

飞机在波浪中着水的砰击载荷数值模拟

宋志杰, 杨晓彬, 许国冬

(哈尔滨工程大学船舶工程学院, 哈尔滨, 150001, Email: xuguodong@hrbeu.edu.cn)

摘要: 飞机紧急情况下在海上着水时机身遭遇巨大的砰击载荷。海上波浪波高与波长对砰击载荷有重大影响。本文通过计算流体力学方法对 TN2929 飞机模型在波浪中着水砰击的耦合运动过程进行数值模拟, 对飞机机身匀速砰击波浪载荷、飞机在波浪中不同位置自由着水的水动力砰击载荷与运动进行研究。首先研究飞机机身匀速砰击波浪, 通过实验数据验证数值算法的可行性。其次采用耦合动力学方法模拟飞机在波峰与波谷着水的耦合运动, 发现波谷处着水的砰击载荷较波峰处着水的砰击载荷小, 但均大于静水中的砰击载荷。进一步研究了波长对砰击载荷的影响规律, 波长与机身接近时的砰击最剧烈, 波长大于两倍机身长度时的波浪砰击载荷变得缓和。

关键词: 飞机着水; 波浪; 数值模拟; 耦合运动

1 引言

当飞机在飞行中遇到突发状况时, 若不能找到合适的场地安全降落, 选择在水上紧急迫降是一个相对安全的方案。因此飞机在紧急情况下水上迫降的水动力学砰击载荷研究显得至关重要。飞机着水问题是一个强非线性耦合动力学问题, 着水历时短且载荷大, 存在很大的分析难度。早期美国的 Thompson^[1]进行了飞机水池降落实验, 根据实验判断飞机的纵向和垂向最大加速度可达到 3~5 倍重力加速度。Steiner^[2]研究了全尺度 B-24D 军用飞机在水上降落的实验, 他发现压力峰值超过 50 磅每平方英尺, 而且大部分高压区域在飞机底部表面。McBride 和 Fisher^[3]完成了 TN2929 飞机模型在水上降落的实验, 他们研究了初始速度及飞机的尾部形状对飞机降落姿态的影响。这些实验研究表明飞机在水上降落是十分危险的, 也为后人研究飞机水上降落提供了实验参考。

飞机水上降落的理论方法随着时代在发展。Von-karman^[4]最早基于动量定理, 忽略自由液面变化, 对水上飞机浮箱着水的砰击载荷进行了计算。Wagner^[5]利用相当平板理论, 引入线性自由面修正, 考虑水面的升高, 计算了楔形入水砰击载荷。Korobkin^[6]考虑自由面非线性变形, 对小底升角结构物入水进行了计算。Zhao 等^[7]采用非线性自由面条件, 时间步进分析了楔形体入水的压力分布。Xu 等^[8]基于全非线性方法, 将楔形结构的自由入水砰击理论拓展到多自由度。这些理论部分应用到飞机的水上降落问题。Shigunov 等^[9]基于修正的瓦格纳方法计算了飞机水上降落的砰击载荷。除了简化方法和势流理论方法, 商用 CFD 软件逐步应用于飞机水上降落的数值模拟。罗琳胤等^[10]基于 LS-DYNA 仿真平台研究了水陆两栖飞机着水运动响应。屈秋林等^[11]采用 CFD 技术模拟了飞机在静水中的耦合运动过程, 分析了着水时仰角对飞机砰击载荷的影响。飞机在海上迫降时不可避免的遭遇风浪。波浪

对砰击载荷有着至关重要的影响,使得降落的风险急剧增加,值得深入研究。

本文主要研究飞机砰击波浪过程中遭受的砰击载荷特性。首先研究飞机机身匀速砰击波浪,通过实验研究验证数值算法的可行性。其次采用耦合动力学方法模拟飞机在波峰与波谷着水的运动与砰击载荷,并进一步研究了波长对砰击载荷的影响规律。

2 数值计算模型与验证

本文主要采用商业 CFD 软件 STAR-CCM+ (V12.02) 计算,采用 Realizable k-epsilon 湍流模型求解雷诺平均纳维-斯托克斯方程计算机身和流体的相互作用,采用 VOF (Volume of Fluid) 方法捕捉自由面的变化,采用重叠网格和 DFBI (Dynamic Fluid Body Interaction) 模型模拟飞机着水耦合运动。重叠网格和 DFBI 模型的应用能保证 CFD 计算过程中网格质量,可以准确模拟飞机在六自由度大幅运动。VOF 模型通过在同一控制体内求解互不相容各相的体积分数确定交界面,对于本文涉及到的是水相和气相,在自由面的控制体内满足:

$$\rho = \rho_0 \alpha_0 + \rho_1 \alpha_1 \quad (1a)$$

$$\mu = \mu_0 \alpha_0 + \mu_1 \alpha_1 \quad (1b)$$

其中, α_n ($n=0,1$) 为各相体积分数, μ 为各相分子黏度, ρ 为各相的密度。

DFBI 模型模拟飞机入水过程的 6 自由度运动,飞机在笛卡尔坐标系下绕质心的平动和转动方程为:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} \quad (2a)$$

$$\vec{I} \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \vec{M} \quad (2b)$$

其中, m 为飞机质量, $\vec{I}$ 为绕飞机质心的惯性矩。

表 1 不同网格尺寸和时间步长的具体参数

	网格数量	机身网格尺寸	时间步
Case1	1738755	0.005	0.005
Case2	1738755	0.005	0.0025
Case3	1950351	0.0025	0.005
Case4	1950351	0.0025	0.0025

首先分析标准 TN2929 模型的机身匀速砰击波浪。图 1 (a) 为机身纵剖面,图 1 (b) 为实验模型,模型长度 1m,采用 3D 打印,中心线与静水面的有效攻角为 8° 。图 1 (c) 为数值模拟网格划分,考虑对称性,数值模拟中计算一半飞机模型。首先验证 CFD 数值模拟的网格和时间步的收敛性,网格和时间步设定的具体参数如表 1 所示。考虑飞机以匀速在波浪上水平飞行并砰击波浪。波浪为五阶 Stokes 波,波高 $H=0.08\text{m}$,波长 $\lambda=3.0625\text{m}$ 。图 2 (a)、(b)、(c) 分别为不同网格尺寸和时间步长的机身匀速砰击波浪遭受的水平力、垂向力和转矩,可以看到不同网格和时间步长得到的时历曲线趋势吻合。下文的数值计算中采用 Case2 所使用的网格尺寸和时间步长,即机身表面尺寸取 0.005m,时间步长 0.0025s。

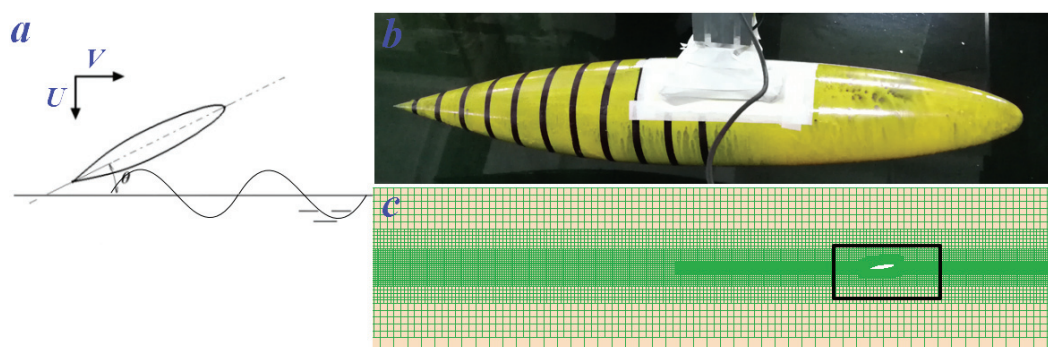
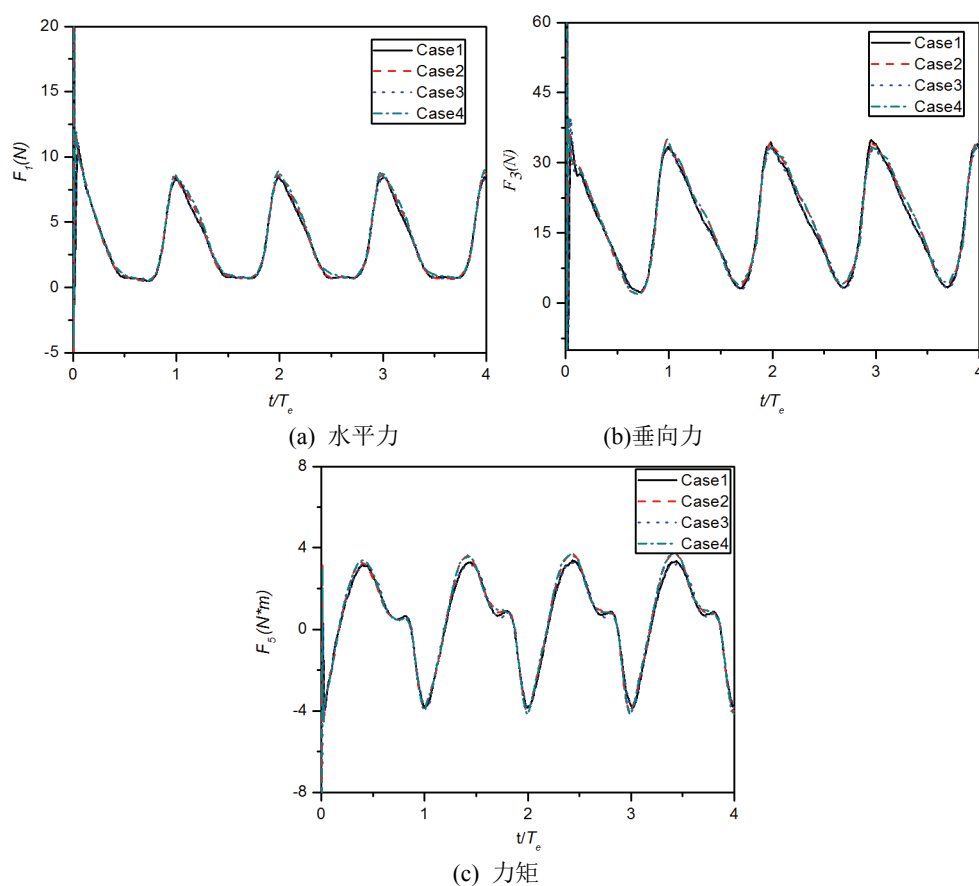


图1 (a)机身纵剖面图(b)实验模型(c)数值模拟计算网格

图2 不同网格尺寸和时间步的机身
波高 $H=0.08\text{m}$ ，波长 $\lambda=3.0625\text{m}$

将飞机机身砰击实验和数值计算结果进行对比，验证数值模拟的可行性。图3为飞机机身遭遇的水平力、垂向力和转矩。在一个遭遇周期内，水平力与垂向力均在零线以上波动。转矩在零线上下波动。实验数据与数值计算结果趋势吻合，但峰值偏小，这可能与实

验中拖车连接机构受到砰击载荷后连接桥发生的弹性形变有关，缓冲了水动力砰击载荷。

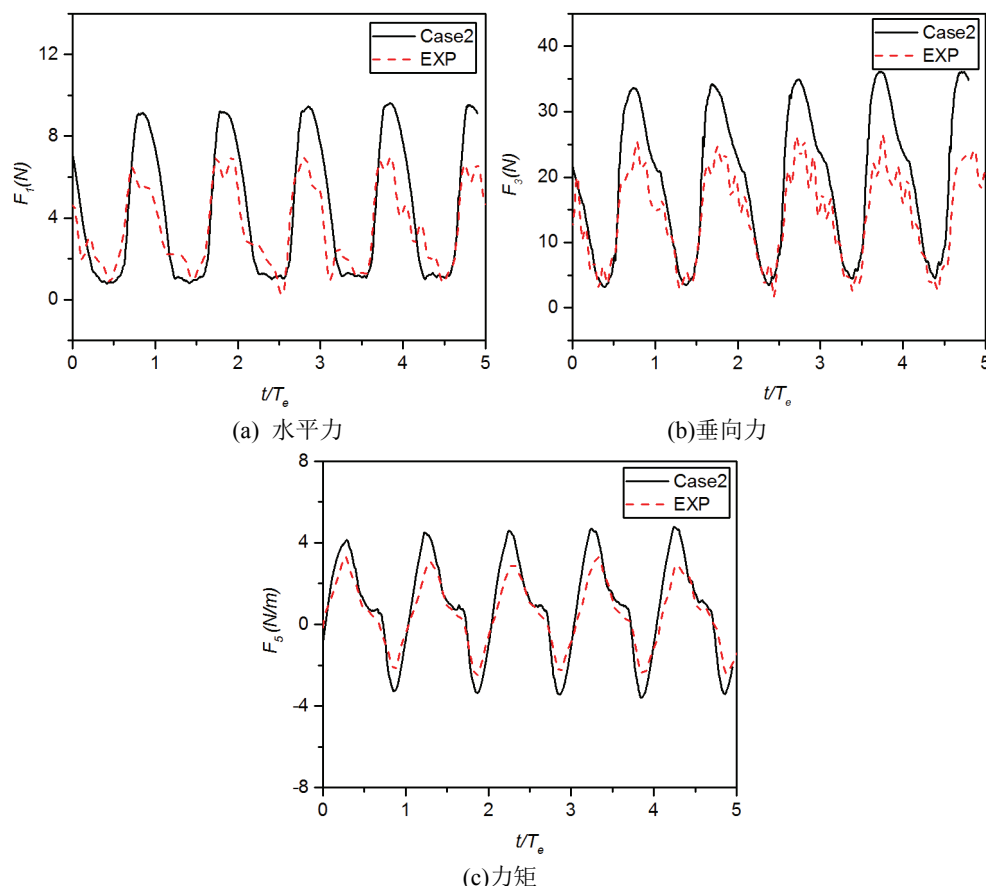


图3 飞机在波浪中拖航时
拖航速度 $V=3\text{m/s}$ ，波高 $H=0.08\text{m}$ ，波浪周期 $T=1.4\text{s}$

3 飞机在波浪中降落的运动与砰击载荷特性

本节研究飞机在波峰和波谷着水的耦合运动与砰击载荷变化规律，分析飞机在不同波长的波浪中降落的运动及砰击载荷变化规律。图4显示了飞机在波峰、波谷和静水中降落的运动变化和受力。TN2929飞机数值模型长度为 1.219m ，所采用的五阶Stokes波波长 $\lambda=1.5L$ 、波高 $H=0.06\text{m}$ ；飞机的水平初始速度 $V=9.144\text{m/s}$ 、垂向速度 $U=0$ 、仰角 $\theta=0^\circ$ 。飞机机身俯仰角峰值受影响较小。在波峰触水时，俯仰角 θ 达到最大值相比静水情况延迟；飞机在波谷触水时，俯仰角 θ 达到峰值比静水快。对应的机身遭遇砰击载荷有类似规律：在波峰降落时水动力峰值延迟出现；而在波谷降落的砰击载荷峰值出现较早。飞机在波峰降落后经过波谷，波浪的砰击不明显；飞机在波谷降落，迅速与迎面而来的波峰作用，砰击载荷迅速增大。图4(c)中机身遭受的水平力峰值变化不大，仅仅峰值出现的时间延迟或提前；图4(d)中表明在波峰降落时砰击载荷峰值明显大于静水中的载荷峰值，是静水

降落砰击载荷峰值的 2 倍；而在波谷降落的砰击载荷与静水中砰击载荷峰值接近。在波谷降落时所受力矩的峰值小于在静水和波峰降落。飞机在波谷降落的砰击过程更快，但其所受的垂向力和力矩较小且相对缓和，因此飞机在波谷降落相对安全。

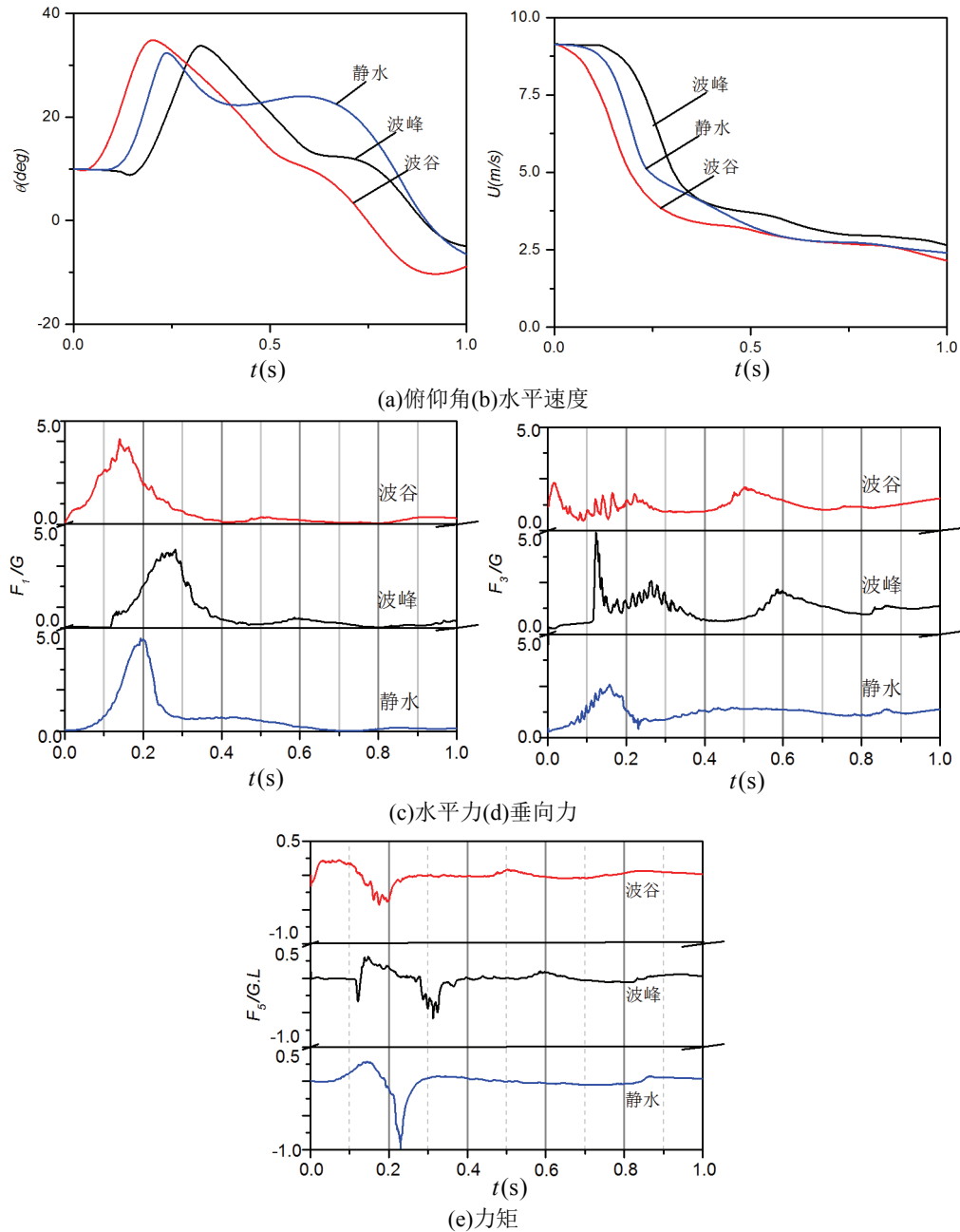


图 4 飞机在波浪中降落时俯仰角、水平速度和载荷随时间变化
 砰击速度 $v_0 = 9.144\text{m/s}$ ，波高 $H = 0.06\text{m}$ ，波长 $\lambda = 1.5L$

接下来研究飞机在波谷降落时波长变化对飞机砰击载荷的影响。入射波波长分为 $\lambda=0.74L$ 、 $\lambda=L$ 、 $\lambda=1.5L$ 、 $\lambda=2L$ 其中 $L=1.219\text{m}$ 为机身长度。图 5 给出了飞机在不同波长波浪中降落时俯仰角、水平速度、所受砰击载荷随时间的变化过程。图 5 (a) 显示了俯仰角的变化过程, 在初始时刻仰角变化相近, 均快速达到峰值, 随后在波长为 $\lambda=0.74L$ 和 $\lambda=2L$ 时, 飞机的俯仰角变化相对缓和; 波长为 $\lambda=L$ 时, 俯仰角有跳动, 机身运动最剧烈。 $\lambda=1.5L$ 时, 俯仰角变化更快。图 5 (b) 显示速度变化趋势相似, 波长 $\lambda=0.74L$ 时, 水平速度变化较平缓。图 5 (c) (d) (e) 表明 $\lambda=0.74L$ 时, 水平力较小而垂向力峰值明显增加, 且波动更加剧烈; $\lambda=L$ 时力矩峰值最大。 $\lambda=2L$ 时, 水平力峰值略有减小, 垂向力峰值较小且变化相对平缓。因此飞机在长波浪中降落时相对有利。

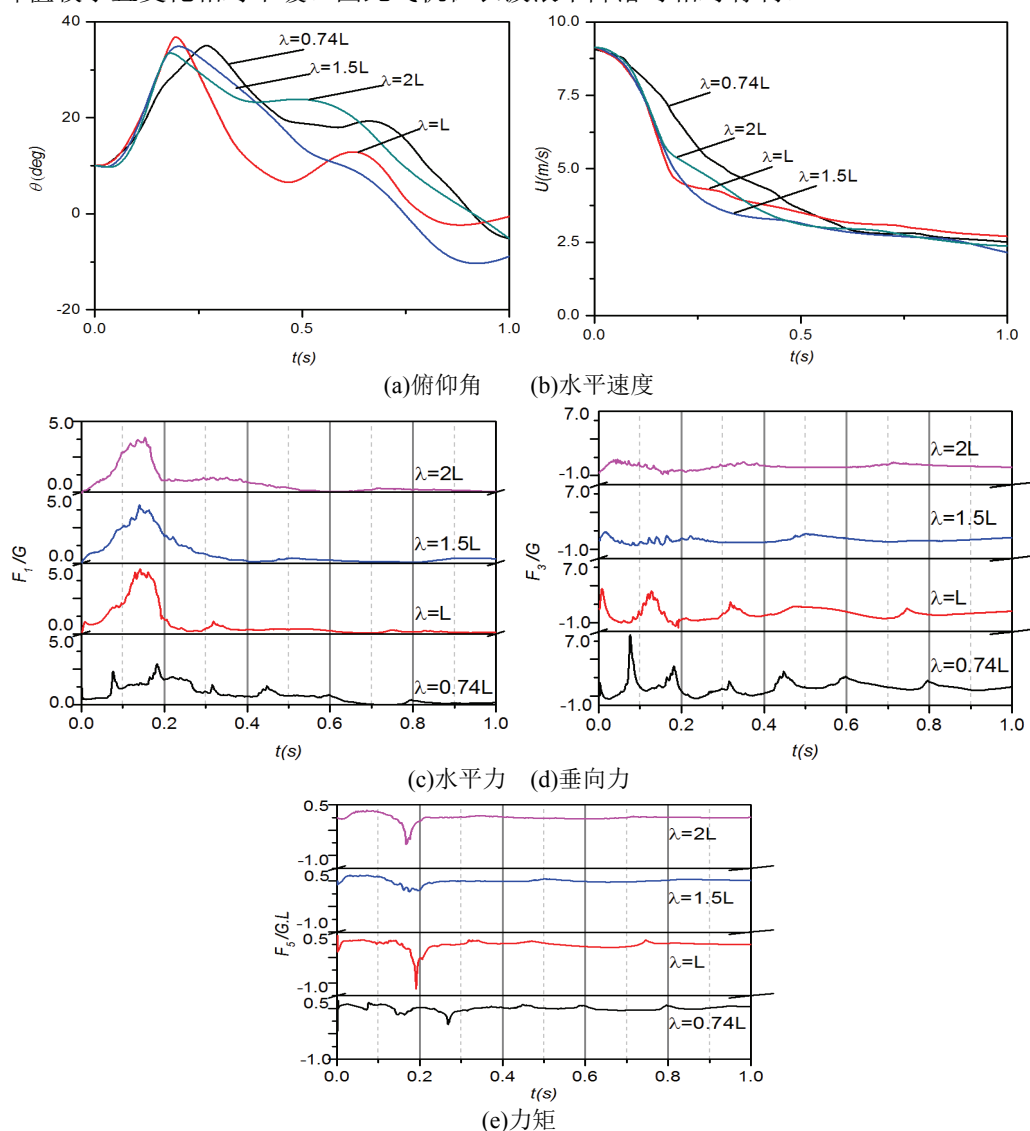


图 5 飞机在波谷降落时的俯仰角、水平速度和载荷随时间的变化
砰击速度 $v_0=9.144\text{m/s}$, 波高 $H=0.06\text{m}$

4 结论

本文采用重叠网格方法对标准 TN2929 飞机模型水上降落过程进行了数值模拟, 通过实验对比验证了数值模拟的可行性, 分析了降落位置与波长对飞机水上迫降过程的影响, 得到如下结论。

(1) 飞机在典型波浪中降落时, 在波谷着水时砰击载荷峰值与静水中降落接近; 在波峰上着水时飞机遭受到的砰击载荷是静水中降落的两倍, 飞机水上迫降在波谷上相对安全; 波浪中降落选择横浪向可近似为静水中降落, 相对较为安全;

(2) 飞机在不同波长波浪中着水时, 机身长度与波长相近时砰击载荷更为剧烈, 当波长达飞机长度两倍时砰击载荷相对较小, 运动相对平缓。

参考文献

- 1Thompson, W.C. Model ditching investigation of a jet transport airplane with various engine installations[R]. Technical Report Archive & Image Library, 1956.
- 2Steiner, M.F. Accelerations and bottom pressures measured on a B-24D airplane in a ditching test[R]. Technical Report Archive & Image Library, 1944.
- 3McBride, E.E. and Fisher, L.J. Experimental investigation of the effect of rear-fuselage shape on ditching behavior[R]. Technical Report Archive & Image Library, 1953.
- 4Von Karman, T. The impact on seaplane floats during landing[R]. Technical Report Archive & Image Library, 1929.
- 5Wagner, H. ÜberStoß und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten[J]. Z. Angew. Math. Mech; 1932,12:192-215.
- 6Korobkin, A.A. Analytical models of water impact[J]. Eur. J. Appl. Maths; 2004,15:821-838.
- 7Zhao, R and Faltinsen, O.M. Aarsnes J. Water entry of arbitrary two-dimensional sections with and without separation[C]. Proc. 21st Symposium on Naval Hydrodynamics pp: 1996,118-133. Trondheim, Norway
- 8Xu, G.D., Duan, W.Y. and Wu, G.X. Simulation of water entry of a wedge through free fall in three degrees of freedom[J]. Proc. Roy. Soc. A; 2010,466:2219-2239.
- 9 Shigunov, V., Söding, H. and Zhou, Y. Numerical Simulation of Emergency Landing of Aircraft on a Plane Water Surface[C]. 2-Nd Int. Conf. on High-Perform. Marine Vehicles Hiper.2001.
- 10 罗琳胤, 杨仕福, 吕继航. 水陆两栖飞机着水响应模型与数值分析[J]. 机械设计, 2013, 30(8).
- 11 屈秋林, 胡茗轩, 郭昊. 整体运动网格法在飞机水上迫降模拟中的应用[J]. 航空科学技术, 2015(11):1-9.

Numerical simulation of the impact load of aircraft ditching in waves

SONG Zhi-jie, YANG Xiao-bin, XU Guo-dong

College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001 China

Email: xuguodong@hrbeu.edu.cn

Abstract: When the aircraft land on the sea in emergency, the fuselage is subjected to huge impact load. Wave height and wavelength have significant effects on the impact loads. In this paper, the computational fluid dynamics method is adopted to simulate the coupled motion of the TN2929 aircraft model impact on the wave numerically. The hydrodynamic impact load and the coupled motion of the aircraft landing at different positions in the waves are studied. Firstly, the aircraft fuselage impacting in the waves at a constant velocity is studied. The feasibility of the numerical method is verified by experimental data. Secondly, we simulated the motion of the

aircraft ditching on the wave crests and troughs. The impact load on the trough is lower than the impact load on the crest, but both are higher than that on the initial calm water surface. The influence of wavelength on the impact load is further studied. The impact load is most severe when the wavelength is close to the fuselage, and the wave impact load become gentle when the wavelength is more than twice of the fuselage.

Key words: Aircraft ditching; waves; CFD; coupled motion;