

应用耗散结构理论研究两相流动 不 稳 定 性 的 探 讨

刘尧奇 陈听宽 陈学俊

(西安交通大学)

摘 要

本文论证指出:两相流动动力学不稳定性是一种耗散结构.这一结论将非线性非平衡态热力学引入了两相流动不稳定性研究之中,从而阐明了不稳定性发生的原因和机理,并且找到了两相流动不稳定性的直接判据——超熵($\frac{1}{2}\delta^2 s$) (它是非线性非平衡系统的 Lyapounov 函数)。本文得出了线性非平衡区的判别式和非线性区的一些初步结果,并阐述了在实际应用中对两相流动不稳定性进行判别的具体步骤及本文方法的优越性。

关键词: 耗散结构; 两相流动不稳定性; 非线性非平衡态热力学; 超熵

1 关于两相流动不稳定性

非绝热汽液两相流动的有关参数在一定条件下出现各种周期性或非周期性的脉动现象称为两相流动不稳定性。它一般地可分为两大类,即静力学不稳定性和动力学不稳定性。前者大多表现为非周期性的流动参数变化,后者通常表现为周期性的振荡。最典型的三种动力学不稳定性是:声学振荡(频率 10~100 赫)、密度波振荡(频率 ≤ 1 赫)及压降型振荡(频率 ≤ 0.1 赫)^[1]。不管是哪一种不稳定性,在许多工业系统(诸如:蒸汽发生器、热对流再沸器、制冷设备及其它化工过程等)的设计和运行中都应竭力避免。因为,流量和压力的波动可能会引起机械振动,使系统失控,受热面遭到破坏;流量波动还可能导致瞬时烧毁,或因壁温波动造成热疲劳,使反应堆中燃料组件或直流锅炉中的沸腾管被损坏等等。可见,两相流动不稳定性是一个至关重要的问题。正因为如此,近二、三十年来人们对该问题进行了不断的研究^[2],但至今尚未得到完满解决,尤其在理论方面还很不成熟。

已有的理论研究绝大多数都是从描述两相流动的基本方程(均相模型或漂移模型)出发,只不过各人所做的简化处理及解法不同而已(如频域法或时域法等)。它们通常都需要进行大量的计算机运算,且理论预测的结果常常不能很好地与宽广参数范围的试验结果相吻合(即理论模型有很强的针对性和局限性)。这主要是因为,无法求得精确描述两相流动的方

程组——两流体模型方程组的精确理论解，必须对方程组本身及其求解过程进行各种简化和近似。此外，我们还知道，动力学方法通常只能用于分析解决具体问题，而热力学方法则可以揭示现象的本质属性，获得具有普遍性的结论。本文将非线性非平衡态热力学及耗散结构概念引入两相流动不稳定性研究之中，期望能为两相流动不稳定性研究寻求一条新的途径。

2 关于耗散结构

耗散结构理论是比利时布鲁塞尔学派领导人 Prigogine 于 1969 年提出的。该理论认为：一个远离热力学平衡的开放体系，通过与外界不断交换物质和能量，以及通过体系内部的不可逆过程，当外界条件的变化达到一定阈值时，无序态有可能失去稳定性，某些涨落可能被放大而使体系到达某种在时间上、空间上或功能上有序的状态。Prigogine 把这样形成的有序状态称为耗散结构^[3,4]。耗散结构一般具有下列主要性质及特点^[3-5]：(1) 发生在开放体系之中，与外界有不断的能量和质量交换；(2) 系统处于远离热力学平衡的状态；(3) 系统内存在着非线性的动力学反馈机制；(4) 当控制参数达到某一阈值时才出现；(5) 它对应着某些对称性的破缺；(6) 耗散结构虽然是原状态不稳定的产物，但它一旦形成，则具有相当程度的稳定性，不会被小的扰动所破坏。

这里解释两个重要概念：对两相流动而言，不稳定性是指参数出现周期性脉动，稳定流动则指参数无脉动；而对热力学来说，稳定态指状态不随时间变化，不稳定态指状态会随时间而变化。所以，如果一种周期性的脉动维持不变，在热力学上也称该态处于稳定态，

3 两相流动动力学不稳定性是一种耗散结构

本文作者认为：两相流动动力学不稳定性是一种耗散结构，因为它完全符合耗散结构的性质和特点：(1) 两相流动的不稳定性均发生在开放体系中，体系与外界有不断的质量交换，并有不断的能量输入；(2) 发生不稳定的沸腾通道中，高速流过受热通道的两相流体不可能处于热力学平衡状态，而应该离平衡态相去较远；(3) 沸腾两相流系统中，存在着流量——密度——压降之间的非线性反馈机制；(4) 不稳定性只有当压力、流量、热负荷、干度、入口欠热度及进出口节流度等参数达到一定数值时才出现；(5) 无序态是最对称的，有序则对应于对称性的破缺^[5,6]。两相流动动力学不稳定性是有序结构，因此必然对应着某些对称性的破缺；(6) 两相流动不稳定性是由稳态流动发生不稳定的产物，但不稳定性（周期性脉动）一经产生，其结构就具有一定的稳定性，若维持系统控制参数不变或只有微小的变化，一般来说脉动的周期和幅值就不会有很大的改变。

耗散结构理论问世十多年来，已被成功地应用于生物、化学、材料、信息、社会、医学、地理、气象、农业、天文等许多科学技术领域^[8,4,7]。将耗散结构概念引入两相流动不稳定性研究中，也可以开辟一条新的研究途径。

4 两相流动不稳定性研究的新途径—— 非线性非平衡态热力学的应用

4.1 两相流动不稳定性发生的机理

前一节的论述在实质上已指出了两相流动不稳定性发生的充要条件,在此基础上来分析不稳定性发生的机理就比较容易了。

在一个两相流动体系中,小的扰动总是不断出现的。但是,当体系处于近平衡态或流动参数没有达到某一一定的阈值时,流量——密度——压降之间的非线性反馈作用比较弱,扰动被衰减,宏观的脉动现象则不会出现。而当体系处于远离热力学平衡的状态,且流动参数达到一定的阈值时,小扰动会被上述非线性反馈作用所放大,同时又受到非线性反馈的制约,从而使两相流动出现宏观的周期性脉动。流动参数及其它条件的改变会使非线性反馈机制发生一定的变化,从而引起脉动周期、振幅及相位等的变化,这就导致了在不同参数范围内及不同条件下会出现一些性质不同的脉动——即各种类型的两相流动不稳定性。

4.2 两相流动不稳定性判据

不论系统处于热力学平衡态、线性非平衡态或非线性非平衡态,体系都可能存在稳定态。耗散结构就是非线性非平衡态中的稳定态^[4]。既然两相流动不稳定性是一种耗散结构,那么非线性非平衡态热力学的有关理论就可以应用于两相流动不稳定性研究。

由 Lyapounov 等人建立的近代稳定性理论可知,要判定一个体系是否处于稳定态,关键在于寻找描述该体系行为的微分方程组的 Lyapounov 函数。Lyapounov 函数 V 可以作为体系稳定性的直接判据。若 $V \cdot \frac{dV}{dt} \leq 0$ (其中 t 为时间),则系统是稳定的。非线性非平衡态热力学指出^[3,4]: 超熵 $\left(\frac{1}{2}\delta^2 s\right)$ 即是非线性非平衡态热力学系统的 Lyapounov 函数。据热力学第二定律可得: $\frac{1}{2}\delta^2 s \leq 0$, 因此,超熵产生 $\delta_x P = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}\delta^2 s\right)$ 大于、小于及等于零就分别对应于系统处于稳定、不稳定及临界情况三种状态。由此可知,耗散结构产生和维持的条件为:

$$\delta_x P = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}\delta^2 s\right) \geq 0 \quad (1)$$

该式也就是两相流动不稳定性是否发生的判别式。这样,只要推导得两相流动系统的超熵与各流动参数之间的关系,就可以应用上述判别式确定两相流动不稳定性产生时各流动参数之间应满足的关系。

5 两相流动系统的超熵产生 $\delta_x P$

5.1 $\delta_x P$ 的基本公式

在理论上,两相流动系统的超熵产生 $\delta_x P$ 应为各流动参数的函数,这些参数包括:压

力 p , 流量 M , 干度 x , 压降 Δp , 热负荷 q , 管道特征尺寸 dt (包括直径 d , 长度 l , 倾角 θ , 曲率半径 R 等) 及物性, 其中物性为非独立变量, 因为单组份两相流体的物性只决定于饱和和压力。因此,

$$\delta_x P = f(p, M, x, \Delta p, q, dt, \dots) \quad (2)$$

根据非线性非平衡态热力学的定义则有^[8]:

$$\delta_x P = \frac{1}{T} \int_V (\sum_k \delta J_k \delta X_k) dV \quad (3)$$

其中, J_k 和 X_k 分别为广义的热力学流和热力学力。

汽液两相流动系统中存在的主要不可逆因素以及相应的热力学力和热力学流如表 1 所列^[8]。表中, w, T, h, μ 分别为流体的流速、温度、焓及化学势; τ_w, C_w, τ_i, C_i 分别表示流体与壁面及相间的剪切力和剪力作用的几何尺度; 上标 “'” 和 “''” 分别代表液相和汽相; Γ, q_i 和 L_i 分别表示单位长度上的相间质量流密度、热流密度及换热面几何尺度, 其中 $\Gamma = dm''/dz = -dm'/dz$, m' 和 m'' 为液相及汽相的质量流率。显然, 在上述参数中包含了式(2) 中的全部原始参数。

表 1

不可逆因素	广义热力学力 X_k	广义热力学流 J_k
液相与壁面摩擦	w'/T'	$\tau'_w C'_w$
汽相与壁面摩擦	w''/T''	$\tau''_w C''_w$
相间摩擦	$(w'' - w_i)/T'' + (w_i - w')/T'$	$\tau_i C_i$
相间动量传递	$\frac{(w'' - w_i)^2 / 2T'' + (w_i - w')^2}{-(w_i - w')^2 / 2T' + (w'' - w')^2}$	$\Gamma (w'' - w')$
相间质量传递	$\mu'/T' - \mu''/T''$	Γ
温差传热	$1/T'' - 1/T'$	$q_i L_i$
输运热流	$1/T'' - 1/T'$	Γh_i

有了超熵产生 $\delta_x P$ 的一般计算式及各项广义热力学力和热力学流的基本表达式, 就可以根据具体问题来求取超熵产生 $\delta_x P$ 。当然, 这是一项相当复杂的工作, 还需进一步研究。

5.2 考例

对于近平衡态(线性非平衡态)的稳定态, 根据非平衡态热力学有:

$$\delta J_k \doteq J_k, \quad \delta X_k \doteq X_k \quad (4)$$

此时, 超熵产生 $\delta_x P$ 变为熵产生 P , 局域平衡处处成立, 且各处局域熵产生近于相等, 则式(3)演化为:

$$P = \sum_k J_k X_k \quad (5)$$

把各项热力学力和热力学流代入上式, 并将 P 代以单位管长上的熵产, 则有:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz}(\dot{m}'S' + \dot{m}''S'') = & \tau'_v C'_v v'/T' + \tau''_v C''_v v''/T'' + \tau_i C_i [(w'' - w_i)/T'' + (x_i - w')/T'] \\ & + \Gamma/2[(w'' - w_i)^2/T'' - (w_i - w')^2/T'] + \Gamma(\mu'/T' - \mu''/T'') \\ & + q_i L_i(1/T'' - 1/T') + \Gamma h_i(1/T'' - 1/T') \end{aligned} \quad (6)$$

这正是稳定流动两相流系统的熵方程^[8]。其中， S' 和 S'' 分别为液相及汽相的熵。这一结果表明，当系统从非线性非平衡态简化到线性非平衡态时，本文提出的方法仍然有效，且所得结果与已有结果一致。

6 本文方法的两种应用

6.1 设计计算

在设计一个不允许发生两相流动不稳定性的系统时，需要确定各参数应满足的关系。此时，可从式(3)出发进行推导，并令：

$$\delta_x P = f(p, M, x, \Delta p, q, dt, \dots) < 0 \quad (7)$$

该式即规定了两相流系统不发生不稳定性时各参数应满足的关系。具体设计时，在保证满足式(7)的前提下，可根据工程需要调整式(7)中各参数的取值。

但是，根据非平衡态热力学理论，满足式(7)时虽然两相流动不稳定性没有发生，但这种状态则处于热力学的不稳定态，即该状态存在着潜在的不稳定因素，一旦条件改变，不稳定性即有可能发生。而我们知道，在线性非平衡区，两相流动不稳定性是不可能发生的。因此，为确保安全，保守的设计法是在满足工程需要的情况下尽可能地使系统处于线性非平衡态，也就是使参数满足式(6)小于零，即

$$\begin{aligned} \tau'_v C'_v v'/T' + \tau''_v C''_v v''/T'' + \tau_i C_i [(w'' - w_i)/T'' + (w_i - w')/T'] + \Gamma/2[(w'' - w_i)^2/T'' \\ - (w_i - w')^2/T'] + \Gamma(\mu'/T' - \mu''/T'') + q_i L_i(1/T'' - 1/T') + \Gamma h_i(1/T'' \\ - 1/T') < 0 \end{aligned} \quad (8)$$

这也就是线性非平衡区的判别式。

6.2 校核计算

已有一个确定的两相流系统，考查其中是否会出现不稳定性，其具体步骤如下：

(1) 将系统的有关参数代入式(8)，看式(8)的不等式是否成立，若成立，则说明该两相流体体系处于线性非平衡区，流动不稳定性绝对不可能出现；若式(8)不等式不能成立，则进行下一步判别。

(2) 将系统的有关参数代入式(3)的展开式，求得 $\delta_x P$ ，若 $\delta_x P < 0$ ，则没有出现流动不稳定性；若 $\delta_x P \geq 0$ ，则会出现流动不稳定性。

7 本文方法的优越性

前已述及，已有的两相流动不稳定性理论研究方法，诸如时域法或频域法等动力学方法，都必须求解动态微分方程组，然后根据解的特性来判断系统是否稳定。它们都是隐式方

及充要条件; b . 可进行直接的判别; c . 计算量大幅度减小。

本文为两相流动不稳定性研究引入了新的概念(耗散结构)和新的研究方法(非线性非平衡态热力学的应用),并介绍了作者所做探讨的一些初步结果。但是,作为一种新的方法,完善它还存在很多问题,还需要做大量的工作。本文旨在提出思想,抛砖引玉,希望并欢迎对之有兴趣的同行给予批评指正,并共同进行探讨。

参 考 文 献

- [1] D. Butterworth and G. F. Hewitt, Two-Phase Flow and Heat Transfer, Oxford Univ. Press, 1977
- [2] S. Kakao, Report of Univ. of Miami, May, 1986
- [3] 李如生, 非平衡态热力学和耗散结构, 清华大学出版社, 1986
- [4] 湛晔华, 沈小峰等, 普利高津与耗散结构, 陕西科学技术出版社, 1986
- [5] 于淦, 郝柏林, 相变和临界现象, 科学出版社, 1984
- [6] 高崇寿, 百科知识, 1(1974), 73
- [7] 李晓刚, 潜科学杂志, 7, 3(1986), 6
- [8] 曾丹岑, 敖越, 工程热物理学报, 7, 3(1986), 213

APPLICATION OF DISSIPATIVE STRUCTURE THEORY TO STUDY INSTABILITY OF TWO-PHASE FLOW

Liu Yaoqi Chen Tingkuan Chen Xuejun
(Xi'an Jiaotong University)

Abstract

Demonstration of this paper shows that dynamic instability of two-phase flow is a dissipative structure. Such conclusion introduces non-linear non-equilibrium thermodynamics into the study of instability of two-phase flow. Hence in the paper the mechanism of occurrence of instability is elaborated, and a direct criterion for two-phase flow instability -- the excess entropy $1/2\delta^2s$ (which is a Lyapounov function in non-linear non-equilibrium system) is found out. And also, the judgement equation of non-linear non-equilibrium region and some preliminary results for non-linear non-equilibrium region are obtained. The procedure to differentiate two-phase flow instability and superiority of the method are presented also.

Key words: dissipative structure, instability of two-phase flow, non-linear non-equilibrium thermodynamics, excess entropy.

ON THE NON-UNIQUENESS OF BOUSSINESQ-GALERKIN SOLUTION IN ELASTICITY

Wang Minzhong Xu Xinsheng
(Peking University) (Henan University)

Abstract

In this paper, non-uniqueness of the solution of the Boussinesq-Galerkin in elasticity is defined. It is proved that if the elastic region is z -convex, the vector B_3 could be eliminated. On other hand from a counter-example, we prove that if the region is not z -convex, vector B_3 could not be eliminated.

Key words: z -convex region. non-uniqueness. Boussinesq-Galerkin solution. biharmonic function.