0254-6124/2011/31(3)-355–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Liang Ruquan, Liang Shuang, Ji Junhong, M. Nasr-Esfahany, N. Ichikawa, M. Kawaji. Effect of G-Jitter on multiphase fluid systems. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(3): 355-360

重力跳动对多相流体系统的影响*

梁儒全[1] 梁 爽[2] 纪俊红[1]

1(东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室 沈阳 110819)

2(东北大学研究生院 沈阳 110819)

M. Nasr-Esfahany N. Ichikawa M. Kawaji

(多伦多大学化学工程与应用化学系 多伦多 M5S 3E5, Canada)

摘 要 研究了重力跳动对液桥表面及内部流体流动的影响, 以期明确重力跳动对多相流体系统的作用效果. 理论研究表明, 当重力跳动作用于液桥时, 液桥反响频率的大小取决于液桥尺寸和物性参数; 实验研究显示重力跳动引入的液桥表面振动、液桥内部流动与温度振动之间存在着三角耦合关系; 数值模拟结果揭示了重力跳动作用于液桥时液桥内部流体的流动结构. 另外, 对理论、实验与数值模拟结果进行了对比验证, 得到了吻合一致的结果.

关键词 重力跳动, 液桥表面, 反响行为, 液桥内部结构

中图法分类号 P 524

Effect of G-Jitter on Multiphase Fluid Systems

LIANG Ruquan[1] LIANG Shuang[2] JI Junhong[1]

1(*Key Laboratory of National Education Ministry for Electromagnetic Processes of Materials, Northeastern University, Shenyang* 110819)

2(*Graduate School of Northeastern University, Shenyang* 110819)

M. Nasr-Esfahany N. Ichikawa M. Kawaji

(*Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, University of Toronto, Toronto M5S 3E5, Canada*)

Abstract The effects of G-Jitter on the surface oscillation and internal flow structure of a liquid bridge have been investigated in order to understand the effect of G-Jitter on the multiphase fluid systems. The theoretical analysis shows that the resonance frequency of the liquid bridge changes depending on the size and physical property of the liquid bridge. The experimental study indicates that there may be a triple coupling link between the vibration-induced surface oscillations and flow/temperature oscillations inside the liquid bridge. The numerical results reveal the flow structure inside the liquid bridge when G-Jitter is applied on the liquid bridge. Moreover, our results from the theoretical analysis as well as experimental study are compared with those from the numerical

* 国家自然科学基金项目 (11072057) 和加拿大空间局基金项目 (CSA 9F007-02-6019) 共同资助

2009-12-07 收到原稿, 2010-12-26 收到修定稿

E-mail: liang@epm.neu.edu.cn

simulation, and the theoretical and experimental results match the numerical ones well.

Key words G-Jitter, Liquid bridge surface, Resonance behavior, Internal structure of liquid bridge

1 引言

微重力环境下, 卫星、飞船、探空火箭、空间站等空间飞行器均受到重力跳动的作用. 这种重力跳动实际上是一种空间微小加速度, 来源于宇航员舱内活动、仪器操作和飞行器姿态调整等. 微重力环境下重力跳动可能具有较宽的频谱, 其能够在密度非均匀分布的多相流体系统中引起流体运动, 而这种流体运动有可能对多相流体系统产生不利的影响. 因此, 研究重力跳动对流体系统的影响及其作用机制, 对有效地减缓或利用这种作用具有重要意义. 利用空间微重力环境, 中国的返回式卫星已成功地进行了多次空间科学实验 [1−2]. 目前中国的返回式卫星微重力水平在 $10^{-3} \sim 10^{-5}\,g$ ($g = 9.81\,\mathrm{m/s^2}$) 的范围. 控制重力跳动的主要方法包括提高微重力水平和开发重力跳动隔振装置. 提高微重力水平需要在两个方面采取措施 [3]: ①提高轨道高度, ②减少动力部件对微重力环境的影响. 在重力跳动的前期理论研究方面, Liu 等 [4] 研究了高频外加振动下两层流体系统中 Marangoni-Benard 对流和 Rayleigh-Marangoni-Benard 对流热振动不稳定性, 其研究结果表明垂直于界面的外加振动可以加强两层流体系统的稳定性和减缓对流, 而水平外加振动可以加强系统的不稳定性, 使系统易于失去稳定.

为减缓或消除空间实验中重力跳动对实验的影响, 特别是高频跳动的影响, 自 20 世纪 90 年代, 加拿大空间局 (CSA) 对微重力环境下隔振技术进行了较系统的研究, 并开发了重力跳动隔振装置 (Microgravity Vibration Isolation Mount, MIM). 第一代重力跳动隔振装置 MIM-1 于 1996 年 4 月搭载于俄罗斯 MIR 空间站, 在该隔振装置上成功地进行了 3000 h 以上的科学实验. 1997 年 8 月第二代重力跳动隔振装置 MIM-2 搭载于美国 STS-85 发现号, 进行了第二次飞行, 在这次空间实验中加拿大宇航员 Bjarni Tryggvason 在 11 天的飞行中利用 MIM-2 进行了 5 项空间实验. 第三代重力跳动隔振装置 (Microgravity Vibration Isolation Subsystem, MVIS) 已运用于欧空局流体科学实验室, 而最新一代重力跳动隔振装置是 MIM Base Unit (MIMBU). 重力跳动隔振装置系列已成功应用于多种微重力流体物理与材料科学实验, 其中包括扩散控制过程、界面质量交换、地球物理流体流动等研究.

本研究以半浮区液桥为研究对象, 采用理论解析、实验研究和基于 Level Set 法的三维直接数值模拟相结合的方法, 分别针对等温与非等温液桥施加微小振动, 综合研究了重力跳动对气–液两相流体系统内部流动结构和气–液自由表面运动行为的影响.

2 解析模型

基于弹性–质量–衰减分析, 建立微重力条件下重力跳动引起的液桥表面振动的解析模型, 给出液桥对于水平方向的微小振动的反响频率的计算公式 [5−6]. 微重力场下考虑一个柱状液桥, 对其施加一个水平强制外部振动 $A\sin\omega t$, 弹性–质量–衰减系统的摆动控制方程为

$$m\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + 2mk\frac{\partial x}{\partial t} + m\omega_0^2 x = A\sin\omega t. \tag{1}$$

其中, m 为移动液体的质量, x 为液桥质量中心的位移, k 为衰减系数, ω_0 为恢复系数, A 为外力的摆动振幅, t 为时间. 当 $k < \omega_0$ 时, 求解上述方程, 可以得到

$$x = C\,\mathrm{e}^{-kt}\cos(\sqrt{\omega_0^2 - k^2}t + \beta) + \frac{1}{\sqrt{(\omega_0^2-\omega^2)^2 + 4k^2\omega^2}}\frac{A}{m}\sin(\omega t - q). \tag{2}$$

其中, C 和 β 均为常数, q 可由 $\tan q = 2k\omega/(\omega_0^2 - \omega^2)$ 确定. 式 (2) 右侧第二项为特解, 其表明液桥对外部强制摆动的响应运动, 当 $k < \omega_0/\sqrt{2}$, 该项在如下角频率时具有一个局部的最大值, 即

$$\omega_\mathrm{r} = \sqrt{\omega_0^2 - 2k^2}. \tag{3}$$

式 (3) 给出了系统的反响频率 ω_r, 此时液桥具有最大振幅. 通过对液桥表面的压差积分, 可以得到

$$\omega_0 = \sqrt{\sigma D\frac{4}{H}\pi\frac{1}{m}} =$$

$$\sqrt{\sigma D\frac{4}{H}\pi\frac{4}{\rho_l\pi D^2H}\frac{1}{B}}=\frac{4}{H}\sqrt{\frac{\sigma}{D\rho_l}\frac{1}{B}}. \tag{4}$$

因而可以得到反响频率

$$f_{\rm r}=\frac{\omega_{\rm r}}{2\pi}=\frac{2}{\pi H}\sqrt{\frac{\sigma}{D\rho_l B}}. \tag{5}$$

式中, H 和 D 分别为液桥的高度和直径, ρ_l 和 σ 分别为液桥密度和表面张力系数, B 是一个引入的参数, 表示液桥移动质量与总质量之比. 当引入无量纲数 $A_{\rm r}$ ($A_{\rm r}=H/D$), 式 (5) 可以表示为

$$2\pi f_{\rm r}\Big/\sqrt{\frac{\sigma}{\rho_l D^3}}=4\sqrt{\frac{(D/H)^2}{B}}, \tag{6}$$

$$\omega_{\rm r}\Big/\sqrt{\frac{\sigma}{\rho_l D^3}}=\frac{4}{\sqrt{B}}(A_{\rm r})^{-1}. \tag{7}$$

式 (5) 表明当水平方向重力跳动作用于液桥时, 液桥反响频率的大小取决于液桥的尺寸和物性参数, 即液桥反响频率随液桥高度、直径和密度的增加而减小, 随液桥表面张力系数增加而增大.

3 实验研究

通过地面实验研究了重力跳动对多相流体系统的影响 [5]. 研究对象为 5cSt 硅油液桥, 液桥直径为 7.0 mm, 高度为 3.5 mm. 图 1 为实验装置. 由计算机控制的振动台对液桥施加正弦微小振动, 振动的频率范围为 0.1~20 Hz, 振动台最大位移为 3.5 mm, 高速照相机、加速度测量仪 (Dytran, Model 3191A1) 与液桥设置在同一振动台, 分别用于监测液桥表面运动和加速度水平. 图 2 所示为液桥模型, 图 3 给出了振动台对液桥施加的加速度水平. 图 4 给出了无外界振动情况下, 不同温差时液桥表面振动的振幅. 在图 4 中, 实验使用的高速照相机的解像度为 2 μm, ΔT 表示液桥上下盘的温度差, $\Delta T_{\rm cr}$ 表示临界温差. 由图 4 可见, 在不施加任何外界振动情况下, 任何温差时液桥表面最大振幅均小于 4 μm. 另外, 振动台对液桥施加图 3 所示的加速度振动时, 随着液桥上下盘温度差的变化, 液桥表面以不规则的变振幅方式发生振动. 图 5 表明了不同上下盘温差时, 液桥表面摆动的最

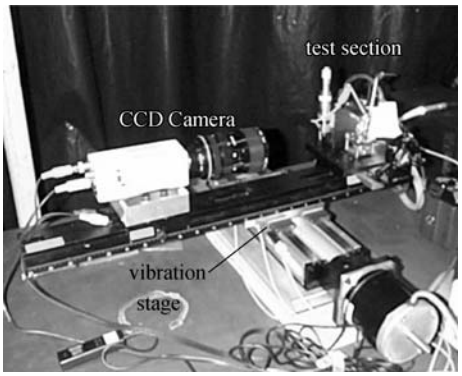

图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus

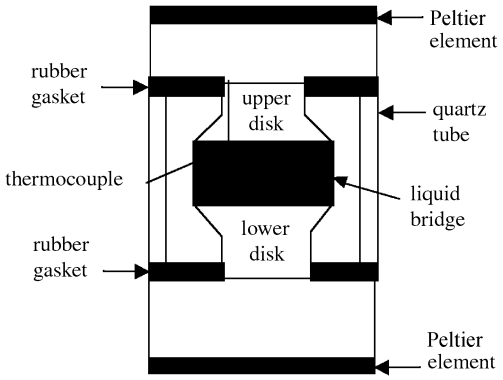

图 2 液桥模型

Fig. 2 Schematic of a liquid bridge

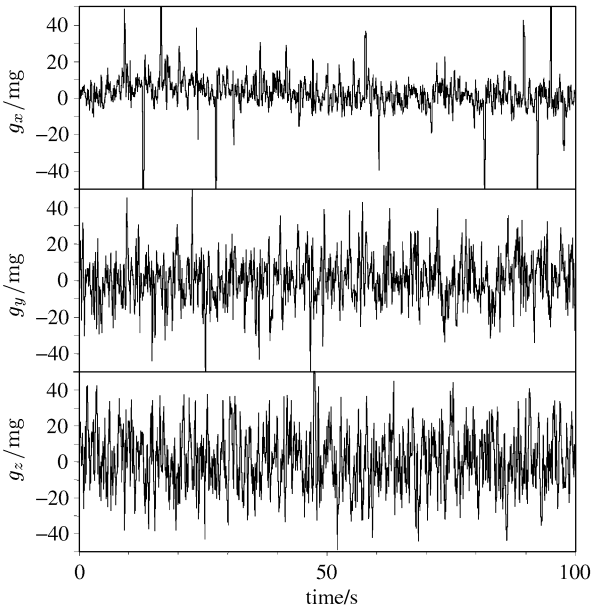

图 3 振动台上测得的 x, y, z 三个方向的加速度水平

Fig. 3 Acceleration levels in x, y, z directions measured on a stage

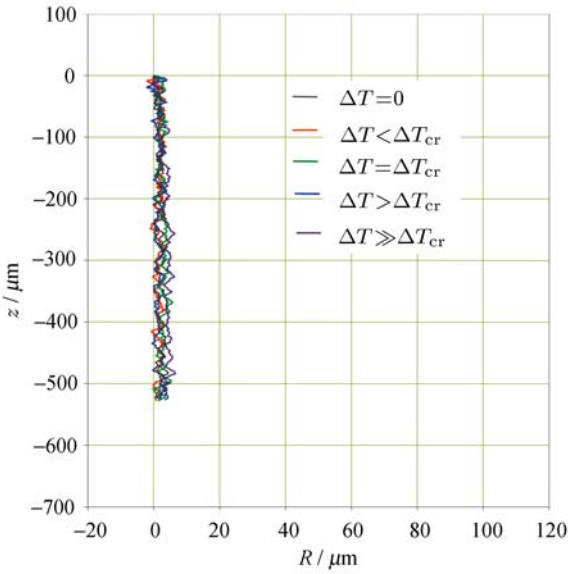

图 4 无外加振动不同温差时液桥表面最大振幅

Fig. 4 Peak surface oscillation amplitude of a liquid bridge at different temperature differences without external vibration

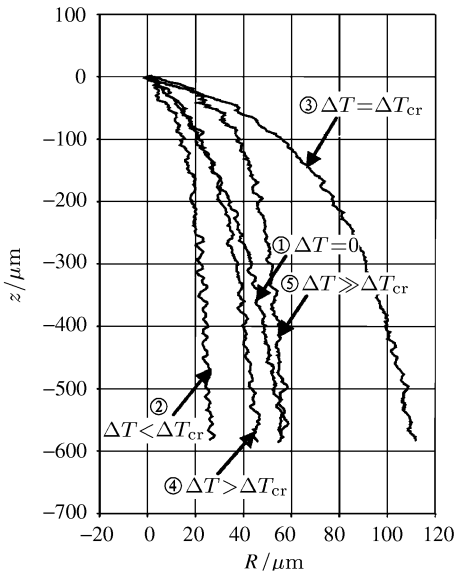

图 5 外加振动作用下不同温差时液桥表面最大振幅

Fig. 5 Peak surface oscillation amplitude of a liquid bridge at different temperature differences with external vibration

大振幅的变化. 当无温度差时, 即 $\Delta T = 0$, 最大振幅由热角下方 100 μm 处的 20 μm 增加到热角下方 500 μm 处的 50 μm. 降低下盘温度而保持上盘温度一定, 热角下方液桥表面温度下降而表面张力增加. 表面张力的增加对于液桥表面振动具有稳定作用, 因此增加 ΔT 至 $\Delta T < \Delta T_{\rm cr}$ 时, 最大振幅减小, 大约减小到了 $\Delta T = 0$ 时最大振幅的一半. 继续增加温度差 ΔT 至临界温差 $\Delta T_{\rm cr}$, 尽管液桥的平均温度降低, 表面张力对液桥表面的稳定作用增大, 但最大振幅仍明显增大. 进一步增大温差 ΔT 至 $\Delta T > \Delta T_{\rm cr}$, 导致最大振幅有较大幅度的下降. 上述结果表明, 在施加外界振动的条件下, 液桥表面振动的振幅与上下盘温差具有明显的依赖关系. 当温度差 ΔT 增加到临界温差 $\Delta T_{\rm cr}$, 振荡流的摆动能量表现为液桥表面的反响振荡. 在较大的温差情况下 ($\Delta T > \Delta T_{\rm cr}$), 液桥内部形成的较强的对流涡耗散了液桥的摆动能, 导致最大振幅减小. 以上结果表明, 当外界对液桥施加振动时, 振动引入的表面振动、液桥内部流动与温度的振动之间存在着三角耦合关系.

4 数值模拟

采用三维直接数值模拟的方法, 研究了重力跳动对等温液桥表面振动及内部流动结构的影响 [5,7]. 使用 Level Set 法跟踪与模拟液桥表面运动, 将正弦函数形式的微小水平振动施加于液桥, 以模拟重力跳动的影响效果. 本研究中采用的加速度水平范围为 $5 \times 10^{-3} \sim 20 \times 10^{-3}\, g$, 施加的振动频率为 3 ~ 21 Hz.

采用的控制方程中包含微小水平加速力以及粘性与表面张力的影响效果如下:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \tag{8}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u\frac{\partial u}{\partial x} - v\frac{\partial u}{\partial y} - w\frac{\partial u}{\partial z} + F_{\rm GX} + \frac{1}{\rho}\Big[-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{Re}\Big(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\Big) + \frac{1}{Bo}\kappa\delta(d)\boldsymbol{n}\Big], \tag{9}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u\frac{\partial v}{\partial x} - v\frac{\partial v}{\partial y} - w\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{\rho}\Big[-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{Re}\Big(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\Big) + \frac{1}{Bo}\kappa\delta(d)\boldsymbol{n}\Big], \tag{10}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -u\frac{\partial w}{\partial x} - v\frac{\partial w}{\partial y} - w\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{\rho}\Big[-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{Re}\Big(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\Big) + \frac{1}{Bo}\kappa\delta(d)\boldsymbol{n}\Big]. \tag{11}$$

其中, u, v, w 分别表示 x, y, z 方向的流体速度; p 表示压力; ρ 和 μ 分别表示流体的密度和粘度; κ 表示界面曲率; δ 表示迪拉克 δ 函数; d 表示任意点到界面的法向距离, $\boldsymbol{n}$ 表示界面单位法向矢量, Re 和 Bo 分别为雷诺数和 Bo 数, $F_{\rm GX}$ 表示微小加速度引入的体积力. 液桥的直径与高度分别为 7.0 mm 和 3.5 mm, 零重力场中对液桥沿 x 方向施加的频率为 5.0 Hz、加速度水平为 $20\times10^{-3}\,g$ 的正弦加速度. 图 6 给出了液桥中间高度截面上三个特征点处 x 方向速度分量的时间变化. 三个特征点分别为 x 方向液桥表面点 (1.5, 1)、截面中心点 (1, 1) 和 y 方向液桥表面点 (1, 0.5). 经过初期过渡阶段 ($t > 0.3$ s), 三个特征点处 x 方向速度分量均表现出正弦函数形式的波动变化规律. 液桥表面点 (1.5, 1) 处的 x 方向速度分量以大约 5.0 Hz 的频率波动, 并伴随有高频、小振幅的振动. 在 x 方向对称轴线上的 (1, 1) 和 (1.5, 1) 处, x 方向速度分量具有基本一致的位相. 由于微小加速度的作用, 液桥内部形成了复杂的流动结构, 使 y 方向液桥表面点 (1, 0.5) 处的 x 方向速度分量与其他两点 (1, 1) 和 (1.5, 1) 处 x 方向速度分量形成了一定的位相差. 图 7 给出了液桥中间高度截面上的典型流线. 由图 7(a) 可以看出, 在 x 方向外加微小加速度的作用下, 液桥内部形成了几个涡流. 在微小加速度振动方向可以看到对称线的存在, 靠近对称线形成了 4 个较小的旋涡, 距对称线较远处形成两个较大的旋涡. 如图 7(b) 所示, 当微小加速度周期性地改变振动方向后, 所有的旋涡均改变了旋转方向, 其中两个较大的旋涡在改变旋转方向的同时由左侧向右侧移动, 即在 x 方向发生了较大位移. 这两个较大旋涡在 x 方向的移动影响了 y 方向液桥表面点 (1, 0.5) 处的 x 方向速度分量, 使 (1, 0.5) 处的 x 方向速度分量滞后于 (1.5, 1) 和 (1, 1) 处的 x 方向速度分量, 二者之间产生了一定的位相差. 图 8 给出了液桥反响频率与液桥密度之间的关系. 无论是数值计算还是理论分析, 结果均表明液桥反响频率随液桥密度的增大而减小, 而且数值计算与理论分析结果吻合较好, 特别是当 $B = 0.9$ 时二者吻合更好, 这里 B 为理论模型中引入的参数, 表示液桥移动质量与总质量之比. 同时还对常重力环境中微小加速度跳动的影响效果

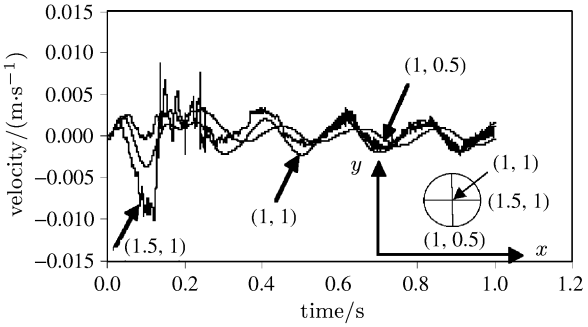

图 6 在 x 方向外加振动作用下液桥中间高度截面上 x 方向速度分量的时间变化

Fig. 6 Temporal variations of x component of velocity at a mid-height plane of a liquid bridge under applied vibration in x direction

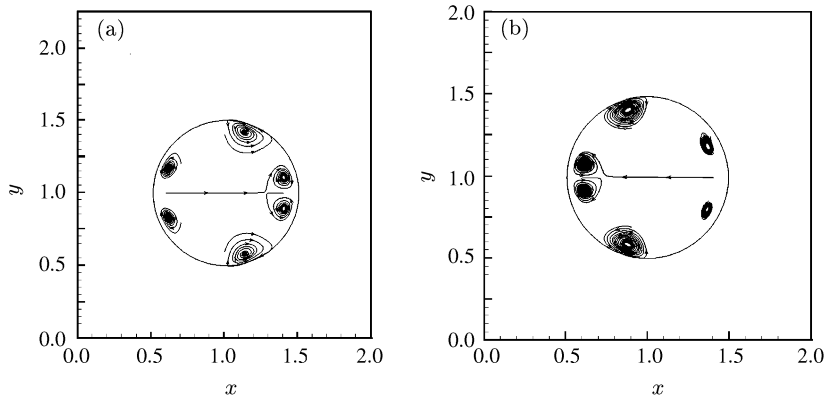

图 7 液桥中间高度截面上外加水平振动引入的典型流线

Fig. 7 Typical streamlines at mid-height plane of a liquid bridge induced by horizontal vibration applied

进行了模拟, 图 9 给出了重力场下液桥径高比对液桥反响频率的影响, 其中包括了与实验对应的环境中液桥反响频率的数值计算与实验结果的对比. 计算结果表明, 随着液桥径高比的增加, 液桥的反响频率逐渐减小, 在实验对应的环境中液桥反响频率的数值计算与实验结果吻合较好. 另外, 在改变单一与复合外加振动频率与加速度水平的情况下, 数值模拟了液桥表面的振荡行为与控制环节, 探讨了外加振动频率变化的影响规律, 研究表明, 当外加振动的频率为液桥反响频率时, 该外加振动完全控制了液桥表面的振荡过程 [7].

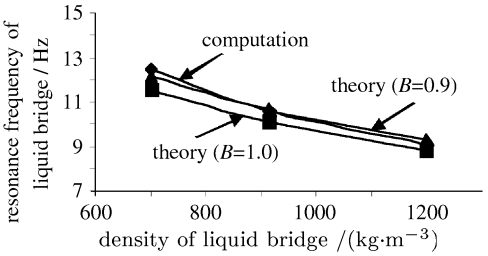

图 8 零重力场下液体密度对液桥反响频率的影响

Fig. 8 Effect of liquid density on the resonance frequency of a liquid bridge under zero gravity

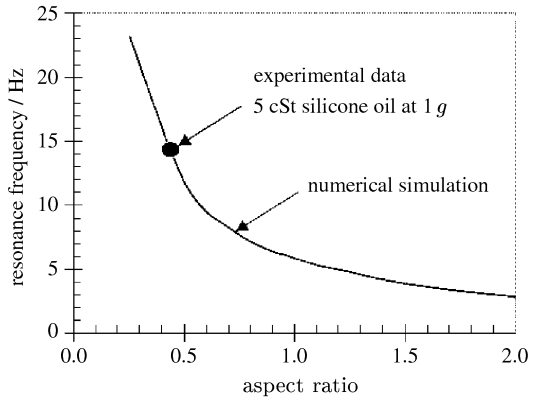

图 9 重力场下液桥径高比对液桥反响频率的影响

Fig. 9 Effect of aspect ratio on the resonance frequency of a liquid bridge under gravity

5 结论

重力跳动是一种周期性变化的微小加速度, 当它以一种周期性变化的体积力方式作用于流体系统时, 流体系统必然按照体积力的作用方向、大小和频率的不同产生相应的运动. 具有密度非均匀分布的多相流体系统更容易受到重力跳动的作用, 从而影响多相流体系统的临界参数、转淚 过程和振荡机理. 本研究对半浮区液桥进行了理论解析、实验研究及基于 Level Set 法的三维直接数值模拟. 理论分析模型表明, 可以通过液桥高度、直径和物性参数确定其反响频率的大小; 实验研究结果表明, 液桥表面振动的振幅与上下盘温差具有明显的依赖关系, 振动引入的表面振动、液桥内部流动与温度的振动之间存在着三角耦合关系; 三维直接数值模拟结果揭示了振动引入的液桥内部流动结构.

参考文献

[1] Liu Q S, *et al*. Progress on microgravity sciences in China [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2006, **26**(supp.):150-159

[2] Zhao Jianfu, *et al*. Study on pool boiling heat transfer in microgravity [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(1):145-149. In Chinese (赵建福, 等. 微重力池沸腾传热研究 [J]. 空间科学学报, 2009, **29**(1):145-149)

[3] Li Chunhua, *et al*. Recoverable satellites and space scientific experiments in China [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(1):124-129. In Chinese (李春华, 等. 中国返回式卫星与空间科学实验 [J]. 空间科学学报, 2009, **29**(1):124-129)

[4] Liu Q S, *et al*. Thermo-vibrational instability of Rayleigh-Marangoni-Benard convection in two-layer fluid systems [J]. *Adv. Space Res.*, 2008, **41**:2131-2136

[5] Kawaji M, *et al*. The effect of small vibrations on Marangoni convection and the free surface of a liquid bridge [J]. *Acta Astron.*, 2006, **58**:622-639

[6] Ichikawa N, *et al*. Resonance behavior of a liquid bridge caused by horizontal vibrations [J]. *J. Jap. Soc. Microg. Appl.*, 2003, **20**(4):292-299

[7] Liang R Q, *et al*. Surface oscillation of a liquid bridge induced by single and multiple vibrations [J]. *Microg. Sci. Tech.*, 2009, **21**:31-37