

## 基于全站仪天文测量中的人仪差标定

时春霖<sup>1,2</sup>, 李帅<sup>3</sup>, 付利扬<sup>1</sup>, 王菲<sup>4</sup>, 王时震<sup>1</sup>, 秦炜<sup>1</sup>, 赵鹏<sup>1</sup>, 马莉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国人民解放军 61206 部队 北京

<sup>2</sup>信息工程大学地理空间信息学院 河南郑州

<sup>3</sup>中国人民解放军 96608 部队 河南洛阳

<sup>4</sup>中国人民解放军 31009 部队 北京

**【摘要】**基于人眼观测的天文测量模式依旧是现在的主要观测手段，测量结果不可避免地带来了人眼观测误差的影响，因此利用光学仪器天文测量前必须进行人仪差测定。本文结合天文测量实际需要，介绍了天文测量的原理以及人仪差产生的根本原因，以全站仪为具体平台，依托北京某天文基本点进行了实测，给出了人仪差具体的标定方法和计算流程，并进行了精度评定。

**【关键词】**天文测量；天文经度；人仪差；精度评定

**【基金项目】**国家自然科学基金（41804034、41804031、42074013）

### Calibration of human instrument difference in astronomical measurement based on total station

Chunlin Shi<sup>1,2</sup>, Shuai Li<sup>3</sup>, Liyang Fu<sup>1</sup>, Fei Wang<sup>4</sup>, Shizhen Wang<sup>1</sup>, Wei Qin<sup>1</sup>, Peng Zhao<sup>1</sup>, Li Ma<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Troop 61206, Beijing, China

<sup>2</sup>Geospatial Information School, Information Engineering University, Zhengzhou China

<sup>3</sup>Troop 96608, Luoyang, China

<sup>4</sup>Troop 61206, Beijing, China

**【Abstract】** It is inevitable that the measurement error of the human eye based on the observation mode of the astronomical instrument still affects the measurement results of the human eye. Combined with the actual needs of astronomical measurement, this paper introduces the principle of astronomical measurement and the root causes of human instrument difference. Taking the total station as the specific platform and relying on an astronomical basic point in Beijing, this paper gives the specific calibration method and calculation process of human instrument difference, and evaluates the accuracy at the same time.

**【Keywords】** Astronomical survey; Astronomical longitude; Human instrument difference; Accuracy evaluation

### 1 引言

科学技术的发展带来测量设备的革新，带动了天文测量的发展。基于数字天顶仪和视频全站仪展开的天文测量自动化研究和开发是当前天文大地测量发展的热点，但是目前并没有相关的规范可以依据，基于人眼观测的天文测量模式依然还是现在工程实践中主要的测量方式<sup>[1]</sup>。由于人眼测量会带来相关的观测误差，因此在利用光学仪器天文测量前必须进行人仪差测定。

在天文测量测定经度或时间中时，由于观测员不同，使用的仪器不同，观测目标恒星的习惯、方法不同，因此每次观测员测量的误差具有偶然性；但是同一观测员使用固定仪器观测时，观测习惯往往是不变的，因此人仪差的影响整体上又具有系统性<sup>[1-3]</sup>。目前，人仪差测定流程有相关规范可以参考，然而规范介绍较为抽象，内容分散，且目前缺少给出相应的实例说明分析的文献论文。基于以上事实和需要，本文以全站仪为具体测量平台，依托北京

某天文基本点, 详细介绍了人仪差的计算方法和标定流程, 并列出具体的实测数据, 给出了精度分析和评定。

### 2 基于全站仪得天文测量原理

天文测量通过观测确定时空信息的恒星方位, 再根据后方交会的方法解算地面待测点的天文坐标和方位角<sup>[3,4]</sup>。作为自主定位导航的一种方式, 天文测量不受电磁干扰影响, 定向精度高, 其坐标是基于野外测量获得的, 水准面为基准面, 铅垂线为基准线, 具有直接实际的物理意义, 不仅可以作为国家高等级大地网的起算数据, 也可以为导弹阵地建设、航天发射以及精密的大地水准面模型和垂线偏差模型研究等提供重要的基础数据<sup>[5,6]</sup>。

经典的高精度经纬度测量通常把经度纬度测量作为单独量进行分开计算, 并且为了控制大气折射对定位结果的影响, 需严格观测等高的子午圈或卯酉圈附近恒星, 导致测量效率低下<sup>[7,8]</sup>。后续基于全站仪特点改进的“多星近似等高法”克服了这类观测方法的局限, 观测时仅需全站仪在等高圈上下小幅度地对选定恒星进行多次测量, 就可以同时解算天文经纬度。多星近似等高法关键是精确测量目标恒星的高度角和此时的观测时刻, 在冗余观测下, 将大气折射作为参数一起进行解算, 其计算公式如式 1 所示<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} \cos(90^\circ - A) = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t \\ t = S - \alpha + \lambda \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\varphi$  为天文纬度,  $\lambda$  为天文经度, 两者为待求量;  $A$  为观测得到的恒星高度角,  $\alpha$  为恒星的赤经,  $\delta$  为恒星赤纬, 两者由当前恒星星表并通过视位置计算, 经过岁差、章动、自行、周日视差、周年视差、周日光行差、周年光行差和光线引力偏折等改正得到;  $t$  为时角,  $S$  为测瞬格林尼治真恒星时, 由卫星授时校准后的观测瞬间 UTC (Universal Time Coordinated, 协调世界时) 时刻和 A 公报中的 UT1 换算而来, 图 1 进一步给出了其相关示意图。随着仪器技术和观测方法的改进, 天文经纬度的观测能效越来越高, 但是无论哪一种方法, 其测量结果的获得均依赖于人眼观测, 也就是说为了消除此类人眼观测影响, 人仪差的标定是必须的。

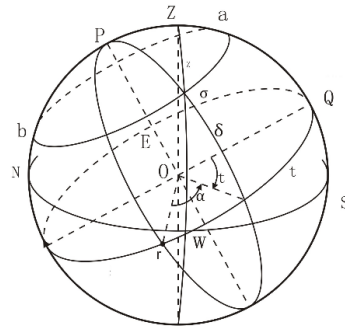


图 1 多星近似等高法

### 3 人仪差标定方法和要求

人仪差是由人差和仪器差组成的。其中, 人差是由观测者的生理和心理的不同造成系统偏差, 而仪器差是由于观测仪器的光学和机械结构不同造成的系统偏差。两种偏差往往混合在一起共同影响测量结果, 其和值可能为正也可能为负。按照其误差性质不同, 人仪差主要由以下几类误差构成。

#### 3.1 对中误差

对中误差对同一测站上观测的所有角度都有影响, 其大小随照准点的方向而变, 其随着观测基线距离的增大而增大, 但是影响率会逐渐变小。但是由于天文定位的精度指标不要求仪器精确对中, 因此其对天文经度并不会产生影响, 但是在进行子午线标定或者高精度定向时, 对中误差必须考虑。特别是, 采用强制对中的观测墩进行观测时, 可以近似认为精确对中, 此时该项误差可以忽略。

#### 3.2 照准部水准器居中误差

水平角误差在很大程度上是由横轴的倾斜引起。照准部居中误差越大, 当视线倾斜度增大, 其对方位角观测影响也就越大。

#### 3.3 照准误差

照准误差是指找准目标时产生的误差。通常收到仪器的放大倍数、人眼分辨能力、目标状态以及大气通透性等因素相关, 其对短边观测比长边观测影响更大, 与仪器未能精确对中对精度影响相仿,

#### 3.4 调焦误差

在同一时段观测目标时, 更变不同焦距进行观测或多或少会影响测量结果, 尤其是短边方位传递时影响更大, 但是对经纬度测量精度影响可以忽略不计。

#### 3.5 天然误差

天然误差是由自然客观因素造成的不可避免的

误差, 如脚架下沉、大气不均匀折射、风力和温度变化引起的仪器振动和不均匀膨胀等。

上述误差的综合影响决定了进行天文观测时, 每个人每个仪器的人仪差是不同的, 经过人仪差改正后的天文坐标才有意义。

在利用全站仪平台进行恒星测量时, 显示和记录的度盘观测数据对应的是视场十字丝中心的坐标。如图 2 所示, 在传统的人眼观测模式中, 人眼需要连续多次瞄准目标恒星, 获得星点目标的度盘读数, 即十字丝度盘值的多次读数对应的角度值。

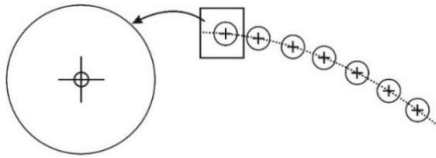


图 2 人眼观测的天文测量

事实上, 整体呈现系统误差的人仪差实质是人和仪器对天文经度的影响。也就是说, 人仪差对纬度精度几乎没有影响, 而主要对经度测量造成影响<sup>[1, 2]</sup>。因此在数据解算时, 仅需将人仪差改正值直接归算到经度上。

只要在实际测量中使用人眼, 测量结果便无法避免人仪差影响, 目前解决人仪差问题的主要方法是标校法。为了获得人仪差, 天文测量规范中要求: 天文测量前后分别在天文基本点上进行人仪差天文经度测量。其中, 在对测前、测后测量人仪差时, 必须同一人使用同一方法、同一仪器施测。相邻两次人仪差的变动, 一、二等分别不得超过 0.06s 和 0.08s, 且标定的相隔时间不得超过 12 个月<sup>[3]</sup>。也就是说, 天文测量人员每次在出测前后, 需到其同一固定基准点进行人仪差测定, 其标定需要满足进一步相应精度。其标校的某次人仪差为:

$$d\lambda = \delta - \delta' \tag{2}$$

其中,  $\delta$  为天文基本点的已知经度值,  $\delta'$  某为观测员的测量经度。一次天文测量的最终成果需要采用测前和测后人仪差的平均值, 即:

$$d\lambda = \frac{d\lambda_1 + d\lambda_2}{2} \tag{3}$$

$d\lambda_1$  和  $d\lambda_2$  分别为测前标定的人仪差和测后标定的人仪差。

说要说明的是, 天文基本点的坐标采用全国天文基本点网联测后的整体平差值, 可靠性和准确性

很高, 可以认为是天文坐标的已知值, 在估计人仪差精度时可以忽略不计<sup>[6]</sup>, 部分天文基本点经度方向上的误差统计如表 1 所示, 图 3 给出了人仪差标定的具体工作流程, 表 2 进一步给出了一、二等天文测量的精度要求。

表 1 部分天文基本点经度中误差 (单位: 时秒)

天文基本点	中误差
上海佘山站	0.0015
西安大地原点	0.0021
北京站	0.0022
武汉站	0.0021
哈尔滨站	0.0026
广州站	0.0023

在利用电子经纬/全站仪进行一、二等天文测量时, 对规范中人仪差标定要求进行归纳, 除观测夜晚数及观测总组数不同外, 其他要求均相同, 具体相关指标详见表 3。除精度要求外, 一组观测数据剔除数据不得超过该组数据量的 1/5, 一点的舍星组数不得超过星组的 30%, 每组单位权中误差不大于  $\pm 2.5''$ 。特殊说明的是, 在实际作业中, 每个时段的单位权中误差反映的是观测恒星时的稳定程度, 当条件极为有限时, 在满足其他要求的基础上, 单位权中误差可以放宽至  $\pm 3.0''$ 。

#### 4 人仪差标定精度分析

现对北京某天文基准点进行观测以测定人仪差, 按照表 2 给出的观测要求进行测定。两名观测手按照二等精度指标分别在 3 个不同晚上进行 7 个不同时段的测量, 测量时保证观测恒星均匀分布在天区的四个象限。由于涉及敏感数据, 现只给出经度秒值的小数部分, 其中误差如表 4 所示。

限差是测量精度的重要指标, 其表述误差可以达到的最大尺度。测量时, 一般按照测量中误差的 3 倍作为极限误差。

为满足整个观测符合规范要求, 单时段测量首先必须满足二等天文测量精度。现在对观测精度进行分析, 设独立观测事件  $x_0, x_1 \dots x_i \dots x_n$ , 其中每次观测事件的中误差为  $m_i$ , 则函数:  $s = f(x_0, x_1 \dots x_i \dots x_n)$  的中误差  $m_s$  如下式所示:

$$m_s^2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot m_i^2 \tag{4}$$

按照误差理论中的误差传播定律可得, 其测量均值的中误差  $m_x$  为:

$$m_x = \frac{m_s}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

现以二等天文测量精度要求为例, 对同一个天文点测量结果与误差均值成果差值计算的中误差分别如下式所示:

$$m_{经} = \pm\sqrt{m_s^2 + m_x^2} = \pm\sqrt{\frac{n+1}{n}} \times 0.02s \quad (6)$$

若取 2 倍中误差作为限差, 则对同一天文点两次成果差值中误差分别为:

$$m_{经限} = 2m_{经} = \pm 2 \cdot \sqrt{\frac{7+1}{7}} \times 0.04s = \pm 0.086s \quad (7)$$

若取 3 倍中误差作为限差, 则对同一天文点两次成果差值中误差分别为:

$$m_{经限} = 3m_{经} = \pm 3 \cdot \sqrt{\frac{7+1}{7}} \times 0.04s = \pm 0.128s \quad (8)$$

其中,  $n$  为观测组数, 其他测量等级按照表 2 对应的精度指标进行相关计算。当  $n=7$  时, 表明目前观测组数为 7 组, 大于二等测量要求的最小观测组数 (6 组)。表 5 给出了两个观测员 7 组的观测值, 以及与均值的差值。一等天文精度限差计算原理同上。

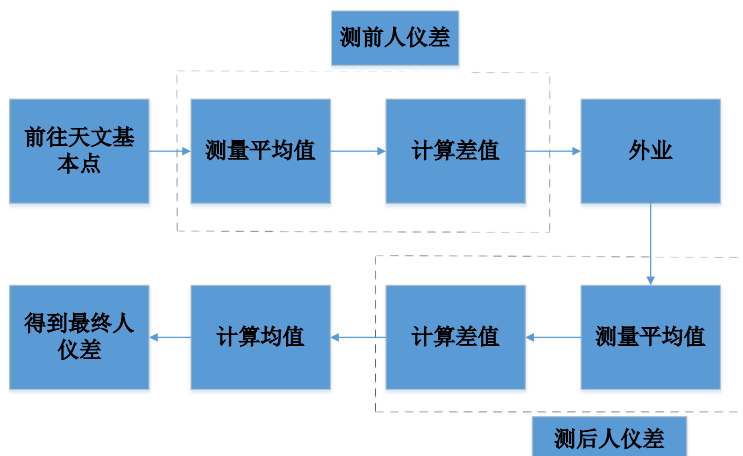


图 3 人仪差标定流程

表 2 天文点测量精度指标

测量等级	纬度 (角秒)	经度 (时秒)
一等	±0.3	±0.02
二等	±0.5	±0.04

表 3 人仪差观测要求

指标要求	一等	二等
一颗星观测 (次)	10~12	10~12
一组观测星数 (颗)	12~16	12~16
一颗星总观测测量不少于 (次)	120	120
一组星观测时间不应多于 (小时)	1	1
一晚观测组数不多于 (组)	5	5
一点夜晚数不少于	3	2
一点总组数不少于 (组)	12	6
一组单位权中误差不大于 (角秒)	2.5	2.5
一组经度结果中误差不大于 (时秒)	0.04	0.04
一组纬度结果中误差不大于 (角秒)	0.5	0.5

表 4 经度观测精度 (单位: 角秒)

观测时段	观测员 1	中误差	观测员 2	中误差
1	**699	0.2666	**852	0.3448
2	**661	0.3393	**986	0.2798
3	**781	0.3457	**956	0.2489
4	**723	0.2919	**968	0.2920
5	**807	0.2575	**947	0.3133
6	**805	0.2186	**984	0.3124
7	**806	0.2313	**845	0.3365

表 5 经度观测与均值差值 (单位: 时秒)

观测时段	观测员 1	观测员 2	差值 1	差值 2
1	**699	**852	-0.056	-0.082
2	**661	**986	-0.094	0.052
3	**781	**956	0.026	0.022
4	**723	**968	-0.032	0.034
5	**807	**947	0.052	0.013
6	**805	**984	0.050	0.050
7	**806	**845	0.051	-0.089

可见若采用计算各组观测值与平均值之差的中误差来衡量观测精度的方法, 上述 2 位观测者最大差值仍满足二等测量精度的限差要求。

中误差也是精度评定的一个重要指标, 其表征的是测量值与其期望值之间的偏离程度, 用以衡量测量值的离散程度测量。式 8 给出了其测量点最终经纬度的计算表达式, 表 6 给出了具体的计算结果, 其中,  $N$  为观测次数,  $x_i$  为天文经纬度测量值,  $\mu$  为经纬度测量均值。实测数据表明: 该点最终测量精度满足二等天文经度测量需求。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (9)$$

表 6 人仪差计算 (单位: 时秒)

	观测均值	中误差	人仪差
1	**755	0.0226	0.081
2	**934	0.0227	-0.260

当测量任务结束时, 重复上文步骤, 对测后人仪差进行再次测定, 最后取得两者中数即为该年的人仪差改正数, 最终的天文经度改正为:

$$\delta_{终} = \delta_{观测} + d\lambda = \delta + \frac{d\lambda_1 + d\lambda_2}{2} \quad (10)$$

### 5 结论

本文结合天文测量工作的实际情况, 介绍了人仪差的计算方法和流程, 以全站仪为具体平台, 依托北京某天文基本点进行了实测, 为天文出测前的人仪差标定提供了整套流程和计算原理说明, 并给出了相关的精度评价指标和标准, 同时以二等天文人仪差测量标定为实例, 列出具体的相关数据, 为人仪差标定和处理相关技术问题, 提供有益参考和借鉴。

### 参考文献

- [1] 武汉测绘学院天文与重力测量教研组. 大地天文学 [M]. 北京: 中国工业出版社, 1963.
- [2] GJB149A-2013. 军用天文测量规范 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2013.
- [3] GJB/T 17943-2000. 大地天文测量规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2000: 10-11.
- [4] 刘新江, 王宗伟. WILD T4 全能经纬仪测量天文成果

- 精度分析[J]. 测绘技术装备, 2015, 17(4): 94-96.
- [5] 董朝阳, 唐宇培, 刘新江. 天文经度测量中人仪差测定精度评估方法研[J]. 海洋测绘, 2015, 35(5): 47-50.
- [6] 王若璞. 新型大地天文测量系统工程化研究[D]. 解放军信息工程大学, 2004.
- [7] 张超. 基于电子经纬仪的天文测量系统及应用研究[D]. 解放军信息工程大学, 2009.
- [8] 李长会. 新型天文测量系统观测方法及测试数据分析研究[D]. 解放军信息工程大学, 2012.
- [9] 张超, 詹银虎, 王若璞, 骆亚波. 光学天文大地测量技术发展评述[J]. 测绘科学技术学报, 2021, 38(04): 331-336+342.

**收稿日期:** 2022年3月9日

**出刊日期:** 2022年5月11日

**引用本文:** 时春霖, 李帅, 付利扬, 王菲, 王时震, 秦炜, 赵鹏, 马莉, 基于全站仪天文测量中的人仪差标定[J]. 工程学研究, 2022, 1(1): 14-19

DOI: 10.12208/j.jer.20220004

**检索信息:** 中国知网 (CNKI Scholar)、万方数据 (WANFANG DATA)、Google Scholar 等数据库收录期刊

**版权声明:** ©2022 作者与开放获取期刊研究中心 (OAJRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

