

微重环境下液体晃动研究进展¹⁾

苗 楠 王天舒²⁾ 李俊峰

(清华大学航天航空学院, 北京 100084)



王天舒, 清华大学航天航空学院, 教授、博士生导师, 兼任中国自动化学会空间及运动体控制专业委员会委员, 中国空间科学学会空间机电与空间光学专业委员会委员, 中国宇航学会空间遥感专业委员会委员, 中国力学学会一般力学专业委员会委员, 北京市力学会理事, 动力学与控制专业委员会副主任委员. 主要研究领域为卫星总体设计、多体航天器动力学与控制、充液航天器动力学. 在国内外期刊发表论文 50 余篇, 其中 SCI 收录 20 余篇, EI 收录 30 余篇, 获国家科技进步二等奖一次 (第四获奖人), 总装备部技术进步一等奖一次、二等奖一次、三等奖一次, 航天部科技进步二等奖一次.

摘要 现代航天器通常携带大量的液体燃料, 液体晃动会影响航天器的姿态稳定性和控制精度, 因此需要对晃动行为进行精确建模. 本文系统介绍了微重环境下液体晃动问题的国内外研究现状: 理论分析方面, 总结了小幅晃动和非线性晃动的研究方法; 数值计算方面, 介绍了模态分析和 CFD (computational fluid dynamics) 方法在该问题上的应用; 物理实验方面, 阐述了地面实验和在轨实验的方法及进展. 最后进行总结与评价, 并提出了该领域未来需要解决的 3 个问题.

关键词 微重, 液体晃动, 表面张力

中图分类号: V412.4, V417 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-15-185

RESEARCH PROGRESS OF LIQUID SLOSHING IN MICROGRAVITY¹⁾

MIAO Nan WANG Tianshu²⁾ LI Junfeng

(School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Sloshing of liquid propellant in microgravity and its influence on the attitude control system have been studied for several decades. Accurate modeling is necessary, especially, for modern spacecrafts carrying large amounts of liquid propellant. Research progress on this issue is reviewed, including a summary of analytical methods for both linear and nonlinear sloshing, an introduction of numerical techniques such as modal analysis and CFD (computational fluid dynamics) methods, and also a description of experimental approaches and advances. Finally, some critical problems concerning liquid sloshing in microgravity are proposed and discussed.

Key words microgravity, liquid sloshing, surface tension

本文于 2015-07-03 收到.

1) 国家自然科学基金资助项目 (11172145).

2) E-mail: tswang@tsinghua.edu.cn

引用格式: 苗楠, 王天舒, 李俊峰. 微重环境下液体晃动研究进展. 力学与实践, 2016, 38(3): 229-236

Miao Nan, Wang Tianshu, Li Junfeng. Research progress of liquid sloshing in microgravity. *Mechanics in Engineering*, 2016, 38(3): 229-236

随着航天技术的发展,火箭的运载能力不断提高,航天器的任务寿命不断增加,因此现代航天器所携带的液体燃料和液体载荷越来越多。同时,航天工程对航天器姿态精度要求越来越高,而液体燃料的晃动会产生一定的干扰力和力矩,并降低结构的振动频率。此外,航天器整体运动与液体晃动之间的耦合作用可能给空间中的关键机动带来不利影响,如交会对接、观测卫星指向及行星勘测等^[1]。因此,液体晃动问题在航天工程中受到了越来越多的关注,研究微重环境下的液体晃动行为并准确预测其对航天器的影响变得更加重要。

在微重环境下,液体会呈现出与常重下截然不同的形态及晃动行为。一方面,液体晃动过程中微重力所提供的回复力很小,使得液体晃动的固有频率显著减小^[2-3]。回复力的减小也使液体运动更容易发生,且很难回到稳定状态。另一方面,常重下由于重力远大于表面张力,通常忽略表面张力的影响。而微重环境下表面张力的作用得到突显,甚至在液体晃动中占主导地位。因此,研究微重下液体的晃动行为需要同时考虑重力、惯性力和表面张力。

无论对于常重还是微重环境下的液体晃动问题,研究通常从理论分析、数值计算以及物理实验三方面展开。针对微重情况,本文分别从这3个角度详细介绍了液体晃动研究的发展历程,并对目前的研究方法进行了评价与分析。最后提出了该领域在未来需要解决的几个问题。

1 理论研究

对于微重环境下的液体晃动问题,早期的研究方法主要是基于势流假设的理论分析,即假设液体理想、无旋、不可压缩。全充液贮箱内不存在晃动行为,此时液体可用 Zhukovskiy 等效刚体代替。部分充液贮箱内的液体可能作小幅晃动、有限幅晃动甚至大幅晃动,后两种情况统称为非线性晃动。一般将液体晃动幅值与自由液面半径之比小于 0.15 的情况视为线性区域,称之为小幅晃动。在该比值大于 0.25 时可能出现强非线性效应,此时作为非线性晃动处理^[4-5]。

1.1 小幅晃动

针对微重液体小幅晃动问题,理论研究已有几十年的历史^[6-7]。液体晃动是在静平衡液面的基础上发生的,而静液面的求解有两类方法:基于自由液面上力的平衡关系和能量法。程绪铎^[8]通过对静液

面方程进行变换,推导了矩形贮箱内静液面形状的迭代公式。从能量角度求解静液面时,应使得重力势能、表面能等能量取最小值,其有效性通过与实验结果对比得到了验证^[9]。

假设液体在受表面张力影响的静液面基础上发生小幅晃动,可将线性化的晃动动力学方程加入系统动力学方程中,以完成对液体部分的建模。Abramson^[2]考虑了轴对称贮箱内微重力沿轴线的情况,讨论了静液面的稳定性并利用势流理论对液体小幅晃动进行了建模。

此外,求解线性化的特征值问题可得到液体晃动的固有频率和模态。王照林等^[10-11]对二维矩形贮箱及球形贮箱内液体的自由晃动进行建模,利用分离变量等方法得到了液体的频率和模态信息。但对于母线形状任意的轴对称贮箱,无法利用传统方法得到液体晃动特征函数的解析表达式。针对这一问题,Utsumi^[12-13]在球坐标下将特征函数表示为高斯超几何函数的形式,利用半解析解得到了维数较低的特征值问题并进行了求解。

1.2 非线性晃动

对非线性晃动的理论研究同样基于势流假设,但由于晃动幅度较大,不能进行线性化处理。常重下非线性晃动的分析方法主要有两类,一类通常将速度势函数及自由液面波高函数用晃动模态进行广义 Fourier 级数表示,代入边值问题或利用变分原理,得到无穷维晃动模态系统后进行降阶处理和数值求解^[14-16]。另一类方法将自由液面的运动学和动力学边界条件中的波高函数消去,利用多尺度方法对速度势函数进行展开并求解^[17-18]。

微重环境下的非线性晃动问题与常重有显著区别,表面能作为自由液面形状的函数,成为非线性的另一主要来源,导致问题更为复杂^[19]。Peterson等^[20]和 Van等^[21]在对航天器进行非线性动力学建模时考虑了液体晃动的耦合作用及表面张力的影响,杨旦旦等^[22]在此基础上讨论了圆柱形贮箱内液体晃动的分岔现象。He等^[23]利用变分原理建立了晃动压力体积分形式的 Lagrange 函数,将速度势函数在自由液面附近作波高的级数展开,建立了圆柱形贮箱中自由液面边界条件的非线性方程组并进行了理论分析。基于 Utsumi^[12]的理论,Yue^[24]研究了平动激励下球形贮箱的非线性耦合动力学问题。陈科^[25]和吕敬^[26]考虑了自由液面上的非线性边界条件,利用 Hamilton-Ostrogradskiy 力学积分变

分原理 (简称 H-O 原理) 分别建立了刚-液系统和刚-液-弹系统的耦合动力学方程, 并分析了系统的非线性动力学特性. 然而, 对非线性晃动问题的理论求解较为繁琐, 仅能够得到简单形状贮箱 (如矩形、圆柱形、球形贮箱) 对应的解析或半解析解, 对于形状更为复杂的贮箱则需要结合数值方法进行研究.

2 数值研究

数值计算方面, 目前主要利用两类方法对微重环境下液体晃动问题进行分析: 一类是频域方法, 即在自由晃动特征值问题的基础上, 利用数值方法进行模态分析得到液体晃动的固有频率、模态和阻尼等信息; 另一类是时域方法即计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法, 通过直接求解 Navier-Stokes 方程或其简化方程, 在时域内对液体晃动进行数值模拟 [27-28].

2.1 模态分析

模态分析常采用边界元法 (boundary element method, BEM) 和有限元法 (finite element method, FEM) 或两者的耦合方法 [29]. BEM 在解决常重下液体流动问题时有独特优势, 但不适合处理复杂边界的情况, 因此微重环境下应用很少 [30-31].

在利用 FEM 进行模态分析方面, Wang 等 [32] 对考虑毛细效应的小幅晃动模态分析方法进行了系统研究, 考虑能量耗散计算了液体的晃动阻尼. Li 等 [33] 建立了平动和转动激励下任意形状贮箱内液体晃动的动力学模型, 推导了液体晃动的等效建模方法, 可拓展应用到微重环境中. Miao 等 [34] 在考虑弯曲静液面的基础上, 对二维矩形贮箱内的液体晃动进行了模态分析, 揭示了静液面的弯曲对固有频率和模态的显著影响.

此外, 岳宝增等 [35] 求解了二维 Cassini 贮箱中的液体晃动问题, 在晃动过程中考虑了表面张力的作用, 但计算时仍假设初始液面水平. El-Kamali 等 [9] 对任意形状贮箱内的液体进行了模态分析, 利用 FEM 得到了考虑表面张力时液体晃动的固有频率和模态.

2.2 CFD 方法

CFD 方法的优点是适用范围较广, 可以处理液体大幅晃动问题, 缺点是计算量较大且不易计算液体晃动阻尼 [3]. 标记子与单元 (marker and cell, MAC) 法 [36]、任意拉格朗日-欧拉 (arbitrary Lag-

rangian-Eulerian, ALE) 法 [37]、水平集方法 (level set method, LSM) [38] 和流体体积 (volume of fluid, VOF) 法 [39] 均属于 CFD 方法的范畴. 现今普遍使用的商用 CFD 软件 Flow-3d 基于 VOF 法编写, 在自由液面流动仿真方面处于领先地位, 可对液体晃动行为进行可靠、稳定的模拟, 在航天工业中应用广泛并得到了验证 [40].

岳宝增等 [41] 和 Yue 等 [42] 通过将 ALE 运动学描述引入到 Navier-Stokes 方程的分步有限元计算格式中, 推导了考虑表面张力时有限元边界条件的弱积分形式, 模拟了圆柱形贮箱内液体的三维非线性晃动, 揭示了表面张力的显著影响. 同样采用 ALE 法, 周宏等 [43] 用 Laplace-Young 公式将表面张力效应引入自由液面边界条件, 采用最小二乘数值逼近方法对自由液面的平均曲率进行拟合并给出了边界条件的数值计算形式.

此外, 无网格法在自由液面流动仿真中也得到了广泛应用, 如光滑粒子流体动力学 (smoothed particle hydrodynamics, SPH) 方法等 [44]. 它利用大量的粒子来代表液体, 原则上可以很好地处理自由液面大变形、液面破碎等问题. Baeten [45] 提出了粒子群法 (particle-cluster approach), 可以用来精确模拟微重环境高度不稳定条件下的液体行为.

3 实验研究

理论分析和数值计算的可靠性常需要通过物理实验进行验证. 目前, 研究微重环境下液体晃动问题的实验方法主要有地面实验和在轨实验两种.

3.1 地面实验

Abramson [2] 的报告对常重下的液体晃动实验研究进行了系统的总结. 但由于地球重力场的影响, 利用地面实验对微重下的液体行为进行模拟存在一定的困难 [46]. 尽管如此, 地面实验结果仍可以为理论、数值研究及在轨实验提供参考. 目前地面实验包括缩比模型实验、落塔实验、飞机抛物线飞行实验以及微重力火箭实验等 [47].

缩比模型实验 [48] 通过调整特征长度, 使重力与表面张力的相对大小即 Bond 数与实际工况相同. 该方法成本较低, 但很难保证其他无量纲数与实际工况相符. Burke [49] 设计了一种缩比模型实验来获取自旋航天器偏置贮箱内液体的第一阶固有频率.

落塔实验 [50] 通过自由落体运动使液体处于微重环境, 但实验时长较短. 马歇尔航天飞行中

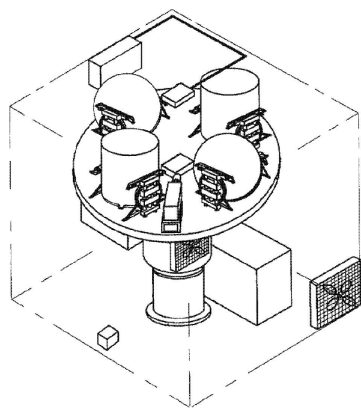
心利用落塔实验研究了加速度急剧减小时液体的晃动行为及静液面形状,实验持续时间为 4.3s^[28]. 由于空气阻力影响,落塔实验中的残余重力加速度一般在 $10^{-2}g$ 量级,若置于真空环境中则可达到 $10^{-5} \sim 10^{-6}g$,其中 g 为常重下的重力加速度^[5].

与落塔实验类似,飞机抛物线飞行实验^[51]可以完成对有限时间内液体晃动行为的观测,但实验数据的价值相对有限^[52-53]. Silvernail 等^[54]在美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的低重仿真飞机上进行了抛物线飞行实验,研究了液体晃动对自旋稳定航天器的影响并与仿真模型进行了比较.

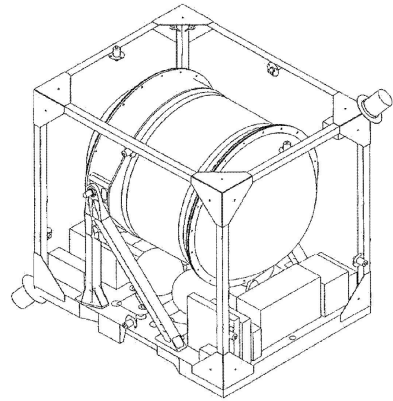
此外,欧空局(European Space Agency, ESA)于2008年进行了一项基准类型的微重力火箭实验 SOURCE (sounding rocket compere experiment),对理论研究和数值计算的预测结果进行了验证^[55].

3.2 在轨实验

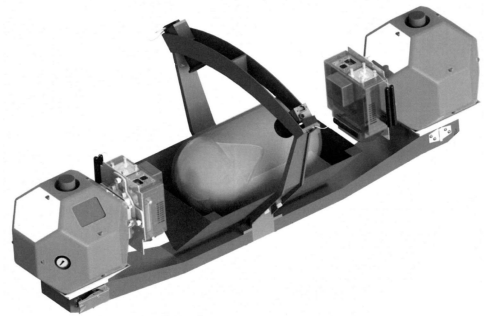
在轨实验可以为液体提供典型、稳定、长期的微重环境,因此是目前研究微重下液体晃动问题最直接有效的方法,得到的实验数据也是最可靠、最有价值的. 近几十年来国际上进行过很多尝试,例如 NASA、荷兰国家宇航实验室(Dutch National Aerospace Laboratory, NLR)^[56]等机构利用在轨实验研究了微重下液体的静平衡状态及其稳定性^[57]、表面张力对液体行为及阻尼特性的影响^[58]、接触线的建模及动力学^[59]等问题. 此处简述3个代表性的在轨实验任务,可为在轨实验方案设计提供参考. 3个任务的实验平台构造及参数对比分别参见图1及表1.



(a) LME



(b) Sloshsat FLEVO



(c) SSE

图1 在轨实验平台构造图

LME (liquid motion experiment) 是 NASA 于 1997 年 5 月搭载于 Atlantis 航天飞机上进行的一项科学实验^[60],目的是确定微重环境下液体运动对自旋航天器章动及稳定性的影响,为分析模型的建立及控制方案的设计提供参考. 通过精密的设计和恰当的操作,LME 得到了极具价值的实验结果和较高的实验成功率,为分析和数值计算模型的验证提供了可靠的数据来源.

Sloshsat FLEVO 是首颗专用于研究微重下液体晃动特性的小卫星,外形为边长 0.9m 的立方体,由 ESA 和荷兰太空探测组织(Netherlands Agency for Aerospace Programmes, NIVR)合作完成,于 2005 年 2 月由 Ariane 5 送入太空^[47]. 它的实验目的是研究微重环境不同激励形式下液体的晃动行为及对航天器姿态和轨道控制的影响、验证现有的数值方法并对液体管理系统的设计提供信息等^[61]. NLR、NASA 及数个高校利用其实验结果对程序和软件进行了验证,体现了该任务的价值及实验数据的可靠性.

表 1 在轨实验参数对比

| 任务名称 | LME | Sloshsat FLEVO | SSE |
|--------|--|--|--|
| 液体贮箱 | 球形、圆柱形 | 两端半球形的圆柱形贮箱 | |
| 贮箱数量 | 12 个 (6 球形、6 圆柱形) | 1 个 | 2 个 |
| 内部结构 | 8 个光箱, 4 个含 PMD (propellant management device) | 光箱 | 光箱 |
| 材料透明 | 是 | 否 | 是 |
| 贮箱尺寸 | 半径 0.011 43 m | 半径及柱段 0.228 m | 半径及柱段 0.075 m |
| 液体及充液比 | 去离子水及掺有丙二醇的去离子水 | 去离子水 | |
| | 1/3 及 2/3 | 38.55% | 20% 及 40% |
| 激励形式 | 正弦扫频实验、正弦保持实验 | 调节自旋速率、改变主轴指向、大机动试验及液体重定位等 | 模拟液体重定位、姿态改变、被动热控制等 |
| 数据采集 | 每个贮箱用两组力传感器测量力矩、1 个相机记录液体图像 | 贮箱壁面 270 个传感器以推测液体形态、6 个加速度计和 3 个陀螺仪测量卫星运动 | 4 组六自由度惯性测量传感器 (3 个加速度计和 3 个陀螺仪)、2 个相机记录液体图像 |

国际空间站 (International Space Station, ISS) 为在轨晃动实验的开展提供了很好的环境 [62], NASA 基于 ISS 上现有的设备设计了一个晃动实验平台 (SPHERES slosh experiment, SSE), 于 2014 年 1 月发往 ISS 并很快开展实验 [63]. 它利用 SPHERES 小卫星给贮箱施加不同形式的激励, 实验数据将用于校准 CFD 模型、考查液体与贮箱之间的耦合作用并为之后的航天器设计提供参考.

4 总结与展望

4.1 研究方法总结与评价

几十年来中外学者在微重环境下的液体晃动研究方面已经取得了显著的成果. 理论研究基于势流理论, 可以为数值和实验研究提供基础, 但求解过程往往较为繁琐, 对于非线性晃动更是如此. 理论研究只能处理贮箱形状较为简单的情况, 对于具有复杂形状或复杂内部结构的贮箱则无能为力.

随着计算机计算能力的提高, 数值方法得到了迅猛发展. 频域的模态分析方法计算效率较高, 可以得到液体晃动分析中关键的固有频率、模态、阻尼等参数, 对于液体区域较规则的情况求解精度非常高. CFD 方法对于晃动幅度较大、液体区域较复杂、存在液面破碎和液体飞溅的情况都可以处理.

实验研究是最直接有效的方法, 并可以为理论和数值模型的验证提供数据来源. 利用地面实验研究微重下的液体行为需要克服重力场的影响, 致使常用的几种方法存在一些缺陷, 如模拟精度不够或实验时长过短等. 在轨实验是一种理想的研究方

法, 近年来得到了很多尝试和发展.

4.2 未来需要解决的问题

4.2.1 微重环境复杂机动下的液体晃动等效建模研究

在航天工程中, 尤其是考虑晃动与航天器姿态耦合作用时, 需要对晃动力和力矩进行实时高效的计算. 由于晃动的主要动力学表现是液体质心相对于贮箱的振动, 因此常用单摆或弹簧-质量等效力学模型来近似代替贮箱内的液体. 等效的原则是等效系统对贮箱的作用力和力矩、固有频率及动能与原系统完全相同. 等效力学模型的优点在于动力学描述非常简便, 与 CFD 方法相比可大大减小计算量、提高计算效率.

在微重环境下, 表面张力会影响液体的静平衡状态和动力学特性, 使等效建模过程更为复杂, 传统的等效力学模型不再适用. 文献 [64] 以航天器交会对接过程为背景提出了一种新形式的弹簧-质量等效力学模型, 适用于球形贮箱内液体小幅晃动情形. 王天舒等 [65] 对该模型进行了改进, 并提出了新的方法获取等效力学模型参数.

对于微重环境下液体大幅晃动、其他形状贮箱内液体小幅晃动对应的等效力学模型, 目前还鲜有研究. 对复杂机动下的液体晃动进行等效建模研究, 是目前亟待解决的问题, 同时也具有一定的工程意义.

4.2.2 无网格法在微重环境液体晃动问题中的应用

在微重环境尤其是复杂机动下, 液体很容易发

生大变形,同时可能存在液面破碎和液体飞溅等情况.无网格法的网格依赖性弱,可以避免 FEM 和 BEM 等数值方法中的网格畸变问题^[66].Lagrange 型无网格法在处理自由表面流动问题中具有很强的优势,其中 SPH 方法在液体晃动问题研究中得到了广泛应用.

传统 SPH 方法对常重下简单形状贮箱内液体晃动的仿真效果已经得到了验证^[67],但在微重和复杂工况下的应用效果不理想.近年来人们主要从边界处理^[68]、压强处理^[69]和表面张力处理^[70]等方面对 SPH 方法进行了完善,但仍有很多问题值得研究.

4.2.3 在轨液体晃动实验方案设计

在轨晃动实验是系统而复杂的任务,对整体构架、实验方法甚至具体实验参数都要进行充足的考虑和精密的设计.参考前文介绍的三个在轨实验,给出如下建议,仅为我国进行在轨晃动实验的方案设计提供参考:

(1) 实验内容及激励形式

应从实际应用出发,选取工程上最关心、最亟待解决的问题作为实验内容.LME 研究的自旋稳定航天器内的液体晃动特性、Sloshsat FLEVO 考查的液体重定位过程及 SSE 模拟的姿态机动等均具有一定工程价值.具体来说,实验内容和激励的设置需要从以下几方面进行考虑.首先应根据实际情况,设计有把握实现且工程上较为关心的激励形式,如液体燃料的重定位等.其次,可以通过改变贮箱的姿态,考查液体与贮箱之间的耦合作用,为耦合动力学研究提供数据来源.再次,可以设计特殊的激励形式以验证模型或算法的可靠性,但在实验前需进行仿真分析,以保证液体响应在实验平台的承载能力内,并及时对激励进行调整.

(2) 液体及贮箱选取

出于安全性考虑,应尽量选取去离子水作为实验液体.贮箱形状上,Sloshsat FLEVO 和 SSE 采用的两端半球的圆柱形贮箱在现代航天器中应用广泛,且有一定的理论和数值研究基础,选择这种贮箱形状可使实验数据发挥更大价值.贮箱尺寸可根据无量纲参数的分析结果进行选取,以保证接近真实工况,但同时需考虑实验平台的尺寸限制.贮箱材料方面应尽量选取光学透明材料,直接通过相机得到液体形态信息,方便数值方法和软件的验证.液体充液比可根据实验目的进行选择,如使充液比为

40%~60% 以验证模型在液体剧烈晃动时的可靠性等.

(3) 实验成本及可靠性考虑

基于现有设备进行设计和操作将使实验成本大大降低且易于操作;采用半自动的实验方式也可以实现对空间和资源的有效利用.此外,应保证实验平台工作部件的稳定性及各个部件之间连接的可靠性,降低单个零件的工作误差或失效对整个系统的影响,以提高实验结果的准确性.

参考文献

- 1 Helder JA. Sloshing Sloshsat FLEVO: numerical simulation of coupled solid-liquid dynamics in micro-gravity. [Master Thesis]. Groningen: University of Groningen, 2005
- 2 Abramson HN. The dynamic behavior of liquids in moving containers. NASA SP-106, Southwest Research Institute, 1966
- 3 Vergalla M, Garry LII, Kirk D, et al. Experimental and numerical investigation of reduced gravity fluid slosh dynamics. 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Seattle, Washington, 2008
- 4 王照林,刘延柱.充液系统动力学.北京:科学出版社,2002
- 5 李青,王天舒,马兴瑞.充液航天器液体晃动和液固耦合动力学的应用.力学进展,2012,42(4): 472-481
- 6 王为.考虑毛细效应的液体小幅晃动问题研究.[博士学位论文].北京:清华大学,2008
- 7 李青.充液挠性系统动力学分析及在航天工程中的应用研究.[博士学位论文].北京:清华大学,2010
- 8 程绪铎.微重时矩形容器内静液面形状研究.水动力学研究与进展,2003,18(1): 38-41
- 9 El-Kamali M, Schotté JS, Ohayon R. Three-dimensional modal analysis of sloshing under surface tension. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2001, 65(1-3): 87-105
- 10 王照林,邓重平.失重时球腔内液体晃动特性的研究.空间科学学报,1985,5(4): 294-302
- 11 王照林,邓重平.失重时方形容器内液体的自由晃动问题.清华大学学报(自然科学版),1986,28(3): 1-9
- 12 Utsumi M. Low-gravity sloshing in an axisymmetrical container excited in the axial direction. *Journal of Applied Mechanics*, 2000, 67(2): 344-354
- 13 Utsumi M. Low-gravity slosh analysis for cylindrical tanks with hemiellipsoidal top and bottom. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2008, 45(4): 813-821
- 14 Moiseev NN. On the theory of nonlinear vibrations of a liquid of finite volume. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1958, 22(5): 860-872
- 15 Perko LM. Large-amplitude motions of a liquid-vapour interface in an accelerating container. *Journal of Fluid Mechanics*, 1969, 35(1): 77-96

- 16 Miles JW. Resonantly forced surface waves in a circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 1984, 149: 15-31
- 17 Faltinsen OM, Rognebakke OF, Lukovsky IA, et al. Multi-dimensional modal analysis of nonlinear sloshing in a rectangular tank with finite water depth. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, 407: 201-234
- 18 余延生, 马兴瑞, 王本利. 圆柱贮箱液体非线性晃动的多维模态分析方法. *应用数学和力学*, 2007, 28(8): 901-911
- 19 Van SMC, Peterson LD, Crawley EF. The coupled nonlinear dynamic characteristics of contained fluids in zero gravity. 31st AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Long Beach, USA, 1990
- 20 Peterson LD, Crawley EF, Hansman R.J. Nonlinear fluid slosh coupled to the dynamics of a spacecraft. *AIAA Journal*, 1989, 27(9): 1230-1240
- 21 Van SMC, Crawley EF. Nonlinear forced-response characteristics of contained fluids in microgravity. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1995, 32(3): 521-532
- 22 杨旦旦, 岳宝增. 微重力下圆柱形贮箱内液体晃动的分岔现象. *力学与实践*, 2013, 35(2): 29-34
- 23 He YJ, Ma XR, Wang PP, et al. Low-gravity liquid nonlinear sloshing analysis in a tank under pitching excitation. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 299(1): 164-177
- 24 Yue BZ. Nonlinear coupled dynamics of liquid-filled spherical container in microgravity. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2008, 29: 1085-1092
- 25 陈科. 充液航天器刚-液耦合动力学研究. [硕士论文]. 北京: 清华大学, 2004
- 26 吕敬. 充液挠性航天器非线性动力学研究. [博士论文]. 北京: 清华大学, 2006
- 27 Aslam M. Finite element analysis of earthquake induced sloshing in axisymmetric tanks. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1981, 17(2): 159-170
- 28 Fisher MF, Schmidt GR, Martin JJ. Analysis of cryogenic propellant behavior in microgravity and low thrust environments. *Cryogenics*, 1992, 32(2): 230-235
- 29 Koh HM, Kim JK, Park JH. Fluid-structure interaction analysis of 3-D rectangular tanks by a variationally coupled BEM-FEM and comparison with test results. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1998, 27(2): 109-124
- 30 Dutta S, Laha MK. Analysis of the small amplitude sloshing of a liquid in a rigid container of arbitrary shape using a low-order boundary element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2000, 47(9): 1633-1648
- 31 包光伟, 王政伟. 液体三维晃动特征值问题的有限元数值计算方法. *力学季刊*, 2003, 24(2): 185-190
- 32 Wang W, Li JF, Wang TS. Damping computation of liquid sloshing with small amplitude in rigid container using FEM. *Acta Mechanica Sinica*, 2006, 22(1): 93-98
- 33 Li Q, Ma XR, Wang TS. Equivalent mechanical model for liquid sloshing during draining. *Acta Astronautica*, 2011, 68(1): 91-100
- 34 Miao N, Li JF, Wang TS, et al. Investigation on free sloshing of liquid in two-dimensional rectangular tanks in microgravity. 64th International Astronautical Congress, Beijing, China, 2013
- 35 岳宝增, 于丹. 微重环境下 Cassini 贮液腔中液体晃动特性研究. *动力学与控制学报*, 2012, 10(1): 76-80
- 36 Amsden AA, Harlow FH. A simplified MAC technique for incompressible fluid flow calculations. *Journal of Computational Physics*, 1970, 6(2): 322-325
- 37 Hirt CW, Amsden AA, Cook JK. An arbitrary Lagrangian-Eulerian computing method for all flow speeds. *Journal of Computational Physics*, 1997, 135(2): 203-216
- 38 Himeno T, Watanabe T, Konno A. Numerical analysis for propellant management in rocket tanks. *Journal of Propulsion and Power*, 2005, 21(1): 76-86
- 39 Hirt CW, Nichols BD. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39(1): 201-225
- 40 Marsell B, Griffin D, Schallhorn P, et al. Integrated CFD and controls analysis interface for high accuracy liquid propellant slosh prediction. 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Nashville, USA, 2012
- 41 岳宝增, 李俊峰. 三维液体非线性晃动及其复杂现象. *力学学报*, 2002, 34(6): 949-955
- 42 Yue BZ, Wang ZL. Nonlinear phenomena of three-dimensional liquid sloshing in microgravity environment. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(20): 2425-2431
- 43 周宏, 李俊峰, 王天舒. 低重环境航天器贮箱内三维液体晃动数值模拟. *清华大学学报: 自然科学版*, 2005, 45(5): 658-661
- 44 Veldman AEP. The simulation of violent free-surface dynamics at sea and in space. European Conference on Computational Fluid Dynamics, Egmond aan Zee, The Netherlands, 2006
- 45 Baeten A. Liquid sloshing simulation using a three-dimensional particle-cluster approach. [PhD Thesis]. Germany: Aachen Technical University, 2007
- 46 Kezirian MT. Fuel slosh dynamics in spinning spacecraft. 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Sacramento, California, 2006
- 47 Vreeburg JPB. Liquid dynamics from spacelab to sloshsat. *Microgravity Science and Technology*, 2009, 21(1-2): 11-20
- 48 Dodge FT, Garza LR. Experimental and theoretical studies of liquid sloshing at simulated low gravity. *Journal of Applied Mechanics*, 1967, 34(3): 555-562
- 49 Burke CA. Nutation in the spinning SPHERES spacecraft and fluid slosh. [Master Thesis]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2010
- 50 Berry RL, Tegart JR. Experiment study of transient liquid motion in orbiting spacecraft. NAS8-30690, 1975
- 51 黄怀德. 低重力环境下的液体晃动研究. *宇航学报*, 1980, 1: 71-84
- 52 Chintalapati S, Hollicker CA, Schulman RE, et al. Design of an experimental platform for acquisition of liquid

- slosh data aboard the international space station. 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Atlanta, USA, 2012
- 53 Schallhorn P, Roth J, Marsell B, et al. Acquisition of long-duration, low-gravity slosh data utilizing existing ISS equipment (SPHERES) for calibration of CFD models of coupled fluid-vehicle behavior. 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Atlanta, USA, 2012
- 54 Silvernail NL, Sances DJ, Gangadharan S. Modeling of fuel slosh in a spin stabilized spacecraft with on-axis propellant tanks implemented with diaphragms. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, Chicago, USA, 2009
- 55 Fuhrmann E, Dreyer M. Description of the sounding rocket experiment-SOURCE. *Microgravity Science and Technology*, 2008, 20(3-4): 205-212
- 56 Prins JJM. Sloshsat FLEVO facility for liquid experimentation and verification in orbit: description of the mini satellite. NLR-TP-2000-63, 2000
- 57 Naumann RJ, Lundquist CA, Tandberg-Hanssen E, et al. Spacelab science results study. NASA/CR-2009-215740, 2009
- 58 Allen JS, Saavedra S. NASA sponsored fluid physics experiments conducted on the Mir Space Station. 37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, USA, 1999
- 59 Weislogel MM, Jenson R, Chen Y, et al. The capillary flow experiments aboard the International Space Station: status. *Acta Astronautica*, 2009, 65: 861-869
- 60 Deffenbaugh DM, Dodge FT, Green ST. Final report for the liquid motion in a rotating tank experiment (LME). NASA/CR-1998-208667, 1998
- 61 Snyder HA. Sloshing in microgravity. *Cryogenics*, 1999, 39(12): 1047-1055
- 62 Vergalla M. Investigation of slosh events using existing SPHERES hardware on ISS platform. 61st International Astronautical Congress, Prague, Czech Republic, 2010
- 63 Otero AS, Miller DW. Initial SPHERES operations aboard the International Space Station.//Rainer S, Hans, PR, Arnoldo V, et al, eds. *Small Satellites for Earth Observation*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008. 267-276
- 64 Bayle O, L'Hullier V, Ganet M, et al. Influence of the ATV propellant sloshing on the GNC performance. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Monterey, California, 2002
- 65 王天舒, 苗楠, 李俊峰. 航天器交会对接中液体燃料晃动等效模型研究. *空间控制技术与应用*, 2015, 41(3): 1-7
- 66 张雄, 刘岩, 马上. 无网格法的理论及应用. *力学进展*, 2009, 39(1): 1-36
- 67 Souto-Iglesias A, Delorme L, Pérez-Rojas L, et al. Liquid moment amplitude assessment in sloshing type problems with smooth particle hydrodynamics. *Ocean Engineering*, 2006, 33(11): 1462-1484
- 68 Gómez-Gesteira M, Dalrymple RA. Using a three-dimensional smoothed particle hydrodynamics method for wave impact on a tall structure. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2004, 130(2): 63-69
- 69 Lo EYM, Shao S. Simulation of near-shore solitary wave mechanics by an incompressible SPH method. *Applied Ocean Research*, 2002, 24(5): 275-286
- 70 Tartakovsky AM, Meakin P. Pore scale modeling of immiscible and miscible fluid flows using smoothed particle hydrodynamics. *Advances in Water Resources*, 2006, 29(10): 1464-1478

(责任编辑: 胡漫)

(上接第 249 页)

- 70 张学言, 闫澍旺. 岩土塑性力学基础. 天津: 天津大学出版社, 2004
- 71 Raie MS, Tassoulas JL. Installation of torpedo anchors: numerical modeling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(12): 1805-1813.
- 72 Cundall PA. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. Symposium of the International Society of Rock Mechanics, Nancy, New York, 1971
- 73 Huang AB, Ma MY. An analytical study of cone penetration tests in granular material. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(1): 91-103
- 74 Tanaka H, Momozu M, Oida A, et al. Simulation of soil deformation and resistance at bar penetration by the distinct element method. *Journal of Terramechanics*, 2000, 37(1): 41-56
- 75 Jiang MJ, Yu HS, Harris D. Discrete element modelling of deep penetration in granular soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2006, 30(4): 335-361
- 76 Tian Y, Cassidy MJ, Randolph MF, et al. A simple implementation of RITSS and its application in large deformation analysis. *Computers and Geotechnics*, 2014, 56: 160-167

(责任编辑: 胡漫)