

图书在版编目(CIP)数据

数控机床及应用/王宏颖主编. -- 青岛:中国石油大学出版社,2016.1(2021.1重印)

ISBN 978-7-5636-5181-8

I. ①数… II. ①王… III. ①数控机床—高等职业教育—教材 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 028813 号

如有印装质量问题,请与中国石油大学出版社发行部联系。
服务电话:400-615-1233

书 名:数控机床及应用

SHUKONG JICHUANG JI YINGYONG

主 编:王宏颖

责任编辑:徐 伟 张云龙

封面设计:刘文东

出 版 者:中国石油大学出版社

(地址:山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号 邮编:266580)

网 址: <http://cbs.upc.edu.cn>

电子邮箱: uppbok@upc.edu.cn

排 版 者:华腾教育排版中心

印 刷 者:三河市龙大印装有限公司

发 行 者:中国石油大学出版社(电话 010-88433760)

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:12.25

字 数:298 千字

版 印 次:2016 年 4 月第 1 版 2021 年 1 月第 2 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5636-5181-8

定 价:39.80 元

数控车床

数控车床作为当今使用最为广泛的数控机床之一,主要用于加工轴套和轮盘等回转体类零件,通过程序控制可以自动完成内外圆柱面、圆锥面、螺纹和端面等表面的切削加工,并能进行切槽、钻孔、扩孔和铰孔等工作。数控车床配有旋转刀架或旋转刀盘,在零件加工过程中,由程序自动选用刀具和更换刀位。因此,采用数控车削加工可以大大提高加工效率,保证加工零件的精度,减轻劳动强度,改善劳动条件。

与普通车床相比,数控车床的显著区别是:当加工对象改变时,数控车床本身无须做任何调整,只需更换程序、重新装夹工件和更换刀具即可。数控车床具有加工灵活、精度高、通用性好、加工质量稳定和生产效率高等优点,特别适用于多品种、小批量和形状复杂零件的加工,为新产品的研制与改型换代节省大量时间和费用,提高了产品的竞争能力。

项目一 认识数控车床

项目导读

数控车床是一种高精度、高效率的自动化机床,具有广泛的加工工艺性能,可加工直线圆柱、斜线圆柱、圆弧和各种螺纹,具有直线插补、圆弧插补等补偿功能,并在复杂零件的批量生产中发挥了良好的经济作用。

学习目标

- (1)掌握数控车床的组成和特点;
- (2)掌握数控车床的布局要求;
- (3)掌握数控车床的加工原理;
- (4)了解数控车床的分类。

知识链接

一、数控车床的组成及布局

1. 数控车床的组成

如图 1-1 所示,数控车床一般由车床本体、数控装置、输入/输出设备、伺服单元、驱动装置、电气控制装置、辅助装置和测量装置等组成,其中的虚线框内的部分称为数控系统。

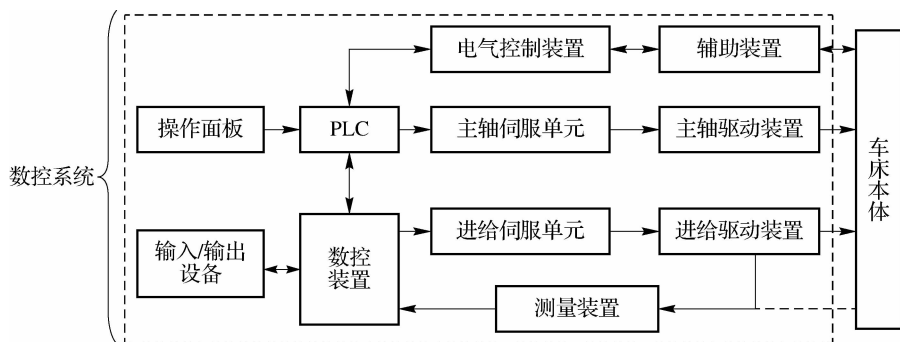


图 1-1 数控车床的组成

(1) 车床本体。车床本体是数控机床的主体,是用于完成各种切削加工的机械部分。车床本体包括车床的主运动部件、进给运动部件、执行部件和基础部件,如刀架、主轴箱、尾座、导轨及传动部件等。数控车床与普通车床不同,其主运动和各个坐标轴的进给运动都是由单独的伺服电动机驱动,所以其传动链短,结构比较简单。

由于数控车床切削用量大、连续加工发热量大等因素对加工精度有一定影响,加工中又是自动控制,不能像普通车床那样由人工进行调整、补偿,因而其设计要求比普通车床更严格,制造要求更精密。因此,车床本体采用了许多新结构来加强刚性、减少热变形和提高加工精度。

(2) 数控装置。数控装置是数控机床的中枢,是由计算机系统、位置控制板、PLC 接口板、特殊功能模块、通信接口板和相应的控制软件组成的,如图 1-2 所示。数控装置的作用是:根据输入的零件加工程序进行相应的处理(运动轨迹处理、机床输入/输出处理),然后输出控制命令到相应的执行部件(伺服单元、驱动装置和 PLC 等),所有这些工作都是在 CNC 装置内的硬件和软件协调配合下,有条不紊地进行的。

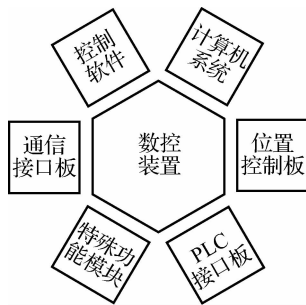


图 1-2 数控装置组成示意图

(3)输入/输出设备。键盘、磁盘机是数控车床的典型输入设备,除此以外,它还可以用串行通信的方式输入。数控系统一般配有阴极射线管(CRT)显示器或点阵式液晶显示器,显示信息丰富,有些数控系统还能显示图形。操作人员可通过显示器获得必要的信息。

(4)伺服单元。伺服单元是数控装置和车床本体的联系环节,可以将来自数控装置的微电指令信号放大成控制驱动装置的大功率信号。根据接收指令的不同,伺服单元有数字式和模拟式之分,其中,模拟式伺服单元按电源种类不同又可分为直流伺服单元和交流伺服单元。

(5)驱动装置。驱动装置把经放大的指令信号转变为机械运动,通过机械传动部件驱动车床主轴、刀架、工作台等精确定位,按规定的轨迹做严格的相对运动,最后加工出图样所要求的工件。与伺服单元相对应,驱动装置有步进电动机、直流伺服电动机和交流伺服电动机等。

伺服单元和驱动装置合称为伺服驱动系统,它是车床工作的动力装置,数控装置的指令要靠伺服驱动系统付诸实施。伺服驱动系统是数控车床的重要组成部分,从某种意义上说,数控车床功能的强弱主要取决于数控装置,而数控车床性能的好坏主要取决于伺服驱动系统。

(6)测量装置。测量装置也称为反馈元件,其通常安装在车床的工作台、丝杠或电动机轴上,相当于普通车床的刻度盘。它把车床工作台的实际位移转变成电信号反馈给数控装置,数控装置比较反馈值与指令值,产生误差信号,从而控制工作台向消除误差的方向移动。因此,测量装置是高性能数控车床的重要组成部分。此外,由测量装置和显示环节构成的数显装置可以在线显示车床移动部件的坐标值,大大提高了工作效率和工件的加工精度。

2. 数控车床的布局

数控车床的布局受到工件尺寸、工件质量、工件形状、机床生产率、机床精度、操纵方便的运行要求和安全与环境保护要求的影响。随着工件尺寸、质量和形状的变化,数控车床的布局相应有所变化,如图 1-3 所示。

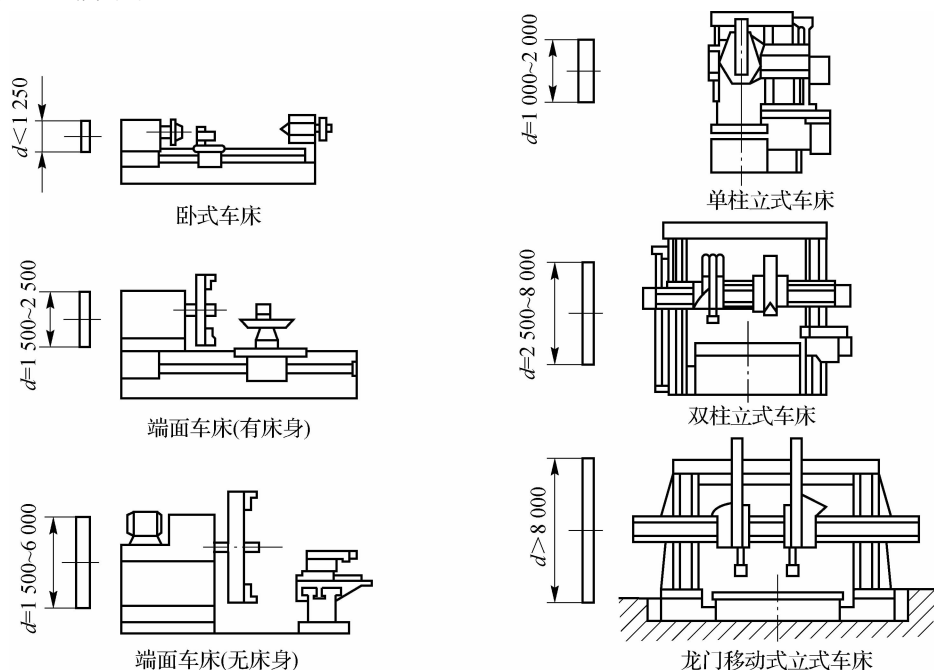


图 1-3 工件尺寸、质量和形状的变化对数控车床布局变化的影响

在卧式数控车床的布局中,主轴、尾座等部件相对床身的布局形式与普通车床基本一致,而刀架和导轨的布局形式有很大变化,直接影响着数控车床的使用性能及机床的结构和外观。考虑到机床和刀具的调整、工件的装卸、机床操作的方便性、机床的加工精度、机床的排屑性和抗振性,导轨宜采用倾斜式。在图 1-4 所示的卧式数控车床的布局形式中,以前斜床身-平滑板式为最佳卧式布局形式。此外,出于对安全的要求和环境的保护,数控车床上都设有封闭的防护装置,将机床加工区全部封闭起来。

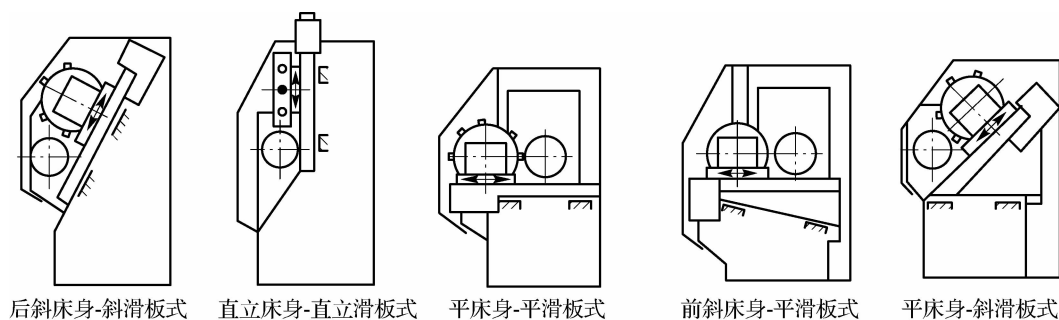


图 1-4 卧式数控车床的布局形式

二、数控车床的加工原理

数控车床的加工原理如图 1-5 所示。当使用车床加工零件时,通常都需要对车床的各种动作进行控制,不但要控制动作的先后次序,而且要控制车床各运动部件的位移量。使用普通车床加工零件时,开车、停车、走刀、换向、主轴变速和切削液的开关等操作都是由人工直接控制的。使用数控车床加工零件时,只需要将零件图形和工艺参数、加工步骤等以数字信息的形式编成数控程序。程序简单时,可以采用手工编程;程序复杂时,可以通过计算机编程。将编好的数控程序输入车床数控系统,再由其进行运算处理后转换成驱动伺服机构的指令信号,从而控制车床主运动的变速、起动,进给运动的方向、速度和位移,换刀,工件的夹紧、松开和切削液的开关等动作,自动地加工出形状、尺寸和精度符合要求的零件。当更换加工对象时,只需要重新编写程序代码输入车床数控系统,即可由数控装置控制加工的全过程,制造出相应的零件。

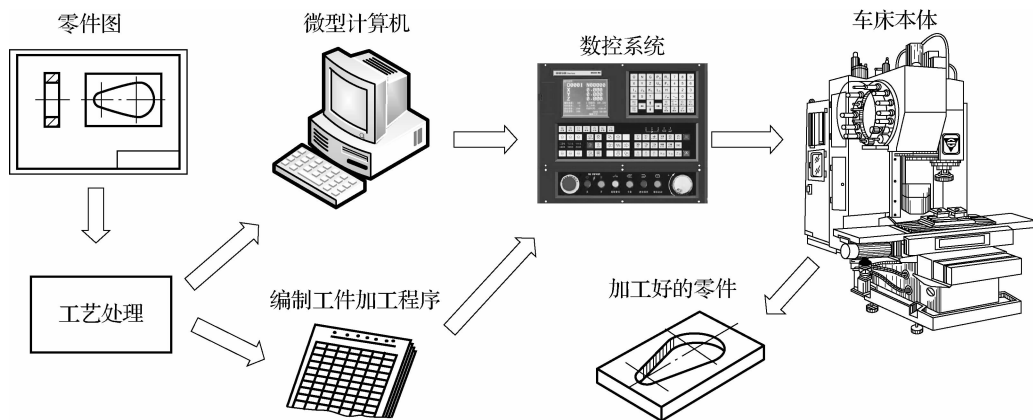


图 1-5 数控车床的加工原理

三、数控车床的加工对象

由于数控车床的刚性好,制造和对刀精度高,能方便和精确地进行人工补偿甚至自动补偿,因而它能够加工尺寸精度要求高的零件,在有些场合甚至可以以车代磨。此外,由于数控车床车削时的刀具运动是通过高精度插补运算和伺服驱动来实现的,因而它能加工对母线直线度、圆度和圆柱度要求高的零件。

1. 表面粗糙度要求较高的回转体零件

数控车床能加工出表面粗糙度要求较高的零件,这是因为数控车床不仅刚性好、制造精度高,而且还具有恒线速度切削功能。在材质、精车留量和刀具已定的情况下,表面粗糙度取决于进给速度和切削速度。如果使用数控车床的恒线速度切削功能,就可选用最佳线速度来切削端面,这样切出的表面的粗糙度的数值小且一致。数控车床还适用于车削各部位表面粗糙度要求不同的零件,表面粗糙度小的部位可以用减小进给速度的方法来加工,这在传统车床上是做不到的。

2. 轮廓形状复杂的零件

数控车床具有圆弧插补功能,可直接使用圆弧指令来加工圆弧轮廓。数控车床也可加工由任意平面曲线所组成的轮廓回转零件,既能加工可用方程描述的曲线,又能加工列表曲线。车削圆柱零件和圆锥零件时既可使用传统车床,也可选用数控车床,但车削复杂转体零件时只能使用数控车床。

3. 带一些特殊类型螺纹的零件

传统车床所能切削的螺纹相当有限,只能加工等节距的直、锥面和公、英制螺纹,而且一台车床只限定加工若干种节距。数控车床不但能加工任何等节距直、锥面和公、英制螺纹,而且能加工增节距、减节距、等节距与变节距之间平滑过渡的螺纹。数控车床加工螺纹时,主轴转向不必像传统车床那样交替变换,它可以一刀一刀不停顿地循环,直至完成,所以数控车床车削螺纹的效率很高。数控车床还配有精密螺纹切削功能,再加上其一般采用硬质合金成型刀片,可以使用较高的转速,所以车削出来的螺纹精度高,表面粗糙度小,包括丝杠在内的螺纹零件很适合于在数控车床上加工。

4. 超精密、超低表面粗糙度值的零件

磁盘、录像机磁头、激光打印机的多面反射体,复印机的回转鼓,照相机等光学设备的透镜,模具、隐形眼镜等,都要求超高的轮廓精度值和超低的表面粗糙度值,可使用高精度、高功能的数控车床加工。此外,以往很难加工的散光用的塑料透镜,现在也可以用数控车床来加工。超精密加工的轮廓精度可达到 $0.1\ \mu\text{m}$,表面粗糙度值可低至 $0.02\ \mu\text{m}$ 。超精车削零件的材质以前主要是金属,现已扩大到塑料和陶瓷。

四、数控车床的分类

数控车床的分类如图 1-6 所示。

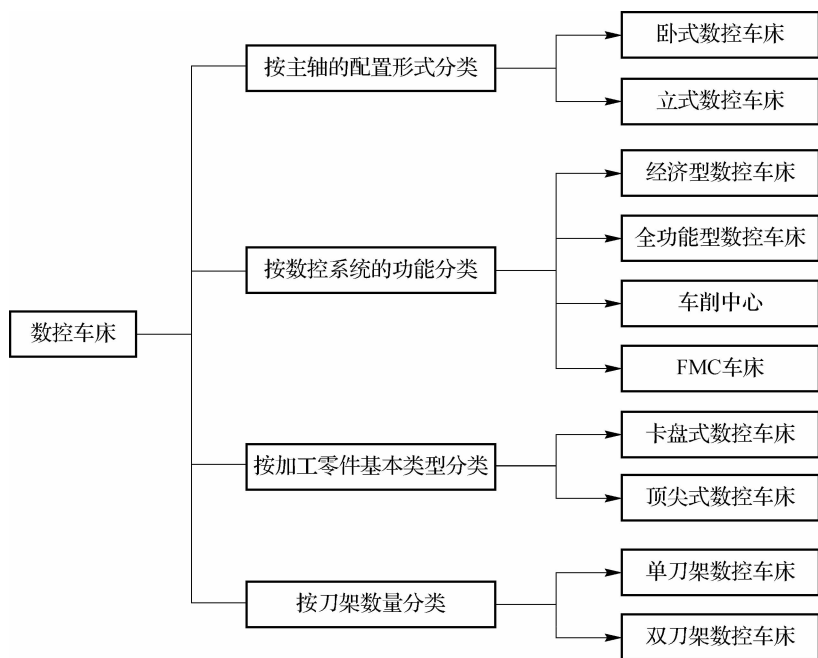


图 1-6 数控车床的分类

1. 按主轴的配置形式分类

按主轴的配置形式不同,数控车床可分为卧式数控车床(见图 1-7)和立式数控车床。

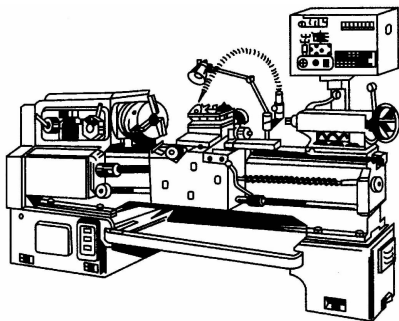


图 1-7 卧式数控车床

(1)卧式数控车床。卧式数控车床是主轴轴线处于水平位置的数控车床。卧式数控车床又分为数控水平导轨卧式车床和数控倾斜导轨卧式车床,其中,倾斜导轨结构使车床具有更大的刚性。具有两根主轴的卧式数控车床称为双轴卧式数控车床。

(2)立式数控车床。立式数控车床是主轴轴线处于垂直位置的数控车床。这类数控车床主要用于加工径向尺寸大、轴向尺寸相对较小的大型复杂零件。具有两根主轴的立式数控车床称为双轴立式数控车床。

2. 按数控系统的功能分类

按数控系统的功能不同,数控车床可分为经济型数控车床、全功能型数控车床、车削中心和 FMC 车床。

(1)经济型数控车床。经济型数控车床一般是在普通车床基础上进行改进设计的,它采用步进电动机驱动的开环伺服系统。此类车床结构简单,价格低廉,但无刀尖圆弧半径自动补偿和恒线速切削等功能。

(2)全功能型数控车床。全功能型数控车床一般采用闭环或半闭环控制系统,具有高刚度、高精度和高效率等特点。

(3)车削中心。车削中心是以全功能型数控车床为主体,并配置刀库、换刀装置、分度装置、铣削动力头和机械手等,实现多工序复合加工的机床。在工件一次装夹后,它可完成回转类零件的车、铣、钻、铰和攻螺纹等多道加工工序,功能全面,但价格较高。

(4)FMC 车床。如图 1-8 所示,FMC 车床实际上是一个由数控车床、机器人等构成的柔性加工单元。FMC 车床能实现工件搬运、装卸的自动化和加工调整准备的自动化。

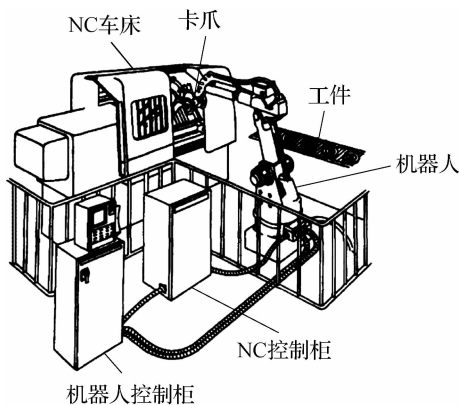


图 1-8 FMC 车床

对于车削中心或柔性制造单元,还须增加其他的附加坐标轴来满足机床的功能。目前,我国使用较多的是中、小规格的两坐标连续控制的数控车床。

3. 按加工零件基本类型分类

按加工零件基本类型不同,数控车床可分为卡盘式数控车床和顶尖式数控车床。

(1)卡盘式数控车床。卡盘式数控车床没有尾座,适合车削盘类(含短轴类)零件。其夹紧方式多为电动或液动控制,卡盘结构有可调卡爪或不淬火卡爪(软卡爪)。

(2)顶尖式数控车床。顶尖式数控车床配有普通尾座或数控尾座,适合车削较长的零件及直径不太大的盘类零件。

4. 按刀架数量分类

按刀架数量不同,数控车床可分为单刀架数控车床和双刀架数控车床。

(1)单刀架数控车床。数控车床一般都配置有各种形式的单刀架,如四工位卧动转位刀架或多工位转塔式自动转位刀架。

(2)双刀架数控车床。双刀架数控车床的双刀架配置可以平行分布,也可以相互垂直分布。

5. 其他分类方法

按数控系统的不同控制方式等指标,数控车床可以分为直线控制数控车床、两主轴控制

数控车床等;按特殊或专门工艺性能,数控车床可分为螺纹数控车床、活塞数控车床和曲轴数控车床等。

五、数控车床的特点

数控车床一般用来加工各种形状不同的轴类或盘类回转体零件。它能自动完成内外圆柱面、圆锥面、成形回转表面及螺纹面等的切削加工,所以数控车床特别适合加工形状复杂的轴类或盘类零件。数控车床具有加工灵活、通用性强、能适应产品的品种和规格频繁变化的特点。数控车床加工零件的尺寸精度可达 IT6~IT5,表面粗糙度可达 $1.6\ \mu\text{m}$ 以下,是目前使用较为广泛的数控机床。

项目实施

认识数控车床

实施目标

- (1) 了解数控车床的布局;
- (2) 掌握数控车床的加工对象;
- (3) 认识数控车床的分类。

工具、仪器和设备

- (1) 数控车床(卧式、立式)、数控车削中心;
- (2) 数控车床加工的产品。

实施内容

- (1) 能够了解数控车床的组成及布局;
- (2) 能够掌握数控车床的加工对象;
- (3) 能够判别数控车床的类型。

项目二 数控车床传动系统

项目导读

数控车床是高度自动化机床。数控车床传动系统具有四个主要特点:机床有足够高的转速和大的功率,适应高效率加工的需要;主轴转速的变换迅速可靠,一般能自动变速;主轴具有足够高的刚度和回转精度;主轴转速范围很广。

学习目标

- (1) 掌握主传动系统的工作原理；
- (2) 掌握进给传动系统的工作原理；
- (3) 掌握刀盘运动的工作原理；
- (4) 了解尾座的结构及工作原理。

知识链接

数控车床有三种运动传动系统,分别是数控车床的主运动传动系统、进给运动传动系统和辅助运动传动系统。每种传动系统的组成和特点各不相同,它们一起组成了数控车床的传动系统,如图 1-9 所示。

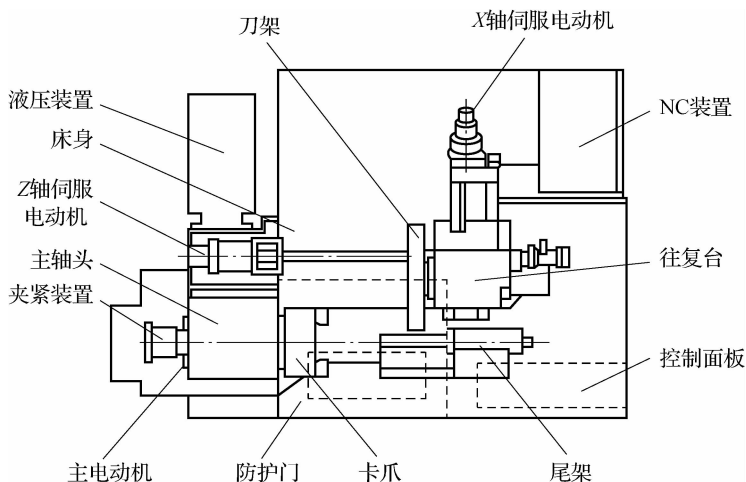


图 1-9 数控车床的传动系统

一、主运动传动系统及其装置

1. 主传动系统

数控车床主运动要求速度在一定范围内可调,有足够的驱动功率,主轴回转轴心线的位置准确稳定,并有足够的刚性和抗振性。

数控车床的主轴变速是按照加工程序指令自动进行的。主传动链应尽可能地缩短,这是为了确保机床主传动的精度,降低噪声,减小振动;主传动系统应能无级地大范围变速,主要是为了保证满足不同的加工工艺要求并能获得最佳切削速度;恒切削速度控制是为了保证端面加工的生产率和加工质量,同时,主轴应能配合其他构件实现工件自动装夹。下面以 TND360 卧式数控车床为例,介绍数控车床上常见的主传动系统。

TND360 卧式数控车床的传动系统如图 1-10 所示。主运动传动系统由主轴直流伺服电动机(27 kW)驱动,经传动比为 27/48 的同步齿形带传递到主轴箱中的轴 I 上。再经轴 I 上双联滑移齿轮,经传动比为 84/60 或 29/86 的齿轮副传递到轴 II(主轴),使主轴获得高(800~3 150 r/min)、低(7~800 r/min)两挡转速范围。在各转速范围内,由主轴伺服电动

机驱动实现无级变速调速。主轴箱内部省去了大部分齿轮传动变速机构,所以减小了齿轮传动对主轴精度的影响,并且维修方便,振动小。

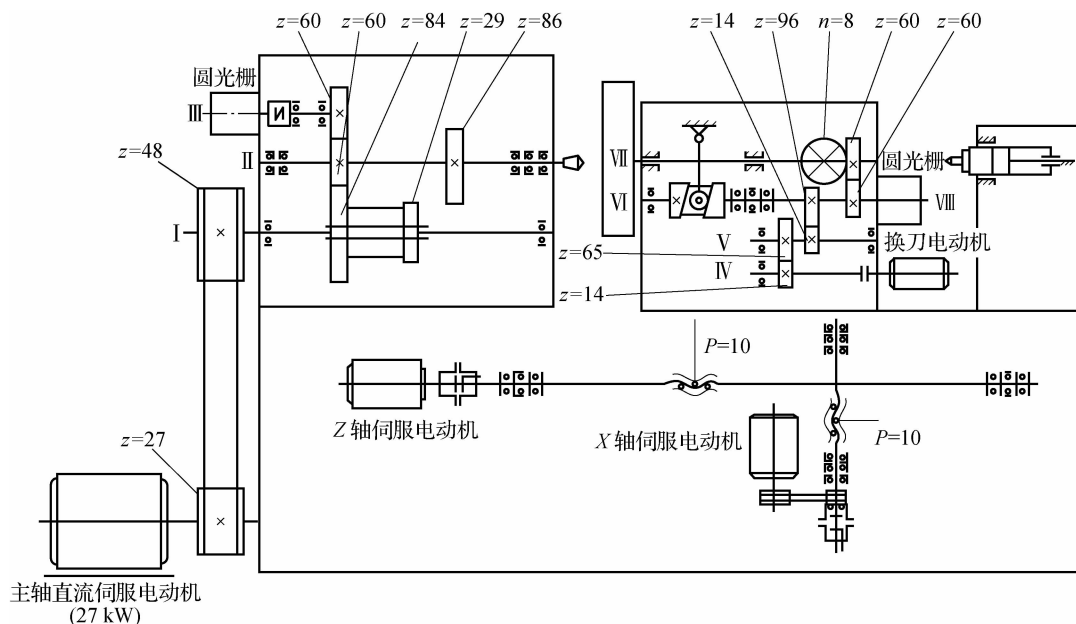


图 1-10 TND360 卧式数控车床的传动系统

主轴的运动经过齿轮副(传动比为 60/60)传递到轴Ⅲ上,由轴Ⅲ经联轴器驱动圆光栅。圆光栅将主轴的转速信号转变为电信号送回数控装置,一方面实现主轴调速用的数字反馈,另一方面可用于进给运动的控制,如实现车削螺纹(主轴每转一转,Z 轴或 X 轴移动一个导程)。

2. 主传动系统装置

主传动系统装置主要是指主轴箱,而数控车床主轴箱是一个比较复杂的传动部件。TND360 卧式数控车床的主轴箱展开图如图 1-11 所示,该图是沿轴Ⅰ—Ⅱ—Ⅲ的轴线剖开后展开的。

(1)主轴电动机。主轴电动机采用直流伺服式,无级调速,由安装在主轴电动机尾部的测速发电机实现速度反馈。其额定转速为 2 000 r/min,最高转速为 4 000 r/min,最低转速为 35 r/min。额定转速至最高转速之间为调磁调速,恒功率输出;最低转速至额定转速之间为调压调速,恒转矩输出。主电动机的功率-转矩特性如图 1-12 所示。电动机转速通过电动机轴上的齿数为 27 的同步齿形带轮,经同步齿形带将运动传到主轴箱的轴Ⅰ上。

(2)变速轴。变速轴(轴Ⅰ)是花键轴。左端装有齿数为 48 的同步齿形带轮,接受来自主轴电动机的转动。轴上花键部分安装有一双联滑移齿轮,齿轮齿数分别为 29(模数 $m=2$ mm)和 84(模数 $m=2.5$ mm)。当齿数为 29 的齿轮工作时,主轴运转在低速区;当齿数为 84 的齿轮工作时,主轴运转在高速区。双联滑移齿轮为分体组合形式,上面装有拨叉轴承。双联滑移齿轮由液压缸带动拨叉驱动,在轴Ⅰ上轴向移动,分别实现齿轮副 29/86、84/60 的啮合,完成主轴的变速。变速轴靠近带轮的一端是球轴承支承,外圈固定;另一端由长圆柱滚子轴承支承,外圈在箱体上不固定,以提高轴的刚度和减小热变形的影响。

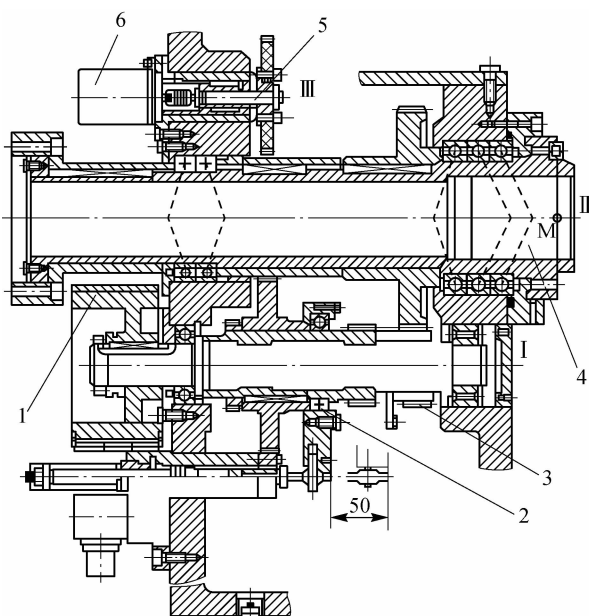


图 1-11 TND360 卧式数控车床的主轴箱展开图

1—带轮；2—拨叉轴承；3—双联滑移齿轮；4—变速轴；5—主轴；6—圆光轴

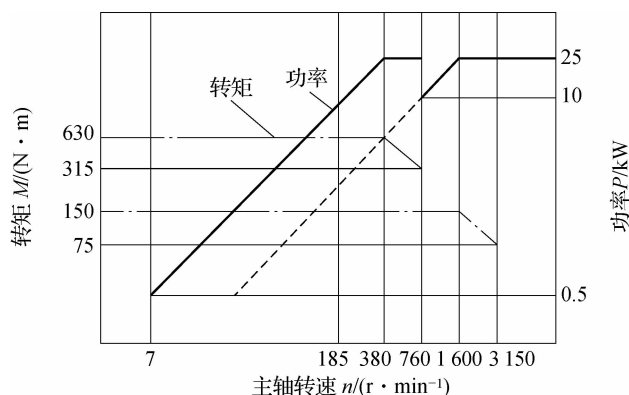


图 1-12 主电动机的功率-转矩特性

(3) 主轴组件。数控机床的主轴是一个空心的阶梯轴, 主轴的内孔用于通过长的棒料及卸下顶尖时穿过钢棒, 也可用于通过气动、电动及液压夹紧装置的机构。主轴前端采用短圆锥法兰盘式结构, 用于定位安装卡盘和拨盘。TND360 卧式数控车床主轴组件如图 1-13 所示。

主轴安装在两个支承上, 这种主轴转速较高, 要求的刚性也较高, 所以前、后支承都用角接触球轴承(可以承受径向力和轴向力)。前支承有 3 个为一组的轴承, 前面两个大口朝外(朝主轴前端), 接触角为 25° ; 后面一个大口朝里, 接触角为 14° 。在前轴承 2 和轴承 3 的内圈之间留有间隙, 装配时加压消除, 使轴承预紧, 纵向切削力由前面两个轴承承受, 故其接触角较大, 减少了主轴的悬伸量, 并且前支承在箱体上轴向固定。后支承为两个角接触球轴承, 小口相对, 接触角为 14° 。这两个轴承共同承受支承的径向载荷, 但纵向载荷由前支承轴

承承受,故后轴承的外圈轴向不固定,使得主轴在热变形时,后支承可沿轴向微小的移动,减小热变形的影响。

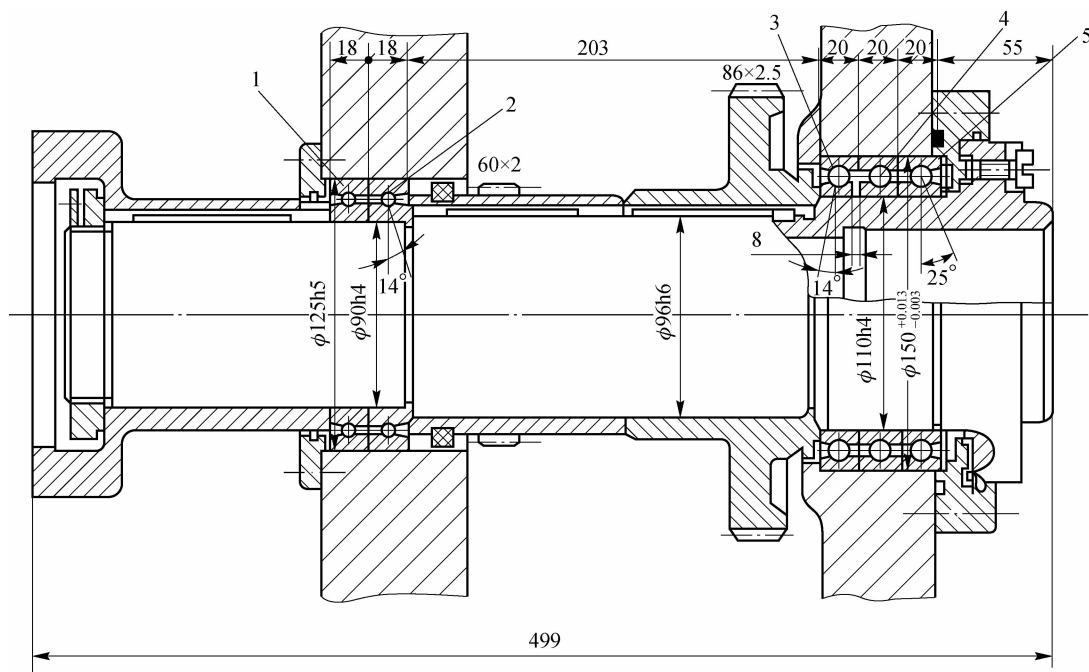


图 1-13 TND360 卧式数控车床主轴组件

1、2、3、4、5—角接触球轴承

主轴轴承属超轻型,且前、后轴承都由轴承厂配好,成套供应,装配时无须修理、调整,轴承精度等级相当于我国的 C 级。主轴轴承对主轴的运动精度及刚度影响很大,主轴轴承应在无间隙(少量过盈)条件下进行运转,轴承中的间隙和过盈量直接影响机床的加工精度,因此,主轴轴承间隙必须在适当范围内进行间隙和过盈量调整。其调整方法是:旋紧主轴尾部螺母,使其压紧托架,由托架压紧后支承的轴承,并压紧主轴上的齿轮(齿数为 60),推动齿轮(齿数为 86)压紧前支承轴承到轴肩上,从而调整前、后轴承,使其为间隙或过盈配合。最后旋紧调整螺母的锁紧螺钉。

主轴轴承采用油脂润滑,迷宫式密封,材料为 16MnCr5。主轴前端的短圆锥面,法兰盘端面,前、后轴承,齿轮的轴颈和前孔皆淬硬至 55 HRC,渗碳深 1 mm,且与主轴前、后轴承相配合的轴颈公差为 h4。

主轴上装有两个圆柱齿轮,齿数分别为 86(模数 $m=2.5$ mm)和 60(模数 $m=2$ mm)。当齿数为 86 的齿轮工作时,使主轴工作在低速区;当齿数为 60 的齿轮工作时,使主轴工作在高速区。齿轮的最高线速度为 9.9 m/s,精度为 6 级,材料是 16MnCr5,渗碳深 0.3 mm,淬硬至 60 HRC。

(4)检测轴。检测轴是阶梯轴,通过两个球轴承支承在轴承套中。它的一端装有齿数为 60 的齿轮,齿轮的材料为夹布胶木;另一端通过联轴器转动圆光栅齿轮与主轴上的齿数为 60 的齿轮相啮合,将主轴运动传到圆光栅上,圆光栅每转 1 圈发出 1 024 个脉冲,该信号送到数控装置,使数控装置完成对螺纹切削的控制。

(5)主轴箱。主轴箱的作用是支承主轴和支承主轴运动的传动系统,其材料为密烘铸铁。主轴箱使用底部定位面在床身左端定位,并用螺钉紧固。

二、进给运动传动系统及其装置

进给运动传动是指机床上驱动刀架实现纵向(Z 向)和横向(X 向)运动的进给传动。工件最后的尺寸精度和轮廓精度都直接受进给运动的传动精度、灵敏度和稳定性的影响,因此,数控车床的进给传动系统应注意减小摩擦力,提高传动精度和刚度,消除传动间隙,减小运动件的惯性。在 TND360 卧式数控车床上,各轴都由直流伺服电动机直接驱动。

1. 纵向进给运动传动及其装置

(1)纵向进给运动传动。纵向进给运动传动由 Z 向直流伺服电动机经过安全联轴器直接驱动滚珠丝杠螺母副,带动机床上的纵向滑板,从而实现纵向运动。

(2)纵向进给运动传动装置。TND360 卧式数控车床 Z 轴进给装置的结构如图 1-14 所示。纵向直流伺服电动机经安全联轴器直接驱动滚珠丝杠螺母副,带动纵向滑板沿床身上的纵向导轨运动。纵向直流伺服电动机由尾部的旋转变压器和测速发电机进行位置反馈和速度反馈,纵向进给的最小脉冲是 0.001 mm ,这样构成的伺服系统为半闭环伺服系统。图 1-14 所示的 I 放大图为无键锥环连接结构。无键锥环是相互配合的锥环,若拧紧螺钉,紧压环就压紧锥环,使内环的内孔收缩,外环的外圆胀大,靠摩擦力连接轴和孔,锥环的对数可根据所传递的转矩进行选择。因此结构不需要开键槽,故没有传动间隙。

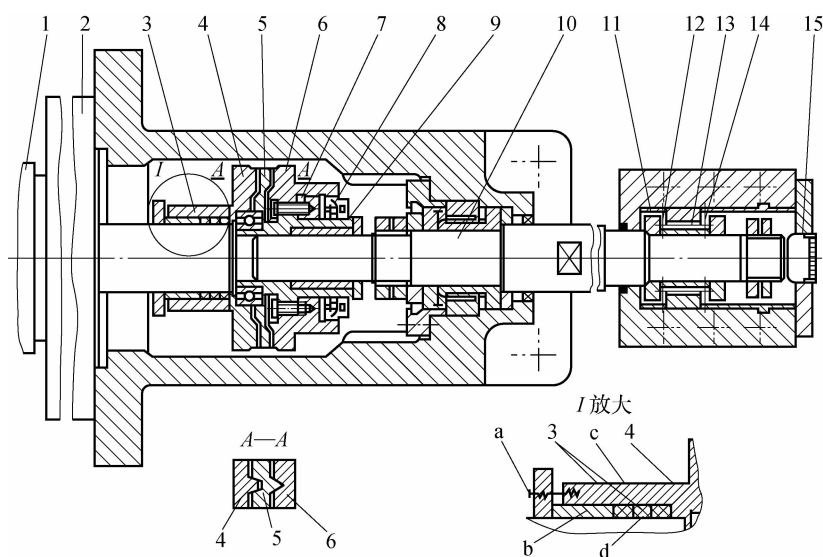


图 1-14 TND360 卧式数控车床 Z 轴进给装置的结构

1—旋转变压器和测速发电机; 2—直流伺服电动机; 3—锥环; 4、6—半联轴器; 5—滑块; 7—钢片;

8—碟形弹簧; 9—套; 10—滚珠丝杠; 11—垫圈; 12、13、14—滚针轴承; 15—堵头

a—螺钉; b—紧压环; c—外环; d—内环

安全联轴器的作用是在进给过程中当进给力过大或滑板移动过载时,为了避免运动传动机构零件损坏,安全联轴器动作,终止运动的传递,其工作原理如图 1-15 所示。在正常情况下,运动由联轴器传递到滚珠丝杠上;当出现过载时,滚珠丝杠上的转矩增大,这时通过安

全联轴器端面上的三角齿传递的转矩也随之增大,以致端面三角齿处的轴向力大于弹簧的压力,将联轴器的右半部分推开,连接的左半部分和中间环节继续旋转,而右半部分却不能被带动,在两者之间产生打滑现象,传动链断开,使传动机构不致因过载而损坏。机床允许的最大进给力取决于弹簧的弹力,而拧动弹簧的调整螺母就可以调整弹簧的弹力。在机床上采用无触点磁性传感器监测安全联轴器的右半部分的工作状况,当右半部分产生滑移时,传感器产生过载报警信号,通过机床可编程序控制器使进给系统制动,并将此状态信号送到数控装置,由数控装置发出报警指示。

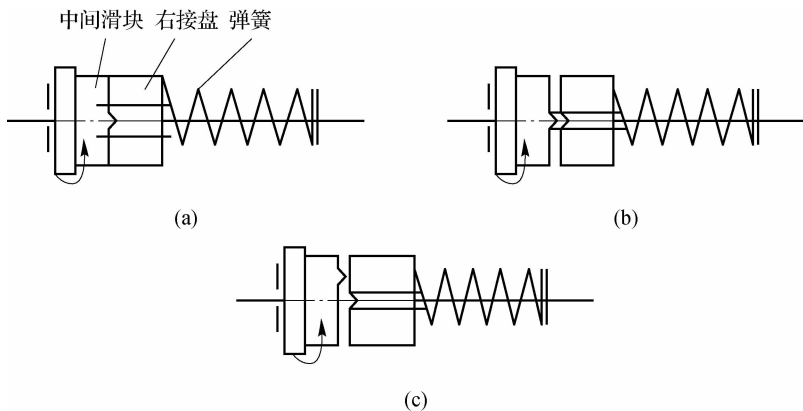


图 1-15 安全联轴器的工作原理

安全联轴器由图 1-14 中的件 4 至件 9 组成。件 4 与件 5 之间由矩形齿相连,件 5 与件 6 之间由三角形齿相连(参见 A—A 剖视图)。件 6 上用螺栓装有一组钢片件 7,钢片件 7 的形状像摩擦离合器的内片,中心部分是花键孔。件 7 与件 9 的外圆上的花键部分相配合,件 6 的转动能通过件 7 传递至件 9,并且件 6 和件 7 一起能沿件 9 进行轴向相对移动。件 9 通过无键锥环与滚珠丝杠相连,碟形弹簧组件 8 使件 6 紧紧地靠在件 5 上。若进给力过大,则件 5 与件 6 之间的三角形齿产生的轴向力超过了碟形弹簧件 8 的弹力,使件 6 右移,无触点磁性开关发出监控信号给数控装置,使数控车床停机,直到消除过载因素后才能继续运行。滚珠丝杠螺母副在数控车床上采用了外循环式滚珠丝杠螺母。丝杠的导程为 10 mm,精度为 3 级,由于纵向丝杠较长,因而丝杠轴的两端采用了预拉伸支承形式。丝杠的支承轴承为组合轴承。

2. 横向进给运动传动及其装置

(1) 横向进给运动传动。横向进给运动传动是由横向直流伺服电动机通过齿数均为 24/24 的同步齿形带轮,经安全联轴器驱动滚珠丝杠螺母副,使横向滑板实现横向进给运动。

(2) 横向进给运动传动装置。横向滑板通过导轨安装在纵向滑板的上面,做横向进给运动。横向滑板的传动系统与纵向滑板传动系统相类似,但由于横向电动机的安装,因而在安全联轴器和直流伺服电动机之间增加了精密同步齿形带传动,使机床的横向尺寸减小。TND360 卧式数控车床横向进给传动系统如图 1-16 所示。

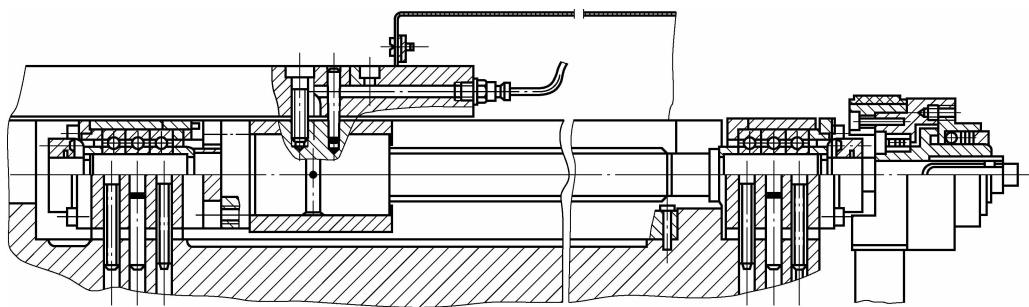


图 1-16 TND360 卧式数控车床横向进给传动系统

三、刀盘运动传动及其装置

1. 刀盘运动传动

刀盘运动是指实现刀架上刀盘的转动和刀盘的开定位、定位与夹紧的运动,以实现刀具的自动转换。刀盘运动传动是由换刀交流电动机(60 W)提供动力,刀架上的轴Ⅳ,经过齿数为 14/65 和 14/96 两对斜齿轮副将运动传递到轴Ⅵ(轴Ⅵ是凸轮轴)。运动传递到轴Ⅵ后分成两条传动支路:一条传动支路由凸轮转动、凸轮槽驱动拨叉带动轴Ⅶ(刀盘的主轴)实现轴向移动,使刀盘实现开定位、定位、夹紧;另一传动支路由轴Ⅵ上齿数为 96 的齿轮与在其上的滚子组成(槽杆与槽数为 8 的槽轮)槽杆槽轮副传动轴Ⅷ,使轴Ⅵ转一周而轴Ⅷ转 45° ,实现刀具的转动换位。

轴Ⅷ的转动经一对齿数为 60/60 的齿轮副传到轴Ⅸ,再传到圆光栅,将转动转换为脉冲信号送给数控机床的电控系统。该脉冲信号,工作正常时用于刀盘上刀具刀位的计数;撞刀时用于产生刀架报警信号。刀盘的转动可按最近找刀原则实现正、反向转动,以达到快速找刀的目的。

2. 刀盘运动传动装置

电动机驱动的转塔刀架的结构如图 1-17 所示。定位用的是三齿盘结构,齿盘 3 用螺钉及定位销固定在刀架体 4 上。齿盘 2 用螺钉及定位销紧固在中心轴套 1 上(齿盘左端面可安装转塔刀盘),齿盘 2、3 的对面有一个可轴向移动的齿盘 5,齿长为齿盘 2、3 之和。其沿轴向右移时,合齿定位、夹紧(碟形弹簧 18);沿轴向右移时,松开脱齿。

齿盘 5 的右端面在 3 个等分位置上装有 3 个滚子 6。此滚子与端面凸轮盘 7 的凹槽相接触,其工作情况如图 1-17(b)、(c)所示。当端面凸轮盘回转使滚子落入端面凸轮的凹槽时,可轴向移动的齿盘右移,齿盘松开、脱齿,如图 1-17(b)所示;当端面凸轮盘反向回转时,端面凸轮盘的凸面使滚子左移,可轴向移动的齿盘左移,齿盘合齿、定位,并通过碟形弹簧将动齿盘向左拉使齿盘进一步贴紧(夹紧),如图 1-17(c)所示。

端面凸轮盘除控制齿盘 2 松开(脱齿)、合齿定位和夹紧之外,还带动一个与中心轴套用齿形花键相连的驱动套 10 和驱动盘 11,使转塔刀盘分度,如图 1-17(a)所示。端面凸轮盘的右端面有凸出部分,其能带动驱动盘、驱动套和中心轴回转进行分度。

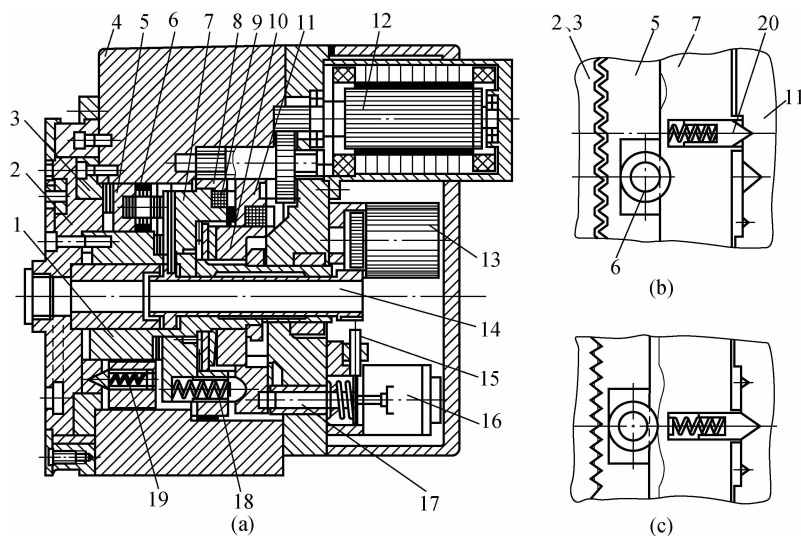


图 1-17 电动机驱动的转塔刀架的结构

- 1—中心轴套；2、3、5—齿盘；4—刀架体；6—滚子；7—端面凸轮盘；8—齿圈；9—缓冲键；10—驱动套；
11—驱动盘；12—电动机；13—圆光栅编码器；14—齿形带轮轴；15—无触点开关；16—电磁铁；
17—插销；18—碟形弹簧；19、20—定位销

整个换刀动作,脱齿(松开)、分度、合齿定位(夹紧)用一个电动机 12 驱动,经两次减速传到套在端面凸轮盘外圆的齿圈 8 上。此齿圈通过缓冲键 9(减小传动冲击)与端面凸轮盘相连。同样,驱动盘与中心轴上的驱动套 10 之间也有类似的缓冲键。

为了识别刀位,转塔刀架装有一个圆光栅编码器 13,用齿形带与中心轴套中间的齿形带轮轴 14 相连。当数控系统得到换刀指令后,自动判断将要换的刀向哪个方向回转分度的路程最短,然后电动机转动,脱齿(松开),转塔刀盘按最短路程分度,当编码器测到分度到位信号后电动机停转,电磁铁 16 通电将插销 17 左移,插入驱动盘的孔中,然后电动机反转,转塔刀盘完成合齿定位并夹紧电动机停转。电磁铁断电,弹簧使插销右移,无触点开关 15 用于检测插销退出信号。

四、尾座

TND360 卧式数控车床尾座的结构如图 1-18 所示。TND360 卧式数控车床出厂时配置标准尾座,尾座体的移动由滑板带动实现。尾座体移动后,由手动控制的液压缸将其锁紧在床身上。

尾座装在床身导轨上,可以在根据工件的长、短调整位置后,用拉杆加以夹紧定位。顶尖 1 与尾座套筒用锥孔连接,尾座套筒可带动顶尖一起移动。在机床自动工作循环中,可通过加工程序由数控系统控制尾座套筒的移动。当数控系统发出尾座套筒伸出的指令后,液压电磁阀动作,压力油通过活塞杆 4 的内孔进入套筒液压缸 2 的左腔,推动尾座套筒伸出。当数控系统令其退回时,压力油进入套筒液压缸的右腔,从而使尾座套筒退回。尾座套筒移动的行程靠调整套筒外部连接的行程杆 9 上面的移动挡块 5 来完成。当图 1-18 所示的移动挡块的位置在右端极限位置时,套筒的行程最长。当套筒伸出到位时,行程杆上的移动挡块 5 压下确认开关 8,向数控系统发出尾座套筒到位信号。当套筒退回时,行程杆上的固定挡

块6压下确认开关7,向数控系统发出套筒退回的确认信号,停止套筒的运动。

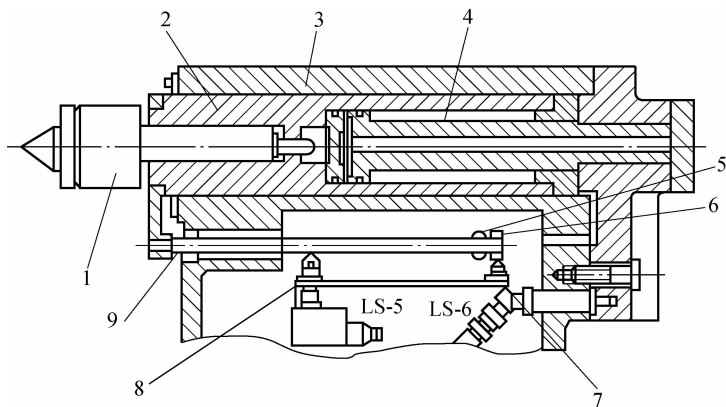


图 1-18 TND360 卧式数控车床尾座的结构

1—顶尖；2—套筒液压缸；3—尾座体；4—活塞杆；5—移动挡块；
6—固定挡块；7、8—确认开关；9—行程杆

项目实施

认识数控车床机械传动部件和支撑部件

实施目标

- (1)掌握数控车床进给运动传动机构中典型零件的工作原理及特性；
- (2)了解数控车床主轴的工作原理及特性；
- (3)对上述典型零件及电主轴建立其外观和结构的感性认识。

工具、仪器和设备

- (1)滚珠丝杠螺母副 1 套；
- (2)滚动导轨副 1 套；
- (3)贴塑导轨模型 1 副,塑料带(50 mm×100 mm)1 条；
- (4)消除间隙双片齿轮装置 1 套；
- (5)变齿厚蜗杆蜗轮 1 副(变齿厚蜗杆 1 件)；
- (6)联轴器(无间隙传动)1 套；
- (7)同步齿形带及带轮 1 套；
- (8)60°角接触滚珠轴承 1 个；
- (9)电动机内藏式电主轴 1 件；
- (10)通用工具:活动扳手 2 个,木柄螺丝刀 2 个,内六角扳手 1 套,紫铜棒或木质手锤 1 个,齿厚卡尺 1 个。

实施内容

- (1) 拆装一种滚珠丝杠螺母副,掌握其工作原理、结构特点和精度要求;
- (2) 拆装一种滚动导轨副,掌握其工作原理、结构特点和精度要求;
- (3) 观察贴塑导轨的外形及结构;
- (4) 拆装一种消除齿轮传动间隙的结构;
- (5) 观察并检测双导程变齿厚蜗杆,了解其工作原理和结构特点;
- (6) 拆装一种消除齿轮齿条传动间隙的结构;
- (7) 拆装一种无间隙传动的联轴器,掌握它的工作原理;
- (8) 认识同步齿形带及带轮的结构;
- (9) 认识主轴和滚珠丝杠用的角接触轴承,掌握其受力和定位特点;
- (10) 观察认识一种结构形式的电主轴。

项目三 数控车床伺服系统



项目导读

伺服系统是以机床运动部件(工作台)的位置和速度作为控制量的自动控制系统。它能准确地执行 CNC 装置发出的位置和速度指令信号,由伺服驱动电路做一定的转换和放大后,经伺服电动机(步进电动机、交流或直流伺服电动机等)和机械传动机构,驱动机床工作台等运动部件实现工作进给、快速运动及位置控制。



学习目标

- (1) 掌握步进电动机的组成、工作原理;
- (2) 掌握步进驱动电路的工作原理;
- (3) 掌握直流电动机的工作原理;
- (4) 掌握交流电动机的工作原理;
- (5) 了解步进电动机的主要特性。



知识链接

数控机床的进给伺服系统与普通机床的进给系统有着本质的差别,前者能够根据指令信号精确地控制执行部件的位置和进给速度,执行部件按一定规律运动所合成的轨迹,加工出所需工件的尺寸和轮廓。伺服系统作为数控机床的重要组成部分,其性能是影响数控机

床的加工精度、表面质量、可靠性和生产效率等方面的重要因素。

一、伺服系统的相关知识

1. 伺服系统的组成与分类

数控机床的伺服系统按其功能可分为主轴伺服系统和进给伺服系统。主轴伺服系统用于控制机床主轴的运动,提供机床的切削动力。进给伺服系统通常由伺服驱动电路、伺服电动机和进给机械传动机构等部件组成。进给机械传动机构由减速齿轮、滚珠丝杠副、导轨和工作台等组成。

进给伺服系统按位置检测和反馈的有无,以及检测装置的安装位置的不同,可分为开环伺服系统、半闭环伺服系统和闭环伺服系统。

(1)开环伺服系统。开环伺服系统只能采用步进电动机作为驱动元件,它没有任何位置反馈和速度反馈回路,所以设备投资少,调试维修方便,但精度较低,高速转矩小,被广泛用于中、低档数控机床及普通机床的数控化改造。开环伺服系统由驱动控制线路、步进电动机、齿轮箱和工作台组成,其组成示意图如图 1-19 所示。

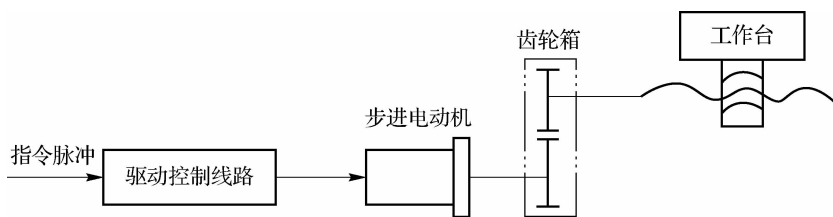


图 1-19 开环伺服系统的组成示意图

开环伺服系统将数字脉冲转换为角位移,靠驱动控制线路本身定位。步进电动机转过的角度与指令脉冲个数成正比,转速与脉冲频率成正比,转向取决于电动机绕组通电顺序。

(2)半闭环伺服系统。半闭环伺服系统一般将角位移检测装置安装在电动机轴或滚珠丝杠末端,用于精确控制电动机或丝杠的角度,然后转换成工作台的位移。它可以将部分传动链的误差检测出来,并使之得到补偿,所以其精度比开环伺服系统高。目前,精度要求适中的中小型数控机床多使用半闭环伺服系统,半闭环伺服系统的组成示意图如图 1-20 所示。

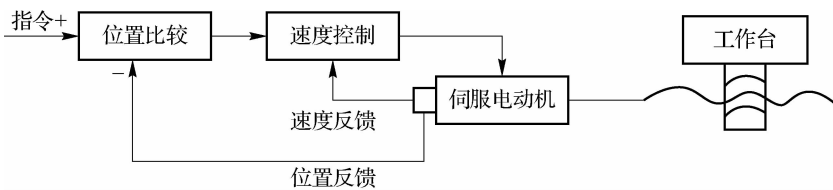


图 1-20 半闭环伺服系统的组成示意图

(3)闭环伺服系统。闭环伺服系统将直线位移检测装置安装在机床的工作台上,并将检测装置测出的实际位移量或实际所处的位置反馈给 CNC 装置,且与指令值进行比较,求得差值,实现位置控制,如图 1-21 所示。闭环(半闭环)伺服系统均为双闭环系统,内环为速度环,外环为位置环。其中,速度环由速度控制单元、速度检测装置等构成。速度控制单元是

一个独立的单元,用于控制电动机的转速,是速度控制单元的核心;速度检测装置有伺服电动机、脉冲编码器等。位置环由 CNC 装置中的位置控制模块、速度控制单元、位置检测与反馈等部分组成。由速度检测装置提供速度反馈值的速度环控制,在进给驱动装置内完成;而装在电动机轴上(丝杠末端)或机床工作台上的位置反馈装置提供位置反馈值构成的位置环,由数控装置来完成。从外部看,伺服系统是一个以位置指令输入和位置控制为输出的位置闭环控制系统。从内部看,伺服系统是先将位置控制指令转换成相应的速度信号,然后通过调速系统驱动电动机才实现位置控制的。

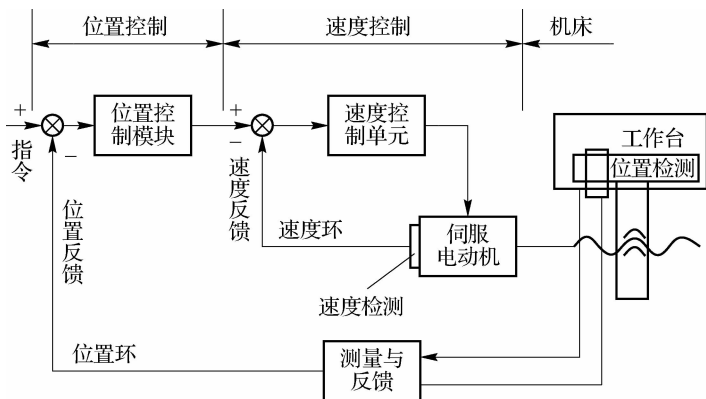


图 1-21 闭环伺服系统的组成示意图

2. 伺服系统的基本要求

根据机械切削加工的特点,数控机床对伺服系统有如下要求:

(1)进给调速范围要宽。调速范围是指机床要求伺服电动机提供的最高转速和最低转速之比。在各种数控机床中,由于加工用的刀具、被加工材料及零件加工要求的不同,为保证在任何情况下都能得到最佳切削条件,就要求进给驱动必须具有足够宽的调速范围。为保证加工精度,一般设备要求进给伺服系统在 $0\sim 24\text{ m/min}$ 进给速度下能正常工作,高档设备要求进给伺服系统在 $0\sim 240\text{ m/min}$ 连续可调,且在低速进给时输出较大的转矩。

(2)位置精度要高。使用数控机床主要是为了解决以下几个问题:

- ①保证加工质量的稳定性、一致性,减少废品率。
- ②解决复杂曲面零件的加工问题。
- ③解决复杂零件的加工精度问题,缩短制造周期等。

满足这些要求的关键是保证数控机床的定位精度和加工精度。数控机床在加工时免除了操作者的人为误差,它是按预定的程序自动进行加工,不可能应付事先没有预料到的情况,即数控机床不能像普通机床那样,可随时手动操作来调整和补偿各种因素对加工精度的影响。为此,伺服系统在位置控制中要求高的定位精度,如 $1\text{ }\mu\text{m}$ 甚至 $0.1\text{ }\mu\text{m}$;在速度控制中要求具有很高的调速精度和很强的抗干扰能力,即工作稳定性要好。

(3)速度响应要快。为了保证轮廓切削形状精度和低的加工表面粗糙度,伺服系统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,即跟踪指令信号的响应要快。一方面,伺服系统要求过渡过程时间要短,一般在 200 ms 以内,甚至小于几十毫秒;另一方面,要使过渡过程的前沿较陡,即上升斜率要大。

(4)低速大转矩。根据数控机床的加工特点,它大都是在低速进行重切削,即在低速时进给驱动要有大的转矩输出。这种可使动力源尽量靠近机床的执行机构,使传动装置机械部分的结构简化,系统刚性增加,传动精度提高。

为满足上述要求,进给伺服系统对执行元件(伺服电动机)也相应提出了很高的要求,即高精度、快反应、宽调速和大转矩等。其具体的要求为:

①电动机从最低进给速度到最高进给速度都能平滑地运转;转矩波动要小,尤其在最低转速时,如 0.1 r/min 或更低转速时,仍保持平稳的速度而无爬行现象。

②电动机应具有大的、较长时间的过载能力,以满足低速大转矩的要求。例如,电动机能在数分钟内过载 $4\sim 6$ 倍而不损坏。

③为了满足快速响应的要求,即随着控制信号的变化,电动机应能在较短时间内完成动作。反应速度的快慢直接影响系统性能的好坏。因此,电动机必须具有较小的转动惯量、较大的制动转矩、尽可能小的机电时间常数和起动电压。另外,电动机必须具有 $4\,000 \text{ rad/s}^2$ 以上的加速度,才能保证电动机在 0.2 s 以内从静止起动到 $1\,500 \text{ r/min}$ 。

④电动机应能承受频繁的制动和反转。

二、步进电动机及驱动电路

步进电动机是一种将电脉冲信号转换为机械角位移的机电执行元件,同普通电动机一样,由转子、定子和定子绕组组成。当给步进电动机定子绕组输入一个电脉冲时,转子就会转过一个相应的角度。转子的转角与输入的电脉冲个数成正比,转速与电脉冲频率成正比;转动方向取决于步进电动机定子绕组的通电顺序。由于步进电动机伺服系统是典型的开环控制系统,没有任何反馈检测环节,精度主要由步进电动机来决定,因而它具有控制简单、运行可靠和无累积误差等优点,已获得了广泛应用。

1. 步进电动机的工作原理

图 1-22 所示为三相反应式步进电动机的结构。电动机定子上有 6 个均布的磁极,直径方向相对的两个极上的线圈串联,构成电动机的一个相控制绕组。

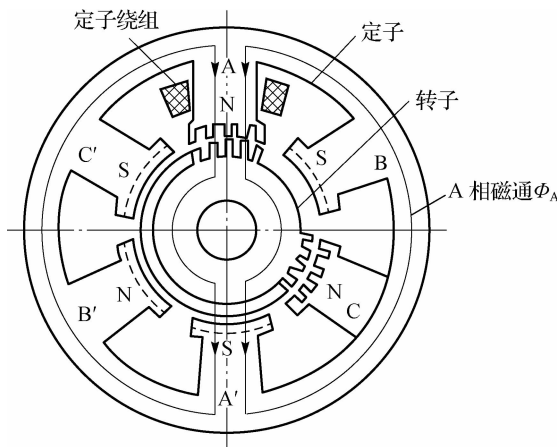


图 1-22 三相反应式步进电动机的结构

图 1-23 所示为三相反应式步进电动机的工作原理图。定子上有 A、B、C 三对磁极；转子上有 4 个齿，转子上无绕组，由带齿的铁心做成。如果先将电脉冲加到 A 相励磁绕组，B、C 相不加电脉冲，A 相磁极便产生磁场，在磁场力矩作用下，转子 1、3 两个齿与定子 A 相磁极对齐；如果将电脉冲加到 B 相励磁绕组，A、C 相不加电脉冲，B 相磁极便产生磁场，转子 2、4 两个齿与定子 B 相磁极靠得最近，转子便沿逆时针方向转过 30°，使转子 2、4 两个齿与定子 B 相对齐；如果将电脉冲加到 C 相励磁绕组，A、B 相不加电脉冲，C 相磁极便产生磁场，转子 1、3 两个齿与定子 C 相磁极靠得最近，转子再沿逆时针方向转过 30°，使转子 1、3 两个齿与定子 C 相对齐。如果按照顺序 A→B→C→A→……通电，步进电动机就按逆时针方向转动，且每步转 30°；如果按照顺序 A→C→B→A→……通电，步进电动机就按顺时针方向转动，且每步转 30°。如果控制电路连续地按一定方向切换定子绕组各相的通电顺序，转子便按相应方向不停地转动。

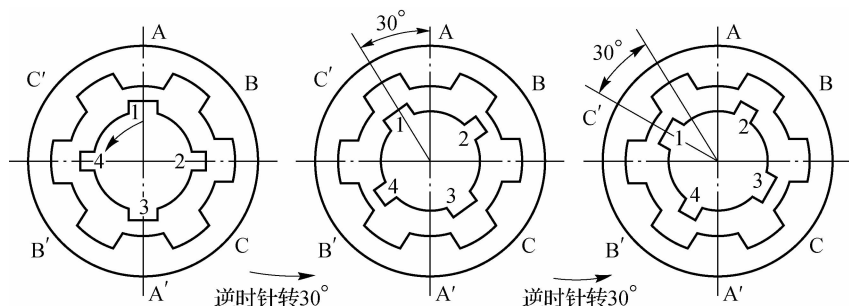


图 1-23 三相反应式步进电动机的工作原理图

步进电动机定子绕组从一种通电状态换接到另一种通电状态称为一拍，每拍转子转过的角度称为步距角。上述通电方式称为三相单三拍，即三相励磁绕组依次单独通电运行，换相 3 次完成一个通电循环。由于每种状态只有一相绕组通电，转子容易在平衡位置附近产生振荡，并且在绕组通电切换瞬间，电动机失去自锁转矩，易产生丢步。实际生产中通常采用三相双三拍控制方式，即 AB→BC→CA→AB→……或 AC→CB→BA→AC→……的顺序通电，定位精度增高，且不易失步。如果步进电动机按照 A→AB→B→BC→C→CA→A→……或 A→AC→C→CB→B→BA→A→……的顺序通电，根据其原理图分析可知，其步距角比三相三拍工作方式减小一半，称这种方式为三相六拍工作方式。综上所述，步距角按下式计算，即

$$\alpha = \frac{360^\circ}{mz k} \quad (1-1)$$

式中， α 为步距角； m 为电动机相数； z 为转子齿数； k 为通电方式系数， $k = \text{拍数} / \text{相数}$ 。

由式(1-1)可知，电动机相数的多少受结构限制，减小步距角的主要方法是增加转子齿数 z ，如图 1-23 所示，电动机相邻两个极与极之间的夹角为 60°，转子有 4 个齿，齿与齿之间的夹角为 90°，所以，当电动机以三相三拍方式工作时，步距角为 30°；以三相六拍方式工作时，步距角为 15°。在一个循环过程中，即通电从 A→……→A，转子正好转过一个齿间夹角。如果将转子齿数变为 40 个，转子齿间的夹角为 9°。那么，当电动机以三相三拍方式工作时，步距角为 3°；当电动机以三相六拍方式工作时，步距角为 1.5°。通过改变定子绕组的通电顺序，就可改变电动机的旋转方向，实现机床运动部件进给方向的改变。

步进电动机转子角位移的大小取决于来自 CNC 装置发出的电脉冲个数,其转速 n 取决于电脉冲频率 f ,即

$$n = \frac{\alpha \times 60 f}{360^\circ} = \frac{60 f}{m z k} \quad (1-2)$$

式中, n 为电动机转速,r/min; f 为电脉冲频率,Hz; α 为步距角。

综上所述,步进电动机的角位移大小与脉冲个数成正比;转速和脉冲频率方向取决于定子绕组的通电顺序。

2. 步进电动机的主要特性

(1)步距角 α 和步距误差 $\Delta\alpha$ 。步进电动机的步距角 α 是定子绕组的通电状态每改变一次,如 A→B 或 A→AB,其转子转过一个确定的角度。步距角越小,机床运动部件的位置精度越高。

步距误差 $\Delta\alpha$ 是指步进电动机运行时理论的步距角 α 与转子每步实际的步距角 α' 之差,即 $\Delta\alpha = \alpha - \alpha'$,它直接影响执行部件的定位精度。步距误差主要由步进电动机齿距制造误差、定子和转子气隙不均匀、各相电磁转矩不均匀等因素造成。步进电动机连续走若干步时,步距误差的累积值称为步距的累积误差,由于步进电动机每转一转又恢复到原来位置,因而误差不会无限累积。伺服步进电动机的步距误差 $\Delta\alpha$ 一般为 $\pm(10' \sim 15')$,功率步进电动机的步距误差 $\Delta\alpha$ 一般为 $\pm(20' \sim 25')$ 。

(2)静态转矩和矩角特性。当步进电动机定子绕组处于某种通电状态时,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 θ ,那么此时转子所受的磁转矩 M 称为静态转矩,角度 θ 称为失调角。当外加转矩撤销时,转子在电磁转矩作用下回到定平衡点位置($\theta=0^\circ$),用来描述静态转矩 M 与 θ 之间关系的曲线称为静态矩角特性,如图 1-24 所示。该矩角特性曲线上的静态转矩最大值 $M_{\max}$ 称为最大静态转矩。

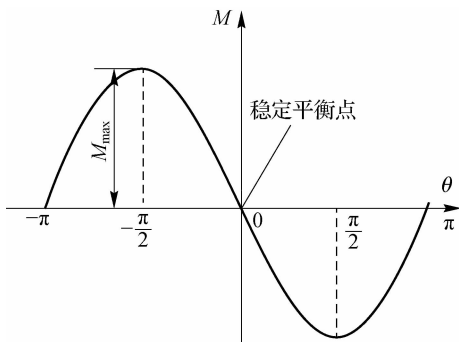


图 1-24 步进电动机的静态矩角特性

(3)最大起动转矩 M_q 。图 1-25 所示为步进电动机的三相单三拍矩角特性曲线,A、B 分别是相邻 A 相和 B 相的静态特性曲线,它们的交点对应的转矩 M_q 是步进电动机的最大起动转矩。如果外加负载转矩大于 M_q ,电动机就不能起动。当 A 相通电时,若外加负载转矩 $M_a > M_q$,对应的失调角为 θ_a ;当励磁电流由 A 相切换到 B 相时,对应角 θ_a ,B 相的静态转矩为 M_b 。从图中看出 $M_b < M_a$,电动机不能带动负载做步进运动,因而起动转矩是电动机能带动负载转动的极限转矩。

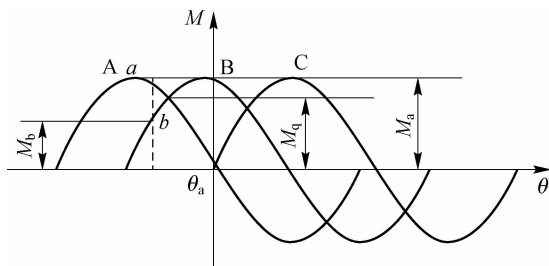


图 1-25 步进电动机的三相单三拍矩角特性曲线

(4) 最高起动频率 f_q 。空载时, 步进电动机由静止突然起动, 并不失步地进入稳速运行, 所允许的起动频率的最高值称为最高起动频率 f_q 。步进电动机在起动时, 既要克服负载转矩, 又要克服惯性转矩(电动机和负载的总惯量), 所以起动频率不能过高。如果加给步进电动机的指令脉冲频率大于最高起动频率, 就不能正常工作, 会造成丢步。步进电动机随着负载加大, 起动频率会进一步降低。

(5) 连续运行的最高工作频率 $f_{\max}$ 。步进电动机连续运行时且在不丢步的情况下所能接受的最高频率称为最高工作频率 $f_{\max}$ 。最高工作频率远大于起动频率, 它表明步进电动机所能达到的最高速度。

(6) 矩频特性。步进电动机在连续运行时, 用来描述输出转矩与运行频率间关系的特性称为矩频特性, 如图 1-26 所示。当输入脉冲的频率大于临界值时, 步进电动机的输出转矩加速下降, 带负载能力迅速降低。

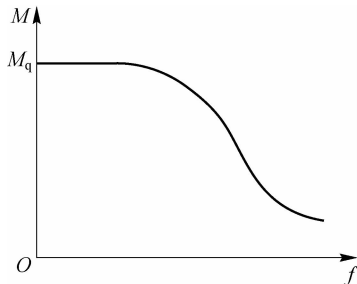


图 1-26 步进电动机的矩频特性

3. 步进电动机的驱动控制

步进电动机的运行特性, 不仅与步进电动机本身和负载有关, 而且与配套使用的驱动装置有着十分密切的关系。步进电动机驱动要解决环形分配和功率放大两个问题。下面主要介绍三相三拍式步进电动机的环形分配, 如图 1-27 所示。

(1) 环形分配的作用。环形分配用于控制步进电动机的通电运行方式, 其作用是将数控装置送来的一串指令脉冲按照一定的顺序和分配方式控制各相绕组的通、断电。

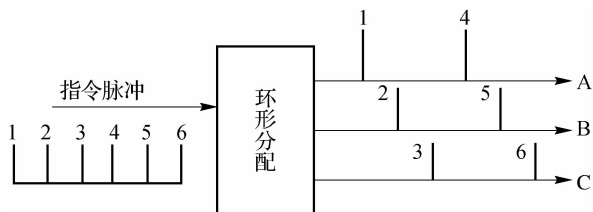


图 1-27 三相三拍式步进电动机的环形分配

(2) 环形脉冲分配器。环形脉冲分配器用于控制步进电动机的通电方式,其作用是将 CNC 装置送来的一系列指令脉冲,按照一定的循环规律依次分配给电动机的各相绕组,控制各相绕组的通电和断电。环形脉冲分配可采用硬件和软件两种方法实现。硬件按其电路结构不同,可分为 TTL 集成电路和 CMOS 集成电路。市场上提供的国产 TTL 脉冲分配器有三相(YB013)、四相(YB014)、五相(YB015)等;CMOS 集成脉冲分配器也有不同型号,如 CH250 用来驱动三相步进电动机。目前,脉冲分配大多采用软件的方法来实现。当采用三相六拍方式时,电动机正转的通电顺序为 $A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C \rightarrow CA \rightarrow A \cdots$;电动机反转的通电顺序为 $A \rightarrow AC \rightarrow C \rightarrow CB \rightarrow B \rightarrow BA \rightarrow A \rightarrow \cdots$ 。它们的环形分配如表 1-1 所示。设某相为高电平时通电。

表 1-1 三相六拍环式步进电动机的环形分配

控制节拍	C B A	控制输出内容	方 向
1	0 0 1	01H	反转 $\updownarrow$ 正转
2	0 1 1	03H	
3	0 1 0	02H	
4	1 1 0	06H	
5	1 0 0	04H	
6	1 0 1	05H	

4. 步进电动机的驱动电路

环形脉冲分配器输出的电流一般只有几毫安,而步进电动机的励磁绕组需要几安培甚至几十安培的电流,所以进入励磁绕组的电流必须经过功率放大器。功率放大器的作用是将脉冲分配器发出的电平信号放大后送至步进电动机的各相绕组,驱动电动机运转,每相绕组分别有一组功率放大电路。过去采用单电压驱动电路,后来常采用高低压驱动电路,现在较多地采用恒流斩波驱动电路。三种驱动电路的波形图如图 1-28 所示。

(1) 单电压驱动电路。如图 1-29 所示, L 为步进电动机励磁绕组的电感, R_a 为绕组电阻, R_c 为外接电阻, R_c 与 C 并联是为了减小回路的时间常数,以提高电动机的快速响应能力和起动性能。续流二极管 VD 和阻容吸收回路 RC ,用于保护功率管 VT。

单电压驱动电路的波形图如图 1-28(a)所示。单电压驱动电路的优点是线路简单,其缺点是电流上升速度慢,高频时带负载能力较差。

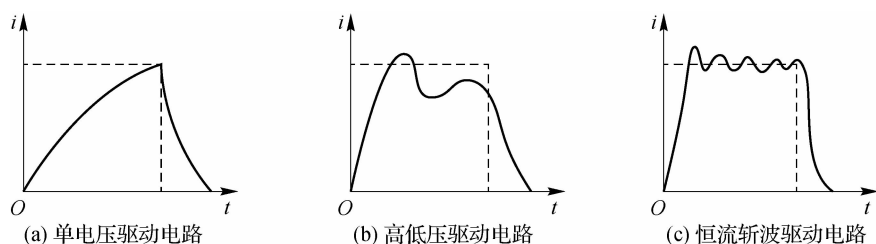


图 1-28 三种驱动电路的波形图

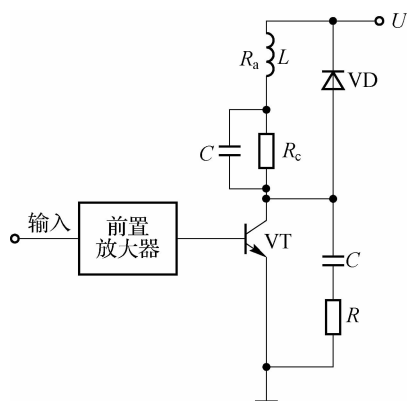


图 1-29 单电压驱动电路原理图

(2) 高低压驱动电路。如图 1-30 所示,该电路由两种电压给步进电动机绕组供电:一种高电压 U_1 ,一般为 80 V 甚至更高;另一种是低电压 U_2 ,即步进电动机绕组额定电压,一般为几伏,不超过 20 V。当相序输入脉冲信号 I_H 、 I_L 到来时, VT_1 、 VT_2 同时导通,励磁绕组 L 上加高电压 U_1 ,以提高绕组中电流上升速率,当电流达到规定值时, VT_1 断开, VT_2 仍然导通,绕组切换到低电压 U_2 供电,维持电动机正常运行。该电路可谓“高压建流,低压稳流”,其优点是在较宽的频率范围内有较大的平均电流,能产生较大而且较稳定的电磁转矩;其缺点是电流有波谷。其高低压电路波形如图 1-28(b)所示。

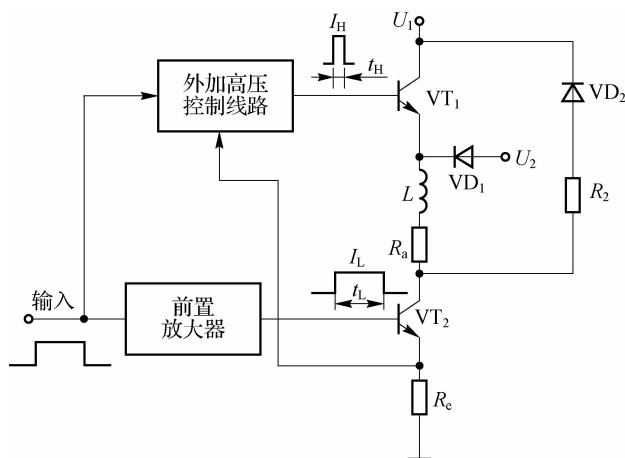


图 1-30 高低压驱动电路原理图

(3)恒流斩波驱动电路。高低压驱动电路的电流在高低压切换处出现了谷点,造成高频输出转矩谷点下降,为了使励磁绕组中的电流维持在额定值附近,故采用斩波驱动电路,其波形如图 1-28(c)所示。在图 1-31 所示的恒流斩波驱动电路原理图中,环形分配器输出的脉冲作为输入信号,若输入信号为正脉冲,则 VT_1 、 VT_2 导通。因为 U_1 为高电压,励磁绕组 L 没串联电阻,所以通过绕组的电流迅速上升,当绕组中的电流上升到额定值以上某个数值时,由于采样电阻 R_c 的反馈作用,输入信号经整形、放大后被传送至 VT_1 的基极,使 VT_1 截止。此时,励磁绕组切换成由低电压 U_2 供电,绕组中的电流立即下降,当下降至额定值以下时,由于采样电阻 R_c 的反馈作用,使整形电路无信号输出,此时高压前置放大电路又使 VT_1 导通,绕组中电流又上升。按此规律反复进行,形成一个在额定电流值附近振幅很小的绕组电流波形,近似恒流,如图 1-28(c)所示。斩波电路也称为恒流斩波驱动电路,其电流波的频率可通过采样电阻 R_c 和整形电路的电位器调整。

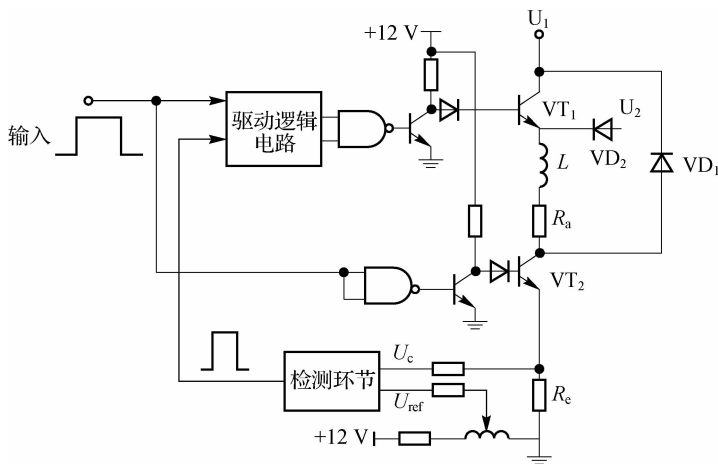


图 1-31 恒流斩波驱动电路原理图

恒流斩波驱动电路虽然较复杂,但优点尤为突出,主要表现为:

- ①绕组的脉冲电流上升沿和下降沿较陡,快速响应性好。
- ②该电路功耗小,效率高,因为绕组电路中无外接电阻 R_c ,且电路中采样电阻 R_c 很小。
- ③该电路能输出恒定转矩。由于采样电阻 R_c 的反馈作用,因而绕组中的电流几乎恒定,且不随步进电动机的转速而变化,从而保证在很大的频率范围内,步进电动机都能输出恒定转矩,使进给驱动装置运行平稳。

④细分驱动电路。步进电动机的运转方式是步进式运动,即每给电动机一相绕组或几相绕组一个脉冲电压,步进电动机就旋转一步。前述的各种驱动电源,都是按电动机工作方式轮流给各相绕组供电,每换一次相,电动机就转动一步,即每拍电动机转动一个步距角。如果在一拍中,通电相的电流不是一次达到最大值,而是分成多次,那么每次使绕组电流增加一些。每次增加,都使转子转过一小步,同样,绕组电流的下降也是分多次完成。这样,步进电动机原来的一个步距,便分成许多微步运动,即实现了步距的细分。这样,使步进电动机的分辨力得以提高,运动更加平稳,振动减小,噪声降低,且不易失步。要实现细分,须将绕组中的矩形电流波变成阶梯形电流波。阶梯形电流波控制信号可由很多方法产生,图 1-32 所示为恒频脉宽调制细分驱动电路及其波形。

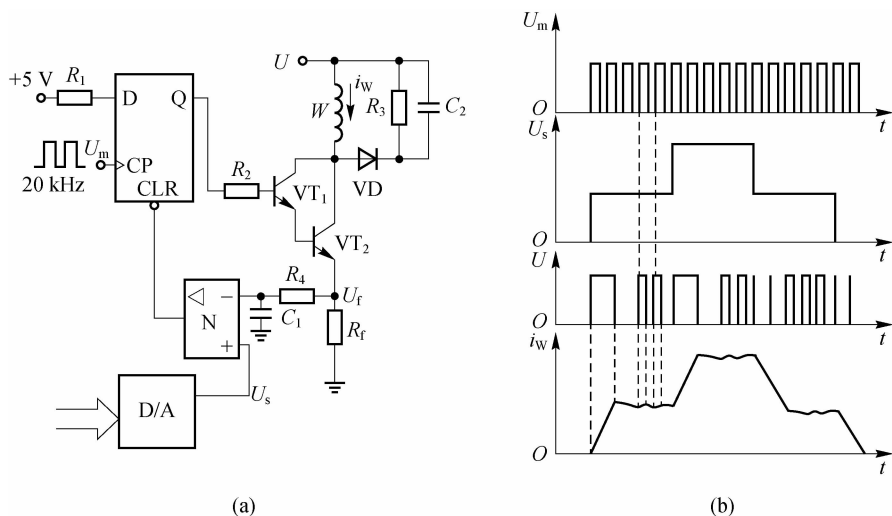


图 1-32 恒频脉宽调制细分驱动电路及其波形

5. 开环控制步进电动机伺服系统的工作原理

(1) 工作台位移量的控制。数控装置发出 N 个脉冲, 经驱动电路放大后, 使步进电动机定子绕组通电状态变化 N 次, 若一个脉冲使步进电动机转过的角度为 α , 则步进电动机转过的角位移量 $\phi = N\alpha$, 再经减速齿轮、丝杠、螺母之后, 转变为工作台的位移量 L , 即进给脉冲数决定了工作台的直线位移量。

(2) 工作台运动方向的控制。只要改变步进电动机输入脉冲信号的循环顺序, 就可改变定子绕组中电流的通断循环顺序, 使步进电动机实现正转和反转; 同时, 工作台进给方向也相应地改变。

三、直流伺服电动机

直流伺服电动机是在机床伺服系统中使用较广的执行元件, 它具有良好的起动、制动和调速特性, 在宽范围内能够实现平滑无级调速, 常使用于对伺服电动机的调速性能要求较高的生产设备中。在伺服系统中, 常用的直流伺服电动机多数为大功率直流伺服电动机, 如低惯量电动机和宽调速电动机等。这些伺服电动机虽然结构不同, 各有特色, 但是其工作原理与直流电动机类似。

1. 直流伺服电动机的基本结构

直流伺服电动机主要包括定子、转子、电刷与换向片三部分, 如图 1-33 所示。

(1) 定子。定子磁极磁场由定子的磁极产生。根据产生磁场方式, 直流伺服电动机可分为永磁式和电磁式。永磁式磁极由永磁材料制成, 电磁式磁极由冲压硅钢片叠压而成, 外绕线圈通以直流电流使产生恒定磁场。

(2) 转子。转子又称为电枢, 由硅钢片叠压而成, 表面嵌有线圈。当通直流电时, 转子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旋转, 电刷与外加直流电源相接, 换向片与电枢导体相接。

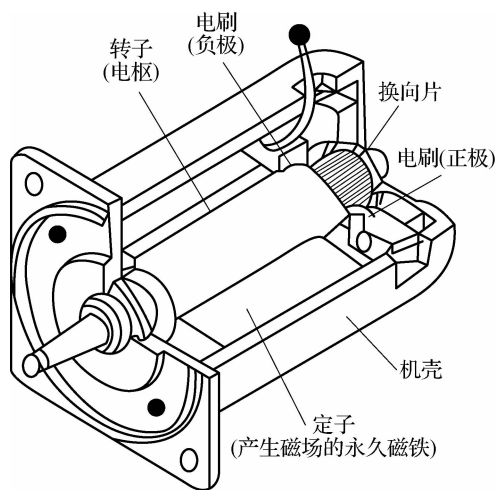


图 1-33 直流伺服电动机结构图

2. 直流伺服电动机的工作原理

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完全相同。他励式直流电动机转子上的载流导体(电枢绕组),在定子磁场中受到电磁转矩 T 的作用,使电动机转子旋转。由直流电动机的基本原理分析,调节电动机的转速有三种方法。

(1)改变电枢电压 u 。改变电枢电压即脉宽调速,直流伺服电动机常用此方法调速。脉宽调速就是利用脉宽调制器对大功率晶体管开关放大器的开关时间进行控制,将直流电压转换成某一频率的矩形波电压,并加到直流电动机的电枢两端,通过对矩形波脉冲宽度的控制来改变电枢两端的平均电压,从而达到调节电动机转速的目的。调整直流伺服电动机转速的主要方法是调整电枢电压。目前使用最广泛的方法是晶体管脉宽调制器-直流电动机调速(PWM-M),它具有响应快、效率高、调速范围宽、噪声污染小和简单可靠等优点。

(2)变磁通量 Φ (改变 k_e 值)。变磁通量 Φ 通常采用调压和调磁两种方法互相配合,以获得很宽的调速范围,并充分利用电动机的容量。

(3)在电枢回路中串联调节电阻 R_t 。这种办法并不经济且转速只能调低,故应用场合有限。

3. 直流伺服电动机的类型

直流伺服电动机按电动机转子的转动惯量的不同可分为小惯量和大惯量两种,按励磁方式不同可分为电磁式和永磁式两种。电磁式直流伺服电动机采用励磁绕组励磁,永磁式直流伺服电动机采用永久磁铁励磁。电磁式直流伺服电动机按励磁绕组和电枢绕组的连接方式不同可分为并励、串励和复励三种。

4. 直流伺服电动机的静态特性与控制方法

直流伺服电动机的模型示意图如图 1-34 所示,当直流伺服电动机的控制电压 U_a 和电磁转矩 T 不变,电动机的电流 I_a 和转速 n 达到恒定的稳定值时,电动机处于静态(稳态),此时直流伺服电动机所具有的特性称为静态特性。它一般包括机械特性(n 与 M 的关系)和调节特性(n 与 U_a 的关系)。

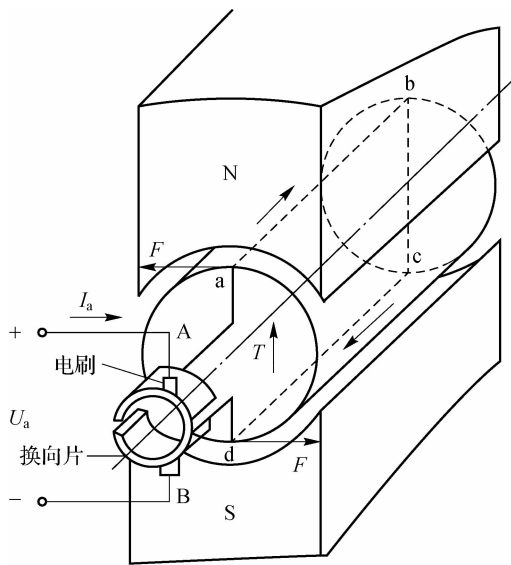


图 1-34 直流伺服电动机的模型示意图

根据电机学的基本知识,有

$$E = C_e \Phi n \quad (1-3)$$

$$T = C_T \Phi I_a \quad (1-4)$$

$$U_a = E + R_a I_a \quad (1-5)$$

式中, E 为电枢感应电动势, V; T 为电磁转矩; U_a 为电枢电压, V; Φ 为磁通, Wb; n 为电动机转速, r/min; I_a 为电枢电流, A; R_a 为电枢回路总电阻, Ω ; C_e 、 C_T 为电势常数和力矩常数。

根据式(1-3)~式(1-5),得电动机的机械特性方程:

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi} = n_0 - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} M \quad (1-6)$$

式中, n_0 为理想空载转速, $n_0 = \frac{U_a}{C_e \Phi}$ 。

由式(1-6)可知,直流电动机的调速方式有:改变电枢电压 U_a , 改变励磁电流 I_f 以改变磁通 Φ , 改变电枢回路总电阻 R_a 。

(1)机械特性。当电枢电压 U_a 和磁通 Φ 一定时,电动机转速 n 与电磁转矩 T 呈一定的函数关系,它表明了电动机的机械特性,如图 1-35 所示。如果改变电枢电压 U_a ,就可得到一组平行直线。当电磁转矩相同时,电枢电压越高,静态转速越高。

(2)调节特性。调节特性是指电磁转矩(负载转矩)一定时电动机的静态转速与电枢电压的关系。调节特性表明电枢电压 U_a 对电动机转速 n 的调节作用。图 1-36 所示为直流伺服电动机的调节特性。

由图 1-36 可知,当负载转矩为零时,电动机的起动没有死区;当负载转矩不为零时,调节特性就会出现死区。只有电枢电压 U_a 大到一定值,所产生的电磁转矩大到足以克服负载转矩,电动机才能开始转动,并随着电枢电压的升高,电动机转速也逐渐提高。

综上所述,当直流电动机通过调节电枢电压的方式控制时,其机械特性和调节特性都是直线,特性组是平行直线,控制方便。

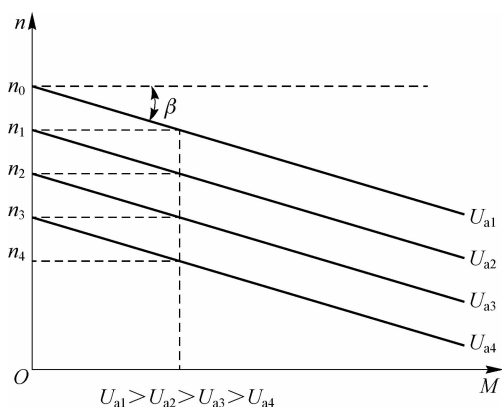


图 1-35 直流伺服电动机的机械特性

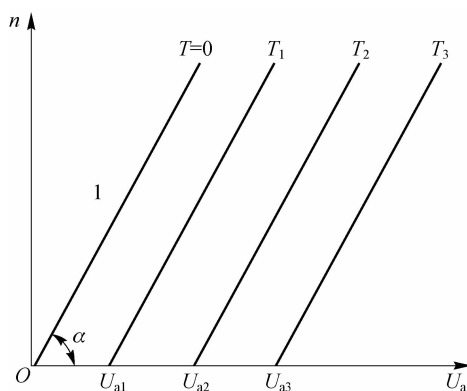


图 1-36 直流伺服电动机的调节特性

四、交流伺服电动机

交流伺服电动机是近些年发展的新型伺服系统，交流电动机的调速驱动系统已发展为数字化，克服了直流驱动系统中电动机电刷和换向器要经常维修、电动机尺寸较大和使用环境受限制等缺点。它能在较宽的调速范围内产生理想的转矩，结构简单，运行可靠，可广泛应用于数控机床等进给驱动系统的精密位置控制。

1. 交流伺服电动机的类型

交流伺服电动机分为同步型交流伺服电动机和异步型交流伺服电动机。

(1) 同步型交流伺服电动机。同步型交流伺服电动机常用于进给伺服系统，其结构较感应电动机复杂，比直流电动机简单。它的定子与感应电动机一样，都装有对称三相绕组，而转子却不同。交流伺服电动机按转子结构的不同又分为电磁式和非电磁式两类。非电磁式同步型交流伺服电动机又分为磁滞式、永磁式和反应式三类。其中，磁滞式和反应式同步型交流伺服电动机有功率因数差、效率低和制造容量小等缺点。与之相比，永磁式同步型交流伺服电动机的优点是结构简单、运行可靠、效率较高；缺点是体积大、起动特性欠佳。

(2) 异步型交流伺服电动机。异步型交流伺服电动机是交流感应电动机，常用于主轴伺服系统。它有三相和单相之分，也有鼠笼式和线绕式之分。由于鼠笼式三相感应电动机结构简单，与同容量的直流伺服电动机相比质量轻 $1/2$ ，价格仅为直流伺服电动机的 $1/3$ ，因而其应用更加广泛。但因其必须从电网吸收滞后的励磁电流才能实现范围很广的平滑调速，故经济性差，同时令电网功率因数变低。采用鼠笼转子的异步型交流伺服电动机简称异步型交流伺服电动机，用 IM 表示。

2. 交流伺服电动机的工作原理

以永磁式交流伺服电动机为例，其结构如图 1-37 所示，工作原理如图 1-38 所示。永磁式交流伺服电动机的转子是一个具有两个极的永磁体，当同步电动机的定子绕组接通电源时，产生旋转磁场 (N_s, S_s)，以同步转速 n_s 逆时针方向旋转。根据两异性磁极相吸的原理，定子磁极 $N_s(S_s)$ 紧紧吸住转子，以同步转速 n_s 在空间旋转，即转子和定子磁场同步旋转。

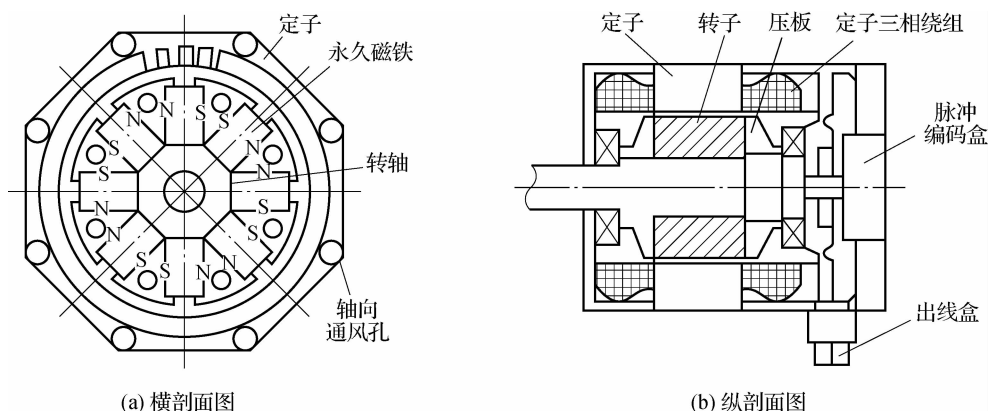


图 1-37 永磁式交流伺服电动机的结构

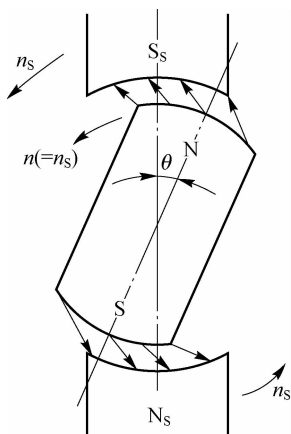


图 1-38 永磁式交流伺服电动机的工作原理

当转子的负载转矩增大时,定子磁极轴线与转子磁极轴线间的夹角 θ 增大;当负载转矩减小时, θ 角减小。但只要负载不超过一定的限度,转子就始终跟着定子旋转磁场同步转动。此时,转子的转速取决于电源频率和电动机的极对数,而与负载大小无关。当负载转矩超过一定的限度时,步进电动机就会丢步,即不再按同步转速运行直到停转。这个最大限度的转矩称为最大同步转矩。因此,使用永磁式同步电动机时,负载转矩不能大于最大同步转矩。

3. 交流伺服系统的控制方法

(1) 交流伺服电动机的调速方法。根据电动机学基本原理可知,永磁式同步伺服电动机的转速 $n(\text{r/min})$ 为

$$n = 60 \frac{f}{p} \quad (1-7)$$

式中, f 为电源频率, Hz; p 为磁极对数。

同步型伺服电动机的调速方法与异步型伺服电动机的调速方法不同,异步型伺服电动机的转速 $n = 60f/[p(1-s)]$, s 为转差,同步型交流伺服电动机不能用调节转差率 f 的方法来调速,也不能用改变磁极对数 p 来调速,只能用改变电源频率 f 的方法来调速,才能满足

数控机床的要求,实现无级调速。

从上述内容可知,为实现同步型交流伺服电动机的调速控制,须改变其供电频率,所以变频器是永磁式交流伺服电动机调速的关键部件。

交流伺服电动机调速种类很多,应用最多的是变频调速,其主要部件是能为交流伺服电动机提供变频电源的变频器。变频器的作用是将 50 Hz 的交流电变换成频率连续可调(0~400 Hz)的交流电。

(2)变频器的类型。变频器可分为交-交型和交-直-交型两类。前者称为直接式变频器,后者称为带直流环节的间接式变频器。

①交-交型变频器。交-交型变频器的原理如图 1-39 所示,它由两组反并联的变流器 P 组和变流器 N 组成,若 P 组和 N 组轮流向负载 R 供电,则负载上可获得交流输出电压 U_o , U_o 的幅值由各组变流器的控制角 α 决定, U_o 的频率由两组变流器的切换频率决定。它不经过中间环节,把频率固定的交流电直接变换为频率连续可调的交流电,效率高,工作可靠,但频率的变化范围有限。交-交型变频器根据输出电压的波形不同可分为正弦波和方波两类,常用于低频大容量调速。

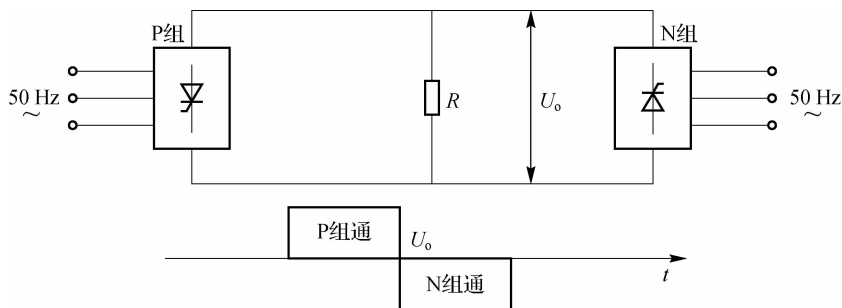


图 1-39 交-交型变频器的工作原理

②交-直-交型变频器。它由顺变器、中间环节和逆变器三部分组成。顺变器的作用是将交流转换为可调直流,作为逆变器的直流供电电源。逆变器是将可调直流电变为调频调压的交流电,采用脉冲宽度调制(PWM)逆变器来完成,逆变器有晶闸管和晶体管之分。目前,数控机床上的交流伺服系统较多地采用晶体管逆变器。脉冲宽度调制的方法有很多,其中正弦波调制(SPWM)方法应用最广泛。

4. SPWM 变频控制器

SPWM 变频器属于交-直-交静止变频装置,它先将 50 Hz 交流电经整流变压器变到所需的电压后,经二极管可控整流和电容滤波,形成恒定直流电压,再送入常用 6 个大功率晶体管构成的逆变器主电路,输出三相频率和电压均可调整的等效于正弦波的脉宽调制波(SPWM 波),拖动三相异步电动机运转。这种变频器结构简单,电网功率因数接近 1,且不受逆变器负载大小的影响,系统动态响应快,输出波形好,使电动机可在近似正弦波的变电压下运行,脉动转矩小,扩展了调速范围,提高了调速性能,所以在数控机床的交流驱动中得到广泛应用。

(1)SPWM 波形与等效正弦波。等效正弦波的 SPWM 波形如图 1-40 所示,SPWM 逆变器用于产生正弦脉宽调制波,其工作原理:把 1 个正弦半波 N 等分,然后把每等份的正弦

曲线与横坐标轴所包围的面积都用 1 个与此面积相等的等高矩形脉冲来代替,这样可得到 N 个等高而不等宽的脉冲序列。它对应着 1 个正弦波的半周,对正负半周都这样处理即可得到相应的 $2N$ 个脉冲,形成与正弦波等效的正弦脉宽调制波。

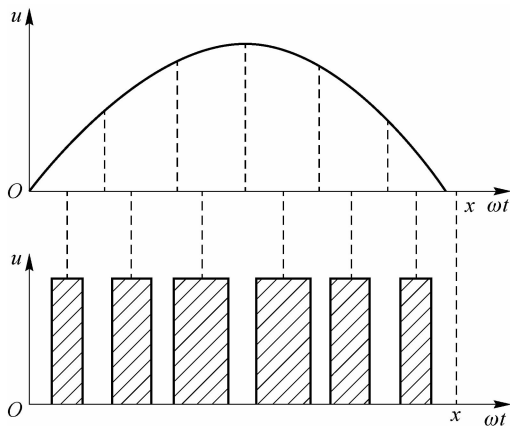


图 1-40 等效正弦波的 SPWM 波形

(2)产生 SPWM 波形的原理。SPWM 波形可通过计算机产生,即对绘定的正弦波用计算机计算出相应脉冲宽度,通过控制电路输出相应波形,或用专门集成电路芯片产生;也可采用模拟式电路,以调制理论为依据产生,其方法是以正弦波为调制波对等腰三角波为载波的信号进行调制。其调制电路仍可采用电压比较放大器。SPWM 波形的产生原理如图 1-41 所示。

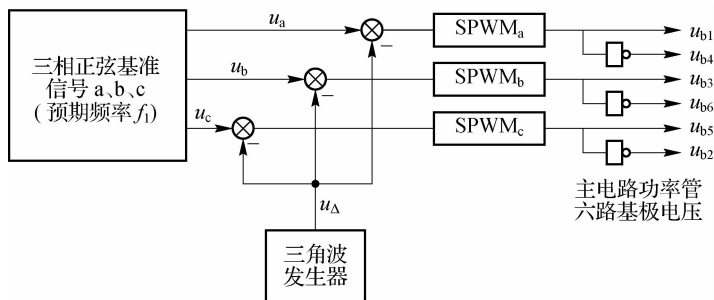


图 1-41 SPWM 波形的产生原理

(3)SPWM 变频器主电路。SPWM 变频器主电路及电动机的线电压波形如图 1-42 所示。图 1-42(a)所示的 $VT_1 \sim VT_6$ 为 6 个大功率晶体管,并各有 1 个二极管与之反并联作为续流。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。按相序要求和频率要求,参考信号振荡器上产生的频率与电压协调控制的三路正弦波信号、等腰三角波发生器的载波信号一同送入电压比较器,产生三路 SPWM 波形,经倒相分路后可得到 6 路 SPWM 信号,加于 $VT_1 \sim VT_6$ 功率晶体管基极,作为驱动控制信号。当逆变器处于双极性工作方式时,可得到图 1-42(b)所示的线电压波形。

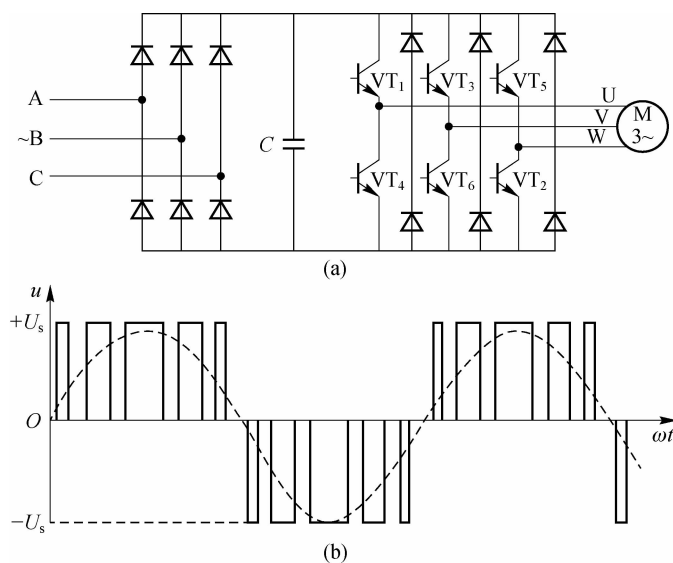


图 1-42 SPWM 变频器主电路及电动机的线电压波形

SPWM 调制有单极性和双极性两种形式,双极性脉宽调制方法的特征是控制信号和载波信号均为双极性信号。在双极性脉宽调制方法中,所使用的正弦波控制信号为变频变幅的三相对称普通正弦波 u_a 、 u_b 、 u_c ,其载波信号 u_t 为双极性三角波,控制信号的正弦波和载波如图 1-43(a)所示。以 U 相为例,其调制规律为:不分正负半周,只要 $u_a > u_t$,就导通 VT₁,封锁 VT₄;只要 $u_a < u_t$,就封锁 VT₁,导通 VT₄。SPWM 调制的输出波形如图 1-43(b)所示。

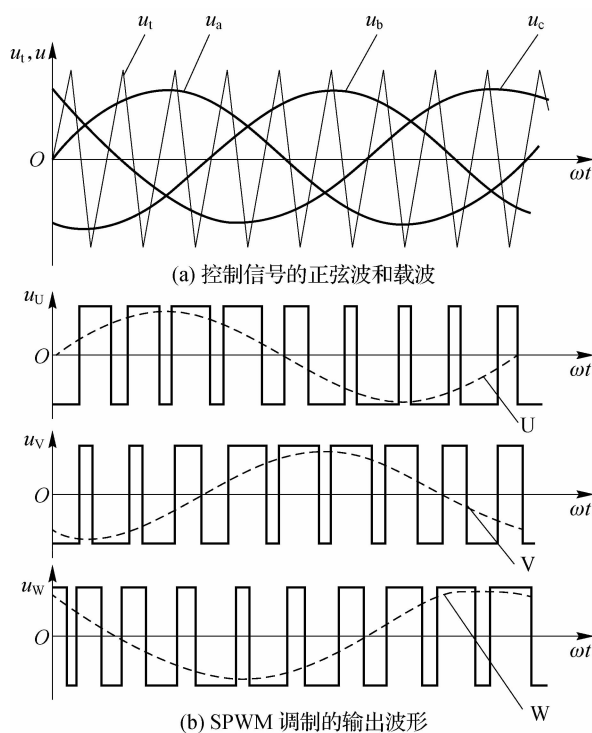


图 1-43 双极性脉宽调制

五、位置控制

位置控制是伺服系统的重要组成部分,是保证位置控制精度的重要环节。就闭环和半闭环伺服系统而言,位置控制的实质是位置随动控制,其控制原理如图 1-44 所示。

根据负反馈控制原理, $P_e = P_c - P_f$ 。位置控制主要解决两个问题:一是位置比较实现的方式;二是位置偏差转化为速度控制指令的方式。其中,位置比较实现的方式有脉冲比较法、相位比较法和幅值比较法。

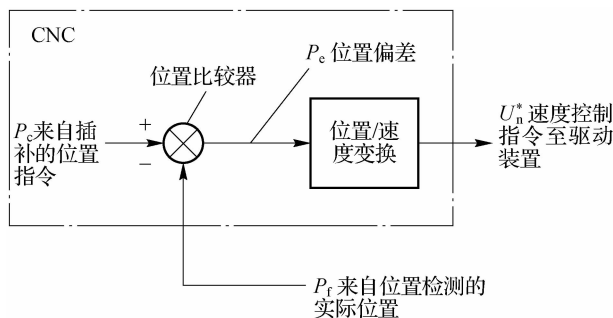


图 1-44 位置控制原理

1. 脉冲比较法

(1)脉冲比较器的组成。脉冲比较法是将 P_c 的脉冲信号与 P_f 的脉冲信号相比较,得到脉冲偏差信号 P_e 。能产生脉冲信号的位置检测装置有光栅、光电编码器等,比较器为由加减可逆计数器组成的数字脉冲比较器。脉冲比较器的组成如图 1-45 所示。

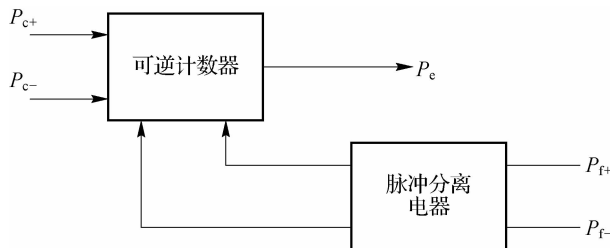


图 1-45 脉冲比较器的组成

P_{c+} 、 P_{c-} 和 P_{f+} 、 P_{f-} 的定义如表 1-2 所示。

表 1-2 P_c 、 P_f 的定义

位置指令	含 义	可逆计数器运算	位置指令	含 义	可逆计数器运算
P_{c+}	正向运动指令	+	P_{f+}	正向位置反馈	+
P_{c-}	反向运动指令	-	P_{f-}	反向位置反馈	-

(2)脉冲比较法的工作原理。当数控系统要求工作台向一个方向进给时,经插补运算得到一系列进给脉冲便作为指令脉冲,其数量代表了工作台的指令进给量,频率代表了工作台的进给速度,方向代表了工作台的进给方向。以增量式光电编码器为例,当光电编码器与伺服电动机(滚珠丝杠)直联时,随着伺服电动机的转动,其产生序列脉冲输出,脉冲的频率将

随着转速的快慢而升降。

①假设工作台处于静止状态,则指令脉冲 $P_c=0$,这时反馈脉冲 $P_f=0$, $P_e=0$,伺服电动机的速度给定为 0,工作台继续保持静止不动。

②现有正向指令 $P_{c+}=2$,可逆计数器加 2,在工作台尚未移动之前,反馈脉冲 $P_{f+}=0$,可逆计数器输出 $P_e=P_{c+}-P_{f+}=2-0=2>0$,经转换,速度指令为正,伺服电动机正转,工作台正向运动。

③工作台正向运动,即有反馈脉冲 P_{f+} 产生,当 $P_{f+}=1$ 时,可逆计数器减 1,此时 $P_e=P_{c+}-P_{f+}=2-1=1>0$,伺服电动机仍正转,工作台正向进给。

④当 $P_{f+}=2$ 时, $P_e=P_{c+}-P_{f+}=2-2=0$,速度指令为零,伺服电动机停转,工作台停止在位置指令所要求的位置。

当指令脉冲为反向 P_{c-} 时,伺服电动机的控制过程与正向时相同,只是 $P_e<0$,工作台反向进给。

脉冲分离电路的作用是当加、减脉冲先后分别到来时,各自按预定的要求经加法计数端或减法计数端进入可逆计数器。若加、减脉冲同时到来,则该电路保证先做加法计数,然后做减法计数,这样可保证两路计数脉冲均不会丢失。

当采用绝对式编码器时,通常情况下,先将位置检测的代码反馈信号经数码-数字转换,变成数字脉冲信号,然后进行脉冲比较。

2. 相位比较法

(1)感应同步器相位控制原理。若位置检测装置采用旋转变压器感应相位工作状态,则位置控制为相位比较法。图 1-46 所示为感应同步器相位控制原理框图。

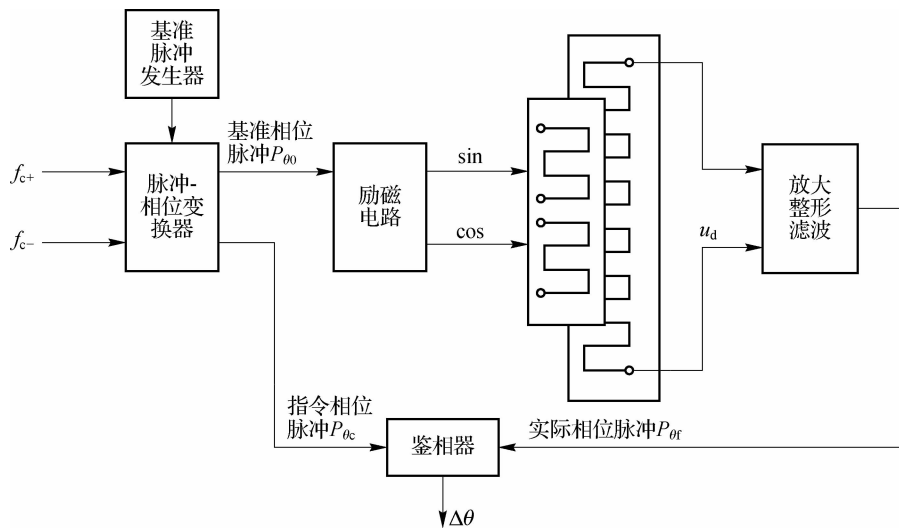


图 1-46 感应同步器相位控制原理框图

感应同步器工作时,感应电压 $u_d = KU_m \sin(\omega t - \theta)$, 其中, $\theta = 2\pi X/\tau$, τ 为时间常数。相位比较的实质不是脉冲数量上的比较,而是脉冲相位之间的比较,如超前或滞后多少。实现相位比较的比较器为鉴相器。

由于旋转变压器、感应同步器和磁栅等检测信号为电压模拟信号,同时这些装置还有励

磁信号,因而相位比较首先要解决信号处理的问题,即怎样形成指令相位脉冲 $P_{\theta c}$ 和实际相位脉冲 $P_{\theta f}$ 。

(2)相位比较法的工作原理。脉冲-相位变换器又称脉冲调相器,其作用有两个:一是通过对基准脉冲进行分频,产生基准相位脉冲 $P_{\theta 0}$,由该脉冲形成的正、余弦励磁绕组的励磁电压频率与 $P_{\theta 0}$ 频率相同, u_d 的相位 θ 随着工作台的移动,相对于基准相位 θ_0 有超前或滞后;二是通过对指令脉冲 P_{c+} 、 P_{c-} 的加减,再通过分频产生相位超前或滞后于 $P_{\theta 0}$ 的指令相位脉冲 $P_{\theta c}$ 。

由于指令相位脉冲 $P_{\theta c}$ 的相位 θ_c 和实际相位脉冲 $P_{\theta f}$ 的相位 θ_f 均以基准相位脉冲 $P_{\theta 0}$ 的相位 θ_0 为基准,因而 θ_c 和 θ_f 通过鉴相器获得相位差值(超前或滞后关系)。图 1-47 所示为相位比较的波形。

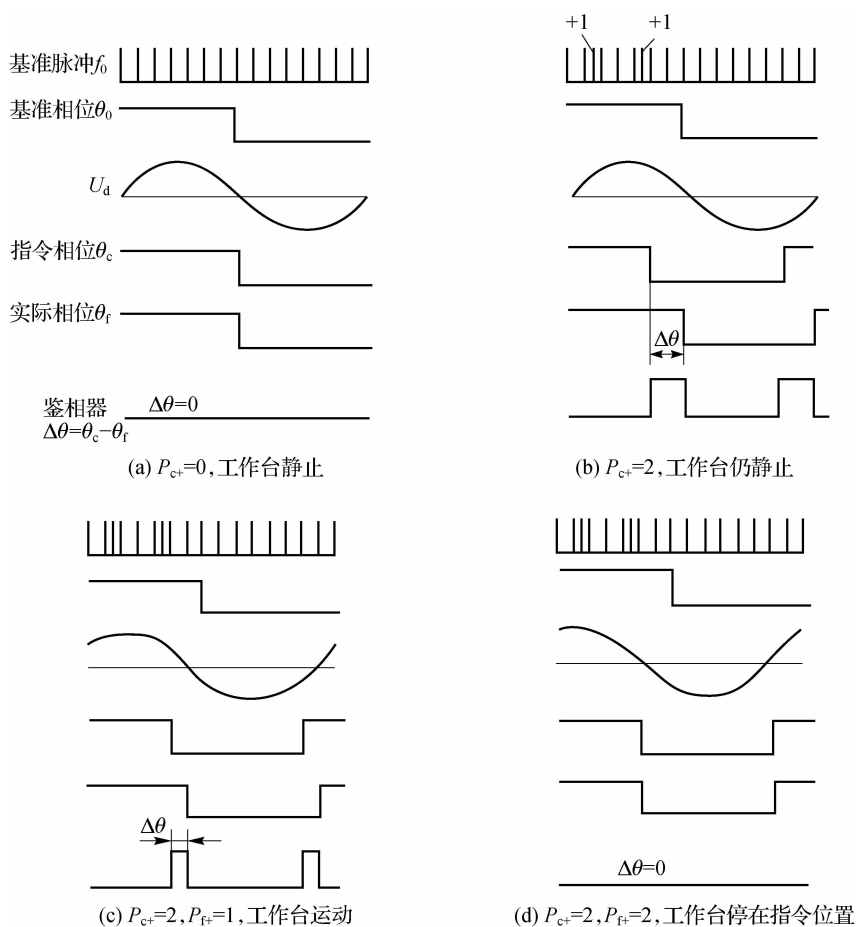


图 1-47 相位比较的波形

①当无进给指令时,即 $P_{c+}=0$,工作台静止,指令相位 θ_c 与基准相位 θ_0 同相位;同时,因工作台静止无反馈,故实际相位 θ_f 也与基准相位 θ_0 同相位,经鉴相器输出 $\Delta\theta=0$,则速度控制信号为零,伺服电动机不转,工作台静止,如图 1-47(a)所示。

②有正向进给指令, $P_{c+}=2$,在指令获得瞬时,工作台仍静止。此时,指令相位 θ_c 超前基准相位 θ_0 ,但实际相位 θ_f 保持不变,经鉴相器输出 $\Delta\theta>0$,速度控制信号大于零,伺服电动机

机正转,工作台正向运动,如图 1-47(b)所示。

③随着工作台的正向移动,有反馈信号产生,由此产生的实际相位 θ_f 超前基准相位 θ_0 ,但 θ_c 仍超前 θ_f ,经鉴相器输出 $\Delta\theta>0$,速度控制信号仍大于零,伺服电动机正转,工作台仍正向移动,如图 1-47(c)所示。

④随着工作台的继续正向移动,实际相位 θ_f 超前基准相位 θ_0 的数值增加,当 $\theta_c=\theta_f$ 时,经鉴相器输出 $\Delta\theta=0$,速度控制信号为零,伺服电动机停转,工作台停止在指令所要求的位置上,如图 1-47(d)所示。

当进给为反向指令时,相位比较同正向进给类似。所不同的是,指令脉冲相对于基准脉冲为减脉冲,故指令相位 θ_c 相对基准相位 θ_0 为滞后;同时,实际相位 θ_f 相对基准相位 θ_0 也滞后,经鉴相器比较后所得的速度指令信号为负,伺服电动机反转,工作台反向移动至指令位置。

鉴相器的输出信号通常为脉宽调制波,须经低通滤波器滤去高频谐波,变换为平滑的电压信号,作为速度控制信号。同时,鉴相器还必须对超前和滞后做出判别,使得速度控制信号 U_n^* 在正向指令时为正,在反向指令时为负。

一个脉冲相当于多少相位增量取决于脉冲-相位变换器中的分频系数 N 和脉冲当量。若感应同步器一个节距为 2 mm(相当于 360° 电角度),脉冲当量为 0.001 mm/脉冲,则相位增量为 $0.001/2 \times 360^\circ = 0.18^\circ/\text{脉冲}$,即一个脉冲相当于 0.18° 的相位移,所以需要将一个节距分为 2 000 等份,即分频系数 $N=2\,000$ 。

在感应同步器中,相位角 θ 与直线位移 X 成正比,当采用旋转变压器时,相位角 θ 即为角位移本身。

3. 幅值比较法

(1)幅值比较器的组成。当位置检测装置采用旋转变压器或感应同步器,且工作在幅值工作状态时,位置比较为幅值比较控制。图 1-48 所示为幅值比较器的组成。

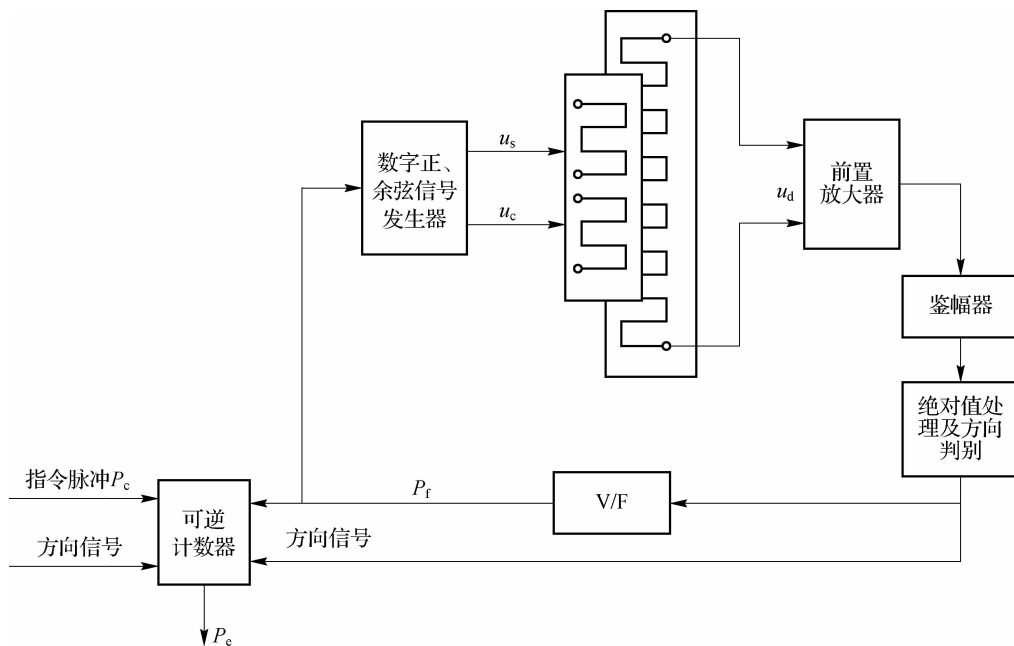


图 1-48 幅值比较器的组成

(2)幅值比较法的工作原理。感应同步器工作在幅值工作方式时,感应电压 $u_d = KU_m \frac{2\pi\Delta X}{\tau} \sin \omega t$ 。在幅值工作方程式中,每当改变一个 X 的位移增量,就有感应电压 u_d 产生,当 u_d 超过某一预先整定的门槛电平时,就产生脉冲信号,该脉冲作为反馈检测脉冲 P_f ,与指令脉冲 P_c 比较得到偏差脉冲 P_e ,经转换变为速度控制信号。同时为了使电气设定角 θ_1 跟随位移角 θ 变化,用脉冲信号 P_f 来修正励磁信号 u_{1s} 、 u_{1c} ,使感应电压重新降低到门槛电平以下。这样,通过不断的修正、比较,实现对位置的控制。由此,幅值比较的实质仍是脉冲比较,只不过反馈脉冲是通过门槛电平获得的。

如图 1-48 所示,感应同步器定尺绕组输出的感应电压 u_d 经前置放大器整形放大后,送鉴幅器,产生正比于 u_d 幅值的门槛电平信号。门槛电平的整定根据脉冲当量确定,例如,当脉冲当量为 0.01 mm 时,门槛值整定在 0.01 mm 的数值上,每产生 0.01 mm 的位移量,经放大刚好达到门槛电平。一旦感应同步器上输出的感应电压超过门槛值,便会产生门槛电平。该电平信号又反映了工作台的移动方向,正向移动时为正,反向移动时为负。鉴幅器输出的电平信号经绝对值及方向判别电路处理后,将正、反方向移动的电平信号统一为正信号,正、反移动方向用高、低电平来表示。门槛电平经电压-频率变换器 V/F 产生正比于门槛电平的脉冲,该脉冲即为反馈脉冲 P_f 。反馈脉冲 P_f 经可逆计数器与指令脉冲 P_c 比较,得到偏差脉冲 P_e ,经变换形成速度控制信号。至于 P_c 和 P_f 的加或减要根据指令脉冲的方向信号和反馈脉冲的方向信号决定,方法同前述的脉冲比较法。幅值比较控制信号变换如图 1-49(a)所示。

为了使 θ_1 跟随 θ 的变化,可通过数字正、余弦信号发生器产生正、余弦励磁电压。数字正、余弦信号发生器供给滑尺的正、余弦的励磁信号不是正弦电压,而是脉宽可调的方波脉冲,它将 θ_1 与励磁脉冲的宽度联系起来,如图 1-49(b)所示。对于这样一组方波信号,根据傅里叶级数可以由一组波形组成,其中基波信号 $u_s = 4U/\pi \sin \theta_1 \sin \omega t$, $u_c = 4U/\pi \cos \theta_1 \sin \omega t$ 。如果设定 $U_m = 4U/\pi$,那么 u_s 、 u_c 等同于幅值工作方式时的励磁电压。

总之,对感应同步器而言,在幅值比较时,每移动一个位移量 ΔX ,通过变换即产生一定的反馈脉冲 P_f ,工作台不断移动, P_f 不断产生,经脉冲比较得到偏差脉冲 P_e 。直至指令脉冲 P_c 等于反馈脉冲 P_f , P_e 为 0,工作台才停止在指令要求的位置上。

对旋转变压器而言,在幅值比较时,每转过一个角位移增量 $\Delta\theta$,即产生一定的反馈脉冲 P_f ,其他同感应同步器。

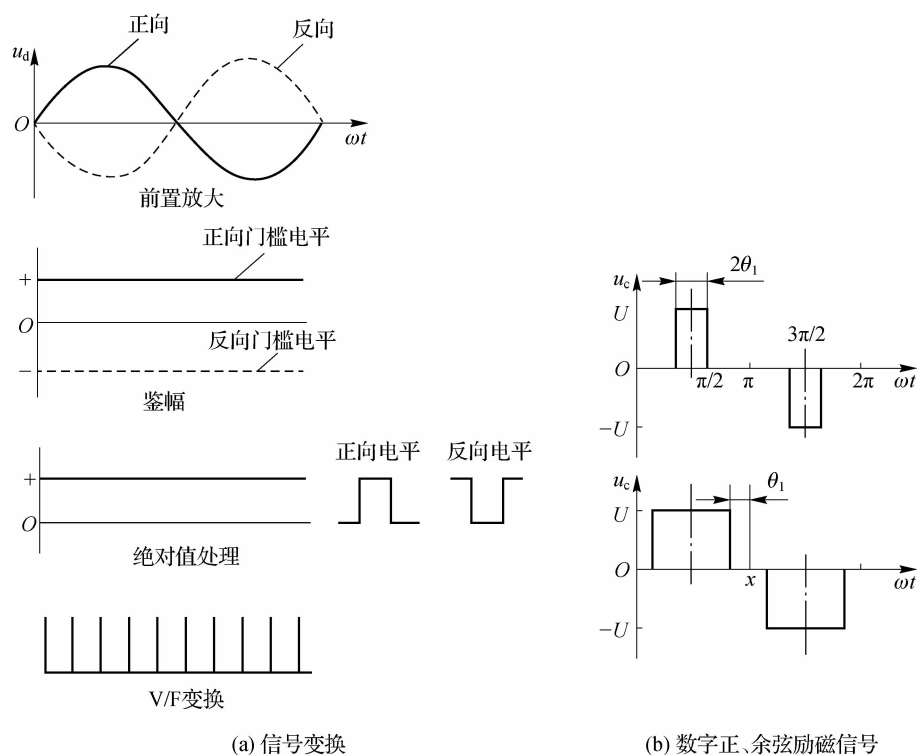


图 1-49 幅值比较控制波形

项目实施

步进电动机驱动系统的调试及使用

实施目标

- (1) 掌握步进电动机的运行原理及驱动系统的连接；
- (2) 掌握步进电动机的性能特性及其与驱动器的关系；
- (3) 了解步进电动机的驱动系统的加速、减速特性。

工具、仪器和设备

- (1) 57HS13 型两相混合式步进电动机 1 台；
- (2) MS535 型两相双极性细分驱动器 1 台；
- (3) CZ-0.5 型磁粉制动器(5 N·m) 1 台；
- (4) 光电编码器 1 只；
- (5) HED-21S 数控系统 1 套；
- (6) 可安装于步进电动机轴上的惯量圆盘。

实施内容

(1)把步进电动机安装于负载测试台上,松开与磁粉制动器连接的联轴器,连接光电编码器与步进电动机。将 57HS13 型步进电动机、MS535 型步进驱动器和 HED-21S 数控系统连接起来,如图 1-50 所示。

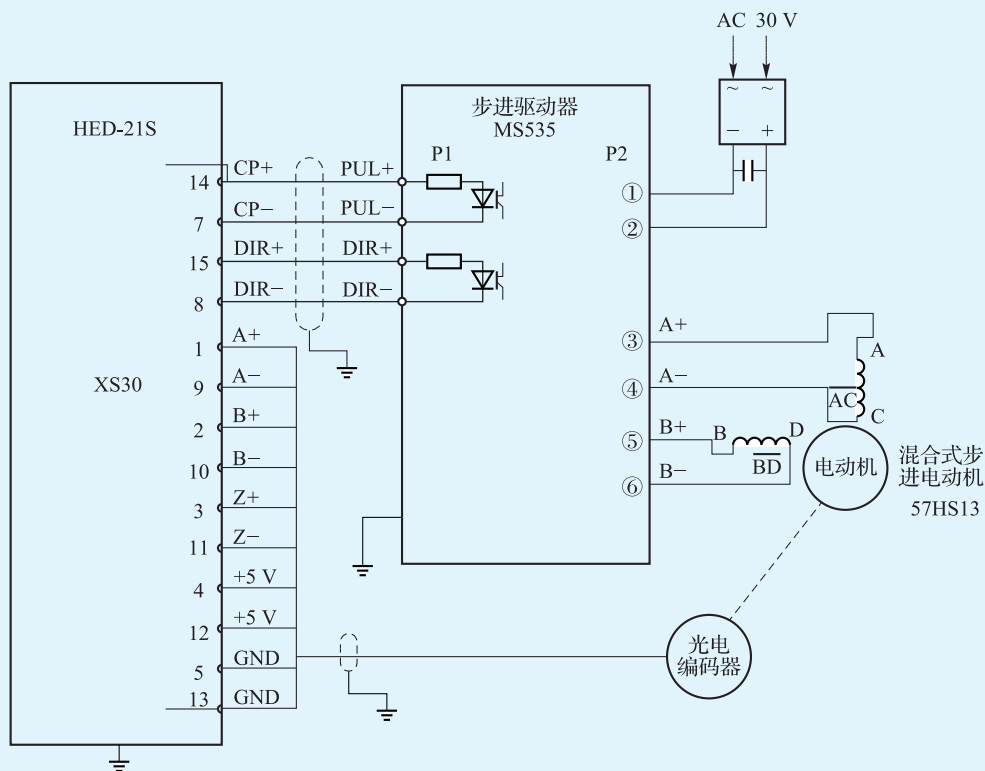


图 1-50 57HS13 型步进电动机、MS535 型步进驱动器和 HED-21S 型数控系统的连接

(2)HED-21S 数控系统参数设置。HED-21S 数控系统坐标轴参数如表 1-3 所示。HED-21S 数控系统硬件配置参数如表 1-4 所示。

表 1-3 HED-21S 数控系统坐标轴参数

参数名	参数值
伺服驱动型号	46
伺服驱动器部件号	0
最大跟踪误差	0
电动机每转脉冲数	400
伺服内部参数[0]	8
伺服内部参数[1]	0
伺服内部参数[2]	0
伺服内部参数[3]、[4]、[5]	0

续表

参数名	参数值
快移加、减速时间常数	0
快移加速度时间常数	0
加工加、减速时间常数	0
加工加速度时间常数	0

表 1-4 HED-21S 数控系统硬件配置参数

参数名	型 号	标 志	地 址	配置[0]	配置[1]
部件 0	5301	46	0	0	0

(3)MS535 步进电动机驱动器参数设置。按驱动器前面板表格,将细分数设置为 2,将电动机电流设置为 57HS13 步进电动机的额定电流。

(4)在线路和电源检查无误后,通电试运行,以手动或手摇脉冲发生器方式发送脉冲,控制电动机慢速转动和正、反转,在没有堵转等异常情况下,逐渐提高电动机转速。

(5)测定步进电动机的步距角。以手动方式发送单脉冲,从数控系统显示屏上记录工件实际坐标值,计算步进电动机的步距角 α ,即:

$$\alpha=\frac{\text{实际坐标值}\times360^{\circ}}{\text{脉冲数}(n)\times4\times\text{光电编码器线数}(n>20)}\left(\text{取最接近数值}\frac{360^{\circ}}{\alpha}\text{的整数}\right)$$

计算每步脉冲的实际坐标增量值,按下式换算成实际步距角 α_n ,即

$$\alpha_n=\frac{\text{单脉冲实际坐标增量值}\times360^{\circ}}{4\times\text{光电编码器线数}}$$

由 α 和 α_n 可算出步距精度 $\Delta\alpha,\Delta\alpha=(\alpha_n-\alpha)/\alpha$,将记录和计算数据填入表 1-5 中。

表 1-5 步距精度

脉 冲 列	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
坐标值/mm										
实际步距角/(°)										
步距精度/%										
脉 冲 列	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
坐标值/mm										
实际步距角/(°)										
步距精度/%										

(6)测定步进电动机的静转矩特性。步进电动机处于锁定状态(不发送脉冲给驱动器)时,用测力扳手或悬挂砝码给步进电动机施加外加转矩 T ,并读取对应的转子轴偏转角 θ (根据记录的工件实际坐标值换算),记录一组转矩 T 与偏转角 θ 的数据,直至最大转矩点。根据 $K=dT/d\theta=\Delta T/\Delta\theta$ 计算步进电动机的静态刚度 K 。

注意:在锁定状态时,驱动器电流自动减半,实际静态刚度还可能增大 1 倍。将记录和计算的数据填入表 1-6 中。

表 1-6 步进电动机静态刚度

坐标值/mm								
实际步距角/(°)								
转矩值/(N·m)								
静态刚度/[N·m(°)]								

思考与练习

- (1) 叙述数控车床的特点、分类、组成及布局。
- (2) 叙述数控车床的加工原理。
- (3) 数控车床主传动系统的工作原理是什么？
- (4) 数控车床进给传动系统的工作原理是什么？
- (5) 叙述步进电动机的组成和工作原理。
- (6) 步进驱动电路的工作原理是什么？