

伺服电机与驱动器工作原理

Principle of servo motor and driver

孙全增, 杨劲, 陈晖

广东大比特网络科技有限公司 广州 510660

摘要: 伺服电机可以在一定范围内精确控制电机的位置和转速,基本上是无级变速,简化了传动系统。伺服驱动器采用数字信号处理器(DSP)作为控制核心,可以实现比较复杂的控制算法,实现数字化、网络化和智能化。能够精确的控制电机的转动,从而实现精确的定位。

关键词: 伺服电机, 驱动器, 工作原理

1 引言

伺服电机(servo motor)是指在伺服系统中控制机械元件运转的发动机,是一种辅助马达间接变速装置。

伺服电机可以控制速度,位置精度非常准确,可以将电压信号转化为转矩和转速以驱动控制对象。伺服电机转子转速受输入信号控制,并能快速反应,在自动控制系统中,用作执行元件,且具有机电时间常数小、线性度高等特性,可把所收到的电信号转换成电动机轴上的角位移或角速度输出。伺服电机分为直流和交流伺服电动机两大类,其主要特点是,当信号电压为零时无自转现象,转速随着转矩的增加而匀速下降。

2 伺机电机工作原理

伺服系统(servo mechanism)是使物体的位置、方位、状态等输出被控量能够跟随输入目标(或给定值)的任意变化的自动控制系统。伺服主要靠脉冲来定位,基本上可以这样理解,伺服电机接收到1个脉冲,就会旋转1个脉冲对应的角度,从而实现位移,因为,伺服电机本身具备发出脉冲的功能,所以伺服电机每旋转一个角度,都会发出对应数量的脉冲,这样,和伺服电机接受的脉冲形成了呼应,或者叫闭环,如此一来,系统就会知道发了多少脉冲给伺服电机,同时以收了多少脉冲回来,这样,就能够很精确的控制电机的转动,从而实现精确的定位,可以达到0.001mm。图1示出伺服电机。



伺服电机

图1 伺服电机

(1) 直流伺服电机分为有刷和无刷电机。有刷电机成本低,结构简单,启动转矩大,调速范围宽,控制容易,需要维护,但维护不方便(换碳刷),产生电磁干扰,对环境有要求。因此它可以用于对成本敏感的普通工业和民用场合。

无刷电机体积小,重量轻,出力大,响应快,速度高,惯量小,转动平滑,力矩稳定。控制复杂,容易实现智能化,其电子换相方式灵活,可以方波换相或正弦波换相。电机免维护,效率很高,运行温度低,电磁辐射很小,长寿命,可用于各种环境。

(2) 交流伺服电机也是无刷电机,分为同步和异步电机,目前运动控制中一般都用同步电机,它的功率范围大,可以做到很大的功率。大惯量,最高转动速度低,且随着功率增大而快速降低。因而适合做低速平稳运行的应用。

伺服电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。伺服电机的精度决定于编码器的精度（线数）。

交流伺服电机和无刷直流伺服电机在功能上的区别：交流伺服要好一些，因为是正弦波控制，转矩脉动小。直流伺服是梯形波。但直流伺服比较简单，便宜。

3 伺服电机选型比较

3.1 交流伺服电动机

交流伺服电动机定子的构造基本上与电容分相式单相异步电动机相似。其定子上装有两个位置互差 90° 的绕组，一个是励磁绕组 R_f ，它始终接在交流电压 U_f 上；另一个是控制绕组 L ，联接控制信号电压 U_c 。所以交流伺服电动机又称两相伺服电动机。图 2 示出两相绕组分布图。

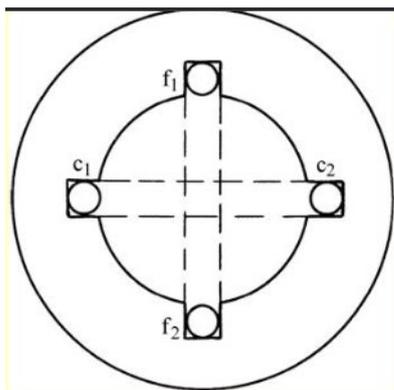


图 2 两相绕组分布图

交流伺服电动机的转子通常做成鼠笼式，但为了使伺服电动机具有较宽的调速范围、线性的机械特性，无“自转”现象和快速响应的性能，它与普通电动机相比，应具有转子电阻大和转动惯量小这两个特点。目前应用较多的转子结构有两种形式：一种是采用高电阻率的导电材料做成的高电阻率导条的鼠笼转子，为了减小转子的转动惯量，转子做得细长；另一种是采用铝合金制成的空心杯形转子，杯壁很薄，仅 $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ ，为了减小磁路的磁阻，要在空心杯形转子内放置固定的内定子。空心杯形转子的转动惯量很小，反应迅速，而且运转平稳，因此被广泛采用。图 3 示出笼形转子导体。

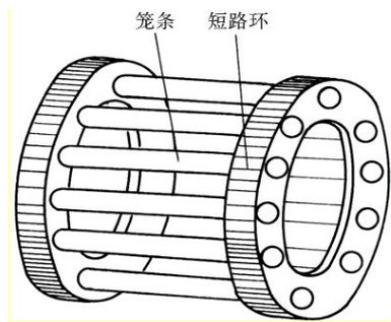
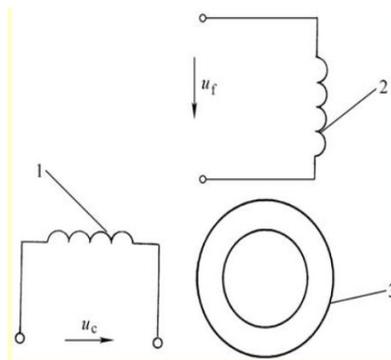


图 3 笼形转子导体

交流伺服电动机的电气原理图如图 4 所示，1 是控制绕组，2 是励磁绕组，3 是笼形转子。



1- 控制绕组；2- 励磁绕组；3- 笼形转子

图 4 交流伺服电动机原理图

(1) 当交流伺服电动机的励磁绕组 2 接到 U_f 上，如果控制绕组加上控制电压为 0 时，定子内只有励磁绕组产生的是脉动磁通势，建立的是脉动磁场，电动机无启动转矩。转子静止不动。(2) 当控制绕组加上控制电压 U_f 且产生的控制电流与励磁电流的相位不同，定子内便建立起椭圆形旋转磁场，于是产生了启动转矩，电动机转子沿旋转磁场的方向就转动起来了。在负载恒定的情况下，电动机的转速随控制电压的大小而变化，当控制电压的相位相反时，伺服电动机将反转。(3) 如果控制电压消失，转速会下降，但不会停止。

交流伺服电动机具有自转的能力。

3.2 永磁交流伺服电动机

20 世纪 80 年代以来，随着集成电路、电力电子技

术和交流可变速驱动技术的发展,永磁交流伺服驱动技术有了突出的发展,各国著名电气厂商相继推出各自的交流伺服电动机和伺服驱动器系列产品并不断完善和更新。交流伺服系统已成为当代高性能伺服系统的主要发展方向,使原来的直流伺服面临被淘汰的危机。90年代以后,世界各国已经商品化了的交流伺服系统是采用全数字控制的正弦波电动机伺服驱动。交流伺服驱动装置在传动领域的发展日新月异。

永磁交流伺服电动机同直流伺服电动机比较,主要优点有:

- (1) 无电刷和换向器,因此工作可靠,对维护和保养要求低。
- (2) 定子绕组散热比较方便。
- (3) 惯量小,易于提高系统的快速性。
- (4) 适应于高速大力矩工作状态。
- (5) 同功率下有较小的体积和重量。

3.3 伺服电动机与单相异步电动机比较

交流伺服电动机的工作原理与分相式单相异步电动机虽然相似,但前者的转子电阻比后者大得多,所以伺服电动机与单相异步电动机相比,有三个显著特点:

(1) 起动转矩大

由于转子电阻大,与普通异步电动机的转矩特性曲线相比,有明显的区别。它可使临界转差率 $S_0 > 1$,这样不仅使转矩特性(机械特性)更接近于线性,而且具有较大的起动转矩。因此,当定子一有控制电压,转子立即转动,即具有起动快、灵敏度高的特点。

(2) 运行范围较广。

(3) 无自转现象。

正常运转的伺服电动机,只要失去控制电压,电机立即停止运转。当伺服电动机失去控制电压后,它处于单相运行状态,由于转子电阻大,定子中两个相反方向旋转的旋转磁场与转子作用所产生的两个转矩特性(T_1-S_1 、 T_2-S_2 曲线)以及合成转矩特性($T-S$ 曲线)。

交流伺服电动机的输出功率一般是0.1~100W。当电源频率为50Hz,电压有36V、110V、220、380V;当电源频率为400Hz,电压有20V、26V、36V、115V等多种。

交流伺服电动机运行平稳、噪音小。但控制特性是非线性,并且由于转子电阻大,损耗大,效率低,因此与同容量直流伺服电动机相比,体积大、重量重,所以只适用于0.5~100W的小功率控制系统。

4 伺服驱动器

伺服驱动器(servo drives)又称为“伺服控制器”、“伺服放大器”,是用来控制伺服电机的一种控制器,其作用类似于变频器作用于普通交流马达,属于伺服系统的一部分,主要应用于高精度的定位系统。一般是通过位置、速度和力矩三种方式对伺服马达进行控制,实现高精度的传动系统定位,目前是传动技术的高端产品。

4.1 伺服驱动器工作原理

(1) 目前主流的伺服驱动器均采用数字信号处理器(DSP)作为控制核心,伺服驱动器(图5)可以实现比较复杂的控制算法,实现数字化、网络化和智能化。功率器件普遍采用以智能功率模块(IPM)为核心设计的驱动电路,IPM内部集成了驱动电路,同时具有过电压、过电流、过热、欠压等故障检测保护电路,在主回路中还加入软启动电路,以减小启动过程对驱动器的冲击。

(2) 功率驱动器单元首先通过三相全桥整流电路对输入的三相电或者市电进行整流。得到相应的直流电。经过整流好的三相电或市电,再通过三相正弦PWM电压型逆变器变频来驱动三相永磁式同步交流伺服电机。功率驱动单元的整个过程可以简单的说就是AC—DC—AC过程。整流单元(AC—DC)主要的拓扑电路是三相全桥不控整流电路。图5示出伺服驱动器。



图5 伺服驱动器

(3) 随着伺服系统的大规模应用,伺服驱动器使用,伺服驱动器调试、伺服驱动器维修都是伺服驱动器在当今比较重要的技术课题,越来越多工程技术服务商对伺服驱动器进行了技术深层次研究。

(4) 伺服驱动器是现代运动控制的重要组成部分,被广泛应用于工业机器人及数控加工中心等自动化设备中。尤其是应用于控制交流永磁同步电机的伺服驱动器已经成为国内外研究热点。当前交流伺服驱动器设计中普遍采用基于矢量控制的电流、速度、位置3闭环控制算法。该算法中速度闭环设计合理与否,对于整个伺服控制系统,特

别是速度控制性能的发挥起到关键作用。

4.2 基本要求

伺服进给系统的要求

- (1) 调速范围宽。
- (2) 定位精度高。
- (3) 有足够的传动刚性和高的速度稳定性。
- (4) 快速响应，无超调。

为了保证生产率和加工质量，除了要求有较高的定位精度外，还要求有良好的快速响应特性，即要求跟踪指令信号的响应要快，因为数控系统在启动、制动时，要求加、减加速度足够大，缩短进给系统的过渡过程时间，减小轮廓过渡误差。

- (5) 低速大转矩，过载能力强。

一般来说，伺服驱动器具有数分钟甚至半小时内 1.5 倍以上的过载能力，在短时间内可以过载 4 ~ 6 倍而不损坏。

- (6) 可靠性高。

要求数控机床的进给驱动系统可靠性高、工作稳定性好，具有较强的温度、湿度、振动等环境适应能力和很强的抗干扰的能力。

4.3 对电机的要求

(1) 从最低速到最高速电机都能平稳运转，转矩波动要小，尤其在低速如 0.1 r/min 或更低速时，仍有平稳的速度而无爬行现象。

(2) 电机应具有大的较长时间的过载能力，以满足低速大转矩的要求。一般直流伺服电机要求在数分钟内过载 4 ~ 6 倍而不损坏。

(3) 为了满足快速响应的要求，电机应有较小的转动惯量和大的堵转转矩，并具有尽可能小的时间常数和启动电压。

- (4) 电机应能承受频繁启动、制动和反转。

5 伺服电机编码器

伺服编码器是安装在伺服电机末端用来测量磁极位置和伺服电机转角及转速的一种传感器，通常内置在伺服电机末端，用于将伺服电机的旋转角（位置）反馈给伺服驱动器，伺服驱动器接收反馈信号来控制伺服电机的旋转，形成闭环控制以精确控制伺服电机的旋转位置和速度。编

码器作为伺服系统的反馈装置，很大程度上决定伺服系统精度。伺服驱动器驱动电机转动，编码器将反馈信号输入驱动器，这样便能得到电机的转速、位置等状况。伺服编码器目前自控领域常用的是光电编码器和磁电编码器。另外旋转变压器也算一种特殊的伺服编码器，市场上使用的基本上是光电编码器，不过磁电编码器作为后起之秀，有可靠，价格便宜，抗污染等特点，有赶超光电编码器的趋势。

按照信号输送方式的不同，光电编码器还分为增量式和绝对式，增量型编码器通过记录旋转圈数的累加值确定电机位置，绝对值编码器可以直接输出位置的数字量，增量型编码器价格便宜，使用领域较广，绝对值编码器价格昂贵，但是数据可靠性和抗干扰性更强。

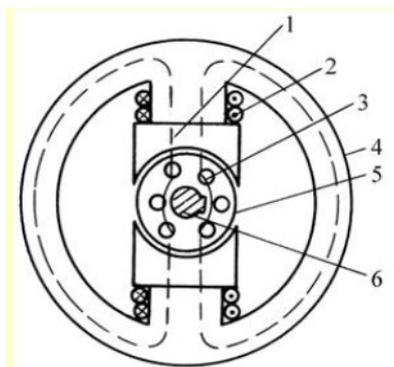
6 直流伺服电机的工作原理及驱动方法

伺服系统的发展经历了由液压到电气的过程，电气伺服系统根据所驱动的电机电型分为直流（DC）伺服系统和交流（AC）伺服系统。20 世纪 50 年代，无刷电机和直流电机实现了产品化，并在计算机外围设备和机械设备上获得了广泛的应用。20 世纪 70 年代则是直流伺服电机应用最为广泛的时期。伺服电机是自动装置中的执行元件，它的最大特点是可控，在有控制信号时，伺服电机就转动，且转速大小正比于控制电压的大小，除去控制信号电压后，伺服电机就立即停止转动。

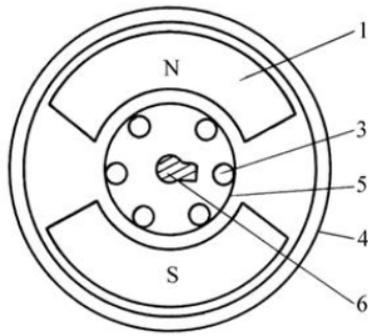
6.1 直流伺服电机的工作原理

(1) 直流伺服电动机的工作原理和普通直流电动机相同，其励磁方式一般采用他励式，也有不用励磁绕组而用永久磁铁的永磁式。

图 6 示出直流伺服电动机剖面图。



(a) 他励式



(b) 永磁式

- 1- 磁极; 2- 励磁绕组; 3- 电枢绕组;
- 4- 机壳; 5- 电枢铁芯; 6- 转轴

图 6 直流伺服电动机剖面图

(2) 直流伺服电动机通过电刷和换向器产生的整流作用,使磁场磁动势和电枢电流磁动势正交,从而产生转矩。其电枢大多为永久磁铁。同交流伺服电动机相比,直流伺服电动机起动转矩大,调速广且不受频率及极对数限制(特别是电枢控制的),机械特性线性度好,从零转速至额定转速具备可提供额定转矩的性能,功率损耗小,具有较高的响应速度、精度和频率,优良的控制特性,这些是它的优点。图 7 示出直流伺服电动机的原理图。

但直流电机的优点也正是它的缺点,因为直流电机要产生额定负载下恒定转矩的性能,则电枢磁场与转子磁场必须恒维持 90° ,这就要借助碳刷及整流子:电刷和换向器的存在增大了摩擦转矩,换向火花带来了无线电干扰,除了会造成组损坏之外,使用场合也受到限制,寿命较低,需要定期维修,使用维护较麻烦若使用要求频繁起停的随动系统,则要求直流伺服电动机起动转矩大:在连续工作的系统中,则要求伺服电机寿命较长,使用时要特别注意先接通磁场电源,然后加电枢电压。

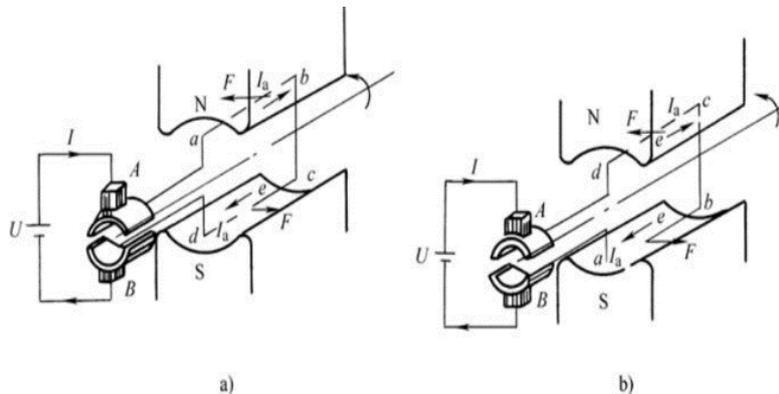


图 7 直流伺服电动机的原理图

6.2 直流伺服电机控制方式

(3) 直流伺服电机依靠电枢电流与气隙磁通的作用产生电磁转矩,使伺服电机转动。直流伺服电动机按控制方式可分为电枢控制和励磁磁场控制两种。

① 工作时将励磁绕组接在固定的直流电源上,而将控制电压加在电枢绕组上,在保持励磁电压不变的条件下,通过改变电压来改变转速,这种方式称为电枢控制。改变电压的大小和方向,电动转矩大小方向也随之改变,电压越小转速越低,当控制电压为零,电动机停转。因为电压为零时,电流也为零,所以电机不会产生电磁转矩,即不会出现自转现象。图 8 示出直流伺服电动机电枢控制线路图。

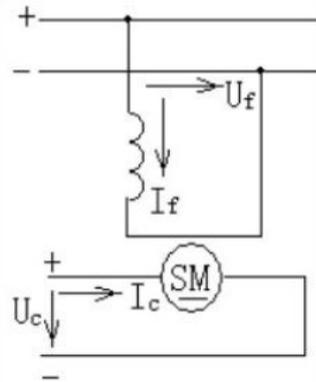


图 8 直流伺服电动机电枢控制线路图

② 励磁磁场控制,通过改变励磁电流的大小来改变定子磁场强度,从而控制电动机的转速和输出转矩。

6.3 模拟调速系统

直流伺服电机的特点输入或输出为直流电能的旋转电机。它的模拟调速系统一般是由 2 个闭环构成的,既速度闭环和电流闭环,为使二者能够相互协调、发挥作用,在

系统中设置了 2 个调节器，分别调节转速和电流。2 个反馈闭环在结构上采用一环套一环的嵌套结构，这就是所谓的双闭环调速系统，它具有动态响应快、抗干扰能力强等优点，因而得到广泛地应用。

通常是由模拟运放构成 PI 或 PID 电路；信号调理主要是对反馈信号进行滤波、放大。考虑到直流电机的数学模型，模拟调速系统动态传递函数关系在模拟调速系统的调试过程中，因电机的参数或负载的机械特性与理论值有较大差异，往往需要频繁更换 R、C 等元件来改变电路参数，以获得预期的动态性能指标，这样做起来非常麻烦，如果采用可编程模拟器件构成调节器电路，系统参数如增益、带宽甚至电路结构都可以通过软件进行修改，调试起

来就非常方便。

参考文献

- 1 伺服电机内部结构及其工作原理. <http://www.doc88.com/p-817905379898.html>
- 2 交流伺服电机驱动器及其工作原理. <https://wenda.so.com/q/1514041280219744>
- 3 伺服电机与驱动器工作原理. <https://docin/p-2020371008.html>
- 4 直流伺服电机的工作原理. <https://www.diangon.com/thread-43958-1-1.html>

上接52页

统。我们还将整个生命周期和温度范围内的总最大灵敏度误差降低至 $\pm 1.75\%$ ，这有助于提高效率并减少成本高昂的系统校准工作。另外，TMCS1123 具有差分霍尔效应感应功能，能够显著减少磁场干扰或串扰，并且还提供了过流检测、精密电压基准和传感器报警等其他功能。请参阅图 1。

TMCS1123 还解决了霍尔效应传感器的一些其他常见限制，例如引线框电阻和芯片散热限制，这些会限制器件能够处理的电流大小。TMCS1123 能够在 25°C 条件下检测 75A_{RMS} 的电流，并在整个温度范围和生命周期内，无需校准即可实现 $\pm 1.75\%$ 的灵敏度误差，因此能够在系统的生命周期内保持高精度。

电流检测设计考虑因素

下面列举了几个为系统选择电流传感器时的一些主要考虑因素。首先，精度是一项重要的考虑因素，应当作为

首要定义的参数之一来确定可行的技术。其次，功率等级对于上述所有技术都至关重要。系统的电压和电流水平必须在器件规定的参数范围内，以确保安全高效地运行。为了灵敏地控制开关系统，例如太阳能系统中的隔离式直流/直流转换器，必须考虑带宽和速度。设计复杂性也是需要考虑的一项重要因素。因为无需额外的电源或元件，霍尔效应电流传感器使用简单，能够在器件允许范围内的所有电压电平条件下工作。

结语

EV 充电器和光伏逆变器等高压系统中日益需要高度精确的电流测量，而高压应用中存在一些设计挑战，使得系统的设计变得更加复杂，成本也更高。现在，借助 TMCS1123 等电流检测器件，您可以在 EV 充电器等高压应用中精确地检测电流，同时降低设计复杂性，并以更合理的价格迅速解决各种设计问题。