

DOI:10.16136/j.joel.2022.10.0067

基于同时多表面设计原理的非球面成像光学系统初始结构构造方法研究

胡俊波¹, 张 帅¹, 解博夫¹, 赵 星^{1,2*}, 刘伟伟^{1,2}

(1. 南开大学 现代光学研究所, 天津 300350; 2. 天津市微尺度光学信息技术科学重点实验室, 天津 300350)

摘要:设计非球面光学系统,尤其是含有多个非球面光学表面的光学系统,合理的初始结构可以有效地减少设计工作量,提高后续的优化效率,本文提出利用同时多表面(simultaneous multiple surfaces, SMS)设计原理构建初始结构的方法,并且分析了其在成像光学系统设计中的像差特性,根据分析提出了利用 SMS 方法开展非球面光学系统初始结构设计的流程。最后使用该方法获得一款激光雷达接收装置的光学系统初始结构,经过进一步优化后,得到了工作中心波长 850 nm,系统焦距 20 mm,相对孔径为 1/1.6,视场角为 40°,总长小于 30 mm 的设计结果,验证了该方法在确定非球面光学系统初始结构方面的可行性。

关键词:应用光学;同时多表面方法;非球面光学系统;激光雷达

中图分类号:O439 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2022)10-1009-09

Research on initial structure construction method of aspheric imaging optical system based on simultaneous multiple surface design principle

HU Junbo¹, ZHANG Shuai¹, XIE Bofu¹, ZHAO Xing^{1,2*}, LIU Weiwei^{1,2}

(1. Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Micro-scale Optical Information Science and Technology, Tianjin 300350, China)

Abstract: A reasonable initial structure can effectively reduce the workload and improve the subsequent optimization efficiency in the design of aspheric system, especially the optical system with several aspheric surfaces. This paper proposes a method using simultaneous multiple surfaces (SMS) principle to construct the initial structure. The aberration characteristics of the method in imaging optical system design are analyzed, and the design process of initial structure of aspheric optical system is proposed based on the analysis. Finally, a laser radar receiving optical system with working wavelength 850 nm, focal length 20 mm, relative aperture 1/1.6, field of view 40°, and total length less than 30 mm is designed by the proposed method, which verifies the feasibility of this method in determining the initial structure of aspheric optical system.

Key words: applied optics; simultaneous multiple surfaces (SMS) method; aspheric optical system; laser radar

1 引 言

非球面透镜,相较于传统的球面透镜,其面型

虽然更为复杂,但提供的自由度更多,能有效地提升系统的光学特性,使系统更为紧凑、轻盈,并能更好地控制系统像差^[1,2]。随着光学加工技术的

* E-mail: zhaoxingtjnk@nankai.edu.cn

收稿日期:2022-02-17 修订日期:2022-02-18

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB0504400)、国家自然科学基金(62075106)、天津市科技支撑计划(19YFZCSY00250)和天津市自然科学基金(19JCZDJC36600)资助项目

发展,非球面已广泛应用于天文望远镜^[3],广角相机^[4]、光谱成像仪等^[5]光学系统中。但在设计非球面系统的过程中,一个与最终设计结果接近的初始结构是非常重要的。如果从一个较差的初始结构出发,会极大地增加后续优化的难度。目前非球面光学系统设计中常使用的初始结构是一个拥有较好像差特性的球面系统,最终系统设计结果通过该系统中的非球面表面进行渐进优化得到。但是对于某些光学系统,初始球面系统往往与最终设计结果相去甚远^[6],需要大量的渐进优化才能无限逼近最终的设计要求。特别是对含有多个非球面的系统初始结构进行优化设计时,使用渐进优化的方法会产生巨大的工作量^[7],因此,使用直接设计方法构建含有非球面表面的系统初始结构,将对减少光学设计后续的优化难度,提高设计效率,具有重要的意义。

非球面系统的直接设计方法主要有偏微分方程法^[8-10]、逐点构造迭代法^[11]、和同时多表面(simultaneous multiple surfaces, SMS)设计方法等^[12-13]。其中 SMS 方法由 MINANO 等^[14]提出,最早应用在非成像光学中,它利用等光程原理,同时设计系统中的一对或者多对表面,来改变光线的出射方向,使光源发出的光线在照明目标面上形成一定的强度分布。由于 SMS 方法原理简单,易于操作,且可以同时计算多个表面,研究人员尝试将其应用于成像系统设计领域。该方法利用等光程原理和物像之间的严格耦合关系,通过逐点的光线追迹获得最终的面形曲线,理论上被证明可以迅速减小成像系统设计视场点在像面上的光斑大小^[13-15]。

然而不同于非成像光学系统设计,成像光学系统设计使用像差理论进行设计结果的评价和设计过程的引导。因此,为了将 SMS 方法更好地运用到成像光学系统设计中,需要结合 SMS 方法的原理和特点分析评估该方法的像差补偿能力。例如:根据 MINANO 等^[12,13]的研究,对于小视场成像系统, SMS 方法设计表面在设定视场实现完善成像的基础上,会影响其他视场光束的球差和彗差。但对于大视场成像系统, SMS 方法设计表面对于全部成像视场光束的约束能力如何,还缺少进一步分析。这其中比较有代表性的问题是 SMS 方法设计表面对轴外视场光束像散像差的影响。因为在经典的 SMS 设计方法中,基于物像等光程原理对设定视场光线计算得到的面形,在理论上已经一定程度控制了轴外视场的畸变和场曲像差。但是需要注意的是,完整的曲面是通过子午面内面形曲线计算结果绕对称轴旋转得到的,它

对于子午和弧矢光束的控制能力不同,理论上势必会因视场角的增大产生较大的像散像差。此外, SMS 设计方法利用等光程原理进行面形设计时,一般针对单波长光线进行光程计算,对于一定范围的工作波长,必须要考虑该方法设计表面的色差特性。对于这些问题,有研究人员在具体的 SMS 设计中使用控制系统中单变量(如透镜曲率)的方法,以获得像散最小的设计结果^[16];通过在系统中加入额外透镜来控制色差^[16],或者使用反射系统避免色差的影响^[17]。

上述研究报道使用 SMS 方法针对特定系统进行了设计,取得了一定效果,但是这些研究成果并没有对 SMS 方法在一般大视场非球面成像系统设计中的像差特性进行详细的分析,因此所提出的设计方案对系统变量数等有一定限制,难以满足利用 SMS 设计方法开展大视场非球面成像系统设计的一般要求。为此,本文在具体分析 SMS 方法应用于大视场非球面成像系统设计中的像差特性的基础上,提出利用 SMS 方法构造非球面成像光学系统初始结构的方法以及系统设计流程,并通过一款激光雷达光学接收装置的设计实例,证明了该设计方法的可行性。

2 SMS 设计方法在成像系统设计中的性能分析

2.1 SMS 设计方法原理

SMS 方法的基本原理如图 1 所示, E_1 和 E_2 为一对对称视场点, R_1 和 R_2 分别为 E_1 和 E_2 在像面上的共轭点,光学系统关于图中的虚线对称,在确定两个设计表面起点 P_0 和 P_1 以及相应法向量 $\mathbf{n}_0$ 和 $\mathbf{n}_1$ 的基础上,使 E_1 发出的光线经过 P_0 和 P_1 折射到达 R_1 ,从而计算得到 E_1 到达 R_1 的总光程 Γ 。由于系统的对称性,从 E_2 到 R_2 之间的光程也应为 Γ 。根据等光程原理,在保持 Γ 不变的情况下,可以计算得

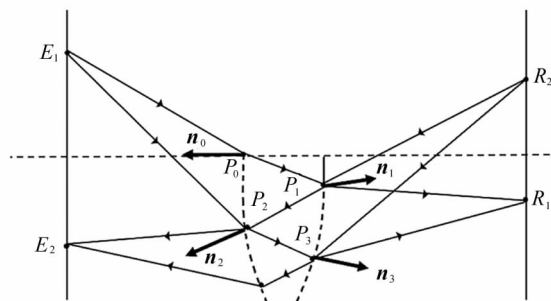


图 1 SMS 方法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of SMS method

到 R_2 发出光线经 P_1 折射后与另一个面的交点 P_2 , 并进一步利用折射定理得到 P_2 点处的法向量 $\mathbf{n}_2$, 同理可以利用 E_1 发出光线经由 P_2 点折射后计算得到其与另一个面的交点 P_3 和该点处的法向量 $\mathbf{n}_3$ 。重复上述过程可以依次同时求出两表面上的点, 使点链不断增长, 当点链长度满足通光口径要求后, 使用合理的曲线拟合并绕对称轴旋转, 即可形成完整的光学折射表面。

2.2 视场对 SMS 方法应用性能的影响

为了研究 SMS 方法用于成像光学系统的像差特性, 使用图 2 所示的包含有两个透镜的简单成像光学系统进行分析, 设定该系统的入射光波长为 850 nm, 入射光瞳直径为 3 mm, 焦距为 5 mm, 视场角 $2\omega = 40^\circ$, 设计视场为 $\pm 10^\circ$ 。根据所分析特性的不同, SMS 方法将用于前组透镜或者后组透镜的表面设计。

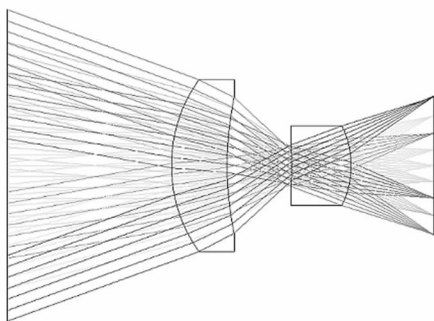


图 2 双透镜光学成像系统
Fig. 2 Optical imaging system with two lens

SMS 方法确保在子午面内对设计视场发出的光线完善成像的同时, 对设计视场附近一定范围内视场光线也会起到约束效果, 而这种约束效果与某个视场光线入射到设计面的角度 α_1 与设计视场光线入射到设计面上的角度 α_2 的差值 $\delta_{\alpha_1-\alpha_2}$ (下文简称为设计面入射角度差) 有关。以图 2 所示的系统为例, 分为以下两种情况讨论:

一是当不同视场光线以平行光入射至设计面时, 以图 2 中前组透镜的两个表面作为设计表面, 此时不同视场光线设计面入射角度差可以根据系统视场角和设计视场数值直接获得, 即此时系统的设计面入射角度差 $\delta_{\alpha_1-\alpha_2}$ 范围在 $-10^\circ-10^\circ$ 之间。使用 SMS 方法设计后, 系统子午面内光线形成的点列图如图 3(a) 所示, 同时可以获得设计面入射角度差和子午面光束光斑半径间的关系, 如图 3(b) 所示, 从图中可知, 设计视场处得到的子午光束光斑半径值最

小, 而且设计面入射角度差越大, 子午光束光斑半径值也越大。

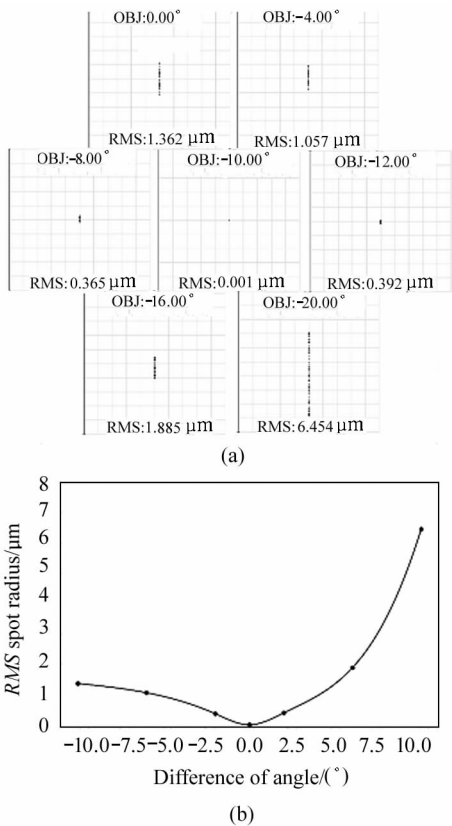


图 3 平行入射情况下设计结果:
(a) 子午光束形成的点列图;
(b) 设计面入射角度差与子午光束光斑半径的关系
Fig. 3 Design result with parallel rays incidence:
(a) The spot diagram of meridional light beam;
(b) Relationship between incident angle difference of design plane and spot radius of meridional light beam

二是当不同视场光线以非平行光入射至设计面时, 以图 2 所示系统中后组透镜的两个表面作为设计面, 由于此时无法直接获得设计面入射角度差, 故取上光线、主光线和下光线的设计面入射角度差的平均值作为非平行光入射情况下的设计面入射角度差 $\delta_{\alpha_1-\alpha_2}$ 。通过前组透镜限制入射到后组透镜上的设计面入射角度差, 使上半视场光线入射到设计面角度 α_1 范围在 $4^\circ-16^\circ$ 之间, 设计面入射角度差 $\delta_{\alpha_1-\alpha_2}$ 范围在 $-6^\circ-6^\circ$ 之间。在这种情况下, 子午面内光线形成的点列图如图 4(a) 所示, 同时获得的设计面入射角度差与子午光束光斑半径的关系如图 4(b) 所示。相比于平行光入射时的分析结果, 在物方视场范围相同的情况下, 非平行光入射时, 前组透镜限

制了设计面入射角度差的范围,使最终得到的子午光束光斑半径相比图3所示结果,总体要更小一些,但其趋势与平行光入射时类似,在设计视场处得到的子午光束光斑半径值最小,随着设计面入射角度差增大,子午光束光斑半径值也增大。

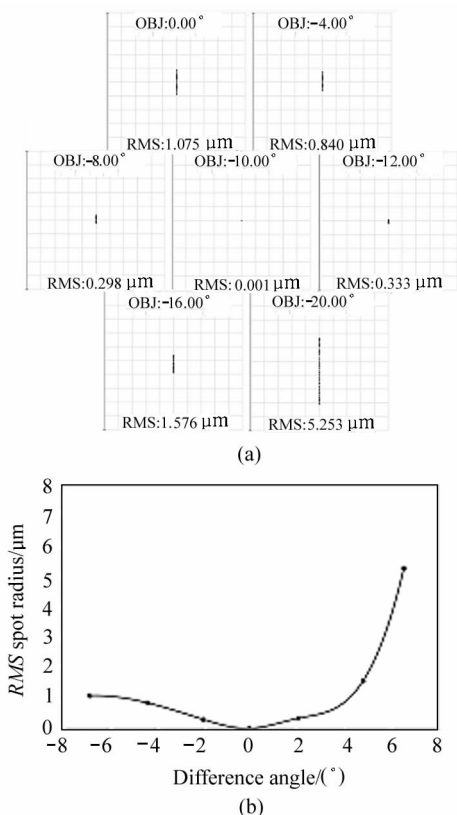


图4 非平行入射情况下设计结果:

(a) 子午光束形成的点列图;

(b) 设计面入射角度差与子午光束光斑半径的关系

Fig. 4 Design result with nonparallel rays incidence:

(a) The spot diagram of meridional light beam;

(b) Relationship between incident angle difference of design plane and spot radius of meridional light beam

通过对以上两种情况的分析可以得出结论,无论是平行光还是非平行光入射 SMS 设计表面,设计面入射角度差越大,子午光束光斑半径的值也越大,说明 SMS 设计表面对偏离设计视场入射光线的限制效果随偏离程度增大越弱。由此可知,限制设计面入射角度差可以得到更好的表面设计结果。然而由于大视场成像光学系统的视场范围大,通常会导致光线的设计面入射角度差较大,从而使最终得到的光斑半径显著增加,因此在选择合理的设计视场前提下,需要通过在系统中加入前置镜组,降低其他视场光线的设计面入射角度差,从而增强 SMS 设

计表面对成像光学系统中大视场范围光线的约束能力,使 SMS 设计方法能够在大视场成像光学系统设计中获得应用。

2.3 SMS 方法设计表面的像散

使用 SMS 方法设计的表面由子午面内设计曲线绕对称轴旋转后得到,因此可能产生像散像差,为了对可能产生的像散像差进行分析,仍然以图2所示的系统为例,采取同样的系统参数,平行光入射,前组透镜的两个表面为设计表面,得到全孔径光束的点列图如图5(a)所示,结合图3(a)子午面内光线的点列图,全视场范围内子午光束和全孔径光束光斑半径与视场之间的关系如图5(b)所示。

从图中可以看到,子午光束光斑半径在设计视场处的值最小,而与设计视场相差越大,其光斑半径也越大,这是因为 SMS 方法设计表面仅针对设计视场的子午光线满足光程相等,其他视场的光线经由该表面折射时光程不再相等,将导致光斑产生弥散,光斑半径增大。但同时可见,全孔径光束光斑半径与子午光束光斑半径存在较大的差异,其最小值已经不再位于设计视场处,这正是由于 SMS 设计表面具有旋转对称性,而大视场条件下子午光线和弧矢光线的空间对称性不同导致的结果。由此导致设计表面对子午和弧矢光线的约束能力不一致,从而产生了较为明显的像散像差。

为进一步研究像散像差对设计结果造成的影响,仍使用同一个系统,对后组透镜进行 SMS 设计,将经过 SMS 设计前后,系统像散与视场之间的变化绘于图6中。由图可知,后组透镜表面经过 SMS 设计后,10°设计视场处系统的像散变化了约-0.02 mm,反映出 SMS 设计表面为系统引入了较大的像散像差。为了预先补偿 SMS 设计表面引入的像散,改变初始结构中前组透镜面形参数,使其在设计视场处保留约 0.02 mm 的像散,再对后组透镜进行 SMS 设计后,得到系统的像散与视场之间的关系也在图6中表示。由图中可知, SMS 设计表面依旧产生了约-0.02 mm 的像散,而由于前组透镜预先保留了符号相反的像散,对后组进行了有效的补偿,使得系统的像散得到了有效控制,不仅设计视场的像散数值接近于0,其余视场的像散也整体处于较低水平。对比两种情况的系统像散分析结果,不难发现,针对 SMS 设计表面所产生的像散像差,采用其他镜

组保留像散的预补偿方法,可以实现系统设计视场和其他视场像散像差的控制。

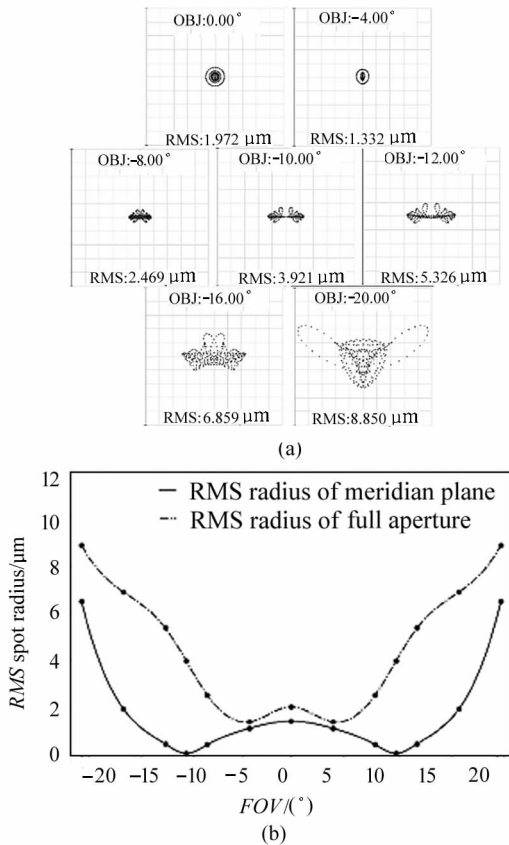


图 5 平行入射情况下设计结果:

- (a) 全孔径光束形成的点列图;
- (b) 视场与全孔径光束光斑半径和子午光束光斑半径的关系

Fig. 5 Design result with parallel rays incidence:
(a) Spot diagram of full aperture light beam;
(b) Relationship between field of view and spot radius of full aperture and meridional light beam

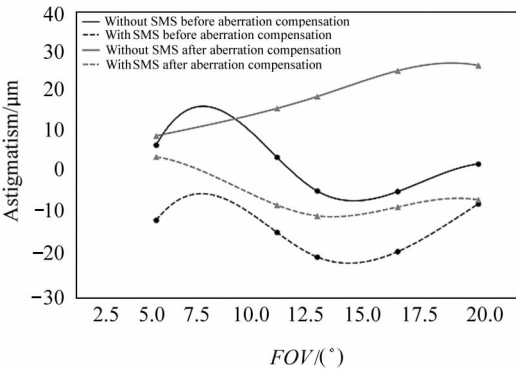


图 6 前组透镜对 SMS 设计表面进行像散补偿的结果
Fig. 6 Results after using front lens to make astigmatism compensation for SMS design surface

2.4 SMS 方法设计表面的色差特性

经典的 SMS 方法是利用单波长光线等光程原理进行光线追迹和面形设计的,当多波长光线入射时,其他波长光线的光程将不再相等,导致像面光斑弥散。因此以平行光入射情况下图 2 所示的系统为例,在系统参数相同的情况下,在 750—950 nm 之间改变入射光波长,分析不同波长光线入射 SMS 方法设计表面后的全孔径光斑半径的变化情况,结果如图 7 所示。

从图中可得,在设定的 850 nm 波长处全孔径光斑半径最小,而随波长偏离设计波长,光斑半径也会快速增长,表明 SMS 方法由于采用等光程原理开展表面设计,将导致设计表面对宽波段入射光线的约束能力有限,其对像面光斑尺寸的限制能力也将随着入射波长逐渐偏离设计波长而快速降低。

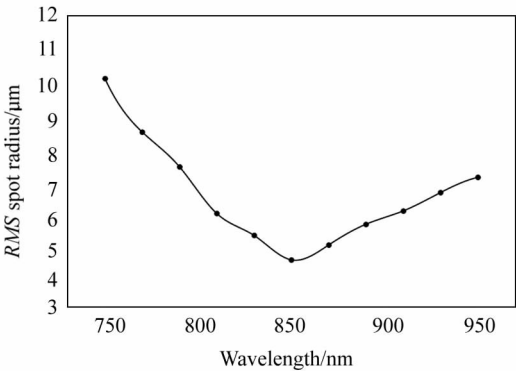


图 7 全孔径光斑半径与波长间的关系
Fig. 7 Relationship between spot radius of full aperture and wavelength

3 SMS 方法构造非球面成像系统初始结构及设计流程

在成像系统设计中应用 SMS 方法后进行像差特性分析,可知要通过 SMS 方法构造较好的大视场成像光学系统初始结构,需要在设计过程中重点考虑上述分析中提到的相关因素。在视场方面,需要考虑大视场光线入射时设计面入射角度差对光斑半径的影响;在像散像差方面,要关注 SMS 设计表面对大视场子午和弧矢光线控制能力的不同;而在色差特性方面,要评估入射光波长偏离设计波长对像面光斑尺寸的影响。而这其中,由于入射光线的视场直接影响光线的设计面入射角度差,进而决定设计后的表面约束全孔径光线和多波长光线的能力,从而影响其像散和色差特性,使得成像系统的视场

成为构造系统初始结构的关键因素。

具体而言,在小视场的情况下,由于入射光线的设计面入射角度差较小,SMS 方法设计表面对全孔径光线和多波长光线的控制能力较强,产生的像散和色差均较小,故而直接使用 SMS 方法进行表面设计,就可以构造出较好的初始结构。而在大视场的情况下,光线容易产生较大的设计面入射角度差,因此需要更具有针对性的设计流程。

针对大视场非球面成像光学系统的初始结构构造,综合考虑上述分析因素,为有效控制设计面入射角度差,可以在设计非球面镜组前增加前置透镜组,有效减小大视场光线的设计面入射角度差,有利于后续 SMS 设计表面产生像散和色差等像差的控制。同时可以在前组透镜中保留一定的像散,从而在后续设计中,补偿非球面后组像散带来的影响。此外,基于 SMS 设计方法所得表面的色差特性可知,该设计方法更适合激光扫描、激光雷达等工作波长范围较窄的成像系统,如用于较宽波长范围的系统设计,

需采用色差补偿镜组或反射结构来控制系统的色差。

为此,本文提出使用 SMS 方法构建非球面成像系统初始结构的方法流程。首先需要找到一个合适的 SMS 方法的起始结构,这个起始结构可以根据系统的要求,通过高斯光学或 P-W 方法计算得到,也可以通过 Zemax 等光学设计软件自动优化得到。但是,根据上述分析,在寻找 SMS 方法的起始结构时,应该根据系统视场设计指标要求,对像散及入射到设计面的光线角度差进行综合约束。此时的系统起始结构,其像面光斑半径与设计指标要求相差甚远,使用 SMS 方法对非球面表面进行计算设计后,其像面光斑半径会迅速缩小,从而得到非球面成像系统的初始结构。在该初始结构基础上,利用光学设计软件对非球面及系统参数进行进一步优化,综合控制系统色差、场曲、畸变等像差,即可获得满足设计要求的最终结果。完整的大视场非球面成像系统的设计过程如图8所示,其中虚线框内为利用SMS方

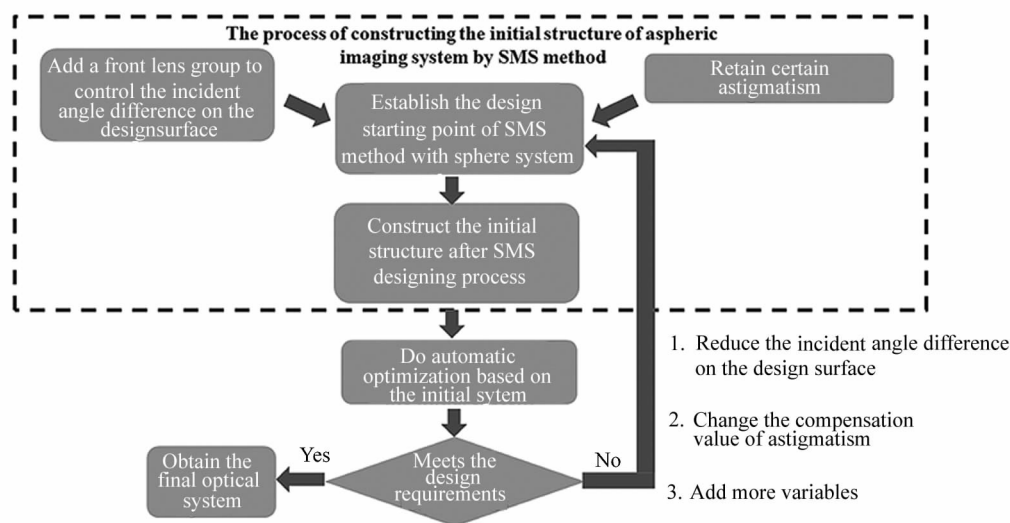


图 8 基于 SMS 方法的大视场非球面成像系统设计过程

Fig. 8 Design process of large field of view aspheric imaging system based on SMS method

法构造非球面系统初始结构的流程。

4 激光雷达接收装置设计实例

4.1 光学系统指标确定

为验证 SMS 方法在构建非球面成像系统初始结构方面的有效性,利用 SMS 方法设计一个用于直接飞行时间(direct time of flight,dTOF)激光雷达的紧凑接收装置,该装置视场范围较大,工作光谱范围较窄,适用于使用 SMS 方法进行设计。激光雷达使

用 ROHM 公司的 RCD94CHQ4 激光器作为发射装置,该激光器为垂直腔面发射激光器,发出的激光波长在 (850 ± 20) nm。选取 On Semiconductor 公司的 PAN-400100A-AI-QFN 单光子雪崩二极管探测器作为该激光雷达的成像探测器,其主要参数如表1所示。

取视场角为 $2\omega = 40^\circ$,探测器接收面直径为 15.92 mm,根据近轴光学可以计算出焦距约为 21.8 mm,由于近轴光学并非最终设计值,为保证入

射到探测面上的光不超出探测器有效接收范围,焦距取 20 mm。根据探测器像元尺寸以及采样定理可以得到系统的 Nyquist 频率约为 41.67 lp/mm,考虑到其他方面的一些损耗,可以认为在 42 lp/mm 下,系统 MTF 大于 0.3 时可以满足系统分辨率要求。同时像面会聚光斑尺寸应小于 12 μm ,以此满足探测器信噪比要求,降低探测器计数不足产生的误差。综合上述结果,该光学接收装置的主要设计参数如表 2 所示。从表中可见,系统的设计难点在于成像系统视场和相对孔径较大的前提下,保持较小的系统总长。如采用常规全球面设计方案一般需要使用 5—6 个镜组才能满足像质要求,很难满足系统总长小于 30 mm 的要求。因此,考虑实际加工装调成本,必须在系统中使用部分非球面镜组,才能满足设计指标的要求。

表 1 探测器主要参数

Tab. 1 Main parameters of detector

Name	Value
Number of pixels	400×100
Effective pixel area	32 μm ×12 μm
Diameter of receiving surface	15.92 mm
Pixel fill factor	26%
Effective detection area	15.44 mm×3.86 mm

表 2 激光雷达接收装置主要参数

Tab. 2 Main parameters of laser radar receiving system

Name	value
Working wavelength	(850±20) nm
Focal length	20 mm
Aperture	$F\#1.6$
Field of view	$2\omega=40^\circ$
Distortion	<5%
Spot radius	<12 μm
Total length of system	<30 mm
Rear focal length	>5 mm
Cut-off frequency	>0.3@45 lp/mm
Circle energy	>80%@12 μm

4.2 设计结果

根据系统视场角指标要求,设定 SMS 方法的设计视场角为 10°。在设计过程中,首先需要对焦距、总长、视场角、畸变等关键参数进行控制,再根据上述设计流程,加入像散与设计面入射角度差的限制,为方便设计,本实例使用 Zemax 软件的操作数约束及自动优化功能获得合适的起始结构,再利用 SMS

设计方法进行光线追迹计算即可得到相应的初始结构,最后进行一定的优化得到最终设计结果,如图 9 所示。图中其中第 3 面和第 4 面为非球面,是将 SMS 方法设计得到的坐标点使用偶次非球面进行拟合得到的。其结构参数如表 3 所示,非球面高次项系数如表 4 所示。

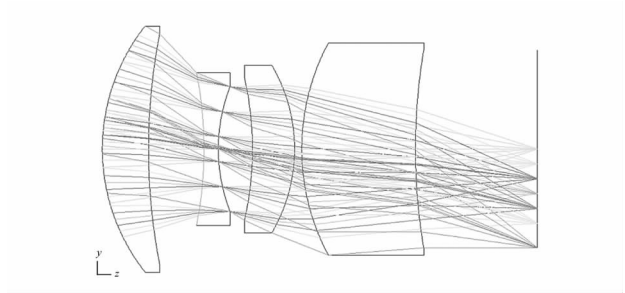


图 9 激光雷达接收装置 2D layout 图

Fig. 9 Layout diagram of laser radar receiver

表 3 激光雷达接收光学系统结构参数

Tab. 3 Structural parameters of optical system of laser radar receiver optical system

Surface	Radius of curvature/mm	Thickness/mm	Materials
1	13.656	3.186	H-ZF1
2	41.208	3.816	
3	-32.07	1.03	H-K9L
4(STO)	11.028	2.354	
5	-22.234	2.906	H-K9L
6	-11.422	0.526	
7	15.494	7.842	H-ZF1
8	40.956	8.396	

表 4 激光雷达接收光学系统非球面高次项

Tab. 4 Aspherical high-order term of laser radar receiver optical system

Surface	High-order data	Value
3	2	5.1124×10^{-5}
	4	-2.378×10^{-4}
	6	1.1487×10^{-5}
	8	5.115×10^{-7}
	10	1.5718×10^{-8}
	12	-3.082×10^{-10}
	14	3.4324×10^{-12}
	16	-1.639×10^{-14}
4	2	-1.881×10^{-3}
	4	-2.011×10^{-4}
	6	1.3338×10^{-5}
	8	-7.423×10^{-7}
	10	3.0179×10^{-8}
	12	-8.287×10^{-10}
	14	1.3233×10^{-11}
	16	-9.195×10^{-14}

系统各个视场的点列图如图 10 所示,MTF 曲线图如图 11 所示,场曲和畸变图如图 12 所示。最终得到的结果其 MTF 值在 45 lp/mm 处大于 0.3,光斑 RMS 半径小于 $12\text{ }\mu\text{m}$,畸变也小于 5%,满足之前所提出的要求,且根据图 13 衍射圆包围能量图来看,在 $12\text{ }\mu\text{m}$ 下,系统的包围能量可以达到 90%以上,根据图 14 相对照度曲线图,其边缘视场不均匀性小于 7%,系统性能良好。另外,该系统总长不超过 30 mm,且仅使 4 片镜组,有利于减少装置的体积和装置后续的装调难度。

设计结果表明对于大视场非球面系统,在使用 SMS 方法构造出合适的初始结构后,可以快速地接近满足设计要求的结果,最后根据设计要求进行少量的优化,便可以完成对大视场非球面系统的设计。

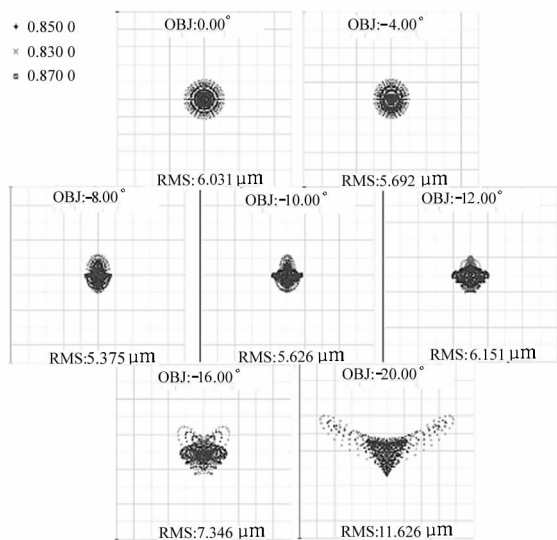


图 10 激光雷达接收光学系统的点列图

Fig. 10 Spot diagram of laser radar receiver optical system

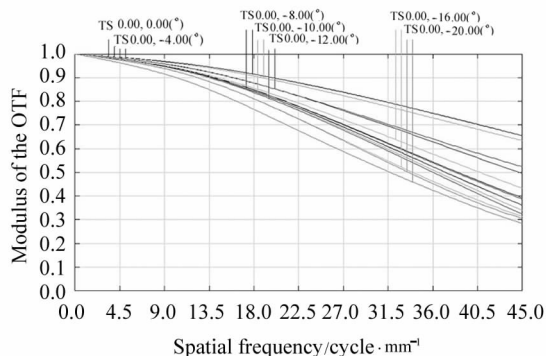


图 11 激光雷达接收光学系统的 MTF 图

Fig. 11 MTF diagram of laser radar receiver optical system

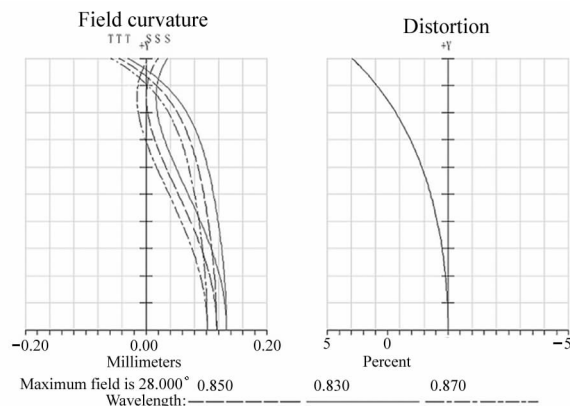


图 12 激光雷达接收光学系统的场曲和畸变图

Fig. 12 Field curve diagram and distortion diagram of laser radar receiver optical system

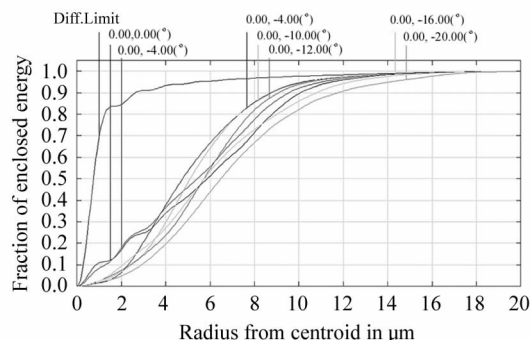


图 13 激光雷达接收光学系统的衍射圆包围能量图

Fig. 13 Diffraction circle surrounding energy diagram of laser radar receiver optical system

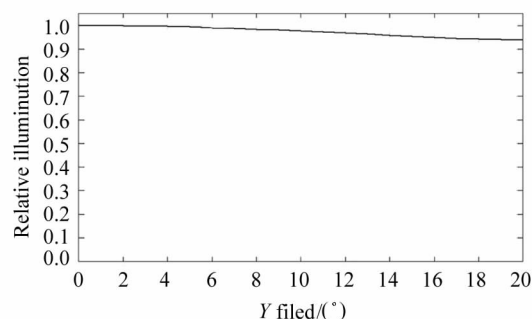


图 14 激光雷达接收光学系统的相对照度图

Fig. 14 Relative illuminance diagram of laser radar receiver optical system

5 结 论

针对大视场非球面成像系统,特别是含有多个非球面表面的成像系统构建初始结构的需求,本文提出使用 SMS 构造初始结构的方法。该直接设计方法可以同时计算设计多个非球面表面,得到含有非球面的初始结构,减少后续渐进优化的工作量,提高设计效率。本文具体分析了视场对 SMS 方法性能的影响,和 SMS 设计表面的像散特性和色差特

性,得到以下结论:视场对设计结果的光斑有显著影响,降低其他视场光线的设计面入射角度差,可增加SMS设计表面对光线的约束能力,从而减小设计结果的光斑大小;SMS设计表面会使大视场入射光束产生较为明显的像散,利用其他镜组的像散可以有效减小设计系统的像散像差;SMS方法对宽波段入射光的约束能力有限,其参与构造初始结构的光学系统,工作波长应在合理范围内。根据以上结论,提出了利用SMS方法构造初始结构的完整非球面成像系统的设计流程。

为验证该方法构建初始结构的能力,利用本文所提出方法设计了一个dTOF激光雷达的紧凑型接收装置,最终结构仅用4片镜组,其中一片镜组的两个表面为通过SMS方法设计得到的偶次非球面。系统工作波长为 (850 ± 20) nm,焦距20 mm,相对孔径为1/1.6,视场角为 40° ,总长小于30 mm,整个系统实现了大口径下的均匀像面照度,满足激光雷达接收装置的设计指标要求,且结构紧凑,验证了基于SMS设计原理的非球面成像光学系统初始结构构造方法的可行性,同时表明SMS方法在成像系统设计中的应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] YANG L. Advanced optical manufacturing technology[M]. Beijing: Science Press, 2001.
杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] MIKS A, NOVAK J, NOVAK P. Third-order design of aspheric spectacle lenses[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2010, 121(23): 2097-2104.
- [3] WANG S G, SU D Q, CHU Y Q, et al. Special configuration of a very large Schmidt telescope for extensive astronomical spectroscopic observation[J]. Applied Optics, 1996, 35(25): 5155-5161.
- [4] WOODS A J, DOCHERTY T, KOCH R. Image distortions in stereoscopic video systems[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2002, 1915: 36-48.
- [5] ZHENG Y Q, WANG H, WANG Y F. Selection and design of optical system of spaceborne hyperspectral imager[J]. Optical Precision Engineering, 2009, 17(11): 9.
郑玉权, 王慧, 王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 9.
- [6] LI W Y, WEI S L, FAN Z C, et al. Variable-diameter beam shaping system design with high zoom ratio containing aspheric optical components[J]. Applied Optics, 2020, 60(3): 705-713.
- [7] BIAN Y, LI H, WANG Y, et al. Method to design two aspheric surfaces for a wide field of view imaging system with low distortion[J]. Applied Optics, 2015, 54(27): 8241-8247.
- [8] ZHENG Z R, SUN X T, MIAO Y Y, et al. Design of reflective lens with Zernike polynomial free form surfaces[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science) 2008, 42(12): 2202-2206.
- [9] ZHUANG Z, CHEN Y, YU F, et al. Field curvature correction method for ultrashort throw ratio projection optics design using an odd polynomial mirror surface[J]. Applied Optics, 2014, 53(22): 69-76.
- [10] HOU J, LI H, WU R, et al. Method to design two aspheric surfaces for imaging system[J]. Applied Optics, 2013, 52(11): 2294-2299.
- [11] YANG T, ZHU J, WU X, et al. Direct design of freeform surfaces and freeform imaging systems with a point-by-point three-dimensional construction-iteration method[J]. Optics Express, 2015, 23(8): 10233-10246.
- [12] MINANO J C, BENITEZ P, LIN W, et al. An application of the SMS method for imaging designs[J]. Optics Express, 2009, 17(26): 24036-24044.
- [13] MINANO J C, BENITEZ P, LIN W, et al. Overview of the SMS design method applied to imaging optics[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2009, 7429: 74290C.
- [14] CHAVES J. Introduction to nonimaging optics[M]. Boca Raton, Florida: CRO Press, 2008.
- [15] MUNOZ F, HERRERO J M I, BENITEZ P, et al. Novel fast catadioptric objective with wide field of view[J]. Proceeding of SPIE, Detectors and Imaging Devices: Infrared, Focal Plane, Single Photon, 2010, 7780: 167-176.
- [16] WANG L, BENITEZ P, MINANO J C, et al. Ultracompact SWIR telephoto lens design with SMS method[J]. Proceeding of SPIE, Novel Optical Systems Design and Optimization XIV, 2011, 8129: 81290I.
- [17] NIE Y, RUBEN M, PABLO B, et al. Multifield direct design method for ultrashort throw ratio projection optics with two tailored mirrors[J]. Applied Optics, 2016, 55(14): 3794.

作者简介:

赵星 (1980—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光学信息处理和光学系统设计等方面的研究。