

文章编号:1004-4213(2010)02-0223-4

消像差条件在共形光学系统中的应用*

孙金霞^{1,2}, 刘建卓^{1,2}, 孙强¹, 方伟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)

摘 要:根据轴对称光学系统中的消像散条件探讨了共形整流罩结构中消像散万向节点位置的存在性. 在此基础上, 对共形光学系统中消像差万向节点位置进行了理论推导. 软件分析结果表明, 轴对称光学系统消像差条件对于共形光学系统的设计仍有良好的指导意义, 由此得到的“消像差”共形光学系统的残余像差已处于实际成像系统的像差校正能力范围之内.

关键词:共形光学; 整流罩; 消像差; 光学设计

中图分类号: V249.32

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103902.0223

0 引言

导引头整流罩的空气动力学性能和罩结构的总长度同底部口径大小之比即径长比有关, 除此之外罩外表面的具体面型对其也有一定的影响^[1]. 通常非球形整流罩的径长比越大, 导引头所引入的空气阻力越小. 我们把这种突破传统球面面型选择而根据空气动力学性能的要求来确定面型的光学系统称为共形光学系统^[2]. 虽然径长比大于 0.5 的非球形整流罩的空气阻力小, 但其设计、加工和检测要远远复杂于球形结构. 在利用万向支架扩大观察视场的导引头结构中, 每个子观察视场中用于实际成像的整流罩结构都不相同, 因而共形光学系统的设计、加工和检测都存在着许多困难.

万向支架式共形导引头整流罩结构外形虽然具有旋转对称性, 但其设计已经超出了旋转轴对称光学系统的设计范围. 与捷联导引头结构相比, 采用万向支架结构能够在扩大系统搜索范围的同时降低轴外像差对成像质量的影响, 从而提高系统的搜索跟踪精度. 然而万向支架式共形整流罩光学系统在非零观察视场中的成像质量却不尽如人意, 系统中除初级球差外的所有低阶像差都存在着明显的波动性, 其中像散曲线的变化尤为恶劣. 在较小的观察视场中, 整流罩引入了线性增加的系统像散; 在大观察视场中, 系统像散随整流罩结构的不对称性而平方

增加, 其动态范围已远远超出了实际成像系统的像差校正能力^[3]. 所以共形光学系统在设计过程中主要有两个设计重点: 一是降低系统中存在的大像差; 二是校正系统中残留的动态像差.

在利用理想透镜代替整流罩后实际成像光学系统的共形结构中, 由于理想透镜在轴上和轴外视场中均不产生任何像差, 所以该系统的非零观察视场与捷联共形整流罩结构的轴外视场除后者存在渐晕效应外仍存在些许相似性. 本文将根据轴对称非球面光学系统中消像差条件探讨万向支架式共形整流罩中的消像差方法.

1 消像散条件

在轴对称光学系统中彗差、像散、畸变均与光阑位置有关. 由于万向支架式共形整流罩中像散是影响成像质量的首要因素, 所以首先探讨在该结构中消像散的万向节点位置的选择.

1.1 瞳像散条件

在单二次曲面折射面中根据瞳像散条件^[4-5]可以找到系统中像散为零时的光阑位置. 对细光束焦点有影响的是该折射面在主光线折射点的曲率. 轴对称非球面上任意一点的子午和弧矢两方向的曲率半径 r_1 和 r_2 可以通过微积分几何公式求出. 设二次曲面子午截线方程为: $y^2 = f(x)$. 则曲面在子午和弧矢截面内的曲率半径分别为

$$r_1 = -(1 + \dot{y}^2)^{\frac{3}{2}} / \ddot{y} \quad (1a)$$

$$r_2 = y(1 + \dot{y}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1b)$$

细光束的子午和弧矢焦线位置由 Young 氏公式决定

$$\frac{n' \cos^2 I'}{t'} = \frac{n' \cos I' - n \cos I}{r_1} + \frac{n \cos^2 I}{t} \quad (2a)$$

* 国家自然科学基金(60507003)、国家高技术研究发展计划(863)(2007AA12Z110)和中国科学院知识创新工程领域前沿资助

Tel: 0431-86176292

Email: sunjinx@126.com

收稿日期: 2009-02-05

修回日期: 2009-02-24

$$\frac{n'}{s'} = \frac{n' \cos I' - n \cos I}{r_s} + \frac{n}{s} \quad (2b)$$

式中细光束入射角为 I 、折射角为 I' ； n 、 n' 分别为折射前后介质折射率； t 和 t' (s 和 s') 分别为子午 (弧矢) 截面内物距和像距。

对无限远物体完全校正像散时即要求

$$\frac{n' \cos I' - n \cos I}{r_t n' \cos^2 I'} = \frac{1}{t'} = \frac{1}{s'} = \frac{n' \cos I' - n \cos I}{n' r_s} \quad (3a)$$

得到条件为

$$r_t \cos^2 I' = r_s \quad (3b)$$

将 r_t 和 r_s 的表达式代入式(3b)后可以得到

$$(1 + \dot{y}^2) \cos^2 I' + y \ddot{y} = 0 \quad (4)$$

由于入射角 I 与物方孔径角 U 及光阑位置 L_p 间存在密切的关系,进而可以推得

$$\cos^2 I' = \frac{1}{1 + \tan^2 I'} = \frac{(\dot{y} + \tan U')^2}{(1 + \dot{y}^2)(1 + \tan^2 U')} \quad (5a)$$

$$\tan U = y / (L_p - x) \quad (5b)$$

$$\dot{y} \ddot{y} + (\dot{y} + \tan U')^2 / (1 + \tan^2 U') = 0 \quad (5c)$$

式(5)表明:对于给定的光阑位置可以通过求解微分方程的方法得到消像散的曲面面型;反之,对于给定的二次曲面面型,也可以找到消像散的主光线位置即光阑位置。

共形导引头整流罩结构通常采用椭球面作为基本面型。设其子午截线方程为

$$y^2 = 2Rx - (1 - e^2)x^2 \quad (6)$$

式中 R 为曲线顶点曲率半径, e 为曲线偏心率。将其代入式(5)中可求得

$$L_p = \frac{R(1 \pm e)}{(1 + e)(1 - e)} \quad (7a)$$

即二次曲面的消像散光阑位置与 x 、 y 无关,仅与曲面的基本参量有关。

对于长短轴分别为 a 、 b ,即物理径长比 $F = a/2b$ 的旋转对称椭球面来讲

$$L_p = b / (2F \pm \sqrt{4F^2 - 1}) \quad (7b)$$

由于共形椭球罩结构中影响成像质量的像差主要由其外表面引入的,内表面作为赋形面对各种像差有一定的补偿作用,所以口径大小为 $2b$ 的共形整流罩中消像散的光阑位置主要由上式决定。式(7)也表明,不管径长比 F 如何选择,椭球结构中一定存在两个能够消像散的光阑位置,且其一位于椭球体内,另一位于椭球体外较远处。但在共形整流罩中由于对通光量和实际成像系统体积大小等的要求限制了该结构中消像散径长比 F 的选择。

1.2 设计实例与结果分析

以径长比为 0.9,口径 70 mm 的整流罩结构为例验证上述消像散条件。图 1 为采用等厚 MgF_2 整

流罩的中波红外导引头结构及其成像质量分析曲线,从图中可以明显地看到上文所提到的低阶像差随观察视场的波动特性。

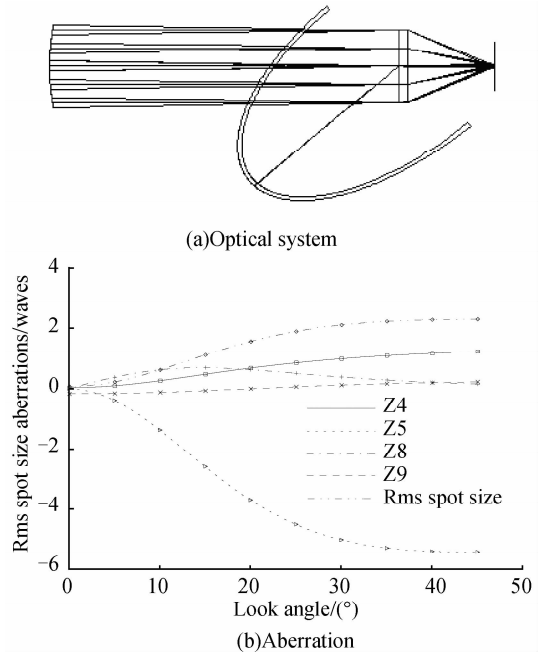


图 1 万向支架式椭球整流罩光学系统及其像差曲线
Fig. 1 Optical system of gimballed conformal dome and its aberrations

椭球体中光阑位置 L_p 的取值决定了系统中最大可利用光阑口径,因而为满足系统通光量的要求, L_p 的取值不能过小。以下几组数据为根据公式(7)计算得到的光阑位置和径长比的匹配要求,结果表明:径长比较大的结构中消像散光阑位置越靠近椭球体顶点,系统的通光量将会受到限制。

$$L_p > 20, F < 0.58 \quad (8a)$$

$$L_p > 15, F < 0.7 \quad (8b)$$

$$L_p > 10, F < 0.946 \quad (8c)$$

图 2 为应用在万向支架式共形光学系统中的等厚同心椭球整流罩结构不同观察视场中初级像散与节点位置间的关系曲线。从曲线中可以看到系统中

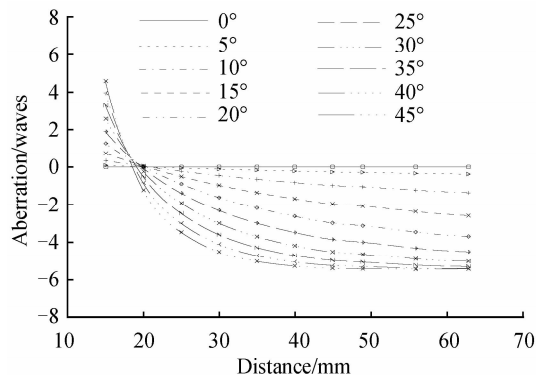


图 2 椭球整流罩中初级像散(Z5)与万向节点位置关系曲线
Fig. 2 Relationship between the third order astigmatism (Z5) and the gimbal point

不存在严格消像散的节点位置,但当节点位于距顶点 20 mm 附近的位置时系统初级像散的动态范围将取得最小值.之所以在该结构中找不到完全消像散的节点位置是由于非零观察视场中的罩面结构即使在零度瞬时视场中也存在许多不同于轴对称光学系统的高级像差^[4],因而仅用初级像差系数描述系统的成像质量有些力不从心.该组曲线还有一明显特点:大观察视场和小观察视场中消像散节点位置有所不同.15°视场内的理想消像散节点位于20 mm处,大于25°观察视场的“消像散”节点位置左移,且像散非零.图3为万向节点位于距椭球顶点18 mm位置处时共形光学系统的初级像差曲线.其成像质量远远好于图1所示结构的成像质量,其中像散Z5的波动范围被控制在0~0.5λ之间,其动态范围仅为原结构的十二分之一.该系统在各观察视场中的初级像散值虽不完全为零,其动态变化范围已经处于可控范围之内,这也表明上述轴对称光学系统的设计思想对于万向支架式共形光学系统的设计仍具有很重要的意义.然而像散为零的节点位置却造成系统彗差呈现随观察视场线性增长的趋势,其最大值不亚于原系统中像散最大值.由此可见共形光学系统中消像差节点位置的选择不能以单一像差为基准,而应充分考虑各像差之间的平衡效应.

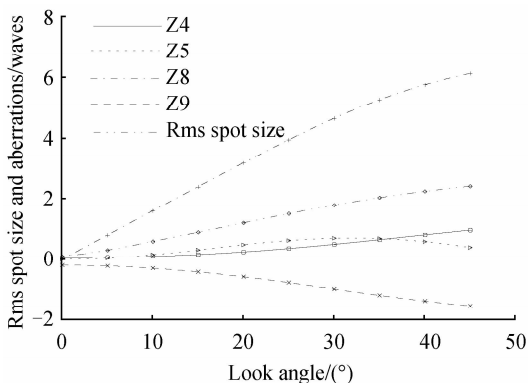


图3 共形光学系统的初级像差曲线
Fig.3 Aberrations of conformal dome

2 共形光学系统节点位置的选择

经分析可知万向节点位置的选择对于万向支架式共形光学系统中的像散和彗差有很大的影响,因而找到该系统中消像差的合理节点位置对于共形光学系统的整体设计有很重要的意义.

在轴对称光学系统中,光阑移动前后的像差系数间存在着可相互求解的关系^[4]

$$S_I^* = S_I \quad (9a)$$

$$S_{II}^* = S_{II} + AS_I \quad (9b)$$

$$S_{III}^* = S_{III} + 2AS_{II} + A^2S_I \quad (9c)$$

$$S_{IV}^* = S_{IV} \quad (9d)$$

$$S_V^* = S_V + A(3S_{III} + S_{IV}) + 3A^2S_{II} + A^3S_I \quad (9e)$$

式中 A 为标志光阑移动量的转面不变量

$$A = \Delta h_p / h = \Delta u_p / u \quad (10)$$

在万向支架式共形光学系统中,相对球差而言,非零观察视场中罩面结构非对称特性对彗差和像散的影响更为严重.基于上述考虑,将系统球差作为自由变量,在轴对称光学系统中寻找同时消彗差和像散的光阑位置,即要求

$$S_{II}^* = S_{II} + AS_I = 0 \quad (11a)$$

$$S_{III}^* = S_{III} + 2AS_{II} + A^2S_I = 0 \quad (11b)$$

解之得

$$S_{II} / S_I = -A \quad (12a)$$

$$S_{III} / S_I = A^2 \quad (12b)$$

计算表明:要想找到消彗差和像散的光阑位置,通过调节椭球罩内壁参量,系统初始结构的球差、彗差和像散间需满足式(11)~(12).对于 $F=0.9$ 的椭球罩结构,利用 ZEMAX 软件分析找到的同时消彗差和像散的万向节点在距顶点 31.976 997 mm 处.将万向节点位于 30 mm、31.976 997 mm 和 50 mm 位置处时的像差曲线进行比较,如图 4.

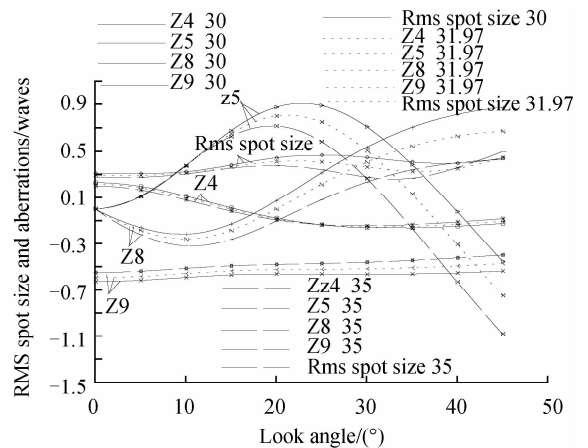


图4 万向节点位于30 mm、31.97 mm和35 mm,位置处时的像差曲线比较

Fig.4 Aberrations comparison of different conformal dome with the gimbal point located at 30 mm,31.97 mm and 35 mm after the apex

从图4中可以看到,系统在利用上述方法找到的万向节点位置处时的成像质量较为理想:在中间视场和边缘视场中的像差都不很大,更有利于后续光学系统的设计.由于赋形面对系统的像差补偿能力有限,可以考虑在系统中引入衍射面^[6],以扩展内壁的波前整形作用.除此之外,系统残余动态像差可采用复杂固定校正板^[7]或者动态校正板^[8-12]等方式平衡处理.

3 结论

光阑位置对轴对称光学系统的成像质量有很大

的影响. 虽然万向支架式共形光学系除零度观察视场外都不再具有旋转对称特性, 但其万向节点位置的选择仍与旋转轴对称光学系统中光阑位置的选择存在些许相似性, 因而合理的选择万向节点位置对共形光学系统的整体设计有很重要的意义. 由消像差条件得到的共形光学系统中的各像差并不为零, 只是其动态特性已完全处于可控范围之内, 系统残余像差可以通过引入固定校正板或者动态校正板等方式进一步校正处理.

参考文献

- [1] ELLIS K S. The optics of ellipsoidal domes [D]. Arizona: the University of Arizona, 1999.
- [2] KNAPP D J. Fundamentals of conformal domes design[C]. *SPIE*, 2002, **4832**: 394-409.
- [3] SUN Jin-xia, SUN Qiang, LU Zhen-wu, *et al.* Characteristic analysis and correction of conformal dome aberration [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, **29**(5): 713-718.
孙金霞, 孙强, 卢振武, 等. 共形整流罩像差特性分析及校正方法研究[J]. *应用光学*, 2008, **29**(5): 713-718.
- [4] WANG Zhi-jiang. Fundamentals of lens design [M]. Shanghai: Science Press, 1965: 310-335.
王之江. 光学设计理论基础[M]. 上海: 科学出版社, 1965: 310-335.
- [5] ZHAO C Y, BURGE J H. Application of the pupil astigmatism criteria in optical design [J]. *Appl Opt*, 2002, **41**: 7288-7293.
- [6] SUN J X, SUN Q, LI D X, *et al.* Conformal dome aberration correction with diffractive elements[J]. *Acta Phys Sin*, 2007, **56**: 3900-3905.
孙金霞, 孙强, 李东熙, 等. 利用衍射光学元件进行共形整流罩像差校正的研究[J]. *物理学报*, 2007, **56**: 3900-3905.
- [7] LI Dong-xi, LU Zhen-wu, SUN Qiang, *et al.* Research on conformal optical system design using Wassermann-Wolf principle[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 776-779.
李东熙, 卢振武, 孙强, 等. 利用 Wassermann-Wolf 原理设计共形光学系统[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 776-779.
- [8] WHALEN M R. Correcting variable third-order astigmatism introduced by conformal aspheric surfaces[C]. *SPIE*, 1998, **3482**: 62-73.
- [9] SPARROLD S W, Mills J P, Knapp D J, *et al.* Conformal dome correction with counterrotating phase plates [J]. *Opt Eng*, 2000, **39**: 1822-1829.
- [10] SPARROLD S W. Arch corrector for conformal optical systems[C]. *SPIE*, 1999, **3705**: 189-200.
- [11] SPARROLD S W, Knapp D J, Manhart P K, *et al.* Capabilities of an arch element for correcting conformal optical domes[C]. *SPIE*, 1999, **3779**: 434-444.
- [12] LI Yan, LI Lin, HUANG Yi-fan, *et al.* Conformal optical design using counterrotating wedges and zernike polynomial [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1788-1792.
李岩, 李林, 黄一帆, 等. 基于反转光楔和泽尼克多项式的共形光学设计[J]. *光子学报*, 2008, **37**(9): 1788-1792.

Application of the Aberration Correction Criteria in Conformal Optical System Design

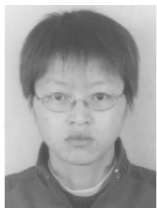
SUN Jin-xia^{1,2}, LIU Jian-zhuo^{1,2}, SUN Qiang¹, FANG Wei¹

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

(2 Graduate school of the Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: We have discussed the proper gimbal point position in conformal optical system based on the pupil astigmatism criteria. Then, we derive the best position of the aberration correction gimbal point by using aberration correction criteria in rotationally symmetrical system. The result proves the application potential of the aberration correction criteria in conformal optical system design and the dome's image quality has been improved greatly by properly choosing the position of the gimbal point.

Key words: Conformal optics; Dome; Aberration correction; Lens design



Sun Jin-xia was born in 1982. She is presently pursuing her Ph. D. degree and her current research area covers optical system modeling and design.



SUN Qiang was born in 1971. He is a researcher and a Doctor, his interesta focus in infrared optics, binary optics and IR optical system simulations.