DOI: 10.3901/JME.2021.06.224

自适应供油压力变化的高速开关阀控制策略研究*

钟 麒^{1,2} 何贤剑³ 李研彪¹ 张 斌² 杨华勇² 陈 波¹

(1. 浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室 杭州 310014

2. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州 310027

3. 浙江海宏液压科技股份有限公司 临海 317000)

摘要: 针对球阀结构高速开关阀动态特性受供油压力影响大的问题, 提出自适应供油压力变化的高速开关阀控制策略, 通过计算不同供油压力下的高速开关阀临界启闭电流, 结合电流反馈机制, 实现多个激励电压源之间的自动切换, 最大程度上维持了高速开关阀在变供油压力下的动态特性。理论分析验证了供油压力对高速开关阀的动态特性有较大影响。仿真和试验都达到了控制策略的预期效果, 结果表明, 与单电压驱动方法相比, 自适应供油压力变化的高速开关阀控制策略在 5~20 MPa 的供油压力变化范围内, 能有效减少高速开关阀总启闭时间 56.9%~75.8%, 扩大可控占空比范围 45.9%~240.6%, 提高最大工作频率 161.0%~637.5%。在动态性能提升的同时, 自适应供油压力变化的高速开关阀控制策略将启闭总时长的变化率控制在 2.1%以内(变化范围 0.2 ms), 可控占空比范围的变化率稳定在 2.1%以内, 最大工作频率的差异系数保持在 4.6%以内。

关键词: 高速开关阀; 供油压力变化; 动态特性维持; 启闭时长; 可控占空比; 最大工作频率

中图分类号: TH137

Research on Control Algorithm for High-speed on/off Valves that Adaptive to Supply Pressure Changes

ZHONG Qi^{1,2} HE Xianjian³ LI Yanbiao¹ ZHANG Bin² YANG Huayong² CHEN Bo¹

(1. Key Laboratory of Special Purpose Equipment & Advanced Processing Technology,

Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014;

2. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027;

3. Zhejiang Haihong Hydraulic Technology Co., Ltd, Linhai 317000)

Abstract: Aiming at the problem that the dynamic characteristic of the sphere structure high speed on/off valve(HSV) is greatly affected by the supply pressure, a control algorithm for HSV that adaptive to supply pressure changes is proposed. Adaptive switching of multi-voltage sources is realized by combining current feedback operation principle with calculating critical switching currents of HSV under different supply pressures, so that the dynamic performance of the HSV under changing supply pressure can be preserved. Theoretical analysis proves that the supply pressure has a great influence on the dynamic characteristic of the HSV. Both simulation and experiment results achieve the expected effects of the presented control strategy. Compared to the single voltage driving method, the results show that when supply pressure changes from 5 MPa to 20 MPa, the presented control algorithm can effectively shorten the total switching time by 56.9%-75.8%, expand the controllable duty cycle range by 45.9%-240.6%, and improve the maximum operation frequency of HSV by 161.0%-637.5%. What's more, the change ranges of both total switching time and controllable duty ratio can be remained within 2.1%, and the difference coefficient of maximum operation frequency is less than 4.6%.

Key words: high speed on/off valve; supply pressure changes; dynamic performance preservation; switching time; controllable duty ratio; maximum operation frequency

* 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金 (GZKF-201906)、国家自然科学基金(51890885, 52005441, 51975523, 51905481)和浙江省自然科学基金(LQ21E050017, LR18E050003)资助项目。20200501 收到初稿, 20201015 收到修改稿

0 前言

高速开关阀是现代数字液压系统中的重要控制元件^[1], 具有结构紧凑、抗污染性强、控制简单、价格低廉等优点。通过电磁阀快速启闭运动生成高频离散流体, 从而实现压力和流量的精确控制, 是数字液压技术的重要研究方向。

动态特性是衡量高速开关阀性能的重要指标, 是决定高速开关阀控液压系统控制精度的关键。目前, 针对高速开关阀动态特性的研究工作, 多围绕高性能电-机械转换器、新型阀体结构以及先进控制策略等 3 方面展开。电-机械转换器方面, 北京航空航天的 WU 等^[2]和 GUO 等^[3]采用音圈电机直驱电磁阀, 实现了电磁阀高频换向。特殊材料也被广泛运用于高速开关阀驱动器设计。浙江大学的张军辉等^[4]设计了一款压电驱动开关阀, 并采用三角放大原理的滚针结构对压电材料的位移进行放大, 保证开关阀频响的同时增大了开关阀行程。XUE 等^[5]和 ZHU 等^[6]利用超磁致材料研制了电-机械转换器, 并用于电喷系统中^[7]。HILL 等^[8]采用介电弹性体驱动气动开关阀, 实现了电磁阀在低功耗下的高频切换。阀体结构设计方面, 浙江工业大学的阮健等^[9]提出了 2 维液压阀结构, 该结构利用伺服螺旋机构将阀芯的旋转运动转换为阀芯轴向运动, 可实现 8 ms 的快速锁紧^[10], 并被运用在高频激振器中^[11]。LIU 等^[12]设计了旋转式阀芯结构, 提高阀芯旋转速度即可提升开关阀的启闭频率。

但是, 不论是涉及电-机械转换器还是阀芯阀体结构优化, 都是面向高速开关阀设计制造阶段, 不适用于现有的高速开关阀。优化控制策略是提升成品高速开关阀动态特性的有效途径^[13]。苏明^[14-15]提出了双电压驱动方法和动态调整回路阻值以加快放电速度的策略, 降低了开关阀在关闭阶段的滞后时间和运动时间。FLORIAN 等^[16]设计了电流增益驱

动器, 控制开关阀各工作阶段的电流状态, 从而实现开关阀快速启闭。LEE^[17]设计了一套 3 电压切换激励的控制电路, 提高了开关阀动态特性, 但是该电路需要人为设定每段电压的有效时间, 自主化程度较低。在此基础上, 钟麒等^[18]提出了基于电流反馈的 3 电压激励方法, 可根据电流状态自动切换激励电压, 减少启闭时间 25% 以上。高强提出了一种复合 PWM 控制策略, 并设计了基于状态量反馈的闭环控制器, 将高速开关阀的关闭时间降低了 62.5%。

目前, 由于滑阀结构的高速开关阀难以在油液泄漏和摩擦阻力之间取得平衡, 因此多数高速开关阀采用球阀或者锥阀结构。这类结构, 在其有效截面上将受到较大的液压力, 因此, 油压的变化会影响高速开关阀的动态特性。

然而, 上述研究大多关注如何提升高速开关阀的动态性能, 忽略了高速开关阀在变工况下的动态维持特性。高速开关阀作为液压系统中的控制元件, 其动态特性将直接决定被控执行器的性能表现^[19]。提高并维持高速开关阀在可变工况下的动态特性, 是优化高速开关阀控液压系统稳定性和控制精度的有效途径^[20]。

本文以球阀结构的高速开关阀为研究对象, 分析了其在不同供油压力下的动态特性。在先前研究成果^[18]的基础上, 进一步提出了自适应供油压力变化的高速开关阀控制策略, 并通过仿真和试验验证了控制策略的效果。

1 高速开关阀结构与工作原理

本文研究的高速开关阀具体结构如图 1 所示, 其中 P 为进油口, A 为工作口, T 为回油口。该阀在 20 MPa 的额定压力下, 可实现 2 L/min 左右的流量输出。不同于传统的弹簧复位结构, 该阀依靠进油口的液压力实现钢球的复位, 因此液压力的变化

图 1 高速开关阀结构

1. 衔铁 2. 线圈 3. 极靴 4. 阀体 5. 出油口钢球 6. 分离销 7. 进油口钢球

对其动态特性具有较大影响。该阀的具体工作原理如下:通电时,电-机械转换器产生的电磁力克服液压力等阻力,衔铁带动左、右两钢球和分离销向右运动,此时,P口与A口联通,T口与A口断开,高速开关阀处于开启状态。断电时,作用在右钢球上的液压力克服剩余电磁力和阻力,推动左、右两钢球和分离销向左运动,此时,P口与A口断开,T口与A口联通,高速开关阀处于关闭状态。

2 高速开关阀数学建模

高速开关阀通过电-机械转换器将电能转换成机械能,并最终推动阀芯,实现对油液的控制,其能量传递过程见图2。图中各模块的数学模型构成了高速开关阀的整体数学模型。

图2 高速开关阀能量传递过程

2.1 电路模块

高速开关阀在工作状态下的电路数学模型可表示为

$$U = RI + L \frac{dI}{dt} + I \frac{dL}{dt} \quad (1)$$

式中, U 为激励电压, R 为等效电阻, I 为线圈电流值, L 为等效电感。

2.2 磁路模块

通过实际测量,该高速开关阀的电磁铁部分装配气隙较小,相比较工作气隙而言,装配气隙可以忽略。因此,电-机械转换器的磁路模型可表示为

$$IN = H_c l_c + H_g l_g = H_c \left(l_c + \frac{H_g}{H_c} l_g \right) \quad (2)$$

$$L = \frac{N\phi}{I} = \frac{N^2}{R_m} \quad (3)$$

$$F_m = \frac{\lambda \phi^2}{2\mu_0 S} \quad (4)$$

式中, N 代表线圈匝数, H_c 和 H_g 分别是磁性材料和气隙中的等效磁场强度, l_c 和 l_g 分别是磁路在磁性材料和气隙中的等效长度, ϕ 为当前工作气隙磁通, R_m 为当前回路中的等效磁阻, F_m 是电-机械转换器产生的电磁力, λ 为漏磁系数, μ_0 为真空磁导率, S 表示衔铁的有效截面积。

2.3 机械模块

高速开关阀的动态运动方程为

$$m \frac{dx^2}{dt} = F_m - (F_s + F_t) - k \frac{dx}{dt} - P_s A \quad (5)$$

式中, m 为运动部件质量, x 为衔铁位移, F_s 和 F_t 分别为作用在阀芯上的稳态液动力和瞬态液动力, k 为摩擦因数, P_s 为进油口压力, A 表示P口的有效横截面积。其中,稳态液动力和瞬态液动力可分别表示为

$$F_s = 2C_v C_d A_o \Delta P \cos \theta \quad (6)$$

$$F_t = C_d w L_d \sqrt{2\rho \Delta P} \frac{dx}{dt} \quad (7)$$

式中, C_v 为流速系数, C_d 为流量系数, A_o 为阀口过流面积, ΔP 为阀口压差, θ 为射流角, w 为面积梯度, L_d 为油液阻尼长度, ρ 为油液密度。

在高速开关阀临界启闭时刻,阀芯仍处于静止状态,因此式(5)中的 dx^2/dt 和 dx/dt 两项均为零。此时,高速开关阀运动的临界电磁力

$$F_{cm} = P_s A \pm F_s \quad (8)$$

根据高速开关阀不同的初始状态,其临界电磁力可进一步扩展为

$$F_{cm} = P_s A - 2C_v C_d A_o P_{AT} \cos \theta \quad (9)$$

$$F_{cm} = P_s A + 2C_v C_d A_o P_{PA} \cos \theta \quad (10)$$

式(9)和(10)分别表示电磁铁吸合和释放所需的临界电磁力,式中 P_{AT} 为A口和T口的压差, P_{PA} 为P口和A口的压差。

2.4 流体模块

高速开关阀的流量计算如下

$$Q = C_d A_o \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (11)$$

式中, Q 表示高速开关阀流量。

2.5 动态过程关键参数求解

根据式(2)~(4)、(9)和(10),可以得到电-机械转换器产生临界电磁力所需的电流大小为

$$I_{on} = \frac{N}{L_{off}} \sqrt{\frac{2\mu_0 S (P_s A + 2C_v C_d A_o P_{AT} \cos \theta)}{\lambda}} \quad (12)$$

$$I_{off} = \frac{N}{L_{on}} \sqrt{\frac{2\mu_0 S (P_s A + 2C_v C_d A_o P_{PA} \cos \theta)}{\lambda}} \quad (13)$$

式中, I_{on} 为临界开启电流,即高速开关阀由关闭状态转换为开启状态所需的电流, I_{off} 为临界关闭电流,即高速开关阀由开启状态转换为关闭状态所需

的电流, L_{on} 和 L_{off} 分别表示高速开关阀在开启和关闭状态下的等效电感。

高速开关阀在开启或关闭状态下, 其等效电感为常数, 因此线圈中的电流可表示为

$$I = I_i + \left(\frac{U}{R} - I_i \right) \left[1 - \exp\left(-t \frac{R}{L}\right) \right] \quad (14)$$

式中, I_i 为线圈的初始电流。由式(14)变换可得到电流变化的滞后时间为

$$t_d = \frac{L}{R} \ln \frac{U - I_i R}{U - IR} \quad (15)$$

式中, t_d 表示滞后时间。因此, 高速开关阀开启过程和关闭过程的滞后时间为

$$t_{don} = \frac{L_{off}}{R} \ln \frac{U - I_i R}{U - \frac{NR}{L_{off}} \sqrt{\frac{2\mu_0 S(P_s A - 2C_v C_d A_o P_{AT} \cos \theta)}{\lambda}}} \quad (16)$$

$$t_{doff} = \frac{L_{on}}{R} \ln \frac{U - I_i R}{U - \frac{NR}{L_{on}} \sqrt{\frac{2\mu_0 S(P_s A + 2C_v C_d A_o P_{PA} \cos \theta)}{\lambda}}} \quad (17)$$

式中, t_{don} 和 t_{doff} 分别表示高速开关阀的开启滞后时间和关闭滞后时间。

由式(12)、(13)可以得到结论: 不同的供油压力下, 高速开关阀的临界启闭电流值不同。由式(5)、(16)和(17)可以得到结论: 供油压力对高速开关阀的动态特性具有较大影响, 随着供油压力的增大, 高速开关阀开启滞后时间增大, 而关闭滞后时间减小。调节激励电压的大小可以改变启闭滞后时间。

3 自适应供油压力变化的控制策略

张斌等^[21]的研究工作介绍了高速开关阀常用的驱动方式及其优缺点。其中, 驱动方法主要包括单电压驱动、双电压驱动和三电压驱动。随着驱动电压数量的增加, 高速开关阀的动态特性有所提高, 且温升和能耗也能得到有效控制, 但是依然无法实现在变供油压力下对高速开关阀动态特性的维持。

根据数学分析的结论, 结合三电压驱动方法和基于电流反馈的电压源切换机制^[18], 本文进一步提出了自适应供油压力变化的高速开关阀控制策略, 将高速开关阀每个启闭周期分为六个阶段, 分别为: 开启滞后阶段, 开启运动阶段, 开启保持阶段, 关闭滞后阶段, 关闭运动阶段和关闭保持阶段。其中, 开启滞后阶段和开启运动阶段采用高电压激励, 开

启保持阶段采用低电压激励, 关闭滞后阶段和关闭运动阶段采用负电压激励, 关闭保持阶段采用零电压激励。该控制策略的硬件框架如图 3 所示, 主要包括外部的四个电压源, 分别为高电压源、可调低电压源、负电压源和零电压源。外部控制信号用于控制高速开关阀的目标工作频率和启闭占空比。控制器接收当前供油压力信号, 计算得到当前供油压力下的临界启闭电流。进一步, 通过电流反馈的方法与临界启闭电流值进行逻辑运算, 实现各电压源的自动切换。

图 3 自适应供油压力变化控制策略硬件框架

该控制策略的具体工作原理如图 4 所示。系统启动时, 压力传感器检测高速开关阀供油腔的压力, 并反馈给控制器。控制器根据当前的供油压力, 更新相应的临界启闭电流和可调低电压源的电压值。为确保高电压切换成可调低电压的瞬间, 高速开关阀已经完全开启; 以及负电压切换成零电压的时刻, 高速开关阀已经完全关闭, 电流比较框中设置了触发阈值 α 和 β , 即触发开启电流应略大于实际的临界开启电流, 相反, 触发关闭电流应略小于实际的临界关闭电流。并且, 可调低电压源的电压值需略大于等效电阻与当前临界关闭电流的乘积, 以维持开关阀开启状态, 并使线圈电流更接近临界关闭电流, 减少关闭滞后时间。

开启保持阶段所采用的可调低电压可由式(13)推导出

$$U_L = R \times I_{off} + \varepsilon = \frac{RN}{L_{on}} \sqrt{\frac{2\mu_0 S(P_s A + 2C_v C_d A_o P_{PA} \cos \theta)}{\lambda}} + \varepsilon \quad (18)$$

式中, U_L 为低电压激励, ε 是电压补偿值。根据仿真和试验结果, ε 的取值在 0.5 V 左右为宜。

当控制信号上升沿来临时, 控制器使能高电压源, 并保持其余三个电压源与回路断开。在高电压的激励下, 回路中电流快速上升。如果在电流达到触发开启电流前, 控制信号的下降沿到来, 则说明控制信号频率过高, 高速开关阀无法响应, 需降低控制信号频率。如果在高电压激励过程中控制信号下降沿未到来, 那么各电压源的使能状态将继续保持, 直到线圈电流达到触发开启电流值。此时, 高

速开关阀开启, 控制器切换至可调低电压源继续激励高速开关阀。由于可调低电压源在每个周期起始阶段的自动更新, 因此, 当可调低电压源接入回路时, 电流逐渐下降并最终稳定在一个略大于当前临界关闭电流的数值, 以保证高速开关阀处于开启状态。当控制信号下降沿到来时, 控制器切换至负电压激励高速开关阀, 在负电压的卸荷作用下, 电流迅速下降, 直至达到触发关闭电流。此时, 高速开关阀关闭, 控制器切换至零电压源以保持高速开关阀的关闭状态。同时, 控制器根据当前的供油压力情况, 实时更新下一个控制周期中的触发启闭电流和可调低电压数值, 直到下一个控制信号的上升沿到来, 控制系统重复上述控制过程。

图 4 自适应供油压力变化控制策略工作流程图

该控制策略根据当前供油压力情况, 自动计算临界启闭电流和保持电压, 并基于触发临界电流数值, 采用电流反馈控制的方法实现了多电压源之间的自动切换。在高速开关阀的开启和关闭阶段, 分别采用较大数值的正电压和负电压激励, 提高高速开关阀的动态特性, 在高速开关阀的开启和关闭维持阶段, 分别采用较低数值的正向维持电压和零电压, 降低高速开关阀的温升和电磁能耗。该控制策略下的高速开关阀动态特性如图 5 所示。

图 5 高速开关阀动态特性

4 高速开关阀仿真模型搭建

高速开关阀仿真参数如表 1 所示。

表 1 高速开关阀关键结构参数

名称	数值
钢球直径/mm	2.4
阀口直径/mm	0.8
钢球最大位移/mm	0.25
线圈电阻/ Ω	9.6
线圈匝数/匝	450
电磁铁初始气隙/mm	0.35
分离销直径/mm	0.5
移动部件质量/g	7.5
衔铁直径/mm	8
衔铁长度/mm	16.5

结合上述关键结构参数, 在 Ansoft 中搭建电-机械转换器仿真模型, 并定义主要导磁材料为电工纯铁, 其 B-H 特性曲线如图 6 所示。得到电-机械转换器的电磁力特性和电感特性如图 7 和图 8 所示。根据仿真结果可得, 电磁力受安匝数和气隙的影响较大, 随着安匝数的增多或气隙的减小, 电磁力均逐渐增加, 最大电磁力达到 50 N。电感大小受安匝数的影响较大, 随着安匝数的减小, 电感逐渐增大, 且在 0~500 安匝数间快速上升, 达到 180 mH。

图 6 电工纯铁 B-H 特性曲线

图 7 电磁铁磁力特性

图 8 电磁铁电感特性

将描述电-机械转换器性能的电磁力数据和电感数据进行相关数据处理后，导入 AMESim 中的电磁铁模块中，得到完整描述电-机械转换器特性的子模型，并用于高速开关阀动态特性仿真分析。高速开关阀的仿真模型如图 9 所示。

图 9 自适应供油压力变化控制策略仿真模型

5 仿真与试验结果分析

被试开关阀结构紧凑，难以通过安装位移传感器来获取其位移状态。为此，本文采用了一种动态压力测试方法来间接获取高速开关阀的阀芯状态，其原理如图 10 所示。

图 10 动态压力测试方法原理图

该方法在高速开关阀的 A 口设置压力传感器，当阀开启时，油液从 P 口流入压力测试腔，此时 A 口压力上升至供油压力；当阀关闭时，油液从压力测试腔流回油箱，此时 A 口压力降低至油箱压力。由于油液的压缩性，动态压力测试方法的准确性取决于压力测试腔的体积，其体积越小，压力动态特性越好，压力响应相对于与阀芯位移的时间滞后越短。本文采用挤压密封的方式，将薄膜溅射压力传感器设置在高速开关阀工作口，尽可能减小压力测试腔体积，如图 11 所示。试验台的主要参数如表 2 所示。

(a) 结构图

(b) 实物图

图 11 动态压力测试装置

1. 阀块 2. 端盖 3. 薄膜溅射压力传感器 4. 密封圈 5. 被试阀

表 2 试验台主要参数

名称	内容
可调油源压力范围/MPa	0.5~20
压力传感器量程/MPa	0~42
压力传感器精度	±0.1%
数据采集卡型号	NI9205
数据采集卡最大采样频率/(kS/s)	250

高速开关阀的临界启闭电流是该控制策略的关键参数。因此,通过静态分析方法,得到了高速开关阀在不同供油压力下的临界启闭电流值,如图 12 所示。

图 12 不同供油压力下的高速开关阀临界启闭电流

5.1 高速开关阀启闭动态特性分析

单电压 PWM 驱动是高速开关阀控制领域应用最为广泛的控制方法,即在开启阶段用高电压激励,在关闭阶段用零电压激励。为了验证自适应供油压力变化控制策略的优越性,本文以单电压 PWM 控制算法的性能作为对比,其电压设置为 24 V,即高速开关阀的额定电压。高速开关阀在单电压 PWM 控制下的启闭特性仿真结果如图 13 所示,试验结果如图 14 所示。

图 13 单电压驱动的高速开关阀启闭特性仿真结果

仿真和试验结果都具有相同的变化趋势,并验证了理论分析的准确性,即随着供油压力的增大,高速开关阀开启滞后时间明显增大,开启运动时间基本保持不变,而关闭滞后时间和关闭运动时间却大幅减小。造成该现象的原因是因为 P 口的液压力方向与电磁力方向相反,阻碍高速开关阀开启。根据式(12),供油压力与临界开启电流成正相关,因此在高压工况下,电流增长至临界开启状态的动态过程更长,其开启滞后时间也 longer。在高速开关阀的关闭阶段,根据式(13),临界关闭电流随着供油

压力的提高而增大,因此,电流降低至临界关闭电流所需的关闭滞后时间将进一步缩短。同时,供油压力是阀芯复位运动的驱动力,其值越大,复位过程越快,关闭运动时间越短。

图 14 单电压驱动的高速开关阀启闭特性试验结果

高速开关阀在自适应压力变化驱动方法下的启闭性能仿真结果和试验结果如图 15、16 所示。受限于高速开关阀的额定驱动电压,自适应压力变化驱动方法中的高电压设置为 24 V,负电压设置为 -24 V。由于两种驱动方法在开启阶段的驱动电压相同,因此,图 15a 和图 16a 中的压力动态曲线也基本一致。

图 15 自适应供油压力变化驱动算法的启闭特性仿真结果

图 16 自适应供油压力变化驱动算法的启闭特性试验结果

但是在高速开关阀关闭阶段, 两种算法所表现出来的动态特性具有明显的差距。由于单电压驱动方法在开关阀开启后继续采用高电压激励, 造成线圈内部电流急剧升高, 直至稳定在最大电流值, 导致高速开关阀关闭时刻初始电流较大, 因此在自然放电状态下, 需要经过较长的时间才能降低至临界关闭电流值, 导致关闭滞后时间延长。自适应压力变化驱动算法在高速开关阀开启后切换成可调低电压进行激励。因此, 线圈电流逐渐降低, 并维持在一个略大于临界关闭电流的状态, 形成一个较为理想的关闭初始电流。当关闭阶段的负电压到来时, 电流可以迅速降低至临界关闭电流, 从而加快开关阀关闭过程。因此, 在自适应压力变化驱动算法下, 高速开关阀的在关闭阶段的动态特性有较大改善。

仿真和试验结果均表明, 采用自适应供油压力控制方法时, 高速开关阀的关闭滞后时间大幅减小, 且关闭滞后特性几乎不受供油压力变化的影响。同时, 关闭运动时间也进一步减少, 且减少的幅度随着供油压力降低而增大。

为了进一步研究高速开关阀在不同供油压力下的启闭特性变化规律, 将图 13~16 中各曲线包含的

动态时间进行分析, 其中单电压驱动方法下的动态时间如图 17 所示。仿真和试验结果都表明随着供油压力的增大, 开启滞后时间略微增大, 开启运动时间基本保持不变, 而关闭滞后时间和关闭运动时间却大幅减小, 并最终导致总启闭时间缩短。关闭阶段动态特性是影响总启闭时间最主要因素。因为相对于电磁力而言, 作用钢球上的液压力较小, 因此, 在高速开关阀开启阶段, 阀芯运动特性主要受电磁力影响, 供油压力的变化对其影响较小; 而在高速开关阀关闭阶段, 液压力是阀芯复位运动的主要驱动力, 因此, 在供油压力变化时, 高速开关阀的关闭特性将受到更大的影响。

图 17 单电压驱动的高速开关阀启闭动态时间

试验结果表明, 高速开关阀在 5 MPa 工作压力下的启闭总时长最大, 达到了 39.7 ms; 在 20 MPa 工作压力下的启闭总时长最小, 仅为 21.8 ms, 其启闭总时长的变化率达到了 82.1%。

自适应供油压力变化驱动方法下的动态时间如图 18 所示。仿真和试验结果均表明高速开关阀的启闭特性得到了大幅提升, 相比较单电压驱动方法下的总启闭时长, 高速开关阀在自适应供油压力变化驱动方法下总启闭时长缩短了 56.9%~75.8%。此外, 研究结果还表明随着供油压力的增大, 开启滞后时间逐渐增大, 开启运动时间和关闭滞后时间基本不变, 关闭运动时间逐渐减小。但是, 高速开关阀的启闭总时间几乎不受供油压力变化的影响。根据试验结果, 高速开关阀在 5 MPa 工作压力下的启闭总时长最大, 达到了 9.6 ms; 在 20 MPa 工作压力下的启闭总时长最小, 达到了 9.4 ms, 其启闭总时长的变化只有 0.2 ms, 变化率仅为 2.1%。

因此, 自适应供油压力变化的高速开关阀控制策略不仅可以有效降低高速开关阀在不同供油压力下的平均启闭时长, 提高动态性能, 还能够不同的供油压力下维持其原有的启闭动态特性。

图 18 自适应供油压力变化驱动的高速开关阀启闭动态时间

5.2 高速开关阀可控占空比特性分析

可控占空比范围是衡量高速开关阀控制精度的重要指标。可控占空比范围越大，控制死区越小，高速开关阀控系统的压力流量调节精度就越高。对高速开关阀在单电压驱动方法和自适应供油压力变化驱动方法下的可控占空比范围进行分析。设置驱动频率为 25 Hz，以高速开关阀临界完全启闭为判断依据，采用单电压驱动的占空比控制结果如图 19 所示。

图 19 单电压驱动的高速开关阀可控占空比特性

结果表明，高速开关阀在单电压方法驱动时，随着供油压力的升高，其最小可控占空比和最大可控占空比均随之增加。由于最小可控占空比主要受到高速开关阀开启特性的影响，最大可控占空比主要受到关闭特性的影响，而在供油压力变化的过程中，高速开关阀开启特性受到的影响相对较小，因此，根据试验结果，在供油压力从 4 MPa 上升至 20 MPa 的过程中，最小可控占空比从 10.0% 逐渐增大至 14.6%，而最大可控占空比从 32.4% 增大至 68.0%。由此导致高速开关阀的有效可控占空比范围（最大可控占空比与最小可控占空比的差值）随着供油压力的增大，从 22.4% 扩大至 53.4%，变化率达到 138.4%。

高速开关阀在采用自适应供油压力变化控制策

略驱动时，其占空比控制特性如图 20 所示。由于自适应供油压力变化驱动方法在开启阶段和单电压驱动方法一样均采用 24 V 电压驱动，因此，两种方法下的高速开关阀的开启特性较为相似。最小可控占空比由开启特性决定，因此，两种驱动方法下的最小可控占空比特性基本保持一致。然而，自适应供油压力变化控制策略在高速开关阀关闭阶段采用负电压激励，加快高速开关阀关闭过程，可以有效提高最大可控占空比。

图 20 自适应供油压力变化驱动算法的可控占空比特性

根据图 20 中的试验结果，采用自适应供油压力变化控制策略驱动时，高速开关阀的最大可控占空比随供油压力的升高而增大，由 4 MPa 供油压力时的 87.7% 逐渐增大至 20 MPa 供油压力时的 92.0%。虽然，最小可控占空比和最大可控占空比均随着供油压力的升高而增大，但是其有效可控占空比范围基本保持稳定，变化范围为 76.3%~77.9%，变化率仅为 2.1%。相比较单电压驱动方法，高速开关阀的可控占空比范围扩大了 45.9%~240.6%，可控占空比范围变化率减小了 98.7%。

由于高速开关阀控系统通过调整驱动占空比来实现压力、流量的控制，因此提高高速开关阀在变供油压力下的可控占空比范围，并降低其可控占空比范围的波动，有利于提高高速开关阀控系统的控制精度。

5.3 高速开关阀最大工作频率

频率响应特性是衡量高速开关阀性能的重要指标，在某些通过高频离散流体的融合来驱动负载的场合，高速开关阀的频率直接决定了负载的控制特性。高速开关阀的频率越高，负载的抖动越小，控制稳定性和精度越高。在驱动信号占空比为 50% 的工况下，对高速开关阀在变供油压力工况下的频率响应特性进行分析。以高速开关阀临界完全启闭为判断依据，其最大工作频率特性如图 21 所示。

图 21 高速开关阀最大工作频率

当高速开关阀采用单电压驱动时,其关闭滞后时间和关闭运动时间较长,因此,高速开关阀的关闭动态特性成了制约提高工作频率的最大因素。由于供油压力的提高有助于加快高速开关阀的关闭过程,因此,随着供油压力的升高,高速开关阀的最大工作频率也逐渐提高。根据试验结果,高速开关阀的最大启闭频率由 4 MPa 供油压力时的 16 Hz 逐渐增大至 20 MPa 供油压力时的 41 Hz。随着供油压力的变化,高速开关阀的最大工作频率变化率达到 156.2%。

根据自适应供油压力变化驱动时的最大启闭频率曲线可以得到一个重要结论:仿真和试验结果均展现了相同的规律,即高速开关阀的最大启闭频率在低压时随着油压增大而增大;相反地,在高压下随着油压增大而减小。试验结果表明:高速开关阀的最大工作频率在 4~10 MPa 的供油压力范围内,随着供油压力升高,从 118 Hz 提高至 122 Hz;在 10~20 MPa 的供油压力范围内,随着供油压力升高,从 122 Hz 逐渐减小至 107 Hz。随着供油压力的变化,高速开关阀的最大工作频率变化率只有 14.0%。由于,供油压力产生的液压力是高速开关阀关闭的主要驱动力,因此,在供油压力较低时,高速开关阀的关闭动态会受到较大影响。自适应供油压力变化的驱动策略,通过关闭时刻采用负电压激励,实现电流的快速卸荷来提高高速开关阀关闭时刻的动态特性,从而提高高速开关阀在低供油压力时的最大工作频率。随着供油压力的升高,高速开关阀的开启滞后时间逐渐增大,成为限制工作频率提高的重主要因素。因此,在较大的供油压力下,高速开关阀的最大工作频率随着供油压力的升高而降低。

根据图中曲线可得,自适应供油压力变化驱动方法将高速开关阀的最大工作频率提升了

161.0%~637.5%。由于自适应供油压力变化驱动方法大幅提高了高速开关阀的最大工作频率,因此,常规的标准差评判方法无法准确评定其数据差异性。差异系数可以消除平均值不同对两个或多个数据变异程度比较的影响,更直观地反映出数据的波动特性。

根据差异系数公式

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \quad (18)$$

式中, CV 为数据的差异系数, σ 为数据的标准差, μ 为数据的平均值。

结合试验结果,采用单电压驱动方法时,高速开关阀最大工作频率的差异系数为 33.5%;而采用自适应供油压力变化驱动方法时,高速开关阀最大工作频率的差异系数仅为 4.6%。相比较传统的单电压驱动方法,自适应供油压力变化驱动方法不仅能够提高高速开关阀在不同供油压力下的最大工作频率,还能有效降低最大工作频率的变化。

6 结论

根据对球阀结构高速开关阀的数学分析和仿真研究,可以得到如下结论。

(1) 供油压力的变化会影响高速开关阀动态特性,随着供油压力的增大,开启滞后时间减小,而关闭滞后时间增大。调节激励电压的大小可以改变启闭滞后时间。

(2) 自适应供油压力变化的高速开关阀控制策略不仅可以有效降低高速开关阀在不同供油压力下的平均启闭时长,提高动态性能,还能够不同的供油压力下维持其原有的启闭动态特性,将启闭总时长的变化控制在 0.2 ms 以内,变化率保持在 2.1% 以内。

(3) 自适应供油压力变化的高速开关阀控制策略可以有效扩大可控占空比范围,并且在供油压力变化的情况下,将可控占空比范围的变化率保持在 2.1% 以内。

(4) 自适应供油压力变化的高速开关阀控制策略不仅能够提高高速开关阀在不同供油压力下的最大工作频率,还能有效降低最大工作频率的变化率,保持不同供油压力下最大工作频率的差异系数在 4.6% 以内。

(5) 试验结果与仿真结果之间的数据差异主要来源于动态压力测试方法的误差。由于压力测试腔的容积无法降低至 0 体积,导致压力响应不可避免

的滞后于阀芯位移。

参 考 文 献

- [1] YANG Huayong, PAN Min. Engineering research in fluid power: A review[R]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2015, 6(16): 427-442.
- [2] WU Shuai, JIAO Zongxia, YAN Liang, et al. Development of a direct-drive servo valve with high-frequency voice coil motor and advanced digital controller[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(3): 932-942.
- [3] GUO Hong, WANG Dayu, XU Jinquan. Research on a high-frequency response direct drive valve system based on voice coil motor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2483-2492.
- [4] 张军辉, 肖友, 陆振宇. 一种新型压电驱动开关阀的理论设计[J]. 液压与气动, 2017(5): 99-103.
- ZHANG Junhui, XIAO you, LU Zhenyu. Theoretical design for a novel piezoelectric on/off valve[J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2017(5): 99-103.
- [5] XUE Guangming, ZHANG Peilin, HE Zhongbo, et al. Design and experimental study of a novel giant magnetostrictive actuator[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2016, 420: 185-191.
- [6] ZHU Yuchuan, LI Yuesong. Development of a deflector-jet electrohydraulic servovalve using a giant magnetostrictive material[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(11): 115001.
- [7] XUE Guangming, ZHANG Peilin, HE Zongbo, et al. Displacement model and driving voltage optimization for a giant magnetostrictive actuator used on a high-pressure common-rail injector[J]. Materials and Design, 2016, 95: 501-509.
- [8] HILL M, RIZZELLO G and SEELECKE S. Development and experimental characterization of a pneumatic valve actuated by a dielectric elastomer membrane[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26: 085023.
- [9] 阮键, 裴翔. 2D 电液数字换向阀[J]. 机械工程学报, 2000, 36(3): 86-89.
- RUAN Jian, PEI Xiang. 2D digital directional control valve[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(3): 86-89.
- [10] 郑波. 快速锁紧阀的设计及性能研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2008.
- ZHENG Bo. Design and analysis of high speed locking valve[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2008.
- [11] YAN Ren, JIAN Ruan. Theoretical and experimental investigations of vibration waveforms excited by an electro-hydraulic type exciter for fatigue with a two-dimensional rotary valve[J]. Mechatronics, 2016, 33: 161-172.
- [12] LIU Yi, GONG Guofang, YANG Huayong, et al. Regulating characteristics of new tamping device exciter controlled by rotary valve[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 21(1): 497-505.
- [13] ZHONG Qi, ZHANG Bin, YANG Huayong, et al. Performance analysis of a high-speed on/off valve based on an intelligent pulse-width modulation control[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(11): 2071942412.
- [14] 苏明. 电磁高速开关阀控制特性及方法研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2010.
- SU Ming. Study on the control characteristics and strategy of the high speed on/off solenoid valve[D]. Guiyang: Guizhou University, 2010.
- [15] 刘宇刚, 苏明. 高速电磁开关阀快速关闭方法设计与实现[J]. 自动化与仪表, 2018(2): 14.
- LIU Yugang, SU Ming. Design and Implementation of high-speed solenoid valve rapid closing method[J]. Automation and Instrumentation, 2018(2): 14.
- [16] FLORIAN M and RUDOLF S. Development and experimental results of a small fast switching valve derived from fuel injection technology[C]// Proceedings of the eighth workshop on digital fluid power, Tampere, Finland, 2016: 9-26.
- [17] LEE I Y. Switching response improvement of a high speed On/Off solenoid valve by using a 3 power source type valve driving circuit[C]//Industrial Technology, 2006. ICIT 2006. IEEE International Conference on IEEE, 2006: 1823-1828.
- [18] 钟麒, 张斌, 洪昊岑, 等. 基于电流反馈的高速开关阀 3 电压激励控制策略[J]. 浙江大学学报, 2018, 52(1): 8-15.
- ZHONG Qi, ZHANG Bin, HONG Haoen, et al. Three power sources excitation control strategy of high speed on/off valve based on current feedback[J]. Journal of Zhejiang University, 2018, 52(1): 8-15.
- [19] ZHANG Junhui, YANG Meisheng, XU Bing, et al. A novel intelligent sliding sleeve for shale oil and gas mining equipment[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 158: 1-10.

- [20] 高强, 朱玉川, 罗樟, 等. 高速开关阀的复合 PWM 控制策略分析与优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2019(6): 9.

GAO Qiang, ZHU Yuchuan, LUO Zhang, et al. Analysis and optimization on compound PWM control strategy of high speed on/off valve[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019(6): 9.

- [21] 张斌, 钟麒, 杨华勇. 高速开关阀控制策略研究[J]. 液压与气动, 2017(6): 7-11.

ZHANG Bin, ZHONG Qi, YANG Huayong. Control

strategy of high speed on /off valve[J]. Hydraulics and Pneumatics, 2017(6): 7-11.

作者简介: 钟麒, 男, 1991 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为数字液压技术、电液比例控制、液压元件与系统的可编程控制技术。

E-mail: zhongqi@zjut.edu.cn

张斌, 男, 1980 年出生, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师。主要研究方向为数字液压技术、智能工程机械。

E-mail: zbzju@163.com

李研彪(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为并联机构设计与控制、智能控制。

E-mail: lybrory@zjut.edu.cn