

文章编号 1004-924X(2018)03-0624-08

太阳辐照度绝对辐射计吸收腔结构优化

高鑫, 王凯, 方伟*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了获得太阳辐照度绝对辐射计中吸收腔的最优结构参数, 需要对结构中吸收腔-热连接-热沉构成的传热链进行热分析。基于 Ansys 软件的有限元方法, 给出了上述传热链的仿真模型, 并计算得到了仿真结构的温度响应曲线; 通过改变吸收腔的结构参数(尺寸、材料等), 探究了不同参数下传热状态的变化及其原因; 通过分析仿真结果确定了吸收腔最优结构参数。仿真结果表明: 在环境温度为常温(298 K)、加热功率为 50 mW 的情况下, 吸收腔最优结构参数为壁厚 0.07 mm/锥顶角 30°/帽檐宽度 2.2 mm/银质, 此时辐射计的时间常数为 11.501 s、响应度为 1.391 K; 同等条件下进行实验, 测得时间常数为 11.487 s, 响应度为 1.397 K, 与仿真结果相比, 误差分别为 0.12% 和 0.43%。仿真结果基本符合理论推导, 所得数据具有足够的可靠性, 证明该模型可以指导绝对辐射计优化设计, 提高其工作性能。

关键词: 太阳辐照度绝对辐射计; 传热链; 有限元方法; 吸收腔最优结构参数

中图分类号: P414.51 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182603.0624

Optimization on the structure of the absorption cavity of solar irradiance absolute radiometer

GAO Xin, WANG Kai, FANG Wei*

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: fangw@ciomp.ac.cn

Abstract: In order to obtain the optimal structural parameters of the absorption cavity of Solar Irradiance Absolute Radiometer(SIAR), a study was carried out on the thermal circuit of the SIAR, which was constituted of the cavity, thermal link and heat sink. Based on the finite element method by using Ansys software, a reliable model of this thermal circuit was introduced. The temperature response curves of the model were consequently obtained. Then the effects of structural parameters of the cavity, e. g. sizes and materials were investigated on the SIAR's thermal performances, and optimal structural parameters of the cavity were proposed. Simulation results indicate that at the ambient temperature of 298 K and heating power of 50 mW, the optimal parameters of cavity are silver with a wall thickness of 0.07 mm, a cone angle of 30° and a brim width of 2.2 mm, and when the thermal time constant is 11.501 s, the responsibility is 1.391 K. Experiments are carried out under the same conditions; the time constant and responsibility of measurement are 11.487 s and 1.397 K.

收稿日期: 2017-06-12; 修订日期: 2017-08-18.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2015AA123703); 国家自然科学基金资助项目 (No. 41227003)

Compared with simulation results, the differences are 0.12% and 0.43%, respectively. The simulation results are in accordance well with the theoretical derivation, and the results are sufficiently reliable, so that this model can be used to conduct the optimization design of the absolute radiometer and improve its performance.

Key words: Solar Irradiance Absolute Radiometer (SIAR); thermal circuit; finite element method; optimal structural parameters of the cavity

1 引言

绝对辐射计 (Absolute Radiometers, ARs) 是用来监测太阳总辐照度的标准计量仪器^[1]。其工作原理常基于电替代法,故又称为电替代辐射计 (Electrical Substitution Radiometers, ESRs)。ESR 的工作过程为:通过记录吸收腔对光辐射功率的温度响应,找到并获取对腔体产生同样温度变化所需的电功率,从而找到光辐射功率与国际单位制单位 (SI) 的直接联系,实现绝对定标^[2]。若辐射计工作在室温环境中,则称为常温绝对辐射计;若工作温度为液氮温度 (4.2 K) 或超流氦温度 (2 K),则称为低温绝对辐射计^[1]。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 在国家 863 计划的支持下开展了太阳辐照度绝对辐射计 (Solar Irradiance Absolute Radiometer, SIAR) 的研制工作^[3-4],该辐射计作为 FY-3C 号卫星的有效载荷,从 2013 年 9 月 23 日开始对太阳辐照度进行持续监测,监测数据表明在波长范围为 0.2~50 μm 的范围内,SIAR 的灵敏度达 0.2 W/m^2 ,相对不确定度小于 550×10^{-6} ^[5]。

SIAR 的测量原理是:(1)光辐照阶段,打开快门,辐射通量 P_e 入射至吸收腔,造成温升 ΔT ; (2)电定标阶段,关闭快门,用绕在吸收腔上的电加热丝对其施加 P_e 的加热功率,获得同样的温升 ΔT ; (3)考虑吸收腔吸收率 α 及光电不等效率度 N ,有 $\alpha P_e = NP_e$ 。如此就可以推算入射光功率,实现定标。

从绝对辐射计的测量原理中看到,其对输入热功率的温度响应是测量精度的关键。T. R. Gentile 等就曾对研制的低温绝对辐射计 (High Accuracy Cryogenic Radiometer, HACR) 的热特性和温度测量方法进行了描述^[6];J. E. Martin 等系统地研究了温度传感器、热沉的性能对绝对辐射计测量精度的影响^[7];D. A. Person 等使用

有限元方法对绝对辐射计整体的动态热特性进行了建模和仿真研究^[8];唐潇等应用有限元方法对 SIAR 的热电不等效率性做了研究^[5];但辐射计热特性研究作为辐射计整体设计的一小部分,缺乏较为详细的理论论证和仿真研究。并且,绝对辐射计的原理虽然基本相同,但仪器结构之间的差异还是比较大的,需要具体结构具体分析。

因此,为了深入地研究太阳辐照度绝对辐射计的热特性,本文对该辐射计的吸收腔-热连接-热沉构成的传热链进行了结构仿真,构造了较为精确的三维模型,并将相关材料参数输入到此模型中,考虑了实际应用中真空、常温的航天环境条件,进行了有限元瞬态热学分析,得到了结构的温度响应曲线,准确地获取了有效时间常数和响应度,为绝对辐射计的结构设计与优化提供了可靠的参考依据。

2 SIAR 传热链导热模型及有限元模型

2.1 SIAR 传热链结构

太阳辐照度辐射计(下文简称辐射计)传热链剖面简图如图 1 所示。

辐射计的传热链包含了吸收腔、双层垫片、热电堆、大热沉 4 个主要部分。大热沉为铜制圆柱

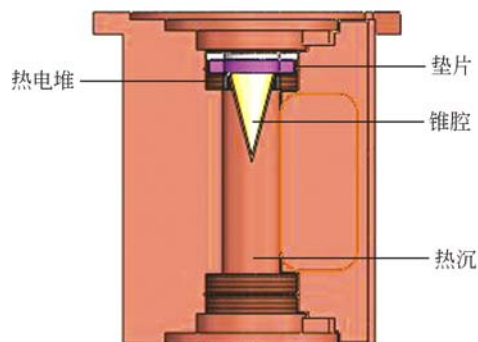


图 1 太阳辐照度辐射计传热链剖面简图

Fig. 1 Sectional drawing of thermal circuit of SIAR

型金属块,高 90 mm。热电堆绝缘环的材料为聚酰亚胺,是外径 16.2 mm,内径 13 mm,高 4 mm 的环状体,表面缠绕了 160 对直径为 0.08 mm 的铜-康铜金属丝,通过热电效应来测量热沉与吸收腔之间的温差;双层垫片起稳固零部件和隔热作用,上层材料为合金,下层材料为塑料。热电堆和双层垫片构成了辐射计传热链中的热连接部分。吸收腔为带帽檐的锥形腔。帽檐用于固定和热接触。腔壁采用埋入加热丝的工艺,提供电加热阶段的加热功率。腔体选取导热系数大的金属(铜、银等),保证接收的电功率或光功率迅速转化成热功率。同时,腔内壁均匀涂有镍磷黑(NiP 黑),其在紫外和可见光波段反射率很低,对 633 nm 波长的反射率仅为 0.4%^[9]。光束进入吸收腔时,由于腔壁的高吸收率和多次反射再吸收,吸收腔的吸收率可以十分接近于 1。吸收腔的内径为 12 mm,壁厚、锥顶角、帽檐宽度和材料在下文中设置为分离变量,深入探究其变化对辐射计热特性的影响。

2.2 SIAR 传热链导热模型

热量传递有 3 种基本方式^[10]:导热、对流与辐射。光功率或电功率施加到吸收腔上时,将转化为热功率。热量由腔体经帽檐、热电堆/垫片,最终到达热沉。由于 SIAR 应用于航天观测,仪器处于真空环境中,在传热过程中,元件之间的接触导热是传热的主要方式,元件与介质的热对流不存在,而元件高于环境温度的热辐射可忽略不计^[5]。这是本导热模型的初始边界条件。

热流场与热路中的物理量与电路中的物理量有很多相似的关系,传热链的瞬态热路与电路中的 RC 串联电路就有一定的类比性^[11]:热量 Q 由腔体输入,经过吸收腔、热连接各自的热阻和热容串并联的热路,传导至大热沉。由于大热沉的热容相对于其他元件相当大,可以将其看作恒温环境。将整个传热链计算为吸收腔热阻 R_q 和热容 C_q ,热连接热阻 R_d 和热容 C_d 构成的等效热路,如图 2。

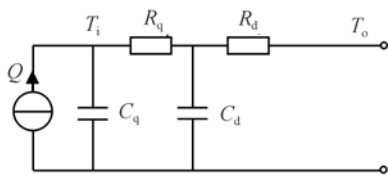


图 2 传热链等效模型

Fig. 2 Equivalent model of thermal circuit

图中: T_i 为吸收腔的温度, T_o 为大热沉温度(恒定环境温度)。

将热路中的热阻和热容进行等效:

$$\begin{cases} R = R_q + R_d & (1) \\ C = C_q + \left(\frac{R_d}{R}\right)^2 C_d & (2) \end{cases}$$

获得了整个系统的等效 R/C 值。

建立热路的热平衡方程:

$$Q = C \frac{dT_i}{dt} + \frac{T_i - T_o}{R} \quad (3)$$

解得方程通解:

$$T_i - T_o = QR + ae^{-t/RC} \quad (4)$$

又由初始条件, $t = 0$ 时, $T_i = T_o$, 得方程特解:

$$\Delta T = T_i - T_o = QR(1 - e^{-t/RC}) \quad (5)$$

其中, ΔT 为辐射计吸收腔接收加热功率后能够上升的最大温度,表征了辐射计的响应度; $\tau = RC$ 具有时间的量纲,称为辐射计的时间常数。二者是辐射计热特性中最重要的两个物理量。

吸收腔的结构参数的变化将影响到 R/C 的取值,进而影响辐射计的响应度和时间常数,由于腔结构的复杂性,难以直接计算其热阻 R_q 和热容 C_q ,因此需要借助有限元方法进行研究。

2.3 SIAR 传热链有限元模型

将传热链离散化为 n 个有限元,任意时刻其上的热物理模型表述为:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n m_k c_k \frac{dT_k}{dt} = & - \sum_{k=1}^n A_k h_k (T'_k - T_h) \\ & - \sum_{k=1}^n A_k \sigma (T'_k{}^4 - T_h{}^4) \\ & - \sum_{k=1}^n A'_k \lambda \frac{T_k - T_j}{l_k} + \dot{\Phi}_k \end{aligned} \quad (6)$$

式中: m_k 为微元体的质量, c_k 为微元体的比热容, T_k 为微元体的平均温度, A_k 为微元体表面积, h_k 为对流换热系数, T'_k 为微元体的表面温度, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, T_h 为微元体所处的外界温度, A'_k 为与微元体接触的绝热体表面积, λ 为导热系数, T_j 为与微元体接触的绝热体温度, $\dot{\Phi}_k$ 为内热源功率。此式是有限元方法遵循的基本公式,也是 Ansys 软件的内置计算公式。

使用 Ansys 软件对传热链进行建模^[12-14]和网格化,元件的尺寸和材料参数均力求与实际情

况相符,以保证建模的精度和数据的可靠性。传热链整体建模结果如图 3 所示,各元件中的热学参数参见表 1。参数来源于实验测定和参考文献 [15]、[16]。

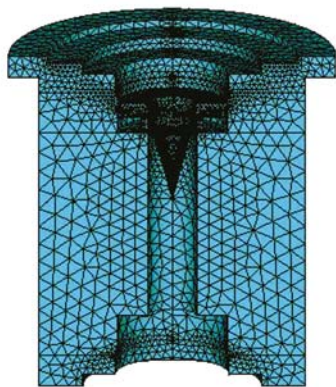


图 3 传热链有限元模型

Fig. 3 Finite elements model of thermal circuit

表 1 各元件使用材料及相关参数

Tab. 1 Materials and relevant parameters of components

元件名	材料	比热 /(J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	导热系数 /(W · m ⁻¹ · k ⁻¹)	密度 /(kg · m ⁻³)
大热沉	铜	410	380	8 960
上层垫片	铝合金	960	160	2 800
下层垫片	尼龙	1 800	0.23	1 500
热电堆 绝缘环	聚酰亚胺	1 090	0.21	1 420
热电堆 热偶	铜-康铜	410/377	380/21	8 960/8 940

锥形吸收腔模型如图 4 所示。

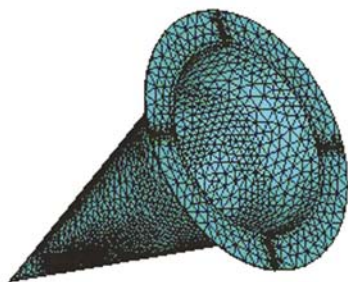


图 4 锥形吸收腔有限元模型

Fig. 4 Finite elements model of conical absorption cavity

模型的壁厚、锥顶角、帽檐宽度和材料参数为变量,所指代物理量见图 5,选取数值范围参见表 2。

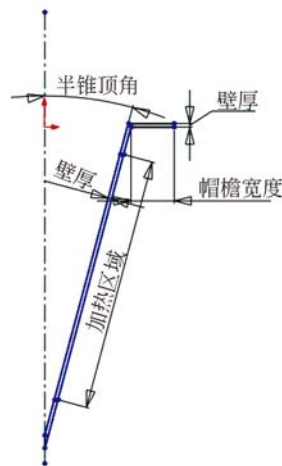


图 5 变量示意图

Fig. 5 Schematic diagram of variables

表 2 变量及取值

Tab. 2 Variables and values

变量	取值范围(步长)
壁厚/mm	0.05~0.13(0.02)
锥顶角/(°)	30~50(5)
帽檐宽度/mm	2.2~2.8(0.15)
材料	银/铝合金/金/铜/镍

3 仿真实验结果与分析

仿真实验得到了不同变量的对照结果,在吸收腔的加热区域给定加热功率为 50 mW,周围环境和初始温度为室温 298 K。首先选取壁厚 0.07 mm/锥顶角 30°/帽檐宽度 2.5 mm/银质吸收腔作为特征结构,研究其温度响应过程,结果如图 6 所示。

根据式(5)得出的结论,热量输入到吸收腔上引起其温度升高符合单幂指数规律,因此对上述仿真结果均进行形如 $y = A_1 e^{-x/t} + y_0$ 的数据拟合, y_0 即吸收腔与热沉间的最大温差(响应度); t 即辐射计的时间常数; A_1 为引入的修正量,其绝对值与 y_0 十分接近,可以认为没有改变 2.2 节中提出的理论模型。

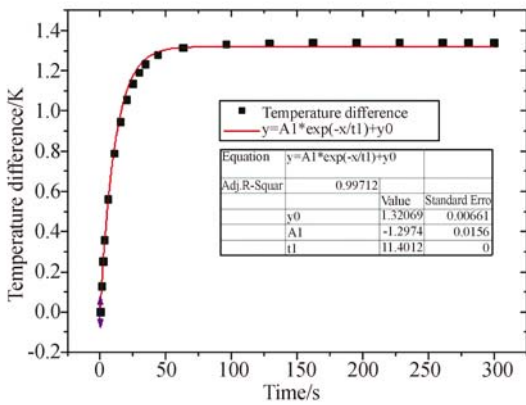


图 6 壁厚 0.07 mm/锥顶角 30°/帽檐宽度 2.5 mm/银质吸收腔下的温度响应及拟合曲线

Fig. 6 Temperature response and fitting curve with a selected cavity (wall thickness-0.07 mm/ cone angle-30°/ brim width-2.5 mm/silver cavity)

从相关系数 R 来看,拟合结果为 99.712%,说明选择此种拟合是适用的,同时也证明了理论模型的可靠性。图中给出此结构的时间常数为 11.401 s,响应度为 1.321 K。

进而,通过相同的方法获得不同变量下的时间常数和响应度,并进行对比分析,结果见图7~图 10。

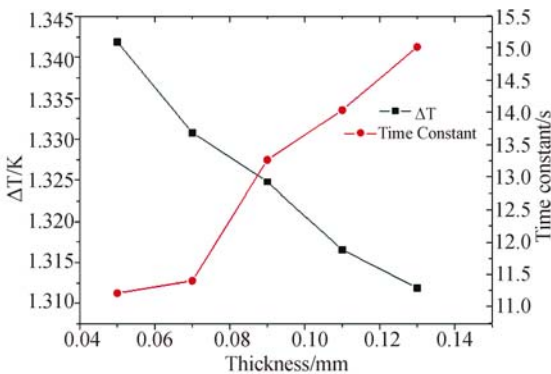


图 7 不同壁厚下的时间常数和响应度(锥顶角 30°/帽檐宽度 2.5 mm/银质吸收腔)

Fig. 7 Time constant and responsibility at different wall thicknesses (cone angle-30°/ brim width-2.5 mm/silver cavity)

仿真结果可以看出:

吸收腔壁厚增加,则热容变大,同时热路稍微变长,热阻有所增加,从而使得辐射计时间常数延长、响应度降低,因此腔壁应尽可能薄;但考虑到在薄壁中埋入电热丝的工艺难度,腔壁厚度存在

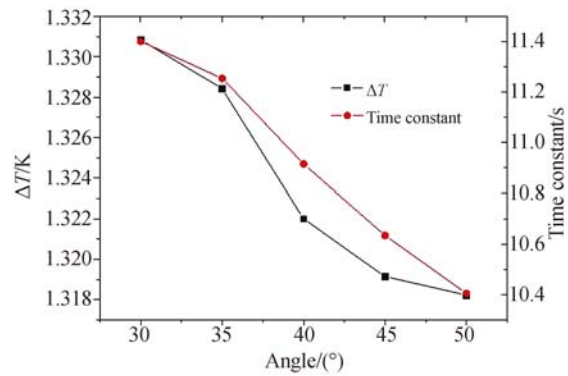


图 8 不同锥顶角下的时间常数和响应度(壁厚 0.07 mm/帽檐宽度 2.5 mm/银质吸收腔)

Fig. 8 Time constant and responsibility at different cone angles (wall thickness-0.07 mm/ brim width-2.5 mm/silver cavity)

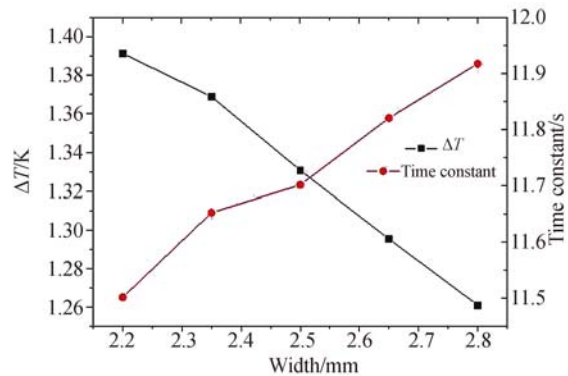


图 9 不同帽檐宽度下的时间常数和响应度(壁厚 0.07 mm/锥顶角 30°/银质吸收腔)

Fig. 9 Time constant and responsibility at different brim widths (wall thickness-0.07 mm/ cone angle-30°/silver cavity)

一定的限制条件。同时,腔壁过薄也会由于应力过大产生变形翘曲,严重时可能出现损坏。综合考虑,吸收腔壁应适当薄。

吸收腔锥顶角增大,其总体积减小,热容也减小,使得辐射计时间常数缩短;但是,热量在腔体内部传导路径变短,热阻变小,响应度降低。二者存在制约关系。再考虑到吸收腔的高吸收率与光在腔内的反射次数有关,为了保证足够的反射次数,可以选择较小的锥顶角。

吸收腔帽檐宽度增加,与垫片的接触面积越大,则吸收腔-垫片-热沉这一热支路的热阻越小,响应度也随之降低;同时腔体总热容有所增加,时间常数延长。从结果来看,应选择较小的帽檐

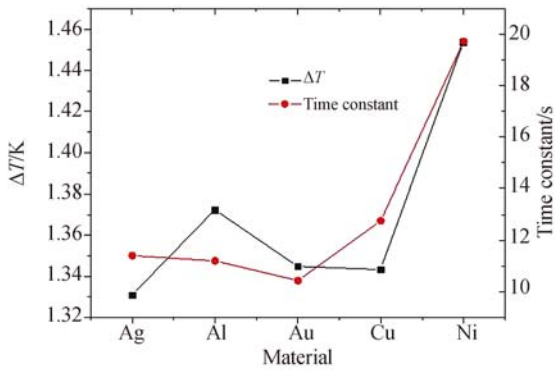


图 10 不同材料下的时间常数和响应度(壁厚 0.07 mm/锥顶角 30°/帽檐宽度 2.5 mm)

Fig. 10 Time constant and responsibility at different materials (wall thickness-0.07mm/ cone angle-30°/ brim width-2.5mm)

宽度。

吸收腔的材料对时间常数和响应度的影响与三个属性有关:密度、比热、导热系数。表 3 给出仿真实验中所用材料的相关数值。为获得较小的时间常数,应选择导热系数相对较大的金属,再考虑到机械强度、生产制造成本方面,使用银质吸收腔最为理想。

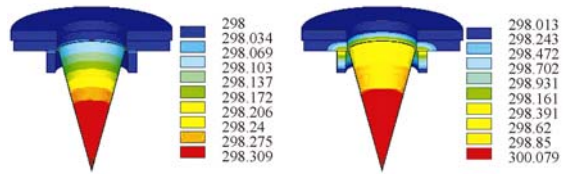
表 3 不同金属的相关参数

Tab. 3 Relevant parameters of different materials

材料	密度 /(kg·m ⁻³)	比热 /(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	导热系数: /(W·m ⁻¹ ·k ⁻¹)
银	11 500	250	429
铝合金	2 800	960	160
金	19 000	130	300
铜	8 960	410	380
镍	8 500	460	43

综上所述,在相同的工作状态下,壁厚 0.07 mm/锥顶角 30°/帽檐宽度 2.2 mm/银质吸收腔应是最优的腔结构,此时辐射计常温环境下的时间常数为 11.501 s,响应度为 1.391 K。此结构下加热瞬间(0.5 s)和达到热平衡(300 s)时的温度分布如图 11。在加热瞬间,见图 11(a),由于腔体的热容热阻都较小,热量迅速到达锥尖,因此腔体下半部温度基本一致,而上半部与其他元件接触,温度呈现出递减的梯度特征。加热区域升温

0.309 K,腔体与其他元件之间的传热几乎还未开始;经过 300 s 的传热后,达到了热平衡状态,见图 11(b),此时腔体本身的温度梯度较(a)有所减小,即温度分布更为均匀。热量通过下层垫片、热电堆与腔帽檐的接触部分进行传导,呈现向外扩散趋势,但由于大热沉的存在,上层垫片和热电堆冷端温度变化很小,存在约 0.013 K 的温度漂移。加热区域升温 2.066 K,帽檐处升温 1.391 K。传热过程与理论预测相符,仿真数据具有可靠性。



(a)0.5 s

(b)300 s

图 11 加热瞬间(0.5 s)和热平衡(300 s)的温度分布

Fig. 11 Temperature counters at the initial state (0.5 s) and the steady state(300 s)

4 实验验证

应用第 3 节中给出的最优结构参数,加工了辐射计吸收腔,在与仿真实验相同的外界环境下进行了验证实验。吸收腔、热沉等传热部件实物图如图 12。实验步骤与分析将在另一篇文章中进行阐述。实验结果在图 13 中给出。

将实验获得的温度数据和仿真获得的温度数据进行相关性分析,如图 14。

实验数据与仿真数据之间的相关性系数可以达到 0.994,此良好的相关性在图 14 中也能够表

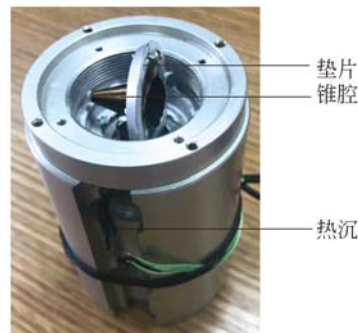


图 12 传热部件实物图

Fig. 12 Picture of heat transfer components

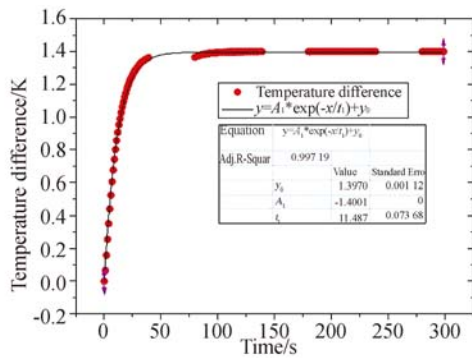


图 13 实验结果与拟合

Fig. 13 Experimental results and fitting curve

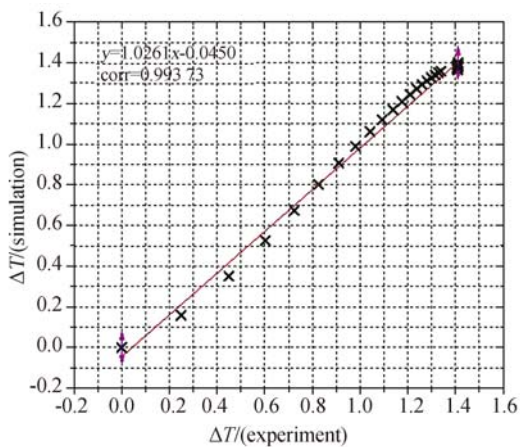


图 14 实验与仿真结果相关性比对

Fig. 14 Comparison between experimental results and simulation results

参考文献:

- [1] 李在清, 吕正. 低温绝对辐射计的发展现状[J]. 现代计量测试, 1993(3): 13-17.
LI Z Q, LÜ ZH. The present state of cryogenic absolute radiometer [J]. *Modern Measurement and Test*, 1993(3): 13-17. (in Chinese)
- [2] 李双, 王骥, 陈凤, 等. 基于低温辐射计的 InGaAs 陷阱探测器高精度光辐射定标研究[J]. 光学技术, 2006, 32(S1): 64-66.
LI SH, WANG J, CHEN F, *et al.*. Highly accurate optical radiation calibration of InGaAs trap based on cryogenic radiometer [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(S1): 64-66. (in Chinese)
- [3] 王红睿, 方伟. 自动寻日的太阳辐照绝对辐射计[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 252-258.
WANG H R, FANG W. Solar irradiance absolute radiometer with ability of automatic solar tracking [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2011, 4(3): 252-258. (in Chinese)
- [4] 王玉鹏, 方伟, 弓成虎, 等. 双锥腔互补型绝对辐射计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1662-1667.
WANG Y P, FANG W, GONG CH H, *et al.*. Dual cavity inter-compensating absolute radiometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1662-1667. (in Chinese)
- [5] 唐潇, 贾平, 王凯, 等. 太阳辐照度绝对辐射计的光电不等效性修正[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 2370-2376.
TANG X, JIA P, WANG K, *et al.*. Non-equivalence correction of solar irradiance absolute radiometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 2370-2376. (in Chinese)
- [6] GENTILE T R, HOUSTON J M, HARDIS J E, *et al.*. National Institute of Standards and Technology high-accuracy cryogenic radiometer [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(7): 1056-1068.

- [7] PEARSON D A, ZHANG Z M. Thermal-electrical modeling of absolute cryogenic radiometers [J]. *Cryogenics*, 1999, 39(4): 299-309.
- [8] YING Y B, WANG J P, JIANG H Y. Inspecting diameter and defect area of fruit with machine vision [J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(5): 216-220.
- [9] 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: 中国科学院大学, 2014.
FANG Q Q. *Research of the blackbody cavity and nonequivalence of Spatial Cryogenic Radiometer* [D]. Changchun: Graduate University of the Chinese Academy of Science, 2014. (in Chinese)
- [10] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG SH M, TAO W Q. *Heat Transfer*[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [11] 张尧, 周鑫, 牛海清, 等. 单芯电缆热时间常数的理论计算与试验研究[J]. *高压电技术*, 2009, 35(11): 2801-2806.
ZHANG Y, ZHOU X, NIU H Q, *et al.*. Theoretical calculation and experimental research on thermal time constant of single-core cables [J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(11): 2801-2806. (in Chinese)
- [12] 李梦庆, 张雷, 邢利娜, 等. 长条形空间反射镜无热化胶层的优化设计[J]. *中国光学*, 2016, 9(6): 704-712.
LI M Q, ZHANG L, XING L N, *et al.*. Optimization design of athermal adhesive for rectangular space mirror [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(6): 704-712. (in Chinese)
- [13] 齐光, 王书新, 李景林, 等. 离轴三反光学传感器遮光罩的设计与试验验证[J]. *中国光学*, 2016, 9(4): 472-482.
QI G, WANG SH X, LI J L, *et al.*. Design and test verification of baffle for off-axis three-mirror space optical remote sensor [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(4): 472-482. (in Chinese)
- [14] 齐光, 王书新, 李景林. 空间传感器高体份 SiC-Al 复合材料反射镜组件设计[J]. *中国光学*, 2015, 8(1): 99-106.
QI G, WANG SH X, LI J L. Design of high volume fraction SiC/Al composite mirror in space remote sensor [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1): 99-106. (in Chinese)
- [15] TOULOUKIAN Y S, POWELL R W, HO C Y, *et al.*. *Thermophysical Properties of Matter* (vol. 1)[M]. New York: Plenum Press, 1970.
- [16] TOULOUKIAN Y S, POWELL R W, HO C Y, *et al.*. *Thermophysical Properties of Matter* (vol. 4)[M]. New York: Plenum Press, 1970.

作者简介:



高鑫(1993—),男,山西朔州人,博士研究生,2015年于浙江大学获得学士学位,主要从事太阳辐照度绝对辐射计建模分析方面的研究。E-mail: gaixin315@ mails.ucas.ac.cn



王凯(1985—),男,山东东阿人,助理研究员,2007年和2009年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光学精密仪器结构的设计工作。E-mail: calerkai@163.com

导师简介:



方伟(1965—),女,辽宁锦州人,博士,研究员,1997年和2005年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,现为FY-3卫星太阳辐照度绝对辐射计主任设计师,主要从事太阳辐射计量的研究。E-mail: fangw@ciomp.ac.cn