

大间距多光轴一致性野外在线检测方法

陈志斌, 肖文健, 马东玺, 秦梦泽, 范 磊

军械工程学院军械技术研究所, 河北 石家庄 050003

摘要 为满足现代复合光电系统多光轴一致性的在线检测需求,提出一种基于光学自动瞄准和惯性测量的大间距多光轴夹角测量方法。利用惯性传感器提供一个准确且可移动的基准坐标系,瞄准被测光轴并测量其在基准坐标系中的单位向量坐标,再由向量坐标计算光轴夹角,以此检测光轴一致性。构建了测量系统的原理样机,并采用蒙特卡罗法对其测量不确定度进行评定。对复合光电系统中激光测距机与红外热像仪的光轴一致性进行实际检测,实验结果表明,激光发射轴与瞄准轴的一致性测量误差为 24.4",红外热像仪光轴与瞄准轴的一致性测量误差为 27.0"。采用移动测量的方式,扩大了测量范围、提高了测量效率,为野外环境下大间距多光轴一致性在线检测提供了一种有效的手段。

关键词 测量;多光轴一致性;在线检测;大间距;惯性传感器

中图分类号 TN274 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0112006

A Method for Large Distance Multi-Optical Axis Parallelism Online Detection

Chen Zhibin, Xiao Wenjian, Ma Dongxi, Qin Mengze, Fan Lei

Ordnance Technology Institute, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China

Abstract In order to satisfy the on-line detection of multi-optical axis parallelism for modern integrated photoelectric systems, a method of large distance multi-optical axis parallelism detection based on optical aiming and inertial measurement is proposed. An accurate and movable reference coordinate system is established by an inertial sensor. The measured optical axes can be aimed and their vector coordinates in reference coordinate system can be measured by the measurement system. The angle between the measured optical axes can be calculated by their vector coordinates and then the parallelism of measured axes can be detected by their angle at the same time. A prototype of the measurement system is built and its measurement uncertainty is evaluated by the Monte Carlo method. The proposed method is experimentally verified through an actual test between laser rangefinder and infrared thermal imager. The test results show that the measurement error of the parallelism between sighting axis and laser emitting axis can reach 24.4" and the measurement error of the parallelism between sighting axis and infrared axis can reach 27.0". The proposed method expands measurement range and improves measurement efficiency by movable measurement. Therefore, it provides a method for large distance multi-optical axis parallelism on-line detection in the wild.

Key words measurement; multi-axis parallelism; on-line detection; large distance; inertial sensor

OCIS codes 120.1800; 120.4640; 120.4570; 120.1680

1 引 言

随着现代科学技术尤其是光电技术的不断发展,观测设备已从传统单光谱单光轴发展为多光谱多光轴综合光电设备。它是一种集激光测距、激光制导、可见光探测和红外探测等于一体的复合光电系统,并得到越来越广泛的应用^[1]。然而光电系统在野外使用过程中受到冲击震动,光机结构易受损、易失调,特别是光轴一致性易超差,直接影响了观测系统的瞄准测量精度^[2],因此适时对其进行野外在线检测具有非常重要的

收稿日期: 2016-07-28; **收到修改稿日期:** 2016-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(51305455)

作者简介: 陈志斌(1965—),男,博士,研究员,主要从事光电信息探测、处理与传输技术方面的研究。

E-mail: shangxinboy@163.com

意义。而且随着光电系统复合程度的增加,其光轴间距也越来越大,这对传统的光轴一致性检测方法带来了新的挑战。因此,探求一种便携式的大间距多光谱多光轴一致性检测方法,实现光轴一致性的野外在线检测是十分必要的。

传统对多光轴一致性的检测方法主要有投影靶板法、五棱镜法、激光光轴仪法和大口径平行光管法等^[3-7]。投影靶板法操作方便、成本低,但是受环境因素影响较大,测量精度低。五棱镜法最大的误差来源于五棱镜本身,其安装方向变化会引起光束方向偏差,产生较大的测量误差。激光光轴仪法的系统装配难度高,一般用于某些专用设备,通用性不强。大口径平行光管法对光轴一致性测量精度高,但该方法受设备体积大的限制不适合携带,多用于实验室条件下的测量^[8]。上述几类传统的检测方法均难以应用于野外在线检测,而且对于大间距多光轴一致性检测更是无法实现。

大间距多光轴一致性在线检测的关键在于,如何在较大空间范围内建立一个高精度的测量基准并且能够实现测量基准的灵活传递。为了扩大多轴一致性的检测范围,一种以远处合作目标为测量基准的多轴一致性检测方法被提出^[9-10],该方法通过安装于各被测轴处的摄像机获取合作目标图像,然后将所获取的合作目标图像叠加,从而确定各被测轴之间的相对误差。这种方法通用性好,对大间距多轴一致性测量具有很大优势,但是该方法在合作目标的架设以及图像的叠加等方面受环境因素影响较大。文献[11]提出一种利用高精度二维直线导轨移动经纬仪测量光轴夹角的方法,该方法将经纬仪安装于二维平移导轨上,在测量过程中利用导轨移动经纬仪至不同测量位置完成对不同光轴夹角的测量。二维直线导轨可以有效实现测量基准的传递以扩大测量范围,但在灵活性方面存在较大劣势,难以实现复合光电系统的外场在线检测。

本文针对大间距多光轴一致性野外在线检测提出一种基于光学自动瞄准的大间距光轴夹角惯性测量方法。该方法利用惯性传感器为多光轴一致性检测提供一个精确、可移动的测量基准,并通过光学自动瞄准实现了测量基准的传递,扩展了多光轴一致性的检测范围,提高了检测效率。

2 测量原理及系统组成

在复合光电系统中,大都要求各子系统光轴之间相互平行或成某一设定角度,光轴一致性检测即测量各子系统光轴之间夹角是否满足设计要求。本文提出的大间距多轴线一致性测量方法的基本原理为:在复合光电系统的子系统选择其中之一的光轴为基准,建立测量基准坐标系,将各个被测光轴等效为基准坐标系中的若干单位方向向量。利用测量系统分别瞄准并测量被测光轴向量在基准坐标系中的坐标,然后通过向量坐标计算表示被测光轴的各个向量之间的夹角,最后通过各被测光轴之间的夹角即可判断其一致性是否满足设计要求。一般复合光电系统中的光轴可分为两类:一类是可见光或者红外探测器等被动光学设备的光轴,另一类是激光测距、指示等主动光学设备的光轴。对于被动光学设备光轴,测量系统可以直接向其投射可见光或红外十字分划准直图像,通过被测光学设备中所成像的位置来瞄准其方向;而对于主动光学设备的光轴,测量系统可以接收被测设备所发出的激光,通过激光光斑在测量系统中图像传感器上的位置来瞄准其方向。

测量系统的结构组成如图1所示,其主要包括多光谱集成靶标、分光镜、准直系统、成像元件、光轴调向装置、三轴陀螺仪以及相关电控系统。其中多光谱集成靶标安装于准直系统的焦平面处,用于产生可见光和红外多光谱十字分划目标;准直系统用于准直测量系统的出射光,为被测设备模拟无穷远目标;成像元件安装于准直系统的共轭焦平面处,用于接收被测设备所发出的激光;光轴调向装置安装于准直系统远端光路中,用于实时调整测量系统光轴方向以瞄准和跟踪被测光轴,测量系统光轴的偏转角可由光轴调向装置中的编码器测得;三轴陀螺仪有两个,一个安装于测量系统内部,另一个与被测光电系统固联。选用两个陀螺仪是因为测量系统中陀螺仪所测量的为测量系统相对惯性空间的角速度,而不是相对测量基准的角速度。而在测量过程中,测量基准受到地球自转或者其他环境因素的影响,其相对惯性空间存在角运动。因此,必须在被测光电系统上安装陀螺仪以测量测量基准相对惯性空间的角速度。

在测量过程之初首先选择测量基准,并将测量基准传递至测量系统,这个过程称为测量系统的初始化。假如选择可见光光轴为基准,由测量人员手持测量系统至可见光轴前,通过控制测量系统中反射镜偏转使测量系统的光轴螺旋运动直到可见光探测器接收到从测量系统发出的光束(扫描模式)。一旦在可见光探测器

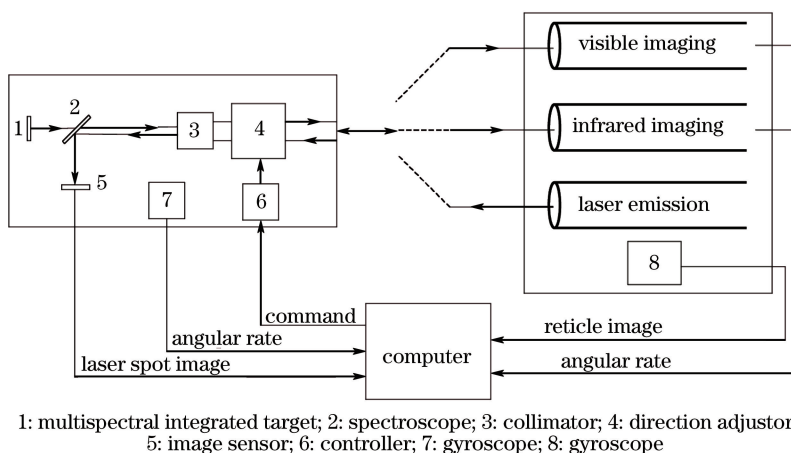


图 1 测量系统工作原理图

Fig. 1 Measurement system working principle diagram

上识别出测量系统投射的十字分划,利用十字分划与可见光探测器中心像素偏差微调反射镜的偏转量,使得十字分划中心与可见光探测器中心重合(跟踪模式)。此时测量系统光轴与可见光光轴平行,记录光轴方向并以此作为测量基准。然后由测量人员将测量系统分别移至其他各被测光轴附近指向被测光轴,采用同样的方法,经过扫描和跟踪使得被测光轴与测量系统光轴平行。最后利用陀螺仪与编码器的测量结果即可求解各被测光轴之间的夹角。

3 测量数学模型建立

3.1 相关坐标系和空间向量定义

所用到的坐标系和空间向量如图 2 所示。

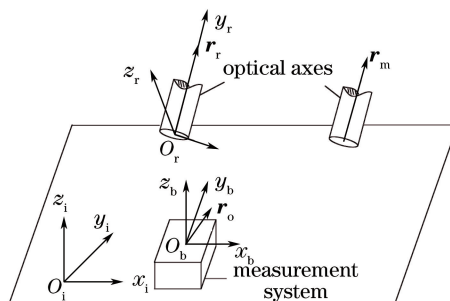


图 2 坐标系与空间向量定义

Fig. 2 Definition of coordinate systems and vectors

3.1.1 基准坐标系

在诸多被测光轴中,任意选择其中之一作为基准轴,并以该轴指向为基础建立基准坐标系,记为 $O_r x_r y_r z_r$ 。基准坐标系的原点 O_r 取在基准轴重心,与基准轴固联, x_r 轴指向基准轴右侧, y_r 轴平行于基准轴方向指向前方, z_r 轴沿基准轴的竖轴方向指向上方, x_r, y_r, z_r 三个坐标轴构成右手直角坐标系。

3.1.2 惯性坐标系

惯性坐标系记为 $O_i x_i y_i z_i$,通常根据春分点来定义。其原点 O_i 位于地心, x_i 轴指向春分点, x_i 轴沿地球自转轴, y_i 轴与 x_i 和 z_i 轴构成右手直角坐标系。惯性坐标系不参与地球的自转也不随基准坐标系的运动而运动。

3.1.3 载体坐标系

载体坐标系是与测量系统固联的坐标系,记为 $O_b x_b y_b z_b$ 。载体坐标系的原点 O_b 取在测量系统的重心, x_b 轴沿测量系统的横轴指向右侧, y_b 轴沿测量系统的纵轴指向前方, z_b 轴沿测量系统的竖轴指向上方, x_b, y_b, z_b 三个坐标轴构成右手直角坐标系,其相对基准坐标系的旋转角度称为测量系统的姿态角。

3.1.4 基准轴向量

基准轴向量记为 r_r , 其方向沿基准光轴指向前方, 模为 1。

3.1.5 被测轴向量

被测轴向量记为 r_m , 其方向沿被测光轴指向前方, 模为 1。

3.1.6 光轴向量

光轴向量记为 r_o , 其方向沿测量系统光轴指向前方, 模为 1。

3.2 测量模型推导

载体坐标系到基准坐标系的坐标变换矩阵 C_b^r 可称为测量系统的姿态矩阵。 C_b^r 可以用四元数表示为^[12]

$$C_b^r = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据四元数微分方程及其矩阵形式

$$\dot{q}(t) = \frac{1}{2} \omega_{rb}^b \cdot q(t), \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{rb}^{bx} & -\omega_{rb}^{by} & -\omega_{rb}^{bz} \\ \omega_{rb}^{bx} & 0 & \omega_{rb}^{bz} & -\omega_{rb}^{by} \\ \omega_{rb}^{by} & -\omega_{rb}^{bz} & 0 & \omega_{rb}^{bx} \\ \omega_{rb}^{bz} & \omega_{rb}^{by} & -\omega_{rb}^{bx} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 $\omega_{rb}^b = [\omega_{rb}^{bx} \ \omega_{rb}^{by} \ \omega_{rb}^{bz}]^T$, 表示载体坐标系相对基准坐标系的角速度; $q = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T$, 是测量系统姿态的四元数表示形式; $\dot{q}(t)$ 为四元数 $q(t)$ 的微分。载体坐标系相对基准坐标系的转动角速率 ω_{rb}^b 满足

$$\omega_{rb}^b = \omega_{ib}^b - (C_b^r)^{-1} \omega_{ir}^r, \quad (4)$$

式中 ω_{ib}^b 为载体坐标系相对于惯性坐标系的角速度, 可通过测量系统中陀螺仪测量得到; ω_{ir}^r 为基准坐标系相对惯性坐标系的角速度, 由于被测光电系统上的陀螺仪敏感轴与基准坐标系坐标轴方向重合, 因此 ω_{ir}^r 可通过该陀螺仪测量得到。

测量系统光轴向量在载体坐标系中的方向可以由方位角和俯仰角来描述, 如图 3 所示。方位角 α_b 定义为光轴向量 $\overrightarrow{O_bP}$ 在 $O_bx_b y_b$ 面中的投影 O_bP' 与 y_b 轴正方向的夹角; 俯仰角 β_b 定义为光轴向量 $\overrightarrow{O_bP}$ 与其在 $O_bx_b y_b$ 面中的投影 O_bP' 的夹角。

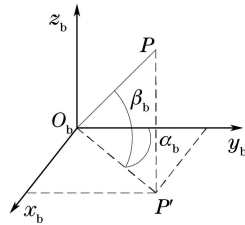


图 3 方位角和俯仰角定义

Fig. 3 Definition of azimuth and pitch

根据几何关系可知, 光轴向量在载体坐标系中的坐标 r_o^b 为

$$r_o^b = [\cos \beta_b \sin \alpha_b \ \cos \beta_b \cos \alpha_b \ \sin \beta_b]^T. \quad (5)$$

当测量系统稳定瞄准被测光轴时, 测量系统光轴与被测光轴平行, 因此被测轴向量在载体坐标系中的坐标为

$$r_m^b = r_o^b. \quad (6)$$

利用(1)式中已经求得的姿态矩阵 C_b^r , 被测轴向量在基准坐标系中的坐标为

$$r_m^r = C_b^r r_m^b. \quad (7)$$

根据基准坐标系的定义, 基准轴向量与基准坐标系的 y_r 轴重合, 因此基准轴向量在基准坐标系中的坐

标为

$$\mathbf{r}_r^i = [0 \quad 1 \quad 0]^T. \quad (8)$$

由(7)式和(8)式可得,基准光轴与被测光轴的夹角 u 为

$$u = \arccos\langle \mathbf{r}_r^i, \mathbf{r}_m^i \rangle. \quad (9)$$

4 实 验

4.1 测量系统构建

根据测量原理在光学平板(500 mm×300 mm)上搭建了测量系统的原理样机,如图4所示。LED光源发出的光的有效光谱范围可以覆盖可见光及近红外波段^[13],而且LED光源质量体积小,成本低,因此选用LED光源作为测量系统的多光谱光源。十字分划板采用表面镀铬的ZnS晶体作为基底,然后在其表面刻上十字分划图案,使其既能模拟可见光靶标又能模拟红外靶标。为了避免色差和中心光路遮挡,准直系统采用离轴反射式结构,由一个离轴抛物面主镜和一个平面次镜组成,所选用的主反射镜焦距为500 mm,口径为50 mm,平面反射镜口径为30 mm。测量系统的光轴调向通过两反射镜实现,反射镜与伺服电机转轴固联,其反射面可由伺服电机驱动自由偏转,两反射镜的旋转轴正交安装,这样通过控制两反射镜的偏转即可实现测量系统光轴方向的调整,其中反射镜1实现方位的调整,反射镜2实现俯仰的调整。图像传感器由CCD和上转换板组成,上转换板安装于准直系统的共轭焦面处,可将红外激光光斑转换为可见光光斑,并延长光斑在上转换板上的停留时间,以便CCD采集。陀螺仪均选用俄罗斯Fizoptika公司生产的VG910F型模拟光纤陀螺,在保证测量精度的前提下成本较低。控制器选用TMS320F28335型数字信号处理器,其体积小、处理速度快,与高精度数模/模数转换器一起完成相关的信号采集、处理以及测量结果的计算。

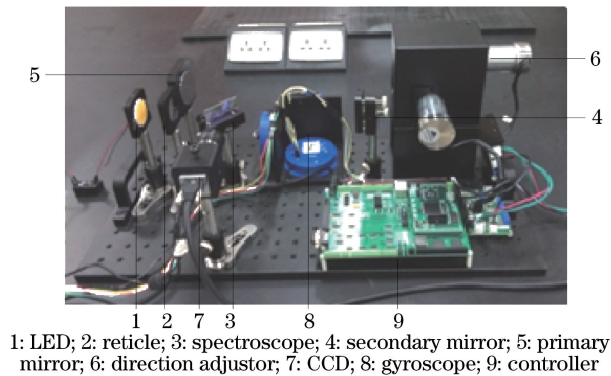


图4 测量系统原理样机

Fig. 4 Measurement system prototype

4.2 测量不确定度评定

为了分析该测量系统进行测量时结果的分布情况,为测量系统性能评估提供参考,有必要对测量系统的测量不确定度进行评定。在评定过程中,只考虑由测量系统所引起的测量不确定度,而忽略测量环境变化或被测量定义不完整所引起的测量不确定度。

不确定度评定的方法主要有解析法、统计法和计算机仿真法。解析法要求待评定系统具有良好的线性和可解析性,而通过前文可知测量系统的测量模型比较复杂,使得解析法很难有效实施;统计法虽然能提供比较可靠的评定效果,但需要进行大量的反复测量,用大量实际测量数据的离散程度来反映光轴夹角测量的不确定度,这种方法耗费大量的时间,而且在实际测量的过程中又会引入新的误差影响评定准确性;计算机仿真法通过建立测量模型,然后在计算机中重现各项误差的大小和分布特征,将各误差源代入测量模型中即可得到测量不确定度。在不确定度评定中,计算机仿真法的应用越来越广泛,逐渐成为一些复杂系统不确定度评定方法的发展趋势。因此采用计算机仿真法对测量系统的测量不确定度进行评定,其流程如图5所示。

4.2.1 生成理论测量数据

设定基准光轴与被测光轴的夹角为 $u=60^\circ$,其两个分量为:方位角 $\alpha=45^\circ$,俯仰角 $\beta=45^\circ$ 。因为在理想

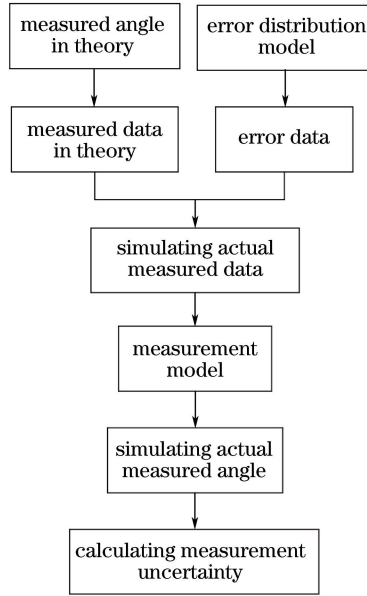


图 5 测量不确定度评定流程图

Fig. 5 Process to evaluate measurement uncertainty

情况下,基准光轴向量的坐标值为 $r_r^r = [0 \ 1 \ 0]^T$, 因此通过计算可得,被测光轴向量的理论坐标值为 $r_m^r = [0.5000 \ 0.5000 \ 0.7071]^T$ 。在测量过程中测量系统的姿态受到测量人员的影响而不断变化,其姿态运动形式为往复摆动,因此在仿真中可以将其等效为正弦运动。通过观测可知,测量系统姿态角变化的幅度不超过 $\pm 10^\circ$,其摆动频率最大不超过 0.5 Hz。因此在仿真中设定测量系统的姿态运动规律为

$$\begin{cases} \theta = 10\sin(\pi t) \\ \psi = 10\sin(\pi t), \\ \varphi = 10\sin(\pi t) \end{cases} \quad (10)$$

式中 θ, ψ, φ 分别表示测量系统的俯仰角、方位角和横滚角。通过测量系统的姿态运动规律可以求解得到测量系统相对基准坐标系的角速度为

$$\boldsymbol{\omega}_{rb}^b = \begin{bmatrix} \omega_{rb}^{bx} \\ \omega_{rb}^{by} \\ \omega_{rb}^{bz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi \cos \theta \\ 0 & 1 & \sin \theta \\ \sin \psi & 0 & \cos \psi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

假设被测复合光电系统上三轴陀螺仪安装时,其 z 轴与地球自转轴重合,则该陀螺仪的理论测量值为

$$\boldsymbol{\omega}_{ir}^r = \begin{bmatrix} \omega_{ir}^{rx} \\ \omega_{ir}^{ry} \\ \omega_{ir}^{rz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_{ie} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中 ω_{ie} 为地球自转角速度, $\omega_{ie} \approx 15^\circ/h$ 。

因此,测量系统中陀螺仪的理论测量值为

$$\boldsymbol{\omega}_{rb}^b = \boldsymbol{\omega}_{rb}^b + \boldsymbol{\omega}_{ir}^r = \boldsymbol{\omega}_{rb}^b + (\mathbf{C}_{ir}^r)^{-1} \boldsymbol{\omega}_{ir}^r. \quad (13)$$

当测量系统瞄准被测光轴时,通过控制光轴调向装置中两反射镜的偏转来补偿测量系统的姿态变化。因此可以通过测量系统的姿态角求出光轴调向装置中两反射镜的偏转角。

4.2.2 误差分析

所述测量系统可以等效为一种多体系统,因此可以采用多体系统运动学理论对测量系统的测量误差进行分析与建模。对测量系统中各部分进行概括与提炼,得到测量系统的拓扑结构。在该拓扑结构中,各体与体间的误差来源主要有姿态测量误差、光轴指向误差和瞄准误差,如图 6 所示。

1) 姿态测量误差

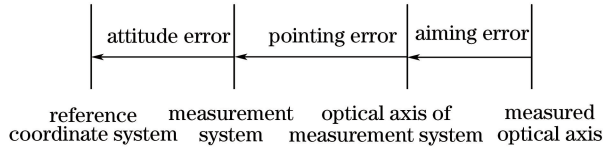


图 6 测量系统的拓扑结构及误差

Fig. 6 Topological structure and errors of measurement system

测量系统中参与姿态测量的元件只有陀螺仪,因此姿态测量误差主要是由陀螺仪的误差引起的。不考虑环境温度以及磁场变化的影响,所用光纤陀螺的误差主要包括标度因数误差、安装误差、稳定零偏误差和随机零偏误差。受陀螺仪误差的影响,测得的角速度可以表示为

$$\boldsymbol{\omega} = \text{diag}(\mathbf{S})\boldsymbol{\omega}' + \mathbf{E}\boldsymbol{\omega}' + \mathbf{B} + \mathbf{n}, \quad (14)$$

式中 $\boldsymbol{\omega}'$ 是测量系统的实际角速度, \mathbf{S} 是陀螺仪的标度因数误差, diag 表示对角矩阵, \mathbf{E} 是陀螺仪敏感轴方向与载体坐标系不重合所引起的安装误差, \mathbf{B} 是陀螺仪的稳定零偏误差, \mathbf{n} 是陀螺仪的随机零偏误差。将(14)式写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & S_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega'_x \\ \omega'_y \\ \omega'_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \theta_{xz} & -\theta_{xy} \\ -\theta_{yz} & 0 & \theta_{yx} \\ \theta_{zy} & -\theta_{zx} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega'_x \\ \omega'_y \\ \omega'_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}. \quad (15)$$

2) 光轴指向误差

在光轴调向装置中,反射镜偏转角同光轴方向偏转角的映射关系与两个反射镜的安装角度有关。理想情况下;入射光束与载体坐标系的 x_b 轴平行,反射镜 1 旋转轴与载体坐标系的 y_b 轴平行,反射镜 2 的旋转轴与载体坐标系的 x_b 轴平行,如图 7 所示。而在实际装配过程中由于零件加工、装配误差的影响,上述条件很难完全满足,客观上存在轴系平行度误差和编码器测量误差^[14-15]。该误差使得两反射镜偏转角与光轴偏转角的映射关系发生变化,从而导致光轴方向的计算出现偏差。

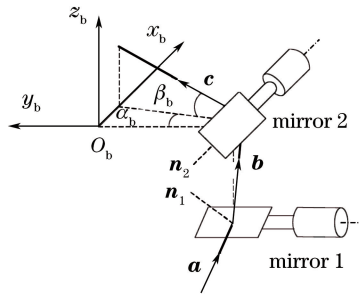


图 7 两反射镜安装结构图

Fig. 7 Structure of two mirrors

按照光束传播的路径,首先考虑入射光束与载体坐标系 x_b 轴的平行度误差(Δ_{oy} 和 Δ_{oz}),其等效为入射光束分别绕 z_b 旋转 Δ_{oz} ,绕 y_b 旋转 Δ_{oy} 。那么入射光束单位向量在载体坐标系中的坐标为

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} \cos \Delta_{oy} & 0 & -\sin \Delta_{oy} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Delta_{oy} & 0 & \cos \Delta_{oy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Delta_{oz} & \sin \Delta_{oz} & 0 \\ -\sin \Delta_{oz} & \cos \Delta_{oz} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

对于反射镜 1,其误差主要有旋转轴与载体坐标系 y_b 轴的平行度误差(Δ_{1x} 和 Δ_{1z})和编码器测量误差(δ_1)。当反射镜 1 绕其旋转轴旋转角度为 λ_1 时,其法线方向单位向量为

$$\mathbf{n}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Delta_{1x} & \sin \Delta_{1x} \\ 0 & -\sin \Delta_{1x} & \cos \Delta_{1x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Delta_{1z} & \sin \Delta_{1z} & 0 \\ -\sin \Delta_{1z} & \cos \Delta_{1z} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin(45^\circ + \lambda_1 + \delta_1) \\ 0 \\ \cos(45^\circ + \lambda_1 + \delta_1) \end{bmatrix}, \quad (17)$$

反射镜 1 的镜面反射矩阵为

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{I} - 2\mathbf{n}_1\mathbf{n}_1^T. \quad (18)$$

对于反射镜 2,其误差主要有旋转轴与载体坐标系 x_b 轴的平行度误差(Δ_{2y} 和 Δ_{2z})和编码器测量误差(δ_2)。当反射镜 2 绕其旋转轴旋转角度为 λ_2 时,其法线方向单位向量修正为

$$\mathbf{n}_2 = \begin{bmatrix} \cos \Delta_{2y} & 0 & -\sin \Delta_{2y} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Delta_{2y} & 0 & \cos \Delta_{2y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Delta_{2z} & \sin \Delta_{2z} & 0 \\ -\sin \Delta_{2z} & \cos \Delta_{2z} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \sin(45^\circ + \lambda_2 + \delta_2) \\ -\cos(45^\circ + \lambda_2 + \delta_2) \end{bmatrix} \quad (19)$$

反射镜 2 的镜面反射矩阵为

$$\mathbf{M}_2 = \mathbf{I} - 2\mathbf{n}_2\mathbf{n}_2^T, \quad (20)$$

式中 \mathbf{I} 表示单位矩阵。根据反射定律,经过两次反射后的测量系统的光轴向量 \mathbf{c} 的坐标为

$$\mathbf{c} = \mathbf{M}_2\mathbf{M}_1\mathbf{a}, \quad (21)$$

(5)式中,测量系统光轴向量在载体坐标系中的方位角 α_b 和俯仰角 β_b 即为

$$\begin{cases} \alpha_b = \arctan\left(\frac{c_x}{c_y}\right) \\ \beta_b = \arctan\left(\frac{c_z}{\sqrt{c_x^2 + c_y^2}}\right)^\circ \end{cases} \quad (22)$$

3) 瞄准误差

瞄准误差是指当测量系统瞄准被测光轴时,测量系统光轴与被测光轴的方向偏差。瞄准误差主要与准直光束不平行误差、图像中十字分划和激光光斑中心提取精度以及测量系统光轴方向控制精度有关。

准直系统像质受衍射限制,弥散斑为艾里斑,衍射造成的轴上光线不平行性用光线的发散角表示,光圈直径 $D=30$ mm 时,以波长为 $\lambda=589.3$ nm 的光为例,计算如下:

$$\theta_{11} = \arctan \frac{1.22\lambda}{D} \approx 4.9'' \quad (23)$$

对于轴外物点,存在彗差和像散,当孔径光阑在焦平面上,且十字分划半高为 5 mm 时,弧矢彗差弥散角为

$$\theta_{12} = \arctan(0.0625 \times \omega \times F^{-2}) \approx 0.46'', \quad (24)$$

式中 F 为 F 数,抛物面面形加工允许误差为 $\lambda/6$,平面反射镜面形加工允许误差为 $\lambda/10$,该部分综合误差 $\theta_{13} < 0.5''$ 。

因此准直系统引起的光束不平行误差为

$$\theta_1 = \sqrt{\theta_{11}^2 + \theta_{12}^2 + \theta_{13}^2} \approx 4.95'' \quad (25)$$

十字分划和激光光斑中心提取的精度为亚像素,测量系统所用 CCD 像元尺寸为 $5.3 \mu\text{m}$,对于 580 mm 焦距系统引入的误差约为 $\theta_2 = 2.1''$ 。

根据测量系统的光轴方向控制精度指标要求,其光轴方向控制误差 $\theta_3 < 10''$ 。至此得到了瞄准误差为

$$\delta = \sqrt{\theta_1^2 + \theta_2^2 + \theta_3^2} \approx 11.35'' \quad (26)$$

4) 建立误差分布模型

A. 陀螺仪随机误差

通过分析可知,陀螺仪的随机误差可以等效为高斯白噪声。根据之前的研究结果^[16],经过滤波处理后,陀螺仪随机误差的标准差为 $0.1(^{\circ})/\text{h}$ 。

B. 编码器测量误差

根据编码器生产厂商提供的技术说明书,其测量误差服从均值为 0 的正态分布,且标准差为 $15 \mu\text{rad}$ 。

C. 瞄准误差

通过分析可知瞄准误差最大为 $11.35''$,根据最大熵原理,可将瞄准误差设定为在最大误差范围内的矩形分布。

D. 系统误差

在测量系统中元件的装配几何误差属于系统误差,可以通过测试的方法得到,理论上通过误差修正即可消除。然而,在实际测试中,由于受到测试设备精度的影响,所得到的系统误差估计值是存在不确定度的,因此在测量系统测量不确定度评定过程中必须要考虑系统误差修正所引入的不确定度。在测量系统中的系统

误差主要包括陀螺仪安装误差、陀螺仪固定零偏误差以及光轴调向装置中各轴线平行度误差。利用三轴测试转台标定后,陀螺仪的安装误差最大为 $\pm 2''$,陀螺仪固定零偏误差最大为 $\pm 1 \times 10^{-4} (^{\circ})/s$;经过修正后,光轴调向装置中各类轴线安装的平行度误差最大为 $\pm 2''$ 。根据最大熵原理,可将上述各类系统误差设为矩形分布。

综上所述,测量系统误差分布模型参数如表 1 所示。

表 1 误差分布模型

Table 1 Probability distributions of errors

Error source	Distribution	Mean	Standard deviation	Lower bound	Upper bound
n_x, n_y, n_z	Gaussian	0	$0.1 (^{\circ})/h$		
δ_1, δ_2	Gaussian	0	$15 \mu rad$		
δ	Gaussian	0	$5''$		
$\theta_{xz}, \theta_{xy}, \theta_{yz}, \theta_{yx}, \theta_{zy}, \theta_{zx}$	Rectangular			$-2''$	$2''$
B_x, B_y, B_z	Rectangular			$-1 \times 10^{-4} (^{\circ})/s$	$1 \times 10^{-4} (^{\circ})/s$
S_x, S_y, S_z	Rectangular			0.9998	1.0002
$\Delta_{0y}, \Delta_{0z}, \Delta_{1x}, \Delta_{1z}, \Delta_{2y}, \Delta_{2z}$	Rectangular			$-2''$	$2''$

4.2.3 测量不确定度评定

采用 ISO/IEC Guide 98-3:2008《测量不确定度表示指南》附件中推荐的蒙特卡罗法(MCM)对测量系统的测量不确定度进行评定^[17-18]。设定蒙特卡罗实验样本量为 $M=10^6$,将前文生成的理论测量数据集以及误差分布模型代入测量模型中进行仿真计算,得到测量结果的概率分布如图 8 所示。从图 8 中可以看出,两光轴夹角的测量结果非常符合正态分布,两条垂直直线直接为 MCM 获得的空间角 95% 概率最短包含区间。仿真结果表明,空间角测量的估计值为 60.0006° ,标准差为 $0.0064^{\circ} \approx 23''$,95% 的对称概率区间为 $[59.9870, 60.0143]$ 。

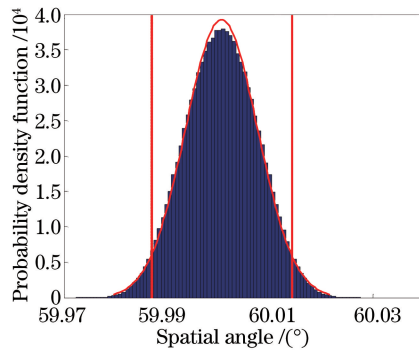


图 8 测量结果分布图

Fig. 8 Probability density of measurement result

4.3 光轴一致性测量实验

为了验证测量系统对多光轴一致性的实际检测效果,将激光测距机与红外热像仪固定在光学平台上作为被测对象,并在光学平台上安装陀螺仪以测量光学平台相对惯性空间的角速度。首先利用实验室的大口径平行光管对被测对象的光轴一致性进行检校(大口径平行光管的测量误差小于 $10''$);然后利用设计的测量系统再对被测对象的光轴一致性进行测量;最后将测量结果与大口径平行光管的测量结果对比。由于实验所用激光测距机瞄准轴没有视频图像输出接口,为了采集激光测距机瞄准轴的图像,在激光测距机目镜后放置 CCD,并提前将 CCD 光轴与激光测距机瞄准轴进行了校准。

在使用本文所设计的测量系统对被测对象光轴一致性进行测量时,选定激光测距机的瞄准轴为基准轴。由测量人员手持测量系统至瞄准轴前,调整测量系统的姿态,一旦测量系统投射的十字分划图案位于瞄准轴后端 CCD 的几何中心时,设定测量系统的姿态角为零,完成测量系统的初始化。然后移动测量系统至激光发射轴前,控制测量系统内部两反射镜偏转使得测量系统稳定瞄准激光发射轴(激光光斑质心与测量系统内部 CCD 的几何中心重合)。为了提高测量精度,减小随机误差的影响,记录 2000 组原始测量数据,并以此计

算激光发射轴与瞄准轴的夹角,其中部分数据如表 2 所示。最后移动测量系统至红外热像仪前,控制测量系统内部两反射镜偏转使得测量系统稳定瞄准红外热像仪光轴(测量系统投射的十字分划图案位于红外热像仪视场的几何中心),同样记录 2000 组原始测量数据,并以此解算红外热像仪光轴与瞄准轴的夹角,其中部分数据如表 3 所示。在表 2 和表 3 中, $\omega_{rx}, \omega_{ry}, \omega_{rz}$ 为基准坐标系相对惯性空间的角速度, $\omega_{mx}, \omega_{my}, \omega_{mz}$ 为测量系统相对惯性空间的角速度, λ_1, λ_2 为光轴调向装置中两反射镜的偏转角, u_1 为激光发射轴与瞄准轴的夹角, u_2 为红外热像仪光轴与瞄准轴的夹角。

从表 2 和表 3 中的测量数据可以看出,在测量环境扰动不大的情况下,基准坐标系相对惯性空间的角速度变化很小,主要体现为地球的自转角速度。而测量系统由于受到测量人员的扰动,其角速度变化较大,为了稳定测量系统的光轴指向,光轴调向装置中两反射镜需要偏转相应角度以对测量系统的姿态变化进行补偿。

表 2 激光发射轴与瞄准轴的夹角测量数据

Table 2 Test data for the sighting axis and the laser emitting axis

No.	$\omega_{rx} / [10^{-3} (^{\circ})/s]$	$\omega_{ry} / [10^{-3} (^{\circ})/s]$	$\omega_{rz} / [10^{-3} (^{\circ})/s]$	$\omega_{mx} / [(^{\circ})/s]$	$\omega_{my} / [(^{\circ})/s]$	$\omega_{mz} / [(^{\circ})/s]$	$\lambda_1 / (^{\circ})$	$\lambda_2 / (^{\circ})$	$u_1 / (")$
1	-0.04	3.28	2.51	7.84220	7.86380	7.84223	-0.0389	-0.0377	14
200	-0.02	3.31	2.63	6.02820	6.67101	6.01157	-1.4333	-1.4334	32
400	0.01	3.30	2.60	2.22579	2.61916	2.20916	-2.3617	-2.3621	44
600	0.04	3.25	2.58	-2.22582	-2.61920	-2.20914	-2.3512	-2.3501	40
800	0.03	3.32	2.59	-6.02825	-6.67099	-6.01156	-1.4330	-1.4327	53
1000	-0.02	3.23	2.57	-7.85394	-7.85398	-7.85402	0.0397	0.0418	13
1200	-0.03	3.30	2.62	-6.67982	-6.02031	-6.66305	1.5360	1.5390	32
1400	-0.05	3.30	2.60	-2.62817	-2.21819	-2.61153	2.4032	2.4070	18
1600	0.01	3.28	2.56	2.62827	2.21816	2.61154	2.3893	2.3950	28
1800	0.01	3.24	2.53	6.67979	6.02029	6.66305	1.4724	1.4754	17

表 3 红外热像仪光轴与瞄准轴的夹角测量数据

Table 3 Test data for the sighting axis and the infrared axis

No.	$\omega_{rx} / [10^{-3} (^{\circ})/s]$	$\omega_{ry} / [10^{-3} (^{\circ})/s]$	$\omega_{rz} / [10^{-3} (^{\circ})/s]$	$\omega_{mx} / [(^{\circ})/s]$	$\omega_{my} / [(^{\circ})/s]$	$\omega_{mz} / [(^{\circ})/s]$	$\lambda_1 / (^{\circ})$	$\lambda_2 / (^{\circ})$	$u_2 / (")$
1	-0.04	3.32	2.57	-0.11263	-0.13361	-0.11165	-2.4768	-2.4727	84
200	0.00	3.24	2.55	-5.21115	-5.88486	-5.18999	-1.7321	-1.7267	51
400	-0.01	3.27	2.56	-7.85394	-7.85398	-7.85402	0.0396	0.0464	79
600	-0.02	3.27	2.54	-5.89603	-5.20119	-5.87499	1.8011	1.8105	75
800	-0.01	3.31	2.56	0.00001	-0.00001	0.00000	2.5189	2.5305	97
1000	0.02	3.29	2.61	5.89604	5.20123	5.87496	1.7714	1.7816	76
1200	-0.02	3.28	2.55	7.85398	7.85398	7.85400	-0.0008	0.0077	89
1400	-0.01	3.25	2.58	5.21109	5.88487	5.19000	-1.7617	-1.7538	64
1600	0.01	3.26	2.56	-0.00004	0.00001	0.00004	-2.4777	-2.4734	88
1800	0.00	3.30	2.59	-5.21112	-5.88490	-5.19000	-1.7332	-1.7274	58

计算 u_1 和 u_2 的平均值并与实验室中大口径平行光管的测量结果对比,其结果如表 4 所示。

表 4 测量结果对比

Table 4 Comparison of the measurement results

Angle	Proposed method	Large aperture collimator	Error
$u_1 / (")$	40.3	18	22.3
$u_2 / (")$	86.1	61	25.1

考虑到大口径平行光管的测量误差最大为 $10''$,因此本文测量系统对 u_1 和 u_2 的测量误差分别为

$$\begin{cases} \Delta u_1 = \sqrt{22.3^2 + 10^2} = 24.4'' \\ \Delta u_2 = \sqrt{25.1^2 + 10^2} = 27.0'' \end{cases} \quad (27)$$

5 结 论

针对现代复合光电系统中光轴间距较大,其一致性难以实现野外在线检测的问题,提出了一种基于光学自动瞄准的大间距光轴夹角惯性测量方法。该方法通过光学瞄准的方式实现了测量基准的建立和传递,依此基准利用捷联惯性测量的方式求得各被测光轴向量在基准坐标系中的坐标,然后通过向量坐标来计算各被测光轴之间的夹角,以此即可判断各被测轴线的一致性是否满足设计要求。采用移动测量方式使得测量过程灵活便捷,大大增加了测量范围、提高了测量效率,特别适用于野外条件下大间距多光轴一致性的在线检测。

目前,系统的测量精度仅能满足某些对测量精度要求不高的应用需求,测量精度还有待提高。后续应继续提高光学瞄准精度和捷联惯性测量精度,使系统整体测量精度提高到角秒级,以满足更高精度的测量要求,进一步拓宽系统的适用范围和应用场合。

参 考 文 献

- [1] Kou Tian, Wang Haiyan, Wu Xueming, *et al.* Detection probability envelope of airborne photoelectric system in complex condition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0304002.
寇 添, 王海晏, 吴学铭, 等. 复杂环境下机载光电系统探测概率包线研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0304002.
- [2] Bates K, Kearns F. Tactical laser system testing: evolution and challenges[C]. *IEEE Autotestcon*, 2005: 212-216.
- [3] Jin Weiqi, Wang Xia, Zhang Qiyang, *et al.* Technical progress and its analysis in detecting of multi-axes parallelism system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 526-531.
金伟其, 王 霞, 张其扬, 等. 多光轴一致性测量技术进展及其分析[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(3): 526-531.
- [4] Cabib D, Segal A, Dolev J. Electro-optical systems to accurately align (boresight) laser designator, FLIR, and CCD on the ground before the mission[C]. *SPIE*, 2008, 7113: 71130S.
- [5] Xiao Z, Guo X, Xia Y, *et al.* Research on detection system of optical sights triaxial parallelism[J]. *Optik*, 2014, 125(16): 4427-4430.
- [6] Li Yacan, Qiu Lirong, Zhang Pengsong, *et al.* Development of portable multi-optical axes parallelism calibration system[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1008002.
李雅灿, 邱丽荣, 张鹏嵩, 等. 便携式多光轴平行性检校系统的研制[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1008002.
- [7] Layton M R. Accurate gun boresighting system: US20120236286[P]. 2012-09-20.
- [8] Ge Bin, Liu Zhaohui, Hou Niancang. Calculation of inconsistent optics axis for several optics-measurement instrument [J]. *Science Technology and Engineering*, 2007, 7(21): 5539-5543.
葛 滨, 刘朝晖, 侯年仓. 多光学测试设备光轴不一致性测量计算的研究[J]. *科学技术与工程*, 2007, 7(21): 5539-5543.
- [9] Chen Zhiqiang, Wang Xiaoman, Zhao Haili, *et al.* Calibration technology based on image method for multi-axis angle zero consistency of sea targets[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(6): 164-167.
陈智强, 王晓曼, 赵海丽, 等. 基于图像法的海上目标多光轴标校技术[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(6): 164-167.
- [10] CI systems. Advanced weapon boresight system (O-AWBS)[EB/OL]. (2015-10-12) [2016-07-20]. [http://www.ci-systems.com/Advanced-Weapon-Boresight-System-\(AWBS\)](http://www.ci-systems.com/Advanced-Weapon-Boresight-System-(AWBS)).
- [11] Liu R, Guo X Q, Yu J. A novel instrument for high precision angle measurement of optical axes[J]. *Optik*, 2013, 124(12): 1132-1135.
- [12] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 293-295.
- [13] Xu Yuzhen, Lin Weiming. A novel LED photo-electro-thermal model with simplified variables[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0523001.
徐玉珍, 林维明. 一种简化变量的新型 LED 光电热模型[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0523001.
- [14] Luo Anzhi, Sun Hui, Jia Hongguang, *et al.* Semi-parametric model kinematic calibration of photoelectric detecting system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0104001.
罗安治, 孙 辉, 贾宏光, 等. 光电探测系统半参数模型运动学标定[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0104001.
- [15] Xiao W J, Chen Z B, Ma D X, *et al.* Large-scale spatial angle measurement system and the pointing error analysis[J]. *Optoelectronics Letters*, 2016, 12(3): 229-232.
- [16] Xiao Wenjian, Ma Dongxi, Chen Zhibin, *et al.* A robust smoothing filter algorithm for de-noising of fiber optic gyroscope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0617005.

肖文健, 马东玺, 陈志斌, 等. 一种用于光纤陀螺降噪的鲁棒平滑滤波算法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(6): 0617005.

- [17] Wen X L, Zhao Y B, Wang D X, *et al.* Adaptive Monte Carlo and GUM methods for the evaluation of measurement uncertainty of cylindricity error[J]. Precision Engineering, 2013, 37(4): 856-864.
- [18] Chen A, Chen C. Comparison of GUM and Monte Carlo methods for evaluating measurement uncertainty of perspiration measurement systems[J]. Measurement, 2016, 87(2): 27-37.