



RELAP5程序预测第一类密度波不稳定边界的能力验证

滕辰, 解衡, 贾海军

Assessment of RELAP5 Code for Predicting Unstable Boundary of Type-I Density Wave with Experiment

Teng Chen, Xie Heng, and Jia Haijun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2021.06.0065>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

RELAP5大空间自然对流管束传热模型改进及验证

Improvement and Validation of Free Convection Heat Transfer Model for Tube Bundle in RELAP5

核动力工程. 2018, 39(3): 29–32

蒸汽发生器传热管密度波振荡现象研究

Research on Density Wave Oscillations in Steam Generator Heat Transfer Tube

核动力工程. 2021, 42(1): 8–14

基于Relap5的ACME台架全厂断电整体试验数值分析

Numerical Analysis of ACME Station Blackout Integral Effect Test with Relap

核动力工程. 2019, 40(3): 98–102

RELAP程序用于PRS分析的适用性研究

Study on Applicability of RELAP Code in PRS Analysis

核动力工程. 2019, 40(6): 189–193

功能可靠性分析方法在XAPR堆芯自然循环可靠性评价中的应用

Application of Functional Reliability Assessment Method in Reliability Analysis of XAPR Reactor Core Natural Circulation

核动力工程. 2019, 40(2): 161–166

基于最大Lyapunov指数的摇摆条件自然循环压降型脉动混沌演化研究

Investigation on Chaotic Evolution of Natural Circulation Pressure Drop Oscillation under Rolling Condition Based on Maximal Lyapunov Exponent

核动力工程. 2021, 42(3): 42–48



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2021)06-0065-07; doi:10.13832/j.jnpe.2021.06.0065

RELAP5 程序预测第一类密度波 不稳定边界的能力验证

滕辰^{1,2}, 解衡^{1,2}, 贾海军^{1,2}

1. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京, 100084; 2. 清华大学反应堆工程与安全教育部重点实验室, 北京, 100084

摘要: 为估算低温核供热堆的第一类密度波不稳定 (Type-I DWO) 边界, 以确定其微沸腾运行模式的参数区间, 本文建立了低温核供热堆 NHR200 相似性实验回路 HRTL200 的 RELAP5 数值模型。通过对比模拟结果与实验结果, 评价了 RELAP5/MOD3.2 程序模拟 Type-I DWO 的一般特性以及预测不稳定边界的能力, 分析了进、出口阻力系数、相间摩擦对模拟结果的影响。结果表明, RELAP5 程序模拟 Type-I DWO 的一般特性与实验符合较好; 运行压力不高于 25 bar (1 bar=10⁵ Pa) 时, 程序计算的不稳定边界的过冷度边界值与实验值偏差在 3 K 以内; 运行压力大于 30 bar 时, 采用准确的相间摩擦关系式可以改善预测结果。因此, 选取与回路相匹配的相间摩擦关系式后, RELAP5 程序可以用于模拟和预测 Type-I DWO。

关键词: 密度波振荡; 微沸腾; RELAP5 程序; 自然循环

中图分类号: TL333 **文献标志码:** A

Assessment of RELAP5 Code for Predicting Unstable Boundary of Type-I Density Wave with Experiment

Teng Chen^{1,2}, Xie Heng^{1,2}, Jia Haijun^{1,2}

1. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing, 100084, China;

2. Key Laboratory of Advanced Reactor Engineering and Safety of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing, 100084, China

Abstract: In order to estimate the unstable (Type-I DWO) boundary of Type-I density wave of low temperature nuclear heating reactor and determine the parameter interval of its slight-boiling mode, the RELAP5 numerical model of NHR200 similarity experimental loop HRTL200 of low temperature nuclear heating reactor is established in this paper. By comparing the simulation results with the experimental results, the general characteristics of RELAP5/MOD3.2 program for simulating Type-I DWO and the ability to predict the unstable boundary are evaluated, and the effects of inlet and outlet resistance coefficients and interphase friction on the simulation results are analyzed. The results show that the general characteristics of Type-I DWO simulated by RELAP5 program are in good agreement with the experiment; When the operating pressure is not higher than 25 bar (1 bar=10⁵ Pa), the deviation between the degree of subcooling boundary value of the unstable boundary calculated by the program and the experimental value is within 3 K; when the operating pressure is greater than 30 bar, the accurate interphase friction relationship can improve the prediction results. Therefore, RELAP5 program can be used to simulate and predict Type-I DWO after selecting the interphase friction relationship matching the circuit.

Key words: Density wave oscillation, Slight boiling mode, RELAP5, Natural circulation

收稿日期: 2020-09-15; 修回日期: 2021-06-16

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB190051)

作者简介: 滕辰 (1986—), 男, 博士研究生, 现主要从事反应堆热工水力方面的研究, E-mail: 15692509975@163.com

0 引言

自然循环系统因其固有安全性成为小型模块反应堆设计的重要选择之一，清华大学设计的低温核供热反应堆（NHR）^[1]、普渡大学设计的小型模块沸水堆（NMR-50）^[2]、巴巴原子中心设计的先进重水堆（AHWR）^[3]均采用了主回路全功率两相自然循环设计。其中，NHR有2种运行模式：压水运行和微沸腾运行。相对于压水运行模式，微沸腾运行模式可以提高主回路冷却剂循环流量和出口温度，从而提升功率密度和蒸汽参数，是增强NHR工业竞争力重要途径之一^[4]。然而与自然循环沸水堆类似，NHR的微沸腾运行模式也存在着启动与运行期间的第一类密度波振荡问题。

随着两相自然循环系统在核反应堆设计中的应用，验证和评价 RELAP5 程序对两相自然循环系统的适用性日益增多。Mangal 等^[4]分析了控制体划分对 RELAP5 程序模拟自然循环回路密度波振荡的影响。Rabiee 等^[5]应用 RELAP5 程序分析了热工参数、实验回路几何参数对两相自然循环系统的流动不稳定性的影响。Bertodano 等^[6]总结已有研究发现，基于两流体模型的 RELAP5 程序可以用于模拟自然循环回路发生的密度波振荡。然而，上述研究结果表明，RELAP5 程序计算获得的两相自然循环回路的流量普遍较实验值偏高，模拟结果较实验更加稳定。对于 Type-I 密度波脉动（DWO）不稳定边界的预测，Kumar^[7]等应用 RELAP5 程序获得了 AHWR 相似性实验回路不确定度约为 20% 时的不稳定边界拟合关系式，但无法保证预测结果的保守性；李宗洋等^[8]研究发现 RELAP5 程序预测自然循环棒束通道单相至两相流动不稳定的起始点较实验略不保守。因此，应用 RELAP5 程序定量地估算特定自然循环回路的不稳定边界仍然存在不确定性。

考虑到定量预测 Type-I DWO 不稳定边界对研究 NHR200 微沸腾运行模式非常关键，本文利用 NHR200 的相似性实验回路（HRTL200）评价了 RELAP5 程序预测不稳定边界的能力，分析了进出口阻力系数以及相间摩擦对 RELAP5 程序模拟密度波振荡的影响。

1 HRTL200

微沸腾是指堆芯出口附近主冷却剂发生低干

度饱和沸腾的现象。HRTL200 微沸腾实验^[9]主要用于研究低干度自然循环系统的热工水力特性，其设计出口干度 $X \leq 5\%$ ，运行压力（ p ）范围为 10~40 bar（1 bar=10⁵ Pa）。HRTL200 的设计既要能够模拟 NHR200 主系统的热工水力特性，特别是流动不稳定性，又要便于参数测量和运行调试。为此，在满足单相和两相流动主要相似准则的前提下，HRTL200 采用分置式管路布置，以模拟 NHR200 的一体化布置，其布置如图 1 所示，相应设备尺寸见表 1。采用换热器和冷凝器独立调节 HRTL200 回路的入口温度及系统的 p ；回路中实验本体^[9]由 3×3 棒束结构的电加热器组成，是 NHR200 燃料组件的缩比模型（缩比为 1/16），用于模拟堆芯。沿回路布置的差压计（DP101~DP108）用于测量回路各段的压降以及计算回路的阻力系数（差压计 DP107、DP108）和上升段空泡份额（差压计 DP104、DP105）等参数。

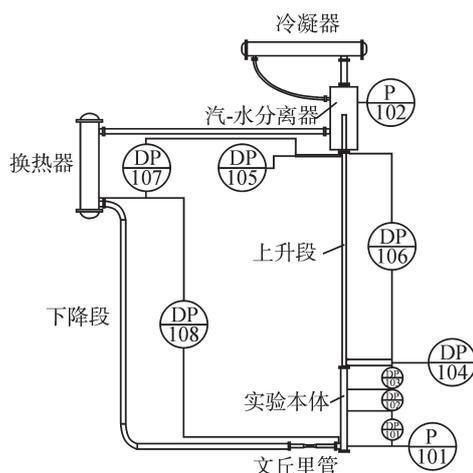


图 1 HRTL200 回路布置图

Fig. 1 Arrangement of HRTL200 Loop

P—压力测点；DP—压差测点

表 1 HRTL200 主要设备部件尺寸

Tab. 1 Dimensions of Main Components of HRTL200

部件名称	内径/mm	外径/mm	长度/mm
上升段	50	57	4990
汽-水分离器	305	325	1446
冷凝器	257	273	2190
换热器	305	325	2715
下降段	100	108	3000~3066
文丘里管	30	—	—
加热棒束（3×3）	—	10	1900

“—”无此项

2 RELAP5 建模

图 2 为 HRTL200 的控制体节点划分图。其中，实验本体的棒束流道、上升段、冷凝器、下降段均通过管型（PIPE）部件模拟；实验本体的电加热器通过热构件模拟并选用带有横向流的垂直棒束模型模拟。由于汽-水分离器内部管段开有大量小孔用于提高汽-水分离效率，因此，本文采用 2 个平行的 PIPE 部件以及横向接管模拟汽-水分离器的液相部分，采用分支（BRANCH）部件模拟汽相空间。时间控制体 201、210 通过时间接管与对应 PIPE 部件连接，通过调节二次侧温度流量来控制一次侧参数。

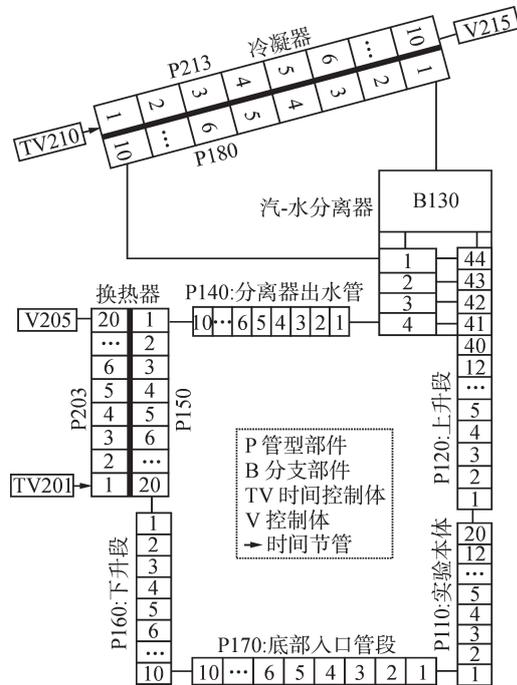


图 2 HRTL200 节点划分
Fig. 2 Node Partition of HRTL200

2.1 边界条件

由于自然循环系统是一个自反馈耦合系统，实验采集的热工水力参数时间序列夹杂含反馈的噪音，呈现出随机扰动。为此，采用傅利叶变换（FFT）来检查实验边界条件的稳定性，排除处在调试状态的实验数据，确保边界条件的有效性^[10]。将实验采集的参数时间序列减去其平均值并除以其波峰与波谷差的平均值后进行 FFT 变换便可得到随机噪音频谱。图 3 为选取相同运行条件下 2 组实验的入口温度和流速数据进行 FFT 变换分析的结果。实验发现，除流速振荡所对应的 2 个特

征频率外，其余的温度噪音频率并未引发相应频率的流速振荡，说明实验的边界参数实现了稳定控制。另外，2 组实验的流速频谱几乎重合但温度噪音存在明显差异，这说明边界参数的随机扰动不会引发流速振荡，回路的稳定性由系统参数决定。

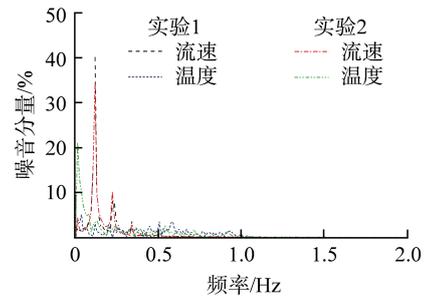


图 3 实验数据 FFT 变换结果
Fig. 3 FFT Transformation Results of Experimental Data

2.2 控制体无关性检验

Mangal 等^[4]研究发现，RELAP5 程序模拟自然循环流动不稳定性与控制体划分存在明显相关性，因此有必要对 HRTL200 的 RELAP5 模型进行网格无关性检验，计算结果见表 2。表 2 针对同一工况选取了 5 种控制体划分方案进行模拟，计算发现，两相区控制体划分对入口流速的平均值影响较小，但对不稳定工况振幅的影响明显。为有效模拟实验回路发生的密度波振荡现象，本文选择实验本体控制体数为 40、上升段控制体数为 120 的网格划分方式。

表 2 HRTL200 控制体网格无关性检验

Tab. 2 Grid Independence Test of HRTL200 Control Volume

控制体数		RELAP5 计算结果	
实验本体	上升段	入口流速/(m·s ⁻¹)	相对振幅/%
10	20	0.841	0.02
20	40	0.847	21.41
40	80	0.848	27.23
40	120	0.851	39.14
60	120	0.854	39.13

3 模拟与分析

本文采用 RELAP5 程序中的控制变量（CNTRLVAR）建立一、二次侧热工水力参数

的控制关系,以模拟通过调节入口过冷度获得的不稳定边界的实验过程。在模拟计算时,RELAP5程序中有2种计算模型可供选择,即非平衡两流体(UVUT)模型和平衡均相流(EVET)模型。UVUT模型考虑了汽-液两相间的相互摩擦,而EVET模型则是将汽-液两相视为均匀混合的流体。表征垂直泡状流及环状流相间摩擦的主要参数为漂移流速度(V_{gj}),EVET模型的 V_{gj} 为0 m/s,而UVUT模型的 V_{gj} 由程序自带的相间摩擦关系式计算得到。因此,上述2种模型可用于分析相间摩擦对RELAP5程序模拟Type-I DWO的影响。此外,对比2种模型可以检验Ambrosini等^[11]分析强迫循环流动不稳定性时获得的结论(EVET模型在估算振荡区间不稳定边界相比UVUT模型更加保守)是否也适用于自然循环系统。

3.1 平均参数

密度波振荡是一种围绕平衡点形成的具有稳定周期的自激振荡^[9]。因此,当运行边界确定时,热工水力参数平均值是稳定的。在 p 为25 bar、热流密度(q)为244 kW/m²工况下,采用RELAP5程序中EVET、UVUT模型计算获得平均参数(入口流速和上升段空泡份额)并与实验值进行对比,如图4所示。由图4可知,随着入口过冷度的减小,回路会从单相自然循环流动转换至两相自然循环流动。图4b中,在过冷度小于60 K时,上升段开始有空泡产生,说明回路开始进入两相自然循环流动。在单相区,2种模型计算获得的入口流速与实验值的最大相对偏差小于15%;由于单相区自然循环流动不存在相间摩擦,此时,UVUT、EVET模型计算结果是一致的。进入两相区后,UVUT模型与EVET模型的计算结果开始出现差别,其中UVUT模型计算的入口流速与实验值的最大相对偏差约为20%,空泡份额的相对偏差小于40%,而EVET模型的计算偏差更大。总体说来,RELAP5程序计算的自然循环回路平均参数随过冷度的变化趋势与实验结果基本相符,并且考虑相间摩擦的UVUT模型计算结果要优于EVET模型。值得一提的是,虽然考虑相间摩擦的UVUT模型计算结果更好,但仅仅从平均参数的模拟结果无法直接判断RELAP5程序中所使用的相间摩擦关系式计算的 V_{gj} 是否能准确描述实验的相间摩擦力,阻力系

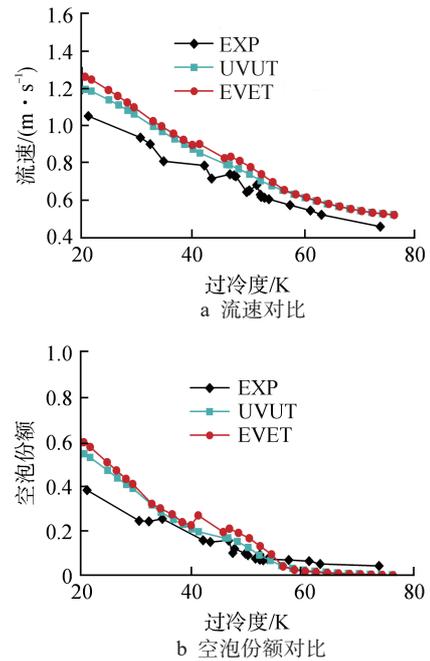


图4 RELAP5模拟平均参数与实验值的比较
Fig. 4 Comparison of RELAP5 Simulated Average Parameters and Experimental Values

EXP—实验值; UVUT、EVET——UVUT、EVET模型计算结果; 其余类同

数的不确定性也会影响平均参数的模拟从而干扰对相间摩擦力的评估。

3.2 不稳定边界

工程应用中,一般将 $\Delta G/G > 10\%$ (ΔG 为振荡流速波峰与波谷差的平均值; G 为平均流速)作为判定发生流动不稳定的指标^[12]。图5为 q 为244 kW/m²时不同 p 下RELAP5程序计算结果与实验值的不稳定边界对比。由图5可知,当 p 、 q 一定时,随着过冷度的降低,自然循环流动会从单相稳定区过渡至两相不稳定区(第一类密度波振荡区),最终进入两相稳定区。因此,可采用两相不稳定区边界所对应的过冷度值来描述回路的不稳定边界。此外还可看出,采用RELAP5程序的2个模型计算获得的流速相对振幅与实验值存在明显的偏差,应用数值程序精确地模拟不稳定流动的振幅仍是当前研究的一个难题^[6]。

相对于振幅,工程上更加关注运行区间的稳定性。 p 分别为10 bar和25 bar时(图5a、图5b),采用RELAP5程序的2个模型预测的不稳定边界过冷度值与实验结果的偏差约为3 K。 p 为40 bar时(图5c),虽然EVET模型计算的

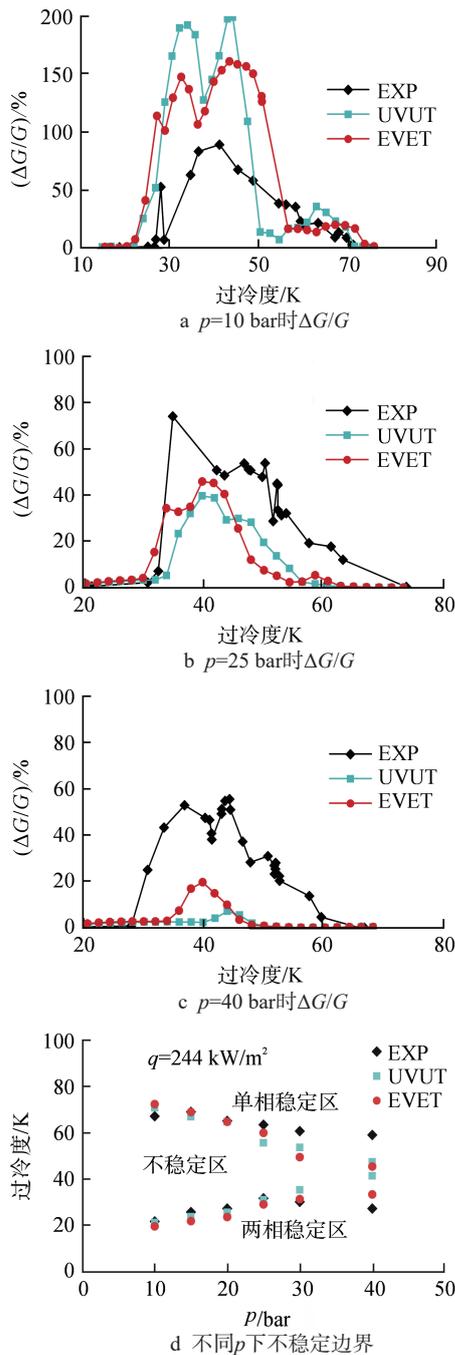


图 5 RELAP5 计算结果与实验结果的不稳定边界对比
Fig. 5 Unstable Boundary Calculated by RELAP5 Against with That of the Experiment

相对振幅值比 UVUT 模型的计算值大，但 2 个模型均不能准确预测回路的不稳定边界，因而也无法满足预测的保守性。也就是说，前文提到的 Ambrosini 的结论并不适用于自然循环回路。图 5d 是在 q 一定、不同 p 下获得的不稳定边界，由此可知 RELAP5 程序不能保守预测 HRTL200

回路实验在高压区 (>25 bar) 的不稳定边界。

3.3 相间摩擦不确定性分析

3.3.1 振荡波形 在分析相间摩擦不确定性的影响前，有必要确认 RELAP5 程序模拟的流动不稳定性的合理性。图 6 是 p 为 25 bar、 q 为 244 kW/m²、入口温度 175 °C 的工况条件下，入口流速的瞬态波形及相应的频谱图。由图 6a 可知，RELAP5 程序计算的入口流速与实验数据的振荡波形均随时间呈类正弦变化。然而，仅凭振荡波形的形状、周期、振幅还无法判断 RELAP5 程序是否能模拟实验的不稳定现象。若进一步对比频谱 (图 6b) 可以发现，模拟结果及实验数据的特征频率接近，且数目一致均为 2 个。根据微分方程解的叠加原理，特征谐波可看作描述系统方程的解，其是振荡机理的表现形式。由此，可大致判断 RELAP5 程序能够近似描述实验回路的不稳定特性。然而，从特征谐波的相对振幅、频率大小看，RELAP5 程序的模拟结果与实验数据仍存在一些偏差，这说明影响不稳定特性的一些参数并没有被准确描述，如阻力系数、相间摩擦等。在计算条件相同的情况下，鉴于考虑相间摩擦的 UVUT 模型模拟计算的特征谐波频率较 EVET 模型更加接近实验数据，初步推断增大相间摩擦即增大漂移流速度可以改善程序对实验的

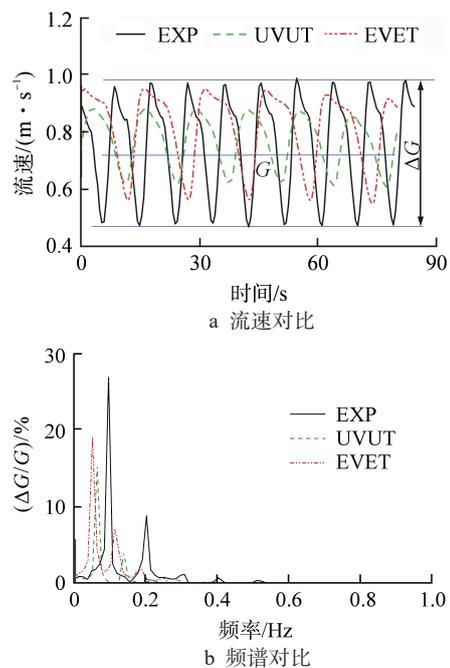


图 6 流速振荡波形及频谱
Fig. 6 Flow Rate Oscillation Waveforms and Spectrums

模拟。因此，有必要分析相间摩擦不确定性对模拟的影响。

3.3.2 阻力系数 在分析相间摩擦的影响前，需要先厘清阻力系数不确定性对模拟的影响。为此分析了入口阻力系数 (K_{in}) 不确定度为 20%、出口阻力系数 (K_{out}) 不确定度为 100% (上升段壁面摩擦压降的不确定性等效至出口) 时对模拟计算的影响。 K_{in} 为 25、 K_{out} 为 2 以及考虑其不确定度时，阻力系数不确定性对模拟结果的影响见图 7。

由图 7a、图 7b 可以发现，当增大阻力时，流速计算值虽会趋向实验值，但空泡份额计算值则偏离实验值。反之，则是空泡份额计算值趋向实验值而流速计算值偏离实验值。因此，通过修正阻力系数无法解决 RELAP5 程序计算的流速、空泡份额均比实验值偏大的问题。也就是说，RELAP5 程序对 HRTL200 回路实验模拟的偏差不仅是由阻力系数的不确定性引起的。图 7c 中阻力系数对 RELAP5 程序计算不稳定边界及振幅的影响趋势与已有实验、数值研究的结论是一致的^[5,9,13]，由此可知，RELAP5 程序能够模拟自然循环系统 Type-I DWO 的一般特性，且准确的阻力系数可以改善对不稳定边界的模拟。图 7d 中，在同一过冷度、不同阻力系数下，RELAP5 模拟的不稳定工况周期几乎不变，因此，RELAP5 程序模拟振荡工况时产生的周期偏差不是阻力系数的不确定性造成的。结合图 6 可知，相间摩擦的不确定性对 RELAP5 程序模拟 HRTL200 回路流动不稳定性的影响是独立于阻力系数的不确定性而存在的。

3.3.3 相间摩擦修正 前文推断 RELAP5 程序未能准确计算 HRTL200 上升段的相间摩擦。实际上，对于管径小于 8 cm、 p 小于 40 bar 的管形流道，RELAP5 程序采用的漂移流关系式 (EPRI) 计算的 V_{gj} 为 0.01~0.1 m/s。然而，在几乎相同条件下，Zuber^[14] 实验得到的 V_{gj} 约为 0.5 m/s。可见，EPRI 关系式严重低估了 HRTL200 上升段的漂移流速度。本文采用 Zuber 实验测得的 V_{gj} 来模拟 p 为 40 bar、 q 为 244 kW/m² 的工况，发现计算的平均参数会更好地区近实验值。不稳定边界及周期的模拟结果也得到明显改进，如图 8 所示。因此，准确的相间摩擦关系式可以改善模拟结果。

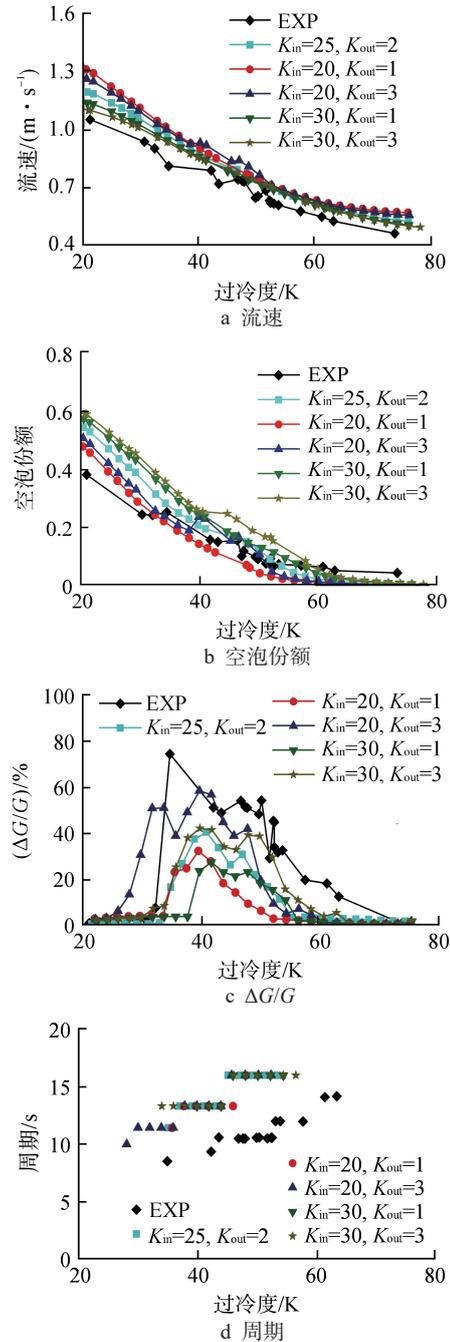


图 7 阻力系数不确定性对各模拟参数的影响
Fig. 7 Influence of Resistance Coefficient Uncertainties on Simulation Parameters

4 结论

应用 HRTL200 实验评价并证明了 RELAP5 程序能够模拟自然循环回路 Type-I DWO 的一般特性。分析阻力系数、相间摩擦对程序模拟回路不稳定特性的影响得到如下结论：

(1) EVET 模型不考虑相间摩擦，其模拟的

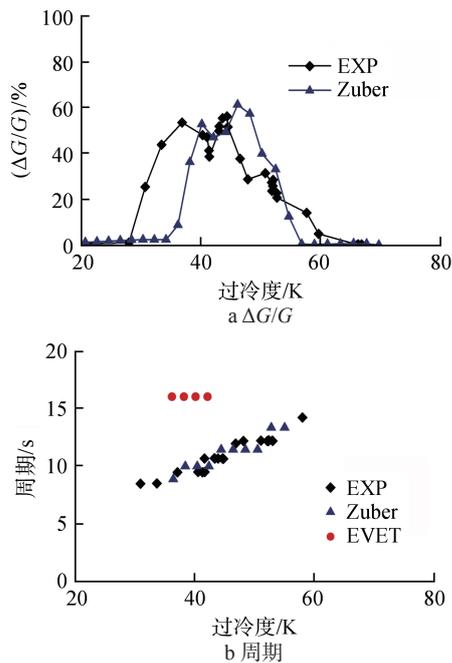


图 8 漂移流速对 RELAP5 模拟结果的影响
Fig. 8 Influence of Drift Velocity on RELAP5 Simulation Results

平均参数（流速、空泡份额）及振荡周期较 UVUT 模型误差更大。

(2) 准确的阻力系数可以改善对不稳定边界的模拟。

(3) 相间摩擦对回路不稳定性的影响区别于阻力系数的影响而单独存在。对于 HRTL200 实验的模拟，合理修正相间摩擦可以明显改善模拟结果。

参考文献：

[1] 王大中, 马昌文, 董铎, 等. 自然循环一体化式低温供热堆[J]. 核动力工程, 1988, 9(1): 1-5.
[2] SINHA R K, KAKODKAR A. Design and development of the AHWR—the Indian thorium fuelled innovative nuclear reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236(7-8): 683-700.
[3] ISHII M, SHI S B, YANG W S, et al. Novel modular

natural circulation BWR design and safety evaluation[J]. Annals of Nuclear Energy, 2015(85): 220-227.
[4] MANGAL A, JAIN V, NAYAK A K. Capability of the RELAP5 code to simulate natural circulation behavior in test facilities[J]. Progress in Nuclear Energy, 2012(61): 1-16.
[5] RABIEE A, MIRZAEI M M, NEMATOLLAHI M R, et al. Experimental and numerical investigation of natural circulation stability of the SHUNCL thermal-hydraulic loop[J]. Progress in Nuclear Energy, 2016(93): 386-396.
[6] DE BERTODANO M L, FULLMER W, CLAUSSE A, et al. Two-fluid model stability, simulation and chaos[M]. Cham: Springer, 2017: 225-245.
[7] KUMAR P P, KHARDEKAR A, IYER K N. Experimental and numerical investigation on a two-phase natural circulation test facility[J]. Heat Transfer Engineering, 2012, 33(9): 775-785.
[8] 李宗洋, 高璞珍, 王强, 等. 自然循环棒束形通道流动不稳定性起始点研究[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(2): 242-249.
[9] 吴少融, 贾海军, 李怀萱, 等. 低压、低干度自然循环系统两相流动特性[J]. 核动力工程, 1997, 18(4): 319-324.
[10] 刘洋, 杨星团, 贾海军. 基于脉动比预处理FFT的密度波不稳定性边界研究[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(12): 2154-2159.
[11] AMBROSINI W, FERRERI J C. Analysis of basic phenomena in boiling channel instabilities with different flow models and numerical schemes[C]//Proceedings of the 14th International Conference on Nuclear Engineering. Miami, Florida, USA: ASME, 2006: 1-12.
[12] 吴少融, 贾海军, 李怀萱, 等. 低压低干度自然循环汽水两相流流量振荡特性[J]. 原子能科学技术, 1997, 31(1): 23-27.
[13] PRASAD G V D, PANDEY M, KALRA M S. Review of research on flow instabilities in natural circulation boiling systems[J]. Progress in Nuclear Energy, 2007, 49(6): 429-451.
[14] ZUBER N, FINDLAY J A. Average volumetric concentration in two-phase flow systems[J]. Journal of Heat Transfer, 1965, 87(4): 453-468.

(责任编辑: 周 茂)