中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

基于V矩阵余弦相似度的高NA显微物镜公差分析

魏碧颖 蒋大成 胡驰 周顺 弓旭航 蒋世磊

Tolerance analysis of high-NA microscope objectives based on V-matrix cosine similarity

WEI Bi-ying, JIANG Da-cheng, HU Chi, ZHOU Shun, GONG Xu-hang, JIANG Shi-lei

引用本文:
魏碧颖, 蒋大成, 胡驰, 等. 基于V矩阵余弦相似度的高NA显微物镜公差分析[J]. 中国光学, 2026, 19(6): 1−11. doi: 10.3724/CO.2026−0075
WEI Bi-ying, JIANG Da-cheng, HU Chi, *et al*. Tolerance analysis of high-NA microscope objectives based on V-matrix cosine similarity[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(6): 1-11. doi: 10.3724/CO.2026-0075

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3724/CO.2026−0075

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大孔径太赫兹波成像光学系统设计
Design of terahertz wave imaging optical system with large aperture
中国光学（中英文）. 2024, 17(2): 374 https://doi.org/10.37188/CO.2023−0129

基于同轴柯勒照明的大变倍比紧凑型显微镜设计
Design of large zoom ratio compact microscope based on coaxial Kohler illumination
中国光学（中英文）. 2024, 17(4): 921 https://doi.org/10.37188/CO.2023−0240

基于超构透镜的微型头戴式荧光显微镜设计
Design of miniature head−mounted fluorescence microscope based on metalens
中国光学（中英文）. 2024, 17(3): 512 https://doi.org/10.37188/CO.2023−0237

低灵敏度空间引力波望远镜光学系统设计
Design of optical system for low−sensitivity space gravitational wave telescope
中国光学（中英文）. 2023, 16(6): 1384 https://doi.org/10.37188/CO.2023−0006

集成弯曲像面的大视场超紧凑型镜头设计
Design of an ultra−compact wide−field lens incorporating a curved image surface
中国光学（中英文）. 2025, 18(6): 1420 https://doi.org/10.37188/CO.2025−0076

基于Philips棱镜3CMOS相机的光学设计及其光谱优化
Optical design and spectral optimization of Philips prism 3CMOS camera
中国光学（中英文）. 2024, 17(3): 648 https://doi.org/10.37188/CO.2023−0155

文章编号 2097-1842(2026)06-0001-11

基于 V 矩阵余弦相似度的高 NA 显微物镜公差分析

魏碧颖[1], 蒋大成[2], 胡 驰[1], 周 顺[1], 弓旭航[1], 蒋世磊[1*]
（1. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021;
2. 西安工业大学 电子信息工程学院, 陕西 西安 710021）

摘要: 针对高数值孔径显微物镜公差分析中的补偿器耦合问题, 本文提出一种基于 V 矩阵余弦相似度的补偿器选择方法, 旨在降低补偿器间的负相关性, 避免慧差、像散等无法同时收敛的问题。以数值孔径为 0.9 的无限远共轭显微物镜为研究对象, 通过一阶有限差分法构建结构参量与像差参量之间的灵敏度矩阵, 利用 V 矩阵余弦相似度与加权贪心策略, 确定了 6 个有效补偿器。实验结果表明: 系统波前像差 RMS 小于 0.07 λ 的累积概率从 47% 提高至 97.7%, 加工公差与装调公差从 Q1 等级降低至 Q2 等级, 显著降低了光学系统的制造公差, 有效地提高了系统良率。装调仿真实验进一步验证了该方法在高数值孔径显微物镜中的可行性与有效性。这一结果表明该方法可以通过选取合适的补偿器, 有效地降低补偿器间的负相关性。

关 键 词: 公差分析; 显微物镜; 余弦相似度; 光学设计; 计算机辅助装调
中图分类号: TH742 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/CO.2026-0075 **CSTR:** 32171.14.CO.2026-0075

Tolerance analysis of high-NA microscope objectives based on V-matrix cosine similarity

WEI Bi-ying[1], JIANG Da-cheng[2], HU Chi[1], ZHOU Shun[1], GONG Xu-hang[1], JIANG Shi-lei[1*]
(1. *School of Opto-Electronical Engineering*, *Xi'an Technological University*, *Xi'an* 710021, *China*;
2. *School of Electronic and Information Engineering*, *Xi'an Technological University*, *Xi'an* 710021, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: 2429765449@qq.com

Abstract: To address the issue of compensator coupling in the tolerance analysis of high-numerical-aperture microscope objectives, we propose a compensator selection method based on the cosine similarity of the V-matrix, aiming to reduce negative correlations between compensators and avoid problems such as coma and astigmatism that cannot be simultaneously corrected. Taking an infinity-conjugate microscope objective with a numerical aperture of 0.9 as the subject of study, a sensitivity matrix between structural parameters and aberration parameters was constructed using the first-order finite difference method. By employing V-matrix cosine similarity and a weighted greedy strategy, six effective compensators were identified. Experimental results show that the cumulative probability of the system's wavefront aberration RMS being less than 0.07 λ increased from 47% to 97.7%, while manufacturing and alignment tolerances were reduced from Q1 to Q2

收稿日期: xxxx-xx-xx; **修订日期:** xxxx-xx-xx
基金项目: 陕西省教育厅科研计划(No. 21JY017)
Research Programs of the Shaanxi Provincial Department of Education (No. 21JY017)

grade, significantly lowering the manufacturing tolerances of the optical system and effectively improving system yield. Alignment simulation experiments further validated the feasibility and effectiveness of this method in high-numerical-aperture microscope objectives. These results demonstrate that this method can select appropriate compensators and effectively reduce the negative correlation among them.

Key words: tolerance analysis; microscopic objective; cosine similarity; optical design; computer-aided alignment

1 引 言

随着精密激光加工、半导体芯片制造与基因检测等领域的发展，对显微物镜的需求日益提升。高数值孔径显微物镜凭借高分辨力、高光能量密度的特点，已成为精密仪器领域中不可或缺的一部分[1-5]。在光学设计与加工制造过程中对显微物镜的成像质量要求极为严格，这就对光学系统的公差分析提出了更高的要求，从而需要对光学系统的公差进行精确、合理地控制与优化。这不仅可以评估、量化各项光学参数对系统成像质量的影响，还为系统装配与校正工作提供理论基础。对于精密光学系统而言，补偿器是光学系统装调与校正过程中重要的调节参量。对光学系统进行装调与校正时，需要利用所选补偿器对光学系统的误差进行精确调整，从而确保光学系统的成像质量。因此，确定合适的补偿方案，实现装调与校正是公差分析中至关重要的一步。

奇异值分解（SVD）作为处理灵敏度矩阵的重要数学工具，在光学系统公差分析中具有广泛应用。赵阳等人[6]针对投影物镜，利用 SVD 得到结构参量向量，通过分析 V 矩阵向量元素的符号定性地判断结构参量间的相关性，选择出 3 个结构参量作为补偿器，有效避免了慧差与像散无法同时收敛的问题。随后，孙圆圆等人[7]以六反极紫外光刻物镜为研究对象，提出 SVD 迭代消除法，通过反复消除灵敏度矩阵中最不敏感的列来确定结构参量的敏感性排序，从而确定了 8 个有效补偿器，将系统的波前像差 RMS 控制在 0.5 nm 以内。上述工作分别为结构参量间相关性分析与灵敏度迭代排序提供了重要基础，但是目前采用灵敏度迭代排序的方法选择补偿器时，尚未考虑补偿器间的相关性。

综上所述，本文提出在经典 SVD 框架中引入 V 矩阵余弦相似度与加权贪心策略[9-14]，即一种基于 V 矩阵余弦相似度的补偿器选择方法，平衡灵敏度与相关性，并将其应用于高数值孔径显微物镜的补偿器选择，针对数值孔径 NA 为 0.9 的无限远共轭显微物镜进行补偿器选择、公差分析与装调仿真。首先，利用一阶有限差分法构造灵敏度矩阵；其次，对灵敏度矩阵进行归一化、奇异值分解与正则化处理；随后，利用 V 矩阵余弦相似度与加权贪心策略，逐步确定有效的补偿器。遵循上述思路确定了 6 个补偿器，并利用 ZEMAX 软件进行了公差分析。最后，对随机选择的失调系统进行装调仿真。

2 高 NA 显微物镜光学系统及其灵敏度矩阵

基于对高数值孔径显微物镜的需求，本文以数值孔径 NA 为 0.9、无限远共轭的水浸显微物镜为例，确定有效的补偿器，并提出切实可行的装调方案。所涉及的高数值孔径显微物镜的技术指标及系统图分别如表 1 和图 1 所示，其中，M7 是光学系统的孔径光阑。

表 1 显微物镜技术指标

Tab. 1 Technical specifications for microscope objectives

Optical parameters /Unit	Value
Wavelength /nm	785~850
Numerical aperture	0.9
Focal length /mm	4.5
Object height /mm	0.707
RMS wavefront aberration /λ	0.07

由于数值孔径为 0.9 的水浸显微物镜具有更高的分辨率、较长的景深范围，在缺陷检测、飞秒激光双光子聚合与基因检测等高分辨成像领域具有广泛应用。因此，对该系统进行公差分析非常有意义。

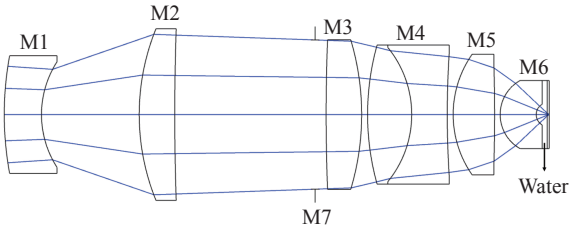


图 1　显微物镜系统图

Fig. 1　Microscope objective lens system diagram

2.1　结构参量选取

进行光学系统装调时, 一般以相对敏感的光学元件作为基准, 去除其严格的公差限制, 从而降低装调成本。上述显微物镜为校正色差, 使用了一组胶合透镜 M4。对于胶合透镜而言, 因为其胶合面最敏感, 所以选择胶合透镜 M4 作为光学系统的装调基准。由于光学元件加工完成后, 材料的色散与折射率以及透镜的面型、厚度等结构参数均已固定, 因此, 分析装调公差时, 仅考虑空气间隔、元件的倾斜和偏心对系统波前像差的影响, 即各光学元件有 5 个自由度。考虑 M7 与 M3 之间的空气间隔, 去掉 M4 光学元件的偏心与倾斜, 仅需考虑 26 个结构参量。

参考现有显微物镜的成像性能, 并综合考虑加工成本和系统性能, 将系统波前像差的评价标准设定为小于 0.07 λ。为评估该显微物镜在先进加工与装调水平下的性能, 参考现代光学先进加工水平(即表 2 所示的 Q1 等级加工与装调公差表)进行分析。其中, 表 2 中的 ATH 代表各光学元件的间隔误差, TIX 与 TIY 分别代表各元件绕 x 轴和 y 轴的倾斜误差, DEX 与 DEY 分别代表光学元件沿 x 轴和 y 轴的偏心误差。以表 2 的制造误差作为公差预设值, 利用 Zemax 软件对加工与装调公差进行初步分析, 得到了 Q1 等级下的波前像差 RMS 累积概率分布。图 2(彩图见期刊电子版)给出了波前像差 RMS 与累积概率的曲线图。

表 2　Q1 等级加工与装调公差表

Tab. 2　Q1-grade machining and assembly tolerance table

Lens	Index	Radius	Thickness /mm	Irregularity	Tolerance of abbe/%	Surface tilt/(°)	Surface eccentricity/mm	ATH/mm	TIX/(°)	TIY/(°)	DEX/mm	DEY /mm
M1	0.000 1	0.5	0.01	0.1	0.01	0.002 8	0.001	0.01	0.002 8	0.002 8	0.001	0.001
M2	0.000 1	0.5	0.01	0.1	0.01	0.002 8	0.001	0.01	0.002 8	0.002 8	0.001	0.001
M3	0.000 1	0.5	0.01	0.1	0.01	0.002 8	0.001	0.01	0.002 8	0.002 8	0.001	0.001
M4	0.000 1	0.5	0.01	0.1	0.01	0.002 8	0.001	0.01	Installation and adjustment standard			
M5	0.000 1	0.5	0.01	0.1	0.01	0.002 8	0.001	0.01	0.002 8	0.002 8	0.001	0.001
M6	0.000 1	0.5	0.01	0.1	0.01	0.002 8	0.001	—	0.002 8	0.002 8	0.001	0.001
M7				—				0.01		—		

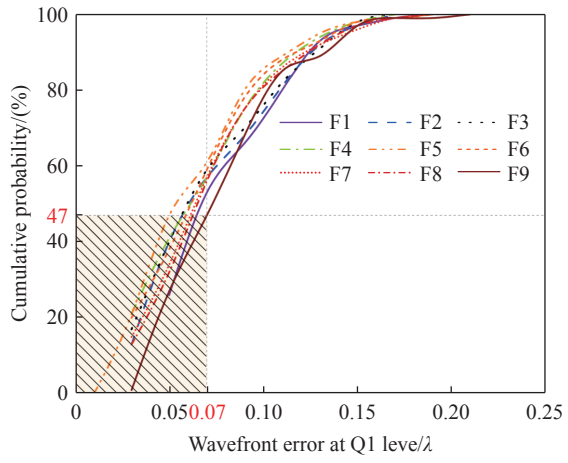


图 2　Q1 等级下的波前像差 RMS 累积概率分布图

Fig. 2　Probability distribution of cumulative wavefront aberration under Q1 grade

根据图 2 可知, 在全视场下, 显微物镜的波前像差 RMS 小于 0.07 λ 的累积概率仅有 47%, 这使得设计与生产现实之间存在鸿沟。因此, 需要针对该系统进行公差灵敏度分析, 并选择合适的补偿器来降低各项加工公差和装调公差, 补偿其造成的像质恶化。

2.2　像差特性分析

由于 Zernike 多项式具有正交性与特有的旋转对称性, 因此其在系统波前像差检测等方面得到广泛应用。其中, Zernike Fringe 多项式共有 37 项, 可表征全部初级像差与高级像差。由于光学系统的高级像差主要来自光学元件自身面型的高频误差, 因此在装调过程中, 不考虑高级像差对系统的影响, 主要针对装调误差引起的初级像差

进行研究。

针对该显微系统，因为离焦问题可以通过机械调焦进行补偿，所以像差参量通过球差、慧差以及像散进行表征，即五项 Zernike Fringe 多项式。其中，Z5 与 Z6 多项式共同表征像散，Z7 与 Z8 多项式共同表征慧差，Z9 多项式代表球差。为全面反映各视场的像差特性，分别对中心视场与边缘视场（即+1 视场与−1 视场）进行采样，3 个视场分别选取上面提到的 5 个 Zernike 多项式，最终确定系统的像差参量有 15 项。

2.3 灵敏度矩阵

光学系统的像差参量与光学元件的各项结构参量密切相关，它们的关系可以用函数描述，即：

$$\begin{bmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1(x_1, x_2, \cdots, x_n) \\ \vdots \\ z_m(x_1, x_2, \cdots, x_n) \end{bmatrix} , \quad (1)$$

其中，$Z_j(j=1,2,\ldots,n)$为系统的像差参量；$X_i(i=1,2,\ldots,n)$为各光学元件的结构参量；z_j表示像差参量与结构参量之间的映射关系。当光学元件的结构参量存在误差时，系统的成像质量会受到影响，像差参量可表示为$Z(X+\Delta X)$。选用泰勒级数对其进行一阶展开，从而得到：

$$Z_j = Z_{0j} + \frac{\partial z_j}{\partial x_1}(x_1 - x_{01}) + \frac{\partial z_j}{\partial x_2}(x_2 - x_{02}) + \ldots + \frac{\partial z_j}{\partial x_n}(x_n - x_{0n}) , \quad (2)$$

其中，Z_{0j}为系统设计时残留的波前像差值；$(x_{01},\ldots,x_{0n})$为设计时各光学元件的结构参量；$\left(\frac{\partial z_j}{\partial x_1},\ldots,\frac{\partial z_j}{\partial x_n}\right)$为像差参量对各结构参量的一阶偏导数。由于该偏导数无法直接求出，因此选择像差参量与各结构参量的差商$\left(\frac{\delta z_j}{\delta x_1},\ldots,\frac{\delta z_j}{\delta x_n}\right)$近似代替，则像差参量与结构参量之间可以近似表示为以下线性方程组：

$$\begin{bmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{01} \\ \vdots \\ Z_{0m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\delta z_1}{\delta x_1}\Delta x_1 + \ldots + \frac{\delta z_1}{\delta x_n}\Delta x_n \\ \vdots \\ \frac{\delta z_m}{\delta x_1}\Delta x_1 + \ldots + \frac{\delta z_m}{\delta x_n}\Delta x_n \end{bmatrix} . \quad (3)$$

若要将上述方程用矩阵进行简化，则需要假设：

$$\Delta \boldsymbol{Z} = \begin{bmatrix} \Delta Z_1 \\ \vdots \\ \Delta Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 - Z_{01} \\ \vdots \\ Z_m - Z_{0m} \end{bmatrix} ,$$

$$\Delta \boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_{01} \\ \vdots \\ x_n - x_{0n} \end{bmatrix} ,$$

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \frac{\delta z_1}{\delta x_1} & \cdots & \frac{\delta z_1}{\delta x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta z_m}{\delta x_1} & \cdots & \frac{\delta z_m}{\delta x_n} \end{bmatrix} ,$$

则方程（3）可以表示为：

$$\Delta \boldsymbol{Z} = \boldsymbol{A} \cdot \Delta \boldsymbol{X} , \quad (4)$$

式中，$\boldsymbol{A}$为灵敏度矩阵，$\Delta \boldsymbol{X}$为结构失调量，即各光学元件结构参量需要调整的变化量，$\Delta \boldsymbol{Z}$为像差参量随失调量的变化值。灵敏度矩阵$\boldsymbol{A}$表征像差参量与各失调量之间的敏感程度。

基于上述理论，根据一阶有限差分法为显微物镜 M1 到 M7 施加微小失调量，利用 Zemax 软件建立显微系统像差参量与结构失调量的数学模型，构造灵敏度矩阵。构建灵敏度矩阵时，为确保灵敏度矩阵的准确性，人为给定的失调量应大于最大公差值。因此，ΔX的取值为：元件倾斜 (TIX、TIY) 为 0.05°，元件偏心 (DEX、DEY) 为 0.01 mm，空气间隔为 0.03 mm。

3 结果分析及装调仿真

3.1 基于 V 矩阵余弦相似度的补偿器选择

在实际装调过程中，由于光学系统的结构参量之间存在一定耦合关系，使得各种像差无法同时收敛。因此，本文提出基于 V 矩阵余弦相似度的补偿器选择方法，以降低结构参量之间的负相关性。另外，选择合适的补偿器也可以为机械结构设计与装调校正阶段预留调整空间。

补偿器的逐步选择过程如图 3 所示。为实现上述目标，首先，根据 2.3 节中的方法得到灵敏度矩阵。其次，对灵敏度矩阵进行归一化处理，消除量纲的影响。接下来，对灵敏度矩阵进行奇异值分解，量化光学元件各结构参量对像差灵敏度的

影响。由于直接对灵敏度矩阵进行分解的条件数为7.4×10^{16}, 这表明灵敏度矩阵为病态矩阵。为解决这个问题, 以能量贡献率作为截断准则, 对灵敏度矩阵进行截断化处理, 确保灵敏度矩阵为良态矩阵。考虑到噪声对数据的影响, 将能量贡献率的范围确定为 95%~98%, 这样不仅可以覆盖系统的主要自由度, 还不会引入过高的噪声。根据奇异值的能量贡献率, 最终确定仅保留前 5 个奇异值。此时, 这 5 个奇异值如图 4(彩图见期刊电子版)所示, 条件数为 2.07, 满足良态矩阵条件。为综合考虑, 将各结构参量在这 5 个奇异向量上的投影作为灵敏度贡献的评价标准, 并以这种方式选择灵敏度贡献最大的结构参量作为第一个补偿器。在此基础上, 提出加权贪心的思想, 计算剩余结构参量与已选结构参量的平均相似度S_{avg}, 并利用图 3 中的加权公式挑选得分最高的结构参量, 将其作为下一个补偿器。

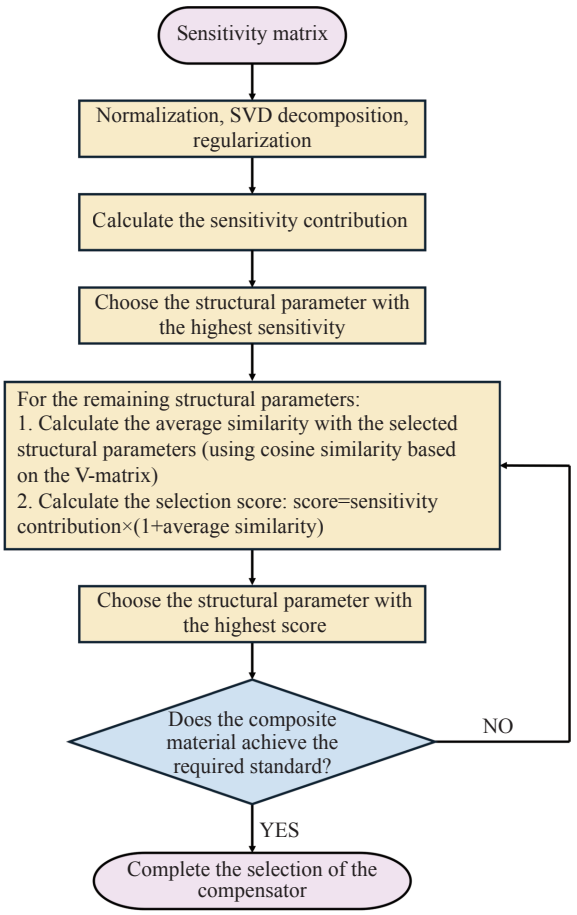


图 3　补偿器选择流程图

Fig. 3　Compensator selection flowchart

平均相似度的计算方法基于 V 矩阵的余弦相似度, 图 5(彩图见期刊电子版)为基于 V 矩阵的结构参量相似度热力图。图 5 直观地揭示了各结构参量之间的相关性, 可以定量判断哪些结构参量之间存在较强的相关性: 相似度数值越接近−1, 代表负相关程度越高, 负相关会导致慧差与像散无法同时收敛; 相似度数值为 0, 则代表不相关; 当数值越接近+1, 代表正相关程度越高。对某个结构参量与其余结构参量的余弦相似度进行取平均值计算后得到平均相似度。平均相似度可以用于评估该结构参量的整体独立性水平, 降低补偿器间的相关性, 避免装调过程中的球差、慧差与像散无法同时收敛的问题。

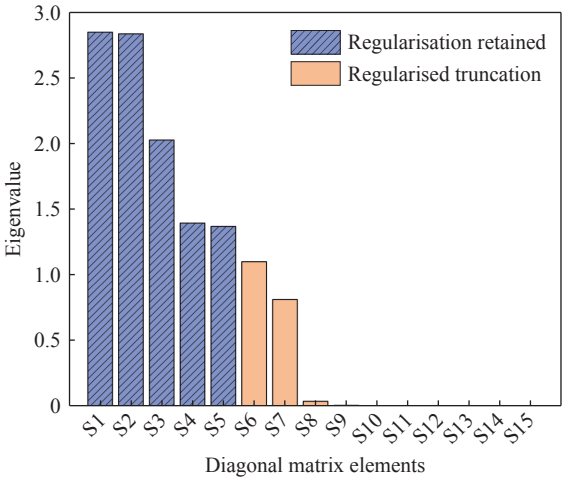


图 4　对角矩阵的奇异值

Fig. 4　Eigenvalue of diagonal matrix

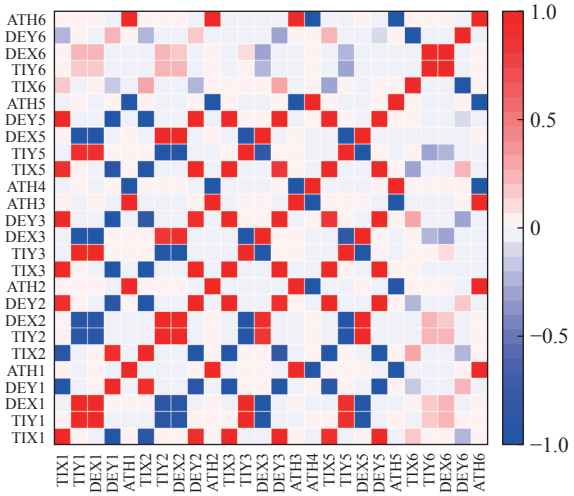


图 5　基于 V 矩阵的结构参量相似度热力图

Fig. 5　Structural parameter similarity heatmap based on V matrix

为实现灵敏度与相关性的多目标优化, 本文提出一种根据结构参量相关性进行自适应调整的权重计算方式[15], S_{avg}计算公式如下:

$$w = 1 + S_{\text{avg}} \quad . \tag{5}$$

从而得到加权贪心策略的得分计算公式:

$$S = k \times w = k \times (1 + S_{\text{avg}}) \quad , \tag{6}$$

其中: k为灵敏度贡献, w为权重因子。

公式(6)中的权重因子仅由结构参量的平均相似度决定。由于平均相似度的取值范围为 [−1, 1], 为确保平均相似度为零的结构参量保持原有的灵敏度贡献, 需将权重因子的取值范围映射到[0,2]。通过该权重因子可以对正相关的结构参量进行鼓励, 增大正相关性结构参量的灵敏度贡献, 提高补偿器的调节效率; 对不相关的结构参量保持原来的灵敏度贡献; 对于负相关的结构参量引入惩罚机制, 降低负相关性结构参量的灵敏度贡献, 减小补偿器之间的耦合效应。通过以上处理可以达到兼顾灵敏度与相关性的目的, 从而提高系统的装调效率与稳定性。

根据上述方法逐步选取最优的结构参量作为补偿器, 直至系统性能满足要求, 同时降低各项加工公差与装调公差, 提高光学系统良率。

基于 V 矩阵余弦相似度的补偿器选择方法虽然是一种贪心算法, 但是, 与只选择灵敏度最高的传统贪心算法相比, 该算法将余弦相似度与传统的贪心算法相结合, 进行多目标优化。在逐步选择补偿器时均考虑与已选结构参量之间的相关性, 兼顾灵敏度与相关性, 最终选取整体独立性较好的补偿器。

3.2 补偿效果分析

遵循一个光学元件只补偿一种装调误差的原则, 利用上述方法进行逐步选择后, 筛选出 6 个结构参量作为补偿器。选择水面离焦作为间隔补偿, 弥补光学元件加工与装调过程中引入的球差, 同时不会引入额外的像散与慧差; 选择透镜 M2 的倾斜公差 TIY 与 M5 的 TIX 作为倾斜补偿, 选择透镜 M3 的偏心公差 DEX 与 M6 的 DEX、DEY 作为偏心补偿, 主要用于补偿加工和装调过程中引入的像散与慧差。针对上述 5 个结构参量的补偿器, 其平均值相似度约为 0.103。这表明, 选择的补偿器整体呈现正相关, 且整体独立性较好, 慧差、像散等像差可以同时收敛, 降低了补偿器间的负相关性。

利用上述补偿器, 再次对该系统进行公差分析, 得到补偿后 Q2 等级下的波前像差 RMS 累积概率分布, 如图 6(彩图见期刊电子版)所示。呈现了补偿后 Q2 等级下的波前误差 RMS 与累积概率曲线图。图 6 表明, 在全视场下, 显微物镜的波前像差 RMS 小于 0.07 λ 的累积概率为 97.7%, 满足系统成像质量要求。与此同时, 该显微系统的加工公差与其余各项装调公差均放宽至如表 3 所示的 Q2 等级加工与装调公差。

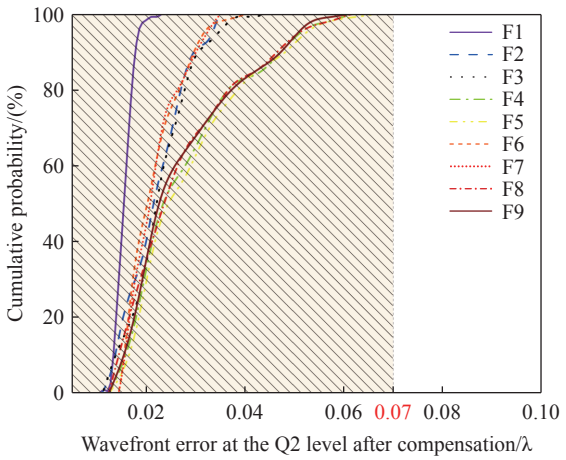


图 6 补偿后 Q2 的波前像差 RMS 累积概率分布

Fig. 6 Cumulative probability distribution of wavefront aberration in Q2 after compensation

表 3 Q2 等级加工与装调公差表

Tab. 3 Q2 Grade machining and assembly tolerance table

Lens	Index	Radius	Thickness /mm	Irregularity	Tolerance of abbe/%	Surface tilt/(°)	Surface eccentricity /mm	ATH/mm	TIX/(°)	TIY/(°)	DEX /mm	DEY /mm
M1	0.0003	1	0.01	0.1	0.03	0.005	0.003	0.01	0.005	0.005	0.003	0.003
M2	0.0003	1	0.01	0.1	0.03	0.005	0.003	0.01	0.005	--	0.003	0.003
M3	0.0003	1	0.01	0.1	0.03	0.005	0.003	0.01	0.005	0.005	--	0.003
M4	0.0003	1	0.01	0.1	0.03	0.005	0.003	0.01	Installation and adjustment standard			
M5	0.0003	1	0.01	0.1	0.03	0.005	0.003	0.01	--	0.005	0.003	0.003
M6	0.0003	1	0.01	0.1	0.03	0.005	0.003	—	0.005	0.005	--	--
M7				—				0.01		—		

同样遵循一个光学元件只补偿一种装调误差的原则, 利用灵敏度排序法同样选取 6 个结构参量作为补偿器。选择水面离焦作为间隔补偿, 选择透镜 M2 的倾斜公差 TIY 与 M5 的 TIX、TIY 作为倾斜补偿, 选择透镜 M6 的偏心公差 DEX、DEY 作为偏心补偿。针对上述 5 个结构参量的补偿器, 其平均值相似度约为−0.076。这表明, 所选的补偿器虽然整体独立性较好, 但整体呈现负相关。

两种方法进行对比结果如图 7(彩图见期刊电子版)所示[7]。该图直观展示了两种方法下的良率结果。根据图 7 可知, 良率为 90% 时, 基于 V 矩阵余弦相似度求得的波前像差 RMS 为 0.034 6 λ, 基于灵敏度排序求得的波前像差 RMS 为 0.035 6 λ。以上结果表明: 基于 V 矩阵余弦相似度选取补偿器的方法较好。这是因为基于 V 矩阵余弦相似度方法选择的补偿器整体呈现正相关, 而基于灵敏度排序选择的补偿器整体呈现负相关。

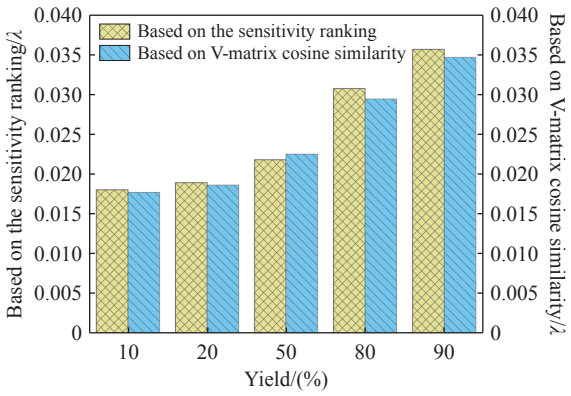


图 7　两种方法的良率对比图

Fig. 7　Comparison of yield rates for the two methods

综上所述, 基于 V 矩阵余弦相似度的方法选择 6 个结构参量作为补偿器, 不仅降低了光学元件加工公差与装配公差要求, 还提高了光学系统的良率。

3.3　装调仿真验证

基于上述补偿器, 对该显微系统进行装调仿真验证。首先, 借鉴表 3 中的加工与装调公差, 利用蒙特卡洛对光学系统随机引入失调量, 生成失调系统; 其次, 根据蒙特卡洛引入的失调量可知, 波前像差 RMS 的平均值为 0.79 λ, 随机选取 1 组与平均波前像差 RMS 相近的失调系统进行装调仿真验证。根据上述方法, 从 100组结果中随机选取一个光学系统作为失调系统, 图 8 为该失调系统的波前像图, 图 8(a) 与图 8(c)为边缘视场(−1 视场与+1 视场)的波前图, 图 8(b)为中心视场的波前图。结合图 8 可知, 此时系统的像差非常显著, 边缘视场的最大波前 RMS 值达到了 0.779 0 λ, 成像质量远大于衍射极限容差。中心视场的波前图及其 Zernike 系数表明: 此时系统的慧差贡献量非常大(Z_7: −0.011 0 λ; Z_8: −0.111 0 λ), 这说明系统在装配时存在一定的偏心误差, 其次是球差(Z_9: −0.047 2 λ), 像散的贡献相对较小(Z_5: −0.014 7 λ; Z_6: −0.004 9 λ)。

下面对该失调系统进行失调量求解与装调仿真。在进行模拟装调时, 利用 ZEMAX 光学设计软件对失调系统进行逆向优化, 求得补偿器的补偿量[16]。将上述所选的 6 个补偿器作为优化变量, 以默认的 RMS 波前差作为评价函数进行优化。经过优化后, 该系统的波前图如图 9(彩图见期刊电子版)所示, 中心视场的波像差 RMS 从 0.736 4 λ 减小至 0.023 7 λ, −1视场的波像差 RMS 从 0.713 6 λ 减小至 0.058 8 λ, +1 视场的 RMS 从 0.779 0 λ 减小至 0.059 4 λ, 均满足系统指标要求。

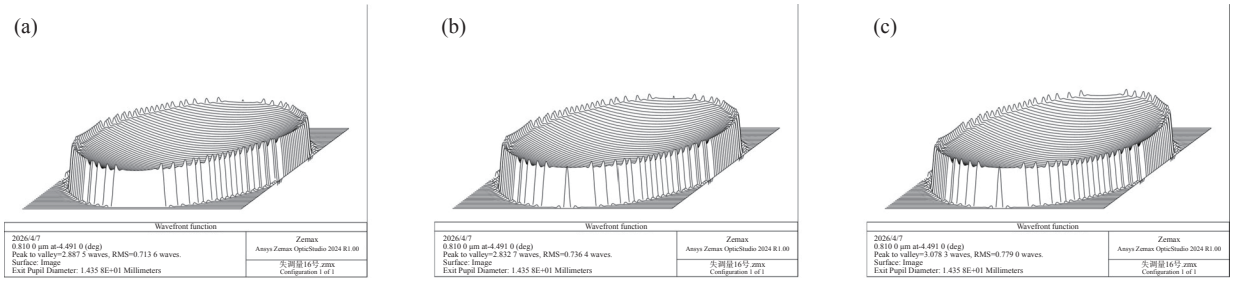


图 8　失调系统的波前图

Fig. 8　Wavefront map of a dysfunctional system

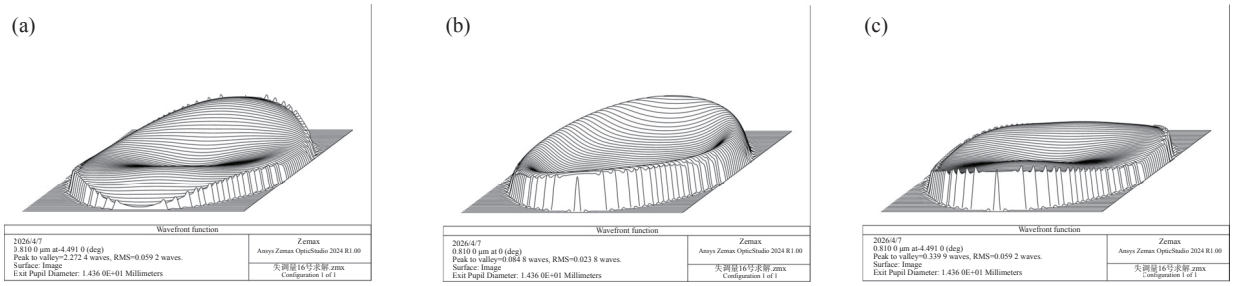


图 9 装调后系统的波前图

Fig. 9 Wavefront map of the system after adjustment

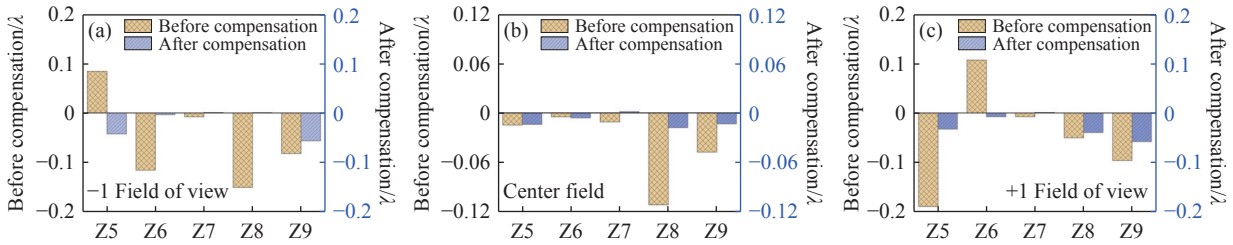


图 10 装调前后的 Zernike 系数对比图

Fig. 10 Comparison of Zernike coefficients before and after adjustment

将失调系统装调前后的 Zernike 系数对比如图 10 所示，图 10 分别对中心视场与边缘视场（−1 视场与+1 视场）的系数进行测量。可知，补偿前，各视场的像差在 0.2 λ 以内，经过补偿后，所有视场下的像差均显著降低，都控制在 0.06 λ 范围之内。

为表征系统的高级球差，选择 Zernike 系数（Z9、Z16 和 Z22）对该系统的高级球差进行定量分析，如图 11（彩图见期刊电子版）所示，将失调系统装调前后的 3 个系数进行对比可知，补偿后，初级球差大幅度降低，与此同时，对高级球差几乎不产生较大影响。

失调系统装调前后的 MTF 对比结果如图 12（彩图见期刊电子版）所示。补偿前，各视场下的 MTF 均未达到系统的衍射极限。经过补偿后，中心视场的 MTF 接近衍射极限。空间频率为 911.0/mm 时，+1 视场下的 MTF 从 0.004 877 提高至 0.421 573（子午方向最低）；与衍射极限的 MTF 相比，全视场下 MTF 最大下降量约为 12.5%。此外，补偿后的 MTF 也可以表明，系统的场曲得到了有效抑制，同时未对色差产生不利影响，使系统在全视场内成像质量较好。

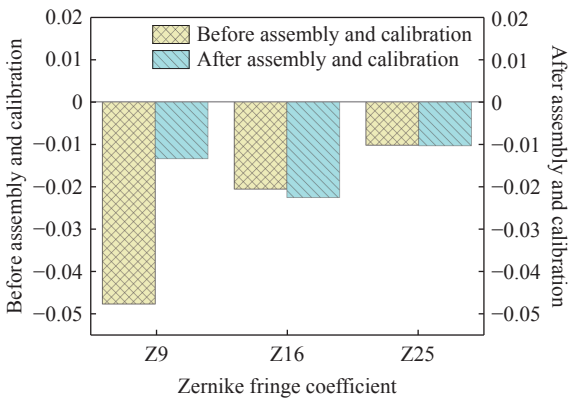
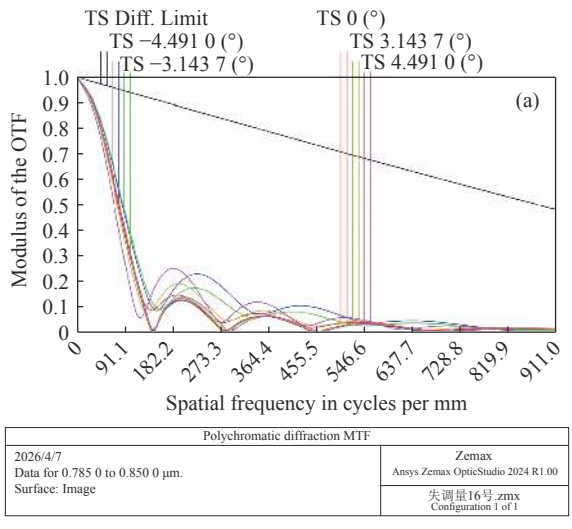


图 11 装调前后的高阶球差 Zernike 系数对比图

Fig. 11 Comparison of Zernike coefficients for higher-order spherical aberration before and after adjustment



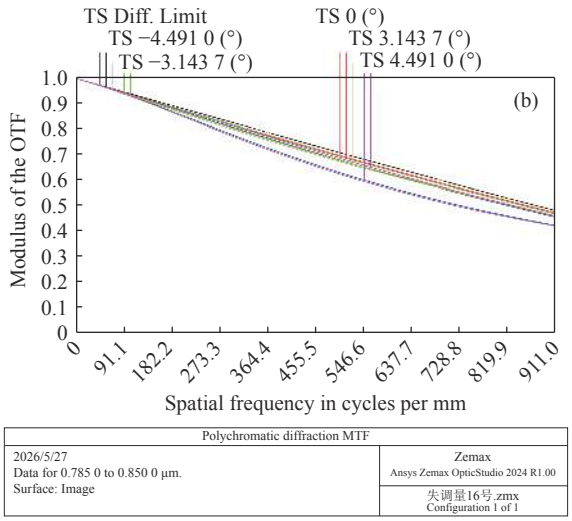


图 12　装调前后的 MTF 对比图

Fig. 12　Comparison chart of MTF before and after adjustment

经过逆向优化后, 该失调系统的补偿量如表 4 所示。由于 DEX3 与 DEX6 之间是弱负相关, 因此 DEX3 的补偿量为−0.002 2, DEX6 的补偿量为 0.002 5。

表 4　失调系统的补偿量

Tab. 4　Compensation for the imbalanced system

Compensator		Compensation value
Compensator of thickness/mm	Out-of-focus water surface	−0.005 0
Compensator of decenter /mm	DEX3	−0.002 2
	DEX6	0.002 5
	DEY6	0.003 1

续表 4

Compensator		Compensation value
Compensator of tilt /°	TIY2	0.005 9
	TIX5	−0.022 0

通过装调仿真实验可知, 采用基于 V 矩阵余弦相似度的补偿器选择方法, 可以选择合适的补偿器, 从而有效提高显微物镜的成像质量。

4　结　论

本文提出一种基于 V 矩阵余弦相似度的补偿器选择方法, 即在经典 SVD 框架中引入 V 矩阵余弦相似度, 实现了补偿器的高效优化选择。以 NA 为 0.9 的无限远共轭显微物镜为研究对象, 利用 V 矩阵余弦相似度与加权贪心策略逐步筛选出 6 个有效补偿器, 有效降低了补偿器之间的负相关性, 提高了系统的稳定性。通过 ZEMAX 公差分析表明, 利用上述方法使该系统的波前 RMS 在 97.7% 的累积概率下优于 0.07 λ, 有效放宽了加工与装调公差, 提高了光学系统良率。装调仿真实验证明该方法的可行性。因为仿真过程中所选取的公差均来自实际制造过程中的误差, 所以实际的装调实验展现出良好的装配效果, 这表明所提出的方法具有工程应用的参考价值。基于 V 矩阵余弦相似度的补偿器选择方法可有效应用于数值孔径为 0.9 的水浸显微物镜, 未来可拓展至更高数值孔径或其他浸没介质的显微物镜。

参考文献:

[1]　郭炜宁, 莫言, 何思琦, 等. 大视场高数值孔径共聚焦显微物镜设计[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(11): 20250386.
GUO W N, MO Y, HE S Q, *et al*.. Large field of view, high numerical aperture objective lens design for confocal microscopy[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(11): 20250386. (in Chinese).

[2]　郁晓晖, 高志山, 袁群. 宽光谱长工作距弱荧光信号检测显微物镜设计[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(7): 1588-1595.
YU X H, YUAN ZH SH, YUAN Q. Design of board spectrum and long work distance microscope objective for weak fluorescence signal detection[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(7): 1588-1595. (in Chinese).

[3]　黄木旺, 刘旭, 林法官. 大视场大数值孔径显微物镜光学设计[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(5): 0518001.
HUANG M W, LIU X, LIN F G. Design of large field of view and high numerical aperture microscope objective[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(5): 0518001. (in Chinese).

[4]　郎松, 张艳微, 郑汉青, 等. 大视场高分辨 HiLo 光切片显微成像系统[J]. 中国光学 (中英文), 2022, 15(6): 1302-1312.
LANG S, ZHANG Y W, ZHENG H Q, *et al*.. Wide-field-of-view and high-resolution HiLo optical sectioning microscopy system[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(6): 1302-1312. (in Chinese).

[5]　刘向东, 匡翠方, 陈友华, 等. 单分子荧光探测、荧光漂白及光切成像技术研究[R]. 杭州: 浙江大学, 2024.

LIU X D, KUANG C F, CHEN Y H, *et al*. . Research into single-molecule fluorescence detection, fluorescence bleaching and photomicroscopy techniques[R]. Hangzhou: Zhejiang University, 2024. (in Chinese) **(查阅网上资料, 未找到对应的英文翻译, 请确认)**.

[6] 赵阳, 王平, 赵磊, 等. 利用失调量向量选择投影物镜小比例模型系统补偿量[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0822001.
ZHAO Y, WANG P, ZHAO L, *et al*.. Selecting system compensators for small scale projected objective using displaced parameters vector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0822001. (in Chinese).

[7] 孙圆圆, 李艳秋, 曹振. 超大数值孔径极紫外光刻物镜的公差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 122207.
SUN Y Y, LI Y Q, CAO ZH. Tolerance analysis of high-numerical aperture extreme ultraviolet lithographic objective[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(12): 122207. (in Chinese).

[8] 曹振, 李艳秋, 孙圆圆. 极紫外光刻物镜补偿器的选择及定位精度分析[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1211003.
CAO ZH, LI Y Q, SUN Y Y. Compensator selection and accuracy analysis for extreme ultraviolet lithographic objective[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1211003. (in Chinese).

[9] 时高建, 王欣威, 刘强, 等. 基于贪心策略改进 RRT*算法机械臂路径规划[J]. 制造技术与机床, 2024(9): 29-35.
SHI G J, WANG X W, LIU Q, *et al*.. Improved obstacle avoidance path planning of the RRT* algorithm robotic arm[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2024(9): 29-35. (in Chinese).

[10] 曹现刚, 丁文韬, 吴旭东, 等. 贪心策略与调度规则融合的煤矸分拣机器人多任务分配方法[J]. 工矿自动化, 2025, 51(4): 64-73,139.
CAO X G, DING W T, WU X D, *et al*.. A multi-task allocation method for coal gangue sorting robots based on the integration of greedy strategy and scheduling rules[J]. *Journal of Mine Automation*, 2025, 51(4): 64-73,139. (in Chinese).

[11] XIONG X, JIANG ZH B, TANG H SH, *et al*.. Research on quality control methods for surface temperature observations via spatial correlation analysis[J]. *International Journal of Climatology*, 2022, 42(16): 10268-10284.

[12] SHARMA K V, AYILURI P R, BETALA R, *et al*.. Enhancing query relevance: leveraging SBERT and cosine similarity for optimal information retrieval[J]. *International Journal of Speech Technology*, 2024, 27(3): 753-763.

[13] 肖巍峰, 邓新平, 李同生, 等. 顾及气候相似和空间相关的入侵物种虚拟负样本生成方法[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(9): 1982-1991.
XIAO W F, DENG X P, LI T SH, *et al*.. Generating pseudo-absence samples of invasive species by considering the climate similarity and spatial correlation[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(9): 1982-1991. (in Chinese).

[14] 冯志刚, 王颖, 王宇. 基于多通道融合的齿轮箱故障诊断方法[J/OL]. 吉林大学学报 (工学版), 1-12[2026-04-02]. https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241377.
FENG ZH G, WANG Y, WANG Y. Gear box fault diagnosis method based on multi-channel fusion[J/OL]. *Journal of Jilin University* (*Engineering and Technology Edition*), 1-12[2026-04-02]. https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241377. (in Chinese).

[15] 韦修喜, 彭茂松, 黄华娟. 基于多策略改进蝴蝶优化算法的无线传感网络节点覆盖优化[J]. 计算机应用, 2024, 44(4): 1009-1017.
WEI X X, PENG M S, HUANG H J. Node coverage optimization of wireless sensor network based on multi-strategy improved butterfly optimization algorithm[J]. *Journal of Computer Applications*, 2024, 44(4): 1009-1017. (in Chinese).

[16] 郭继锴, 王治乐, 陆敏. 基于主成分分析法的离轴三反系统装调及其应用[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0322002.
GUO J K, WANG ZH L, LU M. Off-axis three-mirror anastigmatic system alignment and application based on principal component analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0322002. (in Chinese).

[17] 尚红波. 浸没光刻投影物镜光学设计与像差补偿研究[D]. 长春: 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021.
SHANG H B. Study on the optical design and aberration compensation of immersion lithography lens[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, University of Chinese Academy of Sciences), 2021. (in Chinese).

[18] 陈太喜, 伍雁雄. 航空机载紧凑型长焦距光学系统设计与装调[J]. 光子学报, 2021, 50(11): 1111002.
CHEN T X, WU Y X. Design and alignment of airborne compact long focal length optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(11): 1111002. (in Chinese).

[19] 罗敬, 王金鑫, 鞠国浩, 等. 主动随机送风条件下大口径离轴三反光学系统的计算机辅助装调[J]. 光学 精密工程, 2022, 30(7): 802-812.
LUO J, WANG J X, JU G H, *et al*.. Computer-aided alignment for large-aperture off-axis three mirrors optical system with artificially random air flow[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(7): 802-812. (in Chinese).

[20] 刘广兴, 张洋, 朱海龙, 等. 应用于大视场生物成像分析仪的离轴三反显微物镜设计[J]. 中国光学, 2021, 14(5): 1177-1183.
LIU G X, ZHANG Y, ZHU H L, *et al*.. Objective lens design with off-axis three-mirror system for large field of view biological imaging analyzer[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1177-1183. (in Chinese).

[21] 陈太喜, 伍雁雄, 宋绍漫, 等. 折叠式离轴三反光学系统设计与装调[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1722001.
CHEN T X, WU Y X, SONG SH M, *et al*.. Design and alignment of folded off-axis three-mirror optical system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(17): 1722001. (in Chinese).

[22] 赵阳, 巩岩. 投影物镜小比率模型的计算机辅助装调[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 394-400.
ZHAO Y, GONG Y. Computer aided alignment of small scale projected objective[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 394-400. (in Chinese).

作者简介：



蒋世磊 (1963—), 男, 河北石家庄人, 教授, 硕士生导师, 2003 年于电子科技大学获得硕士学位, 主要从事光学精密仪器设计, 光电检测与校正技术方面的研究工作。E-mail: 2429765449@qq.com