

空气垂直温度梯度对长焦镜面检测精度的影响分析

姜自波^{1,2,3} 李新南^{1,2} 季 波^{1,2}

¹中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042

²中国科学院天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 介绍了光学追迹计算中采用的空气折射率公式,分析了在水平和垂直两种检测情形下,不同曲率半径球面反射镜因空气温度分层导致的像质变化。对 $\Phi 1.5\text{ m}$ 、离轴量为12 m近抛物面拼接子镜在水平和垂直状态检验时受温度梯度影响情况进行了计算和分析。最后在上述两种状态下仿真计算了温度梯度分布对 $\Phi 4\text{ m}$ 、焦比 $f/2$ 的大口径抛物面反射镜的影响情况。结果显示,一般来说水平检验光路像质变化远大于垂直检验,其中大口径快焦比的抛物面镜垂直检测空气温度分层因素的影响结果也需考虑和控制。

关键词 测量; 温度梯度; 空气折射率; 光学检测; 离轴非球面镜

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1012004

Influence Analysis of Testing Accuracy for Long Focal Length Mirror by Vertical Temperature Gradient of Air

Jiang Zibo^{1,2,3} Li Xinnan^{1,2} Ji Bo^{1,2}

¹National Astronomical Observatories / Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China

²Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China

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

Abstract The formula of air refractive index used in this paper for optical trace computing is described in detail. Following the changing of image quality of spherical mirrors with different R is analyzed caused by air temperature layered in horizontal and vertical testing cases. The temperature gradient effects for off-axis near parabolic segment with $\Phi 1.5\text{ m}$, off-axis length 12 m are calculated and analyzed in horizontal and vertical test status. Finally, the influence of image quality by air temperature gradient distribution for large parabolic mirror with aperture $\Phi 4\text{ m}$, focal ratio $f/2$ with the states above mentioned is calculated and simulated. The results above all indicate that, in general, the influence level for image quality in horizontal test is much greater than vertical case, moreover, the air temperature factors should be considered in vertical optical testing in large aperture and fast focal ratio parabolic testing.

Key words measurement; temperature gradient; air refractive index; optical testing; off-axis aspheric mirror

OCIS codes 120.6780; 010.1285; 120.6810; 120.4630

1 引言

国外很早就已开始关注和研究光学系统的热效应问题,20世纪40年代,Perry^[1]研究了均匀温度场中温度变化对光学系统像质的影响,并提出透镜的无热化设计概念。1986年,Povey^[2]对红外光学系统中的热致

收稿日期: 2015-04-07; 收到修改稿日期: 2015-06-04

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(11203051)

作者简介: 姜自波(1977—),男,博士研究生,主要从事非球面镜加工与检测等方面的研究。E-mail: zbjjiang@niaot.ac.cn

导师简介: 李新南(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学加工与检测方面的研究。

E-mail: xnli@niaot.ac.cn(通信联系人)

焦移现象做了理论推导和分析,并讨论了降低热光效应的相关无热化技术。1987年,Pearson等^[3]对Φ15 m的国立新技术望远镜(NNTT)进行了相关预研究,他们对1块Φ1.8 m高硼硅材料的蜂窝镜进行了热形变研究,建立有限元模型,并利用实测数据得到了各种温度分布下镜面理论热变形结果。1992年,Applewhite^[4]对火星探测器中的火星观测器相机(MOC)进行了轨道热环境模拟实验,发现成像过程中存在的径向温度梯度与主镜的曲率半径变化近似线性,且主镜的曲率半径和厚度变化仅影响后焦长,基于此研究结果他们设计使用了边缘加热器和中心加热器对系统进行温度补偿。国内方面,2006年,金群峰^[5]对国外大气折射率公式进行了整理和总结,初步分析了各种公式的适用范围和局限。2013年胡鹏等^[6]建立了封闭水平管道中激光传热热效应物理模型,数值模拟了在不同压强下的温度分布与附加相差和远场光束质量、光斑质心漂移之间的变化关系。2013年,童伟等^[7]对聚合物微透镜在热效应作用下发生的焦移现象进行了有限元仿真和分析。2014年,张鑫等^[8]提出了一种两片式远距结构消热差光学设计方法,利用该方法设计了用于非制冷红外探测器的长波红外物镜。

超长光路光学镜面的检测是长焦镜面和透镜研制的关键环节。中国科学院南京天文光学技术研究所为长焦镜面检测而建的国内最大的30m垂直检验塔将在很大程度上抑制空气温度垂直分层影响,本文以此实验平台为依托和研究对象,详细研究光学检测时光路中的空气温度分层对检测像质的影响情况。首先实测得到温度的垂直分布数据,再利用折射率公式得到相应的折射率分布,对球面镜、离轴近抛物面镜和大口径抛物面反射镜在水平、垂直检测状态进行空气温度梯度导致像质变化仿真研究。

2 空气折射率计算所采用的公式

经过对相关文献详细的收集、整理和分析,本课题组采用Birch等^[9-10]的公式来计算空气折射率。计算几个步骤,首先得到温度15℃、压强1013.25 hPa、CO₂体积混合比为4.5×10⁻³的干空气的折射率 n_s (波长适用范围:0.2~2 μm):

$$n_s - 1 = 10^{-8} \left[A + \frac{B}{130 - \lambda^{-2}} + \frac{C}{38.9 - \lambda^{-2}} \right], \quad (1)$$

式中 λ 为光波长,单位为μm。常数A、B、C值分别为8342.54,2406147和15998。然后可得任意温度和压强下CO₂体积混合比为4.5×10⁻³时的干空气折射率 n_{ip} 为

$$n_{ip} - 1 = \frac{(n_s - 1)p[1 + 10^{-8}(E - Ft)p]}{D(1 + Gt)}, \quad (2)$$

式中 p 为空气压强, t 为空气温度,常数D至G值分别为96095.43,0.601,0.00972和0.003661。接下来得到任意温度和压强下CO₂体积混合比为4.5×10⁻³时的任意湿度空气的折射率为

$$n - 1 = (n_{ip} - 1) - 10^{-10} \left(\frac{292.75}{t + 273.15} \right) \left(3.73345 - \frac{0.0401}{\lambda^2} \right) e, \quad (3)$$

式中水汽压 e 单位为Pa。温度 t 单位为℃。由(3)式可见若要得到最终的折射率必须先求出任意湿度所对应的水汽压 e ,水汽压可由测量空间某点的相对湿度和温度得到。本课题采用Tetens经验公式来计算水汽压^[11],求饱和水汽压(或冰气压) $e_{s(i)}$ 的公式为

$$e_{s(i)} = \begin{cases} a \exp \left[\frac{b(T - 273.16)}{T - c} \right], & T > 273.16 \\ a \exp \left[\frac{d(T - 273.16)}{T - f} \right], & T < 273.16 \end{cases}, \quad (4)$$

式中各 a 至 f 常数分别为6.1078,17.26939,35.86,21.87456和7.66。注意(4)式求出的气压单位为hPa, T 为热力学温标。所以由相对湿度值得到水汽压为

$$e = \frac{RH}{100} e_{s(i)}, \quad (5)$$

最终可求出水汽压 e ,单位为Pa。然后将水汽压代入(3)式可得到任意温度、任意压强、任意湿度、CO₂体积混合比为4.5×10⁻³的空气折射率。

3 球面镜仿真结果

3.1 水平测量时球面镜检测像质变化

经计算发现在垂直塔空间范围内温度对折射率的影响最大。所以下面的计算仅考虑温度分布对光学检测的影响,忽略压强及湿度因素变化影响。首先计算了 $\Phi 1.5\text{ m}$,不同曲率半径球面反射镜在测定的空气环境中波面变化情况。实测的近地面温度随高度变化情况见图1,折射率可由2.1节中的公式计算得出。光线追迹分析中坐标系 y 轴的原点选取为镜面中心。

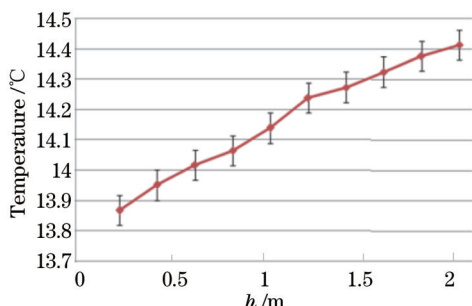


图1 实测的近地面空气温度随高度的变化情况

Fig.1 Measured near ground air temperature changing with height

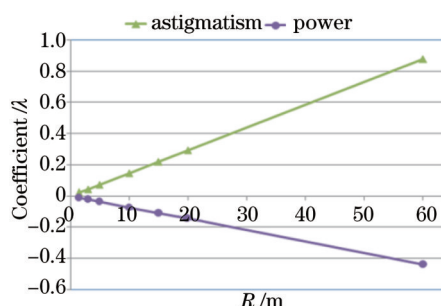


图2 光轴水平时空气分层对不同曲率半径球面镜检测影响

Fig.2 Influence of air layering for spherical mirrors testing with different radii of curvature in the optical axis level state

折射率曲线进行2次多项式拟合,拟合公式为

$$n = n_0 + n_{x1}x + n_{x2}x^2 + n_{y1}y + n_{y2}y^2 + n_{z1}z + n_{z2}z^2, \quad (6)$$

多项式拟合结果为 $n_0=1.0002769$, $n_{y1} = -2.867 \times 10^{-10}$, $n_{y2} = 4.943 \times 10^{-14}$ 。注意光轴水平测量状态时 y 方向垂直地面向上,计算时假定空气只有垂直方向温度梯度。

首先将利用 Matlab 编程对 $\Phi 1.5\text{ m}$, $f_{\text{roc}}=5\text{ m}$ 的球面镜水平检测受温度梯度影响情况进行追迹计算验证。当存在如图1所示的温度梯度分布时,利用3阶精度的龙格库塔法进行光线追迹。结果显示 y 向横向像差范围为从 $-5.708\ \mu\text{m}$ 到 $-8.036\ \mu\text{m}$ 。利用横向几何像差和波像差的积分公式可得到像面处的波像差。波面畸变主要为离焦和像散,Zernike系数分别为 $-0.0363\ \lambda$ 和 $0.0725\ \lambda$ (后文的 λ 为激光干涉仪工作波长,等于 $0.6328\ \mu\text{m}$)。上述光路同样可用 Zemax 光学设计软件仿真验证,仿真计算后得到 y 向横向像差分布在 $-5.928\sim -8.398\ \mu\text{m}$ 之间,与 Matlab 计算得到的结果相近。所以为方便起见后面的光线追迹用 Zemax 软件直接仿真得到。

经过对 $\Phi 1.5\text{ m}$, $f_{\text{roc}} = 1.5, 3, 5, 10, 15, 20$ 和 60 m 球面反射镜计算仿真得到镜面水平检测时因温度垂直分层导致的波像差。对波像差进行 Zernike 多项式系数拟合,结果发现像差主要为离焦和像散分量形式,各像差系数随镜面曲率半径 R 的变化关系见图2。由图可见随着球面镜曲率半径的增大,光路长度随之增大,空气的温度梯度分布将导致像质畸变随 R 线性增大。从量值上来看当 $R=60\text{ m}$ 时,像差中离焦分量和像散分量 Zernike 系数分别为 -0.439λ 和 0.879λ ,如此大的像差严重干扰球面镜最终的光学检验,必须进行无热化改进或将温度梯度打散。

3.2 垂直测量时球面镜检测像质变化

为分析 $\Phi 1.5\text{ m}$ 不同曲率半径球面镜垂直测量时的波面畸变情况,测量了垂直检验塔自然对流情况下的温度垂直分布,并利用第2节的相关公式得出相应的折射率随高度变化情况,见图3。高度 z 的起算点为垂直塔地面,坐标系 z 轴正方向为垂直地面向上。

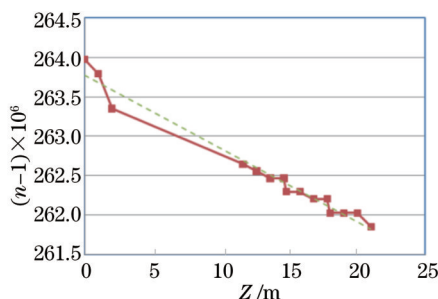


图3 垂直检验塔折射率垂直分布情况

Fig.3 Vertical distribution of the refractive index in vertical test tower

对折射率随高度变化测量散点进行拟合得到 $n_{z1} = -9.294 \times 10^{-11}$, $n_0 = 1.0002638$ 。分别计算了 $R = 1.5, 3, 5, 10, 15$ 和 20 m 时的波面变形情况。图 4 中蓝色曲线是不同曲率半径球面镜波面畸变的离焦系数, 红色曲线是相应的球差系数。由图易见随着 R 的增大波面畸变的离焦和球差都呈减小趋势, 不过主要表现为离焦变形, 这是由于入射角相比于水平检测变小所致。焦比为 0.5 时的离焦系数最大, 最大值为 0.0221λ 。

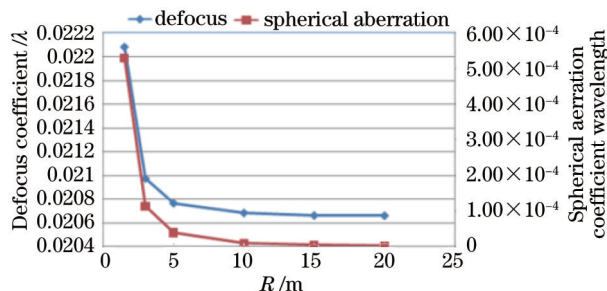


图 4 垂直检测时不同曲率半径球面镜的波面畸变
Fig.4 Wave front aberrations in vertical testing of spherical mirrors with different radii of curvature

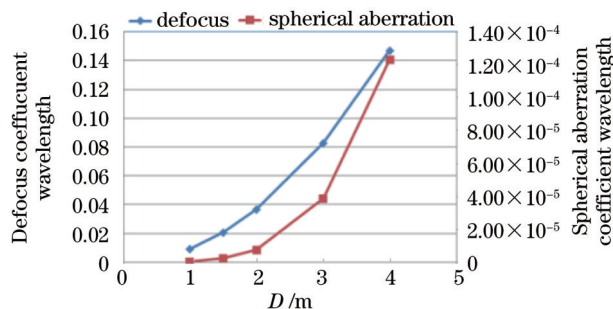


图 5 垂直检测时波面畸变随镜面口径变化情况
Fig.5 Variation of wave front aberrations with diameters of mirrors in vertical testing cases

另外当保持球面镜曲率半径 R 不变, 当镜面全口径 D 在 $1 \sim 4$ m 内取不同值时, 由图 5 可见离焦和球差分量都随着口径的增加而增大, 其中球差分量很小可忽略。在 $D=4$ m 时离焦系数已增大到 0.147λ 。这样的波面变形在抛光检验中是必须考虑和改进的。

4 $\Phi 1.5$ m 离轴近抛物面镜仿真结果

30 m 望远镜离轴拼接子镜镜面参数为: 二次曲面系数 $K = -1.000953$, 顶点曲率半径 $f_{\text{roc}} = 60$ m, 镜面半口径 $a = 0.75$ m, 离轴量 $L = 12$ m, 计算可得离轴角 $\theta = 11.3099^\circ$ 。为便于在 Zemax 中分析装调误差对离轴非球面镜检测影响, 把镜面面形表述为新坐标的形式。新坐标系原点由非球面顶点移动到离轴子镜中心, z 轴为新坐标原点处曲面的法线。 x 轴在过新原点的二次曲面的切平面上, 且同时在回转轴和新原点决定的平面上, 方向远离回转轴。经过推导得出新坐标系下二次曲面的表述公式(7)~(10)式。由上述公式得出面形分布, 再利用最小二乘法可拟合出 Zernike 多项式系数。

$$z = \frac{d}{b + \sqrt{b^2 - at}}, \quad (7)$$

$$a = c(1 + K \cos^2 \theta), \quad (8)$$

$$b = \frac{1}{\sqrt{1 + K \sin^2 \theta}} - cK \sin 2\theta / 2, \quad (9)$$

$$d = c(1 + K \sin^2 \theta)x^2 + cy^2, \quad (10)$$

式中 K 为二次曲面系数, c 为镜面顶点曲率, θ 为离轴角。以下从垂直和水平两种检测状态展开分析。首先考虑垂直检测情况, 在利用上述方法建立的无像差理论光路中增加 z 向垂直温度梯度。折射率随高度的分布曲线可表示为 $n = n_0 + n_{z1}z$, $n_0 = 1.0002637$, $n_{z1} = 9.294 \times 10^{-11}$ 。因为设计的光路中垂直塔上部有三个平面镜将光路水平折转, 垂直温度分层对这部分光路几乎不起作用, 所以只对垂直方向的空气进行温度梯度分布处理, 这里垂直方向空气介质厚度取 18 m。垂直检测情况下 $\Phi 1.5$ m 近抛物面在有温度梯度时检测系统像差变为 $f_{\text{pv}} = 0.0667\lambda$, $f_{\text{rms}} = 0.0154\lambda$, 像差分布见图 6。可见垂直检测情况下温度垂直分层对光学检测影响较小。

当考察 $\Phi 1.5$ m 离轴双曲面水平检测情况下像质变化时, 利用图 1 的近地面温度分布建立折射率场。经计算有温度梯度时系统像质变为 $f_{\text{pv}} = 1.339\lambda$, $f_{\text{rms}} = 0.329\lambda$, 主要为像散和离焦分量, 像差分布见图 7。这是因为温度分层线与入射光线组成的入射角很大, 导致角度变化量也比垂直情况大。水平检测是光学车间中常见的检测姿态, 而仿真结果显示水平检测时受到温度分层的影响较大, 必须考虑引入强制对流等无热化手段, 或者采取多次旋转镜面方法可消除因温度分层引起的像散畸变分量, 而离焦畸变分量需采用其他方法减弱。

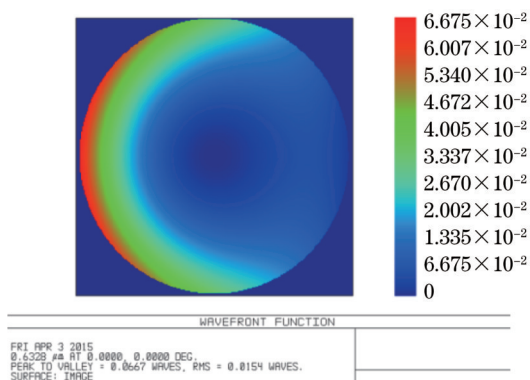


图6 $\Phi 1.5$ m 离轴近抛物面镜垂直检测影响情况
Fig.6 Influence for $\Phi 1.5$ m off-axis near parabolic mirror testing in vertical case

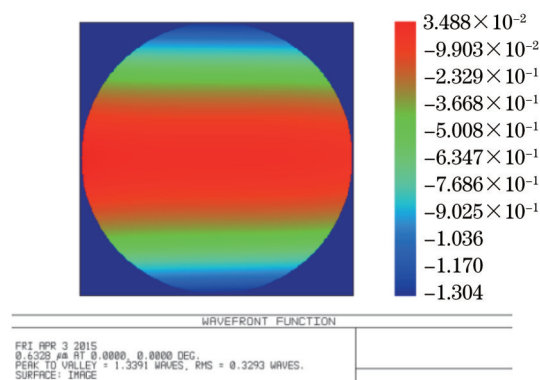


图7 $\Phi 1.5$ m 离轴近抛物面镜水平检测影响情况
Fig.7 Influence for $\Phi 1.5$ m off-axis near parabolic mirror testing in level case

5 $\Phi 4$ m 抛物面镜补偿法水平和垂直检验受垂直方向温度梯度影响分析

类似地,对 $\Phi 4$ m 抛物面镜 Offner 补偿检验光路受温度梯度影响情况进行了分析。抛物面反射镜的参数如下, $\Phi 4$ m, 二次曲面系数 $K=-1$, 主镜顶点曲率半径 $f_{ROC}=16$ m。经计算在垂直检测状态下,当温度垂直梯度分布为图 3 时检测光路像质变化为 $f_{PV}=0.343\lambda$, $f_{RMS}=0.093\lambda$, 相位等高图分布见图 10。当对 $\Phi 4$ m 抛物面镜进行水平检测仿真时,假设温度分布同样遵从图 3 形式,受空气垂直温度梯度的影响,检测波面变为 $f_{PV}=0.797\lambda$, $f_{RMS}=0.192\lambda$ (见图 11),由图可见空气的温度梯度将引入彗差和各级对称像差项,其中彗差 Zernike 系数为 -0.158λ 。

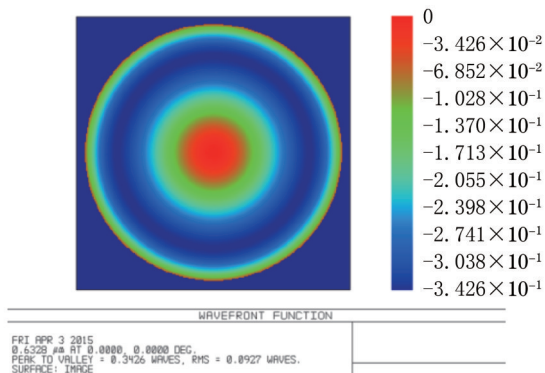


图8 $\Phi 4$ m 抛物面镜垂直检测影响情况
Fig.10 Influence for $\Phi 4$ m parabolic mirror testing in vertical case

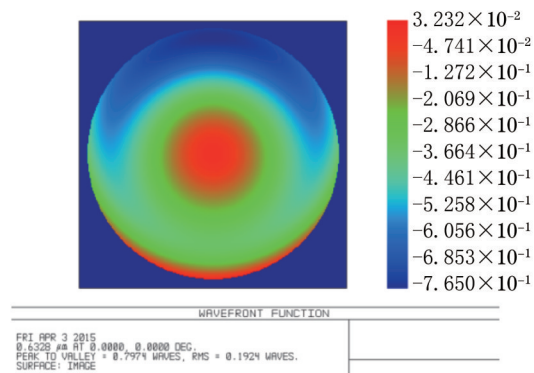


图9 $\Phi 4$ m 抛物面镜水平检测影响情况
Fig.11 Influence for $\Phi 4$ m parabolic mirror testing in level case

空气温度对光学检测的影响研究需要在以下方面做进一步的研究:1) 本文计算中认为空气温度是影响折射率变化的主要因素,压强、湿度、组分都是不变常量。更精确的计算需要考虑除温度外的其他因素对折射率的影响。2) 本文计算时空气温度分层是沿高度方向分布的,但在其他水平检测场合可能会出现横向温度梯度分布。

6 结 论

由以上仿真分析可见,一般情况下水平检测受温度梯度影响大于垂直检测。以 $\Phi 1.5$ m 离轴近抛物面为例,空气温度垂直分层将引入主要为像散和离焦分量的波像差, PV 值达 1.339λ 。无论水平或垂直检测,如果仿真计算结果大于光学最终检测误差容许值,必须考虑强制对流等无热化改善措施。

参 考 文 献

- 1 J W Perry. Thermal effects upon the performance of lens systems[J]. Proc Phys Soc, 1943, 55(4): 257-285.
- 2 Veronia Povey. Athermalisation techniques in infrared systems[C]. SPIE, 1986, 655: 142-153.
- 3 E Pearson, L Stepp. Response of large mirrors to thermal distributions[C]. SPIE, 1987, 0748: 215-228.
- 4 Roger W Applewhite. The effects of thermal gradients on the Mars Observer Camera primary mirror[C]. SPIE, 1992, 1690: 376-386.

- 5 Jin Qunfeng. The Research on the Impacting Factors of Atmospheric Refractive Index[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006: 9–18.
金群峰. 大气折射率影响因素的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 9–18.
- 6 Hu Peng, An Jianzhu, Zhang Feizhou. Pressure effects on laser propagation in a closed horizontal tube[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0702005.
胡 鹏, 安建祝, 张飞舟. 封闭水平管道中气体压强对激光传输的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702005.
- 7 Tong Wei, Tang Xiongwei, Liao Jinkun, *et al.*. Design and analysis for thermal actuated tunable polymer microlens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 042202.
童 伟, 唐雄贵, 廖进昆, 等. 热调控变焦聚合物微透镜的设计与分析[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4): 042202.
- 8 Zhang Xin, Qiao Yanfeng, Zhu Mingchao, *et al.*. Two-lens athermalized infrared telephoto objective[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0822004.
张 鑫, 乔彦峰, 朱明超, 等. 两片式远距结构消热差红外物镜[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0822004.
- 9 Birch K P, Down M J. Correction to the updated equation for the refractive index of air[J]. Metrologia, 1994, 31(4): 315–316.
- 10 Li Wenchen, Dai Zuoxiao, Dai Ning, *et al.*. An updated equation for the refractive index of air[C]. SPIE, 2014, 9297: 929702.
- 11 Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, *et al.*. Atmospheric Physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003: 21.
盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 21.

栏目编辑: 何卓铭