

文章编号:1001-9014(2009)03-0204-03

## 含特殊整流罩的红外光学系统设计

常军, 刘莉萍, 程德文, 赵楠  
(北京理工大学信息学院光电工程系, 北京 100081)

**摘要:**提出了一种有效的特殊整流罩及其像差校正器的设计方法,运用 Wassermann-Wolf 微分方程组(W-W 方程组)的原理,通过在商业光学设计软件中编译宏程序曲面拟合的方法得到校正器最佳面形,从而可以校正整流罩引入的球差、彗差,使系统成像质量得到较大的改善.文章在基于 W-W 方程的基础上,针对应用于红外系统的特殊整流罩做了实际方案设计,研究的光学系统工作谱段为中波红外,视场大于 3.5 度, F 数  $F/1 \sim F/2.5$ ,系统采用了复杂化的 R-C 系统,最终成像质量达到衍射极限,可以满足特殊条件下的红外谱段成像要求,具有较高的实用价值.

**关键词:**整流罩;共形光学;红外系统;Wassermann-Wolf 方程组;像差校正器  
**中图分类号:**004 **文献标识码:**A

## DESIGN OF INFRARED OPTICAL SYSTEM WITH SPECIAL DOME

CHANG Jun, LIU Li-Ping, CHENG De-Wen, ZHAO Nan  
(Department of Optoelectronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** An efficient approach of designing a special dome and its aberration corrector was presented. By using the method of Wassermann-Wolf differential equations, the optimum contour of the corrector was obtained through a macro program in commercial optical design software. This corrector reduces spherical aberration and coma which are introduced by the dome, thus it improves the imaging quality of the system. Actual program design of a special dome applying to infrared system was made based on the Wassermann-Wolf algorithm. It works in the spectrum of middle infrared with a field of view more than  $3.5^\circ$  and an F number of  $1 \sim 2.5$ . A complex R-C form was adopted to make the final imaging quality meet the diffraction limit. The whole system satisfies the imaging requirements in the infrared wave band, and it has a high practical value.

**Key words:** dome; conformal optics; infrared system; Wassermann-Wolf equations; aberration corrector

### 引言

随着特殊应用的需求,非球面和共形面技术被广泛应用到了夜视仪、卫星、飞行器整流罩中.共形光学研究的是一个特殊的光学窗口,它能与系统平台的外形轮廓实现平滑吻合,提高空气动力学性能.传统的飞行器的光学头罩习惯上是一个同心的球面罩或一个半球罩,同心球形保护罩除了对飞行器进行保护以外,同时也是整个成像光学系统的一个组成部分.过去人们很少从空气动力学的角度来考虑飞行器保护罩的优化设计,当飞行器以极高速飞行时会遇到空气阻力的问题,此时球形整流罩并不是最佳方案,而尖顶部的共形光学窗口更能符合空气动力学的要求.为了更好地满足飞行平台的特殊

需求,研究椭球形等二次曲面面形具有重要的意义,尤其随着红外探测技术的日益发展,含特殊整流罩的红外飞行器更是得到了优先发展<sup>[1-5]</sup>.整流罩形状的变化在极大地提高空气动力学性能的同时也引入了大量不规则的像差,其中最主要的像差为彗差和球差<sup>[6-10]</sup>.因此必须加入其它光学元件对像差进行校正.目前较为常用的校正方法有固定校正器、像差发生器、Zernike 光楔等.无论使用何种校正方法,都应设法将最为严重的球差和彗差减小到最低限度.本文主要探讨了基于 W-W 微分方程的固定校正器的设计方法,研究表明此方法能很好地解决固定校正器的设计难题.

### 1 Wassermann-Wolf 非球面组设计原理

收稿日期:2008-11-19,修回日期:2009-02-10

Received date: 2008-11-19, revised date: 2009-02-10

基金项目:航空基金资助项目(20060112102),教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0606)

作者简介:常军(1973-),男,江西省吉安人,副研究员,博士,主要从事光学仪器系统设计、光学检测等方面的研究.

W-W 方程通过设计两个相邻的非球面保证光束通过系统时能满足阿贝正弦和等光程条件,达到校正系统的球差和彗差的目的. 这两个非球面面形的设计是通过求解一对微分方程而得到. 图 1 显示了两相邻非球面以及系统中其它的表面. 在等光程条件下,物空间和像空间的光线存在一一对应的关系. 传统的计算机辅助光学设计方法是定义优化变量、控制像差和结构的约束条件,然后让光学设计软件进行优化计算进而得到理想的结果. W-W 非球面设计方法则是预先定义两个非球面的入射光束和出射光束,根据两光束求解 W-W 微分方程组,通过反复的迭代优化计算得到两个非球面上的两组坐标和矢高数据. 利用这两组数据可以拟合出两个最佳的非球面,设计出使系统理想成像的两个非球面.

1.1 入射光束定义

$$y_1 = h_1 + z_1 \tan U_0 \quad (1)$$

1.2 出射光束定义

$$y_2 = h_2 + z_2 \tan U_2 \quad (2)$$

1.3 两曲面间光束计算

$$\begin{aligned} R_y &= y_1 - y_2 \\ R_z &= d - z_1 + z_2 \\ R &= \sqrt{R_y^2 + R_z^2} \\ \sin U_1 &= \frac{R_y}{R} \quad \text{and} \quad \cos U_1 = \frac{R_z}{R} \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $U_0$  为入射光线物方孔径角,  $h_1$  为入射到第一非球面顶点切平面上的高度,  $U_2$  为出射光线像方孔径角,  $h_2$  为在第二非球面顶点切平面上的高度,  $R$  为

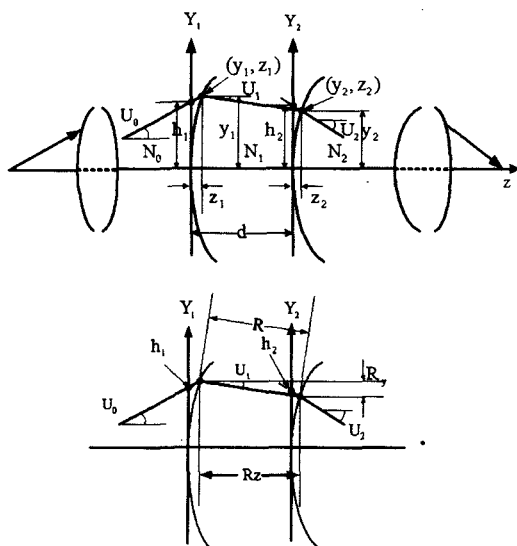


图 1 W-W 两非球面设计原理光路图  
Fig. 1 Design of two aspheric surfaces to attain aplanatism

光线在两非球面间的光程,  $R_y, R_z$  分别为 Y, Z 方向的投影长度.  $U_1$  为离开第一非球面光线与 Z 轴的夹角.

1.4 W-W 微分方程

W-W 方程组定义了非球面矢高相对于光线参数  $f$  的变化. 求解这两个微分方程就能得到所需的非球面轮廓. 数值求解的过程是一个反复迭代求解  $z_1, z_2, y_1, y_2$  的过程. 这一迭代过程可采用迭代速度快、迭代精度高的龙格-库塔 (Runge-Kutta) 迭代算法来实现. 最后将得到的一组点经过曲面拟合得到共形整流罩的固定校正器.

$$\begin{aligned} \frac{dz_1}{df} &= - \left[ \frac{N_1 R_z - N_0 R \cos U_0 + \tan U_0}{N_1 R_y - N_0 R \sin U_0} \right]^{-1} \left( \frac{dh_1}{df} + z_1 \frac{d \tan U_0}{df} \right) \\ \frac{dz_2}{df} &= - \left[ \frac{N_1 R_z - N_2 R \cos U_2 + \tan U_2}{N_1 R_y - N_2 R \sin U_2} \right]^{-1} \left( \frac{dh_2}{df} + z_2 \frac{d \tan U_2}{df} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

2 共形整流罩的几何定义

椭圆非球面具有旋转对称性, 可以通过优化曲率半径和二次曲面系数来得到空气动力学性能良好的整流罩, 如图 2 所示. 定义整流罩长径比为  $F_r = L/D$ , 公式(5)为非球面的一般描述方程:

$$z = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 h^2}} \quad (5)$$

其中  $h^2 = x^2 + y^2$ .

将式(5)整理为标准椭球方程:

$$(x^2 + y^2)/AR^2 + (z - AR)^2/A^2R^2 = 1 \quad (6)$$

其中  $A = \frac{1}{1+k}, R = \frac{1}{c}$ .

根据上述公式, 可以计算出共形整流罩两个光学表面的面形参数, 通过商业光学设计软件宏语言, 编制相关的设计程序, 只需要输入系统的长径比、中心、边缘厚度和口径, 程序将自动设计出所要求的整流罩光学系统.

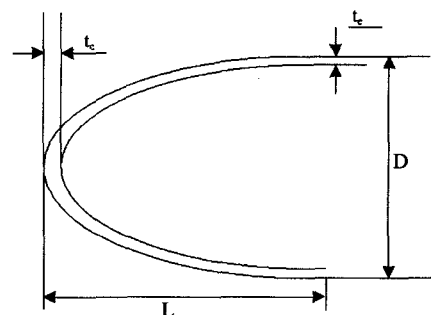


图 2 共形整流罩示意图  
Fig. 2 Sketch map of conformal dome

### 3 固定校正器的算法实现

Wassermann-Wolf 方程组为微分方程组,因此,需采用微分方程的数值解法,通常数值解法可以分为差商近似导数法、数值积分方法以及 Taylor 多项式近似法这三种.根据这三种方法又可导出不同形式的计算公式.龙格-库塔公式是其中之一,具有精度高、稳定、容易编程的特点,而且附加的计算误差可由提高精度来弥补,如果需要较高的精度,可采取减小步长的方法.

采用商业光学设计软件的宏语言编写 W-W 方程求解程序和 Runge-Kutta 程序,通过反复迭代计算得出两组坐标和矢高数据,然后再采用曲面拟合算法程序,可以将这两组点拟合成最佳的曲面.算法实现流程图如图 3 所示.

### 4 系统设计结果

本文设计的系统参数指标为:长径比  $F_r = 1.0$  的共形光学整流罩,长为 100mm,基圆直径为

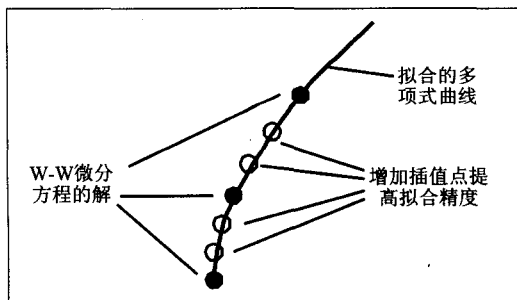
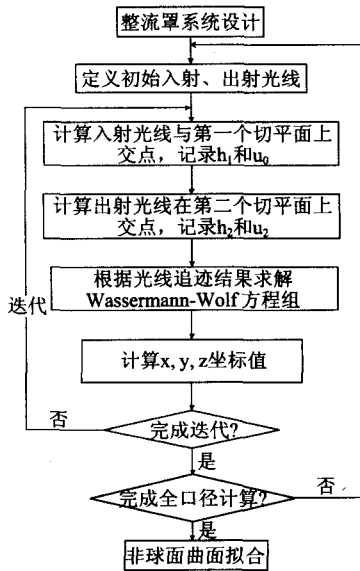


图 3 W-W 算法流程图  
Fig. 3 The W-W calculation method for the system

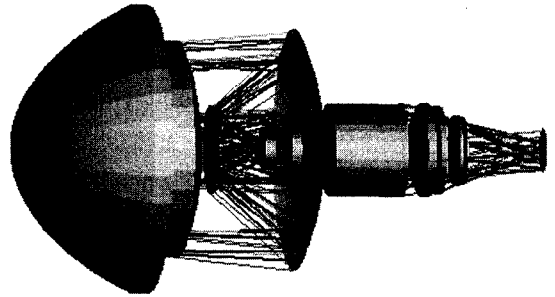


图 4 系统结构示意图  
Fig. 4 Layout of the system with plate and corrector

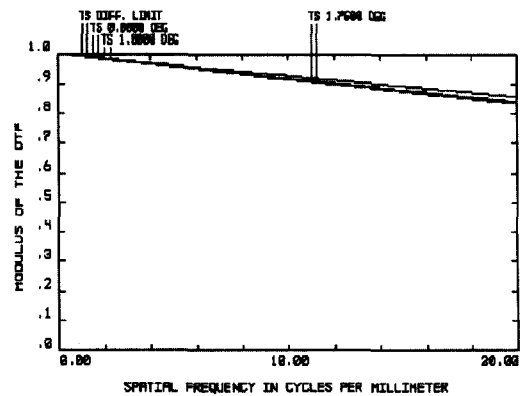


图 5 传递函数曲线图  
Fig. 5 MTF plot of the system

100mm,顶点厚度为 3mm,边缘厚度为 3mm,采用的玻璃材料为  $MgF_2$ ,系统工作波长为  $3 \sim 5 \mu m$ ,系统焦距为 100mm,视场角  $3.5^\circ$ .

图 4 为特殊共形整流罩加上校正器和复杂化的 R-C 系统<sup>[11]</sup>的结构示意图.平行光线经过整流罩后会聚到校正器,校正器采用 W-W 方法优化设计而成,可以很好地校正由共形整流罩引入的球差和彗差,然后加入复杂化的 R-C 系统,并进行系统整机优化,控制残余象散和场曲.图 5 为系统传递函数曲线,在  $20Lp/mm$  时达到 0.82(衍射极限为 0.86).图 6 为系统各视场、全谱段衍射能量分布图.图 7 为各视场、全谱段点列图.从各个图中可以得出,系统在整个谱段和视场内成像质量接近衍射极限,而且系统体积小,结构紧凑,因此采用 W-W 方程得出的校正器可以极大地改善整流罩的像差,满足整机性能的要求.

### 5 结论

本文提出了共形光学整流罩及其像差校正器的设计方法,提出用 W-W 方程非球面设计原理进行  
(下转 240 页)

[5]Soni T, Zeidler R, Ku W H. Performance evaluation of 2-D adaptive prediction filters for detection of small objects in image data[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1993,2(3):327—340.

[6]French P A, Zeidler J R, Ku W H. Enhanced detectability of small objects in correlated clutter using an improved 2-D adaptive lattice algorithm[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997,6(3):383—397.

[7]Ohki M, Hashiguchi S. Two-dimensional LMS adaptive filters[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1991, 37(1):66—73.

[8]Azimi-Sadjadi M R. Two-dimensional block diagonal LMS adaptive filtering[J]. *IEEE Transactions on Signal Process-*

*ing*, 1994,42(9):2420—2429.

[9]SANG Hong-Shi, CHEN Chao-Yang, SHEN Xu-Bang. Structural parameter of TDNLMS adaptive prediction filter used in point objects detection in digital image data[J]. *Journal of Hua Zhong University of Science and Technolgy (Nature Science Edition)* (桑红石,陈朝阳,沈绪榜. TDNLMS 自适应预测器结构参数与点目标检测性能. *华中科技大学学报(自然科学版)*), 2003,31(1):58—60.

[10]Cho H, Priemer R. Automatic step size adjustment of the two-dimensional LMS algorithm [R]. *Proceedings of the IEEE 37th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 1994.

(上接 206 页)

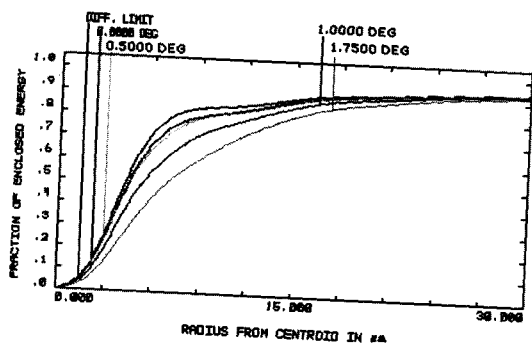


图 6 各视场、全谱段衍射能量分布图  
Fig. 6 Encircled Energy curve

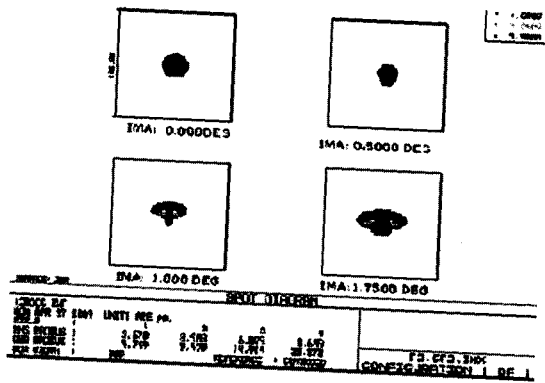


图 7 系统的点列图  
Fig. 7 Spot diagram of the system

很好地校正了系统的像差,提高了光学系统的性能.

### REFERENCES

[1]Ried M J. *Optical Design Fundamentals for Infrared Systems* [M]. Washington: SPIE Press, 2001.

[2]Wood A P, Rogers O J. Hybrid optics in dual waveband infrared systems[J]. *Proc. SPIE*, 1998,3482:602—613.

[3]Zhang Qi. The study of dual-band imaging system and fusion technology[J]. *SPIE*, 3561:189—195.

[4]Huang H M, Wang N C. Two waveband (3- $\mu\text{m}$  and 8-12 $\mu\text{m}$ ) thermal imaging system[J]. *SPIE* 1992,1814, Optical Sensors, 119—129.

[5]Texas Instruments, . Wassermann-Wolf algorithm[R]. Texas Instruments Technical Report on Conformal Optics, Section 3, 1997, 22.

[6]James P Mills, Scott W. Sparrold, et al. Conformal dome aberration correction with counter-rotating phase plates[J]. *Proc. SPIE* 1999, 3705.

[7]Sparrold S W, Arch corrector for conformal optical systems [J]. *Proc. SPIE*, 1999, 3705.

[8]Knapp D J, Mills J P, Hegg R G, et al. Conformal optics risk reduction demonstration[J]. *Proc. SPIE*, 2001, 4375.

[9]FAN Zhi-Gang, ZHANG Ya-Ping, PEI Yang-Wei, et al. Numerical simulation of optical transmission through high speed aircraft optical window in aerodynamic thermal environment[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (范志刚,张亚萍,裴扬威. 气动热环境下高速飞行器光学窗口光传输数值仿真研究. *红外与毫米波学报*), 2007,26(5):398—400.

[10]ZHANG Guang-Ming, SUN Sheng-Li, ZHANG Wei, et al. Model and application of image plane illumination for the space based infrared detecting of boost phase missile[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张光明,孙胜利,张伟. 导弹助推段天基红外探测的像面照度模型及其应用. *红外与毫米波学报*), 2007,26(6):425—428.

[11]Jamieson T H. Double-pass catadioptric systems[J]. *Optical Engineering*, 1972,19(8):663—679.

设计共形光学像差校正器的方法,并用商业光学设计软件宏语言实现了它的自动设计,文章给出了实际设计系统,设计结果表明,该方法设计的校正元件