

文章编号:1007-6735(2013)03-0285-04

基于三维激光传感器的圆柱度测量新方法

张明阳¹, 汤碧红², 李郝林¹

(1. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093; 2. 上海好耐电子科技有限公司, 上海 201615)

摘要: 介绍了由三维激光位移传感器、激光线光源、编码器式拉伸位移传感器以及步进电机搭建的三维激光扫描测量系统. 该系统可以一次测得圆柱体的三维图形、某一位置的圆跳动以及圆柱度、轴线直线度等参数. 阐述了该三维激光测量系统的结构组成和工作原理, 给出了圆柱度误差的具体测量评定过程, 并基于 LabVIEW 开发平台设计出了轴类零件表面形状误差测量软件.

关键词: 圆柱度; 三维激光测量; LabVIEW
中图分类号: TP 212.9; TG 801 **文献标志码:** A

New Method of Measurement of Cylindricity Based on 3D Laser Sensors

ZHANG Ming-yang¹, TANG Bi-hong², LI Hao-lin¹

(1. College of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Horizon Electronic Technology Company, Shanghai 201615, China)

Abstract: The system of 3D laser scanning mainly consisting of 3D laser displacement sensor, laser line source, coded tensile displacement sensor and stepper motor was introduced. The system was applied in the measurement of 3D graphics, round beating of a location, cylindricity and axis straightness. The structure and principle of 3D laser scanning systems were introduced and the measurement process was established for the estimation of cylindricity error. A measurement software was designed based on the software developing platform LabVIEW.

Key words: cylindricity; 3D laser measurement; LabVIEW

圆柱度误差是评定轴类零件表面形状误差的重要指标, 决定回转部件的回转精度, 影响零件的振动、噪声及使用寿命^[1], 同时还能反映圆柱体横截面的圆度和轴截面的母线直线度、轴线的直线度等误差^[2]. 航空航天、机械行业对精密轴承、轴类零件的表面形状误差提出了很高的要求. 因此, 对其进行精确测量具有十分重要的意义. 在生产实践中加工出

的圆柱零件并不是绝对的圆柱体, 而是带有一定的形状误差, 其由零件的半径偏差、各个截面的圆度误差及轴线的直线度误差三部分构成^[3]. 常用的圆柱度测量方法有两点法、三点法、坐标测量法、螺旋线法等, 系统误差对其测量精度影响较大, 主要包括主轴的回转精度、主轴的回转轴线与被测物体的回转轴线不重合引起的回转偏心误差以及导轨的直线度

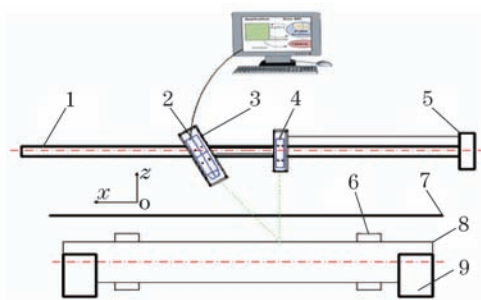
收稿日期: 2012-08-07
第一作者: 张明阳(1988-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 虚拟测试技术与智能控制. E-mail: zhangmingyangjian@yahoo. cn
通讯作者: 李郝林(1961-), 男, 教授. 研究方向: 数控技术、精密检测与智能控制. E-mail: Haolin@public. sta. net. cn

误差等. 本系统通过三维激光位移传感器采集截面外轮廓坐标点, 引入参照物建立相对坐标系, 消除导轨直线度误差. 通过对采集坐标点进行修正来减小回转偏心误差, 提高了圆柱度误差精度. 基于 LabVIEW 软件开发平台设计了圆柱度测量软件, LabVIEW 是美国 NI (National Instrument) 公司研制的虚拟仪器图形编程开发工具, 具有直观界面、便于开发及易于调试等优点^[4]. 该系统自动化程度高, 能满足测量精度要求, 人机界面友好.

1 实验装置与测量方法

1.1 测量系统结构

图 1 为测量系统结构示意图, 直线导轨、三角形量块与 V 型台平行地安装在同一个平台下, 三维激光位移传感器与激光线光源一同安装在固定装置中, 固定装置与编码式拉伸位移传感器安装在直线导轨上, 固定装置可沿导轨滑行. 安装时保证激光线光源垂直照射在被测圆柱体上, 并且保证线激光照射范围能够同时覆盖被测圆柱体与三角形量块.



1. 直线导轨 2. 三维激光位移传感器 3. 激光传感器与激光线光源的固定装置 4. 激光线光源 5. 编码式拉伸位移传感器 6. 称重传感器 7. 三角形量块 8. 被测圆柱体 9. V 型台

图 1 测量系统结构示意图

Fig.1 Scheme of measurement system

系统硬件包括: 计算机, 它是数据处理、存储与显示中心; 三维激光位移传感器, 采用的是德国 Sick 公司生产的 Ranger 3D Camera, 采样率最高为每秒 1 000 个轮廓线, 每个轮廓线采样点数为 1 536, 24 V 外接电源供电, 数据采集卡集成于三维激光位移传感器内部, 通过 tcp/ip 协议与计算机通讯; 激光线光源; 编码式拉伸位移传感器, 测量激光线光源照射截面的 x 轴坐标位置; 称重传感器, 测量被测圆柱体的重量; 行程开关, 控制三维激光位移传感器的起始及终止位置; 通用数据采集卡, 采集称重传感器与行程开关数据; 步进电机, 带动被测圆柱体旋转、带

动三维激光位移传感器与激光线光源的固定装置沿导轨滑行; ADLINK PCI-8134 运动控制卡, 实现步进电机的正反转以及电机运动过程中的加速、减速、匀速; 步进电机驱动器.

1.2 测量原理

以工作台回零处为 x 轴的原点, 以激光线光源沿导轨移动扫描方向为 x 轴的正向, 三维激光位移传感器选用脉冲触发方式采集数据, 编码式拉伸位移传感器对其进行脉冲触发. 所以根据实际要求, 通过修改激光传感器每采集一次数据所需脉冲数, 就可以控制传感器的采集次数, 从而也就推断出数据采集处距 x 轴原点的距离, 得到了 x 轴的相对坐标.

当线激光照射在被测物体表面, 同时也会照射在三角形量块的顶部, 如图 2 所示.

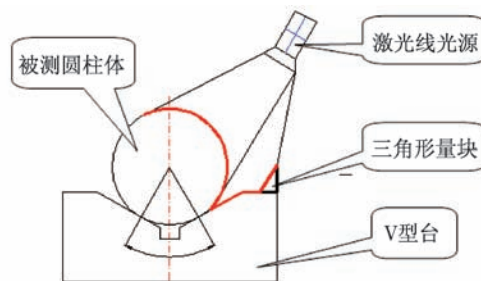


图 2 测量系统的截面图

Fig.2 Section drawing of measurement system

将三角形量块的顶部作为每次扫描测量所得到的圆截面外轮廓线图形 y 轴的原点坐标, 由于传感器拿到的是 y 轴的绝对坐标, 所以经过转换后就可以得到相对于 y 轴原点的相对坐标, 这样可以避免测量过程导轨振动误差和导轨直线度误差. 传感器得到的 z 轴坐标值直接作为本系统的 z 轴相对坐标. 每次扫描过后, 被测物体旋转 120° , 这样经过 3 次扫描后, 就可以得到每个截面完整的外轮廓线上采样点的三维坐标值. 为了提高精度, 对 3 次采集的坐标值进行修正, 以第一次采集拟合的圆心为基准, 让其它两次采集拟合的圆心经过平移与第一次拟合圆心重合, 从而消除被测物体在 V 型台回转偏心处引起的误差, 但会产生由于物体表面自身的差异引起 3 次拟合圆圆心不重合的误差. 经过实验证明, 这个误差远小于被测物体在 V 型台回转偏心处的误差, 因为多点拟合确定的圆心一定要比随机两点确定的圆心精确.

1.3 圆柱度误差数学模型

评定圆柱度误差有最小区域法 (MZC)、最小外接圆柱法 (MCC)、最大内接圆柱法 (MIC) 和最小二

乘法(LSM)4种方法^[5].因最小二乘法比较固定,用软件容易实现,故采用最小二乘法评定圆柱度误差.

1.3.1 测量截面圆圆心的最小二乘拟合

用 (y_{ij}, z_{ij}) 标记第 i 个截面上的第 j 个数据, $i=1,2,3,\dots,m; j=1,2,3,\dots,n$.相对坐标原点 $O(x_i, 0, 0)$ 为三角形量块顶部,截面圆轮廓如图3所示.

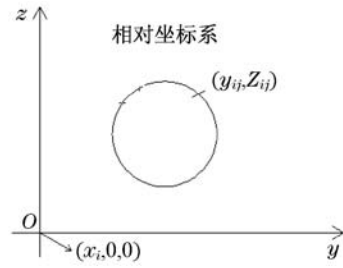


图3 截面圆轮廓

Fig.3 Circular outline of sections

设 i -截面上的拟合圆 Γ_i 的方程为

$$(y - y_i^o)^2 + (z - z_i^o)^2 = r_i^2 \quad (1a)$$

或写为

$$y^2 + z^2 + A_i y + B_i z + C_i = 0 \quad (1b)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} A_i &= -2y_i^o \\ B_i &= -2z_i^o \\ C_i &= (y_i^o)^2 + (z_i^o)^2 - r_i^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

在最小二乘法的意义下确定系数 A_i, B_i, C_i ,即以到拟合圆圆心的距离平方为判据确定,使得

$$\begin{aligned} d(A_i, B_i, C_i) &= \sum_{j=1}^n [(y_{ij} - y_i^o)^2 + (z_{ij} - z_i^o)^2 - r_i^2]^2 = \sum_{j=1}^n (y_{ij}^2 + z_{ij}^2 + A_i y_{ij} + B_i z_{ij} + C_i)^2 \\ & \text{为最小. 极值条件} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial d}{\partial A_i} = 0, \quad \frac{\partial d}{\partial B_i} = 0, \quad \frac{\partial d}{\partial C_i} = 0 \quad (4)$$

给出

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^n (y_{ij}^2 + z_{ij}^2 + A_i y_{ij} + B_i z_{ij} + C_i) y_{ij} &= 0 \\ \sum_{j=1}^n (y_{ij}^2 + z_{ij}^2 + A_i y_{ij} + B_i z_{ij} + C_i) z_{ij} &= 0 \\ \sum_{j=1}^n (y_{ij}^2 + z_{ij}^2 + A_i y_{ij} + B_i z_{ij} + C_i) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

这是一组关于未知量 A_i, B_i, C_i 的(非奇异)线性方程组,可以很容易求解.求解得到 A_i, B_i, C_i 后再求得 i -截面上的拟合圆 Γ_i 的圆心坐标 (y_i^o, z_i^o) 和

半径 r_i ,即

$$\left. \begin{aligned} y_i^o &= -A_i/2 \\ z_i^o &= -B_i/2 \\ r_i &= \sqrt{\frac{A_i^2 + B_i^2}{4} - C_i} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

1.3.2 圆柱度误差定义

按圆柱度定义:圆柱度指柱面上的点相对于基准圆柱的误差,所以应先构造基准圆柱体.基准圆柱体的轴心坐标可定义为各 i -截面拟合圆圆心的平均值,其半径定义为各 i -截面拟合圆半径的平均值

$$\left. \begin{aligned} Y_0 &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i^o \\ Z_0 &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m z_i^o \\ R &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_i \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

如此圆柱度误差可定义为相对基准圆柱体轴心最远点距离和最近点距离之差

$$\delta = \max_{i,j} \sqrt{(y_{ij} - Y_0)^2 + (z_{ij} - Z_0)^2} - \min_{i,j} \sqrt{(y_{ij} - Y_0)^2 + (z_{ij} - Z_0)^2} \quad (8)$$

1.4 软件的总体设计

该系统是基于美国NI公司的LabVIEW软件开发平台设计而成,实现了数据采集、数据分析与处理、数据显示与存储和工作台的驱动等功能,程序流程图如图4所示(见下页).

该测量系统主要用到数据分析与处理模块,它是实现圆柱度算法的过程,是整个软件的关键部分.步进电机驱动控制模块有8134-Initial VI、8134-Start-sa-move VI、8134-Set-home-config和8134-Set-home-move VI 4个子VI,这些模块需导入LabVIEW软件用户库中使用^[6].利用这4个基本的运动控制模块可对步进电机的正反转以及电机运动过程中的加速、减速、匀速进行控制.

2 实验研究

对于一圆柱套筒的外表面进行测量,等间隔采样,截面间距为20 mm,共采样5个截面($m=1, 2, \dots, 5$).三维激光位移传感器每个截面采样点数为1 536,每次打在被测圆柱套筒上的点数约为353,取335个点用于计算.被测圆柱套筒旋转3次($\theta=0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$),3次测量数据分别做最小二乘圆拟合,

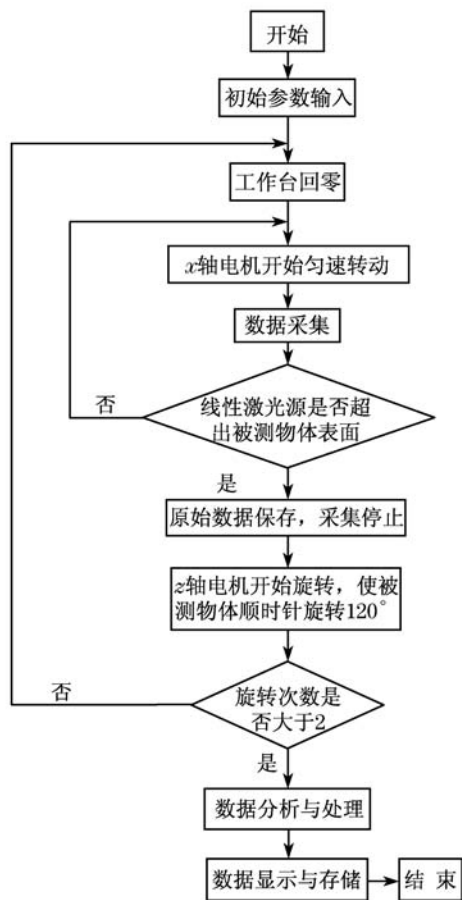


图4 软件流程图

Fig.4 Program flow diagram

最后得到修正结果. (y_m^o, z_m^o) 来标记第 m 个截面圆圆心坐标, r_m 来标记第 m 个截面圆半径. 截面最小二乘半径值、截面最小二乘圆心坐标如表 1、表 2 所示.

表 1 截面最小二乘半径值
Tab.1 Results of least square radius
of cross sections

m	r_m				mm
	0°	120°	240°	修正后	
1	37.892 8	37.876 5	37.940 1	37.902 5	
2	37.862 7	37.867 4	37.930 5	37.886 0	
3	37.918 2	37.860 6	37.930 9	37.902 4	
4	37.878 7	37.837 8	37.940 5	37.884 1	
5	37.966 5	37.866 5	37.935 2	37.921 1	

用游标卡尺对 5 个截面多次测量得其平均半径值分别为 37.885, 37.883, 37.886, 37.884, 37.900, 与修正后的试验结果具有很好的一致性, 证明了该测量方法的可靠性.

图 5 是重构出的被测圆柱套筒的三维图形, 能够直观地反映被测圆柱体形状, 便于观察表面形状误差.

表 2 截面最小二乘圆心坐标

Tab.2 Coordinates of least square centers of cross sections

m	(y_m^o, z_m^o)			
	0°	120°	240°	修正后
1	144.846 8, 134.306 4	146.151 7, 134.117 5	146.008 2, 134.464 6	144.847 3, 134.305 6
2	145.121 7, 133.984 7	146.467 3, 133.861 6	146.231 9, 134.281 0	144.910 5, 133.983 6
3	145.357 1, 133.849 5	146.745 9, 133.619 9	146.535 3, 134.083 1	145.146 0, 133.848 5
4	145.685 4, 133.568 7	147.071 0, 133.379 7	146.851 9, 133.857 0	145.051 6, 133.566 7
5	145.954 6, 133.410 5	147.304 6, 133.149 4	147.162 0, 133.642 2	145.320 9, 133.408 6

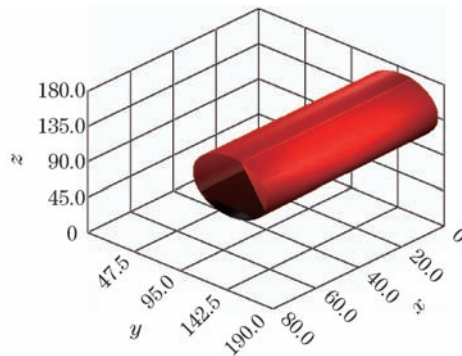


图5 重构出的圆柱套筒

Fig.5 Reconstructed 3D cylindrical sleeve

3 结束语

该方法具有测量系统结构简单、实现了非接触测量、并减小传统方法中圆柱回转偏心以及导轨直线度的误差、直观显示了重构的三维测量图形、自动化程度及测量效率高的优点. 该测量方法还可以用于超长轴类零件表面形状误差的测量、刀具偏心振动测量等相关领域, 能够满足测量精度要求, 具有很好的应用前景.

(下转第 293 页)

- 工大学学报,2011,33(1),18-23.
- [4] Armbrust M, Fox A, Griffith R, et al. Above the clouds: a Berkeley view of cloud computing[R]. Tech Rep UCB/EECS-2009-28. Berkeley: University of California, 2009: 1-23.
- [5] Yau S, An H. Software engineering meets services and cloud computing[J]. Computer Society, 2011, 44(10): 47-53.
- [6] 张兴旺,李晨晖,秦晓珠. 云计算环境下大规模数据处理的研究与初步实现[J]. 现代图书情报技术, 2011, 204(4): 17-23.
- [7] 刘真,刘峰,张宝鹏,等. 云计算模型在铁路大规模数据处理中的应用[J]. 北京交通大学学报, 2010, 10, 34(5): 14-19.
- [8] Bharat K, Broder A, Henzinger M, et al. The connectivity server: fast access to linkage information on the Web [J]. Computer Networks and ISDN System, 1998, 30(1): 469-477.
- [9] Broder A, Kumar R, Moghoul F. Graph structure in the web[J]. Computer Networks and ISDN System, 2000, 33(1): 309-320.
- [10] Dean J, Ghemawat S. MapReduce: simplified data processing on large clusters[J]. Communications of the ACM-50th anniversary issue: 1958-2008, 2008, 51(1): 107-113.
- [11] Elteir M, Lin H, Feng W. Enhancing MapReduce via asynchronous data processing [C] // IEEE 16th International Conference on Parallel and Distributed Systems, New York: IEEE Press, 2010, 397-405.
- (编辑:金虹)

.....

(上接第 288 页)

参考文献:

- [1] 马德锋,朱孔敏,邱明. 基于 LabVIEW 的圆柱度误差测量软件设计[J]. 轴承, 2007(11): 43-47.
- [2] 郑鹏,张琳娜,陈明仪. 现行圆柱度测量方法分析及采样方案新策略[J]. 机械强度, 2011, 33(1): 152-158.
- [3] 张小梅,李春梅. 高精度圆柱度测量方法[J]. 计测技术, 2007, 27: 51-54.
- [4] 蔡俊,王宏光. 转子临界转速实验与计算的对比分析[J]. 上海理工大学学报, 2007, 29(5): 471-475.
- [5] 赵茜,王东霞,刘兰英. 圆柱度误差及其评定方法综述[J]. 计量与测试技术, 2006, 33(12): 1-2.
- [6] 荆学东,何凯,杨亮. 圆度和圆柱度测量虚拟仪器的开发[J]. 自动化仪表, 2011, 32(10): 52-54.