

激光与光电子学进展

大口径光电设备温度补偿模型研究

梁倩^{1,2,3**}, 张涯辉^{1,2,3*}

¹中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 大口径光电设备作为多领域探测的主要工具, 具有探测能力强、细节分辨清晰等特点。但受光学原理的限制, 大口径光电设备对高精度调焦的依赖度较高, 而温度是造成图像质量降低的重要因素之一。为补偿温度对大口径光电设备的影响, 分析了系统等效焦距与温度之间的理论关系, 仿真分析了传统温度补偿模型的局限性。为实现温度与焦距的精确建模, 引入一阶傅里叶函数模型, 实现了温度与焦距之间的精确拟合。最后通过对比传统线性模型与一阶傅里叶函数模型在工程中的适用情况, 表明一阶傅里叶函数补偿模型的准确性远高于线性补偿模型。同时所提模型关系简单, 实现容易, 可在大口径光电设备设计、检测中使用, 也可用于温度调焦。

关键词 测量; 温度补偿; 线性模型; 傅里叶函数模型; 误差分析

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1912003

Temperature Compensation Model for Large-Aperture Optoelectronic Devices

Liang Qian^{1,2,3**}, Zhang Yahui^{1,2,3*}

¹Key Laboratory of Beam Control, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu Sichuan 610209, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract As the main detection tool in multi-field, large-aperture optoelectronic devices are characterized by strong detection capability and high resolution. However, limited by the optical principle, such devices show a strong dependence on precise focusing. Temperature focusing is a key operation for maintaining image quality. First, this study analyzes the theoretical relation between the temperature and the equivalent focal length of the system. Then, the shortcomings of the traditional compensation model are obtained via simulations. To accurately model the relation between the temperature and the focal length, the first-order Fourier function model is introduced for compensating the change in the focal length owing to the temperature. Finally, the linear compensation model and the first-order Fourier function model are compared based on application data. Results show that the fitting accuracy of temperature and focal length for first-order Fourier function model is higher than that for the linear compensation model. The first-order Fourier function model is simple and easy to implement. Moreover, it can be used for test and design of large-aperture optoelectronic devices and for temperature focusing.

Key words measurement; temperature compensation; linear model; Fourier function model; error analysis

OCIS codes 120.6780; 070.2465; 130.4310; 200.4560

收稿日期: 2020-12-27; 修回日期: 2021-02-07; 录用日期: 2021-03-02

通信作者: *zharvey@ioe.ac.cn; **liangqian18@mails.ucas.ac.cn

1 引言

大口径光电设备因其具备通光量大、探测能力强、成像分辨率高等优势,在天文、军事、测量以及目标监测等领域有着重要的应用。但受光学原理、结构设计及材料的影响,大口径光电设备对温度较为敏感。换言之,光学器件以及结构件发生热胀冷缩,会对系统产生较大影响,最终导致成像质量大幅降低。而天基或者野外等大温差的工作环境,使得大口径光电设备的使用更加受限。工程上通常采用两种方法进行处理:第一种方法是对光电设备进行无热化设计^[1-10],这增加了系统成本以及设计加工的复杂度;第二种方法是对系统进行标定处理,通过工作环境的辨识,补偿温度带来的焦距变化。相对而言,第二种方法成本低,且较为灵活。因而在光电设备越来越自主化工作的背景下,建立高精度的温度调焦补偿模型,成为当前以及今后研究的重点。本文分析了温度与光电设备焦距的理论关系,建立了温度与焦距的关系模型;仿真对比了线性模型与新模型的调焦结果;通过实验验证了新模型的精度,并对处理结果进行了分析。结果表明本文提出的模型在温度调焦方面效果较优。

2 理论分析

2.1 基本理论说明

温度变化对光学系统产生影响的实质是:温度的改变,造成光学系统内透镜折射率、反射镜曲率半径改变,同时造成各个镜片间的空气间隔发生改变,进而引起系统焦距改变。其系统的变化可以表示为

$$n_{\text{rel}}(\lambda, T) = n_{\text{rel}}(\lambda, T_0) + \frac{dn_{\text{rel}}(\lambda, T)}{dT} \Delta T, \quad (1)$$

$$\Delta R = \frac{R\alpha\Delta T}{h}, \quad (2)$$

$$\Delta L = L\alpha\Delta T, \quad (3)$$

式中: T_0 指参考温度; $n_{\text{rel}}(\lambda, T_0)$ 指在参考温度下光学材料的相对折射率; λ 指相应色光的波长, $\frac{dn_{\text{rel}}(\lambda, T)}{dT}$ 指光学材料相对折射率温度系数; ΔT 指温度变化量; ΔR 指曲率半径变化量; R 指曲率半径, $\Delta\alpha$ 指线胀系数 α 沿光学元件厚度 h 方向的变化量; ΔL 指主次镜光学间隔 L 变化量。

以上分析可知,温度是光学系统各项因素变

化的一个线性因子。因而将系统等效为单一的透镜,则温度与系统的焦距变化情况可表示为^[11]

$$\Delta f_T = f \cdot \left[a_g + \frac{n_g \cdot p}{(n_a - 1) \cdot p_0} \cdot \eta_a - \frac{n_g}{n_g - 1} \right] \cdot \Delta T, \quad (4)$$

式中: f 为透镜焦距; a_g 为玻璃线膨胀系数; n_g 和 n_a 分别为玻璃折射率和空气折射率; η_a 和 n_g 为标准大气压下空气折射率随温度变化的系数和玻璃折射率随温度变化的系数; p 和 p_0 分别为当前气压和标准大气压; Δf_T 为温度为 T 时的透镜焦距变化量。

2.2 线性补偿模型

依据(4)式可知,在一定的温度范围内,光学材料、结构材料都为稳定的数值,因而光学系统的等效焦距变化量与温度的变化量呈线性关系。线性补偿模型即是依据这个原理建立的调焦补偿模型。图1为某大口径光电设备仿真得到的可见光短焦、可见光长焦、短波红外、中波红外以及长波红外5种不同波段光谱的温度与焦距变化量关系图。从图中可以看出,随着温度的升高,各光谱探测系统均呈现出不同斜率的线性变化趋势。

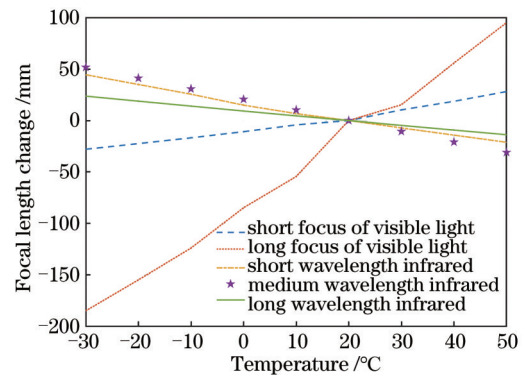


图1 不同波段光谱随温度变化的焦距改变量仿真结果
Fig. 1 Simulation results of focal length changes of different spectral bands with temperature

这种变化趋势可表示为

$$f(T) = p_1 \cdot T + p_2, \quad (5)$$

式中: $f(T)$ 为温度 T 时的焦距值; p_1 为焦距变化量的斜率; p_2 为温度为 0°C 时系统的等效焦距。线性补偿模型简单有效,在一定的温度范围内补偿效果明显。(5)式就是将不同波段探测系统的焦距与温度进行了线性建模。

2.3 傅里叶补偿模型

由于大口径光电设备光路较长,光学设计和结构设计复杂;同时,光学材料或者结构材料存在非

线性因素:故线性温度补偿模型存在一定的局限性,尤其是在宽温度范围内,特定波长(如长波)光学系统的非线性影响尤为明显。主要表现为以下两种情况:

1) 线性段较短,在低温或者高温时非线性特性

明显;

2) 在整个温度范围内,呈现非线性特性。

不同光学系统的非线性温度补偿模型表现形式不同。图 2 是几种较为常见的温度与焦距间的关系图(实际情况不仅限于以下 6 种)。

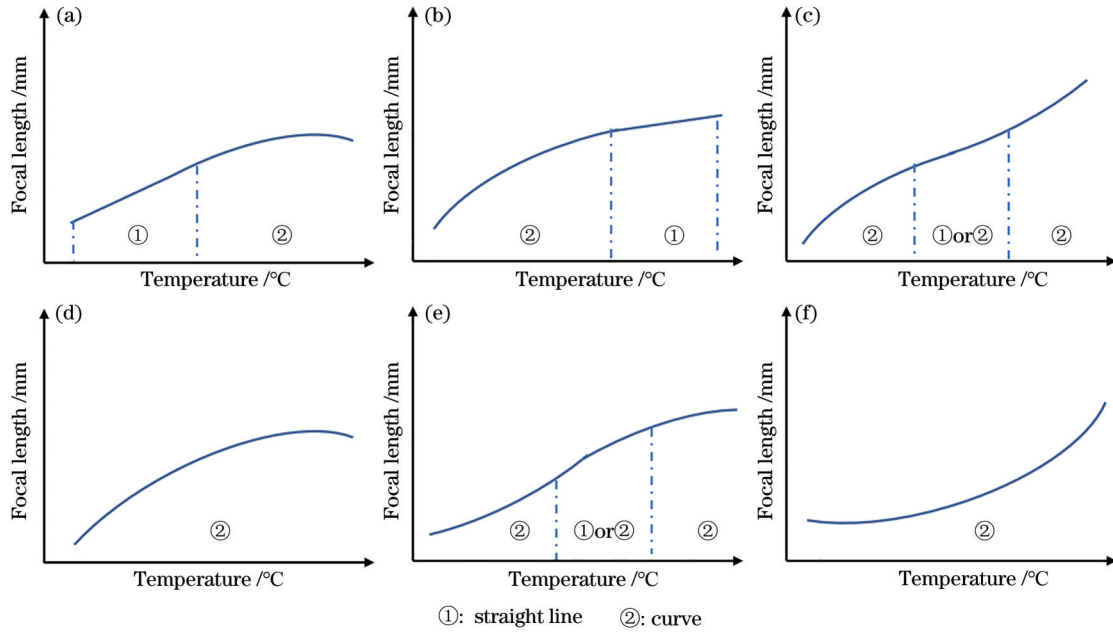


图 2 温度与焦距关系图。(a)线性-凸曲线模型;(b)凸曲线-线性模型;(c)凸曲线-凹曲线(或直线)-凹曲线模型;(d)凸曲线模型;(e)凹曲线-凸曲线(或直线)-凸曲线模型;(f)凹曲线模型

Fig. 2 Relationship between temperature and focal length. (a) Linear-convex curve model; (b) convex curve-linear model; (c) convex curve-concave curve(or linear)-concave curve model; (d) convex curve model; (e) concave curve-convex curve(or linear)-convex curve model; (f) concave curve model

为了在一些精细化的应用中找到一种合适的模型,本课题组利用外场实际环境数据进行研究。在多次标定“无限远”齐焦的位置后,利用云南天文台的某 1 m 望远镜卡焦摄谱仪采集焦距变化量随温度变化的数据^[12],并对其进行仿真分析。通过为期五年的平均重复焦距,得到了如图 3 所示的数据整合关系图。从图中可以看出,实际工程中温度与焦距变化量之间的关系并非线性。

基于以上统计结果,引入基于傅里叶函数的温度-焦距关系模型。傅里叶函数^[13]的三角形式可表示为

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(n\omega x) + b_n \cdot \sin(n\omega x)], \quad (6)$$

式中: a_0 为常数项; ω 为角频率; n 为阶数; a_n 和 b_n 分别表示随阶数 n 改变的系数; x 为自变量; $f(x)$ 为因变量。运用傅里叶函数表示温度与焦距的关系,可将傅里叶函数中的 $f(x)$ 设为受温度影响的焦距表达式

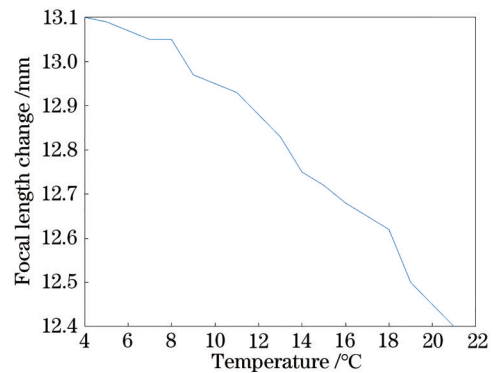


图 3 1 m 望远镜卡焦摄谱仪测光时焦距变化量随温度变化规律

Fig. 3 Relationship between the temperature and the change of the Cassegrain focus for the 1 m telescope

$$f(T) = f_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(n\omega T) + b_n \cdot \sin(n\omega T)], \quad (7)$$

式中: a_0 设为参考温度下的焦距值 f_0 , ω 设为以一组温度数据为周期的角频率,自变量 x 设为摄氏温度,

a_n 和 b_n 仍表示随阶数 n 改变的系数。

3 模型对比与分析

为了对比线性补偿模型与傅里叶函数补偿模型的优劣,利用两模型对云南天文台采集到的数据进行仿真分析,结果如图 4 和图 5 所示。图 4 为线性模型拟合的结果,图 5 为傅里叶函数模型拟合的结果,从上向下分别为 1 阶、2 阶、3 阶的傅里叶函数补偿模型的拟合结果。其中, x 轴参数为温度,

单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$); y 轴为焦距变化量,单位为毫米(mm)。

仿真结果得出:线性补偿模型的拟合效果最差;三阶傅里叶补偿模型的仿真结果最好,但是存在过拟合现象,因而无法将此模型普适化;二阶傅里叶补偿模型与一阶傅里叶补偿模型拟合程度接近,但一阶补偿模型表达式较简单,而且已经可以较准确地表明温度与焦距变化量间的关系,故本研究将此模型作为最终应用模型。

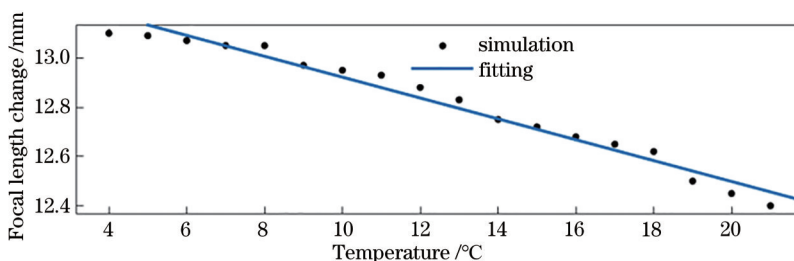


图 4 线性补偿模型仿真结果

Fig. 4 Simulation result of linear compensation model

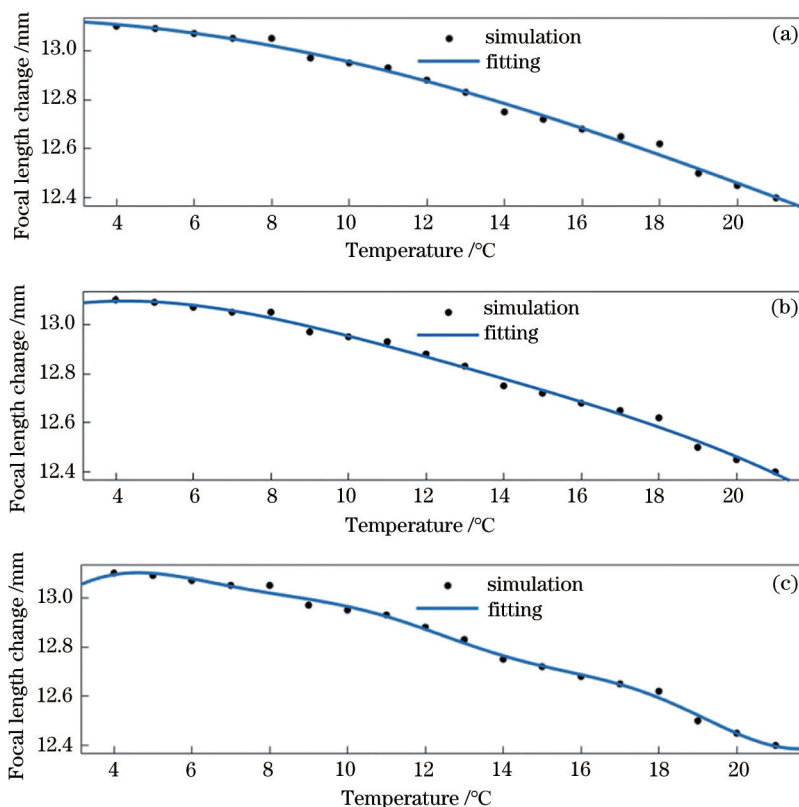


图 5 傅里叶补偿模型仿真结果。(a)一阶傅里叶补偿模型仿真结果;(b)二阶傅里叶补偿模型仿真结果;(c)三阶傅里叶补偿模型仿真结果

Fig. 5 Simulation results of Fourier compensation model. (a) Simulation result of the first-order Fourier compensation model; (b) simulation result of the second-order Fourier compensation model; (c) simulation result of the third-order Fourier compensation model

4 实验验证

为了验证一阶傅里叶补偿模型在不同光学系统中的适用性,实验选用某一套米级大口径光电设备光学系统进行研究。设备启动后定标“无限远”位置,以保证光学系统标定偏差在误差范围内。工作中,利用可见光长焦探测系统进行温度补偿数据采集。长期、多次重复采集数据后,经整合得到如表 1 所示的一组焦距变化量(Δf_T)与温度的相关数据,温度变化以 5℃为间隔,温度的宽度范围为-30~30℃。

表 1 可见光长焦距变化量随温度变化的数据统计

Table 1 Statistical analysis of long focus FLC for visible light with temperature

Temperature /℃	FLC /mm	Temperature /℃	FLC /mm	Temperature /℃	FLC /mm
-30	41.217	-5	13.137	20	0
-25	37.005	0	10.329	25	-3.711
-20	35.133	5	5.649	30	-6.987
-15	24.369	10	2.473		
-10	18.81	15	0.969		

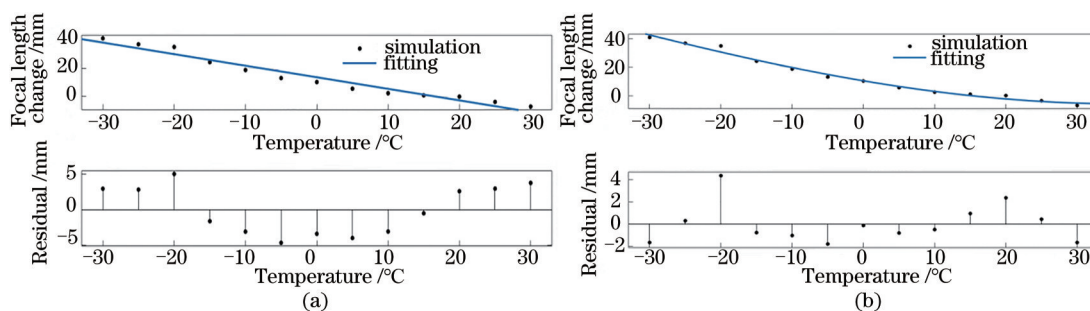


图 6 实验仿真结果。(a)线性补偿模型拟合结果(上)及残差(下);(b)傅里叶补偿模型拟合结果(上)及残差(下)

Fig. 6 Experimental simulation results. (a) Fitting result (up) and residual(down) of linear compensation model; (b) fitting result (up) and residual(down) of Fourier compensation model

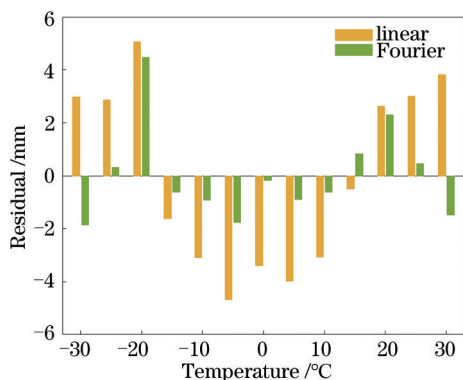


图 7 两种补偿模型残差对比结果

Fig. 7 Residual comparison of two compensation models

大口径光电设备光学系统的温度-焦距分析实验表明,一阶傅里叶补偿模型具有较高的准确性和

基于实验对以上数据进行处理,得到了线性补偿模型和一阶傅里叶补偿模型对外场数据的拟合结果,并给出了每个模型相对于实际数据的残差,如图 6 所示。其中: x 轴指温度,单位为℃; y 轴指焦距变化量(上)与残差值(下),单位为 mm。图 7 是两种模型的残差对比结果,从图中可以看出,一阶傅里叶补偿模型比线性补偿模型的调焦精度有较为明显的提升。而且通过均方根误差(R_{MSE})对两模型拟合,得出一阶傅里叶补偿模型的误差($R_{MSE}=2.03$)约为线性补偿模型($R_{MSE}=3.62$)的一半,调焦精度更高。

可靠性,同时表明此模型在较宽温度范围内合理可行。另外,新模型表达形式简单,对于工程复杂问题的分析具有较大的应用价值。

5 结 论

温度变化是影响光学系统成像质量下降的关键因素之一。温度的变化,不仅使光学系统元件、结构件发生变形,还会导致系统结构间隔发生变化。为了补偿这些因素带来的成像质量下降问题,本研究引入一种新的温度与焦距变化量之间的关系模型——一阶傅里叶补偿模型。以云南天文台大口径卡焦望远镜为研究对象,仿真了传统补偿模型与一阶傅里叶补偿模型对实测数据的拟合情况,并利用残差及均方根误差对两模型进行

比较分析,分析结果表明一阶傅里叶补偿模型精度更高,同时模型具有一定的工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] Zhang D B, Jiang Q B, Wang Y, et al. The abroad development of laser target designation[J]. *Laser Technology*, 2021, 45(1): 126-130.
张德斌, 江清波, 王晔, 等. 国外地面激光测距目标指示器的发展现状[J]. *激光技术*, 2021, 45(1): 126-130.
- [2] Gao X D, Cui Q F, Zheng H Q, et al. Athermalization design of deep ultraviolet optical system with wide temperature range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(17): 1722001.
高旭东, 崔庆丰, 郑汉青, 等. 宽温度范围的深紫外光学系统无热化设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(17): 1722001.
- [3] Cao G L, Liu F F, Jia Y D, et al. Design of ultraviolet warning optical system with large relative aperture and long focal length[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(12): 122203.
曹桂丽, 刘芳芳, 贾永丹, 等. 大相对孔径、长焦距的紫外告警光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(12): 122203.
- [4] Xie N, Cui Q F. Athermalization design of visible light optical system based on grouping by weight[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1222001.
解娜, 崔庆丰. 基于权重分组的可见光光学系统无热化设计[J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1222001.
- [5] Jia M, Xue C X. Design of dual-band infrared optical system with Q-type asphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1022001.
贾孟, 薛常喜. 基于 Q-type 非球面的双波段红外光学系统设计[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1022001.
- [6] He H X. Medium wave infrared optical system based on three group linkage continuous zoom[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(19): 190801.
何红星. 三组联动连续变焦中波红外光学系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(19): 190801.
- [7] Yang F F, Tian H Y, Yan C X, et al. Athermal design of the mirror support with flexure hinges for the laser communication terminal[J]. *Optoelectronics Letters*, 2019, 15(6): 454-458.
- [8] Carlson R T, Janelle M C, Murray I B. Athermal cassegrain telescope: US10534165[P]. 2020-01-14.
- [9] Davis M J. Athermal glasses and athermal systems for infrared optics: US20200299182[P]. 2020-09-24.
- [10] Zhang F P, Zhang H W. Design of long-wave athermal optical system based on binary diffraction surface[J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(1): 25-29.
- [11] Zhang C L, Song L W. Design of focusing mechanism driven by linear motor for photoelectric theodolite[J]. *OME Information*, 2010, 27(11): 47-51.
张春林, 宋立维. 直线电机驱动的经纬仪调焦机构设计[J]. *光机电信息*, 2010, 27(11): 47-51.
- [12] Liu X D. Statistics of the temperature with changes of the Cassegrain focus[J]. *Journal of Yunnan Observatory*, 1987(2): 69-70.
刘新德. 焦距随温度变化的统计[J]. *云南天文台台刊*, 1987(2): 69-70.
- [13] Ding S S, Feng Q B, Lu T T, et al. Fourier-series-based analysis of grating processing error[J]. *Optoelectronic Technology*, 2020, 40(2): 149-154.
丁闪闪, 冯奇斌, 鲁婷婷, 等. 基于傅里叶级数的光栅加工误差分析[J]. *光电子技术*, 2020, 40(2): 149-154.