

doi: 10.3788/gzxb20124107.0757

# 利用自由曲面进行微变焦共形光学系统设计

孙金霞<sup>1</sup>, 潘国庆<sup>1,2</sup>, 孙强<sup>3</sup>

(1 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

(2 航空制导武器航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471009)

(3 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 光电技术研发中心, 长春 130033)

**摘 要:**为使万向支架式共形导引头光学系统获得更大的无渐晕观察视场, 设计了利用自由曲面进行像差平衡补偿的折反射式微变焦共形导引头光学系统. 系统在所有观察视场中的均方根点斑直径都接近或小于像元尺寸, 且在非零搜索观察视场中都具有接近衍射极限的成像质量, 该方法使共形光学系统获得大的无渐晕观察视场成为可能.

**关键词:**共形光学; 整流罩; 自由曲面; 微变焦; 光学设计

**中图分类号:** O439

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2012)07-0757-5

## 0 引言

目前飞行器整流罩多采用球形或平板拼接结构设计, 其设计和制造相对简单, 但空气动力学性能较差. 相对于传统的结构设计方案, 与飞行器主体共形的整流罩不仅气动阻力小, 且具有雷达散射截面小、可以获得大于  $90^\circ$  的无渐晕观察视场以及有利于改善飞行器头部附近的热流特性等特点<sup>[1]</sup>. 上述共形光学系统的设计对于未来飞行器系统应用性能的提高有着深远的影响, 但整流罩的非球面特性以及非零观察视场的非旋转轴对称特性使得该系统的设计、加工及检测都存在很大的困难. 在口径或观察视场较小的共形光学系统中通过合理选择万向节点位置<sup>[2]</sup>以及采用旋转轴对称式固定校正板<sup>[3]</sup>等方式进行像差校正后的残余动态像差已完全处于成像要求范围之内, 从而避免了系统中动态校正板<sup>[4-8]</sup>的应用, 有利于导引头成像系统稳定性的提高. 旋转轴对称固定校正板的使用限制了系统的搜索观察视场, 且固定校正板使用越多, 实际成像系统的旋转空间越小, 系统的搜索观察视场也越小. 为平滑各观察视场中的动态像差, 本文所提出的采用自由曲面校正板和微调焦结构相结合的共形光学系统设计方案使共形光学系统获得大的无渐晕观察视场成为可能.

## 1 共形整流罩结构像差特性分析

与捷联导引头结构相比, 采用万向支架结构能够在扩大系统搜索范围的同时降低轴外像差对成像

质量的影响, 从而提高系统的搜索跟踪准确度. 万向支架式共形导引头整流罩结构外形虽然具有旋转对称性, 但在非零观察视场中系统仅具有面对称性, 子午和弧矢曲率半径的不同使系统在各观察视场中具有不同的近主光线特性, 其设计已经超出了旋转轴对称光学系统的设计范围. 图 1 为径长比为 1、口径 70 mm 的椭球面沿法线向子午和弧矢曲率半径的偏差曲线, 该曲线表明沿子午方向椭球面逐渐向柱面过渡, 对光线的会聚能力逐渐减弱, 所以共形光学系统中除初级球差外的所有低阶像差都会存在明显的波动性, 其中像散的动态变化范围最大.

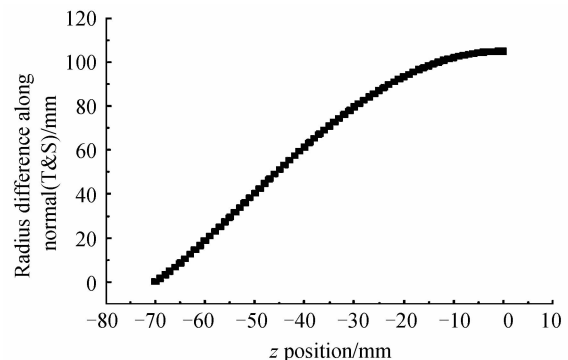


图 1 子午和弧矢曲率半径差

Fig. 1 Radius difference between tangential and sagittal section

## 2 利用自由曲面的像差校正方法

共形光学系统非零观察中的像差主要来自于整流罩子午面的不对称性以及子午和弧矢面的不对称

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60977001)资助

第一作者: 孙金霞(1982-), 女, 工程师, 博士, 主要研究方向为光学系统设计. Email: sunjinx@126.com

导师(通讯作者): 孙强(1979-), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为光学仪器设计. Email: sunqiang\_skla0@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-12-13; 修回日期: 2012-04-05

特性,这些特殊性使得系统中存在严重影响像质但目前仍无法估量的高级像差.倘若子午面内的整流罩结构也具有面对称特性,系统将变成双曲率的变形光学系统,则子午焦面和弧矢焦面的不重合可以利用柱面镜结构来调节.然而共形整流罩在非零观察视场中的子午面不具有任何对称性,若要校正子午光束的像差就不得不用非旋转轴对称结构,所以在共形光学系统中最行之有效的校正板结构应该是双曲率校正板<sup>[6-7]</sup>.前置固定校正板是以零度搜索观察视场为中心逐渐扩展其在非零观察视场中的面型自由度的,受限于非球面的像差校正能力,该结构无法满足 50 度以外观察视场的像差校正要求.为使系统具有更大的观察视场,可以用自由曲面弧形校正板破坏整流罩在零度观察视场中的旋转轴对称性,使各观察视场具有尽可能相似的波前特性,从而减轻实际成像系统的设计压力.

以蓝宝石椭球整流罩在中波段的红外成像光学系统为例验证自由曲面弧形校正板的像差校正作用,系统设计参量如表 1,光线系统基本面型参量如表 2.

表 1 共形导引头光学系统设计参量

Table 1 Parameters of conformal optical system design

Material	Sapphire
Fineness ratio	1
Dome diameter	70 mm
Entrance pupil	30 mm
$F/\#$	2
Field of regard	$\pm 80^\circ$
Pixel size	$30 \mu\text{m}$
Number of pixels	$128 \times 128$

表 2 共形导引头光学系统面型参量

Table 2 Parameters of conformal optical lens data

Surface type	Radius	Thickness	Glass	Conic
1 conic	17.5	2	sapphire	-0.75
2 conic	16.347 3	11.036 6	-	-0.762 5
3 xypolynomial	20.357 0	1.2	znse	-
4 xypolynomial	19.446 8	31.963 4	-	-
5 conic	-47.949	-16.327	mirror	-0.875 5
6 sphere	415.608	12.321 4	mirror	-
7 even asphere	-11.710 5	2.111 8	silicon	-1.154 5
8 sphere	-8.658 5	0.522 5	-	-
9 even asphere	10.418 6	3.122 4	germanium	0.430 4
10 even asphere	9.665 3	3.609 2	-	1.972 1
11 xypolynomial	9.188 3	2.551 3	znse	-
12 xypolynomial	37.103	11.048 8	-	-
13 sphere	-	1	silicon	-
14 sphere	-	19	-	-

整流罩后的自由曲面校正板采用硒化锌材料,实际成像系统采用折反射式二次成像结构,二次成像光路由三片透镜组成,其材料分别为硅,锗,硒化锌.图 2 为处于  $0^\circ$  和  $80^\circ$  观察视场中的万向支架式椭球整流罩导引头光学系统结构图,其中锗透镜前表面带有旋转轴对称的衍射面用以校正系统色差<sup>[10]</sup>.由于自由曲面的校正板使各观察视场均不具有旋转对称性,所以二次成像系统中的硒化锌透镜亦采用了自由曲面面型来平衡所有观察视场中的形变波前.图 3 为该系统在  $0^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $40^\circ$  和  $80^\circ$  观察视场中的调制传递函数曲线,从中可以看到系统子午和弧矢方向的传递函数相差不大,非零观察视场中的像散得到很好的抑制,这也充分证明了利用自由曲面校正板破坏小观察视场的旋转轴对称性,使各观察视场具有尽可能相似的形变波前这一设计思想的可行性.

由于椭球整流罩沿法线向子午和弧矢曲率半径的不同,使各观察视场具有不同的近主光线光学特性.考虑弧矢方向的面对称性,共形光学系统应以近主光线弧矢焦平面为参考面.就径长比为 1、口径 70 毫米的椭球面而言,椭圆半短轴向的弧矢曲率半径是椭球面顶点处的 2 倍,所以椭球整流罩在各观察视场中对光线的会聚能力不同,但其光焦度变化范围不大.基于上述特点我们将实际成像系统中的锗

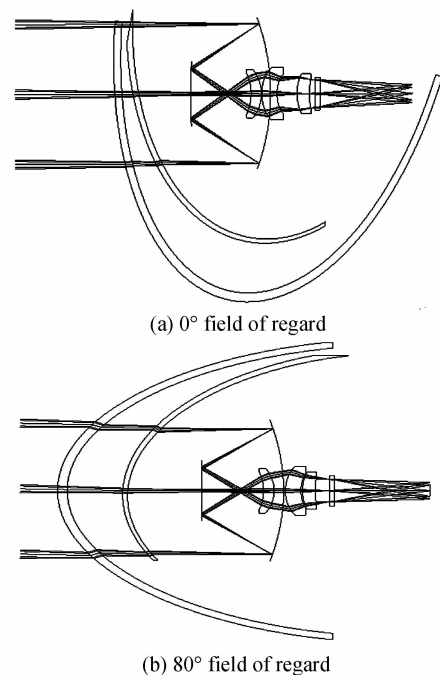


图 2 处于  $0^\circ$  和  $80^\circ$  观察视场中的万向支架式椭球整流罩导引头光学系统

Fig. 2 Optical system of gimbaled conformal seeker in  $0^\circ$  and  $80^\circ$  field of regard

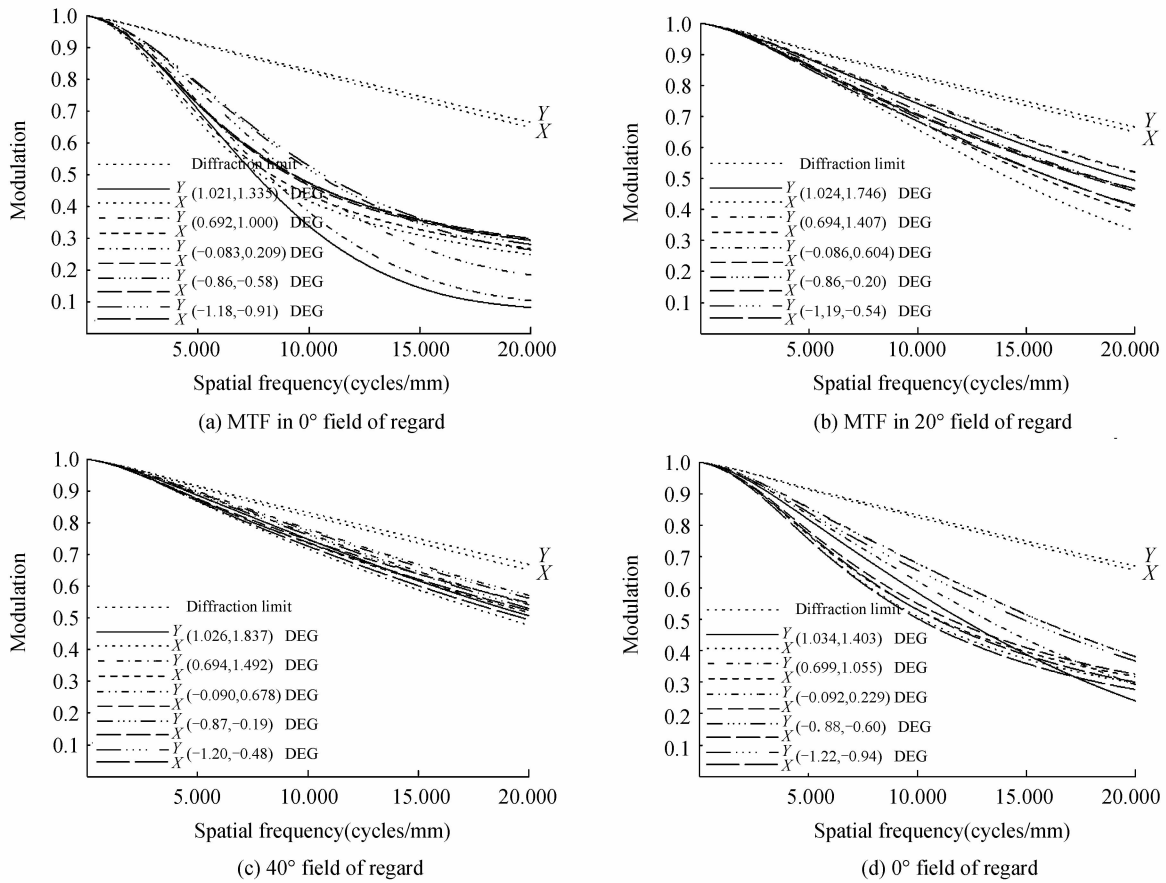


图3 共形导引头光学系统在 0°、20°、40°和 80°观察场中的调制传递函数

Fig.3 MTF of conformal seeker with 0°, 20°, 40°and 80° field of regard

透镜作为系统微调焦元件,其与硅透镜之间的空气间隔随观察视场的变化曲线如图 4,图 5 为系统轴上视场的均方根点斑直径变化曲线,经变焦补偿后的共形导引头光学系统在 0°、20°、40°和 80°观察视场中的调制传递函数曲线如图 6 所示.从图中可以看到经微调焦后的共形导引头系统在所有观察视场

中的频率传递特性都得到了增强,且在非零观察视场中都达到了接近衍射极限的像质,零度观察视场附近虽然没有获得接近衍射极限的频率传递特性,但像面处的均方根点斑直径仍满足探测器成像要求.

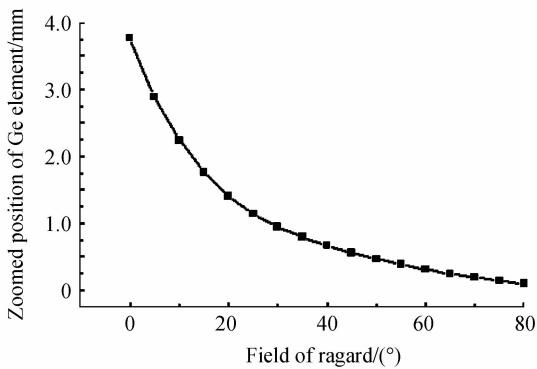


图4 微调焦锗透镜的空间位置变化曲线

Fig.4 Slight zoomed position of Ge element

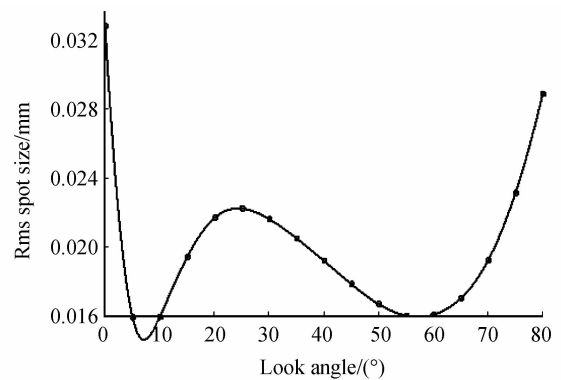


图5 微调焦共形导引头光学系统的轴上视场均方根点斑直径

Fig.5 RMS spot diameter along optical axis of slight zoomed conformal seeker

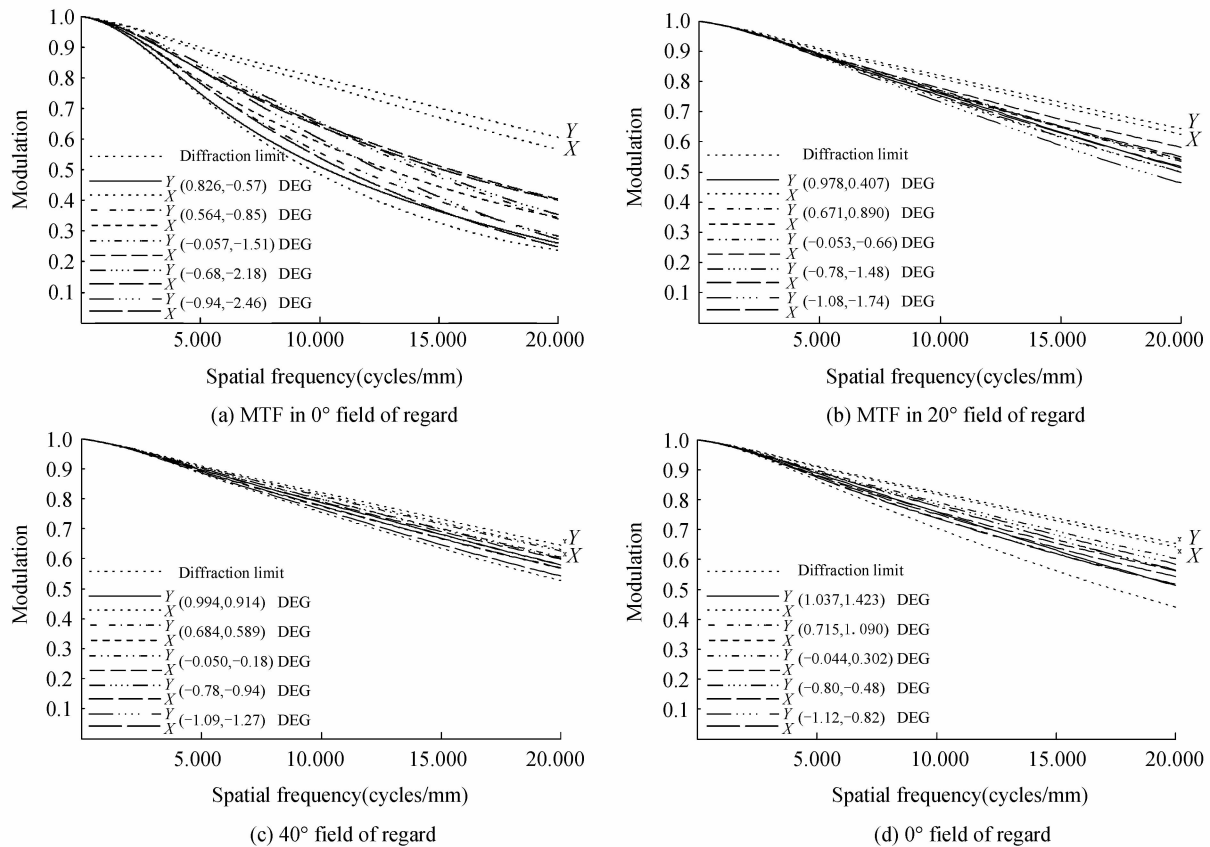


图6 微调焦共形导引头光学系统在0°, 20°, 40°, 80°观察视场中的调制传递函数  
Fig. 6 MTF of slight zoomed conformal seeker with 0°, 20°, 40°, 80° field of regard

### 3 结论

本文利用自由曲面设计的微变焦中波红外共形光学系统充分利用了自由曲面在非旋转轴对称光学系统中的像差校正作用,使系统在非零搜索观察视场中均具有接近衍射极限的成像质量.该设计方案突破了旋转轴对称固定校正板的视场限制弊端,使获得大的无渐晕观察视场成为可能,但这种随弹体旋转的校正板和微变焦结构对导引头光学系统的稳定性增加了负担.

#### 参考文献

- [1] TROTTA P A. Precision conformal optics technology program [C]. *SPIE*, 2001, **4375**: 96-107.
- [2] SUN Jin-xia, LIU Jian-zhuo, SUN Qiang, *et al.* Application of the aberration correction criteria in conformal optical system design[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 223-226.  
孙金霞,刘建卓,孙强,等.消像差条件在共形光学系统中的应用[J].光子学报,2010,**39**(2):223-226.
- [3] KNAPP D J. Fundamentals of conformal domes design[C]. *SPIE*, 2002, **4832**: 394-409.
- [4] WHALEN M R. Correcting variable third-order astigmatism introduced by conformal aspheric surfaces[C]. *SPIE*, 1998,

3482: 62-73.

- [5] SPARROLD S W, MILLS J P, KNAPP D J, *et al.* Conformal dome correction with counterrotating phase plates[J]. *Optical Engineering*, 2000, **39**: 1822-1829.
- [6] SPARROLD S W. Arch corrector for conformal optical systems[C]. *SPIE*, 1999, **3705**: 189-200.
- [7] SPARROLD S W, KNAPP D J, MANHART P K, *et al.* Capabilities of an arch element for correcting conformal optical domes[C]. *SPIE*, 1999, **3779**: 434-444.
- [8] LI Yan, LI Lin, HUANG Yi-fan, *et al.* Conformal optical design using counterrotating wedges and zernike polynomial [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1788-1792.  
李岩,李林,黄一帆,等.基于反转光楔和泽尼克多项式的共形光学设计[J].光子学报,2008,**37**(9): 1788-1792.
- [9] SUN Jin-xia, SUN Qiang, LU Zhen-wu, *et al.* Characteristic analysis and correction of conformal dome aberration [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, **29**(5): 713-718.  
孙金霞,孙强,卢振武,等.共形整流罩像差特性分析及校正方法研究[J].应用光学,2008,**29**(5):713-718.
- [10] SUN Jin-xia, LIU Jian-zhuo, SUN Qiang, *et al.* Athermal design for hybrid refractive/diffractive conformal optical system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(5): 764-770.  
孙金霞,刘建卓,孙强,等.折/衍混合消热差共形光学系统设计[J].光学精密工程,2010,**18**(4):792-797.

## Slight Zoomed Conformal Optical System Design Using Freeform Surface

SUN Jin-xia<sup>1</sup>, PAN Guo-qing<sup>1,2</sup>, SUN Qiang<sup>3</sup>

(1 *China Airborne Missile Academy, Luoyang, Henan 471009, China*)

(2 *Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Airborne Guided Weapons, Luoyang, Henan 471009, China*)

(3 *Opto-electricity Technology Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

**Abstract:** In order to find un-vignetted target in the large field of regard in gimbaleed conformal seeker, a freeform corrector and slight zoomed catadioptric real imaging system are used to balance and correct dynamic aberrations. The RMS spot diameter of the slight zoomed conformal optical system is near or smaller than the pixel size in all field of regard. Besides, the system achieves near diffraction limited performance even in big field of regard.

**Key words:** Conformal optics; Dome; Freeform surface; Slight zoomed; Lens design