

文章编号: 1003-501X(2009)06-0063-05

水平式光电望远镜照准差检测方法

韩雪冰^{1,2}, 张景旭¹, 王 志¹, 赵金字¹, 赵勇志^{1,2}, 吴小霞¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了提高水平式光电望远镜的精度, 满足技术指标要求, 针对水平式跟踪架结构照准差的检测原理和方法, 在对地平式光电望远镜照准差检测原理进行分析的基础上, 本文提出了检测水平式望远镜照准差的方案。该方法根据在研水平式光电望远镜因结构限制不能打倒镜的特点, 采用两个自准直经纬仪对照准差进行了检测, 测得照准差为 4'1", 检测精度为 9"。实验结果表明, 与基本参数模型的回归分析结果相比较, 在检测误差中包含望远镜筒重力变形产生的视轴偏差(1'4", 2'4"), 并提出了同时检测这一偏差和照准差的方法。

关键词: 光电望远镜; 照准差; 经纬仪

中图分类号: TH74, TN16

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2009.06.013

Research of Alt-alt Photoelectric Telescope Sighting Error Measurement

HAN Xue-bing^{1,2}, ZHANG Jing-xu¹, WANG Zhi¹, ZHAO Jin-yu¹, ZHAO Yong-zhi¹, WU Xiao-xia¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of alt-alt photoelectric telescope, and meet the requirements of technology index, the theory and measurement of sighting error were discussed based on the measuring theory of alt-az telescope. Two programs of sighting error measurement were generated. The researching telescope can not work in reversed position of telescope. Sighting error was measured. The result is 4'1" and the standard deviation of this method is 9". Compared with the result of basic parameter model regression, it is found out that the measurement result contains the sighting axis deviation (1'4", 2'4") because of gravity deformation. A simultaneous determination measurement method for gravity deformation deviation and sighting error is proposed.

Key words: photoelectric telescope; sighting error; theodolite

0 引 言

水平式光电望远镜有两根相互垂直的旋转轴, 一根轴平行于地平面, 指向南北方向称为经轴; 另一根轴垂直于经轴指向东西方向, 称为纬轴。视轴绕着经轴和纬轴旋转, 指向不同的天区。水平式跟踪架的突出特点是在天顶位置没有跟踪盲区^[1-2], 这使它多用于对高仰角目标的跟踪测量, 特别是在空间碎片^[3]和人造地球卫星^[4]的跟踪观测上具有明显的优势。

基本的望远镜误差测量方法可分为两类, 一种是单项误差检测法^[5], 另一种是综合测量误差辨识法^[6]。单项误差检测法是判明望远镜技术性能及其特征量能否达到设计和使用要求, 是一种直接也是最直观的方法。在设备出厂前要对影响望远镜技术要求的主要内容和项目进行检测。综合测量误差辨识法是用星体标

收稿日期: 2008-11-17; 收到修改稿日期: 2009-03-18

基金项目: 国家 863 高科技项目(2007AA703104)

作者简介: 韩雪冰(1976-), 女(汉族), 吉林长春人。助理研究员, 博士研究生, 主要从事机械系统误差建模及精度分析, 精密检测技术和方法的研究。E-mail: hanxb2000@sina.com。

校法对望远镜误差进行测量,通过数学模型对测量点的综合误差进行参数辨识,间接得到误差的值。

照准差是保证望远镜精度的重要指标之一,水平式望远镜照准差是指视轴与纬轴的垂直度误差。这种结构与常见的地平式结构有所不同,照准差的检测方法也不尽相同。本文的目的是提出一种水平式望远镜照准差的室内检测方法,为照准差的调试提供依据。

1 地平式跟踪架结构照准差检测原理

地平式结构由于照准差的存在,在水平轴转过 180° 时,望远镜视轴旋转前后在水平面内位置的夹角不为 180° 。如图 1 所示, O 为视轴(亦称照准轴)与水平轴交点, OZ 为正镜(地平式结构水平轴编码器在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 工作时为正镜,在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 时为倒镜)状态下理想视轴位置, OZ_1 为正镜时的实际视轴的位置,它们的夹角 $\angle ZOZ_1$ 即为照准差 C , OZ_2' 为倒镜时的实际视轴的位置,它与 OZ 轴夹角为 $(180^\circ + C)$ 。仪器方位轴顺时针转动 180° 后,实际视轴在 OZ_2 的位置,与正镜时 OZ_1 的位置夹角 $\angle Z_1 O Z_2 = 2C$ 。要再次回到初始位置就要多转动 $2C$ ^[7-8]。

设某目标的实际方位为 A , 正镜时方位轴读数值为 A_1 , 倒镜读数为 A_2 。则照准差可用下式计算:

$$C = \frac{A_1 - A_2 \pm 180^\circ}{2} \quad (1)$$

在测量中,一般用正倒镜两次对准同一个平行光管,或用正倒镜分别对准安置在同一水平线的两个相对的平行光管,记下正镜时的读数 A_1 , 倒镜时的读数 A_2 , 代入式(1), 计算出照准差。

考虑到光管的俯仰角时, 公式为

$$C = \frac{A_1 - A_2 \pm 180^\circ}{2} \cdot \cos E \quad (2)$$

为了不引入水平轴倾斜误差, 应尽量将平行光管置于水平位置, 使望远镜俯仰轴读数为 0° 。

2 水平式跟踪架结构照准差检测方法

水平式与地平式结构照准差检测原理相同, 由于存在照准差, 在纬轴转过 180° 时, 望远镜视轴旋转前后在两轴所在平面内的夹角不为 180° 。我们把水平式结构纬轴工作转角 ($-90^\circ < B < 90^\circ$) 称为水平式结构的正镜, 非工作转角 ($B < -90^\circ$ 或 $B > 90^\circ$) 称为倒镜。

方法一: 首先将望远镜调平, 视轴指向零位。拆除相关限位, 旋转经轴 90° , 至如图 2 所示位置, 在视轴前方放置一平行光管, 调整经纬轴使视轴对准平行光管的十字丝, 记下正镜时经轴读数 L_1 。旋转纬轴 180° 后, 旋转经轴 180° , 调整望远镜使视轴再次对准平行光管的十字丝, 记下倒镜时经轴读数 L_2 。把 L_1 和 L_2 带入式(3)即可计算出望远镜的照准差。

$$C = \frac{L_1 - L_2 \pm 180^\circ}{2} \quad (3)$$

式中: L_1 为正镜时经轴转角; L_2 为倒镜时经轴转角。如果考虑视轴之外其它两轴的位置误差, 即经纬轴垂直度误差、经轴水平倾斜误差和经轴南北指向误差的影响, 则式(3)中:

正镜时:

$$L_1 = L_1^* - \Delta L_{\phi_1} - \Delta L_{\epsilon_1} - \Delta L_{\theta_1} \quad (4)$$

倒镜时:

$$L_2 = L_2^* - \Delta L_{\phi_2} - \Delta L_{\epsilon_2} - \Delta L_{\theta_2} \quad (5)$$

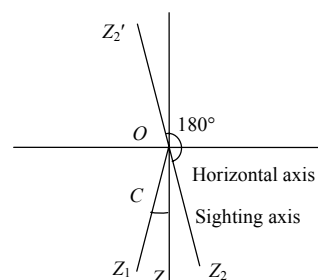


图 1 地平式结构照准差检测原理

Fig.1 Measurement theory of alt-az structure sighting error

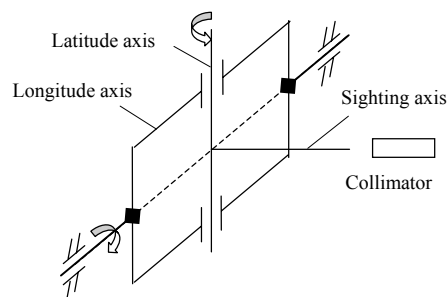


图 2 照准差检测方法 1

Fig.2 Measurement of sighting error No.1

其中: L_1^* 为正镜时理想经轴转角, ΔL_{ϕ_1} 为正镜时经纬轴垂直度误差, ΔL_{ε_1} 为正镜时经轴水平倾斜误差, ΔL_{θ_1} 为正镜时经轴南北指向误差, L_2^* 为倒镜时理想经轴转角, ΔL_{ϕ_2} 为倒镜时经纬轴垂直度误差, ΔL_{ε_2} 为倒镜时经轴水平倾斜误差, ΔL_{θ_2} 为倒镜时经轴南北指向误差。

如图 3 所示, 望远镜在正镜时经纬轴垂直度误差为 ϕ 。倒镜时, 由于经轴旋转角接近 180° , 可视为此时经纬垂直度轴误差与正镜时大小相等, 而方向相反, 为 $-\phi$ 。由经纬轴垂直度误差对经轴转角影响的关系^[9], 可得

$$\begin{cases} \Delta L_{\phi_1} = \phi \cdot \tan B \\ \Delta L_{\phi_2} = -\phi \cdot \tan B \end{cases} \quad (6)$$

而对于经轴的位置误差, 无论是水平倾斜误差还是南北指向误差, 在正倒镜时与视轴的方向关系均未发生改变, 即

$$\begin{cases} \Delta L_{\varepsilon_1} = \Delta L_{\varepsilon_2} \\ \Delta L_{\theta_1} = \Delta L_{\theta_2} \end{cases} \quad (7)$$

将式(4)~式(7)代入式(3):

$$C = \frac{L_1 - L_2 \pm 180^\circ}{2} - \phi \tan B \quad (8)$$

用式(3)计算照准差, 经轴的位置误差不会影响测量结果, 但会引入经纬轴垂直度误差。在式(8)中, 要消除测量值中的经纬轴垂直度误差, 可使 B 值为 0。因此, 在测量中, 平行光管应安放在使纬轴转角接近于 0 的位置上。

方法二: 对由于结构限制不能打倒镜但纬轴旋转范围可以达到 180° 的望远镜, 可以用两平行光管相对放置的方法检测。首先将望远镜置平, 如图 4, OZ 为视轴理想位置, OZ_1 为视轴实际位置, 在 OZ_1 方向上放置平行光管 1, 在望远镜的另一侧放置平行光管 2, 平行光管 2 与平行光管 1 在同一水平面, 且夹角为 180° 。调整望远镜, 使视轴十字丝与平行光管 1 的十字丝重合, 旋转纬轴 180° , 使平行光管 2 的十字丝进入视场, 记下光管 2 十字丝的横向脱靶量 P , 则照准差 C 为

$$C = \frac{\arctan(P/f)}{2} \quad (9)$$

式中: P 为平行光管 2 十字丝的横向脱靶量, f 为望远镜焦距。

3 检测及结果

在研水平式光电望远镜由于经轴两轴端的阻挡不能够打倒镜, 但在经轴框架为竖直即经轴转角为 $\pm 90^\circ$ 时, 纬轴转角范围可以达到 180° 。因此, 我们用上述第二种方法检测照准差。为了方便地确定两平行光管的相对位置, 我们应用两个 DJ2 型自准直经纬仪代替平行光管作为光源和角度测量设备, 其一测回水平方向标准差为 $2''$, 一测回竖直方向标准差为 $6''$, 自准直精度为 $2''$ 。

3.1 检测步骤

- 1) 调平水平式望远镜, 旋转经纬轴, 使两轴位于编码器读数为 90° 的位置上, 即此时纬轴垂直于水平面, 望远镜与经轴平行。
- 2) 在望远镜的前方放置自准直经纬仪 1, 使自准直像与望远镜十字丝重合。
- 3) 旋转望远镜经纬轴, 直至望远镜不再遮挡自准直光线。在望远镜的另一侧放置并调整自准直经纬仪 2, 直到两自准直经纬仪视场内的自准直光都与十字丝重合。记下此时自准直经纬仪 2 的读数 H_{R1} 、 V_1 。
- 4) 再次旋转水平式望远镜两轴, 经轴回到与步骤 1) 相同位置, 旋转纬轴使望远镜与步骤 1) 相差 180° ,

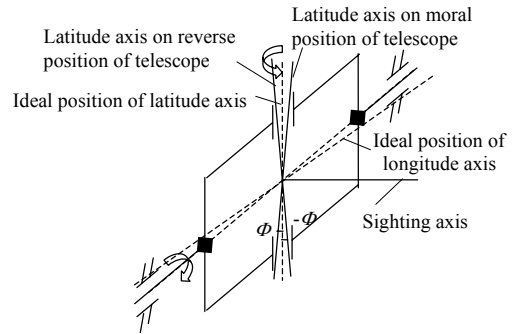


图 3 经、纬轴位置误差对照准差测量的影响

Fig.3 Effect of longitude and latitude axis site error on sighting error measurement

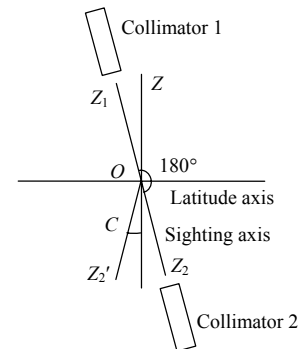


图 4 照准差检测方法 2

Fig.4 Measurement of sighting error No.2

望远镜对准自准直经纬仪 2 的方向, 调整自准直经纬仪 2, 使自准直光与望远镜十字丝重合。记下此时自准直经纬仪 2 的读数 H_{R2} 、 V_2 。

5) 因为读数时纬轴为竖直状态, 所以照准差以下式计算:

$$C = (V_2 - V_1) / 2 \quad (10)$$

6) 重复步骤 1)~5), 计算平均值, 即为水平式望远镜照准差。

3.2 检测数据

自准直经纬仪 2 两次读数如表 1 所示, 将数据代入式(10), 并计算平均值得到照准差为 $4'1''$ 。

表 1 自准直经纬仪 2 两次读值
Table 1 Reading numbers of the second collimation theodolite

No.	The first reading		The second reading	
	Azimuth axis H_{R1}	Elevation axis V_1	Azimuth axis H_{R2}	Elevation axis V_2
1	359°59'59"	89°56'37"	00°00'32"	90°05'41"
2	00°00'19"	89°57'34"	00°00'21"	90°05'32"
3	359°59'58"	89°57'42"	00°00'28"	90°05'32"
4	359°09'12"	89°57'40"	359°02'47"	90°06'00"
5	349°08'26"	89°57'34"	349°09'27"	90°05'35"

3.3 影响检测精度的因素

如果纬轴垂直于地面, 就会在检测结果中引入由于望远镜筒的重力变形而产生的视轴偏差。这一偏差通过理论计算或检测得到, 在望远镜筒刚度较大时可以忽略。

自准直经纬仪 2 方位轴的读数变化是由于其方位轴与水平式望远镜纬轴的不平行而产生的, 由于其值很小, 对照准差的影响可以忽略。而望远镜本身的 CCD 误差在这里也不考虑。因此影响检测精度的因素主要是自准直经纬仪 2 读数误差 $6''$ (两次)和自准直误差 $2''$ 。则检测精度:

$$\Delta C = \sqrt{6^2 + 6^2 + 2^2} = 9''$$

以上方法, 如果采用精度更高的自准直仪会达到更高的检测精度。

4 误差辨识

2008 年 9 月 20 日用该水平式望远镜对全天区的 82 颗恒星进行了观测, 得到 82 组测量值与恒星视位置的误差值, 分别计算每组误差的平均值, 对这些均值用水平式望远镜的基本参数模型, 即式(11), 进行回归分析, 可计算出照准差。

$$\Delta L = a_1 \sin L \tan B + a_2 \cos L \tan B + a_3 \tan B + a_4 \sec B + a_5 \sin L + a_6 \quad (11)$$

式中: ΔL 为星体测量误差, L 为水平式望远镜的经轴转角, B 为水平式望远镜纬轴转角, $a_1 \sim a_6$ 是望远镜各单项误差, 其中 a_5 是望远镜筒重力变形产生的视轴偏差的最大值, a_4 是照准差。

图 5 是拟合前后的对比图。通过计算, 得到在检测照准差过程中重力变形产生的视轴偏差的取值区间应为 $(1'4'', 2'4'')$, 照准差的取值区间为 $(1'51'', 2'6'')$ 。

5 对比分析

用自准直经纬仪测出的照准差为 $4'1''$, 与通过模型计算出的照准差相差很大, 这是因为在检测结果中存在望远镜筒重力变形而产生的视轴偏差(这里简称视轴偏差)。

则照准差应为

$$C = C_{\text{测}} - a_5$$

取值区间为 $(1'57'', 2'57'')$ 。

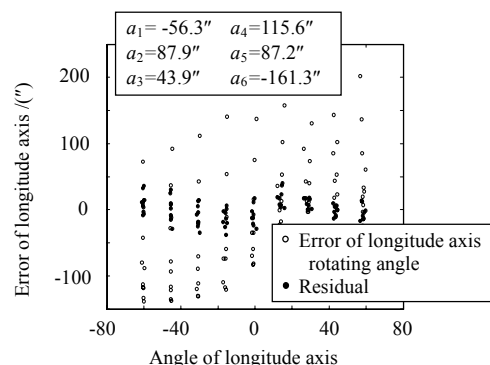


图 5 基本参数模型拟合结果

Fig.5 Fitted result of basic parameter model

如图 6 所示, 在实测数据中减掉望远镜重力变形误差后的计算结果与回归分析的结果存在交集, 可以认为两结果具有一致性。而计算结果与回归结果的交集较小, 这主要是因为望远镜的弹性变形误差十分复杂, 近似模型很难充分涵盖所有误差, 对于望远镜的非刚体特征还有待于进一步的研究。

要在检测中去掉望远镜筒重力变形而产生的视轴偏差的影响, 可在经轴 $\pm 90^\circ$ 两位置上分别测量照准差, 则有照准差:

$$C = (C_{L=+90^\circ} + C_{L=-90^\circ}) / 2$$

望远镜筒重力变形而产生的视轴偏差:

$$w = (C_{L=+90^\circ} - C_{L=-90^\circ}) / 2$$

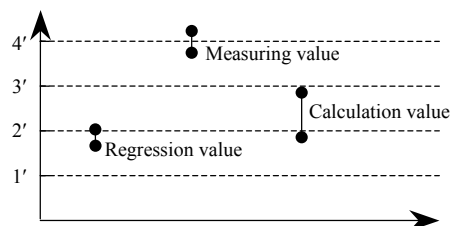


图 6 照准差取值区间对比图

Fig.6 Comparison of sighting error value intervals

6 结 论

本文根据水平式光电望远镜跟踪架的特点, 经过与经纬轴垂直度误差等轴系误差的解耦, 针对可以打倒镜和不能打倒镜的两种结构分别提出了照准差的检测方法。对在研的水平式光电望远镜的照准差应用两个 DJ2 型自准直经纬仪, 进行了检测, 测得照准差为 $4'1''$, 检测精度为 $9''$ 。并与拍星误差解算出的基本参数进行对比, 发现望远镜筒重力变形产生的视轴偏差较大, 不能忽略。在去除了这一偏差的影响后, 计算结果与回归分析的结果存在交集, 可以认为两结果具有一致性。本方法可以应用于水平式望远镜照准差的室内检测。

参考文献:

- [1] Richardson E H, Grundmann W A, Odgers G J. Altitude-altitude mounting for an 8-m telescope [J]. *Proceedings of SPIE* (S0277-786X), 1990, **1236**: 897-904.
- [2] Stefan S, Rodrigo A, Philippe D, *et al.* VLT astronomical site monitor: control, automation, and data flow [J]. *Proceedings of SPIE*(S0277-786X), 2000, **4009**: 338-349.
- [3] 平一鼎, 张晓祥, 鲁春林. 65 cm 水平式望远镜静态指向模型[J]. 天文学报, 2006, **47**(2): 224-230.
PING Yi-ding, ZHANG Xiao-xiang, LU Chun-lin. Static Pointing Model of 65 cm Level Mounting Telescope[J]. *ACTA Astronomica Sinica*, 2006, **47**(2): 224-230.
- [4] 张耀明, 邹丽新, 沈江. 水平式光电经纬仪主要性能的分析[J]. 苏州大学学报: 自然科学版, 2002, **18**(2): 21-24.
ZHANG Yao-ming, ZOU Li-xin, SHEN Jiang. Main feature analysis of photoelectric theodolite of horizon type [J]. *Journal of Suzhou University: Natural Science*, 2002, **18**(2): 21-24.
- [5] 何照才, 胡保安, 董书法, 等. 光电测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 76-85.
HE Zhao-cai, HU bao-an, DONG shu-fa, *et al.* *Optical-electric Measurement* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 76-85.
- [6] 林钦畅, 邓幼俊, 陈玲强. 7 个天文台站人卫经纬仪静态系统差的检测[J]. 云南天文台台刊, 1999(4): 48-52.
LING Xin-chang, DENG You-jun, CHEN Ling-qiang. Detecting the Static Systematic Errors of Satellite Theodolites in Seven Astronomical Observations of Stations [J]. *Publications of Yunnan Observatory*, 1999(4): 48-52.
- [7] GB/T3161 2003. 光学经纬仪[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003: 18-19.
GB/T3161 2003. Optical Theodolite [S]. Beijing: Chinese Standard Press, 2003: 18-19.
- [8] 赵学颜, 李迎春. 靶场光学测量[M]. 北京: 装备指挥技术学院, 2000.
ZHAO Xue-yan, LI Ying-chun. *Optical Measurement in Range* [M]. Beijing: The Academy of Equipment Comand and Technology, 2000.
- [9] 赵金字, 王建立. 水平式望远镜轴系误差分析[J]. 光学 精密工程, 2008, **16**(5): 177-180.
ZHAO Jin-yu, WANG Jian-li. Shafting errors of horizontal telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(5): 177-180.