

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413403

新型旋转激光扫描系统发射站结构 设计与测量模型构建^{*}

滕明鑫,林嘉睿,吴腾飞,任永杰,邾继贵

(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:旋转激光扫描系统基于角度交会原理实现空间三维坐标测量,以其可多目标并行测量、量程可扩展的特点,在航空航天、高端船舶等大型装备制造领域得到了广泛的应用。由于现有仪器激光器安装空间受限制约了系统光源选择与优化,通过分析光路设计需求,设计了新型发射站主体光路结构,通过光纤传导将激光光路延长至发射站外部,利用镜组实现分光和生成扫描光面,配合转台以构建精密空间光场,避免了安装空间对激光器性能的限制,使得后续对光源进行优化设计时不再受到约束,在光信号层面有效减少系统性能受到的影响。由于新设计导光型发射站的结构特殊,结构误差会造成发射站运行过程中扫描激光面型瞬时变化,传统基于旋转光平面特征的参数模型不再适用,因此本文结合光路几何结构,通过对光轴偏心误差、光轴倾斜误差等误差进行分析,取消了传统模型将光平面初始空间方程作为内参的定义,重新定义了发射站内部参数,构建了适用于导光型发射站的多站组网定位模型和内外参标定模型。最后搭建了实验平台进行仿真和实验,结果表明:研究的测量模型有效且坐标测量精度优于0.7 mm,能够满足大型装备制造需求,为新型旋转激光扫描系统的性能提升和后续优化打下了坚实基础。

关键词:旋转激光扫描系统;结构设计;测量模型;测角误差

中图分类号: TH74 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4030

Structural design of the transmitter and measurement model construction for a novel rotating laser-scanning system

Teng Mingxin, Lin Jiarui, Wu Tengfei, Ren Yongjie, Zhu Jigui

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The rotating laser-scanning system achieves spatial three-dimensional coordinate measurement based on the principle of angular intersection, which has been widely applied in the fields of aerospace, high-end shipbuilding, and other large-scale equipment manufacturing due to its capabilities for multi-target parallel measurement and scalable measuring range. However, the limited installation space for lasers in existing instruments constrains the selection and optimization of the system's laser. This article devises the main optical structure of the novel transmitter by analyzing the optical path design requirements. The laser optical path is extended to the exterior of the transmitter via optical fiber conduction. A mirror set is utilized to split light and generate scanning light planes. In combination with a turntable, a precise spatial light field is constructed, which circumvents the limitation of installation space on laser performance, enabling unconstrained subsequent optimization design of the light source and effectively reducing the impact on system performance at the optical signal level. Due to the unique structure of the newly designed laser-guiding transmitter, structural errors can lead to instantaneous changes in the scanning light plane shape during the operation of the transmitter. As a result, traditional parameter models based on rotating light plane characteristics are no longer applicable. Therefore, this article integrates the geometric structure of the optical path, analyzes errors such as optical axis eccentricity and optical axis tilt, abandons the definition in the traditional model that takes the initial spatial equations of the light planes as internal parameters, redefines the internal parameters of the transmitter, and constructs a multi-station networking positioning model and an internal and external parameters calibration model suitable for the laser-

guiding transmitter. Finally, an experimental platform is established for simulation and experimentation. The results show that the measurement model studied in this article is effective and has a coordinate measurement accuracy better than 0.7 mm, which meets the requirements of large-scale equipment manufacturing and laying a solid foundation for performance improvement and subsequent optimization of the novel rotating laser-scanning system.

Keywords: rotating laser-scanning system; structural design; measurement model; angle measurement error

0 引言

随着航空航天、高端船舶等大型装备制造领域对高精度三维测量的需求愈发旺盛^[1-3],很多学者通过机械旋转装置构造激光特征实现空间几何量测量,以满足不同领域测量需求。在结构光测量中,Wang 等^[4]设计了一种集成旋转衍射光栅的新型多线激光三角测量扫描系统。随着光栅旋转,可以捕捉到物体上角度可变的发散激光线的图像序列,使得在一帧图像内能够同时获取多个轮廓。在激光雷达测量中,葛鹏等^[5]针对微电机系统(micro electro mechanical systems, MEMS)振镜机械扫描角较小的缺点,提出一种可以实现均匀扫描的光学扩角系统,采用光学设计的方法,建立多镜片搭配的光学扩角系统模型,使得 MEMS 激光雷达扫描角度较小和出射光束发散角较大的问题得到显著改善。蔡淑娴等^[6]针对弹目交会过程中难以精确控制炸点的问题,采用置于弹丸头部横向旋转扫描的线阵激光引信作为探测装置,利用弹丸自身旋转对来袭目标进行旋转扫描,结合 Monte-Carlo 算法实现了对目标炸点的精确控制。在以虚拟现实技术为背景的室内定位测量中,王晓等^[7]利用 Lighthouse 定位系统的激光扫描定位能力,提出了单基站姿态解算算法,设计了低成本、轻量化、可扩展的定位跟踪器,提高了定位精度。在以飞机、船舶装配为背景的大尺寸三维坐标测量领域,旋转激光扫描系统以其可多目标并行测量、量程可扩展的优势得到了广泛的应用^[8-10],其利用高速旋转的转台带动多组扫描激光在空间中以高转速匀速转动,从而构建出 360°全周向的空间精密光场,利用光敏探测器件在空间中获取与处理光学信号,实现多个空间角度的换算,进而完成基于角度交会的三维坐标测量。

转台是旋转激光扫描系统的关键组成部分。现有研究表明,转台的质量与半径越大,转台的转动惯量越大,越难实现精密控制。同时,旋转状态下由于转台质量分布不均匀而产生的旋转惯性载荷是导致旋转不平衡、转速不稳定的主要原因^[11-12]。因此,作为一种对于旋转稳定性要求极高的系统,转台尺寸设计紧凑将导致激光器安装空间受限。而激光器作为旋转激光扫描系统中的另一关键组成部分,对于系统的性能具有决定性影响。现有旋转激光扫描系统的发射站普遍采用集成式的扫描光

输出结构^[13],激光器体积极小。当测量系统在进行大空间的测量任务时,由于大气和其他环境因素造成的衰减,激光传输距离有限^[14],使得系统发射站的工作距离较短,严重限制了系统测量范围的可扩展性。同时,为确保激光器供电端与使用端完全分离,避免机械摩擦,具备长期工作能力,现有发射站采用了感应耦合非接触供电方式^[15],这种方式传输功率小、传输效率低、且结构复杂、易受电磁干扰^[16],限制了激光器功率的提升,还将在长时间使用过程中面临功率波动导致的光束漂移等问题^[17]。此外,半导体激光器具有输出光束的发散角较大,光强分布不对称的特性,需要通过光路结构设计实现光束整形。而受限于传统发射站的转台结构,激光器光路结构简单,优化空间不足,无法出射光平面保持良好的光强分布特性^[18]。而且由于系统发射站中的激光器整体嵌在转台内部,无法进行有效散热,温度变化会导致激光性能下降,包括激光波长改变和出射激光光平面变形^[19-21]等问题,进一步导致发射站测量参数失准。这些问题都将导致系统性能无法高效的发挥,必须对扫描光输出结构重新设计以优化发射站构建的空间光场,从而进一步提高测量精度。

因此,基于上述问题的分析,提出了一种全新的导光型发射站结构,利用光纤传导对扫描激光实现光路进行延长,将扫描光光源从发射站内部移动至站体外,设计了新的光路结构以构建精密空间光场,避免了安装空间对光源选择的限制,并且在后续对其进行优化设计时不再受到约束,在光信号层面有效减少系统性能受到的影响。然而,在新的光路结构中,由于结构误差会造成发射站旋转过程中扫描激光面型瞬时变化,导致传统旋转激光扫描系统坐标定位方法难以精确解算空间三维坐标,因此需要构建适用于新型发射站的系统测量模型。首先,在进行新型发射站测角误差分析时,需对光轴的偏心误差与倾斜误差进行重点分析。同时,通过对单发射站的几何光路结构进行数学分解,基于光轴姿态及基本结构参数计算扫描光任意时刻的空间方程,重新构建了多站组网定位模型。最后,以系统测量精度为出发点,对发射站内参定义进行改进,取代传统发射站坐标定位模型,提出了导光型发射站的内外参标定模型。从而完成了从发射站结构设计到系统测量模型构建的系统性研究工作,为新型旋转激光扫描系统的性能提升和后续优化创造了条件。

1 结构设计

1.1 设计需求分析

旋转激光扫描系统的工作原理如图 1 所示,发射站向测量空间内发射光信号,接收器记录光信号到来的时刻,并解算自身在每个发射站坐标系下的方位角及俯仰角。在接收到 2 个以上发射站光信号时,接收器可通过不同测站间角度交汇解算自身在全局测量坐标系下的坐标,从而实现大尺寸三维坐标测量。

如图 2 所示,典型的发射站以转轴、转台、激光器作为功能主体,激光器被安装在转台侧方预留的安装孔内。由于转台越大,越难实现精密控制,因此转台不能过度放大,必须对激光器体积进行严格限制。目前,传统发射站均采用集成化的线激光器。激光器点光源选择小型的半导体激光器,其出射的高斯光束在水平和垂直方向的发散角不一致,导致出射后的光斑呈现椭圆形,因此,在

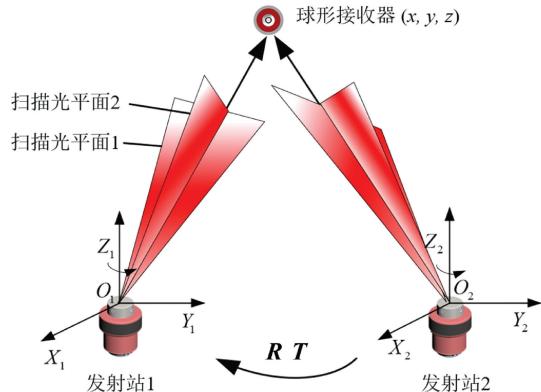


图 1 旋转激光扫描系统坐标测量原理

Fig. 1 Coordinate measurement principle of the rotating laser-scanning system

激光光路中加入准直镜头用于光束整形。经过准直后的高斯光束入射到柱镜进行扩束,形成线结构光形式的扫描激光。

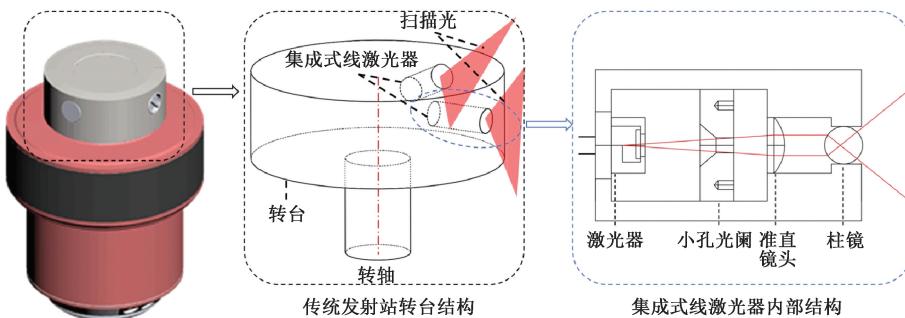


图 2 传统发射站转台结构与集成式线激光器内部结构

Fig. 2 Structure of turntable and integrated line laser in traditional transmitter

但集成式线激光器的光源采用半导体激光器,对外界环境的温度变化敏感,并直接与转台的金属壳体接触,当测量系统工作的环境温度与激光器进行参数标定时的温度不一致时,出射的光束功率及波长将发生变化。而且,由于存在激光器谐振腔的热变形、固定装置的蠕变等因素,激光在传播过程中存在一定的光束漂移,在进行长距离测量任务时,这种漂移现象将导致测量误差增大。此外,在传统发射站工作时,激光器需要随转台高速旋转,必须采用无线供电的方式。这种方案要求两线圈之间气隙间距较小,制约了整体结构设计,且无线耦合电流易受环境干扰而影响激光输出功率。

基于上述分析,由于半导体激光器自身特性及供电问题,造成发射站构建的空间光场不稳定,将直接影响坐标测量解算精度。因此,需要对发射站结构进行重新设计,取消激光器的无线供电方案,采用线缆直接供电,同时取消集成式小型激光器安装结构,为光源提供更大的空间,便于对其采取隔离、温控等后续优化措施,以全新的精密空间光场生成方案,解决系统光源性能问题。

1.2 主体光路设计

基于 1.1 节的分析,为提升光源的可替换性与可操作性,意味着需要为激光器提供更大的空间。因此,对线结构光的输出光路进行放大,将激光器从激光管中分离出来,通过光纤对光路进行延长,让激光的实际输出环节与控制电路放置于发射站外,激光经光纤传导后仍然能够进入站体内部再出射。这种结构设计不必为容纳性能优越但体积较大的激光器而扩大发射站的壳体,且激光器与发射站成为两个独立的个体,在进行测量时,将激光器连接至光纤即可。同时,不再需要为激光器设计供电方案,直接通过电源对其进行供电,提高了光源输出功率的稳定性。

光纤的使用为 2 束扫描光的输出光路设计提供了更大的灵活性,不必为发射站提供 2 个独立的光源,可以通过添加分束镜与反射镜,实现光路分离与转折。扫描线激光采用平凸柱镜对高斯光束进行扩束的方式得到。镜组结构如图 3 所示。

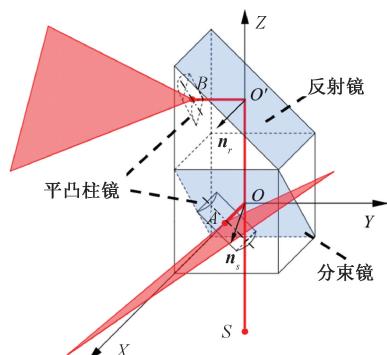
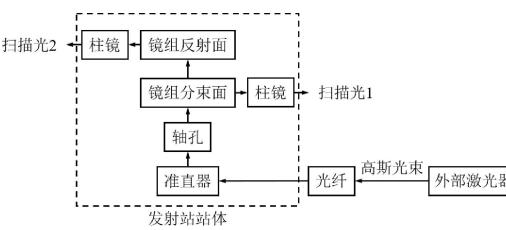
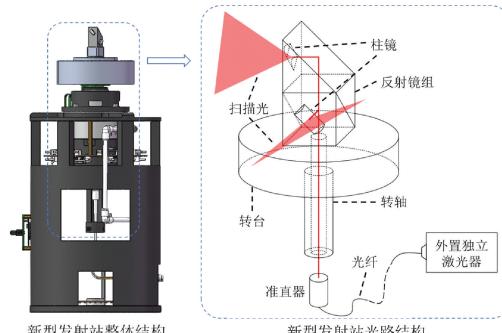


图3 主要光路结构

Fig. 3 Main optical structure schematic diagram

激光从光源出射到输出扫描光经过的中间环节如图4所示。相比于传统发射站,新型发射站结构上的最大区别在于将光源外置,通过光纤引入激光光源,利用镜组实现分光和生成扫描光面,配合转台构建精密空间光场以实现旋转激光扫描,故新型发射站又被称为“导光型发射站”。

(a) 光路结构
(a) Optical structure

(b) 新型发射站整体结构与光路结构

(b) Overall and optical structure schematic diagram of the novel transmitter

图4 新型发射站主体光路结构

Fig. 4 Main optical structure of the novel transmitter

2 面向三维坐标定位的系统测量模型构建

传统旋转激光扫描系统在模型构建、误差补偿及精度优化等方面进行了长期大量的研究工作。新型发射站

为光源的后续优化和维护升级提供了基础的同时,相较于传统发射站,其全新光路结构导致误差分析更为复杂,尤其是新型发射站内部各种光学与机械机构的相互影响进一步增加了模型构建的难度。因此建模分析需要实现从发射站个体到系统整体的全面覆盖,从而构建全面的系统测量模型以实现三维坐标定位。

2.1 单站测角误差分析

发射站扫描角的测量准确度是实现最终多站组网坐标定位的误差源头,保证单站测角的高精度是提高系统整体性能的前提条件,因此,对于发射站测角误差的研究是重要且必须的。现有研究对传统发射站的各种误差来源,包括同步信号时延、扫描光非理想平面、轴系跳动和转子涡动等方面进行了详细分析,并完成了信号延时补偿^[22]、扫描激光面数学模型重建^[23]、旋转轴系性能提升^[24]等工作。而导光型发射站全新的设计思路也引入了非传统的误差源,主要包括光轴偏心误差与光轴倾斜误差两种误差,需要对其进行详细分析。

1) 光轴偏心误差

任永杰等^[25]提出了一种对于光轴倾斜误差的系统性调整方法,使得光轴姿态与转轴轴线接近平行,满足扫描光平面直线度要求,保障激光面变形在设计范围内,但是并未对光轴与转轴轴线是否重合进行约束。在经过调整后,光轴仍然会偏离轴孔中心,如图5所示,在理想情况下,激光是从点S出射,垂直入射到镜组底面中心的实线。而以S'为起点的虚线是实际光束,且SS'=r。在不考虑光轴倾斜量时,两光束平行。

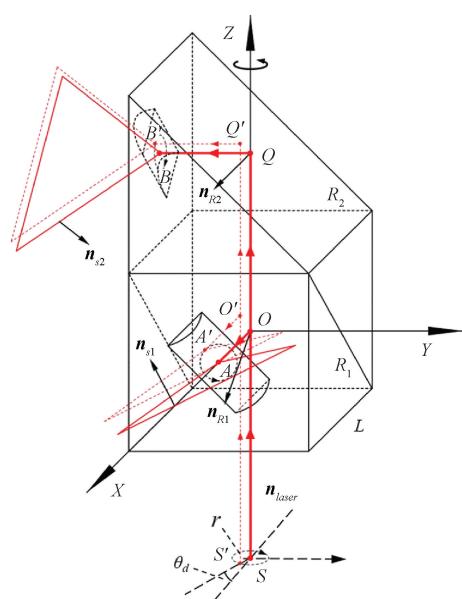


图5 光轴偏心对发射站测角误差的影响

Fig. 5 The influence of eccentric optical axis on the angle measurement error of the transmitter

以镜组下半部分的立方镜中心为原点,转轴轴线为Z轴建立坐标系,X轴正向穿过下侧柱镜中心。当镜组跟随转台绕Z轴旋转时,实际光束出射点相对于镜组底面将会形成一个半径为r的圆周轨迹,方向与转轴旋转方向相反。同理,根据反射镜成像原理,在镜组的2个光束出射面上也会分别产生圆周轨迹。这表明当激光主轴与转轴轴线不重合时,由于未计入光轴倾斜误差,2个扫描光平面的法向量并不会改变,但是扫描光的相对位置会因光束出射点改变而时刻变化。在已有研究中,光平面位置固定是保证传统发射站单站角度测量准确的前提,而导光型发射站无法满足这个理想条件,必然会导致测量误差。

当转台位于起始位置时,SS'与X轴夹角为 θ_d ,已知立方镜边长为L,镜组上方直三棱柱底面为等腰直角三角形,直角边长也为L,根据镜组反射面位姿关系,反射面R1与R2法向量与Z轴夹角均为45°,在O-XYZ坐标系下二者法向量及截距可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{n}_{R1} = [\sqrt{2}/2 \ 0 \ -\sqrt{2}/2], & d_{R1} = 0 \\ \mathbf{n}_{R2} = [0 \ -\sqrt{2}/2 \ -\sqrt{2}/2], & d_{R2} = L \end{cases} \quad (1)$$

当发射站转台以 ω 角速度绕轴旋转,当两扫描光扫过接收器时,各自的扫描角 $\theta_i = \omega \cdot t_i$, i 为扫描光序号, $i=1,2$,发射站坐标系旋转矩阵为 $\mathbf{R}(\theta_i)$,则此刻的反射面法向量为:

$$\begin{cases} \mathbf{n}'_{R1} = \mathbf{n}_{R1} \cdot \mathbf{R}(\theta_1)^T \\ \mathbf{n}'_{R2} = \mathbf{n}_{R2} \cdot \mathbf{R}(\theta_2)^T \end{cases} \quad (2)$$

由于激光垂直于镜组底面,即垂直于XOY平面,则实际入射光束的空间向量 $\mathbf{n}_{S'O'} = \mathbf{n}_{laser} = [0 \ 0 \ 1]$, $S' = [r \cos \theta_d \ r \sin \theta_d \ -L_s]$, L_s 为准直器中心到坐标原点的垂直距离,则光束在反射面上的反射点坐标可通过式(3)计算得到:

$$\begin{cases} O'(t_1) = S' + \frac{-\mathbf{n}'_{R1} \cdot \mathbf{n}_{laser}^T - \sqrt{2}d_{R1}}{\mathbf{n}'_{R1} \cdot S'^T} \cdot \mathbf{n}_{laser} \\ Q'(t_2) = S' + \frac{-\mathbf{n}'_{R2} \cdot \mathbf{n}_{laser}^T - \sqrt{2}d_{R2}}{\mathbf{n}'_{R2} \cdot S'^T} \cdot \mathbf{n}_{laser} \end{cases} \quad (3)$$

其中 $O'(t_1)$ 与 $Q'(t_2)$ 是关于 t_i 的函数。当激光被扩束为扫描光后,反射点必然位于光平面上。而柱镜倾斜角度固定,激光在垂直于柱镜入射后,已知光平面法向量为 \mathbf{n}_{Si} ,当在发射站坐标系下的目标点 $P(x \ y \ z)$ 位于光平面上时,可得到如下方程组:

$$\begin{cases} \mathbf{n}_{S1} \cdot \mathbf{R}(\theta_1)^T \cdot (P - O'(t_1))^T = 0 \\ \mathbf{n}_{S2} \cdot \mathbf{R}(\theta_2)^T \cdot (P - Q'(t_2))^T = 0 \end{cases} \quad (4)$$

由此可解算得到当光轴存在偏心时,扫描光扫过被测目标的旋转时间 t_i 与扫描角 θ_i 。但是,由于扫描光只在半空间中存在,而计算结果是对全空间中的整个平

面经过被测点时的扫描角,因此,会存在2个数值,需要对错误解进行剔除。由于镜组结构参数已知,可以通过计算此时反射点到目标点的方向向量与出射面的法向量的夹角,若夹角 $>30^\circ$ (扫描光张角 $<60^\circ$),则该解应被剔除。

随后将无偏心光源坐标 $S = [0 \ 0 \ -L_s]$ 代入上述计算过程,可以得到理想扫描角 θ_{ideal}^i ,则由于光轴偏心产生的扫描角测量误差为:

$$\Delta\theta_{ecc}^i = \theta_i - \theta_{ideal}^i \quad (5)$$

经过公式推导得到的 $\Delta\theta_{ecc}^i$ 为关于 r 与 θ_d 的二元函数。

2) 光轴倾斜误差

由于在发射站轴系的实际调整过程中存在机械调整分辨率、光斑形态不均匀及人为因素等误差源,导致调整后的光轴与转轴轴线并不是完全平行,而是仍然存在一定的倾斜量,如图6所示,激光束从光源S出射,经过反射后,在旋转镜组的出射面上留下的轨迹仍然为圆周,与光轴偏心误差不同的是,由于激光以一定角度倾斜入射柱镜,出射的扫描光平面法向量与理想的法向量不再一致,光平面姿态产生了相对变化。同时,光轴倾斜会导致激光无法垂直入射到镜组末端的柱面镜上,可能造成出射光的直线度下降,导致出射的扫描光平面无法到达工作要求。

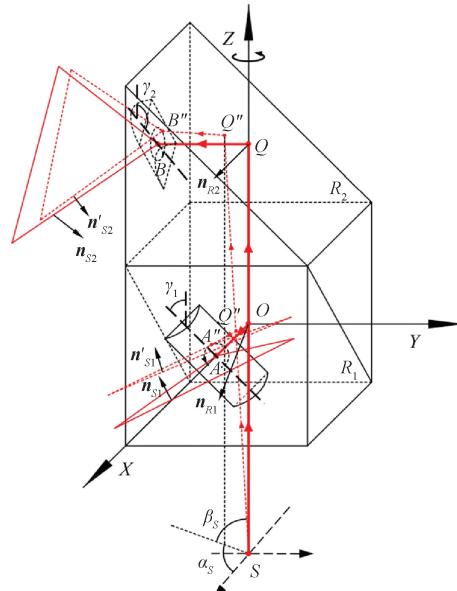


图6 光轴倾斜对发射站测角误差的影响

Fig. 6 The influence of tilted optical axis on the angle measurement error of the transmitter

当激光从镜组末端的柱面镜出射时,光轴在任意方向发生的倾斜,均可分解为沿柱镜轴线方向的倾斜量与沿柱镜径向的倾斜量。经过仿真发现,当激光能够完全

通过柱镜时,沿径向的倾斜角度并不会对扫描光面型造成严重影响,所以光轴沿柱镜轴线方向的倾斜,是造成光平面变形的主要因素。在 Zemax 中对不同激光入射角度造成柱镜出射扫描光面型变化情况进行仿真,得到如图 7 所示的 3 种扫描光截面形状。其中图 7(a)为激光垂直于柱镜平面入射时产生的扫描光,其截面呈梭形,光条中心为理想直线。当激光沿柱镜轴线向上偏转,可以看到图 7(b)中扫描光截面产生了明显的上弯。当激光沿柱镜轴线向下偏转,在图 7(c)中扫描光截面明显向下弯曲,可见入射角度的变化会导致扫描光面型发生相应的变化,且具有一定的规律性。

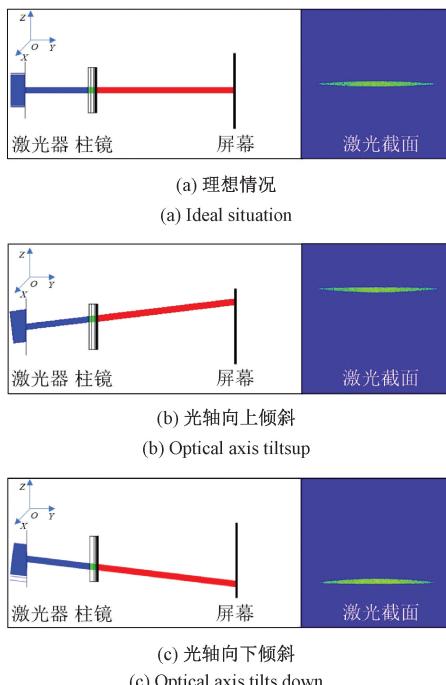


图 7 激光入射柱面镜的角度对扫描光直线度的影响

Fig. 7 The influence of laser incidence angle to the cylindrical lens on the straightness of the scanning light

因此,需要对光轴倾斜误差的传递过程进行数学分析,光轴姿态可以使用水平角 α_s 与垂直角 β_s 表示,则其空间向量可表示为:

$$\mathbf{n}_{SQ'} = [\cos \beta_s \cos \alpha_s \quad \cos \beta_s \sin \alpha_s \quad \sin \beta_s] \quad (6)$$

将 $\mathbf{n}_{SQ'}$ 与光源坐标 S 代入式(3)中,即可求得反射点坐标 O'' 与 Q'' 。由于扫描光姿态发生变化,需要对此刻反射光束的方向向量进行求解,由式(7)可得。

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_{O''A''} &= \mathbf{n}_{SQ''} - 2(\mathbf{n}_{SQ''} \cdot \mathbf{n}'_{R1}) \cdot \mathbf{n}'_{R1} \\ \mathbf{n}_{Q''B''} &= \mathbf{n}_{SQ''} - 2(\mathbf{n}_{SQ''} \cdot \mathbf{n}'_{R2}) \cdot \mathbf{n}'_{R2} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, \mathbf{n}'_{Ri} 由式(2)求得。当激光倾斜入射柱镜时,入射角沿柱镜轴线方向的分量将导致光平面发生偏转,如图 8 所示,扫描光法向量 \mathbf{n}_s 与柱镜轴线的方向向量

\mathbf{n}_{lens} 不重合,而 \mathbf{n}_s 可以通过如下公式进行求解:

$$\mathbf{n}_s = \mathbf{n}_{reflect} \times (\mathbf{n}_{lens} \times \mathbf{n}_{out}) \quad (8)$$

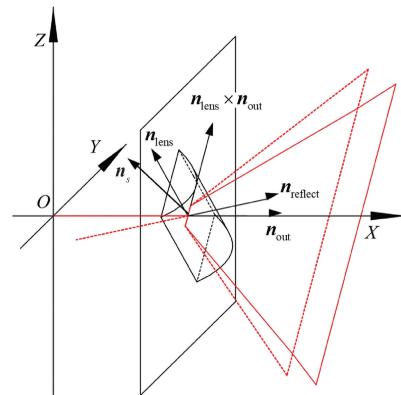


图 8 光轴倾斜引起的扫描光法向量变化

Fig. 8 Normal vector changes of scanning light caused by optical axis tilt

其中, $\mathbf{n}_{reflect}$ 为反射光束方向向量, \mathbf{n}_{out} 为镜组出射平面法向量,可根据镜组结构参数计算得到。通过测量各个柱镜轴线相对于 Z 轴的倾斜角度为 γ_i , 则其方向向量为:

$$\begin{cases} \mathbf{n}_{lens}^1 = [0 \quad \cos \gamma_1 \quad -\sin \gamma_1] \\ \mathbf{n}_{lens}^2 = [-\sin \gamma_2 \quad 0 \quad \cos \gamma_2] \end{cases} \quad (9)$$

将对应的向量代入式(8)中得到两扫描光平面法向量 \mathbf{n}'_{S1} 与 \mathbf{n}'_{S2} ,类比式(4)建立方程组,求解扫描角 θ'_i ,则由于光轴倾斜产生的扫描角测量误差为:

$$\Delta \theta'_{\text{lean}} = \theta'_i - \theta'_{\text{ideal}} \quad (10)$$

经过公式推导得到的 $\Delta \theta'_{\text{lean}}$ 为关于 α_s 与 β_s 的二元函数。

3) 潜在解决方案

基于上述分析,针对单站测角误差的评估,有以下 3 种潜在解决方案:(1)通过机械标定手段直接获取光轴姿态误差。在已有研究中,任永杰等^[25]提出了关于倾斜误差的标定方法,通过设计光轴姿态调整系统和标定方法,保证了光轴倾斜误差对于出射扫描光直线度的影响在设计指标范围内;然而,受限于新型发射站装配工艺限制,尚无可行方案通过机械标定直接获取光轴偏心误差。(2)通过多目标优化拟合计算获取光轴姿态误差,即通过新型发射站结构分析,重新定义内部参数,建立数学模型,进行最优化过程得到光轴姿态误差,是本研究的主要工作内容,也是当前最具可行性的解决方案。(3)通过结构设计迭代,从制作材料和装配工艺上,降低发射站轴系与光路的装配制造误差。需要在未来工作中进一步研究。

2.2 多站组网定位模型

1) 结构误差分析

前文在分析导光型发射站的测角误差源时,分别建立了光轴偏心和倾斜造成的测角误差计算模型。然而,

对于发射站实体,其光轴的偏心与倾斜误差往往相互耦合,同时,由于无法保证光路中各元件的安装位置绝对精确,这些因机械装配制造产生的误差会对光轴姿态误差进行放大,共同作用于系统的定位精度,所以必须基于发射站整体结构,对结构误差进行研究。

在发射站装配过程中,转台存在一定加工误差,在安装到转轴上之后,由于受力不平衡,进而使转台整体发生倾斜,导致镜组底面与转轴轴线无法达到理想垂直,进而导致镜组倾斜。

对于理想状态的激光光路而言,尽管镜组倾斜会使扫描光姿态发生改变,但在旋转过程中,光束始终入射在反射面的同一点,扫描光的瞬时相对位置是固定不变的。然而实际光路中光轴相对于转轴轴线存在偏心与倾斜,与镜组反射面倾斜的耦合将使反射光产生两倍于此倾斜量的偏转。另外,激光在反射面的入射点并不是固定的,在跟随转台旋转过程中,激光束包围的空间形成一个锥体,由于出射面与锥体轴线不垂直,则截面形状,即光斑轨迹不再是圆周,而是椭圆,且轨迹中心也发生了偏移,如图 9 所示。

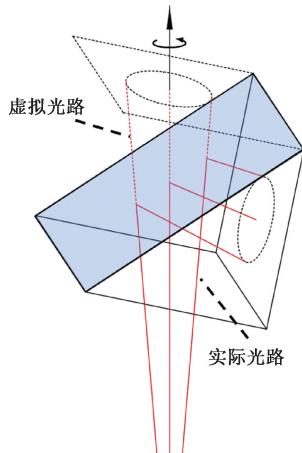


图 9 结构误差造成的激光出射点轨迹变化

Fig. 9 Laser exit point changes caused by structural error

镜组的倾斜会导致其各个平面法向量发生变化,这是因为倾斜改变了原有法向量与坐标轴之间的角度关系。此外,发射站使用镜组由 3 个棱镜组成,棱镜分光面及反射面与镜组底面之间无法保证严格的 45°倾角,此误差会叠加在扫描光的位姿变化中,在进行模型构建时也必须将其作为一种影响因素。

2) 测量模型构建

基于上述分析,为了更准确地评估导光型发射站的测角误差,需要综合考虑各种误差源之间的相互作用。此外,传统发射站坐标定位方法认为扫描光姿态固定不变,在新的光路结构下得到的待测点坐标将是不准确的。

因此,针对导光型发射站的特殊结构,需要重新构建多站组网定位模型。

首先针对单发射站相关测量参数进行分析,当多种误差源同时存在,导光型发射站光路结构模型如图 10(a)所示,对其进行简化后,仅保留两反射面及基本光路,建立了误差分析的物理模型,如图 10(b)所示。图中 M_1 、 M_2 、 M_3 位于转台中心轴线上,其中 M_1 为转台与转轴配合面中心, M_2 为反射面 R_1 中心, M_3 为反射面 R_2 中心。在进行转台安装时,转台及镜组整体将以 M_3 为基准发生倾斜,其倾斜方向的水平角为 α_R , 垂直角为 β_R 。同时,两反射面空间位置及姿态也随之改变,导致激光反射点位置及反射光方向发生变化,为此需要计算倾斜后的反射面空间方程。

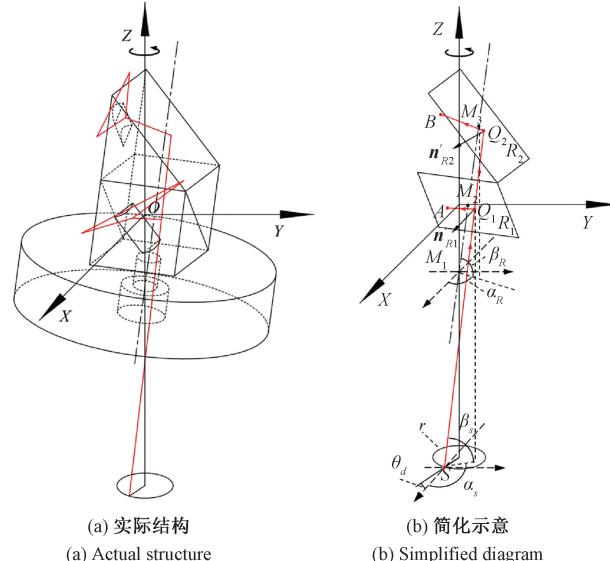


图 10 基于结构误差的光路模型

Fig. 10 Optical model based on structural error

可将转台的倾斜认为是在 M_1 处绕空间中任意一轴旋转了 β_R 角度,则该轴线的方向向量可表示为:

$$\mathbf{n}_a = [\cos(\alpha_R - \pi/2) \quad \sin(\alpha_R - \pi/2) \quad 0] = \\ [\sin(\alpha_R) \quad -\cos(\alpha_R) \quad 0] \quad (11)$$

根据罗德里格斯公式,可计算其旋转矩阵为:

$$\mathbf{R}_a = \mathbf{E} + \sin(\beta_R - \pi/2) \mathbf{K} + (1 - \cos(\beta_R - \pi/2)) \mathbf{K}^2 = \\ \mathbf{E} - \cos(\beta_R) \mathbf{K} + (1 - \sin(\beta_R)) \mathbf{K}^2 \quad (12)$$

其中 \mathbf{E} 为 3×3 的单位矩阵, \mathbf{K} 为反对称矩阵,且

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 & -\mathbf{n}_a(3) & \mathbf{n}_a(2) \\ \mathbf{n}_a(3) & 0 & -\mathbf{n}_a(1) \\ -\mathbf{n}_a(2) & \mathbf{n}_a(1) & 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\cos(\alpha_R) \\ 0 & 0 & -\sin(\alpha_R) \\ \cos(\alpha_R) & \sin(\alpha_R) & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

另外,由于引入镜组结构误差,则理想的分光面及反射面法向量变为:

$$\begin{cases} \mathbf{n}_{R1} = [\sin(\theta_{L1}) \quad 0 \quad -\cos(\theta_{L1})] \\ \mathbf{n}_{R2} = [0 \quad -\sin(\theta_{L1}) \quad -\cos(\theta_{L1})] \end{cases} \quad (14)$$

其中, θ_{L1} 和 θ_{L2} 分别为分光面和反射面与镜组底面的夹角。由转台倾斜的旋转矩阵及镜组结构参数便可求得初始位置处反射面法向量 \mathbf{n}'_{R1} 与 \mathbf{n}'_{R2} , 并且 M_2 与 M_1 之间的距离以及 M_3 与 M_1 之间的距离均是已知的, 也可得到二者坐标。发射站转台转速固定为 ω , 扫描时间 t_i 可通过接收器及处理器解算后得到, 则发射站坐标系旋转矩阵为 $\mathbf{R}(\theta_i)$ 。

对镜组参数进行解算后, 对光轴姿态进行分析。由于光轴偏心与倾斜误差同时存在, 关于光轴的参数包括光源坐标 S 与方向向量 \mathbf{n}_{laser} :

$$\begin{cases} S = (r \cos \theta_d \quad r \sin \theta_d \quad -L_s) \\ \mathbf{n}_{laser} = [\cos \beta_s \cos \alpha_s \quad \cos \beta_s \sin \alpha_s \quad \sin \beta_s] \end{cases} \quad (15)$$

则激光在两反射面的反射点坐标为:

$$\begin{cases} Q_1(t_1) = S + \frac{-\mathbf{n}'_{R1} \cdot \mathbf{R}(\theta_1)^T \cdot (\mathbf{n}_{laser}^T - M_2^T)}{\mathbf{n}'_{R1} \cdot \mathbf{R}(\theta_1)^T \cdot S^T} \cdot \mathbf{n}_{laser} \\ Q_2(t_2) = S + \frac{-\mathbf{n}'_{R2} \cdot \mathbf{R}(\theta_2)^T \cdot (\mathbf{n}_{laser}^T - M_3^T)}{\mathbf{n}'_{R2} \cdot \mathbf{R}(\theta_2)^T \cdot S^T} \cdot \mathbf{n}_{laser} \end{cases} \quad (16)$$

反射光方向向量 \mathbf{n}_{Q1A} 及 \mathbf{n}_{Q2B} 根据式(7)求得, 关于两扫描光平面法向量 \mathbf{n}_{S1} 和 \mathbf{n}_{S2} 的求解过程与 2.1 节中光轴倾斜误差相关推导类似, 不同点在于转台倾斜造成柱镜轴线方向向量与出射面法向量的改变, 因此需通过 \mathbf{R}_a 进行转换。至此便得到了单发射站进行全周扫描时, 扫描光扫过被测点时在发射站坐标系下的空间姿态。

在进行坐标定位时, 空间中放置多台发射站, 数量为 N , 通过提前标定得到从世界坐标系到发射站坐标系的转换矩阵 $[\mathbf{R}_j \quad \mathbf{T}_j]$, 其中 j 为发射站序号, 且 $j=1, 2, \dots, N$, 根据扫描时间、扫描光瞬时姿态可构建如下方程组:

$$\begin{cases} \mathbf{n}_{S1}^j \cdot ((Q_1^j)^T - (\mathbf{R}_j \cdot P^T + \mathbf{T}_j)) = 0 \\ \mathbf{n}_{S2}^j \cdot ((Q_2^j)^T - (\mathbf{R}_j \cdot P^T + \mathbf{T}_j)) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

其中 $P = [x_w \quad y_w \quad z_w]$ 为世界坐标系下待测点坐标, 共 3 个未知参数, 由至少 2 个发射站组网, 求解上述方程组即可得到待测点精确坐标。

2.3 新型发射站内外参标定模型

通过对导光型发射站单站测角误差进行分析可知, 导光型发射站因光源与转台的分离导致出射的扫描光相对位姿无法固定。针对导光型发射站的特殊结构, 取消将两扫描光平面在初始位置的空间方程作为内参进行计算的方法, 转而追溯至光源部分, 将光轴的偏心与倾斜作

为发射站主要内参进行标定。此外, 由于难以采用直接测量的方法得到转台的倾斜情况、镜组的结构参数以及柱镜安装角度, 故将这三者附加至发射站内参, 同时进行标定。由此, 便可得到发射站基本内参为:

- 1) 光轴源点偏心距离 r 与方向 θ_d ;
- 2) 光轴的水平角 α_s 与垂直角 β_s ;
- 3) 转台轴线的水平角 α_R 与垂直角 β_R ;
- 4) 镜组分光面与底面夹角 θ_{L1} 及反射面与底面夹角 θ_{L2} ;
- 5) 两柱镜轴线与 Z 轴夹角 γ_1 和 γ_2 。

对发射站外参进行处理, 将旋转矩阵采用更为简洁的欧拉角代替, 并结合平移矩阵共同构成外参 $[\theta_x \quad \theta_y \quad \theta_z \quad \mathbf{T}_x \quad \mathbf{T}_y \quad \mathbf{T}_z]$, 则旋转矩阵可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\sin(\theta_x) \\ 0 & \sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & \sin(\theta_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & -\sin(\theta_z) & 0 \\ \sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \rightarrow \mathbf{R} = \mathbf{R}_z \cdot \mathbf{R}_y \cdot \mathbf{R}_x \quad (18)$$

通过在发射站可扫描空间范围内建立标定控制场, 由跟踪仪测量得到其中控制点的精确坐标 $P_i = [x_{wi} \quad y_{wi} \quad z_{wi}]$, $i=1, 2, \dots, M$, 使用发射站对所有控制点进行扫描, 得到关于每个点位的扫描时间 t_{li} 和 t_{zi} 。根据前文进行的误差分析, 将发射站内外参作为未知参数带入式(17), 可得到最优化函数组如式(19)所示。

$$\begin{cases} f_1 = \mathbf{n}_{S11} \cdot (Q_{11}^T - (\mathbf{R} \cdot P_1^T + \mathbf{T})) \\ f_2 = \mathbf{n}_{S21} \cdot (Q_{21}^T - (\mathbf{R} \cdot P_1^T + \mathbf{T})) \\ \vdots \\ f_{2i-1} = \mathbf{n}_{S1i} \cdot (Q_{1i}^T - (\mathbf{R} \cdot P_i^T + \mathbf{T})) \\ f_{2i} = \mathbf{n}_{S2i} \cdot (Q_{2i}^T - (\mathbf{R} \cdot P_i^T + \mathbf{T})) \end{cases} \quad (19)$$

其中, \mathbf{n}_{S1i} 与 \mathbf{n}_{S2i} 是两扫描光扫过控制点 P_i 时的法相量, Q_{1i} 和 Q_{2i} 为此刻激光在镜组中的两个反射点坐标。此函数物理意义为在发射站旋转一定扫描时间后, 控制点在发射站坐标系下分别到两扫描光平面的距离。

采用 Levenberg-Marquardt 算法求得函数值最小时的数值解即为发射站内外参。通过对发射站位置进行提前标定得到外参的初值, 而对发射站内参进行分析可知, 由于整体结构紧凑及制造精度的保证, 这些参数与理想值的偏离程度被限制在较小的范围内, 故将无误差的发射站理想内参作为计算初值, 如表 1 所示。

表1 发射站内参初值

Table 1 The initial values of the transmitter internal parameters

名称	初值	名称	初值
r/mm	0	$\beta_R/(\text{°})$	90
$\theta_d/(\text{°})$	0	$\theta_{L1}/(\text{°})$	45
$\alpha_s/(\text{°})$	0	$\theta_{L2}/(\text{°})$	45
$\beta_s/(\text{°})$	90	$\gamma_1/(\text{°})$	45
$\alpha_R/(\text{°})$	0	$\gamma_2/(\text{°})$	135

对于单发射站的标定,共存在16个未知参数(10个内部参数和6个外部参数),而每个控制点对应2个最优化函数,则至少需要8个控制点才能实现参数的求解。

3 实验结果与分析

3.1 仿真分析

为验证导光型发射站坐标定位模型及内外参标定模型的有效性,对多个发射站相对位置及三维空间中控制场布局进行设计,构建多站组网定位仿真模型,如图11所示。首先建立世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$,设置2个发射站站位 T_1, T_2 ,并分别建立发射站坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 与 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 。在 X_w 轴两侧各5 m距离处,相对于 Y_w 轴对称的夹角为的90°范围内,选取深度与高度均为3 m的控制场空间,通过随机生成的24个点位作为控制点。并在此空间中随机设置了3个被测点位,用于定位精度的验证。

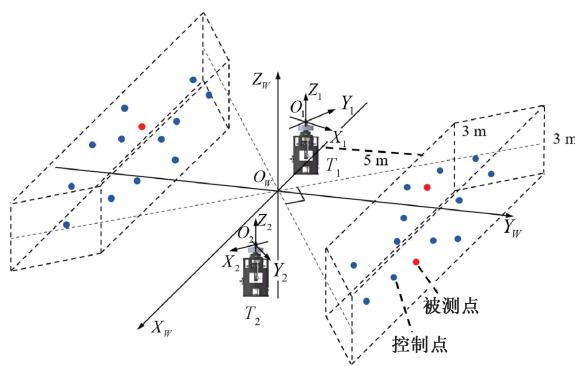


图11 发射站站位及控制场仿真设计

Fig. 11 Simulation design of transmitter positions and control field

对两发射站从世界坐标系到两发射站坐标系的转换矩阵(即发射站外参)和发射站的各项内参进行设定,如表2和3所示。

表2 发射站外参仿真真值

Table 2 The true values of the transmitter external parameters in the simulation

站位	$\theta_x/(\text{°})$	$\theta_y/(\text{°})$	$\theta_z/(\text{°})$	T_x/mm	T_y/mm	T_z/mm
站位1	1.131	-0.675	-82.150	363.567	-1726.244	2.224
站位2	-0.777	0.245	41.220	1051.001	-1135.838	41.552

表3 发射站内参仿真真值

Table 3 The true values of the transmitter internal parameters in the simulation

参数名称	站位1	站位2	名称	站位1	站位2
r/mm	0.591	0.314	$\beta_R/(\text{°})$	90.281	90.116
$\theta_d/(\text{°})$	50.332	76.302	$\theta_{L1}/(\text{°})$	44.591	45.372
$\alpha_s/(\text{°})$	40.548	124.018	$\theta_{L2}/(\text{°})$	44.796	44.829
$\beta_s/(\text{°})$	89.791	90.173	$\gamma_1/(\text{°})$	45.249	45.541
$\alpha_R/(\text{°})$	45.103	105.154	$\gamma_2/(\text{°})$	135.158	134.347

旋转激光扫描系统的误差来源包括发射站本身的结构误差和接收端信号提取误差。根据式(17),将发射站内外参作为已知量,而将扫描时间作为未知量。发射站的内外部参数包含了发射站本身的结构误差,作为待标定的量,设置了一组理论真值;接收端信号提取误差是由于转速波动、光平面面型误差以及光敏单元光脉冲信号提取误差造成的,通过设定内外参真值与被测点位真值,可直接获取两个发射站站位到各个点位的扫描时间,依据实测经验,由于转速波动、光平面面型误差以及光敏单元光脉冲信号提取误差等因素造成单站重复测角值(即接收端信号提取误差)的极差约为9'',故在此范围内对扫描时间序列添加随机误差后再进行标定,标定结果如表4和5所示。

表4 内参标定仿真结果

Table 4 Simulation results of internal parameters calibration

参数名称	站位1	站位1	站位2	站位2
	仿真结果	误差	仿真结果	误差
r/mm	0.608	0.017	0.320	0.006
$\theta_d/(\text{°})$	52.376	2.044	82.839	6.537
$\alpha_s/(\text{°})$	40.434	-0.114	124.029	0.011
$\beta_s/(\text{°})$	89.791	0	90.173	0
$\alpha_R/(\text{°})$	45.478	0.375	105.437	0.283
$\beta_R/(\text{°})$	90.226	-0.055	90.169	0.053
$\theta_{L1}/(\text{°})$	44.576	-0.015	45.191	-0.181
$\theta_{L2}/(\text{°})$	44.872	0.076	44.870	0.041
$\gamma_1/(\text{°})$	45.189	-0.06	45.530	-0.011
$\gamma_2/(\text{°})$	135.177	0.019	134.452	0.105

表 5 外参标定仿真结果

Table 5 Simulation results of external parameters calibration

参数名称	站位 1 仿真结果	站位 1 误差	站位 2 仿真结果	站位 2 误差
$\theta_x/(\text{°})$	1.131	0	-0.776	0.001
$\theta_y/(\text{°})$	-0.675	0	0.245	0
$\theta_z/(\text{°})$	-82.201	-0.051	41.055	-0.165
T_x/mm	362.054	-1.513	1 047.710	-3.291
T_y/mm	-1 726.544	-0.300	-1 136.860	-1.022
T_z/mm	2.218	-0.006	41.486	-0.066

通过分析数据可得,标定结果中关于角度项的误差除 θ_d 外均小于 0.5° ,而由于绝对偏心量 r 较小,故表中 θ_d 存在的误差不会对光轴偏心位置产生过度影响;另外,表中数据显示 r 的计算误差均小于 0.02 mm ,最大相对误差为 2.796% ,而关于外参中平移矩阵的误差均小于 5 mm ,最大相对误差为 0.314% 。将此内外参代入式(17)进行坐标计算以验证系统测量精度。计算结果如表 6 所示。

表 6 坐标测量仿真结果

Table 6 Simulation results of coordinate measurement
(mm)

坐标序号	真值	仿真 结果	误差	合成 误差
P_1	x	-1 887.239	-1 887.228	0.011
	y	6 127.380	6 127.973	0.592
	z	-979.947	-980.177	-0.230
P_2	x	-3 272.398	-3 272.601	-0.203
	y	6 172.569	6 173.156	0.587
	z	932.005	932.014	0.009
P_3	x	-3 142.812	-3 142.920	-0.108
	y	5 968.619	5 969.141	0.522
	z	-633.430	-633.632	-0.202

采用本研究建立的坐标定位模型计算的坐标最大距离误差为 0.635 mm 。仿真结果表明,本文提出的模型适用于导光型发射站,且实现了较高的定位精度。

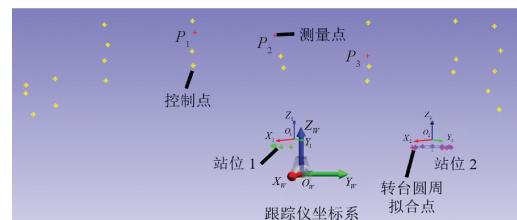
3.2 实验验证

实验采用多次转站、分时测量的方法完成。实验现场布置及控制场布局如图 12(a)所示,设置 28 个被测目标点,随机选取其中 3 个作为测量点,以跟踪仪自身坐标系作为世界坐标系,使用跟踪仪对所有目标点的测量结果作为坐标标准值。图 12(b)中展示了发射站站位及各目标点位分布情况。



(a) 实验现场布置

(a) Experiment site



(b) 发射站及控制场布局示意图

(b) Diagram of the transmitter and control field layout

图 12 实验相关布置

Fig. 12 Experiment layout

在对目标点进行扫描之前,使用激光跟踪仪配合转接工装获取发射站坐标系原点坐标,并设定 X 轴和 Z 轴方向,通过与世界坐标系转换,获得旋转矩阵及位移矩阵,用于提供发射站外参标定的初值,如图 13 所示。获得的外参优化计算初值,如表 7 所示。

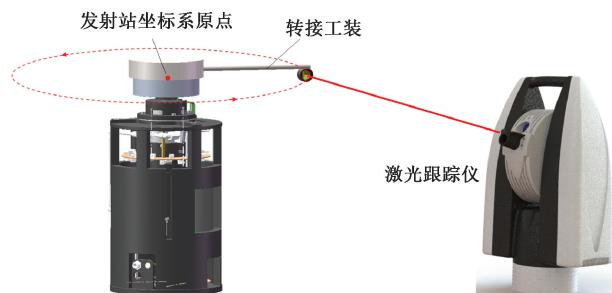


图 13 基于转接工装和激光跟踪仪获取发射站外参初值

Fig. 13 Obtaining initial values of external parameters via the tooling and the laser tracker

表 7 外参初值

Table 7 The initial values of external parameters

参数名称	站位 1	站位 2
$\theta_x/(\text{°})$	-1.537	-1.256
$\theta_y/(\text{°})$	-0.341	-0.315
$\theta_z/(\text{°})$	77.493	75.920
T_x/mm	-123.341	1 345.299
T_y/mm	902.237	195.920
T_z/mm	-307.782	-274.321

在两站位下对控制场空间中的所有目标点位进行扫描,获取两组扫描时间序列。根据内外参标定模型完成两站位外参及发射站内参的计算,标定结果如表 8、9 所示。

表 8 内参标定结果

Table 8 Calibration results of internal parameters

参数名称	初值	参数名称	初值
r/mm	0.258	$\beta_R/(\text{°})$	89.356
$\theta_d/(\text{°})$	60.618	$\theta_{L1}/(\text{°})$	44.415
$\alpha_s/(\text{°})$	-41.043	$\theta_{L2}/(\text{°})$	44.402
$\beta_s/(\text{°})$	89.989	$\gamma_1/(\text{°})$	44.366
$\alpha_R/(\text{°})$	6.700	$\gamma_2/(\text{°})$	135.891

表 9 外参标定结果

Table 9 Calibration results of external parameters

参数名称	站位 1	站位 2
$\theta_x/(\text{°})$	0.318	0.559
$\theta_y/(\text{°})$	-0.204	0.039
$\theta_z/(\text{°})$	77.423	76.137
T_x/mm	-135.372	1 334.811
T_y/mm	902.468	204.879
T_z/mm	-300.269	-318.482

通过分析得到的内外参标定结果可知,在发射站内参的所有参数中,关于描述偏心及倾斜程度的参数均与理想初值接近,符合发射站的实际情况。外参的各项数值标定结果与提前标定的初值也基本相符。

采用此内外参标定结果,获取 3 个测量点的扫描时间序列,由导光型发射站多站组网定位模型计算其坐标。计算结果如表 10 所示。

表 10 坐标测量结果

Table 10 Results of coordinate measurement (mm)

坐标序号	标准值	实验结果	误差	合成误差
P1	x	-7 437.661	-7 437.314	0.348
	y	-3 068.214	-3 067.978	0.236
	z	1 074.881	1 074.579	-0.302
P2	x	-7 724.598	-7 724.018	0.580
	y	-2 294.611	-2 294.344	0.268
	z	1 024.316	1 024.080	-0.236
P3	x	-7 990.242	-7 990.839	-0.597
	y	-1 388.358	-1 388.505	-0.146
	z	795.214	795.187	-0.027

由测量结果可知,采用本文坐标定位模型计算得到的测量点坐标与标准值之间的最大距离误差为 0.681 mm,满足大型装备制造现场定位需求。

4 结 论

以旋转激光扫描系统中的激光发射基站为研究对象,针对其光源性能受到现有硬件结构限制而制约系统性能提升的问题展开研究。提出了构造精密空间光场的新思路,设计了新型导光型发射站。其新结构将光源外置于发射站,直接通过电源对其进行供电,提高了光源输出功率的稳定性为光源提供更大的空间。同时,新型发射站进行测量时,将激光器连接至光纤即可,便于对光源采取隔离、温控等后续优化措施,以解决系统光源性能问题。针对导光型发射站的特殊结构,为解决传统坐标定位模型不再适用的问题,结合新型发射站几何结构误差分析,构建了多站组网定位模型,并对内外参标定模型做出相应的调整,设计仿真与实验,结合内外参标定与点位测量,坐标测量精度优于 0.7 mm,验证了所提出的针对新设计导光型发射站测量模型的有效性,为新型旋转激光扫描系统后续优化奠定了基础。

目前发射站能够实现亚毫米级的测量精度,精度提升潜力较大。除特殊结构引入的误差之外,扫描光面型误差、转速波动误差等传统误差项仍然存在,后续研究需要进行相关误差补偿,以实现测量精度进一步提升。同时,需要对光源采取温控等措施,以保障扫描激光长期工作的稳定性。此外,目前导光型发射站体积较大,后续需要对内部结构进行优化,以实现轻量化、小型化,适配更多的应用场景。

参考文献

- [1] 谭久彬,蒋庄德,雒建斌,等.高端精密装备精度测量基础理论与方法[J].中国科学基金,2022,36(6): 955-962.
- [2] TAN J B, JIANG ZH D, LUO J B, et al. Accuracy measurement theory and method for high-end precision equipment [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2022, 36(6): 955-962.
- [3] 周亮,王振环,孙东辰,等.现代精密测量技术现状及发展[J].仪器仪表学报,2017,38(8): 1869-1878.
- [4] ZHOU L, WANG ZH H, SUN D CH, et al. Present situation and development of modern precision measurement technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 1869-1878.
- [5] SCHMITT R H, PETEREK M, MORSE E, et al. Advances in large-scale metrology-review and future

- trends [J]. CIRP Annals – Manufacturing Technology , 2016, 65(2) : 643-665.
- [4] WANG Y, ZHOU P, YAO CH W, et al. Development of a novel multi-line laser triangulation scanning system based on the rotary diffraction grating [J]. Measurement , 2024, 225: 113988.
- [5] 葛鹏, 储政勇, 瞿启云, 等. MEMS 激光雷达的光学扩角系统设计 [J]. 中国测试 , 2022, 48(12) : 60-66.
- GE P, CHU ZH Y, QU Q Y, et al. Design of optical angle expansion system for MEMS LIDAR [J]. China Measurement & Test , 2022, 48(12) : 60-66.
- [6] 蔡淑娴, 周芸, 汪晓安. 线阵扫描激光近炸引信炸点优化方法 [J]. 国外电子测量技术 , 2020, 39(2) : 65-70.
- CAI SH X, ZHOU Y, WANG X AN. Optimizing method of explosion point for linear array scanning laser proximity fuse [J]. Foreign Electronic Measurement Technology , 2020, 39(2) : 65-70.
- [7] 王晓, 蒋磊, 葛淑伟, 等. 基于激光扫描的室内定位系统的设计与研究 [J]. 电子测量技术 , 2023, 46(7) : 192-198.
- WANG X, JIANG L, GE SH W, et al. Design and research of indoor positioning system based on laser scanning [J]. Electronic Measurement Technology , 2023, 46(7) : 192-198.
- [8] HAN R, DUNKER T, TROSTMANN E, et al. Research on high-precision tracking and localization of industrial robots based on iGPS [J]. Measurement Science and Technology , 2024, 35(6) : 065006.
- [9] 林嘉睿, 荆伟杰, 任永杰, 等. 基于合作靶标的分布式测量系统定向方法 [J]. 仪器仪表学报 , 2021, 42(11) : 10-16.
- LIN J R, JING W J, REN Y J, et al. Orientation method for distributed measurement system based on cooperative target [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument , 2021, 42(11) : 10-16.
- [10] 贾康, 苏文军, 党锦龙, 等. 一种基于脉冲光时钟同步的自动旋转激光经纬仪系统 [J]. 机械工程学报 , 2023, 59(10) : 1-8.
- JIA K, SU W J, DANG J L, et al. A rotary-laser automatic theodolites system with laser pulse based clock synchronization [J]. Journal of Mechanical Engineering , 2023, 59(10) : 1-8.
- [11] 洪杰, 杨哲夫, 孙博, 等. 局部旋转惯性对转子系统动力特性的影响 [J]. 航空动力学报 , 2022, 37(4) : 673-683.
- HONG J, YANG ZH F, SUN B, et al. Influence of local rotary inertia on the dynamic properties of rotor systems [J]. Journal of Aerospace Power , 2022, 37(4) : 673-683.
- [12] 韩东江. 高速涡轮轴系稳定性分析与实验研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(工程热物理研究所), 2014.
- HAN D J. Stability analysis and experimental investigation on high-speed turbomachinery shafts [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics), 2014.
- [13] 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) : 335-349.
- [14] RAHARDJO I A, MUSLIM S, WADJDI F, et al. Analysis of the impact of distance and temperature in determining transfer power using laser applications [J]. Journal of Physics: Conference Series , 2021, 2111(1) : 012022.
- [15] 张波, 疏许健, 吴理豪, 等. 无线电能传输技术亟待解决的问题及对策 [J]. 电力系统自动化 , 2019, 43(18) : 1-12.
- ZHANG B, SHU X J, WU L H, et al. Problems of wireless power transmission technology urgent to be solved and corresponding countermeasures [J]. Automation of Electric Power Systems , 2019, 43(18) : 1-12.
- [16] 高凌凯, 齐红丽, 王天泽, 等. 一种应用于不同轴径转轴的感应供电平面阵列线圈结构 [J]. 电子测量与仪器学报 , 2020, 34(4) : 65-71.
- GAO J K, QI H L, WANG T Z, et al. Inductive power transfer planar array coil structure applied to shafts of different shaft diameters [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation , 2020, 34(4) : 65-71.
- [17] 苏浩. 面向激光雷达的半导体激光器恒流恒温驱动电路设计 [D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2023.
- SU H. Design of constant current and temperature driving circuit for laser diode laser [D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2023.
- [18] 郭嘉, 贾华宇, 罗彪, 等. 半导体激光器结构设计与波导层的优化 [J]. 激光杂志 , 2024, 45(2) : 29-35.
- GUO J, JIA H Y, LUO B, et al. Structure design of semiconductor laser and optimization of waveguide layer [J]. Laser Journal , 2024, 45(2) : 29-35.
- [19] 张龙, 陈建生, 高静, 等. 大功率半导体激光器驱动电源及温控系统设计 [J]. 红外与激光工程 , 2018,

- 47(10): 102-108.
- ZHANG L, CHEN J SH, GAO J, et al. Design of driving power and temperature control system for high power semiconductor laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 102-108.
- [20] 叶茂, 杜恩斯, 王秋玮, 等. 应用于半导体激光器的高精度温控系统设计[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(4): 75-85.
- YE M, DU EN S, WANG Q W, et al. High-precision temperature control system design for laser diode [J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(4): 75-85.
- [21] 缪存孝, 邢国柱, 刘建丰, 等. 高精度激光器电流驱动与交流温控系统设计[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(9): 97-104.
- MIAO C X, XING G ZH, LIU J F, et al. Design of current drive and alternating current temperature control system for high-precision laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(9): 97-104.
- [22] 郭同闯, 任永杰, 林嘉睿, 等. 旋转激光扫描测量系统同步信号电路延时补偿[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 171-179.
- GUO T CH, REN Y J, LIN J R, et al. Delay compensation for synchronization signal in rotating laser-scanning measurement system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 171-179.
- [23] 郑书彦, 林嘉睿, 滕明鑫, 等. 工作空间测量定位系统参数模型建立方法[J]. 光学学报, 2024, 44(16): 179-188.
- ZHENG SH Y, LIN J R, TENG M X, et al. Method for establishing parameter models in workshop measurement and positioning system [J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(16): 179-188.
- [24] ZHANG ZH Y, SHI SH D, REN Y J, et al. Signal processing method for measurement of sub-period speed fluctuation[J]. Measurement, 2021, 183: 109835.
- [25] 任永杰, 郭威, 吴腾飞, 等. 新型旋转激光扫描系统轴系调整与误差标定[J]. 光学精密工程, 2024, 32(8): 1111-1121.
- REN Y J, GUO W, WU T F, et al. Axis alignment and error analysis of a novel rotating laser-scanning system[J]. Optics and Precision Engineering, 2024, 32(8): 1111-1121.

作者简介



滕明鑫, 2020 年于天津大学获得学士学位, 现为天津大学博士研究生, 主要研究方向为旋转激光扫描系统、大尺寸测量技术。

E-mail: tengmingxin@tju.edu.cn



邾继贵(通信作者), 1997 年于天津大

学获得博士学位, 现为天津大学教授, 主要研究方向为激光及光电测试、大尺寸计量和在线视觉检测技术。

E-mail: jiguizhu@tju.edu.cn

Zhu Jigui (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Tianjin University in 1997. He is currently a professor at Tianjin University. His main research interests include laser and optoelectronic measuring technology, large-scale dimensional metrology, and online vision inspection.