

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1703125

新型光学检测靶标静态指向精度评价分析

张绍军^{1,2}, 高云国², 薛向尧², 毕 寻²

(1. 中国科学院大学 北京 100049; 2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘要: 静态指向精度是新型光学检测靶标的主要设计指标之一。为了对检测靶标的静态指向精度进行评价,结合靶标机构运动形式找出影响指向误差的主要误差源,运用齐次坐标变换法构建了指向误差理论模型;在数学模型基础上,利用 MATLAB 软件对指向误差进行了统计意义下的仿真分析,得出在全工作空间内靶标指向误差分布规律,比对了各误差对指向误差的影响程度;实验标定了检测靶标的空间静态指向误差。结果表明,在工作空间内靶标静态指向误差范围为 $70'' \sim 245''$,达到了静态指向精度设计指标 $5'$ 。整个研究对新研制靶标的检测性能有了全面了解,为后续的误差补偿等奠定了理论基础,也为其它机构误差研究提供了参考。

关键词: 光学检测靶标; 静态指向误差; 误差建模; 误差标定

中图分类号: TH74 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Evaluation and analysis of the static pointing accuracy of the novel optical testing target

Zhang Shaojun^{1,2}, Gao Yunguo², Xue Xiangyao², Bi Xun²

(1. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

Abstract: Static pointing precision is one of the main design indices of the novel optical testing target. In order to comprehensively evaluate the spatial pointing accuracy of the novel optical testing target, the main error sources affecting the pointing are identified firstly with the motion form of the target mechanism. The theoretical model of the pointing error is constructed by means of the homogeneous coordinate transformation. Then, the simulation analysis of the pointing error in statistical aspect is carried out by using MATLAB software based on mathematical models. The distribution of the pointing error and the degrees of the error influence on the pointing error are obtained in the full working space by simulation. Finally, the pointing error of the target is calibrated by experiments. The experimental results show that the static pointing error range of the testing target is $70''$ to $250''$ in the working space, and the precision design index is $5'$. The testing performance of the newly developed target are comprehensively explored, which provides a theoretical foundation for subsequent error compensation. This work can also provide a reference for error research of other mechanisms.

Keywords: optical testing target; static pointing error; error modeling; error calibration

0 引 言

光学检测靶标能够在室内模拟外场运动目标,光电跟踪测量设备跟踪该模拟目标,实现自身跟踪性能(跟踪角速度、角加速度及跟踪精度等)的检测^[1]。在光电跟踪测量设备的研制过程中,光学检测靶标起着重要作用。

由于涉及领域较为敏感,国外相关资料报道极少;目

前,国内从事这种特种设备研究工作也较少,具体到该设备的指向误差研究工作就少之又少,但一些研究人员对其他机构指向误差进行了研究,李岩等人^[2]基于多体运动学理论,对光电稳定机构指向误差进行建模及误差灵敏度进行了研究;王涛等人^[3]通过分析稳定平台轴系误差,由各误差合成稳定平台视线角误差,并分析了各轴系误差对视线角误差的影响;Huang L 等人^[4]考虑光学系统误差和机械系统误差共同作用下,应用多体系统运动

收稿日期: 2018-01 Received Date: 2018-01

学理论构建了大型望远镜指向误差模型,对其进行了分析并予以补偿;石要辉^[5]对影响车载光电经纬仪指向精度的主要误差源进行了分析,建立了指向误差修正模型并对部分误差进行了补偿;孙辉等人^[6]线性化模型并运动最小二乘估计法对制导系统中的导引头指向精度进行了标定研究;贾建援等人^[7]基于四元素变换理论,对具有方位与俯仰两轴转台的指向精度进行建模、误差参数辨识及误差补偿等。

本文所研究的靶标主要针对车载光电跟踪测量设备性能检测,是一种新结构形式的检测靶标,不仅与上述各轴系框架式机构存在多处不同,而且与现有光学检测靶标在运动形式上也存在较大区别,这使得其在检测过程中,需保证平行光管主光轴线的指向精度,否则会影响检测结果的准确性,严重时生成的目标像点不能够导入被检设备视场,从而无法被光电传感器接受,导致设备检测失效。因此,新型检测靶标的静态指向误差需要评价分析,后文中指向误差均表示静态指向误差。

1 靶标的机构简介与误差源分析

1.1 机构简介

新型光学检测靶标结构三维效果如图 1 所示,主要由支撑龙门架、方位轴系、直线运动系统、俯仰轴系和目标发生器(卡塞格林式平行光管)组成。本机构工作时主要包括 3 种运动:方位轴系在水平面内做 360°方位运动;俯仰轴系在高低方向上做 30°~60°俯仰运动;直线运动系统带动俯仰轴系和平行光管作直线运动。

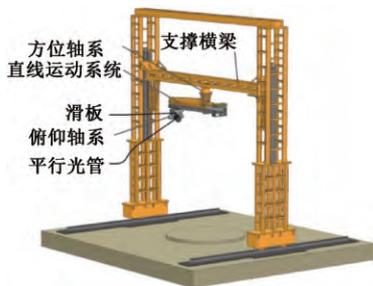


图 1 新型检测靶标三维模型

Fig. 1 A three-dimensional model of the new target mechanism

为保证模拟目标始终在被检测设备的视场内,直线运动参数需与俯仰角相应运动参数成一定函数关系,这样平行光管生成的星点目标^[8]可以模拟外场运动目标。

1.2 误差源分析

1) 靶标指向误差定义

指向误差是靶标设计指标之一,其定义为平行光管

主光轴线实际指向与理想指向的空间夹角。如图 2 所示,理想出射光线方向矢量 p_i 与实际出射光线方向矢量 p_a 之差为指向误差矢量 Δp ,两矢量之间的夹角为指向角误差 $\Delta\theta$ 。

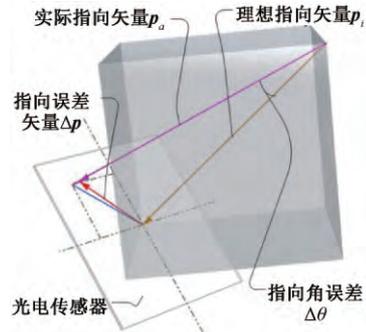


图 2 指向误差矢量示意图

Fig. 2 A sketch map of the pointing error vector

2) 误差源分析

在构件上建立坐标系,如图 3 所示,首先以方位轴线与平行光管光轴交点为原点建立惯性坐标系 $O_0-X_0Y_0Z_0$, Z_0 轴与理想方位轴线重合竖直向上, X_0 轴在水平面内且指向靶标处于零姿态时的平行光管一侧,右手法则确定 Y_0 轴,在此坐标系下衡量指向误差。

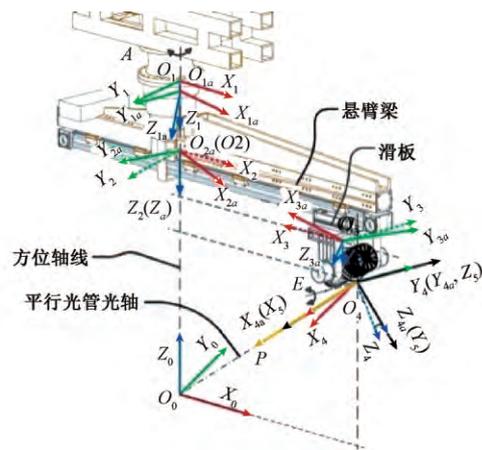


图 3 靶标机构运动坐标系示意图

Fig. 3 Sketch map of motion coordinate system of target mechanism

(1) 支撑横梁变形及调平误差

以方位轴承座与支撑横梁间上法兰面中心为坐标原点建立支撑梁坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 。由图 1 可知,支撑横梁为简支梁形式,其中部挠度与两端倾斜造成沿 Z_1 向移动线位移 δ_{z1} ; 同一端两侧调平高度差会造成绕 X_1 轴倾斜小角度 α_1 , 两端调平高度差会造成绕 Y_1 轴旋转小角度

β_1 。为此,理想坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 变为实际坐标系 $O_{1a}-X_{1a}Y_{1a}Z_{1a}$ 。

(2) 方位轴系误差

以方位轴系和水平运动系统之间的连接部件几何中心为原点建立方位轴参考系 $O_2-X_2Y_2Z_2$,用以描述方位轴线和支撑横梁间安装垂直度误差,该误差可分解为 α_2 (绕 X_2 轴) 和 β_2 (绕 Y_2 轴) 分量^[9-10]。

如图4所示,通常主轴回转运动中存在轴向窜动 ΔS 、径向平移 ΔC 、倾角回转误差 Y 和定位误差 ΔA ,各误差为转角函数且径向平移误差与角运动误差可分解对应坐标轴分量。建立方位轴连体坐标系 $O_{2a}-X_{2a}Y_{2a}Z_{2a}$,用以描述方位轴系回转运动误差,采用 A 表示方位转角,倾角回转误差 $Y_2(A)$ 分解为 $\alpha_{2a}(A)$ (绕 X_{2a} 轴) 和 $\beta_{2a}(A)$ (绕 Y_{2a} 轴) 分量,回转定位误差 ΔA ;对于精密轴系,轴向窜动误差 ΔS 与径向平移 ΔC 非常小,且对指向误差无影响,本文忽略不计。

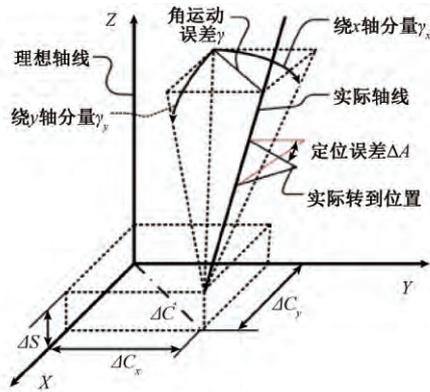


图4 轴系运动误差示意图

Fig. 4 Schematic diagram of motion error of shafting

(3) 滑板运动误差

以滑板几何中心的牵连点为原点,在导轨上建立参考坐标系 $O_3-X_3Y_3Z_3$,描述悬臂梁变形引起滑板静态误差。滑板沿导轨位移 x ,挠度引起滑板沿 Z_3 轴移动 $\delta_{23}(x)$,截面转角引起滑板绕 Y_3 轴转动 $\beta_3(x)$ 角。

以滑板几何中心建立滑板连体系 $O_{3a}-X_{3a}Y_{3a}Z_{3a}$,滑板做直线运动过程中存在六项误差^[11-13],分别是沿 X_3 轴定位误差 Δx 、沿 Y_3 、 Z_3 轴的位移误差 $\delta_{y3a}(x)$ 、 $\delta_{z3a}(x)$ 及绕 X_3 轴横滚角误差 $\alpha_{3a}(x)$ 、绕 Y_3 轴俯仰角误差 $\beta_{3a}(x)$ 和绕 Z_3 轴转偏转角误差 $Y_{3a}(x)$ 。

(4) 俯仰轴误差

同分析方位轴系误差一样,以俯仰轴与平行光管光轴交点为原点建立俯仰轴参考系 $O_4-X_4Y_4Z_4$,描述俯仰轴与滑板理想运动直线轨迹安装垂直度误差;在原点 O_4 处建立俯仰轴连体坐标系 $O_{4a}-X_{4a}Y_{4a}Z_{4a}$,描述俯仰轴倾角回转误差,采用 E 表示俯仰转角,俯仰轴安装垂直度误差分解为 α_4 (绕 X_4 轴) 和 Y_4 (绕 Z_4 轴) 分量,倾角回转误差分解为 $\alpha_{4a}(E)$ (绕 X_{4a} 轴) 和 $Y_{4a}(E)$ (绕 Z_{4a} 轴) 分量,定位误差为 ΔE 。

(5) 平行光管误差

在原点 O_4 处建立平行光管连体坐标系 $O_5-X_5Y_5Z_5$,用于描述平行光管误差,主要包括平行光管主光轴与俯仰轴线的安装垂直度误差和平行光管发出平行光的平行度误差,通常平行度误差非常小,可忽略不计,垂直度误差可以分解为 β_5 (绕 Y_5 轴) 和 Y_5 (绕 Z_5 轴)。

除了以上5种主要的误差源外,也存在其他线性误差,这类线性误差对指向误差没有影响。把上述误差分为静态误差与运动误差,静态误差与安装连接过程的精度有关,而运动误差取决与运动过程的精确度并是运动参数函数,共找出23项误差如表1所示。

表1 检测靶标机构误差参数

Table 1 Error parameters of the testing target mechanism

静态误差源	表达式	运动误差源	表达式
支撑横梁沿 Z_1 线误差	δ_{z1}	方位轴倾角回转误差(绕 X_{2a} 轴分量)	$\alpha_{2a}(A)$
支撑横梁倾角误差(绕 X_1)	α_1	方位轴倾角回转误差(绕 Y_{2a} 轴分量)	$\beta_{2a}(A)$
支撑横梁倾角误差(绕 Y_1)	β_1	方位轴定位误差	ΔA
方位轴系安装垂直度误差(绕 X_2 轴分量)	α_2	滑板沿直线导轨定位误差	Δx
方位轴系安装垂直度误差(绕 Y_2 轴分量)	β_2	滑板沿 Y_{3a} 轴的位移误差	$\delta_{y3a}(x)$
悬臂梁挠度误差	$\delta_{23}(x)$	滑板沿 Z_{3a} 轴的位移误差	$\delta_{z3a}(x)$
悬臂梁截面转角误差	$\beta_3(x)$	滑板绕 X_{3a} 轴的转角误差	$\alpha_{3a}(x)$
俯仰轴安装垂直度误差(绕 X_4 轴分量)	α_4	滑板绕 Y_{3a} 轴的转角误差	$\beta_{3a}(x)$
俯仰轴安装垂直度误差(绕 Z_4 轴分量)	Y_4	滑板绕 Z_{3a} 轴的转角误差	$Y_{3a}(x)$
平行光管安装垂直度误差(绕 Y_5 轴分量)	β_5	俯仰轴回转误差(绕 X_{4a} 轴分量)	$\alpha_{4a}(E)$
平行光管安装垂直度误差(绕 Z_5 轴分量)	Y_5	俯仰轴回转误差(绕 Z_{4a} 轴分量)	$Y_{4a}(E)$
		俯仰轴定位误差	ΔE

2 指向误差建模

基于齐次坐标变换原理,坐标系 $O_5-X_5Y_5Z_5$ 到惯性系 $O_0-X_0Y_0Z_0$ 的总变换矩阵如式(1)。

$${}^0_5T = {}^0_1T {}^1_{1a}T {}^2_{2a}T {}^3_{3a}T {}^4_{4a}T {}^5_{5a}T \quad (1)$$

式中:

$$\left\{ \begin{aligned} {}^0_1T &= \text{Trans}(0 \ \rho \ \rho_0) \text{Rot}(X \ \pi) \\ {}^1_{1a}T &= \text{Trans}(0 \ \rho \ \delta_{z1}) \text{Rot}(X \ \alpha_1) \text{Rot}(Y \ \beta_1) \\ {}^2_{2a}T &= \text{Trans}(0 \ \rho \ \rho_{1a}) \text{Rot}(X \ \alpha_2) \text{Rot}(Y \ \beta_2) \\ {}^3_{3a}T &= \text{Rot}(Z \ A + \Delta A) \text{Rot}(X \ \alpha_{2a}(A)) \text{Rot}(Y \ \beta_{2a}(A)) \\ {}^4_{4a}T &= \text{Trans}(L - x \ \rho \ \rho_{2a}) \text{Rot}(Z \ \pi) \\ &\quad \text{Trans}(0 \ \rho \ \delta_{z3}(x)) \text{Rot}(Y \ \beta_3(x)) \\ {}^5_{5a}T &= \text{Trans}(\Delta x \ \delta_{y3a}(x) \ \delta_{z3a}(x)) \text{Rot}(X \ \alpha_{3a}(x)) \\ &\quad \text{Rot}(Y \ \beta_{3a}(x)) \text{Rot}(Z \ \gamma_{3a}(x)) \\ {}^6_{6a}T &= \text{Trans}(-b \ \rho \ \rho_{3a}) \text{Rot}(X \ \alpha_4) \text{Rot}(Z \ \gamma_4) \\ {}^7_{7a}T &= \text{Rot}(X \ \alpha_{4a}(E)) \text{Rot}(Y \ -E + \Delta E) \\ &\quad \text{Rot}(Z \ \gamma_{4a}(E)) \\ {}^8_{8a}T &= \text{Rot}(Y \ \beta_5) \text{Rot}(Z \ \gamma_5) \end{aligned} \right.$$

其中 i_jT 表示坐标系 $\{i\}$ 在系 $\{j\}$ 的齐次坐标变换矩阵; $\text{Trans}(\dots)$ 代表齐次平移变换矩阵, $\text{Rot}(\dots)$ 代表齐次旋转变换矩阵; c_0 表示点 O_0 与点 O_1 间的距离, ρ_{1a} 表示点 O_{1a} 与点 O_2 间的距离, ρ_{2a} 表示点 O_{2a} 与点 O_3 间沿 Z_{2a} 的距离, b 表示点 O_{3a} 与 O_4 间沿 X_{3a} 负方向的距离, ρ_{3a} 表示点 O_{3a} 与 O_4 间沿 Z_{3a} 的距离, L 表示靶标处于零位时俯仰轴线与方位轴线间的距离,其余符号与前文相同。

结合前文指向误差的定义,平行光管连体系 $O_5-X_5Y_5Z_5$ 下的单位指向矢量 $p = (1 \ \rho \ \rho \ \rho)$ 变换到惯性系 $O_0-X_0Y_0Z_0$ 下进行指向误差描述,当所有误差为 0 时,理想指向矢量 p_i 可由式(2)中第 1 式求得,当存在误差时与实际指向矢量 p_a 可由式(2)中第 2 式求得。

$$\begin{cases} p_i = {}^0_5T(e = 0) p \\ p_a = {}^0_5T(e) p \end{cases} \quad (2)$$

式中: $e = [\delta_{z1} \ \alpha_1 \ \beta_1 \ \dots \ \gamma_5]$ 表示表 1 中误差矩阵。

误差为小角度时,指向误差可由式(3)求得。

$$|\Delta\theta| = |\Delta p| = |p_a - p_i| = |{}^0_5T(e) - {}^0_5T(0) p| \quad (3)$$

把式(1)、(2)代入式(3)求出指向误差矢量,小角度假设下 $\sin(e_i) = e_i$ 、 $\cos(e_i) = 1$ 且省略二阶以上小量后得式(4)。

$$\begin{aligned} \Delta P &= [(\beta_1 + \beta_2) s(E) + (\alpha_{2a}(A) - \alpha_{3a}(x) + \alpha_4 - \alpha_{4a}(E)) s(A) s(E) + (\beta_{2a}(A) - \beta_3(x) - \beta_{3a}(x) - \Delta E - \beta_5) s(E) c(A) + (\Delta A + \gamma_{3a}(x) + \gamma_4) s(A) c(E) + (\gamma_{4a}(E) + \gamma_5) s(A) (\alpha_1 + \alpha_2) s(E) + (\alpha_{2a}(A) - \alpha_{3a}(x) + \alpha_4 - \alpha_{4a}(E)) s(E) c(A) - (\beta_{2a}(A) - \beta_3(x) - \beta_{3a}(x) - \Delta E - \beta_5) s(A) s(E) + (\Delta A + \gamma_{3a}(x) + \gamma_4) c(E) c(A) + (\gamma_{4a}(E) + \gamma_5) c(A) - (\beta_{2a}(A) - \beta_3(x) - \beta_{3a}(x) - \Delta E - \beta_5) c(E) - (\beta_1 + \beta_2) c(E) c(A) + (\alpha_1 + \alpha_2) s(A) c(E) \rho] \quad (4) \end{aligned}$$

式中: s 、 c 分别表示正弦函数和余弦函数,由表 1 中最初 23 项线性误差与角误差变为只含有 18 项角误差,验证了指向误差与线性位移误差无关这一结论。

3 指向误差仿真分析

3.1 精度预估

为了找出指向误差在工作空间内的分布规律及其估值,表 1 中 18 项角误差除悬臂梁变形转角误差 $\beta_3(x)$ 根据结构有限元分析及理论计算有确定值,不设定为随机误差,其余各项误差均假设为服从 $(0, \sigma_i^2)$ 的正态分布,各误差参数如表 2 所示。借助 MATLAB 软件绘制指向误差分布如图 5 所示,图 5(a) 为各误差取值均为其自身标准差时指向误差分布;图 5(b) 为误差取值均等为负的自身标准差时指向误差分布;图 5(c) 为各误差按表 2 的分布抽样 10 000 次,在点 $(A = 75^\circ, E = 45^\circ)$ 处指向误差频次统计图(其他点处分布规律也类似);图 5(d) 为各误差按表 2 的分布抽样 10 000 次,工作空间内指向误差期望分布。

表 2 各项角误差参数

Table 2 Angular error parameters

误差项	期望 μ	标准差 $\sigma_i / (")$	来源依据
α_1, β_1	0	70	工厂调平水平
$\alpha_2, \beta_2, \alpha_4, \gamma_4, \beta_5, \gamma_5$	0	20	轴承型号 FAG/P4S 级,工厂装配水平。
$\alpha_{2a}(A), \beta_{2a}(A), \Delta A$	0	25	轴承型号、ECN 牌 21 位编码器,参考经验。
$\alpha_{4a}(E), \gamma_{4a}(E), \Delta E$			
$\beta_3(x)$	-	自由端截面转角 ≤ 12	有限元仿真及理论计算(非随机误差)
$\alpha_{3a}(x), \beta_{3a}(x), \gamma_{3a}(x)$	0	30	实测数据最大值

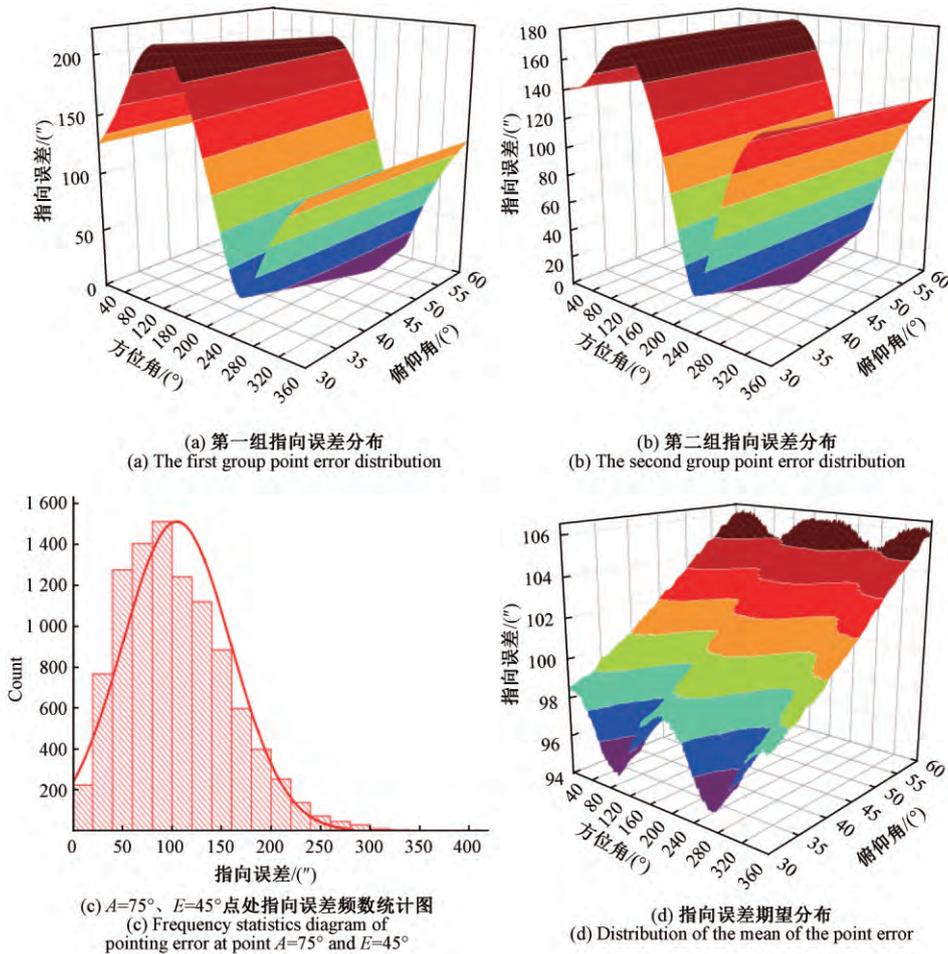


图 5 指向误差分布规律示意图
Fig. 5 The distribution of the pointing error

由图 5 (a)、(b)、(d) 可以看出, 指向误差随方位角增大成三角函数变化, 随俯仰角增大而增大; 图 5 (d)、(c) 可以看出, 指向误差期望值以大概率分布在 $90^\circ \sim 110^\circ$ 。

3.2 灵敏度分析

为了衡量各误差参数对靶标指向误差的影响程度, 基于误差模型选用偏微分法求解误差灵敏度进行定量化分析^[14-16]。由图 5 可知, 指向误差的灵敏度与工作空间的位置有关, 所以定义工作空间内检测靶标的指向误差灵敏度 S_{ei} 为:

$$S_{ei} = \frac{\int \left| \frac{\partial \Delta \theta}{\partial e_i} \right| d\Omega}{\Omega} \quad i = 1, 2, \dots, 18 \quad (5)$$

式中: $e^1 = [\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \dots, \gamma_5]$ 为 18 项角误差组成的误差矩阵, Ω 靶标的工作空间。

利用 MATLAB 仿真时采用 $\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left| \frac{\partial \Delta \theta_j}{\partial e_i} \right|$ 来近似式 (5) $\Delta \theta_j$ 表示工作空间内第 j 点处的指向误差, n 表示工作空间内被计算位置总数。运用蒙特卡罗法(在全工作空间内, 假设各项误差均服从 $(0, 1 \text{ mrad})$ 的正态分布

每点均抽样 10 000 次) 求得指向误差灵敏度, 可解释为均方差等于 1 mrad 时, 各单项误差所引起全工作空间内指向误差均值的变化量。为了更好地对比识别关键性误差, 将求得各项误差灵敏度进行归一化处理, 定义误差灵敏度系数 C_{ei} 为式 (6), 并将各误差灵敏度系数如图 6 所示。

$$C_{ei} = S_{ei} / \sum_{i=1}^{18} S_{ei} \quad (6)$$

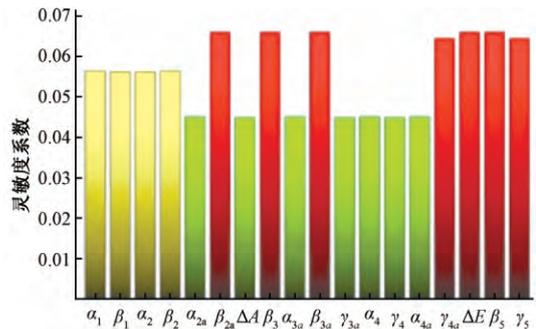


图 6 各项误差灵敏度系数直方图

Fig. 6 Histogram of error sensitivity coefficients

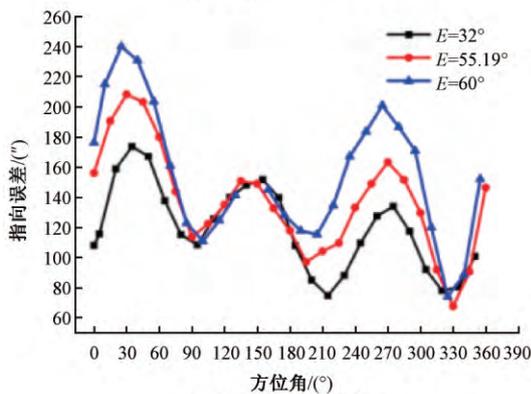
由图 6 可知,对最终指向误差的影响程度可分为 3 组: $\beta_{2a}(A)$ 、 β_3 、 $\beta_{3a}(x)$ 、 $Y_{4a}(E)$ 、 ΔE 、 β_5 和 Y_5 影响程度最大 α_1 、 β_1 、 α_2 和 β_2 影响程度次之 α_2 、 ΔA 、 $\alpha_{3a}(x)$ 、 $Y_{3a}(x)$ 、 α_4 、 Y_4 和 $\alpha_{4a}(E)$ 最小。

4 静态指向误差实验标定

利用 Leica 全站仪(测角精度 0.5")与某型号高精度光电经纬仪(俯仰轴、方位轴角编码器均为 24 bit 光栅码盘,像元分辨率为 1.5")在不同俯仰角范围内对检测靶标进行方位角、俯仰角静态误差标定,图 7(a)所示为实验现场图。



(a) 实验现场
(a) Experimental scene



(b) 静态指向误差曲线
(b) The static pointing error curve

图 7 指向误差实验标定

Fig. 7 The calibration of the pointing error

标定开始前利用与方位轴同轴安装的激光器和与平行光管光轴同轴安装的激光器,配合地面可调垫铁将全站仪或光电经纬仪精调到理想工作位置,利用青岛前哨牌高精度电子水平仪(精度为 0.2")进行调平^[17]。在不同工作点处,进行标定方位角与俯仰角值,选取俯仰角 E 为 32° 时的一组测量数据如表 3 所示。

表 3 方位角、俯仰角测量数据

Table 3 The calibrated values of the azimuth and pitching angle

方位角理论值/(°)	方位角测量值	俯仰角测量值	方位角理论值/(°)	方位角测量值	俯仰角测量值
0	0°1'14"	32°1'19"	185	184°58'57"	31°58'32"
5	5°1'26"	32°1'17"	200	199°58'56"	31°59'4"
20	20°2'24"	32°1'8"	215	214°58'49"	31°59'39"
35	35°2'47"	32°0'49"	230	229°58'32"	32°0'9"
50	50°2'45"	32°0'29"	245	244°58'15"	32°0'32"
65	65°2'16"	31°59'37"	260	259°58'3"	32°0'51"
80	80°1'39"	31°59'1"	275	274°58'1"	32°1'2"
95	95°0'56"	31°58'27"	290	289°58'23"	32°1'6"
110	110°0'26"	31°57'57"	305	304°58'59"	32°1'9"
125	124°59'59"	31°57'40"	320	319°59'33"	32°1'13"
140	139°59'41"	31°57'33"	335	335°0'25"	32°1'17"
155	154°59'13"	31°57'36"	350	350°1'6"	32°1'16"
170	169°58'59"	31°57'54"			

根据测量值与理论值计算出方位角误差 Δ_1 与俯仰角误差 Δ_2 , 指向误差 $\Delta\theta = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2}$, 图 7(b) 所示为俯仰角 $E = 32^\circ$ 、 55.19° 和 60° 时, 指向误差随方位角变化趋势图。由图形可知, 指向误差随着方位角方向出现三处极大值、三处极小值, 且随俯仰角增加而增大, 且在工作空间内指向误差的范围为 $70'' \sim 245''$ 。

5 结 论

分析了影响新型光学检测靶标指向误差的主要误差源, 建立了检测靶标指向误差模型, 对指向误差进行了统计意义下的仿真分析, 最后通过现场实验标定了靶标静态指向误差, 其满足新型靶标指向精度设计指标 5' 要求。得出新型光学检测靶标与单轴旋转动态靶标有如下的优势与不足。

1) 较单轴动态旋转靶标, 新型靶标的指向精度较低。如果被检设备的光电传感器半视场角小于靶标指向误差, 新型靶标不能够用于检测该设备。

2) 新型靶标静态指向误差按照一定规律在 $70'' \sim 245''$ 范围变化, 动态指向误差就不能够保证较高的精度。因此, 新型靶标指向误差未补偿前, 其仅能够作为跟踪靶标使用。

3) 在跟踪特定俯仰或方位角速度、角加速度要求的模拟目标时, 单自由度动态旋转靶标方位角运动参数与

俯仰角运动参数耦合在一起,其不能够胜任检测任务;新型检测靶标俯仰角与方位角相互独立控制,模拟目标运动轨迹多样,其适应性更强。

4) 新型靶标支撑框架大,结构刚度不会太高,支撑悬臂梁外伸长、惯量大,将使目标发生器运动参数精度控制难度大;平行光管运动自由度多,不能够保证其过高精度。

综合以上几点,当前新型靶标指向精度达到设计要求,可以完成跟踪测试任务,但对于要求精度高的检测任务来说不能够胜任,仍有待对影响靶标运动精度原因与补偿方法进行研究。

参考文献

- [1] 顾营迎,沈湘衡,贺庚贤,等.光电经纬仪旋转靶标特性对目标跟踪的影响[J].光电工程,2011,38(3):19-24.
GU Y Y, SHEN X H, HE G X, et al. The impact of target characteristics on target tracking performance of photoelectric theodolite [J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(3): 19-24.
- [2] 李岩,范大鹏.光电稳定机构指向误差建模与灵敏度分析[J].国防科技大学学报,2008,30(1):104-109.
LI Y, FAN D P. Development of pointing error and sensitivity analysis of opto-electrical stabilization mechanism [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2008, 30(1): 104-109.
- [3] 王涛,朱明超,阎胜利,等.稳定平台轴系精度对视轴指向误差的影响分析[J].红外与激光工程,2011,40(11):2265-2269.
WANG T, ZHU M CH, YIN SH L, et al. Analysis of LOS pointing error derived from precision of shafting in stabilization mechanism [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(11): 2265-2269.
- [4] HUANG L, MA W L, HUANG J L. Modeling and calibration of pointing errors with alt-az telescope [J]. New Astronomy, 2016(47): 105-110.
- [5] 石要辉.车载光电经纬仪指向精度稳定性研究[D].成都:中国科学院光电技术研究所,2014.
SHI Y H. Research on pointing accuracy stability of vehicle-borne photo-electronic theodolite [D]. Chengdu: The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, 2014.
- [6] 孙辉,刘慧,罗安治,等.应用模型线性化和最小二乘估计的导引头指向精度标定[J].光学精密工程,2015,23(7):2060-2068.
SUN H, LIU H, LUO AN ZH, et al. Calibration of seeker's pointing error based on model linearization and least square estimation [J]. Optics and Precision Engineering 2015, 23(7): 2060-2068.
- [7] 贾建援,柴伟,于大林,等.方位俯仰转台误差参数辨识与指向精度分析[J].仪器仪表学报,2016,37(7):1500-1508.
JIA J Y, CHAI W, YU D L, et al. Error parameters identification and pointing accuracy analysis of an azimuth-elevation turntable [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1500-1508.
- [8] 王磊,王守印,周虎,等.平行光管的基本原理及使用方法[J].仪器仪表学报,2006,27(6):980-982.
WANG L, WANG SH Y, ZHOU H, et al. Basic principles and use method of collimator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 980-982.
- [9] 贾彦斌,李莹兴.光电观瞄仪轴系垂直误差分析及修正[J].火力与指挥控制,2013,38(9):157-159.
JIA Y B, LI Y X. Electro-optical observer shafting perpendicularity error analysis and correction [J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(9): 157-159.
- [10] 江波,周泗忠,姜凯,等.车载经纬仪的垂轴误差分析[J].红外与激光工程,2015,44(5):1623-1627.
JIANG B, ZHOU S ZH, JIANG K, et al. Analysis of vertical axis error of vehicular theodolite [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(5): 1623-1627.
- [11] KHAN A W, CHEN W Y. Systematic geometric error modeling for workspace volumetric calibration of a 5-axis turbine blade grinding machine [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(5): 604-615.
- [12] 杨婧,冯其波.数控机床空间几何误差测量研究进展[J].仪器仪表学报,2017,38(8):1901-1911.
YANG J, FENG Q B. Research progress on volumetric error measurement of numerical control (NC) machine tools [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 1901-1911.
- [13] 李杰,谢福贵,刘辛军,等.五轴数控机床空间定位精度改善方法研究现状[J].机械工程学报,2017,53(7):113-128.
LI J, XIE F G, LIU X J, et al. Analysis on the research status of volumetric positioning accuracy improvement methods for five-axis nc machine tools [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(7): 113-128.
- [14] 谢福贵,刘辛军,陈禹臻.一种新型虚拟中心并联机构的误差灵敏度分析[J].机械工程学报,2013,

49(17): 85-91.

XIE F G, LIU X J, CHEN Y ZH. Error sensitivity analysis of novel virtual center mechanism with parallel kinematics [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(17): 85-91.

- [15] 阎艳, 王戈, 张发平, 等. 基于误差传递模型的精密装配几何误差灵敏度分析 [J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(7): 682-686.

YAN Y, WANG G, ZHANG F P, et al. Precision assembly geometric error sensitivity analysis based on the error transformation model for precision assembly [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(7): 682-686.

- [16] CHEN Q, ZHAO H W, ZHANG G J, et al. An analytical approach for crucial geometric errors identification of multi-axis machine tool based on global sensitivity analysis [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(1-4): 107-121.

- [17] 赵宏超, 姜海波, 安其昌, 等. TMT三镜原理演示系统轴系结构设计及精度测试 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(10): 113-119.

ZHAO H CH, JIANG H B, AN Q CH, et al. Design and tests of shafting structure in giant steerable science mirror prototype system [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(10): 113-119.

作者简介



张绍军 2008 年于辽宁石油化工大学获得学士学位, 现为中国科学院大学硕博连读研究生, 主要研究方向为光学精密设备检测技术。

E-mail: zhangsj198609@126.com

Zhang Shaojun received his B. Sc. degree from Liaoning Shihua University in 2008. Now he is a Ph. D. candidate in University of Chinese Academy of Science. His main research interest is detection technology of optical precision equipment.



高云国(通信作者), 1982 年于哈尔滨科技大学获得学士学位, 1991 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位, 现为中国科学院长春光机所研究员, 博士生导师, 主要研究方向为光电仪器总体设计。

E-mail: gaoyunguo@163.com

Gao Yunguo (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Harbin University of Science and Technology in 1982, M. Sc. degree from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science in 1991. Now he is a research fellow in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. His main research interest is overall design of photoelectric instrument.