

新型折反射式椭球形整流罩光学系统的设计

王 超^{1,2} 张 新¹ 曲贺盟^{1,2} 史广维¹ 王灵杰¹

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 100049

摘要 提出了一种可用于指导非旋转对称、折反射式光学系统设计的 Wasserman-Wolf 曲面设计方法,并将其用于设计椭球形整流罩光学系统,得到的系统具有结构尺寸小的优点。利用最小二乘拟合的方法使系统初始结构兼顾各个扫描视场的像差校正需求,克服了以往只针对零视场计算校正元件初始参数致使扩展至整个扫描视场时系统评价函数难以收敛的弊端。同时,从平面对称的矢量像差理论出发,分析了平面对称反射镜的像差特性,阐述了在不同扫描视场中,利用反射镜倾斜来进行动态像差补偿的原理。设计了一套工作波段为中波红外的椭球形整流罩光学系统,该系统的调制传递函数(MTF)在整个扫描视场内接近衍射极限。

关键词 光学设计;折反射红外系统;Wasserman-Wolf 曲面;椭球形整流罩;平面对称的矢量像差理论

中图分类号 TN216 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0822002

Design of Novel Catadioptric Elliptical Dome Optical System

Wang Chao^{1,2} Zhang Xin¹ Qu Hemeng^{1,2} Shi Guangwei¹ Wang Lingjie¹

¹ Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A design method of Wasserman-Wolf surfaces is proposed, and it can be used for non-rotationally symmetric catadioptric system. The method is used to design an elliptical dome optical system with compact structure and small volume. Least square method is used to make the initial structure of the system concern the aberration-corrected need of each scanning field. It is beneficial to overcoming the disadvantage that the system evaluation function is difficult to convergence when the entire scanning field is expanded from zero field of regard with respect to calculating and correcting the initial parameters of the components. In addition, the aberration properties of plane-symmetry mirrors with the vector aberration theory of plane symmetry are analyzed and principle by using tilt mirrors to compensate the dynamical aberration in different scanning fields is expounded. At last, a design example of mid-wave infrared elliptical dome optical system is demonstrated, and the results show that the modulation transfer function (MTF) of the optical system approaches the diffraction limit across the entire scanning field.

Key words optical design; catadioptric infrared system; Wasserman-Wolf surfaces; elliptical dome; vector aberration theory of plane symmetry

OCIS codes 220.4830; 080.1005; 080.4228

1 引 言

传统飞行器前端的光学整流罩往往是一个同心的球面罩或一个半球罩,它除了对飞行器进行保护以外,也是整个成像光学系统的一个组成部分。这

种整流罩在不同的观察视场中给后续成像系统引入的像差具有一致性,其设计、制造和检测难度低,应用较为成熟。然而,当飞行器以极高的速度飞行时将遇到严重的空气阻力问题,此时同心球面罩并非

收稿日期: 2012-01-12; 收到修改稿日期: 2012-04-01

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61007009)资助课题。

作者简介: 王 超(1986—),女,博士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: Nicklo19992009@163.com

导师简介: 张 新(1968—),男,博士,研究员,主要从事非常规复杂光学系统设计方面的研究。

E-mail: optlab@ciomp.ac.cn

是理想的解决方案,形状与飞行器气动外形一致,且长径比大于 0.5 的尖拱形头罩更能符合空气动力学的要求^[1]。美国在 2001 年成功将长径比为 1.5 的椭球形尖拱形头罩应用于红外成像导引头,并且得出在时速 3 马赫(3 倍音速)条件下,椭球形整流罩给弹体带来的阻力仅为球形整流罩一半的结论^[2]。

椭球形整流罩与传统结构相比,不仅气动阻力小,而且其雷达散射截面较小,易获得大于 90° 的无渐晕扫描视场等诸多优点^[3]。但是,此种整流罩用于实际成像的部分随着扫描视场的变化将逐渐失去旋转对称特性,因而引入大量动态变化的像差,其中给成像质量带来最严重影响的是球差、彗差和像散,像散的影响尤为恶劣,给后续光学系统的设计带来极大挑战。目前用于飞行器整流罩内部的红外成像系统受到结构尺寸的严格限制^[4,5],如完全使用折射式系统,能够得到好的成像效果,但需要 4 片以上透镜,且很难将系统总长控制在头罩总长度的范围之内^[6,7]。因此,有必要使用折反射式的结构形式设计此类成像系统。

本文扩展了 Wasserman-Wolf 微分方程的使用范围,使之适用于指导高度非旋转对称、折反射式的光学系统设计,且设计出的两镜校正系统兼顾了各个扫描视场的需求,克服以往单一针对零视场计算校正元件初始参数的弊端。折反射式的结构也使系统紧凑性大大加强。另外,利用平面对称的矢量像差理论阐述了利用反射镜倾斜进行动态像差补偿的原理。最后根据以上思想设计了一套椭球形整流罩及后续光学系统的实例,验证了理论的正确性。

2 椭球形整流罩像差分析

为了分析整流罩引入的像差并验证成像效果,利用光学设计软件模拟了一个等厚椭球形整流罩,其材料为氟化镁,最大口径为 100 mm,厚度为 4 mm,长径比为 1.0,头罩后面成像系统扫描视场变化范围为 0°~40°。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。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 5°。依照惯例,采用泽尼克(Zernike)条纹多项式对椭球形整流罩光学系统的出瞳处波面进行拟合^[8,9],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初级球差 Z_4 、彗差 Z_3 和像散 Z_2 随扫描视场的变化曲线。

如图 1 所示,随着扫描视场的变化,初级像散项

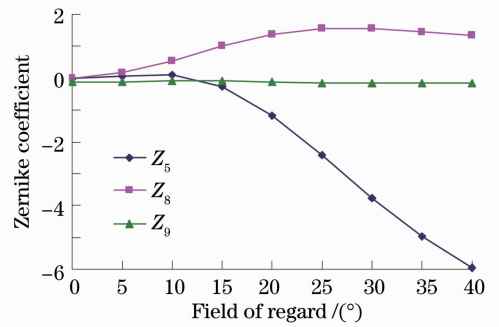


图 1 整流罩主要像差项所对应的泽尼克系数随扫描视场的变化曲线

Fig. 1 Zernike aberration coefficients for Z_5 , Z_8 , Z_9 versus fields of regard (FORs) of the dome

Z_5 和初级彗差项 Z_3 是影响系统成像质量的主要因素,其中像散的峰谷值最大。这是由于随着扫描视场的增大,椭球形整流罩的对称性逐渐退化,其面形接近于柱面,所以引入较大的像散。

3 两镜校正系统初始结构设计原理

Born^[10]曾指出,对于任意的旋转对称光学系统,均可利用两个相邻且满足正弦条件的非球面消除其像散和彗差。这两个面即为 Wassermann-Wolf(W-W)曲面。Knapp^[11]在其博士论文中将 W-W 理论应用于建立椭球面整流罩光学系统的固定校正元件的初始结构,并且拓宽了 W-W 理论的适用范围,使之可以用于指导非旋转对称光学系统的设计。

在含椭球形窗口的系统中,应用 Knapp 的理论只能够设计透射式的固定校正器结构,并且每个结构只针对单一的扫描视场才能有效减小像差。对视场角相差较多的扫描视场点,解算出的透射式的校正器表面形状有较大不同,如图 2 所示(为了显示校正效果,光阑处加有理想透镜)。因此,通常只针对零视场解算出校正元件,元件对其他视场点的像差补偿作用完全依靠软件优化来实现,导致一旦扩展至整个扫描视场,优化评价函数就会收敛缓慢或难

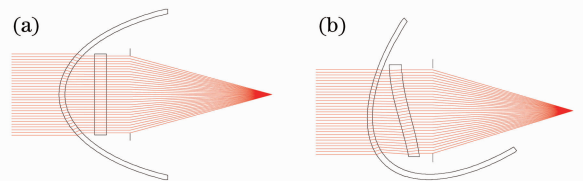


图 2 不同扫描视场所对应的透射式校正器。(a) 0°; (b) 42°

Fig. 2 Transmission correctors with different FORs. (a) 0°; (b) 42°

以收敛。

W-W 曲面既可以是一对透射面,也可以是反射面。应用折射、反射定律和光线追迹公式推导了一

对 W-W 反射面的微分方程,由于篇幅原因,只将最后得到的两个方程式列出(方程中各变量的物理含义见图 3),即

$$\frac{dz_1}{df} = \frac{A_1 \left[\frac{dh_{x1}}{df} + z_1 \frac{d(\cos \theta_{x0}/\cos \theta_{z0})}{df} \right] + B_1 \left[\frac{dh_{y1}}{df} + z_1 \frac{d(\cos \theta_{y0}/\cos \theta_{z0})}{df} \right]}{\left[1 - A_1 \frac{\cos \theta_{x0}}{\cos \theta_{z0}} - B_1 \frac{\cos \theta_{y0}}{\cos \theta_{z0}} \right]}, \quad (1)$$

$$\frac{dz_2}{df} = \frac{A_2 \left[\frac{dh_{x2}}{df} + z_2 \frac{d(\cos \theta_{x2}/\cos \theta_{z2})}{df} \right] + B_2 \left[\frac{dh_{y2}}{df} + z_2 \frac{d(\cos \theta_{y2}/\cos \theta_{z2})}{df} \right]}{\left[1 - A_2 \frac{\cos \theta_{x2}}{\cos \theta_{z2}} - B_2 \frac{\cos \theta_{y2}}{\cos \theta_{z2}} \right]}, \quad (2)$$

$$A_1 = \frac{R \cos \theta_{x0} - R_x}{-R \cos \theta_{z0} + R_z}, \quad A_2 = \frac{R \cos \theta_{x2} - R_x}{-R \cos \theta_{z2} + R_z}, \quad B_1 = \frac{R \cos \theta_{y0} - R_y}{-R \cos \theta_{z0} + R_z}, \quad B_2 = \frac{R \cos \theta_{y2} - R_y}{-R \cos \theta_{z2} + R_z}$$

式中 $R_x = x_2 - x_1$, $R_y = y_2 - y_1$, $R_z = z_2 - z_1 + d$, $R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}$, 此外,还需满足正弦条件:

$$\sin u / \sin u' = \beta (\beta \text{ 为常量}). \quad (3)$$

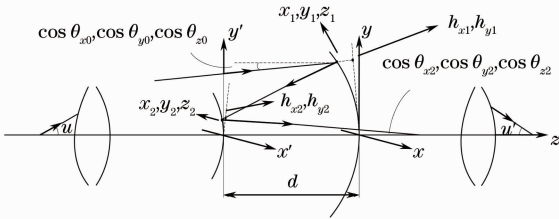


图 3 折反射式 Wassermann-Wolf 曲面光学系统示意图
Fig. 3 Schematic diagram of optical system containing catadioptric Wassermann-Wolf surfaces

以往通常令经过校正器出射的光线与光轴平行,并由后续元件承担绝大部分系统光焦度^[12]。本文为了减小系统总长,拟使经过两镜系统后出射的光线直接会聚于一点并成像。选择适当的焦距长度和次镜口径,解(1)式和(2)式两个微分方程,即可得到图 4 所示系统,其中两反射镜的面型均为仅含平面对称项的泽尼克标准多项式。

$0^\circ \sim 35^\circ$ 之间共 8 个视场点解微分方程,为了方便分析,将所有的系统画在一张图中,如图 5 所示。容易看出,视场变化时两镜面型变化不大,因此编写了一个最小二乘法面型拟合程序,将不同视场时的多个两镜校正器整合为一个通用的两镜校正器,并将此时的两镜系统作为整流罩后续光学系统的优化起点。此时系统的初始结构综合考虑了各个视场像差的校正

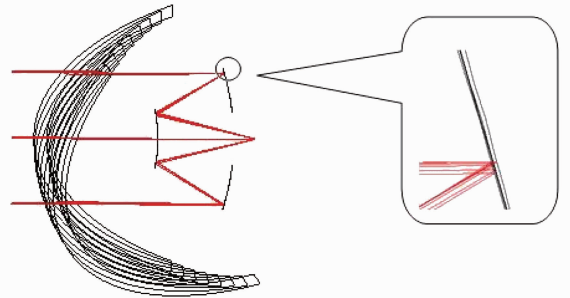


图 5 对 $0^\circ \sim 35^\circ$ 之间的 8 个视场点解折反射式 W-W 方程得到的系统

Fig. 5 Optical system after solving catadioptric W-W equations of 8 points of viewing field between $0^\circ \sim 35^\circ$

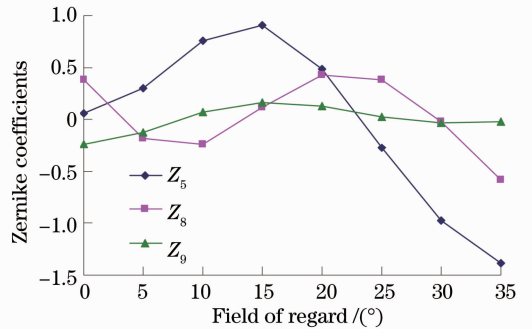


图 6 优化后系统像差曲线

Fig. 6 Zernike aberration coefficients for Z_5 , Z_8 , Z_9 versus FORs of the optimized system

令整流罩旋转达到所需要的目标视场。针对

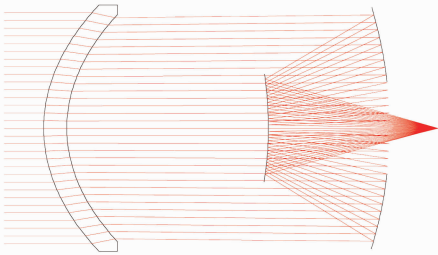


图 4 解折反射式 W-W 方程得到的光学系统
Fig. 4 Optical system after solving catadioptric W-W equations

需求。简单优化后,得到新的系统像差曲线,如图 6 所示。

4 利用平面对称的矢量像差理论对光学系统像差特性进行分析

目前已有文献[13]将矢量像差理论用于椭球形整流罩的像差特性分析。亚利桑那大学的 Sasian^[14,15]对矢量波像差理论进行修正,用于分析平面对称光学系统的波像差,这一理论可用于分析包含离轴高次非球面、超环面、仅含平面对称项的自由曲面等面型的系统。

根据 Sasian 的理论,矢量形式表示的平面对称

系统的波像差为

$$W(\mathbf{H}, \boldsymbol{\rho}, \mathbf{i}) = \sum_{k,m,n,p,q}^{\infty} W_{2k+n+p, 2m+n+q, n, p, q} \times (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H})^k (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho})^m (\mathbf{H} \cdot \boldsymbol{\rho})^n (\mathbf{i} \cdot \mathbf{H})^p (\mathbf{i} \cdot \boldsymbol{\rho})^q, \quad (4)$$

式中 \mathbf{H} 为归一化视场坐标, $\boldsymbol{\rho}$ 为归一化光瞳坐标, \mathbf{i} 为对称平面的单位法向量。

类似于旋转对称系统,当平面对称系统中某一表面存在倾斜时,其像差贡献中心不再重合于光轴,而是相对原有的像差场中心偏移了 $\boldsymbol{\sigma}_j$, 系统总体像差依然为各表面像差贡献之和^[16]。由于对称平面是统一的,省略了 \mathbf{i} 的下标,随扫描视场变化量最大的初级彗差和像散项表达式为

$$W_{\text{coma}} = [W_{\text{lc}}(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) + W_{\text{cc}}\mathbf{i}] \cdot \boldsymbol{\rho}(\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}), \quad (5)$$

$$W_{\text{asti}} = [W_{\text{qa}}(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j)^2 + W_{\text{la}}(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j)\mathbf{i} + W_{\text{ca}}\mathbf{i}^2] \cdot \boldsymbol{\rho}^2 = W_{\text{qa}}[\mathbf{H}^2 + a\mathbf{H} + b] \cdot \boldsymbol{\rho}^2, \quad (6)$$

式中

$$a = \frac{-2A_{\text{qa}} + W_{\text{la}}\mathbf{i}}{W_{\text{qa}}}, \quad b = \frac{A_{\text{qa}}^2 - A_{\text{la}}\mathbf{i} + W_{\text{ca}}\mathbf{i}^2}{W_{\text{qa}}}, \quad W_{\text{lc}} = \sum_j W_{13100j}, \quad W_{\text{cc}} = \sum_j W_{03001j}, \quad W_{\text{qa}} = \frac{1}{2} \sum_j W_{22200j},$$

$$A_{\text{qa}} = W_{\text{qa}}\boldsymbol{\sigma}_j, \quad A_{\text{qa}}^2 = W_{\text{qa}}\boldsymbol{\sigma}_j^2, \quad W_{\text{la}} = \frac{1}{2} \sum_j W_{12101j}, \quad A_{\text{la}} = W_{\text{la}}\boldsymbol{\sigma}_j, \quad W_{\text{ca}} = \frac{1}{2} \sum_j W_{02002j}.$$

令(5)式和(6)式右边等于 0, 求解得到彗差和像散在视场内的节点:

$$\mathbf{H}_{\text{coma}} = -\frac{W_{\text{cc}}}{W_{\text{lc}}}\mathbf{i} + \boldsymbol{\sigma}_j, \quad (7)$$

$$\mathbf{H}_{\text{asti}} = -\frac{a \pm \sqrt{a^2 - 4b}}{2}. \quad (8)$$

由以上推导可知,对于平面对称光学系统,在整个视场范围内,初级彗差具有单节点特性,且与视场呈线性关系,初级像散具有双节点特性,与视场呈二次函数关系。当系统中存在偏心倾斜的元件时,像差场中心与像面中心发生移动,节点个数不变。

以上结论证明,由整流罩倾斜引起的动态像差可由后面的平面对称反射镜进行适当的倾斜来进行补偿。因两次倾斜导致像差场中心向不同方向偏

移,从而使整流罩与反射镜单独引起的、像面上能观察到的像差相互抵消。下文以具体实例定性分析折射面倾角与引入像差大小的关系。

反射面可以看成折射面的特例。由于椭球形整流罩具有较小负光焦度,平行光线入射后呈发散状态,应考虑反射镜在发散光路中进行倾斜后的像差特性。采用光学设计软件分别建立了一个单反射镜和一个两镜成像系统,物点设在有限远,入瞳口径为 40 mm。反射镜面型均为泽尼克表面,仅含关于 $yo z$ 面平面对称项,对各项系数无特殊要求。令单镜系统的倾斜角度在 $\pm 1.6^\circ$ 内变化,两镜系统主镜无倾斜量,次镜倾斜角度在 $\pm 4.5^\circ$ 之间变化。图 7 表示随镜子倾斜角度变化的初级像散和彗差量。从

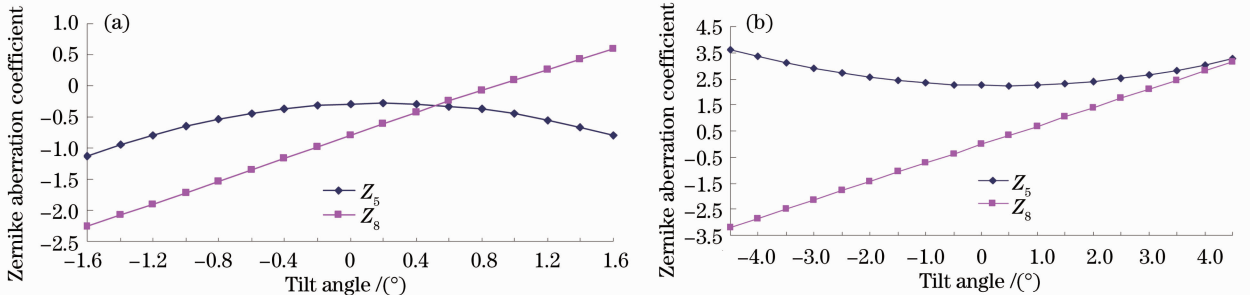


图 7 单镜(a)、两镜(b)系统的泽尼克像差系数随镜子倾斜角的变化曲线

Fig. 7 Zernike aberration coefficients for Z_5 and Z_8 versus tilt angles of single mirror (a) and two-mirror system (b)

图中可以看出,倾斜角在较小范围内(文中不超过 $\pm 4.5^\circ$)时,单镜和两镜系统的彗差大小与倾斜角近似呈线性关系,而像散大小与倾斜角近似成二次函数关系。在保持镜子面型不变情况下,连续改变镜子的倾斜角度,即可平滑改变产生的彗差和像散,从而补偿不同扫描视场中整流罩引入的动态像差。

5 设计实例

基于以上设计原理,设计了头罩直径为 100 mm,长径比为 1.0,入瞳口径为 40 mm,像空间 F 数为 1.5,工作波段为 $3\sim 5\ \mu\text{m}$,扫描视场为 $\pm 35^\circ$,瞬时视场为 0.6° 的椭球形整流罩光学系统。整个系统仅由

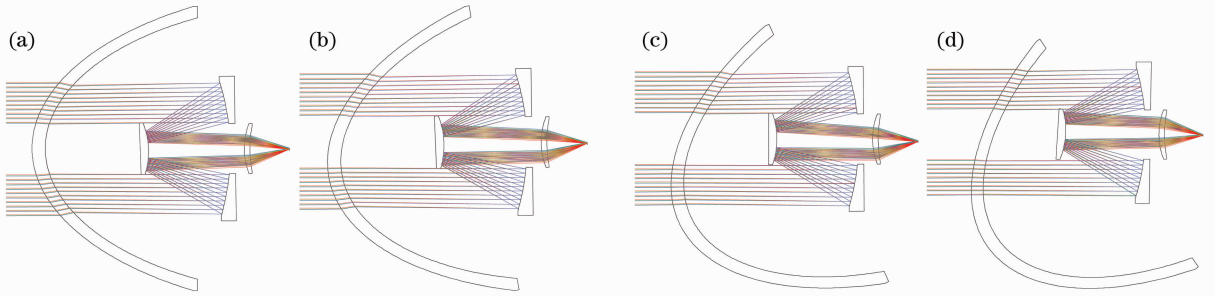


图 8 不同扫描视场的椭球形整流罩光学系统。(a) 0° ; (b) 10° ; (c) 25° ; (d) 35°

Fig. 8 Elliptical dome optical systems with different FORs. (a) 0° ; (b) 10° ; (c) 25° ; (d) 35°

图 9 以直观的方式展示了主镜和次镜随观察视场变化的倾斜角。在视场扫描过程中,可采用凸轮机构实现两镜倾斜角的非线性变化。微型电机旋转驱动凸轮转动,凸轮通过一定的传动机构,带动主镜和次镜绕镜面的水平轴线(x 轴)转动,完成主次镜倾斜调节过程^[17,18]。

图 10 展示了椭球形整流罩光学系统在不同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和瞬时视场范围内子午、弧矢的

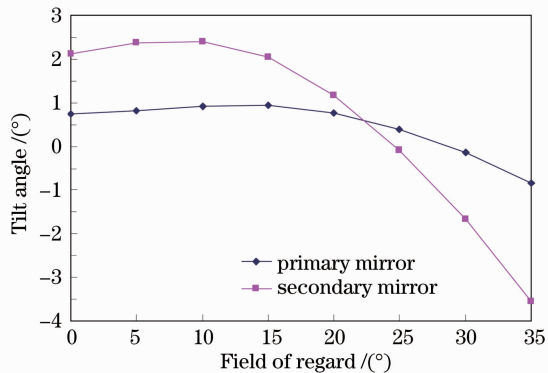


图 9 主镜和次镜的倾斜角随观察视场的变化曲线

Fig. 9 Tilt angles versus FORs of the primary mirror and the secondary mirror

前方整流罩和后续两镜反射系统以及一片锗镜组成。其中,两镜系统的面型均为泽尼克多项式表面,系统中心遮拦比为 0.37,锗镜后表面为高次非球面,系统总长(从整流罩前表面到像面)为 77.9 mm,在头罩总长度 100 mm 范围内,结构简单、紧凑。

在使用软件优化过程中,将两镜系统的主镜和次镜倾斜角设为变量,令其在 yoz 平面内绕 x 轴转动。对每个视场点,控制投射到最后一片锗镜上的光线高度和像高,以避免二次反射后的光线被主镜所阻拦或是成像在探测器以外。图 8 为处于各典型观察视场中的系统。

MTF 均接近衍射极限。

以往采用折反式设计的椭球形整流罩光学系统,其遮拦比在 0.35 左右或更高^[8,19]。本文由于使用了主次镜倾角动态变化的补偿方式,系统遮拦比为 0.37,使中频处 MTF 值稍有下降,但各视场的 MTF 实际值仍在 0.668 以上。为了进一步改善成像质量,下一步工作拟将光学系统的基本形式由同轴两反射镜改为离轴且无中心遮拦的两反或三反射镜^[20~22]。为了完成这一设计,需要解决以下两方面问题:

1) 本文的 Wasserman-Wolf 方法只能解算出不含偏心量的椭球形头罩校正元件。但离轴反射系统存在大偏心大倾斜量,为求解其初始结构,需要进一步推导适用于设计偏心元件的 W-W 公式。离轴系统各反射面的参考坐标系通常相对原始位置作旋转和平移,方程迭代求解过程中还要作必要的坐标变换。因此,需编制新的计算机程序以解算出反射系统参数。

2) 离轴反射光学系统自身存在严重的非对称性,因此在进行导引头内部机械结构设计时,其重量配平方案与常规不同,需要新型设计。

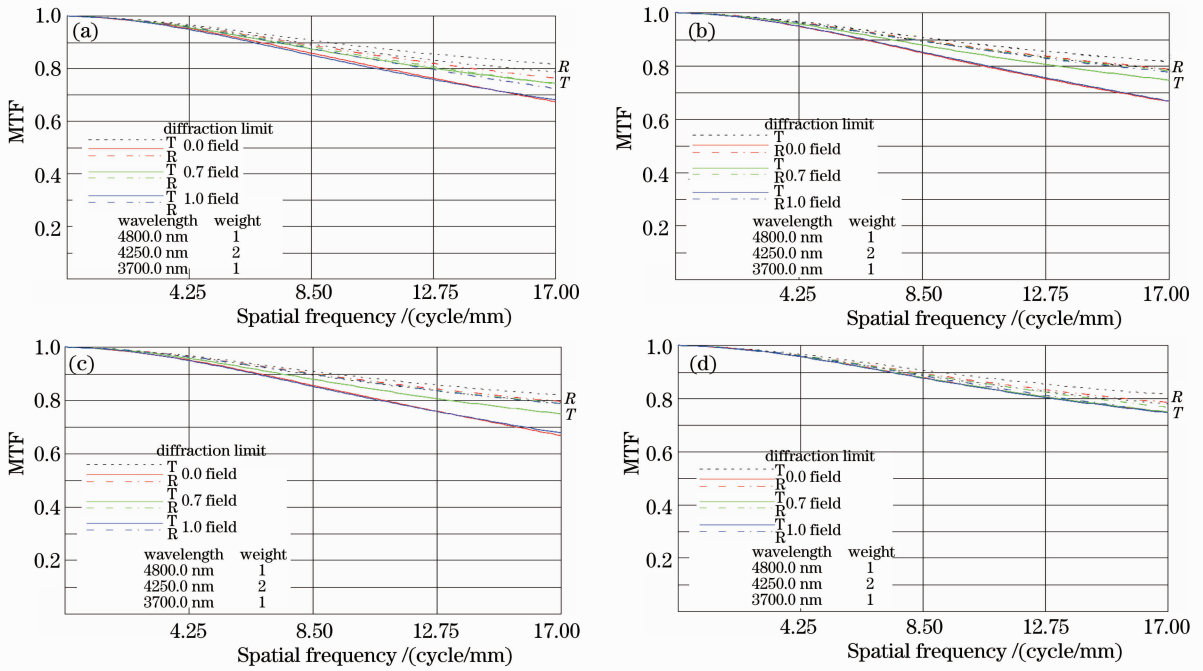


图 10 系统在(a) 0°, (b) 10°, (c) 25°, (d) 35°时的 MTF 曲线

Fig. 10 MTF curves of the system versus FORs. (a) 0°, (b) 10°, (c) 25°, (d) 35°

6 结 论

采用了折反射式 Wassermann-Wolf 曲面设计椭球形整流罩光学系统, 克服了以往采用 Wassermann-Wolf 方法仅能设计透射式校正元件, 使系统长度偏长且只针对单一扫描视场建立初始结构的问题。同时基于平面对称的矢量像差理论阐述了在不同扫描视场中, 利用反射镜倾斜进行前方头罩动态像差补偿的原理。利用以上原理设计了一套中波红外椭球面整流罩光学系统, 系统结构简单、紧凑, 整个系统在 ±35° 扫描视场下成像质量接近衍射极限。

参 考 文 献

- 1 D. J. Knapp. Fundamentals of conformal dome design [C]. *SPIE*, 2002, **4832**: 394~409
- 2 J. P. Mills. Conformal optics; theory and practice[C]. *SPIE*, 2001, **4442**: 101~107
- 3 P. A. Trotta. Precision conformal optics technology program [C]. *SPIE*, 2001, **4375**: 96~107
- 4 Qu Hemen, Zhang Xin, Wang Lingjie *et al.*. Design of a low F -number compact athermalizing infrared system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0322003
曲贺盟, 张新, 王灵杰等. 大相对孔径紧凑型无热化红外光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0322003
- 5 Geng Yaguang, Zhang Mingqian. Miniaturization technique of dual field optical system in imaging infrared seeker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(6): 887~890
耿亚光, 张明谦. 红外成像导引头双视场光学系统小型化技术[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(6): 887~890

- 6 Dalin Song, Jun Chang, Qingfeng Wang *et al.*. Conformal optical system design with a single fixed conic corrector [J]. *Chin. Phys. B*, 2011, **20**(7): 074201
- 7 Qu Hemen, Zhang Xin, Wang Lingjie. Design of elliptical window optical system based on fixed corrector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1022003
曲贺盟, 张新, 王灵杰. 基于固定校正元件的椭球形窗口光学系统设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1022003
- 8 M. R. Whalen. Correcting variable third order astigmatism introduced by conformal aspheric surfaces [C]. *SPIE*, 1998, **3482**: 62~73
- 9 B. G. Crowther, D. B. McKenney, J. P. Mills. Aberrations of optical domes [C]. *SPIE*, 1998, **3482**: 48~61
- 10 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Yang Jiasun Transl.. Beijing: Science Press, 1978. 259~266
玻恩, 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙译. 北京: 科学出版社, 1978. 259~266
- 11 D. J. Knapp. Conformal Optical Design [D]. Tucson: The University of Arizona, 2002. 133~150
- 12 Li Dongxi, Lu Zhenwu, Sun Qiang *et al.*. A research of conformal optical system based on Wassermann-Wolf equations [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(10): 5766~5771
李东熙, 卢振武, 孙强等. 基于 Wassermann-Wolf 方程的共形光学系统设计研究[J]. *物理学报*, 2007, **56**(10): 5766~5771
- 13 Sun Jinxia, Sun Qiang, Lu Zhenwu *et al.*. Characteristic analysis and correction of conformal radome aberration [J]. *J. Appl. Opt.*, 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[J]. *应用光学*, 2008, **29**(5): 713~718
- 14 J. M. Sasian. Imagery of the Bilateral Symmetrical Optical System [D]. Tucson: The University of Arizona, 1988. 22~24
- 15 J. M. Sasian. Design of a Schwarzschild flat-field, anastigmatic, unobstructed, wide-field telescope [J]. *Opt. Engng.*, 1990, **29**(1): 1~5
- 16 L. B. Moore, A. M. Hvisc, J. Sasian. Aberration fields of a combination of plane symmetric systems [J]. *Opt. Express*,

- 2008, **16**(20): 15655~15670
- 17 Wang Ping, Zhang Bao, Cheng Zhifeng *et al.*. Optimal design of cam structure of zoom lens [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(4): 893~898
王 平, 张 葆, 程志峰 等. 变焦距镜头凸轮结构优化设计[J]. *光学 精密工程*, 2010, **18**(4): 893~898
- 18 Liu Feng, Xu Xiping, Sun Xiangyang *et al.*. Design of infrared (IR) hybrid refractive/ diffractive lenses for target detecting/tracking[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2084~2088
刘 峰, 徐熙平, 孙向阳 等. 折/衍射混合红外目标搜索/跟踪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2084~2088
- 19 Yan Li, Lin Li, Yifan Huang *et al.*. Conformal optical design with combination of static and dynamic aberration corrections[J]. *Chin. Phys. B*, 2009, **18**(2): 565~570
- 20 D. J. Morgan, L. cook. Conformal Window Design with Static and Dynamic Aberration Correction [P]. US Patent 6018424, 2000
- 21 Xue Qingsheng, Huang Yu, Lin Guanyu. Optical system design of wide angle and high resolution spaceborne imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0822001
薛庆生, 黄 煜, 林冠宇. 大视场高分辨力星载成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0822001
- 22 Zhang Tingcheng, Wang Yongtian, Chang Jun *et al.*. Design of reflective zoom systems with 3 mirrors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 3034~3038
张庭成, 王涌天, 常 军 等. 三反变焦系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 3034~3038

栏目编辑: 王晓琰