



机械科学与技术

Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering

ISSN 1003-8728,CN 61-1114/TH

《机械科学与技术》网络首发论文

- 题目：偏导射流液压放大器流场气穴数值模拟与可视化验证研究
作者：徐铭骏，蒋承忠，黄健康，王朝玖，李林飞，朱玉川
DOI：10.13433/j.cnki.1003-8728.20250114
网络首发日期：2025-11-27
引用格式：徐铭骏，蒋承忠，黄健康，王朝玖，李林飞，朱玉川. 偏导射流液压放大器流场气穴数值模拟与可视化验证研究[J/OL]. 机械科学与技术.
<https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20250114>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

偏导射流液压放大器流场气穴数值模拟与可视化验证研究

徐铭骏¹, 蒋承忠², 黄健康², 王朝玖², 李林飞¹, 朱玉川^{1,*}

(1.南京航空航天大学 机电学院, 江苏南京 210016;

2.中国航发贵州红林航空动力控制科技有限公司, 贵州贵阳 550009)

摘要: 偏转板电液伺服阀中, 偏导射流液压放大器周期性的气穴会导致偏转板液动力脉动, 脉动频率与衔铁组件固有频率耦合, 极易引发伺服阀啸叫。目前对于偏导射流放大器气穴的研究大多停留在仿真层面, 缺乏真实流道 1: 1 的流场可视化验证研究。本文设计了偏导射流放大器实际尺寸和材料的可视化装置, 使用光学玻璃作为可视化观测窗口。并通过流场数值模拟与可视化实验对比研究, 得到不同入口压力下, 气穴出现的位置, 强度与频率, 定量分析不同位置下气穴强度与入口压力的关系, 并揭示气穴产生机理。研究结果表明: 气穴出现区域为接收腔两侧和 V 型槽区域, 且压力越高气穴强度越大, 前者气穴成因是高速射流和近壁面的边界层分离效应, 后者气穴成因是高速射流和接收腔两侧气穴迁移。数值模拟与可视化实验得到的气穴频率均处于 2500-4000Hz, 验证了数值模拟的准确性, 且与伺服阀啸叫频率符合。

关键词: 偏导射流液压放大器; 气穴; 可视化; 数值模拟

中图分类号: TH137.53+1

Numerical simulation and visual verification of cavitation in the flow field of deflector jet hydraulic amplifier

XU Mingjun¹, JIANG Chengzhong², HUANG Jiankang², WANG Zhaojiu²,
LI Linfei¹, ZHU Yuchuan^{1,*}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. AECC Guizhou Honglin Aero Engine Control Technology Corporation Ltd, Guiyang 550009, China)

Abstract: In deflector jet servo valve, the periodic cavitation of the deflection jet hydraulic amplifier will cause the hydraulic dynamic pulsation of the deflection plate, and the pulsation frequency is coupled with the natural frequency of the armature assembly, which is easy to cause the servo valve to whistle. At present, most of the research on the cavitation of the deflector jet amplifier is at the simulation level, and there is a lack of 1:1 flow field visualization research and verification of the real flow channel. In this paper, a visualization device of the actual size and material of the deflector jet amplifier is designed, using optical glass as the visual observation window. Through the numerical simulation of the flow field and the comparative study of visual experiments, the position, intensity and frequency of cavitation under different inlet pressures are obtained. The relationship between cavitation intensity and inlet pressure at different positions was quantitatively analyzed, and the mechanism of cavitation was revealed. The results show that the cavitation appear on both sides of the receiving cavity and the V-shaped groove area, and the higher the pressure, the greater the strength of the cavitation. The cavitation frequency obtained by the numerical simulation and visualization experiment is at 2500-4000Hz, which verifies the accuracy of the numerical simulation and is consistent with the whistling frequency of the servo valve.

Keywords: Deflector jet hydraulic amplifier; Cavitation; Visualization; Numerical simulation

1 引言

电液伺服阀是电液伺服控制系统的核心控制部件^[1], 电液伺服阀将输入的小功率电信号放大转化为大功率的液压信号, 实现液压执行器的位置和

速度控制^[2]。因为电液伺服阀的控制精度高、响应快、体积小、质量轻、运动平稳可靠、能适应模拟量和数字量调制等优点^[3], 所以在航空航天与军工领域中得到了广泛的应用。

伺服阀啸叫作为典型的疑难性的伺服阀故障, 常常出现在飞机刹车系统、航空发动机控制系统、导弹飞控系统等工作过程中^[4-5]。电液伺服阀的高频

基金项目: 国家自然科学基金 (52375059)

作者简介: 徐铭骏 (2000-), 硕士研究生, xumingjun@nuaa.edu.cn

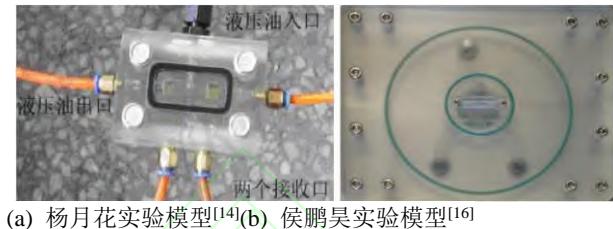
*通信作者: 朱玉川, 教授, 博士, meeyczhu@nuaa.edu.cn

啸叫现象，严重影响电液伺服阀性能，尤其是当伺服阀出现啸叫现象时，力矩马达衔铁组件处于高频自激振荡状态，谐振频率高达数千赫兹，并伴随尖利的叫声，严重影响伺服阀的工作可靠性，同时力矩马达衔铁组件具有较大振动幅值，极易造成弹簧管开裂，导致伺服阀破坏^[6-8]。

目前国内外学者针对伺服阀啸叫现象，对伺服阀前置级流场展开了数值模拟研究，普遍认为前置级流场中的气穴现象是伺服阀啸叫的成因。2016年，哈尔滨工业大学的张圣卓利用LES方法对喷嘴挡板前置级流场中的瞬态气穴现象进行仿真研究。分析不同前置级入口压力与结构参数下的气穴分布与演变规律，并认为前置级流场压力脉动与瞬态气穴有直接关联^[9]。2018年，哈尔滨工业大学的Lv Xinbei对偏转板伺服阀前置级组件的几何参数对压力分布与空化现象的影响进行了仿真研究，并提出抑制空化强度的措施^[10]。2019年，武汉科技大学的WU Ling仿真了不同入口压力与结构参数下的射流管前置级流场中的瞬态空化现象。认为前置级流场的气穴现象，会使射流管伺服阀前置级流场失稳，当入口压力的增加时，气穴现象加剧，且气穴脱落现象更加明显；而当出口压力增大时，气穴现象得到有效抑制。此外，增加劈尖长度有助于显著减轻气穴现象的发生^[11]。2021年，哈尔滨工业大学的Abdallah M K H分析了偏导射流伺服阀前置级流场中的气穴分布和压力脉动特性。表明气穴强度和压力振荡均随着进口压力的增大而增强，提高出口压力可以有效减小压力振荡和气穴现象^[12]。2024年，航空工业西安飞行自动控制研究所的冯怡然等人对偏转板伺服阀前置级流场进行仿真，结果分析表明，伺服阀振动故障主要由前置级流场内出现的“气穴效应”导致。气穴不断生成与溃灭，使得伺服阀前置级出现周期性振荡^[13]。因此针对伺服阀啸叫现象，需对伺服阀液压放大器流场中的气穴现象进行充分的数值模拟分析，但由于流场数值模拟中求解器和设置方法的多样性，需进行流场可视化实验的方法以验证流场仿真准确性。

对于伺服阀前置级流场气穴数值模拟的可视化验证研究，国内外学者设计了流场可视化实验以观察流场中的气穴现象。2006年，哈尔滨工业大学的杨月花针对射流内液体流动的特点，设计可视化实验，使用有机玻璃加工放大的偏导射流液压放大器流道，观察到偏转板射流伺服阀油液的流动情况及其气穴的位置。认为随着入口压力的增加，流场内的速度变快，气穴产生的区域和数量随之变大^[14]。2016年，哈尔滨工业大学的张圣卓搭建喷嘴挡板前置级流场观测试验台，得出了圆角挡板和直角挡板在不同流动条件下的瞬态气穴变化规律，验证了瞬态气穴数值分析结果的正确性^[9]。2019年，哈尔滨工业大学的陈猛在气穴观测实验中，分别观测了不同的油液黏度、喷嘴入口不同的压力脉动频率和不同压力脉动峰-谷幅值三种外界扰动作用下喷

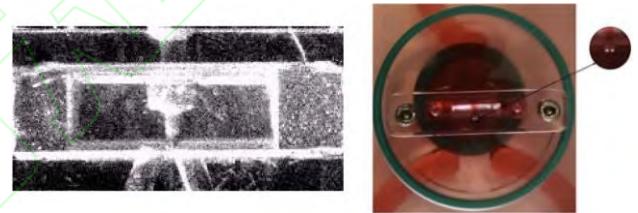
嘴挡板组件的气穴演化过程^[15]。2022年，北京交通大学的侯鹏昊，基于相似理论，对模型等比例放大，并使用有机玻璃加工流道。观测得到偏导射流组件中位状态下气穴的主要发生位置在接受腔入口上方，验证了气穴仿真的结论^[16]。综上，关于喷嘴挡板电液伺服阀前置级组件的气穴可视化研究已有较多。然而对于偏转板射流伺服阀中偏导射流放大器组件的流场可视化研究，均采用相似原理对流道进行放大，并使用有机玻璃加工流道^{[14][16]}，如图1所示，结构尺寸与结构材料均较真实工况有较大偏差。



(a) 杨月花实验模型^[14] (b) 侯鹏昊实验模型^[16]

Fig.1 Existing plexiglass processing magnifying structure test piece

且现有通过有机玻璃加工放大流道的偏导射流放大器流场可视化的研究，仅反映了气穴出现的大概位置^{[14][16]}，如图2所示。并未揭示气穴位置、强弱与入口压力之间的关系，也未开展气穴振荡频率的研究。



(a) 杨月花实验结果^[14] (b) 侯鹏昊实验结果^[16]

Fig.2 Locations of cavitation generation for existing visualization studies

因此针对目前偏导射流液压放大器流场可视化实验研究流场失真的局限性，本文设计了原始结构尺寸与结构材料的偏导射流液压放大器流场可视化试验件，并通过对试验件流场进行数值模拟与可视化实验研究，充分揭示气穴生成位置、强度与入口压力的关系，并明确其振荡频率。

2 偏转板电液伺服阀组成及工作原理

偏转板电液伺服阀由三部分组成：力矩马达组件、偏导射流液压放大器组件和滑阀组件，如图3所示。力矩马达组件由磁钢、上下轭铁、衔铁、控制线圈、弹簧管和反馈杆组成。偏导射流液压放大器组件由射流片、上下压块和反馈杆上的偏转板组成，如图4所示。滑阀组件由阀芯和阀套组成。

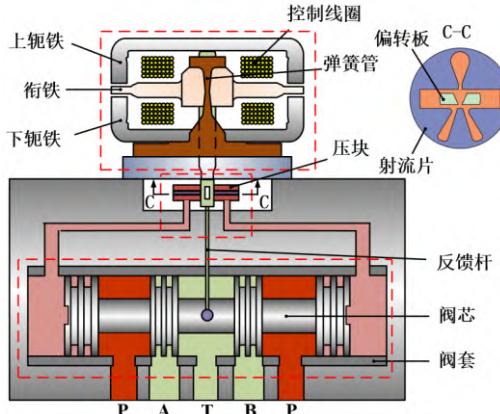


图 3. 偏转板射流伺服阀工作原理

Fig.3 Working principle of deflected jet servo valve

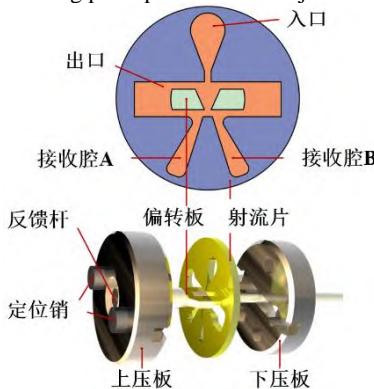


图 4. 偏导射流液压放大器结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of the structure of a deflected jet hydraulic amplifier

偏导射流液压放大器中射流片的入口和出口分别接收高压油液和低压油液，在压力差的作用下，油液从射流片入口处流入，通过偏转板上的V型槽后，均等的射入左右接收腔内，左右接收腔连通阀芯的左右两端，由于高速射流流入左右接收腔的能量相等，作用到阀芯两端的油液恢复压力相等，阀芯处于静止状态。当控制线圈内有激励电流时，力矩马达将会产生电磁力矩，使得衔铁组件偏转，带动偏转板产生一定偏移量，导致左、右接收腔产生的压力不同，左、右接收腔压力分别作用于滑阀阀芯两端，压差驱动阀芯运动^[17]。

3 偏导射流液压放大器流场可视化试验件设计

针对偏导射流液压放大器流道微小且结构复杂的特点，通过几何简化与流道等效设计方法，在保留关键流道特征的前提下，使用原始射流片，构建与原结构流场特征一致的可视化试验件，确保试验件流道压力分布、流速特性与真实工况相符，也保留了真实的结构材料。因为偏导射流液压放大器中射流片是压在上下压块之间的，由于可视化观察的需求，试验件使用高强度玻璃作为观察窗口代替上压块，同时实现流道密封。可视化试验件原理如图5所示，由6部分组成，分别是一级座、压块、偏转板、射流片、圆柱玻璃以及压板。

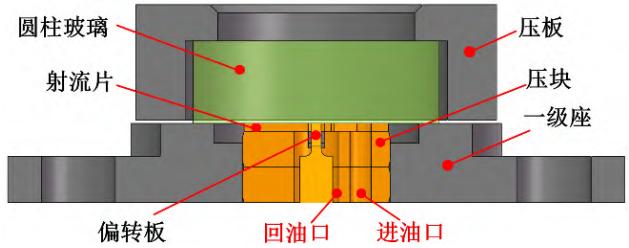


图 5. 流场可视化试验件结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of the structure of the flow field visualization test piece

其中偏转板与射流片配合，形成流场型腔。一级座配合与之过盈装配的压块将射流片安装固定。使用压板压紧圆柱玻璃，形成可视化观测窗口，可以观测流场的运动状态以及气穴等现象。同时偏转板下端与压块内孔形成间隙，作为回油通道。

本文提出的方法可以实现对于偏导射流液压放大器原始流道尺寸的观测，解决了传统研究方法普遍依赖几何放大模型以克服微小尺度的局限性，可以消除传统放大模型引起的流场失真问题，直接捕捉原尺度下的液体流动状态。同时试验件中的偏转板、射流片和压块等偏导射流液压放大器关键结构也是伺服阀实际结构或实际结构改制，较现有依靠有机玻璃加工偏导射流液压放大器放大流道的研究方法，也确保了结构材料的一致性。

4 试验件流场 CFD 数值模拟

4.1 流场有限元建模

根据前文设计的偏导射流液压放大器流场可视化试验件，使用三维建模软件 SolidWorks 对液压放大器组件进行流域提取。为保证流场计算精度的同时减少计算量，对流道几何模型进行简化处理，计算流域三维模型如图6所示。网格划分会影响模型的求解速度与精度，且对于模型中应力集中处和几何特征细节处需要进行网格细化。因此使用 ICEM 软件对流道模型进行六面体网格划分，根据油液在偏导射流液压放大器内部的流动特性，对喷嘴口、V型槽和两接收腔体处进行网格加密处理。

使用 Fluent 有限元分析软件对流道进行数值模拟分析，求解器选取 LES (Large Eddy Simulation, 大涡模拟)，以便捕捉流场中复杂非定常的湍流细节的瞬态变化。并选用 Mixture 多相流模型，用于各介质间存在相互渗透现象的模拟，如油液中溶解有气体。

4.2 流场数值模拟结果

因为试验件使用光学玻璃作为密封与观察窗口，在进行测试时，入口压力不宜超过 10MPa。由于伺服阀啸叫多发生于偏转板位于中位的状况，因此展开偏转板处于中位情况下，入口压力为 2MPa 至 10MPa 的偏导射流液压放大器瞬态气穴仿真，选取距离光学玻璃 0.3mm 的偏导射流液压放大器截面进行监测，提取监测面的气体体积分数云图，截面位置如图7所示。



图 6. 可视化试验件流场三维模型
Fig.6 Three dimensional model of the flow field for the visualization test piece

图 7. 流场监测截面示意图
Fig.7 Schematic diagram of flow field monitoring cross-section

当入口压力 2MPa 时, 流场仿真中未出现气穴现象。入口压力增至 3MPa 时, 如图 8 所示, 偏转板射流出口下侧出现气穴, 从选取的时间段气体体积分数云图看出, 两侧的气穴分别成周期性交替产生、发展和溃灭, 频率约为 2778Hz。

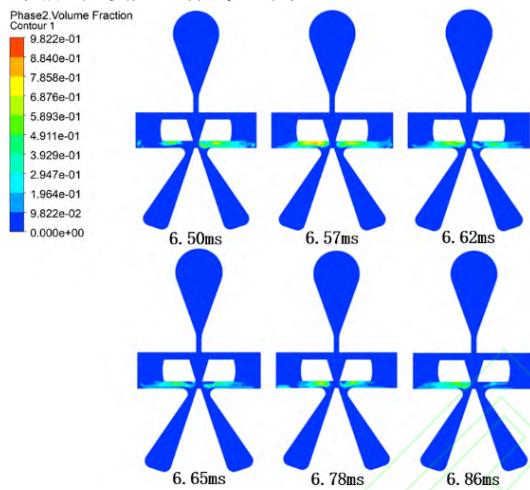


图 8. 入口压力 3MPa 检测面气体体积分数云图
Fig.8 Cloud chart of gas volume fraction on the detection surface with an inlet pressure of 3MPa

随着入口压力的逐渐增大, 偏转板下侧气穴逐渐剧烈, 且在偏转板 V 型槽处出现周期性的气穴现象。入口压力 5MPa 时, 如图 9 所示, 偏转板 V 型槽两侧也开始出现周期性气穴, V 型槽右侧区域(下文称区域 1)首先出现气穴, 随后 V 型槽左侧区域(下文称区域 2)气穴先出现后溃灭, 之后区域 1 气穴溃灭, 最终两个区域气穴同时消失, 频率约为 3333Hz。

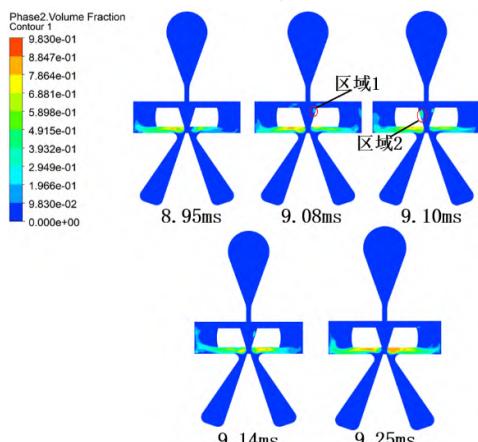


图 9. 入口压力 5MPa 检测面气体体积分数云图
Fig.9 Cloud chart of gas volume fraction on the detection surface with an inlet pressure of 5MPa

当入口压力逐渐增高, 分别选取 7-10MPa 某一时刻的气穴云图, 如图 10 所示, 可以看出, 接收腔两侧及区域 1、2 的气穴气体体积分数随着入口压力的增加而增大, 即气穴强度随着入口压力增大而增强。且当压力逐渐升高后, 偏转板 V 型槽区域的气穴将始终存在, 进行周期性的发展、减弱。

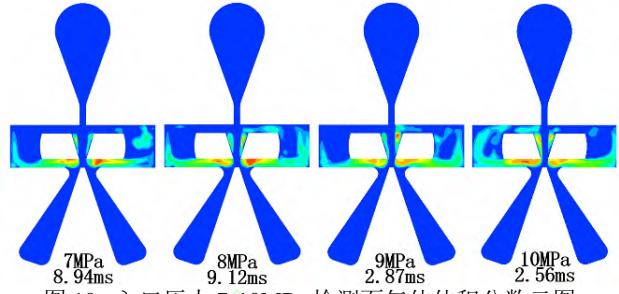
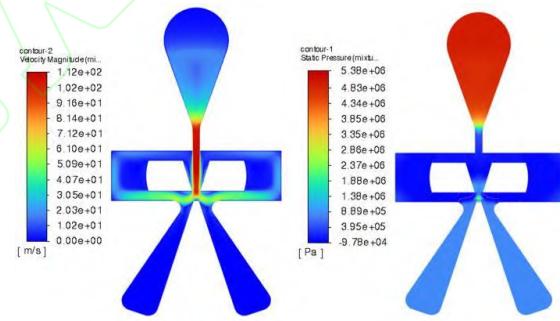


图 10. 入口压力 7-10MPa 检测面气体体积分数云图
Fig.10 Cloud chart of gas volume fraction on the detection surface with an inlet pressure of 7-10MPa

4.3 气穴生成原因分析

以入口压力 5MPa 为例, 提取偏导射流液压放大器流场截面的速度云图和压力云图, 如图 11 所示。当偏转板处于中位时, 液压放大器流场的速度呈对称分布, 当油液经过一次射流口射出时, 形成高速射流区, 最高流速达 112m/s, 由伯努利方程可知, 高速流动的液体周围会形成低压区。高速油液从二次射流口射出后, 同时由于近壁面的边界层分离效应, 也会在接收腔两侧形成低压区, 生成气穴。



(a) 截面速度云图 (b) 截面压力云图
图 11. 入口压力 5MPa 截面仿真云图
Fig.11 Cross section simulation cloud chart with inlet pressure of 5MPa

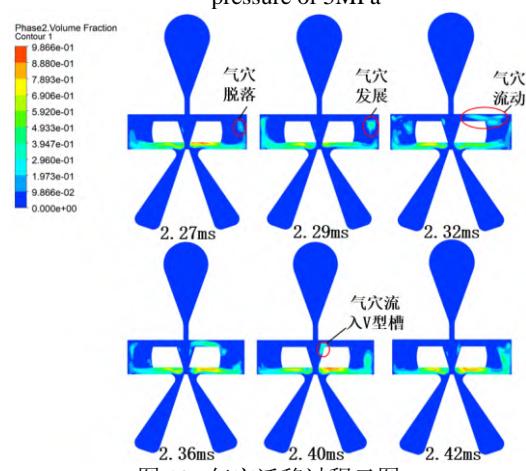


图 12. 气穴迁移过程云图
Fig.12 Cloud chart of cavitation migration process

对于偏转板 V 型槽区域的气穴，本文认为有两种成因，一是靠近槽面的流速较低，中间高速射流区流速较大，因此会形成低压区，生成气穴。二是接收腔两侧形成的大范围气穴，由于油液的流动，会有一部分气穴脱落，迁移至偏转板 V 型槽区域，以入口压力 6MPa 为例，如图 12 所示，这种情况仅在入口压力较高时会出现，因为低压情况下产生的接收腔两侧气穴强度较低，脱落气穴很快溃散消失，不会进一步迁移。且入口压力越高，V 型槽区域和接收腔两侧的流速差越大，气穴也就更为剧烈。

5 偏转板伺服阀前置级流场可视化实验研究

5.1 实验原理

偏导射流液压放大器流场可视化实验系统主要由伺服阀试验台、流场可视化试验件、高亮光源、显微镜/高速摄像机和显示器/计算机组成，如图 13 所示。伺服阀试验台集成了油箱、液压泵、电机、压力表等部件，可以为试验件提供油源，并监测偏转射流液压放大器的入口、出口以及 A、B 两腔的压力。显微镜或高速摄像机作为观察与记录工具，观测偏导射流液压放大器流场的气穴状态。

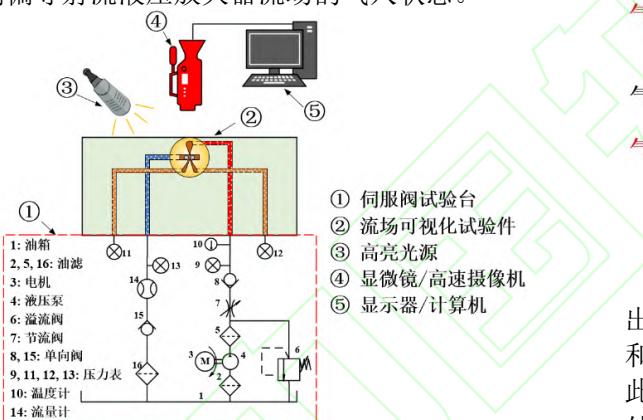


图 13. 偏导射流液压放大器流场可视化实验图
Fig.13 Schematic diagram of flow field visualization experiment of deflector jet hydraulic amplifier

5.2 电子显微镜下的可视化实验

由于偏导射流液压放大器结构较小，外加高速流动的射流，使用肉眼或普通的观察设备很难捕捉流场的细节，本实验使用深圳市奥斯微光学仪器有限公司的 AO-HD228SD 视频显微镜对流场进行观察，实验系统如图 14 所示。



图 14. 基于显微镜的流场可视化实验实物图
Fig.14 Physical image of flow field visualization experiment based on microscope

使用伺服阀试验台，调节试验件入口压力，从 2MPa 至 10MPa，用显微镜的画面记录功能，记录偏导射流液压放大器内部流场的气穴现象。多次实验结果均相同，实验具备可重复性，如图 15 所示，入口压力 3MPa 时，偏导射流液压放大器接收腔两侧出现较弱气穴现象；入口压力 5MPa 时，接收腔两侧气穴逐渐加剧，且偏转板 V 型槽区域开始出现气穴现象。当压力逐渐增加至 10MPa，接收腔两侧和偏转板 V 型槽区域的气穴均随着入口压力的增大而逐渐加剧。显微镜观察得到的不同入口压力下，偏导射流液压放大器气穴的出现区域、气穴强度与仿真结果相契合。

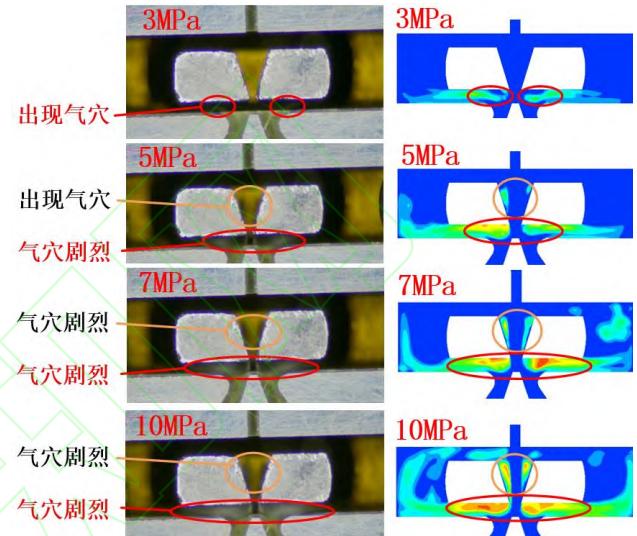


图 15. 2-10MPa 显微镜拍摄与数值模拟气穴对比
Fig.15 Comparison of 2-10MPa microscope imaging and numerical simulation of cavitation

从仿真与实验角度，可以从气穴形态上看到其出现位置、强度与入口压力的关系，但从仿真云图和实验照片的角度，无法定量分析两者的关系，因此在有限元仿真时，针对液压放大器气穴出现的两处主要区域，即接收腔两侧区域和 V 型槽区域，建立如图 16 所示监测面，监测其气体体积分数，定量分析两区域气穴强度随入口压力的关系。

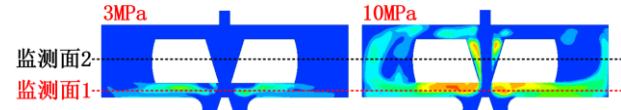


图 16. 基于气穴出现位置的气体体积分数监测面
Fig.16 Gas volume fraction monitoring surface based on the location of cavitation

监测 2-10MPa 入口压力下，两区域监测面的平均气体体积分数均值，结果见表 1。可以看到随着入口压力升高，两区域的气体体积分数均值逐渐增高，即气穴加剧。对于接收腔两侧气穴，从前文的仿真结果，认为 3MPa 时 V 型槽区域出现气穴现象，随着入口压力增大，气穴加剧，入口压力 10MPa 较 3MPa 气体体积分数均值增大了 293.95%；对于 V 型槽区域气穴，入口压力 10MPa 较 2MPa 气体体积分数均值增大了 73775%，主要是因为 2MPa 时，V 型槽区域未出现气穴，从前文的仿真结果，认为 5MPa 时 V 型槽区域出现气穴现象，随着入口压力

增大, 气穴加剧, 入口压力 10MPa 较 5MPa 气体体积分数均值增大了 446.21%。

表 1 不同入口压力下两区域气体体积分数均值

Tab.1 Mean gas volume fraction in two regions under different inlet pressures

入口压 力/MPa	接收腔两侧区域气 体体积分数均值/%	V型槽区域气体体 积分数均值/%
2	0.01705	0.00012
3	0.06396	0.00127
4	0.11051	0.00597
5	0.15208	0.01623
6	0.17817	0.02817
7	0.19916	0.04368
8	0.21790	0.06143
9	0.24596	0.07365
10	0.25197	0.08865

使用显微镜能观察到偏导射流液压放大器流场气穴的位置、剧烈程度及其随压力增大的发展情况, 在实验过程中接收腔两侧和偏转板 V 型槽两侧的气穴在高频闪动, 但是由于显微镜拍摄帧率有限, 无法对气穴的形态进行动态捕捉, 难以判断其振荡频率。

5.3 高速摄像机下的可视化实验

高速摄像机通过超高帧率记录瞬态过程, 捕捉人眼不可见的快速运动细节, 支持慢动作回放分析, 具备高分辨率、快速存储和精准触发功能。可以对伺服阀流场进行动态捕捉, 记录伺服阀流场中气穴的生成、发展与溃灭过程, 本实验使用中科视界的 S1315 型高速摄像机。支撑云台用于固定相机, 并根据实验环境调整观测位置。高亮光源用于照亮流场, 同时使用计算机对高速摄像机拍摄的画面进行储存处理, 实验系统如图 17 所示。

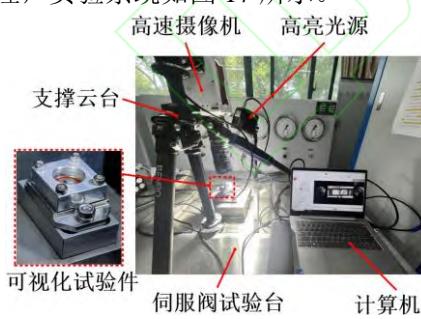


图 17. 基于高速摄像机的流场可视化实验实物图
Fig.17 Physical image of flow field visualization experiment based on high-speed camera

使用高速摄像机拍摄入口压力从 2MPa 升至 10MPa 的偏导射流液压放大器流场形态, 气穴发生的位置、形态以及剧烈程度与显微镜拍摄的一致。由于接收腔处气穴状态一直剧烈, 存在大量气泡, 难以观察到气穴周期, 因此重点分析 V 型槽区域的气穴现象。

高速摄像机选取的拍摄帧率为 26000fps, 在偏转板 V 型槽区域, 由于实验环境补光不便, 外加

5MPa 时该区域气穴强度较低, 拍摄的气穴现象较暗, 因此下文对气穴出现位置采用图像处理的办法, 提高图像的亮度与对比度, 以便可以看到清晰的气穴。如图 18 所示。定义流场仿真和实验拍摄到的偏转板 V 型槽区域无气穴现象的状态为时间 t, 可以看出两者气穴呈相同发展规律, V 型槽右侧先出现气穴, 随后左侧出现并溃灭, 最后两侧区域气穴同时消失。流场仿真的气穴振荡频率为 3333Hz, 实验得到气穴振荡频率为 2924Hz。由于流场仿真中的流道模型是理想模型, 无法反映实际试验件中的加工误差和毛刺等现象, 因此与实验结果在整体振荡频率和特征节点时刻上会有一定的误差。

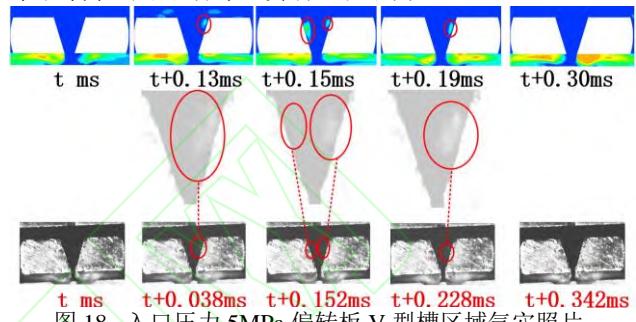


图 18. 入口压力 5MPa 偏转板 V 型槽区域气穴照片
Fig.18 Photo of cavitation in the V-shaped groove area of the deflection plate with an inlet pressure of 5MPa

当入口压力增至 10MPa 时, 选取相同的拍摄帧率, 如图 19 所示, 同样的接收腔两侧始终存在较强且混乱的气穴现象, 重点关注偏转板 V 型槽区域气穴, 使用相同的图像处理方法, 提高气穴存在区域的亮度与对比度。可以看出气穴始终存在, 且气穴强度一直周期性的增强, 减弱。定义气穴强度最大的状态为时间 t, 两者气穴都呈现先减小后增大的规律。流场仿真的气穴振荡频率为 3226Hz, 实验得到气穴振荡频率为 2632Hz。

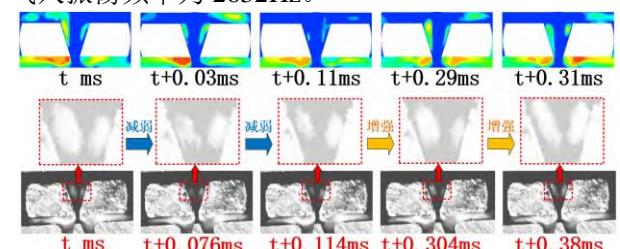


图 19. 入口压力 10MPa 偏转板 V 型槽区域气穴照片
Fig.19 Photo of cavitation in the V-shaped groove area of the deflection plate with an inlet pressure of 10MPa

但是在偏转板伺服阀前置级流场可视化实验研究中, 并未发现流场数值模拟中, 接收腔两侧形成的大范围气穴迁移至偏转板 V 型槽区域的现象, 这可能是迁移的气穴强度较弱, 外加高亮光源未对迁移区域补光的原因。

6 结论

现有的偏导射流液压放大器气穴可视化研究存在结构尺寸和材料失真的问题, 同时也缺乏对于气穴位置, 强弱和振荡频率的深入研究。针对这些问题, 本文设计了基于实际结构尺寸与材料的偏导射流液压放大器流场可视化试验件, 并对试验件的流

场进行数值模拟研究，仿真了偏转板处于中位时，不同入口压力下的流场气穴状态，揭示了流场气穴出现位置、强度与入口压力的关系，并对不同出现区域的气穴强度与入口压力的关系展开定量分析；分别基于电子显微镜与高速摄像机对试验件流场进行拍摄，得到实际的偏导射流液压放大器流场气穴状态与振荡频率，验证了流场数值模拟的准确性，得到结论具体如下：

(1) 首次提出了偏导射流液压放大器真实结构1:1的流场可视化试验件设计方法，同时保留了放大器原有结构材料，克服了现有研究需要使用有机玻璃加工放大流道导致的流场失真问题。

(2) 流场数值模拟和可视化实验结果同时表明，当入口压力3MPa时，偏导射流液压放大器接收腔两侧区域开始出现气穴现象，入口压力5MPa时V型槽区域出现气穴现象。且入口压力越高两区域气穴强度越大，当入口压力升至10MPa时，相较于出现气穴的入口压力，接收腔两侧和V型槽区域的气体体积分数均值分别增大293.95%和446.21%。

(3) 通过对偏导射流液压放大器流场的流速和压力进行数值模拟分析，认为接收腔两侧气穴是由于高速射流和近壁面的边界层分离效应产生的。V型槽区域的气穴是由于高速射流以及接收腔两侧气穴迁移产生的。

(4) 通过本文的研究，较现有研究使用有机玻璃加工放大流场的局限性，首次通过1:1结构尺寸与材料的实验，证实了入口压力2-10MPa时偏导射流液压放大器气穴的周期振荡频率为2500-4000Hz，并与流场数值模拟结果相互验证。偏转板电液伺服阀中，衔铁组件会受到外界信号脉动的作用，脉动频率与衔铁组件固有频率耦合，极易引发伺服阀啸叫，且伺服阀啸叫频率为3000Hz附近^[18]。可以确认周期性的气穴是引发伺服阀啸叫的主要因素。

基于以上结论，可以从抑制流场气穴或使气穴振荡频率与衔铁组件固有频率避开的角度，为解决伺服阀谐振问题提供方向。同时基于本文设计的可视化实验装置，可以对液压放大器流场数值模拟的设置方法进行矫正，以获得符合真实情况的数值模拟方法，以便针对伺服阀谐振问题，准确对液压放大器流场进行结构优化研究。并且通过本文提供的可视化试验方法，可以从实验的角度验证优化效果，以提升伺服阀工作稳定性。

[参考文献]

- [1] 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 Y S,ZHU Y C. Modeling and Simulink simulation of electro-hydraulic servo valve[M].Beijing:China Machine Press,2020 (in Chinese)
- [2] 谢张辰,葛声宏,朱海军,等.考虑气隙具体形貌的力矩马达建模与仿真研究[J/OL].机械科学与技术,2025
XIE Z C,GE S H,ZHU H J, et al. Research on mathematical modeling and simulation of torque motor considering the specific geometry of air gap[J/OL].

Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering,2025 (in Chinese)

- [3] 陈元章.电液伺服阀初始设计理念与应用[J].机床与液压,2019,47(9): 114-118
CHEN Y Z. The initial design concept and applications for the electrohydraulic servovalve[J].Machine Tool & Hydraulics,2019,47(9):114-118 (in Chinese)
- [4] 江金林,张鑫彬,王晓露,等.电液伺服阀啸叫机理分析及抑制措施探讨[J].液压气动与密封,2022,42(4): 14-18
JIN J L,ZHANG X B,WANG X L,et al. Analysis on the principle and solution of servo valve whistling[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals,2022,42(4):14-18 (in Chinese)
- [5] 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 Z,JIN Y L,CHEN D D, et al. Study on howling problem of PIV jet-pipe servo-valve[J].Machine Tool & Hydraulics,2022,50(4): 72-75 (in Chinese)
- [6] 康健,袁朝辉,王江涛.压力伺服阀前置级间液动力振荡和强迫振动的数值研究 [J].振动与冲击,2021, 40(13): 120-128
KANG J, YUAN Z H, WANG J T. Numerical study on hydrodynamic oscillation and forced vibration in front stage of pressure servo valve[J]. Journal of Vibration and Shock,2021,40(13):120-128 (in Chinese)
- [7] 林文,葛声宏,江裕雷,等.偏转板射流伺服阀衔铁组件湿模态仿真与试验分析 [J]. 机械科学与技术,2025,44(3):552-559
LIN W,GE S H,JIANG Y L, et al. Simulation and experimental analysis of wet mode of jet servo valve armature assembly[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2025,44(3):552-559 (in Chinese)
- [8] Semrau S, Skoda R, Wustmann W, et al. Experimental and numerical investigation of noise generation due to acoustic resonance in a cavitating valve[J].Journal of Sound and Vibration, 2019,463: 114956.
- [9] 张圣卓.喷嘴挡板伺服阀前置级流场瞬态气穴及其流致现象研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016
ZHANG S Z. Study on transient cavitation and fluidization phenomenon of nozzle flapper servo valve pre-stage flow field[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2016 (in Chinese)
- [10] Lv X B, Vladimir L, Li S J. Performance and Flow Field Analysis of Flapper Deflection Servo Valve[C/OL]//2018 Global Fluid Power Society PhD Symposium (GFPS), Samara. 2018.
- [11] Wu L, Chen K S, Guo Y. Research on cavitation phenomena in pilot stage of jet pipe servo-valve with a rectangular nozzle based on large-eddy simulations[J/OL]. AIP Advances, 2019.
- [12] Abdallah M K H, Peng J H, Li S J. Analysis of pressure oscillation and structural parameters on the performance of deflector jet servo valve[J/OL]. Alexandria Engineering Journal, 2023: 675-692.
- [13] 冯怡然,吕登洲,李奕宁,等.某型电液伺服阀振动故障研究[J].机械管理开发,2024,39(03): 246-248
FENG Y R,LYU D Z,LI Y N, et al. Study on vibration fault of an electro-hydraulic servo valve[J]. Mechanical Management and Development, 2024, 39(03):246-248 (in Chinese)
- [14] 杨月花.伺服阀前置级射流流场分析及实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006

- YANG Y H. Analysis and experimental research of prestage jet flow field in hydraulic servo valve [D], Harbin: Harbin Institute of Technology,2006 (in Chinese)
- [15] 陈猛.油液黏度及压力脉动扰动下喷嘴挡板阀流致振动特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019
Chen M. Study on flow induced vibration characteristics of nozzle flapper valve under oil viscosity and pressure fluctuation disturbance[D], Harbin: Harbin Institute of Technology,2019 (in Chinese)
- [16] 侯鹏昊.偏导伺服阀偏导射流组件流场和噪声特性仿真与试验研究[D].北京:北京交通大学,2022
Hou P H. Simulation and experimental study on flow field and noise characteristics of deflecting jet assembly of deflecting jet servo valve[D], Beijing: Beijing Jiaotong University,2022 (in Chinese)
- [17] 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 W H,GE S H,YANG H H, et al. Study on pre-stage pressure characteristics of deflector electro-hydraulic servo valve considering velocity distribution of secondary jet[J].Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2025,44(4):724-729 (in Chinese)
- [18] 林文.偏转板伺服阀衔铁组件谐振机理分析及实验研究[D].南京:南京航空航天大学,2023
LIN W. Resonance mechanism analysis and experimental study on deflection jet servo valve armature component[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2023 (in Chinese)

