

倾斜安装的光管焦距标定方法研究

王 涛¹, 田留德¹, 赵建科¹, 周 艳¹, 鄂可伟¹, 刘 锴¹, 刘尚阔¹,
刘 飞², 杨利红³, 刘艺宁¹, 薛 勋¹, 赵怀学¹

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
2. 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;
3. 西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘 要: 平行光管水平放置和倾斜安装时由于受力状态不同其光学参数会有较大差异, 为了精准评价平行光管的焦距, 根据平行光管焦面上的点与全站仪角度之间的映射关系, 建立了倾斜安装条件下光管焦距与全站仪角度关系的精确数学模型, 修正了全站仪垂直轴轴系转动时产生的原理性投影误差。使用全站仪采集了多组数据并进行了实验验证: 修正畸变后由焦面目标与竖丝平行时的各测试点解算的焦距值分别为 1980.03、1983.45、1982.79 mm, 焦距平均值即真值为 1982.09 mm。修正畸变但未修正投影误差的情况下由焦面目标与分划板横丝平行时的各测试点解算的焦距值分别为 996.42、995.23、995.22 mm, 焦距平均值相对误差为 50.2%。修正投影误差和畸变后由焦面目标位于不同象限及与分划板横丝平行时的各测试点解算的焦距值极差为 4.74 mm, 焦距平均值为 1982.69 mm, 与真值差值为 0.6 mm。测量结果的展伸不确定度与焦距真值的最大相对误差为 0.36%, 该值远小于 GB/T 9917.1—2002 照相镜头中实测焦距对名义焦距的相对误差不超过±5% 的规定。实验结果表明: 该模型具有较高的解算精度, 目标狭缝在分划板中的相位可以是随机值, 对于倾斜安装条件下平行光管焦距的原位检测具有极大的工程应用价值。

关键词: 焦距; 畸变; 投影误差; 原位标定; 随机相位

中图分类号: O484 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220124

Research on focal length calibration method of oblique installation collimator

Wang Tao¹, Tian Liude¹, Zhao Jianke¹, Zhou Yan¹, E Kewei¹, Liu Kai¹, Liu Shangkuo¹,
Liu Fei², Yang Lihong³, Liu Yining¹, Xue Xun¹, Zhao Huaxue¹

- (1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;
3. School of Optoelectronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: When the collimator is placed horizontally and installed obliquely, its optical parameters will be greatly different due to different stress states. In order to accurately evaluate the focal length of collimator, according to the mapping relationship between the point on the focal plane of the collimator and the angle of the

收稿日期: 2022-02-08; 修订日期: 2022-04-20

基金项目: 中国科学院西安光学精密机械研究所青年创新促进会资助项目 (E15151Z1)

作者简介: 王涛, 男, 工程师, 硕士, 主要从事光电系统总体性能评价、成像链路仿真建模等方面的研究。

total station, an accurate mathematical model of the relationship between the focal length and the angle of the total station under the condition of oblique installation is established, the principle projection error caused by the rotation of the vertical axis of the total station is corrected. Several groups of data are collected by total station and experimental verification is carried out. After correcting the distortion, the focal length calculated by each testing point when the line segment is parallel to the vertical wire are 1 980.03 mm, 1 983.45 mm, 1 982.79 mm, the average focal length, i.e. the true value, is 1 982.09 mm. When the distortion is corrected but the projection error is not corrected, the focal length calculated from each testing point when the line segment is parallel to the horizontal wire of the reticle is 996.42 mm, 995.23 mm, 995.22 mm, the relative error of the average focal length is 50.2%. The range of focal length calculated by each testing point when the line segment is located in different quadrants and parallel to the horizontal wire of the reticle is 4.74 mm after correcting the projection error and distortion, the average focal length of all testing points is 1 982.69 mm, the difference between the average value and the true value is 0.6 mm. The maximum relative error between the extended uncertainty of the focal length calculated by different testing point and the true value of the focal length is 0.36%. This value is far less than the stipulation in GB/T 9917.1-2002 that the relative error between the measured focal length and the nominal focal length in the photographic lens does not exceed $\pm 5\%$. The experimental results show that the model has universality and high accuracy, the phase of the target slit in the reticle is allowed to be a random value, there is no need to adjust the slit to be strictly parallel to the vertical wire of the total station, the model has great engineering application value for the in-situ detection of the focal length of the collimator under the condition of oblique installation.

Key words: focal length; distortion; projection error; in-situ calibration; random phase

0 引言

对飞行目标进行稳定跟踪并且准确解算其运行轨迹是光电经纬仪优良性能的重要体现^[1-3]。光电经纬仪焦距是影响轨迹解算准确性的主因之一^[4-6],需要在出厂前对其焦距进行测试,测试方法为在平行光管焦面位置处放置双狭缝目标板,狭缝目标板经平行光管和待测经纬仪后用自带的 CCD 进行图像接收,利用双狭缝间距、平行光管焦距以及由 CCD 测得的狭缝像间距联合计算待测经纬仪焦距。由此可见,平行光管焦距是影响经纬仪焦距测试的关键因素,需要对其焦距进行精确标定。根据光电经纬仪布站方案,极端情况下系统工作最大俯仰角会达到 60° ,为了准确评价经纬仪焦距,在拱形检测架上需要安装不同倾角的焦面带有狭缝目标板的平行光管。通常情况下在标定焦距时都要将检测架上的平行光管拆卸下来水平放置,由于平行光管安装位置较高,频繁拆卸会给测试人员带来一定的安全风险,另外最重要的是平行光管水平放置和倾斜安装时由于受力状态不同其

光学参数会有较大差异^[7-9],因此需要对检测架上倾斜安装的平行光管焦距进行原位检测。段亚轩、赵磊、邵晶等采用放大率法测试倾斜状态下平行光管焦距时需要将基准平行光管和显微测量系统均倾斜架设并调整三者之间的相对空间位置关系从而保证光轴之间互相平行^[10-12],这种情况下,不仅架设、调整困难而且由于重力的干扰,基准平行光管的光学参数也会发生变化,进而影响焦距的标定结果。吴玲玲、袁士东、姚震等采用精密测角法测试平行光管焦距时要求全站仪视轴和待标定平行光管光轴均处于水平状态^[13-17],若平行光管倾斜架设,用全站仪测试两狭缝张角时会因投影误差的存在而导致两狭缝间的张角测试值和理论值存在较大差异,从而影响焦距标定结果。因此研究倾斜安装状态下平行光管焦距的标定方法具有极大的工程应用价值。

1 标定基本原理与数学模型建立

1.1 标定基本原理

图 1 为采用精密测角法测试平行光管焦距的基

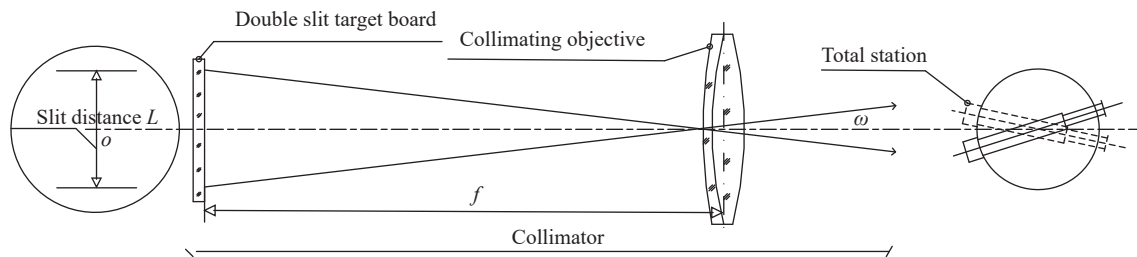


图 1 基于精密测角法的焦距标定原理图

Fig.1 Schematic diagram of focal length calibration based on precision goniometry

本原理图,将平行光管放置于整平的光学平台上,将星点目标板安装于平行光管焦面位置处并用卤钨灯光源照亮目标板,在平行光管正前方放置全站仪并调整全站仪 3 个脚螺使其垂直轴垂直于水平面,旋转水平轴使得全站仪视轴处于水平状态。转动全站仪垂直轴轴系使得星点像在方位方向处于全站仪的视场中心,若此时星点像在俯仰方向偏离视场中心,则调整平行光管调节旋钮最终使得星点像在方位方向和俯仰方向均处于全站仪视场中心。取下星点目标板将间距为 L 的双狭缝目标板安装于平行光管焦面位置处,调整目标板相位使得通过全站仪观察的狭缝像和全站仪竖丝平行,转动全站仪垂直轴轴系依次瞄准对称的两狭缝像,全站仪测得的双狭缝对平行光管的张角记为 ω ,按公式 (1) 计算平行光管焦距 f ,则:

$$f = \frac{L}{2 \times \tan\left(\frac{\omega}{2}\right)} \quad (1)$$

式中: f 为平行光管焦距,单位为 mm; L 为狭缝间距,单位为 mm; ω 为双狭缝对平行光管的张角,单位为 rad。

1.2 数学模型建立

通常情况下在实验室采用图 1 的原理标定焦距即可,但为了避免重力因素对光管焦距产生影响以及准确评价光电经纬仪焦距,需要对平行光管进行原位检测。为了实现平行光管焦距的原位检测,根据光电经纬仪的实际工作角度范围,在检测架上安装不同倾斜角度的焦面带有狭缝目标板的平行光管,各光管光轴均相交于拱形检测架球心,在地基环上架设全站仪并调平,使用卤钨灯光源照亮待标定光管的双狭缝目标板,狭缝目标经平行光管和全站仪光学系统后用人眼接收并瞄准,标定示意图如图 2 所示,倾斜安装条件下全站仪测得的双狭缝对平行光管的张角记为 ω' 。

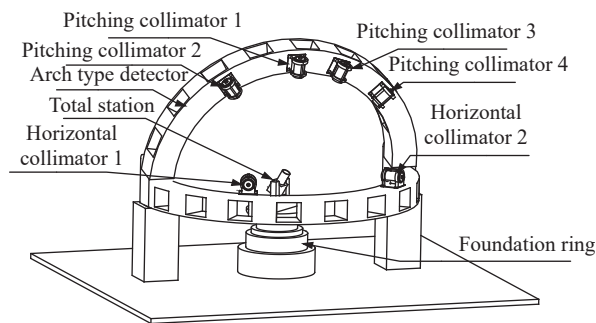


图 2 倾斜安装条件下焦距标定示意图

Fig.2 Schematic diagram of focal length calibration under inclined installation

当全站仪视轴处于非水平状态,此时转动垂直轴轴系就会在方位方向产生投影误差,即倾斜状态下测得的张角 ω' 和水平状态下测得的张角 ω 不相等,倾斜角度越大两者相差越大,这是由全站仪自身的测角原理所决定的,属于系统性、原理性误差,因此需要对倾斜安装状态下测试的张角值进行修正,为此建立以下数学模型:

设图 3 为平行光管狭缝目标板上的点与全站仪角度之间的映射关系, MOQ 面为双狭缝所在的平面, O 点为焦平面的中心, O_1 点为平行光管主点, N 点为目

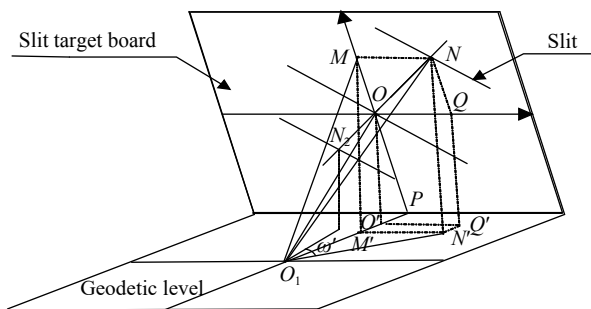


图 3 目标板上的点与全站仪角度之间的映射关系

Fig.3 Mapping between the point on the target board and the total station angle

标板十字横线与狭缝的交点, ON 为中心点到狭缝的距离, OQ 平行于水平面, OM 与 OQ 垂直, 以 OQ 和 OM 分别为横轴和纵轴建立直角坐标系 OXY 。 $N_1Q \parallel MO$, $MN_1 \parallel OQ$, $M'O_1Q'$ 为水平面, O_1P 为 MP 在水平面内的投影, M 、 N_1 、 O 、 Q 在水平面内的投影点为 M' 、 N' 、 O' 、 Q' , 令 $OQ = x$, $OM = y$, $OO_1 = f$, $\angle OO_1P = \angle E_o$, $\angle PO_1N' = \angle A$, $\angle NO_1N' = \angle E$, 由空间几何关系, 可推导出如下关系式:

$$f = \frac{ON_1 \times (\tan \angle E \times \sin \angle E_o \times \tan \angle A + \cos \angle E_o \times \sin \angle A)}{\sqrt{(\sin \angle A \times \tan \angle A)^2 + (\tan \angle A \times \tan \angle E \times \cos \angle E_o - \sin \angle E_o \times \sin \angle A)^2}} \quad (5)$$

2 数据采集

采用光刻工艺制做一块狭缝目标板, 目标板形状为圆形, 直径为 30 mm, 基底材料为 K9 玻璃, 具体布局见图 4, 狭缝目标板中心制作有十字线, 十字竖线一侧平行地刻划有三条狭缝, 十字线和狭缝透光, 其余部分均不透光, N_1 、 N_2 、 N_3 分别为狭缝 1、狭缝 2、狭缝 3 与十字横线的交点, O 为十字线交点。三条狭缝距离十字竖线的距离分别用 ON_1 、 ON_2 、 ON_3 表示, 使用德国马尔公司制造的 10106 HA 型三坐标测量仪对狭缝到十字竖线的距离进行测量, 测量结果由小到大依次为 2.9245、6.5432、9.4979 mm。

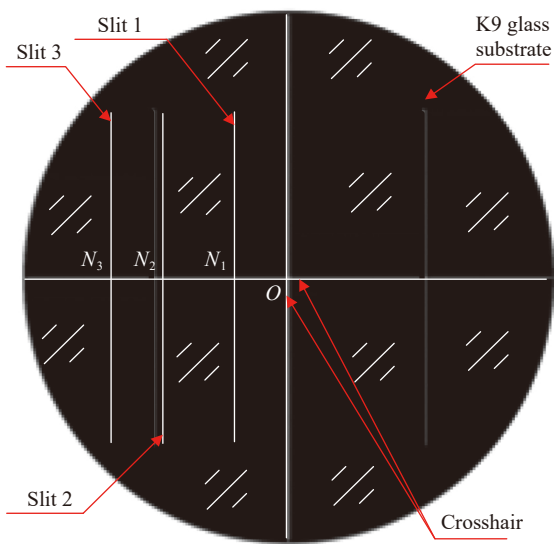


图 4 狭缝目标板布局图

Fig.4 Layout of slit target board

$$x = f \times \sin \angle A \times \tan \angle A / (\tan \angle E \times \sin \angle E_o \times \tan \angle A + \cos \angle E_o \times \sin \angle A) \quad (2)$$

$$y = f \times (\tan \angle A \times \tan \angle E \times \cos \angle E_o - \sin \angle E_o \times \sin \angle A) / (\tan \angle E \times \sin \angle E_o \times \tan \angle A + \cos \angle E_o \times \sin \angle A) \quad (3)$$

点 (x, y) 距离平行光管焦面中心的距离为:

$$ON_1 = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4)$$

则由公式 (2)~(4) 联立解得平行光管焦距:

将制做好的目标板安装到检测架上平行光管的焦面位置处, 在地基环上架设瑞士徕卡公司制造的 TC2003 型全站仪, 如图 5 所示, 使用全站仪首先瞄准目标板经平行光管出射的十字线交叉点 O , 记方位角为 $\angle A_o$, 俯仰角为 $\angle E_o$, 其次瞄准十字横线与狭缝的交点, 记方位角为 $\angle A$, 俯仰角为 $\angle E$ 。

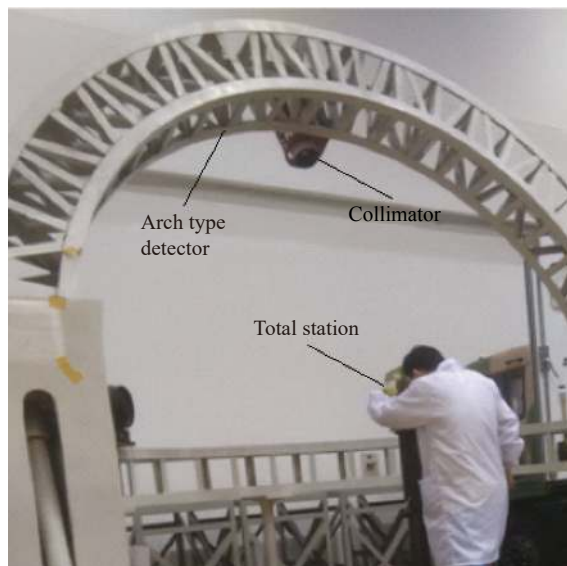


图 5 目标板测点角度采集现场

Fig.5 Acquisition site of testing point angle of target board

转动目标板并通过全站仪目镜进行观察, 使得线段 N_1N_3 经平行光管出射后分别成像于全站仪分划板的第一象限、第二象限、第三象限、第四象限及与分划板的竖丝和横丝平行, 按照上述测试流程依次瞄准交点 O 、 N_1 、 N_2 、 N_3 并采集对应的方位角和俯仰角, 过程数据如表 1 所示。

表 1 线段 N_1 、 N_3 位于不同象限及与分划板横丝竖丝平行时的过程数据 (单位: 弧度)

Tab.1 Process data when the N_1 , N_3 is located in different quadrants and parallel to the horizontal and vertical wire of the reticle (Unit: rad)

Points to be measured	Imaging area of N_1, N_3					
	First quadrant	Second quadrant	Third quadrant	Fourth quadrant	Coincidence with the horizontal wire	Coincidence with the vertical wire
N_1	$\angle A_o$	0	0	0	0	0
	$\angle E_o$	1.044 524	1.044 598	1.044 626	1.044 598	1.044 621
	$\angle A$	0.000 625	0.000 568	0.002 066	0.002 547	0.002 935
	$\angle E$	1.045 966	1.046 047	1.043 576	1.043 868	1.044 611
N_2	$\angle A_o$	0	0	0	0	0
	$\angle E_o$	1.044 524	1.044 598	1.044 626	1.044 598	1.044 621
	$\angle A$	0.001 348	0.001 277	0.004 519	0.005 625	0.006 489
	$\angle E$	1.047 709	1.047 788	1.042 299	1.042 988	1.044 615
N_3	$\angle A_o$	0	0	0	0	0
	$\angle E_o$	1.044 524	1.044 598	1.044 626	1.044 598	1.044 621
	$\angle A$	0.002 003	0.001 749	0.006 530	0.008 002	0.009 276
	$\angle E$	1.049 068	1.049 175	1.041 322	1.042 263	1.044 620

3 数据处理与不确定度分析

3.1 数据处理

将线段 N_1 、 N_3 分别位于不同象限及与分划板横丝平行时所采集的 $\angle E_o$ 、 $\angle A$ (另 $\angle A_o = 0$, 则 $\angle A - \angle A_o = \angle A$), $\angle E$ 代入公式 (5) 可解得修正投影误差后的平行光管焦距, 最终解算的焦距值如表 2 所示。由表 2 可知, 经投影误差修正后由同名测试点解算的焦距最大差值为 4.41 mm, 测试点 N_1 的焦距平均值为 1982.19 mm, 波动值为 4.40 mm, 测试点 N_2 的焦距平均值为 2009.94 mm, 波动值为 3.39 mm, 测试点 N_3 的焦距平均值为 2039.15 mm, 波动值为 3.79 mm。各测试点焦距平均值出现较大差异是由畸变引入的原理性误差所致。平行光管半视场为 15 mm, 则 N_1 点位于 0.19 视场位置处, N_2 点位于 0.44 视场位置处, N_3 点位于 0.63 视

场位置处, 由平行光管的 光学设计结果可知 0.19 视场处系统畸变为 0.02%, 该值可忽略, 0.44 及 0.63 视场处系统畸变分别为 -1.3% 和 -2.8%。根据畸变设计结果对 ON_2 、 ON_3 的长度进行修正重新代入公式 (5) 计算焦距, 如表 3 所示, 测试点 N_2 的焦距平均值变为 1983.81 mm、测试点 N_3 的焦距平均值变为 1982.06 mm, 修正畸变后, 测试点 N_2 和 N_3 的焦距平均值与测试点 N_1 的焦距平均差值分别为 1.62 mm 和 -0.13 mm。

为了解耦投影误差并获得焦距的真值, 根据全站仪工作原理, 转动水平轴轴系进行俯仰方向的角度测量时不存在投影误差, 因此可以利用表 1 中线段 N_1 、 N_3 与分划板竖丝平行时的过程数据解算焦距并作为真值来验证模型的正确性, 需要注意的是, 公式中的 ω 需以 $2|\angle E_o - \angle E|$ 代替, 最终解算的焦距值如表 4 所示。

表 2 修正投影误差后线段 N_1 、 N_3 位于不同象限及与分划板横丝平行时的焦距解算结果 (单位: 毫米)

Tab.2 Focal length when the N_1 , N_3 is located in different quadrants and parallel to the horizontal wire of the reticle after correcting the projection error (Unit: mm)

Points to be measured	Imaging area of N_1, N_3				
	First quadrant	Second quadrant	Third quadrant	Fourth quadrant	Coincidence with the horizontal wire
N_1	1981.77	1980.37	1980.24	1984.65	1983.93
N_2	2009.70	2011.13	2011.01	2010.13	2007.73
N_3	2041.14	2038.21	2037.35	2040.33	2038.74

表 3 修正投影误差和畸变后各测试点的焦距解算结果 (单位: 毫米)

Tab.3 Focal length of different testing points after correcting the projection error and distortion (Unit: mm)

Points to be measured	The imaging area of N_1, N_3				
	First quadrant	Second quadrant	Third quadrant	Fourth quadrant	Coincidence with the horizontal wire
N_1	1981.77	1980.37	1980.24	1984.65	1983.93
N_2	1983.58	1984.98	1984.86	1984.00	1981.63
N_3	1983.99	1981.14	1980.31	1983.20	1981.66

表 4 线段 N_1, N_3 与分划板竖丝平行时的焦距解算结果 (单位: 毫米)

Tab.4 Focal length when the N_1, N_3 is parallel to the vertical wire of the reticle (Unit: mm)

Points to be measured	Coincidence with the vertical wire
N_1	1980.03
N_2	2009.58
N_3	2039.91

同样由于畸变的存在,各测试点解算的焦距值差异较大,测试点 N_1, N_2, N_3 的焦距值分别为 1980.03、2009.58、2039.91 mm,进行畸变修正后对应的焦距值分别为 1980.03、1983.45、1982.79 mm,波动值为 3.43 mm,各测试点焦距平均值即真值为 1982.09 mm。线段 N_1, N_3 位于不同象限及与分划板横丝平行时的各测试点在修正投影误差和畸变后焦距平均值为 1982.69 mm,此值与真值差值为 0.6 mm,验证了模型的正确性及鲁棒性。

修正畸变后将线段 N_1, N_3 与分划板横丝平行时所采集的 $\angle A_o, \angle E_o, \angle A$ 及 $\angle E$ 代入公式 (2) 中可解得传统意义下的焦距,需要注意的是公式中的 ω 需以 $2|\angle A - \angle A_o|$ 代替,最终解算的焦距值如表 5 所示。

由表 5 可知,修正畸变但未修正投影误差的情况

表 5 修正畸变后线段 N_1, N_3 与分划板横丝平行时的焦距解算结果 (单位: 毫米)

Tab.5 Focal length when the N_1, N_3 is parallel to the horizontal wire of the reticle with correcting the distortion (Unit: mm)

Points to be measured	Coincidence with the horizontal wire
N_1	996.42
N_2	995.23
N_3	995.22

下由测试点 N_1, N_2, N_3 解算的焦距结果分别为 996.42、995.23、995.22 mm,焦距平均值与真值之差为 986.47 mm,相对误差为 50.2%。

3.2 不确定度分析

令公式 (5) 中的

$$ON_1 \times (\tan \angle E \sin \angle E_o \tan \angle A + \cos \angle E_o \sin \angle A) = \alpha$$

$$[(\sin \angle A \tan \angle A)^2 + (\tan \angle A \tan \angle E \cos \angle E_o - \sin \angle E_o \sin \angle A)^2]^{-\frac{1}{2}} = \beta$$

$$(\sin \angle A \tan \angle A)^2 + (\tan \angle A \tan \angle E \cos \angle E_o - \sin \angle E_o \sin \angle A)^2 = \gamma$$

$$\tan \angle A \tan \angle E \cos \angle E_o - \sin \angle E_o \sin \angle A = \xi$$

则焦距 f 的表达式可变换为:

$$f = \alpha\beta \tag{6}$$

$\angle A, \angle E, \angle E_o$ 及 ON_1 对焦距的灵敏度系数分别如下式所示:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial \angle A} &= \frac{\partial f}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial \angle A} + \frac{\partial f}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial \angle A} = \\ &\beta ON_1 \left(\frac{\tan \angle E \sin \angle E_o}{\cos^2 \angle A + \cos \angle E_o \cos \angle A} \right) - \\ &\alpha \gamma^{-\frac{3}{2}} \left[\tan \angle A (\sin^2 \angle A + \tan^2 \angle A) + \right. \\ &\left. \xi \left(\frac{\tan \angle E \cos \angle E_o}{\cos^2 \angle A + \sin \angle E_o \cos \angle A} \right) \right] \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial \angle E} &= \frac{\partial f}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial \angle E} + \frac{\partial f}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial \angle E} = \\ &\beta ON_1 \left(\frac{\sin \angle E_o \tan \angle A}{\cos^2 \angle E + \cos \angle E_o \sin \angle A} \right) - \\ &\alpha \gamma^{-\frac{3}{2}} \xi \frac{\tan \angle A \cos \angle E_o}{\cos^2 \angle E} \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial \angle E_o} &= \frac{\partial f}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial \angle E_o} + \frac{\partial f}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial \angle E_o} = \\ &\beta ON_1 (\tan \angle A \tan \angle E \cos \angle E_o - \sin \angle A \sin \angle E_o) + \\ &\alpha \gamma^{-\frac{3}{2}} \xi (\tan \angle A \tan \angle E \sin \angle E_o - \cos \angle E_o \sin \angle A) \end{aligned} \tag{9}$$

$$\frac{\partial f}{\partial ON_1} = \frac{\partial f}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial ON_1} = \beta(\tan \angle A \tan \angle E \sin \angle E_o + \cos \angle E_o \sin \angle A) \quad (10)$$

设 $\angle A$ 、 $\angle E$ 、 $\angle E_o$ 及 ON_1 的测量标准不确定度分别为 μ_A 、 μ_E 、 μ_{E_o} 、 μ_{ON_1} 且相互独立。则线段 N_1 、 N_3 位于不同象限及与分划板横丝平行时焦距测量结果的不确定度应是所有不确定度分量的合成, 用合成标准不确定度 μ_c 来表示, 如下式所示:

$$\mu_c = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial \angle A} \mu_A\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \angle E} \mu_E\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \angle E_o} \mu_{E_o}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial ON_1} \mu_{ON_1}\right)^2} \quad (11)$$

线段 N_1 、 N_3 与分划板竖丝平行时焦距的解算公式可表示为:

$$f = \frac{ON_1}{\tan(|\angle E_o - \angle E|)} \quad (12)$$

合成标准不确定度用 μ_c' 来表示, 如下式所示:

$$\mu_c' = \sqrt{\left(\frac{1}{\tan(|\angle E_o - \angle E|)} \mu_{ON_1}\right)^2 + \left(\frac{ON_1}{\sin(|\angle E_o - \angle E|)} \mu_E\right)^2} \quad (13)$$

通过查验全站仪和三坐标测量仪计量证书可知 $\mu_A=0.3$, $\mu_E=\mu_{E_o}=0.4$, $\mu_{ON_1}=1.0 \mu\text{m}$ 。修正畸变后将采集的过程数据及相应的测量标准不确定度代入公式 (11) 和公式 (13) 中, 可得各测试点对应焦距的合成标准不确定度, 取包含因子 $k=2$, 则展伸不确定度 $U=2\mu_c(2\mu_c')$, 如表 6 所示。

表 6 焦距测量结果的展伸不确定度 (单位: 毫米)

Tab.6 Extended uncertainty of focal length (Unit: mm)

Points to be measured	Extended uncertainty					
	First quadrant	Second quadrant	Third quadrant	Fourth quadrant	Coincidence with the horizontal wire	Coincidence with the vertical wire
N_1	7.33	7.35	5.58	4.26	2.39	1.36
N_2	3.33	3.34	2.55	1.93	1.08	0.60
N_3	2.33	2.33	1.76	1.36	0.76	0.42

由表 6 可知: 线段 N_1 、 N_3 位于不同象限及与分划板横丝平行时, 各测试点的焦距测量结果展伸不确定度均大于与竖丝平行时的焦距测量结果展伸不确定度, 测量结果的展伸不确定度与焦距真值的最大相对误差为 0.36%, 该值远小于 GB/T 9917.1—2002 照相镜头中实测焦距对名义焦距的相对误差不超过 $\pm 5\%$ 的规定。

4 结 论

为了精准评价系统焦距, 建立了倾斜安装状态下光管焦距标定的数学模型, 结合各测试工况下所采集的过程数据证实了目标狭缝在分划板中的相位可以是随机值, 不需要和全站仪竖丝严格平行。线段 N_1 、 N_3 与分划板横丝平行时的各测试点在修正畸变但未修正投影误差的情况下焦距平均值与真值相对误差为 50.2%。线段 N_1 、 N_3 位于不同象限及与分划板横丝平行时的各测试点在修正投影误差和畸变后焦

距平均值与真值差值为 0.6 mm。测量结果的展伸不确定度与焦距真值的最大相对误差为 0.36%, 该值远小于 GB/T 9917.1—2002 照相镜头中实测焦距对名义焦距的相对误差不超过 $\pm 5\%$ 的规定。实验结果表明: 该模型具有普适性和较高的解算精度, 对于倾斜安装条件下平行光管焦距的原位检测具有极大的工程应用价值。

参考文献:

- [1] Tian L D, Liu Z H, Zhao J K, et al. Indoor test method of attitude measurement accuracy of photoelectric theodolite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0812002. (in Chinese)
- [2] Wu J, Su X Q, Guo M. Multiple targets real-time intersection of optic-electric theodolite [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(4): 0411003. (in Chinese)
- [3] Zhao H X, Tian L D, Zhao J K, et al. Analysis of attitude measurement accuracy and indoor evaluation method of photoelectric theodolite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0112004. (in Chinese)

- [4] Jiang B, Mei C, Liang Q Y, et al. Angle measurement error correction of vehicle-borne theodolite based on the rotation of plane equation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(s1): s112002. (in Chinese)
- [5] Liu J Y, Yan H X, Wang D H. Calibration for wide field of view infrared theodolite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 832-836. (in Chinese)
- [6] Liu J Y, Yan H X, Wang D H. Correction method of dynamic error of optoelectronic theodolite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3030-3035. (in Chinese)
- [7] Zhang Z J, Wang J C, Cheng X M, et al. Measurement and calibration of optical axis changes for multi-function astronomical theodolite [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(11): 2321-2328. (in Chinese)
- [8] San X G, Sun N, Zhuo R S, et al. Design of supporting structure for primary mirror of large aperture theodolite [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2103, 21(12): 3111-3117. (in Chinese)
- [9] Jia S Q, Huang W, Xu X R, et al. Compensation effect of radial preload on mirror deformation caused by gravity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0422006. (in Chinese)
- [10] Duan, Y X, Chen Y Q, Zhao J K, et al. Focal length testing method of long focal length laser optical system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(4): 0408005. (in Chinese)
- [11] Zhao L, Bai J, Fang W D. Focal length measurement method for lenses with small aperture and long focal length [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(4): 0412002. (in Chinese)
- [12] Shao J, Ma D M. A method for testing the focal length of optical system with small field and short focal length [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(s2): s208003. (in Chinese)
- [13] Wu L L. Focal length measurement of long-focus lens based on talbot-moiré technology[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese)
- [14] Zhu X C, Cao X D, Wu S B, et al. Focal length measurement of microlens by rotation method based on grating multislit diffraction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0523001. (in Chinese)
- [15] Yao Z, Wu Y M, Gao L M, et al. Method of focal length measurement for infrared optical system with long focal length [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1950-1954. (in Chinese)
- [16] Xie J, He F Y, Wang J, et al. Simulation and optimization of axial supporting structures for theodolite primary mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S118001. (in Chinese)
- [17] Li X Y, Peng B, Jiang B, et al. Tilt error correction of minitype theodolite's vertical shaft based on angular contact ball bearings [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(12): 20210172. (in Chinese)