

文章编号 1004-924X(2016)10-2442-07

微米行程微膨胀型热开关热特性的仿真与试验

张旭升^{1*}, 郭亮¹, 贾卓杭¹, 马明朝^{1,2}, 李义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: 为了提高空间热控分系统的散热调节能力和热环境适应性, 设计了一种微米行程的微膨胀型热开关。介绍了热开关的结构组成和工作原理, 通过理论—仿真—试验相结合的方式, 计算评估了热开关的断开热阻、闭合热阻和开关比等关键热特性。依据热阻网络串并联关系计算热开关的理论特性, 断开热阻为 301.71 K/W, 闭合热阻为 1.06 K/W, 开关比约为 283.6。基于有限元模型分析热开关断开/闭合过程的瞬态热特性, 热端发热功率为 18 W 时, 热开关闭合响应时间为 340 s, 触发温度为 35.5 °C, 闭合热阻约为 2.3 K/W。在 2 次热开关性能测试试验中, 闭合热阻和开关比分别为 1.08 K/W、279.4 和 1.67 K/W、180.7, 试验数据与理论计算高度一致。同时指出: 装配调试过程的不确定性会造成微膨胀型热开关宏观热特性的小区域波动。本文工作可为后续微膨胀型热开关的结构优化设计、机械加工细化和装调方式改进提供参考。

关键词: 微膨胀型热开关; 热特性; 仿真与试验; 断开热阻; 闭合热阻

中图分类号: V444.36; TK124 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162410.2442

Simulation and experiment of thermal properties for micro-expansion type heat switch with micron stroke

ZHANG Xu-sheng^{1*}, GUO Liang¹, JIA Zhuo-hang¹, MA Ming-chao^{1,2}, LI Yi¹, 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: To improve the heat-dissipation regulation capability and thermal environment adaptability of space thermal control subsystem, a micro-expansion type heat switch with micron stroke was designed. The structural components and operating principle of the switch were introduced, and the key thermal properties of heat switch, including OFF resistance, ON resistance and ON/OFF ratio, were evaluated by combination of theory, simulation and experiments. Theoretical thermal properties of heat switch is calculated based on the series-parallel relationship of thermal resistances, the OFF resistance and ON resistance are 301.71 K/W and 1.06 K/W, respectively, the ON/OFF ratio is about 283.6. Transient thermal properties of the OFF/ON process was analyzed by the finite element model, when the heating power of hot end is 18 W, the turn-ON

收稿日期: 2016-02-05; 修订日期: 2016-03-17.

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. SRCX2013001)

response time and triggering temperature are 340 s and 35.5 °C, and the ON resistance is about 2.3 K/W. Moreover, in the twice property experiments, the ON resistance and ON/OFF ratio are 1.08 K/W, 279.4 and 1.67 K/W, 180.7 respectively, and experimental data is in agreement with the theoretical calculations well. The experimental results point out that the uncertainty of assembly-regulation process would cause small interval fluctuations of macro thermal properties of the heat switch, The conclusions could provide references for structural optimization design, machining refinement and assembly-regulation improvement of subsequent micro-expansion type heat switches.

Key words: micro-expansion type heat switch; thermal property; simulation and experiment; ON resistance; OFF resistance

1 引言

在深空探测领域,热控分系统面临大功率散热、小功率保温以及返回高温隔热等不同阶段的任务需求^[1]。若以常规热控技术思路进行设计,会造成小功率保温能力不足或高温补偿功耗能量过大等系统缺陷^[2]。在微小卫星领域,频繁的姿态调整、轨道变换和工作模式切换会造成系统内外热环境的急剧变化^[3],这就要求热控分系统做出快速响应和精准反馈,以维持卫星及其有效载荷的在轨温度稳定性。因此,研制具有散热调节能力和热环境适应性的主动热控部件成为空间热物理领域的发展趋势。热开关技术依据不同工作原理实现闭合小热阻散热、断开大热阻保温等自动调控功能,是解决上述问题简单可靠的措施。

王美芬等^[4]研制了一种长度为 20~40 mm 的低温微膨胀型热开关,试验闭合热阻不大于 1.1 K/W、断开热阻不小于 1 400 K/W,并通过开关循环试验测试了热开关的可靠性。张文千^[5]基于感温驱动件-形状记忆合金弹簧设计了一种直径为 23 mm、长度为 32 mm、质量为 100 g 的记忆合金热开关,理论闭合热阻为 2.7 K/W、断开热阻不小于 352.6 K/W。付立英等^[6]研制了应用于机械制冷系统的微膨胀双向移位型热开关,试验闭合热阻为 0.96 K/W、断开热阻为 527 K/W。韩冬等^[7]针对多姿态空间相机焦面组件,设计了以热开关为核心部件的双向辐冷散热系统,显著提高了低温焦面组件的温度稳定性。F. H. Milanez 等^[8]设计了一种空间微膨胀型双金属热开关,采用无量纲法分析了接触热导、结构参数与闭合/断开热阻的关系,所得理论计算结果与原理样机试验数据基本一致。D. Bugby 等^[9,10]研制

了一种以聚合物-高纯铝为基材的超低温热开关原理样机,在 35 K 时试验闭合热阻为 1.2 K/W、断开热阻为 1 400 K/W,预计将应用于詹姆斯-韦伯空间望远镜低温制冷系统中。M. Dietrich 等^[11]开发了应用于 100 K 焦面组件制冷的微膨胀型热开关,研究了材料属性及其退化对热开关性能的影响。此外,国内外多名学者^[12~14]也较为全面的概括总结了空间制冷领域热开关的研究现状和发展趋势。

与其他类型相比,微膨胀型热开关具备结构简单可靠、综合性能优越、自动触发闭合/断开、热二极管特性、无装置密封性要求等优势^[13,15],同时能够实现振动的抑制和隔离^[9]。本文设计了一种微米行程的微膨胀型热开关,介绍了热开关的结构组成和工作原理,通过理论-仿真-试验相结合的方式,计算评估了断开热阻、闭合热阻和开关比等关键热特性,为后续微膨胀型热开关的结构优化设计、机械加工细化和装调方法改进提供参考借鉴,以期实现热开关技术的广泛工程化应用。

2 物理模型

最初,微膨胀型热开关由于质量大、性能差等缺点而未能应用于空间热控分系统中^[15]。因此,针对热开关结构和性能提出如下要求:整体尺寸和重量不宜过大、开关响应时间不宜过长、闭合/断开配合面保持平整光滑、闭合小热阻散热/断开大热阻保温等。基于以上要求,设计了一种由热端、伸缩段、定位杆、冷端和内六角螺钉等组成的微米行程微膨胀型热开关,如图 1 所示。工作行程 $\delta=20 \mu\text{m}$ 、闭合长度 $l=80.02 \text{ mm}$ 、半径 $R=25 \text{ mm}$ 、质量 $m=550 \text{ g}$ 。其中,热开关零部件的材料热物理属性如表 1 所示。

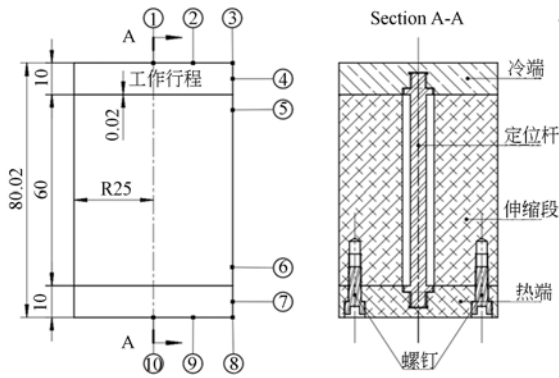


图 1 微米行程微膨胀型热开关结构组成

Fig. 1 Structural components of micron stroke micro-expansion type heat switch

微膨胀型热开关通过调控导热路径来实现热量的排散与隔离。当与热端连接的元器件处于工作状态时,热量通过热端传递到伸缩段和定位杆,温升引起的累积热膨胀长度大于工作行程时,伸缩段与冷端的配合面充分接触,热开关小热阻闭合散热通道开启,并经过冷端由辐射器向外界散热,以维持元器件工作温度小于温控指标上限;当元器件处于非工作状态时,辐射器散热导致伸缩段温度逐渐下降,累积冷收缩长度大于 0 时,热开关切换到大热阻断开保温通道,从而保证元器件非工作温度不宜过低、大于温控指标下限。即:理论上,微膨胀型热开关能够根据热控任务需求,实现在轨控温模式的自动可逆调控。

表 1 微膨胀型热开关材料热物理属性

Tab. 1 Material thermo-physical properties of micro-expansion type heat switch

材料名称及 牌号	密度 ρ [kg/m ³]	导热系数 λ [W/(m·K)]	比热容 c [J/(kg·K)]	备注
热端 铝合金-2A12	2 780	193	921	导热安装于发 热元器件表面
伸缩段 铝合金-8A06	2 710	236	902	通过热膨胀/冷 收缩实现闭/断
定位杆 钢-4J32	8 180	13.9	460	整体连接、装 调、定位等
冷端 紫铜-T2	8 930	398	386	直/间接导热安 装于辐射器上
内六角螺钉 不锈钢-201	7 830	0℃→14.3 100℃→16.1	460	固定、连接和 定位等

3 理论计算与仿真分析

3.1 理论计算

若忽略微膨胀型热开关的径向导热、仅考虑热量的轴向传递,可将其简化为无内热源的一维稳态导热问题。此时,热开关闭合/断开热阻网络如图 2 所示。根据热阻串并联关系,热开关的断开热阻 R_{off} 、闭合热阻 R_{on} 和开关比 γ 的计算式为:

$$R_{off} = R_{m,c1} + (R_{c,s-c} + R_{m,s} + R_{c,s-h}) + R_{m,h1}, \quad (1)$$

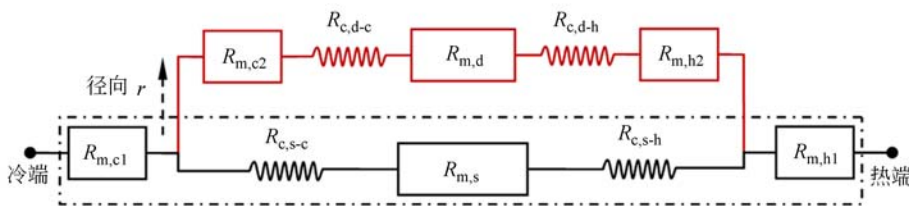


图 2 微膨胀型热开关闭合/断开热阻网络

Fig. 2 ON/OFF resistance network of micro-expansion type heat switch

$$R_{on} = R_{m,c1} + \frac{R_{c,s-c} + R_{m,s} + R_{c,s-h}}{R_{c,s-c} + R_{m,s} + R_{c,s-h} + R_{m,c2} + R_{c,d-c} + R_{m,d} + R_{c,d-h} + R_{m,h2}} + R_{m,h1} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{R_{off}}{R_{on}}, \quad (3)$$

式中:第一下标 m 为材料自身导热热阻;第一下标 c 为安装面接触热阻;第二下标 h 为热端;第二下标 d 为伸缩段;第二下标 s 为定位杆;第二下标 c 为冷端。如: $R_{c,s-h}$ 表示热端与定位杆螺纹连接

的接触热阻, K/W。文献[8]指出,螺纹接触热阻对微膨胀型热开关性能影响微弱,故螺纹接触表面换热系数近似取 $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。结合结构尺寸和材料热物理属性,即可计算热开关闭合/断开导热路径上各个环节的热阻,如表 2 所示。将表 2 数据代入式(1)~(3)得出:理论计算中,热开关

断开热阻 $R_{off} = 301.713\ 93\ \text{K/W}$ 、闭合热阻 $R_{on} = 1.063\ 76\ \text{K/W}$, 开关比 $\gamma \approx 283.6$ 。与文献[4]、[9]对比发现,闭合热阻已处于同一数量级,但断

开热阻明显偏小导致开关比较低。因此,有待进一步开展定位杆结构优化设计等增大断开热阻方面的研究。

表 2 热开关闭合/断开导热路径上的热阻

Tab.2 Resistances in the ON/OFF conduction path of heat switch

$R_{m,cl}$	$R_{e,s-c}$ $R_{e,s-h}$	$R_{m,s}$	$R_{m,e2}$	$R_{c,d-c}$	$R_{m,d}$	$R_{c,d-h}$	$R_{m,h2}$	$R_{m,h1}$
0.0038 4	21.045 28	259.611 04	0.009 13	0.530 52	0.135 50	0.360 00	0.019 96	0.008 49

3.2 仿真分析

采用 Ideas/TMG 建立微膨胀型热开关的有限元模型,如图 3 所示。其中,壳单元为 6 648 个、六面体单元为 17 612 个,共计 24 260 个。热端接收来自于发热元器件的功耗为 18 W,工作时间为 3 600~9 000 s;冷端导热安装于 0.9 °C 低温循环水冷系统冷却面上,表面换热系数 h_c 取 1 500 W/(m² · K)。计算总时间为 10 800 s、时间步长 Δt 为 5 s。

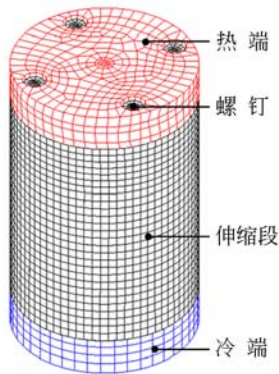


图 3 微膨胀型热开关有限元模型

Fig. 3 Finite element model of micro-expansion type heat switch

在 $t=9\ 000\ \text{s}$ 时,闭合热开关各部分温度场已达到稳定状态,如图 4 所示,伸缩段稳定温度场为 44.65~47.07 °C,且其轴向温度梯度远大于径向和周向,进一步说明理论计算中将热开关简化为一维导热稳态模型的合理性。此时,热端、定位杆和冷端的稳定温度场分别处于 53.27~54.28 °C、16.44~50.72 °C 和 13.21~13.47 °C。

图 5 中给出了 3 个关键位置的时域温度变化,分别位于热端端面、伸缩段与冷端的 2 个配合面上。在 0~3 600 s 时,低温循环水冷系统(低温冷源)引起热开关各部分温度降低,由于热开关处

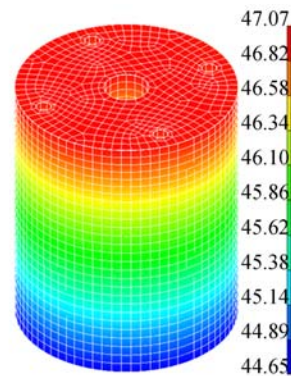


图 4 闭合热开关伸缩段稳定温度场

Fig. 4 Disc steady temperature field of ON heat switch

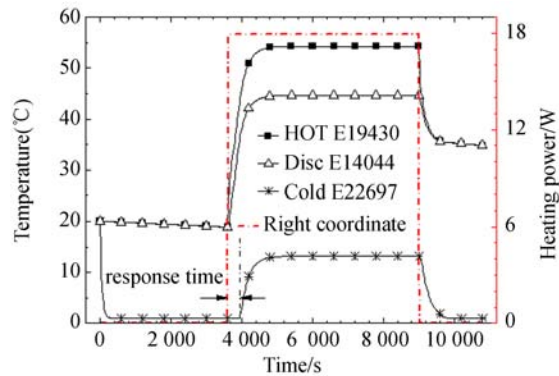


图 5 热开关关键位置的时域温度曲线

Fig. 5 Temporal temperature curves in the key positions of heat switch

于断开大热阻保温状态,故热端和伸缩段的温降斜率微小、冷端温降斜率较大;在 3 600~3 940 s 时,元器件发热功耗导致热端和伸缩段的温度快速升高,冷端温度基本保持不变;在 $t=3\ 940\ \text{s}$ 时,热开关切换到闭合小热阻散热通道,引起冷端温度大幅度升高、热端和伸缩段的温升斜率逐渐减小;在 $t=5\ 000\ \text{s}$ 时,热开关各部分温度场达到稳定热平衡状态,此时冷热端自由面平均温度分

别为 13.23 °C 和 53.99 °C, 仿真闭合热阻 $R_{on} \approx 2.3 \text{ K/W}$ 。

4 性能试验

4.1 试验装置

试验装置由低温循环水冷系统、辐射屏蔽壳、泡沫隔热材料、微膨胀型热开关、T 型热电偶、单层双回路薄膜电加热片、Agilent 数据采集仪、直流电源等组成, 如图 6 所示。采用 GD414 硅橡胶黏贴电加热片的方式模拟与热端接触的大功耗热源, 加热片半径 $r_{jp} = 20 \text{ mm}$ 、电阻 $R_{jp} = 5.915 \Omega$, 加热片中心与热端黏贴面中心重合; 采用低温循环水冷系统模拟与冷端接触的低温冷源, 水温控制在 0.9 °C 附近。图 7 中给出装调微膨胀型热开关、黏贴加热片和热电偶、包覆泡沫隔热材料和安装辐射屏蔽壳等热实施过程, 并根据试验需要规划了 10 个测温点, 如图 1 所示。

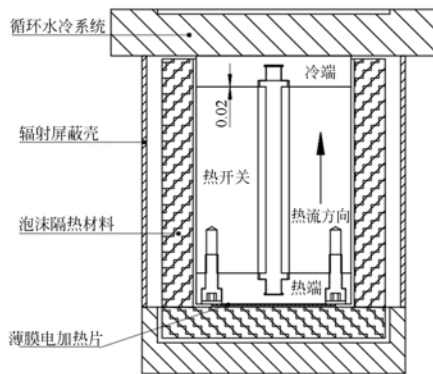


图 6 微膨胀型热开关试验装置示意图

Fig. 6 Experimental setup sketch of micro-expansion type heat switch

4.2 数据处理

在工作温度为 20 °C、相对湿度为 56% 的环境下, 分别对同一热开关进行多次装配、调试与试验, 选取其中 2 次试验的热开关测温点时域温度进行分析计算, 如图 8 和图 9 所示。在试验热阻计算中, 冷热端温度分别取 3 个径向测温点的算术平均值:

$$\bar{t}_c = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}, \quad (4)$$

$$\bar{t}_h = \frac{t_8 + t_9 + t_{10}}{3}, \quad (5)$$

$$R_{on} = \frac{\bar{t}_h - \bar{t}_c}{P_{jp}}, \quad (6)$$

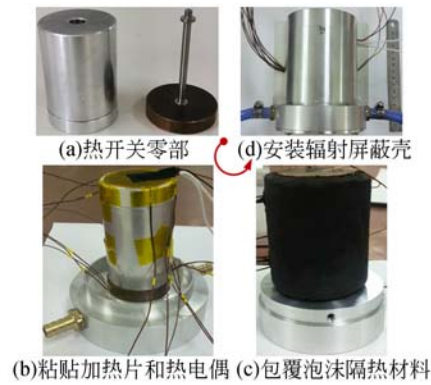


图 7 微膨胀型热开关热实施过程

Fig. 7 Thermal implementation process of micro-expansion type heat switch

式中: \bar{t}_c 为试验中冷端平均温度; \bar{t}_h 为试验中热端平均温度; P_{jp} 为加热片电加热功率。

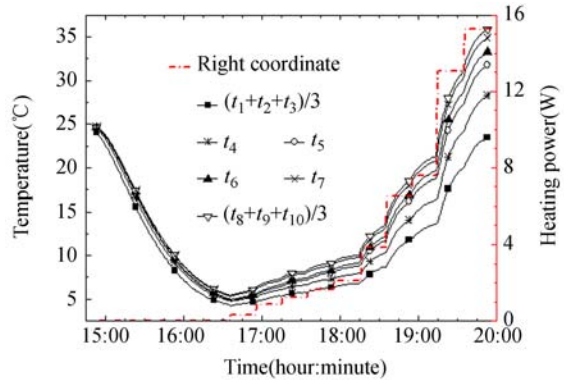


图 8 试验 I 测温点时域温度曲线

Fig. 8 Temporal temperature curves of experiment I

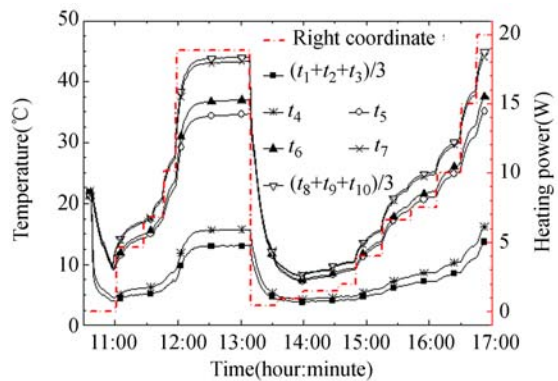


图 9 试验 II 测温点时域温度曲线

Fig. 9 Temporal temperature curves of experiment II

基于试验数据 I、II, 计算热开关闭合热阻分别为 1.08 K/W 和 1.67 K/W、对应开关比达到 279.4 和 180.7。可见, 装配调试过程对微膨胀型

热开关的宏观热特性影响强烈,微小的工作行程差异可引起配合面接触压力的剧烈变化,进而通过配合面接触导热影响热开关的闭合热阻、开关比等热特性,即:装配调试过程的不确定性会造成热开关宏观热特性的小区域波动。试验数据 I 与理论计算达到高度一致,但两者均与仿真分析存在一定差异,主要由于在热-结构耦合过程中,配合面接触热阻计算模型与实际物理模型存在偏差造成的。

5 结 论

本文设计了一种微米行程的微膨胀型热开关,介绍了热开关的结构组成和工作原理。通过理论-仿真-试验相结合的方式,计算评估了热开关的断开热阻、闭合热阻和开关比等关键热特性。

参考文献:

- [1] 宁献文,苏生,陈阳,等.月地高速再入返回器热控设计及实现[J].中国科学:技术科学,2015,45(2):145-150.
NING X W, SU SH, CHEN Y, *et al.*. Design and implementation of circumlunar return and reentry spacecraft thermal control system [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2015, 45(2): 145-150. (in Chinese)
- [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] 王熙元,陈学康,曹生珠,等.卫星静电热开关辐射散热器热性能分析[J].真空与低温,2009,15(1):25-29.
WANG X Y, CHEN X K, CAO SH ZH, *et al.*. Thermal performance analysis of electrostatic switched radiator for satellite [J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2009, 15(1): 25-29. (in Chinese)
- [4] 王美芬,闫涛,洪国筒,等.微膨胀型低温热开关研究[J].低温工程,2006,(2):54-57.
WANG M F, YAN T, HONG G T, *et al.*. Experimental research on a practical cryogenic heat switch [J]. *Cryogenics*, 2006, (2): 54-57. (in Chinese)
- [5] 张文千.航天器用记忆金属热开关的设计与理论分

所得结论如下:

依据热阻网络串并联关系计算了热开关的理论热特性,断开热阻为 301.71 K/W、闭合热阻为 1.06 K/W,开关比约为 283.6;基于有限元模型分析了热开关断开/闭合过程的瞬态热特性,热端发热功率为 18 W 时,热开关闭合响应时间为 340 s、触发温度为 35.5 °C、闭合热阻约为 2.3 K/W;在 2 次热开关性能测试实验中,闭合热阻和开关比分别为 1.08 K/W、279.4 和 1.67 K/W、180.7,试验数据与理论计算高度一致;装配调试过程的不确定性会造成微膨胀型热开关宏观热特性的小区域波动。

后续研究中,将进一步提高配合面的表面平整度和定位杆机械加工精度,改进并优化热开关的装配调试方法,以实现闭合配合面的高压均接触。

析[J].真空与低温,2009,15(1):41-44.

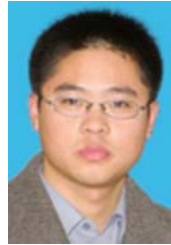
- ZHANG W Q. Design and theoretical analyzes of shape memory alloy heat switch for spaceflight [J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2009, 15(1): 41-44. (in Chinese)
- [6] 付立英,何兴伟.微膨胀双向移位型热开关研究[C].第九届全国低温工程大会,2009,108-110.
FU L Y, HE X W. Research on the thermal expansion switch of double displacement [C]. *The 9th National Cryogenic Engineering Conference*, 2009, 108-110. (in Chinese)
- [7] 韩冬,吴清文,卢铿,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)
- [8] MILANEZ F H, MANTELLI M B H. Theoretical and experimental studies of a bi-metallic heat switch for space applications [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46: 4573-4586.
- [9] BUGBY D, MARLAND B, STOUFFER C, *et al.*. Advanced components and techniques for cryogenic integration [C]. *AIAA-41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2003, 344: 1-12.
- [10] BUGBY D, BERES M, STOUFFER C, *et al.*. Advanced cryogenic thermal switches for JWST [C].

- Proc. of SPIE*, 2005, 5904F:1-7.
- [11] DIETRICH M, EULER A, THUMMES G. A compact thermal heat switch for cryogenic space applications operating near 100 K [J]. *Cryogenics*, 2014, 59:70-75.
- [12] 张利, 何兴伟, 黄志光, 等. 空间低温热开关技术的研究进展[J]. *红外*, 2008, 29(7):15-19.
ZHANG L, HE X W, HUANG ZH G, *et al.*. State-of-arts of space-borne cryogenic thermal switches [J]. *Infrared*, 2008, 29(7):15-19. (in Chinese)
- [13] DIPIRRO M J, SHIRRON P J. Heat Switches for ADRs [J]. *Cryogenics*, 2014, 62:172-176.
- [14] 郭亮, 张旭升, 黄勇, 等. 空间热开关在航天器热控制中的应用与发展[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1):216-229.
GUO L, ZHANG X SH, HUANG Y, *et al.*. Applications and developments of space heat switches in spacecraft thermal control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1):216-229. (in Chinese)
- [15] 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.

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)