

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.01.12

# 光束入射角对旋转扫描测角精度的影响机理与补偿方法

王一然, 史慎东\*, 赵泽森, 杨蕊琦, 王子博, 郝继贵

(天津大学, 天津 300072)

**摘要:** 旋转激光扫描测角系统接收器姿态变化导致的光束入射角变化会引入系统性测角误差, 影响系统精度与鲁棒性。为解决该问题, 基于光束传播几何关系与接收器结构特性, 建立局部投影模型和高斯光条分布模型, 分析不同入射角条件下的光电响应差异, 结合惯性测量单元提供的姿态信息, 构建接收器坐标系下的有效接收面模型, 提出考虑接收器结构特性的误差补偿方法。仿真结果表明: 随着入射角增加, 接收器的光电响应波形呈现出明显的非对称性, 测角误差可达数十角秒; 本文提出的补偿方法能够有效修正该误差, 使均方根降低约90%。精密转台实验结果表明: 补偿后接收器轨迹的圆度误差由0.81 mm减小至0.17 mm, 验证了补偿模型的有效性。研究成果丰富了旋转激光扫描系统的误差建模理论, 为提升接收器姿态变化条件下的测量精度和稳定性提供了有效途径。

**关键词:** 旋转激光扫描; 光束入射角; 接收器姿态; 局部投影模型; 有效接收面; 测角精度; 误差修正; 补偿模型

中图分类号: TB92; 043

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2026) 01-0169-12

## Influence mechanism of beam incident angle on the angular measurement accuracy in rotational scanning systems and its compensation method

WANG Yiran, SHI Shendong\*, ZHAO Zesen, YANG Ruiqi, WANG Zibo, ZHU Jigui

(Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Changes in the beam incidence angle caused by variations in receiver orientation in a rotating laser scanning angle measurement system can introduce systematic angular measurement errors that affect the system's precision and robustness. To address this issue, a local projection model and a Gaussian light-strip distribution model were established based on beam propagation geometry and receiver structure characteristics, and differences in photoelectric response under different incidence conditions were analyzed. Furthermore, by incorporating attitude information provided by an Inertial Measurement Unit (IMU), an effective receiving surface model was constructed in the receiver coordinate system, and an error compensation method considering receiver structure features was proposed. Simulation results show that as the incidence angle increases, the photoelectric response waveform of the receiver becomes significantly asymmetric, with angular measurement errors reaching several tens of arcseconds. The proposed compensation method effectively

收稿日期: 2025-09-09; 修回日期: 2025-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(52205572, 52127810, 52275539); 天津市科技计划项目(N24ZXZSS00300); 城市轨道交通数字化建设与测评技术国家工程研究中心开放课题基金项目(2025034); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(L2024G011)

引用格式: 王一然, 史慎东, 赵泽森, 等. 光束入射角对旋转扫描测角精度的影响机理与补偿方法[J]. 计测技术, 2026, 46(1): 169-180.

Citation: WANG Y R, SHI S D, ZHAO Z S, et al. Influence mechanism of beam incident angle on the angular measurement accuracy in rotational scanning systems and its compensation method [J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(1): 169-180.



corrected these errors, reducing the root-mean-square (RMS) error by approximately 90%. In precision turntable experiments, the roundness error of the receiver trajectory decreased from 0.81 mm before compensation to 0.17 mm after compensation, confirming the effectiveness of the compensation model. The study enriches the error modeling framework of rotational laser scanning systems, and provides an effective approach to enhance measurement accuracy and robustness under varying receiver attitudes.

**Key words:** rotational laser scanning; beam incidence angle; receiver attitude; local projection model; effective receiving surface; angular measurement accuracy; error correction; compensation model

## 0 引言

在航空航天、轨道交通及大型结构件制造等领域,分段装配作为关键工程环节,对装配精度与效率的要求日益严苛。随着装配对象结构尺寸不断增大,传统整体式加工或检测的手段难以满足现场需求,可移动、分段化的装配工艺逐渐成为主流。在可移动、分段化的装配过程中,装配工具常沿非规则轨迹运动并伴随显著姿态变化,在分段对接和轨迹引导等关键步骤中,系统需要实时、准确获取工具或传感器的空间位姿信息,以保证操作轨迹与目标几何位置高度一致<sup>[1-2]</sup>。因此,发展具备高自由度姿态适应能力的测量系统具有重要意义。

近年来,基于旋转激光扫描的测角系统因其分布式、高精度和高效率的优势,在复杂作业环境下展现出良好的应用前景<sup>[3-6]</sup>。典型的基于旋转激光扫描的测角系统包括wMPS(workshop Measurement Positioning System,车间测量定位系统)和iGPS(Indoor Global Positioning System,室内全球定位系统),这类系统通过多基站旋转激光平面实现大尺寸空间内的精确定位。然而,此类系统的光学路径长、同步依赖性强、环境敏感度高,实际应用中常受到多源误差干扰。针对这一问题,研究者提出了多种补偿与优化方法:GUO S Y等人<sup>[7]</sup>提出基于旋转激光的自补偿机制,通过构造空间构型自调整模型有效修正系统对准误差;ZHANG Z Y等人<sup>[8]</sup>提出子区域校准方法,在局部构建误差分布模型以提升测量精度;DENG R等人<sup>[9]</sup>研究了wMPS系统中空间非连续误差的生成机制,并提出结构识别与分类补偿方案;ZHANG R等人<sup>[10]</sup>针对多测站系统中共模误差扩散问题,提出基于差分信息的坐标系统误差抑制模型。这些研究为旋转激光扫描系统的误

差建模与补偿提供了有益借鉴,但对接收器姿态变化导致的光束入射角误差关注不足。

在多种光电测量仪器(例如激光跟踪仪、电子经纬仪等)中,光束入射角的微小变化会引发显著的系统性误差,且呈现出相似的误差演化机制。范志刚等人<sup>[11]</sup>推导了角锥棱镜在不同方位下的反射能量分布公式,分析结果表明:入射角直接决定反射能量大小。陈浩等人<sup>[12]</sup>进一步推导了角锥合作目标的有效反射面积与激光雷达横截面随光束入射角变化的公式,分析结果显示:接收功率随入射角增大而减小,并在最大允许入射角处发生突变。这些研究揭示了入射角变化对光电响应的影响规律,但主要针对激光测距和反射模型,未涉及旋转扫描测角系统的系统性误差建模。

针对旋转激光扫描测角系统中,接收器姿态变化导致的光束入射角变化引入系统性测角误差的问题,本研究团队构建接收器局部投影模型与光条强度分布模型,分析不同入射角条件下的误差产生机理,结合姿态测量信息,提出系统性补偿方法。开展仿真分析与精密转台实验,验证本文提出的误差补偿方法的有效性,为提升旋转激光扫描测角系统的测量精度提供技术支撑。

## 1 旋转扫描测角模型与光束入射角误差机理

### 1.1 旋转扫描测角原理

旋转激光扫描测角系统一般由激光发射基站、光电接收器、前端信号处理器和终端计算机组成,系统可简化为发射站质点模型。旋转扫描测角模型如图1所示。

建立发射基站坐标系 $O_{ix} - X_{ix}Y_{ix}Z_{ix}$ ,定义旋转轴为 $Z$ 轴,扫描光平面1与旋转轴的交点为坐标原点 $O$ 。以扫描光平面1上过原点且垂直于旋转轴的直线为 $X$ 轴,依据右手定则确定 $Y$ 轴方向,构成笛

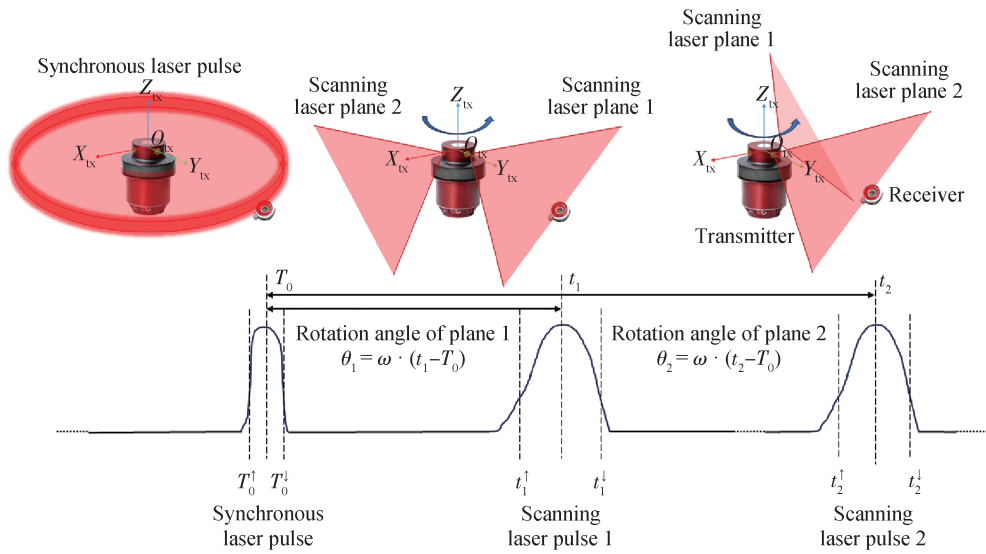


图1 旋转扫描测角模型

Fig.1 Rotating scanning angle measurement model

卡尔坐标系。旋转激光扫描测角过程中，发射基站转台以恒定角速度 $\omega$ 逆时针旋转，连续发射2束旋转扫描激光和1束同步脉冲激光，构建三维测角场。光电接收器通过测量光电脉冲的时域特征，结合发射站旋转的空间特征，实现对信号的时间同步与识别。

为了准确判定脉冲信号的时刻，采用电路比较器对光电模拟信号的上升沿和下降沿进行检测，取上升沿和下降沿触发时刻的中值作为脉冲信号的精确时刻。这种信号判定方法可以在系统工作距离范围内，有效削弱距离变化引起的波形畸变对角度判定的影响。

接收器在 $T_0$ 时刻接收到同步脉冲信号，以该时刻作为初始参考时刻，此时接收器处于位置 $C$ 。在 $t_i(i = 1, 2)$ 时刻，接收器分别接收到第 $i(i = 1, 2)$ 次扫描脉冲信号。旋转角度 $\theta_i$ 计算公式为

$$\theta_i = \omega \cdot (t_i - T_0) \quad (1)$$

激光面结构参数 $(a_i, b_i, c_i, d_i)$ 用于描述发射站坐标系下第 $i$ 个激光平面的空间方程 $a_i x + b_i y + c_i z + d_i = 0$ ，其中， $(a_i, b_i, c_i)$ 为平面法向量的方向余弦分量，反映激光平面的空间姿态； $d_i$ 为平面到发射站原点的有向距离项。根据激光扫描角 $\theta_{1,2}$ ，结合已知的激光面结构参数 $(a_i, b_i, c_i, d_i)$ ，可计算接收器相对原点 $O$ 的方位俯仰角。结合多站角度交会原理，即可进一步实现空间坐标解算<sup>[13]</sup>。

## 1.2 旋转扫描测角系统中的光束入射角模型

### 1.2.1 光束入射角定义

在旋转激光扫描测角系统中，光束入射角为接收器的空间朝向与激光入射方向之间的夹角，它是影响接收信号强度与稳定性的重要参数。wMPS系统中的光束入射角如图2所示。

建立光电接收器坐标系 $O_{rx} - X_{rx} Y_{rx} Z_{rx}$ ，其中， $O_{rx}$ 为接收器中心， $X_{rx}$ 轴为PIN型光电二极管(Positive-Intrinsic-Negative photodiode)接收面法向方向， $Z_{rx}$ 轴为接收器物理结构中预留接线端子指向的方向， $Y_{rx}$ 轴由右手定则确定。

设接收器在发射基站坐标系下的位置向量为 $p_{rx} \in \mathbb{R}^3$ ( $\mathbb{R}^3$ 为三维欧氏空间)，该向量表示接收器坐标系原点相对于发射站原点的位置关系。设接收器法向(即接收器坐标系的 $X_{rx}$ 轴)在发射站系下的单位向量为 $n_{rx} \in \mathbb{R}^3$ ，则从发射站指向接收器的归一化方向向量 $n_{tx}$ 为

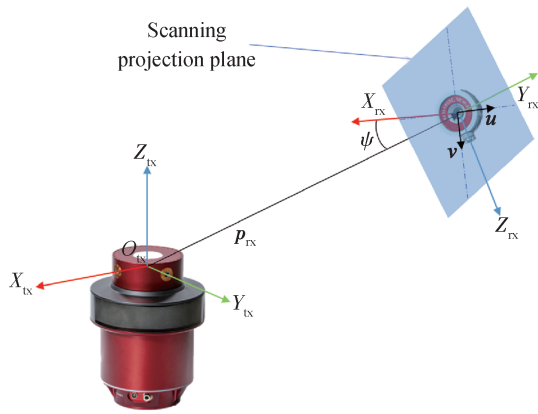
$$n_{tx} = p_{rx} / \|p_{rx}\| \quad (2)$$

定义光束入射角 $\psi$ 为方向向量 $n_{tx}$ 与法向量 $n_{rx}$ 之间的夹角，公式为

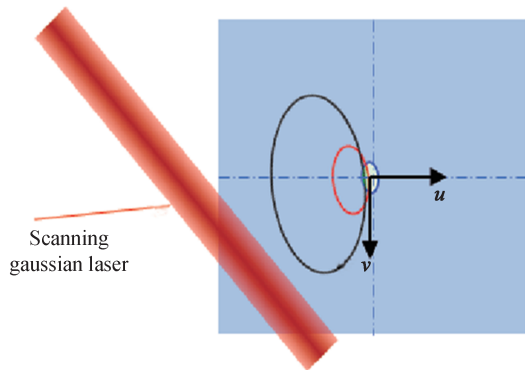
$$\psi = \arccos(n_{tx} \cdot n_{rx}) \quad (3)$$

### 1.2.2 光束入射角误差来源

光电接收器作为wMPS系统的基本单元，提供关键的时间-角度数据源。光束入射角对旋转激光扫描系统的测角精度具有重要影响。目前使用的



(a) 空间几何关系下的光束入射角定义  
(a) Definition of the beam incident angle under spatial geometric relationships



(b) 光束在接收面上的光条投影示意  
(b) Projection of the laser stripe on the receiving surface

图2 wMPS系统中的光束入射角

Fig.2 Definition of beam incident angle in wMPS

光电二极管封装<sup>[14]</sup>结构如图3所示。

由于封装结构的高度远大于光敏单元的高度，在大角度入射的情况下，发射站的扫描光平面无法完全覆盖光电探测器的光敏中心，进而引入测

量误差。具体情况如图4所示。

当扫描光平面以0°的接收角入射PIN管时，扫描光脉冲不受器件封装遮挡，光电响应触发位置位于光敏单元中心，测得的扫描光角度为理想测量值；当扫描光入射PIN管的角度从较小的接收角缓慢变大时，扫描光脉冲会从不受器件封装遮挡变化至受器件封装遮挡，当扫描光脉冲受到遮挡时，扫描光脉宽会不断变窄，脉冲侧沿由于遮挡产生偏移，计算得到的扫描光角度的误差不断变大；当扫描光入射PIN管的角度增大到一定程度时，系统会出现误识别扫描光和同步光信号的现象，此时发射站光信号脉宽识别算法失效，测量已经无法正常进行。

## 2 光束入射角误差效应及其补偿方法

### 2.1 基于光束入射角的接收器响应模型

旋转激光扫描测角过程中，接收器端的光电脉冲信号由其自身结构参数(如PIN单元与光阑孔机械尺寸)与旋转激光平面之间的相对空间位置共同决定。由于扫描光平面在空间中绕发射站轴线固定方向连续旋转，其与接收器结构之间的交互区域呈复杂的空间几何关系，若直接进行三维尺度建模分析，不仅计算量大，且不利于解析描述和误差建模。

针对上述问题，本文引入局部扫描投影模型，以接收器中心为基准，构造一个过该点且平行于PIN单元接收面的投影平面，并在该平面上建立局

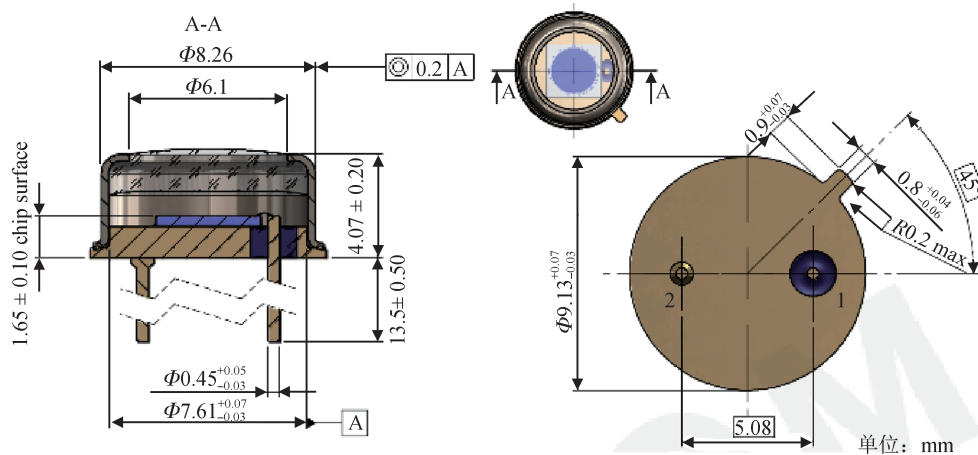


图3 光电二极管封装结构图

Fig.3 Package structure of the photodiode

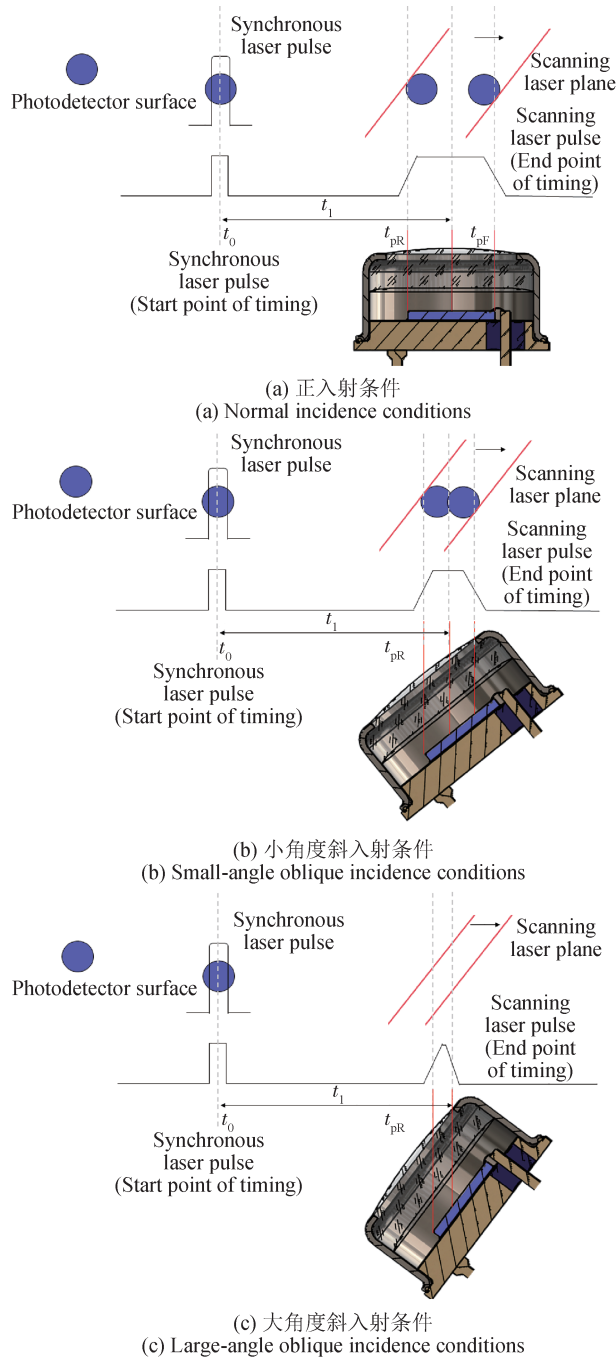


图4 光束入射角误差机理示意图

Fig.4 Schematic diagram of the beam incident angle error mechanism

部直角坐标系。通过将接收器结构参数投影到该平面上，可将空间交互关系简化为二维平面内的几何关系，为后续激光在光敏单元面上的光电转换积分建模与测角误差分析提供直观、可计算的物理建模基础。局部直角坐标系的建立过程如下：

由前文可知，接收器在发射基站坐标系下的

位置向量为  $\mathbf{p}_{rx} = [p_{rx, x}, p_{rx, y}, p_{rx, z}]^T \in \mathbb{R}^3$ ，可以在过接收器坐标系原点、垂直于向量  $\mathbf{p}_{rx}$  方向上构造一个扫描投影面，用于分析扫描光平面与接收器的空间交互关系。为进一步描述接收器上各点在该投影面上的几何分布，在投影面上建立一个局部坐标系  $\{\mathbf{u}, \mathbf{v}\}$ 。设投影平面法向量为单位向量  $\mathbf{n}_{plane} = \mathbf{p}_{rx} / \|\mathbf{p}_{rx}\|$ ，则可按照如下方式构造该平面坐标系：选取一任意不与  $\mathbf{n}_{plane}$  共线的向量  $\mathbf{a}$ ，常取  $\mathbf{a} = [0, 0, 1]^T$ （即发射基站坐标系 Z 轴的单位向量），再由叉乘构造平面内的 2 个正交单位向量，即

$$\mathbf{u} = \frac{\mathbf{n}_{plane} \times \mathbf{a}}{\|\mathbf{n}_{plane} \times \mathbf{a}\|}, \mathbf{v} = \mathbf{u} \times \mathbf{n}_{plane} \quad (4)$$

最终，得到投影平面上的正交基  $\{\mathbf{u}, \mathbf{v}\}$ ，以接收器中心为原点  $O_{plane}$ ，构成扫描投影面坐标系  $\{O_{plane}; \mathbf{u}, \mathbf{v}\}$ ，并构造投影变换矩阵  $T_{proj} = [\mathbf{u}, \mathbf{v}]^T$ ，用于将全局坐标投影到扫描投影面坐标系。

在理想情况下，旋转激光平面与接收器投影面相交形成一条空间直线。已在接收器中心构建的投影面  $\Pi_{plane}$ ，其法向量为  $\mathbf{n}_{plane}$ ，过点  $\mathbf{p}_{rx} = [p_{rx, x}, p_{rx, y}, p_{rx, z}]^T \in \mathbb{R}^3$ 。将旋转激光平面扫描到任意时刻的光平面记为  $\Pi_{scan}(t)$ ，其法向量为  $\mathbf{n}_{scan}(t)$ ，恒过点  $\mathbf{p}_z = [0, 0, d]^T$ ，结合前文的定义，有

$$\mathbf{n}_{scan}(t) = \begin{bmatrix} a \cdot \cos(\omega \cdot t) - b \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ a \cdot \sin(\omega \cdot t) + b \cdot \cos(\omega \cdot t) \\ c \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： $\omega$  为旋转扫描角速度； $t$  为扫描时刻； $a$ 、 $b$ 、 $c$  为平面法向量的方向余弦分量，反映激光平面的空间姿态。

任意时刻下，由 2 个平面的法向量  $\mathbf{n}_{plane}$  与  $\mathbf{n}_{scan}(t)$  可得交线的方向向量为  $\mathbf{v}(t) = \mathbf{n}_{plane} \times \mathbf{n}_{scan}(t)$ ，结合 2 平面的点法式表达，并引入额外约束（如固定  $z$  坐标为  $p_{rx, z}$ ）可解析求得交点  $\mathbf{p}_0$ ，进而得到交线的参数表达形式，即

$$\mathbf{r}(s, t) = \mathbf{p}_0 + s \cdot \mathbf{v}(t), \quad s \in \mathbb{R} \quad (6)$$

式中： $\mathbf{r}(s, t)$  为交线的参数方程， $\mathbf{p}_0$  为交线上的参考点， $s$  为参数， $\mathbf{v}(t)$  为交线的方向向量。

旋转激光扫描测角系统中，扫描激光平面的旋转半径可达数米甚至数十米，而接收器的物理尺寸通常为厘米级。由于这一显著的尺度差异，

接收器在整个扫描空间中可被视为一个局部微元区域。在此前提下, 尽管激光平面在空间中不断旋转, 接收器附近的光面的法向量在短时间和局部范围内变化缓慢, 空间行为近似线性, 故可将旋转激光平面与接收器局部投影面之间的交线视为激光扫描行为在局部坐标系中的代表性表达。将此空间直线投影到局部坐标系中, 作为扫描光条二维模型的中心线, 该中心线在局部坐标系中表示了扫描光条的空间分布方向, 即

$$\mathbf{r}_{\text{local}}(s, t) = \mathbf{T}_{\text{proj}} \cdot \mathbf{r}(s, t), \quad s \in \mathbb{R} \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{r}_{\text{local}}(s, t)$  为中心线的参数方程,  $\mathbf{T}_{\text{proj}}$  为投影变换矩阵,  $\mathbf{r}(s, t)$  为交线的参数方程。

在旋转激光扫描测量系统中, 扫描激光平面通常为经过柱面扩束的线激光。激光束在空间中传播至接收面, 在此过程中, 受限于光源的发散角与扩束系统的出射角, 在接收面上形成1个具有有限宽度与长度的光条区域。设激光在空气中的传播距离为  $L$ , 在发散方向(记作  $x$  轴)上的张角为  $\theta$ , 扩束方向(记作  $y$  轴)上的角度为  $\theta_{\text{long}}$ , 则可估算光条在接收面上的尺寸。

发散方向上, 激光在传播过程中形成高斯分布, 其接收面上高斯光条的半宽度  $w$  可由发散角和传播距离估算, 如式(8)所示, 反映了发散角越大或传播距离越远, 光条越宽的物理趋势。

$$w = L \cdot \tan \frac{\theta}{2} \quad (8)$$

而在扩束方向, 由于系统本身存在有限的出射角度, 远距离下会形成长度有限的线条, 其长度  $l$  估算如式(9)所示, 表明该方向的空间覆盖范围同样由扩束角与传播距离决定。

$$l = 2L \cdot \tan \frac{\theta_{\text{long}}}{2} \quad (9)$$

半导体激光器的典型输出功率范围<sup>[15]</sup>为1~100 mW, 若激光器的输出功率设为  $P_0$ , 且光条在扩束方向的能量近似均匀分布, 在发散方向呈高斯分布, 远场接收面上的二维光强分布  $I(x, y)$  可近似表示为发散方向的一维高斯函数与扩束方向上的矩形分布的乘积, 即

$$I(x, y) = I_0 \cdot \exp \frac{-x^2}{2\sigma^2}, \quad |y| \leq \frac{l}{2} \quad (10)$$

式中:  $I_0$  为沿  $x$  轴高斯分布的中心峰值光强;  $\sigma$  为

对应的标准差,  $\sigma \approx w/3$ 。

根据功率守恒, 接受面上总光强积分应满足

$$\int_{-l/2}^{l/2} \int_{-\infty}^{\infty} I_0 \cdot \exp \frac{-x^2}{2\sigma^2} dx dy = P_0 \quad (11)$$

可得

$$I_0 = \frac{3P_0}{\sqrt{2\pi} wl} \quad (12)$$

接收器处构造的扫描投影面与线激光形成的光面垂直, 故可将接收器在扫描投影面的光强分布视为线激光在该截面上的投影。结合光条中心线在扫描投影面上的轨迹方程, 可进一步表征接收器局部区域内任意时刻下的光强分布, 从而实现了对实际扫描过程的近似建模。

在建立光束与接收器交互模型的过程中, 需要进一步刻画接收器内部的结构限制条件, 主要包括光阑面(Aperture Plane)与感光面(PIN Plane)的空间分布关系。

在光电接收器坐标系  $O_{rx} - X_{rx} Y_{rx} Z_{rx}$  中, PIN面  $C_{\text{PIN}}$  为感光组件的安装面, 定义为以原点为圆心、垂直于  $X$  轴、半径为  $R_{\text{PIN}}$  的圆面, 可表示为

$$C_{\text{PIN}} = \{p \in \mathbb{R}^3 \mid x = 0, y^2 + z^2 \leq R_{\text{PIN}}^2\} \quad (13)$$

式中:  $p$  为光电接收器坐标系下的空间点坐标。

光阑面  $C_{\text{Aper}}$  为限制进入 PIN 面光束范围的物理开口, 其定义为平行于  $YOZ$  面、圆心在  $X$  轴上、半径为  $R_{\text{Aper}}$  的圆面, 可表示为

$$C_{\text{Aper}} = \{p \in \mathbb{R}^3 \mid x = d_{\text{Aper}}, y^2 + z^2 \leq R_{\text{Aper}}^2\} \quad (14)$$

式中:  $d_{\text{Aper}}$  为光阑面在  $X$  轴方向上的位置参数。

上述2个圆面构成了激光信号入射到接收器的空间约束, 只有通过光阑并最终落在 PIN 面内的光强部分, 才可能对接收器产生响应。为了评估接收器对扫描光条的响应, 需要将光阑面与 PIN 面这2个圆面投影到扫描投影面上。通过投影变换矩阵  $\mathbf{T}_{\text{proj}}$ , 可得到2个圆面在扫描投影面上的椭圆形投影区域, 记为  $\Omega_{\text{Aper}}$  与  $\Omega_{\text{PIN}}$ , 它们的交集区域  $\Omega_{\text{eff}}$  构成了激光信号在空间传播后受接收器结构约束所形成的有效接收区域。在该区域中, 前述二维光条分布模型  $I(x, y)$  的坐标轴定义沿光条分布方向, 需要统一到  $\mathbf{r}_{\text{local}}(s, t)$  所在的局部投影平面坐标系下。设  $\mathbf{r}_{\text{local}}(s, t) = \mathbf{r}_0 + s \cdot \mathbf{v}_{\text{local}}(s, t)$ ,  $s \in \mathbb{R}$ , 其中,  $\mathbf{r}_0$  为该区域中的一个参考点,  $\mathbf{r}_0 = [x_0, y_0]^T$ 。

中心线沿方向向量  $\hat{v}_{local} = [v_x, v_y]^T$  通过  $r_0$ , 则局部平面坐标系上任一点  $r = [x, y]^T$  到中心线的距离为

$$d(x, y) = \|(r - r_0) - [(r - r_0) \cdot \hat{v}_{local}] \cdot \hat{v}_{local}\| \quad (15)$$

在局部扫描投影坐标系下, 二维光条的光强分布为

$$I(x, y) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{d(x, y)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (16)$$

在有效接收区域中, 可通过面积积分计算光条在单位时间内作用于 PIN 面上的总光功率  $P_{eff}$ , 公式为

$$P_{eff} = \iint_{\Omega_{eff}} I(x, y) dx dy \quad (17)$$

该积分结果不仅与激光器本身的发散特性与功率有关, 也受接收器姿态、距离和内部结构(光阑/PIN 尺寸与位置)的共同影响, 反映了扫描激光在接收器局部区域内的非均匀能量分布。

## 2.2 由光束入射角引起的系统性测角误差补偿方法

在旋转激光扫描测角系统中, 光束入射角由发射基站指向接收器的方向与接收器姿态共同决定。入射角的变化将显著影响接收器对扫描光脉冲的响应, 从而引入系统性的测角误差。该误差主要源于接收器内部结构(如光阑面与 PIN 面)与扫描激光束之间的空间相对关系偏移。为修正该误差, 本研究团队提出了补偿算法。该补偿算法主要依赖接收器位姿估计值与接收器结构参数计算, 计算量较小, 可在典型旋转激光扫描测角系统的采样周期内实时完成, 满足工程实时性要求。在多接收器协同测量场景下, 各接收器的补偿计算在其局部交会构型内独立进行, 误差不会在接收器间累积传播。补偿算法流程如图 5 所示。

### 1) 获取接收器姿态测量值

在某次测量中, 接收器的姿态可由惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)提供, 通常以方向余弦矩阵  $R_{recv}^{ECL}$  表示, 描述接收器坐标系相对于地理坐标系的方向关系。为实现不同参考系下的统一建模, 在建模初期通过外部设备(如高精度全球导航卫星系统、电子罗盘等)将全局坐标系对准地理坐标系, 使得 IMU 所测姿态亦可视为在全局坐标系下的表达。

### 2) 计算全局坐标系下的接收器姿态

通过外参标定获取发射基站坐标系与全局坐

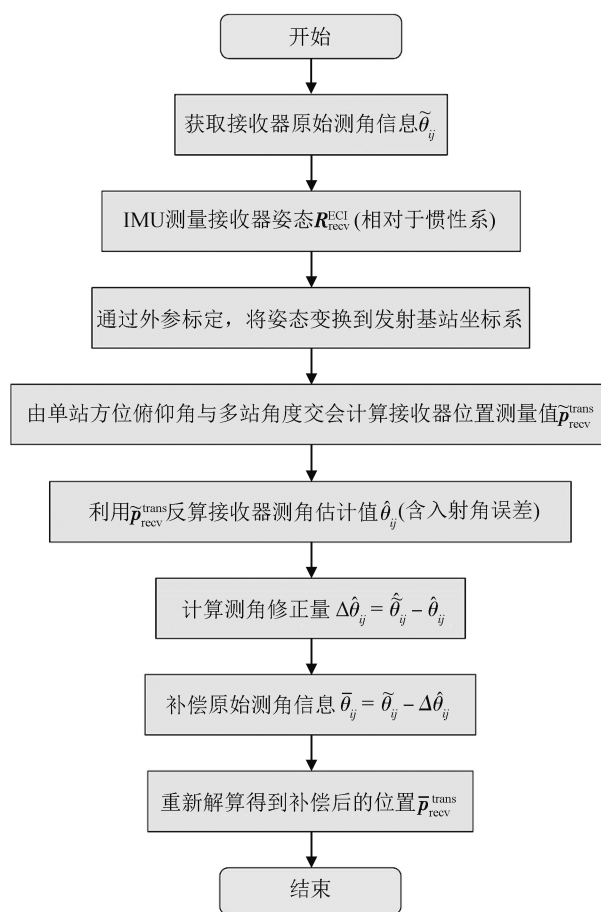


图 5 补偿算法流程图

Fig.5 Flowchart of the compensation algorithm

标系之间的刚体变换关系(包含旋转和平移), 据此可将接收器在全局坐标系下的姿态  $R_{recv}^{global}$  变换至发射基站坐标系下, 从而获得接收器坐标系相对于发射基站坐标系在姿态上的方向变换关系  $R_{recv}^{trans}$ 。

### 3) 获取接收器位置测量值

采用  $\tilde{\theta}_{ij}$  表示接收器第  $i$  个发射基站发射的第  $j$  个扫描光平面对应的原始测角信息, 采用  $\tilde{R}_{recv}^{trans}$  表示由 IMU 得到的接收器相对于发射基站坐标系的姿态测量值。根据单站方位俯仰角和多站角度交会原理可实现空间坐标解算, 由接收器原始测角信息  $\tilde{\theta}_{ij}$  计算得到接收器在发射基站坐标系下的位置测量值  $\tilde{p}_{recv}^{trans}$ 。

### 4) 计算测角估计量

使用接收器位置测量值  $\tilde{p}_{recv}^{trans}$  反算出接收器的测角估计值  $\hat{\theta}_{ij}$ , 再根据  $\tilde{p}_{recv}^{trans}$ 、 $\tilde{R}_{recv}^{trans}$ 、对应的光平面参数, 反算出含有光束入射角误差的接收器测角估

计值 $\hat{\theta}_{ij}$ 。则测角修正量 $\Delta\hat{\theta}_{ij}$ 为

$$\Delta\hat{\theta}_{ij} = \hat{\theta}_{ij} - \tilde{\theta}_{ij} \quad (18)$$

为了降低先验位置 $\tilde{p}_{\text{recv}}^{\text{trans}}$ 中误差分量的影响,可以使用 $\tilde{p}_{\text{recv}}^{\text{trans}}$ 计算测角修正量,原因是光束入射角误差主要与接收器相对于发射站的方向有关,位置对该误差的影响较小。

### 5) 计算测角修正值

为去除由光束入射方向引起的测角偏差,对接收器原始测角信息 $\tilde{\theta}_{ij}$ 进行补偿,公式为

$$\bar{\theta}_{ij} = \tilde{\theta}_{ij} - \Delta\hat{\theta}_{ij} \quad (19)$$

式中: $\bar{\theta}_{ij}$ 为接收器测角补偿值。

### 6) 计算接收器位置修正值

根据接收器测角补偿值 $\bar{\theta}_{ij}$ ,计算得到接收器的位置修正值 $\bar{p}_{\text{recv}}^{\text{trans}}$ 。

## 3 仿真与实验验证

### 3.1 光束入射角对扫描测角影响的仿真

为定量分析光束入射角对扫描测角结果的影响,基于2.1节建立的局部扫描投影面感光模型开展数值仿真研究。保持发射站位置、扫描光平面几何参数与接收器结构参数不变,仅改变接收器绕自身Z轴的旋转角度 $\theta_z$ ,从而改变光束相对于接收面的入射角。仿真主要参数设定如表1所示。

需要指出的是,仿真中接收器仅绕Z轴转动,旋转角范围 $[-150^\circ, -30^\circ]$ ,每旋转 $5^\circ$ 进行1次仿真,以接收器正对发射基站的姿态作为光束入射角为 $0^\circ$ 对应的姿态,即仿真的光束入射角范围为 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 。仿真结果如图6所示。

仿真结果表明:光束入射角的变化显著影响着接收器对扫描光条的响应波形,主要体现在积分峰值功率与脉冲宽度2方面。值得注意的是,响应波形的变化直接影响测角结果。由于扫描系统通常采用上升沿与下降沿中值法提取扫描脉冲,响应波形的不对称将导致提取的脉冲信号中心系

统性偏移,进而引入测角误差。

当 $\psi < 10^\circ$ 时,接收器响应稳定,积分脉冲波形对称,峰值功率保持在最大值的95%以上,脉冲触发中值稳定,系统处于最优测量状态。

当 $10^\circ \leq \psi \leq 45^\circ$ 时,接收区域与扫描光条的重合度下降,导致峰值功率和脉宽均呈线性下降趋势。入射角每增加 $10^\circ$ ,积分功率下降约7%~9%,脉宽缩短10%~15%。受遮挡与能量分布不均的影响,扫描脉冲形态逐渐失衡,导致触发中值发生可观偏移,测角误差快速增大。当 $\psi = 40^\circ$ 时,测角偏差 $\Delta\theta = 3.5''$ ;当 $\psi = 45^\circ$ 时, $\Delta\theta = 8.5''$ 。

当 $\psi > 45^\circ$ 时,接收器响应性能显著退化。此时波形严重畸变,峰值功率降至不足50%,脉宽压缩至原始值的30%~40%,部分信号已接近系统触发识别阈值,测角稳定性显著下降。当 $\psi = 50^\circ$ 时, $\Delta\theta$ 已达 $15''$ 。当光束入射角继续增大,部分信号脉宽接近系统识别阈值,存在同步光与扫描光误判风险,且光电接收器逼近失效区域。

### 3.2 光束入射角引起的系统性测角误差补偿实验

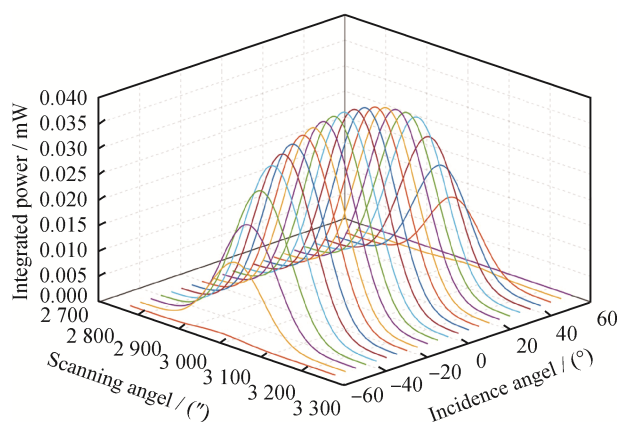
前文的理论分析与仿真结果表明:光束入射角的变化会引入可预测的系统性测角误差,并可通过所建立的误差模型加以补偿。为进一步验证该模型的正确性及实用性,本文开展了基于精密转台的实验研究。实验的重点在于比较未经补偿与经过补偿的测量结果,评估补偿算法对圆度误差的改善程度。误差补偿实验装置及验证平台如图7所示,实验主要参数如表2所示。

为控制接收器安装偏心误差,并保证旋转轴与接收器敏感面尽量对齐,通过专用光学夹具固定接收器,IMU与光学转换件通过刚性结构连接。为保证姿态测量的一致性,获取接收器姿态的IMU传感器在实验前完成标定,可视为与接收器刚性结构连接,能够提供可靠的姿态信息。该标定过程通过摄影测量系统或三坐标测量仪完成,获得IMU系与接收器系之间高精度的相对关系。

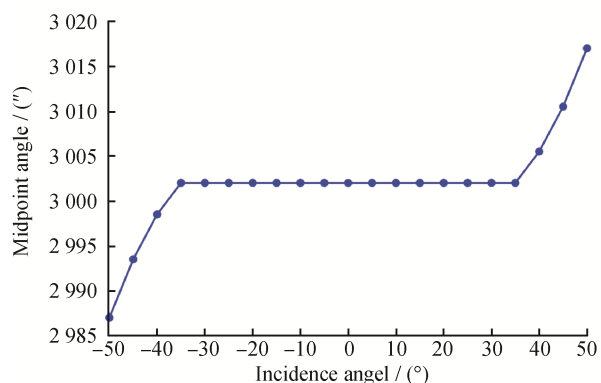
表1 仿真主要参数

Tab.1 Simulation parameters

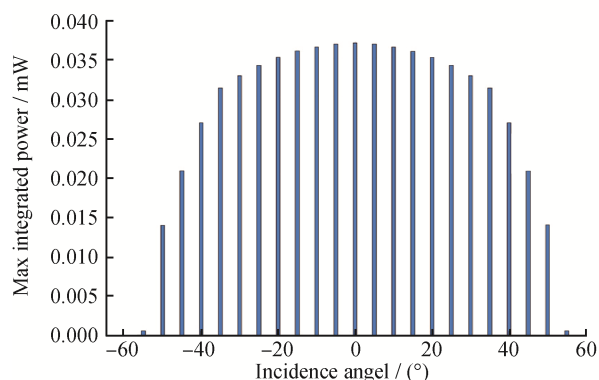
| 发射站位置/mm  | 发射站姿态/rad | 光平面参数   | 接收器位置/mm      |
|-----------|-----------|---|---------------|
| [0, 0, 0] | [0, 0, 0] | [0.654 700, 0.009 289, -0.755 832, 1.203 582] | [0, 5 000, 0] |



(a) 不同入射条件下扫描过程的功率变化  
(a) Power variation during scanning under different incidence conditions



(b) 阈值中点随光束入射角变化  
(b) Variation of threshold midpoint with beam incidence angle



(c) 峰值功率随光束入射角变化  
(c) Variation of peak power with beam incidence angle

图6 仿真结果  
Fig.6 Simulation results

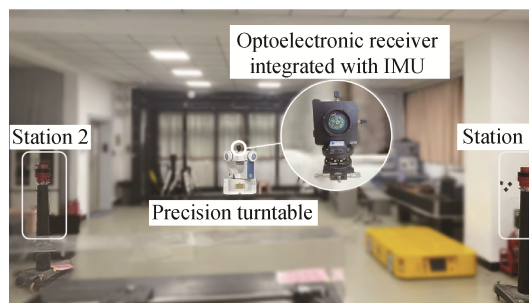


图7 误差补偿实验装置及验证平台  
Fig.7 Experimental setup and verification platform for error compensation

使用基准尺法完成测量场空间几何标定。将接收器固定在高精度转台上，通过精确改变转台角度，使接收器中心在空间中描绘出标准圆轨迹，其位姿随角度变化不断调整。接收器敏感面的方向与入射光束之间的夹角也随之改变，从而实现对光束入射角的可控调节。扫描角测量值如图8所示，接收器位姿在全局坐标系下的测量结果如图9所示。

为建立误差分析的参考基准，本研究团队对接收器的空间分布点位进行圆拟合。拟合所使用的数据点限定在光束入射角较小( $< 30^\circ$ )的区域内，该区域内接收器响应稳定、入射角误差对测角结果影响可忽略，因此其圆拟合结果可视为系统理想几何关系的参考基准，用于后续补偿效果评估。通过最小二乘拟合得到的空间圆参数为

$$\begin{aligned} C &= (-49.877 \text{ mm}, -2\,764.833 \text{ mm}, 314.268 \text{ mm}) \\ n &= (-0.010\,6, 0.004\,8, -0.999\,9) \\ R &= 370.63 \text{ mm} \end{aligned} \quad (20)$$

式中： $C$ 为圆心在全局坐标系下的位置， $n$ 为圆所在平面的单位法向量， $R$ 为圆半径。法向量结果表明：该圆所在平面近似垂直于全局 $Z$ 轴，该拟合圆被作为后续圆度误差补偿分析的参考基准。

根据上述接收器位姿测量结果与标定得到的

表2 实验主要参数

Tab.2 Main parameters of the experiment

| 发射站  | 位置/mm                              | 姿态/rad                            | 内参  |
|------|------------------------------------|-----------------------------------|---|
| 发射站1 | [-1 166.189, -5 535.732, -287.681] | [0.000 000, 0.000 000, 0.000 000] | [0.000 000, 0.674 932, -0.737 880, 0.000 000; 0.731 707, 0.006 444, -0.681 589, -0.593 092] |
| 发射站2 | [6.471, -5 241.87, -335.257]       | [6.471, -5 241.87, -335.257]      | [0.000 000, -0.642 867, 0.765 978, 0.000 000; 0.734 414, 0.007 778, -0.678 657, 0.117 146]  |

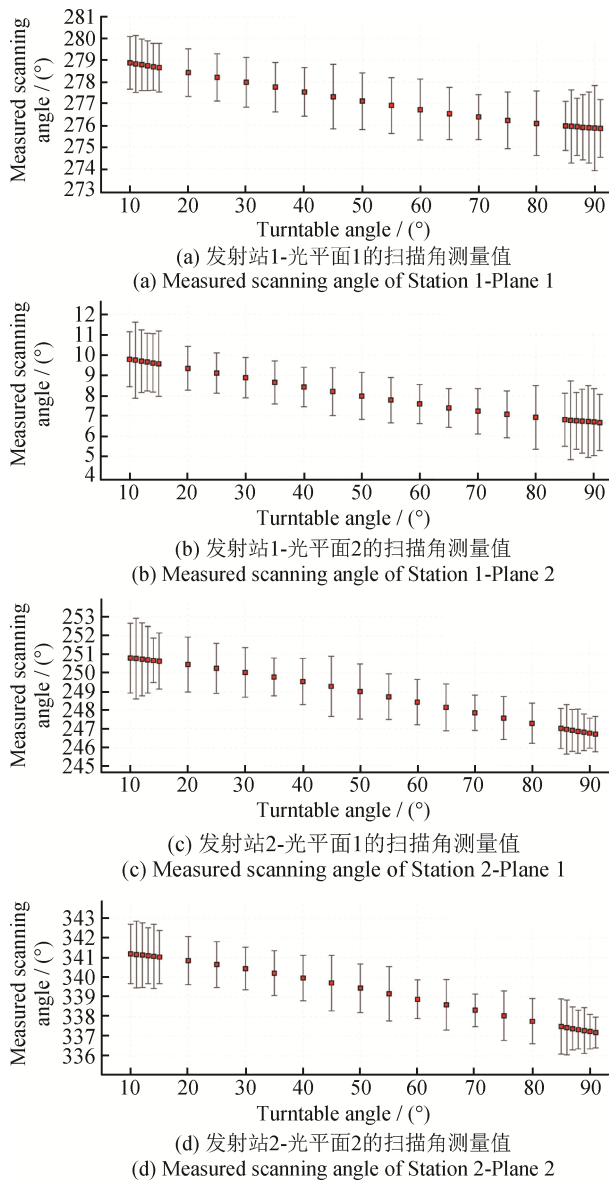


图8 扫描角测量值

Fig.8 Measured scanning angle

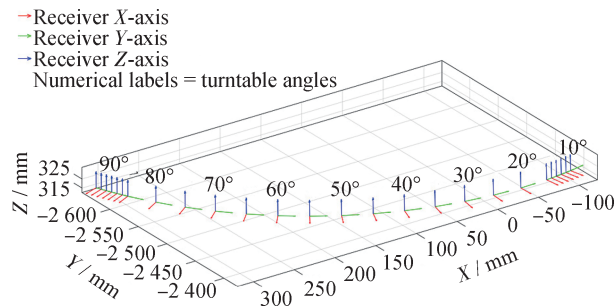


图9 接收器位姿在全局坐标系下的测量结果

Fig.9 Measurement results of receiver pose in the global coordinate system

发射站参数,按照2.2节中的补偿方法,计算得到扫描角补偿值,如图10所示,其中,深色背景区域内的点用于拟合参考圆。2个发射站的扫描角补偿值分别在 $20^\circ$ 与 $80^\circ$ 时发生突变,说明此时接收器开始出现倾斜入射效应。随着转台角度变化,扫描角补偿值不断增大,扫描光平面的倾斜入射效应逐渐显著,测角误差不断累积,直至脉宽匹配算法失效。值得注意的是,发射站2的光平面1未出现明显的倾斜入射特征,这表明光束入射角由激光平面与接收器之间的空间几何关系共同决定,而非单一发射通道特性。

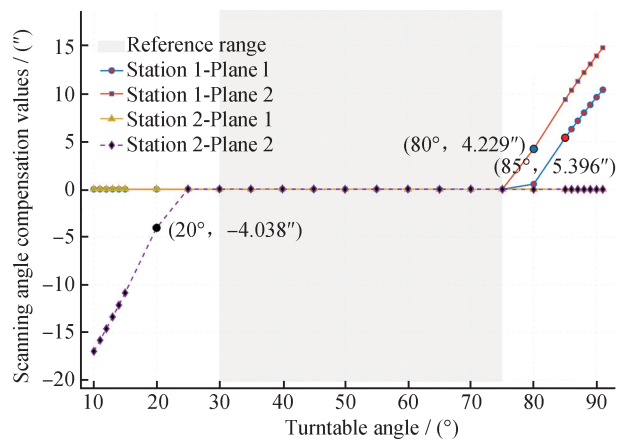


图10 扫描角补偿值

Fig.10 Scanning angle compensation values

根据补偿后的扫描角值解算接收器位置,并将补偿前后得到的2组接收器位置结果分别与参考圆数据进行对比。误差补偿实验结果如图11所示,其中,深色背景区域内的点用于拟合参考圆。

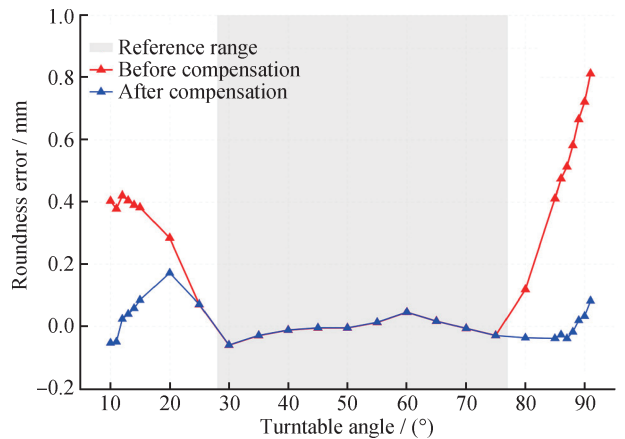


图11 误差补偿实验结果

Fig.11 Results of error compensation experiment

补偿前接收器位置相对于参考圆的圆度误差在不同转台角度下分布不均,最大误差接近0.81 mm,且转台角度靠近 $10^\circ$ 和 $90^\circ$ 时误差明显增大。这表明光束入射角对圆度误差有显著影响。

在应用本文提出的补偿方法后,圆度误差整体水平显著降低。补偿后误差主要分布在 $-0.1 \sim 0.1$  mm,仅在个别点位达到约0.17 mm,相比补偿前大幅减小。在两端角度处的较大误差被有效补偿,整体误差曲线趋于平滑。

从统计结果来看,补偿前圆度误差在 $-0.06 \sim 0.81$  mm波动,均方根接近0.40 mm;而补偿后误差区间收敛为 $-0.05 \sim 0.17$  mm,均方根降低至约0.04 mm,补偿后均方根相较补偿前降低了约90%,补偿效果显著,验证了本文提出的补偿方法的有效性和可行性。

#### 4 结论

针对旋转扫描测角系统中光束入射角引入测角误差的问题,建立了系统性误差模型,提出了基于接收器姿态建模与有效接收面的补偿方法,并通过仿真与实验进行了验证。研究表明:光束入射角的变化会导致测角结果出现系统性偏差,当入射角变化范围为 $0^\circ \sim 35^\circ$ 时,系统性偏差较小,可视为无需补偿;当入射角变化范围为 $35^\circ \sim 50^\circ$ 时,偏差显著增大,可通过本文提出的补偿算法进行修正,补偿后测量数据与参考圆的拟合圆度误差显著降低,均方根下降约90%,充分验证了本文提出的补偿算法的有效性;当入射角超过 $50^\circ$ 时,接收器接近失效区域,测角结果已不具备可靠性。

本研究完善了旋转扫描测角系统的误差机理模型,并提出了具有可行性的误差补偿策略,为提高测量精度提供了有力支撑。所提出的补偿方法适用于光束入射角变化较大的测量场景,如大型工件位姿测量和受限空间下的测量应用。在受限空间条件下,测量交会构型受限,往往无法在光束入射角的无偏区域内完成观测,导致系统性误差显著增大。此时,可利用本文提出的补偿算法降低入射角误差对测角结果的影响,在受限构型条件下仍保持较高的测量精度。后续将进一步提升该方法在大角速

度、高加速度等动态环境下的应用效果,针对接收器位姿动态误差引起的补偿精度下降问题,研究动态误差建模与实时补偿策略,以提升系统在实际应用中的鲁棒性与通用性。

#### 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] 赵子越,甘晓川,马骊群. 数字化大尺寸测量系统的应用发展及若干问题综述[J]. 测控技术, 2018, 37(B09): 188-191.  
ZHAO Z Y, GAN X C, MA L Q. Discussion on application and development of digital large-scale measurement [J]. Measurement & Control Technology, 2018, 37(B09): 188-191. (in Chinese)
- [3] LIU Z X, ZHU J G, YANG L H, et al. A single-station multi-tasking 3D coordinate measurement method for large-scale metrology based on rotary-laser scanning [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(10): 105004.
- [4] HUANG Z, ZHU J G, YANG L H, et al. Accurate 3-D position and orientation method for indoor mobile robot navigation based on photoelectric scanning [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(9): 2518-2529.
- [5] SHI S D, YANG L H, LIN J R, et al. Omnidirectional angle constraint based dynamic six-degree-of-freedom measurement for spacecraft rendezvous and docking simulation [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(4): 045005.
- [6] 端木琼,杨学友,郝继贵,等. 基于光电扫描的三维坐标测量系统[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 2014-2019.  
DUAN M Q, YANG X Y, ZHU J G, et al. 3D coordinate measurement system based on optoelectronic scanning [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(10): 2014-2019. (in Chinese)
- [7] GUO S Y, LIN J R, REN Y J, et al. Application of a self-compensation mechanism to a rotary-laser scanning mea-

- surement system [J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(11): 115007.
- [8] ZHANG Z Y, REN Y J, YANG L H, et al. A sub-regional calibration method that can accomplish error compensation for photoelectric scanning measurement network [J]. Sensors, 2019, 19(9): 2117.
- [9] DENG R, SHI S D, YANG L H, et al. The generation mechanism and identification of spatially non-continuous error in integral multi-station measurement systems [J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(8): 085007.
- [10] ZHANG R, LIN J R, SHI S D, et al. Differential information-based distributed coordinate measurement system common-mode error mitigation method [J]. Measurement, 2025, 253: 117432.
- [11] 范志刚, 张伟, 李世光, 等. 角锥棱镜不同方位反射光束的能量分布 [J]. 航空计测技术, 1995, 15(4): 8-12.
- FAN Z G, ZHANG W, LI S G, et al. Distribution of reflecting energy varying with different position of cube-corner prism [J]. Aviation Metrology & Measurement Technology, 1995, 15(4): 8-12. (in Chinese)
- [12] 陈浩, 谭久彬. 光束入射角对角锥合作目标激光测距的影响 [J]. 光电子·激光, 2006, 17(8): 986-988.
- CHEN H, TAN J B. Effect of beam incident angles on trihedral corner reflector laser ranging [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2006, 17(8): 986-988. (in Chinese)
- [13] 刘哲旭. 面向大型复杂现场的测量定位方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- LIU Z X. Research on measurement and positioning method in large complex field [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [14] First Sensor AG. PIN photodiode data sheet: PC10\_6 TO [Z]. Berlin: First Sensor AG, 2018.
- [15] 王鹏, 付鲁华, 孙长库. 激光测量技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- WANG P, FU L H, SUN C K. Laser measurement technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2020. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨 刘宇轩)



**第一作者:** 王一然(2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光及光电测试技术。2023年获天津大学学士学位, 硕士研究生期间主要从事旋转激光扫描测角系统误差建模与补偿研究。



**通信作者:** 史慎东(1993—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为大尺寸精密测量。担任精密测试技术及仪器国家重点实验室主任助理, 入选中国科协青年人才托举工程、天津大学科技创新领军人才培养计划。发表论文30余篇, 获得中国仪器仪表学会技术发明一等奖、中国计量测试学会科技进步一等奖。



**作者简介:** 郝继贵(1970—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为激光及光电测试技术。精密测试技术及仪器国家重点实验室主任, 天津大学精密仪器与光电工程学院院长, 获国家技术发明二等奖、教育部技术发明一等奖、天津市科技进步特等奖等奖励。