

SCO₂ 布雷顿循环反应堆控制方法研究

苑喆¹, 张博文¹, 彭敏俊¹, 李一卓¹

哈尔滨工程大学核科学与技术学院 哈尔滨 150001)

Email: 1359996262@qq.com

摘要: 随着第四代反应堆的设计建造及应用工作得到了广泛扩展深化, 实际工程对于反应堆的技术特性和性能指标提出了更高的期待和要求, 主要集中在如何实现更高的能量密度、小型化以及无人值守等方面。而超临界二氧化碳布雷顿循环反应堆能够很好的满足以上需求。在其运行中压缩机入口工质存在跨临界运行的问题, 影响系统的安全。因此, 本文以超临界二氧化碳布雷顿循环反应堆为研究对象, 基于 Relap5 软件建立仿真模型, 开展了针对超临界二氧化碳布雷顿循环反应堆的控制方法研究。结果表明, 建立的控制系统可以避免压缩机入口跨临近运行问题, 并且可以满足“堆跟机”的设计需求。

关键词: 第四代反应堆; 超临界二氧化碳; 布雷顿循环; 仿真

1、研究背景

随着近年来涡轮机械和紧凑型热交换器关键技术的长足发展, 作为第四代反应堆系统之一的以超临界二氧化碳 (Supercritical carbon dioxide, SCO₂) 为工质的气体冷却快中子反应堆系统, 凭借自身诸多优势再次成为设计与研究热点。现有的气体冷却反应堆系统大多采用氦气作为流动换热工质, 而与氦气布雷顿循环 (~40%, 850 °C)^[1] 或蒸汽朗肯循环 (~30%, 320 °C)^[2] 相比, 以超临界二氧化碳布雷顿循环作为能量转换系统的气冷快堆可以在适中的堆芯出口设计温度前提下实现较高的循环发电效率 (~45%, 550 °C)^[3]。

超临界二氧化碳布雷顿循环反应堆, 由于结构简单且可进行小型化, 可以应用的领域更加广泛。由于 SCO₂ 反应堆在高压高温条件下运行, 耦合性更强这使得系统的控制更加复杂。目前的控制系统由一系列独立的非线性 PID 控制回路构成, 这种控制系统结构简单, 且便于维护。但当负载功率大范围变化或工况切换时, 已有的控制系统功能比较单一, 调节能力较差, 无法快速响应, 可能导致系统无法快速达到稳定, 产生安全问题。因此对其关键控制参数进行开展了相应的研究。

2、研究内容

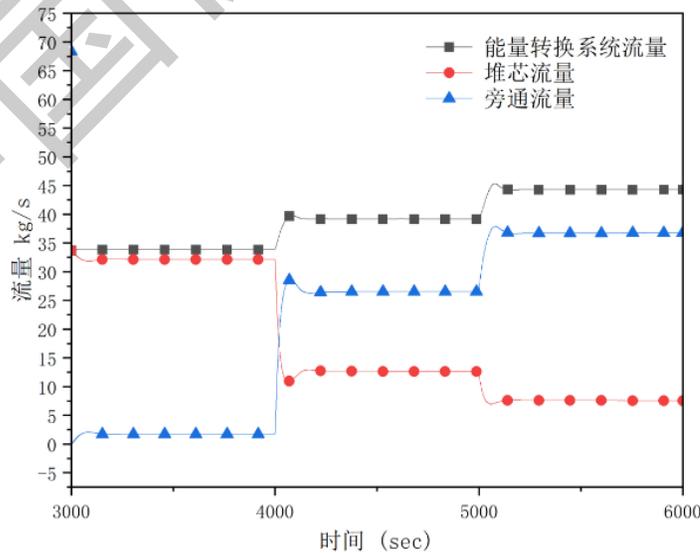
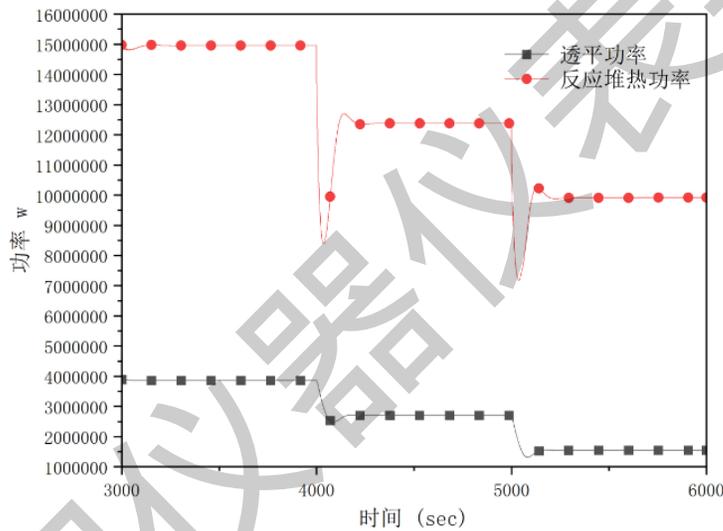
SCO₂ 布雷顿循环是一种高效的热力循环, 利用 SCO₂ 作为介质。与传统的布雷顿循环 (如空气作为工作介质) 相比, SCO₂ 布雷顿循环具有更高的热效率和能量密度, 对于发电、热能回收和一些工业过程更有吸引力^[4]。

SCO₂ 布雷顿循环系统主要包含以下几个基本组件: (1) 冷却器: 膨胀后的 SCO₂ 在冷却器中放

出热量，压力和温度降低，然后循环返回压缩机；(2) 压缩机：将低温的 SCO_2 压缩至高压，过程中会提高其温度；(3) 热源：高压 SCO_2 在此处吸收热能，进一步提升温度；(4) 透平：高温、高压的 SCO_2 流经透平时膨胀并做功，带动发电机发电；(5) 回热器：冷热流体进行热量交换，从而提高系统的热效率。

比例 - 积分 - 微分控制 (PID 控制) 因其算法简明、具备强大的鲁棒性和高度可靠性在工业过程控制中得到了广泛应用。目前，大约 90% 的控制循环仍采用 PID 结构^[5]。考虑到动力转换系统在不添加控制策略下，压缩机入口工质存在跨临界运行的问题，为了保证 SCO_2 布雷顿循环系统运行的稳定性，本研究参考相关文献资料^[6]，首先设定了堆功率控制、压缩机入口压力控制以及压缩机入口温度控制这三种控制方案。

本文采用 RELAP5 软件进行仿真模拟，以反应堆出入口旁通方案（即在反应堆出入口之间设置旁通管路的方案）阶越降低透平功率为例，得到如下研究结果：



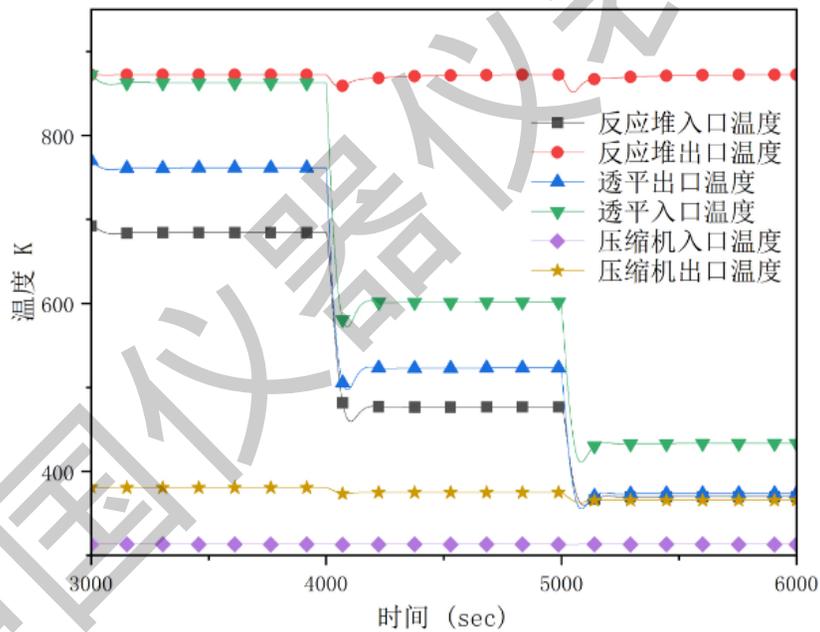
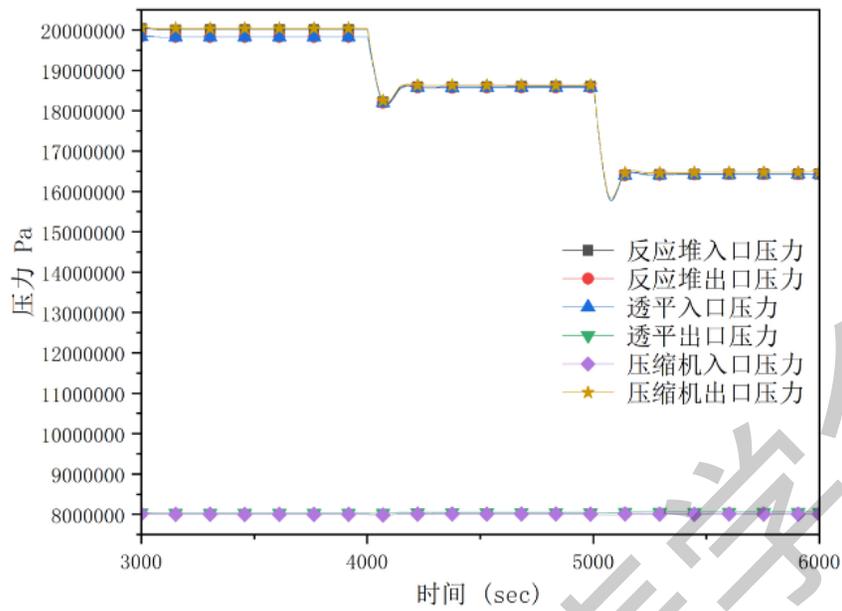


Fig.1 Reactor system step-down power process based on reactor entrance/exit bypass scheme

分析仿真结果可知，本反应堆系统在高功率档位 (100%FP) 以及中档位 (70%FP) 运行时，由于旁通流量占比较小，所以透平入口温度不会剧烈降低，因此系统的循环效率以及回热器的正常运行都能得到保证，但当切换到低功率档位 (40%FP) 时，随着旁通流量的占比增加，透平入口温度大幅降低，系统能量转换效率降低至，且由于回热器冷热侧工质无法建立足够的传热温差导致回热器失效。

3、结论

以超临界二氧化碳布雷顿循环反应堆为研究对象, 结合 Relap5 仿真建模, 在添加 PID 控制器的基础上选取反应堆出入口旁通运行方案对系统进行阶跃降功率工况进行分析。结果显示该控制系统可以很好的满足“堆跟机”的控制需求, 并且控制器可以保障压缩机入口工质温度和压力的稳定。但是系统仍存在其他问题, 因此需要相关控制策略进行控制研究分析。

参考文献

- [1] Labar M P. The gas turbine-modular helium reactor: A promising option for near term deployment [C]. ICAPP' 02: 2002 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, Hollywood, FL (United States), 9 - 13 Jun, 2002.
- [2] Liu Z, Fan J. Technology readiness assessment of Small Modular Reactor (SMR) designs [J]. Progress in Nuclear Energy, 2014, 70: 20-28.
- [3] Dostal V, Hejzlar P, Driscoll M J. The Supercritical Carbon Dioxide Power Cycle: Comparison to Other Advanced Power Cycles [J]. Nuclear Technology, 2006, 154(3):283- 301.
- [4] 黄彦平, 刘旻昀, 卓文彬. 超临界二氧化碳核能动力系统的兴起和发展 [J]. 原子能科学技术, 2023, 57(09):1665-1680+1660
- [5] 黄宜庆. PID 控制器参数整定及其应用研究 [D]. 安徽理工大学, 2009.46-59
- [6] 张元东. 超临界二氧化碳反应堆运行与安全特性研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2021.93-110