

# 线阵CCD在测量液体折射率中的应用

花春波, 吴晓阳, 薛丽, 胡正龙

湖北科技学院电子与电气工程学院, 湖北 咸宁

收稿日期: 2026年4月22日; 录用日期: 2026年5月27日; 发布日期: 2026年6月30日

## 摘要

液体折射率测量是大学物理光学实验的重要内容, 传统方法多依赖人工观察与读数, 存在操作繁琐、易污染样品、偶然误差大等问题。为此, 文章基于光的折射定律与光斑横向偏移原理, 设计了一套由激光光源、旋转平台和线阵CCD模块构成的非接触式测量系统, 并开发了配套的上位机采集软件与MATLAB数据处理程序, 实现了光斑位置的自动捕捉、数据的自动采集与折射率的精准计算。对纯净水与75%乙醇溶液进行了实验测量, 结果表明, 平均相对误差均低于1%, 测量精度优于传统阿贝折射仪法。该系统实现了实验过程的数字化与自动化, 不仅提升了测量精度, 也丰富了光电技术在物理实验教学中的应用, 有助于培养学生的跨学科实践能力与创新思维, 为大学物理实验教学改革提供了可行方案。

## 关键词

线阵CCD, 液体折射率, 物理实验教学, 非接触测量, 数字化改造

# The Application of Linear Array CCD in Measuring the Refractive Index of Liquids

Chunbo Hua, Xiaoyang Wu, Li Xue, Zhenglong Hu

School of Electronic and Electrical Engineering, Hubei University of Science and Technology, Xianning Hubei

Received: April 22, 2026; accepted: May 27, 2026; published: June 30, 2026

## Abstract

The measurement of liquid refractive index is an important component of university physics optical experiments. Traditional methods mostly rely on manual observation and reading, which present issues such as cumbersome operation, easy contamination of samples, and significant random errors. To address these problems, this paper designs a non-contact measurement system consisting of a laser light source, a rotating platform, and a linear array CCD module based on the law of refraction and the principle of lateral spot displacement. A supporting upper-computer data acquisition

software and MATLAB data processing program are also developed to achieve automatic spot position capture, automated experimental data collection, and accurate refractive index calculation. Experimental measurements of pure water and 75% ethanol solution show that the average relative error is less than 1%, indicating higher measurement accuracy compared to the traditional Abbe refractometer method. The system realizes digitalization and automation of the experimental process, not only improving measurement precision but also enriching the application of optoelectronic technology in physics experiment teaching. It helps cultivate students' interdisciplinary practical abilities and innovative thinking, providing a feasible solution for the reform of university physics experiment teaching.

## Keywords

Linear Array CCD, Refractive Index of Liquid, Physics Experiment Teaching, Non-Contact Measurement, Digital Transformation

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/>



## 1. 引言

液体折射率是表征透明介质光学性质的核心物理量，其测量实验是大学物理光学部分的基础教学内容。目前教学中常用的方法主要有阿贝折射仪法和干涉测量法等[1]-[3]。阿贝折射仪法操作相对简便，但属于接触式测量，易造成样品与仪器的双向污染，且测量结果受温度影响显著；干涉测量法精度较高，但光路调节复杂、设备体积较大，对环境要求严格，难以在基础实验教学中广泛推广。此外，这些方法均需人工观察明暗分界线或光斑位置，需手动记录数据，在多次测量中易受视觉疲劳与人为反应偏差影响，引入较大偶然误差。同时实验现象较为抽象，学生难以直观理解折射率与光折射偏移之间的内在联系。

近年来，数字化与光电技术在大学物理实验教学中的应用已成为教学改革的重要方向[4] [5]。CCD 作为高灵敏度光电传感器，具备非接触测量、高时空分辨率、数据可自动采集等优势，在物理实验教学创新中展现出广阔应用前景。已有研究将 CCD 技术引入折射率测量，刘欣等[6]利用平行平板在不同折射率下引起出射光束轴向位移的原理，配合 CMOS 相机实现了液体折射率的非接触式精确测量，但该方法需两次寻找“最清晰像”，系统对机械位移平台精度要求较高。王艳东等[7]设计了双线阵 CCD 系统，通过同时采集两路光斑信号实现液体折射率的动态测量，但该系统在调节光路外还需校准两个 CCD 之间的相对位置，较为复杂。廉惠遥[8]等人验证了线阵 CCD 测量液体折射率的可行性，但该系统在数据自动采集与教学化误差分析方面仍有进一步改进的空间。王可畏[9]等利用线阵 CCD 实现了液体折射率的测量，验证了横向偏移法在教学实验中的可行性，但其系统在数据采集与处理操作上并未做具体分析，且未分析实验过程中存在的误差来源。上述研究为 CCD 技术在折射率测量中的应用提供了有益探索，但在系统自动化程度、实验操作难易和教学适用性等方面仍存在进一步的改进空间。

本文在传统折射法测量折射率的基础上，结合光的折射定律，设计了结构简洁的线性光路，并采用线阵 CCD 替代人眼，实现对激光光斑经液体折射后位置变化的自动观测。研究引入差分测量方法，通过计算加液前后同一入射角下的光斑位移差值来求解折射率，有效抵消了容器壁等固定因素引入的系统误差。并利用软件实时采集数据与 MATLAB [10] [11]数据处理部分，实现了从光斑捕捉、位移计算到折射

率输出的全程自动化处理。本文将光电探测技术、软件编程与传统光学实验有机融合,形成了“光-电-算”一体化的综合性教学案例,有助于培养学生的跨学科实践能力与创新思维,为大学物理实验教学改革提供了可行方案[12]。此外,本工作基于近代物理实验中的线阵 CCD 设备进行二次开发,这种利用现有资源、赋予设备新功能的模式,有效降低了创新性实验的硬件门槛,为物理实验教学改革提供了兼具创新性与经济性的可行方案。

## 2. 设计方案

### 2.1. 实验原理

#### 2.1.1. 理论模型

本测量方法基于光束在多层透明介质中的折射行为,通过线阵 CCD 记录光斑的横向位移,进而反演待测液体的折射率。如图 1 原理图所示,实验中,光线依次穿过空气、容器壁、待测液体及另一侧容器壁,最终被线阵 CCD 接收。图中展示了光束在空容器与盛液容器两种状态下的传播路径对比,黑色箭头表示空容器时的光线轨迹,蓝色箭头表示加入液体后的光线轨迹。由于折射率差异,光路在介质界面发生偏折,导致出射光斑位置相对于空容器壁状态下发生偏移,该偏移量和液体折射率之间存在明确的函数关系。

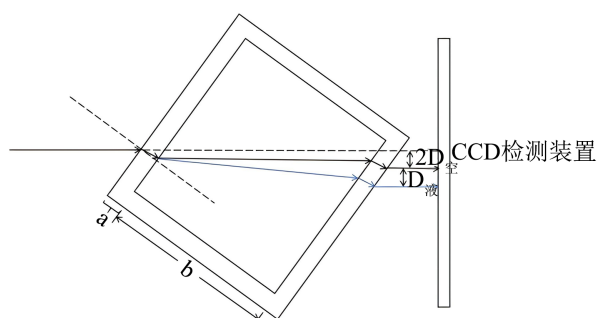


Figure 1. Schematic diagram of light beam propagation path in multilayer media

图 1. 光束在多层介质中的传播路径示意图

为建立数学模型,考虑光束在如图 2 所示的五层介质系统中传播。设空气折射率为  $n_1$ , 容器壁材料折射率  $n_2$ , 待测液体折射率为  $n_3$ ; 容器壁厚度为  $a$ , 液体层厚度为  $b$ ; 光束入射角为  $\theta_1$ , 经空气-容器壁界面折射后进入容器壁的折射角为  $\theta_2$ , 再经容器壁-液体界面折射后进入液体的折射角为  $\theta_3$ 。

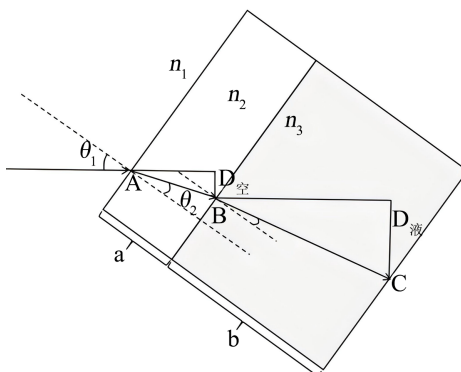


Figure 2. Local enlarged view of light beam propagation path in liquid layer

图 2. 液体层内光束传播路径局部放大图

在空容器状态下, 光束仅经过两层容器壁, 其总横向偏移量  $D_{\text{空}}$  可由几何光学推导, 再利用斯涅耳定律, 将其表示为入射角  $\theta_1$  的函数:

$$D_{\text{空}} = a \sin \theta_1 \left( 1 - \frac{n_1 \cos \theta_1}{\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}} \right). \quad (1)$$

当容器中充满待测液体后, 光束在液体层中也会发生横向偏移。根据图 2 所示的几何关系, 液体层内的横向位移量  $D_{\text{液}}$  可表示为:

$$D_{\text{液}} = b \sin \theta_2 \left( 1 - \frac{n_2 \cos \theta_2}{\sqrt{n_3^2 - n_2^2 \sin^2 \theta_2}} \right). \quad (2)$$

利用  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ , 最终表示为  $\theta_1$  的函数:

$$D_{\text{液}} = b \sin \theta_1 \left( 1 - n_1 \sqrt{\frac{1 - \sin^2 \theta_1}{n_3^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}} \right). \quad (3)$$

因此, 加液前后光束总横向位移的变化量  $\Delta D$  即为液体层引起的位移分量:

$$\Delta D = D_{\text{液}} = b \sin \theta_1 \left( 1 - n_1 \sqrt{\frac{1 - \sin^2 \theta_1}{n_3^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}} \right). \quad (4)$$

在公式(4)中, 将加液前后光束总横向位移的变化量  $\Delta D$  直接等价于液体层引起的位移分量  $D_{\text{液}}$ 。这一近似的前提是: 假定光束在通过空容器(仅有两层平行的亚克力壁)后的出射方向与入射方向严格平行, 且出射光斑位置与入射光斑位置相比无横向偏移。实际上, 根据平行平板的光学特性, 即使没有液体, 光束在通过空容器时也会产生一个微小的横向位移  $\Delta D_{\text{空}}$ , 该位移量与入射角、平板厚度及折射率有关。因此, 更精确的表达式应为  $\Delta D = D_{\text{液}} + \Delta D_{\text{空}}$ 。本系统采用差分测量法, 通过测量加液前后的位置变化  $\Delta D$  作为  $D_{\text{液}}$ , 其原理上忽略了  $\Delta D_{\text{空}}$ 。对本实验装置(亚克力壁厚  $a = 2 \text{ mm}$ , 折射率  $n_2 \approx 1.49$ )的计算表明, 在入射角  $0^\circ \sim 15^\circ$  范围内,  $\Delta D_{\text{空}}$  的最大值不超过  $10 \text{ }\mu\text{m}$ , 约为 CCD 单个像元尺寸( $14 \text{ }\mu\text{m}$ )的 71%, 接近但尚未达到一个像元的分辨阈值。考虑到该值在不同入射角下变化较为平缓, 且与随机误差叠加后难以被 CCD 精确分辨, 因此将其归入系统误差是合理的。这一近似确实引入了系统误差, 这也是后续实验中测量值相较于参考值普遍偏小的潜在原因之一。

在实际测量中,  $\Delta D$  由线阵 CCD 记录的光斑位置变化得到。将上述公式反解, 可得待测液体折射率  $n_3$  的表达式:

$$n_3 = \sqrt{\frac{1 - \sin^2 \theta_1 + \sin^2 \theta_1}{1 - \frac{D_{\text{液}}}{b \sin \theta_1}}}. \quad (5)$$

该式为本实验的核心数学模型。通过测量不同入射角下的位移量  $\Delta D$ , 即可计算出液体的折射率  $n_3$ 。本研究中, 液体层厚度  $b = 7.0 \text{ cm}$ , 容器壁材料为亚克力。

### 2.1.2. 线阵 CCD 测量原理

线阵 CCD 是一种由一维排列的光电二极管阵列构成的光敏传感器, 每个像素单元对应一个积分电路, 能够将接收到的光信号转换为电信号并量化输出。其输出强度与照射光强成正比, 因而可用于精确定位光斑位置。

在本系统中, 激光束经液体折射后照射至线阵 CCD 感光面, 传感器采集光强分布并传输至上位机。

通过分析光强曲线的峰值位置，可精确确定光斑中心所对应的像元索引。设像元尺寸为  $d$ （本系统为  $14\ \mu\text{m}$ ），则加液前后光斑位移量  $\Delta D$  可表示为：

$$\Delta D = |N_{\text{液}} - N_{\text{空}}| \cdot d . \quad (6)$$

其中， $N_{\text{空}}$  和  $N_{\text{液}}$  分别为空容器和加液状态下光强峰值对应的像元索引。该位移量即为前文模型中的  $D_{\text{液}}$ ，代入式(5)即可求得待测液体的折射率。

## 2.2. 系统结构

本测量系统由光学单元、机械单元和信号采集与处理单元三部分组成，图 3 展示了该实验的实物装置，由激光光源、光阑、旋转平台、线阵 CCD 及上位机组成。

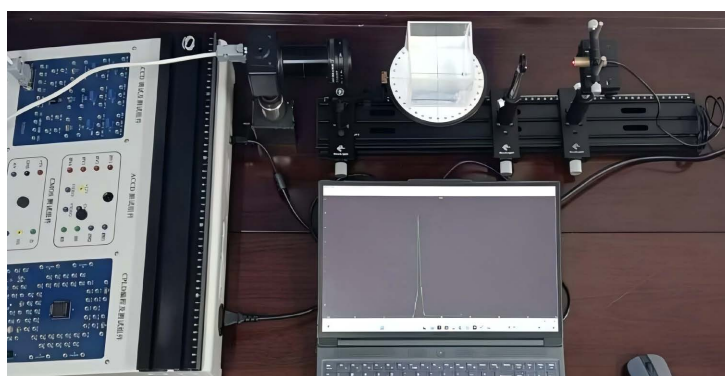


Figure 3. Schematic of experimental setup  
图 3. 实验装置图

图 4 为实验系统结构图，清晰展示了从光束发射到数据输出的完整流程。激光光源发出的红色点状光束经光阑准直后入射至旋转平台上的亚克力样品容器，折射后的出射光斑被线阵 CCD 捕获。CCD 将光信号转换为电信号并传输至上位机，实时显示光强 - 像元分布曲线。最后，通过 MATLAB 软件对采集数据进行自动化处理，提取光斑位移量并代入理论模型计算待测液体的折射率。该系统充分发挥了线阵 CCD 高采样速率的优势，实现了光斑位置变化的动态监测与精确测量。



Figure 4. Schematic of experimental system structure  
图 4. 实验系统结构图

### 3. 实验过程及结果分析

#### 3.1. 实验过程

- 1) 搭建线阵 CCD 成像系统，成像系统由激光光源、旋转平台、线阵 CCD 模块组成，用数据线将线阵 CCD 模块与平台 LCCD 调试及测试组件中的 DB15 接口连接；
- 2) 调节光路，保持光源和 CCD 位于同一高度，旋转平台的一条垂线与光路平行，将容器放置在旋转平台上，调整容器的位置，确保光路垂直通过容器；
- 3) 打开光电平台电源和激光电源，打开上位机测量软件，确保 CCD 可以检测到信号；
- 4) 将旋转平台转动  $5^\circ$  (未盛放液体)，此时入射角为  $5^\circ$ ，光斑的位置发生横向变化，点击上位机“连续”按钮，便可以连续采集线阵 CCD 的输出信号，点击“保存”，可以将所测量的数据保存到指定文件夹中，以便后续进行数据分析；
- 5) 向容器中注入纯净水，确保光路可以从液体中通过，点击上位机“连续”按钮，可以观察到数据图像发生移动，保存当前数据；
- 6) 继续将旋转平台进行转动，依次增大入射角，每次递增  $1^\circ$  进行测量，重复上述实验过程，记录数据；
- 7) 将液体进行更换，测量 75% 的乙醇溶液，重复上述实验过程；
- 8) 将记录的数据进行分析，得出每个入射角和对应光斑移动的距离，代入公式(5)中，即可算出液体折射率。

#### 3.2. 实验结果

实验数据的获取过程充分体现了线阵 CCD 在物理实验教学中的优势。通过 CCD 实时采集的光强 - 像素曲线(图 5)，学生可直观观察到随入射角增大，光斑峰值位置连续移动的过程，降低了光学实验的理解难度。配套的上位机软件实现了数据的自动采集与保存(图 6)，学生无需手动记录读数，可将更多精力集中于物理原理的理解与实验结果的分析。

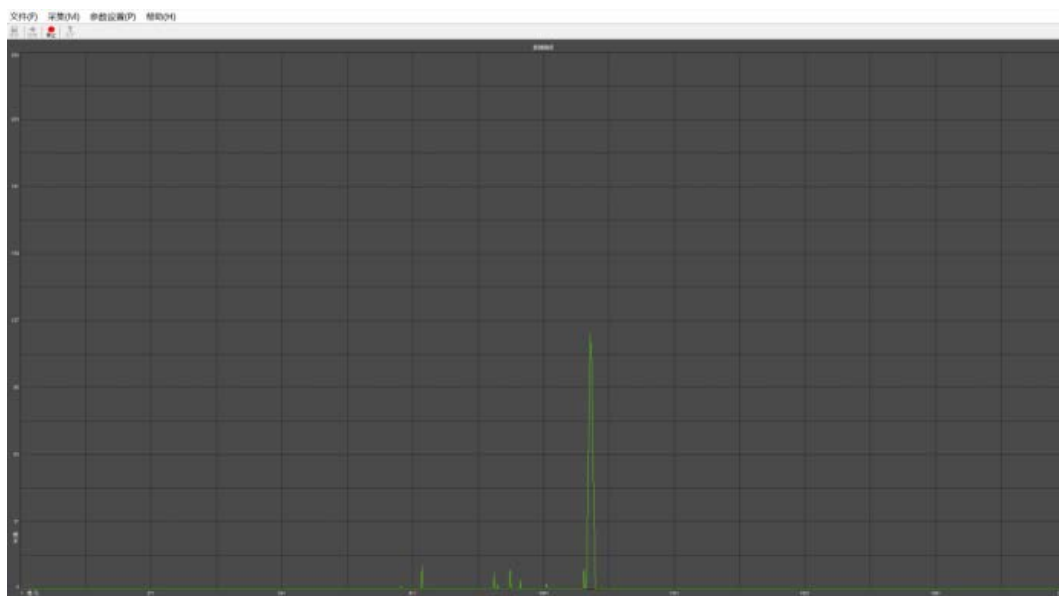


Figure 5. Light intensity-pixel curve  
图 5. 光强 - 像素曲线图

	A	B	C		A	B	C
1	像元索引	对应光强		1	像元索引	对应光强	
929	923	74		1037	1031	115	
930	924	92		1038	1032	139	
931	925	115		1039	1033	169	
932	926	140		1040	1034	175	
933	927	158		1041	1035	180	
934	928	156		1042	1036	187	
935	929	178		1043	1037	191	
936	930	191		1044	1038	187	
937	931	176		1045	1039	175	
938	932	157		1046	1040	169	
939	933	153		1047	1041	165	
940	934	153		1048	1042	158	
941	935	135		1049	1043	139	
942	936	116		1050	1044	130	
943	937	97		1051	1045	123	
944	938	80		1052	1046	115	

Figure 6. Exported data plot of light intensity-pixel curve  
图 6. 光强 - 像元曲线导出数据图

将采集到的光强 - 像元曲线数据导入 Excel, 提取加液前后光强峰值对应的像元索引, 结合像元尺寸 (14 μm) 计算光斑位移量 ΔD, 代入公式(5), 利用 MATLAB 编程快速计算折射率(图 7)。表 1 和表 2 分别列出了纯净水与 75%乙醇溶液在 25℃下、入射角 5°至 14°范围内的测量结果。



Figure 7. MATLAB interface diagram  
图 7. MATLAB 界面图

**Table 1.** Experimental data with pure water as the liquid  
**表 1.** 液体为纯净水的实验数据

入射角(°)	5	6	7	8	9
像素偏移量	107	128	150	172	195
折射率	1.324	1.322	1.323	1.322	1.325
误差	0.53%	0.68%	0.60%	0.68%	0.45%
入射角(°)	10	11	12	13	14
像素偏移量	215	240	264	287	311
折射率	1.321	1.325	1.328	1.327	1.328
误差	0.75%	0.45%	0.23%	0.30%	0.23%
平均误差			0.49%		

**Table 2.** Experimental data with 75% ethanol solution as the liquid  
**表 2.** 液体为 75%乙醇溶液的实验数据

入射角(°)	5	6	7	8	9
像素偏移量	115	138	162	185	209
折射率	1.355	1.357	1.357	1.356	1.358
误差	0.95%	0.80%	0.80%	0.88%	0.73%
入射角(°)	10	11	12	13	14
像素偏移量	235	258	285	310	335
折射率	1.361	1.359	1.363	1.363	1.364
误差	0.51%	0.66%	0.37%	0.37%	0.29%
平均误差			0.64%		

对于纯净水(参考值 1.331),像素偏移量随入射角增大由 107 增至 311,折射率测量值在 1.321 至 1.328 之间波动,相对误差范围为 0.23%至 0.75%,平均误差为 0.49%。对于 75%乙醇溶液(参考值 1.368),像素偏移量由 115 增至 335,折射率测量值在 1.355 至 1.364 之间,相对误差范围为 0.29%至 0.95%,平均误差为 0.64%。结果表明,测量值与参考值吻合良好,验证了该系统在透明液体折射率测量中的准确性与可靠性。从十次的实验数据中平均来看,水的折射率为 1.325,75%乙醇的折射率为 1.359。

### 3.3. 测量不确定度分析

为了评估本测量系统的可靠性,对测量结果进行了不确定度分析。由公式(5)可知,折射率  $n_3$  是多个直接测量值的函数  $n_3 = f(\theta_1, \Delta D, b)$ ,各输入量的不确定度来源及分析如下:

1) 液体层厚度  $b$ 。 $b = 70$  mm,由游标卡尺测量得到。其中 A 类不确定度:在相同条件下,对  $b$  测量了 10 次,并计算得到  $u_A = 0.00487$  mm; B 类不确定度:游标卡尺的仪器误差为  $\pm 0.02$  mm,则不确定度  $u_B = 0.02/\sqrt{3} = 0.0115$  mm。则  $b$  的合成不确定度  $u(b) = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0.0126$  mm。

2) 入射角  $\theta_1$ 。A 类不确定度:在相同条件下,对  $10^\circ$  入射角重复设定 10 次,读取角度值,计算得到  $u_A = 0.00487^\circ$ 。B 类不确定度:转盘最小分度为  $0.1^\circ$ ,估读误差最小分度的 1/5,即  $0.02^\circ$ ,服从均匀分布,

则  $u_B = 0.02^\circ/\sqrt{3} = 0.0115^\circ$ 。入射角的合成标准不确定度  $u(\theta_1) = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0.0125^\circ$ 。

3) 光斑位移量  $\Delta D$  ( $D_{液}$ )。  $\Delta D = |N_{液} - N_{空}| \cdot d$ ，其中  $N$  是光强峰值对应的像元索引， $d = 14 \mu\text{m}$  为像元尺寸。A 类不确定度：在  $10^\circ$  入射角条件下，重复 10 次测量加液前后的峰值像元索引差值  $N$ ，计算得  $u_A = 0.234$  像元。B 类不确定度(峰值定位)：采用最大值法确定，定位精度为  $\pm 0.5$  像元，则  $u_{B1} = 0.5/\sqrt{3} = 0.2887$  像元。B 类不确定度(像元尺寸)：像元尺寸  $d$  的公差为  $\pm 0.5 \mu\text{m}$ ，则  $u_{B2}(d) = 0.5/\sqrt{3} = 0.2887 \mu\text{m}$ 。 $N$  的合成不确定度  $u(N) = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2} = 0.372$  像元。 $\Delta D$  的合成不确定度  $\Delta D = \sqrt{(d \cdot u(N))^2 + (N \cdot u(d))^2} = 62.29 \mu\text{m}$ 。

根据不确定度传播理论，得到  $u(n_3) \approx 0.025$ 。所以最终得到  $n_{水} = 1.325 \pm 0.028$ ； $n_{75\%乙醇} = 1.359 \pm 0.028$ 。

### 3.4. 误差分析与改进措施

由图 8 可见，两种液体的折射率测量值均系统性地低于其理论参考值，这一系统性偏差的主要原因在于公式(4)中将加液前后光束总位移的变化量  $\Delta D$  直接等价为液体层引起的位移分量  $D_{液}$ ，而忽略了空容器状态下光束通过两层平行亚克力壁时产生的微小横向位移  $\Delta D_{空}$ 。该近似导致  $D_{液}$  的计算值系统偏小，进而使折射率测量值偏低。

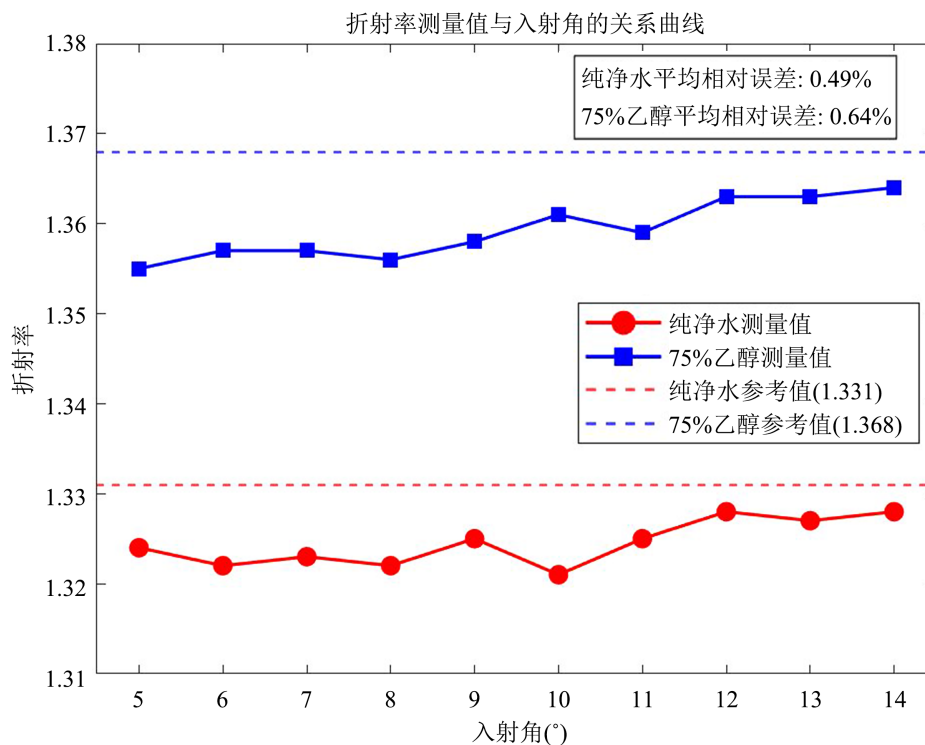


Figure 8. Relationship curve between measured refractive index and incident angle  
图 8. 折射率测量值与入射角的关系曲线

光斑中心定位误差是最大的不确定度贡献项。由 3.3 节可知，峰值索引差值  $N$  的合成标准不确定度为 0.372 像元。本系统采用最大值法确定光斑峰值位置，该方法仅利用了峰值点及其邻近像素的信息，易受光强波动和噪声干扰，是随机误差的主要来源。入射角调节误差是另一重要误差来源。旋转平台由手动操作，角度读数合成标准不确定度为  $0.0125^\circ$ 。该误差随入射角增大而累积，是测量值波动的重要原因之一。

温度变化的影响在本评定中未予量化。液体折射率具有温度依赖性,若实验过程中室温波动 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ,则可引入约 $\pm 0.0004$ 的折射率偏差,相当于相对误差 0.03%。理论模型近似误差,忽略了空容器壁引起的微小位移 $\Delta D_{\text{空}}$ ,导致 $\Delta D$ 的计算值系统偏小,进而使折射率测量值系统性偏低。

针对上述误差来源,后续可采取以下改进措施来优化实验,可选用灰度质心法或高斯曲线拟合法提取光斑中心位置;可在样品容器周围加装恒温循环水浴或半导体制冷片,同时使用高精度温度传感器实时监测,消除温度变化对折射率测量的影响;可采用步进电机驱动旋转平台,配合角度编码器实现入射角的精确控制。

## 4. 结论

本文基于线阵 CCD 光电探测技术,设计并实现了一套非接触式液体折射率测量系统。该系统结合光的折射定律与光斑横向偏移原理,通过上位机软件与 MATLAB 程序实现了数据自动采集与处理,显著提升了测量效率与精度。实验结果表明,该系统对纯净水与 75%乙醇溶液的测量平均相对误差均小于 1%,具有良好的准确性与稳定性。

与传统阿贝折射仪法相比,本系统避免了人工读数与接触式测量带来的误差与污染问题,实现了实验过程的数字化与自动化。同时,系统将光电探测、编程技术与传统光学实验有机结合,拓展了物理实验教学的内容与形式,有助于提升学生的综合实践能力与创新思维。该研究为大学物理实验教学改革提供了具有推广价值的实践方案。

## 基金项目

2023 年湖北科技学院教学改革研究项目“新工科背景下以‘产出为导向,学生为中心’构建地方院校本科教学质量保障体系的研究”(2023XY001)、湖北科技学院校内科研发展基金项目(BK202316)。

## 参考文献

- [1] 陶科, 杨恒. 透明溶液折射率测量实验创新设计[J]. 中学物理教学参考, 2025, 54(28): 60-63.
- [2] 张晓冬, 石开, 欧阳凯南, 李恒权, 汪国庆, 吴鑫鹏. 改进型迈克尔逊干涉仪测量溶液折射率[J]. 大学物理实验, 2023, 36(6): 59-62+87.
- [3] 程丹. 基于光纤马赫-曾德尔干涉仪的温度和折射率传感器的研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2022.
- [4] 张梅, 何鑫, 李柱峰. CCD 特性及其在大学物理实验中的应用[J]. 科技创新导报, 2009(22): 135.
- [5] 曹洁萍, 曾志娟, 张敏敏. 光电检测实验的教学改革探讨[J]. 科教导刊, 2023(1): 132-134.
- [6] 刘欣, 刘相晓, 张红伟, 赵红艳. 基于平行平板非接触式精确测量液体折射率[J]. 中国新技术新产品, 2017(6): 52-53.
- [7] 王艳东, 李赫. 液体折射率双线 CCD 的动态测量[J]. 物理实验, 2013, 33(12): 34-36+40.
- [8] 廉惠遥, 龙璇, 黄继庆, 等. 基于线阵 CCD 的折射率和浓度测量装置[J]. 大学物理实验, 2024, 37(4): 63-68.
- [9] 王可畏, 胡四平, 冯锦平, 彭亚斌, 卢社阶. 利用线阵 CCD 测量液体折射率实验研究[J]. 大学物理实验, 2022, 35(4): 58-62.
- [10] 陈顺芳, 徐四六. MATLAB 在大学物理实验教学中的应用[J]. 湖北科技学院学报, 2012, 32(12): 9-11.
- [11] 沈少冰. MATLAB 在大学物理实验数据处理中的应用[J]. 物理通报, 2024(10): 121-124.
- [12] 赵立珍, 李瑞东, 杨健. 混合教学模式下“大学物理实验”教学改革探究[J]. 教育教学论坛, 2025(38): 149-152.