

# 内套筒安装测量系统及其圆度误差滤除算法

刘 杰 李 华 常何民 蒋 鑫

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

**摘要** 核电蒸发器内套筒安装过程中需对内外筒体同心度及内套筒圆度误差进行测定。基于实际需要, 研制了核电蒸发器内套筒安装测量系统。介绍了该系统的组成及测量原理。针对系统数据处理过程中的实际情况, 提出将相邻测点的位置关系分为三类: 凸型、凹型、共线, 并根据这三种类型, 提出基于相邻测点位置关系确定最大内接圆的滤除算法。该算法便于直观理解, 滤除无用点的效率较高, 可有效节省数据处理时间。在实际应用中, 整个系统测量精度可达到 0.7 mm, 满足工程需要, 有较高的实用价值。

**关键词** 测量; 内套筒; 激光准直仪; 圆度误差; 最大内接圆; 滤除算法

**中图分类号** TH161 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0608002

## System Contributing to Install Inside Sleeve and Filtering Algorithm to Evaluate Its Roundness Error

Liu Jie Li Hua Chang Hemin Jiang Xin

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

**Abstract** Nuclear evaporator has two sleeves, outside sleeve and inside sleeve. To install inside sleeve accurately, the concentricity of the two sleeves and the roundness error of inside sleeve should be evaluated. The system which contributes to install inside sleeve of nuclear evaporator is developed. It is introduced that the parts of the system and the measuring process. The position forms among three close points are divided into three forms: convex, concave and collinear in the data processing. And it is found out how to filter the points that can't fix maximum inscribed circle. Based on that, the filtering algorithm is presented. This algorithm is efficient and easy to be understood. It can save the data processing time. In practical application, the measuring accuracy of the whole system is 0.7 mm, which can meet the needs of project and have practical value.

**Key words** measurement; inside sleeve; laser collimator; roundness error; maximum inscribed circle; filtering algorithm

**OCIS codes** 120.4880; 120.1880; 120.5800

## 1 引 言

核电蒸汽发生器是核岛主设备之一, 是核电站主件, 由上、下筒体组成。其中蒸发器下筒体又分为外筒体和内套筒。在外筒体中安装内套筒, 需要测定内外筒体的同心度, 即各截面上内外筒体圆心的偏离量; 在内套筒中安装支撑板, 需要测定内套筒的圆度误差。这些都是核电蒸发器制造过程中非常重

要的检测环节。小型零件往往采用三坐标测量仪获取其几何数据, 但该方法对于内径超过 4 m 的内套筒显然是不合适的。为了方便上述安装过程, 研发出核电蒸发器内套筒安装测量系统。其由安装支架、激光准直仪、CCD 测量杆等组成部分获取内套筒数据<sup>[1-3]</sup>, 而后由一套专用软件对数据进行处理, 得到内外筒体的同心度及内套筒的圆度误差。内外

收稿日期: 2013-11-01; 收到修改稿日期: 2014-01-13

基金项目: 国家科技重大专项(2010ZX06001-012)

作者简介: 刘 杰(1988—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事光电测量设备方面的研究。

E-mail: liujiebit@hotmail.com

筒体同心度的计算与内套筒的圆度误差评价均采用最大内接圆法。

最大内接圆法评定圆度误差的关键在于解算所有测点的最大内接圆圆心。中外学者已进行较成熟的论证。最优化算法<sup>[4]</sup>、区域搜索法<sup>[5-6]</sup>、计算几何法<sup>[7-9]</sup>、仿增量算法<sup>[10]</sup>等均是较常用的算法。其中最优化算法和区域搜索法是在特定步长及精度下得到估算值。计算几何法与仿增量算法是基于测点分析求解最大内接圆,得到的是最大内接圆的精确值。基于测点分析求解最大内接圆<sup>[11-12]</sup>,要求对所有三个测点确定的圆进行比较分析,计算量较大。计算几何法中提出了删除无用点的方法,来减少计算量,但需要构建最近点泰森多边形图。本文针对核电蒸发器内套筒几何数据的获取过程,提出一种基于相邻测点的位置关系的滤除算法,而且在得到圆度误差的精确值的基础上,有效缩短了求解时间。

## 2 内套筒安装测量系统组成及测量原理

核电蒸发器内套筒安装测量系统由安装支架、激光准直仪、CCD 测量杆(包含 CCD 接收器)及专用数据处理软件等部分组成。

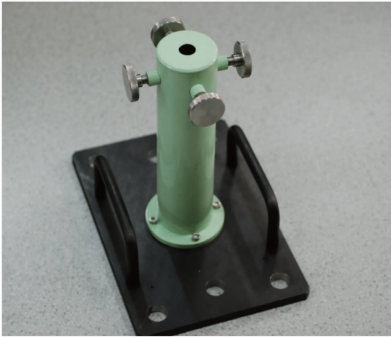


图 1 安装支架及激光准直仪

Fig. 1 Installed frame and laser collimator



图 2 CCD 激光接收器

Fig. 2 CCD laser receiver

系统以准直激光光束建立测量基准。由高分辨率线阵 CCD 获取准直激光光斑的数字图像,通过图像处理技术提取光斑的中心,根据内套筒测量截面上的各点与光斑中心的距离,即可计算出内外筒体的同心度及内套筒的圆度误差。

图 3 为系统测量过程示意图,其中红色部分为外筒体,绿色部分为内套筒,浅蓝色部分为管板。测量过程为:根据管板的孔位,确定安装支架的位置,使激光准直仪定位在管板的中心。此时,打开激光准直仪,使其发出准直激光光束。

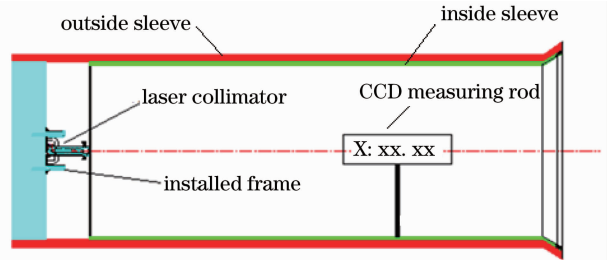


图 3 测量过程示意图

Fig. 3 Measuring process diagram

在外筒体的远端截面,使用 CCD 测量杆在各定位点接收激光光斑,调整激光准直仪的指向,使各定位点的光斑中心位置一致。此时,激光光束指示外套筒轴线。在内套筒各安装截面,对应调节孔的内侧位置上放置 CCD 测量杆,接收激光光斑,显示激光光斑中心与调节孔的距离。操作人员根据各位置的距离偏差,对内套筒进行调整和安装,直至各位置的距离满足要求。最后将各位置的距离残差保存在 CCD 接收器中。待各位置测定完毕,将全部数据传输给数据处理软件,得到内外筒体同心度及内套筒圆度误差。图 4 为实际测量过程。



图 4 实际测量过程

Fig. 4 Practical measuring process

上述测量过程是数据获取过程,而进一步的数据处理需要专用的处理软件及相应的解算算法。下面主要讨论对内外筒体同心度与内套筒圆度误差进

行评价过程中最大内接圆的解算算法。

### 3 最大内接圆的求解

#### 3.1 多测点的滤除算法

基于测点分析解算最大内接圆要求对所有三个测点确定的圆进行比较分析,计算量较大。而在内套筒圆度误差测量过程中,测点沿外套筒轴线分布一周,有较好的规律性。考虑利用一个测点与相邻

两测点的位置关系,来判定这一测点是否位于点集的最大内接圆上。在阐述滤除算法之前,由于最小二乘法拟合圆心十分接近最大内接圆圆心<sup>[7,13-14]</sup>,先定义点集的最小二乘法拟合圆圆心为基准圆心,点集中所有测点距基准圆心的最近距离为 $d$ 。对于测点 $P$ ,与相邻两测点 $P_1$ 、 $P_2$ 的位置关系可分三种:凸型、凹型、共线,如图5所示。

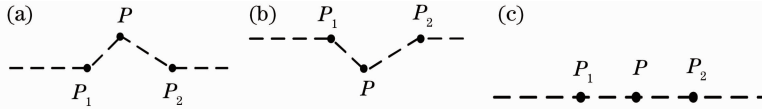


图5 三测点位置关系。(a)凸型;(b)凹型;(c)共线

Fig. 5 Position forms among three close points. (a) Convex; (b) concave (c) collinear

若 $P$ 与拟合圆心在 $P_1P_2$ 连线的不同侧,为“凸型”。此时,若 $P$ 、 $P_1$ 、 $P_2$ 三点所构成圆的半径小于测点距基准圆心的最近距离 $d$ ,那么 $P$ 点就可以被滤除掉,即最大内接圆不可能在通过 $P$ 点的情况下不包含 $P_1$ 点或者 $P_2$ 点。若 $P$ 与基准圆心在 $P_1P_2$ 连线的同一侧,则为“凹型”。此时,若 $P$ 、 $P_1$ 、 $P_2$ 三点所构成圆的半径小于测点距基准圆心的最近距离 $d$ ,那么 $P_1$ 、 $P_2$ 点就可以被滤除掉,即最大内接圆不可能在通过 $P_1$ 点或者 $P_2$ 点的情况下不包含 $P$ 点。“共线”位置关系是“凸型”、“凹型”的中间形态,三测点关系较复杂,不过滤任何测点。

#### 3.2 确定最大内接圆的算法

基于上述研究,可以得到点集的最大内接圆求解算法,进而得到内套筒的圆度误差。解算步骤如下:

- 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近距离 $d$ ;
- 2) 依次对相邻测点位置关系进行分析,利用滤

除算法去除无用测点;

- 3) 对剩余测点再次进行最小二乘法拟合,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,若距离均大于等于圆的半径,记录保存圆心坐标及半径;

- 5) 比较步骤4)中记录的半径大小,半径最大的圆即点集的最大内接圆。计算所有测点距离此圆圆心最远距离,最远距离与最大内接圆半径之差即是内套筒的圆度误差。

## 4 实验结果

根据上述,编制C++算法实验程序。从滤除算法效率、解算用时和解算结果三个方面分析实验结果。

表1 8组数据每次迭代剩余测点数

Table 1 Number of remaining points after each filtering

Filtering times	Number of remaining points							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0	100	100	100	100	100	100	100	100
1	40	40	44	41	40	37	35	38
2	18	20	17	16	17	18	18	14
3	6	12	7	7	9	6	10	8
4	3	9	5	6	5	4	5	5
5	—	6	4	3	3	3	4	4
6	—	3	—	—	—	—	3	—

由表1可以看出,对8组100个测点数据经过滤除后,可以保留3、4个有效测点。滤除效率较高,

而所需的迭代次数为5次左右。

表 2 解算时间对比  
Table 2 Comparison of evaluating time

Series	1	2	3	4	5	6	7	8
Non-filtering algorithm /ms	96	102	90	124	98	104	102	113
Computational geometry /ms	8.5	7.8	7.7	8.0	6.9	7.2	8.7	8.9
Filtering algorithm /ms	7.6	6.3	6.5	6.8	5.1	6.3	9.2	5.6

由表 2 可以看出,8 组 100 个测点数据在经过滤除后,解算时间明显缩短,解算效率较高。滤除算法与计算几何法比较,由于滤除算法针对内套筒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。计算机为: Intel(R) Celeron(R) D, 内存 512MB。

解算结果方面,滤除算法与计算几何法在最大内接圆心、半径及点集圆度误差上结果一致,得到的是点集最大内接圆的准确值。内套筒圆度误差的测量精度取决于 CCD 测量杆获取数据的精度,与最大内接圆解算算法无关。

## 5 结 论

核电蒸发器内套筒安装测量系统利用激光准直技术及高分辨率线阵 CCD 实现了对内外筒体的同心度及内套筒的圆度误差的测定,能够有效地辅助核电内套筒安装。系统在数据处理过程中运用了基于相邻测点位置分析的滤除算法。该算法可以准确求解内套筒各测点的最大内接圆,并解算内套筒圆度误差。其便于直观理解,滤除无用点的效率较高,可有效节省数据处理时间,在大数据处理、系统优化等方面更具实践价值。该滤除算法针对于内套筒圆度误差的解算,同时也适用于其他点集分布在特定圆周上的情况。对于一些异形或带深度凹槽的零件与设备,滤除算法还需要进一步细化。

在实际应用中,核电蒸发器内套筒安装测量系统 CCD 测量杆测量误差小于 0.7 mm,可使内外筒体安装的同心度误差小于 2 mm,满足工程需要,有较高的实际应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Zhang Haifeng, Meng Wendong, Wu Zhibo, *et al.*. One way laser ranging and its measuring experiment[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0308005.  
张海峰, 孟文东, 吴志波, 等. 单向激光测距及其测量实验[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0308005.
- 2 He Yuanxing, Li Xinyang. Analysis of influence of CCD's nonlinear response characterization on measurement results of focal spot and beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0408001.  
贺元兴, 李新阳. CCD 光电相应非线性特性对激光远场焦斑测量及光束质量计算的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(4):

- 0408001.
- 3 Feng Weilei, Wang Fujuan, Zeng Wanqi, *et al.*. CCD spectrum measurement system for laser induced breakdown spectroscopy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 013002.  
冯为雷, 王福娟, 曾万祺, 等. 应用于 LIBS 的 CCD 光谱测量系统[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 013002.
- 4 Zhang Chunyang, Lei Xianqing, Li Jishun, *et al.*. Method of roundness error evaluation based on geometry optimization[J]. Chinese J Mechanical Engineering, 2010, 46(12): 8-11.  
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.
- 5 Lei Xianqing, Chang Weihang, Xue Yujun, *et al.*. Evaluation of roundness error based on mesh searching arithmetic[J]. Chinese J Scientific Instrument, 2008, 29(11): 2324-2329.  
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.
- 6 Huang Fugui, Zheng Yujun. A method for roundness error evaluation based on area hunting[J]. Acta Metrologica Sinica, 2008, 29(2): 117-119.  
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.
- 7 Liu Shugui, Yang Fang, Tao Jin. Valuation of minimum circumscribed circle form error by computational geometry approach[J]. J Engineering Graphics, 2000, 21(3): 83-89.  
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, 21(3): 83-89.
- 8 Liu Shugui, Yang Fang, Zou Zhihua. Study on maximum inscribed circle by computational geometry approach[J]. Chinese J Scientific Instrument, 1998, 19(6): 576-580.  
刘书桂, 杨芳, 邹志华. 计算几何在测试计量技术中的应用——求解最大内接圆[J]. 仪器仪表学报, 1998, 19(6): 576-580.
- 9 Samuel G L, Shunmugam M S. Evaluation of circularity from coordinate and form data using computational geometric techniques[J]. Precision Engineering, 2000, 24(3): 251-263.
- 10 Yue Wuling, Wu Yong. Roundness error based on quasi-incremental algorithm [J]. Chinese J Mechanical Engineering, 2008, 44(1): 87-91.  
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.
- 11 Sun Yuqin, Che Rensheng. Novel method for solving maximum inscribed circle[J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(2): 181-187.
- 12 Endrias D H, Feng H Y. Minimum-zone form tolerance evaluation using rigid-body coordinate transformation [J]. J Computing and Information Science in Engineering, 2003, 3(1): 31-38.
- 13 Fang Qinlin. Research on Roundness Evaluation Algorithm and Programming[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.  
方泌林. 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.
- 14 Zhang Yumei, Zuo Chuncheng, Liu Yan, *et al.*. Present state and expectation of roundness measurement method [J]. Tool Engineering, 2008, 42(11): 8-11.  
张玉梅, 左春怪, 刘岩, 等. 圆度误差检测方法现状与展望[J]. 工具技术, 2008, 42(11): 8-11.

栏目编辑:何卓铭