

文章编号: 1005-0930(2002)-01-0001-07 中图分类号: O359+.1 文献标识码: A

微重力两相流相似模拟准则新探

赵建福, 胡文瑞

(中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080)

摘要: 根据两流体同心环状流线性稳定性分析的结果, 对微重力气/液两相流地面模拟实验所应遵循的相似准则进行了探讨, 得到了一个新的重力无关性准则, 即 Bond 数和环形区流体相的毛细数之比的绝对值不大于 1. 此外, 微重力气/液两相流模拟实验还必须满足两个条件, 即流量比和气相表观 Weber 数应与所模拟的流动中对应数值相等.

关键词: 微重力, 两相流, 模拟实验, 相似准则

在人类不断探索太空、开发空间资源的进程中, 越来越多的空间技术设施(如航天器主动热控系统、动力与能源供应系统、流体管理系统及航天员生命保障系统等)中存在有气(汽)/液两相流现象. 由于此类设施运行的重力环境与地球表面不同(如沿稳定轨道飞行的航天器内残余重力几乎为 0, 而月球表面重力约为地面的 1/6), 其成功设计与安全运行, 依赖于对不同重力条件下气/液两相流规律(即流型、摩擦压降、传热特性及系统稳定性等)的深刻认识. 鉴于目前有关气/液两相流动规律的认识, 往往基于在地面常重力环境中进行的大量精心设计的实验所获得的经验数据, 难以保证能成功地推广应用到空间不同重力条件, 因此, 开展不同重力条件下(尤其是微重力条件下)的气/液两相流实验研究具有特别重要的意义. 此外, 此类研究将重力作为变量, 可以揭示其对气/液两相流动的影响机理, 同样有助于对地面常重力环境中的气/液两相流动规律的理解.

开展微重力气/液两相流实验的理想环境是环绕地球运行的大型空间飞行器, 如空间站或航天飞机. 但空间实验机会很少, 经费支出极大, 而且对实验装置、实验介质甚至观测方法等都有很强的限制. 因此, 目前真正的空间实验^[1]还很少, 绝大部分实验是利用地基短时失重实验设施(失重飞机、落塔等)进行的^[2]. 此外, 利用等密度液/液两相系统和小尺度毛细管气/液两相系统, 在地面常重力环境模拟微重力气/液两相流特征, 也受到很大重视^[2].

一般地说, 对于具有自由界面的流动系统, 当重力大大削弱甚至完全消失后, 界面张力对流动的影响将上升为主导因素; 而在地面常重力环境中, 由于两相介质密度往往相差悬殊, 浮力作用将主导两相流特征. 因此, 表示浮力与界面张力相对大小的 Bond 数 $Bo = (\rho_L - \rho_G)gd^2/\sigma$ (其中, ρ 、 g 、 d 和 σ 分别代表密度、重力加速度、管道直径和表面张力, 下标

收稿日期: 2001-12-10; 修订日期: 2002-02-26

基金项目: 中国科学院“知识创新工程”资助项目(KJ CX2-L02)

作者简介: 赵建福(1967-), 男, 副研究员

“L、G”分别表示液相和气相),在微重力两相流模拟实验中具有重要意义.利用等密度液/液两相系统和小尺度毛细管气/液两相系统进行微重力气/液两相流模拟实验即是据此提出的.

然而,影响两相流特征参数众多,模拟实验中各无量纲参数应满足什么样的关系(即相似模拟准则)尚不清楚,导致对模拟实验结果的解释存在有诸多争议,制约了地面模拟实验在微重力两相流研究中发挥其应有的作用.

严格地讲,相似模拟准则应由相关问题的控制方程及相应的初始条件和边界条件来确定.但是,由于气、液两相介质在流动中均可变形、破碎及合并,两相界面的变化极为复杂,几何相似往往都难以满足,这导致上述严格的分析方法难以应用.不过,对圆截面光滑直管内充分发展的两流体同心环状流的线性稳定性与两相流型特征间关系的研究^[3~8]表明,在重力作用较弱时,该流动构型的线性稳定性分析结果与实验观测到的流型特征间存在很强的关联,可以由线性稳定性分析结果很好地预测相应流动条件下实验观测到的流型特征.因此,本文将根据两流体同心环状流线性稳定性问题,对微重力气/液两相流地面模拟实验准则进行初步分析.

1 同心环状流失稳机制与微重力两相流相似准则

圆截面光滑直管内充分发展的绝热、不可压两流体同心环状层流无量纲速度 W (其特征值为轴心处流速 W_0) 沿半径方向的分布可表示为:

$$W = \begin{cases} 1 - \frac{r^2}{a^2 - 1} [1 - B(2 \ln a - a^2 + 1)] & 0 \leq r \leq 1 \\ \frac{a^2 - r^2}{a^2 - 1} [1 - B(2 \ln a - a^2 + 1)] - B \left(a^2 - r^2 - 2 \ln \frac{a}{r} \right) & 1 \leq r \leq a \end{cases} \quad (1)$$

这里, r 表示以核心区半径 R_1 为特征尺度的无量纲径向坐标,半径比 $a = R_2/R_1$,粘度比 $= \mu_2/\mu_1$,无量纲参数 $B = Bo/(16 Ca_w)$,其中毛细数 $Ca_w = \mu_1 W_0'$,下标 1、2 分别表

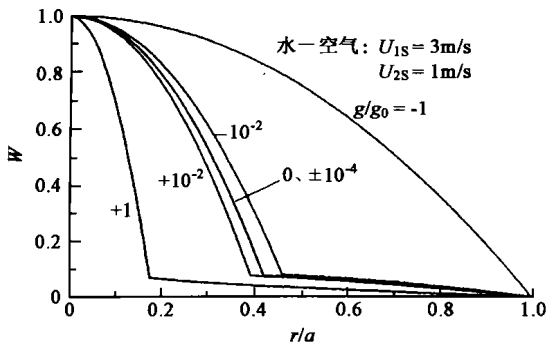


图 1 重力对双流体同心环状流速度分布的影响

Fig. 1 Effects of gravity on the velocity distributions of two-fluid concentric annular flow

示核心区与环形区(在常规气/液两相流中,分别对应于气相与液相).若重力不为 0 时,为保证流动的对称性,流动方向必须与重力平行.这里, g 为正值,对应于垂直向上流动; g 为负值,则对应于垂直向下流动.

图 1 显示了不同重力条件下水、空气两流体同心环状流速度分布的典型特征.可以看到,在垂直向上流动中,浮力将使核心区气流加速,减小截面内气相所占面积;在垂直向下流动中,浮力对核心区气流起着阻碍作用,

相应地会增大截面内气相面积;若重力减小到一定程度,其对流速分布曲线的影响将很微弱,以至于可忽略不计.如图 1 中,当 $g/g_0 = \pm 10^{-4}$ (这里, g_0 表示地面重力加速度) 时,速

度分布曲线与零重力时基本重合.

两相流研究中常用两相表观流速 U_{1S} 、 U_{2S} 和混合流速 $U_M = U_{1S} + U_{2S}$ 来表示相应的流动条件.由式(1)可得:

$$U_{1S} = \frac{W_0}{2a^2} \left\{ 2 - \frac{[1 - B(2 \ln a - a^2 + 1)]}{a^2 - 1} \right\} \quad (2)$$

$$U_{2S} = \frac{W_0}{2a^2} \left\{ \frac{(a^2 - 1)^2 [1 - B(2 \ln a)]}{a^2 - 1} - 4B \ln a \right\} \quad (3)$$

若 $B = 0$,由式(2)和式(3)可得:

$$a = \sqrt{(1 + q + \sqrt{1 + q})/q} \quad (4)$$

$$W_0 = \frac{2}{\sqrt{1 + q}(-1 + \sqrt{1 + q})} U_{2S} \quad (5)$$

其中, $q = Q_1/Q_2 = U_{1S}/U_{2S}$ 为两相体积流量比或两相表观流速比.这样,若以两相表观流速或混合流速作为特征速度进行无量纲化,则轴心处无量纲速度和半径比均将由 q 和唯一确定.若 $B = 0$,由式(2)和式(3)同样可得到由 q 、 a 和 B 所确定的轴心处无量纲速度和半径比的表达式(只不过此时表达式为隐式方程).因此,决定双流体同心环状流速度分布特征的只有流量比、粘度比和无量纲参数 B (或 Bond 数和毛细数之比),半径比 a 不是独立参数(这与 Joseph 等^[7]看法不同).

若有无穷小的扰动(分别以 u 、 v 、 w 、 p 和 δ 代表扰动速度、压力和界面位移)出现在式(1)所代表的基本流动上,利用传统流体力学方程及相关的初始条件、边界条件及相界面条件,可以很方便地得到线性化的扰动量控制方程^[7],对其进行详细分析便可得到同心环状流的线性稳定性特征.研究表明^[3~8],同心环状流线性稳定性特征和两相流型之间有着很强的关联,线性稳定性分析的结果可以用来预测两相流动中实际出现的流型特征,尽管后者远远超出了线性稳定性理论适用的范围.

根据同心环状流基本流动特征及其线性稳定性控制方程可知,决定该流动稳定性特征的是如下6个无量纲数(这里,特征速度仍取轴心处流速 W_0):流量比 q 、粘度比 μ_2/μ_1 、密度比 $m = \rho_2/\rho_1$ 、Reynolds 数 $Re = W_0 R_1/\mu_1$ 、Weber 数 $We = W_0^2 R_1/\sigma$ 以及 Bond 数和毛细数之比 Bo/Ca_w .两相流研究中常用的其他无量纲数,如 Froude 数 $Fr = W_0/(gR_1)^{1/2}$ 和 Suratman 数 $Su = W_0 R_1/\mu_1^2$,可用这6个无量纲数的适当组合来表示,因此不是独立参数.不过,在模拟实验中要同时满足所有无量纲数都相等,往往不可能也不必要.下面将根据该流动构型的失稳机制,来分析模拟微重力两相流实验需保持相等的主要无量纲数(即微重力两相流实验应满足的相似准则).

首先,稳定的同心环状流仅存在于很小的范围内,轻相介质位于核心区的同心环状流总是不稳定的.这和单相管流不同,后者在任意 Reynolds 数条件下都是线性稳定的^[9].导致上述差异的根本原因就在于同心环状流动中相界面的出现.

同心环状流动中,相界面处存在三个导致不稳定因素:

(1) 轴向扰动速度间断,它源于基本流动速度剖面在相界面处斜率 ($W = dW/dr$)的不同:

$$JW [+]w [= 0 \quad (6)$$

这里,符号“ $]$ [$]$ ”表示相界面两侧物理量的间断.显然,基本流动速度斜率的差异源于两相介质粘度的不同.因此,粘度比相同可能是模拟实验应该遵循的相似准则之一.

(2) 切向应力间断,它源于基本流动速度剖面在相界面处曲率的不同:

$$\left. \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right) \right] \right|_{+} - \left. \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right) \right] \right|_{-} = 0 \quad (7)$$

这里, $W = d^2 W / dr^2$. 利用式(1)可得 $]$ W $[= -0.25 Bo / Ca_w$, 即切向应力差正比于无量纲数 Bo / Ca_w , 其根源在于由两相介质密度差和重力共同引起的浮力作用. 因此,若无量纲数 Bo / Ca_w 足够小,以至浮力作用可以忽略,则能够用该系统来模拟微重力条件下的气/液两相流型特征.

(3) 法向应力间断,它源于表面张力的作用:

$$\frac{1}{We} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right) = - \left. \left[\frac{\partial u}{\partial r} \right] \right|_{+} + \left. \left[\frac{\partial u}{\partial r} \right] \right|_{-} \quad (8)$$

这里,Weber 数决定着法向应力差的大小,因此,Weber 数相同也将是模拟实验应该遵循的相似准则之一.

此外,存在于两相(尤其是轻相)介质内部的 Reynolds 应力(依赖于 Reynolds 数和密度比)也会引起该流动构型失稳,不过,液/液两相流动研究表明^[4,7],该不稳定机制一般在极大 Reynolds 数时才起作用,由此导致重相介质完全以微滴形态弥散分布于轻相介质内,这种弥散状流型在目前微重力气/液两相流实验所研究的参数范围内很少出现,这里暂不考虑.因此,从流型研究的角度看,可以适当放宽对 Reynolds 数和密度比的限制.

上述分析和目前微重力两相流型研究结果^[10~13]是一致的.例如,在 Zhao 和 Hu^[10]提出的半理论 Weber 数模型中,决定性的参数为气相表观 Weber 数 $We_{SG} = \rho_G U_{SG}^2 d / \sigma$ 和流量比 q , 该模型不仅成功预测了微重力气/液两相流型实验结果,而且对地面常重力环境中的中性悬浮液/液两相流型和毛细管气/液两相流型的实验结果也有令人满意的预测效果(后两种实验因具有小 Bond 数的特征而成为目前地面模拟微重力气/液两相流常用的方法).此外, Wang 等^[11]采用流量比 q 、液相表观 Weber 数 $We_{LG} = \rho_L U_{LG}^2 d / \sigma$ 的组合 $q^{-0.5} We_{LG}^{2.5}$ 和粘度比、气相表观 Reynolds 数 $Re_{SG} = \rho_G U_{SG} d / \mu_G$ 、气相表观 Weber 数 We_{SG} 的组合 $Re_{SG}^{-0.25} We_{SG}^{2.5}$ 作为流型图坐标,利用现有微重力气/液两相流型实验结果,得出一个微重力气/液两相流型图,其本质等价于 Rezkallah 等^[12,13]的经验 Weber 数模型.考虑到其横坐标 $q^{-0.5} We_{LG}^{2.5}$ 可改写为 $q^{4.5} m^{2.5} We_{SG}^{2.5}$ 的形式,并由该流型图坐标变量中各无量纲数的指数的大小,可以得到如下结论:气相表观 Weber 数、流量比和密度比是影响微重力两相流型特征的主要因素.不过,上述流型图所依据的实验数据中,密度比变化很小,因此,它的出现与否没有明显的差别.

这样,模拟微重力气/液两相流实验需要在满足重力无关性的前提下,保证气相表观 Weber 数和流量比对应相等,而密度比、粘度比和 Reynolds 数由于对微重力两相流型的影响相对较弱,在模拟实验中可以适当放宽对其的限制.

2 重力无关性准则

目前,关于气/液两相流重力无关性准则的研究还很不充分,因此,只能依据如引言中

关于 Bond 数作用定性分析,选择具有小 Bond 数特征的中性悬浮液/液两相流和毛细管气/液两相流系统来模拟微重力气/液两相流相关特征.这显然是不严格的.

由前面对式(6)、式(7)的分析可知,基本流动速度剖面在两流体同心环状流线性稳定性问题中具有特别重要的意义,这也可对照单相剪切流不稳定性的发展对于速度剖面细节的敏感性来理解.这里将据此来确定两相流型的重力无关性准则.

双流体同心环状流速度分布特征决定于流量比、粘度比及 Bond 数和毛细数之比,而且,图 1 表明,和零重力时相同流量比与粘度比的情形相比,若 Bond 数和毛细数之比的绝对值足够小,其基本流动速度剖面间的差异可以忽略不计.因此,只要模拟实验中的 Bond 数和毛细数之比的绝对值不大于某个临界值,同时保证流量比与粘度比不变,即可认为速度剖面满足相似要求.

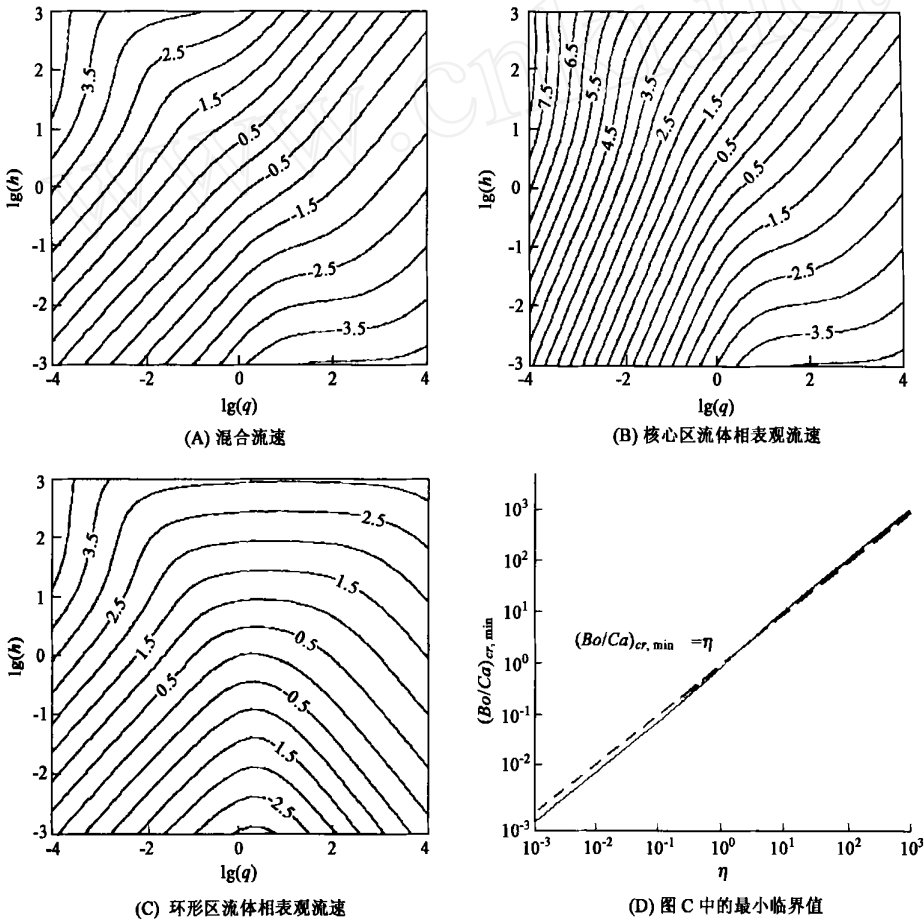


图 2 不同特征速度时 Bond 数和毛细数之比的临界值

Fig. 2 The critical value of the ratio between the Bond number and the capillary number with different characteristic velocities

假设与零重力时环形区厚度与核心区半径之比相比较,有重力作用时相应数值的相对差别不大于 1%时,重力的影响可以忽略,则可由式(2)和式(3)计算出 Bond 数和毛细数

之比的临界值随流量比和粘度比的变化(图 2,其中标注数字为相应等值线对应临界值的自然对数).这里,仅显示了 Bond 数和毛细数之比大于 0 即轻相介质位于核心区的垂直向上流动或重相介质位于核心区的垂直向下流动的情况.对相反方向的流动,Bond 数和毛细数之比为负值,但其临界值的绝对值与上述结果相差甚微.

如前所述,两相流动有 3 个特征速度.为了确定真正反映两相流动特征的速度参量,图 2 分别给出了以混合流速 U_M (图 2A)、核心区流体相表观流速 U_{1S} (图 2B)和环形区流体相表观流速 U_{2S} (图 2C)为特征速度计算的结果.可以看到,选取前两种速度作为特征速度所得到的 Bond 数和毛细数之比的临界值,将随着粘度比和流量比单调增加;而以环形区流体相表观流速为特征速度,在常见的粘度比范围内,其等值线存在一个平台,表明其数值近似地不随粘度比变化,且平台随粘度比增加而扩大.对以环形区流体相表观流速为特征速度的情形,若粘度比不变,该临界值有一最小值 $(Bo/Ca)_{cr,min}$,近似等于粘度比.图 2D 给出了该临界值(实线)与下式

$$(Bo/Ca)_{cr,min} = \frac{1}{2}, \quad \text{其中, } Ca = \mu_1 U_{2S}/\sigma \quad (9)$$

预测结果(虚线)的比较,二者非常接近.

考虑到模拟实验体系一旦选定,粘度比将固定不变,而流量比往往有很大的变化,因此,以环形区流体相表观流速为特征速度将是最恰当的;同时,采用环形区流体相物性参数来定义毛细数,即 $Ca_2 = \mu_2 U_{2S}/\sigma$,则由式(9)可将重力无关性准则近似表示为:

$$|Bo/Ca_2| \leq 1 \quad (10)$$

3 结束语

本文根据两流体同心环状流线性稳定性分析的结果,对微重力气/液两相流地面模拟实验所应遵循的相似准则进行了探讨,得到如下相似准则:

首先,模拟微重力两相流实验应满足重力无关性准则,即无量纲数 Bo/Ca_2 应小于 1.其次,流量比和气相 Weber 数应对应相等.此外,基本流动速度剖面相似还要求粘度比也对应相等,但由于粘度比对流型特征的影响并不明显,对其的限制可以和密度比及 Reynolds 数一样,适当予以放宽.

参考文献

- [1] Zhao J F, Xie J C, Lin H, *et al.* Experimental studies on two-phase flow patterns aboard the Mir space station [J]. *Int J Multiphase Flow*, 2001, 27: 1931 ~ 1944
- [2] 赵建福. 微重力条件下气/液两相流流型研究进展[J]. *力学进展*, 1999, 29(3): 369 ~ 382
- [3] Preziosi L, Chen K, Joseph DD. Lubricated pipelining: stability of core-annular flow [J]. *J Fluid Mech*, 1989, 201: 323 ~ 356
- [4] Hu H H, Joseph D D. Lubricated pipelining: stability of core-annular flow [J]. Part 2. *J Fluid Mech*, 1989, 205: 359 ~ 396
- [5] Chen K, Bai R, Joseph D D. Lubricated pipelining. Part 3: Stability of core-annular flow in vertical pipes [J]. *J Fluid Mech*, 1990, 214: 251 ~ 286
- [6] Aul R W, Olbricht W L. Stability of a thin annular film in pressure-driven, low-Reynolds-number flow through a capillary [J]. *J Fluid Mech*, 1990, 215: 585 ~ 599
- [7] Joseph D D, Bai R, Chen K P, *et al.* Core-annular flow [J]. *Ann Rev Fluid Mech*, 1997, 29: 65 ~ 90

- [8] Carron I, Best F R. Gas-liquid annular flow under microgravity conditions: a temporal linear stability study [J]. *Int J Multiphase Flow*, 1994, 20 (6): 1085 ~ 1093
- [9] Schlichting H. *Boundary Layer Theory*[M]. New York: Mc Graw-Hill, 1968
- [10] W9 lk G, Dreyer M, Rath HJ. Gas/ liquid two-phase flow under low gravity conditions [J]. *ZAMM*, 2001, 81: S577 ~ S578
- [11] Zhao L, Rezkallah K S. Gas-liquid flow pattern at microgravity conditions [J]. *Int J Multiphase Flow*, 1993, 19: 751 ~ 763
- [12] Lowe D C, Rezkallah K S. Flow regime identification in microgravity two-phase flows using void fraction signals [J]. *Int J Multiphase Flow*, 1999, 25: 433 ~ 457
- [13] Zhao J F, Hu W R. Slug to annular flow transition of microgravity two-phase flow [J]. *Int J Multiphase Flow*, 2000, 26: 1295 ~ 1304

Novel Investigation on the Principle of Similarity for Microgravity Two-phase Flow

ZHAO Jianfu, HU Wenrui

(National Microgravity Laboratory/ CAS, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

In the present paper, the principle of similarity for two-phase flows at microgravity is studied based on the results of the linear stability analysis of the two-fluid concentric annular flow configuration. A new criterion of gravity-independence, namely the absolute value of the ratio between the Bond number and the capillary number of the phase flowing in the annulus is no more than one, is achieved. It is also pointed out that the flowrate ratio and the gas superficial Weber number must have the same values as their counterparts in the simulated flow in order to simulate correctly the behavior of two-phase flow at microgravity.

Key words microgravity, two-phase flow, simulating test, principle of similarity