

基于 CATHARE 程序的自然循环 静态流量漂移模拟

张 妍，闫 晓，彭传新，张 震

中国核动力研究设计院中核核反应堆热工水力技术重点实验室，成都，610041

摘要：针对中低压自然循环系统静态流量漂移现象的特点，利用大型系统热工程序 CATHARE 对不同压力和阻力分布下的自然循环系统进行模拟分析，探索静态流量漂移的影响因素。分析结果表明，同等过冷度条件下，低压更易诱发静态流量漂移；加热段出口阻力分布对阻力影响较大。同时，结合计算数据分析系统静态分岔及迟缓现象。

关键词：CATHARE 程序；自然循环系统；静态流量漂移

中图分类号：TK124 文献标志码：A

0 前 言

自然循环系统的安全性和稳定性一直备受关注。研究表明：稳态自然循环流动系统受到瞬时扰动后，流量会发生小幅变化，出现驱动力和阻力不匹配现象，从而造成系统的热工水力参数发生非周期性漂移，进入新的运行工况后，无法回到原来的稳定状态，而是在这一新的状态下稳态运行，这种流动不稳定情况称为静态流量漂移^[1-2]。

自然循环静态流量漂移发生过程中，系统流量下降幅度明显，并有可能引起剧烈振荡，对反应堆安全造成威胁。有关这一现象的机理剖析、试验和数值计算工作等都有必要深入开展，才能更好地掌握静态流量漂移特性的规律和影响因素，以便在设计中尽量避免此类现象的发生^[3]。本文采用系统热工水力计算程序 CATHARE 模拟中低压自然循环系统，分析发生静态流量漂移的规律及影响因素。

1 CATHARE 程序简介

CATHARE 程序是由法国原子能研究中心、法玛通和法国电力公司联合开发的用于压水堆安全分析的大型热工水力分析程序。它以两流体六方程模型为基础，采用 Fortran77 语言作为模块化程序编辑语言开发，具有丰富的与热工水力分析相关的结构模块，可以模拟反应堆一、二回路系

统的稳态或瞬态事故工况。本文使用的程序版本为 CATHARE2.5/Mod2.1。

2 计算结果分析

2.1 模拟对象及程序建模

采用 CATHARE 程序对中、低压自然循环回路系统进行模拟；该系统主要由一、二回路系统以及相应的压力安全管线系统组成。其中，一回路系统为自然循环闭式回路，没有主泵，主要依靠冷热段密度差形成的驱动力克服系统中的阻力带动冷却剂的流动；回路采用氮气稳压，主要设备有加热段、换热器等。上升段和下降段的管径均为 $\phi 25$ mm，加热段与换热器之间的几何中心位差为 2.8 m。加热段内安装一个轴向位置可以调节的阻力件，用以分析阻力分布对流动特性的影响。二回路系统的主要作用是通过换热器的二次侧与一回路进行热交换。

图 1 为二回路 CATHARE 程序模拟该自然循环系统的计算模块图，流体由水平段(LWPLEN)进入加热段后温度升高，随后流经上升段和顶部后进入换热器一次侧进行热交换，冷却后的介质经过下降段又流回 LWPLEN 中完成一次循环流动。稳压器和波动管则共同表示压力安全系统。在图 1 的二回路 CATHARE 程序计算模块图中，换热器二次侧、源和汇分别表示二回路进出

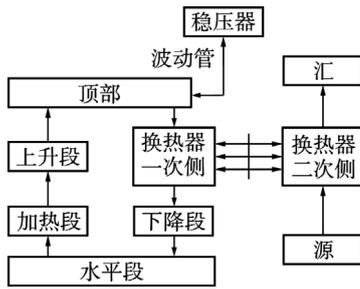


图1 二回路CATHARE程序计算模块图

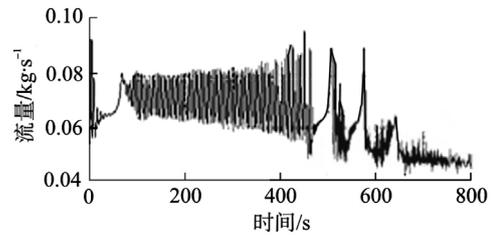
Fig. 1 CATHARE Nodalization of the Secondary System

口边界条件，根据计算工况分别进行定义。计算时，假设所有节点都不与外部环境发生热交换，即认为没有热损失。

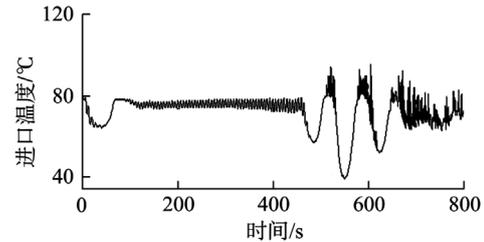
2.2 计算结果与分析

2.2.1 稳态工况 在自然循环系统中，阻力、冷热芯高度差以及系统压力是影响模拟结果的关键要素。阻力包括摩擦阻力及形状阻力^[4]；针对本文计算的试验装置和流量范围，当模拟工况为单相自然循环时，以形状阻力为主；当模拟工况为两相自然循环时，两相摩擦压降占较大份额；由于两相流动的压降比较复杂，与流型判别以及经验模型有关，CATHARE 程序中采用内部逻辑模块自行判别流型并选择合适的摩擦压降计算公式。通过 CATHARE 程序计算，获得系统压力为 0.91 MPa、加热功率为 13.6 kW 时，系统的稳态热工参数分别为：加热段进口温度 92.4、加热段出口温度 143.5、自然循环流量 0.063 kg/s。

2.2.2 自然循环静态流量漂移 在建立稳态工况的基础上，利用程序计算了 19 组瞬态工况。根据静态流量漂移的理论，自然循环系统存在所谓的“迟滞效应”，因此计算时选择了功率增长和功率减小 2 种不同的增减曲线：定义程序稳态时的功率为“起始功率”，定义实验工况中出现自然循环静态流量漂移现象的加热功率值（考虑实验的热平衡后）为“实验功率”，当“起始功率”小于“实验功率”时，采用功率上行方式计算系统的变化情况；当“起始功率”大于“实验功率”时，采用功率下行方式计算系统的变化情况，加热功率按照 1 kW 的步长稳步变化。在 0.91 MPa 压力下，加热功率按照 1 kW 步长由 10.6 kW 上升至 13.9 kW 的过程中，出现了自然循环静态流量漂移现象，并由此诱发了动态流动不稳定性现象（图 2）。



a 自然循环一回路流量随时间的变化曲线



b 加热段进口温度随时间的变化曲线

图2 发生自然循环静态流量漂移时的热工参数变化

Fig. 2 Trend of Thermal-Hydraulic Parameters during Static Flow Excursion in Natural Circulation

将计算值与文献[5]获得的实验数据相比，观察到自然循环流量漂移现象时，两者的一回路压力、加热段进出口温度基本一致，加热功率计算值为 13.9 kW，较实验值高 2.2%。同时计算了 13.6 kW 功率工况下的参数；模拟结果中没有发现自然循环静态流量漂移，所有热工参数变化平稳。表 1 中，将一回路自然循环流量、加热段进出口温差的变化幅度与实验数据相比，分别相差 -0.002 kg/s 和 -2.9，计算和实验的偏差在 15% 以内。

表 1 静态流量漂移参数变化量计算值与实验数据比对
Table 1 Comparison with Calculation and Experimental Data in Static Flow Excursion

参数名称	初始值	终止值	变化幅度		偏差
			计算值	实验值	
自然循环流量/kg·s ⁻¹	0.068	0.052	-0.016	-0.014	-0.002
加热段进口温度/	75.2	74.1	-1.1	0	-1.1
加热段出口温度/	134.1	148.6	14.5	18.5	-4.0
加热段进出口温差/	58.9	74.5	15.6	18.5	-2.9

综合分析自然循环静态流量漂移的过程：静态流量漂移起始点处流量受到扰动而下降，引起过冷沸腾加剧，空泡份额增大，两相摩擦压降增大，单相摩擦压降减小，总流动阻力增大，并且增大的速率超过了驱动力增大的速率。可以说，流动阻力的脉冲现象是自然循环静态流量漂移的主要诱因；而从全液相流转变为含有微量汽泡的

两相流动再又转变为全液相流的这个局部流型变化过程是流动阻力发生脉冲现象的主要原因。

在这个过程中,过冷沸腾和汽泡冷凝是静态流量漂移的关键因素之一^[6],在低压过冷沸腾流动中,汽泡从产生到聚合的速率与冷凝湮灭的速率不同,造成流动阻力的正向或负向脉冲,出现了引起流量漂移的流动阻力动态特性,而加热段区域内阻力件的位置会影响到这种过冷沸腾汽泡的行为特性,加剧其聚合、冷凝的过程,是计算时不能忽略的因素。

当阻力件在加热段区域内时,阻力件与加热段管壁之间的距离较小,形成窄缝通道,在窄缝附近更易形成上游来流的汽泡雍塞,其下游形成漩涡,使附着在壁面上的汽泡更易脱离壁面,和其他汽泡迅速聚合,被液体冷凝湮灭。基于这方面思路,专门对计算模型进行了调整,改变常规方法采用一个轴模型加壁面模型来反映加热段,而是在此基础上再增加单独的模型代表阻力件,以便更好地贴近窄缝通道的形式。

为了更好地说明阻力件的位置与静态流量漂移之间的关系,本研究中在 0.91 MPa 系统压力下,分别计算了阻力件处于加热段区域内 4 个不同位置时的瞬态功率上行情况,当阻力件位于加热段出口或出口上游 200 mm 处时,出现明显的自然循环静态流量漂移现象(图 3);而当阻力件位于加热段的中部或进口部分时,同等压力条件下,自然循环流量的变化非常平稳,瞬时扰动没有诱发流量漂移(图 4)。

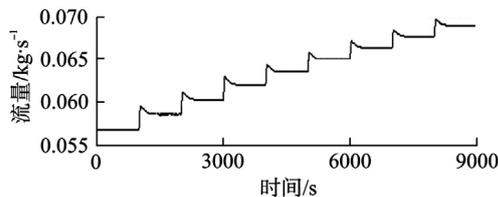


图3 自然循环一回路线流量随时间的变化曲线

Fig. 3 Trend of the Natural Circulation Flow in the Primary System

针对阻力件位于加热段出口位置,分别计算了不同中低压系统压力下瞬态功率上行情况。当系统压力为 0.9 MPa,功率上升至 13.6 kW 时出现了明显的自然循环静态流量漂移现象(图 3);系统压力为 1.8 MPa,加热功率提升至加热段出口过冷度接近 0°时,才出现了周期明显的流动不稳定性现象(图 4);而当系统压力大于 2.0 MPa

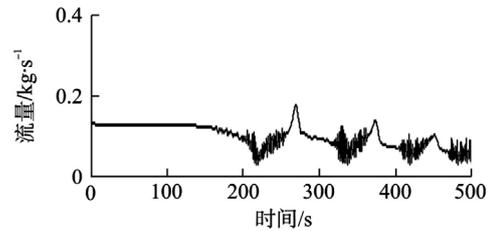


图4 系统压力为1.8 MPa时,自然循环流量变化曲线

Fig. 4 Trend of the Natural Circulation Flow for System Pressure Equals to 1.8 MPa

时,持续提升加热功率均未出现流量漂移或流动不稳定性现象。

2.2.3 迟滞效应 在自然循环系统流量漂移研究中,系统的静态分岔、迟滞现象以及参数效应都具有重要的研究意义,利用本项目获得的计算数据,尝试作这方面的简单分析。根据计算工况的结果,对于阻力件位于加热段出口,0.91 MPa 压力条件,能够拟合出自然循环流量和加热功率之间的关系。如图 5 所示,当加热功率按照 1 kW 步长增加,由 10.6 kW 逐步上升到 18.6 kW,在 13.6 kW 功率附近时出现流量下降情形;以 18.6 kW 的结果作为初始条件,以 -1 kW 的步长令加热功率由 18.6 kW 逐步降低到 10.6 kW,在 12.6 kW 功率附近时出现流量上升情形;12.6 kW 是系统在功率上行和功率下行的分岔点,出现流量下降和上升所对应的功率点不相同,由此可见系统对升、降功率具有记忆。

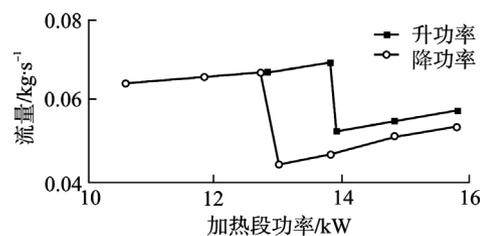


图5 自然循环静态流量漂移时的分岔现象

Fig. 5 Bifurcation Phenomena in Static Flow Excursion

3 结论

本研究采用 CATHARE 程序计算中低压自然循环系统静态流量漂移及由此诱发的动态流动不稳定性,根据计算数据拟合获得系统在功率上行和下行时的分岔点及迟滞现象。主要结论为:

(1) CATHARE 程序能够分析自然循环静态流量漂移。

(2) 不同的阻力件位置会影响过冷沸腾汽泡

的行为特性，进而会影响自然循环静态流量漂移过程中流动阻力的脉冲变化，当阻力件位于加热段区域内时，流量及阻力的脉冲现象明显，而当阻力件位于加热段区域外，计算结果中没有观察到参数的变化。

(3) 相同过冷度下，压力增大，过冷沸腾和汽泡冷凝受到削弱，对流量的扰动能力减小。

(4) 通过对计算数据的分析和研究，获得了自然循环系统中的分岔现象及迟滞效应。

参考文献：

[1] Marco Colombo, Antonio Cammi, Davide Papini, et al. RELAP5/MOD3.3 study on density wave instabilities in

single channel and two parallel channels[J]. Progress in Nuclear Energy 56, 2012: 15-23.

[2] 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: 1-23.

[3] 徐济黎. 沸腾传热和气液两相流[M]. 北京：原子能出版社，2000.

[4] Marcel C P, Rohde M, van der Hagen T H J J, et al. Fluid-to-fluid modeling of natural circulation boiling loops for stability analysis[J]. Int J Heat and Mass Transfer, 2007: 35-38.

[5] 杨廷. 中低压自然循环过冷沸腾流动不稳定性实验研究 [D]. 成都：中国核动力研究设计院硕士学位论文，2009.

[6] 杨星团, 姜胜耀. 低干度自然循环流量漂移的特性曲线图谱分析[J]. 核动力工程, 2005, 42: 312-319.

Analysis of Static Flow Excursion in Natural Circulation Using CATHARE Code

Zhang Yan, Yan Xiao, Peng Chuanxin, Zhang Zhen

CNNC Key Laboratory on Nuclear Reactor Thermal Hydraulic Technology, Nuclear power institute of China, Chengdu, 610041, China

Abstract: This paper based on the characteristic of the static flow excursion under middle and low pressure condition, proposed the research results. CATHARE code was adopted for simulation of the natural circulation system, while different parameters such pressure and resistance positions were taken into account, looking for the influence factors. The results show that lower pressure easily lead to static flow excursion, as well as the higher resistance in the outlet of heater domain. Resistance distribution in the outlet of the heater section made a great impact for the whole natural circulation system. Besides, characteristics of static bifurcation and hysteresis effect are given in this paper.

Key words: CATHARE code, Natural circulation, Static flow excursion

作者简介：

张 妍（1984—），女，副研究员。2006年毕业于浙江大学流体力学专业，获硕士学位。现从事反应堆热工水力研究。

闫 晓（1975—），男，研究员。2005年毕业于西安交通大学动力工程及工程热物理专业，获博士学位。现主要从事反应堆热工水力及多相流与传热方面的研究。

彭传新（1986—），男，助理研究员。2011年毕业于中国核动力研究设计院核能科学与工程专业，获硕士学位。现从事反应堆热工水力研究。

（责任编辑：刘 君）