

文章编号: 1001-3806(2022)02-0283-05

## 采用相位板的中波红外共形光学系统设计

李升辉<sup>1</sup>, 孙祥仲<sup>2\*</sup>

(1. 华中科技大学 网络空间安全学院, 武汉 430074; 2. 华中科技大学 工程实践创新中心, 武汉 430074)

**摘要:** 为了满足现代军事装备中的侦查需求, 提出了一种新型的红外共形成像光学系统, 在消除光学头罩引入的复杂像差过程中, 采用一对轴向移动的相位板来实现像差动态校正。给出了一个红外共形成像光学系统设计实例, 其工作谱段为  $3.7\mu\text{m} \sim 4.8\mu\text{m}$ , 焦距为  $40\text{mm}$ , 长径比为  $1.0$ , 瞬时视场为  $2^\circ$ , 扫描视场为  $\pm 15^\circ$ 。结果表明, 在奈奎斯特频率  $17\text{lp/mm}$  处, 各个扫描视场的调制传递函数均大于  $0.6$ , 系统的光学传递函数接近衍射极限, 各个扫描视场的弥散斑都小于  $30\mu\text{m}$ , 适用于像元尺寸为  $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$  的中红外制冷型焦平面阵列探测器。该研究对于促进新型成像光学装备在军事领域中的进一步的发展、应用是有帮助的。

**关键词:** 成像系统; 相位板; 像差校正; 共形光学系统; 中波红外

**中图分类号:** TN202      **文献标志码:** A      **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2022.02.021

## Design of a middle-wavelength infrared conformal optical system using phase plate

LI Shenghui<sup>1</sup>, SUN Xiangzhong<sup>2</sup>

(1. School of Cyber Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Center for Practice Innovations, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To meet the demand of reconnaissance in modern military equipment, a novel conformal infrared optical system was presented. Two axial translation phase plate were used to correct the dynamic aberrations which were caused by the conformal structure. For the designed optical system, the working band was  $3.7\mu\text{m} \sim 4.8\mu\text{m}$ , the focal length was  $40\text{mm}$ , the ratio of length to aperture was  $1.0$ , the instantaneous angle was  $2^\circ$ , and the scan angle is  $\pm 15^\circ$ , respectively. The results show that the modulation transfer function of each scan fields of view is greater than  $0.6$  with the nyquist frequency of  $17\text{lp/mm}$ , and the optical transfer function is comparable to the diffraction limit. The spot of several scan fields is less than  $30\mu\text{m}$  and falls within the area of one pixel. The designed optical system with well optical performance can be a suitable candidate for the application of the mid-infrared refrigerated focal plane array detector with the pixel size of  $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ . This research is potentially helpful for the further development and application of new imaging optical equipment in the military field.

**Key words:** imaging systems; phase plate; aberration correction; conformal optics system; mid-wave infrared

### 引言

光学头罩的长径比是指光学总长度和口径大小的比值, 共形光学技术将头罩由长径比为  $0.5$  的半球形<sup>[1-2]</sup>变成了长径比更大的椭球形, 被拉长后的面型能够实现与导弹基座、信号平台之间的平滑连接, 从而更加符合空气动力学所要求的结构类型<sup>[3-5]</sup>。这种共形光学结构在侦查机、战斗机等军事装备中的红外成像

光学系统中有着广泛的应用<sup>[6-7]</sup>。被拉长后的椭圆状共形头罩会引入大量不规则的像差<sup>[8-10]</sup>, 其中最主要的光学像差包含彗差、球差和像散。此外, 共形头罩还具有非旋转对称的特性, 由它所引起的像差随着视场角的变化而不同, 因此, 需要采取额外的光学元件对像差进行校正, 进一步提升光学系统的成像质量。

现阶段, 较为常见的像差校正方法包括固定校正系统、相位板、Zernike 光楔以及可变形反射镜几种结构形式<sup>[11-14]</sup>。对于固定校正系统, 通常采用非球面的固定校正板来校正大视场像差, 并配合动态补偿机构去平衡各观察视场中的残余动态像差。SUN 等人提出了一种采用固定校正板进行像差校正的万向支架式

作者简介: 李升辉 (1982-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事光学设计、网络安全等研究。

\* 通讯联系人。E-mail: sunxiangzhong@hust.edu.cn

收稿日期: 2021-02-20; 收到修改稿日期: 2021-04-16

共形导引头光学系统,为简化位标器结构并完成光学系统的成像性能测试,采用头罩旋转的方式替代位标器结构的旋转<sup>[15]</sup>。YU 等人提出了一种由 Wassermann-Wolf 方程确定的固定校正透镜与 Zernike 旋转双光楔相结合的结构<sup>[16-18]</sup>,通过两个光楔沿光轴方向相对转动实现对不同关联视场像差的校正。DANG 提出了基于改进的 Wassermann-Wolf 方程的拱形校正器的设计方法<sup>[18]</sup>,建立了任意视场下弧矢面内相互平行的光线经过光学系统后依然平行的物像方光线的关系。SUN 等人提出了一种将固定校正板置于实际成像系统后或实际成像系统中的大像差和动态像差的补偿校正方案<sup>[19]</sup>。WEI 等人应用 Wassermann-Wolf 方程,结合 Zernike 多项式像差分析方法,设计了用于校正共形光学窗口带来附加像差的两片式固定式校正系统的折反射式成像光学系统<sup>[20]</sup>,并研制了焦距 120mm 的中波红外弹载共形光学系统。

在采用相位板的像差校正方法中,通过在沿光轴方向放置相位板来改变不同视场对应光线的光程差来改变像差。基于 Zernike 光楔的像差校正方法中,通过两个光楔沿光轴方向相对转动实现对不同关联视场像差的校正<sup>[21]</sup>。对于可变形反射镜像差校正系统而言,可以由外加电压的作用改变可变形镜的表面形状,使得经它反射的光束产生所需要的拟合量,以校正其波前像差,该技术是自适应光学系统中的核心组成部分之一。

特别地,相位板校正像差方法可以通过反向旋转相位板和轴向平移相位板这两种形式来实现。对于旋转相位板的像差校正方法来说,一般由两块可以相互旋转的光学相位板组成,它们的回转对称中心都在光学系统的光轴上,两块相位板可以绕着光轴旋转,二者的旋转角度相等,旋转方向相反。在初始状态下,两块相位板紧贴在一起,整体可以等效为平行平板<sup>[22]</sup>;如果两块相位板进行了反向旋转,将可以产生不同的等效厚度,从而产生不同的光程差来校正系统像差,但是反向旋转相位板的方式对机械控制系统有着极为苛刻的精度要求。对于轴向平移相位板像差校正方法,一般由两块近似平行的光学平板组成,两块光学平板具有相互匹配的非球面形状的内表面。同样地,在初始状态下两块旋转相位板紧贴在一起,整体可以等效为平行平板;当两块相位板沿光轴方向移动至不同位置时,光线通过两块相位板的路径相比于相位板未移动之前会发生改变,基于这一原理来实现对光学系统像差的校正。与反向旋转相位板的方式相比,轴向平移

相位板的结构更加简单,在具体实现过程中也更为便捷。本文中研究并分析了相位板在校正共形头罩中复杂像差的应用,同时给出了一个设计实例,设计结果表明,该系统适用于具有轴向移动相位板的中红外波段红外共形光学系统。

## 1 原理分析及系统设计

图 1 为典型共形光学头罩的 2 维结构示意图。共形光学头罩表面为椭球形,其表面几何参量由以下 3 个方程确定:

$$k = 1/(4F^2) - 1 \quad (1)$$

$$r = D/(4F) \quad (2)$$

$$F = L/D \quad (3)$$

式中, $F$  为长径比, $L$  和  $D$  分别为共形整流罩的长度和口径, $k$  是二次曲面常数, $r$  为顶点曲率半径, $t_c$  是中心厚度, $t_e$  是边缘厚度。共形光学头罩的优点在于能够有效降低系统的空气阻力,长径比越大,头罩的空气阻力系数越小。

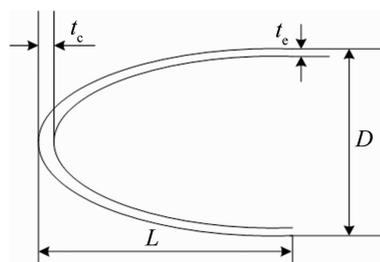


Fig. 1 Layout of the conformal dome

在共形成像光学系统设计中,把动态校正器设计为移动的相位板,当这些光学元件调整到不同的观测角时,光束通过头罩的不同区域。对于普通的椭圆形头罩而言,光束通过头罩的中心时,会看到方向对称的光学元件,而光束通过整个头罩的边缘时,会看到一个不同曲率半径的光学元件,不同的曲率使光的特性发生变化,同时视角的变化引入了大量像差。作者研究了共形成像系统中的轴向移动相位板对像差的校正作用,图 2 为在系统中加入轴向移动相位板时共形成像系统在  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  和  $15^\circ$  扫描视场的示意图。

轴向平移相位板实质上是两个平面平行相位板,它是两个独立的非球面平板的组合,通过转动两个相位板彼此的相位,可以产生不同量的像差,通过这种组合产生特定组合的波前像差,可以校正可变像差量。通过计算给定光束穿过一对板相对于某一参考光束的光程,可以确定相位板面引入的波前像差。两个相位板的内表面用同一个表达式表示,这样相位板本身就

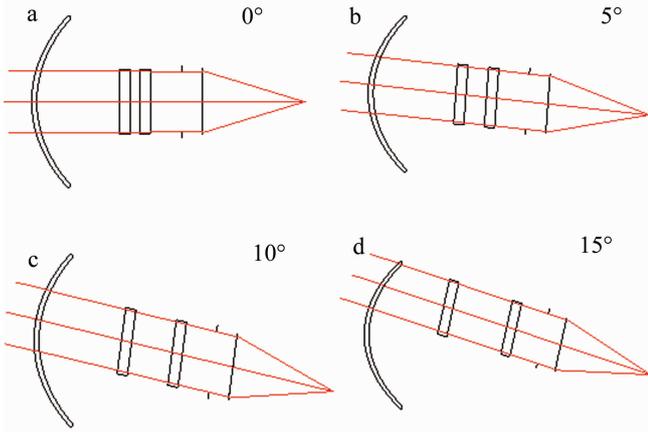


Fig. 2 The axial translation phase plates in the conformal system

匹配成一对板,当它们靠在一起时,就具有一个独立的平行平板的特点。

本设计中,采用相位板的制冷型中红外共形光学系统采用  $F/2$  中波红外制冷型焦平面阵列探测器,像元尺寸为  $30\mu\text{m}$ ,光学系统设计指标如下:工作波段为  $3.7\mu\text{m} \sim 4.8\mu\text{m}$ ;焦距为  $40\text{mm}$ ;长径比为  $1.0$ ;瞬时视场为  $2^\circ$ ;扫描视场为  $\pm 15^\circ$ 。

因为长径比  $F = 1.0$ ,根据上述公式计算可得,窗口的二次曲面常数  $k = -0.75$ ,顶点的曲率半径为  $30\text{mm}$ ,窗口的长度为  $120\text{mm}$ ,根据上述参数建立了光学窗口的模型结构。

然后在系统中加入两块相位板和后面的透镜组,两块相位板校正光学窗口的一部分像差,残余像差由两块相位板后面的透镜组校正。考虑到加工因素,两块相位板的基底都采用锗材料。第 1 块相位板的 1 次相位系数为  $6.8942 \times 10^{-4}$ ,2 次相位系数为  $-2.4086 \times 10^{-2}$ ,3 次相位系数为  $-4.1051 \times 10^{-4}$ ,4 次相位系数为  $7.7921 \times 10^{-5}$ ,5 次相位系数为  $-2.3295 \times 10^{-3}$ ,6 次相位系数为  $1.7720 \times 10^{-8}$ 。第 2 块相位板的 1 次相位系数为  $-6.8942 \times 10^{-4}$ ,2 次相位系数为  $2.4086 \times 10^{-2}$ ,3 次相位系数为  $4.1051 \times 10^{-4}$ ,4 次相位系数为  $-7.7921 \times 10^{-5}$ ,5 次相位系数为  $2.3295 \times 10^{-3}$ ,6 次相位系数为  $-1.7720 \times 10^{-8}$ 。相位板的参数和光学窗口的参数、后组透镜以及系统总体的成像性能有关,因此其校正补偿范围由光学窗口的参数、后组透镜以及系统总体的成像性能决定,不同的参数和要求,相位板的校正补偿范围也不同。

相位板制冷型的中红外共形光学系统采用一次成像的透射式结构,没有遮拦,光学透镜的参数如表 1 所示。光学系统总长可以很短,实现了  $100\%$  冷光阑效率,两个相位板后的校正透镜组由 4 片式结构,光学

Table 1 Optical data

No.	radius of curvature/mm	interval/mm	material
1	51.74	3.82	Si
2	-1015.29	3.21	—
3	-78.07	3.00	Ge
4	75.86	3.00	—
5	-34.08	4.00	Ge
6	-26.11	3.00	—
7	22.62	3.00	ZnSe
8	17.64	3.00	—
9	11.34	3.00	Si
10	9.97	3.00	—
11	$\infty$	19.80	—

材料分别为硅、锗、锗、硒化锌,其后是红外探测器组件。

相位板制冷型的中红外共形光学系统的光路图如图 3 所示。系统选用的是制冷型中红外探测器,因此需要考虑冷光阑效率,冷光阑效率是指来自于目标到指定像素的总立体角与整个冷屏开口到同一像素的总立体角之比,采用相位板的制冷型中红外共形光学系统要满足  $100\%$  冷光阑效率。

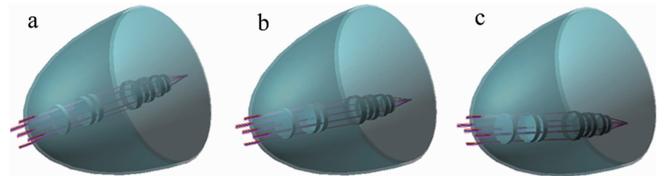


Fig. 3 The infrared conformal optical system

该系统采用一次成像的光学结构形式,设计时将采用相位板的制冷型中红外共形光学系统的出瞳和探测器的冷光阑重合,最终设计时,该光学系统出瞳大小为  $10.5\text{mm}$ ,探测器的冷光阑的大小为  $10.5\text{mm}$ ,出瞳在探测器像面前  $19.8\text{mm}$ ,和探测器的冷光阑重合。可知采用相位板的制冷型中红外共形光学系统满足  $100\%$  冷光阑效率。

## 2 像质评价

### 2.1 调制传递函数

对采用相位板的制冷型中红外共形光学系统分析了成像质量,进行了像质评价。调制传递函数(modulation transfer function, MTF)反映光学系统对目标不同频率的传递能力,低频、中频、高频分别对应目标的轮廓、层次和细节的传递情况。采用相位板的制冷型中红外共形光学系统在最大空间频率为  $17\text{lp/mm}$  时的 MTF 曲线如图 4 所示。

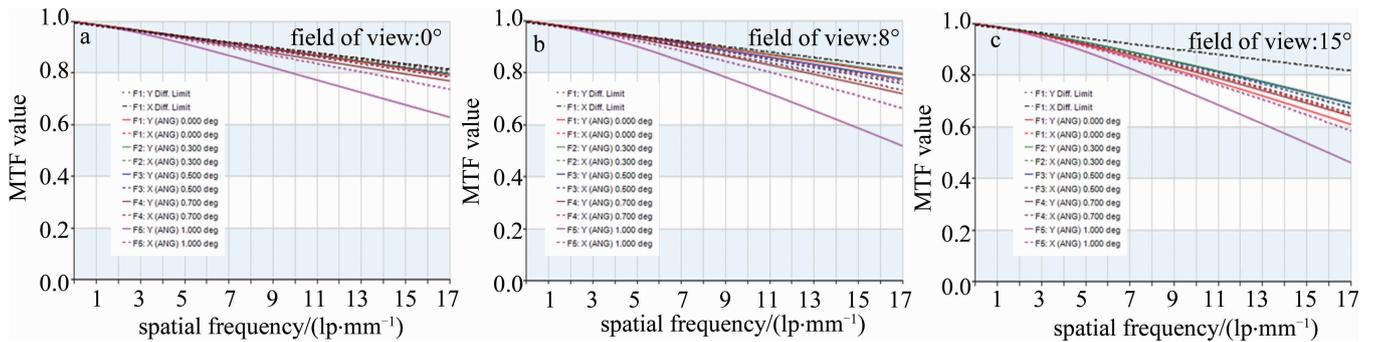


Fig. 4 MTF curves

由 MTF 曲线图可以看出,系统的像质接近衍射极限,在最大空间频率 17lp/mm 处的 MTF 值(相对值)几乎都大于 0.6,成像质量良好,满足设计要求。

## 2.2 点列图

均方根弥散斑直径也是衡量红外成像光学系统成

像质量的重要指标。图 5 中分别给出了采用相位板的制冷型中红外共形光学系统在 0°,8°,15°扫描视场的点列图。由图 5 中数据可知,制冷型中红外光学系统在 0°,8°,15°扫描视场时,全视场内均方根弥散斑直径最大为 28.9 $\mu\text{m}$ ,小于一个像元尺寸,满足设计要求。

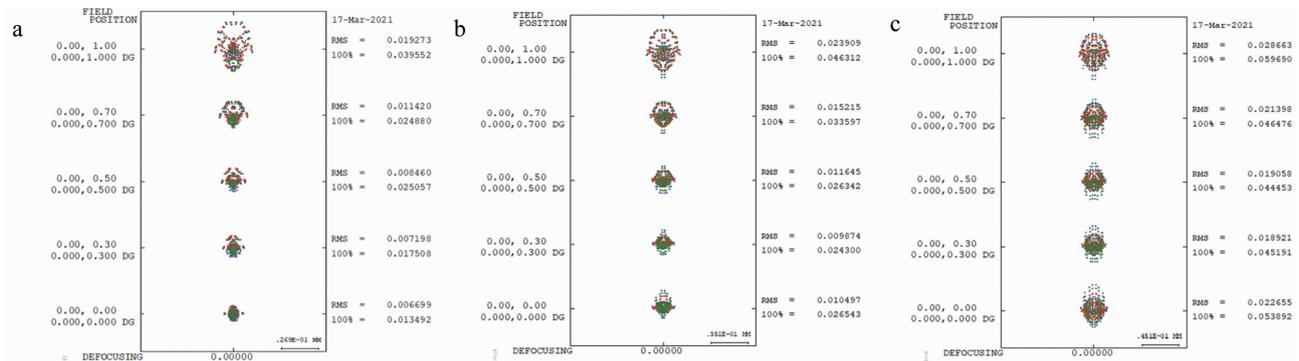


Fig. 5 Spot diagram

a—field of view is 0° b—field of view is 8° c—field of view is 15°

## 3 结论

提出利用一对轴向方向移动的相位板对共形光学头罩引入的复杂像差进行动态校正,构建了一种红外共形光学成像系统。系统工作波段为 3.7 $\mu\text{m}$  ~ 4.8 $\mu\text{m}$ , $F$ 数为 1.0,光学系统出瞳大小为 10.5mm,探测器的冷光阑的大小为 10.5mm,光学系统的出瞳在探测器像面前 19.8mm,和探测器的冷光阑重合,光学系统满足 100%冷光阑效率。通过成像质量分析可以看出,光学系统具有较好的成像特性,利用相位板较好的校正了引入共形光学头罩带来的复杂像差。

### 参考文献

- [1] MILLS J P. Conformal optics: Theory and practice[J]. Proceedings of the SPIE, 2001, 4442: 101-107.
- [2] TROTTA P A. Precision conformal optics technology program[J]. Proceedings of the SPIE, 2001, 4375: 96-107.
- [3] CROWTHER B G, MCKENNEY D B, MILLS J P. Aberrations of optical domes[J]. Proceedings of the SPIE, 1998, 3482: 48-61.
- [4] MILLS J P. Conformal dome aberration correction with counter-rotating phase plates[J]. Proceedings of the SPIE, 1999, 3705: 201-208.
- [5] PALUSINSKI I A, SASIÁN J M, GREIVENKAMP J E. Lateral shift variable aberration generators[J]. Applied Optics, 1999, 38(1): 86-90.
- [6] MITCHELL T A, SASIÁN J M. Variable aberration correction using axially translating phase plates[J]. Proceedings of the SPIE, 1999, 3705: 209-220.
- [7] SUO W K, HU W G, ZHANG Y, et al. Research of visual positioning method during UAV autonomous landing process[J]. Laser Technology, 2019, 43(5): 691-696(in Chinese).
- [8] SPARROLD S W. Arch corrector for conformal optical systems[J]. Proceedings of the SPIE, 1999, 3705: 189-200.
- [9] LIU Sh, NIU Y X, LIU H Y. Design of fisheye lens of omnidirectional gaze photoelectric imaging systems[J]. Laser Technology, 2017, 41(2): 296-301(in Chinese).
- [10] WHALEN M R. Correcting variable third order astigmatism introduced by conformal aspheric surfaces[J]. Proceedings of the SPIE, 3482: 62-73.
- [11] KNAPP D J. Fundamentals of Conformal Dome Design[J]. Proceedings of the SPIE, 2002, 4832: 394-409.
- [12] YANG Zh G, CHEN H Q, WANG L, et al. Investigation of laser aberration compensation using an intra-cavity deformable mirror[J].

- Laser Technology, 2007, 31(5): 449-451 (in Chinese).
- [13] CROWTHER B G, MCKENNEY D B, MILLS J P. Aberrations of Optical Domes [J]. Proceedings of the SPIE, 2014, 3482: 48-61.
- [14] ZHAO N, CHANG J, SUN Zh H, *et al.* Summarize of Conformal optics [J]. Proceedings of the SPIE, 2008, 6624:1-7.
- [15] SUN J X, LI X B, WU W, *et al.* Conformal optical system design and MTF measuring [J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 43(5): 47-53 (in Chinese).
- [16] YU L Y, WEI Q, ZHANG T Y, *et al.* Design of athermal conformal optical system based on rotated phase plates [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(2): 528-534 (in Chinese).
- [17] YU L Y. Research of aberration correction technology of a seeker with conformal dome and wide field of regard [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 72-78 (in Chinese).
- [18] DANG F Y. Research on dynamic aberration characteristics and correction methods of conformal dome [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 32-35 (in Chinese).
- [19] SUN J X, SUN Q, FANG W. Conformal optical system aberration correction with later holding fixed corrector [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 1005-1009 (in Chinese).
- [20] WEI Q, WANG Ch, JIANG H H, *et al.* Manufacture of mid-wave infrared missile used conformal optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(5): 1298-1301 (in Chinese).
- [21] LIU Y M, MA J, MA H P, *et al.* Zernike aberration characteristics of precision conformal optical windows [J]. Proceedings of the SPIE, 2010, 7544:1-7.
- [22] SPARROLD S W, MILLS J P, KNAPP D J, *et al.* Conformal dome correction with counterrotating phase plates [J]. Optical Engineering, 2000, 39(7): 1822-1829.