红外与激光工程
INFRARED AND LASER ENGINEERING
EI, SCOPUS, CSCD等收录期刊

大口径主动光学巡天望远镜大动态范围曲率传感

安其昌　吴小霞　张景旭　李洪文　王亮

Large dynamic range curvature sensing for large-aperture active-optics survey telescope

An Qichang, Wu Xiaoxia, Zhang Jingxu, Li Hongwen, Wang Liang

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3788/IRLA20210224

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于dOTF的大口径透射光学元件检测技术

Large aperture transmission optical element detection method based on dOTF

红外与激光工程. 2021, 50(6): 20200358–1–20200358–7　https://doi.org/10.3788/IRLA20200358

大口径巡天望远镜校正镜弹性体支撑

Elastomer support for large survey telescope corrector

红外与激光工程. 2020, 49(S1): 20200124–20200124　https://doi.org/10.3788/IRLA20200124

基于曲率/斜率混合传感的镜面视宁度检测方法

Detection method of mirror seeing based on curvature/ slope hybrid sensing

红外与激光工程. 2021, 50(7): 20200419–1–20200419–7　https://doi.org/10.3788/IRLA20200419

大口径望远镜阻尼调制技术

Tuned damping technique for large telescope

红外与激光工程. 2017, 46(8): 818006–0818006(6)　https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0818006

大口径望远镜次镜系统的拓扑优化设计

Topological optimization design for SM system of large aperture telescope

红外与激光工程. 2018, 47(8): 818008–0818008(6)　https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0818008

大口径望远镜主镜支撑系统装调

Assembly for large aperture telescope primary mirror support system

红外与激光工程. 2017, 46(9): 918003–0918003(8)　https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0918003

大口径主动光学巡天望远镜大动态范围曲率传感

安其昌[1]，吴小霞[1]，张景旭[1]，李洪文[1]，王　亮[1,2*]

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033；
2. 吉林大学 机械与航空航天工程学院，吉林 长春 130025)

摘　要：为了保证外界环境剧烈变化下大口径巡天望远镜的成像质量以及实现系统的快速对准，其波前传感系统在保持像差检测精度的同时也需要具备较大动态范围。首先基于同侧离焦星点像光强分布与曲率传感技术建立了一套大动态范围的对准检测技术，分别使用解析式表达和机器学习方法实现离焦量以及系统其余低阶像差的解算。然后对不同类型像差的解算精度进行了理论分析，最后针对所提出方法进行实验验证，结果表明离焦检测误差 (以波前 RMS 变化为准) 分别小于 5%，而失调检测误差小于 15%，满足对准装调要求。

关键词：大口径巡天望远镜；　集成检测；　曲率传感；　机器学习

中图分类号：P111.2; O439　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.3788/IRLA20210224

Large dynamic range curvature sensing for large-aperture active-optics survey telescope

An Qichang[1], Wu Xiaoxia[1], Zhang Jingxu[1], Li Hongwen[1], Wang Liang[1,2*]

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: In order to ensure the imaging quality of large-aperture survey telescope under dramatic changes of external environment and realize fast alignment, the wavefront sensing system was required to cover a large dynamic range while maintaining the aberration detection accuracy. First, a set of large dynamic range alignment technology was established based on the light intensity distribution of the single-sided defocus image and curvature sensing. Both analytical formulas and machine learning methods were used to figure out the defocusing and other low-order aberrations. Then, theoretical analysis was made on the resolution accuracy of different types of aberrations. Finally, experimental verification was carried out. The results show that the defocusing detection error (take wavefront RMS variation as the criterion) is less than 5%, while the misalignment detection error is less than 15%, which meets the alignment and adjustment requirements.

Key words: large-aperture survey telescope;　assembling testing;　curvature sensing;　machine learning

收稿日期:2021−04−04;　**修订日期:**2021−07−03

基金项目:中国科学院青年创新促进会 (2020221); 国家自然科学基金 (62005279); 中国科学院装备研制项目 (YJKYYQ20200057); 中国科学院大学 2020 年度大学生创新实践训练计划 (2019005770)

作者简介:安其昌，男，助理研究员，博士，研究方向为大口径光机系统检测装调。

通讯作者:王亮，男，副教授，博士，研究方向为自适应光学波前探测与波前控制。

0 引 言

随着时域天文的发展,天文学界对大口径巡天望远镜的需求越来越大。望远镜口径的增加不仅可以有效地提高对临近目标的分辨能力,同时还可以提升暗弱目标成像信噪比、拓展极限探测能力,最终实现对更加深远宇宙的探索[1]。因此,大口径巡天望远镜是未来验证宇宙学最新理论、增加时域天文等领域学术话语权的关键。

大口径巡天望远镜在近 20 年来获得了飞速发展,为了获得更高的巡天效率与集光能力,其口径与视场都在不断扩大[2]。主动光学作为大口径巡天望远镜的关键技术已经获得了广泛的应用。国外已经研制并成功运行多台大口径巡天望远镜,8 m 级的大口径全景巡天望远镜已经投入建设,而国内尚未开展 4 m 口径以上的大视场望远镜研究。不论是在占领“太空高地”保障国土安全方面,还是在探测存在撞击威胁的小行星等天文学领域,均存在较大的差距[3−8]。为了进一步发挥大口径巡天望远镜的探测能力,通过主动光学对望远镜中的各个主要部件进行独立、实时的面形校正与姿态控制,不仅可以降低对光学加工、系统装配精度的要求,还可以有效地放宽对大型跟踪架刚度的要求,降低系统运动惯量[9−11]。

大口径望远镜观测初始阶段所面临的环境变化可能导致观测前的调节无法充分发挥作用,严重地影响了望远镜的工作效率[12],这一效应对于观测任务紧张、积分时间更长的巡天望远镜的影响更加明显。同时,由于该过程为初始状态不确定,实际边界条件难以预估,因此难以使用软件仿真与预先标校的方法。因此,为了在这种情况下发挥主动光学的作用,系统需要一种大动态范围,同时灵敏度可调的波前传感方式,并以此为反馈实施波前校正。

高性能的波前传感系统是大口径巡天主动光学系统获得更优成像质量与更强探测能力的重要基础。波前传感解算本质上是一个利用强度信息恢复光场信息的过程,主要分为干涉法与非干涉法。干涉测量法适用于相干光照明,干涉光路复杂,测量环境稳定性要求高,一般用于实验室内系统标校;而非干涉测量方法中,相位差异技术基于波前经过存在差异的光学系统 (如引入少量的离焦) 后所产生的变化,利用优化迭代的方法求解波前相位。对于大口径巡天系统而言,相位差异技术单一像差量程小于一个波长的特点,导致其无法有效地针对巡天望远镜像差较大的边缘视场;同时,天光背景与渐晕造成的光瞳非均匀照明也会对相位恢复的精度造成影响,无法实现大动态范围的波前传感。曲率传感器是由 Roddier 在 1988 年提出的[13],其基本原理为通过焦前与焦后像的光强分布估计波前曲率变化,并解算波前信息,由于其可以满足大口径主动光学照相巡天望远镜的特定需求,同时可与科学相机用相同的器件,便于图像采集以及后期维护,具有非干涉 (无需参考光)、结构简单、环境适应性好、解算稳定 (无需迭代)、孔径遮拦影响小等诸多独特优势,已广泛应用于大口径照相巡天望远镜主动光学波前传感系统之中。

但是,目前现有的波前传感技术均需要在探测器接近焦面的位置才可以进行测量,曲率传感需要在焦面附近前后运动,分别获得焦前焦后的光强分布,这些限定要求严重限制了波前传感在主动光学工作初期的作用发挥。针对系统开始工作阶段光学元件较大的位置偏移,当离焦面较远时,传统的方法无法实现,附加测量的方法代价高 (传统的方法为利用附加的距离测量手段确定系统失调状态,但是其测量硬件与时间成本都较高,同时在系统观测的过程中无法发挥作用,造成资源的浪费)。

在此,文中提出大口径主动光学巡天望远镜大动态范围曲率传感方法,基于曲率传感基本原理与机器学习强大的信息提取能力,在系统失调较为严重的情况下实现波前传感,扩大了传统曲率传感的动态范围,可实现系统的快速对准与启动,增加观测窗口的利用率。

1 波前曲率传感技术

波前曲率传感是一种基于曲率传感器来测量波前的技术。其测量依据的原理如下:波前局部的曲率变化将引起焦内像与焦外像的光强分布发生对应的变化,根据这种变化可以对波前径向估计,即利用光强沿光轴方向的差分建立对于波前曲率的估计,并利用相应的解算方法从曲率信号中提取波前相位信息。测量的原理如图 1 所示,黄色部分代表光学系统,蓝色代表像面,z 代表光轴方向,l 代表焦距,Δz 代表离焦量,箭头为光轴方向。

以主焦点形式的大口径巡天望远镜为例,在其主焦点组件相机终端中,内置错位型曲率传感器 (利用

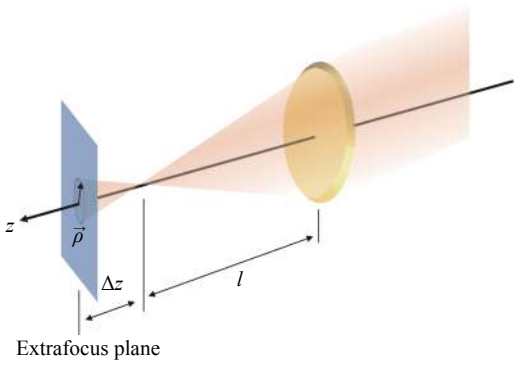


图 1 曲率传感原理图

Fig.1 Principle diagram of curvature sensing

两块分别位于焦面前后的探测器同时采集离焦图), 设光源照明强度为无饱和, 主焦点组件进行调焦时, 错位型传感器均位于焦面的一侧, 在打开圆顶进行观测的过程中逐步进行调节, 在降低像差水平的同时减少离焦量。根据近场电磁波的传输方程可以解算出波前信息, 如公式 (1) 所示[13]:

$$\frac{\partial I(\vec{\rho})}{\partial z}=-\left(\delta(\vec{\rho}).\nabla\Phi(\vec{\rho})+I(\vec{\rho})\nabla^2\Phi(\vec{\rho})\right) \tag{1}$$

式中: $I(\vec{\rho})$为强度; $\Phi(\vec{\rho})$为相位; ∇为梯度算子, 得到的结果为斜率; ∇^2为拉普拉斯算子, 得到的结果为曲率; $\vec{\rho}$为光瞳内坐标; δ为狄拉克算子。可见其结果与斜率、曲率均有关。

对公式 (1) 进行变形, 利用沿光轴的光强差分 $\Delta I(\vec{\rho})$代替微分, 同时, 忽略边缘像素的影响可以得到:

$$\Delta I(\vec{\rho})=-I(\vec{\rho})\nabla^2\Phi(\vec{\rho}) \tag{2}$$

对公式 (2) 进行泊松方程的求解即可, 之后通过傅里叶变换的方法可以求解公式 (2)[13]。针对单空间频率分量 (彗差主导) 的波前对应的焦前焦后光强分布如图 2 所示, 基于图 2 的光强分布, 通过频域积分所得结果如图 3 所示, 解算值与理想值的差值如图 3(c)

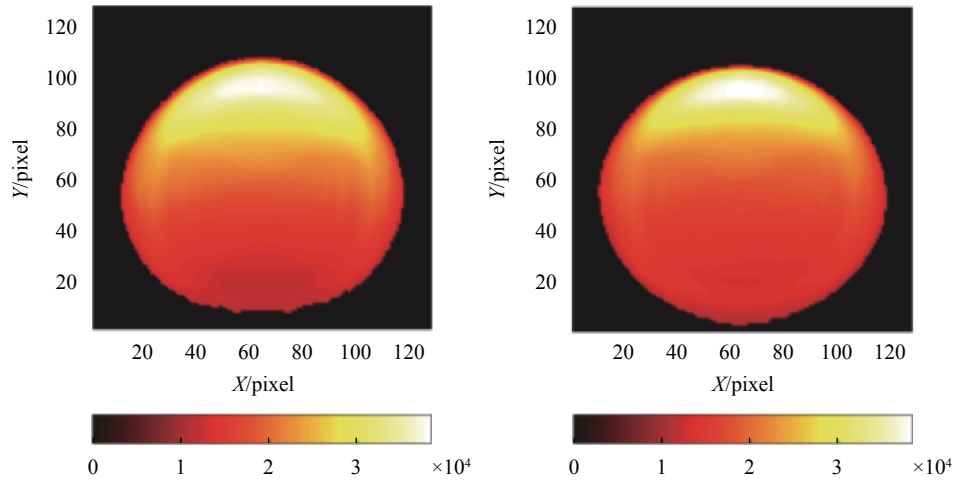
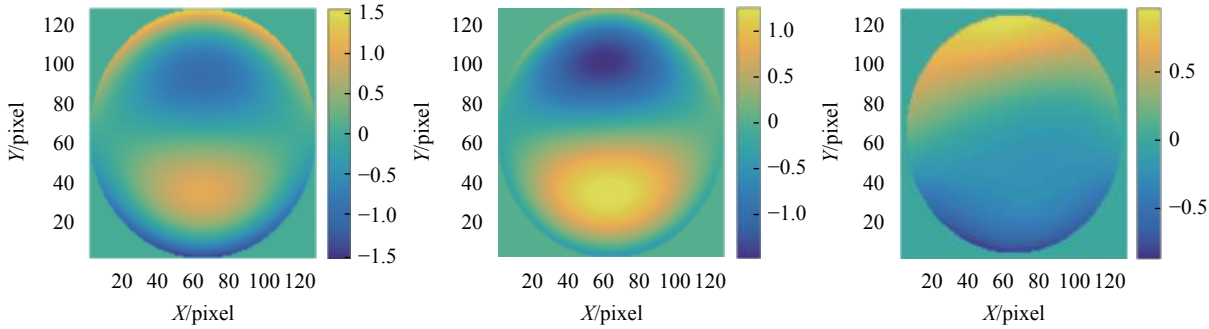


图 2 彗差主导波前焦前焦后光强分布

Fig.2 Coma dominated wavefront pre-focal and post-focal light distribution



(a) 目标波前
(a) Target wavefront

(b) 求解所得波前
(b) Solving the resulting wavefront

(c) 解算后的波前残差
(c) Calculated wavefront residuals

图 3 彗差主导波前重建精度图 (以波前 RMS 变化为准)

Fig.3 Coma dominated wavefront retrieval accuracy (take wavefront RMS variation as the criterion)

所示，经核算针对彗差的波前解算误差低于 5% (以波前 RMS 变化为准)。

2 大动态范围波前曲率传感

根据公式 (2) 可得，进行曲率传感需要进行光强的差分，因此，传统的曲率传感要求错位型传感器位于焦面的两侧，以保证焦前焦后像的大小接近。但在望远镜圆顶内标校后，面对圆顶外部环境，较大的系统离焦导致错位型曲率传感器往往位于焦面的一侧，超出了传统曲率传感的动态范围。面对这种情况，需要对大动态曲率传感原理与实现装置进行研究。

将大动态范围的曲率传感分为两个环节，首先针对离焦这一影响最大的失调情况，基于系统离焦星点像大小与焦面离焦量成正比这一基本原理，确定系统的离焦状况实现焦平面的调节。在此基础上，由于离焦星点像椭圆率与波前的像散成比例关系，同时星点像重心的偏离也与彗差直接相关，将离焦星点像光强分布的形态与纹理作为判断其波前误差的依据，结合利用神经网络强大的非线性建模能力实现数据驱动的波前传感，克服传统方法无法在单侧大范围离焦情况下工作的缺点。

2.1 离焦解算方法与精度分析

在望远镜观测的开始阶段，由于热环境发生突变，望远镜跟踪架、主镜室等大型桁架结构会产生较大的形变，进一步影响光学成像质量[14]，甚至造成系统无法成像。在此情况下，波前误差的变化范围超出了一般的曲率传感器的动态范围，导致在这一过程中望远镜处于无法监测的状态。

位于焦面同侧的两个离焦星点像的大小与离焦量成正比关系。利用两幅同侧离焦图中星点像半径的比例关系可以获得主焦点组件沿光轴方向的移动量。

根据近场电磁波的传输方程，在波前传递的任意过程中均可以通过差分获得波前曲率[15]，并获得波前解算出波前信息，离焦星点像半径如公式 (3) 所示，离焦测量原理如图 4 所示。

$$R=\frac{D}{2f}z=\frac{z}{2F^{\#}} \tag{3}$$

式中：f为系统焦距；D为入瞳口径；$F^{\#}$为系统 F 数；z为离焦量。两个焦面上离焦星点像的等效拟合半径分别如公式 (4)、(5) 所示：

$$R_1=\frac{\Delta z}{2F^{\#}} \tag{4}$$

$$R_2=\frac{\Delta z+2\delta z}{2F^{\#}} \tag{5}$$

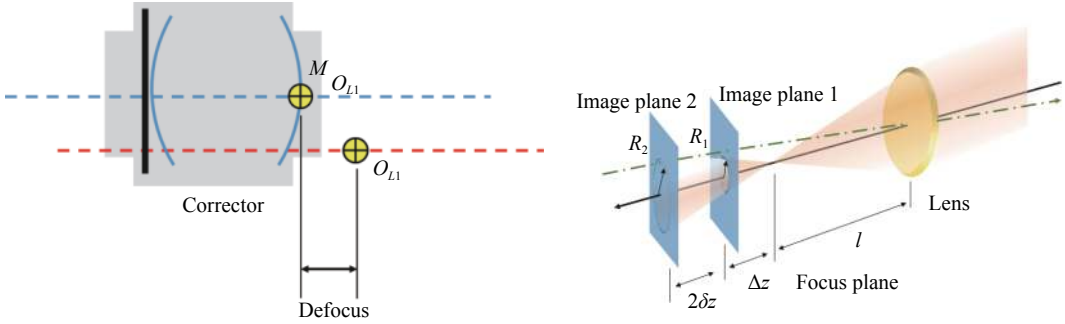
式中：Δz为系统待测离焦量；$2\delta z$为引入的附加离焦量 (已知量)。可得系统的待测离焦量Δz为：

$$\Delta z=2\delta z R_1/(R_2-R_1) \tag{6}$$

在实际计算过程中，等效拟合半径通过与离焦像点面积相等圆的半径所代表。

根据等效直径，图 5 中两者的离焦量为 2 倍，而实际检测为 1.93 倍，其误差小于 5%。但对于低阶像差检测，离焦量量差较大的情况导致其光强差分与波前曲率差别较大。

理论上，沿着光轴方向任意两个垂直光轴平面上强度的差分均可以获得波前的曲率信息，但由于光斑大小的变化，无法实现准确的映射。基于图 5 的光强分布，在此情况下彗差主导波前解算结果如图 6 所示。可见焦前焦后像的分布区域不对应，通过差分估计偏导的物理基础不再成立，因此传统的曲率传感算

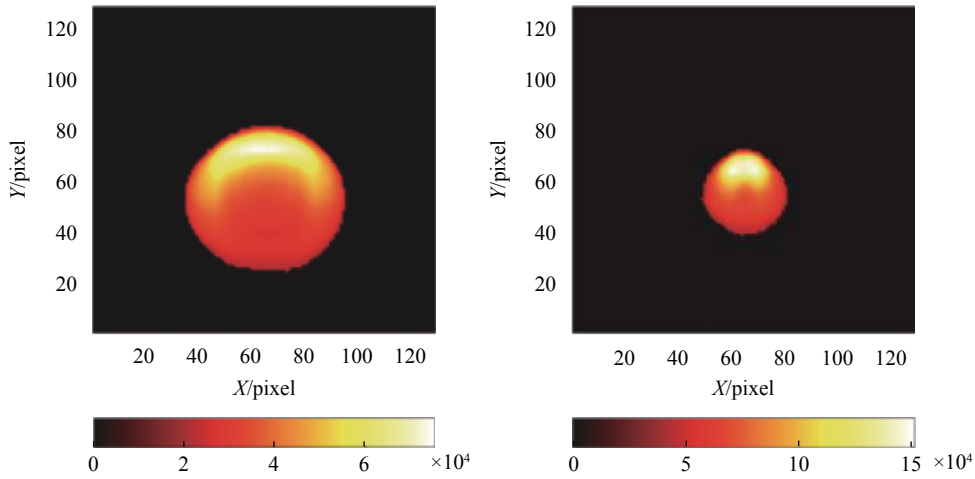


(a) 主焦点组件离焦示意图
(a) Schematics of primary focus assembly defocus

(b) 曲率传感离焦检测示意图
(b) Schematics of curvature sensing defocus detection

图 4 离焦量检测示意图

Fig.4 Schematic diagram of defocus detection

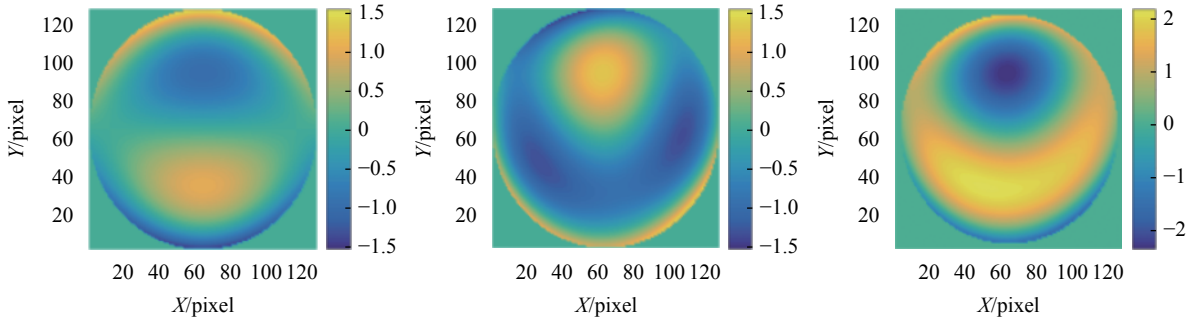


(a) 离焦星点像 1
(a) Defocused image 1

(b) 离焦星点像 2
(b) Defocused image 2

图 5 多重离焦主导波前焦前焦后光强分布

Fig.5 Multiple defocusing dominant wavefront pre-focal and post-focal intensity distribution



(a) 目标波前
(a) Target wavefront

(b) 求解所得波前
(b) Solving the resulting wavefront

(c) 解算后的波前残差
(c) Calculated wavefront residuals

图 6 多重离焦主导波前重建精度图 (以波前 RMS 变化为准)

Fig.6 Multiple defocusing dominant wavefront reconstruction error accuracy (take wavefront RMS variation as the criterion)

法已经不再适用, 解算误差极大 (以波前 RMS 变化为准), 该情况下相位曲率与光强之间的表达为隐式映射, 使用标量衍射分析其解算过程过于复杂, 同时会存在不收敛的问题。

2.2 基于机器学习的大动态范围低阶像差检测技术

近年来, 机器学习算法因其对大数据的强大处理能力被广泛应用于光学传感的各个领域, 通过实际测量或计算模拟仿真得到大量的数据, 机器学习方法可以实现端到端的建模, 构建除从图像拓扑结构、能量分布到系统光学特性的直接映射关系, 从而直接预测类似体系的性质。Guerraramos D 针对拼接望远镜进行了共相流程理论分析, 获得了测量量程大、识别准确率高的良好结果, 能有效抑制传统波前检测方法中的 2π 不确定效应,为大口径望远镜大量程、高精度波前探测指明了新的方向[16]。在此采用机器学习的方法, 以两幅大离焦波前结果为输入, 利用误差反向传播, 以仿真获得的理想波前数据为输出建立神经网络。

以各个视场所测得的离焦图像为输入, 以低阶像差为输出, 建立并训练神经网络; 通过神经网络解算各个视场的低阶像差, 最终获取主焦点组件相对主镜的偏离信息[17]; 获得主焦点组件对应的偏离量。在进行形态学分析前, 需要针对离焦星点像一些探测器坏点、饱和点、以及散斑噪声造成的图形缺陷采用“膨胀”、“腐蚀”这一图形学常用的运算, 首先利用“膨胀”运算将图像上的孔洞进行平滑, 进而进行“腐蚀运算”, 将真正的边缘还原。之后以两幅强度图像分布图为输入, 以泽尼克多项式系数为输出, 训练神经网络。在实际的操作中, 首先利用上节中的方法将两幅

离焦星点像的半径调为像差一倍，之后利用所建网络解算低阶像差，最终实现系统准直，如图 7 所示，以各个视场所测得的错位传感器获得的离焦图像为输入，以低阶像差为输出，训练神经网络。对神经网络中的连接权重和偏置，基于梯度下降的方法实现向后传播更新优化，以使损失函数 (残差) 达到最小。

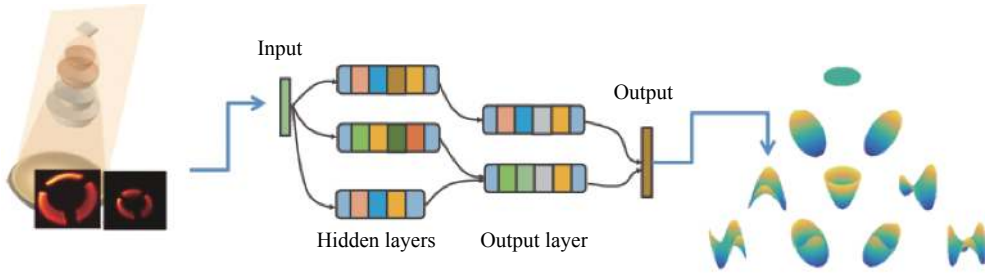


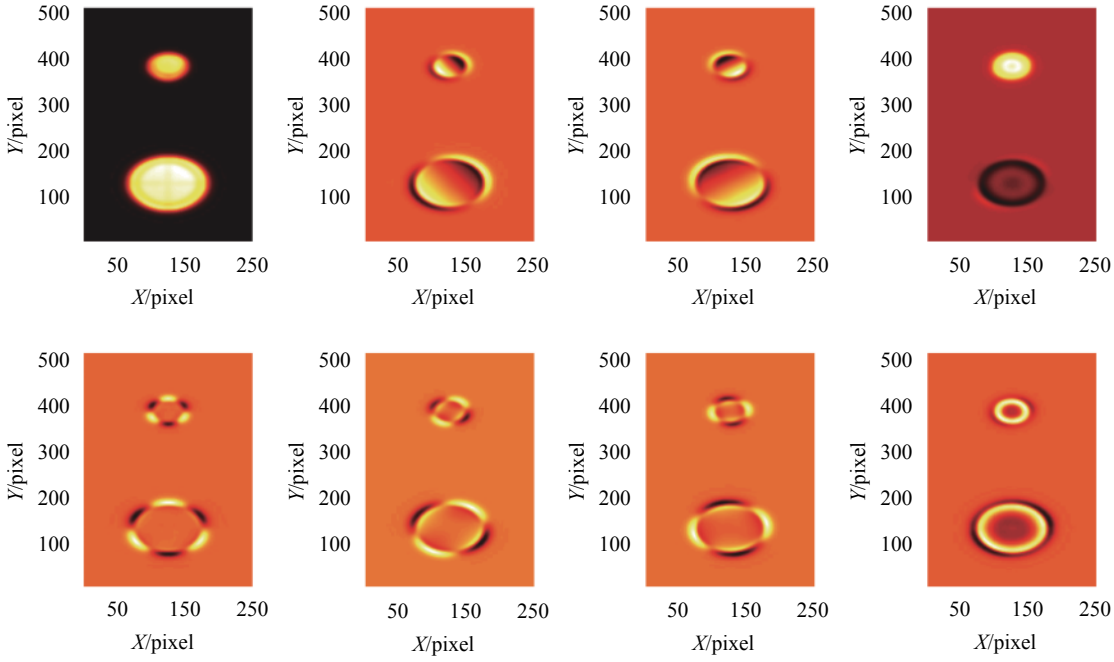
图 7 系统低阶像差解算示意图

Fig.7 Schematic diagram of system low order aberration calculation

2.3 机器学习模型

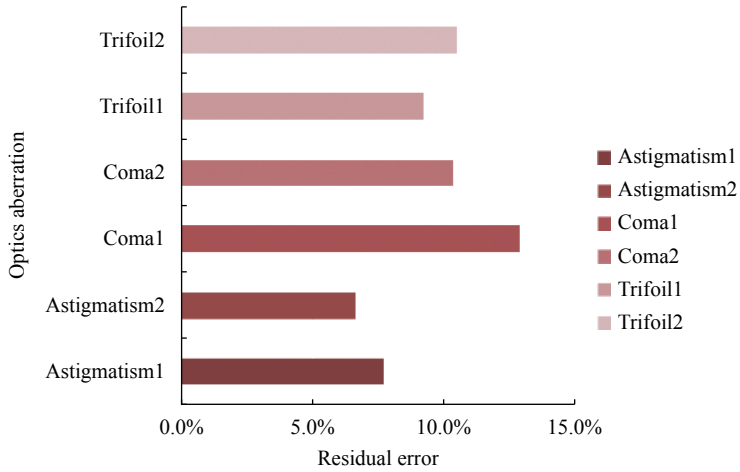
主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 是一种基于统计学意义的数据降维方法，面向多变量课题时，为能减少数据维度所带来的复杂性，通过正交变换将数据映射到一组正交基底上。采用奇异值分解的方法，首先将数据重排为一维向量，之后利用奇异值分解求解其主成分，主成分分析法对低阶像差估计非常有优势，可以有效地提取出低阶像差对离焦星点像形态的影响。

在此，随机生成了 20000 个波前及对应的错位探测器所获得额度离焦星点像。在样本生成的过程中充分考虑了不同的低阶像差，以保证样本的完备性。所生成的样本主成分如图 8 所示。建立双隐层 (10-10) 神经网络，对于隐藏层网络结构所对应的全连型神经网络，分别随机选取 90% 的数据作为训练集，其余 10% 的数据集作为验证集。输出层共包含六个神经元，对应大口径大视场系统的低阶像差，分别为彗差像散与三叶像差。利用向后传播神经网络建立了非线性映射模型，在验证集上进行测试，系统低阶像差的平均估计误差优于 10%。图中出现的个别解算失效情况可通过中值滤波的方法去除。



(a) 样本主成分分布

(a) Sample principal component distribution



(b) 误差分布折线图
(b) Broken line graph of error distribution

图 8 基于机器学习的低阶波前传感

Fig.8 Low order wavefront sensing based on machine learning

3 实验结果与讨论

实验测试装置如图 9 所示。利用准直透镜将单色激光光源扩束，并采用光阑将额外的杂光去除，以避免不必要的影响。在此仅针对一个视场进行了实验测试，用以验证理论的正确性与方法的可行性。在实际的巡天望远镜系统中，由于视场较大，可同时获得多个视场的信息。

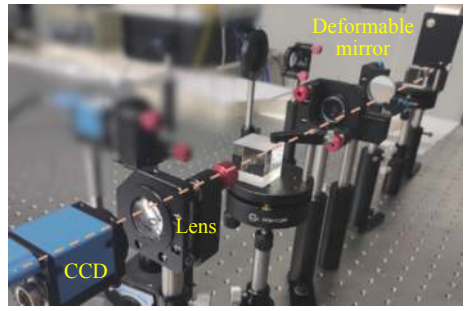
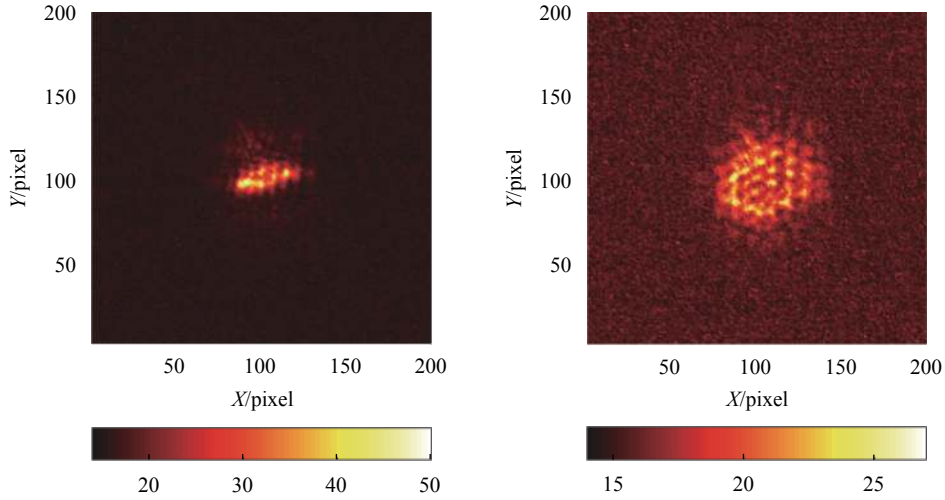


图 9 大范围曲率传感实验装置图

Fig.9 Experimental device diagram of large range curvature sensing

使用的变形镜具有较好的开环精度，可通过引入离焦模拟探测器沿光轴的运动，也可以通过引入彗差与像散。模拟系统元件间的失调，利用变形镜实现离焦，获得离焦星点像。分别进行两次离焦，将离焦量分别设置为 0.3 μm 与 0.5 μm，保证两者的离焦星点像半径为两倍关系。此时相当于整体存在 0.4 μm 的离焦。

对应光强分布如图 10 所示，其像散系数为 0.21，



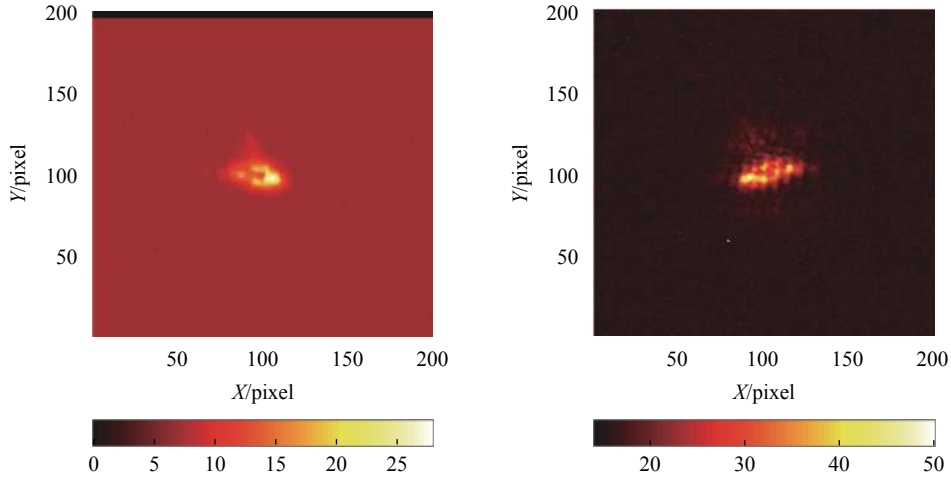
(a) 离焦星点像 1
(a) Defocused image 1

(b) 离焦星点像 2
(b) Defocused image 2

图 10 多重离焦光强分布

Fig.10 Multiple defocusing intensity distribution

彗差系数为 0.13。如图 11 所示，为了验证检测的准确性，采用传统的曲率传感进行检测，其像散系数为 0.86，彗差系数为 0.61。考虑到两种方法的增益不同，选用像散与彗差的比值作为评价指标，二者分别为 1.6 与 1.4，最终解算误差低于 15%。曲率传感所得波前与机器学习方法所得波前如图 12 所示。由图 12 可得，该方法可在单侧大范围离焦情况下获得与传统曲率传感相同的结果，即可在系统失调较为严重的情况下取代额外的坐标测量设备 (如激光跟踪仪等)，简化了系统，降低了成本。

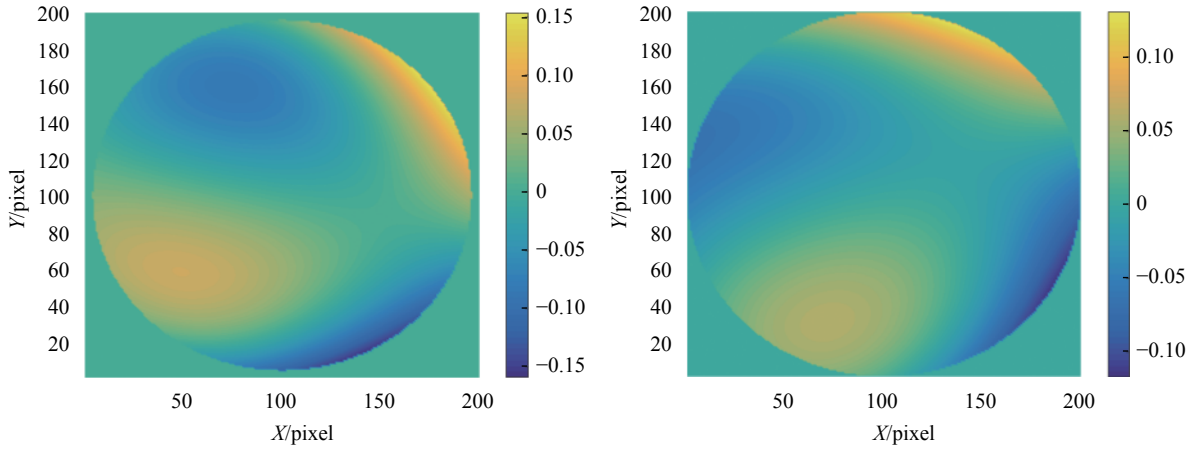


(a) 离焦星点像 1
(a) Defocused image 1

(b) 离焦星点像 2
(b) Defocused image 2

图 11 离焦主导波前焦前焦后光强分布

Fig.11 Intensity distribution before and after defocusing dominated wavefront



(a) 曲率传感所得波前
(a) Wavefront obtained by curvature sensing

(b) 机器学习方法所得波前
(b) Wavefront obtained by machine learning method

图 12 重建低阶波前对比

Fig.12 Comparison of reconstructed low order wavefront

4 结 论

曲率传感具有受孔径影响小、动态范围大的特点，通过不同离焦星点像的同时测量，可有效针对巡天望远镜像差较大的边缘视场；同时，受天光背景与渐晕造成的光瞳非均匀照明影响较小。文中采用曲率传感作为获得大口径透镜波前的方法，该方法检测设备简单，仅通过对离焦量的调节，可保证光学系统迅速进入工作的状态，不受非共光路像差影响，该方法对传统曲率波前探测方法进行了补充与改进，利用

两幅同向离焦图获得波前相位，针对单次测量的过程，可通过解析表达与机器学习直接获得波前相位信息，并进一步得到改正镜组姿态误差：包括倾斜、平移、面内旋转。

结果显示，与传统模式法波前重构结果相比，探测误差小于 15%，可以迅速实现系统的初步对准，取代额外的坐标测量设备 (如激光跟踪仪等)，简化了系统，降低了成本。系统低阶像差单次测量误差以 15% 计，假设每次都可以完全实现曲率传感所计算调整量，当要求测量误差小于 3% 时，主动光学系统校正迭代次数为 2。因此，在打开圆顶后，进行大约两次“曲率传感—调节—曲率传感”的主动光学系统校正迭代循环，即可实现大口径巡天望远镜的对准。

参考文献：

[1] Gansicke B T, Schreiber M R, Toloza O, et al. Accretion of a giant planet onto a white dwarf star [J]. ***Nature***, 2019, 576(7785): 61-64.

[2] Egdall I M. Manufacture of a three-mirror wide-field optical system [J]. ***Optical Engineering***, 1985, 24(2): 242285.

[3] Sebring T A, Dunham E W, Millis R L, et al. The discovery channel telescope: A wide-field telescope in Northern Arizona [C]//Proceedings of SPIE, 2004, 5489: 658-666.

[4] Roodman A, Reil K, Davis C J, et al. Wavefront sensing and the active optics system of the dark energy camera [C]//Proceedings of SPIE, 2014, 9145(1): 51-79.

[5] Holzlöhner R, Taubenberger S, Rakich A P, et al. Focal-plane wavefront sensing for active optics in the VST based on an analytical optical aberration model [C]//Proceedings of SPIE, 2016, 9906: 99066E.

[6] Gunn J E, Siegmund W A, Mannery E J, et al. The 2.5 m telescope of the sloan digital sky survey [J]. ***The Astronomical Journal***, 2006, 131(4): 2332-2359.

[7] Woods D F, Shah R Y, Johnson J A, et al. Space surveillance telescope: Focus and alignment of a three mirror telescope [J]. ***Optical Engineering***, 2013, 52(5): 053604.

[8] Harbeck D R, Boroson T, Lesser M, et al. The WIYN one degree imager 2014: performance of the partially populated focal plane and instrument upgrade path [C]//Proceedings of SPIE, 2014, 9147: 91470P.

[9] McCarthy P J, Fanson J, Bernstein R, et al. Overview and status of the giant Magellan telescope project [C]//Proceedings of SPIE, 2016, 9906: 990612.

[10] Zhu Ran, Gu Bozhong, Xu Jieqian, et al. Thermal control technology of primary mirror of 2.5 m class solar telescope [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2018, 38(11): 1112001. (in Chinese)

[11] Yang Fei, An Qichang, Zhang Jing, et al. Seeing metrology of large aperture mirror of telescope [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2017, 25(10): 2572-2579. (in Chinese)

[12] Schipani P, Noethe L, Magrin D, et al. Active optics system of the VLT survey telescope[J]. ***Applied Optics***, 2016, 55(7):1573.

[13] Unai M, Gorka K, Fernando E, et al. 3D measurement simulation and relative pointing error verification of the telescope mount assembly subsystem for the large synoptic survey telescope [J]. ***Sensors***, 2018, 18(9): s18093023.

[14] Soares-Santos M, Annis J, Bonati M, et al. DECam integration tests on telescope simulator [J]. ***Physics Procedia***, 2012, 37: 1445-1452.

[15] Flaugher B, Diehl H T, Honscheid K, et al. The dark energy camera [J]. ***The Astronomical Journal***, 2015, 150(5): 150.

[16] Guerraramos D, Diazgarcia L, Trujillosevilla J M, et al. Piston alignment of segmented optical mirrors via convolutional neural networks [J]. ***Optics Letters***, 2018, 43(17): 4264-4267.

[17] Xin B, Claver C, Liang M, et al. Curvature wavefront sensing for the large synoptic survey telescope [J]. ***Applied Optics***, 2015, 54(30): 9045-9054.