

易于多面共体加工的自由曲面离轴三反系统设计

周丽军^{1,2}, 杨通^{1,2*}, 高丽娜^{1,2}, 程德文^{1,2}, 王涌天^{1,2}¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;²北京市混合现实与新型显示工程技术研究中心, 北京 100081

摘要 将自由曲面离轴反射系统的曲面加工在同一个基底上实现了多面共体制造,可以有效降低装调难度,进而提升系统的稳定性。提出了一种有柱形轮廓的多面共体自由曲面离轴三反成像系统的设计方法,基于共焦离轴二次曲面实时生成满足离轴共体系统结构和初阶参数要求的初始结构。提出了一种基于曲面采样点位置约束的自由曲面优化方法来控制系统整体外轮廓的形状与大小,使系统的曲面易于实现共体加工。基于光线追迹信息控制系统的焦距,并抑制光线遮拦和光瞳像差。采用 Q2D 多项式自由曲面进行系统优化,降低曲面检测难度。最终设计了一款高像质、低畸变、易于共体加工的自由曲面离轴三反热成像系统,并根据自由曲面面形特点对该系统进行了公差分析。

关键词 光学设计; 应用光学; 自由曲面; 多面共体; 离轴三反系统; 初始结构

中图分类号 O435 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221895

1 引言

反射式成像系统具有无色差、轻量化和高透过率等优点。如果光学系统被应用为空间载荷,光学玻璃在较强宇宙射线辐射下可能改变颜色,导致透过率降低。然而,反射系统不存在此问题。传统共轴反射系统因中心遮拦导致入射能量受到限制并影响分辨率,可以通过将系统离轴化来实现消遮拦。在离轴的过程中,反射镜面的偏心倾斜会使系统引入一些有特殊视场依赖特性的非传统像差,这些像差很难被传统旋转对称球面或非球面校正^[1-2]。在光学设计过程中,非旋转对称的自由曲面可以提供足够的自由度。同时,自由曲面给系统引入的像差的形式与元件离轴倾斜引入的像差的形式完全对应^[3-4]。因此,自由曲面特别适合于离轴反射系统的设计,并被用于各类光学系统中,如望远镜^[5]、遥感照相机^[6]、成像光谱仪^[7]、头戴显示器^[8-9]和光刻物镜^[10]。

自由曲面反射系统的发展依赖于先进的设计,以及加工检测和装调技术的发展。自由曲面离轴反射系统装调过程中存在缺乏基准导致装调难度极高的问题。为了解决此问题,研究者们从光学设计的角度提出了一系列方法。Liu 等^[11]提出了基于逐点设计框架的低装调灵敏度自由曲面反射式系统设计方法。Meng 等^[12]针对离轴三反消像散,提出了一种调整-优

化-评价(AOE)设计方法,降低了系统的装调灵敏度。Qin 等^[13]通过分析光程差的变动与反射镜倾斜量的关系,建立了倾斜灵敏度评价函数,降低了离轴反射系统中元件的倾斜灵敏度。另外一种设计思路是将系统中的多个曲面加工在一个基底上,降低系统中分立元件的个数,从而大幅降低系统的装调自由度^[5, 14-16]。随着自由曲面加工技术的不断进步,将系统中的更多元件加工在相同的基底上成为了可能。Li 等^[17]提出了一种离轴多反系统的一体化加工方法,采用回转切削的思路,可以实现系统中多个表面的一体化成型,并且特别适用于有类似柱形轮廓的系统结构。该研究组采用此方法成功加工出了自由曲面离轴多反系统样机,并实现了优良的像质。虽然采用此种一体制造思路得到的系统的加工难度有所提升(体现在刀具姿态调控、成形机理和基准建立等方面),但是除探测器之外,系统无需进一步装配。此类多面共体自由曲面系统解决了分体自由曲面反射镜系统结构复杂、装调难和稳定性差等问题。然而,目前的自由曲面系统设计大多关注于系统的优化、像质平衡和消遮拦,并不能很好地满足共体加工要求,故亟需有相关的设计方法来指导实现多面共体自由曲面反射系统设计。

本文提出了一种有柱形轮廓、易于实现共体加工的自由曲面离轴三反成像系统的设计方法。详细介绍了共体自由曲面系统的整个优化设计过程与约束条件

收稿日期: 2022-10-31; 修回日期: 2022-11-18; 录用日期: 2022-11-25; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0701200)、国家自然科学基金(62275019)、中国科协青年人才托举工程项目(2019QN-RC001)

通信作者: *yangtong@bit.edu.cn

建立方式,并完成了红外热成像系统实例设计。利用离轴二次曲面的数学性质进行共焦系统设计,实现了符合基本共体结构要求和系统参数要求,以及带有中间像面的良好初始结构的直接生成。提出并采用了一种基于曲面采样点位置约束的自由曲面优化方法,控制系统的整体外轮廓的形状与大小,使系统的曲面易于实现共体加工。系统工作中波红外波段,需要使用制冷探测器,故要求系统有实出瞳并且要实现与冷光阑的匹配。针对带有实出瞳的系统设计,提出了控制光瞳像差的优化策略,有效控制了光瞳变形,保证了系统各视场入射光能的大小与均匀程度。为了降低自由曲面的检测难度,采用 Q2D 多项式自由曲面完成系统设计,有效降低了自由曲面相对基底二次曲面的矢高偏离。设计得到的系统具有优良的像质与较小的畸变。基于自由曲面的实际面形误差特性完成了系统的公差分析。所提方法可以有效指导多面共体自由曲面系统的设计,也可以被推广到更一般的自由曲面离轴非对称系统的研制中。

2 系统设计

2.1 设计指标

设计了一款易于实现曲面共体加工、有近似柱形轮廓的自由曲面离轴三反系统。系统参数如表 1 所示。系统具有矩形视场,工作中波红外波段。为了有效减少杂散光、降低来自视场以外的背景辐射,从而提高信噪比,需要使用制冷探测器与冷光阑,这就需要系统具有实出瞳,位于像面前一定距离处,且与冷光阑匹配(位置和大小与冷光阑一致)。此类系统一般包含一个中间像面。制冷探测器包括探测器阵列(像面)、冷光阑、滤光片和窗口等部件,各个面相互平行。中心视场主光线与像面垂直。

表 1 系统参数
Table 1 System parameters

Parameter	Value
Field of view / ($^{\circ}$) \times ($^{\circ}$)	1.6×1.6
Wavelength / μm	3-5
Focal length / mm	240
F-number of cooled detector	3

2.2 设计方法

设计柱形轮廓离轴三反系统主要包括两个步骤。首先,获取一个带有中间像面的柱形轮廓初始结构。初始结构的基本参数(焦距、视场角和 F 数等)需要和设计参数基本吻合,而对像质、实出瞳大小和实出瞳位置不进行严格要求。然后,在初始结构的基础上,开展进一步优化。优化过程中加入控制出瞳大小与位置、降低光瞳像差等约束条件。为了实现共体自由曲面系统加工,一方面需要降低刀具沿着加工路径垂直方向(曲面矢高方向)的移动量从而提高加工效率与精度,

另一方面需要尽可能将系统的曲面位置约束成一个柱面轮廓并尽量减小系统体积。与此同时,可以升级曲面类型为复杂的自由曲面,这样可以添加更多的自由度。最终可以得到像质良好的自由曲面成像系统。

初始结构的获取可以通过很多种方法实现。首先,可以利用近轴光学理论和初级像差理论^[14],在给定系统焦距与镜面间距后计算各个曲面的曲率,搭建球面同轴三反系统,如图 1(a)所示。然后,在此结构基础上,通过改变各个镜面的位置与倾斜角度使系统离轴化,如图 1(b)和图 1(c)所示,使各个镜子分布在期望的空间位置,并消除光线遮拦。同时,在离轴消遮拦的过程中,约束系统的焦距保持不变。最终得到的离轴消遮拦柱形轮廓系统初始结构如图 1(d)所示。此种方法比较符合光学设计的一般思路,但整个离轴消遮拦的过程是比较复杂的,并且相当依赖于设计者的经验和软件使用技巧。

为降低系统设计过程对设计经验的要求,采用基于离轴二次曲面共焦点的设计思路直接构建满足要求的系统结构。二次曲面中的椭球面和双曲面作为反射面均能将有限距离的物点理想成像在有限距离处。抛物面能够将无限远的物点理想成像在有限距离处。根据实际情况的不同,以上像点可能是实像,也可能是虚像。在建立初始结构时,可以利用二次曲面反射镜的上述性质使系统中的二次曲面满足顺次共焦点条件,即按照光路方向将每一个二次曲面的两个焦点分为物方焦点和像方焦点,且每一个光学面的像方焦点与下一个面的物方焦点重合。当中心视场的物点处于第一个二次曲面的物方焦点时,它会依次成像在各个光学面的像方焦点上,最后一个光学面的像方焦点就是整个系统对于中心视场的像点位置,这样便可以实现中心视场的理想成像。该系统完全校正了视场恒量像差,仅存在随着视场变化的像差。此系统可以作为供后续优化使用的良好初始结构。如图 2 所示,对于本设计,系统的物面位于无限远处,故系统的主镜(M1)应选用抛物面。此外,可以假设系统主镜的像方焦点是一个实焦点 F_1 ,且系统的中间像点 F_2 位于次镜(M2)与三镜(M3)之间。此时,系统次镜的物方焦点和像方焦点分别为主镜的像方焦点和系统的中间像点,而三镜的物方焦点和像方焦点分别为系统的中间像点和最终的像点 F_3 。系统的主镜、次镜和三镜分别为抛物面、双曲面和椭球面。对于离轴系统,光束的实际使用区域一般是二次曲面的离轴孔径区域,而非中心区域。图 2 中的 H_1 、 H_2 和 H_3 分别表示主镜、次镜和三镜的曲面顶点(局部坐标系原点,与二次曲面的原始顶点不同)。

采用离轴二次曲面构建的系统的焦距应满足设计要求。可以用近轴焦距表示系统整体焦距^[18],可以表示为第一片反射镜的像距(焦距)与后续各个光学面的垂轴放大率的乘积,即

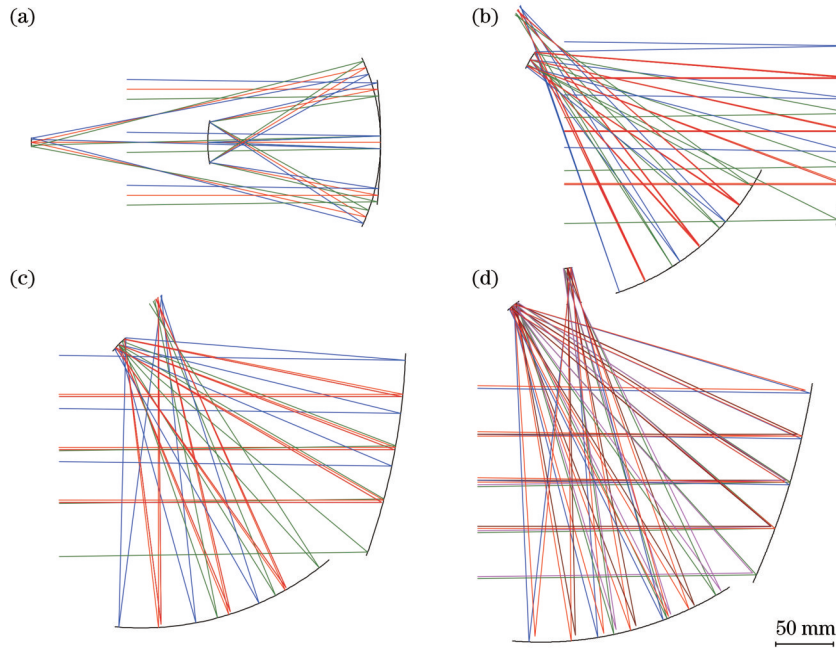


图 1 获得消遮拦离轴初始结构的设计过程。(a)球面同轴结构;(b)(c)通过曲面倾斜偏移消除遮拦的过程;(d)消遮拦离轴初始结构
Fig. 1 Design process of unobscured off-axis initial structure. (a) Spherical coaxial structure. (b)(c) process of eliminating obscuration by surface tilt deviation; (d) unobscured off-axis initial structure

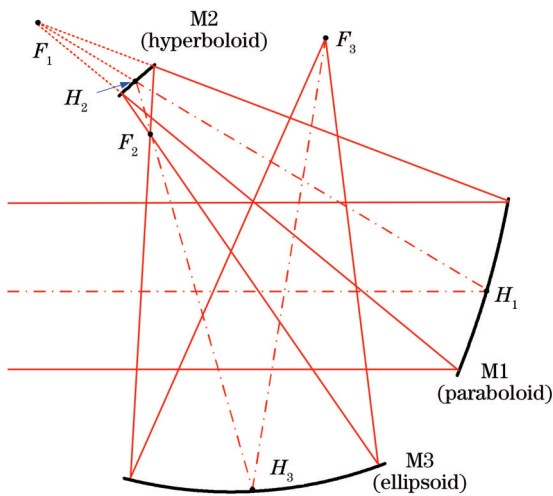


图 2 基于共焦二次曲面实现单个视场点到点理想成像的系统
Fig. 2 System for ideal point-to-point imaging in single field of view based on confocal quadric surface

$$f_{total} = l_{11} \beta_2 \beta_3, \quad (1)$$

式中: l_{11} 为无穷远光线经过主镜后的像距(曲面顶点 H_1 与 F_1 之间的距离); β_2 和 β_3 为次镜和三镜的垂轴放大率,具体可以表示为

$$\beta_2 = \frac{l_{12}}{l_{o2}} = \frac{l_{i2}}{l_{11} - d_1}, \quad (2)$$

$$\beta_3 = \frac{l_{13}}{l_{o3}}, \quad (3)$$

式中: d_1 为主镜与次镜之间的距离(曲面顶点 H_1 与 H_2 之间的距离,曲面顶点即离轴二次曲面局部坐标系的

原点,也是该结构下中心视场主光线与曲面的交点); l_{o2} 为第 2 个反射面的物距(曲面顶点到物方焦点的距离,即 H_2 和 F_1 之间的距离); l_{o3} 为第 3 个反射面的物距(H_3 和 F_2 之间的距离); l_{i2} 为第 2 个反射面的像距(曲面顶点到像方焦点的距离,即 H_2 与 F_2 之间的距离); l_{i3} 为第 3 个反射面的像距(H_3 与 F_3 之间的距离)。

对于此设计,可以根据共体柱形轮廓系统的设计要求,在给定各个离轴二次曲面反射镜的顶点、最终像点的空间位置坐标和系统焦距 f_{total} 后,求解每个镜子的物距与像距。对于三反系统,为了得到物距与像距的唯一解,除了已知的 M1 的物距和 M3 的像距之外,应再给定一个物距或像距的值。例如,在给定中间像面到 M3 顶点的距离 l_{o3} 后,可以根据式(1)~(3)推导得到 l_{11} ,即

$$l_{11} = \frac{f_{total} \cdot l_{o3} \cdot d_1}{f_{total} \cdot l_{o3} - l_{i3} \cdot l_{i2}}, \quad (4)$$

此时即得到每个镜子的物距与像距。也可以给定 l_{11} ,计算得到中间像面的位置,进而得到每个镜子的物距与像距。在此基础上可以通过公式计算出曲面的倾斜角、曲率、二次曲面系数和离轴角^[19]。此时系统的光路结构与二次曲面的参数便都已确定。通过编写程序可以实现给定输入后,面形与结构参数的快速计算输出。图 3 为得到的基于离轴二次曲面的离轴三反系统结构(孔径光阑暂时位于次镜处)。该系统对于中心视场可以理想成像(消除了视场恒量像差),且系统焦距为 240 mm。此系统可以作为供后续优化使用的良好初始结构。

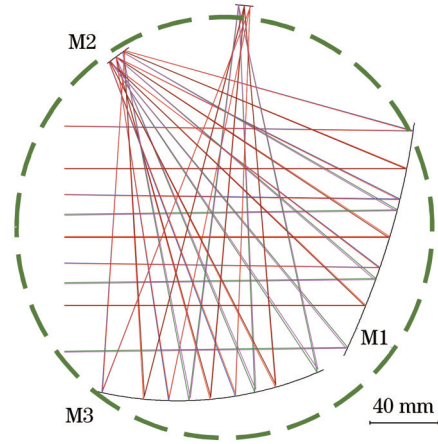


图 3 使用共焦离轴二次曲面得到的柱形轮廓离轴三反系统结构

Fig. 3 Structure of cylindrical package off-axis three-mirror system using confocal off-axis quadric surface

为了进一步校正系统中随视场变化的像差,在初始结构中每个镜子离轴二次曲面基底的基础上,进一步添加自由曲面项来进行进一步优化调整。通常来说,将自由曲面设置在一个易于加工的表面上能够提高系统的可加工性。然而,本文中的系统设计需要同时实现优良的像质、高度离轴非对称且易于共体加工的紧凑型结构、较高的系统参数、严格的制冷探测器匹配和较严格的光瞳变形控制,该设计目标仅通过一个自由曲面是难以实现的。因此,本设计将三个反射镜均设置成自由曲面。零位干涉法是目前一种常见的高精度自由曲面面形检测方法,可以设计并加工计算全息元件(CGH)调控波前,使其与待测自由曲面匹配。为了降低CGH的加工难度与曲面检测难度,自由曲面整体矢高相对于基底二次曲面矢高的偏差应该尽量小。本系统采用Q2D多项式自由曲面进行设计^[20-21]。Q2D多项式自由曲面在顶点位置处相对于基底的矢高差为零,同时在单位圆形孔径边缘上的矢高差平均值为零,进而自由曲面与基底二次曲面之间的整体矢高差较小。此外,自由曲面相对于基底曲面的法向偏离梯度过大也会增加干涉检测的难度。由于Q2D多项式在单位圆域内具有梯度正交性,其各项系数的平方和即为法向偏离梯度的均方值^[22-23],故可以在设计过程中直接约束系数平方和控制法向偏离梯度大小,从而可以进一步约束曲面顶点与孔径边缘之间其他区域的自由曲面和基底曲面的矢高差,有效提升了设计优化效率,避免在曲面孔径范围内取大量点计算矢高差进行控制时出现的优化耗时较长的情况。Q2D多项式的数学性质与系统的具体工作波段无关。因此,Q2D多项式自由曲面不仅可以应用在本文的红外系统设计中,还可以应用在可见光波段的成像系统设计中,以降低曲面的检测难度。需要说明的是,目前的自由曲面面形检测方法可分为点线式测量和面式测量

等^[24]:点线式测量中的典型方法为轮廓仪法,其通用性较强,但绝对测量速度较慢;面式测量中的典型方法为结构光三维测量法、计算全息法等。基于计算全息元件的干涉检测方法是日前公认的光学元件面形高精度检测的有效方法之一,具有检测速度快、精度高和检测区域大的优点,但需要针对每个待测曲面设计加工特定的计算全息元件。本文中设计得到的自由曲面可以采用计算全息法进行检测,也可以根据具体情况,采用轮廓仪法等其他方法进行面形检测。此时,仍可以采用Q2D自由曲面进行光学设计,但没有必要对自由曲面相对于基底曲面的矢高差进行严格控制。

为了使系统设计得到的多个曲面易于实现共体加工,采用了一种基于曲面采样点位置约束的自由曲面优化方法,对系统整体外轮廓的形状与大小进行控制。图4为柱形轮廓离轴三反结构在子午面内的示意图。其中, P_1, P_2, \dots, P_n 为采样点(可以取各个视场的上下边缘光线和主光线与各个反射镜的交点), O 为中心点。在子午面内,反射镜M1、M2、M3应尽可能分布在一个圆上,同时此圆的半径应尽量小。因此,在优化过程中,在常规的与像差有关的误差函数的基础上,进一步引入用于评价共体加工难度的罚函数,即

$$\bar{l}_{OP} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_{OP_i}, \quad (5)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (l_{OP_i} - \bar{l}_{OP})^2, \quad (6)$$

$$\Phi_{\text{total}} = \omega_1 \Phi_{\text{performance}} + \omega_2 \bar{l}_{OP} + \omega_3 \sigma^2 + \sum_{j=4}^n \omega_j \Phi_j, \quad (7)$$

式中: $l_{OP_1}, l_{OP_2}, \dots, l_{OP_n}$ 为中心点到反射镜上采样点的距离(可以通过实际光线追迹信息计算得到); n 为采样点的个数; \bar{l}_{OP} 和 σ^2 为均值和方差; Φ_{total} 为优化过程中建立的误差函数; $\Phi_{\text{performance}}$ 为衡量像差的误差函数; ω_1 、 ω_2 和 ω_3 为像差误差函数、均值和方差的权重; Φ_j 为优化中可能存在的有关其他约束条件的罚函数(如有关面形系数的约束); ω_j 为 Φ_j 的权重。在实际优化调整过程中,首先需要在初始结构基础上,将子午面内镜面上的采样点进行拟合,得到一个最佳的拟合圆并确定圆心的位置。然后,选此圆心作为柱形轮廓系统的中心 O ,利用上述建立的误差函数对系统进行约束。控制相应的方差函数值尽量小使子午面内系统外包络接近圆形,并通过约束均值变小约束系统体积。在实际设计过程中,方差、体积和系统像差函数不可能都很小,需要设计者平衡系统包络形状、系统体积、系统成像质量和其他约束条件,即平衡 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 和其他权重 ω_j 的值以优化总的误差函数 Φ_{total} ,从而得到最终的系统。

由于该系统需要使用制冷探测器,故需要系统有实出瞳,并且要求实出瞳和探测器的冷光阑的大小与形状匹配,即系统的孔径光阑应该在系统的出瞳处。由于系统高度离轴非对称,且使用了非对称的自由曲

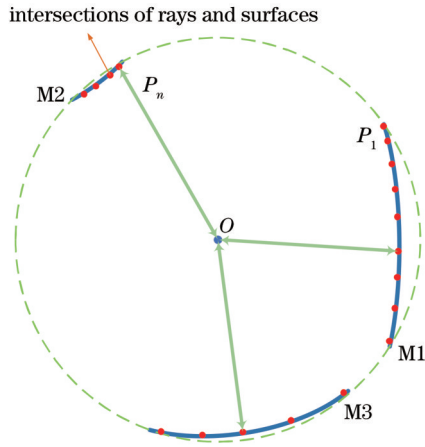


图 4 柱形轮廓自由曲面离轴三反系统在子午面内的结构示意图

Fig. 4 Sketch of cylindrical package freeform off-axis three-mirror system in meridian plane

面,故系统中可能出现严重的光瞳像差。首先,各视场的入瞳形状可能会发生变形,导致系统在 x 方向和 y 方向的入瞳尺寸相差过大,进而导致两个方向衍射极限发生显著的偏离,影响实际探测效果。同时,由于光瞳像差的存在,实际入瞳相对于设计值也可能大幅缩小,导致实际入射光能量不足。此外,各视场入瞳的变形程度可能存在差异,导致整个视场范围内探测器像面照度不均匀。以上问题均会导致实际探测效果不佳,故需要对系统的光瞳像差进行抑制。系统的理想入瞳与出瞳直径的计算公式为

$$\frac{f_{\text{total}}}{D_{\text{exp}}} = \frac{d_z}{D_{\text{exp}}} = F^{\#}, \quad (8)$$

式中: f_{total} 为系统的焦距; D_{exp} 为入瞳直径; D_{exp} 为出瞳直径(冷光阑直径); d_z 为出瞳到像面的距离; $F^{\#}$ 为系统的 F 数。在光学设计软件CODE V中,如果不设置渐晕,则每个视场的光束会充满各自给定尺寸的圆形入瞳,但不一定会充满孔径光阑。在优化过程中,利用实际光线追迹得到各视场入瞳孔径坐标在 $+y$ 方向的边缘光线和 $-y$ 方向的边缘光线与光阑面的交点的 y 坐标 Y_u 和 Y_b 及其差的绝对值 $|Y_u - Y_b|$,以及各视场入瞳孔径坐标在 $+x$ 方向的边缘光线和 $-x$ 方向的边缘光线与光阑面的交点的 x 坐标 X_l 和 X_r 及其差的绝对值 $|X_l - X_r|$ 。通过控制各视场 $|Y_u - Y_b|$ 与 $|X_l - X_r|$ 的比值接近1,实现对光瞳像差的控制。当实际系统各视场光束充满孔径光阑时,各视场的入瞳尺寸和形状也基本接近理想的入瞳,且各视场的差异较小。

在优化过程中,还需要添加其他约束条件,包括利用ABCD矩阵计算并控制系统 x 方向和 y 方向上的焦

距。利用真实光线追迹数据控制系统的Smile畸变与Keystone畸变。对于离轴系统设计,需要使用特殊的结构约束条件来消除光线遮拦和曲面之间的相互干涉,这可以基于实际光线追迹数据,控制两点之间的距离或特定点到特定光线的距离来实现。由于该系统是一个带有中间像面的反射系统,故中间像面的位置也需要被控制,使其与反射镜面之间有一定的距离。否则,镜面上的任何瑕疵最终都会被成像到最终像面附近,严重影响实际成像效果,这可以通过控制中间像面到M2顶点的距离来进行约束。

2.3 设计结果

优化后得到的最终具有柱形轮廓的离轴三反系统结构如图5所示。全视场均方根(RMS)波像差如图6(a)所示,平均RMS波像差为 0.041λ ,其中 λ 为4000 nm。畸变网格图如图6(b)所示,其中 x 方向和 y 方向的相对畸变绝对值均小于0.68%。系统所用的探测器像元尺寸为 $15\ \mu\text{m}$ 。在33 lp/mm空间频率处 x 方向和 y 方向上的调制传递函数(MTF)的视场图如图6(c)和图6(d)所示,平均MTF值为0.456和0.476。在CODE V光学设计软件中,通过足迹图(footprint plot)功能可以得到在任意面处,各个视场光束在该面上实际使用的区域包络的形状和面积。由于系统针对无穷远发来的平行光进行成像,故可以在系统第一个面前的物空间内设置一个垂直于 0 视场光束的虚拟平面。当各视场光束充满出瞳(孔径光阑)时,各个视场在该平面上的足迹图即为各个视场的实际入瞳形状。图7给出了代表性视场在该虚拟面的足迹图的大小与形状。通过足迹图功能还能得到每个视场足迹图(入瞳)的面积 S 。根据 $S = \pi D_{\text{exp}}^2/4$ 即可以计算出等效入瞳直径 D_{exp} ,如表2所示。根据以上分析可以看出,各视场点的等效入瞳直径基本一致且接近理想值,说明系统的光瞳像差得到了较好的控制,既保证了入射光能量的大小,又避免了像面处的照度不均匀。该系统反射镜的基底材料拟采用钢,反射镜表面拟采用镍磷合金层。目前的设计结果是平衡了系统参数(焦距、视场角等)、共体加工约束、系统像质和光瞳畸变等多种因素后得到的。通过该系统设计验证了所提设计方法的可行性。目前的像面尺寸并不是标准的红外探测器靶面尺寸,相当于只用了探测器的一部分。实现全靶面应用和更大的视场角是可能的,但可能会增加共体加工的难度、降低像面处照度均匀性和牺牲一部分像质,或者需要使用 F 数更大的制冷探测器。

表 2 代表性视场点等效入瞳直径

Table 2 Equivalent entrance pupil diameters of typical field points

Field point	$(0^\circ, 0^\circ)$	$(0^\circ, 0.8^\circ)$	$(0^\circ, -0.8^\circ)$	$(0.8^\circ, 0^\circ)$	$(0.8^\circ, 0.8^\circ)$	$(0.8^\circ, -0.8^\circ)$
Equivalent entrance pupil diameter /mm	78.6	78.4	78.0	78.1	77.6	77.5

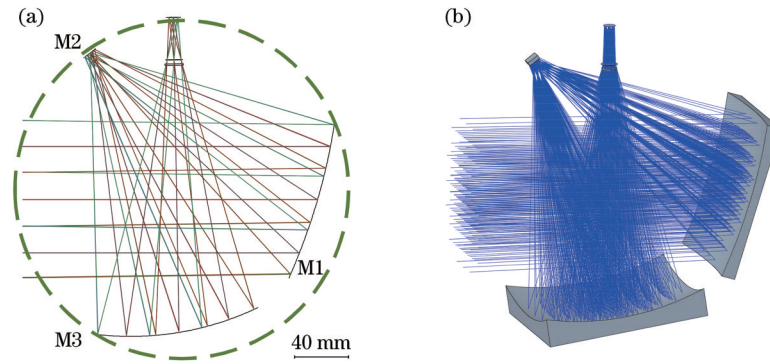


图 5 优化后的最终系统结构。(a)最终系统结构二维图;(b)最终系统结构三维图

Fig. 5 Final system structure after optimization. (a) Two-dimensional plot of final system structure; (b) three-dimensional plot of final system structure

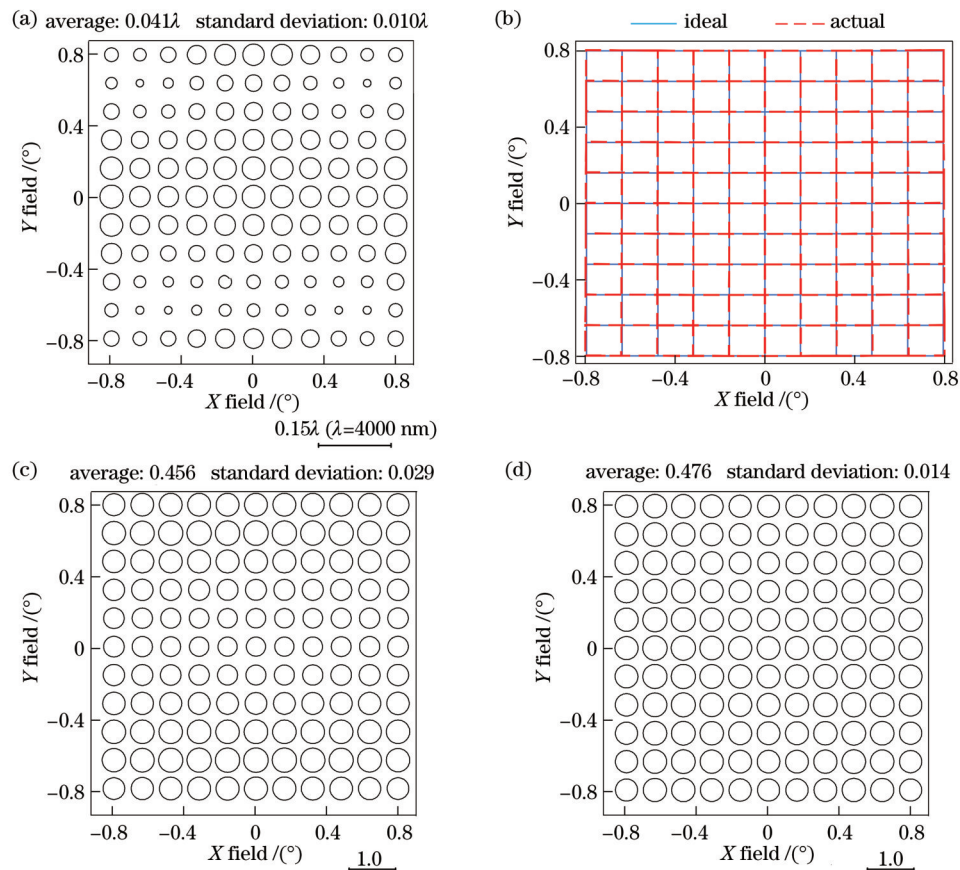


图 6 最终系统的成像质量。(a) RMS 波像差视场图;(b)畸变网格图;(c) 33 lp/mm 空间频率下 x 方向处 MTF 的视场图;
(d) 33 lp/mm 空间频率下 y 方向处 MTF 的视场图

Fig. 6 Image quality of final system. (a) Field map of RMS wavefront error; (b) distortion grid; (c) field map of MTF in x direction at spatial frequency of 33 lp/mm; (d) field map of MTF in y direction at spatial frequency of 33 lp/mm

3 公差分析

成像系统的实际成像效果也依赖于加工与装调的精度。对于共体加工得到的系统,为了预估系统考虑加工公差后的实际成像质量,需要对系统进行公差分析。加工各反射面时每个曲面存在的整体位置误差仍可以用其在三个方向的偏心与倾斜表征。此外,在每个曲面孔径范围内还存在具有局部性与随机性的面形

加工误差。此类面形误差和传统回转对称曲面的误差有较大不同,传统基于半径偏差的曲面误差描述并不适用。采用特定概率分布的高斯径向基函数来描述此类自由曲面面形误差^[25],充分考虑其局域性和随机性。根据面形误差的 RMS 值为每一个自由曲面预先生成大量的面形误差随机分布,结合每个曲面加工后出现的整体位置误差,在 CODE V 中进行 Monte Carlo 公差分析。在表 3 中给出了柱形轮廓离轴三反系统的公

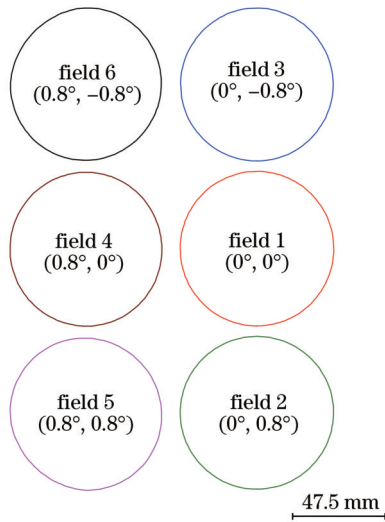


图 7 代表性视场点在 M1 前端物空间虚拟平面处的足迹图
Fig. 7 Footprint plots of typical field points at virtual plane of M1 front object space

差分配。

在表 3 中, DLX、DLY 和 DLZ 分别为曲面沿着 x 方向、 y 方向和 z 方向的整体偏心, DLA、DLB 和 DLG 分别为曲面沿着空间中三个方向上的整体倾斜。另外, 在公差分析时将探测器的 DLX、DLY、DLZ、DLA

和 DLB 设置为补偿器。进行 2000 轮 Monte Carlo 分析的结果如图 8 所示(像质评价指标为 33 lp/mm 空间频率处的 MTF)。在考虑系统的公差后, 系统成像质量能够维持在比较高的水平。

4 结 论

提出了一种带有实出瞳、柱形轮廓、易于实现共体加工的自由曲面离轴三反成像系统的设计方法。利用离轴二次曲面的数学性质实现符合共体结构要求和系统参数要求的离轴初始结构的实时生成。该方法也可以应用于其他系统的初始结构生成。采用的基于曲面采样点位置约束的自由曲面优化方法能够在平衡系统整体外轮廓形状、系统体积和成像质量后实现易于加工的多面共体成像系统设计。针对带有实出瞳的系统设计, 提出了控制光瞳像差的优化策略来控制光瞳变形, 保证系统各视场入射光的能量大小与均匀程度, 有利于后续的成像探测过程。采用 Q2D 多项式自由曲面完成红外热成像系统实例设计, 有效降低了自由曲面相对于基底二次曲面的矢高偏离, 有利于曲面检测。设计得到的系统具有优良的像质和较小的畸变。基于自由曲面的实际面形误差特性完成了系统的公差分析。所提方法可有效指导多面共体自由曲面系统的设计, 也可以被推广到更一般的自由曲面离轴非对称系统的研制中。

表 3 公差分配

Table 3 Tolerance distribution

Component	Maximum allowable RMS figure error /nm	Surface decenter /mm			Surface tilt /(")		
		DLX	DLY	DLZ	DLA	DLB	DLG
M1	50	± 0.02	± 0.02	± 0.02	± 60	± 60	± 180
M2	25	± 0.02	± 0.02	± 0.02	± 60	± 60	± 180
M3	50	± 0.02	± 0.02	± 0.02	± 60	± 60	± 180

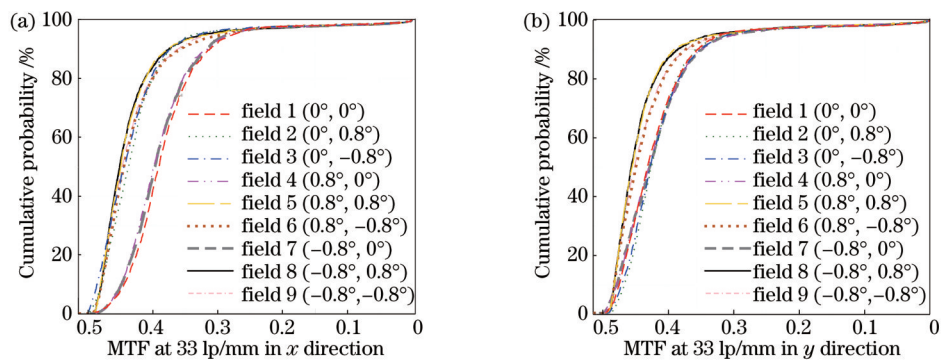


图 8 2000 轮 Monte Carlo 公差分析结果。(a) 33 lp/mm 空间频率处 x 方向上 MTF 的累积概率曲线; (b) 33 lp/mm 空间频率处 y 方向上 MTF 的累积概率曲线

Fig. 8 Tolerance analysis result of 2000-round Monte Carlo analysis. (a) Cumulative probability curve of MTF at spatial frequency of 33 lp/mm in x direction; (b) cumulative probability curve of MTF at spatial frequency of 33 lp/mm in y direction

参 考 文 献

[1] Chen S Y, Xue S, Zhai D D, et al. Measurement of freeform

optical surfaces: trade-off between accuracy and dynamic range [J]. Laser & Photonics Review, 2020, 14(5): 1900365.

[2] Fuerschbach K, Rolland J P, Thompson K P. Theory of aberration fields for general optical systems with freeform

- surfaces[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 26585-26606.
- [3] Rolland J P, Davies M A, Suleski T J, et al. Freeform optics for imaging[J]. *Optica*, 2021, 8(2): 161-176.
- [4] 杨通, 段瓊哲, 程德文, 等. 自由曲面成像光学系统设计: 理论、发展与应用[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0108001.
Yang T, Duan Y Z, Cheng D W, et al. Freeform imaging optical system design: theories, development, and applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0108001.
- [5] Beier M, Hartung J, Peschel T, et al. Development, fabrication, and testing of an anamorphic imaging snap-together freeform telescope[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(12): 3530-3542.
- [6] Yang T, Jin G F, Zhu J. Automated design of freeform imaging systems[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(10): e17081.
- [7] Reimers J, Bauer A, Thompson K P, et al. Freeform spectrometer enabling increased compactness[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(7): e17026.
- [8] Wei L D, Li Y C, Jing J J, et al. Design and fabrication of a compact off-axis see-through head-mounted display using a freeform surface[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8550-8565.
- [9] Gu L, Cheng D W, Liu Y, et al. Design and fabrication of an off-axis four-mirror system for head-up displays[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(16): 4893-4900.
- [10] Liu Y, Li Y Q, Cao Z. Design method of off-axis extreme ultraviolet lithographic objective system with a direct tilt process [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(7): 075102.
- [11] Liu X Y, Gong T T, Jin G F, et al. Design method for assembly-insensitive freeform reflective optical systems[J]. *Optics Express*, 2018, 26(21): 27798-27810.
- [12] Meng Q Y, Wang H Y, Wang W, et al. Desensitization design method of unobscured three-mirror anastigmatic optical systems with an adjustment-optimization-evaluation process[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(6): 1472-1481.
- [13] Qin Z C, Wang X D, Ren C M, et al. Design method for a reflective optical system with low tilt error sensitivity[J]. *Optics Express*, 2021, 29(26): 43464-43479.
- [14] Zhu J, Hou W, Zhang X D, et al. Design of a low F-number freeform off-axis three-mirror system with rectangular field-of-view[J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(1): 015605.
- [15] Zhang X, Zheng L G, He X, et al. Design and fabrication of imaging optical systems with freeform surfaces[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8486: 848607.
- [16] Meng Q Y, Wang W, Ma H C, et al. Easy-aligned off-axis three-mirror system with wide field of view using freeform surface based on integration of primary and tertiary mirror[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(14): 3028-3034.
- [17] Li Z X, Liu X L, Fang F Z, et al. Integrated manufacture of a freeform off-axis multi-reflective imaging system without optical alignment[J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 7625-7637.
- [18] Cheng D W, Xu C, Yang T, et al. Off-axis reflective imaging system design with a conicoid-based freeform surface[J]. *Optics Express*, 2022, 30(6): 9590-9603.
- [19] Schiesser E M, Takaki N, Stone B. Representations of off-axis conics for lens design[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 12078: 120781F.
- [20] Forbes G W. Shape specification for axially symmetric optical surfaces[J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 5218-5226.
- [21] Forbes G W. Characterizing the shape of freeform optics[J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 2483-2499.
- [22] Takaki N, Bauer A, Rolland J P. On-the-fly surface manufacturability constraints for freeform optical design enabled by orthogonal polynomials[J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 6129-6146.
- [23] Takaki N, Papa J C, Bauer A, et al. Off-axis conics as base surfaces for freeform optics enable null testability[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 10859-10872.
- [24] 朱日宏, 孙越, 沈华. 光学自由曲面检测方法进展与展望 [J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0112001.
Zhu R H, Sun Y, Shen H. Progress and prospect of optical freeform surface measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0112001.
- [25] Ni J H, Yang T, Liu Y, et al. Description and tolerance analysis of freeform surface figure error using specific-probability-distributed Gaussian radial basis functions[J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 31820-31839.

Design of Freeform Off-Axis Three-Mirror System Enabling Multisurface-Integrated Fabrication

Zhou Lijun^{1,2}, Yang Tong^{1,2*}, Gao Lina^{1,2}, Cheng Dewen^{1,2}, Wang Yongtian^{1,2}

¹*School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

²*Beijing Engineering Research Center of Mixed Reality and Advanced Display, Beijing 100081, China*

Abstract

Objective Freeform optical surface can benefit the design of off-axis nonsymmetric reflective imaging systems, as more design freedoms can be offered and the aberrations generated by freeform surfaces match the aberrations induced by the decenter and tilt of optical elements. The development of freeform reflective imaging systems relies on advanced technologies in design, fabrication, and assembly. It is very difficult to conduct freeform system assembly due to the lack of assembly references. To this end, one solution is to generate optical systems insensitive to assembly errors directly by special optical design methods. Another solution is to integrate multiple surfaces into a single substrate. As a result, the number of elements in the system and the degrees of freedom during system assembly are reduced. A fabrication method based on rotational cutting is proposed to machine off-axis system with all the surfaces integrated into a single structure. Although the fabrication is more difficult, the system is alignment-free except for the detector. The assembly difficulty and instability of freeform imaging systems using discrete elements can be addressed. However, the current design and

optimization of freeform systems focus on the aberration balance and obscuration elimination, without considering the multisurface-integrated fabrication. Therefore, related design methods are necessary to guide the design of freeform reflective imaging systems via multisurface-integrated structures.

Methods This paper concentrates on the design of a freeform off-axis three-mirror thermal imaging system using multisurface-integrated structure with cylindrical package. An initial structure containing an intermediate image inside the system should be first generated. Traditional design methods of first generating a coaxial system and then making the system unobscured gradually can be employed (Fig. 1), but they require advanced design skills and the design may be very complicated. This paper adopts off-axis conics to establish a feasible initial structure directly. Stigmatic imaging for the central field can be realized by sequentially coinciding with the second focal point of one conic with the first focal point of the next conic (Fig. 2). The surface parameters can be calculated based on the given surface locations and the system focal length. The system can be taken as a good initial structure for further optimization. Freeform surface terms can be added to the base conic to improve imaging performance. Q2D polynomials can be utilized to describe the freeform surface shape and they are orthogonal in gradient normal departure. Finally, the mean-square gradient normal departure of a Q2D freeform surface from the base conic can be constrained by simply controlling the square sum of the coefficients of the polynomials. The proposed surface is easier to be tested through computer-generated holograms or other techniques. An optimization method by controlling the positions of surface sampling points is proposed to generate a system that is easier for multisurface-integrated fabrication. The average value of the distances between the sampling points and the center of the overall cylindrical package is constrained to reduce the system size. The variance of these distances is constrained to control the shape of the overall package. Combined with other constraints, systems enabling easier multisurface-integrated fabrication with good imaging performance can be designed. Cooled detectors are generally employed for high-performance thermal imaging systems. The system should have a real exit pupil (the aperture stop) matching the cold stop of the detector. An optimization strategy is adopted to reduce pupil aberration, in which the shape and size of the pupil are controlled by real ray tracing data. Tolerance analysis considering the random and local characteristics of surface figure error can be leveraged to predict the performance of the as-built system.

Results and Discussions A freeform off-axis three-mirror system with a cylindrical package which is easier for multisurface-integrated fabrication is designed by the proposed method. The field-of-view of the system is $1.6^\circ \times 1.6^\circ$ and the focal length is 240 mm. The system works in the medium-wave infrared band. A cooled detector with an F -number of 3 can be adopted to improve the performance. The off-axis initial structure of the system can be generated directly through confocal off-axis conics based on given surface locations and focal length (Fig. 3). Ideal imaging for the central field is achieved. After further optimization, a freeform system with good performance is obtained (Fig. 5). The average root-mean-square wavefront error is 0.041λ ($\lambda=4000$ nm), and the relative distortion in x and y directions is lower than 0.68% (Fig. 6). The average modulation-transfer-function of the full field-of-view at spatial frequency of 33 lp/mm is 0.456 and 0.476 in x direction and y direction, respectively (Fig. 6). The entrance pupil shapes (Fig. 7) and the equivalent entrance pupil diameter of typical field points show that the pupil aberration is small, which ensures enough input energy and good illumination uniformity across the full field-of-view at the image plane. Acceptable imaging performance considering freeform surface figure error and assembly error based on the Monte Carlo tolerance analysis can be realized (Fig. 8).

Conclusions A design method for an off-axis three-mirror freeform imaging system using multisurface-integrated elements with cylindrical package is proposed. The initial structure satisfying the off-axis multisurface-integrated structure and first-order system specifications can be generated by confocal conicoid surfaces. A freeform surface optimization method based on controlling the position of surface sampling points is proposed to control the shape and size of the overall package of the system, which ensures easier multisurface-integrated fabrication. The control of the focal length and the suppression of light obscuration and pupil aberrations are achieved via real ray tracing data. The freeform surface of Q2D polynomials is employed in the optimization to reduce surface testing difficulty. Finally, a freeform surface off-axis three-mirror thermal imaging system which ensures easier multisurface-integrated fabrication with high imaging quality and low distortion is designed. Tolerance analysis considering the features of freeform surfaces is carried out. The proposed method can be leveraged to guide the design of freeform imaging systems with multisurface-integrated structures, and can also be extended to the development of more generalized off-axis nonsymmetric freeform imaging optical systems.

Key words optical design; applied optics; freeform surface; multisurface-integrated; off-axis three-mirror system; initial structure