

doi: 10.11832/j.issn.1000-4858.2025.12.012

双喷嘴挡板压力伺服阀结构损伤条件下 输出特性研究

宋伟山¹, 刘健², 孙牧¹, 朱玉川²

(1. 中航工业南京伺服控制系统有限公司, 江苏 南京 210032; 2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 为了研究双喷嘴挡板压力伺服阀实际工况出现的结构损伤对整阀输出特性的影响, 通过流场仿真分析了喷嘴墩粗损伤、挡板凹坑损伤、挡板旋转、节流孔堵塞对前置级输出特性的影响规律, 进而建立整阀 AMESim 仿真模型, 分析了上述结构损伤对伺服阀输出特性的影响规律。结果表明: 左喷嘴墩粗损伤会使前置级压差增大, 伺服阀死区变小、输出压力增大; 挡板凹坑损伤对前置级压差无影响, 不会影响伺服阀输出性能; 挡板旋转会使前置级压差增大, 在实际工况的限制下影响程度很小, 对伺服阀的输出性能影响也很小; 左固定节流孔堵塞会使前置级压差减小, 伺服阀死区变大、输出压力降低。

关键词: 双喷嘴挡板; 压力伺服阀; 结构损伤; 输出特性

中图分类号: TH137; TH322 文献标志码: B 文章编号: 1000-4858(2025)12-0115-09

Research of Output Characteristics on Double Nozzle Flapper Pressure Servo Valve Under Structural Damage

SONG Weishan¹, LIU Jian², SUN Mu¹, ZHU Yuchuan²

(1. AVIC Nanjing Servo Control System Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210032;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing, Jiangsu 210016)

Abstract: In order to study the influence of structural damage on the output characteristics of the double nozzle flapper pressure servo valve under the working conditions, the influence laws of nozzle upsetting damage, flapper pitting damage, flapper rotation and orifice blockage on the output characteristics of the pilot stage are analyzed by flow field simulation. An AMESim simulation model of the overall valve is subsequently established, and the influence of those structural damage on the output performance of the servo valve is analyzed. The results show that: left nozzle upsetting damage increases the pressure differential of the pilot stage, resulting in the decrease of the dead zone current of the servo valve and the increase of output pressure; flapper pitting damage has no effect on the pressure differential of pilot stage and does not affect output performance of servo valve; flapper rotation increases the pressure differential of pilot stage, but its influence is minimal under actual operating condition constraints, with negligible impact on the output performance of servo valve; left orifice blockage decreases the pressure differential of pilot stage, leading to a larger servo valve dead zone current and reduced output pressure.

Key words: double nozzle flapper, pressure servo valve, structural damage, output characteristics

0 引言

电液压力伺服阀是电液伺服控制系统的关键元件, 可以将输入的电信号放大成压力输出信号, 从而实现了对压力的控制, 进而控制执行元件的输出力。电液

压力伺服阀具有高频响、高精度等优点, 在航空、航天、航海等领域得到了大量应用^[1-3]。电液压力伺服阀可

收稿日期: 2025-06-03

修回日期: 2025-10-11

分为喷嘴挡板式、射流管式、偏转板射流式和直驱式^[4]。喷嘴挡板电液压力伺服阀压力控制精度高、响应快、结构简单、性能稳定,被广泛应用在飞机刹车系统中,如 A320、A380、B747、C919 飞机及 Mark III、Mark IV 等刹车系统中^[5]。

电液压力伺服阀在应用中,往往会面临恶劣的实际工况,如极端温度、随机振动、离心加速度、高压等环境,其输出性能受到严峻的考验^[6],前置级易产生气穴现象^[7]。GORDIC D 等^[8-9]针对喷嘴挡板式伺服阀构建了综合数学模型,并利用 Simulink 对其性能进行了仿真分析。国内学者对实际工况下电液伺服阀的输出特性进行了研究。

秦嘉言等^[10]分析了气隙磁阻和磁钢磁动势温变的机理,指出气隙长度、永磁体磁动势变化量与温度呈线性关系,并通过试验进行了验证。李长明等^[11]对射流管伺服阀阀芯、阀套的热变形机理进行了研究,发现温度升高时,阀套与阀体之间的间隙变大,阀套与阀芯的间隙变小,解释了该阀高温下输出特性不规则且不具有重复性的现象。王利宁^[12]对喷嘴挡板压力伺服阀温漂产生的原因进行了分析,指出油液黏度、弹簧管刚度、永磁体性能、喷嘴与节流孔的流量系数均会受到温度影响,从而导致输出压力发生变化。张鹤然等^[13]对压力伺服阀的啸叫问题进行了仿真与试验分析,验证了滑阀级回油液阻增大会引起伺服阀啸叫,利用 AMESim 仿真分析了滑阀级不同的回油液阻对衔铁组件中弹簧管振荡幅值的影响,剖析产生自激振荡的条件和本质原因。孟令康等^[14-15]利用流场仿真研究了射流管伺服阀的前置级和滑阀级的冲蚀损伤,并基于整阀 AMESim 模型量化了上述结构损伤对整阀输出性能的影响,结果表明前置级劈尖和滑阀的节流边易出现损伤,前置级的损伤对整阀动态特性影响较大,滑阀级的损伤对整阀静态特性影响较大。闫耀保等^[16-17]对力矩马达进行了动力学建模,考虑了一维离心力的影响,并利用此模型分析了离心加速度对电液伺服阀零偏的影响,结果表明二者成线性关系;研究了三维离心力对射流管伺服阀零偏的影响,并提出改变衔铁组件的偏心距或质量可以降低离心力对零偏的影响。赵天昊^[18]对深海高压、低温环境下电液伺服阀的内泄漏和动态特性进行了研究,研究表明深海环境下,阀芯与阀套径向间隙变小,整阀内泄漏变小,动态响应变慢,超调量变大。

电液伺服阀在服役过程中会出现喷嘴与挡板相碰

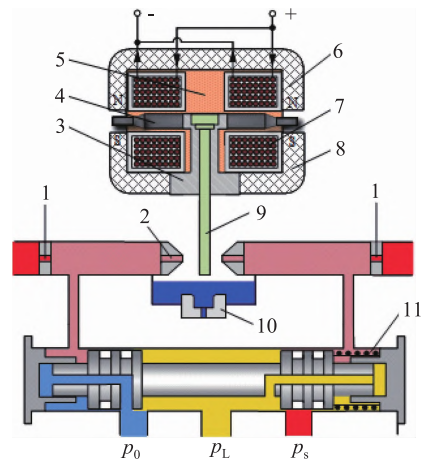
撞、挡板与喷嘴不垂直、喷嘴与节流孔局部堵塞的情况,虽然国内学者对实际工况下电液伺服阀的输出性能进行了较多研究,但主要集中于温度、冲蚀、离心力等方面,针对服役时喷嘴与挡板碰撞导致的结构损伤、挡板凹面与喷嘴环带不平行、节流孔堵塞等情况对压力伺服阀的输出性能的影响研究较少。因此,本研究模拟喷嘴与挡板相碰撞、挡板与喷嘴不垂直、喷嘴与节流孔局部堵塞,利用 Fluent 流场仿真与 AMESim 仿真分析了喷嘴磨损损伤、挡板凹坑损伤、挡板自转、节流孔堵塞对双喷嘴挡板压力伺服阀输出特性的影响规律,为双喷嘴挡板压力伺服阀的故障定位和结构优化设计提供依据。

1 结构原理与实际工况下结构变化

1.1 结构原理

双喷嘴挡板压力伺服阀整体结构如图 1 所示,主要由力矩马达组件、喷嘴挡板组件和滑阀组件三部分组成。力矩马达组件用于形成电磁力,其四个工作气隙长度大致相同。喷嘴挡板组件用于形成液压驱动力,左右喷嘴、左右固定节流孔的结构参数、安装布局均一致。滑阀组件用于形成输出负载力,阀芯两端内部开有 L 形反馈通道,分别为回油反馈通道和负载反馈通道,作用是将回油压力和输出压力反馈到阀芯两端反馈腔,实现压力反馈。本研究中左侧为对应回油侧,右侧为对应供油侧。

当无电流信号输入时,经过调试,使得挡板向右轻



1. 固定节流孔 D_f 2. 喷嘴 D_N 3. 弹簧管 4. 衔铁 5. 永磁体
6. 上导磁体 7. 控制线圈 8. 下导磁体 9. 挡板
10. 回油阻尼孔 D_r 11. 弹簧

图 1 双喷嘴挡板压力阀结构原理图

Fig. 1 Structure schematic diagram of double nozzle flapper pressure valve

微偏离中位,右喷嘴腔压力略大于左喷嘴腔压力,阀芯受到向左的合力,使阀芯运动至左侧极限位置,此时回油口充分打开,进油口充分关闭,输出压力为回油压力。当给线圈输入正向电流时,在力矩马达的驱动下挡板向左偏移,左喷嘴腔压力上升,右喷嘴腔压力下降,在喷嘴腔压差的作用下阀芯开始向右运动,回油口开度逐渐变小,进油口逐渐打开。此时高压油液经过进油口节流降压后进入负载腔,又经过回油口节流再次降压后流向回油口,同时负载腔油液经L形通道流向负载反馈腔,形成压力反馈。当驱动力与反馈力达到力平衡时,阀芯处于某个开启位置,输出一定的压力,使输出压力与控制电流大小成正比。

1.2 实际工况下伺服阀结构变化

在喷嘴挡板电液压力伺服阀服役过程中,会发生因零件结构发生轻微变化导致产品性能改变的情况,常见有以下几种工况。

衔铁组件高频振动时会导致挡板与喷嘴发生碰撞,经多次碰撞后,喷嘴会产生环带变宽,直径变小的现象,定义为喷嘴墩粗损伤,如图2所示。

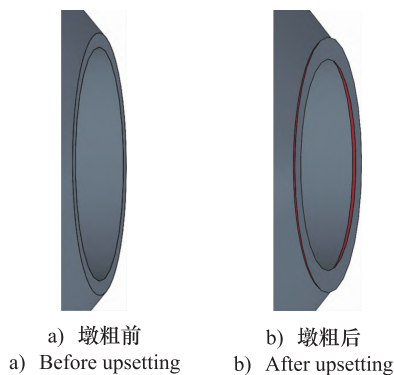


图2 喷嘴墩粗示意图

Fig. 2 Schematic diagram of nozzle upsetting

经过多次碰撞,挡板会出现凹坑损伤现象,如图3所示,某型压力伺服阀在服役过程中挡板侧面出现了环形凹坑损伤。

此外,多次撞击可能会使挡板旋转,导致挡板侧面与喷嘴环带不平行,如图4所示。

由于固定节流孔的尺寸很小,油液中的固体颗粒经过固定节流孔时往往在此局部堵塞或者卡死,如图5所示。

2 仿真建模

针对1.2节中介绍的伺服阀结构变化,采用Fluent流场仿真研究喷嘴墩粗、挡板凹坑、挡板旋转和固定节

流孔堵塞对伺服阀前置级输出特性的影响,采用AMESim仿真研究喷嘴墩粗和固定节流孔堵塞对整阀输出特性的影响。

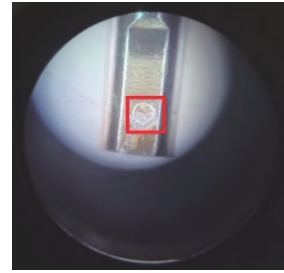
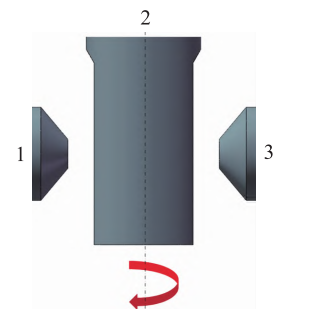


图3 某型压力伺服阀挡板出现凹坑损伤
Fig. 3 Pitting damage observed on flapper of a pressure servo valve



1. 回油侧喷嘴 2. 挡板 3. 进油侧喷嘴

图4 挡板自转方向示意图

Fig. 4 Schematic diagram of flapper rotation direction

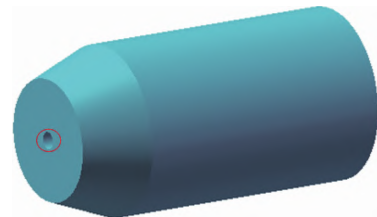


图5 固定节流孔堵塞示意图

Fig. 5 Schematic diagram of blockage for fixed orifice

2.1 流场仿真建模

利用SolidWorks软件提取挡板处于中位时的前置级流场,导入Fluent软件中建立前置级流场仿真模型,对固定节流孔节流处、喷嘴腔、可变节流孔节流处、回油阻尼孔节流处进行网格加密处理,前置级流场网格如图6所示。

设置计算模型为标准 $K-\varepsilon$ 湍流模型,油液为YH-15航空液压油,密度为 839 kg/m^3 ,液体黏度为 $22.482 \text{ mm}^2/\text{s}$,进油压力为 28 MPa ,回油压力为 0.6 MPa 。对节流处网格进行不同程度的加密,分为三种模型:mesh1(稀疏)、mesh2(中等)和mesh3(稠密),



图 6 前置级流场网格

Fig. 6 Flow field grid of pilot stage

表 1 三种网格仿真结果

Tab. 1 Three kinds of grid simulation results

模型	网格总数/个	左/右喷嘴腔压力/MPa
mesh1	2432516	6.59
mesh2	2852680	6.61
mesh3	3193476	6.55

进行网格无关性验证,仿真结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出,三种仿真模型求解出的喷嘴腔压力依次为 6.59、6.61、6.55 MPa,相对误差最大值为 0.9%,可认为三种仿真结果基本一致。为了确保仿真结果的精度,同时减少仿真计算量,本研究采用 mesh2 网格加密方式对前置级进行网格划分。

2.2 AMESim 仿真建模

电液伺服阀涉及电、磁、机、液等多物理场耦合,利用 AMESim 仿真平台提供的液压元件设计库、电磁元件设计库以及机械元件设计库,根据双喷嘴挡板电液压力伺服阀的结构原理建立整阀 AMESim 仿真模型。整阀 AMESim 仿真模型由力矩马达、喷嘴挡板阀和滑阀组成,对于力矩马达的建模,考虑了磁路组件中的漏磁现象的影响,如永磁体处漏磁、控制线圈的漏磁和四个工作气隙处的漏磁,以及磁路中各元件的磁阻。对于喷嘴挡板阀的建模,采用 AMESim 中的弹簧—阻尼元件可以模拟挡板所受的液流冲击力,采用位移—流量模块可以模拟喷嘴腔的压力流量特性。对于滑阀的建模,聚焦于滑阀的动力学方程和阀口的流量压力特性方程,其中,左、右喷嘴腔以及反馈腔的建模采用压力—位移元件模拟喷嘴腔压力对阀芯的作用,进、回油阀口建模则采用流量—位移元件模拟阀芯运动导致流量的变化,阀芯建模采用位移—质量元件模拟阀芯的质量、阻尼、行程等特性,采用容积元件模拟负载腔。最终,将力矩马达组件、喷嘴挡板组件和滑阀组件进行整合,得到整阀 AMESim 仿真模型,如图 7 所示。

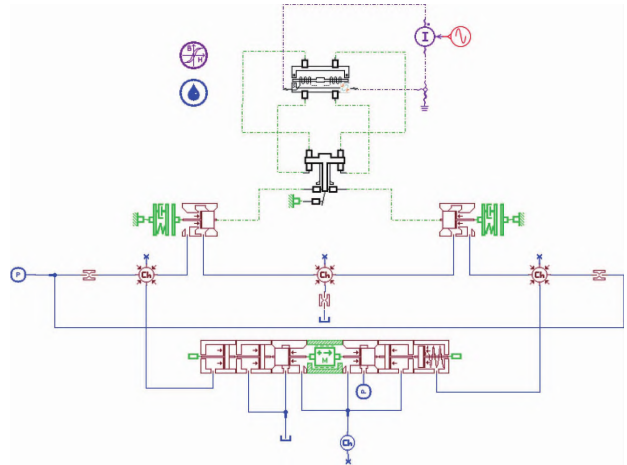


图 7 整阀 AMESim 仿真模型

Fig. 7 AMESim simulation model of servo valve

3 仿真分析

3.1 流场仿真分析

1) 喷嘴镦粗损伤对前置级输出特性的影响

为了研究喷嘴镦粗损伤对前置级压力流量特性的影响,利用 SolidWorks 软件对左喷嘴进行镦粗处理,使喷嘴环带同时向内和向外延长 $x_d \mu\text{m}$,即镦粗尺寸为 $x_d \mu\text{m}$,图 8 为喷嘴镦粗前后对比图,喷嘴环带和直径均发生了变化。实际工况下喷嘴镦粗损伤程度均为微米级,仿真中分别以 2、4 μm 量化镦粗程度。

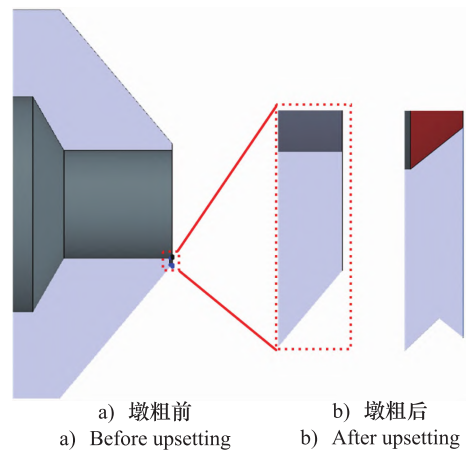


图 8 喷嘴镦粗损伤处理示意

Fig. 8 Nozzle upsetting damage diagram

根据双喷嘴挡板压力伺服阀工作原理,伺服阀通电工作过程中,挡板随通电电流增大向左偏移,通常额定偏移量 x_f 约为几微米,本研究中设定额定偏移量为 10 μm 。

通过 Fluent 流场仿真研究喷嘴镦粗损伤对前置级

左右喷嘴腔压力的影响,左喷嘴不同镦粗尺寸下左右喷嘴腔压力特性、前置级压差特性(左喷嘴腔压力与右喷嘴腔压力之差)如图 9 和图 10 所示,其中, p 为控制腔压力用, p_c 为前置级压差。

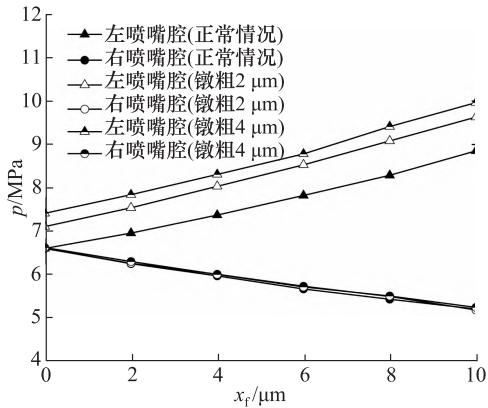


图 9 喷嘴镦粗损伤条件下喷嘴腔压力特性曲线

Fig. 9 Pressure characteristic curves of nozzle chamber under nozzle upsetting damage

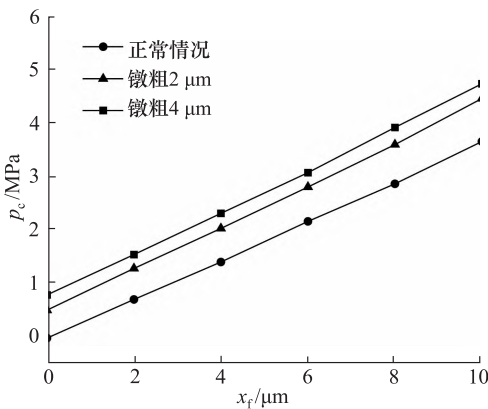


图 10 喷嘴镦粗损伤条件下前置级压差特性曲线

Fig. 10 Pressure differential characteristic curves of pilot stage under nozzle upsetting damage

仿真结果表明,左喷嘴镦粗后左喷嘴腔压力明显增大,且压力随着镦粗尺寸的增大而增大,而右喷嘴腔压力无明显变化,前置级压差随着镦粗尺寸的增大而增大,这将使得滑阀阀芯提前向右运动,进油口提前开启。分析其原因可知左喷嘴镦粗后喷嘴环带变大,通流孔径变小,流阻变大,导致左喷嘴腔压力增大,而右喷嘴无镦粗损伤,所以右喷嘴腔压力不变。

2) 挡板凹坑损伤对前置级输出特性的影响

为了研究挡板凹坑损伤对前置级压力流量特性的影响,本研究在挡板左侧面进行拉伸切除处理,如图 11 所示。环形凹坑内圆直径为喷嘴直径,外径为喷

嘴环带外圆直径,实际工况下凹坑均较浅,仿真研究中凹坑深度分别取 2、4 μm 。



图 11 挡板凹坑损伤处理

Fig. 11 Damage treatment of flapper pitting

通过 Fluent 流场仿真研究挡板凹坑损伤对前置级左右喷嘴腔压力的影响,挡板左侧不同凹坑深度下左右喷嘴腔压力特性和前置级压差特性如图 12 和图 13 所示。

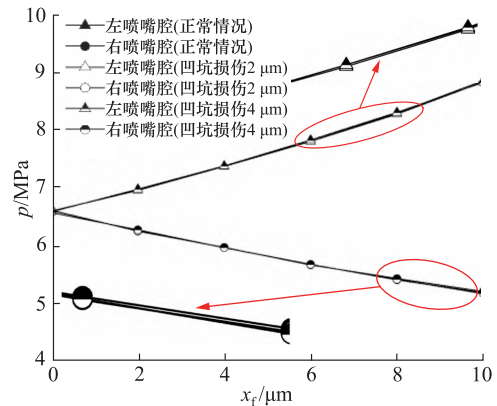


图 12 挡板凹坑损伤条件下喷嘴腔压力特性曲线

Fig. 12 Pressure characteristic curves of nozzle chamber under flapper pitting damage

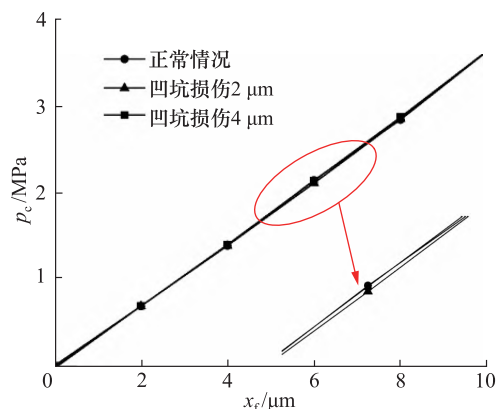


图 13 挡板凹坑损伤条件下前置级压差特性曲线

Fig. 13 Pressure differential characteristic curves of pilot stage under flapper pitting damage

仿真结果表明,挡板左侧不同凹坑深度下的喷嘴腔压力特性曲线和前置级压差特性曲线几乎重合,说

明挡板左侧凹坑损伤对喷嘴腔压力和前置级压差几乎没有影响,故阀芯运动不会受其影响,压力伺服阀的输出特性也不会受到影响。分析其原因可知挡板侧面凹坑对喷嘴挡板可变节流孔的流阻无影响,通流能力基本不变,因而左右控制腔压力不变。

3) 挡板旋转对前置级输出特性的影响

挡板旋转受衔铁组件定位约束,实际结构下挡板能够产生的偏转角度最大不超过 2°,仿真研究中挡板旋转角度分别取 1°和 2°。

通过 Fluent 流场仿真研究挡板旋转对前置级左右喷嘴腔压力的影响,挡板不同旋转角度下左右喷嘴腔压力特性和前置级压差特性如图 14 和图 15 所示。

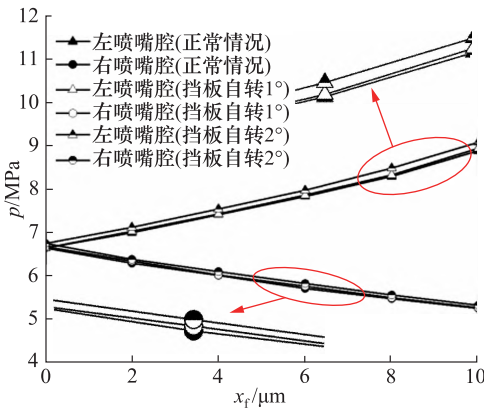


图 14 挡板旋转条件下喷嘴腔压力特性曲线
Fig. 14 Pressure characteristic curves of nozzle chamber under flapper rotation

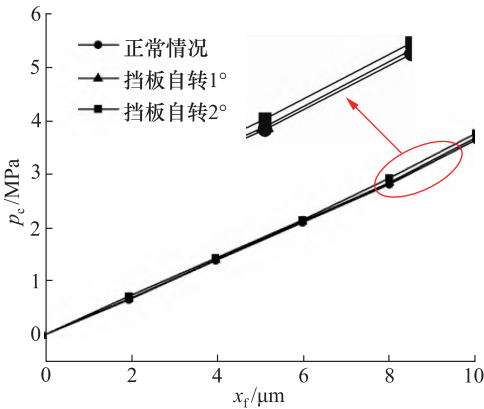


图 15 挡板旋转条件下前置级压差特性曲线
Fig. 15 Pressure differential characteristic curves of pilot stage under flapper rotation

仿真结果表明,挡板旋转会使左喷嘴腔压力和右喷嘴腔压力微微增大,旋转角度为 2°时前置级压差比正常情况最大值 3.75 MPa 增大 0.12 MPa,最大变化量约为 3%,没有明显差异,喷嘴腔压力特性曲线和前

置级压差特性曲线接近重合,挡板旋转对输出压力的影响较小。分析其原因可知挡板旋转导致左右喷挡距离同时发生变化,左右喷嘴腔压力同步同向变化,两者压差变化小,又因为挡板可旋转角度小,因而左右控制腔压差变化不大。

4) 固定节流孔堵塞对前置级输出特性的影响

在液压伺服系统中,85% 以上的故障是由于油液污染而造成的。双喷嘴挡板伺服阀的前置级最容易受到固体污染物的影响出现堵塞故障。为了模拟固定节流孔堵塞故障,等效减小固定节流孔直径,依次减小 2 μm 和 4 μm,相当于 0.15 mm 直径节流孔堵塞 2.6%、5.3% 通流面积。

通过 Fluent 流场仿真研究固定节流孔堵塞对前置级左右喷嘴腔压力的影响,左固定节流孔等效不同直径变化下左右喷嘴腔压力特性和前置级压差特性如图 16 和图 17 所示。

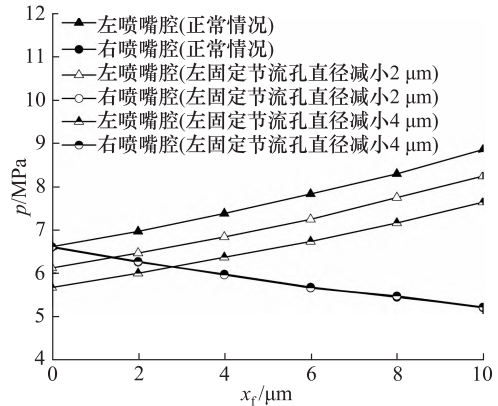


图 16 固定节流孔堵塞条件下喷嘴腔压力特性曲线
Fig. 16 Pressure characteristic curves of nozzle chamber under orifice blockage

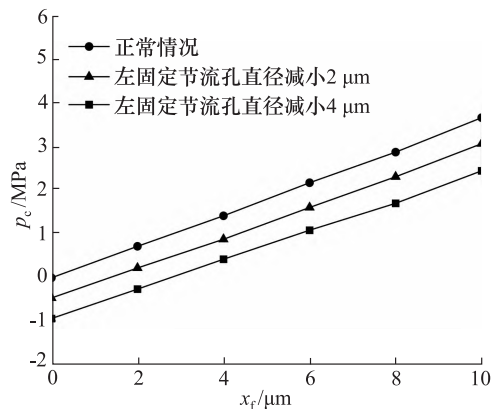


图 17 固定节流孔堵塞条件下前置级压差特性曲线
Fig. 17 Pressure differential characteristic curves of pilot stage under orifice blockage

仿真结果表明,左固定节流孔堵塞时,左喷嘴腔压力明显减小,左喷嘴腔压力特性曲线整体向下平移,前置级压差特性曲线整体向下平移,堵塞 5.3% 通流面积时,压力下降了约 1 MPa,影响较为明显。当挡板处于中位时(偏移量为 0 时),左喷嘴腔压力小于右喷嘴腔压力,前置级有一个负压差,导致滑阀更加紧靠左限位处,滑阀需要更大的驱动力才能开始运动。分析其原因为左固定节流孔堵塞后流阻增加,左喷嘴腔压力下降,右节流孔无影响,右喷嘴腔压力不变,前置级压差下降,甚至出现负值。

3.2 AMESim 仿真分析

压力特性曲线是分析压力伺服阀静态性能的重要曲线,而死区电流、最大输出压力以及压力增益是评价静态性能的重要指标。死区电流是压力伺服阀零位附近不输出压力的最大电流,压力增益为输出压力随电流信号变化的快慢。

从上文分析可知,挡板凹坑、挡板旋转对喷嘴腔压力影响不大,喷嘴镗粗、节流孔堵塞对喷嘴腔压力影响较大。为了进一步分析喷嘴镗粗损伤和固定节流孔堵塞对双喷嘴挡板压力伺服阀整阀输出特性的影响,利用本研究搭建的整阀 AMESim 仿真模型,采用等效模拟,分别选取左喷嘴直径变化和左固定节流孔直径变化进行仿真,分析整阀压力特性曲线。

1) 喷嘴镗粗损伤对整阀输出特性的影响

基于整阀 AMESim 仿真模型,减小左喷嘴直径来等效模拟其受镗粗影响程度,保持其他参数不变,设置左喷嘴直径 D_N 依次为 0.4、0.398、0.396 mm。通过仿真得到左喷嘴直径变化下的整阀压力特性曲线,如图 18 所示,对三种情况的静态特性指标进行具体分析,如表 2 所示,其中, i_c 为电流, p_L 为输出压力。

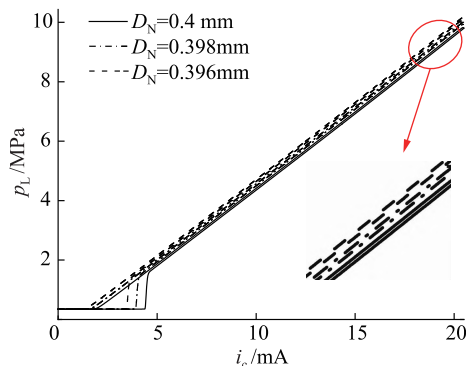


图 18 左喷嘴直径变化下的压力特性曲线

Fig. 18 Pressure characteristic curves under left nozzle diameter variation

表 2 左喷嘴直径变化下的静态特性

Tab. 2 Static characteristics under left nozzle diameter variation

左喷嘴直径 mm	死区电流 mA	压力增益 $\text{MPa} \cdot \text{mA}^{-1}$	输出压力 MPa
0.400	4.3	0.516	9.80
0.398	3.9	0.518	9.97
0.396	3.4	0.520	10.14

由表 2 和图 18 可知,随着左喷嘴直径从 0.4 mm 减小至 0.396 mm(对应喷嘴镗粗过程),整阀压力特性曲线整体上向左平移,死区电流从 4.3 mA 减至 3.4 mA,压力增益从 0.516 MPa/mA 增至 0.520 MPa/mA,最大输出压力从 9.8 MPa 增至 10.14 MPa。结果说明左喷嘴镗粗会使伺服阀死区变小,输出压力增大,而压力增益变化不大。如果是右喷嘴镗粗,会产生相反的影响。

分析原因可知,左喷嘴镗粗、直径变小,导致经过左喷嘴的流量变小,左喷嘴腔压力变大,使得前置级压差变大,作用于滑阀上的驱动力随之变大。故滑阀进油口更早的打开,且开度变大,死区变小,负载腔输出压力变大。

2) 固定节流孔堵塞对整阀输出特性的影响

基于整阀 AMESim 仿真模型,减小左固定节流孔直径来等效模拟其受堵塞影响程度,保持其他参数不变,设置左固定节流孔直径依次为 0.150、0.148、0.146 mm。通过仿真得到左固定节流孔直径 D_f 变化下的整阀压力特性曲线,如图 19 所示,对三种情况的静态特性指标进行具体分析,如表 3 所示。

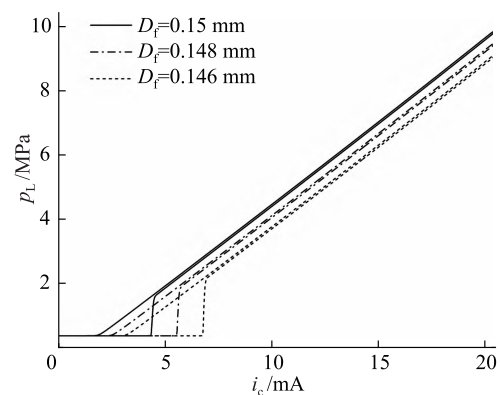


图 19 左固定节流孔直径变化下的压力特性曲线

Fig. 19 Pressure characteristic curves under left fixed orifice diameter variation

表3 左固定节流孔直径变化下的静态特性

Tab.3 Static characteristics under left fixed orifice diameter variation

直径 mm	死区电流 mA	压力增益 MPa · mA ⁻¹	输出压力 MPa
0.150	4.3	0.516	9.80
0.148	5.5	0.514	9.43
0.146	6.8	0.512	9.06

由图19和表3可知,随着左固定节流孔直径从0.15 mm减至0.146 mm(对应节流孔堵塞过程),整阀压力特性曲线整体上向右平移,死区电流从4.3 mA增至6.8 mA,压力增益从0.516 MPa/mA减至0.512 MPa/mA,最大输出压力从9.8 MPa减至9.06 MPa。结果说明左节流孔堵塞会使伺服阀死区变大,输出压力降低,而压力增益变化不大。如果是右节流孔堵塞,会产生相反的影响。

分析原因可知左固定节流孔直径变小,导致经过左固定节流孔的流量变小,使得左喷嘴腔压力变小,前置级压差变小,作用于滑阀上的驱动力随之变小。故滑阀进油口开启所需时间变长,且开度变小,死区变大,负载腔输出压力变小。

4 结论

本研究针对实际工况下压力伺服阀可能出现的喷嘴磨损、挡板凹坑、挡板旋转、固定节流孔堵塞等结构损伤,进行了双喷嘴挡板压力伺服阀流场建模与整阀AMESim仿真建模,通过前置级流场仿真研究了上述工况下前置级的输出特性,通过整阀AMESim仿真研究了整阀输出特性的影响规律,主要结论如下:

(1) 当左喷嘴磨损后,左喷嘴腔压力明显增大且随着磨损程度的增大而增大,而右喷嘴腔压力无明显变化,前置级压差明显增大。左喷嘴磨损会使伺服阀死区变小,输出压力增大,而压力增益变化不大。如果是右喷嘴磨损,会产生相反的影响;

(2) 当挡板左侧面凹坑损伤后,左喷嘴腔和右喷嘴腔压力几乎没有变化,前置级压差没有变化,挡板凹坑损伤对前置级输出特性没有影响,进而也不会影响整阀的输出特性;

(3) 当挡板旋转时,左喷嘴腔压力和右喷嘴腔压力均随着旋转角度的增大而增大,前置级压差随着旋转角度的增大而增大,但在实际工况的限制下旋转角度较小,最大旋转角度对前置级压差的影响程度也很

小,因而对整阀的输出特性影响很小;

(4) 当左固定节流孔局部堵塞时,左喷嘴腔压力减小且随着堵塞程度的增大而减小,右喷嘴腔压力几乎不变,前置级压差明显减小。左节流孔堵塞会使伺服阀死区变大,输出压力降低,而压力增益变化不大。如果是右节流孔堵塞,会产生相反的影响。

参考文献:

- [1] 王春行. 液压控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2009. WANG Chunxing. Hydraulic Control Systems [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [2] 李跃松,朱玉川. 电液伺服阀建模与Simulink仿真[M]. 北京:机械工业出版社,2020. LI Yuesong, ZHU Yuchuan. Modeling and Simulation with Simulink for Electro-hydraulic Servo Valves [M]. Beijing: China Machine Press, 2020.
- [3] 陈元章. 电液压力伺服阀简介[J]. 机床与液压,2021,49(7):172-177. CHEN Yuanzhang. Brief Introduction of Electro Hydraulic Pressure Servo Valve [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021,49(7):172-177.
- [4] 田源道. 电液伺服阀技术[M]. 北京:航空工业出版社,2008. TIAN Yuandao. Electro-hydraulic Servo Valve Technology [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2008.
- [5] 雷晓桦,高光辉,李兵强,等. 飞机刹车系统先进技术研究与发展[J]. 空军工程大学学报,2022,23(6):8-16. LEI Xiaoben, GAO Guanghui, LI Bingqiang, et al. Research and Development on Advanced Technology of Aircraft Brake System [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2022,23(6):8-16.
- [6] 阎耀保. 极端环境下的电液伺服控制理论及应用技术[M]. 上海:上海科学技术出版社,2012. YIN Yaobao. Electro-hydraulic Servo Control Theory and Application Technology in Extreme Environments [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2012.
- [7] AUNG N Z, LI Songjing. A Numerical Study of Cavitation Phenomenon in a Flapper-nozzle Pilot Stage of an Electro-hydraulic Servo-valve with an Innovative Flapper Shape [J]. Energy Conversion and Management, 2014,77:31-39.
- [8] GORDIC D, BABIC M, JOVICIC N, et al. Effects of the Variation of Torque Motor Parameters on Servo-valve Performance [J]. Journal of Mechanical Engineering,

- 2008,54(12):866-873.
- [9] GORDIC D, BABIC M, JOVICIC N. Modelling of Spool Position Feedback Servo-valves [J]. International Journal of Fluid Power, 2004,5(1):37-50.
- [10] 秦嘉言,李长春,延皓,等. 温度对力矩马达气隙磁阻和极化磁动势的影响[J]. 机床与液压,2017,45(9):105-109.
QIN Jiayan, LI Changchun, YAN Hao, et al. Effect of Temperature on Torque Motor Air Gap Reluctance and Permanent Magnet Polarization Magnetomotive Force [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017,45(9):105-109.
- [11] 李长明,阎耀保,汪明月,等. 高温环境对射流管伺服阀偶件配合及特性的影响[J]. 机械工程学报,2018,54(20):251-261.
LI Changming, YIN Yaobao, WANG Mingyue, et al. Influence of High Temperature on Couples Matching and Characteristics of Jet Pipe Electrohydraulic Servo Valve [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(20):251-261.
- [12] 王利宁. 电液压力伺服阀的温度零漂分析[J]. 液压气动与密封,2021,41(3):54-56.
WANG Lining. The Temperature Zero Drift Analysis of Electro-hydraulic Pressure Servo Valve [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2021,41(3):54-56.
- [13] 张鹤然,欧阳小平,郭生荣,等. 基于回油液阻的压力伺服阀啸叫分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2019,53(11):2085-2091.
ZHANG Heran, OUYANG Xiaoping, GUO Shengrong, et al. Howling Analysis of Pressure Servo Valves Based on Return Flow Resistance [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019,53(11):2085-2091.
- [14] 孟令康,朱玉川,丁建军,等. 冲蚀对射流管伺服阀前置级工作特性的影响[J]. 液压与气动,2022,46(6):101-106.
MENG Linggang, ZHU Yuchuan, DING Jianjun, et al. Influence of Erosion on Working Characteristics of Pre-stage of Jet Pipe Servo Valve [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2022,46(6):101-106.
- [15] 孟令康,朱玉川,王玉文,等. 射流管电液伺服阀滑阀冲蚀磨损特性分析[J]. 液压与气动,2022,46(2):124-130.
MENG Linggang, ZHU Yuchuan, WANG Yuwen, et al. Characteristics Analysis of Erosion Wear of Spool Valve for Jet Pipe Servo Valve [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2022,46(2):124-130.
- [16] 阎耀保,张曦,李长明. 一维离心环境下电液伺服阀零偏值分析[J]. 中国机械工程,2012,23(10):1142-1146.
YIN Yaobao, ZHANG Xi, LI Changming. Zero Deviation of Electro-hydraulic Servo Valve Under One-dimensional Centrifugal Acceleration Environment [J]. China Mechanical Engineering, 2012,23(10):1142-1146.
- [17] 阎耀保,王玉. 3 维离心环境下射流管伺服阀的零偏特性[J]. 上海交通大学学报,2017,51(8):984-991.
YIN Yaobao, WANG Yu. Zero Deviation Characterization of Jet Pipe Servo Valve in Three-dimensional Centrifugal Environment [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2017,51(8):984-991.
- [18] 赵天昊. 变海深环境下电液伺服阀形变及动态特性演变规律研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2024.
ZHAO Tianhao. Research on Deformation and Dynamic Characteristics Evolution of Electro-hydraulic Servo Valves in Varying Sea-depth Environments [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2024.

作者简介:

宋伟山(通信作者),女,1994年生,河北衡水人,工程师,硕士,主要从事液压元件、机电控制方面的研究工作。

E-mail: Songweishan_nuaa@163.com

刘健,男,2000年生,湖北广水人,助理工程师,硕士,主要从事电液伺服控制方向的研究工作。

E-mail: 1933001219@qq.com

孙牧,女,1973年生,江苏南京人,高级工程师,学士,主要从事液压元件方面的研究工作。

E-mail: 13913857836@163.com

朱玉川,男,1974年生,江苏南京人,教授,博士,主要从事电液伺服阀、机电控制及智能材料结构方向的研究工作。

E-mail: meeyczhu@nuaa.edu.cn

引用本文:

宋伟山,刘健,孙牧,等. 双喷嘴挡板压力伺服阀结构损伤条件下输出特性研究[J]. 液压与气动,2025,49(12):115-123.

SONG Weishan, LIU Jian, SUN Mu, et al. Research of Output Characteristics on Double Nozzle Flapper Pressure Servo Valve Under Structural Damage [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2025,49(12):115-123.