

A Comparison Study of Once-Through Steam Generation Calculation with the Different Fluid Dynamic Models of the RELAP5 Code

Jiange Liu, Changying Li, Jun Chen, Xiaohua Jiang, Jiliang Sun

China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen Guangdong
Email: kk12357890@126.com

Received: Jun. 18th, 2015; accepted: Jul. 6th, 2015; published: Jul. 9th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

Abstract

The thermal hydraulic characteristic of the once-through steam generation is calculated by using the four type fluid dynamic models of RELAP5 code. The results are compared with the experiment data. The results show that: the trends and calculated values of the primary single-phase flow parameters are close to the experiment data. The thermal hydraulic trends of the superheated steam are similar, but the thermal parameter values, such as pressure, temperature, quality and heat flux, exist some differences. Based on the comparison with experiment data and analysis, to better calculate steam generation transient process and parameters, the first choice is nonhomogeneous and nonequilibrium model, and the second is the homogeneous and nonequilibrium model. The nonhomogeneous and equilibrium model, or the homogeneous and equilibrium model, are not recommended.

Keywords

RELAP5 Code, Homogeneous, Equilibrium, Nonhomogeneous, Nonequilibrium

RELAP5程序不同流体动力学模型计算直流蒸汽发生器比较研究

刘建阁, 李昌莹, 陈 军, 蒋晓华, 孙吉良

中科华核电技术研究院, 广东 深圳

Email: kk12357890@126.com

收稿日期: 2015年6月18日; 录用日期: 2015年7月6日; 发布日期: 2015年7月9日

摘要

本文采用RELAP5程序的四种不同流体动力学模型计算了蒸汽产生过程的热工水力特性, 比较了四种模型之间的差异, 采用直流蒸汽发生器实验数据进行模型的准确性比较和分析, 结果表明: 四种模型计算一次侧单相液流动与换热过程的热工特性趋势一致、数值大小基本吻合; 四种模型计算两相过热蒸汽产生过程趋势一致, 但热工参数压力、温度、含汽率、热流密度的数值存在差异。通过与实验数据的对比和分析, 为准确计算直流蒸汽发生器的瞬态过程, 推荐优先选用非均匀、非平衡态模型, 其次为均匀、非平衡态模型, 不推荐采用均匀、平衡态模型或非均匀、平衡态模型。

关键词

RELAP5程序, 均匀, 平衡态, 非均匀, 非平衡态

1. 引言

RELAP5 程序是进行轻水堆冷却剂系统事故瞬态分析的最佳估算程序, 它采用一维、瞬态、两流体六方程模型来模拟轻水堆的热工水力系统瞬态过程, 该程序基于完整的非均匀、非平衡态两相流系统模型, 并采用快速的、半隐式数值方法来进行系统瞬态计算[1]-[3]。程序开发者目标是直接采用非均匀、非平衡态两流体模型来描述汽液两相流动与传热过程, 它把两相流的汽液两相看作两种流体, 分别对每种流体给出一组质量、能量和动量方程, 对两相共有六个方程组成完整场平衡方程组, 由于它能够分别确定两相流场中每相的局部参量, 并可以分析两相处于非均匀、非平衡态下的各种工况(如: 液相欠热, 汽相过热, 两相温度不等且不等于饱和温度, 两相速度不相等), 因此, 这是一种完善的两相流数学物理模型[1] [4]。

尽管 RELAP5 程序以两流体不平衡态流体动力学模型为基础, 但其中还包括了一些较简单的流体动力学模型, 如采用单速度动量方程的均相流模型、假定汽液两相处于热力平衡的平衡态模型和假定无摩擦的无摩擦流动模型, 可供使用者单独选用或组合选用, 这样做的目的在于使该程序能与以均相平衡态模型为基础的老模型如 RELAP4 的结果进行比较[1] [5]。因此, 用户可以选择的模型有[6]: 1) 均匀、平衡态模型, 简称 HEM; 2) 非均匀、平衡态模型, 简称 NHEM; 3) 均匀、非平衡态模型, 简称 HNEM; 4) 非均匀、非平衡态模型, 简称 NHNEM。这四种模型中, 当汽液两相之间速度差异比较大时, 采用 HEM 或 HNEM 模型的计算结果就可能不准确; 当汽液两相之间热力平衡状态差异比较大时, 采用 HEM 和 NHEM 模型的计算结果就可能不准确。

一般情况下, 采用 RELAP5 程序计算两相换热问题时, 流体模型会选择非均匀、非平衡态模型选项, 较少选择 HEM 模型、NHEM 模型、HNEM 模型, 现有文献中针对该程序中四种模型的对比研究和差异性分析较少。为了详细分析和比较四种不同模型选项对直流蒸汽发生器热工计算结果的影响, 指导两相流系统建模分析, 本文以直流蒸汽发生器实验装置实验数据为基准进行四种模型的计算研究, 比较程序中四种流体动力学模型在计算蒸汽产生过程中的敏感性差异, 从而为直流蒸汽发生器的设计和评估工作提供模型选择指导方案和参考。

2. 计算模型

本文以文献[7]所述的垂直直管式直流蒸汽发生器试验装置为参考计算研究对象，见图 1 所示。该实验装置的传热管采用三角形排列的因科镍管，单根传热管外径为 15.87 mm，内径为 13.94 mm，栅距为 22.2 mm，管长为 15.9 m，一次侧的水从管内由上向下流动，二次侧的水从管外由下向上流动。实验工况边界条件为：一次侧：入口温度 331.7℃ (604.85 K)，流量 11.77 kg/s，压力 15.3 MPa；二次侧：给水温度 251.7℃ (524.85 K)，流量 1.18 kg/s，压力 7.4 MPa。

根据文献[7]在研究直流蒸汽发生器时推荐的计算方法和节点数目敏感性分析结论，采用平均通道分析方法，将一、二回路分别看作是两个独立的平均通道，两个平均通道之间的热量传递通过热构件来模拟，建立 RELAP5 程序的计算节点，一回路和二回路水力学控制体节点取 20 个，热构件取 20 个节点，节点图见图 2 所示。TDV 表示时间相关控制体，TDJ 表示时间相关接管，S 表示单一控制体，P 表示管型部件，A 表示环形部件，J 表示普通接管，灰色模拟管壁换热。左侧控制体(200、204、208、212、216)和左侧接管(202、206、210、214)模拟二回路侧流体，流动方向从下至上，右侧控制体(100、104、108、112、116)和右侧接管(102、106、110、114)模拟一回路侧流体，流动方向从上至下，关键换热区划分为 20 个节块。

根据程序建模指导手册，通过设定控制体(单一控制体、管型控制体、环形控制体、分支部件控制体、时间相关控制体)的模型选项来选择调用平衡态或者非平衡态模型选项，通过设定接管(单一接管、分支部件接管)的模型选项来选择调用均匀或者非均匀模型选项。分别编写：均匀、平衡态流体动力学模型输入计算卡(HEM)，非均匀、平衡态流体动力学模型输入计算卡(NHEM)，均匀、非平衡态流体动力学模型输入计算卡(HNEM)，非均匀、非平衡态流体动力学模型输入计算卡(NHNEM)。而文献[7]仅仅采用了 NHNEM 模型进行计算，并给出了该模型的详细结果，并没有给出其余三种流体动力学模型的计算分析结果，本文则详细计算了四种流体动力学模型，并比较了四种模型选项在计算直流蒸汽发生器问题方面的差异。

3. 计算结果与分析

针对该直流蒸汽发生器实验模型工况，本文采用四种模型进行了计算，提取压力、温度、空泡份额、壁面热流密度、非均匀模型的汽相与液相温度差、二次侧汽相与液相温度的计算结果进行了比较分析，结果如图 3~8 所示。

图 3 给出了换热管一次侧流体的压力随垂直高度的变化趋势，由于一次侧为高温高压单相水，没有发生相变过程，四种模型压力分布计算结果与趋势基本吻合，查计算结果其它参数发现：一次侧控制体内流体的空泡份额均为零，表明一次侧为单相水流动换热，四种模型计算同一位置相同状态参数的流体的速度是一致的，特征流速反映为液相，汽相流速为表观参量，实际应取液相的流速；同样，一次侧流体的实际温度应取液相的温度，液相温度随高度的减小而降低，并且温度趋势和结果与实验值基本吻合(同一位置处温度误差为 5℃ 左右，见图 5 一次侧流体温度)，汽相温度均采用各个位置下相应流体压力下的饱和温度。

图 4 给出了二次侧压力沿着垂直高度方向上的变化趋势，由于二次侧发生相变过程，不同模型反馈出的两相流速大小不同、热力状态参数不同，空泡份额不同，导致两相与壁面、两相之间摩擦力计算不同，摩擦压降、加速压降、提升压降呈现出差异，因而压力变化出现明显的差异特征。一般情况下，在持续温度控制表面加热流体情况下，沿着流动方向上单相蒸汽的压力是平滑下降的趋势(本文研究范围内)，而两种平衡态模型 HEM 模型和 NHEM 模型在高蒸汽含量区(环状流、弥散流型)表现出异常的内凹点特征，

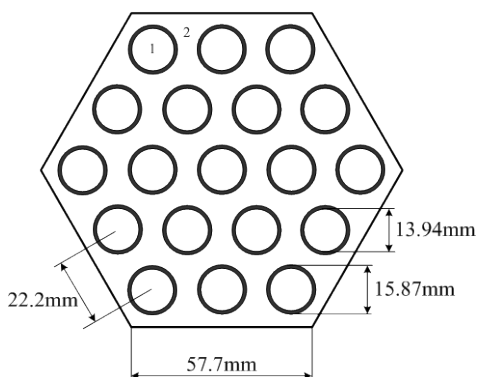


Figure 1. Curve: cross section of the once-through steam generator
图 1. 直流蒸汽发生器横断面示意图

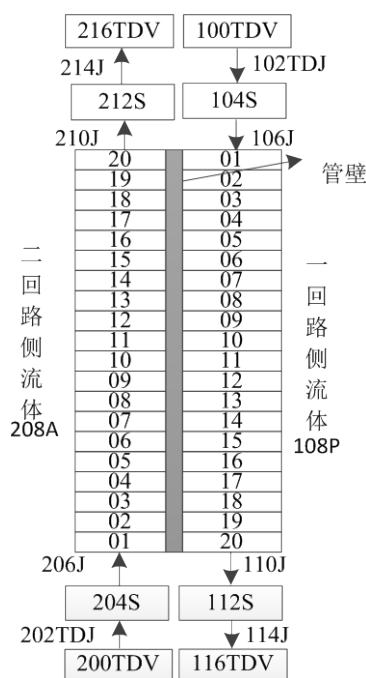


Figure 2. Curve: calculation nodes using average channel with RELAP5 code
图 2. RELAP5 程序平均通道计算节点示意图

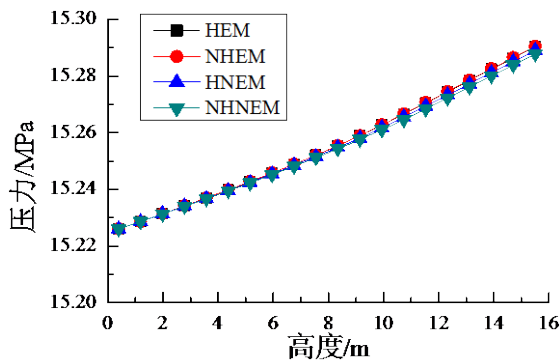


Figure 3. Curve: primary pressure comparison
图 3. 一次侧压力比较图

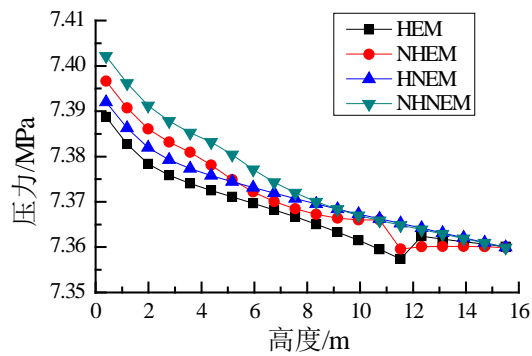


Figure 4. Curve: secondary pressure comparison

图 4. 二次侧压力比较图

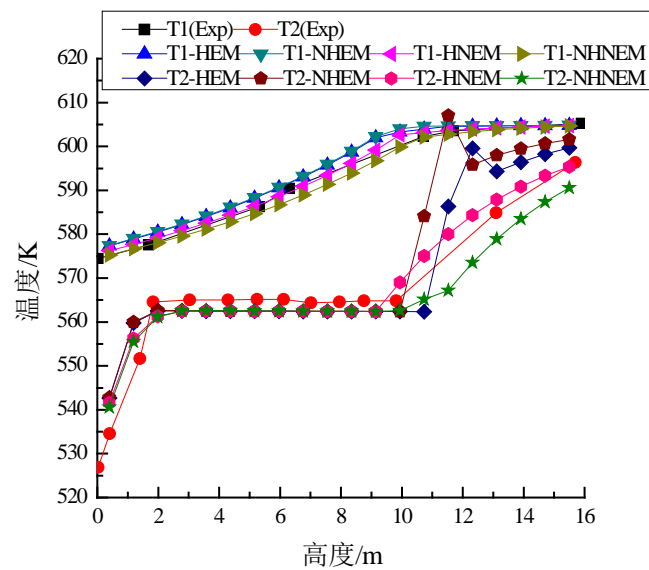


Figure 5. Curve: fluid temperature comparison

图 5. 流体温度比较图

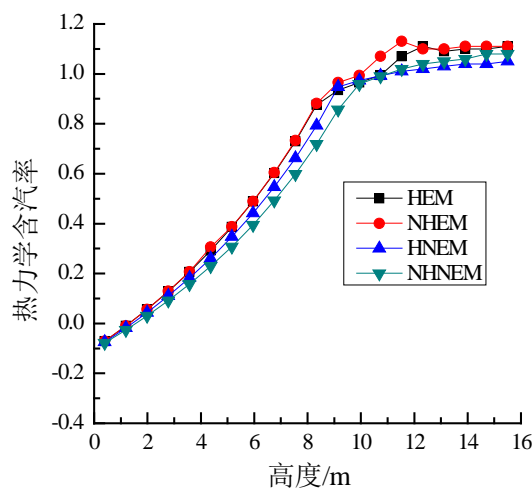


Figure 6. Curve: thermal quality of secondary fluid comparison

图 6. 二次侧流体热力学含汽率比较图

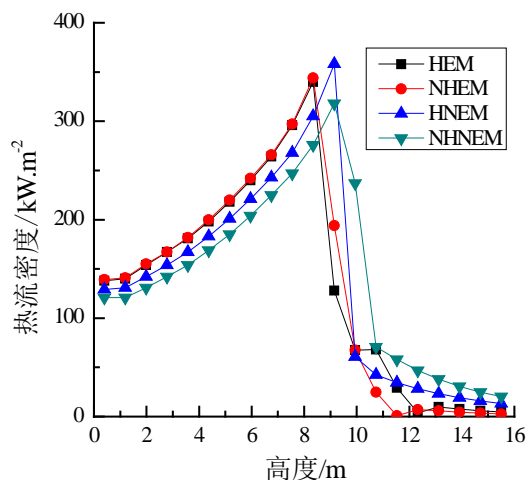


Figure 7. Curve: secondary wall heat flux comparison
图 7. 二次侧管壁面热流密度比较图

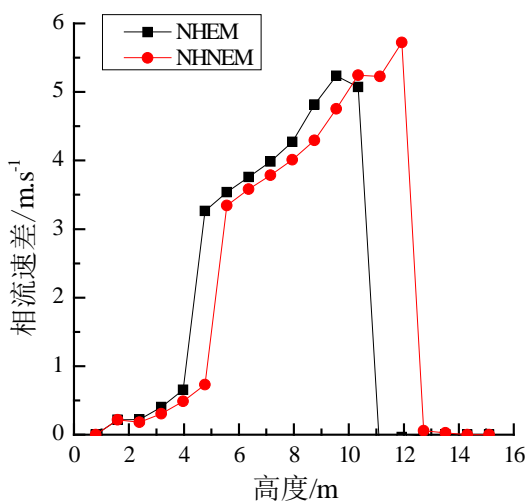


Figure 8. Curve: two-phase velocity difference comparison
图 8. 两相之间速度差比较

而非平衡态模型 HNEM 模型和 NHNEM 模型表现出正常的分布特征,说明高含汽率区(弥散流)汽液两相之间的非平衡效应更加明显,采用非平衡态模型分析更准确。

图 5 给出了直流蒸汽发生器一、二次侧的流体温度随垂直高度的变化趋势,单从与实验对比结果来看,一次侧单相水的温度值及分布趋势与实验值及分布趋势相吻合度较高,二次侧的温度分布趋势与实验趋势大致一致,三个区段(单相水区、饱和沸腾区、单相汽区)温度特征趋势符合实际直流蒸汽发生器蒸汽产生侧流体的温度分布规律,但不同模型表现出各自不同特点: 1) HEM 模型预测蒸干点位置比实验值滞后,在过热蒸汽区温度表现出异常状况,突然出现峰值,然后又下降,出口蒸汽温度明显高于实验值; 2) NHEM 模型预测蒸干点位置与实验值吻合,但在过热蒸汽区温度同样表现出异常状况,突然出现峰值,然后又下降,出口蒸汽温度明显高于实验值; 3) HNEM 模型预测蒸干点位置比实验值超前,过热蒸汽区温度趋势与实验值最为接近,出口蒸汽温度与实验值误差最小,绝对误差为 2℃; 4) NHNEM 模型预测蒸干点与实验值吻合,过热蒸汽区温度趋势与实验值较接近,出口蒸汽温度与实验值存在误差,绝对误

差为 5℃。根据以上分析,可得出结论,采用 RELAP5 程序计算两相沸腾换热及过热蒸汽产生过程,特别是液相蒸干过程时两相非平衡效应比较明显,采用平衡态模型存在较大误差,应采用非平衡态模型。

图 6 给出了直流蒸汽发生器二次侧的热力学含汽率随垂直高度的变化趋势,四种模型计算出的热力学含汽率分布趋势一致,数值大小略有差异。基本涵盖单相过冷水到过热蒸汽的流体热力学状态,即:单相液、过冷沸腾、沸腾、过热蒸汽,其中平衡态模型在过渡至过热蒸汽区时存在明显的异常峰值特性,这与温度表现特征一致,表明:平衡态模型在分析饱和和沸腾至过热蒸汽时存在不确定性,非平衡态模型表现特征符合正常规律。

图 7 给出了直流蒸汽发生器二次侧管壁面热流密度随垂直高度的变化趋势,四种模型计算出的壁面热流密度分布趋势是一致的。单相流体进入饱和沸腾区,换热系数逐渐增大,热流密度逐渐升高;在旺盛的泡核沸腾区,热流密度达到最大值;在膜态沸腾及之后的过热蒸汽区,换热系数急剧下降,热流密度逐渐降低至很低水平。四种模型计算出的热流密度沿高度方向上的分布趋势与数量级均符合强制对流沸腾曲线特征。其中,平衡态模型(HEM、NHEM)计算出的壁面热流密度非常接近,非平衡态模型(HNEM、NHNEM)计算出的壁面热流密度比较接近。考虑非均匀模型后,流速分布表现出差异,换热系数大小表现出不同量值,壁面热流密度因此有所差异。

图 8 给出了非均匀流模型(平衡态模型和非平衡态模型)两相速度之差比较,由于均匀流采用单速动量方程,汽液相流速是相同的,速度之差为零,这里不再进行比较。通过非均匀流模型的两相速度差值比较可发现:在过冷沸腾区、饱和沸腾区、高蒸汽含量区,两相之间的非均匀混合效应已经比较明显,特别是沸腾区域和高含汽率区域,两相之间的速度偏差较大,气泡的流动速度与液相之间存在明显的差异,这种差异已经在很多的蒸汽发生器中被观察到,因此,非均匀模型更能够准确反映实际状况。而在程序模型中,两相之间的速度不均匀是通过动量方程模型来刻划的,均匀流模型中的汽液两相采用了单速动量方程,非均匀流的汽液两相分别采用各自独立的动量方程,两相之间的速度差异通过界面动量传递来描述。

综合以上分析及两相沸腾过程典型的非平衡、非均匀特征可知,在采用 RELAP5 程序研究、分析两相流动与换热过程、直流蒸汽发生器热工水力瞬态特性时,应考虑两相温度的非平衡效应和速度的非均匀效应,优选流体动力学模型为非均匀、非平衡模型选项,其次为均匀、非平衡模型选项。

4. 结论

采用 RELAP5 程序的四种流体动力学模型(HEM、NHEM、HNEM、NHNEM)对直流蒸汽发生器实验装置进行了敏感性分析,比较了 RELAP5 程序四种流体动力学模型计算过热蒸汽的特性,并与实验值进行了比较,结果表明:

- 1) 四种模型计算单相液的流动与换热相关热工参数(温度、压力、热流密度)的趋势一致、结果与实验值比较接近(同一高度方向上最大温度误差为 5℃);
- 2) 四种模型计算过热蒸汽产生过程中的流动与换热相关热工参数(温度、压力、空泡、热流密度)的总体趋势一致,但在局部热工参数的表现特性上存在着差异,在过热蒸汽区,平衡态模型(HEM、NHEM)计算出的流体温度变化趋势与数值与实验偏离较大,非平衡态模型(HNEM、NHNEM)计算出的流体温度分布趋势与试验值较为吻合;
- 3) 在两种非平衡态模型中,过热蒸汽区 HNEM 模型的温度计算结果更接近实验,但预测的蒸干点位置比实验值超前, NHNEM 模型的温度计算结果接近实验,预测的蒸干点位置与实验最接近;

综上分析,在采用 RELAP5 程序进行蒸汽产生过程复杂的两相热工水力瞬态分析时,首选采用非均匀、非平衡态模型选项(NHNEM),其次可考虑均匀、非平衡态模型(HNEM),不推荐采用均匀、平衡态

模型(HEM)或非均匀、平衡态模型(NHEM)。

本文研究工作有助于理解 RELAP5 程序中四种流体动力学模型选项在计算过热蒸汽参数方面的差异,对于正确选用系统分析程序的流体动力学模型具有实际指导意义。

基金项目

受国家 863 核安全研究主题项目《压水堆核电厂安全级冷却链改进研究》课题经费支持。

参考文献 (References)

- [1] Information Systems Laboratories, Inc. (2001) RELAP5/MOD3.3 code manual volume I: Code structure, system models, and solution methods.
- [2] Allison, C.M. and Hohorst, J.K. (2010) Role of RELAP/SCDAPSIM in nuclear safety. *Science and Technology of Nuclear Installations*, **2010**, Article ID: 425658, 1-17. <http://dx.doi.org/10.1155/2010/425658>
- [3] 曹栋兴 (1992) 核反应堆设计原理. 原子能出版社, 北京.
- [4] 刘建阁, 彭敏俊, 张志俭, 黎华 (2009) 套管式直流蒸汽发生器稳态特性分析. *哈尔滨工程大学学报*, **7**, 757-762.
- [5] 朱继洲 (1999) 核反应堆安全分析. 西安交通大学出版社, 西安.
- [6] Information Systems Laboratories, Inc. (2001) RELAP5/MOD3.3 code manual volume II: Users guide and input requirements.
- [7] 刘新凯, 刘建阁, 彭敏俊 (2012) 基于 RELAP5 程序的直管式直流蒸汽发生器敏感性分析. *原子能科学技术*, **9**, 1088-1096.