

## 基于实际光线追迹的共形光学系统设计

李东熙<sup>1,2</sup>, 卢振武<sup>1</sup>, 孙 强<sup>1</sup>, 陆子凤<sup>3</sup>

(1. 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, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3. 东北师范大学 先进光电功能材料研究中心, 吉林 长春 130024)

**摘 要:**提出了基于实际光线追迹的共形光学系统设计方法, 获得了较好的设计结果。共形光学系统具有偏心、倾斜特性, 需用两个视场参量来描述——关联视场和瞬时视场。随着关联视场的变化, 系统的球差与各类轴外像差呈现出动态变化特性。共形光学系统中, 像散和彗差是最重要的两种像差, 强烈地影响系统成像质量。与一般的光学系统相比, 共形光学系统光学设计难度进一步提高。已发表的有关共形光学系统设计的文章都基于泽尼克多项式像差理论, 限制了系统像差的进一步详细分析。为此, 通过建立实际光线追迹像差模型有效克服了上述难点。实例结果表明, 该方法能有效指导共形光学系统设计。最后在整个关联视场内得到较好的成像质量。

**关键词:**共形光学; 光线追迹; 关联视场; 瞬时视场; 像差

中图分类号: O435 文献标识码: A 文章编号: 1007-2276(2008)05-0834-05

## Design of conformal optical system based on real ray tracing

LI Dong-xi<sup>1,2</sup>, LU Zhen-wu<sup>1</sup>, SUN Qiang<sup>1</sup>, LU Zi-feng<sup>3</sup>

(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 Science, Beijing 100039, China;

3. Center for Advanced Optoelectronic Functional Material Research, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

**Abstract:** The design method of conformal optical system based on real ray tracing was presented, designed result was satisfactory. Conformal optical system had decenter and tilt characteristic and needs two parameters, i.e. the field of regard (FOR) and field of view (FOV). Its spherical and all off-axis aberrations changed with its field of regard. In conformal optical system, astigmatism and coma were two kinds of most important aberrations and had intensive influence on image quality. Compared with traditional optical systems, its optical design was more difficult. The previously reported design methods for conformal systems were all based on Zernike polynomial aberration theory, and further detail analysis of their aberration was limited. So, a real ray tracing aberration model was established to overcome above mentioned difficulty. The example results demonstrate that the method is effective for design of conformal optical system. And a good image quality can be acquired over its whole field of regard.

**Key words:** Conformal optics; Ray tracing; Field of regard; Field of view; Aberration

收稿日期: 2007-12-03; 修订日期: 2008-01-30

作者简介: 李东熙 (1979-), 男, 吉林辉南人, 博士, 研究方向为共形光学、二元光学、照明和光学设计。Email: lidx1979@126.com

导师简介: 卢振武 (1955-), 男, 吉林大安人, 研究员, 博士生导师, 主要从事衍射光学元件制造及其应用、光学检测和光学系统设计。

Email: luzw@ciomp.ac.cn

## 0 引言

传统的整流罩一般采用球面或平面结构,相应的光学系统设计较为简单。近年来为了进一步提高导弹的飞行性能,提出了利用流线型表面取代球面或平面结构的整流罩外表面,以减小空气阻力。由此产生的新型导引头光学系统被称为共形光学系统<sup>[1]</sup>。因共形光学系统不具有点对称特性,故须用两个视场参量来描述:(1)用于描述万向节搜索区域变化的关联视场;(2)用于描述导引头光学系统本身成像范围的瞬时视场。

为推动共形光学在多种军事领域的应用与发展,1998年美国成立了精密共形光学技术协会(PCOT),涵盖了从光学设计、检测到制造的各个环节,攻克一系列相关难题<sup>[2]</sup>。其中,亚利桑那大学和美国光学协会共同负责发展专门针对共形光学系统设计、分析和测试软件的开发,取得了一些成果。

因使用 Zernike 多项式系数评价光学系统像差特性的方法不受光学系统倾斜和偏心影响,且分析方便,所以到目前为止有关共形光学系统设计方面的文献都以该方法为理论基础<sup>[3-9]</sup>,但是这种方法自身具有固有的缺陷。Zernike 多项式方法是基于出瞳处波前的 Zernike 多项式拟合,仅与出瞳面的矢径、方位角有关,故用该方法评价光学系统时无法洞察像差特性的细节问题,无法有效指导光学系统设计。为此,提出了基于实际光线追迹的共形光学系统设计方法。在整个关联视场内得到较好的成像质量。

## 1 共形光学系统

当共形光学元件取代球形整流罩时,将会对导引头光学系统造成两方面影响。(1)使系统丧失点对称特性;(2)引入两个视场,关联视场和瞬时视场。前者导致共形光学系统倾斜、偏心;后者导致像差随关联视场呈现动态变化特性。图1为共形光学系统示意图。

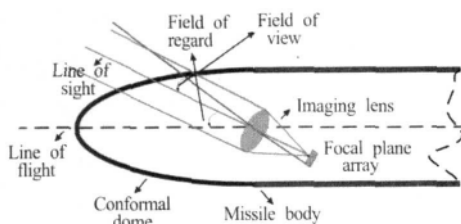


图1 共形光学系统导引头示意图

Fig.1 Schematic diagram of conformal optical system

## 2 实际光线追迹方法

### 2.1 Zernike 多项式方法缺点

在单位圆域内,Zernike 多项式展开式各项互相正交。光学系统波前的 Zernike 多项式表达式为<sup>[10]</sup>:

$$\phi(\rho, \theta) = \sum_{n,m} \alpha_n^m R_n^m(\rho) \cos m\theta \quad (1)$$

定义域为连续的单位圆,其中  $0 \leq \rho \leq 1, 0 \leq \theta \leq 2\pi$ 。

Zernike 多项式  $R_n^m(\rho)$  数学表达式为:

$$R_n^m(\rho) = \frac{1}{\left[\frac{n-m}{2}\right]! \rho^m} \left[ \frac{d}{d(\rho^2)} \right]^{\frac{n-m}{2}} \left[ (\rho^2)^{\frac{n+m}{2}} (\rho^2 - 1)^{\frac{n-m}{2}} \right] \quad (2)$$

式中: $m, n$  为整数, $n-m$  为偶数且  $\geq 0$ 。由亚利桑那大学发展的条纹 Zernike 多项式展开式中 Z5 和 Z6、Z7 和 Z8、Z9 分别对应初级像散、彗差和球差。从上述公式可以看出,像差仅由出瞳处  $\rho, \theta$  两个参量表示,限制了对像差更为详细的分析。

### 2.2 实际光线追迹方法

#### 2.2.1 实际光线追迹像差模型

共形光学系统的倾斜、偏心特性直接导致其像质评价方法的困难。如使用 Seida 像差系数或 Tompson<sup>[11]</sup> 矢量形式的波像差理论都不能正确分析、评价该系统。共轴光学系统 5 种初级像差系数的表达式为<sup>[12]</sup>:

$$\begin{cases} S_1 = l u i (i - i') (i' - u) \\ S = l u i_z (i - i') (i' - u) = S_1 i_z / i \\ S = l u i_z^2 (i - i') (i' - u) 1/i = S_1 i_z / i = S_1 \left( \frac{i_z}{i} \right)^2 \\ S = J^2 \frac{n' - n}{n' n r} \\ S = (S + S') \left( \frac{i_z}{i} \right) \end{cases} \quad (3)$$

应用上述公式的前提是:(1)薄透镜共轴光学系统;(2)傍轴空间。共形光学系统不满足其中任一条件,且具有两个视场参量。系统设计时要同时考虑到各类像差随这两个视场的变化情况,而它们之间又存在着复杂的、隐性的非线性依赖关系,不能像一般光学系统那样简单地以某一像差系数来描述。当关联视场  $\theta$ 、瞬时视场  $\varphi$  作为自变量时,从各类像差定义出发做光线追迹,按下面的函数关系式

$$\begin{cases} SA_1 = SA_1(\theta, \varphi) \\ CA = CA(\theta, \varphi) \\ AA = AA(\theta, \varphi) \\ FCA = FCA(\theta, \varphi) \end{cases} \quad (4)$$

可以得到各类像差对这两个视场的依赖关系。式中： $SA$  为球差； $CA$  为彗差； $AA$  为像散； $FCA$  为场曲。可以根据光线追迹结果直观地表示它们之间的响应关系曲线。利用数值拟合，可以进一步对这种冗长的数据列表提取出表达式系数，供分析像差系数或优化评价函数时使用。

2.2.2 曲线拟合与曲线积分优化方法

通常情况下，光学系统设计都是利用像差系数，如公式(3)所示。这是因为本质上这些像差系数代表相应的像差曲线(傍轴空间内)，优化像差系数就是对相应的像差曲线进行优化。按照这一思想，利用最小二乘法对所绘制的曲线进行多项式拟合，从中提取各阶次系数，用此系数来表征该曲线。拟合系数直接用于分析和优化光学系统。

在系统初始设计阶段，拟合精度比较高，用此拟合系数来表示系统像差特性能得到较好的效果，但是设计越往后拟合精度越差，以至于拟合精度超出误差允许范围。这与系统校正初级像差后残留的高级像差有关。为此，进一步提出了曲线积分优化方法。即利用曲线所围成的面积表示像差大小，以积分值正负号代表像差正负，据此将积分值引入到评价函数中，并在优化过程中优化该参数。设某一像差在关联视场  $\theta$  时数值为  $f(\theta)$ ，则对应的积分评价函数为：

$$M=\sum_{i=1}^n \Delta_i \times f(i \times \Delta_i)$$
 (5)

式中： $i$  为采样点序列； $\Delta_i$  为采样点间距。因系统优化的动态特性，并不需要严格的计算精度。优化时应注意积分值可正可负，评价函数为零时并不意味着像差值为零，并且积分值与积分曲线最大值无关。

2.2.3 共形光学系统总体设计

综合上述设计方法和思想，发展了基于实际光线追迹的共形光学系统设计包，如图 2 所示。

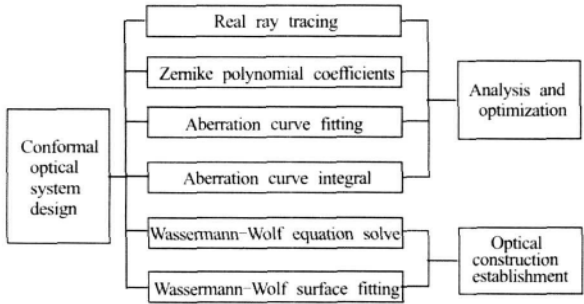


图 2 共形光学系统总体设计  
Fig.2 Whole design of conformal optical system

3 设计实例

针对共形光学系统像差随目标视场动态变化的特性，提出了几种设计方法，其中包括位相板的反向旋转法、横向移动法、径向移动法；一对母线互相垂直的柱透镜移动法；固定方式的弧形校正方法等。位相板法和柱透镜法须动态地移动光学元件；弧形校正方法水平视场受限。考虑到非球面的加工、装调等实际工艺，采用固定方式校正方法设计共形光学系统。固定式补偿用的透镜表面一般采用球面或非球面，不使用弧形等特殊表面类型。共形光学系统参数如表 1 所示，光学系统示意图如图 3 所示。

表 1 共形光学系统主要参数

Tab.1 Typical parameters of conformal system

Parameters	Value or type
Outer surface of dome	Ellipsoidal surface
Material of dome	ZnS
Thickness of dome	5 mm (equal thickness)
Fineness ratio	1.0
Diameter of dome	160 mm
Operating wavelength	3~5 $\mu\text{m}$
FOV	$\pm 1^\circ$
FOR	$\pm 30^\circ$
Aperture	30 mm
$F/\#$ in image space	1.4
Detector	Uncooled

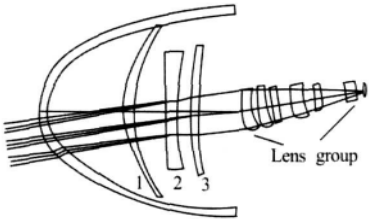


图 3 共形光学系统示意图

Fig.3 Layout of conformal optical system

图中第 1、2、3 块透镜与整流罩一起固定；后面的透镜组为成像系统，随万向节一起旋转并对各关联视场成像。设计系统时需注意以下问题：

(1) 共形整流罩本身为二次非球面。所以 3 块固定透镜表面尽量避免选用高次非球面，不会使加工、装调难度进一步增大。文中第二个透镜前后表面为高次非球面，其余各表面为球面或二次曲面。

(2) 为校正大关联视场色差，应合理选择透镜材料。系统采用了一个二元衍射面，位于透镜组第一个透镜的前表面，与孔径光阑重合。其目的首先是不引入场曲和畸变；其次该折射面的光焦度较小，引入的

像散很小;先校正色差,有利于随后的单色像差校正。

(3) 不论成像系统随万向节旋转到哪一关联视场,入射到成像系统的光束几乎通过各透镜中心部分。这意味着成像系统轴外像差校正能力有限。所以固定式透镜部分应充分校正各类轴外像差,留少量剩余像差供成像系统最后阶段补偿时使用。

(4) 共形光学系统属离轴、动态的光学成像系统,整个系统结构应尽量简单,便于安装、控制。

(5) 系统瞬时视场比较小,在设计过程中只考虑  $0^\circ$  瞬时视场,即公式(4)中  $\varphi=0$ 。

根据系统参数,通过共形光学系统设计包可以得到适当的初始结构<sup>[13-16]</sup>。优化阶段可采用前述的像差曲线拟合和像差曲线积分方法,并配合 Zernike 多项式方法一起使用。前者可提供分析所需的细节内容,后者可提供宏观的像差特性,两者互相补充。当像差曲线拟合时,因整流罩为旋转对称表面,关联视场正负对称,拟合形式采用偶次多项式,即:

$$\text{Aberration}=A_1\theta^2+A_2\theta^4+A_3\theta^6+\cdots+A_n\theta^{2n} \quad (6)$$

式中:  $A_1\cdots A_n$  为系数;  $\theta$  为关联视场。取设计、优化系统时的中间过程,以彗差为例,最高拟合阶次为 4,拟合系数与拟合精度如表 2 所示。表中,9、10、11 依次表示为关联视场  $24^\circ$ 、 $27^\circ$ 、 $30^\circ$ ,其他关联视场省略;cc2、cc4 分别表示多项式 2 次项系数和 4 次项系数;0.90、0.95、1.00 表示归一化入瞳半径,计算单位为微米。

表 2 彗差拟合系数与拟合误差

Tab.2 Polynomial fitting coefficients and error for coma in tangential plane

Configuration	Entrance pupil (normalized)	Coma / $\mu\text{m}$	cc2	cc4	Error
9	.....	.....	79.194 2	-32.402 9	.....
	0.90	43.667 6			0.779 8
	0.95	45.090 3			-0.009 9
	1.00	45.299 4			1.491 9
10	.....	.....	85.920 7	-13.313 6	.....
	0.90	61.291 6			-0.430 9
	0.95	66.729 4			-0.030 0
	1.00	71.805 7			0.801 4
11	.....	.....	125.734 1	-12.650 5	.....
	0.90	94.133 0			-0.588 4
	0.95	103.22 0			-0.049 7
	1.00	111.999 1			1.084 5

从表中可以看出,关联视场越大,彗差抛物线特性越明显。说明彗差在低关联视场和高关联视场呈现出对低阶次和高阶次系数不同变化特性,从另一方面为设计系统提供了更为详细的分析依据。同理其他如球差、像散等像差对各关联视场做类似详细分析。

通过上述对系统像差的细致分析与反复优化,最终得到了较好的成像质量。图 4 为以像面为参考点,按照球差定义,经实际光线追迹后做出的子午轴向球差曲线图,3 条曲线分别代表 3、4、5  $\mu\text{m}$  波长。纵坐标表示归一化入瞳半径,横坐标表示轴向球差,单位为微米。图(a)、(b)、(c)分别为  $0^\circ$ 、 $9^\circ$ 、 $27^\circ$  关联视场。从图中可以明显地看出,球差和轴向色差已得到充分校正。图 5 为 Zernike 多项式系数随关联视场变化曲线(对主光线 4  $\mu\text{m}$  波长)。对比图 4 可以看出,球差、彗差、像散均得到较好的校正。图 6 为调制传递函数曲线,(a)~(c)分别为  $0^\circ$ 、 $9^\circ$ 、 $27^\circ$  的关联视场,可以得到结论,系统在整个关联视场范围内成像质量良好,达到设计预期值。

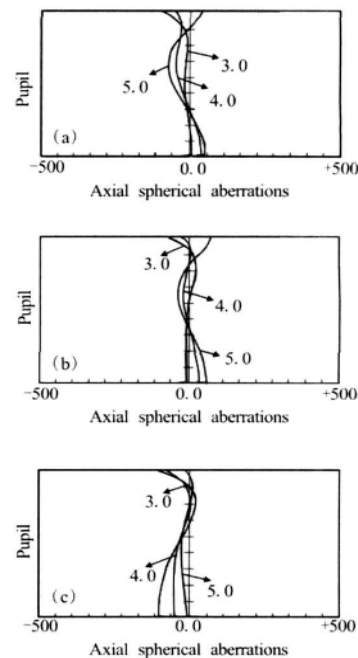


图 4 子午球差、轴向色差分布图

Fig.4 Curves of spherical and axial chromatic aberrations in tangential plane

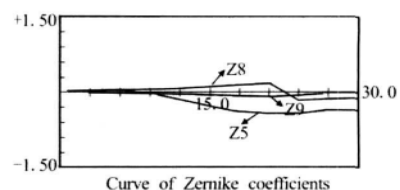


图 5 Zernike 多项式系数 Z5、Z8、Z9 随关联视场变化曲线  
Fig.5 Curves of Zernike coefficients Z5、Z8、Z9 with FOR



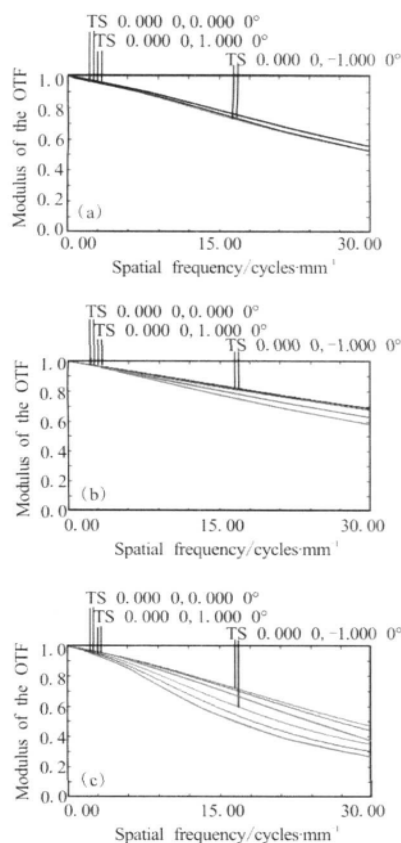


图 6 调制传递函数曲线

Fig.6 MTF curves at FOR

## 4 结 论

共形光学系统是大偏心、大倾斜系统,与一般光学系统显著不同,致使分析、设计、评价方法遇到较大困难。虽然 Zernike 多项式系数方法简单、方便,但是其本身的缺点是难以克服的。相反,实际光线追迹方法虽然追迹数据量多、表现形式繁琐,但是却可以从中获取更多有关光学系统信息,为分析、设计、优化光学系统提供有效的理论依据。两种方法各有优点、缺点,互为补充,在设计过程中应当有机结合。设计实例表明,实际光线追迹方法能够有效指导共形光学系统设计,最终成像质量达到设计预期值。

## 参考文献:

- [1] MILLS J P. Conformal optics: theory and practice [C]// *Proceedings of SPIE, Novel Optical Systems Design and Optimization IV*, 2001, **4442**:101-107.
- [2] TROTTA P A. Precision conformal optics technology program [C]// *Proceedings of SPIE, Window and Dome Technologies and Materials VII*, 2001, **4375**:96-107.
- [3] CROUTHER B G, MCKENNEY D B, MILLS J P. Aberrations of optical domes [C]// *Proceedings of SPIE, International Optical Design Conference*, 1998, **3482**:48-61.
- [4] MILLS J P, SPARROLD S W, MITCHELL T A I, et al. Conformal dome aberration correction with counter-rotating phase plates [C]// *Proceedings of SPIE, Window and Dome Technologies and Materials VI*, 1999, **3705**:201-208.
- [5] PALUSINSKI I A, SASIAN J M. Lateral shift variable aberration generators [C]// *Proceedings of SPIE, International Optical Design Conference*, 1998, **3482**:90-96.
- [6] MITCHELL T A, SASIAN J M. Variable aberration correction using axially translating phase plates [C]// *Proceedings of SPIE, Window and Dome Technologies and Materials VI*, 1999, **3705**:209-220.
- [7] WHALE M R. Correcting variable third order astigmatism introduced by conformal aspheric surfaces [C]// *Proceedings of SPIE, International Optical Design Conference*, 1998, **3482**:62-73.
- [8] SPARROLD S W. Arch corrector for conformal optical systems [C]// *Proceedings of SPIE, Window and Dome Technologies and Materials VI*, 1999, **3705**:189-200.
- [9] KNAPP D J, MILLS J P, HEGG R G, et al. Conformal optics risk reduction demonstration [C]// *Proceedings of SPIE, Window and Dome Technologies and Materials VII*, 2001, **4375**:146-153.
- [10] BORN M, WOLF E. *Principle of Optics* [M]. 7th ed. UK: Cambridge University Press (马科斯·波恩, 埃米尔·沃耳夫. 光学原理. 7 版. 英国: 剑桥大学出版社), 1999.
- [11] TOMPSON K P. Aberration fields in tilted and decentered optical system [D]. Arizona: University of Arizona, 1980.
- [12] ZHANG Yi-mo. *Applied Optics* [M]. Beijing: China Machine Press (张以谟. 应用光学. 北京: 机械出版社), 1982: 275-302.
- [13] LI Dong-xi, LU Zhen-wu, SUN Qiang, et al. A research of conformal optical system based on Wassermann-Wolf equations [J]. *Acta Physica Sinica* (李东熙, 卢振武, 孙强, 等. 基于 Wassermann-Wolf 方程的共形光学系统设计. 物理学报), 2007, **56**(10):5766-5771.
- [14] ZHANG Liang, AN Yuan, JIN Guang. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view and long focal length [J]. *Infrared and Laser Engineering* (张亮, 安源, 金光. 大视场、长焦距离轴三反射镜光学系统的设计. 红外与激光工程), 2007, **36** (2): 278-280.
- [15] CHENG De-wen, WANG Yong-tian, CHANG Jun, et al. Design of a lightweight and wide field-of-view HMD system with free-form-surface prism [J]. *Infrared and Laser Engineering* (程德文, 王涌天, 常军, 等. 轻型大视场自由曲面棱镜镜头盔显示器的设计. 红外与激光工程), 2007, **36** (3): 309-311.
- [16] SUN Qiang, TANG Tong-bin, DONG Guo-cai, et al. Design of the diffractive /refractive optical system in optical collimator of infrared scene generator [J]. *Infrared and Laser Engineering* (孙强, 唐同斌, 董国才, 等. 红外场景产生器折射/衍射准直光学系统设计. 红外与激光工程), 2007, **36** (6): 881-883.
- [17] Focus Software Incorporated. ZEMAX Optica Design Program User Guide, Version 10.0 [Z]. Tucson, Az: Focus Software Incorporated, 2003.