

文章编号 1004-924X(2026)10-1516-10

## 高精度差动对准动态测角瞄准误差抑制技术

梁宇环, 吴中怀, 汝洪武, 王允\*, 邱丽荣, 赵维谦  
(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

**摘要:** 高精度瞄准是测角的基准, 决定了测角的精度, 在精密测量领域中具有重要作用, 针对瞄准过程中由于光斑畸变造成峰值光强点与能量质心分离影响瞄准精度的问题, 提出一种高精度差动对准动态测角瞄准误差抑制技术。通过在探测器前加入双狭缝光阑对光斑进行整形滤波并获取双路光强信号, 两路信号进行差分运算实现误差分离与信号补偿, 根据差动对准光强响应曲线过零点的高灵敏性得到精确的光斑定位, 消除光斑畸变对瞄准精度的影响。理论分析与初步实验结果表明: 该技术可以有效抑制由于光斑畸变引起的瞄准误差, 瞄准重复性可达  $0.03''$ , 测角精度达到  $0.1''$ 。与现有质心定位技术相比, 该技术的瞄准重复性好、测角精度高, 为高精度的动态激光测角系统提供了一种实用的技术方案。

**关键词:** 角度测量; 四象限探测器; 瞄准误差; 差动对准; 动态测角

**中图分类号:** TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A

**doi:** 10.37188/OPE.20263410.1516 **CSTR:** 32169.14.OPE.20263410.1516

## High-precision aiming error suppression technique for dynamic angle measurement based on differential alignment

LIANG Yuhuan, WU Zhonghuai, RU Hongwu, WANG Yun\*, QIU Lirong, ZHAO Weiqian

(School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

\* Corresponding author, E-mail: alotrabbits@163.com

**Abstract:** High-precision aiming is the benchmark for angle measurement. It directly dictates the final measurement accuracy and is crucial in the precision measurement field. Dynamic aiming processes often suffer from optical spot distortion. This distortion separates the peak light intensity and energy centroid. Such spatial separation severely compromises overall aiming accuracy. We proposed an error suppression technique. It targeted high-precision dynamic laser angle measurement systems. Our method was based on differential alignment principles. A double-slit aperture was placed before the quadrant photodetector. The optical spot was systematically shaped and filtered. This setup acquired dual-channel light intensity signals. A differential operation processed these two distinct signals. This calculation achieved spatial error separation. It also provided dynamic optical signal compensation. The differential alignment curve featured a specific light intensity response. The zero-crossing point on this curve was highly sensitive. We utilized this extreme sensitivity for precise spot positioning. This mechanism fully eliminated the impact of optical spot distortion. Consequently, dynamic aiming accuracy remained completely unaffected. We conducted theoretical analysis and preliminary experimental verification. Tests utilized a standard prism on an

收稿日期: 2026-04-08; 修订日期: 2026-04-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 52575609); 北京理工大学科技创新计划项目 (No. 2023CX01006)

air-bearing rotary system. Results prove this technique suppresses distortion-induced aiming errors. The optimized system achieves an aiming repeatability of  $0.03''$ . The angle measurement accuracy reliably reaches  $0.1''$ . We compared this approach with existing centroid location techniques. The proposed method offers superior aiming repeatability. It also guarantees higher angle measurement accuracy. This research provides a practical technical solution ideal for dynamic laser angle measurement applications.

**Key words:** angular measurement; Quadrant Photodetector (QPD); aiming error; differential alignment; dynamic laser goniometer

## 1 引言

随着高端装备制造<sup>[1]</sup>、航空航天<sup>[2]</sup>、极紫外光刻<sup>[3]</sup>等领域的飞速发展,现代工业对角度的高精度测量需求日益迫切<sup>[4]</sup>,角度测量也逐渐从传统的静态标定向动态实时测量发展。然而,现有的角度测量方法难以同时满足动态和高精度的测角需求,制约了测角仪在超精密仪器仪表中的应用。

基于光学原理的动态测角仪,以其超高分辨率<sup>[5]</sup>、响应速度快<sup>[6]</sup>、环境抗干扰<sup>[7]</sup>等优势,已成为实现精密测角的核心技术手段之一。经典光学方法主要包括激光干涉法<sup>[8]</sup>、内反射小角度法和自准直法<sup>[9]</sup>等,其中自准直方法不需要对样品表面固定反射角锥,也不受样品表面反射率影响,为目前国际计量领域中对于小角度测量或者精确对准的标准方法。基于光学原理的测角方法对光电探测器的灵敏性及响应速度都有着极高的要求,一般有以下几种测量方式:基于电荷耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD)、位置敏感探测器(Position-Sensitive Detector, PSD)和四象限探测器(Quadrant Photodetector, QPD)的测量。CCD虽能获取完整光斑图像,但其受限于帧率,无法满足动态测量的实时性要求<sup>[10]</sup>;PSD具备无死区的大范围线性响应<sup>[11]</sup>,已有研究将其应用于动态测角与误差抑制,如杨<sup>[12]</sup>等研究了一种基于PSD的动态测角误差抑制方法,瞄准精度达到 $0.15''$ ,测角精度达到 $0.39''$ 。但受限于物理机制,其抗干扰能力与极限分辨率在亚角秒级的超高精度场景中略显不足。相比之下,QPD在高精度动态跟踪与测角领域展现出绝对优势,凭借其分立光电二极管结构,实现了纳秒级响应与兆赫兹级带宽<sup>[13, 14]</sup>。更为关键的是,QPD独特的四通道独立输出设计与差分信号处理机制赋予了它

在零点极高的位置分辨率和优异的共模噪声抑制能力。张<sup>[15]</sup>等将QPD用于五自由度测量装置中,在5 m长导轨上, $\pm 400 \mu\text{m}$ 量程内,标定后QPD测量误差标准差小于 $0.3 \mu\text{m}$ ,充分印证了其在微纳级偏差探测上的灵敏度。但是QPD在零点附近极高的灵敏度也对其接收面光斑的能量对称性提出了极为苛刻的要求。在实际的动态测角应用中,由于被测样品基座安装的不准直,激光束往往无法保证与被测面绝对垂直入射,这种非理想的对准状态导致返回探测器光敏面的光斑发生畸变,基于圆形光斑的质心定位技术会引入瞄准误差,成为制约动态角度测量精度的重要因素,如何抑制瞄准误差成为提高动态角度测量精度的关键难题。

本文提出了一种高精度差动对准动态测角瞄准误差抑制技术,通过在探测器的光敏面前添加双狭缝光阑,利用光斑中心位置的条形区域获得光斑精确定位,两个狭缝获得的光强差动相减得到光斑的过零点角度,有效解决了由于单一光斑质心偏离引起的瞄准误差问题。与传统测角技术相比,本技术有效抑制了光斑的瞄准误差,测角精度得到大幅提高,为高精度的动态角度测量提供了一种实用且有效的途径。

## 2 差动对准瞄准误差抑制原理

本文通过分析传统测角技术中瞄准误差产生的原因,计算瞄准误差对测角精度的影响,提出高精度差动对准动态测角瞄准误差抑制原理,通过在探测器光敏面前加入双狭缝光阑抑制由于光斑畸变造成质心偏移引起光斑瞄准误差,进而提高测角的精度及稳定性。

### 2.1 角度测量原理及瞄准误差

经典的自准直法测角原理如图1所示,位于

准直物镜焦平面上的光源发出的光经准直物镜  $L_C$  准直后,若垂直于平面反射镜入射,则光线将严格沿原路返回并重新成像于原点;若反射镜产生微小偏转角  $\theta$ ,返回光束将偏转  $2\theta$  并在焦平面上形成偏移量为  $\Delta x$  的光斑,角度变化  $\Delta\theta$  与光斑位移  $\Delta x$  及系统焦距  $f$  之间的关系可表示  $L_C$  为:

$$\Delta\theta = \arctan(\Delta x/2f) \approx \Delta x/2f, \quad (1)$$

其中: $f$ 为长焦准直镜  $L_C$  的焦距, $\Delta x$ 为光斑在探测器上的偏移量。因此如何获得被测光斑的精确定位对于角度测量的精确度至关重要。

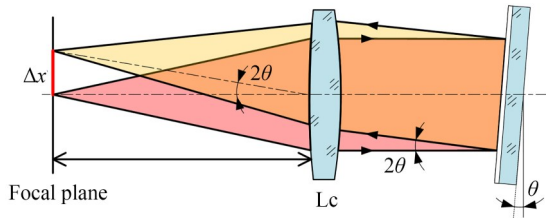


图 1 光学自准直测角原理

Fig. 1 Principle of angle measurement by optical autocollimation

本文的动态测角原理如图 2 所示。采用光学自准直与光栅测角相结合实现角度动态测量,激光器出射光经过缩束由反射镜折转经过长焦准直镜  $L_C$  准直为平行光,对被测样品表面进行照明,当被测面旋转至与平行光垂直范围附近时,将平行光反射回光路中被长焦准直镜会聚后分为两路,首先进入宽场跟踪光路,经场镜  $L_S$  变焦后将光束聚焦到 CCD 表面,利用 CCD 对短焦聚焦光斑进行位置探测实现对反射光斑的大范围跟踪,当光斑移动至 CCD 靶面中心区附近时,另一条返回光束经过分光棱镜 BS1 进入差动对准系统,通过双狭缝光阑对光斑进行整形滤波获得含光强峰值点的条形光斑,通过 QPD 运算获得精确定位,两路光强进行差分运算解算得到实时角度值,当被测面与平行光准直时,差分信号到达过零点,记录此时角度为  $\theta_0$ 。

在理想情况下,返回的光斑为中心对称的高斯光斑,此时光斑的能量重心(质心)与峰值光强点(即无畸变时的理想瞄准点)完全重合,如图 3(a)所示,当一束圆形高斯光斑投射到 QPD 光敏面上时,每个象限将产生与其接收到的光通量成正比的光电流信号,分别记为  $I_A, I_B, I_C, I_D$ (对应第

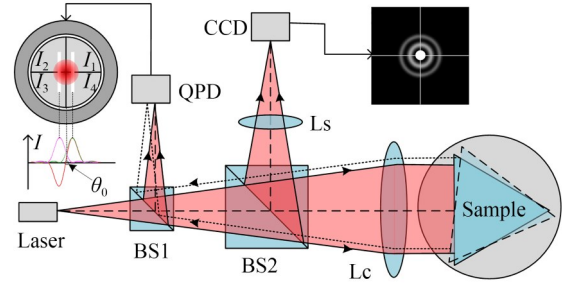


图 2 差动对准动态测角原理

Fig. 2 Principle of differential alignment dynamic angle measurement

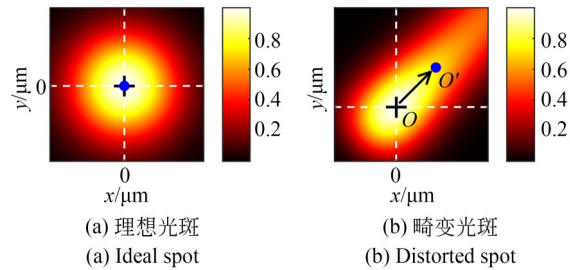


图 3 光斑畸变导致峰值光强点与能量质心分离

Fig. 3 Separation of the peak light intensity point and the energy centroid caused by spot distortion

一至第四象限)。光斑中心位置  $(x_0, y_0)$  与各象限信号存在线性关系,通常采用和差归一化来计算光斑中心坐标,以消除光强波动的影响:

$$X = k_x \cdot \frac{(I_A + I_D) - (I_B + I_C)}{I_A + I_B + I_C + I_D} = k_x \cdot \frac{(E_A + E_D) - (E_B + E_C)}{E\Sigma}, \quad (2)$$

$$Y = k_y \cdot \frac{(I_A + I_B) - (I_C + I_D)}{I_A + I_B + I_C + I_D} = k_y \cdot \frac{(E_A + E_B) - (E_C + E_D)}{E\Sigma}, \quad (3)$$

其中: $X, Y$ 为归一化的中心位置偏差; $k_x, k_y$ 为与光斑半径和探测器灵敏度相关的比例系数(可通过标定获得); $E_A, E_B, E_C, E_D$ 为每个象限接收的光能量, $E\Sigma$ 为总光强信号。

在理想高斯圆形光斑和小位移范围内,  $(X, Y)$ 与光斑的实际物理位移  $(\Delta x, \Delta y)$ 呈线性正比关系。当返回光束以一定倾角偏离主光轴穿过光学系统时,会引入显著的离轴像差,导致光斑发生畸变,光斑的能量质心发生漂移,此时光斑的能量质心与其峰值光强点发生偏离,如图 3(b)

所示,也即产生瞄准误差。为了量化该误差,建立了畸变光斑的数学模型。设探测器靶面上的实际光强分布函数为 $I(x,y)$ ,将其分解为理想的对称高斯分布项 $I_0(x,y)$ 与由畸变引起的非对称扰动项 $\Delta I(x,y)$ :

$$I(x,y)=I_0(x,y)+\Delta I(x,y). \quad (4)$$

传统的灰度重心法提取光斑的坐标 $(x_c,y_c)$ ,在X轴方向上,其质心坐标为:

$$x_c=\frac{\iint x \cdot I(x,y) dx dy}{\iint I(x,y) dx dy}. \quad (5)$$

将光强分解模型代入公式(5),假设理想光斑的峰值光强点为 $x_g$ ,且畸变引起的总能量变化极小,则实际提取的质心坐标可近似展开为:

$$x_c \approx x_g + \frac{\iint (x-x_g) \cdot \Delta I(x,y) dx dy}{\iint I_0(x,y) dx dy}. \quad (6)$$

式(6)的第二项正是由于光斑内部能量分布不对称导致的质心坐标偏移量。将其定义为靶面的瞄准误差 $\delta x$ :

$$\delta x = x_c - x_g = \frac{1}{E_0} \iint (x-x_g) \cdot \Delta I(x,y) dx dy, \quad (7)$$

其中, $E_0$ 为光斑的总能量。该瞄准误差是一种随转台转动动态变化的非线性坐标漂移。将其代入系统的测角方程(准直物镜焦距为 $f$ ),可得由光斑畸变直接耦合产生的角度测量误差 $\Delta\theta$ 为:

$$\Delta\theta = \frac{1}{E_0 2f} \iint (x-x_g) \cdot \Delta I(x,y) dx dy. \quad (8)$$

由上述分析,瞄准误差会直接影响角度测量的精度,要提高动态测角的精度就必须消除由于光路与被测面不准直导致光斑畸变引入的瞄准误差。

## 2.2 基于差动对准的瞄准误差抑制原理

针对传统质心定位技术由于光斑畸变引起的瞄准误差,提出一种基于双路探测空间调制的差动对准瞄准误差抑制原理。通过在光敏面前引入双狭缝光阑结构,利用狭缝截取畸变光斑的光强峰值点附近区域获得光斑精确定位,两路光强信号进行差动相减获得高线性度光斑过零点定位,实现对瞄准误差的抑制。系统光路如图2所示。准直激光束经被测面反射后,由焦距为 $f$ 的准直镜 $L_c$ 会聚。在准直镜的后焦面附近,探测

器前端精密放置一个双狭缝光阑,该光阑的两个狭缝中心间距为 $d$ ,单个狭缝宽度为 $w$ 。系统的关键设计参数需满足:焦面上光斑的直径 $D$ 略大于双狭缝间距 $d$ 。在此条件下,当光斑扫描移动时,存在一个连续区域使得光斑能够同时覆盖两个狭缝,避免产生死区。双狭缝对称放置于四象限探测器中的两个象限组,分别测量透过狭缝1和狭缝2的光强转化的光电流信号,记为 $I_1,I_2$ 。系统最终输出的归一化差分信号为:

$$S = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}, \quad (9)$$

其中:分子 $I_1 - I_2$ 为差动信号,其极性和幅值直接反映光斑中心相对于双狭缝对称中心的偏移方向和大小;分母 $I_1 + I_2$ 为和信号,对输出进行归一化处理,其核心作用在于抑制光源功率起伏、大气湍流引起的整体闪烁等共模噪声,确保输出信号。

最终 $S$ 仅与光斑的相对位置有关,显著提升了系统的稳定性。光强变化的定量模型可精确描述系统响应特性。假设焦面光斑为理想的圆形高斯分布:

$$I(x,y) = I_0 \exp\left(-\frac{2(x^2+y^2)}{w^2}\right), \quad (10)$$

其中: $I_0$ 为峰值光强, $w$ 为光斑的束腰半径。设双狭缝沿 $x$ 方向排列,其对称中心位于 $x=0$ ,两狭缝中心坐标分别为 $-d/2$ 和 $+d/2$ ,宽度均为 $w$ 。当光斑中心位于 $x_c$ 时,透过每个狭缝的光通量可通过高斯函数与矩形狭缝函数的卷积积分求得。沿 $y$ 方向的积分结果为常数,故主要关注 $x$ 方向的分布。透过狭缝的光强可表示为误差函数的形式:

$$I_1(x_c) \propto \left[ \begin{array}{l} \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}}{w}\left(-\frac{d}{2} + \frac{w}{2} - x_c\right)\right) \\ -\operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}}{w}\left(-\frac{d}{2} - \frac{w}{2} - x_c\right)\right) \end{array} \right] \quad (11)$$

$$I_2(x_c) \propto \left[ \begin{array}{l} \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}}{w}\left(+\frac{d}{2} + \frac{w}{2} - x_c\right)\right) \\ -\operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}}{w}\left(+\frac{d}{2} - \frac{w}{2} - x_c\right)\right) \end{array} \right]$$

将式(11)代入式(10),即可得到系统的归一化差分输出 $S$ 与光斑位置 $x_c$ 的完整理论关系。该曲线在零点附近存在一段高度线性的区域,其斜

率定义了系统的位置检测灵敏度。灵敏度  $K$  及线性范围由三个关键参数共同决定: 光斑尺寸  $D$ 、狭缝间距  $d$  和狭缝宽度  $w$ 。通过优化设计这些参数,可以在高灵敏度与宽线性范围之间取得最佳平衡,以适应不同的对准精度和动态范围要求。

### 3 基于差动对准的瞄准误差抑制技术

为了实现非理想对准条件下光斑畸变引起瞄准误差的有效抑制,基于前述差动对准瞄准误差抑制原理,对差动对准系统的光路架构及双狭缝核心参数进行了详细优化设计。为了提高测量效率并减少无效数据采集,系统采用分级对准策略:先由大面阵 CCD 获取全局图像进行宽场引导,由电机驱动气浮转台快速将被测目标旋转至光轴中心区域附近;当 CCD 解算出的光斑质心坐标进入预设切换视场,且 QPD 接收到的四个象限光强总和信号超过设定的有效触发电流阈值时,系统判定光斑已完整进入双狭缝的有效调制区域。此时,系统控制电机转速降低并切换至差动对准模式, QPD 开始高频采样,利用双狭缝的差分信号解算极高精度的中心对准。

以中心波长为 635 nm 的光纤耦合半导体激光器为例,光纤出射的初始发散角为 240 mrad,为匹配后续自准直物镜的通光孔径,设计了一对消色差透镜组成的开普勒望远镜系统,将光束发散角压缩至 60 mrad。自准直部分采用焦距  $f_c=1\ 250\text{ mm}$ 、通光孔径  $D_c=50\text{ mm}$  的准直物镜,经计算其数值孔径  $NA=D_c/(2f_c)=0.02$ ,压缩后的光束直径  $D\approx f_c\times\theta_m=1\ 250\times0.06=75\text{ mm}$  略大于准直镜孔径,可主动截取高斯光束中心能量分布最均匀的部分,有效保证出射光束极高的波前质量与对准基准精度。差动对准系统的双狭缝光阑与 QPD 采用笼式结构进行固定,如图 4 通过微米级精调机构实现双狭缝的 X、Y、Z 轴平移,保证双狭缝对称分布于 QPD 的左右两个象限,探测器将光强信号转化为电信号后输出到集中测量控制系统进行数据处理与角度计算。

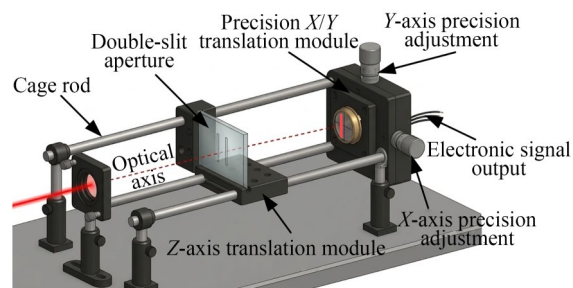


图 4 双狭缝光阑与四象限探测器装配结构

Fig. 4 Assembly structure of the double-slit aperture and quadrant photodetector

对于双狭缝的参数设计要综合考虑光斑尺寸  $D$ 、狭缝间距  $d$  和狭缝宽度  $w$  三个变量,三个变量对归一化差分输出曲线的灵敏度影响如图 5(a)~图 5(c)所示。从图中可以看出,狭缝的宽度  $w$  越小,狭缝的间距  $d$  越大,光斑的直径  $D$  越小,输出曲线的灵敏度越高。图 5(d)为对一组差分曲线的过零点斜率拟合,从图中可以看出此时的过零点斜率为  $0.008\ 6\ \mu\text{m}^{-1}$ ,图 5(d)为对一组差分曲线的过零点斜率拟合,从图中可以看出此时的过零点斜率为  $0.008\ 6\ \mu\text{m}^{-1}$ ,表现出较高的灵敏度。在对三个变量同时进行优化仿真时,要保证  $D$  略大于  $d$ ,防止差分曲线在过零点时出现死区,经参数优化后最终仿真结果如图 5(e)所示,此时的光斑尺寸  $D=100\ \mu\text{m}$ ,狭缝间距  $d=95\ \mu\text{m}$ ,狭缝宽度  $w=20\ \mu\text{m}$ ,系统的归一化差分输出曲线在零点附近表现出最佳的线性响应特性。该曲线的过零点斜率为  $0.072\ 1\ \mu\text{m}^{-1}$ ,以斜率下降不超过过零点斜率的 5% 作为判定标准,有效线性区间宽度可达  $9.6\ \mu\text{m}$ 。此时的双狭缝对应输出光强曲线如图 5(f)所示。

根据衍射极限理论,1 250 mm 的准直系统在后焦面上形成的理论高斯光斑束腰直径  $D_s=2\lambda/(\pi\cdot NA)\approx 20.2\ \mu\text{m}$ ,若直接在焦平面上进行双狭缝调制,狭缝的特征尺寸需达到亚微米级别。不仅大幅增加了加工的成本与难度,且极易因微小的热胀冷缩或装调偏差导致信号丢失。本文引入主动离焦设计,根据高斯光束在自由空间中的传输理论,光斑直径  $D$  随离焦量  $\Delta z$  的关系满足:

$$D(\Delta z)=D_s\sqrt{1+\left(\frac{4\lambda\cdot\Delta z}{\pi\cdot D_s^2}\right)^2}. \quad (12)$$

将系统实际工作波长  $\lambda=635\text{ nm}$ 、理论束腰

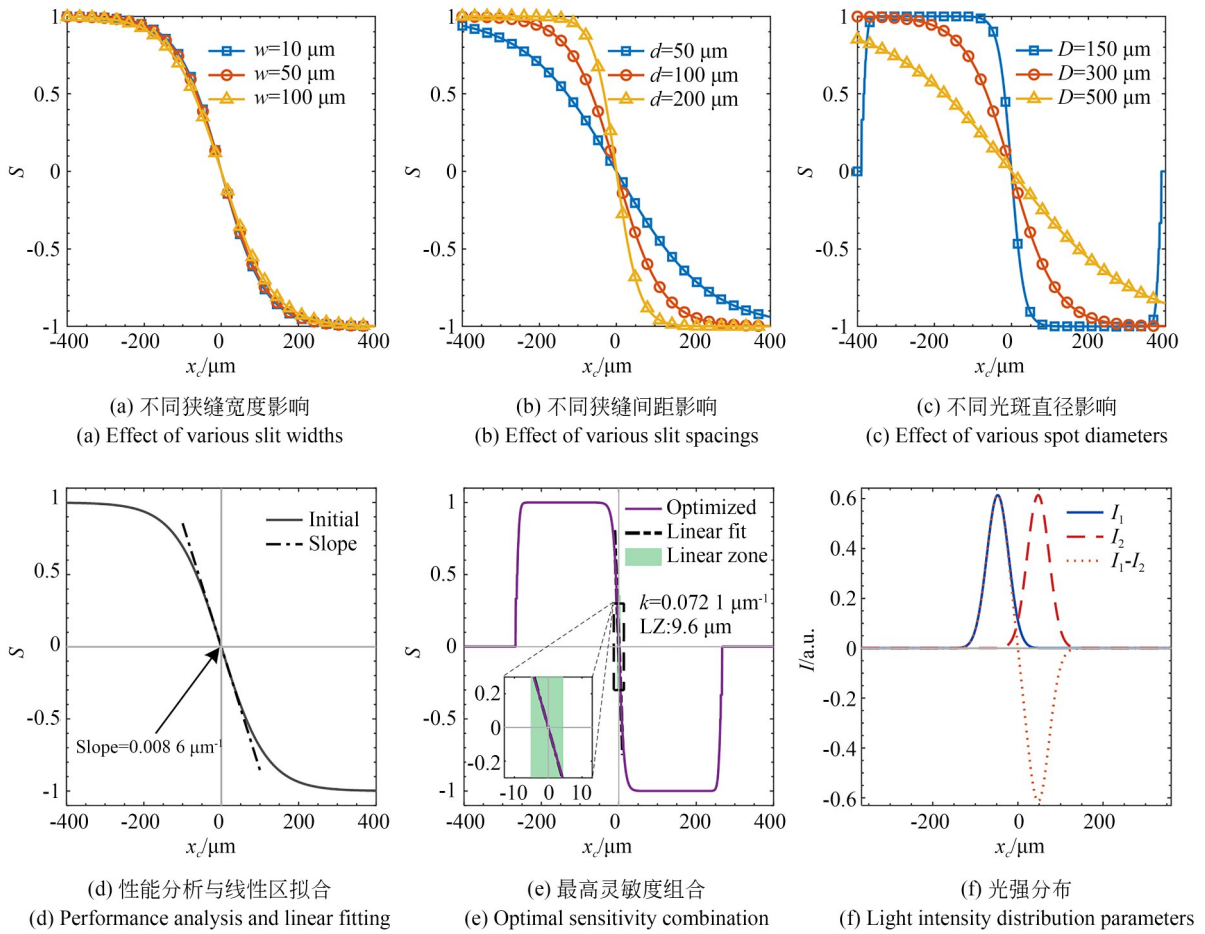


图 5 归一化光强差分输出曲线

Fig. 5 Normalized differential intensity output curve

$D_s=20.2 \mu\text{m}$  及仿真优化的目标光斑尺寸  $D=100 \mu\text{m}$  代入上式,计算可得所需离焦量  $\Delta z \approx 2.5 \text{ mm}$ 。这样即使光斑直径由于探测器热漂移偏离  $100 \mu\text{m}$ ,过零点的灵敏度及线性区间有微小变化,系统仍能维持无死区的线性输出,且零点位置保持稳定,这一设计在显著降低光阑加工难度的同时,完美兼顾了系统所需的超高对准灵敏度与宽线性动态范围。

在实际测角过程中,系统的测量性能还会受到光束质量的影响。实际光纤耦合输出激光可能存在高阶模,并且主动离焦设计会在光斑边缘引入的衍射环,但是由于双狭缝的共模抑制特性,通过双狭缝对光斑截取整形后,杂散光能量会通过差分运算相互抵消,不会引起差分曲线的零点漂移,保证对准的精度。

#### 4 测量实验与不确定度分析

根据差动对准动态测角瞄准误差抑制原理设计了差动对准动态测角系统结构,如图 6 所示。该系统主要由差动对准系统、精密气浮回转系统和集成测控系统三部分组成。其中,差动对准系统用于获取光斑光电信号,传输给集成测控系统进行差分运算及数据处理,与圆光栅读数信号共同解算获得高精度角度值,精密气浮回转系统驱动被测样品旋转实现动态实时测量,系统协作共同完成高精度角度测量。根据以上结构设计研制的差动对准动态测角实验系统如图 7 所示。

首先进行瞄准重复性实验,验证本系统瞄准误差抑制技术的稳定性;随后进行多面棱体角度测量实验,验证系统在实际应用中的测角精度;最后进行不确定度分析,确定本系统的测量不确定度。

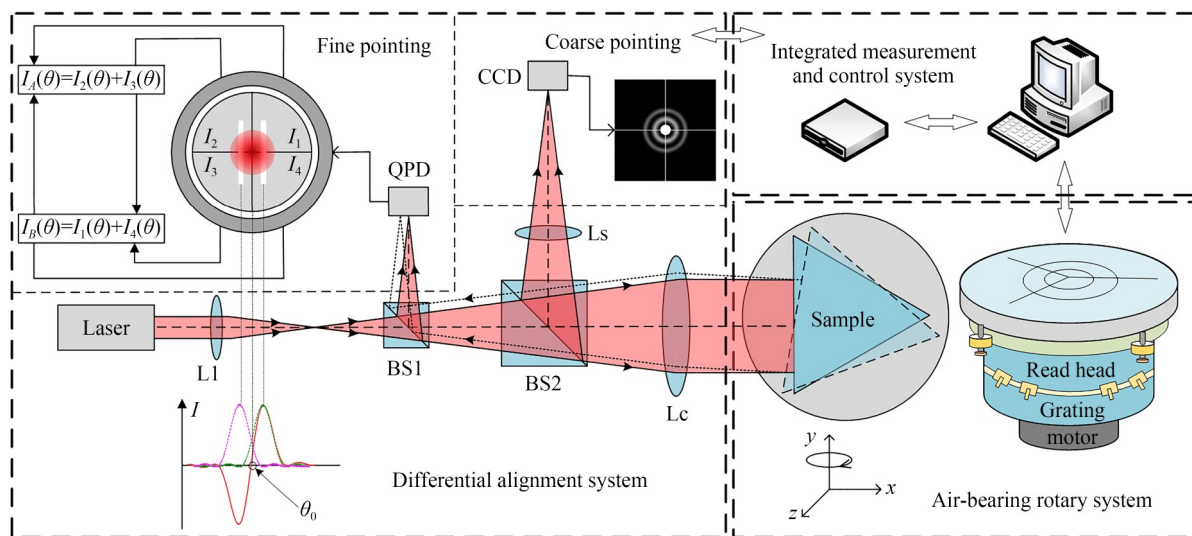


图 6 差动对准动态测角系统总体框图

Fig. 6 Overall block diagram of the differential alignment dynamic angle measurement system

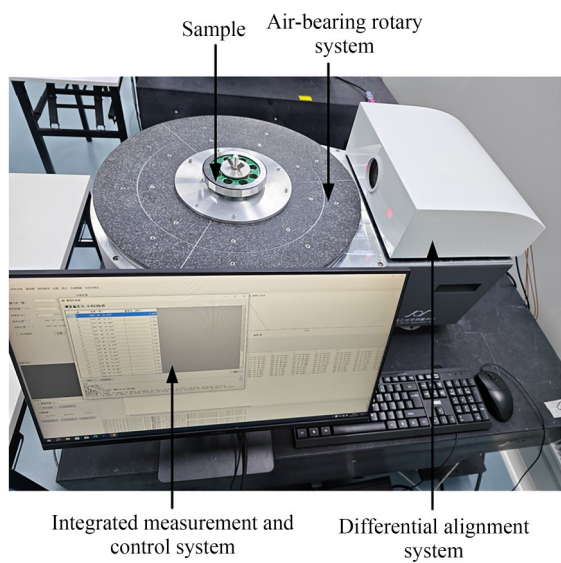


图 7 差动对准动态测角实验系统

Fig. 7 Experimental system of differential alignment dynamic angle measurement

#### 4.1 瞄准重复性测量实验

实验样品采用 24 面标准多面棱体,在温度为 20 ℃,湿度为 75% 的环境下开展测试。为验证差动对准系统的稳定性,将差动对准瞄准误差抑制系统作为实验组,将传统的 QPD 质心定位系统作为对照组,对照组在硬件上采用与实验组相同的激光光源、1 250 mm 焦距准直物镜及同型号四象探测器,在算法实现上,采用标准的和差归一化算法。在进行实验前,利用标准球及平晶对

气浮回转系统进行调平校准,最大程度减小圆光栅测角基准的系统误差。在对比实验环节,为有效检验系统抗干扰能力,使棱体底座处于初始轻微不准直安装,棱体被侧面存在的塔差导致返回光斑产生非对称畸变。由电机驱动高精度气浮转台以 5(°)/s 的转速作匀速旋转测试,系统数据采集卡的采样频率设为 30 kHz,系统自动捕捉并记录棱体 24 个工作面的瞄准角度,设定单次实验的全圆周重复测量次数  $N=20$ ,最终结果见图 8。

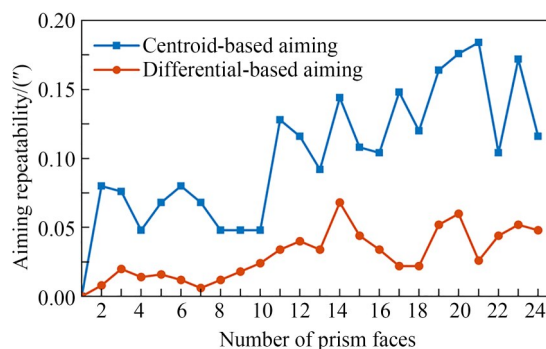


图 8 棱体瞄准重复性测量结果对比

Fig. 8 Comparison of measurement results for prism aiming repeatability

对两组系统测量数据进行统计分析,结果显示:传统质心定位技术瞄准重复性最大为 0.18",平均重复性为 0.1";通过双狭缝空间调制与瞄准

误差抑制,瞄准重复性最大为  $0.07''$ ,平均重复性为  $0.03''$ 。

#### 4.2 角度动态测量实验

为验证差动对准动态测角系统在实际工况下的测量能力,利用搭载的动态测角仪装置对经过中国科学计量研究院标定的 24 面棱体进行角度测量,以计量院标定的工作角偏差为真值,将 24 面棱体同轴安装于气浮转台中心,利用 CCD 宽场跟踪系统初步调整棱体各工作面,使其反射光斑进入 QPD 线性捕获区域。当棱体各工作面依次经过自准直光路时,差动对准系统捕捉光斑过零信号,并同步触发圆光栅记录瞬时角度值  $\theta_i$ ,为抑制随机噪声,系统连续进行 10 圈全圆周测量,实验结果如图 9 所示。

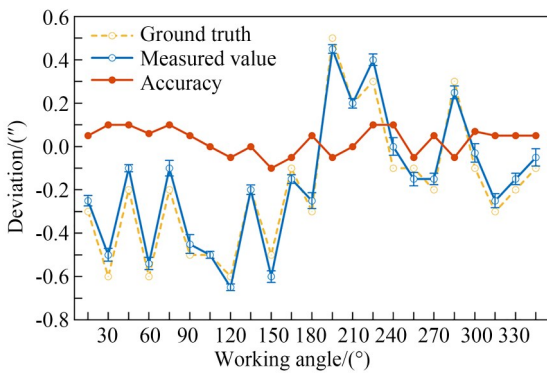


图 9 角度测量精度

Fig. 9 Angle measurement accuracy

从实验结果可以看出,利用差动对准动态测角系统测得棱体工作角度数的测量值与真值之间的最大偏差为  $0.1''$ ,取 10 次测量平均值作为结果后,本系统的测角精度为  $0.08''$ ,测量值的标准差均保持在极低水平内,进一步验证了系统在动态环境下的高重复性与稳定性。

#### 4.3 不确定度分析

基于差动对准的动态角度测量系统,其综合测量不确定度主要来源于(1)重复性不确定度(2)定位不确定度(3)气浮轴偏心不确定度(4)圆光栅测角不确定度(5)残余瞄准不确定度。重复性不确定度采用 A 类不确定度评定,后四项采用 B 类不确定度进行评定。其中定位误差服从正态分布,包含因子  $k$  取 2;其余三项误差均按均匀分布处理,包含因子  $k$  取  $\sqrt{3}$ 。

##### 4.3.1 重复性不确定度

在静态或动态测量环境下,受环境空气扰动、机械结构微小振动以及激光器指向稳定性等随机因素的影响,系统对同一目标的多次测量结果会呈现出一定的离散性。这种由随机误差引起的测量不确定度分量  $u_1$ ,可以通过对同一测量点进行  $n$  次独立重复观测,并利用贝塞尔公式进行统计计算得到。在本系统的性能评估中,通过对 24 个工作面分别进行重复性实验,得到单次测量的标准差,即重复性不确定度  $u_1$  为:

$$u_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \bar{\theta})^2}{n-1}} = 0.03'' \quad (13)$$

##### 4.3.2 定位不确定度

在动态测量过程中,四象限探测器与放大电路的综合本底噪声限制了系统对光斑中心的细分定位能力。由光学衍射极限与系统信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 共同决定的理论分辨率  $u_2$  满足式(13),本系统采用的激光光源波长  $\lambda$  为 635 nm,准直物镜焦距  $f$  为 1 250 mm,系统数值孔径 NA 为 0.02,经实际测试,探测与放大电路的综合信噪比为 250:1。因此,光斑的定位不确定度  $u_2$  为:

$$u_2 = \frac{0.61\lambda}{NA \cdot f_c} \times \frac{180 \times 3600}{\pi} \times \frac{1}{SNR} \times \frac{1}{k} = 0.005'' \quad (14)$$

##### 4.3.3 气浮轴偏心不确定度

在动态全圆连续测量中,气浮回转主轴是带动被测棱体运转的基准。已知气浮转台的有效支撑半径  $R=250$  mm,最大径向跳动极值  $\Delta v=0.15$   $\mu\text{m}$ ,由此引入的极限角摆倾斜误差  $\Delta s$  可表示为:

$$\Delta s = \frac{\Delta v}{R} \quad (15)$$

将该弧度值转化为角秒,气浮轴系角向跳动引入的测角不确定度  $u_3$  为:

$$u_3 = \frac{\Delta v}{R} \times \frac{180 \times 3600}{\pi} \times \frac{1}{k} = 0.07'' \quad (16)$$

##### 4.3.4 圆光栅测角不确定度

本系统采用高精度圆光栅作为角度测量基准。装调过程中,通过精密打表调心将径向跳动严格控制在 2  $\mu\text{m}$  以内,并结合多读数头对径安

装结构,有效消除了一阶机械偏心误差。在信号量化方面,该光栅单圈细分脉冲数为 12 960 000 个。不确定度  $u_4$  为:

$$u_4 = \frac{360^\circ \times 3\,600}{12\,960\,000} \times \frac{1}{k} = 0.06'' \quad (17)$$

#### 4.3.5 残余瞄准不确定度

虽然双狭缝差动对准结构有效抑制了由被测件安装不准直引发的光斑畸变,但其抑制效果受限于双狭缝与 QPD 的精确物理对称性。由于微纳加工导致狭缝宽度的不一致、狭缝边缘粗糙度、X 轴精调残余的微小偏移等,系统会产生微小的零点基准平移。在对该静态偏差进行系统级标定与补偿后,系统的残余瞄准不确定度评定  $u_5$  为:

$$u_5 = \frac{\alpha}{k} = \frac{0.005''}{\sqrt{3}} = 0.003'' \quad (18)$$

#### 4.3.6 不确定度合成

综合考虑上述各项误差源对测量结果的影响,由于各项误差项的产生机制相互独立,该系统的综合测量不确定度  $u$  为:

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} \approx 0.1'' \quad (19)$$

#### 参考文献:

- [1] WANG S T, MA R, CAO F F, *et al.* A review: high-precision angle measurement technologies [J]. *Sensors*, 2024, 24(6): 1755.
- [2] CHEN L, ZHU L, DU H, *et al.* Pointing acquisition and tracking system for free space optical communication based on integrated optical phased array [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2025, 17(4): 7301608.
- [3] SIAUDINYTE L, HANSEN P E. Recent progress in optical nanometrology for the semiconductor industry [J]. *Measurement: Sensors*, 2025, 38: 101607.
- [4] 李波,董文博,肖爱民,等. 基于 PSD 的非接触式二维动态角度精密测量系统[J]. *激光与红外*, 2021, 51(6): 787-796.
- LI B, DONG W B, XIAO A M, *et al.* High-precision non-contact two-dimensional dynamic angle measurement system based on PSD [J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(6): 787-796. (in Chinese)

## 5 结 论

本文提出了一种高精度差动对准动态测角瞄准误差抑制技术,通过分析测量过程中瞄准误差产生的原因,设计了双路差动对准探测系统,通过在探测器前加入双狭缝光阑对光斑进行整形滤波并对双路光强信号进行差分运算进行误差分离补偿,有效抑制了瞄准过程中由于光斑畸变导致的瞄准误差,提高了光斑的瞄准精度。实验结果表明,本技术的瞄准重复性可达  $0.03''$ ,测角精度达到  $0.1''$ ,为高精度的动态角度测量系统提供了一种可行方案,该瞄准误差抑制技术还可拓展应用到透镜光学器件微位移、直线度与同轴度等领域。

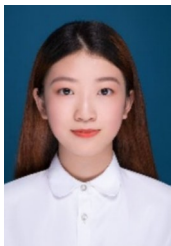
#### 作者贡献声明:

- 梁宇环:测量方法的提出,论文构思和撰写;  
 吴中怀:测量实验的设计;  
 汝洪武:数据分析及处理;  
 王允:实验指导、论文指导;  
 邱丽荣:论文审核与编辑;  
 赵维谦:项目管理,提供实验所需资源。

- [5] ZHANG Z Q, TONG S F, LIN P, *et al.* A  $\mu$ rad accuracy and nW detection sensitivity four-quadrant heterodyne coherent angular measurement system [J]. *Photonics*, 2025, 12(5): 509.
- [6] SUN S W, ZHENG Q, MENG X X, *et al.* High positional resolution pin-cushion position sensitive detector by deliberately introducing barrel distortion [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(2): 1280-1286.
- [7] ZHAO G B, BAN Y W, ZHANG Z H, *et al.* Error compensation strategy with high installation tolerance for angle encoders [J]. *Precision Engineering*, 2024, 91: 568-576.
- [8] 朱均超,许虹虹,张海彤,等. 基于激光自混合干涉的高精度角度测量方法[J]. *激光与红外*, 2020, 50(1): 37-41.
- ZHU J C, XU H H, ZHANG H T, *et al.* High precision angle measurement method based on laser self-mixing interference [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(1): 37-41. (in Chinese)
- [9] MATSUKUMA H, ASUMI Y, NAGAOKA M,

- et al.* An autocollimator with a mid-infrared laser for angular measurement of rough surfaces [J]. *Precision Engineering*, 2021, 67: 89-99.
- [10] BIAN Z L, GAO M, DONG Z R, *et al.* Two-coordinate dynamic photoelectric autocollimator based on single linear CCD[J]. *Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications*, 2010, 7855: 78550H.
- [11] MENG X X, SUN S W, YAN X T, *et al.* Six-degree-of-freedom posture measurement technologies using position sensitive detectors (PSDs): state of the art[J]. *Micromachines*, 2022, 13(11): 1903.
- [12] 杨世栋, 朱维斌, 黄焱, 等. 一种动态测角仪瞄准误差抑制方法研究 [J]. *光电工程*, 2024, 51(12): 30-38.
- YANG S D, ZHU W B, HUANG Y, *et al.* Research on an aiming error suppression method for dynamic goniometer [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2024, 51(12): 30-38. (in Chinese)
- [13] PAN N, ZHAO Q, WU Y P, *et al.* High-accuracy attitude angle measurement system using laser collimation [J]. *Applied Optics*, 2024, 63(19): F67-F73.
- [14] ZHU X, LIU J, LI X, *et al.* High-precision laser angular displacement measurement based on an improved normalized algorithm for four-quadrant detector [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 5002110.
- [15] 张聪, 刘文正, 段发阶, 等. 长导轨五自由度测量中直线度精度提升方法与优化设计[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(20): 2467.
- ZHANG C, LIU W Z, DUAN F J, *et al.* Accuracy improvement method and optimal design of straightness in five-degree-of-freedom measurement of long guide [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(20): 2467. (in Chinese)

## 作者简介:



梁宇环(2000—),女,河北石家庄人,硕士研究生,2023年于河北工业大学获得学士学位,主要研究方向为精密光学测量。Email:liangyuhuan0823@163.com

## 通讯作者:



王允(1984—),男,山东威海人,教授,2008年于北京理工大学获得学士学位,2013年于北京理工大学获得博士学位,主要从事精密光电测试与仪器研究。Email:alotrabbits@163.com