

螺旋管式直流蒸汽发生器多并联通道两相 流动不稳定性研究

钱冠华^{1,2} 赵亚楠^{1,2} 王 旭³ 于 涛^{1,2}

1(南华大学 核科学技术学院 衡阳 421001)

2(先进核能技术设计与安全教育部重点实验室 衡阳 421001)

3(中核工程咨询有限公司 北京 100032)

摘要 螺旋管式直流蒸汽发生器结构紧凑,传热能力强,适用于铅冷快堆等第四代反应堆。两相流的不稳定性可能导致传热管束的机械振动和热疲劳加重,从而对蒸汽发生器的安全运行构成严重威胁。采用 RELAP5/MOD3.4 程序对 14 根螺旋传热管的螺旋管式直流蒸汽发生器的二次侧进行了建模,并基于时域方法研究了启动过程中的振荡行为以及参数对系统稳定性的影响。结果表明:二次侧流体的压力、质量流量和温度在加热段呈现 $(n-2, 2)$ 模式的密度波振荡,并叠加有流型转变不稳定性。此外,增加入口节流度和系统压力、减少出口节流都有利于提高螺旋管式直流蒸汽发生器的系统稳定性。

关键词 螺旋管式直流蒸汽发生器, 多并联通道, 两相流, 流动不稳定性, 时域分析

中图分类号 TL331

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240149

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240149

Two-phase flow instability in multi-parallel channels of helical-coiled once-through steam generator

QIAN Guanhua^{1,2} ZHAO Ya'nan^{1,2} WANG Xu³ YU Tao^{1,2}

1(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

2(Key Lab of Advanced Nuclear Energy Design and Safety, Ministry of Education, Hengyang 421001, China)

3(China Nuclear Engineering Consulting Co., Ltd., Beijing 100032, China)

Abstract [Background] The helical-coiled once-through steam generator (H-OTSG) has the advantages of compact structure and strong heat transfer ability, which is appropriate for lead-cooled fast reactor (LFR). The two-phase flow instability may cause mechanical vibration and thermal fatigue of heat transfer tube bundles, posing a serious threat to the safe operation of steam generators. [Purpose] This study aims to explore the oscillation modes and influencing laws of two-phase flow instability of H-OTSG, providing reference for industrial design. [Methods] Firstly, RELAP5/MOD3.4 code was applied to modelling the helical-coiled once-through steam generator with 14 parallel heat exchange tubes. The primary working fluid of H-OTSG was liquid lead bismuth eutectic (LBE) and the secondary fluid was water. Then, the oscillation behavior during start-up was studied based on time-domain method

国家自然科学基金(No.12205142)、湖南省自然科学基金(No.2023JJ40526)资助

第一作者: 钱冠华, 男, 1995 年出生, 2017 年毕业于济南大学, 现为博士研究生, 研究领域为反应堆热工水力

通信作者: 赵亚楠, E-mail: chinazhaoyanan@hotmail.com

收稿日期: 2024-04-28, 修回日期: 2024-06-13

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 12205142), Hunan Provincial Natural Science Foundation of China (No. 2023JJ40526)

First author: QIAN Guanhua, male, born in 1995, graduated from University of Jinan in 2017, doctoral student, focusing on reactor thermal hydraulics

Corresponding author: ZHAO Ya'nan, E-mail: chinazhaoyanan@hotmail.com

Received date: 2024-04-28, revised date: 2024-06-13

and the oscillation characteristics and the parameter sensitivity of the stable boundary were analyzed. The limit cycles of the oscillation in each channel were shown on the pressure-drop vs. flow-rate plane. Finally, the influence of structural parameters on system stability were explored, so did that of operating parameters such as the pressure, flow rate, and temperature of the secondary fluid. **[Results]** The results indicate that the operating parameters exhibit density wave oscillations at the heating section in a $(n-2, 2)$ pattern, with superimposed flow pattern transition instability. The smaller the flow amplitude, the shorter and thinner the corresponding limit cycle, and the closer to the circle. In the same channel, as the driving force increases, the flow amplitude gradually decreases, and the limit cycle also gradually shrinks. In addition, as the inlet throttling has been increased from 1 100 to 1 700, the duration of oscillation shortened from approximately 6 000 s to less than 1 000 s, and the amplitude decreased by nearly 30%. With the increase of the outlet throttling from 0 to 200, the duration of oscillation has been lengthened from less than 5 400 s to approximately 18 000 s. In addition, the steam temperature and the power-flow ratio of the channel increase with the increase of outlet throttling, resulting in reduced system stability. As the system pressure is increased from 3.7 MPa to 4.4 MPa, the oscillation duration of the flow curve shortens from 10 000 s to less than 5 000 s, and the amplitude also decreases. The density difference between the liquid phase and vapor phase decrease with the increase of system pressure. As a result, two-phase frictional resistance is decreased, the self-sustained oscillation of mass flow is suppressed, and the system stability is increased. **[Conclusions]** Results of this study demonstrate that the system stability of the helical-coiled once-through steam generator can be improved by increasing inlet throttling and system pressure and reducing outlet throttling, and involved structural and operational parameters should be focused on during the design process.

Key words Helical-coiled once-through steam generator, Multi-parallel channels, Two-phase flow, Flow instability, Time-domain analysis

螺旋管式直流蒸汽发生器(Helical-coiled Once-Through Steam Generator, H-OTSG)由于其结构紧凑、传热效率高,在铅冷快堆(Lead-cooled Fast Reactor, LFR)等四代堆中具有良好的应用前景。与直管相比,螺旋管中产生的二次流增加了流体搅混,减薄了边界层,强化了传热能力。然而,在某些运行条件下,并联螺旋管可能会出现两相流动不稳定性,这将影响系统局部换热性能,并进一步导致沸腾危机,最终酿成灾难性后果。持续的流量振荡也会导致传热管受迫振动或系统控制问题^[1]。在LFR特殊的高温 and 强腐蚀环境中,这种不稳定性将严重威胁系统的安全性和可靠性。为了给LFR中配备的H-OTSG的设计和运行提供技术支持,有必要研究并联螺旋管系统的结构和运行参数对两相流不稳定性及振荡行为的影响。

在过去的三十年里,科研人员对并联螺旋管系统两相流动不稳定性现象进行了较为广泛的研究。意大利社会信息经验热工水力(Società Informazioni Esperienze Termoidrauliche, SIET)公司在同名全尺寸实验台架基础上进行了一系列实验,总结了双通道并联螺旋管的振荡特性以及两相区压降随质量的演化规律^[2]。同时,SIET还根据实验数据验证了RELAP5对并联螺旋管系统建模的能力,结果表明,RELAP5 MOD3.3显著高估了高入口过

冷条件下的稳定性边界^[3-5]。杨瑞昌等^[6-7]进行了R-12在三通道并联螺旋管中流动的台架实验,得到了其振荡特性、稳定性边界和经验方程。王明路等^[8-9]研究了SWAMUP-II台架的热参数对系统稳定性的影响,并基于改进的RELAP5程序进行了数值模拟,证明了RELAP5改进的合理性。此外,董芮廷和郝俊伟^[10-11]分别建立了并联螺旋管的频域分析模型,并基于RELAP5时域分析结果进行了验证。值得注意的是,对并联螺旋管的研究很少涉及3通道以上的系统,因为研究表明,对于低干度蒸发管系统,加热通道的数量对同相振荡的起始功率和振幅几乎没有影响^[12]。然而,H-OTSG的传热管出口蒸汽干度极高($\chi > 1$),不会发生完全同相的流量振荡,因此不能简化为双并联通道系统,须采用多并联通道模型进行模拟。尽管在某些特定条件下存在计算误差,RELAP5仍然能够胜任并联螺旋管的数值模拟^[13]。相对地,计算流体力学(Computational Fluid Dynamic, CFD)程序更适合研究管内局部流动换热特性^[14]、壳侧流场分布^[15]以及一、二次侧耦合换热问题^[16],并不适用于本工作的计算任务。

本文利用RELAP5/MOD3.4程序对14通道H-OTSG的二次侧进行了建模,模拟了完整的启动过程,介绍了具体的振荡模式,讨论了驱动和响应之间的关系。此外,基于时域方法,详细分析了振荡特性

和稳定边界的参数敏感性。

1 螺旋管直流蒸汽发生器结构及模型

1.1 设备简介

本文所研究的螺旋管式直流蒸汽发生器结构如图 1 所示。一次侧工质为液态铅铋合金 (Lead-Bismuth Eutectic, LBE)，二次侧工质为水。具体设计参数见表 1。

1.2 RELAP5 建模方案

基于 RELAP5 程序对 14 根螺旋管进行了完整建模,模型的节点划分如图 2 所示。其中,112P~242P 为加热段,采用了与螺旋管等长度、等倾角的直管模型模拟,每根直管划分为 20 个控制体,与之对应的热构件 1112H~1242H 用于模拟蒸汽发生器一次侧热源;114S~244S 为上升段,采用垂直的单一控制体模拟。根据直流蒸汽发生器常用的控制策略^[17-19],二次侧入/出口由时间相关控制体 001TDV 和 008TDV 模拟,以控制入口温度和出口压力;入口流量由时间相关接管 002TDJ 控制。在直流蒸汽发生器传热管入口处安装有端塞提供节流作用,使螺

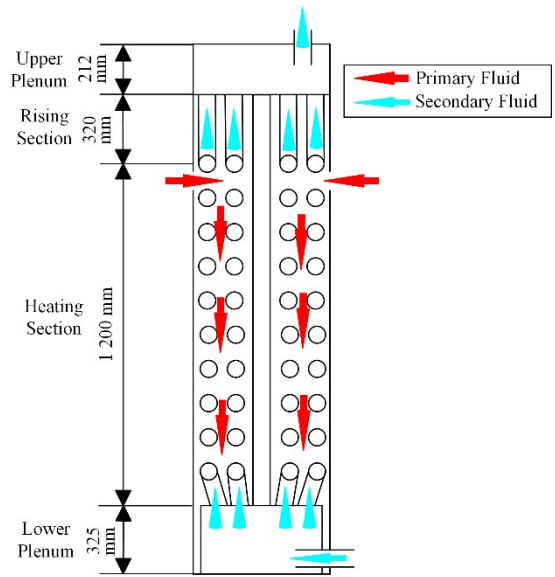


图 1 螺旋管直流蒸汽发生器结构示意图
Fig.1 Structure diagram of the H-OTSG

旋管进出口建立较大压差,保证蒸汽发生器稳定运行。在 RELAP5 模型中,通过设置螺旋管入口接管 111J~241J 和出口接管 113J~243J 的正向阻力系数 flore_g,模拟蒸汽发生器螺旋管进口处的节流度。

表 1 螺旋管直流蒸汽发生器结构参数
Table 1 Specific design parameters of the H-OTSG

参数 Parameter	数值 Value	参数 Parameter	数值 Value
传热管材质 Tube materials	T91	额定功率 Nominal power / MW	1.5
管道数 Number of tubes	14	二次侧入口温度 Secondary inlet temperature / K	453.15
平均管内径 Average inner diameter / m	0.011	二次侧入口流量 Secondary inlet flow rate / kg·s ⁻¹	0.625
平均管长 Average tube length / m	16.2	二次侧出口蒸汽温度 Secondary outlet steam temperature / K	663.15
螺旋升角 Helix angle / (°)	5	二次侧出口蒸汽压力 Secondary outlet steam pressure / MPa	4.3

2 模型验证及振荡特性

2.1 模型稳态验证

基于额定参数对模型进行稳态验证,初始参数采用§1.1 中的额定参数。其中,二次侧入口、水室及加热段流体初始温度设为 453.15 K,上升段、气室及二次侧出口流体温度设为 527.83 K,此温度为 4.3 MPa 下水的饱和温度。由于各通道的入口节流系数相同,因此设置的初始流量均为 44.643×10⁻³ kg·s⁻¹。二次侧出口流体温度、压力取 006B 的计算值,质量流量取 007J 的计算值。最终的稳态结果见表 2。

如表 2 所示,RELAP5 的计算值与设计值的误差均小于 2%,其中,由于出口时间相关控制体的约束作用,出口压力和出口温度的计算值与设计值吻合

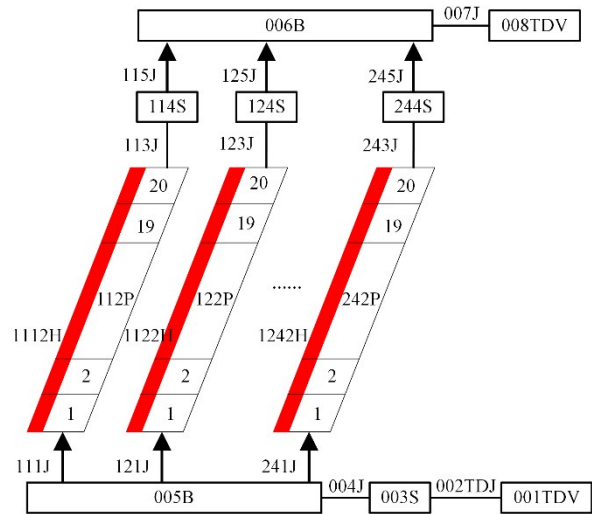


图 2 RELAP5 节点图
Fig.2 Nodalization scheme for RELAP5

表2 稳态验证结果
Table 2 The result of steady state calculation

参数 Parameter	设计值 Design value	计算值 Calculated value	误差 Error / %
出口温度 Outlet temperature / K	663.15	650.4	1.92
出口压力 Outlet pressure / kPa	4 300	4 300.02	0.000 5
出口流量 Outlet mass flow / kg·s ⁻¹	0.625	0.625 1	0.016

良好。值得注意的是,出口温度的计算值比设计值低 12.75 K。这是由于过热蒸汽的比热容较低,微小的功率误差会导致显著的温度误差的缘故。稳态验证结果表明,加热功率误差为-0.41%时,出口过热蒸汽温度误差偏差可达 1.92%,对于过热蒸汽,该误

差在可接受范围内。

2.2 振荡特征分析

为了研究启动过程中可能出现的两相流动不稳定性,将加热功率在 150 000 s 内从 0 增加到 1.5 MW。采用准稳态假设,螺旋管系统在整个过程中可以被视为稳态;采用 Boussinesq 近似,即认为单相段流体不可压,影响其密度的只有温度。观察加热段入口/出口的相关参数。

随着加热的进行,加热段中的水逐渐从过冷态变为饱和态和过热态。随着过热度的增加,流体质量流量在大约 131 000 s 时发生振荡。由于加热段入口处的流体密度远高于出口处的流体密度,入口流速的幅度远高于出口(图 3)。最终,加热段出现了相对稳定的单相水段、两相混合段和过热蒸汽段,蒸发管进出口流体密度差保持不变,振荡消失。

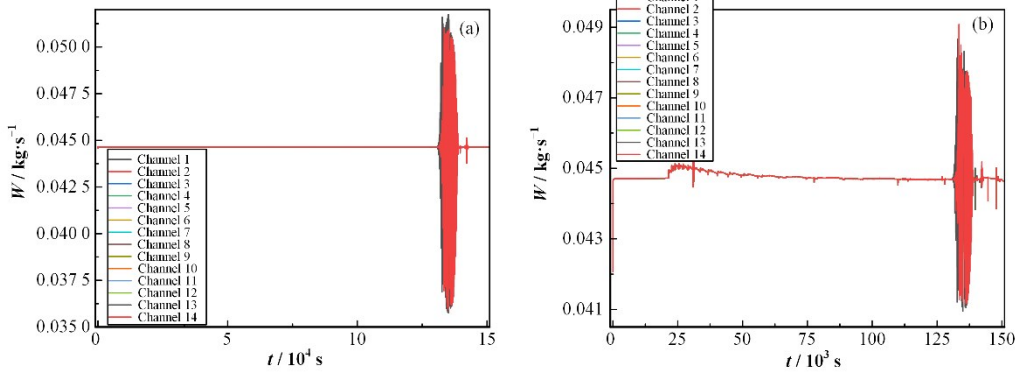


图3 加热段工出入口质的质量流量变化 (a) 入口,(b) 出口
Fig.3 Variations of the mass flow heating section with time at inlet (a) and outlet (b)

截取 133 420~135 320 s 时段内的曲线,观测到一种特殊的振荡模式,如图 4 所示。通道 1 和通道 14 的振荡幅度相对较高并且呈现同相振荡。通道 2~13 的振荡曲线完全重合。由于各通道的初始流量相同,因此当通道 1 和通道 14 出现大幅同相振荡

时,通道 2~13 展现出与之反相的小幅振荡以抵消其质量流量的变化,使整个系统满足质量守恒定律。参照 Fukuda 等^[20]的命名惯例,将这种振荡行为命名为 $(n-2,2)$ 模式。

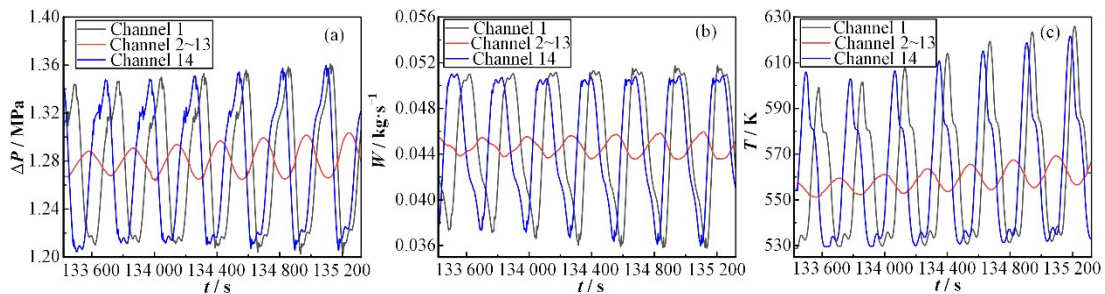


图4 流动失稳的工况参数振荡特性(彩图见网络版) (a) 压降,(b) 质量流量,(c) 温度
Fig.4 The oscillation pattern of working condition parameters with flow instability (color online)
(a) Pressure drop, (b) Mass flow, (c) Temperature

如图 5 所示,三种振荡的压降和入口质量流量存在相位差。这是由流量响应滞后于驱动力变化而

造成的。这一特征与密度波振荡(Density Wave Oscillation, DWO)非常一致^[21]。不同通道中的三种

振荡在入口和出口质量流量之间以及压降和入口质量流量之间的相位差均为 180° 。此外,出口蒸汽的

高干度使得两相摩擦效应不容忽视。此为并联通道间的第二类密度波振荡(DWO_{II})。

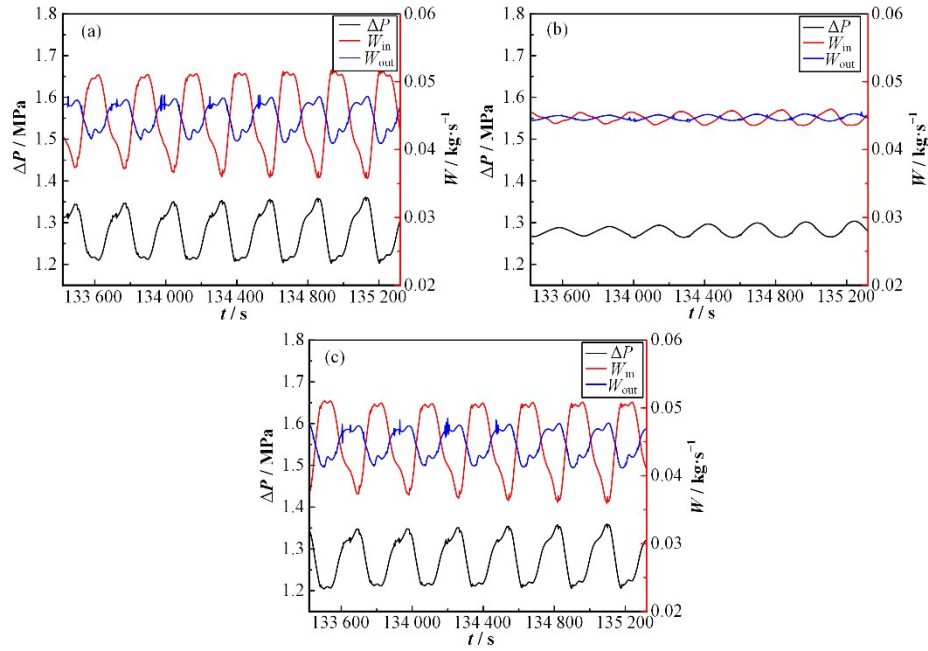


图5 各通道 G - ΔP 振荡曲线的相位差(彩图见网络版) (a) 通道1, (b) 通道2~13, (c) 通道14
Fig.5 The phase shift of G - ΔP in each channel (color online) (a) Channel 1, (b) Channel 2~13, (c) Channel 14

将振荡曲线投影到压降与流速的平面上,其轨迹近似为环形。这种能够反映驱动力和流量响应之间关系的轨迹被称为极限环。分析表明,流速和压降越来越接近 180° 相位差(图5(a)和(c)),极限环在环绕方向上越接近斜率为 -1 的线段(图6(a)和(c))。这种异相导致在质量流量的负斜率区发生自

持振荡。流量振幅越小,相应的极限环越短、越窄,并且越接近圆(图5(b)和图6(b))。此外,在同一通道中,随着驱动力的增加,流量振幅逐渐减小,极限环也沿着演化方向逐渐缩小,并最终趋于设计流量。

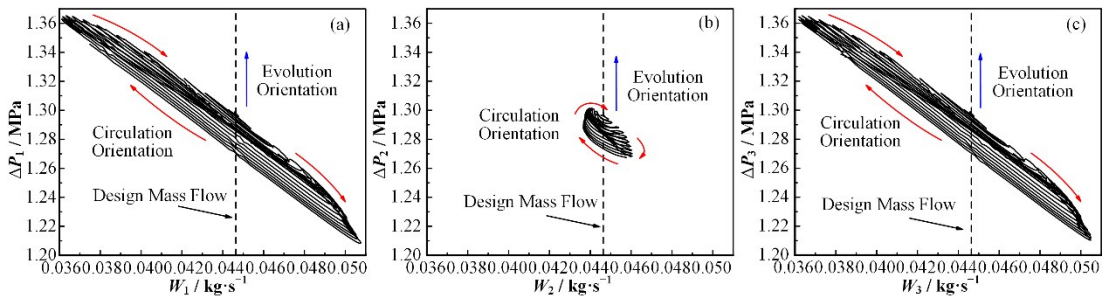


图6 各通道 G - ΔP 振荡曲线的极限环 (a) 通道1, (b) 通道2~13, (c) 通道14
Fig.6 The limit cycles of G - ΔP in each channel (a) Channel 1, (b) Channel 2~13, (c) Channel 14

对通道1内各控制体的流型演变情况进行了分析。由于倾角为 5° , RELAP5采用了水平蒸发管模型进行计算。随着加热的进行,控制体内流体的依次出现泡状流、弹状流、环雾流和雾状流4种流型,其缩写含义见表3。

对图4和图5所选时段内通道1的流型分布进行监控,发现19号控制体(112190000)的流型在ANM和MPR之间不断转变,如图7所示。这是一种

流型转变不稳定性:当MPR发生时,液膜被蒸干,壁面对流体的摩擦阻力降低,导致入口质量流量增大;而质量流量的增大会抑制沸腾,液膜在该控制体内无法被蒸干,流型退化为ANM,壁面对流体的摩擦阻力增大,入口质量流量变低,沸腾增强,该处液膜被重新蒸干,如此往复循环。在所选时段内可见7个完整周期,与图4和图5吻合。通道14的结果与之类似,而剩余通道的流型变化并不明显,这与质量

表3 RELAP5 流型对照(控制体)
Table 3 Flow regime letters and numbers (Volume)

流型 Flow regime	代码(大编辑用) Three-letter code (major edits)	代号(小编辑/绘图用) Number (minor edits/plots)
高混合泡状流 High mixing bubbly	CTB	1
高混合泡-雾流变迁 High mixing bubbly/mist transition	CTT	2
高混合雾状流 High mixing mist	CTM	3
泡状流 Bubbly	BBY	4
弹状流 Slug	SLG	5
环雾流 Annular mist	ANM	6
CHF 前雾状流 Mist pre-CHF	MPR	7
反环状流 Inverted annular	IAN	8
反弹状流 Inverted slug	ISL	9
雾状流 Mist	MST	10
CHF 后雾状流 Mist post-CHF	MPO	11
水平分层流 Horizontal stratified	HST	12
垂直分层流 Vertical stratified	VST	13

守恒定律吻合。因此,启动过程中发生的流量振荡现象本质上是第二类密度波振荡叠加流型转变不稳定性的结果。

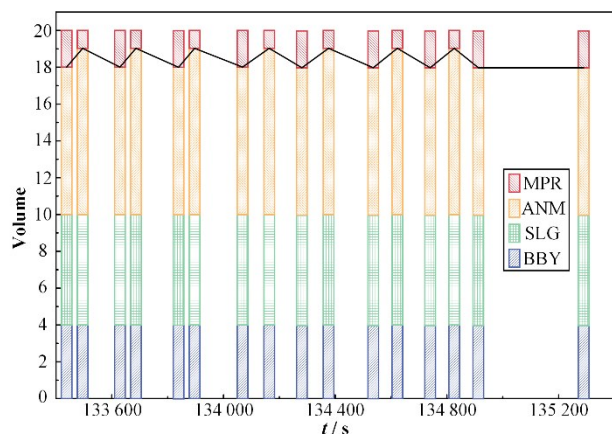


图7 通道1内流型分布(彩图见网络版)

Fig.7 The flow regime of channel in channel 1 (color online)

3 参数对流动不稳定性的影响

入口节流度、出口节流度和系统压力是螺旋管直流蒸汽发生器设计和运行中的重要参数,本文以入口节流度、出口节流度和系统压力作为典型参数,研究并联通道两相流动不稳定性的参数敏感性。

3.1 入口节流度

在4.3 MPa的系统压力和453.15 K的入口流体温度下,入口节流度对振荡的影响如图8所示。逐步提升加热功率以研究两相流的临界稳定边界(Marginal Stability Boundary, MSB),当质量流量振荡幅度增长到一定值(超过10%),则视为处于一种

不稳定状态。为此定义了流动不稳定性的起始点(Onset of Flow Instability, OFI)和消失点(Disappear of Flow Instability, DFI),如图8(a)所示。随着入口节流从1 100增加到1 700,振荡持续时间从大约6 000 s缩短到小于1 000 s,振幅下降了近30%。增加入口节流度将略微延迟OFI并显著推迟了DFI。结果表明,不稳定域急剧收缩(图9),原因是入口节流度的增加导致加热段单相流量压降增加。在控制出口压力的情况下,进口驱动压头将得到提升,单相液体的质量流量增加,两相段的阻力减小^[12,22],有利于抑制振荡,提高系统稳定性。

3.2 出口节流度

出口节流对入口质量流量的影响较为复杂。当系统压力为4.3 MPa、入口流体温度为453.15 K、入口节流度为1 400时,出口节流度50~200的流量曲线如图10所示。随着出口节流度的增加,流量振荡曲线的振幅基本不变,但振荡持续时间已从不到5 400 s延长到约18 000 s。根据图11所示,出口节流度的增加不仅增加了振荡的起始功率,还增加了振荡消失时的功率。系统的不稳定域逐渐增大。在该系统中,出口节流度的增加将增加气相的压降,并延长过热段。一方面,这可以缩短两相段并抑制两相摩擦阻力;另一方面,单相液体段也会缩短,使之不能提供足够的单相重力压降。此外,增加出口节流度会提升蒸汽温度,增大通道的功率-流量比,降低系统稳定性。

3.3 系统压力

在1 300的入口节流条件下,研究了压力对

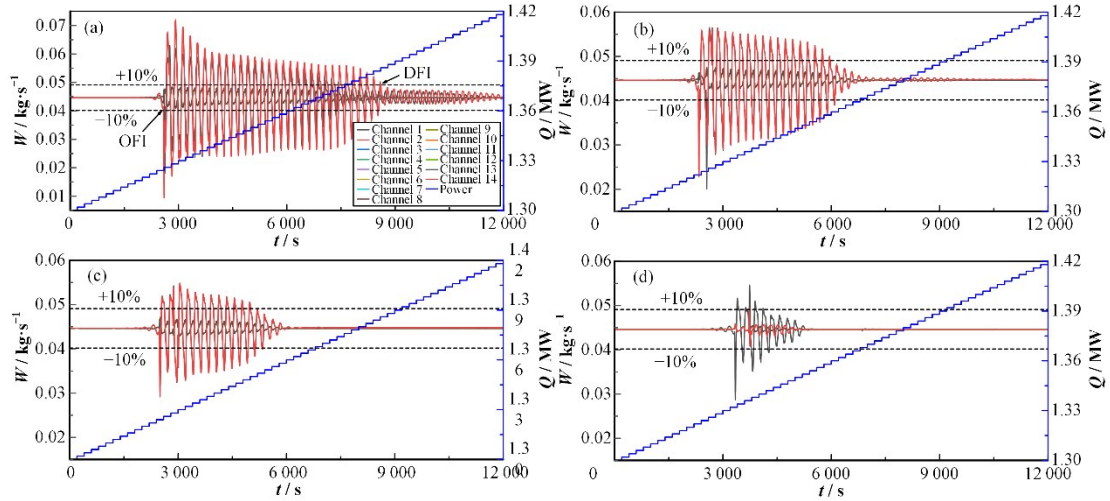


图8 不同入口节流度下振荡曲线的比较(彩图见网络版) (a) $R_{in}=100$, (b) $R_{in}=300$, (c) $R_{in}=500$, (d) $R_{in}=700$

Fig.8 Comparison of oscillation curves with different inlet throttling (color online)

(a) $R_{in}=100$, (b) $R_{in}=300$, (c) $R_{in}=500$, (d) $R_{in}=700$

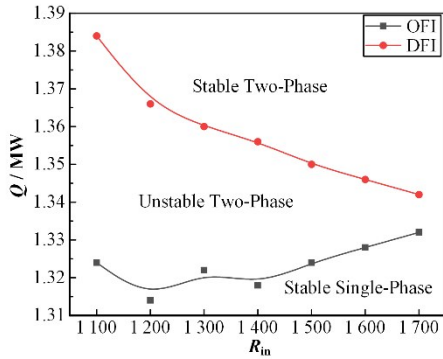


图9 入口节流度对稳定域的影响

Fig.9 Influence of inlet throttling on stability boundary

MSB的影响。对给水温度进行了调整,以保证不同压力下的入口过冷均为 74.68 K。由图 12 可知,当系统压力从 3.7 MPa 增加到 4.4 MPa 时,流量曲线的振荡持续时间从 10 000 s 缩短到 5 000 s 以下,振幅也随之减小。从图 13 可以看出,系统压力几乎不影响 OFI,但增加系统压力会显著延后 DFI,不稳定区急剧缩小。液相和气相之间的密度差将随着系统压力的增加而减小。结果,两相摩擦阻力减小,质量流量的自持振荡得到抑制,系统稳定性提高。

4 结语

在本研究中,利用 RELAP5 模拟了多并联通道螺旋管蒸汽发生器中的两相流动不稳定性,进行了稳态验证,讨论了启动过程中的振荡行为,并基于时域方法分析了三个参数对系统稳定性的影响。具体结论如下:

1) H-OTSG 的稳态分析表明,RELAP5 计算的二次出口温度、压力、质量流量与设计值的误差均小

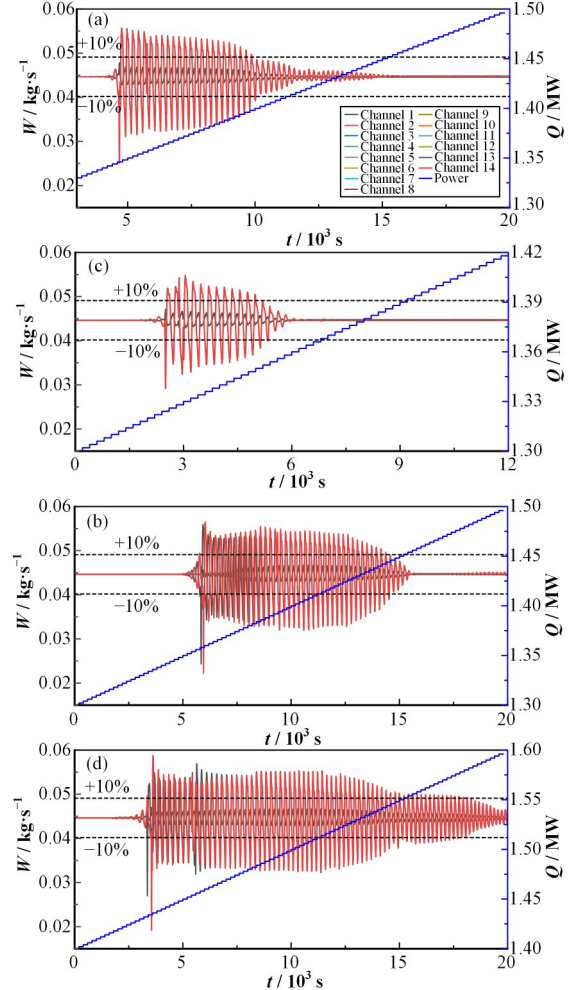


图10 不同出口节流度下振荡曲线的比较(彩图见网络版)

(a) $R_{out}=50$, (b) $R_{out}=100$, (c) $R_{out}=150$, (d) $R_{out}=200$

Fig.10 Comparison of oscillation curves with different outlet throttling (color online)

(a) $R_{out}=50$, (b) $R_{out}=100$, (c) $R_{out}=150$, (d) $R_{out}=200$

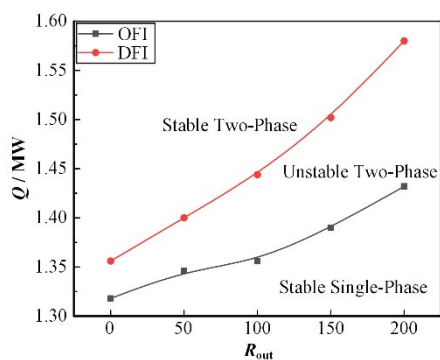


图11 出口节流对稳定域的影响
Fig.11 Influence of outlet throttling on stability boundary

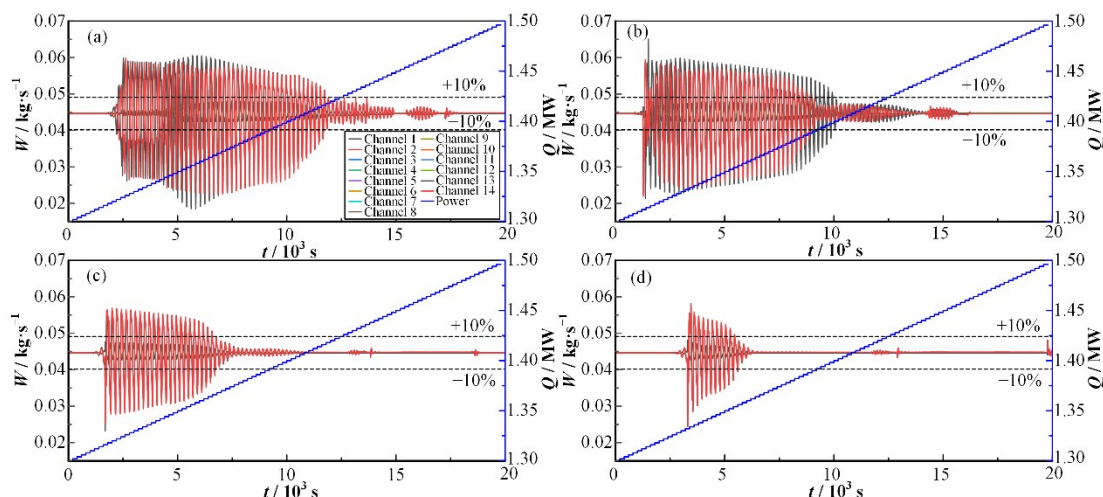


图12 不同系统压力下振荡曲线的比较 (a) $P=3.7$ MPa, (b) $P=3.9$ MPa, (c) $P=4.2$ MPa, (d) $P=4.4$ MPa

Fig.12 Comparison of oscillation curves under different system pressure

(a) $P=3.7$ MPa, (b) $P=3.9$ MPa, (c) $P=4.2$ MPa, (d) $P=4.4$ MPa

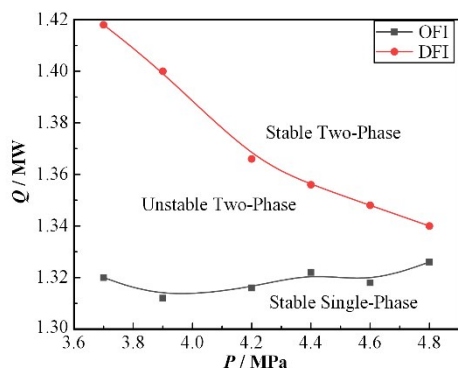


图13 系统压力对稳定域的影响
Fig.13 Influence of system pressure on stability boundary

致谢 感谢南华大学核能与应用实验室(Nuclear Engineering and Application Laboratory, NEAL)对本文工作的帮助与支持。

作者贡献声明 钱冠华负责方法研究、仿真实验、数据分析和论文撰写;赵亚楠指导了仿真设计及数据处理;王旭协助完成了程序调试;于涛为论文撰写提

于2%,证明了RELAP5建模的准确性。

2) 在启动过程中,压力、质量流量和温度表现出 $(n-2, 2)$ 模式的第二类密度波振荡。对驱动力和流量响应的分析表明, ΔP 和 G 的相位差越接近 180° , 极限环越接近斜率为-1的线段;振幅越小, 线段越短;流型分析表明, 管内存在环雾流与CHF前雾状流的流型转变不稳定性。

3) 对H-OTSG的参数敏感性分析表明, 在试验范围内, 增加入口节流度和压力、减少出口节流度可以显著延后DFI, 提高系统稳定性。

供了指导, 并对其进行了监督与审查。

参考文献

- 1 Boure J A, Bergles A E, Tong L S. Review of two-phase flow instability [J]. Nuclear Engineering and Design, 1973, **25**(2): 165 - 192. DOI: 10.1016/0029-5493(73)90043-5.
- 2 Papini D, Colombo M, Cammi A, *et al.* Experimental characterization of two-phase flow instability thresholds in helically coiled parallel channels[C]. International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP), Nice, France, May 2-5, 2011: 1843 - 1852.
- 3 Papini D, Cammi A, Colombo M, *et al.* On density wave instability phenomena - modelling and experimental investigation[M]//Two Phase Flow, Phase Change and Numerical Modeling. 2011: InTech. DOI: 10.5772/22307.
- 4 Colombo M, Papini D, Cammi A, *et al.* Experimental investigation of thermal hydraulic instabilities in steam generator helically coiled tubes[R]. ENEA, 2011. CERSE-

- POLIMI RL-1355/2011.
- 5 Papini D, Colombo M, Cammi A, *et al.* Experimental and theoretical studies on density wave instabilities in helically coiled tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, **68**: 343 - 356. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.09.035.
 - 6 杨瑞昌, 施德强, 鲁钟琪, 等. 并联螺旋蒸发管内汽液两相流动不稳定性的实验研究[J]. 工程热物理学报, 1993, **14**(1): 84 - 87.
YANG Ruichang, SHI Deqiang, LU Zhongqi, *et al.* An experimental study of two-phase flow instability in a parallel helical coil tube system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1993, **14**(1): 84 - 87.
 - 7 杨瑞昌, 鲁钟琪, 施德强, 等. 并联螺旋蒸发管内汽液两相流动不稳定性的模化试验研究[J]. 工程热物理学报, 1994, **15**(1): 84 - 88.
YANG Ruichang, LU Zhongqi, SHI Deqiang, *et al.* Modeling experimental study on instability of vapor-liquid two-phase flow in parallel spiral evaporation tubes [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1994, **15**(1): 84 - 88.
 - 8 Wang M L, Zheng M G, Yan J Q, *et al.* Experimental and numerical studies on two-phase flow instability behavior of a parallel helically coiled system[J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, **144**: 107588. DOI: 10.1016/j.anucene.2020.107588.
 - 9 Xu Z Y, Liu M L, Xiao Y, *et al.* Development of a RELAP5 model for the thermo-hydraulic characteristics simulation of the helically coiled tubes[J]. Annals of Nuclear Energy, 2021, **153**: 108032. DOI: 10.1016/j.anucene.2020.108032.
 - 10 Dong R T, Niu F L, Zhou Y, *et al.* Modeling analyses of two-phase flow instabilities for straight and helical tubes in nuclear power plants[J]. Nuclear Engineering and Design, 2016, **307**: 205 - 217. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2016.07.001.
 - 11 Hao J W, Zhang Y L, Zheng J X, *et al.* Analysis of density wave oscillations in helically coiled tube once-through steam generator[J]. Science and Technology of Nuclear Installations, 2016, **2016**: 3071686. DOI: 10.1155/2016/3071686.
 - 12 Xia G L, Peng M J, Guo Y. Research of two-phase flow instability in parallel narrow multi-channel system[J]. Annals of Nuclear Energy, 2012, **48**: 1 - 16. DOI: 10.1016/j.anucene.2012.05.014.
 - 13 Bai T Z, Peng C H. Thermal hydraulic characteristics of helical coil once-through steam generator under ocean conditions[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33** (10): 134. DOI: 10.1007/s41365-022-01108-9.
 - 14 王明路. 螺旋管直流蒸汽发生器管内气液两相流动传热特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
WANG Minglu. Study on flow and heat transfer characteristics of vapor-liquid two-phase flow in helical coil tube once-through steam generator[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
 - 15 王正阳, 瞿叶高, 余晓菲, 等. 铅铋流体作用下螺旋管束的流致振机理研究[J]. 核技术, 2021, **44**(11): 110601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110601.
WANG Zengyang, QU Yegao, YU Xiaofei, *et al.* Investigation on mechanism of flow induced vibration of spiral tube bundle in cross lead bismuth flow[J]. Nuclear Techniques, 2021, **44**(11): 110601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110601.
 - 16 刘佳伦, 宁亮, 林金鹏, 等. 液态金属快堆螺旋管蒸汽发生器一、二次侧耦合传热数值研究[J]. 核技术, 2024, **47** (9): 090605. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.090605.
LIU Jialun, NING Liang, LIN Jinpeng, *et al.* Numerical study of coupled heat transfer between primary and secondary sides of helical coiled tube steam generator for liquid metal fast reactor[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47** (9): 090605. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.090605.
 - 17 Qian H, Zou M Y. Design of digital nuclear power small reactor once-through steam generator control system[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2022, **54**: 2435 - 2443. DOI: 10.1016/j.net.2022.01.015.
 - 18 夏庚磊, 董化平, 彭敏俊, 等. 环隙窄缝通道管间脉动不稳定性分析[J]. 原子能科学技术, 2011, **45**(9): 1034 - 1039. DOI: 10.7538/yzk.2011.45.09.1034.
XIA Genglei, DONG Huaping, PENG Minjun, *et al.* Analysis of instability in narrow annular multi-channel system[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, **45**(9): 1034 - 1039. DOI: 10.7538/yzk.2011.45.09.1034.
 - 19 Xia G L, Yuan Y, Peng M J, *et al.* Numerical studies of a helical coil once-through steam generator[J]. Annals of Nuclear Energy, 2017, **109**: 52 - 60. DOI: 10.1016/j.anucene.2017.05.025.
 - 20 Fukuda K, Rao Y, Hasegawa S, *et al.* Study on two-phase flow instability in parallel multi-channels[J]. Heat Transfer-Japanese Research, 1996, **23**(8): 259 - 266. DOI: 10.1299/kikaib.61.259.

- 21 Takitani K, Sakano K. Density wave instability in once-through boiling flow system, (III)[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1979, **16**(1): 16 - 29. DOI: 10.1080/18811248.1979.9730866.
- 22 付文, 李晓伟, 吴莘馨, 等. 并联直流蒸发管内两相流密度波不稳定性研究[J]. 工程热物理学报, 2014, **35**(3): 576 - 580.
- FU Wen, LI Xiaowei, WU Xinxin, *et al.* Investigation on two-phase flow density wave instability in parallel once-through evaporation tubes[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, **35**(3): 576 - 580.