

基于 LabVIEW 的迈克尔逊干涉仪虚拟仿真实验系统设计^①

胡未东, 邹智星, 张叶, 唐曦, 谭兴文, 高子叶

西南大学 物理科学与技术学院, 重庆 400715

摘要: 迈克尔逊干涉仪是一种重要的精密光学实验仪器, 可应用于多种实验之中, 是大学物理的必学内容. 但由于器材数量、场地等原因, 学生往往不能很好地掌握迈克尔逊干涉仪相关的知识. 根据测量光波波长、介质折射率和微小位移等实验原理及教学要求, 开发出一种基于 LabVIEW 的迈克尔逊干涉仪虚拟仿真实验系统. 该系统不仅可用于学习迈克尔逊干涉仪的工作原理以及相关实验的原理, 而且可演示这 3 个实验的基本实验操作以及进行实时数据处理. 基于 LabVIEW 的迈克尔逊干涉仪虚拟仿真实验系统还具有界面简洁、交互性强等优点, 能有效激发学生的学习兴趣, 从而提升课堂教学效果.

关键词: LabVIEW; 迈克尔逊干涉仪; 虚拟仿真; 实验教学

中图分类号: G642.423; TP274

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2019)05-0140-07

1881 年, 美国物理学家迈克尔逊和莫雷为研究“以太”漂移而设计制造出来一台精密光学仪器——迈克尔逊干涉仪^[1], 其工作原理是利用分振幅法产生双光束以实现干涉, 根据干涉条纹可以计算出所测物理量, 如测量光波的波长^[2]、介质折射率^[3-5]、微小位移^[6-7]等. 同时, 迈克尔逊干涉仪的工作原理及其使用方法也是大学物理课程中必需的教学内容. 但是对迈克尔逊干涉现象的理解高度依赖于具体实验结果, 而大学物理中的光学实验则是独立于课堂教学的一门实验课程, 与大学物理课程在教学时间和教学空间上分离, 极大地影响了这部分光学内容的教学效果. 而大学物理中的虚拟仿真演示实验则成为物理及实验教学的重要补充手段, 是物理教学中不可或缺的组成部分.

LabVIEW^[8-12]采用图形化编程语言, 简单易学, 基于 LabVIEW 的虚拟仿真设备开发由前面板设计和程序框图设计组成, 其开发周期短, 且用户自定义控件就可以改变仪器功能, 教师可以在较短的时间内设计出和实际实验仪器功能相同、面板一致的虚拟仿真设备. 本研究基于 LabVIEW 建立了利用迈克尔逊干涉仪进行测量光波波长、测量介质折射率和测量微小位移的虚拟仿真实验系统, 并应用于大学物理及相关的实验教学中.

1 实验原理

1.1 迈克尔逊干涉仪测量介质折射率的实验原理

用迈克尔逊干涉仪测介质折射率的示意图和光路图如图 1 所示. 以测量玻璃片的折射率为例, 其中反射镜 M_1 和 M_2 、半反射镜 G_1 、补偿板 G_2 构成干涉仪的主体, M'_2 是 M_2 通过 M_1 所成的像. 不放玻璃片时, 用

① 收稿日期: 2018-09-11

基金项目: 重庆市教委雏鹰计划研究项目“数字化信息系统在高中物理实验中的探究性应用”, 西南大学“国家级大学生创新创业训练计划”项目(201710635011).

作者简介: 胡未东(1995-), 男, 大学本科学学生, 主要从事物理虚拟仿真实验的研究.

通信作者: 高子叶, 女, 讲师.

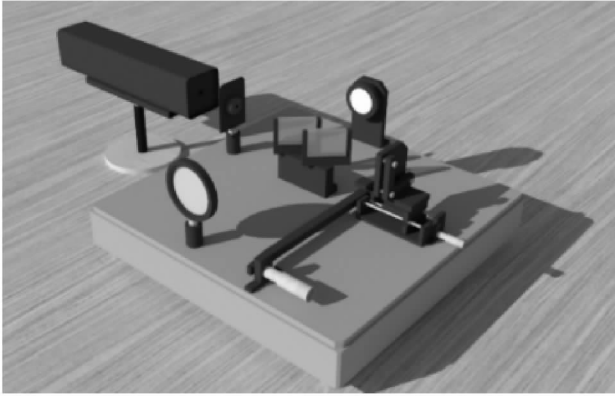
白光调出干涉直条纹, 彩色条纹中央的白色或灰色条纹对应于 M_1 和 M'_2 重合的位置. 设此时 M_1 离开观察透镜的距离为 Z_1 , 加上厚度为 t 、折射率为 n 的玻璃片后, 调出彩色干涉条纹. 设条纹在视场中央并且两侧条纹分布对称时, 对应的距离为 Z_2 . 显然 Z_1 与 Z_2 的差的 2 倍应等于由玻璃片引入的光程与空气的光程之差, 为

$$2 |Z_2 - Z_1| = 2(n-1)t \quad (1)$$

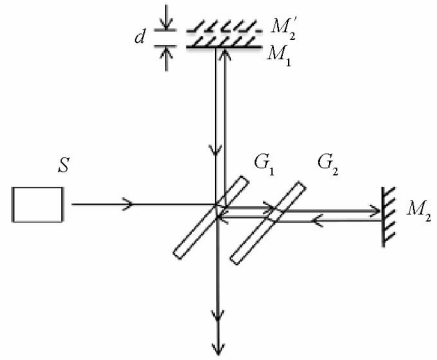
由此可得

$$n = \frac{|Z_2 - Z_1|}{t} + 1 = \frac{\Delta d}{t} + 1 \quad (2)$$

其中, $\Delta d = |d_2 - d_1|$ 是 M_1 在两次观测中移动的距离, 可从实验中测得. 玻璃片的厚度 t 已知, 可由 (2) 式得出玻璃的折射率 n .



(a) 示意图



(b) 光路图

图 1 迈克尔逊干涉仪的示意图和光路图

1.2 迈克尔逊干涉仪测量光波波长的实验原理

用波长为 λ 的单色光照射时, 迈克尔逊干涉仪所产生的环形等倾干涉圆条纹的位置取决于相干光束间的光程差, 而由 M_1 和 M_2 反射的两列相干光波的光程差为

$$\Delta = 2d \cos i \quad (3)$$

式中 i 为反射光在平面镜 M_2 上的入射角. 对于第 j 级条纹, 则有

$$2d \cos i = j\lambda \quad (4)$$

当 M_1 和 M'_2 的间距 d 逐渐增大时, 对任一级干涉条纹, 例如 j 级, 必定是以减少 $\cos i$ 的值来满足 (4) 式的, 故该干涉条纹间距向 i_j 变大的方向移动, 即向外扩展. 这时, 观察者将看到条纹好像从中心向外“涌出”, 且每当间距 d 增加 $\lambda/2$ 时, 就有一个条纹涌出. 反之, 当间距 d 由大逐渐变小时, 最靠近中心的条纹将一个一个地“陷入”中心, 且每向中心陷入一个条纹, 间距 d 的改变必为 $\lambda/2$.

因此, 当 M_1 镜移动时, 若有 N 个条纹陷入中心, 则表明 M_1 相对于 M_2 移近了距离 Δd , 其值为

$$\Delta d = N \frac{\lambda}{2} \quad (5)$$

反之, 若有 N 个条纹从中心涌出来, 则表明 M_1 相对于 M_2 移远了 Δd 的距离. 如果精确地测出 Δd , 则由 (5) 式计算出射光波的波长.

1.3 迈克尔逊干涉仪测量金属丝热膨胀系数的实验原理

金属丝线膨胀系数的表达式为

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l \Delta t} \quad (6)$$

其中, α 为试样的平均线膨胀系数, l 为金属丝原长, Δl 为温度变化 Δt 时金属丝的伸长量. 通过观察金属丝在温度变化 Δt 时干涉环“吞入”或“吐出”的数目 N , 并利用公式 (7):

$$\Delta l = N \frac{\lambda}{2} \quad (7)$$

可得温度变化 Δt 时金属丝的伸长量 Δl .

2 虚拟仿真实验系统

2.1 系统简介

图 2 为实验系统的部分程序框图. 该实验系统分为“测量光波波长”、“测量介质折射率”、“测量微小位移”以及“实验说明”4 个部分, 可以通过界面左上角的选项卡来选择. 实验说明部分包含了本实验用到的实验原理及本系统的详细操作教程, 使用者可以通过说明文件学习实验原理及本系统的使用方法. 实验部分可模拟真实实验调整相关参数, 并能够观察到条纹的实时变化和计算结果. 可调整的参数包括光源、动镜距离、介质类型等. 在开始仿真实验时需要先打开左下角的光源开关并调整光源光强, 否则光屏上不会出现任何条纹; 更换光源类型时条纹的颜色会随光源颜色一起改变; 调整 d 和 L 的大小时, 可以观察到条纹的冒出缩进或变大变小. 由此说明, 本系统比较好地还原了真实实验情形.

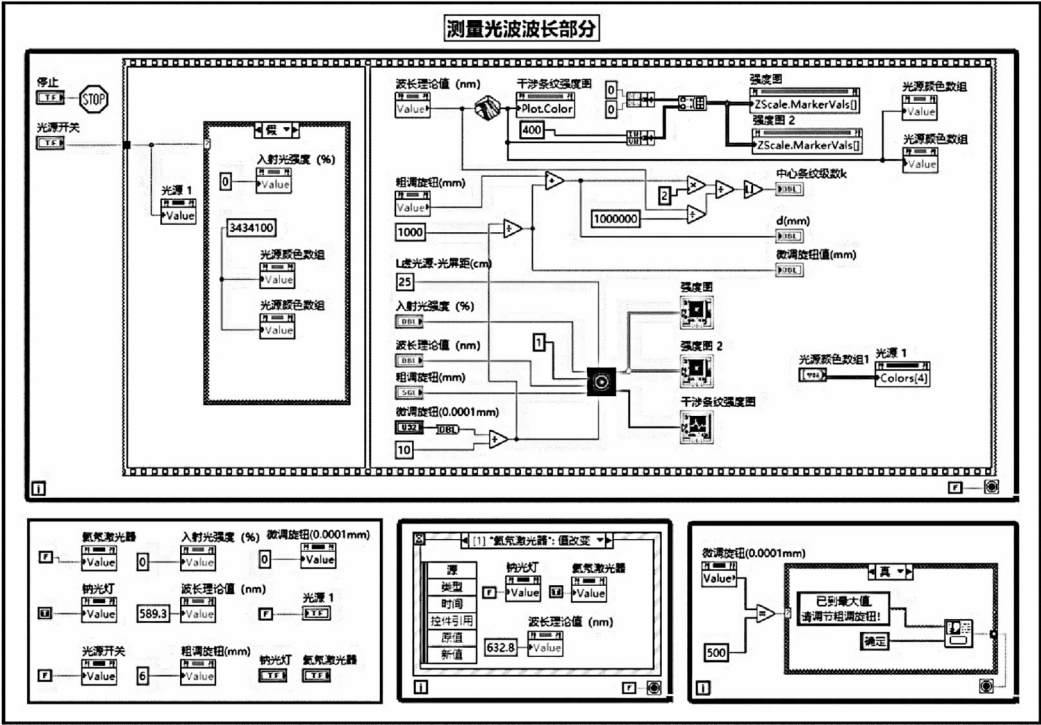


图 2 测量光波波长部分程序框图

2.2 测量光波波长实验演示

图 3 为测量光波波长实验系统界面. 此部分选择了“钠光灯”、“氦氖激光源”这两种较为常见的单色光源, 其中钠光灯的波长为 589.3 nm, 氦氖激光源的波长为 632.8 nm. 页面右下方的灰色部分为控制区, 可选择光源类型并对 L 及 d 进行调整; 对 d 还可以进行微米级别的微调. 可在界面右下角的文本框中观察到此时 d 的大小、中心条纹的级数 k 以及实验得到的光波波长的结果.

实验时, 首先在界面右下方的“光源选择”处选择一种光源类型, 然后打开页面左下角光源的开关, 并调整“入射光光强”至某一个合适的值, 使光屏上出现干涉条纹, 调整 d 的大小, 记录两次 d, k 的取值得到 $\Delta d, \Delta k$, 再根据公式

$$\lambda = \frac{2\Delta d}{\Delta k}$$

(8)

计算得到波长的值.

以测量钠光灯波长为例, 在“光源控制”处打开光源开关, 将光强调至合适值. 调整“粗调旋钮”与“微调旋钮”的位置, 将不同位置的 d 与 k 的值记入表 1, 再根据式(8) 计算出对应的光波长.

图 3 测量光波波长实验系统界面

表 1 测量光波波长实验数据记录

实验编号	d_1/mm	d_2/mm	k_1	k_2	λ/nm
1	3.126 4	4.998 9	10 610	16 965	589.299 8
2	4.256 88	6.458 72	14 454	21 931	588.963 5

由表1可知,实验的计算值与标准值相比相差很小,有一定偏移,与实际情况相符合,可见本系统可较好地模拟测量光波波长的实验.

2.3 测量介质折射率实验演示

图4为测量介质折射率实验室系统界面. 图1所示的光路中, 如果在 G_1 和 M_2 之间插入一个厚度为 t 的介质片, 则会引入额外光程差 δ' , 使干涉条纹发生改变.

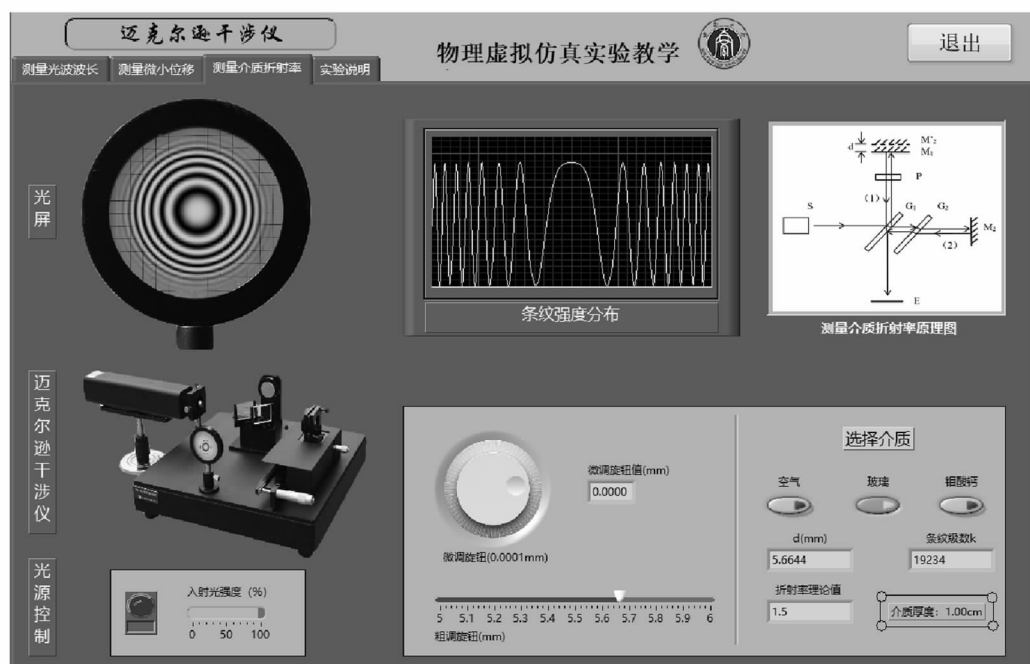


图 4 测量介质折射率实验系统界面

$$\delta' = 2t(n - 1)$$

(9)

以测量厚度为 1 cm, 折射率为 1.5 的玻璃片为例. 实验时, 首先打开页面左下角光源的开关(此实验中使用波长为 589.3 nm 的钠光灯), 并调整“入射光光强”至某一个合适的值, 使光屏上出现干涉条纹, 顺时针转动微调旋钮, 同时观察干涉条纹变化, 当干涉环中心最亮即条纹强度分布图中间位置达到极大值时, 记下此时动镜位置读数 d_1 , 然后在界面右下方的“选择介质”处选择插入玻璃介质, 调节“粗调旋钮”, 使光屏上条纹数目大致与插入介质前相同, 再调节“微调旋钮”, 尽可能地使光屏上干涉图样与插入介质前相同, 记下动镜位置读数 d_2 , 测量两次并记录入表 2, 再由式(2) 计算出介质的折射率.

表 2 测量介质折射率实验数据记录

实验次数	d_1/mm	d_2/mm	n
1	4.675 7	-0.323 0	1.499 8
2	5.084 2	0.005 2	1.507 9

从表 2 可以看出计算值与标准值对比可发现结果误差很小, 但有一定偏移, 与实际情况相符合, 可见本系统可较好地模拟测量介质折射率的实验.

2.4 测量微小位移实验演示

图 5 为测量微小位移实验系统界面. 此部分以“测量金属线膨胀系数”实验为例演示了用迈克尔逊干涉仪测量微小位移的方法. 将金属棒与迈克尔逊干涉仪的动镜连接在一起, 金属棒长度变化时会带动动镜移动, 从而使干涉条纹发生变化, 数出通过条纹变化值 Δk 后, 可计算出金属线膨胀系数, 其中金属棒原长 l 给定为 50 cm, 金属线膨胀系数的计算公式为

$$\alpha = \frac{\lambda \Delta k}{2l \Delta t}$$

(10)

先打开左下角光源开关(此实验中使用波长为 632.8 nm 的氦氖激光源), 并调整“入射光光强”至某一个合适的值, 使光屏上出现干涉条纹; d 可保持默认值. 屏幕上出现干涉条纹后, 在界面右下角选择好金属棒的材质、设定好加热的温度(初始温度默认为 25 $^{\circ}\text{C}$) 后, 点击“加热开关”开始加热, 加热需要大约 20 s, 可通过“加热进度”进度条查看加热进度. 加热的光屏上会出现条纹变化. 记录下加热前后的中心条纹级数 Δk 与金属线膨胀系数 α , 通过公式(6)、(10) 可算出金属棒变化长度 Δl 与金属线膨胀系数 α , 这两个值可通过界面右下角的文本框观察到.

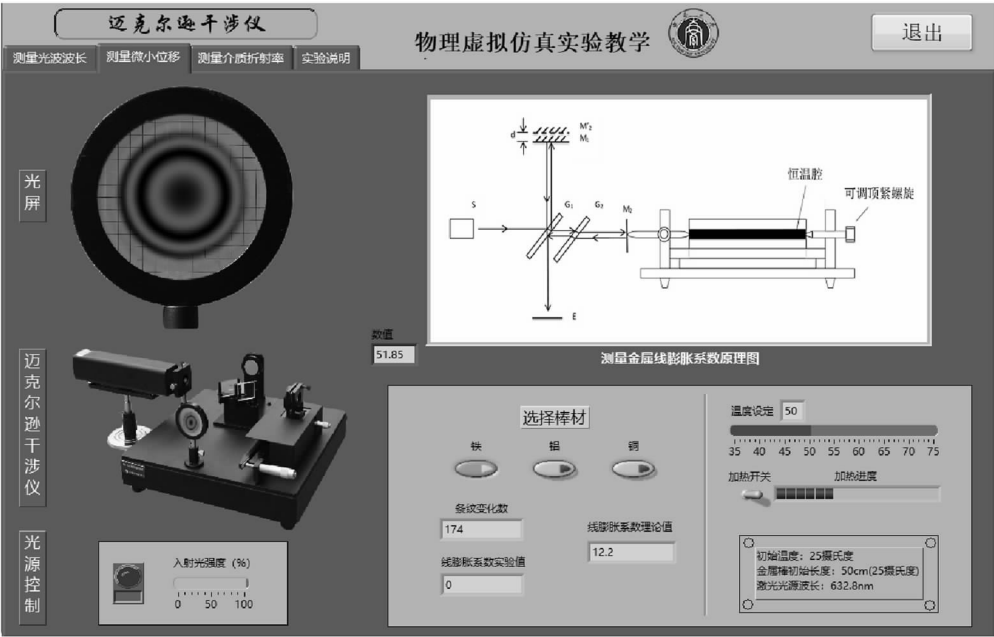


图 5 测量微小位移实验系统界面

以测量铝线膨胀系数为例, 铝线膨胀系数 α 标准值为 $23.2 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. 初始温度为 25 $^{\circ}\text{C}$, 调出干涉条

纹后, 设定棒材与加热温度, 打开加热开关, 等待加热结束后记录下条纹变化数, 根据(8) 式计算出位移量, 根据(10) 式计算出线膨胀系数. 表 3 为测量金属线膨胀系数的实验数据.

表 3 测量金属线膨胀系数实验数据记录

实验次数	$\Delta t/^{\circ}\text{C}$	Δk	$\Delta d/\mu\text{m}$	$\alpha/1 \times 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$
1	20	725	213.621	22.939
2	25	1 087	320.284	22.929

从表 3 可以看出, 计算值与标准值对比可发现结果误差很小, 但有一定偏移, 与实际情况相符合, 可见本系统可较好地模拟测量金属线膨胀系数的实验.

2.5 实验说明部分

用户可在此选项卡内查看实验相关原理及本系统的详细操作步骤. 图 6 为实验说明界面.

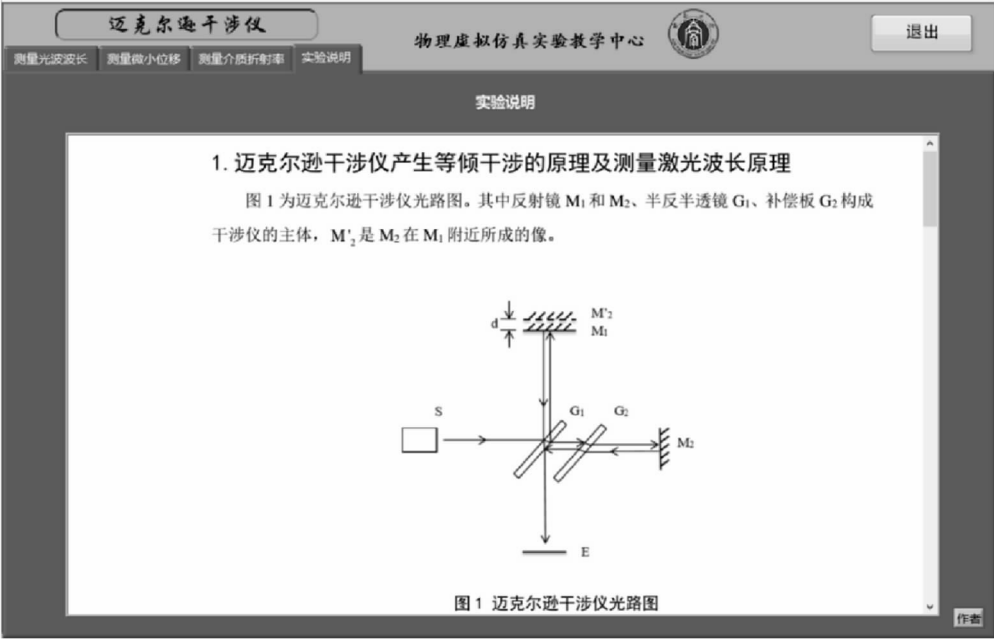


图 6 实验说明界面

3 结 语

本研究开发出一种基于 LabVIEW 的迈克尔逊干涉仪虚拟仿真实验系统, 能够模拟测量光波波长、介质折射率和微小位移实验. 实验结果表明, 该虚拟仿真实验系统生动直观地展示了实验中各种现象, 并辅以相应的数据处理功能, 能加深学生对测量光波波长、测量介质折射率和测量微小位移等 3 个实验及迈克尔逊干涉仪相关知识点的理解, 并帮助学生验证自己的实验结果. 在物理教学过程中, 本系统可帮助学生进行课前预习、课后复习或自学该实验, 教师则可利用此系统进行课堂演示, 以得到更好的教学效果. 本系统的开发充分展示了虚拟仿真实验系统应用于物理教学过程中的实践价值, 能够为一线教育工作者开发基于 LabVIEW 的虚拟仿真实验提供一定的借鉴和参考.

参考文献:

[1] MICHELSON A A. The Relative Motion of the Earth and of the Luminiferous Ether [J]. American Journal of Science, 1881(22): 120-129.

[2] 南 阳,熊 畅,唐 芳,等. 迈克尔逊干涉仪双透射光干涉测激光波长 [J]. 大学物理实验, 2017, 30(3): 39-42.

[3] 汪晓春,杨博文,何冬慧. 一种基于迈克尔逊干涉仪测量透明液体折射率的方法, 光学仪器, 2012, 34(5): 1-4.

[4] 孙宇航. 用迈克尔逊干涉仪测定透明介质的折射率 [J]. 西安邮电大学学报, 2009, 14(1): 157-158.

[5] 熊泽本. 基于迈克尔逊干涉仪的微小长度测量装置的设计 [J]. 荆楚理工学院学报, 2012, 27(2): 56-58.

[6] 万 伟. 迈克尔逊干涉仪测透明介质厚度及折射率 [J]. 大学物理实验, 2013, 26(5): 22-24.

- [7] 赵育良, 王淑娟. 基于迈克尔逊干涉仪的激光 CCD 微位移测量系统研究 [J]. 科学技术与工程, 2010, 10(7): 1628-1632.
- [8] 李 丹, 闫 树. 基于 LabVIEW 的船舶推进监控系统的设计 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(9): 168-171.
- [9] 吕 亮, 曹宏昊, 汪 洪, 等. 基于 LabVIEW 的迈克尔逊干涉仪测量空气折射率虚拟实验研究 [J]. 大学物理实验, 2013, 26(6): 70-73.
- [10] 张 黎, 蔡 亮. 基于 LabVIEW 的虚拟信号发生器的设计与实现 [J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(1): 82-85.
- [11] 李钰杰, 谭兴文, 邓 涛, 等. 基于 LabVIEW 的物理虚拟仿真实验系统设计 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2017, 42(9): 201-205.
- [12] 谭志存, 唐 曦. 基于 LabVIEW 的光纤光学实验室综合测控系统设计 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(9): 156-161.

On a Virtual Simulation Experiment System of Michelson Interferometer Based on LabVIEW

HU Wei-dong, ZOU Zhi-xing, ZHANG Ye,
TANG Xi, TAN Xing-wen, GAO Zi-ye

School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: One of important precision optical experimental instruments is the Michelson interferometer, which can be used in a variety of experiments and needs to be mastered by students in college physics course. However, due to the lack of equipment, venues, and so on, students can not master the knowledge of Michelson interferometer well. According to the teaching requirements of measuring laser wavelength, the refractive index of medium and microdisplacement, a new virtual simulation experiment system of Michelson interferometer based on graphical programming language LabVIEW have been developed. The system can be used not only to learn the working principle of the Michelson interferometer and the principle of related experiments, but also to demonstrate the basic experimental operations of the above three experiments and to perform real-time data processing. Moreover, the virtual experiment system of Michelson interferometer based on LabVIEW also has the advantages of a simple interface, strong interaction, and so on, which can effectively stimulate students' interest in learning and enhance the effect of classroom teaching.

Key words: LabVIEW; Michelson interferometer; virtual reality; experimental teaching

责任编辑 潘春燕