

稳态法测量不良导体导热系数实验方法的改进研究

孙志刚¹ 焦天放² 马泽林² 梁珊珊^{1,3}

(¹ 中国石油大学(北京)克拉玛依校区文理学院, 新疆 克拉玛依 834000;

² 中国石油大学(北京)克拉玛依校区工学院, 新疆 克拉玛依 834000;

³ 华东理工大学物理学院, 上海 200237)

摘要 鉴于传统稳态法在加热温度设定单一及忽略样品侧面散热方面的不足, 本文改进了稳态法测量不良导体导热系数的实验方法。通过引入对流换热系数修正样品侧面散热误差, 并对六组不同加热盘温度(60.0℃、65.0℃、70.0℃、75.0℃、80.0℃、85.0℃)进行测试, 结果表明, 通过对流换热系数法修正后, 六组实验导热系数相对误差显著降低, 最大降幅达21%。并确定了80.0℃为最优加热温度, 此温度下修正后的导热系数为 $0.271 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 相对误差低至3%。本文为提高导热系数测量精度提供了有效途径, 有望推动大学物理实验中的导热系数实验教学方法的革新, 也为工程实践提供有力的支持。

关键词 稳态法; 导热系数; 实验方法改进; 最优温度; 对流换热系数

RESEARCH ON THE ENHANCEMENT OF EXPERIMENTAL METHODS FOR MEASURING THERMAL CONDUCTIVITY USING THE STEADY-STATE METHODS

SUN Zhigang¹ JIAO Tianfang² MA Zelin² LIANG Shanshan^{1,3}

(¹ School of Liberal Arts and Sciences, China University of Petroleum (Beijing) Karamay Campus, Karamay, Xinjiang 834000;

² School of Engineering, China University of Petroleum (Beijing) Karamay Campus, Karamay, Xinjiang 834000;

³ School of Physics, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237)

Abstract Given the limitations of the traditional steady-state method, which involves setting a single heating temperature and neglecting heat dissipation from the sample's sides, an improved experimental method for measuring the thermal conductivity of poor conductors has been developed. By introducing the convective heat transfer coefficient to correct the error caused by heat dissipation from the sample's sides, and testing six different heating plate temperatures (60.0℃, 65.0℃, 70.0℃, 75.0℃, 80.0℃, 85.0℃), the results show that after correction using the convective heat transfer coefficient method, the relative error of the thermal conductivity for the six sets of experiments is significantly reduced, with a maximum de-

收稿日期: 2025-01-28

基金项目: 华东理工大学 2025 年本科教育教学改革中重大项目-人工智能赋能(AI+)课程建设(教学方法创新-大学物理实验; 中石大克拉玛依校区引进人才启动项目基金(批准号: XQZX20240037); 中国石油大学(北京)克拉玛依校区 2024 年本科教育教学改革一般项目-信息化技术与实践结合的《大学物理实验》教学模式的探索(JG2024048)资助。

通信作者: 梁珊珊, liangshanshan@ecust.edu.cn。

引文格式: 孙志刚, 焦天放, 马泽林, 等. 稳态法测量不良导体导热系数实验方法的改进研究[J]. 物理与工程, 2025, 35(4): 186-191, 197.

Cite this article: SUN Z G, JIAO T F, MA Z L, et al. Research on the enhancement of experimental methods for measuring thermal conductivity using the steady-state methods[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(4): 186-191, 197. (in Chinese)

crease of 21%. It is determined that 80.0°C is the optimal heating temperature, and the corrected thermal conductivity at this temperature is $0.271 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, with a relative error as low as 3%. This provides an effective way to improve the measurement accuracy of thermal conductivity, which is expected to promote innovation in the teaching method of thermal conductivity experiments in university physics experiments and provide strong support for engineering practice.

Key words steady-state method; thermal conductivity; improvement of experimental method; optimal temperature; convective heat transfer coefficient

导热系数作为衡量材料导热性能的核心参数,能精准反映材料传导热量的能力,对材料在不同热环境下的应用起着决定性作用。在众多科学研究与工程实践领域,导热系数的精确测定都至关重要^[1-2]。在微观层面,半导体电子元件的散热问题一直是制约其性能提升和稳定性的关键因素。在宏观层面,建筑材料的导热系数直接影响着建筑物的保温隔热性能,此外,航空航天热防护领域也对导热系数有着极高的要求,精确测定这些隔热材料的导热系数,是设计高性能热防护系统的基础。导热系数不仅是材料热物性研究的关键指标,更是各类热设计、热处理的基础数据支撑,通过测量材料的导热系数,可以为工程设计提供科学依据,进一步优化设计方案,有效提高工程的可靠性和经济性。

常见的测量导热系数的实验方法主要分为稳态法和动态法,其中稳态法凭借其原理清晰、操作简单等优势,在科研与教学实践中广泛应用,稳态法测量不良导体的导热系数实验也被众多高校列为“大学物理实验”课程必修基础实验之一^[2]。稳态法首先适当调节实验条件和实验参量使得样品与上下铜板之间的加热、散热、传热过程达到动态平衡,再通过测量散热盘(下铜板)稳态温度附近的散热速率并以此替代不良导体样品内的传热速率,最后利用傅里叶热传导公式并进行修正计算出不良导体的导热系数。传统实验教学中在加热样品实现稳态的过程中只设定了一组加热盘的温度恒定为 70.0°C,并没有考虑不同加热温度对导热系数的影响,故为提高导热系数的测定精度,本研究设置加热盘六组不同的温度,以确定测量导热系数的最优温度;此外,传统的稳态法在利用面积修正方法计算导热系数时,忽略样品侧面的热量损失,导致导热系数测量值偏小,因此本研究在考虑样品侧面散热主要为空气对流散热的基础

上,引入对流换热系数 a 对样品的导热系数公式进行修正,旨在提高导热系数的测量精度^[1-8]。需要指出的是,考虑到已有研究表明:表面粗糙度差异较小时换热系数差别并不显著^[9],本文均采用标准样品进行测量。由于对流散热占本研究散热的绝大部分,故本研究只讨论了对流散热。

1 稳态法测量不良导体导热系数原理

1.1 傅里叶热传导方程

稳态法在样品内部温度场分布稳定的情况下测量导热系数,避免了因样品温度变化引起的热流量波动,使测量结果更准确,该方法建立在傅里叶热传导定律基础之上^[10-12],其表达式为

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda \left(\frac{dT}{dz} \right)_z dS \quad (1)$$

其中, λ 为导热系数, $\left(\frac{dT}{dz} \right)_z$ 表示沿 Z 方向的温度梯度, $\frac{dQ}{dt}$ 表示传热速率(单位时间内通过截面 dS 的热量),根据式(1)可知,确定温度梯度 $\frac{dT}{dz}$ 和传热速率 $\frac{dQ}{dt}$ 就可求得导热系数 λ 。

由于样品为导热不良导体且具有非均质性和各向异性,其传热速率不易测量。当系统达到稳态时,系统上下铜板和样品之间的热流量相同,此时则有样品内部的传热速率等于系统的散热速率。由于实验中样品侧面散去的热量较少,故忽略样品侧面散热量,认为稳态时冷却盘的散热速率就是样品内部的传热速率,冷却盘的散热速率则可由冷却盘在稳态温度下的冷却速率表示,其表达式为

$$\frac{dQ}{dt} = -mc \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

其中, m 为铜板的质量, c 为铜板的比热容, $\frac{dT}{dt}$ 为冷却盘的冷却速率。

然而, 在稳态法测量不良导体传热过程中, 冷却盘的上表面被样品覆盖, 而在自然冷却过程中冷却盘所有表面积均暴露在空气中, 故需要对散热速率进行简单的面积修正。而冷却盘是各向同性材料且导热性能良好的铜板, 其散热速率与面积成正比, 故样品的传热速率表达式为

$$\frac{dQ}{dt} = -mc \frac{\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p}{2\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p} \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

其中, R_p 为冷却盘半径, h_p 为冷却盘厚度。

综上所述, 将样品截面积 πR_B^2 、温度梯度 $\frac{T_1 - T_2}{h_B}$ 和传热速率 $\frac{dQ}{dt}$ 代入式(3)中即可求得导热系数 λ , 其表达式修改为

$$\lambda = mc \frac{1}{\pi R_B^2} \frac{h_B}{T_1 - T_2} \frac{\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p}{2\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p} \frac{dT}{dt} \quad (4)$$

其中, R_B 为样品半径, h_B 为样品厚度, T_1 为加热盘温度, T_2 为冷却盘稳态温度。

1.2 导热系数修正方法

在实验教学中发现稳态法在利用面积修正方法计算导热系数时, 忽略了样品侧面的热量损失, 导致导热系数测量值整体偏小, 故为更准确地测量样品的导热系数, 需要考虑样品侧面散热量。但由于在实验室条件下, 难以准确测量在不良导体侧面的散热量, 故引入对流换热系数 a 计算样品侧面散热量。冷却盘的散热主要由空气自然对流造成, 故稳态传热过程中冷却盘的散热速率还可表达为

$$\frac{dQ}{dt} = a(\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p)(T_2 - T_0) \quad (5)$$

其中, $\frac{dQ}{dt}$ 为冷却盘散热速率, a 为对流换热系数, T_0 为环境温度 25°C 。

根据式(3)和式(5), 利用冷却盘的散热速率 $\frac{dQ}{dt}$ 推导出对流换热系数 a , 其表达式为

$$a = -\frac{mc}{(2\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p)(T_2 - T_0)} \frac{dT}{dt} \quad (6)$$

由于样品与冷却盘所处环境空气的物理性质(比热容、导热系数、密度和黏度等)、空气的温度、空气流动状态等均相同, 所以认为样品侧面和冷却盘对流换热系数 a 相等。垂直于样品表面的方

向上形成温度梯度, 通过积分求出样品侧面的散热速率, 其表达式为

$$\begin{aligned} \frac{dQ_1}{dt} &= \int_0^{h_B} 2\pi R_B a \left[T_1 - \frac{T_1 - T_2}{h_B} x - T_0 \right] dx \\ &= -\frac{mc R_B h_B (T_1 + T_2 - 2T_0)}{2(R_p^2 + R_p h_p)(T_2 - T_0)} \frac{dT}{dt} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\frac{dQ_1}{dt}$ 为样品侧面的散热速率。

在稳态传热过程中, 故样品的传热速率应由侧面散热速率和底面散热速率两部分组成, 其表达式为

$$\begin{aligned} \frac{dQ_{\text{总}}}{dt} &= \frac{dQ_1}{dt} + \frac{dQ}{dt} \\ &= -\frac{mc}{2(R_p + h_p)} \cdot \\ &\quad \left[R_p + 2h_p + \frac{R_B h_B (T_1 + T_2 - 2T_0)}{R_p (T_2 - T_0)} \right] \frac{dT}{dt} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $\frac{dQ}{dt}$ 为样品传热速率。

根据稳态法测量导热系数原理, 将经本方法修正后的样品传热速率 $\frac{dQ}{dt}$ 代入式(1), 得出修正后的导热系数 λ_{conv} 为

$$\lambda_{\text{conv}} = \left\{ \frac{mc}{2(R_p + h_p)} \left[R_p + 2h_p + \frac{R_B h_B (T_1 + T_2 - 2T_0)}{R_p (T_2 - T_0)} \right] \frac{dT}{dt} \right\} \frac{1}{\pi R_B^2} \frac{h_B}{T_1 - T_2} \quad (9)$$

其中, λ_{conv} 为修正后样品的导热系数。

2 实验方法

2.1 传统实验方案

在本研究中, 首先运用传统实验教学所采用的加热温度来测量样品的导热系数, 实验装置如图1所示。在实验操作过程中, 初始阶段将加热盘的温度设定为 70.0°C , 借助导热系数测定仪对样品进行加热, 将加热时长控制在 $30 \sim 40\text{min}$ 之间, 在此期间密切观察冷却盘的温度变化情况, 当冷却盘在连续5分钟内的温度变化不超过 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 时, 即可判定此时系统已达到稳态, 随即记录下冷却盘的稳态温度数值。随后, 将样品从实验装置中移去, 设置加热盘与冷却盘接触, 继续对冷却盘

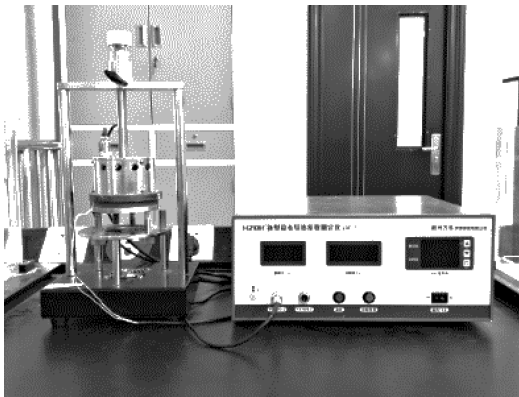
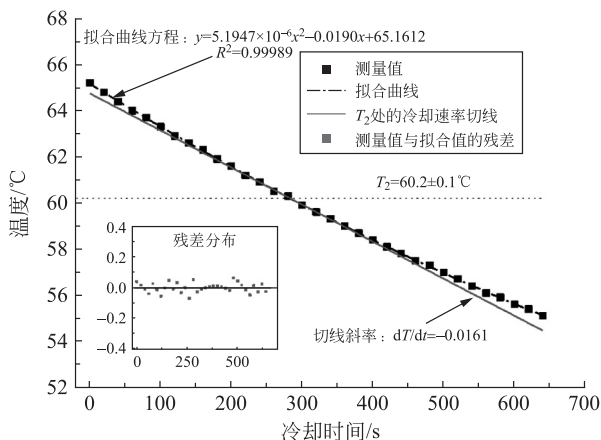


图1 测量导热系数实验装置

进行加热,直至冷却盘的温度高于其稳态温度 5°C ,迅速移开加热盘,使加热盘尽可能与冷却盘保持较大的空间距离,让冷却盘完全暴露在空气中,使其以空气自然对流的方式进行降温,期间每隔20秒读取一次冷却盘的温度,持续记录至温度低于稳态温度 5°C 以下^[13-14]。

根据所获取的实验数据,绘制出冷却盘在稳态温度附近的温度随时间变化的拟合曲线,如图2所示。为确保该拟合曲线能够准确反映实验数据的变化趋势,通过计算测量值与拟合值之间的残差分布情况,对拟合曲线的准确性进行验证。最后做拟合曲线稳态温度处的切线,计算出切线斜率,得到冷却盘稳态温度下的冷却速率 $\frac{dT}{dt}$,代入式(9),求出不同稳态温度下测定的样品导热系数 λ ^[15-16]。

图2 加热盘 70.0°C 条件组的降温曲线

从图2中可以看出,测量值和拟合值的残差分布基本都小于0.1,说明拟合曲线的相关性良

好,故在空气自然对流下,冷却盘的温度随时间的变化是非线性的,设置不同的加热盘温度会影响不同稳态温度下的冷却速率,因此选定合适的加热温度对于准确求解样品的导热系数具有重要意义。

2.2 不同加热温度的导热系数的实验测试

为找到测定导热系数的最优加热温度,除上文提到的 70.0°C 在本研究中又设置了5种其他不同的加热温度进行导热系数测试,加热盘温度参数分别为 60.0°C 、 65.0°C 、 75.0°C 、 80.0°C 、 85.0°C 。在确定加热温度参数后,按照上文描述的操作流程进行了测量描述其降温曲线。进一步根据所获取的实验数据,绘制出冷却盘在不同稳态温度附近的温度随时间变化的拟合曲线,如图3所示。

从图3中可以看出,测量值和拟合值的残差分布均小于0.2以内,说明拟合曲线的拟合相关性良好。不同的加热盘温度会得到不同稳态温度下的冷却速率,且冷却速率的数值随着稳态温度的升高而增大,这也与多项式拟合结果相吻合。

3 导热系数修正结果及最优温度

根据冷却盘冷却拟合曲线图得到冷却速率 $\frac{dT}{dt}$,代入公式(4)求出传统方法的导热系数 λ ,代入公式(9)求出本文方法修正的导热系数 λ_{conv} 。

根据 $E_{\text{相对}} = \frac{\lambda_{\text{实验值}} - \lambda_{\text{实际值}}}{\lambda_{\text{实际值}}}$,再依据材料厂家给出的本导热系数实际值 $\lambda_{\text{实际}}$ 为0.28,分别求出传统方法的导热系数 λ 的相对误差 $E_{\text{前}}$,和本文修正方法的导热系数 λ_{conv} 的相对误差 $E_{\text{后}}$ 。

通过对比不同加热温度的条件对照组,分析稳态法测量导热系数实验的最优加热温度,实验结果见表1。

由表1可知,运用本文所提出的对流换热系数法进行修正后,六组实验中导热系数的相对误差均呈现出显著的降低趋势。具体而言,在这六组实验里,相对误差下降幅度最小的一组达到了14%,而下降幅度最大的一组则高达21%,平均降幅为19%。特别是通过对比不同温度条件发现,当加热盘温度设定为 80.0°C 时,所测得样品的导热系数出现了明显的拐点特征,这一现象表明,

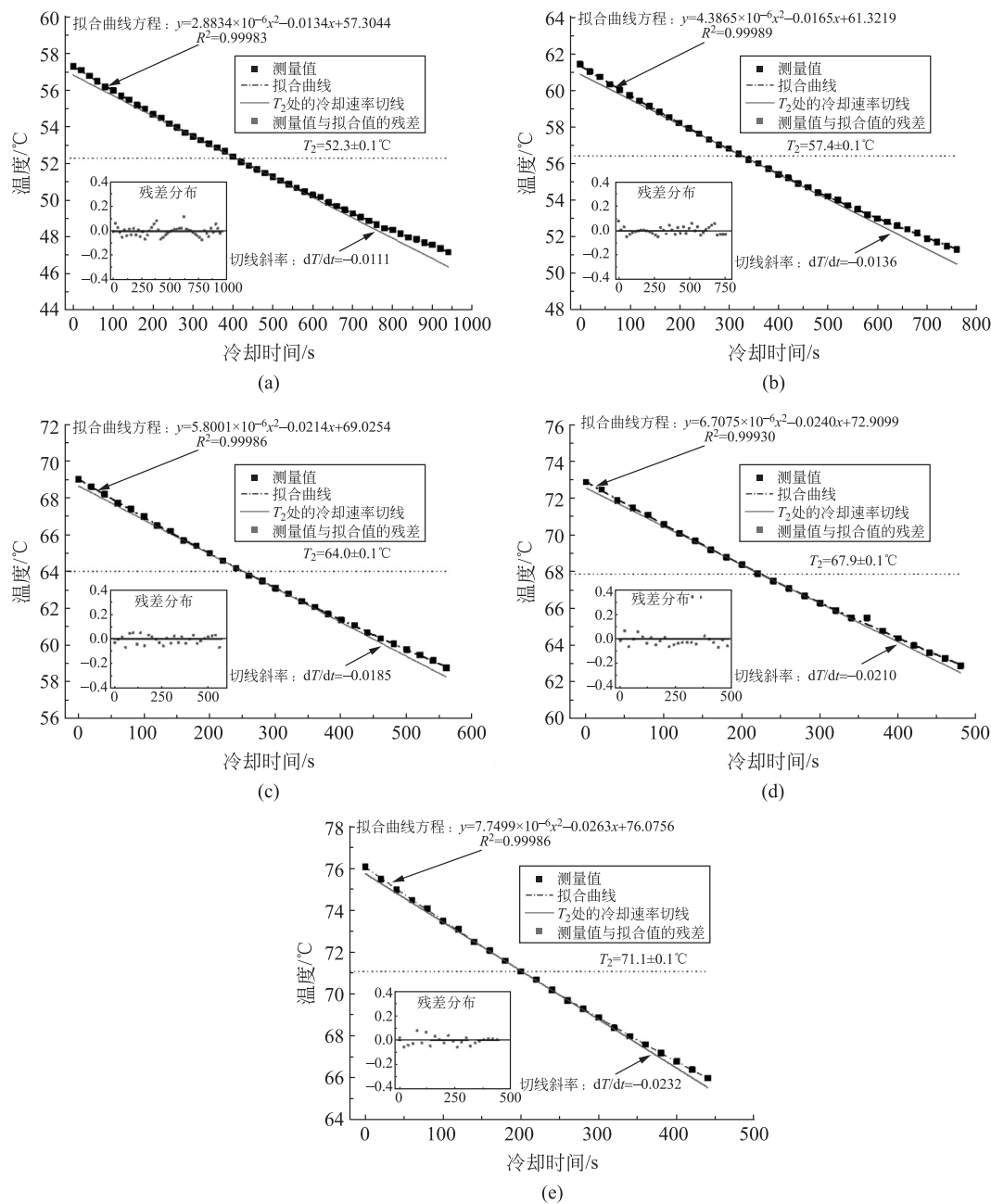


图3 不同条件组的降温曲线(含拟合曲线)

(a) 60.0℃; (b) 65.0℃; (c) 75.0℃; (d) 80.0℃; (e) 85.0℃

表1 不同温度条件组实验结果

$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$	$\frac{dT}{dt}/(^\circ\text{C}/\text{s})$	$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\lambda_{\text{conv}}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$E_{\text{前}}$	$E_{\text{后}}$	$ E_{\text{后}}-E_{\text{前}} $
60.0	52.3	0.0111	0.178	0.225	34%	20%	14%
65.0	56.4	0.0136	0.195	0.247	30%	12%	19%
70.0	60.2	0.0161	0.202	0.256	28%	9%	19%
75.0	64.0	0.0185	0.207	0.263	26%	6%	20%
80.0	67.9	0.0210	0.214	0.271	24%	3%	21%
85.0	71.1	0.0232	0.206	0.262	27%	7%	20%

在该温度条件下所测量得到的导热系数与真实值最为接近。因此,确定 80.0℃ 为最优加热温度,此温度下修正后的导热系数为 $0.271 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

4 结语

为实现对样品导热系数的精准测量,本文聚焦于样品侧面散热这一关键问题,创新性地引入对流换热系数,并在此基础上成功推导出了计算导热系数的全新方法。经过该新方法的修正,在六组不同加热温度条件下,导热系数的相对误差均得到了显著降低,其中最大降幅可达 21%。本文通过设计六组不同加热温度的对照实验,最终确定了测量样品导热系数的最优加热温度为 80.0℃。在最优加热温度 80.0℃ 时,经本文方法修正后的导热系数为 $0.271 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,相对误差仅为 3%。综上所述,本研究为精准测量导热系数提供了一种全新的方法,有望为改革导热系数实验教学方法提供有力的支持与借鉴,并为工程实践提供应用支持。

参 考 文 献

- [1] 贾斐霖,高丽丽,郝琦. 计算导热系数的新公式[J]. 大学物理, 2012, 31(3): 62-65.
JIA F L, GAO L L, HAO Q. A new formula for calculating thermal conductivity[J]. College Physics, 2012, 31(3): 62-65. (in Chinese)
- [2] 冉凯华,冷雪松,王艳东. 测量不良导体导热系数实验装置的改进[J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(9): 47-50.
RAN K H, LENG X S, WANG Y D. Improvement of the experimental apparatus for measuring the thermal conductivity of poor conductors[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2013, 32(9): 47-50. (in Chinese)
- [3] 程德胜,张辉,马书炳. 稳态法测量导热系数面积修正误差分析[J]. 物理实验, 2019, 39(12): 15-18.
CHENG D S, ZHANG H, MA S B. Error analysis of area correction in steady-state method for measuring thermal conductivity[J]. Physics Experiment, 2019, 39(12): 15-18. (in Chinese)
- [4] 王岩,陈俊杰. 对流换热系数测量及计算方法[J]. 液压与气动, 2016, (4): 14-20.
WANG Y, CHEN J J. Measurement and computation methods of convective heat transfer coefficient[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2016, (4): 14-20. (in Chinese)
- [5] 张广斌,鲍军委,董大兴. 稳态法导热系数测量的误差分析及改进方案[J]. 大学物理实验, 2013, 26(5): 94-96.
ZHANG G B, BAO J W, DONG D X. Error analysis and improvement plan for steady-state method of measuring thermal conductivity[J]. Physical Experiment of College, 2013, 26(5): 94-96. (in Chinese)
- [6] 黄平,何天德. 不良导体导热系数实验误差分析与改进[J]. 玉林师范学院学报, 2011, 32(2): 50-52.
HUANG P, HE T D. Error analysis and improvement of the thermal conductivity experiment for poor conductors[J]. Journal of Yulin Normal University, 2011, 32(2): 50-52. (in Chinese)
- [7] 李泽朋,郭松青,王维波. 稳态法测量不良导体导热系数的改进设计[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(6): 77-79.
LI Z P, GUO S Q, WANG W B. Improved design for measuring thermal conductivity of poor conductors using the steady-state method[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, 34(6): 77-79. (in Chinese)
- [8] 赵琪琪,赵嵩卿. 样品传导面积与非传导面积对导热系数测定的影响[J]. 物理实验, 2020, 40(1): 16-18.
ZHAO Q Q, ZHAO S Q. The influence of conductive and non-conductive areas of the sample on the determination of thermal conductivity [J]. Physics Experiment, 2020, 40(1): 16-18. (in Chinese)
- [9] 周林仁,李绍基,陈兰. 表面粗糙度对混凝土对流换热影响的试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2023, 51(7): 81-89.
ZHOU L R, LI S J, CHEN L. Experimental study on the effect of surface roughness on convective heat transfer of concrete[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(7): 81-89. (in Chinese)
- [10] 李志文. 稳态法测量不良导体导热系数[J]. 承德民族师专学报, 1999, (2): 69-71.
LI Z W. Measurement of thermal conductivity of poor conductors using the steady-state method [J]. Journal of Chengde Normal University for Nationalities, 1999, (2): 69-71. (in Chinese)
- [11] 孙庆龙,王玉梅. 利用稳态法测定不良导体的导热系数[J]. 计量与测试技术, 2010, 37(10): 69-70.
SUN Q L, WANG Y M. Determination of thermal conductivity of poor conductors using the steady-state method [J]. Metrology & Measurement Technology, 2010, 37(10): 69-70. (in Chinese)
- [12] 马银辉,张灵辉,卜寿亮. 稳态法测导热系数实验的应用与研究[J]. 大学物理实验, 2020, 33(2): 82-84.
MA Y H, ZHANG L H, BU S L. Application and research of steady-state method for measuring thermal conductivity[J]. Physical Experiment of College, 2020, 33(2): 82-84. (in Chinese)
- [13] 张萍,韦力铨,黄家豪. 稳态法测量不良导体导热系数实验仪器改进[J]. 大学物理实验, 2021, 34(6): 75-79.
ZHANG P, WEI L C, HUANG J H. Improvement of experimental instruments for measuring thermal conductivity of poor conductors using the steady-state method [J]. 2021, 34(6): 75-79. (in Chinese)

(下转第 197 页)

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)