

基于自制光栅生成莫尔条纹的微小位移测量装置研究

刘芋良¹, 付采奕¹, 赵渊涛², 赵佳欣¹, 李庆沅¹, 曾玉婷¹, 邓木兰¹,
李思潜³, 卢恒¹, 肖啸^{1*}

¹乐山师范学院物理与光电工程学院, 四川 乐山

²乐山师范学院电子信息与人工智能学院, 四川 乐山

³乐山师范学院数学与统计学院, 四川 乐山

收稿日期: 2026年2月16日; 录用日期: 2026年3月9日; 发布日期: 2026年3月13日

摘要

针对传统精密光栅制备工艺复杂、成本高昂的问题, 本研究基于两组周期性光栅几何叠加产生莫尔条纹的挡光效应机理, 利用其显著的位移放大特性, 研制了一种利用自制低成本光栅的微小位移测量装置。通过高分辨率菲林胶片打印技术制备亚毫米级直线光栅, 并结合XYZR四轴位移平台与USB摄像头模组构建硬件系统。配合Python-OpenCV开发的数字刻线辅助系统, 在实时视频流上叠加20等分虚拟标尺, 通过计算机辅助目视测量显著提升了读数分辨率。实验数据表明: 在光栅常数为0.7 mm、打印精度不低于4000 dpi的条件下, 测量相对误差低至0.28%。系统参数分析证实, 莫尔条纹的测量特性仅取决于光栅常数, 与栅线宽度的分配比例无关。该研究为高精度非接触位移测量提供了一种简便、实用的低成本技术途径。

关键词

莫尔条纹, 微小位移, 自制光栅, 光栅常数, 打印精度

Research on a Micro-Displacement Measurement Device Generating Moire Fringes Based on a Self-Fabricated Grating

Yuliang Liu¹, Caiyi Fu¹, Yuantao Zhao², Jiaxin Zhao¹, Qingfeng Li¹, Yuting Zeng¹,
Mulan Deng¹, Siqian Li³, Heng Lu¹, Xiao Xiao^{1*}

¹College of Physics and Optoelectronic Engineering, Leshan Normal University, Leshan Sichuan

²College of Electronic Information and Artificial Intelligence, Leshan Normal University, Leshan Sichuan

*通讯作者。

文章引用: 刘芋良, 付采奕, 赵渊涛, 赵佳欣, 李庆沅, 曾玉婷, 邓木兰, 李思潜, 卢恒, 肖啸. 基于自制光栅生成莫尔条纹的微小位移测量装置研究[J]. 现代物理, 2026, 16(1): 1-13. DOI: 10.12677/mp.2026.161001

Abstract

Addressing the complex manufacturing processes and high costs associated with traditional precision gratings, this study leverages the light-blocking effect mechanism of Moire fringes generated by the geometric superposition of two sets of periodic gratings. Utilizing their significant displacement amplification characteristics, we developed a micro-displacement measurement device employing a low-cost, self-fabricated grating. Submillimeter-scale linear gratings were fabricated using high-resolution film printing technology. The hardware system was constructed by integrating an XYZR four-axis displacement stage with a USB camera module. A computer-assisted visual measurement system was developed using Python and OpenCV. By overlaying a calibrated digital reticle on the live video feed, a 20-segment subdivision method was implemented, which significantly enhanced the measurement resolution of the system. Experimental data demonstrate that under conditions of a grating constant of 0.7 mm and a printing precision of no less than 4000 dpi, the relative measurement error is as low as 0.28%. System parameter analysis confirms that the measurement characteristics of Moire fringes depend solely on the grating constant and are independent of the distribution ratio of grating line widths. This research provides a simple, practical, and low-cost technical approach for high-precision non-contact displacement measurement.

Keywords

Moire Fringes, Micro-Displacement, Homemade Grating, Grating Constant, Print Accuracy

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

莫尔条纹是由两组周期结构几何叠加形成的物理机理，凭借其显著的位移放大特性，已广泛应用于光学测量、结构检测及精密传感领域。随着智能感知与图像处理技术的演进，该传统机理正与现代精密测控技术深度融合，为高精度位移测量开辟了新路径。然而，传统精密光栅制备工艺复杂且成本高昂，限制了相关实验探索与大规模推广。本研究提出利用高分辨率菲林输出工艺制备低成本光栅的快速方法，具有操作简易、重现性好的显著优势[1]。基于该自制光栅构建的测量装置，在大幅降低研制成本的同时确保了微米级测量精度，为科研及工程应用提供了实用的技术方案。

2. 实验原理

2.1. 直线光栅结构参数

实验采用激光菲林输出技术在透明胶片上制备直线光栅。如图 1 所示，不透光的黑色条纹称为栅线，其宽度为 a ；相邻栅线间的透光区域称为缝隙，宽度为 b 。光栅常数 $d = a + b$ 表征了光栅的空间周期。其倒数 $N = 1/d$ 定义为光栅密度，即单位长度内分布的狭缝数量。

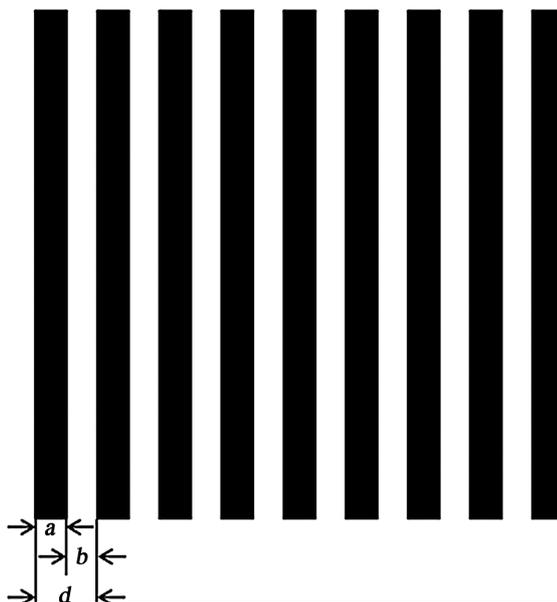


Figure 1. Linear optical grating
图 1. 直线光栅

2.2. 莫尔条纹形成机制

将两组参数相同的直线光栅刻画面相向叠合,并使栅线间形成微小交角。在近于垂直栅线的方向上,由几何叠加形成的明暗相间条纹即为莫尔条纹[2]。其物理本质是基于两光栅重叠区域遮光效应产生的光强空间调制过程,形成原理如图 2 所示。

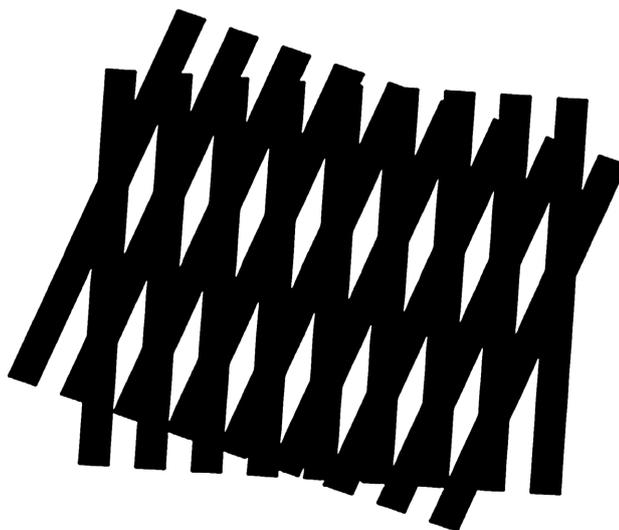


Figure 2. Schematic diagram of Moire fringes formation
图 2. 莫尔条纹形成原理图

2.3. 莫尔条纹方程推导

莫尔条纹方程的推导涵盖光栅常数相等与不等两种情形。出于实验效率与计算复杂度的考量,本文采用光栅常数相等的情况进行分析。在光栅结构中,条纹宽度 B 取决于明暗纹间距。设主、副光栅夹角

为 θ ，则条纹宽度 B 、夹角 θ 与光栅常数 d 间存在如图3所示的几何映射关系[3]。

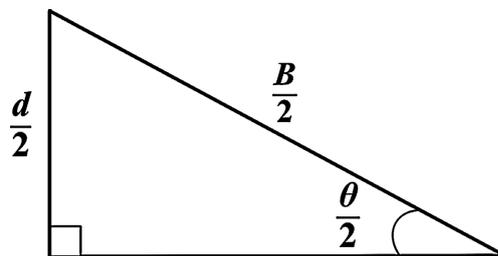


Figure 3. Triangular relationship diagram
图3. 三角关系图

利用上述三角关系图可推导莫尔条纹宽度、夹角以及光栅常数之间的关系：

$$B = \frac{d}{\sin \frac{\theta}{2}}. \quad (1)$$

在小角度近似条件下($\theta \ll 1$)，公式(1)可利用泰勒展开简化为：

$$B = \frac{2d}{\theta}, \quad (2)$$

此即光栅测量的基本方程[4]，上式(2)揭示了条纹对栅距具有倍的放大作用。

2.4. 莫尔条纹的应用特性

2.4.1. 运动同步性

莫尔条纹的运动行为与光栅平移严格同步。当光栅沿垂直栅线方向平移一个栅距 d 时，条纹相应移动一个周期 B ；若平移反向，条纹运动方向亦随之反转[5]。

2.4.2. 位移放大作用

当交角 θ 极小时，条纹间距 B 将栅距 d 放大约 $1/\theta$ 倍。这使得微米级的光栅位移可映射为毫米级的条纹变动[6]，极大地降低了空间分辨难度。测得条纹移动周期数 k 后，位移 ΔL 计算公式为：

$$\Delta L = kd, \quad (3)$$

公式(3)中， d 为光栅栅距， k 为莫尔条纹的移动周期数。

2.4.3. 误差均化效应

条纹由重叠区域内多条栅线积分形成，该机制对局部光栅缺陷具有空间平均化作用，显著增强了测量系统的抗噪性与鲁棒性。

3. 实验方案

3.1. 实验装置总览

实验装置组装架构如图4所示。系统集成高精度XYZR四轴位移平台、自制菲林光栅组以及计算机视觉捕捉模块。

3.2. 工作原理

实验中，副光栅通过光学夹持器固定于位移平台，主光栅置于配备LED背景光源与毛玻璃的固定

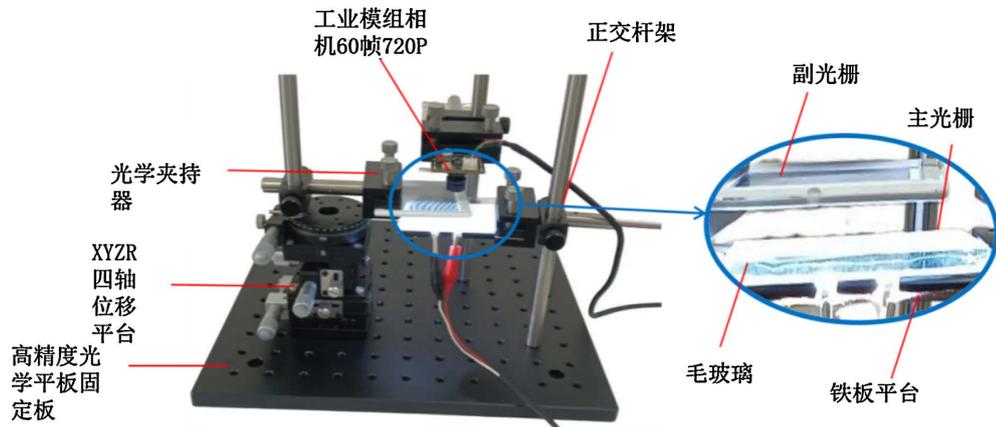


Figure 4. Experimental setup diagram
图 4. 实验装置图

平台上，以确保照明光场的均匀分布。旋转螺旋测微器驱动副光栅产生精密位移，诱导莫尔条纹同步移动。系统采用 USB 摄像头模组实时采集图像，借助 Python-OpenCV 库调用 USB 摄像头进行实时成像，编写程序在视频画面层叠加高精度的虚拟“十字准线”与 20 等分刻度网格。实验时，观察者依据屏幕上的数字刻线对莫尔条纹的移动进行计数与细分估读，以此替代传统的机械读数，比较莫尔条纹测量位移与螺旋测微器参考位移的相对误差，验证测量方案的可行性。

3.3. 光栅位移修正

在常规莫尔条纹测量中，位移与条纹移动数满足 $\Delta L = kd$ 。由于位移量通常表现为光栅常数 d 的离散整数倍，其测量分辨率受限于光栅常数，难以满足高精度连续测量的需求。

为突破物理栅距对精度的限制，本研究利用计算机视觉辅助技术，在屏幕上构建虚拟细分标尺，将单个莫尔条纹周期等分为 20 个子区间见图 5，从而实现准连续位移测量并显著提升系统分辨率。修正后的光栅的实际位移 x 与莫尔条纹移动的周期数 k 的关系为：

$$\Delta L' = \left(p + \frac{q}{20} \right) d, \quad (4)$$

公式(4)中， p 为完整条纹移动周期数， q 为未满一个周期的细分间隔数， d 为光栅常数。该细分算法有效地扩大了测量范围并降低了系统量化误差。

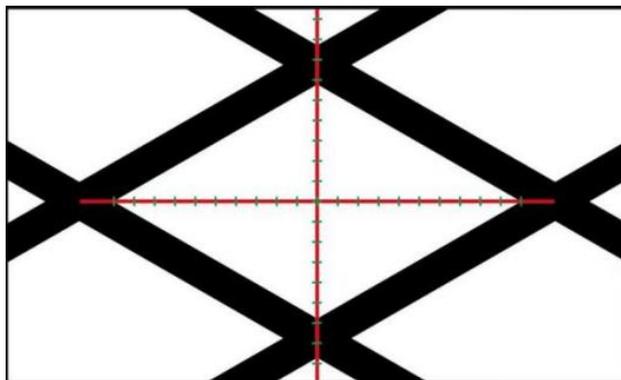


Figure 5. Theoretical diagram of Moire fringes measurement
图 5. 测量莫尔条纹理论图

4. 实验内容

4.1. 直线光栅制作

本研究利用绘图软件设计具有不同常数(如 0.7 mm、0.6 mm 等)的光栅模型, 并采用激光菲林输出技术转印至透明菲林胶片上。该工艺具有显著的成本优势: 单张 16 开菲林售价约为 15 元, 单件 5 cm × 5 cm 规格的光栅成本仅需 1.67 元左右, 有效实现了实验器材的低成本自制。实验选用 LED 背光源提供照明, 部分成品样片如图 6 所示。

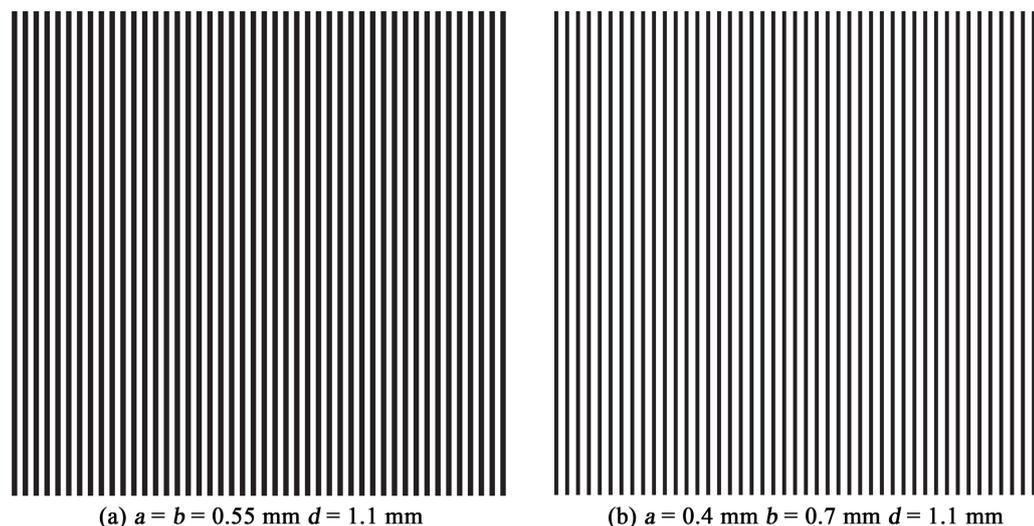


Figure 6. Samples of fabricated linear gratings
图 6. 部分直线光栅实物样片

4.2. 实验方案与流程控制

4.2.1. 装置架构组装

本实验装置的架构组装以高精度光学平板为基准, 旨在构建一个稳定的精密位移监测系统。首先, 利用支撑杆架与螺丝将 XYZR 四轴位移平台稳固于基座, 确保整体结构的机械可靠性; 在照明端, 于固定铁板平台上依次布置 LED 背光源、毛玻璃及自制菲林主光栅, 借助毛玻璃的散射效应提供均匀的背景光源; 随后, 副光栅经由光学夹持器水平固定并与位移平台耦合, 通过微调使其栅线垂直于位移方向, 并与主光栅形成微小交角以诱发莫尔效应; 最后, 通过工业相机建立数字化捕捉链路, 实现对条纹动态周期变化的实时监测与高精度读数。在此耦合过程中, 两胶片间隙(Gap)的严格限位至关重要。间隙过大将导致条纹对比度急剧退化, 过小则易引发胶片摩擦形变。本实验通过微调夹持器高度, 在确保主副光栅平行且绝对非接触的前提下, 将 Gap 严控在亚毫米量级, 从而保障了高对比度干涉条纹的稳定输出。

4.2.2. 信号调准与基准定位

系统初始化阶段, 首先调节工业相机焦距, 确保探测平面获取对比度最优的莫尔条纹图像。随后微调相机位姿, 使条纹菱形的长对角线与数字化十字准线的水平轴向保持平行如图 7 所示。在此基础上, 利用摄像头镜头组的动态缩放功能对成像放大倍率进行精细调节, 确保屏幕上单个完整的莫尔条纹明暗周期严格对应于虚拟标尺的 20 等分刻度总长, 从而保证后续细分读数公式的几何有效性。接着, 选取视场中特定的莫尔条纹, 调整位移平台使其中心对角线恰好被十字准线平分。完成上述基准对齐后, 记录螺旋测微器在 x 轴正方向的初始绝对读数 d_1 。

4.2.3. 动态数据采集流程

在准静态缓慢旋转螺旋测微器的过程中，系统同步监测并计数显示终端上莫尔条纹跨越数字网格的数量。待受控位移行程结束后，读取并记录螺旋测微器的最终示数 d_2 。通过示数差值计算出位移参考值 $\Delta d = |d_1 - d_2|$ ，该数值将作为基准，用于验证基于条纹计数反演的测量位移之准确度。

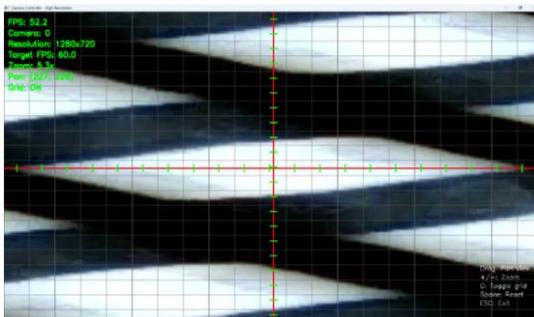


Figure 7. Measurement of Moire pattern effect
图 7. 测量莫尔条纹效果图

4.3. 实验环境控制与操作规范

4.3.1. 界面洁净度控制

在更换或安装菲林胶片时，必须确保胶片与毛玻璃的物理接触面处于无尘、无杂质状态，以消除局部杂质引入的相位畸变或遮挡误差。

4.3.2. 信号信噪比优化

莫尔条纹的调节过程需具备极高的精确度，必须通过微调确保获取条纹边界锐利、对比度鲜明的干涉图像，从而降低数字化读数时的相位识别误差。

5. 实验测量结果与分析

5.1. 实验测量结果

5.1.1. 不同打印分辨率(DPI)的测量结果

在利用菲林胶片制备矢量光栅时，打印分辨率(DPI)是决定图形边缘锐度与位移测量精度的核心参数。本研究在光栅常数统一固定为 0.7 mm 的工况下，测试并记录了系统随 DPI 从 100 提升至 5000 时的位移测量表现。表 1 汇总了各组 DPI 规格下的实验测量数据。

Table 1. Experimental measurement data for different print resolutions (DPI) at a grating constant of 0.7 mm
表 1. 光栅常数为 0.7 mm 时不同打印精度(DPI)的实验测量数据统计

打印精度(DPI)	光栅常数 d (mm)	相对误差(%)
5000	0.7	0.28
4000	0.7	0.29
3000	0.7	0.62
2500	0.7	0.98
2000	0.7	1.03
1500	0.7	1.07

续表

1000	0.7	1.06
500	0.7	1.35
250	0.7	1.43
100	0.7	1.89

5.1.2. 栅线宽度(a)和缝隙宽度(b)测量结果

直线光栅的核心几何参数由光栅常数 d 表征, 其数值定义为栅线宽度 a 与缝隙宽度 b 之代数和。在常规的莫尔条纹理论模型中, 位移放大特性通常被认为仅由空间周期 d 决定, 而栅线与缝隙的具体宽度分配(即占空比)对测量精度的潜在影响尚未得到充分的实验验证。为此, 本研究在保持光栅常数 d 恒定的前提下, 通过调整 a 与 b 的数值比例设计了多组受控对比实验, 并将其测量结果与先前数据进行比对。表 2 详尽记录了在打印分辨率为 5000 dpi 的工况下, 不同栅线与缝隙宽度组合的实验数据, 旨在从实验角度探明莫尔条纹特性与光栅空间周期的排他相关性。

Table 2. Measurement data comparison for various combinations of grid line widths and gap widths

表 2. 不同栅线宽度与缝隙宽度组合的测量数据对比

光栅常数 d (mm)	栅线宽 a (mm)	缝隙宽 b (mm)
1.1	0.7	0.4
1.0	0.3	0.7
0.9	0.6	0.3
0.8	0.2	0.6

5.1.3. 光栅常数(d)和打印分辨率(DPI)之间的关联结果

在莫尔条纹位移测量系统中, 光栅常数 d 是决定系统分辨力与精度的核心参数。理论上, 减小 d 值能显著提升测量灵敏度, 但在实践中受限于图像采集系统的空间分辨率, 过小的光栅常数易导致条纹对比度劣化及成像模糊。本节系统汇总了在不同打印分辨率(DPI)工况下, 各光栅常数对应的实验表征数据见表 3, 旨在探究硬件约束与制造工艺对系统准确度的耦合影响规律。

Table 3. Statistical measurement results for different grating constants

表 3. 不同光栅常数下的测量结果统计

DPI	光栅常数 d (mm)	相对误差(%)	DPI	光栅常数 d (mm)	相对误差(%)
5000	0.7	0.28	1500	0.6	1.16
4000	0.7	0.29	1000	0.6	1.45
3000	0.7	0.62	500	0.6	1.48
2500	0.7	0.98	250	0.6	1.74
2000	0.7	1.03	100	0.6	1.75
1500	0.7	1.07	5000	0.5	1.04
1000	0.7	1.06	4000	0.5	1.22
500	0.7	1.35	3000	0.5	1.24
250	0.7	1.43	2500	0.5	1.34

续表

100	0.7	1.89	2000	0.5	1.39
5000	0.6	0.78	1500	0.5	1.45
4000	0.6	0.77	1000	0.5	1.59
3000	0.6	0.87	500	0.5	1.58
2500	0.6	1.14	250	0.5	1.71
2000	0.6	1.35	100	0.5	1.76

5.2. 实验数据分析

5.2.1. 不同打印分辨率(DPI)结果分析

图 8 展示了相对误差随打印分辨率(DPI)的变化曲线。分析表明,在固定光栅常数下,测量精度随 DPI 提升显著增加。当 DPI 达到 4000 后,相对误差趋于平稳并收敛至 0.30%左右,这表明系统精度已受限于相机模组的空间分辨率瓶颈,进一步提升精度需升级硬件采样性能。

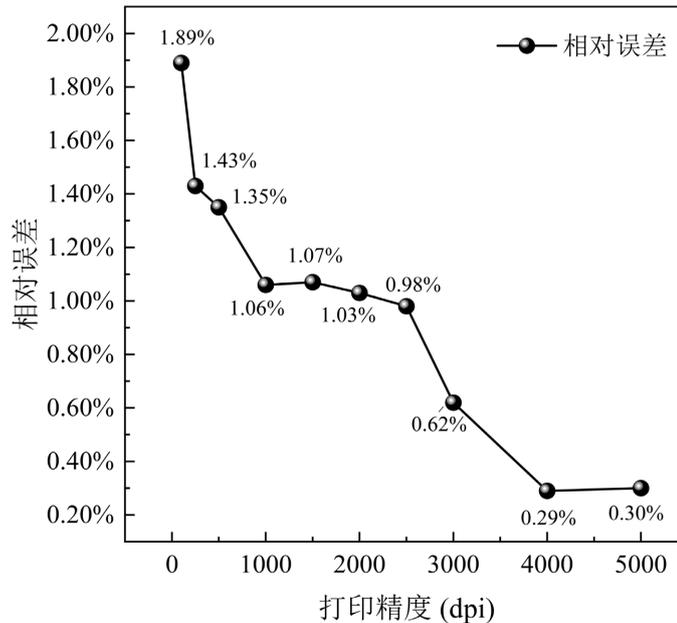


Figure 8. Experimental data chart for different print resolutions at a grating constant of 0.7

图 8. 光栅常数为 0.7 时不同打印精度实验数据图

对比图 9 可知, DPI 直接决定了光栅边缘的形貌质量。在 100 dpi 条件下,光栅边缘呈现明显的锯齿效应(Aliasing),导致条纹光强分布失真并引入较大的读数偏差。相比之下,5000 dpi 下的条纹边缘清晰光滑,确保了图像处理算法在细分读数时能够提取高信噪比的特征数据,从而实现了微米级的高精度位移反演。

需要进一步指出的是,本研究的光栅原图为绝对矢量设计,并采用高精度激光曝光工艺转印,物理机制上避免了传统喷墨打印易出现的液态墨点晕染与堆积现象。因此,图 9 中低 DPI 下的边缘锯齿效应,纯粹源于矢量图形光栅化(Rasterization)过程中的空间离散化误差。当 DPI 提升至 4000 以上时,该离散量化误差已完全隐匿于相机的空间分辨极限之下,从而从底层工艺保障了亚像素细分算法的高效提取。

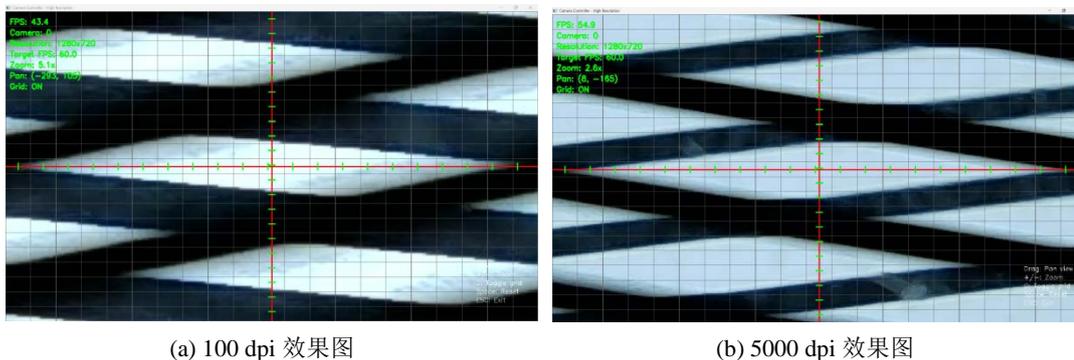


Figure 9. Different renderings at high and low dpi
图 9. 高 dpi 和低 dpi 下不同的效果图

5.2.2. 栅线宽度(a)和缝隙宽度(b)结果分析

针对相同光栅常数 d 设计了多种栅线宽度 a 与缝隙宽度 b 的组合配置, 旨在验证莫尔条纹特性与单一几何参数的关联性。实验测量结果如图 10 所示。

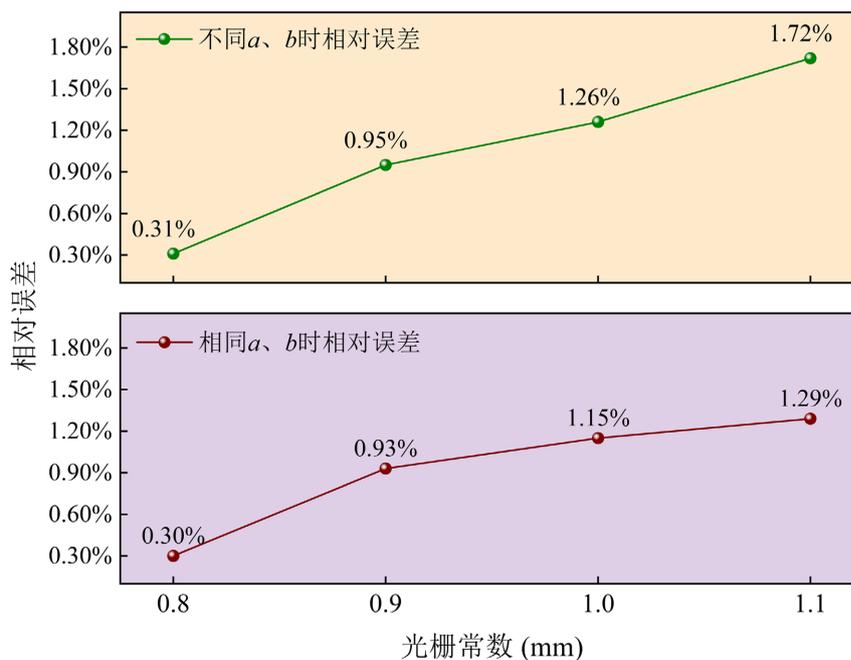


Figure 10. Measurement data for different grid line widths and gap widths
图 10. 不同栅线宽度(a)与缝隙宽度(b)测量数据

由图 10 可知, 在 5000 dpi 的打印精度下, 尽管 a 与 b 的数值比例各异, 不同组合下的系统相对误差随光栅常数变化的趋势保持高度一致。这一现象充分证明: 莫尔条纹的位移放大特性仅取决于光栅的空间周期 d , 而与内部栅线宽度及缝隙宽度的分配比例(即占空比)无关。该结论为自制光栅的参数设计提供了重要的理论依据, 即在制备过程中只需精准控制光栅常数, 即可确保测量系统的稳定性。

5.2.3. 光栅常数(d)和打印分辨率(DPI)之间的关联结果分析

为进一步探讨系统误差的演化规律, 本研究利用热力图 11, 表征了不同打印分辨率(DPI)与光栅常数下的实验相对误差分布。

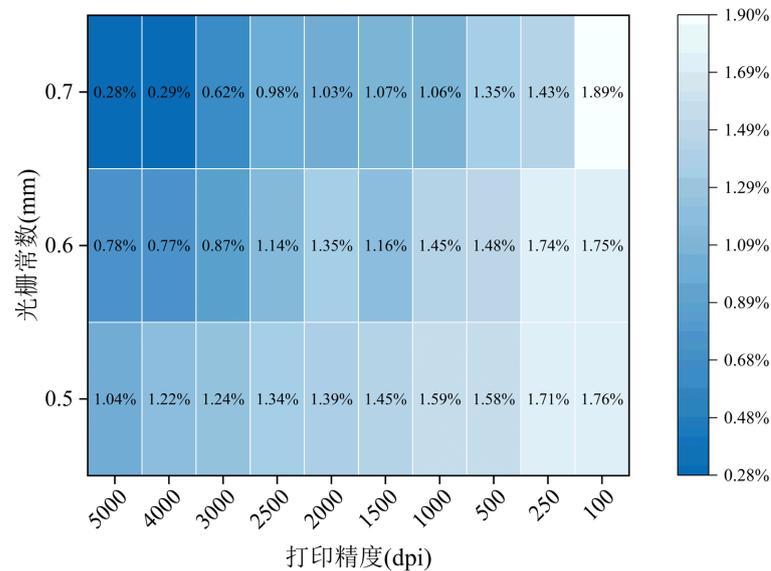


Figure 11. Heatmap of the relationship between different printing resolutions and grating
图 11. 不同打印精度和光栅常数关系热力图

分析表明, 系统相对误差随打印分辨率的提升呈现显著的单调递减趋势。在特定硬件约束下, 尽管在光栅常数小于 0.7 mm 的区间内, 受限于成像分辨率, 误差出现反常上升, 但这与前述 0.7 mm 及 0.8 mm 为最优常数区间的实验分析基本相符。综上所述, 采用高打印分辨率并配合适宜的小型化光栅常数, 是实现该装置测量精度最优化的有效途径。

6. 误差分析

6.1. 测量精度与误差来源分析

根据实验原理, 当 $d = 0.7$ mm 时, 条纹周期被数字化等分为 20 格, 配合十分之一估读, 系统的最小估读值可达:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \approx 0.00222 \text{ mm}. \quad (5)$$

各光栅常数对应的理论分辨率如表 4 所示, 实验表明精度随 d 的减小而提升, 但受限于硬件采样率, 存在物理阈值。

Table 4. Minimum estimated readings for different grating constants

表 4. 不同光栅常数的最小估读值

光栅常数 d (mm)	最小估读值(μm)	光栅常数 d (mm)	最小估读值(μm)
0.4	2.0	0.8	4.0
0.5	2.5	0.9	4.5
0.6	3.0	1.0	5.0
0.7	3.5	1.1	5.5

系统的最终测量精度受硬件参数、光学链路与环境因素的共同制约, 其核心误差来源可系统性地归结为以下三个方面:

6.1.1. 制备工艺与像素约束

在制备端, 打印分辨率(DPI)直接决定了栅线的几何保真度, 低 DPI 引入的边缘锯齿效应会降低空间信号的一致性。在传感端, 光栅常数 d 越小, 系统对微位移越敏感; 但过小的 d 会因突破相机像素分辨率极限而导致成像模糊。此外, 胶片平整度及镜头畸变均是不可忽视的随机误差源。

6.1.2. 几何投影与半影误差

在光学投影层面, 两组光栅间的微小间隙(Gap)配合漫射光源会引入几何投影误差。尽管毛玻璃均匀了 LED 背光, 但漫射光的非平行性仍会在副光栅平面产生半影效应(Penumbra effect)。此效应随 Gap 的增大而加剧, 直接削弱条纹边缘锐度并干扰十字准线的精确对齐。未来拟引入准直透镜组提供高平行度照明场, 以从光路端抑制该误差。

6.1.3. 环境扰动与热漂移效应

胶片在背光加热下的热漂移效应是制约系统极限精度的长期考量因素。鉴于本实验采用低发热 LED 冷光源且单次动态测量周期极短, 热累积引发的光栅常数形变在当前微米级精度下可近似忽略。但在未来工业级长时连续监测应用中, 系统拟采用低热膨胀系数的石英玻璃等硬质基底替代菲林胶片, 从而在物理机理上彻底消除热漂移干扰。

6.2. 不确定度评定

本研究以 $d = 0.7$ mm 组别为例, 通过 5 次独立重复测量进行不确定度合成如表 5 所示。

Table 5. The displacement period obtained from five repeated measurements

表 5. 五次测量位移相同周期值

次数 i	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
位移测量值 x/mm	0.897	0.903	0.902	0.910	0.907

6.2.1. A 类不确定度 u_A

基于表 5 的 5 次测量位移值(单位: mm): 0.897, 0.903, 0.902, 0.910, 0.907。计算得平均值 $\bar{x} = 0.9038$ mm, 样本标准差 $s = 0.00497$ mm。则 A 类不确定度为:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \approx 0.00222 \text{ mm}. \quad (6)$$

6.2.2. B 类不确定度 u_B

B 类不确定度主要由量化分辨误差 u_r 与人眼估读误差 u_e 构成。按均匀分布处理:

(1) 分辨力不确定度: 最小分度 $\Delta x = 0.035$ mm, 则:

$$u_r = \frac{d}{20 \cdot 2\sqrt{3}} = \frac{0.035}{\sqrt{3}} \approx 0.00202 \text{ mm}. \quad (7)$$

(2) 估读不确定度: 假定估读偏差为 ± 0.2 格(即 ± 0.007 mm), 则:

$$u_e = \frac{0.007}{\sqrt{3}} \approx 0.00404 \text{ mm}. \quad (8)$$

合成 B 类不确定度:

$$u_B = \sqrt{u_r^2 + u_e^2} \approx 0.0045 \text{ mm}. \quad (9)$$

(3) 合成标准不确定度(u)

综合 A 类与 B 类分量, 最终合成不确定度为:

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \approx 0.00502 \text{ mm.} \quad (10)$$

7. 结束语

本研究针对精密位移测量需求, 成功开发了一套基于低成本自制光栅的莫尔条纹位移测量装置, 显著降低了高精度传感设备的制备门槛。通过激光菲林输出工艺制备多规格自制光栅, 结合 XYZR 四轴位移平台与高帧率 USB 摄像头, 利用 Python-OpenCV 开发了可视化数字读数系统, 实现了莫尔条纹的亚像素级视觉细分。实验结果表明, 在打印分辨率高于 4000 dpi、光栅常数为 0.7 mm 的优化配置下, 系统测量相对误差低至 0.28%, 实现了微米级的高精度非接触位移测量。此外, 研究深入探讨了打印精度、光栅常数等参数对测量准确度的耦合影响规律, 验证了莫尔条纹特性与光栅内部几何构型的独立性。综上所述, 本装置以极低的材料成本实现了优异的静态测量性能, 为数字化精密检测提供了一种高效、可靠且经济的自制化方案。

基金项目

2025 年四川省大学生创新创业训练计划项目(S202510649201)。

参考文献

- [1] 路秋悦. 光栅莫尔条纹智能细分技术的研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2024.
- [2] 王画然. 基于深度学习的莫尔条纹光刻对准方法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2023.
- [3] Ke, X., Zhang, M., Zhao, K. and Su, D. (2021) Moiré Fringe Method via Scanning Transmission Electron Microscopy. *Small Methods*, **6**, Article ID: 2101040. <https://doi.org/10.1002/smt.202101040>
- [4] 曹子木, 陈云云, 蒋健. 莫尔条纹有效区域识别研究[J]. *应用光学*, 2024, 45(6): 1197-1203.
- [5] 田先洋, 郑泽希, 项华中, 等. 基于莫尔条纹技术的连续帧照相法获取挠动脉脉搏波[J]. *光学仪器*, 2025, 47(1): 41-50.
- [6] Liao, Y., Wang, L. and Yan, Y. (2025) Vibration Measurement of Wind Turbine Blades through Image Analysis of Moiré Pattern. *Measurement: Sensors*, **38**, Article ID: 101718. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101718>