



## 两镜反射系统自适应装调技术研究

左晓舟 王章利 赵金 苏瑛 杨海成 惠刚阳 刘伟光 王中强

### Adaptive alignment technology of two-mirror reflection system

ZUO Xiaozhou, WANG Zhangli, ZHAO Jin, SU Ying, YANG Haicheng, HUI Gangyang, LIU Weiguang, WANG Zhongqiang

引用本文:

左晓舟,王章利,赵金,等.两镜反射系统自适应装调技术研究[J].*应用光学*,2022,43(4):780-786. DOI: 10.5768/JAO202243.0405005

ZUO Xiaozhou, WANG Zhangli, ZHAO Jin, et al. Adaptive alignment technology of two-mirror reflection system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(4): 780-786. DOI: 10.5768/JAO202243.0405005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0405005>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 大尺寸平面激光扫描补偿系统误差分析

Error analysis for large-scale planar laser scanning and compensation system

应用光学. 2018, 39(1): 124-129 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0107002>

#### 多基准轴透射式系统装调方法

Assembly and adjustment method of multi-reference axis transmission optical system

应用光学. 2021, 42(2): 247-254 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0201007>

#### 基于像差特征分析的变焦光学系统装调

Alignment of zoom optical system based on aberration feature analysis

应用光学. 2020, 41(2): 389-393 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0205002>

#### 基于波像差判据的同步相移显微干涉检焦方法

Synchronous phase-shifting microscopic interference focal detection method based on wave aberration criteria

应用光学. 2021, 42(4): 703-708 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0403002>

#### 地平式离轴扩束光学系统装调技术

Assembly technology of alt-az off-axis beam expanding optical system

应用光学. 2018, 39(4): 563-568 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0405002>

#### 紧凑型自由曲面离轴三反系统设计

Design of compact freeform off-axis three-mirror system

应用光学. 2018, 39(6): 780-784 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0601003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082 (2022) 04-0780-07

# 两镜反射系统自适应装调技术研究

左晓舟, 王章利, 赵 金, 苏 瑛, 杨海成, 惠刚阳, 刘伟光, 王中强

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为了满足两镜反射系统对光学元件高精度的装调、定位要求, 以及系统工程化应用对可靠性与装调效率的要求, 提出了一种基于人工神经网络 (ANN) 的自适应装调技术。基于矢量波像差理论分析两镜系统波像差与失调量的映射关系, 在 Keras 框架下搭建 ANN, 并以非解析思路构建了自适应装调模型, 开发了自适应装调装置, 使失调次镜的平移调校精度优于  $2 \mu\text{m}$ , 倾斜调校精度优于  $2''$ , 解决了算法设计与精度优化、反射镜组微应力固联等技术难题, 并对某双抛无焦系统完成了自适应装调验证。试验结果表明: 运用该装调技术, 两镜反射系统装调后波像差优于  $\lambda/16$ 、装调周期大幅缩短、装配可靠性通过环境试验考核, 为该技术的工程化应用打下了基础。

**关键词:** 两镜反射系统; 神经网络; 波像差; 装调

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202243.0405005](https://doi.org/10.5768/JAO202243.0405005)

## Adaptive alignment technology of two-mirror reflection system

ZUO Xiaozhou, WANG Zhangli, ZHAO Jin, SU Ying, YANG Haicheng,

HUI Gangyang, LIU Weiguang, WANG Zhongqiang

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to meet the requirements of high-precision alignment and positioning of optical elements for two-mirror reflection system, as well as the requirements of reliability and efficiency for system engineering applications, an adaptive alignment technology based on artificial neural network (ANN) was proposed. Based on the vector wave aberration theory, the mapping relationship between the wave aberration and the offset of the two-mirror system was analyzed. The ANN was built under the framework of Keras, and the adaptive alignment model was constructed with non-analytic ideas. An adaptive alignment device was developed to make the alignment accuracy of the secondary mirror better than  $2 \mu\text{m}$ , and the tilt alignment accuracy is better than  $2''$ , which solved the technical problems such as algorithm design and precision optimization, micro-stress connection of mirror group, and completed the adaptive alignment verification of a double parabolic defocusing system. The test results show that by using this technology, the wave aberration after alignment of system is better than  $\lambda/16$ , the alignment cycle is greatly shortened, and the assembly reliability passes the environmental test assessment, which lays a foundation for the engineering application of the technology.

**Key words:** two-mirror reflection system; neural network; wave aberration; alignment

## 引言

反射式光学系统以其长焦距、高分辨率的特点, 在空间遥感、国防军工等领域的应用日益广泛。最典型的结构为两镜反射系统, 目前仍是航空机载平台光电装置的共光路设计首选<sup>[1-2]</sup>。两镜

反射系统对主、次反射镜的面形与相对位姿敏感度较高, 通常具有成像质量接近衍射极限的设计要求<sup>[3]</sup>; 同时, 为了满足航空机载产品的工程化应用要求, 保证系统性能的同时还需兼顾制造周期、可靠性等因素, 这些均对该系统的装调提出了较

收稿日期: 2022-05-17; 修回日期: 2022-06-08

基金项目: 国防基础科研计划 (JCKY2018208B029)

作者简介: 左晓舟 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事光电系统装调与工程应用方面的研究。E-mail: [27149993@qq.com](mailto:27149993@qq.com)

大考验。

计算机辅助装调技术(CAA)已被较多应用于反射式系统的装调过程。对于系统波像差与失调量之间复杂的非线性关系,传统算法是对其进行线性近似处理,通过构建系统灵敏度矩阵,以解析的形式计算失调量。岳鹏远等<sup>[4]</sup>人针对随机成分多、调节灵敏度高的反射式系统精密装调问题,采用了干涉测量与计算机优化技术相结合的方法,建立了各元件失调量与初级像差之间的关系,通过初调与精调结合的方法,完成了某无焦压缩光路系统的装调。孙敬伟等人建立了计算机辅助装调模型,通过对某RC式反射系统不同视场下的波像差测试,分析计算出次镜失调量,指导完成了系统装调,但文中提到“由于存在系统误差和调整机械结构误差,要实现精确装调需重复几次调整过程,才能获得比较好的装调结果”<sup>[4-5]</sup>。因此,计算机辅助装调的线性近似所忽略的误差、对失调量的解析求解、以及对失调量的人工复位调整,将对系统的工程化应用带来精度、效率、可靠性等问题。

当一套系统的输入与输出之间的数学模型很难精确建立时,人工神经网络(ANN)的非线性映射能力则表现出优势<sup>[6-7]</sup>。本文针对两镜反射系统波像差与失调量之间的复杂非线性数学关系,提出了一种基于ANN的自适应装调技术,从装调映射理论出发,构建了自适应装调模型,研制了自适应装调装置并进行了实际装调验证,同时针对算法优化、微应力校与固联等问题给出了解决

方案。

## 1 两镜反射系统装调映射理论

典型的两镜反射系统原理如图1所示。当主、次镜共轴时为旋转对称系统,其四阶波像差(对应三阶像差)的Seidel多项式<sup>[8]</sup>可表示为

$$W(H, \rho, \theta) = \sum_j (W_{020})_j \rho^2 + \sum_j (W_{111})_j H \rho \cos \theta + \sum_j (W_{200})_j H^2 + \sum_j (W_{040})_j \rho^4 + \sum_j (W_{131})_j H \rho^3 \cos \theta + \sum_j (W_{222})_j H^2 \rho^2 \cos^2 \theta + \sum_j (W_{220})_j H^2 \rho^2 + \sum_j (W_{311})_j H^3 \rho \cos \theta \quad (1)$$

式中:  $W$  表示系统出瞳处的波像差;  $j$  表示系统中反射面的序号, 分别为主镜反射面与次镜反射面;  $H$  为归一化视场高度;  $\rho$  为归一化孔径高度;  $\theta$  是视场坐标  $H$  与光瞳坐标  $\rho$  之间的夹角;  $W_{xxx}$  为波像差系数, 其下标表示多项式各展开项的幂级数。该多项式的物理意义如表1所示<sup>[9]</sup>。

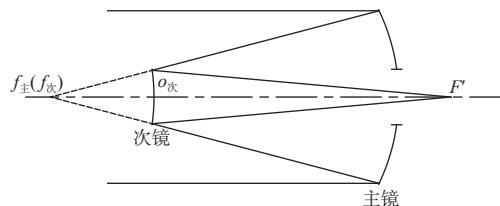


图1 两镜反射系统  
Fig. 1 Schematic diagram of two-mirror reflection system

表1 两镜反射系统三阶像差的Seidel多项式物理意义

Table 1 Physical meaning of Seidel polynomials of third-order aberration of two-mirror reflection system

波像差系数	一阶特性				三阶像差			
	$W_{020}$	$W_{111}$	$W_{200}$	$W_{040}$	$W_{131}$	$W_{222}$	$W_{220}$	$W_{311}$
$H, \rho, \theta$	$\rho^2$	$H \rho \cos \theta$	$H^2$	$\rho^4$	$H \rho^3 \cos \theta$	$H^2 \rho^2 \cos^2 \theta$	$H^2 \rho^2$	$H^3 \rho \cos \theta$
物理意义	离焦	倾斜	平移	球差	彗差	像散	场曲	畸变

该系统的装调是以主镜为基准,通过改变次镜的空间位姿将系统波像差控制在允差范围内。次镜在空间存在6个方向的自由度,分别是沿x、y、z轴的平移与绕x、y、z轴的旋转,不考虑绕z轴的旋转,次镜在其他5个方向的自由度会使两镜反射系统发生“失调”,两镜系统次镜失调示意图如图2所示。系统偏心误差为 $\delta$ 、倾斜误差为 $\chi$ 、轴向偏差为 $\zeta$ 。

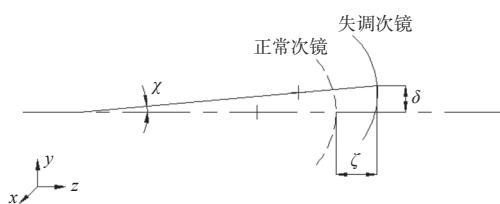


图2 次镜失调示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of secondary-mirror misalignment

根据矢量像差理论, 次镜因为偏心、倾斜引起的失调状态, 将改变两镜系统像差场的对称中心及视场相关性<sup>[10]</sup>。我们引入像差场中心偏移矢量  $\vec{\sigma}$ , 用来表征失调次镜的像差场中心偏移程度。那么, 将(1)式改写为矢量形式, 经推导可得到失调两镜系统的波像差表达式(只考虑三阶像差)为

$$\begin{aligned} W = & W_{040}(\vec{p} \cdot \vec{p})^2 + W_{131}[(\vec{H} - \vec{\sigma}) \cdot \vec{p}](\vec{p} \cdot \vec{p}) + \\ & W_{222}[(\vec{H} - \vec{\sigma}) \cdot \vec{p}]^2 + W_{220}[(\vec{H} - \vec{\sigma}) \cdot (\vec{H} - \vec{\sigma})](\vec{p} \cdot \vec{p}) + \\ & W_{311}[(\vec{H} - \vec{\sigma}) \cdot (\vec{H} - \vec{\sigma})] \cdot [(\vec{H} - \vec{\sigma}) \cdot \vec{p}] \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $W$  为系统波像差;  $\vec{H}$  和  $\vec{p}$  分别为视场与孔径的矢量形式;  $\vec{\sigma}$  为由次镜失调引起的像差场中心偏移矢量, 与次镜的偏心  $\delta$ 、倾斜  $\chi$  存在一定的函数关系。

(2)式中第 1 项为三阶球差, 与视场坐标  $\vec{H}$  无关, 不受次镜偏心与倾斜影响, 只与轴向偏差  $\zeta$  相关; 第 2 项为三阶彗差, 与视场保持线性相关性, 相较于后 3 项(像散、场曲、畸变), 彗差与次镜偏心、倾斜的关系更利于算法逼近。

对于实际光学系统, 次镜失调状态是空间分布的, 那么可将次镜偏心与倾斜表示成矢量形式:

$$\begin{aligned} \vec{\delta} &= D_x \vec{i} + D_y \vec{j} \\ \vec{\chi} &= T_y \vec{i} + T_x \vec{j} \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $x$  向偏心  $D_x$  和绕  $y$  向轴线的倾斜  $T_y$  与像差场中心偏移矢量在  $x$  方向的分量相关;  $y$  向偏心  $D_y$  和绕  $x$  向轴线的倾斜  $T_x$  与像差场中心偏移矢量在  $y$  方向的分量相关。至此, 建立两镜系统波像差与失调量之间的映射关系, 如图 3 所示。

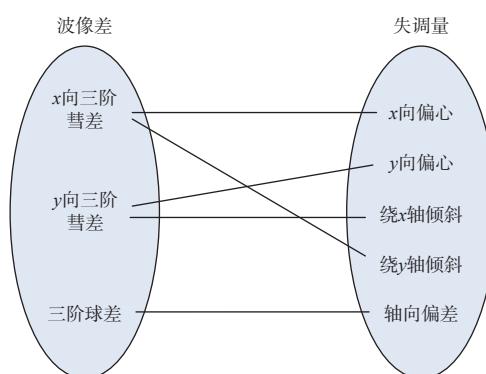


图 3 两镜系统波像差与失调量的映射关系

Fig. 3 Mapping relationship between wave aberration and misalignment of two-mirror reflection system

## 2 基于 ANN 的自适应装调模型框架

两镜反射系统的自适应装调技术基于 ANN, 它自动获取输入数据(波像差与位置信息), 通过对算法进行训练迭代, 使之“适应”待调系统, 然后解算并输出失调信息, 从而实现自动、闭环的装调过程。自适应装调模型框架如图 4 所示。

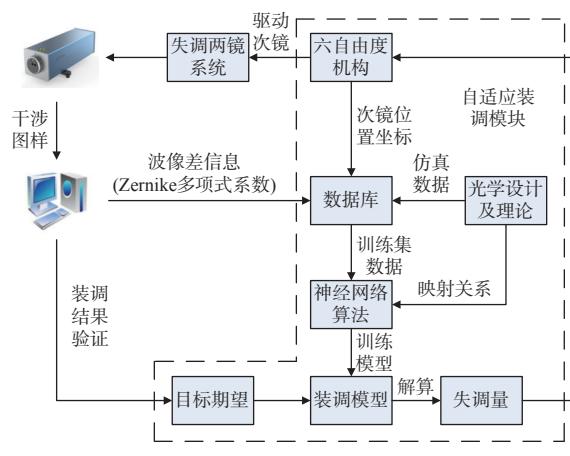


图 4 自适应装调模型框架

Fig. 4 Framework diagram of adaptive alignment model

干涉仪采集获取失调两镜反射系统的干涉图样, 通过计算机以 Zernike 多项式系数的形式将  $x$  向三阶彗差、 $y$  向三阶彗差、三阶球差输入数据库中。同时, 该状态下次镜的位置坐标信息(包括  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、 $\theta_x$ 、 $\theta_y$ )由 6 自由度夹持机构输入数据库, 与像差信息共同构成装调数据集。次镜随机改变空间位置, 将产生若干组数据, 也可通过软件仿真模拟装调数据, 构成数据集。该数据集对已包含映射关系的神经网络进行若干次训练与迭代<sup>[11-12]</sup>, 优化算法模型, 然后以系统对装调目标的期望值为输入, 自动解算出包含 5 维信息的失调量, 通过 6 自由度机构驱动次镜到达目的坐标, 再次测量系统波像差并与期望值比对, 作为完成装调与继续训练迭代的依据。

## 3 装调算法设计与精度优化

基于 ANN 的自适应装调算法是本文技术的核心, 图 5 为自适应装调神经网络的层状结构。图 5 中各节点圆均代表一个神经元, 输入的波像差信息通过隐藏层点作用于输出节点, 经非线性变换后输出失调量信息。该算法的训练优化是通过调整各节点之间的权重、阈值等神经网络参数, 使误差沿梯度方向下降<sup>[13-14]</sup>, 直至达到装调算法所需精度。

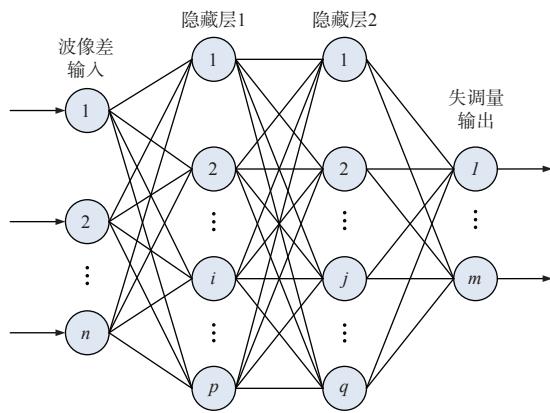


图 5 自适应装调多层神经网络结构

Fig. 5 Multi-layer neural network structure of adaptive alignment

在 Python 编程平台的 Keras 框架下搭建神经网络, 选择 Sequential 作为神经网络模型, 搭建 3 个 Dense(全连接网络层)作为神经网络的主体框架, 以取得更好的拟合精度。其中第 1 个 Dense 层是输入层, 输入维度为 3 维, 与输入的 3 个 zernike 多项式系数对应, 输出维度为 32 维; 第 2 个 Dense 层是隐藏层, 其输入维度与第一层输出相同; 第 3 个 Dense 层是输出层, 输出维度是 5 维, 与 5 个自由度下的失调量相对应。前 2 个 Dense 层的激活函数选用 Relu, 使一部分神经元的输出为 0, 可将网络稀疏化, 从而降低过拟合的程度和概率。同时, Relu 激活函数能够减小计算量, 提升网络训练速度。

在编译环节中, 使用 rmsprop 优化函数对梯度计算微分平方加权平均数, 可使网络算法的收敛过程平缓且快速。将 MSE 均方误差作为 Loss 损失函数, batch\_size 设为 3。

构建仿真数据库对算法网络进行训练与精度优化。根据次镜的可调范围及实际失调情况, 模拟了 50 组针对  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、 $\theta_x$ 、 $\theta_y$  5 个自由度的失调数据。在此基础上, 按正态分布规律再随机生成 1 000 组扩展失调数据, 位姿失调数据分布情况如图 6 所示。从图 6 可以看出, 失调仿真数据关于 0 点基本呈左右对称, 代表了在一个自由度下的 2 个失调方向, 这与次镜的失调本质上是一种空间随机分布相符, 同时, 失调量值也具有较高的真实性<sup>[15-16]</sup>。

在 CodeV 中输入次镜的失调仿真数据, 可得到 Zernike 多项式中相应的  $Z_6$ 、 $Z_7$ 、 $Z_8$ , 与 5 维失调量相映射, 共同形成神经网络算法模型的精度优化数据库。对数据进行关于均值与方差的标准化预处理, 并按 7:3 的比例将数据划分为训练集和测试集。

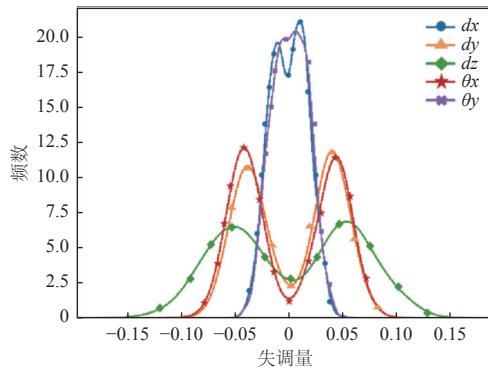
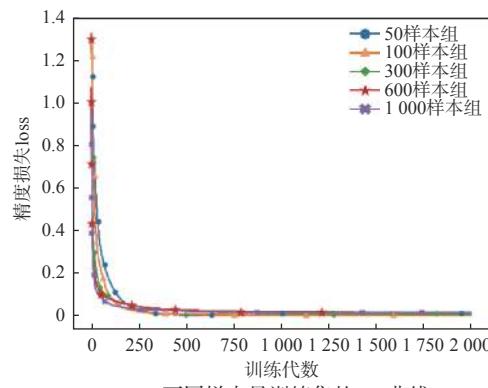


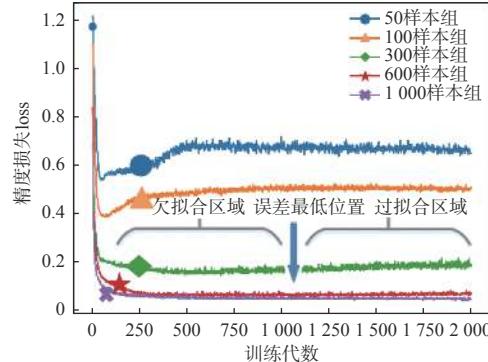
图 6 次镜失调仿真数据分布图

Fig. 6 Distribution diagram of secondary-mirror misalignment simulation data

算法优化的关键是确定训练代数和样本数据量。适宜的训练代数将使模型处于欠拟合和过拟合之间, 具有较高的预测精度与较强的泛化能力。具体表现为训练集的 loss 值趋于平缓, 测试集的 loss 值位于下降与上升的拐点; 样本数据量直接决定着训练时间与装调效率。样本量分别为 50、100、300、600、1 000 时的算法模型训练 loss 曲线如图 7 所示。



(a) 不同样本量训练集的 loss 曲线



(b) 不同样本量测试集的 loss 曲线

Fig. 7 Loss curves of training process in different sample groups

从图 7 可以看出, 5 个样本组训练集的 loss 函数随着训练代数的增加均持续下降, 测试集的 loss 函数先降后升。各样本组在一定的训练代数处, 其测试集 loss 值将达到最低, 随后开始反弹进入过拟合区域。不同样本组的最低 loss 值及其对应的训练代数如表 2 所示。

表 2 不同样本组的最低 loss 值

Table 2 The lowest loss value of different sample groups

样本量测试集	loss最低值	loss最低时对应代数
50	0.542 9	47
100	0.390 9	68
300	0.153 5	678
600	0.065 3	664
1 000	0.047 6	1 884

由表 2 可知, 当样本总数据量达到 600 左右时, 自适应装调算法的精度已达较高水平, 其对应的训练代数为 664, 装调精度与效率均可接受。

## 4 装调过程与结果

以某两镜光学系统为对象开展自适应装调, 如图 8 所示。该系统主、次镜均为抛物面, 采用无焦准直设计, 为后续光路提供压缩孔径和波前良好的平行光束。

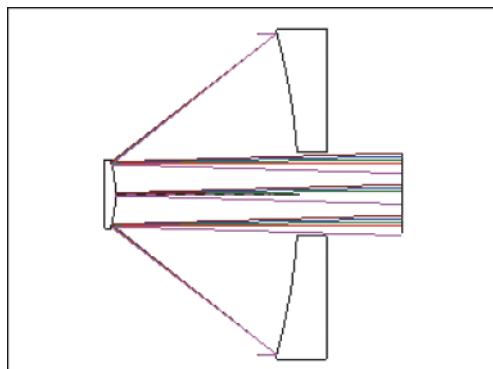


图 8 某双抛系统光学示意图

Fig. 8 Schematic of certain double parabolic system

搭建系统装调光路如图 9 所示。待调次镜组件连接于自适应装调装置中的 6 自由度夹持机构上, 使用 CodeV 对次镜的位置公差进行分析, 其偏心公差灵敏度为  $10 \mu\text{m}$ 、倾斜公差灵敏度为  $5''$ , 轴向位置公差灵敏度达到  $5 \mu\text{m}$ 。采用装置带动次镜进行空间位移, 当次镜在径向与轴向的平移量为  $2 \mu\text{m}$ 、绕  $x$ 、 $y$  轴倾斜量为  $2''$  时, 系统干涉

图样中的条纹仍存在明显变化, 表明自适应装调系统的分辨率满足该两镜系统对装调精度的要求。

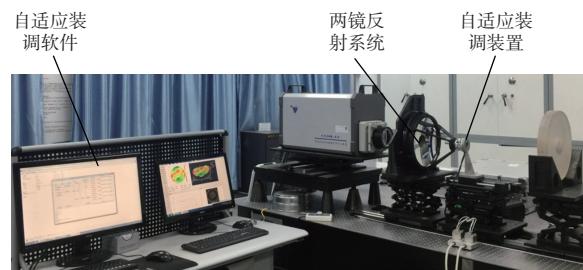


图 9 自适应装调现场图

Fig. 9 Adaptive alignment site

对装调数据的采集、分析、反馈控制由自适应装调软件实现, 如图 10 所示。基于正确训练的装调网络算法, 通过干涉测试、像差与位姿数据采集、失调量自动解算、次镜位姿自动补偿等闭环操作, 使次镜组件快速、准确地定位于空间理想位置,  $Z_6$ 、 $Z_7$ 、Power/Z<sub>8</sub> 均小于预期值 0.02。



图 10 自适应装调软件界面

Fig. 10 Software interface of adaptive alignment

次镜组件调校完成后, 需要在短时间内完成与支撑框的固联。硅橡胶填充固化后具有一定的弹性, 无法满足系统刚性要求, 且固化时间较长。另外, 粘接剂的固化时间与粘接应力通常成反比。为了避免固联过程中发生由应力导致的次镜位姿位移, 并且满足快速、刚性固联的需求, 经充分验证, 在次镜座与支撑框圆周间隙处提前填充某型号紫外黏接剂, 通过对黏接剂的分布、光照固化工艺等进行优化控制, 使次镜组件与支撑框在较短的时间内完成固联。然后将次镜组件与自适应装调装置拆分, 并最终测试系统波像差, 优于  $\lambda/16$ , 如图 11 所示。

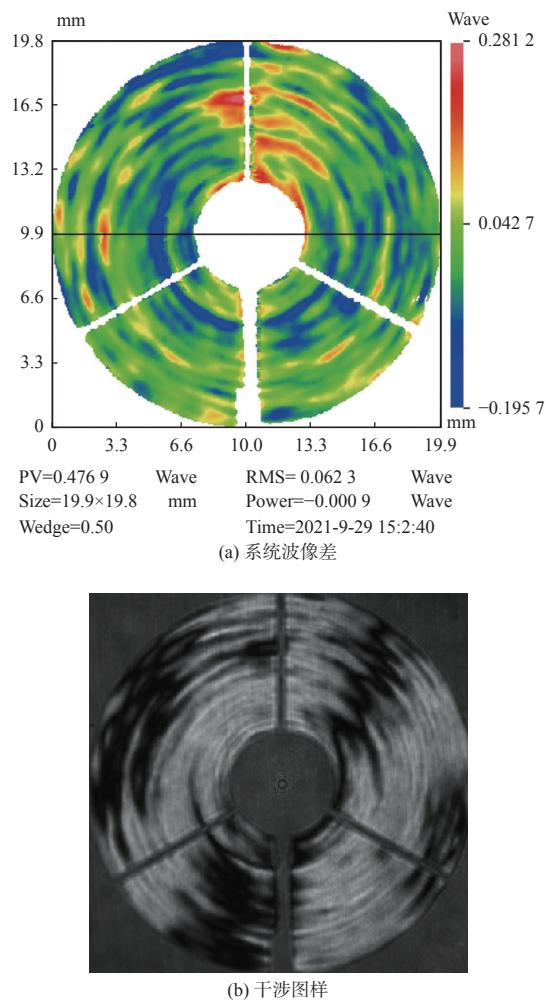


图 11 装调测试结果

Fig. 11 Test results of alignment

## 5 结论

本文针对两镜反射系统失调量与波像差之间的非线性映射关系, 提出了一种基于人工神经网络的光学系统失调量解算方法与自适应装调技术。相较于传统的基于灵敏度矩阵的计算机辅助装调, 此方法避免了对失调量线性近似计算引入的误差, 自适应装调模型的训练以及对失调量的求解可以在很短时间内完成, 且针对传统计算机辅助装调工艺在装调定位精度、失调元件可靠固定等方面存在的问题, 通过自适应装调装置可实现对次镜的失调量精准校正与快速微应力固定, 具有精度高、装调周期短、连接可靠性高等优点。此外, 自适应装调模型对于更加复杂的多反系统同样适用。为使该技术在反射式光学系统的批量装调过程中发挥更好的作用, 还需要在自适应装调坐标标定与复位等方面继续探索。

## 参考文献:

- [1] 王惠林, 刘吉龙, 吴雄雄, 等. 航空光电侦察图像质量影响因素分析[J]. *应用光学*, 2021, 42(5): 817-829.  
WANG Huilin, LIU Jilong, WU Xiongxiong, et al. Analysis of image quality influencing factors for aerial electro-optical detection[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(5): 817-829.
- [2] 孙永雪, 夏振涛, 韩海波, 等. 大口径红外离轴三反光学系统设计及公差分析[J]. *应用光学*, 2018, 39(6): 803-808.  
SUN Yongxue, XIA Zhentao, HAN Haibo, et al. Design and tolerance analysis of infrared off-axis three-mirror optical system with large aperture[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(6): 803-808.
- [3] 韩昌元. 光学系统成像质量评价及测试[M]. 长春: 中国科学院长春精密机械与物理研究所, 2013: 26-43.  
HAN Changyuan. Optical system image quality evaluation and test[M]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2013: 26-43.
- [4] 岳鹏远, 赵希婷, 赵振, 等. 无焦压缩光路系统的计算机辅助装调方法[J]. *应用光学*, 2016, 37(4): 607-611.  
YUE Pengyuan, ZHAO Xiting, ZHAO Zhen, et al. Computer-aided alignment method in afocal compressed optical path system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(4): 607-611.
- [5] 张向明, 姜峰, 孔龙阳, 等. 卡塞格林系统光学装调技术研究[J]. *应用光学*, 2015, 36(4): 526-530.  
ZHANG Xiangming, JIANG Feng, KONG Longyang, et al. Research on optical alignment technology for Cassegrain system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(4): 526-530.
- [6] 周宏强, 黄玲玲, 王涌天. 深度学习算法及其在光学的应用[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(12): 299-318.  
ZHOU Hongqiang, HUANG Lingling, WANG Yongtian. Deep learning algorithm and its application in optics[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(12): 299-318.
- [7] 顾志远. 反射式望远镜失调校正技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2016: 10-11.  
GU Zhiyuan. Misalignment corrections in reflective telescopes[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016: 10-11.
- [8] 郭攀, 周军, 丁晓宇, 等. 基于矢量波像差理论的两反系

- 统装配失调解算方法[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 319-327.
- GUO Pan, ZHOU Jun, DING Xiaoyu, et al. Method to solve assembly misalignment of two-reverse system based on vector wave aberration theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 319-327.
- [9] 操超, 廖志远, 白瑜, 等. 基于矢量像差理论的离轴反射光学系统初始结构设计[J]. *物理学报*, 2019, 68(13): 114-121.
- CAO Chao, LIAO Zhiyuan, BAI Yu, et al. Initial configuration design of off-axis reflective optical system based on vector aberration theory[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(13): 114-121.
- [10] 赵楠. 失调反射系统的矢量像差理论实验研究[D]. 长春: 中国科学院大学(长春光学精密机械与物理研究所), 2018: 45-46.
- ZHAO Nan. Experimental investigation of nodal aberration theory in misaligned reflective system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018: 45-46.
- [11] 赵博, 史迎馨. 卷积神经网络的高精密光学元件表面缺陷检测[J]. 激光杂志, 2021, 42(11): 185-189.
- ZHAO Bo, SHI Yingxin. Detection of surface defects of high precision optical components based on convolution neural network[J]. *Lasers Journal*, 2021, 42(11): 185-189.
- [12] 王一凡, 刘庆文, 何祖源. 基于人工神经网络的瑞利散射频谱解调方法[J]. 光学学报, 2021, 42(13): 104-109.
- WANG Yifan, LIU Qingwen, HE Zuyuan. Method for Rayleigh scattering spectral demodulation based on artificial neural network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 42(13): 104-109.
- [13] 王静, 陈波, 王帅, 等. 无波前传感自适应光学神经网络控制方法[J]. 激光杂志, 2021, 42(2): 102-105.
- WANG Jing, CHEN Bo, WANG Shuai, et al. The neural network control method of adaptive optics without wave-front sensing[J]. *Lasers Journal*, 2021, 42(2): 102-105.
- [14] 许振兴, 杨平, 程涛, 等. 自适应光学系统的自学习控制模型及其验证[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 179-185.
- XU Zhenxing, YANG Ping, CHENG Tao, et al. Self-learningcontrol model for adaptive optics systems and experimental verification[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 179-185.
- [15] 王海超, 陈佳夷, 霍腾飞, 等. 共轴三反光学系统卧式装调技术[J]. *应用光学*, 2020, 41(5): 911-915.
- WANG Haichao, CHEN Jiayi, HUO Tengfei, et al. Horizontal alignment technology of coaxial three-mirror optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(5): 911-915.
- [16] 杨海金, 张平, 郝芳, 等. 一种双曲面光学系统中次镜装调设计与实现[J]. *应用光学*, 2022, 43(1): 131-136.
- YANG Haijin, ZHANG Ping, HAO Fang, et al. Design and realization of secondary-mirror adjustment in hyperboloid optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(1): 131-136.