

## 指向精度对光学姿态测量精度的影响分析

胡小丽 唐明刚 蔡文泽 张玉伦 张思琪 张三喜

### Influence of optical axis pointing error on optical pose measurement accuracy

HU Xiaoli, TANG Minggang, CAI Wenzhe, ZHANG Yulun, ZHANG Siqi, ZHANG Sanxi

引用本文:

胡小丽, 唐明刚, 蔡文泽, 等. 指向精度对光学姿态测量精度的影响分析[J]. 应用光学, 2023, 44(2): 365–370. DOI: 10.5768/JAO202344.0203001

HU Xiaoli, TANG Minggang, CAI Wenzhe, et al. Influence of optical axis pointing error on optical pose measurement accuracy[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(2): 365–370. DOI: 10.5768/JAO202344.0203001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0203001>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 一种单目视觉位姿测量系统的误差分析方法

Error analysis method for monocular vision pose measurement system

应用光学. 2019, 40(1): 79–85 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0103001>

#### 基于单目视觉的航天器位姿测量

Position and pose measurement of spacecraft based on monocular vision

应用光学. 2017, 38(2): 250–255 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0203001>

#### 靶场飞行目标弱透视投影姿态测量可行性研究

Feasibility on attitude measurement of flying target using weak perspective projection in range

应用光学. 2017, 38(3): 445–450 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0303003>

#### 空间激光通信系统动态跟瞄参数测试方法研究

Dynamic tracking and pointing accuracy measurement method of space laser communication system

应用光学. 2018, 39(5): 762–766 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0507002>

#### 基于中轴线像长匹配的靶场单站姿态测量方法

Single station pose measurement method for range based on axis image length matching

应用光学. 2017, 38(5): 746–750 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0502001>

#### 基于姿态测量的光电桅杆侦察方法

Reconnaissance method for photoelectric mast based on attitude measure

应用光学. 2017, 38(1): 1–6 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0101001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 02-0365-06

# 指向精度对光学姿态测量精度的影响分析

胡小丽<sup>1</sup>, 唐明刚<sup>1</sup>, 蔡文泽<sup>2</sup>, 张玉伦<sup>1</sup>, 张思琪<sup>2</sup>, 张三喜<sup>1</sup>

(1. 中国华阴兵器试验中心, 陕西 华阴 714200; 2. 西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为验证光轴指向误差对光学姿态测量精度的影响程度, 并为后续实类设备实现姿态测量提供理论依据, 以中轴线法为依据, 对算法步骤进行拆分, 并对光轴指向误差的影响进行溯源, 得出指向误差影响姿态处理结果可从两个方面进行分析。同时对模型内交会算法的直接影响和模型外动态基准的间接影响进行推导分析, 将仿真计算和实测数据进行结合验证, 获取了在典型中长远光学姿态测量中指向误差 200" 对姿态角误差不超过 0.1° 的结论, 为现有姿态测量可靠性分析以及后续靶场设备能力拓展奠定了理论基础。

**关键词:** 指向误差; 姿态测量; 动态测量基准; 可靠性分析

中图分类号: TN06; TP394.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0203001

## Influence of optical axis pointing error on optical pose measurement accuracy

HU Xiaoli<sup>1</sup>, TANG Minggang<sup>1</sup>, CAI Wenzhe<sup>2</sup>, ZHANG Yulun<sup>1</sup>, ZHANG Siqi<sup>2</sup>, ZHANG Sanxi<sup>1</sup>

(1. Huayin Ordnance Test Center, Xi'an 714200, China; 2. Xi'an Institute of Modern Control Technology, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** To verify the influence of optical axis pointing error on optical attitude measurement accuracy and provide a theoretical basis for subsequent real-time equipment to realize attitude measurement, based on the central axis method, the algorithm steps were split, and the influence of optical axis pointing error was traced. It was concluded that the influence of pointing error on attitude processing results could be analyzed from two aspects. At the same time, the direct influence of the intersection algorithm in the model and the indirect influence of the dynamic reference outside the model were deduced and analyzed. Through the combination of simulation calculation and measured data, the conclusion that the pose angle error is no more than 0.1° in typical medium and long-term optical attitude measurement in the pointing error of 200" was obtained. It lays a theoretical foundation for the reliability analysis of the existing attitude measurement and the capability expansion of the subsequent range equipment.

**Key words:** pointing error; pose measurement; dynamic measurement datum; reliability analysis

## 引言

光学姿态测量对于靶场典型目标飞行性能评估、故障诊断等具有重要意义。目前依据任务特点, 光学测量设备在使用优劣上各有不同, 为了拓展设备测试能力, 探讨光轴指向误差对光学姿态测量精度的影响, 为后续姿态测量拓展测试通道提供理论依据。

测试处理方法是测量的重要环节, 根据靶场测

试距离及不同的目标特性, 姿态处理方法不同, 相应影响因子及精度评估也有差异。目前, 靶场姿态测量主要基于站间交会, 中轴线法<sup>[1]</sup>可以作为事前仿真的分析依据; 相关文献较少, 文献中依据算法模型对指向角度求偏导<sup>[2]</sup>, 可大致评估事后算法内指向精度对结果的影响, 但结果对指向误差导致动态基准变化未做深入分析。文献 [3-6] 主要涉及视觉测量相关基础知识, 文献 [7-14] 重点在于姿

收稿日期: 2022-03-04; 修回日期: 2022-09-14

基金项目: 军内科研项目 (012016018200A22304)

作者简介: 胡小丽 (1979—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事光学姿态测量及数据处理方面的研究。E-mail: scu993@163.com

态测量算法的原理及实施,文献[15]侧重于靶场光学测量基础及姿态测量硬件设计的相关知识,上述文献均未详述指向误差对姿态角的影响。

本文以中轴线法为依据,对算法步骤进行拆分,对光轴指向误差影响进行溯源,得出指向误差影响姿态处理结果可从两个方面进行分析,并对模型内交会算法的直接影响和模型外动态基准的间接影响进行分别分析和联合分析推导,并以仿真数据及实测数据进行联合验证分析,获取有效结论,为后续靶场设备能力拓展奠定理论基础。

## 1 理论分析

所有涉及的坐标系以常规姿态处理算法中涉及的坐标系为基准。其中测量坐标系以北向为 $X$ 轴;摄像机坐标系以光轴指向为 $X_C$ 轴,平行于像面向上为 $Y_C$ 轴;像面坐标系 $Y$ 轴、 $Z$ 轴分别平行于像机坐标系 $Y_C$ 轴、 $Z_C$ 轴。

### 1.1 中轴线法计算关键步骤分析

1) 像面坐标系内分站面轴线提取:

$$z \cdot \cos \alpha + y \cdot \sin \alpha - P = 0 \quad (1)$$

式中 $\alpha$ 为中轴线在像面内的投影斜率。

2) 分站像面方程向摄像机坐标系( $X_C Y_C Z_C$ )可转化为

$$Z_C \cdot \cos \alpha + Y_C \cdot \sin \alpha - \frac{P}{f} \cdot X_C = 0 \quad (2)$$

式中: $P$ 为中轴线在像面内的投影截距; $f$ 为像机焦距。

3) 摄像机坐标系转换为测量基准系( $XYZ$ ),此时引入光轴指向值:

$$a \cdot X + b \cdot Y + c \cdot Z = 0 \quad (3)$$

则坐标系旋转变换为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R(A)R(E) \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} \quad (4)$$

即直观表现为面系数通过光轴指向( $A, E$ )实现 $(-P/f, \sin \alpha, \cos \alpha) \rightarrow (a, b, c)$ 的旋转变换:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos A \cos E & -\cos A \sin E & -\sin A \\ \sin E & \cos E & 0 \\ \sin A \cos E & -\sin A \sin E & \cos A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{P}{f} \\ \sin \alpha \\ \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

4) 平面交会出基准坐标系下的中轴线矢量 $I$ ,最后对中轴线矢量进行处理,获取偏航角和俯仰角。

上述步骤说明:光轴指向主要参与第三步计

算,所以可从两个方面来分析影响姿态测量结果的因素:一是设测量基准不变,模型内计算直接影响姿态测量结果;二是测量动态基准由光轴指向( $A, E$ )间接获取,故指向误差会影响测量基准,进而影响姿态测量结果。

### 1.2 指向误差对测量结果的影响分析(测量基准不变)

姿态测量的实质是目标主体矢量相对于基准方向的相对量值,且靶场姿态测量通常基于中长远距离,相应姿态测量硬件系统通常采用长焦距,故式(5)中的 $P/f$ 项可略去,则由此部分误差导致的 $\overrightarrow{\Delta I_1}(\Delta l \ \Delta m \ \Delta n)$ 获取途径如式(6),首先计算由指向误差引起的相对不变基准坐标系的偏差:

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = R(\Delta A)R(\Delta E) \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} \quad (6)$$

然后按照中轴线法交会,计算出 $\overrightarrow{\Delta I_1}(\Delta l \ \Delta m \ \Delta n)$ 。

### 1.3 指向误差对姿态处理结果的影响分析(测量基准改变)

由前述可知,测量动态基准由光轴指向实现由摄像机坐标系至测量基准系的转换动态构建,实施步骤仍体现在式(4)和式(5)中。为与上一种情况(此处为基准系误差,上一种为基准系下的测量值偏差)有所区别,此处设 $O-X_0Y_0Z_0$ 为基准坐标系, $O_C-X_{C0}Y_{C0}Z_{C0}$ 为摄像机坐标系。则由此部分误差导致的 $\overrightarrow{\Delta I_2}(\Delta l \ \Delta m \ \Delta n)$ 获取途径如式(7),首先获取动态基准偏差:

$$\begin{bmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix} = R(\Delta A)R(\Delta E) \begin{bmatrix} X_{C0} \\ Y_{C0} \\ Z_{C0} \end{bmatrix} \quad (7)$$

此处的动态基准坐标系,由分站摄像机坐标系下所成像的目标主体矢量通过光轴指向间接构建,故实施途径仍为式(5)。但此时由无误差的矢量测量值 $(0 - \sin \alpha - \cos \alpha)^T$ 推算摄像机坐标系,后按式(5)求导获取转换系数 $(\Delta a \ \Delta b \ \Delta c)$ ,最后交会计算出 $\overrightarrow{\Delta I_2}(\Delta l \ \Delta m \ \Delta n)$ 。

### 1.4 两种处理方法所得结果之间的关系

指向误差分为方位指向误差与俯仰指向误差,此处以方位指向误差 $\Delta A$ 为例进行说明。

第一种指向误差情况(测量基准不变)如图1所示。第二种指向误差情况(动态基准坐标系误差)如图2所示。

两种情况下,实际指向相对于基准指向变化量均为 $\Delta A$ ,方式不同但结果殊途同归,故对最终矢量

的交会结果影响也相同, 即  $\vec{\Delta I_1} = \vec{\Delta I_2}$ , 取其中一种即可。

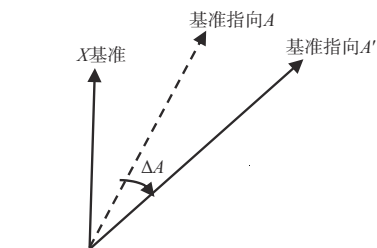


图1 测量基准固定下的指向误差示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pointing error under fixed measurement datum

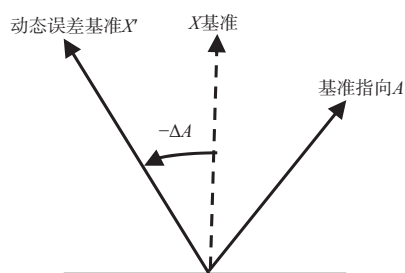


图2 动态基准变化下的指向误差示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pointing error under dynamic measurement datum

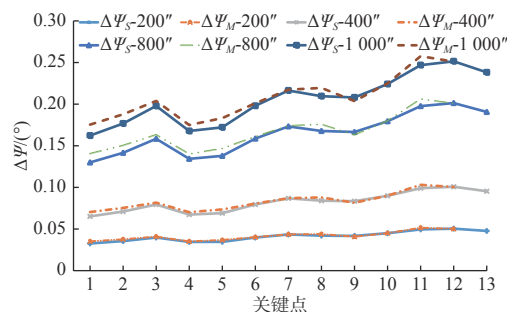
## 2 结果验证

### 2.1 指向误差对姿态测量的影响验证——平飞

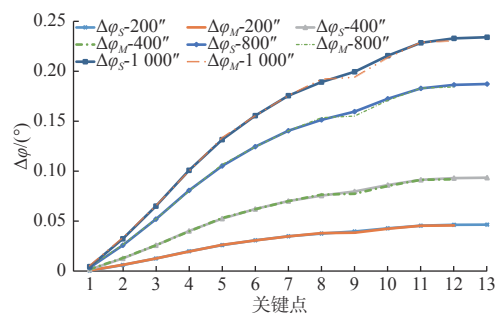
实际场景一: 某飞机沿主靶道近似平飞, 机上有遥测位置和姿态数据, 分站 1#、2# 分别布设于飞机航迹两侧不完全对称位置, 其中 X, Z 的坐标分别为 (3 500 m, -1 500 m)、(5 000 m, 1 700 m), 飞行高度约为 1 200 m、1 550 m、1 600 m。三段各自均匀取样, 将仿真计算结果与实测值进行对比分析验证。其中, 仿真计算采用文中所述方法进行, 飞机姿态值采用飞机自身数据代入获取  $\Delta\psi_s$ 、 $\Delta\varphi_s$ ; 实测值则以分站自身指向 (AE) 分别叠加 200"、400"、800"、1 000" 进行计算, 计算结果再以自身指向值的计算结果为基准, 获取相对误差  $\Delta\psi_M$ 、 $\Delta\varphi_M$ , 然后将两种结果进行对比分析。模型计算与实测数据对比如图 3、图 4 和图 5 所示。

当飞机实际高度约为 1 200 m 时, 如图 3 所示, 飞机飞行航迹与飞行姿态参数为 X(4 400 m~6 600 m), Z(295 m~37 m), Y(1 182 m~1 184 m),  $\psi(-9^\circ \sim 2.3^\circ)$ ,  $\varphi(3.6^\circ \sim -1^\circ)$ , 其中 Y、 $\psi$ 、 $\varphi$  均为量

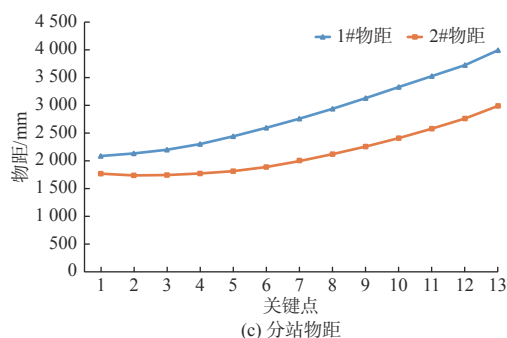
值变化范围, 变化过程随飞机飞行过程呈现非均匀起伏状态。



(a) 指向误差对偏航角的影响-仿真计算与实测值对比分析



(b) 指向误差对俯仰角的影响-仿真计算与实测值对比分析

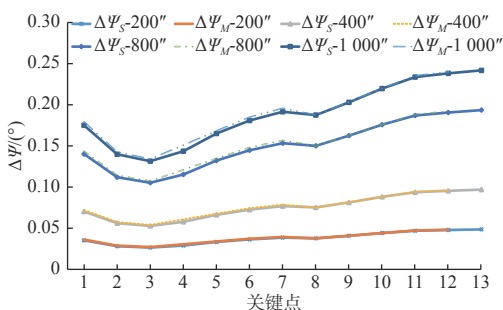


(c) 分站物距

图3 指向误差对姿态角测量影响的仿真与实测对比分析 (高度为 1 200 m)

Fig. 3 Comparative analysis of simulation and actual measurement of effects of pointing error on attitude angle measurement (height: 1 200 m)

当飞机实际高度约为 1 550 m 时, 如图 4 所示, 飞机飞行航迹与飞行姿态参数为 X(3 553 m~



(a) 指向误差对偏航角的影响-仿真计算与实测值对比分析



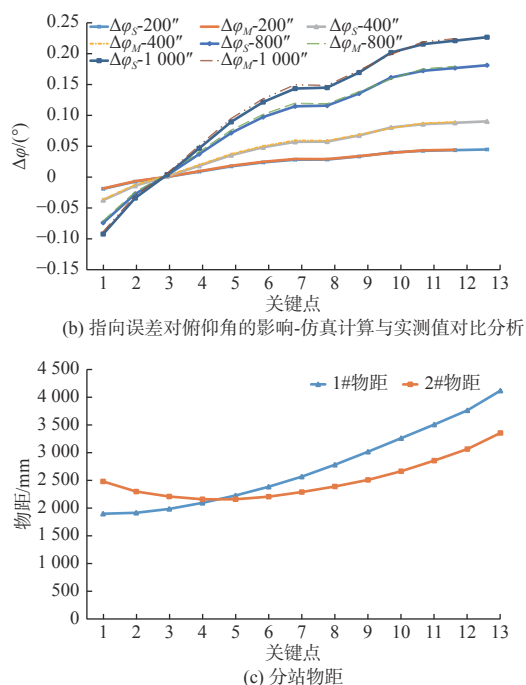
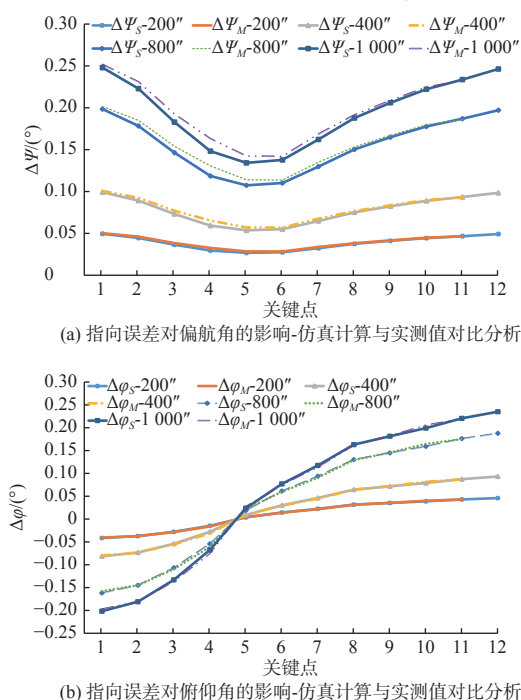


图4 指向误差对姿态角测量影响的仿真与实测对比分析  
(高度为1 550 m)

Fig. 4 Comparative analysis of simulation and actual measurement of effects of pointing error on attitude angle measurement (height: 1 550 m)

7 367 m),  $Z(-29 \text{ m} \sim -194 \text{ m})$ ,  $Y(1 550 \text{ m} \sim 1 553 \text{ m})$ ,  $\Psi(-2^\circ \sim 6.6^\circ)$ ,  $\varphi(-0.5^\circ \sim 1.7^\circ)$ , 其中  $Y$ 、 $\Psi$ 、 $\varphi$  均为量值变化范围, 变化过程随飞机飞行过程呈现非均匀起伏状态。

当飞机实际高度约为 2 000 m 时, 如图 5 所示,



(a) 指向误差对偏航角的影响-仿真计算与实测值对比分析

(b) 指向误差对俯仰角的影响-仿真计算与实测值对比分析

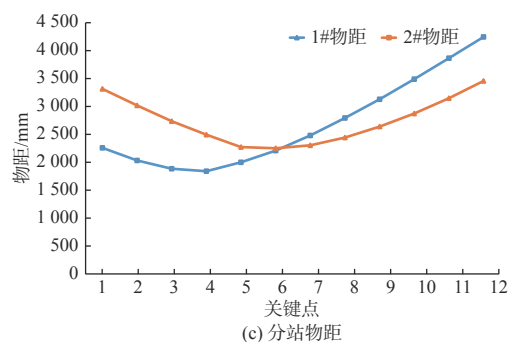


图5 指向误差对姿态角测量影响的仿真与实测对比分析  
(高度为2 000 m)

Fig. 5 Comparative analysis of simulation and actual measurement of effects of pointing error on attitude angle measurement (height: 2 000 m)

飞机飞行航迹与飞行姿态参数为  $X(2 352 \text{ m} \sim 7 439 \text{ m})$ ,  $Z(-86 \text{ m} \sim -165 \text{ m})$ ,  $Y(1 531 \text{ m} \sim 1 670 \text{ m})$ ,  $\Psi(1^\circ \sim 6.6^\circ)$ ,  $\varphi(-0.4^\circ \sim 3.8^\circ)$ , 其中  $Y$ 、 $\Psi$ 、 $\varphi$  均为量值变化范围, 变化过程随飞机飞行过程呈现非均匀起伏状态。

由图 3、图 4 和图 5 可得以下结论。

1) 姿态角误差测量值  $\Delta\Psi_M$ 、 $\Delta\varphi_M$  随指向误差变化量之间的映射关系与仿真计算值  $\Delta\Psi_S$ 、 $\Delta\varphi_S$  几乎完全吻合, 不吻合部分考虑为仿真场景与实测场景之间的跟踪位置差异。这也印证了前面所述结论, 即指向误差导致的影响可以为直接测量误差(测量基准不变)或动态基准误差导致的间接测量误差, 但两者对系统的最终影响相同, 即  $\overrightarrow{\Delta I_1} = \overrightarrow{\Delta I_2}$ 。

2) 指向误差对测量结果的影响, 随指向误差的增加而增加; 相同指向误差下, 测量结果随目标姿态设置和目标布站的不同而变化。

3) 在上述三段弹道、姿态设置前提下, 指向误差 400'' 内对结果的影响几乎不超过 0.1°。

4) 在上述三段弹道、姿态设置前提下(接近平飞状态), 指向误差对姿态影响的绝对量值基本随分站物距的增加而增加。

## 2.2 指向误差对姿态测量的影响验证—非平飞

某型飞机终点段落, 考虑地点通透、拍摄条件以及测量精度要求, 分站同步布设于弹道东侧, 分站 1#、2#分别布设位置: (6 800 m, 3 000 m), (10 300 m, 2 500 m); 目标航迹及姿态:  $X(9 000 \text{ m} \sim 8 600 \text{ m})$ ,  $Y(3 000 \text{ m} \sim 2 900 \text{ m})$ ,  $Z(1 750 \text{ m} \sim 1 715 \text{ m})$ ,  $\Psi(190^\circ)$ ,  $\varphi(-9^\circ \sim 43^\circ)$ 。测量手段只有光测, 经测量及处理, 姿态测量结果随指向误差的变化如图 6 所示。

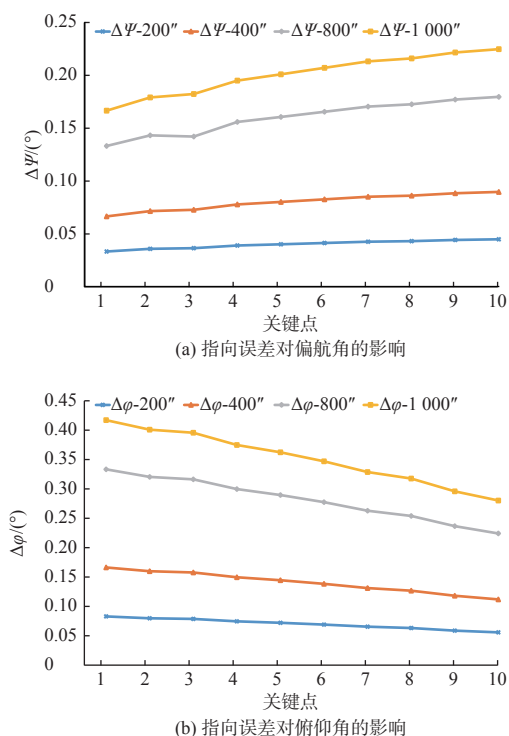


图6 非平飞状态下指向误差对姿态角测量的影响

Fig. 6 Influence of pointing error on pose measurement - non level flight

结合平飞与末段状态, 可获取如下结论。

1) 测量结果随目标姿态角的跨度范围而变化, 比如 2.1 节中, 偏航角变化范围大于俯仰角, 测量结果对偏航角的影响则大于俯仰角; 2.2 节中, 俯仰角变化跨度大, 则测量结果对俯仰角的影响大于偏航角影响。

2) 在通常的姿态测试范围(分站物距 4 km 左右)中, 无论是平飞段或起始、终点段, 200'' 指向误差对测量值的影响不超过 0.1°, 故可将姿态类设备指向精度的要求区别于弹道类设备。

3) 对于实况类设备, 指向误差通常不超过 1000''。在分站物距 4 km 左右范围内, 平飞状态下对姿态测量结果的影响不超过 0.3°, 非平飞状态下对姿态测量结果的影响不超过 0.5°。

### 3 结论

本文突破了光学外弹道位姿测量的惯性思维, 通过对中轴线法关键处理步骤进行溯源, 据此将指向误差对测量过程的影响进行了分类, 将指向误差对姿态测量结果的影响从直接影响和间接影响两个方面进行深入分析, 并以校飞平飞段实际数据和某型飞机终点段落实际测试剖面进行模拟

计算或实际测量。一方面印证了指向误差直接影响与间接影响相等取其一的结论, 另外还获取了靶场中长远姿态测量中指向误差对实际测量结果的影响因素及规律, 以及不同段落指向误差对测量结果影响量值的有效性结论, 为后续实况类设备进行姿态处理奠定了相关理论及模型分析基础。

### 参考文献:

- [1] 于起峰, 孙祥一, 陈国军. 用光测图像确定空间目标俯仰角和偏航角的中轴线法[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(2): 15-19.  
YU Qifeng, SUN Xiangyi, CHEN Guojun. A new method of measure the pitching and yaw of the axes symmetry object through the optical image[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2000, 22(2): 15-19.
- [2] 王鲲鹏. 靶场图像目标检测跟踪与定姿技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.  
WANG Kunpeng. Researches on auto target detection, tracking and 3-D pose measurement for imagery of shooting range[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [3] 冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002: 142-150.  
FENG Wenhao. Close-range photogrammetry[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002: 142-150.
- [4] 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
ZHANG Guangjun. Vision measurement[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [5] 张三喜, 姚敏, 孙卫平. 高速摄影及其应用技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 27-34.  
ZHANG Sanxi, YAO Min, SUN Weiping. High-speed photogrammetry and application[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006: 27-34.
- [6] 张三喜. 弹道特征参数摄像测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.  
ZHANG Sanxi. Ballistic characteristic parameters of vision measurement[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [7] 傅丹. 基于直线特征的空间目标三维结构重建和位姿测量方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.  
FU Dan. Researches on three-dimensional structure reconstruction and pose measurements based on line feature for space targets[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.

- [ 8 ] 高嵩, 白礼卓. 基于单目相机的三点式激光器测距及位姿估计方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 166-178.  
GAO Song, BAI Lizhuo. Monocular camera-based three-point laser pointer ranging and pose estimation method[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 166-178.
- [ 9 ] 胡小丽, 唐明刚, 吴海英. 一种特征直线交会求解的姿态处理方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 103-108.  
HU Xiaoli, TANG Minggang, WU Haiying. A pose information acquisition method based on characteristic line intersection analysis[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 103-108.
- [ 10 ] HARALICK B M, LEE C N, OTTENBERG K, et al. Review and analysis of solutions of the three point perspective pose estimation problem[J]. International Journal of Computer Vision, 1994, 13(3): 331-356.
- [ 11 ] OBERKAMPF D, DEMENTHON D F, DAVIS L S. Iterative pose estimation using coplanar feature points[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1996, 63(3): 495-511.
- [ 12 ] KNEIP L, SCARAMUZZA D, SIEGWART R. A novel parametrization of the perspective-three-point problem for a direct computation of absolute camera position and orientation[C]//CVPR 2011. Colorado Springs: IEEE, 2011: 2969-2976.
- [ 13 ] 张世杰, 曹喜滨, 张凡, 等. 基于特征点的空间目标三维位姿单目视觉确定算法[J]. 中国科学:信息科学, 2010, 40(4): 591-604.  
ZHANG Shijie, CAO Xibin, ZHANG Fan, et al. 3D position and pose determination method of spatial targets based on feature points from mono-view[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2010, 40(4): 591-604.
- [ 14 ] 苏国中. 基于光电经纬仪影像的飞机姿态测量方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.  
SU Guozhong. Research on the method of aircraft pose surveying from image sequences obtained by photoelectric theodolite[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.
- [ 15 ] 赵学颜, 李迎春. 靶场光学测量[M]. 北京: 国防大学出版社, 2001: 168-230.  
ZHAO Xueyan, LI Yingchun. Optical measurement in shooting range[M]. Beijing: National Defence University Press, 2001: 168-230.