

基于数字天顶仪的时间标定方法

刘先一, 张志利, 周召发, 张西辉, 杨 上

(火箭军工程大学 兵器理论与技术国家重点实验室, 陕西 西安 710025)

摘 要: 为了获得高精度的时间信息, 常采用 GPS 等授时系统进行授时, 但在野外等复杂环境下往往接收不到 GPS 等授时信息。数字天顶仪是一种高精度的天文定位仪器, 采用数字天顶仪进行时间标定的研究相对较少。考虑到数字天顶仪的定位结果受恒星视位置和时间的影响, 首先分别研究了时间误差及星表精度对恒星视位置的影响, 然后分析了恒星视位置对数字天顶仪定位精度的影响。基于数字天顶仪的定位原理提出了一种时间标定的新方法, 并得出时间标定的精度在 0.025 s。实验数据的分析结果表明该时间标定的方法是可行的。

关键词: 数字天顶仪; 时间标定; 恒星视位置; 定位精度

中图分类号: P222 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1017007

Time calibration method based on digital zenith camera

Liu Xianyi, Zhang Zhili, Zhou Zhaofa, Zhang Xihui, Yang Shang

(State Key Discipline Laboratory of Armament Launch Theory and Technology, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to get accurate time information, the GPS was always used. But GPS can not be used in outdoors due to the complicated environment. Digital zenith camera is a kind of high-precision astronomical positioning instrument. The study about time calibration based on digital zenith camera was rather little. Considering that the orientation result can be influenced by star apparent position and time. Firstly, the influence of time error and star catalogue on star apparent position was analyzed respectively. Then, the influence of star apparent position on the orientation result was analyzed. One new method of time calibration based on digital zenith camera was proposed. The precision of time calibration was 0.025 s. The analysis of experimental data shows that the time calibration method is feasibility.

Key words: digital zenith camera; time calibration; star apparent position; orientation precision

收稿日期: 2017-02-05; 修订日期: 2017-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(41174162)

作者简介: 刘先一(1991-), 男, 博士生, 主要从事定位技术方面的研究。Email: 1397559188@qq.com

导师简介: 张志利(1966-), 男, 教授, 博士, 主要从事定位定向、基准传递技术以及仿真技术方面的研究。Email: effortyao@163.com

0 引言

数字天顶仪的发展随着 CCD 的运用经历了由模拟时代向数字时代的转变^[1-2]。运用数字天顶仪进行定位是一种高精度的定位方法^[3-4]。通过数字天顶仪拍摄恒星进行定位具有抗干扰能力强、误差不随时间积累等特点^[5]。国外对于数字天顶仪的研究较早,定位精度已经能够达到 0.05",国内对数字天顶仪的研究也逐渐走向了成熟的阶段^[6-8],但是采用数字天顶仪进行时间标定的研究还相对较少。时间的标定方法常采用 GPS 授时等方法^[9-10],但是在野外等复杂环境下,无法接受到 GPS 等外界信号。

为了获取精确的时间信息,文中提出了一种基于数字天顶仪进行时间标定的方法。数字天顶仪的定位结果会受到地球自转和恒星视位置的影响,其中地球自转与时间信息直接相关。这里,首先研究了时间误差值及星表精度对于恒星视位置的影响,然后分析了恒星视位置的误差对于数字天顶仪定位结果的影响。理论推导了数字天顶仪进行时间标定的方法,并对时间标定的精度进行了分析。最后通过试验进行了验证。

1 恒星视位置对天文定位的影响分析

数字天顶仪由光学望远镜、CCD 图像传感器、GPS 接收机、调平系统、控制系统和数据处理系统等构成,如图 1 所示,数字天顶仪在定位过程中通过



图 1 数字天顶仪

Fig.1 Digital zenith camera

CCD 图像传感器进行星图的拍摄,定位解算的结果会受到地球自转以及恒星视位置解算精度的影响。

其中恒星视位置会受到时间和星表精度的影响。这里,分别就时间误差和星表精度对恒星视位置的影响进行了研究。

1.1 时间对恒星视位置的影响分析

采用恒星星表对拍摄的星图进行识别,得出识别恒星在星表中的赤经、赤纬、自行等数据。结合拍摄恒星星图的时刻,解算拍摄恒星的视位置。恒星视位置的解算过程如图 2 所示。

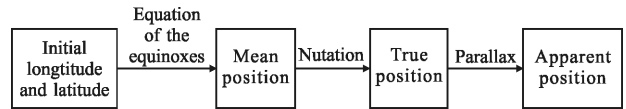


图 2 恒星视位置的解算流程图

Fig.2 Solution flow diagram of star apparent position

下面将分别分析时间误差对岁差、自行、章动、视差及光行差的影响。时间误差对岁差和自行补偿造成的误差值为:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_n &= (m+n \cdot \sin\alpha_0 \cdot \tan\delta_0)\Delta t + \mu_a\Delta t \\ \Delta\delta_n &= n \cdot \cos\alpha_0\Delta t + \mu_\delta\Delta t \end{aligned} \quad (1)$$

式中: m 、 n 分别为赤经总岁率和赤纬总岁率, $m=4\ 612.436\ 2''$, $n=2\ 004.310\ 9''$; μ_a 、 μ_δ 分别为恒星的赤经自行和赤纬自行; α_0 、 δ_0 为识别恒星在星表历元下的赤经与赤纬; Δt 为时间误差值。大多数恒星在年内的自行小于 $0.1''$ ^[11]。所以由时间误差带来的自行误差对于恒星视位置的影响几乎可以忽略不计。则有:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_n &< (m+n \cdot \tan\delta_0) \cdot \Delta t \\ \Delta\delta_n &< n \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (2)$$

对公式(2)进行分析可知,一分钟时间误差造成赤经赤纬的岁差和自行的补偿值的变化量在 $10^{-4}''$ 的数量级。

时间误差值会对章动造成一定的误差值,经章动改正后的恒星真位置(α_z , δ_z)的计算式为:

$$\begin{aligned} \alpha_z &= \alpha_p + \Delta\psi(\cos\varepsilon + \sin\varepsilon \cdot \sin\alpha_p \cdot \tan\delta_p) - \Delta\varepsilon \cdot \tan\delta_p \cdot \cos\alpha_p \\ \delta_z &= \delta_p + \Delta\psi \cdot \sin\varepsilon \cdot \cos\alpha_p + \Delta\varepsilon \cdot \sin\alpha_p \end{aligned} \quad (3)$$

式中:(α_p , δ_p) 为经过岁差和自行后恒星的平位置坐标; ε 为平黄交角; $\Delta\psi$ 、 $\Delta\varepsilon$ 为黄经章动与交角章动。其中 ε 、 $\Delta\psi$ 与 $\Delta\varepsilon$ 均为时间的函数,分析可得时间误差对于章动补偿的影响值可近似为:

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \Delta\psi(\cos\varepsilon + \sin\varepsilon \cdot \sin\alpha_p \cdot \tan\delta_p) - \Delta\varepsilon \cdot \tan\delta_p \cdot \cos\alpha_p \\ \delta_2 &= \Delta\psi \cdot \sin\varepsilon \cdot \cos\alpha_p + \Delta\varepsilon \cdot \sin\alpha_p \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\Delta\psi$ 、 $\Delta\varepsilon$ 分别为由于时间误差值带来的黄经章

动和交角章动的变化值。其中有：

$$\begin{aligned} \Delta\psi < 1.1'' \times 10^{-5} \Delta t \\ \Delta\varepsilon < 5.88'' \times 10^{-6} \Delta t \end{aligned} \quad (5)$$

联立公式(4)、(5)可知，一分钟时间误差造成的赤经赤纬的章动补偿值的变化量在 $10^{-5}''$ 的数量级。对识别恒星的真位置进行视差和光行差补偿可以得到识别恒星的视位置。在对恒星视位置进行计算时，视差的补偿是可以忽略的^[12-13]。这里主要讨论光行差对于恒星视位置计算的影响。其中光行差主要包括长期光行差、周日光行差和周年光行差，比较而言，长期光行差和周日光行差是可以忽略不计的。经过周年光行差补偿后的恒星视位置坐标为 (α_s, δ_s) ，则有：

$$\begin{aligned} \alpha_s &= \alpha_c - k[(\sin l - e \cdot \sin w) \cdot \sin \alpha_c + (\cos l - e \cdot \cos w) \cdot \\ &\quad \cos \varepsilon \cdot \cos \alpha_c] / \cos \delta_c \\ \delta_s &= \delta_c - k[(\sin l - e \cdot \sin w) \cdot \cos \alpha_c \cdot \sin \delta_c + (\cos l - e \cdot \cos w) \cdot \\ &\quad \cos \varepsilon (\tan \varepsilon \cdot \cos \delta_c - \sin \alpha_c \cdot \sin \delta_c)] \end{aligned} \quad (6)$$

式中： k 为光行差常数； w 为近点角距； l 为太阳地心真黄经； e 太阳平近点的偏心率；其中 w 、 l 及 e 均是时间的函数。则有：

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_s &= f(w, l, e, t) \\ \Delta\delta_s &= g(w, l, e, t) \end{aligned} \quad (7)$$

由于一分钟时间误差带来的 w 、 l 及 e 的变化的数量级均在 10^{-5} ，分析后可得一分钟时间误差值带来的光行差的补偿值的变化量均在 $10^{-4}''$ 的数量级。

综上所述，由时间误差带来的恒星视位置经纬度的误差值为：

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= \Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2 + \Delta\alpha_3 \\ \Delta\delta &= \Delta\delta_1 + \Delta\delta_2 + \Delta\delta_3 \end{aligned} \quad (8)$$

通过以上分析可知，由岁差、章动及光行差带来的恒星视位置的误差值几乎相同。当时间误差在 10 min 左右时，恒星视位置的解算误差要小于 $10^{-3}''$ 的数量级。表明当时间误差值在 10 min 以内时，恒星视位置的经纬度与准确值之间的差值要小于 $0.001''$ 。即 $\Delta\alpha \leq 0.001''$ ， $\Delta\delta \leq 0.001''$ ，此时，时间误差对于恒星视位置解算精度的影响基本可以忽略。

1.2 星表对恒星视位置的影响分析

数字天顶仪通过旋转在不同的方位上进行星图的拍摄，将星图与星表结合进行星图识别，因此恒星视位置的解算精度也会受到星表精度的影响。通过建立识别恒星的图像坐标系与天球切平面坐标系之间

的转换关系，迭代数次后实现对测站点位置的解算。

如图 3 所示，以 (α_0, δ_0) 作为测站点初始概略天文坐标值，并以此点为原点作天球切平面，将解算的

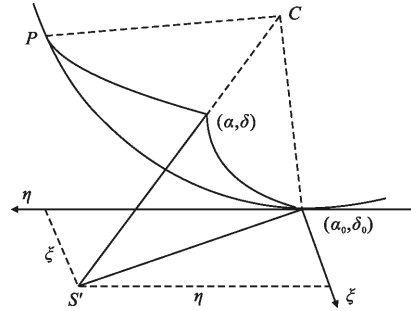


图 3 切平面原理图

Fig.3 Schematic diagram of tangential plane

恒星视位置坐标投影到天球切平面上，建立切平面坐标系 $0-\xi\eta$ ，其中 η 指向天球正北方向， ξ 指向天球正东方向。天球上恒星 (α, δ) 在切平面上的投影坐标可表示为 (ξ, η) 。则有：

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{\sin(\alpha - \alpha_0)}{\tan \delta \cdot \sin \delta_0 + \cos \delta_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0)} \\ \eta &= \frac{\tan \delta \cdot \cos \delta_0 - \sin \delta_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0)}{\tan \delta \cdot \sin \delta_0 + \cos \delta_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0)} \end{aligned} \quad (9)$$

构建识别恒星的天球切平面坐标和 CCD 图像坐标之间的转换关系，则有：

$$\begin{aligned} \xi &= -a \cdot x + b \cdot y + c_1 \\ \eta &= b \cdot x + a \cdot y + c_2 \end{aligned} \quad (10)$$

式中： a, b, c_1, c_2 为坐标之间的转换参数； x, y 为识别恒星的 CCD 图像坐标。下面主要考察恒星视位置误差对于天文定位结果的影响，恒星视位置的经纬度的误差值为 $\Delta\alpha_c, \Delta\delta_c$ 。对公式(9)进行化简，可得由于恒星视位置的误差带来的切平面坐标的变化 $\Delta\xi, \Delta\eta$ 为：

$$\begin{aligned} \Delta\eta &= \Delta\delta_c + \frac{\Delta\alpha_c}{2} \sin(2\delta_0)(\alpha_c - \alpha_0) \\ \Delta\xi &= \Delta\alpha_c \cos \delta_0 - \Delta\delta_c \sin \delta_0 (\alpha_c - \alpha_0) - \Delta\alpha_c \sin \delta_0 (\delta_c - \delta_0) \end{aligned} \quad (11)$$

由上节分析可知，一般情况下时间误差对于恒星视位置的影响基本可以忽略，结合公式(9)可知，由恒星视位置的误差导致的切平面坐标的偏移 $\Delta\xi_0$ 与 $\Delta\eta_0$ 主要受到恒星星表的影响。此时识别恒星的切平面坐标 (ξ', η') 可以表示为：

$$\begin{aligned} \eta' &= \eta + \Delta\eta_0 \\ \xi' &= \xi + \Delta\xi_0 \end{aligned} \quad (12)$$

由四参数模型可得：

$$\begin{aligned} \eta' &= -ax + by + (c_1 + \Delta\eta_0) \\ \xi' &= bx + ay + (c_2 + \Delta\xi_0) \end{aligned} \quad (13)$$

表明恒星视位置存在误差时,会带来切平面坐标的偏移,此时测站点位置的切平面坐标将由 (ξ_0, η_0) 变为 $(\xi_0 + \Delta\xi_0, \eta_0 + \Delta\eta_0)$ 。由星表引起的恒星视位置的误差值基本一致,所以测站点坐标的变化量与恒星视位置的变化量基本相同。也就是解算的测站点的天文坐标将分别变化 $\Delta\alpha_e, \Delta\delta_e$ 左右。而在进行天文定位时,采用的是依巴谷星表(Hipparcos)。依巴谷星表中的恒星位置、自行和视差等的精度分别能达到 $0.001''$ 、 $0.001''/y$ 、 $0.001''$ 。由于依巴谷星表的精度较高,所以恒星视位置误差对于定位精度的影响较小。表明在运用数字天顶仪进行定位时,地球自转将直接影响最终的解算结果,而地球自转与时间相关联,基于此提出了时间标定方法。

2 时间标定的方法

通过数字天顶仪对测站点进行天文定位,定位的坐标值为天文经纬度。天文经纬度将直接受到地球自转的影响,也就是格林尼治时间。其中:

$$\begin{aligned} \phi &= \alpha - \text{GAST} \\ \lambda &= \delta \end{aligned} \quad (14)$$

式中: (α, δ) 为通过数字天顶仪解算的测站点位置的赤经与赤纬;GAST为格林尼治视恒星时,通过以上的理论推导可知,当时间的误差值在10 min以内时,测站点位置的赤道坐标经纬度的变化量要小于 $0.001''$,几乎可以忽略不计。那么测站点位置的天文坐标的误差主要来自于格林尼治视恒星时引起的误差,可以通过格林尼治视恒星时的误差对时间进行标定。

对格林尼治恒星时进行计算时首先要计算格林尼治平恒星时 GMST:

$$\begin{aligned} \text{GMST} &= 24\ 110.548\ 4 + 8\ 640\ 184.812T + 0.093\ 1047^2 - \\ &\quad 6.2 \times 10^{-6}T^3 + r \cdot \text{UT1} \\ r &= 1.002\ 737\ 909\ 0 + 5.900\ 6 \times 10^{-11}T - 5.9 \times 10^{-15}T^2 \end{aligned} \quad (15)$$

观测瞬间的格林尼治视恒星时 GAST 为:

$$\begin{aligned} \text{GAST} &= \text{GMST} + \Delta\psi \cos \varepsilon_A + 0.002\ 64'' \sin \Omega + \\ &\quad 0.000\ 063'' \sin(2\Omega) \end{aligned} \quad (16)$$

式中: Ω 为月亮轨道升交点的平黄经; T 为从 J2 000.0 起算的儒略世纪数。

对公式(15)、(16)进行化简可得由于时间变化带

来的测站点位置的天文经度的变化值为:

$$\Delta\phi = \phi_0 - \phi = 15.082\ 13'' \cdot \Delta t \quad (17)$$

表明测站点位置的天文经度的误差值主要来源于格林尼治视恒星时的误差。

在测站点位置天文经纬度坐标 (ϕ_0, λ_0) 已知的情况下,对数字天顶仪进行授初时 t_0 ,通过数字天顶仪进行定位,进行解算得到测站点的天文经纬度坐标 (ϕ, λ) 。当授予的初始时间 t_0 在10 min误差值以内时,可以得出定位误差主要来自于格林尼治视恒星时,此时则有:

$$\Delta t = \frac{(\phi_0 - \phi)}{15.082\ 13} \quad (18)$$

那么有:

$$t = t_0 + \Delta t \quad (19)$$

当授予的初始时间 t_0 与真实值的误差值大于10 min时,恒星视位置的计算误差和格林尼治视恒星时均会对定位结果造成影响,但格林尼治视恒星时仍然是主要的误差来源。此时可采用迭代法,反复进行上述运用直到得到稳定的时间标定值。

通过推导可知时间标定的精度是与已知测站点位置坐标的精度和数字天顶仪的解算精度直接相关的。数字天顶仪的定位精度能够达到 $0.1''$,当给定的测站点位置坐标的精度也满足国家一级标准时 $(\Delta\phi \leq 0.3'', \Delta\lambda \leq 0.3'')$,那么对于时间的标定的精度就在0.025 s。此时标定的时间的精度较高,可以满足绝大多数实际生产对于时间精度的要求。

3 实验数据分析

实验过程中采用的数字天顶仪的视场角大小为 $3^\circ \times 3^\circ$,焦距值为 600 ± 4 mm。CCD 传感器安装在镜筒下方,通过调焦装置与镜筒连接在一起,可随镜筒一起转动。CCD 采用 KAF-16803 全画幅图像传感器。对拍摄的恒星的视位置进行解算,可得到不同时间误差对恒星视位置计算结果的影响结果如表 1、表 2 所示。

从表 1、表 2 的实验数据处理结果可以看出,时间误差会对恒星的视位置坐标计算产生一定影响。具体来说,当时间误差值在10 min以内时,恒星视位置的经度计算误差要小于 $10^{-3}''$ 的数量级,而恒星视位置的纬度计算误差要小于 $10^{-4}''$ 的数量级。

表 1 时间误差对恒星经度计算的影响(10^{-3})

Tab.1 Influence of time error on star longitude

Number	Influence of different time intervals on longitude/min					
	4	6	8	10	12	14
1	0.358	0.665	0.819	1.05	1.13	1.20
2	0.361	0.669	0.823	1.054	1.13	1.21
3	0.374	0.691	0.849	1.09	1.17	1.25
4	0.376	0.694	0.852	1.09	1.17	1.25
5	0.332	0.620	0.764	0.981	1.05	1.12

表 2 时间误差对恒星纬度计算的影响(10^{-4})

Tab.2 Influence of time error on star latitude

Number	Influence of different time intervals on longitude/min					
	4	6	8	10	12	14
1	-0.087	-0.437	-0.787	-1.13	-1.83	-2.18
2	-0.105	-0.463	-0.821	-1.17	-1.89	-2.25
3	-0.104	-0.461	-0.819	-1.17	-1.89	-2.24
4	-0.080	-0.425	-0.771	-1.11	-1.81	-2.15
5	-0.219	-0.635	-1.050	-1.46	-2.29	-2.71

在已知测站点上通过数字天顶仪进行恒星星图的拍摄, 并进行时间的标定, 将标定的时间与 GPS 授时系统给定的时间进行比较。可以得出表 3 所示的数据, 这里只记录处于秒级上的数据。

表 3 时间数据

Tab.3 Time data

Number	Calibration time/s	GPS time/s
1	2.331 2	2.311 2
2	12.531 1	12.519 1
3	8.231 4	8.244 4
4	11.921 3	11.901 3
5	3.145 2	3.153 2
6	7.238 6	7.226 6

对表中数据进行分析可得出图 4 所示的标定时间与 GPS 时间之间的差值曲线。

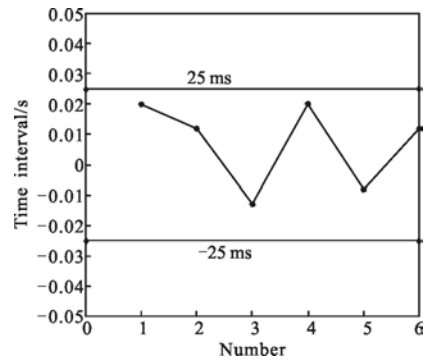


图 4 时间差值

Fig.4 Time D-value

对数据进行分析可知, 采用数字天顶仪对时间进行标定时, 标定的时间精度均能够满足 0.025 s。随着天文定位技术的发展, 这也为实际生产提供了一种时间标定的方法。

4 结论

对采用数字天顶仪进行时间标定的研究较少, 本文理论推到了通过数字天顶仪进行时间标定的方法, 并将数字天顶仪标定的时间与 GPS 授时系统给定的时间进行比较, 验证了该时间标定方法的可行性, 时间标定的精度在 0.025 s 左右, 能够满足绝大多数实践对于时间精度的要求。

参考文献:

- [1] Tian Lili, Guo Jinyun, Han Yanben, et al. Digital zenith telescope prototype of China [J]. *Chin Sci Bull*, 2014, 59 (12): 1094-1099. (in Chinese)
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.
- [2] 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): 115-120.
- [3] Hirt C, Seeber G. High-resolution local gravity field determination at the sub-millimeter level using a digital zenith camera[J]. *Dynamic Planet: IAG Symp*, 2005, 12(3): 316-321.
- [4] Schoebel R, Hein G, Eissfeller B. Renaissance of astrogeodetic levelling using GPS/CCD zenith camera [C]// Proceedings of the IAIN World Congress in Association with the U.S.ION Annual Meeting, 2000, 10(8): 26-28.
- [5] Fang Jiancheng, Ning Xiaolin. The Principle and Application

- of Celestial Navigation [M]. Beijing: Beihang University Press, 2006: 263–267. (in Chinese)
- 房建成, 宁晓琳. 天文导航原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006: 263–267.
- [6] Wang Bo, Tian Lili, Wang Zheng, et al. The image and data processing in digital zenith camera [J]. *Chin Sci Bull*, 2014, 59(12): 1100–1107. (in Chinese)
- 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.
- [7] Zhai Guangqing, Ai Guibin. Digital zenith camera astronomical positioning measurement of project implementation [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2014, 31(3): 232–235. (in Chinese)
- 翟广卿, 艾贵斌. 数字天顶摄影天文定位测量的工程实现[J]. 测绘科学技术学报, 2014, 31(3): 232–235.
- [8] Zhang Zhili, Liu Xianyi, Zhou Zhaofa, et al. Influence of turntable error on axis error in digital zenith camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(11): 3090–3096. (in Chinese)
- 张志利, 刘先一, 周召发, 等. 转台误差对数字天顶仪轴系误差的影响[J]. 光学精密工程, 2015, 23(11): 3090–3096.
- [9] Zhang Chao, Zheng Yong, Li Changhui. GPS application in astronomical measurement [J]. *Global Positioning System*, 2002, 27(1): 33–35. (in Chinese)
- 张超, 郑永, 李长会. GPS 在天文测量中的应用[J]. 全球定位系统, 2002, 27(1): 33–35.
- [10] Tian Ming. Research of GPS disciplined digital timekeeping clock [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- 田鸣. GPS 校准的数字式守时钟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [11] Song Laiyong. Research on theory and algorithm for measuring of vertical deflections based on CCD and GPS [D]. Jinan: Shandong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- 宋来勇. 基于 CCD/GPS 垂线偏差测量理论算法研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2012.
- [12] Wang Wenwu, Wang Hui, Sun Feng. The algorithm continuously used to calculate the apparent place of stars[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 1998, 19(6): 35–40. (in Chinese)
- 王文武, 王辉, 孙枫. 恒星视位置的长期计算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 1998, 19(6): 35–40.
- [13] Meeus J H. *Astronomical Algorithms*[M]. 2nd ed. Richmond: Willmann-Bell, Inc., 1999.