

闭式布雷顿循环核心机调控过程仿真分析

薛 翔, 杜 磊, 王浩明, 张银勇, 林庆国

(上海空间推进研究所 上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112)

摘 要: 为了保证闭式布雷顿循环核心机在空间核电推进系统内能够稳定运行, 需要在其调控过程中同时控制多个系统变量参数, 设定合适的初始状态和调控策略。通过对整个闭式布雷顿循环的系统仿真, 模拟了不同初始压力的情况下核心机在升速加载过程中的系统参数变化情况。在核心机转速与反应堆加热协同配合的调控策略下, 压气机在整个升速加载过程中可以始终处于稳定运行区间内, 而循环系统的初始压力会影响核心机加载过程中的各项参数, 尤其是涡轮入口温度。在相对较低的系统初始压力情况下, 需要在更高的涡轮入口温度条件下, 才能够达到与高初始压力情况下相同的满状态电功率输出。仿真结果验证了以精确转速控制作为运行标准的核心机调控策略可行性, 同时可以为循环系统不同阶段的热试车试验提供指导建议。

关键词: 闭式布雷顿循环; 空间核电推进; 核心机; 调控策略; 系统仿真

中图分类号: V476.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2021)05-0049-07

Simulation analysis of adjustment and control process for core machine in closed Brayton cycle

XUE Xiang, DU Lei, WANG Haoming, ZHANG Yinyong, LIN Qingguo

(Shanghai Engineering Research Center of Space Engine,
Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China)

Abstract: To ensure that the core machine in the closed Brayton cycle can operate stably in the space nuclear power propulsion system, it is necessary to control multiple system variables at the same time during its regulation process, and set appropriate initial states and control strategies. Through the system simulation of the entire closed Brayton cycle, the system parameter changes of the core machine during the speed-up loading process are simulated under different initial pressures. Under the control strategy of the core engine rotational speed cooperated with the reactor heating, the compressor can always be in a stable operation range during the entire speed-up loading process. The initial pressure of the circulation system will affect various parameters during the loading process of the core engine, especially the turbine inlet temperature. In the case of a relatively low system initial pressure, a higher turbine inlet temperature is required to achieve the same full-state electrical power output as that under a high initial pressure.

收稿日期: 2021-06-25; 修回日期: 2021-07-15

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(19DZ1206502); 上海市青年科技英才扬帆计划项目(21YF1430200)

作者简介: 薛翔(1992—), 男, 博士, 研究领域为空间热电转换系统内叶轮机械稳定性分析。

通信作者: 王浩明(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 研究领域为空间热电转换系统的设计与优化。

sure condition. The simulation results verify the feasibility of the core machine adjustment strategy with precise speed control as the operating standard. Meanwhile, these can provide guidance and suggestions for the hot commissioning test of the circulatory system at different stages.

Keywords: closed Brayton cycle; space nuclear electric propulsion; core machine; control strategy; system simulation

0 引言

伴随着人类太空探索的足迹不断扩展,在越来越多的空间任务中,以化学燃料和太阳能为主的常规空间动力能源已不能完全满足任务需求^[1]。利用核能实现空间推进的航天器具备高比冲、大推力、长寿命等特点,可以突破化学能推进的极限,同时不受制于太阳光照条件,是面向未来探索太阳系边界等深空探测任务的重要保障^[2]。

基于闭式布雷顿循环的热电转换系统能够很好地实现百千瓦至兆瓦级的空间核电推进,其循环系统主要由核心机(涡轮、压气机、电机)、核热源、换热器和冷却器等部件构成。闭式布雷顿循环核心机的变工况调节过程中不同系统参数都会受到影响,如果调控策略制定不合理,会严重影响整个系统的循环效率和运行稳定性。

国外在该领域的研究起步较早,NASA 从 20 世纪 60 年代就开始了空间闭式布雷顿循环的研究,研制了小功率闭式布雷顿循环核心机(Brayton rotating unit, BRU)^[3]。本世纪初美国启动了木星冰盖卫星轨道器(jupiter icy Moons obiters, JIMO)计划^[4],文献[5]介绍俄罗斯也在 2009 年首次公布兆瓦级核电推进飞船总体设计方案。欧盟也开展了兆瓦级国际空间核电推进飞船(international nuclear power and propulsion system, INPPS)计划^[6],目前完成了兆瓦级核电推进太空飞船的总体系统设计和地面演示试验台搭建^[7]。这些本质上都是以闭式布雷顿循环热电转换为空的空间核电推进飞行器。国外研究者针对闭式布雷顿循环核心机主要进行了地面试验^[8-9]、系统仿真^[10-11]和循环参数优化^[12]等研究。国内的相关研究工作主要集中在闭式布雷顿循环系统的性能分析^[13-15]、循环参数优化^[16-18]和核心机中部件的单机试验研究^[19-20],对于空间闭式布雷顿循环核心机动态调节策略与系统参数反馈的研究还有所欠缺。

本文聚焦空间闭式布雷顿循环核心机启动加

载过程中的调控策略问题,拟通过转速和反应堆加热的协同控制,在维持核心机空载状态下将转速逐渐提高至额定满转速,随后再热加载,输出电功率,完成核心机启动升速和加载的全过程。参考 JIMO 计划中公布的闭式布雷顿循环参数,对压气机、涡轮等叶轮机机械部件进行设计,通过气动仿真得到其全工况范围性能特性。进一步根据系统总装布局,建立循环系统仿真模型,对核心机升速启动过程中的系统参数、机组状态等特性进行研究,为机组热试车的调控策略和初始状态参数选择提供指导性建议。

1 计算模型

1.1 系统循环参数设定

参照 JIMO 计划中公布的额定发电功率为 100 kW 的闭式布雷顿循环参数,考虑到目前涡轮叶片材料的耐温水平以及辐射散热器的尺寸质量限制,循环系统的热端(涡轮入口)和冷端(压气机入口)温度分别定为 1 150 K 和 411 K,循环系统各处的温度、压力参数如图 1 所示,循环工质选用摩尔质量为 40 g/mol 的 He/Xe 混合气,气体工质流量为 3.5 kg/s,核心机中涡轮、压气机和电机采用同轴设计,转速为 45 000 r/min^[21]。

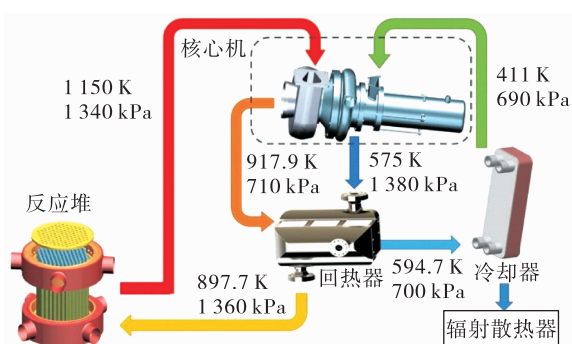


图 1 JIMO 额定发电功率为 100 kW 的闭式布雷顿循环系统参数

Fig. 1 Parameters of the closed Brayton cycle system with a rated power generation of 100 kW in the JIMO plan

1.2 叶轮机械设计与气动仿真

空间闭式布雷顿循环系统受限于空间尺寸和重量,涡轮和压气机通常选用单级径流形式,即向心涡轮和离心压气机,并且由于无法匹配体积庞大的变速箱,需要采用同轴设计,这与地面闭式布雷顿发电系统有所区别,系统变工况调节手段也会有很大差异。

根据图 1 中的系统参数,以向心涡轮绝热效率 $\geq 89\%$,离心压气机绝热效率 $\geq 83\%$,综合喘振裕度 $\geq 15\%$,且压气机和涡轮额定转速相互匹配的技术要求对该闭式循环系统内的离心压气机和向心涡轮进行了气动设计,并通过 CFD 模拟获得涡轮和压气机在全工况范围下的性能曲线如图 2 所示,其中流量和转速均采用与额定状态下参数的相对比例表示。

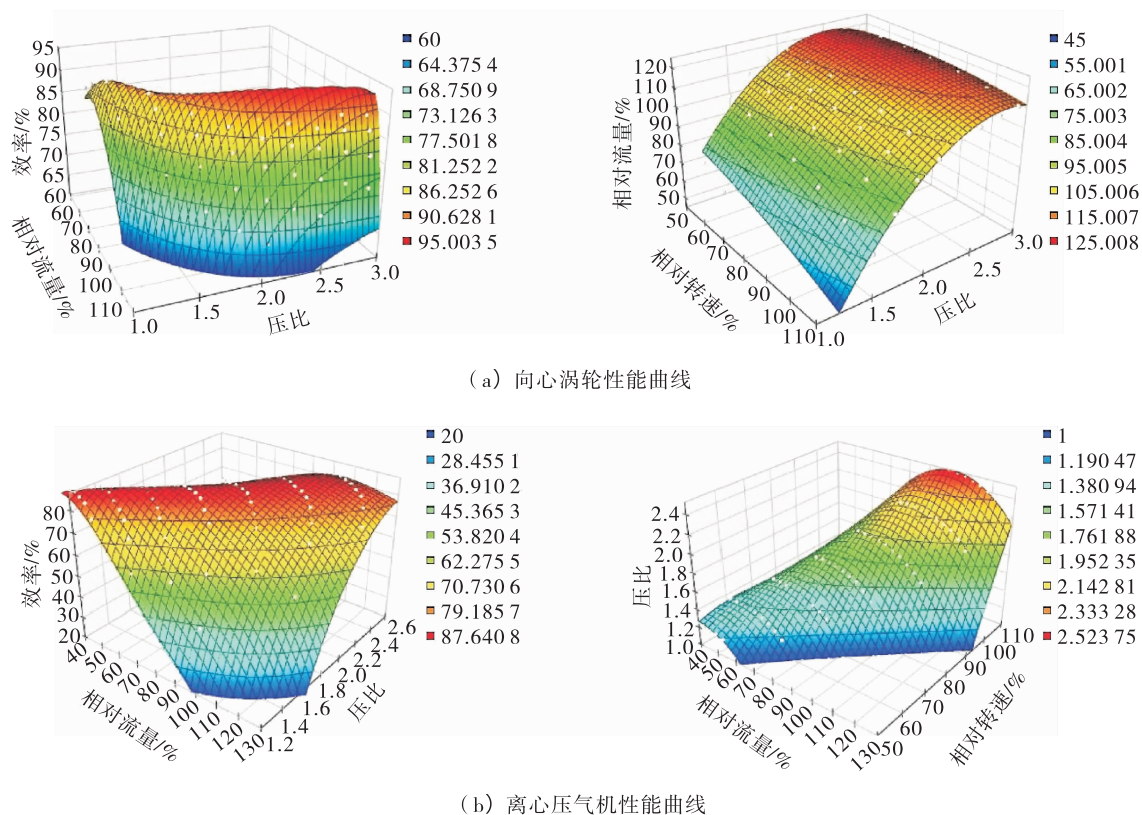


图 2 叶轮机械全工况范围性能曲线

Fig. 2 Performance curve of turbomachinery in full operating range

1.3 电机模型简化

考虑到空间闭式布雷顿循环内电机多为启发一体式,结构较为复杂,需要考虑转子、静子、线圈匝数及具体控制逻辑。为了简化计算,只考虑电动机/发电机转速、电压和扭矩的关系,认为扭矩 Γ 是电压 U 和转速 ω 的函数,即

$$\Gamma = f(U, \omega) \quad (1)$$

借鉴额定发电功率为 100 kW 的通用电机参数表,制定电动机/发电机在不同转速下电压和扭矩的关系如图 3 所示。当转速和扭矩符号相同时,为电动机模式;当转速和扭矩符号相异时,为发电机模式。

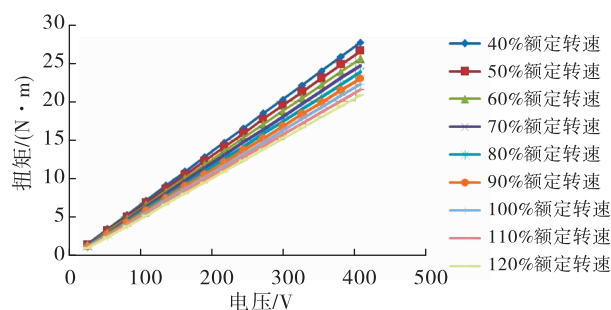


图 3 启发一体式电机的电压-扭矩线

Fig. 3 Voltage-torque line of inspired integrated motor

电机功率 P_e 和电机机械功率 P_m 的关系如下

$$P_e = P_m + Q_e \quad (2)$$

$$P_e = UI \quad (3)$$

$$P_m = \Gamma \omega \quad (4)$$

$$Q_e = P_m \left(\frac{1}{\eta_e} - 1 \right) \quad (5)$$

式中: I 为电动机/发电机工作电流; Q_e 为电动机/发电机产生的热量; η_e 为电动机/发电机效率。

1.4 系统仿真模型构建

利用系统仿真软件 AMESim 建立整体空间闭式布雷顿循环系统模型如图 4 所示, 其中压气机和透平利用气动仿真得到的全工况范围性能曲线数据, 电机采用上述简化模型, 反应堆以加热器模型代替, 系统各部分的相对容积按照图 5 设置。该系统仿真模型的建立基于整体循环系统为闭口绝热系统的假设, 并且动态仿真过程中冷端(压气机入口)温度认为可以通过散热板冷却器的控制维持基本不变。

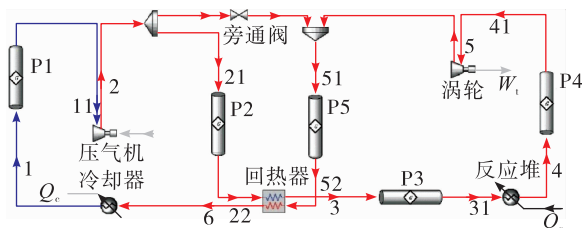


图 4 闭式布雷顿循环系统模型

Fig. 4 System model of closed Brayton cycle

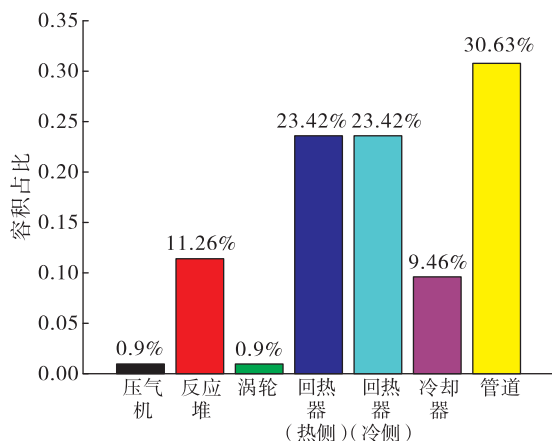


图 5 系统容积组成

Fig. 5 Composition of system volume

2 核心机升速启动过程系统仿真

2.1 过程控制策略描述

以精确转速控制为基础的核心机启动和升速加载过程的调控逻辑如图 6 所示, 其总体过程主要分为以下四步:

1) 核心机在电机驱动下启动并快速升速至额定转速的 35%, 完成转子气浮轴承的起飞。

2) 转子轴承起飞后 1 000 s, 反应堆处的模拟加热器启动并逐渐提高功率, 电机在电动机状态下的输入功率逐渐下降; 同时, 通过电机驱动器提升电机转速, 每间隔 300 s 升高 5 000 r/min, 其中反应堆热功率的升降以电机功耗为判据(当电机功耗小于设定值时, 热功率不再提高)。

3) 电机按照给定电机升速曲线逐渐达到额定转速, 整个启动升速过程保持核心机空载。

4) 继续提高反应堆热功率, 核心机逐渐输出功率, 直到达到设计工况。

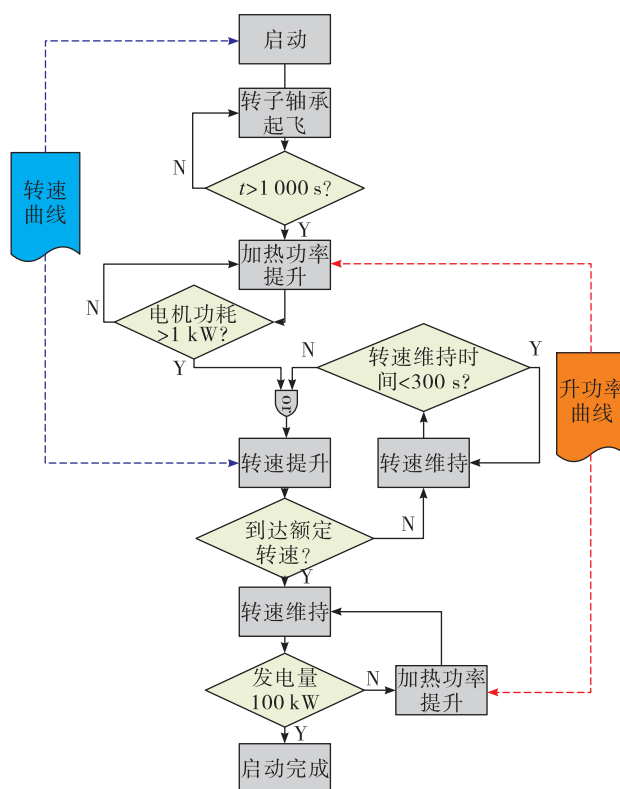


图 6 核心机启动和升速加载过程控制逻辑

Fig. 6 Control logic of core machine during startup and speed-up loading process

2.2 系统仿真结果

2.2.1 设计初始充气压力状态

通过对设计初始状态下的核心机实施上述调控策略升速并加载至额定满状态,从整个过程中系统参数和组件参数的变化情况来看,进一步判定该调控策略的可行性。JIMO 计划中该方案的初始气压力为 400 kPa,在该状态下,核心机按照上述控制策略先快速启动并升速至额定转速的 35%,转子轴承判定起飞后,开始每稳定 300 s 转速提高 500 r/min。在整个启动升速过程中,控制热功率的提升,达到输出功率基本为 0(空载)的目的,同时实现转速的稳定提升。在达到额定转速后,热功率持续增加,逐渐达到额定输出轴功率 100 kW,循环热效率 22.3%,发电效率 20.5%(电机效率按 92% 计算)。整个过程

中系统参数和组件参数的变化情况分别如图 7 和图 8 所示。

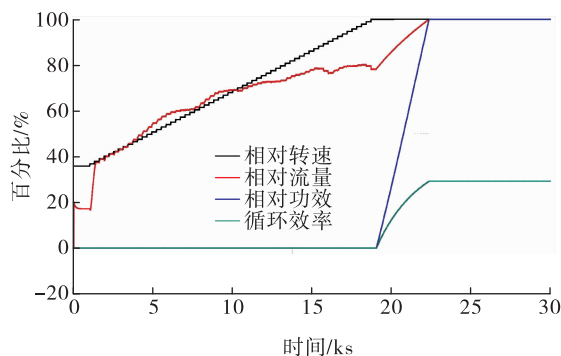


图 7 初始压力为 400 kPa 核心机升速加载过程中系统参数变化情况

Fig. 7 System parameters during startup process of core machine with initial pressure of 400 kPa

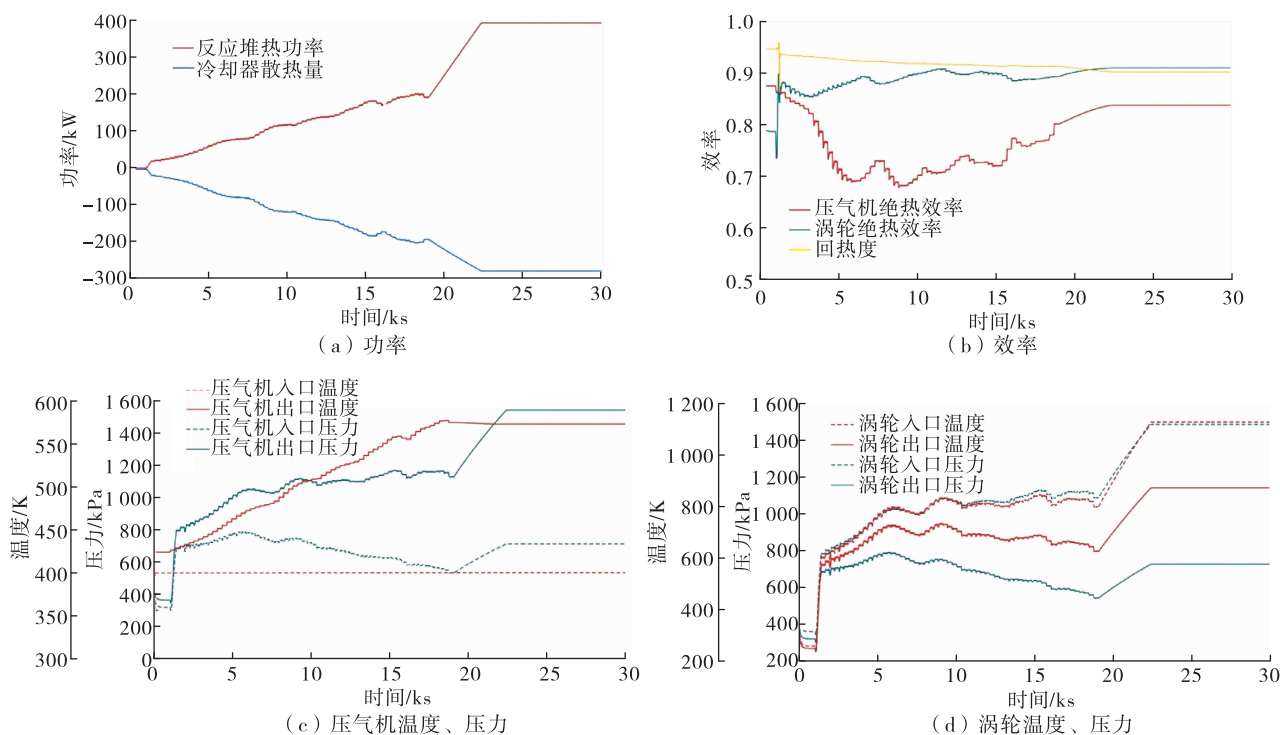


图 8 初始压力为 400 kPa 核心机升速加载过程中组件参数变化情况

Fig. 8 Component parameters during startup process of core machine with initial pressure of 400 kPa

可以看出,在核心机启动并快速升速至转子轴承起飞转速(35% 额定转速)后稳定 1 000 s,开始启动反应堆处的模拟加热器并提高加热功率,此时循环工质流量、各处压力、涡轮入口和出口温度、回热器回热度和涡轮绝热效率都有较为明显的变化。随后按照图 6 中的核心机升速启动策略,转速呈阶

梯状稳步上升,循环系统工质流量随之上升,反应堆模拟器的加热功率和冷却器的散热量也逐渐提高,回热度和涡轮效率始终保持在 90% 左右。在核心机升速加载过程中,压气机压比和涡轮膨胀比逐渐提高,压气机效率有所波动,最低低至 68%,最终在核心机升速至满转速时达到 80%,根据图 2(b)

中的压气机全工况范围性能曲线可知,在整个过程中压气机均处于稳定运行区间。当第 18 750 s(核心机升速至满转速)后,继续加载到额定输出轴功率为 100 kW 的满状态,循环系统内电机开始发电,开始输出电功率,并提升至额定功率 100 kW,整体循环效率达到额定值 22.3%。其过程中,循环工质流量、压气机压比和涡轮膨胀比进一步提高,最终各系统和组件部分重要参数的情况如下:

- 1)反应堆热功率 391.5 kW,工质流量 3 044 g/s,热端温度 1 128.2 K。
- 2)冷却器散热量 277.4 kW,全过程中维持出口温度为 411 K。
- 3)压气机效率 83.8%,涡轮效率 91.0%,回热器回热度 90.3%。

2.2.2 不同相对较低初始压力状态对比

通过系统仿真验证了该调控逻辑可以将闭式布雷顿循环核心机从设计初始状态稳步提升至额定满状态之后,为了给初期的系统热试车调试寻找一个相对较低的合适初始压力值,降低气体泄漏的风险,因而又选择了不同的相对较低初始压力 360 kPa、300 kPa和 200 kPa(90%、75%和 50%设计初始压力值)状态进行对比。采用该调控策略进行了同样流程的系统仿真,核心机升速及加载过程中系统与组件参数的变化趋势相似,当核心机达到额定输出功率为 100 kW 的满状态时,不同初始压力状态下的循环系统和组件部分重要参数如表 1 所示。

表 1 不同初始压力下满状态下循环系统和组件部分重要参数

Tab. 1 Key parameters of circulatory system and components in full state with different initial pressures

参数	初始压力/kPa			
	400	360	300	200
反应堆热功率/kW	391.5	369.8	337.3	281.3
工质流量/(kg·s ⁻¹)	3.044	2.790	2.404	1.737
冷却器散热量/kW	277.4	255.6	223.1	167.2
循环系统热端温度/K	1 128.2	1 159.6	1 222.9	1 410.3
压气机效率/%	83.8	84.0	84.4	85.3
涡轮效率/%	91.0	91.1	91.0	89.8
回热器回热度/%	90.3	90.7	91.3	92.5

通过对比可以发现,当初始压力较低(即工质充填量较小)时,循环流量较小,回热需要设置更大的换热面积,因此回热度有所上升。在相对较低初始压力 300 kPa 和 200 kPa(75%和 50%设计初始压力值)状态下,当核心机要加载到满状态,涡轮入口温度会高于设计温度。尤其在初始压力为 200 kPa 的状态下,核心机加载到满状态需要循环系统热端温度达到 1 410.3 K,远超涡轮设计温度,可能会出现涡轮叶片材料超温损坏的现象,此时涡轮效率也相比其他初始压力状态下有明显降低。在涡轮叶片不超温的前提下,通过仿真结果可知,要保证循环系统热端温度不超过 1 150 K(涡轮入口温度设计值),则该初始压力条件能够输出最大功率为 65.8 kW(额定输出功率的 65.8%),此时反应堆模拟加热功率为 212 kW。在初始压力为 400 kPa 的设计状态下,核心机升速加载至满状态时涡轮入口温度可以严格控制在设计温度 1 150 K 以内,出于安全性考虑,此状态更适用于核心机要满状态运行的情况。但在早期的低状态试车调试过程中,为了防止试验中闭式系统密封性出现问题,可以选择较低的压力体系(50%设计初始压力值),只要控制反应堆加热功率在 212 kW 以内,涡轮入口温度就可以保证在设计值以内,不会出现超温现象,核心机通过加载最大可输出额定电功率的 65.8%。

3 结论

在空间闭式布雷顿循环系统动态仿真模型的基础上,制定了以精确转速控制作为运行标准的核心机调控策略,并对不同初始压力下的核心机升速加载过程进行了仿真计算。根据系统仿真结果,得到以下结论:

- 1)核心机可以通过转速与反应堆加热情况的协同调控策略,在维持核心机空载的状态下将其转速逐渐升至额定满转速,再进一步提高加热功率进行热加载至满状态。整个调控过程中各系统和部件参数稳步趋于设计要求值,压气机在整个调节过程中始终处于稳定运行区间内。
- 2)在循环系统初始压力较低的状态下,意味着工质充填量较小,循环流量也相应较小,回热器需要更大的换热面积,回热器的回热度会有所上升。

3)在循环系统初始压力较低的情况下,需要在更高的涡轮入口温度条件下,才能够达到与高初始压力情况下相同的满状态电功率输出。在核心机要满状态运行的情况下,需要选择合适的初始压力,防止涡轮材料出现超温损坏。

4)相对较低的循环系统初始压力可以降低气体泄漏的风险,在循环系统调试初期的低状态试车中可以优先选择相对较低的压力体系,但要通过监控核心机涡轮入口温度来确定反应堆加热功率和输出电功率的上限值。

参考文献:

- [1] 林庆国,王浩明,程诚. 基于氢化镁的核电/核热双模共质空间核动力技术[J]. 上海航天, 2019, 36(6): 114-120.
- [2] 陈杰,高劭伦,夏陈超,等. 空间堆核动力技术选择研究[J]. 上海航天, 2019, 36(6): 1-10.
- [3] EL-GENK M S, GALLO B M. High-power brayton rotating unit for reactor and solar dynamic power systems[J]. Journal of Propulsion and Power, 2010, 26(1): 167-176.
- [4] MASON L S. A power conversion concept for the Jupiter icy moons orbiter[J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(5): 902-910.
- [5] 朱安文,刘磊,马世俊,等. 空间核动力在深空探测中的应用及发展综述[J]. 深空探测学报, 2017, 4(5): 397-404.
- [6] JANSEN F, GRUNDMANN J T, MAIWALD V, et al. High-power electric propulsion: mars plus Europa-already beyond 2025[C]// 36th International Electric Propulsion Conference. Austria: University of Vienna, 2019.
- [7] KOROTEEV A S, KAREVSKIY A V, LOVTSOV A S, et al. Study of operation of power and propulsion system based on closed Brayton cycle power conversion unit and electric propulsion[C]// 36th International Electric Propulsion Conference. Austria: University of Vienna, 2019.
- [8] JOHNSON P K, MASON L S. Initial test results of a dual closed-brayton-cycle power conversion system [EB/OL]. (2013-8-24) [2021-5-10]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20080006649>.
- [9] BARNETT J W. Nuclear electric propulsion technologies: overview of the NASA/DOE/DOD nuclear electric propulsion workshop[J]. AIP Conference Proceedings, 1991, 217(2): 511-523.
- [10] MARCHIONNI M, BIANCHI G, TASSOU S A. Transient analysis and control of a heat to power conversion unit based on a simple regenerative supercritical CO₂ Joule-Brayton cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 183: 116214.
- [11] MASON L S, SCHREIBER J G. A historical review of brayton and stirling power conversion technologies for space applications[C]//Space Nuclear Conference 2007- Proceedings of Embedded Topical Meeting. [S. l.]: SNC, 2007.
- [12] BIONDI A, TORO C. Closed Brayton cycles for power generation in space: modeling, simulation and exergy analysis[J]. Energy, 2019, 181: 793-802.
- [13] 郭凯伦,王成龙,秋穗正,等. 兆瓦级核电推进系统布雷顿循环热电转换特性分析[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(1): 16-23.
- [14] 冯致远,张昊春,吉宇,等. 航天器核动力推进系统热力学性能研究[J]. 载人航天, 2016, 22(6): 797-804.
- [15] 郑开云. 超临界二氧化碳布雷顿循环效率分析[J]. 发电设备, 2017, 31(5): 305-309.
- [16] LIU H Q, CHI Z R, ZANG S S. Optimization of a closed Brayton cycle for space power systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 179: 115611.
- [17] HU H M, GUO C H, CAI H F, et al. Dynamic characteristics of the recuperator thermal performance in a S-CO₂ Brayton cycle[J]. Energy, 2021, 214: 119017.
- [18] ZHAO H, DENG Q H, HUANG W T, et al. Thermodynamic and economic analysis and multi-objective optimization of supercritical CO₂ brayton cycles[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 138(8): 081602.
- [19] 刘学峥. 氦氖工质离心压缩机气动设计及流动特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [20] 宋怀乐,秦政,杨康. 基于二氧化碳工质的向心透平气动性能研究[J]. 热力透平, 2019, 48(3): 205-208.
- [21] 王浩明,薛翔,张银勇,等. 空间闭式布雷顿循环旁路调节特性分析[J]. 火箭推进, 2021, 47(2): 61-67.
- WANG H M, XUE X, ZHANG Y Y, et al. Analysis of bypass regulation characteristics for space closed Brayton cycle system[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2021(2): 61-67.