动载对管内汽水两相流流阻、空隙率和传热的影响

姚秋萍 宋保银 赵 枚

(南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016)

摘 要: 利用旋转平台对动载作用下单相水和沸腾两相流流动及传热特性进行了实验研究. 通过改变旋转速度、入口温度、液体流量等参数, 获得了静止和旋转 2种状态下的单相水及沸腾两相流实验数据. 对旋转状态下的管内两相流型进行可视化拍摄, 得到了动载作用下的两相流型图. 结果表明, 过载方向与流动方向相反时, 过载越大, 管内压力和流阻越大, 液相流量、空隙率和流体得热量越小. 可见, 动载阻碍流体向前流动, 强化了管外散热, 削弱了管内流体的相变换热能力.

关 键 词: 动载; 流型; 沸腾传热; 实验研究; 汽水两相流

中图分类号: V 214

文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2010)01-0043-05

Effects of dynamic load on flow resistance, void fraction and heat transfer of steam-water two-phase flow in pipes

Yao Qiuping Song Baoyin Zhao Mei

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: An experimental investigation using a rotating platform was performed to obtain the flow and heat transfer characteristics of single-phase water and two-phase pipe boiling water under dynamic load in present work. By changing the parameters, such as rotation speed, inlet temperature, flow rate, and so on, the flow and heat transfer data of single-phase water and two-phase boiling water flow under static and dynamic conditions were obtained. The image of two-phase flow patterns under dynamic load was obtained with a video camera. The results show that as the direction of the dynamic load is opposite to the flow direction, the greater the dynamic load, the higher the outlet pressure in test section and the flow resistance, and the lower the liquid flow rate, the void fraction, and the heat gained by fluid. Therefore, the dynamic load will block the fluid flow, enhance heat dissipation toward the ambient environment and reduce the heat transfer to the two-phase boiling fluid.

Key words: dynamic load; flow pattern; boiling heat transfer; experimental research; steam-water two-phase flow

沸腾传热和气液两相流是由沸腾和两相流动2种物理现象耦合在一起的热流体流动过程, 它是一种伴随着气液相变的热量传递过程. 水平管内流动沸腾换热, 广泛应用于动力、核能、化学、航空航天以及各种加工工业的换热设备和制冷空调中; 蒸发循环制冷系统应用于航空航天技术中, 飞行器的加速飞行或急速转弯势必会给机身带来较大的运动载荷, 机载蒸发制冷循环系统中制冷剂的凝结、蒸发及流动和传热过程都会受到动载作用的影响, 进而影响制冷部件和系统的性能. 因此, 蒸发制冷循环系统的设计和运行的可靠性, 将在很大程度上依赖于对动载作用下气液两相流机理, 尤其是流动及传热特性的认识程度.

近年来, 两相流机理研究的热点集中在微尺

收稿日期: 2009-02-01-05

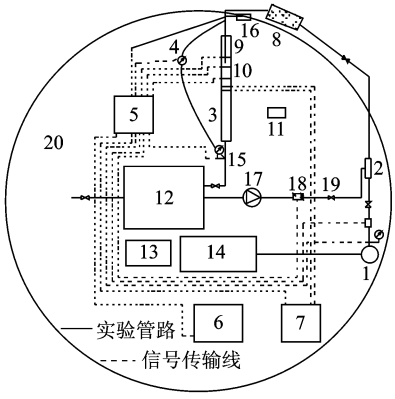
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50576035); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20040287017)

作者简介: 姚秋萍(1982-), 女, 江苏江阴人, 博士生, yiaoqiuping@163.com.

度[1-4]、微重力[5-8]、旋转状态[9-16]等条件下两相流流动与传热机理的研究上. 但从航空发动机涡轮叶片换热以及机载蒸发制冷循环来看, 过载对两相流沸腾传热机理的影响有待研究的开展和深入. 对于加热沸腾的两相流动, 相变造成质传递和含气率变化, 运动流型不仅沿流道不断发生变化, 也会随过载的大小发生改变, 导致流动计算复杂化, 而且也因传质伴随动量传递和能量传递, 使连续、动量、能量方程更加复杂. 因此, 动载作用下沸腾两相流是较为复杂、影响因素较多的两相流动现象之一, 其传热机理还需先通过大量实验进行探索和归纳. 本文通过实验初步考察了管内饱和水沸腾流动情况及过载对其流动和沸腾传热的影响.

1 实验装置

动载作用下管内两相流会在局部出现加速(或减速)、回流、冲击、涡流和滞止等现象, 使得两相流动的现象更加复杂. 因缺少可靠的数学模型, 为了解其流动与传热特性, 本文采用实验方法进行初探性研究. 实验中设计了旋转平台以模拟动载状态, 建立了封闭的管路循环系统、转台系统、加热系统、实验测试系统、数据采集系统和可视化系统, 形成了动载作用下两相流实验系统, 进行了多状态下的沸腾两相流动和传热实验. 旋转状态下径向水平管内水的流动沸腾换热特性研究的具体实验装置简图如图 1所示.



1) 稳压器; 2) 混合器; 3) 实验透明管段 (内有双环探针); 4) 压差计; 5) 数据采集模块; 6) 笔记本电脑; 7) 空隙率测试仪; 8) 预热器; 9) 电阻丝加热器; 10) 测温面; 11) 摄像机; 12) 水箱; 13) 配电箱; 14) 空压机; 15) 压力计; 16) 温度传感器; 17) 水泵; 18) 流量计; 19) 阀门; 20) 转台.

图 1 实验系统简图

实验过程中, 水箱中的水通过水泵抽出后, 先经预热器预热, 后流入透明测试段, 由测试段内的电阻丝加热至沸腾两相流, 然后返回水箱, 排气后由水泵再抽出, 形成闭环回路. 透明测试段为内径 20mm、长 400mm 的有机玻璃圆管, 分前后 2部分. 前半段为加热区, 在相隔 5 cm的 3个测温截面上均装 3个热电偶, 如图 1所示, 可直接测量流体主流温度和内壁温度; 后半段为拍摄区; 中间安装测量流体空隙率的环形探针. 在测试段的入口端接有压差计高压侧的导压管和热电偶, 出口端接压差计低压侧的导压管和压力计. 因此, 测试段就可以完成进出口压差、出口压力、空隙率、加热段的进出口流体温度以及内壁温度的测量. 各数据的电信号传入 ADAM24017, 4018 采集模块, 再由 ADAM24520输出传入计算机, 利用 VB程序对各物理量进行实时采集. 室内温度由温湿计直接读取, 通过调节变频器的电阻来调节转盘的转速而实现不同过载量, 实验台上仪器和设备的电力通过电刷无线供应.

可视化系统用来观测动载下沸腾两相流型的变化. 实验中摄像机以及整个回路系统、测试系统均固定在转台上与转台同步旋转, 从而记录流型的瞬态变化情况. 在测试段后方安装黑色无反光背景屏, 照明光由 105W 的三基色节能灯管供应.

2 实验误差分析

基于本实验系统各测量仪器的精度, 对各测量参数进行误差分析, 进而验证数据的准确度和可靠性. 对于直接测量参数, 如工质的流量、进出口压差等, 可由各自对应的测量仪器的测量误差直接得到; 对于间接测量参数, 即利用直接测量参数进行计算得到的间接量, 则需要进行误差传递计算. 表示误差的方式和计算方法有多种, 本文采用 Holman方法[17]计算.

函数 R为 n个独立变量 $x_1, x_2, \cdots, x_n$的函数, 这 n个独立变量各自的测量误差分别为 $w_1, w_2, \cdots, w_n$, 则函数 R的误差可由下式来进行估计:

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1}w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2}w_2\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n}w_n\right)^2\right]^{1/2} \quad (1)$$

式(1)还可以进一步改写为

$$\frac{w_R}{R} = \left[\left(\frac{1}{R}\frac{\partial R}{\partial x_1}w_1\right)^2 + \left(\frac{1}{R}\frac{\partial R}{\partial x_2}w_2\right)^2 + \cdots + \left(\frac{1}{R}\frac{\partial R}{\partial x_n}w_n\right)^2\right]^{1/2} \quad (2)$$

根据各测量参数的函数表达式, 实验测量范围及各仪器的精度, 通过式(1)和式(2)可计算各测量参数的误差, 主要性能参数的计算结果见表 1.

表 1　测量参数误差

测量仪器	精度	性能参数	参数误差 /%
温度热电偶	? 1e	p	0. 8246
涡轮流量计	0. 5%	q_e	10. 1118
压力传感器	0. 5%	Re_l	0. 5828
压差变送器	0 075%	h	10. 1651
空隙仪	10%	Nu	10. 1651
万用表	0. 8%	q_{loss}	1. 7549
调频器	0. 2%	a	0. 3605

注: p为总加热量; q_e为有效加热量; Re_l为雷诺数; h为对外传热系数; Nu为努赛尔数; q_{loss}为向外界散失的热量; a为加速度.

3　动载作用下水平管内传热特性

本文对单相水在水平光滑管内的流动沸腾换热进行了一系列实验, 获得了多种状态下的多组流动及传热的实验数据. 实验工况范围: 体积流量 0. 1~ 0. 25m^3 /h, 热流率 95kW /m^2; 入口温度 10~ 97e ; 干度 0~ 1; 过载量 0~ 2g.

下面分别对旋转状态下的单相水和汽水两相流的流动及换热特性进行分析.

3. 1　动载作用下单相水的流动和传热特性

实验中实验管段沿转台径向布置, 流动介质为单相水, 加热器持续通电加热, 在旋转状态下其过载方向与流体在实验管段的流动方向相反, 此时空隙率为 0. 在静止状态下调整好实验状态后, 启动变频器, 转台开始旋转, 当转速达到 57 r/min 时, 即过载量上升到 2g 状态后, 随即减小至 0.

经过对众多状态下实验数据的遴选, 得到匀速旋转下过载量分别为 0, 0. 5g, 1g, 1. 5g, 2g 状态时, 单相水的流动及换热特性随运动载荷的变化曲线如图 2所示. 从图中可以明显看出, 无论入口温度为 65e 还是 83e , 随着运动载荷的增大, 都存在水流量 q_V减小, 压力降 $p 和出口压力 p_2增大, 液相雷诺数 Re_l减小的趋势. 从变化幅度方面分析, 对进出口压差增大的趋势而言, 过载越大, 其压力降的幅度越大. 尽管入口温度为 83e 的流体体积流量 $q_{V, 83}$略低于入口温度为 65e 的体积流量 $q_{V, 65}$, 但由于过载的影响, 其压力降却非常相近. 该现象表明流量的大小和入口温度的高低对压力降的影响远小于运动载荷对其影响. 测试段出口压力随着过载的增加而增大, 且过载越高, 增幅越大. 两种入口温度状态下的出口压力不同, 取决于管内流量大小以及入口压力的大小. Re_l为与透明测试段入口相连接的内径为 10mm的管道内的流动雷诺数, 由于 Re_l的数值较大, 在进入测试段之前, 流动状态已为紊流, 虽然雷诺数随着过载的增大而减小, 但没有改变其紊态流动的特征.

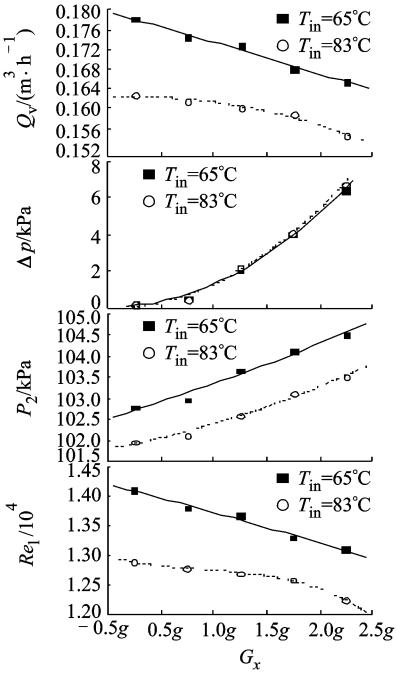


图 2　单相水流动参数随过载的变化

下面分析上述各流动参数变化的原因. 图 3为实验中流体流动及所受载荷作用的简图. 测试段径向布置在转台上, 管内流体由 A点流向 B点, 即流向沿半径指向圆心, 转台绕圆心作顺时针旋转, 此时测试段内流体流动方向与旋转产生的过载 G_x, 即离心力方向相反, 流体相当于受到一个阻碍其流动的力, 转速愈高, 过载愈大, 流动参数的变化量愈大. 在匀速旋转时, 过载一定, 测试段不同位置受到的过载大小是不相同的, 从 B点向 A点动载作用越来越大, 即过载大小与管道局部离旋转圆心的距离成正比. 该实验结果与文献 [18]的实验结果及文献 [14]的数值模拟趋势一致.

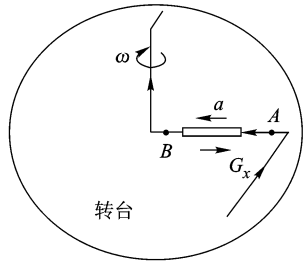


图 3　流体受过载作用简图

在上述同一组参数下, 其传热特性的变化曲线如图 4所示. q_e可反映管内流体传热能力的大小, 由图 4可见, 无论入口温度为 65e 或 83e , 其管内流体的 q_e都随转速的增加而降低, 与管壁的热耗散量成反比. 再考虑入口温度因素对 q_e的影响. 虽然入口温度为 83e 时的流体温度略高,

但其流量较小, 并且在旋转过程中进出口温差的改变和流量的进一步减小对有效加热量都有一定的影响, 因此 $q_{e\,83}$略小于 $q_{e\,65}$, 可见 q_e 受入口温度影响不大, 主要取决于流体的进出口温差 T_{out} - T_{in} 以及流体流量 q_V. 图中 ΔT为管内流体对外的传热温差, 即主流温度与管内壁温度的差值 (T_{in} + T_{out}) /2- T_w, 随着过载的增大, 传热温差增大, 过载量分别为 0. 5g, 1g, 1. 5g时, 其传热温差增幅较小, 而超过 1. 5g后的传热温差开始迅速上升, 且入口温度为 65e 时的传热温差高于入口温度为 83e 时的传热温差. h为管内流体对外传热系数, 过载量在 0~ 1. 5g内变化时, h 随着载荷的增加而增大; 当载荷大于 1. 5g时, 散热量增大的同时对外传热温差急剧增大, 当温差增幅大于散热量的增幅时, 其对外传热系数开始减小, 温差是传热系数的主要影响因素.

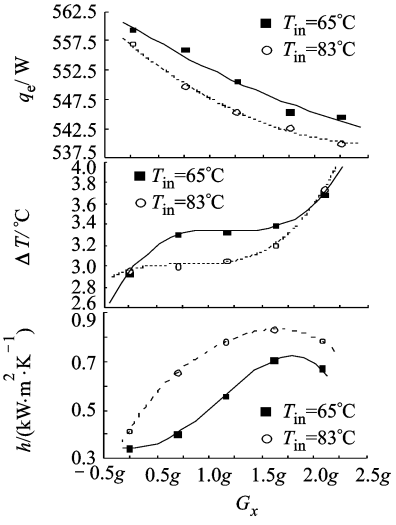


图 4 单相水传热特性随过载的变化

3. 2 动载作用下汽水两相流动和传热特性

本实验的核心是对沸腾两相流在动载作用下的流动和传热机理进行研究. 由于流型会随转速的改变而发生变化, 随之导致管内流体流动机制及传热模型的转变, 因此在研究动载作用对相变换热机理的影响时, 需考虑的影响因素较多, 本文从简化模型中对其进行初探性实验研究.

图 5为沸腾两相流动时各流动参数随过载变化的曲线, 图中每一点所处状态都为过载稳定状态, 由转台匀速旋转时获得的各参数随时间的平均值计算得出.

由图可见, 除空隙率减小外, 两相流动其余参数的变化趋势与单相水加热流动时的变化情况相同, 即随着过载的增大, 液相体积流量减小, 进出口压差增大, 出口压力增大. 不同点在于: 同一过载量作用下, 两相流中流阻的变化幅度大于单相

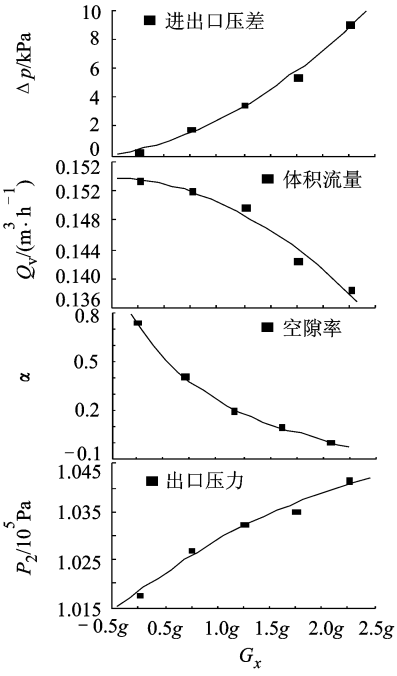


图 5 汽水两相各流动参数随过载的变化

流. 参照上述单相水的特性参数, 在两相流的液相流量小于单相水流量的情况下, 静止时, 两相流的进出口压差高于单相时的压差; 随着过载量逐步增大到 2g时, 两相流进出口压差相对于过载变化的斜率要高于单相水, 即, 同一过载量下, 由过载引起的两相流的压力降远大于单相流的压力降. 另外, 两相流动中还存在空隙率的变化, 它反映了同一截面上汽相所占面积与总截面积之比的变化情况. 在较小动载作用下, 液相明显后壅, 致使测量截面汽相面积减少, 空隙率随过载的增大而减小; 较大载荷作用时, 其热量耗散较大, 有效加热量不能满足流体沸腾所需的热量, 空隙率减小至 0, 管内流体转变为单相水. 空隙率的测量结果与拍摄到的可视化流型变化一致. 旋转状态下流型随过载的变化情况见图 6.

两相流动机制的改变, 必然使流体热量传递的方式发生变化. 单纯为液相时, 流体吸收的热量仅表现为进出口流体的温升; 而沸腾两相时, 有效加热量一部分用于流体温度升高至饱和温度, 另一部分热量用于液相的蒸发. 图 7为与图 5同组数据下的传热特性随过载的变化图. 由于两相流中蒸汽的质量含气率较低, 静止时的汽化潜热低于该过程中流体温升吸收的显热量. 在 0~ 0. 5g过载变化下, 汽化潜热量 q_d减小的幅度较大, 这是由两相流体干度的变化引起的, 而流体温升吸收的显热量 q_s则有相应的增加; 随着过载的继续增大, 二者的变化趋势趋于平缓, 且减小或增加的幅度明显降低, 直到过载为 2g 时, 空隙率为 0, 即质

量含气率为 0, 不存在汽化潜热量, 总的有效加热量仅为流体温升所吸收的显热量. 流体与内壁面的传热温差则随过载的增大而持续增加, 但增幅逐渐减小. 对外传热系数 h 则在过载为 0~ 1g 时由于热耗散快速增加而快速增大, 过载量超过 1g 时, 流型逐渐过渡为单相水, 此时 h 有逐渐减小的趋势. 比较图 7与图 4中的 q_e曲线, 可见动载下单相水的散热要小于两相流的散热.

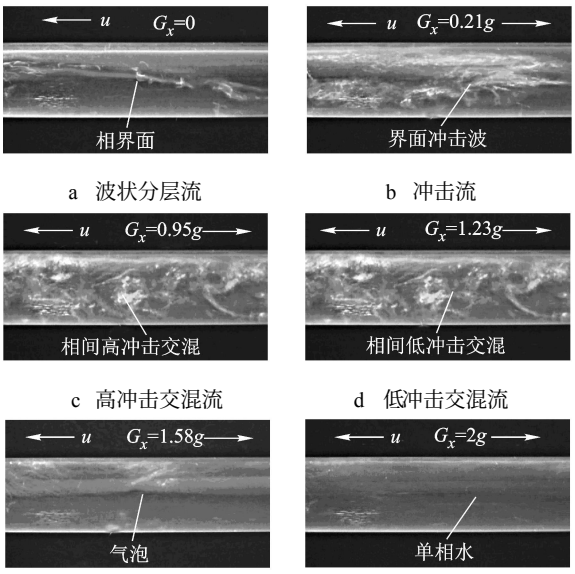


图 6 过载逐渐增大时的流型图

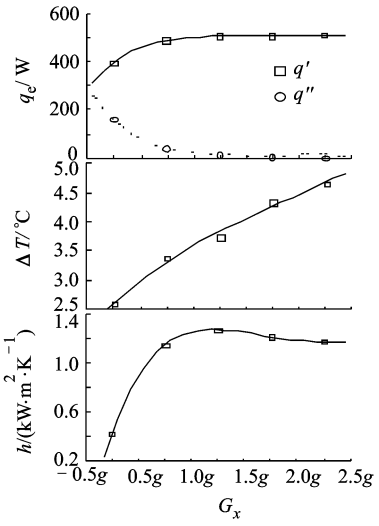


图 7 汽水两相传热特性随过载的变化

4 结 论

本文利用旋转实验台及流动沸腾装置, 对水平管内沸腾两相流的流动及传热参数进行了一系列测量, 并使用摄像机和流动可视化技术对流型进行实时拍摄, 得到了动载作用下的实验数据和图像. 通过对实验数据和图像的分析整理, 获得动载作用下气液两相流的部分流动及传热特性. 主要结论归纳如下:

1) 过载对饱和沸腾两相流流型有一定的影响. 加热时转台在 0~ 57 r/min (即加热段中心处所受过载量变化为 0~ 2g)的加速过程中, 会出现冲击流、高冲击交混流和低冲击交混流.

2) 过载对管内两相流动尤其是压力降及空隙率产生强烈影响. 当加速度方向与流体流动方向相同时, 过载可以看作是流体受到一个与流动方向相反的力的作用, 所以过载会增大管内流体的流阻, 阻碍管内流体继续向前流动. 过载越大, 流阻越大, 液相后壅的现象越明显, 即随过载增大, 液相流量减小, 进出口压差增大, 空隙率减小.

3) 过载促进管外散热. 静止时, 管壁散热以辐射换热为主, 而过载状态下, 管外散热以强迫对流散热为主, 且随着过载的增大, 外掠圆管外壁的空气流速增加, 其对流散热量迅速增大.

4) 过载削弱对管内流体的加热能力. 静止时, 两相流传热能力高于单相流, 其主要因素就是潜热量的存在, 而在过载增大过程中, 两相流逐渐转变为单相流, 其换热优点消失殆尽.

参考文献 (References)

[1] Pettersen J. Flow vaporization of CO_2 in microchannel tubes[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2004, 28(2/3): 111-121

[2] Yu W, France D M, Wambsganss M W, et al. Two2phase pressure drop, boiling heat transfer, and critical heat flux to water in a small2diameter horizontal tube[J]. Int J Multiphase Flow, 2002, 28(6): 927- 941

[3] 甘云华, 徐进良, 周继军, 等. 微尺度相变传热的关键问题[J]. 力学进展, 2004, 34(3): 399- 407
Gan Yunhua, Xu Jinliang, Zhou Jijun, et al. Key issues related to microscale phase change heat transfer[J]. Advances in Mechan2ics, 2004, 34(3): 399- 407(in Chinese)

[4] 赵鹏飞, 毕勤成, 杨朝初, 等. 微小圆通道内流动沸腾换热特性的研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(5): 802- 804
Zhao Pengfei, Bi Qincheng, Yang Zhaochu, et al. Flow boiling heat transfer inside miniature channels[J]. Journal of Engineer2ing Thermophysics, 2005, 26(5): 802- 804(in Chinese)

[5] Ohta H, Kawasaki K, Okada S, et al. On the heat transfer mecha2nisms in microgravity nucleate boiling[J]. Advances in Space Research, 1999, 24(10): 1325- 1330

[6] Straub J. Microscale boiling heat transfer under 0g and 1g condi2tion[J]. Int J Thermal Sciences, 2000, 39(4): 490- 497

(下转第 51页)

燃料相对较少的情况下,能够满足所有的约束条件,保证望远镜不会因受到强光照射而损坏.

3 结　论

本文研究了航天器在星载设备受多种几何约束的情况下进行大角度姿态机动时的姿态路径规划方法.采用罗德里格斯参数描述姿态信息,在罗德里格斯参数空间中,将姿态机动路径规划问题转化为点机器人的三维路径规划问题.基于粒子群优化技术设计了带约束航天器大角度姿态机动的路径规划算法.数值仿真结果表明该方法对于航天器复杂约束下大角度姿态机动的运动规划是有效的.

参考文献 (References)

[1] Frakes J P, Henretty D A, Flatley T W, et al. SAMPEX science pointing with velocity avoidance[C]//The AAS/AIAA Space2flight Mechanics Meeting Part 2 (of 2). Colorado Springs, CO: AAS/AIAA, 1992: 949-966

[2] Mcinnes C R. Large angle slew maneuvers with autonomous sun vector avoidance[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1994, 17(4): 875-877

[3] Hablani H B. Attitude commands avoiding bright objects and maintaining communication with ground station[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1999, 22(6): 759-767

[4] Kornfeld R P. On2board autonomous attitude maneuver planning for planetary spacecraft using genetic algorithms[C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. Austin Texas: AIAA, 2003: 11-14

[5] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C]//Proc of IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1995: 1942-1948

[6] 仲维国, 崔平远, 崔祜涛. 航天器复杂约束姿态机动的自主规划[J]. 航空学报, 2007, 28(5): 1091-1097
Zhong Weiguo, Cui Pingyuan, Cui Hutao. Autonomous attitude maneuver planning for spacecraft under complex constraints[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(5): 1091-1097(in Chinese)

[7] 曾建潮, 介婧, 崔志华. 微粒群算法[M]. 北京: 科学出版社, 2004
Zeng Jianchao, Jie Jing, Cui Zhihua. Particle swarm arithmetic[M]. Beijing: Science Press, 2004(in Chinese)

[8] Giovanni M, Alessandro A Q. Spacecraft control with constrained fast reorientation and accurate pointing[J]. The Aeronautical Journal, 2004, 108(1080): 85-91

(编　辑:张　嵘)

(上接第 47页)

[7] 赵建福, 林海, 解京昌, 等. 微重力条件下气/液两相流压降试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2001, 9(4): 373-380
Zhao Jianfu, Lin Hai, Xie Jingchang, et al. Experimental study on pressure drop of two2phase gas2liquid flow at microgravity conditions[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2001, 9(4): 373-380(in Chinese)

[8] Yue M, Chung J N. An experimental study of critical heat flux (CHF) in microgravity forced2convection boiling[J]. Int J Multiphase Flow, 2001, 27(10): 1753-1767

[9] Wiesche S. Heat transfer from a rotating disk in a parallel air cross flow[J]. Int J Thermal Sciences, 2007, 46(8): 745-754

[10] Seghir2Ouali S, Saury D, Harmand S, et al. Convective heat transfer inside a rotating cylinder with an axial air flow[J]. Int J Thermal Sciences, 2006, 45(12): 1166-1178

[11] Chiu H C, Jang J H, Yan W M. Combined mixed convection and radiation heat transfer in rectangular ducts rotating about a parallel axis[J]. Int J Heat and Mass Transfer, 2007, 50(21/22): 4229-4242

[12] Song F, Ewing D, Ching C Y. Experimental investigation on the heat transfer characteristics of axial rotating heat pipes[J]. Int J Heat and Mass Transfer, 2004, 47(22): 4721-4731

[13] Khan W I. Heat transfer and flow instability in a superconducting machine rotating at 3000 rpm[J]. Cryogenics, 1984, 24(1): 11-14

[14] 刘艺涛. 动载作用下水平和直角弯管内两相流动的数值模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学航空宇航学院, 2005
Liu Yitao. Numerical evaluation of two2phase flow in horizontal and orthogonal pipes under high2g condition[D]. Nanjing: College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005(in Chinese)

[15] 张金红, 阎昌琪, 方红宇, 等. 摇摆对水平管内气液两相流流型的影响[J]. 核科学与工程, 2007, 27(3): 206-212
Zhang Jinhong, Yan Changqi, Fang Hongyu, et al. Effects of swinging on two2phase flow pattern of gas2liquid fluid flowing in horizontal pipes[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2007, 27(3): 206-212(in Chinese)

[16] 栾锋, 阎昌琪, 曹夏昕. 摇摆对竖直管内气2水两相流流型的影响分析[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(增刊 1): 217-220
Luan Feng, Yan Changqi, Cao Xiaxin. Analyzing the effect of swinging on two2phase flow pattern of gas2liquid fluid flowing in vertical tubes[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(Supplement 1): 217-220(in Chinese)

[17] Holman J P, Gaida W J. Tr Experimental methods for engineers[M]. 5th ed. Singapore: McGraw2Hill, 1989: 41-42

[18] 马良军. 动载作用下管内两相流流动特性试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学航空宇航学院, 2007
Ma Liangjun. Experimental research on flow characteristic of two2phase pipe flow under high2g condition[D]. Nanjing: College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007(in Chinese)

(编　辑:李　晶)