

液压 Stewart 主从系统六维控制策略*

侯敬巍¹ 倪涛¹ 唐新星² 赵丁选¹

(1. 吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130025; 2. 长春工业大学机电工程学院, 长春 130025)

摘要:设计了一种主从手均为液压 Stewart 机构的主从控制系统,用于操作者以遥操作的方式进行复杂曲面的研磨,避免研磨粉尘对现场工作的工人造成呼吸道伤害。针对该机构需具有六维力反馈的工作要求,采用基于工作空间的四通道力觉双向伺服策略,以降低连杆差异和外界干扰力等非线性因素的影响,提高力反馈精度。在此基础上提出了六维的策略切换控制,解决因从端遭遇刚性冲击引起的主手震荡问题。通过柔性及刚性碰撞实验证明了该策略的有效性。

关键词: Stewart 机构 液压控制 主从控制 力反馈 多自由度

中图分类号: TH137.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)08-0334-05

引言

临场感 (Telepresence) 技术是人机交互的核心^[1]。近年来,出于空间技术、远程医疗技术及虚拟现实技术等的需要,力觉临场感技术得到了迅猛的发展^[1-4]。

通常情况下,串联机构为了增加机器人运动的自由度,将不得不增加新的活动关节,这会产生累积误差,而并联机构不仅不会产生累积误差,还可以在较小的空间内提供多个自由度。这种特性使得并联机构成为当前多自由度力觉临场感装置的研究热点。如浙江大学研究的外骨骼机构,东京工业大学的双手力觉反馈虚拟现实接口——SPIDAR G&G^[5-6]等。

Stewart 机构是一种重要的并联机构,该结构的操作手柄可以提供空间 6 自由度全方位的位移控制与力反馈。久富等^[7-8]在 2000 年建立了以液压为动力的 Stewart 型主从力反馈系统,这是已知的最早的通过并联机构手柄控制从手并联机构的主从系统。该系统主手操作器和从手均为 Stewart 机构,以力觉双向伺服的方法控制研磨机器人从手。久富等针对该机构提出了力-位置复合的改进并列型力觉双向伺服算法^[8]。赵丁选等对该系统的从端进行了改进设计,使其能用于大承载机构,并提出了一种从端驱动型控制架构,采用类似于盲人探路的方式

进行主从操作,使其控制系统的特性更接近于主从操作的特征^[9-11],从而提高其动力学特性。

上述研究主要以基于连杆的力反馈特性进行研究,以主手连杆的力与信号对从手的连杆进行控制。本文将针对该系统基于平台工作空间的六维力反馈特性进行控制策略研究。

1 力反馈主从控制系统

图 1 所示的为吉林大学工程机器人实验室开发的液压 Stewart 力反馈主从控制系统。图 1a 为主从遥操作力反馈控制系统,图 1b 为液压 Stewart 力反馈操纵杆。

液压 Stewart 力反馈主从控制系统由操作者、主手、通信环节、从手和外界环境等部分构成。该系统主要有如下特点:①采用置于液压缸上的位移传感器采集位移信息,采用置于连杆顶端的直线力传感器进行力信号采集。②其驱动装置为直线液压缸,由于液压系统高刚性的特点,不能像用电机驱动的手柄那样以手直接推动,而是通过其中的力传感器采集力信号来驱动液压缸运动。③主从手均为液压 Stewart 机构。

2 控制策略

2.1 主从控制策略

针对本系统的机构特点,提出了如图 2 所示的

收稿日期: 2013-09-17 修回日期: 2013-11-14

* 国家自然科学基金资助项目(51305153)、吉林省重点科技攻关项目(20130206034GX)和吉林大学基本科研业务费专项资金资助项目(450060481048、450060481333)

作者简介: 侯敬巍,讲师,主要从事动力学与控制研究,E-mail: houjw@jlu.edu.cn

通讯作者: 倪涛,副教授,主要从事动力学与控制研究,E-mail: nitao@jlu.edu.cn

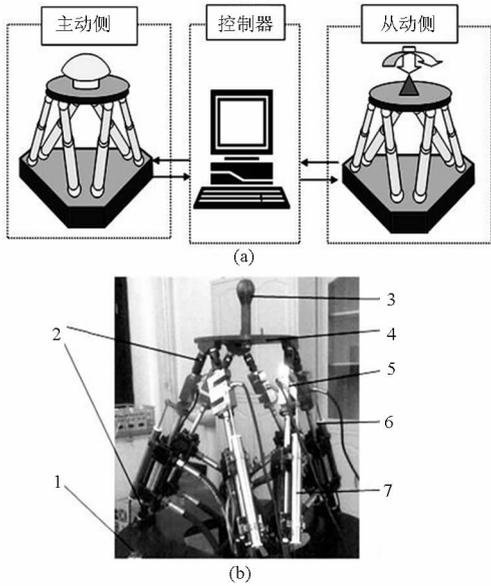


图 1 液压 Stewart 主从系统

Fig. 1 Hydraulic Stewart master-slave system

1. 固定平台 2. 万向节 3. 手柄 4. 运动平台 5. 力传感器
6. 液压缸 7. 位移传感器

控制策略。该策略主要包含两部分: ① 针对液压 Stewart 主从控制系统的机械结构特点和液压动力机构特点设计的四通道主从控制策略, 这种策略可以保证在本系统中使用直线力传感器也能实现有效的力反馈任务。② 六维策略切换算法, 保证在沿空间六维方向遭遇刚性碰撞时, 主手不会产生令操作者难以忍受的冲击。

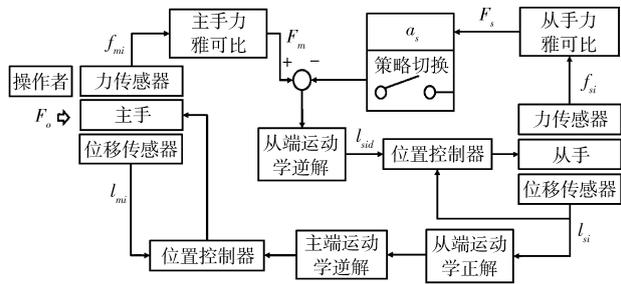


图 2 新型控制策略

Fig. 2 New control algorithm

2.2 基于工作空间的四通道主从控制策略

图 3a 所示的基于工作空间的四通道控制算法可实现完整的主从力反馈控制, 包含 3 个环节: ① 操作者力与从手力的比较环节, 以从手力传感器采集的驱动力经力雅可比矩阵变换后得到从手运动平台受力, 该力乘以一定比例后与操作者作用于主手上平台的力相减, 用其差值作为控制信号去控制从手的运动^[12-13]。② 从手驱动环节, 将主从手力比较的结果用运动学逆解化为从手连杆的期望位移, 通过包含位置反馈的 PD 控制器驱动从手运动。③ 主手对从手的运动跟随环节, 将从手连杆位移传递至主

手, 通过 PD 控制器实现主手对从手的跟随运动。其反馈力和控制策略如下:

主手反馈力为

$$F_o = F_m = K_s F_s \quad (1)$$

其中

$$F_s = J_s f_{si} \quad (2)$$

式中 F_o ——操作者感受到的反馈力

F_m ——主手上平台受力

F_s ——从手上平台受力

K_s ——增益矩阵

J_s ——从手的力雅可比矩阵

f_{si} ——从力传感器检测到的液压缸顶端受力

从端液压缸的期望位移 l_{sid} 由主手和从手力偏差乘以运动学逆解矩阵得到

$$l_{sid} = N_s (F_m - K_s F_s) \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (3)$$

式中 N_s ——从端平台的运动学逆解矩阵

l_{sid} ——从端液压缸的期望位移

液压缸使用 PD 控制器进行运动跟随控制。从端对期望位移 l_{sid} 进行跟随, 其控制输入为

$$u_{si} = K_{sp} (l_{sid} - l_{si}) + K_{sd} (\dot{l}_{sid} - \dot{l}_{si}) \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (4)$$

式中 u_{si} ——从手液压缸的控制输入

l_{si} ——从手液压缸位移

K_{sp} 、 K_{sd} ——从手控制器的比例和微分系数

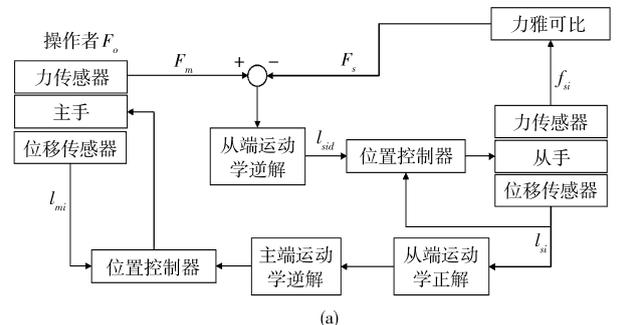
主端对从端位移进行跟随, 其控制输入为

$$u_{mi} = K_{mp} (l_{si} - l_{mi}) + K_{md} (\dot{l}_{si} - \dot{l}_{mi}) \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (5)$$

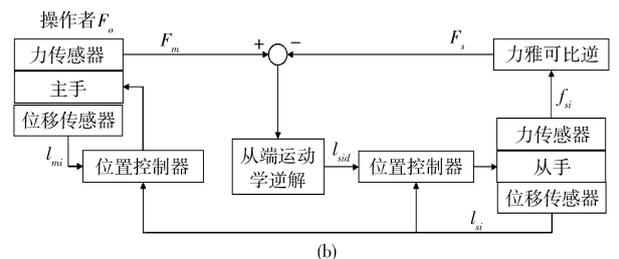
式中 u_{mi} ——主手液压缸的控制输入

l_{mi} ——主手液压缸位移

K_{mp} 、 K_{md} ——主手控制器的比例和微分系数



(a)



(b)

图 3 四通道控制策略

Fig. 3 4-channel control algorithm

通过与图 3b 的基于连杆的四通道策略对比,可以知道:本文的力反馈算法通过力雅可比和运动学逆解^[14-16],将力反馈方法转换为通过操作者施加在主手上的力对从手运动平台受力进行控制。这种方法有助于消除液压缸的个体差异和并联机构耦合力等非线性因素的影响,提高力反馈的精度。

2.3 策略切换算法

由前述可知,本系统以作用在主手和从手上平台的力信号的偏差作为位置控制的输入,因此当从手遇到刚性接触时,由于力的突变,使主手会产生较大的反向位移,通常操作者遇到这种情况时会下意识地增大推力,使主手向前运动与物体接触,这种反复的作用便产生了操作者难以忍受的振荡。文献[17]提出的通过策略切换的方法是解决该问题的有效途径,但其主要是针对一维的串联机构而设计。

针对上述问题,本文在基于工作空间的四通道控制策略基础上引入了策略切换算法。其主要原理是:设计一个切换增益用以检测刚性接触,在空载和遇到柔性负载时使用图 3a 所示的四通道控制策略,为操作者提供有效的力反馈。在检测到刚性接触时,切换为图 4 所示的三通道策略,消除突变力对位置控制环节的影响。

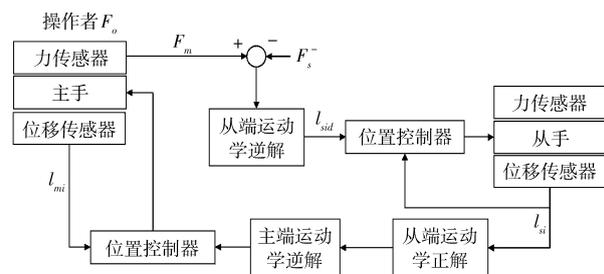


图 4 三通道策略

Fig. 4 3-channel control algorithm

与四通道环节相比,其最大特点是从手的力不再反馈给主手,而是用一个估计值 F_s^- 代替。此时,反馈力为

$$F_o = F_m = F_s^- \quad (6)$$

运动平台的期望位移为

$$l_{sid} = N_s (F_m - K_s F_s^-) \quad (7)$$

主从端控制输入与式(4)、(5)相同。

由式(6)、(7)可知,当切换开关判断刚性接触发生时,切换为三通道策略,此时从手力被设为碰撞发生前的数值而不随传感器检测到的数值变化,从而避免了因从手力突然增大而产生的位置突变,产生操作者难以忍受的振荡。此时,操作者将因液压机构的大刚性而感到难以向前推动主手,感受到与刚性接触类似的力反馈。同时,由于操作者施加的

输入依然存在,因此操作者还可控制从手运动,保证了工作的顺利进行。

2.4 六维切换增益设计

切换增益的作用是通过检测从手是否发生力的突变来判断是否发生刚性接触。对于单自由度的系统,只要通过检测从端的力或加速度即可判定是否发生碰撞^[18-19]。但是对于本文的系统,从端有 3 个平移及 3 个转动等 6 个方向的自由度,如果不能检测出具体方向,则会影响其他几个自由度的反馈力的判断。为此本文通过判断执行末端加速度的方法来判断力的方向。

在图 5 所示的加速度计算示意图中, P 点为执行末端与外力接触点, O_b 点为上平台中心点,将该点设为参考坐标系原点, O_r 为绝对坐标系原点。通过运动学正解可以求出点 O_b 的加速度 $\ddot{\mathbf{r}}$ 与角加速度 $\dot{\boldsymbol{\omega}}$,则可以求出 P 点的加速度为^[20]

$$\ddot{\mathbf{r}}_p = \ddot{\mathbf{r}} + \boldsymbol{\rho}_p'' + \dot{\boldsymbol{\omega}} \boldsymbol{\rho}_p + 2\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\rho}_p' + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\rho}_p) \quad (8)$$

式中 $\ddot{\mathbf{r}}_p$ ——点 P 相对 O_r 的加速度

$\boldsymbol{\rho}_p''$ ——点 P 相对 O_b 的相对加速度

$\ddot{\mathbf{r}}$ ——点 P 因 O_b 平移引起的点 P 平移牵连加速度

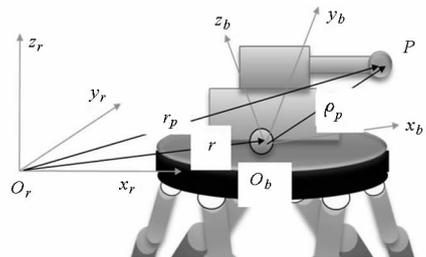


图 5 加速度计算示意图

Fig. 5 Acceleration calculating sketch map

由多体动力学的特性可知, $\dot{\boldsymbol{\omega}} \times \boldsymbol{\rho}_p$ 与 $\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\rho}_p)$ 为因 O_b 旋转引起的点 P 切向与向心牵连加速度。 $2\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\rho}_p'$ 为点 P 的科氏加速度。

最后,将 6 维切换开关 K 设为

$$K = \begin{cases} 0 & (|a_{si}| > K_{0i}) \\ 1 & (|a_{si}| \leq K_{0i}) \end{cases} \quad (9)$$

式中 a_{si} ——切换增益, $i=1,2,\dots,6$

K_{0i} ——6 维的阈值向量, $i=1,2,\dots,6$

$$\mathbf{a}_s = [F_x \ddot{r}_x \quad F_y \ddot{r}_y \quad F_z \ddot{r}_z \quad T_x \dot{\omega}_x \quad T_y \dot{\omega}_y \quad T_z \dot{\omega}_z]^T$$

式中 $F_x, F_y, F_z, T_x, T_y, T_z$ —— A 点的 6 个方向的力
 $\ddot{r}_x, \ddot{r}_y, \ddot{r}_z, \dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$ —— A 点的 6 个方向的加速度

3 实验与结果分析

为了验证策略切换策略的正确性,使用以一对

力反馈手柄为实验工具,进行实验。如图 6 所示,在使用单纯的四通道策略与策略切换策略两种控制策略下,操作者控制主手手柄,驱动从手手柄分别与柔性物体弹簧和刚性物体硬木进行接触实验。

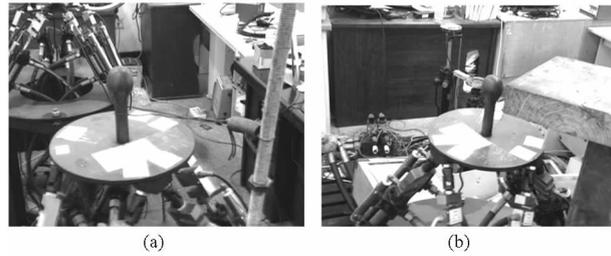


图 6 实验系统

Fig. 6 Experiment system

用四通道策略的力和位移的结果。其中, P_m 、 P_s 为主从手 xy 坐标的矢量和。 F_m 、 F_s 为主从手 xy 方向力的矢量和。由图可知在大约第 2 秒时发生碰撞,在第 2 秒之前,反馈力很小,在此之后,反馈力随着位移的增大而呈线性的增大,液压缸各缸的力也明显增大。操作者会从反馈力中感受到发生了弹性接触。主手能对从端进行很好的位置跟随,且主手力很好地反映了从端工作情况的变化,说明本文的策略能够实现多个方向的力反馈。图 7b 为使用策略切换方法的实验结果,由图可知,在本实验使用的弹簧的刚度下,未能触发策略切换,因而控制策略与四通道策略相同,所以其力与位移特性与四通道策略十分相似。

柔性碰撞的实验结果如图 7 所示。图 7a 为使

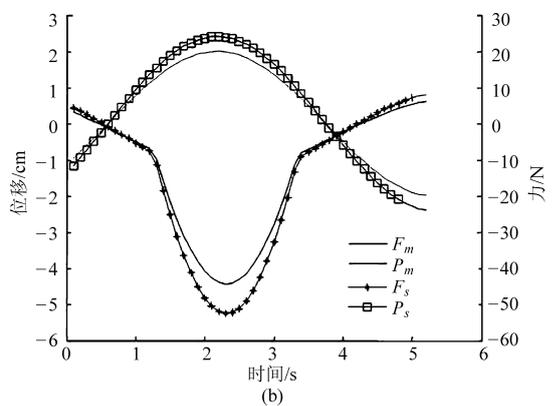
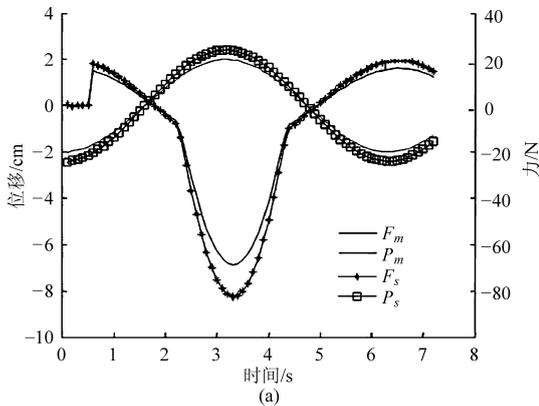


图 7 柔性碰撞实验结果

Fig. 7 Experiment result of soft collision

(a) 四通道策略 (b) 策略切换

图 8 为刚性碰撞实验结果。图 8a 为四通道控制策略的实验结果,图 8b 为策略切换策略的实验结果。在大约接近第 4 秒时发生碰撞。由结果可知,在发生碰撞后,由于产生位置突变,导致使用四通道算法的操纵杆产生了操作者难以忍受的震荡。而采用策略切换控制的方法避免了突变的位置传递,操作者会感受到刚性的碰撞,反馈力迅速增大,但不会

产生震荡。实验证实了六维策略切换算法在避免刚性冲击方面的效果。

4 结束语

针对液压 Stewart 力反馈系统 6 维特性设计的新型控制策略,以基于工作空间的力反馈策略使并联机构的结构特点、力传感器布局特点及电液伺服

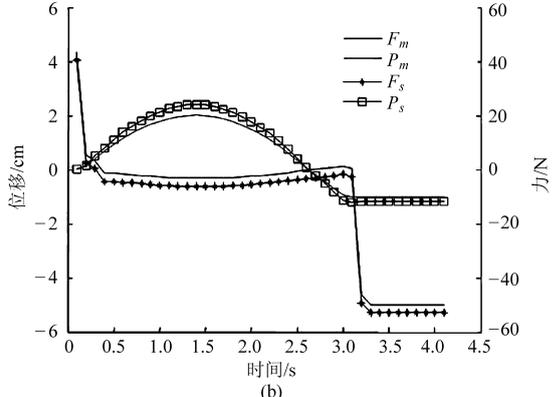
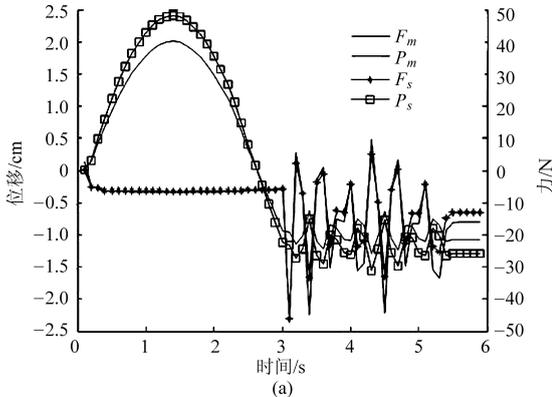


图 8 刚性碰撞实验结果

Fig. 8 Experiment result of rigidity collision

(a) 四通道策略 (b) 策略切换

系统的力学特性获得了有效的结合,提高了力反馈的精度;以此为基础设计的6维策略切换控制策略可以解决在遇到刚性接触时的冲击问题。实验结果

证明该策略可使系统在6维空间进行刚性与柔性的碰撞时均能获得良好的力反馈效果。

参 考 文 献

- 1 宋爱国. 力觉临场感遥操作机器人(1): 技术与现状[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2013, 5(1): 1-19.
Song Aiguo. Force telepresence telerobot(1): review of the history and development[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology: Natural Science Edition, 2013, 5(1): 1-19. (in Chinese)
- 2 Li H J, Song A G. Virtual-environment modeling and correction for force-reflecting teleoperation with time delay[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(2): 1227-1233.
- 3 Song A G, Pan L Z, Xu G Z, et al. Impedance identification and adaptive control of rehabilitation robot for upper limb passive training[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering, Foundations and Applications of Intelligent Systems, 2012, 213: 691-710.
- 4 Hayward V, Maclean K E. Do it yourself haptics: part1[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2007, 14(4): 88-104.
- 5 张佳帆. 基于柔性外骨骼人机智能系统基础理论及应用技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
Zhang Jiafan. Exoskeleton based man machine intelligent system and its application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. (in Chinese)
- 6 Jun Murayama, Laroussi Bougrila, Yanlinluo Katsuhito Akahane, et al. SPIDAR G&G: a two-handed haptic interface for bimanual VR interaction[C]//Proceedings of Euro Haptics 2004, 2004: 138-146.
- 7 久富茂樹, 光井輝彰, 飯田佳弘, 等. 並列リンク型力覚ディスプレイの研究[R]. 岐阜県生産情報技術研究所研究報告, 1999.
- 8 Kudomi S, Yamada H, Muto T. Development of a hydraulic parallel-link-type force display[J]. International Journal of Robotics and Automation, 2004, 19(1): 1-5.
- 9 张祝新, 赵丁选, 陈铁华. 具有力觉临场感的主从机器人双向控制策略[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 164-167.
Zhang Zhuxin, Zhao Dingxuan, Chen Tiejia. Bilateral control strategy of master-slave manipulators with force tele-presence[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 164-167. (in Chinese)
- 10 朱小晶, 权龙, 王新中, 等. 大型矿用正铲液压挖掘机水平推压特性联合仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 30-34.
Zhu Xiaojing, Quan Long, Wang Xinzhong, et al. Co-simulation of flat-pushing characteristics of large mining face-shovel hydraulic excavator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 30-34. (in Chinese)
- 11 严骏, 黎波, 郭刚, 等. 液压挖掘机臂二自由度动力学参数辨识[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 17-21.
Yan Jun, Li Bo, Guo Gang, et al. 2-DOF dynamic parameters identification for hydraulic excavator arm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 17-21. (in Chinese)
- 12 侯敬巍, 赵丁选, 倪涛. 液压二自由度力反馈操纵杆设计[J]. 工程设计学报, 2008, 15(2): 90-93.
Hou Jingwei, Zhao Dingxuan, Ni Tao. Design of hydraulic two-DOF force feedback joystick[J]. Journal of Engineering Design, 2008, 15(2): 90-93. (in Chinese)
- 13 李强, 王宣银, 程佳. 基于逆动力学模型的 Stewart 平台干扰力补偿[J]. 机械工程学报, 2009, 45(1): 14-19.
Li Qiang, Wang Xuanyin, Cheng Jia. Interference force compensation of Stewart platform based on inverse dynamic model[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(1): 14-19. (in Chinese)
- 14 朱小晶, 权龙, 王新中, 等. 大型液压挖掘机工作特性联合仿真研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 27-32.
Zhu Xiaojing, Quan Long, Wang Xinzhong, et al. Co-simulation analysis of working characteristic for large hydraulic excavator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 27-32. (in Chinese)
- 15 冯斌, 龚国芳, 杨华勇. 液压油弹性模量提高方法与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 219-222.
Feng Bin, Gong Guofang, Yang Huayong. Method and experiment for increasing effective fluid bulk modulus in hydraulic systems[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 219-222. (in Chinese)
- 16 赵延治. 大量程柔性铰并联六维力传感器基础理论与系统研制[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2009.
Zhao Yanzhi. Basic theoretics and system development on wide range parallel six-component force sensor with flexible joints[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2009. (in Chinese)
- 17 侯敬巍, 赵丁选, 巩明德, 等. 液压力觉双向伺服系统的策略切换控制[J]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 190-193.
Hou Jingwei, Zhao Dingxuan, Gong Mingde, et al. Strategy-switching control for hydraulic force bilateral servo system when catching objects[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 190-193. (in Chinese)
- 18 方一鸣, 邓菲, 石胜利, 等. 非对称液压缸位置伺服系统鲁棒控制[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 272-276, 271.
Fang Yiming, Deng Fei, Shi Shengli, et al. Robust control for position servo system of asymmetric hydraulic cylinder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 272-276, 271. (in Chinese)
- 19 沈楚敬, 苑士华, 魏超, 等. 液压压紧式牵引传动装置动力学研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 15-18.
Shen Chujing, Yuan Shihua, Wei Chao, et al. Dynamics research of hydraulic clamp traction transmission device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 15-18. (in Chinese)
- 20 洪嘉振. 计算多体系统动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.

- Li Bin, Ding Fan, Li Yong. Research on new-type high pressure bi-directional elliptical gear flowmeter[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(1): 220 - 223. (in Chinese)
- 17 何君, 门金来, 陈杰. 容积式流量计性能及应用[J]. 机械设计与研究, 2012, 28(3): 119 - 121.
- 18 何存兴. 液压元件[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- 19 张利平. 液压泵及液压马达原理、使用与维护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- 20 Choi T H. Design of rotor for internal gear pump using cycloid and circular-arc curves[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2012, 134(1): 011005 - 1 - 12.

Design and Experiment of High-pressure Bi-directional Cycloid Rotor Flowmeter

Liu Shuo Ding Fan Ding Chuan Man Zaipeng

(State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The measurement of the flow rate of various liquids and gases is critical in industrial automation. Positive displacement flowmeters (PDFs) are highly accurate flowmeters that are relatively insensitive to the upstream velocity distribution and fluid viscosity. This paper presents a high-pressure PDF containing a pair of internal cycloid rotors, with the advantages of large displacement, compact structure, high accuracy and small pressure loss. Flow coefficient curve of the prototype fabricated as the part of this research is given, and the reasons influencing the accuracy of the PDF are analysed deeply. In order to further improve the accuracy, the flow coefficient is corrected by linear function. Several experiments were performed to confirm the measurements over a flow range of 1 ~ 100 L/min with relative errors of less than 0.3%.

Key words: Positive displacement flowmeter Cycloid rotor Flow coefficient Accuracy

(上接第 338 页)

6-dimension Control Strategy for Hydraulic Stewart Master-slave System

Hou Jingwei¹ Ni Tao¹ Tang Xinxing² Zhao Dingxuan¹

(1. College of Machinery Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

2. College of Mechanical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130025, China)

Abstract: A master-slave system with hydraulic actuated Stewart mechanism in both master and slave sites is built. The system can be used for curved surface grinding work, where the grinding dust may do great harm to the operator. Aiming at the 6-DOF work condition of the system, a new workspace-based four channel bilateral servo control algorithm is designed. The new algorithm may decrease the nonlinear disturbance such as the difference of the cylinders and environment force, thus improve the accuracy of the feedback force. Based on this result, a multi-DOF strategy switch algorithm is proposed. By using different control strategy under the rigid impact time and soft impact, the vibrate problem on the master side during rigid impact on the slave side is solved. An experiment including soft and rigid collisions is implemented to validate the efficiency of the new algorithm.

Key words: Master-slave control Hydraulic control Stewart manipulator Force feedback Multi-DOF