

基于三维构建法的大视场低畸变 自由曲面空间光学系统设计

李 娜 黄 颖

北京空间机电研究所研发中心, 北京 100190

摘要 为了满足空间遥感对光学系统大幅宽、低畸变、小体积的要求,采用三维构建法设计了一个大视场离轴四反自由曲面光学系统,成像全视场为 60° ,相对孔径为 $D/f' = 1/14$ 。阐述了三维构建法的设计思路,并采用该方法直接由二次非球面系统设计得到自由曲面光学系统,作为初始结构进一步优化。优化之后,光学系统的平均传递函数优于 $0.5(25 \text{ lp/mm})$,最大相对畸变为 0.54% 。研究表明,三维构建法有效、快捷,极大地提高了自由曲面光学系统的设计效率。同时,基于三维构建法设计的大视场自由曲面光学系统,系统畸变显著减小,解决了大视场反射式光学系统传递函数(MTF)与畸变无法平衡的难题,满足空间遥感的未来发展需求。

关键词 光学设计; 自由曲面; 三维构建法; 空间光学系统

中图分类号 V248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0322001

Design of Large-Field and Low-Distortion Freeform Space Optical System with 3D Construction Method

Li Na Huang Ying

Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100190, China

Abstract To meet the requirement of large-field, low-distortion and small-volume for optical system used in remote sensing field, a large-field freeform four-mirror off-axis reflective imaging system is designed with the 3D construction method, which is with the field of view of 60° and the relative aperture of $1/14$. In this paper, the 3D construction method is introduced. A freeform optical system can be obtained directly from a starting point of conic system with the 3D construction method, and it can be taken as a good starting point for further optimization. In the final system, the average of the modulation transform function (MTF) of all field of view is greater than $0.5(25 \text{ lp/mm})$ and the maximum relative distortion is 0.54% . The 3D construction method is effective and can tremendously raise the design efficiency of freeform optical system. And the freeform large-field imaging system designed with 3D construction method shows its advantage of much lower distortion and meets the balance between the high imaging quality and low distortion of the large-field imaging system, satisfying the future development requirement of remote sensing.

Key words optical design; freeform surfaces; 3D construction method; space optical system

OCIS codes 220.4830; 220.1250; 220.1010

1 引 言

高空间分辨率、大探测范围以及低畸变,是现代空间遥感器的发展趋势。反射式光学系统由于具有无色差、小体积、轻量化等优势在空间遥感领域应用广泛,其中大视场空间光学系统一般采用离轴反射式系统。由于离轴光学系统打破了光学系统的旋转对称性,轴外高级像差剧增。尤其对于大视场光学系统,光

收稿日期: 2015-8-20; 收到修改稿日期: 2015-10-18

作者简介: 李 娜(1992—),女,硕士研究生,主要从事自由曲面设计方面的研究。E-mail: zjdxln@163.com

导师简介: 黄 颖(1970—),女,硕士,研究员,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: 1059972060@qq.com

学系统传递函数(MTF)与畸变之间的平衡难题尤为突出。这对仅使用球面、非球面的传统光学系统提出了巨大挑战。

自由曲面主要指非旋转对称的曲面,可提供更多的优化自由度,可显著改善光学系统的视场适应能力。随着数控光学加工技术以及计算机再现全息(CGH)光学面形检测技术的进步,自由曲面光学元件已经在成像光学领域获得了广泛的应用。NASA已经完成了应用自由曲面的空间相机设计、论证工作,进入工程化研制的红外光谱成像仪也采用了自由曲面;国外著名光学系统制造商Leica公司为欧空局研制的新型离轴三反光学系统(TMA)相机也采用了自由曲面,全视场波像差均方根(RMS)由 $\lambda/7$ 提高到 $\lambda/20$ ($\lambda = 1064 \text{ nm}$)^[1]。基于自由曲面的光学系统研究已经成为新一代高性能空间光学系统发展的重要方向。

最常用的自由曲面设计方法为参数优化法^[2-4]。参数优化法是以球面或非球面光学系统作为初始结构,通过软件优化得到满足要求的光学系统。参数优化法设计思路相对简单,但需要相对较好的初始结构以及软件优化技巧。

目前自由曲面直接设计法逐步发展成熟,直接设计法是根据物像关系直接计算得到自由曲面光学系统以作为初始结构进一步优化,如偏微分方程法^[5-9]、多曲面同步设计(SMS)法^[10-15]、微球面方法^[16]以及三维自由曲面构建法^[17]等。偏微分方程法通过建立偏微分方程确定自由曲面面型,高效、简单,但其主要适用于点视场(或小视场)像差校正。SMS法可同时设计多个自由曲面,但该方法所控制的视场点数取决于自由曲面的个数,限制了其应用。微球面方法利用两个自由曲面对多视场点进行像差校正,每个视场仅可控制三条光线(中心光线、边缘光线)的出射方向,主要适用于同轴小孔径光学系统。三维自由曲面构建法可控制来自多视场不同位置孔径光线的出射方向,符合一般成像规律,适用于离轴、小 F 数、大视场的成像光学系统。

针对空间遥感光学系统追求大幅宽低畸变的应用需求,本文采用三维构建法设计了全视场 60° ,焦距为 320 mm ,相对孔径为 $D/f' = 1/14$ 的离轴四反自由曲面光学系统,同时实现了大视场光学系统高成像质量和低畸变的指标。

2 三维自由曲面构建法

三维构建法,同时考虑了来自多视场与不同位置孔径的光线,符合成像系统的一般要求。求解得到的结果可以作为进一步优化的初始结构。三维构建法主要包括3个主要步骤:1)定义多视场不同位置孔径的特征光线;2)求解离散点坐标;3)自由曲面拟合。

2.1 定义特征光线

定义来自多视场不同位置孔径的特征光线。首先适当划分采样视场,使相邻视场的光束在反射镜上的重叠部分为一个特定值;然后定义单视场不同位置孔径的特征光线。鉴于成像光学系统普遍采用圆孔径,可采用极化光线网格或矩形光线网格方式定义单视场不同位置孔径的特征光线。图1(a)为极化光线网格。圆形孔径以 θ 为间隔等分为 N 个极角,即 $N = 2\pi/\theta$,每个径向定义 L 个不同位置孔径坐标,如果光学系统全视场划分为 M 个视场,则有 $K = M \times N \times L$ 条特征光线被定义。另一种定义特征光线的方式为矩形光线网格,如图1(b)所示,每个点对应不同的位置孔径坐标。

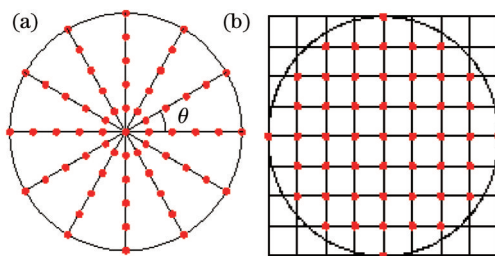


图1 定义单视场特征光线的两种基本方式。(a)极化光线网格;(b)矩形光线网格

Fig.1 Two basic ways of defining the feature rays of each field for circular aperture. (a) Polar ray grids; (b) rectangular ray grids

为计算特征光线与未知面的交点坐标,需要确定特征光线与未知面相邻两个面的交点以作为特征光线的起点和终点,如图2所示。未知面 S 为所要设计的曲面,以特征光线 R_i 为例,定义光线 R_i 与未知面 S 相邻两

面 S' 、 S'' 的交点 S_i 、 E_i 分别为光线的起点和终点,即经过 S_i 点的光线与未知面 S 交与 P_i 点,经该点反射后到达 E_i 点并最终与像面相交于理想像点 I_i 。由光线的起点和终点 S_i 、 E_i 与 P_i 点可确定特征光线相对于未知面的入射方向 $r_i = S_i P_i / |S_i P_i|$ 和出射方向 $r'_i = P_i E_i / |P_i E_i|$ 。特征光线终点 E_i 的确定方式,取决于未知面 S 在光学系统中的位置。若未知面为光学系统最后一个面[如图 2(a)所示],理想像点 I_i 即为 E_i ;若未知面与像面之间有其他面[如图 2(b)所示],则采用费马原理计算光线与面 S'' 的交点 E_i ,使点 P_i 与 I_i 之间的光程最短;如图 2(c)所示未知面为系统第一个面,需要倒转原光路,置换物像关系,采用反向光线追迹方式确定终点 E_i 。对于给定光学系统,定义特征光线之后便可确定特征光线的起点 S_i 。若未知面为光学系统第一个面[如图 2(c)所示],需要在物面与未知面 S 之间加入虚拟面来确定光线起点 S_i 。

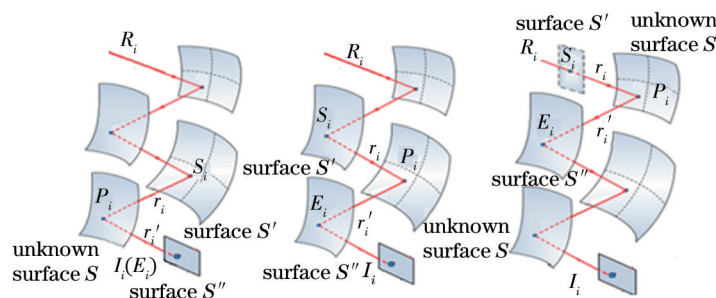


图 2 未知面 S 的相邻面 S' 、 S'' 。红色线为与 P_i 点对应的特征光线 R_i 。(a) 后相邻面为像面;(b) 未知面与像面之间有其他面;(c) 未知面为系统第一个面

Fig.2 Two neighboring surfaces S' and S'' of the unknown surface S . Red ray stands for the feature ray R_i corresponding to the data point P_i . (a) S'' is the image plane; (b) there are other surfaces between S and the image plane; (c) S_i is the first surface of the system

2.2 离散点计算

确定特征光线起点和终点的前提下,可通过反射定律求解描述未知面的离散点:

$$r'_i \times N_i = r_i \times N_i, \quad (1)$$

其中 $r_i = S_i P_i / |S_i P_i|$, $r'_i = P_i E_i / |P_i E_i|$ 分别为单位入射方向和单位出射方向向量, N_i 为 P_i 点处的法向量。根据反射定律, P_i 点处特征光线的出射方向同时取决于该点处坐标和法向量。自由曲面由离散点拟合得到,如果在离散点拟合过程中仅考虑离散点坐标而忽略法向量,拟合后自由曲面在对应离散点处的法向量与原计算离散点的理想法向量不一致^[18-19],这会导致光线脱离预期的光线传播轨迹,理想的物像关系无法实现,对于大视场光学系统尤为如此。因此,三维构建法同时计算离散点坐标和法向量,用于自由曲面拟合。

三维构建法离散点计算算法的核心思想为,特征光线 R_i 与其最邻近点处切平面的交点,可等效为特征光线与未知面的交点 P_i 。详细的计算过程如下:

- 1) 首先为初始点 P_1 赋值,将其作为特征光线 R_1 与未知面的交点坐标。
- 2) 如果点 P_i 的坐标已经确定,那么点 P_i 的法向量可根据反射定律计算得到:

$$N_i = \frac{r'_i - r_i}{|r'_i - r_i|}. \quad (2)$$

P_i 点处的切平面表达式随之确定。

3) 计算剩余 $K-i$ 条特征光线与 P_i 点处切平面的交点,确定与 P_i 点距离最短的点,定义为点 Q_{i+1} ,点 Q_{i+1} 与点 P_i 之间的距离为 d_i ,与 Q_{i+1} 点对应的特征光线为 R_{i+1} [如图 3 (a)所示]。如果 $i=1$,由于仅点 P_1 坐标已确定,那么在已计算未知面上离散点中,与特征光线距离最短的点即为 P_1 点。因此,点 $Q_{i+1}(Q_2)$ 即为未知面上的下一个离散点 P_2 ,便可省略第 4 步与第 5 步。

4) 如果 $2 \leq i \leq K-1$, P_i 点不一定为距离特征光线 R_{i+1} 最短的点。在点 P_i 之前有 $i-1$ 个离散点坐标已确定,计算特征光线 R_{i+1} 与 $i-1$ 个点的切平面的交点[如图 3 (b)或如图 3 (c)所示],每一个点与对应的切平面交点组成一个点对。确定距离最短的点对,定义该点对中未知面上的点为 P'_i ,切平面交点为 Q'_{i+1} ,两点之间的距离为 d'_i 。 P'_i 即为 $i-1$ 个点中与特征光线 R_{i+1} 距离最短的点。

5) 如果 $d_i \leq d'_i$,那么第 3 步中确定的点 Q_{i+1} 则为下一个计算点 P_{i+1} 。否则,第 4 步确定的点 Q'_{i+1} 为未知面

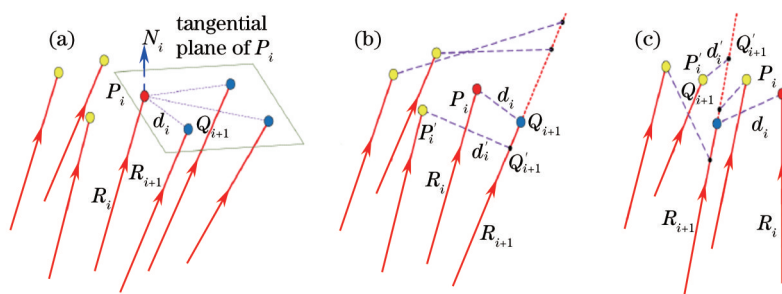


图3 离散点坐标的确定。(a) 确定下一条特征光线 R_{i+1} ; (b) 如果 $d_i \leq d'_i$, 点 Q_{i+1} 则为下一个计算点 P_{i+1} ;

(c) 如果 $d_i > d'_i$, 点 Q'_{i+1} 则为下一个计算点 P_{i+1}

Fig.3 Method to calculate the data point. (a) Find the next feature ray R_{i+1} ; (b) when $d_i \leq d'_i$, Q_{i+1} is taken as the next data point P_{i+1} ;

(c) when $d_i > d'_i$, Q'_{i+1} is taken as the next data point P_{i+1}

上下一个离散点 P_{i+1} [图 3(c)所示]。

6) 经过 3~5 步的计算, 可确定 P_{i+1} 点的坐标。经第 2 步的计算, 可确定 P_{i+1} 点处的法向量。重复 2~5 步, 直到计算得到所有离散点的坐标及相应的法向量。

2.3 自由曲面拟合

根据 2.2 节的分析, 采用法向量加权最小二乘法^[20], 法向量加权最小二乘法的原理公式为

$$d(C) = \sum_{i=1}^K [z_i - f(x_i, y_i; C)]^2 + w \sum_{i=1}^K |N_i - n_i|^2, \quad (3)$$

其中, $z = f(x, y; C)$ 为多项式自由曲面表达式, 向量 $C = (c_1, c_2, \dots, c_j)^T$ 为多项式系数向量, (x_i, y_i, z_i) 为离散点坐标, N_i 为离散点法向量, n_i 为对应点处的自由曲面法向量, w 为加权系数。利用以上关系, 选择恰当的加权系数 w , 将离散点拟合为多项式自由曲面或高次非球面, 得到自由曲面光学系统的初始结构。三维构建法计算得到的自由曲面光学系统可作为初始结构进一步优化。

3 自由曲面光学系统设计

为了满足空间遥感光学系统追求大幅宽的应用需求, 采用三维构建法针对自由曲面离轴反射式光学系统进行设计研究, 该系统的详细性能指标如表 1 所示。

表 1 离轴反射式系统的基本参数

Table 1 Specification of the freeform off-axis four-mirror system

Parameter	Specification
Field of view	$60^\circ \times 2.4^\circ$
F -number	14
Focal length	320 mm
Wavelength	0.45~0.89 μm
Detector pixel size	20 μm
Overall length of the system	< 480 mm
MTF	> 0.5(25 lp/mm)

基于三维构建法的大视场离轴反射式自由曲面光学系统的设计主要包括以下几个步骤: 确定初始结构; 确定自由曲面最佳位置; 定义特征光线; 三维构建法确定镜面面形得到自由曲面光学系统初始结构; 采用 CodeV 软件进一步优化。

3.1 求解初始结构并确定自由曲面的最佳位置

设计二次非球面离轴反射式系统, 作为自由曲面光学系统的设计起点。基于光学系统指标要求, 在已有设计数据库中找到合适的离轴三反光学系统作为初始结构, 对初始结构进行优化设计。由于后截距较长, 加入四镜折叠光路减小光学系统体积, 同时为增加优化变量, 将四镜作为非球面参加优化设计, 并加入离轴量,

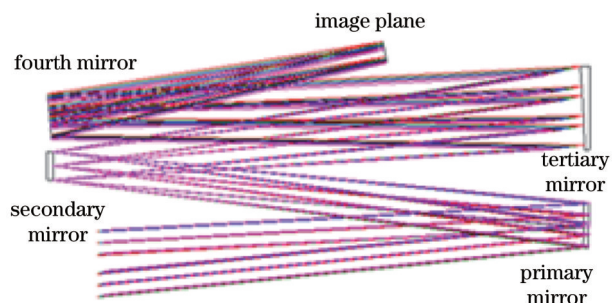


图4 初始系统的结构布局

Fig.4 Layout of the initial system

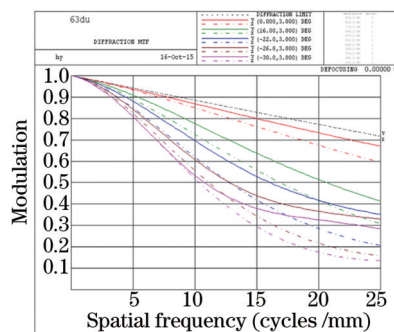


图5 初始系统的MTF

Fig.5 MTF curves of the initial system

得到离轴四反光学系统。结构布局如图4所示,主镜、三镜、四镜为二次非球面,次镜(孔径光阑)为球面。初始系统的传递函数如图5所示,系统全视场平均传递函数为0.12(25 lp/mm),最大相对畸变为15.28%。

确定自由曲面的最佳位置,既要考虑自由曲面对像差的校正效果,同时还要考虑自由曲面的加工与检测水平以及经济效益。图4所示的光学系统中,次镜为孔径光阑,口径小且为凸面,为降低加工和检测难度,采用球面;三镜与孔径光阑相邻,增加其优化变量对轴外残余像差的校正效果颇为明显,故将其设计为自由曲面;而主镜和四镜作为自由曲面对残余像差的校正并不敏感,故将主镜和四镜设计为高次非球面。

3.2 定义视场与特征光线并逐点构建各镜面

该离轴四反光学系统 x 方向的视场为 $60^\circ(-30^\circ\sim 30^\circ)$, y 方向的视场为 $2.4^\circ(3^\circ\sim 5.4^\circ)$, 由于系统关于 YOZ 面对称, 可仅考虑半视场, 采用了24个视场, 使不同视场光线重叠区域尽量一致。在此基础上采用极化光线网格方式定义单视场不同位置孔径的特征光线, 圆形孔径等分为18个极角, 每个径向定义了8个不同光瞳坐标位置(不包括圆心坐标), 即定义了 $K = 24 \times (18 \times 8 + 1) = 3480$ 条特征光线用于构建自由曲面。

逐点构建三镜。对于三镜而言, 特征光线与次镜的交点 S_i 即为光线入射点, 与四镜的交点 E_i 为光线出射点, 如图2(b)所示, 点 E_i 根据费马原理计算得到。然后根据2.2节1)~6)步的算法思路, 利用Matlab程序语言计算三镜上离散点的坐标及其法向量。离散点计算程序的输入为特征光线的起点 S_i 以及特征光线相对于三镜的入射方向 r_i , 输出为离散点的坐标及其法向量, 描述三镜的离散点点阵图如图6所示。

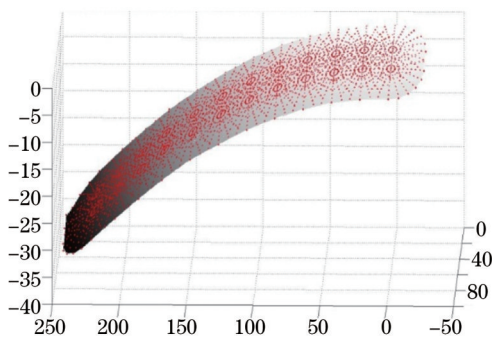


图6 三镜离散点的点阵图

Fig.6 Data points of the tertiary mirror

采用法向量加权最小二乘法将离散点拟合为 XY 多项式自由曲面, 加权系数为 $w = 10^6$ 。由于光学系统是关于 YOZ 面对称的, 因此仅采用 XY 多项式中的 X 偶数项。同时考虑设计效果、优化速度以及加工难度各方面因素, 采用5阶 XY 多项式优化光学系统。

$$z(x,y) = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2(x^2 + y^2)}} + A_3x^2 + A_5y^2 + A_7x^2y + A_9y^3 + A_{10}x^4 + A_{12}x^2y^2 + A_{14}y^4 + A_{16}x^4y + A_{18}x^2y^3 + A_{20}y^5 \quad (4)$$

其中, z 为非球面的旋转对称轴即光轴, 坐标原点取在顶点, $r^2 = x^2 + y^2$, c 为顶点曲率半径, k 为二次曲面系数。

逐点构建主镜与四镜。主镜特征光线的起始点确定方式如图 2(c)所示,将光路倒置,物像关系互换,通过反向光线追迹确定特征光线与次镜的交点 E_i 为光线出射点。四镜特征光线起始点的确定方式如图 2(a)所示,理想像点即为特征光线出射点 E_i 。在此基础上,根据 2.2 节 1)~6)步的算法思路,利用 Matlab 程序语言计算未知面上离散点的坐标及其法向量。采用法向量加权最小二乘法将主镜和四镜拟合为高次非球面,法向量加权系数分别为 $w = 10^6$ 、 $w = 10^4$ 。

采用光学设计软件 CodeV 进行光线追迹。通过 CodeV 的应用程序界面(API)接口,Matlab 可调用 CodeV 软件的命令语句实现光线追迹,确定特征光线的起点 S_i 以及特征光线相对于未知面的入射方向 r_i 并存入 Matlab 的数值矩阵,作为离散点计算程序的输入。

通过三维自由曲面构建法设计完成的自由曲面光学系统,平均弥散斑半径为 3.68 mm,最大相对畸变为 0.99%,实现了对多视场不同位置孔径光线的控制。该自由曲面系统可作为初始结构进一步优化。

3.3 光学设计软件优化

采用光学设计软件 CodeV 完成自由曲面光学系统的优化。采用软件系统默认的误差函数—垂轴光线像差,同时加入畸变、镜间距等约束条件对自由曲面光学系统的初始结构进行优化。最终的自由曲面光学系统系统数据如表 2 所示。三镜 XY 多项式系数如表 3 所示。

表 2 自由曲面光学系统数据

Table 2 Data of the freeform optical system

	Radius /mm	Conic	Aperture /mm	Surface type
Primary	6382.18	0.218	557 × 42	10 th asphere
Second	-1135.4	-	Φ26	Sphere
Tertiary	-824.6	0.079	531 × 69	Freeform surface
Fourth	∞	0	395 × 33	10 th Asphere

表 3 三镜 XY 多项式系数

Table 3 Coefficients of the XY polynomial describing the tertiary mirror

	Parameter		Value		
Term of polynomial	x^2	y^2	x^2y	y^3	x^4
Coefficient	-3.43×10^{-7}	-1.03×10^{-6}	-1.41×10^{-8}	-1.12×10^{-8}	-1.19×10^{-10}
Term of polynomial	x^2y^2	y^4	x^4y	x^2y^3	y^5
Coefficient	-2.81×10^{-10}	-6.35×10^{-11}	-4.38×10^{-14}	-3.35×10^{-14}	-7.69×10^{-13}

采用光学系统传递函数对系统像质进行评价,如图 7 所示,系统全视场平均传递函数在 0.5 以上(25 lp/mm)。图 8 为基于三维自由曲面构建法设计的自由曲面光学系统畸变网格图,自由曲面光学系统的最大相对畸变为 0.54%。基于三维构建法设计的自由曲面光学系统,实现了大视场空间光学系统像质与畸变的平衡。

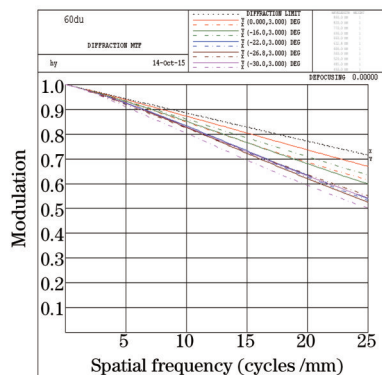


图 7 基于三维构建法自由曲面光学系统的 MTF

Fig.7 MTF curves of the freeform optical system based on the 3D construction method

本设计以二次非球面系统为初始结构设计,若直接采用 CodeV 优化,耗时长,依赖设计者的设计经验,且难得到理想的设计结果。而三维构建法无需好的初始结构和设计技巧,可由二次非球面系统直接设计得到自

由曲面光学系统,而后仅需简单优化即可得到满足要求的光学系统,高效、快捷,在空间自由曲面光学系统设计中具有很大的应用优势。

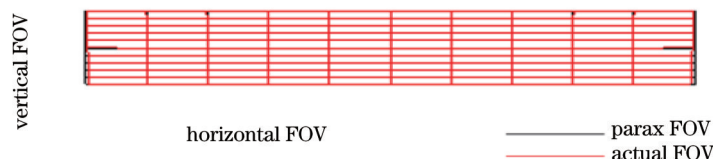


图8 基于三维构建法自由曲面光学系统的畸变网格

Fig.8 Distortion grid of the freeform optical system based on the 3D construction method

3.4 设计结果影响因素分析

法向量加权最小二乘法法向量加权系数对设计结果的影响。针对描述三镜的离散点,加权系数分别取 $w = 10^4, w = 10^5, w = 10^6, w = 10^7$,将离散点拟合为5阶XY多项式(主镜、四镜为二次非球面),对应的平均弥散斑大小和最大相对畸变如图9(a)与(b)所示。选取 $w = 10^6$ 将描述三镜的离散点拟合为5阶XY多项式,选取 $w = 10^6$ 将描述主镜的离散点拟合为高次非球面,在此基础上计算得到描述四镜的离散点,针对描述四镜的离散点,加权系数分别取 $w = 10, w = 10^3, w = 10^5, w = 10^7$,将离散点拟合为10阶高次非球面,对应的平均弥散斑大小和最大相对畸变如图9(c)与(d)所示。

根据图9可以看出对于大视场光学系统而言,离散点的法向量对特征光线出射方向的影响颇大,在离散点拟合过程中要求严格控制法向量偏离量,加权系数越大,特征光线的成像效果越好。同时四镜相较于三镜而言比较平坦,曲率半径为 ∞ ,通过比较图9(b)和(d),可以看出光学表面的曲率半径越小,光线传播方向对法向偏差越敏感,需要相对较大的法向量加权系数,严格控制法向偏差。

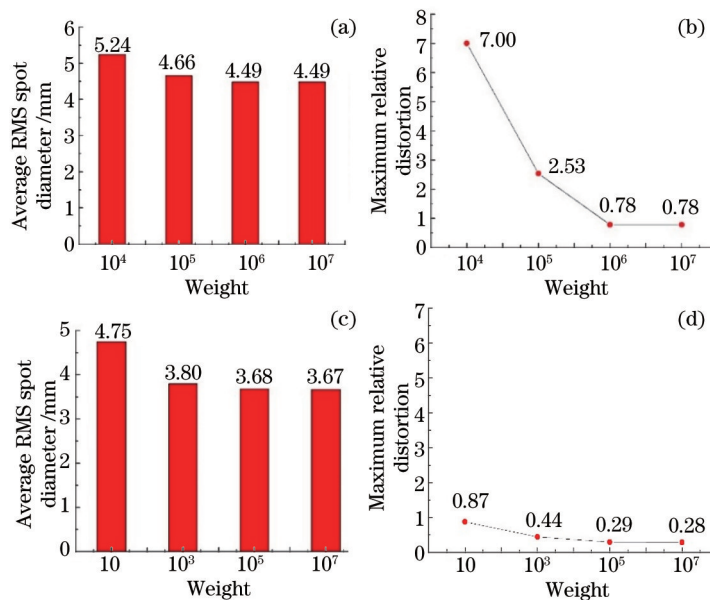


图9 加权系数与设计效果的关系。(a) 三镜加权系数与平均弥散斑大小的关系;(b) 三镜加权系数与最大相对畸变的关系;(c) 四镜加权系数与平均弥散斑大小的关系;(d)四镜加权系数与最大相对畸变的关系

Fig.9 Relationship between the design result and the weight. (a) Relationship between the weight of tertiary mirror and the average RMS spot diameter; (b)relationship between the weight of tertiary mirror and the maximum relative distortion; (c) relationship between the weight of fourth mirror and the average RMS spot diameter; (d)relationship between the weight of fourth mirror and the maximum relative distortion

多项式阶数对设计结果的影响。针对描述三镜的离散点,分别将其拟合为4阶、5阶、6阶XY多项式,加权系数为 $w = 10^6$,对应的平均弥散斑大小和最大相对畸变如图10所示。可以看出,在一定范围内,多项式阶数越高,设计效果越好。但若多项式阶数过高,会导致数值计算的不稳定性,设计效果反而下降。而且,多项式阶数过高,会增加自由曲面的加工与检测的难度。

4 结 论

介绍了三维构建法的实现过程,并采用三维构建法设计了一个焦距为 320 mm,全视场为 60° ,相对孔径为 $D/f' = 1/14$ 的大视场离轴四反自由曲面光学系统,并分析了影响设计结果的因素。该自由曲面光学系统的平均传递函数为 0.5 (25 lp/mm),最大相对畸变为 0.54%。三维构建法,同时考虑了来自多视场与不同位置孔径的光线,适用于具有一定孔径和视场的成像光学系统;而且该方法无需好的初始结构,设计过程高效、快捷,在空间自由曲面光学系统设计中具有很大的应用优势。

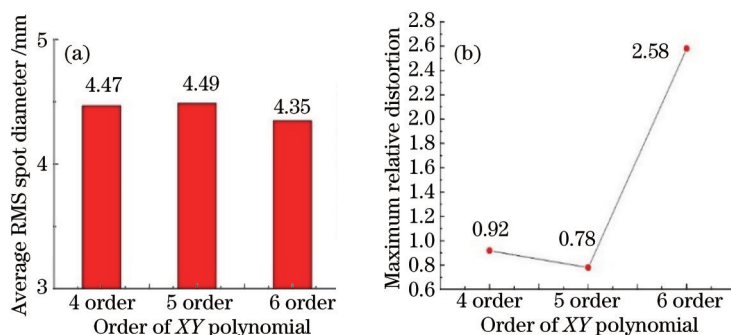


图 10 XY 多项式阶数与设计效果的关系。(a) 三镜 XY 多项式阶数与平均弥散斑大小的关系;

(b) 三镜 XY 多项式阶数与最大相对畸变的关系

Fig.10 Relationship between the design result and the order of the XY polynomial. (a) Relationship between the order of XY polynomial describing tertiary mirror and the average RMS spot diameter;(b) relationship between the order of XY polynomial describing tertiary mirror and the maximum relative distortion

参 考 文 献

- Xue Donglin, Zheng Ligong, Zhang Feng. Off-axis three-mirror system based on freeform mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(12): 2813-2820.
薛栋林, 郑立功, 张峰. 基于光学自由曲面的离轴三反光学系统[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2813-2820.
- Wang Qingfeng, Cheng Dewen, Wang Yongtian, *et al.*. Designing an all-reflective, long focus and large field of view optical system with freeform surface[C]. SPIE, 2012, 8557, 85570Q.
- Gong Dun, Wang Hong. Optical design of large field and low distortion coaxial three mirror system with free-form surface[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0722001.
巩盾, 王红. 含有自由曲面的大视场低畸变同轴三反射光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0722001.
- Li Hua, Zhang Xin, Wang Chao, *et al.*. Optical design of an avionic helmet-mounted displays using freeform surface[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0322001.
李华, 张新, 王超, 等. 自由曲面机载头盔显示器光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0322001.
- Xia Chunqiu, Zhong Xing, Jin Guang. Design of the off-axis four mirror system by differential equation[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 35(9): 0922002.
夏春秋, 钟兴, 金光. 基于微分方程法的离轴四反光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 35(9): 0922002.
- R A Hicks, R K Perline. Blind-spot problem for motor vehicles[J]. Appl Opt, 2005, 44(19): 3893-3897.
- R A Hicks, C Croke. Designing coupled free-form surfaces[J]. J Opt Soc Am A, 2010, 27(10): 2132-2137.
- Hou Jia, Li Haifeng, Zheng Zhenrong, *et al.*. Distortion correction for imaging on non-planar surface using freeform lens[J]. Optics Communications, 2010, 285: 986-991.
- Cheng Fachao, Niu Lihong, Su Binghua, *et al.*. Freeform surface lens design based on numerical solutions of differential equations[J]. Opt Technique, 2013, 39(3): 0267-0271.
程发超, 牛丽红, 苏秉华, 等. 基于偏微分方程数值解的自由曲面透镜的设计[J]. 光学技术, 2013, 39(3): 0267-0271.
- J C Mifiano, P Benitez, Wang Lin, *et al.*. An application of the SMS method for imaging designs[J]. Opt Express, 2009, 17: 24036-24044.
- P Benitez, J C Mifiano. Ultrahigh-numerical-aperture imaging concentrator[J]. J Opt Soc Am A, 1997, 14: 1988-1997.
- O Grabocvickidc, P Benitez, J C Mifiano. Aspheric V-groove reflector design with the SMS method in two dimensions[J]. Opt Express,

- 2010, 18: 2515–2521.
- 13 J C Mifano, Pablo Benitez, Wang Lin, *et al.*. Overview of the SMS design method applied to imaging optics[C]. SPIE, 2009, 7429: 74290C.
- 14 F Duerr, P Benitez, Juan C Minano, *et al.*. Analytic design method for optimal imaging : coupling three ray sets using two free-form lens profiles[J]. Opt Express, 2012, 20: 5576–5585.
- 15 Tang Jian, Yang Bo. Free-form reflector design for beam shaping of laser diode[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0208002.
唐 舰, 杨 波. 基于半导体激光器的线性整形自由曲面反射镜设计[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0208002.
- 16 Hou Jia. Design Method of Imaging Freeform Lens Based on Distortion Correction[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
侯 佳. 基于畸变校正的成像自由曲面光学设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- 17 Yang Tong, Zhu Jun, Hou Wei, *et al.*. Design method of freeform off-axis reflective imaging systems with a direct construction process [J]. Opt Express, 2014, 22(8): 9193–9205.
- 18 Zhu Jun, Yang Tong, Jin Guopan. Design method of surface contour for a freeform lens with wide linear field-of view[J]. Opt Express, 2013, 21(22): 26080–26092.
- 19 Wang Lin, Qian Keyuan, Luo Yi. Discontinuous free-form lens design for prescribed irradiance[J]. Appl Opt, 2007, 46(18): 3716–3723 .
- 20 Zhu Jun, Wu Xiaofei, Yang Tong, *et al.*. Generating optical freeform surfaces considering both coordinates and normals of discrete data points[J]. J Opt Soc Am A, 2014, 31(11): 2401–2408.

栏目编辑: 韩 峰