

物理实验



热辐射综合教学实验平台设计

王振宇 俞鸿彬 刘 伟

(北京理工大学物理学院, 北京 102488)

摘 要 本文设计了一个用于热辐射相关研究的综合性教学实验平台,可以研究常见材料的热辐射特性,验证斯蒂芬-玻尔兹曼定律、辐射反平方定律、兰贝特余弦定律和基尔霍夫定律等热辐射基本定律。该实验平台具有功能多、精度高、成本低、操作简单等优势,实现了实验过程的自动控制和实验数据的自动采集,并借助计算机技术进行数据处理,实现数据的可视化,使得实验结果更加直观。该实验平台可以用于大学物理实验和创新设计性实验教学。

关键词 热辐射;辐射热流传感器;辐射率;热辐射定律;综合实验平台

DESIGN OF A COMPREHENSIVE TEACHING EXPERIMENTAL PLATFORM FOR THERMAL RADIATION

WANG Zhenyu YU Hongbin LIU Wei

(School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 102488)

Abstract A comprehensive teaching experimental platform is designed for the study of thermal radiation, which can be used to study the thermal radiation characteristics of common materials and to verify the basic laws of thermal radiation such as Stefan-Boltzmann law, the inverse square law of radiation, Lambert's cosine law and Kirchhoff's law. The experimental platform has the advantages of multiple functions, high precision, low cost and simple operation. It achieves automatic control of the experimental process and automatic collection of experimental data. By using computer technology to process the data, it realizes the visualization of the data, making the experimental results more intuitive. The experimental platform can be used in university physics experiments and innovative design experiment teaching.

Key words heat radiation; radiant heat flow sensor; emissivity; law of thermal radiation; comprehensive experimental platform

一切自身温度大于绝对零度的物体都会向外发出热辐射,热辐射是唯一不需要介质的传热方式^[1,2]。热辐射与热力学、光学、电磁学关系紧密,也奠定了量子理论的基础。基于热辐射的基本定律,人们发明的红外测温、红外成像等热辐射探测

仪器在红外隐身、导弹拦截、航空航天、抢险救灾等领域应用广泛^[3]。

将热辐射的基本定律纳入大学物理实验教学有较强的现实意义,但目前在国内各高校开设的大学物理实验中,热辐射相关实验较少,也鲜有物

收稿日期: 2024-06-22

基金项目: 教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会教学研究项目(DWJZW202213hb);北京理工大学研究生教研教改重点项目(2023ZDJG017)。

作者简介: 王振宇,北京理工大学物理学院实验师, wangzy@bit.edu.cn。

通信作者: 刘伟,北京理工大学物理学院高级实验师, liuwei73150@bit.edu.cn。

引文格式: 王振宇,俞鸿彬,刘伟. 热辐射综合教学实验平台设计[J]. 物理与工程, 2024, 34(5): 139-143.

Cite this article: WANG Z Y, YU H B, LIU W. Design of a comprehensive teaching experimental platform for thermal radiation[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(5): 139-143. (in Chinese)

理实验教学仪器公司制作热辐射相关教学仪器^[4]。文献[5]利用国外厂家的实验仪器设计了一套热辐射基础实验,其实验仪器价格昂贵、操作复杂、所涉及的热学定律少,不利于在大学物理实验教学中大规模使用。

针对以上问题,本文设计了一套低成本的研究热辐射基本定律的多功能综合性实验平台。该实验平台不仅可以很好地验证斯蒂芬-玻尔兹曼定律、辐射反平方定律、兰贝特余弦定律、基尔霍夫定律等热辐射基本定律,还可以研究常见材料的热辐射特性。通过采用 PID 控温仪和数据采集器,该平台实现了仪器的自动控温、计算机自动采集数据及实时数据显示,使得实验结果更加直观,操作更加便捷。

1 实验装置设计

本实验平台的设计如图 1 所示,发热板作为辐射源对外发出热辐射,其温度由 PID 控温仪控制,可以实现对发热板的精确控温;辐射热流传感器为热辐射的接收端,可以给出到达传感器表面的辐射热流密度;数据采集器将传感器的测量信号以数据形式传输到电脑上,实现测量数据的实时可视化。平台实物装置如图 2 所示。

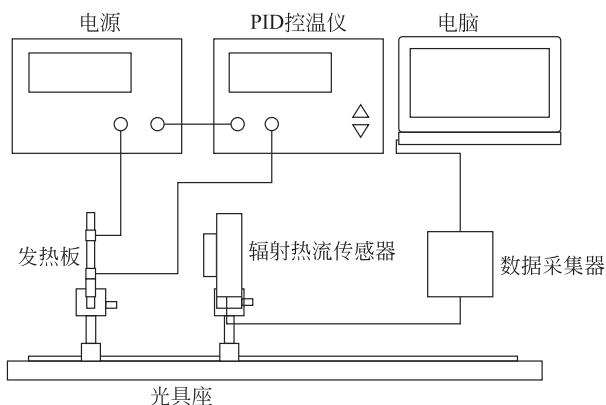


图 1 热辐射综合实验平台架构示意图

1.1 热电堆式辐射热流传感器

热电堆式辐射热流传感器制作工艺成熟,具有成本低、精度高等优势^[6],适用于热辐射实验。

其工作原理是依靠热电偶将通过传感器热阻层的温度梯度转换为电动势,通过若干热电堆串联形成热电偶将电信号叠加,进而反映多个信号的平均特性,实现对热流密度的测量^[6]。实验所采用的传感器的分辨率 $Kr=20\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{V})$ 。



图 2 热辐射综合实验平台装置实物图

考虑到实验所采用的传感器为非水冷式传感器,仪器工作时温度略高于环境温度,受到传感器自身对外的热辐射和环境辐射的影响,从发热板发出且到达传感器表面的辐射热流密度数值与传感器的测量值并不相等。对此我们需要额外测量此时传感器表面的温度 T_{sens} 和环境的平均温度 T_{env} ,可以近似算出发热板发出的辐射热流密度,理论计算过程如下:

当发热板和传感器间达到热平衡时,有

$$E_{\text{hp}} + E_{\text{env}} = E_{\text{meas}} + E_{\text{rad}} \quad (1)$$

其中: E_{hp} 表示由发热板到达传感器表面的辐射热流密度; E_{env} 表示环境(如仪器周围的空气等温度大于绝对零度的物体)发出的辐射热流密度,由斯蒂芬-玻尔兹曼定律可知 $E_{\text{env}} = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{env}}^4$, 其中 T_{env} 为环境的平均温度,探头标称发射率 $\epsilon = 0.95$; 斯蒂芬-玻尔兹曼常量 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$; E_{meas} 表示传感器表面材料的净吸收辐射热流密度,即仪器显示的测量值; E_{rad} 表示传感器对外发出的净辐射热流密度,满足 $E_{\text{rad}} = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{sens}}^4$, 其中 T_{sens} 为传感器工作时其表面的温度。

将式(1)移项并代入 $\epsilon, \sigma, T_{\text{env}}, T_{\text{sens}}$ 可以将 E_{hp} 表示:

$$\begin{aligned} E_{\text{hp}} &= E_{\text{meas}} + (E_{\text{rad}} - E_{\text{env}}) \\ &= E_{\text{meas}} + \epsilon \cdot \sigma (T_{\text{sens}}^4 - T_{\text{env}}^4) = E_{\text{meas}} + E_{\text{amd}} \end{aligned} \quad (2)$$

其中,修正项 $E_{\text{amd}} = \epsilon \cdot \sigma (T_{\text{sens}}^4 - T_{\text{env}}^4)$ 。

在实验中,将传感器的测量值 E_{meas} 作为发热板发出的辐射热流密度的 E_{hp} 测量值误差较大,通过额外测量传感器表面的温度 T_{sens} 和环境的平均温度 T_{env} ,使用修正值 $E_{\text{meas}} + \epsilon \cdot \sigma (T_{\text{sens}}^4 - T_{\text{env}}^4)$ 作

为 E_{bp} 的测量值更为准确,我们通过实验证明了这一点。

在图 3 中我们将实验中得到传感器的测量值 E_{meas} (黑色数据点) 和修正值 $E_{\text{meas}} + E_{\text{amd}}$ (灰色数据点) 进行了对比,可以看出相比于测量值,修正值的线性拟合度 R^2 更高,且偏置项(线性拟合的截距)更接近 0,修正值更逼近 E_{bp} 的真实值,修正效果良好。

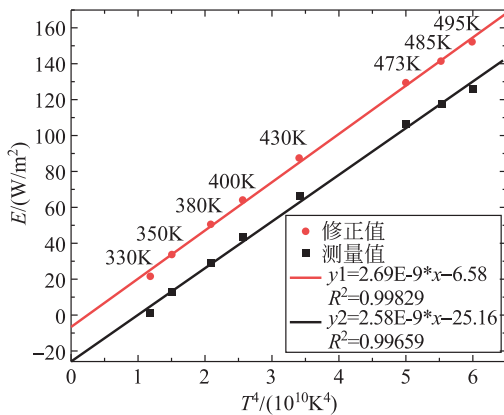


图 3 辐射热流密度测量值与修正值随 T^4 变化关系的对比

1.2 温度可控的发热装置

温度可控的发热装置由改进的陶瓷发热板 (30mm×30mm)、K 型热电偶、PID 控温仪组成。由于陶瓷的导热性较差,发热板表面温度不均,因此将一片同等规格的金属片贴在发热片表面,两者间缝隙用导热硅脂填充,实验验证该方法对发热板均热性有较大提升,且金属片用铝或铜效果最好。PID 控温仪连接 K 型热电偶后可以实现发热板表面的自动控温和温度读取。

1.3 数据采集器

由于热学实验的实验数据易受环境因素影响,涨落较大,需要多次采集数据以减少涨落对数据精确性的影响,使用数据采集器搭配计算机技术可以实现对数据的实时采集、实时显示,减少了实验人员的工作量。

1.4 其他器材

实验平台还包括光具座(带刻度)、温度计和电源等其他配套器材。

2 热辐射基本定律的研究

2.1 验证斯蒂芬-玻尔兹曼定律

斯蒂芬-玻尔兹曼定律表述为黑体表面单位

面积辐射出的总辐射功率 E_b (即辐射热流密度) 与黑体本身的热力学温度 T 的四次方成正比^[1,2],其表达式为

$$E_b = \int_0^{+\infty} E_{b,\lambda} \cdot d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad (3)$$

其中, E_b 为黑体的总辐射热流密度; $E_{b,\lambda}$ 为黑体发出的波长为 λ 的单色光的辐射热流密度; T 为黑体的热力学温度; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常量。实际物体可以理想化为灰体,其发出的辐射密度 $E = \epsilon \cdot E_b$ 其中,发射率 $\epsilon < 1$ 且为常数。基于上述假设,热源到达传感器区域的辐射热流密度 E 与热源的温度 T 依旧满足 $E \propto T^4$ 。

本项实验内容具体步骤如下:

(1) 搭建好实验装置,传感器探头背靠自然光/窗户/人员等热源或光源。

(2) 固定探头与发热板间距为 r 。设置 PID 控温仪,设定发热板温度 T ,加热发热板,等待板面各处发热均匀。

(3) 打开数据采集软件开始采样,等待采样数值图像的涨落趋于稳定时,记下最新的 20 个数值取平均值,作为此时传感器所测量的辐射热流密度 E_0 。

(4) 记下此时实验室温度 T_0 和传感器内部温度 T_1 ,计算此时传感器向环境发出的理论辐射热流密度 $E_1 = \epsilon \cdot \sigma (T_1^4 - T_0^4)$ 。

(5) 最终发热板到达传感器探头表面的实际辐射热流密度 $E = E_0 + E_1$ 。

(6) 设定发热板温度 T 为不同的数值,重复上述操作至测得所有数据,将测得的数据输入计算机,即可得到辐射热流密度 E 随温度 T^4 变化的 $E-T^4$ 曲线和相关系数 R^2 。

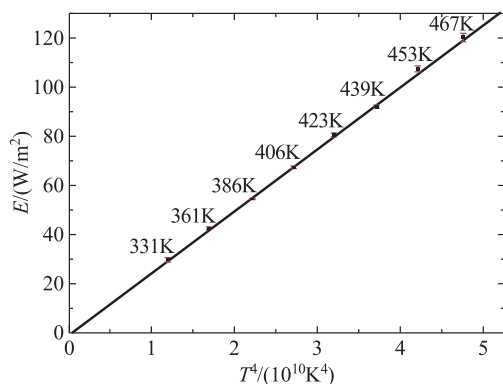
实验中固定 $r = 0.05\text{cm}$,选取 T 的区间为 331~467K,取 T^4 近似等间距(此时 T 不等间距),得到的 $E-T^4$ 曲线如图 4 所示。从图中可以看出, E 和 T^4 关系近似满足 $E \propto T^4$, $R^2 = 0.99883$,说明线性相关性好,符合斯蒂芬-玻尔兹曼定律。

2.2 验证辐射反平方定律

辐射反平方定律描述为热辐射强度与距离的二次方成反比^[1],其表达式为

$$E = \frac{I}{r^2} \quad (4)$$

其中, E 为发热源的辐射功率密度, I 为定向辐射强度。如果热源的辐射功率恒定,那么辐射强度

图4 辐射热流密度 E 随温度 T^4 的变化关系

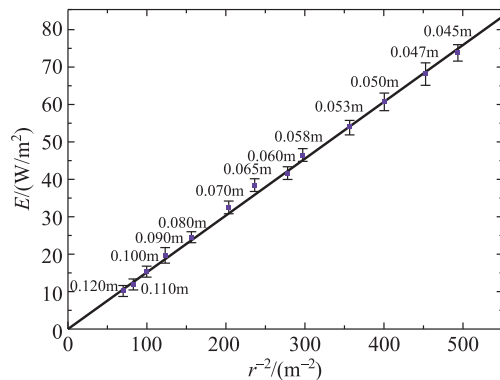
I 为常量,则可以得到 $E \propto \frac{I}{r^2}$ 的结论。

本项实验内容具体步骤如下:

(1) 测量数据的实验操作与验证斯蒂芬-玻尔兹曼定律实验的操作第(1)~(5)步一致。

(2) 调节探头与发热板间距 r , 重复上述操作, 将测得的数据输入计算机, 得到辐射功率密度 E 随距离 r^{-2} 变化的 $E-r^{-2}$ 曲线和相关系数 R^2 。

本项实验内容中固定 $T=430\text{K}$, 选取 r 的区间为 $0.045 \sim 0.120\text{m}$, 得到的实验结果如图 5 所示。

图5 辐射功率密度 E 随距离 r^{-2} 的变化关系

从图中可以看出, E 和 $\frac{1}{r^2}$ 近似满足 $E \propto \frac{1}{r^2}$ 关系, $R^2=0.99729$, 说明线性相关性好, 符合辐射反平方定律。

2.3 验证兰贝特余弦定律

兰贝特指出黑体辐射的定向辐射强度 $I_{b,\theta}$ 是一个常量, 与空间方向 θ 无关, 等于其在法向方向上的辐射强度 I_b [1]。

兰贝特余弦定律用于描述热源发出的辐射热流密度在其表面的半球空间各方向上的分布 [1],

其表达式为

$$E_{\theta} = I \cdot \cos\theta \quad (5)$$

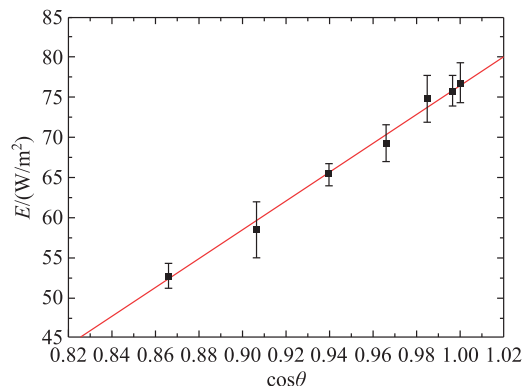
其中, I 为辐射强度, E_{θ} 为定向辐射功率密度, θ 为该方向与表面法向的夹角。如果光源的辐射功率恒定, 那么辐射强度 I 为常量。

本项实验内容具体步骤如下:

(1) 测量数据的实验操作与验证斯蒂芬-玻尔兹曼定律实验的操作第(1)~(5)步一致。

(2) 旋转发热板, 改变其法线方向与光具座中心线夹角 θ , 重复上述操作, 将测得的数据输入计算机, 得到辐射热流密度 E 随夹角余弦 $\cos\theta$ 变化的 $E-\cos\theta$ 曲线和相关系数 R^2 。

本项实验内容中固定 $T=480\text{K}$, $r=0.06\text{m}$, 考虑到发热板不是理想的漫反射表面, 实验中 θ 不宜过大, 故选取 θ 的区间为 $0 \sim 30^\circ$, 得到的实验结果如图 6 所示。

图6 辐射热流密度 E 随夹角余弦 $\cos\theta$ 的变化关系

从图中可以看出, E 和 $\cos\theta$ 关系近似满足 $E \propto \cos\theta$, $R^2=0.99582$, 说明线性相关性好, 符合辐射反平方定律。

2.4 验证基尔霍夫定律

基尔霍夫定律指出, 当温度与波长一定时, 任何物体的发射率 ϵ 和吸收率 α 都相等 [1,2]。

本实验中, 我们用金属片所发出的辐射功率 E 来间接表示金属的发射率 ϵ , 由斯蒂芬-玻尔兹曼定律 $E = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$ 可得: 当 T 一定时, $\epsilon \propto E$; 我们用一定时间内暴露在相同辐射热流场中金属片升高的温度 ΔT 来间接表示金属的吸收率 α , 此时可以近似认为 $\alpha \propto \Delta T$ 。如果不同材料的辐射功率 E 与升高的温度 ΔT 满足线性关系, 可以视为基尔霍夫定律成立。

本项实验内容具体步骤如下:

(1) 搭建好实验装置, 传感器探头背靠自然

光/窗户/人员等热源或光源。

(2) 在陶瓷发热片表面贴上一金属片。固定探头与发热板间距为 r , 设置 PID 控温仪, 设定发热板温度 T , 加热发热板, 等待板面各处发热均匀。

(3) 测量数据的实验操作与验证斯蒂芬-玻尔兹曼定律实验的操作第(3)~(5)步一致, 测量得到表面温度为 T 的金属片所发出的辐射功率 E 。

(4) 将金属片取下, 并将辐射热流传感器移除, 取一片相同材质的金属片置于原探头区域, 测量其表面温度 T_0 。

(5) 继续加热陶瓷发热片维持发热片表面温度为 T , 一段时间后测量此时金属片表面温度为 T_1 , 并计算在辐射场中金属片升高的温度 $\Delta T = T_1 - T_0$ 。

(6) 重复上述操作至测得所有数据, 将测得的数据输入计算机, 得到图像 $E-\Delta T$ 和相关系数 R^2 。

该次实验固定 $T = 463\text{K}$, $r = 0.08\text{m}$ 。更换铝、铁、铜、钛等不同的金属片样品, 包括同种金属但表明粗糙或氧化程度不同的样品, 重复上述步骤(2)~(7), 得到的实验结果如图 7 所示。

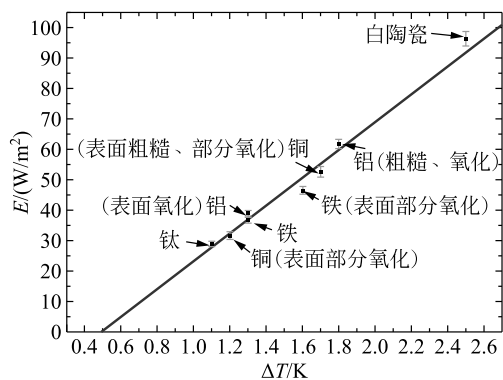


图 7 辐射功率密度 E 随金属片升高温度 ΔT 的变化关系

用传感器所测量的辐射热流密度 E 来表示的金属片的发射率, 金属片升高的温度 ΔT 来表示金属片的吸收率, 近似满足 $E \propto \Delta T$, $R^2 = 0.98022$ 。从几组不同材料与不同的表面参数的对比可以明显看出: 材料自身性质, 以及材料的粗糙度、氧化度都会影响材料的辐射度。

3 误差分析

实验中, 发热板不是理想的漫反射表面, 表面的辐射场不是理想的半球状, 辐射能量会集中于发热板法向方向, 一定程度上会影响实验结果; 考虑到实验室内空气流通性较差且空气为不良导体, 一般情况下热对流对实验结果的影响可以忽略不计, 但当传感器与发热板间距 r 较小时, 热对流和热传导对传感器测量值仍有影响。

4 结语

本文设计并搭建了一个热辐射综合教学实验平台, 可以验证多项热辐射基本定律, 研究常见材料的热辐射特性, 锻炼学生将理论与实践相结合的能力。该实验平台改善了以往辐射源的均热差、热辐射不稳定的问题, 并借助数据采集器和计算机技术提高测量的精度和操作的便捷性, 适用于大学物理实验和创新设计性实验教学。

参 考 文 献

- [1] 秦允豪. 普通物理热学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [2] 陶文铨. 传热学[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [3] 晏敏, 彭楚武, 颜永红, 等. 红外测温原理及误差分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2004(5): 110-112.
YAN M, PENG C W, YAN Y H, et al. Principle and error analysis of infrared temperature measurement[J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2004(05): 110-112. (in Chinese)
- [4] 贾斐霖, 高丽丽, 刘晓, 等. 热辐射研究综合实验平台的设计[J]. 大学物理, 2012(9): 57-60.
JIA F L, GAO L L, LIU X, et al. Design of a comprehensive experimental platform for thermal radiation research[J]. College Physics, 2012(9): 57-60. (in Chinese)
- [5] 李伟斌, 熊永红. 热辐射基础实验[J]. 物理实验, 2003(1): 9-12.
LI W B, XIONG Y H. Basic experiment on thermal radiation[J]. Physics Experiment, 2003(1): 9-12. (in Chinese)
- [6] 牛雅迪. 热电堆型总辐射传感器设计[D]. 南京信息工程大学, 2017.