

基于 SPH 方法的油箱抗冲击有限元分析

刘雄建

(浙江大学, 杭州 310027)

摘要: **目的** 验证 SPH 方法在流固耦合问题上的适用性。**方法** 采用 SPH 方法(光滑粒子流体动力学方法)模拟无人机油箱抗冲击过程, 并与采用 CEL 方法(耦合欧拉-拉格朗日方法)模拟得到的结果进行对比。**结果** 2 种模拟方法得到的燃油晃动情况、油箱应力分布及地面支反力结果接近。

结论 SPH 方法在流固耦合问题上适用的。

关键词: 油箱; 冲击; 光滑粒子流体动力学方法; 耦合欧拉拉格朗日方法

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)15-0126-03

Finite Element Analysis of Impact Resistance of Fuel Tank with SPH Method

LIU Xiong-jian

(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

ABSTRACT: It aims to prove that SPH method is suitable for fluid-structure coupling problems. UAV fuel tank impact process was simulated with SPH (smoothed particle hydrodynamics) method and CEL (coupled eulerian-lagrangian) method respectively. The simulating results with two methods were compared. Fuel fluctuation, stress distribution and ground reaction force of the two results were similar. In conclusion, SPH method is suitable for fluid-structure coupling problems.

KEY WORDS: fuel tank; impact; SPH method; CEL method

无人机因其结构简单、使用方便、飞行时间长、生产成本低、对环境要求低、战场生存能力强、可降低人员伤亡等优点, 在军事和民用领域得到成功应用。目前世界各主要国家都在积极研制先进的军用无人机, 并拓展民用无人机的应用范围。

文中采用 SPH 方法模拟无人机油箱冲击地面的过程, 考察油箱的抗冲击性能, 并与采用耦合欧拉-拉格朗日方法模拟得到的结果进行对比。SPH 方法是一种在拉格朗日描述下的无网格方法, 因其无需划分网格, 不会出现网格扭曲问题, 广泛应用于高速冲击、液体晃动、流固耦合等大变形问题。1977 年, Lucy^[1]和 Gingold^[2]首次提出 SPH 方法, 当时主要用于研究天体物理学和宇宙理论。20 世纪 80

年代, Monaghan 等人^[3-4]在研究 SPH 方法的过程中, 提出了核函数的概念, 为 SPH 方法的理论完善作出了巨大贡献, 并成功地将其应用于冲击问题^[5]、流体动力学问题^[6-7]。20 世纪 90 年代, Swegle^[8], Dyka^[9]和 Chen^[10]等人具体分析了造成 SPH 方法求解不稳定的因素, 并提出了改进方法。随着时间的推移, SPH 方法获得了更多的理论支持^[11-12], 使其在处理大变形和流固耦合等问题上具有很大优势。近 10 多年来, SPH 方法也引起了我国一些学者的重视, 张锁春^[13]对 SPH 方法进行了综述, 详细介绍了该方法的理论基础及具体实施过程。Iglesias 等人^[14-15]采用 SPH 方法模拟二维矩形水槽的纵摇并与试验结果进行了对比, 证明了应用 SPH 方法模拟液体晃

收稿日期: 2016-06-03

作者简介: 刘雄建(1988—), 男, 湖南人, 浙江大学硕士生, 主攻复杂结构有限元计算。

荡问题的有效性。

1 SPH 方法基本理论

SPH 方法通过点来离散求解域, 每个点即 1 个单元, 代表 1 个以该点为中心, 以特征长度 2 倍为棱长的立方体区域, 每个点与以该点为中心的光滑长度为半径的球形区域内的点有相互作用。SPH 方法的核心思想是, 对于待求区域内的任一宏观变量 (如位移、速度和压强等), $f(x)$ 先作积分近似, 再将该积分近似式转化为粒子叠加求和的离散化形式。积分近似表达式如下:

$$f(x) \approx \int_{\Omega} f(x') W(x-x', h) dx' \quad (1)$$

式中: Ω 为求解域; h 为光滑长度; $W(x-x', h)$ 为光滑函数, 满足可微性质。

$f(x)$ 的空间倒数的积分近似表达式可以利用光滑函数可微性质得到:

$$\nabla \cdot f(x) = - \int_{\Omega} f(x') \cdot \nabla W(x-x', h) dx' \quad (2)$$

将函数 $f(x)$ 及其空间倒数的近似连续积分表达式转化为求解域内粒子叠加求和的离散化形式^[16]:

$$f(x) = \sum_{j=1}^n f(x_j) W(x-x_j, h) \frac{m_j}{\rho_j} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot f(x) = \sum_{j=1}^n f(x_j) \cdot \nabla W(x-x_j, h) \frac{m_j}{\rho_j} \quad (4)$$

2 基于 SPH 方法和 CEL 方法的油箱抗冲击模拟

无防负过载设计的无人机油箱, 其简化结构见图 1, 油箱中部为半径 200 mm, 长 700 mm 的圆柱壳, 里面分布 5 块隔板, 隔板下边有孔连通, 孔的半径为 50 mm, 两端为半球形壳。

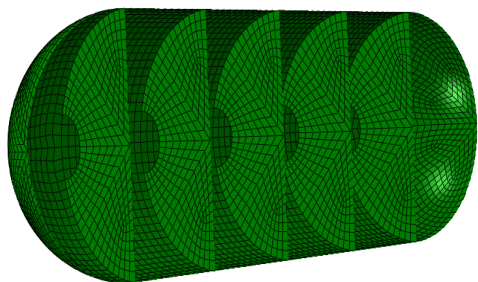


图 1 油箱剖面

Fig.1 Profile of fuel tank

定义油箱中液面高度与油箱高度的比值为液比。油的材料参数: 密度为 0.8 t/mm^3 , 粘性系数为 $1 \times 10^{-8} \text{ N} \cdot \text{s/mm}^2$, EOS 参数为 $1 \times 10^{-8} \text{ N} \cdot \text{s/mm}^2$, $s=0$, $\Gamma_0=0$ 。油箱材料参数: 弹性模量为 70 GPa, 泊松比为 0.33, 密度为 2700 kg/m^3 , 弹性极限为 311 MPa, 强度极限为 697 MPa, 塑性阶段采用各向同性强化模型。

分别采用 SPH 方法与 CEL 方法模拟普通油箱在充液比为 1:2 时水平跌落冲击地面的过程。油箱底部初始位置距离地面高度为 1 m, 自由落体撞击地面。油箱采用壳单元模拟, 油箱壁厚为 2 mm, 地面作刚体处理, 模拟时间为 0.02 s。采用 SPH 方法和 CEL 方法模拟结束时, 燃油晃动情况见图 2, 两者的大致趋势相同。

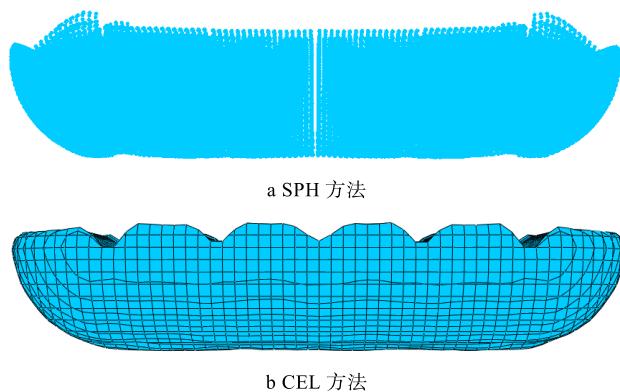


图 2 模拟时间为 0.02 s 时 SPH 和 CEL 方法模拟得到的燃油晃动情况

Fig.2 Fuel fluctuation by SPH and CEL at 0.02 s

冲击过程中, 采用 SPH 和 CEL 方法模拟得到的油箱应力最大时刻均为 3.5 ms, 应力见图 3, 可以看出, 2 种模拟方法得到的最大应力及应力分布情况十分相似。

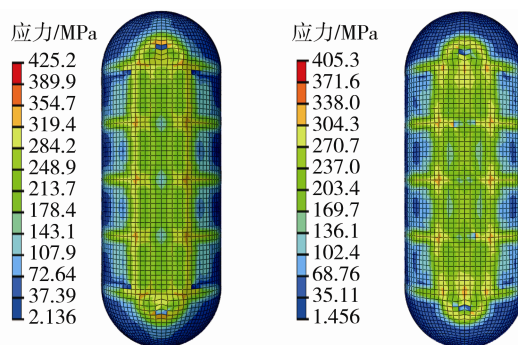


图 3 3.5 ms 时 2 种方法得到的应力云图

Fig.3 Stress nephogram by two methods at 3.5 ms

采用 SPH 方法和 CEL 方法模拟过程中, 地面支反力随时间的变化情况见图 4, 由图 4 可知, 采

用 2 种方法模拟油箱冲击地面过程中得到的支反力结果接近。

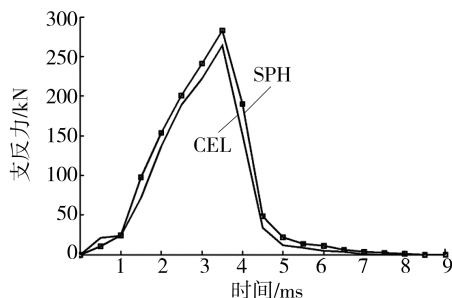


图 4 2 种方法得到的地面支反力随时间的变化情况

Fig.4 Change of ground reacting force over time by two methods

3 结语

基于 SPH 和 CEL 方法模拟无人机油箱抗冲击过程, 2 种模拟方法得到的液体运动情况、油箱应力分布和地面支反力结果都相似。由此, 验证了 SPH 方法在处理流固耦合问题上适用的。

参考文献:

- [1] LUCY L B. A Numerical Approach to the Testing of the Fission Hypothesis[J]. The Astronomical Journal, 1977(2): 1013—1024.
- [2] GINGOLD R A, MONAGHAN J J. Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and Application to Non-spherical Stars[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1977(3):375—389.
- [3] MONAGHAN J J. An Introduction to SPH[J]. Computer Physics Communications, 1988, 48(1): 89—96.
- [4] MONAGHAN J J. Simulating Free Surface Flows with SPH[J]. Journal of Computational Physics, 1994(2): 399—406.
- [5] MONAGHAN J J, GINGOLD R A. Shock Simulation by the Particle Method SPH[J]. Journal of Computational Physics, 1983, 52(2): 374—389.
- [6] MONAGHAN J J. Particle Methods for Hydrodynamics[J]. Computer Physics Reports, 1985, 3(2): 71—124.
- [7] GINGOLD R A, MONAGHAN J J. Kernel Estimates as a Basis for General Particle Methods in Hydrodynamics[J]. Journal of Computational Physics, 1982, 46(3): 429—453.
- [8] SWEGLE J W, HICKS D L, ATTAWAY S W. Smoothed Particle Hydrodynamics Stability Analysis [J]. Journal of Computational Physics, 1995, 116(1): 123—134.
- [9] DYKA C T, INGEL R P. Addressing Tension Instability in SPH Methods[R]. Washington DC: Naval Research Lab, 1994.
- [10] CHEN J K, BERAUN J E, JIH C J. An Improvement for Tensile Instability in Smoothed Particle Hydrodynamics[J]. Computational Mechanics, 1999, 23(4): 279—287.
- [11] JOHNSON G R, BEISSEL S R. Normalized Smoothing Functions for SPH Impact Computations[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1996, 39(16): 2725—2741.
- [12] VIGNJEVIC R, CAMPBELL J, LIBERSKY L. A Treatment of Zero-energy Modes in the Smoothed Particle Hydrodynamics Method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000(1): 67—85.
- [13] 张锁春. 光滑质点流体动力学(SPH)方法(综述)[J]. 计算物理, 1996, 13(4): 385—397.
ZHANG Suo-chun. Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) Method (A Review)[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 1996, 13(4): 385—397.
- [14] IGLESIAS A S, ROJAS L P, Rodriguez R Z. Simulation of Anti-roll Tanks and Sloshing Type Problems with Smoothed Particle Hydrodynamics[J]. Ocean Engineering, 2004, 31(8): 1169—1192.
- [15] SOUTO-IGLESIAS A, DELORME L, PÉREZ-ROJAS L, et al. Liquid Moment Amplitude Assessment in Sloshing Type Problems with Smooth Particle Hydrodynamics[J]. Ocean Engineering, 2006, 33(11): 1462—1484.
- [16] 高伟. 基于 SPH 法的舱内液体晃荡的数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2009.
GAO Wei. Numerical Simulation of Liquid Sloshing in Tanks by SPH[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.