

# 数控伺服系统

## 本章学习目标

- 掌握数控伺服系统的控制原理和组成
- 掌握数控伺服系统的分类和每种类型的数控伺服系统的特点
- 了解数控伺服系统的4种常用驱动装置及其控制方法

数控伺服系统是数控机床的执行机构,是数控系统与机床的连接环节,其以机床的移动部件的位置或速度作为控制对象,因此也称为位置随动系统,其接收数控装置输出的插补结果,并控制电动机驱动机床移动部件,完成预期的运动。数控伺服系统的性能直接决定了数控加工系统的精度、稳定性、可靠性和加工效率。本章首先介绍数控伺服系统的组成和分类方法,然后介绍数控伺服系统常见的4种伺服驱动装置和其相应的控制方法。

## 5.1 概述

### 5.1.1 数控伺服系统组成

如图5-1所示,数控伺服系统主要由功率驱动(由驱动信号产生电路和功率放大器组成)、执行元件、机床以及反馈检测单元(闭环或半闭环系统中存在)组成。功率驱动模块将插补器送来的进给指令转化为执行元件所需的信号形式,执行元件则将功率驱动模块输出的驱动信号转化为相应的机械位移,带动机床的工作台或刀具按系统指令实现特定运动。

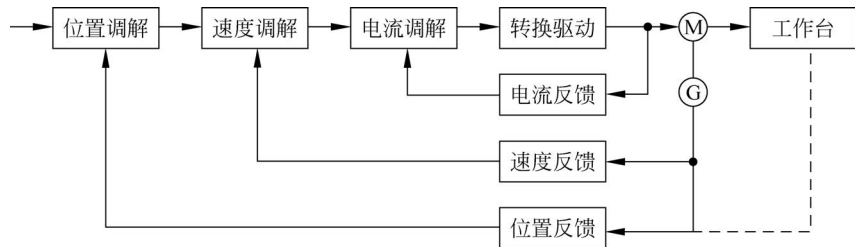


图 5-1 数控机床伺服系统的基本组成

闭环伺服系统主要由功率驱动、执行元件、机床以及反馈检测单元、比较环节等组成。执行元件常常不能保证工作台和刀具准确到达指令所期望的位置,闭环伺服系统通过反馈检测单元将工作台或刀具的实际位置反馈到输入端,通过比较环节将指令信号和反馈信号进行比较,以比较所得的差值作为伺服系统的跟随误差,经功率放大,控制执行元件带动工作台或刀具朝着减小误差的方向运动。位置控制严格来说包括位置控制、速度控制和电流控制,主要用于控制进给运动坐标轴的位置。由数控加工的特点可知,对进给轴的控制是要求最高的位置控制,不仅对单个轴的运动速度和位置精度的控制有严格要求,而且在多轴联动时,还要求各进给运动轴有很好的动态配合,才能保证加工精度和表面质量。速度控制功能包括速度控制和电流控制,一般用于对主运动坐标轴的控制。

开环伺服系统不包括相应的反馈检测单元和比较环节,主要由功率驱动、执行元件和机

床组成。其中的执行元件通常选用步进电动机,它对系统的特性具有重要的影响。

### 5.1.2 伺服系统控制原理

数控伺服系统接收数控装置输出的插补结果,如指令脉冲或数字量信息,通过功率放大控制伺服电动机驱动机床的移动部件,完成预期的直线或转角位移运动。因此,伺服系统的输出就是能直接驱动伺服电动机的电压或电流。高性能的闭环或半闭环伺服系统还由检测元件反馈实际输出,并由位置调节器构成闭环控制。

如图 5-2 所示为一个双闭环数控机床伺服系统组成结构图,其由速度环和位置环分别构成内环和外环。速度环通过检测元件获取的位置量的微分得到速度,速度控制单元由速度调节器、电流调节器及功率驱动放大器等组成。位置控制模块、速度单元、位置检测及反馈控制等构成系统的位置环,主要应用于系统要求最高的位置控制——进给运动坐标轴,实现对机床运动坐标轴的控制,使之满足一定的位置精度。在多轴联动时,进给轴的控制不仅是单个轴的运动速度和位置精度控制,还要求进给运动轴有很好的动态配合,才能保证加工零件的精度和表面质量。在满足位置控制的前提下,速度控制按系统的参数与控制速度使之以最快速度响应且无超调,满足进给要求。具体来说,速度控制功能包括速度控制和电流控制,一般用于对主运动坐标轴的控制。而位置控制功能包括位置控制、速度控制和电流控制。

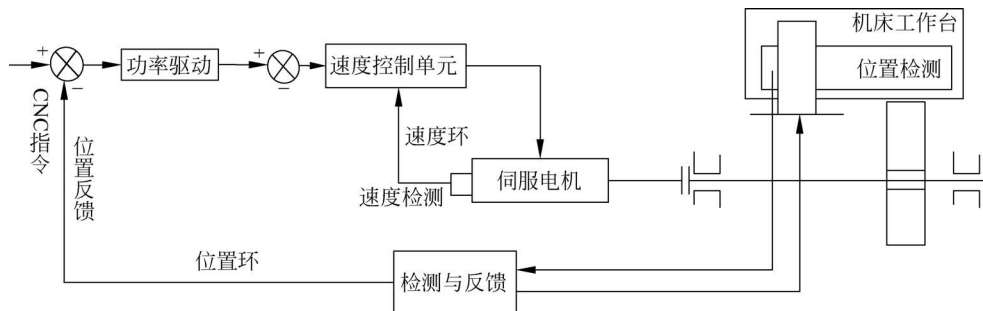


图 5-2 伺服系统的基本性能指标

数控机床运动中,伺服进给运动和主轴运动是机床的基本成型运动。数控机床技术水平的提高首先依赖于进给和主轴驱动特性的改善以及功能的扩大,为此数控机床对进给伺服系统的位置控制、速度控制、伺服电动机、机械传动等方面都有很高的要求。

进给伺服系统是数控装置和机床机械传动部件间的联系环节,包含机械、电子、电动机等各种部件,涉及强电与弱电控制,是一个比较复杂的控制系统。主轴驱动控制一般只要满足主轴调速及正、反转即可,但当要求机床有螺纹加工、准停和恒速加工等功能时,就对主轴提出了相应的位置控制要求。此时,主轴驱动控制系统可称为主轴伺服系统,其控制相对进给伺服控制系统较为简单。由于每种数控系统所面向的加工任务不同,相应对于进给伺服系统的要求也各不一样,但通常可概括为以下几方面。

#### 1. 控制精度高,分辨力低

为了满足数控加工精度的要求,关键是保证伺服系统的位移精度和定位精度。位移精度是指指令脉冲理想的机床工作台进给的位移量与在该指令脉冲作用下工作台实际位移量之间的符合程度,两者误差愈小,伺服系统的位移精度愈高。定位精度是指输出量能复现输

入量的精确程度。目前,数控机床伺服系统位移精度可达到在全程范围内 $\pm 5\mu\text{m}$ 。数控加工对定位精度和轮廓加工精度要求都比较高,定位精度为 $\pm 0.001\text{mm}$ ,甚至 $0.1\mu\text{m}$ ,高的可达到 $\pm 0.01\sim\pm 0.005\mu\text{m}$ 。轮廓加工精度与速度控制和联动坐标的协调控制有关。速度控制对静态、动态精度要求都比较高,要求高的调速精度和较强的抗负载扰动能力。当多轴联动加工时,还要求能够较好地协调控制各个坐标轴,这样可减小零件轮廓误差。

分辨力指当伺服系统接收 CNC 送来的一个脉冲时,工作台相应移动的单位距离。数控系统的分辨力主要取决于系统稳定工作性能和系统所采用的位置检测元件。为达到较好的加工精度,对伺服系统的分辨力也提出了相应的要求。目前,数控测量装置的分辨力可达到 $0.1\mu\text{m}$ ,闭环伺服系统都能达到 $1\mu\text{m}$ 的分辨力,而高精度数控机床可达到 $0.1\mu\text{m}$ 的分辨力,甚至更低。

## 2. 稳定性好,可靠性高

伺服系统的稳定性是指系统在突变的指令信号或外界扰动的作用下,能在短暂的调节过程后,以最大的速度达到新的或恢复到原有的平衡状态的一种性能。伺服系统的稳定性直接影响数控加工精度和表面粗糙度。较强的抗干扰能力是获得均匀进给速度、合格加工精度的重要保证。例如,当伺服系统在不同的负载情况下或切削条件发生变化时,刚性良好的系统使进给速度维持恒定,受负载力矩变化的影响很小。具体来说,静态速降应小于 $5\%$ ,动态速降应小于 $10\%$ 。

另外,伺服系统应对温度、湿度、粉尘、油污、振动、电磁干扰等环境参数的适应性强,性能稳定,使用寿命长,平均无故障时间间隔长。

## 3. 快速响应性好,无超调

快速响应是伺服系统的动态性能指标之一,反映了系统对插补指令的跟踪精度。为了保证轮廓切削形状精度和加工表面粗糙度,要求伺服系统有良好的快速响应特性,即要求跟踪指令信号的响应要快。目前数控机床的插补周期一般都在 $10\text{ms}$ 以内,即在这段时间内指令就变化一次,伺服系统应快速跟踪指令信号,伺服电动机迅速加减速,以实现执行部件的加减速控制,并且要求很小的超调量。具体来说,就对伺服系统的动态性能提出三方面的要求:①在伺服系统处于频繁的启动、制动、加速、减速等动态过程中,为了提高生产率和保证加工质量,则要求加、减速度足够大,以缩短过渡过程时间。一般电动机速度由 $0$ 到最大,或从最大减少到 $0$ ,时间应控制在 $200\text{ms}$ 以下,甚至少于几十毫秒,且速度变化时不应有超调;②当负载突变时,过渡过程前沿要陡,恢复时间要短,且无振荡;③超调要小,甚至没有超调,否则在定位或进给过程中有可能碰撞刀具或工件而发生刀具干涉现象。在过渡过程中快速性和超调量之间往往是矛盾的,实际的系统设计和应用中必须根据工艺要求进行折中选择。

## 4. 调速范围宽

调速范围指数控机床要求电动机额定负载时能提供的最高转速和最低转速之比。通常可表示为

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

其中, $n_{\max}$ 和 $n_{\min}$ 一般是指额定负载时的转速,对于少数负载很轻的机械,也可以是实际负载时的转速。主轴伺服系统主要是速度控制,它要求 $1:100\sim 1:1000$ 调速范围内的低速

(额定转速以下)恒转矩调速和1:10以上的恒功率高速(额定转速以上)调速范围。

为适应不同的加工要求,例如所加工零件的材质、尺寸以及加工用刀具的种类和冷却方式等的不同,要求进给速度可以在很宽的范围内无级变化,伺服系统需要具有足够宽的调速范围和优异的调速特性。进给速度的变化范围一般由电动机转速的变化范围经过机械传动后得到。对于一般的数控系统而言,伺服系统在 $0\sim 24\text{m}/\text{min}$ 进给速度范围内就能满足工作要求。目前,先进的伺服系统调速范围为在分辨力为 $1\mu\text{m}$ 的情况下,进给速度范围为 $0\sim 240\text{m}/\text{min}$ ,且可无级连续可调。代表当今世界先进水平的实验系统的速度控制单元调速范围已达1:100 000。对于一般的数控系统,还可以提出以下更细致的技术要求。

(1) 在1:24 000调速范围内( $1\sim 24\text{m}/\text{min}$ ),要求速度均匀、稳定、无爬行,且速降小。伺服控制系统的总体控制效果是由位置控制和速度控制一起决定的(也包括电流控制)。对速度控制不能过分地追求像位置控制那么大的控制范围,否则速度控制单元将会变得相当复杂,既提高了成本又降低了可靠性。一般来说,对于进给速度范围为1:20 000的位置控制系统,在总的开环位置增益为 $20\text{s}^{-1}$ 时,只要保证速度控制单元具有1:1000的调速范围就可以满足需要,这样可使速度控制单元线路既简单又可靠。

(2) 在工作台停止运动时,要求电动机仍有电磁转矩以维持定位精度,使定位误差不超过系统的允许范围,即电动机处于伺服锁定状态。

(3) 在 $1\text{mm}/\text{min}$ 以下时具有一定的瞬时速度,但平均速度很低。

### 5. 低速大转矩

数控加工系统在进行粗切削加工时,一般采用大切削量和低速进给,这就要求伺服系统在低速运行时有大的转矩输出。主轴坐标的伺服控制在低速时为恒转矩控制,为减小或消除难以解决的爬行现象及低速振动噪声,应能提供较大转矩。进给坐标的伺服控制属于恒转矩控制,在整个速度范围内都要保持这个转矩。

伺服电动机作为伺服系统的执行元件是一个非常重要的部件,因此要求伺服系统具有高精度、快响应、宽调速和大转矩的要求,尤其对进给伺服电动机要求更高。具体要求如下。

(1) 电动机从最低进给速度到高速范围内都能平滑运转,且转矩波动小。在最低转速仍有平稳的速度而无爬行现象。

(2) 电动机在加减速时要求有很快的响应速度,因为电动机可能经常在过载条件下工作,这就要求电动机负载特性应硬,有较强的抗过载能力,具有较长时间的大过载能力,能在数分钟内过载数倍(直流伺服电动机为4~6倍,交流伺服电动机为2~4倍)而不损坏,以满足低速大转矩的要求。

(3) 电动机跟随控制信号的变化能在较短时间内达到规定的速度,以满足快速响应的要求。要求电动机必须具有较小的转动惯量、较大的堵转转矩、尽可能小的机电时间常数和启动电压。

(4) 电动机可以承受频繁的启动、制动和正反转。

## 5.2 伺服系统的分类与特点

数控伺服系统按调节原理和有无反馈环节可分为开环伺服系统、半闭环伺服系统和闭环伺服系统。在半闭环或闭环伺服系统中,按反馈与比较控制方式可将其细分为相位伺服系统、脉冲伺服系统、全数字伺服系统和幅值伺服系统;按使用的驱动元件的工作原理可分

为电液伺服系统和电气伺服系统,电气伺服系统又可细分为步进伺服系统、直流伺服系统、交流伺服系统和直线式伺服系统;按其用途和功能可分为主轴伺服系统和进给伺服系统。

### 5.2.1 按调节原理分类

#### 1. 开环伺服系统

如图 5-3 所示,开环伺服系统不具有任何反馈装置,这种系统通常使用功率步进电动机或电液脉冲马达作为执行驱动元件。这种系统工作原理的实质是将指令数字脉冲信号转换为电动机的角度位移,系统靠驱动装置(即驱动电路)本身实现运动和定位,不使用任何位置检测元件。执行元件接收来自数控装置根据所要求的进给速度和进给位移确定的一定频率和数量的进给指令脉冲,经过驱动电路放大后,转过与指令脉冲的个数成正比的角度,经过传动系统转换成工作台的一个当量位移,其运动速度由相应的进给脉冲频率决定。

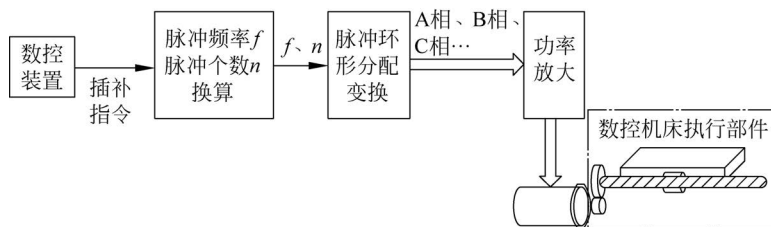


图 5-3 数控开环伺服系统

开环系统没有检测反馈装置对运动部件的实际位移量进行检测,所以结构简单,易于控制,但不能进行运动误差的校正,精度差,步进电动机的步距角误差、齿轮和丝杠组成的传动链误差都将直接影响加工零件的精度。另外,一般的开环系统低速不平稳,高速扭矩小。因此,受开环控制系统中步进电动机的功率和转速值大小所限,一般正常工作转速不超过 1000r/min,主要应用于轻载、负载变化不大或经济型数控机床上。

#### 2. 闭环伺服系统

闭环伺服系统运动执行元件不能反映运动的位置,因此需要位置检测装置。闭环伺服系统也称误差控制随动系统,系统的位置检测装置安装在进给系统末段端的执行部件上,以实时检测进给系统的位移量或位置(图 5-4)。CNC 装置将输出的位移指令和机床工作台或刀架端实际位置反馈信号的差值进行比较,以此构成闭环位置控制,根据其差值不断控制运动,使运动部件严格按照实际需要的位移量运动。在闭环控制中还引入了内部有电流环的速度环,通过对实际速度与给定速度的比较和调整,实现以电动机运行状态实时进行校正、控制,达到速度稳定和变化平稳的目的,以此改善位置环的控制品质。

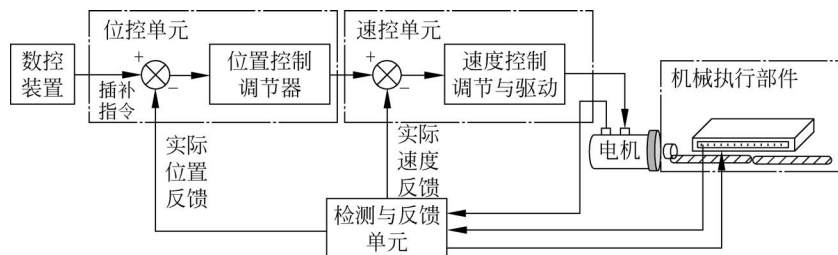


图 5-4 数控闭环伺服系统

由于闭环伺服系统是反馈控制,反馈测量装置精度很高,所以系统运动精度主要取决于检测装置的制造精度和安装精度,而传动部件制造过程中存在的精度误差、环内各元件的误差以及它们在运动时造成的误差都可以得到补偿,从而系统的跟随精度和定位精度很高。目前闭环系统的分辨力多数为 $1\mu\text{m}$ ,定位精度可达 $\pm 0.01\sim\pm 0.005\text{mm}$ ;高精度系统分辨力可达 $0.1\mu\text{m}$ 。但由于伺服系统中增加了位置检测、反馈比较及伺服放大等环节,使系统变得更加复杂,尤其是机械传动链的刚度、磨损、变形,齿隙,导轨的低速运动特性,机床结构的抗震性等因素都会影响整个系统的稳定性,导致闭环伺服系统容易出现振荡,调试相对困难。

### 3. 半闭环系统

半闭环伺服系统的位置检测元件不是直接安装在进给坐标的最终运动部件上(图 5-5),而是通过旋转变压器或脉冲编码器检测电动机或丝杠的转角,经过中间机械传动部件的位置转换来间接获得数控系统移动部件的实际位置测量(电动机或丝杠的转角和移动部件的位移量之间是线性关系),从而通过间接测量形成等效反馈信号。

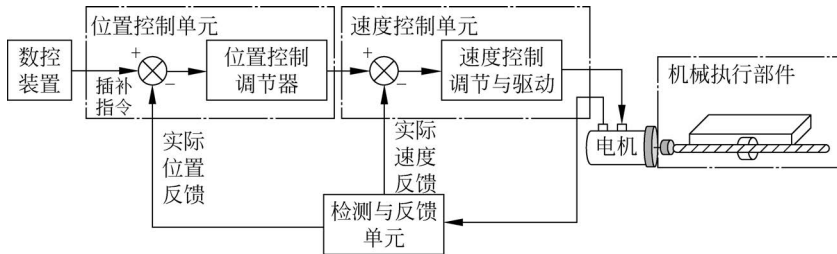


图 5-5 数控半闭环伺服系统

在这种由等效信号构成的半闭环伺服系统中,由于坐标运动的传动链有一部分(从旋转轴到工作台直线位移之间的机械传动链)在位置闭环以外,在环外的传动误差没有得到系统的反馈补偿,因此半闭环伺服系统的精度低于闭环伺服系统。从控制结构上看,半闭环伺服系统和闭环伺服系统是一致的,不同点只是半闭环伺服系统的环内不包括某些机械传动部件,由于这些部件的传动误差均未被补偿,综合精度略低于闭环系统。由于齿隙非线性环节没有被反馈通道所包含,所以半闭环伺服系统的稳定性容易得到保证。目前半闭环系统被广泛采用,只在某些传动部件精密度高、性能稳定、使用过程温差变化不大的高精度数控机床上才使用全闭环伺服系统。

## 5.2.2 按使用的伺服电动机分类

### 1. 直流伺服系统

小惯量直流伺服电动机和永磁直流伺服电动机(大惯量宽调速直流伺服电动机)常被用于直流伺服系统中作为伺服执行元件。其中,小惯量伺服电动机通过减少电枢的转动惯量,以获得较好的快速响应性和平稳性。它一般都被设计成具有较高的额定转速和较低的转动惯量的电动机,所以在实际应用时,需要经过中间机械传动(如齿轮减速副)部件获得合适的转速,再与传动丝杠相连接。

永磁直流伺服电动机具有良好的低转速性能(能在 $1\text{r}/\text{min}$ 甚至在 $0.1\text{r}/\text{min}$ 下平稳地运转)、较大转动惯量、大的调整范围、较小的力矩波动等优点,能长时间工作在较大过载转矩下,可不需中间机械传动装置而直接与传动丝杆相连。因此直流伺服系统在 20 世纪 70

年代以来在数控系统中得到广泛应用,许多数控机床上至今仍使用永磁直流伺服电动机机构成直流伺服系统。这种伺服电动机的缺点是受电刷的影响,其转速的提高受到限制,一般的永磁直流伺服电动机额定转速为 $1000\sim 1500\text{r}/\text{min}$ ,而且价格较贵,结构也比较复杂。

## 2. 交流伺服系统

交流伺服系统常使用交流异步伺服电动机(一般用于主轴伺服电动机)和永磁同步伺服电动机(一般用于进给伺服电动机)作为执行部件。其中,交流伺服电动机没有电刷换向器,且转子惯量较直流电动机小,克服了直流伺服电动机一些固有的缺点,因此动态响应特性好,维护保养简单,输出功率高(在同样体积下,交流电动机的输出功率可比直流电动机提高 $10\%\sim 70\%$ ),可以达到更高的电压和转速(交流电动机的容量可以比直流电动机造得大)。从20世纪80年代后期开始,交流伺服系统在数控系统中得到大量使用,目前部分厂家已全部使用交流伺服系统。

### 5.2.3 按使用的驱动元件分类

#### 1. 电液伺服系统

电液伺服系统采用液压元件作为执行元件,驱动元件常用的有电液脉冲马达和电液伺服马达,在数控机床发展的初期得到广泛使用。电液伺服系统的优点包括刚性好、时间常数小、反应快和速度平稳,而且低速下可以得到很高的输出力矩,但其液压系统需要配套的油箱、油管等供油系统,因此体积大,存在噪声、漏油等问题,逐步被电气伺服系统所取代。在某些特殊要求的场合,电液伺服系统仍被采用。

#### 2. 电气伺服系统

随着电子工业的发展,全部采用电子器件和电动机部件的电气伺服系统制造成本越来越低,可靠性越来越高,操作维护方便。电气伺服系统中主要的驱动元件有步进电动机、直流伺服电动机和交流伺服电动机。和电液伺服系统相比,电气伺服系统具有无噪声、无污染和低维修保养费用等优点,但其反应速度和低速下力矩输出性能不如电液伺服系统,随着电动机的驱动线路、结构特点不断改善,性能大大提高,电气伺服系统已经在很大范围取代了电液伺服系统。

### 5.2.4 按控制轴分类

#### 1. 进给伺服系统

进给伺服系统控制数控机床工作台或刀具的移动,实现各坐标轴的进给运动,控制量一般是角度或直线位移量,其进给速度与数控加工程序中的F功能相对应。进给伺服系统包括速度控制环和位置控制环,具有定位和轮廓跟踪功能,是数控机床中要求最高的伺服控制。其主要性能参数有各轴转矩大小、调速范围的大小、调节精度的高低以及动态响应的快慢等。

#### 2. 主轴伺服系统

数控机床的主轴系统和进给系统有很大的差别,一般的主轴控制只是一个速度控制系统,主要实现主轴的旋转运动,提供切削过程中的转矩和功率,因此主轴传动系统应主要考虑是否具有足够的功率、较宽的恒功率调节范围及速度调节范围等。根据数控机床主传动系统的工作特点,早期的数控机床主轴传动系统全部采用三相异步电动机加上多级变速箱的结构。为保证在额定转速范围内任意转速的调节,完成在转速范围内的无级变速,交流主

轴伺服系统被广泛应用于主轴伺服系统。具有准停控制功能的主轴与进给伺服系统一样,有时就用进给伺服系统来替代主轴伺服系统。此外,刀库的位置控制是为了在刀库的相应位置选择指定的刀具,其性能要求与进给坐标轴的位置控制相比要低很多,故称为简易位置伺服系统。

### 5.2.5 按反馈比较控制方式分类

#### 1. 脉冲、数字比较伺服系统

脉冲、数字比较伺服系统是闭环伺服系统中的一种控制方式,它将数控装置发出的指令信号(数字或脉冲)与检测装置测得的反馈信号(数字或脉冲)进行比较,以此产生位置误差,伺服系统控制伺服电动机向减小误差的方向运动,直至误差达到允许范围,实现闭环控制。

脉冲比较伺服系统如图 5-6 所示。系统接收数控装置的插补器的指令脉冲  $F$ ,反馈脉冲来自安装在伺服电动机输出轴(或丝杠)上的光电编码器检测元件,比较环节采用可逆计数器,可进行加法运算(当指令脉冲为正、反馈脉冲为负时)和减法(当指令脉冲为负、反馈脉冲为正时)运算。指令脉冲的正负依次对应工作台的正方向和反方向运动。两个脉冲源是相互独立的,而脉冲频率随转速变化而变化。可逆计数器前的脉冲分离处理电路是为了防止因脉冲到来的时间不同或执行加法和减法计数发生重叠而产生误操作。系统中的 12 位可逆计数器的值反映了位置偏差,其允许的计算范围是  $-2048 \sim +2047$ ,位置偏差值经 12 位数/模转换模块,形成作为伺服系统速度控制单元的速度给定电压(双极性模拟电压),实现根据位置偏差控制伺服电动机的转速和转向。

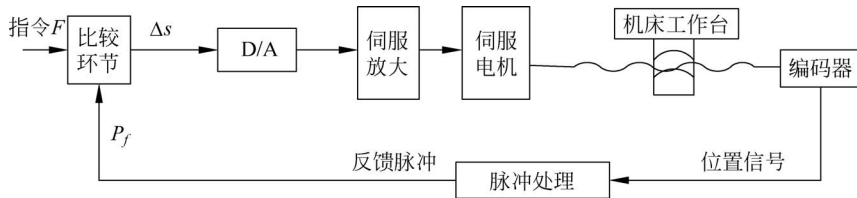


图 5-6 脉冲比较伺服系统

闭环脉冲比较伺服系统的工作原理简述如下。

(1) 开始时指令脉冲  $F=0$ ,工作台处于静止状态,无反馈脉冲( $P_f=0$ ),比较环节的输出  $\Delta s=F-P_f=0$ ,伺服放大和伺服电动机的相应速度输出为零,工作台保持在静止状态。

(2) 当数控装置给定正向( $F>0$ )指令脉冲时,设初始状态工作台没有移动,即反馈脉冲  $P_f$  为零,比较环节的输出  $\Delta s=0$ ,因此指令经伺服放大后驱动伺服电动机带动工作台正向进给。随着伺服电动机的不断运转,位置检测元件不断反馈脉冲信号,脉冲比较环节对指令脉冲  $F$  和通过采样的反馈脉冲  $P_f$  进行比较,按负反馈控制原理驱动工作台重新稳定在指令所规定的位置上,最终使  $F$  和  $P_f$  的脉冲个数相等,偏差  $\Delta s=0$ 。

(3) 当数控装置给定负向( $F<0$ )指令脉冲时,控制过程与当  $F$  为正向指令脉冲的控制过程类似,只是此时  $\Delta s<0$ ,伺服电动机驱动工作台反方向进给并最终准确地指令所规定的反方向的某个稳定位置上停止。

(4) 比较环节输出的位置偏差信号  $\Delta s$  是数字量,经数/模转换后方能变为相应的模拟给定电压,使模拟调速系统工作。

在脉冲比较伺服系统中,为了获得位置的偏差,必须先对指令脉冲 $F$ 与反馈脉冲 $P_f$ 进行比较。如图5-7所示,脉冲比较电路主要由脉冲分离和可逆计数器两部分组成。

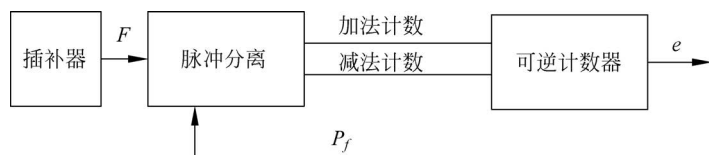


图 5-7 脉冲分离与可逆计数器框图

为了实现脉冲比较,可逆计数器用来根据输入指令脉冲和反馈脉冲的正负分别作加法计数和减法计数:若指令脉冲(反馈脉冲)为正(负)时,可逆计数器执行加法计数;当指令脉冲(反馈脉冲)为负(正)时,可逆计数器执行减法计数。来自插补器和光电编码器的指令脉冲 $F$ 和反馈脉冲 $P_f$ 虽然经过一定的整形和同步处理,但由于其脉冲源具有一定的独立性,且脉冲的频率随运转速度的不同而不断变化,因此脉冲到来的时刻可能会相互错开或重叠。

可逆计数器在进给控制的过程中随时接收加法或减法两路计数脉冲,当这两路具有一定的时间间隔的计数脉冲先后分别到来时,计数器完成先加后减(或先减后加)的准确可靠工作。但是,当计数脉冲输入端同时进入两路脉冲时,这种脉冲的“竞争”可能会使计数器的内部操作产生错误,最终影响脉冲比较的可靠性。解决办法一般为在指令脉冲与反馈脉冲进入可逆计数器之前进行脉冲分离处理。脉冲分离的主要功能是:当加、减脉冲同时到来时由硬件逻辑电路保证,先作加法计数,经过几个时钟的延时然后再作减法计数;若加、减脉冲先后到来时,则按预定的要求经加法计数或减法计数的脉冲输出端进入可逆计数器。如图5-8所示为脉冲分离原理图,其中 $U_1$ 、 $U_4$ 、 $U_5$ 、 $U_8$ 、 $U_9$ 为或非门;而 $U_2$ 、 $U_3$ 、 $U_6$ 、 $U_7$ 为触发器; $U_{10}$ 、 $U_{11}$ 为单稳态触发器; $U_{12}$ 为由时钟脉冲(可取1MHz)CP同步控制的8位移位寄存器。

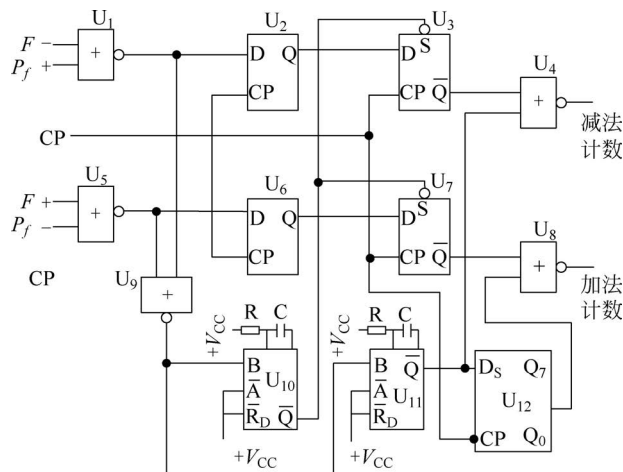


图 5-8 脉冲分离电原理图

当指令脉冲 $F$ 与反馈脉冲 $P_f$ 分别到来时,或非门 $U_1$ 和 $U_5$ 中同一时刻只有一路有脉冲输出,因此 $U_9$ 始终输出低电平。若作加法计数,计数脉冲自 $U_2$ 、 $U_3$ 至 $U_4$ 输出,记作UP;若作减法计数,计数脉冲自 $U_6$ 、 $U_7$ 至 $U_8$ 输出,记作DW。而在这种情况下单稳态触发器 $U_{10}$ 、 $U_{11}$ 和移位寄存器 $U_{12}$ 都不起作用。若当指令脉冲 $F$ 与反馈脉冲 $P_f$ 同时到来时, $U_1$ 与 $U_5$ 的输出同时为“0”,则 $U_9$ 的输出为“1”,单稳 $U_{10}$ 和 $U_{11}$ 有脉冲输出, $U_{10}$ 输出

的负脉冲同时封锁  $U_3$  与  $U_7$ , 使不“竞争”情况下的计数脉冲通路被禁止。 $U_{11}$  的正脉冲输出分成两路, 先经  $U_4$  输出作加法计数, 再经  $U_{12}$  延迟 4 个时钟周期由  $U_8$  输出作减法计数。

可逆计数器一般由多个集成的 4 位二进制可逆计数器组成, 其位数与允许的位置偏差  $e$  有关。控制系统在制动或加速进给时可能会由于机械系统的惯性而出现较大的偏差, 因此计数器的位数不能取得过小。如图 5-9 所示的可逆计数器由三个 4 位计数器组成, 其内部以 4 位为一组, 按二进制数进位和借位的接法互连, 一位作符号位, 其允许的计数范围为  $-2048 \sim +2047$ , 外部共输入三个信号: 加法计数脉冲输入信号 UP、减法计数脉冲输入信号 DW 和清零输入信号 CLP。

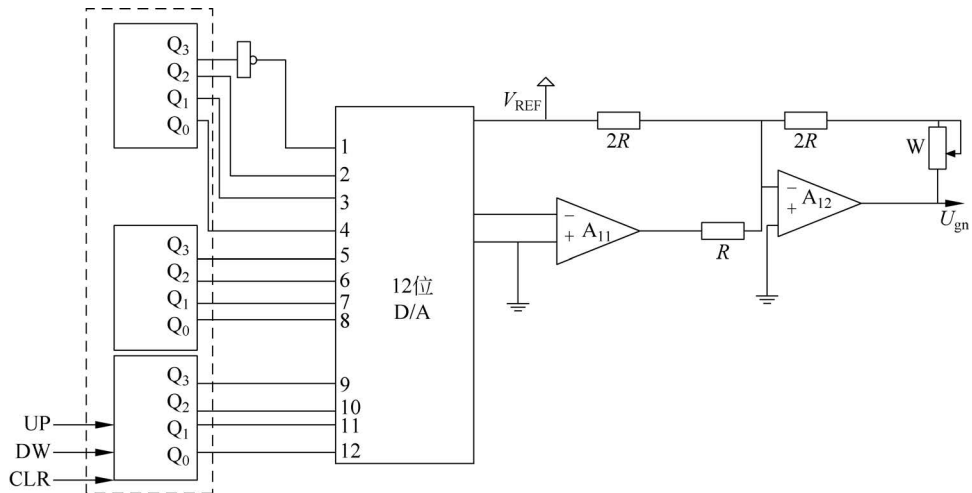


图 5-9 可逆计数器和数/模转换

数/模转换器的输出通过运算放大器  $A_{11}$  和  $A_{12}$  实现双极性模拟电压  $U_{gn}$  输出。当可逆计数器清零时, 设数/模转换器的端口 1 为最高数据位, 端口 12 为最低数据位, 则数/模转换器输入的数字量为  $800H$ , 在  $U_{gn}$  端输出为零。当输入的数字量为  $FFFH(000H)$  时,  $U_{gn}$  的电压可达  $+V_{REF}(-V_{REF})$ 。通过改变基准电压  $V_{REF}$  和适当调整输出端电位器  $W$ , 可获得所需的电压极性与满刻度数值。 $U_{gn}$  可用作伺服放大器的速度给定电压, 而伺服电动机的转向和转速可根据位置偏差来控制, 实现工作台向指令位置精确进给。

脉冲、数字比较伺服系统具有结构简单、易于实现、整机控制稳定等优点, 因此在一般数控伺服系统中得到广泛应用。

## 2. 相位比较伺服系统

相位比较伺服系统采用相位比较法实现位置闭环控制, 是高性能数控系统中常用的一种伺服系统。在相位比较伺服系统中, 位置检测装置采取相位工作方式, 指令信号与反馈信号都变成某个载波的相位, 然后通过两者相位的比较, 获得实际位置与指令位置的偏差, 实现闭环控制。相位伺服系统的核心问题是, 如何把位置检测转换为相应的相位检测, 并通过相位比较实现对驱动执行元件的速度控制。

相位比较伺服系统的结构框图如图 5-10 所示。主要由基准信号发生器、脉冲调相器、检测元件、鉴相器、伺服放大器、伺服电动机等组成。系统接收数控装置的插补器的指令脉冲  $F$ , 由脉冲调相器根据基准信号将指令脉冲转换成重复频率为  $f_0$  的脉冲信号  $P_a(\theta)$ 。系统中的感应同步器作为位置检测元件工作在相位工作方式, 将定尺的相位检测信号经整

形放大后得到位置检测信号  $P_b(\theta)$ ，两个同频率的脉冲信号  $P_a(\theta)$  和  $P_b(\theta)$  的相位差  $\Delta\theta$  即为指令位置和实际位置的偏差，其大小和极性可由鉴相器判定检测。鉴相器作为比较环节，其输出的电压信号与相位差  $\Delta\theta$  成正比，经放大后控制速度单元驱动电动机带动工作台运动，实现位置跟踪。

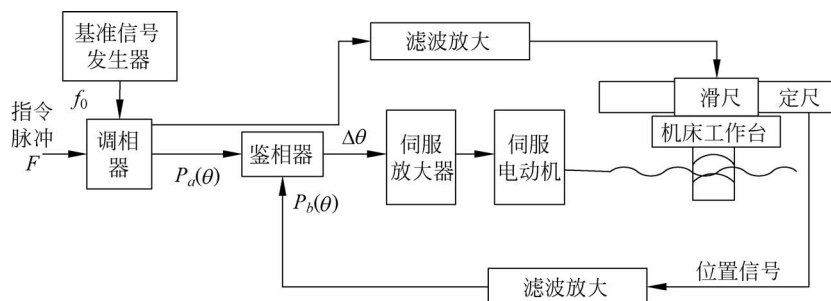


图 5-10 相位比较伺服系统的结构框图

相位比较伺服系统的工作原理简述如下。

(1) 当工作台处于静止状态时，如指令脉冲  $F=0$ ，则鉴相器的输入信号  $P_a$ 、 $P_b$  为同频率同相位的脉冲信号，表示当前没有偏差，鉴相器的输出  $\Delta\theta=0$ ，伺服放大器的速度给定为零，伺服电动机的相应电枢电压也为零，伺服电动机和工作台保持在静止状态。

(2) 当进给脉冲  $F>0$  时，经脉冲调相，转换为频率为  $F_0$  相移为  $+\theta$  的脉冲信号  $P_a$ ，因工作台静止，所以  $P_b=0$ ，鉴相器的输出  $\Delta\theta=P_a-P_b=+\theta>0$ ，伺服放大器驱动伺服电动机使工作台产生相应的正向运动，直至  $\Delta\theta=0$ 。

(3) 当指令脉冲  $F<0$  时，经脉冲调相，转换为频率为  $F_0$  相移为  $-\theta$  的脉冲信号  $P_a$ ，此时鉴相器的输出  $\Delta\theta=-\theta<0$ ，伺服电动机驱动工作台作负向运动，直至  $\Delta\theta=0$ 。

总之，数控机床的工作台根据指令脉冲  $F$  的正负作正向或反向的运动，最终  $P_a$ 、 $P_b$  在新的位置上保持同频同相的稳定状态，当指令脉冲  $F=0$  时，工作台迅速制动。

相位伺服系统采用感应式检测元件，如旋转变压器、感应同步器等，可得到满意的精度。此外，由于其具有载波频率高、响应速度快、抗干扰性强等优点，很适合连续控制的伺服系统。

如图 5-11 所示为脉冲调相器(数字移相电路)组成原理框图，它主要负责完成按指令脉冲的要求对载波信号进行相位调制。

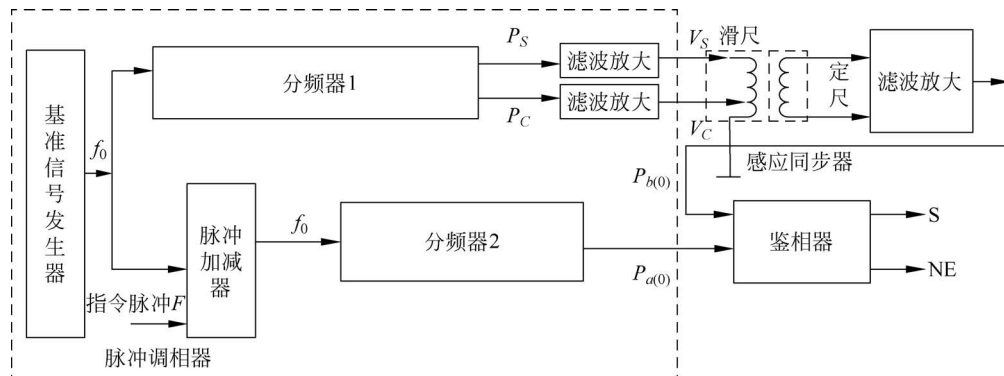


图 5-11 脉冲调相器组成原理框图

为获得频率稳定的载波信号,脉冲调相器中的基准脉冲  $f_0$  由基准脉冲发生器产生(由石英晶体振荡器组成),基准脉冲  $f_0$  信号被送往基准分频通道( $M$  分频的二进制计数器,当输入  $M$  个计数脉冲后产生一个溢出脉冲)和调相分频通道( $M$  分频的二进制计数器,首先经过脉冲加减器)。

感应同步器滑尺的两组绕组(正弦和余弦绕组)激磁需要两路频率、幅值相同,但相位互差  $90^\circ$  的电压信号。可将基准分频通道中的最末一级计数触发器分成两个,如图 5-12 所示,最后一级触发器的输入脉冲相差  $180^\circ$ ,经过一次分频后  $\theta$  输出端的相位相差  $90^\circ$ 。

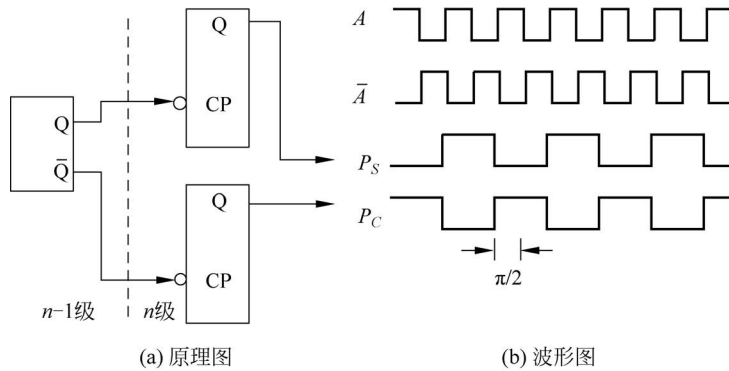


图 5-12 基准分频器末级相差  $90^\circ$  输出

为了使脉冲调相器基准分频通道输出的矩形脉冲直接用作滑尺激磁的正弦、余弦信号  $V_s$  和  $V_c$ ,应先滤除高频分量及相应功率放大。感应同步器在其定尺处通过电磁感应获得相应的感应电势  $u_0$ ,经滤波放大后,可获得作为位置反馈的脉冲信号  $P_b(\theta)$ 。

调相分频通道在指令脉冲的作用下输出脉冲信号  $P_a(\theta)$ ,加减器在该通道中的作用如下。

(1) 当指令脉冲  $F=0$  时,调相分频计数器与基准分频计数器同频同相工作,输出信号  $f'_0=f_0$ ,此时脉冲信号  $P_a(\theta)$  和  $P_b(\theta)$  同频同相,相位差  $\Delta\theta=0$ 。

(2) 当  $F \neq 0$  时,按照正指令脉冲使  $f'_0$  脉冲数增加,负指令脉冲使  $f'_0$  脉冲数减少的原则,加减器使得输入到调相分频器中的计数脉冲个数发生相应变化。分频器产生溢出脉冲的时刻将提前或推迟产生,因此,在指令脉冲的作用下,脉冲信号  $P_a(\theta)$  和  $P_b(\theta)$  不再保持同相,相位差的大小和极性与指令脉冲  $F$  有关。

为说明指令移相的情况,如图 5-13 所示,设两个分频器均由 4 个十六进制计数触发器

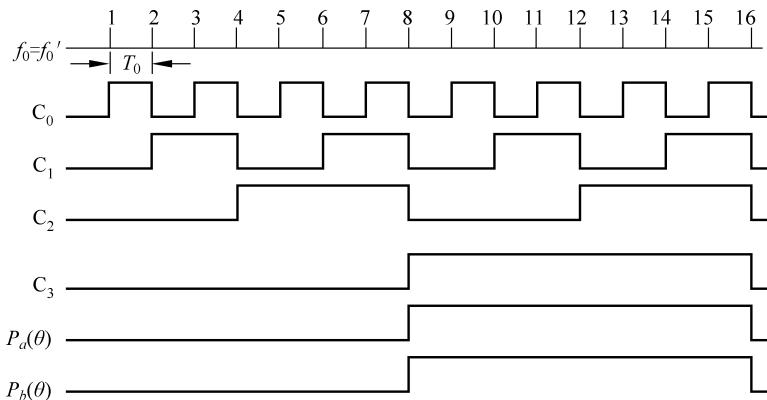


图 5-13  $F=0$  时,时序波形图( $\Delta\theta=0$ )

$C_0 \sim C_3$  组成,分频数  $M=2^4=16$ ,即 16 个输入脉冲对应一个溢出脉冲信号。

(1) 当指令脉冲  $F=0$  时,调相分频计数脉冲  $f'_0$  与基准脉冲  $f_0$  相等。计数触发器  $C_0 \sim C_3$  (设  $C_0$  为最低位,  $C_3$  为最高位) 按二进制数方式逐个进位计数。工作时的时序波形如图 5-14 所示,由于  $F=0$ ,  $f'_0$  与  $f_0$  相等,因此反映指令脉冲输入的  $P_a(\theta)$  应该与位置反馈信号  $P_b(\theta)$  同频同相,两者的相位差  $\Delta\theta=0$ 。

(2) 当指令脉冲  $F=+1$  时,波形图如图 5-14 所示,脉冲移相的输入端接收到一个正向指令脉冲。计数脉冲  $f'_0$  在基准脉冲的基础上插入了一个脉冲,因此调相分频计数器将比基准分频器提前一个时钟周期  $T_0$  产生溢出脉冲。

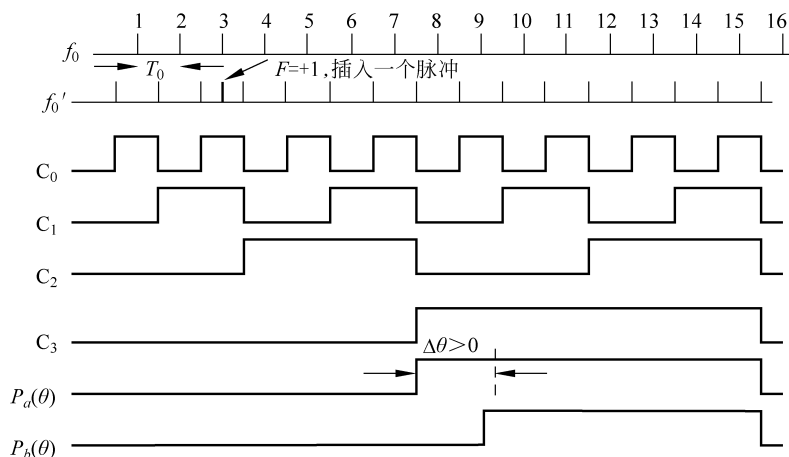


图 5-14  $F=+1$  时,时序波形图( $\Delta\theta>0$ )

因此,此时  $P_a(\theta)$  的波形相位将超前  $P_b(\theta)$ ,记作  $\Delta\theta=+T_0>0$ 。

(3) 当指令脉冲  $F=-1$  时,波形图如图 5-15 所示,此时加入一个负向指令脉冲,则  $f'_0$  在  $f_0$  的基础上减去一个时钟脉冲周期  $T_0$  才有溢出脉冲,则  $P_a(\theta)$  波形的相位应滞后于  $P_b(\theta)$ ,记作  $\Delta\theta=-T_0<0$ 。

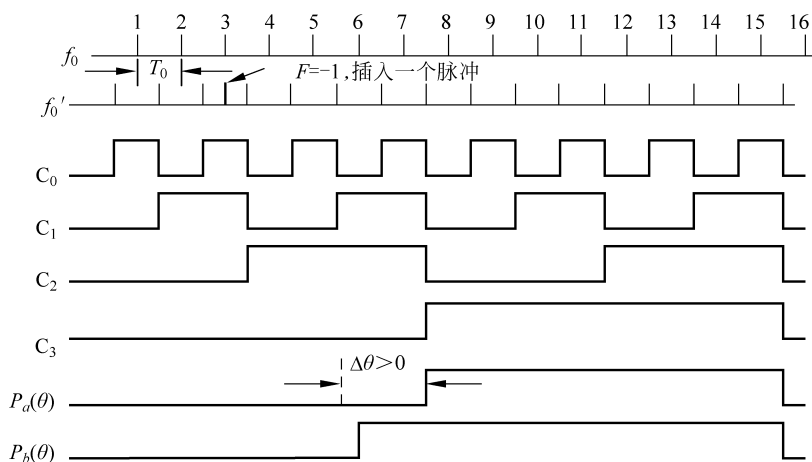


图 5-15  $F=-1$  时,时序波形图( $\Delta\theta<0$ )

由上述指令移相原理可知,由于指令脉冲所形成的相应的相移角  $\Delta\theta$ (记作  $\theta_0$ ) 的量值与分频器的容量相关(例如当分频系数  $m=16$ , 相应的相移角  $\theta_0=360^\circ/16=22.5^\circ$ ), 当要求相移角  $\theta_0$  为某个定值时, 其相应的分频系统  $m$  可由下式计算获得:

$$m = 360^\circ/\theta_0$$

例如, 设某数控机床的脉冲当量为  $\delta=0.002\text{mm}$ , 感应同步器的极距  $2\tau=2\text{mm}$ , 则单位脉冲所对应的相位角  $\theta_0=\delta\times 360^\circ/2=0.002\times 360^\circ/2=0.36^\circ$ 。可知分频系数  $m=360^\circ/\theta_0=360^\circ/0.36^\circ=1000$ 。分频器输入的基准脉冲频率将是激磁频率的  $m$  倍。例如, 本例的感应同步器激磁频率为  $10\text{kHz}$ , 分频系数  $m=1000$ , 则基准频率  $f_0=1000\times 10\text{kHz}=10\text{MHz}$ 。

鉴相器能够鉴别出输入信号的相位差的器件, 使输出电压与两个输入信号之间的相位差有确定关系的电路。在数控伺服系统中, 鉴相器的任务就是把指令信号的相位与实际位置检测所得的相位之间相位差以适当的方式表示出来。如图 5-16 所示是一种鉴相器逻辑

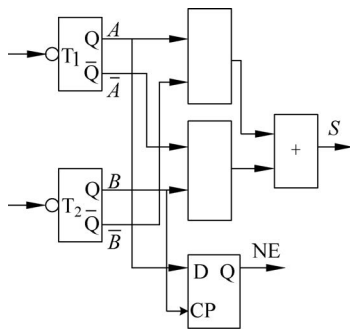


图 5-16 半加器鉴相器

原理图, 由脉冲移相和位置检测所得的脉冲信号  $P_a(\theta)$  和  $P_b(\theta)$  分别输入鉴相器的计数触发器  $T_1$  和  $T_2$ , 经二分频后输出的脉冲信号  $A$ 、 $\bar{A}$  和  $B$ 、 $\bar{B}$  频率各降低一半。鉴相器的第一个输出信号为  $A$  和  $B$  信号的半加和, 即  $S = A\bar{B} + \bar{A}B$ , 其量值反映了相位差  $\Delta\theta$  的绝对值; 第二个输出信号  $NE$  为一个 D 触发器的输出端信号, 其输出的电压高低由 D 端和 CP 端的相位超前或滞后的关系所决定。

由半加原理可知, 当同频脉冲信号  $A$  和  $B$  相位相同时, 半加和信号  $S=0$ 。而当  $A$  和  $B$  不同相时, 半加和信号  $S$  将是一个脉冲宽度与两者相位差(超前或滞后)成正比的周期方波脉冲。通过低通滤波的方法可取出其直流分量作为相位差  $\Delta\theta$  的电平指示。如图 5-17 所示, 相位差  $\Delta\theta$  的极性由  $NE$  信号表示, 对于由下降沿触发的 D 触发器, 当  $A$  滞后于  $B$  由“1”变为“0”, 则 D 触发器将被置“1”, 输出高电平。反之, 当接于 D 端的  $S$  信号超前  $B$  时, 即  $A$  领先于  $B$  由“1”变为“0”, 则 D 触发器的 Q 端就被置“0”, 输出低电平。因此若把该输出端记作  $NE$ ,  $NE=0$  表示指令信号的相位超前于位置信号, 相位差为正; 而  $NE=1$  表示指令信号的相位滞后位置信号, 相位差为负。图 5-17 分别表示相位差  $\Delta\theta$  在 4 种情况下, 鉴相器输入信号  $P_a(\theta)$  和

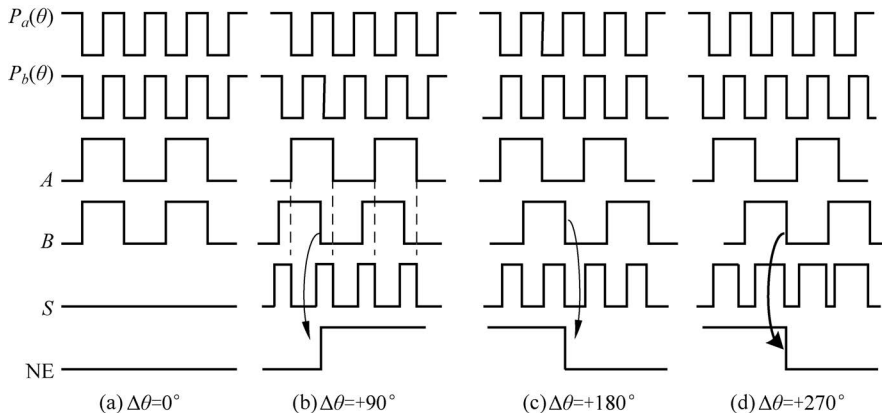


图 5-17 鉴相器输入、输出工作波形图

$P_b(\theta)$ 二分频后的信号  $A$ 、 $B$  以及输出信号  $S$  和  $NE$  的波形。当  $P_a(\theta)$  和  $P_b(\theta)$  的相位差超过  $180^\circ$  后,两者的超前和滞后的关系会发生颠倒。

### 3. 幅值比较伺服系统

幅值比较伺服系统是以位置检测信号的幅值大小来反映机械位移的数值,并以此信号作为位置反馈信号与指令信号进行比较构成的闭环控制系统。一般将位置检测幅值信号转换成数字信号再与指令数字信号相比较,从而获得位置偏差信号以构成闭环控制系统。所用的位置检测元件应工作在幅值工作方式,感应同步器和旋转变压器都可以用于幅值伺服系统。幅值伺服系统实现闭环控制的过程与相位伺服系统有许多相似之处。

幅值比较伺服系统结构框图如图 5-18 所示,比较器比较指令脉冲  $F$  和反馈脉冲  $P_f$ ,当其输出不为零时,经数/模转换器,向速度控制电路发出电动机运转的信号,电动机开始带动工作台运动。同时,位置检测元件检测工作台的实际位移,经鉴幅器与电压频率变换器处理,转换成相应的数字脉冲信号,其两路输出一路作为位置反馈脉冲  $P_f$ ,另一路作为检测元件的激磁电路。当指令脉冲与反馈脉冲相等,比较器输出为零,表示工作台实际位移等于指令信号要求的距离,使电动机停转;若两者不等,说明有误差生成,电动机会继续朝误差减小的方向运转,直到比较器输出为零。

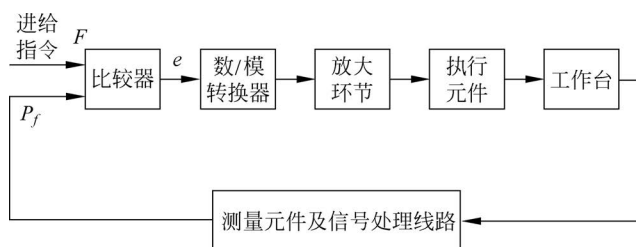


图 5-18 幅值比较伺服系统结构框图

幅值比较伺服系统的工作原理简述如下。

(1) 当脉冲指令  $F=0$  时,设工作台处于静止状态(系统的设定值与反映工作台实际位移的电角度相等,  $\theta_d = \theta$ ),鉴幅器检测到的检测元件输出电压幅值为零,由电压-频率变换器所得的反馈脉冲  $P_f$  也为零,因此偏差信号  $\Delta s = F - P_f = 0$ ,则伺服电动机调速部分的速度给定为零,工作台继续静止。

(2) 当脉冲指令  $F > 0$  时,工作台正向运动,在伺服电动机未转动之前,反映工作台实际位移的电角度  $\theta$  未变,所以反馈脉冲  $P_f$  也为零,因此偏差信号  $\Delta s = F - P_f > 0$ 。 $\Delta s$  经数/模转换后作为伺服电动机调速系统的速度给定值,驱动伺服电动机带动工作台正向运动。

(3) 当脉冲指令  $F < 0$  时,工作台负方向运动。整个系统的工作方式(检测、比较和判别等)和控制过程与  $F > 0$  时相似,只是工作台向反向移动。

如图 5-19 所示是一个数控伺服系统中的鉴幅器原理框图,其中  $e_0$  是由旋转变压器转子感应产生的包含高次谐波和干扰信号的交变电势,低通滤波器 1 可以滤除各谐波的影响并获得与激磁信号同频的基波信号,设系统的激磁频率为  $800\text{Hz}$ ,采用  $1000\text{Hz}$  的低通滤波器。运算放大器  $A_1$  为比例放大器,  $A_2$  为  $1:1$  的倒相器。一对互为反相的开关信号  $SL$  和  $SL'$  分别实现对  $K_1$ 、 $K_2$  两个模拟开关的通断控制,其开关频率与输入信号相同。 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $K_1$ 、 $K_2$  组成对输入的交变信号的全波整流电路,在  $0 \sim \pi$  的前半周期中,  $SL=1$ ,  $K_1$  接通,

$A_1$  的输出端与鉴幅输出部分相连; 在  $\pi \sim 2\pi$  的后半周期中,  $SL' = 1, K_2$  接通, 输出部分与  $A_2$  相连。因此, 经整流后的电压  $U_1$  将是一个单向脉动的直流信号。低通滤波器 2 的上限频率设计成低于基波频率, 在此可设为 600Hz, 则所输出的  $U_2$  是一个平滑的直流信号。

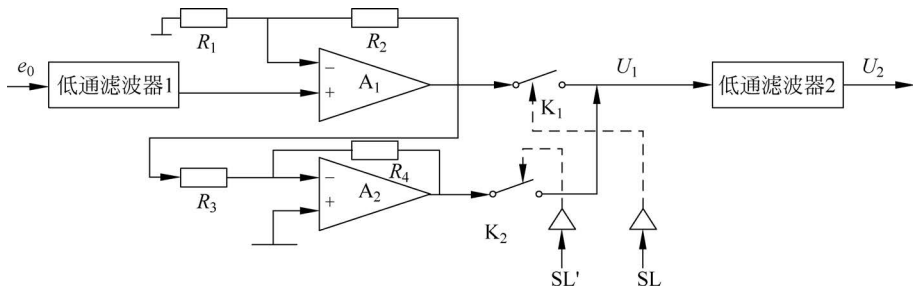


图 5-19 鉴幅器原理框图

在工作台正向或反向进给时, 输入的转子感应电势  $e_0$ , 开关信号  $SL$ 、脉动的直流信号  $U_1$  和平滑直流输出  $U_2$  的波形图如图 5-20 所示, 鉴幅器输出信号  $U_2$  的极性反映了工作台进给的方向, 而  $U_2$  绝对数值的大小反映了  $\theta$  与  $\varphi$  的差值。

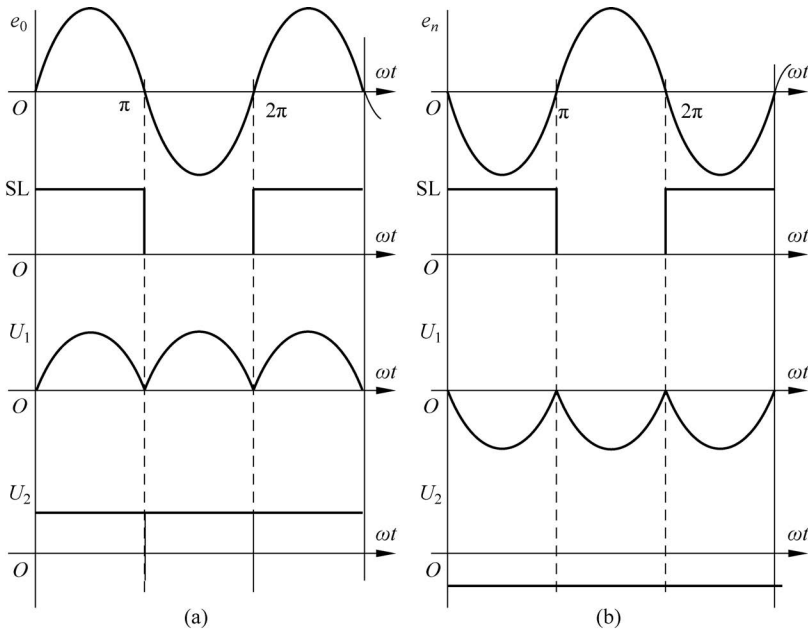


图 5-20 鉴幅器输出波形图

电压-频率变换器的任务是把鉴幅后输出的模拟电压  $U_F$  变换成相应的脉冲序列, 该脉冲序列的重复频率与直流电压的电平高低成正比。单极性的直流电压可以通过压控振荡器变换成相应的频率脉冲, 而双极性的  $U_F$  应先经过极性处理, 然后再作相应的变换。

在位置检测器取得的幅值信号转变成为相应的脉冲和电平信号后即可用来作为位置闭环控制的反馈信号。但若真正完成位置伺服控制, 幅值系统还有激磁角  $\phi$  的跟随变化问题。

综上所述, 幅值工作方式下的位置变压器定子的两绕组激磁电压信号, 是一组同频同相, 但幅值分别随某一可知变量  $\varphi$  作正弦、余弦函数变化的正弦交变信号。因此控制  $\varphi$  角

的变化就可以实现幅值相应的改变。调幅的要求可通过使用多抽头的函数变压器或脉冲调宽式等方案来实现。多抽头的函数变压器方法对加工精度要求很高,控制线路也比较复杂;而脉冲调宽式方法完全采用数字电路,易于实现整机集成化,可以达到较高的位置分辨力和动静态检测精度。

脉冲宽度调制是通过控制矩形波脉宽等效地实现正弦波激磁的方法,其波形如图 5-21 所示。

设  $V_1$  和  $V_2$  分别是放置在变压器定子正弦、余弦激磁绕组的双极性矩形波激磁信号。矩形波幅值的绝对值均为  $A$ , 在一个周期内,  $V_1$ 、 $V_2$  的取值为

$$V_1 = \begin{cases} A, & \frac{\pi}{2} - \phi \leq \omega t \leq \frac{\pi}{2} + \phi \\ -A, & \frac{3\pi}{2} - \phi \leq \omega t \leq \frac{3\pi}{2} + \phi \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$V_2 = \begin{cases} -A, & \phi \leq \omega t \leq \pi - \phi \\ A, & \pi + \phi \leq \omega t \leq 2\pi - \phi \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

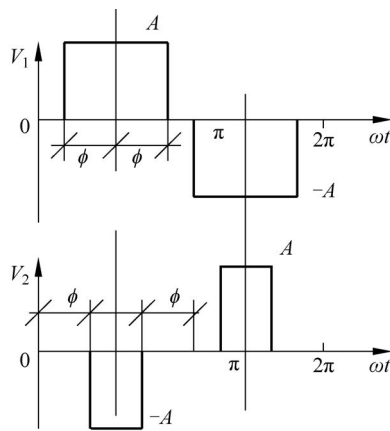


图 5-21 脉冲调宽波形图

其中,  $\phi$  表示正弦波激磁中影响正弦波幅值的电气角, 在此表现为影响矩形脉冲宽度的参数。  $V_1$  和  $V_2$  的脉宽分别为  $2\phi$  和  $\pi - 2\phi$ 。用傅里叶级数对  $V_1$  和  $V_2$  展开, 在  $[-\pi, \pi]$  内可展开成如下正弦级数:

$$F(\omega t) = \sum_{h=1}^{\infty} b_k \sin k\omega t = b_1 \sin \omega t + b_3 \sin 3\omega t + b_5 \sin 5\omega t + \dots$$

式中, 系数  $b_k$  为

$$b_k = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\omega t) \sin k\omega t d\omega t$$

(1) 令  $f(\omega t) = V_1$ , 若只计算基波分量, 则

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V_1 \sin \omega t d\omega = \frac{2A}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}-\phi}^{\frac{\pi}{2}+\phi} \sin \omega t d\omega t \\ &= \frac{2A}{\pi} \left[ -\cos\left(\frac{\pi}{2} + \phi\right) + \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \right] \\ &= \frac{2A}{\pi} [\sin \phi + \sin \phi] = \frac{4A}{\pi} \sin \phi \end{aligned}$$

所以  $f_1(\omega t) = \frac{4A}{\pi} \sin \phi \sin \omega t$ 。

(2) 令  $d(\omega t) = V_2$ , 若只计算基波分量, 则

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V_2 \sin \omega t d\omega = -\frac{2A}{\pi} \int_{\phi}^{\pi-\phi} \sin \omega t d\omega t \\ &= -\frac{2A}{\pi} [-\cos(\pi - \phi) + \cos \phi] = -\frac{4A}{\pi} \cos \phi \end{aligned}$$

所以,  $f_2(\omega t) = -\frac{2A}{\pi} \cos \phi \sin \omega t$ 。

若令  $U_m = 4A/\pi$ , 则矩形激磁信号的基波分量为

$$\begin{cases} f(\omega t) = U_m \sin\varphi \sin\omega t \\ f(\omega t) = -U_m \cos\varphi \cos\omega t \end{cases}$$

从以上分析可知,当消除高次谐波的影响后,用脉冲宽度调制的矩形波激磁与正弦波激磁其幅值工作方式的功能完全相当。因此可将正弦、余弦激磁信号幅值的电气角  $\varphi$  的控制,转变为对脉冲宽度的控制。

从结构上和安装维护上而言,以上三种伺服系统中的幅值和相位比较伺服系统比脉冲、数字比较伺服系统复杂、要求高,所以一般情况下脉冲、数字比较伺服系统应用得最广泛,而相位比较系统要比幅值比较系统应用更广泛。

随着计算机技术、微电子技术和伺服控制技术的不断发展,高速和高精度的全数字伺服系统在数控伺服系统中获得广泛应用。伺服控制技术也因此从模拟方式、混合方式向全数字方式方向发展。全数字控制伺服系统是用计算机软件实现数控系统中位置环、速度环和电流环的控制。许多新的控制技术和改进伺服性能的措施也不断地被数字伺服系统所采用,进一步提高了系统的控制精度和品质。在全数字伺服系统中,插补运算得到的位置指令直接被计算机数控系统以数字信号的形式传送给伺服驱动单元,伺服驱动单元具有位置反馈和位置控制功能,其速度环和电流环都具有数字化的测量元件,速度控制、电流控制、伺服电动机的速度调节分别由专用的 CPU 独立完成。CNC 与伺服驱动之间采用专用接口芯片通信。

普通数控机床的伺服系统根据传统的反馈控制原理设计而成,很难达到无跟踪误差控制,不能同时保证高速度和高精度的运行。而全数字控制伺服系统可以采用多种现代控制技术,通过计算机控制,具有更高的动、静态控制精度,可实现最优控制,达到同时满足高速度和高精度的要求,其检测灵敏度、时间及温度漂移和抗干扰性能等方面都优于混合式伺服系统。相关的控制技术如下。

(1) 预测控制。预测控制的出现为解决大延迟系统控制的难题开辟了一条新的途径,通过预测数控伺服系统的传递函数来调节输入控制量,以产生符合要求的输出,最终实现减小伺服系统跟踪误差的目的。

(2) 前馈控制。数控伺服系统是一个复杂的控制系统,传统伺服控制系统主要是对伺服位置偏差、速度偏差进行 PID 调节控制,由于没有利用已知的后继插补输出条件、机床移动部件的惯性、摩擦阻尼滞后等信息,在高速加工中的动态跟随误差会比较大。在现代数控系统中,一般采用前馈控制减少伺服系统滞后,实际上构成了具有反馈和前馈复合控制的系统结构,从理论上而言,可以完全实现“无差调节”,即同时消除系统的静态位置误差、速度与加速度误差以及外界扰动引起的相关误差,如 SIEMENS 840Di 数控系统采用的速度前馈及转矩前馈跟踪误差补偿等技术。

(3) 学习控制(重复控制)。智能型的伺服控制,适合具有周期性重复性的操作控制指令情况下的加工,可以获得高速、高精度的效果。当系统跟踪第一个周期指令时产生伺服滞后误差,系统经过对前一次的学习,能记住这个误差的大小,在第二次重复这个加工过程中进行相应的处理能够做到精确、无滞后地跟踪指令。

通过总线通信方式,全数字控制伺服系统可以极大地减少连接电缆的数量,使数控系统

更易于安装维护,进一步提高了系统可靠性;另外,全数字式伺服系统具有丰富的自诊断、自测量和显示功能。目前,全数字控制伺服系统在数控机床的伺服系统中得到了越来越广泛的应用。

## 5.3 常用执行元件及其控制

数控机床伺服驱动系统以机床工作台、主轴或刀架等相关移动部件的位置和速度为控制量,按 CNC 装置的进给指令脉冲,通过齿轮和丝杠驱动各加工坐标轴带动工作台或刀架按指令运动,使刀具与工件产生各种相对复杂的机械运动,完成所需要的复杂形状工件加工。数控伺服系统中的执行元件的性能将直接影响整个系统的参数,常用的执行元件有步进电动机、直流伺服电动机、交流伺服电动机、直线电动机等。

### 5.3.1 步进电动机伺服系统

步进电动机是一种将电脉冲信号转换成机械角位移的电气转换装置,常用作开环数控伺服系统的执行元件。步进电动机在接通电源但无脉冲时并不转动,转子保持原有位置不变而处于定位状态,仅当有脉冲输入时,转子才转过一个固定的角度,电脉冲的数量决定了转子的角位移量,电脉冲的频率与转子的转速成正比,旋向取决于脉冲的顺序,在时间上与输入脉冲同步。只要控制步进电动机输入脉冲的数量、频率和电动机绕组的通电相序,即可获得所需的转角大小、转速和方向。步进电动机中的变频信号源是一种脉冲信号发生器,它可以在几赫兹到几万赫兹的频率范围内连续可调,按照运行指令把不同频率的脉冲输送到脉冲分配器,实现对步进电动机实行各种运行状态的控制。脉冲分配器接收输入脉冲和方向指令,向功率驱动器供给控制信号。脉冲分配器输出的脉冲经功率放大器放大后驱动步进电动机工作。步进电动机自 20 世纪 70 年代以来被广泛应用,其特点归纳如下。

(1) 控制系统简单,使用数字信号直接进行开环控制,电动机本体部件少(无刷),整个系统具有较高的性价比和可靠性。

(2) 系统响应速度快,启、停、正反转及变速迅速,停止时可以实现通电自锁。

(3) 有一定的精度,灵敏度高,位移与输入脉冲信号相对应,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,也可以在要求高精度时组成闭环控制系统。

(4) 调速范围广,速度可在相当宽的范围内平滑调节,一台控制器可以同时控制多部电动机完全同步运行。

(5) 步进电动机带惯性负载能力差,由于存在失步和低频共振,其加减方法根据应用状态的不同而复杂化。

#### 1. 步进电动机的分类及结构

步进电动机可以按多种方式进行分类。按其输出扭矩(功率)大小和使用场合,步进电动机可分为控制步进电动机(输出力矩在百分之几到十分之几牛·米,只能驱动较小的负载,要与液压扭矩放大器配用,才能驱动机床工作台等较大的负载)和功率步进电动机(输出力矩在 5~50N·m,可以直接驱动机床工作台等较大的负载);按其励磁相数,步进电动机可分为三相、四相、五相、六相甚至八相步进电动机等;按其工作原理,步进电动机又可分为磁阻式(反应式,转子无绕组,由被激磁的定子绕组产生反应力矩实现步进运行)、感应子式

和永磁式步进电动机；按其结构,步进电动机分为径向式(单段式,电动机各相按圆周依次排列)、轴向式(多段,电动机各相按轴向依次排列)和印刷绕组式步进电动机。

步进电动机本体、步进电动机驱动器和控制器是构成步进电动机系统不可分割的三大部分。总的来说,各种类型的步进电动机都是由定子和转子组成,但是在具体的结构形式上各有差异。反应式步进电动机有轴向分相和径向分相两种,以三相径向式反应式步进电动机为例,其结构如图 5-22 所示,定子由定子铁芯和定子绕组组成。定子铁芯由电工钢片叠压而成,定子绕组是绕置在定子铁芯上 6 个均匀分布的齿上的线圈,形成 6 个均匀分布的磁极,极与极之间的夹角为  $60^\circ$ ,在直径方向上相对的两个铁芯上的线圈串联在一起,构成一相励磁控制绕组。每个定子极上均布置了 5 个呈梳状排列的齿,齿槽距相等,齿间夹角为  $9^\circ$ ,共构成 A、B、C 三相按径向排列的励磁绕组。转子为铁芯(硅钢,无绕组),其上均匀布置了 40 个齿,齿槽等宽,齿间夹角也是  $9^\circ$ 。三相定子磁极和转子上相应的齿在空间位置依次错开  $1/3$  齿距,即  $3^\circ$ 。任一相绕组通电,便形成一组定子磁极。当 A 相磁极上的齿与转子上的齿对齐时,B 相磁极上的齿刚好超前(或滞后)转子上的齿  $1/3$  齿距角,C 相磁极上的齿帽超前(或滞后)转子齿  $2/3$  齿距角。步距角(步进电动机每走一步所转过的角度)的大小等于错齿的角度,而错齿角度的大小取决于转子上的齿数。总的来说,磁极数越多,转子上的齿数越多,步距角会越小,相应步进电动机的位置精度越高,但机械结构也越复杂。

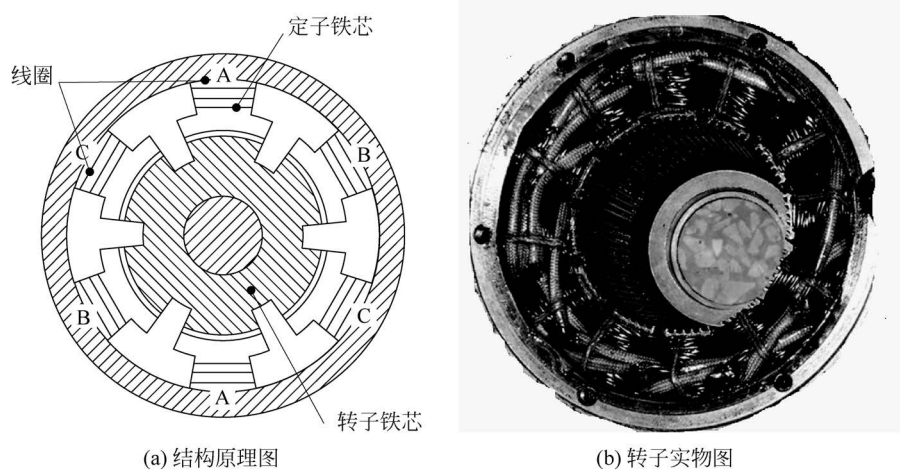


图 5-22 单定子三相径向分相反应式步进电动机

反应式步进电动机还有一种轴向分相的多段式结构形式,其定子和转子铁芯在轴向都分成多段(三、四、五、六段等),形成独立的一相定子铁芯、定子绕组和转子,依次错开排列为 A、B、C、D、E 等相,每相是独立的,各段定子铁芯(由硅钢片叠成)形状如内齿轮;转子(由硅钢片叠成)形如外齿轮。各段定子上的齿在圆周方向均匀分布,彼此之间错开  $1/5$  齿距,其转子齿彼此不错位。当设置在定子铁芯环形槽内的定子绕组通电时,形成某一相环形绕组。

感应子式步进电动机由磁性转子铁芯通过与由定子产生的脉冲电磁场相互作用而产生转动,其结构与反应式步进电动机结构类似,其定子和转子铁芯的磁场和齿槽相同,但感应子式步进电动机在轴向存在恒定磁场,该磁场可以改善步进电动机的动态特性。励磁感应子式步进电动机的轴向磁场是通过转子上的励磁绕组产生,而永磁感应子式步进电动机的

轴向磁场由在转子中部的一段环形磁钢和在环形磁钢的两端的两段铁芯轴向充磁建立。

永磁式步进电动机由磁性转子铁芯通过与由定子产生的脉冲电磁场相互作用而产生转动,其转子为永久磁铁,定子为绕有励磁绕组的软磁材料。永磁式电动机结构形式较多,常见形式有隐极式和爪极式。隐极式步进电动机结构与磁阻式步进电动机一样,具有二、三、四、五相等多种绕组,而爪极式步进电动机结构一般采用二相或四相绕组。

## 2. 工作原理

以反应式(磁阻式)步进电动机为例,三相反应式步进电动机工作原理如图 5-23 所示,当某一相定子励磁绕组加上电脉冲(通电)时,该相磁极产生磁场,并对转子的某一对齿产生电磁转矩,使靠近该通电绕组磁极的转子转动,当转子某对齿的中心线与定子磁极中心线对齐时,因为磁阻最小,转矩为零,从而停止转动。如果按一定次序切换定子绕组上各相电流,即使定子励磁绕组顺序轮流通电,A、B、C 三相的磁极就依次产生磁场,使转子按一定方向“步进式”转动。

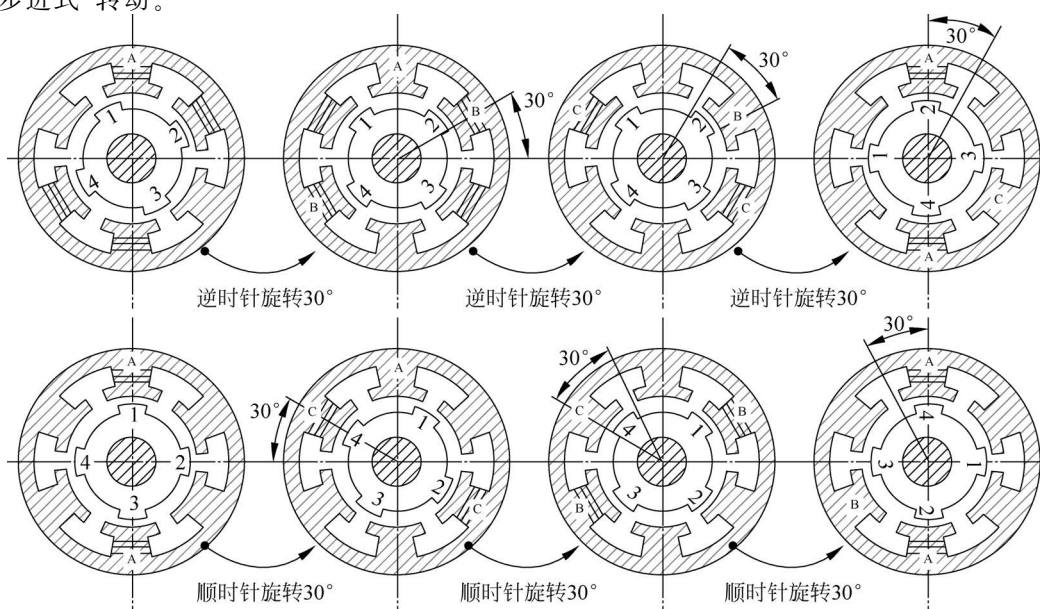


图 5-23 三相反应式步进电动机工作原理

为了便于理解,设每个定子磁极有一个齿,转子有 4 个齿,首先定子 A 相通电,B、C 两相断电,转子 1、3 齿按磁阻最小路径被磁极 A 产生的电磁转矩吸过去,当 1、3 齿与 A 对齐时,转动停止;接着将 B 相通电,A、C 两相断电,磁极 B 又同样使距它最近的一对转子齿 2、4 产生转矩,使转子继续按逆时针方向转过  $30^\circ$ ;接着 C 相通电,A、B 相断电,转子同样又逆时针旋转  $30^\circ$ ,以此类推,定子按 A $\rightarrow$ B $\rightarrow$ C $\rightarrow$ A $\cdots$ 的顺序通电,转子就一步步地按逆时针方向转动,每步转过的角度为  $30^\circ$ 。如果改变各相励磁绕组的通电顺序,如按 A $\rightarrow$ C $\rightarrow$ B $\rightarrow$ A $\cdots$ 使定子绕组通电,步进电动机就按顺时针方向每步  $30^\circ$ 方式转动。这种控制方式就叫单三拍方式。这种方式下由于每次只有某一相绕组处于通电状态,在各相通电状态切换瞬间会暂时失去自锁转矩的情形,这将使步进电动机容易失步,并且任一时刻都只有某一相绕组处于通电吸引转子,因此易在平衡位置附近产生振荡。

为了避免单三拍方式的缺点,在实际应用时不采用单三拍工作方式,而采用双三拍控制方式。如图 5-24 所示,双三拍控制方式下的通电顺序按 AB $\rightarrow$ BC $\rightarrow$ CA $\rightarrow$ AB $\cdots$ (逆时针方

向)或 AC→CB→BA→AC…(顺时针方向)进行。

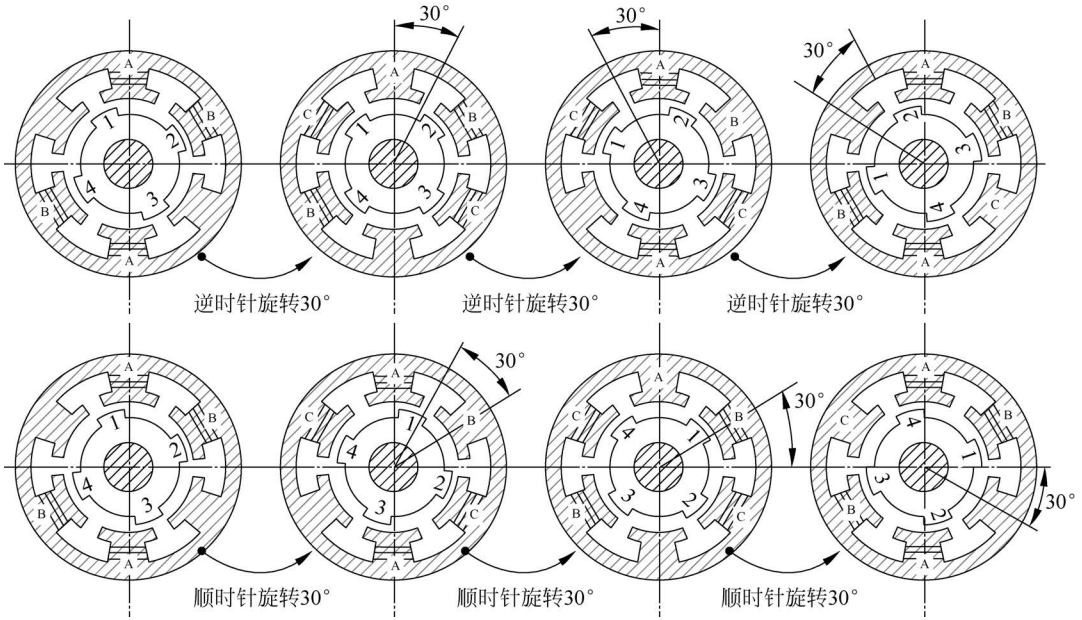


图 5-24 步进电动机双三拍控制方式示意图

与单三拍控制方式不同,双三拍控制任一时刻都有二相绕组片于通电状态,而且在切换时总有某一相保持绕组通电,所以工作较稳定。如图 5-25 所示,如果通电顺序为 A→AB→B→BC→C→CA→A…,就是三相六拍工作方式,步进电动机每步按逆时针方向转过 15°。同样,如果通电顺序为 A→AC→C→CB→B→BA→A…,则步进电动机每步按顺时针方向转过 15°。可知三相六拍控制方式下的步距角是三相三拍控制方式下的一半。

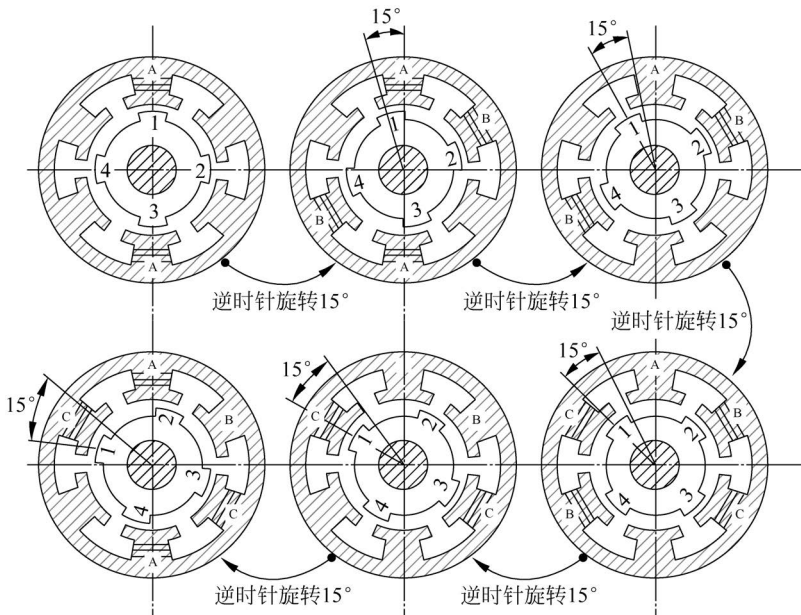


图 5-25 步进电动机三相六拍控制方式示意图

实际上,步进电动机的转子上有40个齿,在三相单三拍工作方式下的步距角为 $3^\circ$ ,而在三相六拍控制方式下为三相三拍控制方式步距角的一半,即 $1.5^\circ$ 。

总之,步进电动机的“步进式”转动是由绕组的控制电流脉冲(指令脉冲)决定的,其脉冲数量决定了其转动的步数(即角位移的大小);而其脉冲频率决定它的转动速度;改变绕组的通电顺序,就可以改变它的旋转方向。由此可见,步进电动机控制十分方便,但缺点是效率低,带惰性负载能力差,尤其在高速时容易失步。

### 3. 步进电动机的常用术语及主要特性

(1) 步距角 $\theta$ ( $^\circ$ )。指步进电动机定子绕组通电状态每改变一次,电动机转子所应转过的角度的理论值,也即每给一个电脉冲信号所对应的转子转过的角度,可按以下的计算公式获得:

$$\theta_b = 360^\circ / (Z \cdot N)$$

式中, $Z$ 为步进电动机转子齿数; $N=km$ 为运行拍数,通常等于相数或相数的整数倍, $m$ 为电动机相数; $k$ 为通电方式系数(单拍时 $k=1$ ,单双拍时 $k=2$ ,例如三相三拍时, $k=1$ ,三相六拍时, $k=2$ )。

步距角 $\theta$ 理论上应是整圆周( $360^\circ$ )的等分值,但实际上的步距角往往会存在误差。一般用步距误差即每转内各步距误差的最大值来作为步进电动机的静态步距误差,其大小主要受相关零部件的制造精度、齿槽和气隙的分布不均匀等因素影响。步进电动机的静态步距误差通常在 $10'$ 以内。

(2) 齿距角。指定子或转子上相邻的两个齿中心线之间的夹角,通常定子和转子具有相同的齿距角。

(3) 零位或初始稳定平衡位置。指步进电动机各绕组不改变其通电状态,转子在理想空载状态下的平衡位置。

(4) 失调角。指转子偏离理论平衡点的角度。如果在电动机轴上外加一个负载转矩,使转子按一定方向转过一个角度 $\theta$ ,此时角度 $\theta$ 就称为失调角。

(5) 矩角特性。步进电动机在空载时,若其某相绕组通电,根据步进电动机的工作原理,电磁力矩会使得转子齿与该相应定子齿完全对齐,使转子上没有力矩输出。如果在电动机轴上加负载转矩 $M$ ,则步进电动机转子就要转过一个角度 $\theta$ (与 $M$ 同方向)才能重新稳定下来,这时转子上受到的电磁转矩 $T$ 和负载转矩 $M$ 相等。矩角特性是指不改变各相绕组的通电状态,即单相或几相绕组同时通以直流电流时,电磁矩与失调角的关系,即

$$T = -\frac{Z_S Z_R}{2} l_t F^2 G_1 \sin Z_R \theta$$

式中, $Z_S$ 、 $Z_R$ 为定、转子齿数; $G_1$ 为定、转子比磁导的基波分量; $l_t$ 为定、转子铁芯长度; $F$ 为定子励磁磁动势。

各相矩角特性差异不应过大,否则会影响步距精度及引起低频振荡。

(6) 最大静转矩。矩角特性上转矩最大值 $T_k$ 称为最大静转矩,它反映了步进电动机承受负载的能力。在静态稳定区内,当外加转矩去除时,转子在电磁转矩作用下,仍能回到稳定平衡点位置( $\theta=0$ )。最大静转矩越大,步进电动机的自锁力矩越大,其静态误差也越小。即最大静态转矩越大,电动机带负载的能力越强,运行的快速性和稳定性越好。

(7) 最大静转矩特性。绕组电流改变时,最大静转矩与相应电流的关系  $T_k = f(I)$  为最大转矩特性。最大静转矩与通电状态和各相绕组电流有关,但电流增加到一定值时使磁路饱和,就对最大静转矩影响不大了。

(8) 误差。步进电动机的误差有两种:一是最大步距误差,是指电动机旋转一周内相邻两步之间最大步距和理想步距角的差值,用理想步距的百分数表示;二是最大累计误差,是指任意位置开始经过任意步之间,角位移误差的最大值。

(9) 响应频率。当步进电动机可以任意运动而不丢步时,其最大频率称为响应频率,通常用启动频率  $f_s$  来作为衡量的指标。它是指在一定的负载下直接启动而不失步的极限频率,称为极限启动频率或突跳频率。若启动时频率大于突跳频率,步进电动机就不能正常启动。空载启动时,步进电动机定子绕组通电状态变化的频率不能高于该突跳频率。

(10) 连续运行最高工作频率。指步进电动机启动以后,在额定负载下其运行速度连续上升时,步进电动机能不失步运行的最高极限频率,称为连续运行频率。其值远大于启动频率,其决定了定子绕组通电状态最高变化频率的参数,也决定了步进电动机的最高转速。它也随着电动机所带负载的性质和大小而异,与驱动电源也有很大关系。

(11) 启动转矩特性。负载惯量一定时,启动频率与负载转矩之间的关系称为启动转矩特性,也称牵入特性。

(12) 运行转矩特性。转矩特性  $T = F(f)$  是在负载惯量一定,连续稳定运行时输出转矩与连续运行频率之间的关系,又称牵出特性。动态转矩的基本趋势是随连续运行频率的增大而降低,运行转矩特性曲线上每一个频率对应的转矩称为动态转矩。在实际应用中一定要充分考虑动态转矩随连续运行频率的上升而下降的特点。

(13) 惯频特性。在一定的负载力矩下,步进电动机的频率和负载惯量之间的关系,称为惯频特性。具体而言,惯频特性分为启动惯频特性和运行惯频特性。

(14) 加减速特性。步进电动机的加减速特性主要描述步进电动机由静止到工作频率或由工作频率到静止的加速或减速过程中,定子绕组通电状态的变化频率与时间的关系。当要求步进电动机启动到大于突跳频率的工作频率时,变化速度须逐渐上升;另外,当从最高工作频率或高于突跳频率的工作频率停止时,变化速度也须逐渐下降。上升和下降的加速时间、减速时间不能过小,否则会出现失步或超步等现象。一般用加速时间常数和减速时间常数来描述步进电动机的升速和降速特性。目前,实际应用中主要通过软件实现步进电动机的加、减速控制。比较常见的加、减速控制实现方法有指数规律和直线规律加减速控制,指数规律加减速控制一般适用跟踪响应要求较高的切削加工中;直线规律加减速控制一般适用速度变化范围较大的快速定位方式中。

在实际应用中,步进电动机的惯频特性和动态特性等也都是很重要的特性。惯频特性主要描述步进电动机带动纯惯性负载时启动频率和负载转动惯量之间的关系;而动态特性主要描述步进电动机各相定子绕组通断电时的动态过程,它决定了步进电动机的动态精度。

#### 4. 步进电动机的驱动控制

除步进电动机本身的性能以外,步进电动机驱动器的性能也很大程度上影响整个步进电动机驱动系统的总体性能。如图 5-26 所示为步进电动机驱动控制模块的组成框图,其一

般由环形分配器(简称环分)、信号放大与处理级、推动级、驱动级等各部分组成,功率步进电动机的驱动器还有多种保护路线。

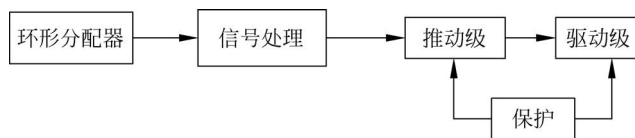


图 5-26 步进电动机驱动控制模块组成框图

环形分配器应根据步进电动机的相数和控制方式进行设计,用以控制步进电动机的通电运行方式,将数控装置送来的一系列指令脉冲按一定的顺序和分配方式,实现单个步进信号转换成步进电动机的控制信号,如三相六拍分配信号、五相十拍分配信号等,实现各相绕组的通电、断电,实现电动机的正反转控制。环形分配器可以由硬件完成,称为硬件环形分配器;也可以由软件来完成,称为软件环形分配器。环形分配器的输出是周期性的,又是可逆的。

信号处理级接收来自环形分配器输出的各相导通或截止的信号,实现信号必要的转换、合成,产生斩波、抑制等特殊功能的信号,从而产生特殊功能的驱动。在实际应用中,信号处理级与各种保护电路、各种控制电路组合,形成较高可靠性的驱动输出。

推动级负责电平转换,同时将较小的信号加以放大,变成足以推动驱动级动作的较大信号。其中的功率放大器用以将 TTL 电平的通电状态信号经过多级功率放大,用于控制步进电动机各相绕组电流按一定顺序切换。每相绕组分别由一组功率放大器控制,根据功率的不同,绕组电流从几安到十几安不等。

保护级的作用是保护驱动级功率器件,以作电流保护、过热保护、过电压保护、欠压保护等用。

#### 1) 环形分配器

输入环形分配器的指令脉冲来自数控装置插补器的输出,为适应步进电动机的运行特点,通常还要将指令脉冲进一步进行加减速处理,使脉冲频率平滑上升或下降,防止失步或过冲。环形分配器的实现方式很多,可以用硬件实现、软件实现及软硬件相结合的方法。

##### (1) 硬件环形分配器。

硬件环形分配器的种类很多,具体可由与非门、D 触发器或 JK 触发器等构成,也可采用通用可编程逻辑器件或专用集成电路实现,甚至采用小规模可编程逻辑器件 GAL 也可固化环形分配逻辑。目前市场上有许多专用的集成度高、可靠性好、具有可编程功能的集成电路环形分配器,例如国产的 PM03、PM04、PM05 和 PM06 专用集成电路,可分别用于 PM 系列三相、四相、五相和六相步进电动机的控制。进口的步进电动机专用集成芯片 PMM8713、PM8714 可分别实现四相(或三相)和五相步进电动机的控制。而 PPM101B 则是可编程的专用步进电动机控制芯片,通过编程可用于三相、四相、五相步进电动机的控制。

如图 5-27 所示为三相步进电动机中硬件环形分配驱动与数控装置的连接图,环形分配器的输入、输出信号一般为 TTL 电平,输出信号 A、B、C 信号为高、低电平分别表示相应的绕组通电和失电;CLK 为数控装置所发脉冲信号,每一个脉冲信号的上升沿(下降沿)到来

时,环形分配器使绕组改变一次通电状态;数控装置发出 DIR 方向控制信号,其电平的高低对应步进电动机绕组通电顺序的改变,即步进电动机的正、反转;FULL/HALF 电平用于控制电动机的整步(三拍)/半步(六拍)运行。

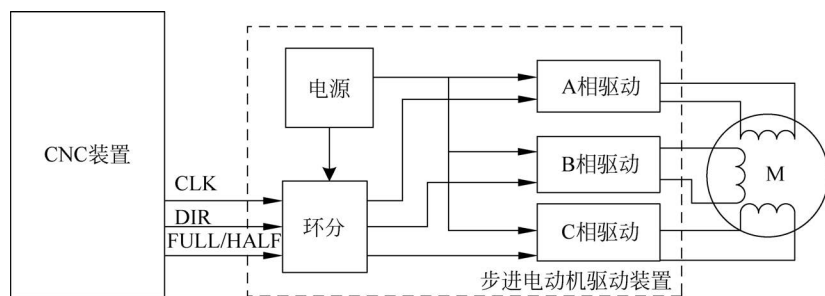


图 5-27 硬件环形分配驱动与数控装置的连接

如图 5-28 所示为三相六拍环形分配器的原理电路图,分配器由三个 D 触发器和若干个与非门组成。CP 端接进给脉冲控制信号,E 端接电动机方向控制信号。当方向控制信号  $E=1$  时,每来一个进给脉冲 CP,则步进电动机正向走一步;当  $E=0$  时,每来一个进给脉冲 CP,则步进电动机反向走一步。环行分配器的输出端  $Q_A$ 、 $Q_B$ 、 $Q_C$  分别控制电动机的 A、B、C 三相绕组。

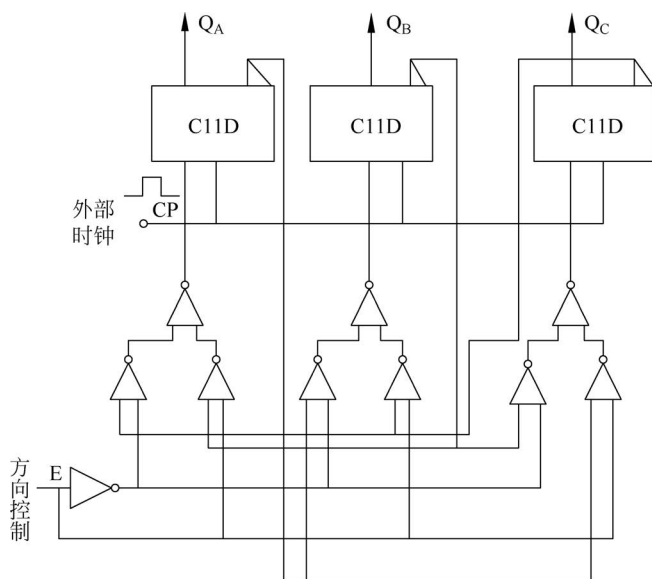


图 5-28 正、反向进给的环形分配器原理图

由 CH250 三相反应式步进电动机环形分配器的专用集成电路芯片构成的反应式步进电动机三相六拍工作时(通过其控制端的不同接法可以实现三相双三拍工作方式)的接线图如图 5-29 所示。

## (2) 软件环形分配器。

基于计算机控制的步进电动机驱动系统中,可以采用软件的方法实现环形脉冲分配功能。与硬件环形分配器不同,软件环形分配由数控装置中的软件部分来完成环形分配的任务,其接口直接输出速度和顺序控制脉冲信号,驱动步进电动机各相绕组的通、断电状态。



图 5-29 CH250 外形和三相六拍接线方式

通过编制不同的环形分配程序,可以在不改变硬件的基础上实现功能的改变,可以达到简化系统、提高性价比、实现步进电动机的灵活控制等特点。软件环形分配器的设计方法有查表法、比较法、移位寄存器法等,最常用的是查表法。下面以三相反应式步进电动机的环形分配为例,说明查表法软件环形分配器的工作原理。

如图 5-30 所示为一个两坐标步进电动机伺服进给系统电路连接原理框图。计算机的 PIO(并行输入/输出接口)的  $PA_0 \sim PA_5$  6 个引脚经各自的光电耦合、功率放大之后,分别与 X 方向(A、B、C 相)和 Z 方向(a、b、c 相)三相定子绕组连接。当采用三相六拍方式时,电动机正转的通电顺序为  $A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C \rightarrow CA \rightarrow A$  ( $a \rightarrow ab \rightarrow b \rightarrow bc \rightarrow c \rightarrow ca \rightarrow a$ );电动机反转的顺序为  $A \rightarrow AC \rightarrow C \rightarrow CB \rightarrow B \rightarrow BA \rightarrow A$  ( $a \rightarrow ac \rightarrow c \rightarrow cb \rightarrow b \rightarrow ba \rightarrow a$ )。如表 5-1 所示,基于 PIO 接口的接线方式,按步进电动机运转时绕组励磁状态转换方式得出环形分配器输出状态表,分别将表示 X 方向、Z 方向步进电动机各个绕组励磁状态的二进制数分别存入内存的 EPROM 地址  $2A00H \sim 2A05H$ 、 $2A10H \sim 2A15H$  中(地址可由用户设定),并分别设定表头的地址为  $TAB0$  和  $TAB6$ ,表尾的地址为  $TAB5$  和  $TAB11$ 。然后编写 X 向和 Z 向正、反方向进给的子程序,按从表头开始逐次加 1 的顺序变化,电动机正向旋转。步进电动机运行时,调用该子程序,如果按从表尾开始逐次减 1 的顺序变化,电动机则反转。

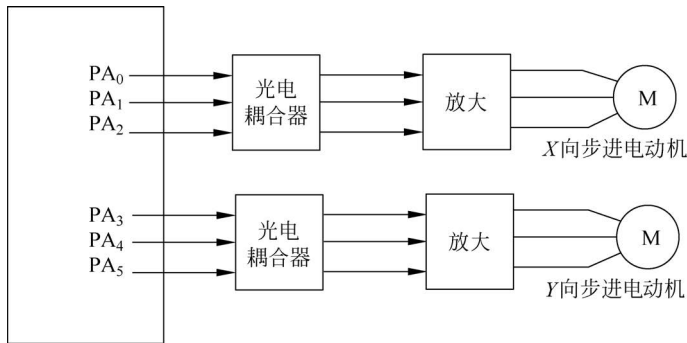


图 5-30 两坐标步进电动机伺服进给系统框图

表 5-1 步进电动机环形分配器的输出状态表

X 向步进电动机							
节拍	C	B	A	存储单元		电动机状态	方向
	PA <sub>2</sub>	PA <sub>1</sub>	PA <sub>0</sub>	内存地址	内容		
1	0	0	1	2A00H	01H	A	正转 ↓
2	0	1	1	2A01H	03H	AB	
3	0	1	0	2A02H	02H	B	反转 ↑
4	1	1	0	2A03H	06H	BC	
5	1	0	0	2A04H	04H	C	
6	1	0	1	2A05H	05H	CA	
Z 向步进电动机							
节拍	c	b	a	存储单元		电动机状态	方向
	PA <sub>5</sub>	PA <sub>4</sub>	PA <sub>3</sub>	内存地址	内容		
1	0	0	1	2A10H	08H	A	正转 ↓
2	0	1	1	2A11H	18H	AB	
3	0	1	0	2A12H	10H	B	反转 ↑
4	1	1	0	2A13H	30H	BC	
5	1	0	0	2A14H	20H	C	
6	1	0	1	2A15H	28H	CA	

采用软件脉冲分配器会增加软件编程的复杂程度,但同时也省去了硬件环形脉冲分配器,从而减少了硬件器件,简化了系统结构,降低了成本,提高了系统的可靠性。

## 2) 步进电动机伺服系统的功率驱动

从环形分配器输出的进给控制信号的电流很小(毫安级),一般需要进行功率放大后,才能达到步进电动机定子绕组所需的安培级电流以驱动步进电动机。功率放大电路将环形分配器输出的各相通电逻辑信号进行相应功率放大,控制步进电动机各相绕组电流按一定顺序切换,一般步进电动机的每一相都有自己的功率放大电路。功率放大电路的结构和性能

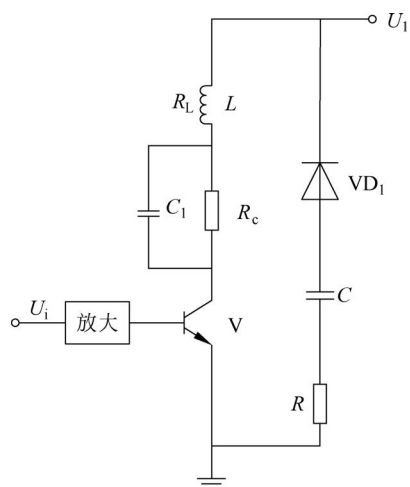


图 5-31 单电源功率放大电路原理图

直接影响整个步进电动机的性能。步进电动机功率放大电路形式很多,所采用的功率半导体元件可以是大功率晶体管 GTR,也可以是功率场效应管 MOS、可关断可控硅 GTO 和混合元件。具体应用上,功率放大电路最早采用单电压驱动电路,后来出现了高低电压切换驱动电路、恒流斩波驱动电路、调频调压驱动电路和细分驱动电路等。为了更好地掌握不同功率放大电路的性能,下面对这些功率放大电路的工作原理进行介绍。

### (1) 单电压功率放大电路。

如图 5-31 所示为一种典型的单电压简单驱动电路,它一般由光电耦合器、限流功率电阻以及大功率晶体管组成,可以作为步进电动机某一相绕组的驱动

电路。图中  $L$  为步进电动机励磁绕组的电感,  $R_L$  为步进电动机励磁绕组的电阻,  $R_c$  是大功率限流电阻, 用于限制稳态电流。为了减小回路的时间常数  $L/(R_a+R_c)$ , 使回路电流上升沿变陡, 将限流电阻  $R_c$  并联了一电容  $C_1$ , 以提高步进电动机的高频性能和启动性能。续流二极管  $VD_1$  和阻容吸收回路  $RC$  在  $V$  由导通到截止瞬间释放电动机电感产生高的反电势, 构成功率管  $V$  的保护电路。

此电路结构简单, 但是限流电阻  $R_c$  消耗能量大, 电流脉冲前后沿不够陡, 在改善了高频性能后, 低频工作时会增加振荡, 使得低频特性变坏。另外, 由于电流较大, 在大功率电阻上的功耗较高, 发热严重, 电路体积也很大, 实际中很少采用这种电路。

## (2) 高低电压功率放大电路。

为了克服单电压简单驱动电路的缺点, 高低电压切换驱动电路的给步进电动机绕组提供高低两种电压供电, 高压充电、低压供电, 高压充电以保证电流以较快的速度上升, 低压供电维持绕组中的电流为额定值。高压由电动机参数和晶体管的特性决定, 一般在  $80V$  至更高范围; 低压即步进电动机的额定电压, 一般为几伏, 不超过  $20V$ 。步进电动机的绕组每次通电时, 首先接通高压, 以保证电流以较快的速度上升, 然后改通低压, 维持绕组中的电流为额定值。通常高压导通时间固定在  $100\sim 600\mu s$  的某一值 ( $t_H$ )。

如图 5-32 所示为一种高低电压功率放大电路原理图。图中主回路由高压管  $V_1$ 、电动机绕组, 低压管  $V_2$  串联而成, 电源  $U_H$  为高电压电源, 具体可取为  $80\sim 150V$ ;  $U_L$  为低电压电源, 具体可取为  $5\sim 20V$ 。低压管的输入信号来自环形分配器, 其脉宽由环分输出决定。在绕组指令脉冲到来时, 脉冲的高电平(上升沿)同时使  $V_1$  和  $V_2$  导通。  $V_H$  是由  $V_L$  的前端经微分和整形获得, 形成脉冲宽度工作频率变化的定宽脉冲, 一般将高压脉宽整定为  $1\sim 3ms$ , 设  $V_H$  的脉宽为  $t_H$ ,  $V_L$  的脉宽为  $t_L$ , 在相绕组导通的过程中, 在前沿开始的  $t_H$  时间内, 由于高低压输入信号同时有效, 使高低压管同时导通电流的通路如图 5-32(b) 所示, 绕组电流由高压电源供给。此时, 机能组电流有很陡的前沿, 并迅速形成上冲, 当  $t_H$  过后

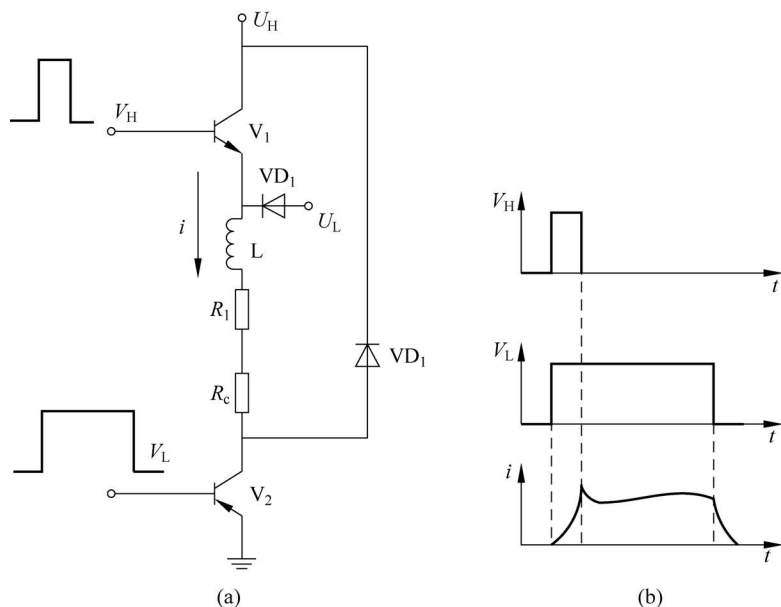


图 5-32 高低压驱动电路原理图

高压管转为截止状态,电动机由低电压  $U_L$  供电,维持规定电流值,  $t_L$  继续处于导通状态,电流通路如图所示,由于绕组阻值很小,所以低压电源只需数伏就可以提供较大的电流。

低频工作时,由于电动机反电势较小,绕组电流在  $t_H$  时间内几乎完全由高压的大小来决定。因为  $U_H$  电压很高,绕组回路电阻很小,所以绕组电流上升很快,能超过绕组的额定电流,但  $t_H$  时间过后,高压立即关闭,电流在低压回路迅速下降,直到变为由低压电源所决定的绕组电流大小。采用高压驱动,电流增长快,绕组电流前沿变陡,因此提高了电动机的工作频率和高速时的转矩,同时由于额定电流是由低电压维持,只需阻值较小的限流电阻  $R_c$ ,故系统功耗较低。其不足之处是高低压衔接处的电流波形在顶部有下凹,影响电动机运行的平稳性。

### (3) 斩波恒流功放电路。

高低压驱动的目的主要是使导通相电流不论在锁定低频或高频工作时,都保持额定值,但高低压切换驱动电路的电流波形会造成高频输出转矩的下降。斩波恒流驱动方式可较好地解决这一问题,斩波驱动电路的控制原理是检测流过绕组的电流值,当其值降到下限设定值时,便通过高压功率管导通使绕组电流迅速上升,上升到上限设定值时,便立即关断高压管。通过使高压管在一个步进周期内多次通断,最终保证绕组电流维持在额定值附近上、下限波动,接近恒定值,达到提高绕组电流的平均值,有效地抑制电动机输出转矩的降低的目的。斩波恒流功放电路原理如图 5-33 所示。

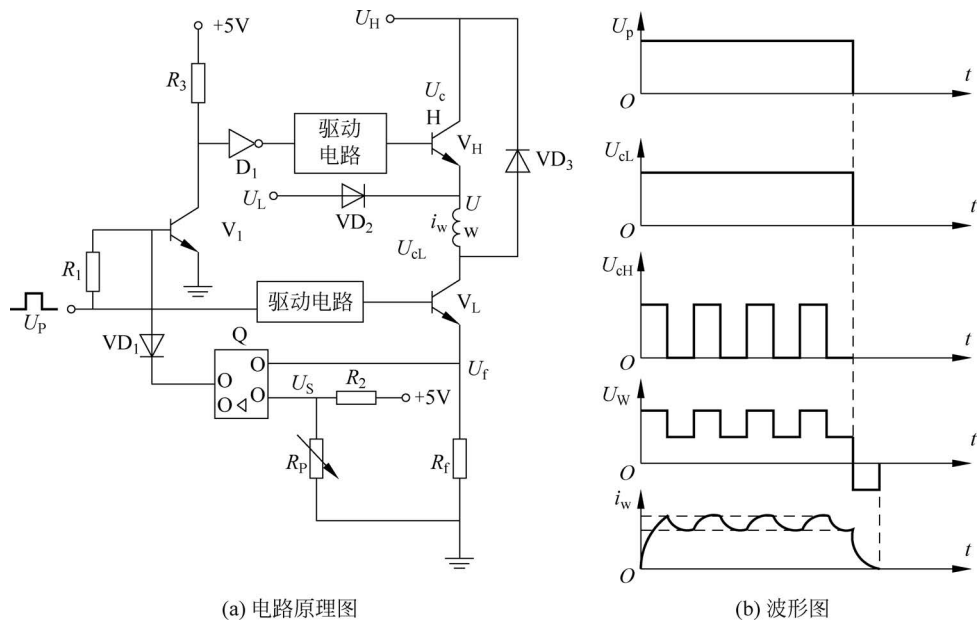


图 5-33 斩波恒流驱动原理图及波形图

环形分配器输出的脉冲作为斩波恒流功放电路的输入信号,低压管的发射极串联了一个大功率、小电阻值的取样电阻  $R_f$ ,电动机绕组的电流经这个取样电阻接地,取样电阻的压降与电动机绕组电流成正比,高压功率管  $V_H$  的通断同时受步进脉冲信号  $U_p$  和运算放大器  $Q$  的控制。由逻辑电路知识可知,在导通脉冲到来之前,晶体管  $V_L$  和  $V_H$  都截止,取样电阻电流为零;当环形分配器输出导通信号(正脉冲)时,环形分配器输出的相绕组导通脉

冲一路经驱动电路驱动低压管  $V_L$  导通,另一路通过晶体管  $V_1$  和反相器  $D_1$  及驱动电路驱动高压管  $V_H$  导通,这时绕组由高压电源  $U_H$  供电。晶体管  $V_L$  和  $V_H$  两管导通,由于  $U_H$  电压较高,高压  $U_H$  经  $V_H$  向电动机的绕组供电,由于电动机绕组有较大的电感,所以电流呈指数上升,但所加电压较高,所以电流上升较快。当绕组中的电流上升到额定值以上某个数值时,取样电阻  $R_f$  上的电压  $U_f$  不断升高,当其升高到比运算放大器  $Q$  同相输入电压  $U_s$  大时, $Q$  输出端变成低电平,使  $V_1$  的基极通过二极管  $VD_1$  接低电平, $V_1$  截止, $D_1$  输出低电平, $V_H$  截止,关断高压供电,绕组转由低压  $U_L$  供电。当绕组上流过的电流下降,取样电阻上得到的电压小于给定电压时,运算放大器  $Q$  输出高电平使  $VD_1$  截止, $V_1$  导通, $D_1$  输出高电平,通过驱动电路使  $V_H$  导通,绕组又转由高压  $U_H$  供电。在步进脉冲有效期内如此反复,使电动机绕组的电流稳定在由给定电平所决定的数值上,形成小小的锯齿波,并限制在给定值上下波动。调节电位器  $R_p$ ,可改变  $Q$  的翻转电压,即改变绕组中电流的限定值。 $Q$  的增益越大,绕组的电流波动越小,电动机运转越平稳,电噪声也越小。

由于驱动电压较高,斩波恒流驱动中的绕组电流上升很快,且达到所需的数值时,由于取样电阻反馈控制作用,绕组电流又可以恒定在不随电动机的转速而变化的数值上,使步进电动机在很大的频率范围内都能输出恒定转矩,是一种恒流驱动方案,绕组上的电流大小与外加电压大小无关,所以对电源的要求很低。其次,因为在相绕组导通时间内,绕组并不是一直由电源电压供电,而是通过一个个的窄脉冲实现供电,所以总的输入能量是各脉冲时间的电压与电流乘积积分的总和,与其他的驱动方式相比,取自电源的能量大幅下降。因此,这种驱动器有很高的效率。另外,由于电动机共振的基本原因是能量过剩,而斩波恒流驱动输入的能量是自动随着绕组电流调节的,能量过剩时续流时间长,而供电时间减小,因此可减小能量的积聚,可以达到有效减少电动机共振现象发生的目的。最后,这种定电流控制的驱动电路在运行频率不太高时,补偿效果比较明显。但当运行频率升高时,因电动机绕组的通电周期缩短,高压管导通时绕组电流来不及升到整定值,所以波峰补偿作用就不明显了。具体应用时通过提高高压电源的电压,使补偿频段提高。

#### (4) 调频调压驱动电路。

步进电动机绕组电流的上冲值在电源电压一定时会随工作频率的升高而降低,导致输出转矩随电动机转速的提高而下降。为保证高频运行步进电动机的输出转矩,就需要将供电电压提高。上面所讲的各种功率驱动电路都是为保证绕组电流有较好的上升沿和幅值而设计的,从而有效地提高了步进电动机的工作频率,但是步进电动机在低频运行时,会给绕组注入过多的能量而引起步进电动机的低频振荡和噪声等现象的发生。为了克服这个不足,可以采用调频调压驱动电路。

调频调压驱动电路的基本原理,是根据当步进电动机所运行在低频或高频状态,实时降低或升高其供电电压,即使得步进电动机的供电电压跟随步进电动机转速增加而升高,在解决了低频振荡问题的同时,也保证了高频运行时的输出转矩。

在计算机数控系统中,通常可以由软件配合适当硬件电路来实现调频调压驱动,如图 5-34 所示为调频调压驱动电路原理图,若由 CPU 输出的开关调压信号  $U_c$  输出一个负脉冲信号,使得晶体管  $V_1$  和  $V_2$  导通,使得电源电压  $U$  作用于电感  $L_1$  和电动机绕组  $W$  上,电流逐渐增大并对电容  $C$  充电(充电时间由负脉冲宽度  $t_c$  决定),电感  $L_1$  感应出负电动势,在开关调压信号  $U_c$  负脉冲过后, $V_1$  和  $V_2$  截止, $L_1$  又产生感应电动势,其方向是  $U_1$  处为

正。此时,若  $V_3$  导通,这个反电动势便经  $W \rightarrow R_s \rightarrow V_3 \rightarrow \text{地} \rightarrow \text{VD}_1 \rightarrow L_1$  回路泄放,同时  $C$  也向  $W$  放电。由此可见,向电动机绕组供电电压  $U_1$  取决于  $V_1$  和  $V_2$  的导通时间,即随负脉冲的宽度  $t_o$  的增大而升高,根据 CPU 输出的步进控制脉冲信号  $U_c$  的频率,调整  $U_c$  的负脉冲宽度,便可实现调频调压。

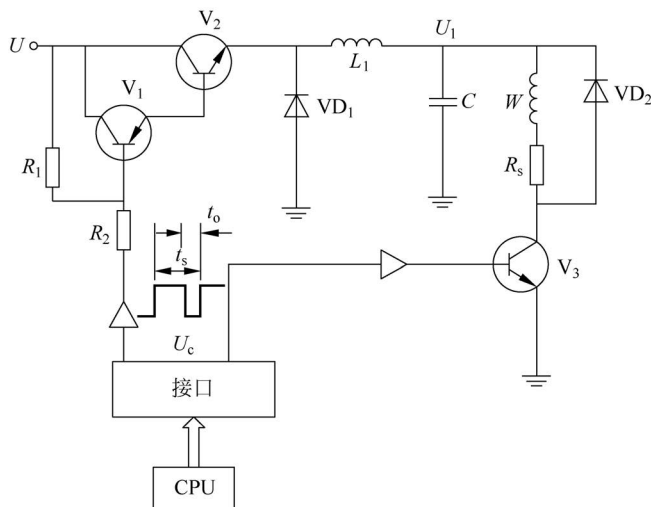


图 5-34 调频调压驱动电路

#### (5) 细分驱动电路。

上述的各种功率驱动电路,都按照环形分配器决定的分配方式来控制电动机各相绕组的导通或截止,从而使电动机产生步进所需的旋转磁势拖动转子步进旋转,因此步距角只有整步工作或半步工作两种。如果要求步进电动机有更小的步距角、更高的分辨力,或者考虑步进电动机振动、噪声等原因,可以在每次输入脉冲切换时,通电相的电流分多次累积增加(或减小)完成,则电动机的合成磁势也只旋转步距角的一部分,转子在每次增加(或减小)时的运行也只有步距角的一部分。这时绕组电流不再是一个方波,而是阶梯波,额定电流也是台阶式的加入或切除,电流分成多少个台阶增加(或减小),则转子就以同样的次数转过一个完整步距角,这种通过控制步进电动机各相绕组中电流的大小和比例,从而使步距角减少到原来的几分之一至几十分之一(一般不小于  $1/10$ )的驱动方法,称为细分驱动。细分驱动电路可以提高步进电动机的分辨力,减弱甚至消除振荡,极大提高电动机运行的精度和平稳性。实现细分的关键在于将绕组中的矩形电流波变成阶梯形电流波。阶梯波控制信号可由很多方法产生,如图 5-35 所示为一种恒频脉宽调制细分驱动电路及其波形图。

数/模转换器的数字信号(与步进电动机各相电流相对应的值)和 D 触发器的触发脉冲信号  $U_d$  可由数控装置提供,数字信号经数/模转换器转换成相应的模拟信号电压  $U_a$ ,加在运算放大器 Q 的同相输入端,因此时绕组上电流还未跟上,故  $U_f < U_a$ ,Q 输出高电平,控制 D 触发器在  $U_m$  的作用下在 H 端输出高电平,使功率晶体管  $V_1$  和  $V_2$  导通,电动机绕组  $W$  中的电流迅速上升。当绕组电流上升到一定值时,反馈电阻  $R_f$  上的电压  $U_{Rf}$  超过  $U_a$ ,使运算放大器 Q 输出变为低电平,控制 D 触发器清零,  $V_1$  和  $V_2$  截止。此时当  $U_a$  不变时,由运算放大器 Q 和 D 触发器构成斩波控制电路,将使绕组电流稳定在一定值上下波动,完成了稳定在一个新台阶上的过程。一段时间后,数控装置再给模数转换器输入一个增加(减小)

的电流数字信号,经模/数转换器  $U_a$  上升(下降)到一个新的大小,绕组电流也将按上述过程跟着上升(下降)一个阶梯。最终实现细分,并保证在每一个阶梯高度(电流大小)维持恒定。

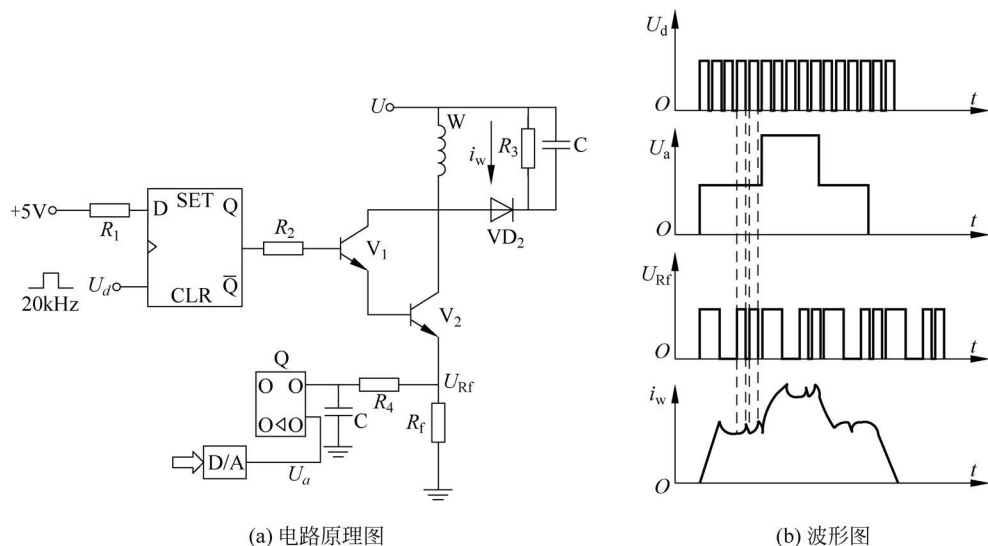


图 5-35 恒频脉宽调制细分驱动电路及波形图

### 3) 提高步进伺服系统精度的措施

步进伺服系统是一个开环系统,系统的工作精度受步进电动机的质量、机械传动部分的结构和质量以及控制电路的完善与否所影响。要改善步进伺服系统的工作精度,应从改善步进电动机的性能、减小步距角、使用精密传动副、减少传动链中传动间隙等方面来考虑。但这些因素一般由于结构工艺的关系受到一定的限制,所以可从控制方法和线路上采取一些弥补措施,下面具体介绍几种常见的方法。

#### (1) 采用细分驱动技术。

通过细分控制电路,可以将步进电动机的一个步距角细分为多个等份,从而提高步进电动机的精度和分辨力。如十细分电路可以将原一个脉冲对应的步距角细化为 10 个脉冲才使电动机完成一步,在进给速度不变的情况下可以使脉冲当量缩小为原来的 1/10。由于步距角被细化,转子到达新稳态点所需的动能变小,使步进电动机不改变电动机内部的结构就可以实现更微量进给,振动显著减小,既有快速性也有低频运行的平滑性等优点。

#### (2) 传动误差补偿。

在实际使用过程中,进给传动结构由于刚度、环境的温度等参数和负载的变化都可能引起一定的传动误差。作为开环系统,步进电动机很难通过其各环节去克服,为了改善开环系统的位置精度,需要考虑各种补偿方法和功能。最常用的是齿距误差和反向间隙补偿,这种方法的基本原理是根据实际测出的传动间隙或齿距误差的大小,在出现反向运动指令或移动到有齿距误差的位置时,通过硬件线路或利用程序来补偿一定的进给脉冲来补偿传动系统的间隙误差和传动误差。通常将各种补偿参数预先存放在 RAM 中,当程序判断应该进行某种补偿时,立刻查找表格,取出补偿值,再进行有关的修正计算,从而完成补偿任务。

#### (3) 螺距误差补偿。

在开环步进伺服驱动系统中,丝杠的螺距误差产生原因如下:由于滚珠丝杠副大都处

在进给系统传动链的最末级,而传动丝杠和螺母都不同程度地存在一些误差(如螺距累计误差、螺纹滚道型面误差、直径尺寸误差),这些误差将直接影响零部件的加工精度;滚珠丝杠大都采用双支撑或三支撑结构,因此在其装配过程中,丝杠会产生轴向弹性伸长而造成丝杠螺距误差增加;在装配过程中,丝杠轴线与机床导轨会因为安装平行度误差引起目标值偏差。

丝杠的螺距累计误差将直接影响到工作台的位移精度,为提高开环伺服驱动系统的精度,就必须予以补偿。补偿原理是通过实测机床实际移动的距离与指令移动的距离之差,得到丝杠全程的误差分布曲线。根据获得的误差分布曲线,适当增减指令值的脉冲个数,使机床的实际移动距离与指令值接近,达到补偿螺距误差和提高机床定位精度的目的。螺距误差补偿只对机床补偿段起作用。

### 5.3.2 直流伺服系统

一般称转速和方向都受控制电压信号控制的一类电动机为伺服电动机,常被用于自动控制系统中作为执行元件。伺服电动机可分为直流、交流伺服电动机两大类。在数控系统中,将以直流电动机作为驱动元件的伺服系统称为直流伺服系统。数控机床对伺服驱动系统有较高的要求,而直流伺服电动机具有良好的启动、制动和调速特性,实现宽范围平滑无级调速比较容易,尤其是他励和永磁直流伺服电动机,具有良好的机械特性,所以直流伺服系统自20世纪70年代以来在数控系统中的半闭环、闭环控制伺服驱动中得到了广泛的应用。直流伺服系统的缺点是由于结构中有电刷和换向器的存在,会产生比较大的摩擦转矩,有火花干扰及维护不便等。随着交流伺服驱动技术的发展,直流伺服电动机已被逐渐取代,但直流伺服电动机目前仍有采用,并且现有的已采用直流伺服驱动(极大部分的直流伺服系统采用永磁直流伺服电动机)的数控系统也需要维护和调试,因此直流伺服驱动相关技术仍是学习的重点。

#### 1. 直流伺服电动机的分类

直流伺服电动机的品种很多,如按转速的高低可分为高速直流伺服电动机和低速大扭矩宽调速电动机。其中,高速直流伺服电动机又可分为普通直流伺服电动机和高性能直流伺服电动机。直流电动机的定子有永久磁铁或激磁绕组所形成的磁极两种,根据电动机磁场产生的方式,可分为他励式、永磁式、并励式、串励式和复励式5种,实际上,永磁直流伺服电动机的定子永磁体通常采用新型稀土钴等永磁材料,其具有极大的矫顽力和很高的磁能积,因此电动机抗去磁力高,体积小。普通高速他励式直流伺服电动机的应用历史最长,但其转矩/惯量比很小,难以满足现代伺服控制技术的要求。20世纪60年代中期出现的永磁式直流伺服电动机(也称为大惯量宽调速直流伺服电动机)由于没有励磁回路,外形尺寸比其他直流伺服电动机小,而且效率高、结构简单。在结构上,直流伺服电动机有一般电枢式、无槽电枢式、印刷电枢式、绕线盘式和空心杯电枢式等。根据控制方式,直流伺服电动机可分为磁场控制方式和电枢控制方式。为避免电刷、换向器的接触,还有无刷直流伺服电动机。

目前数控进给系统中采用的直流电动机主要是20世纪70年代研制的大惯量宽调速直流伺服电动机,这种电动机又可细分为电励式和永久磁铁励磁式两种。占主导地位的永磁式直流伺服电动机采用电枢控制方式,调速范围较宽,低转速下运行平稳,转动惯量

大,加减速大,大加速度状态下有良好的换向性能,其低速高转矩和大惯量结构使其可以与丝杠直接相连,耐高温可达 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ ,能够在较大过载转矩长时间地工作,在数控系统中得到了广泛应用。但是对其控制不如步进电动机简单,快速响应性能不如小惯量电动机,长时间工作时转子的热量会引起丝杠受热变形而影响传动精度,维修保养也存在一定的问题。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: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铁芯表面无槽,电枢表面绕组直接用环氧树脂粘接在光滑的铁芯表面上。空心杯电枢直流伺服电动机转子无铁芯,壁薄而细长,转动惯量更小。因为小惯量直流电动机最大限度地减小了电枢的转动惯量,所以可以达到的响应速度较快,适合对电动机的动态响应性能要求较高的伺服系统。

低速大扭矩宽调速电动机(也称大惯量电动机)具有较高的转矩/转动惯量比,因此有较好的快速响应性和极高的加速度;具有高的热容量,电动机可长时间运行在过载状态下;具有高转矩和低转速特性,可解决齿轮减速器的间隙给系统带来的种种不利影响,总系统的转矩/惯量比值较恒定,具有较高的动态性能。近年来高精度数控系统和工业机器人伺服系统中广泛采用低速大扭矩宽调速电动机,如FANUC-BESK系列直流伺服电动机等。

## 2. 直流伺服电动机的工作原理

直流伺服电动机的基本结构(图5-36)与一般的电动机结构相似,包括三大部分:定子、转子(电枢)和电刷与换向片,永磁式定子磁极由永磁材料制成,他激式定子磁极由外绕线圈的冲压硅钢片叠压而成,并通以直流电流产生恒定磁场;转子由冲压硅钢片叠压而成,表面嵌有的线圈通直流电,在定子的磁场作用下产生带动负载旋转的电磁转矩;电刷与外接直流电源相接,而换向片与电枢导体相连,通过电刷和换向器,转子绕组中的任何一根导体,只要一转过中性线,即发生由定子S极下的范围进入定子N极下的范围(或者由定子N极下的范围进入S极下的范围)的转变,为保证转子的总磁动势的方向始终与定子磁动势正交,这根导体上的电流需要改变方向,而在S极下范围的导体和N极下范围的导体总是保持各自电流方向不变。转子磁场与定子磁场相互作用产生恒定的电动机的电磁转矩,带动电动机转动。

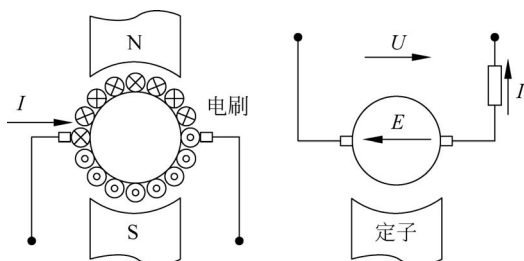


图 5-36 直流伺服电动机工作原理示意图

励磁式直流电动机都是建立在电磁力定律基础上的,一般由励磁绕组和磁极分别建立磁场,由通电导体(电枢绕组)切割磁力线产生的相应电磁转矩的大小与电动机中气隙磁场和电枢电流成正比。产生的电动机电磁转矩大小可以表示为

$$T_M = C_M \phi I_a$$

式中, $T_M$ 为电动机电磁转矩; $C_M$ 为电磁力矩常数。对于永磁式直流伺服电动机,这两个

参数都是常数。

当直流电动机处于匀速旋转时,其输入的转矩会与负载转矩相等。直流电动机的实际输出转矩往往还应考虑其电枢铁芯中的涡流、磁滞损耗和机械零部件摩擦(如电刷和换向器的摩擦,轴承的摩擦等)引起的内部阻转矩。因此,电磁转矩平衡方程可以表示为

$$T_o = T_M - T_i = T_R$$

其中, $T_o$ 为电动机的输出转矩; $T_i$ 为电动机自身内部的阻转矩; $T_R$ 为电动机匀速旋转时所克服的负载转矩。如果把电动机内部阻转矩和负载转矩共同作用称为总阻转矩 $T_s$ ,上式还可以写为

$$T_M = T_s = T_i + T_R$$

即直流电动机在稳态运行时,电动机的电磁转矩与电动机轴上的总阻转矩相平衡。当电动机处于转速变化情况下,例如启动、停转或反转等,这种情况下电动机轴上的转矩平衡方程式可以表示为

$$T_M - T_s = T_J = J \frac{d\omega}{dt}$$

式中, $T_J$ 表示因电动机的转动惯量产生的惯性转矩; $J$ 表示负载和电动机转动部分的转动惯量; $\omega$ 表示电动机的角速度。由上式可知,当电动机电磁转矩 $T_M$ 大于总阻转矩 $T_s$ 时,电动机会加速运行;反之电动机减速运行。

电流通过电枢绕组产生电磁力和电磁转矩。另外,当电枢在电磁转矩的作用下转动后,电枢导体因切割磁力线会产生与电流方向相反的感应电动势,直流电动机电枢回路的电压平衡方程式可以由以下两式表示:

$$I_a R_a + E_a = U_a$$

$$E_a = C_e \phi n$$

式中, $R_a$ 为电枢电阻; $I_a$ 为电枢电流; $U_a$ 为电枢电压; $E_a$ 为电枢反电动势; $C_e$ 为反电动势常数; $\phi$ 为电动机磁通; $n$ 为电动机转速。

上式表明,外加电压一部分用来抵消反电动势,一部分消耗在电阻上。

根据以上分析,可得出直流电动机的机械特性公式:

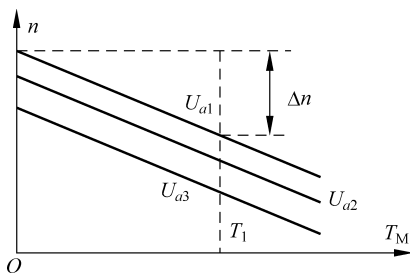


图 5-37 直流电动机的机械特性

$$n = \frac{U_a - I_a R_a}{C_e \phi} = \frac{U_a}{C_e \phi} - \frac{R_a T_M}{C_e C_M \phi^2}$$

其对应的机械特性曲线族如图 5-37 所示,不同的电枢电压对应于不同的曲线,各曲线彼此平行。其中,

$n_0 \left( \frac{U_a}{C_e \phi} \right)$ 称为理想空载转速,而  $\Delta n \left( \frac{R_a}{C_e C_M \phi^2} \right)$ 称为

转速降落。实际采用改变电枢电压 $U_a$ 的方法来调速。

### 3. 直流伺服电动机的速度控制

作为直流伺服系统的一个执行元件,直流伺服电动机可以控制机床的进给速度和移动位置。一般而言,如图 5-38 所示,直流伺服系统的结构为电枢电流闭环、速度闭环与位置闭环三闭环控制,其中电流反馈一般采用取样电阻、霍尔电路传感器等。

由以上分析可知,改变电枢电压、励磁电流或电枢电路的电阻都可改变电动机的转速,

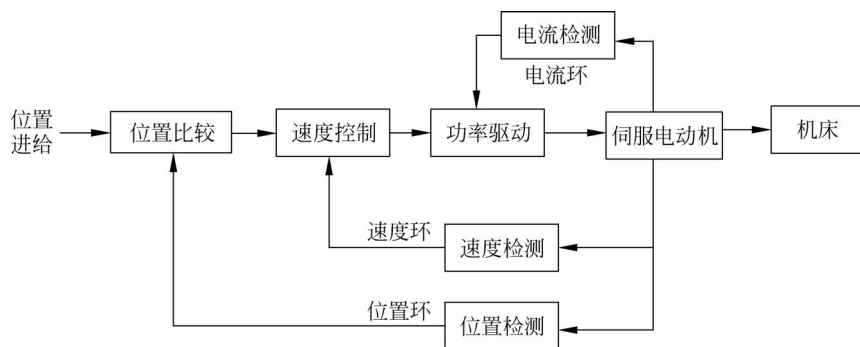


图 5-38 直流驱动系统的一般结构

数控系统的速度控制单元一般采用改变电枢电压和励磁电流的方法,尤其是改变电枢电压方法常用来实现对伺服电动机和主轴电动机的速度调节。直流伺服电动机的速度控制单元主要是把速度指令信号转换成相应的电枢电压值,实现调节电动机速度的目的。直流电动机的速度控制单元通常采用晶闸管(Silicon Control Rectifier, SCR, 可控硅)调速系统和晶体管脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)调速系统,这两种调速系统都有永磁直流伺服电动机调速的控制电路,皆采用模拟控制方法改变电动机电枢的电压,目前最先进的调速方法是全数字调速系统。

### 1) 晶闸管调速系统

晶闸管调速系统通常采用晶闸管三相全控桥式整流电路作为速度控制单元的主回路,通过对 12 个晶闸管触发角的控制,达到控制电动机电枢电压的目的。晶闸管直流调速系统的基本原理框图如图 5-39 所示,其中,  $U_c^*$  为控制电压,  $U_r$  为转速反馈电压,  $U_d$  为直流电动机的电枢电压,在交流电源电压不变的情况下,直流电动机的电枢电压可通过控制电路和晶闸管主电路跟随控制电压的改变,从而得到所要求的电动机转速。速度检测装置如测速电动机检测电动机的转速,输出相应的反馈电压,控制电压与反馈电压的差值即为速度调节器的输入,形成速度环,达到改善电动机运行时的机械特性的目的。速度单元由控制回路和主回路两部分组成,控制回路产生触发脉冲,这种脉冲信号由速度指令  $F$  演变而来,与供电电源的频率及相位同步,实现对可控硅正确触发,脉冲的相位即触发角。主回路为功率级的整流器,将电网交流电源变为直流;将控制回路的控制功率放大,得到较高电压与较大电流以驱动电动机(在可逆控制电路中实现逆变,即电动机制动时,把电动机运转的惯性能转变为电能,并回馈给交流电网)。为了对晶闸管进行控制,必须有相应的触发脉冲发生器,以产生合适的触发脉冲。现有多种型号的专用三相桥式全控整流器触发电路芯片可供选用,以组成相应的触发装置。

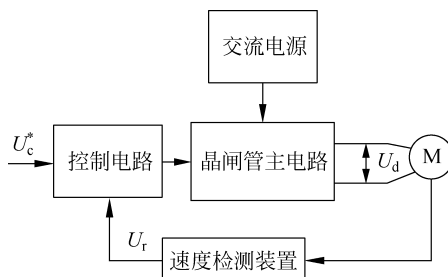


图 5-39 晶闸管直流调速系统原理框图

速度单元由控制回路和主回路两部分组成,控制回路产生触发脉冲,这种脉冲信号由速度指令  $F$  演变而来,与供电电源的频率及相位同步,实现对可控硅正确触发,脉冲的相位即触发角。主回路为功率级的整流器,将电网交流电源变为直流;将控制回路的控制功率放大,得到较高电压与较大电流以驱动电动机(在可逆控制电路中实现逆变,即电动机制动时,把电动机运转的惯性能转变为电能,并回馈给交流电网)。为了对晶闸管进行控制,必须有相应的触发脉冲发生器,以产生合适的触发脉冲。现有多种型号的专用三相桥式全控整流器触发电路芯片可供选用,以组成相应的触发装置。

可控硅整流电路由多个大功率晶闸管组成,按其具体的组成方式可分为单相全控桥、单相半控桥、三相半波、三相半控桥、三相全控桥等。单相全控桥和单相半控桥式整流电路虽然结构简单,但其输出波形差,容量有限,所以较少采用。在数控系统中,主轴直流伺服电动机和

进给直流伺服电动机的转速控制可使电动机正转和反转,是典型的正反转速度控制系统,俗称四象限运行,常采用三相全控桥式反并联可逆电路,如图 5-40 所示。三相全控桥式反并联可逆电路由两组共 12 个可控硅大功率晶闸管组成,每组有按三相桥式连接的 3 个共阳极和 3 个共阴极晶闸管,两组反并联(两组变流桥反极性并联,由一个交流电源供电),分别实现正转和反转。每组晶闸管都有整流和逆变两种工作状态。当其中一组处于整流工作时,另一组处于待逆变状态。在电动机降速时,逆变组工作。在正转组和反转组中,需要共阴极组中一个晶闸管和共阳极组中一个晶闸管同时导通才能构成通电回路,因此必须同时发出触发脉冲。

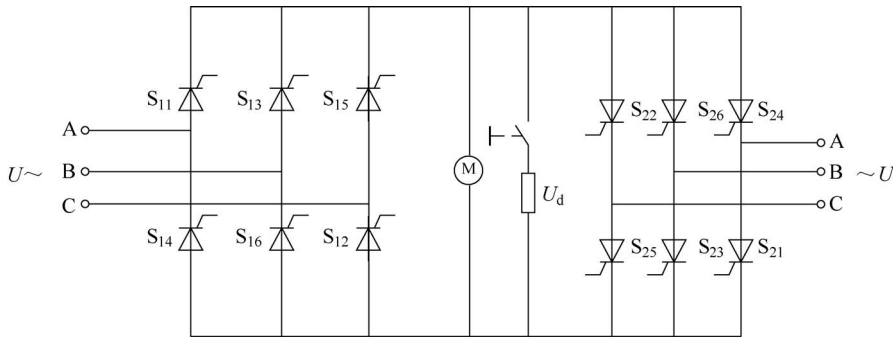


图 5-40 三相桥式反并联可逆电路

共阴极组中的晶闸管在电源电压正半周内按 1、3、5 顺序导通,共阳极组的晶闸管在电源电压负半周内按 2、4、6 顺序导通,共阳极组或共阴极组内晶闸管的触发脉冲之间的相位差是  $120^\circ$ ,在每相内两个晶闸管的触发脉冲之间的相位是  $180^\circ$ 。输出电压可以通过改变晶闸管的触发角实现改变,达到调节直流电动机速度的目的。这种调速系统的调速范围大,因此适合大功率的直流伺服电动机的速度调节。但是因可控硅大功率晶闸管在导通后是利用电流过零来实现关闭的,所以输出的电流波形是断续的,而且在低电压时输出给直流电动机的尖峰电流会使得直流进给伺服电动机在低速旋转时出现脉动现象,导致转速不平稳现象。

## 2) PWM 调速控制系统

大功率晶体管工艺成熟和高反压大电流的模块型功率晶体管商品化导致晶体管脉宽调制型(PWM)直流调速系统被广泛采用。脉宽调速系统是利用大功率晶体管的开关特性来调制固定电压的直流电源,通过脉宽调制器控制工作于开关状态的晶体管按一个固定的频率来接通和断开,根据需要改变一个周期内的开关时间长短,以改变直流伺服电动机电枢上的电压的占空比来调整平均电压的大小,从而实现电动机转速的调节。因此,这种装置也称为开关驱动装置。由于各功率元件均工作在开关状态,因此功率损耗较小,特别适用于功率较大的系统,特别是低速、大转矩的系统。开关放大器可分为脉冲宽度调制型和脉冲频率调制型(Pulse Frequency Modulation, PFM)两种,也可采用这两种形式的混合型,目前脉宽调

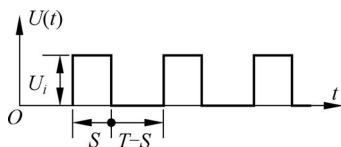


图 5-41 电枢两端的 PWM 脉冲电压  $U(t)$

制型应用最为广泛。

如图 5-41 所示,直流电动机电枢电压  $U(t)$  是一串输入电压 ( $U_i$ ) 和周期 ( $T$ ) 为常数的方波脉冲。脉冲宽度 ( $S$ ) 随每一周期内“接通”的时间长短而改变。因此,由晶体管输出到电动机电枢上

的电压  $U(t)$  的平均值为

$$U_d = U_i S / T$$

由上式可知,当  $S$  为 0 和  $T$  时,  $U_d$  分别为 0 和  $U_i$ , 即  $U_d$  的变化范围为  $0 \sim U_i$ 。

如图 5-42 所示为 PWM 调速系统组成原理框图。其中 PWM 调制器的作用就是使电流调节器输出的按给定指令变化的直流电压电平与振荡器产生的固定频率三角波叠加, 然后利用线性组件产生宽度可变的矩形脉冲, 经驱动回路放大后加到直流斩波器, 驱动直流斩波器中大功率晶体管。

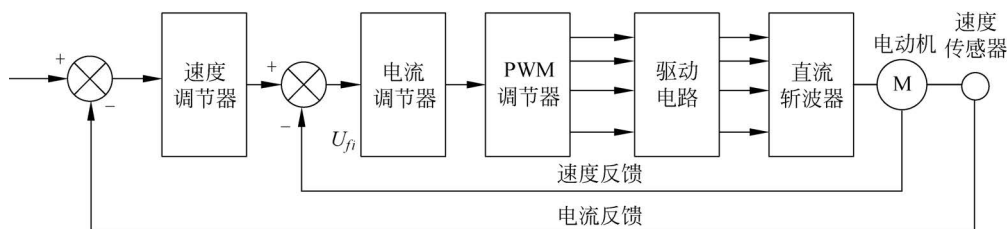


图 5-42 PWM 调速系统组成原理框图

PWM 方式的速度控制单元由系统主回路(脉冲功率放大器)和脉冲宽度调制器两部分组成。脉宽调制器的任务是将插补器输出的速度指令转换过来的连续控制信号(直流电压量)变成具有一定脉冲宽度的方波脉冲电压信号, 该脉冲电压随直流电压的变化而变化。在 PWM 调速系统中, 直流电压量为电流调节器的输出, 经过脉宽调制器变为周期固定、脉冲平均电压随脉宽改变的脉冲信号, 这种脉冲信号作为功率转换电路的基极输入信号, 以改变直流伺服电动机电枢两端的平均电压, 从而控制直流电动机的转速和转矩。脉冲宽度调制器的种类很多, 但从构成来看, 都是由调制信号发生器和比较放大器两部分组成。而调制信号发生器通常采用三角波发生器或锯齿波发生器。

如图 5-43 所示为用比较器将三角波信号  $u_{\Delta}$  和控制信号  $u_c$  进行调制, 使控制信号转换为具有一定脉冲宽度的脉宽调制方波。三角波信号和速度控制信号送入比较器同向输入端进行比较, 相应的工作波形图如图 5-44 所示。当外部控制信号  $u_c = 0$  时[图 5-44(a)], 比较器输出为正负对称的方波, 直流分量为零, 输出平均电压为零。当  $u_c > 0$  时[图 5-44(b)],  $u_{\Delta} + u_c$  对接地端是一个

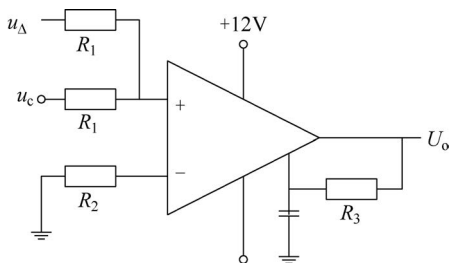


图 5-43 脉宽调制器原理

不对称三角波, 平均值高于接地端, 比较器输出脉冲的正半周宽大于负半周宽度, 输出平均电压为大于零。 $u_c$  越大, 正半周的宽度越宽, 直流分量也就越大, 所以电动机正向旋转越快。反之, 当控制信号  $u_c < 0$  时[图 5-44(c)],  $u_c$  的平均值低于接地端, 比较器输出的方波正半周较窄, 负半周较宽。 $u_c$  的绝对值越大, 负半周的宽度越宽, 因此电动机反转越快。比较器输出脉冲的负半周宽度大于正半周宽度, 输出平均电压小于零。这样通过比较器完成了速度控制电压到脉冲宽度之间的变换且脉冲宽度正比于代表速度的电压的高低。通过改变控制电压的极性, 就改变了 PWM 变换器的输出平均电压的极性, 从而改变了电动机的转向。

开关型功率放大器的驱动回路有 H 型和 T 型两种结构形式, 其中 H 型电路在控制方

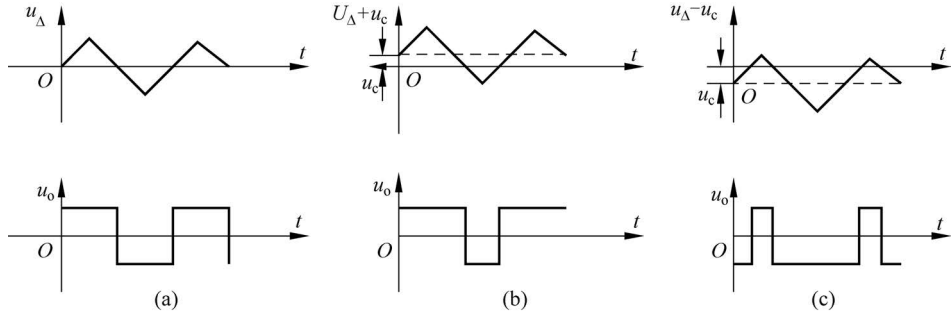


图 5-44 三角波脉冲宽度调制器工作波形图

式上又可分为双极式和单极式。图 5-45 为广泛使用的 H 型双极可逆功率转换电路,图中  $VD_1 \sim VD_4$  为续流二极管,用于保护大功率晶体管  $V_1 \sim V_4$  ( $V_1$  和  $V_4$  为第一组,  $V_2$  和  $V_3$  为第二组,同组中的两个晶体管同时导通或关断,两组晶体管交替导通和关断,为实现交替导通和关断,通常将一组控制方波加到一组大功率晶体管的基极,同时将反向后该组的方波加到另一组的基极上),M 为直流伺服电动机,直流供电电源  $+U_S$  由三相全波整流电源供给。控制方法为:将脉宽调制器输出的脉冲波  $u_1、u_2、u_3$  和  $u_4$  经光电隔离器,转换成与各脉冲相位和极性相同的脉冲信号  $U_1、U_2、U_3$  和  $U_4$  ( $U_1 = -U_2 = -U_3 = U_4$ ),并将其分别加到 4 个大功率晶体管的基极。若加在  $V_1$  和  $V_4$  基极上的方波正半周比负半周宽,则加到电动机电枢两端的平均电压为正,控制电动机正向运转,反之,则电动机反向运转;若方波电压的正负脉冲宽度相等,则加在电枢上的平均电压为零,电动机静止不动,但由于此时电枢回路中的电流是一个交变的电流,没有续断,会使电动机发生高频颤动,有利于减少静摩擦。

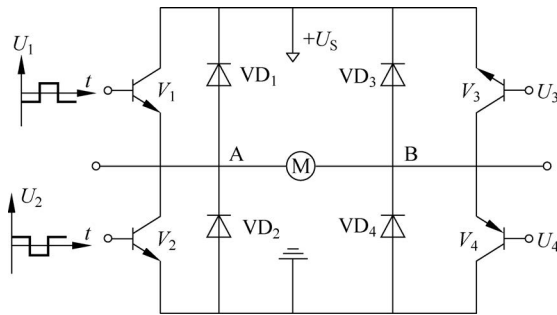


图 5-45 H 型双极可逆功率转换电路

具体来说,当电动机正常工作时,在  $0 \leq t \leq t_1$  时,  $U_1$  和  $U_4$  为低电平,  $U_2$  和  $U_3$  为高电平,  $V_2$  和  $V_3$  饱和导通,  $V_1$  和  $V_4$  截止,此时电源  $+U_S$  通过  $V_2$  和  $V_3$  加到电动机电枢的两端  $U_{AB} = +U_S$  (忽略  $V_1$  和  $V_4$  的饱和压降),向电动机供给能量,电流方向是从电源  $+E_d$  经  $V_3 \rightarrow B \rightarrow$  电动机电枢  $\rightarrow A \rightarrow V_2 \rightarrow$  电源。

在  $t_1 \leq t \leq T$  时,  $U_1$  和  $U_4$  为高电平,  $U_2$  和  $U_3$  为低电平,  $V_2$  和  $V_3$  截止,电源被切断,但  $V_1$  和  $V_4$  不能立即导通,这是因为在电枢电感反电势的作用下,电枢电流经  $V_2$  和  $VD_4$  继续流通。  $V_1$  和  $V_4$  能否导通,取决于续流电流的大小,若电枢电流较大时,在  $t_1 \sim T$  时间内,续流较大,则电枢电流一直为正,此时,  $V_1$  和  $V_4$  没来得及导通,下一个周期即到来,又使  $V_2$  和  $V_3$  导通,电枢电流又开始上升,并维持在一个正值附近波动;若电枢电流较小,在

$t_1 \sim T$  时间内,续流可能会降到零,于是  $V_1$  和  $V_4$  在电源和反电动势的共同作用下导通,电枢电流由电源  $+U_S$  经  $V_1 \rightarrow A \rightarrow$  电动机电枢  $\rightarrow A \rightarrow V_4 \rightarrow$  电源,电动机处于反接制动状态,直到下一个周期,  $V_2$  和  $V_3$  导通,电枢电流才开始回升。 $U_{AB}$  总是不断变化的脉冲电压,由于电源  $+U_S$  切断时续流二极管的续流和电动机电枢电感的滤波作用,电枢电流也在连续波动。

与可控硅调速系统相比,采用 PWM 调速系统具有如下主要特点。

(1) 频带宽,可避开与机械共振。晶体管截止频率远高于可控硅,允许系统有更高的工作频率。PWM 调速系统开关工作频率高(约为 2kHz,有的也使用 5kHz),远高于转子所能跟随的频率,有效避开了机械共振区。当 PWM 系统与小惯量电动机匹配时,可以获得很宽的频带。因此系统的快速响应性好,动态抗干扰能力强,能给出极快的定位速度和很高的定位精度,适合启动频繁的场所。

(2) 电枢电流脉冲小。由于 PWM 调速系统的开关工作频率较高,仅靠电枢绕组本身的电感滤波作用就足可获得脉动很小的电枢电流,电枢电流容易连续,系统低速运行平稳,调速范围较宽,可以达到 1 : 100 000 左右。因此低速工作十分平滑、稳定。在相同的平均电流即相同的输出转矩下,电动机的损耗和发热与晶闸管调速系统相比都较小。

(3) 动态特性好。PWM 调速系统频带宽,没有固有的延时时间性,反应速度很快。校正伺服系统负载瞬时扰动的能力强,具有极快的定位速度和很高的定位精度,提高了系统的动态硬度,且具有良好的线性(尤其是接近零点处的线性好)。

(4) 电源功率因数高。在晶闸管调速系统中,可控硅工作时开关导通角的变化使交流电源电流波形发生畸变,从而降低了电源的功率因数,且给电网造成污染。而 PWM 系统的直流电源为不受控制的整流输出,相当于可控硅导通角最大时的工作状态,整个工作范围内的功率因数可达 90%。而且晶体管漏电流小,使得功率损耗也很小。

PWM 调速系统的主要缺点是承受高峰值电流的能力差,不能承受高的过载电流,功率还不能做得很大。因此在中小功率的伺服驱动装置中,多采用性能优异的 PWM 调速系统,而在大功率场合中则采用 SCR 调速系统。

### 3) 全数字直流调速系统

在数字直流调整系统中,控制信号通过计算机由算法实现,是数字信号,其具体的数值用以确定脉冲的宽度。用微处理器实现数字直流调速可分为软件和硬件实现两种方法,软件实现法会占用较多的计算机机时,对实时控制不利,但开放性好,成本低,所以硬件实现法更被广泛推广。计算机的高速运算能力可以保证在几毫秒内完成电流环和速度环的输入、输出数值的计算,并产生相应的控制方波的数据,以此控制电动机提供指令要求的转速和转矩。

数控系统中基于单片机 8031 的全数字直流调速系统如图 5-46 所示,图左半部分是数字式脉宽调制器,右半部分则是 PWM 调速系统的主回路。系统通过程序使用定时器产生和改变可控方波(也可使用部分单片机内部配置的特殊定时器产生 PWM 控制方波),单片机 8031 通过 P0 口向定时器传送与程序相对应的计数数值,使定时器输出的脉冲宽度满足指令要求。速度环和电流环的检测值经模/数转换后的数字量也由 P0 口读入,经计算机比较获得差值并进行相应处理后,由 P0 口装入定时器,及时改变脉冲宽度,使控制电动机获得指令相应的转速和转矩。每个采样周期(采样周期的大小受闭环系统频带宽度和时间常

数的影响,一般速度环和电流环的采样周期分别小于十几毫秒和 5ms)内计算机通过离散的方式完成一次电流环和速度环的检测和控制数据的计算和输出,完成对电动机转速和转矩一次控制。

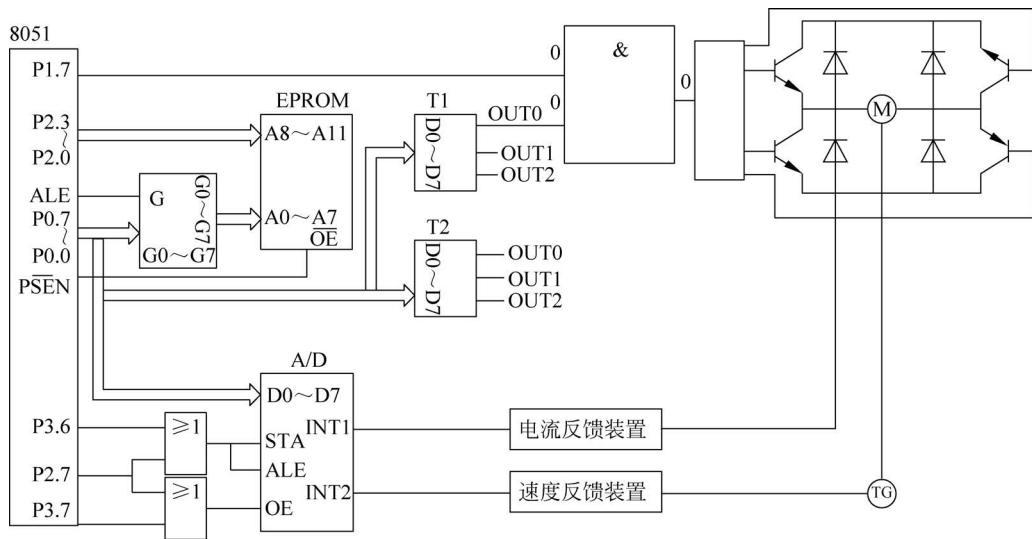


图 5-46 数字 PWM 控制系统框图

### 5.3.3 交流伺服电动机及其速度控制

直流电动机调速系统在要求调速性能较高的场合一直占据主导地位。但各种类型的直流电动机却都存在一些固有的缺点,如电刷和换向器容易磨损,需要经常维护;换向器在换向时会产生火花,使电动机的最高转速和应用环境都受到限制;而且直流电动机的结构相对复杂,制造困难,所用铜材料消耗大,制造成本高。交流电动机(尤其是鼠笼式感应电动机)没有上述缺点,且其转动惯量较直流电动机小,动态响应更佳,同样体积下的输出功率可比直流电动机提高 10%~70%。另外,交流电动机的容量可比直流电动机设计得更大,可使系统达到更高的电压和转速。随着新型大功率电力电子器件、新型变频技术、专用集成电路、新的现代控制算法和微机数控等不断发展和应用,20 世纪 80 年代以来,交流伺服驱动及其调速系统的各方面性能进一步提高,打破了“直流传动调速,交流传动不调速”的传统格局,更好地适应了数控伺服系统的要求,因此目前直流调速系统正逐步被交流调速系统取代。在交流伺服系统中广泛采用同步型交流伺服电动机和异步型交流感应伺服电动机。

#### 1. 交流伺服电动机的种类和特点

数控系统中应用的交流电动机一般都为三相电动机。具体来说,交流伺服电动机可分为异步型交流伺服电动机(IM)和同步型交流伺服电动机(SM)。

异步型交流伺服电动机指交流感应电动机,有三相和单相之分,也有鼠笼式和线绕式之分,通常使用的多为鼠笼式三相感应电动机,与同容量的直流电动机相比,鼠笼式三相感应电动机重量可轻 1/2,但价格仅为直流电动机的 1/3,常用于主轴伺服系统中。其缺点是不能高性价比地实现宽范围平滑调速,其调速时会从电网吸收滞后的励磁电流从而使电网功能因数变坏。同步交流电动机可分为电磁式及非电磁式两大类。

同步型交流伺服电动机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,其复杂程度介于感应式电动机和直流电动机之间。同步型交流伺服电动机的转子又可分为电磁式和非电磁式两大类,其中非电磁式还可细分为磁滞式、永磁式和反应式多种。其中的磁滞式和反应式同步电动机效率低、功率因数差、制造容量不大。因永磁式同步电动机结构简单、运行可靠、效率高,在数控系统中得到应用,但其启动性能欠佳、体积大。交流永磁式电动机相当于交流同步电动机,具有机械特性硬、调速范围宽、功率因数高等优点,常用于数控进给系统。

## 2. 永磁式同步交流伺服电动机的工作原理

如图 5-47 所示,永磁式同步交流伺服电动机由定子、转子和检测元件三部分组成,其中检测元件包括转子位置传感器与测速发电电动机。其中,定子的齿槽结构有三相绕组,形状与普通感应电动机的定子相同。但考虑到散热要求,其外形大多呈多边形,且无外壳,避免了电动机运行所产生的热量对机床的精度造成影响。转子由多块永磁体和冲片组成。这种结构的优点是气隙磁密度较高,极数较多。同一种铁芯和相同的磁铁块数可装成不同的极数。转子结构中还有一类是有极靴星形转子,其采用矩形磁铁或整体星形磁铁构成。

无论哪种永磁交流伺服电动机,所采用的永磁材料的性能将直接影响电动机性能指标、磁路尺寸和外形尺寸大小。现在一般采用最有前途的稀土永磁合金,即第三代稀土永磁合金——钕铁硼(Nd-Fe-B)合金,其最大磁能积达  $4 \times 10^5 \text{ T} \cdot \text{A/m}$ ,是铁氧体的 12 倍,是铝镍钴 5 类合金的 8 倍,是钕钴永磁合金的 2 倍,价格便宜。不同的磁性能决定了其结构形式,如星形转子只适合用铝镍钴等剩磁感应较高的永磁材料。

永磁式交流同步伺服电动机的工作原理很简单,与电磁式同步电动机类似,不同的是转子磁场由转子永久磁铁产生,而不是由转子中激磁绕组产生。如图 5-48 所示,定子三相绕组通上交流电后产生一个旋转磁场,图中以一对旋转磁极表示,该旋转磁场以同步转速  $n_s$  旋转。由于磁极之间同性相斥,异性相吸,定子旋转磁场将与转子的永久磁场磁极互相吸引,并带着转子一起旋转。转子由此也将以同步转速  $n_s$  与旋转磁场同步旋转。当电动机的转子轴上加有负载转矩后,将造成转子磁场轴线落后定子磁场轴线  $\theta$  角,并且随着负载转矩的增加和减小, $\theta$  角也会随之增大和减小。只要不超过一定界限,转子仍然跟着定子以同步转速旋转。

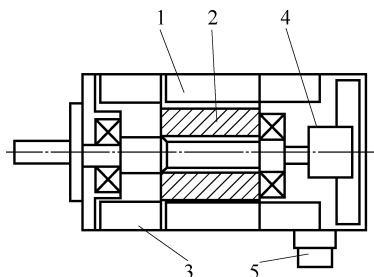


图 5-47 永磁交流伺服电动机结构

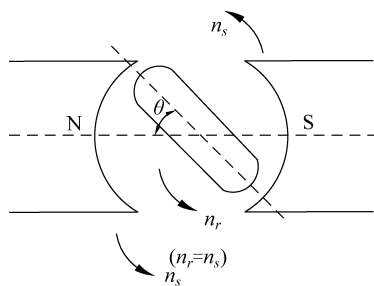


图 5-48 永磁式交流同步伺服电动机工作原理

1—定子; 2—转子; 3—定子三相绕组; 4—编码器; 5—出线盒

交流同步电动机的转子同步转速( $n_0$ , r/min)由交流供电电源交流电频率( $f$ , 定子供电频率, Hz)和转子磁极对数( $p$ )决定,即

$$n_0 = n_s = 60f/p$$

转子磁极对数  $p$  一般出厂后都是固定的,因此只要改变电源交流电频率  $f$  就可达到调速目的。当负载超过一定极限后,转子不再按同步转速旋转,有时甚至出现停转现象,即同步电动机的失步,此负载极限值即为最大同步转矩。

而交流异步电动机的转速可以表示为

$$n_r = n_s(1-s) = \frac{60f}{p}(1-s)$$

其中,  $s = (n_s - n_r)/n_s$  为转差率。

永磁同步电动机启动困难,原因有两点:一是由于转子本身的惯量。虽然定子绕组在接通三相电源时已产生旋转磁场,但转子仍处于初始静止状态,由于惯性跟不上旋转磁场的转动,此时电动机定子和转子两对磁极间存在相对运动,转子受到的平均转矩为零。二是由于定子和转子磁场之间的转速相差太大。为解决永磁同步电动机启动困难问题,可在转子上装鼠笼式的启动绕组,使永磁同步电动机先如感应异步电动机那样产生启动转矩,当转子速度接近同步转速时,定子磁场与转子永久磁极相互吸引,将转子拉入同步转速状态同步速旋转,即所谓的异步启动,同步运行。永磁交流同步电动机中通常无启动绕组,而是在设计中设法减低转子惯量或采用多极,或者在速度控制单元中采取低速启动后加速的控制方法等来解决自启动问题。

永磁交流伺服电动机的性能可用转矩-速度特性曲线描述,如图 5-49 所示,图中 I 区为

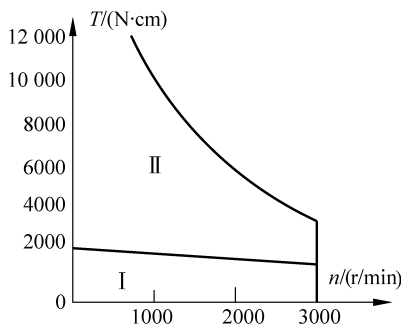


图 5-49 永磁交流伺服电动机工作曲线

连续工作区, II 区为断续工作区。在连续工作区,速度和转矩的任何组合都可连续工作,但连续工作区的划分受一定条件限制。主要条件有供给电动机的电流是理想的正弦波和电动机工作在特定的温度下(这是由所用的磁性材料的负温度系数所决定的)。断续工作区的极限一般受到电动机的供电限制。交流伺服电动机的机械特性比直流伺服电动机的机械特性要硬,其直线更接近水平。断续工作区的范围更大,尤其在高速区,这有利于提高电动机的加减速能力。

为缩小电动机体积,增加输出功率,简化数控机床的机械结构,有时将电动机与数控系统的机床部件做成一体化,如日本 FANUC 公司在 1989 年试制出一种新结构形式的永磁交流伺服电动机——空心轴交流伺服电动机,其转轴是空心的,进给丝杠的螺母安装在空心输出轴上,使进给丝杠能在电动机的内部来回移动可消除联轴器,构成合理的进给传动链,大大节省了空间,提高了系统的刚度和控制精度。交流主轴电动机是基于感应电动机的结构经专门设计而成,由于没有机壳,在定子铁芯上做有通风孔,通常采用定子铁芯在空气中直接冷却的方法,因此电动机的外形一般呈多边形而不是常见的圆形,其转子结构与一般鼠笼式感应电动机相同。在电动机轴的尾部同轴方式安装有检测用的脉冲发生器。为了满足数控系统切削加工的需要,如有时要求主轴电动机在任何尺寸和形状的刀具切削下保持恒定的功率,还出现了一些新型的主轴电动机结构,如输出转换型交流主轴电动机、液体冷却主轴电动机和内装主轴电动机等。

输出转换型交流主轴电动机可以保证主轴电动机在任何切削刀具和切削速度下都能提

供恒定的输出功率。但由于主轴电动机在低速和高速区分别为恒转矩输出和恒功率输出,一般主轴电动机的恒定特性可用恒转矩范围内的最高速度和恒功率时最高速度之比来衡量(一般的交流主轴电动机为 $1:3\sim 1:4$ )。为了使电动机在较宽的范围内具有恒功率特性,在主轴和电动机之间采用主轴变速箱使其在低速时也有恒功率输出。若主轴电动机本身就具有宽的恒功率范围,则可省略变速箱,进一步简化整个主轴传动系统的结构。FANUC研制了一种输出转换型交流主轴电动机。有三角形-星形切换、绕组数切换或两者组合切换输出的多种切换模式。其中绕组数切换方法使用非常方便,且每套绕组都可以分别设计成最佳的功率特性,以此得到较宽的恒功率范围,通常可达 $1:8\sim 1:30$ 。

液体冷却电动机是为了解决电动机的输出功率在其尺寸一定条件下所受发热的限制。电动机通常采用风扇冷却的方法散热。液体冷却电动机采用液体(润滑油)强迫冷却的方法能实现小体积条件下获得较大的功率输出。它的结构的特点主要是在电动机外壳与前端盖中间有一条特殊的油路通道,通道中有循环的润滑油可将绕组和轴承进行冷却,保证电动机在 $20\,000\text{r}/\text{min}$ 的速度下连续高速运行。另外,液体冷却电动机的恒功范围也很宽。

为省去齿轮结构,进一步简化主轴驱动系统,内装式主轴电动机将主轴与电动机制成一体,其转子轴就是机床主轴本身,而定子装在主轴头内。内装式主轴电动机通常由空心轴转子、带绕组的定子和检测器三部分组成。这种设计取消了齿轮变速箱的传动及与电动机的连接,因此极大地简化了系统结构,同时降低了噪声和共振,振动也很小,使其能在高速下平稳运行。

### 3. 交流伺服电动机的调速原理与方法

由电动机学基本原理可知,交流伺服电动机转速的改变可以通过改变磁极对数、改变转速差和变频来实现。其中,变频调速通过平滑改变定子供电压的频率使得交流电动机的输出转速平滑变化,其引起的不同转速时的转差率都较小,因此其调速效率和功率因数都很高。以下重点介绍交流变频调速的基本原理。

由电动机学的基本原理可知,异步电动机的定子每相感应电势( $E_{\text{dg}}$ )的平衡方程为

$$E_{\text{dg}} = 4.44 f_1 N_1 K_1 \phi_m$$

其中, $f_1$ 和 $N_1$ 分别为定子电源频率(Hz)和定子每相绕组匝数, $K_1$ 和 $\phi_m$ 分别为基波绕组系数和每极气隙磁通量(Wb)。

电动机的转矩关系式为

$$T_{\text{eb}} = C_m \phi_m I_2 \cos \phi_2$$

其中, $C_m$ 为异步电动机的转矩常数,与结构有关; $I_2$ 和 $\phi_2$ 分别为转子电流和转子电流的相位角。

由以上两式可知,电动机的输出转矩和最大转矩将随着每极气隙磁通量 $\phi_m$ 的减小而降低,而气隙磁通量又随定子电源频率 $f_1$ 的下降而增加(将引起磁路饱和,激磁电流上升,电动机发热严重)。基频( $f_{1m}$ )以下常采用恒磁通变频控制方式。即在使用变频调速时,为维持气隙磁通量 $\phi_m$ 不变,还应相应改变定子的电势值,即保持 $E_{\text{dg}}/f_1$ 始终为常数。这种调速方式即为恒定电势频率比调速。另一种调速方式是恒定定子电压频率比控制方式(简称为恒压频比控制),即忽略定子绕组上的阻抗压降,使定子电压 $U_1$ 约等于每相感应电势 $E_{\text{dg}}$ ,保持 $U_1/f_1$ 始终为常数。恒压频比控制在低频时,由于定子电压 $U_1$ 和每相感应电势

$E_{dg}$  都较小,定子阻抗压降所占的分量比较显著,这时,可人为地把  $U_1$  抬高,以补偿定子压降。

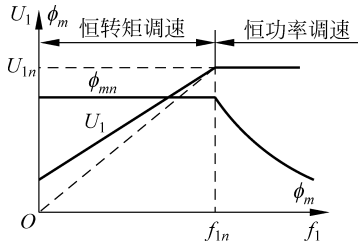


图 5-50 异步电动机变频调速控制特性

图 5-50 是异步电动机变频调速控制特性。当工作频率大于基频时,定子电压  $U_1$  不能向上调节,而只能维持在额定电压,使磁通与频率成反比变化趋势。可知,在基频  $f_{1n}$  以下,属于“恒转矩调速”;而在基频以上,基本属于“恒功率调速”。

恒压频比控制变频调速的机械特性如图 5-51(a) 所示,低频时,定子电源角频率  $\omega_1$  改变时(其中  $\omega_{1n} > \omega_{11} > \omega_{12} > \omega_{13}$ ),机械特性基本上平行移动,而  $T_{eg}$  随  $\omega_1$  降低而减小,限制了调速系统的带负载能力。图中虚线特性就是采用定子阻抗电压补偿提高定子电压后的特性。在基频以上变频时,定子电压  $U_1$  不变,其机械特性如图 5-51(b) 所示,当频率  $\omega_1$  提高时(其中  $\omega_{1n} < \omega_{1a} < \omega_{1b} < \omega_{1c}$ ),同步转速  $n_0$  随之提高,最大转矩减小,机械特性上移;转速降随频率的提高而增大。

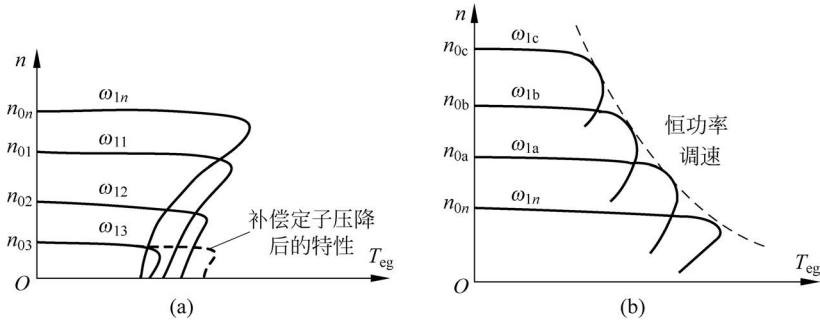
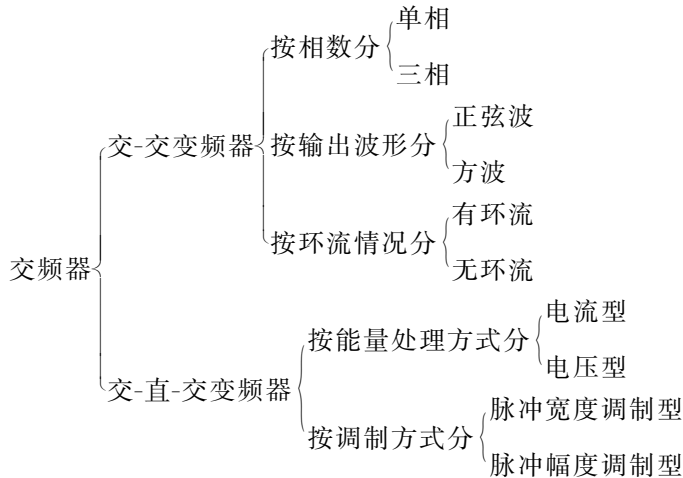


图 5-51 变频调速的机械特性

对交流变频调速的主要环节是为电动机提供频率可变的电源变频器,将电网电压提供的恒压恒频交流电(Constant Voltage and Constant Frequency, CVCF)变为变压变频交流电(Variable Voltage and Variable Frequency, VVVF)。变频器总的来说可分为交-交变频和交-直-交变频两大类,其基本分类如下。



交-直-交变频器的主要构成环节如图 5-52(a)所示,也称为间接变频器,它先把电网交流电转换为直流电,经中间直流环节后再把直流电逆变成变频变压的交流电。交-交变频器的主要构成环节如图 5-52(b)所示,由于没有明显的中间滤波环节,也称为直接变频器,电网交流电被直接变成可调频和调压的交流电。由交-交变频方式所得到的交流电波动比较大,而且最大频率即为变频器输入的工频电压频率。在数控系统中,一般采用交-直-交变频器。

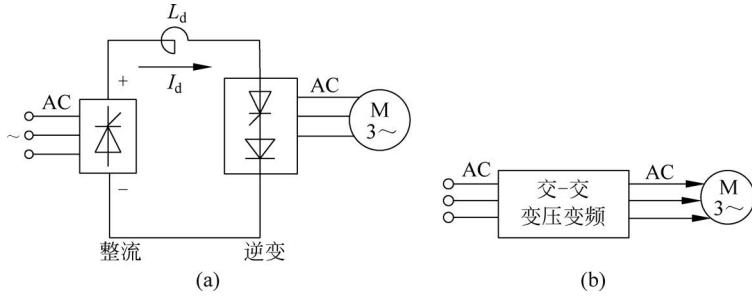


图 5-52 两种主要类型的变频器原理示意图

正弦脉宽调制(SPWM)变频器属于交-直-交静止变频装置,其将工频交流电转换为三相频率和电压均可调的等效于正弦波的脉宽调制波,用于拖动三相异步电动机运转。

如图 5-53 所示,SPWM 逆变器用来产生与正弦波等效的一系列等幅不等宽的矩形脉冲波形。其原理是把一个正弦半波分作  $N$  等份,如图 5-53 所示,然后把每一等份的正弦曲线下所包围的面积都用一个与此面积相等的等高矩形脉冲波来代替(矩形脉冲的中点和正弦波每一等份的中点重合)。这样就可以由  $N$  个等幅而不等宽的矩形脉冲所组成的波形来等效正弦的半周。对正弦波的负半周也使用相同的方法来等效后,即可得到  $2N$  个脉冲与正弦波的一个周期等效。

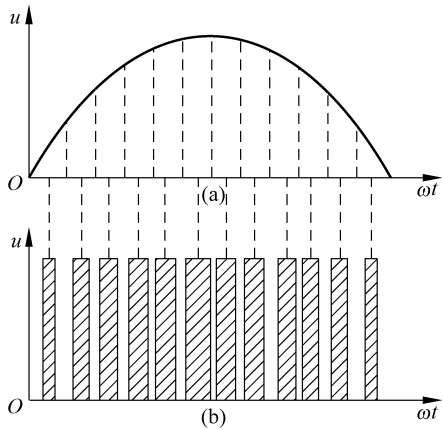


图 5-53 与正弦波等效的 SPWM 波形

SPWM 波形可用计算机或专门的集成电路芯片产生,也可以由模拟电路通过调制的方式产生,如以正弦波为调制波对等腰三角波为载波的信号进行调制,调制电路一般由三相正弦波发生器、三角波发生器、比较器以及驱动电路等构成,其结构如图 5-54 所示。按相序与频率要求,从参考信号振荡器上产生相应的三路正弦波信号,电压比较器比较等腰三角波发生器送来的载波信号与三路正弦波信号,产生三路 SPWM 波形,倒相后得到 6 路 SPWM 信号。

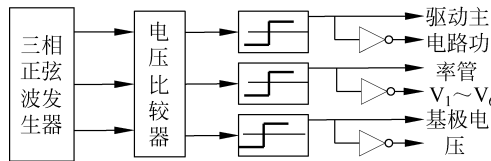


图 5-54 三相 SPWM 控制电路原理图

图 5-55(a)是 SPWM 变频器主电路的原理图。图中  $V_1 \sim V_6$  是逆变器的 6 个功率开关器件,各由一个续流二极管反并连接,整个逆变器由三相整流器提供的恒直流电压供电,来

自控制电路的 SPWM 波形作为基极控制电压加于各功率管的基极上,作为驱动信号。当逆变器工作于三相双极式方式时,SPWM 波形如图 5-55(b)所示。

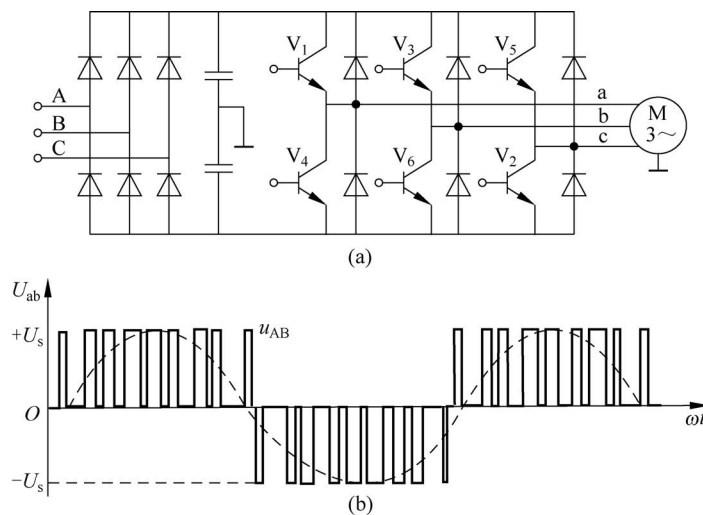


图 5-55 SPWM 变压变频器主电路原理图

#### 5.3.4 直线电动机及其在数控机床中的应用

为适应高效率、高精度为基本特征的高速、超高速加工技术的发展要求,数控系统的驱动部件和机械本体部件正朝着高动刚度、静刚度、热刚度等方向发展,直线电动机作为直接驱动的高速机床进给系统应运而生。正如伺服驱动控制系统替代普通机床中的变速箱,直线电动机在高速加工机床中取代了由“旋转伺服电动机+滚珠丝杠”构成的传统直线运动进给方式。正因为直线电动机不需要从电动机到工作台之间的任何诸如滚珠丝杠和螺母、齿形带以及联轴器等中间传动环节,机床进给传动链的长度被缩短为零,直线电动机所产生的力直接作用于移动部件,即实现“直接驱动”(direct drive)或“零驱动”。另外,由于直线电动机运动功率的传递方式是非接触的,没有任何机械磨损。因此传动系统的惯性矩得到大幅度减小,系统的运动速度、加速度和精度得到极大提高,极大程度上避免了振动的产生。一般直线电动机可以达到  $80\sim 150\text{m}/\text{min}$  的直线驱动速度,可带动质量不大的运动部件实现  $5g$  以上的加速度,并且由于动态性能好,可以获得较高的运动精度。为实现较长的直线运动距离驱动,可采用拼装的次级部件。

自 1845 年被提出后,直线电动机作为新一代运动控制执行元件,受到业界的广泛关注,并于最近几十年在集成电路工艺设备、电子元器件装配设备、高速 PCB 钻/铣床、办公自动化设备以及医疗设备等方面得到广泛推广和应用。第一台采用直线电动机驱动的数控机床(HSC-240 型高速加工中心)由德国 Ex-cell-O 公司在 1993 年德国汉诺威欧洲机床展览会上展出,其采用德国 Indramat 公司开发的感应式直线电动机,最高主轴转速和工作台最大进给速度分别达  $24\,000\text{r}/\text{min}$  和  $60\text{m}/\text{min}$ 。与此同时,美国 Ingersoll 公司在其 HVM-800 型加工中心上,采用美国 Anorad 公司开发的永磁式直线电动机,最高主轴转速和工作台最大进给速度分别达到  $20\,000\text{r}/\text{min}$  和  $76.2\text{m}/\text{min}$ 。日本松浦机械所研制的 XL-1 型四轴联动立式加工中心的进给系统采用直线电动机驱动,快速移动速度达  $90\text{m}/\text{min}$ ,最大加速度

可达 1.5g。SODICK 公司研制的 AQ35L 型电火花成型机床进给系统由永磁式直线电动机驱动,其快速行程为 36m/min。日本 MAZAK(马扎克)公司 Hypersonic 1400L 型超高速龙门式加工中心的 X、Y 方向进给系统采用直线电动机驱动,速度达 120m/min。目前,随着高效和高精度的高速加工技术的崛起,机械加工机床行业已成为直线电动机最大和最具成长性的新兴领域,装备有直线电动机的高速加工中心已经在波音、通用、福特等航空航天和汽车制造业生产线中取得成功应用。直线电动机作为一种新型的驱动装置,在其设计、制造和控制等方面还有一些问题没有得到完善解决,其应用目前还只限于旋转电动机传动方式无法满足的高速高精加工机床上,而且还处于初级应用阶段,生产批量不大,因而成本较高。随着新型磁性材料和电动机专用冷却方法的出现,可以预见作为一种崭新的传动方式,直线电动机在机床工业中的应用必定会越来越广泛,并显现巨大的生命力。目前,在数控机床上使用的直线驱动电动机的研究开发主要有以下几方面的趋势。

(1) 机床进给系统采用的直线伺服电动机以永磁式为主导。各种新的驱动电源技术和控制技术被应用到整个系统中。

(2) 注重直线电动机本体(材料、结构和工艺)的优化设计,将电动机、编码器、导轨、电缆等各功能部件集成化和模块化,以进一步减小尺寸,便于安装和使用。

(3) 注重相关技术尤其是位置检测技术的发展,这是提高直线电动机性能的基础。超声波直线电动机、高温超导直线电动机、薄膜直线电动机和磁致伸缩直线电动机等相继出现,特别是高性能永磁材料的问世,为直线电动机的应用开拓了新的领域。

### 1. 直线电动机的特点

直线电动机与旋转电动机相比,主要有如下几个特点。

(1) 结构简单,惯性小,动态特性好,维护简便,可靠性高,寿命长。直线电动机不需要有将旋转运动变成直线运动的附加转换装置,不受齿轮、螺纹、连杆和带等机械构件的影响,使得系统本身的机械结构大为简化,重量和体积大大下降,而且避免了机械传动中的反向传动间隙、惯性、摩擦力和刚性不足等缺点,数控机床的工作台对相应位置指令可以迅速反应(电气时间常数约为 1ms),使整个闭环伺服系统的动态响应性能大大提高。由于不存在摩擦和磨损等问题,其可靠性高,寿命长。

(2) 速度快、加减速过程短、精度高。装备直线电动机的数控机床进给系统可以满足 60~200m/min 甚至更高的高速进给速度。其高加速度(一般可达 2~10g)和低惯性保证了其加减速所需要的时间极大降低,通过装配全数字伺服系统和高精度的直线位移检测元件,可以达到极好的伺服性能,并使跟随误差减至最小,达到较高的精度,且在任何速度下都能实现非常平稳的进给运动。

(3) 推力平稳、噪声低。直线电动机定子很容易做到使用滚动导轨或磁悬浮支撑,使得定子和定子之间始终保持一定的空隙而不接触,消除了定子、定子间的接触摩擦阻力,并可根据机床导轨的型面结构及其工作台运动时的受力情况来布置直线电动机的布局(通常设计成均布对称),使其运动推力平稳、噪声低。

(4) 行程长度不受限制,在新型数控机床上得到广泛应用。使用多段拼接技术或在一个行程全长上安装使用多个工作台可使直线电动机行程长度不受限制。在新型的数控机床如并联数控机床中通常采用线性直接驱动单元构成直线驱动关节,直线电动机因为其独有的特性被广泛采用,构成与杆件空间组合在一起的一体化结构。

直线电动机在数控机床上的应用也存在一些问题,最根本的缺点是发热相对大、效率低,功率损耗往往超过输出功率的50%,这也决定了在直线电动机上必须采用循环强制冷却以及隔热措施以保证机床不会因为过热变形。另外,由于没有机械连接或啮合,因此较传统的“旋转伺服电动机+滚珠丝杠”垂直轴将需要附加一个制动器或平衡块。当负荷变化较大时,为保证推力平稳,需要重新整定系统(多数现代控制装置都具有自动调整功能,可实现快速调机)。由于工作台面与直线电动机完全融合,应充分考虑电动机部件的磁铁或线圈对导磁材料的吸引力,设计相应的导轨和滑架结构。

2. 直线电动机基本结构和工作原理

直线电动机是一种电力驱动装置,能将电能直接转换为直线运行机械能。从工作原理上看,直线电动机可以认为是旋转电动机在结构上的一种演变,相当于把旋转电动机的定子和转子按圆柱面展开成平面,由定子演变而来的一侧称为初级,由转子演变而来的一侧称为次级,将初级和次级分别安装在机床的运动部件和固定部件上,通过使初级的三相绕组通电即可实现部件间的相对运动。如图5-56所示,将扁平形直线电动机沿着和直线运动相垂直的方向卷成圆柱状(或管状),就形成了管形直线电动机。直线电动机还有弧形(扁平形直线电动机的初级沿运动方向改成弧形,并安放于圆柱形次级的柱面外侧)和盘形(将初级放在次级圆盘靠近外缘的平面上)结构。

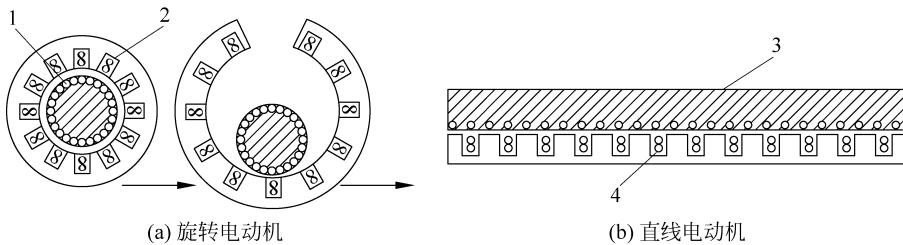


图 5-56 直线电动机的结构

1—转子; 2—定子; 3—次级; 4—初级

直线电动机可以直接产生一维和二维直线形式的机械运动,按工作原理可将其分为直线直流电动机、直线异步电动机、直线同步电动机、直线步进电动机和平面电动机(实用的平面电动机只限于平面步进电动机)等。从驱动原理看,直线电动机可分为直线直流电动机、直线交流电动机、直线步进电动机、混合式直线电动机和微特直线电动机等。交流直线电动机按励磁方式不同可分为永磁式(同步)和感应式(异步)两种。其中,永磁式直线电动机的次级(转子)是永久磁钢,由多块交替的N、S永久磁钢铺设,固定在机床床身上,沿导轨的全长方向铺设,而初级(定子)是含铁芯的三相绕组,固定在移动的工作台上;感应式直线电动机和永磁式直线电动机的初级相同,但次级是用自行短路的不馈电栅条(相当于感应式旋转电动机的“鼠笼”沿其圆周展开)来代替永磁式直线电动机的永久磁钢。永磁式直线电动机在单位面积推力、效率、可控性等方面均优于感应式直线电动机。感应式直线电动机在不通电时没有磁性,有利于机床的安装、使用和维护。

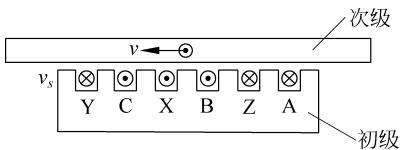


图 5-57 永磁式直线电动机的基本工作原理 直线电动机在其初级三相绕组接三相对称正弦电

永磁式直线电动机的工作原理如图 5-57 所示,

流时,与旋转电动机相似,会产生近似为沿展开直线方向呈正弦形分布的气隙磁场(忽略由于铁芯两端开断而引起的纵向边端效应)。随着三相电流的变化,初级产生的气隙磁场将按A、B、C的相序沿展开直线移动,即所谓的行波磁场。行波磁场与次级产生的励磁磁场相互作用,并产生相应的电磁推力,使次级沿着行波磁场运动方向产生直线运动。行波磁场的产生原理和移动速度与旋转电动机磁场在定子内圆表面上产生同步线速度是一样的。

永磁式直线直流电动机按移动部件可分为动圈式和动磁式两种。动圈式直线直流电动机的工作原理与永磁式直流电动机一样,即载流电枢线圈在永磁磁场中受力作用的原理。动圈式电枢结构又可按其结构分为长动圈(电动机电枢线圈的轴向长度比直线运动工作的行程长)和短动圈两种。

从电动机原理可知,直线电动机的电压和运动基本方程式如下:

$$U = L_a \frac{di}{dt} + R_a i + K_e v$$

$$M \frac{dv}{dt} + K_d U + F_f = B_g L i - K_e i$$

忽略摩擦和阻尼的影响,可得速度方程:

$$\frac{d^2 v}{dt^2} + \frac{1}{T_e} \frac{dv}{dt} + \frac{v}{T_e T_m} = \frac{v_m}{T_e T_m}$$

其中, $U$ 为电压; $L_a$ 为电枢电感; $i$ 为电流瞬时值; $t$ 为时间; $R_a$ 为电枢电阻;电动势常数 $K_e = B_g L$ ;  $M$ 为质量; $v$ 为速度; $K_d$ 为阻尼系数; $F_f$ 为摩擦力; $B_g$ 为气隙磁通密度; $L$ 为运动的行程; $m$ 为运动物体的质量。最大速度 $v_m = U/B_g L$ ;电气时间常数 $T_e = L_a/R_a$ ;机械时间常数 $T_m = mR_a/(B_g L)^2$ 。

忽略电气时间常数,直线电动机的速度方程可最终简化为

$$T_m \frac{dv}{dt} + v = v_m$$

由上式可知,直线电动机和直流电动机的动态特性完全一致,其参数可以等效。

直线步进电动机也称线性步进电动机,其原理与旋转式步进电动机相似,常见的有感应子式和磁阻式两种。其中,感应子式的直线步进电动机因为较好的性能和较小的尺寸得到广泛应用。直线步进电动机在工作时,其利用定子和动子之间气隙磁导的变化使定子和动子之间产生相应的电磁力。如图5-58所示为一感应子式二相(A、B)直线步进电动机,其定子主要由带特殊齿槽的反应导磁板组成,动子则由永磁体、励磁绕组和导磁磁极组成。

图5-58(a)表示A相绕组接电脉冲(通正电流),B相绕组断电,此时导磁磁极的极弧b增磁,而极弧a去磁,动子在电磁力的作用下向右移动1/4个齿距( $t$ )。图5-58(b)所示为B相绕组接电脉冲(通正电流),A相绕组断电,导磁磁极的极弧c增磁,极弧d去磁,动子在电磁力的作用下向右移动1/4个齿距( $t$ )。A相绕组和B相绕组轮流通电使动子持续向右移动,移动一个齿距需4个脉冲(即4步)。不同的位移量和速度可以通过控制通电脉冲的数量和频率得到。直线步进电动机还有三相、四相等结构。若需要更小的步距,则需将导磁磁极的极弧做成均匀多齿槽的形式,定子的齿槽尺寸也应与动子极弧齿槽尺寸一样。直线步进电动机和旋转步进电动机的静、动态特性与参数都相似,但旋转步进电动机有精密的支撑轴承,而直线步进电动机没有,可采用气浮和流体支承以达到减小振动和噪声的目的。

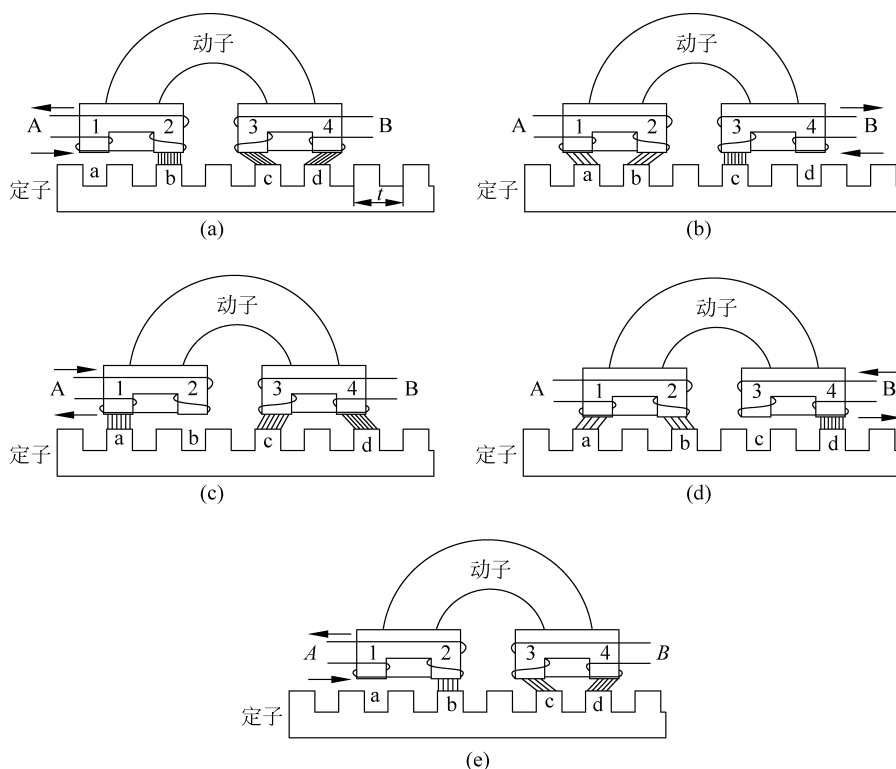


图 5-58 感应子式直线步进电动机的原理

直线步进电动机已在数控绘图机、数控激光剪裁机、数控绘图仪、记录仪、集成电路测量制造等设备上获得广泛应用。

### 3. 直线电动机在并联数控机床上的应用

在并联运动机床中采用线性直接驱动技术,扩大了机床运动设计方案的可能性,虽然直线电动机部件沿直线导轨的运动仍然是传统的单自由度运动形式,但它与杆件的空间组合在一起,可以改善并联机构的特性(如扩大工作空间)等,形成新的并联运动学分支,成为线性并联机构(Linapod)。如图 5-59 所示为直线电动机在并联加工机床上的应用。

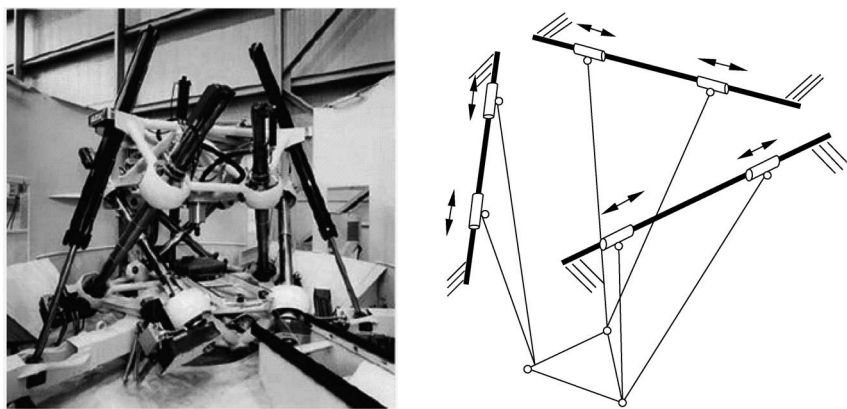


图 5-59 直线电动机在并联加工机床上的应用

近年来,为了提高直线电动机的运动精度,同步直线电动机的应用日益广泛。它的主要特点是采用永磁式次级部件,如西门子公司生产的 1FN1 系列三相交流永磁式同步直线电动机。1FN1 系列直线电动机是专门为动态性能和运动精度要求高的机床设计的,分为初级和次级两个部件,具有完善的冷却系统和隔热设施,热稳定性良好。

1FN1 直线电动机能够适应各种切削加工的环境,配置 SINODRIVE611 数字变频系统后,就成为独立的驱动系统,可以直接安装到机床上,用于高速铣床、加工中心、磨床以及并联运动机床。1FN1 系列直线电动机的特点如下。

(1) 配有主冷却和精密冷却两套冷却回路,再加上隔热层,保证电动机的发热对机床没有影响。

(2) 电动机部件全部金属密封,尽可能防止有腐蚀性的液体和空气间隙中的微粒侵入。

(3) 独立部件,安装方便,即插即用。

(4) 驱动力的波动经过优化,过载特性良好。

1FN1 系列直线电动机的技术规格如表 5-2 所示。

表 5-2 1FN1 系列直线电动机的主要技术特性

初级型号	次级宽度/mm	最大速度/(m/min)		驱动力/N		相电流/A	
		$F_{\max}$ 时	$F_N$ 时	$F_N$	$F_{\max}$	$I_N$	$I_{\max}$
122-5. C71	120	65	145	1480	3250	8.9	22.4
124-5. C71				2200	4850	15	37.5
126-5. C71				2950	6500	17.7	44.8
184-5AC71	180	65	145	3600	7900	21.6	54.1
186-5AC71				4800	10 600	27.2	67.9
244-5AC71	240	65	145	4950	10 900	28	54.1
246-5AC71				6600	14 500	37.7	67.9
072-3AF7□	070	95	200	790	1720	5.6	14
122-5□F71	120	95	200	1480	3250	11.1	28
124-5□F71				2200	4850	16.2	40.8
126-5□F71				2950	6500	22.2	56
184-5AF71	180	95	200	3600	7900	26.1	65.5
186-5AF71				4800	10 600	34.8	86.9
244-5AF71	240	95	200	4950	10 900	36.3	90.8
246-5AF71				6600	14 500	48.3	119.9

## 习题与思考题

1. 数控伺服由哪几部分组成? 对数控伺服的基本要求是什么?
2. 伺服系统有哪几类分类方法? 具体可分为哪几类?
3. 简述步进电动机和直线电动机的工作原理。
4. 步进驱动环形分配的目的是什么? 可通过哪些形式实现?
5. PWM 指的是什么?
6. 简述交流伺服电动机的种类和特点。

7. 提高步进伺服系统精度的措施有哪些?

8. 简述相位比较伺服系统的结构与工作原理。

9. 步进电动机有 120 个齿,采用三相六拍工作方式驱动,丝杠导程为 5mm,工作台最大移动速度为 10mm/s,试计算步进电动机的步距角为多少? 数控系统的脉冲当量为多少? 步进电动机的最高工作频率为多少?