

超临界二氧化碳核能系统负荷运行策略研究

薛琪¹, 冯民¹, 马云铎¹, 吴攀¹, 单建强¹, 黄彦平²

(1. 西安交通大学核科学与技术学院, 710049, 西安; 2. 中国核动力研究设计院

中核核反应堆热工水力技术重点实验室, 610041, 成都)

摘要: 为了确保超临界二氧化碳再压缩布雷顿循环直接冷却核能系统在变负荷工况下的安全经济运行, 利用稳态和瞬态回热器换热实验验证了自主研发的瞬态分析程序 SCTRAN/CO₂ 在预测布雷顿循环动态特性方面的可行性, 并以该程序作为分析工具, 开展了超临界二氧化碳再压缩布雷顿循环核能系统分别在反应堆反应性扰动和二次侧冷却水流量扰动两种典型瞬态工况下的开环动态特性研究, 开发了主压缩机入口温度恒定、堆芯出口温度恒定及改变循环工质装量的负荷运行策略, 研究了系统在 100%~50%~100% 变负荷工况下的瞬态响应。结果表明, 装量控制策略能实现以额定满功率 5%/min 的速率追踪负荷, 并保证系统安全经济运行。此过程中, 堆芯压力波动 0.6 MPa, 堆芯出口温度波动不超过 5℃。研究获得的瞬态分析工具、开环特性和控制策略为此核能系统的负荷运行策略研究提供了参考。

关键词: 超临界二氧化碳直接冷却反应堆; 再压缩布雷顿循环; 动态特性; 负荷运行策略

中图分类号: TL333 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202305014 **文章编号:** 0253-987X(2023)05-0136-13

Study on Load Operation Strategy for Supercritical Carbon Dioxide Nuclear Power System

XUE Qi¹, FENG Min¹, MA Yunduo¹, WU Pan¹, SHAN Jianqiang¹, HUANG Yanping²

(1. School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. CNNC Key Laboratory on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics Technology, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: This paper studies a self-developed transient analysis code SCTRAN/CO₂ to ensure the safe and economical operation of supercritical CO₂ directly-cooled nuclear energy system based on the recompression Brayton cycle under variable load conditions. Steady-state and transient recuperator experiments are modeled to prove the feasibility of the code in predicting the characteristics of the Brayton cycle. The code is used as an analysis tool to study the open-loop dynamic characteristics of the supercritical CO₂ nuclear energy system based on the recompression Brayton cycle under two typical transient conditions: reactor reactivity disturbance and secondary loop cooling water mass flow disturbance. A load operation strategy is developed based on constant main compressor inlet temperature, constant core outlet temperature and varying inventory of

收稿日期: 2022-08-30。 作者简介: 薛琪(2000—), 女, 硕士生; 吴攀(通信作者), 男, 副教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12175172); 中国核工业集团有限公司领创科研项目。

网络出版时间: 2023-01-03

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20230103.1402.006.html>

working fluid. A study is conducted on the transient response of the system under variable load conditions of 100%—50%—100%. The results show that the inventory control strategy can track the load at a rate of 5% of full power per minute and ensure the safe and economical operation of the system. During this process, the core pressure fluctuated by 0.6 MPa and the core outlet temperature fluctuated by no more than 5 °C. The transient analysis tool, open-loop dynamic characteristics and control strategies presented in this paper provide a reference for the development of load operation strategies for such nuclear power systems.

Keywords: supercritical carbon dioxide directly cooled reactor; recompression Brayton cycle; dynamic characteristics; load operation strategy

超临界 CO₂ 布雷顿循环系统(SCBC)因其结构紧凑、布置简单、中温循环效率高等特点而受到广泛关注。CO₂ 在其临界点附近密度较大,利用压缩机对高密度 CO₂ 进行压缩可以减少功耗,在较低的透平入口温度条件下获得较高的循环热效率^[1]。

超临界 CO₂ (SCO₂)再压缩布雷顿循环直接冷却反应堆是一种非常有前景的新型动力系统,具有功率密度高、结构紧凑、循环效率高等显著优势,但同时也带来了一些与传统压水堆不同的技术难题。首先,能量转换系统与反应堆堆芯直接耦合,增加了反应堆系统负荷运行控制的复杂性。堆芯的运行压力和流量分别同压缩机出口压力和透平流量强耦合,升降负荷时压力的变化和燃料包壳温度变化会给反应堆安全带来挑战。其次,系统参数对运行工况十分敏感,压缩机入口状态在临界点附近,CO₂ 的物性变化剧烈,会影响压缩机功率和压力等;堆芯进出口温度通过回热器的高低压两侧强耦合在一起。此外,再压缩布雷顿循环具有两列压缩机,它们之间的流量分配对运行参数和循环效率的影响很大。这些特性使 SCO₂ 再压缩布雷顿循环直接冷却核能系统的运行和控制更复杂,因此研究该核能系统的开环动态特性以及变负荷运行策略对于其概念评估是至关重要的。

目前大部分关于 SCBC 的动态特性研究均以开环动态特性分析为主,系统受到外界扰动时产生的影响不反馈给控制系统,这对于研究系统本身的特性具有重要意义。针对 SCO₂ 布雷顿循环,典型的负荷运行控制方法有装量方法、温度方法、转速方法、节流方法和旁通方法等,每种控制方法都有其优势和局限性^[2-12]。装量方法通过向环路中注入或抽出工质来改变进入透平的质量流量,该控制方案在氦气冷堆^[13-17]中具有吸引力,这是因为氦气密度随

压力线性变化,可以确保涡轮机械的体积流量不变,使得透平的入口温度和压比保持不变,有利于系统维持较高的环路效率。Li 等^[18]对 He-Xe 布雷顿循环偏离设计工况的参数变化规律进行了研究,结果表明在装量方法下系统循环效率可以维持在设计值附近。装量方法在超临界 CO₂ 布雷顿循环中也同样具有吸引力。Singh 等^[19]提出了一种极值寻求控制器,通过控制闭式布雷顿循环的工质装量,获得在太阳能热量输入和冷却空气温度变化时循环功率输出的最大值;在极值寻求控制性能指标中引入松弛变量约束透平的入口温度和压力,保护闭式布雷顿循环免受破坏,模拟结果表明:在基于极值寻求控制器的装量控制下,闭式布雷顿循环的性能优于在固定装量下的运行。Carstens^[3]、Moisseytsev 等^[20]、Muñoz 等^[21]等的研究结果也表明,SCO₂ 布雷顿循环采用的装量控制策略也是负荷运行工况下最为高效的策略。

为了确保 SCO₂ 再压缩布雷顿循环直接冷却核能系统在变负荷工况下的安全经济运行,本文旨在研究系统的开环特性与采用装量控制方法的负荷运行策略,开展的具体研究内容如下:①针对自主研发的 SCO₂ 布雷顿循环瞬态分析程序 SCTRAN/CO₂ 进一步开展了回热器模型的验证,证明该程序可以预测 PCHE 型回热器的稳态参数和瞬态行为;②完成了 SCO₂ 再压缩布雷顿循环直接冷却核能系统的建模,并利用 SCTRAN/CO₂ 开展了系统的开环动态特性研究以及对外界扰动响应的敏感性分析;③基于系统动态特性研究,采用 PI 控制器开发了主压缩机入口温度、堆芯出口温度恒定及改变循环装量的控制策略,研究了 SCO₂ 再压缩布雷顿循环直接冷却核能系统在 100%~50%~100%的典型变负荷工况下的瞬态响应。

1 瞬态分析程序介绍及验证

SCTRAN/CO₂ 是 Wu 等^[22] 开发的适用于 SCO₂ 布雷顿循环系统的一维瞬态分析程序。该程序基于均匀流模型求解循环工质的流动和换热;采用点堆中子动力学模型来计算反应堆堆芯功率;涵盖了包括涡轮机械、回热器等 SCO₂ 布雷顿循环的专用模型;瞬态求解时采用动态时间步长控制策略,可实时求解瞬态结果。Wu 等已经从部件模型和整体环路两个层面对该程序预测闭式布雷顿循环瞬态行为的能力进行了验证,预测结果表明,程序初步具备了进行布雷顿循环瞬态预测的能力^[22]。

在 SCO₂ 再压缩布雷顿循环冷却核能系统中,回热器是整个循环中热载荷最高的部件,其瞬态响应会影响整个核能系统的动态特性。因此,有必要单独开展回热器瞬态行为的验证工作,以确认程序采用的 PCHE 换热器模化方法和换热关系式可以满足研究需求。

本节基于美国海军核实验室(NNL)^[23] 进行的功率瞬态运行(电功率由 5 kW 上升到 30 kW)实验对回热器关键参数的响应开展验证,其整体实验装置见图 1。在升功率过程中,通过调节压缩机再循环支路流量对压缩机转速进行调控,进而实现发电功率的调节;在瞬态过程中压缩机和透平入口温度保持不变。

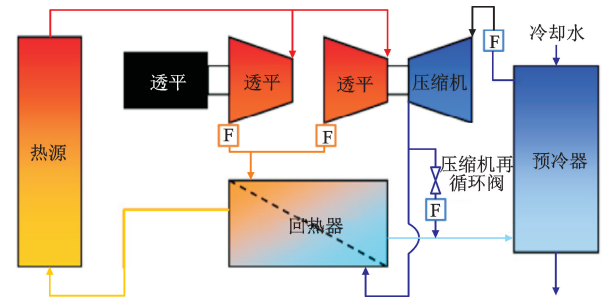
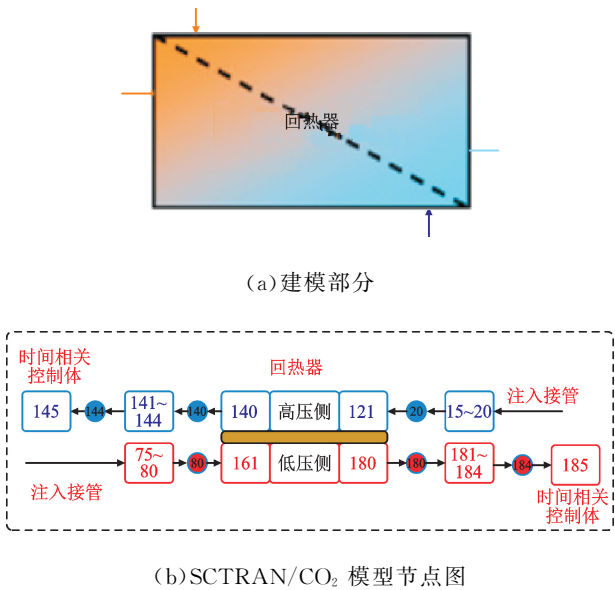


图 1 整体实验装置系统图
Fig. 1 Schematic of overall experimental system

为了排除其他设备建模对回热器瞬态行为的影响,仅对实验回路的回热器进行了建模,如图 2 所示,方框和圆圈中的数字分别表示控制体节点和接管的编号。上游采用给定的回热器入口温度和流量作为边界条件。在整个瞬态过程中,回热器内压力变化较小。下游采用给定恒定的出口压力作为边界

条件,建模采用的 PCHE 回热器的具体参数参考 NNL 的实验^[23]。

在对瞬态工况进行验证前,首先对建模的节点数进行了分析。结果表明 70% 的换热量都发生在回热器热半端,在靠近冷端 1/5 相对长度处出现了夹点,SCTRAN/CO₂ 采用的 PCHE 换热器的模化方法可以预测其温度分布趋势。当节点数为 40 时,对回热器的预测结果符合较好。



(b) SCTRAN/CO₂ 模型节点图

图 2 回热器瞬态验证节点图

Fig. 2 Schematic of recuperator node

表 1 列出了采用 40 个节点时,SCTRAN/CO₂ 对回热器关键参数的预测值同实验值的对比结果。结果表明 SCTRAN/CO₂ 可以在较宽的功率范围内对回热器的性能进行预测。在设计工况下(循环产生 100 kW 电功率),温度误差在 0.53 ℃ 以内,功率相对误差在 0.16% 以内;在非设计工况下(循环产生 5 kW 电功率),温度误差在 2.12 ℃ 以内,功率偏差在 1.1% 以内。

图 3 和图 4 分别给出了在 12 s 内系统负荷从 5% 上升到 30% 瞬态过程中回热器温度和功率的变化。从图中可以看到,回热器入口温度和流量作为模型的边界条件,与实验值保持一致。回热器出口温度和功率的预测结果同实验值趋势一致,冷侧出口温度偏差最大为 4 ℃ 左右,换热功率偏差不超过 6%。因此认为 SCTRAN/CO₂ 可以准确预测 PCHE 换热器的瞬态行为,满足本文的研究需求。

表 1 NNL 实验回路的稳态预测结果

Table 1 Steady state results of NNL experimental cycle

参数	工况	具体参数	数值
热侧入口 温度/℃	非设计工况	实验值	203.10
		计算值	202.75
		绝对误差	0.35
	设计工况	实验值	252.30
		计算值	252.33
		绝对误差	0.03
热侧出口 温度/℃	非设计工况	实验值	46.00
		计算值	45.93
		绝对误差	0.07
	设计工况	实验值	58.30
		计算值	58.83
		绝对误差	0.53
冷侧入口 温度/℃	非设计工况	实验值	42.00
		计算值	41.78
		绝对误差	0.22
	设计工况	实验值	52.70
		计算值	52.75
		绝对误差	0.05
冷侧出口 温度/℃	非设计工况	实验值	140.50
		计算值	138.38
		绝对误差	2.12
	设计工况	实验值	177.50
		计算值	177.67
		绝对误差	0.17
热侧流量/ (kg·s ⁻¹)	非设计工况	实验值	2.70
		计算值	2.70
		相对误差/%	0.00
	设计工况	实验值	5.46
		计算值	5.46
		相对误差/%	0.00
冷侧流量/ (kg·s ⁻¹)	非设计工况	实验值	2.79
		计算值	2.79
		相对误差/%	0.00
	设计工况	实验值	5.54
		计算值	5.54
		相对误差/%	0.00
热侧热 负荷/kW	非设计工况	实验值	674.90
		计算值	678.26
		相对误差/%	0.78
	设计工况	实验值	1 458.00
		计算值	1 460.34
		相对误差/%	0.16
冷侧热 负荷/kW	非设计工况	实验值	685.70
		计算值	678.28
		相对误差/%	1.10
	设计工况	实验值	1 459.00
		计算值	1 460.34
		相对误差/%	0.09

注：# 为非设计工况的出口温度是根据文献[23]中瞬态工况的曲线图得到的，功率参数是根据回热器进出口焓计算得到的。

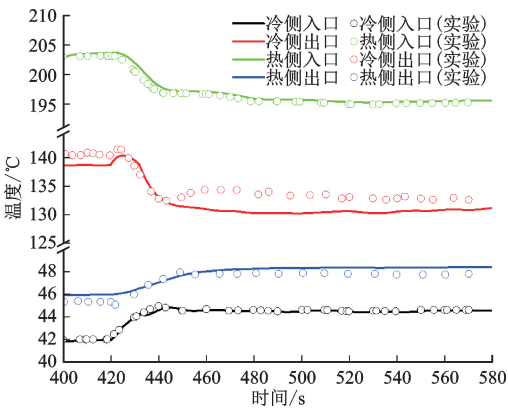


图 3 回热器升功率过程中瞬态温度变化

Fig. 3 Transient temperature change in the process of recuperator power rise

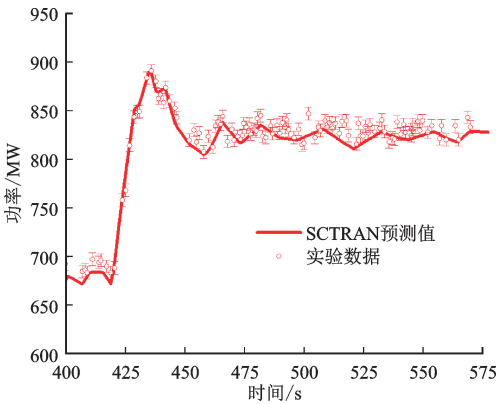


图 4 回热器升功率过程中瞬态功率变化

Fig. 4 Transient power change in the process of recuperator power rise

2 开环动态特性研究

SCO₂ 再压缩布雷顿循环直接冷却核能系统以反应堆作为热源,采用两个回热器以回收利用热量,在主压缩机前设置预冷器以控制压缩机入口温度,两列压缩机作为循环动力装置驱动工质流动,涡轮机械采用同轴布置的方式,有利于简化系统布局 and 调控涡轮机械转速。

小型模块化反应堆是很有前景的发展方向,单机热功率在 100~300 MW。本文的研究对象为典型的热功率约为 100 MW 的核反应堆。堆芯出口温度提升虽然可以提高能量转换系统的效率,但考虑到核燃料壁面温度不宜过高,最终参考现有第四代反应堆的运行状况,选择 500℃作为堆芯出口温度。系统的最大压力为 20 MPa,这一选择参考了

MIT 的参数设计^[24]。主压缩机入口运行于 CO₂ 的临界点附近,有利于减少压缩机功耗,提高循环效率,因此选择 33℃和 7.8 MPa 作为主压缩机入口运行参数。高温和低温回热器的换热能力,以及主压缩机和再压缩机之间的流量分配需要进一步优化,存在一组参数满足在总换热能力一定的情况下系统具有最高的循环热效率。本文利用自主研制的热力学设计软件 SASCOB^[25],优化设计得到了循环效率为 41.54%的 SCO₂ 再压缩布雷顿循环直接冷却核能系统,关键设备的参数如表 2 所示,基于 SCT-RAN/CO₂ 的循环建模如图 5 所示,图中数字表示在对系统进行建模时,每个设备对应的控制体号。

开环动态特性研究是了解 SCO₂ 再压缩布雷顿循环直接冷却核能系统在外界扰动下动态响应的重要内容,根据动态特性的研究结果得到系统的瞬态响应特性,进而制定相应控制策略来实现运行要求,并保护系统免受超预期外部扰动乃至事故的破坏。本节选取了反应堆反应性扰动和二次侧冷却水流量扰动两种典型瞬态工况,针对不添加控制系统的开环动态特性展开研究。

表 2 循环关键设备参数
Table 2 Key parameters of Brayton cycle

循环参数	数值
堆芯功率/MW	94.46
循环流量/(kg·s ⁻¹)	521.4
冷却水流量/(kg·s ⁻¹)	972
循环装量/t	25.06
涡轮机械总转动惯量/(kg·m ²)	386.31
主压缩机功耗/MW	6.51
再压缩机功耗/MW	11.25
透平功率/MW	57.0
压缩机效率/%	0.9/0.9
透平效率/%	0.9
循环效率/%	41.54
高温回热器功率/MW	132.0
低温回热器功率/MW	61.25
高温回热器体积/m ³	42.33
低温回热器体积/m ³	33.86
预冷器功率/MW	55.24
预冷器体积/m ³	10.58

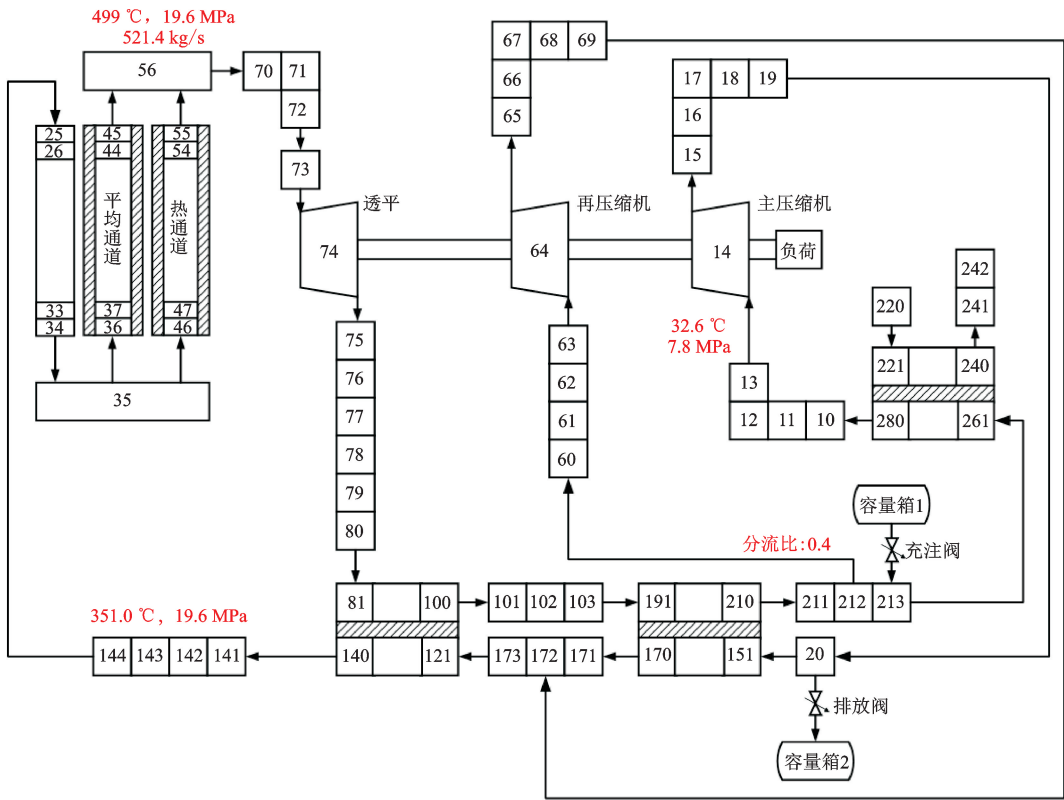


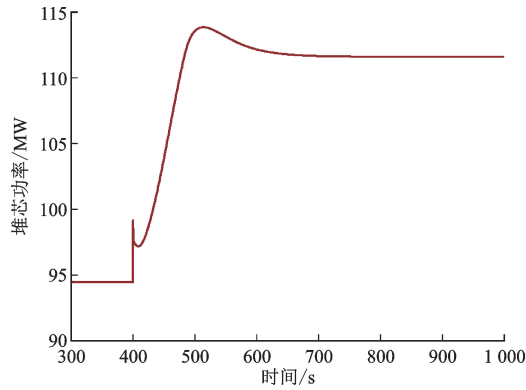
图 5 SCRB 核反应堆系统节点图
Fig. 5 Schematic of SCO₂ recompression Brayton cycle node

2.1 反应性扰动

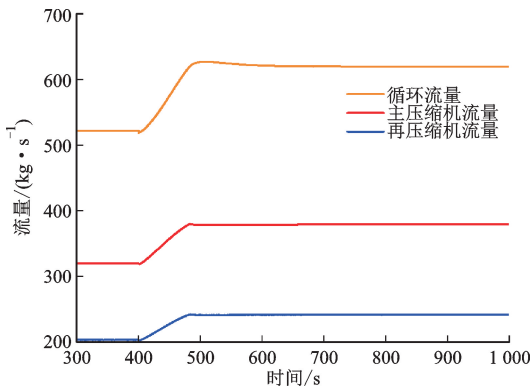
在反应堆系统中,控制棒驱动机构的故障往往会导致非预期的反应性引入,引发反应堆的功率波动。在本节计算中,假设核能系统的控制棒在 400 s 时突然弹出,堆芯在 0.1 s 内引入了 6.5×10^{-4} 的正反应性。堆芯功率的变化如图 6(a)所示,在 656 s 时,反应堆功率迅速增加了 17.1 MW。

随着反应性的引入,堆芯进出口温度先增加了 10℃左右,而系统压力上升了 1.2 MPa。由于布雷顿循环透平入口同堆芯出口的强耦合特性,透平入口温度上升,做功能力增强,涡轮机械转速由 23 000 r/min 上升至 25 316 r/min(见图 6(d))。随着压缩机转速及做功增加,循环的驱动能力增加,循环质量流量迅速增大,如图 6(b)所示。随着循环流量增大,堆芯得到进一步冷却,堆芯温度在上升之后开始下降(见图 6(c))。

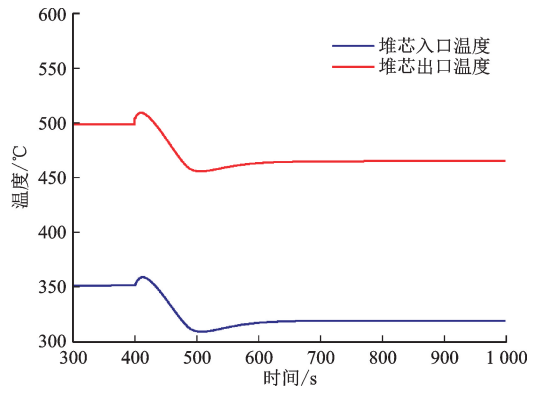
由于堆芯的反应性反馈作用,反应堆功率最终达到平衡。堆芯进出口流体的温度先上升再下降,系统压力增大,密度反应性反馈先下降后上升,最终引入正反应性;多普勒反应性反馈则引入了负反应性,堆芯功率上升,燃料温度上升,从而抑制了反应堆功率的波动,最终反应堆达到了新的热平衡状态。



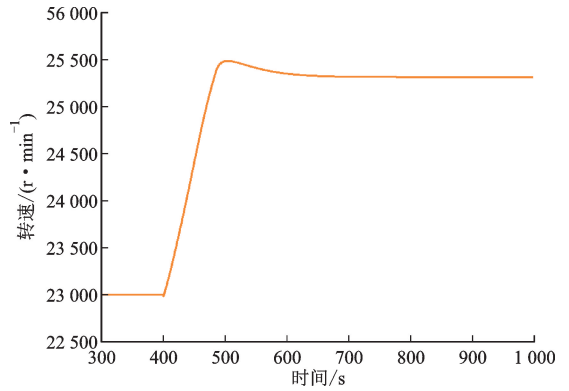
(a)堆芯功率



(b)循环流量



(c)堆芯温度



(d)涡轮机械转速

图 6 反应性引入后的参数变化

Fig. 6 Parameters changes of reactivity introduction

综上,系统在反应性引入过程中表现出了一定的固有安全性和自我调节能力。一方面,反应堆的负反馈特性可以抑制反应堆功率的过度增加;另一方面,系统循环流量的增加也可以冷却反应堆,起到避免堆芯过热的保护作用。尽管系统具有一定的自调节能力,但动态过程中涡轮机械超速仍然会对设备安全产生威胁,同时转速变化会导致发电机侧的发电频率剧烈变化,这违背了小型电网追求稳定的电能质量的初衷。此外,系统压力偏离设计值对于压力边界的保持也带来挑战。

在 6.5×10^{-4} 反应性引入瞬态工况的基础上,本节通过引入不同的反应性进行系统响应的敏感性分析。不同反应性引入后系统响应的具体参数如表 3 所示。

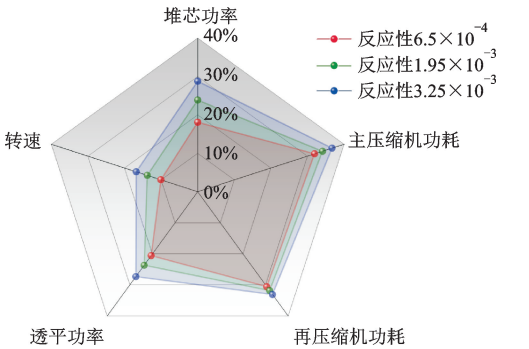
将上述参数归一化折算成百分比于雷达图中显示,如图 7 所示。图 7(a)表明,当反应性引入分别为 6.5×10^{-4} 、 1.95×10^{-3} 、 3.25×10^{-3} 时,对应系统涡轮机械转速上升分别为 10.1%、13.8% 和 16.8%,而堆芯功率上升则达到了 18.1%、23.9% 和 28.8%,压缩机功耗的增幅相比透平更大。

表 3 不同反应性引入下系统参数

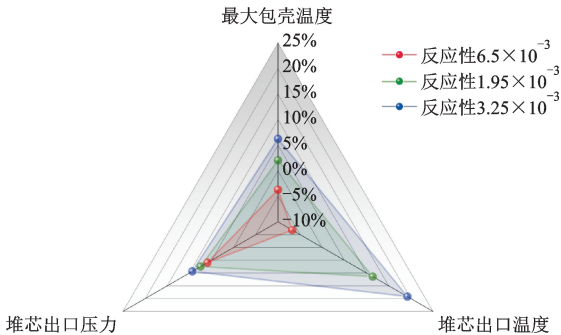
Table 3 System parameters under different reactivity introduction

平衡时的循环参数	稳态	反应性		
		6.5×10^{-4}	1.95×10^{-3}	3.25×10^{-3}
堆芯功率/MW	94.46	111.56	117.02	121.64
主压缩机功耗/MW	6.51	8.59	8.73	8.9
再压缩机功耗/MW	11.25	14.69	14.83	14.97
透平功率/MW	57.00	68.73	70.49	72.57
转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	23 000	25 316	26 171	26 864
最大包壳温度/ $^{\circ}\text{C}$	726.9	700.0	741.89	772.31
堆芯出口温度/ $^{\circ}\text{C}$	499.0	465.2	555.94	595.0
堆芯出口压力/MPa	19.5	20.66	20.96	21.33

图 7(b)则显示了在不同反应性引入后堆芯温度和压力的变化,系统压力由于涡轮机械增速和压比增大而上升,但堆芯出口温度变化规律比较复杂,当引入反应性 6.5×10^{-4} 时,堆芯出口温度降低了 6.77%,最大包壳温度降低了 3.70%;引入 1.95×10^{-3} 时,堆芯出口温度升高 11.4%,最大包壳温度升高 2.06%。在之前的分析中,当反应性引入时,涡轮机械增速导致的流量增加一定程度上冷却了堆芯,此处不同反



(a) 系统功率及涡轮机械转速



(b) 堆芯温度与压力

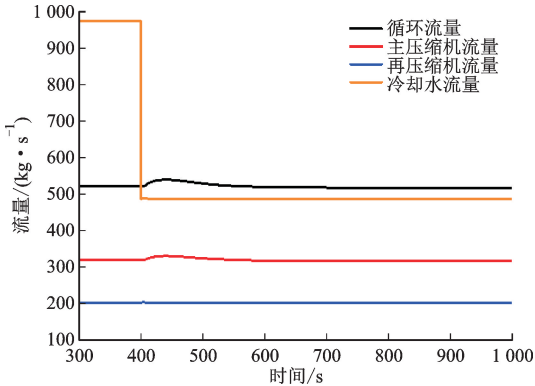
图 7 不同反应性引入下归一化参数的变化
Fig. 7 Changes of normalized parameters under different reactivity insertion

应性引入敏感性分析则表明当引入反应性增大时,反馈效应对堆芯冷却效果被显著削弱,说明在确定的堆芯反应性反馈系数下,堆芯功率的自调节能力有限。

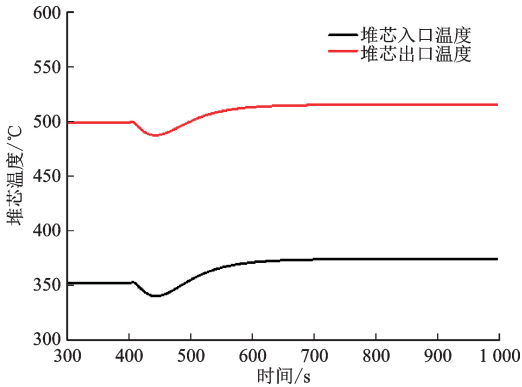
2.2 二次侧冷却水流量扰动

SCO₂ 再压缩布雷顿循环直接冷却核能系统的最低温度和压力出现在主压缩机入口处,此处的 CO₂ 状态接近临界点,微小的扰动可能导致系统运行状态的显著波动。常见的扰动主要是预冷器二次侧冷却水回路因为阀门动作等影响导致冷却水流量降低,对循环的排热能力降低。

如图 8(a)所示,冷却水流量在 400 s 时瞬间降低至稳态值的一半,排热量瞬时减少,主压缩机进出口压力及入口温度增大使其做功增强,循环流量上升,对堆芯瞬时冷却增强。堆芯进出口温度如图 8(b)所示,先略微下降,但之后由于预冷器功率下降,系统 CO₂ 侧回路温度上升,堆芯温度升高,同时压缩机功耗逐渐增大,循环效率降低,堆芯功率在反应性反馈作用下下降达到新的平衡。



(a) 循环流量



(b) 堆芯温度

图 8 冷却水流量减少后的参数变化
Fig. 8 Parameters changes of cooling water flow reduction

由图 8 可以看出,系统的输出功率和循环效率很大程度上取决于预冷器的制冷量。冷却水流量的减少对主压缩机入口温度的影响会逐渐辐射至整个循环。因此,有必要对预冷器进行控制系统设计,以避免主压缩机入口温度偏离设计值过多。

在选取 50%冷却水流量工况的研究基础上,选取不同相对冷却水流量进行系统响应的敏感性探究,具体参数如表 4 所示。

表 4 不同冷却水流量下系统参数

	water flow			
平衡时的循环参数	100%	70%	50%	30%
堆芯功率/MW	94.46	92.15	89.84	86.48
主压缩机功耗/MW	6.51	7.23	7.95	9.23
再压缩机功耗/MW	11.25	11.80	12.40	13.45
透平功率/MW	57.00	55.70	53.80	49.21
循环效率/%	41.54	39.80	37.20	30.60
堆芯入口温度/℃	351.0	362.7	373.7	389.8
堆芯出口温度/℃	499.0	507.2	515.3	527.2
堆芯出口压力/MPa	19.50	20.41	21.28	22.39

同样将上述参数归一化折算成百分比于雷达图中显示,如图 9 所示。冷却水流量分别为 70%、50%、30%时,对应堆芯功率分别下降了 2.45%、4.89%和 8.45%,压缩机的功耗的增幅显著,主压缩机在 30%冷却水流量时功耗增加了 41.78%。最为显著的是循环效率的降低,30%冷却水流量下循环效率已经接近 30%。冷却水流量的减少对于主压缩机压比的影响十分显著,循环压力增加对系统压力边界带来了严峻挑战。表明主压缩机入口参数对外界扰动非常敏感,控制入口参数有利于获得更高的循环效率和更稳定的运行状态。

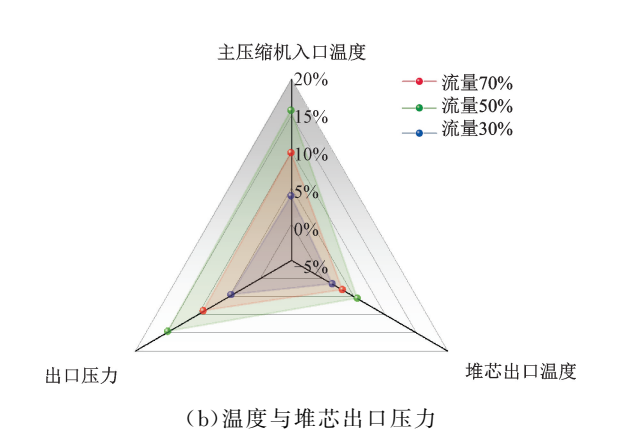
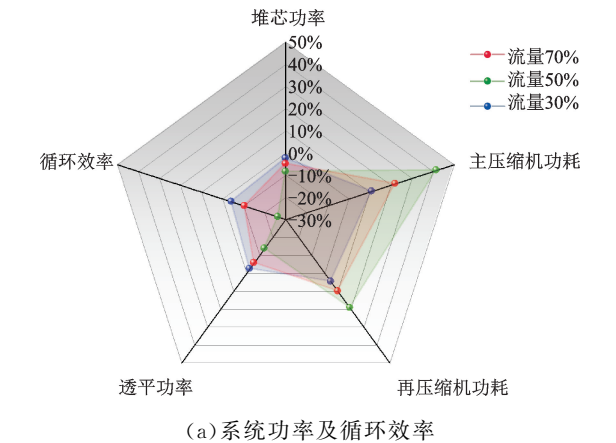


图 9 不同冷却水流量下归一化参数的变化
Fig. 9 Changes of normalized parameters under different cooling water flow

通过对反应性引入及冷却水流量突变等典型外部扰动的敏感性分析,发现 SCO_2 再压缩布雷顿循环直接冷却核能系统在外界扰动变化时的动态响应特性:强耦合特性使得循环自身存在一些固有安全特性,如涡轮机械转速增加能增大流量,加强对堆芯的冷却能力,但反应堆自身的反应性反馈调节能力有限,应当考虑适当的安全限值。

3 控制系统设计及负荷运行策略

3.1 控制系统设计

基于系统的开环动态特性研究,在负荷运行策略研究时,为实现核能系统负荷跟踪,且保证反应堆系统和能量转换系统的安全,循环压力和堆芯温度波动应尽可能小,本文设计了主压缩机入口温度控制、堆芯出口温度控制以及装量控制等控制系统。控制系统设计示意图如图 10 所示。

3.1.1 主压缩机入口温度控制

主压缩机入口参数接近 CO_2 临界点时,物性变化剧烈。在负荷运行工况中,主压缩机入口温度的波动会给系统带来十分显著的影响。主压缩机入口温度控制系统根据实际温度与设定值的偏差,调节预冷器冷却水流量,保证压缩机入口温度稳定在设定值附近。PI 控制器可实现压缩机入口温度的控制,定义如下

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt \tag{1}$$

式中: $u(t)$ 为控制器输出信号; $e(t)$ 为控制器输入信号; K_P 为控制器比例环节增益参数; K_I 为控制器积分环节增益参数。

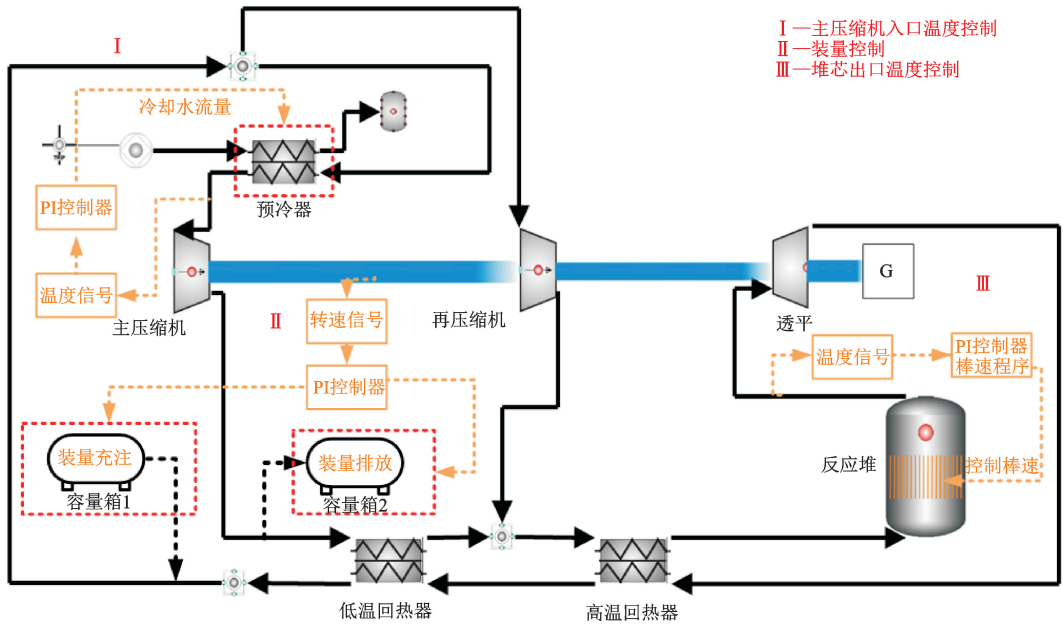


图 10 SCRBC 反应堆系统负荷运行控制示意图

Fig. 10 Schematic diagram of system load operation control of recompression SCO₂ Brayton cycle

图 11 为主压缩机入口温度控制系统的控制流程。在该系统中,冷却水相对流量变化量作为输出信号,压缩机入口实际温度同设定值的偏差作为输入信号。主压缩机入口温度控制系统的输入信号为

$$e_c(t) = \frac{T_c - T_{c, \text{set}}}{T_{c, \text{set}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: T_c 为主压缩机实际入口温度; $T_{c, \text{set}}$ 为主压缩机入口温度设定值。

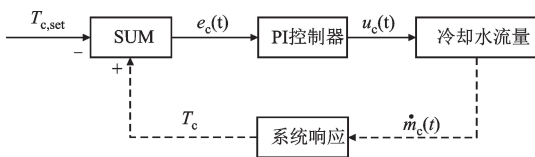


图 11 主压缩机入口温度控制流程示意图

Fig. 11 Flow chart of main compressor inlet temperature control of recompression SCO₂ Brayton cycle

进而求得预冷器冷却水的质量流量

$$\dot{m}_c(t) = \dot{m}_c(0) + \dot{m}_{c, \text{rated}} u_c(t) \quad (3)$$

式中: $\dot{m}_c(t)$ 为当前时刻的冷却水质量流量; $\dot{m}_c(0)$ 为冷却水质量流量的初始值; $\dot{m}_{c, \text{rated}}$ 为预冷器冷却水质量流量的额定值; $u_c(t)$ 为主压缩机入口温度控制系统的输出信号。

3.1.2 装量控制

负荷运行工况中,装量控制系统通过充注或排出工质改变回路装量,直接影响透平做功,从而改变

供电功率。负荷突然降低会在转动轴上引入较大的正向转矩,导致涡轮机械转速飞升。因此,将涡轮机械转速与装量进行耦合,根据涡轮机械实际转速与设定参考转速的偏差,调节容量箱充注或排放工质,实现涡轮机械转速稳定在设定值附近,通过改变回路装量而改变做功,实现发电功率同负荷需求的匹配,控制流程如图 12 所示。装量控制系统的输入信号为

$$e_\omega(t) = \frac{\omega - \omega_{\text{set}}}{\omega_{\text{set}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: ω 为涡轮机械实际转速; ω_{set} 为涡轮机械转速设定值。

进而求得容量箱的充注或排放速率

$$\dot{m}_\omega(t) = k e_\omega(t) \quad (5)$$

式中: $\dot{m}_\omega(t)$ 为当前时刻的容量箱充注或排放速率; k 为参考系数,为了使速率变化在参考限值范围内,需选取合适的 k 值。

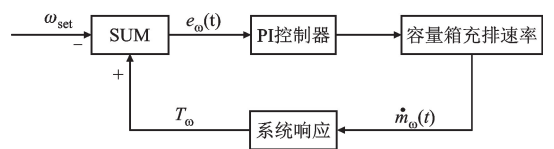


图 12 装量控制流程示意图

Fig. 12 Flow chart of loading control

3.1.3 堆芯出口温度控制

在 SCO₂ 再压缩布雷顿循环直接冷却核能系统

中,堆芯流量同透平流量具有强耦合性。因此,在负荷运行工况中,透平流量变化会引起堆芯冷却剂流量变化,进而改变堆芯冷却剂温度。冷却剂温度的剧烈变化,会使堆芯结构件产生热应力,破坏结构件完整性,因此堆芯温度控制系统是十分必要的。堆芯温度控制系统通过调节控制棒动作,改变控制棒价值从而引入反应性来实现堆芯出口温度控制,控制流程见图 13。本文采取恒定出口温度的方案,即在任意负荷水平下堆芯出口温度设定值始终保持在 500℃。堆芯出口温度控制系统的输入信号为

$$e_t(t) = T_t - T_{t, \text{set}} \tag{6}$$

式中: T_t 为堆芯实际出口温度; $T_{t, \text{set}}$ 为堆芯出口温度设定值。

当堆芯出口温度与设定值的差值 $e_t(t)$ 低于某一阈值 b 时,控制棒的驱动速度正比于 $e_t(t)$; 当 $e_t(t)$ 高于阈值 b 时,驱动速度保持最大;考虑了一定的控制死区,即当 $e_t(t)$ 不超过死区阈值 c 时,驱动速度为 0。控制棒的驱动速度计算方法如下

$$v = \begin{cases} 0, & |e_t(t)| \leq c \\ v_{\max} e_t(t)/b, & c \leq |e_t(t)| < b \\ v_{\max}, & |e_t(t)| \geq b \end{cases} \tag{7}$$

式中: v 为控制棒驱动速率; $v_{\max}$ 为控制棒的最大驱动速率; b 为温度偏差与最大驱动速率的关联系数。

控制棒引入反应性的速率表示为

$$v_\rho = v d\rho \tag{8}$$

式中: v_ρ 为控制棒引入反应性的速率; $d\rho$ 为控制棒的微分价值。

控制棒所引入的总反应性表示为

$$\rho = \int_0^t v_\rho dt \tag{9}$$

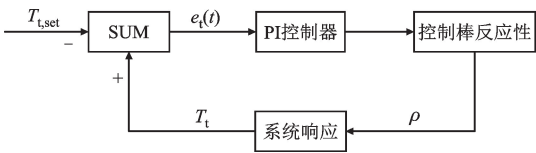


图 13 堆芯出口温度控制流程示意图

Fig. 13 Flow chart of core outlet temperature control

3.2 负荷跟踪运行策略

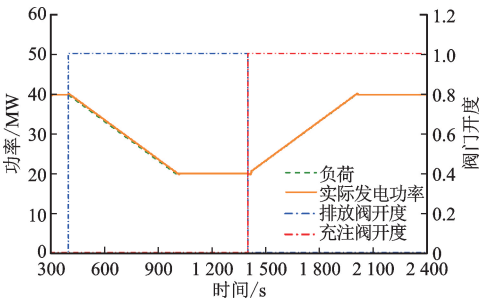
根据负荷跟踪运行策略设计的准则及系统动态特性的研究,开发了相应的控制系统,通过装量控制方法将涡轮机械转速、系统压力同负荷变化联系起来,通过对主压缩机入口温度及堆芯出口温度的控制以保障系统在高热工参数下高效率地跟

踪目标负荷。

目前关于负荷运行工况常常选取的动态范围在 100%~50%内,且由于装量控制时充注流量有限制,系统负荷变化速度往往不超过额定满功率 5%/min,故本文选取 100%~50%~100%的典型负荷运行工况,研究额定满功率 5%/min 下负荷跟踪运行的瞬态响应是否符合预期。如图 14(a)所示,系统负荷在 400 s 时开始以额定满功率 5%/min 的速度下降,600 s 后降到 50%负荷并维持 400 s,之后再以相同的速度升高负荷,600 s 后达到 100%负荷。开始降低负荷时容量箱 2(见图 10)的排放阀门打开,工质从循环中被排入容量箱,排放阀于 1 400 s 负荷开始上升时关闭;1 400 s 时容量箱 1 的充注阀门打开,工质从容量箱中充注进入循环,系统实际发电功率在瞬态过程中同负荷变化符合较好。

图 14(b)给出了堆芯功率以及反应堆的反应性变化规律。堆芯功率随负荷的变化先降低到 71.5%后再增加,主要是受堆芯反应性反馈影响。当负荷降低时,循环装量减少,堆芯温度上升压力减小,密度反应性反馈贡献了负反应性,堆芯功率下降,而燃料功率密度降低使堆芯通过燃料多普勒反馈引入了正反应性,为了控制堆芯出口温度,控制棒动作引入了较大的负反应性,反应堆的总反应性维持相对恒定。

从图 14(c)和(d)可以看出,400 s 时负荷下降,转动轴上负荷的阻力转矩逐渐减小,涡轮机械转速上升,但随着系统排放阀的打开,工质开始逐渐被抽出,涡轮机械做功及循环流量上升趋势被迅速遏制,循环装量下降,流量相应减小,透平做功开始显著下降。负荷上升则为这一过程的逆向进程,随着充注阀门的打开,循环装量增加,流量增加的同时透平做功开始增大。瞬态过程中,涡轮机械转速波动仅 0.01%,说明转动轴转速得到了有效控制;容量箱充排质量流量均不超过 6 kg/s,与文献[3]中所述常见装量充注速率在 5 kg/s 左右这一数据相符;堆芯压力仅降低了 0.6 MPa。



(a) 系统发电功率响应及充排阀门开度

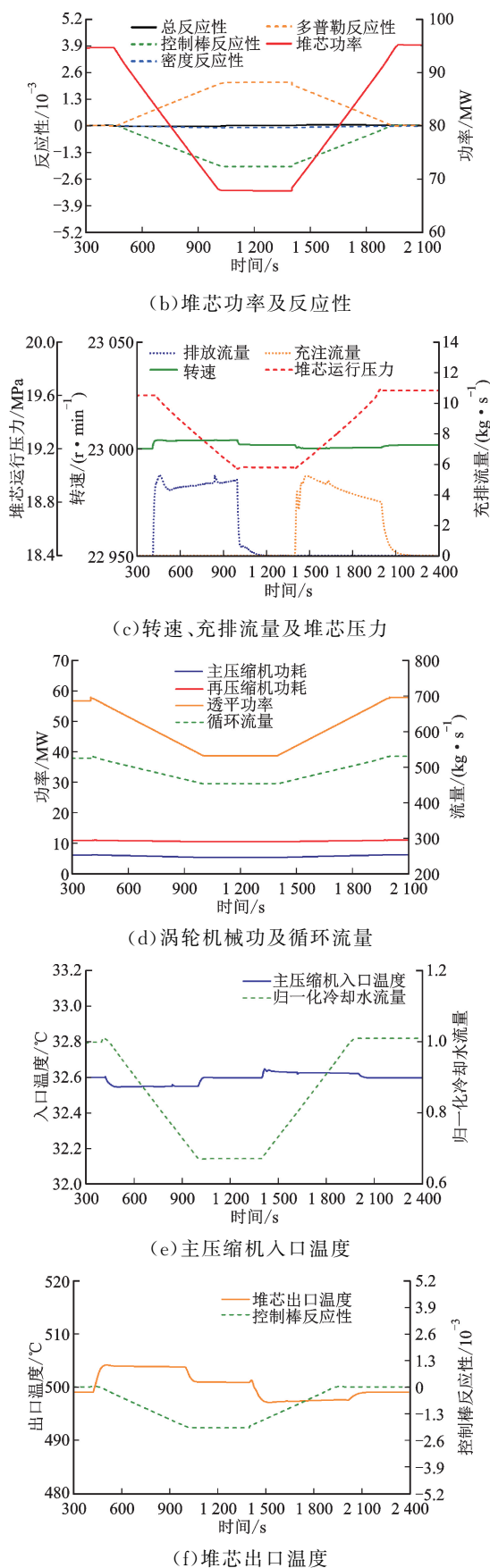


图14 负荷跟踪下参数变化

主压缩机入口温度及堆芯出口温度变化如图14(e)和(f)所示。冷却水流量与控制棒响应负荷变化带来的系统动态变化,实现了将主压缩机入口温度及堆芯出口温度控制在设定值附近的控制目标,主压缩机入口温度波动仅 0.1°C ,堆芯出口温度波动未超过 5°C 。

综上,在 $100\%\sim 50\%\sim 100\%$ 的典型负荷运行瞬态中,采用装量控制方法能够实现额定满功率 $5\%/ \text{min}$ 的负荷变化速率下对目标负荷的跟踪,堆芯功率依靠反应性反馈进行响应变化,实现了经济性运行。在瞬态过程中涡轮机械转速基本维持恒定,堆芯压力波动 0.6 MPa ,主压缩机入口温度波动 0.1°C ,堆芯出口温度波动不超过 5°C 。采用设计的控制系统为该负荷运行瞬态工况提供了控制策略参考。

4 结 论

为了研究 SCO_2 再压缩布雷顿循环直接冷却核能系统的开环特性及负荷运行策略,本文针对自主研发的瞬态分析程序SCTran/ CO_2 开展了回热器模型的验证,利用SCTran/ CO_2 开展了系统的开环动态特性研究以及敏感性分析,并基于动态特性研究,采用PI控制器开发了主压缩机入口温度、堆芯出口温度及循环装量的控制系统,设计了基于装量控制的负荷运行控制策略,研究了 SCO_2 再压缩布雷顿循环直接冷却核能系统在典型变负荷 $100\%\sim 50\%\sim 100\%$ 工况下的瞬态响应。通过以上工作,得到以下主要结论。

(1)瞬态分析程序SCTran/ CO_2 可以正确地实时地预测回热器模型的稳态参数和瞬态行为,满足本文的研究需求。在设计工况下,温度误差在 0.5°C 以内,功率相对误差在 0.16% 以内;在非设计工况下,温度误差在 2.12°C 以内,功率偏差在 1.1% 以内。在 $5\%\sim 30\%$ 升负荷瞬态过程中,回热器出口温度和功率的预测结果同实验值趋势一致,冷侧出口温度偏差最大为 4°C 左右,功率偏差不超过 6% 。

(2)在反应性引入工况中,涡轮机械增速导致的流量增加会在一定程度上冷却堆芯,但当引入反应性增大时,该影响被显著削弱,说明在确定的堆芯反应性反馈系数下,堆芯功率的自调节能力有限。冷却水流量的减少对于主压缩机入口温度及压比的影响十分明显,主压缩机入口参数对于外界扰动非常敏感,控制主压缩机入口参数有利于获得更高的循环效率和更稳定的运行状态。这些典型的动态特性

Fig. 14 Parameters changes under load following

说明了 SCO_2 再压缩布雷顿循环直接冷却核能系统既具有一定的自调节能力,也是一个耦合的有机整体,循环关键参数的变化会影响整个系统。

(3)基于装量控制的负荷跟踪策略能实现在 $100\% \sim 50\% \sim 100\%$ 负荷运行工况下以 $5\%/min$ 的变化速率追踪目标负荷,在瞬态过程中涡轮机械转速基本维持恒定,堆芯压力波动 0.6 MPa ,主压缩机入口温度波动 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$,堆芯出口温度波动不超过 $5\text{ }^\circ\text{C}$,保证系统安全经济运行。

装量控制是 SCO_2 布雷顿循环负荷运行控制的方式之一,其特点是部分负荷运行时,循环效率高,但是变负荷过程较慢,变负荷的范围较窄。未来工作将会把多种控制策略结合在一起,针对核能系统的应用场景,研发灵活性强、安全性高的负荷运行策略。

参考文献:

- [1] WU Pan, MA Yunduo, GAO Chuntian, et al. A review of research and development of supercritical carbon dioxide Brayton cycle technology in nuclear engineering applications [J]. Nuclear Engineering and Design, 2020, 368: 110767.
- [2] HEXEMER M, RAHNER K. Supercritical CO_2 Brayton cycle integrated system test (IST) TRACE model and control system design [EB/OL]. [2022-08-01]. <https://www.semanticscholar.org/paper/SUPERCRITICAL-CO2-BRAYTON-RECOMPRESSION-CYCLE-AND-Hexemer/9370b5e693c427e88c473d0049ba77f55484926c>.
- [3] CARSTENS N. Control strategies for supercritical carbon dioxide power conversion systems [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [4] YU H, OH B S, LEE J I, et al. Physics investigation of a supercritical CO_2 cooled micro-modular reactor (MMR) for autonomous load-follow operation [EB/OL]. [2022-08-01]. <https://media.superevent.com/documents/20170620/2e6e2a268d75ee3f200f1ee14301abaa/fr17-275.pdf>.
- [5] BIAN Xingyan, WANG Xuan, WANG Rui, et al. A comprehensive evaluation of the effect of different control valves on the dynamic performance of a recompression supercritical CO_2 Brayton cycle [J]. Energy, 2022, 248: 123630.
- [6] DING Hao, ZHANG Yaoli, HONG Gang, et al. Comparative study of the supercritical carbon-dioxide recompression Brayton cycle with different control strategies [J]. Progress in Nuclear Energy, 2021, 137: 103770.
- [7] WANG Rui, WANG Xuan, SHU Gequn, et al. Comparison of different load-following control strategies of a sCO_2 Brayton cycle under full load range [J]. Energy, 2022, 246: 123378.
- [8] 孙嘉. 超临界二氧化碳循环发电系统特性仿真及控制应用分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [9] 邹正平, 王一帆, 姚李超, 等. 超临界二氧化碳闭式布雷顿循环系统研究进展 [J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(9): 1643-1677.
- [10] ZOU Zhengping, WANG Yifan, YAO Lichao, et al. Progress in research of closed supercritical carbon dioxide Brayton cycle system [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(9): 1643-1677.
- [11] GAO Chuntian, WU Pan, LIU Weihua, et al. Development of a bypass control strategy for supercritical CO_2 Brayton cycle cooled reactor system under load-following operation [J]. Annals of Nuclear Energy, 2021, 151: 107917.
- [12] LIESE E, ALBRIGHT J, ZITNEY S A. Startup, shutdown, and load-following simulations of a 10 MWe supercritical CO_2 recompression closed Brayton cycle [J]. Applied Energy, 2020, 277: 115628.
- [13] WANG Xuan, WANG Rui, BIAN Xingyan, et al. Review of dynamic performance and control strategy of supercritical CO_2 Brayton cycle [J]. Energy and AI, 2021, 5: 100078.
- [14] 崔小康, 朱郁波, 张靖煊, 等. 闭式布雷顿循环系统变负荷运行特性分析 [J]. 热能动力工程, 2020, 35(1): 16-22.
- [15] CUI Xiaokang, ZHU Yubo, ZHANG Jingxuan, et al. Performances analysis of closed Brayton cycle under different load operating conditions [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(1): 16-22.
- [16] KUNITOMI K, YAN Xing, NISHIHARA T, et al. Jaea's VHTR for hydrogen and electricity cogeneration: GTHTR300C [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2007, 39(1): 9-20.
- [17] SATO H, YAN X L, TACHIBANA Y, et al. Assessment of load-following capability of VHTR cogeneration systems [J]. Annals of Nuclear Energy, 2012, 49: 33-40.
- [18] GAD-BRIGGS A, PILIDIS P, NIKOLAIDIS T. Analyses of the load following capabilities of Brayton helium gas turbine cycles for generation IV nuclear power plants [J]. Journal of Nuclear Engineering and Radia-

tion Science, 2017, 3(4): 041017.

- [17] GAD-BRIGGS A, PILIDIS P, NIKOLAIDIS T. Analyses of the control system strategies and methodology for part power control of the simple and intercooled recuperated Brayton helium gas turbine cycles for generation IV nuclear power plants [J]. Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, 2017, 3(4): 041016.
- [18] LI Zhi, YANG Xiaoyong, WANG Jie, et al. Off-design performance and control characteristics of space reactor closed Brayton cycle system [J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, 128: 318-329.
- [19] SINGH R, KEARNEY M P, MANZIE C. Extremum-seeking control of a supercritical carbon-dioxide closed Brayton cycle in a direct-heated solar thermal power plant [J]. Energy, 2013, 60: 380-387.
- [20] MOISSEYTSEV A, SIENICKI J J. Supercritical carbon dioxide cycle control analysis. [EB/OL]. (2011-04-11)[2022-08-01]. <https://www.osti.gov/biblio/1011299/>.
- [21] MUÑOZ DE ESCALONA J M, SÁNCHEZ D, CHACARTEGUI R, et al. Performance analysis of hybrid systems incorporating high temperature fuel cells

and closed cycle heat engines at part-load operation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(1): 570-578.

- [22] WU Pan, GAO Chuntian, SHAN Jianqiang. Development and verification of a transient analysis tool for reactor system using supercritical CO₂ Brayton cycle as power conversion system [J]. Science and Technology of Nuclear Installations, 2018, 2018: 6801736.
- [23] CLEMENTONI E M, COX T L, KING M A. Response of a compact recuperator to thermal transients in a supercritical carbon dioxide Brayton cycle [C]// ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2017: V009T38A002.
- [24] POPE M A, LEE J I, HEJZLAR P, et al. Thermal hydraulic challenges of gas cooled fast reactors with passive safety features [J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239(5): 840-854.
- [25] WU Pan, GAO Chuntian, HUANG Yanping, et al. Supercritical CO₂ Brayton cycle design for small modular reactor with a thermodynamic analysis solver [J]. Science and Technology of Nuclear Installations, 2020, 2020: 5945718.

(编辑 亢列梅)

(上接第 127 页)

427-429.

- [25] HUANG Zuohua, ZHANG Yong, ZENG Ke, et al. Measurements of laminar burning velocities for natural gas-hydrogen-air mixtures [J]. Combustion and Flame, 2006, 146(1/2): 302-311.

- [26] LAMOUREUX N, DJEBAÏLI-CHAUMEIX N, PAILLARD C E. Laminar flame velocity determination for H₂-air-He-CO₂ mixtures using the spherical bomb method [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2003, 27(4): 385-393.

(编辑 亢列梅)