DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2311122

基于双激光位移传感器的超长深孔圆度检测研究*

曹 志,章 鹏,刘显明,雷小华,张 伟

(1.重庆大学光电工程学院 重庆 400044; 2.重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室 重庆 400044)

摘 要:面向超长深孔管道内壁截面圆度的高精度与快速检测难题,针对基于单个激光位移传感器的传统检测方式存在效率低,受轴心晃动影响大的不足,本文提出了基于两个激光位移传感器的点式检测方案,并通过建立数学模型与数值仿真的方式, 对检测装置旋转轴的偏心参数与两个激光位移传感器的安装偏差参数进行了仿真,分析了各参数对深孔管道圆度评价结果的 影响。在此基础上,提出了存在安装误差的两个激光位移传感器数学校正模型,并搭建了管道圆度检测实验系统,验证了该模 型的有效性。结果表明,相比于两个激光位移传感器所采集的数据直接进行圆度评价,对校正之后的数据进行圆度评价,其圆 度值从 0.30~0.50 mm 范围降低到 0.05~0.15 mm 范围,测量时间由 18.7 s 缩短到 9.8 s。 关键词:超长深孔管道;激光位移传感器;数值仿真;校正模型;圆度评价

中图分类号: TH741 TJ399 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 420.40

Research on roundness detection of ultra-long deep hole based on the double laser displacement sensor

Cao Zhi, Zhang Peng, Liu Xianming, Lei Xiaohua, Zhang Wei

(1. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. The Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The traditional detection methods based on a single laser displacement sensor are low in efficiency and greatly affected by axial shaking. To address this issue and solve the problems of high-precision and rapid detection of the roundness of the inner cavity section of ultra-long and deep-hole pipelines, this article proposes a point-based detection scheme based on two laser displacement sensors. By formulating mathematical models and numerical simulation, the eccentricity parameters of the rotating shaft of the detection device and the installation deviation parameters of two laser displacement sensors are simulated. The influence of each parameter on the evaluation results of the roundness of the deep hole pipeline is analyzed. On this basis, a mathematical correction model of two laser displacement sensors with installation errors is proposed, and an experimental system for pipeline roundness detection is established to evaluate the effectiveness of the model. Compared with the direct roundness evaluation of the data collected by the two laser displacement sensors, the results show that the roundness evaluation of the corrected data decreases from $0.30 \sim 0.50 \text{ mm}$ to $0.05 \sim 0.15 \text{ mm}$, and the measurement time is shortened from 18.7 s to 9.8 s.

Keywords: ultra-long and deep-hole pipeline; laser displacement sensor; numerical simulation; correction model; roundness evaluation

0 引 言

超长深孔管道广泛应用于军事、化工、能源、航空航 天、核工业等各领域,承担着愈发重要的功能。超长深孔 管道包括几百毫米级的粗管道,如能源运输中的石油管 道和武器制造业中的火炮内壳等;毫米级的细管道,如航空航天中的柴油喷射器、内螺纹和特殊内壁等^[1-3]。然而,由于超长深孔管道自身加工误差、以及使用过程中介质腐蚀等外界原因,使得超长深孔管道内表面存在缺陷、裂纹等病害问题,造成了设备安全性能指标的下滑。因此,对超长深孔管道内表面进行高精度检测具有重要的

收稿日期:2023-03-02 Received Date: 2023-03-02

^{*}基金项目:国家自然科学基金委员会青年科学基金(51805054)项目资助

价值和意义,而圆度^[45]表示超长深孔管道内表面截面圆 相对于理想圆所允许的最大变动量,是衡量超长深孔管 道形位误差的重要指标之一。

在超长深孔管道圆度测量领域中,常用的快速检测 方法有环形光视觉检测法^[68],其通过有效调整激光投射 器与摄像机的安装位置,并根据已标定的数学模型可计 算得到管道圆截面的完整坐标信息,进而得到管道圆截 面的圆度,能够在保证高精度检测的前提下实现快速有 效的测量,但该方法对光学装置的安装误差要求较高,并 且针对不同管径的管道,摄像机需要调整不同的焦距,严 格限制了该方法检测范围^[9-12]。相比于环形光视觉检测 法的线扫描方式,基于电容法^[13]、超声波法^[14]、光纤强度 法^[15-16]和激光三角法^[17-20]等单点扫描方式使用更加灵 活。电容法和超声波法是最为成熟的检测技术,其结构 简单,检测效率高,但检测精度较低,仅局限于金属类管 道零件的检测:光纤强度法具有结构紧凑、易集成和易小 型化的优势,检测精度可达微米量级,但测量范围有限, 受光源稳定性,环境温湿度和机械稳定性的影响较大,因 此均不适用于超长深孔管道高精度测量领域:基于激光 三角法的单点扫描方式由于采用逐点扫描方式获取管道 内径信息,检测精度可达微米量级,得到了多方面研究。

2012 年, 天津大学张福民课题组针对直径为 600 mm 大尺寸长阶管圆度的测量需求,设计了基于单个 激光位移传感器的检测系统原型样机,其最高精度可达 到 1.1 µm^[21];2019 年,天津大学黄战华课题组提出了基 于单个激光位移传感器的火炮管道内壁检测系统,其最 高分辨率可达到 20 µm^[22]。上述两种测量方案均需要通 过步进电机带动激光位移传感器旋转 360°,以实现对圆 周截面数据点信息的完整采集,存在检测系统耗费时间 较长,并且检测精度受旋转轴随机振动影响较大的缺 点^[23-25],其次,激光位移传感器相对于旋转轴的安装偏差 没有得到有效校正。

为解决该检测方式耗时长,易受旋转轴振动影响, 存在安装偏差等难题,本文主要研究了采用背靠背安 装的两个激光位移传感器同时进行多点测量的检测方 式,提出了两个激光位移传感器安装位置误差校正模 型,重点围绕检测精度的提升进行了研究,最后通过所 设计的检测系统和所搭建的实验系统装置,验证了该 方式有效性。

1 深孔管道内壁圆度测量原理

1.1 理想状态下的圆度测量原理

在理想状态下,两个激光位移传感器出射激光的反向延长线经过旋转转盘的轴心,并且两者分布在旋转转盘的同一条直径上,如图1所示。以激光位移传感器1

为例,其激光出射点 M 与深孔管道内壁被测点 P 的距离 可以表示为 L,其激光出射点 M 与旋转转盘轴心 O 的距 离可以表示为 ρ (激光位移传感器的安装位置偏离值,为 固定值),旋转转盘轴心 O 与深孔管道内壁被测点 P 的 距离可以表示为 R,旋转转盘相对于初始参考位置转过 的角度可以表示为 β 。类比于激光位移传感器 1,表示激 光位移传感器 2 的各参数含义与其一致。



图 1 理想状态下圆度测量示意图

Fig. 1 Diagram of roundness measurement under ideal conditions

深孔管道内壁检测点 *P* 与旋转转盘轴心点 *O* 的距 离可以表示为:

$$R = L + \rho \tag{1}$$

同理,深孔管道内壁检测点 *P*₁ 与旋转转盘轴心点 *O* 的距离可以表示为:

$$R_1 = L_1 + \rho_1 \tag{2}$$

以旋转转盘轴心 *O* 为坐标原点,以旋转转盘的初始参 考位置为 *x* 轴,建立平面直角坐标系。针对激光位移传感 器 1,深孔管道内壁第 *i* 个被测点的坐标可以表示如下:

$$\begin{cases} x_i = (L_i + \rho) \cos \beta_i \\ y_i = (L_i + \rho) \sin \beta_i \end{cases}, i = 1, 2, \cdots, n/2$$
(3)

式中:n为深孔管壁被测点的数量。

针对激光位移传感器 2, 深孔管道内壁第 *i*+*n*/2 个被测点的坐标可以表示如下:

$$\begin{cases} x_{i+n/2} = (L_{i+n/2} + \rho_1) \cos(\beta_{i+n/2} + \pi) \\ y_{i+n/2} = (L_{i+n/2} + \rho_1) \sin(\beta_{i+n/2} + \pi) \end{cases}, \ i = n/2 + 1,$$

面向深孔内壁被测点坐标数据信息 $P_i(x_i, y_i)$,选用 最小二乘法评价其圆度,该方法首先需要寻找圆心,即数 据点 P_i 到某一点距离的平方和最小时,则该点即为要寻 找的圆心,然后以该圆心作两个同心圆,满足大圆包括 了所有数据点并且半径最小,令其为 R_{min} ,小圆内部不 包含任何数据点并且半径最大,令其为 r_{max} ,则圆度可以

(12)





图 2 深孔管道圆度评价

Fig. 2 Evaluation of roundness of deep hole pipeline

令圆 心 坐 标 为 (*a*, *b*),测得数据点的坐标为 *P_i*(*x_i*,*y_i*),则由数据点组成的点集可简记为:

$$P = \{P_i(x_i, y_i), i = 1, 2, \cdots, n\}$$
(5)

令
$$r_i$$
为任意数据点到圆心的距离,则有:

$$r_i^2 = (x_i - a)^2 + (y_i - b)^2$$
 (6)
则目标函数可表示为.

$$f(a,b) = \min \sum_{i=1}^{n} r_i^2$$
 (7)

由式(7)可以确定
$$a, b$$
 的值,即圆心坐标,则有:
 $R_{\min} = \max(r_i), r_{\max} = \min(r_i)$ (8)
即圆度为.

$$f_{\varphi} = R_{\min} - r_{\max} \tag{9}$$

1.2 存在安装误差的圆度测量校正原理

两个激光位移传感器的安装位置正视图、右视图分 别如图 3(a)、(b)所示,单个激光位移传感器检测等效简 化示意图如图 3(c)所示。两个激光位移传感器以背靠 背的方式安装在旋转转盘上,并保证两者激光出射点的 连线经过旋转转盘的轴心。由于在实际安装过程中,安 装位置与理想状况下不可避免存在偏差,会使前述公式 中 $R < L + \rho$,因此,首先对单个激光位移传感器的安装偏差 参数进行分析非常有必要。在图 3(c)原理示意图中,激 光位移传感器的激光出射点 M相对于旋转转盘轴心 O'的安装偏差可以用长度 ρ 和角度 α 来表示;旋转转盘轴 心 O'相对于深孔管道中轴线点 O的偏心状态可以用长 度 L_{affiet} 和角度 θ 来表示。

在 $\Delta PNO'$ 中,激光位移传感器的实测距离 L 可以表示为:

$$(L + \rho \cos \alpha)^2 + (\rho \sin \alpha)^2 = R^2$$
(10)

式中:R为旋转转盘轴心与深孔管道内表面的距离 O'P。



(b) 安装右视图 (b) Installation right view (c) 安装等效简化示意图 (c) Simplified installation equivalent diagram

图 3 两个激光位移传感器安装位置及等效简化示意图 Fig. 3 Installation position and equivalent simplified diagram of two laser displacement sensors

在 ΔPOO' 中,距离 R 可以表示为:

 $\cos(\beta + \pi - \theta) = (R^2 + L_{affset}^2 - R_{origin}^2)/2RL_{offset}$ (11) 式中: R_{origin} 为深孔管道的半径,单位为 m; β 为步进电机 转过的角度,单位为 rad。

综合式(1)和(2),激光位移传感器的实测距离 L 与 步进电机旋转角度 β 的数学关系表达式为:

 $L = \left(\left(\left(R_{origin}^2 - L_{offset}^2 \sin^2(\beta + \pi - \theta) \right) \right)^{1/2} + L_{offset} \cos(\beta + \pi - \theta) \right)^2 - \rho^2 \sin^2 \alpha \right)^{1/2} - \rho \cos \alpha$

类比于上述激光位移传感器的分析,另一个激光位 移传感器的实测距离 L'与步进电机旋转角度 β 的数学关 系表达式为:

为校正两个激光位移传感器的位置安装误差,需要 获取用于表示激光位移传感器的激光出射口 M 相对于 旋转转盘轴心 O'安装偏差的长度 ρ 和角度 α ,并代入 式(10)中反推 R 值。

1.3 非线性最小二乘校正参数估计

以其中一个激光位移传感器分析为例,针对标准圆 管道,则可以得到 *n*/2 个扫描点数据信息,均符合 式(12),简记为*L*(β),则非线性方程组可以表示为:

$$\boldsymbol{L}(\boldsymbol{\varphi}) = (L_1(\boldsymbol{\varphi}), L_2(\boldsymbol{\varphi}), L_3(\boldsymbol{\varphi}), \cdots, L_n(\boldsymbol{\varphi}))^{\mathrm{T}},$$

$$\boldsymbol{\varphi} = (L_{offset}, \theta, \rho, \alpha)^{\mathrm{T}}$$
(14)

设 $F(\varphi) = L(\varphi) - L, L = (L_1, L_2, \dots, L_n), 为 n 个观 测值的残差向量, 为使全部观测数据点的残差平方和极 小化, 目标函数 <math>S(\varphi)$ 需满足:

$$S(\boldsymbol{\varphi}) = \min \sum_{i=1}^{n} L_{i}^{2}(\boldsymbol{\varphi}) = \| \boldsymbol{L}(\boldsymbol{\varphi}) \|_{2}^{2}$$
(15)

为获取上述目标函数的最小值,采用具有收敛速度 更快与鲁棒性更强的 Levenberg-Marquardt 参数估计算 法,需要给出待求参数的初始迭代值 $\varphi_0 = (L_{offield}, \theta_0, \rho_0, \alpha_0)$,然后按照式(16)进行目标参数的迭代,直至找 到最优参数。

 $\varphi_{k+1} = \varphi_k - (J_k^{\mathrm{T}} J_k + \mu I)^{-1} g_k$ (16) 式中: φ_k, φ_{k+1} 分别为第k次和第k + 1次迭代值; J_k 为雅 可比矩阵; μ 为阻尼参数; g_k 为迭代梯度方向。

2 误差影响因素分析

在居中爬行机械检测系统测量过程中,会自动默认 将长度值 L 与距离值 ρ 两者的和作为管壁被测点 P 与旋 转转盘轴心 O'的距离 R,其中,L 为激光位移传感器所测 长度,ρ 为激光位移传感器激光出射口 M 与旋转转盘轴 心 P 的距离。而在实测过程中,旋转转盘轴心相对于深 孔管道中轴线存在偏心,并且两个激光位移传感器的安 装位置均存在误差,因此为提高检测精度,需要分析各误 差参数对实测数据的影响。

设置管道的半径为 60.5 mm,图 4~7 分别仿真了取 不同偏移距离 L_{ofset} 、偏心角度 θ 、安装偏差长度 ρ 和安装 偏差角度 α 时,利用所获取的数据构造管道内截面形状; 图 8 ~ 11 分别展示了在上述仿真条件下的圆度。



Fig. 4 The influence of different offset distance on roundness

从上述4幅图可以发现,偏移距离 L_{affset} 和偏心角 度 θ 的取值均不会对管道内截面形状的数据重构造成 影响,即居中爬行机械检测系统旋转轴的偏心与晃动 不会对管道截面圆度评价造成影响;2个激光位移传感 器的安装偏差长度 ρ 和角度 α 均会对管道内截面形状 的数据重构造成明显影响,并且随着安装偏差长度 ρ 和 角度 α 值的增大,管道截面圆度的评价误差会随之增大,



图 5 不同偏心角度对圆度的影响





Fig. 6 The influence of different installation deviation

length on roundness



其中安装偏差长度ρ对管道截面圆度评价误差的影响更 大,4个参数的取值对圆度评价的影响分别如图 8~11 所示。



图 8 不同偏移距离的圆度计算

Fig. 8 Calculation of roundness at different offset distances



图 9 不同偏心角度的圆度计算





图 10 不同安装偏差长度的圆度计算





3 系统设计与实验分析

本试验在常温实验室环境下开展,所搭建的圆度检测平台由测距与参考平台、检测装置与待测金属管道两部分组成,其中,测距与参考平台主要由垂直升降微位移台和激光测距仪组成,如图 12 所示。在近端检测时,控制被测金属管道和测距与参考平台的距离为0m;在远端检测时,控制被测金属管道和测距与参考平台的距离为27 m。



针对同一段管道,测试了考虑与未考虑2个激光位 移传感器安装位置误差校正两种状态下的圆度测试效 果。管道圆度测量试验系统如图13所示,采用了长度为 2.5m,直径为121mm的金属管道作为被测件,用来验证 激光位移传感器安装位置误差校正模型的效果。首先将 检测装置放入到金属管道中,然后接通该装置的电源线, 并将该装置的网线与计算机相连接,由计算机上的配套 软件对检测装置进行控制,以及对反馈的数据进行处理 与存储。



图 13 深孔管道圆度检测实验示意图 Fig. 13 Diagram of deep hole pipeline roundness test

在该试验中,设置居中爬行机械检测装置的行进间 隔为10mm,并设置旋转电机以1°角度间隔进行旋转,每 到设定的检测区域,控制2个激光位移传感器进行距离 测量,获取金属管道管壁与激光位移传感器的距离信息, 在此过程中,同时通过秒表计时。

3.1 试验结果与校正分析

结合 2 个激光位移传感器所测试的距离数据与步进 电机旋转的角度数据,并通过将极坐标转化为直角坐标, 绘制如图 14 所示的深孔管道内壁圆截面测试示意图。 可以发现,2 个激光位移传感器所测试的两段曲线在公 共区域处未能完全重合,这将对下一步管道截面圆度评 价的精度造成影响,因此有必要对两个激光位移传感器 的安装误差进行校正。





通过上述圆度测量校正模型,并利用标准管道圆截 面,首先对激光位移传感器 1 所测试的数据点进行曲线 拟合以及位置参数的求取。以激光位移传感器 1 为例, 设置安装偏差长度 ρ 、安装偏差角度 α 、偏移距离 L_{offset} 和 偏心角度 θ 的初始迭代值分别为 28.1 mm、0.01 rad、 1 mm 和1 rad。经计算,激光位移传感器 1 的安装位置误 差参数分别为:偏心长度 L_{offset} 为 1.161 8 mm,偏心角度 θ 为 0.808 8 rad,安装偏差长度 ρ 为 32.097 4 mm,安装偏 差角度 α 为 0.002 32 rad;同理,激光位移传感器 2 的安 装位置误差参数分别为:偏心长度 L_{offset} 为 1.129 6 mm, 偏心角度 θ 为 0.750 6 rad,安装偏差长度 ρ 为 31.790 2 mm,安装偏差角度 α 为 0.002 2 rad。两段测试 数据点的拟合效果图分别如图 15 和 16 所示。

通过将上述参数代入到修正模型中,并对原始数据 点坐标信息进行数据处理。经数据校正可以发现,2个 激光位移传感器所测试的两段曲线在公共区域处能够基 本完全重合,消除了2个激光位移传感器因不同安装位 置所造成的误差,其实际效果图如图17所示。

近端检测时,在距离管道管口 20、22、24、26、28、30、 32 cm 的7个位置进行圆度测试;远端检测时,在距离管



Fig. 15 Data fitting effect of laser displacement sensor 1



国10 版但世界民恐怖之效的以自然不





图 17 深孔管道内腔圆截面测试数据校正示意图 Fig. 17 Calibration diagram of test data of circular section of inner cavity of deep hole pipeline

道管口 2 720、2 722、2 724、2 726、2 728、2 730、2 732 cm 的 7 个位置进行圆度测试。然后对 2 个激光位移传感器 未校正数据和校正数据分别进行圆度评价,结果如图 18 和 19 所示。



图 18 管道不同截面近端检测时圆度测量效果图 Fig. 18 Different sections of the pipeline near end detection roundness measurement effect



Fig. 19 Results of roundness measurement in different sections of pipe

从远近端检测可以发现,对校正后的数据进行圆度 评价时,其圆度误差明显小于未校正的数据,更符合管道 内壁实际圆度。

3.2 重复性测试分析

为验证实验系统的重复性与稳定性,在距离管口 30 cm 处进行了 6 次重复性测试,圆度测试结果波动范围 为 0.007 4 mm,如图 20 所示。针对同一管道同一位置处 的内壁圆截面,理论上其多次测量的圆度应为同一数值, 但在重复测量过程中,由于步进电机旋转轴的非规律性 振动,激光位移传感器自身的测量误差,以及检测环境影 响等,每次获取的测量数据无法保证完全一致。





3.3 不确定度分析

本文选用的激光位移传感器量程为 50 mm,分辨率 为 0.1 μm。置信区间为(-0.05 μm, 0.05 μm)的概率 为 95%,标准不确定分量可表示如下:

$$c_1 = 0.05/2 = 0.025 \tag{17}$$

旋转电机角度检测所引入的位移误差可由千分尺重 复多次测量获取,并通过机械调整可将其最小化至约 ±10 μm,假设其误差影响为均匀分布,则标准不确定分 量可表示为:

$$u_2 = 10/\sqrt{3} = 5.7735$$
(18)

旋转转盘热膨胀效应也会极大影响测量精度,以其 中一个激光位移传感器分析为例,为保证校准长度参数 与最终现场使用参数之间的长期一致性,可采用下式对 该系统误差进行修正。

$$ρ = ρ_0(1 + c\Delta T)$$
(19)
式中: ρ 为安装偏差长度校准值; ρ₀ 为安装偏差长度实测
值: c 为旋转转盘的热膨胀系数: ΔT 为温差。

校准距离参数 ρ 的相关不确定度可表示为:

$$u_{\rho} = \sqrt{(1 + c\Delta T)^2 u_{\rho_0}^2 + (\rho_0 \Delta T)^2 u_c^2 + (\rho_0 c)^2 u_{\Delta T}^2}$$
(20)

结合实测参数, $\rho_0 = 29$. 716 mm, c = 0.000023 6/°不确定度 $u_c = 5\% \times c_o$ 温度测量相关不确定度为 $u_{\Delta T} = 0.1$ ℃。当温差 $\Delta T = 20$ ℃时,校准距离参数 ρ 可修正为 $\rho = \rho_0 (1 + c\Delta T) = 29.730$ mm,相关不确定度 $u_{\rho 0} = 0.001$ mm,因此标准不确定度可表示为 $u_{\rho} = 0.0012$ mm。 综上,合成不确定度如下:

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_p^2} = \sqrt{0.025^2 + 5.7735^2 + 1.2^2} = 5.8969 \ \mu m$$
(21)

4 结 论

本文针对深孔管道内壁圆度评价,为提高圆度检测 效率,采用了背靠背安装的2个激光位移传感器同时进 行多点测量的检测方式,经过数值仿真,验证了检测装置 旋转轴偏移距离 L_{affset} 和偏心角度 θ 两个参数对管道截面 圆度评价没有影响,2个激光位移传感器的安装偏差长度 ρ 和角度 α 两个参数对管道截面圆度评价有明显影响。 基于此,提出了 2 个激光位移传感器安装位置误差校正 模型,并通过搭建试验系统与实验验证,面向同一金属管 道,圆度评价值从 0.30~0.50 mm 范围降低到 0.05~ 0.15 mm 范围,测量时间由 18.7 s 缩短到 9.8 s,证明了该 模型能够有效减小圆度评价误差,验证了该方式的有 效性。

参考文献

- JIAO F W, LIU L, CHENG W S, et al. Review of optical measurement techniques for measuring threedimensional topography of inner-wall-shaped parts [J]. Measurement, 2022:111794.
- [2] CHABLAT D, VENKATESWARAN S, BOYER F. Mechanical design optimization of a piping inspection robot [J]. Proceedia Cirp, 2018, 70: 307-312.
- [3] 程海鹰,贾磊,崔猛. 深孔内径测量装置设计[J]. 制造业自动化,2014(18):16-18.

CHEN H Y, JIA L, CUI M. Design of deep hole inner diameter measuring device [J]. Manufacturing Automation, 2014(18):16-18.

- [4] 方沁林. 圆度误差评定的算法研究与软件设计[D]. 南京:南京航空航天大学,2007.
 FANG Q L. Research on algorithm and software design of roundness error evaluation [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2007.
- [5] 岳龙龙,黄强先,梅腱,等.基于最小包容区域法的圆度误差评定方法[J].机械工程学报,2020,56(4):
 42-48.

YUE L L, HUANG Q X, MEI J, et al. A roundness error evaluation method based on the minimum inclusion region method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020,56(4):42-48.

[6] 冯忠伟,徐春广,肖定国,等. 基于圆结构光照明和 LED照明相结合的三维检测技术[J]. 光学技术, 2009,35(2):265-268.

> FENG ZH W, XU CH G, XIAO D G, et al. Threedimensional detection technology based on the combination of circular structured light lighting and LED lighting [J]. Optical Technology, 2009, 35(2):265-268.

[7] 赵朗月,吴一全. 基于机器视觉的表面缺陷检测方法研究进展[J]. 仪器仪表学报,2022,43(1):198-219.
ZHAO L Y, WU Y Q. Research progress of surface defect detection methods based on machine vision [J].
Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(1): 198-219.

- [8] 朱文娟.复杂深孔几何参数图像法测量技术研究[D]. 北京:北京理工大学,2008.
 ZHU W J. Research on the measurement technique of complex deep hole geometric parameters by image method[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2008.
- [9] SCHEMPF H, MUTSCHLER E, GAVAERT A, et al.
 Visual and nondestructive evaluation inspection of live gas mains using the explorer family of pipe robots [J].
 Journal of Field Robotics, 2010, 27(3): 217-249.
- [10] 叶晶,周常河,贾伟,小型管道内壁三维成像测量系统[J].中国激光,2010,37(8):2025-2028.
 YE J, ZHOU CH H, JIA W. Small pipe inner wall 3D imaging measurement system [J]. Chinese Laser, 2010, 37(8):2025-2028.
- [11] 张广军,贺俊吉,李秀智.一种新型的微小型构件内表面三维形貌检测系统[J].仪器仪表学报,2006,27(3):302-306.
 ZHANG G J, HE J J, LI X ZH. A novel 3D shape detection system for the inner surface of micro-miniature components [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(3):302-306.
- [12] ABDELLATIF M, MOHAMED H, HESHAM M, et al. Mechatronics design of an autonomous pipe-inspection robot [J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 153: 02002.
- [13] 李红民,郭立杨,宋冠锋,等. 基于电容传感器管道焊
 缝位置检测方法的研究[J]. 宇航计测技术,2018, 38(1):68-73.
 LIHM, GUOLY, SONGGF, et al. Research on

detection method of pipeline weld position based on capacitance sensor [J]. Aerospace Measurement Technology, 2018,38(1):68-73.

- [14] 梁海波, 王怡. 基于深度学习的天然气钢制管道缺陷 检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(9):148-158.
 LIANG H B, WANG Y. Research on defect detection method of natural gas steel pipeline based on deep learning[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(9):148-158.
- [15] 陈果. 基于斜射式散射法的曲表面粗糙度检测原理及系统研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2015.
 CHEN G. Research on the principle and system of curvature surface roughness detection based on oblique scattering method [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [16] 徐伟. 基于光纤传感器的深孔内表面粗糙度测量方法 研究[D]. 镇江:江苏大学, 2018.

XU W. Research on measuring method of deep hole internal surface roughness based on optical fiber sensor[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.

[17] 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): 506-508,515.

> LIU H X, QU X H, XING SH J, et al. Large inside diameter measurement system based on laser triangulation[J]. Computer Measurement and Control, 2011,19(3):506-508,515.

[18] 黄战华,岳富军,张光,等.火炮身管内壁检测系统的数据处理方法研究[J].应用光学,2020,41(2):248-256.

HUANG ZH H, YUE F J, ZHANG G, et al. Research on the data processing method of gun tube inner wall detection system [J]. Applied Optics, 2020, 41 (2): 248-256.

[19] 龙续林.基于激光位移传感器的火炮身管内膛检测系统研究[D].南京:南京大学,2015.

LONG X L. Research on gun bore detection system based on laser displacement sensor [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.

[20] 汤一平,吴挺,袁公萍,等.适用于管道内形貌检测的 3D 全景视觉传感器[J].仪器仪表学报,2017,38(3): 726-733.

TANG Y P, WU T, YUAN G P, et al. 3D panoramic vision sensor for in-pipe topography inspection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3): 726-733.

- [21] ZHANG F M, QU X H, OUYANG J F. An automated inner dimensional measurement system based on a laser displacement sensor for long-stepped pipes[J]. Sensors, 2012,12(5):5824-5834.
- [22] 赵原卉.基于激光位移传感器的管道内壁测量与重建[D].天津:天津大学,2019.
 ZHAO Y H. Measurement and reconstruction of pipeline inner wall based on laser displacement sensor [D]. Tianjin: Tianjin University,2019.

[23] 马鹤立,陶天炯,刘盛刚,等. 基于频域干涉的小口径 长身管内径测量系统[J]. 兵工学报,2019,40(5): 1077-1082.

MA H L, TAO T J, LIU SH G, et al. Internal diameter measurement system of small diameter long pipe based on frequency domain interference [J]. Ordnance Engineering Journal, 2019, 40(5):1077-1082.

- [24] BERTETTO A M, RUGGIU M. In-pipe inch-worm pneumatic flexible robot [C]. IEEE/ASME International Conference on IEEE, 2001.
- [25] YOKOTA M, KOYAMA T, TAKEDA K. Digital holographic inspection system for the inner surface of a straight pipe [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 97:62-70.

作者简介



曹志,2020年于燕山大学获得学士学 位,现为重庆大学硕士研究生,主要研究方 向为测试技术与仪器。

E-mail: cao3494957512@163.com

Cao Zhi received his B. Sc. degree from

Yanshan University in 2020. He is currently pursuing his M. Sc. degree at Chongqing University. His main research interest is testing technology and instruments.



章鹏(通信作者),1991年于江汉石油 学院获学士学位,2002年于重庆大学获硕士 学位,2005年于重庆大学获博士学位,现为 重庆大学副教授,主要研究方向为测试技术 与仪器。

E-mail: zhangpeng@cqu.edu.cn

Zhang Peng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jianghan Petroleum Institute in 1991, received his M. Sc. degree from Chongqing University in 2002, and received his Ph. D. degree from Chongqing University in 2005. He is currently an associate professor at Chongqing University. His main research interests include testing technology and instrumentation.