

一种水压比例同步控制系统研究

吴 珊¹,毛旭耀^{2*},吴德发²

(1. 中南民族大学工商学院基础课部,湖北 武汉 430223;

2. 华中科技大学机械工程学院,湖北 武汉 430074)

摘 要:研究了一种带位置反馈的水压比例双缸同步控制系统.选择主从控制策略,其中主动缸采用分别布置于进出口的两个单向节流阀控制,从动缸采用两个水压比例流量阀控制,并建立了系统的数学模型.与此同时,建立了试验测试系统并将试验结果与仿真结果进行了对比.试验结果表明,采用PID控制方法同步控制精度达到2.5%,同时理论分析和试验结果具有很好的一致性.

关键词:水压传动;同步控制;主从控制;比例阀;PID

中图分类号:TH137

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2010.11.025

0 引 言

液压同步控制系统在许多领域具有广泛的用途.传统的液压系统以矿物油作为工作介质,相比较而言,由于水介质容易获得、不燃、安全性高、体积模量大以及环境友好和易于维护等优点,以水作为工作介质的水压同步控制系统在许多场应用具有独特的优势.

根据控制模式分,液压同步控制有两种类型:开环控制和闭环控制.文献[1]介绍了一种水压驱动的水下舞台,采用开环的机械同步控制方式,水压缸的速度由节流阀来控制.对于闭环控制系统,常见的有两种方式,一是以比例阀作为控制元件的比例同步控制系统,另一种是以伺服阀作为控制元件的伺服同步控制系统.

国内外关于水压同步控制的研究并不多见.在水压控制技术研究方面,1995年,KOSKINEN K. T. 等人研究了几种水压控制阀的特性,并建立了水压控制系统的非线性数学模型及试验系统^[2].芬兰坦佩拉工业大学等单位的学者研究了 ITER 项目中水压驱动并联机器人及机械手的控制问题^[3-5].在控制方法上,Sanada K. 基于控制理论提出了一种鲁棒力控制器用于水压伺服控制系统^[6].

研究了一种带位置反馈的水压比例同步控制系统.两个水压缸为非对称缸,采用比例阀流量阀控制.在理论建模仿真分析的基础上进行了试验研究,并设计了一种自适应控制器.通过这些研

究,以期在水压同步控制系统的设计和现场应用提供理论基础.

1 系统组成和原理

图1所示为水压双缸同步控制系统原理图.系统可以分成三个模块:动力源模块,水压缸执行元件模块以及计算机辅助测试和控制模块(CAMCM).

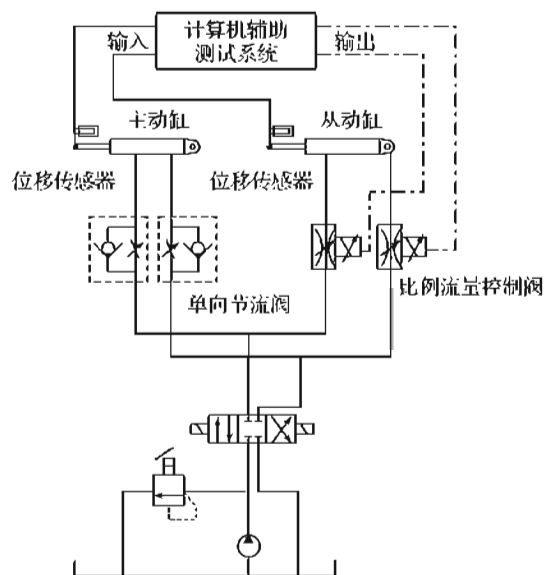


图1 双缸同步控制系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of 2-cylinder synchronous control system

动力源模块由电动机、水泵、水箱、压力控制阀和管道等组成.执行元件模块包括两个水压缸,

收稿日期:2010-11-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(NO.50975101)

作者简介:吴 珊(1979-),女,湖北武汉人,讲师,硕士.研究方向:工程数学及应用.*通信联系人

两个单向节流阀及两个比例流量控制阀. CAMCM 模块包括工控机、两个位移传感器和信号处理电路等. 控制元件采用 Danfoss 提供的 VOH30PE 型比例流量阀.

系统采用线性自适应 PID 控制方法, 如图 2 所示, 选择主从控制策略, 一个缸作为主动缸, 由两个单向节流阀进行调速, 而另一个缸作为从动缸, 由两个比例流量控制阀来进行控制.

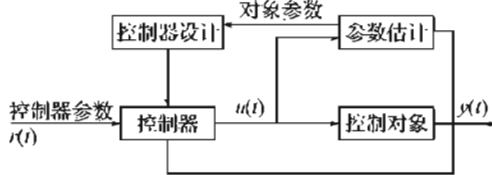


图2 自适应PID控制器原理

Fig. 2 Block diagram of an adaptive PID controller

2 数学模型

2.1 比例流量控制阀

比例流量控制阀的输出流量与输入的电信号成正比. Satoru Hayashi 等人对 VOH30PE 型流

量控制阀进行了较深入的研究^[7], 其传递函数可表示为

$$\frac{Q}{\Delta I} = \frac{K_{vs}}{\frac{s^2}{w_{sv}^2} + \frac{2\xi_{sv}}{w_{sv}}s + 1} \quad (1)$$

2.2 水压缸

从动缸的数学结构原理及主要参数如图 4 所示. 关于水压缸的摩擦力问题, 文献[8]、[9]进行了较深入的研究. 在缸的建模过程中, 忽略摩擦力的影响, 可以得出从动缸的控制方程.

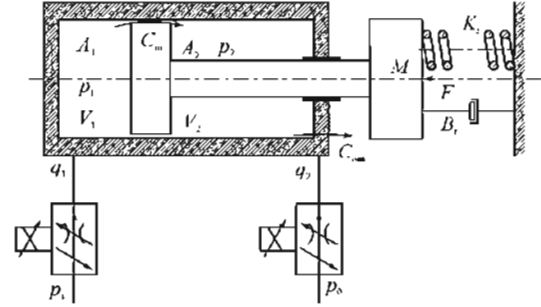


图3 水压缸结构模型无杆腔的流量

Fig. 3 Schematic structure of water cylinder

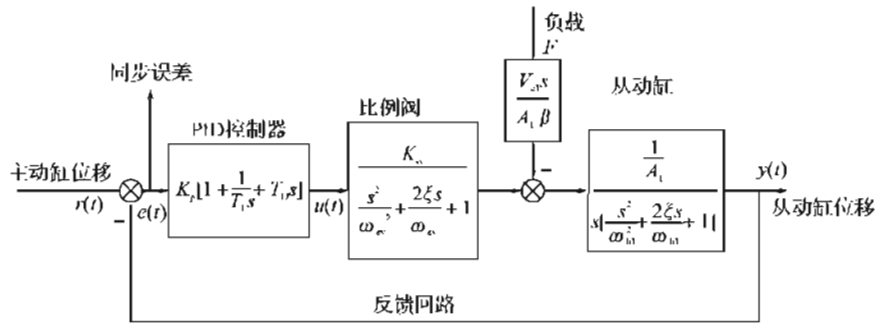


图4 系统传递函数框图

Fig. 4 Block diagram of the system transfer

无杆腔的流量为

$$q_1 = A_1 \frac{dy}{dt} + C_{in}(\rho_1 - \rho_2) + C_{out}\rho_1 + \frac{V_1(y)}{\beta} \frac{dp_1}{dt} \quad (2)$$

式(2)中 $V_1 = V_{01} + A_1 y$.

有杆腔的流量为

$$q_2 = A_2 \frac{dy}{dt} - C_{in}(\rho_1 - \rho_2) + C_{out}\rho_2 - \frac{V_2(y)}{\beta} \frac{dp_2}{dt} \quad (3)$$

式(3)中 $V_2 = V_{02} + A_2(L - y)$.

活塞的受力方程为

$$A_1\rho_1 - A_2\rho_2 = M \frac{d^2y}{dt^2} + B_t \frac{dy}{dt} + k_t y + F \quad (4)$$

忽略泄漏和水的压缩性, 则

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{A_2 \frac{dy}{dt} - \frac{V_2}{\beta} \frac{dp_2}{dt}}{A_1 \frac{dy}{dt} + \frac{V_1}{\beta} \frac{dp_1}{dt}} = \frac{A_2}{A_1} = n \quad (5)$$

设负载压力 $p_L = p_1 - np_2$, 可得缸的传递函数

为

$$Y = \frac{\frac{Q_1}{A} - \frac{[C_{in}(P_1 - P_2)]}{A_1} - \frac{V_{c1}}{A_1^2 E} s F}{s \left(\frac{s^2}{w_{h1}^2} + \frac{2\xi_{h1}}{w_{h1}}s + 1 \right)} \quad (6)$$

式(6)中:

$$w_{h1} = \sqrt{\frac{\beta A_1^2}{M V_{c1}}}, \xi = \frac{B_t}{2\sqrt{\beta A_1^2 M}}$$

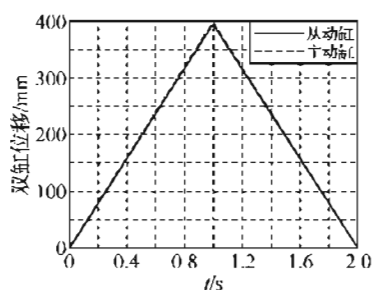
$$V_{c1} = V_1 \frac{1}{\left(1 + n^2 \frac{V_1}{V_2} \right)}$$

2.3 系统传递函数

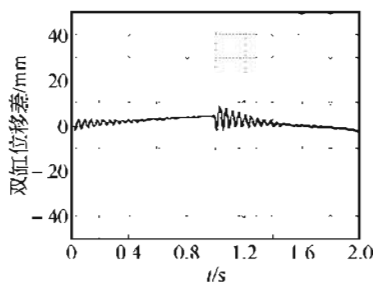
系统传递函数框图如图 4 所示. 设负载 $F = 4000 \text{ N}$.

图 5 所示为系统的三角波响应. 此时主动缸的速度为 $\pm 400 \text{ mm/s}$. 仿真结果表明, 从动缸的最

大跟踪误差为 10 mm, 此误差出现在从动缸的换向运动过程中。



(a)三角波函数响应位移(仿真)



(b)三角波函数响应误差(仿真)

图5 系统三角波函数响应

Fig.5 Triangular response of system

3 试验研究

根据图1所示的系统原理图,来搭建如图6所示的水压双缸同步控制试验平台。图7为试验结果。从试验结果可以看出,从动缸能很好地跟随主动缸。但当水压缸换向时,出现跟随误差增大的现象,其最大误差为 10 mm,这与仿真结果是一致的。

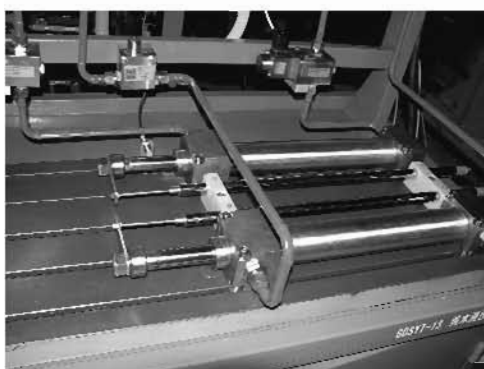
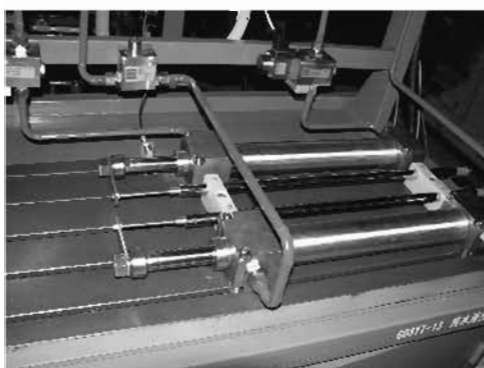


图6 双缸同步控制系统测试平台

Fig.6 Test bench of synchronous control system



4 结 语

从理论分析和试验结果对比可以看出,两者具有良好的一致性。特别是数学模型定量地预测了试验过程中当水压缸换向时同步误差增大的现象,理论分析和试验结果均得出系统的同步控制误差在 2.5% 左右。同时,试验结果证明线性自适应控制器是比较有效的。

与此同时,可以看出系统的同步控制精度还不够理想,这主要受以下几个方面的影响:

1) 水压比例流量控制阀的性能。本系统中所选用的 VOH30PE 型流量阀的控制性能不够理想,具体表现在阀的线性度不好,滞环大(达到 8%),响应速度不快(150 ms 左右),而且两个流量控制阀的一致性不好。

2) 水压缸的影响。根据测试的结果,水压缸的启动压力和沿程阻力波动比较大,这从一个方面反映了水压缸的摩擦力比较大,而且在运行的过程中摩擦力不均匀。

3) 对于水压缸在换向过程中出现的同步误差增大的问题,其主要原因是由于采用不对称缸,换向过程中无杆腔和有杆腔的进出油进行了切换,而且流量产生了突变和运动方向的改变,必然带来控制误差的增大;系统中电磁换向阀的响应时间为 110 ~ 130 ms,其响应速度甚至快于流量控制阀,这必然使得在换向的瞬间从动缸产生位置滞后。

4) 除了 PID 方法外,在后续的工作中可以研究更合适的控制方法。

符号说明

| | |
|------------|------------------|
| K_v | 比例阀系数 |
| ω_v | 比例阀固有频率(1/s) |
| ξ_v | 比例阀阻尼系数 |
| y | 水缸位移(m) |
| V_{01} | 无杆腔初始体积(m^3) |
| β | 水的体积模量(MPa) |
| V_{02} | 有杆腔初始体积(m^3) |
| L | 缸的行程(m) |

参考文献:

- [1] 郭志恒,李利,刘银水,等. 水压驱动水下舞台的设计与试验研究[J]. 液压与气动,2010(4):4-6.
- [2] Koskinen K T, Vilenius M J, Virvalo T, et al. Water as a Pressure Medium in Position Servo Systems[C]// The Proceedings of the Fourth Scandinavian International Conference on Fluid Power. FINLAND: 1995:859-871.

-
- [3] Wu Huapeng, Handroos Heikki, Pessi Pekka et al. Development and control towards a parallel water hydraulic weld/cut robot for machining processes in ITER vacuum vessel [J]. Fusion Engineering and Design, 2005(75-79, SUPPL.): 625 – 631.
- [4] Kekalainen Teemu, Mattila Jouni, Virvalo Tapio. Development and design optimization of water hydraulic manipulator for ITER [J]. Fusion Engineering and Design, 2009, 84(2-6): 1010 – 1014.
- [5] Nieminen Peetu, Esque Salvador, Muhammad Alil et al. Water hydraulic manipulator for fail safe and fault tolerant remote handling operations at ITER [J]. Fusion Engineering and Design, 2009, 84(7-11): 1420 – 1424.
- [6] Sanada K. A Method of Designing a Robust Force Controller of a Water-Hydraulic Servo System [J]. The Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2002; 135 – 141.
- [7] Satoru Hayashi, Atsushi Shirai, Nan-nan Guo, et al. Static and Dynamic Characteristics of A Pressure-Compensated Flow Valve [C] // Proceedings of the Fifth International Conference on Fluid Power Transmission. SWDN; 2001; 156 – 160.
- [8] Lauri Laitinen, Klaus Heiskanen, Jyrki Kajaste, et al. Friction Phenomena in a Water Hydraulic Cylinder at Low Pressure Levels [C] // the Eighth Scandinavian International Conference on Fluid Power, Finland, 2003; 421 – 431.
- [9] 程文芳. 水压双缸位置同步控制系统的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.

Research on a water hydraulic proportional synchronous control system

WU Shan¹, MAO Xu-yao², WU De-fa²

(1. Department of General Foundation Requisites, Engineering and Commerce college,
South-central University for Nationalities, Wuhan Hubei 430223, China;

2. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In this paper, a dual-cylinder water hydraulic synchronous system with position feedback was studied. A master-slave control strategy was selected in the system, in which the master cylinder was controlled by two manually variable throttle check valves respectively at the inlet and outlet of the cylinder and the slave cylinder was controlled by two proportional flow control valves. The mathematical mode of the system was built up and simulation carried out. At the same time, a test bench using tap water as the media was established. Experimental results were compared with the simulation results. An experimental synchronous precision about 2.5% was obtained by using an adaptive PID control method.

Key words: water hydraulics; synchronous control; master-slave control; proportional valve; PID

本文编辑: 陈小平