

新型长时热流测量装置的研制及应用

刘国仟, 李宇, 刘宇飞, 徐晓亮, 崔占中, 周禹

(中国运载火箭技术研究院 空间物理重点实验室, 北京 100076)

摘要: **目的** 设计一种新型热流测量装置, 使传感器满足长时间热流测量的需求, 且传感器外表面可以适量打磨, 与飞行器的气动外型面完好随型。**方法** 采用铜和钢作为备选材料, 施加相同的表面热流边界, 对比敏感端内外壁温差情况。优化热流辨识传感器传热路径、敏感端厚度, 通过有限元模型分析打磨对热流辨识结果的影响。基于优化结果, 研制出热流测量装置, 并通过地面试验验证该装置的有效性。**结果** 从热响应获取时间延迟角度来看, Cu 比钢具有较大的优势。综合考虑敏感端外表面需要与飞行器外表面随型打磨, 选用 5 mm 的厚度具有一定的安全可靠。敏感端的适度打磨基本不影响温度测量结果。辨识获得的热流数据与实际控制热流吻合较好, 最大偏差约 15%。**结论** 成功研制了热流测量装置, 并通过地面热试验证明了热流测量的有效性。

关键词: 热流测量; 传感器; 飞行器; 敏感端

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.01.006

中图分类号: V216 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2020)01-0031-05

Application and Development of a Novel Device for Long Time Heat-flow Measurement

LIU Guo-qian, LI Yu, LIU Yu-fei, XU Xiao-liang, CUI Zhan-zhong, ZHOU Yu
(Key Laboratory of Science and Technology on Space Physics, China Academy of Launch
Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: The paper aims to design a new type of heat flow measuring device, to make the sensor meet the needs of heat flow measurement for a long time. The external surface of the sensor can be moderately ground to fit with the aerodynamic exterior surface of the aircraft properly. With copper and steel as alternative materials, the same surface heat flux boundary was applied to contrast sensitive side temperature difference inside and outside the wall. The heat transmission path and the of the sensitive side thickness of the heat flow thickness identification sensor were optimized to analyze the influences on the grinding heat flux identification results through the finite element model. Based on optimization results, the heat flow measuring device was developed, and the effectiveness of the device was verified through ground test. From the perspective of time delay obtained from thermal response, Cu had a great advantage than steel. After comprehensive consideration, the sensitive side surface needed be grounded according to the exterior surface the aircraft. The thickness of 5 mm had safety and reliability to a certain extent. Proper grounding of the sensitive side had little effect on the temperature measurement results. Heat flow data obtained through identification was in line with the actual control of heat flow, and the maximum deviation was about 15%. The heat flow measurement device is developed successfully, and its validity is proved through the ground thermal test.

KEY WORDS: heat flow measurement; sensor; aircraft; sensitive side

收稿日期: 2019-08-15; 修订日期: 2019-12-13

Received: 2019-08-15; Revised: 2019-12-13

作者简介: 刘国仟 (1980—), 男, 辽宁大连人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为航天工程与力学。

Biography: LIU Guo-qian (1980—), Male, from Dalian Liaoning, Ph. D., Senior engineer, Research focus: aerospace engineering and mechanics.

在航天、航空、能源及国民经济各领域中，热流测量都起着重要的作用。尤其在国防军工领域，随着临近空间飞行器等重点型号的发展，飞行器的飞行马赫数越来越高，飞行时间越来越长。获取试飞条件下飞行器表面热流等参数，飞行器总体方案的优化具有重要的意义。航天领域常用的热流传感器有热阻式、热容式、红外测量式等^[1]。热阻式传感器的敏感端通常在测量环境中，不能根据飞行器外形随形打磨，对于具有一定曲率变化的型面，热流测量存在偏差。热容式^[2-4]传感器不能够适应长时间热流测量的需求，红外测量技术难以应用到飞行测试环境中，采用热流反辨识的方法可以满足长时间热流测量、敏感端不裸露在外的需求。Pourgholi R 等人^[5-11]对辨识算法进行了相关的研究和改进。Mongibello L 等人^[12]采用热流辨识的原理制备了辐射热流传感器。

文中基于热流反辨识的技术，设计了一种新型热流测量装置。其优点是测量点不在测量面上，传感器可以随飞行器外形适当打磨随型；热流测量不受时间限制。

1 热流测量原理及步骤

该热流测量装置的工作原理是通过测量材料的温度响应，采用多维热流辨识的方法反推热流。热流测量装置是通过测点获取温度信息，为热流反辨识提供输入条件。辨识算法是在时间域上进行表面热流辨识，即根据温度随时间的变化历程，辨识出热流随时间的变化历程。从原理上实际是通过温度传感器测量温度值，通过对温度值的处理得到热流，温度值的测量不受时间的限制，因此，辨识得到热流也不受时间的限制。此类问题属于热传导的逆问题，是典型的不适定问题，将热传导逆问题转化为优化问题，再利用优化算法来求解逆问题中的热流。

多维热流辨识算法采用共轭梯度法。 $Q(x, y, t)$ 的辨识问题等价于求合适的 $Q(x, y, t)$ 使如下目标函数达极小的优化问题，见公式 (1)：

$$J(Q) = \sum_{m=1}^M \int_{t=0}^{t_f} [T(x_m, y_m, t, Q) - \tilde{T}(x_m, y_m, t)]^2 dt \quad (1)$$

式中： t 为温度测量的时间段， $t=[0, t_f]$ ； M 为测量面的测点个数； $Q(x, y, t)$ 为 Q 的空间和时间函数。

首先获取温度响应数据，选择一维或多维热流辨识方案。然后建模、网格划分以及辨识计算，对辨识出的热流进行冷热壁转换处理。热流辨识过程如图 1 所示。

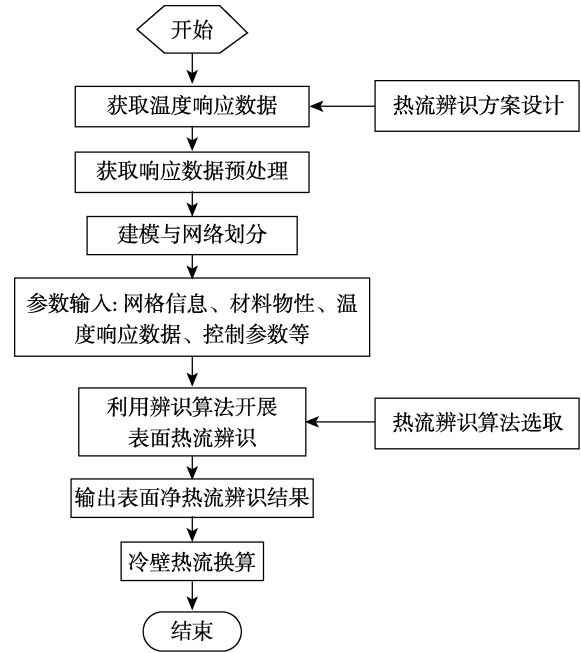


图 1 热流辨识过程
Fig.1 Heat flux identification process

2 热流辨识装置的优化设计

热流辨识装置敏感端优化设计需要满足如下条件：1) 尺寸尽量小，方便多布点；2) 传热路径以及传热速度要明确，方便反算热流；3) 受周围结构温度的影响尽量要小；4) 测温点时间延迟要小；5) 敏感端外表面可以适度打磨，以适应飞行器外形面。

2.1 敏感端材料选择

由于热流辨识装置的温度测点布置在敏感端的内壁面，因此为了降低辨识热流时间上的延迟，需要敏感端内外壁面的温差尽量小，通常选用热导率较高的金属材料。文中采用铜和钢作为备选材料，施加相同的表面热流边界（如图 2 所示），敏感端内外壁温差情况如图 3 所示。相同厚度（5 mm）的钢与 Cu 内外壁温差占比具有量级的差距，Cu 内外壁温差占比峰值约为 1.3%，而钢内外壁温差占比峰值接近 12%。

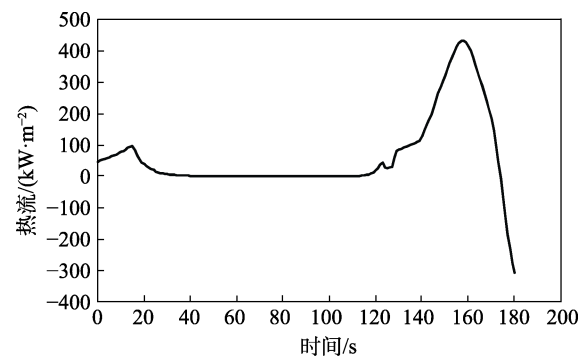


图 2 敏感端外壁热流边界
Fig.2 Sensitive side outer wall heat flux boundary

从热响应获取时间延迟角度来看，Cu 具有较大的优势，因此，选用 Cu 作为敏感端方案最优。

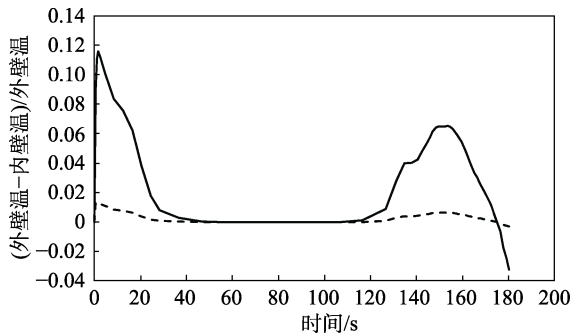


图 3 敏感端内外壁温差占比
Fig.3 Interior and exterior wall temperature difference of sensitive side

2.2 敏感端传热路径设计

热流辨识传感器传热路径设计如图 4 所示。设计思路如下：1) 敏感端与壳体之间不接触，留有一定的“间隙”，尽量减少敏感端与舱体之间的传热；2) 敏感端与壳体之间采用焊接的方式固连，消除接触热阻，减少传热分析的不确定度；3) “安装面”与舱体内壁面接触，采用垫石墨纸的方式尽量消除接触热阻的影响。

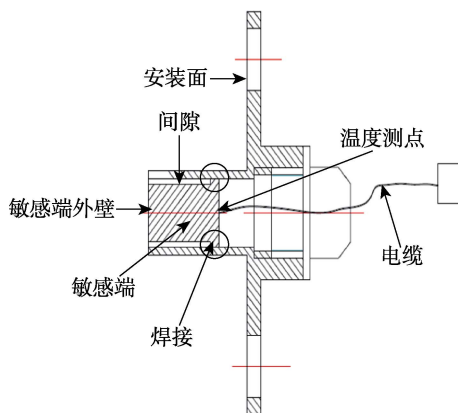


图 4 传热路径设计
Fig.4 Design of heat transfer path

2.3 敏感端厚度设计

铜敏感端内外壁温差占比如图 5 所示，可以看出，3 mm 厚度敏感端相对 5 mm 厚度内外壁温差占比较小，但不存在量级上的差距。综合考虑敏感端外表面需要与飞行器外表面随型打磨，选用 5 mm 的厚度具有一定的安全可靠。

2.4 敏感端打磨影响分析

建立有限元分析模型如图 6 所示，敏感端打磨前形状如图 7 所示，热流边界按照图 2 中所示。敏感端打磨前后的测点温度计算结果如图 8 所示，可以看出，敏感端的适度打磨基本不影响温度测量结果。因

此，打磨对热流辨识结果的影响不大，证明了该测量方案具备适度打磨的可行性。

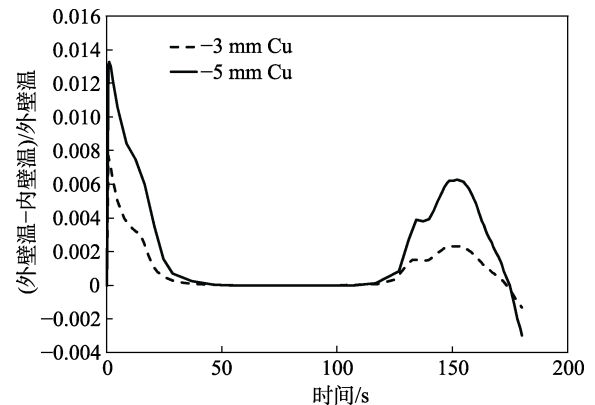


图 5 不同厚度铜敏感端内外壁温差占比
Fig.5 Different interior and exterior wall temperature of copper sensitive side with different thickness

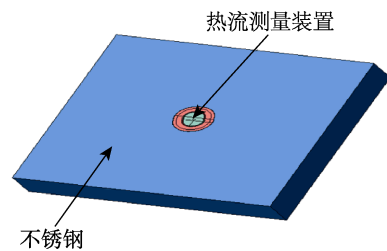


图 6 温度分析模型
Fig.6 Temperature analysis model

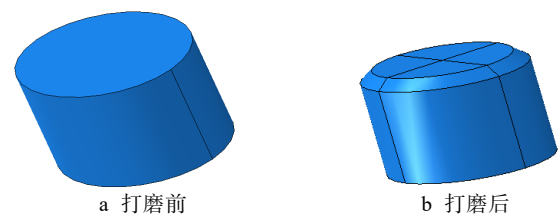


图 7 敏感端打磨前后形貌
Fig.7 Sensitive side morphology before and after grinding:
a) before grinding; b) after grinding

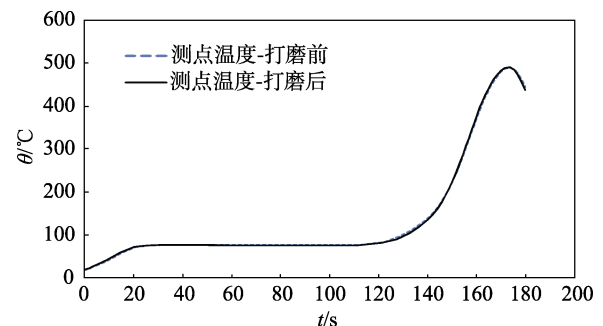


图 8 打磨前后测点温度结果
Fig.8 Measuring point temperature before and after grinding

3 热流测量装置研制

基于优化设计结果，研制出热流测量装置，如图 9 所示。

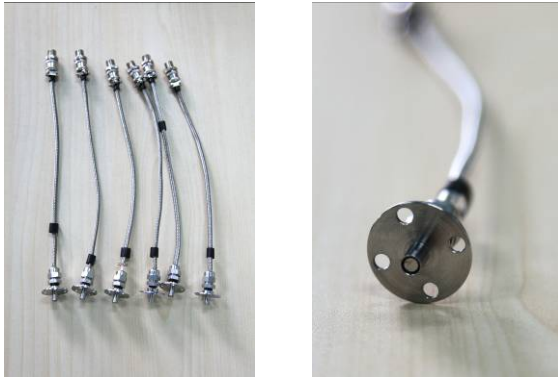


图9 热流测量装置产品照片
Fig.9 Heat flow measurement device product

4 地面试验验证

文中采用石英灯加热来进行试验验证。热流测量装置可以满足长时间滑翔类飞行器的外壁热流测量的需求。这类飞行器外壁热流主要是由气动加热引起的,属于对流加热范畴,而石英灯加热属于辐射加热,热流测量装置敏感头表面发射率的高低会影响温度测量结果。因此,为了实现石英灯与对流换热达到一样的加热效果,在石英灯加热试验前需要对敏感头表面进行涂黑处理,确保试验热流 95%以上进入敏感头表面。

采用石英灯加热的方式对传感器进行验证,地面试验热流曲线如图 10 所示。辐射加热试验时,测点位置及编号如图 11 所示,共四个新研热流测量装置(编号 1#—4#)。试验件的安装如图 12 所示。

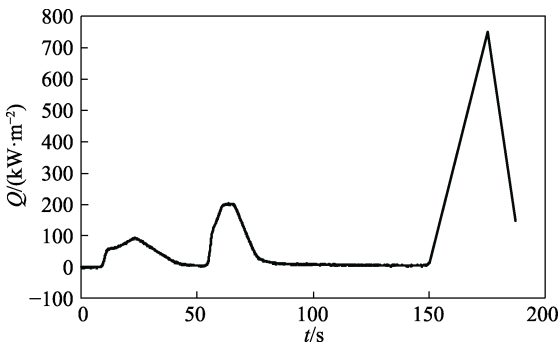


图10 加热热流控制曲线
Fig.10 Heating heat flow control curve

热流测量装置获取的温度曲线如图 13 所示,四个测点温度数值比较接近,在最后峰值时刻略有差别。通过采集的温度数据辨识获得的热流数据与实际控制热流的对比如图 14 所示。可以看出,辨识获得的热流数据与实际控制热流吻合较好,最大偏差约 15%,但辨识热流在热流变化较剧烈的拐点处精度会出现偏差。分析原因为热流测量原理所致,该装置测量点不在外表面而在内表面,温度数据获取具有一定的延迟性。

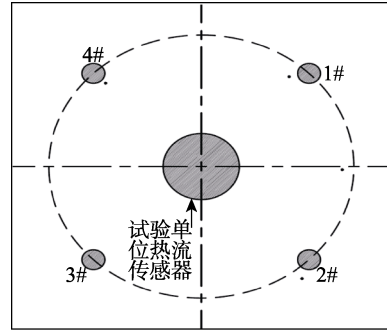


图11 试验件测点分布
Fig.11 Measuring point distribution of test pieces

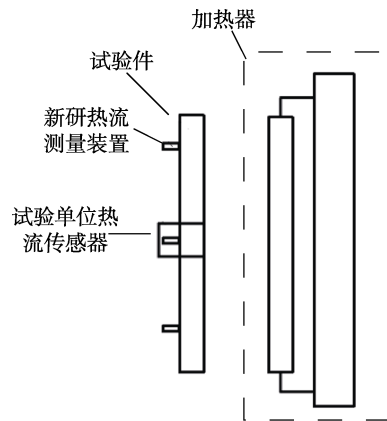


图12 辐射加热试验件安装
Fig.12 Installation of radiation heating test pieces

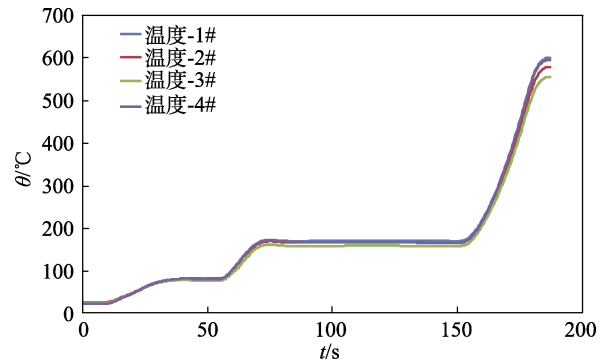


图13 热流测量装置获取的温度曲线
Fig.13 Temperature curve obtained through heat flow measurement device

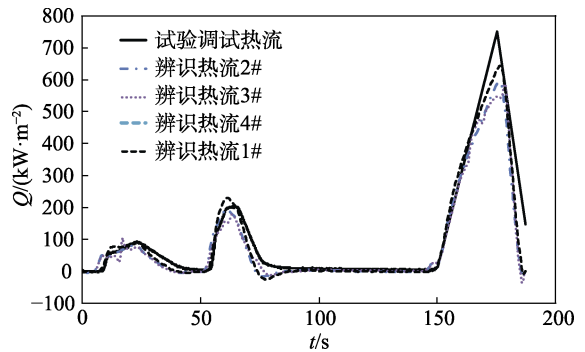


图14 辨识热流与控制热流对比
Fig.14 Identification heat flow compared with control heat flow

5 结论

文中研制了长时测量、表面可随型打磨的热流传感器, 并经过石英灯加热地面试验验证, 证明了传感器的有效性, 为后续长时、高精度热流测量提供了新的思路。

参考文献:

- [1] 尹福炎. 热流传感器及其应用概况[J]. 传感器世界, 2000(11): 7-13.
YIN Fu-yan. Heat Flow Sensor and Its Application[J]. sensor world, 2000(11): 7-13.
- [2] 高玉闪, 杜正刚, 金平, 等. 热沉式燃烧室热载分析[J]. 航空动力学报, 2010, 25(11): 2619-2624.
GAO Yu-shan, DU Zheng-gang, JIN Ping, et al. Investigation on the Heat Flux of Heat Sink Chamber[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(11): 2619-2624.
- [3] 张晓菲, 王文革. 塞式热流传感器影响因素的分析计算[J]. 宇航计测技术, 2012(2): 22-26.
ZHANG Xiao-fei, WANG Wen-ge. Analysis and Calculation of Influencing Factors on Slug-type Heat Flux Sensor[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2012(2): 22-26.
- [4] ESPOSITO A, ROSA D F. A New Concept of Heat flux Probe for the Scirocco Plasma Wind Tunnel[C]// 16th AIAA/DLR/DGLR International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. Bremen, Germany, 2009.
- [5] POURGHOLI R, ROSTAMIAN M. A Numerical Technique for Solving IHCPs Using Tikhonov Regularization Method[J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34(8): 2102-2110.
- [6] YANG F, FU C L. A Simplified Tikhonov Regularization Method for Determining the Heat Source[J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34(11): 3286-3299.
- [7] YANG F, FU C L. The Method of Simplified Tikhonov Regularization for Dealing with the Inverse Time-dependent Heat Source Problem[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2010, 60(5): 1228-1236.
- [8] BIALECKI R, DIVO E, KASSAB A. Reconstruction of Time-dependent Boundary Heat Flux by a BEM-based Inverse Algorithm[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2006, 30(9): 767-773.
- [9] 吕琪. 不适定问题的迭代正则化方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
LYU Qi. Ill-posed Problem of the Iterative Regularization Method Research[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [10] 薛齐文, 杨海天. 二阶非定常热传导反问题的多宗量辨识[J]. 计算力学学报, 2007, 24(4): 425-429.
XUE Qi-wen, YANG Hai-tian. Identification of Multi-variables of Inverse Two-order Transient Heat Conduction Problems[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, 24(4): 425-429.
- [11] 薛齐文, 杨海天, 杜秀云. 同伦正则化算法求解多宗量瞬态热传导反问题[J]. 计算物理, 2006, 23(2): 151-157.
XUE Qi-wen, YANG Hai-tian, DU Xiu-yun. An Inverse Heat Conduction Problem with Multi-variables in a Transient State with a Homotopic Regularization Method[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2006, 23(2): 151-157.
- [12] MONGIBELLO L, BIANCO N, NASO V, et al. Numerical Characterization of a Highly Concentrated Solar Radiation Sensor Based on an Inverse Method[J]. Solar Energy, 2015, 111: 407-417.