

# 深孔内表面缺陷特征内窥测量方法研究

许鹏飞, 刘 阳\*

大连工业大学机械工程与自动化学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2025年5月7日; 录用日期: 2025年7月1日; 发布日期: 2025年7月11日

## 摘 要

在大深径比小孔径深孔、盲孔内表面几何参数测量领域, 由于工作环境复杂, 孔内表面缺陷的高质量检测面临较大挑战。针对这一难题, 提出了一种基于光路分析的缺陷特征内窥成像方法。首先, 通过分析单根光线的路径变化, 构建缺陷高度与角度变化对出射光线偏移量影响的缺陷表征模型。其次, 通过仿真实验对模型验证, 证明了模型的准确性, 并通过对不同高度缺陷和角度缺陷的多截面点云数据进行拼接, 实现深孔内表面不同缺陷轴向三维重构, 表征不同缺陷导致出射光线的变化结果。最后基于高精度实验平台模拟深孔内表存在缺陷, 验证高度变化量平均误差为0.00438 mm, 角度变化量平均误差为0.01556 mm, 证明深孔内表面缺陷特征内窥测量方法准确性, 可根据出射光线结果反演得到深孔内壁缺陷参数。

## 关键词

深孔盲孔检测, 缺陷表征, 光路反演, 内窥测量

# Research on Endoscopic Measurement Method for Surface Defect Characteristics in Deep Holes

Pengfei Xu, Yang Liu\*

School of Mechanical Engineering and Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian Liaoning

Received: May 7<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jul. 1<sup>st</sup>, 2025; published: Jul. 11<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

In the field of measuring geometric parameters of the inner surface of deep and blind holes with

\*通讯作者。

large depth to diameter ratios and small apertures, high-quality detection of surface defects inside the holes faces significant challenges due to the complex working environment. A defective feature endoscopic imaging method based on optical path analysis is proposed to address this challenge. Firstly, by analyzing the path changes of a single light ray, a defect characterization model is constructed to investigate the impact of defect height and angle changes on the offset of the emitted light ray. Secondly, the accuracy of the model was verified through simulation experiments, and the multi section point cloud data of defects at different heights and angles were concatenated to achieve three-dimensional reconstruction of the axial direction of different defects on the inner surface of deep holes, characterizing the changes in the emitted light caused by different defects. Finally, based on a high-precision experimental platform, the presence of defects on the deep hole inner surface was simulated, and the average error of height change was verified to be 0.00438mm, and the average error of angle change was 0.01556mm. This proves the accuracy of the endoscopic measurement method for the characteristics of deep hole inner surface defects, which can invert the parameters of deep hole inner wall defects based on the emitted light results.

## Keywords

Deep Hole and Blind Hole Detection, Defect Characterization, Optical Path Inversion, Endoscopic Measurement

Copyright © 2025 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

在核电、能源动力、航空航天等国家重大工程领域,深孔类零部件作为关键结构件被广泛应用。特别是在以核电蒸汽发生器管板孔道、内燃机曲轴油孔等典型的小口径深孔零件中,其在使用过程中常处于高温、高压及强冲击载荷等极端工作环境下,一旦在加工过程中产生内壁缺陷,极易导致零件性能下降,进而影响整机运行的安全性与可靠性。在严重情况下,甚至可能造成关键部件的失效或整机报废,带来不可忽视的工程风险与经济损失。因此,研发一种高效、稳定且适用于复杂工况的深孔、盲孔内表面缺陷测量技术已显得尤为迫切。这不仅对推动机械制造技术的进步具有重要价值,也对保障实体经济高质量发展与服务国家战略目标具有深远意义。

鉴于小孔径深孔缺陷测量技术在提升重大装备核心零部件制造精度和可靠性方面的重要作用,本文将重点分析光学测量、机器视觉与图像处理等非接触技术在深孔内表面检测领域的发展现状。光学测量技术凭借其高精度、非接触、等特点得到了广泛应用。闫兴涛等人[1]构建了调制传递函数(MTF)理论分析模型对传像系统进行优化。李忠虎等人[2]提出基于圆结构光的管道内表面缺陷检测方法。黄战华等人[3]提出了火炮身管内壁检测系统的数据处理方法。曹建树等人[4]提出了 X80 管道内表面裂纹的激光超声检测方法。李耀明等人[5]提出基于激光谐波调制的线型扫描系统夏康等人[6]提出了基于点阵光谱共焦传感器的盲孔三维测量方案。Liang 等人[7]设计了一种基于轴截面测量原理的深孔零件自动在线测量装置。陈振亚等人[8]提出了一种基于三维点云补偿的圆度测量方法。马瑞等人[9]提出一种基于光谱共焦原理的旋转测量方法。随着机器视觉和数字图像处理技术的快速发展,基于机器视觉的方法在深孔检测中展现出良好的灵活性和适应性。Zhao 等人[10]设计了一种基于光电原理的深孔/盲孔轴线直线度测量机器人。杨泽南等人[11]通过计算机断层成像技术实现零件内表面形貌的高精度无损检测。Liu 等人[12]系统分析了内壁缺陷检测技术的主要方法。Shi 等人[13]提出了一种基于成像几何原理的内窥镜图像校正方法。叶涛

等人[14]设计了一种基于高分辨率摄像机与光学反射系统的全向结构光视觉传感器。靳极升等人[15]提出一种基于图像分析的锥形管内壁形变检测方法。Zhao 等人[16]提出了一种基于固定靶点像素位移与透视变换的误差补偿方法。Liu 等人[17]提出了一种基于 CCD 深焦扫描与高效机械-光学系统的核反应堆压力容器深孔大螺纹缺陷机器视频检测方法。盛强等人[18]提出了一种基于内窥图像畸变校正的孔内表面尺寸测量方法。赵媛媛等人[19]设计一款大视场、短焦距的广角内窥镜头。梁健团队[20]研制了一种微细管道内壁缺陷检测仪。随着深孔内表面检测需求的不断提升, 除传统光学测量与机器视觉方法外, 基于非接触传感与电学测量技术、深度学习与智能检测方法的研究也逐渐兴起。Zhao 等人[21]提出了一套结合轻量级卷积神经网络(LCNN)与浅层分割网络的检测方法。Ren 等人[22]系统综述了深度学习在基于机器视觉的缺陷检测领域中的应用与发展。梁书溢等人[23]提出基于改进 YOLOv5 的缺陷检测算法。冷祥智等人[24]发了针对 155 mm 炮管内壁污渍的实时识别与定位系统。Li 等人[25]提出了一种基于随机裁剪增强(RCA)和优化 YOLOv8 算法的方法综上所述, 尽管国内外学者在深孔测量技术方面取得了一系列重要成果, 但现有方法仍难以同时满足小口径、大深径比深孔及盲孔的细微缺陷测量要求。因此实现对深孔内表面缺陷特征内窥测量具有重要意义。

第 1 节基于单根光线传播特性, 构建高度缺陷和角度缺陷对出射光线偏移量影响的数学模型, 第 2 节利用仿真软件验证模型准确性, 并对不同高度缺陷和角度缺陷的多截面点云拼接, 表征了不同缺陷对出射光线偏移的影响机制。第 3 节通过试验台模拟缺陷高度、缺陷角度变化, 证明深孔内表面缺陷特征内窥测量方法准确性。

## 2. 缺陷高度与缺陷角度表征模型

### 2.1. 基于内表面缺陷高度表征建模

内表面缺陷高度的变化是亟需识别和量化的关键参数之一, 基于单根光线在深孔内表面反射过程中的路径变化, 通过理论推导, 构建缺陷高度变化( $\Delta X$ )与出射光线到轴线距离( $Y$ )的数学关系模型, 实现对内壁高度变化的定量表征, 如图 1 所示。

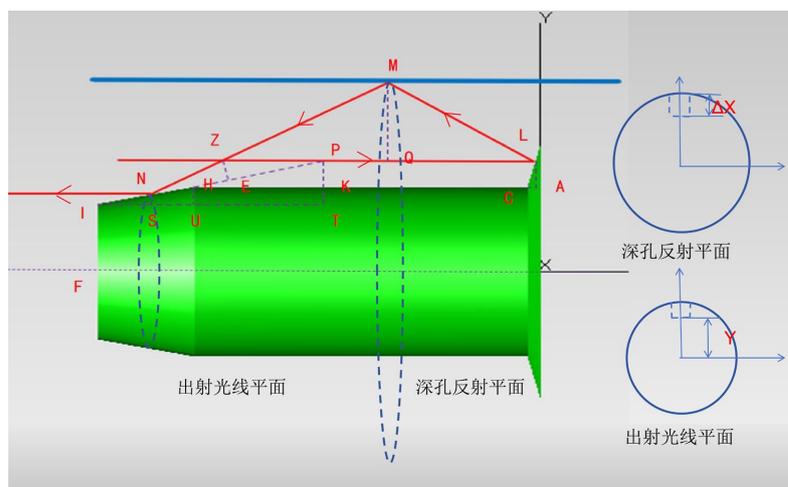


Figure 1. Mathematical model of height variation of single ray folding defect and deviation of outgoing ray from axis

图 1. 单根光线折返缺陷高度变化与出射光线到轴线偏移量数学模型图

基于几何光学原理及空间坐标系变换, 结合系统参数约束条件, 其规定核心几何参数, 如表 1 所示。

构建缺陷高度的理论模型如下:

**Table 1.** Parameter design and symbol definition

**表 1.** 参数设计与符号定义

参数设计与符号定义	
入射孔径半径: $R = 8 \text{ mm}$	偏移修正量: $IF = 3.192 \text{ mm}$
光阑约束半径: $r = 5.5 \text{ mm}$	基准长度: $HC = 12.04 \text{ mm}$
镜组间距: $d = 16 \text{ mm}$	临界边距: $\Delta C = 4 \text{ mm}$
末端平台特征长度: $L_{\text{台}} = 0.462 \text{ mm}$	$\theta_1 = 13^\circ, \theta_2 = 26^\circ$
$\sin\theta_1 = 0.2250, \cos\theta_1 = 0.9744$	$\tan\theta_1 = 0.2309, \tan\theta_2 = 0.4877$

综合上述模型, 点 N 到点 F 的垂直距离和点 M 到光线入射半径的垂直距离关系可表述为:

$$NS + IF = \sin\theta_1 \cdot \left\{ \frac{PT}{\sin\theta_1} - 2\cos\theta_1 \cdot \left[ \frac{2(MF - r)}{\tan\theta_2} - \left( HE - \frac{PK}{\tan\theta_1} + PK \cdot \tan\theta \right) HE - \frac{PK}{\tan\theta_1} + PK \cdot \tan\theta_1 \right] \right\}$$

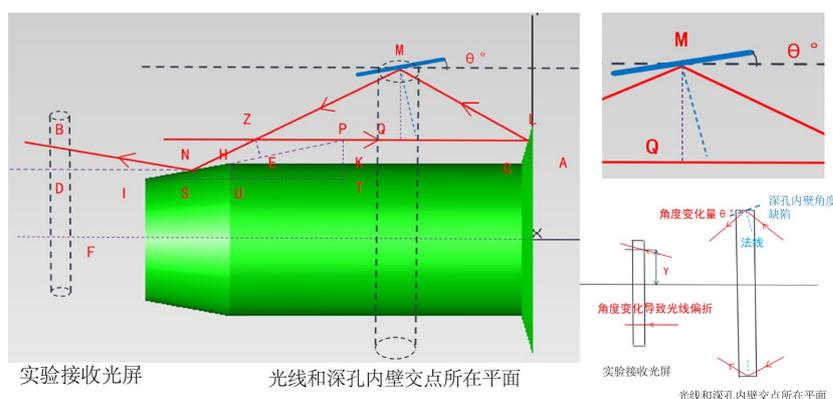
将表 1 中各参数带入, 求得内壁缺陷高度变化( $\Delta X$ )与出射光线到轴线距离( $Y$ )之间关系为:

$$Y = -1.7982 \cdot \Delta X + 3.5872$$

综上所述, 本节通过对单根光线在深孔内壁反射路径的分析, 成功构建了深孔内壁高度缺陷变化与出射光线轴向之间的缺陷表征模型。

## 2.2. 基于内表面缺陷角度表征建模

在深孔内径快速精准测量中, 除了内壁的高度缺陷外, 内壁表面角度的变化同样对成像质量产生显著影响。基于单根光线构建缺陷角度变化量与出射光线到轴线距离之间的数学关系模型。旨在实现对角度缺陷变化的定量表征。具体而言, 假设深孔内壁某点存在一个角度偏差  $\theta$ , 当入射光束到达该位置并发生反射时, 其反射路径将因表面法向的改变而发生偏移, 进而影响最终成像结果, 如图 2 所示。



**Figure 2.** Mathematical model of angle change of single ray folding defect and deviation of outgoing ray from axis

**图 2.** 单根光线折返缺陷角度变化与出射光线到轴线偏移量数学模型图

结合表 1 中参数条件, 构建缺陷角度理论模型如下:

$$\begin{aligned} \text{出射光线半径} = & \left\{ DI + \cos \theta_1 \cdot \left[ \frac{PT}{\sin \theta_1} - 2\cos(\theta_1 + \theta) \cdot \left( \frac{MQ}{\tan(\theta_2 + 2\theta)} - PK \cdot \tan \theta_1 \right) \right] \cdot \tan \theta \right\} \\ & + \sin \theta_1 \cdot \left[ \frac{PT}{\sin \theta_1} - 2\cos(\theta_1 + \theta) \cdot \left( \frac{MQ}{\tan(\theta_2 + 2\theta)} + \frac{MQ}{\tan \theta_2} - HC + \frac{PK}{\tan \theta_1} - PK \cdot \tan \theta_1 \right) \right] + IF \end{aligned}$$

确定出射光线到光屏位置为 9 mm, 保证内表面高度不变, MQ = 2.5 mm, 求得内壁缺陷角度变化( $\theta$ )与出射光线到轴线距离(Y)之间关系为:

$$\begin{aligned} Y = & \left[ 18.9952 - 1.9488\cos(13^\circ + \theta) \cdot \left( \frac{2.5}{\tan(26^\circ + 2\theta)} - 0.7639 \right) \right] \cdot \tan \theta \\ & + 2.3080 - 0.45\cos(13^\circ + \theta) \cdot \left( \frac{2.5}{\tan(26^\circ + 2\theta)} - 0.7639 \right) + 3.192 \end{aligned}$$

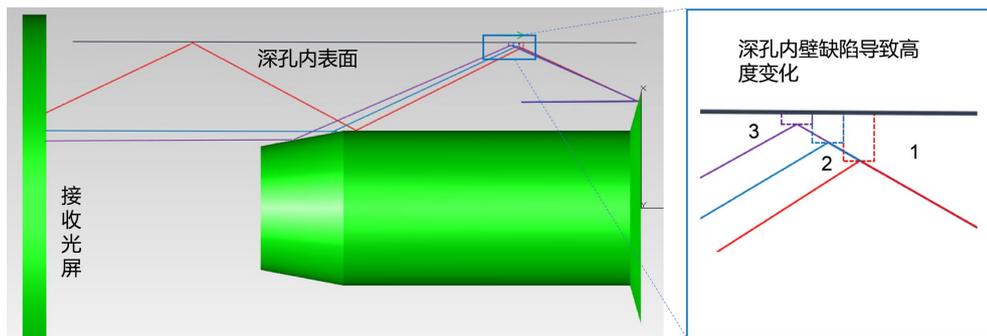
综上所述, 本节通过分析单根光线在内壁角度变化情况下的反射路径, 成功建立了深孔内壁角度变化与出射光线到轴线距离的图像之间的缺陷表征模型。

### 3. 截面仿真与模型验证

#### 3.1. 缺陷高度仿真平台构建及验证

为验证所建立的缺陷高度数学模型的准确性, 基于光学仿真软件 Trace Pro 搭建虚拟高度缺陷场景的仿真平台, 模拟深孔内表面存在高度缺陷时对光路传播路径的影响, 通过对单根光线反射路径的仿真分析, 提取光线受缺陷区域影响的三维坐标变化特征, 为模型提供有效支撑。

为实现对单根光线反射路径的精确分析, 首先将深孔内壁近似简化为一个平面结构, 并在该平面上设置一个突起点以模拟缺陷的存在。通过调整该突起点的高度参数, 可模拟不同高度缺陷对光线传播路径的影响。观察出射光线与孔轴之间的距离变化情况。如图 3 所示。



**Figure 3.** Schematic diagram of simulation changes in the height of surface defects inside deep holes  
**图 3.** 深孔内表面缺陷高度仿真变化示意图

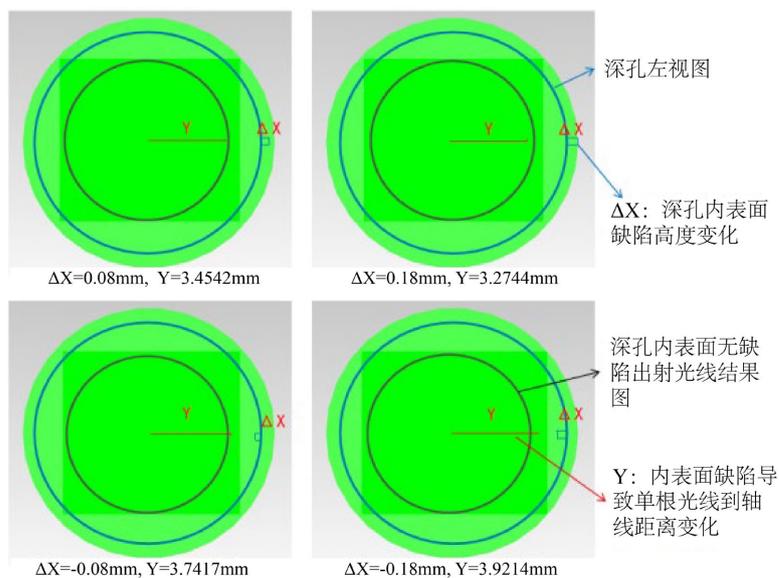
通过对高度缺陷参数的逐步调节, 得到深孔内表面高度变化的测量范围为 -0.18 mm 至 0.18 mm, 表 2 为不同高度变化条件下, 模型计算结果和仿真数据结果, 通过对比分析, 平均误差小于 0.0109 mm, 表明理论模型与仿真实验吻合度较高。

当内壁存在高度变化时, 成像结果与正常状态相比会产生明显移动。基于此, 可实现对单点高度缺陷的识别。进一步地, 根据出射光线与轴线之间的距离, 可反推出对应的内壁缺陷高度值。如图 4 所示。

**Table 2.** Simulation and model correspondence table of distance changes from the outgoing light to the axis due to different height variations

**表 2.** 不同高度变化导致出射光到轴线距离变化仿真和模型对应表

高度位置(mm)	理论模型计算轴线距离(mm)	仿真实验轴线距离(mm)
-0.18	3.9108	3.9214
-0.16	3.8749	3.8855
-0.14	3.8389	3.8495
-0.12	3.8029	3.8136
-0.10	3.767	3.7777
-0.08	3.731	3.7417
-0.06	3.695	3.7158
-0.04	3.6591	3.6699
-0.02	3.6231	3.6301
0	3.5872	3.595
0.02	3.551	3.562
0.04	3.5153	3.5211
0.06	3.4793	3.4941
0.08	3.4433	3.4542
0.10	3.4073	3.4182
0.12	3.3714	3.3823
0.14	3.3353	3.3463
0.16	3.2994	3.3104
0.18	3.2635	3.2744



**Figure 4.** Variation of simulation results under different defect heights

**图 4.** 不同缺陷高度情况下仿真结果变化图

单一截面的仿真验证虽然能够揭示特定位置处缺陷特征与图像形变之间的对应关系, 但难以满足实际检测中对复杂几何结构下深孔内壁不同高度缺陷分布的高精度识别需求, 为解决该问题, 在模型验证的基础上, 以步进方法进行多截面点云拼接方法, 对不同缺陷高度进行精确表征。

仿真结果表明, 深孔内壁的高度缺陷变化与其成像结果之间具有较好的线性对应关系。如图 5 所示。

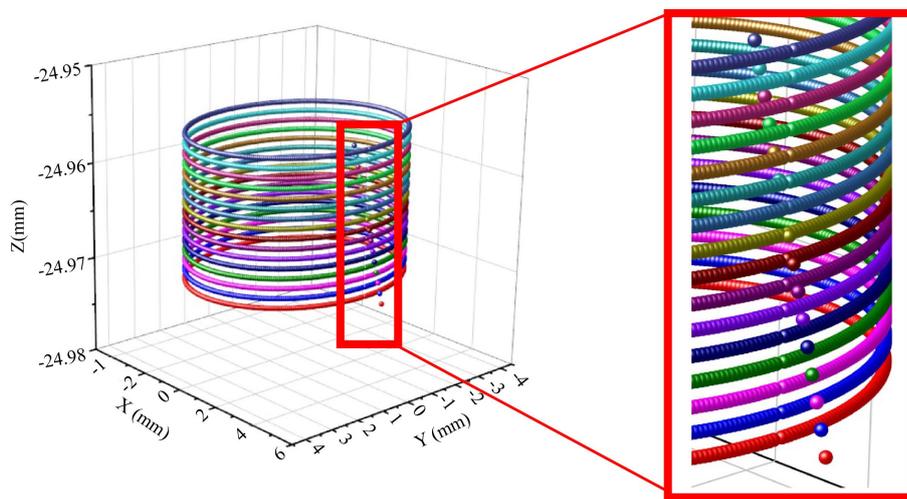


Figure 5. Splicing diagram of point clouds with different defect heights for a single ray  
图 5. 单根光线不同缺陷高度点云拼接图

将高度变化与理论模型计算的轴线距离函数曲线, 和高度变化与仿真模型结果的函数关系图进行对比分析。如图 6 所示。

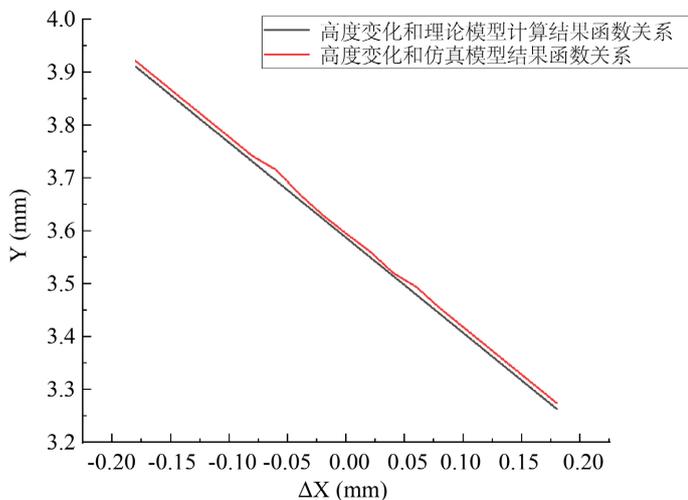


Figure 6. Comparison between simulation models and theoretical models at different heights  
图 6. 不同高度仿真模型和理论模型对比图

对比结果显示, 二者虽总体趋势一致, 但存在一定的误差。其误差产生主要原因是在理论建模过程中, 选取单根光线在标准位置, 进行模型计算, 但是在仿真过程中, 由于不可忽略光环厚度的影响, 当

光环厚度为 0.5 mm 时, 从而导致仿真数据和理论模型的理想计算结果之间存在误差。但在一定范围以内。

### 3.2. 缺陷角度仿真平台构建及验证

为验证在高度保持不变的条件下, 所建立的单根光线角度缺陷数学模型的准确性, 基于光学仿真软件 Trace Pro 搭建虚拟角度缺陷场景的仿真平台, 模拟深孔内表面存在角度缺陷时对光路传播路径的影响, 通过对单根光线反射路径的仿真分析, 提取光线受缺陷区域影响的三维坐标变化特征, 为模型提供有效支撑。

为实现对单根光线反射路径的精确分析, 首先将深孔内壁近似简化为一个平面结构, 并通过旋转该平面以模拟角度缺陷的存在。通过调节表面倾斜角度参数, 可模拟不同角度缺陷对光线传播路径的影响。观察出射光线与孔轴之间的距离变化情况。如图 7 所示。

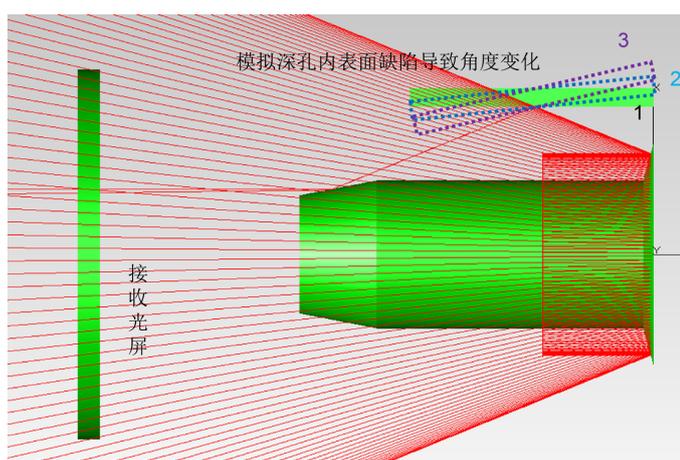


Figure 7. Schematic diagram of simulation of angle variation of surface defects in deep holes

图 7. 深孔内表面缺陷角度变化仿真示意图

通过对角度缺陷参数的逐步调节, 得到深孔内表面角度变化的测量范围为 $-0.4^{\circ}$ 至 $0.5^{\circ}$ , 表 3 为不同角度变化条件下, 模型计算结果和仿真数据结果, 通过对比分析, 平均误差小于 0.02488 mm, 表明理论模型与仿真实验吻合度较高。

Table 3. Simulation and model correspondence table of distance changes from the outgoing light to the axis due to different angle variations

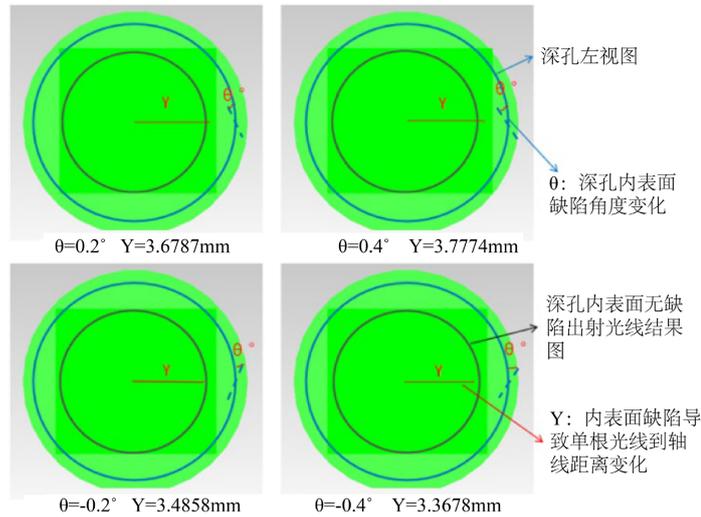
表 3. 不同角度变化导致出射光到轴线距离变化仿真和模型对应表

角度( $^{\circ}$ )	理论模型计算轴线距离(mm)	仿真实验轴线距离(mm)
-0.4	3.4053	3.3678
-0.3	3.4582	3.4278
-0.2	3.5065	3.4858
-0.1	3.5505	3.5418
0	3.5895	3.595
0.1	3.6228	3.635
0.2	3.6589	3.6787

续表

0.3	3.6978	3.7262
0.4	3.7396	3.7774
0.5	3.7846	3.8324

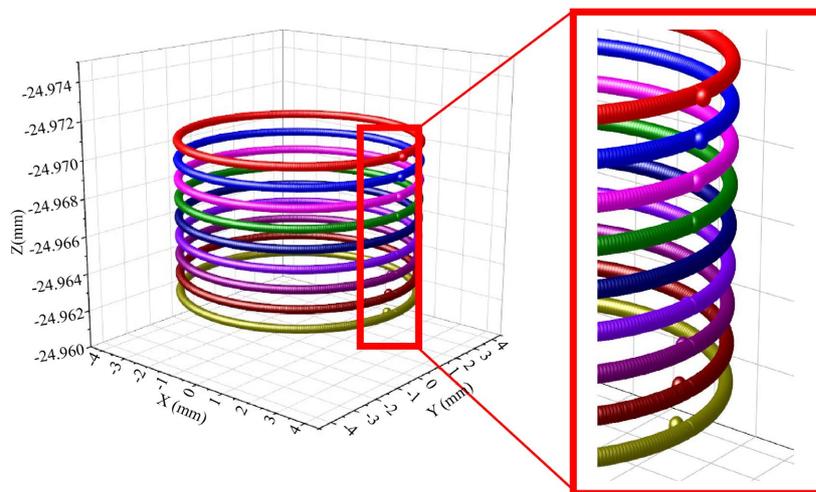
当内壁存在角度变化时, 成像结果与正常状态相比会产生明显移动。基于此, 可实现对单点角度缺陷的识别。进一步地, 根据出射光线与轴线之间的距离, 可反推出对应的内壁缺陷角度值。如图 8 所示。



**Figure 8.** Changes in simulation results under different defect angles  
**图 8.** 不同缺陷角度情况下仿真结果变化图

同理, 单一截面的仿真验证虽然能够揭示特定位置处缺陷特征与图像形变之间的对应关系, 但难以满足实际检测中对复杂几何结构下深孔内壁不同角度缺陷分布的高精度识别需求, 为解决该问题, 在模型验证的基础上, 以步进方法进行多截面点云拼接方法, 对不同缺陷角度进行精确表征。

仿真结果表明, 深孔内壁的角度缺陷变化与其成像结果之间具有较好的线性对应关系。如图 9 所示。



**Figure 9.** Splicing diagram of point clouds with different defect angles for a single ray  
**图 9.** 单根光线不同缺陷角度点云拼接图

将角度变化与理论模型计算的轴线距离函数曲线, 和角度变化与仿真模型结果的函数关系图进行对比分析。如图 10 所示, 对比结果显示, 二者虽总体趋势一致, 但存在一定的误差。但存在一定的误差。误差原因和高度误差相同, 同时误差在大角度变化中, 由于倾斜程度更大, 从而导致光线偏折更明显, 但符合检测范围。

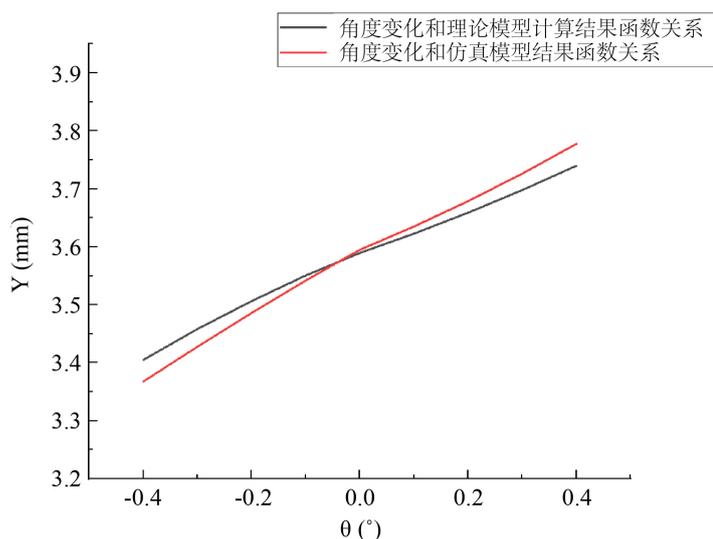


Figure 10. Comparison between simulation models and theoretical models from different angles

图 10. 不同角度仿真模型和理论模型对比图

## 4. 高度和角度缺陷实验验证

### 4.1. 高度缺陷实验验证

为验证 1.1 中所提出的缺陷高度表征模型的准确性, 开展了针对性实验研究。实验采用高精度 Z 轴微动平台对高度参数进行可控调节, 系统验证了深孔内壁高度缺陷对单根出射光线偏移量的影响规律。

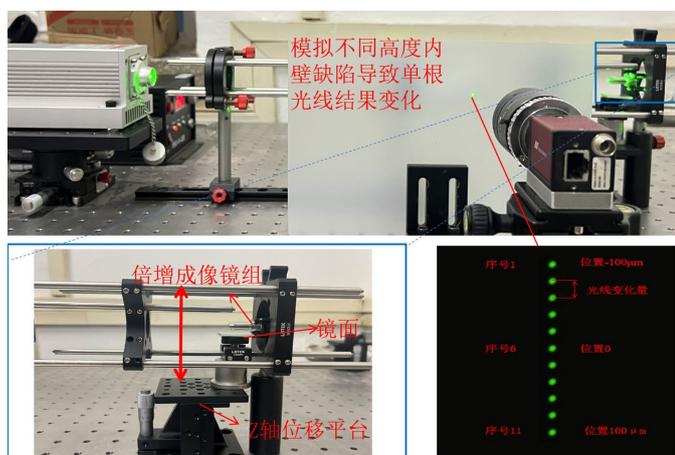


Figure 11. Experimental process diagram of simulating defect height detection system

图 11. 模拟缺陷高度检测系统实验过程图

依托前期搭建的深孔内表面检测平台, 考虑到在单根光线分析条件下难以准确确定孔道轴线以及缺陷至轴线之间的实际距离, 实验中采用了间接方法——通过微动平台的可控位移与出射光线在接收面上的成像位移变化来验证所建立数学模型的有效性, 实验过程如图 11 所示。

具体步骤如下: 首先, 通过距离调节确保接收光屏到 45°镜再到倍增镜组之间的距离固定为 150 mm, 并保持相机与接收光屏之间的相对位置不变。随后对相机进行标定, 建立图像像素坐标与实际空间坐标之间的映射关系, 为后续数据处理提供精确转换依据。然后在模拟缺陷高度变化的过程中, 利用高精度 Z 轴微动平台以 0.01 mm 的步长逐级移动平台位置, 模拟不同高度的内壁缺陷情形。每次完成位移调整后, 均通过工业相机采集接收屏上的成像图像。通过 matlab 中图像处理提取图像中亮度最高点坐标。基于像素位置与空间位置的对应关系, 进一步建立位移量与出射光线偏移量之间的定量映射, 见表 4。

**Table 4.** Experimental results of distance variation of emitted light caused by different height changes  
**表 4.** 不同高度变化导致出射光线实验结果距离变化表

序号	高度位置(mm)	实验得到光线变化量(mm)
1	-0.10	—
2	-0.08	-0.337
3	-0.06	-0.309
4	-0.04	-0.293
5	-0.02	-0.324
6	0	-0.355
7	0.02	-0.33
8	0.04	-0.385
9	0.06	-0.262
10	0.08	-0.381
11	0.10	-0.446

通过调节微动平台实现不同高度缺陷的模拟, 得到各高度条件下单根出射光线之间位置变化, 并与理论模型进行对比验证。每个点相对于上一个点的变化量均为 0.02 mm, 理论模型中, 出射光线变化量 0.03596 mm, 通过正负号来表征变化方向。实验光线位置变化量和模型变化量平均误差为 0.00438 mm。充分验证了所建立模型准确性。

#### 4.2. 角度缺陷实验验证

为验证 1.2 节中所提出的缺陷角度表征模型的可靠性, 本节开展了针对性实验研究。实验通过双微动平台协同调节, 系统验证深孔内壁角度缺陷对单根出射光线偏移量的影响规律。

依托前期搭建的深孔内表面检测平台, 采用两组高精度微动平台分别控制平板镜两端的高度变化, 通过调节两平台之间的高度差, 精确模拟深孔内壁存在角度缺陷的场景。具体而言, 逐步增大高度差, 使平板镜发生可控角度偏转, 从而实现动态偏移角  $\theta$  (范围为  $-0.2^\circ$  至  $0.3^\circ$ ) 的连续调节, 以模拟不同倾斜角度下的缺陷情况。实验装置如图 12 所示。

实验过程和 3.1 流程相同, 同时结合 1.2 中模型公式分析可知, 当深孔内表面存在角度缺陷时, 出射光线将因受表面法向变化影响而产生偏折, 无法保持与孔轴线方向的平行性。因此, 应带入  $DI = 150\text{ mm}$  以确保模型计算与实际光学路径相一致。

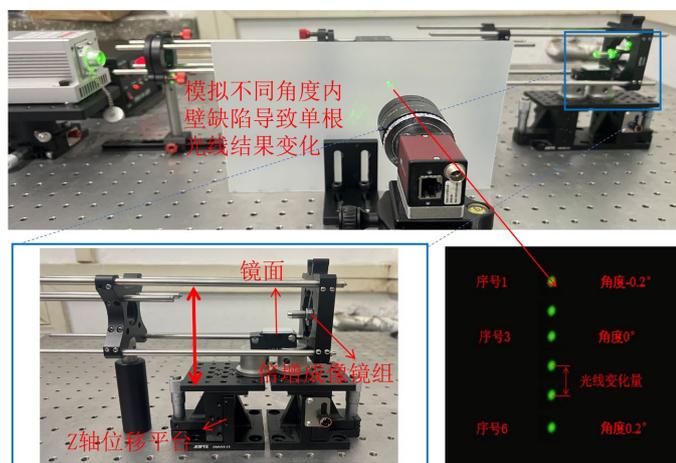


Figure 12. Construction diagram of experimental bench equipment  
图 12. 实验台设备搭建图

Table 5. Distance variation of emitted light caused by different angle changes

表 5. 不同角度变化导致出射光线实验结果距离变化表

序号	角度(°)	实验得到光线变化量( $\mu\text{m}$ )
1	-0.2	—
2	-0.1	0.0573
3	0	0.0532
4	0.1	0.0531
5	0.2	0.0491
6	0.3	0.0564

通过调节微动平台实现不同角度缺陷的模拟, 得到各角度条件下单根出射光线之间位置变化, 并与理论模型进行对比验证。每个点相对于上一个点的变化量均为  $0.1^\circ$ , 可根据 1.2 中不同缺陷角度的理论差值, 分别求出不同角度的变化量, 再和表 5 中实验测量得到的光线变化量差值, 从而求得实验光线位置变化量和模型变化量平均误差为  $0.01556 \text{ mm}$ 。充分验证了所建立数学模型准确性, 见表 5。

在实际实验过程中, 由于微小结构误差、环境干扰及设备精度限制, 从而导致光线在传播过程中出现累计误差, 虽然通过精密加工及实验平台准确搭建缩减误差, 但由于误差随机不可控性, 从而导致实验误差较大, 但同样符合测量要求。

## 5. 结束语

本研究小孔径深孔内表面高度及角度缺陷难以检测的难题, 提出了一种基于光路分析的缺陷特征内窥成像方法。首先, 基于单根光线路径变化分析, 构建缺陷高度与角度变化对出射光线到轴线距离的缺陷表征模型。然后根据高度仿真验证得到模型的平均误差为  $0.0109 \text{ mm}$ , 根据角度仿真验证得到平均误差为  $0.02488 \text{ mm}$ , 验证了模型的准确性并通过多截面点云拼接技术, 实现深孔内壁不同缺陷导致出射光线变化结果沿轴向分布的三维重构。表征在不同缺陷条件下对出射光线结果的影响。最后通过试验台模拟缺陷高度变化和角度变化, 高度变化过程中, 实验光线位置变化量和模型变化量平均误差为  $0.00438 \text{ mm}$ , 角度变化过程中, 实验光线位置变化量和模型变化量平均误差为  $0.01556 \text{ mm}$ , 证明可根据出射光

线变化结果逆向分析得到深孔内壁缺陷数值。尽管在深孔内表面检测问题取得一定成果, 但仍有若干方面值得在后续研究中进一步深入探索, 在提升整体检测精度方面仍具有广阔空间, 可进一步优化光源均匀性、镜组成像分辨率以及图像处理算法, 以实现更高分辨率的微小缺陷识别。同时本研究主要针对高度缺陷与角度缺陷进行了分项建模, 未来可探索将二者融合为一体化检测模型, 提升对复合缺陷类型的识别能力。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(52205554)。

## 参考文献

- [1] 闫兴涛, 李福, 马小龙, 等. 红外光纤传像系统像质优化方法研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(1): 138-145.
- [2] 李忠虎, 李康, 闫俊红, 等. 基于圆结构光的管道内表面缺陷检测方法研究[J]. 计算机仿真, 2020, 37(9): 368-372.
- [3] 黄战华, 岳富军, 张光, 等. 火炮身管内壁检测系统的数字处理方法研究[J]. 应用光学, 2020, 41(2): 248-256.
- [4] 曹建树, 姬保平, 纪卫克. X80 管道内表面裂纹的激光超声检测方法 with 试验[J]. 油气储运, 2021, 40(12): 1365-1369.
- [5] 李耀明, 陈淑琴, 张煌. 基于激光谐波调制的深孔内壁三维面型分析系统[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(3): 228-233.
- [6] 夏康, 洪汉玉, 章秀华. 基于点阵光谱共焦的盲孔自动化三维测量[J]. 计算机与数字工程, 2022, 50(9): 2030-2036.
- [7] Liang, J., Song, X., Wang, K. and Han, X. (2024) An On-Machine Measuring Apparatus for Dimension and Form Errors of Deep-Hole Parts. *Sensors*, **24**, Article 7847. <https://doi.org/10.3390/s24237847>
- [8] 陈振亚, 马卓强, 李翔, 等. 圆结构光系统深孔圆度测量方法研究[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(4): 202-208.
- [9] 马瑞, 吴柏荣, 李保文, 等. 基于光谱共焦原理的大深径比内孔参数旋转测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(7): 207-215.
- [10] Zhao, H. (2023) Design of a Photoelectric Measuring Robot for Straightness of Deep/Blind Hole with Automatic Centering Function. *Manufacturing Technology*, **23**, 739-749. <https://doi.org/10.21062/mft.2023.098>
- [11] 杨泽南, 许俊杰, 赵婉蓉, 等. 基于锥束 CT 的飞秒激光加工气膜孔几何特征测量及表征[J]. 航空动力学报, 2023, 38(5): 1198-1209.
- [12] Liu, L., Zhang, H., Jiao, F., Zhu, L. and Zhang, X. (2023) Review of Optical Detection Technologies for Inner-Wall Surface Defects. *Optics & Laser Technology*, **162**, Article 109313. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109313>
- [13] Shi, P., Tian, Z., Sheng, Q. and Liu, P. (2023) A Method for Correcting Endoscopic Images to Measure the Size of Defects on the Inner Surface of a Hole. *Applied Sciences*, **13**, Article 8597. <https://doi.org/10.3390/app13158597>
- [14] 叶涛, 陶鸿景, 欧阳煜, 等. 基于全向结构光视觉传感器的管道内壁缺陷测量实验设计[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(1): 115-122.
- [15] 靳极升, 马卫红, 田会, 等. 基于图像分析的锥形管内壁形变检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(12): 177-186.
- [16] Zhao, X., Du, H. and Yu, D. (2024) Improving Measurement Accuracy of Deep Hole Measurement Instruments through Perspective Transformation. *Sensors*, **24**, Article 3158. <https://doi.org/10.3390/s24103158>
- [17] Liu, Y., Hu, Y., He, G. and Chen, B. (2024) Research on Deep Hole and Large Thread Defect Detection Based on Machine Vision Fusion. In: S. Shmaliy, Y., Ed., *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer, 490-495. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-6937-7\\_59](https://doi.org/10.1007/978-981-97-6937-7_59)
- [18] 盛强, 郑建明, 陈婷, 等. 基于内窥图像畸变校正的孔内表面尺寸测量方法[J]. 光学学报, 2023, 43(3): 122-131.
- [19] 赵媛媛, 于洵, 李敏, 等. 炮管内壁疵病信息检测系统设计[J]. 光学与光电技术, 2024, 22(1): 52-59.
- [20] 梁健, 曹煜磊, 冯檀源, 等. 微管视界——微细管道内壁缺陷检测仪[J]. 物联网技术, 2025, 15(2): 2.
- [21] Zhao, X. and Wu, B. (2021) Algorithm for Real-Time Defect Detection of Micro Pipe Inner Surface. *Applied Optics*, **60**, 9167-9179. <https://doi.org/10.1364/ao.438287>
- [22] Ren, Z., Fang, F., Yan, N. and Wu, Y. (2022) State of the Art in Defect Detection Based on Machine Vision. *International*

---

*Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, **9**, 661-691.

<https://doi.org/10.1007/s40684-021-00343-6>

- [23] 梁书溢, 何亚平, 唐德东, 等. 基于改进 YOLOv5 的天然气管道内壁缺陷检测[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2023, 25(4): 74-79.
- [24] 冷祥智, 陶卫军. 基于 YOLOv5 算法的炮管内壁污渍识别与定位技术[J]. 兵工自动化, 2024, 43(4): 1-6.
- [25] Li, W., Solihin, M.I. and Nugroho, H.A. (2024) RCA: Yolov8-Based Surface Defects Detection on the Inner Wall of Cylindrical High-Precision Parts. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **49**, 12771-12789.  
<https://doi.org/10.1007/s13369-023-08483-4>