

# 低干度自然循环两相流动系统的 静态分岔特性

王建军, 杨星团, 姜胜耀

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

**摘要:**基于一维两相四方程漂移流模型, 采用数值模拟方法对 5 MW 低温核供热堆热工模拟回路 (HTRTL-5) 的自然循环进行模拟, 分析在自然循环系统中存在的分岔特性及其参数效应。结果表明: 在一定条件下, 低干度自然循环两相流动系统存在静态分岔现象, 静态分岔点出现在特征曲线的切点上; 当压力高到一定程度或热流密度小到一定程度时, 系统的分岔点消失。

**关键词:**分岔; 自然循环; 两相流动

中图分类号: TL33 文献标识码: A 文章编号: 1000-6931(2007)02-0180-05

## Bifurcation Characteristic of Two-Phase Flow in Natural Circulation System With Low Steam Quality

WANG Jian-jun, YANG Xing-tuan, JIANG Sheng-yao

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

**Abstract:** Based on the one-dimension two-phase drift flow model, the simulation of natural circulation system characteristic under HTRTL-5 condition was performed. The bifurcation characteristic of two-phase flow system as well as the parameter effect under natural circulation condition was analyzed. The results show that the bifurcation phenomenon occurs under certain conditions and it occurs at the tangent point of the characteristic curve of the system. The bifurcation phenomenon disappears while the system pressure increases or the heat flux decreases to some extent.

**Key words:** bifurcation; natural circulation; two-phase flow

两相流动稳定性已成为反应堆热工设计领域重要的安全准则之一。1973年, Boure等<sup>[1]</sup>将两相流不稳定分成静态和动态流动不稳定。Lahey<sup>[2]</sup>对后来发现的不稳定现象作了补充。

20世纪60~80年代是两相流动稳定性研究的黄金时期, 但研究背景多为沸水堆条件下的高干度两相流动不稳定问题。姜胜耀<sup>[3]</sup>实验观测到了低干度条件下的自然循环流量漂移现象,

匡波等<sup>[4]</sup>对高干度自然循环系统的静态分岔特性进行了研究。

5 MW 低温核供热堆<sup>[5]</sup>采用自然循环方式,为一体化布置。该堆具有较短的加热段和较长的上升段,运行压力和温度较低,在大多数情况下,加热段不发生饱和沸腾。这些特点与沸水堆有很大区别。本工作在 5 MW 低温核供热堆热工模拟回路 HRTL-5 上研究低干度自然循环两相流动系统的静态分岔特性。

### 1 实验系统

HRTL-5 由 2 个互相平行垂直放置的加热段、上升段,以及 2 个汽水分离器、1 个冷凝器、1 个换热器和下降段组成,其中设置若干节流阀、流量计、连接管段等(图 1)。回路设计压力为 2 MPa。

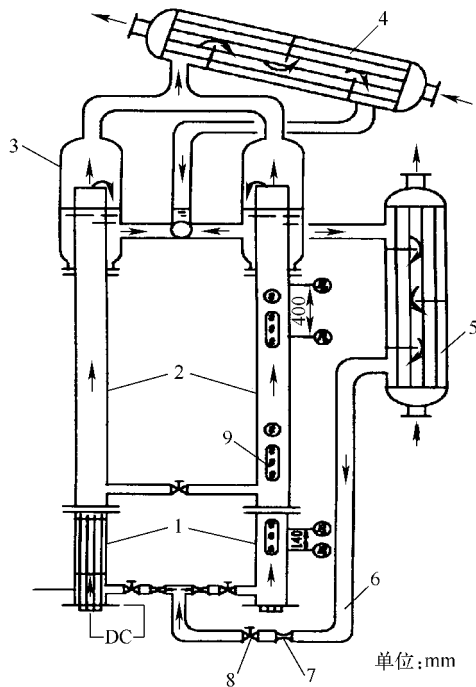


图 1 HRTL-5 实验回路

Fig.1 HRTL-5 test loop

- 1——加热段;2——上升段;3——汽水分离器;
- 4——冷凝器;5——换热器;6——下降段;
- 7——流量计;8——节流阀;9——观察窗

## 2 理论模型<sup>[6]</sup>

### 2.1 基本方程

本文采用一维两相流动的漂移流模型作为

计算的基础。

质量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1-\alpha)\rho_l + \alpha\rho_v] + \frac{\partial}{\partial z}[(1-\alpha)\rho_l u_l + \alpha\rho_v u_v] = 0 \quad (1)$$

其中: $\alpha$  为空泡份额; $\rho$  为密度; $u$  为速度;下角标“l”表示液相,“v”表示汽相。

能量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1-\alpha)\rho_l h_l + \alpha\rho_v h_v] + \frac{\partial}{\partial z}[(1-\alpha)\rho_l u_l h_l + \alpha\rho_v u_v h_v] = \frac{Uq}{A} \quad (2)$$

式中: $h$  为焓。

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1-\alpha)\rho_l u_l + \alpha\rho_v u_v] + \frac{\partial}{\partial z}[(1-\alpha)\rho_l u_l^2 + \alpha\rho_v u_v^2] = -\frac{\partial p}{\partial z} + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_l + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_f + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_g \quad (3)$$

式中: $p$  为压力;下角标“l”表示局部压降,“f”表示沿程压降,“g”表示重力压降。

蒸汽质量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho_v) + \frac{\partial}{\partial z}(\alpha\rho_v u_v) = \tau_i \quad (4)$$

式中: $\tau_i$  为各段的蒸汽产率。

漂移速度约束方程为:

$$J = (1-\alpha)u_l + \alpha u_v \quad (5)$$

式中: $J$  为混合物平均速度; $u_v$  为:

$$u_v = C_0 J + u_{vj} \quad (6)$$

式中: $C_0$  为分布参数; $u_{vj}$  为漂移速度。

### 2.2 补充关系

1) 欠热沸腾关系式<sup>[7]</sup>

欠热沸腾关系式采用 Marotti 方法,有:

$$\tau_1 = \frac{Uq\phi}{Ar} - \frac{Q_c}{Ar} \quad (7)$$

$$Q_c = \frac{3\alpha Aq}{R_b} \cdot \frac{(T_s - T)^2}{(T_w - T)^2 - (T_w - T_s)^2} \quad (8)$$

2) 冷凝关系式

冷凝关系式采用文献<sup>[6]</sup>中推导得到的公式,有:

$$\tau_2 = \frac{-3\lambda\alpha(T_s - T)}{rR_b \left[ \frac{6\lambda z(c_p T_s + r)}{\bar{u}_v r \rho_1 c_p} \left( \frac{T_s - T_{in}}{2T_s + T_{in}} + \frac{T_s - T}{2T_s + T} \right) \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{\alpha u_v c_{pv} T_s \rho_{lv}}{r^2 \rho_1} \cdot \frac{dp}{dz}} \quad (9)$$

### 3) 闪蒸关系式

采用文献[3]从基本守恒方程出发推得关系式,有:

$$\tau_3 = -\frac{1}{r} [(1-\alpha)\rho_1 u_1 + \alpha \rho_v u_v] \frac{dh_s}{dp} \cdot \frac{dp}{dz} \quad (10)$$

式(1)~(10)分别考虑了过冷沸腾、冷凝、闪蒸等因素,形成较为全面的理论模型。

## 3 计算结果与讨论

### 3.1 特征曲线图谱

在自然循环条件下,流量不再是独立变量,而由加热热流、系统压力、入口温度以及阻力系数所决定,因此,不能像强迫循环那样通过改变循环流量来使系统沿着某条阻力曲线变化,而只能通过改变某个自变量,如入口温度或加热热流使系统在不同的阻力曲线之间变化。这样,可得到不同入口温度或加热热流条件下的特征曲线图谱。

本文采用入口欠热度作为控制变量,计算得到的系统特征曲线图谱示于图2。其中,系统压力为1.5 MPa,加热热流  $q=150 \text{ kW/m}^2$ ,入口欠热度分别为30、41.6、42.5、44.6及50 K。

### 3.2 自然循环系统的分岔特性

自然循环系统的特征曲线图谱中的阻力曲线与驱动力曲线的交点即为系统的工作点。连接不同入口欠热度(或加热热流)条件下的工作点,得到了自然循环系统的运行曲线。运行曲线的物理含义是:从系统的某个稳定工作点出发,固定加热热流(或入口欠热度)、压力以及阻力系数,改变入口欠热度(或加热热流),自然循环的工作点将沿着运行曲线相应移动。图3示出了与图2在相同压力、相同加热热流以及相同阻力系数条件下自然循环系统的运行曲线。

在图3中,从A点到C<sub>1</sub>点,对应入口欠热度从140 K到44.6 K变化,在此范围内,自然

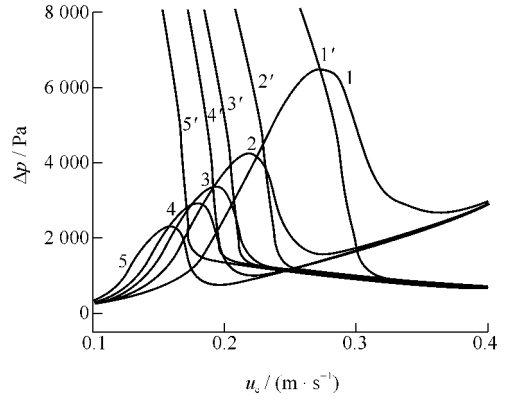


图2 特征曲线图谱

Fig. 2 Two-phase flow characteristics curves

阻力曲线:1—30 K;2—41.6 K;

3—42.5 K;4—44.6 K;5—50 K

1',2',3',4',5'为相应入口温度下的驱动力曲线

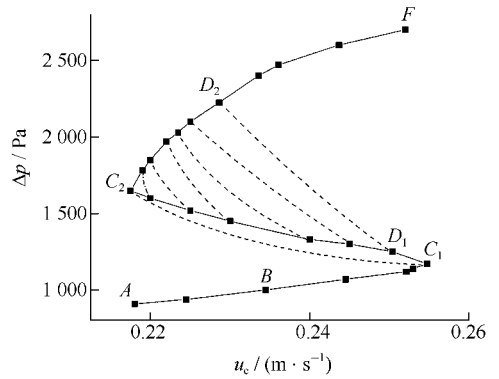


图3 自然循环运行曲线

Fig. 3 Operation curve for natural circulation system

循环系统的驱动力曲线与阻力曲线只有1个交点(图2中第1组曲线);入口欠热度等于44.6 K时,驱动力曲线与阻力曲线有2个交点,分别是图3中的C<sub>1</sub>和C<sub>2</sub>,其中,C<sub>2</sub>点是驱动力曲线与阻力曲线的切点(图2中第2组曲线);当入口欠热度处在44.6~41.6 K范围内时,驱动力曲线与阻力曲线之间的交点是3个(如图4所示,所对应的入口欠热度为42.5 K);入口欠热度等于41.6 K时,驱动力曲线与阻力曲线有2个交点,即图3中的D<sub>1</sub>和D<sub>2</sub>点,其中,D<sub>1</sub>点是切点(图2中的第4组曲线);入口欠热度进一步降低后,驱动力曲线与阻力曲线的交点又转变为1个(图2中第5组曲线)。

根据对自然循环系统的特征曲线图谱和运

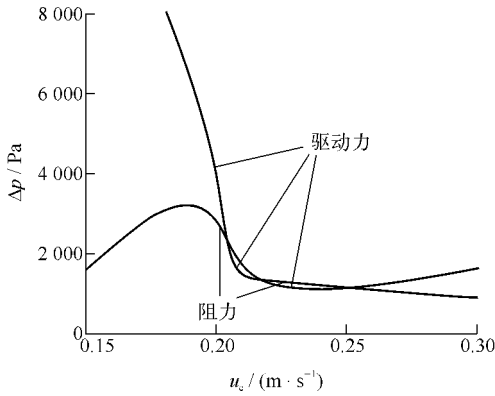


图4 特性曲线

Fig. 4 Characteristic curves

行曲线的分析,当系统入口欠热度逐步减小到达  $D_1$  点(图5中  $E$  点)时,由特征曲线图谱中的第2组曲线可看到,若扰动使得流量稍有减小,则因阻力大于驱动力造成流量的持续降低直到另一工作点(图5中的另一工作点  $O$ ),即发生了流量漂移现象。当系统入口欠热度逐步增加到达  $F$  点时,即特征曲线图谱中的第4组曲线中的切点,则可能发生另外一种静态不稳定现象——热虹吸。可以看到,在自然循环系统的运行曲线上,在  $D_1$  点和  $C_2$  点处,系统工作点的个数发生了突变,或者说描述系统形态的微分方程组的解的个数发生了突变。根据非线性系统理论,描述系统微分方程组的解的个数发生突变对应于静态分岔现象。因此,  $D_1$  点和  $C_2$  点是系统的2个静态分岔点。

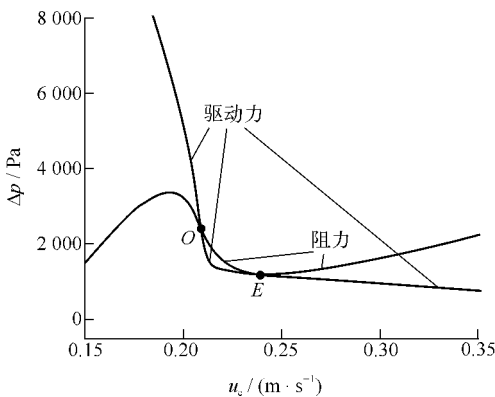


图5 流量漂移点特性曲线  
Fig. 5 Characteristic curves at flow excursion point

### 3.3 参数效应分析

#### 1) 不同热流下的分岔特性

图6示出了系统压力  $p=1.5$  MPa、不同加热热流条件下的自然循环分岔特性。图中各特征点( $C_1, C_2, D_1, D_2$ )与图3中各点的意义相同。从图6可看到,加热热流较大时,流量漂移点的温度减小,这是因为加热热流较大时,加热段流体温度分布不均匀性增强,欠热沸腾将在较大的入口欠热度下发生,即流量漂移点前移。另外,由于在相同入口温度条件下,加热热流越大,回路中的冷流体的密度差越大,驱动力也就越大,循环流量亦越大,因此,加热热流较大的分岔图曲线位置更高。另外计算结果还表明,加热热流越小,流量漂移的范围越窄。

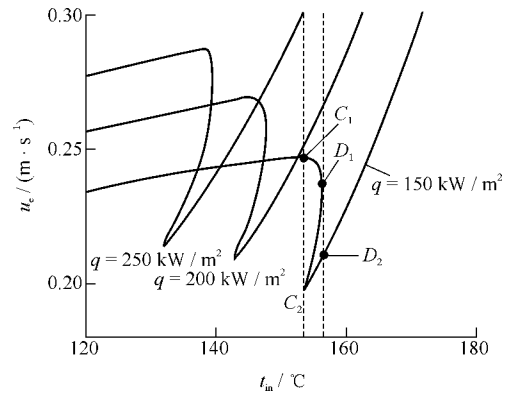


图6 不同热流下的分岔图

Fig. 6 Bifurcation characteristics under different heat flux conditions

图7示出了  $p=1.5$  MPa、 $q=50$  kW/m<sup>2</sup>时的自然循环分岔特性。计算表明,在该条件下,自然循环系统不发生流量漂移。图7中虽有一段流量下降的区域,但不是流量漂移,而是稳定流动。

#### 2) 不同压力下的分岔特性

图8示出了加热热流  $q=150$  kW/m<sup>2</sup>、压力分别为0.5、1.0、1.5 MPa时的分岔特性。

由图8可看出,压力越低,流量漂移点越前移(对应入口温度越低)。这是因为,在恒定加热热流条件下,压力越低,饱和温度越低,相同的入口温度所对应的入口欠热度越小,因此,发生欠热沸腾时对应的温度越低,即漂移点前移。同时,在单相流动区域,压力对流体密度的影响

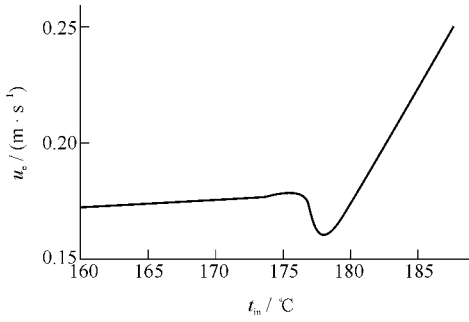


图7  $p=1.5 \text{ MPa}$ 、 $q=50 \text{ kW/m}^2$ 下的分岔  
Fig. 7 Bifurcation in the case  
of  $p=1.5 \text{ MPa}$ 、 $q=50 \text{ kW/m}^2$

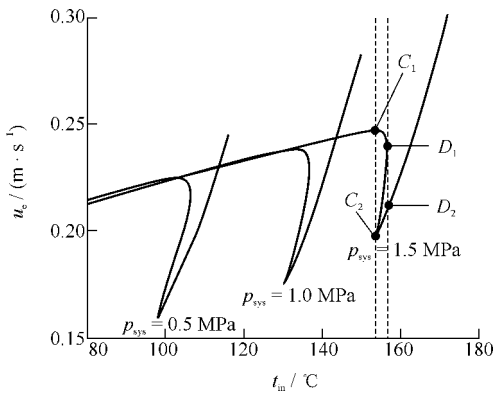


图8 不同压力下的分岔特性  
Fig. 8 Bifurcation characteristics  
under different system pressure conditions

很小,不同压力下的单相流动循环流量基本相同,因此,不同压力下单相流动区域基本重合。另外,计算结果表明,随着压力的升高,流量漂移的范围变窄。

分析系统分岔特性的参数效应的计算结果表明,加热热流越小和压力越高,漂移区域的范围越窄,因此,当加热热流小到一定程度或系统压力高到一定程度时,系统的分岔点将消失。

#### 4 结论

低干度自然循环两相流动系统在一定条件下具有分岔特性。分岔点出现在系统特性曲线的切点处。当系统的加热热流小到一定程度或系统压力高到一定程度时,系统的分岔点将消失。

#### 参考文献:

- [1] BOURE J A, BERGLES A E, TONG L S. Review of two phase flow instability[J]. Nuclear Engineering and Design, 1973, 25: 165-192.
- [2] LAHEY T, Jr. An assessment of the literature related to LWR instability modes, NUREG-CR [R]. USA: NRC, 1980.
- [3] JIANG Shengyao. Instabilitätsuntersuchungen an naturumlaufsystemen[D]. Germany: Universität Stuttgart, 1994.
- [4] 匡波,陈宏,徐济璠,等. 两相自然循环流量漂移的分岔研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(1): 88-90.
- [5] WANG D Z, MA C W. A 5-MW nuclear heating reactor[J]. Trans Am Nucl Soc, 1990, 61: 466-481.
- [6] 杨星团. 自然循环流量漂移研究[D]. 北京:清华大学, 2002.
- [7] MAROTTI L. Axial distribution of void fraction in sub-cooled boiling[J]. Nucl Technol, 1977, 34: 8.