

基于低仰角红外测量的蒙气差修正方法

门涛^{1,2}, 史金霞², 徐蓉^{1,2}, 刘长海^{1,2}, 温昌礼²

(1. 宇航动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710043; 2. 中国西安卫星测控中心, 陕西 西安 710043)

摘要: 受大气蒙气差的影响, 地基光电望远镜观测得到的星体或飞行器位置 and 实际位置存在偏差; 空间目标的俯仰角越小, 蒙气差越大。为了对空间目标进行较为精确的定位, 需要对光电望远镜进行蒙气差修正。文中在分析光电望远镜原有的大气蒙气差修正计算模型的基础上, 为提高低仰角观测时蒙气差修正精度, 采用回扫任务目标轨道附近恒星进行误差修正的方法对回扫得到的蒙气差修正量曲线进行大量实验总结并进行多项式拟合, 最终得到针对低仰角长波红外观测的蒙气差修正公式。经过多次实验验证, 长波红外系统起跟仰角由 10° 降低至 2° , 目标捕获时间提前 50 s 以上, 可观测飞行器部件分离等关键特征点。实验结果表明文中方法有效降低了低仰角蒙气差修正误差, 提高了长波红外系统的跟踪精度和捕获能力, 具有实际工程应用价值。

关键词: 蒙气差; 低仰角; 光电望远镜; 长波红外

中图分类号: P126.2 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0117004

Correction method of atmospheric refraction based on the low elevation infrared measurement

Men Tao^{1,2}, Shi Jinxia², Xu Rong^{1,2}, Liu Changhai^{1,2}, Wen Changli²

(1. State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi'an 710043, China; 2. Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China)

Abstract: Due to the effect of atmospheric refraction, the space objects (e.g. stars, aircraft, and so on) observed from ground-based optoelectronic telescopes always have positions that different from their actual ones. The lower the elevation of the space objects, the more obvious the effect of atmospheric refraction becomes, and hence the larger position difference will be deduced. To position the space objects with high accuracy, it is necessary to correct the effect of atmospheric refraction. In order to improve the correction accuracy of atmospheric refraction effect during the observation of space objects with low elevations, the correction curves of atmospheric refraction effect were obtained by retrace-scanning fixed stars in the neighborhood of the orbit of space objects, based on the original model for correcting and computing the effect of atmospheric refraction. At last, through large amount of experimental demonstration and polynomial curve fitting, a new expression was proposed for the correction of atmospheric refraction effect with low elevation observation. The computation results from several experiments show that, during the observation of mission space objects with infrared long-wavelength system, the initial elevation reduced to 2° from 10° , the capture time for the mission space objects with infrared long-wavelength brought forward

收稿日期: 2015-05-05; 修订日期: 2015-06-03

基金项目: 国家青年自然科学基金(61308083, 61307038)

作者简介: 门涛(1982-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事为光学测量技术方面的研究。Email: mentao1330@163.com

more than 50 s, and the critical characteristic points (e. g. assembly separation) of the mission space objects could be observed. The experimental results indicates that, our proposed method can be used to reduce effectively correction error of atmospheric refraction effect with low elevation observation, to improve the capability and accuracy in the process of capturing and tracking the mission space objects with infrared long-wavelength systems, and has great worth in actual engineering and practical application area.

Key words: atmospheric refraction; low elevation; optoelectronic telescope; infrared long-wavelength

0 引言

在利用地基光电望远镜观测星体时,观测者看到的星体方向和星的真实方向不同,这种差异是由于大气折射(即行星的蒙气)造成的,这个方向差称为蒙气差。观测所得空间目标的高度减去蒙气差,才是目标的真实高度。目标的俯仰角越小,蒙气差越大;温度、气压有所改变,蒙气差大小也就不同^[1-3]。为了对空间目标进行较为精确的定位,一般需要进行对观测设备进行蒙气差修正。

随着航天技术的发展,光电望远镜在空间目标探测与识别、卫星编目定轨、靶场任务实况记录等航天测量任务中发挥着重要的作用,光学设备与雷达、无线电测量设备相比具有直观性强的优点。由于红外测量系统既可以探测目标自身的辐射强度,又可以探测目标反射太阳光的辐射强度,因此在天气许可的条件下系统都在夜晚和白天能够工作,从而使得光电望远镜具有全天时的探测能力,目前的光电望远镜已逐渐引入红外测量系统^[4-5]。尤其是在近地低空飞行器跟踪过程中,观测时间短、低仰角跟踪弧段长,有效地利用观测图像记录飞行过程非常重要,因此必须对低仰角情况下红外测量系统的蒙气差进行修正,提高地基光电望远镜捕获能力和观测精度。

近年来,国内外学者对蒙气差修正模型做了大量的研究工作。Filippenko^[6]分析了蒙气差修正模型及其对光谱测量精度的影响,给出了望远镜观测仰角与蒙气差之间的关系式。Ronald^[7]基于可见光观测数据提出了一种计算快速、相对简化的大气蒙气差修正模型,该方法对观测仰角 25° 以上目标精度可低至 0.15",但对低仰角目标的修正精度不够理想。Philip^[8]对比分析了已有的蒙气差修正公式,并引入了大气湿度等参数的影响,提出了普适气象条件下的修正模型,其适用范围从可见光扩展到了近红外

波段。Kruszewski 等^[9]研究了高密度背景恒星观测条件下蒙气差对望远镜光度测量的影响,提出了一种相对简单的修正方法。Dagang Jiang 等^[10]针对低轨卫星激光通信领域的蒙气差和光束漂移问题开展了研究,并进行了仿真计算。段成林等^[11]提出了一种基于光电传播几何路径迭代的对流层折射修正新方法,解决了修正精度和实时性不能兼顾的问题。张宏艺等^[12]提出了采用三弯矩方程计算任意高度大气折射系数和高斯积分计算俯仰角修正值,提高了数据处理精度。韩先平^[13]、谭碧涛等^[14]基于可见光波段的观测提出了新的蒙气差修正方法,并进行了实验研究。杨晓东等^[15]对基于天体红外测量的蒙气差计算方法进行了研究,考虑了大气对红外波段的折射影响,但该方法主要针对天体观测,对大气层内飞行的低仰角目标红外测量蒙气差修正未进行分析与实验。

从研究现状来看,国内学者对基于电磁波和可见光的大气折射修正模型进行了重点研究,对红外波段的蒙气差修正方法只是针对天体观测任务。而文中针对长波红外系统参加大气层内低仰角观测任务时的蒙气差修正模型,提出了回扫任务目标轨道附近恒星进行误差修正的新方法,提高了长波红外光学系统的捕获能力,具有实际工程应用价值。

1 光电望远镜蒙气差修正简化模型

蒙气差同时受大气温度、大气湿度、大气压力、大气湍流以及观测仰角等诸多因素的影响,由于大气湿度、大气湍流对蒙气差的影响相对于其他因素要小得多,因此目前国内模型中只是考虑了大气温度、大气压力以及观测仰角等 3 种影响因素^[3]。

目前在对地基光电望远镜观测数据进行脱靶量修正时,俯仰角数据也参与计算,俯仰角数据误差也会对方位角产生一定的影响,但经三角函数转换后影响不明显,因此光电望远镜测星数据的蒙气差修

正方法比较粗略。光电望远镜使用的蒙气差修正简化模型为：

$$R = \frac{273P}{1013.2472(273+t)} R_0 \quad (1)$$

式中： P 为大气气压，hPa； t 为大气温度， $^{\circ}\text{C}$ ； R_0 为蒙气差常数(即气温为 0°C 、气压为 1013.2472 hPa 时的蒙气差)，(″)。可根据中国天文年历提供的蒙气差表进行插值得到^[6]，也可根据近似公式计算而得。

而考虑到工程实际应用时的实时性需要，一般使用近似计算公式。根据经验数据，在纬度 45° 处海平面上，气温 0°C ，气压 760 mm 时的蒙气差为：

$$R_0 = 60.04 / \tan E \quad (2)$$

式中： E 为观测目标的俯仰角。

气温的变差系数：

$$A = \frac{-0.00383T}{1+0.00367T} \quad (3)$$

气压的变差系数：

$$B = \frac{H}{760} - 1 \quad (4)$$

式中： T 为空气温度， K ； H 为以毫米计的实时气压。

则在任一温度、气压下的空间目标蒙气差为：

$$R = (1+A+B)R_0 = \frac{60.04}{\tan E} \cdot \left(\frac{H}{760} - \frac{0.00383T}{1+0.00367T} \right) \quad (5)$$

目前采用蒙气差理论公式主要采用三角函数的近似公式。为了应用方便，将近似公式分解成标准大气状态下的平均蒙气差和非标准大气状态的补充修正两个公式。平均蒙气差公式的特点是当观测仰角较高时公式误差较小，而当观测仰角较低时误差较大。

为了检验该公式在低仰角下的修正精度，现将各俯仰角下的理论蒙气差列表，如表 1 所示。

表 1 理论公式计算的蒙气差($T=393\text{ K}$, $H=79.135\text{ kPa}$)

Tab.1 Atmospheric refraction error calculated by approximate formula($T=393\text{ K}$, $H=79.135\text{ kPa}$)

Elevation/($^{\circ}$)	Refraction/(″)	Elevation/($^{\circ}$)	Refraction/(″)
4	64.279 3	12	21.146 6
5	51.376 3	13	19.469 3
6	42.765 6	14	18.027 8
7	36.607 6	15	16.775
8	31.982 5	16	15.675 4
9	28.379 3	17	14.702
10	25.491 5	18	13.833 7
11	23.124	19	13.054

由表 1 可见，在低仰角时理论公式计算的蒙气差严重失真。

2 低仰角长波红外测量的蒙气差修正方法

首先，文中针对长波红外系统进行蒙气差修正，因此只需考虑特定的长波红外光波的折射率。根据国际大地测量与地球物理联合会 1963 年伯克利会议，光波的群折射率与波长有关，为：

$$n_g = 0.965 + \frac{0.0164}{\lambda^2} + \frac{0.00028}{\lambda^4} \quad (6)$$

对公式(5)乘以长波红外波段的改正量，即可对蒙气差公式进行长波红外波段的误差修正。

其次，为消除低仰角蒙气差修正精度不够或望远镜轴系等误差的影响，文中采用在每次跟踪任务完成后，通过回扫此次任务目标航迹附近的恒星以进行位置误差修正的方法。具体步骤是：望远镜操控系统中预先建立一个适当规模的恒星星库，星库中的恒星数量约数百颗，保证任一时刻全天区有 20~40 颗在俯仰及方位比较均匀分布的恒星；亮度与系统的探测能力相匹配，不太暗，不能接近系统探测能力极限；也不能太亮，在相机调光范围内不饱和。在跟踪任务目标的过程中，望远镜操控系统根据未经校正的原始测量数据，激活校正恒星星库中对应位置的恒星，按照一定的角分布密度挑选恒星，按照与目标运动方向相反的顺序，生成回扫作业方案，星库可给出每个恒星在预定时刻精确的理论位置^[7]。望远镜按照凝视工作的方式，逐一在预定的时刻瞄准校正恒星，读取恒星的实际测量位置，将该测量数据与对应恒星理论位置数据求差，经过平滑处理，即可给出本次任务目标航迹各个位置上的修正量。将该修正量与先期实际测量的目标数据对应、插值，可对目标测量数据进行逐帧处理，以获得高精度的目标测量数据。

蒙气差只与俯仰角有关，与方位无关，故下列实验数据仅以俯仰方向为例。图 1 是某飞行实验的飞行器轨迹曲线，起飞后 310~390 s 时段内，光电望远镜观测仰角在 5° ~ 20° 之间，观测仰角较低；图 2 是望远镜观测的经过静态指向误差修正的飞行器测量数据与理论数据相比较的残差序列；图 3 是回扫恒星轨迹得到的修正量补偿到望远镜测量数据并与飞行器理论曲线比较得到的残差序列；图 4 是图 3 与图 2

相减并滤波得到的平滑曲线，即拟合的蒙气差修正量曲线。

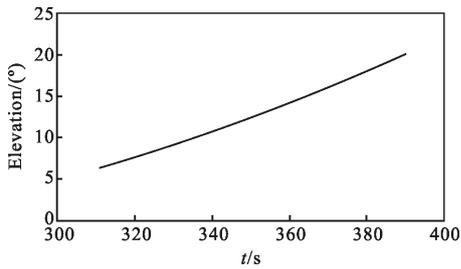


图 1 某飞行器理论轨迹

Fig.1 Theory trace of an aircraft

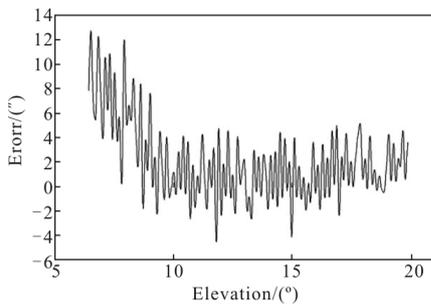


图 2 随俯仰角变化的残差曲线

Fig.2 Residual curve varying with elevation

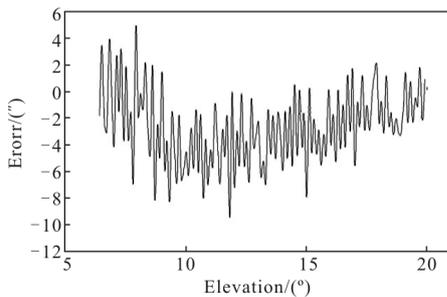


图 3 回扫作业后随俯仰角变化的残差数据

Fig.3 Residual curve varying with elevation after retrace scanning

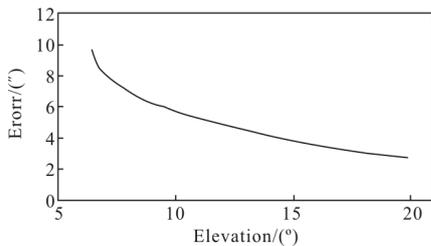


图 4 拟合的蒙气差修正量曲线

Fig.4 Fitting correction curve of atmospheric refraction

对图 4 的蒙气差曲线结合多次飞行任务进行实验总结,并进行多项式拟合,可得到最终的蒙气差修正公式如下:

$$R_g = R_0 \left(1 + \frac{80.343}{273.13+t} \cdot n_g \cdot P \right) \quad (7)$$

其中, R_0 修正为:

$$R_0 = \frac{\cos E}{\sin E + \sqrt{\sin^2 E + 0.0025284}} \quad (8)$$

式中: n_g 为长波红外波段的群折射率(见公式(6)); P 为大气气压, hPa; t 为大气温度, °C。

修正后的蒙气差如表 2 所示, 对比表 1 中的数据可知采用公式(7)修正后蒙气差显著降低, 15°观测仰角时由 16.775"降低至 3.824", 10°观测仰角时由 25.4915"降低至 5.712"; 蒙气差随仰角的增大而减小, 蒙气差变化率随仰角的增加也逐渐减小。结果表明, 文中采用的修正方法在低仰角弧段(20°以下)可明显减小跟踪过程中的蒙气差, 修正效果明显优于原有的理论模型; 较高观测仰角时原方法的误差较小, 修正方法的精度与原有模型相当。因此, 文中提出的修正方法可应用于对低仰角目标的跟踪测量中。

表 2 修正后的蒙气差($T=393\text{ K}, H=79.135\text{ kPa}$)

Tab.2 Atmospheric refraction error calculated by correction formula($T=393\text{ K}, H=79.135\text{ kPa}$)

Elevation/(°)	Refraction/(")	Elevation/(°)	Refraction/(")
4	20.857	12	4.897
5	15.349	13	4.511
6	10.984	14	4.106
7	8.124	15	3.824
8	7.011	16	3.515
9	6.203	17	3.247
10	5.712	18	3.036
11	5.285	19	2.867

文中采用的修正方法有效降低了长波红外波段低仰角测量时的蒙气差,但也存在一定误差,分析主要原因如下:

(1) 文中采用回扫任务目标航迹附近的恒星以进行位置误差修正的方法, 但光电望远镜经恒星标校后存在静态指向误差^[8], 一组恒星标校主要参数如下: 视轴照准差 16.37"、定向差 -16.79"、视轴扰动 2.16"、零位差 -1.94", 最终修正后的方位指向精度 3.86"、俯仰指向精度 2.21", 此外还有光电轴角编码器误差 1.4"等。望远镜存在的系统误差会影响蒙气差修正结果。

(2) 现有修正模型中只考虑了大气压力和大气

温度的影响,未引入大气湿度、大气湍流、固体颗粒等参数的影响,也会影响修正结果的准确性。

(3) 同时,工程应用中若采集的气象参数、时间码等数据不够精确,也对蒙气差修正精度产生影响。

3 实验验证

采用公式(7)中的蒙气差修正公式于 2013~2014 年度针对低仰角飞行器成功进行了 11 次观测实验(受天气原因影响,部分实验光学设备未完成跟踪),具体结果如表 3 所示。采用文中提出的蒙气差修正公式,光电望远镜最低于 2.01°即飞行 237 s 后发现目标;随着捕获目标时间的提前,设备可观测到飞行过程中的关键特征点。部分对飞机的实验观测结果如图 5 所示,图中可以看出观测仰角分别为 2.8°、3.9°。

表 3 蒙气差修正后的目标捕获仰角

Tab.3 Elevation of discovering target after correction of atmospheric refraction

Experiment	Elevation/(°)	Experiment	Elevation/(°)
1	6.62	7	23.1
2	11.1	8	7.01
3	9.53	9	3.79
4	5.54	10	2.39
5	3.35	11	2.01
6	4.82	-	-

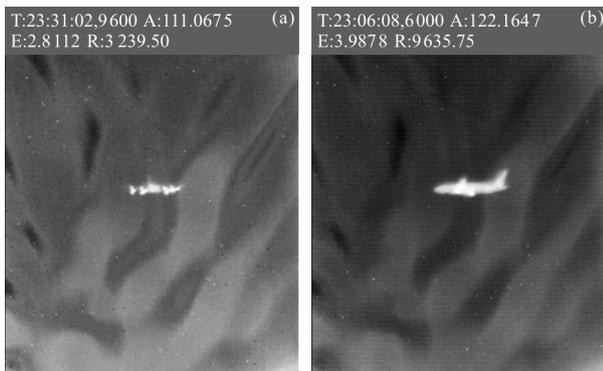


图 5 蒙气差修正后长波红外系统观测图像

Fig.5 Observation image by long-wavelength infrared system after correction of atmospheric refraction

实验结果表明:文中提出的基于低仰角长波红外测量的蒙气差修正方法可显著降低设备的捕获目标仰角,并拓展长波红外系统跟踪弧段,对部分任务

可观测到飞行过程中的器件分离等关键特征点,提高了设备对低仰角飞行任务的跟踪能力,并有助于对飞行事件的事后判读,该方法具备工程应用和推广价值。

4 结论

文中在分析设备原有的大气蒙气差修正计算模型的基础上,为提高低仰角观测时大气折射修正精度,提出了回扫任务目标轨道附近恒星进行误差修正的方法,对回扫得到的蒙气差修正量曲线进行大量实验总结并进行多项式拟合,最终得到针对低仰角长波红外观测的蒙气差修正公式。经过多次实验任务验证,长波红外系统起跟仰角由 10°降低至 2°,目标捕获时间提前 50 s 以上,可观测器件分离等关键特征点。结果表明文中方法有效降低了低仰角蒙气差修正误差,提高了长波红外系统的跟踪精度和捕获能力,具有实际工程应用价值。

参考文献:

[1] Wang Haiyong, Lin Haoyu, Zhou Wenrui. Technology of atmospheric refraction compensation in starlight observation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1101002. (in Chinese)
王海涌, 林浩宇, 周文睿. 星光观测蒙气差补偿技术[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1101002.

[2] Wei Heli, Chen Xiuhong, Zhan Jie, et al. Atmospheric correction in the measurement of infrared radiance [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(6): 472-478. (in Chinese)
魏合理, 陈秀红, 詹杰, 等. 红外辐射测量的大气修正[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(6): 472-478.

[3] Mao Yongxing, Zhang Tongshuang, Zhu Weikang, et al. A real-time atmospheric refraction correction method for measurement data of ship-borne star sensors [J]. *Journal of Spacecraft TTC Technology*, 2012, 31(3): 50-53. (in Chinese)
茅永兴, 张同双, 朱伟康, 等. 船载星敏感器测星数据蒙气差实时修正方法[J]. 飞行器测控学报, 2012, 31(3): 50-53.

[4] Men Tao, Xu Rong, Liu Changhai, et al. Dark target identification algorithm and detecting ability of optoelectronic telescopes[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(3):587-592. (in Chinese)
门涛, 徐蓉, 刘长海, 等. 光电望远镜暗弱目标识别算法及探测能力[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(3): 587-592.

[5] Liu Changhai, Yang Yue, Guo Shiping, et al. Modal

- wavefront sensor employing stratified computer-generated holographic elements [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(11): 1265–1271.
- [6] Filippenko A V. The importance of atmospheric differential refraction in spectrophotometry [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1982, 94(8): 715–721.
- [7] Ronald C S. An accurate method for computing atmospheric refraction [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1996, 108(11): 1051–1058.
- [8] Philip E C. Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(9): 1566–1573.
- [9] Kruszewski A, Semeniuk I. A simple method of correcting magnitudes for the errors introduced by atmospheric refraction[J]. *Acta Astronomica*, 2003, 53(3): 241–248.
- [10] Jiang Dagang, Zhang Peng, Deng Ke, et al. The atmospheric refraction and beam wander influence on the acquisition of LEO–Ground optical communication link [J]. *Optik*, 2014, 125(9): 3986–3990.
- [11] Duan Chenglin, Ma Chuanling, Cao Jianfeng, et al. A new method on tropospheric refraction correction at low elevation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1195–1199. (in Chinese)
段成林, 马传令, 曹建峰, 等. 一种低仰角对流层折射修正的新方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1195–1199.
- [12] Zhang Hongyi, Liu Jingmin. Error-correction method of atmospheric refraction on elevation angle [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2008, 23(4): 25–27. (in Chinese)
张宏艺, 刘敬民. 低仰角大气折射误差修正方法 [J]. 光电技术应用, 2008, 23(4): 25–27.
- [13] Han Xianping, Zhou Hui. Study of accuracy adjust method of atmospheric refraction of low elevation [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2008, 23(1): 24–26. (in Chinese)
韩先平, 周慧. 低仰角大气折射的高精度修正方法研究 [J]. 光电技术应用, 2008, 23(1): 24–26.
- [14] Tan Bitao, Jing Chunyuan, Zhu Qihai, et al. New method of precise correction for atmosphere refraction in low elevation [J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(6): 563–566. (in Chinese)
谭碧涛, 景春元, 朱启海, 等. 低仰角蒙气差修正的新方法 [J]. 应用光学, 2006, 27(6): 563–566.
- [15] Yang Xiaodong, Jiang Lu. Calculation of the refraction based on the measurement of infrared ray from celestial body [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(2): 121–124. (in Chinese)
杨晓东, 姜璐. 基于天体红外测量的蒙气差计算方法 [J]. 红外与激光工程, 2002, 31(2): 121–124.
- [16] Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Science. The Chinese Astronomical Calendar for 2011 Year [M]. Beijing: Science Press, 2010: 594–595. (in Chinese)
中国科学院紫金山天文台. 2011 年中国天文年历 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 594–595.
- [17] Men Tao, Yang Yue, Xu Rong, et al. Resolution of incremental photoelectric angular encoder with reference mark excursion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 497–501. (in Chinese)
门涛, 杨悦, 徐蓉, 等. 增量式光电轴角编码器零点漂移问题研究 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 497–501.
- [18] Peng Chen, Chen Qian, Qian Weixian. Method of correcting the static error of infrared search and track system by using photoelectric theodolite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2791–2794. (in Chinese)
彭晨, 陈钱, 钱惟贤. 利用光电经纬仪修正地基红外搜索跟踪系统静态误差的方法 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2791–2794.