

不规则波作用下回转体出水过程数值研究

王凡瑜, 权晓波, 魏海鹏, 孔德才
(北京宇航系统工程研究所, 北京, 100076)

摘要: 为研究波浪环境对跨介质回转体出水过程受力及运动的影响, 基于P-M谱模拟了半球头回转体在不规则波条件下的出水过程, 获得了回转体受力特性与运动特性。结果表明: 回转体所受法向力主要来源于柱段中部不对称压力分布, 所受俯仰力矩主要来源于头部和柱段尾部的不对称压力分布; 回转体质心水平位移和俯仰姿态的方向与回转体遭遇的波峰波谷演化阶段相关, 而量值与回转体遭遇的波峰波谷高度差相关。

关键词: 回转体; 出水; 不规则波; P-M谱; 数值模拟

中图分类号: O352; V42

文献标识码: A

Numerical Study of the Water-exit Process of Axisymmetric Vehicle under Irregular Waves

WANG Fanyu, QUAN Xiaobo, WEI Haipeng, KONG Decai
(Beijing Institute of Astronautical System Engineering, Beijing, 100076)

Abstract: Aiming to study the wave effects on the water-exit process of aquatic-aerial vehicles, a hemispherical-head axisymmetric vehicle are simulated to exit through different irregular waves based on the P-M spectrum. Both kinetic and dynamic profiles of the vehicle are extracted. The results demonstrate that the normal force mainly originates from the asymmetric pressure distribution on the cylinder part of the vehicle, and the pitching moment from the asymmetry on the head and the tail. Concerning the horizontal displacement of the gravity center and the pitching angle, the magnitudes are entwined with the height difference between the crest and trough that the vehicle encounters, while the directions with the stage of the crest/trough transition.

Key words: axisymmetric body; water-exit; irregular wave; P-M spectrum; numerical simulation

0 引言

波浪是影响跨介质航行体出水过程载荷、姿态及离散特性的重要环境因素, 其影响规律与作用机理受到相关领域学者的广泛关注。姜涛^[1]基于Stokes波比较了航行体波峰出水与波谷出水的运动特性; 陈世雄^[2]研究了波浪相位、攻角以及航行体速度方向对航行体受力特性与空泡溃灭特性的影响; 朱坤等^[3]同样模拟了航行体在不同相位二阶Stokes波下的出水运动, 指出波浪相位通过自由面附近水质点运动速度的大小与方向影响肩空泡对称性, 进而影响航行体受力与姿态; 周炫成^[4]进一步研究了浪级对航行体运动及受力的影响; 权晓波等^[5]模拟了二阶Stokes波作用下的航行体出水运动, 发现航行体所受俯仰力矩与波浪传播方向上航行体前后两侧的不对称旋涡结构有关。

实际环境中波浪通常为不规则波, 但目前关于波浪对航行体出水运动的影响研究大多在规则波条件下开展, 基于不规则波的研究还十分有限。王亚东等^[6]采用P-M谱与SWOP方向分布函数描述不规则波, 基于势流理论与切片理论计算波浪力(矩)并代入弹道方程组求解, 大量子样的统计分析表明, 相关运动参数的最大偏差随浪级或浪向角均近似线性变化, 而采用势流方法的局限在于无法考虑流体的黏性作用; 王之海等^[7]采用ITTC谱模拟了不规则波作用下的航行体出水运动, 但未分析波浪流场影响。

本文基于N-S方程, 采用P-M谱, 通过边界条件造波法生成了有义波高相等但自由面形态不同的两不规则波, 在此基础上模拟了半球头回转体出水运动过程, 比较了两不规则波条件下回转体运动特性及受力特性的异同, 分析了不规则波流场对回转体运动及受力的影响。

1 数值方法

1.1 控制方程

对常黏性系数牛顿流体的三维不可压缩流动，有连续性方程：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程为

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \rho g_i \quad (2)$$

式中 u_i 为速度分量； x_i 为位矢分量； ρ 为密度； p 为压强； μ 为动力黏性系数； g_i 为重力加速度分量。

在 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 方程框架下，采用 $k-\omega$ SST 模型^[8] 封闭湍流项，耦合求解连续性方程与动量方程。气水自由面采用 VOF 模型^[9] 模拟。

1.2 不规则波模拟方法

Longuet-Higgins 等^[10] 提出将不规则波视作大量小幅线性波的叠加，即：

$$\eta(x_1, t) = \sum_{n=1}^N a_n \cos(k_n x_1 - \omega_n t + \varphi_n) \quad (3)$$

式中 $\eta(x_1, t)$ 表示 t 时刻不规则波在水平坐标为 x_1 处的自由面高度； N 为成分波的个数； $a_n, k_n, \omega_n, \varphi_n$ 分别为第 n 个成分波的波幅、波数、角频率与相位。

根据 P-M 谱^[11] 确定各成分波的波幅及其他波浪要素。改写 P-M 谱表达式，以有义波高 H_s 为参数^[12]，有：

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp\left(-\frac{4\alpha g^2}{H_s^2 \omega^4}\right) \quad (4)$$

式中 $S(\omega)$ 表示角频率为 ω 的波浪成分对应的能量密度； α 为常值系数， $\alpha=8.1 \times 10^{-3}$ ； g 为重力加速度。按式 (5) 计算略去 2ε 倍波谱总能量的上、下限频率：

$$\omega_{\text{lower}} = \left(-\frac{4\alpha g^2}{H_s^2 \ln \varepsilon}\right)^{1/4} \quad (5)$$

$$\omega_{\text{upper}} = \left[-\frac{4\alpha g^2}{H_s^2 \ln(1-\varepsilon)}\right]^{1/4}$$

将频率区间 $[\omega_{\text{lower}}, \omega_{\text{upper}}]$ 划分为能量相等的 N 个子区间，子区间与成分波一一对应。因各子区间能量相等，各成分波的波幅 a_n 亦相等。将上、下限频率之间的波谱总能量 $\int_{\omega_{\text{lower}}}^{\omega_{\text{upper}}} S(\omega) d\omega$ 记作 E ，则 $a_n \equiv \sqrt{2E/N}$ 。各成分波的角频率 ω_n 取相应子区间的中点，波数 k_n 由色散关系解出，即：

$$\omega_n^2 = k_n g \tanh(k_n d) \quad (6)$$

式中 d 为水深。各成分波的相位 φ_n 为 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布的随机变量。

采用边界条件法造波，造波边界的相分数条件由式 (3) 确定，速度条件由各成分波在边界处的速度线性叠加得到，即：

$$u_1(x_1, x_2, t) = \sum_{n=1}^N \left\{ \frac{\pi a_n}{T_n} \frac{\cosh[k_n(x_2 + d)]}{\sinh(k_n d)} \cos(k_n x_1 - \omega_n t + \varphi_n) \right\} \quad (7)$$

$$u_2(x_1, x_2, t) = \sum_{n=1}^N \left\{ \frac{\pi a_n}{T_n} \frac{\sinh[k_n(x_2 + d)]}{\sinh(k_n d)} \sin(k_n x_1 - \omega_n t + \varphi_n) \right\}$$

式中 T_n 为各成分波的周期， $T_n = 2\pi/\omega_n$ 。

取成分波个数 $N=200$ ，模拟有义波高 $H_s=1$ m 的不规则波，数值结果如图 1 所示，与规则波相比，不规则波流场呈现出较强无序性。提取自由面高度时间序列反演波谱，如图 2 所示，反演谱与目标谱吻合较好，表明所述方法能够可靠地模拟不规则波。

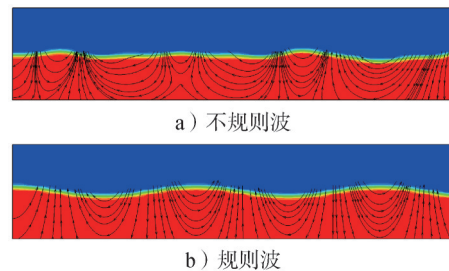


图1 数值波浪流场

Fig.1 Flow fields of numerical wave

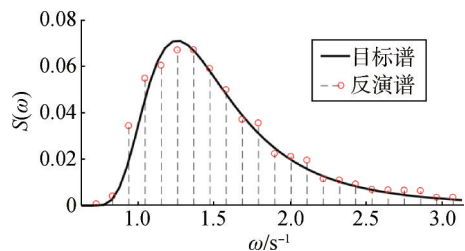


图2 不规则波数值结果反演谱

Fig.2 Spectrum retrieved from numerical irregular wave

2 算例设置

本文的研究对象为直径 1 m、总长 5.5 m 的半球头回转体。计算域长 30 m，宽 10 m，高 45 m，其中静水深 30 m。 X 、 Y 、 Z 三轴与前述位矢分量 $x_i (i=1, 2, 3)$ 一一对应，正方向定义一致，即： X 轴正方向为波浪传播方向， Y 轴正方向竖直向上， Z 轴正方向据右手定则确定。如图 3 所示，忽略回转体沿 Z 轴的平动以及偏航、滚转运动，采用半模模拟回转体三自由度出水过程。在 t_0 时刻，回转体顶点距静水面 19.5 m，速度 30 m/s。不规则波有义波高 $H_s=1$ m。 $-X$ 面与 $-Z$ 面设置为速度入口， $+X$ 面与 $+Y$ 面设置为压力出口， $+Z$ 面设置为对称面， $-Y$ 面与回转体表面设置为无滑移壁面。

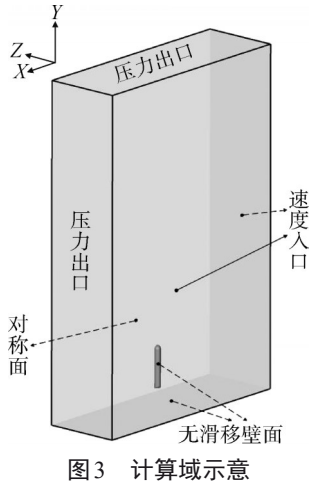


图3 计算域示意

Fig.3 Skeleton of computational domain

3 结果与分析

本文分别在两种不规则波条件下开展了回转体出水过程数值模拟，两条件仅成分波相位不同，相位由程序在 $[0, 2\pi]$ 上随机生成。回转体出水位置附近的自由面形态如图4所示。

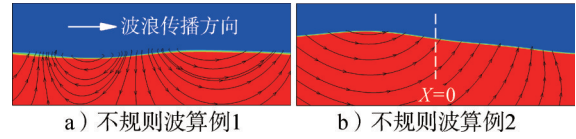


图4 自由面形态

Fig.4 Free surface profiles

3.1 回转体运动特性

回转体运动特性如图5所示。

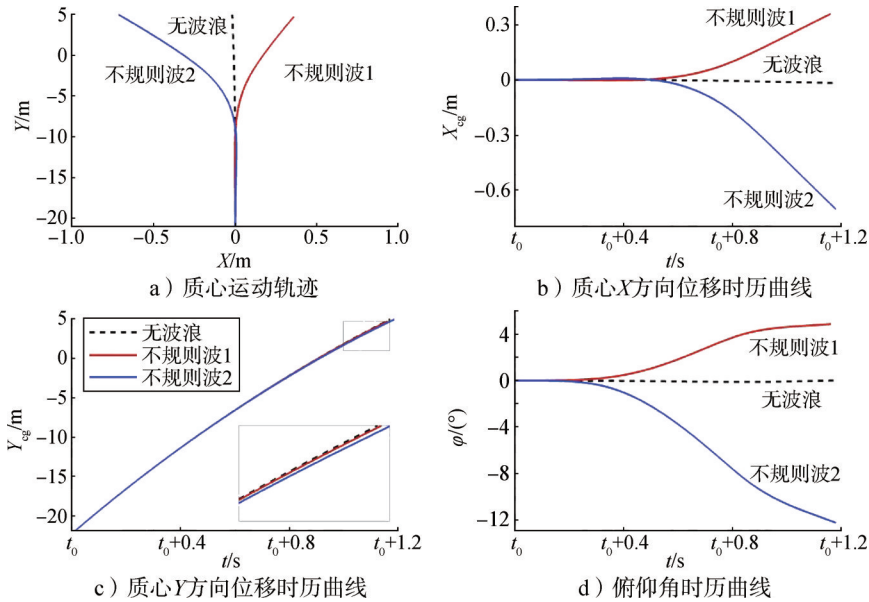


图5 回转体运动特性

Fig.5 Kinetic profiles

不规则波算例及无波浪对照算例的回转体质心运动轨迹如图5a所示，其中Y轴原点位于静水面处。可以看出，回转体质心位于静水面9 m以下时，不规则波作用下的质心运动轨迹与无波浪状态几乎重合；回转体运动至质心距静水面不足9 m时，不规则波作用下的质心运动轨迹显著偏离无波浪状态，且两不规则波算例中偏离方向相反。

图5b给出了各算例中回转体质心X方向位移的时历曲线。在 $(t_0+0.5)$ s前，不规则波作用下的质心X方向位移与无波浪状态没有明显差异；自 $(t_0+0.5)$ s起，不规则波作用下的回转体质心X方向位移显著偏离无波浪状态，且不规则波算例2中偏离程度高于不规则波算例1。

如图5c所示，不规则波作用下的回转体质心Y方

向位移时历曲线与无波浪状态近似重合。由放大图可知，同一时刻，无波浪状态下质心Y方向位移最大，不规则波算例1次之，不规则波算例2最小。说明不规则波作用下回转体Y方向速度略微衰减，且不规则波算例2中衰减稍大于不规则波算例1。

各算例中回转体俯仰角时历曲线如图5d所示。 $(t_0+0.15)$ s前，各算例俯仰角时历曲线未见明显差异。自 $(t_0+0.15)$ s起，不规则波作用下的回转体俯仰姿态显著偏离无波浪状态：不规则波算例1中回转体做正向俯仰运动；不规则波算例2中回转体做负向俯仰运动，且俯仰姿态的量值高于不规则波算例1。

综上所述，不规则波主要影响回转体的质心X方向运动与俯仰姿态，对质心Y方向运动影响较小。在所模拟的两不规则波作用下，回转体质心X方向位移

方向相反、量值差异较大，俯仰姿态亦然。

3.2 回转体受力特性

如图6所示定义半球头回转体的头部、柱段中部及柱段尾部，分别计算各部段所受法向力与俯仰力矩。

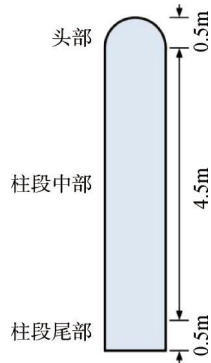


图6 回转体部段分界
Fig.6 Segment definitions

不规则波算例1中半球头回转体受力特性如图7所示。由图7可知，回转体头部先受量值较小的负向法向力及俯仰力矩。随着回转体向上运动，头部所受法向力及俯仰力矩逐渐变正，量值显著增大，直至出水阶段迅速减小。柱段中部所受法向力较大，但因在质心上下两侧分布接近对称，产生的俯仰力矩反而较小；出水阶段法向力分布偏向质心下方，故产生较大的负向俯仰力矩。柱段尾部先受量值逐渐增大的负向法向力，在 $(t_0+0.4)$ s 左右达峰值后逐渐减小，约在 $(t_0+0.6)$ s 时转为正向并逐渐增大，直至出水阶段缓慢减小。

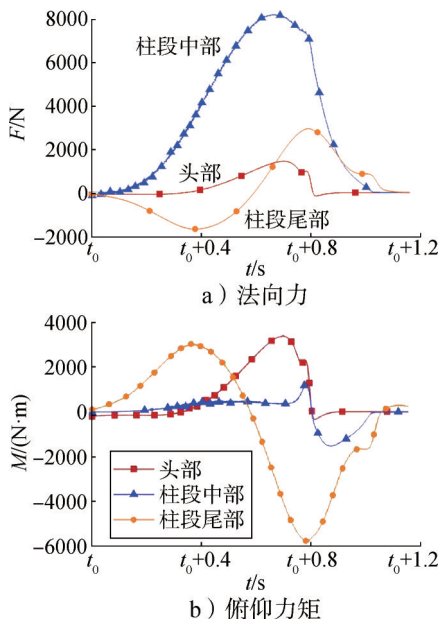


图7 不规则波算例1中回转体受力特性

Fig.7 Dynamic profiles in 1st irregular wave simulation

如图8所示，不规则波算例2中半球头回转体受力特性与不规则波算例1类似：头部所受法向力及俯仰力矩改变方向后量值显著增大，在出水阶段迅速减小；柱段中部所受法向力较大，但仅在出水阶段产生较大的俯仰力矩；柱段尾部所受法向力及俯仰力矩先增大后减小，反向后再增大，直至出水阶段缓慢减小。

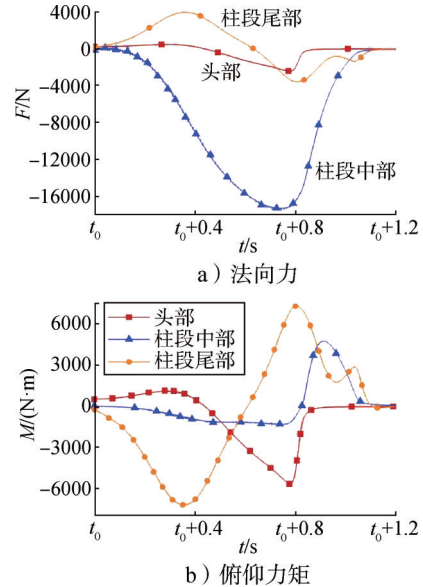


图8 不规则波算例2中回转体受力特性

Fig.8 Dynamic profiles in 2nd irregular wave simulation

两不规则波算例中半球头回转体受力特性主要有两点差异：a) 回转体各部段所受法向力方向相反、所受俯仰力矩方向相反，导致两算例中回转体质心 x 方向位移方向相反、俯仰姿态方向相反；b) 不规则波算例2中回转体所受法向力及俯仰力矩的量值显著高于不规则波算例1，导致不规则波算例2中回转体质心 x 方向位移及俯仰姿态的量值高于不规则波算例1。

3.3 不规则波流场影响

a) 从自由面形态（见图4）可知，不规则波算例1中，回转体在由波峰向波谷发展（简称“峰-谷”）的波浪条件下做出水运动，而不规则波算例2中条件为由波谷向波峰发展（简称“谷-峰”）。对线性波，峰-谷条件与谷-峰条件相位相反，同一位置水质点运动方向相反。不规则波与此类似，峰-谷条件下水质点运动对回转体的作用与谷-峰条件相反，故两算例中回转体质心 x 方向位移方向相反、俯仰姿态方向相反。

此外，不规则波算例2中回转体遭遇的波峰波谷高度差大于不规则波算例1，说明不规则波算例2中回转体遭遇的波浪能量较强，所以不规则波算例2中回转体受到较大的法向力与俯仰力矩，进而导致质心 x 方向位移与俯仰姿态的量值较高。

b) 回转体头部受力(矩)方向先后由波浪速度场和回转体俯仰姿态决定。如图9a所示,对不规则波算例1,在 t_0 时刻,回转体俯仰角较小,头部附近压力场较对称,但波浪场水平速度沿 x 轴负方向,诱导头部产生负法向力,使回转体头部受负俯仰力矩;如图9b所示,在 $(t_0+0.7)$ s时,回转体有较大的正向俯仰角, $-x$ 侧表面迎流,头柱交界处低压区小于 $+x$ 侧,法向力指向 $+x$ 侧,形成正俯仰力矩。

相反地,如图9c、9d所示,不规则波算例2中, t_0 时刻波浪速度场诱导回转体头部受正俯仰力矩;在 $(t_0+0.7)$ s时,回转体俯仰姿态为负, $+x$ 侧表面迎流,头柱交界处低压区小于 $-x$ 侧,法向力指向 $-x$ 侧,产生负俯仰力矩。

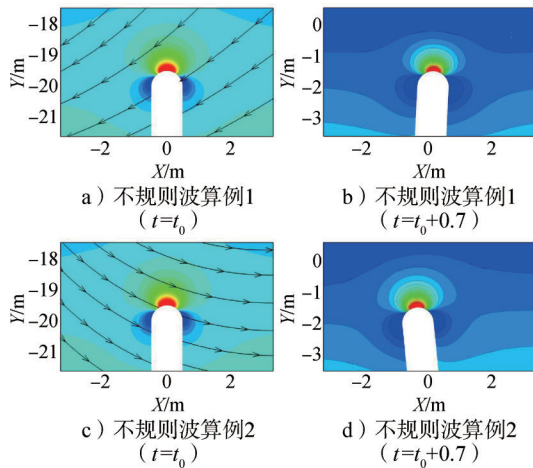


图9 头部附近压力云图

Fig.9 Pressure contours near head

综上所述,回转体俯仰角较小时,回转体头部受力(矩)方向由波浪速度场主导;随回转体俯仰角量值增大,头部受力(矩)方向逐渐转为由俯仰姿态主导。

c) 回转体柱段尾部受力(矩)方向与底部低压区密切相关。如图10a所示,不规则波算例1中,在 $(t_0+0.4)$ s时刻,回转体底部 $-x$ 侧低压区大于 $+x$ 侧,柱段尾部 $+x$ 侧表面压力较高,法向力指向 $-x$ 侧,形成正向俯仰力矩;如图10b所示,在 $(t_0+0.7)$ s时刻,底部低压区变为 $+x$ 侧较大、 $-x$ 侧较小,此时柱段尾部 $-x$ 侧表面压力较高,产生负向俯仰力矩。

不规则波算例2与此类似:如图10c、10d所示,在 $(t_0+0.4)$ s与 $(t_0+0.7)$ s时刻,回转体底部低压区相对大小相反,柱段尾部表面压力差方向相反,使所受法向力方向相反、俯仰力矩方向相反。

综上,回转体出水过程中柱段尾部受力(矩)方向发生变化,底部低压区相对大小亦发生变化。

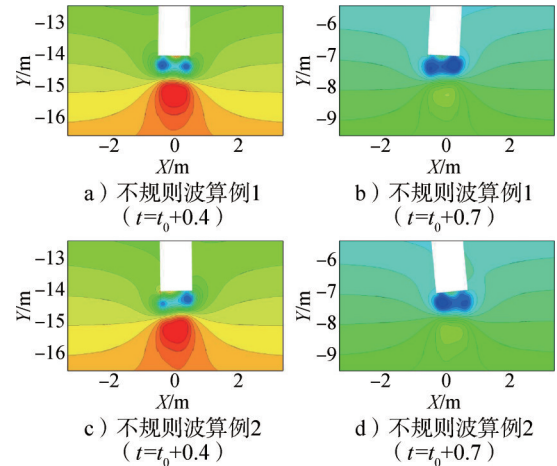


图10 尾部附近压力云图

Fig.10 Pressure contours near tail

4 结论

本文基于P-M谱生成了有义波高相等但自由面形态不同的两不规则波,在此基础上模拟了半球头回转体三自由度出水过程,提取了回转体运动参数,分阶段计算了回转体所受法向力与俯仰力矩,分析了不规则波对回转体受力特性与运动特性的影响,得到以下结论:

a) 峰-谷条件与谷-峰条件下,不规则波流场中水质点对回转体作用方向相反,使回转体各段所受法向力方向相反、俯仰力矩方向相反,导致回转体质心水平运动方向相反、俯仰姿态方向相反。

b) 有义波高相等的两不规则波作用下,回转体遭遇的波峰波谷高度差越大,所受法向力与俯仰力矩的量值越高,质心 x 方向运动与俯仰姿态偏离无波浪状态越显著。

c) 回转体俯仰角较小时,头部受力(矩)方向由波浪速度场主导,随后逐渐转为由俯仰姿态主导。

参考文献

- [1] 姜涛. 波浪模拟及其对航行体出水过程的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
JIANG Tao. The simulation of wave and its effects on the exceeding water process of an underwater vehicle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [2] 陈世雄. 波浪作用下航行体带空泡出水过程数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
CHEN Shixiong. Numerical simulation of vehicle water-exit course with cavitation under wave effect[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [3] 朱坤, 陈焕龙, 刘乐华, 等. 波浪相位对航行体出水过程水动力特性的影响[J]. 兵工学报, 2014, 35(3): 355-361.
ZHU Kun, CHEN Huanlong, LIU Lehua, et al. Effect of wave phase on hydrodynamic characteristics of underwater vehicle out of water [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(3): 355-361.
- [4] 周炫成. 不同波浪环境下航行体出水过程模拟及载荷特性分析[D].

- 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
ZHOU Xuancheng. Simulations for the water-exit process of underwater vehicles and analyses on the characteristics of loads[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [5] 权晓波, 孔德才, 李岩. 波浪模拟及其对水下航行体出水过程的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(3): 140-144.
QUAN Xiaobo, KONG Decai, LI Yan. Wave simulation and its effects on the exceeding water process of the underwater vehicle[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(3): 140-144.
- [6] 王亚东, 袁绪龙, 张宇文, 等. 波浪对导弹垂直发射水弹道影响研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(5): 630-635.
WANG Yadong, YUAN Xulong, ZHANG Yuwen, et al. Research on the effect of wave to vertical launch missile water trajectory[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(5): 630-635.
- [7] 王大海, 刘可, 李智生. 水下航行体在非规则波中出水运动数值仿真研究[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(7): 76-79.
WANG Zhihai, LIU Ke, LI Zhisheng. Research on the gesture of underwater vehicle exiting from irregular wave by numerical simulation method[J]. Ship Electronic Engineering, 2018, 38(7): 76-79.
- [8] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [9] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics. 1981(39): 201-225.
- [10] LONGUET-HIGGINS M S, CARTWRIGHT D E, SMITH N D. Ocean wave spectra[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1963.
- [11] PIERSON W J, MOSKOWITZ L. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii[D]. New York: New York University, 1963.
- [12] 徐曦煜, 王振占, 叶沛, 等. GPS浮标数据反演海浪谱的理论仿真与试验验证[J]. 海洋学报, 2014, 36(7): 34-44.
XU Xiyu, WANG Zhenzhan, YE Pei, et al. Theoretic simulation and campaign validation of ocean wave spectrum retrieval from GPS buoy measurements[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(7): 34-44.

作者简介

王凡瑜 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为跨介质航行体出水水动力学。

权晓波 (1976—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为飞行器总体设计。

魏海鹏 (1982—), 男, 研究员, 主要研究方向为飞行器总体设计。

孔德才 (1983—), 男, 研究员, 主要研究方向为跨介质多相流体动力学。

(上接第9页)

装配工艺技术研究, 确定热防护与热结构装配工艺流程与参数, 确保装配精度、装配公差满足总体设计要求。其主要技术难点在于重复使用防隔热材料制备, 高温动/静密封与连接结构实现, 重复使用防热系统装配、检测与快速修补技术。

4 结束语

基于液氧甲烷发动机的重复使用运载器代表了重复使用运载器的发展方向, 更易实现低成本。以面对称翼身组合体升力式构型为代表的垂直起飞水平降落构型方案以其大空域、宽速域飞行能力技术优势, 成为该领域研究的重要方向。其总体设计中面临的最大难题在于重复使用动力系统、耐高温轻质结构、健康监测及故障诊断、热防护系统等, 国内外围绕这些难题已开展多年关键技术攻关, 取得大量研究成果。为实现重复使用运载器“廉价、快速、机动、可靠”的目标, 后续持续开展液氧甲烷发动机的重复使用运载器总体关键技术攻关, 加快关键技术飞行验证, 为早日具备工程研制条件奠定基础。

参考文献

- [1] 杨开. 国外液氧甲烷发动机的最新进展[J]. 中国航天, 2017(10): 14-19.
YANG Kai. The latest development of liquid oxygen methane engine abroad[J]. China Aerospace, 2017(10): 14-19.
- [2] 唐伟. 重复使用运载器回顾与展望[C]. 杭州: 空气动力学与气动热

力学会议, 2006.

TANG Wei. Review and prospect of reusable launch vehicles[C]. Hangzhou: the Conference on Aerodynamics and Aero Thermodynamics, 2006.

- [3] 刘佳玺. 可重复使用航天运载器及其关键技术[J]. 国际航空航天科学, 2019, 7(2): 33-44.

LIU Jiaxi. Reusable space vehicles and their key technologies[J]. International Journal of Aeronautics and Astronautics, 2019, 7(2): 33-44.

- [4] 孙宏明. 液氧甲烷发动机评述[J]. 火箭推进, 2006, 32(2): 23-31.

SUN Hongming. Review of liquid oxygen methane engine[J]. Rocket Propulsion, 2006, 32(2): 23-31.

- [5] 龙乐豪. 重复使用航天运输系统发展与展望[J]. 科技导报, 2018, 36(10): 84-92.

LONG Lehao. Development and prospect of reusable space transportation system[J]. Science and Technology Guide, 2018, 36(10): 84-92.

- [6] 郑大勇. 液氧甲烷发动机重复使用关键技术发展研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2018(2): 31-35.

ZHENG Dayong. Research an the development of key technologies of liquid oxygen methane engine reuse[J]. Missiles and Space Vehicles, 2018(2): 31-35.

作者简介

郑平军 (1983—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为飞行器总体设计。

赵胜 (1988—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为动力系统设计。

王飞 (1973—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为飞行器总体设计。

蔡巧言 (1968—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为飞行器总体设计。