



航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

——• 中文核心期刊 中国科技核心期刊

“嫦娥五号”高温水升华热排散系统可信构造与确认

宁献文 曹瑞强 王玉莹 周晓伶

Dependability construction and confirmation on high temperature water sublimation heat dissipation system for Chang'E-5

NING Xianwen, CAO Ruiqiang, WANG Yuying, ZHOU Xiaoling

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2023038>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

“嫦娥五号”高温水升华热排散系统 可信构造与确认

宁献文, 曹瑞强, 王玉莹, 周晓伶

(北京空间飞行器总体设计部 空间热控技术北京市重点实验室, 北京 100094)

摘要: 针对“嫦娥五号”月球探测器高温水升华热排散系统研制过程中面临的相关难题, 探索并实践了一种“可信构造与确认”产品质量管理方法, 从“设计正确”“验证充分”“过程受控”3个方面开展了全系统、全要素和全过程的正向构造和确认, 提出了一系列可信要素实现途径、方式与方法。在轨飞行表明: 高温水升华热排散系统在轨性能与地面实验结果一致, 增强了复杂集成单机系统正向设计、验证与过程控制能力, 实现了高温水升华热控技术的首次月面成功应用。

关键词: 嫦娥五号; 热控; 水升华器; 可信质量管理

中图分类号: V411.4; V417⁺.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2023)04-0408-05

DOI: [10.12126/see.2023038](https://doi.org/10.12126/see.2023038)

Dependability construction and confirmation on high temperature water sublimation heat dissipation system for Chang'E-5

NING Xianwen, CAO Ruiqiang, WANG Yuying, ZHOU Xiaoling

(Beijing Key Laboratory of Space Thermal Control Technology,

Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: In response to the relevant difficulties encountered in the development of the Chang'E-5 high temperature water sublimation heat dissipation system (HT-WSHDS), a product quality management method of "dependability element construction and confirmation" was explored and practiced. The forward construction and confirmation of the entire system, all elements and whole process were carried out from three aspects of correct design, sufficient validation and process controlled. A series of approaches for achieving dependability elements were proposed. The on-orbit flight data show that the working performance of HT-WSHDS is consistent with the ground experimental results, which enhances the forward design, verification and process control capabilities of complex integrated equipment. It achieved the first successful application of HT-WSHDS on the lunar surface.

Keywords: Chang'E-5; thermal control; water sublimator; dependability quality management

收稿日期: 2023-03-30; 修回日期: 2023-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 11472040, 52202505); 北京市科技新星计划(编号: Z211100002121078)

引用格式: 宁献文, 曹瑞强, 王玉莹, 等. “嫦娥五号”高温水升华热排散系统可信构造与确认[J]. 航天器环境工程, 2023, 40(4): 408-412

NING X W, CAO R Q, WANG Y Y, et al. Dependability construction and confirmation on high temperature water sublimation heat dissipation system for Chang'E-5[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2023, 40(4): 408-412

0 引言

水升华是一种消耗型散热技术,即通过使消耗水工质在真空下发生相变进行热量排散,可作为理想的空间短期热控措施^[1-3],曾在 Apollo 登月舱、航天飞机与美/俄及我国舱外航天服中得到多次成功应用^[4]。“嫦娥五号”任务中,为解决月面高温(可达 100 ℃)环境下探测器固定辐射器散热能力不足的难题,首次在月球无人探测领域构建了高温水升华热排散系统,作为辅助热沉协同解决月面无人自动采样过程中的短期大热耗散热难题^[5-9]。

水升华热排散系统运行过程中涉及多孔介质内气-液-固多相流、交变相变界面移动以及高真空稀薄气体流动等流体力学基础理论问题,是复杂的气-液-固多相流与传热传质相耦合的流动换热过程,流动特征与调控机制非常复杂,且工作温度高于传统水升华器产品,使得产品研制技术难度极大。

同时,“嫦娥五号”高温水升华热排散系统包括 7 个种类 15 台部组件单机^[10],是较为复杂的小型集成模块系统,不仅面临技术难度大、成熟度低的制约,而且具有单机数目多、配套单位多、研制进度紧等特点,带来的难题是如何满足复杂任务过程和系统的高可靠要求,实施全过程的精细化质量控制,确保航天型号研制及飞行任务一次成^[11]。

针对上述难题,“嫦娥五号”高温水升华热排散系统在研制过程中依据系统级相关要求,结合热控分系统关键项目自身任务特点,开展可信构造与确认工作,本文对相关实践经验进行总结。

1 “可信构造与确认”方法

欧洲空间标准化合作组织标准(ECSS-Q-30B^[12])中指出,可信性是可靠性、可用性和维修性的集合性术语,定义为需要时按要求执行的能力。“嫦娥五号”探测器研制团队借鉴可信性定义并应用于航天器研制过程,即将航天器“可信”概括为系统圆满实现任务目标的能力,将形成这一能力的方法概括为“可信构造与确认”,在航天器研制过程中以“设计正确、验证充分、过程受控”为目标,通过一系列理念、方法、工具的创新和应用,在“全系统、全要素、全过程”开展正向的构造和确认,最终实现通过过程正确保证复杂系统结果满足要求,其中:

1)“全系统”指探测器系统、分系统、单机直至

部组件、元器件,覆盖所有可数单元。

2)“全要素”指全系统各组成部分实现“设计正确、验证充分、过程受控”所需关注的要素。

3)“全过程”指探测器研制的方案阶段、初样阶段、正样阶段以及任务实施阶段等全部过程。

4)“构造”指自上而下地明确产品(要素)的作用、实现过程及其各个组成部分在产品(要素)中的安排、组织和相互关系,强调正向地用需求构造方案、用设计构造实现、用原因构造结果,要求产品实现全过程的每个工作项目都是先有想法、设计及过程推演再实施。

5)“确认”指针对产品实现的全过程都对构造情况进行检查和确认,实时确认当前状态与构造的一致性,要求对前期的构造工作进行闭环、检查,强调在过程中实时确认。

在实施层面,运用系统工程的工作方法,采取“系统抓总、分层负责”的组织方式,动员全体设计师、产保质量以及指挥调度人员按照可信构造与确认工作方法结合自身责任界面,开展设计、验证、过程控制以及实时确认工作,确保自身负责环节没有疑点和隐患。

“可信构造与确认”作为一种新型产品保证方法,能够很好地解决“嫦娥五号”这种复杂巨系统航天工程的质量管理难题,实现复杂系统工程一次做对,研制过程无疑点、无隐患,确保任务目标圆满成功。

2 “可信构造与确认”设计

2.1 设计正确

针对“嫦娥五号”高温水升华热排散系统自身任务特点,正向构建出一套实现“设计正确”的可信构造与确认工作项目及实施流程(如图 1 所示)。

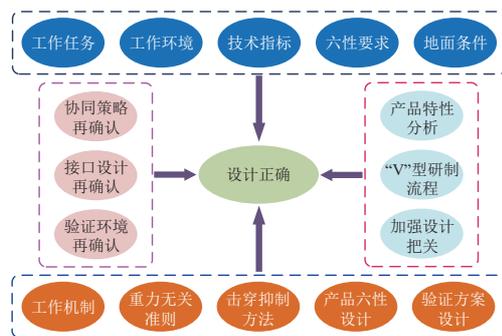


图 1 “设计正确”可信要素构造与确认流程

Fig. 1 Dependability element construction and confirmation process on correct design

主要包括以下3个层面内容:

1)从设计输入层面,针对工作任务、工作环境、技术指标、六性要求与地面条件等,开展可信要素构造与确认,确保设计输入完整、适宜、可行。对于高温水升华热排散系统,要重点分析工作环境与地面条件的不同,尤其是月面(1/6)g与地面1g重力环境对高温热排散系统的不同影响。

2)在具体设计层面,结合高温水升华热排散系统工作机制及工作模式,开展水升华换热器重力无关设计、击穿抑制方法设计、产品六性设计以及验证方案设计等,提出一套高温水升华热排散系统设计理论与方法,建立水升华换热器参数的重力无关设计准则^[1],从而实现设计上的可信构造与确认。

3)在实现途径上,创新性地型号研制中运用双“V”字形设计流程,分解研制过程中的活动工作内容,制定活动实施程序,加强设计把关,设计完成后开展协同策略再确认、接口设计再确认与验证环境再确认等回头看工作。

2.2 验证充分

面向高温水升华热排散系统工作过程中复杂流动特征与控制机制的验证和保障,基于全任务剖面比对分析结果,充分考虑不同重力场对水升华热排散系统性能的影响,构建出2套专用测试系统进行水升华换热器性能验证,以覆盖全寿命周期贮存与工作条件,从而形成一套实现“验证充分”的可信构造与确认工作项目及流程(如图2所示)。

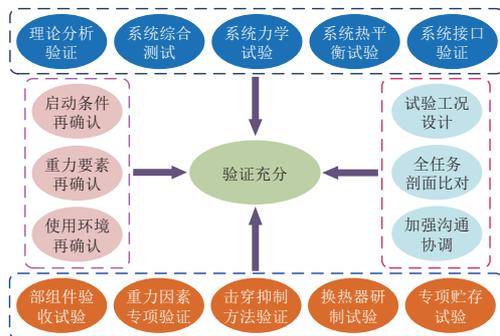


图2 “验证充分”可信要素构造与确认流程

Fig. 2 Dependability element construction and confirmation process on sufficient validation

具体包括以下3个层面内容:

1)在系统验证层面,加强理论分析验证,在揭示多孔介质内真空水升华行为中液-固-气交变相变界面的移动规律及传热传质特性基础上,得出水

升华换热过程中的相变状态及其演变关系,提出一种水升华器启动过程瞬态工作参数预测方法,从而建立起水升华热排散系统的正常与失效工作机制。产品交付探测器总体后,通过整器级综合测试、力学试验、热平衡试验以及系统接口验证等,进一步证明产品功能、性能满足任务需求。

2)在单机验证层面,水升华热排散系统各部件交付前完成单机验收试验,对于水升华换热器开展重力因素专项验证、击穿抑制方法验证与换热器研制试验,任务推迟期间还利用鉴定件、陪存件开展了专项贮存试验。

3)在具体实现方式上,通过全任务剖面分析、试验工况设计并与总体强化沟通协调,最终形成一套覆盖全寿命周期贮存与工作条件的高温水升华热排散系统试验验证方案,试验方案设计完成后还开展了启动条件再确认、重力要素再确认与使用环境再确认等回头看工作。

2.3 过程受控

针对高温水升华热排散系统部组件多、配套单位多与试验验证环节多等特点,以“流程驱动、数据全面、责任压实”为原则,提出一套实现“过程受控”的可信构造与确认工作项目与实施流程(如图3所示)。

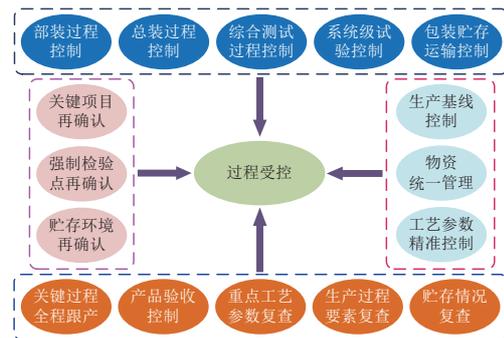


图3 “过程受控”可信要素构造与确认流程

Fig. 3 Dependability element construction and confirmation process on process controlled

具体包括以下3个层面内容:

1)结合研制技术流程,高温水升华热排散系统部组件交付后,针对部装过程、总装过程、综合测试过程、力/热系统级试验与包装贮存运输等过程,开展可信要素构造与确认,确保研制过程相关数据记录完整、受控。

2)在单机研制层面,针对部分技术特点突出但

宇航经验不丰富的承制单位,开展专项二方审核,提高其宇航产品管控质量。此外,还对关键过程(如多孔板制造、换热器装配)强化控制、全程跟产,强化产品验收控制,对重点工艺参数、生产过程要素与贮存情况进行专项复查,确保产品研制过程各项工作一次做对、检查到位、过程受控。

3)在实现方法上,开展单机产品生产基线控制、物资统一管理和工艺参数精准控制,确保产品技术状态和生产基线控制到位,实现质量控制重心前移。产品交付后通过关键项目、强制检验点与贮存环境再确认工作,确认产品关键特性和指标验证到位,产品关键工序和环节操作到位。

3 应用实例

“嫦娥五号”高温水升华热排散系统组成如图4所示^[10],主要包括水贮箱、控制阀(2组)、减压阀、水升华换热器、压力传感器及温度传感器。

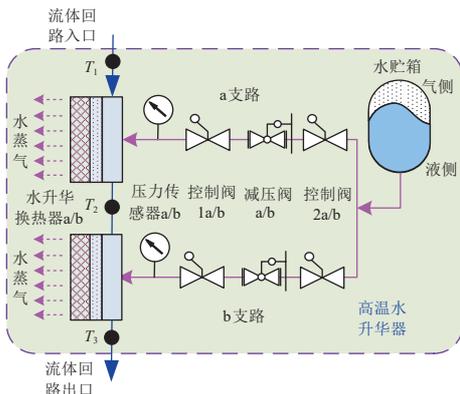


图4 “嫦娥五号”的高温水升华热排散系统

Fig. 4 High temperature water sublimation heat dissipation system for Chang'E 5

针对“设计正确”,主要开展如下工作:

1)型号研制时输入文件6份,经复查确认设计输入完整、适宜、可行;设计输出文件12份,设计状态正确、满足技术指标要求。

2)对于水升华换热器,建立了重力无关设计准则,进而提出一种水升华换热器设计与验证方法,从理论上揭示了其运行过程中的传热传质特性,解决了高温启动中的“击穿”抑制、系统稳定运行以及不同重力场下验证等难题^[1]。

3)方案阶段迭代过程中,首先由分系统根据任务分析给出高温水升华热排散系统初步需求,并基于该需求完成初步设计正向反馈分系统,分系统再根据设计结果给出单机正式需求,单机据此开展底

层技术攻关,根据攻关结果再向上对分系统需求给出满足情况与相关限制条件,从而形成双“V”字形研制流程。

针对“验证充分”,主要开展如下工作:

1)从顶层策划,按照单机验收试验、整器力学热试验、研制试验以及鉴定件陪存试验4个维度进行验证项目完整性可信构造与确认。

2)在验证水升华换热器重力无关设计准则的正确性前提下,以“系统输出压力=减压阀固有压力+管路高度引起的驱动压力”作为设计要素,构建出2套专用地面性能测试系统(见图5)来验证水升华换热器的各项技术指标性能。其中,1套系统测试压力大于月面与地面热平衡试验工作环境,使得启动条件验证能够包络在轨及地面热平衡试验状态;另外1套系统测试压力小于月面与地面热平衡试验工作环境,使地面测试得到的散热量指标相对在轨使用更加保守、可靠。两相结合可以确保地面测试条件整体包络在轨使用条件,做到验证充分。



图5 高温水升华热排散系统地面性能测试方法示意

Fig. 5 Schematic diagram of ground performance testing method for high temperature water sublimation heat dissipation system

3)针对水升华换热器开展了各种研制试验,任务推迟期间利用鉴定件开展陪存试验,发射前确保能够覆盖正样产品全寿命周期。

针对“过程控制”,主要开展如下工作:

1)依据产品特性分析结果,将整个高温水升华热排散系统确定为探测器关键项目,水升华换热器作为重要件,设置了2个强制检验点用于控制单机性能。

2)使用正向FMEA、技术风险识别等方法构造出水升华换热器专项过程控制对象及控制措施,很好地解决了水升华换热器研制过程中的过程控制难题。

4 结束语

本文基于“嫦娥五号”高温水升华热排散系统研制可信情况,结合“一次做对”可信质量理念,从“设计正确”“验证充分”“过程受控”3个方面开展了全系统、全要素和全过程的正向构造和确认,取得了良好的应用效果。其中针对高温水升华热排散系统提出的具体可信要素实现途径、方式与方法等措施,尤其是方案阶段的双“V”字形设计流程,有效保障了型号研制工作的顺利开展。

可信构造与确认工作为我国自主研制的高温水升华热排散系统在轨首次成功应用提供了有力支撑。在轨飞行表明,高温水升华热排散系统的性能与地面实验结果一致,实现了高温水升华热控技术的首次正式工程应用。

“可信构造与确认”方法可以很好地实现复杂单机研制过程中“全系统、全要素、全过程”正向的构造和确认,确保复杂单机研制结果满足在轨使用要求;可以增强复杂集成单机系统正向设计、验证与过程控制能力,对热控其他类型单机以及热控系统设计也具有一定的借鉴作用。

参考文献 (References)

- [1] 苗建印, 钟奇, 赵啟伟, 等. 航天器热控制技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018: 189-197
- [2] GILMORE D G. Spacecraft thermal control handbook[M]. 2nd ed. El Segundo: The Aerospace Press, 2002: 701-705
- [3] 王玉莹. 空间水升华器相变传热传质动态特性及稳定性研究[D]. 北京: 中国空间技术研究院, 2014: 1-11
- [4] 王玉莹, 钟奇, 宁献文, 等. 水升华器空间应用研究[J]. 航天器工程, 2013, 22(3): 105-112
WANG Y Y, ZHONG Q, NING X W, et al. Overview of space application and development of water sublimator[J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(3): 105-112
- [5] 王玉莹, 钟奇, 宁献文, 等. 具有恒热流边界的水升华器启动特性实验[J]. 航空学报, 2014, 35(6): 1571-1580
WANG Y Y, ZHONG Q, NING X W, et al. Experiment on startup performance of sublimator with constant heat flux boundary[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2014, 35(6): 1571-1580
- [6] 王玉莹, 宁献文, 苗建印, 等. 嫦娥五号水升华热排散系统月面运行特性分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2021, 51(4): 353-360
WANG Y Y, NING X W, MIAO J Y, et al. Work performance analysis on the Chang'E 5 lunar lander water sublimation heat dissipation system[J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2021, 51(4): 353-360
- [7] 宁献文, 李劲东, 王玉莹, 等. 中国航天器新型热控系统构建进展评述[J]. 航空学报, 2019, 40(7): 022874
NING X W, LI J D, WANG Y Y, et al. Review on construction of new spacecraft thermal control system in China[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2019, 40(7): 022874
- [8] 宁献文, 蒋凡, 张栋, 等. 月球无人采样返回探测器一体化热管理方案研究[J]. 航天器环境工程, 2017, 34(6): 598-603
NING X W, JIANG F, ZHANG D, et al. Research on an integrated thermal management scheme for lunar robotic sampling and return probe[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2017, 34(6): 598-603
- [9] NING X W, WANG Y Y, PENG J, et al. Design and implementation of the integrated thermal control system for Chang'E-5 lunar module[J]. Acta Astronautica, 2022, 200: 188-195
- [10] 宁献文, 王玉莹, 苗建印, 等. 一种月面高温环境用水升华热排散系统: CN112937927A[P]. 2021-06-11
- [11] 刘亚丽, 岳富占. 航天产品精细化质量管理模型研究[J]. 科技管理研究, 2018, 38(10): 190-195
LIU Y L, YUE F Z. Research on refine quality management model of aerospace products[J]. Science and Technology Management Research, 2018, 38(10): 190-195
- [12] Space product assurance dependability: ECSS-Q-30B-2002[S]. ESA Publications Division ESTEC, 2002: 1-9

(编辑: 冯露漪)

一作简介: 宁献文, 研究员, 主要从事航天器热控制、模块化自适应及水升华热控技术等研究。