

文章编号: 1672-8785(2012)10-0001-06

共形光学头罩及其像差校正方法研究——综述

贾 静 陈星明

(西南技术物理研究所, 四川成都 610041)

摘 要: 为了使高速红外光电制导导弹拥有良好的空气动力学性能, 可以采用共形头罩来代替传统的球形头罩。根据共形光学校正元件的不同, 归纳整理了七种不同的校正方案。其中, 轴向平移相位板、反向旋转相位板、尼克泽楔形板和变形镜属于动态校正; 固定式校正和拱形校正属于静态校正; 还有一种为静态和动态相结合的校正方案。着重讨论了固定式校正方法, 并给出了几种常用的校正表面类型。共形光学是高速红外光电主动制导导弹发展的关键技术之一, 对其研究工作具有重要的现实意义。

关键词: 共形光学; 共形整流罩; 像差校正; 校正器

中图分类号: TH745 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.10.001

Overview of Conformal Domes and Their Aberration Correction Methods

JIA Jing, CHEN Xing-ming

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: To let a high speed infrared electro-optical guided missile have good aerodynamic performance, a conformal dome can be used to replace the traditional spherical dome. Since different conformal optical correction elements are existed, seven different correction methods are summarized. Among them, the axially translating phase plate, counter rotation phase plate, Zernike wedge and deformable mirror are dynamic correction methods. The fixed corrector and arch corrector are static correction methods. There is another method in which the static correction is combined with the dynamic correction. The fixed correction method is discussed in detail and several common correction surface types are given. The conformal optics is one of the key technologies for developing high speed infrared electro-optical active guided missiles. The research on conformal optics is of practical significance.

Key words: conformal optics; conformal dome; aberration correction; corrector

0 引言

整流罩位于导引头的最前端, 是红外光电制导导弹系统中的一个关键部件。传统上来讲, 光学探测系统的罩子一般为球形或者平板玻璃。头罩既参与光学成像, 又起到保护光学系统免受大气环境影响的作用。但是当导弹进行高马

赫飞行时, 传统头罩会引起很大的空气阻力, 进而产生大量热能^[1]。这将会影响导弹的飞行以及人们对目标的有效探测和观察。因此, 对具有良好空气动力学特性的共形光学进行研究具有重要意义。

与传统的球罩相比, 共形头罩具有以下优点^[2]: 第一, 共形头罩可以降低整个机体的阻

收稿日期: 2012-08-12

作者简介: 贾静 (1987-), 女, 山西保德人, 硕士研究生, 主要从事红外成像光学系统设计方面的研究。

E-mail: jiajing-123@163.com

力, 进而使阻力所产生的热能大量减少; 第二, 导弹使用共形表面, 能够显著增加其射程, 而且其在飞行速度及时间上都要优于使用球罩的导弹; 第三, 通过将共形光学运用在军事上, 可以减弱导弹自身的雷达反射截面信号, 从而获得较好的隐身能力。共形光学的诸多优势使其成为了人们研究的热点。

20 世纪 90 年代起, 国外就已经开始对共形光学进行研究。美国国防部高级研究计划局于 1996 年开始资助并发展共形光学项目^[3]。2000 年, 雷声公司宣布首次通过共形光学系统实现了光学成像。2001 年, 美国成功地将径长比为 1.5 的共形整流罩应用到实际的导弹系统中。试验结果表明, 导弹整体的空气阻力降低了 25%, 同时射程增加了 1 倍^[4]。雷声公司对于共形光学在导弹中的应用起了关键性的作用, 至今该公司已经获得了多项专利^[5-7], 其中大多采用动态校正的方法。而德国则是从 2003 年开始资助 BGT 公司研究共形红外导引头的^[8]。他们提出用共形顶盖来改造导弹原有的整流罩^[9]。这样便可以在导弹现有结构变动不大的情况下使其具有共形光学的优点, 从而大幅度地提高导弹的性能。国内对共形光学的研究还处于设计阶段, 相关课题的主要研究单位都集中在具有兵工性质的研究所以及一些大学, 如中国空空导弹研究院、中国科学院、航天科工集团三院八三五八研究所和北京理工大学等等。

1 共形光学的定义

共形光学可以定义成这样的光学系统^[10]: 首先考虑的因素是飞行环境, 其次是光学图像特性。共形光学也称保形光学。在导弹飞行环境中, 共形光学关注的是整流罩外表面的形状对导弹弹体空气动力学性能的影响。共形光学整流罩可以用多种不同的数学形式描述^[11]。其外表面通常是旋转面以及需要用轴向和径向坐标描述的面。本文着重介绍椭圆形共形整流罩。

首先定义整流罩的径长比 F 。径长比是整流罩的长度与直径之比, 即 $F = \frac{L}{D}$ 。图 1 为椭圆

整流罩的示意图。

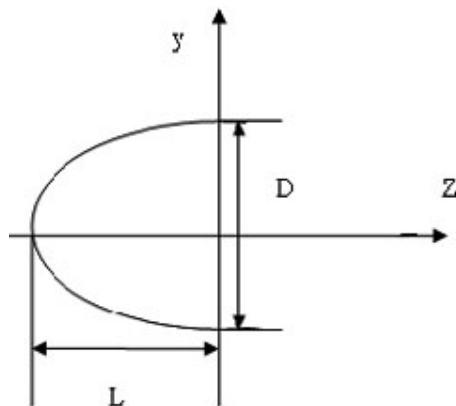


图 1 椭圆整流罩的示意图

式 (1) 为非球面的一般描述方程:

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

式中, $h^2 = x^2 + y^2$; $R = \frac{1}{c}$; k 为锥形常数。

将式 (1) 整理为标准椭球方程:

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

式中, $A = \frac{1}{1+k}$, 则用径长比计算曲率半径和锥形常数的公式如下:

$$R = \frac{D^2}{4L} = \frac{D}{4F} \quad (3)$$

$$k = \frac{4L^2 - D^2}{4L^2} = \frac{1}{4F^2} - 1 \quad (4)$$

2 共形头罩的像差校正方案

共形光学的设计工作充满了挑战。因为共形表面是非球面的, 这将会产生很多随观察角而变化的像差, 所以需要作一些补偿。像差校正方法主要有两种: 一种是通过在系统中增加一个或多个元件产生等量相反的像差来实现被动校正; 另一种是用动态像差来实现主动校正。其中, 后一种需要用机械和电子部分进行控制。常用的校正器包括固定校正器、拱形校正器、变形镜以及尼克泽楔形板等。

2.1 轴向平移相位板

轴向平移相位板是两个平面平行相位板, 其内表面上置有匹配的非球面。当两块板接触时, 它们就被当作一个独立的平行平面板。但是, 当

它们在轴向分开时, 光线便会通过第一个平板与第二个平板在不同的位置相关, 导致光程长度发生改变, 同时产生一系列像差^[12]。图 2 所示为不同观察角下的轴向相位板。

2.2 反向旋转相位板

反向旋转相位板是间隔很小的两个光学元件, 它们的中心位于寻的头的光轴上。每个相位板可以在垂直于光轴的平面上旋转, 而且各自的旋向相反。相位板是圆形的, 标称的平行平面元件的内表面为蚀刻的尼克泽表面。当相位板反向旋转时, 可通过孔径的厚度产生等量相反的像差^[13]。图 3 所示为反向旋转相位板的模型。

2.3 尼克泽楔形镜

这种校正方法依赖于等高的 Rislay 棱镜对。其轮廓可以通过尼克泽多项式表示法描述。通

过改变棱镜间的位置可以校正由不同视角而引入的像差^[14]。图 4 所示为尼克泽楔形镜校正模型。

2.4 变形镜

将变形镜用于成像系统中, 可动态校正由头罩产生的像差。但系统必须通过用查找表或反馈环路控制变形镜来产生需要的像差。随着变形镜及其线路的制作成本的不断降低, 这种解决方案可能会有更大的应用前景。在参考文献^[15]的系统中, 变形镜已被作为反射次镜应用于光学系统中。图 5 为该光学系统的布局图。

2.5 固定式校正镜

固定式校正器是一个旋转对称的元件, 其相对于导弹和外罩本身是固定的。它能够校正

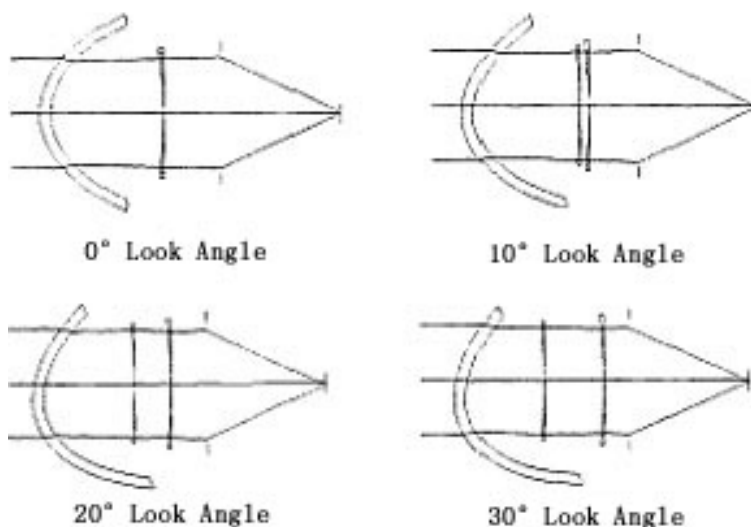


图 2 不同观察角下的轴向平移相位板

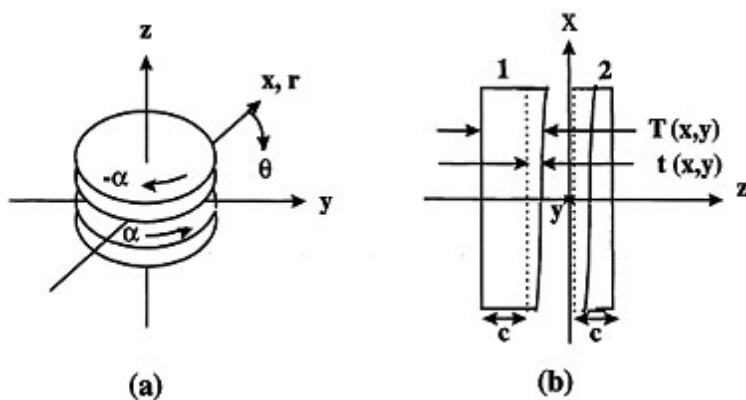


图 3 反向旋转相位板

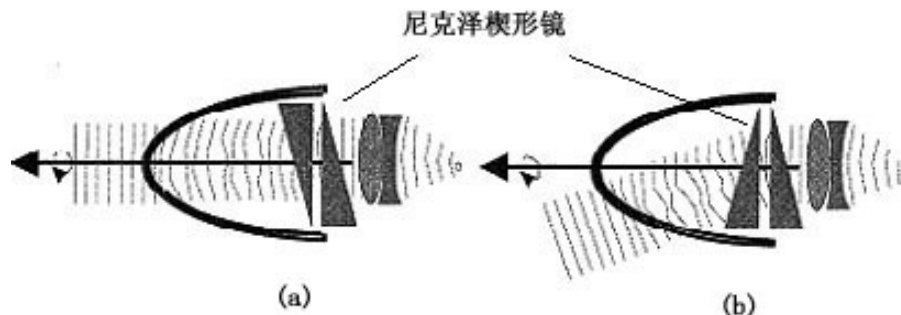


图 4 尼克泽楔形镜

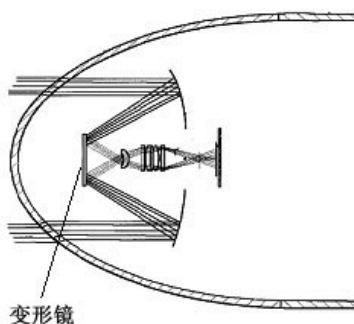


图 5 变形镜校正系统

头罩在所有观察角下的像差。使用固定校正器可以使各个观察视场上的像差减至最小，而剩余的球差和离焦则可以由成像系统进行校正。在一个共形系统中，可能会使用不止一个校正板。在使用两个固定校正板的情况下，采用不同的材料能够降低色差和改进受热能力。

固定式校正系统一般采用 Wassermann-Wolf 曲面拟合方法。Wassermann-Wolf 算法可为光学

表面产生准确的等光程解，这些解可以将共形光学的优化设计限制在解空间的等光程区域内。通过等光程限制，可以去掉常规优化算法的不实际或者不可实现的解。

Wassermann-Wolf 的设计方案是^[16]，先定义两个非球面上的入射光束和出射光束，并根据这两束光上的参数求解 Wassermann-Wolf 方程组；然后通过反复迭代优化得到两个非球面上的两组坐标和矢高数据；最后利用这两组数据拟合出两个最佳的、能使光学系统理想成像的非球面。图 6 为设计 Wassermann-Wolf 曲面的光路图。

入射光束的定义为

$$y_1 = h_1 + z_1 \tan U_0 \quad (5)$$

出射光束的定义为

$$y_2 = h_2 + z_2 \tan U_2 \quad (6)$$

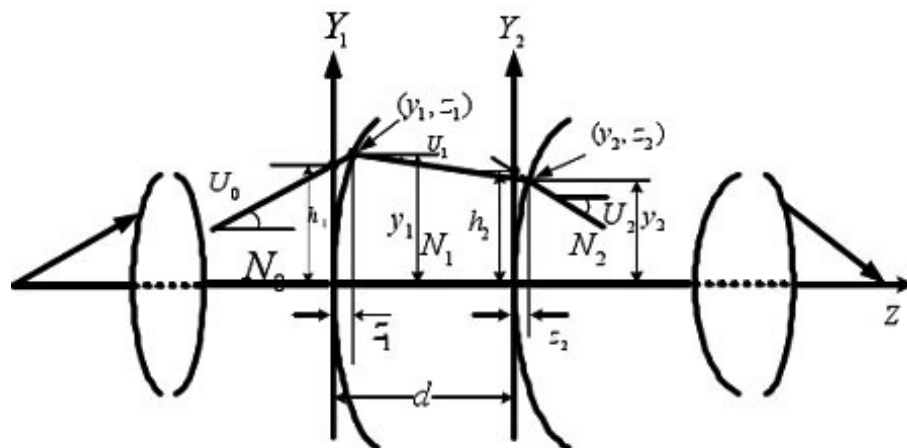


图 6 系统光路图

两曲面间的光束计算如下:

$$R_y = y_1 - y_2 \quad (7)$$

$$R_z = d - z_1 + z_2 \quad (8)$$

$$R = \sqrt{R_y^2 + R_z^2} \quad (9)$$

$$\sin U_1 = \frac{R_y}{R}, \quad \cos U_1 = \frac{R_z}{R} \quad (10)$$

式中, U_0 为入射光线的物方孔径角, h_1 为入射到第一非球面顶点切平面上的高度, U_2 为出射光线的像方孔径角, h_2 为在第二非球面顶点切平面上的高度, R 为光线在两非球面间的光程, R_y 和 R_z 分别为 Y、Z 方向上的投影长度, U_1 为离开第一非球面的光线与 Z 轴的夹角。

Wassermann-Wolf 方程组如下:

$$\begin{aligned} \frac{d_{z_1}}{df} = & - \left[\frac{N_1 R_z - N_0 R \cos U_0}{N_1 R_y - N_0 R \sin U_0} + \tan U_0 \right]^{-1} \\ & \times \left[\frac{d_{h_1}}{df} + z_1 \frac{d_{\tan U_0}}{df} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{d_{z_2}}{df} = & - \left[\frac{N_1 R_z - N_2 R \cos U_2}{N_1 R_y - N_2 R \sin U_2} + \tan U_2 \right]^{-1} \\ & \times \left[\frac{d_{h_2}}{df} + z_2 \frac{d_{\tan U_2}}{df} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

但是, 用 Wassermann-Wolf 拟合的曲面是针一对共轭点而言的。因此需要把 Wassermann-Wolf 方程组扩展至整个视场范围。图 7 为扩展形式的 Wassermann-Wolf 曲面光路示意图。其方法为在一对 Wassermann-Wolf 曲面后再扩展一对 Wassermann-Wolf 曲面^[17]。

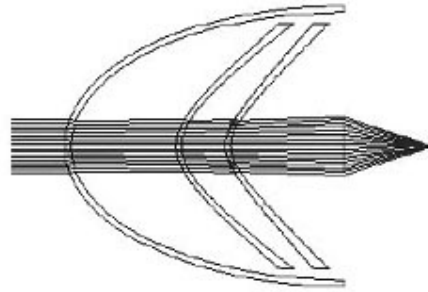


图 7 扩展形式的 Wassermann-Wolf 光路图

2.6 拱形校正器

拱形校正是固定校正器概念的一个延伸, 其不同之处在于拱形不是旋转对称系统, 而且拱形需要和万向节联轴器一起工作。拱形是一个弯曲的薄条, 它的宽度是由其后面的成像系统的孔径直径决定的。拱形校正器能够校正大观察角和高折射率头罩所产生的像差^[18]。但拱形校正器的加工比较困难。图 8 所示为从侧面 (a) 和顶部 (b) 所看到的拱形校正系统的截面图。

2.7 动态和静态校正相结合的情况

为了校正由共形头罩引入的动态像差, 可以同时使用动态校正法和静态校正法^[19]。如图 9 所示, 头罩内的第一、第二个元件为一对反向旋转的楔形镜, 第三、第四个元件为一对固定透镜, 两对校正镜的内表面均为尼克泽表面。

3 常用校正表面类型

表面类型在共形光学整流罩设计中是一种很重要的因素^[20]。共形表面的应用无疑将需要有可校正其像差的特殊表面^[21]。选取恰当的校

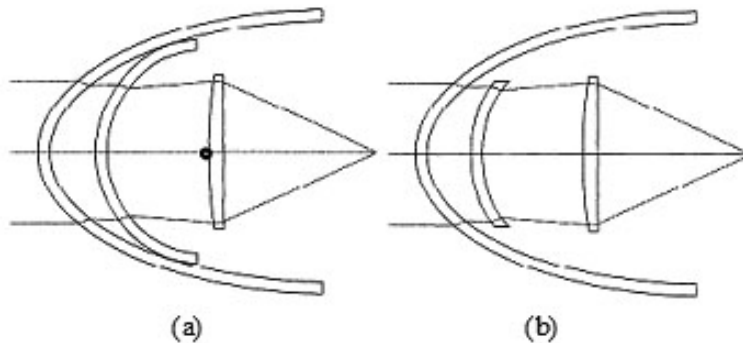


图 8 拱形校正器的示意图

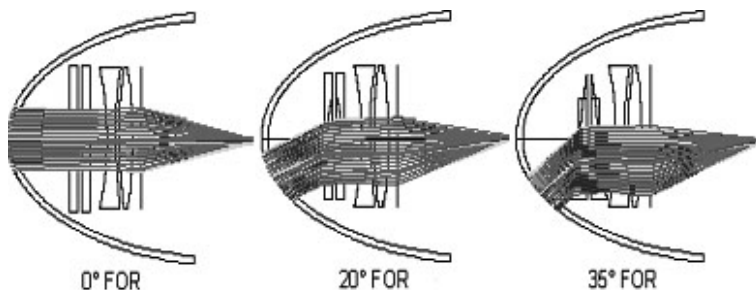


图 9 静动态相结合的校正系统

正表面类型将可以为像差的优化提供一个好的起点。表 1 列出了几种常用的表面类型。

4 结论

共形光学是高速光电主动制导导弹的必要选择。随着校正方案、表面类型选择和加工工艺等方面的深入研究,这个领域的发展将会得到进一步推动。而我国的共形光学研究才刚刚起步,光学设计人员也将会面临愈来愈大的压力和挑战。

参考文献

- [1] 殷兴良. 现代光学新分支学科——气动光学[J]. 中国工程科学, 2005, 7(12): 1-6.
- [2] 孙金霞, 刘建卓, 孙强, 等. 消像差条件在共形光学系统中的应用[J]. 光子学报, 2010, 39(2): 223-226.
- [3] Knappa D J, Mills J P, Hegg R G, et al. Conformal Optics Risk Reduction Demonstration [C]. SPIE, 2001, 4375: 146-153.
- [4] Trotta P A. Precision Conformal Optics Technology Program [C]. SPIE, 2001, 4375: 96-107.
- [5] Sparrold S W, Mills J P, Paiva R A, et al. Missile Seeker Having a Beam Steering Optical Arrangement Using Risley Prisms: US, 6343767B1 [P]. 2002-02-05.
- [6] Knappa D J. Optical System Having a Transmission Optical Corrector with a Selectively Nonuniform Passive Transmission Optical Property: US, 7042654B2 [P]. 2006-05-09.
- [7] Chen C W, Cook L G. Optical Device with a Steerable Light Path: US, 7813644B2 [P]. 2010-10-12.
- [8] 张学成, 徐榕, 刘莉. 保形光学在导引头中的应用[J]. 兵工自动化, 2010, 29(4): 30-33.
- [9] Jorg Baumgart, Herdwangen-Schonach. Nose Cover: US, 7423245B2 [P]. 2008-09-09.
- [10] Shannon R R. Overview of Conformal Optics [C]. SPIE, 1999, 3705: 180-188.

表 1 常用校正表面类型

表面类型	用途
奇次多项式	良好的开始表面, 收敛速度快
双曲面	有效的拱形解决形式
样条	在设计过程的后期可转换为样条来实现最终的性能提升, 用于头罩内表面的描述
尼克泽表面	有效的拱形和尼克泽楔形解决形式
X-Y 多项式	有效的拱形解决形式

- [11] Crouther B G, Mckenney D B, Mills J P. Aberrations of Optical Domes [C]. SPIE, 1999, 3482: 48-61.
- [12] Mitchell T A, Sasian J M. Variable Aberration Correction Using Axially Translating Phase Plates [C]. SPIE, 1999, 3705: 209-220.
- [13] Sparrold S W, Mills J P, Knapp D J, et al. Conformal Dome Aberration Correction with Counter-rotating Phase Plates [C]. SPIE, 1999, 3705: 201-208.
- [14] Knapp D J. Fundamentals of Conformal Dome Design [C]. SPIE, 2002, 4832: 394-409.
- [15] Crowther B G, Mckenney D B, Sparrold S W. Sensor System with Dynamic Optical Corrector: US, 6201230 [P]. 2001-03-13.
- [16] 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): 204-207.
- [17] 李东熙, 卢振武, 陆子凤, 等. 共形光学系统设计研究[J]. 红外技术, 2008, 30(3): 128-132.
- [18] Sparrold S W. Arch Corrector for Conformal Optical Systems [C]. SPIE, 1999, 3705: 189-200.
- [19] Yan L, Lin L, Yi H. Conformal Optical Design Using Counterrotating Wedges and Zernike Fringe Sag Surfaces [C]. SPIE, 2009, 7133: 41-48.
- [20] Lin L, Yan L, Yi H, et al. The Research of Conformal Optical Design [C]. SPIE, 2009, 7383: 1-8.
- [21] Nan Z, Jun C, Zhi S, et al. Summarize of Conformal Optics [C]. SPIE, 2008, 6624: 1-7.