

文章编号 1004-924X(2024)08-1111-11

新型旋转激光扫描系统轴系调整与误差标定

任永杰, 郭 威, 吴腾飞, 滕明鑫, 林嘉睿, 郑继贵*
(天津大学 精密测试技术及仪器全国重点实验室, 天津 300072)

摘要: 旋转激光扫描系统是一种基于精密转台结合多路激光的空间多目标并行角度传感系统。为改善系统光源性能, 设计了一种采用光纤从外部导入光源的新型轴系结构。但是当激光以一定角度穿过中空转轴进入镜组后, 若倾斜入射柱镜, 将导致出射的扫描光面型发生变化。针对此问题, 研究了一种基于平行线的传递性的激光光轴姿态的调整方法, 并借助激光跟踪仪测量平台, 分别对光轴与转轴轴系进行拟合, 建立了对光轴倾斜误差的标定方法。实验结果表明, 调整后光轴与转轴轴线的空间夹角优于 0.15° , 完全满足扫描光截面中心直线度对激光入射柱镜的角度要求。该调整方案可用于系统的装配环节, 使扫描光更加接近理想平面, 有助于系统测量精度的提升。

关键词: 大尺寸测量; 旋转激光扫描系统; 光轴调整; 轴线拟合; 误差分析

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243208.1111

Axis alignment and error analysis of a novel rotating laser-scanning system

REN Yongjie, GUO Wei, WU Tengfei, TENG Mingxin, LIN Jiarui, ZHU Jigui*

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University,
Tianjin 3000072, China)

* Corresponding author, E-mail: jigui@tju.edu.cn

Abstract: The rotating laser-scanning system is a spatial multi-target parallel angle sensing system, which is based on a precision turntable and combined with multiple lasers. To improve the performance of the system's light source, a new type of axis structure was designed that uses optical fibers to import light sources from the outside. However, when the laser passes through the hollow rotating shaft and enters the reflector group at a certain angle, if the incident cylindrical lens is tilted, the scanning light surface pattern will change. To address this problem, a method for adjusting the attitude of the laser optical axis based on the transmissivity of parallel lines was studied. With the help of a laser tracking measurement platform, individual fittings were performed for the optical axis and the rotational axis system. A calibration method for the tilt error of the optical axis was established. The experimental results demonstrate that the spatial angle between the adjusted optical axis and the rotational axis exceeds 0.15° , fully satisfying the angular requirements for laser incidence on the cylindrical lens in terms of the central linearity of the light cross-section. This adjustment scheme is applicable to the assembly phase of the system, enabling the scanned light to approach an ideal plane more closely. This contributes to the enhancement of the system's measurement accuracy.

收稿日期: 2023-11-16; 修订日期: 2023-11-30.

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 52127810, No. 51721003); 天津市自然科学基金 (No. 21JCZDJC00470)

Key words: large-scale measurement; rotating laser-scanning system; optical axis adjustment; axis alignment; error analysis

1 引言

随着先进制造业的发展,飞机、火箭等高端装备作为国力的重要体现,对制造水平均有较高要求,而大尺寸精密测量技术为其提供了关键的质量把控手段,同时,现代工业又对大尺寸测量技术提出了新要求:测量覆盖范围更广阔、测量性能更高效^[1],并逐步走向数字化、网络化、智能化^[2]。传统单站式高精度测量方案,例如激光跟踪仪、全站仪等,量程有限,效率较低,而多基站组网式测量系统通过在空间中构建测量网络,能够实现多目标并行测量,极大地提升了测量效率,正逐渐成为大尺寸测量领域的重要研究方向^[3-4]。

旋转激光扫描系统是多基站式测量方案的典型代表^[5-6],其主要组成部分包括:精密激光发射转台、球形接收器、信号处理器及计算机。系统在工作状态下,由精密转台出射的扇形扫描光对全周范围被测目标进行旋转扫描,由固定在测量点的接收器接收光信号,并通过光电转换电路将其转换为脉冲信号,处理器对脉冲信号的时间信息进行提取,基于时间-空间转换原理,由计算机软件解算实现角度测量。通过多站位角度交会,能够得到点位坐标的精确测量结果^[7]。而激光作为系统测量的媒介,其光束质量与功率稳定性将直接影响整体测量精度。

目前,旋转激光扫描系统大多数采用集成化的扫描光输出结构,对于激光器体积有严格限制,这意味着较低的输出功率,对于测量系统在进行大空间测量任务时,会限制其测量范围。而且小型激光器可能在长时间使用过程中面临光束漂移、功率波动等稳定性问题。此外,小型激光器的热管理成为问题,可能难以有效地散热,导致温度升高,降低使用寿命。为优化系统光源,以进一步提高测量精度,本文研究了一种新的轴系结构,通过延长光源至透镜组部分光路,使出射的激光穿过中空的转轴后再由柱镜扩束

为扇形光,实现了激光器的外置,为光源的后续优化奠定了基础。但是,该结构也引入了新的问题。在系统装配过程中,必须对穿过转轴部分的激光的光轴姿态进行调整,使其分束后能够垂直于柱镜入射,否则,出射的扫描光将发生变形,造成测量误差^[8]。

针对复杂轴系结构的调整及误差分析方法,众多学者做了大量研究。2015年,张志利等人基于四参数模型对数字天顶仪轴系误差进行补偿,此方案利用数字天顶仪的内部摄像系统进行图像采集,采用对称位置的2幅星图解算旋转轴与光轴的位置关系,避免了直接对二者进行补偿^[9];2016年,崔成君等人设计了激光跟踪仪光轴与竖轴的同轴度检测方法,由于其光轴会随竖轴旋转,通过相机采集旋转过程中的光斑位置信息后,对光轴进行调整,经理论计算标定同轴度^[10];2018年,刘红光等人基于等比例偏移定量调整的准直光路调整方法,实现了激光干涉仪光路与被测对象运动轴线的快速调整^[11];2019年,宋辉旭采用二维调整螺钉配合PSD光斑位置传感器,对激光追踪仪的光轴位置进行调整,使其指向标准球的球心,此方案中PSD固定在在激光头部分,要求预留足够的安装空间^[12]。

上述方法均建立在各自的仪器平台之上,能够满足轴系调整要求。但是对于新型旋转激光测量系统,属于光轴与机械轴配合轴系,其激光从固定在壳体上的准直器出射,光源位置未知,且光轴与转轴相互独立,无法直接传递轴线关系。为便于后续安装使用,需保证系统集成化,在壳体内部添加额外的校正装置相对困难。另外,为满足转台稳定旋转的特性,系统采用精密气浮轴承,转轴部分无法调整,只能对光轴姿态进行控制。因此,基于该轴系结构的特殊性,本文提出了一种轴系调整及误差分析的系统性方案。通过借助外部设备传递轴线关系,以转轴为基准对准直器安装角度进行调整,以实现光轴与转轴平行。在同一坐标系下,基于回转中心法拟

合转轴轴线,再通过测量光路上多点坐标拟合得到光轴,最后计算二者空间夹角。确保调整后的光轴倾斜误差在一定范围内,即可保证出射扫描扇面光的质量。

2 新型轴系结构与精确光轴调整

2.1 轴系结构设计方案

典型的旋转激光扫描系统使用两个能够出射线结构光的小型半导体激光器,间隔 90° 安装在与轴体连接的转台上如图1(a)所示。该结构实现了光源位置的固定,但限制了激光器性能的

优化设计,其采用的半导体激光器接触外界空间,对温度变化敏感,测量系统工作的环境温度与参数标定温度不一致,导致光功率及波长变化^[13],扫描光的稳定性无法保证,且出射的激光束存在漂移^[14],直接影响大尺寸空间下测量任务的系统精度。另一方面,由于激光器要随转台高速旋转,只能通过线圈耦合的方式将电能从固定壳体传输至激光器,这种供电方案效率偏低、传输距离短^[15],同时也制约了整体结构的改进。

为解决上述问题,新型的旋转激光扫描系统采用了一种由外部激光器提供光源,通过光纤导光的光路设计方案,如图1(b)所示。首先,对转轴进行中空加工,将装有柱镜的反射镜组稳固安装在转台上方。然后,使用光纤及准直器从外部将激光经转轴传导至镜组底部,经过分束和光路折转,最后由柱镜出射为两束扇形光。该方案突破了硬件结构对光源性能的限制,极大的便利了光源部分的优化以及恒温控制,且不需要设计供电方案,能够有效降低扫描光稳定性及面型偏差对于测量精度的影响。

2.2 光轴调整策略

集成式的线激光器同样采用柱镜进行扩束,激光正入射柱镜能够保证优秀的光平面质量,但是新型轴系结构实现了光源外置,理想情况下,其中光轴应平行于转轴轴线,经过分光后垂直于柱镜入射面,但是在实际装配过程中,无法保证两轴线严格平行,激光被折转后以一定角度倾斜入射柱镜,使得最终出射扫描光的面型偏离理想平面。为改善光平面质量,必须提前对光轴姿态进行调整。

外部光源经光纤传导后由准直器连接在固定的壳体上,光轴与转轴之间并无关联,所以必须借助外部设备建立二者之间的轴线关系。故加入激光管光轴作为中介,并借助相机进行观察。根据平行线的传递性,经过机械调整后,光轴及转轴分别与激光管光轴平行,则前二者也实现平行。

光轴调整系统如图2所示,将激光管、分束镜、相机固定在同一倾斜调整台上。拆除转台上之前安装的反射镜组及柱镜,重新连接反射镜模块,即反射镜调整架与平面反射镜。

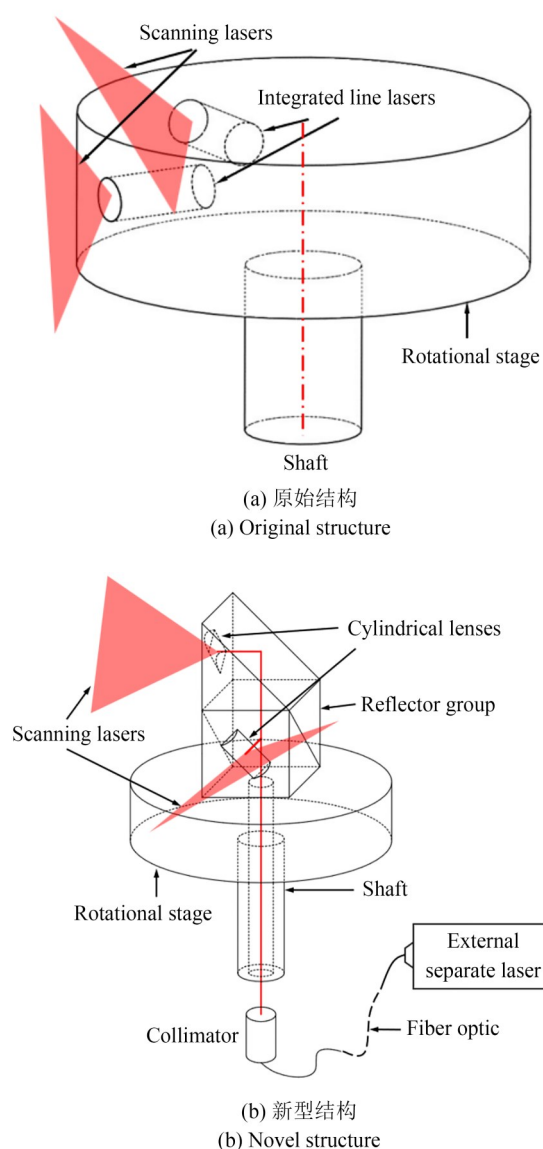
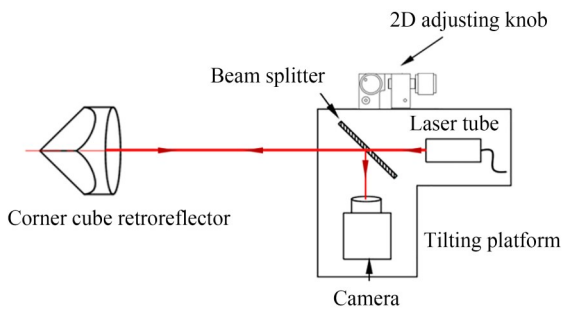


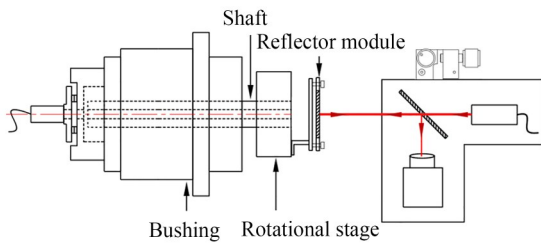
图1 轴系结构原理图对比

Fig. 1 Comparison of shaft system structure schematic diagrams



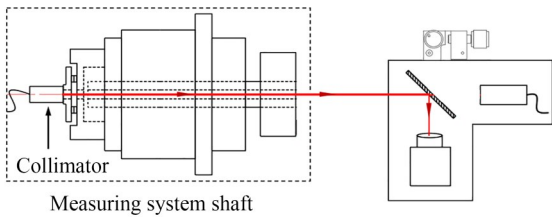
(a) 记录角锥棱镜回光中心

(a) Record the center of return of light from a corner cube retroreflector



(b) 反射镜调整

(b) Reflector adjustment



(c) 准直器调整

(c) Collimator adjustment

图 2 光轴调整系统

Fig. 2 Optical axis adjustment system

首先,打开激光管,并在前方放置角锥棱镜,调整角锥位置,使激光入射其中心并按原路返回,反射光经分束镜折转后进入相机,如图 2(a)所示。若相机的 CCD 像素为 $a \times b$,对其进行灰度处理后, $g(i, j)$ 是像素坐标 (ij) 处的灰度值,其中 $0 < i \leq a, 0 < j \leq b$ 。采用灰度重心法计算圆光斑中心的像素位置,记为点 $O(xy)$:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=2}^b i \cdot g(i, j)}{\sum_{i=1}^a \sum_{j=2}^b g(i, j)}, y = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=2}^b j \cdot g(i, j)}{\sum_{i=1}^a \sum_{j=2}^b g(i, j)}. \quad (1)$$

然后,拆除角锥棱镜,将系统轴体水平固定于激光管前方,如图 2(b)所示。旋转转轴,不断

调整反射镜倾角,若反射光中心在相机中的位置无变化,则反射镜平面垂直于转轴轴线。

另外,由于激光管与相机位置固定,当反射光沿光管光轴原路返回时,光斑在相机中位置将与起始位置 O 重合。因此,对激光管俯仰角及偏转角进行调整,使回光中心 O' 重新回到起始位置,此时,激光管光轴也垂直于反射镜平面。两轴线均垂直于同一平面,则转轴轴线与激光管光轴平行。

最后,关闭激光管电源,并打开系统激光器,拆除转台上连接的反射镜模块,使光束能够穿过转轴进入相机,如图 2(c)所示。通过增减垫片调整准直器安装角度,使图像上的光斑中心 O'' 与点 O 重合,则系统光轴与激光管光轴平行。根据前述分析,此刻测量系统的光轴与转轴已实现平行,调整结束。光轴整体调整流程如图 3 所示。

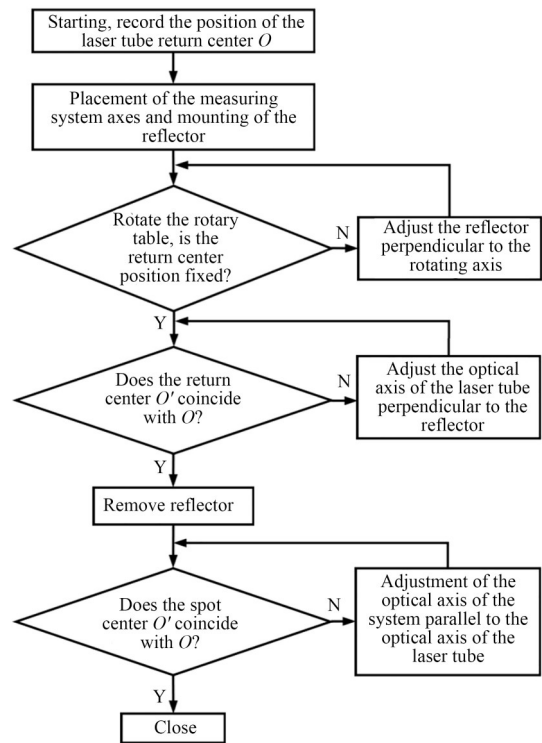


图 3 光轴调整流程图

Fig. 3 Flow chart of optical axis adjustment

3 光轴倾斜误差分析

新型旋转激光扫描系统的转轴与转台之间

通过配合加工制作,反射镜组使用高精度工装固定在转台上方。在整体安装完成后,使用千分表对转台及反射镜在旋转一周过程中的高度差进行测量,并进行相应调整。因此,转台轴心及反射镜组光轴相对于转轴轴线的倾斜误差对于激光入射柱镜的角度偏差的影响可忽略不计。另外,在光轴调整过程中,采用机械调整的方式不可避免的会产生偏差,同时,光斑形态不均匀也会造成中心提取误差,使得调整后的光轴与转轴之间仍存在一定夹角,经柱镜扩束后,扫描光面必然产生变形,因此,必须对光轴倾斜误差进行标定。

3.1 光轴倾斜与扫描光面型关系

新型测量系统镜组部分所用柱镜直径为4 mm,长宽比为2:1,有效焦距4 mm,焦距容差 $\pm 0.2\%$,通过高精度夹具与反射镜组紧密贴合,柱镜自身精度及装配精度对于扫描光面型变化的影响可忽略不计。当激光入射时,光轴沿柱镜轴线方向的倾斜,是造成扫描光变形的主要因素。如图4(b)所示,由于入射角度偏差,激光截面相对于理想情况产生了明显的弯曲。

另一方面,系统光路的构建使用高精度加工的反射镜组,如图5所示,反射面 R 与底面 S 夹角为 45° ,镜组粘接柱镜的平面 M 严格垂直于底面

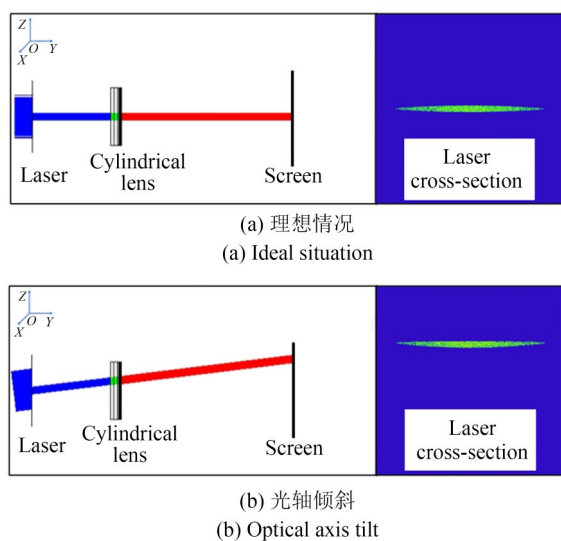


图4 激光入射角度对扫描光面型的影响

Fig. 4 Influence of laser incidence angle on the scanning light pattern

S ,故理想光轴平行于平面 M 。图中平面 M' 为 M 关于反射面 R 的投影,根据反射镜成像原理,理想光轴垂直于平面 M 。在实际情况下,光轴相对于转轴存在倾斜,当反射镜组跟随转轴旋转时,激光在柱镜上的入射点将会形成一个圆形轨迹,图中实线表示激光经过反射的光路,虚线表示投影的虚拟光路。通过观察可得,旋转过程中,光轴与转轴的空间夹角就是沿柱镜轴线方向的最大倾斜角。

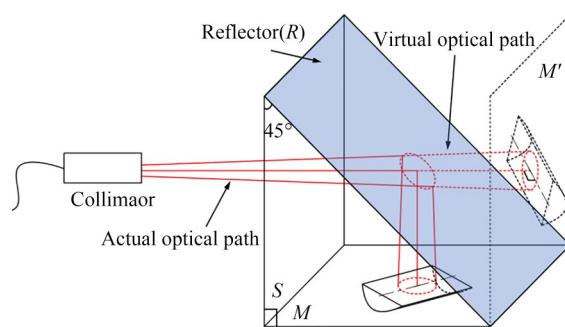


图5 柱镜入射面激光轨迹

Fig. 5 Laser trajectory on the incident surface of cylindrical lens

为保证旋转激光扫描系统测量精度,在实际应用中,对于高质量工业线结构光的直线度要求是5 000:1,即激光条中心线的直线度偏差应保持在其长度的 0.2×10^{-3} 以内^[16]。经仿真实验发现,扫描光截面的直线度与激光沿柱镜轴线方向的入射角度存在近似线性的关系,如图6所示,根

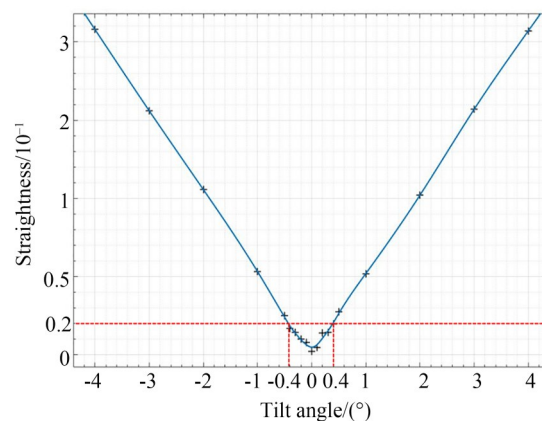


图6 直线度与倾斜角度的关系

Fig. 6 Relationship between straightness and tilt angle

据线结构光直线度指标要求,光轴倾斜误差必须在 $\pm 0.4^\circ$ 区间内。

3.2 倾斜误差标定方法

为实现对扫描光面型质量的把控,需要分别测量光轴与转轴的空间方向向量,最终计算得到光轴的倾斜误差。

3.2.1 光轴拟合

沿光轴方向选取 n 个点位布置激光跟踪仪靶球,使激光指向靶球中心,此时靶球中心刚好在光轴上。使用跟踪仪测量靶球位置,即光轴上一点坐标。

假设拟合直线方程为:

$$\begin{cases} x = x_0 + at \\ y = y_0 + bt, \\ z = z_0 + ct \end{cases} \quad (2)$$

其中: $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 为直线上一点, $L_{OA}=[a \ b \ c]$ 为直线的方向向量, t 是参数。则测量点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 到直线的距离为 d_i 为:

$$d_i = \frac{|(P_i - P_0) \times L_{OA}|}{|L_{OA}|}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

根据最小二乘原理,可得到最优化目标函数:

$$F = \sum_{i=1}^n d_i. \quad (4)$$

由式(4)即可求解光轴的方向向量 L_{OA} 。

3.2.2 转轴轴线拟合

由于转轴具有半径,无法直接测量轴线,故采用回转中心法进行轴线拟合。在转台径向不同位置处安装 w 个长度不等的光学支撑杆,并在支撑杆前端固定跟踪仪靶球用于坐标测量。当转轴旋转时,测量点将形成 w 个圆周,如图7所示。

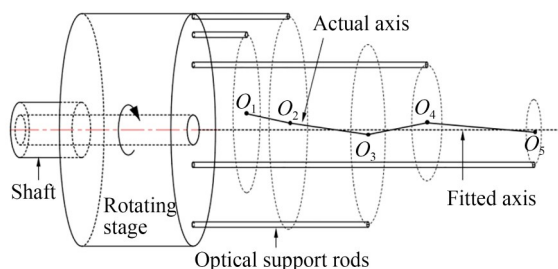


图7 转轴轴线拟合

Fig. 7 Fitting of rotary axis

每旋转一定角度,记录第 i 个靶球当前坐标为 $Q_{ij}(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$,其中 $i=1, 2, w; j=1, 2, \dots$ 。假设该靶球所在截面的测量点拟合得到的圆心为 $O_i(x_i, y_i, z_i)$,半径为 R_i ,则根据最小二乘原理可构建最优化目标函数^[17]:

$$F = \sum_{j=1}^m (|Q_{ij} - O_i| - R_i)^2. \quad (5)$$

由式(5)求得第 i 个圆周的圆心坐标,且认为该点在转轴轴线上,将 w 个圆周的圆心坐标代入式(3)和式(4),得到转轴轴线的方向向量,记为 L_{RA} 。

综上,已经获得光轴与转轴的方向向量,可以计算光轴倾斜误差。在测量过程中,激光跟踪仪位置一直保持固定,两次测量结果建立在同一坐标系下,可直接计算光轴倾斜误差:

$$\theta = \arccos\left(\frac{L_{OA} \cdot L_{RA}}{|L_{OA}| \times |L_{RA}|}\right). \quad (6)$$

4 实验及结果分析

4.1 实验设计

光轴调整系统实验装置如图8所示,外置激光管的光斑直径为4 mm,系统激光器的光斑直径为2 mm,为提高光轴调整精度,要求光斑中心提取精度达到微米级别,故采用IDS UI-5200SE相机,并装配HK3520MP12镜头,相机CCD像素数为 $4\ 104 \times 3\ 006$,像素尺寸为 $3.45 \mu\text{m}$ 。另外,本文光斑中心提取属于静态测量,对于相机帧率无要求。按照图中布局进行安装后,根据光轴调整方案,参考相机中光斑中心位置变化,依次对反射镜倾角、激光管姿态、准直器安装角度进行调整。

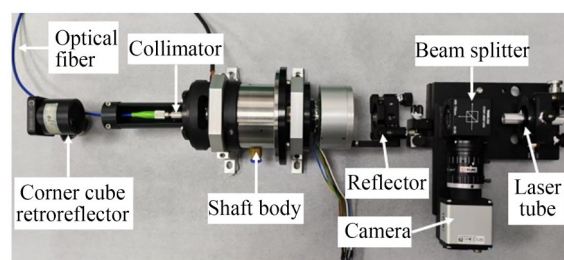


图8 光轴调整系统

Fig. 8 Optical axis adjustment system

光轴倾斜误差测量系统布置如图9所示,实验基于Leica AT960激光跟踪仪,系统测量精度为 $15\text{ }\mu\text{m}+6\text{ }\mu\text{m}/\text{m}$,具有良好的测量重复性^[18]。测量系统轴体与光学平台通过螺丝固定,将跟踪仪靶球的磁吸球座粘接在二维微动平台上,靶球前方放置可变光阑。打开激光器,经过准直器出射的光束直径为2 mm,调整光阑位置和通光孔径,使激光刚好通过光阑中心。由于靶球内部结构为角锥棱镜,能使激光原路返回,通过观察靠近靶球一侧光阑上的光斑位置并调整微动平台,使回光中心与光阑中心重合,此时,激光正好入射靶球球心。关闭激光器,由跟踪仪测量靶球位置并记录。在距离轴体4 m的距离内每隔0.3 m左右采集一个点坐标,共13个被测点。

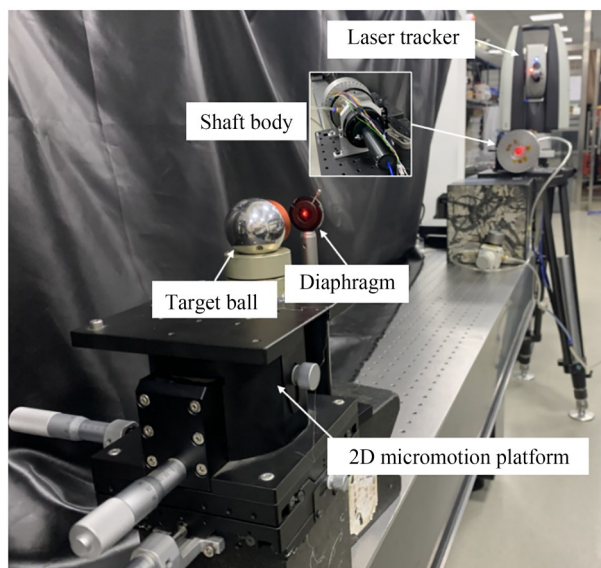


图9 实验平台

Fig. 9 Experimental platform

保持轴体与跟踪仪位置不变,对转轴轴线进行测量。将不同长度的光学支撑杆通过转接工件与转台连接,4个测量点位布置如图10(b)所示。当转台旋转一定角度,利用转台上均匀分布的螺纹孔转接到光学平台上进行固定,如图10(a)中固定装置所示。跟踪仪测量各点位坐标后,松开固定螺钉,继续旋转转台,再次测量。不断重复此步骤,除去跟踪仪盲区外,尽可能多地获取点位信息。

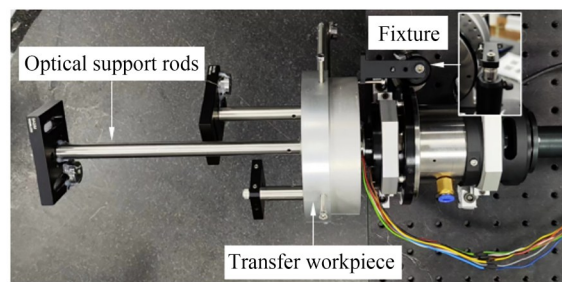
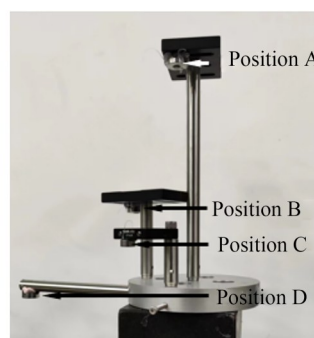
(a) 安装示意图
(a) Installation diagram(b) 测量点位置
(b) Measuring point position

图10 转轴拟合实验装置

Fig. 10 Experimental equipment for rotary axis fitting

4.2 实验结果分析

光轴调整过程中各阶段光斑中心位置提取结果如表1所示,单位为像素。

表1 各阶段光斑中心像素坐标

Tab. 1 Pixel coordinates of spot center in each stage (pixel)

Spot center type	x	y
Starting center O	2 053.252	1 515.756
Reflector return center O'	2 053.119	1 515.657
System laser center O''	2 053.311	1 515.512

表中光斑中心位置最大偏差为 $x_{\max}=0.192$, $y_{\max}=0.244$ 。考虑存在机械调整分辨力问题,以及光斑形态不规则导致的中心提取误差,可认为光斑近似重合。

光轴拟合实验各测量点坐标值如表2所示。

根据前文所述算法,在对数据进行直线拟合后,将残差大于2倍标准差的点进行剔除,重新拟合得到的直线方程为:

$$\begin{cases} x = -2\,246.884 + 0.490t \\ y = 3\,931.352 - 0.872t \\ z = -273.649 + 0.003t \end{cases} \quad (7)$$

拟合结果的最大偏差为0.041 mm, RMS为

0.032 mm,则由此可得光轴的方向向量 $L_{OA}=$ 转轴轴线拟合实验4个测量点在旋转一周后
[0.490 -0.872 0.003]。采集的坐标数据如表3所示。

表 2 光轴上各点坐标
Tab. 2 Coordinates of the points on the optical axis (mm)

i	x_i	y_i	z_i	i	x_i	y_i	z_i
1	-2 556.311	4 482.002	-275.504	8	-1 228.147	2 116.414	-267.986
2	-2 440.805	4 276.323	-274.508	9	-1 108.969	1 904.094	-267.287
3	-2 334.226	4 086.789	-274.007	10	-995.635	1 702.221	-266.702
4	-2 246.881	3 931.353	-273.659	11	-875.274	1 487.725	-266.046
5	-2 056.793	3 592.596	-272.649	12	-751.419	1 267.032	-265.336
6	-1 924.251	3 356.403	-271.878	13	-589.042	977.991	-264.374
7	-1 786.673	3 111.422	-271.083				

表 3 各圆周上被采集点坐标
Tab. 3 Coordinates of points on each circle (mm)

j	Position A			j	Position B		
	x_{1j}	y_{1j}	z_{1j}		x_{2j}	y_{2j}	z_{2j}
1	-475.275	860.476	-250.142	1	-380.951	757.761	-268.506
2	-478.184	858.885	-242.921	2	-381.294	757.658	-255.858
3	-482.002	856.774	-236.628	3	-383.566	756.473	-243.318
4	-486.718	854.151	-231.162	4	-393.552	751.006	-220.471
5	-492.294	851.058	-226.755	5	-401.149	746.804	-210.694
6	-498.301	847.707	-223.542	6	-419.652	736.513	-196.751
7	-504.767	844.090	-221.550	7	-441.489	724.323	-190.724
8	-511.410	840.369	-220.879	8	-463.109	712.17	-193.528
9	-518.099	836.616	-221.557	9	-483.185	700.836	-204.891
10	-524.750	832.865	-223.578	10	-503.597	689.214	-234.032
11	-530.849	829.419	-226.876	11	-508.988	686.043	-258.755
12	-536.315	826.314	-231.355	12	-508.769	686.067	-272.069
13	-547.494	819.940	-250.048				

j	Position C			j	Position D		
	x_{3j}	y_{3j}	z_{3j}		x_{4j}	y_{4j}	z_{4j}
1	-362.765	731.372	-282.901	1	-230.568	733.287	-304.072
2	-360.933	732.462	-269.462	2	-227.086	735.469	-269.488
3	-361.229	732.408	-255.453	3	-298.962	696.278	-103.900
4	-363.391	731.266	-242.871	4	-324.745	681.909	-86.377
5	-424.356	697.575	-185.718	5	-352.782	666.243	-74.246
6	-447.997	684.296	-188.354	6	-442.982	615.705	-73.429
7	-458.977	678.083	-193.051	7	-471.172	599.828	-85.072
8	-478.488	667.064	-209.027	8	-497.146	585.160	-102.192
9	-491.863	659.397	-231.451	9	-520.170	572.126	-124.283
10	-495.861	657.04	-244.572	10	-569.624	543.510	-246.050
11	-497.744	655.905	-257.937	11	-564.240	546.136	-314.694
12	-497.584	655.912	-271.725	12	-554.032	551.620	-346.566
				13	-538.590	560.056	-376.971

在对4组数据分别进行圆周拟合后,将残差大于2倍标准差的点进行剔除,重新得到的拟合结果最大偏差均小于0.040 mm,得到的各圆周圆心坐标如表4所示。

表4 各圆周圆心坐标

Tab. 4 Coordinates of the center of each circle(mm)

Center of each circle	x_i	y_i	z_i
O_1	-398.641	639.305	-263.664
O_2	-511.358	840.132	-264.825
O_3	-429.369	694.171	-264.067
O_4	-445.017	721.872	-264.165

拟合得到的直线方程为:

$$\begin{cases} x = -401.731 + 0.490t \\ y = 644.850 - 0.872t \\ z = -263.735 + 0.005t \end{cases} \quad (8)$$

拟合结果如图11所示,最大偏差为0.080 mm,RMS为0.049 mm,由此可得光轴的方向向量 $L_{OR}=[0.490 \quad -0.872 \quad 0.005]$ 。

将拟合结果代入式(6)计算,得到两直线空间夹角为 0.126° ,调整后的光轴倾斜误差远小于 0.4° ,则经过柱镜出射的扫描光满足截面直线度标准。实验结果表明,本文提出的光轴调整方案具有较高精度,可以很好地满足新型轴系结构对于激光准直器的安装要求。

5 结 论

针对典型的旋转激光扫描系统结构对光源性能的限制问题,本文研究了一种新的外部导光型轴系设计方案,实现了激光器的外置,为光源

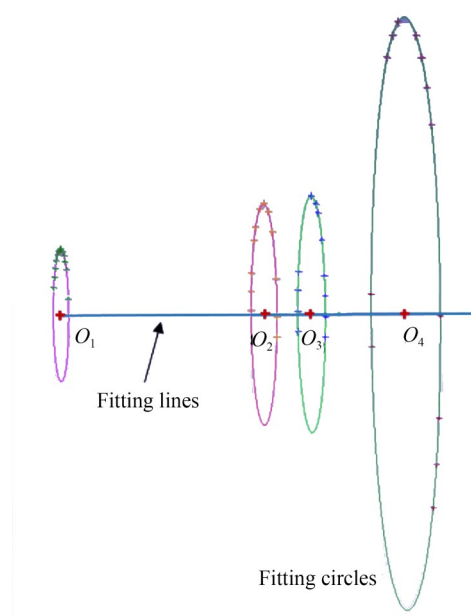


图11 圆周拟合结果

Fig. 11 Results of circle fitting

部分的后续优化创造了条件。同时,本文指出光截面直线度与光轴倾斜角度之间存在相关性。因此,为改善扫描光面型,加强光轴约束,需要对轴系进行调整,针对其结构的特殊性,本文设计了一种关于新型轴系的系统性调整方案,首先基于平行线传递性对系统光轴姿态进行高精度调整,为评估调整后光轴倾斜角度是否满足要求,本文基于激光跟踪仪的精密坐标定位,提出了一种光轴倾斜误差标定方法,拟合得到了光轴与转轴的方向向量及空间夹角。实验表明:调整后系统光轴与转轴轴线夹角优于 0.15° ,完全满足扫描光截面直线度标准对入射角度的要求,该调整方案能够用于系统的装配,有助于测量精度的进一步提升。

参考文献:

- [1] 孙安斌,曹铁泽,王继虎,等. 高端装备大型零部件几何尺寸测量技术现状及趋势[J]. 计测技术, 2021, 41(2): 41-50.
SUN A B, CAO T Z, WANG J H, *et al.* Technological development trends of geometric dimension measurements of large parts in the high-end equipment[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2021, 41(2): 41-50. (in Chinese)

- [2] 何慧霞,魏桂英,武森,等. 智能制造评价理论研究现状及未来展望[J]. 中国工程科学, 2022, 24(2): 56-63.
HE H X, WEI G Y, WU S, *et al.* Research status and future prospects of intelligent manufacturing evaluation theory [J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(2): 56-63. (in Chinese)
- [3] SCHMITT R H, PETEREK M, MORSE E, *et al.* Advances in Large-Scale Metrology-Review and future trends [J]. *CIRP Annals*, 2016, 65(2):

- 643-665.
- [4] MAISANO D A, JAMSHIDI J, FRANCESCHINI F, *et al.* A comparison of two distributed large-volume measurement systems: the mobile spatial coordinate measuring system and the indoor global positioning system [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2009, 223(5): 511-521.
- [5] 方红根, 郭立杰, 杨晓慧, 等. 旋转激光经纬仪空间定位网络的组合式激光三维扫描系统[J]. *光电工程*, 2016, 43(6): 57.
- FANG H G, GUO L J, YANG X H, *et al.* Modular laser 3-dimensional scanning system based on the rotary-laser theodolite positioning network [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(6): 57. (in Chinese)
- [6] MAISANO D A, JAMSHIDI J, FRANCESCHINI F, *et al.* Indoor GPS: system functionality and initial performance evaluation [J]. *International Journal of Manufacturing Research*, 2008, 3(3): 335.
- [7] MAHEEPALA M, KOUZANI A Z, JOORDENS M A. Light-based indoor positioning systems: a review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(8): 3971-3995.
- [8] 林嘉睿, 孙佳蕾, 张饶, 等. 大尺度线结构激光面的非参数模型标定方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(16): 1612001.
- LIN J R, SUN J L, ZHANG R, *et al.* Nonparametric model calibration method for large-scale line-structured laser surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(16): 1612001. (in Chinese)
- [9] 张志利, 刘先一, 周召发, 等. 转台误差对数字天顶仪轴系误差的影响[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(11): 3090-3096.
- ZHANG Z L, LIU X Y, ZHOU Z F, *et al.* Influence of turntable error on axis error in digital zenith camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(11): 3090-3096. (in Chinese)
- [10] 崔成君, 劳达宝, 高书苑, 等. 飞秒激光跟踪仪光轴与竖轴同轴度的标定[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(11): 2651.
- CUI C J, LAO D B, GAO S Y, *et al.* Calibration for coaxiality of optical axis and vertical rotary shaft in femtosecond laser tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(11): 2651. (in Chinese)
- [11] 刘红光, 路瑞军, 李凌梅, 等. 基于等比例偏移定量调整的光路准直方法[J]. *中国测试*, 2018, 44(S1): 82-84.
- LIU H G, LU R J, LI L M, *et al.* Optical path collimation method based on equal offset and quantitative adjustment [J]. *China Measurement & Test*, 2018, 44(S1): 82-84. (in Chinese)
- [12] 宋辉旭. 高精度激光追踪测量若干关键技术[D]. 北京: 北京工业大学, 2020.
- SONG H X. *Several Key Technologies of High Precision Laser Tracing Measurement* [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [13] 高平东, 张法全. 高精度半导体激光器温控系统的设计与实现[J]. *激光技术*, 2014, 38(2): 270-273.
- GAO P D, ZHANG F Q. Design and implementation of high precision temperature control system for semiconductor lasers [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(2): 270-273. (in Chinese)
- [14] 杨滨赫, 蔡引娣, 文志祥, 等. 长距离激光测量中光束漂移的自动补偿[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(11): 2393-2402.
- YANG B H, CAI Y D, WEN Z X, *et al.* Automatic compensation method for beam drift in long-distance laser measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(11): 2393-2402. (in Chinese)
- [15] 马冰卿. 应用于旋转设备的无线供电技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- MA B Q. *Research on Wireless Power Transfer Technology Applied to Rotating Equipment* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [16] 徐鑫. wMPS扫描激光面型评估及测量模型优化[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- XU X. *Shape Evaluation of Scanning Laser Surface and Optimization of Measurement Model for Workshop Measurement Positioning System* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese)
- [17] 郝晋伟, 孟立新, 李小明, 等. 基于最小二乘圆拟合法的三轴转台垂直度误差测试[J]. *中国测试*, 2020, 46(4): 123-129.
- GAO J W, MENG L X, LI X M, *et al.* The verti-

cality error test of three-axis turntable based on least square circle fitting method[J]. *China Measurement & Test*, 2020, 46(4): 123-129. (in Chinese)

[18] 徐亚明,郑琪,管啸. Leica AT960激光跟踪仪测

量精度分析[J]. 测绘地理信息, 2020, 45(1): 8-12.

XU Y M, ZHENG Q, GUAN X. Precision analysis of leica AT960 absolute laser tracker[J]. *Journal of Geomatics*, 2020, 45(1): 8-12. (in Chinese)

作者简介:



任永杰(1975—),男,河北河间人,博士,副教授,1998年于华北电力大学获得学士学位,2004年、2007年于天津大学分别获得硕士、博士学位,主要从事激光及光电测试、视觉监测技术、机器人控制及机器人测量技术方面的研究。E-mail: yongjieren@tju.edu.cn



郭威(2000—),男,山西长治人,硕士研究生,2021年于天津大学获得学士学位,主要从事光电扫描测量系统方面的研究。E-mail: weig0614@163.com