

利用衍射光学元件进行共形整流罩像差校正的研究

孙金霞^{1,2)} 孙 强¹⁾ 李东熙^{1,2)} 卢振武¹⁾

1) 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2006 年 9 月 22 日收到, 2006 年 10 月 27 日收到修改稿)

建立了共形整流罩的模型结构, 分析了其成像特性, 并提出了采用加入衍射元件的方法来设计共形整流罩后的校正板. 软件模拟结果表明带有衍射面的校正板能够进一步地改善共形整流罩成像质量.

关键词: 共形光学, 整流罩, 像差校正, 衍射光学

PACC: 4215E

1. 引言

目前整流罩多采用球形, 平板或者由多块平板拼接而成的结构设计. 球形和平板形整流罩结构的设计和制造都很简单, 但也存在许多问题. 最明显的就是采用这样的结构容易增大机身或弹体的空气阻力, 即空气动力学性能较差. 除此之外, 平板缝隙间存在的热梯度会影响成像系统的成像质量, 整流罩的雷达散射截面也不是很理想. 相对于传统的结构设计, 径长比大于 0.5 的共形整流罩能够很好的解决上述问题. 时速为 3 马赫的导弹, 在采用径长比为 1.5 的共形结构时整流罩给弹体带来的阻力仅为球形结构的一半, 并且整流罩的空气阻力系数随着径长比的增大也逐渐降低^[1]. 共形整流罩的另一个明显的特点是它能够获得比球形结构更大的无渐晕观察视场. 球形结构由于边缘的限制其观察视场往往小于 60°, 而在共形结构中由于头罩内表面和可旋转的成像系统的轴向间距是可以自由调节的, 很容易设计出观察视场大于 90°的整流罩.

共形光学系统是指光学系统的设计首先要满足主平台的某种特性需求, 其次考虑其成像性能. 共形整流罩即为了使机身或弹体具有更好的空气动力学性能, 采用非球面的结构设计代替球面或平板结构设计的整流罩. 然而在降低阻力的同时, 这种非球面结构也引入了严重的随着观察视场而不断变化的非轴对称像差. 为了校正共形整流罩随观察视场变化

的各种像差, 美国的精密共形光学协会(PCOT)设计了在头罩后加入固定校正板、弧形校正板^[2]、对旋的位相板^[3,4]、能够轴向移动的位相板^[5]或者柱面透镜^[6]等多种解决方式. 其中除了固定校正板结构外, 其他的校正器都能够在不同的观察视场中提供不同的像差补偿量, 起到动态校正像差的作用. 固定校正板是指固定于头罩和成像系统之间某位置处的像差校正板, 它不能够动态的校正像差, 但对于大观察视场中的像差有一定的补偿作用, 通常会将这种结构同其他的动态校正板结构相结合达到改善共形整流罩成像质量的目的. 同传统意义上的校正板相比, 文中所采用折衍射混合形式的固定校正板在不增加校正板的重量和大小的前提下能够进一步改善共形整流罩的成像特性, 而且衍射面也可以应用在上述各种动态校正板结构中.

2. 共形整流罩模型及像差分析

数学意义上的共形曲线有多种形式, 可以是多项式型、指数型、贝塞尔曲线型或者样条曲线型等. 考虑整流罩的旋转对称结构以及顶点处连续性问题, 通常选择椭球面作为共形整流罩的基本面型. 文中将以图 1 所示的椭球形结构来说明共形整流罩的特性.

2.1. 数学描述

描述椭球面只需要给出曲率半径(c)和锥形系

数(k)两个参数^[7]：

$$Z = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2\rho^2}}, \tag{1}$$

其中 Z 为轴向坐标， ρ 为径向坐标. 整流罩的内外表面都可以用口径大小 D 、边缘倾斜度 S_e 和径长比 F_R 来表示. F_R 定义为 $F_R = L/D$ ，其中 L 为整流罩长度. 曲率 c 和锥形系数 K 同 D 、 S_e 、 F_R 的关系如下：

$$K = \frac{1}{4F_R} - \frac{S_e}{F_R} - 1,$$
$$c = \frac{8L}{D^2 + 4L^2(1 + K)}. \tag{2}$$

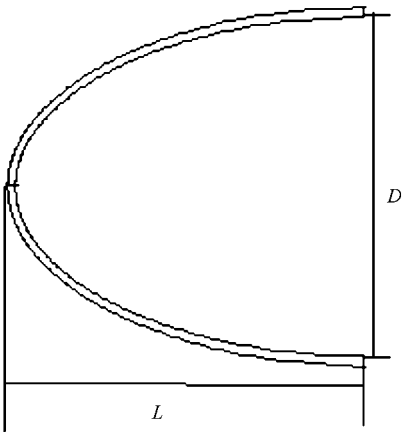


图 1 共形整流罩模型(径长比 = L/D)

2.2. 成像质量分析

为了分析共形整流罩的成像质量以及后文中验证像差校正效果,用软件模拟了一个如图 2 所示 $F_R = 1$ 的等厚共形整流罩,具体参数如表 1 所示.在整流罩后 4.85"处我们用 F 数为 1.5 的理想透镜来代替实际成像系统,并将理想透镜设为孔径光阑.理想透镜的瞬时视场取为 $\pm 2^\circ$,以理想透镜的中心为旋转节点,旋转步进角为 5° ,整个系统的最大观察视场取为 45° .

从上面的图形中可以看到共形整流罩具有连续的外表面,它能提供给位于罩后某节点位置处的成

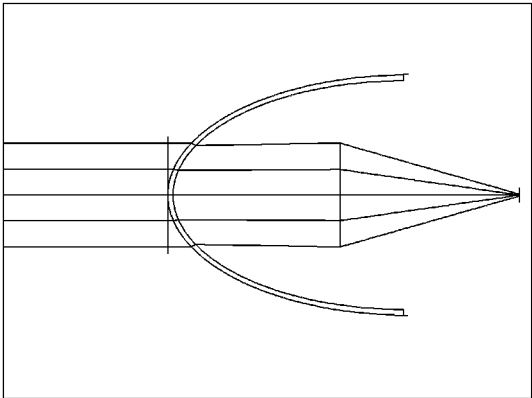


图 2 位于 0° 观察视场的等厚共形整流罩

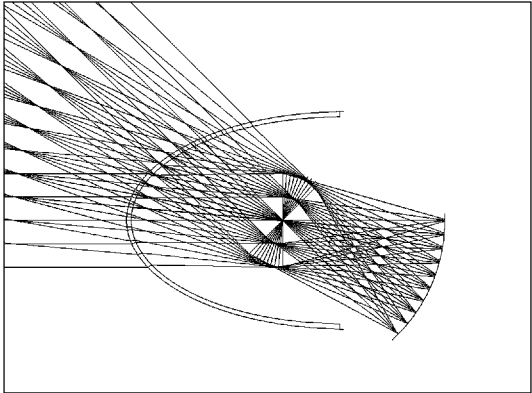


图 3 位于所有观察视场中的共形整流罩

像系统的观察视场也远远大于传统结构.然而尖拱顶式的造型在降低了空气阻力的同时也引入了许多非轴对称的像差.图 4 和图 5 为该共形整流罩轴上视场的 RMS 半径和用泽尼克系数表示的各类像差随着观察视场的变化情况.

可以看到该整流罩在大的观察视场处存在严重的离焦和像散,由于离焦不影响成像质量,所以像散将是影响该共形结构成像性能的主要因素.共形结构中像散随着观察视场的变化具有如此大的动态变化特性是因为位于小视场内的整流罩具有类似于球形的旋转对称结构,而位于较大观察视场的部分失去了该种对称特性,逐渐转化为类似于柱面的结构,

表 1 共形整流罩设计参数

外表面口径 D_0/cm	7.0	外表面锥形系数 K_0	-0.75	内表面锥形系数 K_i	-0.76
边缘倾斜度 S_e	0.0017	外表面半径 R_0/cm	1.74	内表面半径 D_i/cm	6.7
外表面径长比 F_R	1	内表面口径 D_i/cm	6.7	孔径光阑口径 D/cm	3
厚度 T/cm	0.15	内表面径长比 F_R	1.02	材料	ZnSe

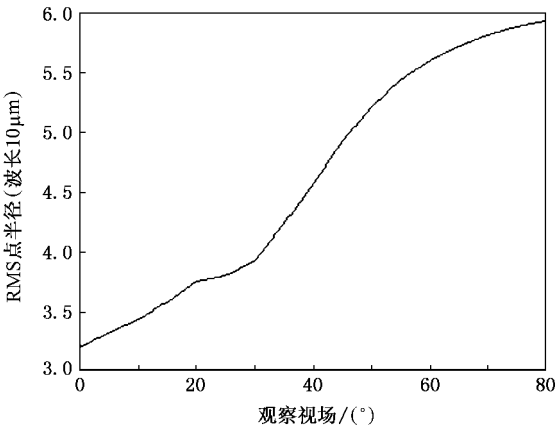


图 4 等厚共形整流罩的 RMS 点斑尺寸

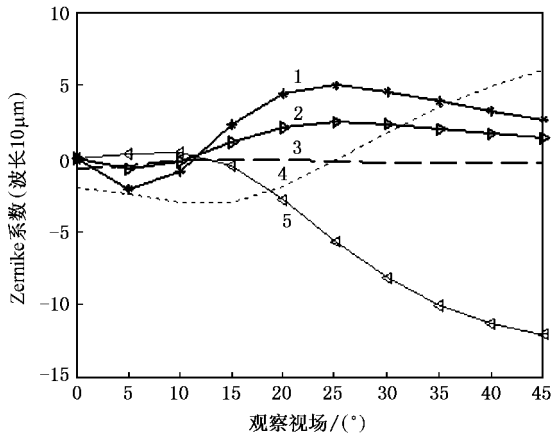


图 5 等厚整流罩的 Zernike 像差(1—5 分别为 z_3 (y - tilt), z_8 (coma + y - tilt), z_9 (spherical + focus + y - tilt), z_4 (focus + piston), z_5 (astigmatism + focus))

不规则柱面结构使波前产生了严重的像散。

3. 采用二元光学元件的像差校正方法

上文所提到的各种校正板结构的折射率固定 , 光学吸收为常量. 实际上若能使这些校正器在不同的空间位置处对入射波前引入不同的位相变化 , 就可以用这些波前变形量来补偿共形整流罩的像差. 基于上述设想我们可以利用带有衍射面的校正板^[8 9]或者采用具有渐变折射率的光学材料来制作校正板 , 从而达到改善进入罩后成像系统的波前形状的目的.

二元光学是指基于光波的衍射理论 , 利用计算机辅助设计 , 并用超大规模集成电路制作工艺 , 在片基上刻蚀产生两个或多个台阶深度的浮雕结构 , 形

成纯位相 , 具有极高的衍射效率的一类衍射光学元件. 它可以产生一般传统光学元件所不能实现的光学波面 , 如非球面、环状面、锥面和镞面等. 二元面产生的位相变化 $\phi(x, y)$ 为

$$\phi(x, y) = (2\pi/\lambda) \sum_{n,m} a_{nm} x^n y^m, \quad (3)$$

其中相位系数 a_{nm} 可以通过光学设计软件优化后得到.

为了验证像差校正效果 , 我们在上文模拟的等厚共形整流罩和理想透镜之间加入两个固定校正板 , 如图 6 和图 7 所示. 校正板位置要适当 , 要为实际成像系统留有一定的转动空间. 根据共形头罩的

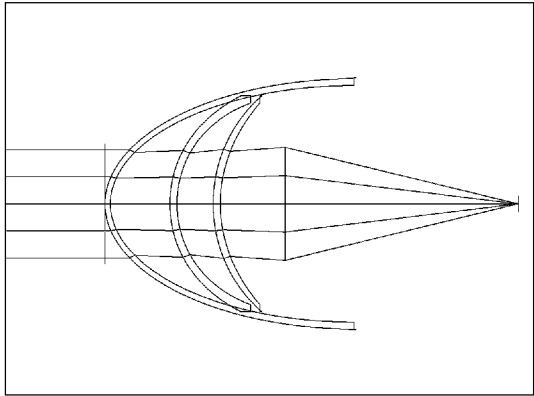


图 6 位于 0°观察视场的带有校正板的共形整流罩

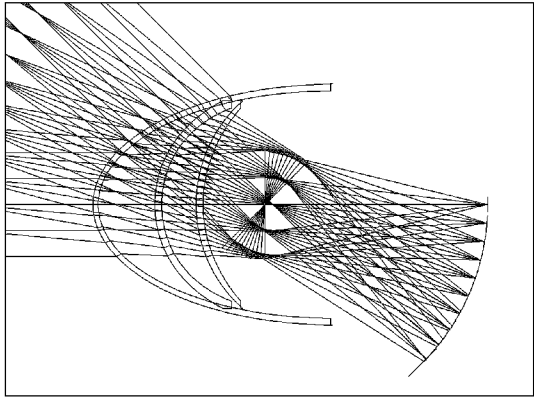


图 7 位于所有观察视场中的带校正板的共形整流罩

特殊需求 , 校正板的面形通常选择为带有高次项的非球面. 由于衍射面的位置不同对于像差校正影响也不同 , 在模拟时我们分别在第一个校正板的前后表面和第二个校正板的第一表面加入了二元面. 优化过程以降低像散获得小的 RMS 点半径为目标 , 图 8 至图 11 为不带二元面的校正板和在不同位置处加入了二元面的校正板结构经优化后的 RMS 点半径和以泽尼克系数形式表示的低阶像散 Z5、彗差

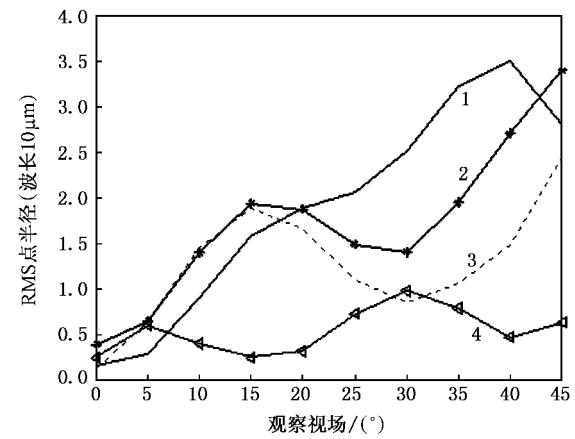


图 8 RMS 点半径的比较(1—4 分别为双校正板,二元面在第一校正板后表面,二元面在第二校正板前表面,二元面在第一校正板前表面)

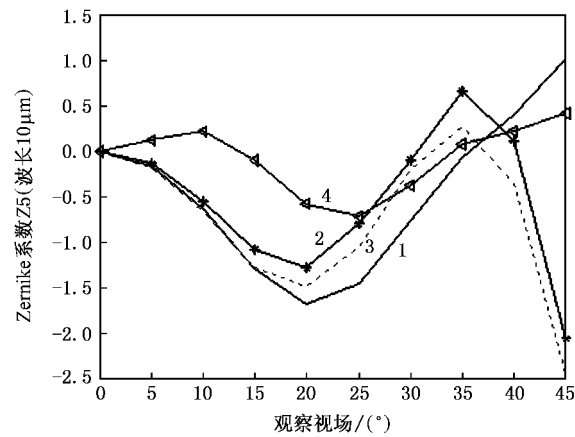


图 9 Zernike 系数 Z5 的比较(1—4 同图 8)

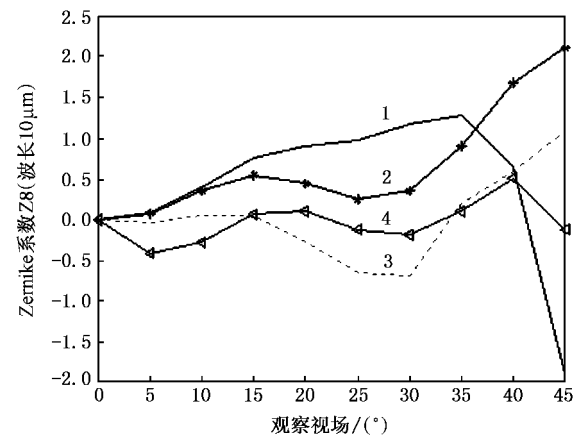


图 10 Zernike 系数 Z8 的比较(1—4 同图 8)

Z8、球差 Z9 随观察视场的变化情况,图 12 至图 14 分别为几种结构中加入的二元面的位相曲线。

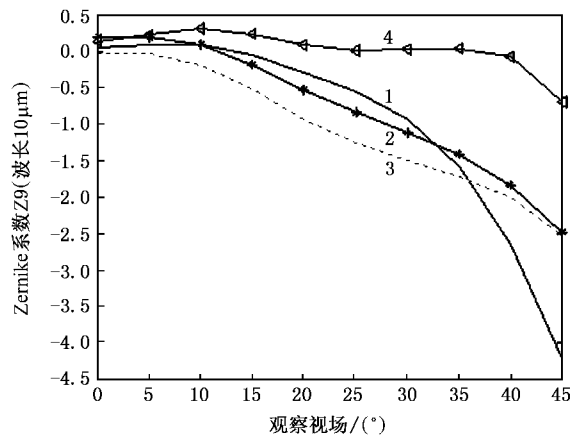


图 11 Zernike 系数 Z9 的比较(1—4 同图 8)

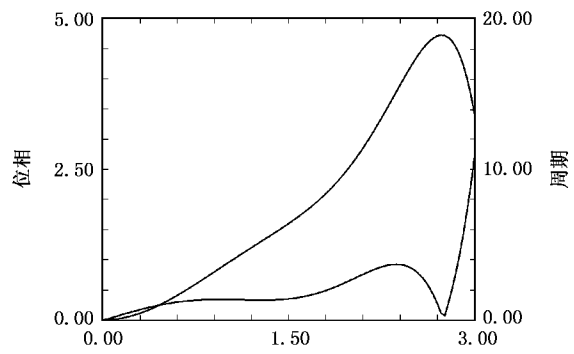


图 12 位于校正板 1 第一表面的二元面的位相曲线

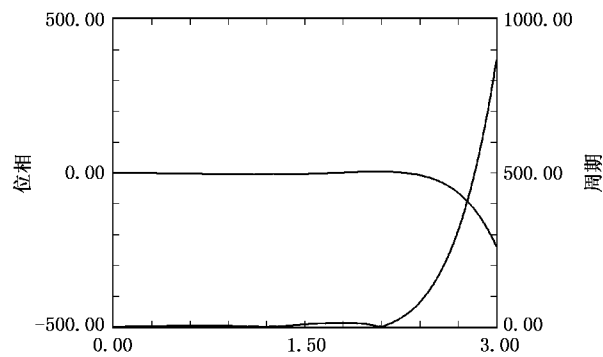


图 13 位于校正板 2 第一表面的二元面的位相曲线

从这些图中可以看到,同上文不带校正板的整流罩相比带有固定校正板的结构有利于大观察视场中的像差校正,而且衍射面位置的不同对于像差校正的影响也不同.其中在第一个校正板的前表面加入了二元面的结构在整个观察视场中能够获得比其他结构动态范围要小得多的像散和彗差,其 RMS 点半径在大观察视场中也几乎为不带衍射面的结构的二分之一.除此之外,较为平滑的球差曲线也表明这

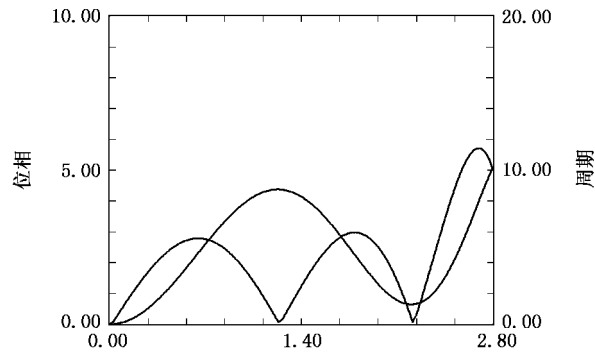


图 14 位于校正板 2 第二表面的二元面的位相曲线

样的结构有利于减轻罩后实际成像系统像差校正压力.同时由于二元面引入不会增加校正板的重量和大小,我们还可以将衍射面应用在动态校正板结构

中,来进一步改善共形整流罩的成像质量.

4. 结 论

在共形整流罩设计中,通常采用非球面的固定校正板来校正大观察视场中头罩带来的大像差.本文在传统的固定校正板上加入了衍射面,软件模拟结果表明这样的结构有利于进一步改善共形整流罩的成像质量.在实际应用中一个非球面校正板是无法完全校正头罩中的各种像差的,一般需要采用几个固定校正板或者固定校正板与动态校正器相结合的方法来完成像差校正,因而在整个校正结构的适当位置处加入衍射面将会获得更好的像差校正效果.

[1] Knapp D J 2002 *Proc. SPIE* **4832** 394

[2] Sparrold S W 1999 *Proc. SPIE* **3705** 189

[3] James P M ,Scott W S ,Thomas A M ,Kenneth S E ,David J K ,Paul K M 1999 *Proc SPIE* **3705** 201

[4] Scott W S ,James P M ,David J K ,Kenneth S E ,Thomas A M ,Paul K M 2000 *Opt. Eng.* **39** 1822

[5] Mitchell T A ,Sasian J M 1999 *Proc SPIE* **3705** 209

[6] Whalen M R 1998 *Proc SPIE* **3482** 62

[7] Crowther B G ,Mckenney D B ,Mills J P 1998 *Proc SPIE* **3482** 48

[8] Sun Q ,Yu B ,Wang Z Q ,Mu G G ,Lu Z W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 756 (in Chinese)[孙 强、于 斌、王肇圻、母国光、卢振武 2004 *物理学报* **53** 756]

[9] Dong K Y ,Sun Q ,Li Y D ,Zhang Y C ,Wang J ,Ge Z J ,Sun J X ,Liu J Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4602 (in Chinese)[董科研、孙 强、李永大、张云翠、王 健、葛振杰、孙金霞、刘建卓 2006 *物理学报* **55** 4602]



Conformal dome aberration correction with diffractive elements

Sun Jin-Xia^{1,2)} Sun Qiang¹⁾ Li Dong-Xi^{1,2)} Lu Zhen-Wu¹⁾

1) *State Key Laboratory of Applied Optics ,Changchun Institute of Optics ,Fine Mechanics and Physics ,
Chinese Academy of Sciences ,Changchun 130033 ,China)*

2) *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100049 ,China)*

(Received 22 September 2006 ; revised manuscript received 27 October 2006)

Abstract

Conformal dome may enhance the velocity and effective range of the missile systems by providing better aerodynamical surfaces than traditional domes. However ,the highly aspheric surface may introduce serious aberration which changes with the field of regard and the fixed corrector can be used to correct these higher aberrations in the big field. This paper analysis the performance of the conformal dome and proposes a way for the optical corrector design by adding diffractive element into the fixed corrector. The simulation proves it 's an effective way to improve the imaging quality of the conformal dome.

Keywords : conformal optics , windows and domes , aberration corrector , diffractive optics

PACC : 4215E