途:一是向计算机控制装置 CNC 中的位置控制器提供位置反馈信号;二是作为速度控制单元的电流指令信号。

2. 正弦永磁同步电动机的电磁转矩

任何电动机都由定子和转子组成,若设定子磁势为 F_a , 转子磁势为 F_r , 则电动机的电磁转矩可按下式计算

$$M_a = k_M |F_a| |F_r| \sin\theta_{ar} \quad (5-12)$$

式中, θ_{ar} 为定子磁势 F_a 和转子磁势 F_r 之间的夹角。

在直流伺服电动机中,由于电刷和换向器的作用使得 F_a 与 F_r 始终垂直,故电磁转矩 M_a 是平稳的。在无刷直流电动机中,由于定子磁势 F_a 是脉冲旋转, F_a 与 F_r 的夹角 θ_{ar} 在 $60^\circ \sim 120^\circ$ 之间周期性地变化,故电动机的电磁转矩 M_a 是脉动的。这一脉动转矩对无刷直流电动机的性能产生了不利影响。永磁同步电动机的电磁转矩也是靠定子磁场与转子磁场相互作用而产生,由于转子磁场是旋转磁场,所以只有使定子磁场与转子磁场同步旋转,才能产生平稳的电磁转矩。因此,在定子的三相对称的绕组中流过对称的三相电流,将会产生旋转磁场。

设定子绕组中的三相电流 I_A 、 I_B 、 I_C 分别是

$$\begin{aligned} I_A &= I_m \sin\theta(t) \\ I_B &= I_m \sin\left[\theta(t) - \frac{\pi}{3}\right] \\ I_C &= I_m \sin\left[\theta(t) - \frac{2\pi}{3}\right] \end{aligned}$$

式中, I_m ——定子电流的幅值;

$\theta(t)$ ——定子 A 相电流的相位角。

可以证明,定子的合成磁势 F_a 是一个旋转矢量, F_a 的表达式为

$$F_a = WI_m \sqrt{\left[\theta(t) - \frac{\pi}{2}\right]} \quad (5-13)$$

式中, W ——电动机定子绕组的有效匝数;

$\theta(t) - \frac{\pi}{2}$ ——定子磁势旋转矢量的旋转相角。

上式表明,定子磁势旋转矢量的旋转相角 $\theta(t) - \pi/2$ 与定子 A 相电流 I_A 相位角 $\theta(t)$ 在数值上相差 $\pi/2$ 。因此,若能实时地测出电动机转子(转子磁势 F_r)的转角(电角度),并使定子绕组电流的相位角 $\theta(t)$ 在数值上等于转子(转子磁势 F_r)的转角,则由定子电流所产生的定子旋转磁势 F_a 与转子磁势 F_r 的夹角 θ_{ar} 始终为 $\pi/2$,因而电动机的电磁转矩是平稳的。

上式还表明,定子磁势 F_a 的幅值与定子绕组电流的幅值 I_m 成正比,而转子磁势 F_r 始终为常值,所以电磁转矩的计算就可以简化为

$$M_a = k_M I_m \quad (5-14)$$

简化后的永磁同步电动机电磁转矩的计算公式与直流伺服电动机电磁转矩的计算公式基本相同,它表明电磁转矩与定子绕组电流的幅值 I_m 成正比。

5.3.4 交流伺服电动机的主要技术参数

美国 A-B 公司、德国 Siemens 公司、日本 FANUC 公司生产的交流伺服电动机的主要

技术参数见表 5-5。

表 5-5 交流伺服电动机

| 项目 \ 厂商 | A-B 公司 | Siemens 公司 | FANUC 公司 |
|-----------|----------|------------|-----------|
| 电动机类型 | 永磁同步电动机 | 无刷直流电动机 | 永磁同步电动机 |
| 电动机系列名 | 1326 | 1FT5 | S·L |
| 额定转矩/N·m | 1.8~47.4 | 0.15~105 | 0.25~55.9 |
| 电动机功率/kW | 0.3~7.5 | 0.16~26 | 0.05~6 |
| 驱动器系列名 | 1391 | 6SC61 | |
| 驱动方式 | 正弦波 | 方波 | 正弦波 |
| 调制频率/Hz | 2500 | 11 000 | |
| 机电时间常数/ms | 20 | 13 | 19 |

5.4 步进电动机

步进电动机 (stepping motor) 又称步级电动机 (step motor)、脉冲电动机 (pulse motor)、步级伺服 (stepper servo) 或步级机 (stepper), 是一种将电脉冲信号变换成相应的角位移或直线位移的机电执行元件。每当输入一个电脉冲, 电动机就转动一个角度前进一步。脉冲一个一个地输入, 电动机便一步一步地转动, “步进电动机”即由此得名。它输出的角位移与输入的脉冲数成正比, 转速与脉冲频率成正比, 控制输入脉冲数量、频率及电动机各相绕组的通电顺序, 就可以得到各种需要的运行特性, 因而广泛应用于数字控制系统中, 在数控开环系统中作为一种伺服驱动元件。从广义上讲, 步进电动机是一种受电脉冲信号控制的无刷式直流电动机, 也可看作在一定频率范围内转速与控制脉冲频率同步的同步电动机。

步进电动机的外施电压是脉冲电压。步进电动机按照输入的脉冲指令一步步地旋转, 脉冲数决定了旋转的角位移大小, 脉冲频率决定了旋转速度, 并能在很宽的范围内调节转速。由于步进电动机可将输入的数字脉冲信号转换成相应的角位移, 易于采用计算机控制, 且精度高, 所以被广泛用于开环控制系统中。步进电动机传动的开环控制系统由于结构简单、使用维护方便、可靠性高、制造成本低等一系列的优点, 特别适合进行简易的经济型数控机床和现有普通机床的数控化技术改造, 并且在中小型机床和速度、精度要求不十分高的场合得到了广泛的应用。

5.4.1 步进电动机的结构

从结构上来说, 步进电动机主要包括反应式、永磁式和复合式 3 种。

反应式步进电动机依靠变化的磁阻产生磁阻转矩, 又称为磁阻式步进电动机, 如图 5-18(a) 所示; 永磁式步进电动机依靠和定子绕组之间所产生的电磁转矩工作, 如图 5-18(b) 所示; 复合式步进电动机则是反应式和永磁式的结合。目前应用最多的是反应式步进电动机。

5.4.2 工作原理

本节以如图 5-19 所示的三相反应式步进电动机为例说明其工作原理。

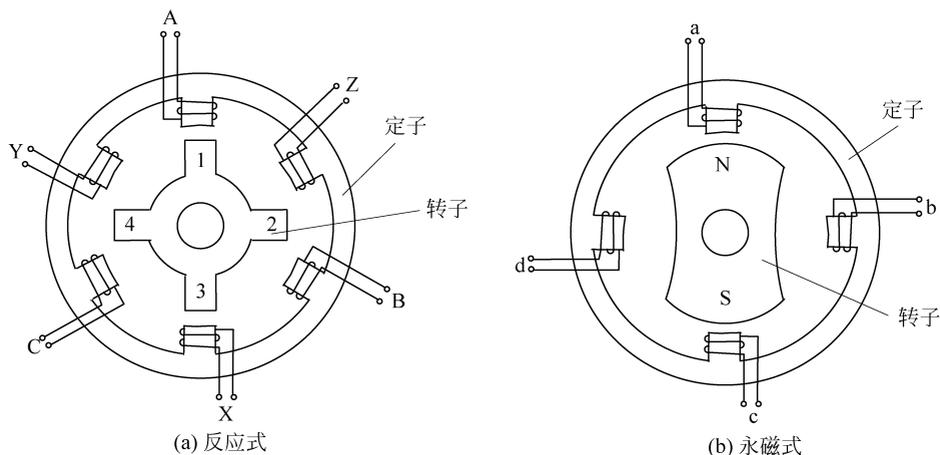


图 5-18 步进电动机的基本结构

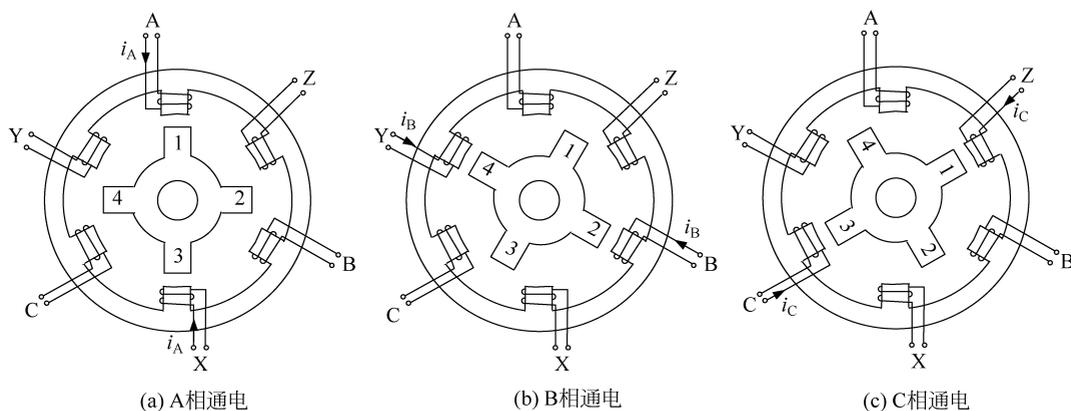


图 5-19 步进电动机工作原理(三相单三拍)

一般来说,若相数为 m ,则定子极数为 $2m$,所以定子有 6 个齿极,相对的两个齿极组成一组,每个齿极上都装有集中控制绕组。同一相的控制绕组可以串联也可以并联,只要它们产生的磁场极性相反。下面讨论转子有 4 个齿极的情况。

当 A 相绕组通入直流电流 i_A 时,由于磁力线力图通过磁阻最小的路径,转子将受到磁阻转矩的作用而转动。当转子转到其轴线与 A 相绕组轴线相重合的位置时,磁阻转矩为零,转子停留在该位置,如图 5-19(a)所示。如果 A 相绕组不断电,转子将一直停留在这个平衡位置,称为“自锁”。要使转子继续转动,可以将 A 相绕组断电,而使 B 相绕组通电。这样转子就会顺时针旋转 30° ,到其轴线与 B 相绕组轴线相重合的位置,如图 5-19(b)所示。继续改变通电状态,即使 B 相绕组断电,C 相绕组通电,转子继续顺时针旋转 30° ,如图 5-19(c)所示。如果三相定子绕组按照 A-B-C 顺序通电,则转子将按顺时针方向旋转。上述定子绕组的通电状态每切换一次称为“一拍”,其特点是每次只有一相绕组通电。每通入一个脉冲信号,转子转过一个角度,这个角度称为步距角。每经过 3 拍完成一次通电循环,所以称为“三相单三拍”通电方式。

三相步进电动机采用单三拍运行方式时,在绕组断电、通电的间隙,转子有可能失去自锁能力,出现失步现象。另外,在转子频繁启动、加速的步进过程中,由于受惯性的影响,转子在平衡位置附近有可能出现振荡现象。所以,三相步进电动机三相单三拍运行方式容易出现失步和振荡,常采用三相双三拍运行方式。

三相双三拍运行方式的通电顺序是 AB-BC-CA-AB。由于每拍都有两相绕组同时通电,如 A、B 两相通电时,转子齿极 1、3 受到定子磁极 A、X 的吸引,而 2、4 受到 B、Y 的吸引,转子在两者吸力相平衡的位置停止转动,如图 5-20(a)所示。下一拍 B、C 相通电时,转子将顺时针旋转 30° ,达到新的平衡位置,如图 5-20(b)所示。再下一拍 C、A 相通电时,转子将再顺时针旋转 30° ,达到新的平衡位置,如图 5-20(c)所示。可见这种运行方式的步距角也是 30° 。

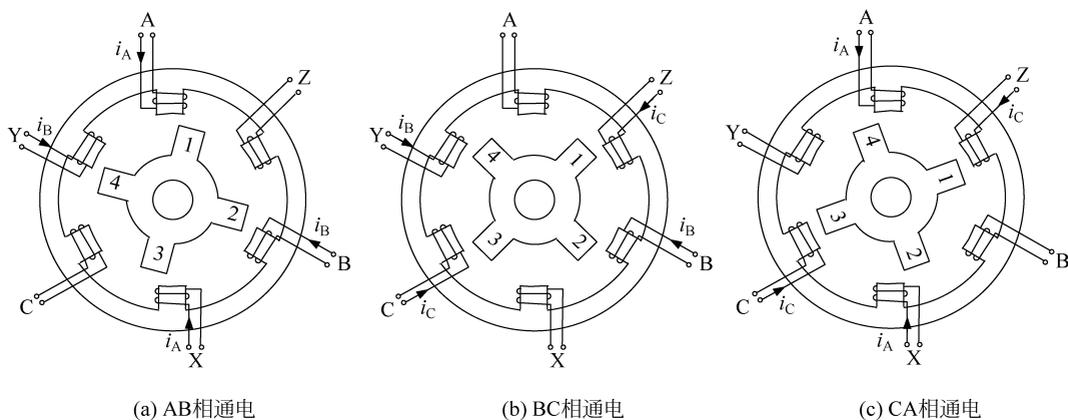


图 5-20 步进电动机工作原理(三相双三拍)

采用三相双三拍通电方式时,在切换过程中总有一相绕组处于通电状态,转子齿极受到定子磁场的控制,不易失步和振荡。

上述两种通电方式下的步进电动机的转子齿极为 4,且步距角都太大,不能满足控制精度的要求。为了减小步距角,可以将定子、转子加工成多齿结构,如图 5-21 所示。

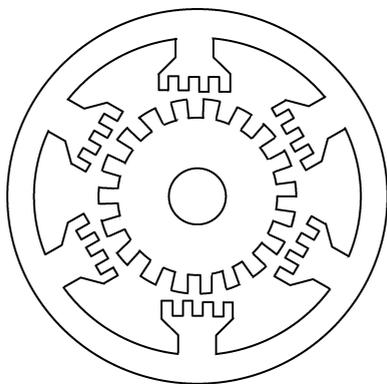


图 5-21 步进电动机多齿结构

5.4.3 步进电动机的主要特性

1. 步距角及步距误差

步距角是指步进电动机的定子绕组每改变一次通电方式,电动机转子所转过的角度。步距角可按下式计算

$$\theta_b = \frac{360^\circ}{mzk} \quad (5-15)$$

式中, m ——步进电动机定子绕组相数;

z ——步进电动机转子的齿数;

k ——定子绕组通电方式系数。

相邻两次通电的相数一样,取 $k=1$,如三相单三拍、三相双三拍工作方式;反之,取 $k=2$,如三相六拍工作方式。

步距误差是指理论步距角与实际步距角之差。步距误差主要由步进电动机齿距制造误差、定子与转子间气隙不均匀、各相电磁转矩不均匀等因素造成。步距误差直接影响执行部件的定位精度及步进电动机的动态特性。国产步进电动机的步距误差一般为 $\pm 10' \sim \pm 15'$,功率步进电动机的步距误差一般为 $\pm 20' \sim \pm 25'$ 。

2. 静态特性

静态是指步进电动机不改变通电状态、转子不动时的状态。步进电动机的静态特性主要指静态矩角特性、最大静转矩特性和最大启动转矩。

1) 静态矩角特性

空载时,步进电动机的某相通以直流电,该相的定子齿与转子齿对齐,这时转子上没有转矩输出。若在电动机轴上加一个负载转矩,则步进电动机转子就要沿着负载力矩的方向转过一个小角度 θ ,才能重新稳定下来。这时转子上受到的电磁转矩 M 和负载转矩相等,称此时的电磁转矩 M 为静态转矩,转角 θ 为失调角。描述步进电动机静态时电磁转矩 M 与失调角 θ 之间关系的特性曲线称为矩角特性曲线。静态转矩 M 与失调角 θ 的函数关系为

$$M = 510(IW)^2 \frac{z}{2} \Delta\lambda \sin(2\theta) \quad (5-16)$$

式中, I ——通入定子绕组的相电流;

W ——定子绕组的匝数;

z ——转子的齿数;

$\Delta\lambda$ ——导磁率;

θ ——失调角。

由式(5-16)可知,步进电动机的矩角特性曲线近似于正弦曲线,如图 5-22 所示。

步进电动机各相的矩角特性曲线差异不能过大,否则会引起精度下降和低频振荡。可通过调整相电流的方法,使步进电动机各相的矩角特性大致相同。

2) 最大静转矩特性

如图 5-22 所示的矩角特性曲线上电磁转矩的最大值称为最大静态转矩,用 M_{\max} 表示。在一定通电状态下,最大静转矩 M_{\max} 与定子绕组中电流的关系,称为最大静转矩特性。

由式(5-16)可知,当绕组中电流很小时,最大静转矩与电流的平方成正比;当电流稍大

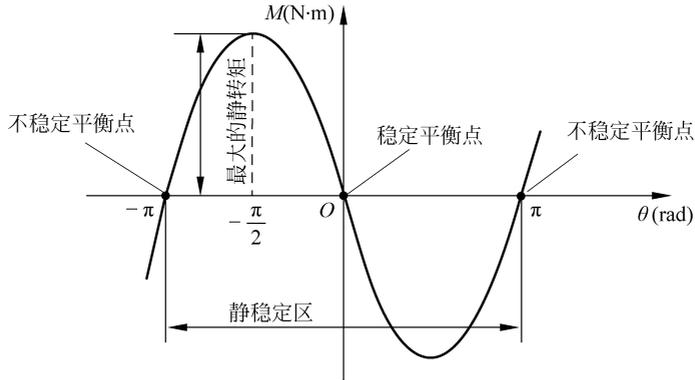


图 5-22 步进电动机的矩角特性曲线

时,受磁路饱和的影响,最大静转矩上升变缓;当电流很大时,曲线趋于饱和。如图 5-23 所示为某三相步进电动机单相通电时的最大静转矩特性曲线。步进电动机的最大静转矩 M_{\max} 越大,其自锁力矩越大,静态误差越小,其负载能力也越强。

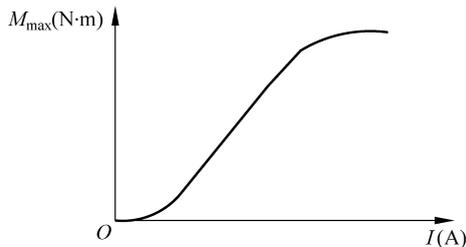


图 5-23 步进电动机最大静转矩特性曲线

3) 最大启动转矩

如图 5-24 所示,A 相与 B 相两静态矩角特性曲线的交点所对应的力矩称为最大启动转矩,用 M_q 表示。若各相的 M_{\max} 相同时,相数越多, M_q 越大。步进电动机的最大启动转矩 M_q 越大,其负载能力越大。当负载力矩小于于最大启动转矩时,步进电动机方能正常启动,否则步进电动机不能正常启动。

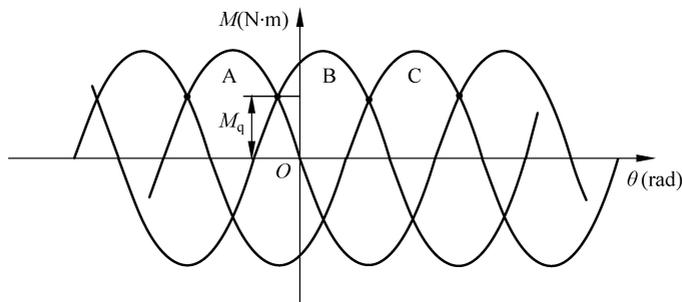


图 5-24 最大启动转矩特性

3. 动态特性

步进电动机的运行是在电气和机械过渡过程中进行的,因此,对它的动态特性有很高的

要求。步进电动机的动态特性对系统的快速响应能力和工作可靠性影响很大。它与电动机本身的特性、负载特性和驱动方式等有关。

1) 矩频特性

动态转矩是指电动机转子运行的过渡过程尚未达到稳定时电动机所产生的力矩,也就是某一频率下的最大负载转矩。由于步进电动机绕组中存在电感,绕组电流的增长可近似地认为是时间的指数函数,所以步进电动机的动态转矩随脉冲时间的不同(即控制脉冲频率的不同)而改变。脉冲频率增加,动态转矩变小。动态转矩与脉冲频率的关系称为矩频特性,如图 5-25 所示。步进电动机的动态转矩随控制脉冲频率的升高而急剧下降。

2) 启动频率和启动时的惯频特性

启动频率是指步进电动机空载时,由静止突然启动,并进入不失步的正常运行状态所允许的最高控制频率。启动频率又叫突跳频率或响应频率。它反映了电动机的响应速度。

启动时的惯频特性是指电动机带动纯惯性负载时,突跳频率与负载转动惯量之间的关系,如图 5-26 所示。随着负载转动惯量的增加,启动频率会下降。若电动机除惯性负载外,还带有转矩负载,启动频率将进一步降低。

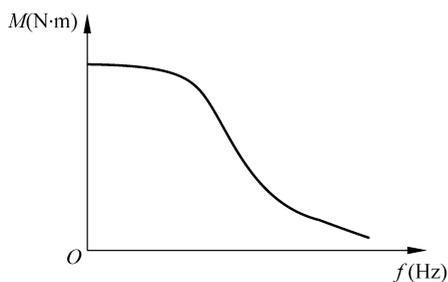


图 5-25 步进电动机的矩频特性

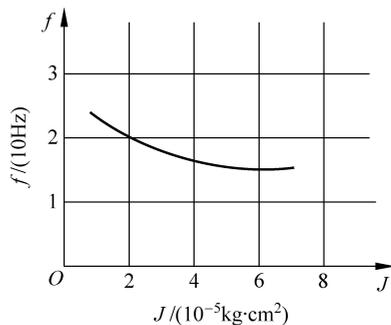


图 5-26 步进电动机的惯频特性

3) 连续运行的最高工作频率

连续运行的最高工作频率是指步进电动机连续运行时,保证其不失步运行的极限频率,用 f_{\max} 表示。步进电动机连续运行的最高工作频率决定了被控对象的最快运行速度。