

氦氙气冷反应堆系统无保护控制事故安全分析

廖浩仰¹, 明 杨¹, 陈宝文², 赵富龙^{1,*}, 秦傲翔¹, 高璞珍¹, 田瑞峰¹, 谭思超¹

(1. 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;

2. 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610213)

摘要: 小型氦氙气冷反应堆布雷顿循环系统作为第4代先进反应堆, 具有轻质、紧凑、系统简单和启停迅速等优点, 十分适合用于偏僻地区和岛屿的能源供应。基于 Modelica 语言通过对各关键设备进行模块化动态建模, 开发了氦氙气冷反应堆布雷顿循环系统分析程序, 并进行程序可靠性验证。模拟了系统稳态工况和事故瞬态变工况, 重点分析了反应性引入和容积控制系统错误投入等瞬态工况的动态响应特性。结果表明: 系统分析程序仿真结果较为合理, 系统具有一定自稳、自调能力, 需采取措施控制转子转速下降速率。本文结果可为氦氙气冷反应堆布雷顿循环系统的安全特性分析提供理论基础。

关键词: 闭式布雷顿循环; 事故分析; 氦氙混合气体; 系统建模; 程序仿真

中图分类号: TL333; O351.2; TK121

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2024)08-1750-10

doi: 10.7538/yzk.2023.youxian.0708

Accident Safety Analysis of Helium-xenon Gas Cooled Reactor System under Unprotected Control

LIAO Haoyang¹, MING Yang¹, CHEN Baowen², ZHAO Fulong^{1,*}, QIN Aoxiang¹,

GAO Puzhen¹, TIAN Ruifeng¹, TAN Sichao¹

(1. Heilongjiang Key Laboratory of Nuclear Power Plant Performance and Equipment, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

Abstract: As the fourth generation advanced reactor, the Brayton cycle system of small helium-xenon cooled reactor has the advantages of light weight, compact structure, simple system, fast start or stop, and is very suitable for the energy supply of remote areas and islands. Nuclear power plant is radioactive and highly hazardous after accidents, so it is very important to study its safety characteristics. In addition, helium-xenon cooled reactor is an advanced future reactor type, and its accident safety characteristics are not yet clear. Therefore, it is necessary to carry out the safety characteristics research of Brayton cycle system of small helium-xenon cooled reactor, especially under the condition of unprotected control. Firstly, based on Modelica language, through the modular dynamic modeling of key equipment, the accident safety characteristics analysis program of helium-xenon cooled reactor Brayton cycle system was developed. Secondly, the steady-state rated condition of the system was simulated, and the reliability of the accident safety characteristics analysis program of the system

收稿日期: 2023-09-30; 修回日期: 2023-11-28

基金项目: 中国科协青年人才托举工程(2021QNRC001); 核反应堆系统设计技术重点实验室基金(KFKT-05-FW-HT-20220018)

* 通信作者: 赵富龙

was preliminarily verified by comparing the error between the simulation value and the design value of the steady-state rated condition of the system, in which the maximum relative error is 2.31%. Finally, the transient conditions of various system accidents were simulated, and the dynamic response characteristics of transient conditions such as step introduction positive reactivity accident, step introduction negative reactivity accident, coolant incorrect charging accident and coolant incorrect discharging accident were analyzed. The results show that the simulation results of the system analysis program are reasonable. The reactor system has a certain self-stability and self-adjustment ability for step introduction positive reactivity accident and coolant incorrect charging accident under the condition of constant load and unprotected control. Under the conditions of step introduction positive reactivity accident and coolant incorrect charging accident, after the rotational speed increases by 21.6% and 12% respectively, it can be stabilized in another steady-state without protection and control. However, under the conditions of constant load and unprotected control, the reactor system can not be stabilized under another steady-state condition through self-regulation for the step introduction negative reactivity accident and the coolant incorrect discharge accident. Under the conditions of step introduction negative reactivity accident and coolant incorrect discharge accident, the corresponding rotational speed drop rate at 800 s is 85 rpm/s and 10 rpm/s respectively. It is necessary to control the rotational speed drop rate of the rotor through some protection and control measures to ensure the safety of reactor system. The relevant results provide a theoretical basis for the safety analysis of Brayton cycle system of helium-xenon cooled reactor.

Key words: closed Brayton cycle; accident analysis; helium-xenon mixture; system modeling; program simulation

小型模块化反应堆因具有结构紧凑、重量轻、可移动性、设计简单和建造周期短等优点^[1-4], 逐渐引起研究人员的兴趣并进行相关的研究工作。小型模块化反应堆对于偏远地区能源供应^[1,4]、海陆空运输设备动力供应^[1,5]和特殊作业任务具有重要意义。从小型模块化反应堆系统轻质小型化和系统结构简单的要求出发, 以闭式布雷顿循环为热电转换方式的气冷反应堆是最佳选择之一。因氦气的导热性能和化学性能良好, 其是气冷反应堆最常用的冷却剂之一^[6]。在氦气中加入少量氙气会减小压气机和涡轮等旋转机械能量转换机组的重量和尺寸, 且不减弱氦气原有的优良换热性能^[7-8], 这促进了核电源系统小型化。因此, 在普罗米修斯计划中计划使用氦氙气冷反应堆系统作为木星冰月轨道器的核电源^[9-10]。

目前, 在氦氙气冷反应堆系统建模分析方面, 国内外已经有一些研究进展。侯捷名等^[11]通过对 RELAP5 进行模型修改, 开发了 Li 冷却循环与氦氙布雷顿循环相互耦合的空间动力系统分析程序, 进行了仿真平台的验证、事故安全分析和设

备参数影响分析。辛杰等^[12]使用 Simulink 平台开展了空间反应堆系统运行特性研究, 分析了稳态特性和不同反应性引入的瞬态响应动态特性。McCann^[13]开发了闭式布雷顿循环氦氙气冷反应堆系统的 RELAP5-3D 模型程序, 分析了稳态热力特性并开展了多种瞬态工况的动态分析研究。Wang 等^[14]使用 RELAP5 平台通过修改关键设备模型开发了系统分析程序, 进行了程序可靠性验证、稳态特性分析和事故瞬态工况的动态特性分析。

综上所述, 国内外研究为氦氙布雷顿循环反应堆系统的发展奠定了基础, 然而以往的研究对系统事故的机理及其瞬态响应特性的深入研究分析存在一定不足。此外, 所研究的事故种类也相对较少, 需要进行补充丰富。因此, 本文基于 Modelica 语言开发采用布雷顿循环的氦氙气冷反应堆系统分析程序, 通过稳态工况仿真验证程序的可靠性, 开展反应性引入事故和容积控制系统错误投入事故等瞬态工况下的仿真模拟, 并进行运行参数特性分析。

1 系统综述与研究方法

本文研究对象为采用 40 g/mol 的氦氙混合气体为冷却剂工质的氦氙气冷反应堆系统,系统工作原理如图 1 所示。系统采用直接布雷顿循环,堆与设备高度集成强烈耦合,事故工况下设备耦合效应尚未明晰,为掌握系统运行特性和各关键设备相互耦合影响规律,开展氦氙气冷反应堆系统在事故工况下的特性分析。系统事故特性研究方法为基于 Modelica 语言进行模块化拖拽式建模开发系统分析程序,分析程序分为反应堆、涡轮与压气机、回热器与冷却器、同轴转子、阀门和容积控制系统等模块,如图 2 所示。

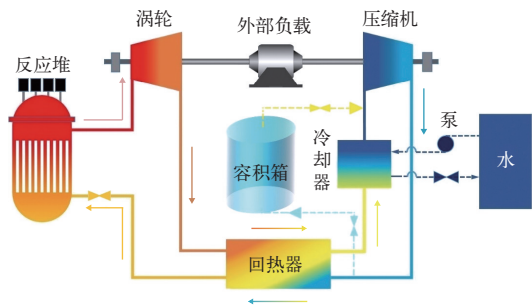


图 1 氦氙气冷反应堆系统原理图
Fig. 1 Schematic diagram of helium-xenon gas cooled reactor system

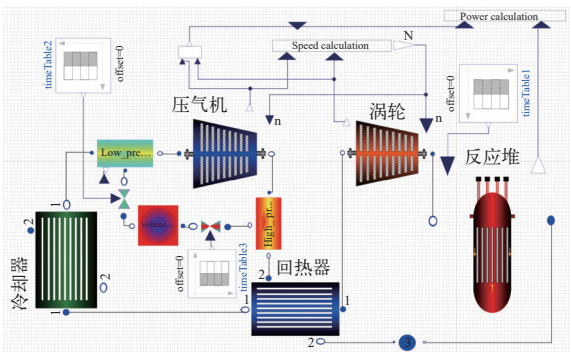


图 2 系统分析程序建模图
Fig. 2 Diagram of system analysis program modeling

反应堆动力系统中所有关键设备均需满足质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程三大守恒方程,其中动量守恒方程和能量守恒方程参考文献 [15-16]。反应堆模型采用单通道集总参数法建立。除三大守恒方程外,其主要方程为压降方程、燃料换热方程和中子动力学方程[17]。压气机与涡轮模型核心为效率和压比特性曲线,模型建立参考文献 [18]。印刷电路板式换热器高效紧

凑[19-20],可作为回热器和冷却器,因换热器中冷却剂物性变化大,通过一维离散方式进行分节点计算,提高程序精度,其核心方程为流动换热方程和压降方程。容积控制模型主要功能为向系统充入氦氙气体和从系统中排出气体,从而达到控制压力的目的,需要考虑充入和排出所导致容积箱内气体质量、压力和温度的变化。压气机、涡轮和负载同轴转子模型的核心方程为转子功率平衡方程,转子转速的变化率取决于三者功率和摩擦损耗功率的差值。最后,氦氙混合气体物性参数参考文献 [14] 中的方法与公式进行计算,通过线性插值的方式耦合进分析程序中。

正常情况下,在发生事故后系统具有负载跟随能力缓解事故后果,但负载跟随系统可能由于某种原因失效,使得外部负载保持额定工况值不变,可能导致事故恶化,因此有必要研究反应堆系统无保护控制事故安全特性,事故序列列于表 1。

表 1 事故序列
Table 1 Accident sequence

序号	事故名称	事故描述
1	正反应性阶跃引入事故	500 s 时,阶跃引入 200 pcm
2	负反应性阶跃引入事故	500 s 时,阶跃引入 -200 pcm
3	容积系统错误充入事故	500 s 时,充入阀开度升高至 35%
4	容积系统错误排出事故	500 s 时,排出阀开度升高至 35%

2 结果分析

2.1 系统分析程序验证

本文通过进行额定稳态工况的数值计算并将结果与设计值进行对比,验证系统分析程序的可靠性,结果列于表 2。从表 2 可看出,系统额定稳态运行参数总体上计算值与设计值之间的相对误差较小,最大为 2.31%,初步验证了布雷顿循环氦氙气冷反应堆系统分析程序的可靠性。

2.2 反应性引入事故

在系统额定工况运行时,控制棒组件可能由于某种原因失控抽出或失控落下,从而阶跃引入较大的正反应性或负反应性。因此,系统仿真初始状态以额定工况运行,在 500 s 时,阶跃引入 200 pcm 正反应性或负反应性,且保持其他外部输入参数不变,研究无保护控制情况下反应性引入特性,计算结果如图 3、4 所示。其中,引入正反应

表 2 额定工况计算结果
Table 2 Calculation result of rated operating condition

系统	参数	参数值		相对误差/%
		设计	计算	
反应堆	功率, MW	10.000	10.000	0.00
	入口温度, K	900.00	900.00	0.00
	出口温度, K	1 200.00	1 199.05	0.08
	入口压力, MPa	2.000	2.000	0.00
	出口压力, MPa	1.950	1.947	0.15
涡轮	功率, MW	8.386	8.486	1.19
	入口温度, K	1 200.00	1 199.05	0.08
	出口温度, K	948.22	941.42	0.72
	入口压力, MPa	1.950	1.947	0.15
	出口压力, MPa	0.975	0.973	0.21
	膨胀比	2.000 0	2.001 0	0.05
压气机	功率, MW	5.358	5.482	2.31
	入口温度, K	330.00	330.31	0.09
	出口温度, K	488.12	492.50	0.90
	入口压力, MPa	0.915	0.919	0.44
	出口压力, MPa	2.020	2.022	0.10
	增压比	2.207 7	2.200 2	0.34
冷却器	功率, MW	6.873	6.996	1.79
	热侧入口温度, K	534.65	537.40	0.51
	热侧出口温度, K	330.00	330.31	0.09
	热侧入口压力, MPa	0.935	0.930	0.53
	热侧出口压力, MPa	0.915	0.919	0.44
回热器	功率, MW	13.787	13.575	1.54
	热侧入口温度, K	948.22	941.42	0.72
	热侧出口温度, K	534.65	537.40	0.51
	热侧入口压力, MPa	0.975	0.973	0.21
	热侧出口压力, MPa	0.935	0.930	0.53
	冷侧入口温度, K	488.12	492.50	0.90
	冷侧出口温度, K	900.00	900.00	0.00
	冷侧入口压力, MPa	2.020	2.022	0.10
	冷侧出口压力, MPa	2.000	2.000	0.00
其他参数	冷却剂流量, kg/s	63.983	63.979	0.01
	转子转速, rpm	20 000	20 000	0.00
	系统效率, %	26.90	26.63	1.00

性工况的温度、功率、压力和流量与转速变化趋势大致与文献 [15] 一致, 进一步验证了程序的可靠性。图 5 示出反应性引入事故下旋转机械效率随时间的变化曲线。

如图 3a、b 所示, 随着正反应性阶跃引入, 反

应堆裂变功率阶跃提升。因反应堆换热功率变化缓慢且滞后, 扰动引入时刻, 裂变功率大于换热功率导致燃料平均温度骤升。由于燃料的温度反馈效应引入负反应性, 抑制了反应堆裂变功率进一步提高, 堆裂变功率经波动后很快与换热功率趋

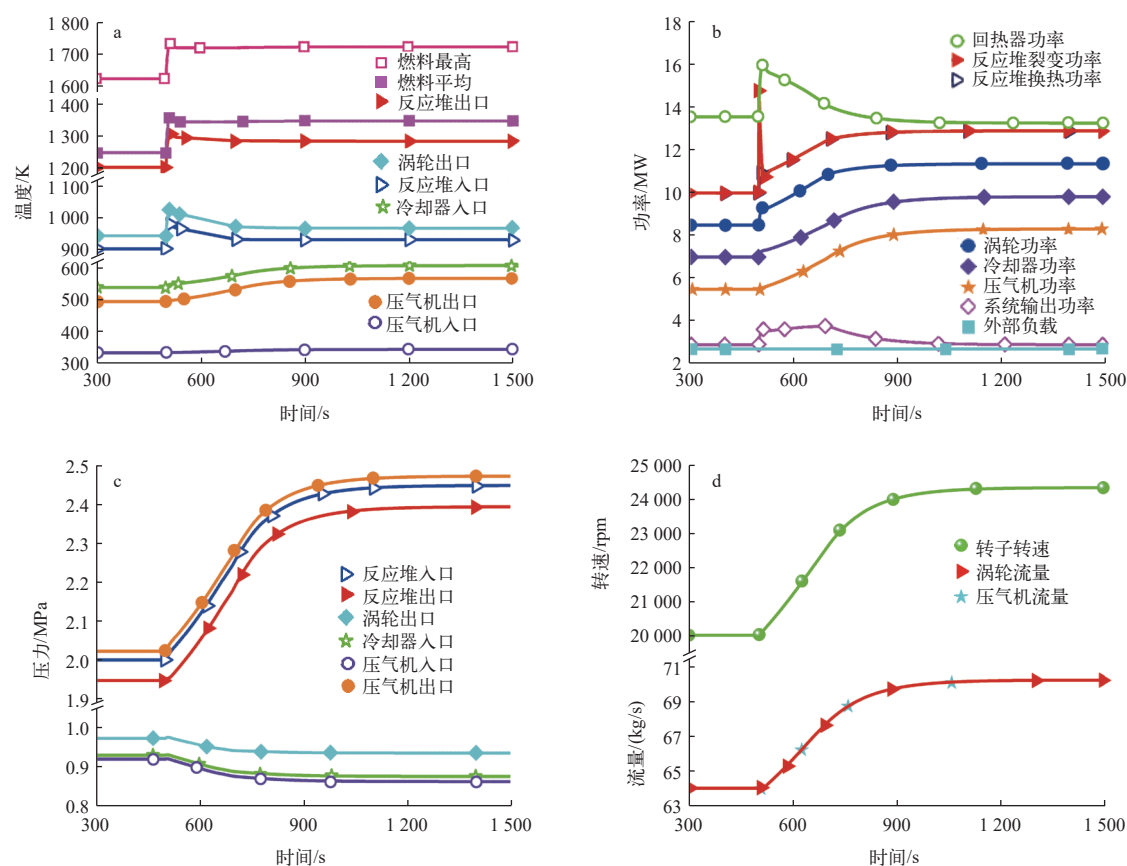


图3 正反应性阶跃引入事故下系统的运行参数曲线

Fig. 3 System operating parameter curve under step introduction positive reactivity accident

于一致。

如图3a、b和d所示,反应堆出口温度、燃料平均温度和涡轮出口温度随反应堆换热功率升高呈骤升趋势。涡轮功率随温度阶跃升高,使得系统输出功率阶跃提升,此时,外部负载不变使得转子转速骤升。因转速上升,使得压气机增压比和涡轮膨胀比增加,提高了它们的比功率,而且系统流量也随转速增加而增加,涡轮与压气机的功率提升至更高的值。随着涡轮比功率的提升,涡轮出口温度在骤升后下降,因系统流量的增加,增强了回热器的回热能力,维持并减小了回热器的传热端差,因此反应堆进出口温度也随涡轮出口温度降低呈下降趋势。因涡轮温度的下降,抑制了其比功率的提升,同理,压气机比功率的提升,压气机出口温度升高,冷却器入口温度随之升高,但由于系统流量的增加,冷却器冷却能力增强,且冷却器传热温差增加,冷却器功率增加,减弱了压气机入口温度的增加幅度,但压气机温度总体呈上升趋势,促进了其比功率的上升。此外,如图5a

所示,随着涡轮和压气机的转速与流量变化,涡轮效率下降,压气机效率上升,这均抑制了涡轮与压气机比功率上升。综上所述,阶跃引入正反应性,因涡轮入口温度阶跃升高,系统输出功率阶跃升高,但涡轮功率增加幅度逐渐小于压气机功率增加幅度,使得系统输出功率呈先上升后下降趋势,最后与外部负载匹配使得转速上升21.6%后趋于稳定。

如图3c所示,由于增压比与膨胀比的增加,使得系统最大压力上升,最小压力下降,但由于氦氖混合气体在低温范围因升温所导致的压力升高值大于高温范围因降温所导致的压力降低值,因此系统的平均压力呈上升趋势,系统最高压力的上升速率大于最低压力的下降速率。

同理,在无保护控制的负反应性引入工况中,其系统温度、功率、压力和流量与转速随时间变化趋势与正反应性引入工况相反,如图4所示。不同的是引入负反应性之后,压气机、涡轮和外部负载无法再达到平衡形成一个新的稳态工况,

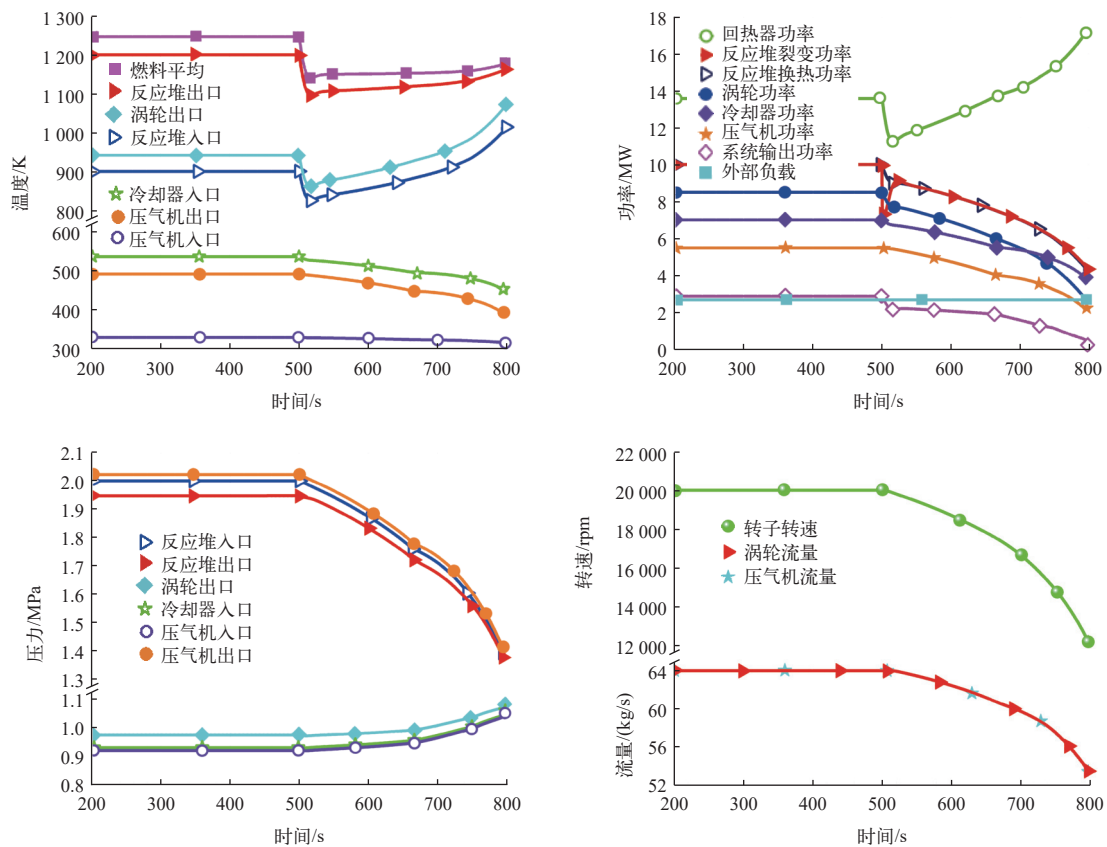
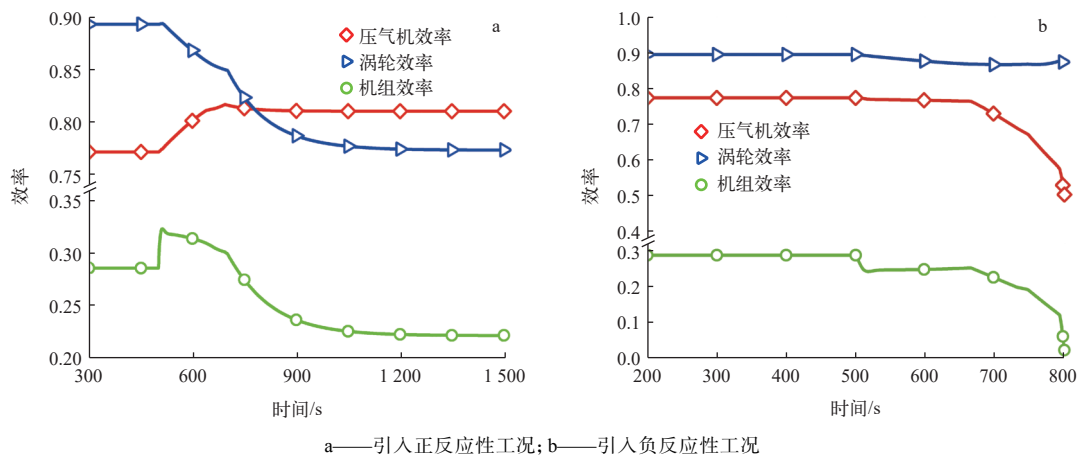


图4 负反应性阶跃引入事故下系统的运行参数曲线

Fig. 4 System operating parameter curve under step introduction negative reactivity accident



a——引入正反应性工况; b——引入负反应性工况

图5 反应性引入事故下旋转机械效率随时间的变化曲线

Fig. 5 Efficiency curve of rotating machinery with time under reactivity introduction accident

转子转速持续下降。在 800 s 时, 转速下降速率为 85 rpm/s, 转速下降过快无法与流量匹配, 容易危及压气机的安全。

如图 5b 所示, 转速持续下降的原因为: 与正反应性引入工况所述同理, 涡轮温度的升高抑制了涡轮比功率的下降, 压气机温度的下降促进了

压气机功率的下降, 这在一定时间内抑制了输出功率下降, 但随着流量与转速偏离设计值, 压气机效率下降速率逐渐加快, 因此效率变化对压气机比功率的影响逐渐占主导地位。然而, 效率下降会使得压气机比功率下降速率变缓甚至变为上升趋势。因此, 系统输出功率随涡轮入口温度阶跃

下降,短时间内因压气机与涡轮温度影响和机组效率变化较小,系统输出功率下降缓慢,随着转速与流量的偏离,系统输出功率快速下降,转速也相应快速下降。

2.3 容积系统错误投入事故

系统额定工况运行时,某些原因可能导致容积系统阀门打开,容积箱错误向压气机入口充入或压气机出口错误向容积箱排出氦氙气体。容积系统错误充入和排出事故下系统运行参数曲线如图6、7所示。容积系统错误投入事故下旋转机械效率随时间的变化曲线如图8所示。

冷却剂的充入或排出将导致系统整体压力上升或下降,如图6c和图7c所示。如图6c、d所示,当充入阀打开,充入流量阶跃升高,容积箱压力因氦氙气体减少而降低,随着容积箱压力下降和压气机入口压力上升,驱动压力减小,充入流量逐渐下降,直至容积箱压力与压气机入口压力一致。

在无保护控制的容积系统错误充入事故中,由于系统整体压力的提升,冷却剂密度也相应提

高。氦氙混合气体在低温范围密度随压力提升的幅度较高温范围大,因此压气机内的冷却剂密度增加幅度大于涡轮。因压缩功和膨胀功的比功率与工质的密度呈反比,则在事故发生后短时间内,涡轮功率和压气机功率小幅度下降,但压气机功率下降幅度大于涡轮,所以系统输出功率增加并大于外部负载,导致转子转速增加,如图6d所示。

如图6b、c和d所示,系统流量、压气机增压比和涡轮膨胀比随转速的增加而增加,使得压气机和涡轮功率由微下降变为上升趋势。如图6a所示,与正反应性引入事故同理,反应堆进出口温度和涡轮出口温度随涡轮比功率的增加而下降,压气机进出口温度和冷却器入口温度随压气机比功率的增加而上升。

如图6b所示,随着堆内冷却剂温度的下降,强化堆内冷却,堆内换热功率增加,使得燃料温度微降引入正反应性,因此反应堆裂变功率随换热功率呈上升趋势。由反应性引入工况叙述可知,涡轮与压气机因比功率变化所引起的温度变化对

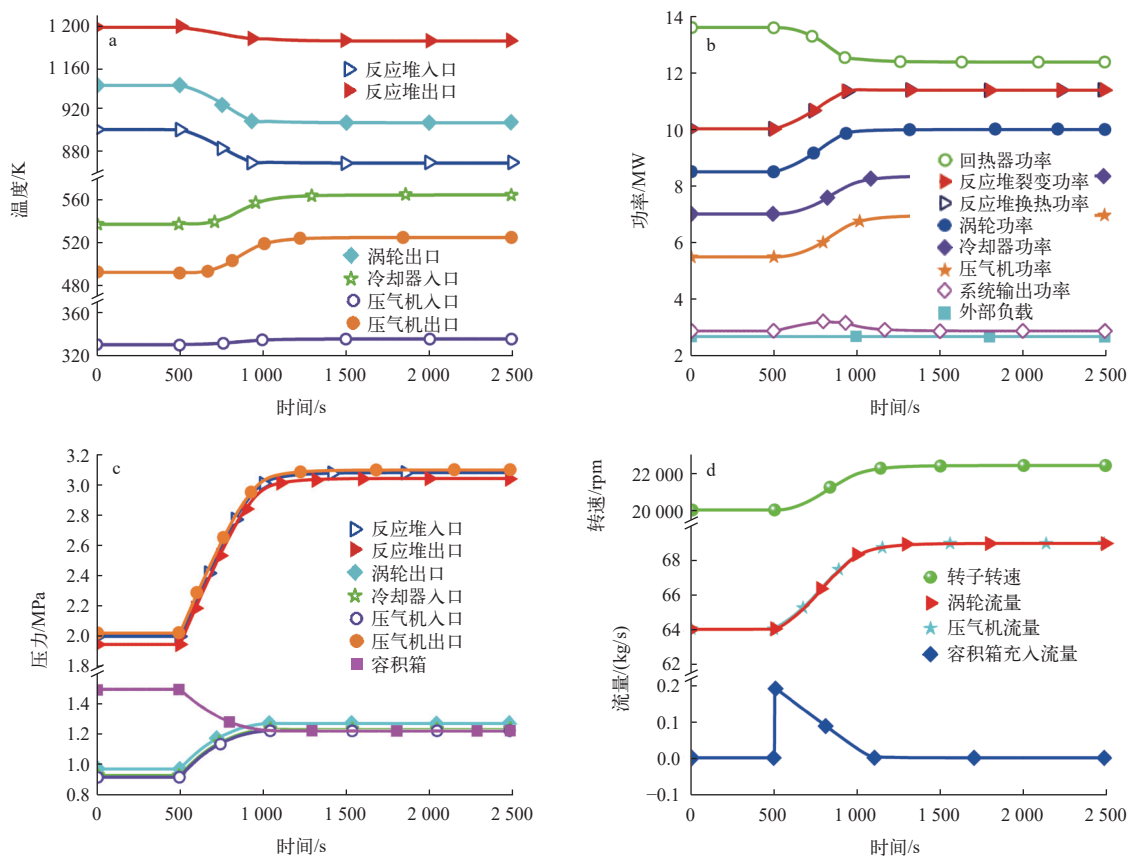


图6 容积系统错误充入事故下系统的运行参数曲线

Fig. 6 System operating parameter curve under coolant incorrect charging accident

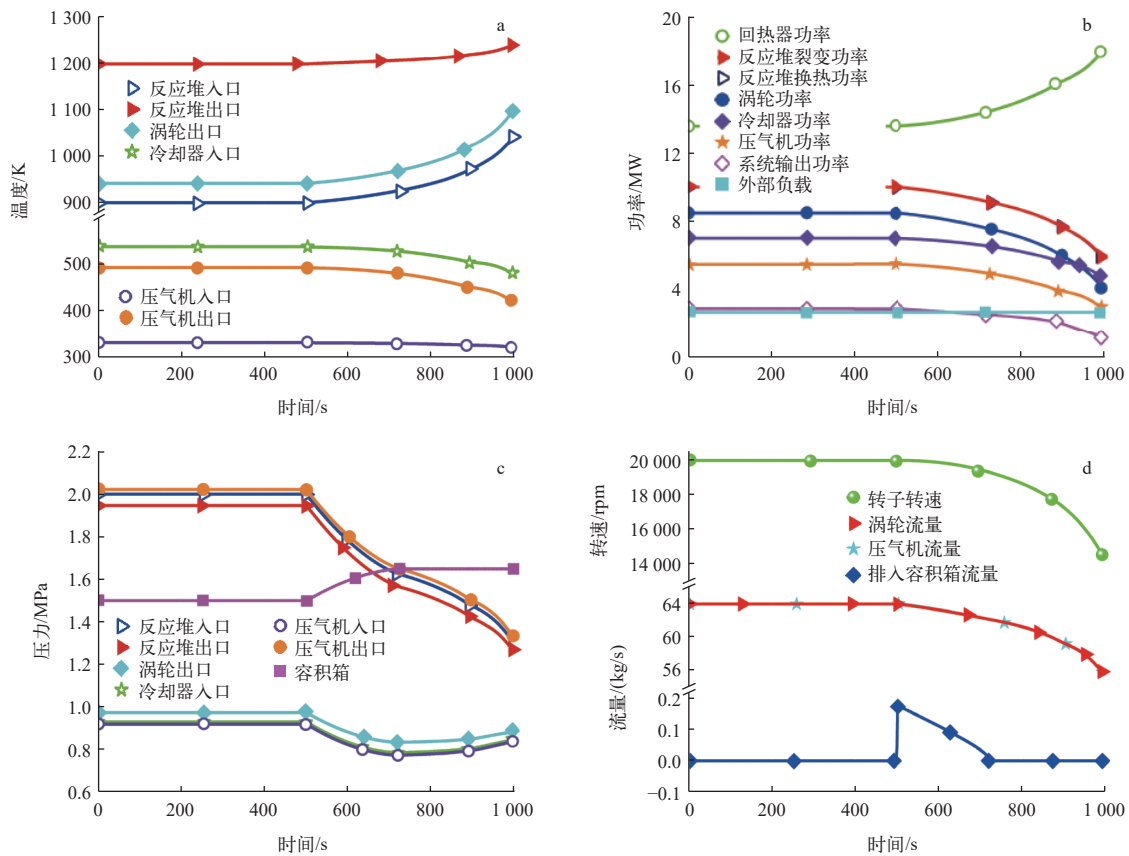
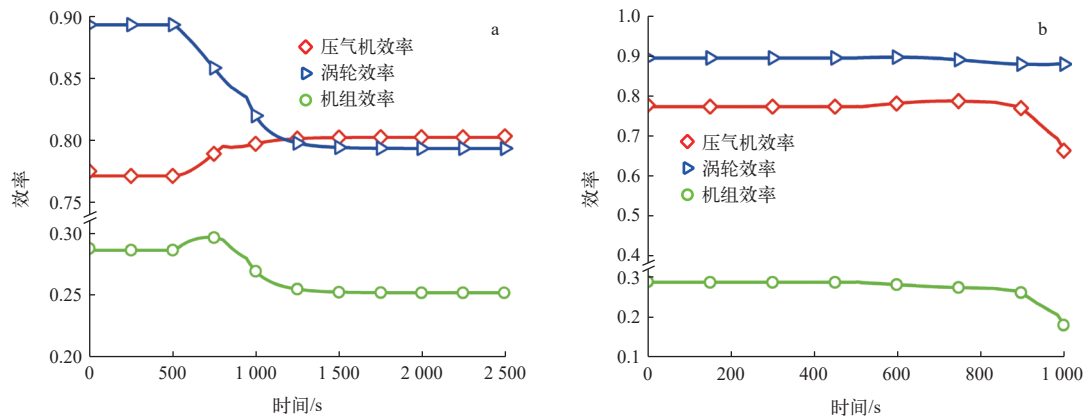


图7 容积系统错误排出工况下系统的运行参数曲线

Fig. 7 System operating parameter curve under coolant incorrect discharge accident



a——冷却剂错误充入工况; b——冷却剂错误排出工况

图8 容积系统错误投入事故下旋转机械效率随时间的变化曲线

Fig. 8 Efficiency curve of rotating machinery with time under coolant incorrect input accident

系统输出功率的提升具有抑制作用。如图8a所示,在布雷顿机组偏离设计值较小时,机组效率得到短暂提升,随着继续偏离,机组效率快速下降,因此,系统输出功率呈先上升后下降趋势,最终与负载匹配使得转速上升12%后趋于稳定。

同理,在无保护控制的容积系统错误排出事

故中,其系统运行参数变化与容积系统错误充入事故相反,如图7所示。值得注意的是,如图7c、d所示,排出流量阶跃升高后,因容积箱压力上升和压气机出口压力下降,使得驱动力减小,排出流量逐渐下降。而排出阀为止回阀,当压气机出口压力低于容积箱压力时,也不会发生反向流动向

系统充入冷却剂,因此容积箱压力增加至等于压机出口压力时将不再变化,此时排出流量为0。

此外,与负反应性阶跃引入事故同理,如图8b所示,布雷顿机组在偏离设计值较小时,虽然通过温度影响和机组效率较小的变化使得系统输出功率下降缓慢,但随着转速的降低,因机组效率快速下降,无法维持转速在另一个较低的稳定值。在800 s时,转速仍存在较大的下降速率10 rpm/s,需采取相应控制措施减缓转速下降速率。

3 结论

本文基于Modelica语言开发了氦氙气冷反应堆系统分析程序,模拟了系统在反应性引入和容积控制系统错误投入下的瞬态事故工况,研究了系统的动态运行特性和主要设备的耦合效应,主要结论如下。

1) 进行了额定稳态运行工况参数误差对比,验证了程序的可靠性和合理性,其中最大相对误差为2.31%。

2) 开展了无保护控制下正反应性阶跃引入和容积系统错误充入事故研究,转速分别上升21.6%和12%后稳定,系统具有自稳自调能力。

3) 开展了无保护控制下负反应性阶跃引入和容积系统错误排出事故研究,在800 s时,转速下降速率分别为85 rpm/s和10 rpm/s,需要采取措施控制转速下降速率。

参考文献:

- [1] BLACK G, SHROPSHIRE D, ARAÚJO K. Small modular reactor (SMR) adoption: Opportunities and challenges for emerging markets[M]//Handbook of Small Modular Nuclear Reactors (Second Edition). INGER-SOLL D T, CARELLI M D. Britain: Woodhead Publishing, 2021: 557-593.
- [2] HIDAYATULLAH H, SUSYADI S, SUBKI M H. Design and technology development for small modular reactors: Safety expectations, prospects and impediments of their deployment[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2015, 79: 127-135.
- [3] TESTONI R, BERSANO A, SEGANTIN S. Review of nuclear microreactors: Status, potentialities and challenges[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2021, 138: 103822.
- [4] VUJIĆ J, BERGMANN R M, ŠKODA R, et al. Small modular reactors: Simpler, safer, cheaper?[J]. *Energy*, 2012, 45(1): 288-295.
- [5] HIRDARIS S E, CHENG Y F, SHALLCROSS P, et al. Considerations on the potential use of nuclear small modular reactor (SMR) technology for merchant marine propulsion[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 79: 101-130.
- [6] TIAN Z, JIANG B, MALIK A, et al. Axial helium compressor for high-temperature gas-cooled reactor: A review[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2019, 130: 54-68.
- [7] EL-GENK M S, TOURNIER J M. Noble gas binary mixtures for gas-cooled reactor power plants[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2008, 238(6): 1353-1372.
- [8] MALIK A, ZHENG Q, LIN A. The design and performance analysis of highly loaded compressor of closed Brayton cycle HTGR power plant with helium xenon gas mixture as working fluid[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2019, 117: 103084.
- [9] TAYLOR R. Prometheus project final report[R]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 2005: 112-117.
- [10] ASHCROFT J, ESHELMAN C. Summary of NR program prometheus efforts[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2007, 880(1): 497-521.
- [11] 侯捷名, 张浩, 汪彬, 等. 100 kWe 级空间快堆核电源系统仿真平台开发与应用[J]. 上海航天 (中英文), 2020, 37(2): 130-138, 145.
HOU Jieming, ZHANG Hao, WANG Bin, et al. Development and application of a simulation platform for the 100 kWe level space fast reactor nuclear power system[J]. *Aerospace Shanghai (Chinese and English)*, 2020, 37(2): 130-138, 145(in Chinese).
- [12] 辛杰, 卢瑞博, 方华伟, 等. 400 kW 空间堆布雷顿循环系统运行特性分析[J]. 上海航天 (中英文), 2021, 38(2): 98-105.
XIN Jie, LU Ruibo, FANG Huawei, et al. Analysis of operational characteristics of the 400 kW space reactor Brayton cycle system[J]. *Aerospace Shanghai (Chinese and English)*, 2021, 38(2): 98-105(in Chinese).
- [13] McCANN L D. Use of RELAP5-3D for dynamic analysis of a closed-loop Brayton cycle coupled to a nuclear reactor[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2007, 880(1): 541-550.
- [14] WANG X, ZHAO F, HE Y, et al. Development and verification of helium-xenon mixture cooled small reaction system[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2023, 160: 104679.
- [15] MING Y, LIU K, ZHAO F, et al. Dynamic modeling and

- validation of the 5 MW small modular supercritical CO₂ Brayton-cycle reactor system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 253: 115184.
- [16] 程道喜, 杜开文, 于松, 等. 铅铋自然循环热工水力分析程序开发 [J]. 原子能科学技术, 2022, 56(9): 1898-1905.
- CHENG Daoxi, DU Kaiwen, YU Song, et al. Development of thermal hydraulic analysis program for lead bismuth natural circulation[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2022, 56(9): 1898-1905(in Chinese).
- [17] 明杨, 易经伟, 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.
- MING Yang, YI Jingwei, FANG Huawei, et al. Analysis of the operational characteristics of the direct Brayton cycle gas cooled reactor system[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2020, 54 (7): 1168-1175(in Chinese).
- [18] 胡骏. 航空叶片机[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 24-90, 158-178.
- [19] 李秋龙, 徐哲, 郭继冠, 等. 板片表面缺陷尺度对印刷板式换热器扩散焊接的影响研究[J]. 材料开发与应用, 2021, 36(2): 74-78.
- LI Qiulong, XU Zhe, GUO Jiguan, et al. Study on the influence of surface defect scale on diffusion welding of printed plate heat exchangers[J]. *Materials Development and Application*, 2021, 36(2): 74-78(in Chinese).
- [20] 史新鑫, 闫栋, 王玮, 等. 印刷电路板式换热器流道结构优化研究[J]. 材料开发与应用, 2023, 38(2): 53-56.
- SHI Xinxin, YAN Dong, WANG Wei, et al. Optimization study of flow channel structure in printed circuit plate heat exchangers[J]. *Materials Development and Application*, 2023, 38(2): 53-56(in Chinese).