

# 光学学报

## 变厚变曲率反射镜及其在空间相机中的应用

赵惠<sup>1\*</sup>, 解晓蓬<sup>1</sup>, 高立民<sup>2</sup>, 樊学武<sup>1</sup>, 许亮<sup>3</sup>, 马臻<sup>3</sup>, 裴永乐<sup>4</sup>

<sup>1</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所空间光学技术研究室, 陕西 西安 710119;

<sup>2</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所总师办, 陕西 西安 710119;

<sup>3</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所先进光学元件试制中心, 陕西 西安 710119;

<sup>4</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所航空光电技术研究室, 陕西 西安 710119

**摘要** 变曲率反射镜是一种主动光学元件,通过改变自身曲率半径实现对波前的动态控制。首先对变曲率反射镜国内外现状及发展趋势进行了综述;其次,建立了变厚变曲率反射镜形变物理模型,对兼顾大中心形变与高面形精度的机理进行了理论分析,并通过形变的面形精度保持实验对其性能进行了验证;最后,从三个方面探索了变厚变曲率反射镜在空间光学相机中的应用:1)针对大变倍比变焦成像对反射镜超大中心形变的要求,设计了基于有限元迭代并叠加高阶球差的反射镜优化流程,实现了近毫米级中心形变反射镜设计;2)针对空间光学相机成像对调焦精度及速度的要求,提出了基于次镜变曲率反射镜的高精度大动态调焦方法;3)提出了积分时间内利用变曲率次镜沿光轴方向快速扫描的编码成像方法。

**关键词** 光学器件; 主动光学; 变曲率反射镜; 空间光学相机; 光学变焦; 调焦

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1723002

## Variable Curvature Mirror with Variable Thickness and Its Application in Space-Borne Optical Camera

Zhao Hui<sup>1\*</sup>, Xie Xiaopeng<sup>1</sup>, Gao Limin<sup>2</sup>, Fan Xuewu<sup>1</sup>, Xu Liang<sup>3</sup>, Ma Zhen<sup>3</sup>, Pei Yongle<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Space Optical Technology Research Department, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, Shaanxi, China;

<sup>2</sup>Chief Engineer Office, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, Shaanxi, China;

<sup>3</sup>Advanced Optics Manufacturing Center, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, Shaanxi, China;

<sup>4</sup>Laboratory of Aeronautical Optoelectronic Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, Shaanxi, China

**Abstract** A variable curvature mirror is a kind of active optical element. By changing its curvature radius, the corresponding wave-front could be dynamically controlled. First of all, the current situation and development trend of variable curvature mirrors are summarized systematically. After that, the physical model of deformation of variable curvature mirrors with variable thickness is established and the capability of this kind of variable curvature mirror in generating large saggitus and maintaining good surface figure accuracy is proven through numerical simulation and experiments. Finally, the application of variable curvature mirrors with variable thickness in space optical cameras is explored from three aspects. In the first place, in order to satisfy the requirement for the super large saggitus variation required by realizing large magnification ratio zoom imaging, a finite element alternating (FEA) based optimization procedure by incorporating high-order spherical deformation is designed, and the mirror with the saggitus variation approaching 1 mm is obtained. In the second place, aiming at the requirements of focusing accuracy and speed in space camera imaging, a high-precision large dynamic focusing method based on sub-mirror variable curvature mirrors is proposed. In the third place, a coding imaging method using a variable curvature secondary mirror to scan quickly along

收稿日期: 2022-05-30; 修回日期: 2022-07-18; 录用日期: 2022-07-22

基金项目: 陕西省青年科技新星项目(2016KJXX-08)、中科院西部之光西部学者 A 类项目(XAB2015A09)

通信作者: \*zhaohui@opt.ac.cn

the optical axis during integration time is proposed.

**Key words** optical devices; active optics; variable curvature mirror; space-borne optical camera; optical zooming; focus adjusting

## 1 引言

变曲率反射镜(VCM)是一种能够改变其自身曲率半径的主动光学元件,又称变焦镜,其原型最早可以追溯到1972年以色列希伯来大学研制的曲率可变反射镜,主要用于提升固体激光器的输出光束质量<sup>[1]</sup>。此后,包括苏联科学院普通物理研究所<sup>[2-3]</sup>、Kvantovaya Elektron公司<sup>[4]</sup>、德国航空航天技术物理研究所<sup>[5]</sup>、德国弗劳恩霍夫激光技术研究所<sup>[6]</sup>、日本住友电工<sup>[7-8]</sup>、捷克技术大学<sup>[9]</sup>、波兰科学院<sup>[10-12]</sup>、美国劳伦斯伯克利实验室<sup>[13]</sup>、美国桑迪亚国家实验室<sup>[14-15]</sup>、美国海军研究实验室<sup>[16]</sup>和法国马赛天体物理实验室<sup>[17-19]</sup>等在内的国外研究机构均针对用于校正固体激光器热透镜效应引起的波前畸变的变曲率反射镜技术开展研究。而针对变曲率反射镜技术的研究起步较晚,只有少数单位如清华大学<sup>[20]</sup>、中国科学院大连化学物理研究所、大连理工大学<sup>[21-23]</sup>、华中科技大学激光研究所<sup>[24]</sup>和中国科学院西安光学精密机械研究所等在开展相关研究<sup>[25-28]</sup>。

实际上,变曲率反射镜不仅可以用于改善固体激光器的光束质量,而且在显微成像中的景深控制<sup>[9]</sup>、激光加工焦斑控制<sup>[29]</sup>、太阳能收集器效率提升<sup>[30]</sup>以及无运动部件变焦成像<sup>[25-28]</sup>等领域均有应用价值。无论是何种应用,中心形变量与面形精度都是变曲率反射镜的核心指标。一方面,变曲率反射镜要有尽可能大的中心形变来满足大尺度的波前控制要求;另一方面,反射镜在改变其曲率半径的同时还必须保持较高的面形精度。然而,反射镜形变必然需要外部驱动,应变越大应力也就越大,面形精度保持就越困难;非成像应用主要关注中心形变量,而成像应用还需要同时关注面形精度,因此兼顾大的中心形变产生与高的面形精度保持对于成像应用而言极具挑战性。特别地,近年来出现的无运动部件变焦成像由于在实现大变倍比时对反射镜提出了接近毫米级中心形变的极高要求,因此需要对变曲率反射镜设计理论和结构参数优化方法等有针对性地进行改进。

本文以变厚变曲率反射镜技术为研究内容,在本课题组前期研究的基础上,首先根据薄板弹性理论提出了一种厚度渐变分布的均匀压力驱动变曲率反射镜模型,通过有限元分析与试制样片的实验证明了该类型变曲率反射镜在兼顾大形变与高面形精度方面的潜力。口径为100 mm的球面变厚度变曲率反射镜可以轻松实现近40 μm的中心形变且面形精度依然优于1/18波长。其次,考虑到在反射镜形变逐渐增大过程中的面形退化主要由高阶球差(如3阶、5阶、7阶等球差)引起,提出了一种将高阶球差面形起伏反向叠加到反射镜厚度分布中再实施有限元分析的迭代优化流

程,不断降低形变过程中面形精度的变化灵敏度可起到增强反射镜高面形精度保持能力的作用,为实现接近毫米级超大中心形变变曲率反射镜的设计提供了可能。最后,研究了变曲率反射镜应用于空间相机并实现大变倍比变焦与高精度大动态调焦的可行性,同时探索了一种基于变曲率反射镜光轴扫描构建编码成像的免调焦设计理念,为新型空间光学相机的研究提供了新颖的思路。

## 2 变厚变曲率反射镜形变机理及实验研究

驱动方式与厚度分布是决定变曲率反射镜中心形变与面形精度保持的主要因素。自变曲率反射镜技术出现以来,驱动方式主要分为单点中心驱动、环形线负载驱动以及均匀压力驱动三种,而反射镜的厚度分布则主要有恒定厚度分布与渐变厚度分布两种。这里,首先通过对恒定厚度反射镜曲率变化的力学机理开展研究,揭示了简单易用的环形线负载驱动等厚变曲率镜模型的产生原因及其固有缺陷,之后对均匀压力驱动结合变厚度设计的变厚变曲率反射镜的特性进行了理论推导、形变机理分析与实验研究,证明了均匀压力驱动结合变厚度分布的变曲率反射镜在兼顾中心形变与面形精度保持方面的优势。

### 2.1 恒定厚度反射镜曲率变化的力学机理

由于变曲率反射镜具有较大的径厚比,所以采用薄板弹性理论<sup>[31-32]</sup>,即将反射镜当作圆形薄板进行形变建模与特性分析。

令 $Z(r)$ 代表反射镜光学表面在极坐标系 $(r-\theta)$ 下的起伏情况,那么反射镜在外界驱动力的作用下相对于初始表面形状的曲率变化就能够表达为

$$Z(r) = A_{20}r^2 = \frac{1}{2R}r^2, \quad (1)$$

式中: $A_{20}$ 为曲率变化系数,与光学像差理论中的离焦像差对应; $R$ 为弯曲表面的曲率半径。

对于厚度为 $t$ 的恒定厚度反射镜来说,其各个位置的刚度 $D = Et^3/[12(1-\nu^2)]$ 都是一致的,其中 $E$ 和 $\nu$ 分别代表反射镜材料的弹性模量和泊松比。当在反射镜的中心施加作用力或者在其边缘施加弯矩力矩时,以薄板表面面形起伏 $Z(r)$ 作为变量的双拉普拉斯泊松公式就可以表示为 $\nabla^2 \nabla^2 Z = 0$ ,而与其对应的通用解则可以表示为

$$Z(r) = B_{20} + C_{20} \ln r + D_{20} r^2 + E_{20} r^2 \ln r, \quad (2)$$

式中: $B_{20}$ 、 $C_{20}$ 、 $D_{20}$ 、 $E_{20}$ 共同决定了弹性薄板的形变特性,其中 $D_{20}$ 代表曲率变化系数。

假设薄板表面形变的坐标原点位于反射镜的顶点中心,那么式(2)中的 $B_{20}$ 就等于0。此时可以看到,如果存在一种驱动方式使 $C_{20}$ 和 $E_{20}$ 都能够等于0,那么薄

板的形变就仅产生曲率变化  $D_{20}$  这一种模式。

薄板形变的拉普拉斯公式可表示为

$$\nabla^2 Z(r) = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dz}{dr} \right) = 4(D_{20} + E_{20} + E_{20} \ln r), \quad (3)$$

由此获得单位长度径向剪切力  $Q_r$  的表达式为

$$Q_r = -D \frac{d}{dr} [\nabla^2 Z(r)] = -4E_{20} D \frac{1}{r}. \quad (4)$$

由式(4)可知,令  $E_{20}$  等于 0 意味着薄板的有效口径之内不受剪切力的影响。以式(2)作为参考,这一点就意味着对反射镜中心施加作用力将无法产生理想的曲率变化。换句话说,单点中心驱动难以产生精确的反射镜面形控制。

考虑到  $B_{20}$  和  $E_{20}$  均等于 0 的情况,那么径向单位长度弯曲力矩可表示为

$$M_r = D \left( \frac{d^2 Z}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dZ}{dr} \right) = D \left[ 2(1+\nu)D_{20} - (1-\nu)C_{20} \frac{1}{r^2} \right]. \quad (5)$$

对于一个更加通用的薄板模型而言,假设薄板的中心存在一个半径为  $b$  的孔洞,那么  $C_{20}$  和  $D_{20}$  就能够由作用于内孔边缘的弯曲力矩  $M_r(b)$  和作用于薄板外边缘的弯曲力矩  $M_r(a)$  决定:

$$C_{20} = \frac{1}{1-\nu} \frac{a^2 b^2 [M_r(a) - M_r(b)]}{(a^2 - b^2) D},$$

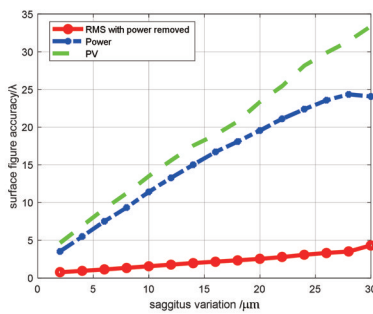
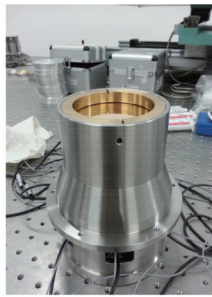


图 1 本课题组研制的环形线负载驱动变曲率镜实物及形变实测结果<sup>[25]</sup>

Fig. 1 Annular force variable curvature mirror developed by our group and deflection testing results<sup>[25]</sup>

### 2.2 厚度渐变反射镜曲率变化物理模型

对于厚度渐变分布的反射镜物理模型来说,其刚度  $D$  是随着径向坐标  $r$  的变化而变化的,即  $D(r) = Et(r)^3/[12(1-\nu^2)]$ 。如果能够获得刚度随径向坐标  $r$  变化的关系,那么就能够得到反射镜的厚度分布  $t(r)$ 。无论是厚度渐变还是厚度恒定,反射镜形变过程中所承受的径向弯曲力矩和切向弯曲力矩都可以分别表示为  $M_r$  和  $M_t$ :

$$\begin{cases} M_r = D \left( \frac{d^2 Z}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dZ}{dr} \right) \\ M_t = D \left( \nu \frac{d^2 Z}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dZ}{dr} \right) \end{cases} \quad (8)$$

$$D_{20} = \frac{1}{2(1-\nu)} \frac{a^2 M_r(a) - b^2 M_r(b)}{(a^2 - b^2) D}, \quad (6)$$

式中:  $a$  表示薄板半径。

由于这里所讨论的反射镜没有中心孔洞,所以其半径  $b$  等于 0,因此  $C_{20}$  就天然地等于 0。综合式(2)~(6)可以看到,如果仅对反射镜的边缘施加力矩,就能够使得  $B_{20}$ 、 $C_{20}$ 、 $E_{20}$  均等于 0,而与曲率变化相对应的系数  $D_{20}$  则可以表示为  $D_{20} = \frac{1}{2(1+\nu)} \frac{M_r(a)}{D}$ 。在这种情况下,式(1)所描述的曲率变化就可以表示为

$$\frac{1}{R} = 2A_{20} = \frac{1}{1+\nu} \frac{M_r(a)}{D} = 12(1-\nu) \frac{M_r(a)}{Et^3}. \quad (7)$$

然而,在实际中,仅对超薄反射镜的边缘施加弯曲力矩非常困难,所以采取利用在内外环上分别施加轴向作用力来间接产生所需弯曲力矩的环形线负载驱动方式。然而,环形线负载驱动属于机械接触式驱动,不可避免地在驱动机构与镜面的解除位置产生集中应力,由此导致面形精度的退化,形变越大要求的驱动力就越大,应变就越大,此时面形精度将快速退化,从而使其难以胜任更大形变要求的应用场景。图 1 给出了本课题组研制的环形线负载驱动变曲率镜实物及实测结果<sup>[25]</sup>。可以看到,当反射镜的中心形变接近 5 μm 时,面形精度就快速退化至波长量级。另外,环形线负载驱动还存在形变过程中的反射镜空间位置不稳定以及只有驱动环内部才是有效工作区域等问题,所以探索新的变曲率镜设计方法极为必要。

在形变过程中,在薄板的某一个位置  $r$  处的径向弯曲力矩、切向弯曲力矩以及剪切力之间存在静态的平衡,可以表示为

$$M_r + r \frac{dM_r}{dr} - M_t + rQ_r = 0. \quad (9)$$

将式(8)代入式(9),并将式(9)的两边都除以  $rD$ ,就可以得到

$$\frac{d^3 Z}{dr^3} + \left( \frac{1}{D} \frac{dD}{dr} + \frac{1}{r} \right) \frac{d^2 Z}{dr^2} + \left( \frac{\nu}{rD} \frac{dD}{dr} - \frac{1}{r^2} \right) \frac{dZ}{dr} = -\frac{Q_r}{D}. \quad (10)$$

将式(3)代入式(10),式(10)又可以进一步简化为



$$D \frac{d}{dr} (\nabla^2 Z) + \left( \frac{d^2 Z}{dr^2} + \frac{v}{r} \frac{dZ}{dr} \right) \frac{dD}{dr} = -Q_r \quad (11)$$

根据式(11)就可以得到薄板即反射镜的刚度  $D$  随径向坐标变化的表达式:

$$\frac{dD}{dr} = -\frac{Q_r}{2(1+\nu)A_{20}} = -\frac{R}{1+\nu} Q_r \quad (12)$$

可以看到,反射镜刚度  $D$  沿径向的变化与形变过程中的单位长度剪切力  $Q_r$  直接相关。当在反射镜的背部施加一个均匀的单位面积作用力  $q$  时,反射镜的边缘位置由于结构的约束会产生相应的剪切力,此时在沿径向的任何一个位置处两者都应该满足动态平衡,则有

$$\pi r^2 q + 2\pi r Q_r = 0 \quad (13)$$

此时,由式(13)可以获得单位长度剪切力的表达式,将其代入式(12)并且进行积分之后就可以获得反射镜刚度的解析表达式:

$$D = -\frac{qR}{4(1+\nu)}(c-r^2) \quad (14)$$

式中: $c$ 为常数。

厚度渐变分布带来的最大好处就是不需要在反射镜的边缘引入一个弯曲力矩,而仅通过为其背部施加一个均匀的单位面积作用力  $q$  就能够实现曲率的变化。令  $D(a)$  等于 0,那么刚度  $D$  随径向变化的函数就重新表示为

$$D = -\frac{qa^2 R}{4(1+\nu)} \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right) \quad (15)$$

此时,反射镜的厚度分布就可以表示为

$$t = -\left[ 3(1-\nu) \frac{qR}{Ea} \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right) \right]^{1/3} a \quad (16)$$

综上可以得出结论:当反射镜的厚度分布按照式(16)从中心向边缘逐渐减小时,通过在反射镜的背部均匀地施加单位面积的作用力就能够获得曲率的变化。从机理上来说,变厚度反射镜发生形变时,由于在每一个  $r$  所处的位置,剪切力与作用力之间都进行了相应的平衡,而且这个平衡的强度与不同  $r$  处的刚度  $D$  有关,所以此时反射镜工作面残余应力导致的面形精度的劣化就可以得到有效的控制,这就是变厚度反射镜发生形变时能够有效抑制面形退化的原因。另外,与环形线负载驱动不同,均匀压力驱动对镜面的影响较小,大形变下面形精度易于控制,同时通过合理的结构设计可以将驱动产生的应力应变转移到非工作区,这为进一步抑制面形精度的快速退化提供了保证。图 2 给出了环形线负载驱动等厚变曲率反射镜与均匀压力驱动变厚变曲率镜的有限元分析对比。可以看到,变厚变曲率反射镜有效区域的应力大部分转移到了支撑结构上,这意味着同等形变下具有更高的面形精度。

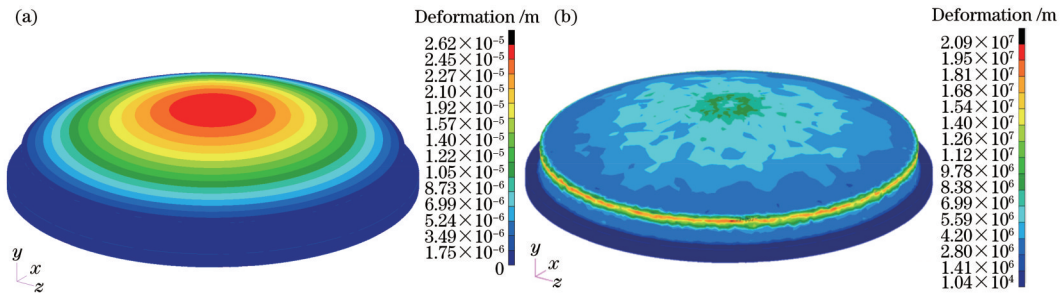


图 2 形变后的应力分布有限元分析对比。(a) 环形线负载变曲率反射镜的应力分布;(b) 均匀压力驱动变厚变曲率反射镜的应力分布

Fig. 2 Strain comparison of finite element analysis after deflection. (a) Strain of annular force variable curvature mirror; (b) strain of variable curvature mirror with variable thickness under uniform force driving

### 2.3 均匀压力驱动变厚变曲率反射镜实验研究

均匀压力驱动变厚变曲率反射镜的模型如图 3(a) 所示。可以看到,施加均匀作用力的最简单的方法就是采用气动驱动。通过将反射镜与支撑结构做成一个密封的气腔,就能够通过空气压缩机所生成的高压空气对反射镜施以形变所需的作用力。这里,通过研制中心厚边缘薄、中心到边缘渐变分布的铝合金反射镜样片来验证其中心大形变与高面形精度保持能力。图 3 给出了口径为 150 mm、中心厚度为 8 mm、边缘小于 4 mm、中心到边缘厚度分布以摆线型方式逐渐减小的变曲率反射镜样片及其配套的驱动系统,其中反射镜的厚度分布

方程为  $t = -C \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/3} = -0.86 \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/3}$ , 其中  $C$

表示反射镜的厚度分布控制因子。其中,核心参数厚度分布控制因子  $C$  的获得方式为:通过使用有限元分析软件建立反射镜的模型,同时对反射镜施加均匀的压力及约束,分析提取反射镜形变的表面数据,通过有限元分析软件与 MATLAB 之间的相互迭代,以面形精度均方根(RMS)的最小值作为依据实施优化,最终得到  $C$  的值,由此确定满足应用要求的反射镜厚度分布。

在 100 mm 有效口径以内,通过离子束抛光,反射镜的初始面形精度优于  $0.0125\lambda$ 。当通过加压的方式逐渐增大反射镜的中心形变时,面形精度开始缓慢降低,这主要来源于球差的增加。随着中心形变的增加,高阶球差的影响将显著增大。经过测算可得:当中心

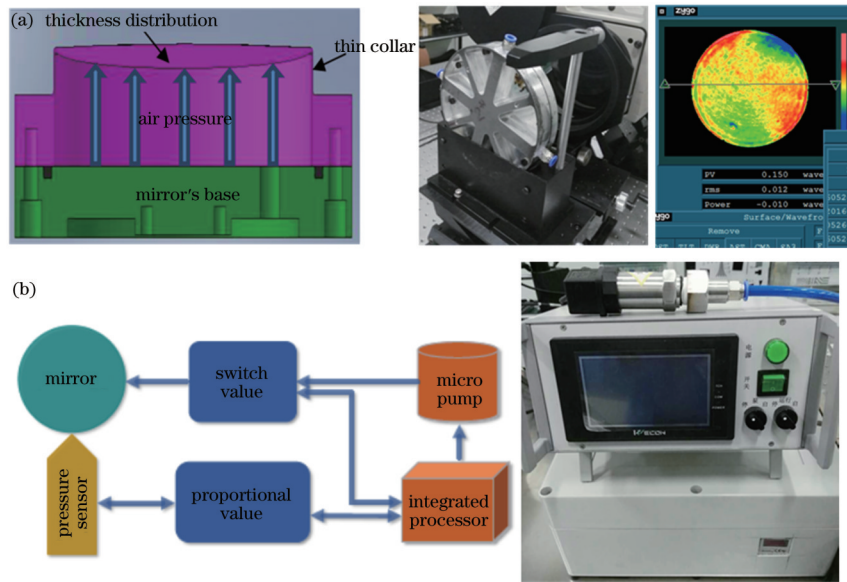


图 3 均匀压力变厚变曲率反射镜实验系统。(a)变厚变曲率反射镜模型、样片实物;(b)变曲率反射镜驱动系统

Fig. 3 Experimental systems of variable curvature mirror with variable thickness under uniform pressure. (a) Model and prototype of variable curvature mirror with variable thickness; (b) actuation system of variable curvature mirror

形变超过  $37\ \mu\text{m}$  时,  $100\ \text{mm}$  以内口径的面形精度依然优于  $0.0556\lambda$ , 与环形线负载系统相比已得到显著改善, 如图 4 所示。表 1 给出了曲率变化与形变的对应关系。均匀压力驱动变厚变曲率反射镜在兼顾大中心形变与高面形精度方面具有潜力, 但是随中心形变的增

大而增加的球差将会导致面形精度的缓慢退化, 由此成为制约进一步增大中心形变而保持高面形精度的主要因素。这就为改进反射镜结构参数的优化设计流程提出了要求——如何抑制高阶球差对面形退化的影响。

表 1 反射镜中心形变量及面形精度随驱动力的变化趋势

Table 1 Central deformation of mirror and surface accuracy vary with change of pressure

Pressure /MPa	Deflection / $\mu\text{m}$	RMS of 100 mm diameter / $\lambda$	RMS of 100 mm diameter without spherical aberration / $\lambda$
0.020	11.14	0.020	0.011
0.036	19.85	0.032	0.012
0.053	28.44	0.046	0.015
0.070	36.89	0.058	0.017

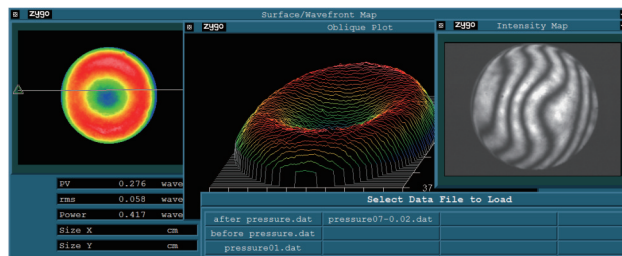


图 4  $0.07\ \text{MPa}$  下  $100\ \text{mm}$  口径变曲率反射镜的面形精度

Fig. 4 Surface accuracy of variable curvature mirror with 100 mm diameter under  $0.07\ \text{MPa}$

### 3 变厚变曲率反射镜在空间光学相机中的应用研究

#### 3.1 大变倍比无运动部件变焦成像

当前, 空间光学相机多采用定焦光学系统, 其分辨率与视场固定不变。如果要对不同距离、不同尺度、不同范围的目标场景进行成像, 就应该采用变焦成像。

变焦是一项古老的技术, 有光学补偿式和机械补偿式两种经典的实现形式, 其概念最早可以追溯到 1834 年, 由英国数学家彼得·巴洛首次提出。1948 年, Zoomer 公司制造了第一个可供  $35\ \text{mm}$  相机使用的  $36\sim 72\ \text{mm}$  光学补偿式变焦镜头, 通过变倍组和补偿组的同方向等速移动实现焦距的变化。1932 年, 贝尔和威尔基于凸轮的非直线运动提出了机械补偿式变



焦,并于同年由赫尔穆特·瑙曼设计制造了焦距为 25~80 mm、相对孔径为  $F/2.8$  的第一款机械补偿式变焦镜头。与光学补偿式变焦相比,机械补偿式变焦便于设计,而且能够实现成像面的最佳补偿,所以自 1960 年以后就成为了变焦光学系统设计的主要方式。

由几何光学原理可知,要改变成像系统的焦距,要么改变元件之间的间隔,要么改变元件所能提供的光焦度,或者同时改变两者。常规光学元件受限于材料和制造工艺,只能提供固定的光焦度(即曲率保持不变),所以无论是光学补偿式变焦还是机械补偿式变焦均需要依靠运动部件。然而,变曲率反射镜的出现为无运动部件变焦提供了技术上的可行性。变曲率反射镜的曲率半径能够根据需要发生高精度的变化,从而改变其自身的光焦度,之后利用光学杠杆效应将其所产生的局部微量光焦度的变化放大,就可以在元件间隔不发生改变的情况下达到系统焦距大幅度改变的目的。

近年来,国内外包括美国 Sandia 国家实验室<sup>[14-15]</sup>、德国 Dresden 大学<sup>[33-34]</sup>、北京理工大学<sup>[35-36]</sup>以及中国科学院西安光学精密机械研究所<sup>[25-28]</sup>等机构均开展了无运动部件变焦技术研究,但是变倍比的提高难度较大。研究表明:要实现 5 倍以上的变焦成像,变曲率反射镜的中心形变量将达到接近毫米的量级,此时还要同时兼顾超大形变下的高面形精度,这就对变曲率反射镜的性能提出了苛刻要求。图 5 给出了一个 5× 无运动部件变焦光学系统设计方案及其对应的指标参数。其中,第 1 镜与第 4 镜为变曲率反射镜,从短焦变化到长焦时,如图 6 所示,第 1 镜与第 4 镜的对应形变量分别超过了 1200  $\mu\text{m}$  和 2000  $\mu\text{m}$ ,远大于本课题组已经掌握的变曲率反射镜技术水平,因此必须从变曲率镜设计理论与优化设计方法进行改进。表 2 为 5× 变焦光学系统的指标参数。

如前所述,变厚变曲率反射镜在形变的过程中,其面形精度主要受球差和高阶球差的影响而退化,其中,影响最大的是 3 阶、5 阶、7 阶及 9 阶球差。通过优化反射镜的结构参数来抑制高阶球差,从而实现大中心形变下的面形精度保持。这里提出了一种改进的基于有限元分析的反向叠加高阶球差的反射镜参数优化流程,主要包括以下几个步骤:1)选定变厚变曲率反射镜

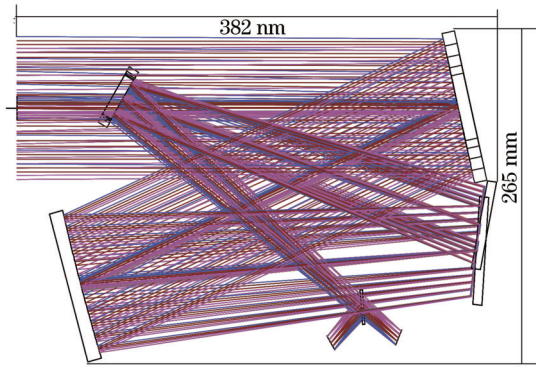


图 5 5× 变焦光学系统设计方案及对应的指标参数  
Fig. 5 Optical design of 5× zoom optical system and corresponding parameters

表 2 5× 变焦光学系统的参数  
Table 2 Parameters of 5× zoom optical system

Focal length / mm	Field of view / [(°)×(°)]	Pupil diameter / mm	F number
228	2.83×2.83	20	11.4
456	1.42×1.42	40	11.4
684	0.95×0.95	60	11.4
912	0.71×0.71	80	11.4
1140	0.57×0.57	100	11.4

的初始厚度分布,建立有限元模型并以此为基础进行有限元形变特性分析;2)提取有限元分析后的表面节点的位置坐标及每个节点形变前后相应的位移值,对提取的数据进行基于 Zernike 多项式的波前分解;3)将高阶球差以额外面形分布的方式加权叠加到初始厚度分布方程中;4)以各高阶球差对应的加权系数为变量,以有限元分析为手段,以同等形变下的面形精度最小化为目标函数,优化得到最佳的加权系数参数,由此获得能够兼顾大形变与高面形精度的反射镜厚度分布。图 7、图 8 给出了一个典型的设计。依托该设计方法,全口径为 70 mm、有效口径为 35 mm 的反射镜在实现 240  $\mu\text{m}$  中心形变时,面形精度依然接近 0.1 $\lambda$ 。

### 3.2 基于变曲率反射镜的高精度大动态调焦

尽管空间相机在发射前都必须在地面完成苛刻的

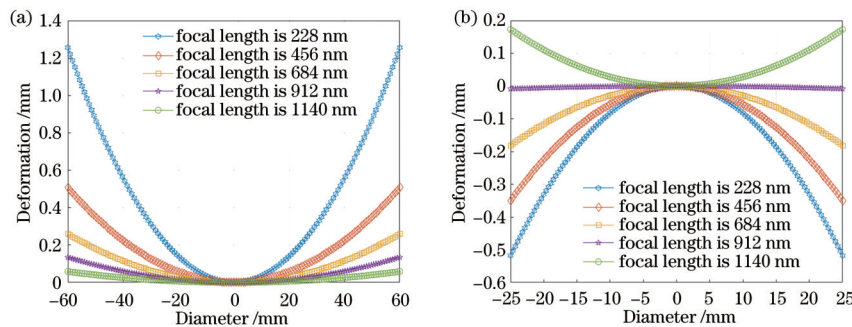


图 6 1 镜与 4 镜对应的中心形变曲线。(a) 1 镜;(b) 4 镜  
Fig. 6 Central deflection curves of 1st and 4th mirrors. (a) 1st mirror; (b) 4th mirror

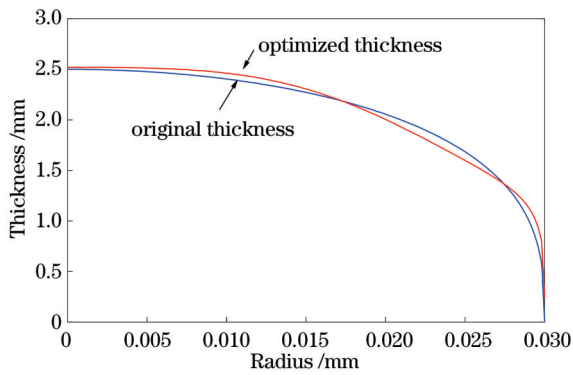


图 7 优化前后反射镜厚度分布对比

Fig. 7 Comparison of thickness distributions before and after optimization

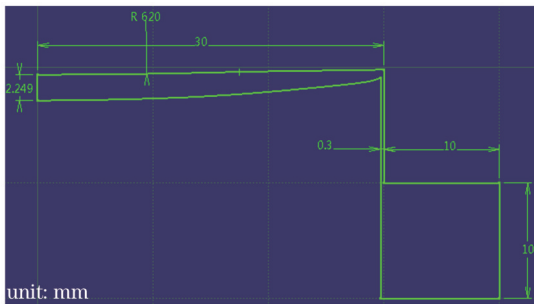


图 8 优化后变曲率反射镜的结构参数

Fig. 8 Structure parameters of optimized variable curvature mirror

环境实验后进行焦面的标定与预置,但是发射入轨阶段的冲击与振动、入轨后光机材料在真空条件下的吸湿放气以及温度的剧烈变化等多种因素都会导致地面预先标定的焦面偏离理想位置,由此导致图像分辨率与信噪比的降低。同时,为了追求更高的空间分辨率,空间相机的口径越来越大,这就导致相机光机结构更易受到内外部各种因素的影响,从而使焦面漂移几乎

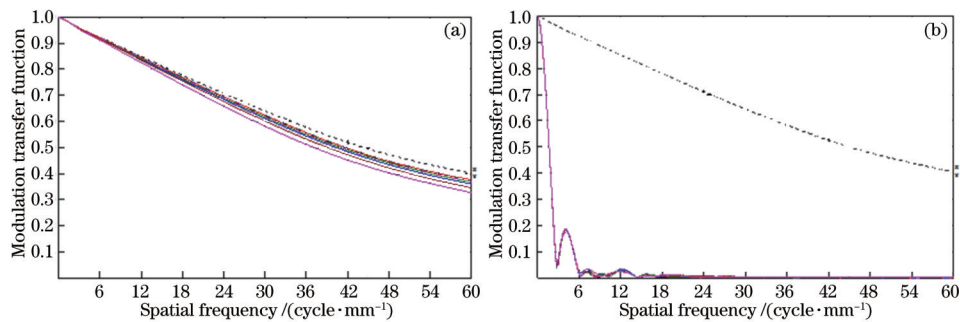


图 10 对焦与离焦 4 mm 时调制传递函数的变化情况。(a) 对焦;(b) 离焦 4 mm

Fig. 10 Changes of MTF under focusing and 4 mm defocusing. (a) Focusing; (b) 4 mm defocusing

首先,按照常规设计方法,以待成像目标位于无穷远完成空间相机光学系统的初始优化设计,保持其他元件的光学参数不变,仅令次镜的曲率半径为后续进一步优化的唯一变量;其次,令焦面按照系统焦深的整数倍偏离理想位置,通过优化获得每一个焦面位置衍

难以避免。因此,为了实现高质量的成像,空间光学相机在发射入轨后,通常要经过一段较长时间的在轨定标来重新标定焦面位置,即通过在轨调焦为获得高分辨率和高信噪比图像提供保障。

当前,针对空间光学相机的调焦主要有三种方式:1) 焦面调焦,即利用电机通过涡轮蜗杆机构改变焦面位置<sup>[37]</sup>;2) 透镜调焦,即通过调节校正镜组件内部透镜间的间隔来改变焦面位置;3) 次镜子调焦,即通过主次镜之间的间隔或者利用六自由度调节机构改变次镜的空间位置,实现调焦<sup>[38]</sup>。在三种方式中,次镜调焦由于灵敏度最高,是空间相机较为理想的调焦方法。这里,通过将次镜由刚性镜替换为变曲率反射镜,就可以实现高灵敏大动态调焦。图 9 给出了某空间光学相机的典型光机结构。其中,系统口径为 600 mm,焦距为 6000 mm,  $F$  数为 10,采用 RC (Ritchey Chrétien) 加校正镜的光机形式。如图 10 所示,对焦状态时,口径为 140 mm 的次镜的曲率半径为  $-309$  mm,此时对应的调制传递函数(MTF)能满足清晰成像要求[图 10 (a)];然而,一旦出现离焦,例如焦面偏离理想位置 4 mm 时,调制传递函数剧烈退化[图 10 (b)],必须通过调焦才能实现清晰成像。

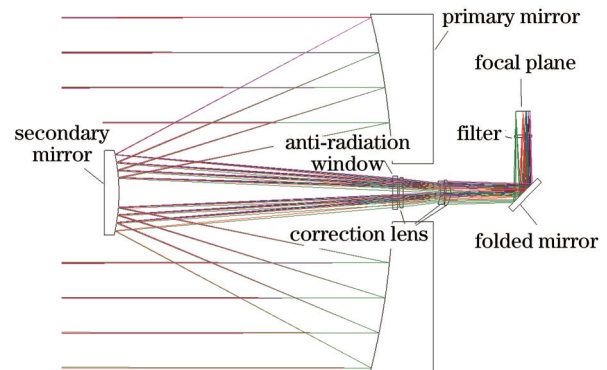


图 9 某空间光学系统设计方案

Fig. 9 Design of one space optical system

射受限成像所需的次镜曲率半径数值,其中最大的焦面偏离量即最大离焦量为 4 mm;最后,由次镜曲率半径与次镜口径大小计算得到每一个焦面位置对应的次镜矢高大小,并得到补偿每一个焦面漂移位置所需的次镜可变曲率反射镜矢高的相对变化量,由此获得次

镜曲率变化与允许补偿离焦量之间的映射关系,如表 3 所示。

表 3 次镜曲率变化与允许补偿离焦量之间的映射

Table 3 Mapping between curvature change of secondary mirror and allowable compensation defocus

Defocus /mm	Original curvature radius /mm	Changed curvature radius /mm	Central deflection equal to focus position / $\mu\text{m}$	Central deflection between two near focus positions /nm
0.1	-309	-309.0035500	0.09	83.39
0.2	-309	-309.0068266	0.18	84.07
0.3	-309	-309.0101046	0.26	84.10
0.4	-309	-309.0133838	0.34	84.14
0.5	-309	-309.0166643	0.43	84.17
0.6	-309	-309.0199462	0.51	84.20
0.7	-309	-309.0232293	0.60	84.23
0.8	-309	-309.0265137	0.68	84.26
0.9	-309	-309.0297995	0.76	84.30
1.0	-309	-309.0330865	0.85	84.33
1.1	-309	-309.0363749	0.93	84.36
1.2	-309	-309.0396646	1.02	84.39
1.3	-309	-309.0429555	1.10	84.42
1.4	-309	-309.0462478	1.19	84.45
1.5	-309	-309.0495414	1.27	84.49
1.6	-309	-309.0528363	1.36	84.52
1.7	-309	-309.0561325	1.44	84.55
1.8	-309	-309.0594300	1.52	84.58
1.9	-309	-309.0627288	1.61	84.61
2.0	-309	-309.0660290	1.69	84.65
2.1	-309	-309.0693304	1.78	84.68
2.2	-309	-309.0726332	1.86	84.71
2.3	-309	-309.0759373	1.95	84.74
2.4	-309	-309.0792427	2.03	84.77
2.5	-309	-309.0825494	2.12	84.80
2.6	-309	-309.0858574	2.20	84.84
2.7	-309	-309.0891668	2.29	84.87
2.8	-309	-309.0924774	2.37	84.90
2.9	-309	-309.0957894	2.46	84.93
3.0	-309	-309.0991027	2.54	84.96
3.1	-309	-309.1024174	2.63	85.00
3.2	-309	-309.1057333	2.71	85.03
3.3	-309	-309.1090506	2.80	85.06
3.4	-309	-309.1123692	2.88	85.09
3.5	-309	-309.1156891	2.97	85.12
3.6	-309	-309.1190103	3.05	85.16
3.7	-309	-309.1223329	3.14	85.19
3.8	-309	-309.1256568	3.22	85.22
3.9	-309	-309.1289820	3.31	85.25
4.0	-309	-309.1323086	3.39	85.29

相应地,图 11(a)给出了相对于正焦位置的次镜调焦所需矢高变化量与离焦量之间的对应关系,而图

11(b)则给出了相邻两档次镜调焦所需矢高相对变化量与离焦量之间的对应关系。可以看到,无论是次镜



矢高相对变化量与离焦量之间的关系,还是相邻两档次镜调焦所需矢高相对变化量与离焦量之间的关系,都具有良好的线性度,非常利于变曲率反射镜的控制。此外,次镜仅需通过不到  $3.5\ \mu\text{m}$  的微量矢高变化就能够实现高达  $4\ \text{mm}$  离焦的补偿,同时,相邻两档曲率变化对应的矢高变化量约为  $84\ \text{nm}$ ,易于实现高精度。

根据表 3,给出了理想对焦与利用变曲率镜补偿离焦后的 MTF 对比,如图 12 所示。可以看到,经过次镜曲率变化调焦补偿后的 MTF 与理想对焦状态相比尽管有一些差异,但是利用次镜曲率变化实现空间光学相机的高精度大动态调焦是可行的。

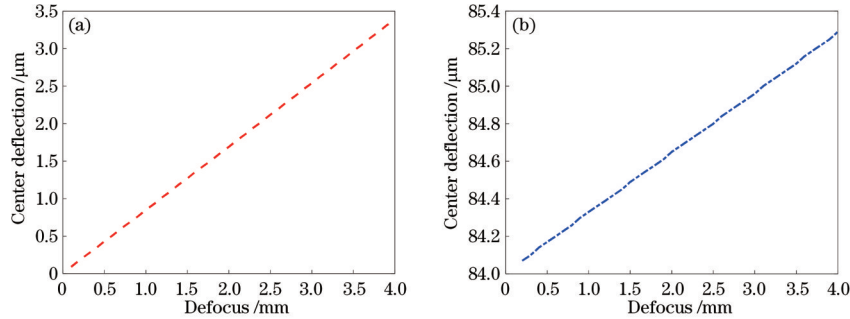


图 11 次镜调焦矢高变化与离焦量的对应关系。(a)正焦位置的次镜调焦所需矢高变化量与离焦量之间的对应关系;(b)相邻两档次镜调焦所需矢高相对变化量与离焦量之间的对应关系

Fig. 11 Correspondence between deflection of focusing vector height of secondary mirror and defocus amount. (a) Correspondence between needed deflection of focusing vector height of secondary mirror at focusing position and defocus amount; (b) correspondence between needed deflection of focusing vector height of two adjacent positions and defocus amount

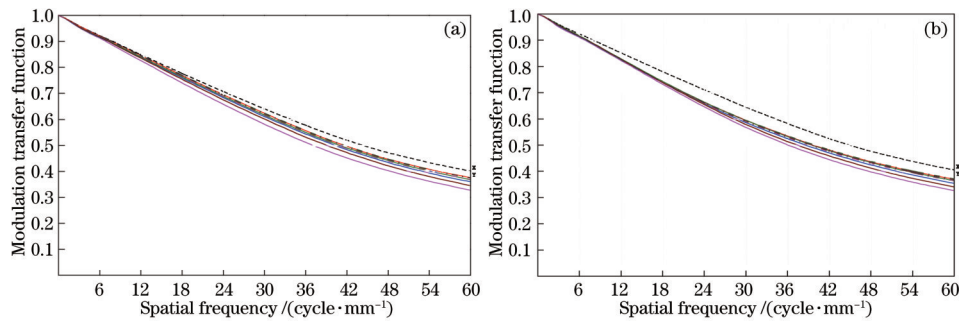


图 12 理想对焦与基于次镜曲率变化针对  $4\ \text{mm}$  离焦实施调焦补偿后的 MTF 的对比。(a)理想对焦 MTF;(b)调焦补偿 MTF

Fig. 12 Comparison between MTF corresponding to ideal in-focus and MTF for  $4\ \text{mm}$  defocus being compensated through variable curvature secondary mirror. (a) MTF of ideal in-focus; (b) MTF after focusing compensation

### 3.3 基于变曲率反射镜扫描编码的免调焦成像

对于空间环境引起的焦面漂移,传统的调焦方式或者第 3.2 节所介绍的次镜调焦方法都适用。但是对于成像距离快速变化引起的离焦而言,空间相机运动中成像过程中的调焦速度可能会严重滞后于成像距离的变化,进而导致调焦过程始终无法闭环。因此,通过拓展光学成像系统的焦深来实现免调焦成像特别适用于运动目标清晰成像。

当次镜曲率变化时,变曲率反射镜实际上就是沿光轴方向进行扫描,这将在系统中引入不同尺度的离焦波像差。对于固定的焦面位置,改变次镜的曲率半径就会使图像的清晰度发生相应的改变。由于次镜改变其自身曲率半径的速度非常快,所以如果在连续高速改变次镜曲率半径的过程中令探测器持续感光,那么就可以创造出一种大焦深成像模式。该模式将以一种类似于调制编码的方式将目标距离信息的变化综合叠加到一幅图像当中,再通过去卷积解码实现离焦不变。

这种方式在本质上与积分时间内通过动态改变焦面位置进行编码成像的方式类似<sup>[37]</sup>,积分时间内次镜曲率变化对应的系统等效传递函数尽管对离焦不敏感,但是其幅值与衍射受限相比显著降低,同样需要进行去卷积解码处理。因此,获取变曲率反射镜扫描等效编码成像调制传递函数是获得免调焦清晰成像的关键。

图 13 给出了变曲率反射镜扫描等效编码成像调制传递函数的流程,主要包括以下几个步骤:1)在光学设计软件中,通过将实际成像设置到偏离理想焦面的多个位置,并针对每一个像面位置通过优化获得次镜对应的最佳曲率半径,其中,实际成像位置与理想焦面之间的偏差即设计引入的离焦可以达到毫米量级;2)将像面恢复至初始位置;3)针对次镜的每一档曲率半径,将其对应的点扩散函数(PSF)存储下来;4)采用离散傅里叶变换将 PSF 转换为光学传递函数,并对所有档位的光学传递函数叠加求和,得到大焦深光学传递函数;5)根据空间相机所采用的探测器的像元大小

与采样间隔,获得探测器对应的传递函数,并将大焦深光学传递函数与探测器传递函数相乘,获得与所需核

函数对应的系统传递函数;6)将大焦深传递函数进行傅里叶逆变换,获得所需的核函数。

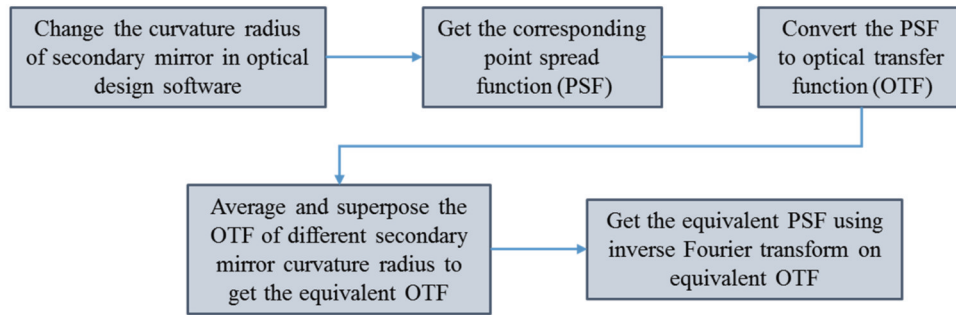


图 13 变曲率反射镜扫描等效编码成像 MTF 流程

Fig. 13 Process of variable curvature mirror scanning MTF of equivalent encoding imaging

按照图 13 所示流程,令离焦参量从 0 变化到 30,那么就可以得到编码成像等效的调制传递函数。如图 14(a) 所示,大焦深空间相机系统对应的调制传递函数(虚线)与衍射受限相比显著降低,但是在整个通频带范围内也没有零点出现,从而为开展去卷积恢复信息提供了基础。实际上,该方法允许将重度离焦的范围

进一步扩展至 40 以上。图 14(b) 给出了焦深不同扩展范围对应的等效光学传递函数,可以看到:随着焦深扩展范围的增加(实线、点划线以及虚线分别代表最大离焦参量为 30、40 和 50 的情况),等效光学传递函数的幅值尽管会降低,但是依然不会出现零点,从而证明了该方法在扩展系统焦深方面的潜力。

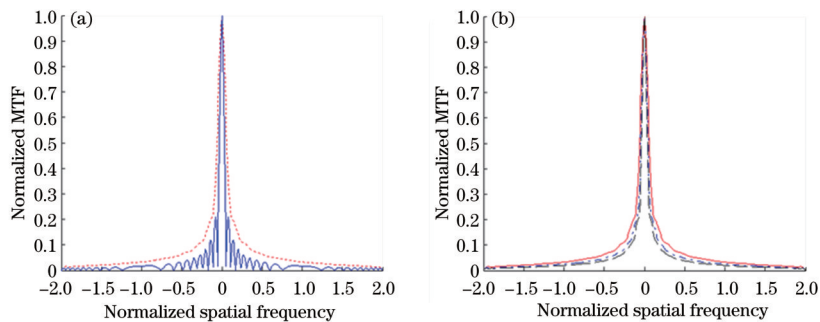


图 14 0~30 离焦量对应的等效编码成像调制传递函数。(a) 大焦深空间相机系统对应的 MTF; (b) 焦深不同扩展范围对应的等效 OTF

Fig. 14 MTF of equivalent encoding imaging under defocus of 0-30. (a) MTF of large focal depth space camera system; (b) equivalent OTF for different focal depth extended range

实际上,早在 1995 年,波前编码技术就被提出用于扩展成像系统的焦深<sup>[38]</sup>。其中,最经典的就是三次方编码成像。次镜扫描编码成像与经典波前编码成像相比具有自身的特点:1)经典波前编码成像一旦设计

定型,就无法改变其编码特性,而次镜扫描编码成像则可以根据实际成像距离的变化范围动态改变其编码特性,灵活性更强;2)次镜扫描编码成像对应的 PSF 始终是旋转对称的(图 15),而三次方编码系统对应的

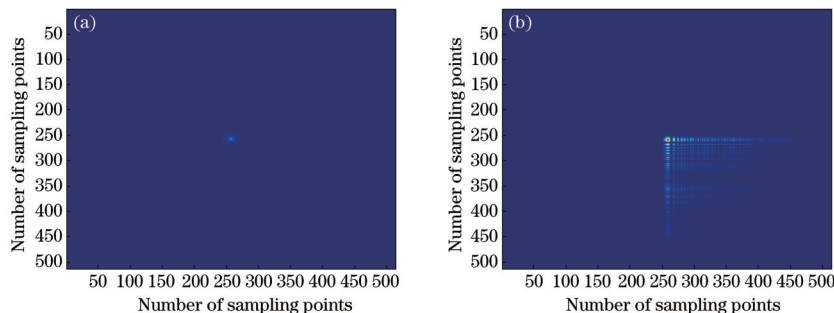


图 15 次镜调制编码等效 PSF 及三次方相位编码 PSF。(a) 次镜调制编码等效 PSF; (b) 三次方相位编码 PSF

Fig. 15 Equivalent PSF of secondary mirror modulation coding; (b) PSF of cubic phase coding

PSF 则是非旋转对称的,这就意味着对综合叠加编码图像进行去卷积时不存在相位残差引起的伪像问题<sup>[39]</sup>,因此可以获得更好的清晰成像效果;3)由大焦深系统与经典三次方相位编码对应的等效调制传递函数之间的对比(图 16)可以看到,次镜扫描编码成像对应的调制传递函数在中低频较大,意味着中间编码图像的信噪比更高,更利于后续去卷积获得更好的复原效果。

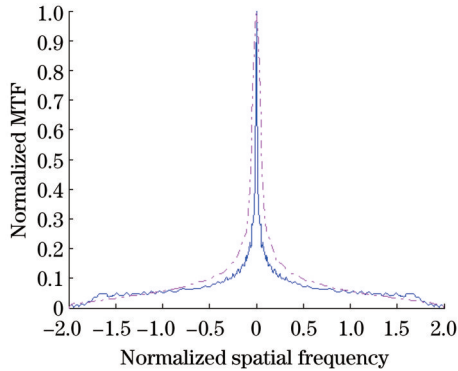


图 16 大焦深系统与经典三次方相位编码对应的等效调制传递函数对比

Fig. 16 Comparison of equivalent MTF between large depth-of-focus system and classical cubic phase encoding

## 4 结 论

变曲率反射镜作为一种主动光学元件,在成像及非成像领域都有应用价值,因此本文对本课题组在该领域的研究进展及取得的结果进行了介绍。研究表明:理论机理研究和实验验证都证明了变厚变曲率反射镜在大形变与高面形精度方面的双重潜力。以此为基础,本课题组深入挖掘了变曲率反射镜的技术潜力。首先,通过新的优化与设计方法实现了能够将反射镜中心形变达到几百毫米以上且在光学波段仍然保持高面形精度的目标,这为大变倍比无运动部件变焦成像提供了保障;其次,探索了变厚变曲率反射镜在空间相机中的应用方式,将其与计算成像结合,提出了变曲率次镜调制编码成像方法并通过仿真分析证明了其有效性,这为将来构造免调焦空间相机提供了理论上的可能。

### 参 考 文 献

- [1] Bin-Nun E, Dothan-Deutsch F. Mirror with adjustable radius of curvature[J]. Review of Scientific Instruments, 1973, 44(4): 512-513.
- [2] Apollonov V V, Vdovin G V, Ostrovskaya L M, et al. Active correction of a thermal lens in a solid-state laser. I. Metal mirror with a controlled curvature of the central region of the reflecting surface[J]. Soviet Journal of Quantum Electronics, 1991, 21(1): 116-118.
- [3] Volyak T B, Krasjuk I K, Pashinin P P. Adaptive mirror for large-aperture laser beams[J]. Proceedings of SPIE, 1985, 0473: 280-283.
- [4] Belomestnov P I, Vyazovich E I, Soloukhin R I, et al. Tunable resonator with a mirror of variable curvature[J]. Soviet Journal of Quantum Electronics, 1974, 3(4): 347-348.
- [5] Greiner U J, Klingenberg H H. Thermal lens correction of a diode-pumped Nd:YAG laser of high TEM<sub>00</sub> power by an adjustable-curvature mirror[J]. Optics Letters, 1994, 19(16): 1207-1209.
- [6] Jarosch U K. Adaptive metal mirror for high-power CO<sub>2</sub> lasers[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2774: 457-467.
- [7] Okada T, Ebata K, Shiozaki M, et al. Development of adaptive mirror for CO<sub>2</sub> laser[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 3888: 509-520.
- [8] Okada T. Variable-curvature reflecting mirror: US6021153[P]. 2000-02-01.
- [9] Miks A, Novak J, Novak P. Theoretical analysis of imaging properties of a pressure-actuated deformable mirror for adaptive compensation of rotationally symmetrical wavefronts[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(11): 1268-1273.
- [10] Rabczuk G T, Sawczak M. Conditions for the dynamic control of the focusing properties of the high-power CW CO<sub>2</sub> laser beam in a system with an adaptive mirror[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5449: 149-154.
- [11] Rabczuk G T, Sawczak M. High-power cw CO<sub>2</sub> laser beam properties in a system with a variable focal length mirror[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5481: 37-42.
- [12] Rabczuk G T, Sawczak M. Output characteristics of a high-power cw CO<sub>2</sub> laser with a dynamic control of the optical cavity configuration[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5230: 183-188.
- [13] Warwick T, Howells M, Shlezinger M. A variable radius mirror for imaging the exit slit of a spherical grating monochromator undulator beamline at the ALS [J]. Review of Scientific Instruments, 1995, 66(2): 2270-2272.
- [14] Schwarz J, Geissel M, Rambo P, et al. Development of a variable focal length concave mirror for on-shot thermal lens correction in rod amplifiers[J]. Optics Express, 2006, 14(23): 10957-10969.
- [15] Schwarz J, Ramsey M, Headley D, et al. Thermal lens compensation by convex deformation of a flat mirror with variable annular force[J]. Applied Physics B, 2006, 82(2): 275-281.
- [16] Penado Ernesto F, Clark J H, Heilman M, et al. Experimental verification of compliant mirror wavefront correction using a single actuator[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10747: 1074708.
- [17] Lemaitre G R. Mirror with a variable focal distance: US4119366[P]. 1978-10-10.
- [18] Hugot E, Madec F, Vives S, et al. Active laser guide star refocusing system for EAGLE instrument[C]//1st AO4ELT Conference-Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes, June 22-26, 2009, Paris, France. Les Ulis: EDP Sciences, 2010: 04008.
- [19] Ferrari M, Lemaitre G R. Active optics methods for highly aspheric mirrors: manufacturing the quaternary



- mirror of the OWL project[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4003: 34-42.
- [20] 巩马理, 胡震岳, 黄磊, 等. 一种调节反射镜曲率半径的装置: CN102684055A[P]. 2012-09-19.  
Gong M L, Hu Z Y, Huang L, et al. Device for adjusting curvature radius of reflector: CN102684055A [P]. 2012-09-19.
- [21] 冯志庆, 白兰, 张增宝, 等. 高能激光反射镜热变形补偿[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1781-1787.  
Feng Z Q, Bai L, Zhang Z B, et al. Thermal deformation compensation of high-energy laser mirrors [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(8): 1781-1787.
- [22] 张治国, 张增宝, 金玉奇. 一种可变曲率反射镜装置: CN102147524A[P]. 2011-08-10.  
Zhang Z G, Zhang Z B, Jin Y Q. Curvature-variable reflector device: CN102147524A[P]. 2011-08-10.
- [23] 张治国, 熊木地, 张增宝, 等. 单驱动变曲率单晶硅反射镜的研究[J]. 激光技术, 2012, 36(2): 280-284.  
Zhang Z G, Xiong M D, Zhang Z B, et al. Research of single crystal silicon mirror with variable curvature controlled by a single actuator[J]. Laser Technology, 2012, 36(2): 280-284.
- [24] Lu X Y, Zhang Y N, Cheng Z H. Flexible focus variable expander[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3550: 419-424.
- [25] Zhao H, Xie X P, Wei J X, et al. Annular force based variable curvature mirror aiming to realize non-moving element optical zooming[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9678: 967807.
- [26] Zhao H, Xie X P, Xu L, et al. Variable curvature mirror having variable thickness: design and fabrication[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10463: 104631D.
- [27] Zhao H, Xie X P, Xu L, et al. Performance comparison between two kinds of variable curvature mirrors: mathematical analysis, prototype design, experimental demonstration, and application potentials in realizing non-moving element optical zooming[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10837: 108371C.
- [28] Xie X P, Xu L, Wang Y J, et al. Solving, analyzing, manufacturing, and experimental testing of thickness distribution for a cycloid-like variable curvature mirror[J]. Optics Express, 2021, 29(12): 18010-18025.
- [29] Aluminum variable-radius mirrors[EB/OL]. [2021-09-06]. <https://ii-vi.com/product/aluminum-variable-radius-mirrors/>.
- [30] Dowty J R. Method for adjusting the radius of curvature of a spherical mirror: US4162825[P]. 1979-07-31.
- [31] Timoshenko S, Woinowsky-Krieger S. Theory of plates and shells[M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1959.
- [32] Lemaitre G R. Astronomical optics and elasticity theory: active optics methods[M]. Berlin: Springer, 2009.
- [33] Seidl K, Knobbe J, Grüger H. Design of an all-reflective unobscured optical-power zoom objective[J]. Applied Optics, 2009, 48(21): 4097-4107.
- [34] Seidl K, Richter K, Knobbe J, et al. Wide field-of-view all-reflective objectives designed for multispectral image acquisition in photogrammetric applications[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8172: 817210.
- [35] 张庭成, 刘莉萍, 常军, 等. 四反射镜红外变焦系统设计[J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(3): 196-199.  
Zhang T C, Liu L P, Chang J, et al. Design of infrared zoom system with 4 reflective mirrors[J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2010, 29(3): 196-199.
- [36] 沈木兰, 常军, 王希, 等. 三反射主动变焦系统设计[J]. 物理学报, 2014, 63(14): 144201.  
Shen B L, Chang J, Wang X, et al. Design of the active zoom system with three-mirror[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(14): 144201.
- [37] Kuthirummal S, Nagahara H, Zhou C Y, et al. Flexible depth of field photography[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(1): 58-71.
- [38] Dowski E R, Cathey W T. Extended depth of field through wave-front coding[J]. Applied Optics, 1995, 34(11): 1859-1866.
- [39] Demenikov M, Harvey A R. Image artifacts in hybrid imaging systems with a cubic phase mask[J]. Optics Express, 2010, 18(8): 8207-8212.

### 约稿专家简介:



高立民(1965—), 博士, 研究员/博士生导师。1988年考入浙江大学光学仪器工程学系光学仪器专业学习, 1988年7月本科毕业获得学士学位, 同年进入中国科学院西安光学精密机械研究所继续深造, 1991年7月获得硕士学位, 2003年获得博士学位。2008—2018年任中国科学院西安光学精密机械研究所副所长。长期从事光电检测仪器的研制工作, 主要的研究方向包括方位定向与传递以及强激光参数测量, 承担并完成了多个型号任务的配套研制工作。E-mail: glm@opt.ac.cn。