

共形光学系统设计研究

李东熙^{1,2}, 卢振武¹, 陆子凤³, 孙 强¹

(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, 长春 吉林 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子功能材料研究中心, 吉林 长春 130024)

摘要: 设计了一个红外波段共形光学系统, 并提出了整体解决方案。共形光学系统具有大偏心、大倾斜光学特性, 因其特殊的光学结构须用瞬间视场和目标视场两个视场参量来描述, 像差同时随两视场的变化而变化, 使系统设计难度大幅增加。通过建立扩展形式的 Wassermann-Wolf 曲面结构、建立实际光线追迹模型与 Zernike 多项式模型相辅相成的像差评价体系, 提出了共形光学系统整体设计方案, 并给出了设计实例。实例结果表明, 系统在整个目标视场范围内均得到较好成像质量。

关键词: 共形光学; 光线追迹; 泽尼克多项式; 目标视场; 瞬间视场; 像差

中图分类号: 0435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2008)03-0128-05

The Research of Conformal Optical System Design

LI Dong-xi^{1,2}, LU Zhen-wu¹, LU Zi-feng³, SUN Qiang¹

(1.State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun Jilin 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 Jilin 130024, China)

Abstract: A conformal optical system operating at infrared wavelength is designed and whole design solution is presented. The conformal optical system which is discentered and tilted needs two parameters to describe itself through field of regard (FOR) and field of view (FOV). With variation of both fields, the system has dynamically varied characteristics in content of aberrations and the system's design becomes more difficult. Finally a whole design solution is presented in which an optical structure is based on extended Wassermann-Wolf surfaces, and estimating model of aberrations is also constructed by real raytracing and Zernike polynomials. An demonstrated example is illustrated and a fine image quality is obtained over full FOV.

Key words: conformal optics; raytracing; Zernike polynomials; field of Regard; field of View; aberration

引言

球形整流罩具有点对称结构, 采用这一结构的导引头光学系统设计已非常成熟, 而基于共形元件的光学系统设计还处于初步发展阶段, 遭遇到了一些困难与挑战。其主要原因在于整流罩外表面采用流线型结构代替传统的球形或平板结构, 从而减小飞行阻力, 提高飞行器性能。这种光学系统被定义为共形光学系统^[1,2]。共形光学系统的非点对称特性, 导致系统随导引头搜索区域的变化引入动态变化的像差。为了完整地描述共形光学系统, 须引入两个视场参量——目标

视场(Field of Regard, FOR)和瞬间视场(Field of View, FOV)。其中目标视场本身又包含相应的瞬间视场, 所以像差同时随两视场的变化而变化, 故系统设计难度大幅增加。图1为共形光学系统示意图。

针对这些像差变化特点, 已有多篇文献提出尝试性的解决方法。上述方案中, 第一种方法是利用具有 Zernike 表面形式的两个位相板^[3-6]的旋转或相对平移运动, 补偿共形整流罩随目标视场变化引入的动态像差。但是这一方法只能校正与位相板 Zernike 表面类型相对应的单一的特定像差。柱透镜校正像散^[7]的方法同样存在上述缺点。第二种方法是非对称形式的弧

收稿日期: 2007-12-26

作者简介: 李东熙(1979—), 男, 吉林辉南人, 博士研究生, 研究领域包括共形光学、二元光学和光学设计。

形校正方法^[8]。非对称形式的弧形校正板受自身非轴旋转对称形状的限制,目标视场在水平方向受到很大的限制。并且上述方案设计都是以 Zernike 多项式理论为基础。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。所以该方法从理论模型上就受限于上述两个参量的描述形式。

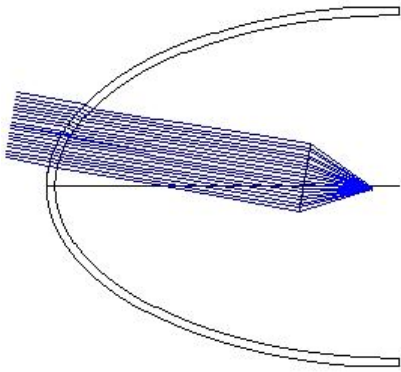


图1 共形光学系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of conformal optical system

为克服上述困难,本文提出了通过建立扩展形式的 Wassermann-Wolf 曲面结构、建立实际光线追迹模型与 Zernike 多项式模型相辅相成的像差评价体系,提出了共形光学系统整体设计方案,并给出了设计实例。最后设计实例表明,系统在整个目标视场范围内均得到较好成像质量。

1 共形光学系统像差模型的建立

1.1 Zernike 多项式像差模型

因 Zernike 多项式方法是基于出瞳处波前的 Zernike 多项式拟合,不受光学系统倾斜、偏心等影响。所以到目前为止,已报道的有关共形光学系统像差分析都采用了 Zernike 多项式像差模型。Zernike 多项式 $R_n^m(\rho)$ 数学表达式为^[9]:

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

式中: m, n 为整数, $n-m$ 为偶数且 ≥ 0 , ρ 为出瞳处归一化半径。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、初级彗差和初级球差项。从上述公式中可以看出,像差仅由出瞳处 ρ, θ 两个参量表示,所以该方法从理论模型上就受限于上述两个参量的描述形式。

1.2 实际光线追迹模型

为克服这一缺点,本文进一步建立了基于实际光线追迹的像差模型。共形光学系统具有两个视场参量,一是目标视场,二是瞬间视场。在设计与优化共形光学系统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,无法获得明确的解析关系。当目标视场 θ 、瞬间视场 φ 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:

$$\begin{cases} SA_I = SA_I(\theta, \varphi) \\ CA_{II} = CA_{II}(\theta, \varphi) \\ AA_{III} = AA_{III}(\theta, \varphi) \\ FCA_{IV} = FCA_{IV}(\theta, \varphi) \end{cases} \quad (2)$$

可以得到各类像差对两个视场的依赖关系。上式中 SA 为球差、CA 为彗差、AA 为像散和 FCA 为场曲。通过追迹一系列实际光线做出数据列表,建立它们之间的响应关系。利用数值拟合,从这种冗长的数据列表可以进一步提取出像差系数,供分析或优化系统之用。因整流罩为旋转对称表面,目标视场正负对称,拟合形式采用偶次多项式,即:

$$\text{Aberration} = A_1 \theta^2 + A_2 \theta^4 + A_3 \theta^6 + \dots + A_n \theta^{2n} \quad (3)$$

式中: A_1, \dots, A_n 为系数, θ 为目标视场。

随着系统优化程度的不断提升,系统残留像差以高级像差为主,拟合精度越来越差。为此,进一步提出曲线积分优化方法。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。设某一像差在目标视场 θ 时数值为 $f(\theta)$, 则对应积分评价函数为:

$$M = \sum_{i=1}^n \Delta_i \times f(i \times \Delta_i) \quad (4)$$

式中: i 为采样点序列, Δ_i 为采样点间距。

2 扩展形式的 Wassermann-Wolf 曲面

Born^[9]提出利用满足正弦条件的两个相邻的非球面设计消像散方法,即 Wassermann-Wolf 曲面方法。

Wassermann-Wolf 微分方程组表达式如下:

$$\frac{dZ}{dt} = \left(\frac{nD \cos U - n''D_z}{nD \sin U - n''D_y} + \tan U \right)^{-1} \left(\frac{dH}{dt} - Z' \frac{d}{dt}(\tan U) \right) \quad (5)$$

$$\frac{dZ'}{dt'} = \left(\frac{n'D \cos U' - n''D_z}{n'D \sin U' - n''D_y} + \tan U' \right)^{-1} \left(\frac{dH'}{dt'} - Z' \frac{d}{dt'}(\tan U') \right) \quad (6)$$

式中: $D_y = Y - Y'$, $D_z = d + Z' - Z$, $D = \sqrt{D_y^2 + D_z^2}$

$$Y = H - Z \tan U, \quad Y' = H' - Z' \tan U'$$

边界条件: $Z = Z' = 0$, $t = t' = 0$ 时:

正弦条件: $\sin U' / \sin U = C$

(7)

或是: $H'/H=C$ (C 为常数)

(8)

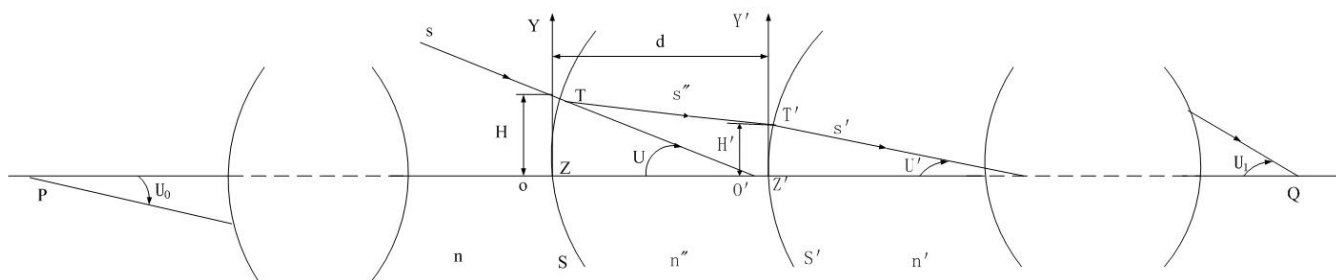


图 2 Wassermann-Wolf 曲面光学系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of optical system for Wassermann-Wolf surfaces

图 2 中, 从物点 p 发出的光线经前方光学系统、曲面 S 、 S' 和后方光学系统会聚于像点 Q 。光轴沿 Z 轴正方向, n 、 n'' 、 n' 分别为 Wassermann-Wolf 曲面前方、中间、后方的介质折射率, H 、 H' 和 U 、 U' 分别为 Wassermann-Wolf 前表面、后表面坐标系下的入射高度和入射角, Z 、 Z' 为曲面矢高, Y 、 Y' 为对应纵坐标。

共形光学系统在整个目标视场范围内像差变化很大, 因此仅利用一对 Wassermann-Wolf 曲面补偿像差存在困难。Vaskas^[10]曾提出过扩展形式的 Wassermann-Wolf 曲面方法, 但是该方法存在数值求解困难。为此, 本文提出 Wassermann-Wolf 曲面独立连续扩展形式, 即在每一对 Wassermann-Wolf 曲面之后再扩展一对 Wassermann-Wolf 曲面。通过上述扩展方法可得到任意对扩展形式的 Wassermann-Wolf 曲面, 通过对参数的适当选择, 建立合适的共形光学系统结构。最后, 利用最小二乘法进一步对每一 Wassermann-Wolf 曲面进行二次曲面拟合, 提取出相应的顶点曲率半径 r_0 和二次系数 k , 转化为标准的非球面形式。图 3 为二次曲线拟合两个连续的 Wassermann-Wolf 曲面对时的光路示意图。图 4 为对其中一表面曲线拟合时的精度与相应误差曲线图, 其中左图为拟合曲线, 右图为对应的拟合误差。因系统的轴旋转对称性, 图中只给出了子午面内上半部分曲线。

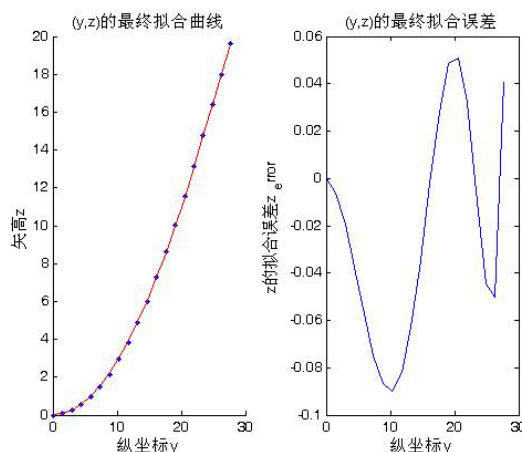


图 4 Wassermann-Wolf 曲面拟合误差图

Fig.4 Plot of Wassermann-Wolf surface fitting error

3 设计实例

本文采用固定校正方式设计共形光学系统,其优点为:1)避免位相板、柱透镜方法中的光学元件的旋转、移动,保证光学系统结构稳定;2)避免采用弧形校正板等特殊表面,有利于加工、检测。光学系统参数由表1列出,系统结构图由图5表示。

表 1 共形光学系统主要参数

Table 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
Spectral range	3~5 μm
FOV	$\pm 1^\circ$
FOR	$\pm 27^\circ$
Aperture	30 mm
F/# in image space	1.5

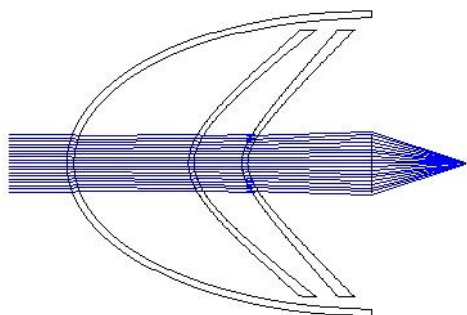


图3 连续的两对 Wassermann-Wolf 曲面二次曲线拟合时的光路示意图

Fig.3 Layout of optical system for continued two Wassermann-Wolf surfaces

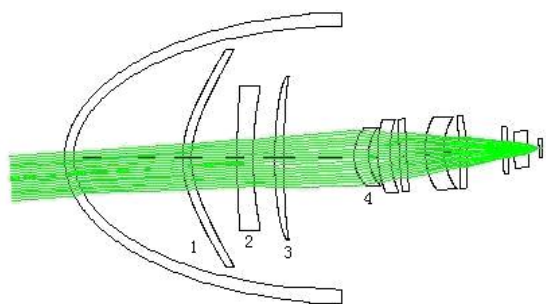


图5 共形光学系统结构图

Fig.5 Layout of conformal optical system structure

固定校正透镜组由第 1、2、3 片共 3 片组成，其中第 1、2 片透镜由扩展形式的 Wassermann-Wolf 曲面生成。第 4 片透镜前表面为二元衍射面，供校正色差之用。

系统初步设计阶段，为分析各类像差在不同目标视场随入瞳的详细分布，选择实际像差模型更为有利。取设计、优化中间过程，当对球差曲线进行二次拟合时，其拟合系数与拟合精度由表 2 列出^[11]。

表2 子午面内球差拟合系数与拟合误差

Table 2 Polynomial fitting coefficients and error for aberration in tangential plane

Configuration	Entrance pupil(normalized)	SA/ μm	sc2	sc4	Error
7	.....	.....	127.8879	-143.2124	.....
	0.8	22.7421			0.4464
	0.9	8.2841			1.3435
	1.0	-14.4779			-0.8466
8	.....	.....	145.9675	-103.4052	.....
	0.8		52.5673		-1.5029
	0.9		51.5268		-1.1373
	1.0		41.2439		1.3184
9	.....	.....	181.5263	-95.5996	.....
	0.8		79.1958		-2.1766
	0.9		86.3032		-1.9898
	1.0		83.8590		2.0676
10	.....	.....	176.5213	-50.6578	.....
	0.8		93.6241		-1.3999
	0.9		111.1552		-1.4096
	1.0		124.4720		1.3916

表中，7、8、9、10 分别代表目标视场 18°、21°、24°、27°；0.8、0.9、1.0 分别代表归一化入瞳半径；SA 代表球差，单位为 μm ；sc2、sc4 分别代表 2 次、4 次拟合系数；Error 为拟合误差。从表中不仅可以看到各目标视场球差随入瞳半径的分布情况，还可以看出二次拟合系数 sc2 从 128 增加到 177，相反 sc4 从 -143 下降至 -51。这说明大目标视场系统像差以初级像差为主，低目标视场初级与高级像差正趋向于平衡。把上述拟合系数作为优化函数引入到评价函数中，分别对各目标视场进一步优化。其间通过像差曲线积分方法，在整个目标视场范围内平衡像差。对其他像差也进行类似分析。

Zernike 多项式模型和实际光线追迹模型各有优缺点，在设计、优化过程中，应相互结合使用。通过精心、反复优化之后，系统在整个目标视场内获得了较好的成像质量。图 6 为 Zernike 系数 Z5、Z8、Z9

随目标视场变化曲线，纵坐标为 Zernike 多项式系数数值，横坐标为目标视场。从图中可以看出，球差、彗差及像散均小于 0.5，说明已得到充分校正。最后从图 7 中可以得出结论，系统成像质量在整个目标视场范围达到设计预期值。

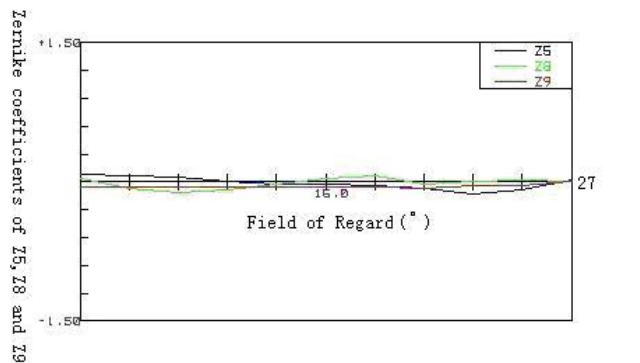
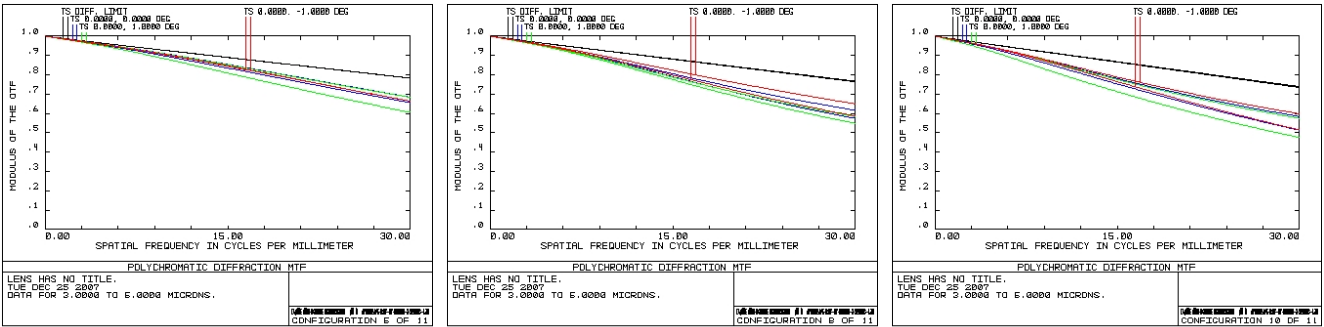


图6 Zernike 系数 Z5、Z8、Z9 随目标视场变化曲线

Fig.6 Plot of Zernike coefficients Z5、Z8、Z9 with FOR



(a) 12°目标视场调制传递函数曲线 (b) 21°目标视场调制传递函数曲线 (c) 27°目标视场调制传递函数曲线

图7 调制传递函数曲线 Fig.7 MTF plots at FOR of 12°、21°、27°respectively

4 结论

共形光学系统的大偏心、大倾斜特性使传统的Seidal系数或波像差理论无法运用于该系统,致使像差分析、评价遇到较大困难。实际光线追迹像差模型与Zernike多项式像差模型都各有其优点和缺点。本文通过建立两者相辅相成的评价体系很好地实现了对共形光学系统的像差分析与优化。并且通过建立扩展形式的Wassermann-Wolf曲面方法,获得了适当的光学系统结构。最后设计结果表明,通过上述总体设计方案,系统在整个目标视场均得到了较好的成像质量。

参考文献:

[1] James P. Mills. Conformal optics: theory and practice[A]. *SPIE[C]*, 2001, **4442**: 101~107.
[2] Patrick A. Trotta. Precision conformal optics technology program[A]. *SPIE[C]*, 2001, **437**: 96~107.

[3] Blake G. Crouther, Dean B. Mckenney, James P. Mills. Aberrations of optical domes[A]. *SPIE[C]*, 1998, **382**: 48~61
[4] James P. Mills, Scott W. Sparrold, Thomas A. Mitchell, et al. Conformal dome aberration correction with counter-rotating phase plates[A]. *SPIE[C]*, 1999, **3705**: 201~208.
[5] Iwona A. Palusinski, Jose M. Sasian. Lateral shift variable aberration generators[A]. *SPIE[C]*, 1998, **3482**: 90~96.
[6] Thomas A. Mitchell, Jose M. Sasian. Variable aberration correction using axially translating phase plates[A]. *SPIE[C]*, 1999, **3705**: 209~220.
[7] Michael R. Whale. Correcting variable third order astigmatism introduced by conformal aspheric surfaces[A]. *SPIE[C]*, 1998, **3482**: 62~73.
[8] Scott W. Sparrold. Arch corrector for conformal optical systems[A]. *SPIE[C]*, 1999, **3705**: 189~200.
[9] Born M and Wolf E. *Principle of Optics*[M], Cambridge: Cambridge University Press, seventhed, 1999.
[10] Evelyn M. Vaskas, Not on the Wassermann-Wolf method for designing aspheric surfaces[J]. *J. Opt. Soc. Am*, 1957, **47**: 669~670.
[11] *ZEMAX user guide*[M], March 4, 2003.