

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.10.010

旋转式旁通型数字调速阀仿真及实验研究^{*}

靳天毅^{1,2,3}, 吴娟^{1,2,3*}, 杜秉华^{1,2,3}, 郭凯宇^{1,2,3}

(1. 太原理工大学机械与运载工程学院, 山西太原 030024; 2. 山西省矿山流体控制工程实验室, 山西太原 030024; 3. 矿山流体控制国家地方联合工程实验室, 山西太原 030024)

摘要: 由于综采工作面处于强时变负载工况下, 支架液压系统进行移架时, 会引起较大的速度波动, 给液压支架直线度智能化调节造成很大的难度, 针对这一问题, 设计了一种适用于支架工况的新型旋转式旁通型数字调速阀。首先, 通过对旋转式旁通型数字调速阀进行理论分析, 得到了影响其调速特性的主要相关参数; 然后, 建立了数字调速阀的 SimulationX 模型, 对旁通型调速阀不同参数下的速度响应特性进行了定量分析, 研究了其调速特性; 最后, 搭建了模拟实验平台, 并进行了实验测试, 测试结果验证了仿真的可行性分析了负载变化对调速阀调速性能的影响。研究表明: 将旁通型调速阀应用于推移回路时, 移架速度波动较小; 随着弹簧刚度增大, 预压缩量减小, 调速阀的速度峰值减小, 且移架到达稳定速度所用时间越少; 不同负载输入下, 速度响应曲线不同, 相同负载峰值情况下, 其中输入正弦负载时速度最大; 验证了旁通型调速阀应用于移架的可行性, 可以为后续阀的参数优化提供依据。

关键词: 强时变负载工况; 数字阀控缸; 调速阀调速性能; SimulationX; 速度响应特性; 静力学分析

中图分类号: TH137.52; TD421

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2022)10-1412-06

Simulation and experimental research of rotary bypass digital speed regulating valve

JIN Tian-yi^{1,2,3}, WU Juan^{1,2,3*}, DU Bing-hua^{1,2,3}, GUO Kai-yu^{1,2,3}

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
2. Shanxi Mine Fluid Control Engineering Laboratory, Taiyuan 030024, China;
3. National-local Joint Engineering Laboratory of Mine Fluid Control, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Due to the strong time-varying load condition of fully mechanized mining face, the support hydraulic system will cause large speed fluctuation when moving the support, which makes it very difficult to adjust the straightness of the hydraulic support intelligently. To solve the problem, a new type of rotary bypass type digital speed control valve suitable for bracket working condition was designed. Firstly, through theoretical analysis of the rotary bypass type digital control valve, the main relevant parameters affecting its speed control characteristics were obtained. Then, the simulation X model of the digital speed control valve was established. The speed response characteristics of the bypass speed regulating valve under different parameters was quantitatively analyze. Its speed regulating characteristics was studied. Finally, by building a simulation experiment platform and conducting experimental tests, the influence of load changes on the speed control performance of the speed control valve was analyzed. The results show that when the bypass speed regulating valve is applied to the moving circuit, the fluctuation of moving speed is small. With the increase of spring stiffness, the precompression shrinkage decreases, the speed peak of speed regulating valve decreases, and the less time it takes to reach the stable speed. The speed response curves are different under different load inputs. Under the same peak load, the speed is the largest when sinusoidal load is input. The feasibility of applying the bypass speed regulating valve to the frame moving is provided, which provides a basis for the parameter optimization of the follow-up valve.

Key words: strong time-varying load condition; digital valve controlled cylinder; speed control performance of speed control valve; SimulationX; speed response characteristics; static analysis

收稿日期: 2022-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1910212)

作者简介: 靳天毅(1997-), 男, 山西汾阳人, 硕士研究生, 主要从事矿山流体控制方面的研究。E-mail: 2689965479@qq.com

通信联系人: 吴娟, 女, 博士, 教授, 硕士生导师。E-mail: wujuan@163.com

0 引言

当前,我国煤炭综合机械化生产由一般机械化普采和综采向自动化、智能化综采方向发展,已成为煤炭行业的现实需求和采煤工艺发展的必然趋势。2016 年国家发展改革委和国家能源局对外发布的《能源技术革命创新行动计划——(2016—2030 年)》^[1]中明确说明能源技术创新的 15 个重点任务之一“煤炭无害化开采技术创新”,并将在 2030 年实现智能化开采,重点煤矿区基本实现工作面无人化,全国煤炭采煤机械化程度达到 95% 以上。

液压支架作为综采工作面的重要组成部分,必须走向智能化方向^[2]。目前,液压支架移架时采用通断式电液元件,导致系统压力波动和冲击大,难以实现对液压支架位置的精确控制,成为煤炭智能化开采的瓶颈问题^[3]。

在实现压力和流量连续控制的电液控制阀中,电液伺服阀和电液比例阀均难以满足井下高压、高水基等复杂工况^[4,5]。近年来,随着电子技术的快速发展,数字阀得到越来越广泛的应用。有别于伺服控制阀和比例阀,数字阀具有结构简单、工艺性好、抗污染能力强、抗干扰能力强等特点^[6,7],且不需要模数转换元件即可接收来自计算机的控制信号,可以精确地控制系统的压力、流量和方向^[8,9]。

在数字阀控缸方面,ANDREAS P 等人^[10]采用了 4 个两位两通数字阀控缸,解决了非对称缸的控制问题。何玉东等人^[11]分析了多缸系统中负载力与位移的关系,提出了一种轨迹跟踪同步控制方法。HENIKL J 等人^[12]研究了多执行器液压闭环系统的渐进稳定性,提出了一种模块化分散控制策略。

目前,数字阀控缸主要从控制算法和控制策略上提高缸的精确性和稳定性,但缺少对高压、高水基、大流量及强时变负载工况下液压支架的研究。

在传统的液压系统中,旁通型调速阀由移动式节流阀和溢流阀组合而成,其中,节流阀用于调节流量,溢流阀用于压力补偿。但该阀的使用却受限于液压支架的复杂工况。

针对上述问题,笔者设计一种适用于支架工况的新型旋转式旁通型数字调速阀。首先,对旁通型数字调速阀进行静力学分析;然后,通过 SimulationX 对其调速特性进行仿真分析^[13],研究时变负载对数字阀控缸控制精度和响应特性的影响;最后,通过实验验证仿真的可行性。

1 旋转式旁通型调速阀工作原理

笔者所研究的旋转式旁通型调速阀由数字转阀、定差溢流阀和溢流阀组合而成。

旋转式旁通型调速阀工作原理图如图 1 所示。

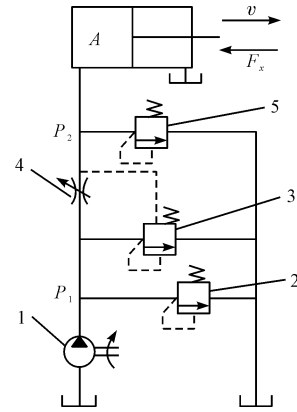


图 1 旋转式旁通型调速阀工作原理图

1—泵;2—安全阀;3—定差溢流阀;4—数字转阀;5—溢流阀

图 1 中,乳化液泵输出的乳化液一部分经转阀 4 进入液压缸左腔,推动活塞向右移动,另一部分乳化液经定差溢流阀 3 的溢流口流回油箱,定差溢流阀 3 阀芯上端 a 腔与节流阀 4 出口口相通,该处压力为 P_2 ;b 腔和 c 腔与泵出口处的油液相通,该处压力即为泵的出口压力 P_1 (a 腔、b 腔、c 腔位置如图 2 所示);

当液压缸所受外负载力 F_x 增大时,压力 P_2 上升,随之 a 腔的压力也上升,使阀芯向下移动,导致定差溢流阀的溢流口减小,乳化液泵 1 的供油压力 P_1 增加,进行压力补偿,从而减小转阀 4 的前后压力差变化;

同理,当外负载力 F_x 减小时,压力 P_2 下降,随之 a 腔的压力也下降,使阀芯相应动作,从而减小压差变化^[14]。

2 旋转式调速阀的结构及其静态分析

2.1 调速阀结构

笔者所设计的调速阀由步进电机输出轴通过联轴器与转阀阀芯相连,随着步进电机驱动转阀阀芯旋转,阀芯与阀套组成的矩形节流口大小随之改变(通流面积与旋转角度近似成线性关系),从而实现进入液压缸流量的调节。

旋转式调速阀结构如图 2 所示。

步进电机根据接收脉冲的个数将其转换为阀芯的角位移^[15]。阀芯与步进电机通过联轴器连接相连,一

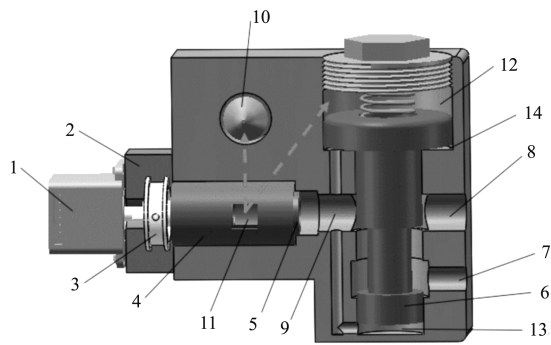


图2 旋转式旁通型调速阀结构图

1—步进电机;2—阀座;3—联轴器;4—转阀阀套;5—转阀阀芯;6—定差溢流阀阀芯;7—溢流口;8—进液口;9—转阀进液口;10—溢流阀;11—出液口;12—a腔;13—b腔;14—c腔

方面简化阀的结构,另一方面避免丝杠和凸轮磨损带来的位置死区和零点漂移,使控制更加精确。

旋转阀可以提供更多流线型的流动轨迹,提高阀门操作的便利性。旋转阀工作时阀芯与阀体之间充满乳化液,因此,阀芯和阀体的受力比较均匀,这使旁通型调速阀工作时更加稳定^[16]。

2.2 静态分析

笔者建立旋转式旁通型调速阀的静态方程,并对其进行静态分析,以寻求提高旋转式调速阀的静态精度,建立相关参数的选择原则,为后续的仿真设计提供变参数理论依据。

笔者针对图2所示结构图建立静态方程。其中,阀的静态流量连续性方程为:

$$Q = Q_1 + Q_2 = C_1 S_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P} + C_2 S_2 \sqrt{\frac{2}{\rho} P_1} \quad (1)$$

式中: C_1 —节流阀口流量系数; C_1 一定差式溢流阀口流量系数, C_1, C_2 取0.68; S_1 —节流阀口通流面积; S_2 一定差溢流阀阀口通流面积; ρ —油液的密度; ΔP —节流阀口的压差。

节流阀口的压差为:

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (2)$$

式中: P_1 —旁通型调速阀的进口压力; P_2 —出口压力。

定差溢流阀的阀芯静力平衡方程为:

$$P_1 (A_1 + A_2) = P_2 A_3 + F_s + F_{bs} \quad (3)$$

式中: F_s —弹簧力; F_{bs} —稳态液动力。

弹簧力和稳态液动力的表达式为:

$$F_s = k_s (x_0 + x_d + x_k) \quad (4)$$

$$F_{bs} = 2C_1 A_1 (\cos\theta) P_1 \quad (5)$$

式中: θ —一定差式溢流阀口射流角,取 69° ; A_1, A_2, A_3 —一定差溢流阀a腔、b腔、c腔有效受压面积; k_s —弹簧刚度系数; x_0 —弹簧预压缩量; x_d —一定差式溢流阀阀芯开

口搭合量; x_k —一定差式溢流阀阀芯开口量。

因为 C_1, C_2, ρ 和 θ 等是固定参数,所以影响该阀稳定性的可变参数有 $\Delta P, A_1, A_2, A_3, x_0, k_s, S_1$ 和 S_2 等,其中, S_1 和 S_2 是按流量要求调定的,设定参数时,应当

$$\text{保证 } S_{\max} = \frac{Q_{\max}}{C_s \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P}}, Q_{\max} \text{ 为阀的最大流量, } A_1, A_2, A_3$$

应在满足结构要求的前提下尽量取最小值以减小阀的结构尺寸^[17,18]。

由以上分析可知:旁通型调速阀的关键参数为 k_s, x_0 和 ΔP 。

3 仿真模型及其分析

3.1 仿真模型的建立

为研究综采面供液系统压力数据,笔者通过压力传感器实时采集现场的压力数据。

实测压力数据如图3所示。

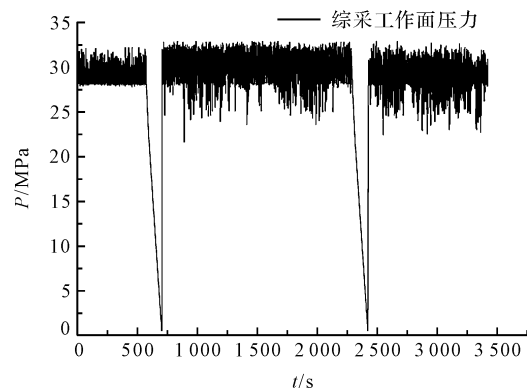


图3 实测压力数据

笔者根据采集数据,可得综采面供液压力主要28 MPa~31 MPa,为仿真时模拟系统压力提供依据。

液压支架移架时,先降架,使顶梁离开顶板后,停止降柱迅速移架,而且顶板存在“擦顶移架”^[19]或“带压移架”。“擦顶移架”或“带压移架”时所受负载力较大,而且具有强时变负载特性^[20]。

通过实际调研可知:目前采用最多的移架方式为单架依次顺序式,支架沿采煤机牵引方向依次前移,移动步距等于截深,支架移成一条直线。该操作方式易保证规格质量,能适应不稳定顶板,应用最多,笔者所研究的旁通型调速阀适用于此工况。

笔者依据图1所示原理,在SimulationX中建立旋转式旁通型调速阀应用于移架的仿真模型,如图4所示。

在仿真模型中,通过变频调速的方式实现乳化液泵的软启动。

仿真模型主要参数如表1所示。

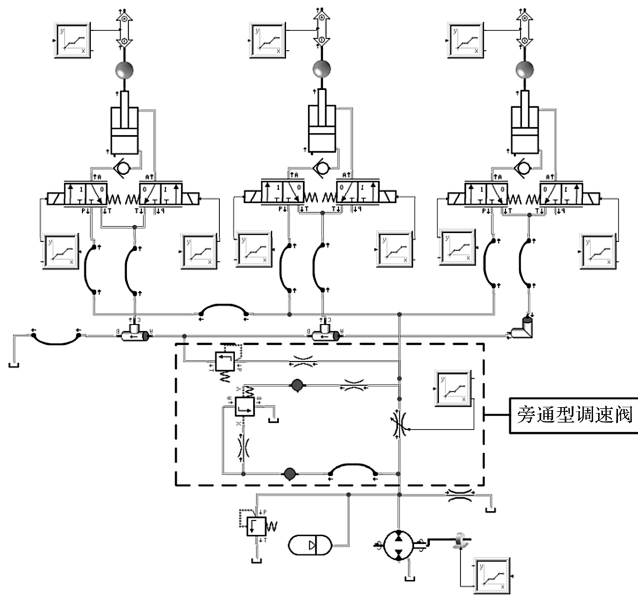


图 4 仿真模型

表 1 仿真模型具体参数

参数/单位	数值
安全阀设定压力/MPa	40
转阀全开口面积/m ²	0.000 196
定差溢流阀开启压力/MPa	2
a 腔受压面积/m ²	0.002 5
b 腔受压面积/mm ²	0.000 5
c 腔受压面积/m ²	0.002
定差溢流阀弹簧刚度/(N·mm ⁻¹)	88.3
弹簧预压缩量/m	0.02
推移千斤顶缸径/m	0.18
推移千斤杆径/m	0.12
负载/N	600 000

3.2 仿真分析

(1)为证明方案的可行性,笔者在相同负载输入下(在 0~4 s 为 600 000 N,4 s~5 s 时增加为 630 000 N,6 s~7 s 时增加为 660 000 N),进行无调速阀和有调速阀的移架仿真,如图 5 所示。

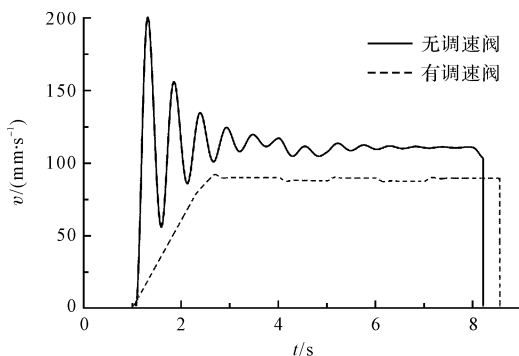


图 5 有无调速阀移架速度对比

根据图 5 的对比可得:

无调速阀时,速度仿真曲线波动较大;
有调速阀时,随着转阀打开速度逐渐上升至稳定

值,随后只有在负载变化时出现小波动。

该结果证明,旁通型调速阀用于移架时可减小速度波动,可在此基础上对其进行继续研究。

(2)由理论分析可知:弹簧刚度、弹簧预压缩量和压力变化是影响旁通型调速阀性能的主要参数(其中,弹簧刚度和弹簧预压缩量是相关量,应同时进行分折),所以笔者选取不同的弹簧刚度和弹簧预压缩量,使支架在相同恒定负载下进行移架。

弹簧刚度及预压缩量对调速特性的影响结果,如图 6 所示。

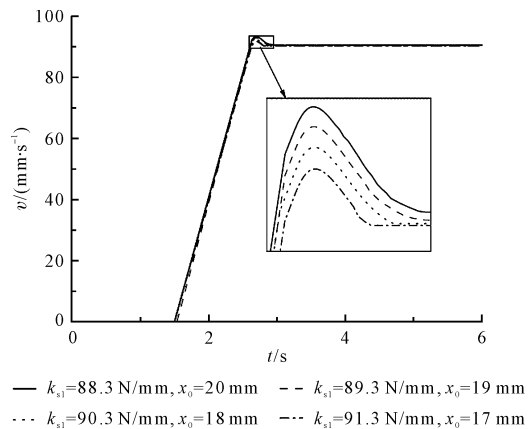


图 6 弹簧刚度及预压缩量对调速特性的影响

图 6 中,在相同负载下,对比 3 条曲线可知:

随着弹簧刚度增大,预压缩量减小,调速阀的速度峰值减小,且油缸到达稳定速度所用时间越少,所以设计调速阀时,选择较大的弹簧刚度和较小的预压缩量,会得到更好的调速性能。

(3)对于参数 ΔP 的影响,主要由于负载变化引起,所以笔者对 3 台支架给予不同负载类型依次进行移架,转阀由控制器控制开度从 0~60%。

3 组阶跃型负载如图 7 所示。

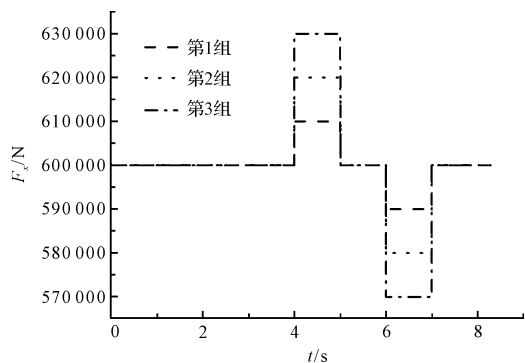


图 7 阶跃型负载

阶跃型负载输入下速度响应曲线,如图 8 所示。

3 组正弦型负载,如图 9 所示。

正弦型负载输入下速度响应曲线,如图 10 所示。

从图(8,10)可看出:

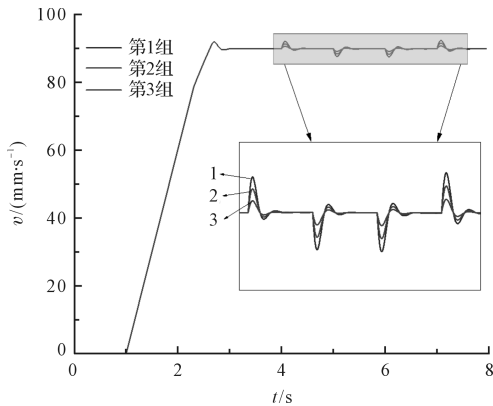


图 8 阶跃负载输入下速度响应

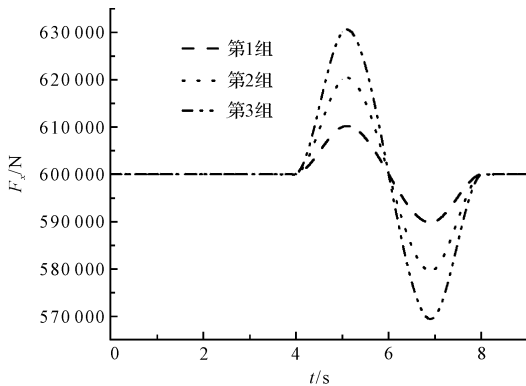


图 9 正弦型负载

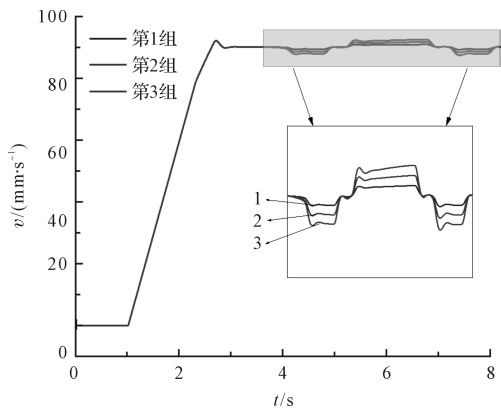


图 10 正弦负载输入下速度响应

将旁通型调速阀应用于推移回路时,移架速度波动较小;

只有在负载出现连续变动时,速度出现明显波动;当负载上升或下降到稳定负载时,速度稳定。

这说明该调速阀可以应用于强时变负载工况,可以极大程度减小移架时因变负载出现的速度波动。

图 9 中,对比各个不同负载变化下的调速曲线可知:

在不同负载变化下,移架速度波动的类型不同;

随着负载变化的程度增大,移架速度的波动程度增大;

图 7 和图 9 第 3 组曲线最大和最小负载一致。

对比图(8,10)速度稳定后的峰值,即不同负载输

入下移架速度对比,如表 2 所示。

表 2 不同负载输入下移架速度对比

负载类型	最大值/(mm·s ⁻¹)	最小值/(mm·s ⁻¹)
阶跃负载速度响应	92.35	87.5
正弦负载速度响应	93.1	86.8

由表 2 可知:不同负载变化下,移架速度峰值不同,其中正弦负载下速度最大,所以应在正弦负载下,去调试旁通型调速阀的性能。

这可以为高压大流量工况下调速阀的后续研究提供借鉴意义。

4 实验验证

为了进一步分析负载变化对调速阀调速性能的影响,笔者搭建了一个模拟变负载移架实验台^[21]。

该实验台实物图如图 11 所示。

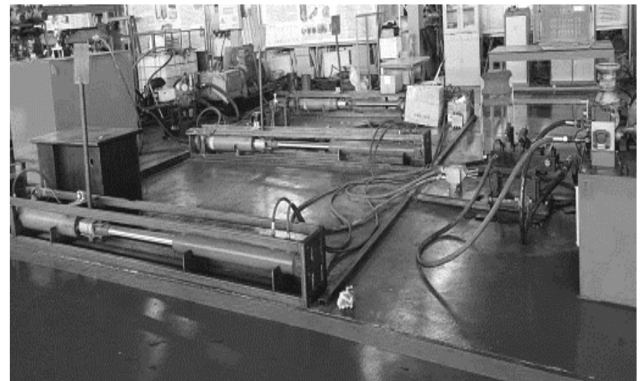


图 11 模拟变负载移架实验台

该实验平台主采用一台额定流量为 200 L/min 的矿用乳化液泵,通过变频器实现其软启动,负载油缸负载通过电磁比例溢流阀实现变负载^[22],利用拉线式位移传感器,通过信号采集仪对移架速度进行采集。

在该实验中,推移油缸在 0 s ~ 4 s 时,负载为 600 000 N;4 s ~ 5 s 时,增加为 630 000 N;6 s ~ 7 s 时,增加为 660 000 N 负载下依次进行移架。

变负载移架实验曲线如图 12 所示。

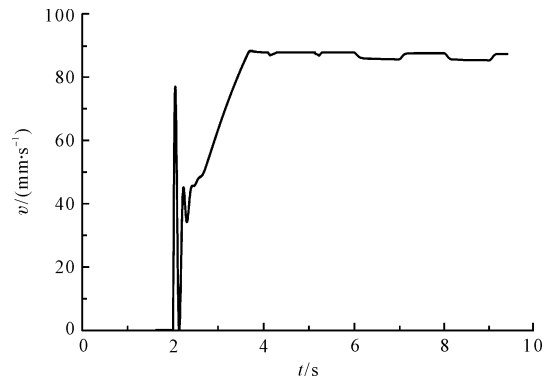


图 12 变负载移架实验曲线

根据图 12,对比实验结果与图 5 中的仿真结果可知:在刚开始移架时,由于系统用液导致系统压力变化较大,致使速度波动大,系统压力稳定后,实验结果基本和仿真结果保持一致。

该结果验证了仿真的可行性。

5 结束语

由于综采工作面处于强时变负载工况下,支架液压系统进行移架时会引起较大的速度波动,为此,笔者设计了一种适用于支架工况的新型旋转式旁通型数字调速阀,并对其进行了理论分析,建立了 SimulationX 模型,并对其进行了仿真分析,最后通过实验的方法,对调速阀的仿真结果进行了验证。

研究表明:

(1)由理论分析可知:影响旁通型调速阀的关键参数为 k_s 、 x_0 和 ΔP ;

(2)通过对比仿真证明:旁通型调速阀确实存在移架过程因变负载出现的速度波动。随着弹簧刚度的增大,预缩量减小,调速阀的速度峰值减小,且油缸到达稳定速度所用时间越少,调速阀调速性能越好;

(3)不同的负载输入时,移架速度波动的类型不同。随着负载变化的程度增大,移架速度的波动程度增大;相同负载峰值情况下,输入正弦负载时速度最大。这可为适用于高压流量、高水基调速阀的后续研究提供参考;

(4)变负载移架实验曲线表明:将旁通型调速阀应用于推移回路时,移架速度波动较小,曲线与仿真结果基本一致,验证了仿真的可行性。

在接下来的研究中,笔者将主要以阀的闭环控制为主,根据支架液压系统的反馈,以此来控制转阀开口的大小,最后达到动态化控制移架速度的目的。

参考文献(References):

- [1] 国家发展改革委. 能源技术革命创新行动计划(2016—2030 年)[Z]. 2016.
- [2] 李成,廖瑶瑶,袁红兵,等. 矿用水压先导阀阀口流量特性仿真研究[J]. 液压与气动,2020(3):16-21.
- [3] 王燕坤. 一种新型数字调速阀的研究及应用[D]. 合肥:合肥工业大学机械与汽车工程学院,2015.
- [4] YANG Hua-yong, PAN Min. Engineering research in Fluid power: a review [J]. *Journal of Zhejiang University-*

Science A (Applied Physics&Engineering), 2015(16): 427-442.

- [5] 俞滨,金正国,王相吉,等. 增量式数字阀控缸位置控制系统动态性能分析及实验研究[J]. 工程科学与技术, 2020,52(6):183-189.
- [6] 王成宾,权龙. 直线步进电机闭环控制的数字阀研究[J]. 机床与液压,2008(11):38-42.
- [7] 要一帆. 基于超声波电机的增量式数字流量阀研究[D]. 昆明:昆明理工大学机电工程学院,2017.
- [8] 邱梦. 新型数字方向流量阀的设计及特性分析[D]. 重庆:重庆大学机械工程学院,2014.
- [9] WANG Feng, GU Lin-yi, CHEN Ying. A continuously variable hydraulic pressure converter based on high speed on-off valves[J]. *Mechatronics*, 2011,21(8):1298-1308.
- [10] ANDREAS P, MIKKO H, RUDOLF S. Simulation and Experimental Results of PWM Control of Digital hydraulics [C]. The Fifth Workshop on Digital Fluid Power, October, Tampere, Finland, 2012:88-100.
- [11] HE Yu-dong, WANG Jun-zheng, LI Ji, et al. Trajectory synchronization of multi-cylinder electrohydraulic lift system with huge load [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2013,22(2):228-234.
- [12] HENIKL J, WOLFGANG K, MEURER T, et al. Infinite-dimensional decentralized damping control of large-scale manipulators with hydraulic actuation [J]. *Automatica*, 2016(63):101-115.
- [13] 李国琳,李继财,张政梅,等. 插装式比例节流阀的动态特性[J]. 机床与液压,2019,47(22):86-89.
- [14] 袁海丽,冀宏,高名乾,等. 调速阀建模及仿真分析[J]. 液压与气动,2019(7):27-32.
- [15] 邓雄章. 数字流量阀的设计与应用[J]. 机床与液压, 2010,38(22):83-85.
- [16] OKHOTNIKOV I, ABUOWDA K, NOROOZI S, et al. Numerical and experimental investigation of the metering characteristic and pressure losses of the rotary tubular spool valve[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2020(71):101679-101679.
- [17] 朱华兴. 高性能调速阀的设计与使用方法的研究[J]. 机床与液压,1996(5):38-44,3.
- [18] 左建民. 液压与气压传动[M]. 北京:机械工业出版社, 2007. 5.
- [19] 牛剑锋. 综采液压支架跟机自动化智能化控制系统研究[J]. 煤炭科学技术,2015(12):85-91.
- [20] 王亮,李勇庆,江守波,等. 大采高液压支架带压移架系统 AMESim 分析[J]. 机械设计与制造,2021(8): 121-125.
- [21] 张全厚,宋林红,张文良. 阀用波级管仿真设计建模方法其试验验证[J]. 压力容器,2020,37(7):52-58.
- [21] 黄文. 基于电液力伺服系统的液压阀控缸自抗扰控制研究[J]. 液压气动与密封,2020(9):13-16,20.

[编辑:全瑶]

本文引用格式:

靳天毅,吴娟,杜秉华,等. 旋转式旁通型数字调速阀仿真及实验研究[J]. 机电工程,2022,39(10):1412-1417.

JIN Tian-yi, WU Juan, DU Bing-hua, et al. Simulation and experimental research of rotary bypass digital speed regulating valve[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2022,39(10):1412-1417.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>