



基于激光干涉法的大型工件内径测量系统设计

屈 杰, 陈本永, 严利平, 楼盈天

(浙江理工大学精密测量技术实验室, 杭州 310018)

摘 要: 当利用激光干涉法对大型工件进行现场测量时, 需铺设长行程直线导轨, 导致测量系统结构复杂; 为解决该问题, 采用模块化接杆式结构的可伸缩测量臂, 设计了一套基于激光干涉位移测量的大型工件内径测量系统。该系统由位移测量模块、旋转驱动模块和数据获取与处理模块三部分组成; 位移测量模块的测量臂采用双支撑外径递减式结构, 有效减少了大尺寸测量时的弯曲变形; 采用 Pratt 法与 LM 法相结合的融合法进行最小二乘法圆拟合, 精确得到被测工件半径和圆度等参数。对研制系统装置进行了定心实验、系统静态稳定性实验、实际工件内径测量及重复性实验等, 重复性测量实验测得同一圆周的半径和圆度标准偏差分别为 17.60、25.48 μm , 不同圆周的半径和圆度标准偏差在几十微米内波动, 符合测量工件的加工精度。结果表明该系统可应用于大型工件的现场测量, 可有效检测和评估工件内径和圆度等参数。

关键词: 激光干涉仪; 大型工件; 内径测量; 最小二乘法; 有限元分析

中图分类号: TS195.644

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2022) 09-0774-09

Design of inner diameter measurement system for large workpieces based on laser interferometry

QU Jie, CHEN Benyong, YAN Liping, LOU Yingtian

(Precision Measurement Laboratory, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: When laser interferometry is used to measure large workpieces on-site, it is necessary to lay long-stroke linear guide rails, making the structure of the measurement system become complex. To solve this problem, a retractable measuring arm with a modular post-rod structure was used in this paper to design a large workpiece inner diameter measurement system based on the laser interferometric displacement measurement. The system consists of a displacement measurement module, a rotation driven module and a data acquisition and processing module. A double-supported outer diameter decreasing structure was used in the measurement arm of the displacement measurement module, which effectively reduced the bending deformation during large-scale measurement. The hybrid circle fitting algorithm combining the Pratt method and the LM method was used to carry out the least squares circle fitting, and accurate parameters such as the radius and roundness of the measured workpiece were obtained. The centering experiment, the static stability experiment, the inner diameter measurement of the actual workpiece and the repeatability experiment of the designed system were carried out. The repeatability experiment showed that the standard deviations of the radius and roundness of the same circle were 17.60

收稿日期: 2022-03-29 网络出版日期: 2022-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875530)

作者简介: 屈 杰(1996—), 男, 湖南永州人, 硕士研究生, 主要从事智能检测与控制方面的研究。

通信作者: 陈本永, E-mail: chenby@zstu.edu.cn

μm and $25.48\ \mu\text{m}$, respectively, and the standard deviations of the radius and roundness of four different circles were tens of microns, which were consistent with the machining accuracy of the workpiece, demonstrating the feasibility and effectiveness of the developed measurement system. The results have shown that the system can be applied to the on-site measurement of large workpieces, and can effectively detect and evaluate parameters such as the inner diameter and roundness of the workpiece.

Key words: laser interferometer; large workpiece; inner diameter measurement; least squares method; finite element analysis

0 引言

大型圆形工件是航空航天、船舶和电力装备,如火箭箭体^[1-3]、船艉轴套^[4-5]和水轮发电机定子^[6]等的重要零部件。目前大型工件的内径测量方法主要有千分尺、弓高弦长法、激光位移传感器和激光干涉仪等。千分尺、弓高弦长法等传统测量方法依赖人工进行操作^[7-10],存在测量效率低、测量精度不高等问题。激光位移传感器的测量原理是激光三角法,是目前内径测量中使用较多的一种方法,例如:曲兴华课题组^[11-13]采用二个激光位移传感器,研制了一套基于激光三角法的大内径测量系统装置,利用双椎体主轴同步定心方法实现测量系统在被测轴孔内高精度自动定心;Yang 等^[14]设计了一套由三个固定在同一平面测量位置的激光位移传感器组成的内径测量装置,分析了激光位移传感器在内径测量中激光光束方向校准的必要性;马孜等^[15]采用二个激光位移传感器研制了一种大孔径管道 4 自由度内部检测机器人系统装置。激光位移传感器具有非接触测量、测量精度较高等优点,但其测量范围较小,一般为几十毫米,因此在大内径测量时需要将激光位移传感器安装在测量臂末端,这将导致激光测量光束方向与回转中心存在偏差,造成内径测量误差。激光干涉仪具有测量范围大、测量精度高的优点,可应用于大型工件参数和大范围空间坐标检测,例如:冯其波等^[16]设计了由双频激光干涉仪、直线滚动导轨和激光准直仪构成的大直径测量系统,对大型工件进行内外径测量,直径端点的选取对内外径测量结果有一定的影响;娄志峰等^[17]采用激光干涉仪研制了一套被动式激光跟踪测量系统,用于工业机器人末端执行器的空间坐标检测,伸缩轴沿滑动导轨运动进行位移测量。由于上述激光干涉仪的测量过程需要运动导轨辅助,在难于铺设导轨的工业现场测量中应用受到限制。

在工业现场,利用激光干涉法进行大型工件测量,需铺设长行程直线导轨,导致测量系统结构复

杂。为解决该问题,本文设计了一套基于激光干涉法的大型工件内径测量系统,可灵活改变测量臂长度,干涉仪的测量镜置于可伸缩接杆式测量臂终端,在立式旋转机构的带动下,对被测工件内壁进行旋转接触式测量,由融合法算得工件内径和圆度参数。该系统无需铺设运动导轨,通过调节测量臂的长度,可实现半径 40 m 范围内的大型工件内径现场测量。

1 测量系统设计与分析

1.1 总体结构设计

基于激光干涉位移测量的大型工件内径测量系统总体结构如图 1 所示。该测量系统由位移测量模块、旋转驱动模块、数据获取与处理模块三部分组成。位移测量模块包括激光干涉仪、测量臂和机械测头。测量光束在测量臂内往返,避免了外界气流扰动对干涉测量的影响;干涉仪的测量镜置于测量臂末端的镜盒中,测量时机械测头通过测量臂中内置弹簧与被测工件接触。旋转驱动模块包括伺服电机、减速器和编码器器件,带动位移测量模块在水平方向进行 360° 转动,实现对被测工件的圆周测量。数据获取与处理模块包括干涉仪位移测量值与编码器反馈角度值的获取和数据集的拟合,以及被测工件的圆心、内径、圆度等信息显示。

该系统应用的干涉仪为本课题组自主研制的激光相调差动干涉仪^[18],位移测量分辨率 $0.1\ \text{nm}$,测量范围 40 m,通过调节测量臂长度,可以实现 40 m 范围的内径测量。

1.2 测量臂结构设计与有限元分析

为满足不同大尺寸工件内径测量要求,该系统采用模块化的接杆式结构,设计了外径递减式测量臂,其结构示意图如图 2 所示。实际测量时,根据被测工件尺寸,可选择不同数量的固定长度接杆灵活构建满足大内径测量需求的测量臂。测量臂末端伸缩杆可实现 50 mm 的伸缩距离,机械测头为碳化钨材料的接触式探头。

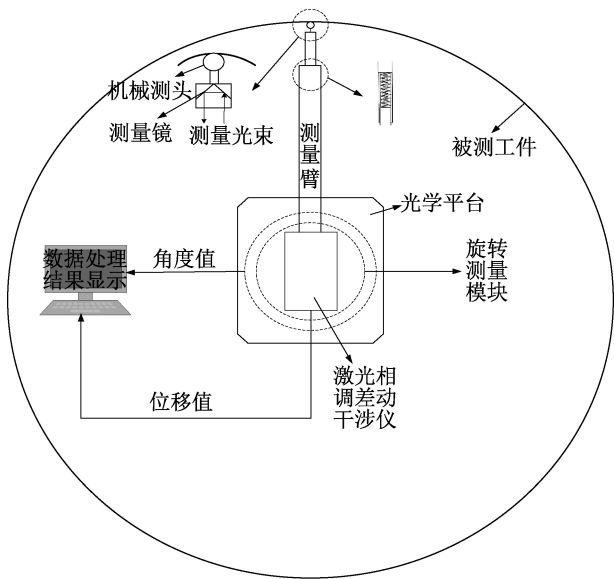


图1 系统总体结构示意图

测量臂属于悬臂梁结构,其弯曲变形不能影响干涉仪测量光束的正确往返。本文采用 Solidworks Simulation 软件对测量臂进行了有限元分析,有限

元分析模型如图 3 所示,分别分析了单支撑和双支撑两种结构。有限元分析模型采用测量臂装配体,即各接杆之间的作用和自身的重力在系统内部进行了计算,综合考虑了测量臂中各接杆自重和末端集中载荷等情况,末端集中载荷为干涉仪测量镜(10 g)的重力,此处载荷给定为 0.1 N 的压力,有限元分析模型的网格化设置相同,网格类型基于曲率大小设置,雅可比点为 16,最大单元为 30 mm,最小为 8 mm,其中对支撑部分均设置为草稿品质网格以简化计算过程,选择分析材料为铝合金 6061,支撑结构底部设置为固定面。对 0.5~5.0 m 长度的测量臂,分析了相同长度下两种支撑结构的最大应力值与最大形变量,分析结果如图 4 所示。以不同长度的不同支撑结构的测量臂为示例,其中长度为 4.5 m 的两种不同支撑结构的测量臂应力分析结果如图 5 所示,长度为 5.0 m 的两种不同支撑结构的测量臂变形分析结果如图 6 所示。

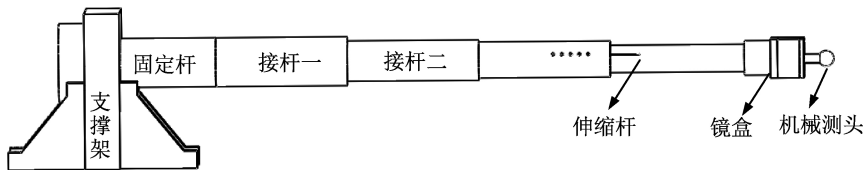


图2 测量臂结构示意图

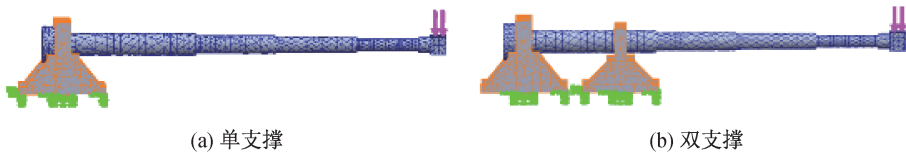


图3 测量臂有限元分析模型

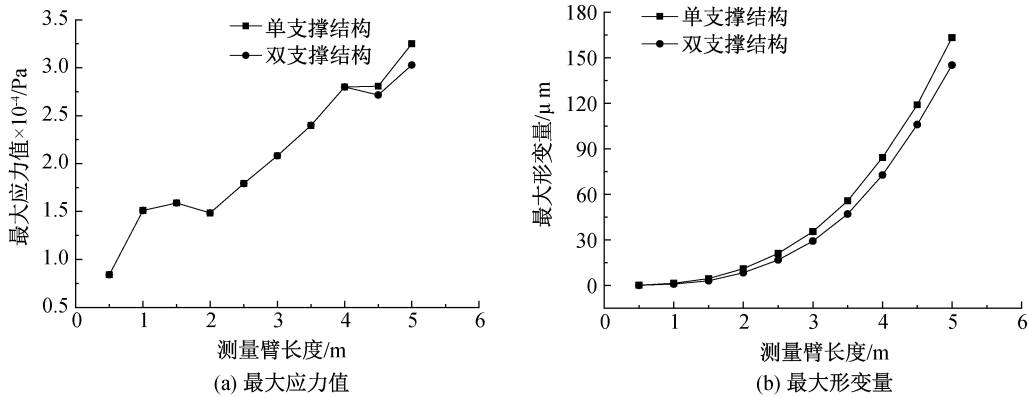


图4 两种支撑结构的测量臂在不同长度下的最大应力值与最大形变量曲线

从图 4(a)和图 5 可以看出:对长度为 0.5~4.0 m 的测量臂,两种支撑结构的最大应力点位置均为测量臂的伸缩杆处,这是由于该位置处接杆的壁厚较薄;长度分别为 4.5、5.0 m 的测量臂,最大

应力点发生的位置不一致,最大应力值也不同,其中单支撑测量臂的最大应力点位于支撑点,双支撑测量臂的最大应力点位于中间接杆连接处(如图 5(b)所示)。以上长度分析中最大应力值都未超过该材

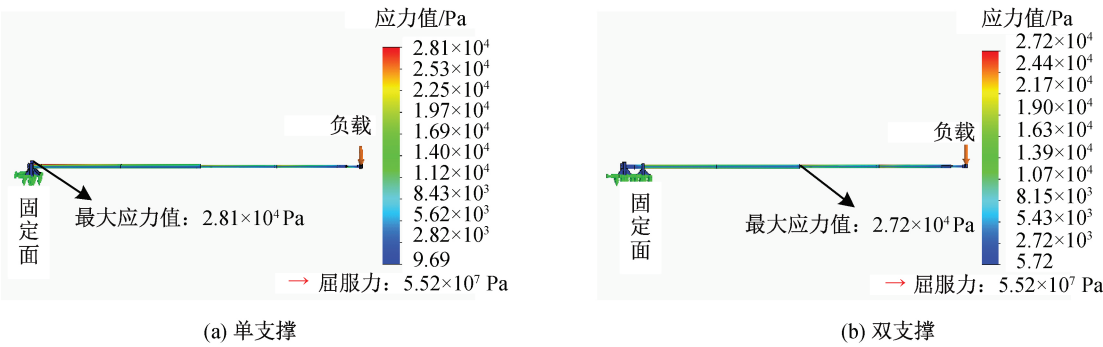


图 5 长度为 4.5 m 的两种不同支撑结构的测量臂应力图

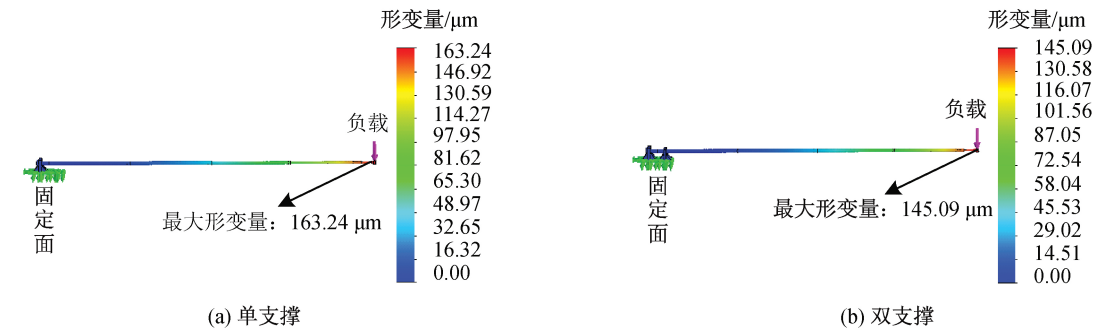


图 6 长度为 5.0 m 的两种不同支撑结构的测量臂形变图

料的最大屈服力(5.52×10^7 Pa),且安全系数要大于 5,远大于实际工业中主流安全系数(3~5)的要求,因此在应用过程不会出现断裂等不安全情况。从图 4(b)和图 6 可以看出:随着测量臂接杆长度的增加,其最大形变量也随之增加,其中最大形变量位置都在其末端位置镜盒处。以长度为 5.0 m 的测量臂为例,单支撑和双支撑结构的最大形变量分别为 $163.24 \mu\text{m}$ 和 $145.09 \mu\text{m}$,当测量臂孔径为 30.0 mm,测量镜为通光孔径 25.4 mm 的角锥棱镜时,该形变量不会影响测量光束的正确往返,从而可以保证激光干涉仪进行位移测量,而且对于固定长度的测量臂,形变量为固定值,不会对干涉仪的相对位移测量结果产生影响。另外,相同长度的测量臂,双支撑结构的最大形变量要小于单支撑结构,因此本系统最终选择双支撑结构,可以有效减少测量臂的形变。

1.3 旋转驱动模块结构

旋转驱动模块带动位移测量模块对工件内壁进行接触式旋转测量,获得被测圆周内采样点的数据集(旋转角度,位移值)。本文设计的旋转驱动模块结构示意图如图 7 所示,主要包括伺服电机系统、RV 减速器、滚子轴承、垫片和转盘等。以电机输出轴为中心进行旋转测量,采用立式结构以减少系统旋转轴线与被测工件中心轴线的偏转角。电机与减速器通过底座进行固定,测角编码器固定在伺服电

机末端,通过 17 位的编码器对旋转角度进行实时反馈,垫片用于抬高转盘避免轴承固定面与转盘相互摩擦。位移测量模块固定在面包板上方,调节激光干涉仪位置使得测量光束中心线通过旋转轴中心。为避免测量过程中旋转模块抖动,采用滚子轴承进行缓冲,保证系统启停的平稳性。

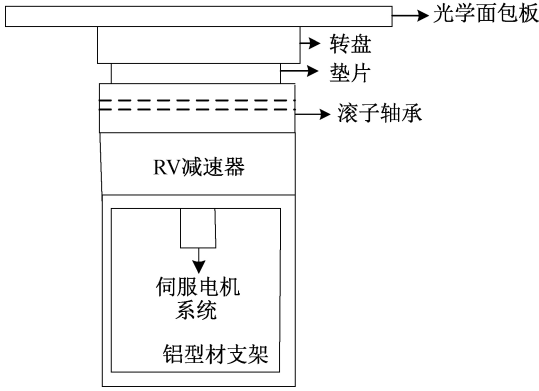


图 7 旋转驱动模块结构示意图

2 数据获取与处理

该系统实现被测工件内径测量流程如图 8 所示,分为系统初始化、旋转测量、采样点坐标计算和圆拟合 4 个过程,其中: d_0 为测量臂初始距离; d_i 为采样点的位移测量值; (x_i, y_i) 为采样点的坐标; a, b, R, C 分别为拟合圆心横坐标、拟合圆心纵坐标、拟合半径和拟合圆度。

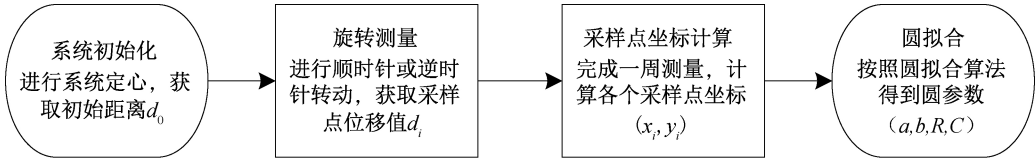


图8 系统测量流程

由于干涉仪电源线及信号线等长度的限制,将系统测量起点选为 $\pm 180^\circ$ 位置。系统初始化包括测量系统的三点物理初始定心、干涉仪位移测量初始化和伺服电机控制与计算机的通信测试。

旋转测量过程如图9所示, O 为本系统旋转中心, O' 为拟合圆心, D_0 为测量起始点,由千分尺和游标卡尺测得测量臂的固定长度即初始距离 d_0 ,旋转驱动模块带动干涉仪进行接触式测量,得到位移值 d 和编码器反馈旋转角度 θ ,从而采样点 D_i 的坐标可表示为:

$$\begin{cases} x_i = |OD_i| \cos \theta_i = (d_0 + d_i) \cos \theta_i, \\ y_i = |OD_i| \sin \theta_i = (d_0 + d_i) \sin \theta_i \end{cases} \quad (1)$$

其中: θ_i 为采样点的旋转角度。

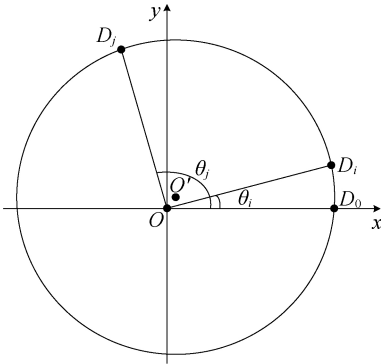


图9 系统测量过程示意图

在完成一周旋转测量及数据采集后,得到被测工件圆周内采样点的数据集。采用最小二乘圆拟合算法,对采样点数据集 (x_i, y_i) 进行圆拟合,求得圆心坐标和半径等参数值。在直角坐标系下,圆的表达式分为几何表达式和代数表达式两种形式。

圆的几何表达式为:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 - R^2 = 0 \quad (2)$$

其中: a, b, R 为拟合圆的圆心横坐标、纵坐标和半径。

圆的代数表达式为:

$$A(x^2 + y^2) + Bx + Cy + D = 0 \quad (3)$$

对式(3)通过配方法进行变形,可得式(2)中的圆参数 (a, b, R) 与式(3)的系数 (A, B, C, D) 的关系为: $a = -B/2A, b = -C/2A, R = \sqrt{(B^2 + C^2 - 4AD)/4A^2}$ 。

Pratt法^[19]圆拟合是根据代数表达式(3)得到最小二乘目标函数,其表达式为:

$$F(A, B, C, D) = \sum_{i=1}^n [A(x_i^2 + y_i^2) + Bx_i + Cy_i + D]^2 \quad (4)$$

其中: n 为拟合点个数。

LM(Levenberg-Marquardt)法^[19]圆拟合是根据几何表达式(2)得到最小二乘目标函数,其表达式为:

$$F(a, b, R) = \sum_{i=1}^n [\sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} - R]^2 \quad (5)$$

Pratt法为线性求解,无需给定初值,但拟合精度较低;LM法通过迭代计算可实现高精度拟合,但需要预先给定一个圆参数初值,初值偏差较大时,LM法存在发散的可能,无法获得正确拟合结果。

在测量大型工件内径时,为了获取圆心初始位置,通常需要引入复杂的定心结构和耗费较长时间进行预定心。因此,为了提高测量效率和测量精度,本文对两种算法进行融合,称为融合法。首先利用Pratt法获得圆参数初测值 (a_0, b_0, R_0) ,然后将该值作为LM法的初始值进行迭代拟合,得到被测工件圆参数的精确值 (a, b, R) 。该融合算法不仅大大降低了对待测工件预定心的精度要求,又能保证拟合结果的精度和可靠收敛。

在Matlab中采用Pratt法、LM法及融合算法分别对 (a, b, R) 为 $(0, 0, 1)$ 的单位圆进行了拟合仿真分析,按照角度等间隔的原则在单位圆上选取了72个数据点作为数据集,并分别添加了均值为0、标准差为0.005和均值为0.05、标准偏差为0.1的高斯噪声。三种算法拟合结果如图10所示,圆参数、均方根误差和计算时间如表1所示。其中,根据实际圆心定位误差大小,LM法的圆参数初值给定为 $(0.5, -0.5, 1.2)$,拟合算法的均方根误差 e_{RMS} 按照式(6)进行计算:

$$e_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} - R)^2}{n}} \quad (6)$$

从仿真结果可以看出,Pratt 法的拟合精度最低,均方根误差最大;融合法与 LM 法的精度基本一致,均方根误差几乎相等(两种误差情况下,LM 法和融合法的均方根误差的差值分别为 $2.64 \times$

10^{-12} 和 2.55×10^{-13}),这是因为融合法也是基于 LM 法拟合得到的最终结果。此外,相对于 LM 法需要复杂且费时的精确预定心操作而言,融合法比 LM 法增加的 0.01 s 时间开销可以忽略不计。

表 1 三种算法拟合结果

高斯噪声	拟合算法	圆心坐标	半径	均方根误差	耗时/s
均值为 0,标准偏差为 0.05	Pratt 法	(-0.0135,-0.0043)	0.9969	0.0455	0.013
	LM 法	(-0.0132,-0.0054)	0.9938	0.0454	0.007
	融合法	(-0.0132,-0.0054)	0.9938	0.0454	0.017
均值为 0.05,标准偏差为 0.1	Pratt 法	(0.0224,0.0418)	1.0216	0.1010	0.012
	LM 法	(0.0207,0.0385)	1.0073	0.0999	0.007
	融合法	(0.0207,0.0385)	1.0073	0.0999	0.017

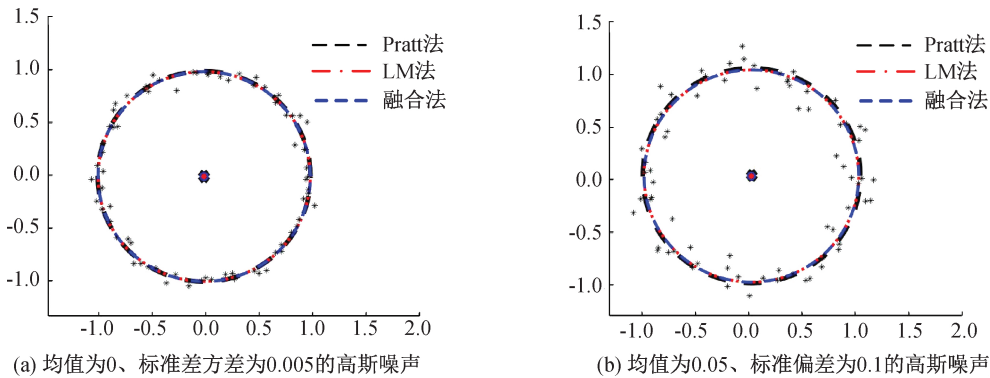


图 10 三种算法在两不同噪声条件下的拟合圆图形

3 实验与结果分析

研制的基于激光干涉法的大尺寸工件内径测量系统装置照片如图 11 所示,包括了被测工件、激光相调差动干涉仪、测量臂和旋转驱动模块。被测工件为一定制的尺寸为 $\Phi 2100$ mm 的圆形工件。

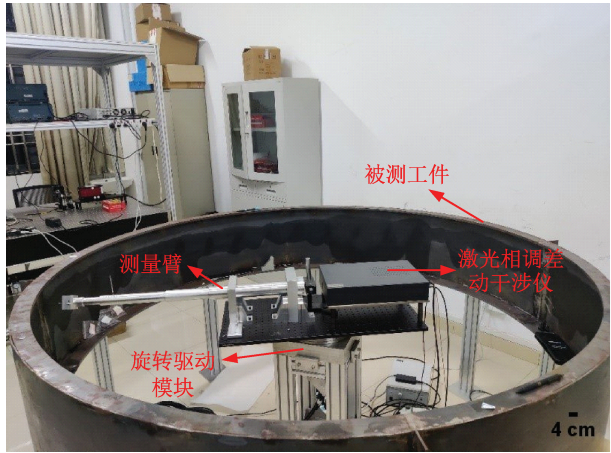


图 11 测量系统装置照片

测量时,通过弹簧预紧力实现测量臂的伸缩,带动测头(HF-HSS16 型碳化钨球头)与被测工件内壁进行接触式滑动测量。首先根据测量光束的光轴方向调整测量臂终端的测头位置,使得测头

法向与测量光光束同轴。然后首先调节测量臂接杆的弹簧调节预紧力,使得测头在被测圆周内运动时保持与工件内壁的轻微接触,预紧力过大会导致工件划伤,预紧力过小会导致无法良好接触。接着在旋转驱动模块带动下,测头从编码器的一 180° 位置开始,以 5° 间隔在工件内壁逆时针旋转进行滑动式测量,获得被测圆周内的 73 个位置点的数据集,其中 $\pm 180^{\circ}$ 为重合点。在每一位置点静止 5 s 进行位移测量,每间隔 0.1 s 读取干涉仪的位移值,为消除电机启停抖动影响,取中间 10 个数据的平均值作为该位置点的位移测量结果,按式(1)数据处理后得到拟合数据集,采用融合法对该数据集进行圆拟合,得到被测工件的内径和圆度信息。

3.1 定心实验

为了减小测量过程中测量臂弹簧的伸缩量范围,从而降低弹簧力释放导致的测量臂抖动引入的位移波动,测量系统的旋转中心应尽可能的处于待测工件圆心位置,为此在测量开始之前进行了初步的物理定心。根据三点确定一个圆的原则,本系统采用激光干涉仪测量三个等间隔 120° 的固定点的位移,当三点的位移值大致相同即半径相等时,则实

现被测工件的三点定心。将测量系统放置在工件内部,首先通过事先标记点(间隔 120° 的固定点)进行系统位置固定,随后通过激光干涉仪进行三点定心,以编码器反馈角度在工件内部以 120° 间隔标记三个定心点即 -180° 、 -60° 、 60° ,系统转动前对干涉仪进行复位,系统分别转动至定心点,读取位移值,根据三点位移情况,调整系统位置,使得激光干涉仪测得的三点位移值不超过 0.500 mm 时,完成三点初步定心。

定心实验结果如图 12 所示,图中显示了工件内轮廓上包括定心点的各个采样点在定心前后激光干涉仪测得位移变化情况。“定心前”数据为未进行三点定心操作的各采样点干涉仪位移值,此时三个定心点位移值为 $(0,-5.801,-1.606)$ (单位: mm ,下同)，“定心中”数据为三点定心调整过程中位移值,此时三个定心点位移值为 $(0,2.915,1.198)$,经过调整后得到“定心后”数据,此时三个定心点位移值为 $(0,0.159,-0.446)$ 。需要说明的是,本测量系统不需要精确的定心, 0.500 mm 误差不会影响测量结果,精确的圆心位置是根据测量数据进行拟合得到。

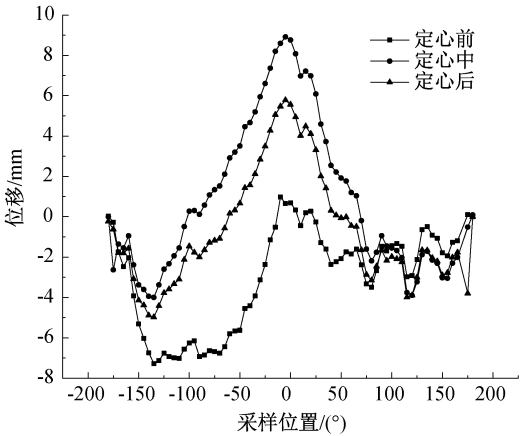
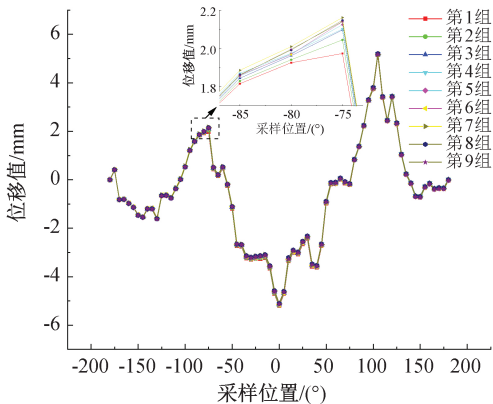


图 12 系统定心实验各采样位置的位移值



(a) 9组实验位移测量结果

3.2 系统静态稳定性实验

为了验证测量臂伸缩结构对采样点位移测量的影响,开展了系统静态稳定性实验。在各采样点静态测量前对干涉仪测量结果进行复位操作,测量臂在弹簧预紧力的作用下,测头顶住被测工件内壁,在 360° 范围以 5° 为间隔进行滑动式旋转测量,在每个位置处停留 5 s ,获得 50 个位移测量值,取中间 10 个测量值的平均值作为该位置处的测量结果。实验结果如图 13 所示, 72 点平均值为 6.9 nm ,标准偏差为 12.5 nm ,这表明本系统设计的伸缩式测量臂结构在一个圆周内可实现高精度的位移测量。

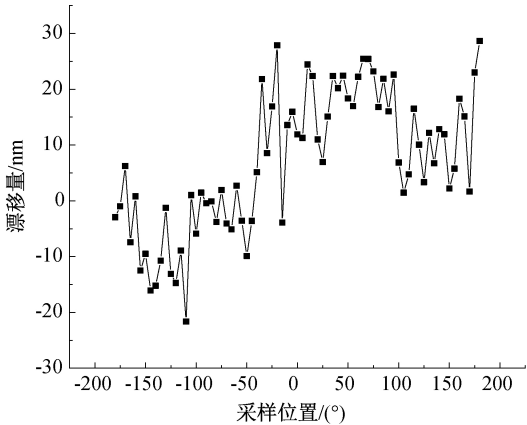
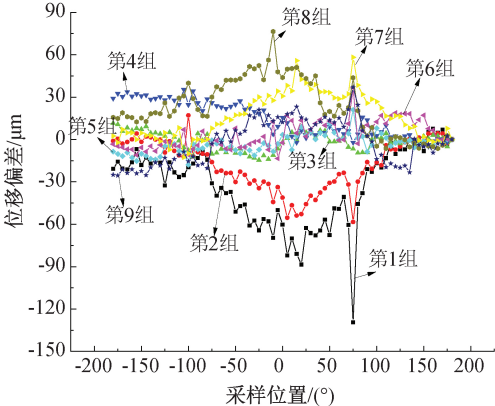


图 13 系统静态稳定性实验各采样位置的漂移量

3.3 工件内径重复性测量实验

为了验证研制系统的可行性,开展了对被测工件内径圆参数的重复性测量实验。在同一圆周内对被测工件进行了 9 次测量,得到 9 组位移测量结果,如图 14(a)所示;计算 9 组实验结果中每一位置点 (73 个位置点)的位移测量均值,每组实验的对应位置点位移值分别与该均值作差,得到 9 组实验位移测量值的偏差结果,如图 14(b)所示, 9 组实验位移偏差结果的平均标准偏差为 $21.33\text{ }\mu\text{m}$,实验结果表明,测量系统有良好的位移测量重复性。



(b) 9组位移测量值的偏差结果

图 14 工件内径重复性实验各采样位置的位移值与位移偏差结果

结合由千分尺和游标卡尺测得的初始距离 1050.680 mm,对位移测量结果与编码器角度进行数据处理,由融合法拟合得到被测工件内径和圆度等参数信息,圆心分布情况如图 15(a)所示,半径与圆度计算结果如图 15(b)所示,9 组实验结果的圆心标准偏差按 $\delta_o = \sqrt{\delta_a^2 + \delta_b^2}$ 计算为 20.20 μm ,其

中: δ_a 、 δ_b 分别表示圆心纵坐标、圆心横坐标的标准偏差;圆度评估以 9 组实验拟合圆心的均值作为工件实际圆心进行计算,图 15(b)中第 10 组为 9 组实验结果的平均值,半径测量结果的标准偏差为 17.60 μm ,圆度测量结果的标准偏差为 25.48 μm 。

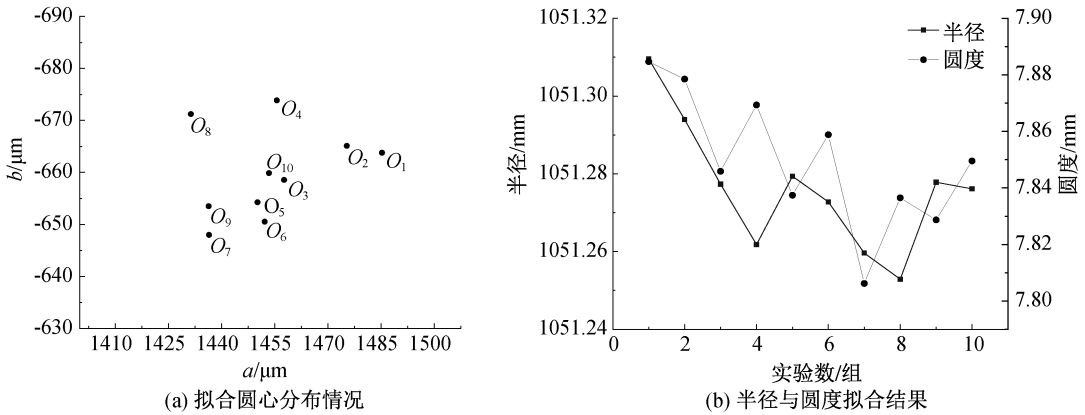


图 15 同一圆周内径重复性实验的各拟合圆心与半径、圆度结果

3.4 不同圆周内径测量实验

该实验测量被测工件不同圆周处的内径值。调整位移测量模块至任意圆周处,首先进行系统定心,由游标卡尺和千分尺对各个接杆分别检测获得测量臂的初始距离,然后旋转驱动模块带动位移测量模块进行被测圆周数据集获取,并按融合法进行数据处理,得到被测工件圆参数信息。在被测工件的 4 个圆周处进行了测量,其初始距离分别为

1050.680、1051.010、1050.520 mm 和 1051.100 mm,对每个圆周测量了 4 次,以 4 次测量结果的均值作为该圆周处的圆参数值,实验结果如表 2 所示。实验结果表明该被测工件的圆度值为毫米级,不同圆周处圆度测量结果存在毫米级差异,不同圆周处半径和圆度的标准偏差在几十微米内波动,这些实验结果与该工件(实验模拟样件)的加工精度较低是基本相符合的。

表 2 不同圆周测量结果 mm

圆周位置	O	R	δ_R	C	δ_C
1	(1.449, -0.654)	1051.277	0.003	7.863	0.017
2	(1.542, -0.847)	1050.829	0.009	6.759	0.022
3	(0.817, -0.250)	1049.782	0.010	7.994	0.095
4	(-3.183, -0.223)	1051.469	0.032	6.950	0.085

注: δ_R 表示工件拟合半径的标准偏差, δ_C 表示工件拟合圆度的标准偏差。

4 结 论

本文采用激光相调制干涉仪和模块化接杆式结构的测量臂,设计了一套基于激光干涉法的大型工件内径测量系统。激光干涉仪的测量镜嵌入测量臂内,测量光束在测量臂内部往返,避免了环境气流扰动变化对干涉测量的影响;测量臂采用模块化的接杆式结构,根据被测工件尺寸,可灵活构建测量臂长度以适用于不同尺寸的大内径测量;旋转驱动模块采用立式结构,带动干涉仪进行滑动接触式测量;最小二乘圆拟合采用 Pratt 法与 LM 法相结合的融合法,提高了拟合精度。对研制系统装置开展了稳

定性实验和实际工件内径测量实验,内径和圆度结果重复性在几十微米以内,实验结果表明该系统具有良好的应用价值。

参考文献:

[1] 郑正路,叶青,李烁,等. 运载火箭箭体结构低成本途径及性能影响分析[J]. 航天制造技术, 2019(6): 11-15.
[2] 顾名坤,何巍,唐科,等. 中国液体运载火箭结构系统发展规划研究[J]. 宇航总体技术, 2021, 5(2): 55-67.
[3] 郑正路,徐振亮,汪小卫,等. 可重复使用运载火箭箭体结构检测及维护方法研究[J]. 航天制造技术, 2016 (1): 68-70.
[4] 邱晓峰,李磊,郭飞,等. 半潜船艏轴密封装置设计与

- 应用[J]. 江苏船舶, 2020, 37(5): 27-29.
- [5] 许琼俊, 马培良, 李晓燕. 大中型船舶艉轴密封装置结构及维修[J]. 船舶工程, 2019, 41(S2): 196-198.
- [6] 杨黎明, 李利华, 尹春元, 等. 大型立式水轮发电机内部巡检机器人应用分析[J]. 大电机技术, 2020(4): 75-82.
- [7] 完海涛, 周晓辉, 许麒章, 等. 一种大尺寸内径测量辅助装置及大尺寸内径测量方法: CN110906837A[P]. 2020-03-24.
- [8] 马敬军, 杜俊莉, 白成强, 等. 一种操作简单的大内径测量装置: CN206891338U[P]. 2018-01-16.
- [9] Li B. Polygon-based large diameter measurement with modular gauges[J]. Measurement, 2000, 27(1): 1-11.
- [10] 陈满意, 卢振伟. 基于弓高弦长的大型圆柱体直径测量的不确定度研究[J]. 机械制造, 2009, 47(9): 80-82.
- [11] 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.
- [12] 邢书剑, 曲兴华, 王晟, 等. 采用高精度自动定心机构的大尺寸内径测量[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8): 1681-1687.
- [13] 赵士磊, 曲兴华, 邢书剑, 等. 激光非接触式大尺寸内径自动测量系统[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2185-2191.
- [14] Yang T Y, Wang Z, Wu Z G, et al. Calibration of laser beam direction for inner diameter measuring device[J]. Sensors, 2017, 17(2): 294.
- [15] 马孜, 张旭, 黄进, 等. 大孔径管道 4 自由度内部检测机器人系统[J]. 机械工程学报, 2009, 45(6): 267-273.
- [16] 冯其波, 梁晋文, 田芊. 双频激光干涉仪高精度测量大型工件内外径系统的研制[J]. 仪器仪表学报, 1995, 16(2): 145-150.
- [17] 姜志峰, 耿万佳, 张记云, 等. 被动式激光跟踪测量方法及其误差补偿技术[J]. 计测技术, 2021, 41(5): 34-41.
- [18] Yan L P, Chen B Y, Chen Z Q, et al. Phase-modulated dual-homodyne interferometer without periodic nonlinearity[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(11): 115006.
- [19] Chernov N. Circular and Linear Regression; Fitting Circles and Lines by Least Squares[M]. CRC Press, 2010: 79-112.

(责任编辑:康 锋)