

DOI: 10.7652/xjtuxb201701016

# 一种转动容器中磁流体液表面形貌测量方法

张西宁, 张海星, 吴婷婷

(西安交通大学机械制造系统国家重点实验室, 710049, 西安)

**摘要:** 针对旋转容器中磁流体液表面形貌测量,提出了一种基于线型激光同步斩波调制投影的多步测量方法。采用与容器同步转动窗口斩波调制的线型激光投影方法获得了稳定的磁流体表面投影线,同时采用长时间多圈测量的平均和亮度增强效应,获得了高亮度和对比度的磁流体表面投影线;采用高透光率的亚克力盖板,实现了磁流体密封与高透光测量的双重功能,研究并给出了考虑亚克力板折射率对测量结果影响的磁流体高度测量公式;构建了磁流体形貌测试实验台,并开展了不同转速、不同磁场强度下磁流体的形貌测量验证实验,通过多组实验测量提高精确度,并与理论分析进行磁流体变化规律对比验证。通过这种实验方法可测量在旋转运动中的磁流体表面形貌,真实反映磁流体受到磁场、离心力作用下的运动状态。

**关键词:** 磁流体;表面形貌;激光投影测量

**中图分类号:** TH741 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)01-0103-06

## Surface Topography Measurement of Magnetic Fluid in Revolving Containers

ZHANG Xining, ZHANG Haixing, WU Tingting

(State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Aiming at the measurement of surface topography of magnetic fluid contained in revolving containers, a multi-step measurement method based on the synchronous chopper modulated linear laser projection was proposed. According to the principle of linear laser projection measurement, synchronous revolving window chopper modulated laser is introduced to obtain the steady projection light curve on the surface of magnetic fluid. In the meantime, taking the advantages of multi-revolving averaging and lightness enhancing effect of long exposure time, the projection light curve pictures with high brightness and contrast were obtained. A high transparency acrylic plate was adopted to guarantee good sealing performance and light transmission quality in the experiments. The height formula of magnetic fluid surface was deduced, in which the influence of refractive index of the acrylic plate on the measurement results was taken into account. Experiments were carried out under different revolving speeds and magnetic field intensities to verify the accuracy of the proposed method. The method can measure the surface topography of magnetic fluid in revolving containers, and truly reflect the motion state of the magnetic fluid under magnetic and centrifugal forces.

**Keywords:** magnetic fluid; surface topography; laser projection measurement method

收稿日期: 2016-06-06。 作者简介: 张西宁(1965—),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275379);国家自然科学基金创新研究群体资助项目(51421004)。

网络出版时间: 2016-10-20

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20161020.1044.008.html>

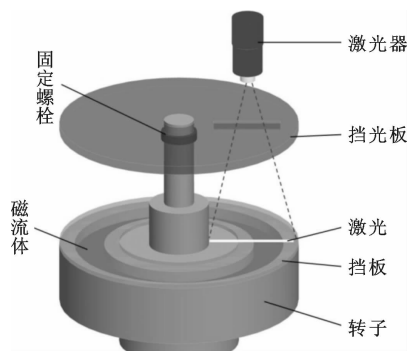
磁流体是由磁性颗粒分散在溶剂中形成的悬浮状智能型液体,在减振等方面得到广泛应用<sup>[1-4]</sup>。利用磁流体流变后质量分布的变化,可实现转动部件的平衡校正<sup>[5]</sup>。磁流体动平衡需要实验研究封闭在旋转容器中磁流体的分布表面形貌,进而验证理论分析的正确性。在转子旋转过程中,转子的转速较高,磁流体表面不能被触及,不能采用接触式测量和一般静止形貌测量方法。同时,受到转子外磁场、离心力及重力的混合作用,磁流体在运动转子中呈现不规则形状,超声波或声波等检测方法中声波会发生漫反射不能被传感器接收,给磁流体表面形貌的测量设计带来很大难度。现有的三维形貌表面测量方法有基于光栅投影的测量方法、立体投影法等,光栅投影方法需要利用栅线的相位改变来获得三维信息,立体投影法则需要从不同角度同时摄取被测物得到的二维图片进行三维重构。由于旋转机械转速很高,从不同角度同步获得旋转中磁流体的二维图片或者利用改变相位进行光栅投影的方法不具有可行性<sup>[6-9]</sup>。针对随容器转动的磁流体表面形貌难以测量的问题,本文提出了一种基于线型激光同步斩波调制投影的多步测量方法,解决了转动容器中磁流体表面形貌的测量问题。实验测试结果表明该方法可有效实现磁流体表面形貌的测量。

## 1 形貌多步测量原理

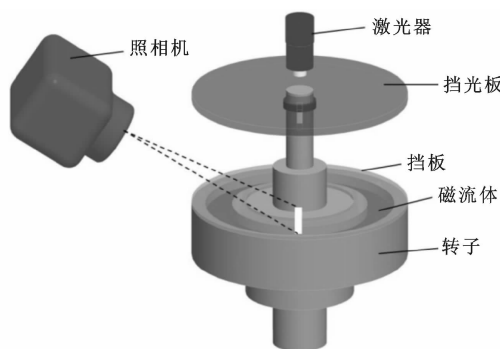
当磁流体随容器旋转时,其表面的投影线时刻在变化,难以测量到清晰的激光投影线。为了在转动过程中测到清晰的激光投影线,测量角度采用同步窗斩波投影方法,在与容器同步转动的圆形遮光板斩波器上沿径向开设斩波窗口。为了保证不同半径处激光投影线亮度的均匀性,投影窗采用扇形窗口。当遮光板随容器转动只有当投影窗口运动到与固定激光器激光重合的角度时,才有线型激光投影到磁流体的表面,容器每圈转动到激光器所在的角度都能得到相同的激光投影线。同步斩波投影消除了与测量角度无关的投影光干扰,得到了与容器测量角度对应的稳定激光投影线。

为了有效捕捉瞬间显现的投影线,利用多圈长时间测量的平均效应和亮度增强效应来提高投影光线的亮度和对比度,长时间测量结果相当于对每转的激光投影线进行了叠加和平均,旋转状态下磁流体表面形貌测量原理如图1所示。激光投影采用自顶向下垂直投影,沿与投影激光线垂直、45°向下倾斜的方向测量。实验中拍摄相机的位置固定,由相

机来获取当前角度下磁流体表面投影线反射的光线。完成某一角度处投影线测量后,将遮光板的投影窗口调整到容器上新测量角度的刻线处继续测量。



(a) 磁流体表面形貌测量激光投影图



(b) 磁流体表面形貌测量照相机拍摄图

图1 测量磁流体表面形貌的实验装置简图

在容器上表面添加了高透光率的亚克力有机玻璃板,满足密封、透光的双重功能。亚克力板对反射出的投影光线有折射作用,折射改变了投影光的传播路径,因此需要对测量的投影线进行修正,投影光线光路如图2所示。

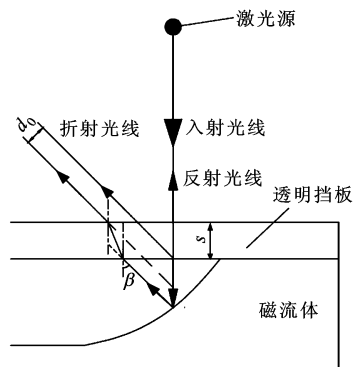


图2 折射对投影光线光路的影响

根据几何光学理论,经推导得到真实高度与测量高度之间的关系式

$$d = s - \frac{\tan[\sin^{-1}(\sin\beta/\alpha)]}{\tan\beta} + \frac{d_0}{\sin\beta} \quad (1)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left( \frac{L_1}{L_2} \right) \quad (2)$$

式中:  $d$  为实际高度;  $d_0$  为沿测量方向上的拍摄高度;  $\beta$  为计算得到的拍摄角度;  $\alpha$  为亚克力板的折射率, 取 1.49;  $s$  为亚克力板厚度;  $L_1$  为处理后图像平衡头短边长度;  $L_2$  为处理后图像平衡头长边长度。

## 2 验证测量实验

为了通过实验验证本文方法的性能, 设计并构建了磁流体表面形貌测量实验台, 实验台由线型激光光源、带有透光窗的遮光盘、磁流体容器、亚克力圆盖板、连接件、拍摄相机、工作转台, 变频器和电源等组成。实验中采用线型激光投影照射, 线型激光光源可直观投影所测角度的磁流体凸起线条, 预先在容器盘内注入一定体积的磁流体, 采用在容器外侧黏贴永磁体的方式提供局部磁场, 并使该处磁流体表面形貌发生变化而产生凸起, 拍摄相机与激光头的位置、角度固定。磁流体容腔的内半径为 20 mm, 外半径为 30 mm, 深度为 8 mm, 线性激光器的输出波长为 650 nm, 采用长度为 20 mm 的扇形斩波窗口, 相机光圈大小为 8, 曝光时间为 25 s, 感光度为 100。激光器高于斩波窗口 100 mm 位置放置, 挡光板位置高于测量转子平面 100 mm。

实验分别采用不同转速、不同磁场强度下测量容器不同角度处的投影线, 磁流体型号选用 200 Gs、500 cP, 容器转速分为 0、300、600、900、1 200、1 500 和 1 800 r/min 等 7 种情况, 频率为 0 时机械转子处于静止状态, 可描述静止状态下磁流体表面形貌在加入磁场之后的变化。局部磁场强度分为 0、30、60、90 和 110 mT 等 5 种情况, 测量角度按照间隔  $3^\circ$  进行实验, 实验过程中采用控制变量法分别对每一个转动频率、磁场强度和角度进行测量。

磁流体在旋转过程中会受到磁力、重力、离心力和表面作用力等综合作用, 大部分情况下磁流体的充液量适量, 转速较高时的液面分布如图 3 所示。磁流体表面拟合曲线顶点与腔体底部间距、磁流体在旋转运动中的顶部半径和底部半径为

$$h = \frac{(1-\alpha)\omega^2 r_2^2}{2g} - \frac{H}{2} + \alpha \frac{\omega^2 r_1^2}{2g} \quad (3)$$

$$r_0 = \frac{(2g(h+H))^{1/2}}{\omega} \quad (4)$$

$$r_i = \frac{(2gh)^{1/2}}{\omega} \quad (5)$$

式中:  $H$  为磁流体腔体高度;  $r_1$  为磁流体容腔外半径;  $r_2$  为磁流体容腔内半径。

磁场强度为 90 mT、转速为 900 r/min、容器  $0^\circ$  处及磁场强度为 90 mT、转速为 300 r/min、容器  $0^\circ$  处的测量结果如图 4、5 所示。对比图 4、5 所示结果, 图 4 中磁流体底部半径小于图 5 的结果, 与理论计算结果一致。

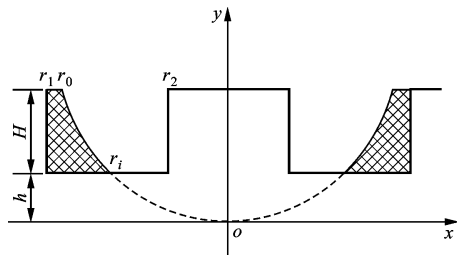


图 3 磁流体在充液量适量、转速较高时的液面分布

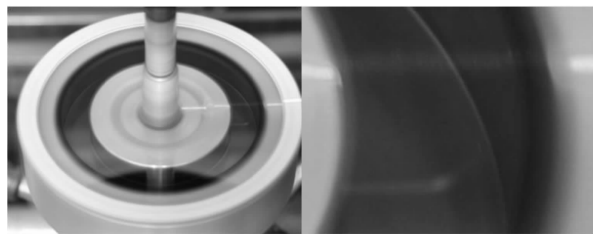


图 4 转速为 900 r/min、磁场强度为 90 mT、容器  $0^\circ$  的测量结果

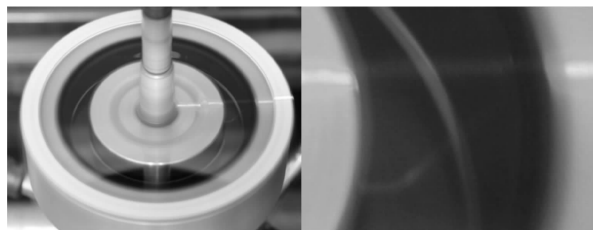


图 5 转速为 300 r/min、磁场强度为 90 mT、容器  $0^\circ$  的测量结果

## 3 实验数据处理

实验图像处理时采用 Photoshop CS6 和 Matlab 图像处理软件, 图像处理系统流程图如图 6 所示。为减小需要处理数据的大小, 将实验结果中拍摄得到的图像进行裁剪, 调整饱和度并将图像中的激光信息智能提取得到激光光路图轮廓, 进而得到 Matlab 处理的初始图像。

由于图像在拍摄过程中存在拍摄角度问题, 在 Matlab 中首先要进行水平处理, 并计算照相机拍摄的倾斜角度和照片与实际平衡头的比例, 从而可将处理得到的激光光图转化为现实条件下的磁流体液面高度。

分析图像信息的方法采用极大值检测法, 提取

图像上每列像素点最大值处的位置坐标,最后得到由各列最大点位置坐标组成的曲线。极大值算法程序的处理过程是对图片沿行进行纵向扫描,扫描单位是一个像素,在每次扫描的过程中会得到一个或者多个点并记录,将记录得到的点在同一张图像上绘制出来,并进行光滑处理。由于需要得到实际情况下的磁流体液面高度,需要将图片中的磁流体液面高度进行转化,首先需要计算转化基准,根据转化基准与转化比例求得真实高度,并求得磁流体表面曲线,将磁流体表面曲线进行插值处理,方便与其他曲线进行合并分析。实验中将各个角度的磁流体表面形貌分别测量出来并形成二维图像,将所有角度的结果按照角度分布整合为三维,得到所要求的磁流体表面形貌。

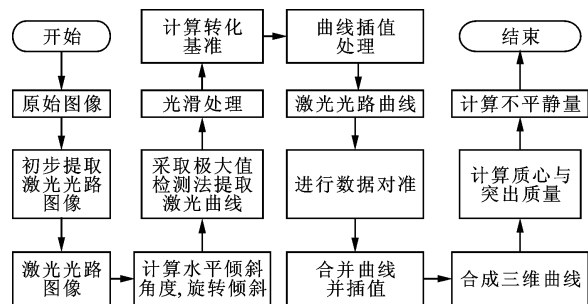


图6 测试图像处理的系统流程图

## 4 实验结果分析

按照图像处理方法,将每种实验条件下的结果都分别进行图像处理。在测量过程中,控制条件相同对每种情况进行多次拍摄,并将拍摄结果进行分析计算,通过计算二维图像得到的磁流体凸出面积来表示测量结果,计算得到精密度约为2%。

图7给出了转速为900 r/min、磁场强度为90 mT、角度为0°条件下的投影线,并将该条件下所有角度的投影线叠合成为三维表面形貌,如图8所示。转速为900 r/min、磁感应强度为90 mT和磁感应强度为90 mT、转速为300 r/min下的三维形貌图如图9、10所示,磁感应强度为60 mT、转速为900 r/min条件下的三维形貌图如图11所示。比较图9、10可知,磁场强度为90 mT、转速为900 r/min下磁流体表面突起小于转速为300 r/min时磁流体表面突起,和磁流体所受离心力、转速有关。比较图10、11可知,转速为900 r/min、磁场强度为90 mT下的磁流体表面突起高于磁场强度为60 mT下的表面突起。由此可知,在同等条件下磁场强度越大,磁流体表面磁流变效应越大,表面突起越大。

计算不同磁场强度、不同转速下磁流体形貌变化产生的不平衡量,结果如图12所示。由于磁流体在磁场作用下会受到磁场力作用产生磁能,在磁能

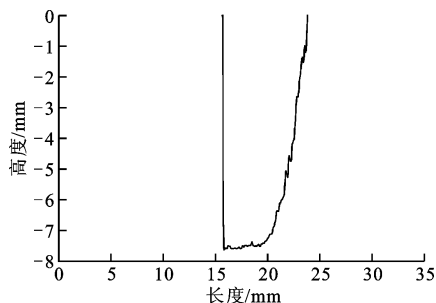


图7 转速为900 r/min、磁场强度为90 mT下0°处的投影线

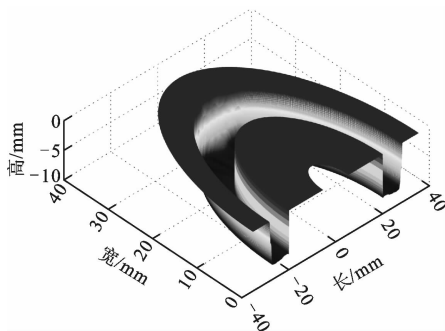
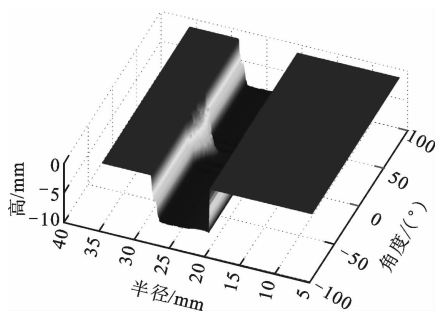
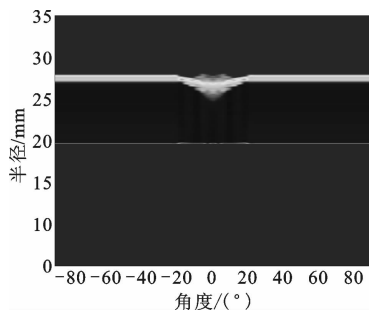


图8 转速为900 r/min、磁场强度为90 mT下磁流体的三维形貌图

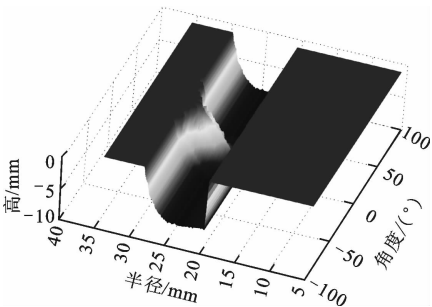


(a)磁流体形貌展开的三维图

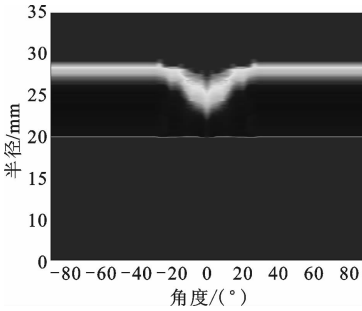


(b)磁流体形貌展开图

图9 转速为900 r/min、磁感应强度为90 mT下磁流体的三维形貌图

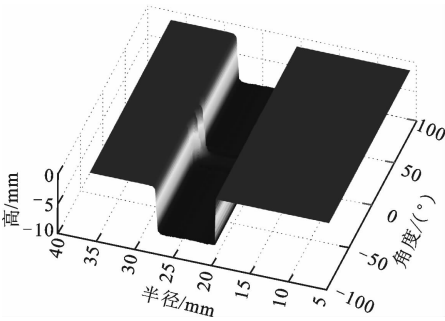


(a)磁流体形貌展开的三维图

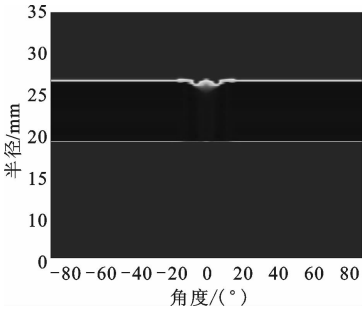


(b)磁流体形貌展开图

图 10 转速为 300 r/min、磁场强度为 90 mT 下磁流体的三维形貌图



(a)磁流体形貌展开的三维图



(b)磁流体形貌展开图

图 11 转速为 900 r/min、磁场强度为 60 mT 下磁流体的三维形貌图

作用下磁流体会产生质量凸起的变化,外加磁场强度越大,磁流体表面凸出越多,产生质量偏心越大,不平衡量越大。在磁场强度不变条件下,磁流体所

受离心力与转速的平方成正比,转速越大,离心力越大,离心力增大使磁流体表面聚集质量减小,不平衡量减小。

由计算结果可知,在相同转速下磁场强度越强,磁流体产生的不平衡量越大;在相同磁场强度下转速越大,磁流体产生的不平衡量越小。实验测量结果的变化趋势与理论分析一致,验证了实验方法的有效性。

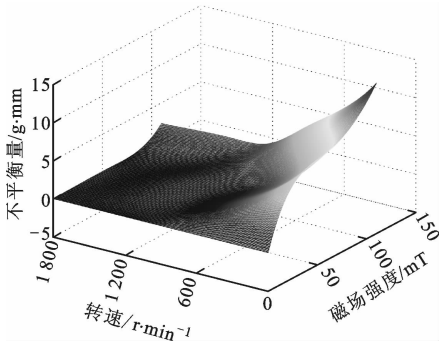


图 12 不同磁场强度、不同转速下磁流体的不平衡量

5 结 论

本文针对旋转容器中磁流体液表面形貌测量,提出了一种基于激光同步斩波调制投影的形貌多步测量方法。采用与容器同步转动的窗口斩波调制激光投影方法,获得了稳定的磁流体表面投影线,同时采用长时间多圈测量的平均效应和亮度增强效应,获得了高亮度和对比度的磁流体表面投影线。采用高透光率亚克力盖板,实现了磁流体密封与高透光测量的双重功能,研究并给出了考虑亚克力板折射率对测量结果影响的磁流体高度测量公式。对不同转速、不同磁场强度下磁流体的形貌测量结果表明,本文方法能够实现转动过程中磁流体表面形貌的测量,不同条件下测量所得磁流体表面形貌的变化趋势与理论分析一致,可真实表现磁流体的运动状态。

参考文献:

[1] 徐咏梅,李婷,李银银,等. 磁流体轴承的磁场与润滑特性分析研究 [J]. 机电工程, 2016, 33(3): 259-264.

XU Yongmei, LI Ting, LI Yinyin, et al. Analysis of magnetic field and lubrication characteristic of magnetic fluid bearings [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(3): 259-264.

[2] 范浩亮,周剑锋,汪宇. 磁流体润滑非接触式机械密封系统的设计分析 [J]. 润滑与密封, 2016, 41(1): 90-95.

- FAN Haoliang, ZHOU Jianfeng, WANG Yu. Design of non-contact mechanical seal lubricated by magnetic fluid [J]. *Lubrication Engineering*, 2016, 41(1): 90-95.
- [3] 唐龙, 卢利平, 岳恩, 等. 磁流变液的研究与应用 [J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2013, 27(12): 44-48.
- TANG Long, LU Liping, YUE En, et al. Research and applications of magnetorheological fluids [J]. *Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)*, 2013, 27(12): 44-48.
- [4] DAI Jixiang, YANG Minghong, LI Xiaobing, et al. Magnetic field sensor based on magnetic fluid clad etched fiber Bragg grating [J]. *Optical Fiber Technology*, 2011, 17(3): 210-213.
- [5] NAKAMOTO K, ADACHI K, SHIRASE K. Proposal of real-time balancing mechanism using magnetic fluid for machine tool spindle [J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 2007, 75(4): 387-390.
- [6] 尚忠义, 李伟仙, 董明利, 等. 基于四步相移光栅投影的三维形貌测量系统 [J]. *应用光学*, 2015, 34(4): 584-589.
- SHANG Zhongyi, LI Weixian, DONG Mingli, et al. 3D shape measurement system based on fringe projection in 4-step phase shifting [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 34(4): 584-589.
- [7] 刘常杰, 黄东晓, 杨凌辉. 新型三维形貌测量系统 SIFT 算法改进研究 [J]. *传感技术学报*, 2014(11): 1500-1505.
- LIU Changjie, HUANG Dongxiao, YANG Linghui. Improved SIFT algorithm based on a new measurement system of large scale 3D shape [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2014(11): 1500-1505.
- [8] LI Biao, FU Yanjun, ZHANG Jiancheng, et al. A fast three-dimensional shape measurement method based on color phase coding [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(3): 1011-1015.
- [9] HEIST S, LUTZKE P, KÜHMSTEDT P, et al. Experimental comparison of aperiodic sinusoidal fringes and phase-shifted sinusoidal fringes for high-speed three-dimensional shape measurement [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(2): 024105.

(编辑 赵炜)

(上接第 102 页)

- [10] DENG Wenxiang, YAO Jianyong, JIAO Zongxia. Adaptive backstepping motion control of hydraulic actuators with velocity and acceleration constraints [C] // *Proceedings of 2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 219-224.
- [11] MOHANTY A, YAO Bin. Indirect adaptive robust control of hydraulic manipulators with accurate parameter estimates [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, 19(3): 567-575.
- [12] SASTRY S, BODSON M. Adaptive control: stability, convergence and robustness [M]. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1989: 07632.
- [13] YAO Bin, TOMIZUKA M. Smooth robust adaptive sliding mode control of robot manipulators with guaranteed transient performance [J]. *Journal Dynamic Systems Measurement and Control*, 1996, 118(4): 764-775.
- [14] SHTESSEL Y, SHKOLNIKOV I, LEVANT A. Smooth second-order sliding modes: missile guidance application [J]. *Automatica*, 2007, 43(8): 1470-1476.
- [15] LANDU I D, LOZANO R, M'SAAD M. Adaptive control [M]. Berlin, Germany: Springer, 1998: 75-89.
- [16] 徐张宝, 马大为, 姚建勇, 等. 采用干扰估计的液压系统自适应鲁棒控制 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(8): 123-129.
- XU Zhangbao, MA Dawei, YAO Jianyong, et al. Adaptive robust control for hydraulic actuators with accurate disturbance estimation [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(8): 123-129.

## [本刊相关文献链接]

- 徐张宝, 马大为, 姚建勇, 等. 采用干扰估计的液压系统自适应鲁棒控制. 2016, 50(8): 123-129. [doi:10.7652/xjtuxb201608020]
- 闻德生, 甄新帅, 陈帆, 等. 变频电机-多输出泵调速回路速度特性分析. 2016, 50(10): 99-103. [doi:10.7652/xjtuxb201610015]
- 崔宁, 秦四成, 赵丁选. 液压挖掘机并联混合节能动力系统多目标优化控制策略. 2016, 50(6): 116-121. [doi:10.7652/xjtuxb201606018]

(编辑 苗凌)