

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205177

大型水陆两栖飞机入水压力测试技术研究

李卢丹 蒋红娜 姜宏伟

(中国飞行试验研究院 西安 710089)

摘要:针对我国自主研制的大型水陆两栖飞机入水压力测试需求,首先分析了船底结构压力场及测试环境,通过 ALE 算法对船底压力进行数值仿真,得出船底入水时刻压力分布;并结合基于改进 Wanger 模型的理论计算,确定入水压力最优测点,设计基于非线性振动模型的信号传感方案;其次,分析机上改装实际工程难题,确定传感器改装工艺;最终通过飞行试验,验证了方案的可行性及仿真模型的可靠性,测试结果与仿真结果最大偏差为 3.4%,并为下一阶段测试方案的优化与完善提供依据。

关键词:入水压力;ALE 算法;Wanger 模型;飞行试验

中图分类号: TN06; V217 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 590.5020

Research on water entry pressure measurement technology of large amphibious aircraft

Li Ludan Jiang Hongna Jiang Hongwei

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: According to the requirements of water entry pressure test of large amphibious aircraft independently developed in China, the pressure field and test environment of the ship bottom structure are analyzed firstly. The ship bottom pressure is numerically simulated by ALE algorithm, the pressure distribution at the time of landing the water at the bottom of the ship is obtained. Combined with the theoretical calculation based on the improved Wanger model, the optimal measuring point of the water inlet pressure is determined, and the signal sensing scheme based on the nonlinear vibration model is designed. Secondly, analyze the practical engineering problems of aircraft modification, and determine the sensor refitting process. Finally, through the flight test, the feasibility of the scheme and the reliability of the simulation model are verified. The maximum deviation between the test results and the simulation results is 3.4%, and provide a basis for the optimization and improvement of the test scheme in the next stage.

Keywords: pressure of water landing; ALE algorithm; Wanger model; flight test

0 引言

以 TA600 为代表的大型水陆两栖飞机是我国重点研制的特种飞机,也是国家应急救援体系建设中的重大航空设备,该机需要在水面反复起降,在水面降落过程中的入水冲击瞬间会遭受巨大的冲击载荷,一方面这种载荷会导致入水物体的局部结构变形甚至损坏,另一方面冲击压力沿物体湿表面积所得到的水动力会影响飞机的整体运动性能,同时非线性水动力合力能够使机体产生振动,显著增加疲劳损坏几率,当机体颤振产生的弯矩与低频波浪弯矩叠加时,还可能导致总体强度的降低。

此外根据中国民用航空规章第 25 部运输类飞机适航标准 CCAR-25-R4^[1] 中的 25.231 和 25.239 条中的要求,必须对水上飞机在起飞,滑行和着水的过程中的操纵性和稳定性进行鉴定,不得产生不可控制的海豚运动、弹跳或摇摆倾向。着水过程的冲击压力,会对飞机的操作稳定性带来巨大的影响。因此,有必要对大型水陆两栖飞机入水过程中的机身船体受力状况进行测试^[2]。

近年来,国内多个高校和科研单位针对水上飞机着水响应进行了理论分析与地面试验^[3-6],但由于型号任务的研制进度以及飞行试验特种测试技术的限制,尚未进行飞行试验,因此在实际飞行中对飞机入水瞬间的船底压力场实现精确测量面临严峻考验。为了实现入水压力

的精确测量,本文依据 TA600 设计指标及测试需求,在理论计算及仿真的基础上,选择最优测点,设计入水压力测试方案,并规范其改装工艺,对该机底部特征位置入水压力进行测试,实现国内该项测试技术在飞行试验领域的突破,并为下一步入水压力测试精度提升奠定基础。

1 总体方案设计

在飞行试验中进行水压测试尚属首次,在进行测试之前,首先需要对测试对象进行分析。飞机入水过程分为3个阶段,分别为空中飞行、入水瞬间以及水上滑行,可以看出测试对象为入水瞬间的飞机船底压力场,但是由于船底面积大,布置测点工作量大,因此不易实现,并且被测环境介质包括空气介质和水介质,被测信号为气流两相流动气压,但是由于目前飞行试验中通常使用的绝对压力传感器存在引管和空腔,会损失频响,由于气泡响应,影响测试精度,并且机上改装要求满足共形特性,同时保证船底入水过程以及水上滑行阶段的气密性,不影响传递结构强度,因此本文设计入水压力测试方案,主要包含如下3个方面:

1) 选择合适的测点,从点测量反演面测量;在进行测点选择的过程中,分别从数值仿真和理论计算两个方面,综合分析最终确定最优测点;

2) 对入水压力的测试信号特点进行分析,通过对传统飞行试验中压力传感器在进行水压测试时的频响分析,建立基于非线性振动模型的信号传感方案设计,并对影响因素进行分析;

3) 根据测试需求及船底结构强度要求,在传感器安装过程中,通过安装支架进行仿真,确定最终安装方式。

入水压力测试系统原理框图如图1所示,即通过在船底相应测点布置测式传感器,机载采集系统将传感器测试压力信号统一采集,可以看出测点选择,传感器方案设计以及传感器的安装环节尤为重要。

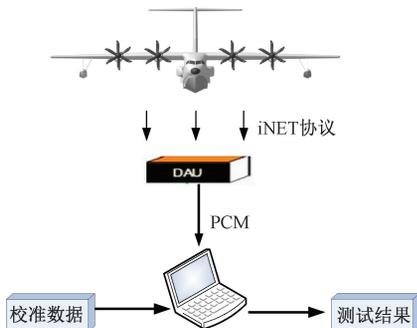


图1 入水压力测试系统原理图

Fig. 1 Principle of water inlet pressure test system

2 入水压力数值仿真及测点优选

2.1 入水压力数值计算

入水冲击问题可以概括为“固液研击作用”,它是一个高耦合、强非线性的复杂物理过程。飞机着水响应的研究方法主要有动力模型试验和数值仿真计算^[7-9],因此本文采用 ALE 算法进行入水压力数值计算,既能克服由于拉格朗日算法带来的网格严重畸变,还能进行动态分析。

针对某水陆两栖飞机入水压力测试需求,需建立全尺寸飞机结构和水体耦合的数值仿真模型,因飞机模型较复杂,首先按照 1:1 的比例建立飞机结构有限元模型^[10-11],并导入到 LS_DYNA 软件前处理器 LS_PREPOST 中,如图2所示;该型号机身长 37 m,翼展 38.8 m,着水失速速度 44.72 m/s,设计着水攻角 6°。

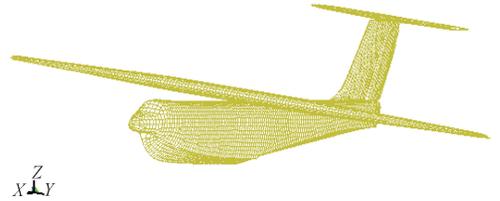


图2 飞机结构网格模型

Fig. 2 Aircraft finite element model

在正常着水情况下,该飞机着水时纵倾角(飞机龙骨基准线与平静水面夹角)为 5°~7°,飞机着水垂直下降速度范围为 0~3 m/s,着水前飞速度取 41.667 m/s。取飞机在不同纵倾角下的着水响应特性进行分析,分析工况如表1所示。

表1 飞机着水工况

Table 1 Aircraft landing condition

工况	纵倾角/ (°)	襟翼位置/ (°)	前飞速度/ (m·s ⁻¹)	垂向速度/ (m·s ⁻¹)
1	5.0	45.0	41.667	3.0
2	6.0	45.0	41.667	3.0
3	7.0	45.0	41.667	3.0

飞机入水瞬间为流固耦合过程,采用 ALE 耦合算法,结合飞机着水工况及建立的有限元模型对该水陆两栖飞机进行着水响应仿真计算,仿真结果如图3所示,在此过程中,飞机船底压力场分布如图4所示。

可以看出,船底断阶处在入水瞬间压力最大,其他部位也会遭受不同程度的入水冲击。在船首,断阶处以及船尾选取6个特征区域的压力点,如图5所示,进行数值计算,结果如表2所示。

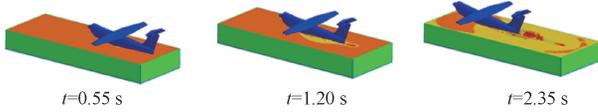


图 3 飞机着水数值仿真结果

Fig. 3 Numerical simulation results of aircraft landing

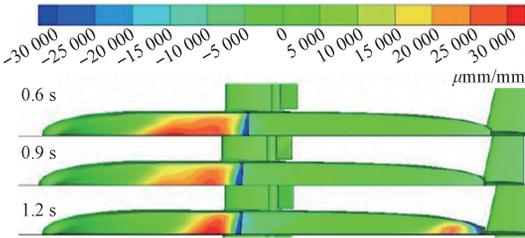


图 4 飞机船底压力场分布

Fig. 4 Distribution of pressure field at the bottom of aircraft

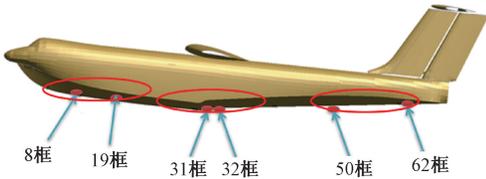


图 5 选取压力点

Fig. 5 Selected pressure point

表 2 机身底部水压力最大值

Table 2 Maximum water pressure at fuselage bottom (MPa)

工况	8 框	19 框	31 框	32 框	50 框	62 框
1	0.000 6	0.064 2	0.094 3	0.088 4	0.000 2	0.000 2
2	0.007 4	0.067 5	0.152 6	0.103 3	0.034 4	0.008 5
3	0.016 6	0.030 3	0.131 6	0.124 8	0.004 6	0.027 4

2.2 入水压力理论计算

物体入水过程一般可简化为如图 6 所示的 Wanger 模型^[12-15]。

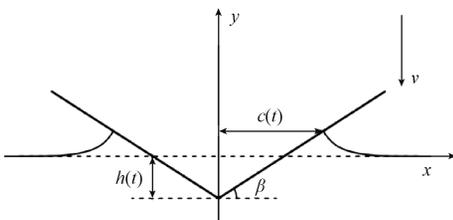


图 6 二维楔形体入水示意图

Fig. 6 Schematic diagram of water entry of two-dimensional wedge

在势流理论框架下进行计算,以平板速度势代替物体浸湿部分的速度势分布,则流场中速度势满足拉普拉斯方程根据动量守恒定律,可以得到伯努里方程:

$$p = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho |\nabla \phi|^2 - \rho g y + p_\alpha \quad (1)$$

其中,由于结构物的运动速度较大而砰击时间很短,砰击力产生的加速度远大于 g,因此伯努里方程中的重力作用项可以忽略,假设自由面上的压力恒为大气压,则可以忽略 P_alpha,得到自由面动力学边界条件,将速度势代入上式即可得到物面上的压力分布:

$$p = \rho \frac{dV}{dt} \sqrt{c^2 - x^2} + \rho V \frac{c}{\sqrt{c^2 - x^2}} \frac{dc}{dt} \quad (2)$$

椭圆拟合方法为平板拟合的改进,将入水物体用椭圆来代替,用椭圆绕流的速度势分布表示物体浸湿表面的速度势,进而得到湿表面的压力分布和结构物所受的砰击力。与 Wanger 平板模型相比,椭圆拟合方法在物体表面与液面交界处流速有界,压力为有限值,因此在进行水陆两栖飞机入水压力理论计算时可简化为该模型。图 7 为椭圆拟合示意图。

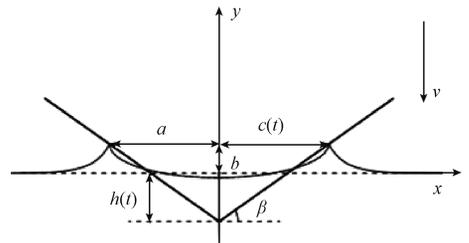


图 7 椭圆拟合示意图

Fig. 7 Ellipse fitting

采用椭圆形状代替楔形,半长轴 a 等于入水半宽,为了使理论模型交界处附近压力尽量符合实际情况,最终得到压力值。

$$p = \text{Re} \left(\frac{k_2^2}{\sqrt{(1-k^2)k_2^2 - z^2}} \right) \quad (3)$$

将改型飞机设计值代入式(3),可得几个特征区域压力值,如表 3 所示。可以看到选区的压力点压力极限值与数值仿真结果相近,因此选择的测点合理,可用于船底结构强度分析。

表 3 理论计算测点压力值单位

Table 3 Theoretical calculation of pressure value at measuring point unit (MPa)

工况	8 框	19 框	31 框	32 框	50 框	62 框
1	0.008 2	0.064 2	0.097 7	0.089 2	0.003 2	0.001 8
2	0.009 3	0.013 7	0.168 2	0.122 7	0.014 5	0.007 3
3	0.018 6	0.059 0	0.270 1	0.258 3	0.062 6	0.018 8

3 基于非线性气泡效应模型的传感方案设计

3.1 信号分析

入水压力信号属于气流两相流动压力,其变化量远大于初始压力,该信号可以视为脉动压力,因此,设计适合高盐高湿的环境的脉动压力传感方案就尤为重要。

目前飞行试验中,常用的压力传感器属于空腔式压力传感器,前端接管嘴为引管,敏感部件之前存在空腔,在进行入水压力测试时,由于引管中液体的表面张力效应,空腔内的空气无法排出,于是形成较软的空气弹簧。因此,当入水压力变化时,空腔压力不能与其保持一致,引管中的液体和空腔气体就形成了弹簧-质量振动系统,导致传感器容腔端敏感面测量压力与引管前端压力有差异,这也就是容腔式传感器测量液体压力时频响特性显著降低的原因。

3.2 传感方案设计

为分析各种因素对传感器频响特性的影响,以不考虑液柱长度变化的等效振动模型(式4)为基础^[16-19],分析各种因素对传感器频响特性的影响。

$$\frac{d^2P}{dt^2} - \frac{1+k}{kP} \left(\frac{dP}{dt}\right)^2 + \frac{8\pi u}{\rho S} \cdot \frac{dP}{dt} + \frac{S}{\rho L_{eq}} \cdot \frac{kP_0}{V_q} \left(\frac{P}{P_0}\right)^{1+1/K} [P - P_{水}] = 0 \quad (4)$$

式中: P 为传感器容腔内压力, P_0 为初始压力, $P_{水}$ 为水压, V_q 为容腔有效体积, L_{eq} 为液柱等效长度, ρ 为液体密度, k 为空气的比热比, $\frac{8\pi u}{\rho S} \cdot \frac{dP}{dt}$ 为液体粘性力, $\frac{S}{\rho L_{eq}}$

$\frac{kP_0}{V_q}$ 为传感器的等效比刚度,决定了频响曲线谐振峰的频率。由式(4)可以看出,增大引管面积和减小容腔体积可以明显提高频响特性,因此采用“齐平”安装方式传感器,没有容腔和气泡响应,传感器的频响特性只受到敏感膜片特性的限制。在进行传感器选型的过程中。考虑到安装问题,在前期进行强度计算的基础上,选取 ENDEVCO 公司的 8530C 传感器,利用 CATIA 软件对其进行应力分析,如图 8 所示为传感器应力仿真图,可以看出传感器压力集中于敏感面,可满足脉动压力的测试需求。

根据选取的测点位置将所选传感器进行安装,由于选传感器特殊结构,其敏感面位于传感器前端,为保证入水压力的测试要求,需要在船底开结构孔,因此需要设计专用夹具,并通过仿真验证其结构强度,如图 9 所示为在施加 500 N 的作用下,夹具应力分布图,可以看出夹具不会发生形变,可满足飞行试验。

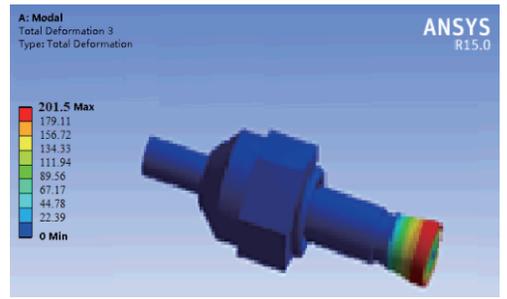


图 8 图传感器应力仿真图

Fig. 8 Sensor stress simulation

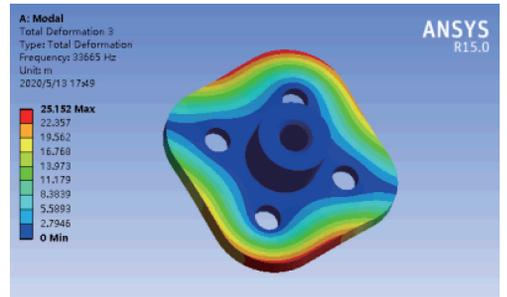


图 9 安装夹具应力仿真图

Fig. 9 Stress simulation of installation fixture

此外还必须保证船底的气密性以及共形特性,由于传感器是通过专用改装夹具固定在蒙皮上,因此对安装扭矩和传感器前端突出量关系进行实验验证,数据如表 4 所示,可以看出,当扭矩达到 1.7 N·m 时,传感器敏感面与蒙皮之间突出误差最小,基本平齐,并且通过密封铆接的形式,可以达到保证气密性的要求,所以传感器最终如图 10 所示。

表 4 扭矩与传感器突出误差关系

Table 4 Relationship between torque and sensor outburst error

扭矩/(N·m)	应变/($\mu\epsilon$)	传感器初始值/kPa	误差/%
4.9	720.3	101.2	0.69
3.3	785.1	99.18	0.58
1.7	251.2	97.62	0.41

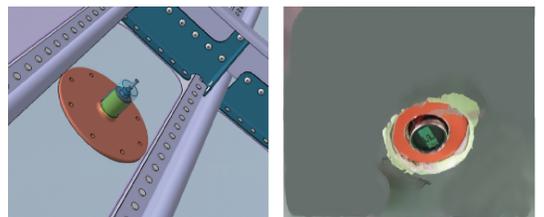


图 10 传感器安装示意图

Fig. 10 Sensor installation diagram

4 飞行试验验证

传感器及测点选择后,根据测试要求进行机上改装,由于选择的传感器需要打孔。因此要考虑密封性以,并且保证共形特性。根据入水压力测试需求,在船首、中部、尾部分布 26 个测点,在断阶处分布 6 个测点,如图 11 所示。

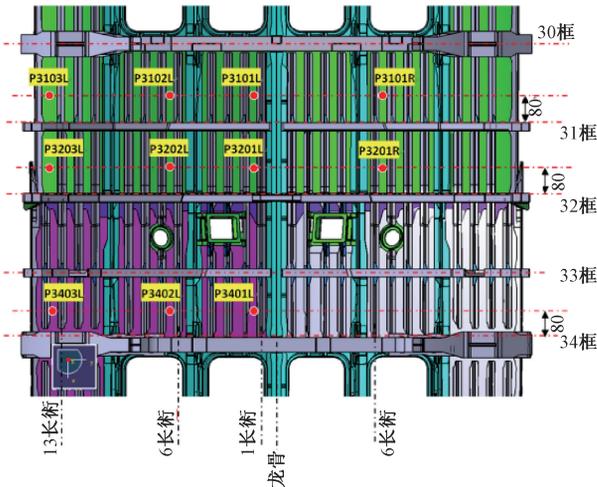


图 11 断阶处的测点

Fig. 11 Measuring point at fault step

选取安装在 8 框、31 框、32 框、50 框处的压力传感器为例,入水压力测试结果如图 12 所示。

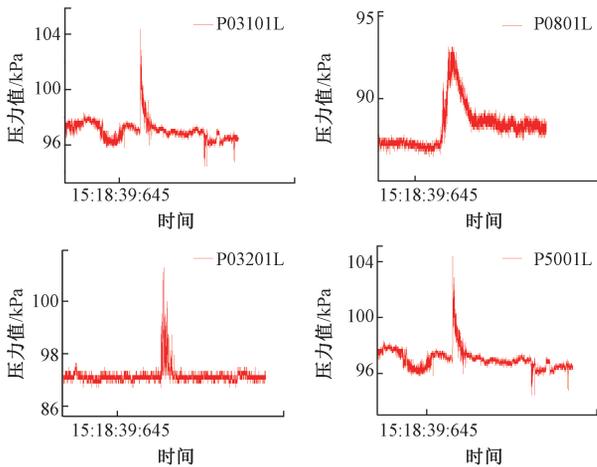
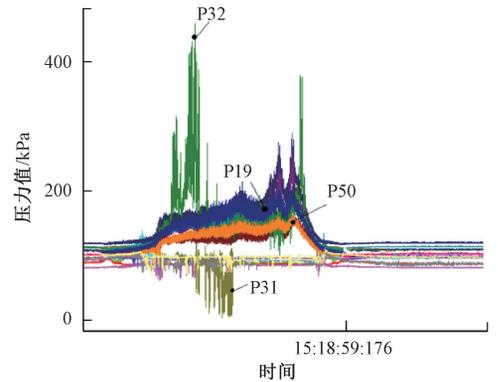


图 12 8 框,31 框,32 框,50 框传感器测试数据

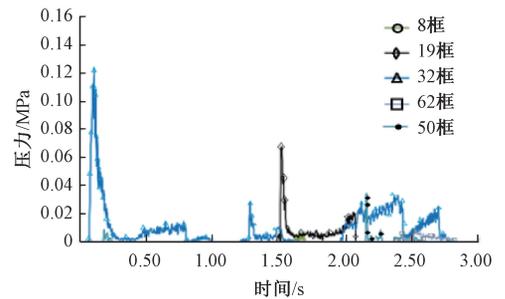
Fig. 12 8 frames, 31 frames, 32 frames, 50 frames sensor test data

将所有测点的数据与仿真数据进行对比,如图 13 所示,可以看出实际飞行数据与仿真结果吻合,压力最大偏差仅为 3.4%,这是由于实际水面并非静止不动,且水下

存在湍流、石子等情况,因此在数值方面会有微小差异。



(a)不同传感器入水压力测试值
(a) Water pressure test values of different sensors



(b)不同安装位置入水压力测试值
(b) Water pressure test values of different installation positions

图 13 测试数据与仿真数据对比

Fig. 13 Comparison between test data and simulation data

5 结论

本文通过分析大型水陆两栖飞机入水压力测试需求,进行基于 ALE 算法的数值仿真和改进 Wanger 模型的理论分析选取最优入水压力测点,并进行基于等效振动模型分析传感方案设计,经飞行试验验证,测试结果与仿真结果趋势一致,在国内首次实现了大型水陆两栖飞机入水压力特种测试,为后续该机水上试飞性能评估奠定基础。

参考文献

[1] 中国民用航空局. CCAR-25-R4 运输类飞机适航标准[S]. 北京:中国民用航空局,2011.
Civil Aviation Administration of China. CCAR-25-R4 Airworthiness standards: Transport category airplanes[S]. Beijing: CAAC,2011.

[2] 黄领才,雍明培. 水陆两栖飞机的关键技术和产业应用前景[J]. 航空学报,2019,40(1):18-34.
HUANG L C, YONG M P. Key technologies and industrial application prospects of amphibian aircraft[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2019, 40(1):

- 18-34.
- [3] 王丑丑,吴宗成. 飞机简化模型水上迫降入水的数值研究[J]. 航空工程进展,2016,7(1):51-61.
WANG Q Q, WU Z CH. Water entry numerical study of a simplified aircraft model in ditching[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2016, 7 (1) : 51-61.
- [4] 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 Y K, QU Q L, LIU P Q. 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.
- [5] 贺谦,李元生,李磊,等. 基于 ALE 方法的飞机水面降落过程[J]. 爆炸与冲击,2010,30(2):125-130.
HE Q, LI Y SH, LI L, et al. On dynamic structural response of an airplane landing onto water[J]. Explosion and Shock Waves,2010,30(2) :125-130.
- [6] 褚林塘,孙丰,廉滋鼎,等. 水陆两栖飞机船体着水载荷数值与试验分析[J]. 振动与冲击,2016,35(15):211-215.
CHU L T, SUN F, LIAN Z D, et al. Numerical simulation and tests for water load of amphibious aircraft hulls [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(15):211-215.
- [7] 陈占晖,卢永锦. 水平高速运动的弹性立方体砰击水面动特性研究 [J]. 中国造船, 2010, 51 (4) : 166-170.
CHEN ZH H, LU Y J. Study on the dynamic performance of elastic cube's slamming water with high horizontal speed [J]. Shipbuilding of China, 2010, 51(4):166-170.
- [8] 宋盼盼. 三维弹性体入水动力学数值仿真研究[D]. 太原:中北大学,2014.
SONG P P. The research on numerical simulation about water entry of 3D elastic body [D]. Taiyuan: North University of China, 2014.
- [9] 贾鹏. 运动体高速入水冲击载荷数值模拟研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
JIA P. Numerical simulation research on high-speed water entry impact [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2018.
- [10] 杨仕福,曾毅,陈吉昌. 考虑气动力作用的水上飞机着水动响应特性[J]. 机械设计,2019,36(7):63-67.
YANG SH F, ZENG Y, CHEN J CH. The study of aircraft landing water response considering aerodynamic forces[J]. Journal of Machine Design, 2019,36(7):63-67.
- [11] 曾毅,杨仕福,罗琳胤. 水陆两栖飞机波浪着水响应研究[J]. 机械设计,2015,32(9):96-100.
ZENG Y, YANG SH F, LUO L Y. The structural response of amphibian landing onto wave[J]. Journal of Machine Design,2015,32(9) :96-100.
- [12] 寇莹,王宝寿,陈玮琪. 二维物体入水砰击问题的理论方法研究[J]. 船舶力学,2017,21(4):383-389.
KOU Y, WANG B SH, CHEN W Q. A study of theoretical method for two-dimensional water impact problems[J]. Journal of Ship Mechanics,2017,21(4) : 383-389.
- [13] 陈小平,李军伟,王辉,等. 大尺度楔形体板架钢模落体试验和仿真研究[J]. 船舶力学,2012,16(10):1152-1163.
CHEN X P, LI J W, WANG H, et al. Experiments and numerical investigation of water entry of large-scale steel wedge models [J]. Journal of Ship Mechanics, 2012, 16(10):1152-1163.
- [14] 张岳青,白治宁,曾小凡,等. 楔形和弧形结构入水冲击响应研究[J]. 船舶力学,2020,24(3):400-408.
ZHANG Y Q, BAI ZH N, ZENG X F, et al. Study of water impact response of wedge and arc-shaped structures [J]. Journal of Ship Mechanics,2020,24(3):400-408.
- [15] 朱仁庆,陆嘉文,纪仁玮,等. 波浪作用下三维楔形体入水砰击数值模拟[J]. 舰船科学技术,2019,41(13):6-11.
ZHU R Q, LU J W, JI R W, et al. Numerical simulation of three-dimensional wedges entering the water under wave action [J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(13):6-11.
- [16] 马斌捷,吴军,王国庆,等. 水中容腔式压力传感器频响特性的非线性气泡效应分析[J]. 导弹与航天运载技术,2013(3):42-49.
MA B J, WU J, WANG G Q, et al. Nonlinear bubble effect analysis for frequency response characteristics of chamber type pressure sensor in water[J]. Missiles and Space Vehicles,2013(3) :42-49.
- [17] 王淮阳,胡珊珊,刘正士,等. 深海大压力及其微小波动压力的测量方法[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(11):155-161.
WANG H Y, HU SH SH, LIU ZH SH, et al. Measurement method of deep-sea high pressure and its small wave pressure [J]. Journal of Electronic

Measurement and Instrumentation, 2019, 33 (11): 155-161.

- [18] MA B J, WU J, WANG G Q, et al. Nonlinear bubble effect analysis for frequency response characteristics of chamber type pressure sensor in water[J]. Missiles and Space Vehicles, 2013(3):42-49.
- [19] 赵萌,毛军,郗艳红. 高雷诺数下有限长圆柱绕流阻力特性研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(22):176-182.
- ZHAO M, MAO J, XI Y H. Research on drag characteristic of flow around finite circular cylinder at high reynolds numbers [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(22):176-182.

作者简介



李卢丹(通信作者), 2013 年于西北工业大学获得学士学位, 2016 年于西北工业大学获得硕士学位, 现为中国飞行试验研究院机载测试技术工程师, 主要研究方向为飞行试验机载测试及传感器技术。

E-mail: 767888260@qq.com

Li Ludan (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 2013, M.Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 2016. Now she is an airborne test technology engineer of China Flight Test and Research Institute. Her main research interests include airborne test and sensor technology.