中国科学: 技术科学 2026 年 第 56 卷 第 4 期: 1009 ~ 1025
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
进 展 西安交通大学建校130周年暨西迁70周年机械工程学科专刊

超精密光栅狭缝多场耦合扰动模态识别与精度保持技术

李国俊[1,2,3†], 王兰兰[1,2,4†], 雷彪[1,2,3], 牛东[1,2,3], 李甜[1,2,4], 姜维[1,2,4], 史永胜[1,2,3], 陈邦道[1,2,3], 尹磊[1,2,3], 蒋维涛[1,2,4], 刘红忠[1,2,3*]

1. 西安交通大学精密微纳制造技术全国重点实验室, 西安 710049
2. 西安交通大学机械工程学院, 西安 710049
3. 内蒙古智能制造研究院, 呼和浩特 011500
4. 陕西省石墨烯联合实验室, 西安 710049
†同等贡献
* E-mail: hzliu@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2025-12-26; 接受日期: 2026-03-03; 网络版发表日期: 2026-03-16
国家自然科学基金(批准号: 52575639, 52475605)资助项目

摘要 面向先进光刻机、超精密机床等高端装备的纳米级定位需求, 超精密光栅位移传感器狭缝内的光-热-流多场耦合扰动, 是限制测量不确定度进一步降低的关键因素. 光栅读数头与光栅尺之间光干涉狭缝中, 局部热源、高速运动和气浴流场共同作用, 引起温度、压强和密度场强烈波动, 进而导致气体折射率场时空变化和干涉条纹畸变, 引起纳米级测量不确定度. 本文梳理超精密光栅狭缝多场耦合扰动的形成机理与误差传递路径, 综述气动光学效应、跨尺度流动模型以及光-热-流多物理场耦合理论模型与数值求解方法, 总结跨尺度扰动模态识别的研究进展. 在精度保持技术方面, 综述整体气浴与局部微射流控制的多场扰动抑制技术, 浸没式光栅与狭缝折射率均化技术, 以及基于干涉信号特征和多源信息融合的数模驱动误差补偿技术, 并结合西安交通大学光栅团队近年研究, 提出面向超精密光栅狭缝扰动的“源头抑制-路径调控-结果补偿”一体化技术路线. 建议多物理场精细建模、数字孪生驱动在线扰动预测、多技术协同与新型光场模式等未来发展方向, 为构建面向高端装备的工程化超精密光栅测量系统提供技术参考.

关键词 超精密光栅, 多场耦合, 气动光学, 流场控制, 误差补偿

1 引言

半导体制造、超精密机床以及先进光学加工检测装备近些年快速发展, 其运动平台的定位精度需求已逐渐提升至纳米级甚至亚纳米级[1]. 以先进光刻机为例, 7 nm及以下先进光刻机中, 掩模台、工件台及光路调节系统等, 定位精度要求亚纳米级(<1 nm), 并需要在高速扫描(>1 m/s)、高加速度(>2g)以及长时间连

引用格式: 李国俊, 王兰兰, 雷彪, 等. 超精密光栅狭缝多场耦合扰动模态识别与精度保持技术. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 1009–1025
Li G J, Wang L L, Lei B, et al. Multi-physics coupled perturbation mode recognition and accuracy preservation technology in the confined space of ultra-precision grating (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 1009–1025, doi: 10.1360/SST-2025-0442

© 2026 《中国科学》杂志社

续运行工况下保持长期稳定[2,3]. 超精密光栅位移传感器凭借结构紧凑、可实现多自由度测量以及与平台一体化集成等优势, 是光刻机、超精密机床和先进光学加工检测装备中关键的位置反馈部件[4~8].

随着高端装备测量分辨力和测量不确定度指标不断逼近光干涉测量理论极限, 光栅测量狭缝区域内温度、压强、流致振动等环境扰动因素变化对测量精度的影响已不容忽视. 大量实验与数值研究表明, 光栅读数头与光栅尺之间的毫米级狭缝空间, 是多物理场扰动高度集中的关键区域, 如图1所示. 局部热源、驱动装置和气浴系统产生的热量, 通过对流与传导在狭缝中形成强温度梯度和复杂流动结构, 引起气体折射率的时空波动, 进而导致干涉条纹畸变和位移测量误差显著放大[3].

超精密光栅狭缝光干涉测量的主要误差源可归纳为相位测量误差、空气折射率变化、光源频率漂移等[9]. 对于高精度光栅读数测量系统, 实验与理论分析均表明, 空气折射率波动直接影响亚纳米级测量精度[10]. Edlén公式指出, 如果读数狭缝存在150 Pa左右的压力波动, 或者18 mK的温差变化, 可导致1 nm的位移测量误差. 实际服役工况下, 光栅读数由于光-热-流耦合噪声(ΔP > 300 Pa, ΔT >100 mK), 气动光学效应将使得光束在穿越扰动介质时出现光学畸变[11~15], 导致数纳米甚至数十纳米测量误差, 降低了先进光刻机等高端装备的制造精度. 光栅干涉读数路径更短、结构更紧凑, 理论上对大尺度温度梯度更具抗扰能力, 但在微尺度狭缝内, 稀薄流效应、壁面滑移和非平衡热传导等问题使得折射率场呈现强非线性与强随机性, 对测量精度构成新的挑战.

针对上述问题, 研究人员已围绕光栅狭缝多场耦合扰动模态识别与精度保持技术开展了研究[16]. 理论研究层面, 针对多物理场耦合机理建模与跨尺度数值模拟, 发展了狭缝流场与折射率场求解方法, 建立温度、压强、密度扰动与光程差、相位噪声之间的定量映射关系[17,18]. 在工程技术路径上, 围绕气浴流场控制、浸没式光栅测量与误差补偿等方向形成了多条技术路线, 包括整体气浴温控与局部微射流控制[19~22], 浸没式光栅位移传感器与折射率均化设计[23], 以及基于干涉信号特征和多物理场信息融合的误差补偿技术[24]. 当前研究仍存在三方面局限与不足:

(1) 在多场耦合扰动形成机理方面, 光-热-流跨尺度耦合模型尚不完备, 对连续-稀薄流动交界面、滑移边界和非平衡热传导等效应的描述精度有限;

(2) 在扰动模态识别与建模方法方面, 现有折射率模型和环境监测方案难以捕捉亚毫秒级、宽频谱的折射率波动, 气动光学效应与干涉条纹畸变之间的非线

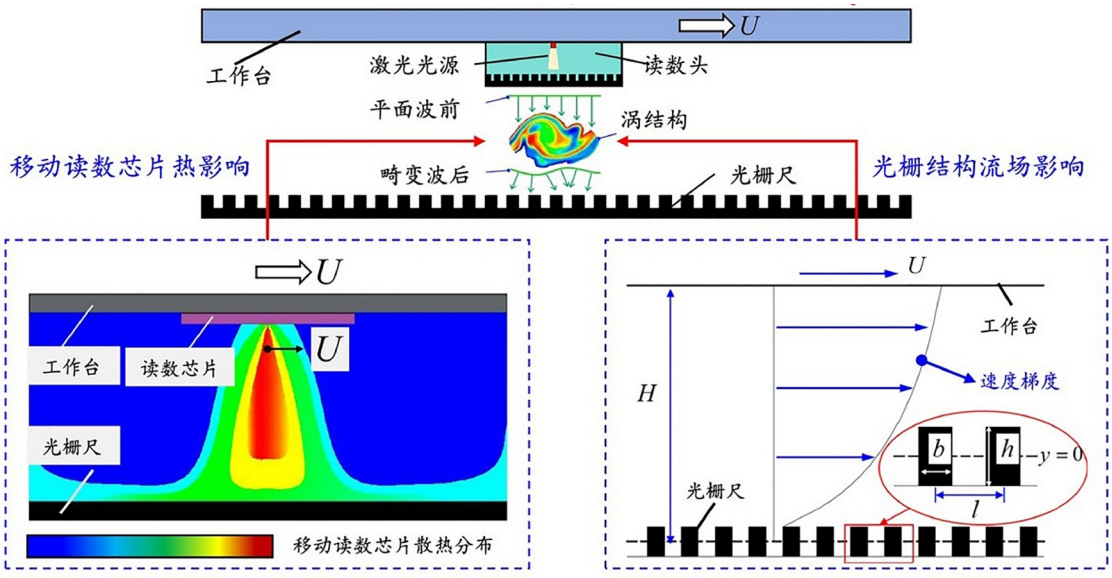


图 1 (网络版彩图)光刻机用超精密光栅狭缝内多物理场耦合噪声形成示意图

Figure 1 (Color online) Schematic of the multi-physics coupling noise formation in the confined space of an ultra-precision grating for lithography machines.

性传递路径尚未完全理清;

(3) 在精度保持技术方面, 单一依靠气浴温控或光路结构优化已接近理论瓶颈, 急需将局部气浴流场控制、浸没式折射率均化与高频动态误差补偿协同集成, 构建“源头抑制-路径调控-结果补偿”的一体化技术路线.

本文围绕超精密光栅干涉读数狭缝这一典型受限微尺度空间, 针对光-热-流多场耦合扰动的形成机理、跨尺度传递过程与模态识别方法进行梳理, 综述气浴流场调控, 浸没式测量与折射率均化, 以及基于干涉信号特征与多源信息融合的数模驱动误差补偿等精度保持技术的研究进展与发展趋势, 旨在为亚纳米级乃至皮米级光栅位移测量系统的工程化实现提供参考. 相较于已有综述多从气动光学效应、稀薄气体建模或误差补偿等单一方向展开, 本文从多场扰动产生、跨尺度误差传递和干涉成像误差的链路出发, 对相关研究内容进行归纳, 按照“源头抑制-路径调控-结果补偿”的调控路径层级对精度保持技术进行对比总结, 讨论不同路径的抑制对象、抑制能力、工程代价与可集成性, 提出面向工程应用的协同集成思路与未来研究方向.

2　光栅狭缝扰动机制与模态识别

2.1　多场耦合扰动形成机制及误差传递路径

超精密光栅测量系统通常由光栅尺、读数头、光源与信号处理电路等组成, 其中光栅读数狭缝区域为光束传播通道, 在电机、驱动线圈、信号处理电路等多种热源和气浴流场的共同作用之下, 形成典型的光-热-流多场耦合微环境, 其扰动形成机制分析难点主要体现在以下方面.

(1) 从热学角度看, 电子器件、自发热运动部件和局部光源会在狭缝附近形成分布复杂的热源, 热量通过固体结构和气体介质传播, 导致狭缝气体中存在显著的温度梯度及时间波动. 温度场的不均匀性直接改变气体的密度和折射率分布, 进而影响干涉光束的光程稳定性.

(2) 从流动角度看, 平台高速、高动态运动导致狭缝内气体相对流速较高, 伴随边界层发展、分离与再附着等现象. 平台的高速运动或狭缝高度减小, 系统的Knudsen数可超过0.01, 其中$Kn = \lambda / L$, λ为分子平均自由程, L为狭缝特征尺度, 进入滑移流乃至过渡流区域, 传统基于连续介质假设的纳维-斯托克斯(Navier-Stokes, NS)方程不再适用, 需要引入稀薄气体动力学模型来描述分子自由程、分子碰撞和壁面滑移等效应.

(3) 在光学层面, 狭缝气体折射率的时空波动会改变干涉光束的传播路径与相位分布, 形成典型的气动光学效应, 局部密度波动使得干涉条纹出现漂移、扭曲和对比度下降. 这种效应在长距离望远镜与飞行器激光视窗中已得到广泛研究, 但在光栅狭缝等微尺度场景中, 其表现形式具有明显的跨尺度与非平衡特征, 现有气动光学理论难以直接应用.

热扰动与流场扰动之间并非简单叠加, 而是通过热对流和非平衡热传导形成强烈耦合. 温度场分布改变局部密度和黏度, 进而影响流场结构; 反之, 流场的滞后区和二次流动又会导致热量在局部区域积聚, 热惯性形成长时间尺度的扰动记忆效应. 这使得折射率场呈现明显的时序滞后和多时间尺度叠加特性, 使得传统基于稳态假设或单一时间常数的补偿模型难以有效应对.

综上, 光栅狭缝内的多场耦合扰动形成路径、狭缝气体湍流扰动、温度不均匀分布等, 将诱发气动光学效应, 引起超精密光栅测量基准漂移, 测量不确定度达到纳米级(>1 nm). 其科学本质为, 光栅狭缝微环境中, 光-热-流多物理场耦合噪声、失稳扰动引起介质折射率波动, 光场畸变机制和扰动边界尚未被充分解析, 噪声时空反演机制缺失, 热-流波动对光干涉的影响量化规律及耦合动力学模型亟待完善. 因此, 建立准确描述连续-稀薄、稳态-瞬态以及多时间尺度耦合的多物理场模型, 是实现光栅狭缝扰动模态识别与精度保持的理论基础.

2.2　跨尺度多场耦合扰动模态识别

2.2.1　气动光学效应

传统气动光学研究主要关注高速飞行器外部流场对光学系统成像质量的影响, 其理论基础是将折射率视为密度、温度或压强场的函数, 通过气体状态方程与经验公式(如Edlén, Gladstone-Dale等)建立折射率与环境参数之间的定量关系[12~15]. 在此基础上, 分析不同尺度密度扰动对波前畸变和光程差的影响. 在超精密光栅狭缝研究中, 上述理论仍需进行两方面拓展:

(1) 折射率模型修正, 微尺度下滑移流和非平衡效应显著, 常规Edlén公式需要引入改进项以考虑局部温度、压强和湿度的高梯度分布;

(2) 动态气动光学建模, 由于光栅读数过程本身是高速动态过程, 需要将气动光学分析从经典的静态流场、光线追迹扩展到时变流场、波动光学传播, 实现对光程差的时域统计与频域特征分析.

为研究光栅狭缝的热流耦合扰动和气动光学效应, 建立跨尺度多场耦合数值分析框架, 利用计算流体力学(computation fluid dynamics, CFD)模拟中NS和直接模拟蒙特卡罗(direct simulation Monte Carlo, DSMC)混合方法获得狭缝内温度、压强和密度场的瞬态分布, 将环境参数代入改进折射率模型, 得到折射率场, 采用波动光学模型计算光束传播过程中的光程差, 通过统计分析光程差的均值、方差和功率谱, 评估折射率波动对位移测量的不确定度贡献. 已有研究表明, 在典型光刻机气浴系统中, 温度波动控制在±20 mK、局部折射率波动控制在10^{-7}量级时, 仍然会对亚纳米级位移测量造成可观影响[25]. 因此, 如何在微尺度狭缝内进一步压缩折射率波动, 成为发展新一代气动光学抑制技术的关键需求.

2.2.2 跨尺度流动模型

光栅狭缝高度通常在毫米级, 当特征长度接近或小于气体分子自由程时, 流动状态从连续流逐渐过渡到滑移流、过渡流甚至自由分子流. 此时, Knudsen数$Kn=\lambda/L$(λ为分子自由程, L为特征长度)成为判断流场类型的重要指标[26]. 为准确捕捉光栅狭缝内的跨尺度流动特性, 研究者提出了多种流场物理建模策略, 不同跨尺度建模技术的特点与适用范围对比如表1所示. 常用的三种模型对比分析如下.

(1) 改进NS方程模型. 在$Kn<0.1$的滑移流区域, 可在传统Navier-Stokes方程边界条件中引入Maxwell滑移条件与温度跃迁条件, 对壁面附近的速度和温度分布进行修正[27]. 尽管这种方法在计算效率上具有优势, 但在狭缝高度降至0.1 μm量级时, 壁面滑移速度可达主流速度的10%~15%, 使用简化模型还会产生高达30%的误差.

(2) DSMC方法. DSMC通过对分子运动与碰撞过程进行统计模拟, 可在$0.01<Kn<10$的广泛范围内获得较高精度, 在狭缝高度极小或压强极低场景下表现尤为出色. 但DSMC计算量大, 对时间步长和网格尺寸要求严格, 难以直接用于大尺度系统的全域模拟[26].

(3) 跨尺度NS-IP-DSMC混合模型. 针对光栅狭缝局部微尺度、周围连续流场的特点, 近年来提出基于动态Knudsen数判据的区域划分方法, 在连续流区域采用NS方程, 在稀薄流区域采用DSMC或信息保存型DSMC(information preservation DSMC, IP-DSMC)方法, 并通过重叠区域或界面条件实现两类模型的耦合[28,29]. 该类模型在保证整体计算效率的同时, 能够较好地捕捉边界层滑移、稀薄效应以及流动非平衡特征, 为后续折射率场与干涉测量误差建模提供精细的流动基础数据.

西安交通大学光栅团队面向超精密光栅狭缝内跨尺度流场扰动解析难题, 开发基于OpenFOAM框架的跨尺度NS-IP-DSMC混合模型, 实现对不同Knudsen数区域的协同建模与高效求解. 如图2所示, 光栅狭缝内计算域被划分为连续流区域(NS)与稀薄流区域(DSMC), 两区域通过信息传递网格与计算网格进行动态耦合. 耦合界面采用滑动窗口自适应识别机制, 为避免传统界面识别不准确难题, 构建基于当地物理量梯度变化的梯度长度局部Knudsen数作为连续失效判断参数, 其定义为$Kn_Q=\lambda|\nabla Q|/Q$, 其中Q为当地物理量, 如密度、温度和速度. 对于狭缝复杂跨域流动, 采用多参数混合方式实现连续失效判定, 定义混合算法界面判定参数为$Kn_{\max}=\max\left(Kn_\rho, Kn_T, Kn_u\right)$, 其中$Kn_\rho$, Kn_T, Kn_u分别为基于密度、温度和速度的当地Knudsen数. 在混合算法中, 连续流域和稀薄流域采用同一套网格进行计算, 在每个计算网格中计算局部Knudsen数, 设定一个信息传递界面动态识别阈值, 在大于该阈值区域采用IP-DSMC模型进行计算, 在小于该阈值区域采用NS方程进行计算.

根据上述定义的局部最大Knudsen数作为连续失效判定标准, 对光栅狭缝内全流场进行流域动态划分, 设定连续失效判定阈值为Kn_c, 当$Kn_{\max}\geqslant Kn_c$时判定连续假设失效并切换至IP-DSMC, 当$Kn_{\max}<Kn_c$时采用NS方程, 如图2所示. 图中黄色区域为NS方程计算网格, 紫色区域为DSMC计算网格, 中间的变色区域为信息传递区域, 红色为混合算法耦合交界面. 在稀薄流动区域, 采用DSMC方法将分子的碰撞和运动解耦, 对网格内的微观分子采用统计来表征宏观物理特征.

表 1　跨尺度流动建模技术路线对比

Table 1　Comparison of modeling strategies for multiscale flows

流动模型	适用Knudsen数区间	计算资源	边界处理要点	优点	缺点
连续介质模型: NS+无滑移边界	$Kn < 0.001$	低	固壁无滑移、无温度跳跃	工程成熟、求解稳定、效率高; 适合大尺度、低稀薄度	对稀薄效应无效
连续介质模型: NS+滑移/跳跃边界	$0.001 < Kn < 0.1$	中	壁面速度滑移、温度跳跃	在连续流区边缘有效扩展了N-S方程的适用范围, 计算增量小	经验或半经验滑移系数影响精度, *Kn*数进一步增大时精度迅速下降
高阶连续介质模型: Burnett/Grad-13	$0.01 < Kn < 1$	中	边界条件复杂, 需要高阶滑移模型	从Chapman-Enskog展开更高阶推导, 理论框架严谨	方程复杂、数值稳定性差, 边界条件难以确定, 实际应用受限
分子动力学	从原子尺度出发, 通常用于极微尺度	极高	需要原子势函数、壁面材料模型	从微观机理出发, 可捕捉界面/吸附/纳米尺度效应	计算规模受限, 难以用于工程域; 参数依赖势函数与材料模型
直接模拟蒙特卡罗	全流域	极高	网格尺度需小于局部平均自由程; 时间步需小于碰撞时间	物理可靠性强, 适用范围广	计算成本巨大, 统计噪声高; 低速/低马赫或高密度时效率下降
混合方法: NS-IP-DSMC	全流域	中	界面通量匹配与统计噪声抑制, 局部连续失效判据	在弱稀薄/低速区较传统DSMC更高效、噪声更低	混合算法复杂, 具体应用场景参数设置需验证

注: (1) *Kn*区间为常用经验范围, 用于方法选型与理解;
(2) 计算资源消耗按常见相对量级给出, 实际与网格、时间步、粒子数、统计收敛要求、耦合迭代次数等密切相关.

DSMC的分子碰撞模型采用变径硬球模型，碰撞对的选取采用费时间计数器法，采用L-B模型计算能量交换，采用漫反射模型模拟分子与物面碰撞. 连续流域控制方程采用积分形式的NS方程, 基于有限元体积法进行空间离散求解，时间推进格式采用隐式Runge-Kutta法. 跨尺度NS-IP-DSMC混合模型的求解流程如下(图3).

(1) 应用NS方程将整个流场模拟为连续流体.

(2) 基于连续介质失效参数与热非平衡检测, 识别DSMC计算网格与NS计算网格的边界，划分出DSMC区域(包含DSMC计算网格、DSMC信息网格、NS信息网格)与NS区域(包含NS计算网格、NS信息网格、DSMC信息网格).

(3) 在DSMC信息网格施加Dirichlet型边界条件, 从当前NS模拟结果获取计算结果，将界面附近NS区网格的格心值根据网格大小作加权平均得到格点值, 再将网格格点值作算术平均, 得到DSMC的边界宏观物理量. 由密度生成模拟分子数，采用Chapman-Enskog分布得到分子运动速度，根据随机分布确定分子在耦合交界面的空间位置，传递的分子信息作为边界值输入DSMC模型进行计算.

(4) 使用IP-DMSC程序对DSMC域中的流场进行随机分子碰撞模拟和宏观统计采样，直至达到可接受的统计不确定度.

(5) 在NS信息网格上施加Dirichlet型边界条件, 从当前DSMC模拟获取计算结果，对每个DSMC网格内的分子信息进行统计平均，在耦合界面附近的网格格心处计算微观量的统计结果，通过界面插值算法，将得到的DSMC信息沿着动态界面传递到NS区, 与NS网格的格心值一起输入NS方程用于通量计算，完成DSMC区到NS区的界面信息传递.

(6) 使用NS方程, 在NS域中进行流动模拟, 得到收敛的稳态解.

(7) 更新整个计算域的解.

(8) 重复步骤(2)~(7), 直到超过最大耦合迭代次数或达到预设的收敛标准.

2.2.3　多物理场耦合求解算法

基于构建的NS-IP-DSMC流场混合模型，进一步耦合热传导方程和光传播方程，建立光栅狭缝内光-热-流多物理场耦合模型. 其中，温度场和流场间存在紧密耦合效应, 流场的密度和黏度影响热输运, 温度梯度分布反过来改变流场的热边界和对流过程. 热-流耦合场通过改变介质折射率，影响光传播过程和光干涉,

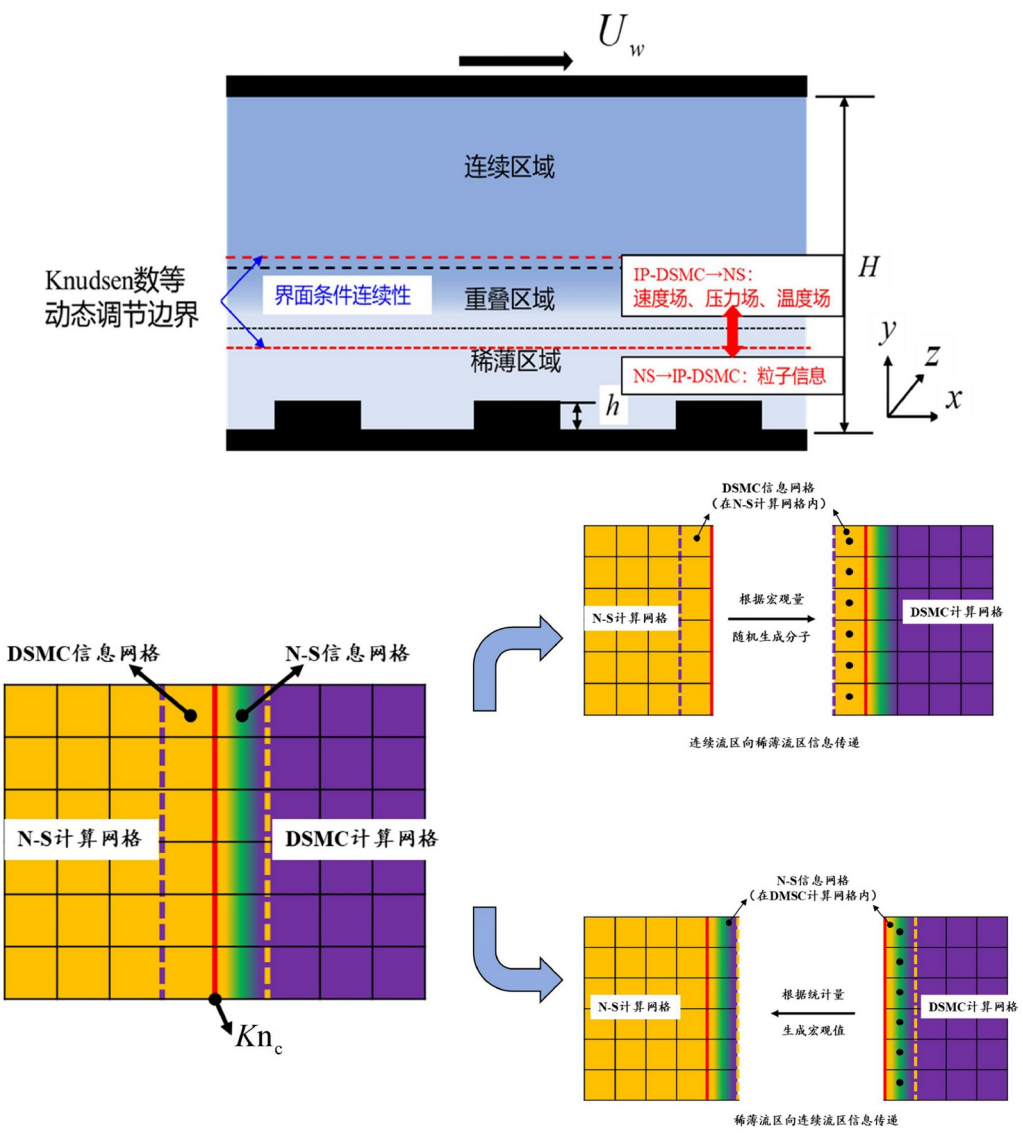


图 2 (网络版彩图) NS-IP-DSMC跨尺度混合模型

Figure 2 (Color online) Hybrid NS-IP-DSMC modeling for multi-scale flows.

光栅狭缝中光场对于温度场和流场的影响可以忽略.

根据多场耦合特点，西安交通大学光栅团队建立基于预估-校正方法的分区迭代多场耦合数值求解算法，如图4所示. 考虑到温度场和流场的双向紧密耦合效应，对热传导方程和NS-IP-DSMC混合方程采用弱耦合迭代求解方式，通过在每个物理时间步的内迭代中进行分区求解和物理量传递，实现热-流耦合模拟. 光场的光传播和光干涉过程与热-流耦合输运过程存在显著的时间偏差, 且为单向耦合过程. 因此，在光场时间推进求解时，采用和热-流耦合场不同的迭代时间步，减少不必要的计算量. 在热-流耦合求解完成的每个时间步, 将流场的温度、速度和密度传递到光场, 基于提出的动态折射率波动校正模型(图5)，实现Maxwell方程的边界条件和初始条件更新.

具体数值模拟求解步骤如下:

(1) 在每个时间步开始, 首先求解热传导方程, 用于模拟光栅狭缝内的热源传导过程;

(2) 采用径向基函数, 沿着热流耦合界面, 将温度

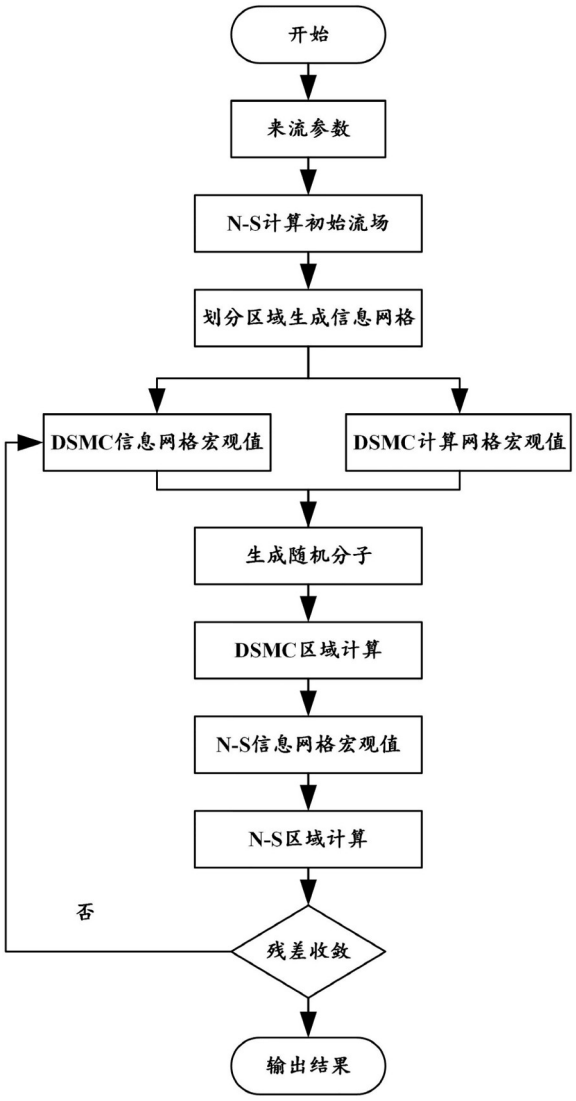


图 3　NS-IP-DSMC跨尺度混合模型求解流程
Figure 3　Solution procedure for the hybrid NS-IP-DSMC model.

分布信息传递到流场区域，实现热边界和热源信息更新;

(3) 根据气体状态方程更新流场密度和黏度, 求解NS-IP-DSMC混合方程, 获得流场特征分布;

(4) 采用径向基函数, 沿着热流耦合界面, 将速度值和压力值传递到温度场, 更新温度场边界条件;

(5) 对温度场和流场方程在内迭代中进行分区求解，直至求解残差收敛，完成n时间步到n+1时间步的温度场和流场更新;

(6) 在每个时间步, 采用径向基函数, 将流场网格点上的温度、速度、密度信息插值到光场网格上，通过介质折射率计算模型, 更新光场介质折射率分布;

(7) 基于更新后的介质折射率, 采用时域有限差分法(finite-difference time-domain, FDTD)求解近场光场, 采用耦合模理论求解远场光场，实现光栅干涉光场求解, 完成n时间步到n+1时间步光场更新;

(8) 反复执行步骤(1)~(7), 直至达到设定的求解迭代步数, 完成光栅狭缝光-热-流多物理场耦合求解.

3　超精密光栅狭缝扰动下精度保持技术

当前，国内外针对光栅光学干涉测量稳定技术的研究主要有三条技术路径: 一是光栅干涉光路优化设计，通过减少光束在流场中的传播路径或优化光干涉模式，降低多场耦合扰动的影响，但已有技术难以兼顾速度和动态精度，亟需发展新型光栅光干涉测量技术. 二是通过光学隔振、环境温控与气浴流场降低狭缝多场耦合扰动的影响，如光刻机通常采用超洁净空气或惰性气体填充来减少测量系统的折射率波动，但这些方法对多物理量扰动的同步控制效果不足，且难以应对动态环境中的实时变化. 三是对干涉信号进行误差补偿，利用相位恢复算法或干涉条纹处理方法进行误差修正，但由于气动光学扰动的随机性与复杂性，实时准确地获取扰动信息并建立有效的补偿算法仍存在困难，难以满足高精度测量对稳定性与实时性的严格要求.

针对光栅狭缝内多场耦合失稳扰动难题，综述当前气浴流场控制技术进展，西安交通大学光栅团队基于高保真数值模拟和实验测试研究，提出光栅狭缝局部微射流控制的多场耦合扰动抑制技术和浸没式原理的狭缝折射率均化技术，综述光栅多场扰动误差补偿技术研究现状，介绍光栅团队研发的误差补偿技术，形成多层级多场扰动抑制技术路径.

3.1　气浴流场控制与多场扰动抑制技术

3.1.1　气浴流场控制原理

针对光栅干涉测量服役环境中流场波动和温度梯度变化抑制，现有研究多聚焦在高端装备整体环境控制，如光刻机气浴温控技术、精密元件面形检测环境控制技术等[30]. 气浴流场控制的基本思想是在光路传播路径周围构建一个温度、压强和成分高度稳定的局

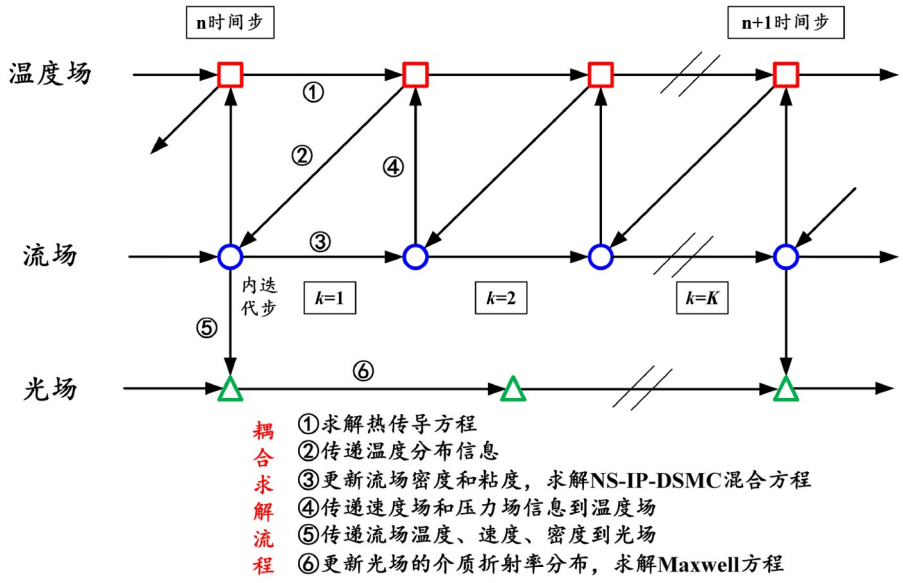


图 4 (网络版彩图)光-热-流多物理场耦合模型与耦合求解策略

Figure 4 (Color online) Optical-thermal-fluid multi-physics coupling model and solution strategy.

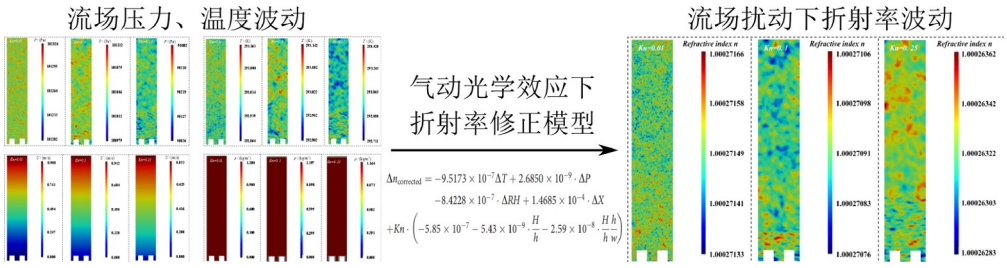


图 5 (网络版彩图)光-热-流多物理场耦合模型计算的流场扰动空间分布及气动光学效应下折射率修正模型

Figure 5 (Color online) Spatial distribution of flow field disturbance calculated by optical-thermal-fluid multi-physics coupling model and refractive index correction model under aero-optical effects.

部洁净环境, 通过超洁净空气或惰性气体填充, 并辅以高精度温控与流场整形, 使折射率波动被限制在可接受范围内. 光刻机等高端装备通常采用多级温控系统, 整机罩内采用±0.1 K级温控, 而关键光学路径与测量通道则通过局部气浴系统将温度波动进一步压缩至数十毫开尔文甚至更低.

典型的气浴系统包括恒温气源、稳压腔、导流通道与多层气帘等, 通过合理设计进出口位置和通道截面, 可以在光传播区域形成近似层流且温度均匀的环境, 同时避免外界扰动直接侵入干涉光路. ASML采用的环境温度控制系统的温度控制精度可达±20 mK, 相对湿度控制精度可达±1%. 国内上海微电子装备有限公司提出了区域空间气浴超精密温度控制系统, 可实现系统温度控制精度优于±50 mK, 且局部关键区域短期温度稳定性可达4 mK/5 min. 对于光栅狭缝而言, 传统整体气浴虽能降低大尺度温度和湿度波动, 但对亚毫秒级的局部热流扰动和微尺度涡结构的抑制能力有限, 因此需要发展更精细化、局部性的实时气浴控制策略.

3.1.2 微射流控制的多场耦合扰动抑制技术

在整体气浴温控已逐渐逼近工程极限的背景下, 针对局部区域热-流强耦合扰动的发展, 国内外逐渐形成了以微射流为代表的主动流场调控技术路线. 微射流通常指喷口尺度为亚毫米至数毫米、质量流率较小但具有较高喷射动量的小型射流装置, 其核心思想是

在近壁区定向注入高动量或温度可控的气体介质，通过重构边界层与剪切层结构，打散大尺度涡、削弱压力脉动，并在此过程中实现对温度场与折射率场的间接调控.

在航空航天领域，微射流最早被广泛用于机翼和高升力构型的边界层主动控制[31]. 通过在翼型前缘或襟翼附近布置阵列式微孔，将高动量气流沿切向或倾斜方向喷入边界层，可显著推迟流动分离，提高升阻比并扩展攻角包线[32]. 微射流冲击冷却和微射流热沉技术通过引入多孔或多层射流阵列强化对流换热，显著提高芯片和功率器件表面的局部换热系数，并改善温度场均匀性. 大量综述和实验研究指出，微射流热沉在高热流密度(>100 W/cm^2)工况下，可在有限流量和压降代价下实现数十kW m^{-2} K^{-1}的换热能力，并显著改善温度场均匀性，为高端电子装备的热-流协同管理提供了成熟的技术范式[33,34].

从机制上看, 无论是气动分离控制、噪声抑制, 还是强化换热, 微射流控制的共同物理本质在于, 通过高动量射流和主流的相互作用，在近壁区生成稳定或周期性的纵向涡结构，向低能量边界层持续输运动量和湍动能; 同时, 增强主流与近壁低速区之间的混合, 提高热量和质量传输效率，从而重构原有的速度梯度和温度梯度分布, 实现多场耦合扰动抑制[35,36].

针对光栅狭缝内的热-流耦合扰动, 近年来出现了以局部微射流控制为代表的主动抑制技术路径, 如图6所示. 通过在光栅尺盒或读数头周围布置微射流气孔, 采用闭环控制调节射流速度、方向和温度，可以在狭缝内形成可控的稳定流场，从而可有效削弱原有不规则涡结构和压力波动. 上海交通大学Huang等人[19]和Cao等人[20~22]近年针对光刻机工件台用光栅尺狭缝射流流动机理和控制开展了一系列研究，量化了流场扰动对光干涉测量的影响，结果表明微射流气屏可有效调控狭缝内流场特性.

针对超精密光栅狭缝中存在的强非定常压力波动和局部温度梯度问题，西安交通大学光栅团队在前期高保真NS-IP-DSMC-Maxwell多场耦合建模基础上, 提出了面向光栅狭缝微环境的局部微射流主动控制技术. 在光栅尺盒侧壁和读数头附近布置若干高动量微射流喷口，通过控制射流方向和强度使其沿狭缝长度方向或斜向注入，形成稳态射流和气流屏蔽，以削弱原有剪切层中的大尺度回流与涡团结构.

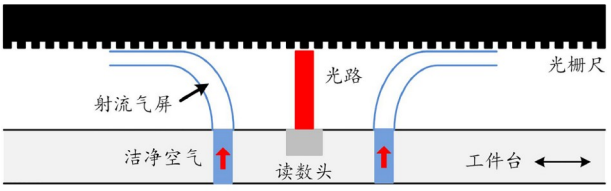


图 6　(网络版彩图)微射流控制的超精密光栅狭缝多物理场耦合扰动抑制技术

Figure 6　(Color online) Multi-physics coupling disturbance suppression technology in the confined space of ultra-precision grating using microjets.

数值模拟与实验结果表明，在典型读数速度1 m/s工况下, 施加优化布置的微射流后, 狭缝内压力波动范围可由原来的数百帕压缩至±10 Pa量级，读数头气动载荷波动降低约一个数量级，相应折射率波动与干涉相位噪声随之降低，位移测量不确定度有望进一步减小. 在此基础上，可进一步结合跨尺度流场模拟与机器学习优化方法，根据实际测量工况，系统优化射流喷口的数量、间距、倾角和质量流量，实现射流布局与参数的全局寻优. 面向更高的亚纳米级精度需求, 深度强化学习驱动的微射流闭环控制是实现狭缝扰动下实时稳定测量的可靠技术途径之一. 基于NS-IP-DSMC-Maxwell多场耦合模型和在线监测数据，以压力波动、温差和干涉相位噪声为反馈，利用强化学习算法训练射流控制策略，实现对射流质量流率和温度设定值的自适应调节，使局部压强扰动抑制至ΔP < 10 Pa、温差控制在ΔT < 5 mK的目标区间内，从源头上削弱光-热-流多场耦合噪声.

与传统整体气浴温控和被动隔振技术相比，微射流控制的超精密光栅狭缝多场耦合扰动抑制方案，具有局部化、可重构和可扩展的特点. 一是可在不显著改变整机结构的前提下外挂式集成于现有光栅测量系统, 实现对关键狭缝区域压力和温度的精细调控; 二是便于与折射率在线感知、干涉信号误差补偿等模块协同，实现流场整形、折射率均化和信号补偿的闭环扰动抑制; 三是为后续与涡旋光等新型抗扰光场模态协同集成提供了物理接口和控制模式，有望构建面向皮米级光栅测量的多层级抗扰体系.

3.2　浸没式光栅与折射率均化技术

3.2.1　浸没式光栅测量原理

浸没式光栅技术借鉴了浸没式光刻的基本思想,

在光干涉测量区域引入折射率高、热物性稳定的浸没介质, 如图7所示, 将原本在空气中传播的测量光路部分或全部浸没在液体介质中[37,38]. 浸没式光栅测量技术对测量稳定性的提升主要体现在以下方面.

(1) 在光学层面, 液体折射率通常在1.44~1.64量级, 远高于空气. 高折射率使系统可实现数值孔径NA > 1的光学设计, 提高横向分辨率与焦深, 但同时对浸没液折射率稳定性、色散特性和吸收损耗提出了更高要求.

(2) 热-流层面, 浸没液具有更大的热容量和导热能力, 在合理设计循环流道与换热结构的条件下, 可有效减小局部温度梯度, 并使折射率波动降低约一个数量级.

浸没式光栅测量原理在光学层面提升了测量灵敏度, 在热-流层面提供了折射率均化的物理基础, 为后续在微尺度狭缝区域进一步研究局部折射率均化技术奠定了理论和工程前提.

3.2.2 狭缝折射率均化技术

相较于整机级的浸没式测量结构, 将浸没思想局部应用于光栅读数狭缝, 形成一种更为精细化的狭缝折射率均化技术路径, 即在保持整体气浴系统不变的前提下, 仅对光束传播的关键微尺度区域进行折射率环境再设计, 使其在热学和流体特性上更接近准稳态、准均匀的理想介质.

从机理上看, 光栅狭缝折射率波动主要源于局部热流耦合与微尺度流动引起的温度、密度和压强梯度时空演化. 传统方法依靠整体气浴温控和腔体设计, 将环境温度波动控制在几十毫开尔文、压力波动控制在数百帕以内, 但在毫米级狭缝高度和高速读数工况下, 仍会产生10^{-7}量级的折射率波动, 对亚纳米级测量造成不可忽略的影响. 狭缝折射率均化技术的核心目标, 是在微尺度空间内通过材料、结构和介质的协同设计, 将折射率时空波动抑制到更低水平.

西安交通大学光栅团队结合光栅狭缝气动光学建模和实验测试, 提出了面向超精密光栅测量系统的浸没式原理狭缝折射率均化技术. 其主要特点包括下列内容.

(1) 局部封装式浸没腔体和光栅表面能设计. 在光栅读数狭缝附近设计微型封装腔体, 通过微通道引入少量折射率稳定、化学惰性的浸没液, 构成气浴、液膜和光栅组合结构, 使测量光路在通过狭缝时主要处于液体通道中, 而整体系统仍以气浴环境为主. 为确保液体在高速动态读数时的稳定性, 在光路侧将与液体接触表面改性为超亲水表面, 光栅尺表面改性为超疏水表面, 减小液体在光栅尺侧的黏滞(图7).

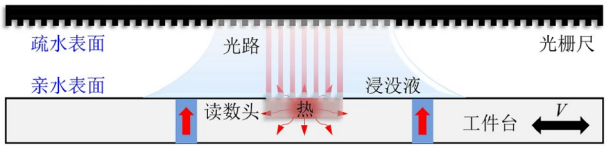


图 7 (网络版彩图)超精密光栅测量系统浸没式原理的狭缝折射率均化技术

Figure 7 (Color online) Refractive index homogenization technology based on immersion principle in the confined space of ultra-precision grating measurement systems.

(2) 多场耦合驱动的折射率均化参数设计. 利用NS-IP-DSMC-Maxwell多物理场耦合数值求解框架, 求解不同浸没液性质和流动方式下狭缝内温度、压力和折射率场的分布, 构建压力波动、温度变化与折射率之间的非线性映射模型, 为浸没液种类选择和结构参数优化提供依据. 图8展示了不同介质液膜厚度对光干涉成像距离调控的能力, 通过选择浸没液种类和调控液膜厚度, 可实现高动态读数下成像景深调节, 提升光栅的读数容差.

(3) 数据驱动的折射率模型修正与标定. 通过对不同工况下狭缝介质折射率进行直接测量, 结合卷积神经网络等数据驱动方法, 对理论折射率模型中的非线性项与待辨识参数进行修正, 实现物理模型结合数据驱动的混合折射率校正.

随着浸没式光刻和高端光栅测量需求的不断提升, 狭缝折射率均化技术将在介质设计、浸没液限域控制和多场耦合控制等方面持续演进, 并与新型干涉光场技术结合, 为皮米级位移测量提供更加稳定的环境基础.

3.3 光栅多场扰动误差补偿技术

气浴流场控制和浸没式折射率均化技术主要针对扰动源头和传播路径, 通过重构流场、温度场与折射率场来削弱多场耦合扰动. 然而, 在超精密光栅狭缝这种强非线性、强随机微环境中, 难以完全消除残余扰动, 不可避免地会传递到干涉信号的相位和幅值上. 因此, 需要在光电信号端构建高效的误差识别与补偿

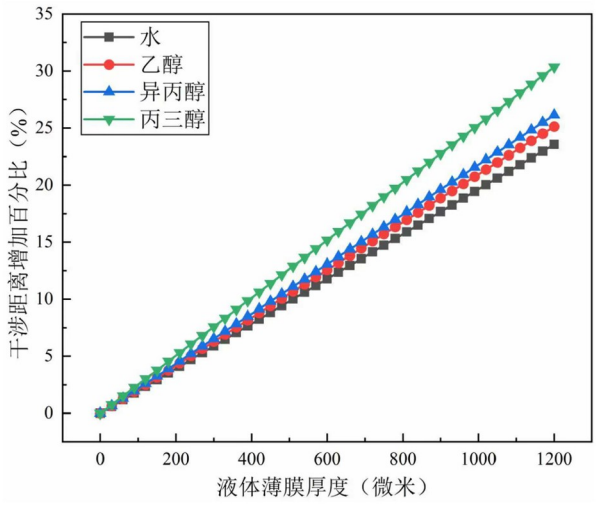


图 8　(网络版彩图)浸没式光栅中不同介质液膜厚度对光干涉成像距离的影响

Figure 8　(Color online) The influence of different medium liquid film thicknesses on optical interference distance in immersion gratings.

链路, 将多场耦合扰动映射为可观测的信号特征, 并通过数据-物理模型混合驱动的补偿模型对位移读数进行实时修正, 从而实现全链路的精度保持.

从技术演进上看, 光栅多场扰动误差补偿经历了三个阶段, 早期以静态标定表为基础的机理驱动补偿, 随后引入时频域分析、经验模态分解和神经网络的数据驱动补偿, 近年来则逐步发展为结合多物理场高保真仿真与数据驱动算法的数模混合驱动补偿框架[9]. 本节对光栅多场扰动的误差补偿技术演进路径进行综述, 并介绍西安交通大学光栅团队近年围绕光干涉信号特征识别和多场扰动补偿开展的研究工作.

3.3.1　光场干涉信号特征的误差识别

超精密光栅狭缝中光-热-流多场耦合扰动, 通过干涉光场的相位和强度波动体现, 因此基于干涉信号特征的误差识别, 是连接多场扰动、折射率波动、干涉光场畸变和测量误差的关键纽带. 已有研究表明, 微小机械振动、热应力、环境气压与温度变化以及激光源频率和功率漂移, 都会导致衍射效率下降、干涉条纹对比度降低、畸变和相位噪声增大, 从而引起位移读数的随机漂移和慢变漂移[39]. 如何从这些复杂、多尺度的信号特征中解析出扰动来源及其强度, 是当前误差识别技术的核心问题.

传统方法主要针对光栅位移信号的频谱和谐波进行分析, 将莫尔条纹光电信号视为含有直流偏置、幅值失衡和相位不正交的正弦信号, 通过傅里叶变换、谐波分解和基波/高次谐波分离, 识别出安装偏心、栅距误差和电子细分误差等系统性误差分量, 并建立误差补偿表. 相移干涉和结构光测量领域则发展了多种相位提取与条纹处理算法, 例如高阶相移、正交解调、空间载波法等, 在一定程度上抑制噪声和背景干扰, 为误差建模提供了较为稳定的相位场输入.

随着光栅位移测量精度的不断提升, 传统单一频域分析的局限逐渐显现. 近年来, 研究者引入时频域分析与模态分解方法, 如短时傅里叶、小波包、希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)、经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)等, 将干涉信号分解为若干具有不同频率带宽和局部特征的模态分量, 其中高频模态主要反映振动和电子噪声, 中低频模态对应热漂移, 通过对各模态能量、瞬时频率和相位的分析, 可以实现不同误差源的分离和定量评估[40,41]. 在光栅位移传感器领域, 已有工作利用EMD、奇异值分解等方法分离细分误差与环境噪声, 实现对细分周期性误差的精细识别.

另一个发展方向是将图像处理与模式识别引入光干涉条纹分析[42~45]. 针对二维条纹图像, 研究者通过条纹轮廓提取、局部对比度、纹理统计等方法构建特征向量, 用以表征折射率扰动、机械振动工况等状态差异, 再通过聚类或监督分类, 实现不同扰动类型的识别. 在此基础上, 深度学习进一步拓展了特征提取能力, 利用卷积神经网络、生成对抗网络等方法, 对干涉条纹进行去噪、归一化和相位反演, 能够在强噪声背景下自动学习复杂纹理特征. 物理约束深度网络则在损失函数中嵌入干涉方程、波动光学约束, 提高了网络对非理想条纹和相位跳变场景的泛化能力.

在多源信息融合方面, 近年来有学者提出基于环境监测与干涉信号联合建模的误差识别方案, 通过同时采集温度、压力、湿度、振动加速度等环境信号, 以及干涉条纹或莫尔信号的相位与幅值特征, 构建多维输入空间, 利用双混合神经网络、时序网络等模型实现环境扰动参数的动态估计与补偿系数预测[46,47]. 这类方法的优势在于能够在不显式求解多物理场方程的前提下, 从数据层面捕捉复杂扰动与测量误差之间的非线性关系, 为在线误差识别与预测提供可能[48].

3.3.2 数模驱动的多场扰动误差补偿技术

完成误差特征识别后，将误差特征信息转化为对位移读数的定量修正，是实现超精密光栅狭缝精度保持的核心. 近年来，误差补偿技术正从单一物理模型、经验查表，向高保真数值模型、数据驱动模型和硬件实时实现一体化的数模混合驱动方向发展.

传统的机理驱动补偿主要包括两类: 一是基于折射率模型的环境补偿，通过布置温度、压力、湿度传感器，利用Edlén，Ciddor或Gladstone-Dale等公式实时计算折射率变化，对测得光程差和相位信息进行修正; 二是基于标定表和谐波拟合的系统误差补偿，对光栅位移传感器一周期或一圈内的系统性误差进行离线测量和傅里叶拟合, 生成误差补偿表, 在在线测量中通过插值进行修正. 对于动态细分误差, 还可以采用自适应滤波或递推估计在线辨识幅值失衡和相位偏差，并进行实时校正. 此类方法结构清晰, 物理意义明确, 但对未建模扰动和强非线性场景的适应性有限.

为突破上述局限，数据驱动补偿方法在光栅与精密测量领域得到广泛应用. 径向基函数(radial basis function，RBF)因具有良好的非线性逼近能力和简单的结构，被大量用于光栅细分误差和系统误差的拟合[49]. 通过以位置或相位为输入、误差量为输出进行训练，得到驱动模型可在数字信号处理(digital signal processing, DSP)芯片或可编程门阵列(field-programmable gate array，FPGA)芯片上以较小资源开销实现高速补偿. 与此同时，反向传播(back propagation，BP)神经网络、支持向量回归、混合集成学习等模型也被用于补偿圆光栅编码器、直线光栅和机床位置检测系统中的非线性误差，提高了系统在复杂环境下的稳定性[50,51].

围绕干涉信号本身的误差补偿，经验模态分解及其改进方法提供了一种多尺度视角，将干涉或莫尔信号分解为若干本征模态函数，各模态分别对应高频振动噪声、中频结构振动与低频热漂移，再针对不同模态设计滤除、重构或建模策略，可在抑制噪声的同时保留有用位移信息. 部分工作还将EMD与小波、奇异值分解等手段联合，构建模态分解和模态重构的复合补偿框架, 在复杂噪声场景下取得了较好的效果.

近年来, 随着深度学习与物理约束建模的发展, 数模结合的补偿框架逐渐应用于误差补偿[52]. 利用多物理场仿真平台在不同扰动工况下批量生成输入扰动、干涉相位和位移误差的高维数据集，构建虚拟标定库. 将折射率模型、干涉方程以及流-热-光耦合关系以软约束的形式嵌入到神经网络或其他回归模型中，使模型在学习数据统计特性的同时遵循基本物理规律，从而提高模型在外推工况和长期运行条件下的可靠性和可解释性.

西安交通大学光栅团队围绕数模混合驱动的多场扰动误差补偿，提出面向超精密光栅狭缝的误差补偿技术路线，如图9所示. 首先，基于前述NS-IP-DSMC-

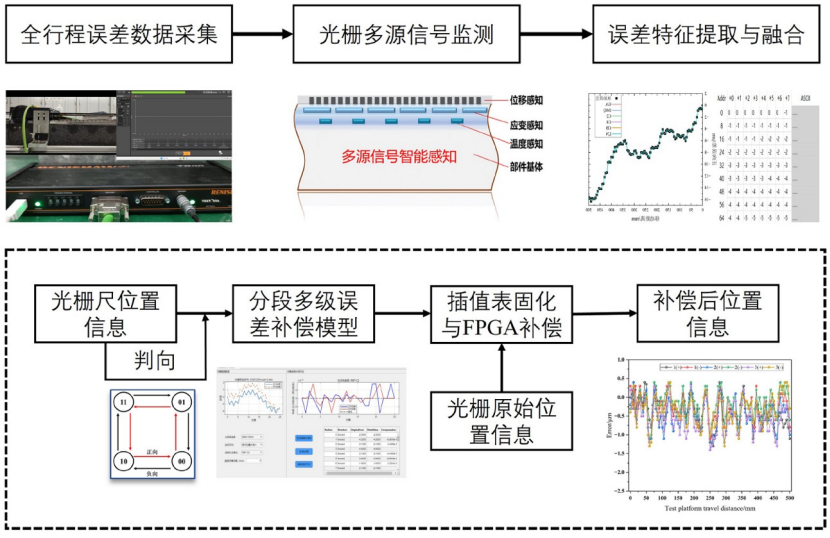


图 9 (网络版彩图)数模驱动的多场扰动误差补偿技术

Figure 9 (Color online) Multiphysics perturbation error compensation technology based on data-physics model-driven method.

Maxwell多场耦合求解框架, 构建狭缝内温度场、流场和折射率场到干涉相位误差的映射关系, 建立代理模型, 获得不同扰动模态下的标定误差库. 其次, 在实验系统中开展长时间、多工况运行试验, 采集干涉信号及环境多源数据, 利用经验模态分解、小波包分解等工具, 将测量误差分解为低频热漂移、中频结构松弛、高频振动与电子噪声等多尺度成分. 针对不同频段误差分别构建BP神经网络、RBF插值模型和自回归移动平均(auto regressive moving average, ARMA)等子模型, 再通过加权叠加实现误差的全频段拟合.

在误差补偿模型的硬件实现层面, 团队针对光栅读数系统采用FPGA作为在线补偿的核心载体. 通过对误差补偿网络进行结构裁剪和定点化处理, 将离线训练得到的网络权重和插值表固化到FPGA中, 对实时采集的干涉信号进行相位解调、误差估计和补偿输出, 补偿前后测量误差对比如图10所示, 所提数模驱动的多场扰动误差补偿技术可有效减小光栅测量误差, 提升重复定位精度. 同时, 引入在线更新机制, 通过周期性自校准或小批量增量学习, 在不影响实时性的前提下逐步修正模型参数, 跟踪光栅狭缝环境特性的长期变化. 这一数值仿真、数据驱动和硬件实现一体化方案, 在实验样机上开展验证, 为后续构建面向光刻机等高端装备的工程化超精密光栅测量系统提供了可行路径.

综上所述, 围绕超精密光栅狭缝内光-热-流多场耦合扰动对干涉测量精度的影响, 本文从源头抑制-路径调控-结果补偿三个层面构建了精度保持技术体系, 对比如表2所示. 整体气浴与局部微射流控制侧重于在

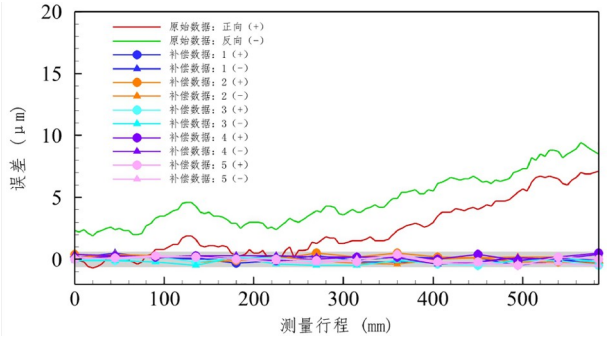


图 10　(网络版彩图)多场扰动测量误差补偿前后对比

Figure 10　(Color online) Comparison of multi-physics disturbance measurement error before and after compensation.

扰动产生端主动重构局部流场与温度边界条件, 能够以较直接的方式降低扰动幅值, 但对气路、传感与闭环控制提出更高工程要求; 浸没式光栅与狭缝折射率均化技术侧重于在传播路径上均化介质、弱化梯度和降低误差传递, 在提高环境稳定性方面具有优势, 但对封装密封、材料兼容性与长期维护可靠性更为敏感; 基于干涉信号特征与多源信息融合的数模驱动误差补偿侧重于对残余误差的识别与在线修正, 具有较强的软件可集成性与可扩展性, 但其补偿效果依赖于可观测信息的完备性、模型泛化能力以及标定与更新机制. 总体而言, 这三条路径在抑制对象、能力边界与工程实现代价方面呈现互补关系, 前端主动抑制提升系统整体稳定性, 中端均化削弱误差传递链路, 末端补偿增强在复杂工况下的可靠性. 因此, 面向高端装备纳米级定位与长期稳定运行需求, 更可行的工程策略是采用前端抑制和末端补偿的协同控制策略, 并根据

表 2　超精密光栅狭缝扰动下精度保持技术三条路径对比

Table 2　Comparison of three paths for precision preservation technology under perturbation in the confined space of ultra-precision grating

技术路径	扰动抑制对象	抑制能力和作用效果	工程实现代价	可集成性
整体气浴与局部微射流控制的多场扰动抑制技术	源头抑制: 在扰动产生端主动重构流场/温度场, 降低压力/温差等原始扰动幅值	微射流抑制压力波动小于±10 Pa, 温度波动小于5 mK, 折射率波动及干涉相位噪声显著减小	喷口、气路和稳压稳流组件及测量传感器与闭环控制	可外挂式集成于现有光栅测量系统, 不显著改变整机结构, 便于与折射率在线感知、信号补偿等协同形成闭环抑制
浸没式光栅与狭缝折射率均化技术	路径调控: 在光束传播路径上重构介质与热-流边界条件, 降低折射率场空间梯度与时空波动的传递与放大	浸没介质提供更稳定介质环境和均化温度梯度, 在气浴流场基础上进一步压低折射率波动	局部封装浸没腔体及微通道供液、材料表面能改性、浸没液管理	可作局部光路应用以保持整体气浴系统不变, 但对密封、材料兼容性、液体稳定性与长期维护提出要求
基于干涉信号特征和多源信息融合的数模驱动误差补偿技术	结果补偿: 在信号/读数端对残余扰动造成的相位/幅值误差进行识别、建模与在线修正	有效减小测量误差并提升重复定位精度	多源信息传感器布置、数据标定及训练、FPGA代码开发	在现有系统信号处理端直接集成, 改动小, 可与气浴及浸没式技术形成互补闭环

系统空间、维护条件与精度指标对路径调控方案进行模块化集成与优化.

4 总结与展望

超精密光栅狭缝多场耦合扰动模态识别与精度保持, 已经从早期的整体环境温控和经验补偿阶段, 逐步演化为集多场耦合建模、跨尺度扰动模态识别、局部气浴与浸没控制以及高频动态误差补偿于一体的综合技术路径. 本文从光栅狭缝多场耦合扰动形成机制出发, 综述了气动光学与热-流耦合理论、跨尺度流动模型以及流-固-光多场耦合求解方法的研究进展, 系统梳理了气浴流场控制、浸没式光栅与折射率均化以及干涉信号误差补偿等精度保持技术路线. 下一步研究仍面临以下关键挑战.

(1) 多场耦合机理的精细建模与实验标定. 需要进一步发展面向微尺度、非平衡、强梯度场景的光-热-流多物理场统一模型, 并结合高时空分辨率的折射率与流场测量技术, 实现模型参数的精确标定与动态校准.

(2) 数字孪生驱动的在线扰动识别与预测. 将NS-IP-DSMC-Maxwell多场耦合模型嵌入数字孪生平台, 构建仿真、测量和控制的闭环技术路径, 使系统能够在运行过程中持续学习光栅狭缝内扰动模式, 实现对未来扰动的主动预测与自适应调控.

(3) 多技术协同的综合精度保持方案. 单一技术路线(如纯气浴温控或纯浸没结构)在成本、复杂度和可扩展性方面都存在局限, 未来更有前景的方向是将局部气浴流场控制、折射率均化和高频误差补偿有机融合, 形成源头抑制、路径调控和结果补偿的多层级抗扰体系.

(4) 新型干涉光场与测量模式探索. 涡旋光、量子光源、多波长与多模态复用等新型光场为提高测量系统的抗扰性提供了新的物理理论基础. 在保持系统工程可实现性的前提下, 探索将这些前沿光学技术与现有光栅测量系统深度融合.

随着光刻机等高端装备对测量精度和长期稳定性的要求持续提高, 超精密光栅狭缝多场耦合扰动识别与精度保持技术将在未来一段时期内持续成为交叉学科研究的热点. 通过多学科理论的深度融合与工程技术的协同创新, 在系统级热-流-光协同抑制与在线补偿能力进一步完善的条件下, 有望推动测量能力由纳米级向皮米级方向提升, 为我国在先进制造与半导体核心装备领域的自主可控提供坚实的测量基础.

致谢 感谢西安交通大学魏荣、彭匿明、房毅、董增鹏等博士生对本工作的帮助.

参考文献

1 Schmidt R H M. Ultra-precision engineering in lithographic exposure equipment for the semiconductor industry. Philos T R Soc A, 2012, 370: 3950–3972

2 Liu Y, Li L, Chen S W, et al. Ultra-precision motion stage control technology for IC lithography (in Chinese). Laser Optoelectron Prog, 2022, 59: 0922013 [刘杨, 李理, 陈思文, 等. 面向IC光刻的超精密运动台控制技术. 激光与光电学进展, 2022, 59: 0922013]

3 Wang L J, Zhang M, Zhu Y, et al. Review of ultra-precision optical interferential grating encoder displacement measurement technology for immersion lithography scanner (in Chinese). Opt Precision Eng, 2019, 27: 1909–1918 [王磊杰, 张鸣, 朱煜, 等. 面向浸没式光刻机的超精密光学干涉式光栅编码器位移测量技术综述. 光学精密工程, 2019, 27: 1909–1918]

4 Zhu J H, Wang S T, Li X H. Ultraprecision grating positioning technology for wafer stage of lithography machine (in Chinese). Laser Optoelectron Prog, 2022, 59: 0922019 [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. 激光与光电学进展, 2022, 59: 0922019]

5 Yin Y F, Liu Z W, Yu H Z, et al. Overview of 2D grating displacement measurement technology (in Chinese). Chin Opt, 2020, 13: 1224–1238 [尹云飞, 刘兆武, 于宏柱, 等. 二维光栅位移测量技术综述. 中国光学, 2020, 13: 1224–1238]

6 Yin Y, Liu Z, Jiang S, et al. High-precision 2D grating displacement measurement system based on double-spatial heterodyne optical path interleaving. Optics Lasers Eng, 2022, 158: 107167

7 Luo L, Zhao M, Li X. A review: Grating encoder technologies for multi-degree-of-freedom spatial measurement. Sensors, 2025, 25: 6071

8 Huang G, Cui C, Lei X, et al. A review of optical interferometry for high-precision length measurement. Micromachines, 2024, 16: 6

9 Gao Q Y, Shi Y S, Zhang S, et al. Traceable-grating-based high precision displacement measurement system and its uncertainty analysis (in Chinese). Acta Metrologica Sinica, 2025, 46: 151–159 [高启元, 施玉书, 张树, 等. 基于可溯源光栅的高精度位移测量系统研究及不确定度分析. 计量学报, 2025, 46: 151–159]

10 Li X H, Cui C. Grating interferometric precision nanometric measurement technology (in Chinese). Optics Precision Eng, 2024, 32: 2591–2611 [李星辉, 崔璨. 光栅干涉精密纳米测量技术. 光学精密工程, 2024, 32: 2591–2611]

11 Wang M, Mani A, Gordeyev S. Physics and computation of aero-optics. Annu Rev Fluid Mech, 2012, 44: 299–321

12 Ding H, Xia Z, Yi S, et al. Research progress in aero-optical effects of supersonic turbulent shear layers. Prog Aerospace Sci, 2024, 146: 101006

13 Yi S, Ding H, Luo S, et al. Research progress on aero-optical effects of hypersonic optical window with film cooling. Light Sci Appl, 2024, 13: 310

14 Jia P, Chen J, Tian D P. Overview of computational studies of aerodynamic optical transmission effects in aerial optical imaging (in Chinese). Infrared Laser Eng, 2022, 51: 20220713 [贾平, 陈健, 田大鹏. 航空光学成像气动光学传输效应计算研究综述. 红外与激光技术, 2022, 51: 20220713]

15 Sun X W, Liu W. Research progress of aero-optical effect (in Chinese). Adv Mech, 2020, 50: 202008 [孙喜万, 刘伟. 气动光学效应研究进展. 力学进展, 2020, 50: 202008]

16 Liu H, Lu B, Jiang Z. Grating interference ultra-precision measurement technology applied to high-end equipment. Engineering, 2025, doi: 10.1016/j.eng.2025.08.044

17 Wei R, Li G, Peng N, et al. Characterization of rarefied gas flows within narrow-confined spaces in grating interferometers. Phys Fluids, 2025, 37: 082068

18 Qi L, Zhao C L, Yuan J, et al. Highly reflective long period fiber grating sensor and its application in refractive index sensing. Sens Actuat B-Chem, 2014, 193: 185–189

19 Huang Z, Qu H, Zeng X, et al. On three-dimensional behaviours of a short plane purging jet impinging on wafer stage of lithography machine: Time-resolved tomographic particle image velocimetry measurement. Int J Heat Mass Transfer, 2026, 256: 128121

20 Cao J, Li S, He C, et al. Turbulent scalar transport in annular purging jet issuing from moving wafer stage of lithography machine. Int J Heat and Fluid Fl, 2025, 117: 110098

21 Cao J, Li S, Wen X, et al. On simplified scenario of annular purging jet issuing from moving wafer stage in lithography machine. Sci China-Phys Mech Astron, 2025, 68: 294704

22 Cao J, Wang P, Liu Y. Influence of dual purging jets on interferometric measurement of optical path difference. Phys Fluids, 2024, 36: 015108

23 Zhang Z, Lei B, Zhao G, et al. Distance and depth modulation of Talbot imaging via specified design of the grating structure. Opt Express, 2022, 30: 10239–10250

24 Zhao J, Ou W, Cai N, et al. Measurement error analysis and compensation for optical encoders: A review. IEEE Trans Instrum Meas, 2024, 73: 1–30

25 Wang L J, Zhang M, Zhu Y, et al. A displacement measurement system for ultra-precision heterodyne Littrow grating interferometer (in Chinese). Opt Precision Eng, 2017, 25: 2975–2985 [王磊杰, 张鸣, 朱煜, 等. 超精密外差利特罗式光栅干涉仪位移测量系统. 光学精密工程, 2017, 25: 2975–2985]

26 Fan J. Rarefied gas dynamics: Advances and applications (in Chinese). Adv Mech, 2013, 43: 185–201 [樊菁. 稀薄气体动力学: 进展与应用. 力学进展, 2013, 43: 185–201]

27 Mcnenly M J, Gallis M A, Boyd I D. Slip model performance for micro-scale gas flows. In: Proceedings of the 36th AIAA Thermophysics Conference. 2003. 1

28 Abbate G, Thijsse B J, Kleijn C R. Hybrid Navier-Stokes/DSMC simulations of gas flows with rarefied-continuum transitions. In: Proceedings of the Advanced Computational Methods in Science and Engineering. 2009. 403–435

29 Vasileiadis N, White C. hybridDCFoam: A coupled DSMC/Navier-Stokes-Fourier solver for steady-state multiscale rarefied gas flows. Adv Eng Software, 2024, 193: 103669

30 Xu S Y, Zhang X S, Fan K, et al. Suppression of airflow turbulence in wavefront measurement for large-aperture optical systems (in Chinese). Opt Precision Eng, 2020, 28: 80–89 [徐抒岩, 张旭升, 范阔, 等. 大型光学系统波前检测中气流扰动的抑制. 光学精密工程, 2020, 28: 80–89]

31 Choi J J, Annaswamy A M, Lou H, et al. Active control of supersonic impingement tones using steady and pulsed microjets. Exp Fluids, 2006, 41: 841–855

32 Sun Q, Bahri F, Jabbal M, et al. Suppression of flow separation of a high-lift wing with active flow control. Aerospace Sci Tech, 2025, 159: 110017

33 Zigunov F, Sellappan P, Alvi F. Beyond actuator line arrays in active flow control studies: Lessons from a genetic algorithm approach. Phys Rev Fluids, 2021, 6: 083903

34 Walsh S M. Microjet impingement cooling of high power-density electronics. Dissertation for Master's Degree. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology. 2018

35 Ebadian M A, Lin C X. A review of high-heat-flux heat removal technologies. J Heat Transfer, 2011, 133: 110801

36 Xue Z, Yan Y, Shen K, et al. Thermal performance enhancement of a micro-jet heat sink via parametric investigated micro pin fin arrays. Int J Therm Sci, 2024, 196: 108717

37 Owa S, Nagasaka H. Immersion lithography: Its potential performance and issues. Proc SPIE Opt Microlithography XVI, 2003, 5040: 724–733

38 Wei Y, Brainard R L. Advanced Processes for 193-nm Immersion Lithography. San Francisco: SPIE Press, 2009

39 Wang L J, Zhang M, Zhu Y, et al. Ultra-precision phase-shifting locking system of scanning beam interference lithography tool (in Chinese). Opt Precision Eng, 2019, 27: 1765–1773 [王磊杰, 张鸣, 朱煜, 等. 扫描干涉光刻机的超精密移相锁定系统. 光学精密工程, 2019, 27: 1765–1773]

40 Gao X, Wan Q H, Li J H, et al. Photoelectric shaft encoder error of moire fringe signal compensation (in Chinese). Infrared Laser Eng, 2015, 35: 0205003 [高旭, 万秋华, 李金环, 等. 光电轴角编码器莫尔条纹误差信号补偿. 红外与激光工程, 2015, 35: 0205003]

41 Du H, Gu X, Zhang W, et al. Error compensation of a heterodyne grating interferometer based on redundancy characteristics. Opt Eng, 2025, 64: 044103

42 Chen Y, Cheng W. Moiré fringe analysis across diverse carrier frequencies by deep learning. Optics Laser Tech, 2024, 179: 111384

43 Villa J, Moreno G, González E, et al. Fringe pattern denoising with a deep neural network. Optics Lasers Eng, 2025, 194: 109134

44 Chang L, Lu Q, Guo Y, et al. Error correction algorithm for grating Moiré fringes based on QM-ANN. Measurement, 2024, 226: 114155

45 Wang N, Jiang W, Zhang Y. Deep learning-based moiré-fringe alignment with circular gratings for lithography. Opt Lett, 2021, 46: 1113–1116

46 Wang Y, Li J, Feng Q, et al. Dynamic filling and prediction of environmental compensation parameters for positioning error interferometry of CNC machine tools based on a dual hybrid neural network. Opt Express, 2025, 33: 41087–41102

47 Yang Z, Liu B, Zhang Y, et al. Intelligent sensing of thermal error of CNC machine tool spindle based on multi-source information fusion. Sensors, 2024, 24: 3614

48 Iñigo B, Colinas-Armijo N, López de Lacalle L N, et al. Digital twin for volumetric thermal error compensation of large machine tools. Sensors, 2024, 24: 6196

49 Hong X, Xu Z J, Yang N. Error compensation method for photoelectric encoder based on radial basis function network (in Chinese). Opt Precision Eng, 2008, 16: 598–604 [洪喜, 续志军, 杨宁. 基于径向基函数网络的光电编码器误差补偿法. 光学精密工程, 2008, 16: 598–604]

50 Zhou X, Bai W, He J, et al. An enhanced positional error compensation method for rock drilling robots based on LightGBM and RBFN. Front Neurorobot, 2022, 16: 883816

51 Jia H K, Yu L D, Jiang Y Z, et al. Compensation of rotary encoders using Fourier expansion-back propagation neural network optimized by genetic algorithm. Sensors, 2020, 20: 2603

52 Ma C, Mu R, Li M, et al. A multi-scale spatial–temporal interaction fusion network for digital twin-based thermal error compensation in precision machine tools. Expert Syst Appl, 2025, 286: 127812

Multi-physics coupled perturbation mode recognition and accuracy preservation technology in the confined space of ultra-precision grating

LI GuoJun[1,2,3], WANG LanLan[1,2,4], LEI Biao[1,2,3], NIU Dong[1,2,3], LI Tian[1,2,4], JIANG Wei[1,2,4], SHI YongSheng[1,2,3], CHEN BangDao[1,2,3], YIN Lei[1,2,3], JIANG WeiTao[1,2,4] & LIU HongZhong[1,2,3]

[1] *State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*
[2] *School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*
[3] *Inner Mongolia Institute of Intelligent Manufacturing, Hohhot 011500, China*
[4] *Shaanxi Provincial Graphene Joint Laboratory, Xi'an 710049, China*

To satisfy nanometer-level positioning demands in high-end equipment such as advanced lithography machines and ultra-precision machine tools, coupled optical-thermal-fluid disturbances in the interferometric gap of ultra-precision grating displacement sensors have become a key barrier to further reducing measurement uncertainty. In the narrow gap between the grating readhead and the scale, local heat sources, high-speed motion, and the air-bath flow act simultaneously. They induce strong fluctuations in temperature, pressure, and density. As a result, the gas refractive-index field varies in space and time, and the interference fringes are distorted, which ultimately degrades nanometer-level measurement performance. This paper clarifies the formation mechanisms of these multiphysics disturbances and their error-transmission pathways. We review aero-optical effects, multiscale flow models, and coupled optical-thermal-fluid theories and numerical solution methods. We also summarize recent progress in identifying cross-scale disturbance modes. For accuracy preservation, we compare three representative routes. The first is disturbance suppression via global air-bath conditioning and local micro-jet control. The second is immersion-type gratings and refractive-index homogenization within the gap. The third is digital-physical, model-and-data-driven error compensation based on interferometric signal features and multisource information fusion. Based on recent studies from the Xi'an Jiaotong University grating group, we further propose an integrated framework for gap disturbances, namely source suppression-path regulation-output compensation. Finally, we discuss future directions, including high-fidelity multiphysics modeling, digital-twin-enabled online disturbance prediction, multi-technique synergy, and new optical-field modes. These insights provide references for developing engineering-grade ultra-precision grating metrology systems for high-end equipment.

ultra-precision grating, multi-physics coupling, aero-optics, flow-field control, error compensation

doi: 10.1360/SST-2025-0442