

浮动断接器热控设计与仿真

刘海娃, 汤建华

(上海空间推进研究所, 上海 201112)

摘 要: 浮动断接器作为在轨补加接头, 是两航天器液路和气路的连通和断开的接口部件, 可以实现两航天器之间的燃料、氧化剂的传输。浮动断接器一般安装在航天器的头部或尾部, 外热流条件严酷, 为保证其合适的工作温度, 有效的热控制措施非常关键。以推进剂补加用浮动断接器作为研究对象, 建立了浮动断接器物理模型, 分析了其外部极端热环境, 采用传热学的辐射以及热传导理论, 形成热控设计方案。根据边界温度以及宇宙空间的外热流极端条件, 应用 IDEAS/TMG 热分析软件进行了不同工况下的热分析仿真计算, 在此基础上对热控方案进行了优化设计。分析结果表明: 采用主动热控和被动热控相结合的热控措施可以满足浮动断接器正常工作的温度指标要求, 热控设计合理可行。

关键词: 浮动断接器; 热控; 仿真

中图分类号: V241-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 01-0023-06

Design and simulation of thermal control for floating coupling

LIU Hai-wa, TANG Jian-hua

(Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China)

Abstract: The floating coupling as a on-orbit resupply connector can connect or disconnect liquid and gas lines of two spacecrafts to achieve the transmission of oxidant and fuel. Due to its extreme temperature environment, the thermal control measure is a key factor to keep the floating coupling work well. In this paper, a physical model of the floating coupling for propellant resupply is built, and the external extreme temperature environment is analyzed. The thermal control design scheme of the floating coupling is drawn up according to the radiation and heat conduction theory in heat transmission science. The thermal analysis and simulation calculation are executed by means of thermal analysis software IDEAS/TMG under different working conditions. The thermal control scheme was optimized. The analysis results indicate that the thermal control measure combining active thermal control with passive thermal control can meet the temperature specifications of floating coupler. Therefore, the thermal control design is rational and feasible.

Keywords: floating coupler; thermal control; simulation

收稿日期: 2014-06-11; 修回日期: 2014-08-02

基金项目: 上海市科学技术委员会资助课题(13DZ2250600)

作者简介: 刘海娃 (1980—), 女, 工程师, 研究领域为航天器热控制技术

0 引言

对于航天器的热控制设计一直以来备受研究人员的关注,而利用热分析计算是热控制设计的基础和主要手段^[1]。随着设计和试验以及计算机技术的积累和发展等因素,未来的大型空间站可能不进行热模拟试验仅通过热分析计算进行设计^[2]。同时,研究人员对热分析方法等方面进行了大量的工作。文献 [3] 利用 IDEAS/TMG 建立了双轴太阳翼的轨道热分析模型,对影响太阳翼温度状态的相关参数进行了灵敏度分析。文献 [4] 利用 IDEAS/TMG 对某卫星进行了热分析,并且提出卫星热控中最佳耦合机制理论与实践问题是卫星热控领域的一个重点。

浮动断接器,也称为“在轨补加接头”,是两飞行器之间连通、断开液路或者气路管路的接口,以实现两飞行器之间的燃料、氧化剂和气体的传输^[5]。浮动断接器一般安装在航天器的头部或尾部,外热流条件严酷,为保证其合适的工作温度,有效的热控制措施非常关键。

不同于航天器舱内较好的环境条件,浮动断接器通常安装在航天器的头部或尾部,暴露在宇宙空间中,既受宇宙热沉深冷影响,又要接收太阳辐照等外热流。极端高温与低温 2 种工况均可能出现,因此其热设计面临一些困难。本文采用 IDEAS/TMG 热分析软件建立了浮动断接器有限元模型,根据热控方案分别对其所在高低温工况即不同热边界条件下的温度场进行分析,以此为依据确定热控设计方案,并确定了相关的热控参数,为热设计提供依据。

1 浮动断接器以及温度指标

近地轨道运行的航天器受到空间外流主要为太阳直接照射、太阳自地球的反照和地球红外辐射^[6-7]。浮动断接器主要由步进电机、支架、丝杠及后壳体等组成。

浮动断接器安装支架温度要求:

- 1) 浮动断接器温度要求-20~70℃范围;
- 2) 插入管温度在 0~30℃范围内。

2 热控措施

浮动断接器的热控设计从阳照区域和阴影区域 2 种高低温工况角度进行考虑。

2.1 针对在阳照区域时的热控措施

当浮动断接器在阳照区域时,要尽量降低浮动断接器受到太阳辐照而带来的高温影响,那么其表面的太阳吸收率和发射率^[8-9]是尤为重要的可控热辐射性能参数。采用不同太阳吸收率和发射率的材料,可决定暴露于空间环境中表面热平衡温度水平。假定在空间有一等温物体,它只受到太阳的直接照射,没有地球反照、地球红外辐射以及内热源等影响,那么,在达到稳定状态时吸收的太阳光的热量应等于它辐射的热量^[6],即:

$$\alpha_s A_\alpha S = \sigma \varepsilon_H A_e T_s^4 \quad (1)$$

式中: A_α 为物体表面在垂直于太阳光的平面上的投影面积; A_e 物体表面的辐射面积; T_s 物体表面的平衡温度。

物体表面的热平衡温度可以求得:

$$T_s = \left(\frac{\alpha_s S A_\alpha}{\varepsilon_H \sigma A_e} \right)^{1/4} \quad (2)$$

公式(2)表明,物体表面的热平衡温度与太阳吸收率 α_s 和发射率 ε_H 的比值 α_s/ε_H (简称太阳吸收发射比)的 1/4 次方成正比,材料的太阳吸收发射比值不同,表面平衡温度也不尽相同,因此材料的太阳吸收发射比值对浮动断接器表面的温度影响相当大。经分析,浮动断接器通过选取自身低太阳吸收辐射比的表面材料和热控材料,可以大大降低外界太阳辐射热流的影响,进而降低浮动断接器的温度水平。依此采取的热控措施为:

1) 在安装面板朝外太空侧,粘贴聚酰亚胺薄膜^[10],该种金属材料与安装面板材料的太阳吸收辐射比,前者仅是后者的 15%,那么在相同的条件下,前者表面温度仅是后者的 0.62 倍;

2) 在浮动断接器表面包覆多层隔热材料,表面为白色防原子氧布,由于白色防原子氧布的较低太阳吸收发射比,其表面温度只为不采用该材料包覆的 0.5。因此该项热控措施合理可行。

2.2 针对在阴影区域时的热控措施

在阴影区域, 主要是低温宇宙空间热沉对浮动断接器的影响, 由于其自身无内热源, 因此采取在浮动断接器表面主动加热的方式来提升温度, 保证正常使用。

除了以上的两项热控措施以外, 为阻隔高低温环境热载荷对浮动断接器的影响, 与安装支架之间安装隔热垫。

2.3 浮动断接器热控方案

根据所在的阳照和阴影区域不同高低温环境对浮动断接器会产生的温度影响, 分析热控对策以及选择适应的主动和被动的热控方式, 得出浮动断接器的热控方案见表 1。

表 1 浮动断接器热控状总表

Tab. 1 List for thermal control status of floating coupling

部件	热控方式
安装支板	朝向外侧表面粘贴聚酰亚胺薄膜
步进电机	表面粘贴电加热器
浮动断接器与安装支架之间	隔热垫 ($\delta=5\text{mm}$)
浮动断接器整体	多层隔热材料, 表面为白色防原子氧布

3 热流与温度边界条件

浮动断接器在轨飞行过程中根据轨道位置以及飞行姿态, 要经历不同的高低温工况, 只要选取极端低温和高温的环境条件对浮动断接器的温度影响进行研究。在阴影区域其环境选取为极端低温 4 K 宇宙热沉; 在阳照区域, 根据不同的太阳入射角吸收太阳辐照仅取 2 种极端的太阳入射方向进行研究, 太阳入射方向如图 1 和图 2 所示。太阳热流取平均太阳热流。所选取的边界条件覆盖各种高低温工况, 可认为如果验证了极端工况下热控方案可行, 那么在所有工况下该热控方案必然可行。浮动断接器热分析边界条件汇总见表 2。其中电机加热功率设定为 4 W, 工况 1-工况 4 对应非对接段, 工况 5-工况 7 对应对接段。

表 2 浮动断接器有限元模型边界条件汇总表

Tab. 2 Finite element model boundary condition of floating coupling

序号	主动热控	被动热控	边界条件
工况 1	无	有	安装面板温度 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 宇宙热沉 4 K。
工况 2	有	有	安装面板温度 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 插入管端面温度为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 宇宙热沉 4 K。
工况 3	无	有	安装面板温度 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, 宇宙热沉太阳从安装面垂直入射, 见图 1。
工况 4	无	有	安装面板温度 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, 宇宙热沉, 太阳从侧面入射, 见图 2。
工况 5	有	有	安装面板温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 插入管端面温度为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 宇宙热沉 4 K。
工况 6	无	有	安装面板温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 宇宙热沉, 太阳从安装面垂直入射, 见图 1。
工况 7	无	有	安装面板温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 宇宙热沉, 太阳从侧面入射, 见图 2。

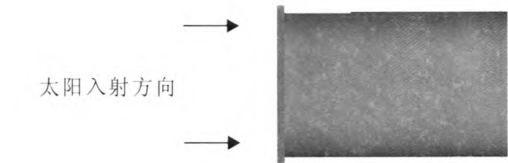


图 1 太阳光垂直入射安装面板示意图
Fig. 1 Schematic diagram of sunlight vertical incidence to installation panel

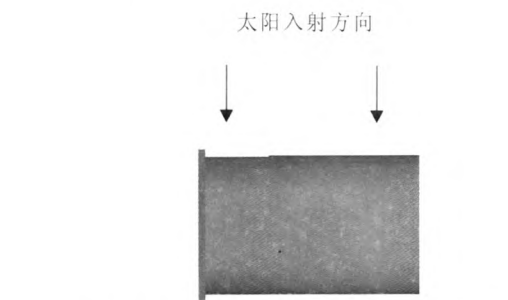


图 2 太阳光从浮动断接器侧面垂直入射示意图
Fig. 2 Schematic diagram of sunlight incidence from side of floating coupling

4 数值仿真计算

热分析软件 IDEAS/TMG 可用于解决复杂传

热问题，其功能包括热传导、对流和辐射^[11]。对浮动断接器的热分析计算，在热控方案确定后，要从两个方面入手：在低温工况下，无主动加热有被动热控的情况下看是否可以满足热控目标，如果无法满足，则在浮动断接器的电机表面粘贴薄膜式电加热器进行主动加热，加热功率定为 4 W；在高温工况，只能依靠被动热控方式来控

制浮动断接器温度，因此计算只有被动热控时的温度是否满足温度要求。根据安装面对接段和非对接段的温度边界，对浮动断接器在高低温工况下做出了温度场仿真分析。根据不同边界条件共 7 种计算工况（见表 2）进行模拟仿真。图 3 为浮动断接器热分析模型图。

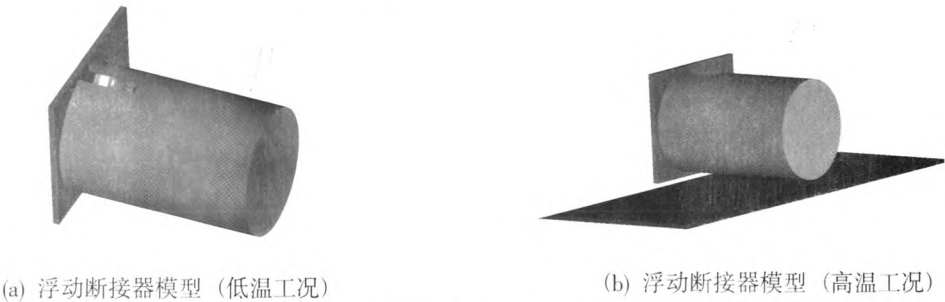


图 3 浮动断接器热分析模型图

Fig. 3 Thermal analysis model of floating coupling

对低温工况无主动热控状态进行热分析，对表 2 中工况 1 下进行仿真计算，浮动断接器的温度在-50.2~3.74 ℃范围内，密封圈温度为-12.7 ℃。由于浮动断接器中插入管是推进剂运送的通道，其温度是否合理直接影响到是否能将推进剂安全可靠的运送到航天器上，因此在浮动断接器所有组件的温度场分析中插入管是最为重要的组件，插入管在空间宇宙热沉及其他组件导热后，温度为-42.8~3.74 ℃，显然在补加时推进剂

充满整个插入管，该温度水平无法保证推进剂正常补给。通过分析，在低温工况下无主动热控的情况下，浮动断接器温度不满足热控温度目标，需进行主动控温才能解决该问题。表 3 为浮动断接器为工况 2-工况 7 的热分析不同阶段的高低温边界仿真计算结果。从表 3 可得，在高低温不同工况下，浮动断接器各组件温度均满足温度指标要求，其中低温工况下浮动断接器主动加热启动，从中验证了热控设计方案的合理性。

表 3 浮动断接器模拟结果汇总表
Tab. 3 Simulaiton results of floating coupling

℃				
低温边界（-20 ℃）对应仿真结果			高温边界（40 ℃）对应仿真结果	
对接段（安装支架高低温边界：-20~40 ℃）	浮动断接器	3.03~12.9	浮动断接器	太阳安装面照射：36.3~47.5； 太阳侧面照射：31.5~45
	插入管	4.02~10.6	插入管	太阳安装面照射：42.7~47.5； 太阳侧面照射：36.7~4
	密封圈	5.05	密封圈	太阳安装面照射：47 太阳侧面照射：44.8
非对接段：（安装支架高低温边界：-30~70 ℃）	浮动断接器	-3.65~6.57	浮动断接器	太阳安装面照射：55.2~64.9； 太阳侧面照射：50.6~62.6
	插入管	3.16~5.16	插入管	太阳安装面照射：61.2~64.9； 太阳侧面照射：55.4~62.6
	密封圈	3.2	密封圈	太阳安装面照射：64.8； 太阳侧面照射：62.4

5 方案比较

为说明浮动断接器现热控方案更具优势, 分别从材料以及规格的选择上进行分析 and 比较。

5.1 多层隔热材料外表面防原子氧布的选取优势

防原子氧布目前 3 种规格可以选择, 按颜色分类分别为白色、灰色及黑色, 其表面发射和太阳吸收率灰色和黑色分别是白色防原子氧布的 2.38 倍和 4.15 倍。在深冷空间中主要考虑的是发射率对物体温度的影响, 3 种防原子氧布的发射率基本相当。在太阳辐照 (高温工况) 下, 表面

太阳吸收辐射比越小, 温度就越低, 考虑到浮动断接器在阳照区域被太阳照射, 因此选取太阳吸收辐射率最小的白色防原子氧布更优。

5.2 隔热垫厚度的选取

通过对无隔热垫和 3 mm 厚隔热垫片对浮动断接器温度进行计算来比较说明 5 mm 隔热垫片的优势。计算极端高温和低温下温度情况, 既低温工况下安装面为-30 ℃, 步进电机加热功率为 4 W 的情况; 高温工况下为太阳直照安装面的情况, 安装面为 70 ℃, 附近的舱壁为 100 ℃。表 4 为不同隔热垫厚度下的浮动断接器各组件温度。

表 4 无隔热垫和 3 mm 厚隔热垫片下的浮动断接器温度表

Tab. 4 Temperature of floating coupling with 3 mm insulation blanket and without insulation blanket

℃				
隔热垫状态	低温边界下各组件温度		高温边界下各组件温度	
无隔热垫	浮动断接器(加热功率 4 W)	-29.9~3.87	浮动断接器	66.7~75.9
	插入管	-16.9~3.87	插入管	72.2~74.9
	密封圈	3.5	密封圈	74
3 mm 隔热垫片	浮动断接器(加热功率 4 W)	-11.8~3.95	浮动断接器	58.4~68
	插入管	-1.42~3.95	插入管	64.3~67.7
	密封圈	3.9	密封圈	67

从表 4 中可以看出, 高温边界下安装 3 mm 厚隔热垫对应的浮动断接器温度场较无隔热垫有很大的差异, 其中整体温度低温工况下后者较前者高出 18.1 ℃, 高温工况下后者较前者高 8.3 ℃, 因此可以看出高低温工况下隔热垫对阻隔外界热量总是有益的。

图 4 和图 5 对隔热垫分别为 0 mm、3 mm 和 5 mm 的情况下对浮动断接器的温度影响进行详细比较。从图 5 得出在低温工况下, 随着隔热垫厚度的增加, 除插入管上密封圈的温度基本无变化外, 其余浮动断接器和插入管的最低温度均出现了大幅上升的趋势, 3 mm 和 5 mm 的隔热垫分别较无隔热垫的情况, 浮动断接器的最低温度分别高 18.1 ℃和 26.25 ℃, 插入管的最低温度高 15.48 ℃和 20.06 ℃。从图 6 可得出, 随着隔热垫厚度的增加, 浮动断接器、插入管以及密封圈的最高温度均出现了大幅下降的趋势, 3 mm 和

5 mm 的隔热垫分别较无隔热垫的情况, 浮动断接器的最高温度分别低 7.9 ℃和 11 ℃, 插入管的最低温度低 7.2 ℃和 10 ℃, 密封圈的最低温度分别低 7 ℃和 9.2 ℃, 说明增加隔热垫的厚度对防止高温起到明显的作用。因此应选取 5 mm 厚隔热垫。

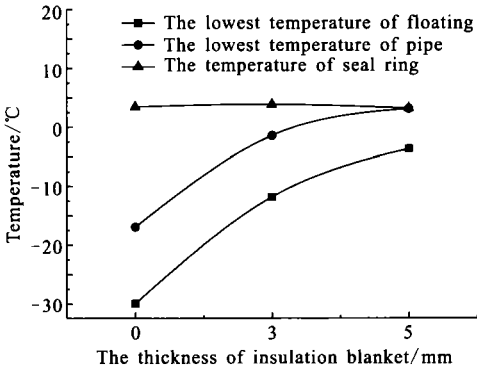


图 4 低温工况下隔热垫厚度对浮动断接器温度的影响

Fig. 4 Impact of insulation blanket thickness on temperature of floating coupling under low-temperature working condition

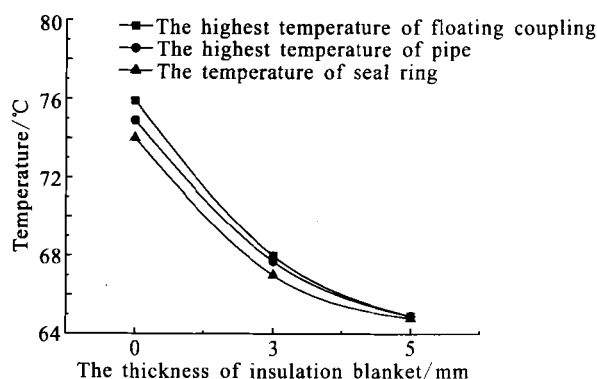


图5 高温工况下隔热垫厚度对浮动断接器温度的影响

Fig. 5 Impact of insulation blanket thickness on temperature of floating coupling under high-temperature working condition

6 结论

本文以浮动断接器为研究对象, 利用IDEAS/TMG软件对其在高低温工况不同热控方案下的温度场进行仿真计算, 得出如下结论:

1) 从低温环境工况考虑, 浮动断接器必须采用主动加热方式(加热功率为4 W)才能保证其温度在要求的范围内。

2) 从高温环境工况考虑, 为阻隔太阳辐照对安装板以及浮动断接器本身组件的高温影响, 安装板表面采用低太阳吸收发射比的聚酰亚胺材料, 在浮动断接器采用表面包覆多层隔热材料, 外表面为白色防原子氧布。

3) 在浮动断接器和安装板之间安装隔热垫,

可以有效降低外界高低温环境热载荷对其温度的影响。

参考文献:

- [1] 丁延卫, 付俊明, 尤政. 纳型卫星热控系统设计与仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(1): 169-172.
- [2] 符致勇, 范绪箕, 黄春生. 航天器突起物热防护结构的瞬态温度场有限元分析[J]. 导航与航天运载技术, 2004, 27(3): 47-50.
- [3] 闵桂荣, 郭舜. 航天热控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [4] 丁延卫, 赵欣, 张立华, 等. 临界倾角轨道卫星双轴太阳翼热性能研究[J]. 宇航学报, 2008, 29(6): 2050-2055.
- [5] 马海涛, 陈健, 魏青, 等. 一种在轨补加用浮动断接器设计[J]. 火箭推进, 2011, 37(4): 45-49.
- [6] 侯增祺, 胡金刚. 航天器热控制技术 - 原理及其应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.
- [7] GILMORE D G. Spacecraft thermal control handbook [M]. 2nd ed. El Segundo, California: Aerospace Corporation Press, 2002.
- [8] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [9] 章熙民, 任泽霏, 梅飞鸣. 传热学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [10] 高劭伦, 周定, 蔡国飙, 等. 低地球轨道环境原子氧对航天器表面材料聚酰亚胺作用的数值模拟[J]. 宇航学报, 1999, 20(1): 5-13.
- [11] 郭亮, 吴清文, 丁亚林, 等. 航空相机焦面组件相变温控设计及验证[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2060-2066.

(编辑: 马 杰)