

文章编号:0253-4339(2020)01-0154-07
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2020.01.154

环路热管精密控温性能的热真空实验研究

赵石磊 高腾 杨涛 孟庆亮

(北京空间机电研究所 北京 100094)

摘要 本文研制了一套高性能的改进型环路热管,具有驱动功率与散热功率分离的特点,具备对多个分散热源的控温与散热能力。为验证改进型环路热管的精确控温的性能,本文以 CCD 相机的 4 个 CCD 器件作为控温对象,在热真空环境下,对环路热管进行了稳态运行测试、热补偿功率测试及不同蒸发器加载功率测试。实验结果表明:通过控制改进型环路热管的储液器温度可以实现控制 CCD 器件的温度,控温精度在 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 以内;对于 CCD 器件开关机引起的温度波动,提出了 3 种维持器件温度稳定性的方法,并通过实验及理论分析验证了其可行性。

关键词 环路热管;控温;CCD;热真空

中图分类号:TK172.4;TQ051.5

文献标识码:A

Thermal Vacuum Test on the Precise Temperature Controlling Performance of Loop Heat Pipe

Zhao Shilei Gao Teng Yang Tao Meng Qingliang

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing, 100094, China)

Abstract An improved loop heat pipe (LHP) with high performance was developed in this paper. It has temperature controlling and heat-dissipating characteristics for multi-distributed heat sources by detaching the driving and dissipating power. To investigate the precise temperature controlling performance, the improved LHP was tested for the thermal control of four charge-coupled device (CCD) components on a camera in a vacuum chamber; stable operating tests, heat compensation power tests, and different powers on the evaporator tests were carried out. Test results showed that the improved LHP can control the temperature of the CCD in the range of $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ by controlling the accumulator temperature. Three methods to maintain the CCD temperature stability were introduced for the temperature fluctuations caused by device switches and their feasibilities were verified through experimental and theoretical analysis.

Keywords loop heat pipe; temperature control; CCD; thermal vacuum environment

环路热管是一种利用相变换热的高效传热装置,在电子元件高效散热等领域已得到广泛应用^[1-3]。环路热管是由蒸发器、散热面、储液器和管路构成的回路,蒸发器内装有由致密多孔材料制成的毛细芯,用来产生足够的毛细力,驱动回路内工质循环,多孔材料表层的液体吸收热量后蒸发,蒸气通过管路流到散热面冷凝散热,然后在毛细力的作用下,从另一根管路返回储液器,再进入蒸发器内的毛细芯^[4]完成整个循环。

随着电子技术的发展,高效的散热方式备受关注。尤其对于光电设备,为追求光学性能和信号处理能力,对关键器件的温度要求严格,且布局主要按照光路和电路的最佳状态设计,发热器件往往不

能直接散热,甚至热传输的装置都无法安装。例如,空间 CCD 相机的核心部件 CCD 器件(charge-coupled device),其性能受温度影响很大,热电子噪声随温度呈指数递增,若温度波动较大,热噪声变化不定,会给电路设计和信号输出带来较大的负面影响^[5-7],因此需要对 CCD 器件进行合理的热设计。

本文制备了一套高性能控温型环路热管,利用其高传热、远距离传输、传热温差小、管路有柔性及安装灵活方便等优点,以 CCD 器件为控温目标,研究环路热管精密控温的方法,并在热真空环境下进行了实验验证。

1 控温型环路热管

主动控温能力是环路热管的重要特性之一,通过在储液器上配置控温装置(薄膜加热片或 TEC)控制温度恒定,可以精确控制环路热管系统或热源温度,该种环路热管可以称作控温型环路热管。J. Ku 等^[8-9]首次解释了 LHP(loop heat pipe, 环路热管)的控温原理,指出通过对储液器温度的控制可以控制整个系统的运行温度。D. A. Wolf^[10]研究了通过加热或冷却储液器对 LHP 进行主动温度控制的方法。

本文采用改进后的控温型环路热管,原理如图 1 所示。特点是将环路热管的驱动部分与散热部分分离,通过给环路热管蒸发器加载功率驱动工质在整个回路内循环,蒸发器出来的蒸气进入散热面 1,冷凝后依次流经 4 个 CCD 冷板。工质在 CCD 冷板内吸收来自与 CDD 器件上的热量而汽化,汽化后进入散热面 2,再次凝结后返回储液器,完成整个循环。储液器和 CCD 冷板内工质均处于气液两相饱和状态,储液器温度值和冷板温度值基本一致^[10]。

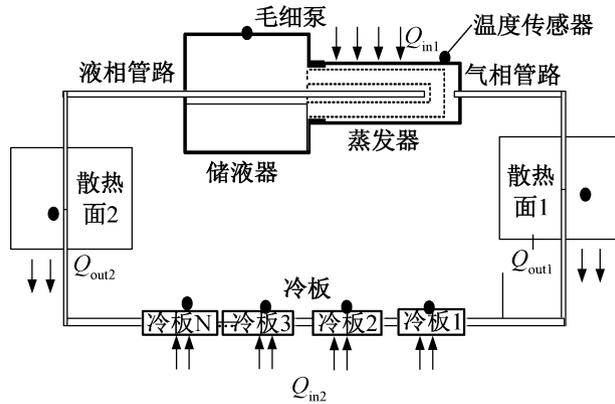


图 1 控温型环路热管原理

Fig.1 Principle of temperature control LHP

实验采用的环路热管实物如图 2 所示,内部工质为氨,基本参数如表 1 所示。环路热管采用陶瓷毛细芯,具有导热系数低、化学性能稳定等特点^[11]。

表 1 环路热管基本参数

Tab.1 Basic parameters of the tested LHP

部件	参数
蒸发器外径×长度/mm×mm	Φ19×130
储液器外径×长度/mm×mm	Φ29×103
蒸气管线长度/mm	3 500
液体管线长度/mm	3 500
管线外径/mm	3
管线内径/mm	2
工质充灌量/g	50

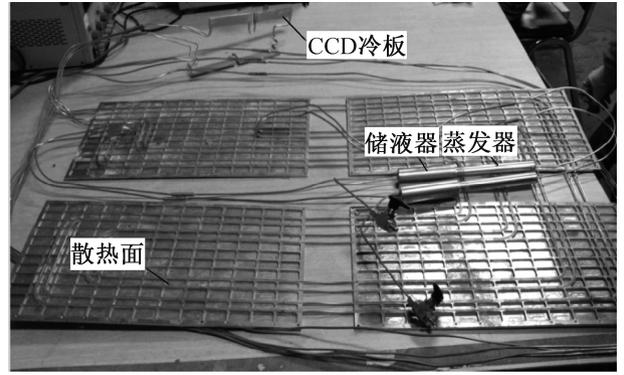


图 2 环路热管实物

Fig.2 Practicality picture of LHP

2 热真空实验状态及测试项目

实验在真空环境下进行,热沉温度 ≤ 100 K, 实验压力 $< 1.3 \times 10^{-3}$ Pa^[12]。各部件热控状态:

- 1) 散热面固定在包覆多层绝热材料的支架板上,辐射面朝下。
- 2) 散热面背面粘贴控温电加热器, 包覆 20 单元多层散热面正面喷黑漆。
- 3) 蒸发器与储液器安装加热工装,蒸发器工装上粘贴电加热器,用于加载驱动功率;储液器工装上粘贴电加热器并连接温控仪,用于对储液器控温。工装外包装 20 单元多层,工装与散热面之间隔热安装,并保证蒸发器与储液器水平。
- 4) CCD 冷板安装加热工装,工装上粘贴电加热器模拟 CCD 器件功耗,整体包覆 20 单元多层。在 CCD 进口管路上加补偿加热工装,工装上粘贴电加热器。CCD 整体放在控温笼内,控温笼控温 20 °C。
- 5) 各管路包覆 20 单元多层。
- 6) 各部件粘贴测温 T 型热偶(热电偶分布如图 1 所示)。

真空罐内放置实物如图 3 所示。测试项目如表 2 所示。



图 3 真空罐内实物布局

Fig.3 Physical layout of LHP in the vacuum tank

表 2 实验测试项目及条件
Tab.2 Tests items and conditions

测试项目	稳态运行	热补偿测试	不同蒸发器功率测试
储液器控点/°C	20	5	5
散热面控温/°C	0	-10	-10
蒸发器加载功率/W	60	45	45-55-65-70-75-85*
CCD 模拟加载功率/W	50	30	0
热补偿功率/W	0	5	0

注：* 表示蒸发器按顺序依次加载 45、55、65、70、75、85 W 的功耗。

3 实验结果及分析

3.1 控温性能测试

真空罐内实验条件满足后, 散热面控温 $T_r = 0\text{ }^\circ\text{C}$, 储液器控温 $T_c = 20\text{ }^\circ\text{C}$, 温度稳定后, 蒸发器加载功率 $Q_e = 60\text{ W}$, 通过热电偶监测, 蒸发器温度会上升然后达到稳定, 说明环路热管已启动成功^[13], 最终温度稳定在约 $23\text{ }^\circ\text{C}$ 。然后 CCD 模拟件通过电加热器加电 50 W , 并持续 1 h , 然后关闭。4 片 CCD 模拟件及蒸发器温度的变化如图 4 所示。

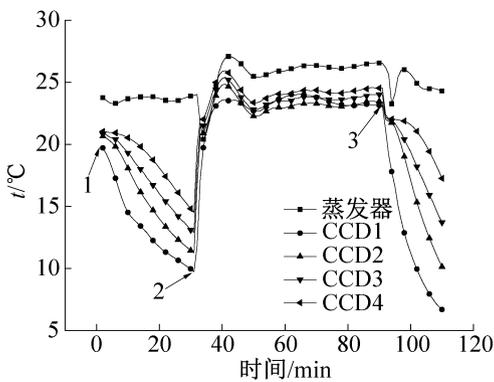


图 4 CCD 模拟件及蒸发器温度变化

Fig.4 Temperature variations of CCD simulated parts and evaporator

环路热管运行过程中工质的分布如图 5 所示, 黑色表示液态, 白色表示气态, 条格表示气液两相。当蒸发器加载驱动功耗后, 蒸发器内液体受热蒸发成过热蒸气, 通过蒸气管路进入散热面, 随着换热进行, 过热蒸气变为饱和蒸气, 工质继续与散热面换热, 直至全部变为液态, 此时工质温度仍高于散热面温度, 所以会继续换热使工质变为过冷液体, 充分换热后流出第一片散热面的工质温度与散热面 1 温度相同。过冷液体流经 4 片 CCD 冷板及第二片散热面后回到储

液器内, 不考虑沿途漏热, 这时流回储液器工质为过冷液体, 温度与散热面 2 温度相同。

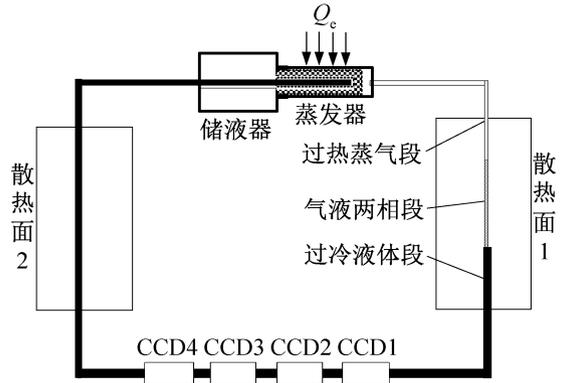


图 5 CCD 模拟件不加热时工质状态分布

Fig.5 The state distribution of working medium when CCD simulated parts are not heated

第一片散热面换热如图 6 所示, 其中 Q_g 、 Q_s 、 Q_l 分别为过热蒸气段、气液两相段、过冷液体段与第一片散热面之间的换热量, 单位为 W, 且 $Q_s + Q_g = Q_e$, Q_l 即为工质的过冷量。

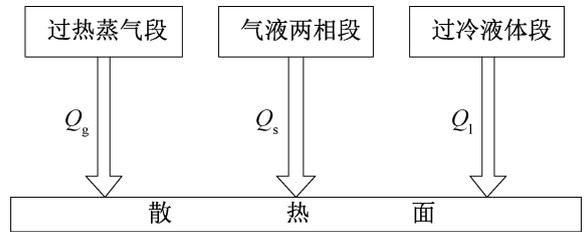


图 6 第一片换热面换热示意图

Fig.6 Schematic diagram of heat exchange on the first heat sink

此时 CCD 冷板没有加热, 它相当于一个工质的流道, 热管启动后过冷液从散热面流过来, 由于 CCD 冷板内工质量较管路内要大很多, 故其温度会逐渐下降(图 4 中 1-2 段), 最终其温度将与散热面 1 出口的工质温度相同。

当 CCD 模拟件加电后, 温度变化为图 4 中 2-3 段, 4 片 CCD 模拟件温度迅速上升, 经历一段“过冲”后达到稳定 $23\text{ }^\circ\text{C}$, 单片 CCD 模拟件温度波动在 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$, 4 片最大温差在 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 以内。CCD 模拟件温度比储液器温度高是由环路热管自身及 CCD 冷板与 CCD 模拟件之间的热阻引起的^[14]。此时环路热管内气液分布如图 7 所示。流到 CCD 冷板处的过冷液体吸热后变为气液两相的饱和态, 再经第二片散热面后变为过冷液体流回储液器。此时状态成立的条件为 $4Q_{in} \leq Q_s + Q_l$ 。 Q_{in} 为单片 CCD 模拟件加载的功耗, W。

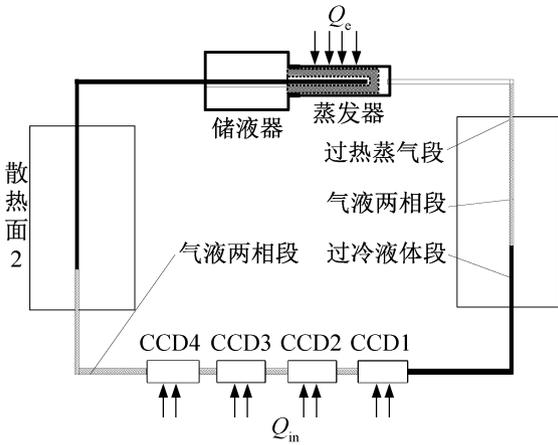


图 7 CCD 模拟件加热后工质状态分布

Fig.7 The state distribution of working medium when the CCD simulated parts are heated

由实验结果可知,改进后的环路热管能够将 CCD 模拟件的温度控制在 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,且 4 片 CCD 的温度一致性在 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 以内。但实际在轨应用中,CCD 相机并非一直处于工作状态,而是大部分时间内处于关机状态,如图 4 所示,在点 3 处 CCD 关机后,温度迅速下降且最终降至第一片散热面出口工质温度 T_r 。当再次开机后其温度则会重新升至与储液器温度 T_c 相近的温度,相当于每次开关机过程中 CCD 部件的温度在 $T_r \sim T_c$ 波动,该波动在十几摄氏度甚至更大,若不加任何措施则不能满足 CCD 器件对温度稳定性的要求。

由上述分析可知,在工质为气液两相时工质温度保持不变且可以通过调整储液器温度来控制,因此,保证 CCD 温度稳定的关键变为如何保证 CCD 冷板内工质始终为气液两相的问题。

3.2 维持 CCD 温度稳定性方法

1) 补偿加热法

CCD 不工作时,其温度下降是由于从散热面内流过来的工质过冷,若在工质进入 CCD 冷板之前加一个补偿功率 Q_b ,且保证 $Q_b > Q_l$,工质就从过冷液变为饱和和气液两相态进入 CCD 冷板,可以保证 CCD 模拟件温度的稳定性和均匀性,此时工质状态分布如图 8 所示。

实验验证: $T_r = -10\text{ }^\circ\text{C}$, $T_c = 5\text{ }^\circ\text{C}$,蒸发器加载功率为 45 W ,在冷板入口管路上安装加热工装,粘贴电加热器组成补偿回路。图 9 所示为加载补偿功率后蒸发器和 CCD 模拟件的温度变化。环路热管启动运行后,4 片 CCD 冷板温度开始下降,此时加补偿功率 5 W ,可以看到 4 片冷板温度依次上升,最后稳定在 $(7 \pm 0.5)\text{ }^\circ\text{C}$ 。同时最靠近补偿加热工装的 CCD 冷板

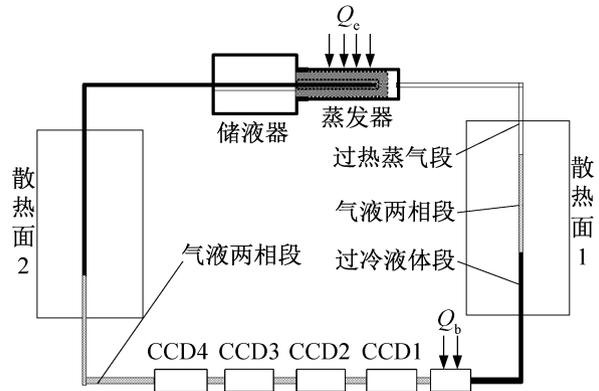


图 8 加补偿功率后工质状态分布

Fig.8 The state distribution of working medium when the compensation plate is heated

受补偿功率影响最显著,平衡过程中波动也最大。因此,通过加补偿回路可以保证在 CCD 不工作时仍将其温度保持在稳定的温度范围内。待温度稳定后,开始测试 CCD 通断电时的温度稳定性,CCD 模拟件先加电 30 W ,稳定后 4 片 CCD 模拟件温度稳定在 $(8 \pm 0.5)\text{ }^\circ\text{C}$,4 片模拟件温差最大不超过 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。关闭 CCD 加载功率,45 min 后再对 CCD 模拟件加电 30 W ,持续 15 min ,然后关闭。依次进行两个该过程,CCD 模拟件通断电温度变化如图 10 所示。由图 10 可知,在通断电过程中 4 片冷板的温度有波动,这是因为突然的通断电打破了原有的平衡状态,温度波动实际是环路热管自身重新建立平衡的过程,尤其 CCD 模拟件加电后其温度上升至一定温度后开始下降,其过程实际上是图 4 中的“过冲段”,但总体波动在 $(7.5 \pm 1)\text{ }^\circ\text{C}$,且 4 片模拟件温度差最大不超过 $1\text{ }^\circ\text{C}$,说明通过加补偿功率的方法来保证 CCD 温度稳定性的方法是可行的。

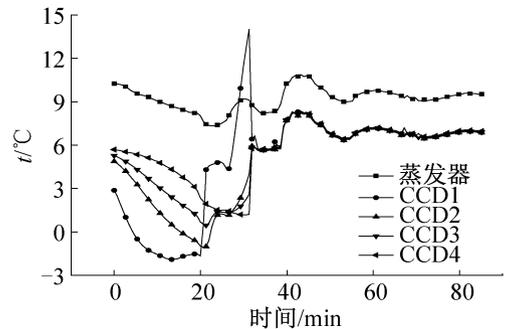


图 9 加补偿功率后温度变化

Fig.9 Temperature variation when the compensation plate is heated

2) 加大蒸发器功率

由图 5 可知,若保证进入 CCD 冷板的工质为气

液两相则需要消除第一片散热面里的过冷液体段,即增大过热段与冷凝段,由于 $Q_s + Q_g = Q_c$, 因此增大 Q_c 可以实现消除过冷液体段的目的,如图 11 所示。

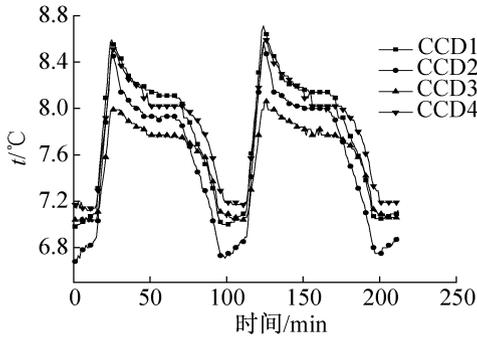


图 10 CCD 模拟件通断电温度变化

Fig.10 Temperature variation of CCD simulated parts when the heating make-and-break

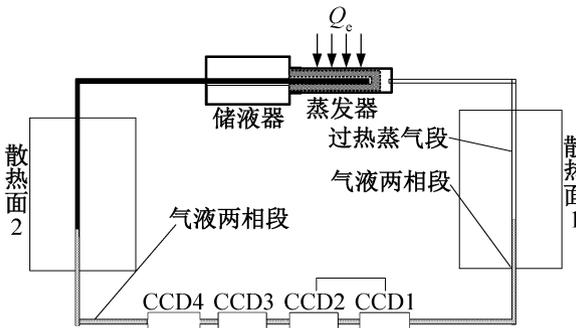


图 11 加大蒸发器功率后工质状态分布

Fig.11 The state distribution of working medium when evaporator power increased

实验验证: $T_r = -10\text{ }^\circ\text{C}$, $T_c = 5\text{ }^\circ\text{C}$, 蒸发器功率由 45 W 逐渐加大, 蒸发器及 4 片 CCD 模拟件温度变化如图 12 所示。按 1) 中的方法开补偿加热 5 W, 4 片 CCD 模拟件温度稳定在 $(6.5 \pm 0.5)\text{ }^\circ\text{C}$, 4 片温度差最大不超过 0.5 $^\circ\text{C}$ 。稳定后关闭补偿回路(图 12 中 1 所指时刻), 蒸发器功率在 45 W 和 55 W 时 CCD 冷板温度持续下降, 说明此时蒸发器加载功率不足以抵消过冷段, 散热面 1 出口工质温度仍很低。当功率加至 65 W 后, 4 片 CCD 冷板的温度依次开始上升, 稳定后温度基本与 1) 中开补偿加热功率时一致, 说明此时第一片散热面出口已经为气液两相。继续增大功率至 70 W 后温度略有上升, 稳定温度较 65 W 时上升 0.5 $^\circ\text{C}$, 这是环路热管内热阻增大引起的。继续增大功率至 75 W 时温度浮动较大, 可认为此时流经 CCD 冷板的已为过热蒸气, 由此可以估算该状态下蒸发器功率在 60~70 W 时, CCD 模拟件不加电状态下仍能保持在稳定的温度。

3) 合理设计散热面

由前面分析可以看出对于两片散热面, 第二片散

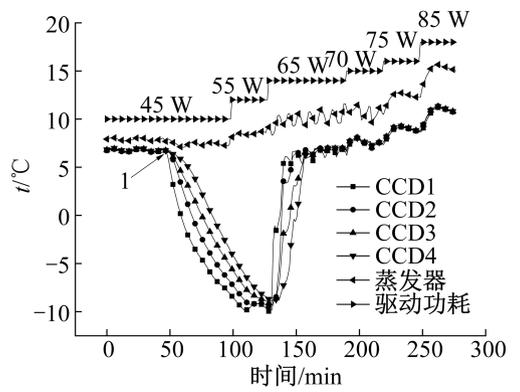


图 12 加大蒸发器功率后温度变化

Fig.12 Temperature variation when evaporator power increased

热面的作用是保证流回到储液器的工质为过冷态, 而第一片散热面的作用则更为重要, 它需要吸收蒸发器加载的热量同时保证进入到 CCD 冷板的工质不能太冷。如图 5 所示, 若使 CCD 冷板内为气液两相, 必须保证第一片散热面出口处为饱和态, 由图 5 可知, 其他条件不变的前提下, 减小散热面可以实现流出散热面的工质为气液两相, 这样流经 CCD 冷板的工质温度即可保持稳定。

散热面中工质状态的分布除了与蒸发器加载功率有关, 还与散热面的温度有很大关系。航天器在太空中工作时, 散热面上的外热流是不断变化的^[15], 导致散热面温度在外热流高温工况与低温工况之间变化, 假设在高低温工况下第一片散热面内工质状态分布如图 13 所示, 1、3 为高温工况下散热面内的两相段, 2、4 为低温工况下散热面内的两相段, 2、3 段则为二者的重叠段, 即整轨均为两相状态。即若将散热面大小控制在 2、3 段, 即可保证在整个轨道周期内进入 CCD 冷板内的工质均为气液两相态, 从而保证温度稳定。当然不能排除整个周期内散热面上外热流变化剧烈导致高低温工况下两相段没有重叠段的可能, 这种情况下该方法就没有了实现的可能。

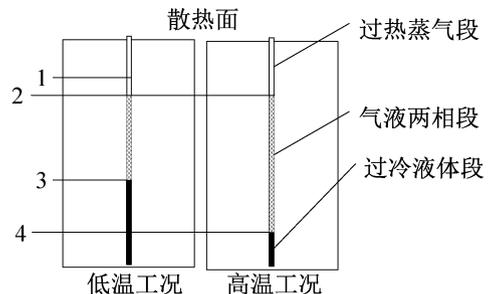


图 13 高低温工况下第一片散热面内工质分布

Fig.13 The state distribution of working medium in the first heat sink under high and low temperature conditions

此外,还有可以与折叠散热面、百叶窗及改变散热面散热能力的其他方法相结合来达到保证散热面出口工质为气液饱和态的目的^[16]。由于实验条件的限制,本文未对该方法进行实验验证。

上述 3 种方法均能保证在 CCD 不工作时保持器件温度的稳定性,且各有特点。补偿功率法原理简单,便于实现,控温效果好,缺点是需要加额外的补偿功率;增大蒸发功率法无需改变原有结构,但所加功率相对较大,同时受到环路热管最大传热能力的限制;合理设计散热面法是最经济实惠的一种方法,但由于受散热面温度变化影响大,在轨外热流复杂,不便于实验验证等,实现难度最大。3 种方法可以单独应用,也可以相互结合使用。

4 结论

本文在热真空条件下,对改进型环路热管进行控温能力及方法的测试,得到如下结论:

1) 通过实验验证应用改进型的环路热管能够对 CCD 器件进行精确控温,控温精度能达到 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2) 通过补偿加热法、增大蒸发器功率法及合理设计散热面法可以解决被控温器件不工作时如何维持温度稳定性的问题,3 种方法各有特点,可根据实际情况分别应用于不同的工作状态。

3) 对于控温型环路热管,根据散热面的功能不同,将其设计成两块有利于解决被控温器件不工作时维持温度稳定性的问题。

符号说明

下标

- g——气体
- s——饱和态
- l——液体
- c——储液器
- e——蒸发器
- r——散热面
- i——CCD

参考文献

[1] VASILIEV L, LOSSOUARN D, ROMESTANT C, et al. Loop heat pipe for cooling of high-power electronic components[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(1/2):301-308.

[2] 黄洁,王乃华,程林. 环路热管启动特性模拟[J]. *化工学报*, 2014, 65(增刊 1): 297-302. (HUANG Jie, WANG Naihua, CHENG Lin. Simulation of loop heat pipe start-up characteristic[J]. *CIESC Journal*, 2014, 65(Sup-

pl.1):297-302.)

[3] 莫冬传,丁楠,吕树申. 平板型环路热管应用于 LED 的启动特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2009, 30(10): 1759-1762. (MO Dongchuan, DING Nan, LYU Shushen. Start-up characteristics of flatten loop heat pipe using in LED[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, 30(10):1759-1762.)

[4] 曹剑峰. 环路热管控温原理与方法讨论[C]//第十届全国热管会议论文集. 贵阳:中国工程热物理学会, 2006: 388-394. (CAO Jianfeng. Discussion on principle and method of loop heat pipe temperature control [C]//The Tenth National Conference on Heat Pipes. Guiyang: Chinese Society of Engineering Thermophysics, 2006:388-394.)

[5] 赵振明,雷文平. 环路热管在 CCD 热设计中的应用[C]//第十二届全国热管会议论文集. 深圳:中国工程热物理学会, 2010:301-306. (ZHAO Zhenming. LEI Wenping. Application of loop heat pipe in CCD thermal design [C]//12th National Conference on Heat Pipes. Shenzhen: Chinese Society of Engineering Thermophysics, 2010:301-306.)

[6] 申才力,陈瑞明,王栋,等. 基于电磁带隙结构的 CCD 相机成像电路降噪[J]. *航天返回与遥感*, 2015, 36(2): 44-50. (SHEN Caili, CHEN Ruiming, WANG Dong, et al. Noise suppression in CCD camera imaging circuits using electromagnetic band-gap structure[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2015, 36(2):44-50.)

[7] 武星星,刘金国,周怀得,等. 制冷对电子倍增 CCD 相机成像质量的影响[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10): 529-533. (WU Xingxing, LIU Jinguo, ZHOU Huaide, et al. Influence of cooling on imaging quality of EMCCD camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10): 529-533.)

[8] KU J. Operating characteristics of loop heat pipes[C]//29th International Conference on Environmental System. US: SAE Technical Paper, 1999.

[9] MICHAEL N, EVGENYI K, GENNADYI S. Basics of loop heat pipe temperature control[C]//29th International Conference on Environmental System. US: SAE Technical Paper, 1999.

[10] WOLF D A. Investigation of temperature control characteristics of loop heat pipes [J]. *SAE Transactions*, 1994: 1619-1626.

[11] SANTOS P H D, BAZZO E, OLIVEIRA A A M. Thermal performance and capillary limit of a ceramic wick applied to LHP and CPL[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 41:92-103.

[12] 李国强,刘强. 星载 CCD 相机真空热实验方法讨论[J]. *航天器环境工程*, 2006, 23(5):273-276. (LI Guo-

- qiang, LIU Qiang. Discussion on vacuum thermal test method for CCD camera on satellite[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2006, 23(5):273-276.)
- [13] 李金旺, 邹勇, 程林. 毛细芯蒸发器启动和运行特性[J]. *中国空间科学技术*, 2012, 32(2):43-47. (LI Jinwang, ZOU Yong, CHENG Lin. Startup and operating characteristics of capillary wick evaporator[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2012, 32(2):43-47.)
- [14] 杨卧龙, 纪献兵, 徐进良. 小型平板式环路热管的反重力运行特性[J]. *制冷学报*, 2017, 38(1):88-94. (YANG Wolong, JI Xianbing, XU Jinliang. Anti-gravity operating performance of a miniature loop heat pipe with flat evaporator[J]. *Journal of Refrigeration*, 2017, 38(1):88-94.)
- [15] 赵振明, 王兵, 高娟. 地球静止轨道凝视型相机热分析与热设计[J]. *航天返回与遥感*, 2010, 31(3):34-40. (ZHAO Zhenming, WANG Bing, GAO Juan. Preliminary research on the thermal design methods of the geosynchronous orbit staring camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 31(3):34-40.)
- [16] 刘佳, 李运泽, 常静, 等. 微小卫星热控系统的研究现状及发展趋势[J]. *航天器环境工程*, 2011, 28(1):77-82. (LIU Jia, LI Yunze, CHANG Jing, et al. A review of small satellite thermal control system[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2011, 28(1):77-82.)

通信作者简介

孟庆亮,男,博士研究生,北京空间机电研究所,13693541520, E-mail: qlmeng@mail.ustc.edu.cn。研究方向:两相流换热。

About the corresponding author

Meng Qingliang, male, Ph. D., Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, +86 13693541520, E-mail: qlmeng@mail.ustc.edu.cn. Research fields: two-phase flow heat exchange.