

文章编号 1004-924X(2026)12-1807-10

激光差动对准的动态角高精度光学测量系统

刘龙康, 赵维谦, 汝洪武, 魏晓玺, 邱丽荣, 王 允*

(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要:针对动态角度测量系统中由于光学像差难以被抑制从而导致对准测量精度下降的问题,本文提出了一种基于激光差动对准原理的高精度动态抑制像差光学测量技术。通过建立包含像差因子的差动对准数学模型,深入分析了像差对探测光斑能量分布及差动信号零点定位的影响,进而实现了波前差与测角灵敏度之间定量规律的推导;在此基础上,利用长焦距折反式光学结构与引入偶次非球面,有效抑制了轴上与轴外残余像差,提高了测角精度。理论分析和初步的实验表明,该技术可以有效抑制像差,系统在全视场下的均方根弥散斑半径均小于艾里斑半径,波前均方根误差低于 0.0424λ ,MTF 逼近衍射极限;本系统的对准测量重复性可达 $0.027''$,相比于目前广泛使用的 ELCOMAT®3000 自准直仪重复性提高了 41%,且本系统的对准测量最大偏差仅为 $0.085''$ 。可为高精度动态角度测量提供可靠的技术途径。

关键词:光学设计;差动对准;高精度;像差抑制

中图分类号:TH741 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20263412.1807 CSTR:32169.14.OPE.20263412.1807

High-precision optical measurement system for dynamic angle based on laser differential alignment

LIU Longkang, ZHAO Weiqian, RU Hongwu, WEI Xiaoxi, QIU Lirong, WANG Yun*

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

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

Abstract: To address the degradation of alignment measurement accuracy caused by the difficulty in suppressing optical aberrations in dynamic angle measurement systems, this paper proposed a high-precision optical measurement technique featuring dynamic aberration suppression based on the principle of laser differential alignment. A differential alignment mathematical model incorporating aberration factors was established to thoroughly analyze the impact of aberrations on the energy distribution of the detection spot and the zero-point positioning of the differential signal. This analysis facilitated the derivation of a quantitative relationship between wavefront aberration and angular measurement sensitivity. Subsequently, a long-focal-length catadioptric optical structure alongside even aspheric surfaces was employed to effectively suppress both on-axis and off-axis residual aberrations, thereby enhancing the angular measurement accuracy. Theoretical analysis and preliminary experiments demonstrate that the proposed technique can effectively suppress optical aberrations. Across the full field of view (FOV), the root-mean-square (RMS) spot radii are all smaller than the Airy disk radius, the wavefront RMS error is less than 0.0424λ , and the modula-

收稿日期:2026-04-08;修订日期:2026-04-28.

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(No. 2023CX01006)

tion transfer function (MTF) approaches the diffraction limit. The alignment measurement repeatability of the proposed system reaches 0.027 arcseconds, which is 41% higher than that of the widely adopted EL-COMAT®3000 autocollimator, and the maximum alignment measurement deviation of this system is only 0.085 arcseconds. This study provides a reliable technical pathway for high-precision dynamic angle measurement.

Key words: optical design; differential alignment; high precision; aberration suppression

1 引言

高精度角度测量技术在精密光学检测、航空航天姿态测量、惯性导航系统标定以及高端装备制造等领域具有重要应用价值^[1-2]。随着相关系统向高速化和动态化方向发展,角度测量逐渐由静态拓展至动态测量场景,对测量系统在全角度范围内的测量精度提出了更高要求^[3]。在众多测角手段中,光学测角方法凭借其非接触、高灵敏度和高分辨力等优势,成为实现高精度动态角度测量的重要技术途径。然而,随着测角精度要求的不断提升,光学系统中像差的影响愈发凸显,对像差的抑制程度直接影响了测角精度,因此光学系统像差的优劣成为限制测角精度进一步提高的主要问题。

在动态角度测量领域,基于激光自准直原理的测角技术结构相对简单、灵敏度高,在精密角度测量领域得到了广泛应用^[4]。但常规的自准直方法在试图扩大测量范围时,往往受到镜头孔径和像差理论的严重限制,为突破这种像差对量程的约束,李仁普^[5]提出了一种基于光斑变形的测角算法与系统,在紧凑的光学结构下绕开了传统像差放大的缺陷,实现了大范围的动态角度测量,测量精度为6.1"。孙军华^[6]提出了一种基于三个激光位移传感器的光电测量方法,通过建立视觉测量模型并进行标定,实现了动态角度测量。也有研究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,该系统可以在现场应用中对光纤陀螺仪的标度因子进行校准,在 $\pm 0.05^\circ$ 范围内精度可达1"^[7]。基于光纤陀螺的动态角度测量中,通过引入倾斜传感器来消除对准误差,该方法测量误差优于2",标准偏差接近0.2"^[8]此外,基于光栅剪切干涉测量的动态角度测量原理也得到了分析,研究发现,像差会导致干涉条纹的周期、位置和形状畸变,从而增加测

量误差,采用一维方波相位光栅作为衍射分束器并优化系统参数,成功消除了由像差引起的动态测角误差,使系统的角度误差在 $\pm 6 \mu\text{rad}$ 以内,测量不确定度仅为 $0.14 \mu\text{rad}$ ^[9]。在自准直高斯式的光学系统中视场无影响,但半透明棱镜上下表面均会反光,产生难以消除的系统杂光,导致测量误差^[10]。张军^[11]推导出基于四象限探测器的角度测量系统因畸变而产生的误差规律,定量给出了角度测量误差与测量镜头畸变系数之间的正相关关系。李跃超指出彗差系数越大,其对自准直仪测量精度的影响就越显著;像差对自准直仪精度的影响会随着出瞳距离的增加、焦距的缩短和出瞳直径的减小而增加^[12]。

在动态测角条件下,被测目标的连续旋转和姿态变化会放大光学系统像差引起的成像误差,导致目标像点出现偏移、扩散及非线性变化,从而直接影响角度解算精度^[13]。尤其是在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 全角度动态测量过程中,传统光学系统在高精度、高动态响应以及微小角度分辨力方面存在挑战。像差的存在,尤其是球差与彗差,会导致光斑弥散,严重影响探测器对像点位置的精确判断,从而限制了测角系统的测量精度。因此,有必要针对动态差动对准测量高精度的需求,开展面向像差抑制的光学系统设计与优化技术研究。

因此本文基于差动对准原理,分析光学系统像差对动态角度对准测量精度的影响,推导波前差与测角灵敏度之间的定量关系;通过采用长焦距折反式光学结构并引入偶次非球面透镜,提出一种能有效抑制像差的动态角度光学测量技术,从而提高对准测量精度。

2 高精度差动对准角度测量原理

高精度差动对准角度测量原理基于自准直光路结合四象限探测器进行光强探测,实现对信

号差动对准;为利用差动信号零点附近的线性高斜率特性,实现对角度位置的精确定位,建立含像差因子的差动对准模型,推导光学系统的透射波前均方根误差与测角灵敏度的定量规律。

激光差动对准角度测量方法原理如图 1 所示。半导体光纤激光器发出的激光经过光纤准直镜 L_{FC} 、准直物镜 L_C 二次准直后照射到面被测件 (Device Under Test, DUT) 表面,光束反射后经过像差校正透镜组 L_{AC} ,最终在四象限探测器 (Four-Quadrant Detector, QPD) 靶面形成探测光斑。被测件按固定方向旋转,当被测面法线与光轴平行时,光斑处于探测器中心位置,此时探测器左右两侧象限接收光功率相等,差动信号到达零点位置,触发并读取编码器角度信息。通过该方法可获得被测件任意被测面的角度位置坐标,并通过差值计算获得任意两面之间的夹角。

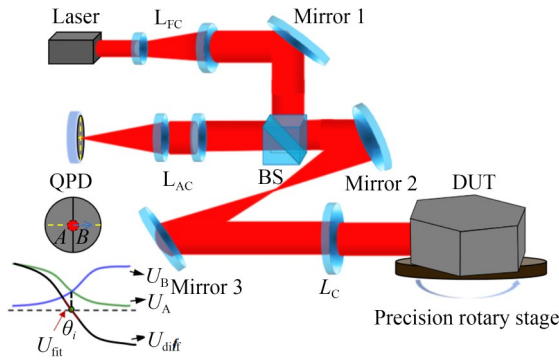


图 1 激光差动对准角度测量系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of laser differential angle measurement system

针对差动对准测量原理^[14],建立数学模型讨论像差对差动对准测角系统性能的影响:

假设光学系统入瞳处的高斯光束振幅分布为:

$$A(\xi, \eta) = A_0 \exp\left(-\frac{\xi^2 + \eta^2}{\sigma_p^2}\right), \quad (1)$$

其中: A_0 为光瞳中心振幅峰值, (ξ, η) 为归一化光瞳坐标, σ_p 为高斯宽度参数。

对应的入瞳处光强度分为:

$$|A(\xi, \eta)|^2 = |A_0|^2 \exp\left(-\frac{\xi^2 + \eta^2}{\sigma_p^2}\right). \quad (2)$$

在实际系统中,透射波前往往存在畸变。用

泽尼克多项式表示系统在像面处的透射波前差:

$$W(\xi, \eta) = \sum a_i \cdot Z_i(\xi, \eta), \quad (3)$$

其中: a_i 分别为像差系数; Z_i 为泽尼克多项式。

波前像差的存在会导致光线偏离理想的会聚路径^[15]。在几何光学近似下,波前斜率的变化直接映射为像面上光斑位置的偏移。光瞳上任意一点发出的光线本应会聚到理想像点,但由于波前斜率的存在偏移到:

$$\begin{cases} x_g(\xi, \eta) = \frac{\partial W}{\partial \xi} \cdot M \\ y_g(\xi, \eta) = \frac{\partial W}{\partial \eta} \cdot M \end{cases}, \quad (4)$$

其中: M 为几何比例因子; $M = \frac{f + \Delta z}{R}$, f 为系统等效焦距; Δz 为像面离焦量; R 为光瞳半径。

综合考虑衍射效应与像差影响,像面上的光强分布 $I_l(x, y)$ 可通过菲涅尔衍射积分^[16]求得:

$$I_l(x, y) = \iint_{\text{pupil}} |A(\xi, \eta)|^2 \cdot \frac{1}{2\pi r_0^2} \exp\left(-\frac{(x - x_g)^2 + (y - y_g)^2}{2r_0^2}\right) d\xi d\eta, \quad (5)$$

其中, $r_0 = \frac{\lambda f}{\sqrt{2} \pi \sigma_p R}$ 。

角度测量误差原理如图 2 所示,当被测面法线与系统光轴存在夹角 θ 时,反射光斑在探测器靶面产生横向偏移 X_c ,其几何中心位置满足:

$$X_c = f \cdot \tan 2\theta \approx f \cdot 2\theta, \quad (6)$$

其中, f 为系统等效焦距。

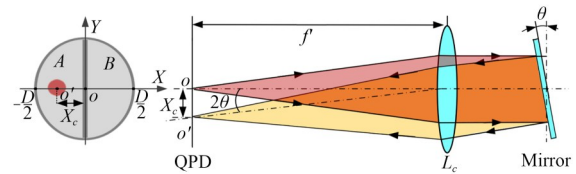


图 2 角度测量误差原理图

Fig. 2 Schematic diagram of angle measurement errors

此时,以探测器中心为分界线(假设以 A, B 区域划分),左右两侧象限接收的光功率 P_A 和 P_B 分别为光强分布在对应光敏面积分:

$$\begin{cases} P_A = \int_{-D/2}^0 \int_{-D/2}^{+D/2} I_l(x - X_c, y) dy dx \\ P_B = \int_0^{+D/2} \int_{-D/2}^{+D/2} I_l(x - X_c, y) dy dx \end{cases}. \quad (7)$$

探测器输出电压信号经前置放大与差分电路处理后,得到的单路信号 $U_A(\theta)$, $U_B(\theta)$ 为:

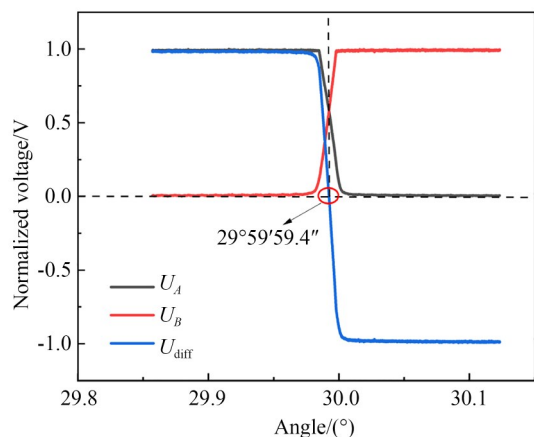
$$\begin{cases} U_A(\theta) = K \cdot R_{AV} \cdot R_P \cdot P_A(\theta) \\ U_B(\theta) = K \cdot R_{AV} \cdot R_P \cdot P_B(\theta) \end{cases} \quad (8)$$

其中: K 为运算放大器电压增益; R_{AV} 为跨阻放大系数; R_P 为探测器响应度。

系统的差动对准信号输出电压 U_{diff} 为:

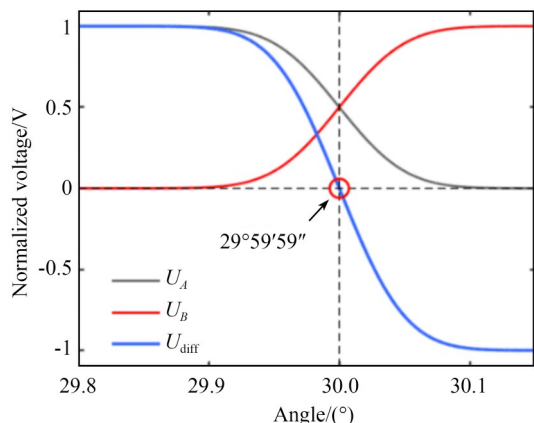
$$U_{\text{diff}} = K \cdot R_{AV} \cdot R_P \cdot (P_A - P_B). \quad (9)$$

基于上述理论模型,仿真计算了理想无像差情况与存在混合像差情况下的差动对准曲线。仿真结果如图 3 所示,其中图 3(a) 为无像差时的理想曲线,图 3(b) 为引入像差后的曲线。



(a) 无像差横向差动对准曲线

(a) Aberration-free transverse differential alignment curve



(b) 有像差横向差动对准曲线

(b) Aberrated transverse differential alignment curve

图 3 有无像差横向差动对准曲线仿真结果对比图

Fig. 3 Comparison of the simulated transverse differential alignment curves with and without aberrations

由图 3 可知,不同像差对探测光斑的作用机制不同,在实际的光学系统中往往是多种像差叠加,最终导致光斑的光功率曲线偏离理想的高斯形。这种偏离主要有两种表现形式,一是光斑光功率峰值下降^[17],二是光斑的能量中心偏离几何中心^[18]。前者会导致差动信号曲线零点附近的斜率降低,感知信号变化的灵敏度下降,系统测角分辨率降低;后者会使差动信号的零点位置产生偏移,进而产生角度定位偏差。

对于小像差系统,引入斯特列尔比 (Strehl Ratio, SR) 量化峰值光强的下降^[19],其定义为有像差时中心光强 $I_{i_aberrated}(0,0)$ 与无像差时理想中心光强 $I_{i_ideal}(0,0)$ 的比值:

$$SR = \frac{I_{i_aberrated}(0,0)}{I_{i_ideal}(0,0)} \approx 1 - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 W_{\text{RMS}}^2, \quad (10)$$

其中: W_{RMS} 为透射波前的均方根值; λ 为系统的波长。

基于高斯光束弥散时的能量守恒,光强在中心线上一维积分下降比例,大致与二维峰值光强下降的平方根成正比。因此有像差时的斜率 $K_{\text{aberrated}}$ 与无像差时的理想斜率 K_{ideal} 之间满足以下定量关系:

$$K_{\text{aberrated}} \approx K_{\text{ideal}} \sqrt{SR}. \quad (11)$$

利用泰勒展开近似为:

$$K_{\text{aberrated}} \approx K_{\text{ideal}} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 W_{\text{RMS}}^2 \right]. \quad (12)$$

通过上述推导,差动信号斜率的相对下降量 ($\Delta K/K_{\text{ideal}}$) 与系统波前差 W_{RMS} 的定量关系式为:

$$\frac{\Delta K}{K_{\text{ideal}}} \approx \frac{2\pi^2}{\lambda^2} W_{\text{RMS}}^2. \quad (13)$$

由此可知,当系统波长为 635 nm 时,要保持高斜率,系统测角灵敏度下降不超过 10% 时,系统透射波前均方根误差 RMS 须优于 $\lambda/14$ 。

3 差动对准光学系统设计

通过差动对准原理以及对各类型测角仪的参数与精度分析,利用 Zemax 光学仿真软件,设计初始光学系统,并对其进行优化,实现满足差动对准曲线高斜率特性下的像差要求的光学系统;利用波前像差引起的质心偏移,

推算出光学残余像差所引入的理论对准测量偏差,并结合实际实验多种影响因素,得到综合理论对准偏差。系统初始参数要求如表 1 所示。

表 1 系统初始参数	
Tab. 1 Initial system parameters	
Name	Parameters
Imaging band(λ)	635 nm
Exit pupil(D)	50.8 mm
L_c of focal length(f)	1 000 mm
Field of view (FOV)	0.458°
Dimensions	≤300 mm×200 mm

从图 1 所示的激光差动对准原理来看,需要设计长焦准直物镜以及像差校正透镜组。选用靶面直径为 16 mm 的四象限探测器作为接收器,同时使结构更紧凑、体积更小,选择折-反混合式光学系统,该结构具有集光能力强、像差小等优点。

其次,将所设计的长焦准直镜进行组合并按设计目标进行结构优化,通过设计透镜的厚度、透镜曲率半径、玻璃空气间隔等变量,编写评价函数操作数控制系统各数据范围,在局部优化和锤形优化的过程中不断添加操作数,使系统满足设计要求。最终优化得到的光学系统整体尺寸为 266 mm×162 mm,实现系统的小型化。光学系统模拟图如图 4 所示。

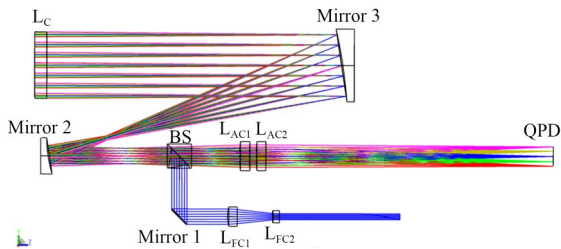


图 4 光学系统模拟图

Fig. 4 Simulation diagram of the optical system

除了将透镜 L_{AC1} 的前表面设置为偶次非球面进行优化设计^[20],其余均是标准面。偶次非球

面表达式为:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2r^2}} + \alpha_1r^2 + \alpha_2r^4 + \alpha_3r^6, \tag{14}$$

其中: z 为矢高; c 为非球面顶点处的曲率; r 为旋转对称透镜的径向坐标; k 为圆锥曲线常数; α_i 为非球面系数。

其中优化后的非球面系数以及光学系统参数如表 2 和表 3 所示。

表 2 差动对准光学系统参数		
Tab. 2 Aspheric coefficients of the optical system		
Name	α_2/mm	α_3/mm
Front surface of L_{AC1}	-3.626×10^{-6}	-9.805×10^{-9}

表 3 差动对准光学系统参数			
Tab. 3 Differential alignment optical system parameters			
Name	Radius/mm	Thickness/mm	Material
L_c	∞	10	SILICA
	∞	250	
MIRROR3	-400	-250	MIRROR
MIRROR2	100	100	MIRROR
BS	∞	20	H-K9L
	∞	40	
L_{AC1}	121.85	8	H-K9L
	128.524	5.694	
L_{AC2}	126	8	H-K9L
	1647.663	238.306	
MIRROR1	∞	40	MIRROR
L_{FC1}	30.647	8	H-K9L
	5804.863	30	
L_{FC2}	-17.011	5	H-K9L
	47.078	100	

从图 5 光学系统点列图可以看出,所有视场的 RMS 半径都远小于艾里斑半径($r=15.232\text{ }\mu\text{m}$),该系统成像质量较好,光斑能量高度集中在艾里斑内部。尽管在大视场下还存在一定的彗差与像散,但测试精度主要依赖中心视场下的光斑质量,这不影响整体成像质量。

从图 6 调制传递函数图可以看出,该系统

(17)可知探测器靶面理想质心位置偏移量为 $0.6458\ \mu\text{m}$ 。

据公式(6)可知,由光学系统残余像差引入的理想对准测量偏差 $\Delta\theta$ 为:

$$\Delta\theta = \frac{X_c}{2f} = 0.066'', \quad (18)$$

其中,系统焦距 f 为 $1\ 000\ \text{mm}$ 。

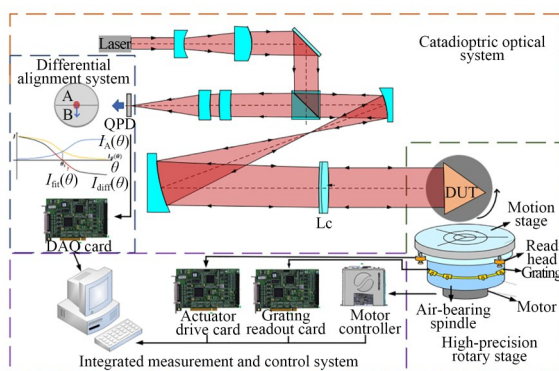
由此可知,单独由光学残余像差导致的理论对准偏差达到 $0.066''$,实际实验动态环境扰动引起的对准偏差为 $0.02''$ 、机械轴系误差引起的对

准偏差为 $0.025''$ 以及电路温漂引起的对准偏差为 $0.013''$,最终理论综合对准测量偏差为 $0.075''$ 。

4 实验验证

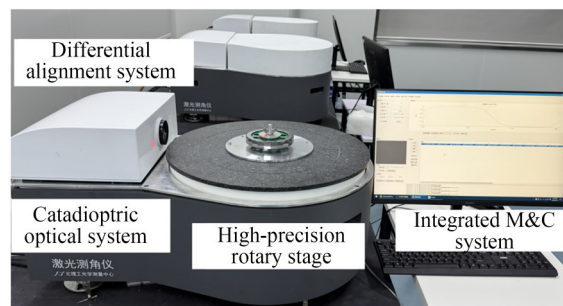
4.1 实验装置

为测试差动对准光学系统的测角精度,集成了高精度回转模块、高分辨圆光栅以及集成测控模块,搭建了动态角激光差动对准测量系统,如图8所示。



(a) 差动对准测角系统总体框图

(a) Block diagram of the differential alignment angle measurement system



(b) 差动对准测角实验系统

(b) Experimental setup for differential alignment angle measurement

图8 激光差动对准测角系统

Fig. 8 Laser differential alignment angle measurement system

实验装置安装于气浮隔振平台上,以隔绝地面微震动对测量结果的干扰。实验参数设定如下:设定驱动电机转速为 $0.5\ (^{\circ})/\text{s}$,光栅码盘物理刻线数为 $48\ 000/\text{周}$,四象限探测器采样频率为 $6\ \text{kHz}$ 。采用该转速和采样率,系统相邻采样点间的角度分辨力为 $0.3''$,保证在差动信号零点附近能够获取足够密集的数据点以实现高精度定位。

4.2 角度测量精度验证

为验证本文提出的基于激光差动对准原理的高精度动态抑制像差光学测量技术的对准测量精度,采用上述实验装置并采用正24面二等棱体工作面尺寸为 $18\ \text{mm} \times 18\ \text{mm}$,在温度为 $20\ ^{\circ}\text{C}$,湿度为 70% 的环境下开展测试。

本系统与采用自准直法的 ELCO-

MAT®3000 自准直仪进行对比实验,其中 EL-COMAT®3000 自准直仪在相同实验条件下作为对照组,当被测面法线与光轴平行时(即自准直仪读数为 0 度),触发记录光栅编码器角度读数,实验装置如图9所示。

根据《JJG97-2001 测角仪检定规范》并结合多面棱体对测角系统对准测量重复性进行测试,以棱体 0 度工作面开始,按度数递增方向依次每隔 30 度对准各工作面,对每一工作面重复 3 次读数并取算术平均值,记 a_t ;再次从 0 度工作面开始,按度数递减方向每隔 30 度依次对准各工作面,同样对每一工作面重复 3 次读数并取算术平均值,记 a'_t ,其中 $t=0, 30, \dots, 330$ 。基于往测与返测数据,分别计算相邻工作角的测量值。将每一相邻工作角对应的往测值与返测值相减,得到

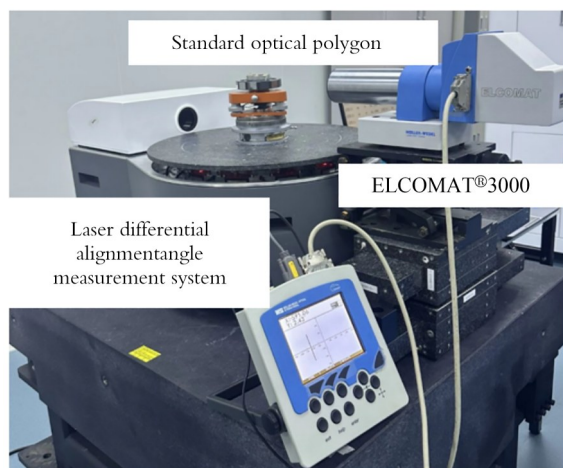


图 9 对准测量精度对比实验

Fig. 9 Comparison test of alignment measurement accuracy

差值序列 v_j , 其中 $j = 1, 2, \dots, 12$ 。按以下公式计算对准测量重复性 s :

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n v_j^2}{2n}}, \quad (19)$$

其中, n 为待测工作面个数。该值 s 即为测角系统对准测量重复性评定结果。利用相同方法得到的 ELCOMAT®3000 自准直仪对准测量重复性为 s' 。

本系统与 ELCOMAT®3000 自准直仪对准测量重复性对比结果, 如图 10 所示。

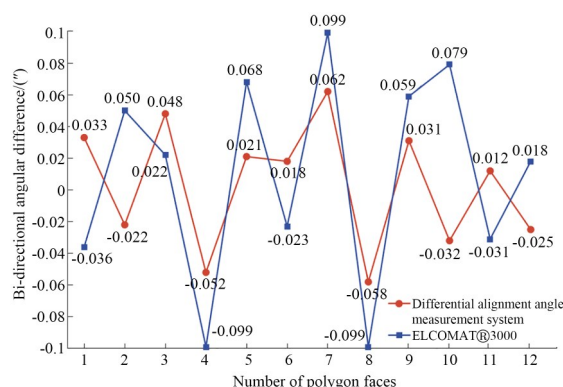


图 10 角度测量差值序列对比结果

Fig. 10 Comparison results of angular measurement difference sequences

由实验结果可知, 差动对准测角系统对准测量重复性 s 为 $0.027''$, ELCOMAT®3000 自准直对准测量重复性 s' 为 $0.046''$, 对准测量重复性提高了 41%。

采用多面棱体对差动对准测角系统进行对准测量精度测试。先利用 ELCOMAT®3000 自准直仪对正 24 面棱体进行数据采集, 将转台转至 0° , 自准直仪对准 0° 度面, 将 ELCOMAT®3000 读数清零。控制转台按棱体角度递增的方向严格转动 30° , 对准第三个面, 静置稳定后读取并记录数据。依次旋转 $60^\circ, 90^\circ$ 直至 360° , 记录每个面读数并重复测量 20 次并取算术平均值, 记录每个面算术平均值为 E_i , 其中 $i = 1, 2, \dots, 12$ 。随后采用差动对准测角系统对正 24 面棱体进行数据采集, 将转台置于零位, 以棱体稍微与准直光束错开的 0° 工作面为起始进行旋转, 记录按度数递增方向依次每隔 30° 对准各工作面之间的相对角度, 并重复测量 20 次并取算术平均值为 T_i 。利用两者差值的绝对值 M_i 作为测角系统的对准测量精度的结果。即为:

$$M_i = |T_i - E_i|. \quad (20)$$

本系统与 ELCOMAT®3000 自准直仪对棱体测得值差值的绝对值 M_i 如图 11 所示。

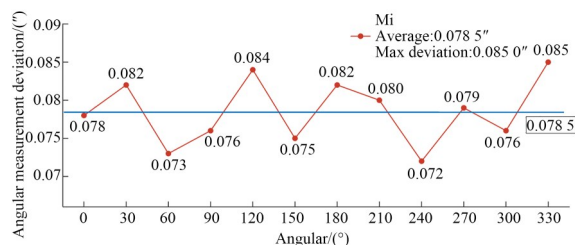


图 11 对准测量偏差结果

Fig. 11 Results of alignment measurement deviation

由实验结果可知, 差动对准测角系统对准测量平均偏差为 $0.078''$, 对准测量最大偏差为 $0.085''$ 。

实验结果表明, 相比于静态测量的 ELCOMAT®3000 自准直仪, 本系统不仅能够实现 $0^\circ \sim 360^\circ$ 整周动态测量, 且在对准测量精度和重复性表现上更优。对经国家计量单位标定的二等棱体进行对准测试, ELCOMAT®3000 自准直仪对准测量重复性为 $0.046''$, 而本系统对准测量重复性为 $0.027''$, 相较提高了 41%, 本系统的角度测量对准最大偏差仅为 $0.085''$, 验证了该系统在高精度动态角度测量领域的优势。

5 结 论

针对高精度角度对准测量的难题,本文提出并研制了一种基于激光差动对准原理的高精度光学测量系统。通过建立包含像差因子的差动对准模型,得到了波前均方根误差与系统测角灵敏度之间的定量规律,确定了高精度测量前提下的系统像差允许范围;设计了长焦距折反式准直光学系统,并引用偶次非球面以有效校正像差,从而确保系统像差对准测量精度的影响降至最低;搭建动态测角系统进行对比验证,实验结果表明,与目前广泛使用的ELCOMAT®3000自准直仪相比,本系统的对准测量重复性提高了41%,本系统对准测量最大偏差仅为0.085",这证明该系统不

仅实现了高质量成像,且在对准测量精度上也得到了提升,为高端装备制造、航空航天姿态测量等领域的精密测量提供了新的技术支持。

作者贡献声明:

刘龙康:系统设计,论文构思和撰写,初稿写作;实验设计及数据整理与分析;

赵维谦:测量方法的提出;

汝洪武:数据管理,测量系统软件的调试与维护;

魏晓玺:数据管理,测量系统软件的搭建;

邱丽荣:实验指导,对组内人员任务分配;

王 允:项目管理,提供实验资源,论文初稿审核。

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] YANG X L, JU Y W, ZHAO X. A space optical scanning system with angle error analysis and test method [C]. *Third International Conference on Mechanical, Electronics, and Electrical and Automation Control (METMS 2023)*. February 17-19, 2023. Hangzhou, China. SPIE, 2023: 191.
- [3] 于冀平, 郭继平. 动态角测量方法研究进展 [J]. *中国测试*, 2012, 38(3): 27-30.
YU J P, GUO J P. Research development of dynamic angle measurement methods [J]. *China Measurement & Test*, 2012, 38(3): 27-30. (in Chinese)
- [4] 肖倩, 俞宪同, 周军, 等. 一种高测量稳定性的光电自准直仪系统设计 [J]. *光学仪器*, 2025, 47(1): 72-78.
XIAO Q, YU X T, ZHOU J, *et al.* A photoelectric autocollimator system design with high measurement stability [J]. *Optical Instruments*, 2025, 47(1): 72-78. (in Chinese)
- [5] LI R P, XIE L Y, ZHEN Y, *et al.* Roll angle autocollimator measurement method based on a cylindrical cube-corner reflector with a high resolution and large range [J]. *Optics Express*, 2022, 30(5): 7147-7161.
- [6] SUN J H, ZHANG J, LIU Z, *et al.* High-dynamic angle measurement based on laser displacement sensors [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(23): 5676-5685.
- [7] 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 Sensors Journal*, 2021, 21(13): 15308-15317.
- [8] MOU J P, PANG B, HUANG T C, *et al.* A new method to eliminate the misalignment angle in dynamic goniometer based on fiber optic gyro [J]. *Optik*, 2019, 193: 162998.
- [9] LI X H, XU Y S, *et al.* Modeling analysis and error correction of dynamic angle measurement based on grating shear interferometry [J]. *Optics Express*, 2024, 32(24): 42826.
- [10] 王韵竹. 光电自准直仪光学系统设计与技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
WANG Y Z. *Optical System Design and Technology Research of Photoelectric Autocollimator* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [11] ZHANG J, QIAN W X, GU G H, *et al.* The effect of lens distortion in angle measurement based on four-quadrant detector [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 104: 103060.
- [12] LI Y C, ZHANG S, CHANG D, *et al.* Influence of lens systematic errors on autocollimator angle measurement: theoretical and experimental explanations [J]. *Sensors*, 2025, 25(24): 7654.
- [13] CLARK L, SHIRINZADEH B, TIAN Y L, *et al.* Laser-based sensing, measurement, and mis-

- alignment control of coupled linear and angular motion for ultrahigh precision movement [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20 (1): 84-92.
- [14] 王伟, 杜卓, 程然, 等. 激光差动共焦透镜中心偏的自动测量[J]. 光学精密工程, 2023, 31(23): 3405-3413.
WANG W, DU Z, CHENG R, *et al.* Automatic measurement of center deviation of lens of laser differential confocal [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(23): 3405-3413. (in Chinese)
- [15] 李彦宏, 杨帅, 唐顺, 等. 后置分光瞳激光差动共焦曲率半径测量[J]. 光学精密工程, 2021, 29 (10): 2287-2295.
LI Y H, YANG S, TANG S, *et al.* Detecting divided aperture laser differential confocal radius measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29 (10): 2287-2295. (in Chinese)
- [16] 王永祥. 矩孔菲涅耳衍射的光强分布[J]. 量子电子学报, 2010, 27(3): 264-269.
WANG Y X. Light intensity distribution of Fresnel diffraction at rectangular apertures [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2010, 27 (3): 264-269. (in Chinese)
- [17] 徐晶, 王钊潮, 任正玮, 等. 高精度激光定位散斑机理分析及抑制[J]. 光学精密工程, 2023, 31 (13): 1900-1908.
XU J, WANG Q C, REN Z W, *et al.* Mechanism analysis and suppression of speckle in high-precision laser location [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(13): 1900-1908. (in Chinese)
- [18] LIU A, CAI P, ZHANG J J, *et al.* High-speed road sign detection scheme based on ultrafast single-pixel scanning LiDAR [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 176: 108111.
- [19] LIM H, SHIMIZU Y. Feasible resolution of angular displacement measurement by an optical angle sensor based on laser autocollimation [J]. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2023, 6(1): 32.
- [20] 李晨霄, 赵渊明, 张禹, 等. 基于人眼视敏度的折、反/衍混合式光学系统设计[J]. 光学学报, 2025, 45(16): 1622003.
LI C X, ZHAO Y M, ZHANG Y, *et al.* Refractive, reflective/diffractive hybrid optical system based on human eye visual sensitivity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45(16): 1622003. (in Chinese)
- [21] BORN M, WOLF E. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light* [M]. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

作者简介:



刘龙康(2000—),男,河北沧州人,硕士研究生,2023年于河北工业大学获得学士学位,现就读于北京理工大学光电学院,主要从事光学精密测量方面的研究。E-mail: 19831733196@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,alotrabbits@163.com