

DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2019.11.021

本文引用格式: 赵红美, 杨成刚, 唐杰, 等. 基于有源液压测试的电液换向阀泄漏预测理论与应用研究 [J]. 机床与液压, 2019, 47(11): 103-107.

ZHAO Hongmei, YANG Chenggang, TANG Jie, et al. Research on Leakage Prediction Theory and Application of Electro-Hydraulic Directional Control Valve Based on Hydraulic Active Test [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(11): 103-107.

## 基于有源液压测试的电液换向阀泄漏预测理论与应用研究

赵红美<sup>1</sup>, 杨成刚<sup>1,2</sup>, 唐杰<sup>2,3</sup>, 董玟<sup>4</sup>, 赵士明<sup>1,2</sup>

(1. 唐山工业职业技术学院, 河北唐山 063299; 2. 燕山大学机械工程学院, 河北秦皇岛 066004;  
3. 中国民航大学航空工程学院, 天津 300300; 4. 河北机车技师学院, 河北唐山 064000)

**摘要:** 针对飞机起落架液压系统电液换向阀内泄漏无法实施检测的问题, 提出了飞机起落架电液换向阀内泄漏故障预测方法。根据飞机起落架由于电液换向阀内泄漏产生的各种故障, 进行了电液换向阀内泄漏机制的研究。利用有源液压测试技术, 建立了有源液压测试电液换向阀内泄漏模型。通过实验验证了有源液压测试技术预测电液换向阀内泄漏的可行性, 解决了飞机电液换向阀内泄漏无法预测的问题。

**关键词:** 有源液压测试; 飞机起落架; 电液换向阀; 泄漏故障预测; 截堵法

**中图分类号:** V216.8

## Research on Leakage Prediction Theory and Application of Electro-Hydraulic Directional Control Valve Based on Hydraulic Active Test

ZHAO Hongmei<sup>1</sup>, YANG Chenggang<sup>1,2</sup>, TANG Jie<sup>2,3</sup>, DONG Wen<sup>4</sup>, ZHAO Shiming<sup>1,2</sup>

(1. Tangshan Polytechnic College, Tangshan Hebei 063299, China;  
2. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China;  
3. Aeronautical Engineering Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;  
4. HeBei Locomotive Technician College, Tangshan Hebei 064000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the internal leakage of electro-hydraulic directional control valve of the aircraft landing gear hydraulic system can not be detected, it puts forward a method of predicting the internal leakage. It was researched on the leakage mechanism of electro-hydraulic directional control valve, basing on the all kinds of faults being due to the internal leakage. Introducing the hydraulic active testing technology, it was established the model of testing the internal leakage of the electro-hydraulic directional control valve. Through testing, it is feasible to predict the leakage of the electro-hydraulic directional control valve by hydraulic active testing technology, to solve the problem of the leakage of electric-hydraulic directional control valve in the aircraft.

**Keywords:** Active hydraulic test; Aircraft landing gear; Electro-hydraulic directional control valve; Leakage failure prediction; Intercept-plugging method

### 0 前言

飞机起落架收放系统在飞机着陆及地面滑跑过程中起着举足轻重的作用<sup>[1]</sup>, 该系统的性能好坏直接影响飞机的安全性和机动性。飞机起落架的前起落架动作筒、主起落架动作筒、开锁动作筒等都是由电液换向阀实现动作的, 电液换向阀的泄漏量大小直接影响其换向动作的快慢和动作的锁定<sup>[2]</sup>。现今, 对电液换向阀泄漏量的在线检测没有行之有效的方法, 因此,

在线电液换向阀泄漏量预测技术的研究很有必要。

目前, 比较常用的预测检测技术包括故障诊断专家系统 (Expert System, ES)<sup>[3]</sup>、故障预测与健康管埋 (Prognostics and Health Management, PHM)<sup>[4]</sup>、智能维护系统 (Intelligent Maintenance System, IMS)<sup>[5]</sup>等, 以上方法基于事件数据和状态数据进行故障预测, 电液换向阀的内泄漏仅是制造厂进行出厂检验, 在线检测方面的研究成果较少, 本文作者运用有源液

收稿日期: 2018-02-01

基金项目: 河北省科技厅科技计划项目 (16211303)

作者简介: 赵红美 (1981—), 女, 硕士, 副教授, 主要从事液压技术方面的科研和教学工作。E-mail: tsgzyzhm@126.com。

通信作者: 杨成刚 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事电液控制系统创新设计及应用研究。E-mail: beiyang65@sina.com。

压测试技术<sup>[6]</sup>, 对电液换向阀内泄漏量进行在线检测的研究, 为购进电液换向阀配件质量检验以及在线电液换向阀的内泄漏量预测提供可行的方法。

### 1 飞机起落架电液换向阀泄漏引起的故障及分析

某种飞机起落架液压原理图如图 1 所示。液压系统偶然发生的故障有<sup>[7]</sup>:

- (1) 起落架已完全收上, 但液压泵不停止工作;
- (2) 起落架在收上过程中, 泵突然停止工作;
- (3) 起落架收上特别慢, 超过 5~10 s 的正常范围;
- (4) 起落架收上后, 液压泵间断工作;
- (5) 起落架不能自由落下。

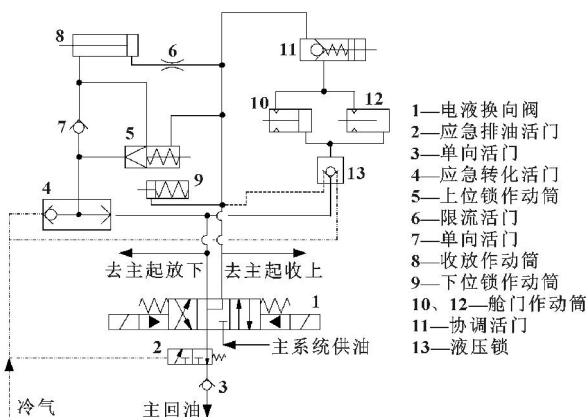


图 1 某飞机起落架液压系统原理图

造成以上故障的原因由于起落架液压系统存在较大的内泄漏和外部泄漏, 外部泄漏很容易发现, 而动作筒、电液换向阀的内部泄漏不易发现和诊断。电液换向阀内部泄漏占主要。某飞机起落架液压系统原理图如图 1 所示。

从图 1 可以测得电液换向阀为三位换向阀, 中位 Y 型功能在不通电的状态下, 收放管路都经过中位流回油箱, 但当阀芯与阀孔间隙造成的泄漏量不一样时会造成下位锁误动作, 前起落架自动收回, 以及泄漏造成压力和动作缓慢等, 因此, 电液换向阀中位泄漏量的预测测试非常重要, 对提高飞机起落架的可靠性和安全性起到促进作用。

### 2 电液换向阀的内泄漏机制研究

电液换向阀的内泄漏主要对阀芯在阀体内孔的左极限位 (简称左位)、中位和右极限位 (简称右位) 进行分析与研究。

#### 2.1 电液换向阀左位、右位的内泄漏方程

电液换向阀主阀的结构示意图如图 2 所示, 阀芯处在左位和右位时, 阀内泄漏量方程可以用下式表示:

$$Q_{LL} = Q_{C1} + Q_{C2}$$

$$Q_{LL} = \frac{\pi d C_1^3}{12 \mu l} (p_3 - p_2) + \frac{\pi d C_2^3}{12 \mu l} (p_4 - p_2) \quad x_{sp} < 0 \quad (1)$$

$$Q_{RL} = Q_{C3} + Q_{C4}$$

$$Q_{RL} = \frac{\pi d C_3^3}{12 \mu l} (p_3 - p_2) + \frac{\pi d C_4^3}{12 \mu l} (p_1 - p_4) \quad x_{sp} > 0 \quad (2)$$

式中:  $Q_{LL}$  为  $x_{sp} < 0$  时, 总泄漏流量;  $Q_{RL}$  为  $x_{sp} > 0$  时, 总泄漏流量;  $Q_{C1}$  为间隙  $C_1$  间隙泄漏流量;  $Q_{C2}$  为间隙  $C_2$  间隙泄漏流量;  $Q_{C3}$  为间隙  $C_3$  间隙泄漏流量;  $Q_{C4}$  为间隙  $C_4$  间隙泄漏流量;  $p_1$  为供油口压力;  $p_2$  为回油口压力;  $p_3$  为 A 口压力;  $p_4$  为 B 口压力;  $l$  为间隙长度;  $d$  为主阀芯外径;  $\mu$  为液压油运动黏度。

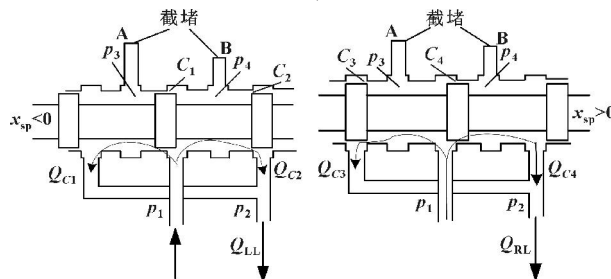


图 2 电液换向阀结构示意图

主阀芯在移动过程中, 由于磨损的情况不同, 以及粗糙表面的误差, 使得阀芯与阀孔配合副间隙是不一样的, 如图 2 所示的位置分别为  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 。

#### 2.2 电液换向阀中位内泄漏方程

电液换向阀阀芯处在中位时结构示意图如图 3 所示。

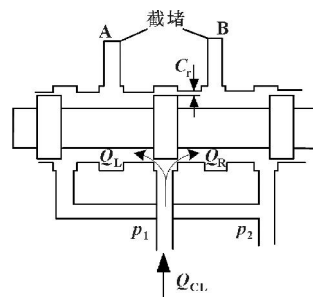


图 3 中位结构示意图

当阀芯处在中位时, 液压油从间隙向左泄漏和向右泄漏, 电液换向阀的内泄漏方程可以用下式经验公式表达<sup>[8]</sup>:

$$Q_{CL} = Q_L + Q_R = \frac{\pi w}{32 \mu} C_r^2 (p_1 - p_2) \quad (3)$$

式中:  $Q_{CL}$  为中位泄漏流量;  $Q_L$  为左泄漏流量;  $Q_R$  为右泄漏流量;  $C_r$  为中位阀芯与阀体内孔径向间隙;  $w$  为开口面积梯度。

电液换向阀的泄漏量从式 (1)、(2)、(3) 来分析可以预测:  $w$ 、 $C_r$ 、 $\mu$ 、 $l$  以及等压力差都会影响泄漏量的大小, 但间隙  $C_r$  占主要因素。

### 3 电液换向阀的内泄漏故障预测理论研究

#### 3.1 有源液压测试技术

电液换向阀, 在一定的压力、温度、配合间隙等

参数下, 都允许存在一定的泄漏量, 但随着液压油中固体污染物的颗粒大小和含量逐渐增加, 会造成泄漏量越来越大, 直至失效。有源液压测试技术, 就是对电液换向阀泄漏量进行在线检测来实现液压系统的故障预测。

有源液压测试技术是利用有源液压测试仪 (简称测试仪) 充当动力源, 通过被测试液压系统或液压元件的测压口或供油口向被测试的液压系统或液压元件输入测试油液 (被检测液压系统停止工作), 借助截堵法, 用测试仪的流量变化来检测被检测液压系统各个支路或液压元件泄漏量的技术。如图 4 为测试仪原理示意图。

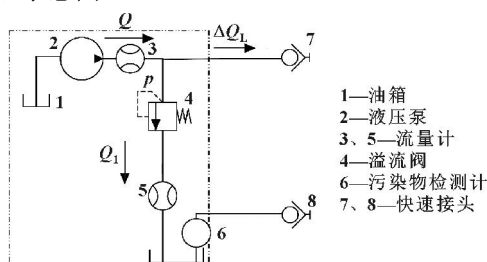


图 4 测试仪原理示意图

### 3.2 有源液压测试电液换向阀泄漏模型及理论推导

图 2 和图 3 电液换向阀的左、中、右 3 个位置泄漏量的有源液压测试技术测试模型, 如图 5 所示。

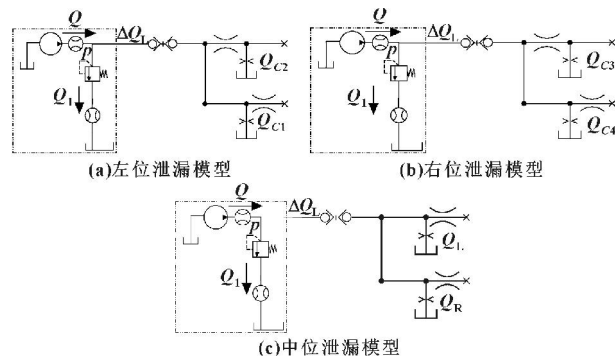


图 5 有源液压测试电液换向阀泄漏模型图

测试仪输出的恒定测试流量  $Q$ 、测试仪溢流阀的溢流量  $Q_1$ 、被测试电液换向阀的泄漏量  $\Delta Q_L$  之间的关系满足下式:

$$Q = Q_1 + \Delta Q_L \quad (4)$$

公式分析:

(1)  $Q_1$  的取值范围为:  $Q_1 \in [0, Q]$

当测试仪标定流量时  $Q_1$  值取大值  $Q$ ; 当被测电液换向阀出现严重的泄漏故障时,  $Q_1$  取小值 0; 当被电液换向阀泄漏量正常时,  $Q_1$  取区间值。

(2)  $\Delta Q_L$  的取值范围为:  $\Delta Q_L \in [0, Q]$

当被测电液换向阀出现严重的泄漏故障时,  $\Delta Q_L$  取大值  $Q$ ; 当测试仪标定流量时,  $\Delta Q_L$  取小值 0; 当

被电液换向阀泄漏量正常时,  $\Delta Q_L$  取区间值。

因此, 被测试的电液换向阀的总泄漏量可以用下式表示:

$$\Delta Q_L = Q - Q_1 \quad (5)$$

从图 5 (a) 电液换向阀左位泄漏量方程如下:

$$\Delta Q_L = Q_{C1} + Q_{C2} = Q_{LL} \quad (6)$$

从图 5 (b) 电液换向阀右位泄漏量方程如下:

$$\Delta Q_L = Q_{C3} + Q_{C4} = Q_{RL} \quad (7)$$

从图 5 (c) 电液换向阀中位泄漏量方程如下:

$$\Delta Q_L = Q_L + Q_R = Q_{CL} \quad (8)$$

可见, 以上电液换向阀的三位泄漏量  $Q_{LL}$ 、 $Q_{RL}$ 、 $Q_{CL}$  可以用测试仪测试出来。

### 3.3 电液换向阀内泄漏故障预测

(1) 预测前测试仪参数的标定

为了反应电液换向阀的工作中实际内泄漏量, 将测试仪的标定压力按照电液换向阀的额定工作压力的 100% 调定, 测试时间调定为 12~15 s 之间, 在标定压力下, 测试仪溢流阀的溢流量为标定流量  $Q_1$ 。

(2) 泄漏量预测原理图

电液换向阀内泄漏量预测的液压原理图如图 6。

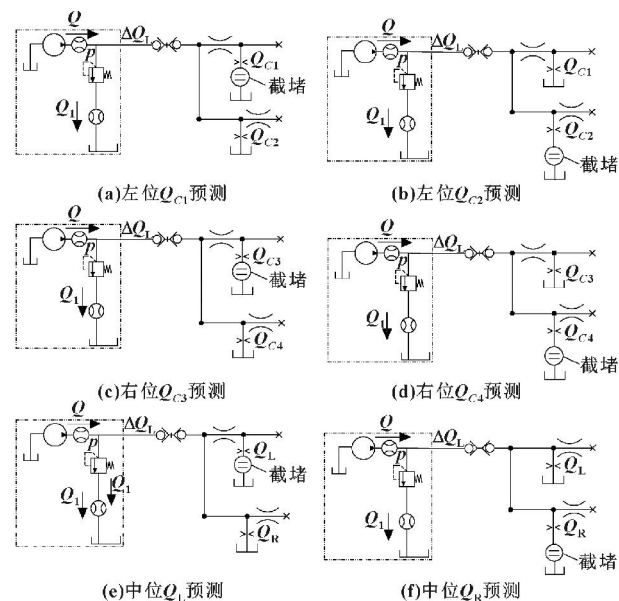


图 6 电液换向阀三位内泄漏量预测图

按照图 6 (a) 和图 6 (b) 电液换向阀处在左位, 启动测试仪测量出  $\Delta Q_L^{C1堵}$  的数值, 则  $Q_{C1}$  可以用下式求得:  $Q_{C1} = \Delta Q_L^{C1堵} - Q_{LL}$ 。

同理,  $Q_{C2}$  可以用下式求得:  $Q_{C2} = \Delta Q_L^{C2堵} - Q_{LL}$ 。

按照图 6 (c) 和图 6 (d) 电液换向阀处在右位, 启动测试仪测量出  $\Delta Q_L^{C3堵}$  的数值, 则  $Q_{C3}$  可以用下式求得:  $Q_{C3} = \Delta Q_L^{C3堵} - Q_{RL}$ 。

同理,  $Q_{C4}$  可以用下式求得:  $Q_{C4} = \Delta Q_L^{C4堵} - Q_{RL}$ 。

按照图 6 (e) 和图 6 (f) 电液换向阀处在中位,

启动测试仪测量出  $\Delta Q_L^{L堵}$  的数值, 则  $Q_L$  可以用下式求得:  $Q_L = \Delta Q_L^{L堵} - Q_{CL}$ 。

同理,  $Q_R$  可以用下式求得:  $Q_R = \Delta Q_L^{R堵} - Q_{CL}$ 。

显然, 采用上述方法, 较式 (1), (2) 要简单、快捷、准确。

#### 4 实验验证

为验证基于有源液压测试电液换向阀泄漏预测理论的可行性, 采用最常用的某厂 4WEH16E 电液换向阀作为研究对象。电液换向阀的泄漏预测原理图如图 7 所示, 搭建的实验测试现场图如图 8 所示。

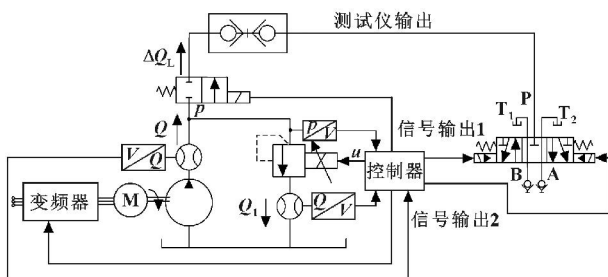


图 7 电液换向阀泄漏量预测原理图



图 8 电液换向阀泄漏量预测实验现场  
该系统的主要组成元件和参数见表 1 所示。

表 1 实验系统使用元件和参数

序号	名称	型号/参数	单位	数量	备注
1	电液换向阀	某厂 4WEH16E	台	2	新阀和使用 24 个月的旧阀各 1 台
2	有源液压测试	设定流量范围 2.0 L/min 设定压力范围 25 MPa 测试时间设定 13 s	台	1	输出流量调定不变
3	抗磨液压油	L-HM46 41.4~50.6 mm <sup>2</sup> /s	升	20	
4	液压油污染度 (NAS)	NAS 0~12	等级	9	

电液换向阀中位时实验数据见表 2 所示。

表 2 电液换向阀中位实验数据 mL/min

$Q_{CL}$	$Q_R$	$Q_L$	备注
65	30	35	新阀
200	140	60	使用 24 个月的旧阀

从表 2 可以看出, 电液换向阀阀芯处在中位时新阀的左泄漏量  $Q_L$  和右泄漏量  $Q_R$  明显不同, 说明电液换向阀的阀芯在阀体内孔中有微量的偏差; 使用 24 个月后的电液换向阀泄漏量增大了 135 mL, 并且右泄漏量  $Q_R$  比左泄漏量  $Q_L$  多 80 mL, 说明右侧阀芯和阀体磨损较大致使配合间隙增大。

电液换向阀左位时实验数据见表 3 所示。

表 3 电液换向阀左位实验数据 mL/min

$Q_{LL}$	$Q_{C1}$	$Q_{C2}$	备注
80	50	30	新阀, A、B 口堵死
180	75	105	使用 24 个月的旧阀, A、B 口堵死

从表 3 可以看出, 电液换向阀阀芯处在左位时新阀和使用 24 个月的旧阀内泄漏量有显著不同, 并且间隙泄漏量  $Q_{C2}$  增大了 75 mL。

电液换向阀右位时实验数据见表 4 所示。

表 4 电液换向阀右位实验数据 mL/min

$Q_{RL}$	$Q_{C3}$	$Q_{C4}$	备注
78	40	38	新阀, A、B 口堵死
240	80	160	使用 24 个月的旧阀, A、B 口堵死

从表 4 可以看出, 电液换向阀阀芯处在右位时新阀和使用 24 个月的旧阀内泄漏量有显著不同, 并且旧阀间隙  $C_4$  间隙泄漏量  $Q_{C4}$  增大了 122 mL。

新旧电液换向阀三位泄漏量柱形对比图如图 9 所示。

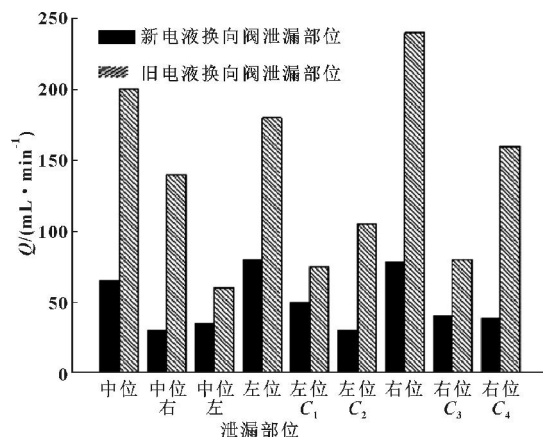


图 9 电液换向阀三位泄漏量柱形对比图

从图 9 可以看出, 在测试压力 25 MPa 下, 新旧某厂 4WEH16E 电液换向阀处左、中、右位时各配合副内泄漏量都不同, 这说明沿着主阀芯轴线方向的配合间隙  $C_r$  有偏差, 特别是旧阀, 由于流动的液压油

液固体污染物造成的磨损使得各配合间隙  $C_r$  偏差更大。因此, 液压油中的固体污染物的含量对配合间隙变化有着决定作用, 结果和理论分析是一致的。利用有源液压测试技术对飞机起落架液压系统电液换向阀内泄漏的预测是可行的。

## 5 结论

运用有源液压测试理论对飞机起落架电液换向阀内泄漏量进行了研究, 得出以下结论:

(1) 电液换向阀新阀存在内泄漏量。

(2) 电液换向阀随着使用时间的延长, 内泄漏量明显加剧。

(3) 有源液压测试技术可以在线预测电液换向阀内部不同工作位的总泄漏量以及不同配合副的局部泄漏量。

(4) 解决了飞机电液换向阀内泄漏量无法预测的问题, 为机械师预测飞机起落架液压系统电液换向阀提供科学的检测手段, 保障飞机安全的飞行。

## 参考文献:

- [1] 马泓琰. 飞机起落架系统故障诊断仿真研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [2] 唐有才, 刘振岗, 于德会, 等. 某型飞机前起落架自动收起的故障研究 [J]. 机床与液压, 2005 (4): 177-178.  
TANG Y C, LIU Z G, YU D H, et al. The Research for the Failure of a Certain Aircraft's Nose Landing Gear Automatic Raising [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2005 (4): 177-

178.

- [3] 朱新宇, 马丽璇, 王威风. 基于 CLIPS 飞机液压系统故障诊断专家系统的实现 [J]. 中国民航飞行学院学报, 2015, 27 (2): 58-62.  
ZHU X Y, MA L X, WANG W F. Diagnostic Expert System for Hydraulic System of Aircraft Based on CLIPS [J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2015, 27 (2): 58-62.
- [4] 陶来发, 樊焕贞, 吕琛, 等. 机电系统故障预测技术的现状与分析 [J]. 控制工程, 2011, 18 (4): 636-639.  
TAO L F, FAN H Z, LV C, et al. A Review on Electro-mechanical Systems Prognostics [J]. Control Engineering of China, 2011, 18 (4): 636-639.
- [5] 梁艳艳, 张博. 大型机械装备智能维护系统的特性分析 [J]. 科技经济市场, 2016 (4): 140-140.
- [6] 杨成刚, 赵静一. 便携式有源液压测试仪及测试方法: ZL200910148231.6 [P]. 2011-06-15.
- [7] 任可, 苟江, 任毅. 西门诺尔飞机起落架液压收放系统故障分析 [J]. 航空维修与工程, 2010 (3): 40-42.  
REN K, GOU J, REN Y. Hydraulic Retraction Defaults of Seminole Aircraft Landing Gear System [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2010 (3): 40-42.
- [8] GARIMELLA P, YAO B. Model Based Fault Detection of an Electro-Hydraulic Cylinder [C] // Proceedings of American Control Conference. IEEE, 2005.

(责任编辑: 卢文辉)

(上接第 154 页)

## 参考文献:

- [1] 袁卓林, 雷玉勇, 孙书蕾, 等. 微磨料水射流对工件表面抛光作用的研究 [J]. 机床与液压, 2010, 38 (21): 52-60.  
YUAN Z L, LEI Y Y, SUN S L, et al. Study on Surface Polishing Micro Abrasive Water Jet [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38 (21): 52-60.
- [2] 车翠莲, 黄传真, 朱洪涛, 等. 磨料水射流抛光技术的研究现状 [J]. 工具技术, 2007, 41 (10): 14-16.  
CHE C L, HUANG C Z, ZHU H T, et al. Research Situation of Abrasive Waterjet Polishing Technology [J]. Tool Engineering, 2007, 41 (10): 14-16.
- [3] MULIK R S, PANDEY P M. Mechanism of Surface Finishing in Ultrasonic-Assisted Magnetic Abrasive Finishing Process [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2010, 25 (12): 1418-1427.
- [4] 朱红钧, 林元华, 谢龙汉. Fluent 12 流体分析及工程仿真 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [5] 刘敬彬. 高压磨料水射流喷头内部流场研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- [6] 王海冰, 王攀达, 李文华, 等. 基于 COMSOL 液压节流阀

内部流场数值模拟研究 [J]. 液压与气动, 2015 (8): 26-29.

- WANG H B, WANG P D, LI W H, et al. Numerical Simulation of Flow Field Inside Throttle Valve Based on COMSOL [J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2015 (8): 26-29.
- [7] 杨倩. 基于不同湍流模型的离心泵内部流场数值模拟与分析 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
- [8] 张宝裕, 刘恒基. 磁场的产生 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [9] CHANG G W, YAN B H, HSU R T. Study on Cylindrical Magnetic Abrasive Finishing Using Unbounded Magnetic Abrasives [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42 (5): 575-583.
- [10] 张桂冠, 赵玉刚, 高跃武. 双喷嘴雾化水冷法制备磁性磨料及研磨性能 [J]. 粉末冶金工业, 2017, 27 (4): 22-25.  
ZHANG G G, ZHAO Y G, GAO Y W. Preparation of Magnetic Abrasive by Dual-Nozzle Atomizing Water-Cooling Method and Its Grinding Performance [J]. Powder Metallurgy Industry, 2017, 27 (4): 22-25.

(责任编辑: 卢文辉)