

# 正交倾角仪对车载光学经纬仪误差修正的深度探究

董经纬 唐伯浩<sup>(通讯作者)</sup> 杨帅 初威澄

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春, 130022;

**摘要:** 针对车载光电经纬仪在动态环境下受载体晃动、环境干扰导致测量精度下降的问题, 本文提出基于正交倾角仪的误差修正方法。通过双正交倾角仪实时监测底座倾斜, 结合温漂补偿算法抑制温度干扰, 设计动态数据插值——外推融合算法实现高精度误差修正。实验结果表明: 垂直轴误差降至 $\pm 5''$ 以内, 水平轴误差控制在 $\pm 3''$ 以下, 动态跟踪精度提升 40%以上, 风速 10m/s 扰动下仍保持 $\pm 10''$ 稳定跟踪, 为复杂环境下高精度测量提供技术支撑。

**关键词:** 车载经纬仪; 倾角仪; 误差修正; 动态补偿; 变形测量; 传感器; 测角误差

**DOI:** 10. 69979/3041-0673. 26. 02. 047

## 引言

车载光学经纬仪是靶场核心精密测量设备, 广泛应用于军事(导弹、无人机跟踪)与航天(卫星轨道测量)领域<sup>[1]</sup>, 但其测量精度易受轴系偏差、环境扰动等影响, 导致目标定位偏差、轨迹绘制失真。正交倾角仪可精准测量倾斜变化<sup>[2]</sup>, 为误差修正提供有效途径, 对保障任务执行效果具有重要意义。

国内近年来加大了这方面的研究力度。长春光机所张晗助理研究员提出了一种基于正交倾角仪的实时误差修正方法, 并在实验中取得了一定成效。但目前研究仍存在不足, 如误差修正算法的通用性和实时性有待提高, 不同环境下正交倾角仪的适应性研究还不够完善。

本研究旨在深入探究正交倾角仪对车载光学经纬仪各项误差的修正方法, 以提高经纬仪的实时测量精度。具体研究内容包括:

(1) 全面分析车载光学经纬仪的误差来源, 重点剖析轴系误差;

(2) 深入研究正交倾角仪的工作原理与特性, 明确其在误差测量修正中的优势;

(3) 建立基于正交倾角仪测量数据的误差修正数学模型, 设计高效的误差修正算法模型;

(4) 通过实验验证正交倾角仪对车载光学经纬仪各项误差的修正效果, 评估修正方法的可行性与有效性。

实验研究通过搭建倾角仪与经纬仪实验平台<sup>[4]</sup>, 模拟不同的测量环境, 采集车载光学经纬仪在有无正交倾角仪修正情况下的测量数据, 针对温度、湿度变化以及考虑倾角仪延时进行实验数据采集与模型搭建。

## 1 车载光学经纬仪误差分析

误差源分类与产生机制见表 1。

表 1 误差分类与影响

误差类型	具体表现	影响
机械结构误差	垂直轴偏差(与铅垂线夹角)、水平轴倾斜	水平角系统性误差、垂直角偏差
测量元件误差	定向差(基准与目标方向偏差)、零位差(编码器零位与视轴不一致)	方位角/俯仰角固定偏差
环境误差	温度导致轴系变形、湿度引起光学元件结露	增加测量不确定性

经纬仪轴系误差和编码器误差会直接导致测量的方位角和俯仰角出现偏差<sup>[3]</sup>。这些角度偏差会被放大到目标的空间位置坐标上, 使目标定位产生较大偏差。在测量目标运动轨迹时, 误差的存在会使绘制的轨迹出现波动和偏差, 无法准确反映目标的真实运动情况。

## 2 正交倾角仪工作原理与特性

### 2.1 正交倾角仪基本工作原理

正交倾角仪基于重力感应原理工作<sup>[11]</sup>。当正交倾角仪处于倾斜状态时, 敏感元件中的加速度计会感受到重力加速度在敏感轴方向上的分量。通过测量这些分量的大小, 可以计算出正交倾角仪相对于重力方向的倾斜角度<sup>[12]</sup>。

### 2.2 技术参数与性能指标

实际应用中,正交倾角仪存在一定的延时,即从倾斜角度发生变化到倾角仪输出准确测量值存在时间差,需要在误差修正模型中予以考虑和校正。

### 3 正交倾角仪对误差的修正方法

#### 3.1 基于正交倾角仪的误差测量方法

车载光电经纬仪在动态环境下受以下误差影响<sup>[5]</sup>:

(1) 轴系误差:包括水平轴倾斜误差( $\delta$ )、垂直轴偏转误差( $\gamma$ );

(2) 安装误差:载体平台变形导致的基座非正交性( $\alpha, \beta$ );

(3) 环境扰动:车辆振动、路面倾斜引起的动态角度偏差( $\Delta\theta$ )。

#### 3.2 误差修正数学模型的建立

基于正交倾角仪测量的倾斜角度数据,建立误差修正数学模型。以轴系误差修正为例,设经纬仪测量的目标方位角为A,俯仰角为E,正交倾角仪测量出横轴在水平方向的倾斜角度为 $a_1$ ,垂直方向倾斜角度为 $a_2$ ,纵轴倾斜角度为 $\beta$ 。建立如下方位角修正公式: $A'=A+f_1(a_1, a_2, \beta)$ ,其中 $A'$ 为修正后的方位角, $f_1$ 为根据经纬仪结构参数和三角函数关系确定的函数。同理,俯仰角修正公式为: $E'=E+f_2(a_1, a_2, \beta)$ 。

建立四坐标系:

- (1) 载体坐标系( $O_b-X_bY_bZ_b$ ):与车辆固连;
- (2) 倾角仪坐标系( $O_i-X_iY_iZ_i$ );
- (3) 经纬仪坐标系( $O_t-X_tY_tZ_t$ );
- (4) 地理坐标系( $O_n-X_nY_nZ_n$ )。

通过欧拉角旋转矩阵实现坐标系转换:

$$R_{nb}=R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\phi)$$

其中 $\psi, \theta, \phi$ 为偏航、俯仰、横滚角。

对于编码器误差修正,设编码器在某一测量点的误差为 $\Delta\beta$ ,通过对测量角度进行反向补偿,即 $A''=A'-\Delta\beta$ (或 $E''=E'-\Delta\beta$ ),得到修正后的角度值。

水平轴倾斜误差修正: $\Delta\theta_H=\delta \cdot \cos\phi+\gamma \cdot \sin\omega$

垂直轴偏转误差修正: $\Delta\theta_V=\alpha \cdot \tan\omega+\beta \cdot \sec\phi$

将倾角仪测量的 $\phi, \omega$ 代入误差模型,得到经纬仪测角修正量。

#### 3.3 修正算法与实现步骤

设计误差修正算法采用滤波算法对正交倾角仪测量数据进行预处理<sup>[10]</sup>,去除噪声干扰。将正交倾角仪测

量的轴系倾斜数据与经纬仪自身的角度测量数据、编码器数据以及温湿度数据进行融合处理。

设实测偏差为 $Y=[\Delta A_1, \Delta E_1, \dots, \Delta A_n, \Delta E_n]^T$ ,倾角仪数据为 $X=[\phi_1, \omega_1, \dots, \phi_n, \omega_n]^T$ ,则系数矩阵K的最小二乘解为:

$$K=(XTX)^{-1}XTY$$

通过建立的误差修正数学模型,考虑温度、湿度和倾角仪延时因素,计算出修正后的角度值。对正交倾角仪测量数据进行时间校正和温湿度补偿。

将修正后的角度值反馈给经纬仪的测量系统,实现对测量结果的实时修正。

### 4 实验验证与结果分析

搭建实验平台包括车载光学经纬仪、正交倾角仪、模拟目标装置以及数据采集与处理系统。将正交倾角仪按照选定的安装方式安装在车载光学经纬仪上。模拟目标装置用于产生不同运动轨迹和位置的目标。实验设置涵盖不同的目标运动速度、加速度以及车载平台的不同行驶路况<sup>[9]</sup>。为探究温度、湿度和倾角仪延时对误差修正的影响,设置多组环境模拟实验。对于倾角仪延时实验,通过在倾角仪测量范围内对倾角仪和经纬仪进行自检引导试验获取。

对不同温度下的轴系垂直度误差( $\delta_1$ )、回转轴系径向跳动( $\delta_2$ )进行多项式拟合<sup>[6]</sup>,建立误差向量 $\delta(T)=[\delta_1(T), \delta_2(T)]^T$ 与温度T的映射关系。

采用最小二乘支持向量机进行非线性回归,核函数选用径向基函数,通过交叉验证优化惩罚参数C和核参数 $\sigma$ ,拟合公式为:

$$\delta(T)=\omega^T\varphi(T)+b$$

其中:

$\varphi(\cdot)$ ——高维特征映射;

$\omega$ 和 $b$ 为待求参数。

根据当前温度采样值 $T_k$ ,通过插值算法获取对应的误差补偿量 $\delta_k$ ,对经纬仪测量值进行实时修正。

$$\theta_{corr}=\theta_{raw}-\delta_k$$

设倾角仪测量时刻 $t_i$ ,经纬仪测量时刻为 $t_j$ ,计算延时 $\Delta t=|t_i-t_j|$ ,通过线性插值构建倾角测量值的时间序列 $\gamma(\Delta t)$ 。

将延时误差视为动态测量中的相位偏移,通过相位差 $\Delta\varphi=2\pi f\Delta t$ ( $f$ 为目标频率)进行补偿,修正公式为:

$$\gamma_{corr}=\gamma_{raw} \cdot \exp(-j\Delta\varphi)$$

结合卡尔曼滤波预测下一时刻的倾角变化率，提前补偿因延时产生的滞后误差，状态方程设为： $x_k = Ax_{k-1} + w_k$ ，观测方程为  $z_k = Hx_k + v_k$ ，其中  $w_k$ 、 $v_k$  为高斯白噪声。

通过对比修正前后车载光学经纬仪的测量精度<sup>[7]</sup>，评估正交倾角仪的误差修正效果<sup>[8]</sup>，尤其关注温度、湿度和倾角仪延时因素的影响。

分析不同工况下误差修正效果的差异。通过全面的评估与对比分析，验证正交倾角仪对车载光学经纬仪各项误差修正方法的可行性和有效性，为进一步优化误差修正技术提供了实验依据。

在某型车载光电经纬仪上测试，修正前后对比数据如表 2：

表 2 修正前后数据比对

误差类型	修正前 (°)	轴系修正	轴系编码器修正
照准差	0.15	0.03	0.005
方位轴倾斜	0.10	0.02	0.008
定向差（峰值）	0.05	-	0.001

结果表明，修正后测角精度提升约 81%。

## 5 研究成果总结

本研究深入分析了车载光学经纬仪的误差来源，详细阐述了轴系误差、编码器误差以及环境因素误差的产生机制与影响。通过对正交倾角仪的各项研究，建立了基于正交倾角仪的误差修正方法，包括误差测量方法、数学模型以及考虑温度、湿度和倾角仪延时因素的修正算法。实验结果表明，正交倾角仪能够有效提高车载光学经纬仪的测量精度，在不同温度、湿度环境以及存在倾角仪延时的情况下，通过相应的修正措施，显著降低了目标定位偏差和轨迹测量误差，验证了误差修正方法的可行性和有效性。

### 参考文献

- [1] 石要辉. 车载光电经纬仪指向精度稳定性研究[D]. 中国科学院研究生院（光电技术研究所），2014.
- [2] 李增，吴志勇，佟刚，等. 车载经纬仪的静态指向误差补偿[J]. 光学精密工程，2010，18(4):7.
- [3] 赵怀学，田留德，赵建科，等. 光电经纬仪姿态测量精度分析及室内评价方法[J]. 光学学报，2018，38(1):7.
- [4] 佟刚，王涛，吴志勇，等. 高精度倾角传感器在测量车载平台变形中的应用[J]. 光学精密工程，2010，18(6):7.
- [5] 肖春生，孙倩. 光电经纬仪误差修正方法探讨[J].

信息技术与信息化，2020.

- [6] 黄文德，黄家如，杨家生. 环境温度对倾角传感器测量数据的影响研究[J]. 工程技术研究，2023，8(11):96-98.
- [7] 王显军. 大型望远镜测角系统误差的修正[J]. 光学精密工程，2015，23(9):6.
- [8] 机械. 高精度动态倾角仪误差补偿技术研究[D]. 2024.
- [9] 李超，申继志，吴建敏，等. 光电经纬仪误差修正方法研究[J]. 测试技术学报，2016(3):6.
- [10] 王若晗. 光电经纬仪系统误差分析及修正方法研究[D]. 西安工业大学，2022.
- [11] 修睿，孙丽艳，郭思诺. 基于融合滤波的 MEMS 动态倾角仪算法设计[J]. 导航与控制，2023，22(4):81-90.
- [12] 李庆贤. 校准倾角仪时安装误差的影响研究[J]. 工业计量，2022(3):62-63.

作者简介：董经纬（1994.06-），男，汉族，山西省阳泉市人，本科，工程师，研究方向：靶场经纬仪测控设备研发，经纬仪控制软件开发。

通讯作者：唐伯浩（1990.01-），男，汉族，吉林长春人，硕士，副研究员，主要从事靶场光学测量设备、反导防空装备以及半导体测试装备研制等方面工作。