

·基础研究·

部分重力驱动的两相流体自然循环回路 传热性能的数值仿真

赵建福¹ 李震东¹ 苗建印² 张红星² 向艳超² 张 良^{1,3} 杜王芳^{1,4}

(1. 中国科学院力学研究所微重力重点实验室, 北京 100190; 2. 中国空间技术研究院北京空间飞行器总体设计部空间热控技术北京市重点实验室, 北京 100094; 3. 国家核电技术有限公司北京软件技术中心, 北京 102209; 4. 国家核电技术有限公司北京研发中心, 北京 102209)

摘要: 针对部分重力辅助两相流体自然循环系统构建了数值仿真模型, 对不同运控条件下的月面部分重力场 ($g/6$) 和地面常重力场 ($1g$) 的嫦娥三号月球车两相流体自然循环系统稳态性能进行了数值仿真研究。数值仿真结果表明, 地面重力场模拟系统能够真实反映月面重力场应用系统的性能; 对于月面部分重力场中的两相流体自然循环系统, 随着系统压力的增加, 绝大多数工况下系统阻力减小, 但在环境温度较高时, 系统特性参数对系统阻力存在双值现象, 可能存在系统不稳定现象, 引起系统波动, 甚至传热恶化。

关键词: 两相流体自然循环系统; 嫦娥三号; 月球重力; 系统特性; 数值仿真

中图分类号: TK1245, O359⁺.1, V423.6⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1674-5825(2015)01-0064-05

DOI:10.16329/j.cnki.zrht.2015.01.012

Numerical Simulation of Heat Transfer in Closed Two-phase Natural Circulation System Driven by Partial Gravity

ZHAO Jianfu¹, LI Zhendong¹, MIAO Jianyin², ZHANG Hongxing²,
XIANG Yanchao², ZHANG Liang^{1,3}, DU Wangfang^{1,4}

(1. Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Beijing Key Laboratory of Space Thermal Control Technology, Institute of Spacecraft System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China; 3. State Nuclear Power Software Development Center, Beijing 102209, China; 4. State Nuclear Power Technology Corporation Research & Development Center, Beijing 102209, China)

Abstract: A numerical simulation model for the heat transfer in the closed two-phase natural circulation system driven by partial gravity was established. The simulations of steady operation characteristics of the two-phase loop designed for the Chinese lunar exploration spacecraft Chang'E-3 in lunar gravity ($g/6$) and of a ground-based simulator in normal gravity ($1g$) showed a satisfied agreement, indicating that the ground-based simulator in normal gravity may be used to successfully simulate the characteristics of the practical two-phase loop in lunar gravity. The simulations of the practical two-phase loop in lunar gravity reveal that the system resistance usually decreases monotonously with the increase of the system pressure, except the case of high ambient temperature where a dual-value dependences of the system characteristic parameters on the system resistance will appear, indicating some possible instability of the two-phase loop, even deterioration of heat transfer.

Key words: closed two-phase natural circulation system; Chang'E-3; lunar gravity; system characteristics; numerical simulation

收稿日期: 2014-07-26; 修回日期: 2014-12-24

作者简介: 赵建福(1967-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为微重力多相热流体动力学(气液两相流动、沸腾传热、液体真空闪蒸射流、凝结换热)基础及其空间应用。E-mail: jfzhao@imech.ac.cn

1 引言

深空探测往往面临着极为恶劣的温度环境以及紧缺的能源供应等方面的严峻挑战。例如,在我国探月工程中,嫦娥三号月球探测器成功着陆月球表面后,着陆器将工作 12 个月(即 12 个月球昼夜),巡视器将工作 3 个月。月球表面的温度在月昼时高达 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$,而月夜则低至 $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$,探测器热控分系统面临的最大挑战是如何在没有能源供给的情况下帮助探测器度过长达 14 个地球日的月夜,确保巡视器和着陆器中的仪器设备处于适宜的温度水平。中国空间技术研究院设计了一种 $g/6$ 重力驱动的两相流体自然循环回路(热虹吸环路),来实现在月球表面的热量高效传输,以满足巡视器和着陆器温控要求。2013 年嫦娥三号月球探测器成功着陆并开展巡视活动,两相流体回路正常工作,经历了月昼、昼夜转换、月夜等多个工况,功能和性能完全满足使用要求^[1]。

两相流体回路在我国嫦娥三号月球探测器上的成功应用是此类回路在全球航天器设计上的首次应用。两相流体回路的驱动力和阻力决定其传热能力,但驱动力和阻力受重力加速度的影响,地球和月球表面重力加速度的差异导致了地面等效验证的困难。采用数值仿真技术对月球表面重力加速度条件下的两相流体回路系统特性进行研究,对确定两相流体回路运控特性、保障任务顺利实施具有重要作用。

本文将主要以嫦娥三号月球探测器用的流体回路为例,对不同运控条件下月面应用系统($g/6$)和地面模拟试验系统($1g$)的两相流体回路系统性能进行了数值仿真研究。基于数值仿真结果,对系统稳定性进行了讨论。

2 数值仿真模型

图 1 给出了嫦娥三号月球探测器巡视器两相流体自然循环系统布局示意图^[1],该回路包括蒸发器(包括分流环、4 个并联的蒸发管和汇流环)、蒸气回路、冷凝器、储液罐和液体回路等,管壳材料不锈钢,工质为氦。

数值仿真的主要目的在于分析系统的稳定工作特性,即得到稳定运行时系统压力、环境温度(这里指仪器舱内部温度,是冷凝器辐射换热所



图 1 月球重力驱动的两相流体自然循环系统布局^[1]
Fig. 1 Layout of a closed two-phase natural circulation system driven by lunar gravity^[1]

对应的环境温度)、系统流量、冷凝器和蒸发器热量等物理量之间的关系,为简便起见,数值仿真中对储液器、蒸气管路、液体管路、蒸发器采用的是集总参数模型,而对冷凝器则是采用分布参数模型,即将整个冷凝管划分成若干个微元,对每个微元分别进行换热和压降计算。具体假设如下:

- 1) 流动为一维流动;
- 2) 管段各节点饱和气、液两相的物性按照系统设定压力对应的饱和物性计算,不考虑沿程压降对物性参数的影响;
- 3) 储液器、蒸气管路、液体管路绝热,不考虑漏热影响;
- 4) 将汇流环和分流环作为局部阻力单元计算其阻力,不考虑三通位置分布对汇流环和分流环阻力特性的影响;
- 5) 4 个并联的蒸发段流动阻力与传热特性一致,蒸发管壁面热负荷沿程均匀分布,不考虑管间振荡效应;
- 6) 冷凝管内流动阻力与传热的计算采用基于流型的方法构建相关模型^[2],忽略重力对流型特性的影响。

基于上述假设,可以推导得到如式(1)~(3)所示的两相流体回路系统的控制方程:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ G^2 \left[\frac{(1-x)^2}{\rho_L(1-\alpha)} + \frac{x^2}{\rho_G\alpha} \right] \right\} = - \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{fG^2}{2d_i\rho} - \rho g \sin\theta \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(Gh)}{\partial z} = \frac{q}{A} \quad (3)$$

方程(1)~(3)中, G 、 t 、 z 、 ρ 、 x 、 α 、 p 、 g 、 f 、 d_i 、 θ 、 h 、 q 、 A 分别为质量流率、时间、轴向坐标、密度、干度、空隙率、当地压力、重力加速度、摩擦因子、管路内

径、流动方向与水平方向的夹角、比焓、单位长度的换热量及控制容积的横截面积,下标 L 、 G 分别代表液相和气相。

对于闭式的自然循环两相流体回路,驱动力等于阻力,因此压力平衡关系如式(4):

$$\oint (\Delta p_f + \Delta p_a + \Delta p_g) dz = 0 \quad (4)$$

式中 Δp_f 、 Δp_a 和 Δp_g 分别代表摩擦压降、加速压降和重位压降。而除冷凝器和蒸发器外的其他部件绝热假设,则意味着氨工质在蒸发器内吸收的热量等于其在冷凝器内放出的热量。

冷凝管内气液两相流型判断准则如式(5)~(7):

$$\text{环状流: } 0.8 \leq \alpha \leq 1 \quad (5)$$

$$\text{弹状流: } 0.45 \leq \alpha < 0.8 \quad (6)$$

$$\text{泡状流: } 0 \leq \alpha < 0.45 \quad (7)$$

赵建福和彭浩^[3]对地面常重力和空间微重力环境冷凝气液两相流压降的实验测试与数据分析进行了系统评述,指出在小管径、低质量流率情形中,冷凝气液两相流的摩擦阻力与重力无关,并且在最为常见的环状流情形中,两相摩擦阻力要小于基于常规气液两相流实验数据的经验关联式(如 Chen^[4]模型)的预测结果,而更接近光滑环状流关系或 Duschatko^[5]模型的预测。不过,为安全起见,数值仿真中同时采用了 Chen^[4]和 Duschatko^[5]模型,以便考察系统可能的性能边界。

最后,地面模拟试验系统要求满足工质充注量不变、系统总容积不变、流体管路总长度不变、驱动力不变等基本原则,其中,“驱动力不变”原则意味着在地面 $1g$ 常重力环境中的模拟系统中,驱动高度是月球 $g/6$ 部分重力场中的实际应用系统驱动高度的 $1/6$,储液器截面积则是月球重力场应用系统的 6 倍。不过,由于受同位素热源(RHU)的限制,蒸发器结构与尺寸难以改变,地面模拟试验系统无法做到完全的尺度相似,“驱动力不变”原则的实现依赖于蒸发器模型。本文假设的“蒸发管壁面热负荷沿程均匀分布”,使得干度沿程表现为线性增长,由于气相密度远小于液相密度,干度的线性增长对应于含气率的急剧增加,在绝大部分的蒸发管内含气率趋于出口值,从而可以将蒸发器内部近似地看作全“空”(这里的“空”是指介质状态与上升管内一致,若

出口干度为 1 ,则对应全蒸气状态;若出口干度小于 1 ,则为气液两相混合状态)。这样,在确定地面模拟试验系统驱动高差时,可以忽略蒸发器内部液相介质分布的不均匀性对驱动力的影响。

3 数值仿真结果与分析

3.1 月面应用系统与地面模拟系统间的性能比较

针对月面应用系统和地面模拟试验系统的数值仿真,主要核算了不同系统在相应的重力加速度(月面重力场 $g/6$ 和地面常重力 $1g$) 条件下的性能参数,包括系统阻力、系统质量流量、系统换热量、冷凝器进口干度等。具体的数值仿真工况参数范围如下:

重力加速度: $g/6$ (1.633 m/s^2)、 $1g$ (9.8 m/s^2)

系统压力 p_{sys} : $500 \sim 1500 \text{ kPa}$

工作温度 T_{sat} : $3.1 \sim 37.1 \text{ }^\circ\text{C}$

环境温度 T_{am} : $-60 \sim -10 \text{ }^\circ\text{C}$

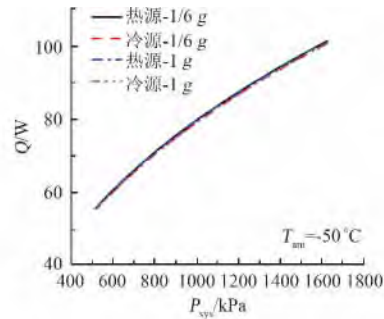


图 2 蒸发器与冷凝器换热量随系统压力的变化
Fig. 2 Variation of the heat transfer in the evaporator and in the condenser with the system pressure

典型的数值仿真结果示于图 2~4。仿真结果表明,对于同样的工况条件,月球部分重力场($g/6$)和地面常重力场($1g$)中的 2 套系统性能吻合良好(误差不超过 1%),说明尽管无法完全实现尺度相似的要求,但地面重力场模拟系统依然能够较好地反映月球重力场应用系统的性能。

图 5 给出了系统阻力与系统压力的对应关系:对于固定的环境温度,绝大多数工况下系统阻力随着系统压力的增加而减小;对于固定的系统压力,系统阻力一般随着环境温度的增加而减小。前者是由于系统压力的增加会使气相密度近似正比地增加,同时也使液相密度显著下降,这导致两相密度差的显著降低,进而导致系统驱动力(及

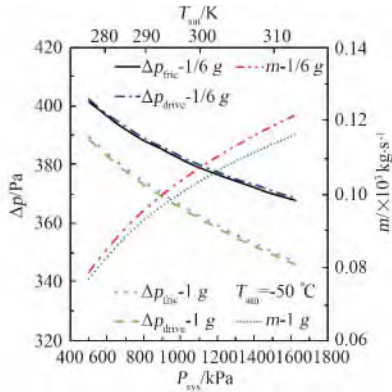


图 3 质量流量、系统阻力及驱动力与系统压力的关系
 Fig. 3 Relationship of the mass flow rate, system resistance and driven force with the system pressure

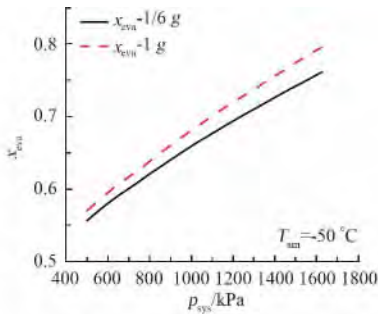


图 4 蒸发器出口干度随系统压力的变化
 Fig. 4 Variation of the vapor quality at the outlet of the evaporator with the system pressure

与其平衡的系统阻力) 的下降; 后者是由于随着环境温度的增加, 冷凝器的换热温差减小, 使冷凝量减小, 冷凝器进口干度减小, 从而导致系统阻力减小。然而, 在环境温度较高的情况下 ($T_{amb} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$), 系统阻力随着系统压力的增加先增加后减小。这是因为环境温度较高的情况下, 随着系统压力的增加, 冷凝器进口处的流型从弹状流过渡到环状流(冷凝器进口空隙率随系统压力的变化见图 6, 其中标示了弹-环状流型转换边界的位置)。流型的转变导致储液器液位高度的变化。尽管两相密度差随系统压力增加而降低, 但系统驱动力(及与其平衡的系统阻力)随着系统压力的增加先增加后减小。

3.2 两相系统运行性能特征

鉴于前述结果, 月面应用系统和地面模拟试验系统性能基本一致, 后续讨论将只考虑前者, 即针对实际的月面应用系统进行数值仿真和分析。

图 7 给出了系统质量流量与系统压力的对应

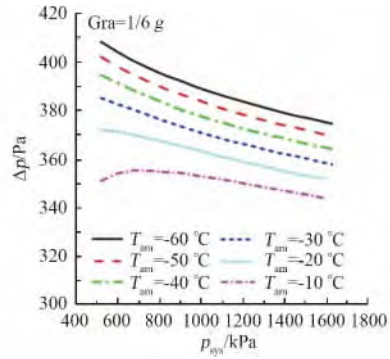


图 5 系统阻力与系统压力的关系
 Fig. 5 Relationship between the system resistance and the system pressure

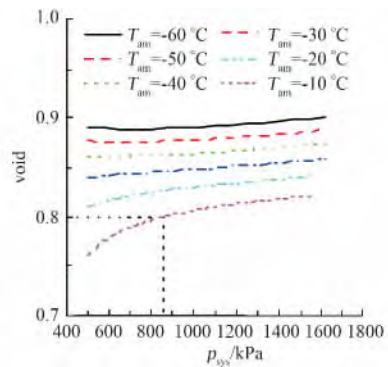


图 6 冷凝器进口空隙率与系统压力的关系
 Fig. 6 Relationship between the void fraction at the inlet of the condenser and the system pressure

关系: 对于固定的环境温度, 系统质量流量随系统压力的增加而增大; 对于固定的系统压力, 系统质量流量随着环境温度的增加而增大。前者原因在于系统压力的增加会使气相密度近似正比的增加, 同时也使液相密度显著下降, 这导致两相密度差的显著降低, 进而导致系统驱动力(及与其平衡的系统阻力)的下降, 与此同时, 系统工作温度随之增加, 则引起冷凝器换热温差增大, 使冷凝量增大, 引起冷凝两相流动阻力效应显著下降, 并且远大于驱动力的下降, 从而造成系统质量流量随压力的增加而增大; 后者则是由于随着环境温度的增加, 冷凝器的换热温差减小, 使冷凝量减小, 但同时冷凝器进口干度也减小, 而且干度随环境温度减小的程度大于换热量随环境温度减小的程度, 造成系统质量流量增大。

图 8 给出了冷凝器(蒸发器) 换热量与系统压力的关系: 对于固定的环境温度, 换热量随系统压力的增加而增大; 对于固定的系统压力, 换热量随着环境温度的增加而减小。前者源于系统压力

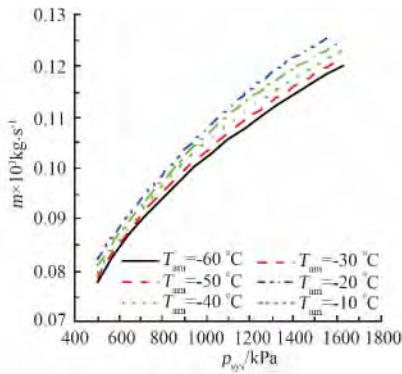


图 7 系统质量流量与系统压力的关系
Fig. 7 Relationship between the mass flow rate and the system pressure

的增加使冷凝器内工质的饱和温度增大,造成冷凝器辐射换热能力增大;后者则是因为环境温度的增加使冷凝器的换热温差减小,造成冷凝器辐射换热能力降低。

图 9 给出了冷凝器进口干度与系统压力的关系:对于固定的环境温度,冷凝器进口干度随系统压力的增加而增大;对于固定的系统压力,冷凝器进口干度随着环境温度的增加而减小。前者源于系统压力的增加会导致冷凝器换热量增大,引起冷凝器干度变化量增大,即冷凝器进口干度增大(假设冷凝器出口干度为 0);而后者则是因为环境温度的增加使冷凝器的换热温差减小,造成冷凝器辐射换热能力降低,从而导致冷凝器干度变化量减小,冷凝器进口干度减小。

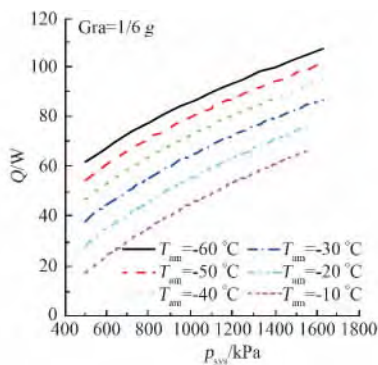


图 8 系统换热量与系统压力的关系
Fig. 8 Relationship between the heat transfer and the system pressure

为考察系统的稳定性,图 10 将系统换热量表示为系统阻力的函数。图中一个最显著的特点在于:在较高环境温度($T_{amb} = -10^{\circ}\text{C}$)下,系统特性参数对系统阻力存在双值现象(其它系统特性参

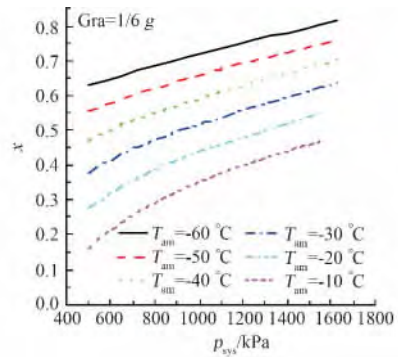


图 9 冷凝器进口干度与系统压力的关系
Fig. 9 Relationship between the vapor quality at the inlet of the condenser and the system pressure

数具有类似特征),这预示着在该区域所研究的回路系统可能存在所谓的 Ledinegg 不稳定现象,即系统特性可能在对应的两个解之间跳动,引起系统波动,甚至传热恶化^[6,7]。该区域在设计 and 运控中必须予以高度关注,并采取有效措施,避免系统在该区域运行,以免发生系统不稳定现象。

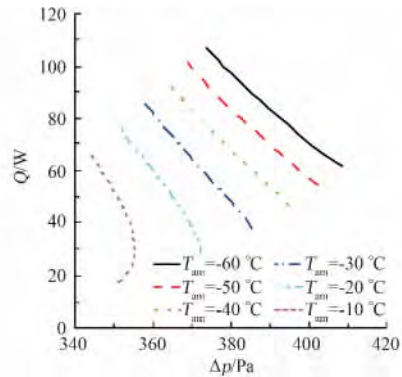


图 10 系统换热量对系统阻力的依赖关系
Fig. 10 Dependence of the heat transfer on the system resistance

4 结论

本文针对重力辅助两相流体自然循环系统构建了数值仿真模型,并编制了相应的仿真计算软件,对不同运控条件下的月面部分重力场($g/6$)和地面常重力场($1g$)的两相流体自然循环系统稳态性能进行了数值仿真研究,得到以下结论:

1) 月面重力场($g/6$)和地面常重力($1g$)环境下的 2 套两相流体自然循环系统性能(包括系统阻力、质量流量、蒸发器和冷凝器的换热量、冷凝器进口干度等)的仿真结果吻合良好,说明地

(下转第 94 页)

4 结语

2014 年,国外主要航天国家依据本国的发展战略持续推进载人航天活动,新型航天运输系统的发展向实现载人航天长远目标迈进一步。作为政府空间运输能力的补充,商业航天能力不断成熟的同时安全性尤为值得关注。近地轨道重要的试验平台——国际空间站上开展的科学研究和技术验证将为未来发展奠定坚实的技术基础,能否延寿尚无定论。

未来,美国仍将秉承能力驱动创新发展的策略和手段,开发先进技术的同时稳步推进“猎户座”/“空间发射系统”等新型运输系统,航天器向

可重复使用、多用途等方向发展,商业公司在空间运输、太空旅游中将扮演越来越重要的角色;俄罗斯的新空间站计划值得关注,大推力运载火箭计划快速推进,月球基地仍是其未来发展热点;欧洲、日本仍以国际合作方式发展载人航天,效益和产出成为日本关注的重点,日本 HTV 货船的改造计划也将列上日程;印度独立发展载人航天的计划能否如愿,将依赖于国家的批准和大力支持。总之,虽然受到政策、资金等多个因素影响,载人航天仍将在世界航天舞台上出演重要角色。

信息来源: <http://www.nasa.gov>; <http://www.cmse.gov.cn>; <http://www.isro.org>; <http://global.jaxa.jp>.

(上接第 68 页)

面重力场模拟系统能够真实反映月面重力场应用系统的性能;

2) 随着系统压力的增加,绝大多数工况下系统阻力减小,但在环境温度较高(T_{am} 为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,系统阻力先增加后减小。以系统阻力为自变量,可以清晰看到,在较高的环境温度(T_{am} 为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,系统特性参数对系统阻力存在双值现象。这预示着在该区域可能存在系统不稳定现象,即系统特性可能在对应的两个解之间跳动,引起系统波动,甚至传热恶化。该区域在设计和运控中必须予以高度关注,并采取有效措施,避免系统在该区域运行,以免发生系统不稳定现象。

[参考文献]

[1] 张红星,苗建印,王录,等. 嫦娥三号两相流体回路的地面试验验证方法及试验结果分析[J]. 中国科学技术科学, 2014, 44(6): 589-596.
Zhang H X, Miao J Y, Wang L, et al. Ground test method and results of closed two-phase thermosyphons for the moon exploration spacecraft Chang' E-3 [J]. SCIENCE CHINA Technological Sciences, 2014, 44(6): 589-596. (in Chinese)

[2] 赵建福,彭浩,张良. 重力辅助两相流体回路系统性能研究 II - 部分重力对两相回路流阻影响的分析报告[R]. TSRGATLS-02,北京: 中国科学院力学研究所,2011.
Zhao J F, Peng H, Zhang L. Study on the performance of a gravity-assisted two-phase fluid loop: II - the influence of partial gravity on flow resistance in two-phase fluid loops [R]. TSRGATLS-02, Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)

[3] 赵建福,彭浩. 不同重力条件下管内冷凝现象研究进展[J]. 力学进展, 2011, 41(6): 480-488.
Zhao J F, Peng H. Review on in-tube condensation in different gravity conditions [J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(6): 480-488. (in Chinese)

[4] Chen I Y, Downings R S, Keshock E, et al. Measurements and correlation of two-phase pressure drop under microgravity conditions [J]. J. Thermophys., 1991, 5(4): 514-523.

[5] Duschatko J. Condensate Tube ΔP Test Summary [R]. LTV Aerospace & Defense Co., October 1, 1991.

[6] 陈听宽. 两相流与传热研究[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004: 63-101.
Chen T K. Study on Two-phase Flow and Heat Transfer [M]. Xi'an, Xi'an University Press, 2004, pp. 63-101. (in Chinese)

[7] 王经. 气液两相流动态特性的研究[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2012: 32-38.
Wang J. Research on the Dynamic Behavior of Gas-Liquid Two-Phase Flow [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2012: 32-38. (in Chinese)