有两种机制共存的耗散结构的极值条件

李静海 张忠东 葛蔚 袁捷

(中国科学院化工冶金研究所, 北京 100080)

摘要 通过分析湍流管道流动中惯性和粘性的协调作用与气固流态化系统中颗粒运动与流体运动的协调作用之间的相似性, 初步提出如下推论: 由两种机制(如: 湍流中的粘性和惯性; 流态化中的颗粒运动和流体运动)共同支配的、系统的稳定性条件物理意义上可表达为这两种机制各自独立的极值趋势互为约束的条件极值。

关键词 湍流 气固流态化 颗粒 耗散结构

1 背景和思路

自然界中多数现象都具有非线性非平衡特征, 并常常呈现非均匀的耗散结构。然而, 非线性非平衡系统不存在普适单一的稳定性判据^[1], 因而这类系统的量化非常困难。一般来讲, 非线性非平衡系统中存在至少两种的作用机理, 比如: 单相湍流中同时存在粘性和惯性两种作用, 比层流中仅存在粘性作用要复杂很多; 气固流态化中存在气体和颗粒两种介质的运动, 比单相流动问题更加复杂。由于不同的作用机理具有各自的内在趋势, 用一个统一的规律来描述系统中所有的作用机理是很难成功的, 这也许是目前难以找到一些复杂系统稳定性判据的原因之一。可行的途径是先分析各种机制独立的变化规律, 然后分析它们之间的相互关系。根据这一思路, 本文报道近期我们实验室在这方面的初步研究结果。通过分析单相湍流和气固流态化两个例子, 试图说明在两种机制共存的系统中如何建立系统稳定性条件; 两种机制的协调在形成耗散结构中有何重要作用; 并用两种介质的计算机仿真结果说明这些问题。

2 气固流态化的极值条件

气固流态化是固体颗粒在向上流动的气体作用下悬浮并运动的操作。它是一种典型的耗散结构^[2], 由颗粒聚集形成的密相与气体富集形成的稀相构成。对气固两种介质各自的独立运动而言, 颗粒总是尽可能处于势能最小的状态; 而流体总是以阻力最小的通道流动。然而, 这两种独立的运动趋势在颗粒和流体都不能完全控制对方的相互作用中都无法彻底实现, 它们只能在对方制约的条件下达到各自的相对极值, 从物理意义上可表达为

$$\text{系统极值条件} = \text{流体的运动趋势} \setminus \text{颗粒的运动趋势} \quad (1)$$

当颗粒处于悬浮状态时, 颗粒的运动趋势可用相对于单位质量颗粒的悬浮输送能耗 $N_{st} = \min$ 来表达^[3]; 而流体的运动趋势可表达为单位体积中的悬浮输送能耗 $W_{st} = \min$ ^[3], 所以式(1)可具体化为

$$W_{st} = \min \mid N_{st} = \min. \quad (2)$$

图1为用能量最小多尺度作用(EMMS)模型^[3]计算得到的颗粒流体协调(PFC)和流体完

本文符号: r ——径向坐标, R ——管道半径, $u(r)$ ——局部流体速度, $\bar{u}$ ——截面平均流体速度, $W_v(r)$ ——局部剪切耗散(单位体积), W_v —— W_v 的截面积分, W_T ——对应于 W_v 的总耗散, W_{st} ——气固流态化系统中单位体积的悬浮输送能耗, N_{st} ——气固流态化系统中单位质量颗粒对应体积内的悬浮输送能耗, Re ——雷诺数, α ——与惯性影响权重有关的因子, ϵ ——气固两相系统中的平均空隙率, ϵ_r ——稀相空隙率, ϵ_c ——密相空隙率, μ ——流体动力粘度

全控制(FD)时的流态化系统中($G_s = 50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $\rho_p = 930 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $d_p = 54 \mu\text{m}$) 的流动结构. 在 $U_g < U_{pt}$ 的 PFC 区, $N_{st} = \min$, W_{st} 达到一相对极小值, 即 $W_{st} = \min$, $N_{st} = \min$, 系统内呈现非均匀的稀密两相结构($\epsilon_c = \epsilon_{mf}$, $\epsilon_f \rightarrow 1$), 这一结果与实验中常见的两相结构一致; 鼓泡流态化中的乳化相/气泡结构就是这一结果的直接证明. 当流体的运动趋势 $W_{st} = \min$ 彻底实现时, 系统进行 FD 区并呈现均匀的流动结构($\epsilon_c = \epsilon_f = \epsilon$) (理想状态下). 此时, 颗粒的运动趋势被遏制, 导致 $N_{st} = \max$. 图中的突变点 U_{pt} 由文献[3]定义的临界条件确定.

图 1

3 湍流管流流动的极值条件

层流流动时, 粘性剪切作用控制系统, 此时系统内粘性耗散最小^[4]. 由于粘性作用是系统内唯一的作用机制, 所以层流管流流动中的速度分布 $u(r)$ 必然满足粘性剪切耗散最小的条件, 即

$$\overline{W_v} = 2\pi \int_0^R r W_v(r) dr = 2\pi \int_0^R r \mu \left| \frac{du(r)}{dr} \right|^2 dr = \min \quad (3)$$

随 Re 增加, 惯性作用开始出现而导致湍流发生, 粘性剪切耗散最小不再是系统的稳定条件, 惯性作用必然对系统稳定性发挥作用. 近年来, 已有若干研究工作表明: 一些耗散结构中能量耗散有趋于最大的趋势^[5], 特别是气固流态化的研究表明, 非均匀结构的产生与能量耗散最大相关^[6]. 如将单相流动的流体看作由无数多个涡团(非均匀结构)组成, 并将任何一个涡团与

其周围涡团之间的相互作用等价于气体和颗粒之间的作用,则可以认为单相湍流和气固两相流态化的能量耗散具有相同的趋势,即

$$\overline{W_T} = 2\pi R \mu \left. \frac{du(r)}{dr} \right|_{r=R} = \max, \quad (4)$$

如果一个系统完全由粘性控制,则它必满足 $W_V = \min$; 反之,如系统完全由惯性控制,则它必然满足 $W_T = \max$. 然而,湍流流动既非粘性也非惯性完全控制,而是这两种作用共同决定系统的状态. 也就是说 $W_V = \min$ 和 $W_T = \max$ 都不可能完全实现,但都可保持其各自的极值趋势,在不可避免的相互约束和协调过程中达到一相对极值,从物理意义上表述为

$$\overline{W_v} = \min \left| \overline{W_T} = \max \right. \quad (5)$$

这也是一个双目标优化问题,由于一最大值与一最小值之差必为最大值,从数学意义上,上式可表达为以下单目标极值问题^[7]:

$$W = \overline{W_T} \alpha - \overline{W_v} (1 - \alpha) = \max \quad (6)$$

假设合适的速度分布形式^[7]后,按此极值条件求得的管流流速分布和按 $W_V = \min$ ($\alpha = 0$) 求得的层流流速分布以及用 $W_T = \max$ ($\alpha = 1$) 求得的惯性完全控制时的流速分布的比较如图2所

图2 根据式(6)计算得到的管流流速分布与 Kaman 实验关联的比较

——为式(6), Kaman 实验关联^[8,9]. 表明 $W = \min | W_T = \max$ 导致湍流流速分布

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb1999-44-6-613>

示. 图中的 α 值为与惯性作用相关的权重系数. 该图表明, 粘性作用 ($W_V = \min$) 使系统速度分布趋于抛物形分布(图 2(上部)), 而惯性作用 ($W_T = \max$) 使系统内速度分布趋于平坦(图 2下部), 两种作用的总效果, 导致图 2(中部)中的分布, 它与 Karman 实验关联式^[8] 很接近. 图 2 也表明在相同的 Re 下, 水和空气的流速分布相同, 对应的 α 值也相同.

4 湍流和流态化极值条件的相似性

比较上述两种情况, 单相湍流和气固两相流态化具有类似的极值条件, 都可通过首先分析各种作用机制独立的变化趋势及相互约束得到, 归纳如下:

系统	子过程	子过程极值趋势	稳定性条件	系统特征
气固流态化	流体 / 颗粒	$W_{st} = \min / N_{st} = \min$	$(W_{st} = \min) N_{st} = \min$	稀密两相结构
湍流管流	粘性 / 惯性	$W_v = \min / W_T = \max$	$(W_v = \min) W_T = \max$	湍流涡团

5 两种独立运动介质相互作用的计算机仿真

为说明上述结论的合理性, 对两种相向运动的离散介质进行了计算机仿真, 每种介质代表系统中一独立的运动趋势. 结果如图 3 所示, 介质 A 和介质 B 等速相向运动而相互作用, 由

图 3 两种介质在相互协调中实现各自运动趋势的计算机仿真结果

(a) $R_m = 2 \times 10^{-6}$, B 控制 A: B 的运动趋势可彻底实现, A 的运动趋势被抑制, 无法对系统发挥作用; (b) $R_m = 2 \times 10^{-2}$; (c) $R_m = 1$, A 与 B 协调: 两介质的运动趋势都不可能彻底实现, 但在对方约束下达到相对极值; (d) $R_m = 2 \times 10^2$; (e) $R_m = 2 \times 10^6$, A 控制 B: A 的运动趋势可彻底实现, B 的运动趋势被抑制, 无法对系统发挥作用. $\circ$ 为介质 A, $\bullet$ 为介质 B.

于等速, 两介质的相对控制能力可用它们的质量比表达, 即

$$R_m = \frac{m_A}{m_B}.$$

如图所示, 当 R_m 很大或很小时, 即其中一种介质完全控制系统时(A 控制 B 或 B 控制 A), 系统内结构均匀, 控制系统的一方可按自身的规律运动, 而被控制一方服从于控制方. 但当 $R_m = 1.0$ 时, 表明两介质控制能力相当, 都不能控制对方, 它们的独立运动趋势无法实现, 只能相互约束, 有条件地实现各自的运动趋势, 为此, 每种介质都自身聚团, 减小与对方的作用, 以有条件地实现自身的趋势, 从而导致非均匀的耗散结构.

6 结论

对于有两种作用机理共存的非线性非平衡的耗散结构, 其稳定性条件可通过分析每一种作用的极值趋势和它们之间的相互约束来得到. 从物理意义上这类系统的稳定性条件可表达为

$$\text{系统稳定性条件} = \text{作用1的极值趋势} \mid \text{作用2的极值趋势}$$

即数学上的双目标优化问题. 由此可见, 认识每一种作用机制的极值趋势是建立有多种机制共存的系统的稳定性条件的关键. 进一步的工作还在进行之中, 两因素以上问题的研究也有待开展.

致谢 感谢郭慕孙院士对这方面工作的支持、鼓励和对文稿的修改以及与袁亚湘教授的讨论. 本工作为国家自然科学基金(批准号: 29736190; 29425006)、国家科技部和中国科学院的经费支持项目.

参 考 文 献

- 1 Gage D H, Schiffer M, Kline S J, et al. The nonexistence of a general thermokinetic variational principle. in: Donnelly R J, Herman R, Prigogine I ed. Nonequilibrium Thermodynamics, Variational Techniques and Stability, Chicago: the University of Chicago Press, 1966. 283~ 286
- 2 Li Jinghai, Qian Guihua, Wen Lixiong. Gas-solid fluidization—a typical dissipative structure. Chem Eng Sci, 1996, 51: 667~ 669
- 3 Li Jinghai, Kwauk M. Particle-Fluid Two-Phase Flow—the Energy-Minimization Multi-Scale Method. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994
- 4 Lamb H. Hydrodynamics. New York: Dover, 1945. 617
- 5 Peusner L. Studies in Network Thermodynamics. Amsterdam: Elsevier, 1986
- 6 Li Jinghai, Wen Lixiong, Cui Heping, et al. Dissipative structure in gas-solid two phase flow. Chem Eng Sci, 1998, 53(19): 3367~ 3379
- 7 Li Jinghai, Zhang Zhongdong, Sun Qicheng, et al. A simple variational criterion for turbulent flow in pipe. Chem Eng Sci, 1998
- 8 von Karman T. The analogy between fluid friction and heat transfer. Trans ASME, 1939, 61: 705
- 9 Adrian B. Entropy Generation through Heat and Fluid Flow. New York: John Wiley & Sons, 1982

(1998-11-10 收稿, 1999-01-18 收修改稿)