

低温绝对辐射计热沉的热特性分析

唐 潇^{1,2} 方 伟¹ 骆 杨¹ 王 凯¹ 夏志伟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 利用有限元软件对低温绝对辐射计热沉在测量过程中的动态响应进行了研究, 分析了影响热沉平衡温度的关键因素和不同结构下热沉对应的温度变化, 并对比了 304 号不锈钢、6061 铝合金和无氧高导铜材料作为热链接时热沉的响应状态。结果表明, 低比热容和低热导率的热链接材料是未来低温辐射计发展的首选。另外, 对辐射计结构进行合理的调节可以实现对热沉平衡温度的有效控制。

关键词 测量; 低温绝对辐射计; 有限元法; 太阳总辐照度; 温度场

中图分类号 P422.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1012004

Thermal Characteristic Analysis of Heat Sink in Absolute Cryogenic Radiometer

Tang Xiao^{1,2} Fang Wei¹ Luo Yang¹ Wang Kai¹ Xia Zhiwei¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

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

Abstract The dynamic response of heat sink in the measurement process by an absolute cryogenic radiometer is studied with the finite element method, the key factors affecting the equilibrium temperature of heat sink and the temperature variations under different heat sink structures are analyzed, and the thermal responses when 304 stainless steel, 6061 aluminum alloy, and oxygen-free high-conductivity copper are respectively used as thermal links are compared. The results indicate that, a heat link with low heat capacity and thermal conductivity is the first choice in the future of cryogenic radiometers. In addition, the equilibrium temperature of heat sink can be effectively controlled via suitable adjustment of the heat sink structure.

Key words measurement; absolute cryogenic radiometer; finite element method; total solar irradiance; temperature field

OCIS codes 120.5630; 120.3930; 120.4800

1 引 言

绝对辐射计是测量太阳总辐照度的主要监测仪器之一,其工作原理是利用光电等效性,用电替代法将电功率等效为太阳辐射能量,从而测得太阳的总辐照度值^[1]。低温绝对辐射计在低温下具有高热扩散率、高测量精度、锥腔高吸收率的特点,已经成为当前辐射测量的基准。近 30 年,太阳辐照度的测量精确度从常温绝对辐射计的 0.1%~1%已提高到现在的 0.01%^[2],可用于计算太阳总辐照度对地球气候变化的驱动效应^[3]。

为了对太阳辐照度进行更精确的测量,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在原有常温绝对辐

收稿日期: 2016-05-16; **收到修改稿日期:** 2016-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(41474161)、国家 863 计划(2015AA123703)

作者简介: 唐 潇(1990—),男,博士研究生,主要从事绝对辐射计光电不等效性及热平衡方面的研究。

E-mail: tangxiao1022@126.com

导师简介: 方 伟(1965—),女,博士,研究员,主要从事太阳辐射计量及总设计方面的研究。

E-mail: fangw@ciomp.ac.cn(通信联系人)

射计^[4-8]的研究基础上开展了低温绝对辐射计的研制工作。提出了一种反射太阳光谱区(0.2~2.5 μm)的空间遥感绝对辐射定标基准辐射计(ARCPR)。ARCPR是在低温 20 K 下运行的电替代辐射计。

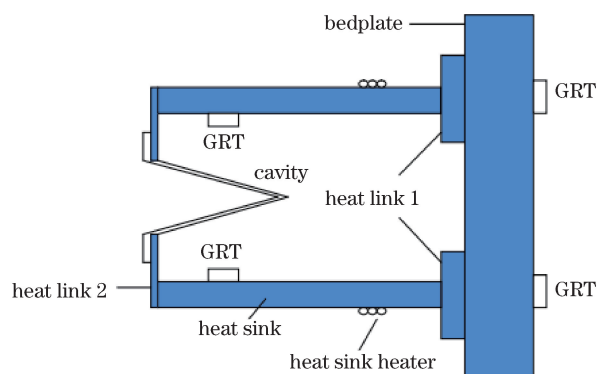
对于低温绝对辐射计,热沉的热特性分析至关重要。常温辐射计采用双锥腔背靠背式结构消除热沉温度偏移等对热沉的影响^[9]。在对太阳辐照度进行在轨测量时,需要体积较大的制冷机将低温辐射计搭载于风云系列卫星^[10]上,该结构需优化精简。如何在满足辐射计灵敏度的同时高效地提高热沉的稳定性,实现对热沉温度的有效控制成为太阳辐照度学亟待研究和解决的关键问题之一。

本文从热沉的实际结构出发,以热传递基本规律为基础,在考虑环境温度对热沉辐射换热的前提下,利用有限元单元法^[11-13]对 ARCPR 的关键部位进行了仿真模拟,观察了不同条件下热沉温度的响应曲线,并对不同规格的热链接结构进行了实验探讨。该研究加深了对辐射计内部热动态响应过程的认识,为低温绝对辐射计的发展提供了有效的参考。

2 结 构

在恒温实验室中,运用分子泵、前级泵(干泵)相结合的方法对辐射计抽真空。通常情况下气体压强小于 10^{-3} Pa 时,气体传导的热流不大于 0.25 W/m^2 ,其值小于辐射热流的 3%。在 ARCPR 的功率测量中,真空度小于 10^{-5} Pa,故热对流对腔体组件的影响可以忽略不计。ARCPR 为二级制冷,第一级用铝罩封装辐射计的关键部位,液氮制冷使整个辐射计温度稳定在 77 K 左右;第二级制冷为机械制冷,使 ARCPR 的腔体组件温度稳定在 20 K 左右。

ARCPR 的腔体组件主要由制冷机底座、底座与热沉之间的热链接(热链接 1)、热沉、热沉与锥腔之间的热链接(热链接 2)、锥腔组成,如图 1 所示。接收腔为圆锥型腔,半径为 3.5 mm,高度为 13 mm,圆心角为 30° ,接收腔的内表面涂有黑漆,对太阳光的吸收率接近于 1。热沉呈圆柱状,中空,内径为 14.8 mm,外径为 19 mm,长度为 34 mm,在其底端缠绕加热丝,通过温控设备使其温度稳定在 20 K 左右。接收腔、热沉、制冷机底座主要由无氧高导(OFHC)铜组成,该材料在低温下具有较高的热扩散率,能显著提高辐射能量在腔体组件内的传递效率。



GRT: germanium resistance thermometer

图 1 ARCPR 腔体组件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of essential elements of ARCPR cavity

3 热分析理论基础

在三维空间中设一个均匀的、各项异性的物体,结合热扩散方程和傅里叶基本传热定律,该物体内各点温度 T 随时间 t 的分布规律符合导热微分方程^[14]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\Phi}{\rho c}, \quad (1)$$

式中 ρ 和 c 分别为物体的密度和比热容; Φ 为物体的内热源,物理含义是单位时间内单位体积中产生或消耗的热能,单位为 W/m^3 ; $\alpha = \lambda / \rho c$ 为物体的热扩散率,其中 λ 为物体的热导率,因此 α 越大,热交换过程

中温度变化越快。

由于 ARCPR 的三维结构十分复杂,运用(1)式很难得到符合传热规律的解析式。此处采取零维问题的分析方法——集中参数法对该问题进行简化,即不考虑几何体的边界条件,边界热量交换的能量等效为物体内部热源的一部分,且发生能量交换的物体看作具有等效热容和热导率的质点,空间位置对温度的分布贡献很小。因此(1)式可简化为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\dot{\Phi}}{\rho c}, \quad (2)$$

$\dot{\Phi}$ 由边界热交换折算功率 $\dot{\Phi}_1$ 和入射光功率 $\dot{\Phi}_2$ 两部分组成:

$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 = \frac{-K(T - T_0)}{V} + \frac{P_0}{V} = \frac{P_0 - K(T - T_0)}{V}, \quad (3)$$

式中 K 为总热导率, T_0 为初始温度, P_0 为补偿功率, V 为物体的体积。结合(2)式和(3)式可得

$$C \frac{\partial \Delta T}{\partial t} + K \Delta T = P_0, \quad (4)$$

式中 C 为总热容, ΔT 为圆锥腔和热沉之间的温度差异。由已知的初始条件可知,在初始时刻锥腔和热沉之间的温度差异为零。将其代入(4)式,求解可得

$$\Delta T(t) = \frac{P_0}{K} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad (5)$$

式中 $\tau = C/K$ 为锥腔的时间常数,是评定辐射计达到平衡状态的重要参数。当 $t = 10\tau$ 时, $\Delta T(10\tau) = 0.99995 \Delta T_{\max}$, 其中 ΔT_{\max} 为最终温度差异。因此当 $t = 10\tau$ 时即可认为热平衡达到最大平衡温度,可进行电定标测量。当时间趋于无穷大时,温度差异 ΔT 接近最终温度差异

$$\Delta T_{\max} = \frac{P_0}{K}. \quad (6)$$

ARCPR 的工作原理:记录经过 10τ 的采样时间后(一般为 5 min)辐射能量入射锥腔对应的 ΔT 值,并用可精确测量的电功率复现该温度差异,达到相同温度差异的电功率值即为需要测量的辐射功率值。该方法称为电替代法,有效地实现了太阳总辐照度值向标准国际单位的溯源。

4 有限元分析

4.1 热沉传导实验

ARCPR 热沉的温度响应属于瞬态的非线性热分析,利用有限元软件 ANSYS 的 APDL 语言建立 ARCPR 腔体组件的三维有限元模型,该模型由 49900 个单元和 13306 个节点组成,初始温度设为 20 K。低温下,仿真中使用的各项热物理参数如表 1 所示^[15-16]。

表 1 APCPR 的材料参数^[15-16]

Table 1 Material parameters of APCPR^[15-16]

Material	Density / (kg·m ⁻³)	Specific heat / (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	Thermal conductivity / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
304 stainless steel	7930	13.52	2.14
6061 Al alloy	2700	30	8.5
OFHC Cu	8920	7.42	5000

在仿真实验中,将辐射计吸收的光功率作为模型的面热源,利用有限元软件在底面上依次施加 20, 30, 40, 50, 60, 70 mW 的制冷功率(因为是制冷功率,仿真中在底面施加的是负功率)进行稳态热分析,观察不同制冷机功率对热沉平衡温度的影响。对数据进行线性拟合,得到相应的温度与制冷功率的关系曲线,如图 2 所示。

从图 2 可以发现,ARCPR 热沉的平衡温度与制冷机功率大小呈线性反比例关系。根据对 ARCPR 运行过程的初步认识,辐射计热沉的平衡温度主要通过制冷机输入功率调节。在实际热沉温控过程中,热沉的实时温度通过温度传感器进行采集。当热沉平衡温度出现明显波动时,运用比例/积分/微分(PID)法则和

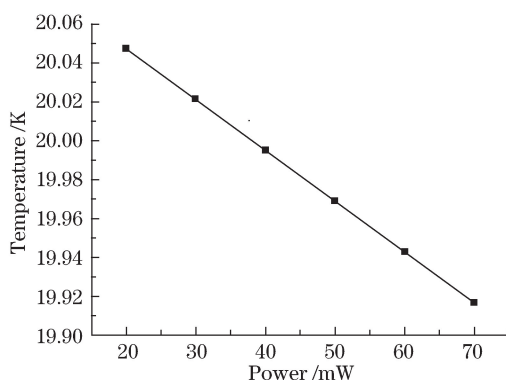


图 2 热沉平衡温度与制冷功率的关系

Fig. 2 Relationship between equilibrium temperature of heat sink and cryocooler power

Matlab 的调节程序,改变热沉外壁的加热丝加热功率,实现对制冷功率的调节,从而稳定热沉的平衡温度。

4.2 热沉辐射实验

热沉与制冷功率良好的线性关系实现了热沉温度的有效控制,但热沉温度仍受其他因素的影响,如环境温度对热沉的辐射换热。由于低温辐射计 0.01% 的高精度需求,对环境温度与热沉辐射换热的能量进行定性对比评估,完善热沉温度的不确定度分析,是提高 APCPR 精度的重要工作。由于角度因子的计算比较复杂,辐射换热的能量很难通过解析式对比评估。此次仿真实验用一种新的简化方法进行了等效:在模型的远端建立一个与三维模型没有坐标关系的空间节点,设低温辐射计的第二层辐射罩的温度为常量并稳定在 77 K,即环境温度为 77 K 并赋值给空间节点;然后在整个辐射计外表面覆盖一层与空间节点对应的辐射单元,将它们之间的形状因子存储在一个矩阵中。求解时利用该矩阵和对应辐射的关系,环境温度与热沉之间的辐射换热可等效为空间节点与对应辐射单元的辐射换热,这种辐射传热能量随着热沉温度的变化而改变。将辐射状态下和没有辐射状态下的低温辐射计温度分布云图进行对比,如图 3 所示。

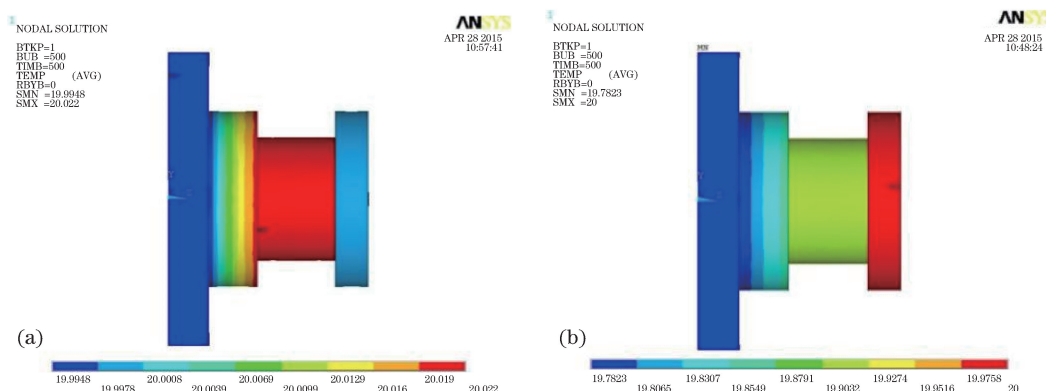


图 3 关键部位的温度分布云图。(a) 有辐射状态;(b) 无辐射状态

Fig. 3 Temperature distribution cloud charts of essential elements. (a) With radiative heat transfer;

(b) without radiative heat transfer

由图 3 可以发现,在不考虑辐射换热的情况下,热沉的平衡温度为 19.92 K,小于有辐射换热情况下的 20.02 K,辐射换热产生了 0.1 K 的温度差异。根据图 2 得出的结论,经过计算可知,在相同功率条件下,锥腔传感器接受功率照射后,热沉、锥腔之间热交换产生的温度差异为 0.1316 K。通过对比,热沉、锥腔热交换产生的温度差异仅为辐射传热产生的温度差异的 1.3 倍,辐射换热对热沉温度有至关重要的影响。

为了消除辐射换热对热沉温度的影响,实验测量过程中,在辐射计的关键部位和底座外覆盖一层 OFHC 铜材料的辐射罩。在辐射罩外表面电镀一层铝薄膜,大部分辐射传热的能量被铝薄膜吸收传递到辐射计底座。同时,考虑辐射罩能量传递中温度波动对热沉温度控制的影响,进一步优化对热沉的 PID 控制。采用参数自适应的方法对热沉的温度进行进一步精准控制,消除辐射罩能量波动引起的误差。在实验测量

过程中,目标温度为 20 K,温度连续稳定 1.5 h 的精准温度控制的热沉温度输出如图 4 所示。由图可知,辐射罩结构削弱了辐射传热对热沉温度的影响,其平衡温度只受辐射罩温度起伏的影响而产生细微的波动。采取精准的温度控制后,热沉温度的性能满足辐射计测量要求。

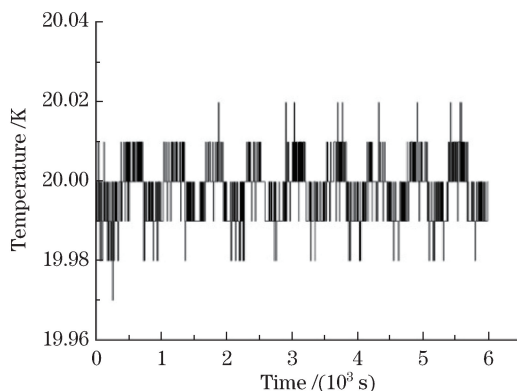


图 4 精准温度控制的 ARCPR 热沉温度时域演化

Fig. 4 Time evolution of heat sink temperature for ARCPR under precise temperature control

4.3 热沉温度精准控制的影响因素

热沉温度进行精准控制后,温度调节仍存在滞后性,使得热沉温度存在波动并影响热沉的稳定性。于是出现图 4 所示的温度在一定范围内起伏而不会稳定在特定值的情况。滞后性通过热链接传递影响锥腔的灵敏度响应,故有效调节热沉温度时确保辐射计灵敏度的要求与热链接的选取息息相关。304 号不锈钢、6061 号铝合金和 OFHC 铜在低温下具有良好的热物理属性而广泛运用在低温辐射计中。图 5 横向对比了这三种材料作为热链接时热沉的动态温度响应曲线。

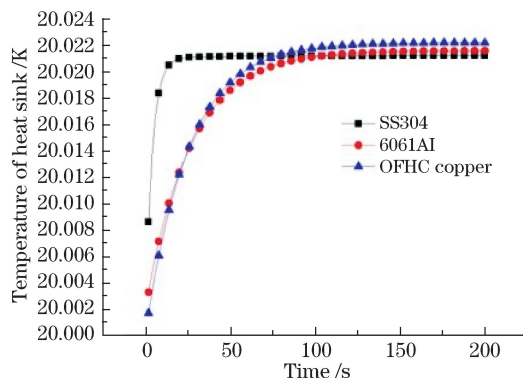


图 5 不同热链接材料对应的热沉温度响应曲线

Fig. 5 Temperature response curves corresponding to different heat link materials

观察图 5 发现,选取材料为 304 号不锈钢作为热链接时,热沉在不到 30 s 的时间内达到平衡。这显著地降低了热沉达到平衡的时间常数,减小了热沉温度传递的滞后性,有助于加速热沉与锥腔进行稳定的热交换,减少锥腔达到平衡的时间,从而减少整体的实验测试时间。这说明低热导率及低热容的热链接材料会明显改善热沉的平衡温度与时间常数,提高辐射计的灵敏度。然而,热链接的热导率并不是越小越好,热导率越低,时间常数越大,怎样平衡时间常数与灵敏度的关系从而选取热导率不同的材料需要针对不同需求综合考虑。这一结论也与文献[17]在低温 4.4 K 下选取聚酰亚胺作为热链接材料的原因具有一致性。

热链接设计的关键参数为横截面积与长度的比值,在仿真实验中进行了深入研究。图 6 所示为横截面积 A 与长度 L 的比值不同时,热沉温度进行精准控制时的温度响应曲线。当 $t=300$ s 时,不同 A/L 值的响应曲线同时接受了相同功率大小的制冷功率调节。可以发现调节后热沉的温度迅速降低,由于热沉的滞后性,该调节的效果在经过一段时间的热交换后使热沉温度再次趋于平衡。再次达到平衡所用的时间,即热沉调节滞后性的长短随 A/L 值的增大而减小。这表明热沉温度的调节与热链接的性质虽然无直接相关性,但热链接是连通热沉与锥腔的枢纽,当输入功率发生变化时,锥腔通过热链接影响热沉的再平衡。 A/L 值

越大,该影响越明显,热沉的滞后性越小。该结论有助于低温绝对辐射计的优化设计,为辐射计腔体组件的结构设计提供指导。

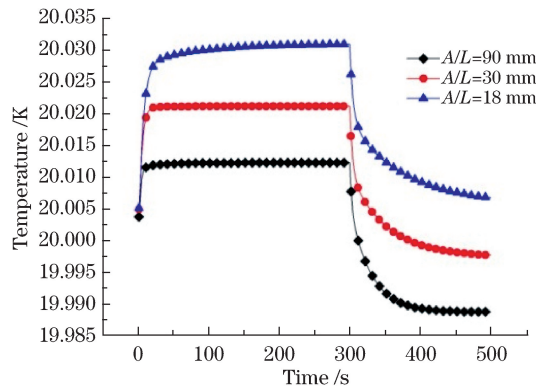


图 6 不同 A/L 值对应的热沉温度调节的响应曲线

Fig. 6 Response curves of heat sink temperature control corresponding to different A/L values

5 结 论

在 ARCPR 的结构基础上,建立了辐射计腔体组件的三维传热及热辐射模型,研究了环境温度对热沉结构的辐射换热,模拟并实验研究了辐射计热沉在不同情况下的温度响应。结果表明,环境温度对热沉的辐射换热不可忽略,考虑环境温度的辐射交换以及热沉温度与制冷功率良好的线性关系,利用 Matlab 程序和 PID 法则能够实现对热沉温度的精准控制。当目标温度为 20 K 时,有效控制后的热沉温度不确定度为 0.04 K。热沉温度平衡后,其滞后性受热链接材料的影响。实验测试了不同条件下热沉温度调节后的温度响应。结果表明,在锥腔选取 OFHC 铜材料的基础上,热链接选取低热导率及低热容的材料能够显著改善低温辐射计热沉的平衡状态和时间常数,是未来低温辐射计发展的趋势。在热链接材料已经确定的情况下,结合辐射计的结构设计,在合理范围内调节热链接 A/L 值是减少热沉滞后性的有效手段。这在建立符合实验要求的热沉及锥腔的热平衡状态,预估与测量锥腔的平衡温度以及修正光电不等效误差等方面有指导作用。

参 考 文 献

- 1 Yang Zhenling, Fang Wei, Song Baoqi, *et al.* Variation of solar irradiance absolute radiometer cavity temperature response in vacuum and its effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0912009.
杨振玲, 方 伟, 宋宝奇, 等. 真空环境中太阳辐照度绝对辐射计腔温响应的变化及其影响[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0912009.
- 2 Fox N, Kaiser-Weiss A, Schmutz W, *et al.* Accurate radiometry from space: An essential tool for climate studies[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, 2011, 369(1953): 4028-4063.
- 3 Kopp G, Lean J L. A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(1): L01706.
- 4 Wang Yupeng, Hu Xiuqing, Wang Hongrui, *et al.* Standard transfer chain for radiometric calibration of optical sensing instruments with traceability in solar reflective bands[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1807-1812.
王玉鹏, 胡秀清, 王红睿, 等. 可在轨溯源的太阳反射波段光学遥感仪器辐射定标基准传递链路[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1807-1812.
- 5 Yang Dongjun, Fang Wei, Ye Xin, *et al.* Program-controlled sun-tracking precision of spaceborne solar irradiance monitor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1813-1821.
杨东军, 方 伟, 叶 新, 等. 星载太阳辐射监测仪的太阳程控跟踪精度[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1813-1821.
- 6 Song Baoqi, Ye Xin, Yang Dongjun, *et al.* Precise measurement of voltages in space cryogenic radiation temperature system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1903-1910.
宋宝奇, 叶 新, 杨东军, 等. 空间低温辐射计中的精密电压测量控制[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1903-1910.

- 7 Zhang Hao, Fang Wei, Ye Xin, *et al.* Design of prism spectrometer with wide spectral coverage for solar spectrum measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0222001.
张 浩, 方 伟, 叶 新, 等. 宽光谱棱镜型太阳光谱仪设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0222001.
- 8 Zhang Jiaqi, Qi Jin, Fang Wei, *et al.* Correction of observation angle in solar radiation monitor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0212003.
张佳琦, 齐 谨, 方 伟, 等. 太阳辐射检测仪观测角度变化的修正[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0212003.
- 9 Fang Wei. Dual cavity inter-compensating absolute radiometer (DCICAR) [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2005.
方 伟. 双锥腔互补型绝对辐射计(DCICAR)[D]. 北京: 中国科学院, 2005.
- 10 Yang Z D, Lu N M, Shi J M, *et al.* Overview of FY-3 payload and ground application system[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(12): 4846-4853.
- 11 Chi Shanshan, Wang Xuyue, Xu Wenji. Numerical simulation on stainless steel-carbon steel laminated sheet considering interface during pulsed laser bending[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1103002.
池闪闪, 王续跃, 徐文骥. 考虑结合面的不锈钢-碳刚层合板脉冲激光弯曲数值模拟[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1103002.
- 12 Tang Xiao, Fang Wei, Wang Yupeng. Effect and experiment analysis of first specular reflection error on absolute radiometers[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(4): 0408003.
唐 潇, 方 伟, 王玉鹏. 绝对辐射计一次反射不等效的影响及实验分析[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0408003.
- 13 Fang Jinxiang, Dong Shiyun, Xu Binshi, *et al.* Study of stresses of laser metal deposition using FEM considering phase transformation effects[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(5): 0503009.
方金祥, 董世运, 徐滨士, 等. 考虑固态相变的激光熔覆成形应力场有限元分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0503009.
- 14 Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
杨世铭, 陶文铨. *传热学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- 15 Touloukian Y S, Powell R W, Ho C Y, *et al.* Thermophysical properties of matter: volume 1 [M]. New York: IFI/Plenum Press, 1970.
- 16 Touloukian Y S, Powell R W, Ho C Y, *et al.* Thermophysical properties of matter: volume 4 [M]. New York: IFI/Plenum Press, 1970.
- 17 Zhang Z M, Lorentz S R, Rice J P, *et al.* Measurement of thermophysical properties of polyimide and a black paint for future development of cryogenic radiometers[J]. *Metrologia*, 1998, 35 (4): 511-515.