

基于运行状态的氦氙布雷顿循环气体组分分析

王浩明^{1,2}, 陈金利^{1,2}, 王园丁^{1,2}, 郭曼丽^{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 氦氙气体的组分保持是氦氙布雷顿能量转换系统长期稳定运行的基础,而无论是工质气体的泄漏还是充填量的调节都有可能导导致系统中的氦氙气体组分发生变化,进而影响系统运行状态。通过对氦氙布雷顿系统的动态仿真计算,得到了气体组分发生变化时系统运行的差异。当气体组分发生变化时,系统共同工作线将发生偏移,尤其是气体摩尔质量变小时,共同工作线向喘振线偏移;并且在到达满功率输出时,压气机喘振裕度变小,且需要更高的涡轮入口温度;同时会导致回热器热侧温度入口提高,不利于系统的稳定运行。基于系统仿真结果提出了在额定转速下以负荷率、流量为变量的氦氙气体组分计算方法,为实现氦氙布雷顿循环工质组分变化的监控和调节提出了新思路。该方法中,流量的精确测量是提高组分分析精度的重要保障。

关键词 布雷顿循环;氦氙工质;运行状态;动态仿真;气体组分

中图分类号 V476.2 **文献标识码** A **文章编号** 1672-9374(2023)03-0076-07

Gas composition analysis of helium-xenon Brayton cycle based on operating status

WANG Haoming^{1,2}, CHEN Jinli^{1,2}, WANG Yuanding^{1,2}, GUO Manli^{1,2}

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

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

Abstract Gas composition maintenance of helium-xenon mixture is the basis for the long-term stable operation of the helium-xenon brayton energy conversion system. However, composition of the helium-xenon gas in the system may change because of working gas leakage or adjustment of filling amount, and then system operation status is affected. Through the dynamic simulation of the helium-xenon brayton system, the difference of the system operation status was obtained with the condition of the gas composition changing. When the gas composition changes, the common working line of the system will shift, especially when the gas molar mass becomes smaller, the common working line will shift to compressor surge line; and when the full power output is reached, the surge margin of the compressor will be smaller and higher inlet temperature of turbine and recuperator is required, which is not conducive to the stable operation of the system. Based on the system simulation results, this paper proposed a calculation method of helium-xenon gas composition with load rate and flow rate as variables at rated speed and put forward a new idea for monitoring and adjusting the change of working fluid composition in helium-xenon Brayton cycle. In

收稿日期:2022-07-03;修回日期:2022-07-23

基金项目:上海市科学技术委员会科研计划项目(19DZ1206502);国家自然科学基金项目(u1967203)

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。

this method, accurate measurement of flow rate is an important guarantee to improve the precision of component analysis.

Key words Brayton cycle; helium-xenon mixture; operating status; dynamic simulation; gas composition

0 引言

从 20 世纪 60 年代开始,核能作为长期稳定的能量来源已经在多种长周期的空间任务中得到应用^[1]。最常见的类型是放射性同位素发电机,已用于许多深空探测器和星表能源供应^[2-3];也有小型裂变反应堆用在地球观测卫星,如 TOPAZ^[4]和 Romashka^[5]反应堆。随着未来空间任务的多样性和复杂性,航天器对能源的需求不断增加^[6-7],大功率核反应堆结合高效热电转换已经成为解决空间能源短缺的唯一途径。欧美国家已经开展了百千瓦和兆瓦级以上的航天器能源系统研究^[8-10]。并且,在能量转换方式上,基本都选择了布雷顿循环。布雷顿循环兼顾了热电转换效率和系统质量,特别是随着系统功率等级向兆瓦、十兆瓦级以上发展^[11],系统功率密度相比其他转换方式呈现出更快的提高趋势^[12]。因此,布雷顿循环是未来兆瓦级以上大功率热电转换的优选技术路径^[13]。

闭式布雷顿循环的工质从早期的空气、氮气发展到氦气^[14]。空气和氮气存在材料氧化、高温渗氮脆化以及换热性能差、流阻大等问题;相比之下,氦气作为惰性气体且具备良好的换热性能,避免了上述问题,但是由于其压缩困难,往往需要通过设计多级叶轮机械,一定程度上难以达到空间应用的轻量化要求。为解决氦气工质难压缩的问题,同时尽可能保持换热特性,研究人员开始对氦气中加入二氧化碳、氮气、氙气等其他气体形成的混合气体物性进行研究^[15]。通过改变不同气体组分,并从比热容、热导率和黏度等参数对比发现,氦氙混合气体具有良好的流动换热特性,并且在摩尔质量 40 g/mol 时普朗特数达到最小值 0.26^[15]。因此,布雷顿循环通常采用氦氙混合气体作为循环工质^[16]。从系统优化角度而言,通常十千瓦级的小功率系统采用摩尔质量为 83.8 g/mol 的氦氙混合气体^[17],而百千瓦级的大功率系统一般采用摩尔质量为 40 g/mol 的氦氙混合气体^[18]。对于确定的系统,对氦氙混合气体的组分具有较高的稳定性要求以保持运行状态。然而,空间布雷顿循环通常需要具备五至十年

甚至更长的在轨周期,因此循环中气体的泄漏尤其是氦气的泄漏、气体的充填等情况都会导致混合气体组分发生变化,从而影响系统运行状态。在地面环境中,可通过气体成分测量仪来对混合气体组分进行实时监控,从而反馈至气体储供系统进行调节。而在空间应用状态下,气体成分测量仪会带来额外的设备质量,且在辐射状态下设备是否能够满足长期使用要求仍然处于未知状态。因此,如何通过简单的方式分析布雷顿循环气体组分,为系统中的混合气体组分调节系统提供调节方向,是系统长期高效稳定运行的重要保障。

本文对混合气体组分变化引起的系统状态变化进行分析,并对叶轮机械和换热器等关键单机的运行安全性进行评估。另外,对运行参数进行分析,提出对混合气体成分进行表征的方法,为空间氦氙布雷顿循环的工质组分分析提供方法。

1 计算模型

1.1 系统模型

笔者基于 NASA 的普罗米修斯计划 JIMO 任务循环参数^[18-19]完成了系统动态计算模型(见图 1),并且进行了系统调控方面的相关研究^[20-21]。该项目采用 40 g/mol 的氦氙混合气体作为循环工质(氦氙摩尔比为 72:28),通过并联两个 100 kW 的发电模块,实现总功率 200 kW 的输出。对于单个发电模块,由涡轮、压气机、高速电机、回热器、冷却器以及连接管道组成。其中,高速电机通常采用具备电动和发电两种工作模式的高速电机,在启动初期,以电动机模式运行并驱动压气机,维持回路气体循环;随着反应堆热源功率的提高,涡轮输出轴功率不断增大,因而电机消耗功率开始降低,并最终进入发电工作模式。回热器和冷却器分别用于涡轮排气的余热利用和循环废热的排放。计算模型中在 40 g/mol 的氦氙混合气体条件下进行了涡轮和压气机的设计并获得了不同转速下的特性曲线,建立了对应的反应堆、回热器、冷却器和管道模型。本文将基于该仿真模型分析氦氙混合气体组分变化对系统运行的影响和如何通过系统参数来获得循环工质中氦氙气体的比例。

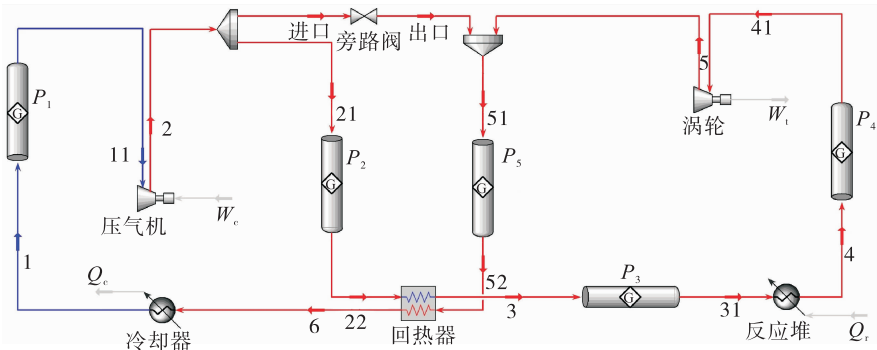


图 1 闭式布雷顿循环动态仿真模型

Fig. 1 Dynamic simulation model of closed Brayton cycle

1.2 系统运行过程描述

本文对系统启动升速至加载到满功率输出的过程进行仿真。其中,启动加速过程采用零功率输出的控制策略,即涡轮输出功率与压气机消耗功率相等,以此获得系统中涡轮和压气机的共同工作线。在系统转速达到设计转速后,保持转速不变的情况下加载至额定输出。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不变;③忽略气体组分变化时黏度等参数变化对叶轮机械气动特性的影响;④忽略单机在长期运行状态下的性能衰减。计算流程如图 2 所示。

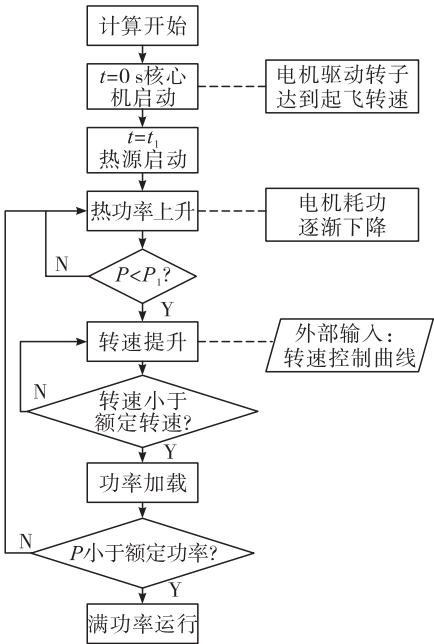


图 2 计算流程

Fig. 2 Calculation process

2 不同气体组分运行特性

2.1 叶轮机械运行特性

在以 40 g/mol 的氦氙混合气体工质为设计基准的系统中,当所运行的工质组分发生变化时(摩尔质量 30、40、50、60 g/mol 分别对应混合气体中的氦气体积分数为 80 %、72 %、64 %、56 %),系统的启动加载特性线同样发生变化。图 3 为不同气体组分下的系统启动加载曲线,由于采用了零功率升速的方法,因此升速过程曲线为共同工作线。从计算结果可知,随着气体组分的变化,共同工作线将发生偏移。当气体摩尔质量变小时(氦气过充),共同工作线向着靠近压气机喘振线的方向移动;当气体摩尔质量变大时(氦气泄漏),共同工作线向远离压气机喘振线的方向移动。

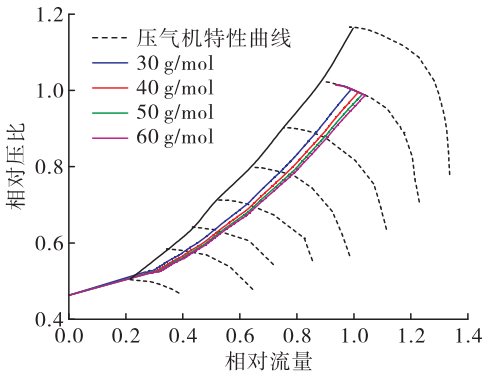


图 3 不同气体组分下的系统启动加载曲线

Fig. 3 System startup-loading curves under different gas compositions

由此可知,当系统启动前如果氦气多于设计比例,则容易减小压气机的喘振裕度,可能影响系统的正常启动。在这种情况下,一种方法是采用补入氙气的方式使得氦氙组分达到设计值;另一种方法是在启动时控制电机升速时间,使得电机处于小功率电动状态,将启动线往右侧移动,这种方法将消耗更多的启动功率。

图 4 为系统在不同组分的氦氙气体下从 0 加载到满功率输出的工作曲线对比。可以看到,随着混合气体摩尔质量的增加,整个加载过程的流量变化范围更大且都运行在同一条转速特性线上。原因在于对于一个完成设计的压气机,修正转速只和入

口温度有关,因此在不同气体组分下的加载过程都是沿着额定转速线变化。另外,除了设计工况,无论气体摩尔质量增加还是减少,在达到 100 %输出时,压气机的喘振裕度都会减小,具体数据见表 1。从表 1 中数据还可以发现,当气体组分与设计点发生偏离,且氦气组分降低(混合气体摩尔质量升高)时,要达到满功率输出,必须提高涡轮入口温度。因此,无论是从压气机运行裕度还是涡轮材料考虑,气体组分发生偏离都是不利的因素。另外,从图 4 中还可以看到,在不同气体组分下,系统从 0 ~ 100 %加载过程中,流量变化在 5 % ~ 15 %之间。因此,流量的准确测量是进行组分精确分析的关键。

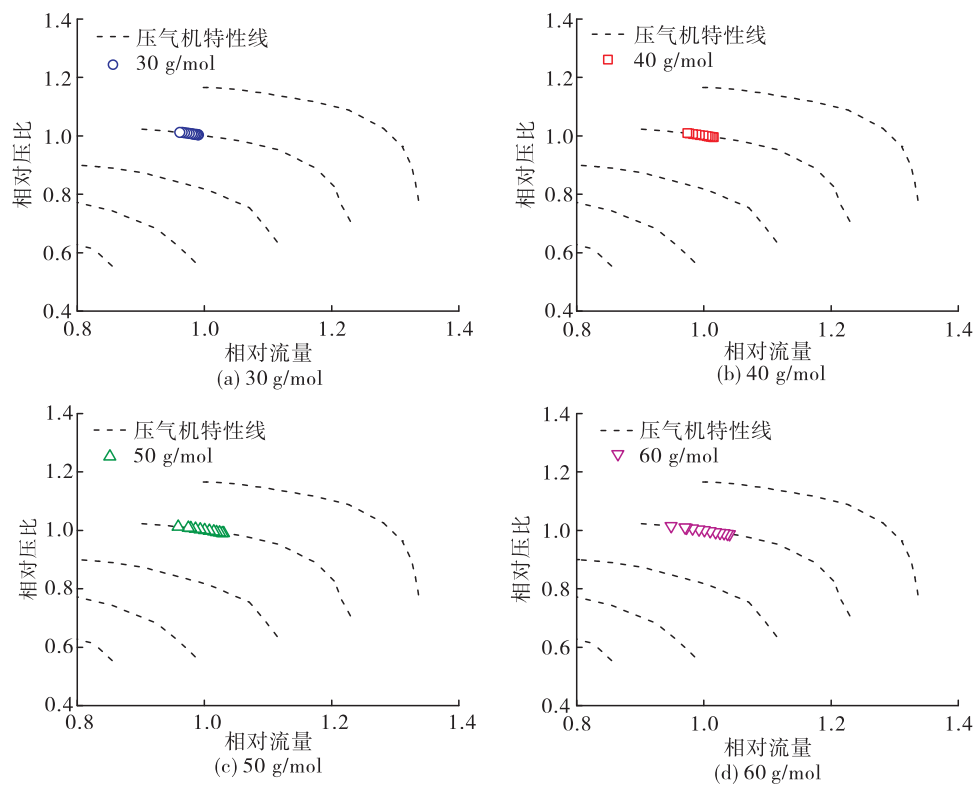


图 4 不同工质加载过程对比

Fig. 4 Comparison of loading processes with different working fluid

表 1 不同工质加载始末的压气机喘振裕度及满载时涡轮温度

氦氙气体摩尔质量/ ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	压气机喘振裕度/%		涡轮入口温度 (100 %输出)/K
	加载初始(0 输出)	加载完成(100 %输出)	
30	13.5	9.2	1 142
40	17.3	11.0	1 189
50	19.5	10.9	1 246
60	21.1	7.5	1 306

2.2 回热器运行特性

由于组分变化,在固定负荷率下所需的涡轮入口温度不同,因此会导致回热器热侧入口温度发生变化。图 5 为不同组分氦氙气体在系统不同负荷率下的回热器热侧入口温度变化。

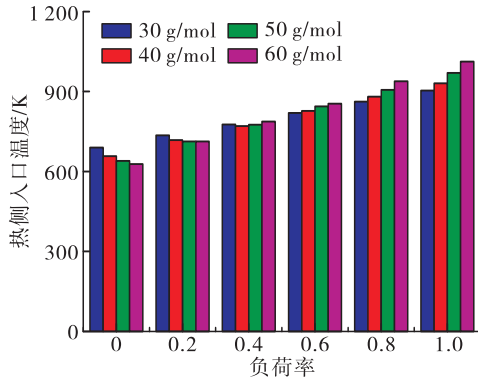


图 5 不同组分气体在不同负荷率下的回热器热侧入口温度

Fig. 5 The inlet temperature of the hot side of the regenerator with different gas components under different load rates

从图 5 中可以看到,当混合气体中氦气组分减小(即摩尔质量增加)时,在 100 %输出功率条件下,热侧入口温度相比设计工况需要提高 80 K 左右;在 0 ~ 100 %范围内功率变化时,摩尔质量高的气体在回热器热侧入口的温度变化相对更大(30 g/mol 和 60 g/mol 气体的温度变化分别为 62 K 和 100 K)。由此可见,当混合气体中氦气组分减少时,对回热器的运行也是不利的。

3 气体组分表征方法

系统运行过程中,转速稳定是考虑的首要因素,通常系统在执行功率调节时,均选择恒转速调节方法,即保持额定转速不变。本文以压气机特性曲线为基础,再将额定转速上运行工况点的流量、压比(见表 2)与参考值进行对比和插值,计算得到当前状态下的混合气体组分。

表 2 不同组分工质不同负荷率下的系统流量、压比参数(相对值)

Tab. 2 System flow rate and pressure ratio with different components of working fluid and load rates (relative value)

负荷率/%	30 g/mol		40 g/mol		50 g/mol		60 g/mol	
	流量	压比	流量	压比	流量	压比	流量	压比
0	0.990 7	1.003 2	1.015 4	0.995 4	1.029 6	0.990 7	1.039 6	0.987 5
20	0.986 8	1.004 6	1.009 6	0.997 2	1.021 8	0.993 1	1.029 6	0.990 7
40	0.982 5	1.006 0	1.003 2	0.999 5	1.013 6	0.996 3	1.018 2	0.994 4
60	0.976 1	1.007 9	0.993 6	1.002 8	1.000 4	1.000 5	1.002 9	1.000 0
80	0.968 9	1.010 2	0.983 2	1.006 0	0.987 9	1.004 6	0.987 5	1.004 6
100	0.961 4	1.011 6	0.973 9	1.009 3	0.974 6	1.008 8	0.970 4	1.010 2

表 2 给出了额定转速下不同组分工质在不同系统负荷率下的流量压比参数。从表 2 中可以看到,在某一固定负荷率下,氦氙气体摩尔质量和流量成正相关,和压比成反相关。由于压气机特性线中,压比与流量的关系可以通过多项式拟合,因此将氦氙气体摩尔质量 $M_{\text{He-Xe}}$ 简化为和负荷率 L 、流量 m_c 相关的函数,即 $M_{\text{He-Xe}} = f(L, m_c)$ 。通过数据变化趋势探索得到拟合关系式,即

$$M_{\text{He-Xe}} = [\sin(L m_c + a) / \sin(L m_c + b) + \sin(L / m_c + c) / \sin(L / m_c + d)] / (eL + m_c f + g) + hL + i m_c \quad (1)$$

式中参数 $a \sim i$ 为待定系数,这些参数数值与系统设计状态相关。利用 Quasi-Newton 方法计算得到各参数数值见表 3。

表 4 为不同负荷率和流量下氦氙摩尔质量 $M_{\text{He-Xe}}$ 计算值与目标结果对比,从计算结果来看,计算公式表现出较好的拟合精度,最大误差为 6.85 %,平均误差 2.74 %。该公式能够实现系统在运行过程中通过实时负荷率和流量来表征氦氙气体摩尔质量,从而对气体组分进行调节。并且根据不同的系统设计进行仿真或试验,得到该系统适用的 $a \sim i$ 参数数值。

表 3 拟合公式(1)中的参数值
Tab.3 Parameter values in the fitting formula(1)

<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>
[0,60)	-1.502 4	1.734 5	0.654 3	0.188 6	-0.043 6	-0.332 4	0.362 1	40.115 3	0.046 0
[60,100]	7.522 8	11.509 6	-10.589 7	21.199 8	0.099 6	-0.626 2	0.575 9	-36.045 7	83.155 5

表 4 氦氙摩尔质量计算结果
Tab.4 Molar mass calculation results of helium xenon mixture

负荷率	流量	$M_{\text{He-Xe}}$	计算值	相对误差/%	负荷率	流量	$M_{\text{He-Xe}}$	计算值	相对误差/%
0	0.990 7	30	30.20	0.65	0.6	0.976 1	30	29.72	-0.94
0	1.015 4	40	40.27	0.68	0.6	0.993 6	40	39.33	-1.67
0	1.029 6	50	49.84	-0.33	0.6	1.000 4	50	51.39	2.78
0	1.039 6	60	59.85	-0.25	0.6	1.002 9	60	59.22	-1.30
0.2	0.986 8	30	29.90	-0.34	0.8	0.968 9	30	32.06	6.85
0.2	1.009 6	40	39.98	-0.05	0.8	0.983 2	40	38.93	-2.66
0.2	1.021 8	50	49.94	-0.13	0.8	0.987 9	50	49.75	-0.51
0.2	1.029 6	60	60.09	0.15	0.8	0.987 5	60	59.93	-0.11
0.4	0.982 5	30	29.73	-0.90	1.0	0.961 4	30	30.33	1.09
0.4	1.003 2	40	39.42	-1.46	1.0	0.973 9	40	38.39	-4.01
0.4	1.013 6	50	50.77	1.54	1.0	0.974 6	50	51.54	3.08
0.4	1.018 2	60	59.82	-0.31	1.0	0.970 4	60	59.35	-1.08

4 结论

本文利用氦氙布雷顿热电转换系统参数的动态仿真模型,对气体组分变化下系统的启动加载过程进行仿真计算。通过对比氦氙气体组分发生变化时的系统运行特性,得到结论如下。

1)氦氙气体组分变化时,共同工作线发生偏移:氦气组分增加时,共同工作线向压气机喘振线方向偏移,压气机运行裕度减小;氦气组分降低时,共同工作线将远离压气机喘振线。

2)加载过程中,氦气组分降低时,系统达到最大功率输出需要更高的涡轮入口温度,并且压气机运行裕度变小。

3)本文基于系统仿真结果提出了在额定转速下以负荷率、流量为变量的氦氙气体组分计算方法,为实现氦氙布雷顿循环工质组分变化的监控和调节提出了新思路。在实际工程应用中可通过试验代替仿真结果提高该方法的预测精度并将转速范围进一步扩大。

4)目前质量流量计测量精度可达 0.1%,根据不同组分工质在不同负荷率下的流量变化范围,该测量精度仍会导致 0.7%~2%的分析误差。因此实际工程应用中,流量的精确测量是提高组分分析精度的重要保障。

参考文献

[1] 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.

[2] RITZ F,PETERSON C E. Multi-mission radioisotope thermoelectric generator (MMRTG) program overview[C]//2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings. New York: IEEE,2004.

[3] WERNER J,LIVELY K,KIRKHAM D. A multi-mission radioisotope thermoelectric generator (MMRTG) for Mars 2020[C]//2017 IEEE Aerospace Conference. New York: IEEE,2017.

[4] VOSS S S,RODRIGUEZ E A,EL-GENK M S,et al. Russian TOPAZ II system test program (1970—1989)[C]//AIP Conference Proceedings. Albuquerque, New Mexico:

- AIP, 1994.
- [5] PONOMAREV-STEPNOI N N, KUKHARKIN N E, USOV V A. “Romashka” reactor-converter [J]. Atomic Energy, 2000, 88(3):178-183.
- [6] ROSEN R, SCHNYER A D. Civilian uses of nuclear reactors in space [J]. Science & Global Security, 1989, 1(1/2):147-164.
- [7] STANCULESCU A. The role of nuclear power and nuclear propulsion in the peaceful exploration of space [M]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005.
- [8] KOROTEEV A S, ANDIANOV D I, KAREVSKIY 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: [s. n.], 2017.
- [9] BARNETT J W. Nuclear electric propulsion technologies: Overview of the NASA/DOE/DOD nuclear electric propulsion workshop [C]//AIP Conference Proceedings. Albuquerque, New Mexico: AIP, 1991.
- [10] OLSON S. Mars opposition piloted nuclear electric propulsion (NEP)-chem vehicle [Z]. 2020.
- [11] DATAS A, MARTÍ A. Thermophotovoltaic energy in space applications: Review and future potential [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017, 161:285-296.
- [12] 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. Albuquerque, New Mexico: AIP, 2001.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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). Reston, Virginia: AIAA, 2006.
- [17] MASON L, SCHREIBER J. A historical review of brayton and stirling power conversion technologies for space applications [EB/OL]. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Historical-Review-of-Brayton-and-Stirling-Power-Mason-Schreiber/2fbcdb6db6c38452944eacda9b22cf4f240b7a22>, 2007.
- [18] MASON L S. A power conversion concept for the Jupiter icy moons orbiter [J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(5):902-910.
- [19] MASON L S. Power conversion concept designed for the Jupiter icy moons orbiter [R]. NASA 20050192432.
- [20] 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, 47(2):61-67.
- [21] 薛翔, 杜磊, 王浩明, 等. 闭式布雷顿循环核心机调控过程仿真分析 [J]. 火箭推进, 2021, 47(5):49-55.
- XUE X, DU L, WANG H M, et al. Simulation analysis of adjustment and control process for core machine in closed Brayton cycle [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2021, 47(5):49-55.