

大长径比整流罩光学系统设计

常军¹, 何伍斌¹, 冯树龙²

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081; 2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林, 长春 130033)

摘要: 提出一种采用大长径比非球面整流罩的导引头光学系统, 分别就其像差特性和像差校正方法进行分析和探讨. 该系统整流罩的长径比为 2, 工作谱段为中红外波段, 半视场角为 30° , F 数为 2. 设计结果表明成像质量接近衍射极限, 满足红外光学系统的成像要求.

关键词: 整流罩; 大长径比; 光学设计; 红外系统

中图分类号: TN 219 文献标志码: A 文章编号: 1001-0645(2011)03-0333-03

Design of Conformal Dome Optical System with Large Fineness Ratio

CHANG Jun¹, HE Wu-bin¹, FENG Shu-long²

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract: A seeker optical system of non-spherical dome with large fineness ratio is purposed in this paper. Properties of the aberration and its correction methods are analyzed and discussed. The designed dome optical system has the following features: fineness ratio is 2, operating waveband is the middle infrared spectrum, half of the field is 30 degrees, and its F number is 2. The results show that the image quality is approaching the diffraction limit and satisfies the requirements of imaging optical system.

Key words: dome; large fineness ratio; optical design; infrared system

长径比是描述整流罩表面形状延长程度的参量, 它与导引头的空气阻力、速度以及光学成像能力密切相关^[1-3]. 其定义为整流罩内表面或者外表面的长度 L 与相对应的底面直径 D 的比值, 记为 $F_r = L/D$. 从定义中可以看出, 整流罩外长径比越大, 整流罩的形状越尖越长; 长径比越小, 形状越钝越短. 如图 1 所示^[4], 图中 d_1 和 d_2 分别为整流罩中心及边缘厚度.

传统球形整流罩的长径比为 0.5, 这种面形整流罩加工难度低, 光学性能好, 但是整体的空气动力学性能差. 增加长径比可以降低整流罩的空气阻力和空气热能, 减弱飞行器的信号, 提高飞行速度, 增大飞行距离. 但是随着长径比的增加, 由于其面形的非中心对称性而引入的像差也会同时增大. 随着

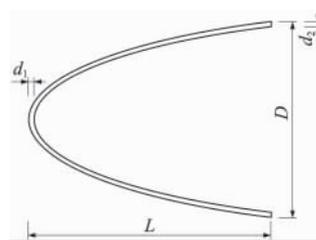


图 1 整流罩示意图

Fig. 1 Sketch map of conformal dome

现代导引头高速高精度方面的需求, 整流罩需要在满足光学特性的基础上降低空气阻力, 提高动力学性能. 图 2 给出了整流罩长径比与空气阻力、飞行速度的关系^[5], 从图中可以看出在速度为 $2Ma$ 的条件下, 长径比为 2.0 时的空气阻力系数约为长径比 0.5 时的 $1/3$. 作者选择长径比为 2.0 的椭球面整

收稿日期: 2010-05-11

作者简介: 常军(1973—), 男, 博士, 副研究员, E-mail: bitchang@bit.edu.cn.

流罩,研究其像差特性,并给出含这一面形整流罩实际参数条件下的光学系统的设计思路和结果。

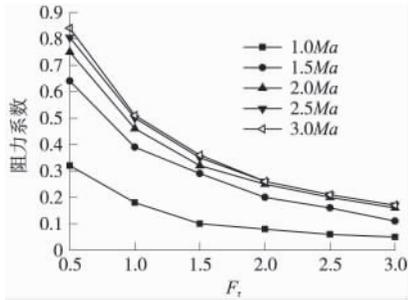


图 2 不同长径比整流罩的空气动力学曲线

Fig. 2 Aerodynamic curves of dome with different fineness ratio

1 整流罩的建模与像差特性分析

椭球面具有旋转对称性,二次曲面的一般表达式为^[6]

$$z = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2h^2}}. \quad (1)$$

式中: c 为曲率半径的倒数即 $c=1/r$; k 为二次曲面系数; 曲面上的点在 z 轴上的坐标 h 满足 $h^2=X^2+Y^2$. 对于椭球形二次曲面有 $-1 < k < 0$.

令整流罩 F_r 为 2, D 为 200 mm, d_1 和 d_2 均为 5 mm, 输入软件中即可完成整流罩模型的建立. 为了准确描述整流罩引入的像差, 假设物点位于无穷远处, 整流罩的后继光学元件为理想透镜, 忽略系统中的其它光学元件对像差造成的影响, 如图 3 所示. 系统像空间 F 数为 2, 半视场角为 30° .

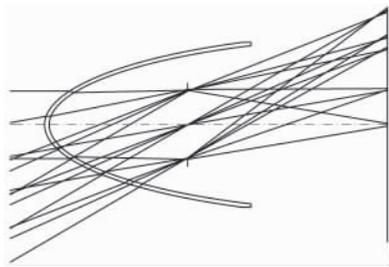


图 3 多视场情况下的椭球面整流罩示意图

Fig. 3 Ellipsoidal dome in view of multi-field

与传统的平面和球面窗口相比, 该整流罩窗口会引入大量不规则的像差, 且随着视场角变化而变化^[7-8]. 描述波前像差常用的泽尼克多项式的表达式为^[9]

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^N A_i Z_i(\rho, \theta). \quad (2)$$

根据泽尼克边缘多项式的前 16 项在出瞳处对波前像差拟合的结果, 得知影响像差的泽尼克系数主要有 $Z_4, Z_5, Z_8, Z_9, Z_{11}, Z_{12}$ 这 6 项, 其余几项数值很小. 且当视场角变化时, 像差系数也随之改变, 图 4 为低阶(Z_4 和 3 阶)及 5 阶泽尼克系数随目标视场的变化趋势.

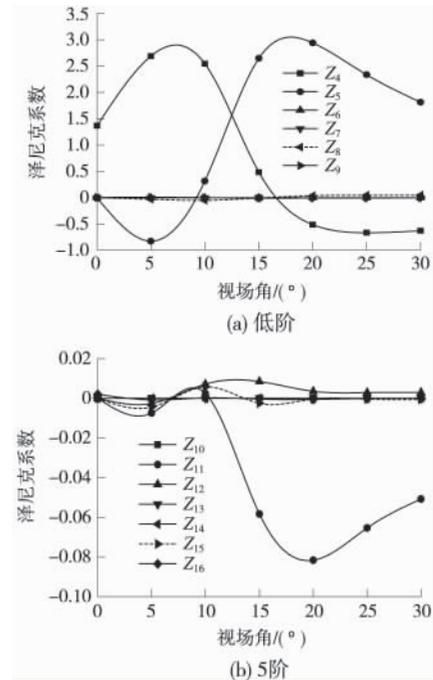


图 4 低阶及 5 阶泽尼克系数随目标视场的变化曲线

Fig. 4 Low-order and fifth-order Zernike coefficient versus FOV

根据上述的泽尼克系数及其变化曲线可知, 椭球面整流罩引入了离焦、球差、慧差、像散. 其中离焦(Z_4)、像散(Z_5)的数值较大, 球差(Z_9)和慧差(Z_7, Z_8)较小. 系统在零视场时只有离焦量不为 0, 且离焦量在整个视场范围内一直存在, 17° 之前为正, 之后变为负, 5° 之后数值快速下降. 像散与离焦量的变化规律呈现相反的趋势, 经历了下降-上升-下降的过程, $5^\circ \sim 18^\circ$ 视场范围内, 像散变化非常明显. 5 阶像散(Z_{11})在近轴时数值较小, 当视场角大于 10° 时, 数值急剧增大. 慧差与像散有相同的变化规律, 但变化幅度相比要小很多. 球差在整个视场范围内均较小, 数值变化不大.

2 设计方案

2.1 系统参数

本方案采用的探测器为 (320×240) 像元制冷型红外探测器, 像元尺寸为 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$. 整流罩选为椭球形, 长径比 2, 底面直径 200 mm, 厚度 5 mm.

系统的波段范围为3 700~4 800 nm, F 数为 2, 像高 10 mm, 半视场角为 30° 。根据上节所讨论的像差特性, 整流罩主要引入了离焦、像散、慧差和球差, 并且都随视场角的变化而改变, 因此先在光学系统中加入像差矫正器校正主要像差, 再优化系统结构校正剩余像差。

2.2 设计结果

系统由整流罩、像差矫正器等 7 片透镜和 2 片保护玻璃组成。整流罩和像差矫正器材料选用氟化镁, 其他透镜使用硅和锗, 硅和锗在此波段具有高折射率和低色散。系统结构如图 5 所示, 图中第 1 片透镜为整流罩, 第 2 片透镜为像差矫正器, 其余皆为球面校正透镜。



图 5 系统结构图
Fig. 5 Layout of the system

3 像质评价

调制传递函数(MTF)是光学系统的主要评价手段, 图 6 为各个视场下系统的 MTF 曲线。由图可知, 系统在空间频率为 20 lp/mm 时达到 0.75, 接近衍射极限的 0.80。从图中可以看出, 系统在整个谱段和视场内的成像质量接近衍射极限, 成像质量满足要求。

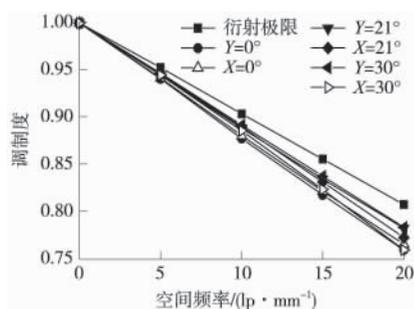


图 6 调制传递函数曲线
Fig. 6 MTF plot of the system

4 结 论

给出了采用长径比为 2 的非球面整流罩光学系统的设计方案, 分别就其像差特性和像差校正方法进行了分析和探讨。设计结果表明成像质量接近衍射极限, 满足红外光学系统的成像要求。

参考文献:

- [1] Crowther B G, McKenney D B, Mills J P. Aberrations of optical domes[J]. SPIE, 1998, 3482:48-61.
- [2] 黄秋, 陈亦庆, 高志峰, 等. 红外导引头整流罩技术研究[J]. 应用光学, 2009, 30(5):840-843.
Huang Qiu, Chen Yiqing, Gao Zhifeng, et al. Consideration to radome technology for IR seeker[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(5):840-843. (in Chinese)
- [3] 刘新建. 导弹总体分析与设计[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2006.
Liu Xinjian. Analysis and design of missile[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2006. (in Chinese)
- [4] Whalen M R. Correcting variable third order astigmatism introduced by conformal aspheric surfaces [J]. SPIE, 1998, 3482:62-73.
- [5] Knapp D J, Mills J P, Hegg R G, et al. Conformal optics risk reduction demonstration[J]. SPIE, 2001, 4375: 146-153.
- [6] 常军, 刘莉萍, 程德文, 等. 含特殊整流罩的红外光学系统设计[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(3):204-210.
Chang Jun, Liu Liping, Cheng Dewen, et al. Design of infrared optical system with special dome[J]. J Infrared Millim Waves, 2009, 28(3):204-210. (in Chinese)
- [7] Mills J P. Conformal optics: theory and practice[J]. SPIE, 2001, 4442:101-107.
- [8] Sparrold S W, Knapp D J, Manhart P K, et al. Capabilities of an arch element for correcting conformal optical[J]. SPIE, 1999, 3779:434-444.
- [9] Knapp D J. Fundamentals of conformal dome design[J]. SPIE, 2002, 4832:394-409.

(责任编辑:赵业玲)