

偏导射流阀前置级液动力试验台设计与研究

李 竞,延 皓,董立静,李 磊

(北京交通大学 机械与电子控制工程学院,北京 100044)

摘 要:为找到干扰偏导射流伺服阀正常工作的因素,对偏导阀前置级射流喷嘴到偏导板 V 形槽之间的流场进行分析,利用动量定理,建立前置级 V 形槽斜面受冲击时的受力模型并确定前置级液动力随偏导板位移变化的关系式.针对偏导阀前置级液动力的测量难题,设计一套高精度的前置级液动力测试平台.基于该测试平台,采用特定的液动力测试方法,最终可达到对前置级液动力进行间接测量的目的.结果表明:前置级液动力的测试值与计算值一致,即 V 形槽斜面受冲击时的液动力随偏导板位移的增加而逐渐增大,证明了计算方法与测试实验台的可行性.为该类伺服阀的结构设计和参数优化提供参考.

关键词:偏导射流阀;液动力;前置级;试验台

中图分类号:TH137.5 **文献标志码:**A

Design and research of flow force test bed for pre-stage on deflector jet servo valve

LI Jing, YAN Hao, DONG Lijing, LI Lei

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to find out the factors that interfere with the normal operation of the deflector jet servo valve, the flow field between the jet nozzle of the pre-stage deflector jet servo valve and the V-groove of deflector plate is analyzed. Based on the momentum theorem, the mechanical model of pre-stage V-groove bevel under impact is established, and the relation between the pre-stage flow force and the displacement of the deflector plate is determined. To overcome the difficulty of the measurement of the pre-stage deflector jet servo valve flow force, a high-precision pre-stage flow force test bed is designed. Based on this test bed, a specific flow force test method is adopted. Finally, indirect measurement on the pre-stage deflector jet servo valve flow force can be achieved. The results show that the test values of the pre-stage flow force consist with the calculated values. The flow force of V-groove under incline impact increases with the increase of the displacement of deflector plate, which proves the feasibility of the calculation method and the test bed. This will provide references for the structure design and parameter optimization of this kind of servo valve.

Keywords: deflector jet servo valve; flow force; pre-stage; test bed

收稿日期:2017-12-15
基金项目:国际科技合作计划项目(2012DFG71490)
Foundation item: Key Program for International S & T Cooperation Projects of China(2012DFG71490)
第一作者:李竞(1984—),男,北京市人,博士生.研究方向为流体传动与控制. email: 11116324@bjtu.edu.cn.
引用格式:李竞,延皓,董立静,等.偏导射流阀前置级液动力试验台设计与研究[J].北京交通大学学报,2018,42(6): 119—124.
LI Jing, YAN Hao, DONG Lijing, et al. Design and research of flow force test bed for pre-stage on deflector jet servo valve[J].
Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(6): 119—124. (in Chinese)

航空航天系统中,飞行器舵面的控制多采用液压舵机.电液伺服阀是舵机中的控制放大元件,实现了信号转换和功率放大的功能.前置级液动力作为其中一项重要的影响因素,时时刻刻地改变着偏转板的位置,从而影响电液伺服阀的输出.

目前国内外很多学者对伺服阀液动力及偏导射流阀等方面进行了分析.付永领等^[1]对直接驱动伺服阀的瞬态液动力进行了研究.Sangiah 等^[2-3]利用多层压电双晶片取代传统的力矩马达作为前置级的驱动器,建立了偏转板射流伺服阀的整体数学模型,并结合有限元分析软件对双压电晶片和反馈杆进行分析,验证了欧拉-伯努利梁理论,此外还对采用多层压电双晶片的偏转板射流伺服阀的前置级流场特性进行了仿真,建立了偏转板射流伺服阀的高阶非线性数学模型,并通过实验验证了模型的准确性.吴金波等^[4]对斜进口流道滑阀的稳态液动力进行了仿真研究.Lorenzo 等^[5]利用 CFD 方法对伺服阀的阀芯处的油液特性进行分析,得出油液在节流口处的流动模式主要依赖于孔的几何形状,而不是 Reynolds 数,随后建立了阀芯的 AMESim 模型,并将仿真结果与 CFD 仿真结果进行了对比.阎耀保等^[6-7]对偏转板伺服阀的压力特性进行了研究,并通过建立偏转板射流伺服阀前置级流场模型,对入口压力、出口压力以及接受器管路夹角对伺服阀流场特性的影响进行了分析.马小良^[8]通过对偏转板射流伺服阀的前置级进行数学建模并推导出了前置级的阀系数.韩笑等^[9]对双喷嘴挡板伺服阀前置级流场内的气穴现象进行了仿真研究,并且搭建了试验台,通过试验验证了该类伺服阀前置级内部气穴形成的位置和变化.王凤聚等^[10]对偏导射流伺服阀的前置级流场进行了研究,分析了射流过程中的能量转化,并提出了射流放大器的二次射流模型,得到了偏转板射流伺服阀前置级紊动射流的速度分布和时均动能变化.延皓等^[11]提出了基于偏导射流伺服阀矩形喷口和接受器的前置级节流模型,并推导出了位于前置级内接收口前端的液动力简化计算公式.蒋大伟^[12]利用 Fluent 软件对偏导射流伺服阀的前置级进行了仿真,对前置级射流理论进行了分析,并讨论了不同喷嘴宽度、偏转板导流槽角度以及劈尖宽度随偏转板位移的变化量对接收孔恢复压力和压差的影响.刘增光等^[13]通过数值模拟的方法分析了不同阀口结构参数组合对偏导射流阀输出压力特性的影响规律,并得到了输出压力特性曲线与偏转板位移的线性关系.李磊等^[14-15]对喷嘴挡板伺服阀温漂电流波动进行了研究,推导出了喷嘴挡板伺服阀

阀芯与阀套间隙的楔形变化规律表达式以及滑阀楔形变形下的库仑摩擦力表达式,证明了伺服阀温漂电流的波动与温升引起的伺服阀内部非线性摩擦有关,此外还对喷嘴挡板液动力及流量系数进行了分析,得到了挡板与喷嘴件的最佳间距.综上所述,虽然在伺服阀前置级液动力方面已经有了一定的研究基础,但是针对偏导射流伺服阀前置级液动力的研究还难以在实际工程应用中起到可靠的指导作用,需要进一步验证.而且对偏导射流阀的分析和设计也需要采用理论分析及实验测试相结合的方法进行推导和验证.

本文作者以某型号的偏导射流盘力反馈两级伺服阀作为研究对象.基于动量定理,建立了前置级内液动力的数学模型,搭建了一套间接测量液动力的试验平台,对液动力的数学模型进行了验证,探讨了液动力随偏导板位移的变化规律,为偏导射流伺服阀的结构设计和参数优化提供了参考依据.

1 前置级工作原理及受力分析

1.1 前置级工作原理

偏导射流阀由力矩马达、偏导射流放大器 and 滑阀组成.偏导射流放大器即前置级,由射流盘和偏导板组成,如图 1 所示.射流盘上开有 1 个射流喷嘴和 2 个对称的接收口.射流喷嘴与液压能源相通,2 个接收口分别通过各自的接收腔与第 2 级滑阀两端的控制腔相连.偏导板位于射流喷嘴与接收口之间,由弹簧管支撑.板上开有 V 形导流槽,其上端与衔铁固定连接,其下端通过反馈杆末端的小球插入滑阀阀芯中部的小槽中.当偏导板处于射流盘中位置时,由喷嘴射出的油液通过接收口被均等地接收至 2 个接收腔内,在滑阀两端产生相等的恢复压力,阀芯不移动.当偏导板发生偏移时,2 个接收腔内将产生压差,使阀芯移动.阀芯的位置变化会使反馈杆产生变形,并以力矩的形式反馈到力矩马达的衔铁上,与衔铁产生的电磁力矩相平衡^[16].

1.2 受力分析

偏导板受冲击示意如图 2 所示,密度为 ρ 的射流油液以速度 U 从射流喷嘴喷出,喷嘴宽度为 a ,喷嘴面积为 A .射流方向与 V 形槽斜面的夹角为 θ_1 .设虚线位置为偏导板零位,当偏导板处于零位时,油液直接穿过偏导板 V 形导流槽缝隙,不对偏导板施力.当偏导板从零位移动 Δx ,射流厚度为 d 的油液撞击到挡板,在撞击后挡板两端流出的两股分流厚度分别为 d_1 和 d_2 ,流速分别为 U_1 和 U_2 .以双点划线 ABCD 所示的空间为控制体.由于理想流体没有

黏性,故 V 形槽斜面与射流油液间的作用力与受冲击斜面垂直.以 F_b 表示 V 形槽斜面对控制体的作用力, R_b 为射流对 V 形槽斜面的作用力, R_b 在垂

直于射流方向上的分力 f 即液动力, f 的方向与偏导板运动方向相反.

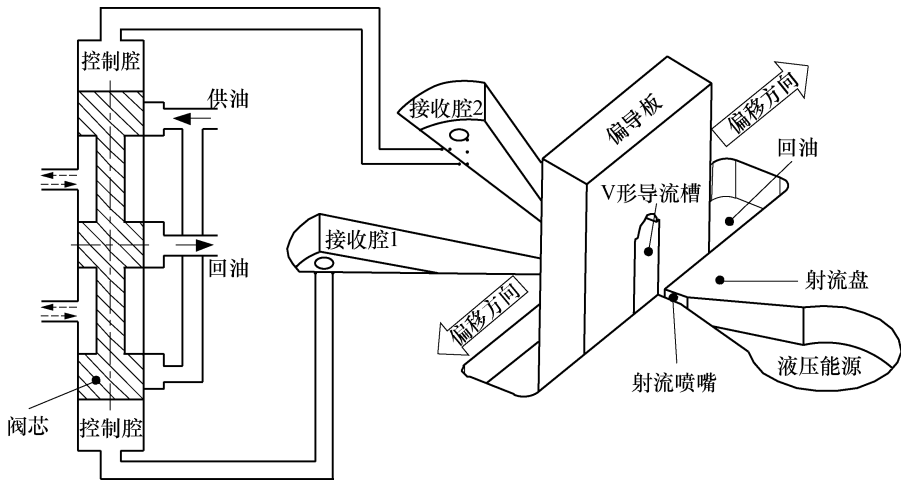


图 1 偏导射流阀前置级结构及工作原理

Fig.1 Structure and operating principle of pre-stage on deflector jet servo valve

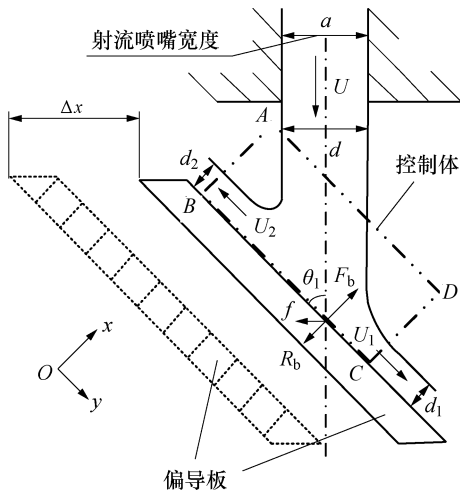


图 2 偏导板受冲击示意图

Fig.2 Schematic diagram of deflector plate under impact

取自由表面上的流线,由伯努利方程得

$$U = U_1 = U_2 \tag{1}$$

由连续性方程得

$$d = d_1 + d_2 \tag{2}$$

对控制体应用动量方程^[17]得

x 方向

$$F_b = \rho U^2 \sin \theta_1 \tag{3}$$

y 方向

$$(\rho U_1^2 d_1 - \rho U_2^2 d_2) - \rho U^2 \cos \theta_1 = 0 \tag{4}$$

R_b 可表示为

$$R_b = -F_b = -\rho U^2 \sin \theta_1 \tag{5}$$

此时

$$f = R_b \cos \theta_1 = -\rho U^2 A \sin \theta_1 \cos \theta_1 \tag{6}$$

最终,液动力 f 的变化量为

$$\Delta f = \frac{\Delta x}{a} \rho U^2 A \sin \theta_1 \cos \theta_1, 0 \leq \Delta x \leq a \tag{7}$$

2 试验台原理及设计

2.1 试验台组成及工作原理

由于偏导板射流伺服阀前置级的内部结构较为复杂,且各元件的尺寸较小,无法直接对前置级内部的液动力进行测量,所以需要采用等效法利用传感器在阀的外部对该力进行测量.实验系统原理图如图 3 所示.

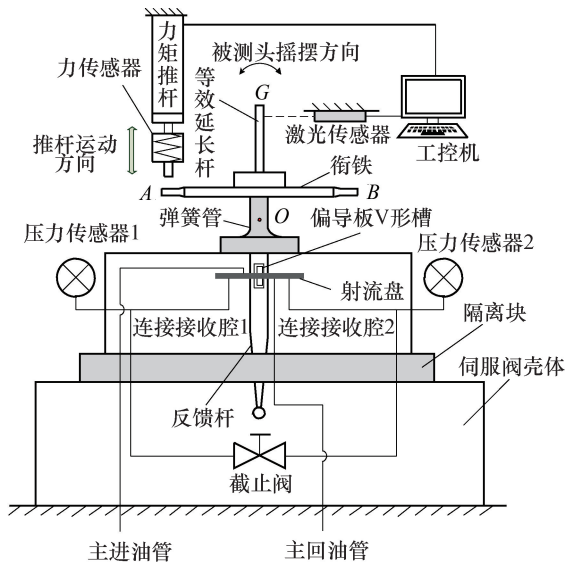


图 3 试验系统原理图

Fig.3 Schematic diagram of the test system

用微给进力矩推杆向衔铁左侧 A 端施加压力.力矩马达以 O 点为圆心发生偏转.衔铁 A 端受压后

缓慢下移, B 端随之翘起, 偏导板随之从零位偏移. 利用力矩推杆顶端的微力传感器测量所施加的力值, 同时用设置在衔铁上方的激光位移传感器测量等效延长杆顶端 G 的偏移量. 根据几何关系, 利用 G 处的偏移量可以换算出相对应的偏导板的实时位移量. 分别记录入口油压在 0 MPa 和 20 MPa 情况下 A 端的力值和 G 处的位移量. 最终对这 2 种不同油压情况下相同位移量所对应的不同力值进行做差, 从而得到偏导板产生位移时的液动力曲线. 正常工况且下, 衔铁组件偏移后反馈杆会发生形变, 在衔铁与阀芯之间产生 1 个平衡力矩. 实验时, 为了减少测量过程中的干扰因素, 需要在前置级与伺服阀壳体之间添加隔离块, 前置级反馈杆与阀体分离, 处于悬空状态.

2.2 测试方法

衔铁几何关系示意图见图 4, 在入口压力为 0 MPa 的情况下, 当力矩推杆向衔铁左侧 A 端施加压力 F_{s1} 后, 衔铁沿推杆力方向移动一段距离. 由于偏导板、等效延长杆及衔铁组件紧密固连, 等效延长杆和偏导板随之发生偏移. 衔铁总长度为 L , 被测点 G 至弹簧管回转中心 O 的长度为 h , 偏导板受液动力作用点至弹簧管回转中心 O 点的长度为 r , 等效延长杆被测点 G 处的偏移量为 Δl . 根据几何关系可换算出延长杆偏移角 θ_2

$$\theta_2 = 2\arcsin(\Delta l / 2h) \tag{8}$$

偏移时前置级组件会产生 2 个力矩, 并保持平衡. 1 个是由推杆力产生的力矩 T_{f1} , 另 1 个力矩为弹簧管变形产生力矩 T_t , 其方向与 T_{f1} 相反. 此时, 前置级组件的静态力矩平衡为

$$T_{f1} - T_t = F_{s1} \frac{L}{2} - k\theta_2 = 0 \tag{9}$$

式中: k 为弹簧管刚度.

在入口压力为 20 MPa 的情况下, 对衔铁左侧 A 端施加压力 F_{s2} , 使衔铁产生与 0 MPa 时相同的位移, 其等效延长杆的偏转角度也与 0 MPa 时偏转角一致. 此时, 前置级组件上共有 3 个力矩, 分别为推杆力产生的力矩 T_{f2} 、弹簧管产生的力矩 T_t 、液流冲击偏导板产生的力矩 T_L . T_L 即液动力对前置级组件产生的力矩. T_t 和 T_L 的方向一致, 与 T_{f2} 的方向相反.

前置级组件的静态力矩平衡可写成

$$T_{f2} - T_t - T_L = 0 \tag{10}$$

$$F_{s2} \frac{L}{2} - k\theta_2 + fr = 0 \tag{11}$$

最后, 通过对比 2 种工况下衔铁移动到相同位

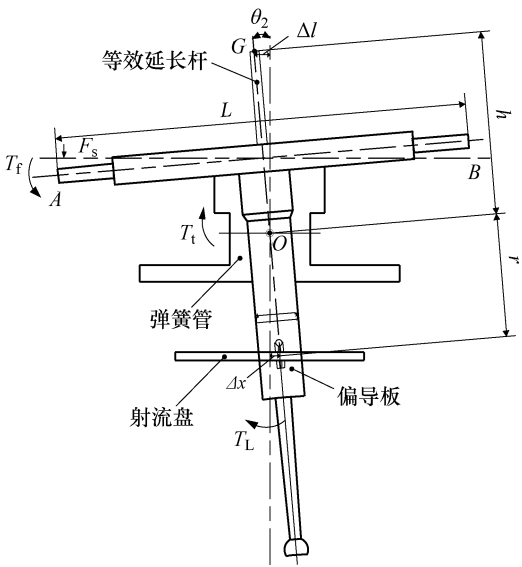


图 4 衔铁几何关系示意图

Fig.4 Geometry relation of the armature subassembly
置时产生的力矩, 可以得到液动力测量值 f_m .

$$T_{f2} - T_{f1} = T_L \tag{12}$$

$$f_m = \frac{(F_{s2} - F_{s1}) L}{2r} \tag{13}$$

2.3 试验台关键组件

试验台的关键部件包括压力传感器、微力传感器、微位移电动力矩推杆及激光传感器. 液压系统选用的 CYB-20/21s 型压力传感器, 量程为 35 MPa, 精度为 $\pm 0.1\%$ FS, 介质温度 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$; 激光传感器选用 MICRO-EPSION 的高精度 CCD 激光位移传感器, 量程为 2 mm, 分辨率为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$, 线性度为 0.05% ; 微力传感器选用 Futek02665 型传感器, 量程为 2.5 N, 分辨率 1 mN, 非线性度 $\pm 0.1\%$. 微位移给进单元选用 PI 的 M238.DG 型力矩推杆, 精度为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$, 最大压(拉)力 400 N. 液动力试验台如图 5 所示^[15].

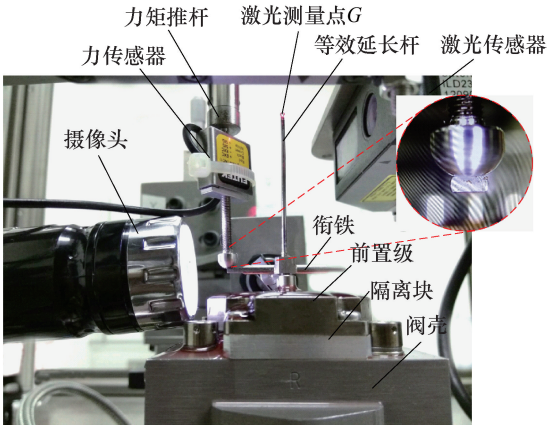


图 5 试验台实物图

Fig.5 Photo of the test bed

3 结果分析

式(7)中的参数见表 1, 偏导板位移量 Δx 取值范围为 $0\sim120\ \mu\text{m}$, 在 Matlab 中偏移量从 $0\ \mu\text{m}$ 处开始, 每隔 $10\ \mu\text{m}$ 计算一次。

表 1 参数表
Tab.1 Parameters

名称	数值	名称	数值
喷嘴宽度 a/mm	0.15	油液密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	850
喷嘴长度 b/mm	0.54	油液流量 $Q/(\text{L}/\text{min})$	0.2
斜面角度 θ_1/rad	1.28	偏导板位移 $\Delta x/\mu\text{m}$	$0\sim120$

经过测试, 可得推杆力与偏导板位移关系见图 6, 由图 6 可知, 入口压力 $20\ \text{MPa}$ 情况下测得的推杆力值略大于入口压力为 $0\ \text{MPa}$ 时的推杆力测量值。并且随着偏导板位移量的增大, 前后两次推杆力测量值的差值也逐渐变大。

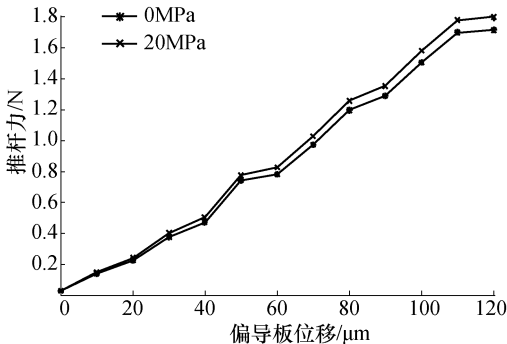


图 6 推杆力与偏导板位移关系

Fig.6 Relation between pushrod force and displacement of deflector plate

将两次测得的推杆力值做差后得到液动力测量值曲线, 该曲线为 1 条逐渐递增的曲线。如图 7 所示, 经过对比可以看出, 液动力测量值略大于计算值。这可能是由于计算时没有考虑流场中射流油液的卷吸作用对偏导板的影响, 以及试验时的测量误

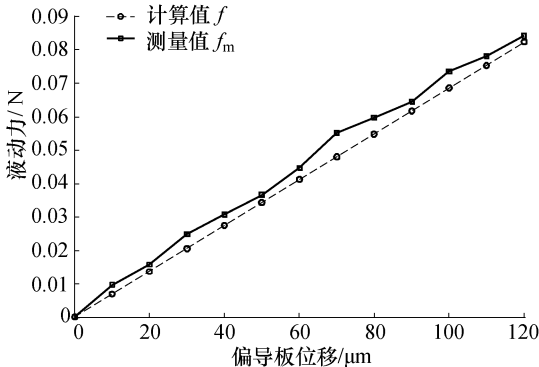


图 7 液动力计算值与测量值对比

Fig.7 Comparison of calculation values and measured values of flow force

差导致。但液动力测量值与计算值的数量级保持一致, 且有着同样的变化趋势, 说明本实验可行。

4 结论

1) 分析了前置级液动力的测试原理, 基于搭建的试验台设计了特定的液动力测试方法和具体测试步骤。应用该试验台研究了液动力与偏导板位移之间的定量关系, 对定量研究偏导射流伺服阀的前置级液动力特性具有重要意义。

2) 本试验台针对偏导射流伺服阀前置级液动力测量难题, 利用微位移推杆和微位移传感器等精密元件, 设计并实现了此类伺服阀前置级液动力的测试系统, 系统位移检测精度可达 $0.1\ \mu\text{m}$ 。

3) 根据试验数据可知, 在偏导板从零位沿 1 个方向运动时, 液动力是随位移距离的变大而逐渐增大的, 与假设相吻合。

参考文献 (References):

[1] 付永领, 裴忠才, 宋国彪, 等. 新型直接驱动伺服阀的瞬态液动力分析[J]. 液压与气动, 1999(1): 23-24.
FU Yongling, PEI Zhongcai, SONG Guobiao, et al. Analysis of transient flow force in a new type direct drive servo valve[J]. Machine Tool & Hydraulics, 1999(1): 23-24. (in Chinese)

[2] SANGIAH D K, PLUMMER A R, BOWEN C R, et al. Modelling and experimental validation of a novel piezo-hydraulic servo valve[C]//Asme Dynamic Systems & Control Conference & Bath/Asme Symposium on Fluid Power & Motion Control. Arlington, 2011: 343-350.

[3] SANGIAH D K, PLUMMER A R, BOWEN C R, et al. A novel piezohydraulic aerospace servo valve, Part I: Design and modelling [J]. Journal of Systems and Control Engineering, 2013, 227(4): 371-389.

[4] 吴金波, 陈飞, 徐礼林. 斜进口流道滑阀稳态液动力的仿真与分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(11): 109-111.
WU Jinbo, CHEN Fei, XU Lilin. Steady-state flow force simulation and analysis of oblique-inlet spool valves[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2011, 39(11): 109-111. (in Chinese)

[5] LORENZO P, MARCO F, FEDERICO F, et al. Comparative analysis of a hydraulic servo-valve[J]. International Journal of Fluid Power, 2013, 14(2): 53-62.

[6] 阎耀保, 张鹏, 张阳. 偏转板伺服阀压力特性研究[J]. 流体传动与控制, 2014(4): 10-15.
YIN Yaobao, ZHANG Peng, ZHANG Yang. Analysis of the pressure characteristics of deflector jet servo valve

- [J]. Fluid Power Transmission and Control, 2014(4):10—15. (in Chinese)
- [7] 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, 13(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, 13(1):1—7. (in Chinese)
- [8] 马小良. 偏导射流电液伺服阀工程化建模及仿真研究[J]. 液压与气动, 2015(3):83—85.
MA Xiaoliang. Model and simulation for deflector jet electrohydraulic servovalve[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015(3):83—85. (in Chinese)
- [9] 韩笑, Nay Zar Aung, 曹俊章, 等. 伺服阀前置级流场气穴现象的仿真及试验研究[J]. 机电工程, 2014, 31(10):1239—1243.
HAN Xiao, NAY Zar Aung, CAO Junzhang, et al. Study of cavitation in pilot stage of hydraulic servo valves[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(10):1239—1243. (in Chinese)
- [10] 王凤聚, 李长春, 延皓, 等. 偏导射流阀前置级流场计算与分析[J]. 液压与气动, 2016(8):74—78.
WANG Fengju, LI Changchun, YAN Hao, et al. Calculation and analysis of flow field in the pre-stage of the deflector-jet valves[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2016(8):74—78. (in Chinese)
- [11] 延皓, 康硕, 王凤聚, 等. 偏转板射流式伺服阀前置级液动力计算方法研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(7):1258—1265.
YAN Hao, KANG Shuo, WANG Fengju, et al. Research on the calculation methods of fluid force in pilot stage of jet deflector servo valve[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(7):1258—1265. (in Chinese)
- [12] 蒋大伟, 许明理. 基于 Fluent 的偏转板射流伺服阀的前置级仿真[J]. 液压与气动, 2016(4):48—53.
JIANG Dawei, XU Mingli. Simulation based on fluent for pre-stage of deflector jet servo valve[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2016(4):48—53. (in Chinese)
- [13] 刘增光, 杨国来, 岳大灵, 等. 偏转板射流阀压力特性数值模拟分析[J]. 液压与气动, 2016(2):76—79.
LIU Zengguang, YANG Guolai, YUE Daling, et al. Numerical simulation of pressure characteristics of deflector jet valve[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2016(2):76—79. (in Chinese)
- [14] 李磊, 李长春, 延皓, 等. 喷嘴挡板伺服阀温漂电流波动研究[J]. 北京交通大学学报, 2017, 41(3):96—102.
LI Lei, LI Changchun, YAN Hao, et al. Research on temperature drift current fluctuation of nozzle flapper servo valve[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(3):96—102. (in Chinese)
- [15] LI L, LI C C, ZHANG H X. Numerical simulation and experimental research of the flow coefficient of the nozzle-flapper valve considering cavitation [J]. International Journal of Fluid Machinery & Systems, 2017, 10(2):176—188.
- [16] 王春行. 液压控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014:103—104.
WANG Chunxing. Hydraulic control system[M]. Beijing: China Machine Press, 2014:103—104. (in Chinese)
- [17] 杨含离. 工程流体力学双语教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015:105—106.
YANG Hanli. A bilingual textbook for engineering fluid mechanics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015:105—106. (in Chinese)