

基于电替代原理的高精度光功率计仿真设计与精度分析

赵 聪^{1,2}, 叶 新¹, 方 伟¹, 王 凯¹, 吴 铎¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对传统便携式热电型光功率计测量精度低的问题, 基于电替代原理设计了一种便携式宽波段高精度光功率计。首先, 建立光功率计的热平衡方程及温度响应的理论模型。其次, 设计光功率计的结构, 采用有限元软件 (COMSOL Multiphysics) 仿真分析各元件结构参数 (材料、尺寸、位置) 对其热平衡及光电传热过程差异性的影响, 得到了光功率计的温度响应曲线。最后, 研究了影响测量精度的主要参量, 评估各影响量不确定度, 分析光功率计的不确定度。结果表明: 该光功率计能实现光功率的高精度测量, 不确定度优于 0.5%。

关键词: 光功率计; 电替代原理; 有限元分析; 多物理场; 高精度

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-1841(2022)08-0030-06

Simulation Design and Accuracy Analysis of High-precision Optical Power Meter Based on Electrical Substitution Principle

ZHAO Cong^{1,2}, YE Xin¹, FANG Wei¹, WANG Kai¹, WU Duo¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: For the problem that traditional portable thermoelectric optical power meter has low measurement accuracy, a portable wide-band high-precision optical power meter based on the principle of electrical substitution was designed. Firstly, the thermal balance equation and temperature response theoretical model of optical power meter were established. Secondly, the structure of the optical power meter was designed. The influence of the structural parameters (material, size and position) of each element on its thermal balance and the difference of photoelectric heat transfer process was simulated and analyzed by finite element analysis (FEA) software (COMSOL Multiphysics), and the temperature response curve of the optical power meter was obtained. Finally, the main parameters which influence the measurement accuracy were studied, the uncertainty of influence factors on the optical power meter was evaluated, and the uncertainty of the optical power meter was analyzed. The results show that the optical power meter can achieve high-precision measurement, and the uncertainty is better than 0.5%.

Keywords: optical power meter; principle of electrical substitution; finite element analysis (FEA); multi-physics field; high-precision

0 引言

光功率计作为一种光功率测量的精密仪器, 在光通信、激光加工及光纤传感等领域应用广泛^[1]。宽波段高精度快速测量的便携式光功率计研究十分重要^[2]。

光功率计分为热电型和光电型两类, 热电型较光电型功率计光谱响应曲线更平坦、准确度高、稳定性更好^[3]。热电型光功率计主要基于热电效应或电替代原理进行光功率测量。商用化光功率计产品多基于热电效应, 稳定性需提高^[4]。实验室用光功率测量仪器多采用电替代原理, 低温辐射计精度高, 测量不

确定度优于 0.01%, 但其系统复杂, 体积大^[5]。美国国家标准技术局 (NIST) 研制的微加工电替代绝对辐射计在 1~100 mW 范围内光功率测量精度为 0.83%, 但测量周期为 5 min^[6-7]。

本文基于电替代原理设计高精度快速响应的便携光功率计, 建立了光功率计测量不确定度的数学模型; 通过建立光功率计的热学设计模型设计了传热结构, 采用光热耦合多物理场仿真分析的方法对光功率计进行结构仿真及分析, 研究了传热结构中各参量对光功率计的温度响应及精度的影响, 确定了光功率计的最佳结构尺寸, 并进行了不确定度的分析。

1 光功率计的测量原理

便携式高精度热电型光功率计是基于电替代原理实现光功率测量的, 即以入射光功率与电功率加热

基金项目: 国家重点研发计划项目资助 (2018YFB0504600, 2018YFB0504603)

收稿日期: 2022-01-18

交替加热的方式来测量光功率的绝对量值^[8],其工作原理如图 1 所示。

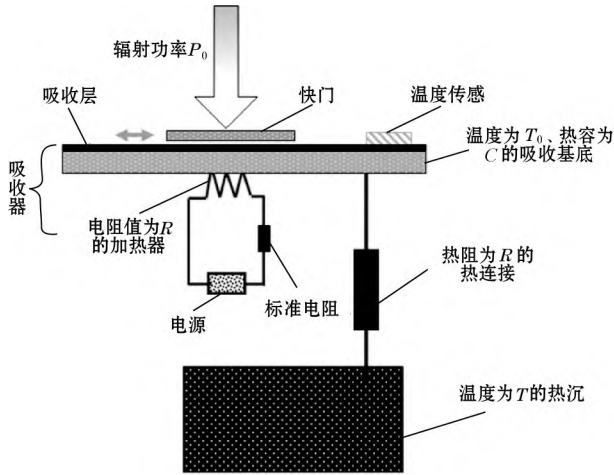


图 1 电替代原理测量光功率

基于电替代原理的光功率测量分为光辐射和电定标两个阶段。光辐射阶段打开快门,辐射功率 P_0 入射到辐射计的吸收层,吸收层吸收的光辐射功率为

$$P_{0a} = \alpha \cdot P_0 \quad (1)$$

式中: P_0 为入射光功率, W; α 为吸收器的吸收率。

吸收层将吸收的辐射转化为热量,并迅速传导至吸收基底,通过低热导率的热连接结构与热沉相连的吸收基底升温,并在一段时间后达到热平衡,通过温度传感器测量此时温度 T_0 。

电定标阶段关闭快门,通过吸收基底上的加热器对其加热,使得系统达到与光辐射阶段相同的热平衡,即传感器测量的平衡温度仍为 T_0 ^[8]。在理想情况下,吸收层吸收的光功率为

$$P_{0a} = N \cdot P_E \quad (2)$$

式中: N 为光电不等效度; P_E 为电加热功率, W。

电加热功率 P_E 通过电源进行调节,通过与加热器串联的标准电阻及电压的测量值进行计算,电加热功率计算公式为

$$P_E = \frac{V_H \cdot V_R}{R_0} \quad (3)$$

式中: V_H 为加热器两端的电压, V; V_R 为标准电阻两端电压, V; R_0 为标准电阻的阻值, Ω 。

以此实现光功率计的自定标,由式(1)~式(3)可得到测量的入射光功率为

$$P_0 = \frac{P_{0a}}{\alpha} = \frac{N \cdot P_E}{\alpha} = \frac{N \cdot V_H \cdot V_R}{\alpha \cdot R_0} \quad (4)$$

2 光功率计设计与仿真分析

2.1 光功率计的整体结构

本文提出了一种基于电替代原理的高精度便携

光功率计,光功率的测量范围为 1~100 mW,光谱范围为 0.5~20 μm ,测量精度预计可达到 0.5%。为实现光功率计对宽波段光的高吸收,采用可在 0.5~20 μm 光谱范围内光吸收率高于 98% 的 Nextel 811-21 吸收黑材料作为吸收层的材料,该吸收层表面为漫反射,不受入射光角度的影响;同时采用复合抛物面反射器将未被吸收层吸收的光辐射进行多次反射回吸收面以增加吸收器的光吸收。

光功率计的吸收器采用平面型吸收器结构,选用热容及密度小、导热较好的硅作为吸收基底材料;热连接采用三立柱结构,其材料为镁铝合金,以实现光功率计的低热容、高热阻,即实现光功率计时间常数小的特点,满足光功率计的快速响应需求。

为实现光功率计的便携性及高精度,将吸收层与加热片置于吸收器的适当位置以实现光加热与电加热的温度响应一致性,将热连接结构与吸收器用高热导率的导热胶连接,以减小接触热阻,采用体积热容小、稳定性好、精确度高的 Pt100 热电阻进行温度测量。将各结构组装到铝合金圆柱外壳内,得到光功率计结构如图 2 所示。

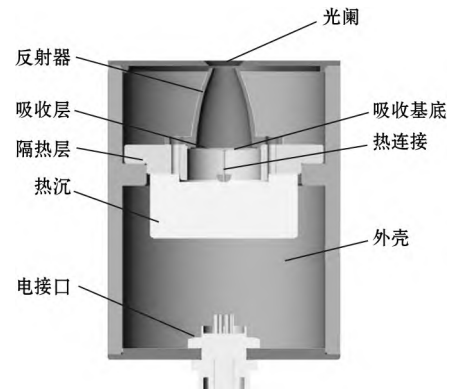


图 2 光功率计的结构

2.2 光功率计的热学设计模型

吸收器的温度动态响应是热电型光功率计测量研究的基础,用于描述吸收器的瞬态温度变化。采取零维问题的分析方法—集中参数法对光功率计的传热规律进行分析,即空间位置对温度分布的影响很小,不考虑几何边界条件,边界交换的热量等效为吸收器的体积热源^[8]。基于傅里叶定律及热扩散方程建立光功率计传热结构的热平衡方程为

$$P = C \frac{d\Delta T}{dt} + \frac{\Delta T}{R} \quad (5)$$

式中: P 为加热功率, W; C 为吸收器的热容, J/K; t 为热功率施加的时间, s; ΔT 为吸收器与热沉的温差, $^{\circ}\text{C}$; R 为传热结构的热阻, W/K。

吸收器与热沉的温差 ΔT 随加热时间 t 变化,根据热平衡方程可得 ΔT 关于 t 的函数为

$$\Delta T(t) = PR(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (6)$$

式中 τ 为热时间常数,是评定光功率计响应时间的重要参数^[14]。

τ 定义为

$$\tau = R \cdot C \quad (7)$$

由此可得到温度响应的计算模型:

$$\Delta T_E = P \cdot R \quad (8)$$

式中 ΔT_E 为达到平衡时的吸收器与热沉的温差,℃。

热时间常数和响应度是光功率计热特性的主要参数,影响光功率计的稳定性及测量精度。由式(7)、式(8)可知:这2个指标因热阻 R 而相互制衡,热阻越大,响应度高,但时间常数也越长,因此热阻值的设计是光功率计热设计的关键因素之一。由于光功率计的高精度,吸收基底及吸收层的热阻不可忽略,且热连接并不规则,通过理论计算很难精确定量地确定结构对其温度响应的影响,因此借助有限元方法进行设计及仿真分析。

2.3 有限元仿真模型

使用 COMSOL Multiphysics 软件对光功率计的结构进行三维建模并对其采用自适应能力较强的非结构化网格划分生成网格模型,对尺寸较小区域及光热耦合界面进行网格细化,提高网格划分质量。本文有限元仿真分析时划分的网格单元数为5 614 444,最小单元质量为0.000 946,其网格划分如图3所示。元件初始温度及环境温度均设置为 298.15 K;各元件中的热学设计及参数参见表1,该参数来源于仿真分析结果及参考文献^[14]。采用光热耦合仿真方式对光功率计进行仿真分析,光源采用从栅格释放的六边环型,光束半径设置为 1 mm,光线数量为3 003 001,采用耦合式求解器,相对容差设置为 10^{-8} ,保证了仿真的计算精度及收敛性。

表1 各单元使用材料及相关参数

组成单元	材料	热容 $/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	导热系数 $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	密度 $/(kg \cdot m^{-3})$
吸收基底	硅	703	129.34	2 329
热连接	铝镁合金	904	107.00	2 160
热沉	康铜	5 000	7.42	8 920
外壳	铝合金	902	236.00	2 710
绝缘层	聚酰亚胺	1 099	0.21	1 420

2.4 设计与仿真分析

为研究光功率计各元件的结构参数(材料、尺寸、

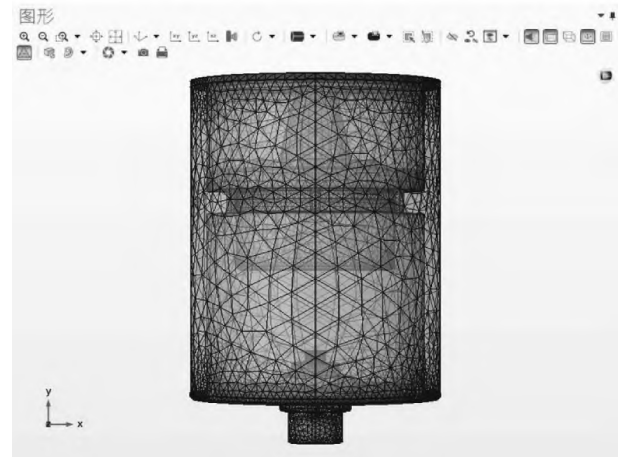


图3 光功率有限元模型

位置)对光功率计温度响应及测量精度的影响,通过有限元方法仿真光功率计的温度响应过程,分析各参量对光功率测量的影响,确定了光功率计的最佳结构。

2.4.1 吸收器

为获取更小的体积及时间常数,光功率计的吸收器采用平面型吸收结构,选择导热系数大、总热容小的材料作为吸收器的吸收基底,再考虑机械强度、加工工艺、入射光及生产制作成本等方面,将吸收基底设计为直径 15 mm、厚度 0.2 mm 的圆薄片,并对不同材料的吸收基底进行理论计算分析,材料的参数及计算结果见表2。由表2的计算数据可知,应选用硅作为吸收基底材料,同时硅基底利于光刻技术的应用,便于光功率计的微型化。采用喷涂工艺将吸收黑材料喷涂到吸收基底上,以形成吸收器的吸收层。

表2 不同材料的吸收基底的热性能参数

材料	导热系数 $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	热容 $/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	吸收基底 热容/ $(J \cdot K^{-1})$	吸收基底 热阻/ $(W \cdot K^{-1})$
硅	129	703	2 329	0.057 9	0.008 8
铝	236	902	2 710	0.086 4	0.004 8
铜	398	386	8 930	0.122 0	0.004 5
镁	156	1 020	1 730	0.062 3	0.011 3
银	427	234	10 500	0.086 8	0.004 1

为满足高精度温度测量的需求,选用热容及体积小、稳定性好且适用于精密测量的 Pt100 热电阻进行测温,测试及计算得到 Pt100 在 25 ℃温区内的灵敏度为 0.43 K/Ω,拟采用的测量电路及万用表对 100 Ω 电阻的测量不确定度为 0.1 mΩ,计算得到温度的测量不确定度为: $0.43 K/\Omega \times 0.1 m\Omega = 0.043 mK$ 。在光功率

计的加热功率为 1 mW , 灵敏度为 70 K/W 时, 加热器的理论温度变化为 $1\text{ mW} \times 70\text{ K/W} = 0.07\text{ K}$, 热电阻的相对测量不确定度为 0.061% 。为保证测温的准确性, 采用 4 个热电阻对称置于加热基底的边缘位置如图 4 所示, 取其测温平均值作为温度测量值, 相对于单点测量准确性高、重复性好。

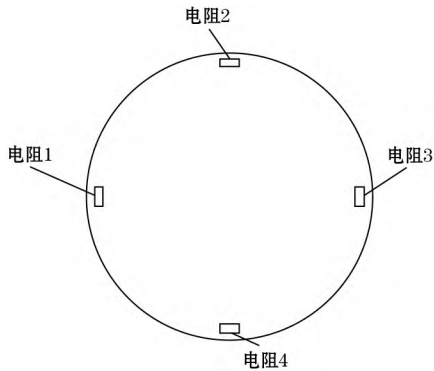


图4 电阻分布示意图

电功率加热通过热容小、稳定性好的贴片电阻实现, 仿真研究加热片在不同位置对光电加热平衡温度差异的影响; 将吸收层接收的光加热及电加热功率均设置为 10 mW , 光斑半径为 1 mm , 电阻的长、宽边分别位于 Z 、 X 方向, 仿真结果如图 5 所示: 加热片在吸收基底的中心位置时, 光电加热的平衡温差最小。故将加热片置于吸收基底下表面中心处, 此时电加热功率的温度响应与光加热时最接近, 光电传热路径带来的平衡温差为 0.0038 mK , 对测量精度的影响为 0.0006% 。

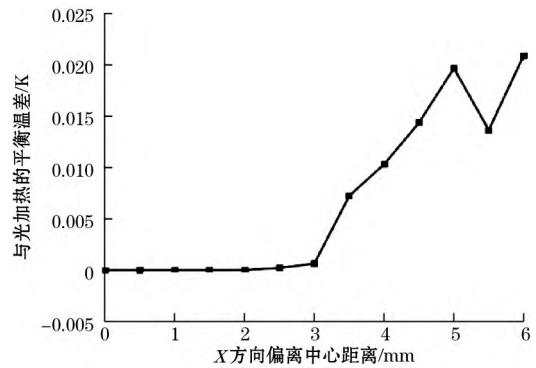
2.4.2 热连接

热连接设计的关键是确定材料及横截面积 A 与长度 L 的比以得到合适的总热阻值, 进而平衡时间常数与灵敏度的关系。对不同材料及不同 A/L 比的热连接进行计算及有限元仿真分析, 根据仿真结果对比分析得到: 使用铝镁合金, 同时采用三立柱结构作为传热结构, 热时间常数低于 6.5 s , 温度响应的灵敏度高于 74 K/W 。

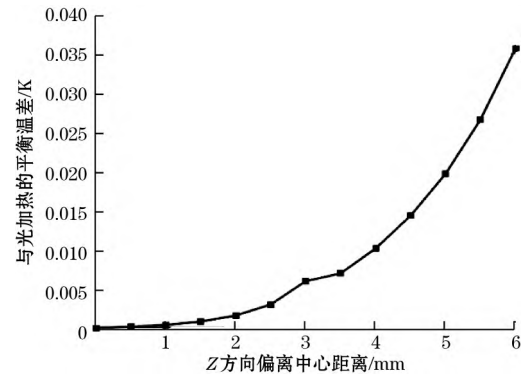
2.5 光功率计的整体设计结果

根据设计及仿真优化确定的最佳光功率计结构参数, 采用有限元方法在 10 mW 的加热功率下对该光功率计的传热结构进行仿真, 得到瞬态温度变化(如图 6 所示), 吸收器与热沉的温差为 0.745 K , 传热结构的温度分布如图 7 所示, 仿真分析的传热过程与理论计算相符, 仿真数据具有可靠性。

为更好地研究光功率计的温度响应, 在不同功率



(a) 加热片在 X 方向上不同位置对光电加热平衡温差的影响



(b) 加热片在 Z 方向上不同位置对光电加热平衡温差的影响

图5 加热片的位置对光电加热平衡温差的影响

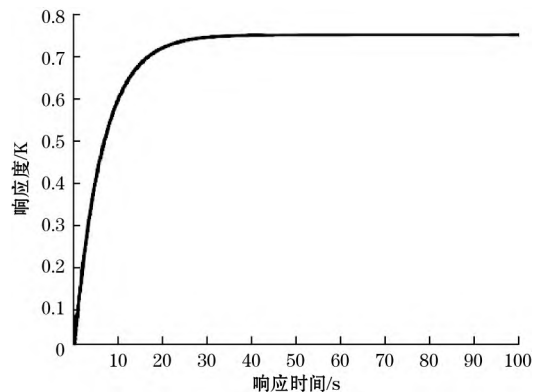


图6 光功率计的温度响应

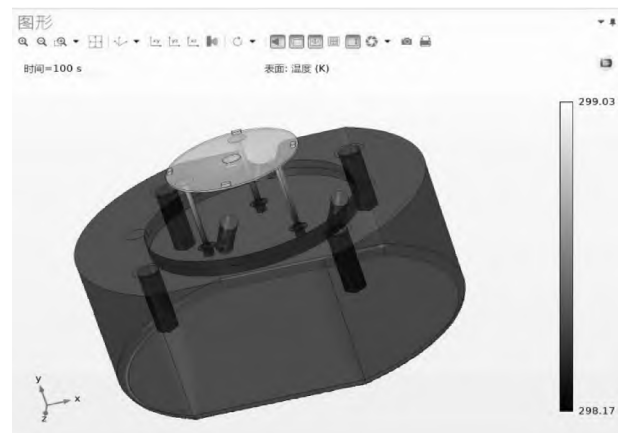


图7 传热结构瞬态及平衡时温度分布

下,对光功率计整体结构的温度响应进行分析。在光功率计的功率测量范围内,对不同功率下光功率计的温度响应进行热仿真分析,仿真结果如图8所示,不同功率下的温度响应度呈线性变化,灵敏度一致为74.5 K/W,响应时间为6.3 s。

3 不确定度分析

由式(4)及不确定度合成公式可得到测量光功率的合成不确定度为

$$u(P_0) = \sqrt{\left(\frac{\partial P_0}{\partial V_H}\right)^2 u^2(V_H) + \left(\frac{\partial P_0}{\partial V_R}\right)^2 u^2(V_R) + \left(\frac{\partial P_0}{\partial N}\right)^2 u^2(N) + \left(\frac{\partial P_0}{\partial R}\right)^2 u^2(R) + \left(\frac{\partial P_0}{\partial \alpha}\right)^2 u^2(\alpha)} \quad (9)$$

式中: $u(V_H)$ 、 $u(V_R)$ 、 $u(N)$ 、 $u(R)$ 、 $u(\alpha)$ 分别为加热器及标准电阻两端电压、光电不等效度、标准电阻、吸收率的不确定度。

目前电压及电阻的测量不确定度可达到 10^{-6} 量级的水平,电压及电阻测量不确定度对测量精度为0.5%的光功率计影响较小。由电替代的测量原理可知,光电不等效度受测温精度、温度响应度(包括光电传热路径不等效性及环境温度)的影响;因此吸收率及其测量精度、测温精度、光电传热路径不等效性及环境温度是决定光功率测量精度的关键因素。

3.1 光电传热路径不等效特性

对光功率计的光电传热不等效性进行分析,令吸收层分别接收相同光功率和电功率,光功率加热位置置于吸收层中心,光斑半径为1 mm,两过程吸收基底的表面温度变化情况如图9所示,温度变化具有一致性,在10 mW的功率下,温度变化的差异为0.038 mK。根据响应度计算公式,光电功率不等效的差异量为0.000 51 mW,是吸收层吸收功率的0.005 1%,对测量精度影响较小,有助于光功率计测量精度的提高。

3.2 入射光位置及光斑大小的差异性分析

光功率测量过程中,由于入射光位置及光斑半径的变化会导致光加热过程的传热路径改变,对平衡时的温度响应产生影响。为定量分析该变化量,对入射光斑半径为0.5~3 mm范围变化,入射光位置相对于吸收器中心横向偏差为0~2 mm的10 mW入射光进行仿真,与光斑半径为1 mm,中心位置的入射光入射时的响应度进行对比,仿真结果如图10所示。仿真结果表明:中心位置入射时,入射光斑大小对平衡温度的影响小于0.03%;光斑半径为1 mm的入射光位置变化对平衡温度的影响低于0.025%。入射光的光斑大小及相对中心偏移量均为3 mm时,温度响应差异量为3.1 mK,对平衡温度影响为0.4%。

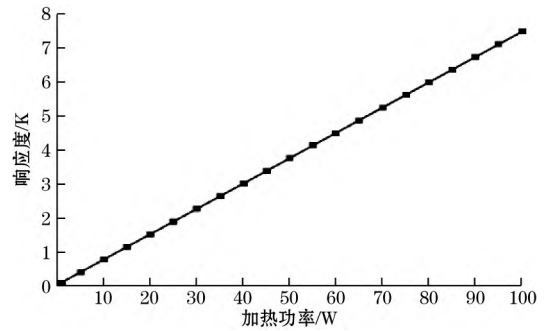
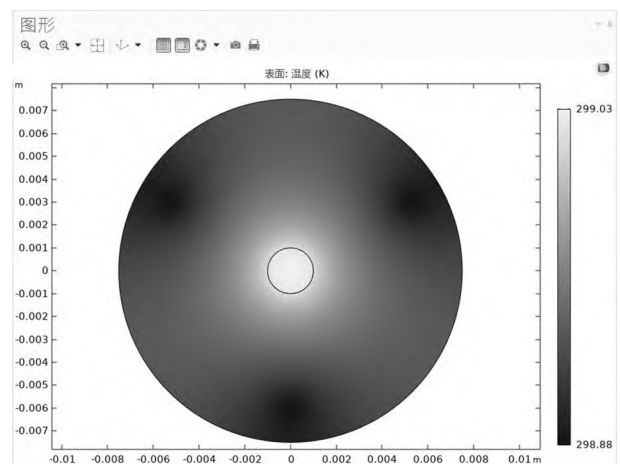
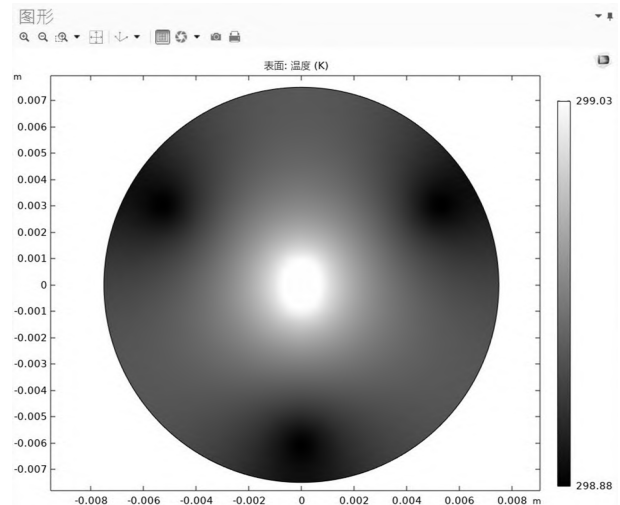


图8 不同加热功率的温度响应



(a) 光加热时的温度分布

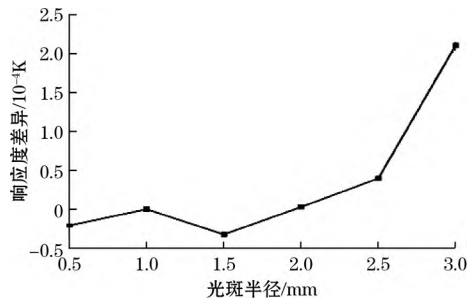


(b) 电加热时的温度分布

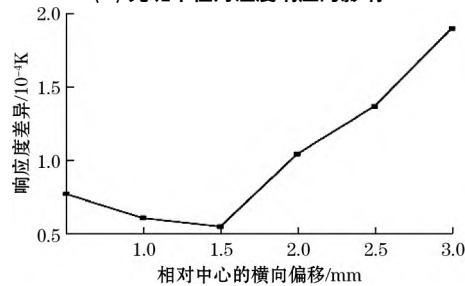
图9 光加热及电加热时吸收基底的温度分布

3.3 环境温度对光功率测量的影响

光功率计在测量阶段与周围环境存在热交换,环境温度的变化对光功率计的测量精度产生影响。利用COMSOL分析方法研究环境温度变化对光功率计温度响应的影响。将吸收层吸收的功率设置为10 mW,环境温度设置为随时间变化的正弦函数: $T =$



(a) 光斑半径对温度响应的影响



(b) 入射光位置对温度响应的影响

图 10 光斑半径及入射光位置对温度响应的影响

298.15+0.2 · sin($t \cdot \pi/750$), 仿真时间为 50 min, 仿真得到热平衡时温度的变化小于 0.000 2 mK, 对结果温度值的影响低于 10^{-7} , 该影响可忽略。

3.4 不确定度的评估

基于光功率计测量不确定度的数学模型, 以测量 10 mW 的光功率为基准, 分别评定各个影响量(包括吸收率、电压测量、标准电阻、光电不等效应)的标准不确定度。

根据吸收材料的吸收率及反射器反射效率计算预估吸收器的吸收率为 0.997 00, 拟采用基于替代法的吸收率测量装置对吸收器的吸收率进行测量, 测量不确定度优于 $1/10^4$; 通过八位半数字多用表(FLUKE 8508A)用四线法测试标准电阻阻值, 得到标准电阻 R_0 为 1 000.155 Ω , 实验标准差为 0.000 4%, FLUKE 8508A 相对测量精度为 0.000 5%, 因此标准电阻的相对标准不确定度为 0.000 6%, 标准不确定度为 0.006 0 Ω 。拟采用六位半数字万用表(Agilent 34401a)测量加热丝及标准电阻上的电压, 其电压的最佳估计值分别为 $V_R = V_H = 3.162$ 3 V; 相对实验标准差约为 0.003%, Agilent 34401a 的相对测量精度为 0.004%, 因此电压测量的相对标准不确定度为 0.005%, 标准不确定度为 0.000 2 V。

综合考虑影响光功率计测量不确定度的参量, 利用 COMSOL 进行多物理场耦合仿真分析, 根据仿真结果: 光功率计的光电不等效应为 0.999 0, 根据热电阻的温度测量不确定度及测量不确定度的分析, 得到光电不等效应的相对标准不确定度为 0.45%, 标准不确定度为 0.004 5。

根据式(3)及各影响量的不确定度分析, 对光功率计的不确定度进行评估(见表 3), 由式(9)计算得到该光功率计的合成标准不确定度为 0.045 mW, 合成相对标准不确定度为 0.45%, 可实现不确定度优于 0.5% 的光功率测量。

表 3 光功率计的不确定度评估

不确定度影响量	预计值	标准不确定度
吸收率	0.997 0	0.000 1
标准电阻电压测量	3.162 3 V	0.000 2 V
加热丝电压测量	3.162 3 V	0.000 2 V
标准电阻阻值	1 000.155 0 Ω	0.006 0 Ω
光电不等效应度	0.999 0	0.004 5
合成标准不确定度	0.045 mW	
合成相对标准不确定度	0.45%	

4 结论

本文设计了一种可实现宽波段光功率测量的高精度光功率计, 采用平面型吸收结构提高系统的响应速度, 基于电替代测量原理实现光功率计的高精度测量, 并通过建立数学模型及有限元光热耦合模型进行光功率计的结构设计及仿真分析, 确定了光功率计的最优结构, 得到了系统的温度响应曲线, 并对系统的不确定度进行了分析及预估。结果表明: 该光功率计具备良好的响应度和测量精度, 不确定度优于 0.5%。因此本文将电替代原理与平面型吸收结构结合的方式可实现光功率的高精度快速测量。

参考文献:

- [1] 杨照金, 王雷. 激光功率和能量计量技术的现状与展望 [J]. 应用光学, 2004, 25(3): 1-4.
- [2] 陈舒凡, 房丰洲. 激光功率计发展及应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0900003.
- [3] 邱明新. 激光功率计和能量计的实验研究 [J]. 中国激光, 1974(2): 24-31.
- [4] 宋亮. 光功率计计量现状及相关探析 [J]. 数码世界, 2020, 181(11): 278-279.
- [5] 吴铎, 王凯, 叶新, 等. 空间低温绝对辐射计研究 [J]. 发光学报, 2019, 40(8): 1015-1021.
- [6] VASKURI A, STEPHENS M S, TOMLIN N, et al. Planar Absolute Radiometer Operating at Room Temperature for Replacing NIST's Legacy Laser Calorimeter [C]. New Developments and Applications in Optical Radiometry (NEWRAD 2021). 2021.
- [7] VASKURI A K, STEPHENS M S, TOMLIN N A, et al. High-accuracy room temperature planar absolute radiometer based on vertically aligned carbon nanotubes [J]. Optics Express, 2021, 29(14): 22533-22552.

(下转第 57 页)

6 结束语

在表盘区域检测方面,本文提出的基于仪表轮廓的表盘显示区域寻找算法可以应用在多种类型的表盘,在适当距离上不受表盘轮廓外形和大小变化影响。在读数识别方面,采用刻度点到指针直线的距离比值取代传统方法中指针转动角度作为表盘示数的计算准则,在一定程度上解决了因拍摄角度不理想引起的读数误差。

参考文献:

- [1] 韩绍超,徐遵义,尹中川,等.指针式仪表自动读数识别技术的研究现状与发展[J].计算机科学,2018,45(S1): 54-57.
- [2] 邢浩强,杜志岐,苏波.变电站指针式仪表检测与识别方法[J].仪器仪表学报,2017,38(11): 2813-2821.
- [3] 向友君,江文,阮荣钜.基于刻度准确定位的指针式仪表示数识别方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2020,48(10): 133-139.
- [4] 宋伟,张文杰,张家齐,等.基于指针区域特征的仪表读数识别算法[J].仪器仪表学报,2014(S2): 50-58.
- [5] ZHANG L, FANG B, ZHAO X, et al. Pointer-type meter automatic reading from complex environment based on visual saliency[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Jeju, 2016: 264-269.
- [6] 许丽,石伟,方甜.巡检机器人中的指针式仪表读数识别系统[J].仪器仪表学报,2017,30(7): 1782-1790.
- [7] 吴杰,吴怀宇,陈洋.基于轮廓拟合与径向分割的指针式仪表自动读数方法[J].高技术通讯,2019,29(9): 905-913.
- [8] LIN Y, ZHONG Q H, SUN H L. A pointer type instrument intelligent reading system design based on convolutional neural networks[J]. Frontiers in Physics, 2020, 8: 1-9.
- [9] WANG L, WANG P, WU L H, et al. Computer vision based automatic recognition of pointer instruments: data set optimization and reading[J]. Entropy, 2021, 23(3): 1-21.
- [10] MA Y F, JIANG Q. A robust and high-precision automatic reading algorithm of pointer meters based on machine vision[J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30(1): 1-11.
- [11] 喻汉,吴怀宇,陈镜宇,等.基于 ELSD 的指针式仪表自动识别算法研究[J].高技术通讯,2019,29(7): 648-655.
- [12] GONG X Y, SU H, XU D, et al. An overview of contour detection approaches[J]. International Journal of Automation and Computing, 2018, 15(6): 656-672.
- [13] 闫蓓,王斌,李媛.基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法[J].北京航空航天大学学报,2008,34(3): 295-298.
- [14] AKINLAR C, TOPAL C. EDLINES: A real-time line segment detector with a false detection control[J]. Pattern Recognition, 2011, 32(13): 1633-1642.
- [15] 冈萨雷斯 R C, 伍兹 R E. 数字图像处理[M]. 阮秋琦, 阮宇智, 译. 北京: 电子工业出版社, 2020: 445-450.

作者简介: 孙顺远(1984—), 副教授, 博士, 主要从事仪表设计开发与仪表检测等方面的工作。

E-mail: hzrobin@jiangnan.edu.cn

魏志涛(1997—), 硕士研究生, 主要研究方向为计算机视觉。E-mail: 1349028964@qq.com

(上接第 35 页)

- [1] 杨东军,方伟,叶新,等.绝对辐射计参数测量的实现[J].计算机测量与控制,2009(10): 1892-1894.
- [2] 方茜茜.空间低温辐射计黑体腔与光电不等效性研究[D].长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2014.
- [3] 唐潇,方伟,骆杨,等.低温绝对辐射计热沉的热特性分

析[J].光学学报,2016(10): 140-146.

作者简介: 赵聪(1997—), 硕士研究生, 主要研究方向为光辐射、光功率测量。E-mail: 18514301872@163.com

通信作者: 叶新(1979—), 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为太阳辐射、地球辐射绝对测量及光谱辐射基准与溯源。E-mail: yexin@ciomp.ac.cn