

马赫-曾德尔干涉仪及其在折射率测量中的教学应用

满天龙 周宏强 万玉红

(北京工业大学物理与光电工程学院, 北京 100124)

摘要 马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪是常用的光学系统,在光学干涉测量及干涉成像领域具有重要应用。面向具备实践创新能力的新工科专业人才培养要求,本文设计了基于马赫-曾德尔干涉仪的空气折射率测量实验。除向学生讲授基本的光学原理和概念外,还对其中涉及的数据处理和分析方法进行了介绍和讨论。本文旨在培养应用物理、光学、光电信息等专业本科生从光学系统构建、数据采集到数据分析完整过程的综合能力。通过引发学生对光学测量方法的核心原理、可实现的测量精度及其影响因素等内在问题进行深入思考的方式,进一步培养和开拓学生的创新能力。

关键词 马赫-曾德尔干涉仪;干涉;光学测量;折射率测量;物理实验

MACH-ZEHNDER INTERFEROMETER AND ITS TEACHING APPLICATION IN THE MEASUREMENT OF AIR REFRACTIVE INDEX

MAN Tianlong ZHOU Hongqiang WAN Yuhong

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract As a commonly used optical system, Mach-Zehnder interferometer has important applications in specific techniques such as optical interferometric measurement and imaging. In response to the requirements for cultivating new engineering talents with practical innovation capabilities, this paper designs an experiment for measuring the refractive index of air based on the Mach-Zehnder interferometer. In addition to teaching students the basic principles and concepts of optics, the paper also introduces and discusses the data processing and analysis methods involved. This paper aims to cultivate the comprehensive abilities of undergraduate students in applied physics, optics, optoelectronic information, and related majors, from the construction of optical systems to data acquisition and analysis. By prompting students to think deeply about the core principles of optical measurement methods, the achievable measurement accuracy, and their influencing factors, the paper further fosters and expands students' innovative capabilities.

Key words Mach-Zehnder interferometer; interference; optical measurement techniques; measurement of refractive index; physics experiments

收稿日期: 2025-04-09

基金项目: 北京工业大学教育教学研究课题(ER2022KCB13);教育部产学合作协同育人项目(231104090200321);2025年度北京工业大学教育教学研究课题“数智化绿色化”改革专项(ER2025ZXB041)。

通信作者: 万玉红, yhongw@bjut.edu.cn。

引文格式: 满天龙, 周宏强, 万玉红. 马赫-曾德尔干涉仪及其在折射率测量中的教学应用[J]. 物理与工程, 2025, 35(6): 41-46.

Cite this article: MAN T L, ZHOU H Q, WAN Y H. Mach-Zehnder interferometer and its teaching application in the measurement of air refractive index[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(6): 41-46. (in Chinese)

在光学成像或探测系统中,物体发出或反射光波的波长、振幅、位相决定了其所表现出的颜色、亮暗和形状等特性^[1]。然而,几乎所有的记录介质和探测器都只对光强敏感,不能直接反应光波的位相信息。作为其波动性的具体体现,光波在自由空间或光学系统中传播时具有干涉和衍射特性。其中,利用光的干涉可将其包含振幅和位相的完整波前信息编码在干涉条纹的强度分布中,并由记录介质或探测器记录。通过干涉实现光波位相定量探测进而对物体微小位移^[2,3]、光学面型^[4,5]或折射率^[6]等具体参数进行测量的基本思路,是全息学和光学检测领域诸多技术的基础。

马赫-曾德尔干涉仪是常用的光学系统,在数字全息成像^[7]、光学相干断层成像^[8]等光学成像或检测方法中具有广泛应用。掌握马赫-曾德尔干涉仪的原理和基本结构,是进一步构建更为复杂干涉光学系统的基础,对光学、应用物理学相关专业本科生的能力培养至关重要。除利用干涉仪产生和记录干涉条纹外,还需通过数据处理从干涉条纹中提取所需测量的物体信息。因此,在教学中融入有关数据处理和分析方法的内容是十分必要的。同时,对数据的产生、获取和分析进行综合考虑的方式,可加深学生对实验方法科学思路和探测精度等深刻问题的认识和理解。

本文对马赫-曾德尔干涉仪的基本原理、光学结构及具体应用进行了分析。我们设计了空气折射率的定量测量实验,并对其中涉及的数据分析方法和测量精度等进行了讨论。本文设计的实验有利于学生理解光学干涉测量方法的核心机制,可作为面向新工科专业人才培养的基础光学实验课程具体内容,服务于应用物理、光学、光电信息等专业本科生。

1 马赫-曾德尔干涉仪的基本原理及结构

马赫-曾德尔干涉仪的基本光学结构如图 1

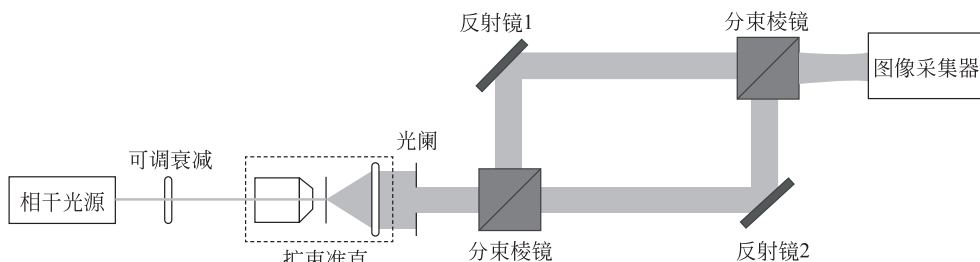


图 1 马赫-曾德尔干涉仪的光路结构示意图

所示。其中,相干光源发出的光经可调衰减器后入射扩束准直器。扩束准直器由显微物镜、针孔及透镜组成,其作用是通过物镜聚焦再通过针孔选频,得到激光的基模光束后对其进行准直,从而直径扩展的相干光束。使用光阑控制光束直径,利用分束棱镜将光分为强度相等的两束。这两束光分别被反射镜反射并由另一分束棱镜合束后,最终到达图像采集器平面并发生干涉。设经反射镜 1 和反射镜 2 反射后到达图像采集器平面上的两束光的复振幅 E_1 和 E_2 分别为

$$E_1(x, y) = A_1(x, y) e^{j\varphi_1(x, y)}$$

$$E_2(x, y) = A_2(x, y) e^{j\varphi_2(x, y)}$$

其中, (x, y) 为图像采集器平面的空间坐标, A_1 和 A_2 分别为两光束在图像采集器平面上的振幅分布, φ_1 和 φ_2 分别为两光束在图像采集器平面上的位相分布。一般采用电荷耦合器件 (Charge-coupled device, CCD) 相机等图像采集器记录两光束所产生的干涉条纹,则最终采集到的干涉条纹 $I(x, y)$ 具有如下形式

$$\begin{aligned} I(x, y) &= [(E_1 + E_2)(E_1 + E_2)^*] S_{\text{CCD}} \\ &= [(A_1)^2 + (A_2)^2 + A_1 A_2 e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} + \\ &\quad A_1 A_2 e^{j(\varphi_2 - \varphi_1)}] S_{\text{CCD}} \\ &= [(A_1)^2 + (A_2)^2 + 2A_1 A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)] S_{\text{CCD}} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $*$ 表示复共轭操作。可见, CCD 平面上产生的干涉条纹分布中,原本不能被直接探测的光波位相分布 φ_1 和 φ_2 可以被编码在干涉条纹余弦强度分布的相对位相中。需要注意的是,条纹强度分布中记录的是参与干涉的两光束的相对位相差,而非任一光束的绝对位相。我们将在下一节中对如何测量某一光束传播路径中产生的位相变化进行展开。 S_{CCD} 表示 CCD 对干涉条纹光强分布的离散化和积分效应

$$S_{\text{CCD}} = \left[\text{rect}\left(\frac{x}{\Delta x}, \frac{y}{\Delta y}\right) \otimes \text{comb}\left(\frac{x}{\Delta x}, \frac{y}{\Delta y}\right) \right] \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{N_x \Delta x}, \frac{y}{N_y \Delta y}\right)$$

其中, CCD 感光靶面尺寸为 $L_x \times L_y$, 其像元尺寸为 $\Delta x \times \Delta y$, 像素数为 N_x 和 N_y , rect 表示矩形函数, $\otimes$ 表示二维卷积, comb 表示梳状函数^[1]。可见, 由于 CCD 的特性, 连续的光强信号在离散化采样和积分效应影响下, 被以离散数字信号的形式保存在计算机中。

在实际应用中, 与另一常用的干涉仪结构迈克耳孙(Michelson)干涉仪相比, 马赫-曾德尔干涉仪具有如下特点: (1) 由于具备两个分束棱镜, 因此参与干涉两光束的夹角具有更大的调节范围; (2) 参与干涉的两光束在干涉仪内部均为单向传播, 因此可测量透射型样品。下面, 我们以空气折射率测量实验为例, 对马赫-曾德尔干涉仪在光学精密测量领域中的具体应用进行分析。

2 基于马赫-曾德尔干涉仪的空气折射率测量实验

在空气动力学研究和设计、大气探测、流场测量等领域中, 利用某种方法对空气的折射率及其动态分布进行测量是重要的技术基础之一。理论上, 空气折射率受气压、温度、大气成分及光波长的影响, 因此其理论计算公式通常较为复杂。然而, 在可见光范围内可进行一定的近似, 得到常用的简化空气折射率计算公式^[9]

$$n = 1 + 77.6 \left(1 + \frac{7.53 \times 10^{-3}}{\lambda^2} \right) \frac{P}{T} \times 10^{-6} \quad (2)$$

其中, P 为压强, 单位是 hPa; T 为温度, 单位是 K; λ 为光波长, 单位是 μm 。若测量的时空周期内

光波长和温度较为稳定, 则温度 T 和波长 λ 可认为是常数, 此时空气折射率是关于压强的线性函数, 不同的理论计算方法之间的区别主要在于函数的斜率。由此, 可先对该斜率系数进行测量, 而后再结合实验条件下具体压强值计算出准确的空气折射率。如图 2 所示, 若设计实验产生可控的压强改变量 ΔP , 并测量相应的空气折射率改变值 Δn , 则可以通过它们之间的比值获得 n - P 关系的斜率。

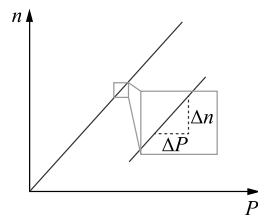


图 2 温度和波长为常数时, 空气折射率 n 与其压强 P 间的关系示意图

当光在介质中传播时, 若介质的折射率发生变化, 则会导致光程发生改变, 光程的变化进而影响某一平面上光场复振幅的位相分布。因此, 可以利用光学干涉方法对位相变化进行定量测量, 进而实现介质折射率改变的间接测量。如图 3 所示, 如果在马赫-曾德尔干涉仪的一路中引入一气室, 并配置相应的压强调节和测量装置, 则可实现对气室内空气折射率的定量测量。需要注意的是, 测量过程中干涉仪的另一光束传播路径应保持稳定并作为参考, 以便使干涉条纹中编码的相对位相差仅反应由待测样品折射率改变所引起的位相变化。

在图 3 所示的装置中, 气室内空气的压强改变可导致其折射率的变化, 并影响经反射镜 1 反射的光束的光程。该光程变化与图像采集器上接

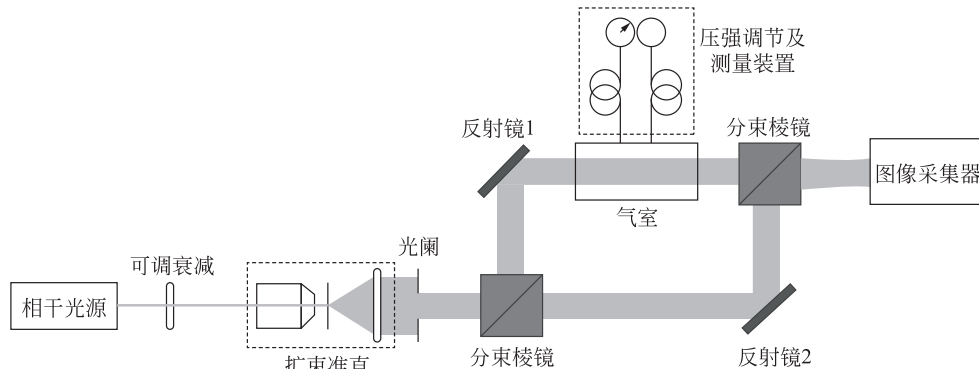


图 3 基于马赫-曾德尔干涉仪的空气折射率测量实验装置示意图

收到的干涉条纹的相对移动有关。因此,可通过观测干涉条纹的相对移动获知由于压强变化所导致的折射率改变

$$[n_1(P_1) - n_2(P_2)]L = \frac{\Delta m \lambda}{M} \quad (3)$$

其中, L 为气室长度,由于气室采用硬质坚固结构且实验过程中压强改变量不大,所以可认为是常数; λ 为光波长; Δm 为干涉条纹的空间移动量; M 为条纹周期。结合式(1)和式(3)及压强变化量可计算出图2中的 $n-P$ 关系斜率 $\Delta n/\Delta P$ 。由此,结合式(1)~式(3)可得在图3所示装置中对空气折射率进行测量和计算的方法为

$$n = 1 + \frac{\lambda}{L} \frac{\Delta m}{M} \frac{P}{\Delta P} \quad (4)$$

我们在实验室中搭建了如图3所示实验装置,其中,相干光源为中心波长532nm的单模激光器;可调衰减为可变中性密度滤光片;扩束准直系统由40倍显微物镜、15 μ m直径针孔以及150mm焦距透镜构成;使用光阑控制光束直径;两个非偏振分束镜结合两个保护银反射镜构成干涉仪主体;使用CCD相机作为图像采集器;金属外科筒形气室两侧由硬质有机玻璃密封,气室长度 $L=80$ mm,其上两个开口经软管分别连接气球及血压表构成压强调节和测量装置。实验装置实物如图4所示。

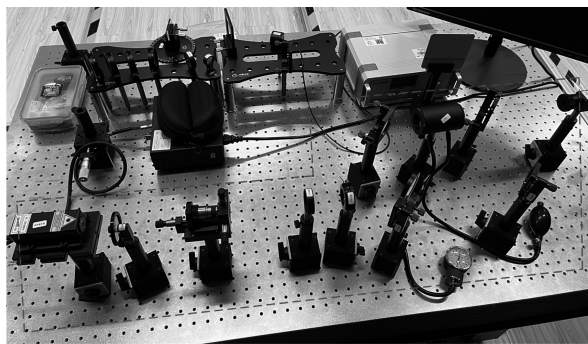


图4 基于马赫-曾德尔干涉仪的空气折射率测量实验装置实物图

3 数据处理方法及测量精度分析

当气室中的压强处于不同值时,图4实验系统中CCD采集到的干涉条纹如图5(a)和图5(b)所示。通过作为参考的绿色虚线可观察到,由于气室内空气的压强发生了改变,导致马赫-曾德尔

干涉仪产生的干涉条纹发生了位移。从公式(3)及上节中的分析中可知,此时通过测量干涉条纹的相对位移并结合压强的变化量则可获得如图2所示的 $n-P$ 关系的斜率,并最终对空气的折射率进行测量。实验中,光波长 λ 为532nm,温度大致为28摄氏度即301.15K,气室长度 $L=80$ mm,仅需计算干涉条纹的周期和相对位移即可。然而,从公式(1)可知,CCD采集到的是经过空间采样及积分后的离散光强信号,直接对其进行分析则导致对条纹位移的测量精度受限于CCD的像元尺寸。常见CCD的像元尺寸为微米量级,因此无法实现亚微米级的条纹相对位移测量。另一方面,由公式(1)可知物理系统产生的干涉条纹光强分布具备已知的(即余弦函数分布)理论形式。在这一前提下,可以通过对CCD的离散光强信号进行曲线拟合的方式对其相对位移进行高精度的测量。选取余弦函数作为拟合模型,拟合结果如图5(c)和图5(d)所示。

理论上,利用曲线拟合方法所能实现的干涉条纹相对位移测量精度仅受所采集的离散信号的信噪比限制,而不被CCD的像元尺寸大小所限制。基于上述实验系统和数据处理方法,我们首先验证了 $n-P$ 关系是否如式(2)和式(4)所示呈线性。实验中,我们分别在不同的气室气压下采集干涉条纹,通过曲线拟合提取各幅干涉条纹的条纹周期及横向位置,并计算条纹间的相对位移,最终得到的结果如图6所示。10组测量数据中,压强与条纹相对位移间展现出良好的线性关系(线性拟合 R 值为0.99924),验证了式(2)和式(4)的理论预期。

图6所示结果证明,基于曲线拟合的数据处理方法提供与理论预期较为吻合的实验测量结果,可以在此基础上进一步计算空气的折射率。需要特别说明的是,实际实验的测量精度仍然受诸多因素的影响。事实上,可以设计另外的光学干涉实验,在高稳定性的环境下采集干涉条纹,排除空气扰动、平台振动等因素的影响并单独对曲线拟合方法所能实现的干涉条纹相对位移测量精度进行定量研究。本文主要侧重实验教学的方法讨论,因此所给出的实验结果统一保留两位小数。图5所示的结果中,经曲线拟合获得的两干涉条纹的平均条纹周期为15.04像素,相对位移为8.38像素。图5(a)和图5(b)所示结果对应的气

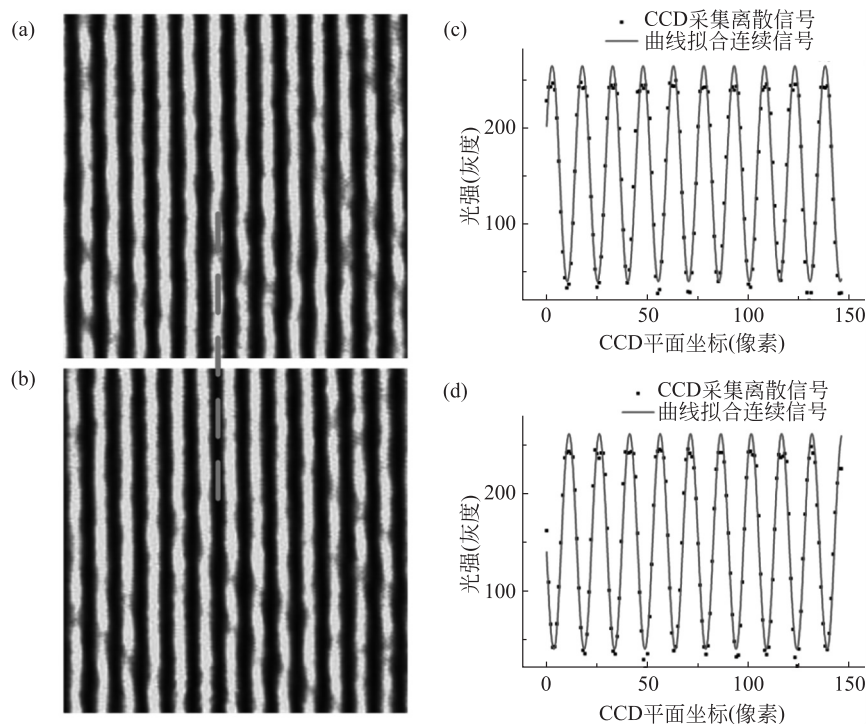


图5 实验结果及数据处理

其中, (a)和(b)为气室内压强差 15hPa 间 CCD 采集到的干涉条纹强度分布(经裁剪,假彩色)。图(c)和(d)为分别对应图(a)和(b)所示干涉条纹沿水平方向的强度分布离散信号及曲线拟合连续信号

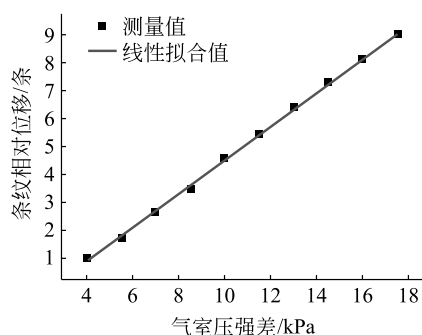


图6 实验中气室压强差及其对应的干涉条纹相对位移, 黑色方块为实验测量值, 灰色线为线性拟合数据

室内压强差为 15hPa, 结合本节中给出的其他系统参数可得, 基于马赫-曾德尔干涉仪测量的 n - P 关系的斜率为 2.47×10^{-7} 。利用式(2)计算出的理论 n - P 关系斜率为 2.67×10^{-7} , 实验测量值和理论值间的相对误差为 7.5%。

4 讨论

马赫-曾德尔干涉仪在光学干涉成像及测量系统中具有广泛应用, 讲授其基本原理和结构, 对

培养应用物理、光学、光电信息等专业本科生的基本能力十分重要。以具体应用为例进行教学和实验设计, 不仅能够生动、形象地传达相关的物理概念, 还可以在从数据采集到数据分析的完整流程中培养学生的综合能力, 并帮助其深入理解光学测量方法测量精度及其决定因素等光学和物理学概念。基于这一思想, 我们设计了利用马赫-曾德尔干涉仪实现空气折射率测量的实验, 并对其中的细节进行了研究。实验结果表明, 该方法可提供较为准确的测量值(与理论值偏差为 7.49%)。需要说明的是, 本文所设计实验的重点在于向学生传达光学干涉测量方法的基本知识, 而非追求绝对的测量精度。鉴于空气折射率精密测量的复杂性, 实验过程中的湿度、大气组成成分、激光波长漂移等因素均可能对结果产生较为显著的影响。

在本文设计的实验当中, 除了介绍马赫-曾德尔干涉仪的基本原理、结构及特性外, 还特别强调了对实验数据的处理及分析方法。由此想引发学生思考的主要问题是: (1) 如何对可能编码在光波振幅、位相、波长等参量中的样品结构和功能信息

进行分析;(2)如何合理地利用或设计光学系统,实现光波参量的探测;(3)光学测量方法所能实现的精度,测量精度有哪些本质影响因素等。此外,若将气室换位液体容器并使用气泵实现液体加压,还将本文所设计的实验和数据分析方法可用于透明液体的折射率测量中,并进一步对不同压强下液体折射率改变的物理规律进行研究。通过对上述内容的思考,在锻炼学生基本能力的同时,更可以为其进一步了解如精密光学定位和测量^[10,11]、超分辨率显微成像^[12]等现代光学技术的基本原理打下基础。

参 考 文 献

- [1] 吕乃光. 傅里叶光学[M]. 2版. 北京:机械工业出版社, 2006: 226.
LYU N G. Fourier optics[M]. 2nd ed. Beijing: China Mechine Press, 2006: 226. (in Chinese)
- [2] 潘文,冯晓军,刘星雨,等. 光纤马赫-曾德尔干涉微位移测量系统[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(3): 0312008.
PAN W, FENG X J, LIU X Y, et al. Micro-displacement measurement system based on optical fiber Mach-Zehnder interferometry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025, 62(3): 0312008. (in Chinese)
- [3] 季长胜,罗松杰,陈子阳,等. 基于扫描误差修正的高精度白光干涉测量[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(3): 0312003.
JI C S, LUO S J, CHEN Z Y, et al. High-resolution white light interferometry based on scanning error correction[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025, 62(3): 0312003. (in Chinese)
- [4] 梅雪松,孙涛,赵万芹,等. 光学相干成像技术在激光加工过程实时监测与控制中的应用研究进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59(15): 216-231.
MEI X S, SUN T, ZHAO W Q, et al. Recent advances of optical coherence tomography technology in real-time monitoring and control of laser processing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(15): 216-231. (in Chinese)
- [5] 周建起,刚建华. 数字全息技术的激光超精密加工表面检测研究[J]. 激光杂志, 2023, 44(8): 243-247.
ZHOU J Q, GANG J H. Research on laser ultra precision machining surface detection based on digital holography[J]. Laser Journal, 2023, 44(8): 243-247. (in Chinese)
- [6] 李伟霞,黄素娟,闫成,等. 基于数字全息显微技术的光聚合物折射率测量[J]. 应用科学学报, 2022, 40(2): 179-189.
LI W X, HUANG S J, YAN C, et al. Refractive index measurement of photopolymer based on digital holographic microscopy[J]. Journal of Applied Sciences, 2022, 40(2): 179-189. (in Chinese)
- [7] 钟丽云,张以谟,吕晓旭,等. 数字全息中的一些基本问题分析[J]. 光学学报, 2004, 24(4): 465-471.
ZHONG L Y, ZHANG Y M, LYU X X, et al. Analysis of some fundamental issue about digital hologram[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(4): 465-471. (in Chinese)
- [8] 尹子辰,何滨,陈政宇,等. 光学相干成像及临床应用研究[J]. 中国激光, 2024, 51(9): 24-36.
YIN Z C, HE B, CHEN Z Y, et al. Optical coherence imaging for clinical applications[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(9): 24-36. (in Chinese)
- [9] MURTY S S R. Laser beam propagation in atmospheric turbulence[M]. U. S. A.: Proc. Indian Acad. Sci. (Engg. Sci.), 1979: 179-195.
- [10] 朱俊豪,汪盛通,李星辉. 面向光刻机晶圆台的超精密光栅定位技术[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 320-336.
ZHU J H, WANG S T, LI X H. Ultraprecision grating positioning technology for wafer stage of lithography machine[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 320-336. (in Chinese)
- [11] 张正宇,刘显含,罗杰,等. 一种基于非共光路外差激光干涉反馈的新型纳米精密定位系统[J]. 光学技术, 2023, 49(4): 390-397.
ZHANG Z Y, LIU Y H, LUO J, et al. A novel nano accuracy positioning system based on feedback of heterodyne laser interferometry with non-coaxial beams[J]. Optical Technique, 2023, 49(4): 390-397. (in Chinese)
- [12] 左超,陈钱. 分辨率、超分辨率与空间带宽积拓展——从计算光学成像角度的一些思考[J]. 中国光学, 2022, 15(6): 1105-1166.
ZUO C, CHEN Q. Resolution, super-resolution and spatial bandwidth product expansion—some thoughts from the perspective of computational optical imaging[J]. Chinese Optics, 2022, 15(6): 1105-1166. (in Chinese)