

doi: 10.3788/gzxb20134201.0059

一种形位不确定回转壳体内壁表面的激光 测量与重构方法研究

王菲, 罗忠, 柳洪义

(东北大学 机械工程与自动化学院 机械电子工程研究所, 沈阳 110819)

摘 要:针对形位不确定回转壳体内表面的测量及重构问题,提出了一种准在线纵截线测量与曲面重构方法.通过粗、精测量相结合的实现过程,首先根据技术文件提取回转壳体的基本信息,并针对内表面存在的不确定性,建立一种模糊调节规则,对回转壳体内表面的形位进行预测,实时调整激光测量的角度与位置,完成测量.搭建激光测试试验平台,开发了模块化的测试平台软件系统.采用所提方法对回转壳体内表面进行测量试验研究,得到待测回转壳体内表面的三维数据,并进一步根据回转曲面二次加工的要求对曲面的重构方法进行分析,重构回转壳体内壁的三维曲面实体模型.试验结果表明,曲面模型的相对误差绝对值平均值小于 0.024%.

关键词:回转壳体内表面;激光测量;准在线;逆向工程;模糊规则

中图分类号:TN247;TP249

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)01-0059-5

Laser Measurement and Reconstruction Method Research for a Kind of Rotary Shell's Inner-surface with Uncertain Configuration

WANG Fei, LUO Zhong, LIU Hong-yi

(Institute of Mechatronics Engineering, School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: According to configuration uncertainty of a kind of rotary shell's inner surface, a laser measurement and reconstruction method based on quasi-online longitudinal curve for the inner-surface is proposed in this paper. The whole laser measurement is implemented in virtue of two steps. One is coarse measurement process, the other is precise measurement process. In coarse process, the basic information of the rotary shell's inner-surface is picked up from its technical file. For the uncertainty of the inner-surface's configuration, a fuzzy prediction algorithm for the actual inner-surface is applied for precise measurement process. The measurement position of inner surface in next sampling time is predicted based on fuzzy reasoning. The measurement is accomplished through adjusting of projecting angle and location of laser sensor depending on the prediction algorithm. The laser experimental platform is set up. Its software system is developed. Experimental research of the proposed method are carried out by means of the test platform. The three-dimensional data are obtained from coarse and precise measurement process. The measurement and reconstruction method is evaluated in terms of secondary processing requirement. The 3D model of the rotary shell's inner-surface is reconstructed by using appropriate measurement and reconstruction method. The experimental results verify that the proposed method reveals better performance. The mean absolute difference rate of the model is less than 0.024%.

Key words: Rotary shell's inner-surface; Laser measurement; Quasi-online; Reverse engineering; Fuzzy rule

基金项目:国家自然科学基金(No. 51105064)和辽宁省自然科学基金(No. 201202056)资助

第一作者:王菲(1981—),女,讲师,硕士,主要研究方向为智能控制理论、机器人技术. Email: feiwang@mail.neu.edu.cn

导师:柳洪义(1945—),男,教授,博士,主要研究方向为控制理论、智能机器人、特种机器人技术. Email: hylu@mail.neu.edu.cn

收稿日期:2012-09-12;录用日期:2012-11-01

0 引言

在复杂曲面本身没有准确的数学模型时,对曲面的后续精密加工将产生极大的影响,如使加工误差增大甚至设备及工件损毁等.因此,在加工前需要对曲面进行测定并建立其精确的模型,这个过程称为逆向工程,需要经过对曲面的测量进行规划、采用数字化传感器对曲面进行数字化扫描检测、将数字化“点云”进行曲面重构生成曲面的数学模型这三个过程.它在汽车、航空航天、舰船等的设计和制造业中有着广泛的应用前景^[1-4].

由于加工工艺等原因,通过模具形成的回转壳体特别是回转腔体,其内表面通常存在较大的不确定性,如圆柱内表面实际为圆锥内表面或内表面存在较大的起伏等.对这种回转壳体内表面进行随形加工,如去除内表面规定厚度的材料、脱模剂等,需要内表面精确的模型.因此,回转壳体内表面的精确测量与重构是后期随形加工最为重要的一个步骤.

激光具有方向性好、亮度高、准确度高等优点;准在线测量方法使测量与加工在同一台设备上进行,可以减小对曲面进行进一步加工时的二次装夹误差.采用非接触式准在线激光测量方法,保证了测量数据的高准确度,同时避免了对被测物表面造成的损伤,十分适合于对复杂曲面的准确测量^[5-8].

目前国内外已经研究出了多种三维轮廓的测量与重构方法.如: Molleda 等人研发的一种长平轧(long flat-rolled)产品在线测量及三维重构系统^[9],能够实时检测系统的宽度和平面度,从而对产品质量进行实时有效地监控;Schwartz 等人提出了一种分级测量方法^[10],能够有效地提高激光测距数据的采集速度、减小数据采集量,并提高数据拟合效果;文献[11-12]提出了对测量数据的有效处理方法,以提高重构曲面的准确度及效率;英国雷尼绍(Renishaw)公司的 Retroskan、Renscan200 系列产品和德国西门子(Siemense)的 840D/FM-NC 等设备采用准在线测量方法从而提高测量效率、消除二次装夹误差等.综上所述,多数研究为针对物体外表面三维信息的获取方式和方法讨论,对狭长壳体内壁表面的测量和重构方法研究少有相关论述.

本文针对形位不确定的回转壳体内表面,提出了一种准在线纵截面激光测量与曲面重构方法.通过粗、精测量相结合的测量手段,在粗测量过程中根据技术文件提取回转壳体的基本信息,对回转壳体规划的关键点进行测量;为克服内表面存在的形位不确定性的影响,在精测量过程中建立了一种模糊调节规则,对回转壳体内表面的形位进行预测,实时

调整激光测量的角度与位置,完成对整个回转壳体内表面的精确测量.搭建了四自由度激光测试平台,开发了模块化激光测试软件系统,采用提出的准在线纵截面测量进行了回转壳体内表面的测量试验研究,并根据内表面后期二次加工的特殊性要求分析了曲面的重构方法,建立了曲面的三维模型,分析了测量密度对曲面重建准确度的影响.

1 准在线纵截面智能测量方法

为了适应回转壳体内表面后续二次加工特殊性 & 减少数据量、简化数据处理过程的需要,对形位不确定回转壳体内表面的测量原理与测量方法进行了研究,提出了准在线纵截面线测量方法.纵截面定义为沿回转壳体轴线方向剖切形成的内表面截线,如图 1 所示.为完成回转壳体内壁表面位置信息测量,采用 3-DOF 装有激光测距仪的机械手伸入旋转的回转壳体内进行测量,通过对回转壳体不同方位的纵截线的准确测量,进而由纵截面簇构成曲面的三维实体模型.

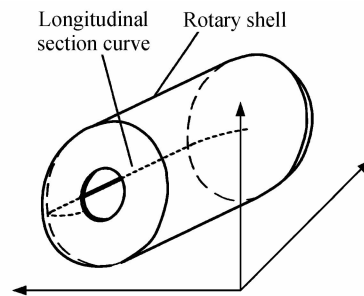


图 1 回转壳体内表面的纵截面
Fig. 1 Longitudinal section curve of the rotary inner-surface

为得到回转壳体工件内表面纵截线的精确信息,分粗测量和精测量两个过程对回转壳体内表面的实际形状、位置进行测量,整个测量过程如图 2 所示.在粗测量中,利用待测回转壳体的技术文件中的信息,识别出回转壳体内表面的构成曲面类型及其特征量信息,如柱面、球面、样条曲面等曲面的起始点、半径、结构点数量等此类信息,作为准在线纵截面测量方法的基础参考信息.根据这些基础信息,找出部分理论关键点进行测量,得到对应的实测的关键点.由于曲面位形的不确定性,在实测关键点间可能有不确定的凸、凹等形状变化,致使激光测距仪的测量无效.为更好地测量出这些变化,在实测关键点之间插值,并根据插入值与实测值之间的误差调节相邻插入点之间的斜率,对下一时刻的插入点位置进行预测、调整,从而使机械手可以完成对回转壳体不确定位形的测量.

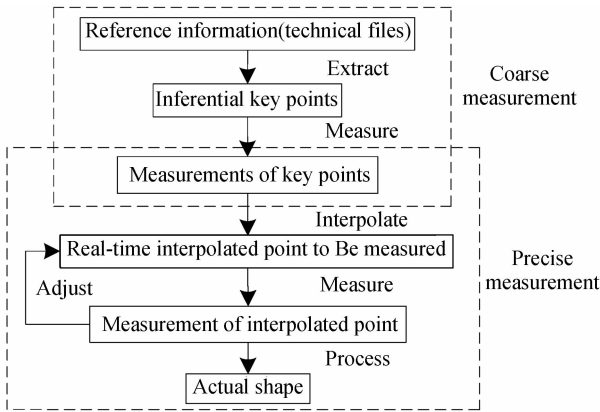


图 2 纵截线测量方案

Fig. 2 Scheme of shape measurement

在精确测量中,需要实测数据和粗测的关键点数据对插入点在线调整,以此实时预测回转体内表面的形位变化,示意图 3. 图中虚线为由待测曲面

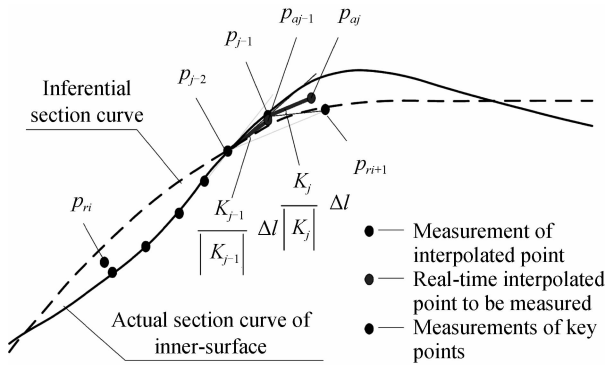


图 3 激光测量实时调整方法

Fig. 3 On-line adjusting algorithm in laser measurement process

技术文件中所得到的理论曲线,实线为实际回转壳体的内表面截线, p_r 为粗测时得到的实测关键点,作为参考点; p_a 为预测点; p 为实测得到的曲面位置. 预测点表达式为

$$p_{aj} = \begin{cases} p_{j-1} + \frac{K_j}{|K_j|} \Delta l & \left| \frac{K_j}{|K_j|} \Delta l \right| < |p_{rj+1} - p_{j-1}| \\ p_{rj+1} & \left| \frac{K_j}{|K_j|} \Delta l \right| \geq |p_{rj+1} - p_{j-1}| \end{cases} \quad (1)$$

其中, $i(i=0, \dots, m)$ 为粗测参考点的数量, $j(j=0, \dots, n)$ 为实时测量点的数量, Δl 为测量步长, K_j 为预测下一点时的方向参考向量,表达式为

$$K_j = \begin{cases} p_{rj+1} - p_{ri} & (i=0) \\ p_{rj+1} - p_{j-1} & (i=1) \\ a(p_{j-1} - p_{j-2}) + (1-a)(p_{rj+1} - p_{j-1}) & (i>1) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $a \in [0, 1]$ 为曲率调解因子. 针对曲面的不确定,根据对曲面的预测值与其实际值之间的误差,建立模糊控制规则(见表 1)实现对曲面插入点的预测. 模糊控制器的输入为对曲面的预测值与实测值

之间的误差,控制器的输出为曲率调解因子 a , 对应的模糊语言变量分别为 DT、AR, 对应的模糊子集为 D、A. 分别表示为 $D = \{PN, VN, N, KN, AN, Z, AF, KF, F, VF, PF\}$, $A = \{PS, VS, S, KS, AS, M, AB, KB, B, VB, PB\}$, 分别对应输入与输出从小至大的 11 个等级. 模糊子集 D、A 中隶属度函数均选择高斯型函数. 调节原理为:当曲面的预测值与实测值之间的误差较大时,曲率调解因子 a 值趋近 1, 这样可根据曲面实测数据调节预测方向. 反之,当曲面的预测值与实测值之间的误差较小时,曲率调解因子趋于 0, 预测方向按照参考位置向量调整.

表 1 曲率调解因子模糊控制规则表

Table 1 Fuzzy logic for curvature fit factor

DT	PN	VN	N	KN	AN	Z	AF	KF	F	VF	PF
AR	PS	VS	S	KS	AS	M	AB	KB	B	VB	PB

精测量以粗测量数据为基础,通过重复预测、逆运算、运动/测量、正运算的过程,完成对形位不确定壳体内壁表面纵截线的测量.

2 激光测试试验平台

为了验证所提出回转壳体内表面测量方法的有效性,搭建了四自由度激光测试试验平台. 测试平台分为主机械手与回转壳体支撑、旋转驱动部分,如图 4 所示. 完成激光测量的机械手,包含可前后移动的大臂、旋转的小臂和腕部,其中腕部固装有激光距离传感器. 被测回转壳体装置在配有托滚的支架上,通过伺服电机驱动壳体旋转.

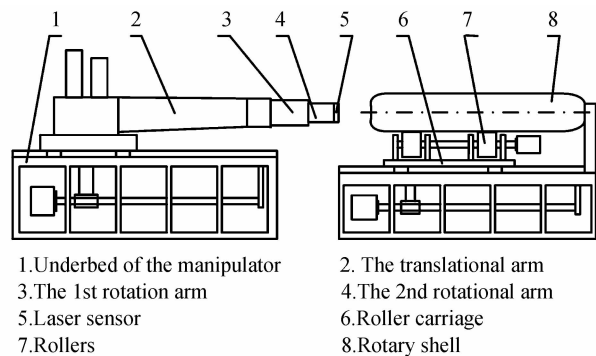


图 4 四自由度激光测试平台

Fig. 4 4-DOF test platform for laser measurement

机械手由 1 个移动关节和 2 个转动关节构成,多出的一个冗余自由度可满足机械手在狭长、小体积回转壳体内调整位姿的要求,使之在有限空间内更加灵活地完成较为复杂的测量工作.

在测量时需要协调机械手与壳体回转的不同动作,测试平台采用工控机+多轴运动控制卡的模式驱动各部分. 以 DPRAM(双端口 RAM)作为公共缓

存区来提高多轴运动控制卡与工控机之间数据交换的速度,通过扩展高速模拟信号采集卡进行模拟量电压信号的采集,支持系统的采集频率达到1.22 MHz,保证系统的实时性.采用的激光传感器是OPTEX FA公司的CD4-350激光测距传感器,其标准线性测量范围为250~450 mm,与其对应的电压模拟量输出范围为-5~+5 V,分辨率为40 μm.待测壳体圆柱段内径约为490±10 mm,待测量截线长度为500 mm,系统见图5所示.

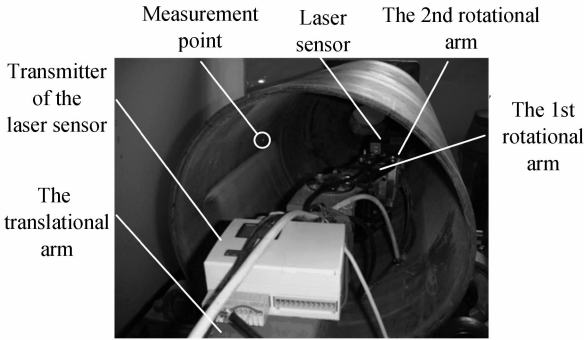


图5 回转壳体内表面测量试验

Fig. 5 Laser measurement experiment of a rotary shell

针对回转壳体内表面测量的需求,采用QT语言开发了跨平台的模块化软件系统.系统可实现对回转壳体内表面的自动测量、实时数据采集及显示、参量设置、数据保存等功能.

3 曲面测量与重构试验

通过搭建激光测试平台,采用提出的智能测量方法对某回转壳体内表面进行了测量,并以试验数据为基础对曲面重构方法进行了试验研究.

由于对曲面的后续加工以纵截线信息为基准,在粗、精测量的数据基础上,在重建曲面的模型时着重研究了重建曲面截线的连续、准确性问题.对回转壳体内壁曲面进行了多次测量,选取不同的测量步长 $\Delta l \in [5, 50]$ mm,得到数量不等的实测点,并以这些实测点数据为基础对曲线的拟合数据进行了拟合准确度分析.

在实际测量中,粗、精测量得到截线数据后,通过曲线拟合方法对整个内壁表面进行数学描述.为研究截线数据采集量大小对拟合准确度的影响,前期先以最小步长对曲面进行多次密集测量后,得到的数据成为参考数据,作为与拟合数据比对的基准.本系统采用三次B样条方法拟合,将拟合后的数据与该壳体内部的参考数据进行比较.基于不同数量的实测点进行拟合后的结果如图6所示.由图可见,随着截线数据数量的增加,拟合准确度提高.拟合平均绝对误差与实测点数量之间的关系见图7.由图可见,曲线拟合的误差随测量密度的增大而减小,测量点插入的步长大于30 mm即实测点数量少于20个

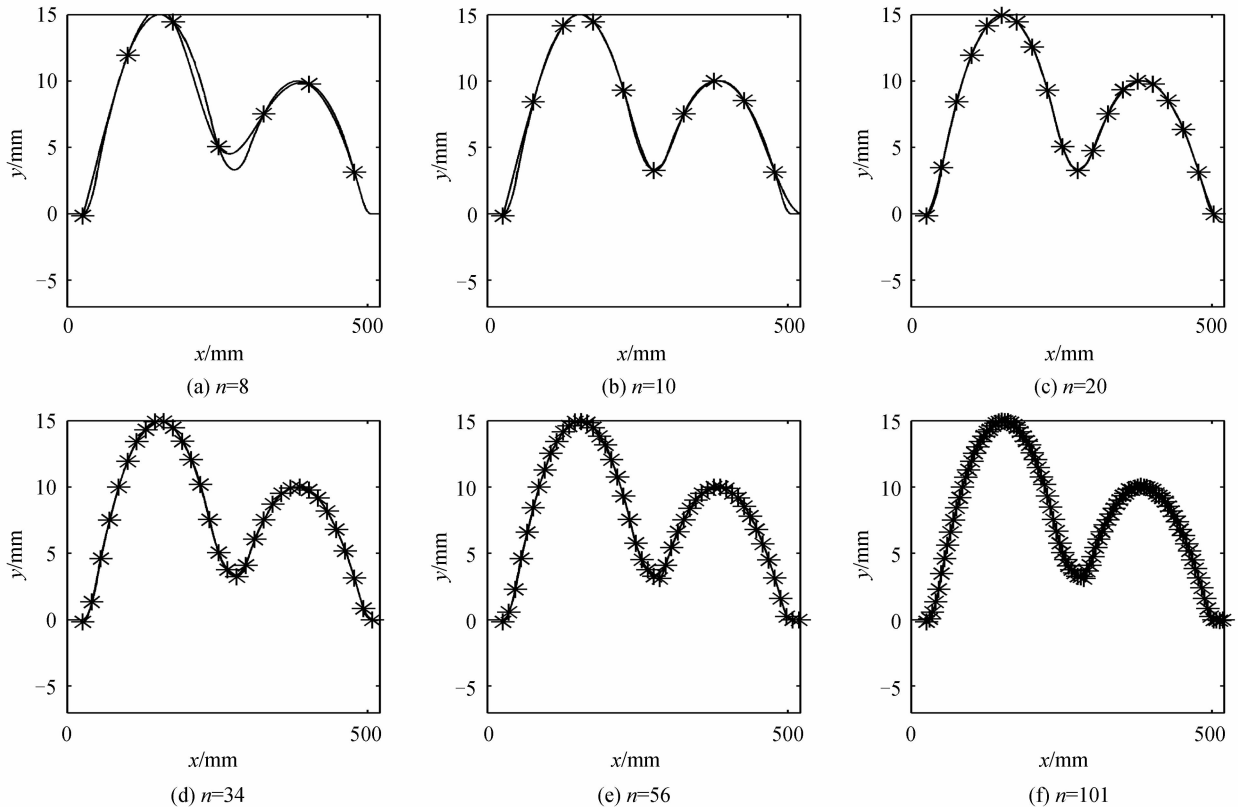


图6 步长不同拟合效果比较

Fig. 6 Data fitted results comparison with different measurement steps

时拟合误差过大;步长小于 20 mm 时拟合误差较小,但数据过多时不仅增加了曲面测量过程的时间,且所占用的资源过多、数据处理所需的时间变长而拟合误差并无明显减小。由试验分析可得:当壳体内表面为连续自由曲面且内径变化小于 20 mm,测量点步长选取范围为 20~30 mm 时,截线数据采集量适中,测量时间较短,拟合平均绝对误差小于 0.06 mm。

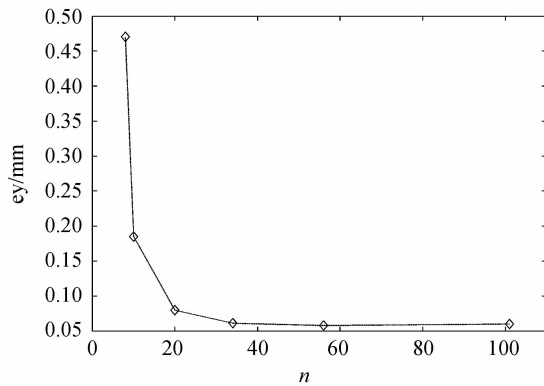


图 7 拟合误差与实测点数量的关系

Fig. 7 Relation between fitted error and data size

选择步长为 20 mm 的实测数据为曲面重构依据,重建了待测回转壳体的内表面,被测形位不确定回转壳体的三维实体模型见图 8。重建后的回转壳体内表面相对误差绝对值平均值小于 0.024%。

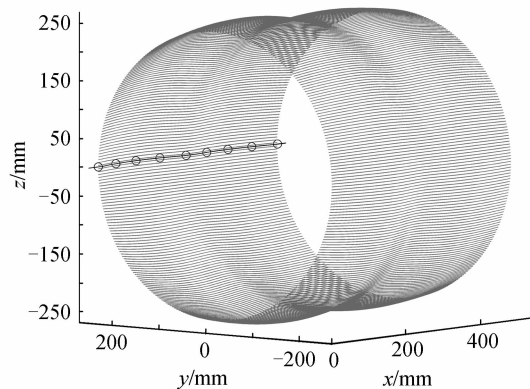


图 8 壳体内壁曲面三维模型重构

Fig. 8 Reconstructed 3D model of the rotary shell's inner-surface

4 结论

针对回转壳体内表面三维自由曲面的精确测量问题,提出了一种采用非接触激光测量传感器的准在线纵截线智能测量与重构方法,并搭建了四自由度激光测试平台,开发了智能激光测量软件系统。准在线纵截线智能测量方法通过粗、精测量过程,实现了对回转壳体基本信息的提取,并针对内表面存在的不确定性,建立了一种模糊调节规则,对回转壳体内表面的形位进行预测,实时调整测量的角度与位置,可实现对存在不确定性的回转壳体内表面的精确测量。以

激光测试平台为基础对回转壳体内表面进行了实际的测量,并对曲面的重建方法进行了试验研究,分析了测量密度对曲面重建准确度的影响。试验结果表明,当回转壳体内表面为连续自由曲面且内径变化小于 20 mm 时,采用文中提出的智能测量方法,选取测量点插入步长范围为 20~30 mm,重建后的回转壳体内表面相对误差绝对值平均值小于 0.024%,可为曲面的后续二次加工提供准确的模型依据。

参考文献

- [1] LIU Li-feng, YANG Xi-chen. Path planning of laser remanufacturing robot based on reverse engineering[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(7): 0703008-1-4. 刘立峰, 杨洗陈. 基于逆向工程的激光再制造机器人路径规划[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0703008-1-4.
- [2] YUE Kai-duan, ZHOU Xiang, TANG Jing-yuan, et al. ESPI for full field vibration model measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 608-611. 乐开端, 周翔, 唐经源, 等. 激光全场模态测量技术研究[J]. *光子学报*, 2003, **32**(5): 608-611.
- [3] SANDAK J, TANAKA C. Evaluation of surface smoothness by laser displacement sensor 1: effect of wood species[J]. *Journal of Wood Science*, 2003, **49**(4): 305-311.
- [4] ZHANG Hui, WANG Yong-tian. Scattering characteristics and targets recognition of laser TDD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 22-24. 张辉, 王涌天. 激光目标探测装置的回波特性及目标识别技术研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(1): 22-24.
- [5] ZHU Wan-bin. Laser displacement sensor using in shape measurement[J]. *OME Information*, 2010, **27**(10): 70-72. 朱万彬. 激光位移传感器在物体表面形状测量中的应用[J]. *光机电信息*, 2010, **27**(10): 70-72.
- [6] LI Jian. Fundamental research of digital manufacturing of freeform surface based on laser measurement [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002: 1-12. 李剑. 基于激光测量的自由曲面数字制造基础技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002: 1-12.
- [7] LIU Li-sheng, ZHANG He-yong, GUO Jin, et al. High precise measurement of target velocity using laser heterodyne technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(10): 2366-2372. 刘立生, 张合勇, 郭劲, 等. 用激光外差技术高精度测量目标速度[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(10): 2366-2372.
- [8] MA You-liang, JIN Yu-ping. The research on reverse engineering for surface by laser scanner[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2009, **37**(8): 43-45. 马有良, 金玉萍. 基于激光扫描仪的曲面反求工程研究[J]. *机床与液压*, 2009, **37**(8): 43-45.
- [9] MOLLEDA J, USAMENTIAGA R, GARCIA D F, et al. Shape measurement of steel strips using a laser-based three-dimensional reconstruction technique [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2011, **47**(4): 1536-1544.
- [10] SCHWARTZ S, WONG A, CLAUSI D A. Multi-scale saliency-guided compressive sensing approach to efficient robotic laser range measurements[C]. Piscataway: IEEE, 2012: 1-8.
- [11] ZHANG Yu-xiang, ZHANG Xing-jun. Study on reconstruction property of free surface fitting for point clouds with laser scanning [J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(3): 351-355. 张玉香, 张兴军. 采用激光扫描点云拟合自由曲面的重构特性研究[J]. *激光与红外*, 2011, **41**(3): 351-355.
- [12] WEI Yong-chao, LIU Chang-hua, DU Dong. 3D points cloud object recognition based on surface segmentation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2268-2273. 魏永超, 刘长华, 杜冬. 基于曲面分割的三维点云物体识别[J]. *光子学报*, 2010, **39**(12): 2268-2273.