

## 大尺寸筒状设备圆度误差测量系统

刘 杰, 李 华, 付西红

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

**摘 要:** 为了对大尺寸筒状设备进行圆度误差评定, 研制了大尺寸筒状设备圆度误差测量系统。其结合了激光准直、图像处理等多方面技术对大尺寸筒状设备的圆度误差评定进行研究。首先, 介绍了系统获取大尺寸筒状设备圆度数据的方式。然后, 根据圆度数据的获取方式, 提出了基于相邻测点位置关系的最小外接圆过滤算法。最后, 验证该算法的过滤效率, 并与同类算法在解算时间、解算结果两方面进行比较。实验结果表明: 最小外接圆过滤算法解算时间较以往同类算法缩短了 30% 以上。系统 CCD 测量杆的测量精度达到 0.7 mm。大尺寸筒状设备圆度误差测量系统满足工程需要, 可对大尺寸筒状设备进行有效圆度误差评定。

**关键词:** 测量; 大尺寸筒状设备; 激光准直; 最小外接圆; 圆度误差

**中图分类号:** TH161 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0117005

## Measurement system of large-scale sleeve roundness error

Liu Jie, Li Hua, Fu Xihong

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** In order to evaluate the roundness error of large-scale sleeve, a roundness error measurement system of large-scale sleeve was established and its applied algorithms such as laser collimation, image processing and etc were investigated. First, the method that the system obtained roundness error of large-scale sleeve was introduced. Then, based on the measuring process, a filtering algorithm of minimum circumscribed circle which analyzed the point position forms was presented. Finally, filtering efficiency was analyzed. Computing time and the precision were compared with the similar algorithm. Experimental results indicate that the computing time of the filtering algorithm is shorter by more than 30% and the precision of the CCD measurement rod is 0.7 mm. The roundness error measurement system of large-scale sleeve can satisfy the requirement of the project and evaluate roundness error effectively.

**Key words:** measurement; large sleeve; laser collimation; minimum circumscribed circle; roundness error

收稿日期: 2015-05-05; 修订日期: 2015-06-03

基金项目: 国家科技重大专项(2010ZX06001-012)

作者简介: 刘杰(1988-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事光电测量设备方面的研究。Email: liujie2015@opt.ac.cn

## 0 引言

工业领域对零件及设备进行圆度误差评定是一种常用定量检测手段<sup>[1-2]</sup>。小型零件往往采用三坐标测量仪进行几何数据采集并进行圆度误差评定。而对于大型锅炉、蒸发器筒体等直径 3~5 m 的大尺寸筒状设备的测量,未有较好的方法予以解决<sup>[3-4]</sup>。为了能够获得大尺寸筒状设备的几何数据并评定其圆度误差,研制了大尺寸筒状设备圆度误差测量系统,包含调节装置、激光指示器、CCD 测量杆、系统数据处理软件等组成部分,结合了激光准直<sup>[5]</sup>、CCD 图像处理<sup>[6-7]</sup>等多方面技术<sup>[8]</sup>。并加装调节装置使测量系统获得对大尺寸筒状设备测量的通用性。该系统利用激光指示器及 CCD 测量杆获取设备的几何数据,而后经过系统数据处理软件对数据进行快速处理,得到设备的圆度误差。其圆度误差评价采用最小外接圆法。

最小外接圆法是评定设备圆度误差最常用的方法之一,而求解最小外接圆圆心是最小外接圆法的关键。对此,国内外学者已进行了较成熟的论证,提出了较多算法:最优化算法<sup>[9]</sup>、网格搜索法<sup>[10-11]</sup>、计算几何法<sup>[12]</sup>、仿增量算法<sup>[13]</sup>等。最优化算法、网格搜索法均是得到最小外接圆的优化值。计算几何法是在对测点分析得基础上得到的最小外接圆的精确值。其提出了一种删除无用测点的方法,提高了解算效率,但需要构造凸壳、最远点泰森多边形图。文中在介绍大尺寸筒状设备几何数据获取方式的基础上,提出一种基于邻近测点位置分析的求解测点最小外接圆的过滤算法。该算法便于直观理解,可有效缩短系统数据处理时间。

## 1 系统组成及数据获取

大尺寸筒状设备圆度误差测量系统由调节装置、激光指示器、CCD 测量杆、系统数据处理软件等部分组成。图 1 为激光指示器及调节装置。调节装置可以升降及平移。激光指示器可以发出准直激光光束,并能够调节激光束出射方向。

图 2 为 CCD 测量杆。其一端为钢制耐磨圆头,另一端可发出准直激光。另外测量杆中部固定有一 CCD 激光光斑接收器。该接收器由线阵 CCD、数据处理电路、蓝牙数据传输模块、显示电子管等组成,

必要时附加倾角传感器。该接收器可获取激光指示器所发出激光光束的光斑图像,提取光斑中心,得到激光光斑中心到测量杆圆头端的长度。同时若附加倾角传感器,其可记录测量杆在测量时的倾角。线阵 CCD 的接收范围大于 10 cm。对于不同口径的大尺寸筒状设备,测量杆长度需要相应改变。图 3 为 CCD 激光光斑接收器。



图 1 激光指示器及调节装置

Fig.1 Laser director and installed frame



图 2 CCD 测量杆

Fig.2 CCD measurement rod



图 3 CCD 激光光斑接收器

Fig.3 CCD laser receiver

系统数据获取原理为:以激光指示器发出的激光束为测量基准。由高分辨率线阵 CCD 测量杆获取

指示激光束的图像,进而对此图像进行处理,获取激光光斑中心,记录筒状设备截面内壁上各测量点到光斑中心的距离及相应测量杆的倾角,即可计算出筒状设备各截面的最小外接圆,继而计算设备截面的圆度误差。

具体测量过程如图 4 所示。首先打开激光指示器,使其发出激光光束。然后在筒状设备距离激光指示器的最近端截面与最远端截面,利用 CCD 测量杆分别观察激光光束位置,调整调节装置及激光指示器指向,使激光束粗略指示筒状设备的轴线,保证截面内各测量点到指示激光束的距离大致相当,误差在 CCD 接收器的测量范围内(10 cm 以内)。

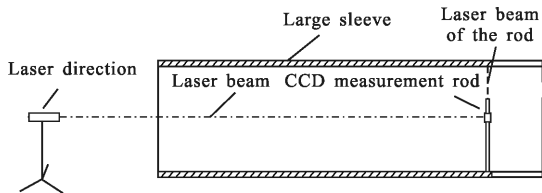


图 4 系统数据获取过程

Fig.4 Process of getting data

在准备工作完成后,便可利用 CCD 测量杆对筒状设备进行测量,得到各截面内测量点到指示激光束的距离及相应测量杆倾角。各测点全部测量完毕,即可通过 CCD 激光光斑接收器的内置蓝牙模块将数据传输给系统数据处理软件。系统数据处理软件对以激光光斑为坐标圆心的测量点坐标数据进行计算分析,得到设备的圆度误差。

针对筒状设备形状数据获取的特点,利用各测点的最小外接圆评价筒状设备的圆度,并提出针对性的过滤算法节省运算时间。

## 2 最小外接圆的求解

### 2.1 基于相邻测点位置关系过滤算法

点集的最小外接圆只有少数的几个测点确定,那么如果可以将不参与最小外接圆构建的点去除,就可以有效提高最小外接圆解算效率。当人眼对所有测点的位置进行观察时,能够感觉到若干靠近点集内部的测点必然不会参与构建最小外接圆,属于无用测点。如果能将这种感性认识转化为严谨的理论分析,那么可以对所有测点进行有效的“过滤”,去除无用测点。

首先对相邻测点的位置关系进行分析。根据测点与点集的最小二乘法拟合圆心的位置,可将测点 A 与其相邻测点 B、C 连线的关系分为三种:远离中心、靠近中心、共线。即若点 A 与点集的最小二乘法拟合圆心在点 B、点 C 连线的不同侧,则相邻测点位置关系视为远离中心;若点 A 与该拟合圆心在点 B、点 C 连线的同一侧,视其测点位置关系为靠近中心;点 A 在点 B、点 C 的连线上,视为共线,如图 5 所示。

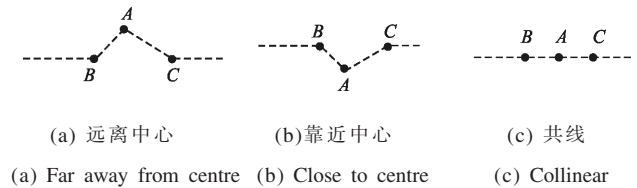


图 5 相邻测点位置关系

Fig.5 Position forms among close points

如果一个测点位于点集的最小外接圆上,那么就是说通过该测点的圆中存在包含所有测点的情况。而若一个测点与点集中任意其他两点构造的圆,均不能包含所有测点,那么其必定是无用测点,不参与最小外接圆的构建。根据这个思想,如图 5 在靠近中心、共线这两种情况下,若一个圆的圆心在点集内部且通过点 A,那么这个圆必然不包含点 B、点 C。此时点 A 就必然是无用测点,就可去除点 A。

对于远离中心情况,利用 A、B、C 三点所构建三角形的外接圆的曲率半径来评价通过 A 的圆是否可以在包含 B、C 两点的情况下作为最小外接圆。首先选取一个最小外接圆的最低标准。对点集所有测点进行最小二乘法拟合,得到点集的拟合圆心。找出所有测点中距拟合圆心最远距离  $d$ ,那么可知以拟合圆心为圆心,以  $d$  为半径的圆是点集的外接圆。

$d$  与点集的最小外接圆半径  $R$  的关系为:  $d \geq R$ 。若 A、B、C 三点所构建三角形的外接圆的曲率半径大于  $d$ ,那么 A 点便可以去除,即最小外接圆不可能在通过 A 点情况下,同时包含 B、C 两点。

### 2.2 最小外接圆的求解

在对最小外接圆存在形式与基于相邻测点位置关系过滤准则的研究基础上,可以得到最小外接圆的求解算法。如下:

(1) 利用最小二乘法对点集进行拟合,记录圆心坐标,计算测点距圆心的最远距离  $d$ 。此拟合圆心视

为判定测点位置关系的基准圆心；

(2) 根据待判定测点与拟合圆心的关系,依次对相邻测点位置关系进行分析,利用过滤准则去除无用测点；

(3) 对剩余测点再次进行最小二乘拟合,重复步骤(1)、(2),直到没有测点可以去除；

(4) 对剩余测点任选两测点进行组合,对每一个组合计算两测点连线作直径的圆的圆心坐标及半径。计算除这两个测点以外剩余测点到圆心的距离。若距离均小于等于圆的半径,记录保存圆心坐标及半径。

(5) 对剩余测点任选三测点进行组合,对每一个组合计算三测点构建三角形外接圆的圆心坐标及半径。计算除这三个测点以外剩余测点到圆心的距离。若距离均小于等于圆的半径,记录保存圆心坐标及半径。

(6) 比较步骤(4)、(5)中记录的半径大小。半径最小的圆即是点集的最小外接圆。计算所有测点距离此圆圆心最近距离。最小外接圆半径与最近距离之差即是所测设备的圆度误差。

### 3 实验结果

根据上述,编制 C++实验程序。从过滤效率、解算用时、解算精度等三个方面分析实验结果。

由表 1 可以看出,对 8 组 200 个测点数据经过过滤后,可以保留 3、4 个有效测点。过滤效率较高,所需的迭代次数仅为 6 次左右。

表 1 8 组数据每次迭代剩余测点数

Tab.1 Number of remaining points after each filtering

Filtering times	Number of remaining points							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0	200	200	200	200	200	200	200	200
1	85	77	73	74	76	79	76	68
2	33	35	27	31	31	34	30	34
3	17	14	9	15	11	12	13	17
4	9	6	6	7	9	7	5	8
5	5	4	4	5	3	3	4	5
6	4	3	3	4	-	-	3	4
7	3	-	-	-	-	-	-	3

由表 2 可以看出,8 组 200 个测点数据在经过过滤后,解算时间明显缩短,解算效率较高。过滤算法与计算几何法比较,由于过滤算法针对测点的分布规律只考虑相邻测点关系,不需构建最近点泰森多边形图,故计算时间较计算几何法占优,解算时间提高 30%以上。计算机为: Intel(R) Celeron(R) D,内存 512 MB。

表 2 解算时间对比

Tab.2 Comparison of computing time

Series	1	2	3	4	5	6	7	8
Non-filtering algorithm /ms	143.6	144.1	136.2	138.9	145.2	132.1	134.3	146.3
Computational geometry /ms	16.3	15.1	15.6	15.2	14.8	14.8	15.0	15.1
Filtering algorithm /ms	10.8	9.8	9.3	10.1	8.6	8.5	9.1	9.6

在解算精度方面,过滤算法与计算几何法得到的最小外接圆圆心、半径及点集圆度误差结果一致,均是对最小外接圆的精确求解。

### 4 结论

大尺寸筒状设备圆度误差测量系统为大尺寸筒状设备的圆度几何数据获取提供了一个较新的获取方式。而基于相邻测点位置分析的最小外接圆过滤算法可有效去除无用测点,便于直观理解,可以有效缩短解算时间,提高解算效率。其为后续的数据处理算法与硬件的集成节省了硬件开支,便于系统优化。该过滤算法适用于测点依照一定顺序分布在圆周上的情况。实验结果表明:最小外接圆过滤算法较以往同类算法计算时间缩短 30%。对直径 4m 的核电蒸发器筒体的实际测量中,系统 CCD 测量杆的测量精度达到 0.7 mm。系统满足工程需要。

### 参考文献:

[1] Fang Qinlin. Research on roundness evaluation algorithm and programming [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)  
方沁林. 圆度误差评定的算法研究与软件设计 [D]. 武汉:



- 华中科技大学, 2007.
- [2] Endrias D H, Feng H Y. Minimum-zone form tolerance evaluation using rigid-body coordinate transformation [J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2003, 3(1): 31–38.
- [3] Zhou Sen, Guo Yongcai, Gao Chao. Dynamic length measuring system for large scale workpieces [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2472–2478. (in Chinese)  
周森, 郭永彩, 高潮. 用于大尺寸工件的动态长度测量系统. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2472–2478.
- [4] Hu Wenchuan, Qiu Zurong, Zhang Guoxiong. Measurement of large-scale space angle formed by non-uniplanar lines[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1427–1433. (in Chinese)  
胡文川, 裘祖荣, 张国雄. 大尺寸空间异面直线夹角的检测[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1427–1433.
- [5] Li Jian, Tan Jiubin, Cui Jiwen. Study on method of feedback compensation drift of collimation beam based on filter[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2013, 4(2): 336–342. (in Chinese)  
李结安, 谭久彬, 崔继文. 基于滤波的准直光束漂移反馈补偿方法研究[J]. *光电子·激光*, 2013, 4(2): 336–342.
- [6] Zhang Zhen, Zhou Menglian, Zhang Jianmin, et al. Shadows of laser spots in CCD and their mechanism [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1365–1370. (in Chinese)  
张震, 周孟莲, 张检民, 等. CCD 中激光光斑阴影现象及机理[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1365–1370.
- [7] Wang Xijun. Computation and comparison of laser speckle with sub-pixel measurement methods [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6): 652–657. (in Chinese)  
王希军. 激光散斑的亚像素位移法计算及比较[J]. *中国光学*, 2012, 5(6): 652–657.
- [8] Liu Jie, Li Hua, Chang Hemin, et al. System contributing to install inside sleeve and filtering algorithm to evaluate its roundness error[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(6): 626–630. (in Chinese)  
刘杰, 李华, 常何民, 等. 内套筒安装测量系统及其圆度误差滤除算法[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 626–630.
- [9] Zhang Chunyang, Lei Xianqing, Li Jishun, et al. Method of roundness error evaluation based on geometry optimization [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46 (12): 8–11. (in Chinese)  
张春阳, 雷贤卿, 李济顺, 等. 基于几何优化的圆度误差评定算法[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(12): 8–11.
- [10] Lei Xianqing, Chang Weihang, Xue Yujun, et al. Evaluation of roundness error based on mesh searching arithmetic [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29 (11): 2324–2329. (in Chinese)  
雷贤卿, 畅为航, 薛玉君, 等. 圆度误差的网格搜索算法[J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(11): 2324–2329.
- [11] Huang Fugui, Zheng Yujun. A method for roundness error evaluation based on area hunting [J]. *Acta Metrological Sinica*, 2008, 29(2): 117–119. (in Chinese)  
黄富贵, 郑育军. 基于区域搜索的圆度误差评定方法[J]. *计量学报*, 2008, 29(2): 117–119.
- [12] Liu Shugui, Yang Fang, Tao Jin. Valuation of minimum circumscribed circle form error by computational geometry approach[J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2000, 3: 83–89. (in Chinese)  
刘书桂, 杨芳, 陶晋. 计算几何在测试计量技术中的应用——求解最小外接圆[J]. *工程图学学报*, 2000, 3: 83–89.
- [13] Yue Wuling, Wu Yong. Roundness error based on quasi-incremental algorithm [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(1): 87–91. (in Chinese)  
岳武陵, 吴勇. 基于仿增量算法的圆度误差快速准确评定[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(1): 87–91.