

# 射流管伺服阀前置级 AMESim 仿真与试验研究

赵小龙<sup>1</sup>, 姜本九<sup>2</sup>, 朱玉川<sup>2</sup>

(1. 中国航发西安动力控制科技有限公司 技术中心, 陕西 西安 710077;  
2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 前置级是射流管伺服阀的核心部件, 其工作性能直接影响到伺服阀的整体性能。由于射流管伺服阀前置级内部流动状态复杂, 流速很快, 目前 AMESim 元件库中尚缺少对应的元件进行建模, 属于非标准、非通用部件, 为了用图形化建模方式准确、直观地揭示前置级的内部机理, 使用 AMESim 软件中的 Submodel Editor 工具对前置级进行二次开发, 搭建了前置级 AMESim 仿真模型, 得到其压力特性与流量特性, 并通过试验验证了仿真模型的准确性。研究结果表明, 该型射流管伺服阀前置级压力增益为 11.547 MPa/mm, 流量增益为 3.270 L/(min · mm), 实验结果与 AMESim 仿真结果基本一致, 证明了前置级 AMESim 仿真模型的准确性。

**关键词:** 射流管伺服阀前置级; AMESim 仿真; 试验; 压力特性; 流量特性

中图分类号: TH137 文献标志码: B 文章编号: 1008-0813(2025)05-0054-08

## AMESim Simulation and Experimental Study on Pre-stage of Jet Pipe Servo Valve

ZHAO Xiao-long<sup>1</sup>, JIANG Ben-jiu<sup>2</sup>, ZHU Yu-chuan<sup>2</sup>

(1. Technology Center, Avic Xi'an Aero Power Control Technology Co., Ltd., Xi'an 710077, China;  
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and  
Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The pre-stage is the core component of the jet pipe servo valve, and its performance directly affects the whole performance of the servo valve. Due to the complex internal flow state and fast velocity of the pre-stage of the jet pipe servo valve, the corresponding components are still lacking in the AMESim component library for modeling, and it is non-standard and non-general components. In order to accurately and intuitively reveal the internal mechanism of the pre-stage by graphical modeling method, Submodel Editor tool in AMESim software was used to conduct secondary development of the pre-stage, and the AMESim simulation model of the pre-stage was built to obtain its pressure characteristics and flow characteristics, and the accuracy of the simulation model was verified through experiments. The research results show that the pressure gain of the pre-stage of the jet pipe servo valve is 11.547 MPa/mm, and the flow gain is 3.270 (L · min<sup>-1</sup>)/mm. The experimental results are basically consistent with the AMESim simulation results, which proves the accuracy of the pre-stage AMESim simulation model.

**Key words:** pre-stage of jet pipe servo valve; AMESim simulation; experiment; pressure characteristics; flow characteristic

## 0 引言

电液伺服阀能够将输入的微小电信号放大为相应的流量和压力信号, 其性能优劣将影响整个电液伺服系统<sup>[1]</sup>。射流管伺服阀因其具有可靠性高、抗污染能力强、失效对中性及容积效率高等突出优点, 被广泛应用于国防军事领域中<sup>[2]</sup>。

前置级是射流管伺服阀的关键部件, 具有功率控

制和放大作用<sup>[3]</sup>, 国内专家学者开展了大量关于射流管伺服阀前置级的研究工作。LI Yuesong<sup>[4]</sup>基于动量定理建立了前置级数学模型, 得到了压力特性曲线与流量特性曲线, 然后进行流场数值模拟和实验研究, 验证了模型正确性。孟令康等<sup>[5]</sup>等将流场仿真与实验相结合, 研究了前置级劈尖的冲蚀磨损对伺服阀性能的影响。王纪森等<sup>[6]</sup>利用 Fluent 软件仿真得到了压力分布云图、速度幅值分布图及压力特性曲线, 并在 AMESim 子模型二次开发平台中建立前置级模型, 形成相互验证。阎耀保等<sup>[7]</sup>建立了前置级数学模型, 得到其压力特性, 并进行结构参数优化, 然后利用 CFD 流场仿真验证了数学模型的有效性。黄礼浩等<sup>[8]</sup>仿真得到

收稿日期: 2024-03-21

作者简介: 赵小龙(1980-), 男, 陕西宝鸡人, 高级工程师, 学士, 研究方向为航空发动机燃油电液转换装置。

前置级压力特性，并通过实验验证了流场仿真的正确性。赵开宇等<sup>[9]</sup>仿真分析了射流管偏转角度与接收器两端压差之间的关系。赵康等<sup>[10]</sup>利用数值模拟技术，仿真得到了不同喷嘴结构下的压力特性与流量特性，并拟合成函数表达式。胡文钢等<sup>[11]</sup>研究了接收器的接收口形状对阀的静态特性与动态特性的影响。杨泽贺<sup>[12]</sup>对前置级进行流场仿真，并通过 PIV 试验，验证了数值模拟结果的准确性。黄增等<sup>[13]</sup>利用 Fluent 软件得到前置级内部流场图像及涡系分布，并在前置级上采用套筒结构消除交变作用力，解决啸叫问题。夏天等<sup>[14]</sup>运用热-流-固耦合仿真，模拟伺服阀升温时流场变化情况与固体的热变形状况，分析前置级热变形对射流管伺服阀零位影响。

此外，国外专家学者开展了大量关于射流管伺服阀前置级的研究工作，但是相关研究成果公布不多，资料较少，对中国实行技术封锁。HIREMATH 等<sup>[15]</sup>建立了用于精确燃油控制的射流管伺服阀数学模型，分析了恢复压力对反馈杆的影响。KRIVTS<sup>[16]</sup>建立了前置级模型，并以阀的静态特性与动态特性为目标函数进行结构参数优化。DHINESH 等<sup>[17]</sup>重新设计了阀的前置级，利用数值模拟方法流场仿真，证实了理论模型的正确性。PACE 等<sup>[18]</sup>利用 CFD 技术对前置级流场仿真，结果表明，油液流经节流口的流动方式仅与孔的形状有关，与雷诺数无关。

综上所述，国内外专家学者开展了大量关于射流管伺服阀前置级建模、仿真与实验的相关研究工作，但由于射流管伺服阀前置级内部流动状态复杂，流速很快，且前置级元件属于非标准、非通用部件，目前AMESim 元件库中尚缺少对应的元件进行建模，相关 AMESim 建模工作研究较少。本研究使用 AMESim 软件中的 Submodel Editor 工具对前置级进行二次开发，搭建了前置级 AMESim 仿真模型，得到其压力特性与流量特性，并通过实验验证了仿真模型的准确性。

## 1 射流管伺服阀的结构和工作原理

射流管伺服阀由上到下可将整阀分成立矩马达、前置级、滑阀三部分，其结构如图 1 所示。立矩马达磁路组件采用四气隙结构，磁钢提供稳定磁场，前置级组件采用喷嘴、接收器结构，喷嘴位于射流管的末端，喷嘴的偏移由立矩马达控制。滑阀组件采用四通非全周开口结构，衔铁组件中反馈杆的末端小球固定在阀芯上，通过反馈杆实现机械反馈。在图 1 中，P 为进油口，T 为回油口，A、B 为负载口。

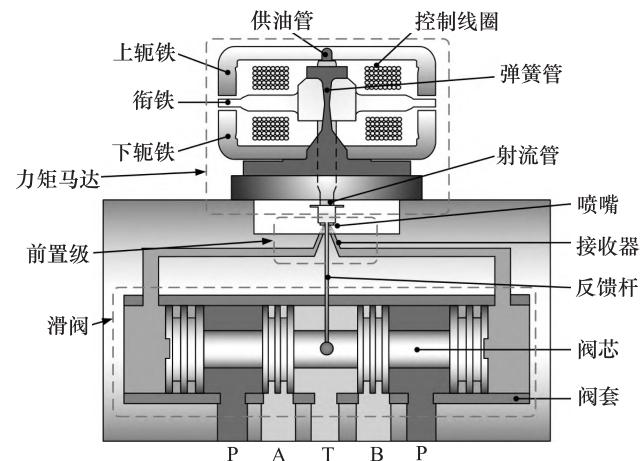


图 1 射流管伺服阀结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of jet tube servo valve

当阀无电流输入时，衔铁受力平衡不发生偏转，喷嘴处于中位，流入接收器两接收腔的油液动能相同，滑阀阀芯左右两端压力相等，压差为零，阀芯处于中位，伺服阀不工作。

当阀有电流输入时，立矩马达控制线圈的电信号在衔铁两端产生电磁力矩，带动衔铁偏转，喷嘴也随之发生偏转，使得流入接收器两接收腔的油液动能不同，从而滑阀阀芯左右两端产生压力差，驱使阀芯运动。阀芯的运动带动反馈杆发生变形，产生反馈力矩，当反馈杆、弹簧管产生的力矩与电磁力矩达到平衡时，阀芯停止运动，处于动态平衡状态。若输入极性相反的控制电流，阀芯将运动至对称的另一侧某个平衡位置。

## 2 前置级 AMESim 仿真建模

### 2.1 图标设计

AMESim 软件是一个包含多学科领域的建模仿真平台，其内置库非常丰富，可在同一个平台上联合进行机械、电磁及流体的仿真计算和深入分析<sup>[19-20]</sup>。AMESim 软件中的 Submodel Editor 工具提供了一个标准化、规范化和图形化的二次开发平台，使用者可通过图形化模块形式在 AMESim 软件中集合 C 代码<sup>[21-22]</sup>。

前置级元件的二次开发过程可分为 3 个步骤，首先进行图标设计，前置级由喷嘴和接收器组成，其三维结构图及剖面图如图 2 所示，喷嘴处在接收器正上方位置，高压油液流经射流管，从喷嘴高速喷出，射入两接收腔。图标设计应要求形象、简便，故根据前置级三维结构图与剖面图，设计前置级元件图标，如图 3 所示。

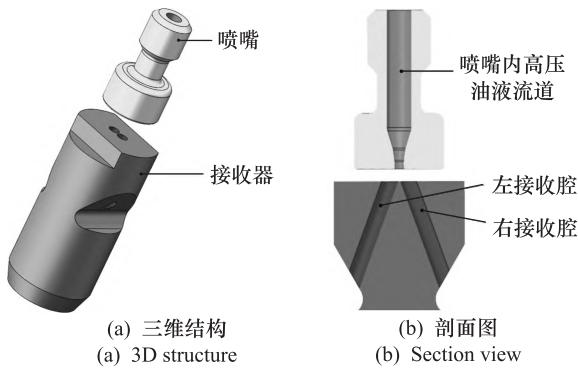


图2 前置级三维结构与剖面图

Fig.2 Pre-stage 3D structure and section view

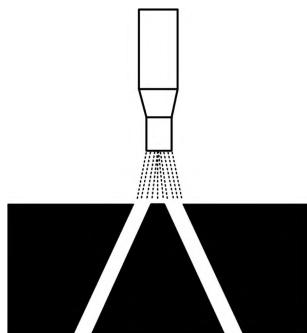


图3 前置级元件图标设计

Fig.3 Icon design of pre-stage components

## 2.2 设置变量与参数

Submodel Editor 工具是基于编程语言可供用户自行开发仿真模型的自定义设计平台,通过定义外部变量、内部变量以及参数,在程序行嵌入代码,实现AMESim 内置模型相同的计算功能。

图4 表示了参数、输入变量、输出变量、内部变量间的关系,参数是用户输入的量,变量是由 AMESim 计算得到的量。在 AMESim 中,每个元件子模型本质上都是一组用代码表示的数学方程,这组方程通过若干已知量计算若干未知变量。

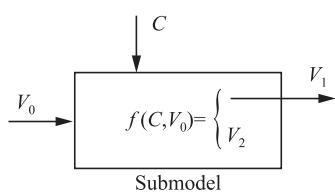


图4 参数与变量的关系

Fig.4 Relationship between parameters and variables

在图4中,C 表示参数,V<sub>0</sub> 表示输入变量,V<sub>1</sub> 表示输出变量,V<sub>2</sub> 表示内部变量,V<sub>0</sub> 和 V<sub>1</sub> 统称为外部变量。已知量包括参数和输入变量,计算得到的变量包括输

出变量和内部变量。对前置级输入输出关系进行分析,以确定端口数量及端口类型,如图5 所示。

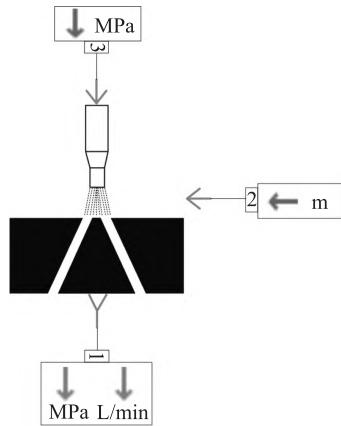


图5 端口数量与端口类型的设定

Fig.5 Setting number and type of ports

从图5 可以看出,端口3 为供油压力输入端口,端口2 为喷嘴位移输入端口,端口1 为前置级负载压差与空载流量输出端口。

设置前置级子模型的外部变量、内部变量以及参数,如表1、表2 和表3 所示。

表1 前置级子模型的外部变量

Tab.1 External variables of pre-stage submodel

端口	变量	含义	类型
1	$p_L, q_L$	负载压差,空载流量	压力输出,流量输出
2	$x_j$	喷嘴位移	位移输入
3	$p_s$	供回油压差	压力输入

表2 前置级子模型的内部变量

Tab.2 Internal variables of pre-stage submodel

变量	含义	变量	含义
$R_a$	射流核心区半径	$S_{bl}$	射流至右接收孔通流面积
$R_b$	射流半径	$S_{l2}$	射流至左接收孔通流面积
$R_{re}$	接收孔半径	$\alpha_{al}, \theta_{al}$	计算 $S_{al}$ 时的相关角度
$v_j$	喷嘴出口速度	$\alpha_{a2}, \theta_{a2}$	计算 $S_{a2}$ 时的相关角度
$S_{al}$	射流核心区至右接收孔通流面积	$\alpha_1, \theta_1$	计算 $S_{bl}$ 时的相关角度
$S_{a2}$	射流核心区至左接收孔通流面积	$\alpha_2, \theta_2$	计算 $S_{l2}$ 时的相关角度

表3 前置级子模型的参数  
Tab. 3 Parameters of pre-stage submodel

变量	含义	变量	含义
$p_s$	供油压力	$\theta_r$	接收孔夹角一半
$p_i$	回油压力	$\rho$	油液密度
$r_j$	喷嘴半径	$C_{dj}$	喷嘴流量系数
$R_r$	接收孔半径	$C_d$	接收孔流量系数
$e$	劈尖宽度	$\alpha$	扩展角
$h$	喷嘴至接收器距离	$\beta$	收缩角

### 2.3 前置级元件内部程序编写

Submodel Editor 工具的编译语言为 C 语言、Fortran。在用户设置了各种参数、变量后,点击 generate submodel code 按钮即可产生相应的代码,用户可在特定区域编写相关的算法和声明。

本研究使用 C 语言编写前置级元件内部程序,前置级的子模型部分代码如下所示:

$$\begin{aligned}
 v_j &= C_{dj} \times \sqrt{(2/\rho) \times p_s} \\
 R_a &= r_j - h \times \beta \\
 R_b &= r_j - h \times \alpha \\
 R_{re} &= R_r / \sqrt{\cos \theta_r} \\
 S_r &= \pi i \times R_{re}^2 \\
 \alpha_1 &= 2 \times \arccos \left\{ [R_{re}^2 + (R_{re} + e/2 - x_j)^2 - R_b^2] / \right. \\
 &\quad \left. [2 \times R_{re} \times (R_{re} + e/2 - x_j)] \right\} \\
 \alpha_2 &= 2 \times \arccos \left\{ [R_{re}^2 + (R_{re} + e/2 + x_j)^2 - R_b^2] / \right. \\
 &\quad \left. [2 \times R_{re} \times (R_{re} + e/2 + x_j)] \right\} \\
 \alpha_{a1} &= 2 \times \arccos \left\{ [R_{re}^2 + (R_{re} + e/2 - x_j)^2 - R_a^2] / \right. \\
 &\quad \left. [2 \times R_{re} \times (R_{re} + e/2 - x_j)] \right\} \\
 \alpha_{a2} &= 2 \times \arccos \left\{ [R_{re}^2 + (R_{re} + e/2 + x_j)^2 - R_a^2] / \right. \\
 &\quad \left. [2 \times R_{re} \times (R_{re} + e/2 + x_j)] \right\} \\
 \theta_1 &= 2 \times \arccos \left\{ [R_b^2 + (R_{re} + e/2 - x_j)^2 - R_{re}^2] / \right. \\
 &\quad \left. [2 \times R_b \times (R_{re} + e/2 - x_j)] \right\} \\
 \theta_2 &= 2 \times \arccos \left\{ [R_b^2 + (R_{re} + e/2 + x_j)^2 - R_{re}^2] / \right. \\
 &\quad \left. [2 \times R_b \times (R_{re} + e/2 + x_j)] \right\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \theta_{a1} &= 2 \times \arccos \left\{ [R_a^2 + (R_{re} + e/2 - x_j)^2 - R_{re}^2] / \right. \\
 &\quad \left. [2 \times R_a \times (R_{re} + e/2 - x_j)] \right\} \\
 \theta_{a2} &= 2 \times \arccos \left\{ [R_a^2 + (R_{re} + e/2 + x_j)^2 - R_{re}^2] / \right. \\
 &\quad \left. [2 \times R_a \times (R_{re} + e/2 + x_j)] \right\} \\
 S_{a1} &= (R_{re}^2 \times \alpha_{a1} + R_a^2 \times \theta_{a1} - R_{re}^2 \times \sin \alpha_{a1} - \\
 &\quad R_a^2 \times \sin \theta_{a1}) / 2 \\
 S_{a2} &= (R_{re}^2 \times \alpha_{a2} + R_a^2 \times \theta_{a2} - R_{re}^2 \times \sin \alpha_{a2} - \\
 &\quad R_a^2 \times \sin \theta_{a2}) / 2 \\
 S_{b1} &= (R_{re}^2 \times \alpha_1 + R_b^2 \times \theta_1 - R_{re}^2 \times \sin \alpha_1 - \\
 &\quad R_b^2 \times \sin \theta_1) / 2 \\
 S_{b2} &= (R_{re}^2 \times \alpha_2 + R_b^2 \times \theta_2 - R_{re}^2 \times \sin \alpha_2 - \\
 &\quad R_b^2 \times \sin \theta_2) / 2 \\
 p_L &= (\rho / S_r) \times \\
 &\quad [0.75 \times (S_{a1} - S_{a2}) \times v_j^2 \times \cos^2 \theta_r - \\
 &\quad (S_{a1} + S_{a2}) \times v_j \times \cos \theta_r \times (q_L / S_r) + \\
 &\quad 0.25 \times (S_{b1} - S_{b2}) \times v_j^2 \times \cos^2 \theta_r - \\
 &\quad (S_{b1} + S_{b2}) \times v_j \times \cos \theta_r \times (q_L / S_r) + \\
 &\quad (S_{b1} - S_{b2}) \times (q_L / S_r)^2 - q_L^2 / (C_d^2 \times S_r)]
 \end{aligned}$$

通过图标设计、变量与参数设置以及子模型内部程序编写,完成了前置级压力-流量特性 AMESim 仿真模型的搭建,如图 6 所示。

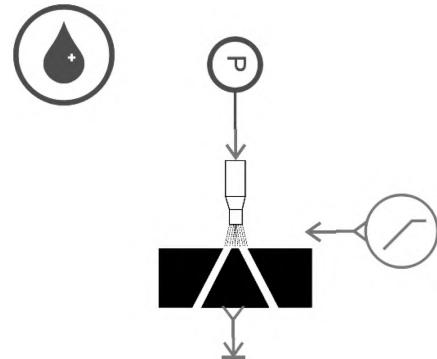


图 6 前置级 AMESim 仿真模型  
Fig. 6 Pre-stage AMESim simulation model

### 3 仿真结果分析

#### 3.1 通流面积

前置级射流及射流核心区至接收孔的通流面积直接关系到阀的能量传递效率,利用前置级 AMESim 仿真模型,仿真得到喷嘴位移在  $\pm 0.1$  mm 范围内射流及射流核心区至左、右接收孔通流面积随喷嘴位移变化

关系,如图 7 所示。

表 4 前置级 AMESim 仿真模型参数汇总  
Tab. 4 Summary of pre-stage AMESim simulation model parameters

名称参数	数值
喷嘴出口半径 $r_j/\text{mm}$	0.125
接收孔半径 $R_i/\text{mm}$	0.2
喷嘴末端至接收器端面距离 $h/\text{mm}$	0.22
劈尖宽度 $e/\text{mm}$	0.04
左右接收孔轴线夹角一半 $\theta_i/(^\circ)$	20
喷嘴流量系数 $C_{dj}$	0.927
接收孔流量系数 $C_d$	0.65
油液密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	786

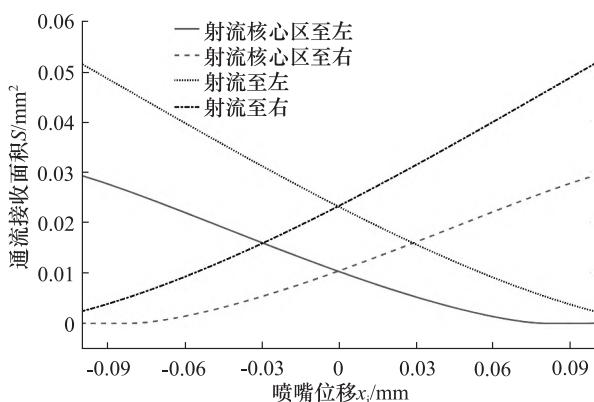


图 7 射流及射流核心区至左、右接收孔通流面积变化

Fig. 7 Flow area changes from jet and jet core area to left and right receiving holes

从图 7 可以看出,随着喷嘴从左向右偏移,射流至左接收孔通流面积逐渐减小,射流至右接收孔通流面积逐渐增大,射流核心区至左接收孔通流面积逐渐减小,直至喷嘴位移大于 0.08 mm 时与左接收孔无通流面积,射流核心区至右接收孔在喷嘴位移小于 -0.08 mm 时无通流面积,随后逐渐增大。

### 3.2 压力特性

利用前置级 AMESim 仿真模型,设置供油压力为 2 MPa,回油压力为 0.15 MPa,当喷嘴位移变化在 -0.1 ~ 0.1 mm 时,仿真得到前置级压力特性曲线,如图 8 所示。

从图 8 可以看出,喷嘴处于零位时,压差为 0,随着

喷嘴位移增大,压差逐渐增大,零位压力增益系数为 11.547 MPa/mm,当喷嘴位移达到 0.1 mm 时,前置级的最大负载压差达到了 1.136 MPa。此外,压差与喷嘴位移之间呈近似线性关系,线性度为 1.24%,压差与喷嘴位移线性拟合程度高,有利于射流管伺服阀的整体线性控制。

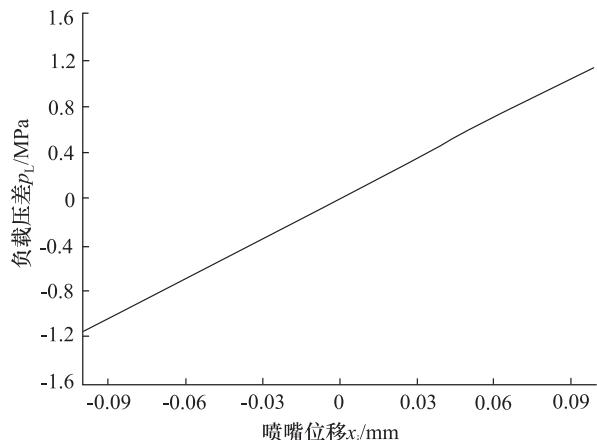


图 8 前置级压力特性曲线

Fig. 8 Pressure characteristic curve of pre-stage

### 3.3 流量特性

利用前置级 AMESim 仿真模型,设置供油压力为 2 MPa,回油压力为 0.15 MPa,当喷嘴位移变化在 -0.1 ~ 0.1 mm 时,仿真得到前置级流量特性曲线,如图 9 所示。

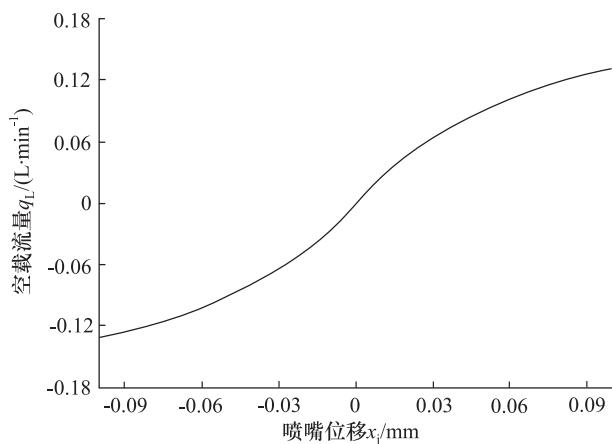


图 9 前置级流量特性曲线

Fig. 9 Flow characteristic curve of pre-stage

从图 9 可以看出,喷嘴处于零位时,流量为 0 L/min。随着喷嘴位移增大,空载流量逐渐增大,当喷嘴位移较大时,流量增加较缓慢,逐渐趋于饱和,流量增益为 3.270 L/(min · mm)。当喷嘴位移达到 0.1 mm 时,前置级的最大空载流量达到了 0.132 L/min。

## 4 试验验证

### 4.1 试验系统组成

为验证前置级 AMESim 模型的准确性,本研究以前置级为研究对象,搭建前置级压力特性测试试验台对前置级接收器末端压力进行测试,图 10 为前置级压力特性测试试验台的实物图。

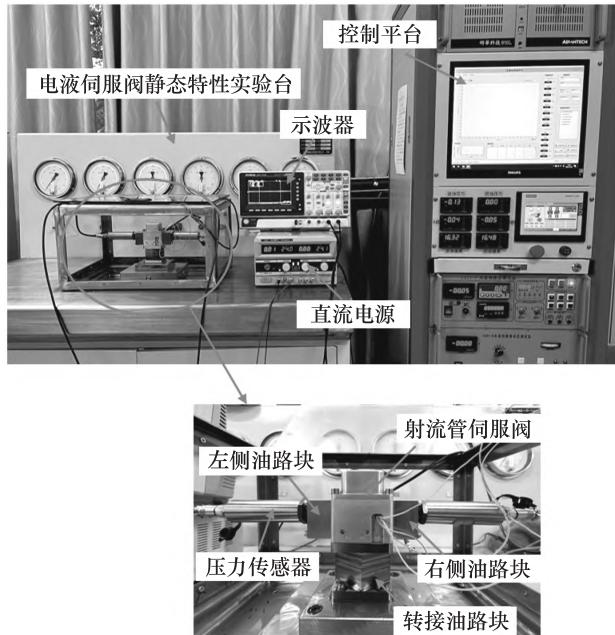


图 10 前置级压力特性测试试验台

Fig. 10 Test bench of pre-stage pressure characteristic

在图 10 中,前置级压力特性测试主要采用的试验设备有电液伺服阀静态特性试验台、控制平台、24 V 直流电源、示波器、压力传感器、油路块以及射流管伺服阀。

### 4.2 试验原理

图 11 为前置级压力特性测试试验原理图,射流管伺服阀通过转接油路块与电液伺服阀静态特性试验台连接,控制平台内部集成有信号发生器和伺服放大器电路组件,可产生控制电流信号,输出到电液伺服阀静态实验台,作用于力矩马达的控制线圈,磁路组件产生电磁力矩,射流管在力矩马达电磁力矩作用下偏转一定角度,则射流管伺服阀前置级左右接收腔末端产生压力差。

为了方便测试前置级两接收腔压力,在该射流管伺服阀设计时,从前置级左右接收腔末端引出了 2 条油路通向阀体外部,在阀正常工作时,通过堵头将该油路封闭,则油液流经左右接收腔将到达阀芯左右两侧,驱动阀芯运动,达到控制流量和压力的目的。在本试

验中,将阀体左右两边堵头拔出,设计左右两侧对称的油路块将前置级左右接收腔压力引出到压力传感器测量,24 V 直流电源为压力传感器供电,测出的压力信号传递到示波器上进行数据的显示和保存。由于本试验主要涉及的是力矩马达与前置级,力矩马达产生电磁力矩驱动射流管偏转,不需要反馈杆提供的反馈力矩,故在试验中需要把力矩马达上的反馈杆组件移除。

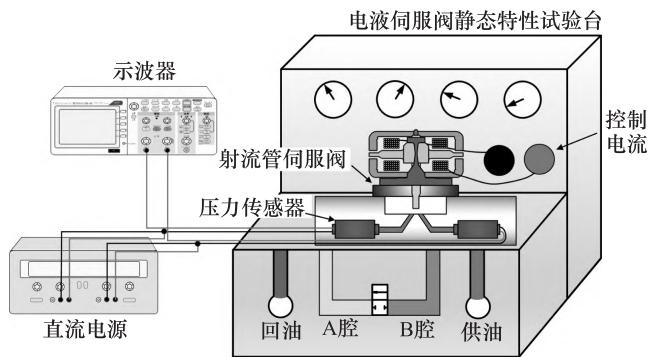


图 11 前置级压力特性测试试验原理图

Fig. 11 Schematic diagram of pre-stage pressure characteristic test experiment

### 4.3 压力特性测试试验结果

基于所搭建的前置级压力特性测试试验台开展研究,设置供油压力为 1.85 MPa、回油压力为 0 MPa,通过压力传感器测得前置级左右接收腔压力,计算得到两接收腔压差(右腔压力减去左腔压力),并将试验结果与 AMESim 仿真求解结果进行对比,如图 12 所示。

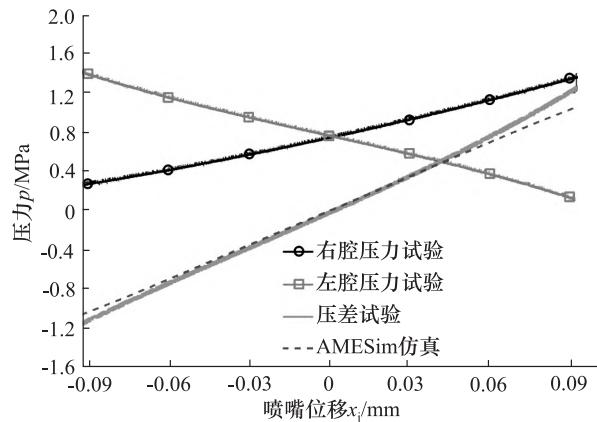


图 12 前置级压力特性测试试验结果

Fig. 12 Test results of pre-stage pressure characteristics

从图 12 可以看出,随着喷嘴位移增大,前置级左接收腔压力逐渐减小,右接收腔压力逐渐增大,压差逐渐增大,对比结果表明,前置级压力特性试验结果与 AMESim 仿真求解结果基本一致,证明了前置级

AMESim 仿真模型的准确性。

## 5 结论

(1) 使用 AMESim 软件中的 Submodel Editor 工具对前置级进行二次开发, 搭建了前置级 AMESim 仿真模型, 准确描述了前置级压力特性与流量特性, 并通过试验验证了仿真模型的准确性。

(2) 前置级压力特性仿真研究结果表明, 随着喷嘴位移增大, 负载压差逐渐增大, 呈近似线性关系, 线性度为 1.24%, 有利于射流管伺服阀的整体线性控制, 压力增益为 11.547 MPa/mm, 当喷嘴位移达到 0.1 mm 时, 前置级的负载压差达到了 1.136 MPa。

(3) 前置级流量特性仿真研究结果表明, 随着喷嘴位移增大, 空载流量逐渐增大, 当喷嘴位移较大时, 流量增加较缓慢, 逐渐趋于饱和, 流量增益为 3.270 L/(min · mm), 当喷嘴位移达到 0.1 mm 时, 前置级的空载流量达到了 0.132 L/min。

## 参考文献

- [1] 陈佳, 袁朝辉, 郭强, 等. 射流管伺服阀前置级的动态流场分析[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1731–1737.  
CHEN Jia, YUAN Chaohui, GUO Qiang, et al. Dynamic Flow Field Analysis of the Prestage of Jet Pipe Servo Valve [J]. Chinese Journal of Scientific Instrume, 2017, 38(7): 1731 – 1737.
- [2] 阎耀保. 射流管伺服阀在飞机液压系统中的应用[J]. 液压气动与密封, 2012, 32(7): 8–12.  
YAN Yaobao. Applications of Jet Pipe Servo Valve on Airphne Hydraulic System [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2012, 32 (7): 8 – 12.
- [3] YAN Yaobao, ZHANG Zhiheng, LI Changming, et al. Analysis on Stiffness of Armature Assembly of Jet Pipe Servo Valve [C]// Proceedings of 2019 IEEE 8th International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM), Wuhan: IEEE, 2019: 818 – 825.
- [4] LI Yuesong. Mathematical Modelling and Characteristics of the Pilot Valve Applied to a Jet-pipe/Deflector-jet Servovalve [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 245: 150 – 159.
- [5] 孟令康, 朱玉川, 丁建军, 等. 前置级放放大器流场的数值仿真[J]. 机械设计与制造, 2017 (1): 218 – 221, 226.  
MENG Lingkang, ZHU Yuchuan, DING Jianjun, et al. Numerical Simulation of the Flow Field of the Pre-stage Amplifier [J]. Machinery Design & Manufacture, 2017 (1): 218 – 221, 226.
- [6] 王纪森, 张晓娟, 彭博. 射流管式伺服阀前置级建模与仿真[J]. 机床与液压, 2012, 40(7): 160 – 162.  
WANG Jisen, ZHANG Xiaojuan, PENG Bo. Modeling and Simulation for Prestage of Jet Pipe Hydraulic Servo Valve [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2012, 40(7): 160 – 162.
- [7] 阎耀保, 王玉. 射流管伺服阀前置级压力特性[J]. 航空动力学报, 2015, 30(12): 3058 – 3064.  
YAN Yaobao, WANG Yu. Pressure Characterization of the Pre-stage of Jet Pipe Servo Valve [J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(12): 3058 – 3064.
- [8] 黄礼浩, 郝圣桥, 孙宾, 等. 某型气动阀门射流级流场仿真分析与实验验证[J]. 液压与气动, 2015(6): 92 – 96, 100.  
HUANG Li Hao, HAO Shengqiao, SUN Bin, et al. Flow Field Simulation and Experimental Validation on Certain Type Pneumatic Valve [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015(6): 92 – 96, 100.
- [9] 赵开宇, 张利剑, 袁朝辉. 射流管电液伺服阀特性分析[J]. 机床与液压, 2016, 44(14): 56 – 59, 87.  
ZHAO Kaiyu, ZHANG Lijian, YUAN Chaohui. The Characteristics Analysis of the Jet Pipe Electro-hydraulic Servo Valve [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44 (14): 56 – 59, 87.
- [10] 赵康, 傅连东, 湛从昌, 等. 基于 FLUENT 的射流管伺服阀前置级放大器流场的数值仿真[J]. 机床与液压, 2016, 44 (4): 41 – 43.  
ZHAO Kang, FU Liandong, ZHAN Congchang, et al. Flow Field Numerical Simulation of Jet Pipe Servo Valve Prestage Amplifier Based on FLUENT [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(4): 41 – 43.
- [11] 胡文钢, 吴凛, 陈奎生, 等. 射流管伺服阀接收口形状对阀特性的影[J]. 机械设计与制造, 2017 (1): 218 – 221, 226.  
HU Wengang, WU Lin, CHEN Kuisheng, et al. The Influence of the Shape of Receiving Ports on Characteristics of Jet Pipe Servo Valve [J]. Machinery Design & Manufacture, 2017 (1): 218 – 221, 226.
- [12] 杨泽贺. 射流管伺服阀前置级流场测量及结构参数匹配研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.  
YANG Zehe. Research on Flow Field Measurement and Structural Parameter Matching for the Pilot Stage of Jet Pipe Servo Valve [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [13] 黄增, 金瑶兰, 陈冬冬, 等. PIV 射流管伺服阀啸叫问题的研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(4): 72 – 75.  
HUANG Zeng, JIN Yaolan, CHEN Dongdong, et al. Study on Howling Problem of PIV Jet-pipe Servo Valve [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(4): 72 – 75.

- [14] 夏天,陈誉,张晋.高温下应力不对称及热变形对射流管伺服阀零位的影响[J].液压与气动,2023,47(8):155–166.  
XIA Tian, CHEN Yu, ZHANG Jin. The Influence of Stress Asymmetry and Thermal Deformation on Zero Position of Jet Pipe Servo Value at High Temperature [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2023,47(8):155 – 166.
- [15] HIREMATH S S, SINGAPERUMAL M, KRISHNA R K. FE Approach: Electro-Mechanical-Fluid Interaction of Jet Pipe Electrohydraulic Flow Control Servovalve [C]// Proceedings of the ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2003.
- [16] KRIVTS I L. Optimization of Performance Characteristics of Electropneumatic (Two-Stage) Servo Valve [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2004, 126 (2):416 – 420.
- [17] DHINESH K S, ANDREW R P, CHRISTOPHER R B, et al. Modelling and Experimental Validation of a Novel Piezohydraulic Servovalve [C]// ASME 2011 Dynamic Systems and Control Conference and Bath/ASME Symposium on Fluid Power and Motion Control, 2011(2):343 – 350.
- [18] PACE L, FERRO M, FRATERNATE F, et al. Comparative Analysis of a Hydraulic Servo-valve [J]. International Journal of Fluid Power, 2013(2):53 – 62.
- [19] 张松亭,陈新元,李邦,等.基于AMESim的先导式比例压  
力阀仿真与试验[J].液压气动与密封,2023 (12):59  
– 63.  
ZHANG Songting, CHEN Xinyuan, LI Bang, et al. Simulation and Test of Pilot Proportional Pressure Value Based on AMESim [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2023 (12): 59 – 63.
- [20] 汪红星,朱华,潘政阳.基于AMESim与MATLAB/Simulink的注油机电液比例流量控制系统设计[J].液压气动与密封,2023,43(4):11 – 16.  
WANG Hongxing, ZHU Hua, PAN Zhengyang. Design of Electro-hydraulic Proportional Flow Control System for Oil Injection Based on AMESim and MATLAB/Simulink [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2023,43(4):11 – 16.
- [21] 肖威,刘卫,苟睿睿.基于AMESet的湿态换热器模型的二次开发[J].热能动力工程,2021,36(5):90 – 95.  
XIAO Wei, LIU Wei, GOU Ruirui. Secondary Development of Wet Heat Exchanger Model Based on AMESet [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(5):90 – 95.
- [22] 岳壮.某压力调节系统执行机构典型故障诊断方法[D].绵阳:西南科技大学,2023.  
YUE Zhuang. Typical Fault Diagnosis Method for Actuator of a Pressure Regulating System [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023.

#### 引用本文:

赵小龙,姜本九,朱玉川.射流管伺服阀前置级AMESim仿真与实验研究[J].液压气动与密封,2025,45(5):54 – 61.  
ZHAO Xiaolong, JIANG Benjiu, ZHU Yuchuan. AMESim Simulation and Experimental Study on Pre-stage of Jet Pipe Servo Valve [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2025,45(5):54 – 61.

## 我国工业领域大规模设备更新加速推进

2025年1–3月,在“两新”政策持续发力下,我国工业领域大规模设备更新加速落地,不仅拉动了投资增长、促进了产业发展,更在释放内需潜力、助力绿色转型等方面发挥了重要作用。

在正在建设中的川气东送施工现场,我国自主研发的油气管道全自动焊接检测机器人正式上岗作业。这套智能焊接系统取代了传统的人工加焊机方式,焊接一次合格率达到98%以上。

在新疆,不少矿山企业更新了智能开采设备。新设备的投入不仅提高了人员的安全,生产效率也比过去提高了20%。

数据显示,今年一季度,全国企业采购机械设备金额同比增长11%,高端化、智能化、绿色化升级态势明显。目前,财政部已安排了5000亿超长期特别国债,专项用于设备更新和消费品以旧换新。今年,我国除了在工业、用能设备、能源电力等领域持续进行设备更新,还将范围进一步扩展至电子信息、安全生产、设施农业等领域。同时,鼓励有条件的地方以工业园区、产业集群为载体,整体部署并规模化实施设备更新。

工业和信息化部表示,到2027年我国工业设备投资规模较2023年要增长25%以上,关键工序数控化率达到75%,实现工业大省和重点园区数字化改造全覆盖。

来源:央视新闻  
摘自《中国液压气动密封件工业协会公众号》