

大扫描视场红外椭球形整流罩光学系统设计方法

王超^{1,2}, 张新¹, 王灵杰¹, 曲贺盟¹, 王超^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:应用椭球形整流罩的飞行器具有良好的空气动力学特性,但由于头罩的非旋转对称结构特性,后续红外搜索/跟踪成像系统难以同时实现大扫描视场与良好成像质量.为解决这一难题,提出一种基于拱形校正元件和动态校正器的椭球形整流罩光学系统设计方法,使用该方法设计的中波红外头罩光学系统具有 $\pm 54^\circ$ 的超大扫描视场,且成像质量在整个扫描和瞬时视场内接近衍射极限.

关键词:光学设计;中波红外系统;椭球形整流罩;超大扫描视场

中图分类号:TN216 **文献标识码:**A

Design method for infrared elliptical dome optical system with wide field-of-regard

WANG Chao^{1,2}, ZHANG Xin¹, WANG Ling-Jie¹, QU He-Meng¹, WANG Chao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The aircraft with an elliptical dome acquires excellent aerodynamic performance, but the non-rotationally symmetric structure characteristic of the dome makes the airborne infrared search/track system difficult to meet the requirements of wide field-of-regard (FOR) and high imaging quality at the same time. In order to overcome this problem, a design method for the elliptical dome optical system based on the combination of an arch corrector and a dynamic corrector was proposed. A mid-wave infrared optical system with an ellipsoid dome was designed as an example. The system has a super wide FOR of $\pm 54^\circ$, and the imaging quality of the system approaches to the diffraction limit across the entire FOR and instantaneous field-of-view.

Key words: optical design; mid-wave infrared system; elliptical dome; super wide field-of-regard

PACS: 42.79.-e, 42.15.Eq, 42.15.Fr

引言

传统飞行器的红外整流罩往往是一个同心的球面罩或一个半球罩,其加工检测技术较为成熟,也不会给后续成像系统带来难以控制的像差;但这种形式的整流罩给飞行器带来很大的气动阻力,难以满足现代超音速飞行器的发展需求^[1].由此便产生了多种新型整流罩,其中椭球形窗口/整流罩与飞行器气动外形一致,具有优良的空气动力学性能,因此成为目前的研究热点.这种头罩的另一优势是,由于头

罩内表面和成像系统旋转支点间的轴向间距可以自由调节,能够获得比球形结构更大的无渐晕扫描视场^[2].但是,这种非球面整流罩结构也引入了严重的随着扫描视场角动态变化的非轴对称像差,且视场范围越大,像差变化范围也越大,给成像系统的设计带来极大挑战.

为了解决这一问题,国内外提出了多种椭球形整流罩的像差校正方法,常用的方式有在头罩后加入固定校正板、对旋的位相板、一对能够轴向移动的柱面镜、变形镜等^[3].除使用固定校正板外,其他方

收稿日期:2012-06-07,修回日期:2013-01-08

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(091RIDS91)

Foundation items: Supported by Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (091RIDS91)

作者简介(Biography):王超(1986-),女,吉林长春人,博士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究. Email: Nicklo19992009@163.com

Received date: 2012-06-07, revised date: 2013-01-08

法均能在不同的扫描视场中提供大小不等的像差补偿量,即动态校正像差.固定校正板为一块旋转对称的透镜,实际设计中通常先利用这种元件将全部扫描视场的像差补偿至可控程度,再利用动态校正器消除余下的小量像差,足以在扫描视场不超过 35° 的系统中得到较好像质^[4,5].然而,椭球形头罩主要应用于红外搜索/跟踪系统,为了尽可能地不丢失目标,要求光学系统的扫描视场越大越好,一般大于 45° .因此,仍需探索进一步增大后续成像系统扫描视场的像差校正方式.

提出了一种基于拱形校正元件及动态校正器的椭球形整流罩光学系统设计方法,实现了超大搜索视场,且具有系统结构尺寸小的优点,符合作为飞行器载荷的红外光学系统使用要求.设计实例采用了长径比为1.0的硫化锌椭球形头罩,工作波段为中波红外,焦距60 mm, F数为1.875,扫描视场为 $\pm 54^\circ$,瞬时视场为 $2.4^\circ \times 2.4^\circ$.

1 椭球形整流罩材料选择及像差分析

1.1 材料选择

中波红外窗口可用的材料包括氟化镁、尖晶石、蓝宝石、硫化锌等.考虑到多光谱硫化锌材料不仅具有较高的光谱透射比、较宽的透射波段、较好的机械性能、热性能和化学稳定性,且美国曾经成功地将这种材料应用于超音速飞行器的椭球形头罩,故采用硫化锌作为整流罩材料^[6].

1.2 整流罩像差分析

为分析整流罩引入的像差及后文验证成像效果,利用光学设计软件模拟了一个等厚 ZnS 椭球形整流罩,其最大口径100 mm,厚度4 mm,长径比为1.0,像空间 F 数为1.875,头罩后的成像系统扫描视场变化范围在 0 至 54° .由于头罩光焦度很小,为了分析准确将一个理想透镜放在光阑处代替实际成像系统,系统有效焦距为60 mm.以理想透镜的中心作为头罩旋转的万向节点,旋转步进角为 6° ,共10个变焦点.依照惯例,采用 Zernike 条纹多项式对整流罩光学系统的出瞳处波面进行拟合^[7],从而直观地展示其主要波像差的大小.图1显示了主要影响系统成像质量的三阶球差(Z_9)、慧差(Z_8)和像散(Z_5)随扫描视场的变化曲线.

依图1所示,随着扫描视场的变化,初级像散项 Z_5 和初级彗差项 Z_8 是影响系统成像质量的主要因素,其中像散的波峰-波谷值最大.这是由于:随着扫描视场的增大,罩体用于成像的部分越来越失去对

称性,其面形接近于柱面,所以引入较大的像散.

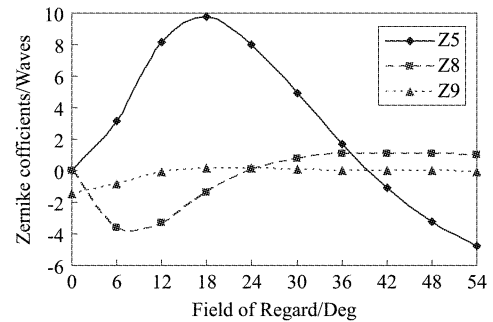


图1 整流罩主要像差项所对应的泽尼克系数随扫描视场的变化曲线
Fig. 1 Aberrations Z_5 , Z_8 , Z_9 versus field of regard (FOR) of the dome

2 拱形校正元件设计方法

以往的固定校正元件采用二次曲面或高次非球面进行设计.这两种面型均为旋转对称结构,子午和弧矢方向的曲率半径相同,因此光焦度也相同,不利于离轴像差的校正.

本文中的系统最大视场角达到 54° ,像散和慧差影响严重,因此需打破固定校正板的旋转对称性,将其发展为拱形校正板.其表面使用平面对称面型,如超环面、双锥度系数曲面、仅含平面对称项的XY多项式曲面等,即可以在子午、弧矢两个不同的平面方向相对独立地校正像差^[8].以上几种面型偏离旋转对称的程度逐渐增加,因此为校正板提供了更多设计自由度;在光学系统设计中使用此类面型,系统评价函数的收敛速度以及最终收敛程度将与以往使用旋转对称面型时有着很大不同^[9].

本文使用变形非球面(Anamorphic Asphere)来构造拱形校正元件.这种曲面有着xoy和yoz两个对称平面.表面矢高方程如下^[10]:

$$z_{sag} = \frac{C_x x^2 + C_y y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_x) C_x^2 x^2 - (1 + k_y) C_y^2 y^2}} + A[(1 - A_p)x^2 + (1 + A_p)y^2]^2 + B\{(1 - B_p)x^2 + (1 + B_p)y^2\}^3 + C[(1 + C_p)x^2 + (1 + C_p)y^2]^4 + D[(1 - D_p)x^2 + (1 + D_p)y^2]^5 \quad (1)$$

其中, C_x 、 C_y 和 k_x 、 k_y 分别为弧矢、子午方向的曲率和圆锥常数,A、B、C、D为4~10阶非球面系数. A_p 、 B_p 、 C_p 、 D_p 是面型4~10阶偏离轴对称的分量,本文中均取0,以避免表面过度扭曲,出现光线追迹错误.

以上一节给出的 ZnS 整流罩为例,系统各参数不变,但加入 $2.4^\circ \times 2.4^\circ$ 瞬时视场,取 5 个瞬时视场点. 使用光学设计软件构造 3 个前方整流罩相同,但后续校正透镜面型不同的系统:(1) 利用圆锥曲面设计一块置于头罩后的校正板.(2) 利用高次非球面设计校正板:使用 Wassermann-Wolf 曲面设计方法,通过解一对 Wassermann-Wolf 微分方程,得到对于零视场消像散、慧差的非球面校正透镜^[14],然后将此透镜扩展、优化至整个扫描视场范围.(3) 对(2)中得到的结果,将高次非球面替换为变形非球面,并开放表面在弧矢方向的曲率半径和圆锥常数,再次对整个系统进行优化. 从而得到变形非球面设计的校正板.

以上优化过程中,校正板材料相同,开放校正板厚度以及系统后截距为变量,约束有效焦距、校正板整体大小和边缘厚度. 最后考虑到系统扫描视场点众多,且使用变量数多,增加了设计的复杂度,因此对以上全部系统再次进行全局优化(Global Synthesis Optimization)以寻找最优解. 最终 3 个系统在零视场时的光路图如图 3. 三者优化结果比较见表 1.

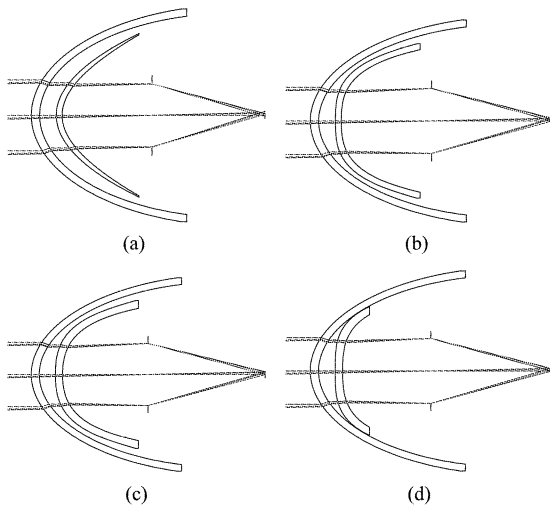


图 2 3 个椭球形整流罩系统的光路图,校正板面型分别为:(a)圆锥曲面 (b)高次非球面 (c)变形非球面(侧视) (d)变形非球面(俯视)

Fig. 2 Schematic diagrams of three elliptical dome optical systems, surface type of the corrector is (a) conic, (b) asphere, (c) anamorphic asphere (side view), and (d) anamorphic asphere (planform)

由表 1 容易得到,使用变形非球面后,对整流罩像差校正能力大幅提高,其残余误差函数值仅为使用圆锥曲面和高次非球面时的 1/28 和 1/3,但优化时间大幅度增加. 建立以变形非球面设计的拱形校

表 1 3 个系统的优化结果和优化时间比较

Table 1 The comparisons of optimization results and processing time of the three systems

	残余误差函数 (Error Function) 值	全局优化时间 (min)
圆锥曲面	23 602.443 3	0.07
高次非球面	2 611.654 3	30.53
变形非球面	837.083 1	67.35

正板后,系统泽尼克像差系数与扫描视场的关系曲线如图 3.

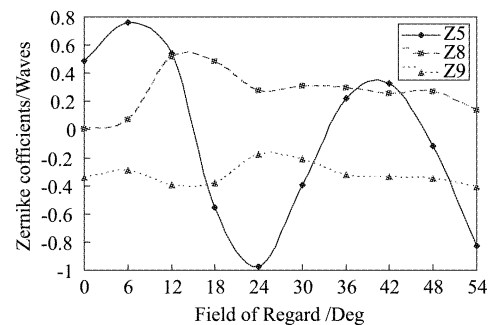


图 3 使用拱形校正板后系统像差曲线

Fig. 3 Aberrations Z5, Z8, Z9 versus FOR of the system using arch corrector

3 动态校正器设计原理

美国专利#6201230 提出,可将变形反射镜用于校正红外整流罩引入的像差^[11]. 变形反射镜通过分布在反射镜背面的驱动器阵列向反射镜施加轴向作用力进行镜面面形控制,对每一扫描视场均可提供不同的像差补偿量,从而在整个扫描视场范围内实现高分辨率成像. 本文中使用的变形镜为基于微型机电系统(MEMS)的分立式微变形镜,具有响应速度快、功耗低、成本低、体积小等优势. 镜面有 61 个控制单元,呈方形阵列排布,具体分布方式见图 4.

在弹性范围内,变形镜所产生面形由下式确定^[12]:

$$z(x, y) = \sum_{i=1}^n v_i V_i(x, y) \quad (2)$$

其中 $z(x, y)$ 为表面矢高, v_i 是第 i 个驱动器的控制电压, $V_i(x, y)$ 为第 i 个驱动器施加单位电压的面形影响函数, n 为驱动器个数. 面形影响函数通常使用如下的高斯函数近似^[13]:

$$V_i(x, y) = \exp[\ln \omega (\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}/d)^\alpha] \quad (3)$$

其中 (x_i, y_i) 为第 i 个驱动器的位置, d 为驱动器间

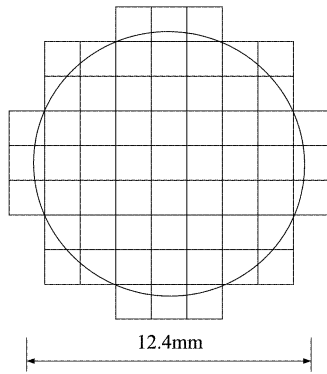


图4 61单元变形镜驱动器分布示意图
Fig. 4 Schematic diagram of actuators distribution of 61-element DM

距, α 为高斯函数指数, ω 为驱动器交连值. 交连值定义为一个驱动器工作时, 相邻驱动器中心的形变量与工作驱动器中心的最大形变量的比值. 本例中根据镜面直径, d 取 1.6 mm, 其余参数选择类似的变形镜在以往实验中具有最佳波前拟合效果的参数, α 取 2.0, ω 取 0.06. 将上述值代入式(3):

$$V_i(x, y) = \exp\{-1.098\ 989[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2]\} \quad (4)$$

为了在光学设计软件中对变形镜的表面特性进行仿真, 根据式(2)、(4)的数学模型, 利用 C 语言编写了用户自定义面型子程序, 并与软件相链接. 在软件中, 此种面型共有 61 个可控系数, 分别对应各个驱动器的控制电压; 使用软件对这些系数进行优化, 即可使变形镜呈现出一定的镜面形貌以补偿系统像差.

4 设计实例

基于以上像差校正手段, 设计了前方为等厚 ZnS 椭球形整流罩, 整流罩长径比为 1.0, 最大口径和总长度均为 100 mm, 工作波段为中波红外, 像空间 F 数 1.875, 焦距 60 mm, 扫描视场为 $\pm 54^\circ$, 瞬时视场为 $2.4^\circ \times 2.4^\circ$ 的光学系统. 系统从头罩前表面到像面总长 87.17 mm, 在整流罩长度范围之内.

整个系统由一块拱形校正镜与成像系统组成. 拱形校正镜的前、后表面均为变形非球面. 万向支架结构上加入随实际成像系统一起转动的一块校正板, 其前表面为平面, 后表面为高次非球面. 考虑到变形反射镜像差补偿方法的运用及红外搜索/跟踪光学系统结构紧凑、轻巧的使用需求, 后继成像系统选用折反射二次成像结构形式, 在一次像面后增加中继透镜组, 最终将物成像到探测器上, 这种结构形

式不仅有效地缩短了系统长度, 减小了系统的口径, 并且在一次像面处放置视场光阑还可以有效地抑制杂光. 主镜为双曲面, 次镜为变形反射镜. 中继透镜组结构为三片式, 材料分别为锗、硅、硅, 全部为球面镜. 该系统在整个视场内冷光阑效率达 100%. 椭球形整流罩光学系统典型目标视场的光路图如图 5.

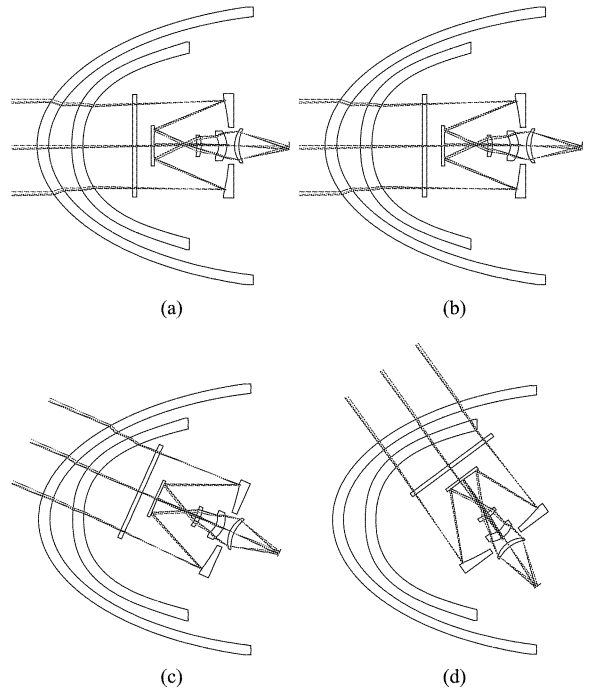
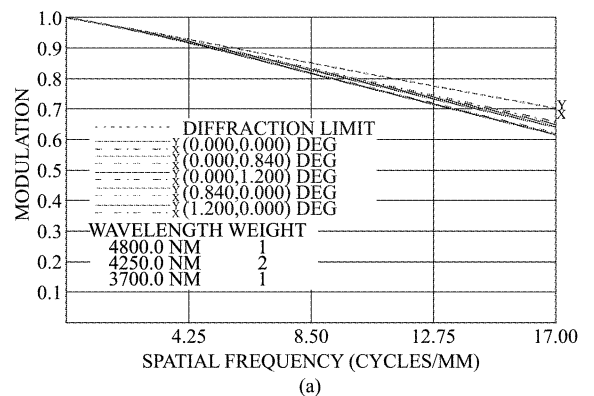
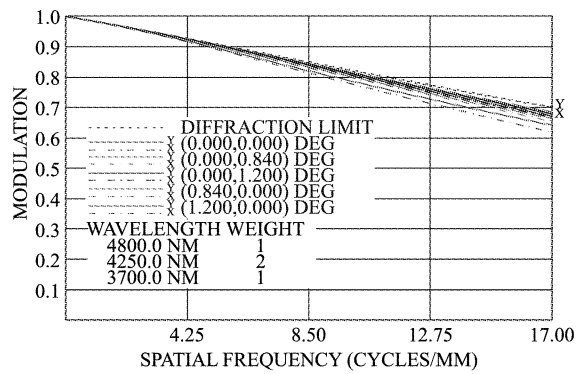


图5 扫描视场分别为(a)0°(侧视)、(b)0°(俯视)、(c)24°(d)54°的椭球形整流罩光学系统
Fig. 5 Elliptical dome optical system with FOR (a) 0°(side view), (b)0°(planform), (c)24°, and (d)54°

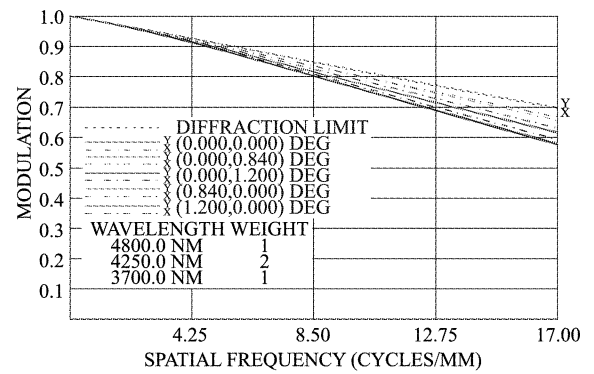
图6展示了整流罩光学系统在各典型扫描视场中的光学系统调制传递函数(MTF). 系统在整个扫描视场范围内子午、弧矢的 MTF 均接近衍射极限. 在 $2.4^\circ \times 2.4^\circ$ 的瞬时视场范围之内, 系统的成像质量亦得到较好的结果.

在实际应用中, 可将扫描视场角按照一定的步长离散化, 将视场角及其对应的变形镜驱动电压值

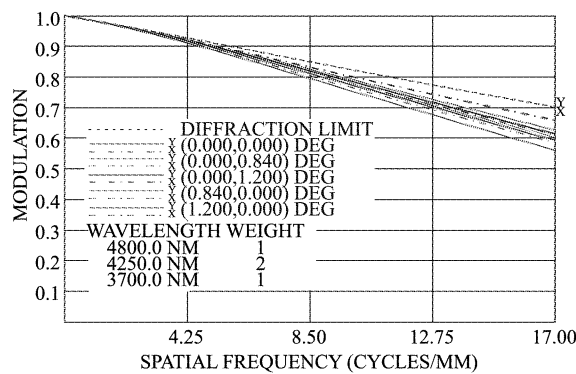




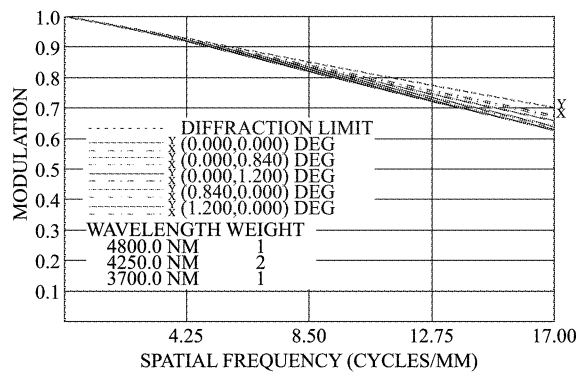
(b)



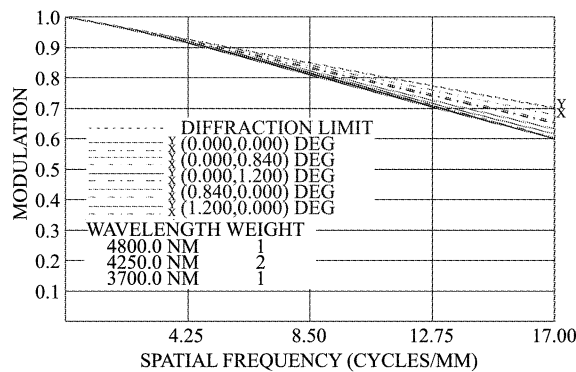
(f)



(c)



(d)



(e)

图6 系统在(a)0°、(b)12°、(c)24°、(d)36°、(e)48°、(f)54°时的MTF曲线

Fig. 6 Modulation transfer function (MTF) of the system with FOR (a)0°, (b)12°, (c)24°, (d)36°, (e)48°, and (f)54°

存储在一个查询表内. 在飞行器内部放置一个角度传感器, 当某一时刻探测到扫描视场角时, 即可由表中查出各驱动器电压值, 控制变形镜面形相应变化, 达到补偿系统像差的目的.

5 结论

根据红外整流罩光学系统对大目标视场的需求, 提出了一种基于拱形像差校正元件和变形反射镜的椭球形窗口/整流罩像差补偿方法. 设计了一套完整的中波红外椭球形整流罩光学系统, 实现了在 $\pm 54^\circ$ 的超大扫描视场内平衡头罩引入的动态像差. 系统总长度为 87.17 mm, 在头罩长度范围之内, 结构较为紧凑. 在整个扫描视场和瞬时视场范围内, 系统的成像质量接近衍射极限.

REFERENCES

- [1] Mills J. Conformal optics: theory and practice [J]. *SPIE*, 2001, 4442: 101 ~ 107.
- [2] Trotta P. Precision conformal optics technology program [J]. *SPIE*, 2001, 4375: 96-107.
- [3] Knapp D. Fundamentals of Conformal Dome Design [J]. *SPIE*, 2002, 4832: 394 - 409.
- [4] CHANG Jun, LIU Li-Ping, CHENG De-Wen, *et al.* Design of infrared optical system with special dome [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (常军, 刘莉萍, 程德文, 等. 含特殊整流罩的红外光学系统设计. *红外与毫米波学报*), 2009, **28** (3): 204 - 240.
- [5] SONG Da-Lin, CHANG Jun, WANG Qing-Feng, *et al.* Conformal optical system design with a single fixed conic corrector [J]. *Chin. Phys. B*, 2011, **20**(7): 074201: 1 - 5.
- [6] ZHANG Rong-Shi. Recent advances in infrared window and dome technologies [J]. *Infrared and Laser Engineering* (张荣实. 红外窗口/整流罩技术新进展. *红外与激光工程*), 2007, **36**(2): 114 - 119.

- [7] Crowther B, McKenney D, Mills J. Aberrations of Optical Domes [J]. *SPIE*, 1998, 3482:48 ~ 61.
- [8] JIANG Yang, SUN Qiang, GU Li-shan, *et al.* Design of optical system of HMD using hybrid refractive/diffractive and free-form surfaces [J]. *Optics and Precision Engineering* (姜洋, 孙强, 谷立山, 等. 折/衍混合自由曲面式头戴显示器光学系统设计, *光学精密工程*) 2011, **19**(3):508 - 514.
- [9] CHENG De-Wen, WANG Yong-Tian, HUA Hong, *et al.* Design of an optical see-through head-mounted display with a low f-number and large field of view using a freeform prism [J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(14): 2655 - 2668.
- [10] Mehta P, Hufnagel R. Pressure distribution under flexible polishing tools - Conventional aspheric optics [J]. *SPIE*, 1990, 1303:178 - 188.
- [11] Crowther B, McKenney D, Sparrold S, *et al.* Sensor System with Dynamic Optical Corrector. US Patent Number 6, 201, 230, 2001.
- [12] ZHOU Ren-Zhong, Yan Jin-Xiang. *Adaptive optics theory* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press (周仁忠, 阎吉祥. 自适应光学理论. 北京:北京理工大学出版社), 1996, 310 - 322.
- [13] ZHOU Ren-Zhong. *Adaptive optics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press (周仁忠. 自适应光学. 北京:国防工业出版社), 1996, 160 - 193.

(上接 258 页)

系统中波、长波波段 MTF 值均接近衍射极限, 温度适应性好, 并且该双色多视场光学系统具有结构紧凑、体积小、透过率高等优点. 随着红外双色焦平面探测器的进一步发展, 该系统在目标探测、识别等领域具有广阔的应用前景.

REFERENCES

- [1] ZHANG Xing-de, LI Rong-gang, LIU Lin, *et al.* Research and development of dual-band infrared camera system [J]. *Laser & Infrared* (张兴德, 李荣刚, 刘琳, 等. 红外双波段成像系统的研究与发展. *激光与红外*), 2010, **40**(8): 801 - 804.
- [2] SWEENEY D W, SOMMARGREN G E. Harmonic diffractive lense [J]. *Appl. Opt*, 1995, 34(14): 2469 - 2473.
- [3] YAN Shu-Hua. *Design of Diffractive Micro-optics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press (颜树华. 衍射微光学设计. 北京: 国防工业出版社), 2011.
- [4] FAN Chang-jiang, WANG Zhao-qi, WU Huan-bao, *et al.* The design of infrared dual-band double-layer harmonic diffractive optical system [J]. *Acta optica sinica* (范长江, 王肇圻, 吴环宝, 等. 红外双波段双层谐衍射光学系统设计. *光学学报*), 2007, **27**(7): 1266 - 1270.
- [5] SUN Qiang, WANG Zhao-qi, LIU Hong-li, *et al.* Optical system of harmonic diffractive/ refractive for infrared dual-color detector [J]. *Infrared and Laser Engineering* (孙强, 王肇圻, 刘宏力, 等. 应用于双色探测器的谐衍射/折射光学系统. *红外与激光工程*), 2003, **32**(3): 317 - 321.
- [6] DONG Ke-yan, PAN Yu-long WANG Xue-jin, *et al.* Optical design of a HDE infrared dual-band step-zoom system [J]. *Optics and Precision Engineering* (董科研, 潘玉龙, 王学进, 等. 谐衍射红外双波段双焦光学系统设计. *光学精密工程*), 2008, **16**(5): 764 - 770.
- [7] WEN Qing-rong, XU Ming-xuan. Design of triplicate infrared FOV switching mechanics [J]. *Laser & Infrared* (温庆荣, 徐明轩. 切换式红外三视场光机组件的设计. *激光与红外*), 2010, **40**(8): 877 - 879.
- [8] WANG Zhi-jiang. *Optical technology handbook* [M]. Beijing: China Machine Press (王之江. 实用光学技术手册. 北京: 机械工业出版社), 2007.
- [9] WANG Cheng-gang, SUN Hao, LI Jing-guo, *et al.* Trends in two-color infrared focal plane detectors of MCT [J]. *Laser & Infrared* (王成刚, 孙浩, 李敬国, 朱西安. 双色碲镉汞红外焦平面探测器发展现状. *激光与红外*), 2009, **39**(4): 367 - 371.
- [10] LI Lin. *Modern Optical Design Method* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press (李林. 现代光学设计方法. 北京: 北京理工大学出版社), 2009.