

引用格式: LIU Xian-yi, ZHANG Zhi-li, ZHOU Zhao-fa, *et al.* Orientation Method of Digital Zenith Camera Based on Coordinate Transformation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(1): 0112003

刘先一, 张志利, 周召发, 等. 基于坐标转换的数字天顶仪定向方法[J]. 光子学报, 2020, 49(1): 0112003

## 基于坐标转换的数字天顶仪定向方法

刘先一, 张志利, 周召发, 常振军, 段辉

(火箭军工程大学, 西安 710025)

**摘 要:** 为了提高仪器的工作效率, 在数字天顶仪定位的基础上开展了定向方法的研究, 构建了识别星点的坐标转换模型. 从坐标转换模型出发, 分析了仪器倾斜及光轴倾斜等因素对恒星像点图像坐标的影响, 研究了焦距值及光轴指向的天文坐标对恒星理论坐标的影响, 并在坐标转换的基础上建立了定向模型. 试验结果表明, 单组星图的定向精度均在  $5''$  以内, 定向精度较高, 能够满足实际条件下对定向精度的要求.

**关键词:** 精密工程测量; 天文定位; 数字天顶仪; 坐标转换; 定向模型; 定向精度

中图分类号: TH761; P232

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204901.0112003

### Orientation Method of Digital Zenith Camera Based on Coordinate Transformation

LIU Xian-yi, ZHANG Zhi-li, ZHOU Zhao-fa, CHANG Zhen-jun, DUAN Hui

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of digital zenith camera, the orientation method was studied on the basis of precision position. Coordinate transformation model for identified star points was constructed. Then the coordinate transformation model was analyzed. The effects of instrument tilt and optical axis tilt on star points were analyzed respectively. Influence of focal length and astronomical coordinates of optical axis on the theoretical image coordinates of star points were also studied. Then the orientation model was established based on coordinate transformation. Analysis of experimental data shows that the orientation accuracy of single group star images is within  $5''$ . The orientation accuracy is high, which can meet the requirements of orientation accuracy under actual conditions.

**Key words:** Precise engineering survey; Astronomical positioning; Digital zenith camera; Coordinate transformation; Orientation model; Orientation precision

**OCIS Codes:** 120.6085; 120.3930; 120.4640; 280.4788

## 0 引言

目前, 寻北定向主要通过陀螺经纬仪定向、天文定向、全球定位系统(Global Position system, GPS)定向等技术完成<sup>[1,2]</sup>. 陀螺经纬仪价格昂贵、维护费用高, 且定向精度要达到  $5'' \sim 10''$  也具有一定的难度<sup>[3,4]</sup>. 天文定向技术是一种传统的手段, 在航海、测绘等领域有广泛的应用, 主要包括太阳高度角法及北极星时角法等. 其中高精度的天文定向技术操作复杂、定向时间长, 往往用于构建北向基准<sup>[5]</sup>, 不具有普遍适用性. 随着技术的进步, GPS 定向方法得到了一定的应用, 但易受外部环境的影响<sup>[6,7]</sup>. 当前, 天文定向方法因其受外界影响

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(No.41404022)

第一作者: 刘先一(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事定位定向技术研究. Email: 1397559188@qq.com

导师: 张志利(1966—), 男, 教授, 博导, 主要从事定位定向、仿真技术研究. Email: 15594979259@163.com

收稿日期: 2019-08-03; 录用日期: 2019-10-17

<http://www.photon.ac.cn>

小的优点受到青睐.

数字天顶仪是一种在地面使用的高精度天文仪器,可用于天文定向,主要通过拍摄星图获取测站点的天文坐标<sup>[8,9]</sup>.国外对于数字天顶仪的研究起步相对较早,德国的汉诺威大学和瑞士的苏黎世大学对数字天顶仪的研究较为深入,采用数字天顶仪进行天文定位的精度可以达到 $0.2''$ 以内<sup>[10]</sup>.欧洲的土耳其等国也相继开展了数字天顶仪的研究,定位的精度也可达到 $0.2''$ <sup>[11]</sup>.我国对于数字天顶仪的研究相对较晚,主要的研究单位有中国科学院、山东科技大学及西安航光仪器厂等<sup>[12,13]</sup>.2011年,中国科学院与山东科技大学合作研制了数字天顶望远镜样机,其单次测量的定位精度在 $0.2''\sim 0.3''$ ,单组测量的定位精度可达到 $0.1''$ <sup>[14,15]</sup>.综上所述可知,对数字天顶仪的研究主要体现在定位上,而通过数字天顶仪进行定向的研究则相对较少<sup>[16]</sup>.为提高仪器的工作效率以及实现定位定向的一体化,本文在数字天顶仪定位的基础上开展定向方法的研究,构建识别星点的坐标转换模型,并对转换模型进行分析,从而实现测站点的高精度定向.

## 1 定向模型的构建

数字天顶仪是一种在地面使用的高精度天文定位仪器,主要由光学望远镜、CCD 图像传感器、GPS/北斗授时系统、调平系统、控制系统和数据处理系统等构成,如图 1 所示.

数字天顶仪采用 CCD 图像传感器进行星图的拍摄,如图 2 所示,理想情况下 CCD 图像传感器处于水平的状态,以 CCD 图像传感器的两侧为  $x_0$  轴和  $y_0$  轴建立图像坐标系  $O-x_0y_0$ ,以光轴所处的位置为原点,北向指向为  $O'N$  轴,东向指向为  $O'E$  轴,建立坐标系  $O'-NE$ .由天球的北极  $P$ 、光轴指向对应的天文坐标  $(\alpha_0, \delta_0)$  和恒星构成球面三角形,结合 GPS/北斗授时系统将星点的赤经赤纬转换至天文坐标系中,其值为  $(\alpha_i, \delta_i)$ .



图 1 数字天顶仪

Fig.1 Digital zenith camera

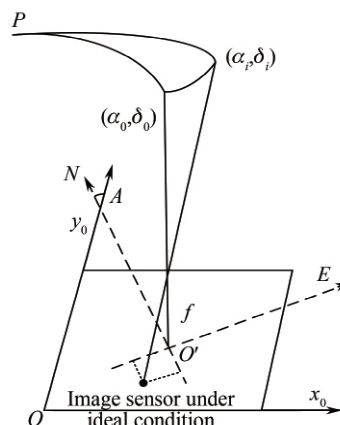


图 2 恒星像点示意

Fig.2 Schematic diagram of star point

恒星在坐标系  $O'-NE$  中的理论坐标  $(x_E, y_N)$  为

$$\begin{cases} x_E = -\frac{f}{p} \times \frac{\cos \delta_0 \tan \delta_i - \sin \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin \delta_0 \tan \delta_i + \cos \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)} \\ y_N = \frac{f}{p} \times \frac{\sin(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin \delta_0 \tan \delta_i + \cos \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $f$  为仪器焦距值,  $p$  为像元尺寸.该恒星像点在图像坐标系  $O-x_0y_0$  中的坐标为  $(x_0, y_0)$ .如图 2 所示,恒星的理论坐标  $(x_E, y_N)$  与图像坐标  $(x_0, y_0)$  可通过旋转与平移完成坐标之间的转换,即满足

$$\begin{cases} x_0 = x_E \cos A - y_N \sin A + c_1 \\ y_0 = x_E \sin A + y_N \cos A + c_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $A$  为图像传感器的一侧  $y_0$  轴与  $O'N$  轴之间的夹角,即需要求解的天文方位角.通过直角棱镜等光学设备可以将天文方位信息精确地传递出来,  $c_1, c_2$  为  $O'$  在坐标系  $O-x_0y_0$  中的坐标值.

显然,式(2)中恒星像点的图像坐标  $(x_0, y_0)$  与理论坐标  $(x_E, y_N)$  均是在理想情况下获得的,但是在实际条件下却是存在误差的.为保证北向方位角  $A$  的精确求解,下面将分别对恒星像点的图像坐标与理论坐标

进行分析,从而构建出准确的定向模型.

### 1.1 恒星像点图像坐标的分析

在进行星图拍摄时,仪器的倾斜会带来恒星像点图像坐标的变化;由于安装误差等原因,仪器的光轴会发生倾斜,从而导致恒星像点图像坐标发生误差;另外,恒星像点的图像坐标会受到光学畸变、大气折射等因素的影响,这里将逐一进行分析,完成对恒星像点图像坐标的修正.

#### 1.1.1 仪器倾斜对图像坐标的影响

理想状态下,CCD 图像传感器处于水平状态,此时恒星像点的图像坐标值为 $(x_0, y_0)$ .但是在实际情况下,数字天顶仪在拍摄星图时会存在一定程度的倾斜,倾角 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 为 CCD 图像传感器两个方向与水平面的夹角,且为角秒级的小角度.如图 3 所示,此时恒星像点的图像坐标为 $(x, y)$ .

将恒星像点的图像坐标 $(x, y)$ 转换至完全水平状态,则有

$$(x, y, -f) \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\theta_1 \\ 0 & 1 & -\theta_2 \\ \theta_1 & \theta_2 & 1 \end{pmatrix} = (x - \theta_1 f, y - \theta_2 f, -\theta_1 x - \theta_2 y - f) \quad (3)$$

恒星星光属于无穷远处的平行光,恒星星光矢量平行,则有

$$\frac{x - \theta_1 f}{x_0} = \frac{y - \theta_2 f}{y_0} = \frac{-\theta_1 x - \theta_2 y - f}{-f} \quad (4)$$

由式(4)可得

$$\begin{cases} x_0 = \frac{fx - \theta_1 f^2}{f + \theta_1 x + \theta_2 y} \\ y_0 = \frac{fy - \theta_2 f^2}{f + \theta_1 x + \theta_2 y} \end{cases} \quad (5)$$

由于 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 均为小角度,相对于恒星像点的图像坐标而言,焦距 $f$ 属于较大数值,对式(5)进行化简后可得

$$\begin{cases} x_0 \approx x - f\theta_1 \\ y_0 \approx y - f\theta_2 \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可对因倾斜造成的恒星像点图像坐标的变化进行修正.

#### 1.1.2 光轴倾斜对图像坐标的影响

数字天顶仪在拍摄星图时,恒星星光经过仪器光学焦点在 CCD 图像传感器上成像,由于安装误差等原因导致光轴并不是完全与成像的 CCD 图像传感器相垂直,也就是说光轴指向存在着偏差,此时恒星在图像坐标系 $O-x_0 y_0$ 中的坐标值会发生变化,这里将其简化为 $Ox_0$ 和 $Oy_0$ 两轴的方向进行讨论,如图 4.

当光轴指向没有倾斜时,星光与光轴指向之间的夹角为 $\psi_1$ .当光轴指向存在倾斜时,光轴倾斜的平面夹角为 $\alpha_1$ .恒星像点在 $Ox_0$ 轴方向的偏差值 $\Delta x_0$ 为

$$\Delta x_0 = \frac{f \sin(\psi_1 + \alpha_1)}{\cos \psi_1} - f \tan \psi_1 \quad (7)$$

化简后可得

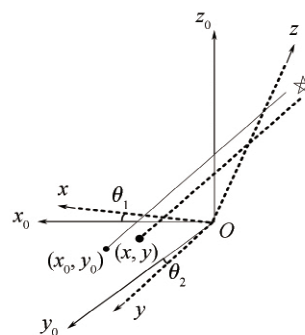


图 3 星点示意图

Fig.3 Schematic diagram of star point

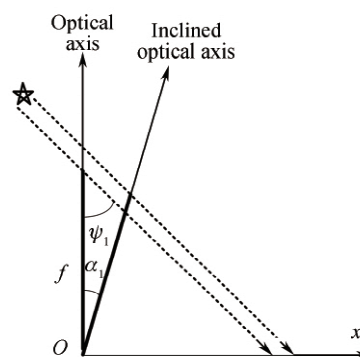


图 4 光轴倾斜导致的坐标变化

Fig.4 Coordinate change caused by optical axis

$$\Delta x_0 = f\alpha_1 \quad (8)$$

同理,可得恒星像点在  $oy_0$  轴方向的偏差值  $\Delta y_0$  为

$$\Delta y_0 = f\alpha_2 \quad (9)$$

式中,  $\alpha_2$  为在  $oy_0$  平面内光轴的平面夹角.

由以上分析可知,由光轴倾斜导致的恒星像点图像坐标的变化量只与光轴倾斜的夹角有关,可以理解为恒星像点图像坐标的整体平移.

### 1.1.3 其他误差对图像坐标的影响

恒星星光穿过大气层在 CCD 图像传感器上成像,星光经过大气层时会发生折射.大气折射包含正常大气折射和反常大气折射.正常的大气折射是可以进行补偿的.反常大气折射主要来自镜筒内温度不均匀产生的光线偏转和观测上空的反常折射.反常大气折射是多变的,一般将其看作是没有规律的.在较短时间尺度上,反常大气折射呈现系统误差的特性.可将反常大气折射带来的恒星质心的偏移看作是系统误差进行研究<sup>[17]</sup>.

在对恒星像点进行提取时,常采用传统质心法、平方加权质心法等方法,这些方法都存在着星点质心提取误差.另外,在进行星图拍摄的过程中,存在着噪音及光学畸变等因素,噪音及光学畸变等的存在也会导致恒星像点图像坐标的误差.恒星像点的质心提取精度在 0.1 像素以内<sup>[18]</sup>,噪音、大气折射及光学畸变等带来的星点位置误差在 0.3 像素以内<sup>[19]</sup>.也就是说由其他误差引起的恒星像点图像坐标的误差值  $|\Delta x| \leq 0.4$  像素,  $|\Delta y| \leq 0.4$  像素.

综上所述可知,

$$\begin{cases} x_0 = x - f\theta_1 + f\alpha_1 + \Delta x \\ y_0 = y - f\theta_2 + f\alpha_2 + \Delta y \end{cases} \quad (10)$$

## 1.2 恒星像点理论坐标的分析

由式(1)可知,恒星像点理论坐标的解算值主要受光轴指向对应的天文坐标  $(\alpha_0, \delta_0)$  和焦距值  $f$  影响,下面对这两个因素进行分析.

### 1.2.1 光轴指向的天文坐标对理论坐标的影响

数字天顶仪作为一种高精度的天文定位仪器,定位的精度在  $0.3''$  以内.也就是说在选取  $(\alpha_0, \delta_0)$  的数值时,其精度也在角秒以内.对式(1)进行分析可知,较难得到简单直观的表达式解,于是拟通过理论分析的方式来研究选取的光轴指向的天文坐标  $(\alpha_0, \delta_0)$  对恒星像点理论坐标的影响.

如图 5 所示,恒星处于无穷远处,恒星星光可等效为平行光,当选取的光轴指向的天文坐标存在误差值时,作为平行光的恒星星光通过仪器光学焦点在图像传感器上成像.恒星星光作为空间的三维矢量,可以分解转化到二维平面进行处理,这里将问题简化为二维平面进行分析,此时星光与理论光轴的夹角为  $\psi$ ,含有误差的光轴与理论上的光轴之间的平面夹角为  $\alpha$ .显然,由光轴误差带来的理论坐标解算的变化量  $\Delta l$  为

$$\Delta l = f \tan \psi - f \tan(\psi - \alpha) \quad (11)$$

由于光轴的误差值很小,  $\alpha$  为小角度,对式(11)进行化简可得

$$\Delta l = f\alpha \quad (12)$$

即当选取的光轴指向的天文坐标含有小量误差时,在解算恒星理论坐标时,恒星理论坐标的误差是个定值,只与选取的光轴指向有关,相当于一个偏移量.

### 1.2.2 焦距值 $f$ 的影响分析

当焦距值  $f$  存在误差  $\Delta f$  时,显然会带来恒星像点理论坐标  $(x_E, y_N)$  的变化,则有

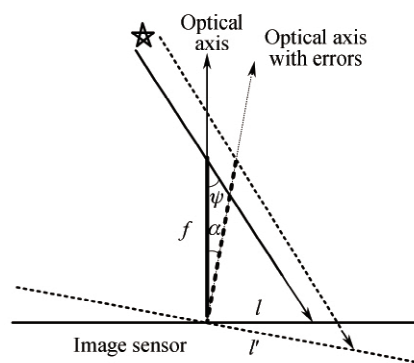


图 5 光轴指向对理论坐标的影响

Fig.5 Influence of optical axis on theoretical coordinates

$$\begin{cases} x'_E = -\frac{f + \Delta f}{p} \times \frac{\cos \delta_0 \tan \delta_i - \sin \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin \delta_0 \tan \delta_i + \cos \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)} \\ y'_N = \frac{f + \Delta f}{p} \times \frac{\sin(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin \delta_0 \tan \delta_i + \cos \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)} \end{cases} \quad (13)$$

结合式(2),可构建

$$\begin{cases} x_0 = ax'_E - by'_N + c_1 \\ y_0 = bx'_E + ay'_N + c_2 \end{cases} \quad (14)$$

式中,系数  $a = \frac{f}{f + \Delta f} \cos A$ ,  $b = \frac{f}{f + \Delta f} \sin A$ ,在进行天文方位角  $A$  的求解时,由  $b/a$  来解算方位角,显然通过比例求解北向方位角时,不会受到焦距值  $f$  变化的影响。

综上所述可知,在解算恒星理论坐标时,选取的光轴指向的天文坐标  $(\alpha_0, \delta_0)$  含有误差时,带来的是理论坐标值的整体性偏移,且天文方位角的求解不受焦距值  $f$  变化的影响。

1.1 节和 1.2 节分别就影响恒星像点图像坐标和恒星理论坐标的因素进行了分析,这里做如下总结:1) 在小角度情况下,仪器倾斜及由安装误差等因素导致的光轴倾斜带来的是恒星像点图像坐标的整体偏移;2) 由星点提取方法及光学畸变等因素带来的恒星像点图像坐标的误差会对定向模型产生影响,直接决定着天文方位角的解算精度;3) 在小角度情况下,解算恒星理论坐标时,选取的光轴的天文坐标  $(\alpha_0, \delta_0)$  含有误差时,带来的是理论坐标的整体偏移;4) 焦距值  $f$  不影响天文方位角的求解。

结合式(2)、式(10)、式(14)及以上分析,可构建如下的定向模型

$$\begin{cases} x = ax'_E - by'_N + c'_1 \\ y = bx'_E + ay'_N + c'_2 \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $(x, y)$  为实际条件下提取的恒星像点的图像坐标,  $(x'_E, y'_N)$  为实际条件下解算得到的恒星理论坐标,  $c'_1$  和  $c'_2$  中包含了以上分析的偏移量。

天文方位角  $A$  为

$$\tan A = \frac{b}{a} \quad (16)$$

## 2 试验数据分析

试验过程中首先要对数字天顶仪进行精确调平,调平的精度在  $10''$  以内,仪器的视场角为  $3^\circ \times 3^\circ$ ,焦距值为  $600 \text{ mm}$ , CCD 图像传感器的分辨率为  $4096 \times 4096$ ,像元尺寸  $9 \text{ } \mu\text{m}$ 。拍摄星图的曝光时间为  $0.5 \text{ s}$ ,该仪器的定位精度在  $0.3''$  以内。为了验证采用该定向方法的正确性及定向精度,这里结合光学经纬仪在已知天文北向的基准点上开展试验,首先通过数字天顶仪进行定位,数字天顶仪定位的天文经纬度坐标为  $(109.12122^\circ, 34.31604^\circ)$ 。

完成天文定位后,在外部环境稳定的情况下开始拍摄星图进行定向。由于篇幅所限,这里给出在一个基准点进行定向试验的部分结果。采用依巴谷星表对星图进行识别,每幅星图识别的星点数量在 20 颗左右。将识别的星点数据、定位结果和仪器光学焦距带入式(1),分别解算出识别恒星对应的理论坐标,如表 1。

将表 1 中的数据带入到式(15),可得  $a = -0.3346$ ,  $b = -0.9409$ ,解算得到天文方位角  $A = 70.42722^\circ$ ,即 CCD 图像传感器一侧的天文方位角为  $70.42722^\circ$ 。已标定用于输出天文方位信息的棱镜的固定安装角度为  $18.22312^\circ$ ,此时解算的方位棱镜输出的北向角为  $88.65034^\circ$ 。采用光学准直经纬仪对方位棱镜进行光学准直,可获得基准点上的天文方位角为  $88.65192^\circ$ ,解算的天文方位角与基准点上北向信息的差值为  $5.7''$ 。

对同一基准点上拍摄的多幅星图进行处理,由于该试验是在已知天文方位角的基准点上展开的试验,将解算的天文方位角与真实值进行比较,如图 6。

表 1 星点数据  
Table 1 Star data

Num	Image coordinate $x/\text{pixel}$	Image coordinate $y/\text{pixel}$	Star longitude/ $(^\circ)$	Star latitude/ $(^\circ)$	Theoretical coordinate $x/\text{pixel}$	Theoretical coordinate $y/\text{pixel}$
1	2 228.02	3 466.16	199.783 98	34.025 17	609.53	1 720.07
2	553.36	240.44	203.509 74	33.586 40	4 214.47	1 222.40
3	1 772.05	706.35	202.649 20	34.452 70	3 366.20	2 216.00
4	1 475.24	3 641.28	199.885 12	33.365 56	696.60	951.03
5	2 557.54	4 066.49	199.079 94	34.108 90	3 944.60	2 649.39
6	1 986.32	17.09	203.260 38	34.816 72	3 273.64	634.22
7	314.49	1 322.39	202.532 38	33.094 82	2 110.27	1 793.18
8	1 794.44	2 029.50	201.340 07	34.096 98	2 799.74	2 475.62
9	2 205.92	1 152.52	202.061 05	34.680 99	3 407.83	769.41
10	396.86	1 150.94	202.671 85	33.209 47	4 240.69	1 695.55
11	989.65	57.50	203.547 65	33.992 20	2 120.39	3 069.08
12	2 991.84	1 593.13	201.351 55	35.193 46	185.39	1 461.16
13	2 126.40	3 951.90	199.349 59	33.796 69	1 216.99	1 922.29
14	2 214.56	2 826.96	200.411 90	34.204 93	2 845.79	2 941.85
15	2 629.30	953.31	109.958 76	35.081 28	2 845.79	2 941.85
16	2 397.84	1 942.29	109.060 78	34.611 37	1 990.33	2 391.70
17	419.92	1 473.51	110.195 91	33.138 33	3 095.57	682.90
18	933.00	1 331.80	110.162 14	33.595 39	3 057.21	1 214.56
19	871.65	2 273.45	109.266 43	33.278 31	2 189.49	840.56
20	955.56	1 543.13	109.948 36	33.554 53	2 850.36	1 165.15
21	268.56	1 789.96	109.939 60	32.926 57	2 847.75	434.12
22	3 283.91	813.01	109.872 62	35.653 00	2 758.84	3 606.67
23	874.48	3 994.48	107.605 54	32.775 71	564.68	265.98

对图 6 的数据进行分析,可得单幅星图解算的天文信息与真实值之间的最大误差为  $8.45''$ ,相对于真实值,单幅星图解算的天文方位角的稳定度为  $5.95''(1\sigma)$ .将多幅星图作为一组,选取定向结果的均值作为最终的定向结果.这里选择 6 幅星图作为一组,将天文方位角的均值与真值相比较,可得最大定向误差为  $3.86''$ .显然,该定向精度较高.

在数个基准点上分别进行天文定向试验,不同的时间段在每个基准点上均拍摄了多幅星图,对星图进行处理.这里仍将 6 幅星图的定向均值作为一组,并将解算的天文方位角与基准点上的真值进行比较.定向差值如表 2,这里给出了在三个基准点上所做的部分试验结果.

从表 2 的数据可知,与真实值相比,该定向精度较高.将基准点及光学传递等因素造成的误差考虑在内,仍可得天文定向的精度在  $5''$  以内,该定向精度能够达到目前陀螺寻北仪的精度,且定向流程简单、耗时较短.在实际条件下,可根据精度和时间的要求,通过对多幅星图的解算完成测站点的高精度定向.

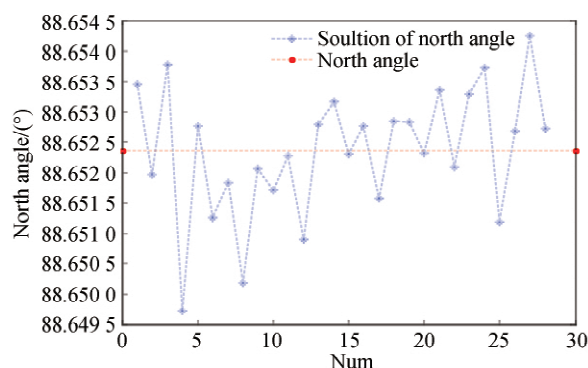


图 6 北向方位角

Fig.6 Azimuthal angle of north

表 2 定向差值  
Table 2 Orientation D-value

Num	Reference point 1/( $''$ )	Reference point 2/( $''$ )	Reference point 3/( $''$ )
1	2.96	4.01	2.67
2	2.84	2.12	4.18
3	3.01	4.13	2.98
4	3.23	3.11	3.46
5	4.06	2.98	3.68
6	2.45	3.99	2.36
7	2.26	3.12	3.38
8	3.03	4.45	3.95

### 3 结论

数字天顶仪主要用于地面测站点的高精度定位,采用数字天顶仪进行天文定向的研究较少.本文对数字天顶仪的天文定向方法进行了研究,通过构建定向模型完成了定向工作.该定向方法实现了仪器定位定向的一体化,而且采用单组星图进行定向的精度较高,操作简单.数据分析结果表明,该定向方法是一种高精度的定向方法,可以满足实际条件中对于精确的天文方位角信息的需求.

#### 参考文献

- [1] ZHAO Liang. Research on positioning orientation model based on astronomical photogrammetry[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018.  
赵亮. 基于天文摄影测量的定位定向模型研究[D]. 西安:西安科技大学,2018.
- [2] ZHANG Yao-min, Technique for true north reference calibration and north leading to inertial test equipment[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2018, **5**(6): 105-110.  
张耀民. 真北方位基准标定与惯导测试设备引北技术[J]. *导航定位与授时*, 2018, **5**(6): 105-110.
- [3] FU Yong-jie, Discussion on the accurate alignment method of gyro theodolite calibration system[J]. *Measurement Technology*, 2018, **38**(5): 17-20.  
付永杰. 陀螺经纬仪校准系统精确对中方法探讨[J]. *计测技术*, 2018, **38**(5): 17-20.
- [4] YANG Yong-qiang, YANG Lin, LIU Bin. Research on error characteristics of land FOG north-seeker[J]. *Laser and Infrared*, 2018, **48**(5): 615-619.  
杨建强,杨林,刘斌.陆用光纤陀螺寻北仪误差特性研究[J]. *激光与红外*, 2018, **48**(5): 615-619.
- [5] LI Fu-peng, ZHANG Chao, WANG Zheng-tao, et al. Design of astronomical/GNSS combination directional system[J]. *Journal of Geomatics*, 2017, **42**(5): 25-28.  
李夫鹏,张超,王正涛,等.天文/GNSS组合定向系统研究[J]. *测绘地理信息*, 2017, **42**(5): 25-28.
- [6] ZHAO Shu-hong, XUE Zhi-hong, GAO Hong. A portable astronomical orientation system and its precision analysis[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2009, **29**(4): 22-25.  
赵树红,薛志宏,高宏.便携式天文定向系统及其精度分析[J]. *海洋测绘*, 2009, **29**(4): 22-25.
- [7] HONG Shao-ming, YANG Yong-ping, DUAN De-lei. Introduction and comparison of usual orientation methods[J]. *Exploration Science and Technology*, 2008, **1**: 52-57.  
洪绍明,杨永平,段德磊.常用定向方法综述及其比较[J]. *勘察科学技术*, 2008, **1**: 52-57.
- [8] LIU Xian-yi, ZHANG Zhi-li, ZHOU Zhao-fa, et al. A new method for fast star identification based on star trace[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, **39**(7): 1443-1449.  
刘先一,张志利,周召发,等.数字天顶仪中恒星像点轨迹的快速定位方法[J]. *兵工学报*, 2018, **39**(7): 1443-1449.
- [9] ZHANG Xi-hui, ZHOU Zhao-fa, LIU Xian-yi, et al. Tilt error analysis of digital zenith instrument positioning at large dip angle[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, **39**(2): 405-410.  
张西辉,周召发,刘先一,等.大倾角状态下数字天顶仪定位的倾斜误差分析[J]. *兵工学报*, 2018, **39**(2): 405-410.
- [10] HIRT C, SEEGER G. Accuracy analysis of vertical deflection data observed with the hannover digital zenith camera system TZK2-D[J]. *Journal of Geodesy*, 2008, **82**(6): 347-356.
- [11] KEREM H, RASIM D, HALUK O. Digital zenith camera system for astro-geodetic applications in turkey[J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation*, 2012, **1**(2): 8-14.
- [12] TIAN Li-li, GUO Jin-yun, HAN Yan-ben, et al. Digital zenith telescope prototype of China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, **59**(12): 1094-1099.  
田立丽,郭金运,韩延本,等.我国的数字化天顶望远镜样机[J]. *科学通报*, 2014, **59**(12): 1094-1099.
- [13] SONG Lai-yong. Research on theory and algorithm for measuring of vertical deflections based on CCD and GPS[D]. Shandong: Shandong University of Science and Technology, 2012.

- 宋来勇. 基于 CCD/GPS 垂线偏差测量理论算法研究[D]. 山东:山东科技大学,2012.
- [14] WANG Bo, TIAN Li-li, WANG Zheng, *et al.* The image and data processing in digital zenith camera[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, **59**(12):1100-1107.  
王博,田立丽,王政,等. 数字化天顶望远镜观测图像及数据处理[J]. 科学通报, 2014, **59**(12): 1100-1107.
- [15] ZHOU Xing. Stellar location and identification algorithm in celestial location system[D]. Xi'an: Xi Dian University, 2012.  
周兴. 天文定位系统中恒星定位与识别算法的研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2012.
- [16] ZHANG Xi-hui, ZHOU Zhao-fa, LIU Xian-yi, *et al.* A solving method for the azimuth angle based on digital zenith camera[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, **38**(5): 546-550.  
张西辉,周召发,刘先一,等. 一种基于数字天顶仪的方位角计算方法[J]. 大地测量与地球动力学,2018,**38**(5):546-550.
- [17] HIRT C. Monitoring and analysis of anomalous refraction using a digital zenith camera system [J]. *Astronomy Astrophysics*, 2006, **45**(9): 283-290.
- [18] ZHANG Guang-jun. Star identification[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2011.  
张广军. 星图识别[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
- [19] ZHANG Hui, YUAN Jia-jun, LIU En-hai. CCD noise effects on position accuracy of star sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(5): 629-633.  
张辉,袁家虎,刘恩海. CCD 噪音对星敏感器星点定位精度的影响[J]. 红外与激光工程,2006,**35**(5):629-633.