

文章编号:1005-4642(2020)05-0054-04

基于旋转上升式光路的小型光杠杆

顾倍康, 柳 铄, 刘振鹏, 隗群梅, 尹教建

(中国石油大学(华东)理学院, 山东 青岛 266580)

摘要:将传统光杠杆中平面镜和标尺之间的平面光路立体化, 设计了多次反射、旋转上升式光路. 以 Solidworks 软件为设计手段, 利用 3D 打印技术, 制作了激光器为光源的小型光杠杆装置. 利用传统光杠杆和小型光杠杆对钢丝的杨氏模量进行了对比测量研究. 实验结果表明, 设计制作的小型光杠杆装置空间尺寸小, 操作简单, 仪器制作方便, 测量结果准确. 对于开拓学生思维, 提高学生的创新能力有一定的借鉴意义.

关键词:光杠杆; 反射; 杨氏模量; 激光器

中图分类号: O435.1

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2020.05.013

静态拉伸法测量金属丝的杨氏模量是大学物理实验中重要的基础性项目. 其基本原理是利用光杠杆的放大原理将拉伸的微小量转化为标尺长度等宏观的测量. 该实验原理直观, 方法巧妙, 在仪器调整和数据处理方面具有代表性, 被许多高校所采用^[1-1]. 但是其不足也较为明显, 主要集中在平面镜转角过大引起系统误差增大、实验仪器难以调节以及占地面积较大导致实验室空间利用系数低等方面^[3-9]. 很多实验者对光杠杆测量系统进行了改进^[10-18], 其中常用的方法是利用激光器代替望远镜以及利用多组平面镜增加光的反射次数. 采用平面镜组后, 经过光的多次反射, 虽然能够减小横向尺寸, 但纵向尺寸也会增加.

基于上述现状, 在分析传统光杠杆的放大原理不足的基础上, 以 Solidworks 为设计和检验手段, 确立了多次反射、旋转上升式立体光路. 利用 3D 打印技术, 以激光器为光源, 制作了可以直接安装在杨氏模量测量仪上的小型光杠杆装置.

1 光杠杆的基本原理

光杠杆测量微小长度变化量原理如图 1 所示^[19]. 当光杠杆下降为 ΔL 时, 可动平面镜 M 绕 O 转过角度 θ , 可动平面镜法线也将转过角度 θ . 根据反射定律, 反射光线转过 2θ 角度, 在望远镜

十字叉丝的位置可见标尺像的刻度值由 n_0 变为 n_1 , 若 M 与标尺之间的距离为 D, 则有:

$$\tan \theta = \frac{\Delta L}{l}, \quad (1)$$

$$\tan (2\theta) = \frac{\Delta n}{D}, \quad (2)$$

当 θ 很小时

$$\Delta n = \frac{2D}{l} \Delta L, \quad (3)$$

式中 $\Delta n = n_1 - n_0$.

可见放大倍数 $\frac{2D}{l}$ 与可动平面镜与标尺之间的距离 D 成正比. 正常情况下长度 l 可以设为 7.84 cm, 若将 0.25 mm 的微小量放大至 0.8 cm, 则放大倍数为 32, 可动平面镜与标尺之间的距离

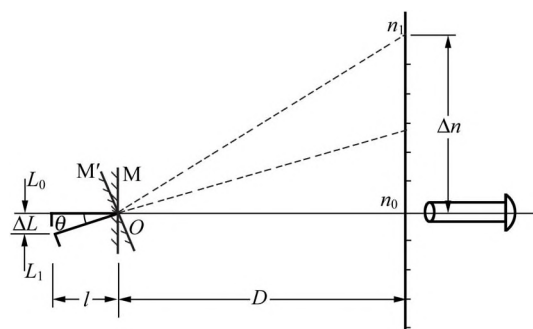


图 1 光杠杆原理图

收稿日期: 2019-12-25; 修改日期: 2020-03-02

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目 (No. 201910425029); 中国石油大学(华东)常规教学研究项目 (No. JY-B201858)

作者简介: 顾倍康(1997-), 男, 河北石家庄人, 中国石油大学(华东)理学院 2016 级本科生.

通信作者: 尹教建(1976-), 男, 山东新泰人, 中国石油大学(华东)理学院讲师, 博士, 主要从事离子注入光波导研究及物理实验教学.



D 为 1.25 m,因此,该实验装置占地面积较大.

由图 1 可知,光杠杆光路中仅有 1 次反光,并且入射、反射光仅在竖直平面内移动. 要增大 Δn 只能增加可动平面镜与标尺之间的距离 D ,这是实验装置占地面积较大的原因.

2 多次反射、旋转上升式立体光路设计

如果用激光器代替望远镜,并在水平面内斜入射可动反射镜,增加多组竖直的平面镜,构造有多次反射的立体化光路,可使得光杠杆尺寸大大减小.

在水平面内边长为 D 的等边 $\triangle ABC$ 的 3 个顶点上竖直安装 3 块平面镜 M_1, M_2 和 M_3 ,每块平面镜与角平分线垂直,其俯视图如图 2 所示. 当有光从 B 点出发沿着 BA 照射平面镜 M_1 时,经过平面镜 M_1 和 M_3 的反射,最终会回到 B 点,构成闭合的光路.

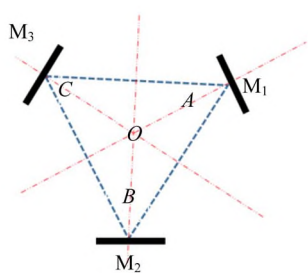


图 2 3 组竖直平面镜布置的俯视图

假设用平面镜的中线代替平面镜,如图 3 所示,在平面镜 M_1 的下端放置有可动平面镜 M ,设后足下降为 ΔL ,可动平面镜 M 绕 A 点在角平分线 OA 平面内转过小角度 θ ,则光线经可动平面镜 M 反射后以 2θ 入射到平面镜 M_3 ,如图 3(a)所示,光点在竖直方向的移动量为 Δn_1 . 平面镜 M_3 将光以 2θ 反射到平面镜 M_2 ,如图 3(b)所示,光点在竖直方向的移动量为 Δn_2 . 平面镜 M_2 将光以 2θ 反射回平面镜 M_1 ,如图 3(c)所示,完成 1 次旋转上升,如图 3 中红颜色的光线所示.

此时,光点在竖直方向的移动量为 Δn_3 ,则

$$\Delta n_1 = \Delta n_2 = \Delta n_3 = D \tan(2\theta), \quad (4)$$

相比较于动平面镜 M 未旋转的位置,光点在竖直方向的改变量为

$$\Delta n = 3\Delta n_1 = 3D \tan(2\theta), \quad (5)$$

当有 n 次旋转上升时(图 3 中绿颜色的光线为第 2 次旋转上升示意图),则有

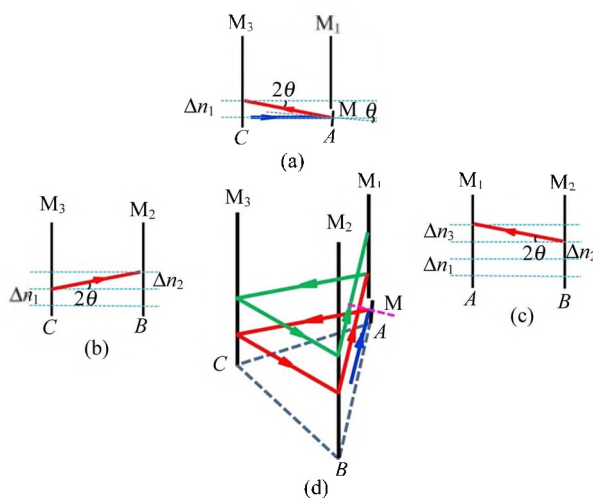


图 3 旋转上升式立体光路图

$$\Delta n' = 3nD \tan(2\theta), \quad (6)$$

由于 θ 很小,将式(1)代入可得

$$\Delta n' = \frac{6nD}{l} \Delta L. \quad (7)$$

相比式(3)可知,放大倍数 $\frac{6nD}{l}$,为传统光杠杆放大倍数的 $3n$ 倍,设经过 3 次旋转上升,即放大倍数为 32 倍时,距离 D 为 13.9 cm,可见距离 D 大大减小.

3 小型光杠杆的设计与制作

基于上述光路图原理,利用 Solidworks 软件设计了立体光杠杆装置,如图 4 所示.

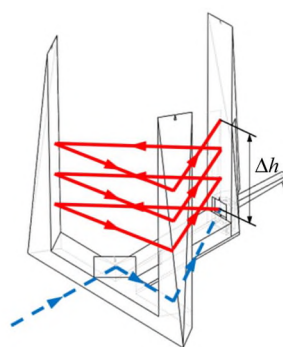


图 4 基于 Solidworks 设计的立体光杠杆装置

由图 4 可知,在 T 字型底座上竖立 2 个棱柱,其内侧面用于粘贴条形平面镜,在 1 个棱柱下端开孔,放置带有反射镜的三足支架,上端中心线一侧竖直的贴有标尺,其正对的横梁上装有竖直放置的斜反射镜,当激光光束正对三足支架反射

镜入射,经斜反射镜反射后进入与其相对棱柱平面镜,再经过反射后入射三足支架反射镜,入射光路如图4中虚线所示.当三足支架反射镜后足下降时,可将反射光束会进行旋转上升式反射,有效光路如图4中实线所示.

有效光路在水平面上的投影如图5所示,距离 $D=100\text{ mm}$. 三支点光杠杆反射镜支架设计如图6所示,其长度 l 为 55 mm . 为了保证加工精度,图4中的光杠杆装置采用3D打印技术加工,加工完成后,贴上平面镜.

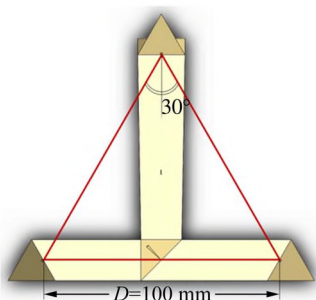


图5 有效光路在水平面上的投影

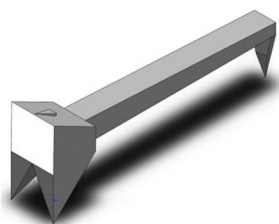


图6 三支点光杠杆反射镜支架设计图

设计的总装配图如图7所示,实际装置如图8所示.3D打印的光杠杆装置、激光器以及激光器三维调节支架放置在台阶型钢板上,采用2块木工G字夹将钢板固定在杨氏模量测量平台上.

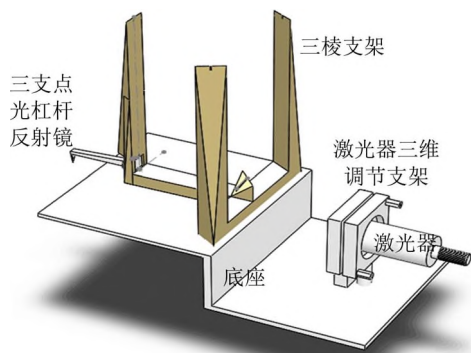


图7 光杠杆总装配图



图8 实际总装图

4 杨氏模量对比测量实验

根据文献[19]的拉伸方法测量步骤,利用传统光杠杆和改进光杠杆对相同的钢丝的杨氏模量进行了对比测量. 钢丝的直径如表1所示,由表1得 $\bar{d}=0.5416\text{ mm}$,钢丝长度以及2种光杠杆的相关参量如表2所示. 传统光杠杆和改进光杠杆加减砝码测试结果如表3所示,其中 m 为砝码的重量, n_{t1} 为传统光杠杆加砝码时的读数, n_{t2} 为传统光杠杆减砝码时的读数, n_{i1} 为改进光杠杆加砝码时的读数, n_{i2} 为改进光杠杆减砝码时的读数. 根据表3,利用逐差法计算得到的传统光杠杆 $\frac{\Delta n_t}{m} = 0.8128\text{ cm/kg}$,改进光杠杆 $\frac{\Delta n_i}{m} = 0.4861\text{ cm/kg}$.

表1 钢丝直径 d 读数

N	d/mm	N	d/mm
1	0.545	4	0.535
2	0.539	5	0.544
3	0.545		

表2 钢丝长度以及光杠杆参量

光杠杆	L/m	l/mm	D/mm	n
传统光杠杆	1.4000	81.2	1354.2	1
改进光杠杆	0.8400	55.0	100.0	3

表3 传统光杠杆和改进光杠杆加减砝码测试结果

m/kg	n_{t1}/cm	n_{t2}/cm	n_{i1}/cm	n_{i2}/cm
0	0	0.05	0	0.05
1.00	0.91	0.91	0.50	0.55
2.00	1.70	1.75	1.00	1.05
3.00	2.55	2.55	1.40	1.50
4.00	3.30	3.35	2.00	2.00
5.00	4.10	4.10	2.50	2.50

拉伸法杨氏模量测量 E 为^[19]

$$E = \frac{4FL}{\pi d^2 \Delta L}, \quad (8)$$

将式(3)代入式(8)可得传统光杠杆杨氏模量测量结果为

$$E_c = \frac{8D_c mgL_c}{\pi d^2 l_c \Delta n_c} = 2.44 \times 10^{11} \text{ N/m}^2,$$

将式(7)代入式(8)可得改进光杠杆杨氏模量测量结果为

$$E_n = \frac{24nD_n mgL_n}{\pi d^2 l_n \Delta n_n} = 2.41 \times 10^{11} \text{ N/m}^2,$$

两者之间的相对偏差为 1.2%。

为了进一步说明 2 种光杠杆测量时的异同,根据表 3 绘制了加减砝码测量曲线,如图 9 所示。图 9 表明,2 种光杠杆在加减砝码过程中都有良好的重复性。但相比较而言,改进光杠杆的重复性稍差,其原因可能是改进光杠杆需要更为精密的组装要求,安装时精度稍差造成的。

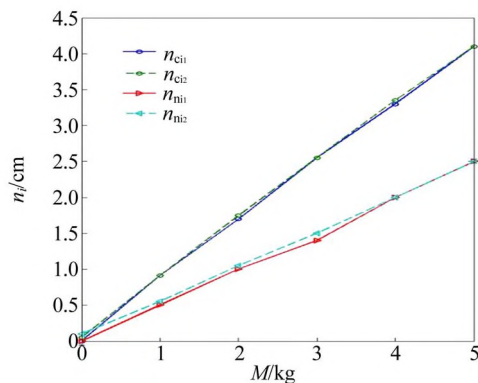


图 9 2 种不同光杠杆加减砝码的测试数据

5 结束语

分析了传统光杠杆的放大原理,指出了其空间利用率较低的原因,设计了在三棱柱平面镜间多次反射、旋转上升式的立体光路,基于 Solid-works 设计了立体光杠杆装置,并利用 3D 打印技术进行了加工,以激光器为光源,制作了可以直接安装在杨氏模量测量仪支架上的小型光杠杆装置。与传统的光杠杆装置对同一钢丝的杨氏模量对比测量结果表明,小型光杠杆装置加减砝码的读数具有较好的重复性,具有相同的测量精度。

参考文献:

[1] 周晓明. 三种杨氏模量测量方法比较[J]. 实验科

学与技术,2011,9(6):101-103.

- [2] 徐翠艳,符伟. 杨氏模量实验的光杠杆法原理辨析[J]. 渤海大学学报(自然科学版),2016,37(4):42-45,51.
- [3] 林佩珠. 普通物理实验微课程开发——以“钢丝杨氏模量的测量”为例[J]. 物理实验,2016,36(10):30-33.
- [4] 唐子彦,冷文秀. 非平行板电容器测量杨氏模量的改进[J]. 物理实验,2018,38(7):7-50.
- [5] 关寿华,徐辑彦. 用光杠杆测量杨氏模量的误差分析及改进[J]. 大连民族大学学报,2004,6(1):11-12.
- [6] 高海林. 拉伸法测金属杨氏模量实验的改进[J]. 实验科学与技术,2006,4(4):65-68.
- [7] 姬忠涛,王连友,陶淑芬. 利用激光测量金属丝杨氏模量的实验研究[J]. 曲靖师范学院学报,2008,27(6):49-52.
- [8] 许红霞. 拉伸法测金属钢丝杨氏弹性模量优缺点探究[J]. 科技资讯,2017,15(2):160-162.
- [9] 房鑫,刘成森,张因因,等. 数字激光散斑照相技术测金属杨氏模量[J]. 物理实验,2018,38(3):21-23.
- [10] 唐文强. 光杠杆平面镜对成像清晰度分析及新型光杠杆[J]. 大众科技,2010(10):22-22.
- [11] 殷鹏飞,薛健,王杨. 多级光杠杆放大原理及探讨[J]. 大学物理实验,2012,25(1):20-22.
- [12] 时有明,杨远洪,陈卓,等. 多级光杠杆测量微小形变量研究[J]. 曲靖师范学院学报,2012,31(3):20-22.
- [13] 刘颖,张嘉誉,王颖,等. 激光光杠杆弯曲法测杨氏模量[J]. 大学物理实验,2015(6):28-30.
- [14] 郭涛,盛琛,杨悦. 光杠杆测量杨氏模量的研究[J]. 大学物理,2016,35(3):40-42.
- [15] 王建伟,易俊全,罗浩,等. 基于杨氏模量仪的微小伸长量测量方法改进与实践[J]. 大学物理实验,2018,31(3):55-58.
- [16] 骆敏,骆泽如,陈蕾,等. 多重反射激光光杠杆测量金属线胀系数[J]. 物理实验,2018,38(7):14-16,22.
- [17] 谢杨莹,秦玉霞,杨旭昕,等. 拉伸法测头发丝杨氏模量实验装置的改装[J]. 物理实验,2018,38(9):51-54.
- [18] 王小怀. 利用光杠杆测量流体压强及流速的微小变化[J]. 物理实验,2018,38(10):21-23.
- [19] 李书光,张亚萍,朱海丰. 大学物理实验[M]. 北京:科学出版社,2012:109-115.

(下转 61 页)

Development and application of multi-functional horizontal projectile experiment device

XIAO Hong, ZHOU Xiang-ping

(Physics and Electronic Information College, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: By using daily necessities, magnetic control and optical control switches, a multi-functional horizontal projectile experiment device with simple operation and obvious experimental effect was developed. It could not only visually show the synchronization of horizontal and vertical movement of horizontal projectile motion, but also could analyze and verify the experimental phenomena with the help of Tracker software, which solved the problem in traditional horizontal projectile experiment device such as single function, difficult in tracing and inaccuracy etc.

Key words: horizontal projectile motion; horizontal movement; vertical movement; Tracker

[责任编辑:尹冬梅]

(上接 57 页)

Development of small light lever based on rotating rising optical path

GU Bei-kang, LIU Shuo, LIU Zhen-peng, WEI Qun-mei, YIN Jiao-jian

(College of Science, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Based on the deficiency of the traditional optical lever device, the plane light path between the plane mirror and ruler in the traditional optical lever was three-dimensional, and a multi-reflection and rotating rising light path was designed. Using Solidworks software as a design means, a laser-based micro-light lever device was produced using 3D printing technology. Taking the Young modulus measurement of wire as an example, a comparative experiment was carried out using traditional optical lever and micro-optical lever. The experimental results shown that the micro-optical lever designed and produced was small in size, simple to operate, convenient to make instruments and was accurate to measure. It was reference to develop students' thinking and improve students' innovation ability.

Key words: optical lever; reflection; Young modulus; laser

[责任编辑:郭伟]