

基于固定校正元件的椭球形窗口光学系统设计

曲贺盟^{1,2} 张 新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 提出了一种基于非球面固定校正元件的椭球形窗口光学系统设计方法。结合广义科丁顿公式及几何光学原理,推导出非球面校正元件的像散表达式,在此基础上,以消像散和正弦条件作为非球面校正元件像差评价参数,采用最小二乘法拟合出满足消像散及彗差的非球面面形方程。并建立以泽尼克(Zernike)多项式特殊优化函数取代传统的光学系统评价函数,克服了采用传统光学设计方法设计椭球形窗口光学系统时系统评价函数收敛缓慢的问题。成像光学系统设计时通过比对不同材料匹配实现了光学系统的无热化。给出了完整的椭球形窗口光学系统的设计,设计结果表明,系统的调制传递函数在整个扫描视场范围内接近衍射极限。

关键词 光学设计;椭球形窗口;非球面;广义科丁顿方程;无热化;泽尼克(Zernike)多项式

中图分类号 TN24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1022003

Design of Elliptical Window Optical System Based on Fixed Corrector

Qu Hemeng^{1,2} Zhang Xin¹ 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 elliptical window optical system is proposed and it is based on the fixed aspheric corrector. The algebraic expression of the fixed aspheric corrector is given combining the generalized Coddington equation and the theory of geometric optics. In addition, eliminating astigmatism and sine condition are taken as evaluating parameters, aspheric surface equation is fit by least square method to eliminate astigmatism and coma. Zernike polynomials is used to replace traditional merit function in order to overcome slow convergence in traditional design method of elliptical window optical system. The athermalization of elliptical window optical system is realized by comparing matches of different materials. A complete design example of elliptical window optical system is demonstrated and the results show that the MTF of optical system approaches the diffraction limit across the entire scanning field.

Key words optical design; elliptical window; aspheric surface; generalized Coddington equation; athermalization; Zernike polynomial

OCIS codes 220.4830; 220.1250; 200.1130

1 引 言

传统飞行器的光学窗口往往采用半球面或平面结构,因为其加工及检测技术较为成熟,而且不会给后续成像光学系统带来较难控制的像差,但并未考虑其空气动力学性能。随着现代光学加工与检测技术的不断发展,不仅要求制导武器能提供精确的图

像信息,而且要求制导武器具有优良的飞行性能,以满足远距离飞行快速打击的要求。传统的光学窗口外形已经不能满足发展需求,限制了飞行器性能的进一步提高^[1]。

由此便产生了许多新型的光学窗口,其共同特点是光学窗口与主体平台外形轮廓实现高精度吻

收稿日期: 2011-01-26; 收到修改稿日期: 2011-04-11

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: 曲贺盟(1984—),男,博士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: quhemeng@126.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

合,大大减小主体所受空气阻力。雷声公司对基于导弹平台的椭球形窗口光学系统的研究表明^[2],当导弹以 3 马赫速度以 40°仰角发射时,采用长径比 1.5 的椭球形窗口整流罩受到的空气阻力几乎为球形的 50%。椭球形窗口光学有着传统光学系统无法比拟的优势,但是给成像光学系统的设计带来了巨大的挑战。由于椭球形窗口整流罩面形的非中心对称性,会引入随着扫描视场角变化的动态像差,像散和彗差成为影响光学系统成像质量的主要因素^[3],其中像散的影响最为突出,因此校正这些像差成为椭球形窗口光学设计的重要课题。

本文结合广义科丁顿公式及几何光学原理,建立了基于固定校正元件的椭球形窗口光学系统。本例中设计椭球形窗口光学系统采用长径比为 1.0 的蓝宝石头罩,像空间 F 数为 3.0,焦距 120 mm,工作波段 3~5 μm ,扫描视场 $\pm 40^\circ$,瞬时视场 3° 。

2 椭球形窗口光学系统的像差分析

由于泽尼克(Zernike)多项式在单位圆域内,展开式各项互相正交,且每一项都对应特定种类、特定级次的像差,因此采用 Zernike 多项式进行椭球形窗口光学系统的像差特性分析,具有明显优势^[4]。光学系统波前的 Zernike 多项式表达式为

$$\phi(\rho, \theta) = \sum_{n,m} \alpha_n^m R_n^m(\rho) \cos(m\theta), \quad (1)$$

定义域为连续的单位圆,式中 $0 \leq \rho \leq 1$, $0 \leq \theta \leq 2\pi$ 。Zernike 多项式 $R_n^m(\rho)$ 数学表达式为

$$R_n^m(\rho) = \frac{1}{\left(\frac{n-m}{2}\right)! \rho^m} \left[\frac{d}{d(\rho^2)} \right]^{(n-m)/2} \times [(\rho^2)^{(n+m)/2} (\rho^2 - 1)^{(n-m)/2}]. \quad (2)$$

式中 m, n 为整数, $n-m$ 为偶数且大于等于 0。条纹 Zernike 多项式展开式中 Z_5, Z_8, Z_9 分别对应初级像散、初级彗差和初级球差项。

采用光学设计软件,对长径比为 1.0 的蓝宝石椭球形整流罩进行像差分析,像空间 F 数为 3.0,头罩后面成像系统扫描视场在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 之间变化。由于是针对椭球形头罩进行像差分析,为分析准确,将一个理想透镜放在孔径光阑处作为成像光学系统,通过旋转得到不同的扫描视场。图 1 显示 Zernike 像差系数随扫描视场变化曲线。

从图 1 中明显发现,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两个主要像差,其中像散的 P-V 值最大。主要是由于:随着扫描视场的增大椭球形窗口整流罩变得不

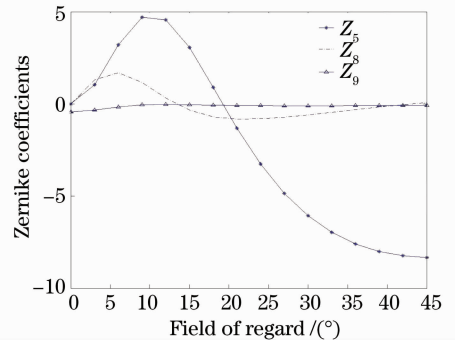


图 1 系统主要像差项所对应的 Zernike 系数值随扫描视场的变化曲线

Fig. 1 Dome Aberrations Z_5, Z_8, Z_9 versus field of regard (FOR) of the elliptical dome

具有对称性,其面形接近于柱面,所以引入较大的像散。而与较大的彗差、像散比较,其中球差项随扫描视场的变化量要小很多,这主要与具体选定的光学系统的相对孔径大小有关。由上面分析可以看出,由于椭球形窗口整流罩引入了随着扫描视场变化的动态像差,其后边的校正系统也必须产生随扫描视场变化而变化的像差,从而平衡椭球形窗口整流罩所带来的像差^[5]。

3 固定校正元件设计原理

椭球形窗口光学系统的设计难点主要在于光学系统初始结构的建立。这是由于较大的倾斜、偏心的引入导致现有的像差理论与光学系统结构之间产生脱节,无法使用解析形式的数学表达式来描述椭球形窗口光学系统。因此很难采用 P-W 等方法,以从光学系统 5 种初级单色像差和 2 种初级色差方程出发,通过预置设计完成之后的像差残余量,建立系统的初始光学结构。而且系统倾斜、偏心导致的依赖于扫描视场的动态像差特性,把优化空间从传统光学系统的一维视场拓展到椭球形窗口光学系统的二维视场,更加重了建立系统光学结构的困难。为解决上述难题,本文根据广义科丁顿公式及几何光学原理,建立了一套非球面固定校正元件的设计方法,消除了椭球形窗口整流罩引入的随视场变化较大的像散及彗差。

3.1 固定校正元件数学模型

首先建立非球面固定校正系统光路数学模型,如图 2 所示,设子午面内两个相邻的非球面 S_1 和 S_2 ,其法线分别为 N_1, N_2 ,入射光线经过椭球形窗口整流罩后与 S_1 面相交于 (y_1, z_1) 点,其折射光线与 S_1 法线间夹角为 Φ_{s1} ,继续传播并与 S_2 面相交于

(y_2, z_2) 点, 其折射光线与 S_2 法线间夹角为 Φ_{s_2} , Φ_1 和 Φ_2 为经过两面的折射光线与光轴之间的夹角。

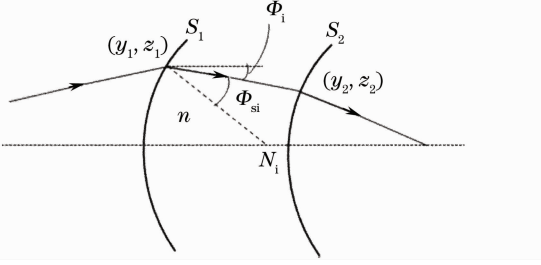


图2 固定校正元件光路图

Fig.2 Light path fixed corrector

利用广义科丁顿公式中定义的非球面半径表达式^[6], 经过 S_1, S_2 两非球面两次折射后的出射波波面可以表示为

$$\frac{1}{r'_T} = \frac{1}{n} + \frac{2}{R_{T_1} \cos \phi_{s_1}}, \quad (3)$$

$$\frac{1}{r'_S} = \frac{1}{n} + \frac{2 \cos \phi_{s_1}}{R_{S_1}}, \quad (4)$$

$$\frac{1}{r''_T} = \frac{1}{n} + \frac{2}{R_{T_2} \cos \phi_{s_2}}, \quad (5)$$

$$\frac{1}{r''_S} = \frac{1}{n} + \frac{2 \cos \phi_{s_2}}{R_{S_2}}, \quad (6)$$

式中 r_T 和 r_S 为子午和弧矢面内入射波面的曲率半径, 相对应的 r'_T 和 r'_S 为经过 S_1 面折射后子午和弧矢面内出射波面的曲率半径, r''_T 和 r''_S 为经过 S_2 面折射后子午和弧矢面内出射波面的曲率半径, ϕ_{s_1}, ϕ_{s_2} 为光线在 S_1 面和 S_2 面的折射角, n 为 S_1 和 S_2 间材料的折射率, R_{T_1} 和 R_{S_1}, R_{T_2} 和 R_{S_2} 为 S_1 面和 S_2 面子午和弧矢的曲率半径, 可以表示为

$$R_{T_1} = \frac{(1 + Z_1^2)^{3/2}}{Z'_1}, \quad (7)$$

$$R_{S_1} = \frac{y \sqrt{1 + Z_1^2}}{Z'_1}, \quad (8)$$

$$R_{T_2} = \frac{(1 + Z_2^2)^{3/2}}{Z'_2}, \quad (9)$$

$$R_{S_2} = \frac{y \sqrt{1 + Z_2^2}}{Z'_2}, \quad (10)$$

式中折射面表示为 $Z = f(y)$ 的函数关系, Z 为表面矢高, y 为面形上任意一点到光轴的距离。

如果出射子午和弧矢波面相交于一点, 说明系统不存在像散的影响。这里设置(1)和(2)式中 $r''_T = r''_S$ 表示为

$$\frac{2 \cos \phi_{s_2}}{R_{S_2}} - \frac{2}{R_{T_2} \cos \phi_{s_2}} = \frac{1}{r'_T} - \frac{1}{r'_S} = \omega, \quad (11)$$

式中 ω 为椭球形窗口整流罩随视场变化而引入的

动态像散。综合(3)~(11)式, 可以得到表示 S_1 和 S_2 面的二次微分方程为

$$Z''_1 = \frac{Z'_1(1 + Z_1^2)n \cos \phi_{s_1}}{y_2} - \frac{\omega}{2}(1 + Z_1^2)^{3/2} \cos \phi_{s_1}, \quad (12)$$

$$Z''_2 = \frac{Z'_2(1 + Z_2^2)n \cos \phi_{s_2}}{y_2} - \frac{\omega}{2}(1 + Z_2^2)^{3/2} \cos \phi_{s_2}. \quad (13)$$

同时为了满足消彗差条件, 系统需要满足阿贝正弦条件:

$$y_1 = f \sin \phi_1, \quad (14)$$

$$y_2 = f \sin \phi_2. \quad (15)$$

通过求解(12)~(15)式可以得到满足校正椭球形窗口整流罩引入的动态变化像散和彗差的一对非球面表面。

3.2 非球面设计实现过程

为了便于微分计算, 将矢高 Z 表示成以口径 y 为变量的非球面幂级数形式标准方程

$$Z_1 = A_0 + A_1 y^2 + A_2 y^4 + A_3 y^6, \quad (16)$$

$$Z_2 = B_0 + B_1 y^2 + B_2 y^4 + B_3 y^6. \quad (17)$$

系数 $A_0, A_1, A_2, A_3, B_0, B_1, B_2, B_3$ 为拟合参量。

微分方程可以拟合为如(16), (17)式所示的幂级数形式。虽然幂级数形式的非球面表达式形式简单, 方便于微分计算, 但不利于在通用的光学设计软件中实现光线追迹和像差计算。因此需转化为常见的非球面方程:

$$Z = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)cy^2}} - a_1 y^2 + a_2 y^4 + a_3 y^6, \quad (18)$$

式中 c 为非球面顶点处的曲率, k 为非球面系数。

3.3 Zernike 多项式优化函数

椭球形窗口光学系统具有较大范围扫描视场, 在优化过程中会需要设置较多变焦点, 因此变量还会成倍增多。采用传统的优化方法时, 光学系统评价函数收敛缓慢, 优化过程时间较长, 并且较多的时候无法得到好的优化结果。为此, 引入了 Zernike 多项式形式的像质评价函数。光学系统评价函数的一般形式为

$$(f_{MF})^2 = \sum_i W_i (V_i - T_i)^2 / \sum_i W_i, \quad (19)$$

式中 i 为评价选项, V_i 为系统当前评价选项值, T_i 为相应的目标值, W_i 为权重。结合椭球形窗口光学系统像差分析结果, 利用(19)式构造 Zernike 多项式评价函数。用于优化椭球形窗口光学系统固定校正元件。

4 成像光学系统无热化设计

由于采用椭球形窗口整流罩的导弹发射后以数倍音速飞行,受气动加热的影响,导弹整流罩的温度甚至能达到数百度。此时由于环境因素和气动加热产生的热效应使光学材料的折射率、厚度等都发生了变化,光学系统面形以及光学元件之间的间隔也会发生变化,这些变化都会影响焦距的变化,进而影响光学系统的成像质量,导致探测系统输出信号质量下降。因此,在椭球形窗口光学系统的设计过程中进行无热化设计是相当必要的^[7~10]。

对比了电子主动补偿、机械被动补偿、光学被动补偿 3 种技术的特点,并结合椭球形窗口光学系统内部结构尺寸特点,得出结论:光学被动补偿无论在可靠性还是无热化的效果上都能达到椭球形窗口光学系统的使用要求。基于这样的考虑,在椭球形窗口光学系统无热化设计的过程中,选用光学被动式无热化技术^[11~13]。

光学被动式无热化技术通过匹配光学材料的 dn/dt 、膨胀系数和光学机械材料的膨胀系数,使各种因素影响产生的温度焦移互相抵消或补偿,使光学系统的成像质量在工作温度范围内始终保持可以接受的水平。目前国内适用于热成像的红外光学材料较为常用的主要有 3 种:锗、硅和硒化锌。表 1 列出了这 3 种材料的光学特性和热特性,表中 dn/dt 是折射率温度变化系数, X_f 是光学热膨胀系数。

表 1 红外光学材料的光学特性和热特性(25 °C)

Table 1 Optical and thermal properties of infrared material available (25 °C)

Material	n	n	$(dn/dt)/$	$X_f/10^{-6}$	$X_f/10^{-6}$
	(4 μm)	(10 μm)	10^{-6}	4 μm	10 μm
Ge	4.024	4.003	396	-125.1	-126.1
Si	3.425	3.417	150	-58.02	-58.22
ZnSe	2.433	2.406	60	-34.81	-35.61

本例中椭球形窗口整流罩和固定校正元件组合几乎为无焦系统,因此成像光学系统的焦距决定了整个椭球形窗口光学系统的焦距。选定焦距为 120 mm,像空间 F 数为 3.0,初步确定采用三片式光学结构。通过对表 1 各材料的特点分析,选择了两种材料组合方式分别为:硅、锗和硅;硅、锗和硒化锌。结构材料上选择热膨胀系数较低的钛。并结合椭球形窗口头罩和固定校正元件综合分析。从表 2 中可以看出在 50 °C ~ -40 °C 环境下硅、锗和硒化锌的材料组合离焦范围较小,满足成像质量要求。

表 2 三片式系统在不同温度下的离焦量

Table 2 Defocused of systems which are made up of three lens at different temperatures

Combination	Defocus / μm
SGS	250
SGZ	35

由上面的分析可以得出结论:成像光学系统采用硅、锗和硒化锌 3 种材料组成的三片式系统,完全满足椭球形窗口光学系统的无热化要求。

5 设计实例

基于以上设计原理,设计了椭球形整流罩,径长比为 1.0,像空间 F 数为 3.0,工作波段为中波 3 ~ 5 μm ,扫描视场为 $\pm 40^\circ$,瞬时视场为 3° ,焦距 120 mm 椭球形窗口光学系统。

将结构参数以约束形式代入推导的非球面微分方程中求解出的消像散和彗差的非球面面形。并转化为常用非球面方程表达式为

$$Z = \frac{51.67y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 - 1.958) \times 51.67y^2}} - 3.04 \times 10^{-11}y^2 + 5.86 \times 10^{-14}y^4 + 1.21 \times 10^{-18}y^6, \quad (20)$$

$$Z = \frac{52.18y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 - 2.287) \times 52.18y^2}} - 6.27 \times 10^{-11}y^2 + 5.69 \times 10^{-14}y^4 + 1.01 \times 10^{-18}y^6. \quad (21)$$

将此非球面表达式代入光学设计软件,组成椭球形窗口光学系统。整个系统由 2 块固定校正元件和成像系统组成。其中第 1 块为采用上述方法设计的非球面校正元件,第 2 块为校正色差引入的球面校正元件。成像系统由 3 片透镜组成,并承担了大部分系统光焦度。在保证一定的后截距条件下,根据初级像差理论,成像系统初始结构留有一定的剩余像差,用于补偿前方系统残留的各种轴外像差。椭球形窗口光学系统不同视场的光路图如图 3 所示。

系统采用 Zernike 多项式特殊优化函数,通过适当的选取权重,反复优化后,光学系统各视场成像质量均接近衍射极限。图 4 展示了不同扫描视场椭球形窗口光学系统调制传递函数(MTF)。系统 MTF 在整个扫描视场范围内接近衍射极限。不存在为了平衡边缘扫描视场处像差,使系统在其他扫描视场 MTF 下降的情况。此外在 3° 的瞬时视场范围之内,系统的成像质量均得到较好的结果。

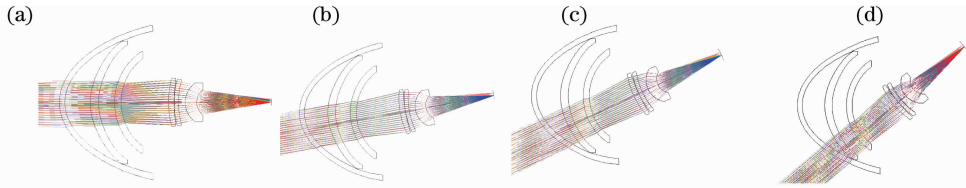


图 3 扫描视场分别为(a) 0°, (b) 10°, (c) 25°, (c) 40°椭球形窗口光学系统

Fig. 3 Elliptical window optical system with FOR (a) 0°, (b) 10°, (c) 25°, (d) 40°

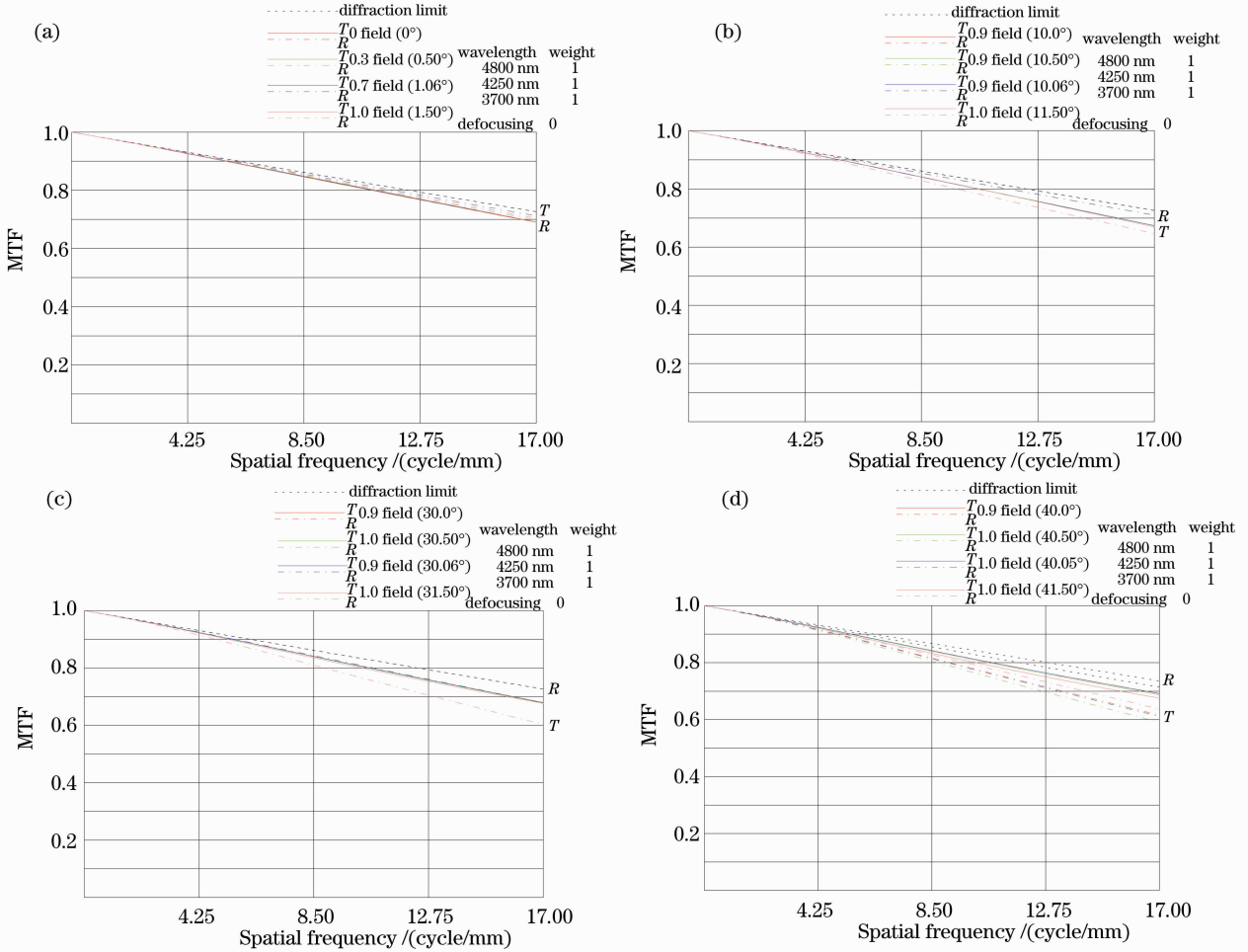


图 4 扫描视场分别为(a)0°, (b)10°, (c)25°, (d)40°时椭球形窗口光学系统调制传递函数(MTF)

Fig. 4 Modulation transfer function (MTF) of elliptical window optical system with FOR (a) 0°, (b) 10°, (c) 25°, (d) 40°

另外成像光学系统综合考虑了校正元件的材料,进行了无热化设计。成像系统采用;硅、锗和硒化锌材料的三片式结构。进行无热化分析,在 50 °C ~ -40 °C 环境下,系统离焦量为 35 μm,完全在成像光学系统焦深范围内。因此本例所设计的椭球形窗口光学系统满足无热化要求。

扫描视场内平衡椭球形窗口整流罩引入的动态像散和彗差,并给出了满足正弦条件和消像散的非球面表达式。利用泽尼克多项式特殊优化函数,设计了完整的椭球形窗口光学系统,并且在 50 °C ~ -40 °C 环境下达到了无热化的要求。整个光学系统在 ±40° 扫描视场成像质量均接近衍射极限。

6 结 论

本文根据广义科丁顿方程公式和几何光学原理,提出了一种椭球形窗口光学系统非球面固定校正元件的设计方法。实现了固定校正元件在较大的

参 考 文 献

- 1 James P. Mills. Conformal optics: theory and practice [C]. SPIE, 2001, 4442: 101~107
- 2 David J. Knapp. Conformal optics risk reduction demonstration [C]. SPIE, 2001, 4375: 146~153

- 3 David J. Knapp. Fundamentals of conformal dome design[C]. *SPIE*, 2002, **4832**: 394~409
- 4 Scott W. Sparrold. Arch corrector for conformal optical systems [C]. *SPIE*, 1999, **3705**: 189~200
- 5 R. R. Shannon. Overview of conformal optics [C]. *SPIE*, 1999, **3705**: 180~188
- 6 D. G. Brukhard, D. L. Shealy. Simplified formula for illuminance in optical system [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(5): 897~909
- 7 Yasuhisa Tamagawa. Dual-band optical systems with athermal chart; design[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(1): 297~301
- 8 Tadeusz Kryszczyński. Material problem in athermalization of optical systems[J]. *Opt. Eng.*, 1997, **36**(6): 1596~1601
- 9 Pilkington. Athermalization Techniques in infrared systems[C]. *SPIE*, 1986, **655**: 142~153
- 10 Juan L. Rayces. Thermal compensation of infrared achromatic objectives with three optical materials[C]. *SPIE*, 1990, **1354**: 752~759
- 11 Guo Yonghong, Shen Mangzuo. Athermal design for infrared diffractive/refractive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1392~1395
郭永洪, 沈忙作. 折射/衍射红外光学系统的消热差设计[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1392~1395
- 12 Xue Hui. Optical design of infrared search and trace system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2383~2386
薛 慧. 红外搜索与跟踪系统中光学系统的设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2383~2386
- 13 Tong Jingbo, Cui Qingfeng, Xue Changxi *et al.*. Optical design of a off-axis dual-channel helmet mounted display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2662~2667
佟静波, 崔庆丰, 薛常喜 等. 离轴双通道头盔显示器光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2662~2667