

# 阶梯轴类零件激光在机测量误差补偿研究

尉渊<sup>1</sup>,丁大伟<sup>2</sup>,赵正彩<sup>2</sup>,刘英智<sup>1</sup>,徐九华<sup>2</sup>

(1. 北京星航机电装备有限公司,北京 100074; 2. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**轴类零件主要用来传递转矩和承受载荷,常通过数控车床加工而成其精度要求高,可用激光位移传感器对其轮廓信息进行采集,但由于机床存在位置及运动误差等,使得在机测量精度较低。因此为提高测量精度,提出面向阶梯轴类零件激光测量的实时误差补偿算法,并分别对补偿前后台阶测量点云进行模型重构,对比分析其测量误差。对比分析结果验证了补偿算法的有效性。台阶面测量表明,经几何关系修正后,其平面测量误差与三坐标测量结果差值为 0.002 mm,证明测量拟合精度高。

**关键词:**数控车床;阶梯轴零件;误差补偿;激光在机测量;模型重构

**中图分类号:**TH161 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)01-0023-03

## Research on Error Compensation for Laser On-machine Measurement of Stepped Shaft Part

YU Yuan<sup>1</sup>, DING Dawei<sup>2</sup>, ZHAO Zhengcai<sup>2</sup>, LIU Yingzhi<sup>1</sup>, XU Jiuhua<sup>2</sup>

(1. Beijing Xinghang Mechanical & Electronic Equipment Co., Ltd., Beijing 100074, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Shaft parts are mainly used to transfer torque and bear load and machined by numerical control lathe. Their accuracy needs to be high. A laser displacement sensor is adopted in collecting the profile information, but the measurement accuracy can't satisfy the demand due to the location and motion errors of lathes. To improve the accuracy, a real-time error compensation algorithm for the stepped shaft part is proposed. The measured point clouds before and after compensation are imported into software respectively to reconstruct the models, which are used to compare and analyze the measuring errors. The results show that the effectiveness of the compensation method is verified. After the correction based on the geometric relationship, the error of the step plane is close to the result of CMM and the high precision of the laser on-machine measurement is proved.

**Keywords:** numerical control lathe; stepped shaft part; error compensation; laser on-machine measurement; model reconstruction

## 0 引言

在机测量(on-machine measurement, OMM)技术实质是指在前后工序间隙对零件实际形状尺寸进行现场快速测量,及时发现加工偏差,以便在加工中实时进行误差补偿,进而提高加工精度与效率。激光在机测量是非接触式动态扫描过程,效率较高,测量精度主要受机床误差、传感器误差及安装误差等影响。因此,为提高激光在机测量精度,国内外学者从测量原理、机床精度、路径规划、模型重构及误差分析等方面进行了深入研究。对阶梯轴类零件在机测量而言,卡盘跳动与尾架偏差无疑会对结果产生较大影响。国内外许多学者对车床主轴回转精度检测进行研究,郑相周等<sup>[1]</sup>设计的计算机测量系统识别了径向跳动、端面跳动和角度摆动误差,并可在计算机上用 3D 图形表达。SHOJI 等<sup>[2]</sup>提出矢量表示方法,用垂直于轴线的矢量来计算主轴径向回转误差;ROBERT 等<sup>[3]</sup>改进反向法,通过设计转台减少位移传感器的移动和调整,从三维角度显示主轴径向和轴向同步误差。

此外,合理规划测量路径可快速而准确获取测点位置坐标,DING 等<sup>[4]</sup>基于 CAD 模型提出三维激光扫描路径规划方案;王禹等<sup>[5]</sup>构造 1×30×1 的 BP 神经网络模型,很好地提高了路径拟合和预测的准确性及效率。后期需对采集数据进行处理时,高瑞等<sup>[6]</sup>提出一种复杂曲面零件散乱点云特征点提取方法,直接操作于散乱点云;沈琰辉等<sup>[7]</sup>提出一种新的基于邻域离散度的异常点检测算法,性能稳定。后期对数据进行光顺处理<sup>[8]</sup>,便于模型重构及误差分析。

基于上述思路,诸多激光在机测量系统应运而生,如:KLAUS 等<sup>[9]</sup>提出 1D-3D 物体(5 m×5 m×5 m)测量概念,采用激光跟踪仪构建完整 M3D3 在线测量系统,可实现对大尺寸工件的精确测量。NISHIKAWA 等<sup>[10]</sup>选用性能良好的激光位移传感器代替探针,将截面测量结果与 CAD 模型及三坐标测量数据对比分析发现误差相对较小。YANG 等<sup>[11]</sup>为提高测量精度,采用激光干涉仪提出一种干涉图拼接法来测量曲面形状偏差,并验证了该 IFP 拼接算法的有效性。

本文基于 SK50P 型三轴数控车床,在刀架上通过辅

**基金项目:**国家自然科学基金(51475233);国家自然科学基金青年基金项目(51805258);江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20180441)

**第一作者简介:**尉渊(1987—),男,山西运城人,工程师,工学硕士,研究方向为大尺寸异形结构件高精度加工技术。

助工装搭载激光位移传感器,对阶梯轴类特征零件进行在机测量。首先制作两端呈锥度的高精度标准件,用于车床实时误差表征,并设计误差补偿算法,计算不同角度下补偿值;然后处理数据并重构模型,分析误差补偿前后激光在机测量精度,验证补偿效果;再由传感器与台阶特征位置几何关系计算出点云偏转角度,对初始测量点云进行修正,并与三坐标测量结果进行对比,分析测量误差,实现阶梯轴类零件高精度激光在机测量。

## 1 试验及方法

### 1.1 试验装置

激光在机测量装置的基本结构如图 1 所示。该系统以数控车床为运动载体,以 LK-G80 型点扫描激光位移传感器为轮廓信息采集装置,搭配 LK-Navigator 软件实现对阶梯轴型面的自动化扫描及数据导出、存储等,并用于误差补偿与分析。

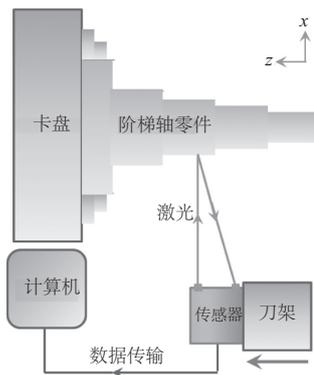


图 1 测量装置示意图

### 1.2 试验方法

首先,建立测量坐标系,选择传感器进给速度  $F = 120 \text{ mm/min}$ 。由于刀架启动并达到进给速度需要一定时间,因此在编程时预留响应距离,使得传感器能稳定可靠地进行阶梯轴型面数据的采集。测量中利用卡盘上的分度将阶梯轴每次旋转  $30^\circ$ ,然后运行测量程序进行数据采集,共测量 12 组数据。阶梯轴理论模型及测量路径规划如图 2(a) 所示。

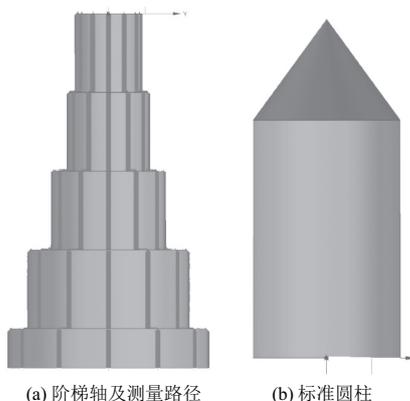


图 2 阶梯轴和标准圆柱理论模型

在工件与尾架顶针间装配标准圆柱,其模型如图 2(b) 所示。圆柱两端分别与工件及顶针锥度连接,并且是线接触,可移动。通过数据处理将尾架偏差剔除,对不同角度下的卡盘跳动进行评价,并将该误差补偿进型面测量结果,实现高精度激光在机测量。

## 2 误差补偿算法

激光在机测量过程中,主轴跳动与尾架偏差的影响最大,且该类偏差极不稳定,需实时检测,因此在阶梯轴与尾架间装夹标准件来表征误差。该标准件由高精密外圆磨工艺制成,圆度可达  $0.0005 \text{ mm}$ ,两端分别有  $60^\circ$  锥孔和锥尖,装夹过程中尽量保证阶梯轴、标准件、尾架顶针在同一高度上。随后对标准件表面测量数据进行最小二乘线性拟合,如图 3 所示。

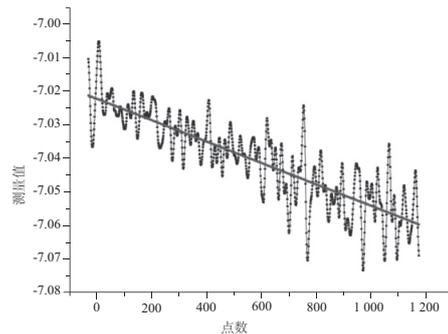


图 3 最小二乘线性拟合

由图 3 可知,标准件圆柱面测点数据不规则,其总体趋势呈单调下降。为此,线性拟合后,计算两端点数据差,即为主轴跳动与尾架偏差之和,设为  $\alpha_i$ ,则

$$\alpha_i = \beta_i + \gamma \quad (i \in [1, 12], i \in N)$$

其中: $\alpha_i$  为端点数据差; $\beta_i$  为主轴跳动误差; $\gamma$  为主轴中心线与尾架偏差; $N$  是自然数,表明  $i$  取整。

为确定不同角度测量数据的补偿值,以其中某一角度的偏差值为基准,设为  $\alpha_0$ ;计算其他角度相对偏差值,得:

$$\alpha_i - \alpha_0 = (\beta_i + \gamma) - (\beta_0 + \gamma) = \beta_i - \beta_0$$

取阶梯轴各圆柱面测量值的平均值,为  $L_{im} (m=1, 2, 3, 4, 5)$ ,基准角度测量值为  $L_{0m}$ ,因此,测量数据平均值之差为:

$$\delta_i = \frac{1}{5} \sum_{m=1}^5 (L_{im} - L_{0m}) \quad (m \in [1, 5], i = 30k,$$

$k \in [0, 11], m, k \in N)$

建立  $\delta_i - (\alpha_i - \alpha_0)$  的线性关系,可由 MATLAB 线性拟合得到,程序如下:

$$p = \text{polyfit}(\alpha_i - \alpha_0, \delta_i, 1)$$

经计算,拟合得关系式:

$$\delta_i = -0.674 \times (\alpha_i - \alpha_0) - 0.0027$$

随后,代入不同  $\alpha_i - \alpha_0$ ,计算相应的  $\delta_i$ ,作为其补偿值,结果如图 4 所示。

## 3 结果与讨论

### 3.1 误差分析

首先进行误差补偿,并将坐标点云导入 UG 中并重构

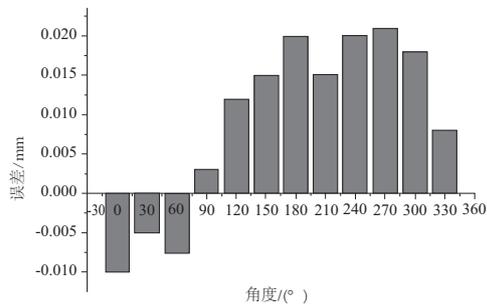
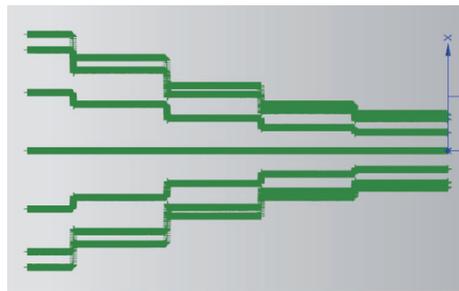
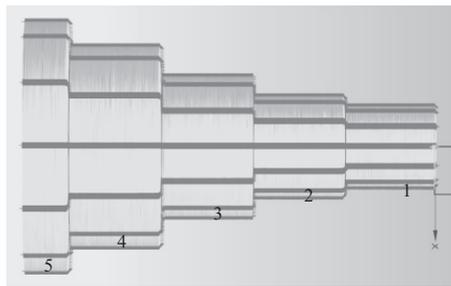


图4 不同角度下误差补偿值

模型,通过“面到面”检查来分析其误差,结果如图5所示。



(a) 测量数据点云



(b) 重构模型

图5 数据点云及模型重构

为分析其误差,由图5(a)中的测量数据点云重构出图5(b)中的零件模型,并将其与三坐标测量结果对比分析。将模型各圆柱面沿z负向编号,分别为1、2、3、4、5,如图5(b)所示;调用“面-面”偏差指令来评价其补偿前后分别与三坐标修正模型间误差,如图6所示。

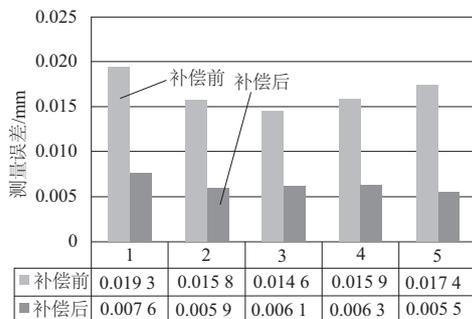


图6 补偿前后测量误差

由图6可知,在误差补偿前,测量重构精度在0.0146 mm~0.0193 mm之间,而经误差识别补偿后,精度

可达0.0055 mm~0.0076 mm,可有效提高激光在机测量精度。

### 3.2 台阶面精确测量

复杂曲面零件常包含台阶等特征,如何对台阶面信息进行准确表达是个关键问题。主要原因有:接触式测头虽能满足大部分高精度测量要求,但由于测头半径的存在导致台阶面爬升起点和终点尖锐处难以测量,如图7(a)所示;而非接触式测头,如激光传感器等,则可能存在光线被遮挡等现象使得测量数据缺失,如图7(b)所示。

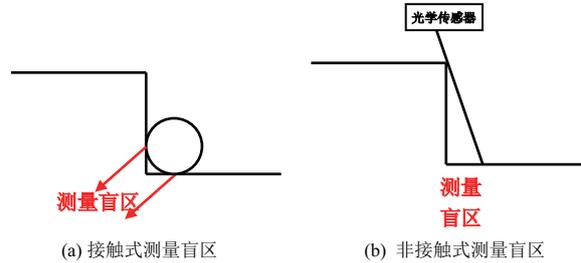


图7 台阶面测量盲区

为此,为完整获取台阶处特征信息,参考激光传感器斜射测量方式,将激光测头逆向偏转12.5°,使发射光束与接收光束之间夹角为25°。微调并运行测量程序,测量数据如图8所示。

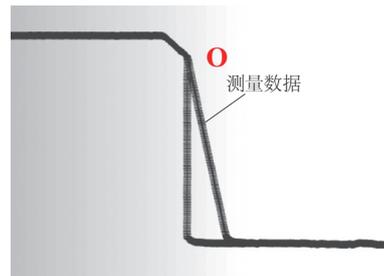


图8 测量点云

该特征与真实台阶之间也存在一个旋转角度,设为 $\alpha$ ,其关系如图9所示。

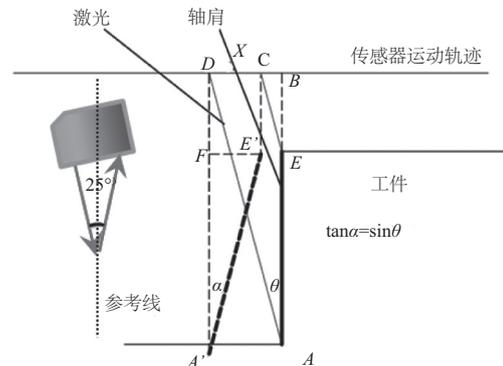


图9 拟合特征与真实台阶数学关系

已知:AD、CE为红外光线长。其中A'E'为测量拟合值。

(下转第51页)

加工方式或合理设置有预应力的加强箍,可进一步提高转鼓性能。

#### 参考文献:

- [1] 周征, 王晓阳. 煤矿爆破震动中卧式沉降过滤式离心机转鼓性能优化设计[J]. 科技通报, 2017, 33(1): 133-136.
- [2] 刘建华, 赵立宏, 周其旺. 基于 ANSYS Workbench 的立式离心机转鼓动力学分析[J]. 机械工程与自动化, 2013(1): 56-57.
- [3] 曹尉南, 谢桂兰, 龚曙光, 等. 均匀化理论在开孔转鼓结构优化中的应用研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(9): 937-940.
- [4] 毛文贵, 李建华, 傅彩明, 等. 基于模态分析的转鼓优化设计[J]. 机械设计, 2010, 27(6): 71-74.
- [5] 李焕. 利用 ANSYS 软件对翻袋式过滤离心机转鼓结构与轴系振动的设计与计算[D]. 北京:北京化工大学, 2000.
- [6] MAYER Gerd Ph (De), GERTEIS Hans. Invertible filter centrifuge: DE, 10115381 [P]. 2002-10-24.
- [7] 马新龙. 双级活塞推料离心机转鼓开孔结构优化设计研究[D]. 天津:天津大学, 2014.
- [8] 周连刚. 离心机转鼓开孔问题的研究[D]. 天津:天津大学, 2007.
- [9] VAN Quynh Le, KHAC Tuan Nguyen. Optimal design parameters of cab's isolation system for vibratory roller using a multi-objective genetic algorithm [J]. Applied Mechanics and Materials, 2018, 457: 81-85.
- [10] 范德顺, 李焕. 翻袋式离心机简介[J]. 过滤与分离, 2000, 10(3): 35-37.

收稿日期: 2018-11-16

(上接第 25 页)

$$\tan\theta = \frac{BD}{AB} = \frac{BC}{BE}$$

$$AD = \frac{BD}{\sin\theta} \quad CE = \frac{BC}{\sin\theta}$$

在  $\triangle AEF$  中,

$$\tan\alpha = \frac{EF}{AF}$$

$$AF = AD - CE = \frac{BD - BC}{\sin\theta} = \frac{CD}{\sin\theta}$$

$$EF = CD$$

$$AF \cdot \tan\alpha = AF \cdot \sin\theta$$

$$\tan\alpha = \sin\theta$$

由此可得  $\alpha = 12.213^\circ$ , 旋转后如图中箭头所示。台阶高度为 6 mm, 因此平面度为:  $T = 6 \times \sin 0.112 = 0.011$  mm, 这与三坐标测量台阶平面度 0.009 mm 非常接近, 意味着台阶处数据拟合精度高。

## 4 结语

1) 设计并制作标准圆柱用于误差表征, 提出误差补偿算法; 通过测量及拟合, 给出不同角度下误差补偿值在  $-0.01$  mm ~  $0.021$  mm 之间, 该值主要是卡盘跳动误差及尾架偏差。

2) 误差补偿前后分别对测量点进行模型重构, 结果表明, 补偿前测量偏差在  $0.0146$  mm ~  $0.0193$  mm 之间, 补偿后精度可达  $0.0055$  mm ~  $0.0076$  mm。

3) 激光测量台阶平面度为  $0.011$  mm, 与三坐标测量机所测  $0.009$  mm 相近, 表明该测量方法可行。

#### 参考文献:

- [1] 郑相周, 傅国栋, 黄思, 等. 车床主轴回转精度测量系统的研制[J]. 机械, 2011, 38(9): 77-80.

- [2] SHOJI N, TADAO T, ATSUSHI S. Evaluation method to determine radial accuracy of high-precision rotating spindle units[J]. Precision Engineering, 1995, 17(4): 266-273.
- [3] ROBERT G, ERIC M, RYAN V. Techniques for calibrating spindles with nanometer error motion[J]. Precision Engineering, 2005, 29(1): 113-123.
- [4] DING L J, DAI S G, MU P A. CAD-Based Path Planning for 3D laser scanning of complex surface[J]. 2nd International Conference on Intelligent Computing, Communication & Convergence, 2016, 92: 526-535.
- [5] 王禹, 袁楚明, 陈幼平. BP 神经网络在非接触测量路径规划中的应用[J]. 机械与电子, 2012(9): 35-39.
- [6] 高瑞, 李泷泉, 黄翔, 等. 复杂曲面零件散乱点云特征点提取[J]. 航空制造技术, 2017(13): 60-65.
- [7] 沈琰辉, 刘华文, 徐晓丹, 等. 基于邻域离散度的异常点检测算法[J]. 计算机科学与探索, 2016, 10(12): 1763-1772.
- [8] LEE S H, SEO J K. Noise removal with gauss curvature-driven diffusion[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(7): 904-909.
- [9] KLAUS W, MATTHIAS F, FRANK H. Measuring large 3D structures using for portable tracking laser interferometers[J]. Measurement, 2012, 45(10): 2339-2345.
- [10] NISHIKAWA S, OHNO K, MORI M, et al. No-contact type on-machine measurement system for turbine blade[J]. New Production Technologies in Aerospace Industry-5th Machining Innovations Conference, 2014, 24: 1-6.
- [11] YANG P C, LIU Y, FANG S P, et al. Interferogram stitching method in measuring the form deviation of curved surface with laser interferometry[J]. Optics Communications, 2017, 387: 303-309.

收稿日期: 2019-04-15