

# 流动不稳定性频域法分析模型研究

王 飞, 卓文彬, 肖泽军, 陈炳德

(中国核动力研究设计院 空泡物理和自然循环国家级重点实验室, 四川 成都 610041)

**摘要:** 本工作从描述沸腾流动系统的控制方程出发, 采用均相流模型和 Zuber 漂移流模型, 推导了包括液相区、汽液两相区及过热蒸汽区系统的传递函数和特征方程, 借助于经典控制理论中的 Nyquist 稳定性判据, 可进行流动不稳定性边界的判定。

**关键词:** 流动不稳定性边界; 频域法; Nyquist 判据

**中图分类号:** TL33      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2007)S0-0245-05

## Investigation on Modeling of Flow Instability by Frequency Domain Method

WANG Fei, ZHUO Wen-bin, XIAO Ze-jun, CHEN Bing-de

(National Key Laboratory of Bubble Physics and Natural Circulation,  
Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** From the investigation on the governing equations for boiling flow system, including the single phase liquid region, vapor-liquid two-phase mixture region and superheat vapor region, transfer function and characteristic equation for boiling flow system, which is based on homogeneous model and Zuber drift-flux model, are derived. A theoretical study of the threshold of flow instability by use of the Nyquist stability criterion of classic control theory is fulfilled.

**Key words:** threshold of flow instability; frequency domain method; Nyquist criterion

流动不稳定性现象可能发生于锅炉、反应堆等系统。通过实验和理论研究, 在流动不稳定性分类、产生机理及参数影响规律、抑制措施等方面已取得大量成果<sup>[1-2]</sup>。由于流动系统的控制方程是一组相互耦合的非线性方程, 目前求解方法主要有时域法和频域法, 二者各有所长。Wallis 等<sup>[3]</sup>最早采用频域法进行两相流稳定性分析。该方法是在微扰动条件下对系统

控制方程线性化、拉氏变换, 得到系统的传递函数, 借助于经典控制理论中的稳定性判据, 进行流动不稳定性边界的判定。

本工作从描述沸腾流动系统的控制方程出发, 采用均相流模型和 Zuber 漂移流模型, 推导包括液相区、汽液两相区及过热蒸汽区系统的传递函数和特征方程, 建立流动不稳定性边界的频域法判定模型<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2007-05-08; 修回日期: 2007-07-02

作者简介: 王 飞(1970—), 男, 重庆人, 副研究员, 核能科学与工程专业

### 1 研究对象及基本假设

当系统包括大量并联通道,而每个通道的动态特性完全相同且相互独立时,系统的稳定性等价于其中任何一个通道的稳定性<sup>[5-6]</sup>。因此,本工作以单通道模型为研究对象(图1)。考虑通道入口为液体,出口为过热蒸汽。另外,本模型仅考虑入口流速的扰动,不计入口焓及压力的扰动。为简化分析,作下述假设:1)一维流动;2)通道进出口定压降边界条件;3)不考虑通道内压力变化对物性参数的影响,且流体密度取对应系统压力下的饱和值,瞬态摩擦系数取其稳态值,且每一分区的摩擦系数假定为常数;4)忽略压力变化、能量耗散、动能和势能变化引起的焓变化,仅考虑由加热引起的焓变化;5)在液相区及过热蒸汽区,因介质的流速远小于其声速,可将流体看作不可压缩性介质;6)采用热力学平衡假设,即沸腾边界处热力学平衡含汽率  $x_e = 0$ ,过热边界处  $x_e = 1$ ;7)在汽液两相区,热流密度不随时间变化。

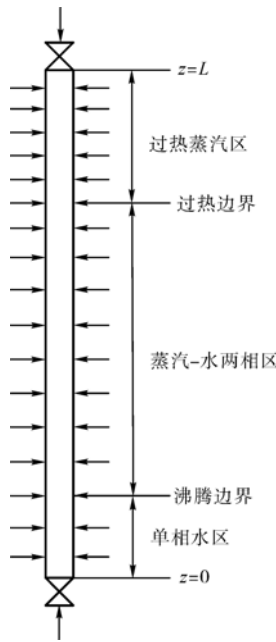


图1 研究对象

Fig.1 Object of study

### 2 控制方程(质量、动量、能量方程)

#### 2.1 液相区

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_l v_l)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$-\frac{\partial p_{SP}}{\partial z} = \rho_l \frac{\partial v_l}{\partial t} + \rho_l v_l \frac{\partial v_l}{\partial z} +$$

$$g\rho_l + \rho_l \frac{f_{SP}}{2d_e} v_l^2 + \sum k_j \frac{\rho_l v_l^2}{2} \delta(z - z_j) \quad (2)$$

$$\frac{\partial h_l}{\partial t} + v_l \frac{\partial h_l}{\partial z} = \frac{q_w'' \zeta_h}{\rho_l A_{x-s}} \quad (3)$$

其中:  $\rho$ 为流体密度;  $v$ 为流速;  $z$ 为空间坐标;  $p$ 为压力;  $t$ 为时间;  $g$ 为重力加速度;  $f$ 为摩擦系数;  $d_e$ 为水力当量直径;  $h$ 为流体焓;  $k$ 为局部阻力系数;  $A_{x-s}$ 为流道横截面积;  $q_w''$ 为热流密度;  $\zeta_h$ 为加热周长;  $\delta(z)$ 为狄拉克(Dirac)函数; 下标  $l$ 、 $SP$  代表单相液区。

#### 2.2 汽液两相区

1) 均相流模型(下标“H”)

$$\frac{\partial \rho_H}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_H v_H)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$-\frac{\partial p_H}{\partial z} = \rho_H \frac{\partial v_H}{\partial t} + \rho_H v_H \frac{\partial v_H}{\partial z} + g\rho_H + \rho_H \frac{f_H}{2d_e} v_H^2 \quad (5)$$

$$\frac{\partial h_H}{\partial t} + v_H \frac{\partial h_H}{\partial z} = \frac{q_w'' \zeta_h}{\rho_H A_{x-s}} \quad (6)$$

2) Zuber 漂移流模型<sup>[7]</sup>(下标“m”)

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m v_m)}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho_{gs}) + \frac{\partial(\alpha \rho_{gs} v_{gs})}{\partial z} = \Gamma_g \quad (8)$$

$$\Gamma_g = \Gamma_{g,eq} = \frac{q_w'' \zeta_h}{A_{x-s} \Delta h_{fg}}$$

$$-\frac{\partial p_m}{\partial z} = \rho_m \frac{\partial v_m}{\partial t} + \rho_m v_m \frac{\partial v_m}{\partial z} + g\rho_m + \rho_m \frac{f_m}{2d_e} v_m^2 + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\rho_s - \rho_m}{\rho_m - \rho_{gs}} \cdot \frac{\rho_s \rho_{gs}}{\rho_m} v_{gj}^2 \right] \quad (9)$$

$$\rho_m \frac{\partial h_m}{\partial t} + \rho_m v_m \frac{\partial h_m}{\partial z} = \frac{q_w'' \zeta_h}{A_{x-s}} - \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\rho_{gs} \rho_s}{\rho_m} \cdot \frac{\rho_s - \rho_m}{\Delta \rho} v_{gj} \Delta h_{fg} \right] \quad (10)$$

其中:  $\alpha$ 为空泡份额;  $\Gamma_g$ 为蒸汽产生率;  $v_{gj}$ 为汽相漂移速度;  $v_m$ 为混合物质心速度; 下标  $fs$ 、 $gs$  分别指饱和液体和饱和蒸汽。

#### 2.3 过热蒸汽区(下标“SH”)

$$\frac{\partial \rho_{SH}}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{SH} v_{SH})}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

$$-\frac{\partial p_{SH}}{\partial z} = \rho_{SH} \frac{\partial v_{SH}}{\partial t} + \rho_{SH} v_{SH} \frac{\partial v_{SH}}{\partial z} +$$

$$g\rho_{SH} + \rho_{SH} \frac{f_{SH}}{2d_e} v_{SH}^2 + \sum k_j \frac{\rho_{SH} v_{SH}^2}{2} \delta(z - z_j) \quad (12)$$

$$\frac{\partial h_{SH}}{\partial t} + v_{SH} \frac{\partial h_{SH}}{\partial z} = \frac{q_w'' \zeta_{SH}}{\rho_{SH} A_{s-s}} \quad (13)$$

### 3 扰动方程

由液相区的质量守恒方程与能量守恒方程可求得沸腾边界  $\lambda_1(t)$  的扰动方程为:

$$\hat{\delta}\lambda_1(s) = \frac{\hat{\delta}v_f(s)}{s} (1 - e^{-s\tau_{1,0}}) \quad (14)$$

其中:  $\delta$  为扰动量; 顶标“ $\wedge$ ”指 Laplace 变换;  $s$  为 Laplace 变换复参量; 下标“0”为稳态值。式中  $\tau_{1,0}$  的物理意义为: 稳态时流体以速度  $v_{f,0}$  由通道入口 ( $z=0$ ) 到沸腾边界的特征时间。

液相区的压降扰动方程为:

$$\begin{aligned} \hat{\delta}\Delta p_{SP} = & \rho_f \hat{\delta}v_f \lambda_{1,0} + \rho_f g \hat{\delta}\lambda_1 + \\ & \rho v_{f,0} \hat{\delta}v_f \left[ \frac{f_{SP} \lambda_{1,0}}{d_e} + k_i \right] + \rho \frac{f_{SP}}{2d_e} v_{f,0}^2 \hat{\delta}\lambda_1 \end{aligned} \quad (15)$$

对汽液两相区, 采用均相流模型的两相区密度扰动方程为:

$$\begin{aligned} \hat{\delta}\rho_H = & \rho \left[ \frac{\hat{\delta}v_H}{v_{f,0}} \cdot \frac{e^{-(s+\Omega)\tau_{2,H}(z)} - e^{-2\Omega\tau_{2,H}(z)}}{1 - s/\Omega} + \right. \\ & \left. \frac{\Omega \hat{\delta}\lambda_1}{v_{f,0}} e^{-(s+\Omega)\tau_{2,H}(z)} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

其中:  $\Omega$  为相变频率;  $\tau_{2,H}(z)$  为稳态流动下流体质点以速度  $v_{H,0}(z)$  由沸腾边界 ( $z=\lambda_{1,0}$ ) 到  $z$  点的特征时间;  $\hat{\delta}v_H(s) = \hat{\delta}v_f(s) - \Omega \hat{\delta}\lambda_1(s)$ 。

过热边界的扰动方程为:

$$\hat{\delta}\lambda_2 = \frac{\hat{\delta}v_H}{\Omega} \frac{e^{(\Omega-s)\tau_{2,H,0}} - 1}{1 - s/\Omega} + \hat{\delta}\lambda_1 e^{(\Omega-s)\tau_{2,H,0}} \quad (17)$$

式中:  $\tau_{2,H,0}$  为稳态流动下流体质点以速度  $v_{H,0}(z)$  由沸腾边界 ( $z=\lambda_{1,0}$ ) 到过热边界 ( $z=\lambda_{2,0}$ ) 的特征时间,  $\tau_{2,H,0} = \frac{1}{\Omega} \ln \left[ 1 + \frac{\Omega}{v_{f,0}} \cdot (\lambda_{2,0} - \lambda_{1,0}) \right]$ 。

采用均相流模型的两相区压降分量的扰动方程为:

$$\hat{\delta}\Delta p_{H,ine} = \rho_f v_{f,0} \tau_{2,H,0} \hat{\delta}v_H \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \hat{\delta}\Delta p_{H,a} = & \Omega \rho_f v_{f,0} (\tau_{2,H,0} \hat{\delta}v_H + \hat{\delta}\lambda_2 - \hat{\delta}\lambda_1) + \\ & \frac{\Omega^2 \rho v_{f,0}}{\Omega - s} \left\{ \hat{\delta}v_H \left[ \frac{1 - e^{(\Omega-s)\tau_{2,H,0}}}{s - \Omega} - \tau_{2,H,0} \right] - \right. \\ & \left. \hat{\delta}\lambda_1 \left[ 1 - e^{(\Omega-s)\tau_{2,H,0}} \right] \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \hat{\delta}\Delta p_{H,e} = & \frac{\rho g \hat{\delta}v_H}{1 - s/\Omega} \left( \frac{1 - e^{-s\tau_{2,H,0}}}{s} - \right. \\ & \left. \frac{1 - e^{-\Omega\tau_{2,H,0}}}{\Omega} \right) + \frac{\rho g \Omega \hat{\delta}\lambda_1}{s} \cdot \end{aligned}$$

$$(1 - e^{-s\tau_{2,H,0}}) + \rho_{gs} g \hat{\delta}\lambda_2 - \rho_s g \hat{\delta}\lambda_1 \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \hat{\delta}\Delta p_{H,r} = & \frac{f_H}{2d_e} \rho_f v_{f,0}^2 \left\{ (e^{\Omega\tau_{2,H,0}} \hat{\delta}\lambda_2 - \hat{\delta}\lambda_1) + \right. \\ & \frac{2 \hat{\delta}v_H}{v_{f,0}} (\lambda_{2,0} - \lambda_{1,0}) + \frac{\hat{\delta}v_H}{1 - s/\Omega} \cdot \\ & \left[ \frac{e^{(2\Omega-s)\tau_{2,H,0}} - 1}{2\Omega - s} - \frac{\lambda_{2,0} - \lambda_{1,0}}{v_{f,0}} \right] + \\ & \left. \frac{\Omega \hat{\delta}\lambda_1}{2\Omega - s} [e^{(2\Omega-s)\tau_{2,H,0}} - 1] \right\} \end{aligned} \quad (21)$$

其中:  $\Delta p$  为压降; 下标“a”、“e”、“ine”分别为加速压降分量、提升压降分量、惯性分量, “r”为阻力分量。

对汽液两相区, 采用 Zuber 漂移流模型的两相区密度扰动方程为:

$$\begin{aligned} \hat{\delta}\rho_m = & \frac{\rho \hat{\delta}v_f}{c_{k,0} (\lambda_{1,0})} e^{-2\Omega\tau_{2,m}(z)} \left[ \frac{\Omega}{s} + \right. \\ & \left. \frac{\Omega^2}{s(s - \Omega)} e^{-s\tau_{1,0}} + \frac{\Omega}{\Omega - s} e^{-s\tau_{1,0}} e^{(\Omega-s)\tau_{2,m}(z)} \right] \end{aligned} \quad (22)$$

过热边界的扰动方程为:

$$\begin{aligned} \hat{\delta}\lambda_2(s) = & \hat{\delta}v_f(s) \left[ \frac{1}{s} + \right. \\ & \left. \frac{\Omega e^{-s\tau_{1,0}}}{s(s - \Omega)} + \frac{e^{-s\tau_{1,0}}}{\Omega - s} e^{(\Omega-s)\tau_{2,m,0}} \right] \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} c_{k,0}(\lambda_{1,0}) = & v_{f,0} + v_{gj}; \tau_{2,m,0} = \\ & \frac{1}{\Omega} \ln \left[ 1 + \frac{\Omega(\lambda_{2,0} - \lambda_{1,0})}{v_{f,0} + v_{gj}} \right] \end{aligned} \quad (24)$$

其中,  $c_k$  为汽相运动波速。

采用 Zuber 漂移流模型的两相区压降分量的扰动方程为:

$$\begin{aligned} \hat{\Delta} p_{m,ine} = & \rho \hat{\delta} v_f \left\{ c_{k,0}(\lambda_{1,0}) \tau_{2,m,0} (s - \Omega + \Omega e^{-s\tau_{1,0}}) + v_{kj} \Omega \left[ \tau_{2,m,0} + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{\Omega}{s - \Omega} \tau_{2,m,0} e^{-s\tau_{1,0}} + \frac{s}{(s - \Omega)^2} e^{-s\tau_{1,0}} (e^{(\Omega-s)\tau_{2,m,0}} - 1) \right] \right\} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \hat{\Delta} p_{m,a} = & \frac{\rho_f \hat{v}_{f,0}^2 \Omega}{c_{k,0}(\lambda_{1,0})} (\hat{\Delta} \lambda_2 - \hat{\Delta} \lambda_1) + \rho_f \hat{v}_{f,0} \hat{\delta} v_f \frac{\Omega}{s} \left\{ \tau_{2,m,0} (s - \Omega + \Omega e^{-s\tau_{1,0}}) + \frac{\Omega v_{kj}}{c_{k,0}(\lambda_{1,0})} \left[ \tau_{2,m,0} + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{\Omega}{s - \Omega} \tau_{2,m,0} e^{-s\tau_{1,0}} + \frac{s}{(s - \Omega)^2} e^{-s\tau_{1,0}} (e^{(\Omega-s)\tau_{2,m,0}} - 1) \right] \right\} + \frac{\rho_f \hat{v}_{f,0}^2 \Omega^2 \hat{\delta} v_f}{c_{k,0}(\lambda_{1,0})} \left\{ \frac{\tau_{2,m,0}}{s} + \right. \\ & \left. \frac{\Omega}{s(s - \Omega)} \tau_{2,m,0} e^{-s\tau_{1,0}} + \frac{e^{-s\tau_{1,0}}}{(s - \Omega)^2} [e^{(\Omega-s)\tau_{2,m,0}} - 1] \right\} + \frac{\rho_f \hat{v}_{f,0} \Omega \hat{\delta} v_f}{c_{k,0}(\lambda_{1,0})} \left\{ \frac{\rho_{fs}^2}{\rho_{gs}^2} e^{-2\Omega\tau_{2,m,0}} \cdot \right. \\ & \left. \left[ \frac{1}{s} + \frac{\Omega}{s(s - \Omega)} e^{-s\tau_{1,0}} + \frac{e^{-s\tau_{1,0}}}{\Omega - s} e^{(\Omega-s)\tau_{2,m,0}} \right] - \left[ \frac{1}{s} + \frac{\Omega}{s(s - \Omega)} e^{-s\tau_{1,0}} + \frac{e^{-s\tau_{1,0}}}{\Omega - s} \right] \right\} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \hat{\Delta} p_{m,e} = & \rho_f g \hat{\delta} v_f \left[ \frac{1 - e^{-\Omega\tau_{2,m,0}}}{s} + \frac{\Omega}{s(s - \Omega)} e^{-s\tau_{1,0}} (1 - e^{-\Omega\tau_{2,m,0}}) + \right. \\ & \left. \frac{\Omega}{s(\Omega - s)} e^{-s\tau_{1,0}} (1 - e^{-s\tau_{2,m,0}}) \right] + \rho_{gs} g \hat{\Delta} \lambda_2 - \rho_{fs} g \hat{\Delta} \lambda_1 \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \hat{\Delta} p_{m,r} = & \frac{f_m}{2d_e} \rho_f \hat{v}_{f,0} \left\{ [v_{f,0} + \Omega(\lambda_{2,0} - \lambda_{1,0}) + v_{kj} \left(1 - \frac{\rho_{fs}}{\rho_{gs}}\right)] \hat{\Delta} \lambda_2 - v_{f,0} \hat{\Delta} \lambda_1 + \right. \\ & 2 \frac{\hat{\Delta} c_k (\lambda_{2,0} - \lambda_{1,0})}{c_{k,0}(\lambda_{1,0})} + \frac{\Omega \hat{\delta} v_f}{c_{k,0}(\lambda_{1,0})} (2v_{kj} + v_{f,0}) \left[ \left( \frac{1}{s} + \frac{\Omega e^{-s\tau_{1,0}}}{s(s - \Omega)} \right) (\lambda_{2,0} - \lambda_{1,0}) + \right. \\ & \left. \left. \frac{c_{k,0}(\lambda_{1,0}) e^{-s\tau_{1,0}}}{(\Omega - s)(2\Omega - s)} (e^{(2\Omega-s)\tau_{2,m,0}} - 1) \right] \right\} \end{aligned} \quad (28)$$

本工作采用 M. Ishii 的假设<sup>[8]</sup>,即在漂移流模型中,假定  $\rho_m - \rho_{gs} \approx \rho_m$ ,则

$$\hat{\Delta} p_{m,d} = \rho_{fs} \rho_{gs} \hat{v}_{kj}^2 \left\{ \frac{(2\rho_{fs} - \rho_{gs})}{\rho_{gs}^3} \cdot \frac{\Omega \rho_f c_{k,0}(\lambda_{1,0})}{c_{k,0}^2(\lambda_{2,0})} \hat{\Delta} \lambda_2 - \frac{\Omega}{\rho_f c_{k,0}(\lambda_{1,0})} \hat{\Delta} \lambda_1 \right\} \quad (29)$$

过热蒸汽区(由  $z = \lambda_{2,0} + \delta \lambda_2(t)$  至  $z = L$ )的压降分量的扰动方程为:

$$\hat{\Delta} p_{SH} = \rho_{gs} \hat{\delta} v_{SH} (L - \lambda_{2,0}) - \rho_g g \hat{\Delta} \lambda_2 + \rho_g v_{SH,0} \hat{\delta} v_{SH} \left[ \frac{f_{SH} (L - \lambda_{2,0})}{d_e} + k_e \right] - \rho_g \frac{f_{SH}}{2d_e} v_{SH,0}^2 \hat{\Delta} \lambda_2 \quad (30)$$

式中:  $\hat{\delta} v_{SH}(s) = \hat{\delta} v_f(s) + \Omega [\hat{\Delta} \lambda_2(s) - \hat{\Delta} \lambda_1(s)]$ 。对均相流及 Zuber 漂移流模型,  $\hat{\Delta} p_{SH}(s)$  的表达式在形式上完全相同,差别仅在  $\hat{\Delta} \lambda_2(s)$ 、 $\hat{\delta} v_{SH}(s)$  及  $v_{SH,0}$  的具体表达式因均相流或漂移流模型而有所不同,对均相流模型  $v_{SH,0} = v_{f,0} + \Omega(\lambda_{2,0} - \lambda_{1,0})$ ,对 Zuber 漂移流模型  $v_{SH,0} = v_{f,0} + \Omega(\lambda_{2,0} - \lambda_{1,0}) + (1 - \frac{\rho_{fs}}{\rho_{gs}}) v_{kj}$ 。

### 4 不稳定性分析

本工作选取通道两端压降与入口流速的关系式作为传递函数,反馈系统示于图 2。

图中,系统输入  $I(s) = \hat{\Delta} p(s)$ ,系统输出  $R(s) = \hat{\delta} v_f(s)$ ,前向传递函数为:

$$G(s) = \frac{\hat{\delta} v_f(s)}{\hat{\Delta} p_{SP}(s)} \quad (31)$$

反馈传递函数为:

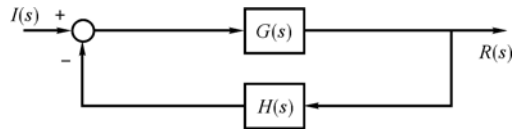


图 2 闭环控制系统

Fig. 2 Closed-loop control system

$$H(s) = \frac{\hat{\Delta} p_{TP}(s) + \hat{\Delta} p_{SH}(s)}{\hat{\delta} v_f(s)} \quad (32)$$

应用 Nyquist 稳定判据判别系统稳定性的步骤<sup>[9]</sup>是: 1) 绘制开环频率特性  $G(j\omega)H(j\omega)$  的极坐标图( $\omega$ 为角频率,  $\omega$ 从  $0 \rightarrow \infty$ ); 2) 求曲线  $G(j\omega)H(j\omega)$  对  $(-1, j0)$  点的包围次数  $N$ ; 3) 若  $N = 0$ , 则闭环系统稳定; 反之, 闭环系统不稳定; 若曲线  $G(j\omega)H(j\omega)$  恰好通过  $(-1, j0)$  点, 则闭环系统处于临界稳定状态, 由此可得到闭环系统的稳定边界。

对均相流模型和 Zuber 漂移流模型, 分别求取开环传递函数  $G(j\omega)H(j\omega)$  的实部及虚部, 用软件绘制 Nyquist 图, 根据 Nyquist 稳定性判据, 判定工况是否稳定。

## 5 结论

本工作从描述沸腾流动系统的控制方程出发, 采用均相流模型和 Zuber 漂移流模型, 推导了包括液相区、汽液两相区及过热蒸汽区系统的传递函数和特征方程, 借助于经典控制理论中的 Nyquist 稳定性判据, 可进行流动不稳定性边界的判定。

### 参考文献:

- [1] BOURE J A, BERGLES A E, TONG L S. Review of two-phase instability[J]. Nuclear Engineering and Design, 1973, 25: 165-192.
- [2] LAHEY R T, Jr, DREW D A. An assessment of the literature related to LWR instability models, NUREG/CR-1414[R]. Washington D. C. : US Nuclear Regulatory Commission, 1980.
- [3] WALLIS G B, HEASLEY J A. Oscillation in two-phase flow system[J]. J Heat Transfer, Trans ASME, 1961, 83: 363-369.
- [4] 王飞. 套管式并联通道间流动不稳定性研究[D]. 成都: 中国核动力研究设计院, 2006.
- [5] YADIGAROGU G, BERGLES A E. Fundamentals and higher-mode density-wave oscillations in two-phase flow[J]. J Heat Transfer, Trans ASME, 1972, 94: 189-195.
- [6] PENG S J, PODOWSKI M Z, LAHEY R T, Jr, et al. A digital computer code for the linear stability analysis of boiling water nuclear reactors, NUREG/CR-4116[R]. Washington D. C. : US Nuclear Regulatory Commission, 1984.
- [7] ZUBER N. Flow excursions and oscillations in boiling, two-phase flow systems with heat addition [C]//Symposium on Two-Phase Flow Dynamics. Eindhoven: EURATOM, 1967:1 071-1 109.
- [8] ISHII M. Study on flow instabilities in two-phase mixtures, ANL-76-23 [R]. Argonne, Illinois, USA: Argonne National Laboratory, 1985.
- [9] 王划一. 自动控制原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.