

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.047

# 大口径钢管圆度测量喷标系统设计与误差补偿研究\*

李 钊 周晓军 徐 云 何 强

(浙江大学机械工程学系, 杭州 310027)

**摘要:** 为满足大口径钢管测量精度的需要,设计了一种龙门架式钢管在线测量及喷标系统。利用龙门架两侧立柱激光传感器的竖直运动,测量钢管截面外径上点的坐标,利用最小二乘法求其圆心坐标,采用近似直径法求取该截面的最大直径和最小直径,从而求得该截面的圆度。实例证明该系统及数据处理算法可实现钢管外径及圆度的测量,并具有相当高的精度。对测量结果进行误差分析,得知影响测量结果的主要来源是钢管的摆放姿态,通过投影及坐标变换对误差进行补偿,补偿后结果得到了一定的改善,从而验证了误差分析的合理性和补偿方法的可行性,该系统可用于大口径钢管的在线测量。

**关键词:** 大口径钢管 圆度 在线检测 误差补偿

**中图分类号:** TG806; TH161<sup>+</sup>.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)09-0272-07

## Error Compensation and Design of Roundness Measurement and Stenciling System for Large Diameter Steel Pipe

Li Zhao Zhou Xiaojun Xu Yun He Qiang

(Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** In order to satisfy the accuracy measurement demand of large diameter steel pipe, a gantry system for on-line measurement and stencil was designed. The coordinates of outer diameter points of the section could be measured by utilizing the vertical motion of laser sensor installed inside column of gantry. Coordinate of circle center was obtained by using least square method. The maximum and minimum of diameter were obtained by approximate diameter method, and then the roundness could be calculated. An example proved that the proposed system and data processing could be used to measure the outer diameter and roundness with high precision. Analysis of result showed that the gesture of steel was the main source of the error, which could be compensated through coordinate transformation and projection. It was verified the rationality of error analysis and the feasibility of compensation method. This system could be used for on-line measurement of large diameter steel pipe.

**Key words:** Large diameter steel pipe Roundness On-line measurement Error compensation

### 引言

为了满足恶劣环境下钢管对接及装配的需求,必须对钢管的质量提出更高的要求<sup>[1~2]</sup>。钢管检测主要分为探伤检测和外形检测,外形检测主要包括对长度、端面垂直度、直径、圆度、壁厚、直线度等参

数的测量,大型企业对钢管生产及检测时还需进行相应的喷标处理。

钢管圆度测量的方法主要分为接触式测量和非接触式测量。接触式测量常采用长脚卡尺和圆度仪,有三点法<sup>[3]</sup>、两步法<sup>[4]</sup>、多步法<sup>[5]</sup>等,但只适合于小直径管,且效率低、受人为因素影响较大,不适

收稿日期:2012-08-26 修回日期:2012-10-07

\* 国家自然科学基金资助项目(51075358,51005252)

作者简介:李钊,博士生,主要从事车辆检测及信号处理研究,E-mail: lizhaoza@163.com

通讯作者:周晓军,教授,博士生导师,主要从事检测及信号处理研究,E-mail: cmeesky@163.com

合大规模及大直径管的在线测量;随着光电设备的迅速发展,非接触式测量<sup>[6]</sup>逐渐得到应用,肖鹏<sup>[7]</sup>等采用 CCD 技术进行动态测量,王宏<sup>[8]</sup>等基于 Labview 平台采用三点法进行测量,姜晓勇<sup>[9]</sup>等提出 MWS 系统进行在线测量,黄富贵<sup>[10]</sup>等用谐波分析法识别圆度误差特征,但上述方法在测量精度及综合测量功能上都有待提高。

本文提出一种在线钢管检测系统,针对圆度误差,采用两个伺服电机通过丝杠传动分别控制两个激光传感器作竖直方向运动,激光传感器水平测量钢管表面的点,从而得到这些点水平坐标和垂直坐标,通过近似计算获得圆度值。本文对在线测量的某钢管外径数据进行计算,并分析测量时误差产生的机理,对所测数据进行补偿。

## 1 钢管测量及喷标系统

### 1.1 系统结构

钢管测量及喷标系统采用如图 1、2 所示的龙门架式结构,龙门架由两侧的伺服电机通过减速器驱动,可沿导轨水平移动;龙门架顶部横梁上装有导轨,顶部测量臂和喷标臂分别位于横梁两侧,由伺服电机通过丝杠控制,可在横梁上移动;测量臂和喷标臂均安装有伺服电机和丝杠,从而可以在竖直方向运动,测量臂下端两侧水平装有两个激光位移传感器,用于端面垂直度和钢管长度的测量,底部装有测厚仪,用于测量钢管的壁厚,喷标臂下端装有喷头,用于钢管喷标;龙门架两侧立柱装有直线导轨和伺服电机,两个导轨均水平装有激光位移传感器,用于钢管直径及圆度测量;地面导轨的一端装有激光位移传感器,用于龙门架位置和钢管长度的测量。

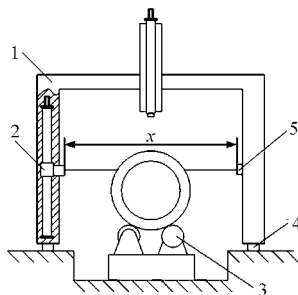


图2 钢管测量及喷标系统侧视图

Fig.2 Side view of pipe measurement and stencil system

1. 龙门架 2. 激光传感器 4 3. 辊道 4. 导轨 5. 激光传感器 5

### 1.2 圆度测量原理

测量时钢管放置于支撑辊道上,每个辊道上有两个伺服电机,可使钢管转动以及水平方向移动,测量过程中钢管保持静止状态。

圆度测量如图 1、2 所示,龙门架停至钢管某待测截面位置,激光传感器 1 测得龙门架位置  $L$ 。测量前需将龙门架两侧支柱的激光传感器 4 和 5 调至同一高度,该系统中龙门架两立柱导轨中激光传感器的起始位置各装有一个限位开关,安装时通过重锤和直尺保证两限位开关在同一高度,测量时先检测两传感器是否到达限位,如未到达限位则先将传感器移至限位开关位置,同时通过设置两侧立柱伺服电机速度使两传感器移动速度相同,从而使其制动距离相同,进一步保证两侧传感器在同一高度处开始检测。

圆度测量前还需测出两传感器端面间的距离  $x$ ,具体测法如图 3 所示,本系统中选用  $l = 1\text{ m}$  长标准量块水平置于两传感器中间,两侧传感器分别测出到量块的距离  $x_1$ 、 $x_2$ ,则  $x = x_1 + l + x_2$ 。两传感器端面距离只需定期进行标定即可,其精度取决于传感器精度以及量块的水平精度,可通过多次平均提高精度,由于该误差精度远小于圆度误差,因而对后续的数据处理影响很小。

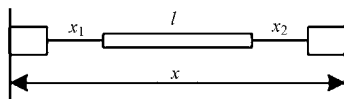


图3 传感器端面距离测量原理图

Fig.3 Side view of pipe measurement and stencil system

激光位移传感器在伺服电机的驱动下竖直向下运动,传感器的竖直位置可由伺服电机编码器的反馈脉冲计算获得,传感器下降过程中依次测得钢管外径各点的水平位置,当电机速度足够慢或采样频率足够高时,理论上可以测得外径上整个测量范围内轮廓上所有点的位置。

取两传感器初始最高位的中点为该截面的坐标原点,竖直向下方向为  $y$  轴正方向,水平向右方向为

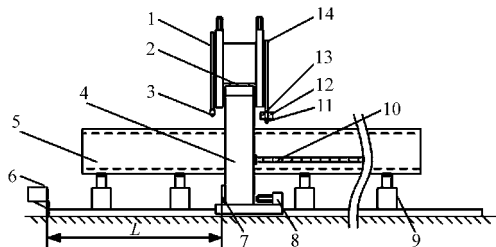


图1 钢管测量及喷标系统主视图

Fig.1 Front view of pipe measurement and stencil system

1. 喷标臂 2. 横梁导轨 3. 喷头 4. 龙门架 5. 钢管 6. 激光传感器 1 7. 反光板 8. 电机、减速机 9. 辊道 10. 坦克链 11. 测厚仪 12. 激光传感器 2 13. 激光传感器 3 14. 测量臂

整个系统由工控机控制,测量前只需将龙门架停到钢管左侧,设置好参数后整个测量及喷标过程中无需操作,测量时间随测量截面数的不同而变化,以测量 3 个截面为例,大约需要 10 min。该系统设有各种限位及故障保护,安全可靠。

$x$  轴正方向,建立该平面的直角坐标系,从而可以得到所测截面外径上各点的坐标。

由于激光位移传感器测量范围的限制,钢管接近顶部和底部的两块区域传感器无法测到,因而当位移传感器从上至下测完一遍时,需转动辊道使钢管旋转  $90^\circ$ ,位移传感器从下至上对钢管该截面再进行一次测量,经过两次测量便可测出该截面各个位置点的坐标,对两组数据分别进行圆度求解,取结果较大值为该截面圆度。

本系统采用 LK - G500 型高精度激光位移传感器,测量范围 250 ~ 1 000 mm,重复精度 0.002 mm,光点小且适合小角度测量。经测量两传感器端面距离为 1 966.65 mm,考虑到传感器量程以及适合测量的角度范围,并且考虑到每次采样点应覆盖圆周至少  $2/3$  的范围,本系统可测量的钢管外径范围为 200 ~ 1 400 mm,因而本系统可用来测量大口径钢管,同时也适用于小口径钢管。

为了得到直线度,需对钢管至少 3 个截面进行测量。设空间坐标系  $z$  的正方向沿导轨水平向右, $z$  轴零点在激光传感器 1 的端面位置,经圆度计算可得每个截面的圆心坐标,由 3 个以上的圆心坐标即可获得钢管的直线度。

## 2 圆度计算

### 2.1 圆度定义

圆形钢管的横截面上存在着外径不相等的现象,即存在着不一定互相垂直的最大外径和最小外径,则最大外径与最小外径之差即为不圆度(或椭圆度),钢管圆度公式为<sup>[11]</sup>

$$\varepsilon = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{其中 } D = (D_{\max} + D_{\min}) / 2 \quad (2)$$

式中  $\varepsilon$ ——圆度  $D$ ——公称直径

这种方法求得的圆度为相对量,本文只针对圆度的绝对量进行计算,即求解  $D_{\max} - D_{\min}$ ,圆度误差的相对量可除以公称直径求得。

### 2.2 圆度求解

根据定义,若求解钢管某截面圆度,只需找出该截面的最大直径和最小直径。本系统采用近似直径测量方法,用激光传感器测量钢管某截面外径上大量点的坐标,如图 4 所示, $A_i$  表示左侧传感器采集到钢管外径左半部分点的坐标, $B_j$  表示右侧传感器采集到钢管外径右半部分点的坐标,伺服电机转速越慢,采样频率越高,则采集到的点越密集,测量结果越精确。

对采集到的点进行处理,步骤如下:

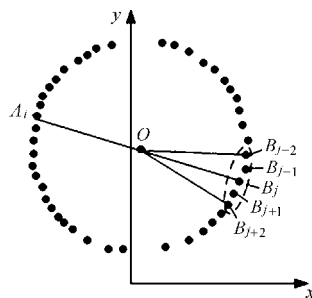


图 4 圆度测量及求解示意图

Fig. 4 Schematic diagram of roundness measurement and solving

(1) 根据该截面的第 1 组数据,求解该截面最小二乘圆心坐标  $(x_0, y_0)$ 。

(2) 比较左右两侧采样点数目,以采样点少的一侧为基准,图 4 中以左侧点为基准点,以下均以此情况为例。

(3) 对左侧每个点分别进行计算,以第  $i$  个点计算为例:第  $i$  个点  $A_i$  的坐标为  $(x_{A_i}, y_{A_i})$ ,找出右侧点坐标中与其可能构成直径的点  $B_j(x_{B_j}, y_{B_j})$ ,所找的点需满足

$$x_{A_i} - x_0 + x_{B_j} - x_0 \leq \delta_x \quad (3)$$

$$y_{A_i} - y_0 + y_{B_j} - y_0 \leq \delta_y \quad (4)$$

$$|(x_{A_i} - x_{B_j})^2 + (y_{A_i} - y_{B_j})^2|^{1/2} - D \leq \delta_d \quad (5)$$

式中  $\delta_x$ 、 $\delta_y$ 、 $\delta_d$  分别为横坐标、纵坐标及直径的偏差,为计算准确,可选允许的圆度绝对误差的 2 倍,如果某点处未找到对应点,则需将偏差适当放大再计算。

(4) 假设对于左侧点  $A_i$ ,找得右侧点  $B_j$  满足以上条件,分别求出  $B_j$  前后各两点和  $A_i$  的距离,取最大值作为  $A_i$  点处的直径,若  $B_j$  前后某一侧少于两点,则在另一侧多加相应点数进行计算。

(5) 在所得直径中找出最大直径  $D_{\max}$  和最小直径  $D_{\min}$ ,计算  $D_{\max} - D_{\min}$  即得该组数据的圆度。

(6) 对该截面第 2 组数据,重复步骤 (1) ~ (5),求得该组数据的圆度和圆心坐标。

(7) 取两组数据中圆度的较大值为该截面的圆度值,取圆度较小值时对应的圆心坐标为该截面的圆心坐标。

### 2.3 计算方法实例分析

实际测量前,运用该系统对管径 500 mm、长度 1 000 mm、圆度误差为 0.50 mm 的标准管的一个截面进行多次测量,测得圆度误差在 0.47 ~ 0.54 mm 之间,因而该系统具有很高的精度,系统如图 5 所示。

对某公称直径为 637 mm、长度为 5 700 mm 的未经精加工的钢管进行测量,测量 3 次,测量截面与激光传感器 1 的距离  $L$  分别为 2 560 mm、3 954 mm、

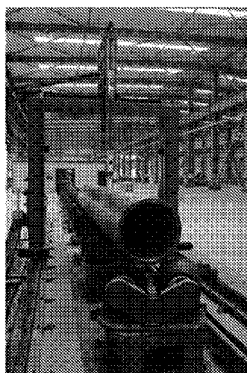


图5 钢管测量系统

Fig. 5 Pipe measurement system

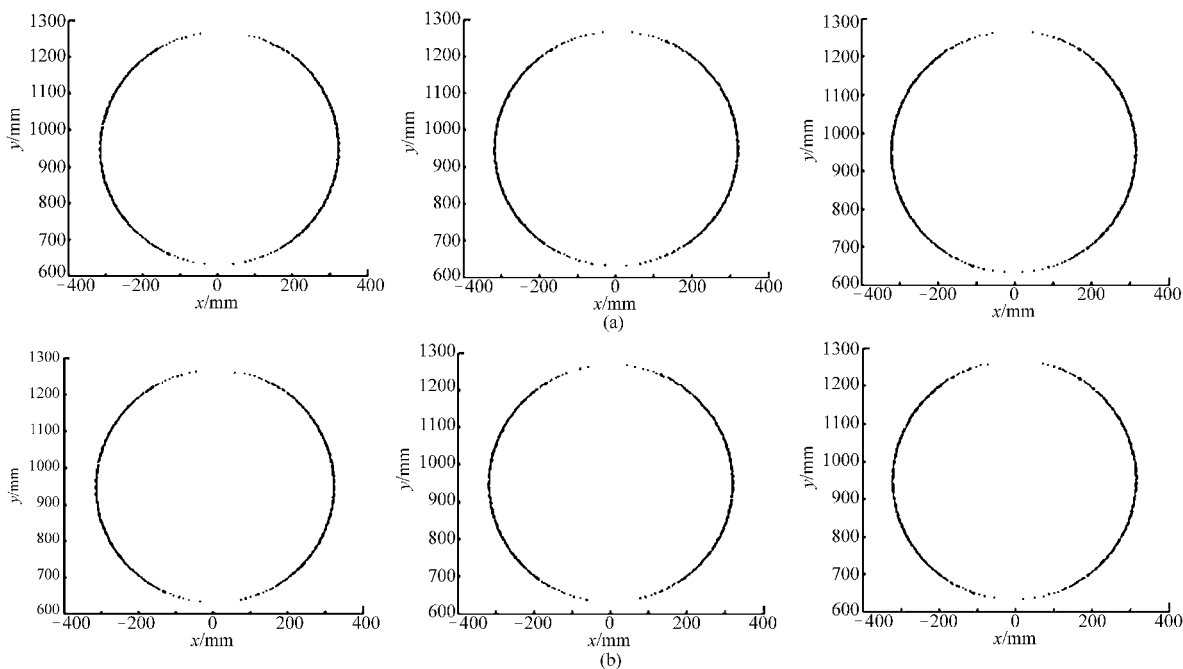


图6 3个截面的外径测量结果

Fig. 6 Measurement results of outer diagram at three sections

表1 各截面测量结果

Tab. 1 Measurement results of each section mm

截面 编号	圆心坐标		直径	圆度
	横坐标	纵坐标		
1	3.87	950.33	637.07	0.86
2	0.39	950.87	637.24	0.62
3	-4.22	951.45	636.76	0.71

### 3 误差分析及补偿

#### 3.1 误差产生机理

与以往钢管测量系统相比,本测量系统的最大优点在于激光传感器由丝杠传动竖直运动以及测量时钢管处于静止状态。由于测量过程中钢管无需转动,因而数据处理时无需考虑钢管运动时振动带来的影响,又由于丝杠传动具有精度高、运动平稳的特点,因而激光传感器运动过程中产生的振动基本可以忽略。此外激光传感器采用串口通讯,避免了模

5 473 mm,测量结果如图6所示。

图6a为每个截面第1次测量结果,图6b为钢管旋转90°后的测量结果,钢管顶端和底端各有一片区域未能采集到。

经计算,各截面圆心坐标、直径及圆度的绝对量分别如表1所示。

从计算结果可知,考虑到钢管未经过精加工,所测结果已具有很高的精度,但所得圆度偏大。现场测量时对钢管进行粗略检查,并未发现钢管表面有明显的凸起和凹陷,因而测量结果存在一定的误差。

拟量通讯时信号衰减带来的影响,保障了信号传输精度。

经过分析,本系统的误差主要存在于以下几个方面:安装精度、测量精度、辊道旋转精度、环境干扰及钢管摆放位置精度。

安装精度包括龙门架两立柱丝杠的垂直度、两侧激光传感器的起始高度、传感器激光束与丝杠的垂直度以及两侧激光束是否位于同一平面,这些因素均可以通过机械调整使其控制在一定范围内。

测量精度包括两激光传感器端面距离的测量精度以及传感器本身的测量精度,前者可以控制,后者需根据测量精度合理选择。

辊道旋转精度主要是指对钢管某截面进行测量时,钢管顶部和底部部分区域存在测量盲区,为了避免由此造成的误差,需要对该截面进行两次测量,两次测量中间需要转动辊道使钢管旋转90°,由于辊道底盘可以旋转(为了能够驱动钢管自转以及前后

移动),因而辊道转子的主轴方向与钢管轴线方向可能存在夹角,导致辊道转动时钢管除了自转还会前后移动,使得第2次测量的点与第1次测量的点不在同一截面,从而带来误差。解决方法:在辊道底座边缘加装接近开关进行控制,使辊道转子轴线与钢管轴线尽量平行;使二者轴线形成一定夹角,测量前转动辊道,测出钢管移动的距离,测量时钢管转动后龙门架移动相应位置进行补偿。但二者都无法完全消除误差。

环境干扰是指同一车间其它生产加工设备工作时产生的振动对测量造成的影响。该系统地基四周与厂房地面通过 1.5~2 m 的深沟隔开,同时该生产线附近不设置大型加工设备,一定程度上可以减少环境对测量的影响。

影响圆度误差的最大因素在于钢管的摆放精度,如图 7 所示,由于辊道固定位置、高度以及支撑辊存在位置偏差,使得钢管轴线与系统测量截面(两侧激光传感器激光束所在的平面)不垂直,钢管实际轴线与系统 z 轴存在  $\alpha$  的偏角。

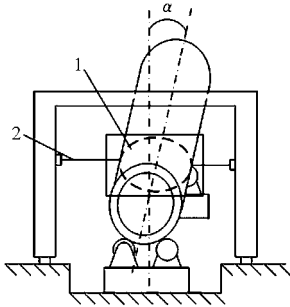


图 7 钢管实际摆放姿态示意图  
Fig. 7 Real gesture of pipe  
1. 测量截面 2. 激光

为了验证这一点,将上例中钢管被测 3 个截面的圆心投影到同一个坐标系,结果如图 8 所示,可以看出 3 个圆心并不重合,且呈现出一定的线性关系,若将 3 圆心沿 z 轴延伸至所测截面各位置处,可知钢管轴线必然与 z 轴存在偏差。

由于钢管摆放位置存在倾斜,实际测到的截面并非是垂直于钢管轴线的截面,而是与该截面同圆心且夹角为  $\alpha$  的一个椭圆,因而计算得到的

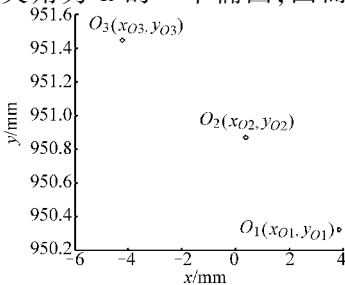


图 8 不同截面圆心坐标

Fig. 8 Circle center coordinates at different sections

圆度必然存在着一定的误差,此误差需经过计算进行补偿。

### 3.2 圆度误差补偿

为了获得与钢管轴线垂直截面的圆度,需要对所测点进行补偿,补偿方法是求出过该测量面圆心且与轴线垂直的截面位置,将所测点投影到该截面上,进而进行计算。

如图 9 所示,  $A_1$  是测量截面,  $O_1$  是测量得到的点,  $A_2$  是所要投影的截面,  $O_2$  是投影后的点,  $l$  是两个面的交线,  $O(x_{oi}, y_{oi})$  为公共圆心。误差补偿的步骤如下:

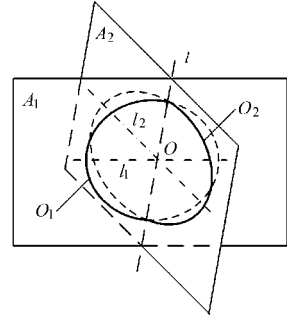


图 9 测量面与实际截面位置关系

Fig. 9 Position relation between measurement and real section

(1) 根据不同测量截面的圆心坐标,用最小二乘法拟合出圆心所在直线的方向向量  $L(l, m, n)$ , 即各投影截面的法向量,进而求出  $L$  与 z 轴正方向的夹角  $\alpha = \langle (l, m, n), (0, 0, 1) \rangle$ 。

(2) 对于某一测量截面  $A_1$ , 将所测得的点的坐标  $(x_{1i}, y_{1i}, z_{1i})$  投影到  $A_2$  上, 得到其投影后的坐标  $(x_{2i}, y_{2i}, z_{2i})$ , 其中  $z_{1i}$  为该截面到激光传感器 1 的距离。

(3) 坐标变换<sup>[12]</sup>: 将空间坐标系原点移至圆心  $O$  处, 平移矩阵为

$$T_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_{oi} \\ 0 & 1 & 0 & -y_{oi} \\ 0 & 0 & 1 & -z_{oi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

将所得坐标系沿新的 z 轴旋转  $\theta$ , 旋转矩阵为

$$T(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中  $\theta$  求解方法为: 如图 10 所示,  $\theta_1$  为  $L$  与平面  $A_1$  的夹角, 由图知  $\theta_1 = \pi/2 - \alpha$ ,  $\theta_2$  为  $L$  与 x 轴正方向的夹角,  $\theta_2 = \langle (l, m, n), (1, 0, 0) \rangle$ , 由几何关系可知

$$\cos\theta = \frac{\cos\theta_2}{\cos\theta_1} \quad (8)$$

需注意  $\theta$  的符号, 当  $L$  在  $xy$  平面内的投影在

一、三象限时取正值,在二、四象限时取负值,最后将 $\theta$ 值取反后代入到式(7)中。

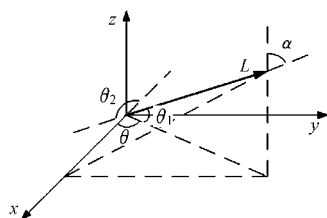


图 10  $\theta$ 角求解示意图

Fig. 10 Schematic diagram of  $\theta$  solving

再将坐标系绕  $y$  轴旋转  $-\alpha$ ,即得到  $A_2$  平面内的坐标系,转换矩阵为

$$T(y, -\alpha) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

(4) 将  $A_2$  上点的原始坐标转换为  $A_2$  平面内坐标系的坐标,为了使转换后的左侧点和右侧点坐标对称,将转换后的坐标再绕新的  $z$  轴旋转  $-\theta$ ,变换公式为

$$\begin{bmatrix} x_{3i} \\ y_{3i} \\ z_{3i} \\ 1 \end{bmatrix} = T(z, -\theta)T(y, -\alpha)T(z, \theta)T_m \begin{bmatrix} x_{2i} \\ y_{2i} \\ z_{2i} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

对 2.3 节中的 3 个截面点坐标变换后舍去  $z$  向坐标,所得结果如图 11 所示。

对坐标变换后的点按 2.2 节所述方法计算圆度,变换后的圆度如表 2 所示。

由表 2 可知,补偿后圆度值得到改善,更接近实际值,说明用本文的方法进行补偿行之有效。

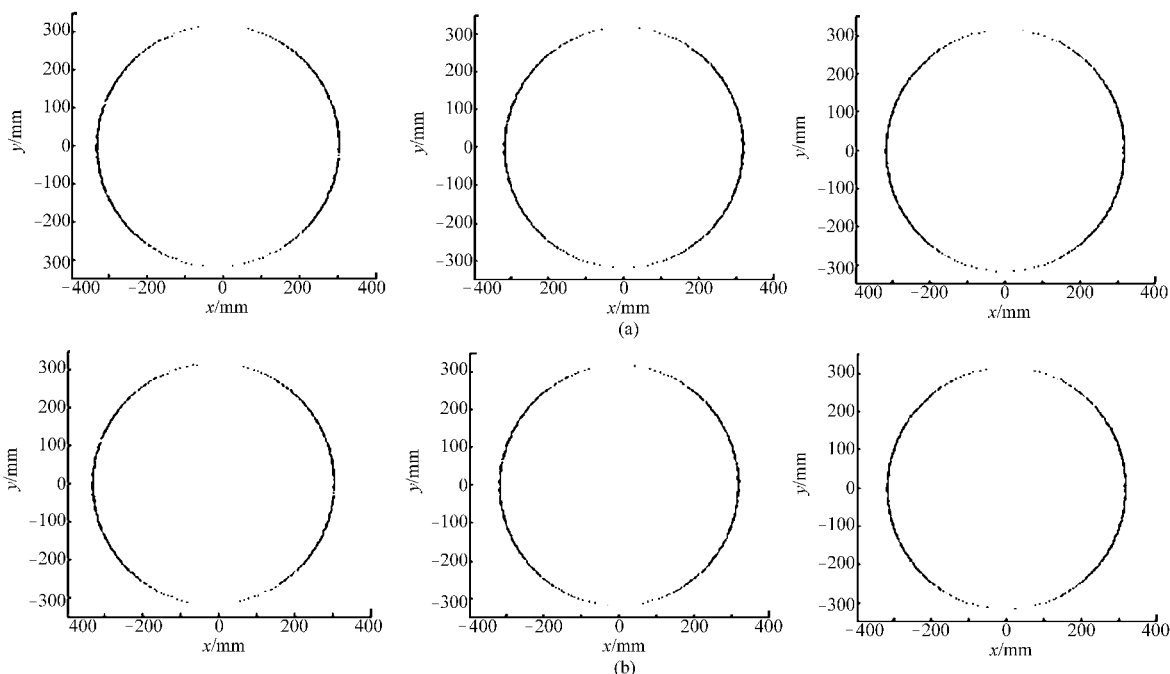


图 11 误差补偿后 3 个截面外径测量结果

Fig. 11 Results of measurement after error compensation

表 2 误差补偿前后圆度对比

Tab.2 Comparison of roundness before and after compensation

截面编号	补偿前圆度	补偿后圆度	mm
1	0.86	0.72	
2	0.62	0.51	
3	0.71	0.58	

## 4 结束语

提出了一种用于大口径钢管测量的新方法。利用龙门架两侧立柱激光传感器的竖直运动,测量钢管截面外径上的点的坐标。本方法测量过程中钢管

无需转动,仅在每个截面两次测量的间隔转动钢管,消除了钢管运动过程中振动带来的误差。对采集到的数据点通过近似直径计算得到截面的最大直径和最小直径,进而算得该截面的圆度。针对圆度偏大的现象,对误差机理进行了分析,得出误差主要来源于钢管摆放位置与测量截面不垂直,经过补偿,将测量截面的点投影到实际直径截面,再次计算圆度,计算结果得到改善,从而验证了误差分析的合理性和补偿算法的可行性。该系统及测量方法可用于大口径钢管的圆度测量,并且由于控制简单、算法简便、测量时间短,适合于工厂对钢管进行大批量的在线测量。

## 参 考 文 献

- 1 周锦进,阿达依·谢尔亚孜旦,安晓刚. 电化学机械加工在碳钢管内孔光整中的应用[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10): 145 ~ 148.  
Zhou Jinjin, Adayi Xieeryazidan, An Xiaogang. Research and application of ECMM in inner surface finishing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10): 145 ~ 148. (in Chinese)
- 2 胡龙飞,刘全坤,王成勇,等. 基于多目标优化的钢管拉拔成形过程设计[J]. 农业机械学报, 2007, 38(10): 161 ~ 164.  
Hu Longfei, Liu Quankun, Wang Chengyong, et al. Forming process design of pipe drawing based on multi-objective optimization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(10): 161 ~ 164. (in Chinese)
- 3 Muralikrishnan B, Venkatachalam S. A note on three-point method for roundness measurement [J]. Precision Engineering, 2005, 29(3): 257.
- 4 赵维谦,谭久彬,杨文国,等. 基于两步法超精密圆度仪误差分离系统[J]. 中国机械工程, 2000, 11(11): 1 206 ~ 1 208.  
Zhao Weiqian, Tan Jiubin, Yang Wenguo, et al. Ultra-precision roundness error separation system based on the two-step separation method[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(11): 1 206 ~ 1 208. (in Chinese)
- 5 赵维谦,谭久彬,常承,等. 超精圆度仪全自动误差分离装置的研制[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(2): 203 ~ 205.  
Zhao Weiqian, Tan Jiubin, Chang Cheng, et al. Development of automatic error separation system for ultra-precision roundness instrument[J]. China Journal of Scientific Instrument, 2000, 21(2): 203 ~ 205. (in Chinese)
- 6 姜丽华. 非接触式实时在线直径测量系统的研究与开发[D]. 大连:大连理工大学,2005.  
Jiang Lihua. Non-contact diameter measurement system real-time online research and development [D]. Dalian: Dalian University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)
- 7 肖鹏,刘文耀,裘稀石,等. 高抗振性大口径钢管动态直径测量系统[J]. 光电工程, 2012, 39(1): 40 ~ 47.  
Xiao Peng, Liu Wenyao, Qiu Xishi, et al. Active anti-vibration system for measuring diameter of steel pipe[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(1): 40 ~ 47. (in Chinese)
- 8 王宏,陈庆峰. 基于虚拟仪器的大直径焊管的形位误差检测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2008(12): 101 ~ 106.  
Wang Hong, Chen Qingfeng. Form and position error measuring system for large dia. welded pipe based on VI[J]. Instrument Technique and Sensor, 2008(12): 101 ~ 106. (in Chinese)
- 9 姜晓勇. 钢管测量、称重、喷标系统的研究与开发[D]. 杭州:浙江大学,2003.  
Jiang Xiaoyong. Study & development of steel tube's measure, weight, stencil system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003. (in Chinese)
- 10 黄富贵,董兆鹏,崔长彩. 用谐波分析方法识别零件的圆度误差特征[J]. 实验室研究与探索, 2011, 30(8): 8 ~ 10.  
Huang Fugui, Dong Zhaopeng, Cui Changcai. Using harmonic analysis method to identify characteristics of roundness error of components [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2011, 30(8): 8 ~ 10. (in Chinese)
- 11 张复兴. 关于钢管的圆度[J]. 上海计量测试, 2004, 31(1): 21 ~ 22.  
Zhang Fuxing. About pipe circularity[J]. Shanghai Measurement and Testing, 2004, 31(1): 21 ~ 22. (in Chinese)
- 12 蒋新松. 机器人学导论[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,1993.

~~~~~

(上接第 288 页)

- 8 何秀华,张睿,杨嵩,等. “V”型无阀压电泵的流阻特性[J]. 农业机械学报,2009,40(12): 242 ~ 246.  
He Xiuhua, Zhang Rui, Yang Song, et al. Property of flow resistance for piezoelectric pump with “V”-shape tube [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 242 ~ 246. (in Chinese)
- 9 何秀华,张睿,杨嵩,等. V型无阀压电泵的流场分析[J]. 农业机械学报,2008,39(10): 218 ~ 221.
- 10 何秀华,王健,杨嵩,等. 三通全扩散/收缩管无阀压电泵的流阻性能[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(6): 497 ~ 501.  
He Xiuhua, Wang Jian, Yang Song, et al. Flow resistance characteristics of valveless piezoelectric pump with three-way diffuser/nozzle tube[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010,28(6): 497 ~ 501. (in Chinese)
- 11 何秀华. 椭圆组合管无阀压电泵:中国, 201010505904.1 [P]. 2012-07-04.  
He Xiuhua. Valveless piezoelectric pump with oval composite tubes; CN, 201010505904.1 [P]. 2012-07-04. (in Chinese)
- 12 李军,吴博达,程光明,等. 收缩管/扩张管型无阀压电泵的工作原理[J]. 压电与声光,2000,22(6): 376 ~ 378.  
Li Jun, Wu Boda, Cheng Guangming, et al. The principle of diffuser/nozzle based valveless piezoelectric pump[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2000,22(6): 376 ~ 378. (in Chinese)
- 13 陈魁. 试验设计与分析[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2005: 108 ~ 121.
- 14 白兰. 基于 MEMS 的无阀压电泵数值仿真与实验研究[D]. 长春:中国科学院长春精密机械与物理研究所,2005.  
Bai Lan. Simulations and experimental studies of valve-less micropumps based on MEMS[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)