

文章编号 1004-924X(2007)06-0846-06

光电经纬仪测量误差的实时修正

高 策^{1,2}, 乔彦峰¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:分析了光电经纬仪的测量误差来源及其影响,采用了星体角度法分离得出各项系统误差,并在此基础上编程实现了对测量结果的实时修正。使用这种方法修正了某型号光电经纬仪的测量数据,并对修正前后的测量精度进行比较,得出的结果表明,该修正方法可以使光电经纬仪的精度从原来的15"左右提高到5"以内,也就是修正效果明显,达到了提高光电经纬仪测量精度的目的。

关键词:光电经纬仪;测量误差;测量精度;轴系误差

中图分类号:V557.4 **文献标识码:**A

Real-time error-correction method for photoelectrical theodolite

GAO Ce^{1,2}, QIAO Yan-feng¹

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: After analyzing the source and effect of measuring error, all the system errors of a photoelectric theodolite were obtained with means of shooting star, based on which, programs to fulfill the real-time error-correction for the photoelectrical theodolite's measuring result were given. The measuring data from a certain kind of photoelectrical theodolite were corrected using the proposed method. Through comparing the measuring precision before and after error-correction, the results indicate that this correction method can improve photoelectrical theodolite's measuring precision from about 15" to less than 5"; that is to say the correction effect is obvious enough to prove that the method has achieved the expectant purpose.

Key words: photoelectrical theodolite; measuring error; measuring precision; axis error

1 引言

光电经纬仪是应用光学成像原理采集目标信息并获取实况图像资料的光测设备,主要应用于导弹、运载火箭、航天飞船的动力段和弹头的再入

段精密弹道测量,空间目标探测以及无线电外测设备的精度鉴定。随着科技的进步和我军现代化进程的发展,对光电经纬仪的精度要求也越来越高。光学结构和机械结构加工上的偏差,工程材料的性能变化,环境因素的影响都会降低设备的使用精度,使测量结果达不到高精度的要求。通

过数据处理进行误差修正,是提高设备精度的主要方法之一。传统的电影经纬仪,需要对摄影胶片冲洗获取脱靶量信息,因此通常采用事后数据处理的手段,而目前使用的光电经纬仪大量应用了数字 CCD 技术,可以同步输出脱靶量信息,为实时数据处理提供了条件。本文使用了星体角度法分离光电经纬仪的单项测量误差,并用分离出的数据对某型号光电经纬仪的测量数据进行误差修正,通过对人造卫星的跟踪测量验证了该修正方法对提高光电经纬仪测量精度的有效性和稳定性。

2 修正理论与方法研究

光电经纬仪的观测数据与其真值之间总存在偏差,这个偏差称为测量误差。按照误差特性来分可以分为随机误差,系统误差和异常值。随机误差是在一定观测条件下进行多次重复测量或者在时间序列上测量时,存在的一种无规律和不可预测的误差,所以随机误差无法消除,但是它又服从一定的统计特性,可以设法减弱它对测量结果的影响。系统误差是测量数据中保持不变或者按一定规律变化的误差。由于系统误差具有一定的变化规律,数据处理中可以预先修正。修正后的系统误差残差仍占一定的比例,还需要应用统计估计的方法对系统误差的残差进一步估计和校准。比真值明显偏大或偏小,偏差量严重超过精度范围的观测数值称为异常值。异常值是明显不合理的且对观测结果产生不利影响的数据,可以利用数学方法来判别,剔除和替代它。

光电经纬仪的系统误差主要包括:定向差(g)、照准差(c)、零位差(h)、水平差(b)、垂直轴倾斜误差(I)、垂直倾角(α_H)、主镜下沉量(d)以及大气折光量的影响(ΔP)。

这些系统误差的修正公式如下:

$$A = A^* + \Delta a - g - c \sec E^* - b \tan E^* + I \sin(\alpha_H - A^*) \tan E^*$$

$$E = E^* + \Delta e - \Delta p - h - I \cos(\alpha_H - A^*) - d \cos E^*, \tag{1}$$

其中 A, E 为测量值, A^*, E^* 为设备编码器读数, $\Delta a, \Delta e$ 为脱靶量。

$$\Delta P = 60.2 \times \frac{273}{T_0} \frac{P_0}{1013} \tan E^* \quad \text{气压 } P_0 \text{ (Pa), 温度 } T_0 \text{ (K)}$$

经纬仪在运输过程中系统误差通常会发生一定程度的改变,每到一个新的观测位置要进行编码器方位零位与俯仰零位的重新校对,相对应的定向差和零位差也会改变,而经纬仪的使用环境通常不存在常规的检测系统误差设备,如检测架,平行光管等,所以只能依靠星体角度法分离各项测量误差。

通过误差修正公式采用最小二乘法求各单项差(轴系误差)的估计值公式如下:

$$\epsilon = -Q^{-1}L, \tag{2}$$

$$I = \sqrt{x^2 + y^2}, \tag{3}$$

$$\alpha_H = \tan^{-1}\left(\frac{x}{y}\right), \tag{4}$$

表 1 α_H 所在象限判断方法

Tab. 1 Judging method for the α_H quadrant

Sign of x	Sign of y	Quadrant
$x > 0$	$y > 0$	I
	$y < 0$	II
$x < 0$	$y < 0$	III
	$y > 0$	IV

其中

$$\epsilon = \begin{bmatrix} x \\ y \\ b \\ c \\ g \\ h \\ d \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N a_{1i} \Delta A_i + \sum_{i=1}^N b_{1i} \Delta E_i \\ \sum_{i=1}^N a_{2i} \Delta A_i + \sum_{i=1}^N b_{2i} \Delta E_i \\ \sum_{i=1}^N a_{3i} \Delta A_i \\ \sum_{i=1}^N a_{4i} \Delta A_i \\ \sum_{i=1}^N a_{5i} \Delta A_i \\ \sum_{i=1}^N a_{6i} \Delta E_i \\ \sum_{i=1}^N a_{7i} \Delta E_i \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N a_{1i}^2 + \sum_{i=1}^N b_{1i}^2 & \sum_{i=1}^N a_{1i}a_{2i} + \sum_{i=1}^N b_{1i}b_{2i} & \sum_{i=1}^N a_{1i}a_{3i} & \sum_{i=1}^N a_{1i}a_{4i} & \sum_{i=1}^N a_{1i}a_{5i} & \sum_{i=1}^N a_{1i}a_{6i} & \sum_{i=1}^N a_{1i}a_{7i} \\ \sum_{i=1}^N a_{2i}a_{1i} + \sum_{i=1}^N b_{2i}b_{1i} & \sum_{i=1}^N a_{2i}^2 + \sum_{i=1}^N b_{2i}^2 & \sum_{i=1}^N a_{2i}a_{3i} & \sum_{i=1}^N a_{2i}a_{4i} & \sum_{i=1}^N a_{2i}a_{5i} & \sum_{i=1}^N a_{2i}a_{6i} & \sum_{i=1}^N a_{2i}a_{7i} \\ \sum_{i=1}^N a_{3i}a_{1i} & \sum_{i=1}^N a_{3i}a_{2i} & \sum_{i=1}^N a_{3i}^2 & \sum_{i=1}^N a_{3i}a_{4i} & \sum_{i=1}^N a_{3i}a_{5i} & 0 & 0 \\ \sum_{i=1}^N a_{4i}a_{1i} & \sum_{i=1}^N a_{4i}a_{2i} & \sum_{i=1}^N a_{4i}a_{3i} & \sum_{i=1}^N a_{4i}^2 & \sum_{i=1}^N a_{4i}a_{5i} & 0 & 0 \\ \sum_{i=1}^N a_{5i}a_{1i} & \sum_{i=1}^N a_{5i}a_{2i} & \sum_{i=1}^N a_{5i}a_{3i} & \sum_{i=1}^N a_{5i}a_{4i} & \sum_{i=1}^N a_{5i}^2 & 0 & 0 \\ \sum_{i=1}^N b_{6i}b_{1i} & \sum_{i=1}^N b_{6i}b_{2i} & 0 & 0 & 0 & \sum_{i=1}^N b_{6i}^2 & \sum_{i=1}^N b_{6i}b_{7i} \\ \sum_{i=1}^N b_{7i}b_{1i} & \sum_{i=1}^N b_{7i}b_{2i} & 0 & 0 & 0 & \sum_{i=1}^N b_{7i}b_{6i} & \sum_{i=1}^N b_{7i}^2 \end{bmatrix}$$

其中：
 $x = I \sin \alpha_H \quad y = I \cos \alpha_H \quad a_{1i} = \cos A_i \tan E_i$
 $a_{2i} = -\sin A_i \tan E_i \quad a_{3i} = -\tan E_i$
 $a_{4i} = -\sec E_i \quad a_{5i} = -1 \quad a_{6i} = a_{7i} = 0$
 $b_{1i} = -\sin A_i \quad b_{2i} = -\cos A_i \quad b_{3i} = b_{4i} = b_{5i} = 0$
 $b_{6i} = -1 \quad b_{7i} = -\cos E_i$
 $\Delta A_i = A_i - A_i^0 \quad \Delta E_i = E_i - E_i^0$
 $\Delta A_i, \Delta E_i$ 为第 i 颗星测量误差。
 A_i, E_i 为实测值(编码器与脱靶量的合成值)
 A_i^0, E_i^0 为恒星真值或理论值。

通过光电经纬仪获取星体测量数据,选取恒星的原则为共选 36 颗星,方位角在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间均匀分布。俯仰角分布在 $25^\circ \sim 65^\circ$ 之间选星。通过调整滤光片控制所选星体成像亮度,以脱靶量的提取不受恒星亮度影响为准。表 2 为 2006 年 11 月 16 日晚应用某型号光电经纬仪采集的一组恒星数据(部分),为便于记录,统一采用度($^\circ$)为单位($1 \text{ deg} = 3600 \text{ arc sec}$)。每颗星采集 10 帧数据,采样频率为 100 Hz,将采集的数据剔除异常值后,取平均值并记录。

表 2 恒星数据记录格式(单位: $^\circ$)
 Tab. 2 Recording format of star data(Unit: $^\circ$)

SN	Error of azimuth	Error of elevation	Measuring value of azimuth	Measuring value of elevation	Theoretical value of azimuth	Theoretical value of elevation
001	0.004 691	-0.005 515	359.317 62	20.101 867	359.312 929	20.107 382
002	0.004 661	-0.005 463	9.112 37	28.357 436	9.107 709	28.362 899
003	0.004 226	-0.005 479	19.759 286	35.790 91	19.755 06	35.796 389

每天晚间隔一小时进行一次恒星测量,并应用公式(2)、(3)、(4)解算单项差,得到连续四天的解算结果见表 3:

从结果中可以看出设备的定向差,零位差较大,但因为是固定的系统误差,并不会影响修正后的测量结果,所以不予考虑。虽然每次解算出来

表 3 单项差结果(单位:("))
Tab.3 Result of axis error(Unit: ("))

SN	B	c	g	h	I	α_H	d	Correction for azimuth	Correction for elevation
1116	-0.22	-3.18	21.74	-16.85	3.75	78.9	-3.59	19.450	-16.333
1116	0.93	-4.85	22.07	-17.63	3.47	77.5	-3.40	18.433	-17.265
1117	0.45	-4.80	23.15	-18.04	3.35	78.4	-3.47	18.879	-17.766
1117	5.59	-12.87	28.04	-19.28	2.99	70.2	-2.34	17.406	-18.863
1118	0.17	-5.49	23.13	-19.56	2.98	72.4	-1.82	17.431	-18.718
1118	2.45	-8.83	25.86	-17.02	3.24	73.7	-3.95	17.833	-17.322
1119	-5.22	2.05	18.15	-15.96	3.51	63.9	-6.19	18.604	-17.983
1119	3.73	-10.18	27.15	-18.42	3.81	82.2	-2.12	18.540	-16.771

注:温度 274 K,湿度 43%,压强 840 Pa

的单相差都有变化,但总体情况稳定,通过把单项差的测量结果带入公式(1)得出最终方位修正量与俯仰修正量,从表 3 中看出修正量的波动很小,从而保证了修正后精度结果的稳定性。

为验证修正效果,用某型号光电经纬仪对激光星(LASER Satellite)进行了跟踪测量。图 1、图 2 是某型号光电经纬仪对海洋观测卫星 Jason1 的观测数据,选用激光星是因为激光星在国际上提供精确的轨道数据,可以与光电经纬仪的测量

结果进行比对。图 1、2 中的测量误差就是用设备的测量数据与精确轨道数据比较得到的。

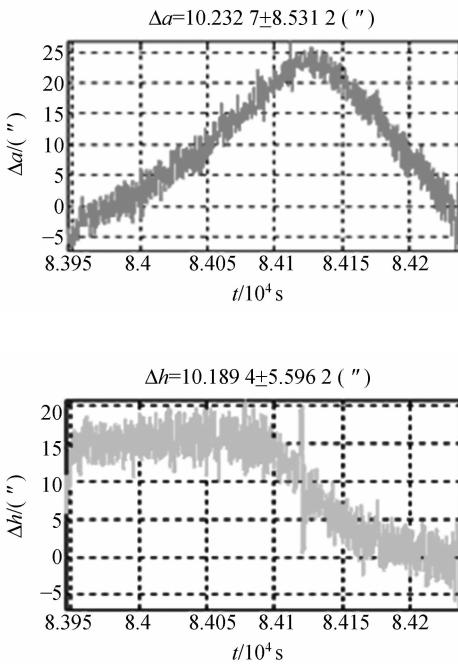


图 1 测量数据误差曲线(修正前)
Fig.1 Error-curve before correction

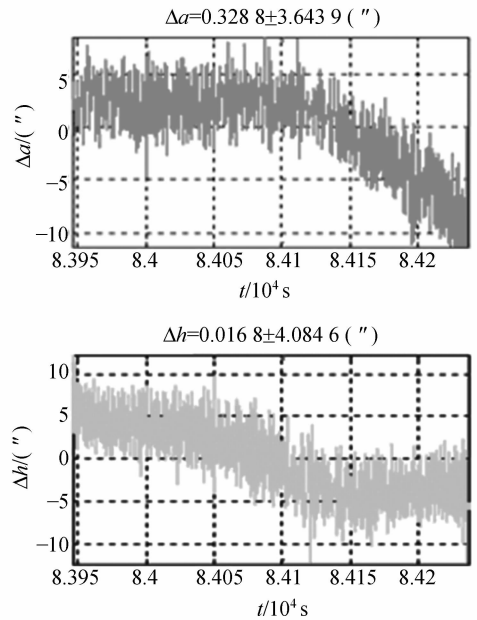


图 2 测量数据误差曲线(修正后)
Fig.2 Error-curve after correction

从图 1、2 中可以看出设备方位的原始数据误差为 $10.232 7 \pm 8.531 2''$,修正后的误差为 $0.328 8 \pm 3.643 9''$;俯仰的原始数据误差为 $10.189 6 \pm 5.596 2''$,修正后的误差为 $0.016 8 \pm 4.084 6''$ 。修正效果是明显的。再通过一段时间连续对三颗激光星的跟踪测量和数据对比(精度结果见表 4、5),验证了该修正方法提高设备精度的可行性。

表 4 方位精度列表(单位:("))

Tab. 4 Precision of azimuth(Unit:("))

Laser satellite name	System error	Random error	Precision
Ajisai	-2.103	2.575 2	3.324 795
Jason 1	-1.010 77	1.897 8	2.150 186
Starlette	0.492 0	2.007 3	2.066 717

表 5 俯仰精度列表(单位:("))

Tab. 5 Precision of elevation(Unit:("))

Laser satellite name	System error	Random error	Precision
Ajisai	-3.596 6	2.493 4	4.376 366
Jason 1	1.557 6	2.029 3	2.558 159
Starlette	-1.132 1	2.285 0	2.550 074

在对光电经纬仪测量信息进行采样时,通过上述方法直接对测量结果进行修正后再记录数据或者进行数据传输,就可以达到实时修正的目的。编程过程中可以应用内存映射文件的方法,提高数据的存储速度,方便了原始数据信息的还原,为数据进行事后分析提供条件。

3 其他影响因素

在对结果进行修正的过程中还发现了其他一些影响测量精度的因素。首先,由于经纬仪是使用时统终端接收 GPS 信号作为整个设备的时间基准,时统终端从接收 GPS 信号,解析时间,到发送时间信息这个过程中,不可避免地会出现延迟,这个延迟对设备精度存在影响。同样测量信息采集系统(编码器)的数据传输过程也存在延迟影响。要保证较高的设备精度就必须对这些延迟进行处理,不过降低延迟比较困难。简单的方法是通过实时修正记录的测量数据将时间与编码器

的采样数据对齐,这样不管链路上有多少延迟,测量数据总是和时间信息一一对应,就不会对精度产生影响。

其次数字 CCD 存在积分时间,也就是曝光时间,这会使脱靶量的输出滞后,需要通过实验确定滞后的具体时间,将脱靶量与当帧的测量数据对齐。

经纬仪的主镜玻璃固定在镜筒内部,由于玻璃的性质,不能承受过多的应力,否则玻璃受挤压变形会影响成像质量,因此无法像金属材质一样完全固定,受重力的影响存在一个下沉量 d ,这个偏移量使经纬仪主镜上的光十字丝与 CCD 的电十字丝不能重合,经纬仪的口径越大,主镜玻璃越重,偏移量的影响就越明显。本文中采用 $d\cos E$ 作为修正量进行修正,但在此基础上还应该根据设备的实际情况进行调整。

在程序的运算过程中应尽量使用较小的测量单位,例如用角秒(")代替度($^{\circ}$)来表示测量数据,尽量避免计算机由于字长有限产生的舍入误差。

4 结 论

通过对激光卫星连续数日的跟踪测量,比较修正前后的精度,可以看出这种修正方法能够使光电经纬仪的测量精度从原来的 $15''$ 左右提高到 $5''$ 范围内,另外还在其他光电经纬仪上也做了相同的实验,得到了同样的满意效果,验证了文中所论述的实时修正方法是行之有效的。这种方法克服了光学系统以及机械系统调整难度大的问题,通过数据处理的方法提高了光电经纬仪的测量精度,缩短了事后数据处理的时间,使测量数据能够尽快地投入使用,为完成更高的光电经纬仪的测量精度指标提供了可能。

参考文献:

- [1] 赵学研,李迎春. 靶场光学测量[M]. 北京:装备指挥技术学院,2001.
ZHAO X Y, LI Y CH. *Optical Measurement in Shooting Range*[M]. Beijing: Institute of Command and Technology, 2001.
- [2] 刘利生. 外弹道测量数据处理[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
LIU L SH. *Tracking Data Processing*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000.
- [3] 李春艳,李怀锋,孙才红. 高精度星敏感器天文标定方法及观测分析[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(4): 558-563.
LI CH Y, LI H F, SUN C H. Astronomical calibration method and observation analysis for high-accuracy star sen-

sor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4):558-563. (in Chinese)

- [4] 刘治华, 白越, 黎海文, 等. 单轴飞轮储能与姿态控制系统误差分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(1):127-132.
LIU ZH H, BAI Y, LI H W, *et al.*. Analysis on errors of single axis energy storage/attitude control system with double flywheels [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 127-132. (in Chinese)
- [5] 贾永年. 计算机在测控网中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
JIA Y N. *The Application of Computer in Tracking Telemetry and Command Networks*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000.
- [6] 颜明, 张军安, 吴佑华. 静电陀螺仪对准误差产生系统伺服随动误差分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5):853-857.
YAN M, ZHANG J A, WU Y H. Analysis of system servo following error caused by alignment error of ESG [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5):853-857. (in Chinese)
- [7] 杨德化, 戚永军. 应用在拼接镜面中的电容位移传感器的结构性误差分析及校正[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2):173-178.
YANG D H, QI Y J. Structural error correction and simulation of capacitive displacement sensor for segmented mirrors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):173-178. (in Chinese)

作者简介:高 策(1981—),男,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学工程专业研究生,主要从事计算机应用及光电测控技术研究。E-mail: gaoc2006@yahoo.com.cn
乔彦峰(1962—),男,研究员,博士生导师,国家 863 项目组专家,中国光学学会会员,中国宇航学会会员,主要从事光电测控技术及相关领域的研究。

(本栏目编辑 严寒)