

① 979(4). 3-7

TP: 71.9  
TH: 137

# 液压同步闭环控制及其应用

西安交通大学机械电子系 施光林 史维祥 李天石

**摘要:** 本文对液压同步闭环控制进行了系统的分类和比较了几种主要控制形式的特点; 分析了各种控制策略及现代控制理论应用对其的影响, 并对液压同步闭环控制的实际应用进行了回顾与展望。

**关键词:** 液压同步 闭环控制 同步精度 控制策略

## 1 引言

随着航天航空技术和现代机械加工业等的发展需要, 越来越多的各类金属加工设备、冶金机械、工程机械及航天与航空驱动装置等对高精度的同步驱动技术的需要也愈加迫切, 其中, 液压同步驱动占据了非常重要的地位。这是因为同其它同步驱动方式相比, 液压同步驱动具有结构简单、组成方便、易于控制和适宜大功率场合等特点。

实现液压同步驱动一般主要有开环控制和闭环控制两种基本形式。诚然, 由于液压系统的泄漏、执行元件等存在的非线性摩擦阻力、控制元件间的性能差异、负载和系统各组成部分的制造误差等因素的影响, 使得液压同步的高精度问题还未完全得到真正解决。尤其是采用开环控制的液压同步驱动, 因为它完全靠液压控制元件(如同步阀、各类节流阀或调速阀)本身的精度来控制执行元件的同步驱动, 而不对执行元件的输出进行检测与反馈来构成闭环控制, 所以它不能消除或抑制对高精度同步的不利因素的影响(与调速阀相比, 因同步阀和节流阀的结构不合理, 其抗干扰能力均很差)。这也就大大限制了该种控制形式的实际应用范围。与此相比, 尽管液压同步闭环控制组成较复杂、造价偏高, 但由于它靠的是对输出量进行检测、反馈, 从而构成反馈闭环控制, 在很大程度上消除或抑制不利因素的影响, 而可望获得高精度的同步驱动。所以液压同步闭环控制已经越来越得到人们的重视, 特别是随着现代控制理论及计算机控制技术的发展, 该种控制形式几乎在所有需要高精度液压同步驱动的各类主机上都得到了较好的应用。

本文旨在对液压同步闭环控制的各种实现形式进行系统的分类和比较几种主要形式的特点; 并分析与总结用于液压同步闭环控制的各种控制策略及现代控制理论应用对其产生的影响; 另外, 对该种控制的具体的实际应用做一回顾与展望。

## 2 形式分类与特点比较

### (1) 形式分类

迄今, 液压同步闭环控制的实现形式很多, 然而可以依据其实现的任务、被控执行元件的数量、类型与结构、安装与运动方向和控制元件的不同对它进行系统的分类。

①按实现的任务(或控制输出)的不同, 液压同步闭环控制分为力同步闭环控制、速度同步闭环控制和位置同步闭环控制三种形式。

②按被控执行元件的数量不同, 液压同步闭环控制又有双执行元件和多执行元件同步闭环控制之分。

③按被控执行元件的类型与结构、安装形式与运动方向的不同, 可以将液压同步闭环控制分为液压缸同步闭环控制和液压马达同步闭环控制。由于液压执行元件的安装形式与运动方向对同步控制的性能有着直接的影响, 因此, 液压同步闭环控制又能细分成卧式和立式两种形式。而针对液压缸又可分为双作用与单作用两种不同的结构。

④按控制元件的不同, 液压同步闭环控制能分为下列五种类型: 机液伺服阀等组成的同步闭环控制、电液伺服阀等组成的同步闭环控制、电液比例阀等组成的同步闭环控制、数字阀等组成的同步闭环控制及各种电控变量泵等组成的同步闭环控制。

另外, 按上述分类方法得到的各种液压同步闭环控制形式间又能相互结合, 从而形成庞大的液压同步闭环控制的分类体系, 如图1所示。

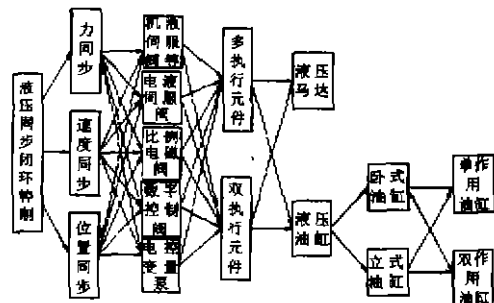


图1 液压同步闭环控制形式分类图

### (2) 几种形式的特点比较

对于液压同步闭环控制各种形式而言, 由于各种控制元件间在结构及性能上存在的差异, 液压执行元件——单作用液压缸与双作用液压缸的结构及安装方式的不同等原因造成了相应控制形式间都有着各自的鲜明特点。因而掌握住它们各自的特点, 无疑会对实际的应用有着积极的意义。

①不同控制元件组成的同步闭环控制的比较<sup>[18]</sup>

与其它控制阀相比,电液伺服阀是种高精度、高频响的电液控制元件。由它组成的液压同步闭环控制系统不仅具有较高的响应速度,而且同步控制精度高。然而,因为该种阀结构复杂、造价高且抗污染能力差,所以由电液伺服阀组成的液压同步闭环控制一般适用于高同步精度要求的各类主机。

电液比例阀是一种新型的电液控制元件,虽然它比电液伺服阀的频率响应低,但因其造价较低、抗污染能力高、性能良好,所以由它组成的同步闭环控制已大量用于系统频率响应适中而需要较高同步精度的主机上,具有良好的工业应用前景。

数字控制阀是八十年代初期才逐渐发展起来的另一种机电液一体化控制元件。它的最大特点就是能适应计算机控制的需要,直接用数字量来实现控制,而省去了一般计算机控制系统中所必备的 D/A 转换器。另外该阀也具有较高的抗污染能力。因此,由它组成的液压同步闭环控制系统控制方便、可靠性高、重复精度高、结构简单,且易于实现计算机直接控制。目前该种同步闭环控制已开始在一些高精度的位置和速度同步驱动的主机上得到了应用<sup>[7]、[8]</sup>。当然这种控制形式的同步控制精度要受到步进电机驱动信号的脉冲数、脉宽占空比及计算机硬、软件的影响。

与上述三种形式相比,由机液伺服阀等组成的同步闭环控制的一个明显特点就是它采用机械反馈检测形式闭环控制。因而其组成简单、造价较低,一般适用于控制精度不高,系统频响不高的需同步驱动的主机。该同步闭环控制的最大缺点就是不能实现电控制和计算机控制;另外机械反馈装置的误差是直接导致同步精度不高的原因。

而由各种电控变量泵组成的液压同步闭环控制实质上属泵控马达或泵缸缸液压控制系统,所以同上面各类阀缸缸(或马达)液压同步闭环控制相比,它效率高,但响应慢,一般适用于大功率和频响不高的场合。

## ②卧式和立式两种形式的比较

由于卧式液压缸同步闭环控制中的液压缸水平安装且活塞杆或缸筒水平方向运动,所以不存在重力负载的作用,也不会造成两个运动方向上的动力学性能的不一致而使同步控制精度发生变化。相比之下,立式液压缸同步闭环控制就存在因液压缸竖直安装导致的重力负载的作用,且会引起油缸在两个运动方向上的动态性能的不一致,给正反两个运动方向的高精度同步控制带来困难。这种重力负载的“干扰”现象,对大负荷的同步提升或下降是尤为严重的。

## ③单作用和双作用两种形式的比较<sup>[19]、[22]</sup>

单作用(或非对称)液压缸是种单杆输出的液压缸,其结构上的最大特点就是进、回油腔承压面积不相等。它的主要优点是构造简单、制造容易、单边滑动密封的效率及可靠性高、工作空间小。双作用(或对称)液压缸是种双杆双向输出的液压缸,它的最大特点就是进、回油腔承压面积相等,但其构造较复杂、滑动摩擦阻力增大、需要的运行空间也大。鉴于两种液压缸的上述特性,单作用液压缸的液压同步闭环控制在正、反向的同步控制性能就存有很大的差异,这给分析和控制实现带来了麻烦。相反,双作用液压缸的液压同步闭环控制就不存在这一同步控制性能上的差异。

## 3 控制策略及现代控制理论应用的影响

如前所述,采用液压同步闭环控制的目的,就是要利用闭环控制的自身特点来获得被控多个执行元件与负载的输出量的高精度同步。对于液压同步闭环控制来说,“同等方式”和“主从方式”是通常采用的两种控制策略<sup>[26]</sup>。“同等方式”即指多个需同步控制的执行元件跟踪设定的理想输出而都分别受到控制并达到同步驱动。“主从方式”是指多个需同步控制的执行元件以其中一个的输出为理想输出,而其余的执行元件均受到控制来跟踪这一选定的理想输出并达到同步驱动。两者相比,为获得高精度的同步输出,则要求按“同等方式”工作的液压同步闭环控制系统中的各执行元件、反馈、检测元件及控制元件等的性能间应具有严格的匹配关系,这显然给工业实现增加了难度。图 2 至图 5 为由上述两种控制策略派生出的四种具体控制方案的方块图<sup>[3]、[10]、[21]、[27]、[28]</sup>。

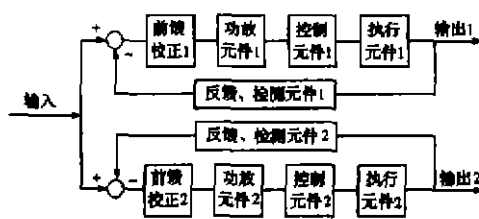


图 2 独立反馈校正同步控制方块图

其中,图 2 为独立反馈校正同步控制方块图。可见,它是对两个支路分别进行独立的反馈校正控制,从而使两支路的输出都跟踪设定的理想输出达同步目的。图 3 为共反馈共校正同步控制方块图。从图中看出它是当两执行元件与负载固联后,用一套反馈元件测量负载的实际运动状态,并对两执行元件同时实施反馈控制以跟踪所设定的理想输出达到同步的目的。图 4 为共反馈同步误差校正同步控制<sup>《机床与液压》</sup>

制方块图。即它以单支路最佳跟踪控制为基础,以被同步驱动件的输出作为跟踪目标,通过反馈控制使跟踪误差最小,且利用输出同步误差对两执行元件分别进行同步补偿控制。图5则为状态差值反馈

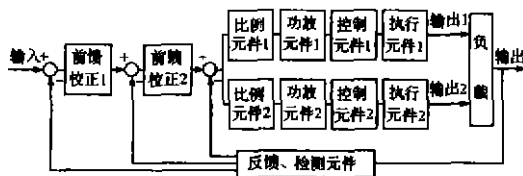


图3 共反馈共校正同步控制方块图

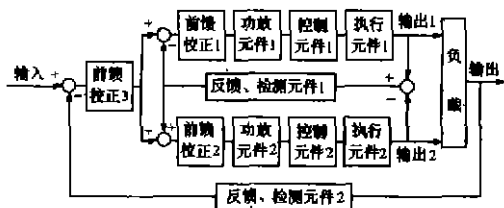


图4 共反馈同步误差校正同步控制方块图

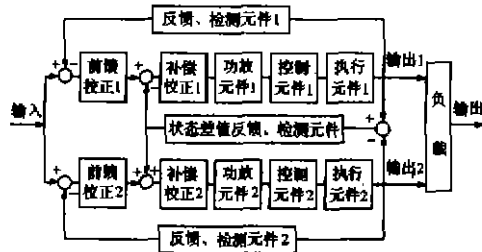


图5 状态差值反馈校正同步控制方块图

校正同步控制方块图。它是以两执行元件的相应状态(位移、速度和加速度)的差值达到最小为目标,通过状态差值反馈实现两执行元件的同步驱动。对比可以得出:独立反馈校正同步控制和共反馈共校正同步控制同属于“同等方式”控制策略,而共反馈同步误差校正同步控制和状态差值校正同步控制则同属于“主从方式”控制策略。这四种控制策略中,尽管状态差值校正同步控制可以获得较高的同步精度,但它需要的传感检测元件增多,因此系统的组成复杂,结构参数设计与调整也相应困难。

由于液压同步闭环控制所特有的强耦合及非线性等特点,往往使得用上述控制策略来实现高精度的同步驱动还存有“力不从心”之感。为此,一方面近年来人们在控制系统的前馈和反馈通路上通过增加多种多样的校正环节来提高同步闭环控制系统的性能,如采用了“动态特性一致性校正和同步误差比例微分校正”<sup>[28]</sup>,“同步误差比例微分积分校

正”<sup>〔27〕</sup>、〔16〕、“加速度小闭环校正与瞬态速度反馈校正”<sup>〔11〕</sup>、“加强的状态差值反馈与加速度微分反馈补偿”<sup>〔2〕</sup>等,并都已在不同程度上获得了较满意的效果。另一方面,现代控制理论自七十年代以来有了迅速的发展,尤其是随着最优控制理论、自适应控制理论、鲁棒控制理论和智能控制理论的丰富以及在工业控制中获得的成功,极大地鼓舞和激发了人们运用这些新理论成果于各类工业实际应用的热情。对于液压同步闭环控制的应用也不例外,为了更好的解决好高同步精度驱动问题,人们已经采用或正在尝试用最优控制理论,自适应控制理论和智能控制理论来设计控制策略和各式各样的控制器,如有:PI与PD优化调节器<sup>〔5〕</sup>、模型跟随自适应(AMFC)控制器<sup>〔12〕</sup>、〔20〕、参考模型自适应(MRAC)控制器<sup>〔9〕</sup>、自适应学习控制器<sup>〔26〕</sup>、模糊学习控制器<sup>〔25〕</sup>和基于逆传递函数矩阵辨识的控制器<sup>〔23〕</sup>。这些新理论的采用及新型控制器的实际应用,使得液压同步闭环控制的性能有了很大程度的改善与提高,有的已取得了明显的工业应用效果。

#### 4 液压同步闭环控制的实际应用

目前,液压同步闭环控制在包括航天航空设备、各类金属压力加工与冶金设备和工程机械等在内的很多机械与设备上得到了广泛使用。

液压折板(弯)机是一种通用的金属板料折弯机械。它的用途就是能在常温下利用简单模具将板料弯成各种型材或构件。这一机械已大量用在汽车、船舶、飞机及家电制造业。为保证板料折弯成形的质量,其关键就在于控制推动活动横梁运动且布置于横梁两端的两个液压缸的同步驱动。为此,对于精度要求不高的小型液压折板机,一般均采用由机械伺服阀等组成的机械反馈式同步闭环控制;而对于中型液压折板机或同步精度要求较高的小型液压折板机,以采用电液伺服阀或比例控制阀或数字控制阀组成的电反馈式同步闭环控制为宜;对于大型液压折板机,则多使用电控变量泵等组成的同步闭环控制<sup>〔1〕</sup>。根据上述原则对液压折板机实行同步驱动,均获得了较好的效果。

汽车纵梁液压机是汽车制造行业必不可少的大型设备之一。该机一般采用多个液压缸并联工作,因此各液压缸的同步驱动就成为其技术关键。现在一般都采用比例控制阀等组成的同步闭环控制实现多缸的同步驱动<sup>〔4〕</sup>。如我国研制的30000kN和35000kN两种汽车纵梁液压机均采用了比例同步闭环控制技术<sup>〔11〕</sup>、〔13〕。具体地说,前者中采用“整机化为单机分立”同步方案,即各单机系统为由位移传感器和电液比例阀等元件组成闭环节流调速系



