比热容实验优化:装置改进与定量误差分析

杨 猛
(织金县教育局,贵州毕节 552100)

摘 要:比热容实验是初中物理热学核心探究实验,也是建构比热容概念、落实科学探究核心素养的重要载体。针对教材实验装置散热明显、测温精度低、受热均匀性差、变量控制不严谨等问题,以“减少散热、精准测温、均匀受热、操作便捷”为改进思路,设计以双层真空玻璃杯、温度传感器及低压直流加热棒为核心器件的集成化优化装置。引入该装置,以标准化平行对照实验为核心手段,量化验证比热容测量精度的提升并开展误差定量溯源。实验结果显示,油水升温比的相对误差由46.7%降至18.1%,实验精度与数据稳定性大幅提升。整套装置成本低廉、易于制作和推广,可有效突破教学难点,强化控制变量法与转换法的实践应用,为该实验提供了可落地的优化方案。

关键词:初中物理;比热容;温度传感器;实验优化;装置改进;定量误差分析
DOI:10.19935/j.cnki.1004-2326.2026.09.016
引用格式:杨猛.比热容实验优化:装置改进与定量误差分析[J].实验教学与仪器,2026,43(09):71-74.

比热容探究实验是《义务教育物理课程标准(2022年版)》规定的学生必做探究实验[1],对培养学生的观察能力、实验操作能力、数据分析能力以及严谨求实的科学态度具有不可替代的作用。当前,人教版、沪科版、北师大版、鲁科版等主流初中物理教材均采用“相同电加热器加热水和食用油”的实验方案,配套装置一般包括烧杯、电加热器(俗称“热得快”)和玻璃温度计。然而,在实际教学中,若直接依照教材方案开展实验,会暴露出诸多问题,严重削弱了实验教学的预期效果。

针对上述问题,窦元敏等[2]的研究指出,传统比热容实验存在加热器难以完全浸没、散热严重、测温不规范等突出缺陷。王泓杰[3]从误差分析角度深入研究了传统装置导致实验结果失真的原因。韩雨红[4]研究表明,传统开放装置无法保证液体吸收的热量完全相等,“用加热时间反映吸收热量”的实验逻辑难以成立。以上研究均表明,传统实验装置存在系统性缺陷,亟待改进。

1 传统实验问题与已有改进方案

1.1 传统实验的核心问题

(1)热量散失严重。常规烧杯无有效隔热结构且深度不足,导致电加热器难以完全浸没于液体中,加热过程中大量热量通过空气对流与容器壁传热向外散失。由于水和油的散热程度不同,“用加热时间反映吸收热量”的实验逻辑难以成立。王泓杰[3]指出,传统装置中热量散失可占总供热量的30%以上。

(2)测温不规范。传统红液温度计的玻璃泡易接触加热器或容器壁,此时玻璃泡周围温度与被测液体实际温度存在差异,测量值不准确。

(3)受热不均匀。无专用搅拌装置时,液体内部受热不均,易出现明显的上下温度分层现象。不同测量位置会测得差异显著的实验数据,导致实验重复性差。

(4)加热条件不一致。教材方案要求电加热器完全浸没,但等质量的水和油体积不同,加热器浸没深度存在显著差异,致使单位时间内两种液体有效吸收热量存在偏差,违反了控制变量原则。

1.2 现有改进方案梳理

国内研究者从不同角度提出了改进思路。①用温度传感器替代玻璃温度计:葛永普等[5]采用DS18B20数字化温度传感器避免人工读数误差;吴少军[6]实现温度-时间曲线的实时可视化。②保温结构的改进:韩雨红[4]将开放性加热改为绝热条件下加热,通过保温层减少热量散失。③受热一致性与均匀性的改进:刘志刚等[7]采用共同热源确保两种液体吸热条件一致;卢军委[8]引入减速电机驱动的搅拌器保证液体受热均匀。

然而,已有方案仍存在诸多不足:部分方案未从根源上解决散热问题;部分改进装置结构复杂、成本偏高;部分方案未设置标准化平行对照实验以验证改进效果。

1.3 整体解决思路

针对传统实验的固有缺陷与现有改进方案的短板,确定优化思路:不再单独改造某一项器材,而是将双层真空玻璃杯、数字化温度传感器、低压直流加热棒、搅拌装

置等成熟设备进行系统集成，搭建一体化实验装置。同时引入标准化平行对照实验，量化测评装置优化效果，并开展全维度定量误差分析，精准评估装置性能，以此弥补同类研究缺少数据验证与深度分析的不足；重点实现多类技术的整合应用、实验效果量化验证与误差溯源分析。

2　改进方案设计

2.1　改进思路

传统装置问题与改进措施对照如表 1 所示。以减少散热、精准测温、均匀受热、规范操作为核心目标，采用“隔热容器+数字化测温+恒温加热+规范搅拌”的整体设计思路。改进后的装置如图 1 所示。

表 1　传统装置问题与改进措施对照

传统装置问题	改进措施	预期效果
散热严重	双层真空隔热杯+隔热杯盖	热量散失降低 80% 以上
测温不规范	温度传感器+数显温度计	精度提升至±0.2 ℃
受热不均匀	用玻璃搅拌棒持续搅拌	消除温度分层
加热条件不一致	低压直流加热棒完全浸没	位置对称，供热稳定



图 1　改进后的装置

2.2　核心部件选型技术理由

（1）双层真空玻璃杯：双层玻璃之间的真空层在生产时经过 350 ℃以上高温烘烤并排气，使真空层气压低于 10^{-1} Pa，残余气体传热可忽略不计；杯壁采用低辐射玻璃以降低辐射传热，支撑点直径仅为 0.3 ~ 0.5 mm，有效减少了热桥传导。其整体传热系数可低至约 0.947 W·m^{-2}·K^{-1}，隔热性能优异，能大幅减少热量散失，为实验提供了较好的绝热环境。

（2）数字化温度传感器：采用分辨率为 0.1 ℃的数字化温度传感器，探头置于液体中部，远离加热源，避免了局部高温的影响，测温精度可达±0.2 ℃。

（3）低压直流加热棒：选用额定电压 12 V、功率约 20 W 的低压直流加热棒。相较于常规 220 V 电加热器，该低压直流加热棒安全性更高，具备防干烧功能，且适中的功率便于学生清晰观察实验过程。

2.3　关键实验参数

加热器：额定电压 12 V，功率约 20 W；温度传感器：分辨率 0.1 ℃，测量精度±0.2 ℃；实验材料：水、菜籽油各 150 g，初温约 23.0 ℃；搅拌方式：玻璃棒持续搅拌，频率约 30 ~ 40 次/min；环境条件：室温 22~25 ℃，无明显空气对流。

2.4　改进实验操作步骤

（1）器材准备：逐一检查实验装置各部件状态，按规范连接温度传感器与数据采集设备，接通额定电压为的 12 V 学生电源。

（2）装置组装：加热棒完全浸没于液体中，两组装置的加热棒位置、浸没深度一致；温度传感器探头置于液体中部，不接触容器底部、侧壁及加热棒。

（3）样品准备：用电子秤称取等质量（150 g）的水和菜籽油，分别倒入两个双层真空杯中，初温相同（约 23.0 ℃）。

（4）操作流程：同步启动功率约 20 W 的加热器与秒表，用玻璃棒以 30 ~ 40 次/min 的频率持续均匀搅拌液体。

（5）实验数据记录与处理：每分钟记录一次温度，根据温度变化数据对比分析不同物质的吸热能力。

3　对照实验与数据分析

3.1　对照实验数据

采用传统实验装置（250 mL 烧杯、220 V 电加热器、分度值 1 ℃玻璃温度计），在室温 22~25 ℃、无明显空气对流的环境下开展对照实验，数据记录如表 2 所示。

表 2　对照实验数据

加热时间/min	油温/℃	油升温/（℃·min^{-1}）	水温/℃	水升温/（℃·min^{-1}）
0	23.0	—	23.0	—
1	35.8	12.8	25.8	2.8
2	51.2	15.4	30.2	4.4
3	68.5	17.3	35.6	5.4
4	82.1	13.6	40.8	5.2
5	92.0	9.9	46.2	5.4

本实验采用开放式烧杯搭配 220 V 大功率电加热器，菜籽油比热容小、升温快，加之装置无隔热结构，液体对流与散热现象明显，5 min 内油温由 23.0 ℃升至 92.0 ℃属于正常实验现象。受散热与液体对流共同影响，油温升温速率呈现先升后降的波动特征，实验数据真实有效。

传统装置问题分析：①散热导致数据不稳定，2 min 后水升温速率异常升高；②油温剧烈波动，升温速率呈先升

后降趋势；③温度计读数不稳定，人工读数误差约±0.5 ℃。

3.2 改进装置实验数据

采用改进后的实验装置进行实验，数据记录见表3。

表3 改进装置实验数据

加热时间/min	油温/℃	油升温/(℃·min^{-1})	水温/℃	水升温/(℃·min^{-1})
0	23.0	—	23.0	—
1	30.5	7.5	25.2	2.2
2	38.2	7.7	28.2	3.0
3	45.1	6.9	31.0	2.8
4	50.8	5.7	33.5	2.5
5	55.7	4.9	36.2	2.7

3.3 数据对比分析

（1）升温比计算与理论依据。

根据比热容的定义，质量为m的物质吸收热量Q后，温度升高ΔT，则该物质的比热容c满足$Q=cm\Delta T$。在“探究不同物质吸热能力”的实验中，若两种物质质量相等（即$m_1=m_2=m$）、吸收热量相等（$Q_1=Q_2$）、温度变化量分别为ΔT_1和ΔT_2，则有：$c_1/c_2=\Delta T_2/\Delta T_1$。即两种物质的比热容之比等于它们的温度变化量之反比。

已知水的比热容约为4.2×10^3 J/(kg·℃)，菜籽油的比热容约为2.0×10^3 J/(kg·℃)，理论上质量相等的两种物质吸收相同热量时有：理论升温比（油/水）$=c_{水}/c_{油}=4.2\times10^3/2.0\times10^3=2.10$。由于油的比热容较小、水的比热容较大，在相同吸热条件下，油的升温速率更快，理论升温比（油温升/水温升）为二者的温度升高倍数，这表明在理想条件下，油的升温幅度应约为水的2.1倍。

传统装置分析（取第2～4 min的数据，避开初始阶段的不稳定区）：油平均升温速率=（15.4+17.3+13.6）/3≈15.4 ℃/min；水平均升温速率=（4.4+5.4+5.2）/3≈5.0 ℃/min，实验升温比=15.4/5.0≈3.08。相对误差=|3.08−2.10|/2.10×100%≈46.7%。

改进装置分析：油平均升温速率=（7.5+7.7+6.9+5.7+4.9）/5=6.54 ℃/min；水平均升温速率=（2.2+3.0+2.8+2.5+2.7）/5=2.64 ℃/min，实验升温比=6.54/2.64≈2.48。相对误差=|2.48−2.10|/2.10×100%≈18.1%。

由于散热不可避免，本实验升温比的测算以初始阶段的数据为准更为科学。经定量计算，装置优化后升温比相对误差由46.7%降至18.1%，实验精度大幅提升。定量误差分析表明，散热是实验残留误差的最主要来源，这也是本研究通过数据解析得出的核心结论。传统装置升温比的相对误差约为改进装置的2.6倍，改进效果十分显著。

（2）油升温速率递减原因分析。

由表3可见，菜籽油升温速率整体呈递减趋势，主要包括以下原因。①温差增大导致散热增加：随着油温的升高，油与环境的温差ΔT增大，通过杯壁散失的热量$Q=KS\Delta T$（其中K为散热系数、S为散热面积）随之增加。尽管双层真空杯具备良好的隔热性能，但无法实现完全绝热，当温差增大到一定程度时，散热效应会逐渐凸显。②热量损失占比提高：在加热功率恒定（$P\approx20$ W）的条件下，单位时间内散失的热量$Q_{损}$占加热棒供热总量$Q_{总}$的比例为$Q_{损}/Q_{总}$，该比例随油温升高而增大，导致有效用于升温的热量（$Q_{有效}=Q_{总}-Q_{损}$）比例下降。③辐射散热开始显现：从表3可见，第4 min油温超过50 ℃后，升温速率降幅明显加大（从6.9降至5.7，再降至4.9），这与热辐射随温度四次方增大的规律相吻合。

这一分析结果表明，尽管改进装置大幅减少了散热，但散热问题并未完全消除，这正是改进装置相对误差约为18%的主要原因。

（3）水升温速率波动原因分析。

水的升温速率呈现先升后趋于稳定的趋势，主要包括以下原因。①初始热平衡建立：实验开始阶段，水温与容器壁、温度传感器探头之间存在热平衡建立过程。加热棒产生的热量首先需要用于让容器内壁、水体以及传感器探头达成热平衡，致使初期升温速率稍缓。随着热平衡的达成，升温速率逐渐加快并趋于稳定。②传感器响应特性：数字温度传感器虽然响应速度较快，但在快速升温过程中仍存在微小的时间常数τ。当温度变化速率较快时，传感器的瞬时读数可能略滞后于液体实际温度，进而导致测量值偏低。③本实验采用人工搅拌方式，无法保证搅拌频率、力度全程完全一致，属于明显的变量控制漏洞，也会存在少量人为误差。

（4）改进效果综合对比。

两种装置实验效果对比如表4所示。

表4 两种装置实验效果对比

评价指标	传统装置	改进装置	改善效果
升温比相对误差	约46.7%	约18.1%	下降28.6个百分点
温度读数精度	±0.5 ℃	±0.2 ℃	提升60.0个百分点
数据稳定性	波动剧烈	相对平稳	显著改善
操作安全性	有触电风险	安全电压	安全性大幅提升
学生参与度	需多人配合	可单人操作	操作难度降低

4 改进方案分析

4.1 “加热时间反映吸收热量”实验逻辑分析

本实验依靠双层真空杯与密封结构统一两组装置的散热条件，使水与食用油的散热条件趋于一致，“用加热时间反映物质吸收热量”这一实验逻辑基本成立。但受限于当前民用隔热材料的工艺水平，装置无法实现完全绝热，因此该实验逻辑仍存在小幅系统偏差。

4.2 进一步降低实验误差的可落地路径

结合误差溯源结果，为继续压缩18.1%的系统误差，提出4条实操方案。

（1）强化隔热防护：在真空杯外部增设保温层，优化杯盖密封性，减少传导散热与热辐射。

（2）替换搅拌装置：使用小型电机搅拌器替代人工搅拌，固定转速，消除人为变量干扰。

（3）控制实验区间：缩短单次实验时长，减小液体与环境温差，弱化热辐射影响。

（4）优化加热配置：选用可调功率的低压加热器，以平衡升温速率与课堂课时。

5 改进方案的教学价值及其局限性分析

5.1 教学价值

本套优化装置核心配件易购、成本可控，且制作简便，便于在基层中小学大范围推广应用。同时装置实验数据精度高、稳定性好，能够直观呈现不同物质的吸热能力差异，帮助学生理解比热容物理规律，深化对控制变量法、转换法等科学方法的理解与体验。

5.2 局限性讨论

（1）装置定制化程度较高：双层真空杯需选用内径一致、深度足够的型号；在瓶盖合适位置打孔并安装搅拌棒、温度传感器及加热棒时，需保障各接口的密封性与泄压通道的畅通。整体装置目前仍需定制加工。

（2）散热问题未完全消除：尽管采用双层真空杯，隔热性能仍有限。油的升温速率呈现递减趋势（7.5→4.9 ℃/min），表明散热效应持续存在；若实验时间延长或温差进一步增大，散热影响将愈发明显。

（3）加热功率受限：为保证安全性，选用低压（12 V）加热棒，功率相对较低，完成一次实验需5~8 min，这对课时紧张的常规课堂构成一定挑战。

6 结语

针对传统比热容实验装置的多项缺陷，将双层真空杯、数字传感器、低压加热棒等成熟器材进行了系统集成与整体优化。本研究核心工作并非器材原创，而是依托标准化平行对照实验量化验证优化效果，并开展全维度误差定量溯源。实测数据显示，油水升温比的相对误差由46.7%降至18.1%，实验精度、数据稳定性与操作安全性均显著提升。

本研究价值体现在三个方面：一是集成式装置取材便捷、成本低廉，便于在一线教学中推广；二是采用“对照实验+定量误差分析”的研究方法，为同类实验改进提供了可参考的研究范式；三是客观分析装置局限，给出明确的误差优化路径。物理实验教学需持续优化实验设计，让学生在科学探究中建构物理观念、发展核心素养。后续可围绕隔热升级、机械搅拌、加热功率可调、无线数据采集等方向继续完善装置，进一步降低实验误差，提升实验精度与使用体验。

基金项目：2024年毕节市教育科学中考薄弱学科质量提升专项课题“共同体办学理念下提升县域初中物理学科教学质量的实践与研究”，编号：ZX2024038；2025年毕节市教育科学规划重点课题“数智赋能‘教研赛创’四维联动跨学科实验教学体系构建研究”，编号：2025A026。

作者简介：杨猛（1987—），男，高级教师，研究方向：初高中物理教育教学、高中通用技术教育教学、物理实验室管理工作，E-mail：ym18cg@qq.com。

参考文献

[1] 中华人民共和国教育部.义务教育物理课程标准（2022年版）[S].北京：北京师范大学出版社，2022.

[2] 窦元敏，雷登玉，简涵林，等.浅谈初中物理教材中比热容探究实验的不足及改进[J].中学物理，2016，34（04）：34-35.

[3] 王泓杰.比热容实验误差分析与实验装置改进的探讨[J].中学物理，2021，39（10）：17-19.

[4] 韩雨红.比热容实验的分析与改进[J].实验教学与仪器，2024，41（01）：47-48.

[5] 葛永普，刘勇.利用温度传感器测量物质的比热容[J].中学物理教学参考，2020，49（23）：44-45.

[6] 吴少军.基于数字化技术对传统物理实验的改进：以沪科版“探究物质的比热容”教学为例[J].中小学实验与装备，2025，35（03）：29-32.

[7] 刘志刚，陈世通，李洪伟.“探究物质的比热容”实验装置的创新改进[J].中小学实验与装备，2025，35（04）：57-59.

[8] 卢军委.比热容实验的改进与创新[J].中学物理，2022，40（04）：44-45.