

非理想光学系统波前像差校正方法探究

段耀武¹, 王 栋²

(1. 北京控制与电子技术研究所, 北京 100045;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130000)

摘要 波前像差是光学系统中由于光学元件的不完美、装配误差或外部环境因素所导致的光波相位畸变, 这些相位畸变直接影响了系统的成像效果。因此波前像差的校正是许多高精度光学应用中必不可少的一步, 如天文观测、激光系统、显微镜以及自适应光学等领域。传统的波前像差校正方法主要采用主动校正和被动校正。近年来, 随着硬件的计算能力提升, 智能优化算法、粒子群优化算法和遗传算法在波前像差的校正中都取得了显著进展。本文综述了该领域的研究背景、波前像差的定义和常用校正方法, 探讨了当前校正方法的应用与挑战, 并展望了未来技术的发展方向, 以期为相关人员提供借鉴。

关键词 波前像差; 像差校正; 主动校正; 被动校正

基金项目: 国家国防科技工业局 2024 年度科研专项资助 (项目编号: KJSP2023020304)。

中图分类号: O43

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.001

0 引言

在高精度光学系统中, 波前像差^[1]是影响成像质量的重要因素之一, 其产生原因主要包括光学元件的加工误差、装配偏差以及外部环境干扰。这些相位畸变若不加以校正, 将严重降低系统的分辨率与成像清晰度, 因此对波前像差进行有效校正是确保光学系统性能的关键。传统的校正方法多依赖于主动或被动光学手段, 尽管在一定程度上取得了良好效果, 但仍存在响应速度慢、适应性差等问题。随着智能优化算法和计算技术的发展, 粒子群优化、遗传算法等被广泛引入波前校正领域, 并展现出良好的应用前景。本文围绕波前像差的定义、产生机制与校正方法进行综述, 分析当前研究成果与挑战, 并展望未来的技术发展趋势。

1 研究背景

随着光学成像和激光技术的快速发展, 现代高精度光学设施对光学系统成像性能的要求不断提高, 如何既快速又高精度地校正像差成了一个十分重要的问题, 这个问题尤其体现在天文成像、激光传输、显微成像等领域。在光学系统中, 由于系统存在波前像差, 因此导致了其成像质量下降, 使得系统的分辨率和精度无法达到高精度仪器的要求。为了提高系统性能, 波前像差的有效校正成为光学工程中的一个重要问题。

波前像差的影响在天文望远镜、显微镜、激光束整形和医疗成像等高精度领域尤其重大。在天文望远

镜中, 由于大气湍流的影响, 星光的波前会产生很大畸变, 从而导致成像模糊。而在激光系统中, 波前畸变会影响激光光束的聚焦性和传输稳定性, 降低激光通信应用的效率。因此, 如何准确地测量并高效地校正波前像差是光学系统设计和应用中的重大挑战之一。

随着光学技术和计算机硬件的发展, 尤其是自适应光学和智能优化算法的出现, 使得波前像差的校正取得了显著性进展。这些新兴技术为解决复杂的波前像差问题提供了新的方法, 并在多个应用领域中取得了突破性的进展。

近年来, 人工智能技术的快速发展, 特别是深度学习与强化学习等智能优化算法的广泛应用, 为波前像差的实时校正提供了强有力的技术支持。在传统的波前校正方法中, 如基于 Zernike 多项式的拟合或最小均方差方法, 虽然具备一定的准确性, 但在面对动态变化的复杂扰动环境 (如大气湍流、热畸变) 时, 仍存在响应慢、鲁棒性差的问题。相比之下, 智能优化方法能够从环境反馈中不断学习并更新控制策略, 使得系统能够自适应不同的扰动条件, 提高校正效率与精度。

此外, 自适应光学系统 (Adaptive Optics, AO) 的发展也极大地推动了波前像差校正技术的进步。AO 系统通常由波前传感器、控制器和变形镜等组成, 能够实时检测并校正光束波前的畸变, 广泛应用于地基大型望远镜、高功率激光系统以及生物显微成像中。近年来, 集成高分辨率波前探测器与高速驱动器的 AO

系统不断涌现,进一步推动了波前校正从“慢速、低精度”向“快速、高精度、高动态范围”的方向发展。

综上所述,波前像差校正技术正朝着高精度、智能化、实时化的方向不断演进,其核心在于融合先进的感知技术、建模算法与高性能硬件设备,从而为现代光学系统提供更加稳定、高效的成像与传输保障。

2 波前像差的定义

波前像差是指光波在传播过程中,由于光学系统中的光学元件存在形状畸变、制造误差或其余外部环境因素的干扰,使得光波相位发生畸变^[2]。根据傅里叶光学理论,理想的光波应该是均匀的平面波或球面波。波前像差则是实际光波前与理想光波前的相位差异。波前像差不仅会影响光学系统的分辨率和成像质量,还会显著降低系统的光能传输效率。

波前像差的具体表现形式可以分为多种类型,其中最常见包括:

1. 球差:在光波经过光学系统时,由于光学元件表面形状的偏差,光线的聚焦位置出现差异,进而导致成像位置不集中。

2. 彗差:该像差主要发生在成像系统的中心和边缘区域,成像出现尾迹或“拖影”现象,影响图像的清晰度。

3. 场曲:该像差指光学系统中成像平面相对于理想平面发生的曲率变化,导致成像畸变。

4. 像散:由于系统中不同位置的光线聚焦于不同的焦点,导致光线在不同方向上的失焦,从而形成不规则的成像。

5. 畸变:光学系统中由于光学元件的形状不完美,导致图像与实际物体之间的关系发生失真,通常表现为图像的形状发生扭曲。

6. 色差:不同波长的光线由于折射率不同,聚焦位置也不同,导致出现色带,通常在色彩还原度较为敏感的应用中表现得尤为明显。

这些像差通常会叠加在一起,形成复杂的波前像差,影响成像效果。

3 波前像差的校正方法

波前像差的校正方法主要包括主动校正和被动校正两类。主动校正方法依赖于自适应光学技术,通过实时监测波前畸变并动态调节光学元件的形状来补偿像差,常见的实现方式包括使用变形镜、液晶空间光调制器等可变形光学器件,使光波前恢复到理想状态。这种方法广泛应用于天文观测、生物显微成像和高分辨率光学系统,能够有效应对大气湍流、光学系统误差等动态干扰。而被动校正方法则通过优化光学元件

的设计,从源头上减少像差,如采用非球面透镜修正球面像差、优化光学材料以降低色差、使用多层膜涂层减少反射引起的干涉,或通过计算机设计结合优化算法提升光学系统整体成像质量。

3.1 主动校正方法

自适应光学技术^[3]是主动校正方法中最为成熟且广泛应用的技术,能够实时补偿光学系统中的波前像差,提高成像质量。典型的自适应光学系统由波前传感器、波前控制系统和变形镜等核心部件组成。波前传感器用于检测入射光波的相位畸变,并将误差信息传输至波前控制系统,控制系统基于这些数据计算出最佳补偿策略,并驱动变形镜或其他可变形光学元件,使其表面形状动态调整,以抵消波前畸变。

在天文观测中,大气湍流造成的光学畸变是影响地基望远镜成像质量的主要因素,而自适应光学能够通过高速波前校正,大幅度提高望远镜的分辨率。在自由空间光通信领域,自适应光学能够减少湍流引起的光束散射和衰减,确保远距离高速数据传输的稳定性。

除了自适应光学技术外,动态波前补偿技术也是主动校正中重要的手段之一。动态波前补偿主要依靠可调镜面或液晶空间光调制器,通过精确调整这些元件的表面形状来动态补偿光学系统的波前误差。这一方法在高速成像和激光传输等领域具有显著优势。在激光传输系统中,特别是远距离高功率激光应用中,由于空气湍流和热效应的影响,激光束会发生畸变和能量损失,动态波前补偿技术可以实时优化光束质量,提高能量传输效率。这种方法的灵活性使其在多种光学应用中成为一种高效的波前校正方案,与自适应光学技术互补,共同提升光学系统的性能。

随着计算光学和人工智能技术的发展,自适应光学和动态波前补偿方法正在向更高精度和更快响应速度的方向发展。近年来,基于机器学习的波前校正方法开始受到关注,这些方法能够通过训练数据建立非线性映射关系,使光学系统在复杂环境下依然保持高效补偿能力。

3.2 被动校正方法

被动校正方法主要依赖于优化光学设计^[4],以减少像差的产生,使光学系统在成像过程中更加精确。光学设计优化的核心在于改善光学元件的形状、选择优质材料以及运用多层膜涂层等手段,从而有效降低波前像差。传统的光学系统往往受到球面像差、彗差和色差等影响,而通过合理调整透镜和反射镜的几何形状,可以在设计阶段减少这些误差。此外,光学材料的选择对于系统的像差控制也至关重要,如低色差

玻璃可以减少色差,而高均匀性材料能够提高透射率,减少光学元件内部的不均匀性所带来的像差问题。

在实际应用中,多层膜涂层技术也扮演着关键角色,它可以通过改变光的透射和反射特性来优化光学系统的性能。例如:在高精度成像系统中,常采用抗反射涂层以减少光的反射损耗,避免因多次反射而产生的鬼像和干涉条纹。这不仅提升了系统的透光率,还能够有效抑制杂散光,提高对比度和信噪比。特别是在波前像差控制方面,增透膜和滤光膜的优化设计可以减少光学元件表面的反射,使得入射光的透射更为均匀,从而降低像差的影响。此外,在紫外、可见光以及红外等不同波段的应用中,不同的涂层组合能够针对性地优化系统性能,使光学系统在特定波长范围内达到最佳成像效果。

近年来,随着对高性能光学系统需求的不断增长,被动校正方法在材料科学与工艺控制方面也取得了诸多进展。例如:超材料和自由曲面光学元件的引入,为光学设计带来了新的可能性。自由曲面光学元件由于不受传统球面和非球面限制,具有更大的设计自由度,能够实现更高阶像差的补偿,显著提升系统的成像质量。此外,微纳结构表面的应用也逐渐兴起,通过对亚波长尺度结构的精细设计,可以有效控制光的传播路径,实现特定波前的调控,从而进一步抑制像差的形成。

在制造工艺方面,超精密加工与离子束修形等高端技术的发展,使得光学元件的加工精度显著提升,可以更好地还原复杂设计曲面,从源头减少像差的引入。同时,精密装调技术和误差补偿机制的引入,也增强了被动校正在系统集成阶段的实用性与可控性。这些进展使得被动校正不仅仅停留在设计阶段,更延伸到了整个系统制造和集成流程中,成为实现高性能光学系统不可或缺的技术基础。

3.3 智能优化算法

近年来,随着计算智能技术的迅速发展,智能优化算法在波前像差校正中的应用日益广泛。其中,粒子群优化算法、遗传算法和模拟退火算法等方法凭借其强大的全局搜索能力和优化效率,为复杂光学系统的波前校正提供了新的解决方案。粒子群优化算法^[5]模拟群体智能的行为,通过在解空间内搜索并调整个体粒子的速度和位置,使其逐步逼近最优解。在波前校正中,该算法能够快速适应光学系统的动态变化,特别适用于实时像差补偿场景,如自适应光学系统中的实时优化控制。

遗传算法^[6]则通过模拟自然界生物的进化过程,

利用选择、交叉和变异等操作对候选解进行优化,使其逐步趋向全局最优解。在波前像差校正问题中,遗传算法的全局搜索能力使其能够有效应对复杂的多目标优化任务,例如同时优化多个波前控制参数,以获得最优的成像质量。

模拟退火算法则基于物理退火过程的数学模拟,利用降温机制控制解空间的搜索,使优化过程能够避免陷入局部最优解,最终找到全局最优解。在波前像差校正中,模拟退火算法能够帮助光学系统在复杂的误差分布下找到最佳的校正方案,特别是在初始状态较差或者优化目标函数存在多个局部极值的情况下,其优势尤为明显。

4 结束语

尽管波前像差的校正技术已取得了显著的进展,但仍面临一些技术挑战。

首先,实时校正仍是一个待需解决的重要问题。在许多高速成像和实时监控应用中,波前像差的校正需要在极短的时间内完成,这对计算能力和反馈系统的要求极高。

其次,多像差协同校正也是一个极大的挑战。在复杂的光学系统中,可能同时存在多种类型的像差,如何协调这些像差的校正并优化整体性能,是目前研究的热点问题。未来的技术需要更加高效、精确地处理这些多重像差问题。

此外,随着人工智能和深度学习技术的发展,基于数据驱动的波前像差预测与校正方法成为一个新的研究趋势。深度学习模型可以通过大量数据训练,准确预测波前像差并实时进行修正,会在未来的波前像差校正中发挥越来越重要的作用。

参考文献:

- [1] 徐欢欢,葛轶睿,黄振平.波前像差对视觉质量的影响分析[J].临床眼科杂志,2020,28(05):456-458.
- [2] 李云霄.无波前传感激光大气传输畸变补偿技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.
- [3] 胡海宁.基于深度学习的自适应光学控制技术[D].北京:军事科学院,2024.
- [4] 习啸天.无人机载复眼光学系统设计[D].西安:西安工业大学,2024.
- [5] 梅泽迅,周木春.基于改进粒子群算法的光学相控阵栅瓣优化[J].激光与光电子学进展,2023,60(20):202-207.
- [6] 张昊,李苗,翟兴辉,等.基于遗传算法的卫星光学载荷成像路径规划及参数优化[C].2024中国自动化大会论文集,2024.