

液体晃动液面动态变形实验研究

杨洋^{1*} 石文雄¹ 黄先富² 刘战伟¹

(¹北京理工大学宇航学院, 100081; ²中国科学院力学研究所, 100190)

摘要: 飞行器液体推进剂晃动问题一直是航天工作者研究的热点。本文发展了一种基于透射条纹技术的液体晃动液面动态变形测量方法。在发生晃动的液面下方布置单向几何光栅, 通过容器上方和水平方向上的高速 CCD 相机分别记录下因液面变形而产生的条纹变形图和液面边缘高度信息。将之代入所推导的液面离面变形与条纹位移之间的数学关系中, 即可迭代求得液面动态形貌。本方法具有精度高、成本低、非接触、简便易行等优点。

关键词: 液体晃动, 透射条纹法, 液面动态变形

一、引言

现代航天器需要携带大量液体推进剂以完成长时间、复杂的飞行任务。液体推进剂的晃动一直是航天器动力学与控制研究的热点问题。而对于飞行器贮箱液面变形的测量是研究液体晃动特性的前提^[1,2]。然而由于液体具有流动性或不稳定性等特点, 为实验研究带来了很多困难。本文发展了一种基于透射条纹法的针对晃动液面变形的动态全场测量方法, 具有精度高、成本低、非接触、简便易行等优点。

二、透射条纹法测量技术原理

如图1所示, 当水平液面在竖直方向上发生变形时, 从液面上方观察水中或水底的物体, 可发现物体的虚像会发生变形, 该变形与液面的离面变形及物体所在的空间位置有关。在透明水槽底部放置拥有固定周期的规则单向几何栅线, 当液面发生晃动时, 栅线的虚像会发生变形, 通过测量透射条纹的变形信息, 可进一步推导出晃动液面的形貌。液面高度与条纹变形几何关系如图2所示。

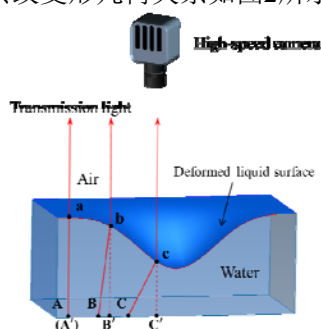


图1 透射条纹法原理示意图

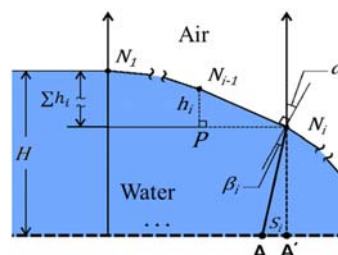


图2 液面高度与条纹变形几何关系示意图

将变形的液面曲线分割并近似成无限多段微小折线, 根据斯涅耳定律及两者几何关系建立如下方程:

* 报告人简介: 杨洋 1987.3-, 男, 实验力学, 研究生。E-mail: 2120120025@bit.edu.cn

$$\begin{cases} n_{water} \cdot \sin \beta_i = n_{air} \cdot \sin \alpha_i \\ h_i = L_{PN_i} \cdot \tan \alpha_i \\ H - \sum h_i = \frac{s_i}{\tan(\alpha_i - \beta_i)} \end{cases} \quad (1)$$

其中 n_{water} 和 n_{air} 分别为水和空气的折射率， L_{PN_i} 为计算步长。通过相关软件求出条纹位移 s_i ，即可根据以上推导的方程迭代求出液面的变形进而求出液面位移量 $\sum h_i$ ^[3-5]。

三、 晃动液面形貌动态全场测量实验及结果

将显示有几何光栅的LCD显示器置于盛有染色清水(模拟推进剂)的圆筒状水槽下方。水槽垂直方向和水平方向上均布置高速CCD相机。人为造成水槽内液面晃动，此过程中通过两个方向上的高速CCD相机分别连续采集不同时刻透射条纹图及液面边缘高度信息。分析高速CCD相机采集的图像，通过提取中心线法得到条纹的位移量，标定液面边缘高度作为迭代初始量，进而通过迭代得到液面位移量，最终绘制出不同时刻晃动液面的全场形貌。部分测量结果如图4所示。

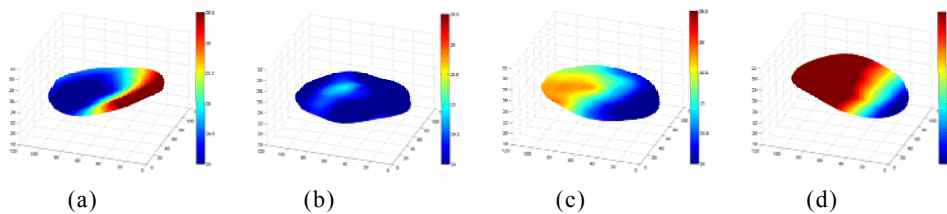


图4 不同时刻晃动液面形貌部分测量结果
(a)t=0.000s, (b)t=0.003s, (c)t=0.006s, (d)t=0.009s

四、 结论

本文发展了一种针对晃动液面全场形貌动态测量的方法。本方法精度高，简便易行，测量过程不会对液面的变形产生干扰，基于透射条纹技术，采用高速CCD相机连续采集不同时刻条纹变形和液面边缘高度信息，通过相应数学关系计算出晃动液面全场动态形貌。为飞行器贮箱液体晃动特性的研究提供了新的方法和思路。

参 考 文 献

- 1 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研究与应用. 力学进展, 2012; 42(4): 472~481.
- 2 岳宝增, 于丹. 微重环境下 Cassini 贮液腔中液体晃动特性研究. 2012; 10(1): 76~80.
- 3 Liu ZW, Huang XF, Xie HM. A novel orthogonal transmission-virtual grating method and its applications in measuring micro 3-D shape of deformed liquid surface. Opt. Laser Eng. 2013; 51: 167~171.
- 4 赵玉臣, 黄先富, 刘战伟, 谢惠民, 何光. 透射虚栅计量法及其在液面微变形测量中的应用. 中国激光, 2012; 39 (9): 0908001.
- 5 刘战伟, 杨晓波, 方志军, 谢惠民. 一种液面微形貌测量技术及在微浮力和表面张力研究中的应用. 光学技术, 2011; 37(6): 641~646.