

# 伺服阀偏导射流液压放大器仿真与试验研究

张恒轩<sup>1,2</sup>, 潘英<sup>1,2</sup>, 陈俊光<sup>1,2</sup>, 姬腾<sup>1,2</sup>

(1. 北京精密机电控制设备研究所, 北京, 100076; 2. 控制执行机构技术创新中心, 北京, 100076)

**摘要:** 偏导射流式伺服阀抗污染能力较强, 广泛应用于航空航天领域。但由于偏导射流液压放大器内部几何形状复杂, 为非节流式液压放大器, 对输出特性的预估较为困难, 设计分析中较为依赖计算流体力学仿真分析。由于加工及装配精度因素影响, 试验中特性往往具有较大的散布, 对流场仿真模型的验证造成了困难。对偏导射流液压放大器压力特性进行了试验及数据统计, 分析了不同流体力学仿真模型对压力特性预估的准确性, 验证了低雷诺数 $k-\epsilon$ 模型在偏导射流液压放大器性能预估中具有更好的计算精度。

**关键词:** 伺服阀; 偏导射流; 雷诺平均方程;  $k-\epsilon$ 模型; 低雷诺数

中图分类号: TH137.52; V19

文献标识码: A

## Simulation and Experimental Research on Servo-valve Jet-deflector Hydraulic Amplifier

ZHANG Hengxuan<sup>1,2</sup>, PAN Ying<sup>1,2</sup>, CHEN Junguang<sup>1,2</sup>, JI Teng<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Institute of Precise Mechatronics and Controls, Beijing, 100076; 2. Innovation Center for Control Actuators, Beijing, 100076)

**Abstract:** Jet-deflector servo-valve is known for high resistance to contamination and is widely used in aerospace where reliability is critical. However, the internal structure of jet-deflector device is very complex which makes it more challenging to a performance indication. When Computational Fluid Dynamics is introduced into an analysis of a jet-deflector servo valve, the dispersion of experimental data is always intolerable for a precise verification because of manufacturing or assembling accuracy. In this research, a distribution of experimental results is presented. After a comparison of different turbulence models, the low Reynolds number  $k-\epsilon$  model shows more precision in pressure characteristic analysis of jet-deflector device.

**Keywords:** servo-valve; jet-deflector; Reynolds-Averaged Navier-Stokes;  $k-\epsilon$  model; low Reynolds number

### 0 引言

偏导射流式伺服阀是一种在航空航天领域广泛应用的电液伺服阀, 其结合了喷嘴挡板式电液伺服阀和射流技术的优点, 具有较好的动静态性能和抗污染能力, 且相比射流管伺服阀, 由于不需要挠性供油管, 消除了结构上可能出现的振动, 具有结构简单、工作可靠的特点<sup>[1]</sup>。王传礼等<sup>[2]</sup>基于射流盘过流面积分布建立了射流盘阀的流量方程。Sangiah等<sup>[3]</sup>以节流元件为模型建立了偏导射流液压放大器的模拟模型。Saha等<sup>[4]</sup>考虑不同流动状态时理论公式与实际性能的差异, 基于不可压缩层流的Schlichting速度方程推导了偏导板出口速度分布, 从而完善了偏导射流前置级的数学模型。Ren等<sup>[5]</sup>针对偏导射流伺服阀压力特

性鲁棒性差的问题, 建立偏导射流伺服阀的三维度数学模型。程文豪等<sup>[6]</sup>基于平面自由紊动射流理论和液体活塞模型, 建立了偏导射流伺服阀前置级的压力特性模型。李竞等<sup>[7]</sup>在偏导射流前置级的二次射流过程中分别采用不同理论模型建立前置级流场的数学模型, 该模型描述了射流形态演变的全过程。

由于偏导射流前置级属于非节流式液压放大器, 实际工作原理与采用节流元件建立的模型有较大差异, 因此在伺服阀设计中多需采用计算流体力学模拟方法进行压力流量特性分析。任玉凯等<sup>[8]</sup>对不同湍流模型下偏导射流伺服阀的前置级流场进行了仿真研究。此外, 任玉凯与邢晓文等<sup>[9-10]</sup>对偏导射流前置级的计算流体力学仿真确定了流场的特征参数, 并对前

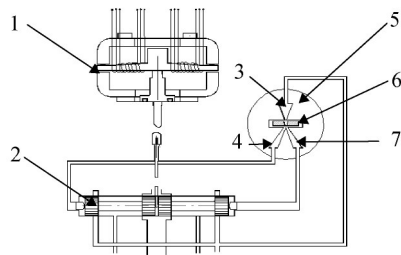
置级的结构参数进行优化设计。Pan等<sup>[11]</sup>针对偏导射流伺服阀调试性能一致性问题,对不同偏转板位置偏差下偏导射流液压放大器的静态性能进行仿真分析,得出适合的偏转板位置范围。Saha等<sup>[12]</sup>还运用欧拉多相流、标准 $k-\epsilon$ 湍流等多种经典计算流体力学模型对偏转板前置级的流动空化现象进行研究,揭示了多种模型对前置级流场模拟的适应性和可操作性。

偏导射流液压放大器内部几何形状复杂,射流盘内部射流口、尖劈等结构的几何尺寸和形位公差在加工中容易产生较高的不一致性,而整个偏导射流液压放大器的实际尺寸还受到射流盘组件和衔铁组件各自装配精度及相互位置关系精度的影响,因此试验样件往往具有较大的散布,使模型的适应性较为难以判断。本文基于偏导射流液压放大器的批量试验统计数据分布,为确立更为适用的流体力学模型建立了数据参照。

## 1 偏导射流液压放大器湍流模型分析

### 1.1 偏导射流伺服阀前置级工作原理

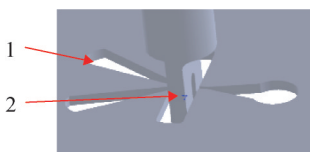
偏导射流伺服阀原理如图1所示。偏导射流液压放大器如图2所示,由偏转板和射流盘组成,偏转板开有V型导流槽,射流盘由压力入口和两个对称接收腔组成。压力入口与供油连接,两个接收腔则与主阀芯两端相连。



1—力矩马达;2—滑阀阀芯;3—压力入口;4—左接收腔;5—射流盘;  
6—偏转板;7—右接收腔。

图1 偏导射流式伺服阀原理

Fig.1 Principle of jet-deflector servo-valve



1—射流盘;2—反馈杆上作为偏转板的导流槽。

图2 偏导射流前置级液压放大器结构

Fig.2 Structure of the servo-valve jet-deflector hydraulic amplifier

输入控制信号时,力矩马达产生控制磁场,衔铁受极化磁通和控制磁通共同作用,产生与控制信号成比例的电磁力矩,从而使衔铁组件向某一方向偏转。偏转板受衔铁连带作用偏转,导致两接收腔面积出现差异,入射口流体更多冲击到接收腔面积增大的一侧。此时两侧接收腔的压力不同,两侧接收腔形成的压差则作用于阀芯两端,推动阀芯运动。阀芯的运动使得反馈杆弯曲,产生反馈力矩反作用于衔铁组件,直至与衔铁组件所受的电磁力矩平衡,此时阀芯将保持在某个位置,而阀芯的位移与输入控制电流的大小成一定比例<sup>[13]</sup>。

Yan等<sup>[14]</sup>根据偏导射流前置级的流动特点,将其分为外部引入的初始射流,以及流经偏转板后的二次射流,如图3所示。初始射流时液压油高速射入偏转板,形成平面紊动射流,使偏转板内形成高压区域,促使其内部压力恢复。这种压力恢复现象不受偏转板的运动影响,因此偏转板射流流速近似恒定,随着偏转板偏转,尖劈对偏转板射流形成分流作用,由于左右接收腔的面积变化,形成了驱动主阀芯运动的驱动压差。

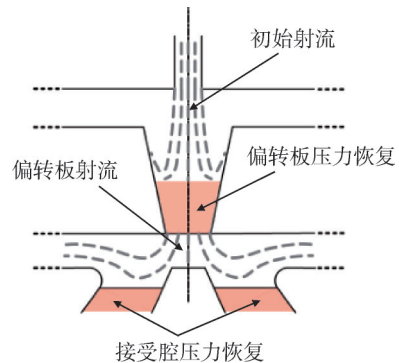


图3 偏导射流液压放大器的二次射流原理

Fig.3 The secondary jet principle of the servo-valve jet-deflector hydraulic amplifier

### 1.2 前置级湍流模型分析

目前在大部分对液压阀类元件的流场仿真研究中采用较广的是 $k-\epsilon$ 模型,其具有鲁棒性、经济性和对各种湍流的合理精度。 $k-\epsilon$ 模型是一种基于雷诺平均方程(Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS)涡黏模型,通过求解涡黏度来求解雷诺应力。标准 $k-\epsilon$ 模型的湍动能 $k$ 和湍流耗散率 $\epsilon$ 的方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 P_k \frac{\varepsilon}{k} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\rho$  为流体密度;  $\mu$  为流体黏度;  $\mu_t$  为涡黏度;  $P_k$  为由平均速度剪切产生的湍动能;  $k$  为湍动能;  $\varepsilon$  为湍流耗散率;  $\sigma$  为湍流普朗特数;  $C_1$ 、 $C_2$  为经验系数。两方程最左侧为时间导数, 第二项为对流项。等号右侧第一项为扩散项, 其余项为源项。

标准  $k-\varepsilon$  模型是半经验公式, 其中  $k$  方程是依据推导得出, 而  $\varepsilon$  方程是根据量纲分析、经验和类比等办法模拟得到的。标准  $k-\varepsilon$  假设了高雷诺数下分子黏性对耗散率和涡流脉动的影响可以忽略不计, 因此在充分发展、各向同性的湍流计算方面具有较强的优势。但在流场的近壁面区域内, 湍流发展并不充分, 壁面附近的黏性底层内流动更接近层流状态, 采用标准  $k-\varepsilon$  模型进行计算将会产生较大误差。偏导射流液压放大器流场内部间隙较小, 射流在离开入射口后即进入 V 型导流槽的导流区域, 射流宽度收缩与 V 型槽壁面发生碰撞。在射流离开 V 型槽后又与两接收腔之间的尖状结构接触并改变流向, 流入导流槽和射流盘组件之间的缝隙。因此偏导射流液压放大器流场内部存在大量的近壁面流动, 采用标准  $k-\varepsilon$  模型不能很好地分析流场特性。为了更好地解决近壁面流动的计算问题, 通常采用的方法主要有壁面函数法和低雷诺数  $k-\varepsilon$  模型等。

壁面函数法是湍流模拟中的一种处理方式, 主要用于简化壁面附近的复杂流动计算。这种方法将湍流流域分为核心区与壁面区两个部分, 基于标准  $k-\varepsilon$  模型计算湍流核心区的流动。壁面区域则通过半经验公式将壁面的物理量与核心区域的求解变量关联, 避免了在壁面内部直接求解流动问题<sup>[15]</sup>。而低雷诺数  $k-\varepsilon$  模型是一种  $k-\varepsilon$  模型的修正模型。为了能使标准  $k-\varepsilon$  模型从高雷诺数湍流区延伸至近壁面, 模型使用阻尼函数将近壁面流动和远离壁面的耗散率统一起来, 使修正模型实现不同雷诺数区域的数值计算<sup>[16]</sup>。湍流耗散率  $\varepsilon$  的方程为

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 f_1 P_k \frac{\varepsilon}{k} - C_2 f_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

涡黏度表达式为

$$\mu_t = C_\mu f_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

其中, 阻尼函数  $f_1$ 、 $f_2$  和  $f_\mu$  为紊流雷诺数  $Re_\tau$  的函数, 紊流雷诺数的表达式为

$$Re_\tau = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon} \quad (4)$$

紊流雷诺数表示了流体所受的紊动力和黏性力之间的关系。在近壁面区域, 紊流动能较小, 紊流雷诺数较低, 在流动中黏性力起主导作用。在远离壁面区域紊流雷诺数较大, 紊流力起主导作用。低雷诺数  $k-\varepsilon$  模型目前主要有 Launder-Sharma、Abid、Shih 等几种形式, 其区别主要在于阻尼函数的形式不同。各模型使用的阻尼函数如表 1 所示<sup>[17]</sup>。

表 1 低雷诺数阻尼函数形式比较

Tab.1 Comparison of low Reynolds number damping function forms

模型	$f_1$	$f_2$	$f_\mu$
L-S	1	$1 - 0.3 \exp(-Re_\tau^2)$	$\exp\left(\frac{-3.4}{\left(1 + \frac{Re_\tau}{50}\right)^2}\right)$
Abid	1	$1 - \frac{2}{9} \exp\left(-\frac{Re_\tau^2}{36}\right) \times \left(1 - \exp\left(-\frac{Re_\tau}{12}\right)\right)$	$\tanh(0.008 Re_\tau) \times \left(1 + \frac{4}{Re_\tau^{3/4}}\right)$
Shih	1	$1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^4 a_i y^+ \right)$	$1 - 0.22 \exp\left(-\frac{Re_\tau^2}{36}\right)$

由表 1 可见, 在各类低雷诺数模型中, 阻尼函数通常为关于紊流雷诺数  $Re_\tau$  或者无量纲壁面距离  $y^+$  的函数, 当  $Re_\tau$  越高或者  $y^+$  越大时, 阻尼函数的值越趋近于 1, 模型向标准  $k-\varepsilon$  模型转化。当  $Re_\tau < 150$  时, 一般情况下阻尼函数的影响较为明显, 这是由于低雷诺数区域的分子黏性对湍流动量的影响较为明显。在低雷诺数区域的流动问题已不再适用标准  $k-\varepsilon$  模型求解。

对偏导射流前置级液压放大器建立如图 4 所示的流场模型, 该模型为偏导射流液压放大器内部流道的几何模型。入口为压力入口形式, 以前置级底座通往射流盘入射口的小孔底部为边界; 出口为压力出口形式, 以前置级底座通往回油的大孔底部为边界。两接收口以底座通往功率级的小孔底部为边界, 设定为壁面形式, 分别监视左右两个接收腔壁面的平均压力,

计算得到两接收腔压差。射流盘厚度为0.3 mm，射流区域入口及导流口宽度为0.15 mm，接收口外侧间距为0.6 mm。入口压力设定为16 MPa，出口压力为0.1 MPa，工作介质为10号航空液压油，密度为850 kg/m<sup>3</sup>，40 °C下动力黏度为0.008 5 Pa·s。

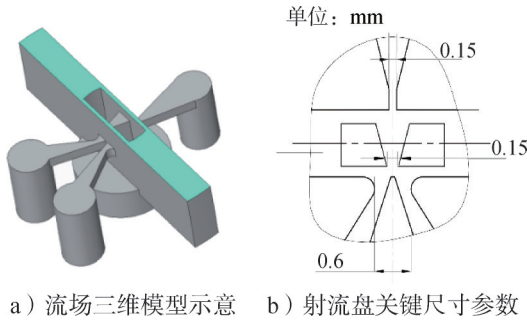


图4 偏导射流流场几何结构及尺寸参数

Fig.4 Geometrical structure and dimensional parameters of the jet-deflector flow field

通过初步仿真计算，流场除了在初始出射、二次出射和间隙外侧的局部区域具有比较大的空间，湍流发展比较充分以外，绝大部分近壁面区域，包括部分核心射流区域内紊流雷诺数  $Re_T$  均较小。以标准  $k-\epsilon$  模型和低雷诺数  $k-\epsilon$  模型对  $Re_T$  进行计算，两种模型计算结果均显示存在  $Re_T < 150$  的大范围区域，如图5所示。可见采用低雷诺数模型对流场进行计算具有较强的适应性。

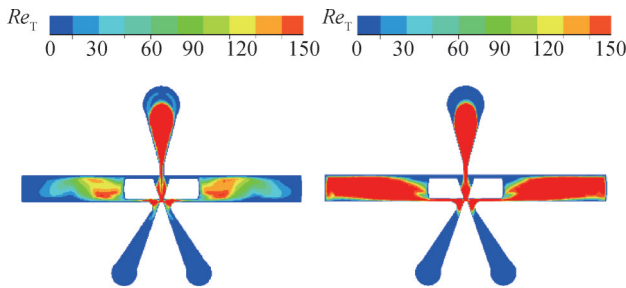


图5 偏导射流液压放大器流场的紊流雷诺数  $Re_T$  分布

Fig.5 Turbulent Reynolds number  $Re_T$  distribution in the flow field of the jet-deflector hydraulic amplifier

网格单元从低到高依次对标准  $k-\epsilon$  模型和低雷诺数  $k-\epsilon$  模型进行比较，中位压力计算结果如表2所示。标准  $k-\epsilon$  模型采用标准壁面函数时计算偏导射流流场受网格影响较大，而低雷诺数  $k-\epsilon$  模型计算中对网格单元数较为不敏感，但由于需要计算黏性底层的湍流方程，需要建立更为细化的边界层网格，壁面网格层数少于10时中位压力难以得到收敛解。

表2 不同模型下中位压力仿真结果对比

Tab.2 Comparison of median pressure simulation results under different models

网格单元数	低雷诺数 $k-\epsilon$ 模型 (Abid)	标准 $k-\epsilon$ 模型	
		标准壁面函数	增强壁面函数
634 814	—	2.51	2.02
1 350 942	3.32	2.83	2.07
3 259 943	3.28	2.03	1.97

偏导射流液压放大器流场核心区域速度分布如图6所示。对于标准  $k-\epsilon$  模型，由于其针对高度发展湍流忽略了分子黏性力，在计算近壁面射流时出现了耗散较高的结果，计算得到的核心射流区宽度更小，中位压力更低。而低雷诺数  $k-\epsilon$  模型仿真速度云图中射流核心区域更宽，计算得到的射流能量更为集中，因此中位压力计算结果也更高。相同网格单元数下标准  $k-\epsilon$  模型的中位压力计算结果约为低雷诺数  $k-\epsilon$  模型计算结果的60%，引入增强壁面函数后对计算结果无明显影响。

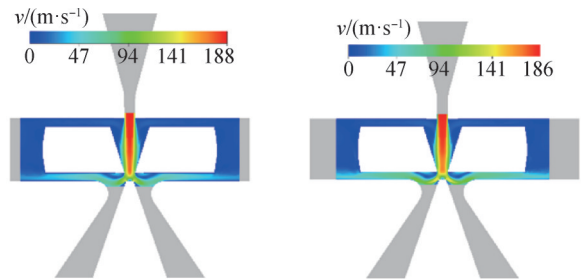


图6 偏导射流液压放大器流场仿真速度云图

Fig.6 Velocity cloud of the simulated flow field of the jet-deflector hydraulic amplifier

在不同的低雷诺数模型之间运用中位压力统计值进行了对比，各模型中位压力值计算结果如表3所示，单元数均为表2中的最大单元数，可见各类低雷诺数  $k-\epsilon$  模型在中位压力计算方面表现基本接近。

表3 不同阻尼函数下中位压力仿真结果对比

Tab.3 Comparison of simulation results of median pressure with different damping functions

模型	中位压力仿真值/MPa
L-S	3.23
Abid	3.28
Shih	3.23

以低雷诺数  $k-\epsilon$  模型/Abid 阻尼函数对偏导射流液压放大器  $\pm 0.04$  mm 偏移范围内的压力特性进行仿真计算，单个接收腔压力最大时为6.3 MPa，最小时

为0.9 MPa, 左右两腔压力随导流槽位移的变化曲线如图7所示。

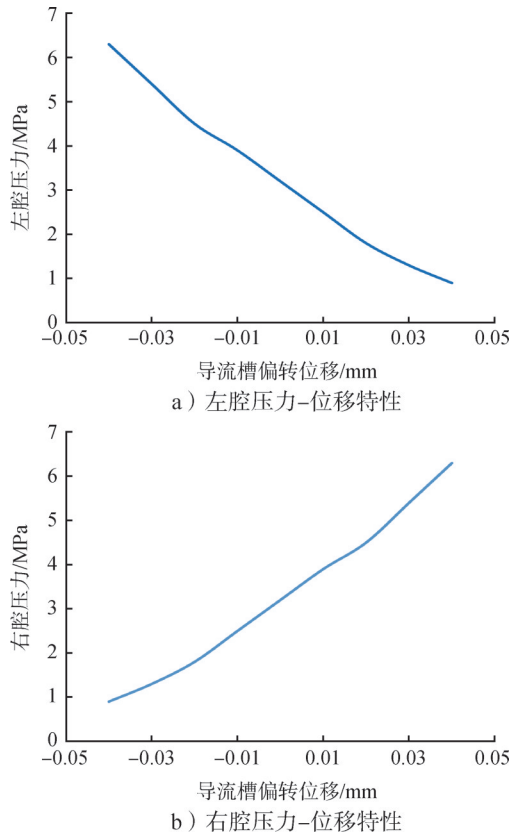


图7 偏导射流液压放大器压力特性仿真结果

Fig.7 Simulation results of pressure characteristics of the jet-deflector hydraulic amplifier

### 2 偏导射流液压放大器试验分析

在图8所示的伺服阀性能测试台上对偏导射流液压放大器测试样件进行了压差特性试验, 测试台液压原理如图9所示。测试射流盘厚度为0.3 mm, 入口压力设定为16 MPa, 出口压力为0.1 MPa, 工作介质为航空液压油, 与仿真参数一致。

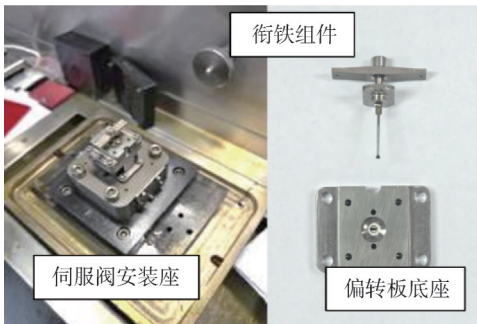
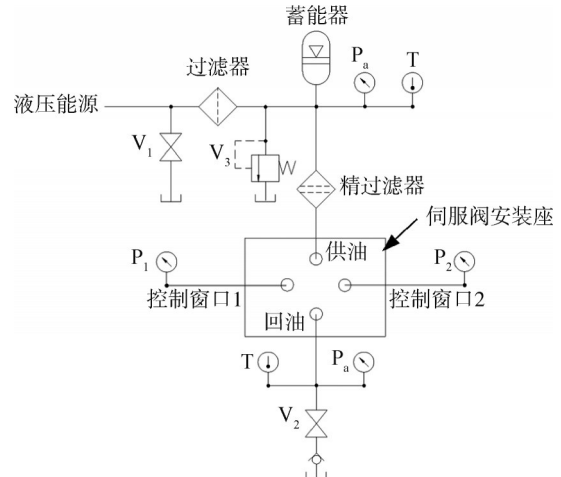


图8 伺服阀液压放大器测试台及测试样件

Fig.8 The experimental platform and test samples of servo-valve hydraulic amplifier



V—调压器; V<sub>2</sub>—回油阀; V<sub>3</sub>—溢流阀; T—温度计; P<sub>a</sub>、P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>—压力表。

图9 伺服阀测试台液压原理

Fig.9 The hydraulic principle of servo-valve experimental platform

以100件样件的压力特性试验结果进行分析, 中位压力试验数据分布情况和统计结果如图10和表4所示。

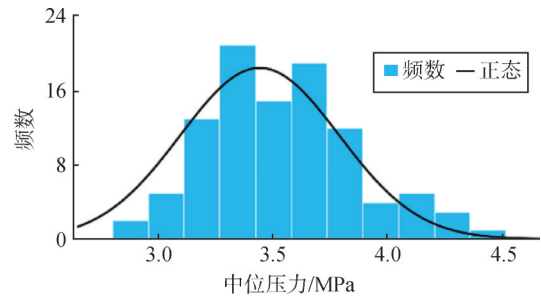


图10 偏导射流液压放大器中位压力数据分布

Fig.10 Distribution of median pressure data for jet-deflector hydraulic amplifier

表4 偏导射流液压放大器中位压力数据分析

Tab.4 Analysis of median pressure data for jet-deflector hydraulic amplifier

试验数量	中位压力/MPa				Jarque-Bera 检验	
	最大值	最小值	平均值	标准差	$\chi^2$	p
100件/次	4.5	2.8	3.44	0.35	5.192	0.075

由 Jarque-Bera 检验可知<sup>[18]</sup>, 偏导射流液压放大器中位压力的大量试验结果分布符合正态分布。中位压力试验平均值为3.44 MPa。与表2中的3 259 943 网格仿真结果比较, 低雷诺数  $k-\epsilon$  模型仿真结果为3.28 MPa, 与试验结果相比偏差为4.6%。而标准  $k-\epsilon$  模型在标准壁面函数下中位压力仿真结果为2.03 MPa, 增强壁面函数仿真结果为1.97 MPa, 误差

约为40%。

压差特性试验采用精度为0.002 mm的千分表抵住衔铁一侧，分别对衔铁两侧施加不同的位移，记录导流槽处每变化0.01 mm时的前置级压差特性，导流槽位移与衔铁位移的对应关系由衔铁组件的尺寸关系计算得出。压差特性试验与仿真结果对比如图11所示，仿真值与试验值在中位附近偏差较低，在位移最大的±0.04 mm位置偏差较高。±0.04 mm处两腔压差低雷诺数 $k-\epsilon$ 模型仿真值为5.4 MPa，试验平均值为5.1 MPa，误差为5.9%。标准 $k-\epsilon$ 模型±0.04 mm位移处压差仿真值为2.9 MPa，误差为46%。由仿真和试验结果对比可见，对于偏导射流前置级内部流场问题，采用低雷诺数模型进行计算流体力学仿真分析与标准 $k-\epsilon$ 模型相比能够得到更高的计算精度。

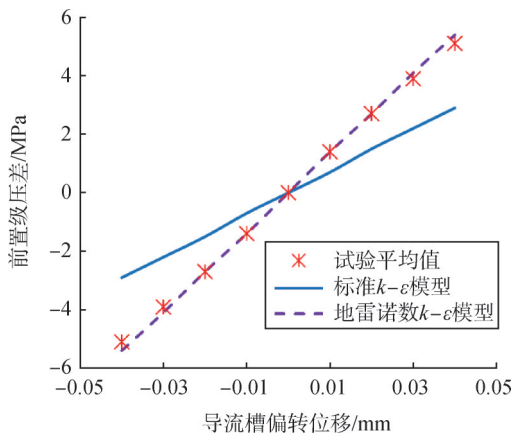


图11 偏导射流液压放大器仿真与试验结果对比

Fig.11 Comparison of simulation and test results of the jet-deflector hydraulic amplifier

### 3 结论

通过偏导射流液压放大器的压力特性仿真与试验分析，得到了以下结论：

a) 应用雷诺平均模型对偏导射流液压放大器进行计算流体力学仿真分析时，近壁面问题是重要的影响因素。通过仿真分析，偏导射流流场在V型槽、劈尖以及间隙等位置的紊流雷诺数较低，而以上结构对偏导射流液压放大器输出特性影响显著，采用标准 $k-\epsilon$ 模型会产生较大误差，低雷诺数模型具有更好的适应性。

b) 射流盘内部射流口、尖劈等结构的几何尺寸和形位公差在加工和装配中容易产生较高的不一致性。通过试验分析数据统计，偏导射流液压放大器压

力特性符合正态分布，大量数据的试验均值可以作为仿真的对比参照。

c) 通过仿真和试验对比，低雷诺数 $k-\epsilon$ 模型在偏导射流液压放大器压力特性仿真中与试验数据均值更为接近，中位压力仿真误差为4.6%，压差特性仿真误差最大为5.9%，远低于标准 $k-\epsilon$ 模型的仿真误差，证明了低雷诺数模型对偏导射流液压放大器的性能特性具有更好的预估效果。

### 参 考 文 献

[1] 阎耀保, 张鹏, 岑斌. 偏转板射流伺服阀前置级流场分析[J]. 中国工程机械学报, 2015(1): 1-7.  
YIN Yaobao, ZHANG Peng, CEN Bin. Pre-stage flow field analysis on deflector jet servo valves[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2015(1): 1-7.

[2] 王传礼, 丁凡, 李其朋, 等. 射流盘伺服阀控电液位置系统的动态特性[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2003, 26(11): 11-15.  
WANG Chuanli, DING Fan, LI Qipeng, et al. Dynamic characteristics of electro-hydraulic position system controlled by jet-pan servovalve[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2003, 26(11): 11-15.

[3] SANGIAH D K, PLUMMET A R, BOWEN C R, et al. A novel piezohydraulic aerospace servovalve. Part 1: design and modelling [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I Journal of Systems & Control Engineering, 2013, 227(14): 371-389.

[4] SAHA B K, LI Songjing, LYU Xinbei. Analysis of pressure characteristics under laminar and turbulent flow states inside the pilot stage of a deflection flapper servo-valve: mathematical modeling with CFD study and experimental validation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020(3): 1107-1118.

[5] REN Yukai, YAN Hao, MAO Qiyuan, et al. A model-based investigation of the performance robustness of the deflector jet servo valve[J/OL]. Applied Sciences, 2022, 12(20): 10428.

[6] 程文豪, 葛声宏, 杨瀚浩, 等. 考虑二次射流速度分布的偏转板电液伺服阀前置级压力特性研究[J]. 机械科学与技术, 2025, 44(4): 724-729.  
CHENG Wenhao, GE Shenghong, YANG Hanhao, et al. Study on the pressure characteristics of the front stage of a deflector plate electro-hydraulic servo valve considering the secondary jet velocity distribution[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2025, 44(4): 724-729.

[7] 李竞, 延皓, 任玉凯, 等. 偏导射流伺服阀前置级流场特性研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(5): 1012-1021.  
LI Jing, YAN Hao, REN Yukai, et al. Research on flow field in pre-

- stage of jet deflector servo valve[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(5): 1012-1021.
- [8] 任玉凯, 延皓, 白龙, 等. 不同湍流模型下偏导射流伺服阀前置级流场特性仿真[J]. *北京交通大学学报*, 2018, 42(3): 127-133+140.  
REN Yukai, YAN Hao, BAI Long, et al. Simulation on flow field characteristics of deflector jet servo valve pre-stage under different turbulence models[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2018, 42(3): 127-133+140.
- [9] 任玉凯, 延皓, 王书铭, 等. 偏导射流阀前置级流场特征参数的仿真计算[J]. *液压与气动*, 2018(12): 43-47.  
REN Yukai, YAN Hao, WANG Shuming, et al. Simulation calculation of characteristic parameters for deflector jet valve's flow field[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2018(12): 43-47.
- [10] 邢晓文, 吴凇, 陈奎生, 等. 偏转板伺服阀射流放大器结构参数优化研究[J]. *液压与气动*, 2018(3): 16-21.  
XING Xiaowen, WU Lin, CHEN Kuisheng, et al. Research on structural parameters optimization of servo-valve jet amplifier with deflection plate[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2018(3): 16-21.
- [11] PAN Ying, CAI Cunkun, ZHANG Hengxuan, et al. Simulation analysis of the performance of the front stage and the deflector jet servo valve[C]. Nanjing: 2023 3rd International Conference on Electrical Engineering and Mechatronics Technology (ICEEMT), 2023.
- [12] SAHA B K, LI L J, LI S J. CFD investigations of flow field and cavitation phenomena in the pilot stage of deflector jet servo-valve [C]. Wuhan: 3rd International Conference on Advances in Materials, Machinery, Electronics, 2019.
- [13] 毛麒麟, 延皓, 左哲清, 等. 偏导射流伺服阀工作压力形成机理研究[J]. *液压与气动*, 2020(10): 33-38.  
MAO Qiyuan, YAN Hao, ZUO Zheqing, et al. Mechanism analysis of working pressure formation of jet deflector servo valve[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2020(10): 33-38.
- [14] YAN Hao, REN Yukai, YAO Lei, et al. Analysis of the internal characteristics of a deflector jet servo valve[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 32(2): 180-192.
- [15] CHMIELEWSKI M, GIERAS M. Three-zonal wall function for  $k-\epsilon$  turbulence models[J]. *Computational Methods in Science and Technology*, 2013, 19(2): 107-114.
- [16] BISWAS D, FUKUYAMA Y. Calculation of transitional boundary layers with an improved low-reynolds-number version of the  $k-\epsilon$  turbulence model[J]. *Journal of Turbomachinery-transactions of the Asme*, 1994(116): 765-773.
- [17] ABID R. Evaluation of two-equation turbulence models for predicting transitional flows[J]. *International Journal of Engineering Science*, 1993, 31(6): 831-840.
- [18] 郭小萍, 俞巷天, 李元. 基于 Jarque-Bera 检验的非线性多分布过程故障检测[J]. *化工自动化及仪表*, 2022, 49(2): 165-174.  
GUO Xiaoping, YU Xiangtian, LI Yuan. Jarque-Bera test-based fault detection for nonlinear multi-distribution process[J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2022, 49(2): 165-174.

### 作者简介

张恒轩 (1986—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为液压元件设计与仿真技术。

潘英 (1992—), 女, 工程师, 主要研究方向为伺服阀设计与仿真技术。

陈俊光 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为伺服阀数字化设计与仿真技术。

姬腾 (1989—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为伺服阀试验技术。