

现代 交流伺服系统

秦忆等编著

XIANDAI
JIAO LIU CHIFU XITONG
QINYI DENG BIA NZHU

● 华中理工大学出版社



73.826
448

现代交流伺服系统

秦 忆
周永鹏 邓忠华
程善美 李叶松
编 著

210097/02

华中理工大学出版社

(鄂)新登字第 10 号

图书在版编目(CIP)数据

现代交流伺服系统/秦 忆等编著

武汉:华中理工大学出版社, 1995 年 1 月

ISBN 7-5609-1071-8

I. 现…

II. 秦…

III. 伺服系统-交流

IV. TP 275

现代交流伺服系统

秦 忆等编著

责任编辑 黄以铭

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山 邮编:430074)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

开本:787/1092 1/16 印张:9.25 字数:222 000

1995 年 1 月第 1 版 1995 年 1 月第 1 次印刷

印数:1-2 000

ISBN 7-5609-1071-8/TP·130

定价:5.38 元

内 容 提 要

本书是在编著者们长期从事直流、交流伺服驱动系统研究的基础上编著而成的。书中详细论述了常用伺服驱动系统的基本问题,介绍了现代交流伺服驱动系统的基本特征;讨论分析了以 16 位单片微机为控制 CPU 的现代交流伺服驱动系统的组成、软件化控制方法以及控制参数的设计计算;还介绍了现代交流伺服驱动系统的部分辅助功能;最后是从机械传动到电气控制的综合计算示例。书中内容理论联系实际,叙述简练,重点突出,既适合于大专院校本科或研究生阅读,也适合于工矿企业、设计研究单位的有关科技人员阅读。

前言

常用的以直流伺服电动机为控制对象的直流伺服驱动系统,几十年来一直占据着“伺服驱动”的主导地位,发挥了极其重要的作用,也为广大从事自动化工作的科技人员所熟悉。但近十年来,由于高性能的16位单片微机以及高速功率开关器件的出现和应用,使得过去难以想象能赋予实现的、以交流伺服电动机(永磁同步伺服电动机和异步伺服电动机)为控制对象的交流伺服驱动系统,今天借助于新的控制方法得以实现,且迅速被推广应用,并逐步发展成为“伺服驱动”的主导系统,特别是那些要求高精度、高效率以及高质量加工的场合,交流伺服驱动系统具有独到的使用优势。这就为了解并掌握现代交流伺服驱动系统提供了客观的需要。本书也就是在这样的背景下,依据近十年来的研究成果,贸然抛砖引玉,进行首次编著尝试的。

全书共分六章。第一章,主要介绍常用直流伺服驱动系统的结构、设计计算以及性能指标,目的是为后面各章打下基础。这一章由周永鹏编著。第二章,重点是论述现代交流伺服系统的基本特征,目的在于使读者对现代交流伺服系统有一个整体特征感。这一章,涉及的知识面比较宽。第三章,主要介绍如何由16位单片微机构成软件化控制的现代交流伺服驱动系统。这一章,要求读者有较好的单片微机构、软件知识及部分控制理论知识。这一章由程善美编著。第四章,重点分析讨论以三相永磁同步伺服电动机为执行电动机时系统的动、静态特性分析、研究和设计计算。由李叶松、邓忠华编著。第五章,主要介绍现代交流伺服驱动系统的部分辅助功能,是向更加智能化控制进行的初步介绍。这一章由程善美、李叶松、邓忠华编著。第六章,主要以实例介绍从机械传动到电气控制的有关参数计算。秦忆编著第二章、第六章,并担任全书的主编。

本书的特点是既注意于理论分析,又结合实际,内容新颖,适应性很强。本书既可作为有关专业的教学用书,也可作为从事自动化工作的工程技术人员参考书。

本书编著过程中,得到了陶醒世教授的热心指导,在此表示感谢。

由于编著这类书,实属首次,错误之处,望广大读者予以批评指正。

编著者

1994年8月

raic

目 录

第一章 位置伺服系统的基本问题	(1)
§ 1.1 位置伺服系统的基本结构形式	(1)
一、开环位置伺服系统	(2)
二、半闭环位置伺服系统	(2)
三、全闭环位置伺服系统	(3)
四、混合闭环位置伺服系统	(4)
§ 1.2 位置伺服系统的组成与控制性能指标	(4)
一、数字位置伺服系统	(5)
二、位置伺服系统的性能指标	(8)
§ 1.3 位置伺服控制方法与典型系统	(12)
一、位置调节器	(12)
二、用复合控制提高位置跟踪精度	(15)
三、全硬件位置伺服系统	(18)
四、半软件直流位置伺服系统	(23)
五、软件直流位置伺服系统	(25)
六、全数字直流位置伺服系统	(27)
第二章 现代交流伺服系统的基本特征	(30)
§ 2.1 高性能交流伺服电动机	(30)
一、高性能三相永磁同步伺服电动机	(31)
二、三相异步伺服电动机	(34)
三、伺服电动机的选择及评价因素	(35)
§ 2.2 高分辨率的位置传感器	(37)
一、旋转变压器	(37)
二、磁性编码器	(37)
三、光电编码器	(38)
四、多圈式绝对光电编码器	(39)
§ 2.3 高效率三相逆变电源	(40)
一、逆变器的基本工作原理	(40)
二、逆变器的最低开关工作频率	(44)
三、逆变器的最高开关工作频率	(45)
四、逆变器的控制功能	(45)
五、逆变器的各种数字控制方法	(46)
§ 2.4 多功能微机控制	(48)
§ 2.5 高可靠性设计	(50)

一、可靠性概念	(50)
二、故障回避与容限	(51)
三、功率开关器件的保护	(51)
四、其他保护措施及可靠性设计	(56)
第三章 单片机控制的交流伺服系统	(58)
§ 3.1 16 位单片机及其最小系统	(58)
一、8097BH 单片机的特征	(58)
二、80C196KC 单片机的特征	(58)
三、最小系统	(60)
§ 3.2 反馈信息及其处理	(65)
一、位置反馈信息及其处理	(65)
二、速度反馈信息及其处理	(68)
三、电流反馈信息及其处理	(70)
§ 3.3 比例-积分 (PI) 控制的软件实现	(71)
§ 3.4 单片机控制的交流伺服系统综合实例	(72)
第四章 交流位置伺服系统中控制环节的分析及参数校正	(81)
§ 4.1 三相永磁同步伺服电动机线性化解耦控制	(81)
一、三相永磁同步伺服电动机矢量变换方程式	(8)
二、三相永磁同步伺服电动机矢量解耦控制	(82)
§ 4.2 交流位置伺服系统中各环节的数学模型	(86)
一、三相永磁同步伺服电动机电流解耦控制数学模型	(86)
二、电流检测器的数学模型	(87)
三、三相脉宽调制逆变器的数学模型	(87)
四、速度反馈环节传递函数	(87)
五、电流反馈滤波环节传递函数	(90)
§ 4.3 交流位置伺服系统中电流控制方式的分析	(91)
一、模拟控制方式	(91)
二、数字控制方式	(93)
三、电流控制方式及控制器的选择	(96)
四、电流控制器增益的工程整定	(99)
§ 4.4 交流位置伺服系统中速度控制器的设计	(100)
一、典型的交流伺服系统速度控制特性	(100)
二、光电编码器分辨率和速度控制范围的关系	(101)
三、速度高精度特性分析	(102)
四、速度控制器参数的整定	(104)
五、速度控制器增益的工程选择方法	(107)
§ 4.5 交流位置伺服系统中位置控制的分析	(108)
一、典型的交流伺服系统位置控制特性	(108)
二、数字式复合前馈控制的结构分析	(109)
三、交流伺服系统位置复合前馈控制器的实现	(111)
§ 4.6 交流位置伺服系统控制器参数设计举例	(114)

第五章 交流伺服系统的辅助功能	(117)
§ 5.1 电子齿轮	(117)
§ 5.2 自诊断	(118)
一、EPROM 的诊断	(118)
二、RAM 的诊断	(118)
三、EEPROM 的诊断	(119)
四、光电编码器接线的诊断	(120)
五、三相永磁同步伺服电动机转子磁极位置信号的诊断	(121)
§ 5.3 自调整及识别功能	(121)
第六章 负载及电动机参数综合计算	(128)
§ 6.1 定位精度及设计注意点	(128)
§ 6.2 负载及电动机参数综合计算举例	(132)
一、不同运动方式时负载转矩的计算	(132)
二、综合参数计算举例	(133)
参考文献	(140)

第一章 位置伺服系统的基本问题

以快速、精确跟踪为主要目标的位置伺服系统,是现代高科技各领域中不可缺少、应用十分广泛的一种自动控制系统。在历经开环、电气-液压、直流电气伺服的发展历程之后,现已进入交流电气伺服迅猛发展的时代。本章首先从直流位置伺服系统出发,阐述系统的基本结构和伺服性能指标,着重讨论半闭环结构直流位置伺服系统的组成、控制原理和控制方法。它们是后续章节进一步讨论交流位置伺服系统的基础。

§ 1.1 位置伺服系统的基本结构形式

随着现代科学技术的飞速发展,特别是微电子、计算机、电力半导体和电机制造技术取得的巨大技术进步,使得位置伺服这样一种扮演重要支柱技术角色的自动控制系统,在许多高科技领域得到了非常广泛的应用,如激光加工、机器人、数控机床、大规模集成电路制造、办公自动化设备、雷达和各种军用武器随动系统、以及柔性制造系统(FMS——Flexible Manufacturing System)等等。它的控制性能,对这些高科技的发展正起着越来越关键的作用。

位置伺服系统是一种与普通电动机调速系统有着紧密联系但又有明显不同的系统。一般说来,人们对调速系统的要求是希望有足够的调速范围、稳速精度和快且平稳的启、制动性能。系统工作时,都是以一定的速度精度、稳定在调速范围内某一固定的转速上运行的,系统的主要控制目标,是使转速尽量不受负载变化、电源电压波动及环境温度变化等干扰因素的影响。而位置伺服系统,一般是以足够的位置控制精度(定位精度)、位置跟踪精度(位置跟踪误差)和足够快的跟踪速度来作为它的主要控制目标。系统运行时要求能以一定的精度随时跟踪指令的变化,因而系统中伺服电动机的运行速度常常是不断变化的。故伺服系统在跟踪性能方面的要求一般要比普通调速系统高且严格得多。

伺服(servo)这一术语,源于拉丁语 servus,是“奴隶(slave)”或“奴仆(servant)”的意思。它含有使机械像奴隶一样忠实地按照命令动作的意义。因而,“以物体的位置、方位、姿势等作为被控量,使之能跟踪目标值任意变化的控制系统”被定义为位置伺服系统(JIS——日本工业标准定义)。

一个位置伺服系统,仅当它的指令形式呈斜坡函数形式,即每单位时间移动的距离或转过的角度相等时,其运行与控制特性才与一个普通调速系统相似。

从广义上讲,位置伺服系统包括机械执行机构和电气自动控制两大组成部分。例如,一个数控机床的进给驱动位置伺服系统,它的机械执行机构常包括工作台(或刀架)、滚珠丝杠、导轨和减速齿轮等等;电气自动控制部分则包括交流或直流伺服电动机、驱动功率放大器、反馈检测传感器和控制调节器等等。根据应用场合和对控制性能要求的不同,位置伺服系统具有多种不同的结构形式。按照系统的构造特点,大体上可以将其分为四种基本结构类型。下面,以

数控机床中常用的进给驱动位置伺服系统为例,来说明这四种基本结构形式的特点和一般构成方法。

一、开环位置伺服系统

开环位置伺服系统是一种没有位置反馈的位置控制系统。它的伺服机构按照指令装置发来的位置移动指令,驱动机械作相应的运动,但并不对机械的实际位移量或转角进行检测,从而也无法将其与指令值进行比较。它的位置控制精度只能靠伺服机构本身的传动精度来保证。

早期简易型数控机床的进给驱动位置伺服系统,常采用步进电机为主要部件的开环位置

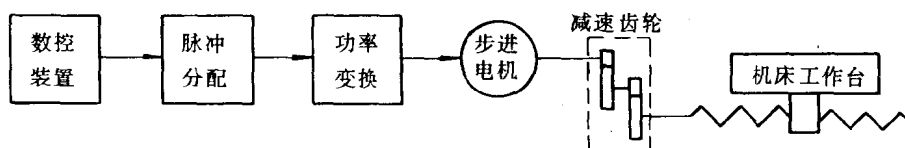


图 1-1 开环位置伺服系统

伺服系统,结构如图 1-1 所示。步进电机实质上是一种同步电动机,每当数控装置向步进电机发出一个进给脉冲指令的时候,步进电机的转子就在此脉冲所产生的同步转矩作用下旋转一个固定的角度,通常称之为步距角,因此它是一种将电脉冲变为角位移或线位移的电磁装置。其特点是定位精度高,但转换速度不快,约在毫秒数量级。步进电机步距角的大小与它的结构和控制方式有关,最常用的一般为 1.5° 。步进电机再经过减速齿轮带动丝杠旋转,通过丝杠、螺母的相对转动,最后形成机床工作台的运动。这样,工作台的位移量将与进给指令脉冲的数量成正比,而工作台移动的速度将与进给指令脉冲的频率,即单位时间的脉冲量成正比。显然,这种开环位置伺服系统的位置控制精度完全依赖于步进电机的步距角精度和齿轮、丝杠等传动部件的精度。若传动链存在误差,系统是无法随时进行修正的。加上受步进电机本身力矩频率特性的制约,系统的进给移动速度不能很高,所以这种开环位置伺服系统仅适用于那些对位置控制精度要求不高、位移速度较低的简易型数控系统。它的位置控制精度一般在 0.01mm 左右。但由于它结构简单、造价低、调试容易,所以仍被广泛用于各种低档的位置控制系统。开环位置伺服系统是最早被采用的伺服系统,其系统组成与工作原理在许多教材和专著中均有详尽的描述,此处不再详述。

二、半闭环位置伺服系统

与开环位置伺服系统不同,半闭环位置伺服系统是具有位置检测和反馈的闭环控制系统。它的位置检测器与伺服电动机同轴相连,可通过它直接测出电动机轴旋转的角位移,进而推知当前执行机械(如机床工作台)的实际位置。由于位置检测器不是直接装在执行机械上,位置闭环只能控制到电机轴为止,所以被称之为半闭环,它只能间接地检知当前的位置信息,且也难以随时修正、消除因电动机轴后传动链误差引起的位置误差。数控机床进给驱动最常用的半闭环位置伺服系统如图 1-2 所示。半闭环位置伺服系统中一般采用伺服电动机(交流伺服电动机或直流伺服电动机)作执行电动机,与普通电动机相比,它具有调速范围宽和短时输出力矩大的特点。这样,系统设计时不必再为保证低速性能和增大力矩而添置减速齿轮,而可将电动机轴与丝杆(一般采用滚珠丝杆)直接连接,使传动链误差和非线性误差(齿轮间隙)大大减小,在机床导轨几何精度和润滑良好时,一般可以达到微米数量级的位置控制精度。另外,系统还可

以采用节距误差补偿和间隙补偿的方法来提高控制精度。

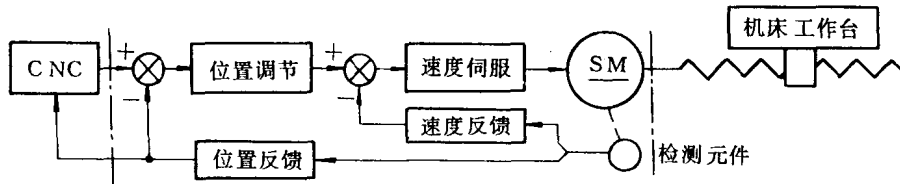


图 1-2 半闭环位置伺服系统

所谓节距误差补偿(又称螺距误差补偿)是按照滚珠丝杠的每一个节距,预先把半闭环间接测量结果与机械实际位移间的误差测出来,根据控制要求均匀取出一定数量的补偿点记入存储器,系统运行时,当机械运动到某一位置时就取出相应的值来对指令值加以修正以减小或消除实际位置误差。

所谓间隙补偿(又称反转误差补偿),是当机械运动方向改变时,由于滚珠丝杠与丝杠螺母间存在传动间隙,为使工作台反向运动,电动机必须在反转时首先带动滚珠丝杠空转一定角度,才能使丝杠与螺母贴合驱动工作台,这样一来,就会使工作台反向运动时的实际位移量小于指令值,产生反转误差。这种由传动间隙引起的反转误差在整个行程范围内一般是一定的,所以,只要在机械运动方向发生改变时,在指令值中再附加上相当于间隙量的补偿指令,即可有效地消除反转误差。

半闭环位置伺服系统在它的闭环中非线性因素少,容易整定,还可以比较方便地通过补偿来提高位置控制精度,此外,半闭环的结构使它的执行机械与电气自动控制部分相对独立,系统的通用性增强,因而这种结构是当前国内外数控机床进给驱动位置伺服系统中最普遍采用的方案。

但严格说来,反转间隙量会随机床工作台上工件的重量和安装位置而发生变化,节距误差也会因环境温度、润滑和机械磨损而发生变化。重型机床中一般只能采用齿条、齿轮传动,半闭环位置控制的精度就更难保证。为了达到更好的控制效果,人们自然提出了直接对工作台实际位置进行闭环控制的结构方案。

三、全闭环位置伺服系统

全闭环位置伺服系统典型构成方法如图 1-3 所示。它将位置检测器件直接安装在机床工作台上,从而可以获取工作台实际位置的精确信息,通过反馈闭环实现高精度的位置控制。从

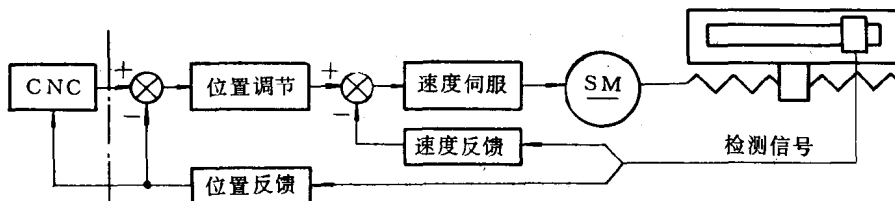


图 1-3 全闭环位置伺服系统

理论上说,这是一种最理想的位置伺服控制方案。但是,在实际的数控机床系统中却极少采用这种全闭环结构方案。这主要是当采用全闭环时,机床本身的机械传动链也被包含在位置闭环中,伺服的电气自动控制部分和执行机械不再相对独立,传动的间隙、摩擦特性的非线性、传动链的刚性等都会影响控制系统的稳定,使系统容易产生机电共振和低速爬行。同时,工作台

上的负载变化也会对系统的摩擦特性、机械惯量等产生影响,给系统的整定造成困难。此外,由于机床的一部分被包含在位置闭环内,位置控制调节器的设计就不得不考虑这部分机械的传输特性。机床不同,被包含在位置闭环中的那部分机械的结构、特性往往也各有差异,这就给全闭环位置伺服系统的通用性设计带来了困难,也不利于降低成本。

四、混合闭环位置伺服系统

对有的执行机械(如重型机床工作台),位置伺服系统采用半闭环结构虽然容易整定,但很难补偿其机械传动部分引起的位置误差,使位置控制精度不能达到要求的指标;采用全闭环结构系统又很难整定,系统闭环后因环内多种非线性因素诱发的振荡很难消除。于是,人们提出一种混合闭环结构的位置伺服系统方案,如图 1-4 所示。

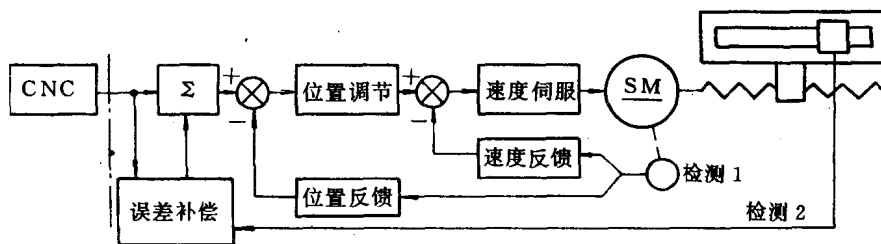


图 1-4 混合闭环位置伺服系统

系统中同时存在半闭环和全闭环。系统工作时,半闭环起主要控制作用。由于半闭环中电气自动控制部分与执行机械相对独立,可以采用较高的位置增益,使系统易整定、响应快、跟踪误差小;而全闭环只用于稳态误差补偿,位置增益可选得较低以保证系统的稳定性。两者相结合可最后获得较高的位置控制精度和跟踪速度。但由于系统中同时存在两个闭环,使系统的控制复杂程度大大增加,它们之间的配合、增益调整等都必须仔细整定,位置伺服系统也因之不再具有通用性。

在位置伺服系统的上述四种基本结构形式中,半闭环结构是当前应用最为广泛的结构。并且由于它的电气自动控制部分与机械部分相对独立,可以根据机械惯量和负载情况划分为不同的等级,独立地对其电气部分进行通用化设计,因此,从狭义上讲,人们也习惯地把在半闭环结构中位置伺服的电气自动控制部分称为位置伺服系统。本教材的后续内容,将侧重对这种意义上的位置伺服系统进行讨论。

§ 1.2 位置伺服系统的组成与控制性能指标

在半闭环位置伺服系统之中,有许多种不同的实际组成方案。早期的系统是全部采用模拟元件构成的。伺服电动机也是一种模拟的执行元件,它的输出速度、转角都是模拟量。在位置与速度的反馈测量器件中,也相应发展出了许多输出为模拟信号的器件,例如测速发电机、自整角机、旋转变压器、感应同步器等等。由它们构成的模拟型位置伺服系统,具有以下特征:

- (1) 抗噪声干扰能力强,一般不会因峰值噪声导致致命的误动作。
- (2) 可用常规示波器、仪表等直接读取信息,容易随时把握系统工作的基本情况。

其主要缺点是：

- (1) 对微弱信号信噪分离困难,很难将控制精度提高到 1% 以上的级别。
- (2) 在零点附近容易受到温度漂移的影响,使位置控制产生零点漂移误差。

模拟系统的这种本质缺陷,使它很难满足高精度位置伺服控制的要求,目前已逐渐为数字伺服系统所取代。

与模拟系统相比,数字伺服系统的特点是：

- (1) 可以通过增加数字信息的位长,达到要求的控制精度。
- (2) 对逻辑电平以下的漂移、噪声不予响应,零点定位精度可以充分得到保证。
- (3) 容易与计算机进行数据交换。

但也存在下述缺点：

- (1) 噪声峰值大于逻辑电平时,对数据最高位和最低位的干扰出错程度是相同的,这就可能对系统产生致命的危害。
- (2) 传送数据时一般须采用前沿陡的矩形波,从而要求系统的数字电路部分具有很宽的通频带。

这样,抑制干扰、防止数据出错,往往成为数字位置伺服系统设计成败的关键。

根据数字化的程度,数字位置伺服系统又分为数字模拟混合式和全数字式两大类型。其中数字模拟混合式还可进一步划分为全硬件、半软件和全软件三种类型。下面仍以数控机床进给驱动位置伺服系统为例来介绍它们的组成方法。

一、数字位置伺服系统

所谓数字位置伺服,是指它的位置闭环控制与调节采用数字技术,即它的位置指令与反馈都不再是模拟信号而改用逻辑电平脉冲信号。

1. 全硬件位置伺服系统

全硬件位置伺服系统属于数字模拟混合式结构,其典型组成方式如图 1-5 所示。

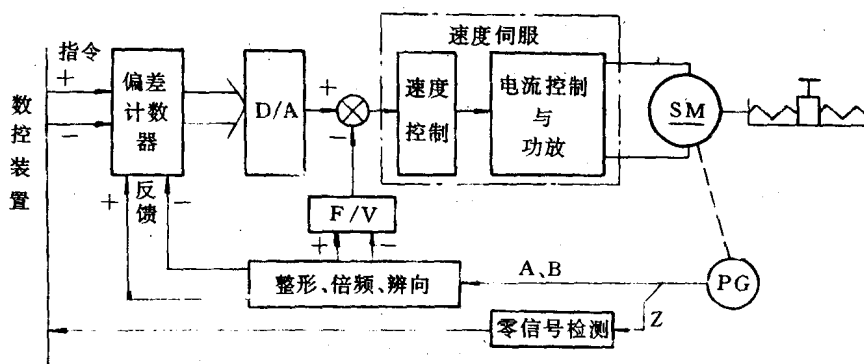


图 1-5 全硬件位置伺服系统

在这种系统中,位置闭环的控制与调节运算主要由偏差计数器(一般为可逆计数器)和数模转换器(D/A)完成,所以又被称为偏差计数-D/A 型位置伺服系统。

图中,SM 为伺服电动机(servo motor),PG 为光电脉冲发生器(optical pulse generator)、又称光电编码器或旋转编码器,F/V 为频率电压变换。

系统的硬件结构,使得它的各调节器参数在机电联调整定之后就被固定下来,不再改变。这对负载惯量变化不大的位置伺服控制,例如数控车床的刀架进给控制,可以获得较高的控制性能指标。而对某些负载惯量变化较大的伺服系统,例如机器人关节驱动位置伺服系统,采用这种参数固定、结构不变的控制系统,很难在整个负载惯量变化范围内都取得同样令人满意的控制效果。

这种位置伺服系统是在采用步进电动机的开环结构位置伺服系统基础上发展起来的,它的控制思想与开环系统十分相似,指令输入也采用脉冲的形式。以脉冲的个数代表位移的距离,例如每一个脉冲代表 0.01mm 或 0.001mm;脉冲的频率代表位移运动的速度;运动方向则用一个逻辑电平信号表示,例如以低电平代表正向运动,高电平代表反向运动。

在数字位置伺服系统中,伺服电动机的运行速度一般不再使用调速系统里常用的单位 r/min,而习惯采用的单位是脉冲/s。并定义每一脉冲所对应的机械直线位移量或角位移量为脉冲当量,量纲为 mm/脉冲、rad/脉冲、密位/脉冲(2π 弧度=6000 密位)。

对硬件型系统,系统脉冲当量与指令装置的位置指令最小设定单位是相同的。系统脉冲当量由位置反馈脉冲当量 ΔL 决定,指令脉冲当量 ΔL_k 由指令最小设定单位决定。即有

$$\Delta L_k = \Delta L$$

在数控系统中,若用 f_p 代表位置环指令脉冲频率,则进给速度 V_0 为

$$\{V_0\}_{\text{m/min}} = (60\{f_p\}_{\text{脉冲/s}}\{\Delta L_k\}_{\text{mm/脉冲}} \times 10^{-3})$$

例如,若 $f_p = 200 \times 10^3$ 脉冲/s, $\Delta L_k = 1 \times 10^{-3}$ mm, 则

$$V_0 = 60 \times 200 \times 10^3 \times 10^{-3} \times 10^{-3} \text{ m/min} = 12 \text{ m/min}$$

硬件位置伺服系统依靠数模转换器(D/A),将位置调节输出的数字量转换成模拟电压作为速度指令信号,提供给速度伺服单元,因此仍然存在影响定位精度的零点漂移问题。

2. 半软件型位置伺服系统

这种系统的位置控制采用含单片微机的软硬件组成,速度伺服仍采用模拟方式,系统组成如图 1-6 所示。

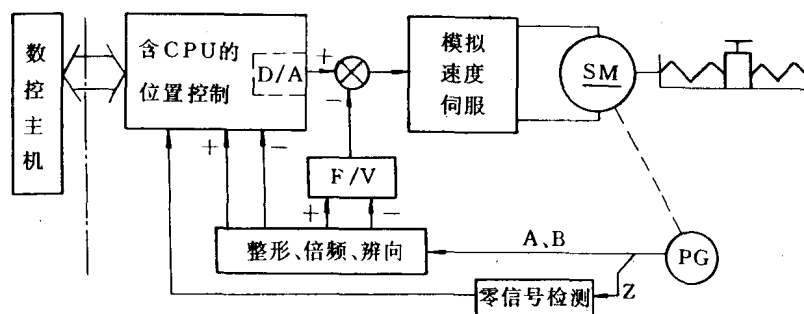


图 1-6 半软件位置伺服系统

单片微机的引入使系统位置控制与调节的灵活性大大增加,不仅调节器参数可以通过指令进行修改、设定,还可方便地运用单片微机的判断功能实行调节器的变结构、变增益控制,进行故障自诊断和报警,按照机械传动要求完成脉冲当量的变换,即所谓“电子齿轮”功能等等,这都是在硬件型系统中难以实现的。

由于采用了单片机,位置伺服的指令形式不单只使用脉冲列,也可用标准的串行或并行通讯来完成。通过制定通讯协议可以实现多种控制功能,例如自动跟踪、原点返回、点动、反馈

信息传送及参数修改等等。指令传送按某一固定的时间间隔进行。这一时间间隔通常与数控主机的插补运算即位置伺服运动轨迹计算的速度(插补算法所需花费的时间)有关,所以也称其为插补周期或主机采样时间,用 T_{so} 表示。位置闭环控制的采样时间 T_{sp} 在时间上与它保持同步,并且 T_{so} 一般为 T_{sp} 的整数倍。每个插补周期 T_{so} 中的位移指令量 x 对应位置伺服系统在与 T_{so} 相等的时间区间内应移动的位置量。对数控机床进给驱动位置伺服系统,进给速度的计算公式为

$$\{V_o\}_{m/min} = 60 \{x\}_{脉冲} \{ \Delta L_g \}_{mm/脉冲} \times 10^{-3} / \{T_{so}\}_s$$

例如,若 $T_{so} = 0.016s$, $\Delta L_g = 0.001mm/脉冲$, $x = 2000$ 脉冲时,

$$V_o = 60 \times 2000 \times 10^{-3} / 0.016 m/min = 7.5 m/min$$

即相当于要求系统按 $7.5m/min$ 的速度进给 $2mm$ 距离。位置伺服中的单片微机接收到这一指令时,立即按 T_{so} 与 T_{sp} 的倍率关系将指令均分至 T_{so} 中的各个 T_{sp} 周期,以保证各位置采样周期的位移速度与指令相等。

在半软件位置伺服系统中,速度伺服单元仍保持模拟形式,在全硬件位置伺服系统中存在的问题并没有明显得到解决。它的内环参数(速度、电流)和位置环中 D/A 转换器的位数依然是固定的,因此,很难兼顾负载惯量的变化。不过,它的零点漂移已可以通过单片微机自诊断进行自动补偿而消除其对定位的影响。位移换向时,还可按预先设定的数值自动进行反转间隙补偿。这使得半软件位置伺服系统的位置控制精度要高于全硬件型的位置伺服系统。

3. 软件位置伺服系统

所谓软件位置伺服系统,是指系统除电流环仍保留模拟结构外,位置、速度控制均由单片微机通过控制软件实现,系统组成如图 1-7 所示。

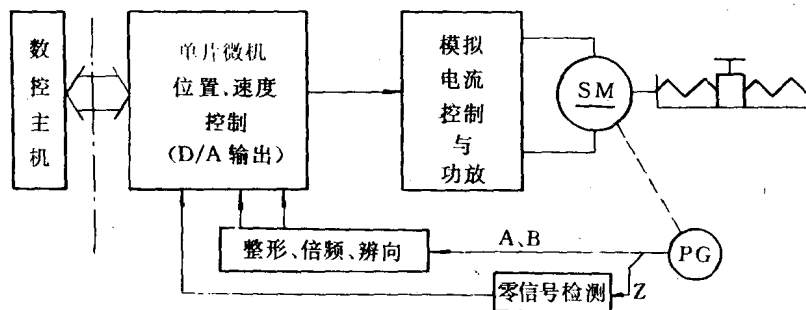


图 1-7 软件位置伺服系统

单片微机控制范围的扩大使系统的控制更加灵活。位置、速度调节器的结构和参数可以按照工作环境自动进行切换,适应负载变化能力显著增强。应用优化理论还可设置调节器参数自动优化功能,使系统可驱动不同的执行机械,通用化程度大大提高。速度检测与位置检测共用同一个检测器,系统结构更加简化。软件伺服控制的输出通过 D/A 转换成模拟电压作为电流指令信号送往模拟电流环。这样,模拟的零点漂移电压只会使电流指令产生微小的变化,一般这种变化不足以产生驱动伺服电机运动的力矩,也不致对位置控制精度构成不良影响。系统的指令输入方式与半软件位置伺服系统相同。

出于快速和安全(主要指电力半导体器件如功率晶体管、功率场效应管的安全)方面的考虑,系统虽称为软件,却仍保留了模拟电流环。电流调节器的结构和参数还是固定的,所以还不

能通过单片机充分自如地改变全部控制策略,以获得最佳的控制效果。

尽管如此,但由于它工作可靠、结构紧凑、控制性能也优于全硬件和半软件位置伺服系统,使得它在 80 年代中期以来的交、直流位置伺服系统的产品中逐渐占据了主导地位,成为位置伺服系统的首选方案。

4. 全数字位置伺服系统

含单片机的数字位置伺服系统诞生以来,人们就一直致力于用软件尽可能多地去取代硬件的工作,以降低成本,提高系统性能价格比。可直接用逻辑电平控制通断的电力半导体器件——功率晶体管、功率场效应管的商品化和高性能单片机如 8096,80C196 等的出现,使全数字位置伺服系统很快从理想走向了现实。

一种全数字、采用脉宽调制(PWM——pulse width modulation)控制的晶体管直流位置伺服系统组成如图 1-8。

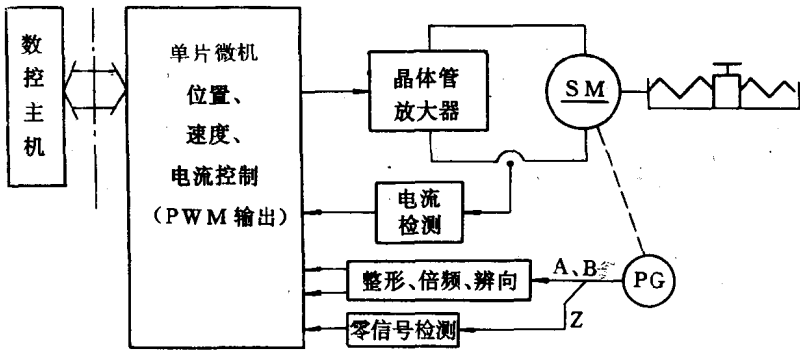


图 1-8 全数字位置伺服系统

系统的所有控制调节全部由软件完成,最后直接输出逻辑电平型的脉宽调制控制信号驱动功率晶体管放大器对伺服电机进行电压控制,完成位置伺服控制任务。

调节器的全部软件化使控制理论中的许多控制思想和手段,包括经典的和现代的,都可以方便地被引进来。例如鲁棒控制、自适应控制、变参数控制、变结构控制、滑模控制等等。还可以完成参数的自动优化和故障的自动诊断等,使系统控制性能进一步得到提高。

二、位置伺服系统的性能指标

位置伺服系统的主要控制目标是迅速跟踪指令值的任意变化。虽然因应用场合的不同,其性能指标会有所侧重和差异,但都包含反映系统跟踪性能的技术指标。一般说来,位置伺服系统性能的好坏,可用下述指标衡量。

1. 稳态位置跟踪误差与位置环增益

当系统对输入信号的瞬态响应过程结束以后,在稳定运行时间伺服系统执行机械实际位置与指令目标值之间的误差被定义为系统的稳态位置跟踪误差。

根据线性系统理论,在闭环单位反馈系统中,误差信号同输入信号之间的关系为

$$E(S) = \frac{1}{1 + G_o(S)} R(S)$$

稳态误差为

1
1
1

$$\varepsilon = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1 + G_o(s)} R(s) \quad (1-1)$$

其中, $G_o(s)$ 为单位反馈系统的开环传递函数; $R(s)$ 为系统参考输入。

若将位置伺服系统的传递函数结构图化为单位反馈形式, 表达式(1-1)即代表系统的稳态位置跟踪误差。

由式(1-1)可知, 位置伺服系统的位置跟踪误差不仅与系统本身结构有关, 还取决于系统的输入指令形式。因此, 为了评价一个位置伺服系统的跟踪性能, 必须根据它的应用场合确定一种标准的输入指令形式。不同应用领域所选定的输入指令形式是不一样的。例如, 用于方位角跟踪的位置伺服系统常采用正弦输入指令信号来确定系统的跟踪误差指标。

对于数控机床中的位置伺服系统, 为了保证系统工作稳定、响应快速而且没有位置超调, 位置调节器一般采用纯比例型, 化为单位反馈的系统结构如图 1-9 所示。

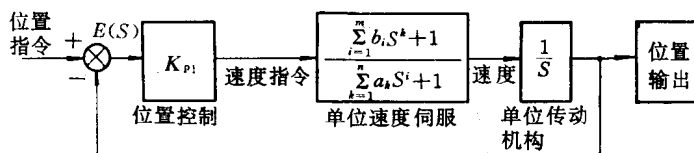


图 1-9 位置伺服系统结构图

图 1-9 中, K_p 为位置环增益, 它包括位置调节器增益、速度伺服和传动机构的增益。

在数控机床进给位置伺服系统中, 位置环的截止频率通常远低于速度环截止频率, 分析设计时, 一般将速度环按一阶近似处理。其系统结构如图 1-10 所示。

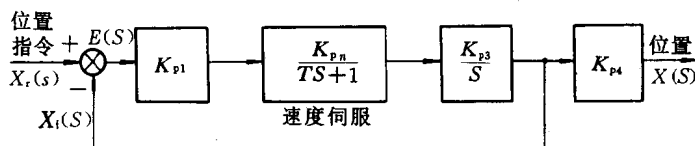


图 1-10 位置伺服系统近似结构图

图中, K_{p1} 为位置调节器增益, 单位为 $V/\text{脉冲}$; K_{pn} 为速度环增益, 单位为 $r \cdot s^{-1}/V$; K_{p3} 为光电编码器检测增益, 单位为 $\text{脉冲}/r$; K_{p4} 为执行机械移动量换算系数, 单位为 $\text{mm}/\text{脉冲}$; T 为速度环一阶近似等效时间常数, 单位为 s ; x_r 为位置指令, 单位为 脉冲 ; x_f 为位置反馈, 单位为 脉冲 。

根据系统结构和它的实际使用情况, 人们采用斜坡函数输入指令信号来确定系统的稳态位置跟踪误差。对单位斜坡函数输入, 由式(1-1), 有

$$\varepsilon = \frac{1}{K_{p1} K_{pn} K_{p3}} = \frac{1}{K_p}$$

即系统位置环增益 K_p 的倒数就是系统在单位斜坡函数输入作用下的稳态位置跟踪误差。因此, 对仅用比例调节的位置伺服系统, 人们直接采用位置环增益 K_p 作为系统位置跟踪误差的性能指标。这里,

$$K_p = K_{p1} K_{pn} K_{p3} \quad (1-2)$$

根据线性系统理论, K_p 也是系统的速度误差常数, 所以系统的位置跟踪误差又可表示为