

文章编号 1004-924X(2016)07-1632-08

微膨胀型热开关热特性的参数敏感性

张旭升^{1*}, 郭亮¹, 马明朝^{1,2}, 黄勇¹, 毛阿龙¹, 吴清文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:采用参数敏感性分析法研究了微膨胀型热开关导热路径上各项不确定因素对其断开热阻、闭合热阻及开关比等关键热特性的影响。通过与性能试验的比对,验证了热开关有限元仿真热模型的正确性。基于该模型,分析了结构组件导热系数和配合面接触热导率与断开热阻、闭合热阻等热特性的关联性,并依据性能指标的绝对/相对变化量对不确定因素进行了敏感性分类。研究表明:定位杆导热系数是关于断开热阻和开关比的敏感参数,敏感性指标分别为 $6.716 \text{ m}^{0.5} \cdot \text{K}/\text{W}$ 和 $5.129 \text{ m}^{0.5} \cdot \text{K}^{0.5}/\text{W}^{0.5}$;冷端-伸缩段间接触热导率是闭合热阻的敏感参数,绝对变化量和敏感性指标分别为 $1.865 \text{ K}/\text{W}$ 和 $0.267 \text{ m} \cdot \text{K}/\text{W}$,其余配合面的接触热导率均是闭合热阻的不敏感参数;定位杆径向小面接触热导率是断开热阻和开关比的敏感参数,绝对变化量(敏感性指标)分别为 $56.495 \text{ K}/\text{W}$ ($0.307 \text{ m} \cdot \text{K}/\text{W}$)和 32.936 ($0.235 \text{ m} \cdot \text{K}^{0.5}/\text{W}^{0.5}$)。所得的结论可为优化微膨胀型热开关的结构性能提供参考与借鉴。

关键词:微膨胀型热开关;热特性;参数敏感性;不确定因素

中图分类号:TM564;V444.3+6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162407.1632

Parameter sensitivity of thermal characteristics for micro-expansion type heat switch

ZHANG Xu-sheng^{1*}, GUO Liang¹, MA Ming-chao^{1,2}, HUANG Yong¹, MAO A-long¹, WU Qing-wen¹

(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)*

* *Corresponding author, E-mail: zxs1933@126.com*

Abstract: The effects of various uncertain factors in the conduction path of a micro-expansion type heat switch on its thermal characteristics including OFF thermal resistance, ON thermal resistance and ON/OFF ratio were researched using parameter sensitivity analysis method. By comparing with the property experiment, the validity of heat switch finite element thermal model was verified. Based on the model, the relevance between thermal conductivity of structural components, thermal contact conductance of mating surfaces and OFF thermal resistance, ON thermal resistance and other thermal characteristics was analyzed. Then, the sensitivity of uncertain factors was classified by the absolute/relative variation of performance indexes. Research shows that the thermal conductivity of positioning shaft is the sensitive parameter about OFF thermal resistance and ON/OFF ratio, and the sensitivity

收稿日期:2015-11-12;修订日期:2015-12-14.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间机器人中心创新基金资助项目(No. SREC2013CX0201)

indexes are $6.716 \text{ m}^{0.5} \cdot \text{K/W}$ and $5.129 \text{ m}^{0.5} \cdot \text{K}^{0.5}/\text{W}^{0.5}$ respectively. The thermal contact conductance between cold side and disc is the sensitive parameter about ON thermal resistance, and the absolute variation and the sensitivity index are 1.865 K/W and $0.267 \text{ m} \cdot \text{K/W}$ respectively. The thermal contact conductances of other mating surfaces are the insensitive parameters about ON thermal resistance. Moreover, the shaft thermal facet-contact conductance is the sensitive parameter about OFF thermal resistance and ON/OFF ratio, and the absolute variations (sensitivity indexes) are 56.495 K/W ($0.307 \text{ m} \cdot \text{K/W}$) and 32.936 ($0.235 \text{ m} \cdot \text{K}^{0.5}/\text{W}^{0.5}$) respectively. These conclusions could provide the targeted reference for the structure-performance optimization of micro-expansion type heat switches.

Key words: micro-expansion type heat switch; thermal characteristics; parameter sensitivity; uncertain factor

1 引言

微膨胀型热开关是依靠材料热膨胀/冷收缩引起的行程差而实现导热通道闭合与断开的主动热控组件。理论上可显著提高空间热控分系统的自主调控能力和热环境适应性,实现星上能源合理分配与高效利用^[1]。但实际中,受工作性能、整体质量和运行可靠性等限制,热开关技术正处于空间飞行试验验证阶段^[2],并未在机械制冷系统多机并联、间歇式工作载荷辐冷系统设计等预定领域得到应用。面临上述问题,参数敏感性分析能够定性的预测和估算各项不确定因素对性能指标的影响程度及趋势,在削弱全系统敏感性分析复杂性的同时,也为进一步的多参数耦合敏感性分析奠定了基础。在工程技术领域,基于参数敏感性分析的最优化设计已较为普遍,如热控系统鲁棒性设计^[3-4]、支撑结构优化设计^[5-6]等。

程文龙等^[7]基于蒙特卡洛混合算法和不确定参数敏感性分析进行了地面试验模拟热控星的热模型修正,实现了仿真计算偏差不大于 $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。杨化彬等^[8]采用局部灵敏度分析法提出了广角极光成像仪高温滤光片的热设计方案,满足光学系统元件的温控指标要求。潘维等^[4]分析了小卫星全被动热控系统的整星热耗敏感性,较为全面的评估了热设计的适应性。李延伟等^[9]采用灵敏度分析法研究了对流换热系数、气动热流密度、内部热源功耗等热设计参数对航空光学遥感器透镜组件轴/径向温差的影响,获得与设计指标相关联的主/次要因素。试验表明,该方法可有效提高热控系统的设计针对性和运行可靠性。此外, H. P.

Shen 等^[10]针对影响 LED 接合点温度/热阻测量的各项因素进行了不确定性分析。C. Y. Han 等^[11]研究了卫星推进组件热控系统中接触热导率和加热片位置的参数敏感性。

本文采用参数敏感性分析法研究了微膨胀型热开关导热路径上各项不确定因素对断开热阻、闭合热阻及开关比等关键热特性的影响,依据性能指标的绝对变化量和相对变化量将不确定因素分为敏感参数和不敏感参数。对于几何结构相似、闭合/断开方式相同的微膨胀型热开关,着重针对热特性敏感环节进行结构性能优化,降低敏感参数的大权重负面影响,实现微膨胀型热开关在航天器热控技术领域的广泛工程化应用。

2 模型验证

微膨胀型热开关由热端、定位杆、伸缩段、内六角螺钉和冷端等组成,结构关系及尺寸如图 1 所示。通过伸缩段对高低温度的物理响应(热膨胀/冷收缩),实现热开关导热通道的自主闭合与断开。采用热开关性能试验验证有限元仿真热模型的正确性,在此基础上,分析评估各项不确定因素关于微膨胀型热开关热特性的参数敏感性。

2.1 性能试验

热开关性能试验装置由 $0.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温循环水冷系统、聚酰亚胺薄膜型电加热片、辐射屏蔽壳、泡沫隔热材料、铜-康铜热电偶、Agilent-N5750A 直流电源、Agilent-34970A 数据采集仪等部分组成,如图 1 所示。其中,采用薄膜型电加热片模拟与热端接触的大功率发热元器件,工作电压 U_{JP}

=14.997 V、工作电流 $I_{rp}=1.258$ A；采用0.9℃恒温循环水冷系统模拟与冷端连接的辐射冷板，温度波动幅度不大于±0.1℃；采用辐射屏蔽壳和泡沫隔热材料等措施限制试验系统的漏热量，

保证电加热有效效率不小于90%。为了验证有限元仿真热模型的正确性，在热开关的热端、伸缩段和冷端等结构外表面规划9个测温点，具体位置如图1所示。

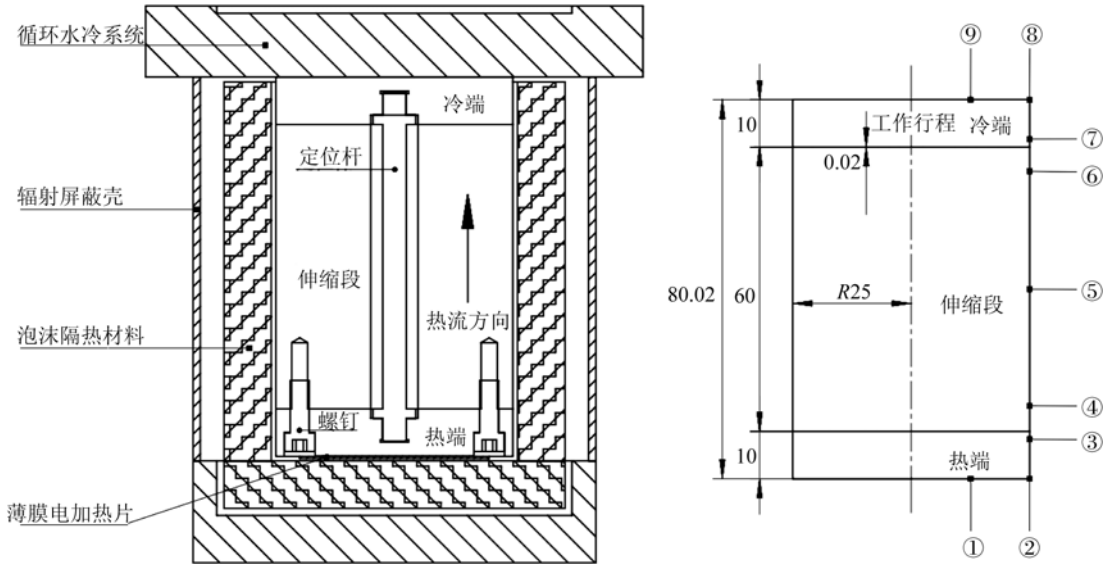


图1 微膨胀型热开关试验装置及测温点规划

Fig.1 Experimental setup and temperature measurement points of heat switch

2.2 仿真分析

热开关有限元仿真热模型如图2所示。

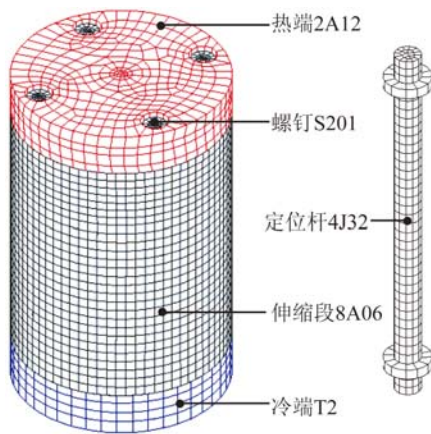


图2 微膨胀型热开关有限元热模型

Fig.2 Finite element thermal model of heat switch

其中,四边形二维平面单元7 005 个、六面体三维实体单元 17 612 个,共计 24 617 个。为了保证仿真分析与性能试验热边界条件的一致性,在热端薄膜电加热片的粘贴区域设置 17.923 W 功率(电加热有效效率为 95%)；冷端与 0.9℃恒温循环水

冷系统之间导热安装,由 Dittus-Boelter 公式计算强制对流表面传热系数约为 1 500 W/(m²·K)。在稳态热分析中,结构材料的热物性参数仅需要导热系数,如表 1 所示；配合面热耦合的接触热导率取值参见表 2 中基准值。在上述条件下,闭合热

表 1 热开关结构材料导热系数

Tab.1 Thermal conductivity of heat switch structural materials

结构名称及材料牌号	导热系数 λ [W/(m·K)]	备注
热端 铝合金-2A12	193	导热安装于大功率元器件上
内六角螺钉 不锈钢-S201	0℃→14.3 100℃→16.1	固定、连接和定位等
定位杆 钢钢-4J32	13.9	整体连接、装调、定位等
伸缩段 铝合金-8A06	236	通过热膨胀/冷收缩实现闭合/断开
冷端 紫铜-T2	398	直接/间接导热安装于辐射冷板

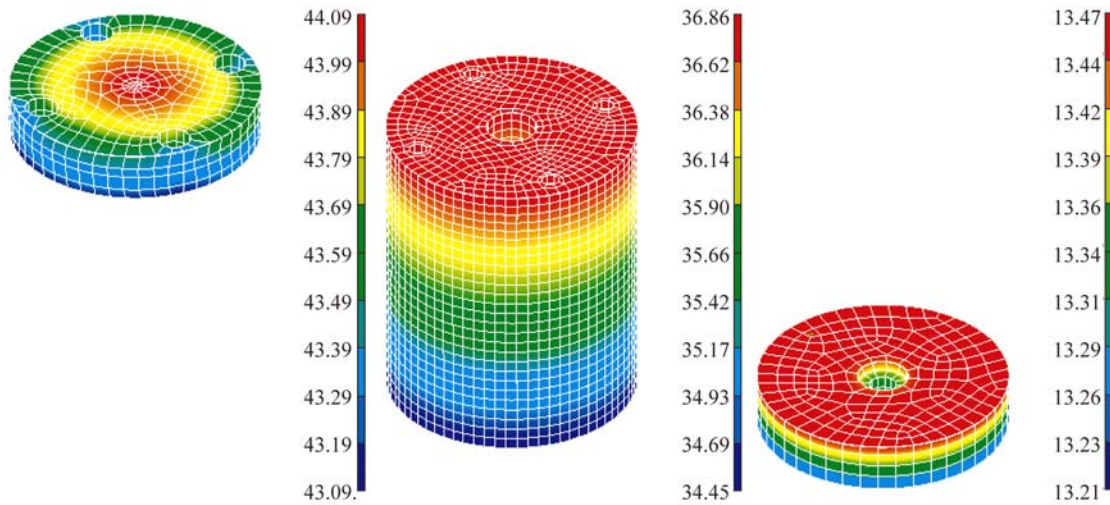


图 3 闭合热开关结构组件的稳态温度场

Fig. 3 Steady temperature field of ON heat switch structural components

开关结构组件的稳态温度场如图 3 所示,整体温度为 13.21~44.09 °C、闭合热阻 $R_{on} \approx 1.71$ K/W。

2.3 对比验证

提取与性能试验测温点位置相对应的仿真分析节点温度,如图 4 所示。其中, t_c 表示性能试验中测温点温度(°C); t_s 表示仿真分析对应位置节点温度(°C)。在仿真分析中,热开关温度的整体变化趋势与性能试验完全相同,呈近似阶梯式下降;编号 1~9 测温点的绝对温度大小与性能试验基本保持一致,最大温度差异不大于 2.25 °C。无论是热量传递规律还是绝对温度大小,性能试验均充分验证了有限元仿真热模型的正确性,为下一步不确定因素的参数敏感性分析提供了保障。

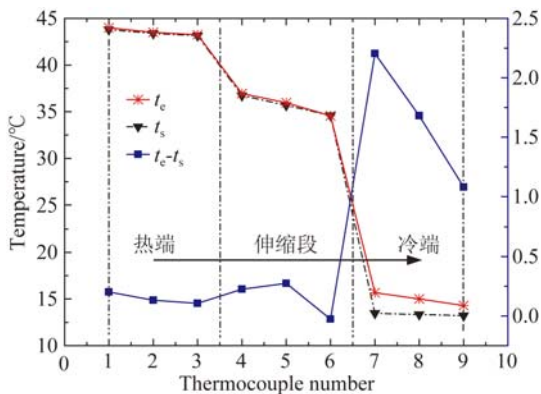


图 4 热开关仿真与试验测温点温度对比

Fig. 4 Temperature comparison between simulation and experiment of heat switch

3 参数敏感性分析

在参数敏感性分析过程中,首先需要确定相关不确定因素和关联性能指标,即:材料导热系数 λ 、配合面接触热导率 h_c 和闭合热阻 R_{on} 、断开热阻 R_{off} 等。其中,各项不确定因素的基准值和取值范围如表 2 所示。

热关闭合热阻 R_{on} 和开关比 γ 分别为:

$$R_{on} = \frac{T_h - T_c}{P_{jrp} \eta_h}, \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{R_{off}}{R_{on}}. \quad (2)$$

式中: T_h 为热端端面平均温度; T_c 为冷端端面平均温度; P_{jrp} 为电加热片功率; η_h 为电加热有效效率;断开热阻 R_{off} 的计算式与闭合热阻类似。为了进行不确定因素的敏感性分类,定义敏感性指标 χ 为性能指标变化量与不确定因素变化量比值的算术平方根:

$$\chi(x) = \sqrt{\left| \frac{R(x_{n+1}) - R(x_n)}{x_{n+1} - x_n} \right|} = \sqrt{\left| \frac{\Delta R}{\Delta x} \right|}, \quad (3)$$

式中: ΔR 为性能指标变化量; Δx 为不确定因素变化量。

表 2 不确定因素的基准值和取值范围

Tab. 2 Reference value and value range of uncertain factors

不确定因素	导热系数 λ [W/(m · K)]		接触热导率 h_c [W/(m ² · K)]			
	伸缩段	定位杆	热端-伸缩段	冷端-伸缩段	热/冷端-定位杆 (径向小面)	热/冷端-定位杆 (轴向螺纹)
基准值	236	13.9	1 500	450	1 000	50
取值范围	150~300	8~20	1 000~2 000	200~700	500~2 000	10~90
间隔	25	2	100	50	250	20

3.1 导热系数

导热系数是衡量材料热传导能力优劣的热物理参数^[12],直接通过自身导热热阻影响热开关的热特性。结合热开关结构特点,着重分析伸缩段和定位杆的导热系数对闭合热阻 R_{on} 、断开热阻 R_{off} 及开关比 γ 的影响,如图 5、图 6 所示。

由图 5 可知,在伸缩段和定位杆导热系数取值范围内,闭合热阻的绝对变化量分别为 0.105 K/W 和 0.007 25 K/W、敏感性指标分别为 $0.034 7 m^{0.5} \cdot K/W$ 和 $0.029 0 m^{0.5} \cdot K/W$ 。可见,无论伸缩段还是定位杆,导热系数均是关于闭合热阻的不敏感参数,但伸缩段导热系数的敏感性略强。

由图 6 可知,在定位杆导热系数取值范围内,断开热阻和开关比的绝对变化量分别为 270.645 K/W 和 157.818、敏感性指标分别为 $6.716 m^{0.5} \cdot K/W$ 和 $5.129 m^{0.5} \cdot K^{0.5}/W^{0.5}$,故定位杆导热系数是关于断开热阻和开关比的敏感参数,而伸缩段导热系数为不敏感参数。

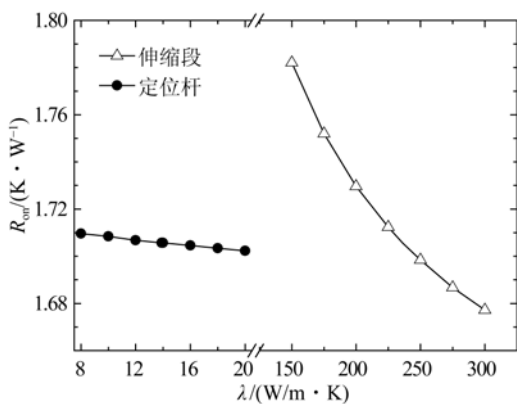


图 5 闭合热阻对导热系数的参数敏感性

Fig. 5 Parameter sensitivity to thermal conductivity of ON thermal resistance

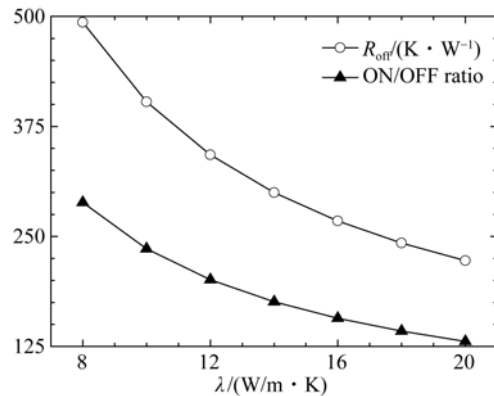


图 6 断开热阻/开关比对导热系数的参数敏感性

Fig. 6 Parameter sensitivity to thermal conductivity of OFF thermal resistance and ON/OFF ratio

3.2 接触热导率

接触面间微观离散性引起的附加热传递阻力称为接触热阻^[12],其与接触区域的表面粗糙度、压力、硬度、温度等因素有关,且具有强烈的非均匀性和随机性^[13]。因此,暂未获得通用的计算公式或辨识方法,仅能针对具体情况进行实验测定或依据工程经验给出粗略数值^[14-15]。与对流换热相类似,接触热阻的实际传热效果采用接触热导率 h_c 评价,单位为 $W/(m^2 \cdot K)$,将依次分析不同配合面的接触热导率对闭合热阻 R_{on} 、断开热阻 R_{off} 及开关比 γ 的影响。

图 7 所示为伸缩段-螺钉、冷/热端-定位杆间的轴向螺纹接触热导率对闭合热阻的影响。图 8 所示为热端-螺钉、冷/热端-定位杆间的径向小面接触热导率对闭合热阻的影响。在接触热导率取值范围内,闭合热阻的最大绝对变化量和最大敏感性指标仅为 $0.001 71 K/W$ 和 $0.005 29 m \cdot K/W$,均处于 10^{-3} 量级。因此,上述 4 处接触热导率均是关于闭合热阻的不敏感参数。

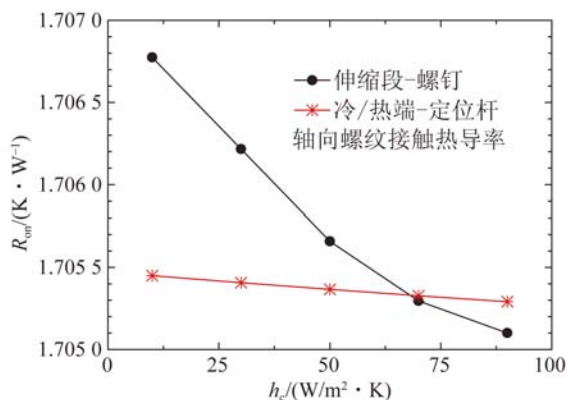


图 7 闭合热阻对螺纹接触热导率的参数敏感性

Fig. 7 Parameter sensitivity to thermal thread-contact conductance of ON thermal resistance

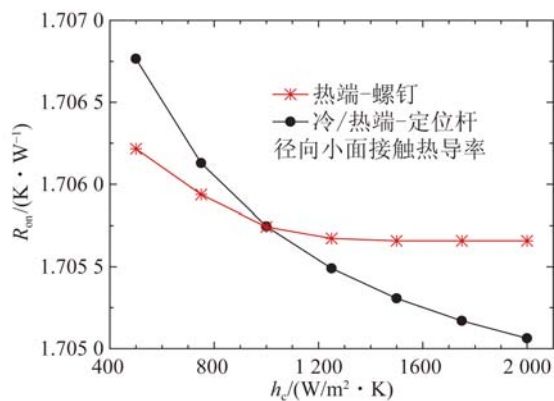


图 8 闭合热阻对小面接触热导率的参数敏感性

Fig. 8 Parameter sensitivity to thermal facet-contact conductance of ON thermal resistance

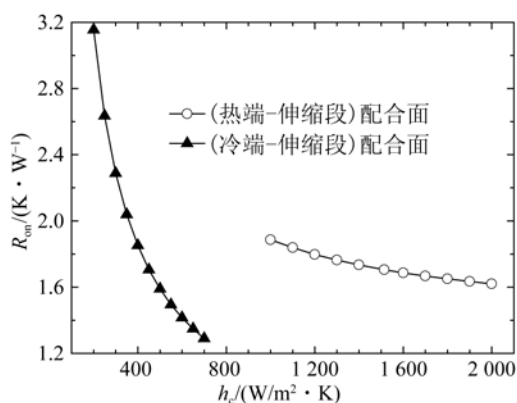


图 9 闭合热阻对伸缩段接触热导率的参数敏感性

Fig. 9 Parameter sensitivity to disc thermal contact conductance of ON thermal resistance

图 9 所示为冷/热端-伸缩段间的圆环面接触热导率对闭合热阻的影响。冷端-伸缩段间接触热

导率所引起的闭合热阻绝对变化量和敏感性指标分别为 1.865 K/W 和 0.267 m·K/W;热端-伸缩段间接触热导率所引起的闭合热阻绝对变化量和敏感性指标分别为 0.102 K/W 和 0.021 9 m·K/W。可见,冷端-伸缩段间接触热导率是关于闭合热阻的敏感参数、而热端-伸缩段间接触热导率为不敏感参数。

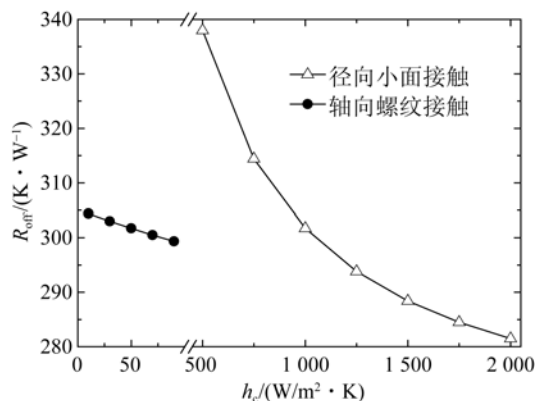


图 10 断开热阻对定位杆接触热导率的参数敏感性

Fig. 10 Parameter sensitivity to shaft thermal contact conductance of OFF thermal resistance

图 10 所示为定位杆轴向螺纹和径向小面的接触热导率对断开热阻的影响。轴向螺纹接触热导率所引起的断开热阻绝对变化量和敏感性指标分别为 5.027 K/W 和 0.262 m·K/W;径向小面接触热导率所引起的断开热阻绝对变化量和敏感性指标分别为 56.495 K/W 和 0.307 m·K/W。因此,径向小面接触热导率是关于断开热阻的敏感参数,而轴向螺纹接触热导率为不敏感参数。同样,对于开关比 γ ,径向小面接触热导率的敏感性仍远强于轴向螺纹接触热导率,绝对变化量和敏感性指标分别达到 32.936 和 0.235 m·K^{0.5}/W^{0.5}。

4 结 论

本文通过与微膨胀型热开关性能试验的对比,验证了有限元仿真热模型的正确性。基于该模型,采用参数敏感性分析法研究了热开关导热路径上导热系数、接触热导率等不确定因素对断开热阻、闭合热阻及开关比等关键热特性的影响,并依据性能指标的绝对变化量和相对变化量对不确定因素进行了敏感性分类。

仿真分析中,热开关温度的整体变化趋势与性能试验完全相同,呈近似阶梯式下降,各测温点的绝对温度大小与性能试验基本保持一致,最大温度差异不大于 $2.25\text{ }^{\circ}\text{C}$;伸缩段和定位杆的导热系数是关于闭合热阻的不敏感参数,定位杆导热系数是关于断开热阻和开关比的敏感参数,敏感性指标分别为 $6.716\text{ m}^{0.5}\cdot\text{K}/\text{W}$ 和 $5.129\text{ m}^{0.5}\cdot\text{K}^{0.5}/\text{W}^{0.5}$;冷端-伸缩段间接触热导率是关于闭合

热阻的敏感参数,绝对变化量和敏感性指标分别为 $1.865\text{ K}/\text{W}$ 和 $0.267\text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$,其余配合面的接触热导率均是关于闭合热阻的不敏感参数;定位杆径向小面接触热导率是关于断开热阻和开关比的敏感参数,绝对变化量(敏感性指标)分别为 $56.495\text{ K}/\text{W}$ ($0.307\text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$) 和 32.936 ($0.235\text{ m}\cdot\text{K}^{0.5}/\text{W}^{0.5}$),而轴向螺纹接触热导率是关于断开热阻和开关比的不敏感参数。

参考文献:

- [1] HENGEVELD D W, MATHISON M M, BRAUN J E, *et al.*. Review of modern spacecraft thermal control technologies [J]. *HVAC&R Research*, 2010,16(2):189-220.
- [2] 李春林. 空间光学遥感器热控技术研究[J]. *宇航学报*, 2014,35(8):863-870.
LI CH L. Research on space optical remote sensor thermal control technique [J]. *Journal of Astronautics*, 2014,35(8):863-870. (in Chinese)
- [3] 韩冬,吴清文,卢镔,等. 多姿态变化相机中 CCD 焦面组件的热设计[J]. *光学精密工程*, 2009,17(11):2665-2671.
HAN D, WU Q W, LU E, *et al.*. Thermal design of CCD focal plane assemblies for attitude-varied space cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(11):2665-2671. (in Chinese)
- [4] 潘维,赵欣. 小卫星全被动热设计及其验证技术[J]. *航天器工程*, 2014,23(4):46-51.
PAN W, ZHAO X. Complete passive thermal design and its verification for small satellite [J]. *Spacecraft Engineering*, 2014,23(4):46-51. (in Chinese)
- [5] 辛宏伟,杨近松,高明辉,等. 高分辨率空间遥感器次镜支撑设计[J]. *红外与激光工程*, 2011,40(9):1724-1729.
XIN H W, YANG J S, GAO M H, *et al.*. Support design for secondary mirror of high resolution space telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011,40(9):1724-1729. (in Chinese)
- [6] 汪宝旭,伍凡,蒋世磊,等. 卡式红外光学系统光机分析及结构优化[J]. *红外与激光工程*, 2012,41(7):1872-1778.
WANG B X, WU F, JIANG SH L, *et al.*. Optomechanical analysis and structure optimization of infrared cassegrain optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012,41(7):1872-1778. (in Chinese)
- [7] 程文龙,刘娜,李志,等. 卫星热模型蒙特卡罗混合算法的修正方法应用研究[J]. *科学通报*, 2010,55(20):2056-2061.
CHENG W L, LIU N, LI ZH, *et al.*. Application study of a correction method for a spacecraft thermal model with a monte-carlo hybrid algorithm [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010,55(20):2056-2061. (in Chinese)
- [8] 杨化彬,陈立恒,李义,等. 广角极光成像仪滤光片的热设计及试验[J]. *光学精密工程*, 2014,22(11):3019-3027.
YANG H B, CHEN L H, LI Y, *et al.*. Thermal design and verification of transmission filter for wide angle aurora imager [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014,22(11):3019-3027. (in Chinese)
- [9] 李延伟,张洪文,郑丽娜,等. 高空光学遥感器热设计参数的灵敏度分析[J]. *红外与激光工程*, 2015,44(2):572-577.
LI Y W, ZHANG H W, ZHENG L N, *et al.*. Sensitivity analysis of thermal design parameters for altitude optical sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015,44(2):572-577. (in Chinese)
- [10] SHEN H P, ZHOU X L, ZHANG W L, *et al.*. Uncertainty analysis in measurement for LED junction temperature and thermal resistance [C]. *Proc. of SPIE*, 2010,7544(6J):1-6.
- [11] HAN C Y, YOU J H, LEE K H, *et al.*. Sensitivity analyses of satellite propulsion components with their thermal modelling [J]. *Advances in Space Research*, 2011,47:466-479.
- [12] 杨世铭,陶文铨. *传热学(第四版)* [M]. 北京:高等教育出版社,2006.
YANG SH M, TAO W Q. *Heat Transfer (Fourth Edition)* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [13] GILL J, DIVO E, KASSAB A J. Estimating thermal contact resistance using sensitivity analysis and

regularization [J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2009, 33: 54-62.

- [14] 石友安, 桂业伟, 杜雁霞, 等. 相变材料热控系统内部接触热阻的辨识方法研究[J]. *实验流体力学*, 2012, 26(4): 54-58.

SHI Y A, GUI Y W, DU Y X, *et al.*. Study on thermal contact resistance estimation in the phase-

change material thermal control device [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2012, 26(4): 54-58. (in Chinese)

- [15] SHOJAEEFARD M H, MAZIDI M S, MOUSAPOUR V K. The estimation of time-varying thermal contact conductance between two fixed contacting surfaces [J]. *Mechanika*, 2013, 19(2): 167-171.

作者简介:



张旭升(1988—),男,黑龙江讷河人,硕士,助理研究员,2013年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事红外热辐射传输、航天器热控技术等方面研究。
E-mail: zxs1933@126.com



郭亮(1982—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,副研究员,2006年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2013年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事传热传质学、空间机构环境适应性、空间光学遥感器热控技术等方面研究。
E-mail: guoliang329@hotmail.com

(版权所有 未经许可 不得转载)