

基于离轴自由曲面的激光通信光学天线设计

谷茜茜 崔占刚 亓波

Design of optical antenna for laser communication based on an off-axis freeform surface

GU Xi-xi, CUI Zhan-gang, QI Bo

引用本文:

谷茜茜, 崔占刚, 亓波. 基于离轴自由曲面的激光通信光学天线设计[J]. 中国光学, 2020, 13(3): 547-557. doi: 10.3788/CO.2019-0157

GU Xi-xi, CUI Zhan-gang, QI Bo. Design of optical antenna for laser communication based on an off-axis freeform surface[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 547-557. doi: 10.3788/CO.2019-0157

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/CO.2019-0157>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

星间激光通信终端光学天线的隔离度

Isolation of optical antenna of inter-satellites laser communication terminals

中国光学. 2017, 10(4): 462 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0462>

离焦对激光通信接收视场的影响分析

Analysis of the influence of defocus on the field of view of laser communication reception

中国光学. 2018, 11(5): 822 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0822>

大视场高像质简单光学系统的光学-算法协同设计

Optical/algorithmic co-design of large-field high-quality simple optical system

中国光学. 2019, 12(5): 1090 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1090>

光学自由曲面面形检测技术

Optical free-form surfaces testing technologies

中国光学. 2017, 10(3): 283 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0283>

LED微阵列投影系统设计

Design of projection system for a micro-LED array

中国光学. 2019, 12(1): 88 <https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0088>

基于数字相位恢复算法的正交相移键控自由空间相干光通信系统

Coherent free-space optical communication system with quadrature phase-shift keying modulation using a digital phase recovery algorithm

中国光学. 2019, 12(5): 1131 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1131>

基于离轴自由曲面的激光通信光学天线设计

谷茜茜^{1,2,3}, 崔占刚^{1,2,3}, 亓波^{1,2,3*}

(1. 中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209;

2. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了提高空间激光通信系统的工作范围, 简化光学系统的结构, 提出了基于离轴自由曲面的大视场两镜无焦光学天线的设计形式。该光学天线采用无焦结构, 无需再使用准直透镜元件, 可以极大地简化系统结构, 克服了传统聚焦光学天线体积过大、大功率光源情况下焦点处功率密度过高等问题。首先, 基于三级像差理论, 推导了两镜无焦系统的消像差公式, 并对求解结果进行了分析总结。然后, 根据求解结果和实际需求设计了一款无焦光学天线, 该系统的有效通光口径为 100 mm, 放大倍率为 5 倍, 波段为 500~1 100 nm, 全视场角为 0.6°, 主镜为凹抛物面的一部分, 次镜采用 XY 多项式表征的自由曲面, 并用 MATLAB 对次镜自由曲面面形进行了仿真。结果表明, 光学系统全视场的波像差优于 $\lambda/14$ ($\lambda=500$ nm), 斯托列尔比大于 0.8, 系统能量集中度较高, 像质接近衍射极限, 光学视场相对于传统二次曲面系统增加了 26.7%。因此, 该种天线结构在激光通信领域具有较强的实用性和很好的发展前景。

关键词: 光学天线设计; 大视场; 自由曲面; 离轴两镜无焦系统

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标志码: A

doi: 10.3788/CO.2019-0157

Design of optical antenna for laser communication based on an off-axis freeform surface

GU Xi-xi^{1,2,3}, CUI Zhan-gang^{1,2,3}, QI Bo^{1,2,3*}

(1. Key Laboratory of Beam Control, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: qibo@ioe.ac.cn

Abstract: We propose a design for a large-field two-mirror afocal optical antenna based on an off-axis freeform surface to improve the working range of space laser communication systems and simplify the structure of optical systems. The optical antenna adopts an afocal structure without using collimating lens elements, which can greatly simplify the system structure, overcome the problems of traditional focusing optical antennae such as them being too large in volume or having a power density that is too high at the focus when us-

收稿日期: 2019-07-25; 修订日期: 2019-09-15

基金项目: 中国科学院创新基金 (No. CXJJ-19S008)

Supported by CAS Innovation Project of China (No. CXJJ-19S008)

ing high power light source. First, based on third-order aberration theory, the aberration-free formula of this class of two-mirror afocal optical antenna is derived, and relative results are analyzed. Then, an afocal optical antenna is designed according to the analyzed results and practical requirements. The effective aperture of the system is 100 mm, the magnification is 5, the range of the wavelength is 500~1 100 nm, the full field of view is 0.6° , the primary mirror is part of the concave paraboloid and the secondary mirror is a freeform surface characterized by XY polynomials. MATLAB software is used to simulate the freeform surface of the secondary mirror. The design results show that the total field of view wavefront error of the optical system is better than $\lambda/14$ ($\lambda=500$ nm), the Strehl ratio is greater than 0.8, the system has a higher energy concentration, and the image quality is close to the diffraction limit. The field of view of the freeform surface optical system increased by 26.7% compared with that using traditional conic surface system. Therefore, this antenna structure is highly applicable and shows strong prospects for development in the field of laser communication.

Key words: optical antenna design; large field of view; freeform surface; off-axis two-mirror afocal system

1 引言

近年来,空间激光通信由于具有信息容量大,速率高,抗干扰、抗截获能力强等优点而被广泛应用于国防军事、民用商用等领域^[1-2]。光学天线是空间激光通信终端的核心部分,是整个通信系统信号发射和接收的关键部件。能量利用率和视场角大小是影响光学天线性能的重要指标:一方面,要进行远距离传输,必须保证激光具有极高的能量利用率;另一方面,要提高对准精度,接收端必须要有足够大的视场,增大视场角对于提高捕获概率、降低对准难度具有重要意义^[3]。离轴反射式光学系统可以实现无遮拦,能提高能量利用率^[4]。基于传统离轴无焦两反结构的光学天线已经有设计成果。2018年,王蕴琦^[5]等设计出离轴式共口径的光学天线,全视场仅为 0.12° ,视场较小;孙权社等通过对离轴两反系统加入折转镜和目镜,有效提高了光学天线的视场,但系统相对复杂^[6]。增大视场除了采用三镜、四镜等更多的元件来增加设计自由度外,还可以采用新兴的自由曲面进行设计。自由曲面具有非旋转对称性,自由度丰富,可以很好地校正光学系统由于离轴和倾斜带来的非对称像差^[7]。随着加工及检测技术的发展,自由曲面在离轴反射式系统中得到了实际应用。Suryakant Gautam^[8]等人采用XY多项式设计出一种离轴两反聚焦系统,关妹^[9]等人采

用Zernike多项式表征的自由曲面对系统次镜进行优化以改进离轴两反聚焦光学天线性能。虽然自由曲面聚焦系统增大了视场,但需要引入准直透镜元件,光学系统体积过大^[10],尤其是对于具有较高功率的通信光源,焦点处功率密度过高,存在较大风险。

本文针对传统离轴两反无焦光学天线视场较小以及自由曲面离轴两反聚焦光学天线不利于后续光学系统简化、大功率光源情况下焦点处功率密度过高等问题,提出将自由曲面应用于离轴两反无焦光学天线的设计思想。文中对自由曲面及离轴两镜无焦结构形式展开研究,并结合传统离轴两反无焦光学系统设计进行比较分析。

2 设计相关基础理论

2.1 无焦系统

无焦系统是指对光束没有发散或聚焦的光学系统,即平行光进,平行光出,光学系统的等效焦距为无限大。在空间激光通信中:发射信号时该无焦系统相当于扩束系统,作用是增大束腰半径,扩大发射范围,压缩光束发散角,提高其准直性,减少光束发散损耗,进而降低对光源发射功率的要求;接收信号时该无焦系统相当于缩束系统,作用是减小后续光路元件的尺寸,尽可能提高接收光功率^[11]。

两镜离轴反射式无焦系统主要有两种结构^[12], 如图1所示。一种是中间无实际焦点的离轴无焦卡塞格林系统, 其更适合光功率较高的系统, 不会发生空气击穿, 应用范围较广; 另一种是中间存在实焦点的离轴无焦格里高利系统, 其只应用在光功率不高的系统中。本设计采用的是图1(a)所示的离轴无焦卡塞格林系统。

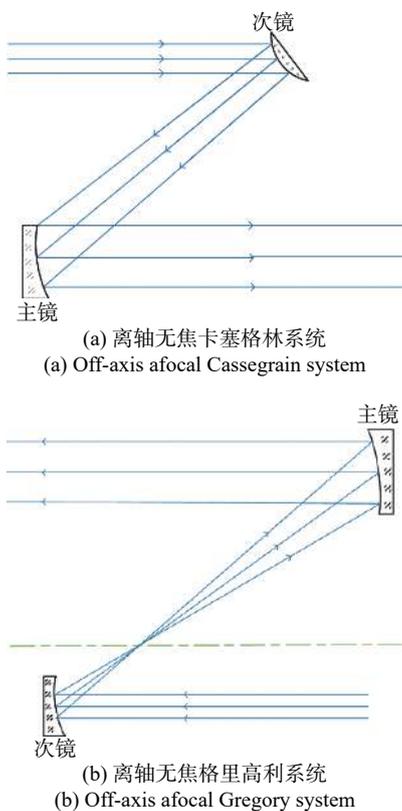


图1 离轴两镜无焦系统的两种结构

Fig. 1 Structures of two kinds of off-axis two-mirror afocal systems

2.2 光学自由曲面

光学自由曲面是指非旋转对称的光学曲面, 不具备全局的旋转对称性, 没有统一的光轴。它利用自由曲面来表征光学表面, 可增加光学系统设计自由度, 增强非对称像差校正能力和结构简化能力。由于光学系统的使用需求及加工方式不同, 自由曲面具有多种表征方法, 常见的表征方法有变形非球面、XY 多项式、Zernike 多项式、径向基函数、Q 型多项式、切比雪夫多项式及非均匀有理 B 样条 NURBS 等。在性能较高的空间光学系统中, 应用较多的是 XY 多项式和 Zernike

多项式表征的自由曲面, 它们各有优缺点。XY 多项式自由度高, 适合校正非对称像差, 并且与数控光学加工的表达形式一致, 最适合确定式加工^[13-16]。结合像差校正能力及与实际加工的联系程度, 本设计选用的是 XY 多项式表征的自由曲面, 面形矢高定义为在二次基底的基础上叠加泰勒多项式, 表达式为:

$$z = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2(x^2 + y^2)}} + \sum_{i=1}^N A_i E_i(x, y), \quad (1)$$

式中, k 为基底的二次曲面系数, c 为顶点曲率半径的倒数, N 为级数中多项式系数的总数, A_i 为第 i 项 XY 多项式的系数。该多项式只是在 x, y 方向的幂级数。第一项是 x , 然后是 y , 接着是 $x \times x$, $x \times y$, $y \times y$ 等。1 次项有 2 项, 2 次项有 3 项, 3 次项有 4 项, 依次类推。位置值 x 和 y 除以归一化半径得到的多项式系数是无量纲的。从 XY 多项式的表达式可以看出, 它可以有无穷多项, 但是在优化设计过程中, 如果无限制的增加 XY 多项式的项数并不能有效地提高优化效果, 而且会对光线追迹造成巨大的负担, 导致优化设计时间加长, 效率急剧下降。

在 XY 多项式自由曲面优化过程中应注意, 首先将低阶项设置为变量进行优化, 再逐步增加高阶项变量进行优化, 并不是一开始就给定 XY 多项式的阶次。而且在优化的过程中有一定的规律, 如果系统只关于子午面对称, 则含有 X 项的参数一般选取偶次项进行优化, 优化时先只对含有 Y 项的面形参数进行优化, 再优化包含 X 项的面形参数等^[17]。XY 多项式阶次的选择与初始结构、系统的复杂程度、像质要求等都有关, 所以要根据具体系统在优化过程中逐渐确定 XY 多项式的阶次。

2.3 两镜无焦系统的消像差理论

图2为同轴无焦两镜系统的示意图, 平行光束入射到主镜 M1, 相继被主镜 M1, 次镜 M2 反射后仍以平行光出射, 只是光束的宽度发生了变化^[18]。在该无焦系统中, 折射率 $n_1 = n'_1 = 1$, $n'_1 = n_2 = -1$; 孔径角 $u_1 = u'_1 = 0$, $u'_1 = u_2 = h_1/f'_1 = h_2/f'_2$; 系统的拉格朗日不变量 $J = nu y = n'u'y' = 0$; 顶点的曲率半径 $R_1 = 2f'_1$, $R_2 = 2f'_2$; 系统的放大倍率 $\Gamma = h_2/h_1 = f'_1/f'_2 = R_1/R_2$ 。

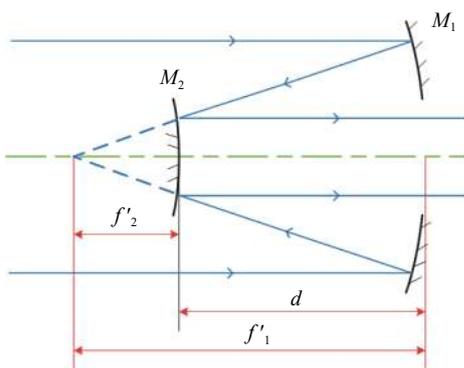


图 2 同轴两镜无焦系统示意图

Fig. 2 Schematic of coaxial two-mirror afocal system

光学系统的单色像差一共有 5 种: 球差、彗差、像散、场曲及畸变, 根据三级像差理论, 其系数分别为 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 及 S_5 , 表达式为^[14]

$$\begin{cases} S_1 = \sum hP + \sum h^4 K \\ S_2 = \sum yP + J \sum W + \sum h^3 y K \\ S_3 = \sum \frac{y^2}{h} P + 2J \sum \frac{y}{h} W + J^2 \sum \phi + \sum h^2 y^2 K \\ S_4 = \sum \frac{\Pi}{h} \\ S_5 = \sum \frac{y^3}{h^2} P - 3J \sum \frac{y^2}{h^2} W + J^2 \sum \frac{y}{h} \left(3\phi + \frac{\Pi}{h} \right) \\ \quad - J^3 \sum \frac{1}{h^2} \Delta \left(\frac{1}{n^2} \right) + \sum h y^3 K \end{cases} \quad (2)$$

式中,

$$\begin{cases} P = \left(\frac{u' - u}{1/n' - 1/n} \right)^2 \left(\frac{u'}{n'} - \frac{u}{n} \right) \\ W = \left(\frac{u' - u}{1/n' - 1/n} \right) \left(\frac{u'}{n'} - \frac{u}{n} \right) \\ \Pi = \frac{n'u' - nu}{nn'} \\ \phi = \frac{1}{h} \left(\frac{u'}{n'} - \frac{u}{n} \right) \\ K = -\frac{e^2}{R^3} (n' - n) \end{cases} \quad (3)$$

将无焦系统的参数代入到式(3)中, 可以得到

$$\begin{cases} P_1 = -\frac{u_1^3}{4}, P_2 = \frac{u_2^3}{4} = \frac{u_1^3}{4} \\ W_1 = \frac{u_1^2}{2}, W_2 = -\frac{u_2^2}{2} = -\frac{u_1^2}{2} \\ \Pi_1 = u_1', \Pi_2 = -u_2 = -u_1' \\ \phi_1 = -\frac{u_1'}{h_1}, \phi_2 = \frac{u_2}{h_2} = \frac{u_1'}{h_2} \\ K_1 = \frac{2e_1^2}{R_1^3}, K_2 = -\frac{2e_2^2}{R_2^3} \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)的参数求解结果代入式(2)像差系数 $S_1 \sim S_5$ 的表达式中, 可以得到式(5)的求解结果

$$\begin{cases} S_1 = -\frac{2h_1^4}{R_1^3} \left(1 - \frac{1}{\Gamma} - e_1^2 + \frac{1}{\Gamma} e_2^2 \right) \\ S_2 = \frac{2h_1^3}{R_1^3} (y_1 e_1^2 - y_2 e_2^2 - y_1 + y_2) \\ S_3 = -\frac{2h_1^2}{R_1} (y_1^2 e_1^2 - \Gamma y_2^2 e_2^2 - y_1^2 + \Gamma y_2^2) \\ S_4 = \frac{2}{R_1} (1 - \Gamma) \\ S_5 = -\frac{2h_1}{R_1^3} (y_1^3 e_1^2 - \Gamma^2 y_2^3 e_2^2 - y_1^3 + \Gamma^2 y_2^3) \end{cases} \quad (5)$$

对式(5)的求解结果进行分析, 可以得出以下结论:

(1) 当且仅当 $e_1^2 = e_2^2 = 1$ 时, $S_1 = S_2 = S_3 = S_5 = 0$, 即当主镜和次镜均为抛物面时, 系统可以同时消除球差、彗差、像散以及畸变这 4 种像差, 但系统存在一定量的场曲。

(2) 假设场曲系数 $S_4 = 0$, 此时系统的放大倍率 $\Gamma = 1$, 这种系统不符合实际情况

(3) 若 $\Gamma > 1$, 系统为无卡塞格林系统; 若 $\Gamma < -1$, 系统为无焦格里高利系统; 若 $|\Gamma| \leq 1$, 无实际意义。

(4) 场曲系数 S_4 和主镜的顶点曲率半径 R_1 、系统放大倍率 Γ ($|\Gamma| > 1$) 有关。对同一主镜, 当放大倍率 $\Gamma < -1$ 时 (即无焦格里高利系统), $|\Gamma|$ 越大, 场曲系数 $|S_4|$ 越大; 当 $\Gamma > 1$ 时 (即无焦卡塞格林系统), $|\Gamma|$ 越大, 场曲系数 $|S_4|$ 越大; 对同一放大倍率 $|\Gamma|$, 主镜的顶点曲率半径 $|R_1|$ 越大, 场曲系数 $|S_4|$ 越小。

3 光学系统设计

3.1 设计要求

光学系统的设计指标要求如下: (1) 有效通光口径: $D = 100 \text{ mm}$; (2) 系统的放大倍率: $\Gamma = 5\times$; (3) 适用波段: $500 \sim 1100 \text{ nm}$; (4) 全视场角: 0.6° ; (5) 全视场波像差: $RMS \leq \lambda/14$; (6) 全视场斯托列尔比: $SR > 0.8$

3.2 初始结构参数计算

3.2.1 同轴结构参数计算

首先, 根据高斯光学计算同轴系统的结构参

数, 比较关键的是确定主镜的相对口径。主镜相对口径的选取要考虑多方面因素: 主镜的相对口径越大, 镜筒的长度越短, 可以减小光学系统的体积, 但是主镜相对口径越大, 加工难度就会增加, 加工难度和相对口径的立方成正比, 因此经常取 1/3, 现在很少用 1/4, 大望远系统越来越多的采用 1/2^[19]。这里选择主镜的相对口径为 1/3, 则有主镜焦距 $f_1 = 3D$, 主镜的顶点半径 $R_1 = 2f_1$, 次镜焦距 $f_2 = f_1/\Gamma$, 次镜的顶点半径为 $R_2 = 2f_2$, 两镜间距 $d = f_1 - f_2$ 。由 2.3 节对消像差公式求解结果的分析可知, 主次镜的面形参数取 $e_1^2 = e_2^2 = 1$, 则在光学设计软件 ZEMAX 中有二次曲面系数 $k_1 = -e_1^2 = -1, k_2 = -e_2^2 = -1$ 。

3.2.2 离轴量计算

光阑在主镜前方 300 mm 处, 采用光阑离轴的方式, 离轴时一方面要实现无遮挡, 另一方面还要留出装配时机械结构余量。图 3 为该系统的离轴量示意图。图中 p 为避免机械结构干扰光路所留余量, 工程上一般取为 15~20 mm, b 为主镜的离轴量, D_1 为主镜口径, D_2 为次镜口径, 则有

$$b > b/5 + D_2/2 + D_1/2 + p. \quad (6)$$

若取 $p=16$ mm, 则 $b > 95$ mm, 所以可取主镜离轴量 $b=100$ mm, 次镜离轴量为 20 mm。

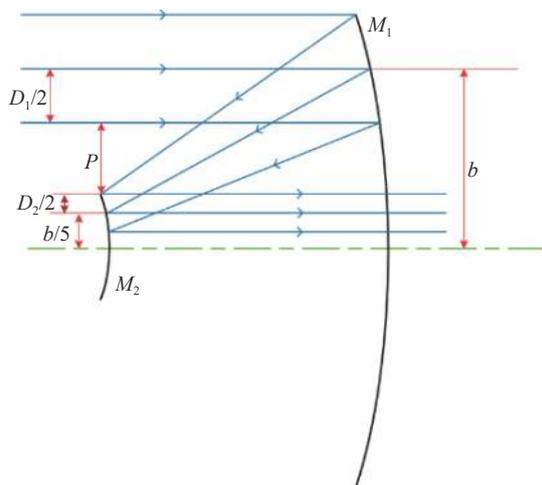


图 3 离轴量示意图

Fig. 3 Schematic of off-axis distance

3.3 优化设计

大多数光学系统都是旋转对称的, 在设计时一般只考虑 0、0.7、1 三个采样视场, 再由旋转对

称性就可以知道全视场的成像质量。而自由曲面离轴光学系统失去了旋转对称性, 只对三个视场采样显然是不够的, 需要更多的视场点^[20]。

对该系统优化前设置视场采样点的个数为 65 个, 如图 4 所示, 各个方向的视场范围均为 $[-0.3^\circ, 0.3^\circ]$, 视场采样点较密, 设计结果更为精确。离轴两反无焦光学系统结构如图 5 所示, 主镜为凹抛物面的一部分, 次镜为 5 次 XY 多项式表征的自由曲面。次镜自由曲面参数如表 1 所示。

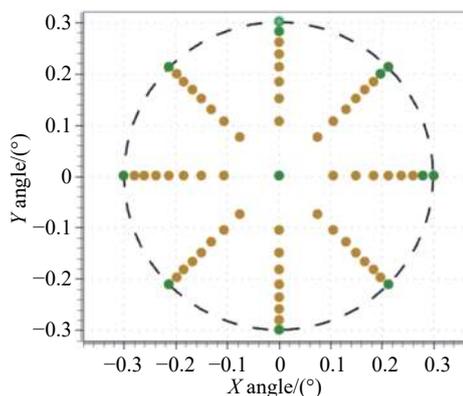


图 4 视场采样图

Fig. 4 Field sampling map

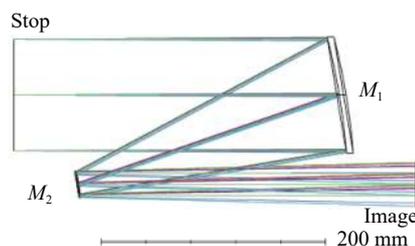


图 5 光学系统结构图

Fig. 5 Layout of the optical system

基于表 1 的自由曲面参数及公式(1), 利用 MATLAB 仿真得到次镜的自由曲面面形, 面形的二维和三维仿真结果如图 6(彩图见期刊电子版)所示。

自由曲面的加工与检测技术是限制其应用的关键因素, 目前对自由曲面进行检测仍采用非球面检测方法, 其中计算全息法(Computer-Generated Hologram, CGH)被广泛应用于自由曲面面形测量^[21]。CGH 适用于面形梯度变化比较小的自由曲面光学元件, 对于面形梯度变化非常大的自由曲面, 加工难度较高, 误差较大, CGH 检测精度下降。

表 1 次镜自由曲面参数

Tab. 1 Polynomial parameters of freeform surface for secondary mirror

Item	Coefficient A_i	Item	Coefficient A_i
X^0Y^0	0	X^3Y^1	0
X^0Y^1	$6.735\ 780 \times 10^{-5}$	X^2Y^2	$6.216\ 308 \times 10^{-9}$
X^2Y^0	0	X^1Y^3	0
X^1Y^1	0	X^0Y^4	$1.616\ 430 \times 10^{-9}$
X^0Y^2	0	X^5Y^0	0
X^3Y^0	0	X^4Y^1	$-2.079\ 343 \times 10^{-11}$
X^2Y^1	$-1.055\ 768 \times 10^{-7}$	X^3Y^2	0
X^1Y^2	0	X^2Y^3	$-1.129\ 752 \times 10^{-10}$
X^0Y^3	$-4.533\ 126 \times 10^{-8}$	X^1Y^4	0
X^4Y^0	$5.532\ 042 \times 10^{-11}$	X^0Y^5	$-1.957\ 926 \times 10^{-11}$

自由曲面的梯度即自由曲面面形与最佳比较球面偏离量的切线斜率值^[22]。从图 6 的面形图中可以看出,次镜面形变化相对平缓,没有局部突变。由于该面形沿 Y 轴方向变化相对明显,对自由曲面沿 Y 轴这一特征方向的偏离量每隔 0.01 mm 采样,用 MATLAB 计算得到次镜的面形梯度如图 7 所示。次镜的最大面形梯度为 2.6 μm ,边缘处面形梯度变化相对较慢,没有局部突起。另外,计算了自由曲面与最佳拟合球面的偏离量,根据设计值首先利用最小二乘法^[23-24]得到该自由曲面的最佳拟合球面,然后计算该自由曲面的矢高和最佳拟合球面的矢高之差得到各点的偏离量,结果显示:自由曲面与最佳拟合球面的最大偏离量为 7.7 μm ,能够进行加工与检测。

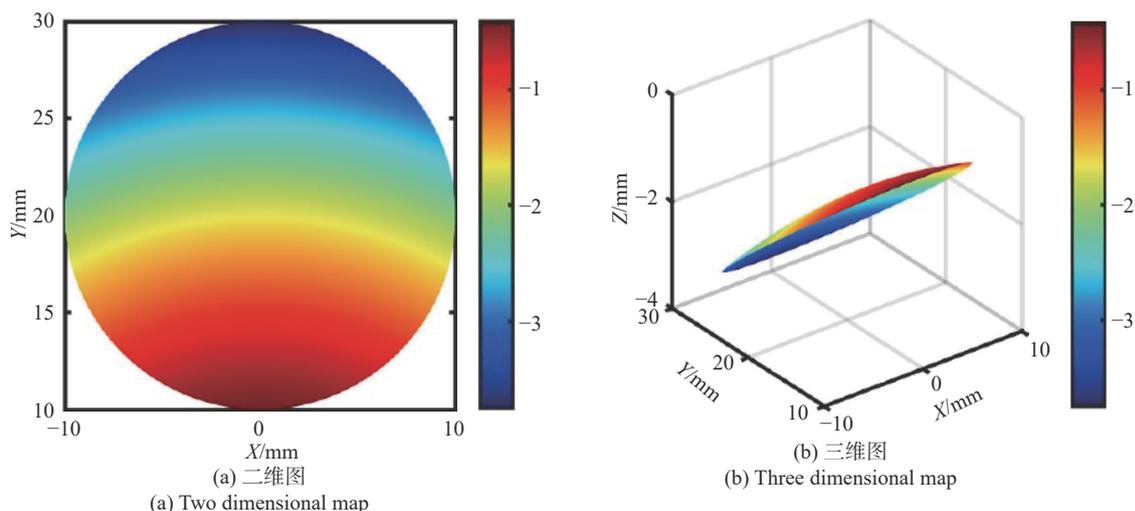


图 6 次镜 XY 自由曲面的二维和三维面形图

Fig. 6 2-D and 3-D profiles of XY freeform surface for secondary mirror

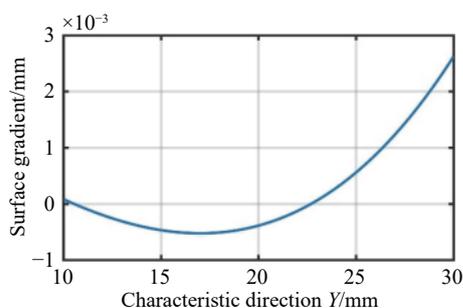


图 7 次镜的面形梯度

Fig. 7 Surface gradient of secondary mirror

3.4 像质评价

该类无焦系统的像质评价与聚焦系统不同,

主要采用波像差和斯托列尔比来分析,MTF 曲线和点列图可以作为辅助评价方法,应尽量保证点列图为圆形,使光学系统能量比较集中、分布均匀,MTF 接近衍射极限。像质评价结果如图 8~11 所示。图 8(a)和图 9(a)分别为自由曲面光学系统全视场的波像差和斯托列尔比,可以看出全视场的波像差优于 $\lambda/14$ ($\lambda=500\text{ nm}$),斯托列尔比大于 0.8,满足设计要求,并且从图 10(a)和图 11(a)所示点列图和 MTF 曲线可以看出,点列图基本为圆形,较均匀,能量比较集中,MTF 十分接近衍射极限。

考虑到加工检测的问题,最初也采用离轴高次非球面对该系统进行设计,非球面光学系统的

波像差和点列图分别如图 8(c) 和图 10(c) 所示, 部分视场的波像差不满足小于 $\lambda/14$ ($\lambda=500\text{ nm}$) 的要求, 并且点列图变形较严重, 光学系统能量分布不均匀, 而对于自由曲面光学系统, 不仅全视场的波像差满足要求, 且点列图十分接近圆形, 能量分布比较均匀、集中。另外, 现在自由曲面加工与

检测技术已经比较成熟, 自由曲面和离轴高次非球面的加工方法相同, 如果都用 CGH 检测方法, 难度相当, 没有本质区别。加工组分析发现, 该系统中的自由曲面和离轴高次非球面加工难度相当。权衡加工条件与光学性能之间的利弊, 最终还是选择了成像质量较好的自由曲面来进行设计。

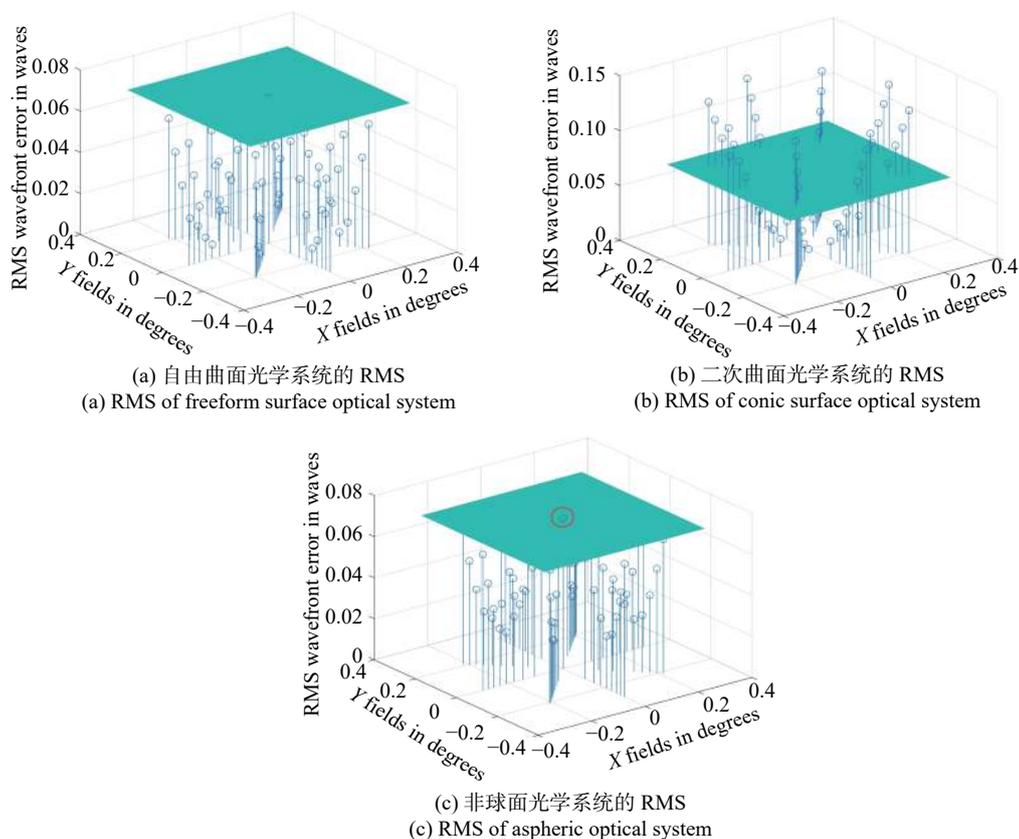


图 8 光学系统的 RMS 波像差

Fig. 8 RMS wavefront errors of different optical systems

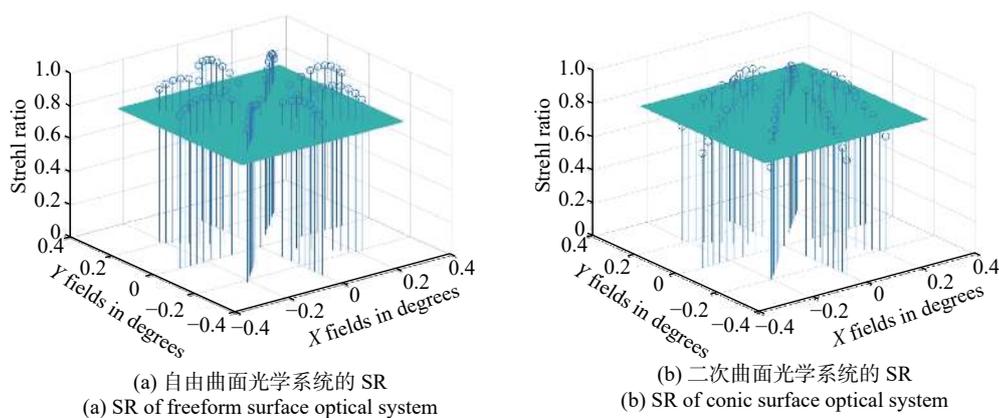
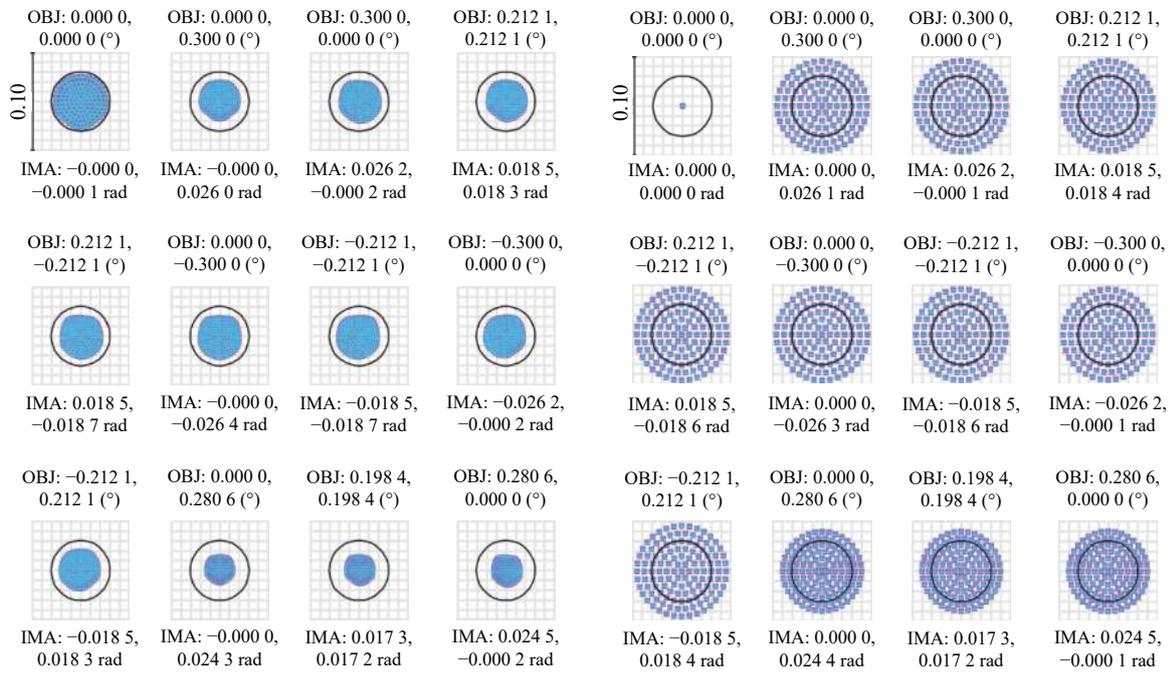


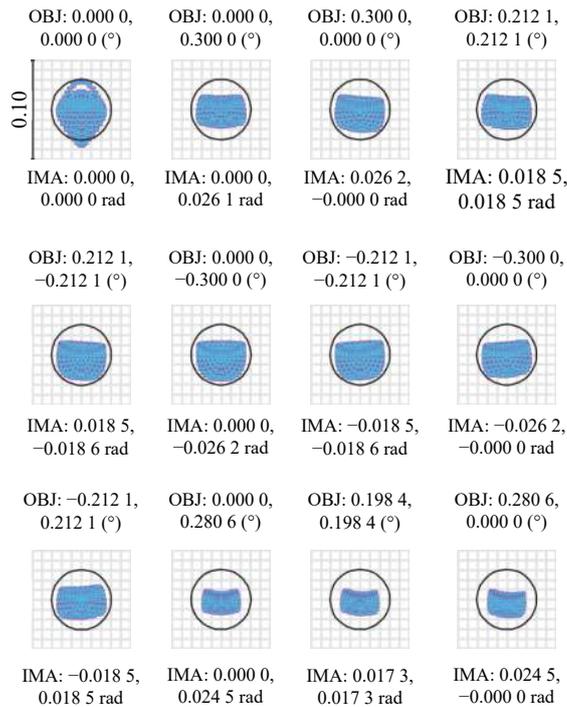
图 9 光学系统的斯托列尔比(SR)

Fig. 9 Strehl Ratios (SR) of different optical systems



(a) 自由曲面光学系统的点列图
(a) Spot diagram of freeform surface optical system

(b) 二次曲面光学系统的点列图
(b) Spot diagram of conic surface optical system



(c) 非球面光学系统的点列图
(c) Spot diagram of aspheric optical system

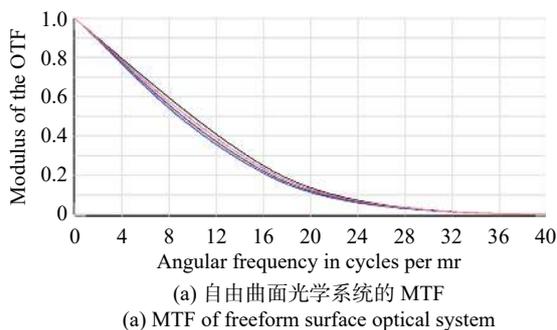
图 10 光学系统点列图

Fig. 10 Spot diagrams of different optical systems

由于现有系统多为二次曲面系统,因此对该系统采用传统的二次曲面进行设计,图 8(b)和图 9(b)分别为传统二次曲面光学系统全视场的

波像差和斯托列尔比。可以看出,当半视场小于 0.22° 时,光学系统对应的波像差小于 $\lambda/14$ ($\lambda=500\text{ nm}$),斯托列尔比大于 0.8,像质较好。当半视

场从 0.22° 增大至 0.3° 时, 系统的波像差将大于 $\lambda/14$ ($\lambda=500\text{ nm}$), 斯托列尔比将小于 0.8, 在边缘视场 ($0^\circ, -0.3^\circ$) 波像差最大, 为 0.131λ ($\lambda=500\text{ nm}$), 斯托列尔比最小, 为 0.686, 不满足设计要求, 并且



从图 10(b) 和图 11(b) 所示点列图和 MTF 曲线可以看出, 像质很差。综上, 相比于传统的二次曲面, 自由曲面可以很好地校正轴外非对称像差, 在增大视场、提高像质方面具有很大优势。

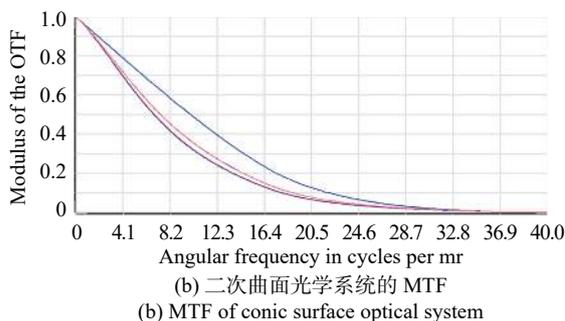


图 11 不同光学系统的 MTF

Fig. 11 MTFs of different optical systems

4 结 论

本文提出了基于离轴自由曲面的大视场两镜无焦光学天线的设计形式, 基于高斯光学和三级像差理论, 推导了两镜无焦系统的消像差公式, 并对求解结果进行了分析总结。根据消像差的求解结果及光学系统的设计要求, 对光学系统进行了设计、优化, 光学系统有效通光口径为 100 mm, 放大倍率为 5 倍, 波段为 500~1 100 nm, 主镜为凹抛物面的一部分, 次镜采用 XY 多项式表征的自由曲面, 全视场角可以达到 0.6° , 次镜自由曲面面形相对连续光滑, 面形梯度较小, 适合检测和加工。设计结果表明, 所设计光学系统的全视场波像差优于 $\lambda/14$ ($\lambda=500\text{ nm}$), 全视场的斯托列尔比大于 0.8, 系统能量集中度较高, 像质接近衍射极限。用 MATLAB 对次镜自由曲面面形进行仿

真, 仿真结果显示面形相对连续光滑, 梯度较小, 适合检测、加工。将本文设计结果与传统二次曲面光学系统设计结果进行对比发现: 自由曲面光学系统在 0.6° 全视场内, 波像差和斯托列尔比都满足设计要求, 像质接近衍射极限; 而传统二次曲面光学系统只有在全视场小于 0.44° 时才满足设计要求, 视场增大后, 像质下降得很明显, 说明自由曲面在增大视场、提高像质方面具有很大优势。另外, 该光学天线为无焦结构, 无需再使用准直透镜元件, 可以直接添加快速反射镜、分光镜等后续光路, 从而极大地简化了系统结构, 克服了传统聚焦光学天线体积过大、大功率光源下焦点处功率密度过高等问题。光学视场相对于传统的二次曲面光学系统提高了 26.7%。研究结果说明这种天线结构在激光通信领域具有较强的实用性和很好的发展前景。

参考文献:

- [1] 姜会林, 佟首峰, 张立中, 等. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
JIANG H L, TONG SH F, ZHANG L ZH, *et al.*. *The Technologies and Systems of Space Laser Communication* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [2] 金光, 李艳杰, 钟兴, 等. 空间成像与激光通信共口径光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2067-2074.
JIN G, LI Y J, ZHONG X, *et al.*. Design of co-aperture optical system for space imaging and laser communication[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2067-2074. (in Chinese)
- [3] 肖海桥, 张量, 汤俊雄. 卫星光通信链路新型宽视场角捕捉方案探讨[J]. *电子学报*, 1999, 27(8): 56-59.
XIAO H Q, ZHANG L, TANG J X. A new wide field-of-view acquisition approach in inter-satellite laser link

- establishing[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 27(8): 56-59. (in Chinese)
- [4] JURANEK H J, SAND R, SCHWEIZER J, *et al.*. Off-axis telescopes: the future generation of earth observation telescopes[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3439: 104-115.
- [5] 王蕴琦, 刘伟奇, 付瀚毅, 等. 离轴式共口径激光通信光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 010602. WANG Y Q, LIU W Q, FU H Y, *et al.*. Design of laser communication optical system with off-axis common aperture[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 010602. (in Chinese)
- [6] 孙权社, 赵发财, 陈坤峰, 等. 空间激光通信系统离轴天线设计研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2501-2505. SUN Q SH, ZHAO F C, CHEN K F, *et al.*. Design of off-axis optical antenna for space optical communications[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2501-2505. (in Chinese)
- [7] 王伟. 自由曲面离轴反射式光学系统设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2016. WANG W. Design of off-axis reflective optical system with freeform surface[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2016. (in Chinese)
- [8] GAUTAM S, GUPTA A, SINGH G S. Optical design of off-axis Cassegrain telescope using freeform surface at the secondary mirror[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(2): 025113.
- [9] 关妹, 王超, 佟首峰, 等. 空间激光通信离轴两镜反射望远镜自由曲面光学天线设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(12): 01222003. GUAN SH, WANG CH, TONG SH F, *et al.*. Optical antenna design of off-axis two-mirror reflective telescope with freeform surface for space laser communication[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 01222003. (in Chinese)
- [10] 田永明, 王永志, 姜义君, 等. 星间激光通信信标跟踪无焦光学系统设计[J]. 制导与引信, 2016, 37(4): 54-57. TIAN Y M, WANG Y ZH, JIANG Y J, *et al.*. The design of afocal optical system of beacon tracking system in inter-satellite laser communication[J]. *Guidance & Fuze*, 2016, 37(4): 54-57. (in Chinese)
- [11] 王红亚. 大气激光通信系统及其主要部件的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005. WANG H Y. Research on free space optical communication system and its major components[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese)
- [12] 武越. 离轴反射式扩束系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2016. WU Y. Research of off-axis reflection beam expander[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [13] 王灵杰, 张新, 张建萍, 等. 自由曲面空间光学系统设计研究[J]. 应用光学, 2012, 33(6): 1040-1046. WANG L J, ZHANG X, ZHANG J P, *et al.*. Free-form surface space optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(6): 1040-1046. (in Chinese)
- [14] 朱钧, 吴晓飞, 侯威, 等. 自由曲面在离轴反射式空间光学成像系统中的应用[J]. 航天返回与遥感, 2016, 37(3): 1-8. ZHU J, WU X F, HOU W, *et al.*. Application of freeform surfaces in designing off-axis reflective space optical imaging systems[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, 37(3): 1-8. (in Chinese)
- [15] YE J F, CHEN L, LI X H, *et al.*. Review of optical freeform surface representation technique and its application[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(11): 110901.
- [16] 薛栋林, 郑立功, 张峰, 等. 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. XUE D L, ZHENG L G, ZHANG F, *et al.*. Off-axis three-mirror system based on freeform mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(12): 2813-2820. (in Chinese)
- [17] 倪栋伟, 李旭阳, 杨明洋, 等. 基于自由曲面的大视场天基探测光学系统[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1122003. NI D W, LI X Y, YANG M Y, *et al.*. Large field of view space-based optical detection system based on freeform surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1122003. (in Chinese)
- [18] 刘秀梅, 李红光. 离轴非球面无光焦度系统的设计[J]. 红外, 2010, 31(7): 14-17. LIU X M, LI H G. Design of off-axis aspheric non-power system[J]. *Infrared*, 2010, 31(7): 14-17. (in Chinese)
- [19] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004. PAN J H. The Design, *Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces*[M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2010. (in Chinese)

- [20] 王涌天. 自由曲面光学系统设计及其应用[J]. 光学与光电技术, 2012, 10(3): 13-16.
WANG Y T. Design and application of free-curved surface optical system[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2012, 10(3): 13-16. (in Chinese)
- [21] 张磊, 刘东, 师途, 等. 光学自由曲面面形检测技术[J]. 中国光学, 2017, 10(3): 283-299.
ZHANG L, LIU D, SHI T, *et al.*. Optical free-form surfaces testing technologies[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 283-299. (in Chinese)
- [22] 李旭阳, 倪栋伟, 杨明洋, 等. 基于自由曲面的大视场空间相机光学系统设计[J]. 光子学报, 2018, 47(9): 922003.
LI X Y, NI D W, YANG M Y, *et al.*. Design of large field of view space camera optical system based on freeform surfaces[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(9): 922003. (in Chinese)
- [23] 王权陡, 余景池, 张学军, 等. 离轴非球面最接近球面半径及非球面度的求解[J]. 光电工程, 2000, 27(3): 16-19.
WANG Q D, YU J CH, ZHANG X J, *et al.*. Solution for best fitting spherical curvature radius and asphericity of off-axis aspherics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2000, 27(3): 16-19. (in Chinese)
- [24] 杜玉军, 任海霞, 刘中本. 光学非球面元件非球面度计算方法[J]. 应用光学, 2002, 23(5): 42-45.
DU Y J, REN H X, LIU ZH B. The method of calculation to asphericity of optical aspheric surface component[J]. *Journal of Applied Optics*, 2002, 23(5): 42-45. (in Chinese)

作者简介:



谷茜茜(1993—),女,河北石家庄人,硕士研究生,2017年于长春理工大学获得学士学位,主要从事激光通信光学系统设计方面的研究。E-mail: gu_xi_xi@126.com



亓波(1978—),男,山东莱芜人,博士,研究员,博士生导师,主要从事光学工程,光学精密机械等方面的研究。E-mail: qibo@ioe.ac.cn