

空间闭式布雷顿循环旁路调节特性分析

王浩明^{1,2}, 薛 翔^{1,2}, 张银勇^{1,2}, 林庆国^{1,2}

(1. 上海空间推进研究所, 上海 201112;

2. 上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112)

摘 要: 闭式布雷顿循环是未来空间大功率热电转换的有效途径, 而旁路调节是实现系统快速功率调节和转速控制的有效手段。通过对标美国普罗米修斯计划中的热电转换系统参数, 进行了涡轮、压气机的气动设计和换热器性能计算, 获得了包括组件特性、管道布局的热电转换系统动态仿真模型。基于该动态模型, 对旁通阀不同响应时间、开度对系统功率、转速和循环温度、压力等参数影响进行仿真研究。空间闭式布雷顿循环系统在旁通阀开启后, 系统功率和转速快速下降, 其中功率出现了超调现象; 循环高压侧压力下降且低压侧压力上升; 回热器热侧入口温度增加而冷侧入口温度下降, 热应力进一步提高。系统容积的提高, 在一定程度上可以降低系统对旁通阀调节的敏感性。

关键词: 闭式布雷顿循环; 动态仿真; 旁路调节; 阀门开度; 响应时间

中图分类号: V476.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2021)02-0061-07

Analysis of bypass regulation characteristics for space closed Brayton cycle system

WANG Haoming^{1,2}, XUE Xiang^{1,2}, ZHANG Yinyong^{1,2}, LIN Qingguo^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai 201112, China)

Abstract: Closed Brayton cycle is an effective way of high-power thermo-electrical conversion in the future space mission, and the bypass adjustment is an effective way to realize fast power regulation and rotating speed control. Through the cycle parameters of thermo-electrical conversion system in Prometheus Project of US, the aerodynamic designs of turbine and compressor were finished as well as the performance of heat exchangers. Then, a dynamic simulation model was obtained based on the components characteristics and pipeline layout. Based on this dynamic model, the effect of different response time and opening degree of the bypass valve on the system power output, rotating speed, cycle temperature, pressure and other system parameters were simulated. The results show that the power output and rotating speed of the closed space Brayton cycle system decrease rapidly after the bypass valve opening, especially the power overshoot occurs in the process. The pressure in the high-pressure side decreases and it increases in the low-pressure side. The inlet temperature of recuperator hot side increases, but the inlet temperature of cold side decreases, and the thermal stress of recuperator further increases. The sensibility for bypass regulation can be reduced by improving system volume inertia.

收稿日期: 2020-10-11; 修回日期: 2020-11-11

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(19DZ1206502)

作者简介: 王浩明(1985—), 男, 博士, 研究领域为空间推进系统及大功率热电转换技术。

Keywords: closed Brayton cycle; dynamic simulation; bypass regulation; valve opening; response time

0 引言

随着空间任务对能源动力需求的不断增长,常规化学能和太阳能已无法适应大范围轨道转移、空间拖船、深空探测等空间任务^[1-2]。核能以其长期、稳定的能量供应和大功率输出的特点,在可预期的未来将成为解决空间能源问题的唯一途径^[3]。然而,核能只能提供热能,虽然可以通过加热氢来达到 900 s 的高比冲核热推进^[4-5],但是在实现 7 000 s 比冲以上的高效核电推进^[6]、星表能源站或者其他科学载荷时需要进一步将核的热能转化为电能。以核反应堆为热源的空间大功率电源的研究从 20 世纪 50 年代开始持续至今,并且逐渐向着更高的功率量级发展^[7]。

核反应堆空间电源中除了反应堆之外,热电转换系统承担了将热能转换成电能的重要任务。热电转换方式主要包括静态转换(温差、热离子、碱金属等)和动态转换(朗肯循环、布雷顿循环、斯特林循环)两类,其中动态转换效率往往高于静态转换,一般情况下更适合大功率应用场合^[8]。在动态转换中,布雷顿循环相比于朗肯循环和斯特林循环,能够兼顾转换效率和系统质量^[9],更重要的是随着系统功率的增加,布雷顿循环系统的质量比功率(kg/kWe)逐渐减小^[10]。因此,国外百千瓦和兆瓦级核动力飞行器均采用了布雷顿循环作为热电转换方案^[11-12]。

国外对于空间闭式布雷顿循环的研究起步较早,理论研究方面进行了热力循环的参数分析优

化^[13]、系统工作特性的仿真验证^[14]等工作;试验验证方面,从早期的十千瓦级小功率核心机的系统试验^[15]逐渐发展到多机组并联闭式布雷顿循环研究^[16]、百千瓦级大功率核心机与电推进联合演示验证^[17]。国内闭式布雷顿循环的研究主要集中在系统级的热力学循环性能分析^[18]、基于质量尺寸和性能的多目标参数优化等^[19-20],缺乏对具有空间应用特点的闭式布雷顿循环动态工作特性和运行控制策略的研究。本文以美国普罗米修斯计划的木星冰盖卫星轨道器 Jupiter Icy Moon Orbiter(JIMO)任务为研究对象,一方面在其总体循环参数的基础上,对涡轮、压气机等关键组件进行设计,获取组件特性;另一方面,根据其总装结构,建立管路模型。最终,建立全系统动态仿真模型,对系统容积变化、旁通阀开关引起的系统状态变化进行分析研究。

1 JIMO 项目概述

本世纪初,NASA 开始了普罗米修斯计划和 JIMO 任务。根据之前的技术积累,研制初期即确定了闭式布雷顿循环作为热电转换系统^[12]。热电转换系统采用简单回热式布雷顿循环以提高转换效率,系统输出功率为 200 kWe,采用两个额定发电功率为 100 kWe 的闭式布雷顿循环发电模块并联实现。考虑到涡轮叶片材料以及辐射散热系统的尺寸质量,循环高低温端温度分别取为 1 150 K 和 411 K,系统压比 2.0,整体循环热效率为 22.3%^[21]。循环各处温度压力参数如图 1 所示。

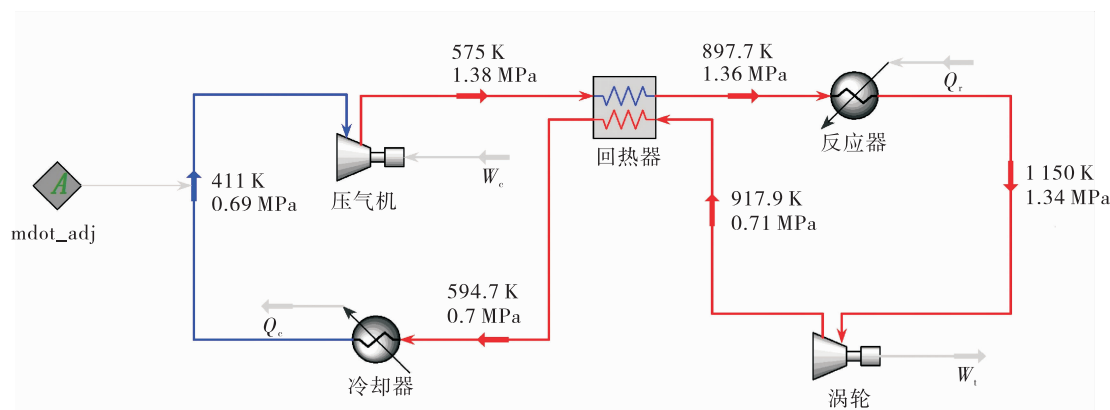


图 1 100 kWe 闭式布雷顿循环参数

Fig. 1 Parameters of 100 kWe closed Brayton cycle

2 计算模型

2.1 循环工质选择

闭式布雷顿循环的工质经历了空气、氮气、氦气、超临界二氧化碳、氨基混合气的过程^[22]。虽然空气或者氮气方面已有丰富的叶轮机械设计经验,但是由于热工性能特性较差,从流阻以及循环性能方面无法满足空间高效、紧凑型布雷顿循环热电转换系统的应用。超临界二氧化碳工质由于其密度高,便于叶轮机械的设计,理论上可以获得较高的循环效率,但是由于二氧化碳在近临界状态下物性变化剧烈,对系统控制提出了更高的要求。同时,超临界二氧化碳取得高转换效率的前提是低温端温度接近30℃左右的临界温度,但是对于空间辐射散热条件下,尤其是对于兆瓦及以上的大功率系统中,获得30℃的循环低温会大大增加辐射散热系统的尺寸和质量^[23]。氦气相比空气和氮气,优点在于其高热导率和低黏度,但是其缺点在于过低的摩尔质量导致了叶轮机械气动载荷的提高,增加设计难度。氨基混合气在氦气中混合其他摩尔质量更高的气体,一方面能够减小叶轮机械的气动载荷,另一方面会导致热工性能的下降。已有研究表明,

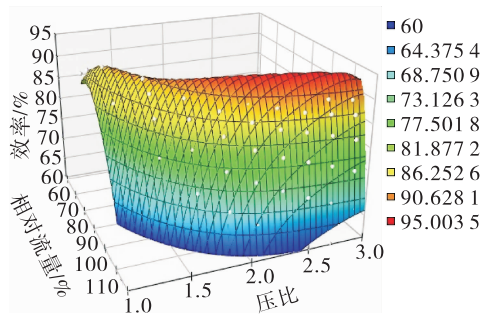
氦、氙混合气体是比较适合用于空间闭式布雷顿循环的循环工质^[24]。其中,摩尔质量为40 g/mol的氦氙混合气适合于100 kWe级的大功率场合,摩尔质量为83.8 g/mol的氦氙混合气适合于10 kWe级的小功率场合。

2.2 叶轮机械

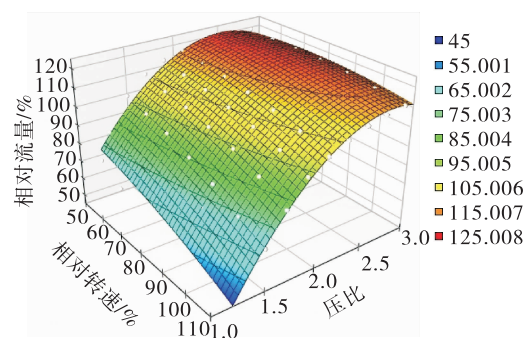
根据系统循环流量和压比,对闭式布雷顿循环中的涡轮和压气机进行气动设计。设计采用单级向心涡轮,额定工况点温度和压力分别为1 150 K和1.34 MPa,设计膨胀比1.9。设计采用单级离心压气机,转速为45 000 r/min,压比2.0,额定工况点温度和压力分别为411 K和0.69 MPa。通过CFD仿真得到涡轮特性曲线如图2所示,由此可以按式(1)得到涡轮和压气机折合转速、折合流量下的性能曲线,以此得到不同工况下的涡轮、压气机压比和效率。

$$\begin{cases} \pi = \pi\left(\frac{\dot{m} \sqrt{T_{in}}}{p_{in}}, \frac{n}{T_{in}}\right) \\ \eta = \eta\left(\frac{\dot{m} \sqrt{T_{in}}}{p_{in}}, \frac{n}{T_{in}}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: π 为压力比; η 为效率; \dot{m} 为质量流量; T_{in} 为入口温度; p_{in} 为入口压力; n 为转速。



(a) 涡轮特性曲线



(b) 压气机特性曲线

图2 涡轮与压气机特性曲线

Fig. 2 Turbine and compressor characteristics

2.3 换热器

空间闭式布雷顿循环涉及换热器包括回热器与冷却器。换热器特性可通过换热有效度 ε 、压力损失 $\Delta p/p$ 等无量纲参数来表示,参数定义如下

$$\varepsilon = \dot{Q}_{\text{act}} / \dot{Q}_{\text{max}} \quad (2)$$

式中: \dot{Q}_{act} 为实际热流量; \dot{Q}_{max} 为最大热流量, $\dot{Q}_{\text{max}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{h,\text{in}} - T_{c,\text{in}})$ (\dot{m} 为工质流量; c_p 为定压比热容; $T_{h,\text{in}}$ 和 $T_{c,\text{in}}$ 分别为热侧和冷侧入口温度)。

$$\Delta p/p = (p_{\text{in}} - p_{\text{out}})/p_{\text{in}} \quad (3)$$

式中 p_{in} 和 p_{out} 分别为进出口压力。换热器主要参数如表 1 所示^[25],表中下标 h 和 c 分别表示换热器热侧和冷侧。

表 1 JIMO 换热器设计参数

Tab.1 Heat exchanger parameters of JIMO

换热器	换热介质	ε	UA / (kW · K ⁻¹)	(Δp / p) _h /%	(Δp / p) _c /%
回热器	气-气	0.95	38.7	2.0	1.0
冷却器	气-液	0.97	22.8	1.0	/

2.4 管道模型

JIMO 项目布雷顿循环总装结构如图 3 所示^[12]。与反应堆的对接接口^[24],预估布雷顿循环主回路各管道长度如表 2 所示。

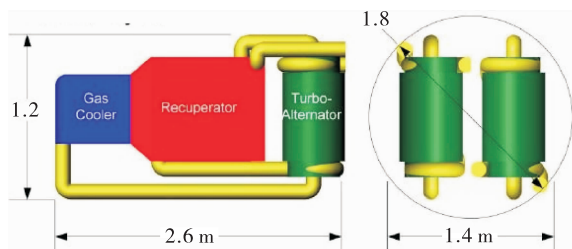


图 3 JIMO 闭式布雷顿循环热电转换系统总装布局

Fig.3 Layout of JIMO's closed Brayton cycle thermo-electric conversion system

表 2 主回路管道长度估算

Tab.2 Pipe length estimation of primary loop

管道	编号	数值/m	备注
冷却器-压气机	P1	2.72	低压侧
压气机-回热器(冷侧)	P2	1.20	高压侧
回热器(冷侧)-反应堆	P3	2.32	高压侧
反应堆-涡轮	P4	1.55	高压侧
涡轮-回热器(热侧)	P5	0.62	低压侧
回热器(热侧)-冷却器	-	-	无管道,见图 3

2.5 系统模型

图 4 为带有旁通阀调节的闭式布雷顿循环动态仿真模型,其中各组件之间的连接管道按表 2 参数设置,计算过程基于以下假设:①不考虑系统漏热;

②压气机入口温度保持 411 K 不变;③反应堆通过简化模型代替^[26]。

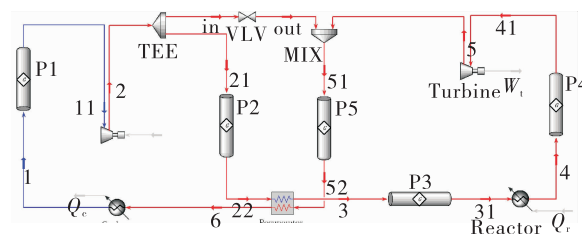


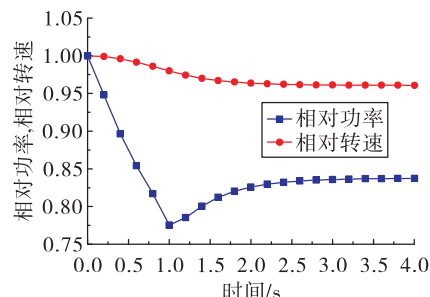
图 4 闭式布雷顿循环动态仿真模型

Fig.4 Dynamic simulation model of closed Brayton cycle

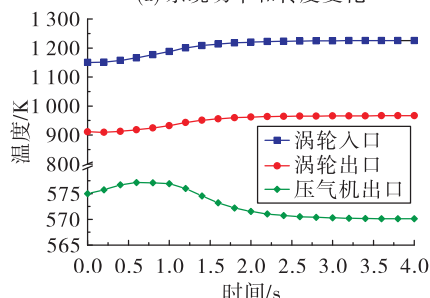
3 旁路调节系统特性

3.1 系统参数变化

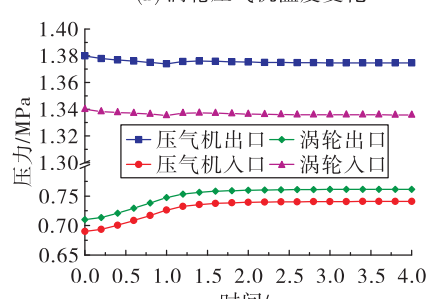
系统在额定工况下打开压气机与涡轮之间的旁通阀,压气机出口气体中有一部分直接与涡轮出口气体混合,图 5 为开阀后(阀门响应时间为 1 s)系统状态参数的变化。



(a) 系统功率和转速变化



(b) 涡轮压气机温度变化



(c) 涡轮压气机压力变化

图 5 系统状态参数变化

Fig.5 Variation of system parameters

由于经过旁通阀的气体不参与加热和做功,因此核心机输出功率和转速在开阀后快速降低,在短时间(4 s)内达到新的平衡。从功率和转速变化曲线中可以看到,从阀门开始动作(0 s)至阀门完全打开(1 s),功率和转速均呈现下降趋势;1 s以后转速持续下降而功率呈现略有回升的趋势。

造成这种现象的原因在于,旁通阀打开瞬间造成压气机转速突降,效率下降较快,同时在此过程中低压侧压力开始升高。当阀门停止动作,低压侧升高的压力导致旁通阀流量相比于全开瞬间有所下降,于是输出功率逐渐回升。涡轮压气机方面,开阀后造成流经热源的流量变小,在加热功率不变的条件下,涡轮入口温度有所上升。同时由于转速下降,一方面使得压气机压比下降,出口温度和压力均降低,另一方面造成涡轮膨胀比下降,出口温度升高。

3.2 旁通阀开度的影响

图6为旁通阀开度变化对系统状态的影响。旁通流量越大,系统功率和转速下降程度越大,当旁通流量达到主流的25%时,系统功率下降接近70%,转速下降约20%。因此,在闭式布雷顿循环中如果采用旁通阀调节系统转速和功率,需要控制旁通阀的开度,尤其是对于采用动压箔片轴承的核心机,以免开度过大引起转速骤降,导致轴承承载力不足。

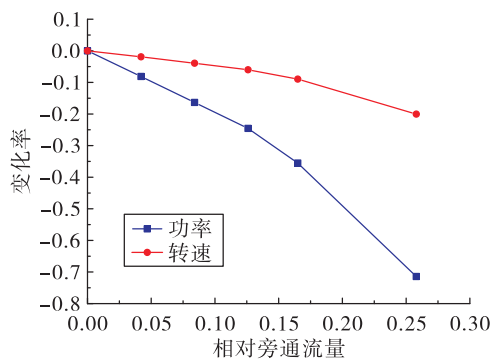


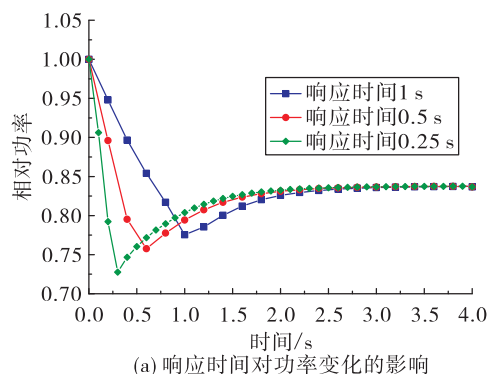
图6 不同旁通量下的系统功率和转速变化

Fig.6 Power output and rotating speed change with different bypass flow rates

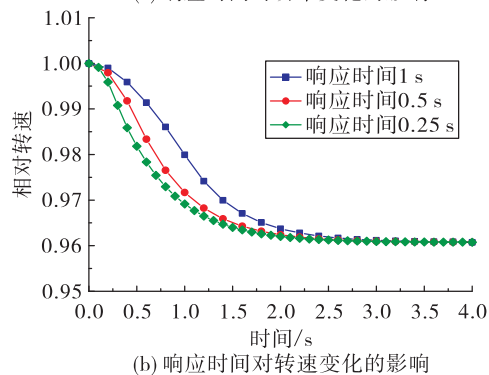
3.3 旁通阀响应时间的影响

图7为旁通阀(开度一致)不同响应时间下系统开阀后的特性变化曲线。响应时间大小不影响系统最终的平衡状态。旁通阀响应时间越短,系统变化过程越剧烈,并且系统再次达到平衡所需时间

越小。将相对功率曲线中新平衡状态下的值 P_{eq} 与曲线中最小值 P_{min} 之差定义为超调量 $\Delta P = P_{eq} - P_{min}$ 。从曲线数据可以看到,阀门响应时间越小,超调量越大,因此在旁通阀调节过程中,需要考虑开阀后的超调量对系统的影响,防止由于超调造成负载过大导致核心机负载过大而转速持续下降的问题。



(a) 响应时间对功率变化的影响



(b) 响应时间对转速变化的影响

图7 阀门响应速度对系统状态变化的影响

Fig.7 Impact of valve response time on system state change

4 系统容积对旁路调节的影响

在闭式布雷顿循环总体参数以及各组件设计确定的条件下,影响系统容积的主要因素是各组件之间的连接管路,而连接管路的长度与走向直接与系统布局有关,即系统总装布局决定了系统容积。由于以反应堆为热源的空间闭式布雷顿循环系统在飞行器上的位置靠近核堆,因此总装布局需要考虑:①减小闭式布雷顿循环系统横截面积,通过减小屏蔽角来降低反应堆屏蔽层质量(约占反应堆总重量的53%);②减小管道长度,降低系统流动阻力。JIMO项目在反应堆与闭式布雷顿循环气体回路之间设有主换热器,因此热源容积按照主换热容积计算。根据组件设计和表2管道数据,系统各部

分容积占比和循环高、低压侧容积对比如图 8 所示。系统容积构成中高压侧与低压侧容积分别为 54.04% 和 45.96%, 其中回热器占比最大达 46.84%, 管道次之, 占 30.63%。

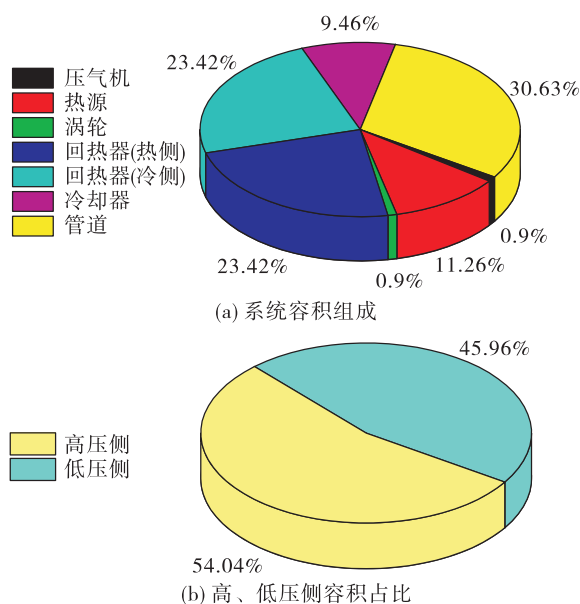


图 8 闭式布雷顿循环各部分容积占比

Fig. 8 Volume percentage of each component in closed Brayton cycle

以表 2 数据为基准, 改变管道长度来计算不同管道容积 (即总装布局) 下的系统性能变化, 结果如图 9 所示。

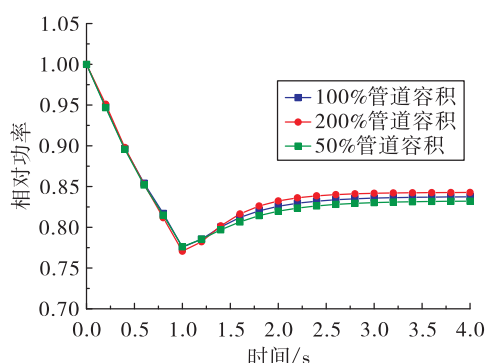


图 9 不同容积下旁通阀调节对系统的影响

Fig. 9 Effect of bypass valve regulation on system under different volumes

图 9 中 200% 和 50% 管道容积分别表示将表 2 数据中的管道数据增加一倍和减半, 管径保持不变。管道长度较大的系统容积较大, 仿真计算过程中, 保持初始系统中的工质充装压力相同 (容积大

的系统工质充装质量较大)。此时容积大的系统相比于容积较小的系统而言, 在核心机达到额定转速时系统压比略小而流量略大。同时, 旁通阀开度一致的情况下, 旁通流量对于不同容积系统而言基本相同。因此容积大的系统在旁通阀打开并重新达到平衡后, 功率略大于容积小的系统。即在相同的阀门开度和响应时间下, 旁通阀对系统功率变化的程度与系统容积呈现负相关的关系。值得注意的是, 管道长度增加必然导致流阻增加, 但由于系统循环阻力主要集中在换热器芯体, 因此由此造成的功率下降并不明显。

5 结论

本文利用 JIMO 热电转换系统参数对压气机、涡轮进行了气动设计, 并且利用该系统换热器参数得到了回热器与冷却器的性能参数, 最后基于各组件模型和管路布局形成了 100 kW_e 空间闭式布雷顿循环热电转换动态仿真模型, 通过该模型对旁路调节下的系统动态特性进行了仿真计算。结果表明:

- 1) 通过压气机与涡轮两者出口之间的旁通阀, 可实现系统输出功率和转速的快速调节; 同时, 该调节方式会造成循环高压侧压力下降和低压侧压力上升, 并且导致涡轮出口温度升高和压气机出口温度降低, 由此对回热器造成一定冲击。
- 2) 系统在旁通调节后的最终平衡状态与阀门响应时间无关, 仅与阀门开度有关。
- 3) 阀门响应时间影响调节过程中参数变化的剧烈程度, 尤其是功率变化出现超调的现象。
- 4) 通过管道容积对比不同系统容积下旁路调节的系统特性, 容积较大的系统在旁通流量一定的情况下, 系统变化程度略小。

参考文献:

- [1] ROSEN R, SCHNYERA D. Civilian uses of nuclear reactors in space[J]. Science & Global Security, 1989, 1(1/2): 147-164.
- [2] STANCULESCU A. The role of nuclear power and nuclear propulsion in the peaceful exploration of space[M]. Vienna: Intl Atomic Energy Agency, 2005.
- [3] LYONS V J, GONZALEZ G A, HOUTS M G, et al. Space

- power and energy storage roadmap[R]. Washington DC: NASA, 2012.
- [4] GABRIELLI R A, HERDRICH G. Review of nuclear thermal propulsion systems[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2015, 79: 92-113.
- [5] 李强, 李家文, 王戈, 等. 新型空间双模式核热推进系统热力学性能研究[J]. 火箭推进, 2018, 44(6): 21-28.
- LI Q, LI J W, WANG G, et al. Research on thermodynamic performance of a new aerospace nuclear thermal propulsion system[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2018, 44(6): 21-28.
- [6] BARNETT J W. Nuclear electric propulsion technologies: Overview of the NASA/DOE/DOD nuclear electric propulsion workshop[C]// AIP Conference Proceedings. New Mexico: American Institute of Physics, 1991.
- [7] 胡古, 赵守智. 空间核反应堆电源技术概览[J]. 深空探测学报, 2017, 4(5): 430-443.
- [8] DATAS A, MARTÍ A. Thermophotovoltaic energy in space applications: Review and future potential[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017, 161: 285-296.
- [9] TORO C, LIOR N. Analysis and comparison of solar-heat driven Stirling, Brayton and Rankine cycles for space power generation[J]. Energy, 2017, 120: 549-564.
- [10] MASON L S. A comparison of Brayton and Stirling space nuclear power systems for power levels from 1 kilowatt to 10 megawatts[C]//AIP Conference Proceedings. New Mexico: American Institute of Physics, 2001.
- [11] KOROTEEV A S, ANDIANOV D I, KAREVSKIY A V, et al. Test bench for key components of megawatt class international power and propulsion system ground demonstration[C]// 7th European Conference for Aeronautics and Space Sciences. Milan, Italy: EUCASS, 2017.
- [12] MASON L S. A power conversion concept for the Jupiter icy moons orbiter[J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(5): 902-910.
- [13] BIONDI A, TORO C. Closed Brayton cycles for power generation in space: Modeling, simulation and exergy analysis[J]. Energy, 2019, 181: 793-802.
- [14] WRIGHT S A, LIPINSKI R J, VERNON M E, et al. Closed Brayton cycle power conversion systems for nuclear reactors[R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2006.
- [15] MASON L S, SCHREIBER J G. A historical review of brayton and stirling power conversion technologies for space applications[C]//Proc. of the Space Nuclear Conference. Boston, MA: [s. n.], 2007.
- [16] JOHNSON P K, MASON L S. Initial test results of a dual closed-brayton-cycle power conversion system[EB/OL]. 2007.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] MASON L S. Power conversion concept designed for the Jupiter Icy Moons Orbiter: 20050192432[R]. NASA Glenn Research Center Cleveland: Research and Technology, 2003.
- [22] DE OLUMAYEGUN O, WANG M H, KELSALL G. Closed-cycle gas turbine for power generation: a state-of-the-art review[J]. Fuel, 2016, 180: 694-717.
- [23] ROMANO L F, RIBEIRO G B. Optimal temperature of operation of the cold side of a closed Brayton cycle for space nuclear propulsion[C]// International Nuclear Atlantic Conference. Brazil: [s. n.], 2017.
- [24] TOURNIER J M, EL-GENK M, GALLO B. Best estimates of binary gas mixtures properties for closed brayton cycle space applications[C]//4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC). San Diego, California: AIAA, 2006.
- [25] BARRETT M. Performance expectations of closed brayton-cycle heat exchangers in 100-kWe nuclear space power systems[C]//1st International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC). Portsmouth, Virginia: AIAA, 2003.
- [26] 郝浩然, 杨小勇, 王捷. 旁路阀调节对高温气冷堆闭式布雷顿循环瞬态特性影响研究[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(4): 612-620.