

# 横摇条件下九通道系统两相流动 不稳定性研究

张友佳, 苏光辉, 秋穗正, 郭玉君

(西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室 核能科学与技术系, 陕西 西安 710049)

**摘要:**对横摇条件下并联多通道系统的两相流动不稳定性进行了理论研究。基于横摇条件的均匀流模型,通过控制容积积分法建立了并联九通道系统的分析模型。用吉尔方法对系统控制方程组进行了求解。分析了在横摇条件下并联九通道系统入口段和上升段及加热功率对管间脉动不稳定性的影响,得到了相应的不稳定性边界。在低含汽率、高含汽率及低过冷度数区域,系统均不稳定。同时,在高含汽率区域会出现倍增周期现象及混沌现象。

**关键词:**横摇;并联通道;两相流动不稳定性;管间脉动

**中图分类号:**TL33      **文献标志码:**A      **文章编号:**1000-6931(2009)10-0886-07

## Two-Phase Flow Instability in Parallel Nine-Channel System Under Rolling Condition

ZHANG You-jia, SU Guang-hui, QIU Sui-zheng, GUO Yu-jun

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering,

Department of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Two-phase flow instability in parallel multi-channel system was studied under rolling motion condition. A parallel nine-channel model was established by using the control volume integrating method based on the homogeneous flow model with considering the rolling motion condition. The gear method was used to solve the control equations. The influences of the entrance, upward sections and the heating power on the flow instability under rolling motion condition were analyzed. The marginal stability boundary (MSB) under rolling motion condition was obtained. The unstable regions occur in both low and high equilibrium quality regions. The region with low inlet sub-cooling is also unstable. In high equilibrium quality region, the multiplied period phenomenon is found and the chaotic phenomenon appears at the MSB.

**Key words:** rolling motion; parallel channel; two-phase flow instability; inter-tube pulse

舰船行驶时,特殊的海洋条件(如横摇)会对堆芯内流体的热工水力特性产生一定的影

响,甚至破坏系统的稳定性。因此,有必要对横摇条件下的两相流动不稳定性进行研究。对在摇摆条件下核动力系统一回路自然循环能力已有很多报道<sup>[1-4]</sup>。在两相流动不稳定性研究的领域中,众多学者对管间脉动现象进行了研究。苏光辉等<sup>[5-7]</sup>实验研究了自然循环情况下两相流密度波不稳定性,得出用相变数  $N_{pch}$ 、过冷度数  $N_{sub}$ 、弗劳德数  $Fr$  表示的系统稳定性边界图及稳定性判别准则式。Y. N. Lin 等<sup>[8]</sup>对 中高压下沸水堆内 2~6 个并联通道的强迫循环流动不稳定性进行了研究。周云龙等<sup>[9]</sup>提出了并联通道密度波型不稳定性的非线性数学模型。J. L. Munoz-Cobo 等<sup>[10]</sup>对沸水堆内并联通道的流动不稳定性进行了研究,同时考虑了物理耦合的影响。黄彦平等<sup>[11]</sup>对由 7 根双层套管单管组成的多管平行通道进行了流动不稳定性实验。李会雄等<sup>[12]</sup>在高压汽水两相流实验台上对垂直上升并联多通道中的汽水两相流密度波型不稳定性进行了系统的实验研究,发现多通道比单通道更加不稳定。然而,这些研究均未考虑横摇条件的影响。

本文对横摇条件下并联多通道系统的不稳定性进行理论研究,并分析管间脉动对系统不稳定性影响。

## 1 系统模型

### 1.1 并联多通道模型

并联多通道系统示意图示于图 1。将多通

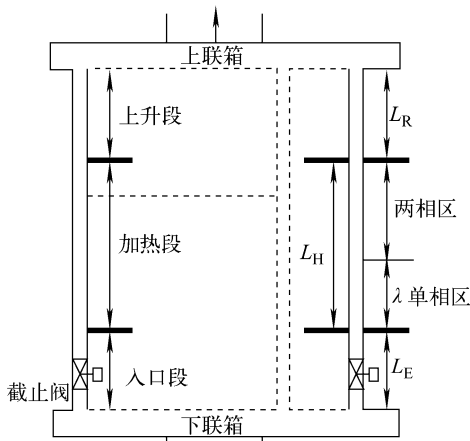


图 1 并联多通道系统

Fig. 1 Parallel multi-channel system

道系统简化成由上、下两个联箱和 9 个平行通道组成的系统。管道从下至上被分为入口段、加热段和上升段。其长度分别为  $L_E$ 、 $L_H$  和  $L_R$ ,其中加热段又被分为单相区和两相区。而 J. D. Lee 等<sup>[13]</sup>处理该问题时仅考虑了加热段。假设:1) 加热段轴向均匀加热;2) 进口过冷;3) 系统压力为常数。则用无量纲参数表示的系统控制方程组可表示为:

$$\begin{cases}
 \frac{dL_{n,j}^+}{dt^+} = 2u_{i,j}^+ - 2N_s \frac{N_{pch,j}^+}{N_{sub,j}^+} \cdot \\
 (L_{n,j}^+ - L_{n-1,j}^+) - \frac{dL_{n-1,j}^+}{dt^+} \\
 \frac{dM_{H,j}^+}{dt^+} = u_{i,j}^+ - \rho_{e,j}^+ u_{e,j}^+ \\
 \frac{d\rho_{e,j}^+}{dt^+} = \left( \left( 1 + \frac{\rho_{e,j}^+ \ln \rho_{e,j}^+}{1 - \rho_{e,j}^+} \right) \frac{d\lambda_j^+}{dt^+} + \rho_{e,j}^+ u_{e,j}^+ - u_{i,j}^+ \right) \cdot \\
 \frac{(1 - \rho_{e,j}^+)^2}{(1 - \lambda_j^+)(1 - \rho_{e,j}^+ + \ln \rho_{e,j}^+)} \\
 \frac{dM_R^+}{dt^+} = \frac{A_R}{A_H} u_e^+ (\rho_c^+ - \rho_R^+) \\
 \frac{du_e^+}{dt^+} = \frac{du_i^+}{dt^+} - \Omega \frac{d\lambda^+}{dt^+} \\
 \frac{du_{i,j}^+}{dt^+} = A_j \frac{du_{i,1}^+}{dt^+} + B_j, j = 2, 3, \dots, m \\
 \frac{du_{i,1}^+}{dt^+} = \left( \frac{dW_{tot}^+}{dt^+} - \sum_{j=2}^M A_{H,j}^+ B_j \right) / \\
 \left( 1 + \sum_{j=2}^M A_{H,j}^+ A_j \right)
 \end{cases} \quad (1)$$

其中: $A$  为控制体截面积,  $m^2$ ;  $A_j$ 、 $B_j$  为流速计算系数,它们和通道压降及通道质量有关;  $N_s$  为单相区节点数;  $\Omega$  为出口流速变化率计算系数;  $A_H^+$  为无量纲的加热通道截面积,  $A_H^+ = A/A_H$ ;  $L^+$  为单相段的无量纲长度,  $L^+ = L_n/L_H$ ;  $M^+$  为无量纲的冷却剂质量,  $M^+ = M/\rho_t L_H A_H$ ;  $u_i^+$  为无量纲的通道进口流速,  $u_i^+ = u_i/u_s$ ;  $W_{tot}^+$  为无量纲的总质量流量;  $\lambda^+$  为单相区无量纲长度,  $\lambda^+ = \lambda/L_H$ ;  $\rho^+$  为无量纲密度,  $\rho^+ = \rho/\rho_t$ 。下标: e 表示加热段出口; f 表示流体或摩擦压降; H 表示加热段; i 表示通道进口; j 表示第 j 个通道数; n 表示单相区第 n 节点; R 表示上升段; tot 表示总量。

### 1.2 横摇模型

横摇的影响可转化为其对通道压降的影响<sup>[2]</sup>,如下式所示:

$$\Delta p_j^+ = \Delta p_{i,j}^+ + \Delta p_{a,j}^+ + \Delta p_{g,j}^+ + \Delta p_{l,j}^+ + \Delta p_{add,j}^+ \quad (2)$$

其中： $\Delta p^+$ 为无量纲压降； $\Delta p_{i,j}^+$ 、 $\Delta p_{a,j}^+$ 、 $\Delta p_{g,j}^+$ 、 $\Delta p_{l,j}^+$ 和 $\Delta p_{add,j}^+$ 是无量纲的压降，分别为摩擦压降、加速压降、重力压降、惯性压降和附加压降。

### 1.3 模型的验证

当入口段和上升段的长度为零时，式(1)转化为 Lee 模型。Lee 模型的计算结果与实验数据吻合良好<sup>[13]</sup>。横摇条件下并联多通道系统的压降模型采用高璞珍等<sup>[2]</sup>的模型。

## 2 求解方法

对于式(1)采用适合于刚性方程组的吉尔算法进行求解。单相区的控制体数取 3，上升段看作 1 个控制体。初始步长为  $10^{-3}$ ，求解精度为  $10^{-4}$ 。

## 3 结果分析与讨论

图 2 示出对称布置的九通道系统。其中，1、3、6、8 通道布置在横摇轴上 ( $x$  轴)；2、4、7、9 通道布置在径向位置 ( $y$  轴)；通道 5 布置在中心。通道高 1 m，入口段长度  $0 \sim 0.8$  m，出口段长度  $0 \sim 0.3$  m。

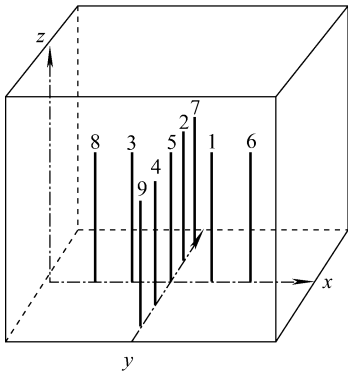


图 2 九通道布置示意图

Fig. 2 Scheme of nine-channel system

### 3.1 入口段和上升段对系统不稳定性的影响

在进口阻力系数  $k_{in} = 0$ 、进口温度  $T_{in} = 250$  °C、系统压力  $p = 15$  MPa、进口流速  $u_{in} = 2.75$  m/s、摇摆角速度为  $0.1$  rad/s、摇摆幅度为  $20^\circ$  的横摇条件下进行了计算分析。计算结果列于表 1。表 1 中， $Q$  表示加热功率。

表 1 入口段和上升段对系统不稳定性的影响

Table 1 Effect of inlet and outlet sections on system stability

Q/kW	$L_E/m$	$L_R/m$	稳定性
170	0.3	0	稳定
170	0.4	0	稳定
170	0.5	0	稳定
170	0.6	0	不稳定
170	0.7	0	稳定
170	0.8	0	不稳定
90	0.2	0	稳定
90	0.2	0.1	稳定
90	0.2	0.2	稳定
90	0.2	0.3	不稳定

从表 1 可看出，入口段对系统不稳定性的影响呈现出非常复杂的情况。一方面，单相段长度增加有利于系统内在的稳定性；另一方面，在横摇条件下，单相段长度的增加使附加压降所占的份额增大，同时由于各个管道的位置不同，使各个管道的附加压降的差别更大，从而造成流量脉动增大，使系统不稳定，所以入口段的影响是非单值性的。表 1 还清楚地表明，增加上升段的长度会使系统的稳定性变差。因此，在实际工程应用中，缩短上升段的长度可使系统的稳定性增加。

### 3.2 加热功率对系统不稳定性的影响

图 3 为横摇条件下九通道系统在进口温度为  $270$  °C 时的流量脉动曲线。从图 3a 可知，当加热功率较低时，系统不稳定；随着加热功率的提高(图 3b、c)，系统处于稳定状态；当继续增加功率，系统由稳定的管间脉动变为发散的不稳定状态(图 3d)，且由于加热功率的升高导致管间相互作用力增强，管间的流量脉动增大，因此，出现了回流现象；在图 3d 中，通道 3 的流量脉动曲线约在  $75$  s 时发生了发散振荡，且其流量脉动值为负值，此刻即发生了回流现象。因此，加热功率对系统稳定性的影响也是非单值性的。在低含汽率区域，增加加热功率有利于系统的稳定性。在高含汽率区域，增加加热功率不利于系统稳定。

### 3.3 横摇条件下的不稳定性边界

图 4 示出当系统压力为  $15$  MPa、摇摆角速

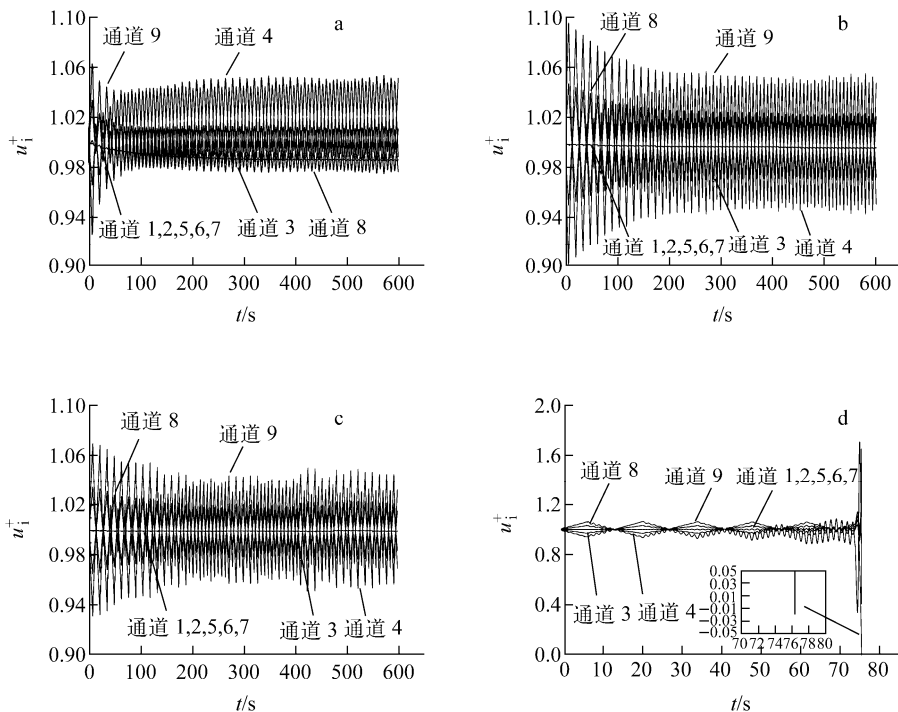


图3 九通道系统的流量脉动曲线

Fig. 3 Flow oscillation curves of nine-channel system  
a—58.5 kW;b—100 kW;c—140 kW;d—158.5 kW

度为 0.1 rad/s、摇摆幅度为 20°、入口段长度和上升段长度分别为 0.2 和 0 m 时的系统不稳定性边界图。图 4 表明,在横摇条件下系统的不稳定性边界是一倾斜的 V 字形。在高含汽率和低含汽率区域及低过冷度数区域系统均不稳定。低含汽率区域的不稳定性是由于入口段引起的,而高含汽率区域的不稳定性是由于系统的特性,即真正的管间脉动引起的。即使没有横摇运动,此时管间脉动也会发生,只是此时的流量脉动同时包含了系统本身的管间脉动和横摇引起的流量波动。在低过冷度数区域,过冷度数对系统的不稳定性有较大的影响,出现了非单值性。一方面,进口过冷度数的增加导致入口段中的单相区长度增加,单相区的液体具有较好的稳定性,这相当于增加了进口阻力,从而增强了系统的稳定性。另一方面,进口过冷度数的增加,入口段内的平均含汽率下降,气泡的生长循环周期增大,蒸发时间变长,这有助于脉动的发生,使系统的稳定性减弱。上述两方面因素的迭加,形成了在低过冷度数区域其非单值性的影响。在某一临界值内增加进口过冷度,增加了系统的稳定性。超过此临界值后继

续增加过冷度,系统的稳定性反而降低。在低过冷度数区域,由于入口段的进口温度接近 15 MPa 下水的饱和温度,因此,两相段的长度增加,不稳定性出现的几率大大增加。

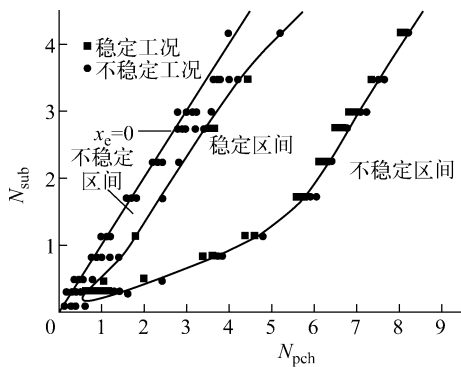


图4 九通道系统的不稳定性边界  
Fig. 4 Marginal stability boundary of nine-channel system

### 3.4 倍增周期现象及混沌现象

对于九通道系统,当入口温度为 250 °C 时,在高含汽率区域,通道 1 的流量脉动曲线示于图 5。从图 5a~c 可知,随着加热功率逐渐升

高,系统存在倍增周期现象,这是由于系统的非线性特性引起的。因式(1)是非线性方程组,可能会存在周期解。现加入横摇这一周期性的作用力,随着加热功率逐渐升高,倍增周期现象开始显现出来。图5a为1倍周期流量脉动曲线,该流量脉动仅由横摇条件引起。随着功率的提高,并联多通道本身的管间脉动特性开始显现出来,而这两者发生了叠加。在图5b、c中出现了明显的2倍和4倍周期现象。这一现象在由无量纲的沸腾边界( $L_{N_s}^+$ )和入口标准流量( $u_i^+$ )组成的相空间轨迹图(图5d~f)中更加清楚。多倍周期现象一般多发生在高含汽率的不稳定

性边界右边,即不稳定区域。由于倍增周期现象的出现,加剧了每根管道中的流量脉动,管道间的相互影响作用加强,使管间脉动很不规律,导致了混沌现象的产生(图6)。如图6a所示(进口温度为290℃,  $Q=148.5$  kW),其流量脉动曲线的振幅很不规则。第1、2、5、6、7通道的流量脉动曲线发生了重叠。图6b相空间轨迹中流量脉动曲线大量交叉,还出现了多个吸引子,因此,是一种非常典型的混沌振荡现象<sup>[14]</sup>。

### 3.5 横摇条件对系统不稳定性的影响

图7为九通道系统在系统参数相同时,横摇与非横摇条件的流量脉动曲线。入口温度为

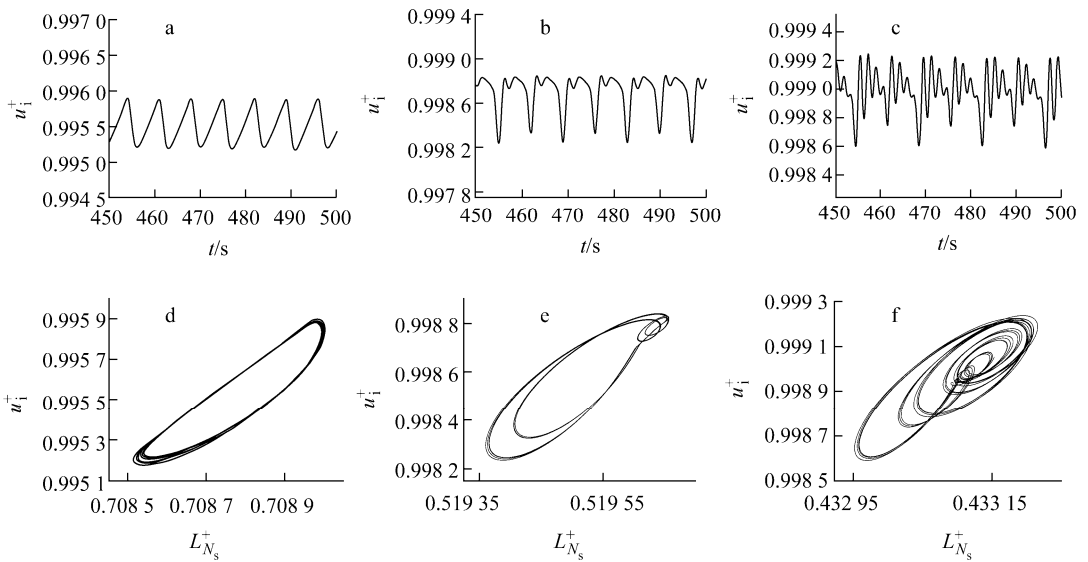


图5 倍增周期的流量脉动曲线和相空间轨迹

Fig. 5 Flow oscillation curve and phase trajectory of multiplied period

a——1倍周期(95 kW)流量脉动曲线;b——2倍周期(130 kW)流量脉动曲线;c——4倍周期(156 kW)流量脉动曲线;  
d——1倍周期相空间轨迹;e——2倍周期相空间轨迹;f——4倍周期相空间轨迹

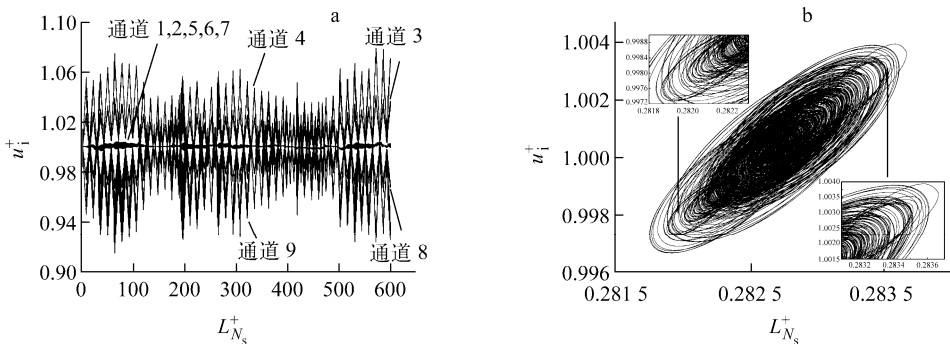


图6 混沌工况下流量脉动曲线和相空间轨迹

Fig. 6 Flow oscillation curve and phase trajectory of chaos condition

a——流量脉动曲线;b——相空间轨迹

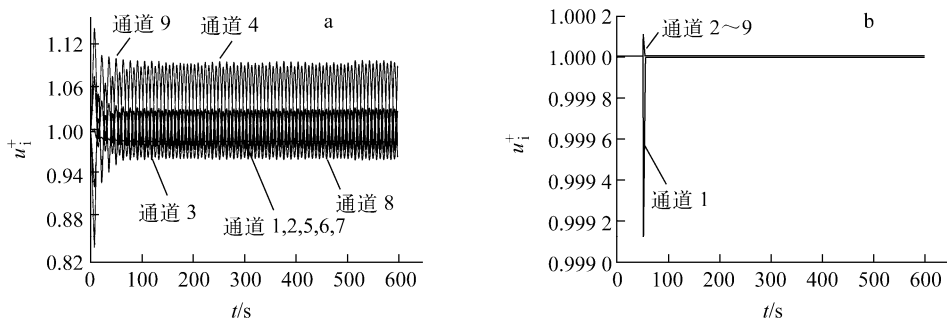


图7 横摇条件与非横摇条件下的流量脉动曲线

Fig. 7 Flow oscillation curves of rolling condition and non-rolling condition

a——横摇条件;b——非横摇条件

190 °C,  $Q=118$  kW。从图 7a 可看出,系统不稳定。在第 50 s 时加热功率有 1/1 000 的功率扰动,因此,可发现在第 50 s 时的流量脉动突跳。之后,流量又恢复到其平衡位置,因此,系统是稳定的。据此可得出横摇使流动不稳定性提前发生,使系统更加不稳定。

### 3.6 通道数量对不稳定性的影响

并联九通道系统的分析模型是基于均匀流模型而建立的。均匀流模型能够很好地描述中、高压下多管并联通道的两相流动不稳定性及非线性动力学特性。将模型外推到不同数量并联通道系统可分析多管间的相互作用对系统不稳定性的影响及其非动力学特性,可得到不同数量通道下系统的不稳定性边界。但由于均匀流模型未考虑相间的滑移影响,而相间的滑移作用会增强系统的稳定性。因此,在预测系统不稳定性边界方面会偏于保守。且随着管道数量的增加,管间的相互作用增强,对分析系统的不稳定性会产生影响。另外由于模型只考虑了横摇条件的影响,没有耦合其他的海洋条件(如纵摇、水平加速、倾斜、起伏、沉浮)对系统不稳定性的影响,将模型外推后会加大理论不稳定性边界和实际不稳定性边界间的误差。

## 4 结论

1) 在横摇条件下并联多通道中存在低含汽率和高含汽率及低过冷度数 3 个不稳定性区域,这主要是由于入口段对系统不稳定性的复杂影响造成的。上升段使系统的稳定性变差。

2) 加热功率对系统不稳定性的影响是非单值性的。在低含汽率区域,加热功率的增加

有利于系统的稳定性;在高含汽率区域,加热功率的增加不利于系统的稳定性。

3) 在横摇条件的作用下系统的非线性特性更加明显,会出现倍增周期现象。在不稳定性边界的高含汽率附近还会出现混沌现象。

4) 横摇条件使临界加热功率降低,使系统的不稳定性提前发生。

### 参考文献:

- [1] 庞凤阁,高璞珍,王兆祥,等. 海洋条件对自然循环影响的理论研究[J]. 核动力工程,1995,16(4):330-335.  
PANG Fengge, GAO Puzhen, WANG Zhaoxiang, et al. Theoretical research for effect of ocean conditions on natural circulation [J]. Nuclear Power Engineering, 1995, 16(4): 330-335(in Chinese).
- [2] 高璞珍,庞凤阁,王兆祥. 核动力装置一回路冷却剂受海洋条件影响的数学模型[J]. 哈尔滨工程大学学报,1997,18(1):26-29.  
GAO Puzhen, PANG Fengge, WANG Zhaoxiang. Mathematical model of primary coolant in nuclear power plant influenced by ocean conditions[J]. Journal of Harbin Engineering University, 1997, 18(1): 26-29(in Chinese).
- [3] 谭思超,庞凤阁,高璞珍. 摇摆对自然循环传热特性影响的实验研究[J]. 核动力工程,2006,27(5):33-36.  
TAN Sichao, PANG Fengge, GAO Puzhen. Experimental research of effect of rolling upon heat transfer characteristic of natural circulation[J]. Nuclear Power Engineering, 2006, 27(5): 33-36 (in Chinese).

- [4] 谭思超,高璞珍,苏光辉. 摇摆运动对自然循环流动不稳定性的影响[J]. 核动力工程,2007,28(5):42-45.  
TAN Sichao, GAO Puzhen, SU Guanghui. Effect of rolling motion on flow instability of natural circulation[J]. Nuclear Power Engineering, 2007, 28(5): 42-45(in Chinese).
- [5] 苏光辉,张金玲,郭玉君,等. 两相自然循环密度波不稳定性的实验研究[J]. 核科学与工程,1998,18(1):19-24.  
SU Guanghui, ZHANG Jinling, GUO Yujun, et al. An experimental investigation of density wave oscillation in two-phase natural circulation system [J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 1998, 18(1): 19-24(in Chinese).
- [6] SU Guanghui, JIA Dounan, FUKUDA K, et al. Theoretical study on density wave oscillation of two-phase natural circulation under low quality conditions[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2001, 38(5): 607-613.
- [7] SU Guanghui, JIA Dounan, FUKUDA K, et al. Theoretical and experimental study on density wave oscillation of two-phase natural circulation of low equilibrium quality[J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 215(3): 187-198.
- [8] LIN Y N, LEE J D, CHIN Pan. Nonlinear dynamics of a nuclear-coupled boiling channel with forced flows[J]. Nuclear Engineering and Design, 1998, 179: 31-49.
- [9] 周云龙,蔡辉,程卓明. 并联通道汽液两相流不稳定性的非线性数学模型[J]. 化工学报,1999,50(6):806-811.  
ZHOU Yunlong, CAI Hui, CHENG Zhuoming, Non-linear analysis of two-phase flow instability in boiling parallel channels[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 1999, 50(6): 806-811(in Chinese).
- [10] MUNOZ-COBO J L, PODOWSKI M Z, CHIVA S. Parallel channel instabilities in boiling water reactor systems; Boundary conditions for out of phase oscillations[J]. Annals of Nuclear Energy, 2002, 29: 1 891-1 917.
- [11] 黄彦平,马介亮,肖泽军,等. 多管平行通道流动不稳定性类型试验研究[J]. 核科学与工程,2002,22(4):289-295.  
HUANG Yanping, MA Jieliang, XIAO Zejun, et al. An experiment on unsteady flow type in parallel multi-channel test element [J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2002, 22(4): 289-295(in Chinese).
- [12] 李会雄,汪斌,陈听宽. 垂直并联多通道内高温高压汽水两相流密度波型不稳定性的实验研究[J]. 中国动力工程学报,2005,25(1):55-59.  
LI Huixiong, WANG Bin, CHEN Tingkuan. Experimental research on pulsating density instability of high-temperature and high-pressure steam-water two-phase flow[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2005, 25(1): 55-59 (in Chinese).
- [13] LEE J D, CHIN P. Dynamics of multiple parallel boiling channel systems with forced flows [J]. Nuclear Engineering and Design, 1999, 192: 31-44.
- [14] 郝柏林. 从抛物线谈起——混沌动力学引论 [M]. 上海:上海科技出版社,1993:51-66.