

文章编号 1004-924X(2014)04-0815-07

钢管管端内外径测量系统的设计与实现

梅剑春¹, 叶青^{2,3*}, 田建国^{2,3}

(1. 南开大学 现代应用技术研究院, 天津 300071; 2. 南开大学 物理科学学院, 天津 300071;
3. 南开大学 弱光非线性光子学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要: 为了实现对钢管管端内外径、不圆度的自动化非接触快速测量, 设计并实现了一种钢管管端内外径测量系统。该系统利用转台带动激光三角法位移传感器绕钢管中轴线转动的方法来测量管端截面整个圆周的外径和内径尺寸, 然后利用圆心拟合算法修正转台中轴线与钢管中轴线不重合带来的误差。通过平移台自动调整测量截面与管端的距离, 大型升降台调节管心对齐高度, 双臂平移台调节可测量管径范围, 自动实现对不同管径钢管的非接触测量。实验结果表明: 系统测量精度小于 0.05 mm; 重复性限小于等于 5 μm ; 每个管端截面测量 500 个点时, 测量时间小于 25 s。设计的系统具有精度高、操作简便、测量速度快的优点, 满足无缝钢管生产在线检测的要求, 并已经在天津天管元通管材制品有限公司通过离线测试。

关键词: 激光三角法; 无缝钢管; 直径测量; 不圆度测量; 非接触测量

中图分类号: TN247; TB92 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142204.0815

Design of measurement system for inside and outside diameters of steel pipe

MEI Jian-chun¹, YE Qing^{2,3*}, TIAN Jian-guo^{2,3}

(1. *Advanced Technology Institute, Nankai University, Tianjin 300071, China;*
2. *School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China;*
3. *The Key Laboratory of Weak Light Nonlinear Photonics of the Ministry of Education, Nankai University, Tianjin 300457, China*)

* *Corresponding author, E-mail: yeqing@nankai.edu.cn*

Abstract: To realize automatic non-contact measurement for the inside diameter, outside diameter and the out-of-round of a steel pipe end, a measurement system for inside and outside diameters of the steel pipe was designed. Two laser optical triangulation sensors were used to perform full scans of the inside and outside diameters as they rotated around the pipe ends. Then a fitting algorithm was taken to reduce errors brought by the misalignment between rotary axis and steel pipe axis. Moreover, the distance between measured cross section and pipe end was adjusted by motorized translation stages fixed on the sensor, the aligning height of pipe center was adjusted by a lifter and the measurable pipe diameter was controlled with a two-aim translation stage, so that the measurement of steel pipes with different specifications could be implemented by the non-contacted method. Experimental results indi-

收稿日期: 2013-06-27; 修订日期: 2013-08-20.

基金项目: 天津滨海新区自主创新重大成果产业化关键技术攻关项目 (No. 2012-BK120012)

cate that the measurement accuracy of the system is less than 0.05 mm; repeatability limit is less than or equal to 5 μm . When 500 points are sampled per pipe end, the measurement process lasts less than 25 s, which can fully meet the requirements of seamless steel pipe production enterprises. With advantages of high precision, easy operation and rapid speed, the system has passed the off-line test in Tian Guan Yuan Tong pipe products Co., Ltd., Tianjin.

Key words: laser triangulation method; seamless steel pipe; diameter measurement; out-of-round measurement; non-contact measurement

1 引言

目前,钢管作为一种多功能的经济断面钢材,在国民经济各部分中的应用愈来愈广泛。历经 10 年的发展,我国的钢管产量由 2000 年的 933.7 万吨发展到 2009 年的 5 291.6 万吨,并在 2006 年跃居世界第一,我国也成为名副其实的钢管大国。但我国对特种钢管、大口径钢管等生产附加值高的钢管的生产能力较弱,仍需要大量进口,与钢管强国仍有较大差距^[1-2]。

在钢管生产中,随着国内外管道建设“大口径、厚壁、高钢级”的趋势,大口径钢管的生产比重占得越来越大。作为钢管端部重要的参数指标,大口径钢管管端的直径及不圆度在保证管道施工进度和质量方面具有重要意义。随着管道现场焊接施工技术的不断进步,对钢管管径的要求也不断提高,特别是对管端,其内外径和管端不圆度的要求极为严格。因为当两管在野外或海洋中进行配管焊接施工时,如果钢管的管端直径和不圆度符合要求,焊接能顺利地完成;反之,会造成两管对焊困难,即使能勉强对焊在一起,也会产生很大的残余应力,致使焊缝处的机械性能下降,降低管道的安全性^[3]。而油气输送管道输送大量易燃易爆物质,要承受几十甚至上百个大气压的内压,如果焊缝的机械性能不好,极易发生泄漏、爆炸事故。尤其是深海管线管,管道受洋流、潮汐、海浪的影响,对焊接效果要求更高,而且一旦断裂会导致原油泄漏,发生海洋污染事件,产生巨大的生态污染,造成严重的经济损失。由于生产工艺的限制,内外径不合格的钢管依然存在。为了筛选出合格的钢管,同时严格监控大口径钢管的生产质量,有必要对大口径钢管管端的内径、外径及不圆度进行检测。

目前,管端内外径的测量主要依靠卡尺和千

分尺等手工量具,这种方法受生产环境、量具精确度和操作人员因素的影响较大,测量精度低、速度慢、效率低,工人劳动强度大,而且每个截面最多测量 4 组数据,无法充分反映管端不圆度情况。因此,钢管管端内外径自动测量系统的研发不仅可以系统地测量钢管管端的内径、外径和不圆度,还可以提高生产效率、降低工人劳动强度,对提高钢管产品质量,增加生产附加值具有非常重要的意义。目前,国外一些公司已经开发出这类功能的自动化测量系统,并且应用在壁厚测量、精度规格分类、焊接管端匹配、镗加工分析等场合。如 Tenaris 公司的 LEMS^[4-5] 和 OMS 公司的 Pipe CheckerTM,但至今在国内尚无此类产品。本文提出了一种基于激光三角法位移传感器的钢管内外径自动测量系统,实现了钢管内外径的非接触测量,具有操作简单、精度高、速度快等优点。

2 系统构成及其工作原理

如图 1 所示,钢管管端内外径测量系统由两个激光测距探头、两个小型精密平移台、一个精密转台、一个大型平移台和一个底座升降台构成。

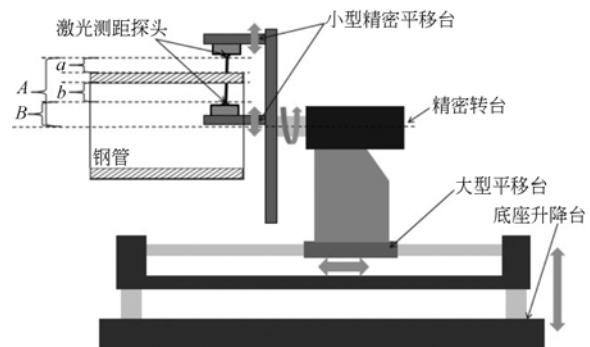


图 1 钢管管端内外径测量系统结构图

Fig. 1 Measuring system for inside and outside diameters of pipe end

该系统利用旋转装置带动激光位移传感器沿管端旋转,测量整个圆周截面的内径和外径分布情况,并配合升降台和探头固定臂上的精密位移台对探头位置进行微调,以适应不同尺寸钢管管端检测的需要。此装置的主要误差是由旋转台转动的中轴线和钢管的中轴线不能完全重合引入的,即测距探头旋转时围绕的中轴线不同于待测钢管的中轴线,但这种误差可以利用数据处理算法来消除。

2.1 激光位移传感器

测量系统所用的探头是激光三角法位移传感器,激光三角法测距原理^[6]如图2所示。激光二极管发出的平行光束垂直投射到被测物体表面,形成一个光斑,光斑在物体表面发生漫反射,其中一部分散射光经过接收透镜成像于 CCD 上;如果被测物体产生位移,将导致物体表面上的光点沿着激光束的方向产生移动,CCD 上的成像点也会相应移动,通过像移和实际位移之间的三角关系可以计算出实际位移。在信号处理电路的作用下,线阵 CCD 将位移数据转变为数字信号,进而转换成探测距离。

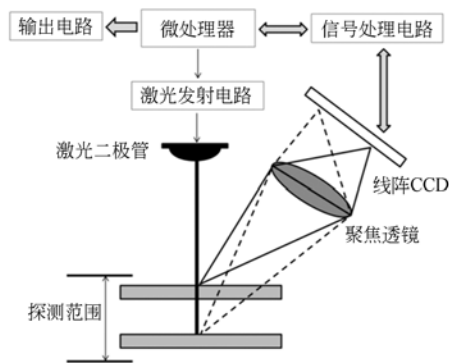


图2 激光三角法测距原理图

Fig. 2 Principle of laser triangulation method

由于光学系统的限制,光束除了在测量范围中心处是聚焦成像,在其余部分都是轴外光成像,而且越偏离中心,所形成的光斑尺寸越大。通过合理地设计光学镜头,可以缩小光斑大小,提高测量精度。光斑能量呈高斯曲线分布,通过高斯曲线公式可以精确地计算中心点的位置^[7]。本文采用美国邦纳公司的 LH30 型激光位移传感器,测距范围为 10 mm,分辨力为 1 μm ,光斑直径最小为 50 μm ,最大为 110 μm ,可以满足钢管管端检

测的需求。

激光三角法的测量精度高,分辨力最高可以达到 1 μm ;但是其探测范围有限,而且得到的结果是一个相对位移变化,要得到绝对距离需要对结果进行标定。

2.2 系统工作原理

如图1所示,两个激光测距探头固定在精密转台前的旋转平面上,转台的中轴线与待测钢管的中轴线基本一致。激光测距探头垂直射向转台中轴线方向照射到钢管管壁上,外径探头测得的距离记为 a ,内径探头测得的距离记为 b 。外径和内径测距探头与转台中轴线之间的距离分别记为 A 和 B ,这样计算出外径尺寸 $R_0 = A - a$,内径尺寸 $R_1 = B + b$ 。转台带动两个激光测距探头沿转台中轴线转动,每转动一定角度,测量一次读数,从而得到整个圆周的内外半径尺寸。转动角度 θ 由编码器测定,编码器与转台同轴连接,所以测得的内外半径尺寸均为角度 θ 的函数,分别记为 $R_0(\theta)$, $R_1(\theta)$ 。通过数据采集卡将测得的内外径尺寸和对应的角度信息传输到计算机,再通过数据处理算法计算出钢管的内径 (Inner Diameter, ID)、外径 (Outer Diameter, OD)、壁厚 (Wall Thickness, WT) 和不圆度 (Out-of-Roundness, OR)。

在每个测量角度,控制电机停止 1 ms,然后继续旋转到下个角度。这样既可以保证测量数据的准确性及探头的响应时间,又不影响整体扫描的流畅性。

钢管生产过程中,管径型号经常发生切换。为了方便不同管径钢管的自动化测量,在转台的旋转面上安装了两个小型精密平移台来分别调整外径探头和内径探头与转台中轴线之间的距离 A 和 B 。钢管测量时固定在 V 型支架上,管径不同时,除了旋转半径发生变化,钢管中轴线的中心高也不同,所以增加了一个底座升降台来调整转台中轴线的高度,保证转台中轴线与钢管中轴线基本一致。

底座上的大型平移台带动两个激光测距探头、两个小型精密平移台和转台整体前后移动,可以根据需要调整测量管端截面与钢管端面的距离,同时整体向后移动,使探头远离钢管,方便钢管移动到生产线上下一个工位。

2.3 生产线配套辅机

本测量系统在天津天管元通管材制品有限公司经过离线测试,顺利通过验收。将该系统安装在生产线上时,需要安装一定的辅机设备。

钢管管端内外径测量系统在生产线上工作时,需要保证钢管中轴线位置固定,管端中心位置偏差不得超过 $\pm 5\text{ mm}$,以确保钢管在激光位移传感器的工作范围内,以及管端对齐。因为一根钢管有两个管端需要测量,所以需要同时安装两套测量系统,记为 1#设备和 2#设备。为了在生产线上配合使用,需要安装一定的辅机设备。辅机设备结构如图 3 所示。

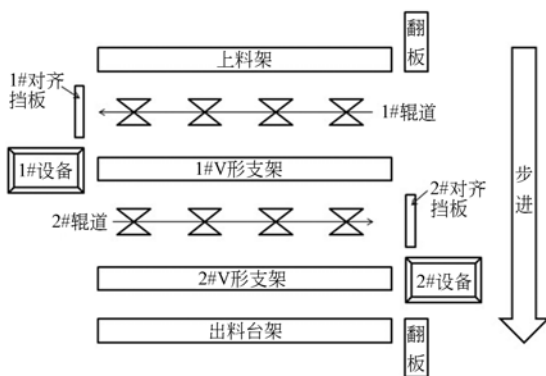


图 3 配套辅机结构框图

Fig. 3 Block diagram of auxiliary equipment

辅机设备工作流程为:钢管传输到测量工序时,通过翻板或者翻料钩将其翻转到上料台架上,然后通过步进梁传输到 1#辊道,1#辊道带动钢管向左侧移动,在 1#对齐挡板处对齐;继续步进到 1#V型支架,由安装在该支架左侧的 1#设备测量钢管左侧管端。然后步进至 2#辊道,2#辊道带动钢管向右侧移动,在 2#对齐挡板处对齐;继续步进至 2#V形支架,由安装在该支架右侧的 2#设备测量钢管右侧管端。测量完毕后步进至出料台架。所有的步进操作由同一个步进梁完成,该步进梁每次同时移动五根钢管向下一个工位,保证了生产线流程的连续性。

两台设备分别完成测量后,相互之间还需要进行通讯,将测量数据统一到同一个钢管管号,同时将测量数据传输到总的信息管理系统,方便查询和后期跟踪。

3 数据处理算法

钢管管端内外径测量系统的主要误差是由待测钢管中轴线与转台中轴线不重合带来的。两条中轴线不重合的主要原因有两个:一个是中轴线的倾斜度不同,另外一个轴心位置有偏移。

中轴线倾斜度不同主要是由 V 型支架的固定位置偏差造成的。为保证待测钢管管端在测距探头的工作范围内,辅机设备需确保管端位置偏差不能超过 $\pm 5\text{ mm}$ 。钢管的长度一般在 $10\sim 20\text{ m}$,所以倾斜角度非常小。经过计算,中轴线倾斜造成的误差不会超过 $10\ \mu\text{m}$,而系统的测量精度是 0.05 mm ,所以倾斜误差基本可以忽略。

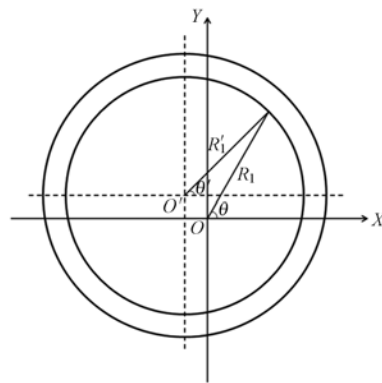


图 4 内径测量原理图

Fig. 4 Principle diagram of ID measurement

对于轴心位置偏移造成的误差,可以通过数据处理算法^[8]进行修正。如图 4 所示,转台的旋转轴心为 O 点,而钢管的实际轴心为 O' 点。钢管的内径轴心和外径轴心一般情况下并不重合,由于钢管生产过程中对内径不圆度的加工精度要求更高,所以定义钢管的轴心 O' 为内径圆的中心。转台带动两个激光测距探头沿中轴线转动,每转动到一定角度 θ 测量一次读数,得到了整个圆周的外半径尺寸 R_0 和内半径尺寸 R_1 。 R_0 和 R_1 均为 θ 的函数,分别是 $R_0(\theta)$, $R_1(\theta)$ 。

以转台的旋转轴心 O 为原点建立平面直角坐标系 XOY,将 $R_0(\theta)$ 和 $R_1(\theta)$ 从极坐标系转变

为该平面直角坐标系的函数:

$$\begin{cases} x_0(\theta) = R_0(\theta) \cos \theta \\ y_0(\theta) = R_0(\theta) \sin \theta \\ x_1(\theta) = R_1(\theta) \cos \theta \\ y_1(\theta) = R_1(\theta) \sin \theta \end{cases}$$

利用最小二乘法^[9]求内径圆周 $x_0(\theta)$, $y_0(\theta)$ 的圆心 O' 的坐标 (x', y') 。重新计算内径圆周和外径圆周上每一点到 O' 的距离 R' 和角度 θ , 相当于把圆心从 O 点平移到 O' 点, 就可以得到修正后的外径和内径尺寸 $R_0'(\theta)$, $R_1'(\theta)$, 从而消除轴心偏移带来的误差, 进而可以计算出钢管的 ID, OD, WT 和 OR:

$$\begin{aligned} ID(\theta) &= R_1'(\theta) + R_1'(\theta + 180), \\ OD(\theta) &= R_0'(\theta) + R_0'(\theta + 180), \\ WT(\theta) &= R_0'(\theta) - R_1'(\theta), \\ OR &= \frac{2(OD_{\max} - OD_{\min})}{OD_{\max} + OD_{\min}} \times 100\%. \end{aligned}$$

不圆度的测量精度与外径的测量精度相关, 而且测量点数越多, OD 值的采样点越多, OD_{\max} , OD_{\min} 的计算就越精确。

影响系统误差的其它来源主要有转台的径向晃动、测量臂的抖动、由车间的震动、湿度和温度变化^[10]引起的机械长度变形以及编码器精度降低^[11]等, 这些误差通过软件算法很难消除。因此, 在进行机械设计时需要充分考虑这些因素, 通过选用高性能材料, 优化机械结构, 提高加工精度等方法来尽量减小干扰因素的影响, 提高整体系统的测量精度。

4 测量实验与结果

为了检验设备的测量精度, 将一段钢管样品送交中国计量科学研究院 (National Institute of Metrology P. R. China, NIM) 长度计量科学与精密机械测量技术研究所进行标定, 然后将标定结果与本设备所测得的数据进行了比对。

NIM 长度计量科学与精密机械测量技术研究所标定时利用的设备为德国 LIETZ 公司生产的三坐标测量仪 (Coordinate Measuring Machine, CMM), 属于长度标定的标准设备^[12], 型号为 PMM544, 探测误差 $P=0.6 \mu\text{m}$ 。测量标定钢管管端的一个截面, 将圆周 1000 等分, 测得 1000 个内径点和 1000 个外径点的坐标。同样条件下,

利用自主研发的钢管管端内外径分布非接触数字式在线测定设备测量得到 1000 组数据。

图 5 是本设备和 NIM 三坐标测量仪测量的钢管内径数据的对比图, 两条曲线基本重合。内径数据偏差如图 6 所示, 内径 1000 点数据的偏差均小于 0.05 mm。对比结果显示, 设备的测量精度在 0.05 mm 以内。

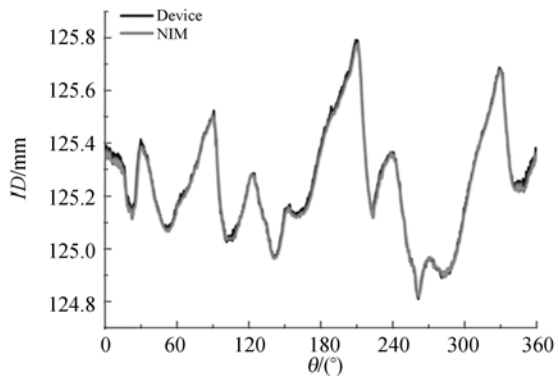


图 5 本文设备和计量院三坐标机测量结果对比图
Fig. 5 Comparison of measurement profiles between proposed system and CMM

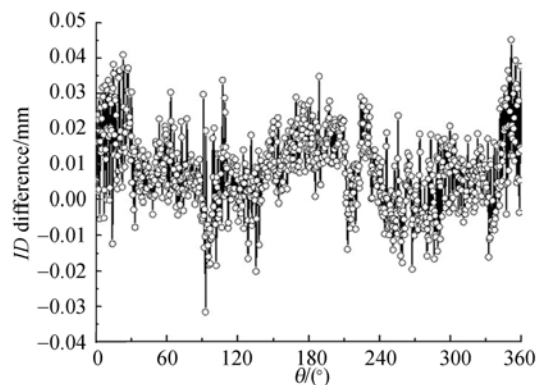


图 6 本文设备和计量院三坐标机测量结果的误差
Fig. 6 Difference of measurement profiles of proposed device and CMM

根据《GB-T 17395-2008 无缝钢管尺寸、外形、重量及允许偏差》的规定, 标准化外径的允许偏差分 D_1 , D_2 , D_3 和 D_4 4 个等级。其中 D_4 等级最严格, 其最大允许偏差为 $\pm 0.5\% D$ 或 $\pm 0.10 \text{ mm}$ 中的较大值。本设备的最小检测外径为 110 mm, 其对应的最大允许偏差为 $\pm 0.55 \text{ mm}$, 测量精度为 0.05 mm, 完全能满足无缝钢管行业的测量要求。国外 Tenaris 公司同类型的检测设备 LEMS 的测量精度在 0.1 mm 以内 (99%

的数据)。与其相比,本文设备的精度优于对方。

钢管管端内外径测量系统的技术指标如表 1 所示。

表 1 钢管管端内外径测量系统的技术能标

Tab. 1 Technical index of measuring system for inside and outside diameters of pipe end

技术指标	数值
分辨力	1 μm
测量精度	0.05 mm
测量速度	单次测量过程时间 < 25 s (单次测量过程包括平移台前进、回转测量和平移台后退),每周测量 500 点时
单次扫描最多点数	1000 点
钢管内径	> 110 mm
钢管外径范围	< 750 mm
测量截面距管端距离	≤ 300 mm

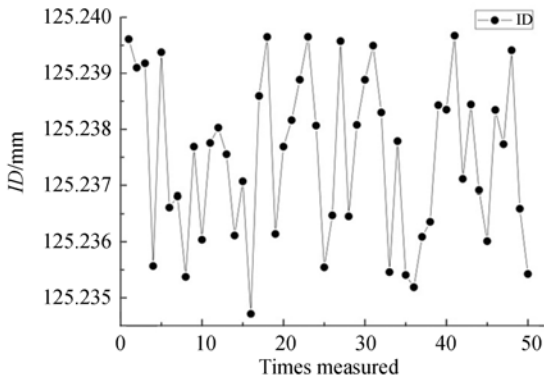


图 7 内径重复性测量示意图

Fig. 7 Result of ID repeated measurement

参考文献:

- [1] 严泽生. 加快结构调整实现钢管行业科学发展[J]. 焊管, 2010, 33(5): 12-19.
YAN Z SH. Expediting adjustment structure and eliminating backward to realize scientific development in steel pipe industry [J]. *Welded Pipe and Tube*, 2010, 33(5): 12-19. (in Chinese)
- [2] 殷国茂. 我国钢管工业的现状和今后发展的思考[J]. 钢管, 2011, 40(1): 1-7.
YIN G M. Current situation of domestic steel tube-manufacturing industry and thinking about further development [J]. *Steel Pipe*, 2011, 40(1): 1-7. (in Chinese)
- [3] 许晔, 吴瑞珉, 金成国, 等. 直缝焊管管端直径及椭圆

工业测量设备的重复测量精度也非常重要。为了验证钢管管端内外径测量系统的重复精度, 对同一根钢管样品连续测量了 50 次, 其平均内径的分布情况如图 7 所示。由图可以看出, 最大偏差为 5 μm , 所以本测量系统的重复性限 $\leq 5 \mu\text{m}$ 。

5 结 论

本文设计并实现了一种钢管管端内外径非接触自动化测量系统。该系统利用转台带动激光位移传感器绕钢管中轴线转动的方法, 测量管端一个截面整个圆周的外径和内径尺寸; 然后利用圆心拟合算法修正转台中轴线与钢管中轴线不重合带来的误差; 同时结合平移台自动调整测量截面与管端的距离, 大型升降台调节管心对齐高度, 双臂平移台调节可测量管径范围, 实现了多种规格钢管管径的非接触自动测量。实验结果表明: 系统的测量精度为 0.05 mm, 重复性限 $\leq 5 \mu\text{m}$; 每个管端截面测量 500 个点时, 测量时间小于 25 s。本测量系统具有较高的自动化程度, 测量速度满足生产节奏, 并已经在天津天管元通管材制品有限公司通过测试和验收; 可以为钢管公司生产企业制造高品质高附加值的精品钢管产品提供检测手段, 有利于企业提高产品附加值, 增加盈利空间。

度的检测方法[J]. 物理测试, 2010, 28(2): 48-51.

- XU Y, WU R M, JIN CH G, *et al.*. Measurement methods for outer diameter and ellipticity of the end of butt-welded pipe[J]. *Physics Examination and Testing*, 2010, 28(2): 48-51. (in Chinese)
- [4] MOTTA L, NOVELLI P, DARCIS P, *et al.*. Flowlines and risers pipes ends laser measurement for enhanced girth welds manufacturing and fatigue behavior[C]. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, 2011, 4: 361-366.
- [5] MOTTA L, NOVELLI P, DARCIS P, *et al.*. Improved girth welds manufacturing for fatigue demanding deep water developments through laser

- pipe end measurement[C]. *Offshore Technology Conference*, 2011, 2:1060-1068.
- [6] 邹振书,李喜增,张景和,等.非接触测量激光光学探头[J].*光学精密工程*,1997,5(3):83-89.
ZOU ZH SH, LI X ZH, ZHANG J H, *et al.*. Laser optical probe for non-contact measurements[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(3):83-89. (in Chinese)
- [7] 王蕾,王会峰,王金娜.提高激光位移传感器精度的技术研究[J].*仪表技术与传感器*,2013(3):1-4.
WANG L, WANG H F, WANG J N. Research on technique of improving the measurement precision of laser-displacement-sensor[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2013(3):1-4. (in Chinese)
- [8] 刘红轩,曲兴华,邢书剑,等.基于激光三角法的大内径测量系统[J].*计算机测量与控制*,2011,19(3):506-515.
LIU H X, QU X H, XING SH J, *et al.*. Large-scale diameter measuring system based on laser triangulation [J]. *Computer Measurement & Control*, 2011, 19(3):506-515. (in Chinese)
- [9] 朱嘉,李醒飞,谭文斌,等.基于圆心约束最小二乘圆拟合的短圆弧测量[J].*光学精密工程*,2009,17(10):2486-2492.
ZHU J, LI X F, TAN W B, *et al.*. Measurement of short arc based on centre constraint least-square circle fitting [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10):2486-2492. (in Chinese)
- [10] 李醒飞,董成军,陈诚,等.单热源作用下滚珠丝杠的温度场建模与热误差预测[J].*光学精密工程*,2012,20(2):337-343.
LI X F, DONG CH J, CHEN CH, *et al.*. Temperature model of ball screw and its thermal error prediction under single heat [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2):337-343. (in Chinese)
- [11] 王显军.光电轴角编码器细分信号误差及精度分析[J].*光学精密工程*,2012,20(2):379-386.
WANG X J. Error and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoders [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2):379-386. (in Chinese)
- [12] 石照耀,张宇,张白.三坐标机测量齿轮齿廓的不确定度评价[J].*光学精密工程*,2012,20(4):765-771.
SHI ZH Y, ZHANG Y, ZHANG B. Uncertainty evaluation of CMM measurement for gear profile [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4):765-771. (in Chinese)

作者简介:



梅剑春(1986—),男,山东济宁人,工程师,2007年,2010年于南开大学分别获得学士、硕士学位。主要从事光电检测、嵌入式系统、虚拟仪器开发等方面的研究。Email:mei@nankai.edu.cn

通讯作者:



叶青(1981—),男,河北沧州人,副教授,2003年于天津大学获得学士学位,2008年于南开大学获得博士学位,主要从事光电检测、测量与控制仪器开发等方面的研究。E-mail:yeqing@nankai.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)