

# 利于像差校正的共形整流罩内表面面形设计

张 旺 左宝君 陈守谦 胡海力 范志刚

(哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 共形光学系统中, 椭球形等厚度整流罩使入射的平行光线经过整流罩后不再平行, 变为发散的光线, 进而使系统像差急剧增加, 不利于后续像差的校正。通过对等厚度共形整流罩的内表面进行重新设计, 打破了共形整流罩的等厚度条件, 从而在使用较少校正光学透镜的基础上实现了系统像差的校正。通过分析不同级次非球面分别作为整流罩内表面面形时的像差校正效果, 确定了将 6 次非球面作为共形整流罩内表面面形初始结构。通过对内表面进行优化设计, 最终得到整流罩内表面面形。结果表明, 该方法有效地减小了共形整流罩引入的像差。最后使用固定校正器对内表面变化后的整流罩进行了像差校正, 设计结果表明, 内表面的改变有效地减少了光学元件数量, 消像差效果良好。

**关键词** 光学设计; 共形光学; 整流罩; 等厚度; 内表面

中图分类号 O435.2; O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201232.1122001

## Design of Conformal Dome Inner Surface Shape Beneficial to Aberration Correction

Zhang Wang Zuo Baojun Chen Shouqian Hu Haili Fan Zhigang

(Research Center for Space Optics Engineering, Harbin Institute of Technology,  
Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** In a conformal optical system, the incident parallel light rays are no longer parallel when transmitting through an ellipsoidal dome, and transform into diverging light rays which greatly increase the system's aberration. This is bad for the subsequent aberration correction. This paper breaks the condition of equal thickness and redesigns the inner surface of the conformal dome. Consequently, the aberrations of system are corrected by using less optical lenses when compared with equal thickness dome. By analyzing aberration correction results of different order aspheric surfaces as the inner surface of dome, six-order aspheric surface is selected as the initial structure. By optimizing the inner surface of dome, the final shape of inner surface is achieved. The results show that this method obviously reduces the aberrations induced by the conformal domes. Finally, aberrations of the conformal dome are corrected by using the fixed correctors. The results show that the number of the optical elements decreases by redesigning the inner surface of the dome, and this method has a good effect on correcting aberrations.

**Key words** optical design; conformal optics; dome; equal thickness; inner surface

**OCIS codes** 080.1005; 080.2740; 220.1000

## 1 引 言

传统导引头的整流罩通常为半球形, 半球形整流罩产生的空气阻力约占整个导弹阻力的一半, 因此优化整流罩形状可以降低阻力, 提升导弹的作战性能。由于共形整流罩外形上满足空气动力学性能要求, 其形状往往与半球形整流罩有很大的不同, 可

以是非球面或自由曲面。这些外形上的改进极大地增加了导弹的射程和内部成像系统的探测范围, 使其作战性能有了很大的提高。研究表明, 导弹采用长径比为 1.5 的椭球形整流罩后, 在 680 m/s 的速度下飞行时所受的阻力低于半球形整流罩时的一半<sup>[1]</sup>。本文所研究的共形整流罩为椭球形整流罩。

收稿日期: 2012-04-19; 收到修改稿日期: 2012-06-06

作者简介: 张 旺(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事共形光学设计方面的研究。E-mail: zw\_hit@163.com

导师简介: 范志刚(1966—), 男, 教授, 主要从事精密光电测试技术方面的研究。E-mail: fzg@hit.edu.cn

共形整流罩为军事领域带来巨大贡献的同时也降低了光学系统的成像质量。由于共形整流罩相比半球形整流罩失去了对称性,从而引入了随目标视场变化的像差。所以共形光学主要的挑战就是校正这些动态变化的像差。

在以往的共形光学系统消像差设计中,很少考虑将整流罩内表面作为消像差元件,往往选用等厚度整流罩,引入的像差仅仅依靠附加的校正器件进行校正<sup>[2~6]</sup>。但是等厚度整流罩引入的像差很大,不利于提高共形光学系统的成像质量。使用过多的附加校正器件增加了系统的重量,使系统结构更为复杂,降低了系统稳定性。

本文以典型的椭球形整流罩为例,在保持整流罩椭球形外表面的基础上,通过改变整流罩内表面面形,建立了利于像差校正的内表面面形结构,使整

流罩内表面作为共形光学系统消像差元件,克服了以往共形光学设计上结构复杂、重量大以及稳定性差的缺点。

## 2 椭球形等厚整流罩像差分析

在传统的半球形整流罩光学系统中,如图 1(a)所示,成像系统位于半球形整流罩的球心处,当目标视场变化时,成像系统对应的整流罩各个部分形状相同,引入的像差也一样。但是对于共形光学系统而言,如图 1(b)所示<sup>[5]</sup>,当目标视场变化时,成像系统对应的整流罩各部分形状各不相同,轴上视场对应的整流罩区域是一个近似于球形的旋转对称结构,最大目标视场对应的区域则近似为圆柱形结构。共形整流罩各部分引入了不同的像差,造成光学系统成像质量大大下降。

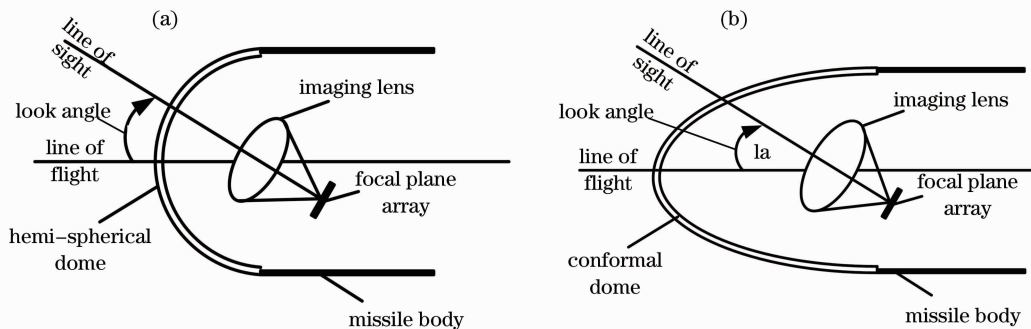


图 1 (a)采用半球形整流罩的导引头;(b)采用共形整流罩的导引头

Fig. 1 (a) Seeker using a hemi-spherical dome; (b) seeker using a conformal dome

由于椭球形整流罩在非零目标视场失去了旋转对称性,传统的赛德尔像差无法准确描述整流罩的成像质量,本文采用泽尼克多项式像差理论分析共形光学系统在出瞳面上的像差特性。泽尼克多项式具有正交的、线性的且各项独立的特性,每一项泽尼克系数都有明确的物理意义,泽尼克系数能够直接反映出像差对成像质量的影响<sup>[7]</sup>。部分泽尼克多项式和对应的像差如表 1 所示。

表 1 泽尼克像差多项式<sup>[7]</sup>

Table 1 Zernike aberration polynomial<sup>[7]</sup>

Term	Zernike polynomial	Aberration name
Z1	1	piston
Z2	$r \cos \theta$	Y tilt
Z3	$r \sin \theta$	X tilt
Z4	$2r^2 - 1$	focus
Z5	$r^2 \cos 2\theta$	X astigmatism
Z6	$r^2 \sin 2\theta$	Y astigmatism
Z7	$(3r^3 - 2r) \cos \theta$	X coma
Z8	$(3r^3 - 2r) \sin \theta$	Y coma
Z9	$6r^4 - 6r^2 + 1$	spherical

通过应用泽尼克系数表示相应的像差,得到的整流罩不同目标视场(FOR)像差特性曲线如图 2 所示。该等厚度椭球形整流罩长径比  $F(F=L/D, L$  为流罩长度,  $D$  为底部直径)为 1,外径为 70 mm,厚度为 2 mm,为研究其像差变化特性,在整流罩后加入一个理想透镜,在理想透镜焦面处观测整流罩的像差变化。由于理想透镜不引入任何像差,系统

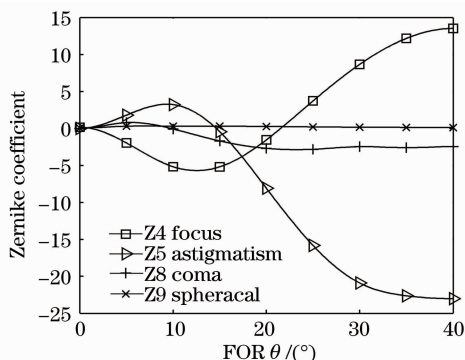


图 2 不同目标视场的像差特性

Fig. 2 Aberration characteristics of different FOR

像差均由整流罩产生。

从图2中可以看出,等厚度椭球形整流罩引入的像差主要是离焦、像散和彗差,由于离焦本身并不是一种实际的像差,通过调整像面的位置,可以获得较好的成像质量。但是像散和彗差数值较大并且随着目标视场变化,致使像的形状发生变化,严重影响成像质量,必须予以校正。

### 3 整流罩内表面面形设计

#### 3.1 等厚整流罩光传输特性研究

等厚度的椭球形整流罩虽然方便加工和检测,

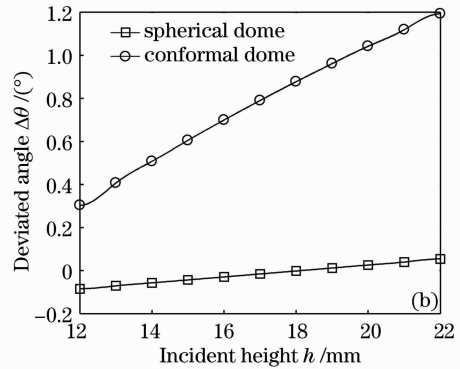
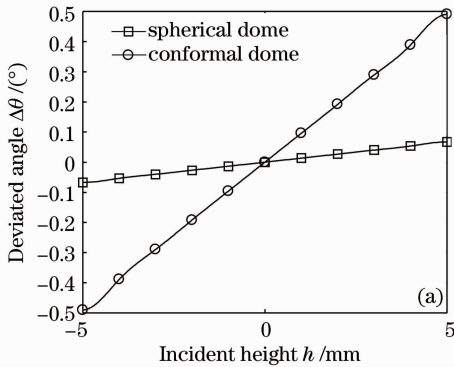


图3 光线经过共形整流罩和半球形整流罩出射后的偏折角度。(a)  $0^\circ$ 目标视场;(b)  $15^\circ$ 目标视场

Fig. 3 Deviated angles of emergent light rays which are refracted from a conformal dome and a spherical dome. (a)  $0^\circ$  FOR; (b)  $15^\circ$  FOR

图3(a)是 $0^\circ$ 目标视场时,不同高度入射光线经过整流罩后相对于入射光线的偏折角度。图3(b)是 $15^\circ$ 目标视场时的情况,其中 $0^\circ$ 目标视场时的中心高度选为0 mm, $15^\circ$ 目标视场时的中心高度选为17 mm,中心高度上下各追迹5条光线,相邻光线高度间隔为1 mm。从图中可以看出,在 $0^\circ$ 目标视场和非 $0^\circ$ 目标视场时,入射光线经过半球形整流罩后,其出射光线方向基本平行于入射光束,偏离角度非常小。而入射光线经过椭球形整流罩后,出射方向大幅度偏离入射光线,已经不再是平行光束,且光线越远离光轴偏折角度越大,从而引入了大量的像差。此外由于共形整流罩后方的固定校正器是通过光线追迹方法设计,发散的光束会导致校正器尺寸过大,同时增加了校正像差的负担,因此有必要优化设计整流罩内表面面形,改变光线传播方向。

#### 3.2 整流罩内表面面形建立

在优化设计共形整流罩内表面面形过程中,将其内表面面形设置为高次非球面,在保证非球面的圆锥系数与曲率半径均与等厚度共形整流罩内表面相同的情况下,将其高次项系数设置为变量进行优

但是引入了大量的动态变化的像差,这为后续的光学设计工作增加了过重的负担,为此需要分析等厚椭球形整流罩产生像差的根本原因,才能予以校正。

在分别建立了等厚度半球形整流罩和等厚度椭球形整流罩的数学模型后,运用光线追迹方法计算不同目标视场的入射光线经过整流罩后的传播方向,其中半球形整流罩的半径等于椭球形整流罩的长度,建立的椭球形整流罩模型与图2所分析的一致。图3是不同目标视场情况下,经过半球形整流罩和椭球形整流罩后的出射光线相对于入射光线的偏折情况。

化。该设计方法有两方面优势,其一可使设计后的整流罩外形结构变化较小,不至于因整流罩形状上的较大变化而无法应用;其二可使整流罩内表面在等厚度结构的基础上进行优化,较好地满足外部环境对整流罩厚度的要求,设计结果会更为理想。图4是椭球形整流罩内表面分别设置成4次、6次、8

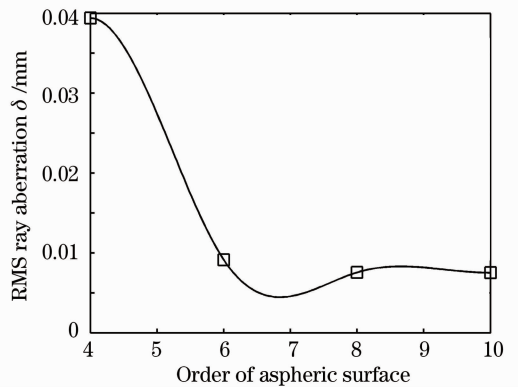


图4 共形整流罩内表面采用不同级次非球面时的均方根光线像差

Fig. 4 RMS ray aberration of a conformal dome when using inner surface with different order aspheric surfaces

次和 10 次非球面, 经过初步优化设计后的均方根 (RMS) 光线像差曲线。

从图 4 中可以看出, 当整流罩内表面分别选取 6 次、8 次和 10 次非球面进行初步优化设计后, 产生的像差要远小于 4 次非球面产生的像差。当内表面分别设置为 6 次、8 次和 10 次非球面时, 它们之间产生的像差变化较小, 综合考虑非球面加工因素, 决定选取 6 次非球面作为整流罩内表面优化设计的初始面形。优化过程中会遇到误差函数有多处极小值的情况, 此时需要根据整流罩内表面变化趋势, 适当改变高次项系数继续优化, 以寻求误差函数的最小值点。优化设计后, 椭球形整流罩变为非等厚结构, 其内表面面形参数如表 2 所示, 等厚整流罩内表面与非等厚整流罩内表面面形的最终表达式分别为

$$z_1 = \frac{0.062(x_1^2 + y_1^2)}{1 + \sqrt{1 - 9.05 \times 10^{-4}(x_1^2 + y_1^2)}}, \quad (1)$$

$$z_2 = \frac{0.062(x_2^2 + y_2^2)}{1 + \sqrt{1 - 9.05 \times 10^{-4}(x_2^2 + y_2^2)}} - 7.16 \times 10^{-7}(x_2^2 + y_2^2)^2 + 1.69 \times 10^{-9}(x_2^2 + y_2^2)^3. \quad (2)$$

表 2 设计后的整流罩内表面面形参数  
Table 2 Parameters of inner surface of dome after designing

Parameter	Value
Y radius ( $r$ )	16.0148
Conic constant ( $k$ )	-0.7645
4th order coefficient ( $A$ )	$-7.16 \times 10^{-7}$
6th order coefficient ( $B$ )	$1.69 \times 10^{-9}$

优化设计后的椭球形整流罩结构图如图 5 所示, 其中整流罩的内表面是 6 次非球面, 用理想透镜

作为成像系统。从图中可以看出, 设计后的椭球形整流罩大致仍为等厚结构, 厚度变化并不明显。

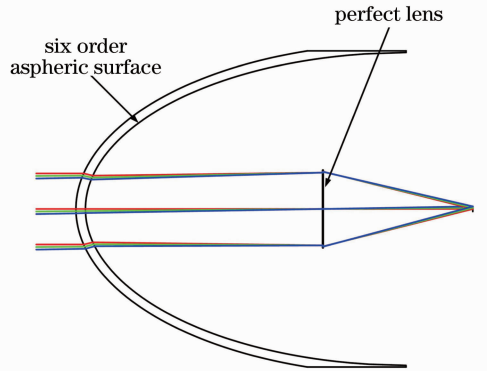


图 5 重新设计整流罩内表面后的共形光学系统  
Fig. 5 Schematic of a conformal optical system after optimizing the inner surface of dome

### 3.3 等厚整流罩与非等厚整流罩比较

为了认清整流罩结构上的变化, 选取等厚整流罩与非等厚整流罩的内表面单独进行研究, 等厚整流罩与非等厚整流罩的内表面三维 (3D) 图如图 6 所示, 从 3D 图中可以看出, 非等厚整流罩的内表面如图 6(b) 所示, 相对于等厚整流罩内表面图 6(a) 形状上更加细长, 底部口径更小。为了进一步认清楚整流罩内表面面形的变化, 依据计算数据绘制了一个新整流罩的局部放大图, 如图 7 所示, 其中新整流罩的外、内表面分别是等厚整流罩和非等厚整流罩的内表面, 新整流罩的放大区域的长度  $L$  方向为 40~66 mm, 口径  $D$  方向为 29~33 mm。从图中可以清晰地看出, 新整流罩在结构上由中心向底部逐渐变厚, 即非等厚整流罩相比等厚整流罩呈现中心薄、底部厚的结构, 部分区域形状偏离了原有的椭球面。

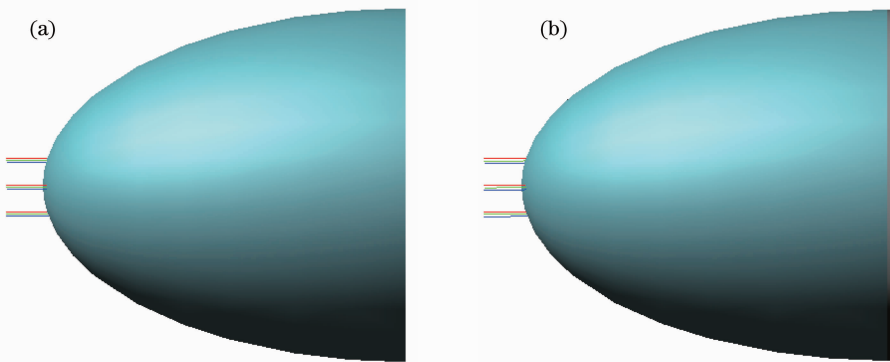


图 6 (a) 等厚整流罩与 (b) 非等厚整流罩内表面 3D 图

Fig. 6 3D maps of inner surfaces of (a) equal thickness dome and (b) unequal thickness dome

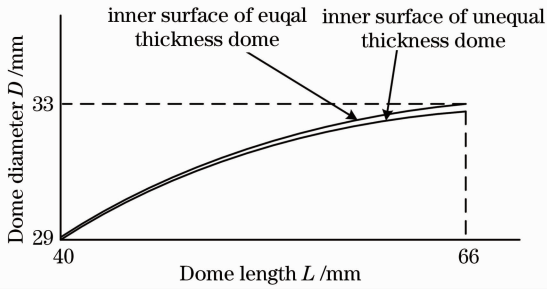


图 7 整流罩部分区域放大图

Fig. 7 Amplified schematic of part of dome

优化设计整流罩内表面前、后,入射光线在  $0^\circ$  和  $15^\circ$  时经过椭球形整流罩的偏折情况分别如图8(a)和

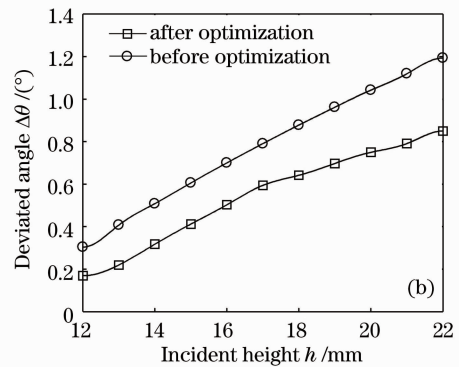
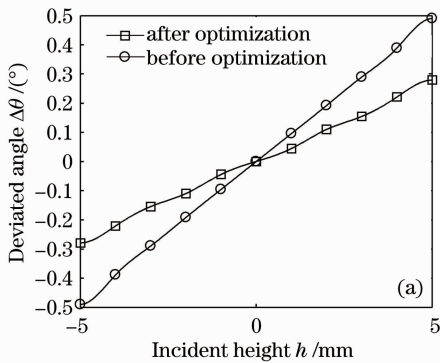


图 8 优化设计前、后光线经共形整流罩内表面出射的偏折角度。(a)  $0^\circ$  目标视场; (b)  $15^\circ$  目标视场

Fig. 8 Deviated angles of emergent light rays refracted from a conformal dome before and after optimization. (a)  $0^\circ$  FOR; (b)  $15^\circ$  FOR

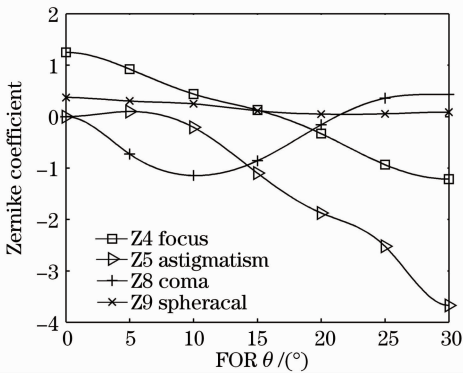


图 9 改变整流罩内表面后不同视场的像差特性  
Fig. 9 Aberration characteristics of different FOR after changing inner surface of dome

#### 4 椭球形整流罩消像差设计

为了进一步说明得到的整流罩内表面利于像差校正,下面进行校正器设计。考虑系统工作稳定性,采用固定校正器补偿剩余像差。最终的共形光学系统设计结果如图 10 所示,固定校正器由两片透镜组成,透镜的前后表面为高次非球面,均通过求解

8(b)所示。从图 8 中可以看出优化设计整流罩内表面后,出射光线的偏折角度较优化前大幅度减小。改变共形整流罩内表面面形后的像差特性曲线如图 9 所示,设计结果表明,相比于等厚度椭球形整流罩,设计后的非等厚整流罩像差大幅度减小,其中像散的峰谷(P-V)值由等厚整流罩时的 26 下降到 4,彗差的 P-V 值由 3.5 下降到 1.2。等厚整流罩各目标视场的 RMS 波像差为 6.20 mm,设计后的非等厚整流罩各目标视场的 RMS 波像差为 1.08 mm,由此可见重新设计整流罩内表面面形对于减小共形整流罩像差起着巨大的作用。

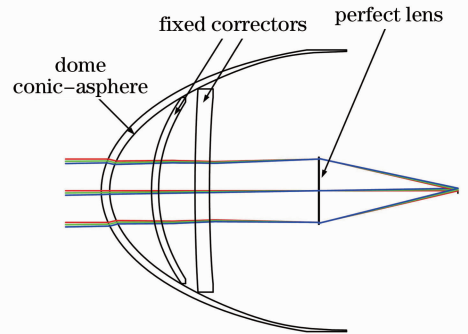


图 10 采用固定校正器设计的共形光学系统  
Fig. 10 Schematic of a conformal optical system using fixed correctors

Wassermann-Wolf 微分方程得到<sup>[8]</sup>。共形光学系统最终设计后的像差曲线如图 11 所示,设计结果表明,各种像差大幅度减小,均达到了成像质量要求的范围内,其中像散 P-V 值由 26 下降到 0.28,彗差 P-V 值由 3.5 下降到 0.1,两种主要像差基本消除,这符合 Wassermann-Wolf 原理描述的具有消除像散、彗差的性质。设计过程中还发现固定校正器具有减小不随视场变化的像差的能力,如球差和色差,

这与 Mills 所描述的一致<sup>[9]</sup>。相比文献[10]中使用了 4 片校正元件,本文提出的设计方法大大减少了校正元件的使用数量,减轻了系统重量,简化了系统的结构,增强了工作稳定性。

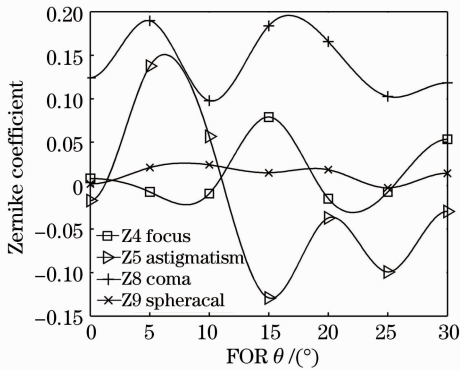


图 11 带有固定校正器的共形光学系统像差特性  
Fig. 11 Aberration characteristics of a conformal optical system using fixed correctors

## 5 结 论

为减小等厚度共形整流罩引入的像差,通过改变整流罩的内表面面形,将整流罩内表面作为共形光学系统的消像差元件。以椭球形整流罩为例,对等厚度整流罩的像差特性及光线偏折情况进行了研究。基于此,对整流罩内表面面形进行了优化设计,确定了内表面面形参数。研究表明,内表面面形变化后,像差大幅度减小,泽尼克像散系数的 P-V 值由等厚度时的 26 下降到 4,彗差的 P-V 值由 3.5 下降到 1.2。并对建立的非等厚度整流罩进行了像

差校正器设计,改变内表面面形后,仅使用 2 片校正器就可实现传统 4 片校正器能够实现的像差校正状态,有效地减小了系统的尺寸和重量。本文提出的将共形整流罩内表面作为像差初步校正器件的概念不仅适用于椭球形整流罩,也适用于其他等厚度共形整流罩的设计。

## 参 考 文 献

- 1 P. A. Trotta. Precision conformal optics technology program [C]. *SPIE*, 2001, **4375**: 96~107
- 2 S. W. Sparrold, D. J. Knapp, P. K. Manhart *et al.*. Capabilities of an arch element for correcting conformal optical domes[C]. *SPIE*, 1999, **3779**: 434~444
- 3 B. G. Crowther, D. B. McKenney, J. P. Mills. Aberrations of optical domes[C]. *SPIE*, 1998, **3482**: 48~61
- 4 S. W. Sparrold. Arch corrector for conformal optical systems [C]. *SPIE*, 1999, **3705**: 189~200
- 5 J. P. Mills, S. W. Sparrold, T. A. Mitchell *et al.*. Conformal dome aberration correction with counter-rotating phase plates [C]. *SPIE*, 1999, **3705**: 201~208
- 6 Yan Li, Lin Li, Yifan Huang *et al.*. Conformal optical design with combination of static and dynamic aberration corrections[J]. *Chinese Phys. B*, 2009, **18**(2): 565~570
- 7 Yongmeng Liu, Jing Ma, Huiping Ma *et al.*. Zernike aberration characteristics of precision conformal optical windows[C]. *SPIE*, 2010, **7544**(3W): 1~7
- 8 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. New York: Cambridge University Press, 1999. 214~217
- 9 J. P. Mills, S. W. Sparrold, T. A. Mitchell *et al.*. Conformal dome aberration correction with counter-rotating phase plates[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(7): 1822~1829
- 10 Li Yan, Li Lin, Huang Yifan *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

栏目编辑: 韩 峰