

# 基于液压转角伺服的液压关节研究\*

蒋 林, 陈新元, 赵 慧, 曾良才, 金晓宏\*, 谢 臻  
(武汉科技大学 机械自动化学院, 湖北 武汉 430081)

**摘要:**针对液压机器人关节研究中存在关节径向尺寸过大, 运动范围偏小, 控制精度有限等问题, 提出了一种阀芯径向力平衡、伺服盲区小的液压转角伺服阀来解决该问题, 设计了对应的液压转角伺服阀, 并基于该液压转角伺服阀设计了液压关节。该液压关节尺寸小、力矩大。仿真实验结果证明该液压关节响应快, 运动平稳性与稳定性好, 运动精度高, 带负载能力强。

**关键词:** 液压转角伺服阀; 液压机器人关节; 小尺寸关节

中图分类号: TH112; TH137.52; TP24

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)03-0265-04

## Hydraulic robot joint research based on hydraulic rotary servo

JIANG Lin, CHEN Xin-yuan, ZHAO Hui, ZENG Liang-cai, JIN Xiao-hong, XIE Zhen  
(College of Machinery and Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the development of hydraulic robot joint is restricted by joint dimension, movement range and control precision, a hydraulic rotary servo valve was proposed, in which the valve spool stress is balance in radial direction and servo dead zone is small. A hydraulic robot joint was designed based on the hydraulic rotary servo valve. The hydraulic robot joint dimension is compact, and its output torque is larger. The simulation experimental results show that hydraulic robot joint has high response rate, good motion stationarity, high movement precision, and larger load capacity.

**Key words:** hydraulic rotary servo valve; hydraulic robot joint; compact joint dimension

## 0 引 言

机器人关节的驱动方式主要有 3 种: 电机驱动、液压驱动和气压驱动。液压驱动相比电机驱动具有传动平稳、功率/重量比和转矩/惯性比大、功率传递密度大、调速范围大、结构简单、控制系统的负载刚度大、响应速度快、控制精度高、易于实现过载保护等优点。

液压伺服驱动在液压机器人中得到了普遍应用, 液压机器人的关节系统属于液压机器人的基础部件, 是整个机器人中的一个重要环节, 其结构、重量、尺寸、精度等对机器人整体性能有直接影响, 在液压伺服关节中电液伺服阀是关键, 其具有精度高、反应快等特点, 在高精度的机电一体化系统、航空航天机载驱动系统、大型试验设备中有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。国内外有多

家单位在机器人液压伺服关节方面进行了相应的研究。国外的有 PYR 型液压伺服关节<sup>[2]</sup>, 伺服关节的伺服控制以带有先导阀的两级或三级喷嘴挡板阀和射流阀为主, 这类伺服阀体积较大, 常外置<sup>[3-4]</sup>。国内有扬州大学研究的三自由度液压伺服关节<sup>[5]</sup>, 液压伺服关节中应用了液压转角伺服技术, 关节旋转液压阀芯上有一对油口一进一出, 阀芯需要的控制力矩较大<sup>[6]</sup>。重庆大学进行了逆滚动螺旋传动机构的机器人旋转关节的研究<sup>[7]</sup>。综上所述, 液压伺服关节有多种控制和结构形式, 其中以液压转角伺服与螺旋传动机构为主, 螺旋传动机构的径向尺寸较小但轴向尺寸较长, 液压转角伺服能让液压关节的径向和轴向尺寸均较小, 目前液压转角伺服也存在阀芯的阻力矩和伺服盲区较大等一些难题<sup>[8]</sup>。

收稿日期: 2010-11-10

基金项目: 国家重点实验室开放基金资助项目 (SKLRS-2010-MS-12); 湖北省自然科学基金资助项目 (2008CDB296)

作者简介: 蒋 林 (1976-), 男, 湖北荆门人, 博士, 讲师, 主要从事移动机器人定位、导航、运动规划、控制、智能算法及液压伺服系统方面的研究. E-mail: jlxhjl@163.com

通信联系人: 金晓宏, 男, 教授, 博士生导师. E-mail: fluidpower@263.net

综合液压机器人研究进展和液压伺服驱动的特点<sup>[9]</sup>,目前在液压机器人关节研究中存在:液压关节尺寸过大;液压系统动力非线性;液压转角伺服阀控制精度有待提高等问题。针对这些问题,本研究研制出了一种阀芯径向力平衡的阀芯阻力小、盲区小的液压转角伺服阀,这种液压转角伺服阀是一种基于转动阀芯结构原理的旋转式伺服阀,它由电动机直接驱动,从原理上克服了传统伺服阀的结构复杂、制造要求高、使用条件苛刻、对油液的污染敏感、故障率较高、制造和使用成本高等缺点,是一种结构简单、流量连续、抗污染能力强、可靠性高、控制灵活、制造和装配方便的直接驱动电液伺服阀,并将该液压转角伺服技术应用到液压机器人的关节模块中。让基于液压转角伺服的液压关节在提供大力矩的同时,减小关节尺寸。

# 1 液压转角伺服阀

## 1.1 液压转角伺服原理

针对目前液压转角伺服存在阀芯的阻力矩和伺服盲区均不理想的情况,本研究提出了一种阀芯径向力平衡的阀芯阻力小、盲区小的液压转角伺服阀。该技术是将液压伺服技术和电机控制结合起来,用小尺寸、小力矩的电机通过液压伺服技术控制大力矩的液压关节,利用液压伺服阀中的转角伺服技术,无需减速机构,减小关节尺寸。在液压转角伺服技术中用舵机产生控制角度,舵机体积小、力矩大,舵机本身就具有转角内反馈控制,控制起来也方便,一定占空比脉宽对应一定的转角。液压转角伺服阀的截面图如图 1 所示。

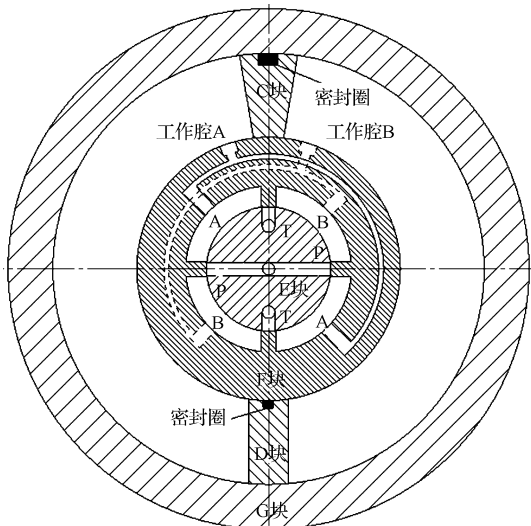


图 1 液压转角伺服阀截面图

G 块—摆动缸缸体;F 块—随动阀套;E 块—伺服阀芯;C 块—叶片;D 块—固定块;其中 C 块和 F 块固连,D 块和 G 块固连。

液压转角伺服阀的伺服过程如下:起初伺服阀芯与随动阀套处于中位,伺服阀芯与随动阀套关闭,油液不能进入摆动缸,摆动缸中的油液被密闭起来,摆动缸自锁。当给舵机发出一转角信号,舵机转过一角度,此时伺服阀芯与随动阀套之间的阀口被打开,压力油液流进摆动缸的 A 腔,另一腔(B 腔)与回油油路相通,A 腔高压油在 C 块上产生顺时针的力矩带动负载转动。随着阀套的转动,其与伺服阀芯之间的开口度逐渐变小,直至关闭,从而实现随动阀套对伺服阀芯的位置跟踪,反之亦然。

## 1.2 液压转角伺服阀特点

本研究提出的液压转角伺服阀由于 P 口和 T 口成对垂直正交分布,因而阀芯径向力平衡。当阀芯相对于阀套左转时,P 口与 B 腔相通,高压油作用在阀套上的力如图 2 所示, $F_1$  与  $F_2$  均指向圆心,大小相等、方向相反。当阀芯相对于阀套右转时,P 口与 A 腔相通,高压油作用在阀套上的力亦指向圆心,大小相等、方向相反。

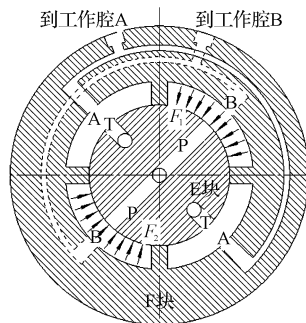


图 2 阀芯受力分析

由于阀芯径向力平衡,阀芯偏心小,阀芯上受到的液压卡紧力就小,因而阀芯运动起来阻力就小。因阀芯径向力平衡,阀芯阀套配合精度高,该阀体中阀芯与台肩零开口,为保证伺服阀在中位可靠截止,每个台肩和阀口对中时,左右各有 0.25 mm 的重叠量,换算成角度重叠量为 0.152°,伺服盲区很小。

# 2 液压关节

本研究研制的基于液压转角伺服的液压关节三维模型图如图 3 所示。

在液压关节的转角伺服阀中,阀套被高压油驱动旋转,需要与阀芯和缸体有良好的配合,同时又需要输出转矩。液压油通过滑环,从缸体进入阀套,然后进入阀芯,由阀芯控制油路方向。在液压关节中油道设计如图 4 所示。

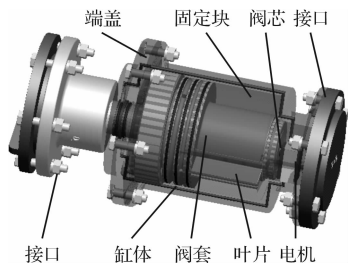


图3 液压关节结构

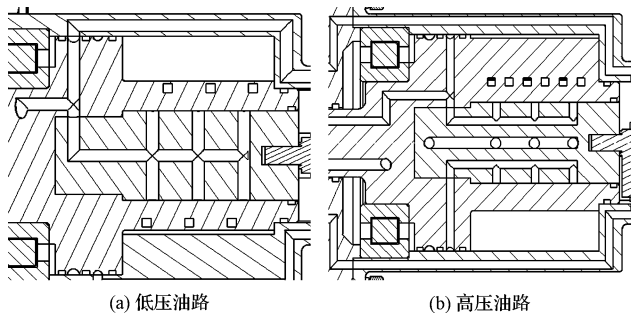


图4 液压关节中油道布置

在液压转角伺服阀中,缸筒内径  $D=0.080\text{ m}$ , 阀套外径  $d=0.050\text{ m}$ , 叶片宽度  $l=0.050\text{ m}$ , 叶片厚度  $b=0.006\text{ m}$ , 容积弹性模数  $E=1.4 \times 10^9\text{ Pa}$ , 液压油的运动粘度为  $\lambda=105 \times 10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$ , 叶片与缸筒间的间距  $\delta=0.05\text{ mm}$ , 液压油的密度  $\rho=868\text{ kg/m}^3$ 。

叶片有效作用面积:

$$A = \frac{(D-d) \times l}{2} = 7.5 \times 10^{-4}\text{ m}^2 \quad (1)$$

转角伺服阀的体积:

$$V_z = \pi \times \left( \left( \frac{D}{2} \right)^2 - \left( \frac{d}{2} \right)^2 \right) \times l - (D-d) \times l \times b = 1.523 \times 10^{-4}\text{ m}^3 \quad (2)$$

液压转角伺服阀旋转刚度为<sup>[10]</sup>:

$$K_z = \frac{EA^2}{V_z} = 5.1707 \times 10^6\text{ N/m} \quad (3)$$

式中: $E$ —容积弹性模数,取  $1.4 \times 10^9\text{ Pa}$ 。

液压转角伺服的粘性阻尼为:

$$C_z = \frac{\pi \times b \times l \times \lambda \times \rho}{\delta} = 171.7948\text{ N} \cdot \text{s/m} \quad (4)$$

液压阀套加接口的总质量  $M_z=2.5\text{ kg}$ 。

### 3 液压关节运动仿真

在模型中可添加一些运动副来模拟液压转角伺服阀的运动情况,如图5所示。在舵机和阀芯间加旋转运动副1,在旋转运动副1中添加运动,运动函数为 AKISPL(time,0,SPLINE\_n,0) \* 1d, SPLINE\_n 为定义舵机旋转角度与时间关系的函数,本研究分别为斜坡

阶跃曲线、抛物线曲线和正弦曲线。阀芯与阀套之间添加一个旋转的弹簧副、阻尼副,令阀口在开启过程中旋转刚度与阀开口量成一定比例关系,水力半径及压力一定,阀口与流量成近线性关系,当阀口开口达到最大时,此弹簧阻尼副的最大旋转刚度为  $K_z$ ,阻尼为  $C_z$ ,预载荷为0,被控制系统为液压伺服阀阀套及接口部分,其质量为  $M_z$ 。阀口有很小的正重叠量,正重叠区域系统形成自锁,阀套相对阀芯也有一定刚度,这通过弹簧阻尼副的旋转刚度定义函数来实现。同时在阀芯与阀套间还添加一个旋转运动副2,并定义摩擦半径为15 mm(阀芯半径)的摩擦副,表示阀芯与阀套间的干摩擦。故添加在阀芯与阀套间的运动副基本模拟了阀芯、阀套间的相互关系。在阀套与缸筒间添加一旋转运动副3,运动副3定义摩擦半径为40 mm(缸筒内半径)的摩擦副,表示阀套叶片与缸筒间的干摩擦。模型中作用于阀芯的力矩很小,不考虑阀芯变形,把阀芯作为刚体,阀套上虽作用力矩较大,但阀套抗扭刚度很大、变形微小,本研究也将其作刚体处理,然后通过转换接口导入到 ADAMS 中,进行仿真。

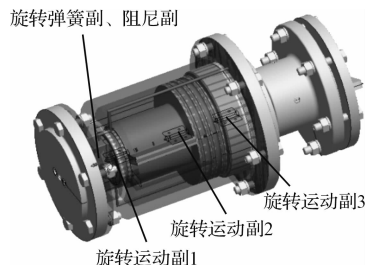


图5 液压关节运动副

仿真中分别让舵机控制阀芯进行斜坡阶跃运动、抛物线运动和正弦曲线运动,随动阀套的跟踪运动情况,即系统在斜坡阶跃、抛物线和正弦输入下的时间响应情况,如图6、图7所示。

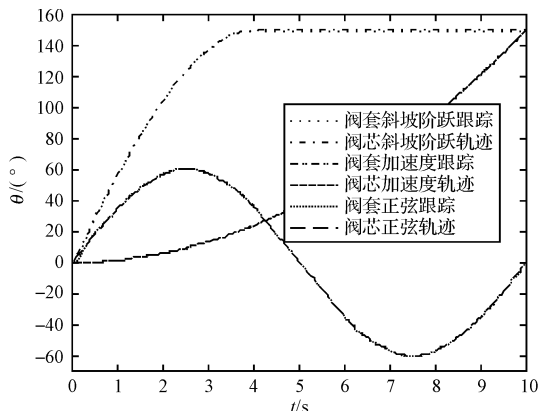


图6 液压伺服阀时间响应

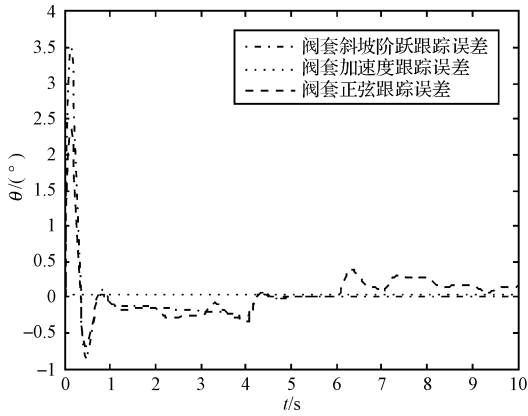


图 7 液压伺服阀时间响应误差

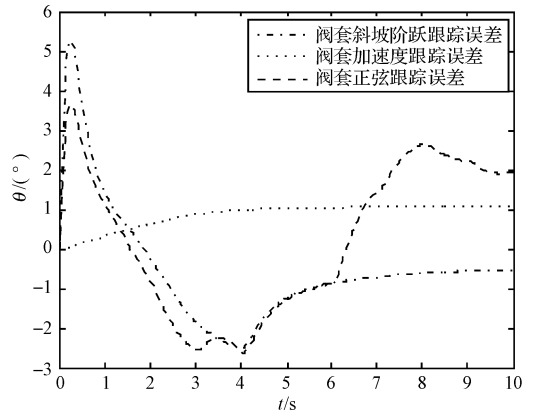


图 10 盲区加大后时间响应误差

由图 6 可见,系统在这 3 种情况下能很快稳定,初始的瞬态误差相对较大,稳态误差很小,基本为零。由图 7 可见,3 种曲线运动跟踪时抛物线跟踪误差最小。系统加上 5 倍于自重的负载,在相同输入下的响应,如图 8、图 9 所示。

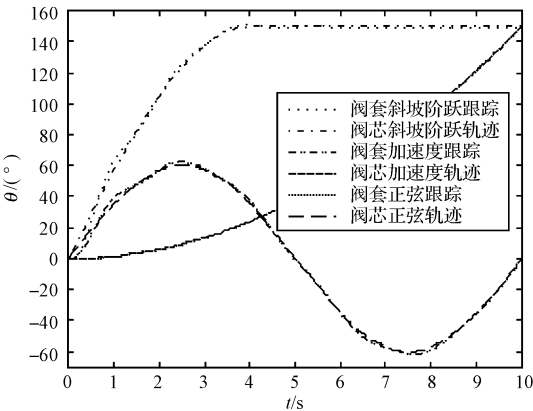


图 8 加负载后时间响应

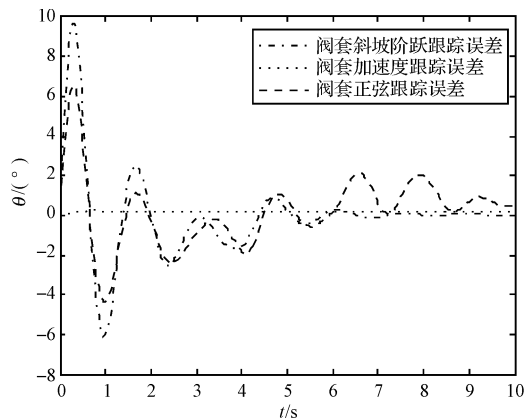


图 9 加负载后时间响应误差

比较图 6 与图 8,以及图 7 与图 9 可见,加负载后其响应整体性能变化不大,但瞬态误差及稳态误差都变大了,然而最终的控制精度仍然很高。

在与图 6、图 7 相同条件下,当转角伺服阀阀口重叠量达 1°时,得到对 3 种运动的跟踪误差如图 10 所示。

比较图 7 与图 10 可见,伺服盲区对液压转角伺服阀运动性能影响较大,伺服盲区变大会使液压转角伺服阀响应速度变慢,稳态误差增加。本研究的小伺服盲区的液压转角伺服阀提高了液压转角伺服阀的运动性能。

为验证该阀的带负载能力,在与图 6 相同的条件下让液压转角伺服阀分别带动 5 倍、10 倍、15 倍及 20 倍于自重的负载,并让阀套跟踪与图 6 相同的斜坡阶跃轨迹,得到的跟踪误差如图 11 所示。

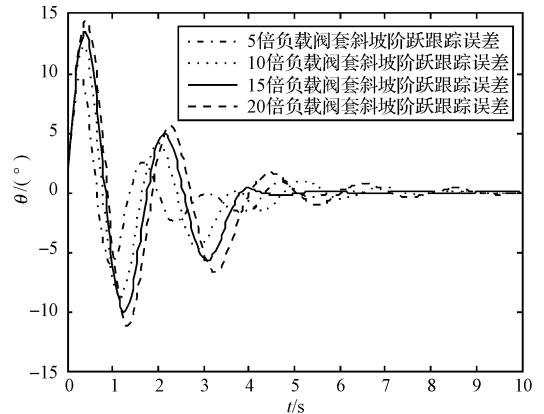


图 11 不同负载斜坡阶跃跟踪误差

由图 11 可见本液压转角伺服阀的带负载能力较强。

为得到系统在频域中的性能,本研究在上述模型中使阀芯输入角度幅值为 60°,频率为 0.1 ~ 1 000 rad/s 的谐波信号,分析随动阀套的稳态响应,得到对应的幅值与相位差,其中一些特征值如表 1 所示,对应的 Bode 图如图 12 所示。

表 1 频率特性的幅值与滞后相位

序号	1	2	3	4	5	6
频率/(rad · s <sup>-1</sup> )	0.628	1.256	6.28	12.56	31.4	34.89
幅值/(°)	60	61.5	80	100	180	129
相位/(°)	0	-2.52	-10.8	-18	-90	-113
序号	7	8	9	10	11	12
频率/(rad · s <sup>-1</sup> )	41.87	52.33	62.8	78.5	314	628
幅值/(°)	75	31.5	18.5	11.5	1.5	1
相位/(°)	-134	-138	-135	-124	-108	-95

提供共享资源,因而在企业中具有较大的推广价值。

## 参考文献(References):

- [1] 魏 铮,牟 林. SolidWorks 2004 冷冲模设计实训教程[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [2] GRABOWSKI H, KUNIE H, LOSSACK R, et al. Interpretation of low-level CAD data for knowledge extraction in early design stages[J]. **Lecture Notes in Computer Science**, 2002(2390):13-24.
- [3] 季 忠,王晓丽,刘 韧. 冲压模具设计自动化—SolidWorks 应用[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [4] 池 勇,辛选荣,葛中新,等. SolidWorks 二次开发研究[J]. 机械,2003,30(3):38-40.
- [5] NAHM Y E, ISHIKAWA H. A new 3D-CAD system for set-based parametric[J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2006, 29(1-2):137-150.

- [6] KIM S, KWEON I S. Automatic model-based 3D object recognition by combining feature matching with tracking[J]. **Machine Vision and Applications**, 2009, 16(5):67-72.
- [7] 徐宏海,华利敏,詹 宁. 基于 VB 和 Solidworks 的调弯阀参数化设计[J]. 机电工程技术,2009,38(4):30-32.
- [8] 黄永宁,姜玲莲,李化杰,等. 基于 Solidworks 的时效炉送料车参数模块化设计[J]. 机电工程技术,2009,38(9):36-38.
- [9] 刘春义,杨胜强. 圆柱压缩弹簧参数化建模[J]. 机械管理开发,2007(8):71-72.
- [10] 王秀凤. SolidWorks 冷冲压模具设计教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2007.
- [11] 张信群. 基于 SolidWorks 配置功能建立和调用冲模标准件库[J]. 模具工业,2009,35(8):6-11.
- [12] TAI Li-gang, LI Dian-qi. Research on integrating customization design for mechanical product[J]. **Frontiers of Mechanical Engineering in China**, 2007, 2(1):89-93.

[编辑:柴福莉]

(上接第 268 页)

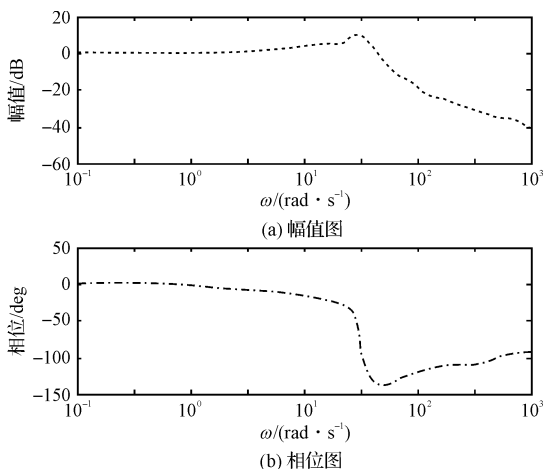


图 12 系统 Bode 图

由对系统的 Bode 图的分析,可得系统的相位裕度大于  $45^\circ$ ,幅值裕度足够大,系统的稳定性能很好<sup>[11]</sup>。

## 4 结束语

本研究设计的基于液压转角伺服液压关节响应频率高,工作平稳性好,控制精度高,带负载能力强,可以在提供大力矩的前提下减小机器人关节尺寸,应用前景广阔。

## 参考文献(References):

- [1] 卢菊仙,李树立,焦宗夏. 一种有限角度旋转式电液伺服阀[J]. 液压气动与密封,2005(4):40-42.

- [2] DUBUSA G, DAVIDA O, NOZAISA F, et al. Assessment of a water hydraulic joint for remote handling operations in the divertor region[J]. **Fusion Engineering and Design**, 2008(83):1845-1849.
- [3] MEASSON Y, DAVID O, LOUVEAU F, et al. Technology and control for hydraulic manipulators[J]. **Fusion Engineering and Design**, 2003(69):129-134.
- [4] NIEMINENA P, ESQUEA S, MUHAMMAD A, et al. Water hydraulic manipulator for fail safe and fault tolerant remote handling operations at ITER[J]. **Fusion Engineering and Design**, 2009(84):1420-1424.
- [5] 朱兴龙,周骥平,周建华. 三自由度液压伺服关节动力学模型简化[J]. 扬州大学学报:自然科学版,2005,8(1):46-49.
- [6] 朱兴龙,周骥平,颜景平. 一种新型的三自由度垂直相交运动解耦液压伺服关节的设计[J]. 中国机械工程,2002,13(21):1824-1826.
- [7] 梁锡昌,王光建,郑小光. 基于螺旋机构的旋转作动器研究[J]. 航空学报,2003,24(3):282-285.
- [8] 朱兴龙,周骥平. 一种液压伺服关节稳定性及其稳态误差分析[J]. 控制工程,2006,13(1):87-90.
- [9] 杨 勇. 液压伺服系统自适应模糊变结构控制[J]. 电子学报,2008,36(1):86-89.
- [10] 田源道. 电液伺服阀技术[M]. 北京:航空工业出版社,2008.
- [11] 吴丽华,高红俐,齐子诚. 基于虚拟仪器的径向柱塞液压泵测试系统[J]. 轻工机械,2009,27(6):59-61.

[编辑:张 翔]