

文章编号:1006-1355(2021)02-0028-06

## 二通插装阀方向元件的动作响应特性研究

庹前进<sup>1,2</sup>, 刘敏<sup>2</sup>

(1. 中南大学 机电工程学院, 长沙 410083;  
2. 湖南机电职业技术学院 机械工程学院, 长沙 410151)

**摘要:**针对某造型机中二通插装阀方向元件的启闭特性,建立数学模型理论,分析插装阀阀芯动作特性的影响因素;利用 AMESim 建立二通插装阀模型,通过仿真分析弹簧刚度与预压缩力、阀芯面积比与油液流通方向、阻尼孔孔径与安装位置等因素对阀芯动作特性的影响。由仿真结果可知:与弹簧预压缩力相比,阀芯的弹簧刚度对响应特性影响较大;油液在插装阀中通流方向以及插装阀 A 和 X 腔的面积比对阀芯动作特性有明显影响;阻尼孔的孔径和安装位置对阀芯动作特性均有较大影响,实际工程中选定阻尼孔的孔径和安装位置时应综合考虑系统工作周期和冲击性要求。

**关键词:**振动与波;二通插装阀;动作响应;AMESim

中图分类号:TH137

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2021.02.005

## Research on Action Response Characteristics of Directional Components of Double-way Cartridge Valves

TUO Qianjin<sup>1,2</sup>, LIU Min<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;  
2. College of Mechanical Engineering, Hunan Vocational College of Mechanical and Electrical Technology, Changsha 410151, China)

**Abstract:** The opening and closing characteristics of the directional element of the double-way cartridge valve in a molding machine were studied. First of all, the double-way cartridge valve model was established by the AMESim code. Then, the influences of spring stiffness and pre-compressive force, spool area ratio, oil flow direction, damping hole diameter and installation position on the valve core action characteristics were simulated and analyzed. The simulation results show that compared with the spring pre-compressive force, the spring stiffness of the spool has a greater influence on the response characteristics; the flow direction of oil in the cartridge valve, the area ratio of the cartridge A and cavity X have obvious influences on the spool action characteristics. And the diameter and installation position of the damping hole also have a significant effect on the spool action characteristics. In practice, the diameter and installation position of the damping hole should be selected considering the working period and impact effect of the system.

**Key words:** vibration and wave; double-way cartridge valve; action response; AMESim

二通插装阀具有通流能力大、动作快和密封性能好等特点,在高压大流量领域应用较为广泛。相对于普通阀而言,二通插装阀内部流道复杂,工作特性影响因素较多。由于插装阀大多应用于高压、大流量场合,因此必须重视其动态响应特性,特别是

阀芯的启闭动作。二通插装阀的启闭特性将直接影响系统回路的瞬时通断状态,在多插装阀组成回路中,此特性将对整个液压系统产生较大影响<sup>[1]</sup>。

黄海鸿等<sup>[2]</sup>研究了阀口开度对二通插装阀压力流量特性的影响,对阀内部结构进行改进,有效降低了进出口两端实际压力流量特性曲线和基于理论公式所计算得到压力流量特性曲线之间的误差;Sun等<sup>[3]</sup>进行了插装阀的流体结构耦合仿真分析,得到了插装阀的瞬态力学性能和减压过程中液压油与阀芯相互作用的冲击特性,研究结果表明减压过程的稳定性和阀芯与阀套的接触时间有关;于良振等<sup>[4]</sup>基于

收稿日期:2020-04-26

基金项目:湖南省教育厅科学研究资助项目(17C0576);

国家自然科学基金资助项目(51175518)

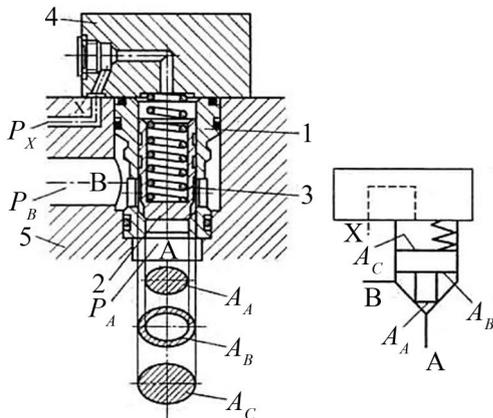
作者简介:庹前进(1983-),男,长沙市人,硕士,副教授,从事机械设计与制造研究。

E-mail: 542053665@qq.com

AMESim 研究了二通插装阀阻尼匹配情况,较为全面和系统地分析了压力插装阀的稳态和动态特性,利用仿真结果可以在系统设计阶段预测其特性;Yang 等<sup>[5]</sup>研究了较小的阻尼孔直径对流量上升速度和流通平稳性的影响,结果表明阀芯开度的波动程度随阀芯质量相对地增加。综上分析,前人的研究未能系统地分析阀芯面积比、通流方向以及阻尼孔位置等因素对阀芯动作产生的影响。本文以某公司的造型机液压系统为背景,在理论上分析插装阀阀芯动作特性的影响因素,利用 AMESim 软件建立模型,通过仿真分析上述因素对插装阀阀芯动作的影响。

## 1 二通插装阀结构及原理

在某型号的造型机液压系统中,为保证满足系统流量要求,统一选用公称直径为 32 mm 的二通插装阀。如图 1 所示。二通插装阀主要由方向元件、控制盖板、先导控制阀 3 部分构成;二通插装阀的方向元件由阀套、阀芯、弹簧和密封件等组成,方向元件装在集成块的腔孔内并由控制盖板压住。



1-阀套; 2-阀芯; 3-弹簧; 4-控制盖板; 5-集成块

图 1 二通插装阀结构

二通插装阀的动作逻辑由 A 腔、B 腔和 X 腔的控制油压决定,其中 A、B 为主作用油口,负责将系统油液输入执行机构,X 为控制口,负责调整阀芯的动作。在二通插装阀工作过程中,根据自身油道与接口的不同,油液有两种流通方向,即油液既可由插装阀 A 口流向 B 口,也可由 B 口流向 A 口。

在由插装阀作为油路通断元件组成的液压系统中,插装阀有多种安装方式。以插装阀轴线垂直于地面安装为例,工作状态下插装阀阀芯除受到各油口处的油液压力作用外,还受到弹簧力、摩擦力、重力等作用。非工作状态下,阀芯依靠弹簧的预压缩力处于关闭状态;当入口油压升高时,弹簧进一步压

缩,阀芯开启。以油液自 A 口流向 B 口为例,阀芯向上移动压缩弹簧,插装阀实现开启。对平衡状态下的插装阀阀芯进行受力分析,可得:

$$\Sigma F = P_A A_A + P_B A_B - P_C A_C - F_k - F_H - F_G - F_f \quad (1)$$

式中: $P_A$  为主油口 A 处压力; $P_B$  为主油口 B 处压力; $P_C$  为控制口 X 处压力; $A_A$  为主油口 A 腔承压面积; $A_B$  为主油口 B 腔承压面积; $A_C$  为控制口 X 腔承压面积; $F_H$  为阀口液动力; $F_G$  为阀芯重力; $F_f$  为摩擦力。

插装阀工作过程中,弹簧一直处于被压缩的状态,阀芯位移与弹簧力之间有如下关系:

$$F_k = k \cdot (x + x_0) \quad (2)$$

式中: $F_k$  为弹簧力; $k$  为弹簧刚度; $x_0$  为弹簧预压缩量; $x$  为阀芯位移。

综上分析,决定阀芯的动作情况的因素有:油液在插装阀阀芯上的作用面积、插装阀 A 腔与 B 腔以及 X 腔处的油液压力、弹簧预压缩力等;影响阀芯具体响应特性的因素还包括:插装阀阀芯所受的液动力、阀芯与阀体间摩擦力和弹簧的弹性刚度等。

## 2 阀芯动作影响因素分析

在式(1)所示的插装阀阀芯平衡方程中,阀芯所受主作用力为插装阀 A 腔、B 腔和 X 腔在各自受力面上的油液压力。与插装阀 A 腔和 B 腔相连通的一般为系统油源或负载,这两处的油液压力分别由系统压力或负载所决定,插装阀控制口 X 腔常与单独的控制油源相通。根据插装阀 X 腔控制油的不同来源可分为 3 种控制方式:独立的控制油源外部供油式、主系统内部供油式、内外结合供油式。控制油液在进入插装阀控制口 X 腔前若通过阻尼孔等元件时,将产生一定的减压作用。

本文所述方案中插装阀 X 腔的控制油源为第 2 种,即主系统内部供油式,此控制方式中阀芯控制油分别取自插装阀 A 口或 B 口,因此其压力值为系统油源压力或负载端压力。这种插装阀阀芯控制方式简单易行,具有一定的自锁能力,但无法保证阀芯两端的有效压差,使得插装阀关闭速度较慢<sup>[6-7]</sup>。解决此类问题的方法有以下两种:(1) 改变控制油的引出点,从系统中压力较高的地方引出,例如从泵出口的上游处引出控制油;(2) 在先导回路中增加蓄能器,使得当系统卸荷时,控制油路仍能维持较高的控制油压力。

由于本系统中方向元件的阀芯控制方式已确定,下文分析弹簧刚度与预压缩力、阻尼孔通径与位置、阀芯两侧面积比与油液通流方向对阀芯动作的影响。

## 2.1 弹簧刚度与预压缩力

由二通插装阀方向元件结构可知,工作状态下油液流经的阀口类型属于锥阀阀口,如图2所示。

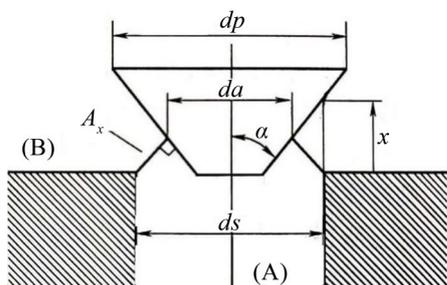


图2 方向元件油口结构

锥阀阀口关闭时,阀芯紧压在阀座孔上,二者间为线密封;阀芯离开阀座则阀口开启。阀口开启时,由图2中所标结构变量可知,阀口的通流截面积为母线等于  $x \sin \alpha$  的截头圆锥的侧面积,此时截头圆锥的顶面半径为  $\frac{ds}{2} - \frac{x \sin \alpha \cos \alpha}{2}$ ,因此锥阀阀口的通流面积与阀芯向上位移距离的关系式如下:

$$A_x = \pi x \sin \alpha (ds - x \sin \alpha \cos \alpha) \quad (3)$$

式中: $A_x$ 为通流面积; $x$ 为阀芯位移; $\alpha$ 为锥阀开口角度; $ds$ 为阀座孔直径。

设方向元件的进口压力为  $P_1$ ,出口压力为  $P_2$ ,由孔口流量公式可得此时阀口处的流量压力方程:

$$q_x = C_d \pi x \sin \alpha (ds - x \sin \alpha \cos \alpha) \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (4)$$

式中: $C_d$ 为流量系数; $\rho$ 为油液密度; $\Delta p$ 为油液进出口压差。

因此,在油液压差一定时,阀口开度将决定系统的供油量,进而将对阀芯响应情况产生较大影响。在决定阀口开度和开启速度的因素中,除油液压力外,弹簧的预压缩力和弹性刚度将产生较大作用。

当插装阀作为方向元件使用时,阀芯关闭过程的时间比开启过程的时间长,其直接原因是阀芯开启时靠液压力,而关闭时靠弹簧力。当对插装阀阀芯采用内控方式时,不论是将其作为进油阀或回油阀使用,阀芯上下的压差均基本平衡;同时,阀芯关闭主要依靠弹簧力作用,为缩短关闭时间,可选用较硬的弹簧或在压降允许条件下减小阀的开度等。

## 2.2 油液通流方向与两腔面积比

二通插装阀有两种通流方向,即  $A \rightarrow B$  和  $B \rightarrow A$ ,在不同的流量压力场合,针对不同的启闭速度与安全性要求,选用不同的通流方向。阀芯的主油口A腔承压面积与控制口X腔承压面积之比  $A_A:A_x$  称为阀芯的面积比,常用的阀芯面积比规格一般有 1:1、1:1.07、1:1.2、1:1.5 及 1:2 等。

图3为锥阀稳态液动力示意图,图中左侧所示  $\omega_1 \rightarrow \omega_2$  为上流式锥阀,右侧所示  $\omega_1 \rightarrow \omega_2$  为下流式锥阀。以上流式锥阀为例,根据动量定理,其锥阀稳态液动力的轴向分量为

$$F_w = \rho q [(-\omega_2) \cos \alpha - (-\omega_1)] \quad (5)$$

式中: $F_w$ 为稳态液动力; $\rho$ 为油液密度; $q$ 为流量; $\omega_1$ 为入口流速; $\omega_2$ 为出口流速。式中负号表明液流速度与假设正方向相反。式(5)中  $\omega_1$  比  $\omega_2$  小得多,故第2项可省略,将式(4)代入式(5),可得:

$$F_w = -C_d C_v \pi x ds \Delta p \sin 2\alpha \quad (6)$$

式(6)中: $C_v$ 为速度系数。式中负号表示上流式锥阀稳态液动力的轴向分量方向与流体流向相反,即方向向下。对于下流式锥阀,其稳态液动力的分析过程类似。

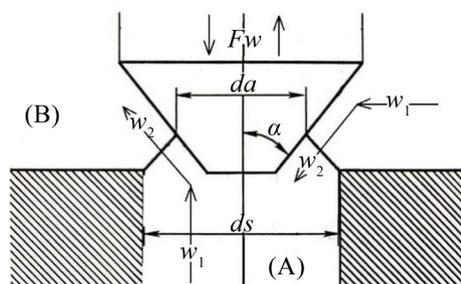


图3 稳态液动力示意图

综上,阀口开度、油液通流方向和通流面积等对阀芯所受的稳态液动力有较大影响,而稳态液动力将显著影响阀芯的响应特性<sup>[8-9]</sup>。

当阀芯两侧面积比较大时,如为 1:1.1 时,阀口直径也相应较大,液流从插装阀A口向B口流动时,阻力小,通流能力大,阀的开启压力较小;而液流从B口向A口流动时,B腔的作用面积较小,阀的开启压力自然较高。因此,具有较大面积比的插装阀适宜用于工作流向为从A口向B口的流动,不宜用于需要反向流动的场所。对于较小面积比的插装件,如面积比为 1:1.5, B腔有效面积加大,液流从B向A流动时,阀的开启压力会相应下降,使得阀芯面积对开启压力影响降低。因此,具有较小面积比的插装件,适用于液流从A向B和从B向A的双向流动。

对于较小面积比的阀芯,液流的流动方向对插装阀响应时间影响较大。若选定油液流向为  $A \rightarrow B$ ,控制油从A口引出,则阀芯开启较快,而关闭较慢。这是因为插装阀的A腔与X腔的面积较接近,控制油又取自A腔,阀芯关闭时作用于阀芯上的压差较小。在阀芯关闭初期,阀芯动作主要靠弹簧的作用,当阀芯开口减小到使阀芯行程小于 10% 时,A腔与B腔形成明显的压力差,阀芯以较快的速度关闭。若选定油液流向为  $B \rightarrow A$ ,则阀芯开启较慢而关闭较

快,开启慢是由于B腔油液作用面积较小,且油液在B腔的作用力须大于控制油压力和弹簧力的合力;由于油液在阀芯两端形成了较大的压力差,关闭自然较快。

### 2.3 阻尼孔通径与位置

如前所述,当插装阀控制口排油通畅时,在系统压力作用下阀芯的开启速度较快,甚至可能产生液压冲击,这时可在控制腔的排油通道中加设节流阻尼孔。阻尼孔在控制油路中的作用是减轻压力波动,并使控制油产生一定的压差。当阻尼孔通径较小时,阻尼孔产生压降较大,阀芯易于开启,但关闭速度较慢;当通径较大时,阻尼孔的稳压作用降低,阀芯动作较快,易产生冲击。

一般来说,阻尼孔在控制油路中有以下3种安装位置可供选择,3种位置对应不同的降压与稳压效果,如图4所示。将阻尼孔1加装在先导控制阀与方向元件阀芯之间是最为常用的一种方式,此时阻尼孔对阀芯的开启和关闭速度都有影响。在一些系统中,由于开启和关闭的速度要求不同,因此安装在1位置处往往不能兼顾二者速度要求,只能用于对一个方向的调速有要求的系统,或用于对两个方向调节要求都不高的系统。因此,当阀芯开启与关闭速度都需要调节时,可在先导阀压力油口和回油口各设一个阻尼孔分别产生压差,即阻尼孔2用于调节阀芯的关闭速度,阻尼孔3用于调节阀芯的开启速度。

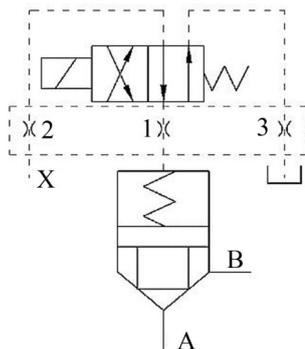


图4 阻尼孔安装位置

## 3 仿真分析

如图5所示。以某公司造型机液压系统为背景设计的液压系统仿真模型,利用AMESim软件中的液压库、信号库、机械库以及HCD库中的模型构建如图5所示元件级插装阀模型,仿真插装阀阀芯的动作响应情况。采用内控方式中带有蓄能器保压系统的仿真模型,利用梭阀引取蓄能器和负载油缸中的较高压力油作为插装阀控制油;模型中阻尼孔默认放置在图4所示的位置1处,默认流向为A→B,

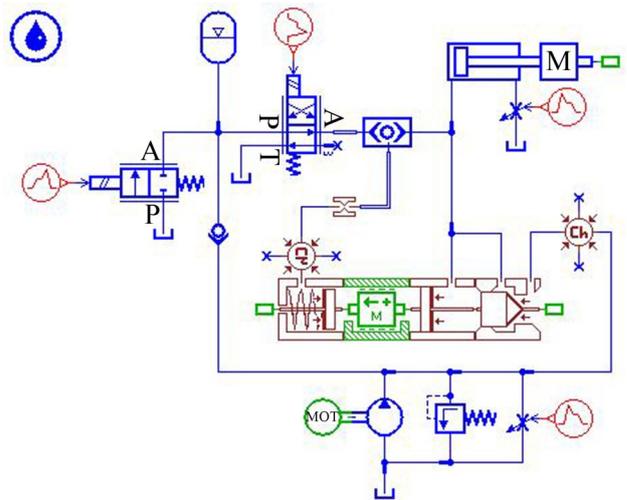


图5 AMESim仿真模型

后续再根据仿真需要进行调整。此AMESim仿真模型中部分主要参数设置如表1所示。

表1 AMESim模型参数设置

元件模块	变量	参数
电动机	转速	1 460 rev/min
变量泵	排量	130 cc/rev
溢流阀	溢流压力	100 bar
蓄能器	体积	2 L
	预充气压力	60 bar
插装阀	阀芯质量	0.3 kg
	黏性阻力系数	20 N/(m·s <sup>-1</sup> )
	位移区间长度	50 mm
	无杆腔直径	100 mm
油缸	有杆腔直径	50 mm
	油缸行程	2 m
	库伦摩擦力	100 N

下面通过仿真第2节所分析的3种因素对插装阀阀芯动作响应的影响情况。

### 3.1 弹簧刚度与预压缩力

由2.1节分析可知,弹簧刚度与预压缩力对阀芯的开启时刻和动作时长有较大影响。仿真模型中设定阻尼孔通径 $C=0.7\text{ mm}$ ,插装阀X腔和A腔的面积比为1:1.2,取油液经过插装阀的流向为A→B,此时分别设定弹簧刚度为10 N/mm、30 N/mm、50 N/mm、70 N/mm,仿真弹簧刚度对阀芯动作的影响。

仿真结果如图6所示(仿真图中所示的位移数值“y、x”单位为m,下同),由仿真结果可知,采用内控加装蓄能器的控制方式时,弹簧的刚度会影响阀芯开启的速度和最终的位移,弹簧刚度对阀芯开启速度和最终位移的影响随着弹簧刚度的增大而减小。当弹簧刚度 $k$ 从10 N/mm变为70 N/mm时,开启速度时长由0.15 s延长为0.5 s,开启速度下降,而

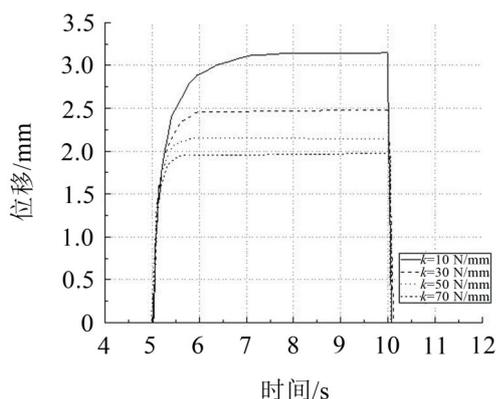


图6 弹簧刚度不同时阀芯动作特性

整体开启周期因为位移的缩短而降低。

由2.1节分析可知,弹簧预压缩力的大小也会对插装阀阀芯的动作情况产生一定的影响。仿真模型中设定阻尼孔孔径 $C=0.7\text{ mm}$ ,插装阀X腔和A腔的面积比为1:1.2,取油液经过插装阀的流向为A→B,分别取预压缩力为10 N、20 N、30 N、40 N,仿真弹簧预压缩力对阀芯动作的影响,如图7所示。

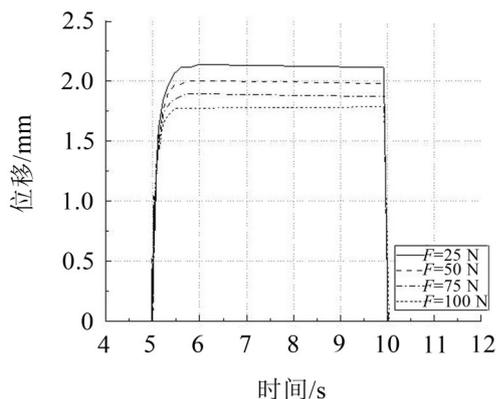


图7 弹簧预压缩力不同时阀芯动作特性

由图7所示仿真结果可知,由于二通插装阀入口压力由系统油源确定,弹簧的预压缩力和弹簧刚度一同决定了阀芯最终的开口情况。随着弹簧预压缩力的增大,阀芯最大位移量减小,阀芯的关闭速度增大,仿真结果符合前述分析。

### 3.2 两侧面积比与油液通流方向

由2.2节分析可知,插装阀X和A腔作用于阀芯的面积比正比于压力油液对阀芯的作用力,因此阀芯面积比对插装阀的启闭动作有较大影响。仿真模型中设定阻尼孔孔径 $C=0.7\text{ mm}$ ,分别设定阀芯面积比为1:1、1:1.2、1:1.5、1:2,油液经过插装阀的流向取A→B和B→A两种流向,仿真面积比对阀芯动作的影响。

由图8和图9所示仿真结果可知,油液流向为A→B时,阀芯面积对阀芯位移的影响相对较小,面积比从1:1降低至1:2时,阀芯位移缩短了10%左右;

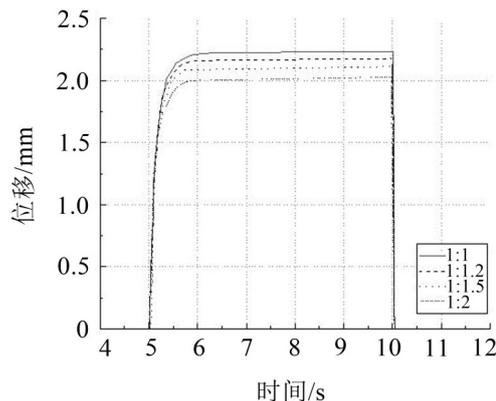


图8 油液流向为A→B时阀芯动作特性

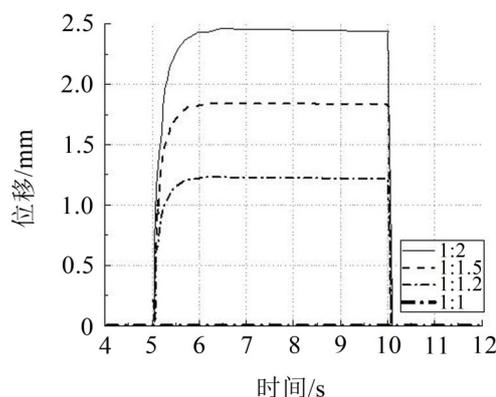


图9 油液流向为B→A时阀芯动作特性

当油液流向为B→A时,阀芯面积对阀芯位移的影响相对较大,说明其对油缸行进速度影响较大;阀芯面积比从1:1降低至1:2时,阀芯位移从最大值降为0。当油液流向为B→A时,不同面积比阀芯动作至相同位移时,面积比越大,插装阀开启速度越快,阀芯面积比为1:2的插装阀启闭时间约为阀芯面积比为1:1.2的插装阀启闭时间的1/2。

### 3.3 阻尼孔影响分析

由2.3节分析可知,阻尼孔一般有3种加装位置:(1)电磁阀与插装件之间;(2)先导阀前油路中;(3)回油路中。仿真模型中设定阻尼孔孔径 $C=0.7\text{ mm}$ ,插装阀X腔和A腔的面积比为1:1.2,取油液经过插装阀的流向为A→B,仿真阻尼孔加装位置对阀芯动作的影响情况如图10所示。

由如图10所示的仿真结果可知,当阻尼孔置于电磁阀和阀芯之间时,阀芯开启和关闭均较为缓慢,开启时间为其余两种方式开启时间的数十倍,关闭时间也明显长于后两种方案。当阻尼孔置于先导阀前油路中时,阀芯开启较为迅速,在关闭阶段的前半部分较为缓慢,后半部分则较为迅速。当阻尼孔置于回油路时,插装阀的开启速度与采用第二种加装位置时基本一致,而关闭速度则明显快于前两者,即此方案中阻尼孔的作用不明显。

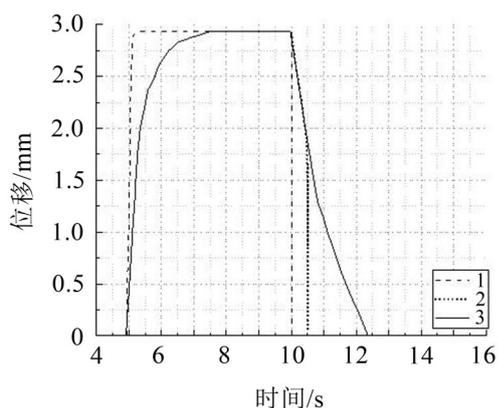


图10 阻尼孔位置不同时阀芯动作特性

由2.3节分析可知,阻尼孔的大小对方向元件阀芯的开启速度影响很大。在仿真模型中设定阀芯面积比为1:1.2,阻尼孔加装在电磁阀与插件之间的位置,取油液流向为A→B,仿真阻尼孔大小分别为0.6 mm、0.8 mm、1.2 mm、2 mm时阀芯的动作响应,如图11所示。

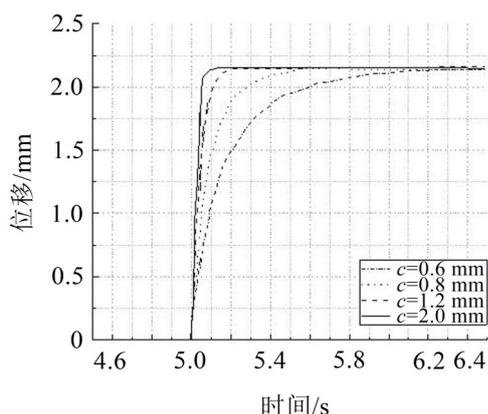


图11 阻尼孔孔径不同时阀芯动作特性

由图11所示的仿真结果可知,随着阻尼孔孔径增大,插装阀开启和关闭的速度都将不断增大;当阻尼孔孔径由2.0 mm变为1.2 mm、0.8 mm和0.6 mm时,插装阀的开启时间将分别延长为原时长的3倍、5倍和10倍左右,仿真结果符合前述分析。实际工作中,应综合考虑液压系统的工作周期及系统对阀芯动作的冲击性要求,利用阻尼孔动态调整阀芯的启闭特性。

## 4 结语

(1) 在AMESim中建立元件级的插装阀模型,

通过仿真分析了弹簧刚度与预压缩力对插装阀阀芯动作特性的影响,结果表明:弹簧刚度决定了插装阀的最大开口;弹簧刚度越大,阀芯动作响应越快;相较于弹簧刚度,弹簧预压缩力对阀芯动作特性的影响不明显。

(2) 通过仿真分析了油液的通流方向与插装阀X腔和A腔的面积比对阀芯动作特性的影响,结果表明:对于不同的油液通流方向,面积比对阀芯动作特性的影响有明显差别;油液通流方向的不同对阀芯动作特性的影响较为明显,实际中应根据阀芯的面积比选择油液通流方向。

(3) 通过仿真分析了阻尼孔的孔径与安装位置对阀芯动作特性的影响,结果表明:3种阻尼孔的安装位置对阀芯的开启和关闭特性的影响明显不同。阻尼孔的孔径对阀芯动作特性影响较为明显,阻尼孔越大,阀芯启闭动作越迅速,同时带来的冲击也越大;实际中应综合考虑系统的工作周期和冲击性要求,准确选择阻尼孔的孔径和安装位置。

### 参考文献:

- [1] 邓克,叶小华,王刚. 二通插装阀启闭动态试验及特性分析[J]. 机械工程师,2006(7):71-72.
- [2] 黄海鸿,刘明,李新宇,等. 阀口开度对二通插装阀压力流量特性的影响[J]. 机械设计与制造,2014(11):144-146.
- [3] SUN K, CHEN W, TAN J P. Dynamic characteristics study on hydraulic impact of cartridge valve in high pressure and large flow depressurization process[J]. Advanced Materials Research, 2012, 510: 350-355.
- [4] 于良振,王明琳,张海波. 基于AMESim的二通插装阀阻尼匹配以及仿真分析[C]. 战略性新兴产业与科技支撑—2012年山东省科协学术年会论文集,2012:11.
- [5] YANG ZHONG JIONG, ZHOU ZHEN FENG, ZHOU LI QIANG. Study on dynamic characteristics of cartridge valve in a vibration environment[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2016.
- [6] 张永顺,姜万录,苏晓,等. 二通插装阀非线性动力学行为[J]. 中国机械工程,2018,29(10):1159-1165.
- [7] 李国琳,李继财,张政梅,等. 插装式比例节流阀的动静态特性[J]. 机床与液压,2019,47(22):86-89.
- [8] 姚静,寇成浩,尹钰鑫,等. 超高压大流量比例插装阀测试方法[J]. 中国机械工程,2020,31(6):638-646.
- [9] 冯长印,王琳,曹瑞涛. 二通插装阀方向油路设计中的几个问题[J]. 佛山陶瓷,2004(6):29-32.