

基于磁致旋光增强效应的 Verdet 常数自动化测量装置设计

徐红昌¹ 王晓杰^{1,2}

(¹ 南开大学物理科学学院, 天津 300071; ² 基础物理国家级实验示范中心(南开大学), 天津 300071)

摘要 磁致旋光效应相关实验是研究光与物质相互作用的重要实验之一。本文利用单片机和磁致旋光增强效应设计了一种自动化的磁光材料 Verdet 常数测量装置, 通过引入反射腔实现磁致旋光增强效应, 并利用 Arduino、光电二极管、按键模块、键盘模块和 LCD 液晶屏等实现了实验数据的采集。通过移动平均和牛顿迭代法实现了数据处理。使用该装置测量不同磁场强度下磁光玻璃的 Verdet 常数, 结果证明测量精度较高。该装置融合了磁光学和电子信息技术等领域的内容, 能够激发学生学习兴趣、培养学生动手能力。

关键词 Arduino; 反射腔; 磁致旋光效应; Verdet 常数

DESIGN OF AUTOMATIC DEVICE FOR MEASURING VERDET CONSTANT BASED ON MAGNETIC ROTATION ENHANCEMENT EFFECT

XU Hongchang¹ WANG Xiaojie^{1,2}

(¹ School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071;

² National Demonstration Center for Experimental Physics Education, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract Magnetic rotation effect is one of the important experiments to study the interaction between light and matter. This paper designs an automatic Verdet constant measuring device for magneto-optical materials by using Single-chip microcomputer and magneto-optical rotation enhancement effect. A reflective cavity is introduced to enhance the magnetic optical rotation effect. Arduino, photodiodes, button modules, keyboard modules, and LCD screens are used for data acquisition. The data are processed by moving average and Newton iteration method. The Verdet constant of magneto-optical glass under different magnetic field intensity is measured by this device. The results show that the measurement accuracy is high. This device combines elements from fields such as magneto-optics and electronic information technology to stimulate students' interest in learning and cultivate their hands-on ability.

Key words Arduino; reflection cavity; magnetic rotation effect; Verdet constant

磁致旋光效应是大学物理中的一个重要的现象, 指的是当线偏振光穿过材料并且在传播方向

有一个磁场时, 偏振光的偏振面会发生旋转。磁致旋光效应是理解光与物质相互作用、光的电磁

收稿日期: 2024-08-04

基金项目: 教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会课题(DJZW202310hb); 教育部供需对接就业育人项目(2023121911686); 南开大学教学改革项目(24NKZZYQ09, NKJG2025088)。

通信作者: 王晓杰, wxj@nankai.edu.cn。

引文格式: 徐红昌, 王晓杰. 基于磁致旋光增强效应的 Verdet 常数自动化测量装置设计[J]. 物理与工程, 2025, 35(4): 192-197.

Cite this article: XU H C, WANG X J. Design of automatic device for measuring Verdet constant based on magnetic rotation enhancement effect[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(4): 192-197. (in Chinese)

理论等概念的一个重要实例。在现代光学技术特别是激光技术中,磁致旋光效应获得了重要的应用,例如制作光调制器件、光开关等^[1]。为了加深对磁致旋光效应的理解与应用,大部分高校开设了相关的物理实验。在磁致旋光效应中,Verdet常数是衡量磁光材料旋光性能的一个重要参数,所以精确测量磁光材料的 Verdet 常数是十分重要的。目前,大学物理实验中测量磁光材料 Verdet 常数的方法主要有 Malus 定律法^[2]、消光法^[3]、磁光调制法^[3]以及磁致旋光增强效应法^[2,4]。以上测量方法都是通过手动测量相关数据,并通过一定的数学计算,才能得到磁光材料的 Verdet 常数,具有一定局限性。

为了进一步拓展物理实验内容,克服传统实验装置的不足,本文基于 Arduino 对原有实验进行改进,实现了磁光材料 Verdet 常数的实时测量。同时,将测量结果与传统方法进行比较,证明了该装置测量结果的精确性。

1 实验装置设计

大多数材料的磁致旋光效应十分微弱,旋光角难以直接精确测量。磁致旋光效应具有非互易性,即线偏光在通过磁场中的磁光材料时,无论是沿着磁场方向还是逆着磁场方向,线偏光偏转的方向始终是一样的^[4]。利用磁致旋光效应的非互易性,可以设计在弱磁场和小光程限制条件下显著提高测量精度的反射腔。例如梁忠诚等人设计的基于部分反射镜-全反镜的旋光增强器和胡宇阳等人设计的基于双反射镜的反射腔^[2,4]。

在磁致旋光实验中,需要测量施加磁场时的入射光强和出射光强,通过计算得到 Verdet 常数。为了实现 Verdet 常数自动化测量,需要使用光电二极管对入射光强和出射光强进行采集,并使用单片机进行自动化的数据处理。为此,基于部分反射镜-全反镜的反射腔,本文设计的自动化测量装置如图 1 所示。

反射腔由分束镜、部分反射镜和全反镜构成,通过起偏器的线偏光被非偏振型分束镜分成两束,反射光光强被光电二极管 1 测量,透射光被部分反射镜分成两束,反射的一束经分束镜进入检偏器,透射的一束会在部分反射镜和全反镜之间来回多次反射,进而多次通过磁光材料,并经部分

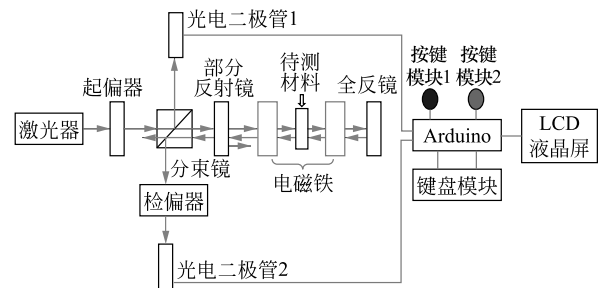


图1 Verdet常数自动化测量装置示意图

反射镜、分束镜和检偏器进入光电二极管 2。光电二极管 2 测量到的光强 I 、光电二极管 1 测量到的光强 I_0 与线偏光通过磁光材料一次后的旋转角 θ 的关系为

$$I = I_0 T_1 T_2^2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin^2(2n\theta) T^{2n} R_2^{n-1} \quad (1)$$

其中, T_1 是分束镜的透射率, T_2 和 R_2 分别是部分反射镜的透射率和反射率, T 是磁光材料透射率。Verdet 常数自动化测量装置以单片机为核心,引入光电二极管测量光强,利用按键模块实现光强的采集,通过键盘模块实现其他参数的输入,最后将数据处理得到的 Verdet 常数在 LCD 液晶屏上输出。

1.1 硬件模块

1.1.1 单片机模块

Arduino 是一种开源电子原型平台,可以用来制作交互式的电子项目^[5]。Arduino 包括硬件和软件两部分。Arduino 的硬件是 Arduino UNO,通过 USB 数据线连接到电脑上以实现供电和数据传输功能。Arduino 的软件是 Arduino IDE,它提供了一个便于编写和上传代码的集成开发环境。Arduino 广泛应用于大学物理实验的改进和创新^[6,7]。

1.1.2 光电二极管

光电二极管是一种能够将光信号转化为电信号的光电探测器。光电二极管的基础结构是 PN 结,当足够强的光强照射在 PN 结上就会产生光电流,且电流强度与入射光强成线性关系,因此可以通过测量电流强度得到入射光强。本文所使用的是 LSSP-2.5 硅光电二极管,光谱响应范围为 400~1100nm,感光面积为 2.5mm×2.5mm。在 532nm 激光辐照下的灵敏度为 0.22mA/mW。由于光电二极管输出的是电流,而 Arduino 检测的是电压,所以将光电二极管与另一个电阻串联,并

且使光电二极管处于反向偏置模式,可以提高灵敏度、拓宽测量量程,使测量结果更准确、可靠。如图 2 所示,将光电二极管阴极(N区)与 Arduino UNO 的 5V 引脚相连,阳极(P区)与 4.7k Ω 电阻的一端和 Arduino UNO 的 A0 引脚相连,电阻的另一端与 GND 引脚相连。

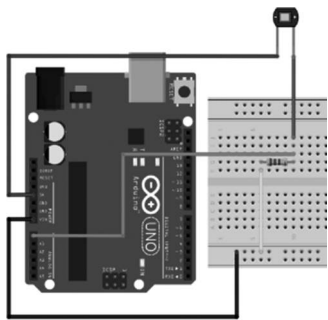


图 2 光电二极管连接图

改变激光强度,用光功率计读出实际光强大小,并记录相应的光电二极管模拟输出值,得到光电二极管的电压(U)-光强(I)响应曲线,结果如图 3 所示。可以看出, U 与 I 满足线性关系,并得到 LSSP-2.5 硅光电二极管的光强测量范围为 6 μ W~5.27mW。

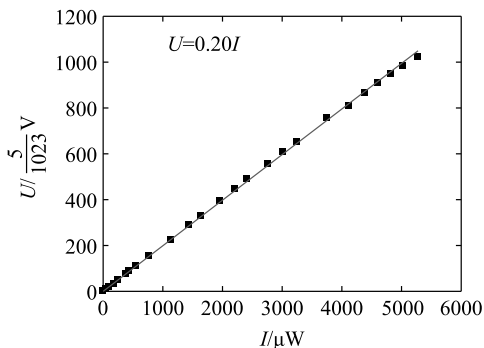


图 3 硅光电二极管电压(U)-光强(I)响应曲线

利用线性拟合关系将电压模拟输出值转化为光强。将光电二极管输出的计算光强与实际光强比较,计算误差。结果表明:光强较小时由于暗电流的存在,存在一定测量误差,经计算误差不超过 2.8%,能够满足实验要求。

1.1.3 按键模块

本文使用三针按键模块来控制实际光强的计算和存储。按键模块包括按键开关和上拉电阻两部分。当按键被按下或释放时,通过向 Arduino UNO 输入不同的电平信号再配合相应代码触发

相应功能。如图 4 所示,将按键模块的 VCC 引脚与 Arduino UNO 的 5V 引脚相连,OUT 引脚与数字引脚 11 相连,GND 引脚与 GND 引脚相连。

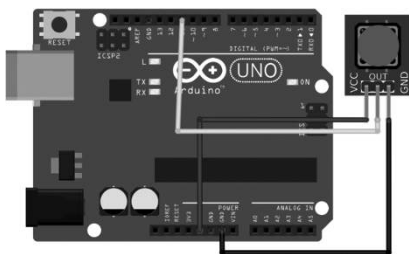


图 4 按键模块连接图

本文通过定义布尔型变量读取按键开关按下或释放的状态,并根据按键开关的状态来决定当前光强值是固定值还是继续随着模拟输出值变化而变化。本文最终实现当按下和释放一下按键后,光强值变为固定值,数值为最新一次读取到的光强值,当再按下和释放一次按键后,光强值可以产生变化,根据光电二极管模拟输出值计算出光强值,如此反复,实现光强的计算和存储。

1.1.4 键盘模块

本文使用 4 $\times$ 4 矩阵薄膜键盘来实现磁场强度 B 和磁光材料长度 L 数据的输入和更新。4 $\times$ 4 矩阵薄膜键盘由 16 个按键构成,有 4 行和 4 列,一共 8 个输出引脚,通过读取行和列的电流信号来确定按下的按键。如图 5 所示,分别将键盘模块的 4 个连接 4 列按键的引脚与 Arduino UNO 的数字引脚 2、3、4、5 相连,将 4 个连接 4 行按键的引脚与 Arduino UNO 的数字引脚 6、7、8、9 连接。

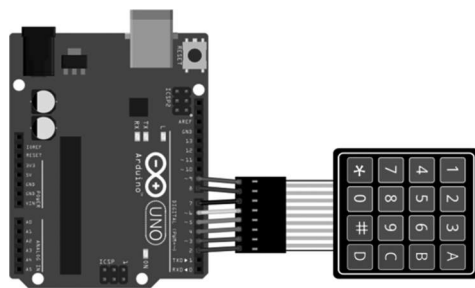


图 5 键盘模块连接图

本文通过使用布尔型变量和 if...else 函数实现当按下 A 键后,可以开始输入磁场强度 B 值,输入完成后再按下 B 键来实现新的 B 值对原有 B 值的覆盖,从而实现了磁场强度 B 值的输入和更

新。同理磁光材料长度 L 值的输入和更新通过 C 键和 D 键完成。使用非阻塞式等待的 `millis()` 函数来代替 `delay()` 函数,使得 Arduino 可以在执行定时输出任务的同时持续响应按键的输入。

1.1.5 LCD 液晶屏

本文使用 I2C 接口的 LCD12864 液晶屏显示最后得到的 Verdet 常数,该液晶屏接线简单,易于调节背光亮度,绘图模式简单,可以显示多行文本,共有 128×64 个像素点。使用时,将 LCD 液晶屏的 VDD 引脚连接到 Arduino UNO 的 5 V 引脚, SCL 引脚连接到 A5 引脚, SDA 引脚连接到 A4 引脚, BUSY 引脚连接到 A3 引脚, GND 引脚连接到 GND 引脚。调节背光、显示数据的位置和大小以达到理想的显示效果。

对硬件部分进行组装,结构如图 6 所示。

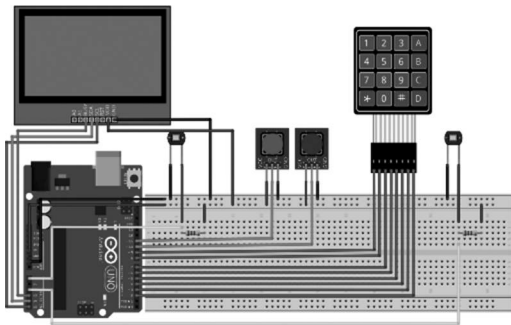


图 6 单片机模块连接图

1.2 软件设计

1.2.1 移动平均法

本文采用移动平均的方法,对光电二极管的模拟输出值做动态平均来降低示数不稳定带来的干扰。不断读取光电二极管的模拟输出值,计算 10 个输出值之和并进行平均,通过在 10 个输出值之和中不断减去最旧的输出值和加上最新的输出值来保证计算的是最新的 10 个输出值的平均值。

1.2.2 牛顿迭代法

由于 Arduino UNO 直接求解无穷级数方程难度较大,本文采用牛顿迭代法求解式(1)。牛顿迭代法在求解 $f(\theta) = I_0 T_1 T_2^2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin^2(2n\theta) T^{2n} R_2^{n-1} - I = 0$ 时,选取 θ_0 作为初始值,过点 $(\theta_0, f(\theta_0))$ 做曲线 $y = f(\theta)$ 的切线,得到切线与 θ 轴的交点 $\theta_1 = \theta_0 - f(\theta_0)/f'(\theta_0)$,重复上述过程直到 $f(\theta_n)$ 无限接近于 0,其中第 n 次迭代的解为^[8]

$$\theta_{n+1} = \theta_n - \frac{f(\theta_n)}{f'(\theta_n)} (f'(\theta_n) \neq 0) \quad (2)$$

2 实验探究

2.1 实验装置

实验装置包括:MGL-III-532 半导体激光器, $\lambda = 532\text{nm}$,输出功率为 20.00mW;WDS-50 电磁铁;待测圆柱形磁光玻璃,直径和高度均为 0.60cm,透射率为 84.4%;GCL-050003 型偏振片;TD8620 特斯拉计,最小分辨率为 $10\mu\text{T}$;非偏振分束镜,透射率为 51.0%,反射率为 41.5%;部分反射镜,透射率为 53.0%,反射率为 47.0%;全反镜;Arduino UNO 开发板;硅光电二极管(2 管脚);三针按键模块;4x4 矩阵薄膜键盘;I2C 接口 LCD12864 液晶屏;4.7k 电阻;面包板;杜邦线。

2.2 磁光玻璃 Verdet 常数标定

本文使用 Malus 定律法对磁光玻璃 Verdet 常数进行标定。具体实验步骤如下:

(1) 摆放实验装置,调节光路,如图 7 所示。

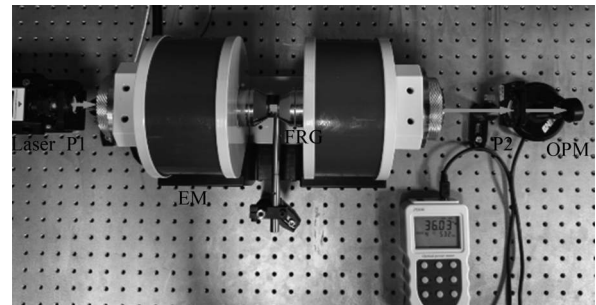


图 7 Malus 定律法装置图

Laser:激光器; P1:起偏器; EM:电磁铁; FRG:磁光玻璃; P2:检偏器; OPM:光功率计

(2) 打开激光器,调节检偏器使其与起偏器正交。

(3) 打开电磁铁电源并调节大小,测量电磁铁中心位置的磁场强度。放置磁光玻璃,使磁光玻璃位于电磁铁中心位置。

(4) 记录检偏器前后光强。

(5) 改变磁场强度,重复步骤(3)~(4),记录数据。

测量不同磁场强度下的光强,计算得到对应的旋光角。进行线性数据拟合,如图 8 所示。计算得到磁光玻璃的 Verdet 常数 $V = 1.441\text{rad}/(\text{T} \cdot \text{cm})$ 。

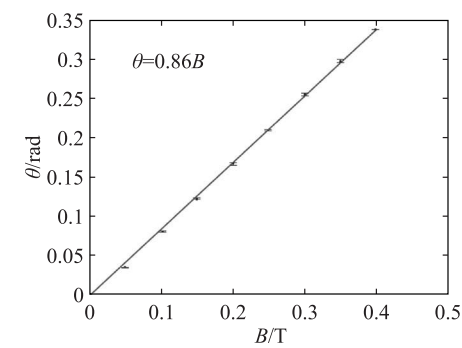


图8 Malus 定律法 θ 和 B 的关系

2.3 Verdet 常数自动化测量

实验步骤如下：

(1) 按图 1 所示摆放实验装置,调节光路,如图 9 所示,其余步骤与 Malus 定律法步骤(2)~(3)相同。

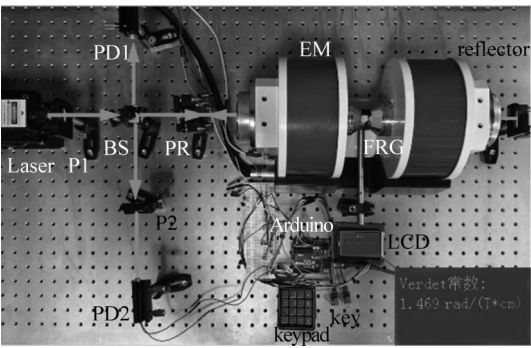


图9 Verdet 常数自动化测量装置图

Laser:激光器; P1:起偏器; BS:分束镜; PR:部分反射镜; EM:电磁铁; FRG:磁光玻璃; reflector:全反镜; PD1:光电二极管 1; PD2:光电二极管 2; P2:检偏器; keypad:键盘模块; key:按键模块

(2) 按下按键,光电二极管读取光强,通过薄膜键盘输入测得磁场强度和磁光玻璃长度,通过 LCD 液晶屏读出 Verdet 常数。

(3) 改变并测量磁场强度,重复步骤(2),记录不同磁场强度下的 Verdet 常数。

实验结果如表 1 所示,将测量结果与 Malus 定律法进行比较,可以看出,Verdet 常数自动化测量装置精度较高。

表 1 Verdet 常数自动化测量装置精度

磁场强度/mT	测量平均值/ rad/(T · cm)	相对误差/%
52.8	1.492	3.5
100.2	1.489	3.3

续表

磁场强度/mT	测量平均值/ rad/(T · cm)	相对误差/%
149.7	1.494	3.7
199.8	1.484	3.0
248.2	1.469	1.9
299.4	1.482	2.8
350.2	1.464	1.6
398.7	1.469	1.9

3 装置不确定度及分辨率分析

3.1 不确定度分析

装置的不确定度为

$$u = \sqrt{\left(\frac{u_I^2}{I}\right) + \left(\frac{u_{I_0}^2}{I_0}\right) + \left(\frac{u_B^2}{B}\right) + \left(\frac{u_L^2}{L}\right) + \left(\frac{u_\theta^2}{\theta}\right)}$$
$$= 0.077 \text{ rad}/(\text{T} \cdot \text{cm}) \quad (3)$$

3.2 分辨率分析

式(1)两边对 θ 求导可得

$$\Delta I = \frac{I_0 T_1 T_2^2 (1 + R_2)^2 4 \sin 4\theta}{2(1 + R_2^2 - 2R_2 \cos 4\theta)} \Delta \theta \quad (4)$$

以磁场 $B = 398.7 \text{ mT}$ 时为例,旋光角 $\theta = 0.33 \text{ rad}$,光电二极管的最小分度 $\Delta I = 5.14 \mu\text{W}$,并代入各光学镜片参数,得到 $\Delta \theta = 0.0036 \text{ rad}$ 。由此,计算出本装置的分辨率 $\Delta V = \frac{\Delta \theta}{BL} = 0.015 \text{ rad}/(\text{T} \cdot \text{cm})$ 。

4 结语

本文基于磁致旋光增强效应搭建了反射腔用于精确测量磁光材料 Verdet 常数,并利用 Arduino 单片机设计了自动化测量装置。该装置通过光电二极管分别测量入射光强和出射光强,利用牛顿迭代法求解旋光角,进而得到磁光玻璃的 Verdet 常数。与 Malus 定律法相比,测量结果相对误差小于 3.7%。在低磁场强度下相对误差仍然较低,说明装置测量精度相对较高。

本研究将单片机与传统实验结合,改进了现有物理实验的不足,体现了创新性的教育理念。通过该实验,可以激发学生的学习兴趣、培养学生的创新意识、锻炼学生的动手能力。本实验装置

改造成本低,适宜在大学物理实验中进行推广。

参 考 文 献

- [1] 艾延宝,金永君. 法拉第磁致旋光效应及应用[J]. 物理与工程, 2002, (5): 50-51, 60.
AI Y B, JIN Y J. Faraday magneto-optical rotation effect and its application[J]. Physics and Engineering, 2002, (5): 50-51, 60. (in Chinese)
- [2] 胡宇阳,郑大怀,宋柏君. 磁致旋光效应测量透明液体浓度的装置设计[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(10): 94-98.
HU Y Y, ZHENG D H, SONG B J. Design of device for measuring the concentration of transparent liquid by magneto-optical rotation effect[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2023, 42(10): 94-98. (in Chinese)
- [3] 赵一阳. YIG 磁光晶体生长与性能研究[D]. 吉林: 长春理工大学, 2016.
ZHAO Y Y. Growth and performance research of YIG magneto-optical crystal[D]. Jilin: Changchun University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [4] 梁忠诚,赵瑞. 磁致旋光增强效应与微量样品旋光检测方法[J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2221-2224.
LIANG Z C, ZHAO R. Effect of magneto-optic rotation enhancement and the polarimetric detection of the small rotation angles[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2221-2224. (in Chinese)
- [5] 蔡睿妍. Arduino 的原理及应用[J]. 电子设计工程, 2012, 20(16): 155-157.
CAI R Y. Principle and application of Arduino[J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(16): 155-157. (in Chinese)
- [6] 马淋漓,王晓杰. 基于 Arduino 单片机的金属杨氏模量测量实验[J]. 物理与工程, 2023, 33(6): 54-59.
MA L L, WANG X J. Measurement experiment of Young's modulus of metal based on Arduino microcontroller[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(6): 54-59. (in Chinese)
- [7] 林炳权,石皓宇,车宇,等. Arduino 中 PWM 调制在电子技术实验中的应用研究[J]. 物理与工程, 2023, 33(3): 80-87.
LIN B Q, SHI H Y, CHE Y, et al. Application research of PWM modulation in Arduino in electronic technology experiments[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(3): 80-87. (in Chinese)
- [8] 韩栗,汪晓勤. 牛顿迭代法求方程近似解: 从历史到课堂[J]. 数学通报, 2023, 62(9): 12-17.
HAN L, WANG X Q. Newton's method for approximating solutions to equations: from history to classroom[J]. Journal of Mathematics (China), 2023, 62(9): 12-17. (in Chinese)
- (上接第 191 页)
- [14] 车宇,丁望峰. 稳态法测量导热系数实验的温度补偿[J]. 物理实验, 2020, 40(5): 11-14.
CHE Y, DING W F. Temperature compensation in steady-state method for measuring thermal conductivity[J]. Physics Experimentation, 2020, 40(5): 11-14. (in Chinese)
- [15] 孙平,汪梅芳. 对不良导体导热系数测量原理的修正[J]. 物理与工程, 2001, (3): 31-33, 43.
SUN P, WANG M F. Correction of the measurement principle of thermal conductivity for poor conductors[J]. Physics and Engineering, 2001, (3): 31-33, 43. (in Chinese)
- [16] 张红佳,郭永利,李正. 真空热流法测定不良导体的导热系数[J]. 物理实验, 2012, 32(9): 5-7, 11.
ZHANG H J, GUO Y L, LI Z. Determination of thermal conductivity of poor conductors using vacuum heat flow method[J]. Physics Experiment, 2012, 32(9): 5-7, 11. (in Chinese)