

低温辐射计吸收腔组件的热分析方法

薛王斌 俞兵 储隽伟 范纪红 曹孟威 薛依伦 吴浩东

Thermal analysis method for absorption cavity module of cryogenic radiometer

XUE Wangbin, YU Bing, CHU Junwei, FAN Jihong, CAO Mengwei, XUE Yilun, WU Haodong

引用本文:

薛王斌, 俞兵, 储隽伟, 等. 低温辐射计吸收腔组件的热分析方法[J]. 应用光学, 2025, 46(4): 922–928. DOI: 10.5768/JAO202546.0405004

XUE Wangbin, YU Bing, CHU Junwei, et al. Thermal analysis method for absorption cavity module of cryogenic radiometer[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(4): 922–928. DOI: 10.5768/JAO202546.0405004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0405004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低温辐射计紫外探测器光谱响应度测试技术研究

Spectral responsivity measurement technology for UV detector based on cryogenic radiometer

应用光学. 2022, 43(2): 311–316 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0204001>

精密红外辐射计测量模块研究

Research on measurement module of precision infrared radiometer

应用光学. 2022, 43(4): 738–743 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0404004>

自校准多通道红外辐射计的设计与性能测试

Design and performance test of self-calibration multichannel infrared radiometer

应用光学. 2020, 41(4): 743–753 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0406004>

高低温试验装置中多光谱光学窗口组件设计

Design of multispectral optical window assembly for high and low temperature test device

应用光学. 2023, 44(3): 661–667, 683 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0305001>

基于低温积分球的中红外陷阱探测器技术

Mid-infrared trap detector technology based on cryogenic integrating sphere

应用光学. 2024, 45(4): 685–692 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0401003>

锁相热像方法实验测量 Nb_2O_5 薄膜吸收率

Absorptance measurement on Nb_2O_5 coating with lock-in thermography method

应用光学. 2020, 41(3): 441–446 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0301002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 04-0922-07

引用格式: 薛王斌, 俞兵, 储隽伟, 等. 低温辐射计吸收腔组件的热分析方法 [J]. 应用光学, 2025, 46(4): 922-928.

XUE Wangbin, YU Bing, CHU Junwei, et al. Thermal analysis method for absorption cavity module of cryogenic radiometer[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(4): 922-928.



在线阅读

低温辐射计吸收腔组件的热分析方法

薛王斌, 俞 兵, 储隽伟, 范纪红, 曹孟威, 薛依伦, 吴浩东

(西安应用光学研究所 国防科技工业光学一级计量站, 陕西 西安 710065)

摘 要: 吸收腔组件是电替代低温辐射计的重要组成单元, 电替代低温辐射计工作时, 吸收腔和热连接共同建立并保持热平衡。根据电替代测量原理, 分别建立光辐射加热平衡态和电替代加热平衡态, 为了准确描述两种平衡态的温度分布差异和电替代的不等效性, 结合差异加热方法和有限元仿真方法对加热路径引起的不等效性进行评估。通过仿真分析与不确定度分析, 得到加热路径引起的温度测量值差异为 1.5×10^{-5} K, 电替代加热的不等效性为 1.2×10^{-8} W。

关键词: 电替代低温辐射计; 吸收腔组件; 不等效性; 差异加热

中图分类号: TH741; TN214

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0405004

Thermal analysis method for absorption cavity module of cryogenic radiometer

XUE Wangbin, YU Bing, CHU Junwei, FAN Jihong, CAO Mengwei, XUE Yilun, WU Haodong

(Primary Optical Metrology Station of National Defense Science and Technology Industry,
Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The absorption cavity module is an important component of the electrical substitution cryogenic radiometer. When the cryogenic radiometer works, the absorption cavity and the thermal link jointly establish and maintain the thermal balance. According to the measurement principle of electrical substitution, the equilibrium state of light radiation heating and the equilibrium state of electrical substitution heating were established, respectively. In order to accurately describe the differences of temperature distribution and electrical substitution inequivalence between the two equilibrium states, the differential heating method and finite element simulation method were proposed to evaluate the inequivalence caused by heating paths. According to the results of simulation analysis and uncertainty analysis, the difference of temperature measured by heating path is 1.5×10^{-5} K, and the inequivalence of electrical substitution heating is 1.2×10^{-8} W.

Key words: electrical substitution cryogenic radiometer; absorption cavity module; inequivalence; contrast heating

引言

低温辐射计以其能够进行微小功率高精度绝对计量的优势建立了基于低温辐射计的辐射度量溯源传递体系。低温辐射计通过测量电信号推算探测器接收到的光辐射强度, 能够将光辐射功

率的测量不确定度缩小到 0.01% (1 mW), 是国际公认的光功率计量最高标准^[1]。20 世纪 90 年代, 英国国家物理实验室 (national physical laboratory, NPL) 研发了世界上第一台电替代低温辐射计^[2], 将测量不确定度缩小到 0.01% (1 mW)。低温辐射计

收稿日期: 2024-11-21; 修回日期: 2025-01-02

基金项目: 国家部委基金

作者简介: 薛王斌 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学测试计量技术研究。E-mail: 1092089996@qq.com

通信作者: 俞兵 (1981—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事光学测试计量技术研究。E-mail: yubinglaile@126.com

主要结构包括真空低温舱、布儒斯特入射窗、吸收腔和热连接等^[3]。其中吸收腔是重要的功能单元, 电替代低温辐射计工作时, 吸收腔和热连接共同建立并保持热平衡态^[4]。NPL 绝对低温辐射计的不确定度分析中考虑了窗口透过率、吸收腔吸收率、激光镜面散射、电功率测量、辐射计灵敏度和杂散辐射共 6 项分量, 给出了校正系数为 0.057%, 校正系数的不确定度为 0.004% 的计量能力评估^[2]。美国国家标准与技术研究院(national institute of standards and technology, NIST)研制了纳瓦微瓦低温辐射计, 在该设备的不确定度分析中提出了使用发热电阻在两个不同点位分别加热的方法, 进行了两次差异显著的电加热并记录了吸收腔温度, 将温度差量化作为不等效系数, 利用该方法评估纳瓦微瓦低温辐射计中的不等效分量为 0.034%^[5]。

如上所述, 现有研究对低温辐射计的电替代不等效概念仍不完善, 未有成体系的不等效性评价方法。NPL 和 NIST 在进行低温辐射计不确定度分析时未涉及不等效性或仅使用了较为粗放的评估方法。本文基于电替代过程建立低温辐射计测量模型, 评价加热路径不等效性和电替代不等效性。利用热传导微分方程建立吸收腔组件的热响应模型, 利用有限元方法模拟光辐射加热过程和电替代加热过程, 根据仿真结果评价加热路径的不等效性, 结合电替代测量公式计算电替代不等效性^[6]。结合有限元方法与差异加热方法分析电替代过程和电替代不等效性, 评价电替代不等效性, 指导设计自研的低温辐射计。

1 低温辐射计测量原理与测量模型

1.1 测量原理

如图 1 所示, 在低温辐射计测量过程设计中, 进行光辐射加热和电替代加热, 认为相同温升对应相同功率^[7]。电功率的测量不确定度可以达到 3.0×10^{-12} W, 以吸收腔为核心器件构建光、电功率传感器, 将毫瓦级的光、电功率转化为开尔文级的吸收腔温升, 光功率的测量不确定度将大幅优化。如图 2 所示。电替代加热分为功率略低于和略高于光功率的两个过程, 这样的设计能够提高测量结果的可靠性。

图 3 为低温辐射计主机模型图, 低温辐射计在电替代辐射计的基础上引入真空低温环境, 通过设计接近绝对零度的环境, 极大减小环境背景温

度的影响, 同时提供超导环境, 通过引入超导线抑制电学噪声, 减小测量不确定度。同时, 真空低温工作环境也带来了新的影响, 如激光从空气介质经过布儒斯特窗进入真空低温工作腔时不完全透过。常温电替代辐射计中, 电替代不等效性影响远低于热噪声, 不必做单独分析, 但在真空低温环境下需要重点研究电替代不等效性的原理和由此引起的不确定度^[8]。

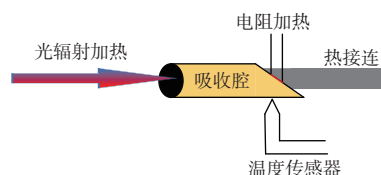


图 1 电替代原理

Fig. 1 Principle of electrical substitution

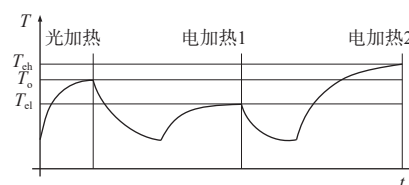
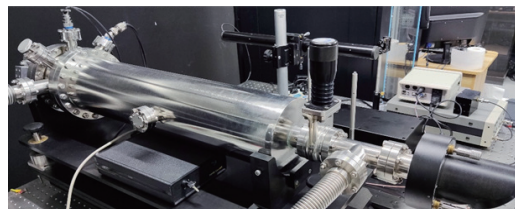


图 2 电替代过程

Fig. 2 Course of electrical substitution



(a) 实物图

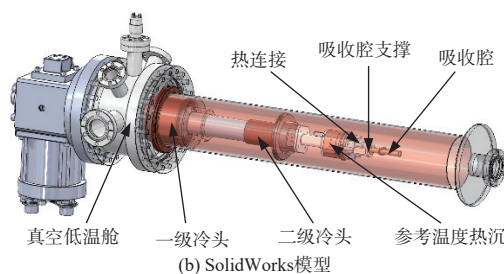


图 3 低温辐射计主机

Fig. 3 Model of cryogenic radiometer

1.2 测量模型

根据低温辐射计光路设计, 考虑待测光从空气环境进入真空舱时的窗口透过率, 光辐射能量被吸收腔吸收时的吸收率和环境中的杂散辐射光, 建立待测光功率和转换光功率的校正公式:

$$P_{\text{optic-measure}} = \frac{1}{T_B} \left(\frac{P_{\text{optic-trans}}}{A} + S \right) \quad (1)$$

式中: $P_{\text{optic-measure}}$ 为待测光辐射功率; $P_{\text{optic-trans}}$ 为参与吸收腔加热过程并建立热平衡的转换光功率; T_B 为布儒斯特窗口透过率; A 为吸收腔吸收率; S 为杂散光功率。

根据图2所示的电替代过程, 将式(1)中的 $P_{\text{optic-trans}}$ 表示为电替代功率、吸收腔平衡温度的形式, 即:

$$P_{\text{optic-trans}} = P_{\text{el}} + (P_{\text{eh}} - P_{\text{el}}) \left(\frac{T_o - T_{\text{el}}}{T_{\text{eh}} - T_{\text{el}}} \right) \quad (2)$$

式中: P 为功率; T 为温度; 下标 el 和 eh 分别表示略低和略高的电替代过程; 下标 o 表示光辐射过程。

式(1)描述了待测光功率和参与建立热平衡的转换光功率的关系, 包含3个校正项。式(2)描述了电替代过程中转换光功率和电替代功率、吸收腔平衡温度的关系。

低温辐射计测量原理建立在吸收腔对相同光/电加热功率具有相同热响应的基础上。但实际上光加热过程和电替代过程不完全等效, 在真空低温条件下, 光电不等效性成为了影响系统不确定度的重要因素^[9-13]。

2 吸收腔组件结构

2.1 吸收腔腔体

低温辐射计吸收腔的功能是将不同类型的能量输入(光辐射能量和电阻发热能量)转换为自身的温升。从物理量分析, 吸收腔将低温辐射计的探测对象由光功率转化为温度; 从灵敏度角度分析, 通过吸收腔转换, 微小的功率被放大为显著的温度, 用温度间接标注功率值; 从测量原理分析, 通过吸收腔转换, 光功率测量被转换为电功率测量和温度测量, 而电功率能够溯源到量子基准, 降低了光功率的测量不确定度。因此, 吸收腔具备如下功能或特点:

1) 能量转化。电阻发热转化为吸收腔温升, 这一过程涉及焦耳热和固体热传导, 可以认为是完全转化。光辐射能量转化为吸收腔温升这一过程涉及热辐射和固体热传导, 其中热辐射效率依赖受照面的光学特征, 因此低温辐射计吸收腔内部受照面涂覆高吸收率黑色涂层, 结合腔形接收器可达到接近完全转化。

2) 参数放大。吸收腔可将微小的光功率转化为更容易被探测的温度参数, 因此吸收腔应具有

极小的热容。

3) 温度指示。吸收腔将吸收的能量转化为温升, 但由于吸收腔本身温度倾向于均匀分布, 因此吸收腔材料需具有极大的热导率。

综上所述, 设计了以无氧高导电铜 (oxygen free high conductivity copper, OFHC) 为主要材料的斜底圆柱形吸收腔, 吸收腔外径为 10 mm, 厚度为 0.1 mm, 一端开放, 一端用与圆锥母线夹角 60° 的斜面截断, 长度为 50 mm, 内部涂覆垂直排列碳纳米管阵列 (vertically aligned nanotube arrays, VANTAs) 黑色涂层^[14]。

2.2 热连接结构

低温辐射计热连接的功能是配合吸收腔建立并维持热平衡状态。热连接前端是 PID 控制的 4 K 参考温度热沉, 后端是作为转换元件的吸收腔。热连接具有以下功能或特点: 作为热阻建立参考温度热沉和吸收腔之间的温差, 因此热连接应具有极小的热导; 机械支撑吸收腔, 因此热连接需具有一定强度。总之, 设计了以 304 不锈钢为主要材料的三组细圆管为主体的热连接。

低温辐射计吸收腔组件如图4所示, 包含参考温度热沉、热连接、支撑结构和吸收腔四部分。

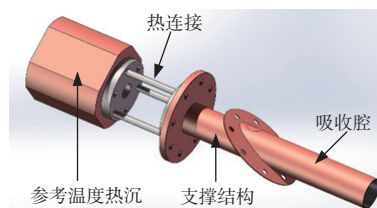


图4 低温辐射计吸收腔组件

Fig. 4 Absorption cavity module of cryogenic radiometer

3 热平衡分析

3.1 热平衡模型

低温辐射计的测量原理是基于吸收腔对相同加热功率(光/电)的温度响应。因此对吸收腔-热连接结构建立的热平衡进行分析, 建立温度-功率响应模型。在理想的绝热条件下, 加热功率(光/电)和吸收腔温度的关系如下:

$$C(T(t) - T_0) = Pt \quad (3)$$

式中: C 为吸收腔总的热容; $T(t)$ 为吸收腔在 t 时刻的温度; T_0 为吸收腔初始温度; P 为加热功率。

在实际工作条件下, 必须考虑热耗散, 因此在热平衡态时, 热连接传热功率与温差关系如下:

$$P_{\text{link}} = k(T_{\text{cavity}} - T_{\text{sink}}) \quad (4)$$

式中: P_{link} 为高温吸收腔通过热连接向低温热沉的热传导功率; k 为热导率; T_{sink} 为参考温度热沉的温度; T_{cavity} 为吸收腔的温度。当吸收腔被加热到一定温度时, 外加功率和热沉降温功率相同, 吸收腔进入热平衡态, 且平衡时吸收腔温度和光/电加热功率正相关。

图 5 所示为加热过程中各功率分量随时间的变化情况。低温辐射计工作时, 吸收腔上的作用量有光/电加热功率 $P_{\text{o/e}}$ 和热连接传热 P_{link} 。在无光/电功率时(时间轴 $t < 0$), 制冷舱中温度相对高的器件作为正热源向吸收腔辐射热, 4 K 参考温度热沉作为负热源吸收热, 二者维持平衡。开始测量后(时间轴 $t > 0$), 光/电加热器开始工作, 吸收腔受热温度升高, 参考温度热沉和吸收腔之间的温差变大, 负热源的 P_{link} 变大; 直到吸收腔温度升高到一定程度, $P_{\text{o/e}}$ 和 P_{link} 再次达到平衡状态, 建立热平衡, 加热过程如式 (5) 所示:

$$C\Delta T(t) = \int_0^t P_{\text{o/e}} - P_{\text{link}} dt \quad (5)$$

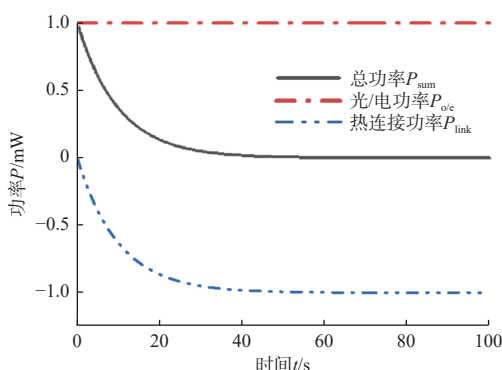


图 5 吸收腔工作时各功率分量变化

Fig. 5 Each power component changes during operation of absorption cavity

建立微分方程:

$$C \frac{d\Delta T(t)}{dt} + K\Delta T(t) = P_{\text{o/e}} \quad (6)$$

解方程得:

$$\Delta T(t) = \frac{P_{\text{o/e}}}{K} (1 - e^{-\frac{K}{C}t}) = \frac{P_{\text{o/e}}}{K} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (7)$$

式中: K 为热连接热导; $\tau = C/K$ 为吸收腔的时间常数。观察式 (7), 当时间 t 趋于无穷时吸收腔温升 ΔT 为 $P_{\text{o/e}}/K$, 与光/电加热功率呈正相关, 因此可利用 τ 和 ΔT 的表达式指导吸收腔和热连接的设计。

时间常数 τ 和热连接热导 K 的关系有: 热导越大, 吸收腔更快达到热平衡状态。温升 ΔT 和热导

K 的关系有: 热导越小, 温升越高, 吸收腔灵敏度越大, 有利于提高测量精度。因此, 在灵敏度和时间常数这两个参数的设计中对热连接的热导有互相矛盾的要求。

首先, 确定温升 ΔT 的取值。低温辐射计中用吸收腔温度指示功率。被测功率为 $10 \mu\text{W}$ 时, 以 0.06% 即 6 nW 的分辨率为依据, 锗电阻的测温分辨率为 $6 \mu\text{K}$, 则吸收腔至少需要 1 K/mW 的温度/功率响应度。取 $1 \text{ K} \sim 1 \text{ mW}$ 作为计算依据, 所确定的热连接热导 $K = 0.001 \text{ W/K}$ 。从吸收腔灵敏度需求分析, K 应该不大于此值。再考虑时间常数 τ , 在 $K = 0.001 \text{ W/K}$ 的基础上, 加热到 $0.9999\Delta T$, 即达到热平衡的时间为 9.2τ 。令 $9.2\tau < 1000 \text{ s}$, 则 $\tau < 109 \text{ s}$ 。相应地, 吸收腔总热容 $C < 0.109 \text{ J/K}$ 。为实现小热容和相对大的体积, 选取低温条件下比热容小的 OFHC 作为吸收腔的主要材料^[15]。OFHC 在 $4 \text{ K} \sim 10 \text{ K}$ 的低温条件下热导率能够达到 $700 \text{ W/(m}\cdot\text{K)} \sim 4000 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 远高于常温下的 $500 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 比热容能够达到 $0.01 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ 数量级, 远低于常温下的 $385 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。此外, 吸收腔具有几何结构, 吸收 1 mm 直径的激光需要涂覆全光谱吸收涂层, 需有 99.995% 以上的光谱辐射吸收率和相应的冗余设计, 综合而言, 吸收腔入射口直径应不小于 10 mm 。

吸收腔-热连接结构达到热平衡时的温度色图如图 6 所示。主要依靠作为热阻的 3 个细圆柱建立温度梯度, 而在 3 个细圆柱之外的地方温度平均分布。由于 OFHC 热导率高, 且在接近绝对零度的环境温度下, OFHC 的热导率进一步增大, 由 OFHC 塑形的吸收腔和热沉的温度均匀性更好。

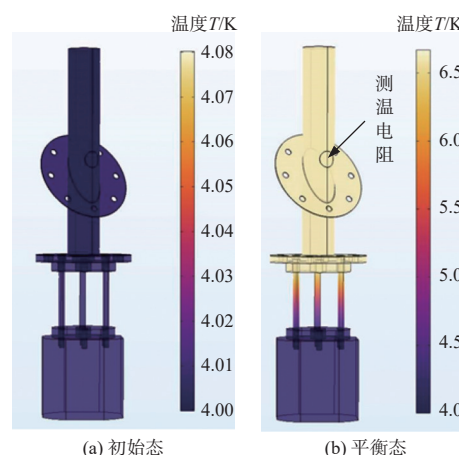


图 6 热平衡时吸收腔组件温度色图

Fig. 6 Temperature color chart of absorption cavity module during thermal equilibrium

3.2 加热路径不等效性分析

评估加热路径不等效性时,引用了差异加热方法,差异加热方法的思路如图 7 所示。

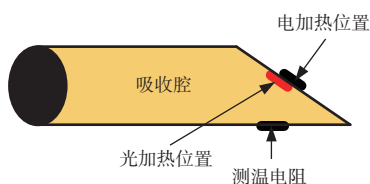


图 7 差异加热方法

Fig. 7 Contrast heating method

光辐射和电阻焦耳热分别加热吸收腔,测温电阻读取温度,用测温电阻读出的温度衡量光/电加热因加热路径不同引起的不等效。

将差异加热方法与有限元仿真方法结合,设置光辐射加热和电替代加热两个过程,对吸收腔的热响应进行分析。吸收腔-热连接结构被加热后一段时间的温度色图如图 6 所示,可以看出,热平衡时,吸收腔温度分布趋于均匀,这是因为无论加热位置如何变化,热量都被传导到吸收腔结构,而吸收腔是由高热导率材料制成的。

仿真参数设置为:真空(10^{-6} Pa)低温(10 K)环境,吸收腔组件整体初始温度为 4 K,热沉参考温度为恒温 4 K;光加热设置为 1 mW,激光在吸收腔斜底面沉积;电加热按照总功率 1 mW 和接触面积 $6.25\pi \text{ mm}^2$ 设置发热面热通量为 0.050 930 W 。

在仿真时使用了多种有限元网格,不同网格划分对应的仿真结果均收敛。表 1 为两种网格划分方案对应的仿真结果。其中,网格 1 为基于物理学的自适应网格,精细度为 Comsol 软件模板提供的极细化,网格 2 在网格 1 的基础上进行了局部细化。

表 1 热平衡时吸收腔的温度特征

Table 1 Temperature characteristics of absorption cavity during thermal equilibrium

网格		平均温度/K	测温点温度/K
网格1	光加热	6.600 089	6.600 016
	电加热	6.600 089	6.600 002
网格2	光加热	6.600 089	6.600 016
	电加热	6.600 089	6.600 002

读取数据时,读取如图 7 所示吸收腔部分外侧面的平均温度,用于表征吸收腔整体吸收的热量。在实物设计中,不能安装一种测量吸收腔全表面温度的测温仪器,因此用如图 7 中箭头所指的

小物块表面的平均温度模拟测温仪器读数。

图 6 和表 1 为热平衡仿真结果。以热平衡时吸收腔外表面的平均温度为依据,认为平均温度一致或接近,代表吸收腔转换了相同能量。根据光辐射加热和电加热的结果,测温区域最大温度差为 $14 \mu\text{K}$ 。电替代不等效中的温度测量不确定度 U_T 为:

$$U_T = \sqrt{14^2 + 6^2} = 15.23 \mu\text{K} \quad (8)$$

可以得出以下结论:

1) 两次电加热路径不一致,在吸收腔温度值接近的情况下,测温点存在温度差异,证明加热路径对测量结果有影响;

2) 光辐射加热和电替代加热选取相近路径,且测温点选择恰当时,加热路径的不等效能够缩小到 $14 \mu\text{K}$ 。

3) 结合测温仪器本身 $6 \mu\text{K}$ 的测量不确定度,电替代过程中的温度测量不确定度修正为 $15 \mu\text{K}$ 。

3.3 电替代不等效性分析

除了加热路径引起的不等效,电替代公式中的温度、电功率分量测量不确定度也会影响电替代不等效。温度测量的不确定度由测温模块 Model 372 的技术说明书给出,核心传感器铂电阻的温度分辨率为 $6 \mu\text{K}$,电功率测量不确定度由加热电阻的电路结构给出,测量不确定度为 $3.0 \times 10^{-12} \text{ W}$ 。

吸收腔与热沉控温测温模块如图 8 所示。利用 Model 372 进行吸收腔的温度测量和二级热沉的温度测量,Model 372 通过数字/模拟电路进行精细测量,测量电路如图 8 所示。利用 Model 372 进行二级热沉的温度控制,控温精度为 0.1 mK 。

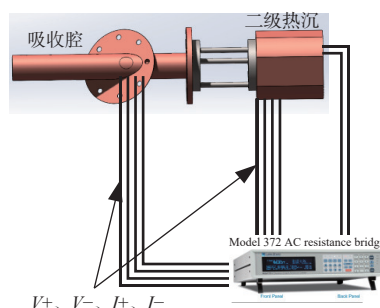


图 8 吸收腔与热沉控温测温模块

Fig. 8 Absorption cavity and heat sink temperature control and measurement module

电功率测控模块如图 9 所示。进行电功率测量时,将精密电流源、标准电阻与加热电阻薄膜串联,使用 Keithley 2000 数字万用表分别测量标

准电阻和加热电阻两端的电压, 获得加热电阻的功率。

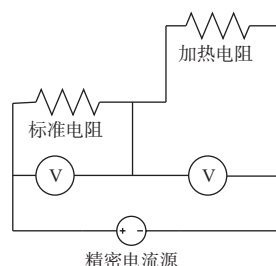


图9 电功率测控模块

Fig. 9 Electric power measurement and control module

图9所示电路中的加热电阻是贴在吸收腔底部的薄膜电阻。薄膜电阻的加热功率表示为:

$$P_{\text{electric}} = \frac{U_r U_{R_0}}{R_0} \quad (9)$$

式中: R_0 为标准电阻阻值; U_r 为加热电阻两端电压; U_{R_0} 为标准电阻两端电压; P_{electric} 为加热电阻输出功率。

由式(2)分析电替代的不等效性。加热路径引起的不等效性体现在温度的不确定度上, 温度不确定度包含温度测量系统的不确定度和加热路径引起的不确定度两项, 不确定度分析如表2所示。

表2 电替代不等效的不确定度分析

Table 2 Electrical substitution inequivalent uncertainty analysis

误差源	量具不确定度	校正	不确定度/W
P_{el}	3.0×10^{-12} W	/	1.5×10^{-12}
P_{eh}	3.0×10^{-12} W	/	1.5×10^{-12}
T_{el}	6 μ K	15 μ K	5.0×10^{-9}
T_{eh}	6 μ K	15 μ K	5.0×10^{-9}
T_0	6 μ K	15 μ K	1.0×10^{-8}
电替代	/	/	1.2×10^{-8}

如表2所示, 将电替代公式中的5个分量分别列举。第二列表示电加热功率测量仪和温度测量仪的不确定度。第三列使用3.2节计算得出的加热路径不等效对吸收腔温度进行校正。第四列为电替代不等效的不确定度分析。最终计算得到电替代的不等效性为 1.2×10^{-8} W, 相对不确定度为0.001 2%。

4 结论

本文在建立低温辐射计测量模型的基础上提

出模型重要组成单元——吸收腔-热连接结构的热分析方法。从建立热平衡出发, 提出结合差异加热法和有限元方法对加热路径引起的不等效进行评估, 根据本文方法评估, 加热路径引起的不等效为 1.5×10^{-5} K。结合电替代公式对电替代不等效进行综合分析, 最终得到电替代的不等效性为 1.2×10^{-8} W。

参考文献:

- [1] 孙立群, 朱京平, 唐天同, 等. 实现光辐射度量基准的几种方法[J]. 照明电器光源灯具, 2002, 23(4): 20-23.
SUN Liqun, ZHU Jingping, TANG Tiantong, et al. Several methods to achieve the optical radiation measurement benchmark[J]. Electric Lighting: Light Sources and Luminaires, 2002, 23(4): 20-23.
- [2] MARTIN J E, FOX N P, KEY P J. A cryogenic radiometer for absolute radiometric measurements[J]. Metrologia, 1985, 21(3): 147-155.
- [3] HOUSTON J M, RICE J P. NIST reference cryogenic radiometer designed for versatile performance[J]. Metrologia, 2006, 43(2): 31-35.
- [4] PEARSON D A, ZHANG Z M. Thermal-electrical modeling of absolute cryogenic radiometers[J]. Cryogenics, 1999, 39(4): 299-309.
- [5] DATLA R U, STOCK K, PARR A C, et al. Characterization of an absolute cryogenic radiometer as a standard detector for radiant-power measurements[J]. Applied Optics, 1992, 31(34): 7219-7225.
- [6] FONG J T, FILLIBEN J J, DEWIT R, et al. Uncertainty in finite element modeling and failure analysis: a metrology-based approach[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2006, 128(1): 140-147.
- [7] 徐涛, 于靖, 邓玉强, 等. 准分子激光功率标准探测器的研制[J]. 应用光学, 2012, 33(4): 793-798.
XU Tao, YU Jing, DENG Yuqiang, et al. Excimer laser power standard detector[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(4): 793-798.
- [8] CARR S M, WOODS S I, JUNG T M, et al. Experimental measurements and noise analysis of a cryogenic radiometer[J]. Review of scientific instruments, 2014, 85(7): 075105.
- [9] WILLSON R. The ACRIMSAT/ACRIM III experiment: extending the precision, long-term total solar irradiance climate database[J]. The Earth Observer, 2001, 13(3):

- 14-17.
- [10] BRUSA R W, FRÖHLICH C. Absolute radiometers (PMO6) and their experimental characterization[J]. [Applied Optics](#), 1986, 25(22): 4173-4180.
- [11] MEKAOUI S, DEWITTE S, CROMMELYNCK D, et al. Absolute accuracy and repeatability of the RMIB radiometers for TSI measurements[J]. *Solar Physics*, 2004, 224(1): 237-246.
- [12] KOPP G, LAWRENCE G. The total irradiance monitor (TIM): instrument design[J]. *Solar Physics*, 2005, 230(1): 91-109.
- [13] KOPP G, HEUERMAN K, LAWRENCE G. The total irradiance monitor (TIM): instrument calibration[J]. *Solar Physics*, 2005, 230(1): 111-127.
- [14] VELPULA P K, KRAMER D, ĎURÁK M, et al. Femto-second laser damage resistance of beam dump materials for high-peak power laser systems[J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(5): 1-9.
- [15] JORDAN J L, SIVIOUR C R, SUNNY G, et al. Strain rate-dependant mechanical properties of OFHC copper[J]. [Journal of Materials Science](#), 2013, 48(20): 7134-7141.