

一种新型稳压器的可行性研究

袁园¹, 陈聪², 周源^{1*}, 唐彬¹

¹四川大学物理学院, 四川 成都

²中国核动力研究设计院, 四川 成都

收稿日期: 2023年3月12日; 录用日期: 2023年3月24日; 发布日期: 2023年4月26日

摘要

为了紧凑布置核动力装置, 以改变稳压器内部结构为出发点, 文章提出一种新的波动管和电加热元件水槽布置形式的稳压器结构设计方案, 探讨新型稳压器结构设计的可行性。新型稳压器结构为了灵活布置电加热元件新增了电加热元件水槽, 水槽位于稳压器的上部空间, 内置水平插入的电加热元件, 波动管改为从稳压器上封头接入, 以减少杂质进入主回路。通过STAR-CCM软件分析了换热元件水槽位置变化对稳压器水体积的影响规律, 获得新型稳压器基本设计参数, 并建立RELAP5稳压器设备模型, 与传统稳压器模型进行对比分析, 获得功率变化下新型稳压器结构的系统稳压特性。研究表明, 新型稳压器水槽位置对压力响应的速度影响不大, 在缓解下部空间布置紧张的同时满足瞬态稳压需求。

关键词

新型稳压器, 电加热元件水槽, 波动管, STAR-CCM, RELAP5

Feasibility Research on a New Type Pressurizer

Yuan Yuan¹, Cong Chen², Yuan Zhou^{1*}, Bin Tang¹

¹College of Physics, Sichuan University, Chengdu Sichuan

²Nuclear Power Institute of China, Chengdu Sichuan

Received: Mar. 12th, 2023; accepted: Mar. 24th, 2023; published: Apr. 26th, 2023

Abstract

In order to compact layout the nuclear power plant and to change the pressurizer internal structure, a new design scheme with the arrangement of surge line and the electric heater tank of the pressurizer was proposed, and the feasibility of the new pressurizer structure design is discussed.

*通讯作者。

To flexibly arrange the electric heater, the new pressurizer adds an electric heater tank which is located in the upper space of the pressurizer, and electric heater device is inserted horizontally. Besides, surge line is changed to be connected from the upper head of the pressurizer to reduce impurities entering the main loop. STAR-CCM was used to analyze the influence of the location of heater tank, and the basic design parameters of the new structure were obtained, then established the new pressurizer RELAP5 model, finally compared and analyzed with the traditional model to obtain the stabilizing characteristic under power change cases. The results show that the position of the water tank has little influence on the speed of pressure response, which can relieve the tension of the lower space arrangement and meet the steady pressure demand.

Keywords

New Pressurizer, Electric Heater Tank, Surge Line, STAR-CCM, RELAP5

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

核动力装置空间有限, 灵活的设备结构会极大的缓解系统布置压力, 使核动力装置在布局上更为紧凑, 设计上更为合理, 因此核动力装置布置优化是研究重要方向之一。传统反应堆稳压器结构形式单一, 以体积优化为主, 布置方案受限[1]。电加热元件是稳压器中故障率较高的部件, 而电加热元件本身需要很大的检修空间, 给稳压器的布置带来更高要求。基于核动力装置布置需求, 本文提出将电加热元件置于稳压器中上部空间的设计方案(图 1)并探讨其可行性。

目前, 国内外主要是通过建立数学模型的方式对核电站稳压器进行动态特性研究, 其研究方法大致分为两类: 自编程计算和系统程序建模分析[2]。自编程计算采用的模型有两相平衡态模型、两相非平衡模型、三区非平衡模型及多区非平衡模型, 但数值解法对边界条件的设定要求高、计算量巨大。系统程序建模分析通过如 RELAP5 程序等建立稳压器设备及辅助系统, 分析其优化设计方案和系统稳压特性[3], 但不能得到精细计算结果。研究人员为了研究稳压器设备波动管或喷嘴等特殊位置的疲劳或者热分层现象也会建立 CFD 精细化模型[4]分析局部效应。

本文关注新型稳压器的结构设计和瞬态稳压特性, 基于 CFD 高精度建模优势, 建立稳压器 STAR-CCM 分析模型, 分析电加热元件水槽位置对稳压器内的水体积和热力平衡过程的影响机制, 并进一步建立 RELAP5 稳压器模型, 得到稳压器系统响应行为。本研究设计的新型稳压器可为核动力设备的系统优化布置提供新思路。

2. 新型稳压器模型

传统稳压器的波动管接管位于稳压器下封头, 将稳压器和主管冷却管道热端相连; 电加热器位于稳压器下端加热区壳段, 用于反应堆装置冷却剂的加热以及温度保持(图 1(a))。图 1(b)中显示的新型稳压器结构为了灵活布置电加热元件新增了电加热元件水槽, 水槽位于稳压器的上部空间, 内置水平插入的电加热装置, 波动管改为从稳压器上封头接入, 通过补水箱和筒体夹缝进入稳压器下端的水空间, 以减少杂质进入主回路。电加热元件水槽连接给水管线, 保证电加热元件的安全性。新方案所有的接管和附属设备都置于上封头和上部筒体, 满足更加灵活的核动力装置布置和检修方案, 缓解核动力设备下部空间布置。

稳压器净容积包括蒸汽空间体积和水空间体积两部分。根据文献净容积计算理论[5]，新型稳压器的总水体积、蒸汽体积和传统稳压器水空间的体积是一样的，区别于传统水体积，水槽内水体积的组成：电加热区水体积；摇摆所需水体积；蒸发的水体积。文章不考虑摇摆所需水体积，基于小堆设计参数[6] (表 1)，借助 STAR-CCM 软件，设计新型稳压器设备。

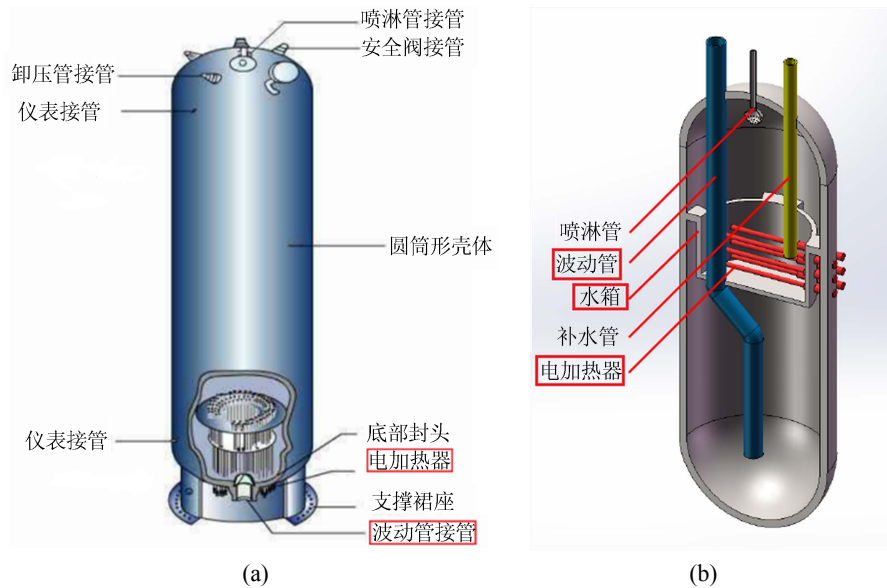


Figure 1. Comparison of traditional pressurizer and new pressurizer structure. (a) Traditional pressurizer structure; (b) new pressurizer structure

图 1. 传统稳压器和新型稳压器结构的对比。(a) 传统压水堆稳压器结构；(b) 新型稳压器结构

Table 1. Design parameters of modular small reactor

表 1. 模块式小型堆设计参数

参数	数值
反应堆功率/MW	310.0
回路数	4
堆芯流量/kg·s ⁻¹	1353.0
冷却剂进口温度/K	555.75
冷却剂出口温度/K	596.55
旁流份额/%	5.0
运行压力/MPa	15.0
蒸汽发生器二次侧入口温度/K	378.15
蒸汽发生器二次侧出口温度/K	563.15
蒸汽发生器台数/台	16
二次侧压力/MPa	4.0
二次侧流量/kg·s ⁻¹	~125
稳压器总容积/m ³	10.28

经过水体积计算(图 2)，发现水槽内的水体积约为总水体积的一半，总的汽空间体积约等于总水体积。

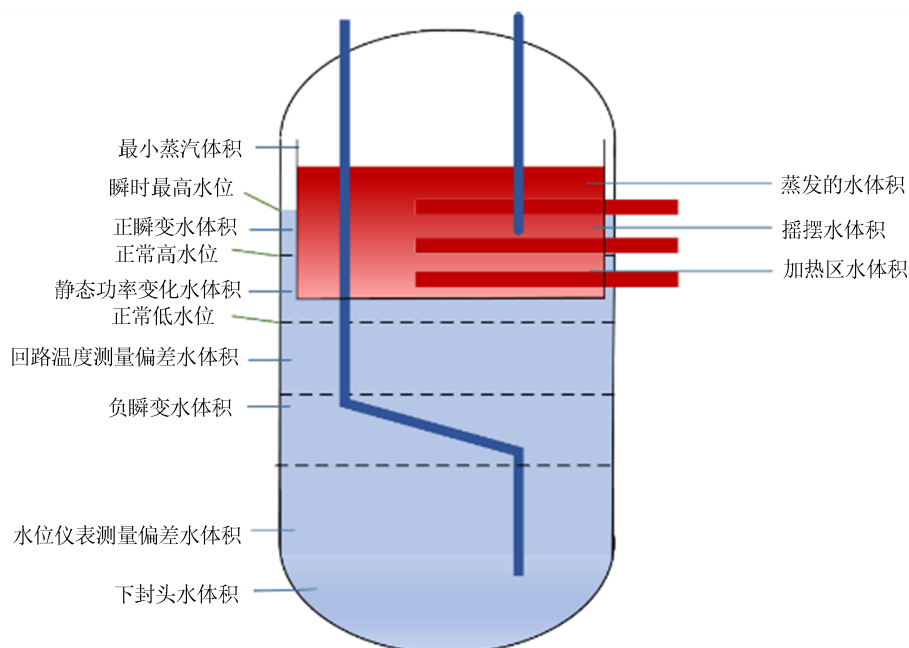


Figure 2. New pressurizer liquid volumes
图 2. 新型稳压器净容积示意图

3. 新型稳压器 STAR-CCM 建模分析

由于稳压器体积较大，计算涉及蒸发和冷凝相变，在满足计算需求的情况下，为建立可计算的网格数目 STAR-CCM 模型，假定：

a) 建立稳压器 STAR-CCM 二维模型；

b) 根据一回路波动得到的水体积变化(膨胀、收缩)作为稳压器波动管输入的时序化参数，得到不同水槽位置下，稳压器内的参数(压力场、温度场、水位)变化数据。

3.1. 物理模型

以两流体为基本模型框架，基于分离流算法，汽相考虑可压缩性，两相均考虑湍流进行流动模拟，相间传热传质以相变为主要方式，相间采用了界面锐化及识别算法，模型总体为 URANS 方法进行计算求解。基于空泡份额的准则对流型进行划分和区分，并采用归一化线性拟合方法进行参量在流型间的过渡计算，引入权重因子 W_r 。壁面函数采用全壁面函数进行处理，液相采用 IAPWS-IF97 物性表进行水工质的物性计算，且假定水工质中无其他任何杂质。

3.2. STAR-CCM 模型

基于三维几何参数，进行了不同高度二维几何模型建模，如图 3 所示，主要结构包括水槽、加热组件模拟组件、波动管进水管。

文章对稳压器网格敏感性进行了分析，计算中选取全局网格尺寸 60、30、15 mm 作为对比网格参数(分别为方案 1、方案 2、方案 3)，对应最小网格尺寸分别为 18、9、4.5 mm。计算中，选取计算分析中关注的系统平均、压力参数作为敏感性分析的对比参数。计算工况为波动管流入、水槽高度 d 工况，计算时间为 2.3 s 后的参数结果进行分析，不考虑喷淋过程。通过三种网格方案的计算对比，发现计算结果均基本相同(图 4)，基于计算效率需求，选取方案 2 作为后续计算的网格方案。

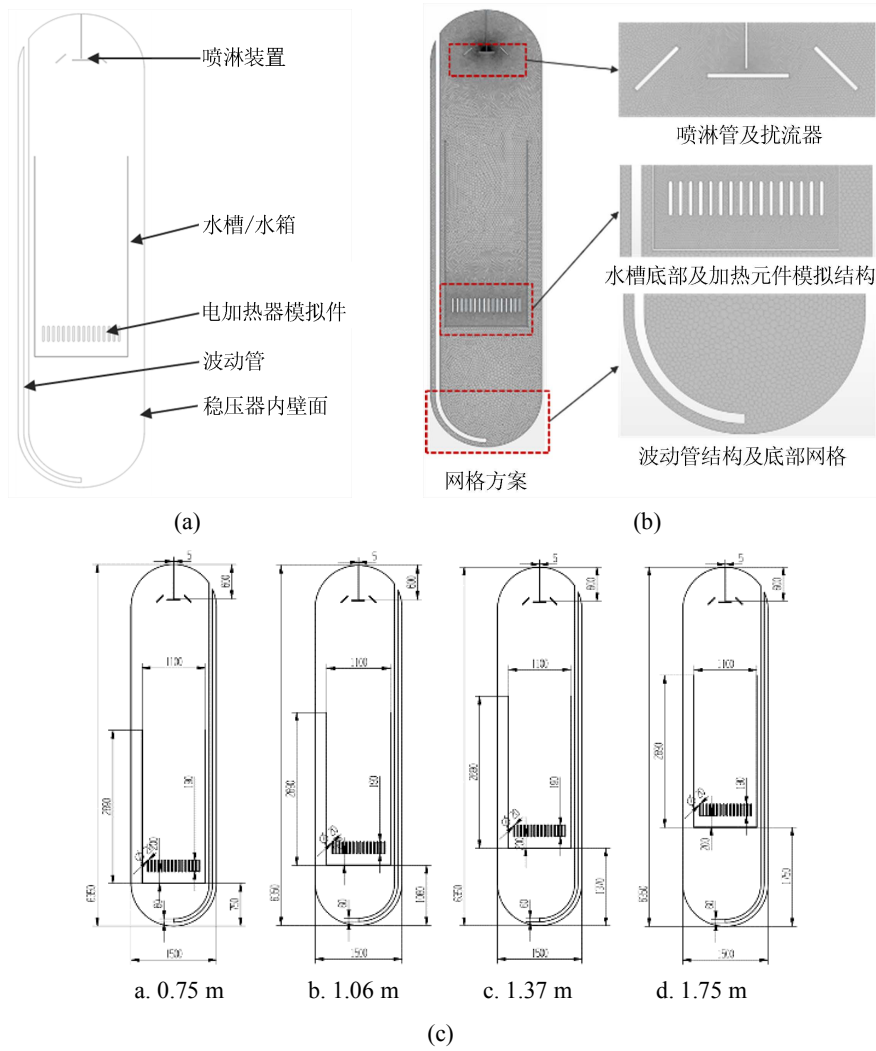


Figure 3. CFD grid structure of PRZ. (a) 2-D structure of PRZ; (b) discrete scheme of space grid; (c) schematic diagram of water tank position
图 3. 稳压器 CFD 网格结构。(a) 稳压器二维模型结构；(b) 空间网格离散方案；(c) 水槽位置变化示意图

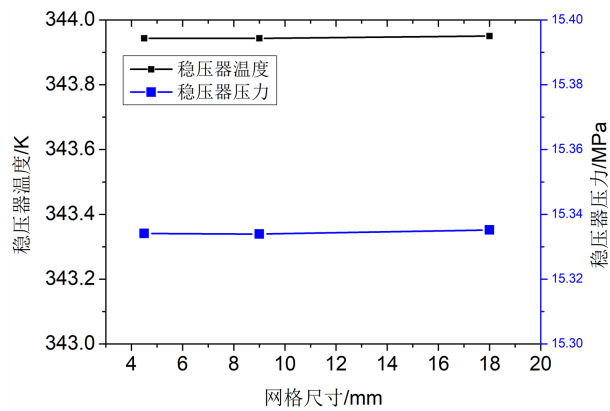


Figure 4. CFD grid sensitivity analysis results
图 4. CFD 网格敏感性分析结果

3.3. STAR-CCM 计算结果

3.3.1. 稳压器波入工况计算

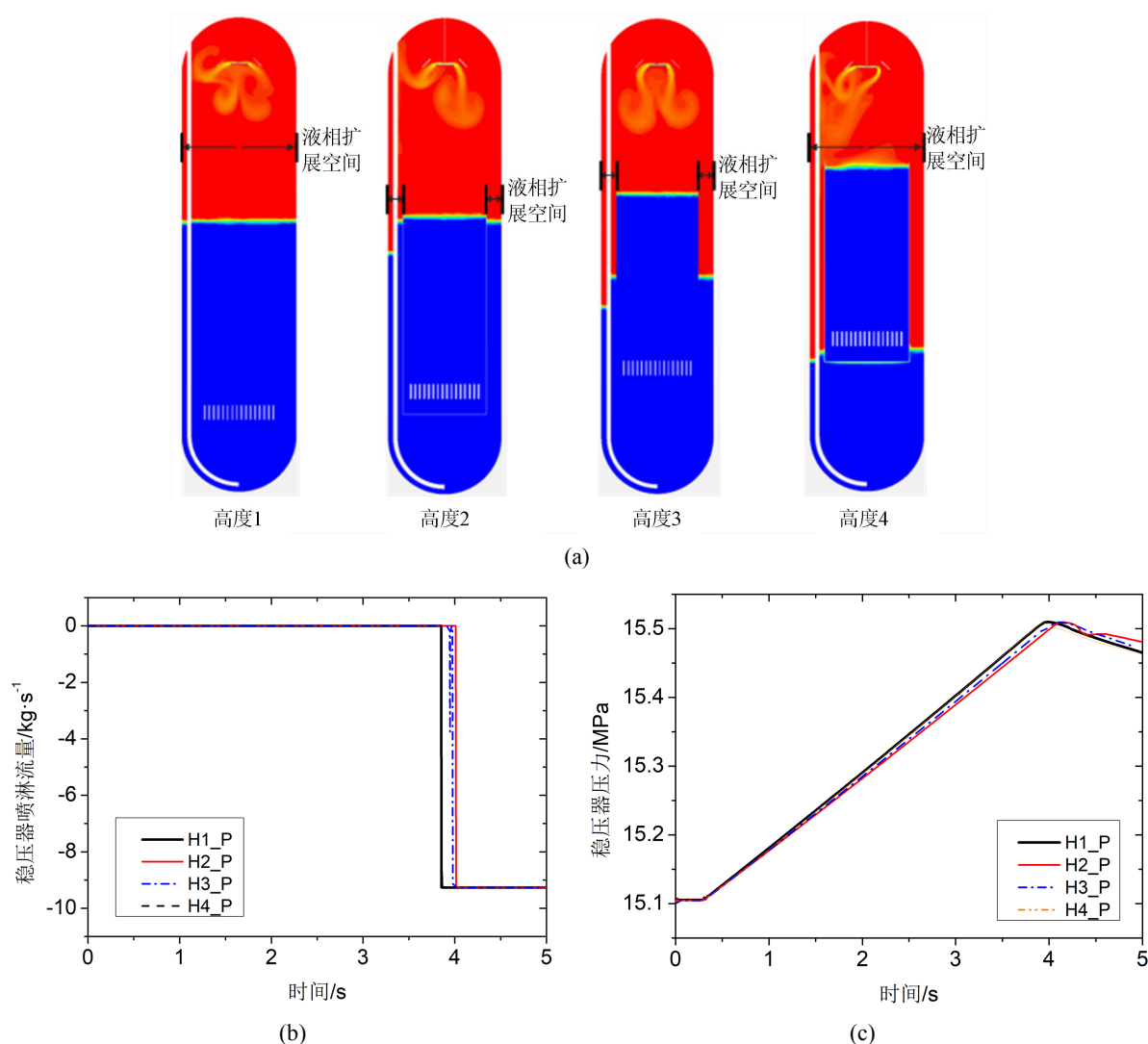


Figure 5. Parameters curve of four different tank heights under inflow condition (a) Expansion of liquid phase space when level rises at four heights; (b) spray rate curve at four different tank heights; (c) pressure curve at four different tank heights

图 5. 稳压器波入工况下四种水槽高度参数变化。(a) 四种高度下液位上升时液相空间的扩展情况；(b) 四种水槽高度下喷淋管流量变化曲线；(c) 四种水槽高度下压力变化曲线

液位上升速率的差异主要由水槽高度不同时，引起的液相向上拓展的空间大小产生，如图 5(a)所示。对于四种高度的压力变化情况，高度 4 工况升压最快，高度 1 工况最慢，导致高度 4 工况最早触发喷淋，如图 5(b)所示(负号表示流入)。同时受到系统压力逐渐上升的影响，稳压器内饱和温度也随之升高，其变化速率与压力变化相一致(图 5(c))，在喷淋系统介入后，受到汽空间内冷凝换热的作用，系统的压力随之下降，但是不同高度的变化曲线基本一致(图 5)。

3.3.2. 稳压器波出工况计算

当波动管流出液相流体时，液位下降速率的差异原因与波动管流入工况下，液相拓展空间的横截面

差异原理相同。对于四种高度的压力变化情况，高度 4 工况降压最快，高度 1 工况最慢，导致高度 4 工况最早触发加热元件投入工作，如图 6(a)所示。四种工况的压力变化如图 6(b)所示，同时受到系统压力逐渐下降的影响，稳压器内饱和温度也随之降低，其变化速率与压力变化相一致。同样，在稳压器波出工况，不同高度的变化曲线基本一致(图 6)。

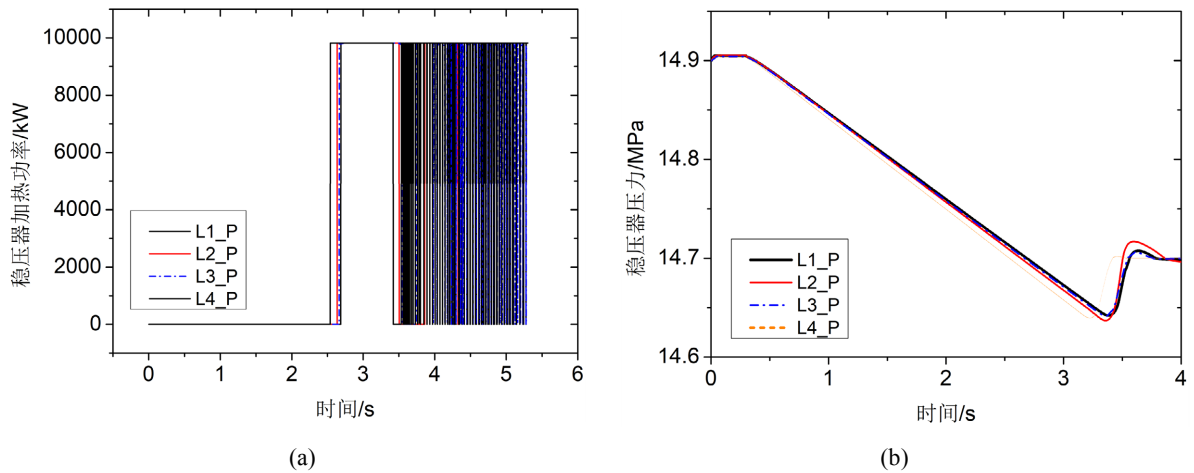


Figure 6. Parameters curve of four different tank heights under out flow condition. (a) Pressure curve at four different tank heights; (b) pressure curve at four different tank heights

图 6. 稳压器波出工况下四种水槽高度参数变化。(a) 四种水槽高度下电加热元件功率变化曲线；(b) 四种水槽高度下压力变化曲线

4. RELAP5 模型分析

4.1. 稳压器节点模型

从 STAR-CCM 计算结果可知，水体积不变，水槽位置基本不影响稳压器响应特性。为使新型稳压器的电加热元件处于上半空间(图 7)，方便维修，在其余水体积不变的情况下，引入置于上半空间的少量水体积，最终得到几何设计参数，并建立新型稳压器 RELAP5 模型(图 8(b))。

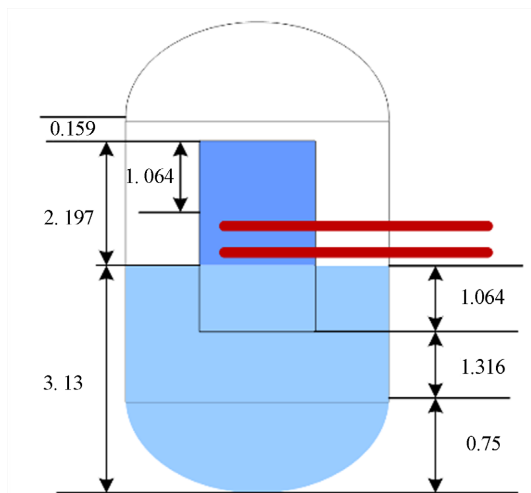


Figure 7. New PRZ geometric parameters

图 7. 新型稳压器几何参数

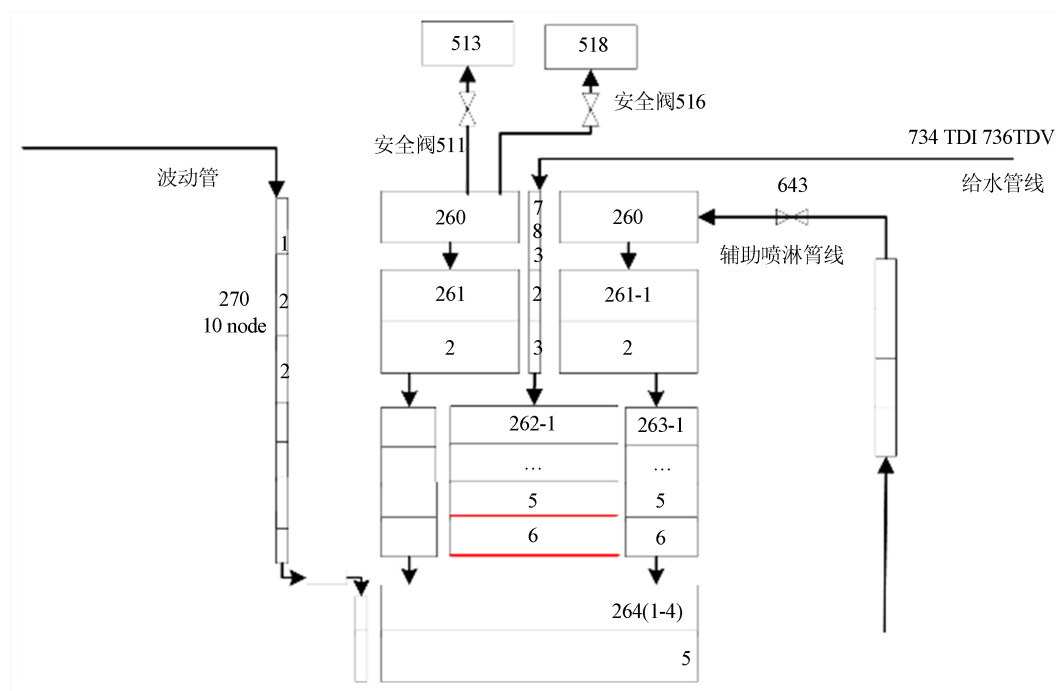
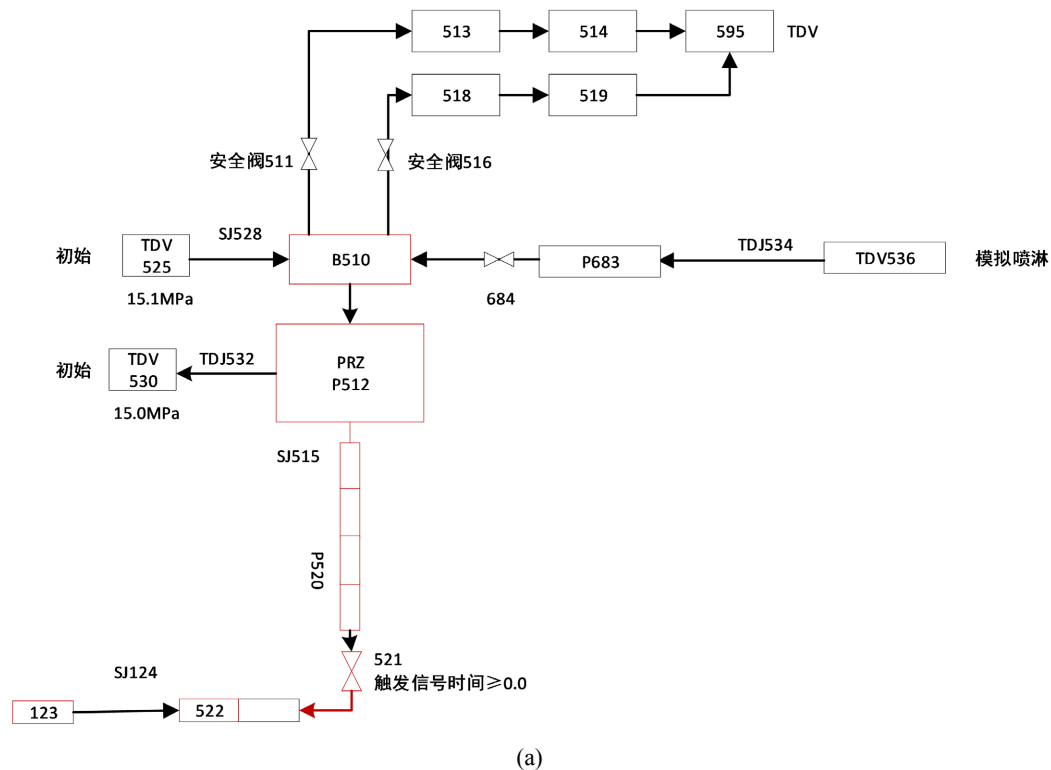


Figure 8. PRZ RELAP5 model. (a) Traditional PRZ RELAP5 model; (b) new PRZ RELAP5 model

图 8. 稳压器 RELAP5 节点图。(a) 传统稳压器 RELAP5 节点图；(b) 新型稳压器 RELAP5 节点图

为了明确节点数目的对 RELAP5 计算结果的影响，对传统稳压器的节点进行了压力和温度的敏感性分析，结果如图 9 所示，发现网格节点已经满足计算需求。

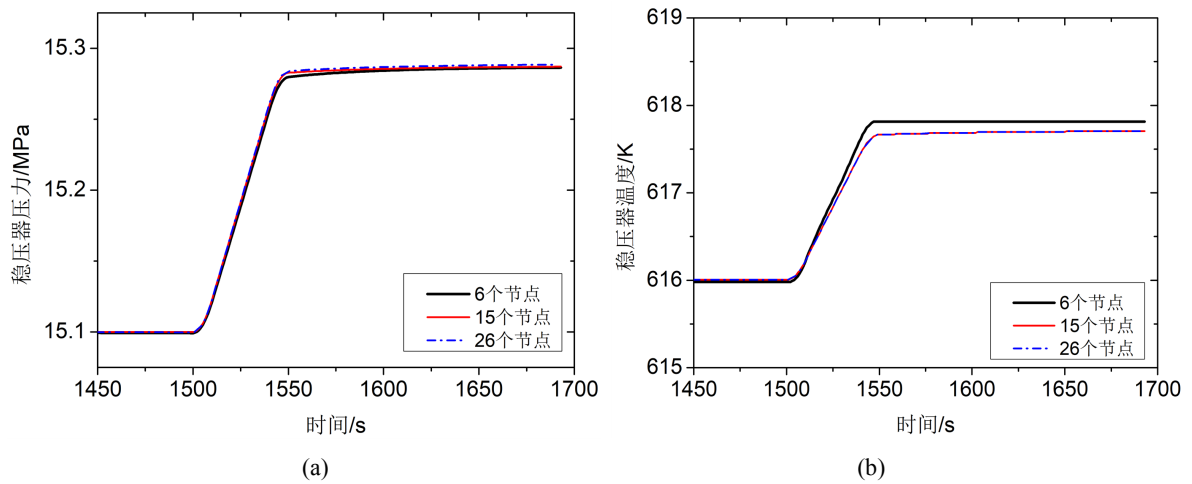
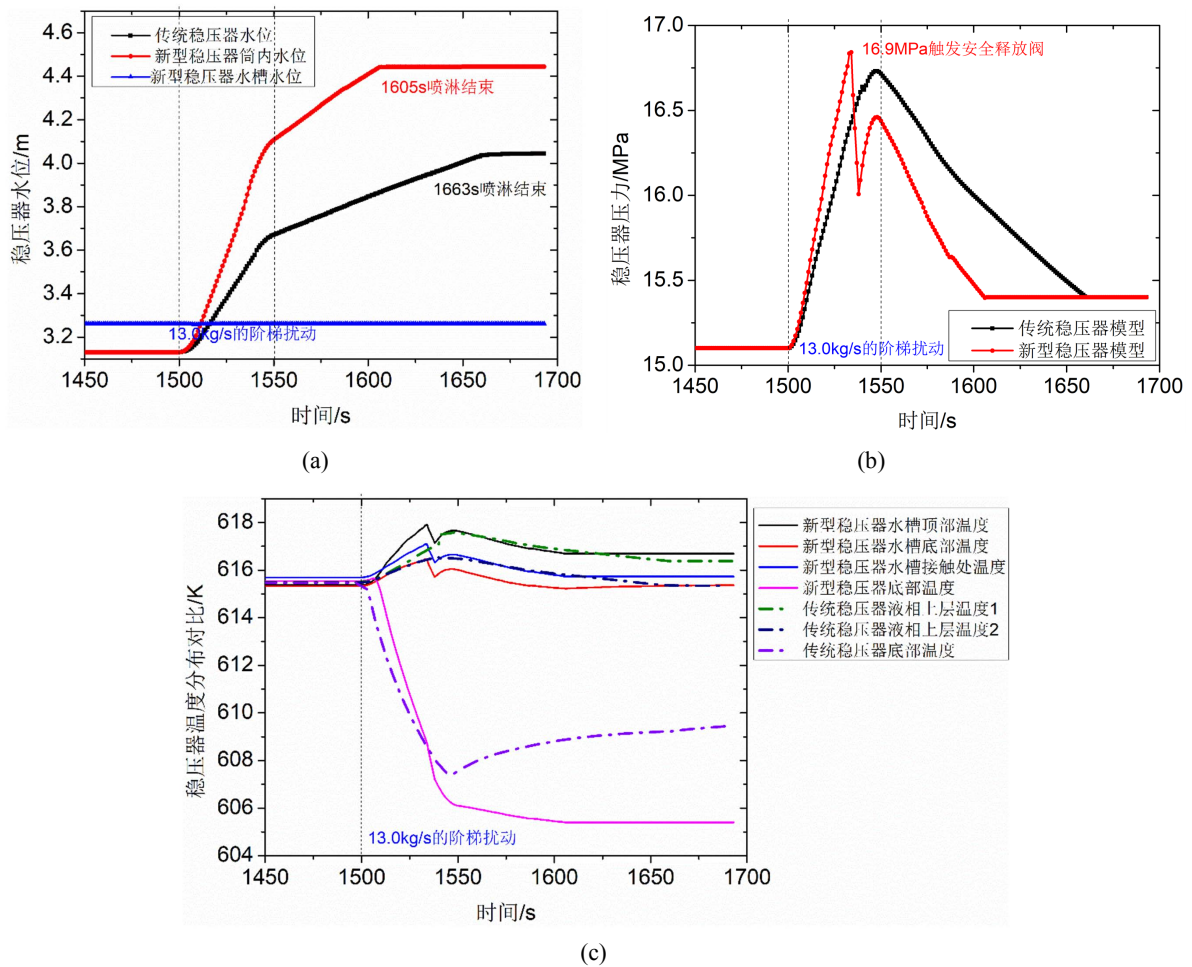


Figure 9. RELAP5 node sensitivity analysis results. (a) Comparison of PRZ pressure; (b) comparison of PRZ temperature
 图9. RELAP5 节点敏感性分析结果。(a) 稳压器压力变化对比; (b) 稳压器温度变化对比

4.2. 稳压器波入工况

为了明晰新型稳压器的动态响应，对比分析了 13 kg/s 阶梯流入扰动下的稳压特性。



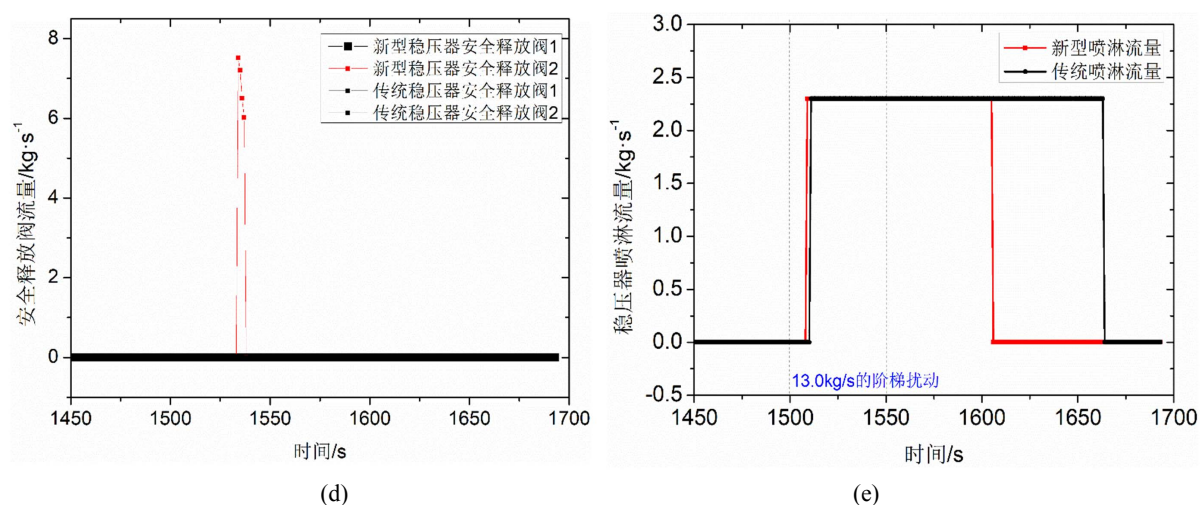


Figure 10. Parameters curve of new and traditional PRZ under inflow condition. (a) Comparison of PRZ water level; (b) comparison of PRZ pressure; (c) comparison of PRZ thermal stratification; (d) safety release valve flow rate

图 10. 新型和传统稳压器波入工况参数对比。(a) 稳压器水位变化对比; (b) 稳压器压力变化对比; (c) 稳压器温度在液相中的热分层对比; (d) 安全释放阀流量; (e) 喷淋流量

由于新型稳压器汽空间在假设条件下比传统稳压器的汽空间小, 所以可压缩空间变小(图 10(a)), 压力上升速度快(图 10(b)), 新型稳压器内的压力在边界扰动下达到稳压器安全释放阀的触发压力 16.9 MPa, 触发安全阀动作(图 10(d)), 压力迅速下降, 同时新型稳压器喷淋触发压力 15.4 MPa 到达时间比传统的要早(图 10(e)). 虽然传统和新型稳压器都触发了喷淋, 由于波动流量引起的压力上升比喷淋冷凝引起的降压效应强, 所以压力的整体下降是在波动结束后。

新型和传统稳压器蒸汽腔的第一次压力下降是因为喷淋启动, 蒸汽腔蒸汽冷凝, 压力突降, 之后在压缩效应和蒸汽流动过程中温度开始升高, 当新型稳压器释放阀开启后, 压力迅速下降引起温度的下降。当流量不再波动后, 在喷淋作用下, 蒸汽腔温度持续下降, 波动结束, 蒸汽腔蒸汽在流动下重新回到饱和温度。图 10(c)中新型稳压器由于水槽区域的存在, 导致波动管过冷流体流进后与筒内的水换热流动受阻, 所以最下层的水的温度比传统稳压器的水温低。

综上, 在稳压器波入工况下, 新型稳压器由于汽空间的减少, 吸收压力波动的能力降低, 比传统稳压器更加敏感。

4.3. 稳压器波出工况

文章分析了稳压器在 13 kg/s 的流量流出工况下的稳压特性。

当有流量流出稳压器时, 由于新型稳压器内的冷却剂流出流体来源于筒内的液相区域, 水槽内的水不会流出, 所以新型稳压器筒内水位下降比传统稳压器筒内水位下降快(图 11(a)), 同时由于新型稳压器内的水空间更多, 所以发生波出工况时, 压力下降的趋势比传统稳压器的缓(图 11(b)), 响应的蒸汽腔温度变化更小(图 11(c))。

压力持续下降达到电加热元件触发阈值 14.9 MPa, 电加热元件开始工作, 随流量扰动结束, 水位降低速度基本停止; 随着热源的投入, 水温上升, 水汽化成蒸汽, 稳压器压力迅速回升, 直至压力上升至 14.9 MPa, 电加热元件停止工作, 稳压器压力渐渐趋于稳定(图 11(d))。新型稳压器的压力变化比传统稳压器缓, 所以电加热元件停止工作时间比传统稳压器的时间要早。

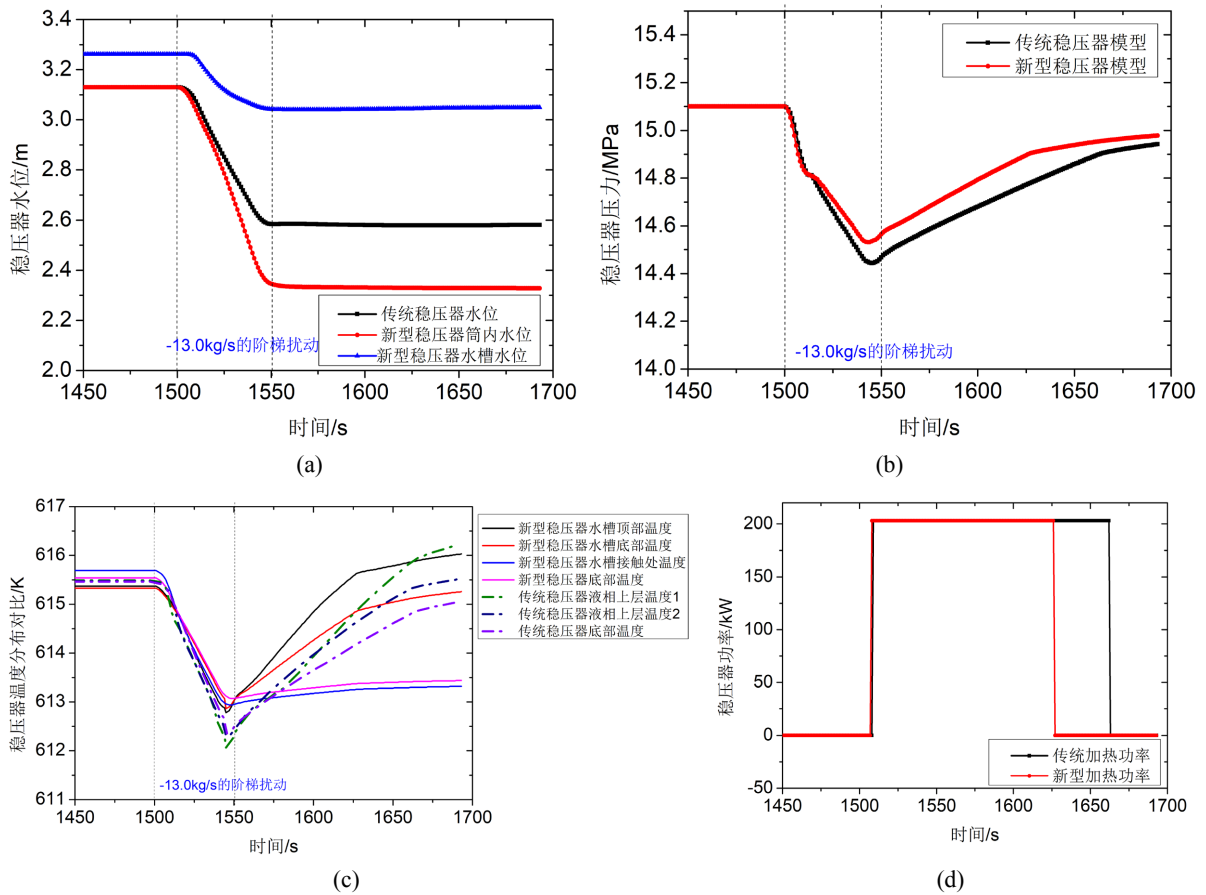


Figure 11. Parameters curve of new and traditional PRZ under outflow condition. (a) Comparison of PRZ water level; (b) comparison of PRZ pressure; (c) Comparison of PRZ temperature thermal stratification in liquid phase; (d) comparison of PRZ electric heater power

图 11. 新型和传统稳压器波出工况参数对比。(a) 稳压器水位变化对比; (b) 稳压器压力变化对比; (c) 稳压器温度在液相中的热分层对比; (d) 电加热元件功率对比

5. 新型稳压器系统特性分析

瞬态分析前使用 RELAP5 程序对小型反应堆满功率工况下的稳态结果进行验证, 符合良好, 可基于模型开展瞬态分析, 结果见表 2。

Table 2. RELAP5 steady-state part calculation results are compared with the design values

表 2. RELAP5 稳态部分计算结果与设计值对比

参数	传统	新型	设计值
反应堆功率/MW	310.0	310.0	310.0
堆芯流量/kg·s ⁻¹	1354	1354	1353.0
稳压器压力/MPa	15.1	15.1	15.0
堆芯进口温度/K	558.08	558.09	555.75
堆芯出口温度/K	598.36	598.36	596.55
二次侧出口蒸汽温度/K	558.0	558.299	563.15
二次侧给水流量/kg·s ⁻¹	125.0	125.0	—

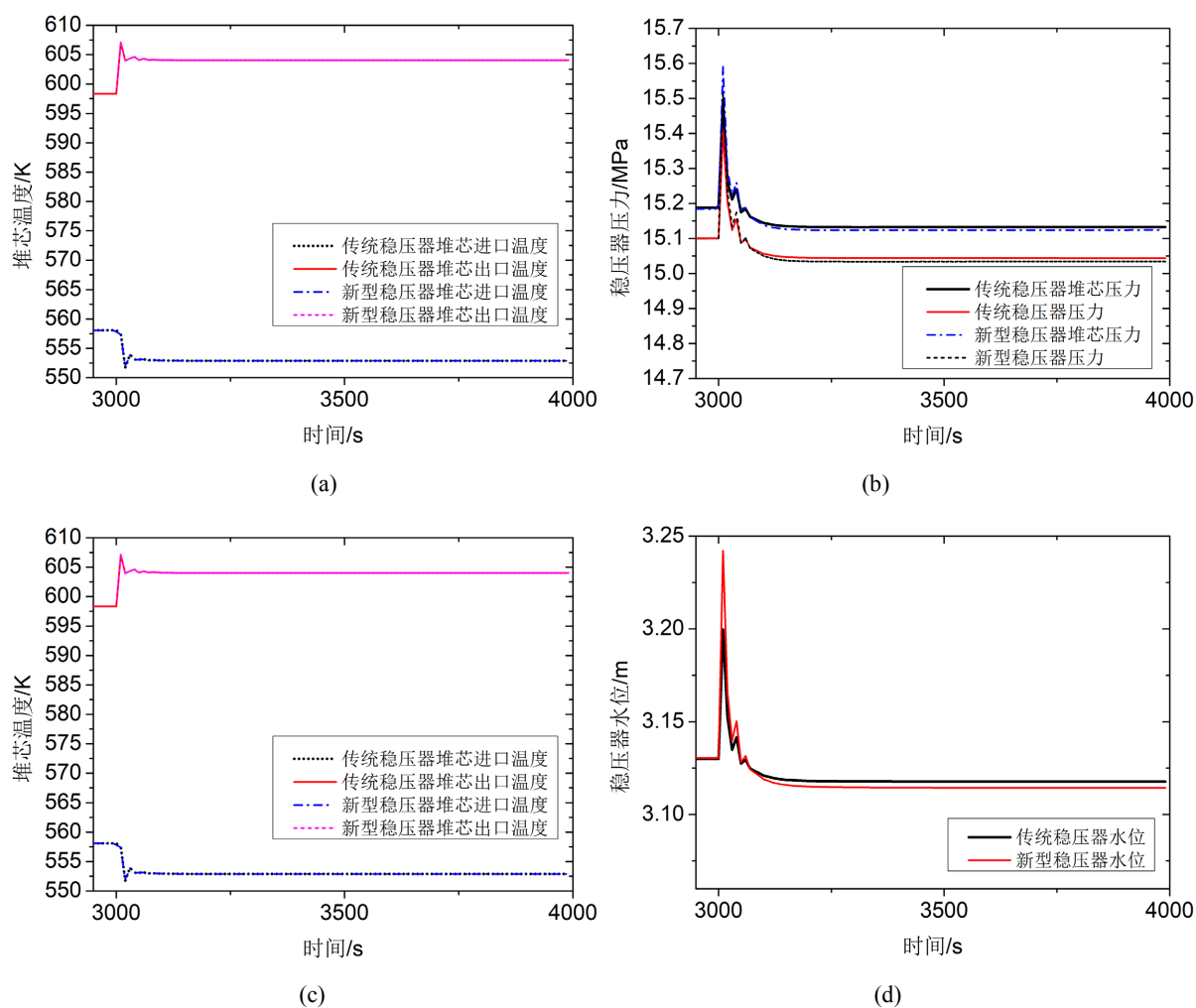
程序根据 2 种稳压器模型, 分别计算了 2 种不同功率变化的瞬态工况, 计算工况如表 3 所示, 图 12 给出了计算结果。计算认为反应堆在降功率的时候, 二回路的给水流量也相应变化, 传统稳压器和新型稳压器的二次侧给水流量设定为相同值, 在整个计算过程中没有触发稳压器辅助系统, 压力稳定过程体现了稳压器自稳自调能力。

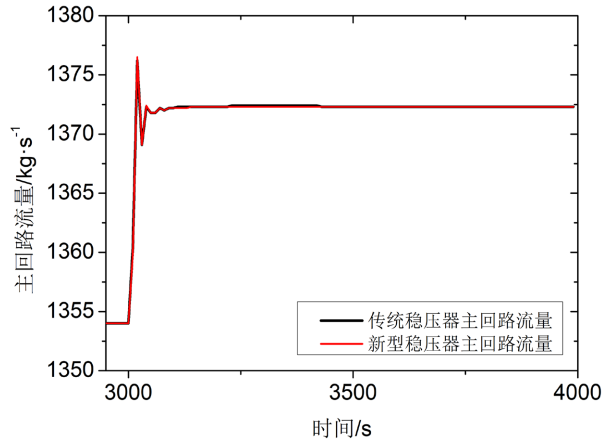
Table 3. Transient calculation conditions

表 3. 瞬态计算工况

功率	功率比	触发时间	突变前二次侧流量	突变后二次侧流量
217 MW	0.7	2950 s	1354 kg/s	42.5 kg/s
403 MW	1.3	2950 s	1354 kg/s	119 kg/s

堆芯功率上升, 反应堆温度升高(图 12(a)), 密度变小, 压力上升(图 12(b)), 之后在稳压器汽空间的调节下(图 12(c)、图 12(d)), 压力下降, 直到稳定, 稳压器的压力波动直接影响回路的流量(图 12(e))。在现有的功率上升瞬变下, 传统和新型稳压器的稳压特性基本相同, 满足运行瞬变下的稳压特性。

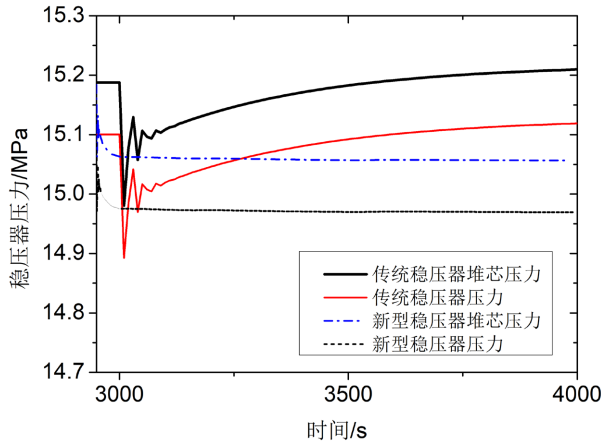




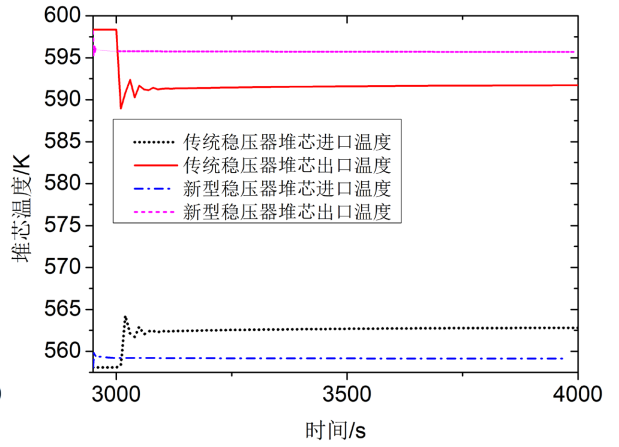
(e)

Figure 12. Parameters curve of under power increase condition. (a) Comparison of core outlet temperature; (b) comparison of system pressure; (c) comparison of core outlet temperature; (d) comparison of PRZ water level; (e) comparison of system flow rate

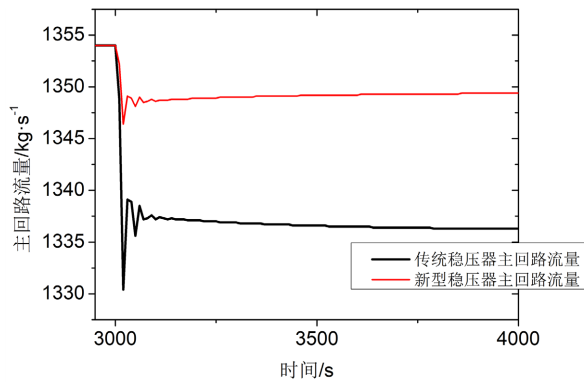
图 12. 功率上升时工况参数对比。(a) 反应堆出口温度对比; (b) 系统压力变化对比; (c) 反应堆出口温度对比; (d) 稳压器水位变化对比; (e) 主回路冷却剂流量对比



(a)



(b)



(c)

Figure 13. Comparison of parameters under power decrease condition. (a) Comparison of system pressure; (b) comparison of core outlet temperature; (c) comparison of flowrate in main loop

图 13. 功率下降时工况参数对比。(a) 系统压力变化对比; (b) 反应堆出口温度对比; (c) 主回路冷却剂流量对比

在功率下降的瞬变工况下, 稳压器的压力(图 13(a))、堆芯进出口温度(图 13(b))、主回路的流量(图 13(c))有较大差异, 主要是因为水空间体积不一样, 新型稳压器的水体积更多, 汽空间更少, 在功率降低下更能维持系统的稳定。

6. 结论

本研究采用 CFD 方法分析了新型稳压器电加热元件水槽位置对稳压器稳压特性的影响, 并进一步基于 RELAP5 程序分析了新型稳压器的动态稳压特性。通过模拟, 得到如下结论:

- 1) 在水体积不变下, 电加热元件水槽位置几乎不影响稳压器的稳压特性;
- 2) 为保证电加热元件水槽置于稳压器高度 1/2 处, 引入 1/2 水槽体积的水空间, 降低了汽空间的可压缩体积。RELAP5 小堆系统计算结果表明, 该设计参数下依然能保证稳压器的稳压行为。

本研究提出了一种改变内部结构的新型蒸汽式稳压器形式, 实现了新型稳压器稳压性能的初步分析, 为稳压器设计和反应堆系统的布置提供了新的思路。

基金项目

国防科技工业和动力技术创新中心基金(HG2021052)。

参考文献

- [1] 贺士晶, 阎昌琪, 王建军, 等. 稳压器容积的优化设计[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(3): 320-324.
- [2] 王伟伟, 苏光辉, 田文喜, 等. 基于多区非平衡模型的稳压器动态仿真与验证[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(3): 310-315.
- [3] 陈磊, 阎昌琪, 王建军. 一种改进的稳压器优化设计及其瞬态特性[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(12): 2277-2282.
- [4] Cai, B., Yu, W., Wang, Y., *et al.* (2017) Experimental Investigation on Thermal Stratification in a Pressurizer Surge Line with Different Arrangements. *Progress in Nuclear Energy*, **98**, 239-247. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.03.029>
- [5] 贺士晶. 核动力装置参数优化设计[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [6] 宋丹戎, 李庆, 秦冬, 党高健, 曾畅, 李松, 肖仁杰, 魏学栋. “玲龙一号”反应堆研发关键技术——堆芯设计与安全设计[J]. 核动力工程, 2021, 42(4): 1-5.