

引文格式: 项朋昆, 夏锐, 秦华林, 等. 基于激光准直的大距离直线基准构建[J]. 航空制造技术, 2026, 69(9): 25020272.

XIANG Pengkun, XIA Kun, QIN Hualin, et al. Large-distance straight-line datum construction based on laser collimation[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(9): 25020272.

## 基于激光准直的大距离直线基准构建

项朋昆<sup>1</sup>, 夏锐<sup>2</sup>, 秦华林<sup>2</sup>, 余厚云<sup>1</sup>, 程晶明<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016;

2. 中国航发湖南动力机械研究所, 株洲 412002)

[摘要] 针对航空制造、装配与测试现场的大距离直线基准构建难题, 提出一种基于激光准直和多传感器融合的大距离直线基准构建方法。以准直激光束作为直线基准, 设计了测量光路和补偿光路, 并开发出光电检测装置。通过装置上的位置敏感探测器 (Position sensitive detector, PSD) 检测准直激光束投射的光斑坐标, 并结合倾角传感器数据, 实现对目标位姿的精确解算。试验结果表明, 该方法能够准确测量 2 个方向平移和 3 个方向旋转共 5 个自由度的位姿变化, 5 m 范围内的位置测量误差小于 6  $\mu\text{m}$ , 角度测量误差小于 0.003°, 有效使用距离达 50 m, 满足大距离直线基准的构建精度要求。

关键词: 直线基准; 激光准直; 位置敏感探测器 (PSD); 大距离; 位姿测量

中图分类号: V21; TN209

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25020272

### Large-Distance Straight-Line Datum Construction Based on Laser Collimation

XIANG Pengkun<sup>1</sup>, XIA Kun<sup>2</sup>, QIN Hualin<sup>2</sup>, YU Houyun<sup>1</sup>, CHENG Jingming<sup>1</sup>

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

[ABSTRACT] Aiming at the challenge of establishing a large-distance straight-line datum in aviation manufacturing, assembly, and testing sites, a method for constructing a large-distance straight-line datum based on laser collimation and multi-sensor fusion was proposed. The measurement and compensation optical paths were designed and the photoelectric detection device was developed, using the collimated laser beam as the straight-line datum. The precise solution of the target pose was achieved by detecting the spot coordinates of the collimated laser beam using position sensitive detector (PSD) on the device, and combining them with the data from the tilt sensor. Experimental results indicated that the proposed method can accurately measure pose variations encompassing two translational and three rotational degrees of freedom (5 DOF in total). Within a 5 m range, the positional measurement error was less than 6  $\mu\text{m}$  and angular measurement error was less than 0.003°, the effective operational distance was up to 50 m, fulfilling the accuracy requirements for establishing a large-distance straight-line datum.

**Keywords:** Straight-line datum; Laser collimation; Position sensitive detector (PSD); Large-distance; Pose measurement

收稿日期: 2025-08-29; 退修日期: 2025-09-28; 录用日期: 2025-10-17

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (62503223); 南京航空航天大学“实验技术研究与开发”项目 (SYJS202405Z)

通信作者: 余厚云, 副教授, 研究方向为机械工程测量、光电检测技术等。

在航空航天、船舶及大型装备等制造领域,零部件的加工、装配及测量过程常涉及同一直线上多点协同作业或单点大跨度直线移动作业,例如,长距离轨道直线度测量<sup>[1]</sup>、大型构件装配现场的多设备协同工作<sup>[2]</sup>等。在此类场景中,构建能覆盖整个工作范围的高精度直线基准,对于确定测头或工作台等目标的位姿信息尤为重要。

传统的直线基准主要依赖实物基准构建,如钢丝、平尺<sup>[3]</sup>、精密导轨、平晶、大理石<sup>[4]</sup>等。其中,基于钢丝、平尺的方法能够实现较大跨距的直线基准构建,但其精度差且效率较低;基于高精度精密导轨或大理石平台构建直线基准的测量设备有直线度仪、三坐标测量机等,其测量精度可达 $\mu\text{m}$ 级<sup>[5]</sup>,然而受加工和装配精度的限制,长距离基准的成本过高,且精度也难以保证。此外,基于实物构建的直线基准一般只适合三维位置测量,用于三维姿态角测量时存在解算复杂、效率较低等问题,无法满足现场快速便捷的应用需求。

随着激光技术和光电检测技术的发展,激光干涉仪、激光跟踪仪及基于激光准直技术的测量装置等被广泛应用于形位误差测量和测量基准的构建。激光干涉仪基于激光干涉原理,配合不同的参考镜组,能够在几十m的较大范围内实现超高精度的位姿误差测量,但单次只能测量一个维度,面对多自由度位姿测量场景时,需采用分时分步操作<sup>[6]</sup>,效率受限。激光跟踪仪基于激光干涉原理和角度编码器<sup>[7]</sup>,可实现对目标镜三维坐标的测量与跟踪,并在大范围内保持较高的定位精度,配合专用合作靶标后能够进一步获取目标的三维姿态<sup>[8]</sup>,从而构建完整的位姿测量基准。然而,激光跟踪仪位姿测量精度随距离增大而逐渐下降,限制了激光跟踪仪在长距离直线基准构建场景中的应用。激光准直技术通过光学手段建立测量坐标系,利用光电传感器获取被测对象相对于坐标轴的偏移,实现位置与姿态角的高精度测量。基于此原理,杨治刚等<sup>[9]</sup>设计了深孔直线度检测装置,可同时测量深孔的二维位置偏差与二维角度偏差,1m深孔的直线度测量精度达到 $13.3\mu\text{m}$ ,然而该方法在测量过程中需要将激光束与测量装置的轴线精确调成同轴,光路调校较为繁琐。

综上所述,现有的大距离直线基准构建方法难以兼顾精度、效率与成本等多方面综合要求。为此,本文利用激光准直和光电检测技术,提出一种基于激光准直的大距离直线基准构建方法。利用准直激光束的优良指向性构建基准直线<sup>[10]</sup>,设计专用光路系统,通过多传感器数据融合获取直线上目标点位的位姿信息。该方法柔性好、精度高、效率高、操作方便,既能够直接用于零件形位误差测量,也可用于设备位姿校正,适用于机械加工、装配及测试等场合下的大跨度直线基准构建。

## 1 激光准直光路设计

### 1.1 激光束准直

半导体激光器出射的激光束为高斯激光束<sup>[11]</sup>,光束呈双曲线状,其发散角主要与激光器共振腔的几何形状和尺寸等有关<sup>[12]</sup>。若发散角过大,在大距离准直场景中激光束投射的光斑大小会超出光电探测器的接收范围,从而影响准直光束的捕捉。因此需采用准直扩束镜对激光束先进行准直,以获取具有良好准直特性的激光束。

如图1所示,准直扩束镜利用望远镜原理。设透镜 $L_1$ 、 $L_2$ 的焦距分别为 $f_1$ 、 $f_2$ ,两透镜间距离 $L=f_1+f_2+\Delta$ ,其中 $\Delta$ 为失调量,准直扩束镜的扩束倍数 $m=-f_1/f_2$ 。高斯光束的最小截面处称为束腰,若入射光的束腰直径为 $\omega_0$ ,扩束镜物距为 $s$ ,经过准直扩束镜后,激光束的束腰直径变为 $\omega'_0$ ,像距为 $s'$ 。

当透镜 $L_1$ 、 $L_2$ 焦点重合,即 $\Delta=0$ 时,有

$$\omega'_0 = |m| \cdot \omega_0 \quad (1)$$

远场发散角 $\alpha$ 与束腰成反比关系<sup>[13]</sup>,即入射光束的发散角 $\alpha_0$ 与出射光束发散角 $\alpha'_0$ 之间满足如下关系。

$$\alpha'_0 = \frac{1}{|m|} \alpha_0 \quad (2)$$

由式(2)可知,经准直扩束后,激光束的发散角减小了 $|m|$ 倍,且与物距、像距均无关。

### 1.2 光斑位置检测

准直激光束提供了一条大距离理想基准直线,为了确定沿着该基准直线分布的各个目标的位姿,就需要每个目标能够捕捉到激光束,采用位置敏感探测器(Position sensitive detector, PSD)感知准直激光束投射在其光敏面上的光斑坐标<sup>[14]</sup>。

如图2所示,当激光束入射在PSD光敏面并形成光斑点 $P_s$ 时,由于半导体器件的横向光电效应<sup>[15]</sup>,光敏面上会产生电势差,进而形成光电流。

电极连接PSD光敏面的4个角点,光斑点 $P_s$ 将光敏面划分为4个区域<sup>[16]</sup>,面积分别为 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ ,则4

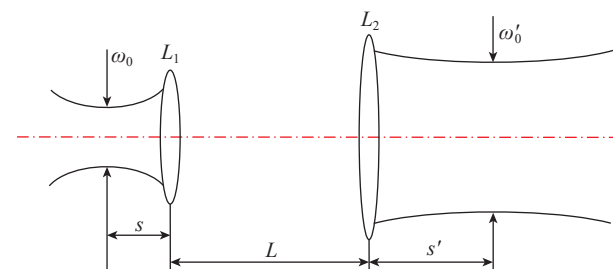


图1 准直扩束镜工作原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of working principle of collimating beam expander

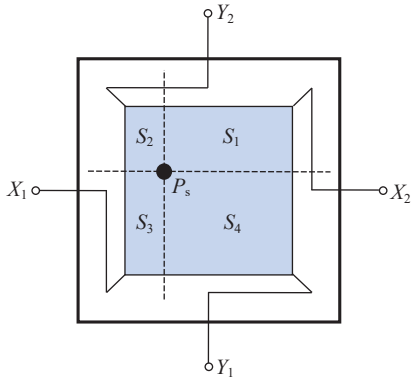


图2 二维 PSD 传感器结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of two-dimensional PSD sensor structural

个电极输出的光电流可分别表示为

$$\begin{cases} I_{X_1} = \frac{U_o}{\rho \cdot S_3} \\ I_{X_2} = \frac{U_o}{\rho \cdot S_1} \\ I_{Y_1} = \frac{U_o}{\rho \cdot S_4} \\ I_{Y_2} = \frac{U_o}{\rho \cdot S_2} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $I_{X_1}$ 、 $I_{Y_1}$ 、 $I_{X_2}$ 、 $I_{Y_2}$  为入射光束产生的输出光电流;  $U_o$  为光斑点  $P_s$  处产生的光电势;  $\rho$  为 PSD 光敏面单位面积的电阻。记 PSD 传感器在  $X$  坐标和  $Y$  坐标方向上的光敏面长度分别为  $L_x$  和  $L_y$ , 则光斑中心在 PSD 光敏面上的坐标  $(x_p, y_p)$  可由式 (4) 计算<sup>[17]</sup>。

$$\begin{cases} \frac{(I_{X_2} + I_{Y_1}) - (I_{X_1} + I_{Y_2})}{I_{X_1} + I_{X_2} + I_{Y_1} + I_{Y_2}} = \frac{2x_p}{L_x} \\ \frac{(I_{X_2} + I_{Y_2}) - (I_{X_1} + I_{Y_1})}{I_{X_1} + I_{X_2} + I_{Y_1} + I_{Y_2}} = \frac{2y_p}{L_y} \end{cases} \quad (4)$$

### 1.3 激光束漂移补偿

在检测光斑位置过程中, 激光漂移、PSD 暗电流、环境温度变化及测量电路噪声等均会造成测量误差。对于大距离准直来说, 激光束在出射及传播过程中因漂移产生的影响尤为显著<sup>[9]</sup>。即使激光器方向稳定性达到  $5 \mu\text{rad}/^\circ\text{C}$ , 在 3 m 处仍会引入  $15 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$  的漂移误差。传统的低通滤波与卡尔曼滤波可以抑制 PSD 传感器本身及其测量电路带来的噪声<sup>[18]</sup>, 但光束漂移通常为 1 Hz 以内的超低频信号, 常规滤波手段难以区分该信号与有效坐标信号, 过度降低截止频率不仅效果有限, 还会降低系统的动态特性。

针对上述问题, 提出了一种基于差分补偿的激光束漂移补偿方法。如图 3 所示, 在准直激光束  $l$  投射到测量 PSD 之前, 先经过一块包含测量光束  $l_1$  和补偿光束

$l_2$  的分光片。其中,  $l_1$  投射到测量 PSD 上用于位姿测量,  $l_2$  则投射到补偿 PSD 上用于测量激光束漂移量。由于测量光束  $l_1$  和补偿光束  $l_2$  的光程接近, 投射在两个 PSD 上的光斑漂移量相等<sup>[19]</sup>。

记补偿 PSD 上光斑的初始坐标为  $(x_0, y_0)$ , 在任意时刻记录的补偿 PSD 的实时坐标  $(x_c, y_c)$  与初始坐标之间的差值为  $x_c - x_0$  和  $y_c - y_0$ , 即当前时刻沿 PSD 两个坐标轴方向的漂移量。将该漂移量补偿给测量 PSD 测得的当前光斑坐标  $(x_m, y_m)$ , 则补偿后的坐标  $(x, y)$  可表示为

$$\begin{cases} x = x_m - (x_c - x_0) \\ y = y_m - (y_c - y_0) \end{cases} \quad (5)$$

## 2 目标位姿测量

### 2.1 测量装置设计

目标位姿测量装置的结构组成如图 4 所示, 主要由笼式立方体、分光片、PSD 传感器、倾角传感器、信号处理电路和工装等组成。两块分光片相互平行, 分别置于两个笼式立方体内。PSD 传感器 1 和 2 (PSD1 和 PSD2)

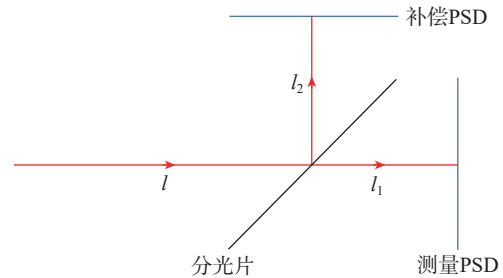


图3 差分补偿原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of differential compensation principle

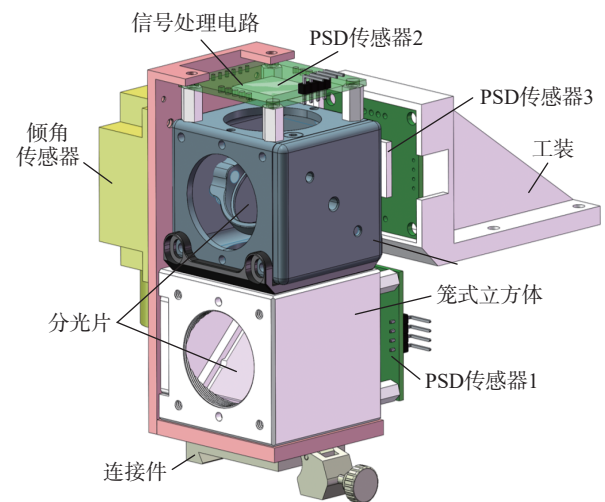


图4 目标位姿测量装置结构组成示意图

Fig.4 Schematic diagram of the target pose measurement device

安装在笼式立方体上,其光敏面与分光片成 $45^\circ$ 夹角。补偿 PSD 传感器 3 (PSD3) 独立于笼式立方体之外,位置保持不动。测量目标位姿时,装置通过笼式立方体下方的连接件安装到目标上。该连接机构采用燕尾槽快速安装座,燕尾槽结构依靠对称斜面实现自定心装夹,可实现测量装置的快速高精度定位,提高测量效率。

该测量装置的光路原理如图 5 所示,准直激光束经分光片 1 和 2 后分成两束测量光束,分别投射在 PSD1 和 PSD2 的光敏面上形成光斑  $P_1$  和  $P_2$ ,根据这两个光斑的坐标可解算出目标相对于准直激光束的位置及俯仰角、偏摆角,再结合装置上倾角传感器的数据获得滚动角,从而确定目标的三维姿态。同时,根据光斑坐标还可以确定目标在垂直于准直激光束的两个方向上的位置。分光片 2 分出的另一束补偿光束则投射到 PSD3 的光敏面上,用于激光束的漂移补偿。

## 2.2 位姿测量与坐标转换

忽略 PSD 3 构成的补偿光路,系统的测量光路如图 6 所示。在准直激光束上任取一点  $O$  作为原点,激光束出射方向为  $OZ$  轴,垂直于  $OZ$  轴的水平方向为  $OX$  轴,从而建立世界坐标系  $OXYZ$ 。PSD 传感器拥有自身的平面坐标系,坐标原点位于光敏面的中心,例如图 6 中 PSD1 的坐标系  $x_0y_0$ 。

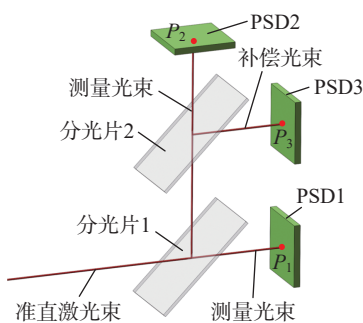


图 5 位姿测量装置光路示意图

Fig.5 Schematic of optical layout of pose measurement device

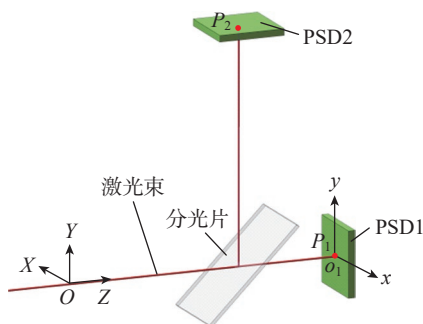


图 6 位姿测量原理及坐标系定义示意图

Fig.6 Schematic of pose measurement principle and coordinate system definition

将图 6 中的光路沿  $o_1x$  轴方向投影,投影视图如图 7 所示。假设激光束  $l$  以角度  $\theta$  射向 PSD1 的光敏面,经分光片透射后在 PSD1 的光敏面上形成光斑点  $P_1(x_1, y_1)$ ,反射后的光束  $l'$  在 PSD2 的光敏面上形成光斑点  $P_2(x_2, y_2)$ 。由于两个 PSD 的光敏面与分光片的夹角均为  $45^\circ$ ,因此根据平面镜成像原理,将 PSD2 的光敏面对称至 PSD1 的同侧得到 PSD2',对应  $P_2$  点的虚像  $P_2'$  也落在光束  $l$  的延长线上。记 PSD1 与 PSD2' 之间的距离为  $D_1$ ,则激光束  $l$  的入射角  $\theta$  为

$$\theta = \arctan \frac{y_1 - y_2}{D_1} \quad (6)$$

同理,在光路沿  $o_1y$  轴方向的投影中,激光束  $l$  的入射角  $\varphi$  为

$$\varphi = \arctan \frac{x_1 - x_2}{D_1} \quad (7)$$

式中,  $\theta$  和  $\varphi$  分别为测量装置相对于准直激光束的俯仰角和偏摆角,其数值由 PSD1 和 PSD2 测得的光斑坐标代入式 (6) 和 (7) 计算而得。滚动角  $\gamma$  由测量装置上的倾角传感器测得。

在同一直线上多点协同作业或单点大跨度直线移动作业的应用中,将测量装置固定安装在执行操作的目标上,先根据 3 个角度测量结果将目标姿态调成一致,即 PSD 坐标系与世界坐标系的对应坐标轴平行。然后,目标位置分别由 PSD 传感器和激光测距传感器提供,其中,传感器 PSD1 上的光斑坐标反映了目标在世界坐标系  $OX$  轴和  $OY$  轴方向上的位置,在  $OZ$  轴方向上的位置则由大量程激光测距传感器测得。通过上述多传感器融合的方法最终确定目标的所有位姿参数。

目标姿态经调整后,俯仰角  $\theta$  和偏摆角  $\varphi$  的误差很小,对目标位置测量的影响可忽略。滚动角  $\gamma$  反映目标绕准直激光束的旋转量,由于激光束未必投射在 PSD 的原点上,因此滚动角的存在会给目标位置计算带来一定偏差,需要进行修正。在 PSD1 的光敏面内,滚动角  $\gamma$

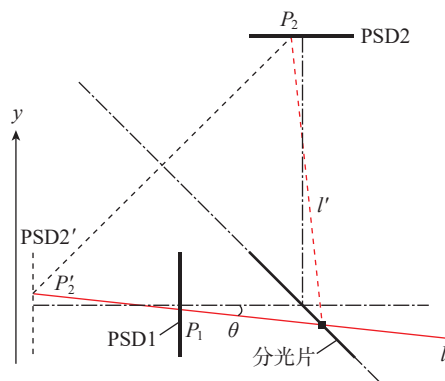


图 7 沿  $o_1x$  轴方向内的投影

Fig.7 Projection along the  $o_1x$  axis

对应的旋转变换矩阵  $R$  可表述为

$$R = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (8)$$

光斑点  $P_1(x_1, y_1)$  绕 PSD1 中心  $o_1$  旋转  $\gamma$  角后, 坐标变为

$$P'_1 = R \cdot P_1 = [x_1 \cos \gamma - y_1 \sin \gamma \quad x_1 \sin \gamma + y_1 \cos \gamma]^T \quad (9)$$

由图 6 可知, 世界坐标系  $OX$  轴与 PSD1  $o_1x$  轴的方向相反, 因此, 在世界坐标系的  $XOY$  平面内, 目标相对于世界坐标系的平移向量可表述为

$$t = [x_1 \cos \gamma - y_1 \sin \gamma \quad -x_1 \sin \gamma - y_1 \cos \gamma]^T \quad (10)$$

### 3 试验分析

#### 3.1 大距离激光准直

为了验证大距离条件下测量装置的有效性, 选取 50 m 距离测试光斑直径, 具体如图 8 所示。选用 NewOpto-650-5DM 型半导体激光器(杭州新势力公司), 波长为 650 nm, 输出功率为 5 mW, 发散角为 2 mrad, 并采用扩束倍率 8× 的准直扩束镜用于激光束准直。接收端放置一块由一系列同心圆组成的环形靶标, 如图 8 (b) 所示, 准直激光束投射在靶标上的光斑直径约为 6 mm, 可完整落入 PSD 传感器的光敏面范围。此外, 将 PSD 置于 50 m 距离处进行测试, 发现本文所提方法能够准确测得光斑坐标的位置变化。

#### 3.2 激光漂移补偿

PSD 传感器采集光斑坐标时不可避免地会引入噪声。为减小噪声对系统测量精度的影响, 选用温度特性稳定的半导体激光器作为光源, 并设计滤波电路抑制测量电路中的噪声干扰。另外结合卡尔曼滤波<sup>[20]</sup>与均值滤波算法对 PSD 数据进行软件滤波, 即先将 A/D 转换芯片采集的原始数据分组平均, 均值结果经卡尔曼滤波处理后再作为当前有效数据。

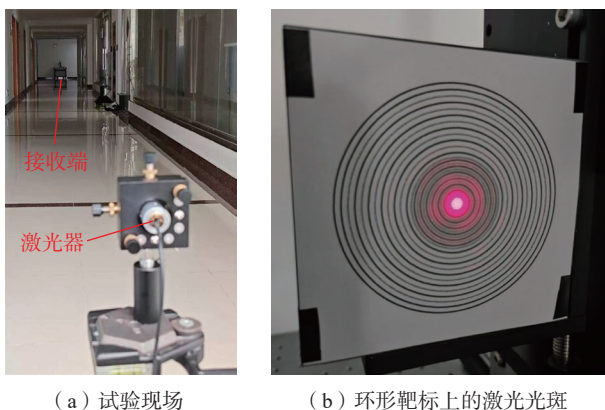


图 8 50 m 距离的激光准直验证试验

Fig.8 Laser-collimation validation experiment at 50 m

如图 9 所示, 为了验证处理后 PSD 光斑坐标采集数据的稳定性, 将测量装置固定安装在五自由度调整台上, 激光器固定在距离测量装置的 3000 mm 处, 连续采集 10 min 内 PSD1 输出的光斑坐标数据, 结果如图 10 所示。可以看出, 尽管采取了噪声抑制措施, PSD1 的光

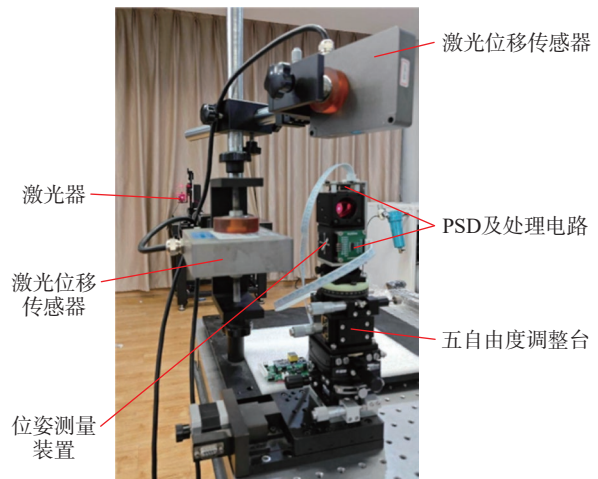
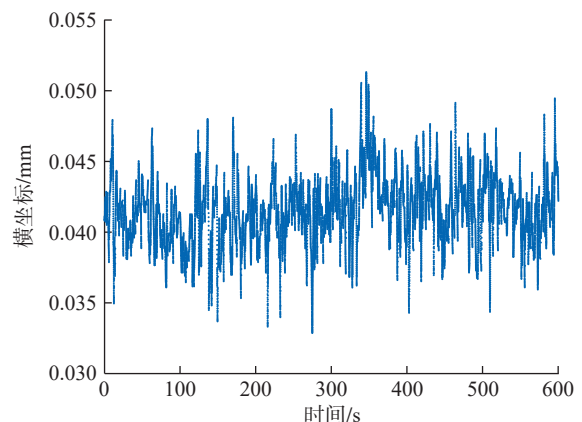
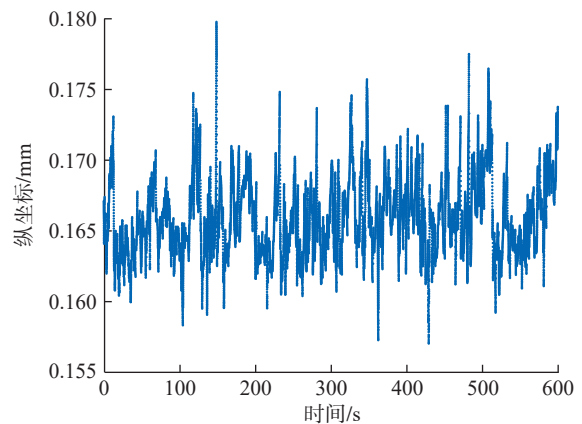


图 9 光斑坐标测量试验

Fig.9 Measurement experiment of beam spot coordinate



(a) PSD1横坐标



(b) PSD1纵坐标

图 10 PSD1 输出的光斑坐标

Fig.10 Spot coordinates output by PSD1

斑中心坐标在两个坐标方向上仍存在  $\pm 10 \mu\text{m}$  的波动,在位姿测量时将引入较大误差。因此,在测量装置旁边固定安装了 PSD3,用于激光漂移补偿,如图 11 所示。

图 12 给出了经过漂移补偿后, PSD1 在 10 min 内采集的光斑坐标数据,可以看出,补偿后 PSD1 输出的激光光斑横、纵坐标波动显著降至  $\pm 1.5 \mu\text{m}$ ,表明 PSD3 有效抑制了由激光漂移引起的随机测量误差。

### 3.3 激光光斑位置测量

漂移补偿后测量装置的光斑坐标测量精度需进一步验证,为此,基于图 9 的试验平台设计了位置测量重复性试验。位姿测量装置固定在五自由度调整台上,其水平和竖直方向位移量由测量精度为  $1 \mu\text{m}$  的高精度激光测距传感器监测。分别调整五自由度调整台的水平和竖直方向位置,使相应方向的激光位移传感器读数相同,水平和竖直方向分别重复进行 10 组试验,并记录 PSD1 的坐标读数。表 1 和 2 给出了水平和竖直方向 10 次重复测量的结果,水平和竖直方向光斑坐标测量的极差最大值为  $5.9 \mu\text{m}$  ( $< 6 \mu\text{m}$ ),表明系统具有良好的测量重复性。

由于 PSD3 及工装在安装过程中存在定位误差,重复安装时无法保证与准直激光束的相对位姿完全相同。为评估该定位误差对位置测量的影响,在图 11 所示的试验平台上设计了补偿模块处于不同位姿时的位移测量值误差试验。调整 PSD3 相对激光束的偏摆角度,范围为  $-3^\circ \sim 3^\circ$ ,以  $1^\circ$  为间隔进行试验。在每个角度下,以激光位移传感器为基准,记录补偿后测量装置位移  $0.1 \text{ mm}$  的坐标读数变化,得到 14 组位移读数,如表 3 所示。补偿后测量装置位移  $0.1 \text{ mm}$  的测量极差为  $2.5 \mu\text{m}$ ,标准差为  $0.7 \mu\text{m}$ ,表明 PSD3 的位姿偏差未对测量装置的位移测量产生显著影响,验证了该补偿方法具有较强的鲁棒性。

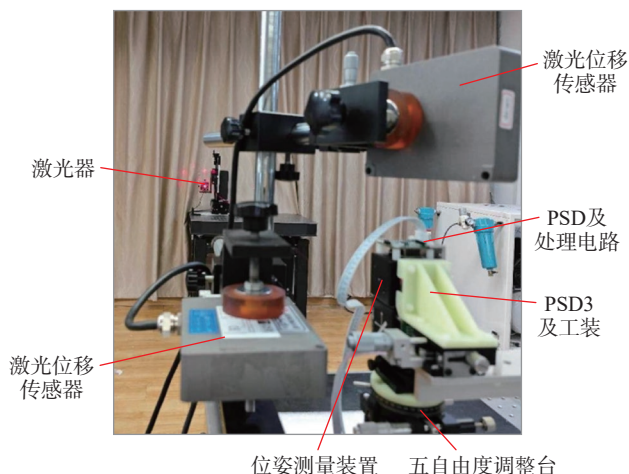


图 11 漂移补偿光斑坐标测量试验

Fig.11 Measurement experiment of drift-compensation beam spot coordinate

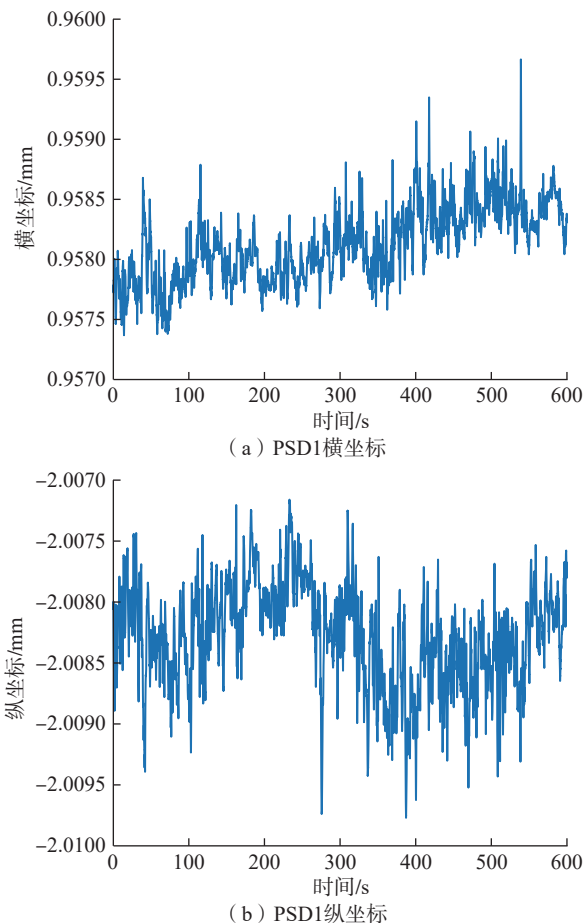


图 12 漂移补偿后 PSD1 输出的光斑坐标

Fig.12 Spot coordinates output by PSD1 after drift-compensation

表 1 光斑坐标水平方向的测量重复性试验结果

Table 1 Repeated experiment results of beam spot coordinates in horizontal direction mm

序号	水平方向 读数	竖直方向 读数	PSD1横坐标	PSD1纵坐标
1	72.571	72.474	-0.0258	0.0029
2	72.571	72.474	-0.0252	0.0022
3	72.571	72.474	-0.0249	0.0028
4	72.571	72.474	-0.0246	0.0019
5	72.571	72.474	-0.0246	0.0009
6	72.571	72.474	-0.0257	0.0023
7	72.571	72.474	-0.0251	0.0016
8	72.571	72.474	-0.0241	0.0016
9	72.571	72.474	-0.0245	0.0038
10	72.571	72.473	-0.0256	0.0025
极差			0.0017	0.0029
标准差			0.0006	0.0008

3.4 激光准直姿态角测量试验

测量装置以准直激光束作为测量基线,激光束的漂移不仅影响位置测量精度,也影响姿态角的测量,为

表 2 光斑坐标竖直方向的测量重复性试验结果

Table 2 Repeated experiment results of beam spot coordinates in vertical direction mm

序号	水平方向 读数	竖直方向 读数	PSD1横坐标	PSD1纵坐标
1	72.589	72.543	-0.0577	0.0446
2	72.588	72.543	-0.0577	0.0461
3	72.586	72.543	-0.0575	0.0467
4	72.586	72.543	-0.0548	0.0460
5	72.585	72.543	-0.0544	0.0450
6	72.587	72.543	-0.0542	0.0443
7	72.584	72.543	-0.0542	0.0443
8	72.584	72.543	-0.0536	0.0451
9	72.581	72.543	-0.0595	0.0449
10	72.583	72.543	-0.0550	0.0439
极差			0.0059	0.0028
标准差			0.0020	0.0009

表 3 不同位姿下 PSD3 的位移测量结果

Table 3 Displacement measurement results under different pose conditions of PSD3

序号	补偿模块偏摆角/(°)	位移测量值/mm
1	-3	0.0994
2	-3	0.1010
3	-2	0.1001
4	-2	0.1013
5	-1	0.0996
6	-1	0.0997
7	0	0.1008
8	0	0.1005
9	1	0.0997
10	1	0.0999
11	2	0.0995
12	2	0.0994
13	3	0.0988
14	3	0.1002
极差		0.0025
标准差		0.0007

此在图 9 所示的试验平台上设计了位姿测量系统的姿态角数据采集稳定性试验。位姿测量装置固定在五自由度调整台上,距离准直激光器 3000 mm,连续测量 10 min。根据式(6)和(7)可知,姿态相关角度  $\theta$  和  $\varphi$  仅与两个 PSD (PSD1 和 PSD2') 的纵坐标差 ( $\Delta y=y_1-y_2$ ) 和横坐标差 ( $\Delta x=x_1-x_2$ ) 相关,  $\Delta y$  和  $\Delta x$  的稳定性直接反映姿态角测量的稳定性。试验结果(图 13)表明,  $\Delta y$  和  $\Delta x$  的数据波动范围约为  $\pm 2 \mu\text{m}$ , 对应的姿态角波动约为  $0.003^\circ$ , 表明姿态角测量具有较高的稳定性。

姿态角测量试验如图 14 所示,位姿测量装置安装在定位精度为  $\pm 0.5''$  的高精度气浮转台上。使用气浮转台分别带动位姿测量系统沿俯仰和偏摆轴旋转,记录各轴运动过程中气浮转台角度读数及测量系统两个 PSD 传感器的横、纵坐标读数差  $\Delta x$  和  $\Delta y$ 。

表 4 和 5 给出了在俯仰角和偏摆角  $\pm 3^\circ$  的范围内,气浮转台角度与  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  的对应关系。将试验结果代入式(6)和(7),求解得出 PSD1 与 PSD2' 之间的距离  $D_1$  为 39.55 mm。

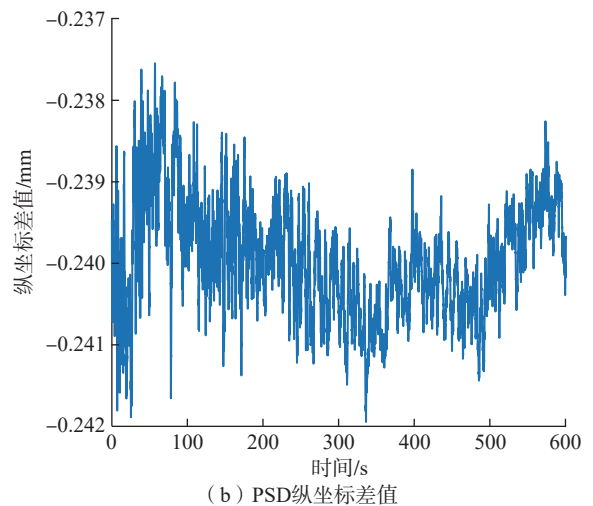
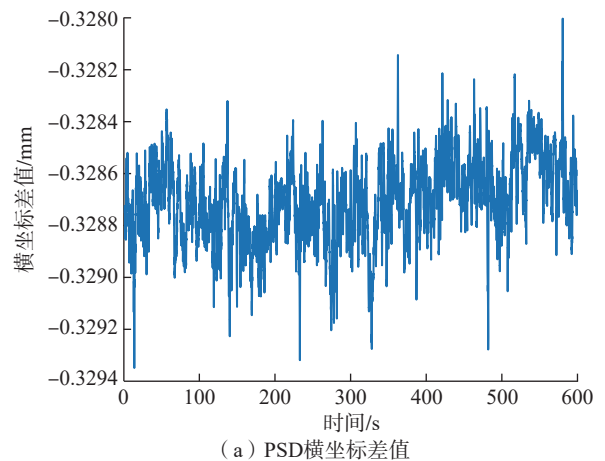
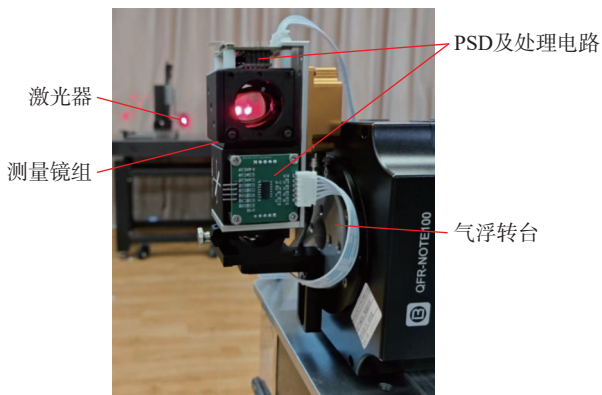
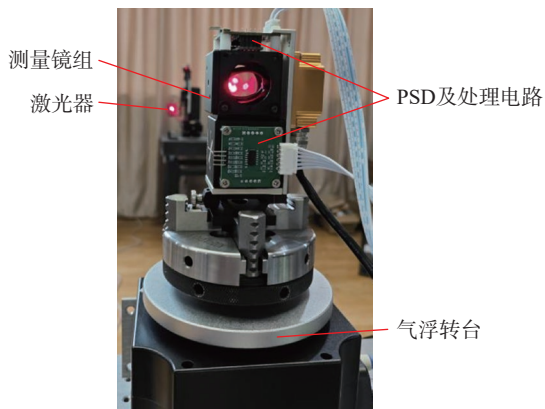


图 13 位姿测量稳定性试验结果

Fig.13 Experimental results of pose measurement stability



(a) 俯仰角测量试验



(b) 偏摆角测量试验

图 14 激光准直姿态角测量试验

Fig.14 Measurement experiment of laser-collimation-based Euler angle

表 4 位姿测量装置的俯仰角测量结果

Table 4 Pitch angle measurement results by pose measurement device

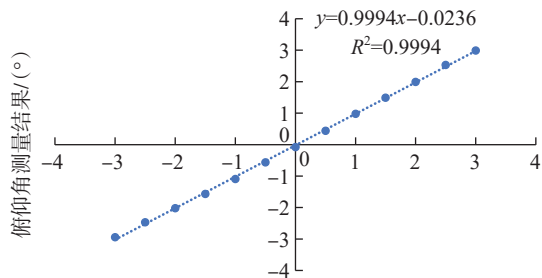
序号	气浮转台读数/(°)	$\Delta y/mm$
1	-3.0	-2.0312
2	-2.5	-1.7042
3	-2.0	-1.3941
4	-1.5	-1.0814
5	-1.0	-0.7553
6	-0.5	-0.3894
7	0	-0.0544
8	0.5	0.3034
9	1.0	0.6743
10	1.5	1.0288
11	2.0	1.3773
12	2.5	1.7502
13	3.0	2.0645

将表 4 和 5 的数据及求解得到的  $D_1$  代入式 (6) 和 (7), 计算得到以角度值表示的俯仰、偏摆角测量结果, 以及与气浮转台角度间的对应关系如图 15 所示。可以看出, 俯仰、偏摆角的测量结果与气浮转台角度呈线性

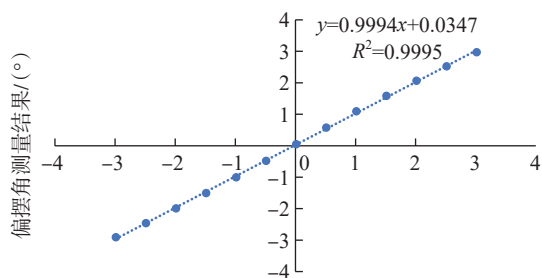
表 5 位姿测量装置的偏摆角测量结果

Table 5 Yaw angle measurement results by pose measurement device

序号	气浮转台读数/(°)	$\Delta x/mm$
1	-3	-2.0118
2	-2.5	-1.7016
3	-2.0	-1.3794
4	-1.5	-1.0444
5	-1.0	-0.6963
6	-0.5	-0.3359
7	0	0.0313
8	0.5	0.3959
9	1.0	0.7502
10	1.5	1.0928
11	2.0	1.4221
12	2.5	1.7407
13	3.0	2.0481



(a) 俯仰角



(b) 偏摆角

图 15 位姿测量装置的姿态角测量结果

Fig.15 Measurement results of Euler angles by pose measurement device

关系,拟合决定系数  $R^2$  分别为 0.9994 和 0.9995,该结果验证了姿态角计算公式(式(6)和(7))的准确性。

为评估位姿测量系统的角度测量重复性,基于图 14 所示的试验平台进行试验,重复调节气浮转台至相同角度位置,在俯仰角和偏摆角方向分别重复 10 次试验,记录气浮转台角度读数及测量系统对应的俯仰角  $\theta$  和偏摆角  $\varphi$ ,结果如表 6 和 7 所示。可知,位姿测量系统的俯仰角和偏摆角测量极差分别为  $0.00136^\circ$  和  $0.00114^\circ$ ,表明系统具有较高的姿态角重复测量精度。

表 6 俯仰角的测量重复性试验结果

Table 6 Repeated experiment results of pitch angle (°)

序号	气浮转台读数	俯仰角
1	0	-0.06093
2	0	-0.06113
3	0	-0.06093
4	0	-0.06199
5	0	-0.06099
6	0	-0.06173
7	0	-0.06137
8	0	-0.06176
9	0	-0.06229
10	0	-0.06124
极差		0.00136
标准差		0.00048

表 7 偏摆角的测量重复性试验结果

Table 7 Repeated experiment results of yaw angle (°)

序号	气浮转台读数	偏摆角
1	0	0.08894
2	0	0.08832
3	0	0.08826
4	0	0.08886
5	0	0.08882
6	0	0.08918
7	0	0.08827
8	0	0.08904
9	0	0.08804
10	0	0.08819
极差		0.00114
标准差		0.00041

### 3.5 现场应用

本文所构建测量装置在直升机传动轴直线度测量及传动轴系偏角测量中均得以应用。在测量过程中,需要沿着轴向布置多个测头,每个测头分别获取当前截面上的轴心坐标,而多个测头则通过本文所提测量基准构建方法统一在同一个测量坐标系内。

如图 16 所示,将准直激光器置于被测轴系的一端并发射激光束,然后将测量装置依次安装到各个测头上,通过所提出的位姿解算方法得到测头 6 个自由度的位姿参数。测量装置在不同测头间的切换耗时约为 10 s,装夹完成后测头的位姿测量结果可被立即获取。根据测量结果将各个测头的位姿调成一致,最终实现大距离分布的多个测头坐标系的统一,为同一直线上的大距离多点分布式测量奠定基础。

## 4 结论

(1)提出了一种基于激光准直的位姿测量方法,开发了相应的测量装置并进行试验验证,并已在直升机传动轴直线度测量及传动轴系偏角测量现场成功应用。该测量装置可同时实现三维姿态角与二维位置测量,准确获取不同测量点位的位姿信息,建立统一的直线基准。该测量装置的姿态角测量误差小于  $0.003^\circ$ ,位置测量误差小于  $6\ \mu\text{m}$ ,能够满足加工、测量与装配等环节的大距离直线基准构建要求。

(2)采用准直扩束镜获取具有良好准直特性的激光束作为基准直线,融合卡尔曼滤波与均值滤波构建复合滤波算法,并提出基于差分补偿的激光漂移补偿方法。该方法有效抑制了准直激光光斑位置的随机测量误差,增强了 PSD 传感器的抗干扰能力,显著提升了直线测量基准构建的鲁棒性。

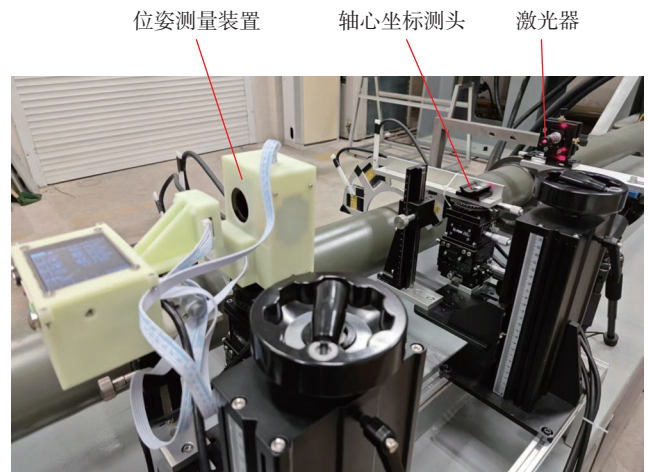


图 16 传动轴偏角测量试验

Fig.16 Measurement of deflection angle of drive shaft

## 参考文献

- [1] 金挺, 朱进, 陈挺, 等. 基于PSD的分离式长导轨直线度测量方法研究[J]. 计量学报, 2024, 45(3): 425–432.
- JIN Ting, ZHU Jin, CHEN Ting, et al. Research on PSD-based straightness measurement method of separated long guide rail[J]. Acta Metrologica Sinica, 2024, 45(3): 425–432.
- [2] 王哲, 丰飞, 郭峰. 大尺度复杂构件群体机器人协同并行制造系统集成关键技术[J]. 航空制造技术, 2025, 68(4): 53–66.
- WANG Zhe, FENG Fei, GUO Feng. Key technologies of swarm robotic cooperative parallel manufacturing system integration for large scale complex components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(4): 53–66.
- [3] 程维明, 宋伟, 刘亮, 等. 一种新型桥门式起重机轨道测量方法[J]. 中国机械工程, 2010, 21(18): 2187–2191.
- CHENG Weiming, SONG Wei, LIU Liang, et al. A new method of measuring bridge and trestle crane rails[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(18): 2187–2191.
- [4] 吴宇. 基于无衍射光直线基准和激光三角测距的直线度测量系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
- WU Yu. Research on straightness measurement system based on non-diffraction beam straight reference and laser triangulation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024.
- [5] 李婷, 郭宇, 张拥军, 等. 直线度测量技术综述[J]. 计量技术, 2020, 64(6): 84–87.
- LI Ting, GUO Yu, ZHANG Yongjun, et al. Survey of straightness measurement methods[J]. Measurement Technique, 2020, 64(6): 84–87.
- [6] HAITJEMA H. Calibration of displacement laser interferometer systems for industrial metrology[J]. Sensors, 2019, 19(19): 4100.
- [7] 金涨军. 飞机装配中大尺寸测量场的建立与优化技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- JIN Zhangjun. Establishment and optimization of large-volume measuring field in aircraft assembly[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [8] 邱启帆, 程智, 高豆豆, 等. 基于准直激光的跟踪合作目标小范围二维姿态测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(5): 188–196.
- QIU Qifan, CHENG Zhi, GAO Doudou, et al. Research on the small-range two-dimensional attitude measurement method of tracked cooperative target based on collimating laser[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(5): 188–196.
- [9] 杨治刚, 郝建军, 刘子涛. 单激光双PSD深孔直线度检测系统设计[J]. 工具技术, 2024, 58(11): 144–148.
- YANG Zhigang, HAO Jianjun, LIU Zitao. Design of single laser dual PSD deep hole straightness detection system[J]. Tool Engineering, 2024, 58(11): 144–148.
- [10] 翟玉生, 柳文龙, 王新杰, 等. 激光准直测量中的光漂补偿方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(7): 071203.
- ZHAI Yusheng, LIU Wenlong, WANG Xinjie, et al. Methods for laser beam drift compensation in laser alignment measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(7): 071203.
- [11] 吴逢铁, 张前安, 郑维涛. 等效轴棱锥产生长距离无衍射贝塞尔光束[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1202004.
- WU Fengtie, ZHANG Qian'an, ZHENG Weitao. Generating long-distance nondiffracting Bessel beams with equivalent axicon[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(12): 1202004.
- [12] 赵伊宁, 王鑫, 向阳. 折反射式连续大变倍比扩束系统设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2012, 35(1): 46–48, 89.
- ZHAO Yining, WANG Xin, XIANG Yang. Design of catadioptric variable focus beam expanding optical system[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2012, 35(1): 46–48, 89.
- [13] 张建君, 谢剑锋, 李莉, 等. 远距离脉冲激光测距发射与接收系统设计[J]. 激光杂志, 2024, 45(11): 37–41.
- ZHANG Jianjun, XIE Jianfeng, LI Li, et al. Design of transmitting and receiving system for long-distance pulse laser ranging[J]. Laser Journal, 2024, 45(11): 37–41.
- [14] CONNORS W P. Lateral photodetector operating in the fully reverse-biased mode[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1971, 18(8): 591–596.
- [15] 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.
- [16] DIJKKOMP V, OGALE K. Non-linear localized filtering using transimpedance amplifier for microscopy systems based on PSD[J]. International Journal of Latest Engineering and Management Research, 2018, 3(8): 40–46.
- [17] LU X H, JIA Z Y, HU X C, et al. Design of Double PSDs mounting plate on the tracing measurement system[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2017, 11(1): JAMDSM0006.
- [18] 赵文赫, 白杨杨, 王劲凯, 等. 基于双PSD的三维测角传感器精度分析[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(2): 20230543.
- ZHAO Wenhe, BAI Yangyang, WANG Jinkai, et al. Accuracy analysis of a three-dimensional angle measurement sensor based on dual PSDs[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(2): 20230543.
- [19] 翟玉生, 耿利杰, 李阳, 等. 激光光线漂移补偿方法综述[J]. 激光杂志, 2015, 36(9): 1–4.
- ZHAI Yusheng, GENG Lijie, LI Yang, et al. Survey of laser beam drift compensation methods[J]. Laser Journal, 2015, 36(9): 1–4.
- [20] VUJEČ I, ODAK PLENKOVIĆ I. Kalman filter sensitivity tests for the NWP and analog-based forecasts post-processing[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2023, 135: 1.

(责编 向阳)