

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

一种动态测角仪瞄准误差抑制方法研究

杨世栋, 朱维斌, 黄焱, 朱进, 薛梓

引用本文:

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): 240209.

Yang S D, Zhu W B, Huang Y, et al. A method for suppressing aiming error of dynamic goniometer[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(12): 240209.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240209>

收稿日期: 2024-09-02; 修改日期: 2024-11-20; 录用日期: 2024-11-21

相关论文

望远镜光程稳定性测量方案设计及噪声理论分析

赵凯, 范纹彤, 海宏文, 张锐, 范磊

光电工程 2023, 50(11): 230158 doi: [10.12086/oe.2023.230158](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230158)

空间引力波探测干涉仪探测模式比较研究

吴金贵, 王小勇, 白绍竣, 吴铠岚, 郭忠凯, 郑永超, 王芸, 林栩凌

光电工程 2024, 51(2): 230134 doi: [10.12086/oe.2024.230134](https://doi.org/10.12086/oe.2024.230134)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE_Journal



Website

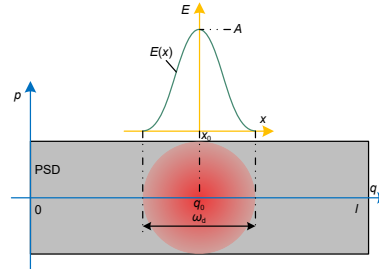
一种动态测角仪瞄准误差抑制方法研究

杨世栋¹, 朱维斌^{1*}, 黄 垚², 朱 进³, 薛 梓²

¹中国计量大学计量测试与仪器学院, 浙江 杭州 310018;

²中国计量科学研究院, 北京 100029;

³浙江省质量科学研究院, 浙江 杭州 310019



摘要: 本文针对动态测角仪精度容易受瞄准过程中光强稳定性影响的问题, 开展动态瞄准误差抑制方法研究。在建立高斯光斑光强分布模型的基础上, 分析动态瞄准误差的产生机理, 证明了基于横向光电效应的动态瞄准误差抑制方法原理; 搭建动态瞄准系统, 分别对本文提出方法的瞄准重复性、瞄准精度进行实验验证, 实验结果表明瞄准重复性为 0.19", 瞄准精度为 0.15", 相比较于光强阈值瞄准方法, 瞄准误差降低了 66%; 开展角度块动态测量实验, 将本文提出的动态瞄准方法应用于动态测角系统, 实验结果证明系统精度能够满足 1 级角度块的校准需求。

关键词: 动态测角仪; 瞄准误差; 高斯光斑; 横向光电效应

中图分类号: TH741.2

文献标志码: A

杨世栋, 朱维斌, 黄垚, 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): 240209

Yang S D, Zhu W B, Huang Y, et al. A method for suppressing aiming error of dynamic goniometer[J]. *Opto-Electron Eng.* 2024, 51(12): 240209

A method for suppressing aiming error of dynamic goniometer

Yang Shidong¹, Zhu Weibin^{1*}, Huang Yao², Zhu Jin³, Xue Zi²

¹College of Metrology Measurement and Instrument, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

²National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;

³Zhejiang Institute of Quality Sciences, Hangzhou, Zhejiang 310019, China

Abstract: This study investigates methods for suppressing dynamic aiming errors, addressing the issue of dynamic goniometer accuracy being easily affected by light intensity stability during aiming. A Gaussian spotlight intensity distribution model is established, and the mechanism of dynamic aiming error generation is analyzed. The principle of the suppression method based on the lateral photovoltaic effect is demonstrated. A dynamic aiming system is constructed, and experiments are conducted to validate the aiming repeatability and accuracy of the proposed method. The results show that the aiming repeatability is 0.19", and the aiming accuracy is 0.15". Compared to the light intensity threshold aiming method, the aiming error is reduced by 66%. Dynamic measurement experiments with angle blocks are conducted, applying the proposed method to the dynamic goniometer system. The results

收稿日期: 2024-09-02; 修回日期: 2024-11-20; 录用日期: 2024-11-21

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFF0615703); 浙江省基础公益研究计划项目 (TGC24E050001); 国家自然科学基金资助项目 (52175526)

*通信作者: 朱维斌, zhuweibin@cjl.edu.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

demonstrate that the system accuracy meets the calibration requirements for the grade 1 angle block gauge.

Keywords: dynamic goniometer; aiming error; Gaussian spot; transverse photoelectric effect

1 引言

角度测量是几何量计量的一种重要组成部分^[1-2], 广泛应用于航空航天、机械制造、精密仪器等领域^[3]。随着科学技术的发展, 对于测角精度的要求也随之提高。测角仪是由精密气浮转轴、标准角度产生系统、瞄准系统等组成的高精度角度测量仪器, 主要用于测量高精度光学器件抛光平面之间的角度^[4-6], 在角度量值传递体系中发挥着重要作用。角度块和正多面棱体是最为常用的标准量具, 检定和校准是保证量具精度的重要手段和必要环节, 检定校准需求和工作量巨大。目前, 最为常用的量具校准采用光学测角仪、多齿分度台和自准直仪完成, 计量检测中主要依赖人工操作, 存在效率低等问题。

光电自准直仪常作为测角仪中的瞄准系统使用, 目前, 包括英国、德国、美国、日本等许多国家都生产了多种类型的光电自准直仪。在这些产品中, 精度较高的光电自准直仪一般采用高分辨率线阵电荷耦合器件 (charge-coupled device, CCD) 作为光电检测器件^[7-8]。由于线阵 CCD 的采样频率与响应频率较低, 因此, 这些基于线阵 CCD 的光电自准直仪主要用于静态测量。

目前, 工业发展对动态角度测量的精度提出了更高要求^[9], 有别于传统测角仪定角工作标定的工作模式, 测角仪逐渐往动态角度测量方向上发展, 要求测角仪能在转动过程中完成角度校准工作, 提高检测效率。动态瞄准作为动态测角仪的关键技术, 如何降低动态瞄准中的瞄准误差, 提高瞄准精度成为了热门的研究方向。北京空间机电研究所的张继友等人在 2007 年基于二维位置敏感探测器 (position-sensitive detector, PSD) 研制了一种动态光电自准直仪, 测量范围为 $400''$, 动态精度为 $1.9''$ ^[10]。国防科技大学的黄云等人于 2012 年研制了一种在激光陀螺测角仪中运用的指零仪, 利用双光束干涉原理, 通过光电二极管来捕捉零级干涉条纹实现动态瞄准, 瞄准时刻触发陀螺测角仪输出当前测角值, 在转速为 $144^\circ/\text{s}$ 时指零精度优于 $0.1''$ ^[11]。北京理工大学的 Guo 等人于 2018 年提出了一种改进的 K-means 算法, 可以确定光斑的精确

位置从而进行角度计算, 动态测量精度在 $20^\circ/\text{s}$ 转速下为 $1.25''$, 动态测量精度提高约 50%^[12]。2021 年浙江大学的牟家鹏等人设计了一种基于自准直仪和光纤陀螺仪的动态角度测量系统, 使用自准直仪对光纤陀螺仪的标度因数进行校准, 可以实现 $1''$ 的动态测角精度^[13]。俄罗斯圣彼得堡电工大学的 Filatov 等人于 2023 年对应用干涉指零仪与自准直指零仪的测角仪精度进行对比实验, 实验结果表明应用干涉指零仪的测角仪精度更高, 取多圈均值为测量值后, 测量值的标准差为 $0.02''$ ^[14]。

综上所述, 为了提高动态测角仪中瞄准系统的瞄准精度, 或是研制响应速率更快的光电自准直仪, 使其更加适用于动态测量工况; 又或是设计复杂的光路研制如指零仪这样的瞄准器, 但其对于激光光源的稳定性要求较高。这些都限制了动态测角仪的使用场景和实用性价值。

本文从动态测角仪的组成和工作原理出发, 在建立高斯光斑光强分布模型的基础上, 分析了激光光强变化对于动态瞄准误差的影响, 利用一维 PSD 的横向光电效应, 从动态瞄准原理上抑制光强不稳定对动态瞄准误差的影响, 提出了一种基于横向光电效应的动态瞄准方法, 最后通过实验证明该动态瞄准方法在动态测角过程中具有良好的瞄准精度。

2 动态测角仪的动态瞄准误差

2.1 动态测角仪原理

测角仪主要由转台和瞄准单元组成。区别于传统测角仪由自准直仪完成瞄准任务, 动态测角仪通常使用光强阈值瞄准方法。图 1 是以角度块为待测对象的动态测角仪组成和工作原理示意图。

由图 1(a) 可见, 角度块放置于转台载物面中心, 随转台匀速旋转, 瞄准单元向角度块发射激光, 经过角度块工作面垂直反射后被瞄准单元内的光电接收器接收, 当接收到的光强达到设定阈值时, 通过后续的信号处理电路产生瞄准信号, 触发转台输出当前测角值。如图 1(b-c) 两图所示, 测角仪的瞄准单元接收到工作 A 面反射的激光, 触发转台得到当前测角值 θ_A ;

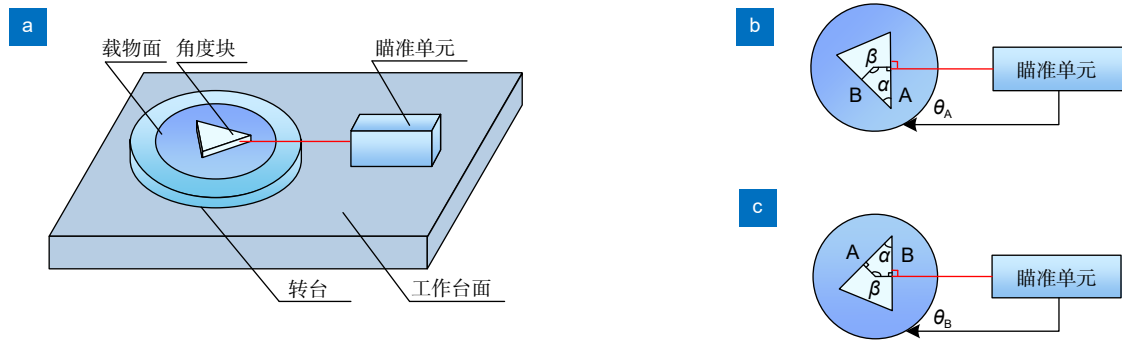


图 1 动态测角仪组成和工作原理示意图。(a) 动态测角仪组成; (b) A 面瞄准示意图; (c) B 面瞄准示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the composition and working principle of the dynamic goniometer. (a) Composition of the dynamic goniometer; (b) A side aiming diagram; (c) B side aiming diagram

转台转动后, 瞄准单元接收到工作 B 面反射的激光, 触发转台得到测角值 θ_B , 其中转台转动的角度值为 β , 则角度块工作角 α 可以计算得到:

$$\alpha = |180^\circ - \beta| = |180^\circ - |\theta_B - \theta_A||. \quad (1)$$

2.2 光强阈值动态瞄准误差原理

动态测角仪通过瞄准待测对象的工作面来实现动态测角。传统方法采用光电接收器将激光光强转换为电压信号, 并预设一个光强阈值对应的比较电压。当光电接收器接收到的反射激光光强达到此阈值时, 电压比较器产生瞄准信号, 触发转台输出当前测角值。

在动态瞄准过程中, 半导体激光器工作在基模 TEM00 状态, 根据相关文献, 其光斑能量分布较好地符合高斯分布模型^[15-17], 光强分布函数 $E(x)$ 可表示为

$$E(x) = A \cdot \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{\omega_d^2}\right], \quad (2)$$

式中: A 为光斑的最大强度, ω_d 为光斑的直径, x_0 为光斑中心的位置, x 为光斑上某一点的位置。

在以光强阈值作为瞄准触发条件下, 由于待测对象工作面的反射率存在差异, 且激光器的输出功率和波长会随时间、环境会发生微小变化, 因此 $E(x)$ 会有微小变化。相同瞄准阈值对应的前后两次瞄准位置存在距离偏差 Δx , 进而会引入转台动态瞄准误差 $\Delta\theta$ 。以光斑中心位置 x_0 为原点建立坐标系, 动态瞄准误差产生原理示意图如图 2 所示。

图 2 中, E_s 为设定的瞄准光强阈值, $E_1(x)$ 为第一次瞄准时光斑的光强分布函数, A_1 为第一次瞄准时光斑的最大强度, x_1 为第一次瞄准时瞄准位置; $E_2(x)$ 为第二次瞄准时光斑的光强分布函数, A_2 为第二次瞄准时光斑的最大强度, x_2 为第二次瞄准时瞄准

位置。

根据设定的瞄准光强阈值 E_s , 由式 (2) 计算前后两次瞄准位置:

$$\begin{cases} x_1 = x_0 + \sqrt{\omega_d^2 \cdot \ln \frac{A_1}{E_s}} \\ x_2 = x_0 + \sqrt{\omega_d^2 \cdot \ln \frac{A_2}{E_s}} \end{cases}. \quad (3)$$

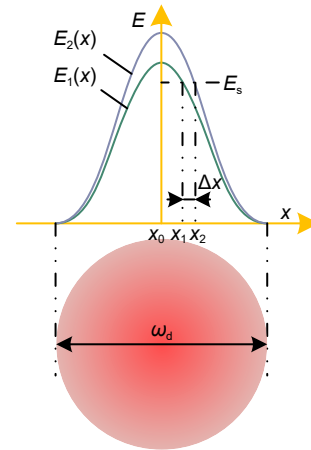


图 2 动态瞄准误差示意图

Fig. 2 Dynamic aiming error diagram

前后两次瞄准位置的距离偏差 Δx 为

$$\Delta x = x_2 - x_1 = \sqrt{\omega_d^2 \cdot \ln \frac{A_2}{E_s}} - \sqrt{\omega_d^2 \cdot \ln \frac{A_1}{E_s}}. \quad (4)$$

触发转台测角值后引起的动态瞄准误差为

$$\Delta\theta = \frac{\Delta x}{2 \cdot R \cdot \pi} \cdot 360, \quad (5)$$

式中: R 为转台旋转轴中心与光电接收器之间的距离。由式 (5) 可见, 通过光电接收器接收的绝对光强阈值大小进行瞄准, 会因为反射激光的光强变化, 导致瞄准单元瞄准不同的工作面时, 前后两次瞄准位置之间存在距离偏差, 触发转台测角值后引起动态瞄准误差。

3 动态瞄准误差抑制原理

为了摆脱对动态瞄准方法对绝对光强的依赖性, 根据 PSD 的横向光电效应, 利用 PSD 两电极电流比值与光斑中心位置的对应关系实现动态瞄准, 抑制由光强不稳定引入的动态瞄准误差, 从而提高动态测角仪中瞄准单元的瞄准精度。

PSD 通常工作在完全反偏状态下, 其工作机理可由简化后的 Lucovsky 方程表示^[18]:

$$\frac{\partial \phi(q, t)}{\partial t} - \frac{1}{rc} \nabla^2 \phi(q, t) = F(q, t), \quad (6)$$

式中: $\phi(q, t)$ 为 PSD 上的光生电动势, r 为 PSD 单位长度的面电阻, c 为 PSD 单位面积的结电容, $F(q, t)$ 为光源函数, (q, t) 为 t 时刻的光斑入射位置。

以 PSD 光敏面的一端为原点建立坐标系, 图 3 是高斯光斑在 PSD 光敏面的光强分布示意图。

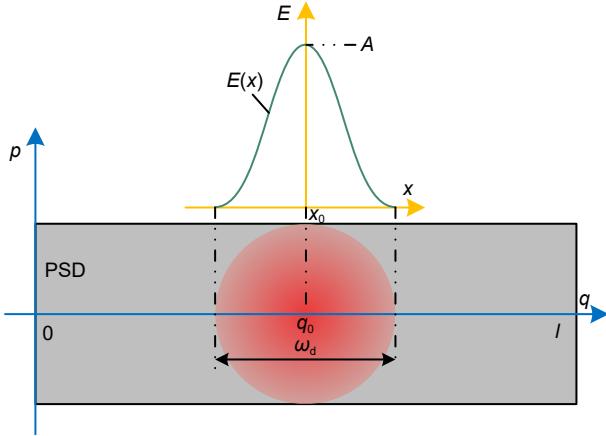


图 3 高斯光斑在 PSD 光敏面的光强分布示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the Gaussian spot intensity distribution on the PSD photosensitive surface

图 3 中 l 为一维 PSD 的长度, q_0 为高斯光斑中心 x_0 在 PSD 光敏面上的位置, 光斑的当高斯激光照射在 PSD 的光敏面上时, 考虑其照射的时间 t , 其光源函数可写为^[19]

$$F(q, t) = \frac{I_0}{c} \exp \left[\frac{-(q - q_0)^2}{\omega_d^2} \right] U(t), \quad (7)$$

式中: $I_0 = \eta A$, 为光束截面中心最大光电流强度, η 为光电转化系数, $U(t)$ 为 Heaviside 单位阶跃响应函数, 将式 (7) 代入式 (6), 可以解得高斯光源照射下, PSD 上产生的光生电动势为

$$\phi(q, t) = \left(\frac{2rlI_0}{\pi^2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} n^{-2} \sin \left(\frac{n\pi q}{l} \right) \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{-n^2 t}{T_c} \right) \right] \cdot \int_0^l \exp \left[\frac{-(\xi - q_0)^2}{\omega_d^2} \right] \sin \left(\frac{n\pi \xi}{l} \right) d\xi, \quad (8)$$

式中: $T_c = rc l^2 / \pi^2$, 为一维 PSD 的时间响应常数。设式 (8) 中的积分项为关于光斑中心位置 q_0 的函数 $P(q_0, n)$:

$$U(q_0, n) = \int_0^l \exp \left[\frac{-(\xi - q_0)^2}{\omega_d^2} \right] \sin \left(\frac{n\pi \xi}{l} \right) d\xi. \quad (9)$$

由于一维 PSD 输出电流为

$$\begin{cases} i_1 = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi(q, t)}{\partial q} \Big|_{q=0} \\ i_2 = -\frac{1}{r} \frac{\partial \phi(x, t)}{\partial q} \Big|_{q=l} \end{cases}. \quad (10)$$

将式 (8)、(9) 代入式 (10), 可得一维 PSD 两电极单位长度上的输出电流为

$$\begin{cases} i_1 = \frac{2I_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{-n^2 t}{T_c} \right) \right] \cdot U(q_0, n) \\ i_2 = -\frac{2I_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cdot \cos(n\pi) \left[1 - \exp \left(\frac{-n^2 t}{T_c} \right) \right] \cdot U(q_0, n) \end{cases}. \quad (11)$$

两电极电流之比 k 的表达式为

$$k = \frac{i_1}{i_2} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} U(q_0, n)}{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \cdot U(q_0, n)}. \quad (12)$$

由式 (12) 可知, 一维 PSD 的两电极电流比值 k 仅与激光光斑中心位置相关, 因此瞄准时刻的光斑中心与 PSD 光敏面的相对位置不受光斑光强变化影响, 即利用 PSD 电极电流比值 k 与激光光斑位置 q_0 的单值对应关系, 能够实现不依赖绝对光强的动态瞄准。

4 实验结果与分析

4.1 瞄准重复性实验

首先开展本文研究动态瞄准方法的重复性验证实验, 通过重复性来评价动态瞄准方法的稳定性。构建如图 4 所示实验系统, 转台由作者所在研究组提前进行了标定, 其定位重复性为 0.14"。实验系统由气浮转台进行连续动态转角发生, 使用 23 面棱体提供圆周多个固定触发角位置; 分别研制了 PSD 动态瞄准器和光强阈值动态瞄准器, PSD 动态瞄准器的主要构成元件为大恒光电的 GCI-07 系列小型半导体激光器与滨松公司的 S4584-06 一维 PSD。同时对多面棱体进行瞄准触发; 研制基于 FPGA 的同步触发采集电路实现对两种动态瞄准器触发转台角度的动态采集, 采用 Inter 公司的 EP4CE115F29C7N 为电路的算法承载核心, 工作频率为 50 MHz, 在 200°/s 转速工况范围

内, 时钟引起的动态角度测量误差为 $0.015''$, 小于编码器最小分辨力的 $1/3$, 满足本次实验需求。转台的速率平稳性为 1×10^{-5} , 速率波动引入的瞄准重复性偏差为 $0.002''$, 可忽略速率波动影响。

实验系统中的主要仪器设备与参数如表 1 所示。

以转台 $30^\circ/\text{s}$ 转速工况开展实验, 转台动态连续旋转, 记录每个棱体面连续 10 次瞄准触发的转台角度值, 使用贝塞尔公式求得每个棱体面的瞄准重复性, 实验结果如图 5 所示。

由图 5 可知, 在使用光强阈值动态瞄准方法时, 瞄准重复性最大为 $0.49''$, 23 个棱体面的瞄准重复性平均值为 $0.37''$; 在使用 PSD 动态瞄准方法时, 瞄准重复性最大为 $0.37''$, 23 个棱体面的瞄准重复性平均值为 $0.19''$ 。由 23 个棱体面的瞄准重复性比较可见, PSD 动态瞄准方法在 22 个棱体面上的瞄准重复性优于光强阈值动态瞄准方法, 即 PSD 动态瞄准方法的稳定性优于光强阈值动态瞄准方法。

4.2 瞄准精度实验

以圆周 360° 为参考值评价动态瞄准方法的精度, 仍使用如图 4 所示实验平台, 将正多面棱体换成一平

面反射镜, 相邻两次瞄准之间转台转过的理想角度为圆周 360° 。分别在转台转速为 $15^\circ/\text{s}$ 、 $30^\circ/\text{s}$ 、 $45^\circ/\text{s}$ 、 $60^\circ/\text{s}$ 、 $75^\circ/\text{s}$ 、 $90^\circ/\text{s}$ 、 $105^\circ/\text{s}$ 、 $120^\circ/\text{s}$ 工况下开展实验, 每个转速转动 10 圈, 获取连续 9 次触发角度值, 将触发值与圆周 360° 进行差值处理, 得到动态瞄准误差。图 6 分别为两种动态瞄准方法的误差曲线。

由图 6 可见:

- 1) 对于两种瞄准方法, 随着转速增加, 动态瞄准误差均没有明显变化, 即瞄准精度与转速弱相关;
 - 2) 对于光强阈值动态瞄准方法, 各个转速下的单次最大瞄准误差为 $0.9''$; 各个转速下瞄准误差平均值的最大值为 $0.06''$, 均方根误差最大为 $0.47''$;
 - 3) 对于 PSD 动态瞄准方法, 各个转速下的单次最大瞄准误差为 $0.3''$, 各个转速下瞄准误差平均值的最大值为 $0.02''$, 均方根误差最大为 $0.15''$, 与传统的光强阈值动态瞄准方法相比, 瞄准误差降低了 66%;
- 综上所述, PSD 动态瞄准方法在多个转速工况下均拥有良好的动态瞄准精度。

4.3 角度块动态测量实验

为了验证本文研究的动态瞄准方法在实际应用中

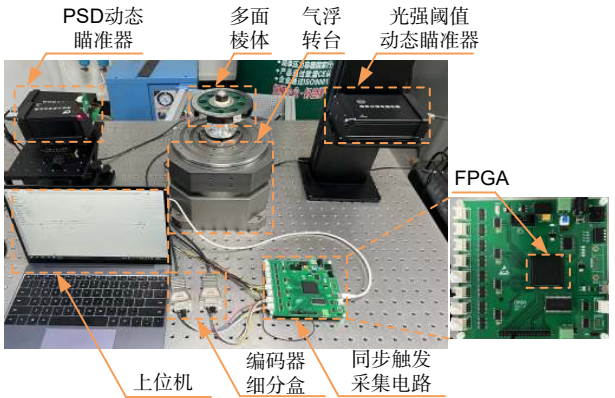


图 4 动态瞄准重复性实验系统装置图
Fig. 4 Device diagram of dynamic targeting repeatability experiment system

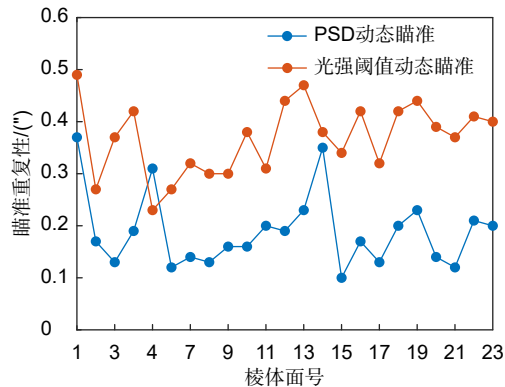


图 5 每个棱体面的瞄准重复性
Fig. 5 Repeatability of aiming on each edge surface

表 1 主要仪器规格
Table 1 Specifications of main instruments

仪器名称	型号(制造商)	技术参数
气浮转台	/	重复性: $\pm 0.2''$; 最高转速: $200^\circ/\text{s}$
圆光栅盘	RESM20 USA150(Renishaw)	23600刻线 栅距: $20\text{ }\mu\text{m}$
编码器读数头\细分盒	T1011-30A\Ti1000(Renishaw)	细分倍率: 1000; 角分辨力: $0.055''$
23面多面棱体	上海荣量	等级: 三等扩展; 不确定度: $0.1''$
FPGA电路	自制	工作频率: 50 MHz
光强阈值动态瞄准器	自制	RS422差分触发
PSD动态瞄准器	自制	RS422差分触发

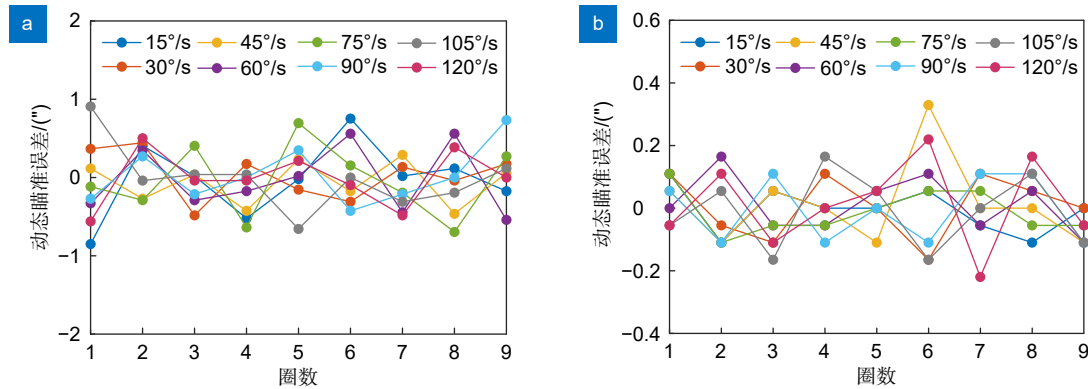


图 6 不同转速下的动态瞄准误差。(a) 光强阈值动态瞄准方法; (b) PSD 动态瞄准方法

Fig. 6 Dynamic aiming error at different rotational speeds. (a) Dynamic aiming method based on light intensity threshold; (b) PSD dynamic aiming method

的有效性, 本实验使用由 PSD 动态瞄准器与高精度气浮转台组成的动态测角实验平台对角度块进行测量, 实验装置如图 7 所示。

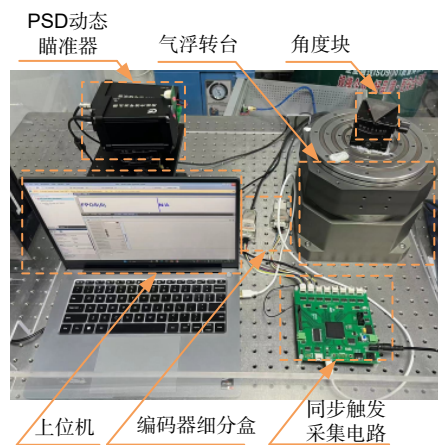


图 7 角度块动态测量实验装置图

Fig. 7 Experimental setup diagram for dynamic measurement of angle blocks

转台以 $90^\circ/\text{s}$ 工况匀速旋转 10 圈, 使用同步触发采集电路获取 PSD 动态瞄准器触发的转台角度, 角度块由专业的计量检定实验室通过标准程序检定后, 实际工作角角值为 $45^\circ 30' 2''$, 作为本次实验的真值使用, 本实验的动态测角实验平台对该角度块的测量结果如表 2 所示。

由表 2 可知, 在单次测量中, 角度块工作角测量值与实际工作角角值偏差最大为 $0.54''$, 取 10 次测量平均值作为测量结果后, 与实际工作角角值偏差为 $0.39''$, 测量结果重复性为 $0.09''$ 。根据计量检定规程《JJG 70-2004 角度块》, 1 级角度块允许的最大的工作角偏差为 $\pm 10''$, 对校准仪器的测量不确定度要求为 $3''$, 由实验结果可知, 应用 PSD 动态瞄准器的动态测角系统可以满足 1 级角度块的校准要求。

5 结 论

本文针对动态测角仪在瞄准过程中受到光强稳定

表 2 角度块测量结果

Table 2 Angle block measurement results

测量次数	A面测角值	B面测角值	工作角测量值
1	$290^\circ 36' 25.34''$	$65^\circ 6' 22.80''$	$45^\circ 30' 2.54''$
2	$290^\circ 36' 25.18''$	$65^\circ 6' 22.91''$	$45^\circ 30' 2.27''$
3	$290^\circ 36' 25.29''$	$65^\circ 6' 22.91''$	$45^\circ 30' 2.38''$
4	$290^\circ 36' 25.23''$	$65^\circ 6' 22.80''$	$45^\circ 30' 2.43''$
5	$290^\circ 36' 25.18''$	$65^\circ 6' 22.91''$	$45^\circ 30' 2.27''$
6	$290^\circ 36' 25.40''$	$65^\circ 6' 23.02''$	$45^\circ 30' 2.38''$
7	$290^\circ 36' 25.07''$	$65^\circ 6' 22.80''$	$45^\circ 30' 2.27''$
8	$290^\circ 36' 25.23''$	$65^\circ 6' 22.86''$	$45^\circ 30' 2.37''$
9	$290^\circ 36' 25.34''$	$65^\circ 6' 22.86''$	$45^\circ 30' 2.48''$
10	$290^\circ 36' 25.29''$	$65^\circ 6' 22.80''$	$45^\circ 30' 2.49''$

性影响的问题, 提出了一种基于横向光电效应的动态瞄准误差抑制方法。通过建立高斯光斑光强分布模型, 分析了动态瞄准误差的产生机理, 并验证了本文提出方法的有效性。对两种动态瞄准方法的瞄准重复性和瞄准精度开展对比实验, 实验结果显示, 与传统的光强阈值瞄准方法相比, 本文提出方法在瞄准重复性和瞄准精度上均有显著提升, 瞄准误差降低了 66%。在角度块动态测量实验中, 实验结果表明应用 PSD 动态瞄准器的动态测角系统精度能够满足 1 级角度块的校准需求, 这一研究成果为提高动态测角仪的精度和实用性提供了新的思路。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] Wang S T, Ma R, Cao F F, et al. A review: high-precision angle measurement technologies[J]. *Sensors (Basel)*, 2024, **24**(6): 1755.
- [2] Kumar A S A, George B, Mukhopadhyay S C. Technologies and applications of angle sensors: a review[J]. *IEEE Sens J*, 2021, **21**(6): 7195–7206.
- [3] Ma X Y, Zhu W B, Huang Y, et al. Research on the dynamic angle measurement method based on Kalman[J]. *Chin J Sci Instrum*, 2023, **44**(3): 119–127.
马新宇, 朱维斌, 黄垚, 等. 基于 Kalman 的动态角度测量方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, **44**(3): 119–127.
- [4] Filatov Y V, Bohkman E D, Ivanov P A, et al. Calibration of angle-measurement system for direction measurements[J]. *Proc SPIE*, 2016, **10023**: 100230W.
- [5] Cheng L. Design and research of absolute goniometer device based on autocollimator[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
<https://doi.org/10.27356/d.cnki.gtjdu.2021.000667>.
程霖. 基于自准直仪的绝对式测角仪装置设计与研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
<https://doi.org/10.27356/d.cnki.gtjdu.2021.000667>.
- [6] Filatov Y V, Pavlov P A, Velikoseltsev A A, et al. Precision angle measurement systems on the basis of ring laser gyro[J]. *Sensors (Basel)*, 2020, **20**(23): 6930.
- [7] Hsieh T H, Lin M X, Yeh K T, et al. Calibration of a rotary encoder and a polygon using a two-autocollimator method[J]. *Appl Sci*, 2023, **13**(3): 1865.
- [8] Larichev R A, Filatov Y V. A model of angle measurement using an autocollimator and optical polygon[J]. *Photonics*, 2023, **10**(12): 1359.
- [9] Xu X C, Zhu W B, Huang Y, et al. Signal synchronization method for dynamic comparison of turntable angle measurement system[J]. *Chin J Sci Instrum*, 2022, **43**(12): 112–119.
徐兴晨, 朱维斌, 黄垚, 等. 一种转台测角系统动态比对的信号同步方法[J]. *仪器仪表学报*, 2022, **43**(12): 112–119.
- [10] Zhang J Y, Fan T Q, Cao X D. Dynamic photoelectric autocollimator based on two-dimension position sensitive detector[J]. *Proc SPIE*, 2007, **6723**: 672315.
- [11] Huang Y, Huang H L, Liu J P, et al. Development on a high precision null-indicator by using two-beam interference[J]. *Infrared Laser Eng*, 2012, **41**(9): 2498–2502.
黄云, 黄海乐, 刘贱平, 等. 高精度双光束干涉指零仪的研制[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(9): 2498–2502.
- [12] Guo Y, Cheng H B, Wen Y F, et al. High-frequency small angle measurement using a dynamic autocollimator based on an improved k-means algorithm[J]. *Opt Eng*, 2018, **57**(6): 064109.
- [13] Mou J P, Su J J, Miao L J, et al. Research on field application technology of dynamic angle measurement based on fiber optic gyroscope and autocollimator[J]. *IEEE Sens J*, 2021, **21**(13): 15308–15317.
- [14] Larichev R A, Filatov Y V, Venediktov V. Dynamic angle measurements involving different optical null-indicator types[J]. *Proc SPIE*, 2023, **12769**: 127690Q.
- [15] Chen J Q. Study on microlens applied in semiconductor laser beam collimation[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2005.
陈建清. 半导体激光器光束准直微透镜的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2005.
- [16] Zhang H, Chen Y S, Geng T W, et al. Study on main factors affecting position detection accuracy of four-quadrant detector[J]. *Chin J Lasers*, 2015, **42**(12): 1217002.
张辉, 陈云善, 耿天文, 等. 四象限探测器位置检测精度的主要影响因素研究[J]. *中国激光*, 2015, **42**(12): 1217002.
- [17] Qiu H, Liu X J, Liu S G. Design of laser stabilization integrated system based on four-quadrant detector[J]. *Opt Commun Technol*, 2022, **46**(6): 44–49.
仇浩, 刘晓杰, 刘书钢. 基于四象限探测器的激光稳定集成化系统设计[J]. *光通信技术*, 2022, **46**(6): 44–49.
- [18] Lucovsky G. Photoeffects in nonuniformly irradiated p-n junctions[J]. *J Appl Phys*, 1960, **31**(6): 1088–1095.
- [19] Shang H Y, Zhang G J. Analysis of the response characteristics of position sensitive detector under different modes of light source[J]. *Opto-Electron Eng*, 2005, **32**(1): 93–96.
尚鸿雁, 张广军. 不同光源模式下位置敏感探测器响应特性分析[J]. *光电工程*, 2005, **32**(1): 93–96.

作者简介



杨世栋 (2000-), 男, 2022 年于中国计量大学获得工学学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为动态角度测量。

E-mail: p22020854154@cjlu.edu.cn



【通信作者】朱维斌 (1976-), 男, 2014 年于浙江大学获得工程博士学位, 现为中国计量大学教授, 主要研究方向为光栅信号处理和角度精密测量。

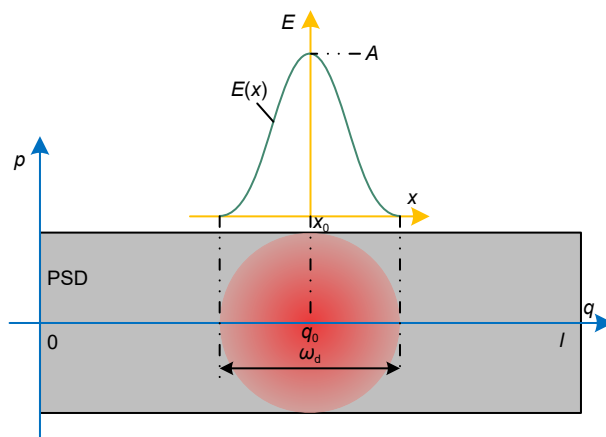
E-mail: zhuweibin@cjlu.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

A method for suppressing aiming error of dynamic goniometer

Yang Shidong¹, Zhu Weibin^{1*}, Huang Yao², Zhu Jin³, Xue Zi²



Schematic diagram of Gaussian spot intensity distribution on PSD photosensitive surface

Overview: Dynamic goniometers are widely used in precision engineering and calibration tasks, but their accuracy is often compromised by aiming errors caused by light intensity fluctuations. These errors, prevalent during dynamic operations, limit the reliability of angle measurements and hinder their broader application. To address this issue, this study focuses on developing a robust aiming error suppression method to enhance the precision and repeatability of dynamic goniometers. The research is motivated by the need for stable and accurate aiming mechanisms under varying light conditions. A Gaussian spotlight intensity distribution model is proposed to analyze the mechanism of aiming error generation, providing a theoretical basis for error suppression strategies. Based on this model, a dynamic aiming system leveraging the lateral photovoltaic effect is designed. Unlike traditional methods reliant on intensity thresholds, this approach employs a position-sensitive detector (PSD) to detect spot center positions by utilizing the proportional relationship between electrode currents, effectively reducing dependency on absolute light intensity. Built a dynamic angle measurement system to evaluate the accuracy and repeatability of different aiming methods. Results showed that the system achieved the aiming repeatability of 0.19" and the aiming accuracy of 0.15", representing a 66% reduction in aiming errors compared to conventional methods. Furthermore, dynamic angle measurements were performed using the system on Grade 1 angle blocks, demonstrating that the system meets stringent calibration requirements. The method also exhibited consistent performance under varying rotational speeds, highlighting its robustness and adaptability to different operational conditions. This study contributes to the field by presenting an innovative suppression method for dynamic aiming errors. The findings underscore the potential of PSD-based lateral photovoltaic detection to improve measurement accuracy in dynamic environments. The proposed system not only advances the precision and repeatability of dynamic goniometers but also lays a foundation for further development of dynamic angle measurement technologies.

Yang S D, Zhu W B, Huang Y, et al. A method for suppressing aiming error of dynamic goniometer[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(12): 240209; DOI: [10.12086/oee.2024.240209](https://doi.org/10.12086/oee.2024.240209)

Foundation item: Project supported by National Key Research and Development Program of China (2023YFF0615703), The Zhejiang Provincial Basic Public Welfare Research Plan (TGC24E050001), and National Natural Science Foundation of China (52175526)

¹College of Metrology Measurement and Instrument, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China; ²National Institute of Metrology, Beijing 100029, China; ³Zhejiang Institute of Quality Sciences, Hangzhou, Zhejiang 310019, China

* E-mail: zhuweibin@cjl.u.edu.cn