

一种基于光电技术的大深径比微孔无损测量技术

郭璇, 谭诗睿, 田依泽, 张聪哲*

华北理工大学电气工程学院, 河北 唐山

收稿日期: 2026年2月5日; 录用日期: 2026年3月5日; 发布日期: 2026年3月13日

摘要

本设计为基于光电技术的大深径比微孔参数无损测量装置。旨在实现对直径为0.2~0.5 mm、深径比3~10的盲孔参数的精准检测。系统结构主要包括孔径测量装置、孔深测量装置和上位机界面实时数据显示模块。孔径测量装置采用CCD边缘检测技术, 孔深测量装置采用耦合光纤探入孔内, 光功率计光强反馈的非接触无损测量方式, 深径比则通过上位机界面显示出来。系统的创新点为: 整套装置为“CCD边缘检测孔径和光强反馈深度”的复合测量系统, 且深径比数据能实时传输并显示在上位机界面上。

关键词

大深径比微孔, CCD图像采集, 光功率计光强反馈, 上位机界面

A Non-Destructive Measurement Technology for Large Aspect Ratio Microholes Based on Optoelectronic Technology

Xuan Guo, Shirui Tan, Yize Tian, Congzhe Zhang*

School of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

Received: February 5, 2026; accepted: March 5, 2026; published: March 13, 2026

Abstract

This design presents a non-destructive measurement device for micro-hole parameters based on optoelectronic technology, specifically targeting blind holes with diameters ranging from 0.2 to 0.5

*通讯作者。

文章引用: 郭璇, 谭诗睿, 田依泽, 张聪哲. 一种基于光电技术的大深径比微孔无损测量技术[J]. 应用物理, 2026, 16(3): 185-191. DOI: 10.12677/app.2026.163018

mm and aspect ratios between 3 and 10. The system architecture primarily comprises an aperture measurement unit, a depth measurement unit, and a real-time data display module on the host computer interface. The aperture measurement unit employs CCD edge detection technology, while the depth measurement unit utilizes a coupled optical fiber inserted into the hole, employing a non-contact, non-destructive measurement method with optical power meter intensity feedback. The depth-to-diameter ratio is displayed via the host computer interface. The innovation of the system lies in its integrated “CCD edge detection for diameter and optical intensity feedback for depth” composite measurement approach, with data transmitted and displayed in real time on the host computer interface.

Keywords

High Aspect Ratio Micro-Holes, CCD Image Acquisition, Optical Power Meter Intensity Feedback, Host Computer Interface

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在微电子、微纳光学、集成光学和微流控技术等多个领域，常常需要在金属、半导体、玻璃等不同材料上加工具有大深径比的微孔。加工过程中会产生各种误差，比如孔的加工深度、直径、孔轴的垂直度、不同深度小孔直径的一致性、孔壁的表面光滑度、孔的不圆度等等。精确测量大深径比微孔的各项参数是获得高质量微孔的重要前提。对于微孔的测量，较新的研究方法是利用电涡流效应测微孔直径和深度[1]，实验方法只适用于直径为 1.5~5 mm、深度为 0.1~0.5 mm 的微孔，对于更小的孔(比如直径小于 1.5 mm)、更深的孔(比如深度大于 0.5 mm)，电涡流效应将不够明显，线圈电感值的变化也很难找寻到规律[2]。并且对于实验中未提及的其他材料(比如不锈钢、铜)等零件，线圈电感值的变化规律可能不一样，该方法的适用性将显著降低。

而对于更早些的微孔测量研究方法，总的分为接触式测量和非接触式测量两大类，其中接触式测量包括三坐标测量法、尺寸线规法等，接触式测量由于测量力的存在可能导致测量结果不够准确[3]。非接触式测量包括光学测量法、气动测量法、光纤测量法与电容测量法等[4]。其中以往的光学测量多应用于测量通孔，且对被测物表面镜面度有一定要求，因此应用场景受限。气动测量法对气源要求很高，供气系统体积庞大，装置不灵活，影响测量效率。电容测量法在深入微孔测量时存在测量盲区，测量效率较低，且易受环境污染物影响，致使测量结果不准，且电容不满足工业生产中微孔大规模批量测量的要求。这些技术瓶颈使得行业亟需一种适配小微孔与大深径比、兼顾精度与成本的新型测量方案。

基于此，本文提出一种基于光电技术的大深径比微孔无损测量技术。此技术是一种基于电荷耦合器件(下文以 CCD 简称)边缘检测与光纤光强反馈融合的微孔深径比测量方法，并设计上位机显示功能实现结果可视化。其中，CCD 凭借“高分辨率”的特点，结合边缘检测算法能精准识别孔径边缘位置，实现直径的非接触式高精度测量；而光纤光强反馈技术则具有“微型化、抗干扰”的核心优势，细径光纤可轻松伸入大深径比微孔内部，通过光强反馈信号的规律性变化，能精准反推微孔深度。最后是在所设计上位机界面上实现“孔径”与“孔深”的数据融合显示。该技术可检测的微孔规格为：直径为 0.2~3 mm，深径比为 3~10。

2. 测量原理

2.1. 微孔深度测量原理

本研究中的深度测量，是基于光纤光强反馈原理实现的。原理如图 1 所示。首先，构建一个光强反馈检测回路：利用 1×2 光耦合器的单针端连接裸光纤，双出线端分别连接光源与光功率计，构成光信号传输及功率检测回路；其次需选用具备数显功能的手动位移台，并将光纤固定在位移台的升降台上；实验测得反馈光功率值与盲孔深度的对应关系如图 2 所示。由图 2 可知，在距孔底 $0 \sim 450 \mu\text{m}$ 的范围内，光功率值与盲孔深度呈近似线性关系，验证了该光强反馈检测方案的可行性——即以已知精确参数(包括深度、直径等)的标准盲孔作为光强校准基准孔。将光纤伸入标准盲孔，移动至距离底部一定距离处，记录此时的光强值 I_0 及对应的深度距离 d_0 ，则该光强值 I_0 就作为 d_0 深度的标准反馈光强。

测量目标盲孔时，先旋动手动位移台手柄，调节光纤上下位移，使光纤探头与孔口齐平，此时将位移台数显值手动归零，接着继续旋动手动位移台手柄，观测光功率计所显示的数值，当光强值稳定在 I_0 附近时，记录位移台数显值 d_1 ，则称 d_1 为“光纤有效位移量”。

因此可计算出目标盲孔的深度 H ，计算公式为： $H = d_1 + d_0$ 。

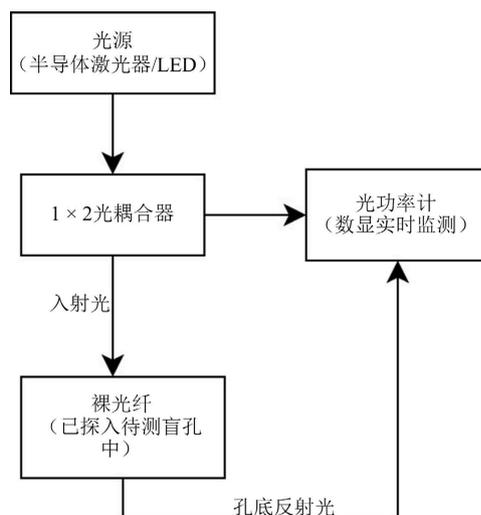


Figure 1. Schematic diagram of micro-hole depth measurement
图 1. 微孔深度测量原理图

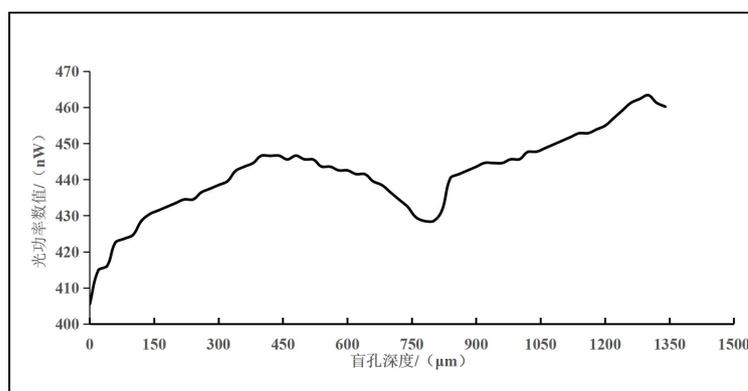


Figure 2. Relationship diagram between optical power and depth from hole bottom
图 2. 光功率值与距孔底深度对应关系图

2.2. 微孔直径测量原理

红光光源发出的光经光纤耦合器传输后，照射至盲孔表面，此时盲孔会对光线产生衍射效应，导致反射光的光强分布发生变化。此时利用 CCD 传感器采集反射光，通过光电效应将光信号转换为电荷信号，再以模拟量形式输出，因此需将输出的模拟信号通过 STM32 中的模数转换器 ADC 转换为数字信号，并通过串口通信发送到上位机，上位机界面上将会显示一条“直径 - 光强”分布曲线从而获取微孔直径。

2.3. 上位机显示

本研究采用 C#语言开发上位机交互界面，集成数据接收、处理、曲线绘制及参数显示功能，支持深径比的查询与实时更新。CCD 采集到光强信号并发送给上位机后，上位机界面上将会显示一条“直径 - 光强”曲线，此时可查询到微孔直径，手动输入微孔深径后，即可获取深径比。

摄像头阈值是图像二值化处理的关键参数，作为灰度门限值将连续灰度图像转换为黑白二值图像。该阈值以水平直线 $y = a$ 的形式作用于光强曲线，通过区分目标区域与背景的灰度差异，实现盲孔边缘像素位置的精准定位。因此在上位机界面上设计“摄像头阈值”按钮，通过实时修改阈值，来有效抵抗光照波动等干扰，确保边缘定位的准确性和稳定性。

测量校正值是实现像素到实际尺寸转换的标定系数，代表单个像素对应的实际物理尺寸。该值通过测量标准件标定得到，通过修改测量校正值，可综合补偿光学放大倍率偏差、镜头畸变及传感器像元尺寸误差等系统误差。将识别出的盲孔直径像素数与校正值相乘，即可获得实际的微孔直径。整套装置的光路原理图如图 3 所示。

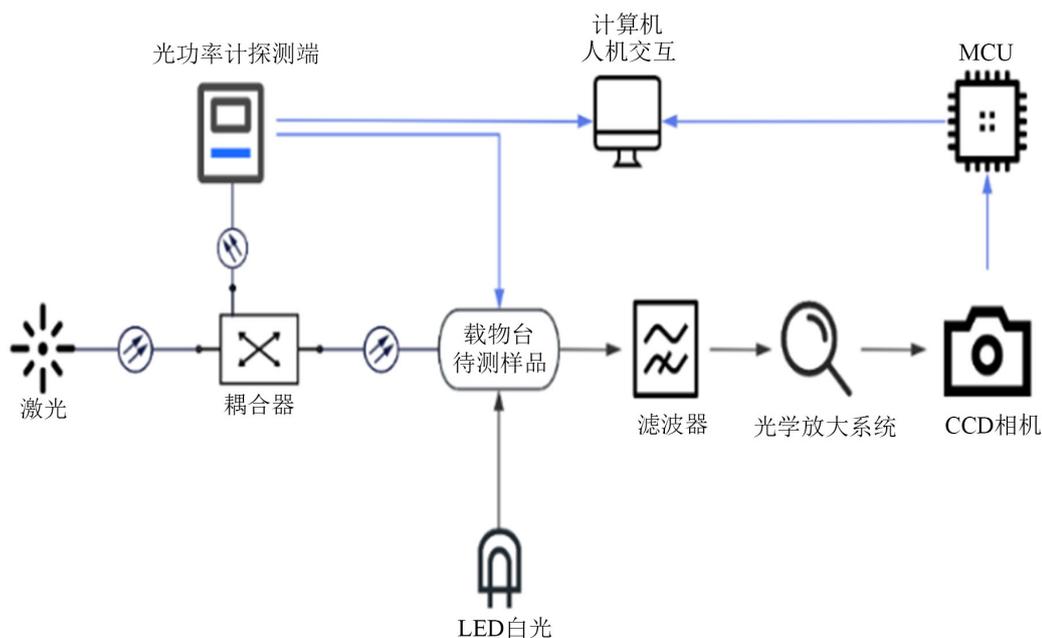


Figure 3. Optical path principle diagram

图 3. 光路原理设计图

3. 测量系统

系统结构主要由光源模块、孔径测量模块、孔深测量模块及上位机显示模块四部分构成，通过光学

信号采集、转换、处理及数据融合，实现微孔深径比的实时检测与显示。下面将分别详述以上四个模块的硬件搭建和检测回路。

3.1. 光源模块

光源模块采用 LED 90 度环形白光光源(型号 ZC-R-90)为测量前的调试提供稳定均匀的照明，采用 650 nm 红光笔(型号赛纤充电式光纤，功率 15 mW)作为入射光光源，并插入光纤耦合器的一端。

3.2. 孔径测量模块

孔径测量模块主要进行的是信号的采集与转换——通过 TSL1401CL 线性 CCD 传感器采集微孔衍射后的反射光强信号，将光信号转化为电荷模拟信号，再经 STM32F103C8T6 单片机的 ADC 模块转换为数字信号。

数据采集及处理的具体过程是：CCD 连续采集 100 次数据，每次 128 个数据点，统计大于阈值的数据点数量并换算为孔径信息，通过串口传输至上位机。此时上位机界面的“光强 - 直径”分布曲线将会实时更新，点击界面中“查询”按键即可显示孔径数值。

3.3. 孔深测量模块

孔深测量模块由 1×2 光纤耦合器、裸光纤、Z 轴精密手动位移台(数显分辨率 0.001 mm)及光功率计组成检测回路。

3.4. 上位机显示界面

通过上位机界面，显示直径及深径比等参数。

系统结构框架图如图 4 所示。

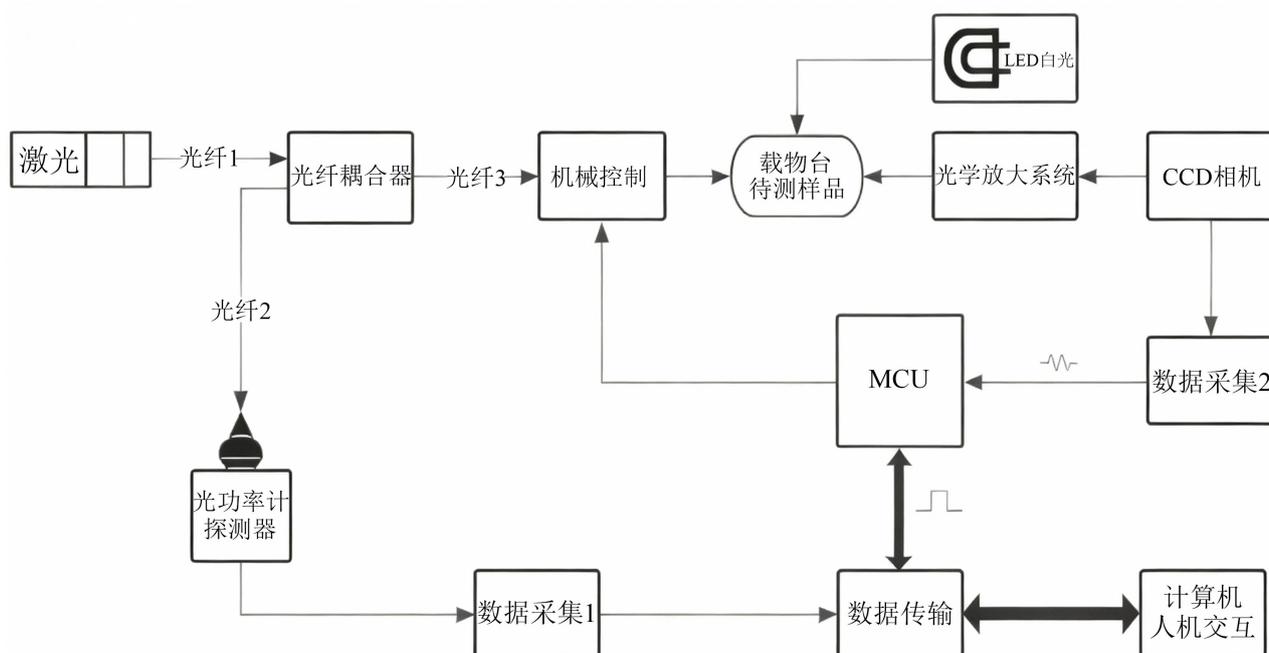


Figure 4. System architecture diagram
图 4. 系统结构框架图

4. 实物装置与微孔参数测量验证实验

4.1. 实物装置

根据所述系统框架图，搭建实物，装置正面与侧面如图 5 所示。实物装置外部配备遮光黑箱，以避免环境光干扰。

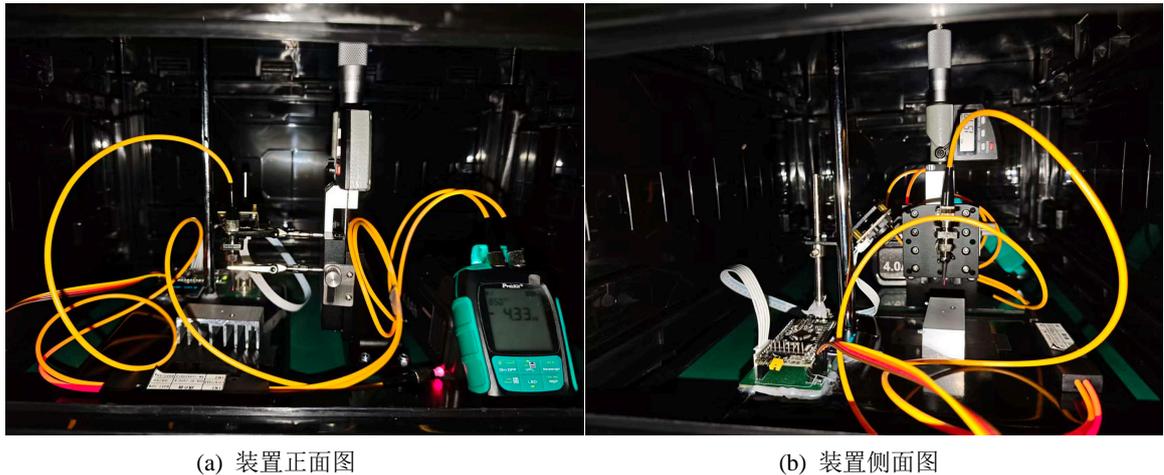


Figure 5. Physical device diagram
图 5. 实物装置图

4.2. 验证实验

以标准盲孔为校准件，选取 5 组待测微孔样品，其深度范围 0.6~3 mm、直径范围 0.2~0.4 mm。微孔直径、深度在上位机中显示结果如图 6 所示。

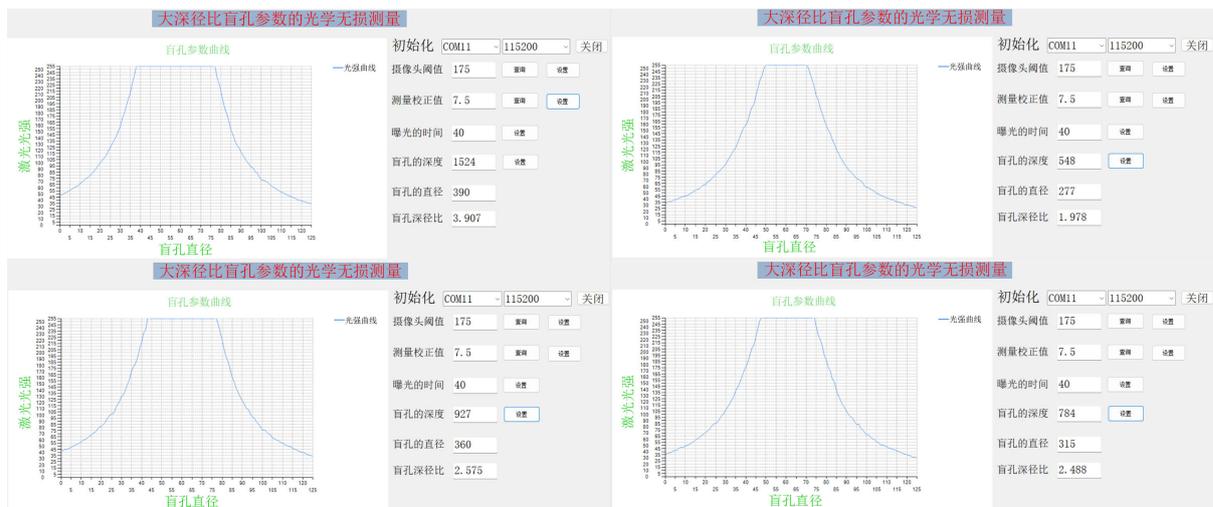


Figure 6. Host computer result display figure
图 6. 上位机结果显示图

4.3. 误差拟合

基于更多样品孔的检测，得到测量值与实际值的拟合曲线如图 7 所示。

其中，拟合决定系数 $R^2 = 0.9306$ 。因此，此实验装置具有较高的可行性和可靠性。



Figure 7. Error fitting curve

图 7. 误差拟合曲线

5. 总结与发展

本文提出了一种基于光电技术的大深径比微孔无损测量技术，该技术为“CCD 边缘检测加光纤光强反馈”的非接触式复合测量方案。该装置可实现直径 0.2~0.5 mm、深径比 3~10 的盲孔参数检测。文章详细阐述了测量系统的硬件搭建、算法设计、上位机开发及实验验证过程，以为微孔加工质量在线监测及微结构器件制造水平提升提供技术支撑与应用参考。

参考文献

- [1] 牛国钰, 潘巧生, 万澳德, 等. 一种利用电涡流效应的微孔直径和深度测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(10): 123-133.
- [2] 陈立蔚. 基于电涡流效应的微孔测量研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.
- [3] 崔继文, 谭久彬, 宋传曦. 精密微小内尺度测量技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2010, 21(1): 120-125.
- [4] 崔继文, 谭久彬, 刘洋. 基于双光纤耦合的微深孔测量方法[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 106-109.