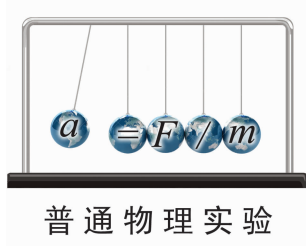


文章编号: 1005-4642(2024)09-0015-07



基于 LabVIEW 虚拟仪器和机器视觉 测量普朗克常量和光波波长

黄林¹, 李逸繁², 方杰¹, 熊水兵¹, 唐一文¹

(1. 华中师范大学物理科学与技术学院, 湖北武汉 430079;

2. 包头市第九中学, 内蒙古包头 014010)

摘要: 设计了基于 LabVIEW 虚拟仪器和机器视觉的普朗克常量和光波波长测量综合实验装置。该装置以发光二极管为测量对象, 综合运用了基于机器视觉技术的 NI Vision Builder AI, ImageJ 以及科学数据绘图软件 Origin 测得普朗克常量, 其大小与普朗克常量的公认值接近。另外, 该装置为学生提供了测量普朗克常量新的思路和方法, 可作为对传统光电效应法测量普朗克常量实验的补充, 有利于学生创新能力的培养和提高。

关键词: 发光二极管; 普朗克常量; 虚拟仪器; 机器视觉; LabVIEW

中图分类号: O4-39

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2024.09.002

普朗克常量是现代物理学中最重要的基本常量之一, 其精确测定对于质量计量基准的建立、量子效应精密测量等研究具有重要的科学意义^[1]。普朗克常量测量的一般方法有光电效应法、X 射线衍射法、黑体辐射法等^[2-5]。在大学物理实验中, 测量普朗克常量通常利用光电管的光电效应, 但实验时装置中的光电管成本较高且容易老化, 高压汞灯产生的高温和紫外谱线, 可能造成潜在的安全隐患。另一方面, 在国家近年出台的《中国教育现代化 2035》《教育部关于一流本科课程建设的实施意见》等文件中, 均对在教学中引入一定程度的现代信息技术和科技前沿技术有相关的要求^[6-7], 可见在传统的大学物理实验中, 融入一定的现代化测量手段和方法, 既是响应国家对物理实验教学改革的要求, 也是新时代对创新型物理人才培养的需要^[8-10]。

综上所述, 本文设计了基于 LabVIEW 虚拟仪器和机器视觉的普朗克常量和光波波长测量综合实验装置, 该装置以成本较低的发光二极管为测量对象, 利用其特殊的发光机制, 结合在工业和自动测量领域中广泛使用的机器视觉技术和 LabVIEW 虚拟仪器技术测得普朗克常量, 为学

生提供了一种测量普朗克常量的新思路和新方法, 可作为对传统光电效应实验的补充。除了普朗克常量测量实验以外, 该装置也可以开展如光波波长测量等实验项目, 有利于学生实验能力和创新能力的培养与提高。

1 测量思路

发光二极管是可以将电能转换成光能的半导体器件。当施加在发光二极管两端的电压低于器件的阈值电压 U_0 , 流经发光二极管的电流几乎为零; 如果该电压高于阈值电压 U_0 , 则流经发光二极管的电流迅速增加(图 1)。根据半导体能带理论, 其发光过程可以简单看作器件中的电子在电场力的作用下, 从能量较低的价带跃迁到能量较高的导带(获得能量), 再从能量较高的导带跃迁回能量较低的价带(释放能量), 并与价带中的空穴复合后释放出光子(自发辐射), 如图 2 所示。

在不计能量损失的前提下, 假设电场力对电子做的功全部转化为光子能量, 满足以下近似公式^[11-13]:

$$W = U_0 e = h\nu, \quad (1)$$

其中, U_0 为阈值电压, e 为电子电荷量, h 为普朗

收稿日期: 2024-02-29; 修改日期: 2024-05-29

基金项目: 湖北省教育厅教学改革项目(No. HBSY2023-009); 华中师范大学教学研究项目

作者简介: 黄林(1975—), 男, 湖北武汉人, 华中师范大学物理科学与技术学院实验师, 学士, 主要从事物理实验教学工作及实验教学仪器的开发。E-mail: huanglin@ccnu.edu.cn

通信作者: 唐一文(1968—), 女, 重庆人, 华中师范大学物理科学与技术学院教授, 博士, 主要从事纳米能源材料研究以及物理实验教学工作。E-mail: ywtang@ccnu.edu.cn

克常量, ν 为光量子频率. 而 ν 与波长 λ 和光速 c 之间满足

$$\nu = c/\lambda, \quad (2)$$

联立式(1)和式(2)可得:

$$h = \frac{U_0 e \lambda}{c}. \quad (3)$$

由于式(3)中的电子电荷量 e 和光速 c 为已知量, 因此只需测得发光二极管波长和对应的阈值电压 U_0 , 即可求出普朗克常量 h . 其中, 波长 λ 采用光栅衍射并结合机器视觉的方法测出, 阈值电压 U_0 采用线性拟合得到.

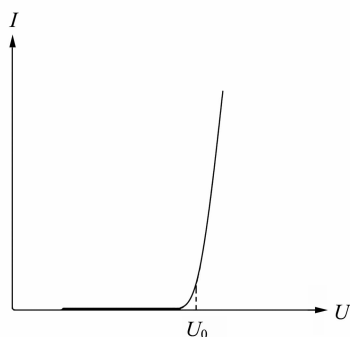


图 1 发光二极管的 $I-U$ 曲线

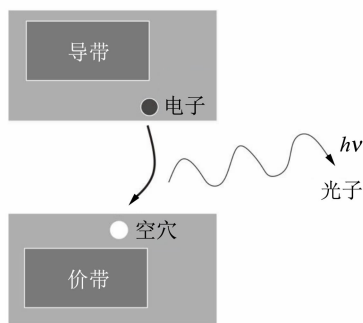


图 2 发光二极管的发光原理简图

2 装置设计及工作原理

设计的装置主要由波长测量模块和阈值电压测量模块 2 部分组成.

2.1 发光二极管波长测量模块

2.1.1 硬件构成

波长测量模块主要由实验光源、平行光管、衍射光栅、工业相机(acA2000-50gc)和电脑主机等部件构成, 其模块的结构框图如图 3 所示.

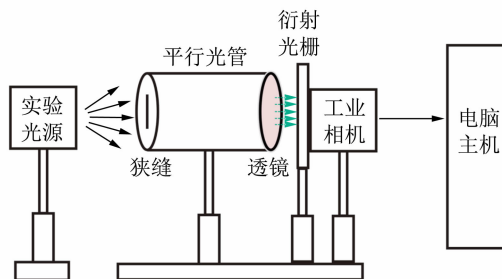


图 3 波长测量模块结构框图

装置中的实验光源为 Na 灯和各色发光二极管(对称分布在换向器上), 其中 Na 灯用于定标, 发光二极管为待测对象. 学生在测量时, 首先点亮发光二极管, 然后通过旋转换向器, 将其旋至最高点(图 4)测量. 换向器由发光二极管及驱动电路、亚克力圆筒、光学支架、底座等部件构成.

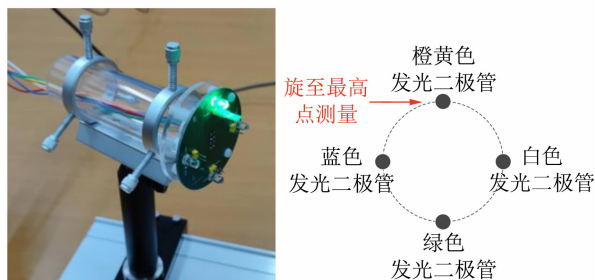


图 4 已安装在换向器上的实验光源

平行光管为已校准的商用成品光管, 光管的焦距 $f=168\text{ mm}$, 狭缝宽度 $L=0\sim 2\text{ mm}$ (连续可调), 通光口径 $K=22\text{ mm}$ (与工业相机镜头的直径近似相等). 装置上的平行光管、光栅、工业相机等高共轴且紧挨在一起, 在一定程度上减小了杂散光对工业相机的影响. 工业相机的水平/垂直分辨率为 $2046\text{ pixel}\times 1086\text{ pixel}$, 镜头畸变率低于 0.1% .

2.1.2 测量原理

实验光源发出的光经平行光管后, 垂直入射到衍射光栅, 由工业相机获得衍射图像, 其中 1 级亮纹的位置 x (距中央 0 级条纹的距离)满足^[14]

$$\lambda = d \sin \theta = \frac{xd}{\sqrt{x^2 + D^2}}, \quad (4)$$

其中, d 为光栅常量, θ 为衍射角, D 为光栅与相机感光面的距离, 如图 5 所示.

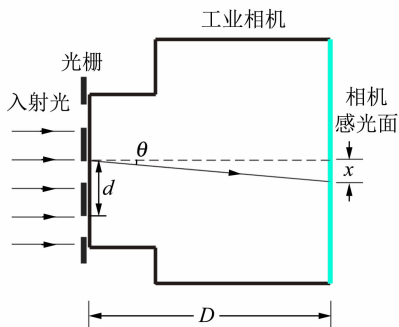


图 5 光栅衍射原理图

对于实验装置而言, $D \approx 80 \text{ mm}$, 工业相机感光芯片的尺寸为 $11.3 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$, 其 $1/2$ 幅面的横向最大尺寸约 6 mm , 则有 $D^2 + x^2 \approx D^2$, 式(4)可简化为

$$\lambda = \frac{xd}{D}, \quad (5)$$

由式(5)可知, 如果先测出波长 λ_0 已知光源(定标光源)的 1 级亮纹位置 x_0 (距中央 0 级条纹的距离, 以下简称像素距离), 再测出发光二极管的 1 级亮纹位置 x_1 , 则发光二极管的波长为

$$\lambda = \lambda_0 \frac{x_1}{x_0}. \quad (6)$$

2.2 发光二极管阈值电压测量模块

2.2.1 硬件构成

该测量模块主要由换向器、发光二极管、直流稳压电源(SPD3303X)、数据采集卡(USB-6351)、电脑主机等部件构成, 其结构框图如图 6 所示. 模块中的直流稳压电源用于为发光二极管供电.

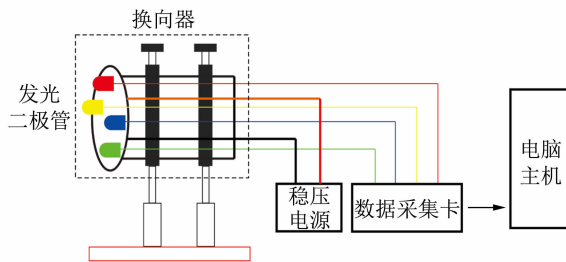


图 6 阈值电压 U_0 测量模块结构框图

2.2.2 实验软件

采用 LabVIEW 虚拟仪器程序测量阈值电压 U_0 . 实验时, 连续改变直流稳压电源的输出电压, 由程序测得发光二极管的 $I-U$ 曲线, 然后将相关数据导入到 Origin 中, 拟合求得阈值电压 U_0 . 程序的编写主要是通过调用 DAQmx 创建虚拟通道函数、DAQmx 定时函数、DAQmx 开始任务函数、DAQmx 读取函数等相关函数来实现(图 7).

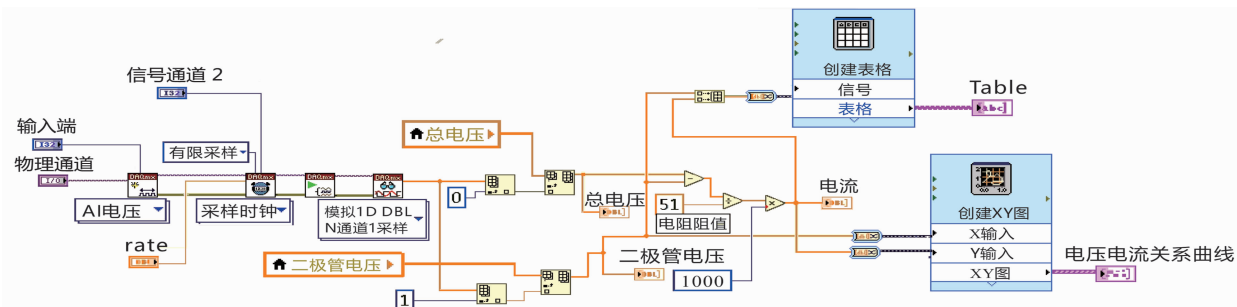


图 7 LabVIEW 实验测量程序框图(部分框图)

3 实验测量

实验测量主要分为发光二极管波长测量和阈值电压测量 2 部分.

3.1 发光二极管波长的测量

3.1.1 像素距离的测量

按图 3 搭建实验装置, 实验软件主要采用 NI Vision Builder AI(简称 VBAI), ImageJ, Origin 等软件. VBAI 是基于机器视觉技术的应用软件, 可利用其对工业相机(acA2000-50gc)进行配

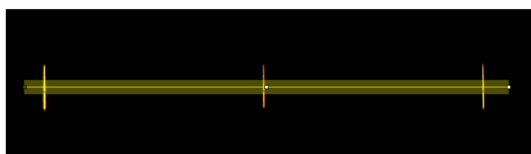
置并拍摄衍射图像; ImageJ 是具有科学图像分析和处理功能的机器视觉软件. 上述 2 款软件和 Origin 联用, 可将工业相机拍摄的衍射图像数值化后再进行定量测量, 主要操作步骤如下:

- 1) 调节各光学元件之间的距离和高度, 使各光学元件中心等高共轴;
- 2) 固定相机与光栅的位置, 打开 Na 灯, 预热 $5 \sim 10 \text{ min}$;
- 3) 利用工业相机镜头上的“ ∞ ”标识, 将镜头对焦到无穷远, 调节平行光管(光管已校准)上的

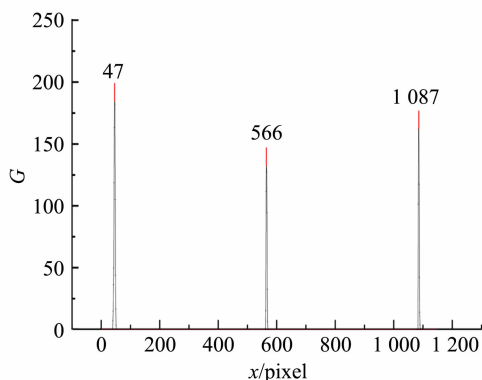
狭缝宽度和相机光圈,运行 VBAI 软件操控工业相机,直至电脑屏幕上观察到清晰、细锐的亮线为止,拍摄并保存 Na 灯的衍射图像;

4)将 Na 灯换成发光二极管,旋转换向器,将待测发光二极管旋转至最高点,并通过调节光学支架,使其与平行光管狭缝的中部平齐,重复步骤 3),拍摄并保存发光二极管的衍射图像;

5)在 ImageJ 中分别打开 Na 灯和发光二极管的衍射图像,在图像上绘出高亮的矩形区域,如图 8(a)和图 9(a)所示,点击“Analyze→Plot profile”命令,由程序自动对该区域进行灰度测量,并将测量数据导入 Origin 中,得到横坐标以像素为单位,纵坐标以灰度值为单位的像素坐标-灰度图,如图 8(b)和图 9(b)所示. 通过 Origin 寻峰,测得 Na 灯和发光二极管的左、右衍射条纹和中央零级条纹的像素坐标,以及其像素距离 $x_{0左}$, $x_{0右}$, $x_{1左}$ 和 $x_{1右}$;

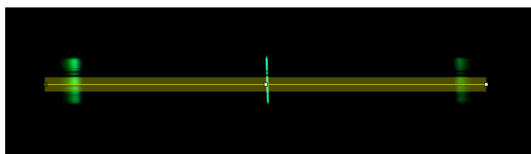


(a) 衍射图像

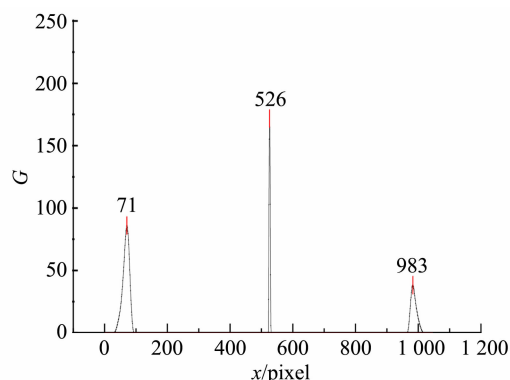


(b) 衍射光谱

图 8 Na 灯的衍射图像和衍射光谱



(a) 衍射图像



(b) 衍射光谱

图 9 绿色发光二极管的衍射图像和衍射光谱

6)重复步骤 5),随机绘出不同的矩形区域,并进行多次测量,实验数据如表 1 和表 2 所示.

表 1 Na 灯左、右衍射条纹像素距离测量

n	$x_{0左}/\text{pixel}$	$x_{0右}/\text{pixel}$	n	$x_{0左}/\text{pixel}$	$x_{0右}/\text{pixel}$
1	519	521	6	519	521
2	519	521	7	519	521
3	520	521	8	519	521
4	519	521	9	519	521
5	519	520	10	519	521

表 2 绿色发光二极管左、右衍射条纹像素距离测量

n	$x_{1左}/\text{pixel}$	$x_{1右}/\text{pixel}$	n	$x_{1左}/\text{pixel}$	$x_{1右}/\text{pixel}$
1	455	457	6	454	456
2	455	457	7	455	457
3	455	457	8	455	457
4	454	456	9	455	457
5	455	457	10	455	457

需要说明的是,在用 ImageJ 对衍射条纹具有一定宽度的发光二极管进行测量时,ImageJ 将对矩形区域内坐标相同的像素点求平均灰度值,因此可以由软件自动测得发光二极管衍射条纹中最亮部分的像素坐标、距中央零级条纹的像素距离,即可求得其波长 λ 值.

式(6)中的 x_0 和 x_1 满足

$$x_0 = \frac{1}{2}(x_{0左} + x_{0右}), x_1 = \frac{1}{2}(x_{1左} + x_{1右}).$$

x_0 和 x_1 的 A 类不确定度计算比较简单,这里需要指出的是其 B 类不确定度的简易评定方法.

装置所用工业相机的水平/垂直分辨率为 $2\,046\text{ pixel} \times 1\,086\text{ pixel}$,镜头畸变率小于 0.1% ,

则因畸变对 $x_{0左}, x_{1右}, x_{1右}$ 和 $x_{1左}$ (半幅画面) 测量产生的影响不大于 2 pixel, 且 ImageJ 测量产生的误差也不大于 2 pixel, 则 B 类不确定度为

$$u_B(x_{0左,右}) = u_B(x_{1左,右}) = \sqrt{\frac{2^2 + 2^2}{3}} \text{ pixel.}$$

又因为 x_0 和 x_1 的 B 类不确定度的计算公式为

$$u_B(x_{0,1}) = \sqrt{\frac{1}{4} u_B^2(x_{0,1左}) + \frac{1}{4} u_B^2(x_{0,1右})}.$$

由于像素一般为整数, 故最终测得的像素距离也为整数, 其实验测量结果为: Na 灯的像素距离为 (520 ± 1) pixel, 绿色、蓝色和橙黄色发光二极管的像素距离分别为 (456 ± 1) pixel, (410 ± 1) pixel 和 (547 ± 1) pixel.

3.1.2 波长 λ 的测量

利用式(6), 测量各色发光二极管波长 λ , 并计算出其在置信概率为 95%、包含因子 $k \approx 2$ 的条件下的不确定度(钠光波长 $\lambda_0 = 589.3 \text{ nm}$), 另外将发光二极管在台式光谱仪上测得的波长值作为参考值, 实验数据如表 3 所示. 由表 3 可知, 二者的测量结果较为接近.

表 3 各色发光二极管的波长测量值

发光二极管	λ/nm	
	ImageJ	光谱仪
绿色	517 ± 3	515.77
蓝色	465 ± 3	463.62
橙黄	620 ± 4	618.42

3.2 阈值电压 U_0 的测量

运行 LabVIEW 实验程序, 每间隔 0.1 V 测 1 次数据, 由程序绘制各发光二极管的 $U-I$ 曲线, 如图 10 所示. 最初, 流经器件的电流很小, $U-I$ 曲线近似为水平的直线; 当施加在二极管上的电压大于阈值电压时, 电流开始增加, 在曲线经过底部一段弧形区域(指数关系)后, $U-I$ 曲线呈近似线性关系.

拟合求阈值电压 U_0 时, 要求取近似线性范围内的数据进行拟合, 拟合得到的截距即为阈值电压. 为方便操作, 在测量 $U-I$ 曲线时, 可一直测到各色发光二极管的最大额定工作电流(电流的大小由技术手册确定, 例如蓝色发光二极管可测到 25 mA; 绿色或橙黄色发光二极管可测到 35 mA)附近, 然后从所测数据上从后往前截取 10 个左右的数据点进行拟合, 即可得到阈值电

压. 实验数据如图 11 所示, 实验结果如表 4 所示. 从拟合的结果看, 参与拟合的数据线性相关度较高, 且蓝色发光二极管的阈值电压最高, 绿色次之, 橙黄色最小.

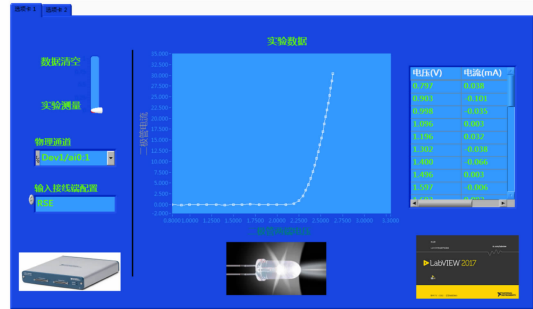


图 10 LabVIEW 实验测量程序界面

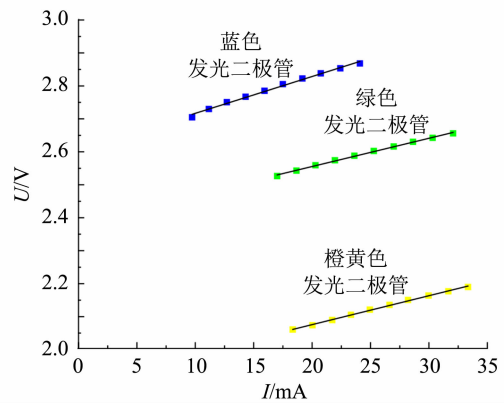


图 11 实验测得各色发光二极管的 $U-I$ 关系曲线

表 4 各色发光二极管的阈值电压 U_0

发光二极管	U_0/V	R^2
绿色	2.382 ± 0.004	0.997
蓝色	2.603 ± 0.006	0.993
橙黄	1.898 ± 0.004	0.998

一般而言, 对于直线拟合, 计算不确定度只考虑 A 类不确定度, 只有因变量标准差 S_y 显著小于 $\Delta/2$ 时(Δ 为仪器误差限值), 才需考虑 B 类不确定度的影响^[15], 由于实验所用数据采集卡精度较高, 例如根据技术手册, 在实验测量所用电压量程下, 其绝对最大误差为 $800 \mu\text{V}$, 根据因变量标准差的计算公式^[15]:

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum [y_i - (a + bx_i)]^2}{n - 2}}, \quad (7)$$

可计算得到绿色、蓝色、橙黄色发光二极管直线拟合的因变量标准差 S_y 分别为 0.002 V, 0.005 V 和 0.002 V, 不满足上述条件, 故此处可以忽略 B 类不确定度。

3.3 普朗克常量的测量

将测得的发光二极管波长 λ 和阈值电压 U_0 代入式(3)(其中, $e = 1.602\ 18 \times 10^{-19}$ C, $c = 2.997\ 92 \times 10^8$ m/s), 即可计算得到普朗克常量 h , 并与其标准值 $h_{\text{标}} = 6.626\ 07 \times 10^{-34}$ J·s 进行比较, 同时计算出其在置信概率为 95%, 包含因子 $k \approx 2$ 的条件下的不确定度, 实验结果见表 5。

表 5 各色发光二极管测得的普朗克常量 h

发光二极管	$h/(\text{J} \cdot \text{s})$	E_r
绿色	$(6.58 \pm 0.05) \times 10^{-34}$	0.70%
蓝色	$(6.47 \pm 0.06) \times 10^{-34}$	2.4%
橙黄	$(6.29 \pm 0.05) \times 10^{-34}$	5.1%

装置以发光二极管为测量对象, 运用 LabVIEW 虚拟仪器技术和机器视觉技术, 通过测量发光二极管波长 λ 、阈值电压 U_0 可近似测得普朗克常量 h , 其误差的来源需考虑在测量波长 λ 、阈值电压 U_0 这些中间量时引入的误差。例如, 在测量 λ 时, 由于所用工业相机的像素较低, 而且发光二极管发射光谱的半峰宽较大, 在测量其衍射条纹距中央零级条纹的像素距离时, 引入误差; 另外, 为了简化计算, 没有严格考虑工业相机镜头的像差(如畸变、色差等)等因素对测量造成的影响等。用拟合法求发光二极管的阈值电压 U_0 时, 参与拟合的数据点不同, 也会造成拟合得到的阈值电压 U_0 略有差别。除了上述原因外, 误差来源还有实验所用的普朗克常量测量公式, 另外不同颜色发光二极管的带隙结构、温度效应、发射光谱等因素的差异, 也会造成测得普朗克常量的相对偏差有所不同^[16], 等等。

4 结束语

本文设计的装置采用模块化结构, 学生可以根据实验需求的不同选择相应的模块, 如选择装置的全部模块开展普朗克常量测量实验, 也可以只选其中部分模块开展光波波长的测量实验(如 Hg 灯光谱测量等)。该装置为学生提供了测量普朗克常量和光波波长的新思路和新方法。在实验

过程中, 学生需自己编写 LabVIEW 虚拟仪器实验程序, 并灵活运用基于机器视觉技术的 NI Vision Builder AI 和 ImageJ 软件, 以及在科学研究中应用广泛的数据分析绘图软件 Origin, 装置中现代化测量手段的运用, 可以激发学生的学习兴趣, 有利于培养学生的创新思维。

参考文献:

- [1] 李玉芬, 和穗荣, 韦联福. 普朗克常数精密测量的历史和现状[J]. 计量学报, 2021, 42(11): 1534-1542.
- [2] 杨祺, 金惠吉, 陈海涛, 等. 光电效应的伏安特性曲线[J]. 物理实验, 2023, 43(11): 44-49.
- [3] 王合英, 孙文博. 用 X 射线衍射仪测量普朗克常量[J]. 物理实验, 2014, 34(10): 4-7.
- [4] 顾恩友, 谢东立. 用分光计测量 X 射线连续波谱及普朗克常数的验证[J]. 物理实验, 1988, 8(2): 51-52.
- [5] 闵春宗, 鲁跃先, 王立平. 黑体辐射测定普朗克常数[J]. 松辽学刊(自然科学版), 1994(2): 41-43.
- [6] 李震春, 孙瑶等. 基于 Python 的物理实验数据实时检测分析系统[J]. 物理实验, 2021, 41(11): 38-43.
- [7] 张敏, 文福安, 刘俊波. 高质量虚拟仿真实验教学课程内涵和特征[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(3): 1-4.
- [8] 袁吉仁, 韩道福, 邓新华, 等. 国家级物理实验教学示范中心教学方法改革实践与探索[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(10): 135-138, 170.
- [9] 张凤琴, 刘强, 林晓珑. 信息技术与大学物理实验深度融合的教学模式研究与探索[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(6): 204-207.
- [10] 王合英, 陈宜保, 孙文博, 等. 信息技术在大学物理实验教学中的应用[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(8): 141-144.
- [11] PILI U, VIOLANDA R. Smartphone-based measurement of the Planck's constant with light-emitting diodes [J]. Physics Education, 2019, 54(2): 023007.
- [12] 林智国, 鲍庆奔, 鲁晓东. 用发光二极管的电致发光过程测普朗克常量[J]. 大学物理实验, 2013, 26(1): 62-64.
- [13] 陈霞, 孙太宇, 何宇飞, 等. 基于 LED 的光量子理论测量普朗克常量[J]. 物理与工程, 2023, 33(5): 41-45.
- [14] 姚启钧. 光学教程[M]. 6 版. 北京: 高等教育出版社, 2019: 87.
- [15] 吴平. 理科物理实验教程: 力学、热学、电磁学、光

学实验分册[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2022:21-22.
 [16] ZHOU F, CLONINGER T. Computer-based ex-

periment for determining Planck's constant using LEDs [J]. Physics Teacher, 2008, 46(7): 413-415.

Measuring Planck constant and optical wavelength measurements based on LabVIEW and machine vision

HUANG Lin¹, LI Yifan², FANG Jie¹, XIONG Shuibing¹, TANG Yiwen¹

(1. College of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China;
 2. No. 9 High School, Baotou 014010, China)

Abstract: An integrated experimental device for Planck constant and optical wavelength measurements based on virtual instrument LabVIEW and machine vision was designed. The light emitting diode was used as the light source. The Planck constant could be obtained by using several software, such as NI Vision Builder AI based on machine vision technology, ImageJ and Origin. It could be found that the measured value was closed to the recognized Planck constant. The device provided a new method to measure the Planck constant and could be used as supplement for the teaching of the traditional experiment of measuring Planck constant by photoelectric effect method, which was conducive to the cultivation and improvement of students' innovation ability.

Key words: light emitting diode; Planck constant; virtual instrument; machine vision; LabVIEW
 [编辑:龙玉梅]

欢迎订阅 欢迎投稿

《物理实验》是由教育部主管、东北师范大学主办的学术期刊,是教育部高等学校物理学类专业教学指导委员会会刊,是全国高等学校实验物理教学研究会副秘书长单位,是全国高等学校物理演示实验教学研究会常务理事单位。本刊宗旨主要是交流物理实验研究成果,介绍国内外物理实验教学经验,培养读者的科学精神与创新能力,引领我国物理实验教学的改革与发展。杂志着重刊载对物理实验教学改革与发展具有前瞻性,对实验教学的具体问题具有指导性,对新科技成果应用于实验教学具有深度融合性,对传统实验内容具有拓展性和创新性的论文。目前开设的主要栏目有:前沿导读、近代与综合实验、普通物理实验、专家讲坛、拓展与创新、专题、互联网+物理、学生园地、基础教育等。《物理实验》适合于物理实验工作者、理工科学生以及教学仪器研制技术人员阅读。

《物理实验》为月刊,全国各地邮局均可订阅,邮发代号为 12-44。若错过邮局订阅时间,可直接与编辑部联系。