

压力容器内部关键特征失圆率的检测研究

王子涵^{1,3}, 肖天琦^{1,3}, 张炳雷², 魏克敏², 江志铭², 张凯², 李瑞宇², 陈金毅^{1,3}, 熊伦^{1,3}, 卢永雄^{1,3}

¹ 武汉工程大学光电信息与能源工程学院 湖北武汉

² 广东省特种设备检测研究院顺德检测院 广东顺德

³ 武汉工程大学荆门化工新材料产业技术研究院 湖北荆门

【摘要】失圆率作为压力容器的一个关键参数,对其产品质量和安全性能有着显著影响,目前在实际中检验困难,精度不高。采用先进光电测距技术获取压力容器内部空间数据,且关键在于运用容器截面非平行轴的方式解决该问题。通过将高精度的测距传感器,搭载于一根可伸入容器内部的测量杆上,旋转一周采集数据,之后对数据进行投影变换和最小二乘法拟合,得到压力容器筒体截面。变换后数据找到最大内径差,从而计算出失圆率。实际工况测量中误差在 0.1% 左右。相较于现有的钢卷尺和千分尺测量,精度和效率都显著提高,为压力容器失圆率的检验问题提供了一种新的解决办法,同时为压力容器内部空间的数字孪生提供了精确的数据基础。

【关键词】压力容器;失圆率检验;激光测量

【基金项目】武汉工程大学研究生教育创新基金(NO: CX2023268);广东省特种设备检测研究院项目《压力容器内径及内部宏观特性智能检测仪研发》(2022CY-2-08);武汉工程大学荆门化工新材料产业技术研究院开放基金项目(NO: H01061): 化工压力容器实时检测和数字孪生关键技术研发

【收稿日期】2025 年 11 月 6 日

【出刊日期】2025 年 12 月 30 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250402

Research on detection of out of roundness rate of critical characteristics inside pressure vessels

Zihan Wang^{1,3}, Tianqi Xiao^{1,3}, Binglei Zhang², Kemin Wei², Zhiming Jiang², Kai Zhang², Ruiyu Li², Jinyi Chen^{1,3},
Lun Xiong^{1,3}, Yongxiong Lu^{1,3}

¹School of Optical Information and Energy Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei

²Guangdong Institute of Special Equipment Inspection and Research Shunde Branch, Shunde, Guangdong

³Jingmen Institute of Chemical Industry and New Materials Industry Technology, Wuhan Institute of Technology, Jingmen, Hubei

【Abstract】 The out-of-roundness, a crucial parameter of pressure vessels, significantly impacts their product quality and safety performance. Currently, its inspection in practice faces difficulties and lacks precision. Advanced photoelectric ranging technology is employed to acquire spatial data within pressure vessels, with a pivotal solution lying in addressing the issue through non-parallel axis measurement of vessel cross-sections. This approach involves mounting high-precision ranging sensors on a measuring rod that can be inserted into the vessel interior, rotating the rod once to collect data, and subsequently applying projection transformation and least squares fitting to the data to obtain the cylinder cross-section of the pressure vessel. The transformed data enable the identification of the maximum internal diameter difference, from which the out-of-roundness is calculated. In actual operating conditions, the measurement error is approximately 0.1%. Compared to existing methods using steel tapes and micrometers, this approach significantly enhances both precision and efficiency, offering a novel solution to the inspection of out-of-roundness in pressure vessels. Furthermore, it provides an accurate data foundation for the digital twinning of internal spaces within pressure vessels.

【Keywords】 Pressure vessels; Loss of roundness rate test; Laser gauge

引言

压力容器最大内径差的控制在其制造和定期检验中具有显著意义,因为内径差的存在会导致筒体失圆,加剧应力集中,进而引发严重的爆裂失效事故,给人们

的生命和财产带来巨大风险^[1-4]。在国家制订的技术规范和标准中,如 TSG 21-2016《固定式压力容器安全技术监察规程》和 GB 150.4-2011《压力容器 第 4 部分:制造、检验和验收》^[5-6],都对压力容器的内径偏差指

标提出了明确要求。这些要求不仅是为了保证产品质量,更是为了确保压力容器在运行过程中的安全性能。因此,失圆率作为一个关键参数,对压力容器的产品质量和安全性能有着重要的影响,需要严格依照技术规范进行监测和控制^[7]。如下图1为压力容器筒体截面上的最大内径差示意图,失圆率F即定义为: $F = (D_{\max} - D_{\min}) / D$ ^[8]。

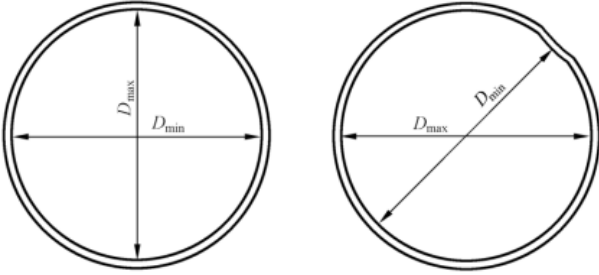


图1 压力容器筒体截面上的最大内径差示意图

因此,失圆率检验的关键在于精准测量压力容器最大内径与最小内径的数值,目前国内特检院和压力容器设计制造单位一般采用钢卷尺或内径千分尺测量压力容器的内径^[9],对于在役压力容器的内径测量暂无较好的解决方案。针对目前在役压力容器失圆率检验困难、精度不高等问题,基于激光测距技术,将激光测距传感器搭载于可伸入筒体的测量杆上,研究了一种在役压力容器失圆率检验方法,且关键在于测量杆无需与容器筒体中心轴线完全重合或者平行。

1 方法论述

1.1 非接触式检测系统原理

目前,在检验、测量和控制等诸多应用中,激光测距已被证明为一种非常重要的非接触式检测手段^[10-11]。该检测方法数据的获取主要是运用激光测距的原理^[12]。本研究中采用精度及分辨率更高相位式测距法^[13]。将传感器安装固定在一长为1500mm,直径25mm的测量杆中。测量杆中固定一条微型直线导轨,导轨上装有三个直线滑块,设计一连接件,反面固定直线滑块,正面安装固定三个传感器且相邻间隔固定。

如图2内径测量工作示意图所示。当测量杆旋转一周后,收集容器内截面数据,随后对这些数据点进行处理和投影变换,以获取容器内部空间的数值表征。因此,系统设计了一套算法,确保测量杆能够根据在罐体截面任意姿态进入压力容器,并准确计算出压力容器的最大内径和最小内径,无需完全与容器筒体中心轴线对齐或者平行。

1.2 数据处理原理

如图2,测量杆上安装有3个传感器,中心相邻S

为固定距离,在测量杆旋转一周后得到数据点组成C1面,只要将数据点C1面投影为压力容器筒体的正截面即C2面,再计算出截面的最大直径与最小直径即可得出容器该截面的失圆率。由于测量杆进入罐体内部时可能带有一定角度即 α 。因此C1面与C2面产生夹角即 β 。在测量杆偏向方向上的数据分析:测量杆中心轴线与容器中心轴线,两线与采集得到各传感器数据 L_i ($i=1, 2, 3$)相交,构成直角三角形 $\triangle CPE$;同时, L_i 与C2面对应边 T_i 分别与压力容器内壁相交,构成另一直角三角形 $\triangle AOB$ 。根据相似三角形原理, $\triangle CPE \sim \triangle AOB$,从而可得夹角 $\alpha = \beta$ 。基于此,结合测量数据d与已知间距S,便可将C1面上的原始距离序列换算为C2面上的坐标点集,为后续在C2面上搜索直径做好准备。具体步骤如下:

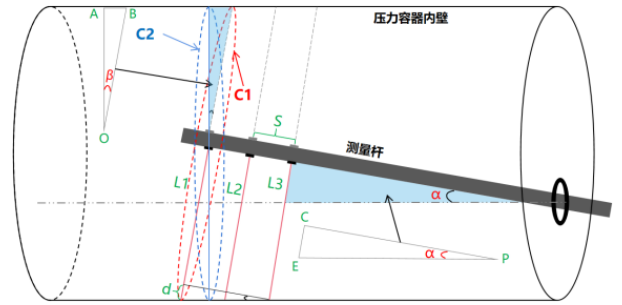


图2 内径测量工作示意图

如下图3数据投影转换示意图与图4寻找直径示意图所示,在C2面上建立坐标系以点 (X_i, Y_i) 为基准点,计算基准点的斜率 k_i 。即 $k_i = \frac{Y_i}{X_i}$;由此基准点

向右开始遍历四分之一后的对面一半的点即点 $\left(X_{i+\frac{j}{2}}, Y_{i+\frac{j}{2}}\right)$ 与点 $\left(X_{i+\frac{3}{2}j}, Y_{i+\frac{3}{2}j}\right)$ 之间的数据点,计算遍历点的斜率 k_{i+j} 。进而计算遍历点的与基准点之间的斜率差距,寻找差距最小的值 k_{\min} ,连接此两点构成的线段为其中一条直径D。以此类推,可得到n个D;寻找最大的直径与 D_{\max} 最小的直径 D_{\min} ;

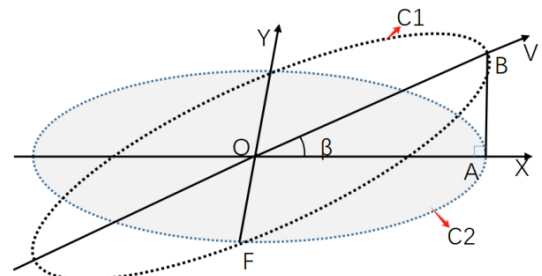


图3 数据投影转换示意图

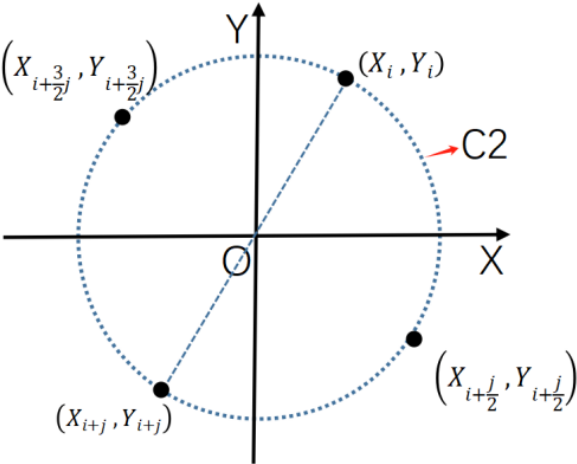


图 4 寻找直径示意图

2 实验结果

本研究为验证此失圆率检验方法的可行性, 研究设计了重复性实验与实际工况检测实验, 并进行了大量测试对系统精度进行验证。主要是选用了某特种设备压力容器制造厂标注内径为 800mm、1300mm、1600mm 的立式压力容器或生产组件进行实际工况实验。采用此方法进行多次实验, 并与内径千分尺测量结果进行比较。

2.1 重复性测试实验

为保证系统检测重复性, 将系统安装好后对标称内径 1600mm 的压力容器进行测试。如表 1 重复性测量数据所示, 实验环境如图 5 和图 6 所示。

表 1 重复性测试数据表

| 序号 | 测量最大直径/mm | 测量最小直径/mm | 标称值/mm |
|----|-----------|-----------|--------|
| 1 | 1603 | 1597 | 1600 |
| 2 | 1602 | 1597 | 1600 |
| 3 | 1602 | 1597 | 1600 |



图 5 测试时容器外图



图 6 测试时容器内图

重复性实验的结果表明, 实验传感器的重复性在 $\pm 1\text{mm}$ 以内, 说明系统重复性满足使用需求。

2.2 非同心轴测试实验

为验证当前系统测量的准确度, 将系统安装好后对不同标称内径的压力容器进行测试。同时使用内径千分尺进行测量相同工况的压力容器, 测量数据如下表 2 不同内径数据对比表所示。

表 2 不同内径数据对比表

| 序号 | 标称值/mm | 中心夹角 ($^{\circ}$) | 设备仪器测量/mm | | 内径千分尺测量/mm | |
|----|--------|---------------------|-----------|------|------------|--------|
| | | | 最大直径 | 最小直径 | 最大直径 | 最小直径 |
| 1 | 800 | 5.7 | 801 | 792 | 801.3 | 792.3 |
| 2 | 800 | 17.6 | 801 | 791 | 801.3 | 792.3 |
| 3 | 1300 | 4.3 | 1321 | 1263 | 1320.0 | 1262.0 |
| 4 | 1300 | 12.7 | 1319 | 1262 | 1320.0 | 1262.0 |
| 5 | 1600 | 5.2 | 1603 | 1597 | 1603.3 | 1598.3 |
| 6 | 1600 | 14.0 | 1602 | 1597 | 1603.3 | 1598.3 |

该次测量实验主要是针对内径 800mm、1300mm、1600mm 三种不同内径的压力容器进行测量。测试的压力容器目前正在生产中未投入使用，且 1300mm 的容器两端均未封口的圆柱形，800mm 与 1600mm 的容器只有一端进行了封口。分别采用了研发设计的设备进行测量最大直径与最小直径，同时也采用了内径千分尺进行测量然后作为对比。由上述的表 2 中数据可得：在不同的内径的容器以截面不同角度测量此容器的最大直径与最小直径的数据稳定。同时与内径千分尺所测数据对比，数据相差在 $\pm 1\text{mm}$ 左右。而运用内径千分尺在寻找最大直径与最小直径时出现操作复杂繁琐、

需要大量的人工时间且效率低下等问题。但本研究的设备仪器操作简单、数据稳定、工作效率高以及减少了人工所带来的误差。

2.3 存在内构件测试实验

在目前应用的压力容器中有一部分容器的内部空间存在内构件，让容器的内部空间不再是近乎规则的圆。此实验在不同角度测量压力容器的最大直径和最小直径，主要检验容器内部的内构件对容器失圆率的影响。测试数据如下表 3 存在内构件数据对比表所示。实验环境如图 7 和图 8 所示。

表 3 存在内构件数据对比表

| 序号 | 标称值/mm | 中心夹角 (°) | 设备仪器测量/mm | | 内径千分尺测量/mm | |
|----|--------|----------|-----------|------|------------|-------|
| | | | 最大直径 | 最小直径 | 最大直径 | 最小直径 |
| 1 | 800 | 5.7 | 801 | 792 | 801.3 | 792.3 |
| 2 | 800 | 23.3 | 801 | 791 | 801.3 | 792.3 |
| 3 | 800 | 5.7 | 801 | 792 | 801.3 | 792.3 |

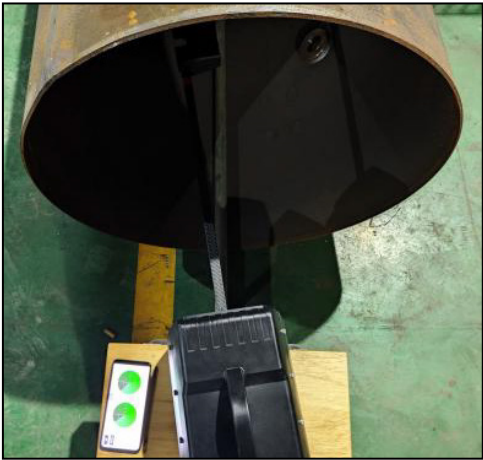


图 7 内构件容器斜测量图

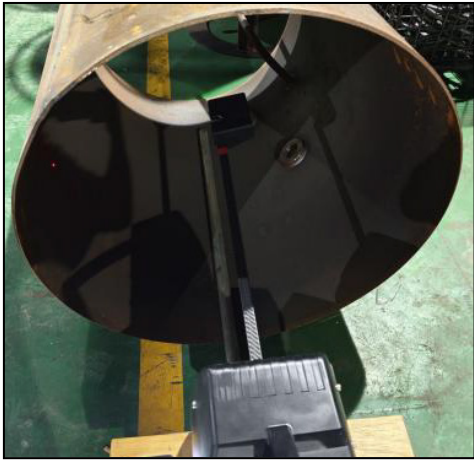


图 8 内构件容器斜测量图

3 误差来源与分析

3.1 电机转动误差分析

该设备主要误差来源机械结构数据采集时产生的误差和算法中所引入的误差。如下图 9 所示。当存在最小的角分辨率 θ 时, 则 N_1 与 N_2 之间的距离为; 当 N_1 与 N_2 之间距离过大即角分辨率过大会导致采集点稀疏, 当角分辨率固定时, 随着测量容器的尺寸越大则越大, 造成 N_1 与 N_2 之间存在极大值点而没有被采集到该数据。针对该误差采用不同尺寸的压力容器, 采用不同的角分辨率。例如容器内径 1000mm 时采用角分辨率 0.9 度; 容器内径 2000mm 时采用角分辨率 0.45 度; 即可控制该误差的影响。

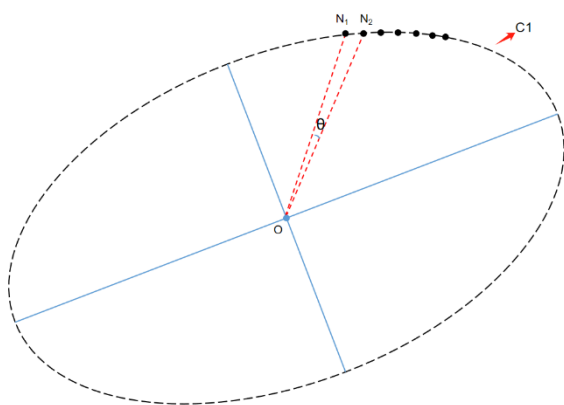


图 9 测量面数据点示意图

3.2 传感器与测量杆匹配误差分析

在机械结构设计中传感器的安装不在旋转杆子的正中心, 因此在旋转过程中, 激光出光点围绕的转动轨迹为一个圆环。则传感器所得测量数据并非测量杆到筒体壁之间的距离, 如下图所示:

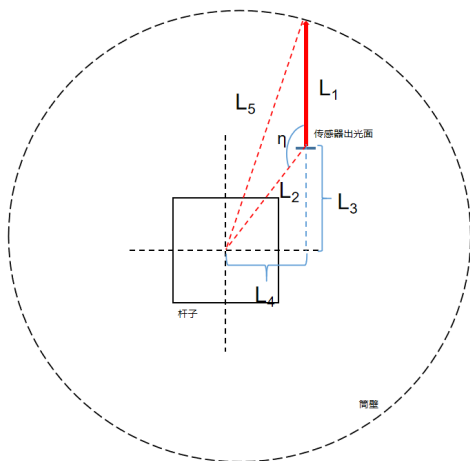


图 10 测量面数据点示意图

L_1 为传感器到筒壁的距离即激光测距所得距离;
 L_2 为杆子中心轴到传感器出光面的距离; L_3 与 L_4 是杆

子中心轴到传感器出光面的横纵方向上的距离, 由安装固定而已知。 L_5 是杆子中心轴到容器筒体壁面的距离; 所以由图可知传感器所测出来的实际距离并不是杆子中心轴到筒壁的实际距离, 从而存在误差。针对该误差可以计算 L_2 的实际距离进而补偿得出 L_5 ; 在 L_1 、 L_2 、 L_5 组成的三角形中, 已知 η 、 L_1 、 L_2 。根据余弦定理来求解 L_5 ; 即
$$L_5 = \sqrt{L_1^2 + L_2^2 - 2 \times L_1 \times L_2 \times \cos \eta}$$
; 则可以解决该误差对测量结果的影响。

4 结论

(1) 文中针对目前在役压力容器失圆率检验困难、精度不高等问题, 采用先进的光电测距技术, 应用于压力容器最大内径差测量及失圆率检验。研究了在实际工况中的数据重复性、测量杆不同角度下测不同内径的压力容器工况, 以及容器含有内构件的测量实验。根据实际工况的各类实验相较于传统人工使用钢卷尺和千分尺测量, 精度和效率都显著提高, 设备操作简单。

(2) 文中对设备可能存在的误差进行了分析和如何控制误差。如传感器安装位置不在旋转杆正中心导致的误差, 本文提出了通过几何计算和余弦定理来补偿这一误差的方法。具体是通过已知传感器到筒壁的距离 (L_1)、传感器出光面到杆子中心轴的距离 (L_2) 以及它们之间的角度关系 (η), 利用余弦定理可以计算出杆子中心轴到筒体壁面的实际距离 (L_5), 从而有效补偿了因安装位置偏移带来的测量误差。通过几何计算补偿传感器安装误差、调整角分辨率以适应不同尺寸的压力容器、以及增加数据点密度来优化算法, 本文系统地解决了机械结构设计与测量系统中的几个关键误差问题, 为提高测量精度和数据的可靠性提供了有效的策略和方法。

参考文献

- [1] 吕炯怡. 压力容器制造质量管理控制要点分析[J]. 中国设备工程, 2023, (15):227-229.
- [2] 董红瑞. 压力容器制造检验过程存在的问题及控制措施[J]. 决策探索(中), 2020(12):63.
- [3] 张今越. 化工机械压力容器制造中焊接质量的控制分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(19):49-51.
- [4] 王中原, 殷婉君, 纪纯明, 等. 压力容器制造质量管理体系的比较研究[J]. 石油和化工设备, 2020, 23 (10):9-12.
- [5] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. 压力容器定期检

验规则:TSG R7001—2004[S].北京:新华出版社,2004.

准出版社,2011.

- [6] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会.固定式压力容器安全技术监察规:TSG 21—2016[S].北京:新华出版社,2016.
- [7] 刘亚庭, 杜辉, 赵二虎. 压力容器制造检验时宏观检验技术应用述评[J]. 化工管理, 2020, (04):52-54.
- [8] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会.压力容器第 4 部分:制造、检验和验收:GB/T 150.4—2011[S].北京:中国标

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

