

文章编号: 1674-8190(2022)06-134-10

地效飞行器双断阶机腹着水砰击过载分析

陈思宇¹, 孙建红^{1,2}, 孙智², 侯斌¹, 刘浩¹

(1. 南京航空航天大学 飞行器环境控制与生命保障工业与信息化部重点实验室, 南京 210016)

(2. 南京航空航天大学 民航应急科学与技术重点实验室, 南京 211106)

摘要: 地效飞行器着水过程中, 断阶着水产生的冲击易导致结构表面屈曲或破坏。基于ALE有限元法, 通过罚函数法处理两相界面流固耦合问题, 对地效飞行器着水过程进行数值模拟, 分析不同前飞速度、下沉速度、俯仰角等参数变化对浸水深度、砰击过载等的影响。结果表明: 在研究工况下, 机体着水产生的压力峰值均出现在断阶处; 随着俯仰角增加, 水平过载峰值减小, 垂向过载峰值先增大后减小, 俯仰角为7°时垂向过载峰值最大, 是最低过载峰值(俯仰角为15°时)的1.4倍; 前飞速度增加致使水平过载峰值增大, 而对垂向过载峰值影响不明显, 但垂向过载峰值与垂向速度的平方近似呈线性关系, 下沉速度越大, 砰击过载峰值越大。

关键词: 地效飞行器; 断阶; 着水砰击; 过载; 俯仰角

中图分类号: V275.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.06.14

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of Water Landing Overload of the Double-stepped Wing-in-ground Aircraft

CHEN Siyu¹, SUN Jianhong^{1,2}, SUN Zhi², HOU Bin¹, LIU Hao¹

(1. Key Laboratory of Aircraft Environment Control and Life Support of the Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2. Key Laboratory of Civil Aviation Emergency Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: During the landing process of wing-in-ground aircraft, the impact caused by the landing of broken steps is likely to lead to the buckling or damage of the structural surface. The Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) finite element method is utilized to simulate the water landing of a wing-in-ground aircraft, and the penalty function method is used in the two-phase interface fluid-solid interaction problem. The effect of different parameters such as horizontal flight velocity, falling velocity, pitch angle on the immersion depth, and overload are analyzed. The results show that the pressure maxima of the aircraft with water landing all occur at the broken step. With the increase of the pitch angle, the peak of vertical overload rises and then falls, while the peak of horizontal overload keeps reducing. When the pitch angle is 7°, the vertical overload peak reaches the highest, which is 1.4 times that of the lowest overload in the pitch angle of 15°. On the other hand, the peak of the horizontal overload rises as the horizontal component of flight velocity increases, and it is visible that there is no discernible effect on the peak of vertical overload. Meanwhile, an approximately linear relationship appears between the peak of vertical overload and the square of falling velocity. The larger the falling velocity, the bigger the peak of vertical overload.

Key words: wing-in-ground aircraft; broken step; water landing slamming; overload; pitch angle

收稿日期: 2022-01-14; 修回日期: 2022-03-15

基金项目: 航空科学基金(20200023052002); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 中国空气动力研究与发展中心基础和前沿技术研究基金(PJD20200210)

通信作者: 孙建红, jhsun@nuaa.edu.cn

引用格式: 陈思宇, 孙建红, 孙智, 等. 地效飞行器双断阶机腹着水砰击过载分析[J]. 航空工程进展, 2022, 13(6): 134-143.

CHEN Siyu, SUN Jianhong, SUN Zhi, et al. Analysis of water landing overload of the double-stepped wing-in-ground aircraft [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(6): 134-143. (in Chinese)

0 引言

随着航空事业的发展,地效飞行器因其高气动效率和运输速率受到广泛关注。地效飞行器是通过地面效应原理贴近地面或水面高速稳定飞行的飞行器^[1]。地效飞行器水面起降过程会给机体造成剧烈的冲击载荷,使飞行器受到强烈扰动,严重者会破坏机体结构,折断机翼、机身等。因此研究地效飞行器的着水过程具有重要意义。

国外对飞机着水砰击问题的研究起步较早,发展初期主要依靠理论分析与实验研究。理论研究方面,K. T. Von^[2]于1929年对飞机着水响应进行了研究,用附加质量的惯性力作用代替流体对结构的冲击载荷;1932年,针对结构入水冲击问题,H. Wagner^[3]提出了近似平板理论。实验研究方面,20世纪50~60年代,NASA和EADS(欧洲宇航防务集团)等机构对水上飞机着水问题进行了大量试验研究^[4-5],研究了不同型号的水上飞机的着水动力学特性^[6]。2016年,王明振等^[7]通过实验与数值方法研究了水平速度、着水姿态、重心位置对水陆两栖飞机平静水面着水过载的影响;2019年,孙丰等^[8]利用大型水陆两栖飞机舱段开展着水载荷试验研究,进行了不同重量和入水速度下的着水试验。

随着计算机技术日趋成熟,数值模拟方法被广泛应用于研究水上飞机及地效飞行器入水冲击问题。Cheng H等^[9]采用有限元法研究了飞机低速降落流固耦合问题;许震宇等^[10]通过数值模拟得到了某型号地效飞行器对称断阶着水过程重心处过载系数和机身底部压力分布规律;侯斌等^[11]对直升机带应急气囊冲击入水过程进行了模拟;赵芸可等^[12]采用整体动网格方法模拟了水上飞机的水面降落全过程;王峥华等^[13]基于Matlab/Simulink仿真环境,对船身式水陆两栖飞机水面和地面起飞过程进行仿真分析。

绝大多数地效飞行器主要针对水面飞行设计,在设计中常参考舰船的特性,通常机身上半部分与陆基飞机机身相似,机身下半部分采用断阶式滑行艇体的设计,以适应在水面的滑行、起飞和降落^[14-15]。船舶航海领域研究断阶对滑行艇高速滑行的影响较多,例如,孙华伟^[16]研究了单断阶对滑行艇不同航行状态下阻力性能的影响,表明滑行艇在底部设置断阶后有效地降低了高速滑行时

的阻力;W. R. Garland等^[17]研究表明,双断阶船体中,断阶使得滑行艇在高速滑行过程中黏性阻力减小,升阻比增加;A. Dashtimanesh等^[18]研究了两级断阶艇体在静水中的运动特性。

当艇底采用双断阶布局时,水流流经第一断阶时突然离开艇底,在断阶后形成一个空穴,经一定距离后再与第二断阶接触,直至船艏。这使得艇底在断阶前后形成两个较短的滑行面,即展弦比较大,提高了滑行效率。此外,在较高的 F_r 数下,断阶可以使浸湿面积减小,进一步降低滑行时的静水阻力,同时保证了良好的纵向稳定性^[19]。相关研究表明,在艇体高速运动时,单断阶设计失稳的概率会增加,而双断阶设计可以减小滑行过程中艇体的垂荡和纵摇响应^[20]。通常,地效飞行器航速较大,因此断阶结构被广泛应用于地效飞行器的设计中,但目前的研究主要关注单断阶结构对着水过程的影响和滑行艇双断阶水面航行过程,鲜见有关双断阶结构对地效飞行器着水过程的影响研究。

本文采用任意拉格朗日欧拉(Arbitrary Lagrangian-Eulerian,简称ALE)法对地效飞行器双断阶着水过程进行数值模拟,分析不同初始速度和姿态角下地效飞行器双断阶机腹着水运动响应与力学特性,以期地为地效飞行器静水面着水问题的研究提供参考和支持。

1 数值方法

ALE方法在处理结构边界时能够有效追踪其变化,处理内部网格时可以根据参数适当调整,使其不会出现严重的畸变,因此适用于处理移动边界和大变形问题^[21]。基于ALE方法的非定常、有黏、不可压流场控制方程^[22]如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - c_j \frac{\partial \rho}{\partial x_j} \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} = -c_j \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} = -\rho c_j \frac{\partial E}{\partial x_j} + \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho b_i \quad (3)$$

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

式中: $\rho, u_i, p, c_j, \sigma_{ij}, \mu, b_i, \delta_{ij}, x_i, t, E$ 分别为流体的密度、速度向量、压力、对流速度、应力张量、动力

黏度、体积力、克罗内克函数、 x 方向坐标、时间以及能量;下标 i, j 表示方向。

机体与水体碰撞过程中使用罚函数法来模拟不同结构之间的接触力,接触力 F 的表达式为

$$F = k_i \cdot d \tag{5}$$

式中: k_i 和 d 分别为耦合刚度和贯穿深度。

为求解流场的控制方程组,需要添加状态方程,空气的状态方程为多项式状态方程,水的状态

方程为 Gruneisen 状态方程。在计算中机体作刚体假设。

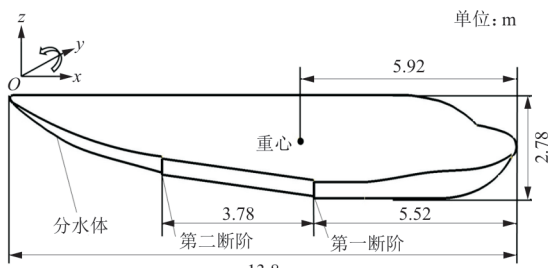
不同研究中水上飞机着水试验和数值模拟冲击加速度结果如表 1 所示,可以看出:在垂向速度相近的条件下,第一组工况中本文模拟结果与试验相差 5.8%;第二组工况中本文计算结果与采用 Fluent 整体动网格法模拟水上飞机着水的计算结果相近。

表 1 地效飞行器着水冲击加速度比较
Table 1 Comparison of water landing simulations for different WIG aircrafts

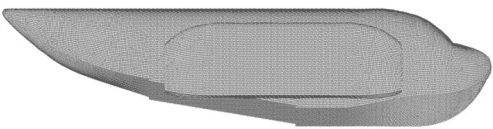
编号	计算模型	计算方法	质量/t	垂向速度/(m·s ⁻¹)	俯仰角/(°)	垂向加速度/g
1	水陆两栖飞机舱段 ^[8]	模型试验	1.2	4.0	0	2.60
	本文地效飞行器	ALE 方法	4	3.4	3	2.45
2	水上飞机 ^[12]	Fluent 整体动网格法	49.8	1.5	5	1.68
	本文地效飞行器	ALE 方法	4	1.4	5	1.17

2 计算模型和网格

本文采用某型地效飞行器^[22]为研究对象,简化后地效飞行器的相关尺寸及有限元模型如图 1 和表 2 所示,转动惯量 I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} 分别为 $5.65 \times 10^4, 3.23 \times 10^4, 8.56 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。计算域长 80 m,宽 20 m,水深 20 m,空气域高度 4 m。机体面网格数量为 15 万,计算域网格数量为 620 万。为了分析机体过载峰值位置和压力分布,在分水体龙骨线和第一断阶处机身 y 方向设置探测点,探测点分布如图 2 所示。



(a) 地效飞行器机身几何特征



(b) 地效飞行器面网格

图 1 某型地效飞行器几何特征和网格
Fig. 1 Geometric characteristics and grid of the WIG

表 2 机体几何参数
Table 2 Geometric parameters of WIG aircraft

参数	数值
机身总长/m	13.80
翼展/m	10.60
浮筒长度/m	6.70
浮筒最大宽度/m	0.45
第一断阶位置(距离机头)/m	5.52
第二断阶位置(距离机头)/m	9.66
机体质量/t	4.00
重心位置(距离机头)/m	5.92

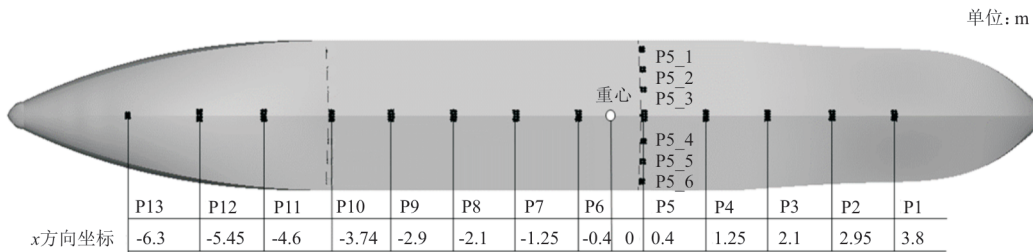


图 2 机身分水体监测点示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the monitoring points

3 计算结果分析

3.1 姿态角对着水过程的影响

根据某型地效飞行器巡航速度和起飞速度^[23]选取前飞速度 24.0 m/s,下沉速度 3.4 m/s,并根据相关研究结果^[24]选取俯仰角分别为 3°、5°、7°、9°、12°、15°,对地效飞行器着水冲击过程进行研究。其中图 1(a)箭头所指方向,即机体绕重心逆时针旋转为正向。

水陆两栖飞机着水分为断阶着水、船艏着水和船艉着水 3 种情况,其中断阶着水砰击过载较大^[7],因此本文主要对地效飞行器断阶着水工况进行研究。根据初始俯仰角不同导致的着水状态变化,将地效飞行器断阶着水工况分为三类,分别为一处断阶着水、双断阶着水、二处断阶着水,如表 3 所示。不同工况初始着水压力云图如图 3 所示。

表 3 不同着水工况
Table 3 Classification of simulation condition

工况	初始俯仰角/(°)	着水特征	初始着水压力云图
一处断阶着水	3~5	一处断阶与断阶间龙骨线前侧触水	图 3(a)
双断阶着水	7~9	两处断阶都触水	图 3(b)
二处断阶着水	12~15	二处断阶与船艉部分着水	图 3(c)

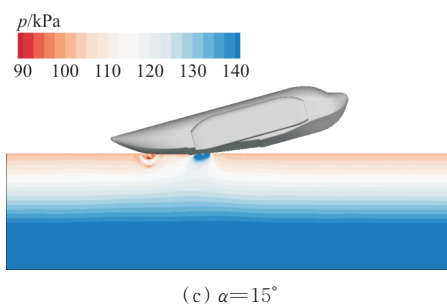
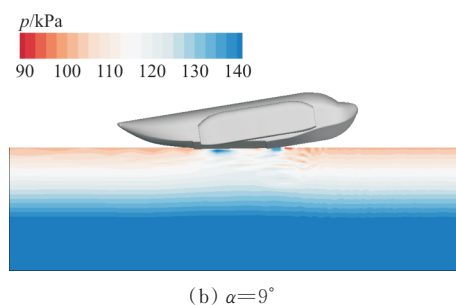
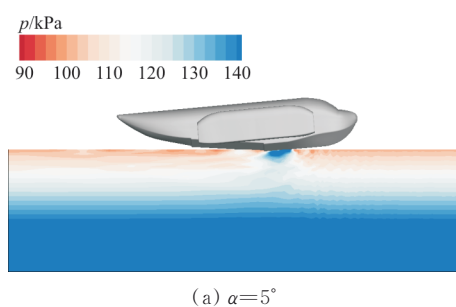


图 3 不同工况初始着水压力云图
($t=0.30$ s, $v_x=24.0$ m/s, $v_z=3.4$ m/s)

Fig. 3 Pressure contour under different working conditions
($t=0.30$ s, $v_x=24.0$ m/s, $v_z=3.4$ m/s)

一处断阶着水工况下,机身姿态呈现先“抬头”后“低头”的变化趋势,二处断阶着水工况下,机身姿态呈现先“低头”后“抬头”的变化趋势。俯仰角时历曲线如图 4 所示。不同的俯仰角变化趋势是重心位置与水动力作用相对位置不同造成的。一处断阶着水工况下,船艏部分与水平面相交,水体高压区产生的水动力反作用于机体,质心前侧产生向上的俯仰力矩使机体“抬头”。二处断阶着水工况下,质心后侧产生向上的俯仰力矩使得机身“低头”,滑行面动压靠后,在飞行器高速运动过程中易引起纵向失稳。三类工况中,初始着水姿态影响下,断阶间龙骨线与静水面夹角越大,水动力作用下力矩越大,姿态变化越显著。双断阶着水工况下的夹角最小,其俯仰角变化幅度也最小。

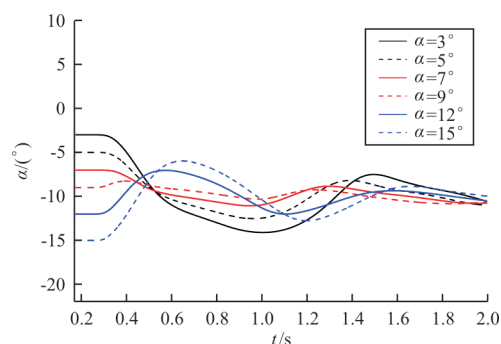


图 4 俯仰角时历曲线

Fig. 4 The time variation of pitch angle

楔形体倾斜入水时,入水角(斜边与水面夹角)越大,着水产生的砰击力极值越小^[25]。本文地效飞行器断阶间龙骨线入水过程与楔形体入水过程规律相近,如图 5 所示,不同初始俯仰角下断阶间龙骨线与水面夹角越大,受到水阻作用越小,减速过程加速度越小,运动时间越长,浸水深度越

大。三类着水工况中,双断阶着水工况断阶间龙骨线与静水面近似平行,浸水深度最小。另两类工况中,初始触水时刻断阶间龙骨线与静水面夹角越大,浸水深度越大,二处断阶着水工况浸水深度大于一处断阶着水工况。

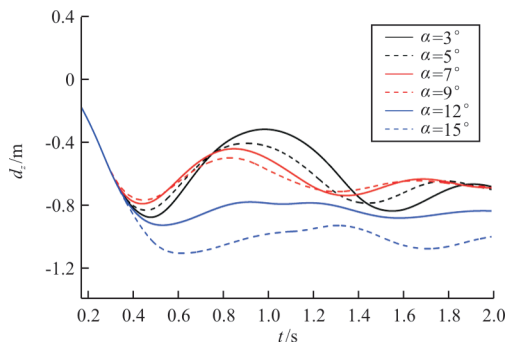


图 5 不同俯仰角浸水深度时历曲线

Fig. 5 Comparison of depth of water immersion at different pitch angles

一处断阶和二处断阶着水工况水平方向过载呈两段式变化,如图 6 所示,这与到达过载峰值运动过程中两处断阶着水状态有关。结构体着水过载主要受到湿面积的影响^[26],机体水平方向为减速运动,水平过载随着湿面积的增加而增加,各工况到达水平过载峰值时,两处断阶都浸入水中呈滑行姿态。

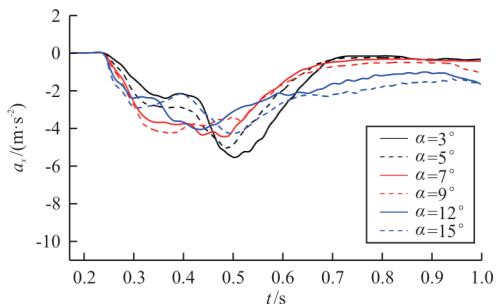


图 6 不同俯仰角水平过载时历曲线

Fig. 6 Comparison of horizontal overload at different pitch angles

一处断阶着水工况下,初始船艏部分与水体作用产生的水动力使机体产生“抬头”变化,前体湿面积变小,二处断阶着水导致后体湿面积增加,短时间内断阶间产生空腔,滑行艇中也产生此类现象^[27],总体湿面积变小,因此水平过载曲线出现两段式变化趋势(如图 6 所示)。随着机体向下运动,空腔缓冲作用减弱,水平力作用面积增加,机体过载增加到水平过载峰值。二处断阶着水工况下,机体在“低头”趋势下顺时针旋转,由于分水体

构造的影响,断阶间龙骨线形成的空气夹层缓冲作用更显著,因此二处断阶着水工况水平过载峰值均低于一处断阶着水工况。双断阶着水过程中,水平过载呈现梯形变化趋势,这是由于着水后俯仰角变化较小,水中滑行姿态变化较小,断阶间空腔作用不明显,因此过载曲线较平缓。 $\alpha=15^\circ$ 时,二处断阶着水工况压力云图如图 7 所示。

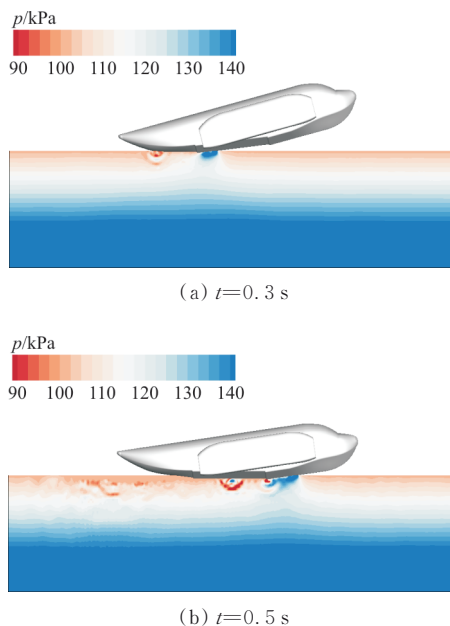


图 7 二处断阶着水工况压力云图($\alpha=15^\circ$)

Fig. 7 Pressure contour of the second-step landing condition ($\alpha=15^\circ$)

水平过载峰值统计如图 8 所示,可以看出:俯仰角为 3° 、 5° 、 7° 、 9° 、 12° 时水平过载峰值分别为 $0.57g$ 、 $0.52g$ 、 $0.46g$ 、 $0.44g$ 、 $0.42g$;随着俯仰角增加,分水体从船艏到船艉面积减小导致水平力作用湿面积减小,水平过载峰值减小;而当俯仰角为 15° 时,过载为 $0.44g$,这是由于机体在 $t=0.50$ s 时同时到达水平过载与垂向过载峰值,此时机体浸水深度较 $\alpha=12^\circ$ 大,因此水平过载略有增加。

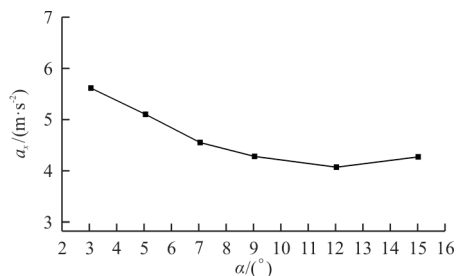


图 8 水平过载峰值统计

Fig. 8 Statistics of horizontal overload peaks

机体断阶结构使得机体着水位置和运动姿态随俯仰角变化而不同,改变了机体运动过程,相同着水速度下,水平过载峰值随俯仰角增加而减小。

一般地,楔形体着水垂向过载呈现先增加后减小趋势^[28]。双断阶着水工况下,机体姿态角变化较小,最早达到垂向过载峰值,由于机体分水体呈楔形构造,双断阶垂向过载曲线与楔形体趋势相同。一处断阶着水和二处断阶着水两类工况中,初始断阶间龙骨线与静水面夹角越大,转动时间增加导致垂向过载峰值时刻推后,如图9所示。

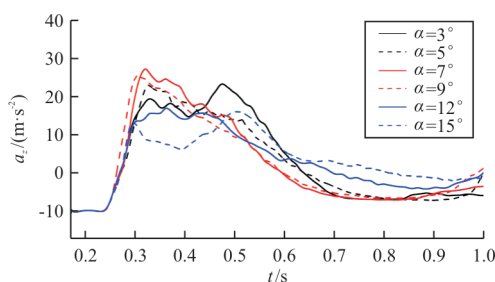
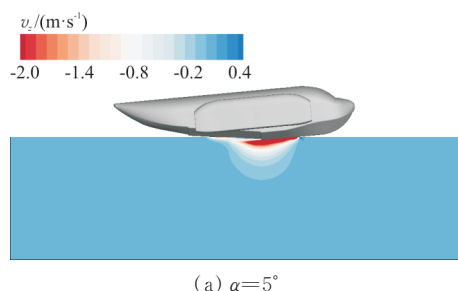


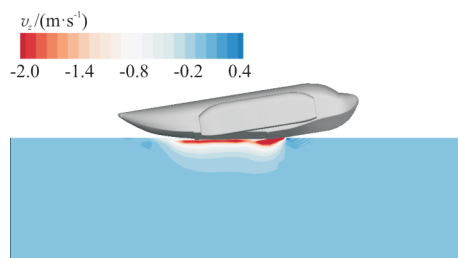
图9 不同俯仰角垂向过载时历曲线

Fig. 9 Comparison of vertical overload at different pitch angles

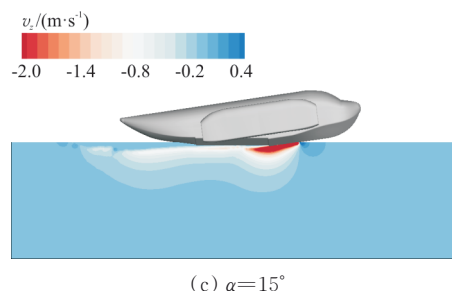
机体着水垂向运动中,机体先到达速度峰值,再向下减速运动到垂向过载峰值时刻,如图10所示,可以看出:各工况到达垂向过载峰值时刻两处断阶都浸入水中。二处断阶着水工况中,机体“低头”运动,一处断阶着水后到达垂向过载峰值,水面动压向前移动,该过程机体动能减小,受水阻力作用较小,因此二处断阶着水工况垂向过载峰值最小。



(a) $\alpha=5^\circ$



(b) $\alpha=9^\circ$



(c) $\alpha=15^\circ$

图10 垂向过载峰值时刻速度云图

Fig. 10 Velocity contour at the moment of the peak of vertical overload

垂向过载峰值统计如图11所示,三类工况中,双断阶着水工况垂向过载峰值最大,这是由于双断阶着水工况断阶间龙骨线与水面夹角较小(如图10(b)所示),过载峰值时刻浸水面积较大,受水阻力作用较强。随着俯仰角增加垂向过载峰值呈现先增大后减小趋势,其中俯仰角为 7° 时垂向过载峰值最大,是最低过载峰值(俯仰角为 15°)的1.4倍。

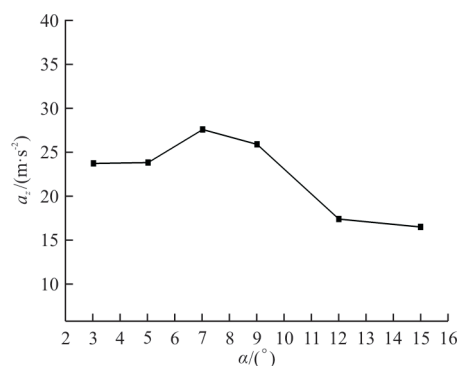


图11 垂向过载峰值统计

Fig. 11 Statistics of the vertical overload peak

分水体表面的局部压力峰值是水上飞机着水研究关注的重点^[29],初始俯仰角导致地效飞行器着水位置发生变化,造成水体动压分布不同,压力峰值位置也有所变化。监测点压力峰值如图12所示,可以看出:双断阶着水工况两处断阶压力都很大,压力峰值出现在第一断阶,一处断阶着水工况压力峰值位于第一断阶处,二处断阶着水工况压力峰值位于第二断阶处。因此为防止地效飞行器断阶着水过程结构局部受损,应对地效飞行器断阶处结构进行加强。

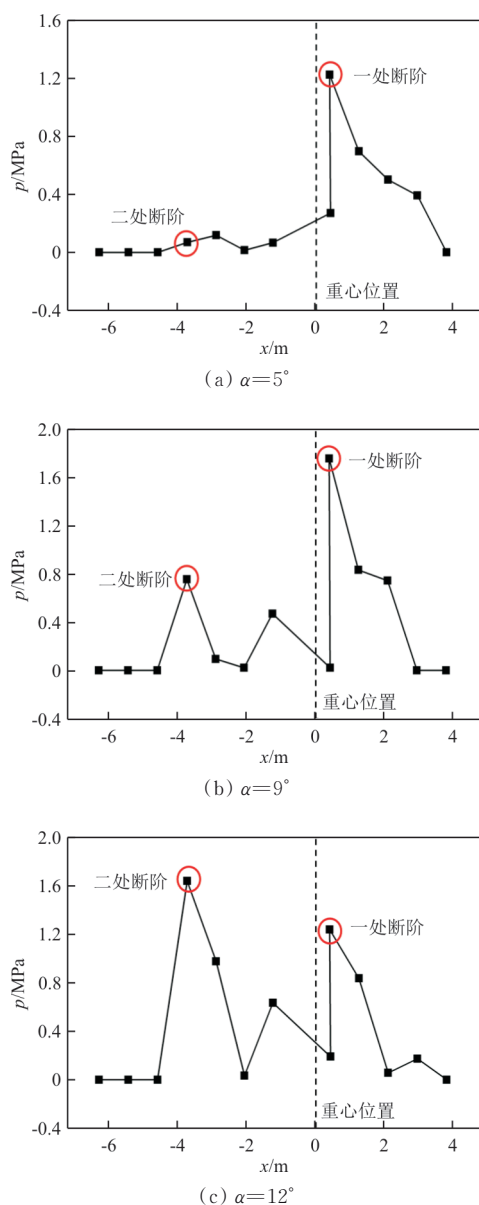


图 12 监测点压力峰值示意图

Fig. 12 Diagram of the pressure peak of the monitoring points

3.2 前飞速度对着水过程的影响

参考某型地效飞行器起飞和降落速度^[8],取前飞速度分别为 20.0、24.0、30.0 m/s,初始俯仰角为 5°,垂向速度为 3.4 m/s。不同前飞速度运动时历曲线如图 13 所示。

从图 13(a)可以看出:垂向运动相同的情况下,前飞速度越大,到达水平方向过载峰值时间提前,水平过载分别在 0.51、0.49、0.47 s 到达过载峰值,分别为 0.43g、0.52g、0.58g;水平速度越大,与水体接触相互作用后水体获得动能越大,水体反

作用力越大,因此水平方向过载峰值越大。

从图 13(b)可以看出:在到达过载峰值时刻之后,前飞速度越大,垂向过载变化越剧烈。但由于垂向速度相同,不同水平速度工况下垂向过载峰值基本保持在 2.5g,三个工况计算结果相差不超过 2%,因此在研究工况条件下,前飞速度对机体垂向过载峰值的影响不大。

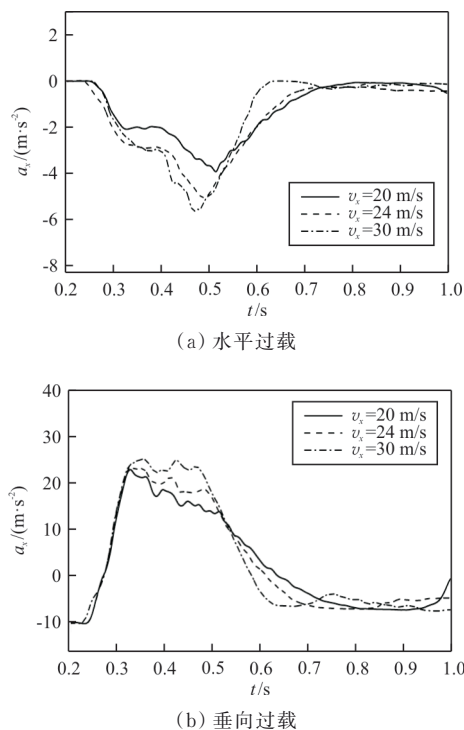
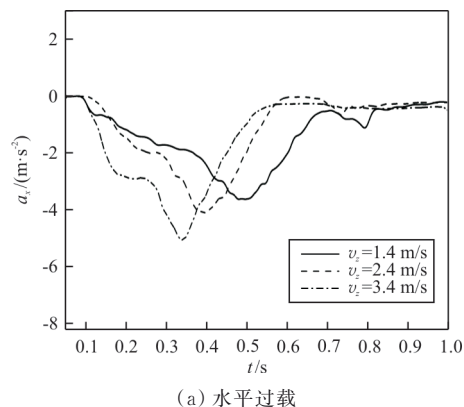


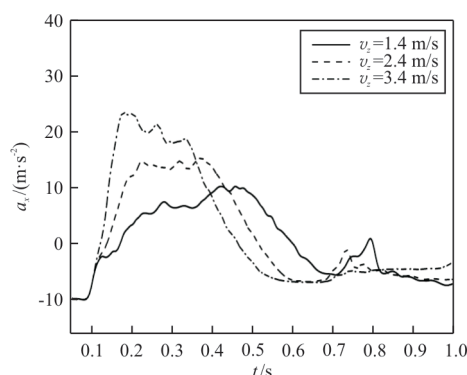
图 13 不同前飞速度运动时历曲线

Fig. 13 The time variation of computed acceleration in different horizontal flight velocities

3.3 下沉速度对着水过程的影响

前飞速度为 24.0 m/s,俯仰角为 5°,不同下沉速度(1.4、2.4、3.4 m/s)地效飞行器运动时历曲线如图 14 所示。





(b) 垂向过载

图14 不同下沉速度运动时历曲线

Fig. 14 The time variation of computed acceleration in different falling velocities

从图14可以看出:前飞速度相同的工况下,水平和垂向运动变化趋势整体相同,垂向速度越大,入水深度增加,到达速度峰值和加速度峰值时间均提前,水平和垂向的冲击过载均越大。

随着垂向速度增加,着水时间缩短,较大的浸水深度使浸水面积增加,如图15所示,到达垂向过载峰值时刻机体传递给水体的动能增加,水阻力增加,碰撞过程挤压机体的作用力增加,过载峰值增加。下沉速度为1.4、2.4、3.4 m/s时,地效飞行器垂向过载峰值分别为1.05g、1.57g、2.41g。

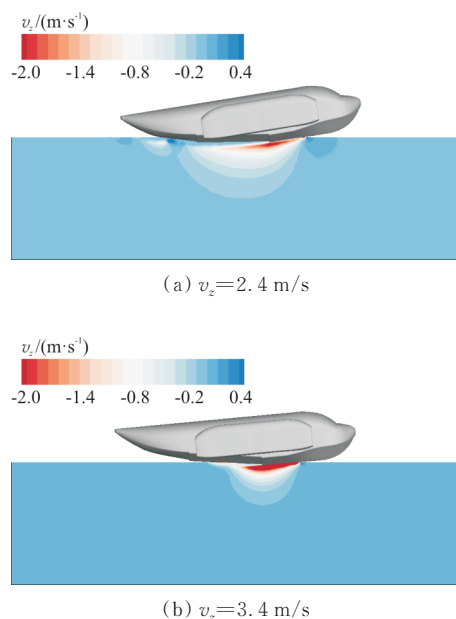


图15 垂向过载峰值时刻垂向速度云图

Fig. 15 Vertical velocity contour at the moment of the peak of vertical overload

就总体变化趋势而言,3个工况无显著差异,仅着水加速度峰值不同。对于给定的楔形体垂直入水问题,垂向力峰值随垂向速度的平方和楔形体质量的平方根增加而增大^[30]。根据相关试验结果^[31],飞机着水速度通常低于20 m/s,本文地效飞行器构造为船型机身,由于机体着水问题速度通常较小,在地效飞行器着水问题涉及速度范围内,垂向加速度峰值与下沉速度的平方近似线性关系,如图16所示。

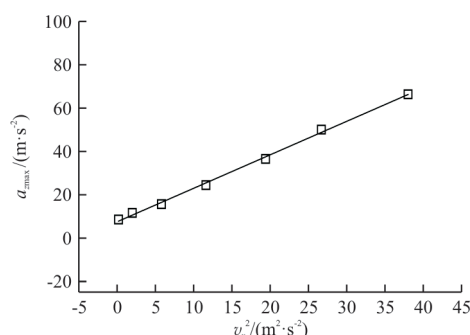


图16 加速度峰值与下沉速度平方关系

Fig. 16 The relationship between peak acceleration and the square of falling velocities

4 结 论

(1) 本文将具有双断阶构型的地效飞行器断阶着水工况分为三类:一处断阶着水,双断阶着水和二处断阶着水工况。机体断阶结构使得机体着水位置和运动姿态随俯仰角变化而不同,改变了机体运动过程。相同着水速度下,水平过载峰值随俯仰角增加而减小。二处断阶着水工况垂向过载峰值最小,双断阶着水工况垂向过载峰值最大,这是由于入水时机体断阶间龙骨线区域挤压越严重,过载越大。

(2) 双断阶着水工况两处断阶压力峰值都较大,峰值位于第一断阶,一处断阶着水压力峰值位于第一断阶处,二处断阶着水压力峰值位于第二断阶处。着水过程中为了避免结构体局部损坏,应对双断阶地效飞行器两断阶处结构进行加强。

(3) 在研究工况条件下,前飞速度越大机体水平过载越大,但对于垂向过载峰值无明显影响。垂向速度越大,垂向和水平砰击过载越大。在着水问题涉及速度范围内,本文具有前飞速度的船型机身地效飞行器的垂向过载峰值与垂向速度平方近似呈线性关系。

参考文献

- [1] 刘浩, 孙建红, 孙智, 等. 波浪条件下地效翼型气动力的环量控制研究[J]. 上海交通大学学报, 2021, 56(1): 83-92.
LIU Hao, SUN Jianhong, SUN Zhi, et al. Research on circulation control of airfoil aerodynamic force under ground effect of wavy wall[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 56(1): 83-92. (in Chinese)
- [2] VON K T. The impact on seaplane floats during landing [J]. National Advisory Committee for Aeronautics, 1929, 321: 1-11.
- [3] WAGNER H. Phenomena associated with impacts and sliding on liquid surfaces [J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1932, 12(4): 193-215.
- [4] BENSON J M, HAVENS R F, WOODWARD D R. Landing characteristics in waves of three dynamic models of flying boats[R]. Washington: Technical Report Archive & Image Library, 1952.
- [5] HUGLI W C, AXT W C. Hydrodynamic investigation of a series of hull models suitable for small flying boats and amphibians[R]. Washington: Technical Report Archive & Image Library, 1951.
- [6] 马增辉. 水陆两栖飞机波浪水面上降落动力特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
MA Zenghui. Investigation on the dynamic characteristics of amphibious aircraft landing on waves[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [7] 王明振, 吴彬, 李新颖, 等. 水陆两栖飞机平静水面着水冲击载荷影响因素分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(12): 5-11.
WANG Mingzhen, WU Bin, LI Xinying, et al. An experimental study about impact load of the amphibious aircraft landing on the calm water[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(12): 5-11. (in Chinese)
- [8] 孙丰, 魏飞, 吴彬, 等. 大型水陆两栖飞机舱段入水冲击实验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(12): 39-43, 52.
SUN Feng, WEI Fei, WU Bin, et al. An experimental study on water impact of large amphibious aircrafts[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(12): 39-43, 52. (in Chinese)
- [9] CHENG H, CHAO F, CHENG J. Simulation of fluid-solid interaction on water ditching of an airplane by ALE method [J]. Journal of Hydrodynamics, 2011, 23(5): 637-642.
- [10] 许震宇, 李沙, 崔萌, 等. 地效飞行器对称断阶着水过载的数值计算[J]. 力学季刊, 2011, 32(3): 392-396.
XU Zhenyu, LI Sha, CUI Meng, et al. Numerical analysis of water overload on wing-in-ground effect craft during symmetrical body step landing[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2011, 32(3): 392-396. (in Chinese)
- [11] 侯斌, 孙建红, 苏炳君, 等. 直升机—浮囊组合体静水着水冲击过程分析[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(2): 207-212.
HOU Bin, SUN Jianhong, SU Bingjun, et al. Analysis of calm water impacts of helicopter-float combination[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(2): 207-212. (in Chinese)
- [12] 赵芸可, 屈秋林, 刘沛清. 水上飞机水面降落全过程力学特性数值研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(4): 830-838.
ZHAO Yunke, QU Qiulin, LIU Peiqing. Numerical study on mechanical properties of seaplane in whole water surface landing process[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(4): 830-838. (in Chinese)
- [13] 王峥华, 段旭鹏, 程志航, 等. 船身式水陆两栖飞机起降飞行仿真研究[J]. 航空工程进展, 2021, 12(1): 115-123.
WANG Zhenghua, DUAN Xupeng, CHENG Zhihang, et al. Take-off and landing flight simulation of amphibious aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(1): 115-123. (in Chinese)
- [14] 陈枫. 两栖飞机船体机身水气动设计及着水载荷减缓技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
CHEN Feng. Hydro-aerodynamic design and water landing load reduction for an amphibious aircraft fuselage[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautic Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [15] 褚林塘. 水上飞机水动力设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014.
CHU Lintang. Hydrodynamic design of waterplane [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [16] 孙华伟. 滑行面形状对滑行艇阻力与航态影响数值分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
SUN Huawei. Numerical analysis of planing-hull surface shape on resistance and sailing attitude[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)
- [17] GARLAND W R, MAKI K J. A numerical study of a two-dimensional stepped planing surface[J]. Journal of Ship Production and Design, 2012, 28(2): 60-72.
- [18] DASHTIMANESH A, ESFANDIARI A, MANCINI S. Performance prediction of two-stepped planing hulls using morphing mesh approach[J]. Journal of Ship Production and Design, 2018, 34(3): 236-248.
- [19] 赵连恩, 韩端锋. 高性能船舶水动力原理与设计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007.
ZHAO Lianen, HAN Ruifeng. Hydrodynamic principle and design of high performance ship [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2007. (in Chinese)
- [20] BILANDI R N, TAVAKOLI S, DASHTIMANESH A. Seakeeping of double-stepped planing hulls[J]. Ocean Engineering, 2021, 236: 109475.
- [21] 吴臣. 不同海况下直升机应急漂浮系统入水冲击过载分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
WU Chen. Analysis and simulation of overload of water en-

- try impact for helicopter emergency floating system under different sea conditions [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020. (in Chinese)
- [22] 王文全, 张立翔. 计算流固耦合动力学及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- WANG Wenquan, ZHANG Lixiang. Computational fluid-structure interaction dynamics and applications[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2015. (in Chinese)
- [23] 刘静. 地效飞机着水载荷数值分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- LIU Jing. Numerical analysis about high-speed entry water of wing-in-ground-effect-plane[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2010. (in Chinese)
- [24] 吴行, 成婷婷. 水上飞机着水性能分析[J]. 科技与创新, 2020(4): 3-9.
- WU Xing, CHENG Tingting. Analysis of water landing performance of waterplanes[J]. Science and Technology & Innovation, 2020(4): 3-9. (in Chinese)
- [25] 孙振云. 楔形体入水砰击过程数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- SUN Zhenyun. Numerical simulation research on water entry problem of wedge[D]. Harbin: Harbin Institute University, 2016. (in Chinese)
- [26] CHAUDHRY A Z, SHI Y, PAN G. Recent developments on the water entry impact of wedges and projectiles [J]. Ships and Offshore Structures, 2020, 103: 1-20.
- [27] SAJEDI S M, GHADIMI P, GHADIMI A, et al. Experimental appraisal of hydrodynamic performance and motion of a single-stepped high-speed vessel in calm water and regular waves [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2021, 235(17): 3223-3235.
- [28] FAIRLIE-CLARKE A C, TVEITNES T. Momentum and gravity effects during the constant velocity water entry of wedge-shaped sections [J]. Ocean Engineering, 2008, 35(7): 706-716.
- [29] 孙丰, 吴彬, 廉滋鼎, 等. 着水姿态对大型水陆两栖飞机着水性能的影响[J]. 船舶力学, 2019, 23(4): 397-404.
- SUN Feng, WU Bin, LIAN Ziding, et al. Influence of pitch angle on water-entry performance of large-scale amphibian aircraft hull[J]. Journal of Ship Mechanics, 2019, 23(4): 397-404. (in Chinese)
- [30] PANCIROLI R, ABRATE S, MINAK G. Dynamic response of flexible wedges entering the water[J]. Composite Structures, 2013, 99: 163-171.
- [31] MCBRIDE E E, FISHER L J. Experimental investigation of the effect of rear-fuselage shape on ditching behavior[R]. Washington: Langley Aeronautical Laboratory, 1953.

作者简介:

陈思宇(1996—),女,硕士研究生。主要研究方向:飞行器救生技术,计算流体力学与流固耦合。

孙建红(1968—),男,博士,教授。主要研究方向:飞行器设计,人机与环境工程,适航技术与管理。

孙智(1987—),男,博士,助教。主要研究方向:直升机救生技术,飞机管理与热防护,飞机故障诊断与健康管理。

侯斌(1989—),男,博士研究生。主要研究方向:空气动力学,计算流体力学。

刘浩(1995—),男,博士研究生。主要研究方向:地效飞行器,流动控制。

(编辑:马文静)