

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.02.005

舟船空投入水姿态与过载特征分析

李正达, 郭海军, 陈勇, 洪淼

(航空工业航空救生装备有限公司航空防护救生技术航空科技重点实验室, 襄阳 441003)

摘要: 舟船空投入水时将承受较大的垂直和侧向过载, 将对舟船的结构强度、稳定性产生不利影响, 通过控制船体入水俯仰角可减小此过载。为研究船体入水角度对减载的影响规律, 利用 LS-DYNA 对不同角度下船体着水过程进行了仿真, 得到不同工况下着水过程加速度变化曲线, 并通过水上跌落试验对仿真计算结果进行了验证, 结果表明通过采取合理的入水角度, 可有效降低船体入水过载。本文所做工作可为舟船空投系统着水减载提供依据。

关键词: 流体力学; 海上空投; 入水减载; 空投系统; 跌落试验

中图分类号: V24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2021)02-0194-08

Analysis of Entry Attitude and Overload Characteristics of Ships in Water

LI Zhengda, GUO Haijun, CHEN Yong, HONG Miao

(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Life-Support Technology,
AVIC Aerospace-Life-Support Industries Ltd., Xiangyang 441003, China)

Abstract: A ship will bear large vertical and lateral overloads when dropped into water, which imposes adverse effects on the structural strength and stability of the ship. The overloads can be reduced by controlling the pitching angle of the ship. In order to study the influence of the pitching angle on overload reducing, LS-DYNA is used to simulate the landing process at different angles. The acceleration curves of landing process under different working conditions are obtained, and the simulation results are verified by the fall-down test. The results show that the reasonable entry angle can effectively reduce the ship's water overloads. The work in this paper can provide the basis for the landing load reduction of the sea airdrop system.

Key words: hydromechanics; airdrop on the sea; load reduction; airdrop system; fall-down test

当前各国的水面力量除了各类大中型战舰, 还有一批不起眼但很重要, 也颇具技术含量的小船, 即各类战斗快艇, 用于执行巡逻、封锁、警戒护卫、搜索救援以及水上特种作战等任务。这类战斗快艇以体积小、吃水浅、机动灵活的特点, 广泛活动于全球各地的江河内水和沿海港口。与运输机相结合, 采用专用的舟船空投系统, 以空投进行远距离、快速投送是其重要的使用方式, 是应付远洋地区突发事件, 执行远洋搜索救援行动的重要手段。

舟船空投系统与传统陆上空投系统最大差异

体现在使用环境上, 常规空投系统主要针对陆地着陆场设计, 为保证装备和物资器材的空投安全, 一般采用气囊、纸蜂窝等方式进行缓冲^[1]; 水上空投时, 舟船经主伞减速稳降后直接着水, 主伞脱离后即可进入工作状态。该方式在提升任务效率的同时对着水过载控制也提出了更高的要求。

目前国内外学者对陆上空投系统着陆过程, 尤其是气囊缓冲着陆过程研究较多, 如 Cole 等^[2]建立了“火星探路者”气囊缓冲系统的解析模型, 研究了气囊着陆反弹的动态响应问题。Esgar 等^[3]在不考

收稿日期: 2021-01-20; **修订日期:** 2021-03-28

通信作者: 李正达, 男, 工程师, E-mail: 15872203907@163.com。

引用格式: 李正达, 郭海军, 陈勇, 等. 舟船空投入水姿态与过载特征分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(2): 194-201. LI Zhengda, GUO Haijun, CHEN Yong, et al. Analysis of entry attitude and overload characteristics of ships in water [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(2): 194-201.

虑气囊织物材料的弹性及囊内气体质量的前提下,建立了缓冲气囊的解析模型。戈嗣诚和施允涛^[4]开展了固定排气孔缓冲气囊应用于无人机回收过程的可行性研究,并且探讨了不同气囊参数对缓冲性能的影响。温金鹏等^[5-6]在考虑气囊织物材料发生弹性变形的情况下,对固定排气孔面积的气囊缓冲特点进行了探讨。徐保成等^[7]建立了土壤双线性弹塑性材料模型并利用LS-DYNA对火炮空投非线性着陆过程进行了仿真分析。洪煌杰等^[8]对空降车-气囊系统着地缓冲过程进行了仿真分析。李建阳等^[9]对空降车着陆缓冲过程车体动态应力进行了仿真研究。唐晓慧^[10]研究了车载武器系统空投着陆缓冲特性。

气囊数值模拟方法方面,目前常用的耦合计算方法主要有3种:(1)控制体积法;(2)任意拉格朗日欧拉法;(3)粒子法。Welch^[11]采用控制体积法对乘员探测飞行器(CEV)的着陆缓冲过程进行了模拟分析。Dmitri和Nitin^[12]分别利用任意拉格朗日法和控制体积法对物体碰撞试验过程进行了模拟计算,对两种算法的计算结果进行了对比分析,发现任意拉格朗日法与试验数据更加吻合。代小芳等^[13]利用有限体积法和任意拉格朗日法对折叠气囊折叠气囊展开过程进行了对比研究。

水上空投领域目前国内外研究相对较少,前苏联在其舟船空投系统中曾采用入水姿态控制技术,通过调整舟艇入水角度减少船体入水过载,保障船体着水安全。国内目前尚无成熟的舟船空投系统,但在水上应急救援方面做了一些工作。李名琦^[14]建立了应急气囊的有限元模型,对应急气囊着水冲击过程进行了数值计算,并通过缩比模型试验和数值仿真数据进行了对比分析。

目前国内在陆地着陆缓冲和稳定技术已相当成熟,基本可保证空投着陆安全^[15],但水上空投着水减载和稳定技术尚不具备,为有效指导舟船空投系统着水减载设计,有必要对舟船空投入水过程进行仿真分析,研究入水角度对舟船着水过载的影响规律,为水上空投减载研究提供帮助。

$$L_{bg} = \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\psi & \cos\theta \sin\psi & -\sin\theta \\ \sin\theta \sin\phi \cos\psi - \cos\phi \sin\psi & \sin\theta \sin\phi \sin\psi + \cos\phi \cos\psi & \sin\phi \cos\theta \\ \sin\theta \cos\phi \cos\psi + \sin\phi \sin\psi - \sin\phi \cos\psi & \sin\theta \cos\phi \sin\psi & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.1.3 动力学方程

(1) 舟船质心动力学方程

在机体坐标系 $Ox_b y_b z_b$ 下,根据牛顿第二定律有

1 舟船入水过程仿真

1.1 舟船着水动力学方程介绍

1.1.1 基本假设

为了简化舟船运动方程的推导,作如下基本假设:

- (1) 舟船为刚体,不考虑船体弹性变形和旋转部件的影响;
- (2) 大气条件为国际标准大气;
- (3) 地球为平面大地,忽略曲率和旋转。

1.1.2 坐标系及转换矩阵

为了建立舟船运动方程,引入以下几种常用坐标系。各坐标系均为右手直角坐标系。

(1) 地面坐标系 $Ox_g y_g z_g$

定义:固定于地球表面,原点 O 位于回收初始时刻舟船质心在水面上的投影点; Ox_g 轴指向舟船初始运动方向; Oy_g 轴铅垂向下; Oz_g 轴垂直于 $Ox_g y_g$ 平面,按右手定则确定。

(2) 机体坐标系 $Ox_b y_b z_b$

定义:原点 O 固联于舟船质心, Ox_b 轴在舟船对称平面内,平行于船体轴线,指向前; Oz_b 在对称平面内,垂直于 Ox_b 轴,指向下; Oy_b 轴垂直于对称平面指向右。

(3) 气流坐标系 $Ox_a y_a z_a$

定义:原点 O 位于舟船质心, Ox_a 始终指向舟船空速方向; Oz_a 轴位于对称平面内,垂直于 Ox_a 轴,指向下; Oy_a 轴垂直于 $Ox_a z_a$ 指向右。

坐标系 $Ox_a y_a z_a$ 通过按一定的顺序先绕 y_b 轴转过角 $-\alpha$,再绕当时的 z 轴转过角 β ,就可以与重合。相应的转换矩阵为

$$L_{ab} = \begin{bmatrix} \cos\alpha \cos\beta & \sin\beta & \sin\alpha \cos\beta \\ -\cos\alpha \sin\beta & \cos\beta & -\sin\alpha \sin\beta \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (1)$$

机体坐标系 $Ox_b y_b z_b$ 相对于地面坐标系 $Ox_g y_g z_g$ 的方位常用3个欧拉角表示,即:偏航角 ψ ,俯仰角 θ ,滚转角 ϕ 。

相应的 $Ox_b y_b z_b$ 到 $Ox_g y_g z_g$ 的转换矩阵为

$$\begin{bmatrix} \cos\theta \cos\psi & \cos\theta \sin\psi & -\sin\theta \\ \sin\theta \sin\phi \cos\psi - \cos\phi \sin\psi & \sin\theta \sin\phi \sin\psi + \cos\phi \cos\psi & \sin\phi \cos\theta \\ \sin\theta \cos\phi \cos\psi + \sin\phi \sin\psi - \sin\phi \cos\psi & \sin\theta \cos\phi \sin\psi & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$F_b = m \frac{dV_b}{dt} \quad (3)$$

式中: F_b 为船体所受合外力矢量

$$F_b = G_b + A_b + T_b \quad (4)$$

式中： G_b, A_b, T_b 分别为重力、气动力、连接绳拉力矢量。由于重力、气动力分别定义在地面坐标系和气流坐标系下，所以其坐标转换关系如下

$$G_b = L_{bg} G_g = L_{bg} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$A_b = L_{ba} A_a = L_{ab}^T \begin{bmatrix} -D \\ C \\ -L \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中： D, C, L 分别为舟船所受的阻力、侧力和升力。

质心的绝对加速度可表示为

$$\frac{dV_b}{dt} = \frac{\delta V_b}{\delta t} + \omega_b \times V_b \quad (7)$$

联立即可得到机体坐标系下质心动力学方程为

$$L_{bg} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} + L_{ab}^T \begin{bmatrix} -D \\ C \\ -L \end{bmatrix} + T_b = m \left(\frac{\delta V_b}{\delta t} + \omega_b \times V_b \right) \quad (8)$$

(2)舟船绕质心转动动力学方程

在机体坐标系 $Ox_b y_b z_b$ 下，根据动量矩定理

$$M_b = \frac{\delta h_b}{\delta t} + \omega_b \times h_b \quad (9)$$

式中： M_b 为作用于船体质心的合外力矩， ω_b 为绕质心的角速度矢量。机体坐标系下有

$$M_b = \begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} = M_A + M_T \quad (10)$$

式中： M_A, M_T 分别为作用于船体的气动力矩和连接绳拉力产生的力矩。

连接绳拉力对质心产生力矩为

$$M_T = r_p \times T_b \quad (11)$$

式中： r_p 为舟船质心到连接绳拉力作用点的的矢径， T_b 为连接绳拉力。

由于 $\omega_b = [p \ q \ r]^T$ (其中 p, q, r 分别表示 3 个方向上的角速度分量)，故动量矩 h_b 可表示为

$$h_b = \begin{bmatrix} pI_x - qI_{xy} - rI_{zx} \\ qI_y - pI_{xy} - rI_{yz} \\ rI_z - pI_{zx} - qI_{yz} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中 I_x, I_y, I_z 为分别舟船对 x, y, z 轴的惯性矩， I_{xy}, I_{yz}, I_{zx} 为惯性积。对于一般舟船， $Ox_b y_b$ 平面通常为对称面，此时 $I_{xy} = I_{yz} = 0$ 。

联立即可得船体绕质心转动的动力学方程如下

$$\begin{cases} I_x \frac{dp}{dt} + (I_z - I_y)qr - I_{zx}(pq + \frac{dr}{dt}) = L \\ I_y \frac{dq}{dt} + (I_x - I_z)rp + I_{zx}(p^2 - r^2) = M \\ I_z \frac{dr}{dt} + (I_y - I_x)pq + I_{zx}(qr - \frac{dp}{dt}) = N \end{cases} \quad (13)$$

(3)舟船质心运动学方程

在地面坐标系下，舟船速度矢量即为空间坐标的微分，即

$$V_g = \left[\frac{dx_g}{dt} \quad \frac{dy_g}{dt} \quad \frac{dz_g}{dt} \right]^T \quad (14)$$

对 V_g 进行坐标变换可得

$$L_{bg} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \left[\frac{dx_g}{dt} \quad \frac{dy_g}{dt} \quad \frac{dz_g}{dt} \right]^T \quad (15)$$

(4)舟船绕质心转动运动学方程

根据机轴系形成过程可以写出旋转角速度在机体轴系上的投影为

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \cos \phi \\ -\dot{\theta} \sin \phi \end{bmatrix} + L_{bg} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (16)$$

解得

$$\begin{cases} \frac{d\phi}{dt} = p + \tan \theta (q \sin \phi + r \cos \phi) \\ \frac{d\theta}{dt} = q \cos \phi - r \sin \phi \\ \frac{d\psi}{dt} = \frac{1}{\cos \theta} (q \sin \phi + r \cos \phi) \end{cases} \quad (17)$$

1.2 舟船入水过程建模

选取蜘蛛船作为研究对象，采用三维造型软件对蜘蛛船模型进行处理，保留部件整体外形及尺寸，去除较小的倒角、孔缝等特征，将几何模型导入 Hypermesh 软件中进行网格划分，网格数量 366 万个。蜘蛛船网格模型如图 1 所示。

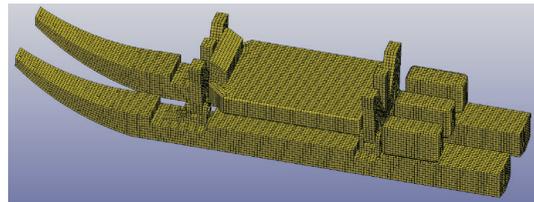


图1 蜘蛛船网格模型

Fig.1 Spider boat grid model

流场域的大小直接决定了网格的数量，过大的流场域会导致计算资源的浪费，造成计算时间过长或求解器无法承受的大容量计算等问题^[16]；过小的水域会导致计算结果受到边界的反射波的影响，因此流场域在与蜘蛛船耦合的区域采用与船相似的

网格尺寸,超出耦合区域的流场网格采用渐疏网格的方式处理,如图 2 所示。流场域尺寸 27 m×13 m×8 m,建立的空气域和水域如图 3 所示。

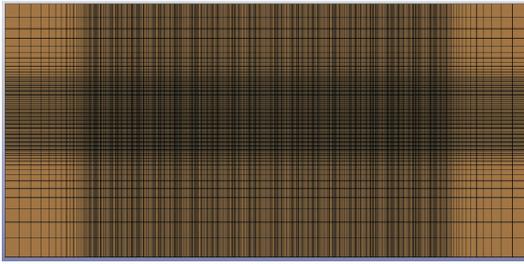


图 2 流场域网格图
Fig.2 Field grid

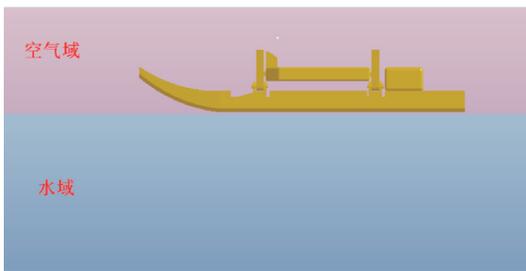


图 3 空气域和水域图
Fig.3 Air and water areas

水域周围,右侧采用全约束约束条件,底侧采取竖直方向位移约束条件,左侧采取无反射边界条件,前后两侧采取垂向位移约束条件,从而保证水域边界计算以及波浪稳定产生。

1.3 求解参数设置

LS-DYNA 通过设置关键字进行求解参数设置^[17],其中主要涉及的关键字类型如下:

1	LCIDD	SF	LCIDDR	XC	YC	ZC	CID
	1	9.8066502	0	0.0	0.0	0.0	0

图 5 重力加速度设置图

Fig.5 Gravity acceleration settings

1.3.3 耦合控制关键字设置

蜘蛛船与水之间通过罚函数法进行耦合,相关参数如图 6 所示。

*CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID (1)									
1	COUPLD	TITLE							
2	SLAVE	MASTER	SSTYP	MSTYP	NOUND	CTYPE	CBEC	MCOLB	
3	STARTI	ENDI	FEAC	ESIC	ESICEN	NOEM	NORMTYP	DAMP	
4	CO	HSHN	HMAX	LEAK	PLEAK	LCIDPOR	NVENT	BLOCKAGE	
5	BOUO	ESNCK	INTEROC	JAESOF	LASALL	PEACUM	THIF		

图 6 耦合控制关键字设置

Fig.6 Coupling control key set

1.3.4 输出控制关键字设置

为了在计算结果中提取蜘蛛船的加速度结果

(1) 部件参数设置。包括每个部件所用的材料、算法等参数。

(2) 重力加速度设置。设置受到重力影响的物体。

(3) 耦合控制关键字。本次计算主要考虑蜘蛛船与水之间的耦合作用。

(4) 输出控制关键字。设置需要输出的主要参数。

1.3.1 部件参数设置

部件主要包括蜘蛛船、空气域和水域,以蜘蛛船为例,主要参数设置如图 4 所示。

*SECTION_SHELL_(TITLE)									
TITLE									
ZCC									
1	SECTID	ELEFORM	SHPE	NIP	PROPT	CE/RSH			
4	2	1	2	1	1	0			
2	T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA			
1	0.0010000	0.0010000	0.0010000	0.0010000	0.0	0.0			
2	BID	MID	EOSID	HCID	GRAV	ADPOPT	TMID		
4	4	4	0	0	0	0	0		
3	XC	YC	ZC	IM	BCS	NOCEDID			
	-5.961e+06	0.0	0.0	5050	质量	1	10	重心	
4	DX	DY	DZ	DX	DY	DZ			
	2.000e+04	0.0	0.0	2.000e+04	0.0	0.0	惯性		
5	VTX	VTY	VTZ	VFX	VFY	VFZ			
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
6	XL	YL	ZL	XLP	YLP	ZLP			
TR:=Translational mass.									
*MAT_RIGID_(TITLE) (020) (2)									
TITLE									
ZCC									
1	MID	BD	E	ES	M	COUPLE	M	ALIAS	
4	4	4	4.201e+04	2.000e+11	0.3000000	0.0	0		

图 4 蜘蛛船部件参数设置图

Fig.4 Parameters of spider ship

1.3.2 重力加速度设置

本次计算中主要考虑蜘蛛船的重力作用,重力加速度设为参数设置如图 5 所示。

和耦合力的结果,设置 rbdout 和 dbfsi 关键字进行输出,如图 7 所示。

*DATABASE_OPTION									
[x] RBDOUT									
	DT	BINARY	LCLR	ICOPT					
	0.001	0	0	1					
*DATABASE_FSI (1)									
1 DT									
0.0010000									
Repeated Data by Button and List									
DBFSI ID	SID	STYPE	SWRD	CONNID	NOSETID	CID			
1	4	1	0	0	0	110			

图 7 输出控制关键字设置

Fig.7 Output control key set

1.4 仿真计算结果

定义船体与水平方向的夹角为 θ , 计算不同夹角情况下蜘蛛船着水过程中所受到的过载峰值, 计算工况见表 1, 计算结果见表 2。

表1 计算工况表

Table 1 Calculation conditions

计算工况	与水平方向的夹角 $\theta/(^\circ)$	着水垂直速度 $/(m\cdot s^{-1})$	着水水平速度 $/(m\cdot s^{-1})$
1	0	8	0
2	30	8	0
3	70	8	0

表2 计算结果

Table 2 Calculation results

计算工况	与水平方向的夹角 $\theta/(^\circ)$	最大着水过载/g
1	0	48
2	30	6.2
3	70	2.8

工况1蜘蛛船的加速度-时间曲线如图8所示, 过载峰值48g, 着水过程如图9所示。

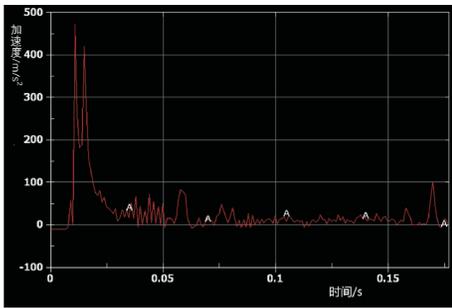


图8 工况1加速度-时间曲线图

Fig.8 Acceleration-time curve of condition 1

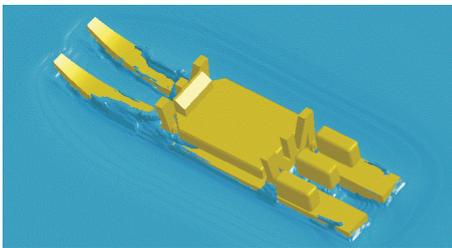


图9 工况1着水过程图

Fig.9 Entry process of condition 1

工况2蜘蛛船的加速度-时间曲线如图10所示, 过载峰值6.2g, 着水过程如图11所示。

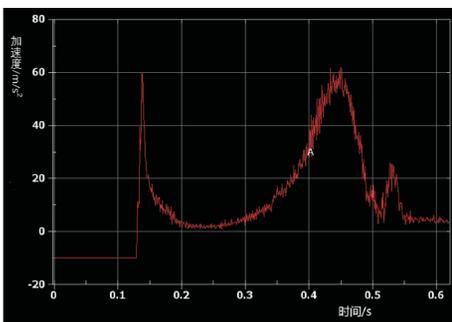


图10 工况2加速度-时间曲线图

Fig.10 Acceleration-time curve of condition 2

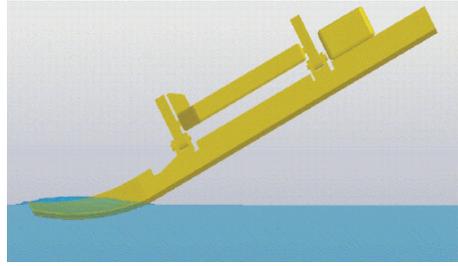


图11 工况2着水过程图

Fig.11 Entry process of condition 2

工况3蜘蛛船的加速度-时间曲线如图12所示, 过载峰值2.8g, 着水过程如图13所示。

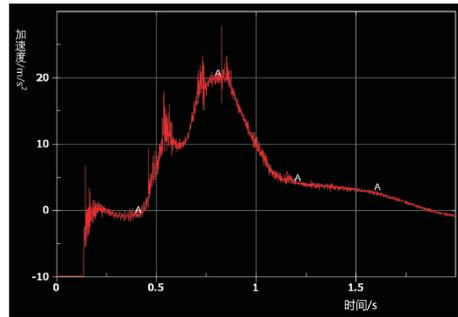


图12 工况3加速度-时间曲线图

Fig.12 Acceleration-time curve of condition 3

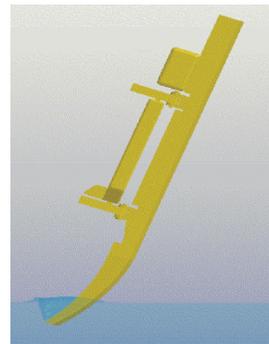


图13 工况3着水过程图

Fig.13 Entry process of condition 3

1.5 仿真结果分析

从计算结果可以看出:

(1)水平着水过程历时约20ms,远小于正常着陆缓冲过程(约200ms)。其着水过载很大,可达到48g(着陆过载一般不大于20g),因此必须考虑舟船入水减载问题。

(2)随着船体与水平面夹角增大,其着水过程历时有大幅增加(30°时已达到400ms以上),最大着水过载则相应减小。由此可见,通过调整舟船入水角度,可将其缓冲持续时间延长,使其过载变化趋于平缓,从而起到降低着水冲击载荷的目的。从能量的角度来看,该措施使得能量经更长时间耗散,从而起到保护船体的作用。

(3)带角度入水时,且其加速度变化曲线呈现多个峰值,第 1 个峰值为船体刚入水时的峰值,第 2 个峰值为船体转为水平时与水面接触产生的峰值。入水角度为 30° 时,两个峰值大小相当;角度增加到 70° 时,由于刚入水船体与水面接触面积大幅减少,其入水峰值(0.8g)小于船体转为水平时的峰值(2.8g)。因此在考虑着水过载时不应单独关注其最大过载的大小,也应关注过载出现的时刻以及船体所处的阶段。

(4)通过调整船体入水角度可有效减小最大过载,避免着水时冲击过大对船体造成损伤。

(5)从流场情况来看,入水角度越小,流场变化越剧烈,这是由于角度越小,竖直方向上引起的水动量变化(质量更大)则更大,因而导致过载更大。

2 船体水上跌落试验

2.1 试验概况

采用模型船进行水上跌落试验,试验环境为静止水面,通过调整吊带长度控制船体入水角度,共完成 3 个人水角度 5 次试验,获得有效数据 5 组。

由于试验条件限制,入水角度实际试验值分别为 6°、18°及 36°。水上跌落试验按如下步骤进行:

- (1)安装模型船吊带;
- (2)使用吊车将模型船吊起离地约 1 m;
- (3)将光学倾斜仪放置在模型船甲板处,测量模型船俯仰角度;
- (4)吊车吊钩下降至模型船着陆;
- (5)如模型船俯仰角度为试验预定值,则转步骤(6),否则调整模型船吊带长度后转步骤(2);
- (6)将遥控脱离锁挂在吊车吊钩处,模型船起吊带通过可卸半圆扣连接并锁定在遥控脱离锁处;
- (7)吊车吊钩上升至模型船离地 1 m,吊钩转向至水面正上方(保证模型船分离后落入水面),吊钩继续上升至模型船地面距离水面 3.2 m(保证着水速度 8 m/s);
- (8)按下遥控脱离锁解锁按钮,脱离锁解锁,模型船自由降落至着水。

2.2 试验结果

试验结果数据详见表 3。

表 3 试验结果
Table 3 Test result

序号	试件名称	入水角度/ (°)	垂直着水速度/ (m·s ⁻¹)	着水过载峰值/g			
				船头部		船中部	
				40 Hz 滤波	80 Hz 滤波	40 Hz 滤波	80 Hz 滤波
1	模型船	6	8	19.26	22.27	23.99	28.83
2		18	8	13.17	14.82	10.95	17.41
3		36	8	9.76	10.74	9.54	15.07

典型过载曲线见图 14~19。

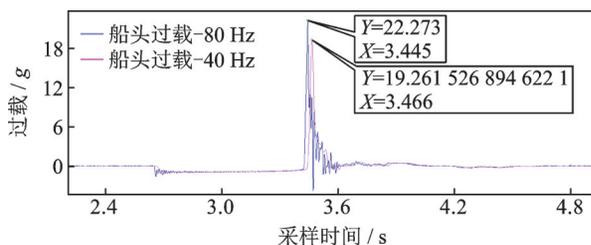


图 14 入水角度 6° 时船头部过载曲线
Fig.14 Overload curve in head of 6°

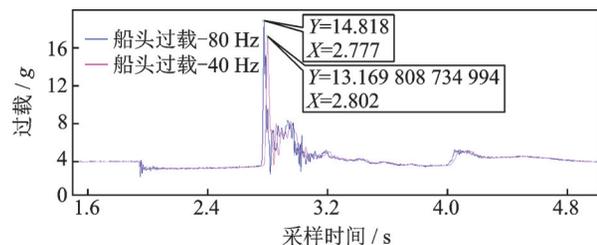


图 16 入水角度 18° 时船头部过载曲线
Fig.16 Overload curve in head of 18°

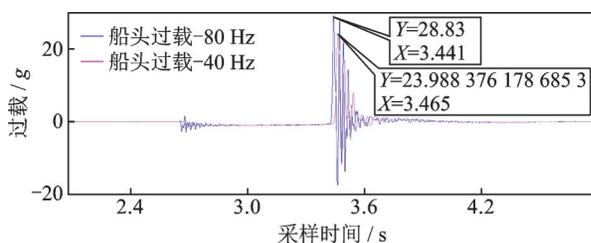


图 15 入水角度 6° 时船中部过载曲线
Fig.15 Overload curve in midship of 6°

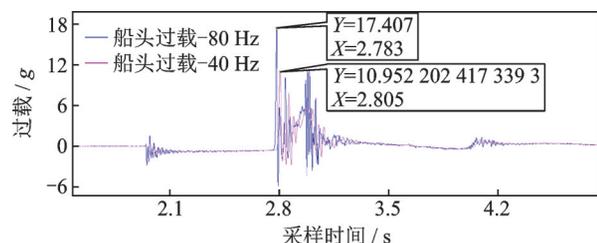


图 17 入水角度 18° 时船中部过载曲线
Fig.17 Overload curve in midship of 18°

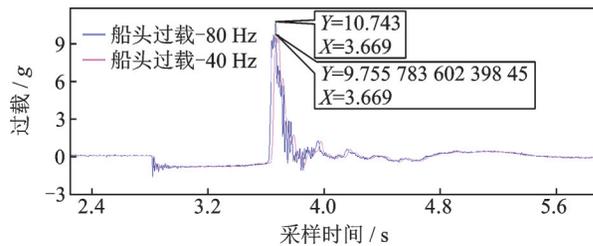


图18 入水角度36°时船头部过载曲线

Fig.18 Overload curve in head of 36°

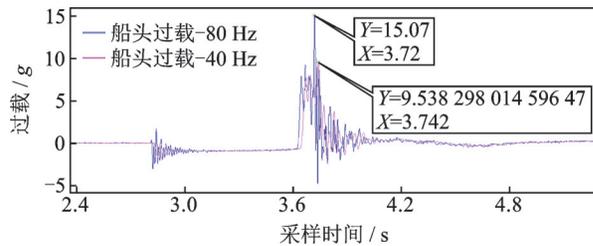


图19 入水角度36°时船中部过载曲线

Fig.19 Overload curve in midship of 36°

2.3 试验结果分析

从试验结果可以看出:

(1)随着船体入水角度增加,其过载值逐渐减小,其趋势与仿真结果吻合,验证了仿真计算结果分析的合理性。

(2)从船体载荷分布来看,船体头部过载与船体中部过载存在一定差异,表明船体入水过程仿真分析中不能完全将船体作为质点处理,应当考虑载荷分布情况。在设计过程中也应根据载荷分布情况在强度方面针对性进行设计,对重点部位进行加强。

(3)从过载数据上分析,头部过载相对较小,表明头部先接触水面产生的峰值过载相对较小,与仿真计算结果相吻合(尤其在入水角度较大时)。

(4)从过载曲线上分析,船体中部过载曲线有明显的“双峰”情况,与仿真计算结果相吻合。

3 结 论

本文主要研究船体入水角度对着水过载的影响规律,利用LS-DYNA对不同角度下船体着水过程进行了仿真,得到不同工况下着水过程加速度变化曲线,并通过水上跌落试验对仿真计算结果进行了验证。结果表明:

(1)水平着水过程历时约20 ms,远小于正常着陆缓冲过程(约200 ms)。其着水过载很大,若不加以控制有可能造成船体受损。

(2)随着船体与水平面夹角增大,其最大着水过载逐渐减小。通过调整船体入水角度可使其着水过载曲线趋于平缓,有效减小最大过载,避免着

水时冲击过大对船体造成损伤。

(3)带角度入水时,且其加速度变化曲线呈现多个峰值,第1个峰值为船体刚入水时的峰值,第2个峰值为船体转为水平时与水面接触产生的峰值。

由于试验条件限制,本文仅对0级海况情况下舟船着水过程进行了模拟及验证,后续待试验条件成熟可针对海浪作用下着水过程进行研究分析,进一步指导舟船着水减载设计。

本文所做工作可为舟船空投系统着水减载提供依据。

参考文献:

- [1] 王利荣. 降落伞理论与应用[M]. 北京: 宇航出版社, 1997.
- [2] COLE J K, WAYE D E. A code for predicting the performance of a gas bag impact attenuation system for the pathfinder lander: SAND93-2133[R]. Albuquerque, USA: [s.n.], 1993.
- [3] ESGAR J B, MORGAN W C. Analytical study of soft landing on gasfilled bags: NASA Technical Report R-75[R]. Cleveland, USA: NASA, 1960.
- [4] 戈嗣诚, 施允涛. 无人机回收气囊缓冲特性研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1993, 31(4): 458-463. GE Sicheng, SHI Yuntao. Study on buffer characteristics of airbag recovery in UAV[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1993, 31(4): 458-463.
- [5] 温金鹏, 李斌, 谭德伟. 考虑织布弹性的软着陆气囊缓冲特性研究[J]. 振动与冲击, 2010, 22(29): 79-83, 110. WEN Jimpeng, LI Bin, TAN Dewei. Study on buffer characteristics of soft landing airbag considering weaving elasticity [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 22(29): 79-83, 110.
- [6] WEN Jimpeng, LI Bin, YANG Zhichun. Study on cushioning characteristics of soft landing airbag with elastic fabric[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2010, 33(3/4): 1535-1545.
- [7] 徐保成, 崔青春, 曾志银, 等. 基于LS-DYNA的火炮空投着陆过程仿真[J]. 火炮发射与控制学报, 2011(2): 35-38. XU Baocheng, CUI Qingchun, ZENG Zhiyin, et al. Simulation of artillery airdrop landing process based on LS-DYNA [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2011(2): 35-38.
- [8] 洪煌杰, 王红岩, 郝贵祥. 空降车-气囊系统着地缓冲过程仿真分析[J]. 装甲兵工程学院学报, 2010, 24(4): 33-36. HONG Huangjie, WANG Hongyan, HAO Guixiang.

- Simulation analysis of ground buffer process in airborne vehicle-airbag system [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2010, 24(4):33-36.
- [9] 李建阳,王红岩,郝贵祥. 空降车着陆缓冲过程车体动态应力仿真研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2010, 24(3):25-28.
- LI Jianyang, WANG Hongyan, HAO Guixiang. Simulation study on dynamic stress of carbody during landing buffer of airborne vehicle [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2010, 24(3):25-28.
- [10] 唐晓慧. 车载武器系统重装空投着陆缓冲特性研究 [D]. 南京:南京理工大学, 2014.
- [11] WELCH J V. CEV airbag landing system modeling [C]// Proceedings of 19th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar. Williamsburg, USA: AIAA, 2007: 1-9.
- [12] DMITRI F, NITIN L. On airbag simulation in LS-DYNA with the use of the arbitrary Lagrangian-Eulerian method [C]// Proceedings of 4th European LS-DYNA Users Conference. ULM, Germany: [s. n.], 2003: 1-12.
- [13] 代小芳,宗智,王喜军,等. 折叠气囊展开过程 CV 和 ALE 数值模拟方法对比研究 [J]. 汽车工程, 2008 (8): 676-680.
- DAI Xiaofang, ZONG Zhi, WANG Xijun, et al. Comparative study on the CV and ALE numerical simulation of collapse airbag development process [J]. Automotive Innovation, 2008(8): 676-680.
- [14] 李名琦. 应急气囊着水冲击特性的试验研究与数值分析 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2008.
- LI Mingqi. Numerical analysis and experimental research on ditching characteristic of emergency floatation bags [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [15] 于成果,李良春. 空投安全着陆的实现途径 [J]. 包装工程, 2007(10):135-137.
- YU Chengguo, LI Liangchun. Airdrop safe landing [J]. Packaging Engineering, 2007(10):135-137.
- [16] 王勖成. 有限单元法 [M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
- [17] 白金泽. LS-DYNA 3D 理论基础与实例分析 [M]. 北京:科学出版 2005:30-35, 175-180.

(编辑:张蓓)