

基于脉动比预处理 FFT 的密度波 不稳定性边界研究

刘洋, 杨星团, 贾海军

(清华大学核能与新能源技术研究院, 先进核能技术协同创新中心,
先进反应堆工程与安全教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 两相流不稳定性试验的数据会包含一定程度的噪声信号。在判断两相流不稳定边界时, 传统的基于流量脉动量幅值的方法具有局限性。本文研究了一种基于脉动比预处理的快速傅里叶变换(FFT)方法, 通过捕捉密度波不稳定发生时频域上的特征信号来确定稳定边界, 并对两组不同工况的试验数据进行分析。试验结果表明, 本文方法具有较好的准确性。

关键词: 两相流; 密度波; 不稳定性; 傅里叶变换

中图分类号: TK124

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2017)12-2154-06

doi: 10. 7538/yzk. 2017. 51. 12. 2154

Study of Instability Boundary of Density Wave Based on Pulsation Ratio Pre-processing FFT Method

LIU Yang, YANG Xing-tuan, JIA Hai-jun

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Collaborative Innovation Center
of Advanced Nuclear Energy Technology, Key Laboratory of Advanced Reactor Engineering and
Safety of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The test data of the two phase flow instability contain some noise signal. When judging the unstable boundary of two-phase flow, the traditional method based on flow fluctuation amplitude has some limitations. In this paper, a method of FFT (fast Fourier transformation) based on pulsating was studied. The stable boundary was determined by capturing the characteristic signal on the frequency domain when the density wave instability occurred. The two sets of test data with different working conditions were analyzed. The results show that the present method has good accuracy.

Key words: two-phase flow; density wave; instability; Fourier transformation

在新一代反应堆研发中, 小型一体化压水堆以其固有安全性、非能动、多用途和模块化等特点受到越来越多的重视^[1-4]。紧凑型蒸汽发生器

是小型一体化压水堆中的重要部件, 其特点是传热结构紧凑、热流密度大。由于一体化压水堆蒸汽发生器二次侧压力较低, 在较大热流密度下容

易发生两相流不稳定。两相流不稳定是指因系统的质量流密度、压降或空泡变化而引起热工参数的恒振幅或变振幅的周期性流量振荡和零频率的流量漂移现象^[5]。这会导致蒸汽发生器流量和壁温的周期性脉动,造成机械振动、传热壁面热疲劳和传热恶化,对控制系统和蒸汽发生器寿命都有很大危害^[6-7]。

两相流不稳定性的试验和数值研究一直是两相流领域的研究热点。Wang 等^[8]完成了水力直径为 571~1 454 μm 的矩形窄缝流道的两相流试验,研究了流动不稳定发生时壁温的周期性变化。Guo 等^[9]研究了平行通道中不同压力、入口阻力和热流密度条件下的两相流不稳定性,其中以 10% 流量振荡作为稳定边界的判定准则。黄彦平等^[10]针对多管平行通道开展了两相流不稳定性类型试验,研究了管间密度波脉动、不规则脉动和热力型脉动情况下入口压降等参数随时间的变化。吴鸽平等^[11]针对具有强化换热特性的套管窄环缝通道不稳定性开展了试验研究,获得了时域内流量、差压、温度等参数的振荡情况,并通过时域内的振荡曲线研究了不同工况的稳定边界。Qiu 等^[12]研究了低压下金属钠在环形通道中的密度波不稳定性;Lee 等^[13-14]研究了 1 mm \times 1 mm 槽道中流型、可压缩空间等因素对两相流振荡的影响。夏庚磊等^[15]和周源等^[16]分别使用 RELAP 程序对平行通道密度波流动不稳定性进行了数值研究,由于数值计算中没有各种干扰因素,振动起始点较明显。综合以上的研究成果,相比于数值分析,多数试验研究中稳定边界的判定准则并不统一和明确。

为正确比较蒸汽发生器流道两相流稳定性,在试验研究中有必要建立评价稳定性边界的方法和准则。文献[7]总结了试验中广泛使用的准则,包括以下几类:1) 入口流量横幅振荡达到某已确定振幅水平,不同文献中幅值水平各不相同,通常取为传热通道稳定流量的 5%、10%、20% 和 30% 等;2) 发生入口流量小幅横幅振荡;3) 发生振幅不等的流量振荡;4) 根据流量振荡幅值与加热功率关系曲线,将曲线外推到振荡幅值为零时。但在实际试验中,以这些准则为基础所确定的流动稳定边界可能分散在较为广阔的范围内,这其中除试验人员的主观因

素外,还因为两相流系统本身的噪声因素。

紧凑型蒸汽发生器流道中,密度波型不稳定性是一种常见的动态不稳定形式。在研究蒸发通道发生密度波不稳定性时,试验数据会具有不同程度的噪声。噪声是由一系列的因素引起的,包括沸腾过程的随机特性、泵的噪声、电源的噪声、流体的湍流度、流场局部漩涡、仪器仪表噪声、回路的特性所产生的扰动等。通常这些噪声的平均幅度可达到稳定区域流动流量的百分之几甚至 10% 左右。另外,在部分典型流道中,当两相流从稳定区向不稳定区过渡时,流动振荡没有爆发过程,而是缓慢地增加,振荡开始的边界很模糊,在时域上难以依靠振幅来判断稳定性边界。

本文研究一种通过捕捉密度波不稳定性发生时频域上的特征信号来确定稳定边界的方法,在传统傅里叶变换基础上对原始信号增加脉动比预处理,并通过试验数据进行验证。

1 两相流试验系统

两相流试验段为采用双面水加热方式的套管窄环缝通道,试验系统包括 4 个回路,其流程图如图 1 所示。一回路包含主加热器、泵和套管的一次侧,流动工质为高温、高压单相去离子水,作为加热套管二次侧窄缝通道内工质的热源;二回路主要包含窄缝通道试验本体,缝隙间隙为 1.0 mm;三回路为试验冷却回路,用于吸收冷凝器中水蒸气的放热;试验系统热量最终通过水冷却塔散入大气。

试验主要的被测量为流量、温度、压力和压差。套管试验段一、二次侧流量采用精度为 1.0% 的便携式超声波流量计 FLUXUS ADM 6725 测量,进出口流体温度采用 I 级精度的 T 型热电偶测量,压力及压差采用精度为 0.075% 的罗斯蒙特 3051C 压力/差压变送器测量。数据采集系统为 Solartron IMP 35951C,采样频率为 4 Hz。

2 基于脉动比预处理的 FFT 方法

蒸汽发生器通道中,当两相流由稳定区过渡到密度波不稳定区时,流量、入口差压等物理量会产生特定频率的低频振荡。但在稳定区边界时,密度波在时域上引起的振荡易被数据的

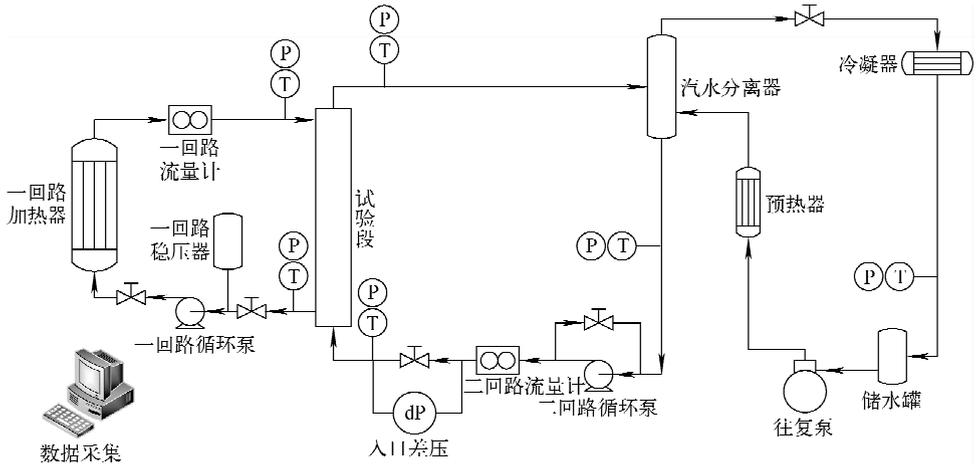


图1 试验系统流程图

Fig. 1 Flow diagram of experimental apparatus

背景噪声干扰或掩盖。将以时间为自变量的物理量变换为以频率为自变量的频谱函数后,密度波振荡频率和背景噪声频率分布在不同谱线上,达到去除背景噪声干扰的目的。当密度波不稳定性特定频率的低频振荡幅值与噪声信号幅值比例达到一定数值时,认为此时流道热工参数为密度波不稳定性边界。

2.1 离散傅里叶变换

试验过程中,流动沸腾两相流发生密度波不稳定时,流量、差压等物理量在时间、幅值上是连续变化的。而以计算机为核心的数据采集系统处理的是离散量,所以需对连续物理量按照预定的时间间隔进行离散化处理,从而把连续模拟信号转化为离散的序列。离散模拟信号 $X(nT_s)$ 是从连续模拟信号 $X(t)$ 上采集到的离散时刻上的信号瞬时值。根据采样定理,数据采集系统的采样频率和仪表的响应频率应大于密度波不稳定发生时流量、差压振荡信号频率的2倍,才能保证

有用的信号在采样后不发生混叠。

对采集得到的长度为 N 的离散时间流量、差压信号 $x(n)$ (取值范围为 $0 \leq n \leq N-1$) 进行离散傅里叶变换,如式(1)所示,即可获得信号数据序列主要由频率成分的构成及其振幅。

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad (1)$$

其中, k 的取值范围为 $0 \leq k \leq N-1$ 。快速傅里叶变换(FFT)是离散傅里叶变换的一种快速算法,在信号分析和处理领域得到广泛应用。

2.2 脉动比预处理

套管入口阻力压差测量值及 FFT 结果如图 2 所示。由于密度波不稳定发生时,流量、差压信号虽然开始振荡,但其平均值仍较为恒定,这使得直接使用傅里叶变换的结果中包含很强的直流分量,直接对流量、差压信号进行傅里叶变换,不仅会在横坐标零点产生一高峰,还会由于离散傅里叶中频谱泄漏的问题在相邻的

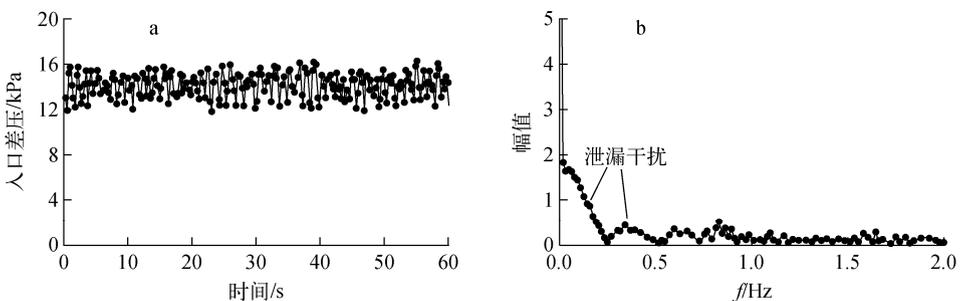


图2 套管入口阻力差压测量值(a)及 FFT 结果(b)

Fig. 2 Experimental data of inlet differential pressure (a) and FFT result (b)

谱线上产生较大的干扰虚假值,如图 2b 中 $0 \text{ Hz} \leq f \leq 0.3 \text{ Hz}$ 区间,除 $f=0 \text{ Hz}$ 处有很强的直流量外,还在 $0 \text{ Hz} < f \leq 0.3 \text{ Hz}$ 区间产生了一些较大幅值,而实际上这是由频率泄漏造成的,并不是真实的振荡频率。

为解决直流泄漏的问题,提出对信号进行脉动比预处理的方法。定义 $x(n)$ 为物理量的瞬时值, $\overline{x(n)}$ 为物理量的平均值, $x'(n)$ 为物理量的脉动值。

$$x(n) = \overline{x(n)} + x'(n) \quad (2)$$

定义物理量的脉动比 $y'(n)$ 为:

$$y'(n) = \frac{x(n) - \overline{x(n)}}{\overline{x(n)}} = \frac{x'(n)}{\overline{x(n)}} \quad (3)$$

用脉动比 $y'(n)$ 改写傅里叶变换(式(1)),得到物理量脉动比的傅里叶变换公式:

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y'(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{x'(n)}{\overline{x(n)}} e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad (4)$$

使用式(4)对图 2a 中的套管入口阻力差压测量值进行傅里叶变换,结果如图 3 所示。图 3 结果表明,各频率的能量幅值均很小,测量信号中的脉动量是各种背景噪声叠加的结果,套管中并未发生密度波振荡,仍处于稳定区。

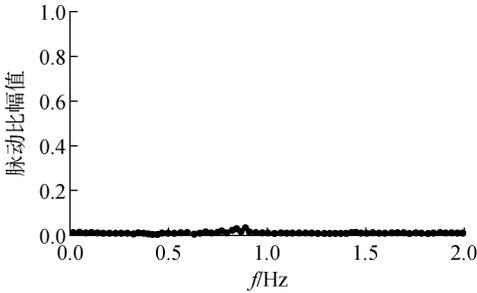


图 3 套管入口差压脉动比预处理 FFT 结果
Fig. 3 FFT result of inlet differential pressure based on pulsation ratio pre-processing

3 数据分析与讨论

为验证本文提出的用脉动比预处理 FFT 确定密度波不稳定性边界的方法,选取了两组试验数据进行分析,主要试验参数列于表 1。

试验主要是在一定的传热热流密度和入口阻力条件下,通过逐步降低二次侧质量流量,使蒸汽发生器管从稳定区逐步过渡到不稳定区,试验中流量间隔约为 $40 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$,

待系统稳定后,再继续降低流量。本次试验中,差压信号脉动比 FFT 结果中,背景噪声的幅值一般小于等于 0.05,所以谱线上特定频率幅值达到背景噪声 2 倍时,认为发生了密度波不稳定。

表 1 主要试验参数

Table 1 Main test parameter

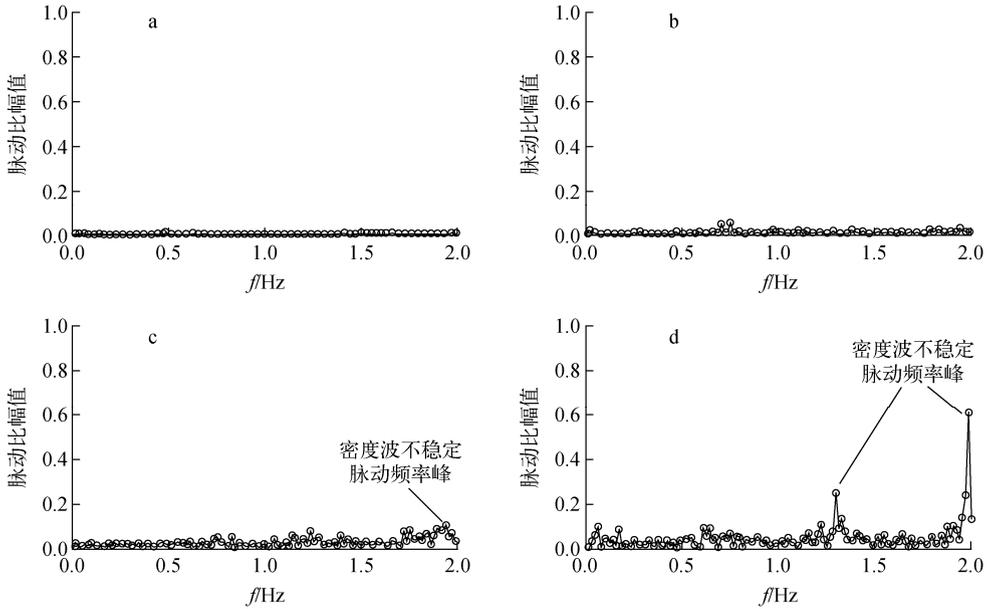
参数	参数值	
	第 1 组	第 2 组
热流密度, kW/m^2	120	60
蒸汽出口压力, MPa	1.0	2.4
二次侧平均质量流量, $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$	760~1 080	500~1 200
二次侧入口阻力系数	10	20
二次侧入口过冷度, $^{\circ}\text{C}$	15	15
出口质量含气率, %	13~21	5~14
试验件	单通道	单通道

图 4 示出第 1 组试验中截取的 4 个试验点。从图 4 可看出,当蒸汽发生器管二次侧质量流量从 $1 080 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 下降到 $920 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 时,蒸汽发生器管入口阻力脉动量的 FFT 谱中没有明显的峰值。

图 4c 中,当二次侧质量流量逐步降低到 $800 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 时,在 1.9 Hz 处首次出现了脉动量幅值超过 0.1 的峰,认为这一工况为蒸汽发生器管在第 1 组试验中的稳定边界。随着二次侧质量流量进一步降低,如图 4d 中,在 1.9 Hz 处脉动量幅值进一步增大,而且还在 1.3 Hz 处出现第 2 波峰,不稳定程度进一步增大。

图 5 示出第 2 组试验中截取的 4 个试验点。当二次侧质量流量逐步降低到 $660 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 时,在 0.7 Hz 处首次出现了脉动量幅值超过 0.1 的峰值,认为这一工况为蒸汽发生器管在第 2 组试验中的稳定边界。

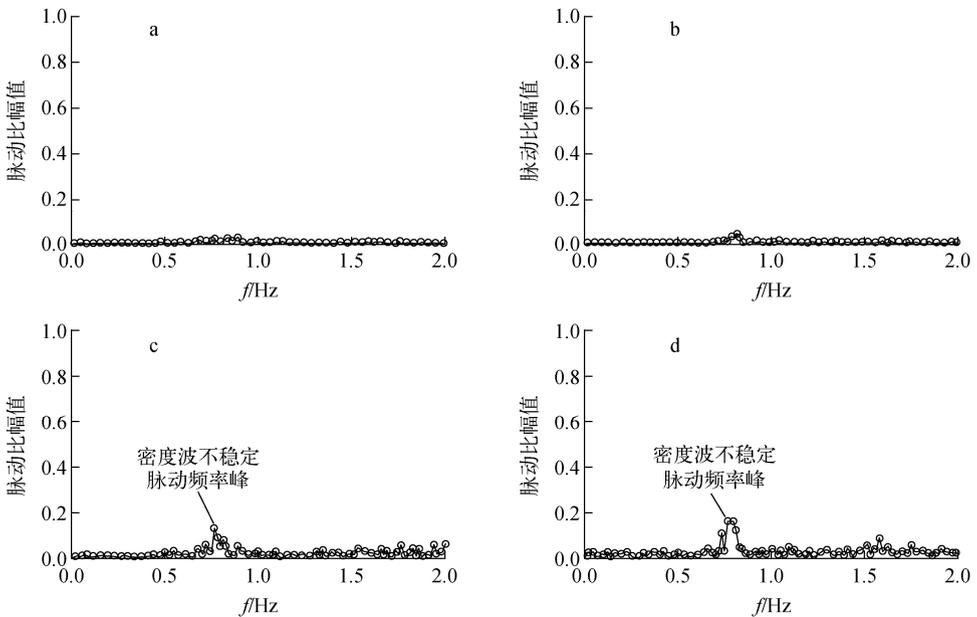
通过以上两组试验数据可看出,密度波不稳定发生时基于脉动比预处理 FFT 方法可有效提取特征频率和幅值,能较好地判断密度波不稳定性边界工况。



二次侧质量流量, $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$: a—1 080; b—920; c—800; d—760

图4 第1组试验中不同流量下入口差压脉动量的FFT结果

Fig. 4 FFT result of inlet differential pressure under different flow rates in the 1st test group



二次侧质量流量, $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$: a—1 160; b—770; c—660; d—560

图5 第2组试验中不同流量下入口差压脉动量的FFT结果

Fig. 5 FFT result of inlet differential pressure under different flow rates in the 2nd test group

4 结论

本文在试验基础上研究了一种确定密度波不稳定性边界的方法,主要结论如下。

1) 通过傅里叶变换,将密度波振荡频率和背景噪声频率分解到不同谱线上,去除背景噪

声的干扰;将密度波不稳定性发生时频域上的特征信号幅值与噪声信号幅值比例作为边界判断依据。

2) 针对差压、流量信号直接傅里叶变换导致的直流分量频谱泄漏问题,提出了对原始信

号进行脉动比预处理方法,解决虚假值干扰问题。

通过对两组不同工况的试验数据进行分析,证实了本方法具有较好的准确性。

参考文献:

- [1] IAEA. Design safety considerations for water cooled small modular reactors incorporating lessons learned from the Fukushima Daiichi accident, IAEA TECDOC No. 1785[R]. Vienna: IAEA, 2016.
- [2] JANG B I, KIM M H, JEUN G. Experimental and computational investigation of a natural circulation system in regional energy reactor-10 MWth[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(6): 2 214-2 223.
- [3] REYES J N, GROOME J, WOODS B G, et al. Testing of the multi-application small light water reactor (MASLWR) passive safety systems[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(18): 1 999-2 005.
- [4] 李卫华,张亚军,郭吉林,等. 一体化核供热堆 II 型的开发及应用前景初步分析[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(增刊): 215-218.
LI Weihua, ZHANG Yajun, GUO Jilin, et al. Development of integrated nuclear heating reactor and its application prospect[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43 (Suppl.): 215-218(in Chinese).
- [5] RUSPINI L C, MARCEL C P, CLAUSSE A. Two-phase flow instabilities: A review[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2014, 71(3): 521-548.
- [6] 徐济黎. 沸腾传热和气液两相流[M]. 北京:原子能出版社, 2001.
- [7] 哈宾斯基 B, 格尔里加 B. 动力装置部件中载热质的两相流动不稳定性[M]. 马昌文, 译. 北京:中国原子能出版社, 2012.
- [8] WANG Y, SEFIANE K. Effects of heat flux, vapour quality, channel hydraulic diameter on flow boiling heat transfer in variable aspect ratio micro-channels using transparent heating[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2012, 55(9-10): 2 235-2 243.
- [9] GUO Y, HUANG J, XIA G, et al. Experiment investigation on two-phase flow instability in a parallel twin-channel system[J]. Annals of Nuclear Energy, 2010, 37(10): 1 281-1 289.
- [10] 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).
- [11] 吴鹤平, 秋穗正, 苏光辉, 等. 环形窄缝通道内流动不稳定性试验研究[J]. 核动力工程, 2007, 28(6): 25-28.
WU Geping, QIU Suizheng, SU Guanghui, et al. Experimental research on flow instability in vertical narrow annuli[J]. Nuclear Power Engineering, 2007, 28(6): 25-28(in Chinese).
- [12] QIU Suizheng, TAKAHASHI Minoru, JIA Dounan, et al. Density wave instability of sodium boiling two-phase flow in a vertical annulus at low pressure[J]. Journal of Nuclear Science & Technology, 2003, 40(7): 493-500.
- [13] LEE S, MUDAWAR I. Transient characteristics of flow boiling in large micro-channel heat exchangers[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2016, 103: 186-202.
- [14] LEE S, MUDAWAR I. Thermal and thermodynamic performance, and pressure oscillations of refrigeration loop employing large micro-channel evaporators[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2016, 103: 1 313-1 326.
- [15] 夏庚磊, 郭赞, 彭敏俊. 平行通道密度波不稳定性研究[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(9): 1 074-1 079.
XIA Genglei, GUO Yun, PENG Minjun. Investigation on density wave instability in parallel channels[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(9): 1 074-1 079(in Chinese).
- [16] 周源, 闫晓, 王艳林. 加热双通道密度波流动不稳定性数值研究[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(4): 552-556.
ZHOU Yuan, YAN Xiao, WANG Yanlin. Numerical investigation on density wave oscillation of two heated parallel channels[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(4): 552-556(in Chinese).