

基于深径比约束的多特征融合光学测量方法*

康绍林¹⁾ 仲齐²⁾ 吴健¹⁾ 陆翔¹⁾³⁾ 潘智毅^{1†)}

1) (广西大学, 物理科学与工程技术学院, 广西南宁 530004)

2) (广西大学, 资源环境与材料学院, 广西南宁 530004)

3) (广西大学, 国有资产与实验室管理处, 广西南宁 530004)

摘要

传统大深径比微孔非接触光学测量易受孔底弱信号、孔内杂散反射及伪焦点干扰影响, 导致深度判定不稳、深径比误差累积, 难以满足复杂微结构高精度测量需求. 针对上述问题, 提出一种基于深径比约束的多特征融合光学测量方法. 该方法通过轴向精密扫描获取不同离焦位置下的显微图像序列, 在感兴趣区域内提取清晰度、灰度均值和对比度等特征, 建立图像特征与轴向位移的响应关系, 并基于归一化响应离散度进行自适应加权融合, 生成深度候选参数集; 进一步结合孔口直径测量结果及合理深径比区间对候选结果进行约束筛选, 实现微孔深度及深径比的稳定测量. 对 20 组不同深径比的微孔样品的实验结果表明, 测量深径比与标准值具有良好线性一致性, 平均绝对误差为 0.0195, 均方根误差为 0.0235, 最大绝对误差为 0.06. 该方法不依赖复杂干涉光路, 能够有效抑制弱光、低对比度及复杂反射条件下伪焦点对测量结果的影响, 为大深径比微孔几何参数的非接触测量提供了一种准确、稳定且可行的方法.

关键词: 微孔; 光学测量; 深径比约束; 多特征融合

PACS: 06.30.Bp, 07.05.Pj

基金: 2025 年度广西高等教育本科教学改革工程项目 (批准号: 2025JGB100)、2024 年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目 (批准号: 2024KY0014) 和 2025 年度广西大学实验教学改革项目 (批准号: syjg2025024) 资助的课题.

† 通信作者.E-mail: panzhiyi@gxu.edu.cn

第一作者.E-mail: shaolinkang@yeah.net

1 引言

随着航空航天、电子封装、生物医疗及精密制造等领域的快速发展,大深径比微孔结构被广泛应用于冷却结构、微通道和功能集成单元中^[1].微孔的直径、深度及深径比是表征其加工质量与服役性能的重要几何参数,其中深径比不仅反映微孔的几何形貌特征,而且直接影响流动传输、结构强度及器件功能可靠性.因此,实现大深径比微孔几何参数的高精度测量,对微结构制造质量评价和工艺优化具有重要意义^[2].

目前,微孔测量方法主要包括接触式测量与非接触式光学测量两大类.接触式测量方法虽然在宏观结构检测中具有一定精度优势,但在微孔或内腔测量中容易对孔壁及孔底造成损伤,且难以适用于孔径小、深径比较大的结构^[3].相比之下,非接触式光学测量方法因具有无损、高分辨率和自动化潜力等优点,受到越来越多关注.当前研究主要集中于白光干涉^[4]、共焦显微^[5,6]、反射光谱^[7]等技术路线,并在微结构形貌获取方面取得了较多进展.在微小物体三维形貌测量方面,数字全息、干涉测量和光学相干层析等非接触光学方法能够利用相位或相干信息实现表面轮廓的定量重建.王毅等提出了一种基于谱域相位分辨光学相干层析的纳米级表面形貌成像方法,通过计算样品相邻位置的相位差获得表面相位差分图,并经积分重建样品表面形貌;该方法在共光路结构下减小了环境扰动和系统振动影响,实现了优于 1nm 的轴向分辨率,为微小物体三维表面形貌的高精度非接触测量提供了重要参考^[8].此外,Fu 等利用非接触式激光扫描方法实现了圆柱壳体热态尺寸测量^[9],表明光学非接触测量在复杂结构尺寸检测中具有较强的应用前景.然而,相较于外径等二维尺寸参数,微孔深径比的提取因涉及孔径与深度的多维耦合变量,在极端深径比条件下的测量难度呈指数级增加.

对于大深径比微孔,非接触光学测量在实际应用中仍面临若干关键问题.其一,微孔孔径小、孔深大,高深径比结构中入射光到达孔底时易发生明显光强损失,导致孔底反射信号较弱、成像信噪比较低^[10].同时,由于微孔尺寸小、深径比较大且内表面形貌复杂,孔底及内壁特征的清晰获取与三维重建仍然较为困难^[11].其次,孔内反射、散射及局部遮挡等因素会引起伪焦点现象,使焦面判定结果易受噪声干扰.再次,现有多数方法往往依赖单一图像特征或单一极值判据来确定孔底位置,其测量结果对成像条件和系统扰动较为敏感,测量稳定性和重复性不理想.最后,深度测量误差与直径测量误差在深径比计算过程中会发生耦合,从而放大最终测量结果的不确定性.

针对上述问题,近年来已有研究尝试通过改进成像方式或引入多特征评价策略来提高微孔深度测量的可靠性.例如,Xu等提出基于机器学习的多特征融合成像方法^[12],以提高复杂检测场景下的信噪比和识别能力.这类方法在多源信息融合方面具有一定优势,但通常较依赖训练样本与数据库构建,且在参数测量任务中,对测量结果稳定性和重复性的提升仍然有限.Ren等提出一种基于多特征融合与卷积神经网络的图像分类方法,其有效性建立在特定数据集的评估基础之上^[13].总体来看,现有研究多侧重于改善图像质量或增强特征响应,而对深度参数本身缺乏与微孔几何属性相结合的约束机制,因此难以从根本上抑制孔底判定中的不确定性.

鉴于此,本文提出一种基于深径比约束的多特征融合光学测量方法.与传统单一清晰度评价或单一极值判定方法相比,本文方法的主要特点体现在将清晰度、灰度均值和对比度等多种图像特征统一到轴向响应分析框架中,通过响应离散度自适应确定特征权重,降低单一特征对光照波动、局部噪声和孔内杂散反射的敏感性;将由孔口直径、设计深度及加工公差确定的深径比先验区间引入孔底候选焦面筛选过程,使图像特征判据与微孔几何约束相结合,从而抑制伪焦点导致的

深度误判；建立孔深、孔径与深径比之间的不确定度传播关系，并通过 20 组不同深径比样品验证该方法的线性一致性和测量稳定性.本文方法不依赖复杂干涉系统，可在普通显微成像和轴向扫描平台上实现大深径比微孔几何参数的稳定测量.

2 理论方法

2.1 测量原理与系统

该光学测量方法基于显微光学成像与轴向扫描原理^[14,15].如图 1 所示，通过控制光学成像系统沿微孔轴线方向作精密位移，在不同轴向位置采集微孔图像序列；随后在有效测量区域内提取灰度、清晰度和对比度等多种图像特征，以表征微孔在离焦过程中的成像变化规律.

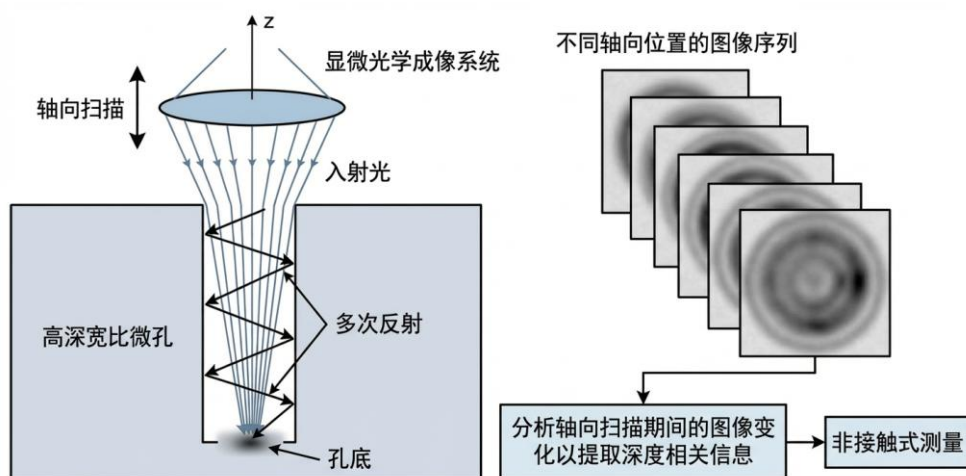


图 1 通过轴向扫描获取不同焦平面图像并构建深度候选参数集

Fig. 1. Image acquisition at different focal planes through axial scanning and construction of a depth candidate parameter set

灰度化^[16]、清晰化^[17]与对比度增强^[18]是显微图像预处理中提升成像质量和提取焦面特征的关键步骤.灰度化用于突出亮度信息，清晰化用于增强边缘细节，对比度增强用于提高目标区域与背景之间的区分度.图 2 展示了上述预处理过程及

其结果，最终获得用于焦面判定的特征信息.

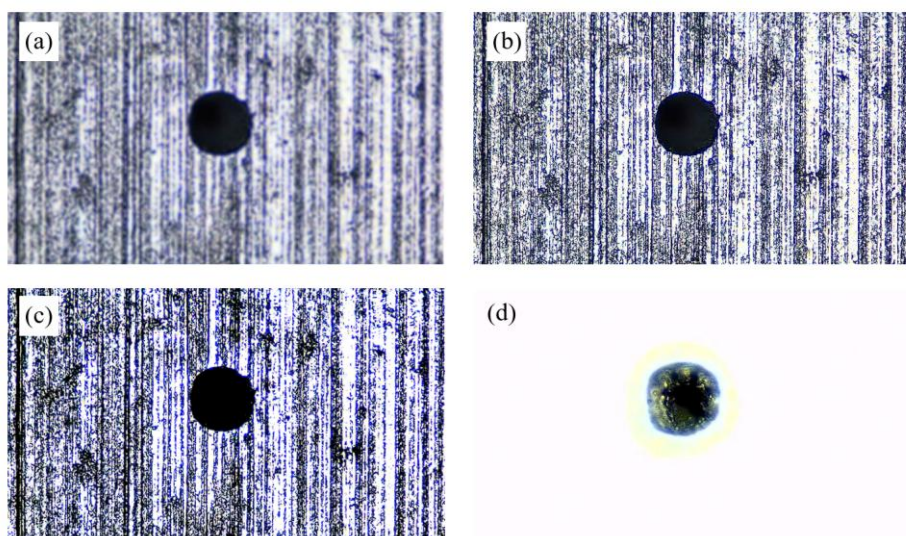


图 2 图像预处理结果: (a)灰度化; (b)清晰化; (c)对比度增强; (d)焦面提取

Fig. 2. Image preprocessing results: (a) grayscale conversion; (b) sharpening; (c) contrast enhancement; (d) focal plane extraction

实验系统结构如图 3 所示.整个测量系统由稳定工作台、精密轴向位移机构、载物台、工业电子显微镜、光学照明单元、CMOS 图像传感器以及上位机处理模块组成，用于实现微孔轴向多位置成像与图像特征分析.结合装置结构与测量流程，系统能够同步获取位移信息与图像信息，为后续深度候选参数生成与深径比约束筛选提供基础数据.

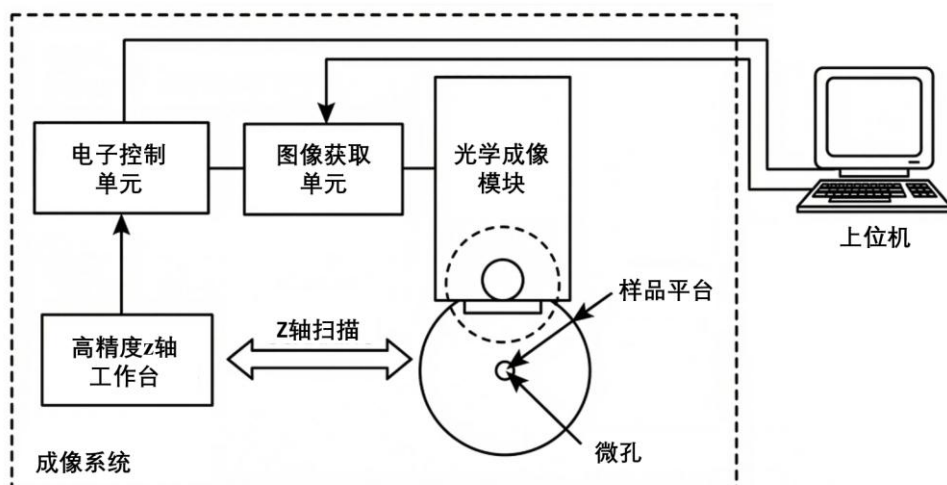


图 3 测量系统结构示意图

Fig. 3. Schematic diagram of the measurement system

需要指出的是, 本文方法依赖于微孔孔口、孔壁及孔底区域在轴向扫描过程中形成可分辨的灰度、边缘或对比度响应, 因此对样品表面的光学反射条件具有一定要求. 对于具有漫反射或弱镜面反射特性的微孔表面, 孔口边缘和孔底区域能够形成较稳定的图像特征响应, 本文方法适用性较好; 对于强镜面反射表面, 若局部反射导致图像饱和或产生强烈高光, 则可能引入额外伪峰, 需要通过降低曝光、调节环形照明角度、加入偏振抑制或扩散照明等方式改善成像条件. 对于反射信号过弱、孔底不可见或孔内严重遮挡的样品, 本文方法的孔底定位精度会受到限制. 因此, 本文方法更适用于在显微成像系统中能够获得孔口和孔底有效图像响应的金属、陶瓷、聚合物及经适当照明调节后的微结构表面.

2.2 微孔光学成像模型

在显微光学系统中, 显微图像可视为样品空间分布与成像系统点扩散函数 (point spread function, PSF) 的卷积结果^[19]. 设微孔结构的真实强度分布为 $O(x, y, z)$, 显微系统的点扩散函数为 $PSF(x, y, z)$, 则图像传感器接收到的强度分布可表示为:

$$I(x, y, z) = O(x, y, z) \otimes PSF(x, y, z) + n(x, y, z) \quad (1)$$

式中, $\otimes$ 表示二维卷积运算, $n(x, y, z)$ 为成像噪声项. 式(1)表明, 当显微系统沿光轴方向扫描时, 离焦量 z 的变化将引起 PSF 形态变化, 从而导致图像边缘锐度、平均亮度及局部对比度等特征参数发生响应变化.

在显微成像系统中, 其轴向分辨率可由光学衍射理论估算为:

$$\delta_z \approx \frac{2n_0\lambda}{NA^2} \quad (2)$$

式中 δ_z 为系统轴向分辨率, n_0 为成像介质折射率, λ 为照明波长, NA 为物

镜数值孔径.当成像介质为空气时,可取 $n_0 \approx 1$.轴向分辨率决定了系统能够区分的最小轴向位移,也是后续微孔深度测量精度的重要物理基础.

对大深径比微孔而言,由于孔内遮挡、弱光照及多次反射等因素的存在,孔底区域的图像特征往往不再表现为单一尖锐极值,而更可能呈现局部峰值、平台或梯度突变等复杂响应形式.因此,仅依赖单一图像评价函数容易引起孔底误判.基于此,本文进一步引入多特征响应融合与几何约束联合判定策略.

2.3 ROI 选取

在轴向扫描过程中,原始显微图像除微孔主体外,还包含大面积背景、照明不均匀区域以及随机噪声.若直接对整幅图像进行全局特征统计,大量与测量目标无关的信息会削弱微孔局部成像变化的响应强度,降低孔底识别的稳定性与准确性.为此,本文在每帧图像中选取包含微孔主体结构的感兴趣区域 (region of interest, ROI) 作为特征提取对象^[20].

设第 k 帧图像为 $I(x, y, z_k)$, 其中 $k=1, 2, \dots, N$, N 为扫描图像总帧数.选取孔口附近成像较清晰的一帧图像作为定位参考图像,对其进行灰度化、滤波和阈值分割处理;随后提取孔口边缘点集 $\{(x_p, y_p)\}_{p=1}^P$.其中, p 为孔口边缘点序号, P 为提取到的边缘点总数, (x_p, y_p) 表示第 p 个孔口边缘点在图像平面内的像素坐标.利用这些边缘点进行最小二乘圆拟合,可确定微孔中心坐标和孔口半径.圆拟合模型可表示为:

$$(x_p - x_c)^2 + (y_p - y_c)^2 = r^2, \quad p = 1, 2, \dots, P \quad (3)$$

式中, (x_c, y_c) 为拟合得到的孔口圆心坐标, r 为拟合得到的孔口半径.由于实际图像中的孔口边缘点会受到噪声、光照不均和边缘提取误差的影响,各边缘点不一定严格位于同一理想圆上,因此本文采用最小二乘方法求取使边缘点到拟合圆偏差最小的圆心和半径.当孔口边缘受局部噪声影响导致拟合不稳定时,可采用

分割区域质心作为初始中心，再结合圆拟合结果进行修正。

随后以 (x_c, y_c) 为 ROI 中心，截取固定大小的二维区域 Ω 作为感兴趣区域，使其覆盖孔口边缘、孔内主要成像区域及孔底响应区域。设 ROI 内像素总数为 M ，则后续清晰度、灰度均值和对比度等特征均在同一区域 Ω 内随轴向位置逐帧计算。

ROI 本身是图像平面内的二维区域，不随空间坐标 z 展开；而不同轴向位置下的成像变化通过 $I(x, y, z_k)$ 和相应特征函数体现。为保证不同轴向位置下特征响应的可比性，整个扫描序列中 ROI 的位置和尺寸保持一致。若轴向扫描过程中存在轻微横向漂移，则通过中心坐标修正或图像配准保证 ROI 始终覆盖微孔主体区域。该处理能够有效抑制背景区域对统计特征的干扰，并增强特征参数对孔口及孔底局部成像变化的敏感性。

ROI 的引入具有两方面作用：其一，可抑制背景区域对清晰度、灰度均值和对比度等统计量的干扰；其二，可增强特征参数对孔口及孔底局部成像变化的敏感性，从而提高后续响应曲线构建与候选深度提取的可靠性。

2.4 多特征响应模型

为便于描述，设轴向扫描过程中共采集 N 帧显微图像，第 k 帧图像对应的轴向位置为 z_k ，其中 $k=1, 2, \dots, N$ 。

为降低背景区域对特征提取的干扰，在每帧图像中选取包含微孔结构的 ROI，其像素总数为 M 。针对大深径比微孔成像中焦面信息弱、亮度衰减明显及局部反射复杂等特点，本文选取清晰度、灰度均值和对比度三个特征构建轴向响应模型。

图像清晰度反映图像边缘信息的强度，可采用 Laplacian 算子构建清晰度评价函数^[21]：

$$S(z_k) = \frac{1}{M} \sum_{(x,y) \in \Omega} [\nabla^2 I(x, y; z_k)]^2 \quad (4)$$

式中， $S(z_k)$ 为轴向位置 z_k 处的清晰度响应， ∇^2 为 Laplacian 算子。当图像处

于离焦状态时，边缘扩散、细节模糊，清晰度响应较低；当焦平面接近孔口边缘或孔底区域时，图像边缘锐度增强，清晰度响应升高。在成像系统焦点附近，图像边缘信息最为明显，因此清晰度函数通常在焦平面附近达到最大值。

ROI 区域包含 M 个像素点，则平均灰度值可表示为：

$$G(z_k) = \frac{1}{M} \sum_{(x,y) \in \Omega} I(x,y;z_k) \quad (5)$$

对于大深径比微孔，孔内照明会随深度增加而衰减，孔底区域的平均亮度还会受到遮挡效应和内壁反射影响，因此灰度均值特征可在一定程度上反映孔内能量分布的轴向变化。

对比度用于衡量 ROI 内灰度分布的离散程度，本文采用标准差形式表示：

$$C(z_k) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{(x,y) \in \Omega} [I(x,y;z_k) - G(z_k)]^2} \quad (6)$$

该特征能够表征孔口边缘、孔壁及孔底区域之间的灰度差异，当局部结构响应增强时，对比度通常会出现明显变化。

在轴向扫描过程中，采集不同轴向位移位置的微孔图像，并从每一帧图像中提取清晰度、灰度和对比度等特征参数。为消除不同特征之间的量纲差异，对各特征进行最小-最大归一化处理。

设 m 表示图像特征类型， $m=1,2,3$ 分别对应清晰度、灰度均值和对比度特征。第 m 类特征在轴向位置 z_k 处的原始响应记为 $F_m(z_k)$ ，归一化后的响应记为

$\tilde{F}_m(z_k)$ ：

$$\tilde{F}_m(z_k) = \frac{F_m(z_k) - \min_{1 \leq k \leq N} F_m(z_k)}{\max_{1 \leq k \leq N} F_m(z_k) - \min_{1 \leq k \leq N} F_m(z_k) + \varepsilon} \quad (7)$$

式中， ε 为防止分母为零的极小正数。归一化后，三类特征被映射到统一数值范围内，便于后续加权融合。

在此基础上，通过加权融合构建综合特征响应函数^[22]：

$$Q(z_k) = \sum_{m=1}^3 w_m \tilde{F}_m(z_k), \quad \sum_{m=1}^3 w_m = 1, \quad w_m \geq 0. \quad (8)$$

式中, $Q(z_k)$ 为综合特征响应值, w_m 为第 m 类特征的权重. 权重大小反映不同特征在当前轴向扫描序列中对离焦变化的响应强弱.

为避免采用固定经验权重带来的主观性, 本文依据各归一化特征在扫描过程中的响应离散度自适应确定权重. 第 m 类特征的响应均值为:

$$\bar{F}_m = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \tilde{F}_m(z_k) \quad (9)$$

其响应离散度定义为:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N [\tilde{F}_m(z_k) - \bar{F}_m]^2} \quad (10)$$

其中, σ_m 表示第 m 类特征在整个轴向扫描过程中的响应离散程度.

权重定义为:

$$w_m = \frac{\sigma_m}{\sum_{m=1}^3 \sigma_m} \quad (11)$$

由上述响应离散度和权重定义可知, 当某一特征在轴向扫描过程中变化更明显时, 其响应离散度较大, 在综合响应函数中获得更高权重. 该策略能够增强对孔底焦面变化敏感的特征贡献, 同时削弱响应不明显或受噪声主导的特征影响.

2.5 候选深度提取与深径比约束

综合响应函数 $Q(z_k)$ 随轴向位置变化形成特征响应曲线. 对于理想平面样品, 响应曲线通常在真实焦面附近表现为单一峰值; 但对于大深径比微孔, 由于孔口边缘、孔壁杂散反射、孔底弱反射及局部噪声等因素共同作用, 响应曲线可能出现多个局部极大值. 这些局部极大值中既可能包含真实孔底位置, 也可能包含由孔内反射或伪焦点引起的干扰峰. 因此, 本文不直接将全局最大值作为孔底位置, 而是首先提取综合响应曲线中的局部极大值点, 构建候选孔底位置集合.

定义局部极大值点集合为：

$$K = \{k | Q(z_k) \geq Q(z_{k-1}), Q(z_k) \geq Q(z_{k+1})\} \quad (12)$$

其中， K 为综合响应曲线中的局部极大值点集合， k 为轴向扫描位置序号.对于集合 K 中的第 j 个候选位置，其对应轴向位置记为 z_j ，候选孔深为：

$$H_j = |z_j - z_0|, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (13)$$

式中， z_0 为孔口焦面位置， J 为候选孔底位置数量.本文方法允许响应曲线中存在多个候选峰值，并通过后续几何约束进一步筛选.

孔口直径由孔口边缘点的圆拟合结果确定.设图像标定系数为 α ，单位为实际长度/像素，孔口直径可表示为：

$$D = 2\alpha r \quad (14)$$

式中， r 为像素单位下的孔口半径.得到候选孔深 H_j 和孔口直径 D 后，可计算第 j 个候选深径比：

$$A_j = \frac{H_j}{D} \quad (15)$$

设微孔设计标称深度和孔径分别为 H_0 和 D_0 ，其允许偏差分别为 ΔH 和 ΔD ，则由设计尺寸和加工公差确定的深径比先验约束区间下限为：

$$A_{\min} = \frac{H_0 - \Delta H}{D_0 + \Delta D} \quad (16)$$

上限为：

$$A_{\max} = \frac{H_0 + \Delta H}{D_0 - \Delta D} \quad (17)$$

其中需满足 $D_0 > \Delta D$.由此得到候选深径比的约束条件：

$$A_{\min} \leq A_j \leq A_{\max} \quad (18)$$

满足上述条件的候选值被保留，不满足者予以剔除.设满足深径比约束的候选集合为 V ，则最终孔底位置由下式确定：

$$j^* = \arg \max_{j \in V} Q(z_j) \quad (19)$$

式中, j^* 为最终选定的候选孔底位置序号. 若多个候选位置同时满足深径比约束, 则优先选取综合响应值 $Q(z_j)$ 最大的候选位置; 若多个候选位置的综合响应值相同, 则选取其深径比最接近先验区间中心值的候选位置. 先验区间中心值可表示为:

$$A_c = \frac{A_{\min} + A_{\max}}{2} \quad (20)$$

此时最终候选位置可进一步表示为:

$$j^* = \arg \min_{j \in V} |A_j - A_c| \quad (21)$$

上述过程表明, 本文方法并不假定综合响应曲线只存在一个最大值, 而是允许多个局部极大值同时存在. 多特征融合用于生成候选孔底位置, 深径比约束用于剔除不符合微孔几何结构的伪焦点候选点, 从而提高孔底定位的稳定性和物理合理性.

2.6 不确定度传播分析

由于深径比 A 由深度 H 与孔径 D 共同决定, 因此二者的测量误差会共同影响最终结果. 由误差传播定律可得, 深径比不确定度满足:

$$u^2(AR) = \left(\frac{\partial AR}{\partial H} \right)^2 u^2(H) + \left(\frac{\partial AR}{\partial D} \right)^2 u^2(D) + 2 \frac{\partial AR}{\partial H} \frac{\partial AR}{\partial D} \text{cov}(H, D) \quad (22)$$

式中, $u(H)$, $u(D)$ 分别为孔深与孔径的标准不确定度, $\text{cov}(H, D)$ 为二者的协方差. 由 $A = H/D$ 可得:

$$u^2(AR) = \frac{u^2(H)}{D^2} + \frac{H^2}{D^4} u^2(D) - \frac{2H}{D^3} \text{cov}(H, D) \quad (23)$$

当孔深与孔径的测量误差近似独立时, 可忽略协方差项, 上式可简化为

$$u(AR) \approx \sqrt{\frac{u^2(H)}{D^2} + \frac{H^2}{D^4} u^2(D)} \quad (24)$$

上式表明,当孔径较小而孔深较大时,孔深测量误差与孔径测量误差会共同放大深径比的不确定度.因此,在大深径比微孔测量中,提高孔底定位精度和孔口边界拟合精度对于降低最终测量误差都具有重要意义.

3 结果与讨论

3.1 多特征响应曲线分析

在轴向扫描过程中,不同图像特征对离焦变化表现出不同的响应规律.实验结果表明,清晰度特征在孔口和孔底邻域通常出现较明显的波动,其极值位置对成像状态较为敏感,但在孔底弱光照及杂散反射存在时易产生局部伪峰;灰度均值特征能够反映孔内照明衰减及孔底亮度变化,对整体能量分布较为敏感,但单独作为判据时易受光照波动影响;对比度特征在孔口边缘及孔内结构变化区域具有较好的响应一致性,但对局部噪声仍存在一定敏感性.由此可见,单一特征虽然能够在一定程度上表征微孔成像状态的变化,但在复杂成像条件下均存在不同程度的局限性.以某一典型微孔样品为例,不同图像特征及其综合响应曲线如图 4 所示,将清晰度、灰度均值和对比度等特征进行归一化处理并加权融合后,综合特征响应曲线相较于单一特征曲线表现出更平滑、更稳定的变化趋势,其峰值区间与微孔结构实际位置之间具有更好的对应关系.与仅依赖唯一极值点判定孔底位置的方法不同,综合响应曲线能够在扫描范围内生成多个物理上较为合理的深度候选参数,从而为后续引入深径比几何约束提供更可靠的候选集合.上述结果表明,多特征融合能够在候选深度生成阶段提高孔底判定的鲁棒性,并为复杂成像条件下的稳定测量奠定基础.

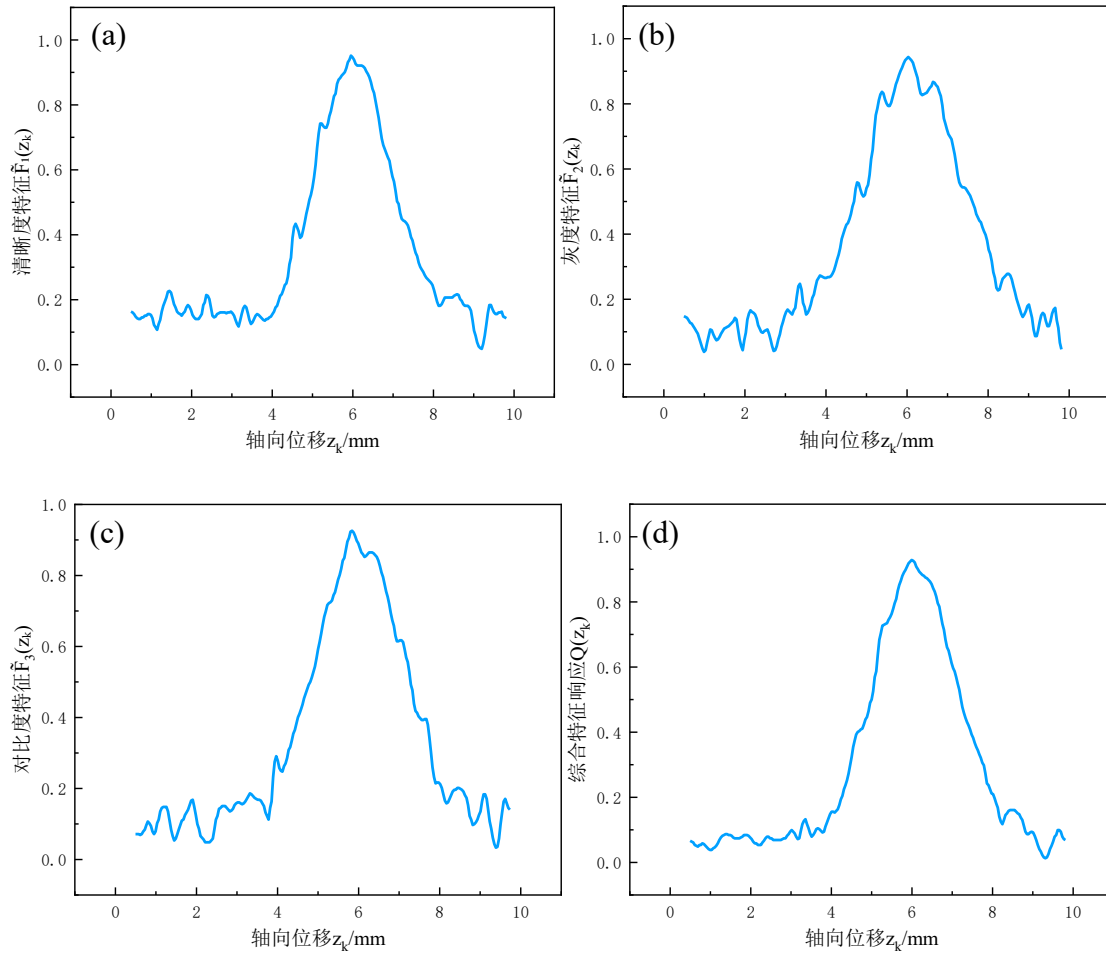


图4 多特征响应曲线：(a)清晰度特征；(b)灰度特征；(c)对比度特征；(d) 综合特征响应

Fig. 4. Multi-feature response curves: (a) sharpness feature; (b) grayscale feature; (c) contrast feature; (d) fused feature response

图 4 给出了同一轴向扫描过程中三类单一图像特征及综合特征响应曲线.图 4(a)—(c)分别为清晰度、灰度均值和对比度的单一特征响应，图 4(d)为三类特征归一化并自适应加权后的综合响应.由图 4(a)可见，清晰度响应对图像边缘和细节变化较为敏感，在孔口边缘、孔壁局部反射区域及孔底附近均可能出现局部峰值.因此，若仅以清晰度曲线的单一极值作为孔底判据，容易受到伪焦点干扰.图 4(b)中灰度均值响应主要反映 ROI 区域整体光强变化，其曲线变化相对平缓，能够表征孔内光强衰减和孔底反射变化，但该特征单独使用时容易受到照明波动和曝光条件影响.图 4(c)中对比度响应反映 ROI 内灰度分布差异，当焦平面接近孔口边缘或孔底结构时，局部亮暗差异增强，对比度响应随之升高，但局部高光和随机噪声也可能引起对比度波动.

与上述单一特征响应相比,图 4(d)中的综合特征响应曲线能够同时利用清晰度、灰度均值和对比度三类信息.当某一轴向位置同时引起多种图像特征变化时,该位置在综合响应曲线中表现得更加突出;而由局部噪声、偶然高光或单一反射引起的异常峰值,在多特征融合过程中会被削弱.因此,图 4 并非重复展示单一特征,而是用于说明单一特征判据在复杂成像条件下存在局限性,并进一步证明采用多特征融合构建候选孔底位置的必要性.

后续单一特征判据的定量测量结果进一步表明,清晰度、灰度均值和对比度单独作为孔底判据时均存在不同程度误差,而多特征融合结合深径比约束能够获得更低的平均绝对误差和均方根误差.

3.2 深径比测量结果与误差分析

为验证所提方法在不同深径比区间内的适用性,选取 20 组具有不同孔径和孔深组合的微孔样品进行实验测量,并将所得深径比结果与标准值进行对比分析.实验样品的标准深径比范围为 4.62—6.44.以标准深径比为自变量、测量深径比为因变量进行线性拟合,结果表明两者之间具有良好的线性关系为:

$$AR_m=0.997AR_s+0.00912 \quad (25)$$

其中 AR_s 为标准深径比, AR_m 为测量深径比.

拟合结果显示,斜率为 0.997,截距为 0.00912,大多数数据点分布在拟合直线附近,说明在所考察的深径比范围内,本文方法能够较准确地反映样品真实几何参数的变化规律,测量结果与标准值之间具有较高一致性.尽管拟合直线仍存在小幅偏差,但由于引入了深径比先验约束,异常的候选深度值在筛选阶段已被有效抑制,从而保证了最终测量结果的高准确性与稳定性.

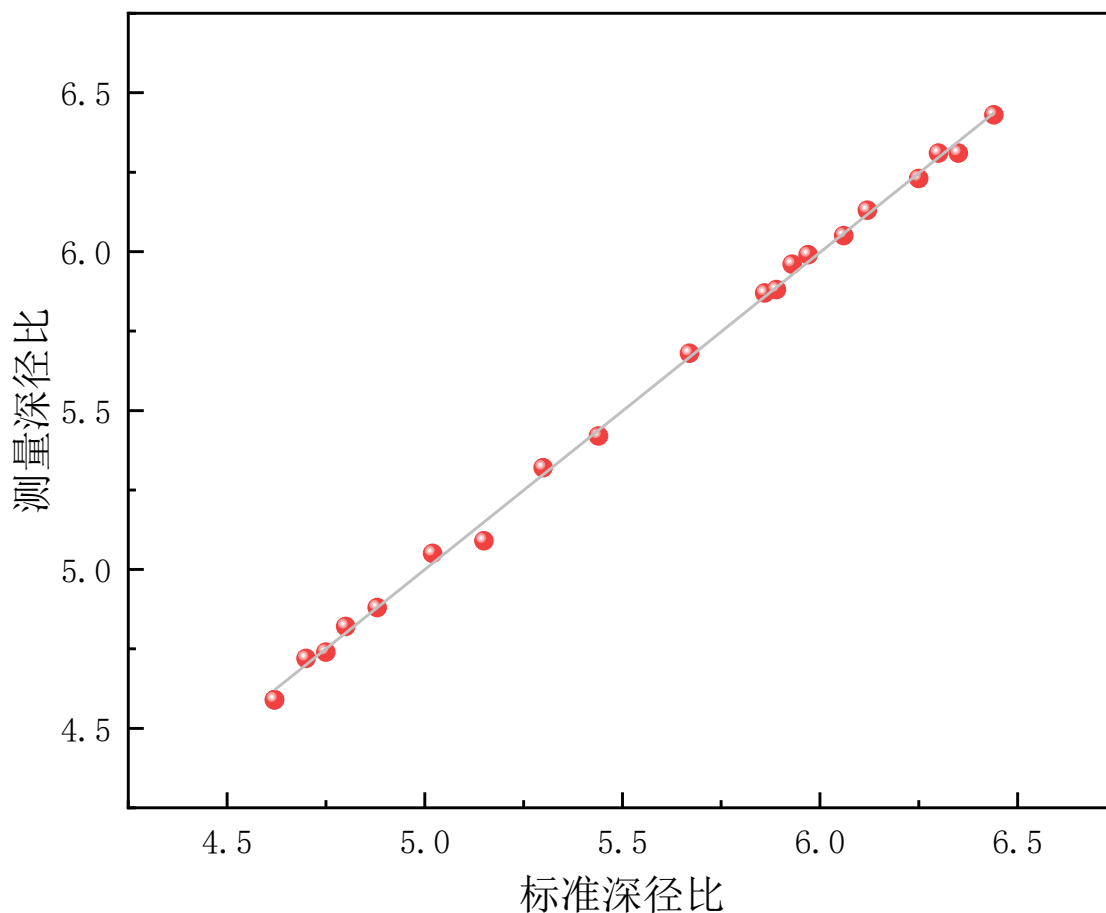


图 5 标准深径比与测量深径比之间的线性拟合结果

Fig. 5. Linear fitting results between the standard aspect ratio and the measured aspect ratio

为进一步评价测量误差特性,对测量值与标准值之间的误差进行了统计分析. 设误差为 $e_i = AR_{mi} - AR_{si}$,则 20 组样品的平均绝对误差为 0.0195,均方根误差为 0.0235,最大绝对误差为 0.06.如图 6 所示,误差总体围绕零值附近分布,未表现出明显的单调变化趋势;误差频数主要集中在零值附近,整体呈近似对称的分布特征;误差与拟合值之间未观察到明显的结构性趋势.综合来看,在当前样本范围内,所提方法的测量误差主要表现为随机误差,未显示出明显的系统性偏差,说明所建立的线性关系能够较好描述测量深径比与标准深径比之间的对应关系.

如图 6(a)所示,残差总体围绕零值附近随机分布,未随标准深径比增加而表现出明显的单调放大趋势,也未出现显著的扇形扩散现象,说明误差方差总体较为稳定.图 6(b)所示残差直方图整体呈近似对称的单峰分布,表明测量误差主要集

中在零值附近.图 6(c)给出的残差与拟合值关系图中, 各点在零线两侧离散分布, 未观察到明显的系统性变化趋势, 说明当前模型不存在显著的结构性偏差.图 6(d)的正态概率分析结果表明, 大部分样本点分布在参考直线附近, 仅在分布尾部存在轻微偏离, 说明残差总体满足近似正态分布特征.

综合图 6 的分析结果可以认为, 本文方法的误差主要以随机误差为主, 其来源主要包括成像噪声、局部亮度波动以及特征提取过程中的微小扰动, 而未表现出明显的系统性偏差.上述结果表明, 在当前样本范围和实验条件下, 所建立的一阶线性模型能够较好描述测量深径比与标准深径比之间的关系, 所提方法具有较好的线性可描述性和测量一致性.

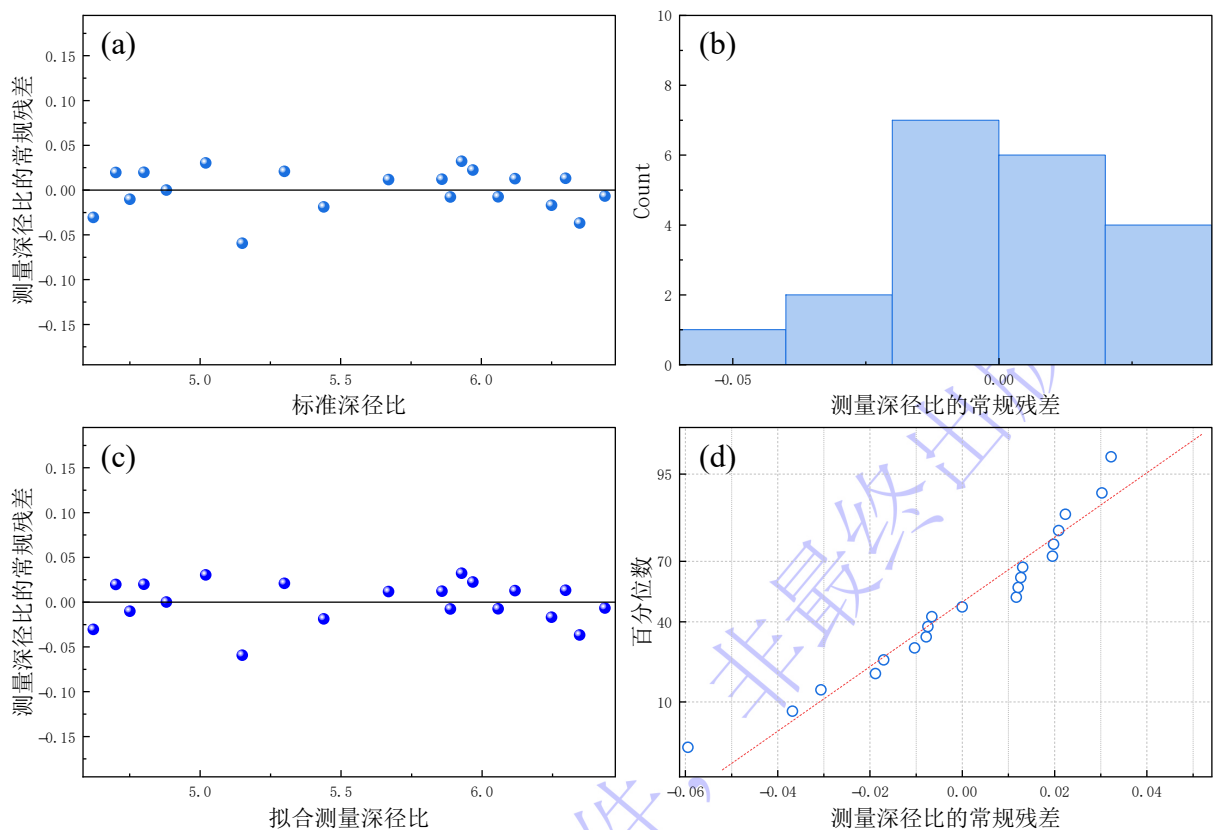


图 6 残差统计结果: (a)残差随标准深径比变化; (b)残差直方图; (c)残差与拟合值关系; (d) 正态概率图

Fig. 6. Residual analysis results: (a) residuals versus standard aspect ratio; (b) histogram of residuals; (c) residuals versus fitted values; (d) normal probability plot

3.3 单一特征判据与多特征融合方法的对比分析

为进一步验证多特征融合与深径比约束对孔底判定稳定性的改善作用,本文基于同一组轴向扫描图像序列,分别采用单一清晰度、单一灰度均值和单一对比度判据进行孔底位置提取,并与本文方法进行对比.各方法均采用相同的图像采集序列、相同 ROI 和相同孔口直径测量结果,差异仅在于孔底候选位置的判定依据不同.其中,单一清晰度判据以清晰度响应曲线的局部极值作为候选孔底位置,单一灰度均值判据以灰度均值响应变化作为候选依据,单一对比度判据以对比度响应极值作为候选依据;本文方法则在三类特征归一化和自适应加权融合的基础上,进一步结合深径比先验约束筛选最终孔底位置.

不同判据下的误差统计结果如表 1 所示.单一清晰度、单一灰度均值和单一对比度判据的平均绝对误差分别为 0.0945、0.0565 和 0.0415,均方根误差分别为 0.0967、0.0576 和 0.0425;本文方法的平均绝对误差和均方根误差分别为 0.0195 和 0.0235.以平均绝对误差降低率衡量测量精度提升程度,本文方法相较于单一清晰度、单一灰度均值和单一对比度判据,测量精度分别提升了 79.37%、65.49% 和 53.01%;以均方根误差降低率衡量整体稳定性提升程度,本文方法分别提升了 75.70%、59.20%和 44.71%.

上述结果表明,单一清晰度特征对图像边缘和局部细节变化较为敏感,在孔口边缘、孔壁反射和孔底区域均可能出现局部峰值,容易受到伪焦点干扰;灰度均值特征主要反映 ROI 内整体光强变化,易受照明波动和孔底弱反射影响;对比度特征虽然在三种单一特征中表现相对较好,但仍可能受到局部高光、噪声和孔内杂散反射影响.相比之下,本文方法通过多特征融合削弱单一特征异常波动的影响,并利用深径比约束剔除不符合微孔几何结构的伪焦点候选位置,因此能够获得更低的平均误差和更好的整体测量稳定性.

表 1 不同特征判据下深径比测量误差统计结果

Table 1. Error statistics of aspect-ratio measurement under different feature criteria

判据方法	孔底判定依据	平均绝对误差	均方根误差	最大绝对误差
单一清晰度判据	清晰度响应极值	0.0945	0.0967	0.13
单一灰度均值判据	灰度均值响应变化	0.0565	0.0576	0.08
单一对比度判据	对比度响应极值	0.0415	0.0425	0.06
本文方法	多特征融合 + 深径比约束	0.0195	0.0235	0.06

注：各判据均基于同一组轴向扫描图像序列、相同 ROI 和相同孔口直径结果进行计算，差异仅在于孔底候选位置的判定依据不同。

4 结论

本文提出了一种基于深径比约束的多特征融合光学测量方法，用于大深径比微孔深度及深径比的稳定测量.该方法通过轴向扫描获取不同离焦位置下的显微图像序列，在 ROI 区域内提取清晰度、灰度均值和对比度等图像特征，并利用归一化和响应离散度自适应赋权构建综合特征响应函数.在此基础上，结合孔口直径测量结果和由设计尺寸及加工公差确定的深径比先验区间，对候选孔底位置进行约束筛选，从而降低弱光照、孔内杂散反射和伪焦点对孔底判定的影响.对 20 组不同深径比微孔样品的实验结果表明，测量深径比与标准值之间具有良好的线性一致性，平均绝对误差为 0.0195，均方根误差为 0.0235，最大绝对误差为 0.06.结果表明，本文方法能够在普通显微成像和轴向扫描条件下实现微孔深径比的稳定测量. 该方法为大深径比微孔参数的非接触、自动化测量提供了一种有效途径，

并对在线检测、质量评估及工艺优化具有参考意义.

录用稿件，非最终出版稿

附录

表 A1 单一清晰度判据下深径比测量及误差数据

Table A1. Aspect-ratio measurement and error data under the single sharpness criterion

编号	标准深径比 AR_s	测量深径比 AR_m	绝对误差	相对误差
1	4.62	4.74	0.12	2.597%
2	4.70	4.62	-0.08	1.702%
3	4.75	4.85	0.1	2.105%
4	4.80	4.74	-0.06	1.25%
5	4.88	4.97	0.09	1.844%
6	5.02	4.91	-0.11	2.191%
7	5.15	5.28	0.13	2.524%
8	5.30	5.23	-0.07	1.321%
9	5.44	5.52	0.08	1.471%
10	5.67	5.57	-0.1	1.764%
11	5.86	5.97	0.11	1.877%
12	5.89	5.8	-0.09	1.528%
13	5.93	6.00	0.07	1.180%
14	5.97	5.85	-0.12	2.010%
15	6.06	6.16	0.1	1.650%
16	6.12	6.04	-0.08	1.307%
17	6.25	6.37	0.12	1.920%
18	6.30	6.24	-0.06	0.952%
19	6.35	6.46	0.11	1.732%
20	6.44	6.35	-0.09	1.398%

表 A2 单一灰度均值判据下深径比测量及误差数据

Table A2. Aspect-ratio measurement and error data under the single mean gray-level criterion

编号	标准深径比 AR_s	测量深径比 AR_m	绝对误差	相对误差
1	4.62	4.57	0.05	1.082%
2	4.70	4.64	0.06	1.277%
3	4.75	4.68	0.07	1.474%

4	4.80	4.76	0.04	0.833%
5	4.88	4.83	0.05	1.025%
6	5.02	5.08	0.06	1.195%
7	5.15	5.07	0.08	1.553%
8	5.30	5.25	0.05	0.943%
9	5.44	5.40	0.04	0.735%
10	5.67	5.74	0.07	1.235%
11	5.86	5.80	0.06	1.024%
12	5.89	5.84	0.05	0.849%
13	5.93	5.86	0.07	1.180%
14	5.97	6.02	0.05	0.838%
15	6.06	6.01	0.05	0.825%
16	6.12	6.06	0.06	0.980%
17	6.25	6.18	0.07	1.120%
18	6.30	6.26	0.04	0.635%
19	6.35	6.41	0.06	0.945%
20	6.44	6.39	0.05	0.776%

表 A3 单一对比度判据下深径比测量及误差数据

Table A3. Aspect-ratio measurement and error data under the single contrast criterion

编号	标准深径比 AR_s	测量深径比 AR_m	绝对误差	相对误差
1	4.62	4.66	0.04	0.866%
2	4.70	4.66	0.04	0.851%
3	4.75	4.80	0.05	1.053%
4	4.80	4.77	0.03	0.625%
5	4.88	4.92	0.04	0.820%
6	5.02	4.98	0.04	0.797%
7	5.15	5.21	0.06	1.165%
8	5.30	5.26	0.04	0.755%
9	5.44	5.47	0.03	0.551%
10	5.67	5.62	0.05	0.882%
11	5.86	5.90	0.04	0.683%
12	5.89	5.86	0.03	0.509%
13	5.93	5.98	0.05	0.843%

14	5.97	5.94	0.03	0.503%
15	6.06	6.10	0.04	0.66%
16	6.12	6.08	0.04	0.654%
17	6.25	6.30	0.05	0.800%
18	6.30	6.27	0.03	0.476%
19	6.35	6.41	0.06	0.945%
20	6.44	6.40	0.04	0.621%

表 A4 多特征融合与深径比约束方法下深径比测量及误差数据

Table A4. Aspect-ratio measurement and error data obtained by the multi-feature fusion method with aspect-ratio constraint

编号	标准深径比 AR_s	测量深径比 AR_m	绝对误差	相对误差
1	4.62	4.59	-0.03	0.649%
2	4.70	4.72	0.02	0.426%
3	4.75	4.74	-0.01	0.211%
4	4.80	4.82	0.02	0.417%
5	4.88	4.88	0	0
6	5.02	5.05	0.03	0.598%
7	5.15	5.09	-0.06	1.165%
8	5.30	5.32	0.02	0.377%
9	5.44	5.42	-0.02	0.368%
10	5.67	5.68	0.01	0.176%
11	5.86	5.87	0.01	0.171%
12	5.89	5.88	-0.01	0.170%
13	5.93	5.96	0.03	0.506%
14	5.97	5.99	0.02	0.335%
15	6.06	6.05	-0.01	0.165%
16	6.12	6.13	0.01	0.163%
17	6.25	6.23	-0.02	0.320%
18	6.30	6.31	0.01	0.159%
19	6.35	6.31	-0.04	0.630%
20	6.44	6.43	-0.01	0.155%

参考文献

- [1] Hovell T, Petzing J, Guo W, Gill C, Justham L, Lohse N, Kinnell P 2023 *Metrology* **3** 139
- [2] Wu Y S, Wang Z Z, Sun X L, Wu F Y, Huo S C, Hu C G 2023 *Metrol. Meas. Technol.* **43** 3 (in Chinese) [吴岳松, 王子政, 孙新磊, 武飞宇, 霍树春, 胡春光 2023 计测技术 **43** 3]
- [3] Xie W Z, Wen G C, Ling Y X, Tang X L, Wang Q Y, Kong L B 2025 *Infrared Laser Eng.* **54** 20250368 (in Chinese) [谢文喆, 温国聪, 凌羽溪, 唐鑫岚, 王启元, 孔令豹 2025 红外与激光工程 **54** 20250368]
- [4] Wang G C, Li X H, Yan S H, Tan L L, Guan W L 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 040601 (in Chinese) [王国超, 李星辉, 闫树华, 谭立龙, 关文良 2021 物理学报 **70** 040601]
- [5] Ding W Y, Wang Y H, Zhang T, Qin H, Wang J X 2024 *Laser Optoelectron. Prog.* **61** 0618024 (in Chinese) [丁万云, 王宇航, 张韬, 秦浩, 王吉祥 2024 激光与光电子学进展 **61** 0618024]
- [6] Shao T B, Yang K C, Xia M, Guo W P 2023 *Laser Optoelectron. Prog.* **60** 1200001 (in Chinese) [邵谭彬, 杨克成, 夏珉, 郭文平 2023 激光与光电子学进展 **60** 1200001]
- [7] Wang Z Z, Huo S C, Wu F Y, Qu Y, Chen X M, Yang F, Hu C G 2024 *Opt. Laser Technol.* **176** 110980
- [8] Wang Y, Guo Z, Zhu L D, Zhou H X, Ma Z H 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 154202 (in Chinese) [王毅, 郭哲, 朱立达, 周红仙, 马振鹤 2017 物理学报 **66** 154202]
- [9] Fu X, Liu B, Zhang Y 2012 *Measurement* **45** 1343
- [10] Chein W H, Yang F S, Thakur K, Wu G W, Chen L C 2023 *Opt. Lasers*

- [11] Qiu Z J, Tang J J 2024 *Opt. Lasers Eng.* **178** 108246
- [12] Xu W, Li X H, Zhang J 2022 *Opt. Laser Technol.* **150** 107918
- [13] Ren Y M, Yang J, Zhang Q N, Guo Z Q 2019 *Appl. Sci.* **9** 4209
- [14] Saxton W O 2013 *Computer Techniques for Image Processing in Electron Microscopy* (New York: Academic Press) pp1—33
- [15] Li Z L, Dong J Q, Zhong W H, Wang G J, Liu X, Liu Q G, Song X L 2023 *Opt. Commun.* **546** 129756
- [16] Zhang L, Yang J L, Xu Y M 2026 *Electronics* **15** 114
- [17] Lepcha D C, Goyal B, Dogra A, Sharma K P, Gupta D N 2023 *Inf. Fusion* **93** 36
- [18] Vijayalakshmi D, Nath M K, Acharya O P 2020 *Sens. Imaging* **21** 40
- [19] Liu S, Chen J W, Hellgoth J, Müller L R, Ferdman B, Karras C, Xiao D F, Lidke K A, Heintzmann R, Shechtman Y, Li Y, Ries J 2024 *Nat. Methods* **21** 1082
- [20] Jan M M, Zainal N, Jamaludin S 2020 *IAES Int. J. Artif. Intell.* **9** 520
- [21] Piao W Y, Han Y Q, Hu L Y, Wang C X 2025 *Sensors* **25** 3144
- [22] Wu A, Lu R S, Li M 2024 *Sens. Actuators A Phys.* **376** 115657

Multi-feature Fusion Optical Measurement Method Based on Aspect-Ratio Constraint*

KANG Shaolin¹⁾ ZHONG Qi²⁾ WU Jian¹⁾ LU Xiang¹⁾³⁾ PAN Zhiyi¹⁾†

1) (School of Physical Science and Technology, Guangxi University, Nanning Guangxi 530004, China)

2) (School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning Guangxi 530004, China)

3) (Department of State-owned Assets and Laboratory Management, Guangxi University, Nanning Guangxi 530004, China)

Abstract

High-aspect-ratio microholes are widely used in aerospace, electronic packaging, biomedical devices, and precision manufacturing. However, their non-contact optical measurement is still challenged by weak bottom signals, false-focus interference caused by stray reflections and scattering inside the hole, and accumulated uncertainty in aspect-ratio evaluation. To address these problems, this paper proposes a multi-feature fusion optical measurement method based on an aspect-ratio constraint for stable measurement of microhole depth and aspect ratio. In this method, a sequence of microscopic images is acquired at different defocus positions through precise axial scanning. Within a predefined region of interest, multiple image features, including sharpness, mean gray level, and contrast, are extracted to establish the response relationship between image characteristics and axial displacement. After min-max normalization, these features are adaptively weighted according to their

response dispersion and fused into a comprehensive feature response function. The local extrema of the fused response curve are then extracted as candidate bottom positions. Furthermore, combined with the measured entrance diameter, a reasonable prior interval of the aspect ratio is introduced as a geometric constraint to screen the candidate depths, thereby reducing the uncertainty caused by false-focus points and single-feature judgment. Experiments were carried out on 20 microhole samples with different aspect ratios. The results show that the proposed method can effectively suppress false-focus interference under weak illumination, low contrast, and complex internal reflection conditions. A good linear agreement is obtained between the measured aspect ratios and the standard values, with a fitted slope of 0.997 and an intercept of 0.00912. The mean absolute error, root-mean-square error, and maximum absolute error are 0.0195, 0.0235, and 0.06, respectively. The proposed method provides a feasible and robust approach for non-contact measurement of geometric parameters of high-aspect-ratio microholes and has potential applications in online inspection, quality evaluation, and process optimization in precision manufacturing.

Keywords: microhole, optical measurement, aspect-ratio constraint, multi-feature fusion

* Projects supported by Guangxi Higher Education Undergraduate Teaching Reform Project in 2025 (Grant No. 2025JGB100), Guangxi University Young and Middle-aged Teachers' Scientific Research Basic Ability Improvement Project in 2024 (Grant No. 2024KY0014) and Guangxi University Experimental Teaching Reform Project in 2025 (Grant No. syjg2025024).

† Corresponding author.E-mail: panzhiyi@gxu.edu.cn

The first author.E-mail: shaolinkang@yeah.net

录用稿件，非最终出版稿