400 kW空间堆布雷顿循环系统运行特性分析

辛　杰[1],卢瑞博[2],方华伟[3],易经纬[3],赵富龙[2],谭思超[2]
(1.山东核电有限公司,山东 海阳265100;2.哈尔滨工程大学 黑龙江省核动力装置性能与设备重点实验室,黑龙江 哈尔滨150001;3.中国核动力研究设计院,四川 成都610213)

摘　要: 针对百千瓦级大功率航天任务需求,基于Simulink平台开展空间核反应堆直接布雷顿循环系统特性分析研究。根据直接布雷顿循环反应堆系统设计方案,通过对系统中各个关键设备的模块化建模,开发反应堆系统一维系统分析程序,实现了反应堆系统稳态及动态响应特性分析。重点分析了稳态特性、阶跃引入反应性、反应堆升功率和持续步进引入反应性等瞬态工况下的动态特性。相关模拟结果能够为未来大功率空间反应堆运行及安全特性分析提供支撑。

关键词: 空间核反应堆;布雷顿循环;气冷反应堆;系统分析程序;稳态和瞬态
中图分类号: O 351.2; TK 121　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.02.012

Operation Characteristic Analysis of 400 kW Brayton Cycle Space Reactor System

XIN Jie[1], LU Ruibo[2], FANG Huawei[3], YI Jingwei[3], ZHAO Fulong[2], TAN Sichao[2]
(1.Shandong Nuclear Power Co., Ltd., Haiyang 265100, Shandong, China; 2.Heilongjiang Key Laboratory of Nuclear Power Plant Performance and Equipment, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China; 3.Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, Sichuan, China)

Abstract: In order to meet the demand of high-power space mission of 100 kW level, the characteristics of the direct Brayton cycle system in space reactor are analyzed based on the Simulink platform. According to the design scheme of the direct Brayton cycle system, a one-dimensional system analysis program is developed based on the modular modeling of each key equipment in the system. The dynamic characteristics under transient working conditions such as steady state, step-in reactivity, reactor power increase, and continuous reactivity increase are analyzed. The results can lay basis for the operation and safety analysis of the future high-power space reactor.

Key words: space reactor; Brayton cycle; gas-cooled reactor; system analysis program; steady and transient states

0　引言

核能因其高能量密度、无需氧气等特点更加适合于极地、深远海和太空等极端环境。在核动力的空间应用方面,美国和苏联较早开展研究,研发了不同功率水平的空间反应堆系统[1-2]。空间核动力电源是将核能转换为电能的装置,包括同位素电源和反应堆电源[3]。随着航天探测朝着大规模、多样化的方向发展,不同空间任务对核能功率的多样化需求越来越高[4]。国际原子能机构(IAEA)对未来高功率民用航天任务能源需求进行了综述,这些任务功率需求从10 kWe直至100 MWe量级[5]。在此功率量级下,传统能源的航天发射成本将急剧增加,核能以其不依赖于氧气和阳光、环境适应性好、功率范围广和使用寿命长等特点,成为大功率空间能源供给的唯一合理、可行的方案。

核能转换为电能需要一套能量转换系统,主要包括静态能量转换(热电转换、热离子转换、磁流体发电等)和动态能量转换(朗肯循环、布雷顿循环和

收稿日期: 2020-07-08; **修回日期:** 2020-08-10
基金项目: 国家重点研发计划(2017YFE0106200);中央高校基金(3072020CFT1504);黑龙江省博士后基金(LBM-Z19013)
作者简介: 辛　杰(1984—),男,工程师,主要研究方向为核电厂生产运营。
通信作者: 谭思超(1979—),男,博士,教授,主要研究方向为核反应堆热工水力。

斯特林循环)[3]。能量转换系统的运行特性直接关系到空间核动力电源的效率和安全性,掌握系统的运行特性对航天器、反应堆的安全性和经济性具有重要的工程意义[6]。对于功率需求超过 10 kW 的航天任务,布雷顿循环和反应堆电源相结合的方式由于拥有较小的比质量[7],是百千瓦级电源的较优选择。

国内外针对空间反应堆系统分析程序,开展了较多研究。EL-GENK 等[8-11]使用 Fortran 语言针对 SP-100 空间核动力系统开发了 SNPSAM 程序,并开展了一系列的瞬态特性分析及安全特性分析,此后又对俄罗斯 TOPAZ-Ⅱ系统进行了相应的分析。

为充分利用先进的计算机技术,近年来又基于 Simulink 平台开发了一维仿真分析程序,获得了 ScoRe 空间核动力系统的启动特性,对开发可自适应、自主运行的空间核动力系统具有重要意义。

WRIGHT 等[12-13]使用 Simulink 平台针对氦氙冷却闭式布雷顿循环系统进行了动态仿真分析,获得了该类型空间核动力系统的工作特性。EL-GENK 等[14]建立了基于 S^4(Submersion-Subcritical Safe Space)空间堆动力系统多闭环布雷顿循环的启动瞬态动力学仿真模型。VERKERK 等[15]利用 RELAP5 和 ACM 商用软件包或求解器对陆地高温氦气冷却堆系统进行了建模仿真,对比结果表明,两个计算程序均可对核动力系统进行良好的瞬态特性分析以及运行策略研究。李智等[16]采用 Fortran 语言编程针对空间反应堆闭式布雷顿循环系统提出了两种优化分析方法。杨谢等[17]推导出了空间核反应堆电源的闭式 Brayton 循环热力学模型,通过 Fortran95 自开发程序,分析了绝热系数、回热器回热度、相对压损系数变化对循环效率的影响。

早期研究对发电用途的 200 kWe 以上空间反应堆的研究相对较少,且其研究经验并不能完全应用到当前的以发电用途为主的大功率空间反应堆的研究上。

本文拟从航天任务对能源的需求出发,基于 Simulink 平台,开展 400 kWe 电功率的氦氙冷却布雷顿循环系统运行特性研究,掌握系统的运行特性和规律,以支持空间核动力系统安全分析。

1　计算模型和方法

1.1　模型假设

本文采用的直接布雷顿循环气冷反应堆系统流程图如图 1 所示。冷却剂为 40 g/mol 的氦-氙混合气体[18-19],气轮机、压缩机和发电机采用同轴布置的方式。

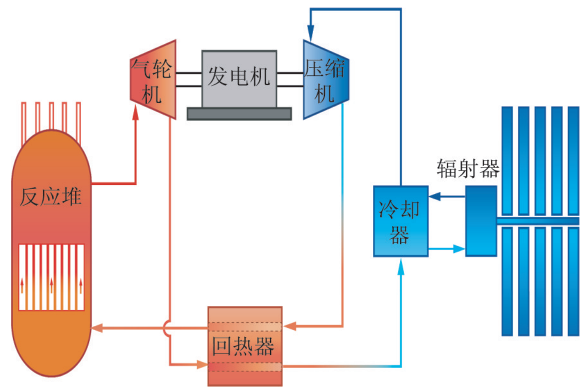


图 1　气冷堆直接布雷顿循环系统原理图

Fig.1　Schematic diagram of the direct Brayton cycle system of gas-cooled reactor

基于模块化建模思路,通过 Simulink 将数学模型封装在各子模块中,通过计算公式、自定义函数、物性数据库和曲线插值方法等实现了每个子模块的计算功能,通过数据的输入与输出反映实际物理模型的运行特征。此外,每个子模块间连线及其分支与方向,代表实际物理模型中的质量、能量和动量传递过程。为更好地建立数学物理模型,做出以下基本假设:1) 氦-氙混合气体物性参数是温度和压力的函数,通过插值表的方式加入到计算过程,忽略工质物性在空间上的不均匀性;2) 忽略工质泄露,系统在运行时与外界环境无质量与能量的交换;3) 忽略转动部件运行时摩擦导致的能量损失。

如图 2 所示,建立的系统分析程序包括如下子模块:反应堆模块、气轮机模块、压气机模块、回热器模块、冷却器模块、转子模块、流量变化模块、PID 控制模块、辐射器模块。

1.2　关键设备数学模型

1.2.1　反应堆模型

本系统反应堆模型考虑了燃料的温度反馈等核反馈物理过程是布雷顿循环的能量来源。由于

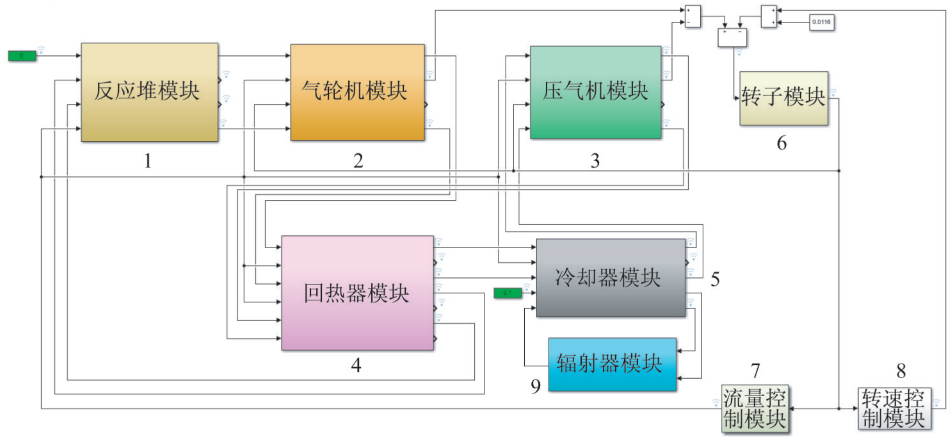


图2　一维系统分析程序示意图

Fig.2　Schematic diagram of one-dimensional system analysis program

在系统动态过程中,主要关注反应堆功率变化以及中子通量变化。因此,采用点堆中子动力学方程,主要方程参考文献[20]。

堆芯传热模型基于集总参数法建立,由于堆芯传热模型关心的是反应堆的出口温度与堆芯功率的关系,可以认为整个堆芯的燃料元件在同一时刻均处于同一温度。

1.2.2　气轮机与压气机模型

由于系统需要计算气轮机与压气机的变工况运行特性,准稳态法不适用于偏离稳态工况较大的计算,因此,系统分析程序采取特性曲线插值法得到气轮机和压气机转速、流量和压比的特性曲线以及转速、压比和效率的特性曲线[20]。

1.2.3　回热器与冷却器模型

回热器模型与冷却器基于其结构和换热方式对其建模,忽略回热器、冷却器与外界的换热,认为同一截面内工质的温度、速度和压力参数一致,流体沿轴向一维流动,从而建立两者集总参数法的瞬态换热模型。

1.2.4　辐射散热器模型

辐射散热器模型基于其结构和换热方式对其进行建模,基于集总参数法建立瞬态换热模型,辐射散热器的散热量与冷却器的换热器相等,通过与宇宙空间环境之间的辐射换热机理向外散热,具体的数学模型如下:

$$Q_{\mathrm{R}}=Q_{\mathrm{C}}=A\varepsilon\sigma\left[\frac{T_{\mathrm{Ci}}^{4}+T_{\mathrm{Co}}^{4}}{2}-T_{\mathrm{K}}^{4}\right] \qquad (1)$$

式中:Q_{R}、Q_{C}为辐射散热器和冷却器的散热功率;A为辐射器辐射面积;ε为辐射板发射率;σ为黑体辐射系数;T_{K}为宇宙空间温度。

2　结果分析

2.1　稳态计算结果

如图3所示,系统稳态运行时,引入的反应性为0,反应堆处于临界状态,堆内的中子通量维持在稳定水平。使用系统稳定时各设备的参数作为系统初始化值,系统中设备相互联系,单一设备参数变化对系统运行特性影响较大,进而影响系统中的其他设备,因此,在计算前1 000 s内各主要设备的功率会出现波动变化。在1 500 s左右,各主要设备的功率区域稳定,图3(a)为反应堆功率1.6 MW;图3(b)为气轮机功率1.363 MW;图3(c)为压气机功率0.952 MW;图3(d)为发电机功率400 kW,功率损耗为11.6 kW。气轮机产生的功率等于压气机耗功、功率损耗值与发电机输出功率的总和。

根据模拟部件得到的参数,得到各部件的温度、压力和功率参数,如图4所示。其中,反应堆功率1.6 MW,气轮机功率1.363 MW,压缩机功率0.952 MW,发电机功率0.4 MW,辐射器功率1.341 MW。反应堆出口压力1.403 MPa、温度1 200 K,气轮机出口压力0.734 MPa、温度966.3 K,冷却器入口压力0.698 MPa、温度553.7 K,压缩机入口压力0.667 MPa、温度340 K,压缩机出口压力1.412 MPa、温度501.6 K。转子转速60 000 r/min,回路冷却剂流量11.2 kg/s。

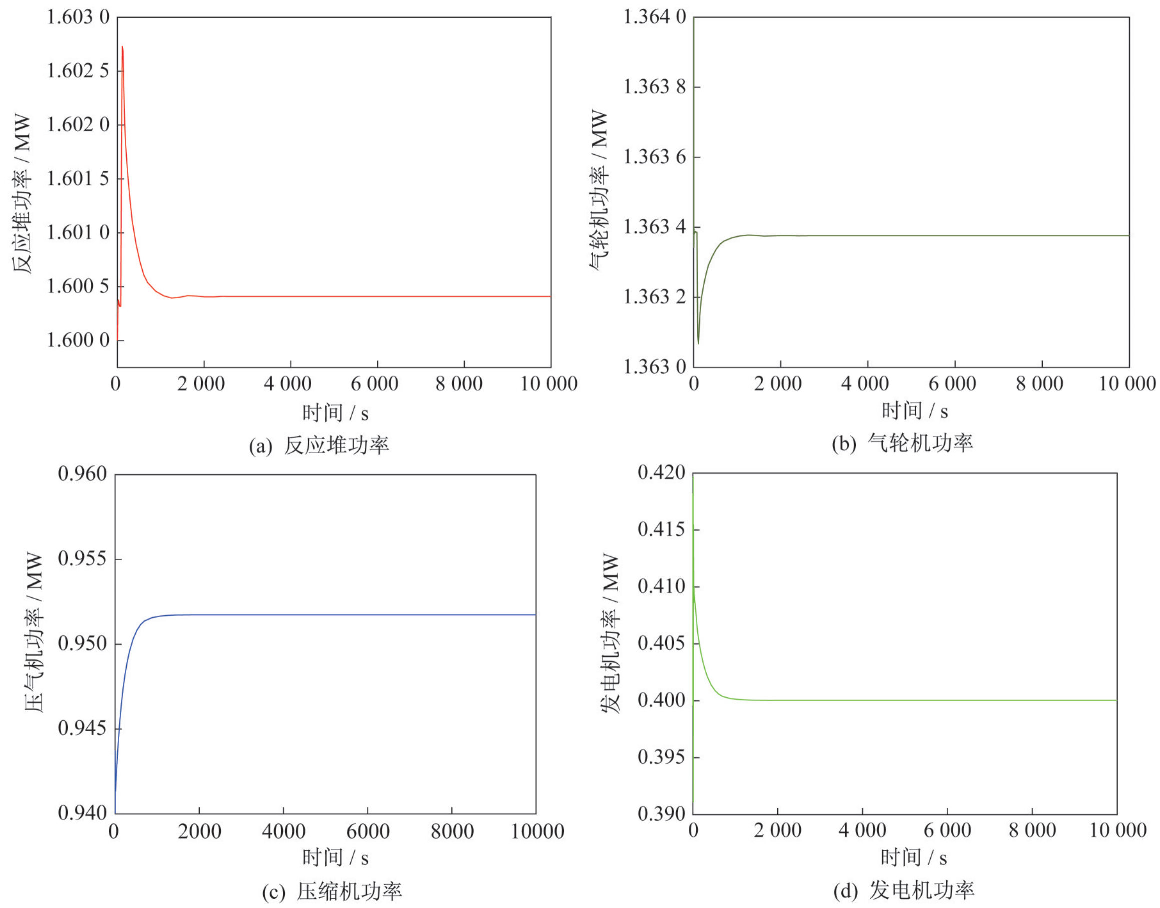


图 3　稳态运行系统主要设备功率

Fig.3　Power of the main equipment under steady operation condition

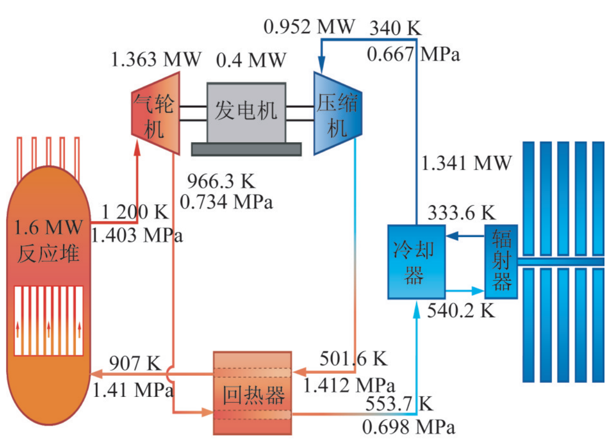


图 4　稳态运行系统主要设备功率

Fig.4　Power of the main equipment under steady operation condition

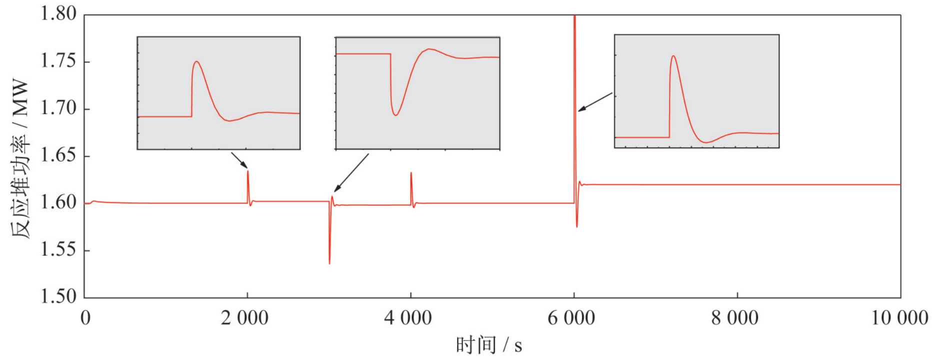
反应堆稳态运行时,转子所受的力矩平衡,因此,转速稳定在额定转速 60 000 r/min。此外,系统各主要设备的质量流量同样稳定在 11.2 kg/s,入口与出口温度趋于稳定,整个系统处于稳定状态。

2.2　引入反应性运行结果分析

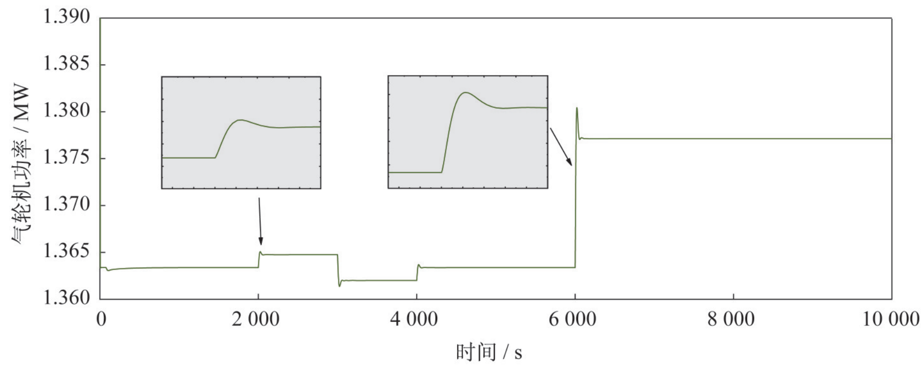
在布雷顿循环的变工况运行过程中,反应堆会由于控制棒的动作或其他原因而引入反应性,这将会导致反应堆的功率发生变化,整个系统运行参数也会产生较大的波动。因此,引入反应性是探究系统特性的重要工况之一。

程序模拟总时长为 10 000 s,系统在 2 000 s 已经达到稳定状态。在系统稳态运行 2 000 s 时在反应堆内引入 0.000 1 的正反应性,随后在 3 000 s 时在反应堆内引入 −0.000 1 的负反应性,在 4 000 s 时,引入 0 的反应性,在 6 000 s 时引入 0.001 的正反应性。计算结果如图 5 所示。

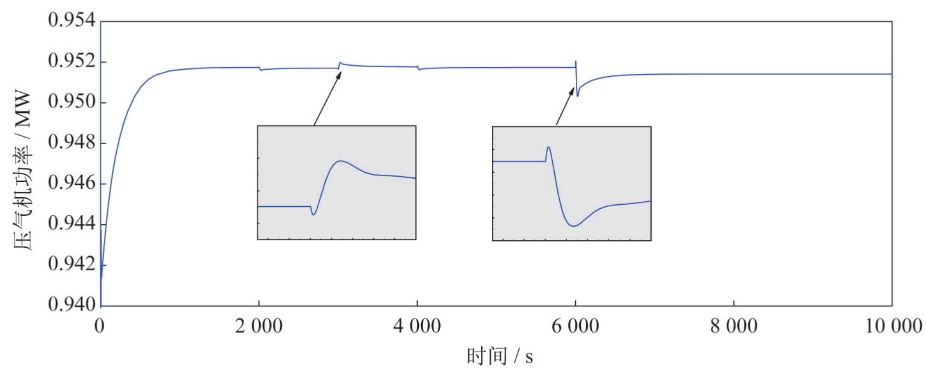
图 5 中引入 0.000 1 的正反应性时,反应堆功率会迅速升高到 1.63 MW,随后在反应堆的自稳调节作用,如燃料温度效应、慢化剂温度效应影响下反应堆功率呈现高低震荡现象,并最终趋于稳定,相比不引入反应性时,功率提升至 1.602 MW。由于



(a) 反应堆功率



(b) 气轮机功率



(c) 压缩机功率

图5　引入反应性时主要设备的功率变化

Fig.5　Power variation of the main equipment under reactivity introduced condition

反应堆功率的上升,导致工质出口温度升高,同时气轮机做功功率提升,发电机的电功率增加至0.401 MW,布雷顿循环的功率输出能力提升。且引入反应性越大,系统稳定后,反应堆的热功率升高值越大,电功率值也会略微上升。

图5中引入−0.000 1的负反应性时,反应堆功率会迅速下降到1.537 MW,随后在反应堆的自稳调节作用下功率发生震荡,并最终趋于稳定,相比不引入反应性时,功率提降低至1.598 MW。因反应堆功率下降,工质出口温度降低,且气轮机做功减小,功率降低,发电机的电功率减小至0.398 6 MW,布雷顿循环的功率输出能力降低。

系统设置了转速与电功率之间的PID控制,因此,转子转速与质量流量的变化趋势相同,且变化范围相对不大,变化方式均为先增大或减小,之后短暂震荡后趋于稳定,如图6所示。

转子转速的变化会引起布雷顿循环系统工质质量流量的剧烈变化。同时由于转速的变化会引起气轮机膨胀比的波动与压气机压比的波动,这将使系统的压力也出现较大的波动,引起工质物性的剧烈变化。由于PID控制的存在,系统中发电机的输出功率会尽可能适应气轮机与压气机的功率之

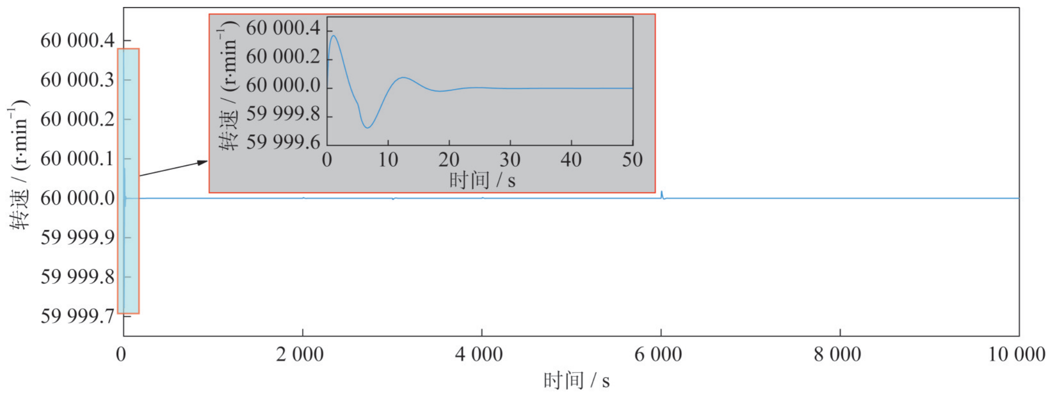


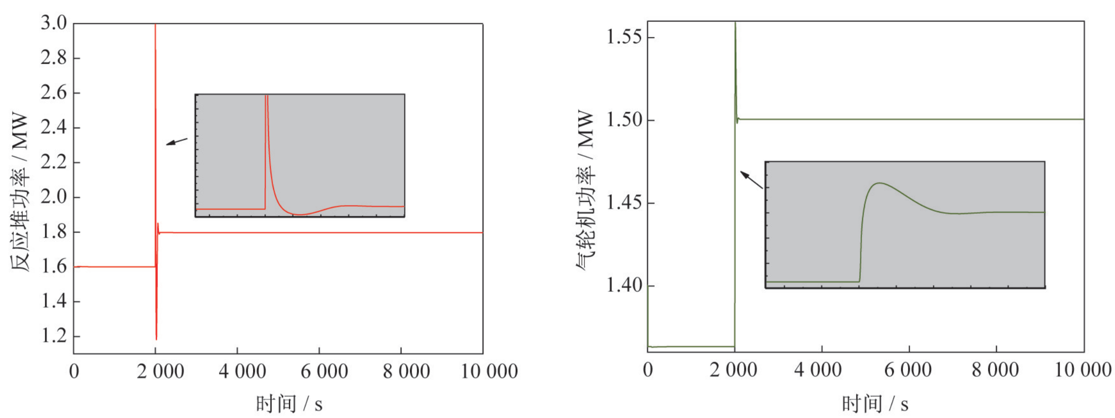
图 6　引入反应性时转速变化

Fig.6　Rotate speed variation under reactivity introduced condition

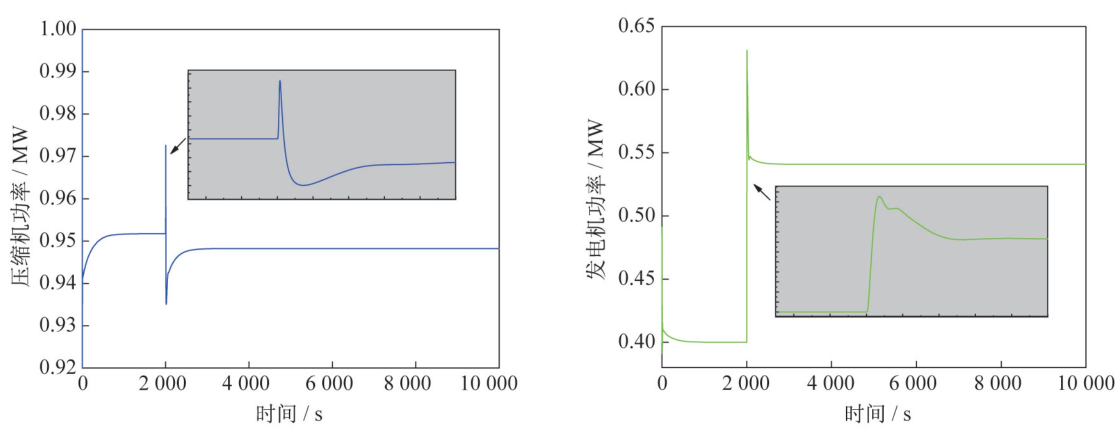
差,从而减小转子力矩的变化,继而控制整个系统在变工况时保持稳定。

2.3　反应堆升功率运行结果分析

在布雷顿循环的变工况运行过程中,系统需要对反应堆功率进行调控,从而使整个系统的输出功率维持在一定范围内。因此,研究反应堆根据设定功率值进行调控时整个系统的响应速度与工况变化情况十分重要。将反应堆功率与引入反应性建立 PID 控制关系,设置反应堆目标功率为 1.6 MW,在 10 000 s时将目标功率设置为 1.8 MW,计算结果如图 7 所示。



(a) 反应堆功率　　(b) 气轮机功率



(c) 压缩机功率　　(d) 发电机功率

图 7　反应堆升功率时主要设备的功率变化

Fig.7　Power variation of the main equipment under power increasing condition

图7中，在2 000 s时受到控制器发出的提高反应堆功率信号，从而引入正反应性。反应堆在5 000 s时经PID控制将功率调整至1.798 MW，发电机功率稳定在0.54 MW，气轮机做功与压气机耗功随之增加。

当反应堆功率稳定在1.798 MW时，须引入的反应性为0.01，变化趋势和反应堆功率的变化趋势相同。计算结果反映了系统针对反应堆功率升降的响应，同时也为控制棒的动作方式提供了参考。

2.4　反应性步进提升功率过程

在反应堆的运行过程中，通常通过向堆芯引入正反应性提升功率，分析了反应堆功率稳定后，向堆芯通过阶梯函数的形式引入正反应性时系统各设备的功率变化过程。反应性引入时间和大小见表1。

得到反应堆功率步进时主要设备的功率变化如图8所示。

表1　阶梯函数反应性引入

Tab.1　Reactivity insertion conditions with the step function

时间/s	0	2 100	2 200	2 300	2 400	2 500	2 600	2 700	2 800	2 900	3 000
反应性	0	0.000 1	0.000 2	0.000 3	0.000 4	0.000 5	0.000 6	0.000 7	0.000 8	0.000 9	0.001 0

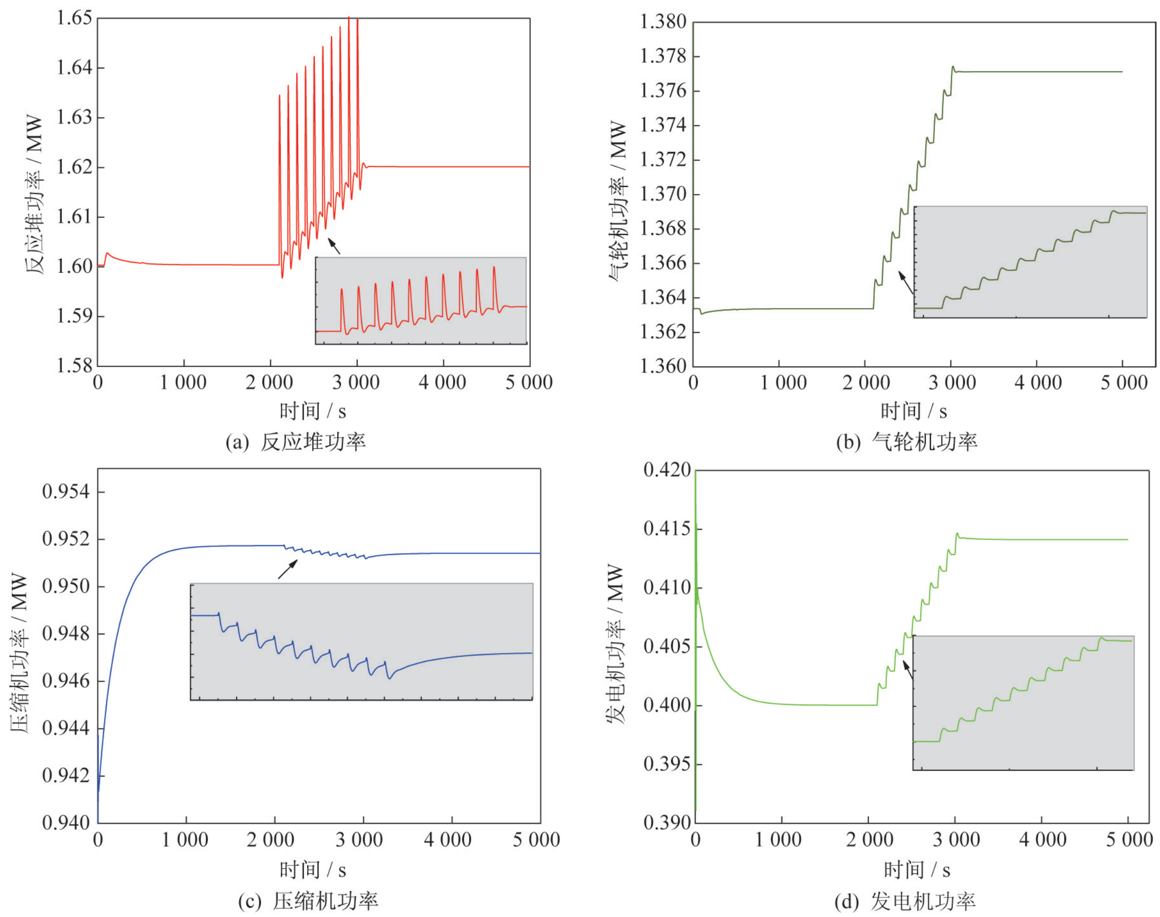


图8　反应堆功率步进时主要设备的功率变化

Fig.8　Power variation of the main equipment under power step-increasing condition

由于引入反应性较小，每次功率步进在100 s内可达到稳定状态，在最后引入0.001的反应性后，在3 100 s达到稳定状态。由于外来反应性对反应堆有直接的影响，反应堆功率变化先急剧上升，后由于温度的负反馈效应，功率降低并达到稳定。功率急剧上升值约为初始功率的1.88%。气轮机、压缩机和发电机的功率在引入反应性后，由于对反应性的响应滞后于反应堆，并且由于反应堆的自稳、自调能力，传递到后续设备的功率变化率较小，因此，上升到一定功率后，自调节降为稳定值。此值相对于引入反应性前的

值稍大。若忽略控制棒步进时间,此模拟过程可以反映反应堆提高控制棒,引入正反应性的升功率过程。

3 结束语

本文通过数学建模,开发了直接布雷顿循环反应堆系统一维系统分析程序,并采用该一维系统分析程序对输出电功率为400 kWe的空间反应堆系统进行了瞬态与稳态响应特性分析。通过研究主要得到以下结论:开发的系统分析程序能够较为精确地进行布雷顿循环反应堆系统动态响应特性分析;气轮机、压缩机和发电机的功率在引入反应性后,由于对反应性的响应滞后于反应堆,且反应堆的自稳、自调能力,传递到后续设备的功率变化率较小,因此,上升到一定功率后,通过自调节为稳定值。

参考文献

[1] 何宇豪,孟涛,卢瑞博,等.空间核反应堆电源研究进展[J].上海航天,2019,36(6):126-133.

[2] 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.

[3] 苏著亭,杨继材,柯国土.空间核动力[M].上海:上海交通大学出版社,2016,443.

[4] 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.

[5] STANCULESCU A. The role of nuclear power and nuclear propulsion in the peaceful exploration of space [M]. Vienna, Austria: Intl Atomic Energy Agency, 2005:133.

[6] 张一帆,屈伸,曹良志,等.空间核反应堆安全分析[J].上海航天,2019,36(6):121-125.

[7] 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 York, USA: American Institute of Physics, 2001:1017-1029.

[8] EL-GENK M S, XUE H, MURRAY C. Transient and load-following characteristics of a fully integrated single-cell thermionic fuel element [J]. Nuclear Technology, 1993, 102(2):145-166.

[9] GENK M SEL, PARAMONOV D V, MARSHALL A C. Startup simulation of the TOPAZ - II reactor system for accident conditions [C]// AIP Conference Proceedings. New York, USA: American Institute of Physics, 1994:1-6.

[10] EL-GENK M S, PARAMONOV D V. An integrated model of the TOPAZ-II electromagnetic pump [J]. Nuclear Technology, 1994,108(2):171-180.

[11] EL-GENK M S, TOURNIER J M. DynMo-TE: dynamic simulation model of space reactor power system with thermoelectric converters [J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236(23):2501-2529.

[12] WRIGHT S A. Preliminary results of a dynamic system model for a closed-loop Brayton cycle coupled to a nuclear reactor [R]. Sandia National Laboratories (United States), 2003:1-5.

[13] WRIGHT S A, SANCHEZ T. Dynamic modeling and control of nuclear reactors coupled to closed - loop BRAYTON cycle systems using Simulink ™ [C]// AIP Conference Proceedings. New York, USA: American Institute of Physics, 2005:1-6.

[14] EL-GENK M S, TOURNIER J P, GALLO B M. Dynamic simulation of a space reactor system with closed Brayton cycle loops [J]. Journal of Propulsion and Power, 2010, 26(3):394-406.

[15] VERKERK E C, KIKSTRA J F. Comparison of two models for a high temperature reactor coupled to a gas turbine [J]. Nuclear Engineering and Design, 2003, 220(1):51-65.

[16] 李智,杨小勇,王捷,等.空间反应堆布雷顿循环热力学优化分析[J].原子能科学技术,2017,51(7):1173-1180.

[17] 杨谢,石磊.空间核反应堆电源闭式Brayton循环热力学分析[J].清华大学学报(自然科学版),2018,58(9):821-826.

[18] EL-GENK M, TOURNIER J M. Selection of noble gas binary mixtures for Brayton space nuclear power systems [C]// 4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC). Reston, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006:1-9.

[19] 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, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006:1-14.

[20] 明杨,易经纬,方华伟,等.直接布雷顿循环气冷反应堆系统运行特性分析[J].原子能科学技术,2020,54(7):1168-1175.