



波浪扰动下的水面平衡发射特性研究

鱼航溢,黄 勇*

(南京理工大学 能源与动力工程学院,江苏 南京 210094)

摘要:当前的战场环境要求把高价值作战平台及其乘员的危险减小到最小程度,发展打击力更强、隐蔽性更好的战场武器。针对海上无人发射系统的性能要求,以水面浮式发射筒为研究对象,采用线性波浪理论分析了海浪对发射平台的作用形式,提出了一种新的水面平衡发射方式,建立了波浪扰动下的水面发射动力学模型,通过仿真,对不同波浪等级以及平台初始偏角下水面发射的动力学特性进行了对比研究。结果表明,平衡发射时平台的偏转角较正常发射时大幅减小;不同波浪等级和初始偏角对平衡发射系统的影响主要体现在平台的偏转角上,波浪等级越高,平台的偏转幅度越大;由初始偏角以及波浪相位所决定的浮囊吃水深度越大,平台的偏转幅度越大,载体在出筒过程中随平台的偏转幅度产生不同程度的震荡;由于水动力与内弹道作用力相比较小且发射时间极短,不同工况对发射系统的内弹道特性几乎无影响。

关键词:内弹道;波浪;水面发射;动力学特性

中图分类号:TJ768 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-499X(2026)03-0028-09

Study on Characteristics of Balanced Launching From Water Surface Under Wave Perturbation

YU Hangyi, HUANG Yong*

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The current battlefield environment requires the minimization of danger to high-value combat platforms and their occupants, and the development of battlefield weapons with greater lethality and better concealment. In view of the performance requirements of the unmanned missile system at sea, taking the surface floating launcher as the research object, the linear wave theory was used to analyze the action of the wave on the launcher platform, and a new surface balanced launch method was proposed. A dynamic model of the surface launch under the wave disturbance was established, and the dynamic characteristics of the surface launch under the different wave levels as well as the initial deflection angle of the platform were compared by simulation. The results show that the deflection angle of the platform during the balanced launch is greatly reduced compared with that of the normal launch. The influence of different wave levels and initial deflection angles on the balanced launch system is mainly reflected in the deflection angle of the platform. The higher the wave level, the higher the deflection amplitude of the platform. The higher the draught depth of the float bladder determined by the initial deflection angle and the phase of the wave, the higher the deflection amplitude of the platform is. During the process of exiting the tube, the carrier has a greater effect on the deflection amplitude of the platform. Since the

hydrodynamic force is small compared with the internal ballistic pressure and the launching time is very short, the different working conditions have almost no effect on the internal ballistic characteristics of the launching system.

Key words: internal ballistics; wave; water surface launch; dynamic characteristics

在现代潜射技术中,从弹体是否直接接触水中环境可分为湿式发射和干式发射。水面无人发射平台是一种新型的干式发射系统,其工作过程主要分为两个阶段:发射平台在深水区域释放,受浮力作用向水面运动;当发射平台到达水面后,火药燃气将载体弹射出筒。这种发射系统具有结构简单、隐蔽性强等优点,而且具有独特的水下可部署性,有重要的战略意义^[1]。由于发射过程在自由液面进行,海浪的扰动将直接影响到发射平台的姿态稳定性,若载体发射时无法达到预定要求,将导致发射失败。因此,深入开展波浪扰动下水面发射特性研究非常必要。

目前,国外关于无人水面发射的研究较少,主要针对水下发射跨介质运动^[2]和空中分离问题^[3]。国内有较多学者开展了水面发射的相关研究。彭正梁^[4]从适配器结构参数、流体作用力、助推器等影响因素出发,建立了航行体出水分离的三维弹道方程。李晶等^[5]基于多刚体动力学,针对筒式保护结构下的导弹出水分离过程,对复杂水动力环境下的两刚体相对运动过程进行数值仿真,并通过试验数据进行了对比修正。顾媛媛等^[6]采用切片法分析水面分离时浮筒和航行器的受力情况,建立了浮筒与航行器的运动模型,通过仿真得到其动力学参数变化。以上研究缺乏对液体相的模拟,在处理水动力问题时采取势流理论等简化的液体流动模型。随着计算机技术的发展,通过计算流体力学对流固耦合模型进行计算的方式得到广泛应用。曾培高等^[7]采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型、Mixture 多相流模型以及动态分层技术,建立考虑上浮速度影响的弹、筒内弹道弹射模型,并研究发射筒出水速度对水面发射内弹道性能的影响。陆辰昱等^[8]建立了自由液面模型和六自由度运动方程,通过数值模拟耦合求解了运载器式潜射导弹的水面分离运动,对不同海况条件以及出水角度下潜射导弹的水面分离运动特性进行了对比研究。刘冰等^[9-10]采用 RNG 湍流模型和 VOF 模型,基于分数容积障碍网格法,建立含适配器的运载器式潜射导弹水面分离耦合模型,数值模拟了运载器出水过程中不同的导弹弹射起始高

度、初始姿态角对动平台分离特性的影响。以上研究通过 CFD 方法可以较为精确地获得水面分离发射的压力场分布,但该方法计算周期较长、过程复杂,且没有同时考虑发射筒姿态角和内弹道燃气推力的影响。

本文针对水面发射系统对发射筒姿态稳定的需求,提出了一种新型的上浮式水面发射平台。发射平台上浮至水面后,通过浮囊对发射筒的姿态进行修正,采用平衡发射的方式改善发射过程中发射筒姿态角的剧烈变化。通过数值仿真研究发射平台所面临的波浪扰动以及分离扰动等问题。通过仿真模型的计算,可以得到不同初始姿态、不同海况参数下,发射前、后载体与平台的质心位移、姿态角及轴向速度等关键参数的变化。

1 发射系统总体描述

1.1 发射系统与发射过程

水面无人发射平台是一种新型的干式发射系统,主要由发射筒、浮囊、载体和平衡体等部件构成。浮囊充气后,在波浪冲击下变形较小,可视为刚体,发射筒与浮囊之间为刚性连接。载体和平衡体通过锁定销与发射筒固定。其工作过程主要分为两个阶段:发射平台在深水区域释放,受浮力作用向水面运动;当发射平台到达水面后,浮囊产生的恢复力矩可以对发射过程中筒的姿态进行修正。发射开始后,火药迅速燃烧,当药室压力达到挤进压力时,载体和平衡体上的锁定销被剪断,火药气体推动载体向上运动,同时平衡体受到反向推力向下运动,当载体出筒后完成水面发射过程。

1.2 坐标系建立

如图 1 所示,建立惯性坐标系 $OXYZ$, OX 轴方向为波浪方向, OZ 轴方向垂直向上, OY 轴由右手坐标系确定。分别建立发射筒坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 、载体坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$ 和平衡体坐标系 $O_3X_3Y_3Z_3$, 其中 O_1 位于发射筒主体的质心, O_1X_1 轴沿发射筒切向, O_1Z_1 轴沿发射筒轴向, O_1Y_1 轴由右手坐标系确定。 $O_2X_2Y_2Z_2$ 与 $O_3X_3Y_3Z_3$ 同理。

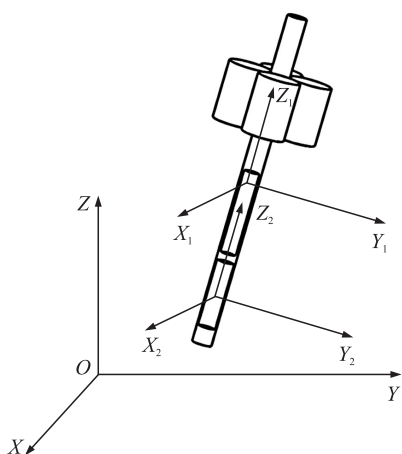


图1 坐标系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coordinate systems

2 发射系统动力学模型

2.1 动力学方程

假设平台整体为刚性体。由于发射筒坐标系、载体坐标系和平衡体坐标系均为固结在各刚体上的连体坐标系,使用连体坐标系 $oxyz$ 进行统一表述。将质心运动方程在连体坐标系下展开,其表达式为

$$\begin{cases} m \left(\frac{dv_x}{dt} + v_z \omega_y - v_y \omega_z \right) = \sum F_x \\ m \left(\frac{dv_y}{dt} + v_x \omega_z - v_z \omega_x \right) = \sum F_y \\ m \left(\frac{dv_z}{dt} + v_y \omega_x - v_x \omega_y \right) = \sum F_z \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为发射筒的质量; v_x, v_y, v_z 为速度在连体坐标系上的投影; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 为角速度在连体坐标系上的投影; F_x, F_y, F_z 为外力在连体坐标系下各个方向的分力。

平台绕质心转动的动力学方程需要在连体坐标系下求解,主要原因是平台的转动惯量在此坐标系中一直是常值。其绕质心运动的动力学方程在连体坐标系下的表达式为

$$\begin{cases} I_x \frac{d\omega_x}{dt} + (I_z - I_y) \omega_y \omega_z = \sum M_x \\ I_y \frac{d\omega_y}{dt} + (I_x - I_z) \omega_x \omega_z = \sum M_y \\ I_z \frac{d\omega_z}{dt} + (I_y - I_x) \omega_x \omega_y = \sum M_z \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_x, I_y, I_z 为发射筒在连体坐标系下各个方向的转动惯量; M_x, M_y, M_z 为外力矩在连体坐标系下各

个方向的分力矩。

2.2 运动学方程

通过求解平台质心运动的运动学方程和绕质心转动的运动学方程,可以获取每一个时间步平台质心的位置及运动姿态角。

令 X_i, Y_i, Z_i 分别为连体坐标系原点 o_i 在惯性坐标系下的值,则有质心运动的运动学方程为

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} + \int_0^t \mathbf{A} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} dt \quad (3)$$

式中: $\mathbf{A}$ 为连体系到惯性系的转换矩阵。

令惯性坐标系与连体坐标系之间的欧拉角分别为偏转角 θ 、偏航角 ψ 和滚转角 γ ,建立与求解惯性坐标系下平台绕质心转动的运动学方程的目标是确认平台相对地面的运动姿态角,其表达式为

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = \omega_x + \tan\theta(\omega_y \sin\gamma + \omega_z \cos\gamma) \\ \dot{\theta} = \omega_y \cos\gamma - \omega_z \sin\gamma \\ \dot{\psi} = (\omega_y \sin\gamma + \omega_z \cos\gamma) / \cos\theta \end{cases} \quad (4)$$

2.3 受力分析

假设发射平台平面对称分布在水面上,在理想情况下忽略由波流引起的平台自转,则发射平台在线性波浪下的运动可以简化到二维平面内,主要包括 x 向位移、 z 向位移和偏转角 θ 。

在发射过程中,平台所受外力主要包括:重力、浮力,适配器作用力和水动力。载体所受的外力主要包括:重力、内弹道作用力和适配器作用力。平衡体所受的外力主要包括:重力、内弹道作用力、适配器作用力和水动力。下面对这些力进行具体分析。

2.3.1 重力

发射系统各部件所受的重力大小是不变的,方向铅垂向下,在连体坐标系中不产生力矩。

2.3.2 浮力

平台受到的浮力是铅垂向上的,力的大小为平台排开水所受的重力。当平台产生偏转角后,平台的浮心与质心不重合,浮力产生力矩。在发射过程中浮力和浮力矩是不断变化的^[11]。

浮力的计算公式为

$$F_f = \rho g \pi \int_L r^2 dz \quad (5)$$

浮心坐标的计算公式为

$$z_f = \frac{\rho g \pi \int_L z r^2 dz}{F_f} \quad (6)$$

式中: ρ 为流体密度, r 为平台在高度为 z 处的半径, L 为平台浸水部分的等效长度。

2.3.3 轴向阻力

平台和平衡体受到的水动力按作用方向分为轴向力和法向力。其中,轴向力包括摩擦阻力和压差阻力。在连体坐标系中,当平台的攻角较小时,阻力方向与平台轴向方向基本一致。

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho v_z^2 S \quad (7)$$

式中: S 为平台浸湿部分最大横截面积, C_D 为阻力系数。由于平台初始漂浮在水面上,发射时处于相对稳定的冲击阶段,阻力系数变化不大。对于低速的平头圆柱体,平均阻力系数约为 $1.0^{[12]}$ 。

2.3.4 波浪力

波浪力是法向水动力的重要组成部分,是影响平台姿态变化的主要作用力。

根据线性波浪理论^[13],线性波的波面方程为

$$\eta = a \cos(kx - \omega t) \quad (8)$$

式中: a 为振幅,波高 $H = 2a$; $k = \frac{2\pi}{L_w}$ 为波数, L_w 为波长。

由于平台的直径远小于波长,因此适用 Morison 公式进行波浪力的计算。Morison 公式将波浪力分为绕流阻力和绕流惯性力。对于倾斜圆柱体,采用修正的 Morison 公式,将柱体沿柱体轴线离散为多个微元,分别计算每个微元上的波浪力,然后进行积分,可以得到柱体受到的波浪力^[14]。

令微元直径为 d ,波浪水质点在惯性坐标系下的速度为 u_{x0} 和 u_{z0} 。将波浪水质点的速度分解到连体坐标系,则:

$$\begin{pmatrix} u_x \\ u_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{x0} \\ u_{z0} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} U_x \\ U_z \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中: U_x 和 U_z 分别为微元的运动速度在连体坐标系下的分量。由于平台绕质心转动,微元的速度与质心速度不同,即:

$$U_x = v_x + \omega_y \times r \quad (10)$$

式中: r 为微元在连体坐标系中距平台质心的距离。

单位长度微元的水阻力 f_x 和 f_z 为

$$\begin{cases} f_x = \frac{1}{2} C_{D1} \rho A_s u_x |u_x| \\ f_z = \frac{1}{2} C_{D2} \rho A_s u_z |u_z| \end{cases} \quad (11)$$

式中: A_s 为微元在波浪速度方向的投影面积; C_{D1} 为

法向水阻力系数,对于光滑圆杆,其变化范围大约为 $1.0 \sim 1.38$; C_{D2} 为切向力系数,其取值一般为常数,且 $C_{D2} = C_f \cdot C_{D1}$,对于小尺寸光滑圆杆, $C_f = 0.02^{[15]}$ 。

微元受到的力矩采用 f_x 来计算, f_z 的方向与微元的轴线方向一致,不产生力矩。则整个平台的阻力矩:

$$M_{Hf} = \int_0^L z f_x dl \quad (12)$$

式中: z 为微元到平台质心的距离。

同理,将水质点的加速度在连体坐标系下分解为 a_x 和 a_z ,惯性力的计算公式为

$$\begin{cases} f_{Mx} = \rho V_0 \cdot a_x + C_{mx} \cdot \rho V_0 \cdot (a_x - a'_x) \\ f_{Mz} = \rho V_0 \cdot a_z + C_{mz} \cdot \rho V_0 \cdot (a_z - a'_z) \end{cases} \quad (13)$$

式中: V_0 为柱体浸水体积; a'_x , a'_z 分别为 x 和 z 方向微元的加速度分量; C_{mx} , C_{mz} 分别为 x 和 z 方向的附加质量系数,取决于柱体浸水深度和直径之比^[16-17]。

平台受到的波浪惯性力矩为

$$M_{HM} = \int_0^L z f_{Mx} dl \quad (14)$$

平台在连体坐标系下受到的波浪合力为

$$\begin{cases} F_x = \int_0^L (f_x + f_{Mx}) dl \\ F_z = \int_0^L (f_z + f_{Mz}) dl \end{cases} \quad (15)$$

2.3.5 适配器作用力

如图2所示,在载体出筒过程中,载体和适配器共同运动,随着载体逐渐离开筒口,适配器脱落,不再对平台和载体产生作用。适配器在筒内移动时,适配器和发射筒内壁的摩擦力相比载体底部推力是一个小量。因此,将适配器的摩擦力在内弹道过程中计算,不单独计算适配器对载体的轴向摩擦力。

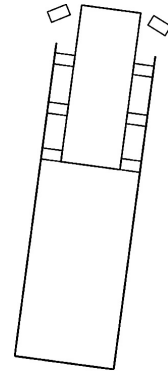


图2 适配器示意图

Fig.2 Schematic diagram of adapter

发射过程中,适配器对载体的法向作用力可分为弹性力与阻尼力。适配器的变形是一小量,可以认为适配器产生的弹性力随压缩量线性变化。阻尼力取决于适配器的阻尼系数与适配器节点的相对运动速度。当载体与发射筒内壁的间隙小于适配器的初始厚度时,适配器会产生相应的力并作用在载体的法向。

适配器作用力 F_A 的计算公式为

$$F_A = K\delta + C\dot{\delta} \quad (16)$$

式中: K 为适配器的刚度, δ 为适配器的变形量, C 为适配器的阻尼系数。

2.3.6 内弹道作用力

与经典内弹道学不同的是,平台在载体发射的过程中产生运动,且由于适配器的变形影响,导致载体与平台的姿态角并不完全相同,在这种情况下,难以通过内弹道方程描述载体和平台的运动。因此,本文只求内弹道过程中作用在载体和平台上的压力,通过动力学方程组对载体和平台的运动进行解算。

由于水面发射对火药的燃烧不产生影响,保留形状函数与燃速方程。但发射时除了具有经典内弹道的能量消耗外,还增加了平衡体受水动力引起的能量消耗,因此有:

$$\begin{cases} \psi = \chi Z(1 + \lambda Z + \mu Z^2) \\ \frac{dZ}{dt} = \frac{u_1}{e_1} p^n \\ \frac{Sp(l_1 + l_2 + l_\psi)}{\theta} = \frac{f\omega\psi}{\theta} - \frac{\varphi}{2} m_1 (v_1^2 - v_0^2) + \\ \Delta E_{p1} - \frac{\varphi}{2} m_2 (v_2^2 - v_0^2) + \Delta E_{p2} + W_F + W_w \end{cases} \quad (17)$$

式中: ψ 为火药质量燃去百分数; χ, λ, μ 为火药形状特征量; 相对厚度 $Z = e/e_1$, 表示药粒已燃厚度 e 与火药弧厚 e_1 的比值; u_1 为火药燃速系数; n 为火药燃速指数; S 为发射筒横截面积; v_0 为初始速度; v_1 和 v_2 分别为载体和平衡体的轴向速度; p 为发射筒内平均压力; m_1 和 m_2 分别为弹丸和平衡体的质量; φ 为次要功计算系数; f 为火药力; ω 为装药质量; l_ψ 为药室自由容积缩径长; ΔE_{p1} 和 ΔE_{p2} 分别为载体和平衡体的重力势能变化量; l_1 和 l_2 分别为载体和平衡体在轴向上的位移; W_F 和 W_w 分别为浮力和水动力做功。通过计算上式,可以得到发射过程中作用于载体与平台上的内弹道作用力,代入到动力学方程组中,即可求解内弹道问题。

3 仿真分析

3.1 仿真初始条件

发射平台在波浪扰动下的运动响应受多个因素共同影响,分析过程中采用线性波浪理论,设置波浪的传播方向为 x 正方向,水深 5 m。控制发射时浮囊中部处于海浪波节的位置附近,如图 3 所示。

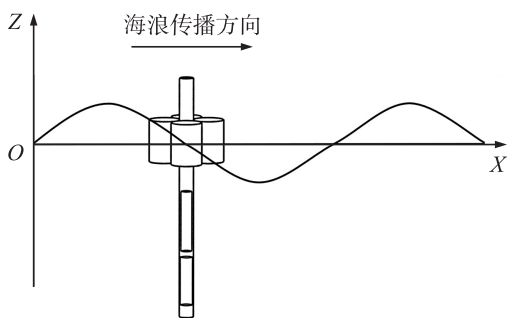


图3 发射平台初始位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the initial position of the launch platform

设定平台逆时针偏转为正,主装药采用 3/1 发射药,发射系统的主要参数如表 1 所示。经过仿真计算,载体和平衡体几乎同时出筒,满足平衡发射系统的工作要求。

表1 发射系统主要参数

Table 1 Main parameters of the launching system

发射筒 口径/m	发射筒 长度/m	平台质 量/kg	载体质 量/kg	平衡体 质量/kg	适配器 厚度/mm
0.1	2	31.477	8.588	24.662	5

3.2 不同发射方式对发射系统的影响

令发射系统的初始角度为 0° , 初始速度为 0。使用平衡发射和正常发射 2 种发射方式进行仿真。正常发射时载体底部密封,火药气体推动载体和平台运动。

图 4 给出了不同发射方式下平台的偏转角变化曲线,表 2 给出了不同发射方式下平台的最大偏转角和最大姿态变化率。整个发射过程仅用时约 20 ms,且浮囊产生的恢复力矩有效抑制了平台偏转,因此平衡发射与正常发射的平台偏转角均维持在较小范围。正常发射工况下的平台偏转角达到 -0.19° 左右,平衡发射工况下的平台偏转角达到 -0.015° 左右,较正常发射工况时大幅减小。这主要是由于正常发射过程中,内弹道作用力使平台产生较大的加速度,导致其受到的惯性力矩显著大于平衡发射工况;且平衡发射时由于平衡体的配重,发射平台的重心更低。

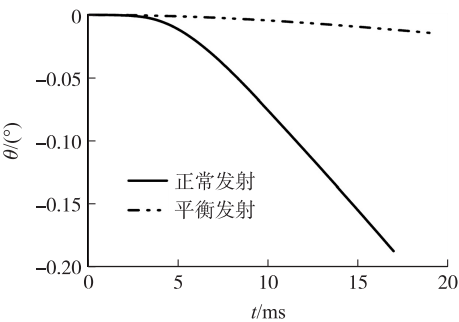


图4 不同发射方式下平台偏转角曲线

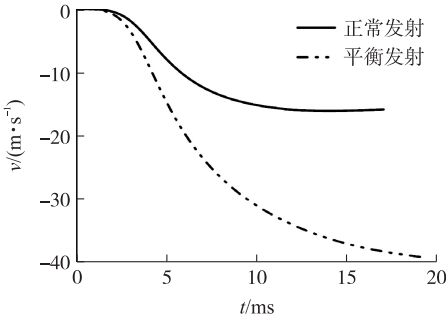
Fig. 4 Curves of platform deflection angle under different launching methods

表2 不同发射方式下的仿真结果

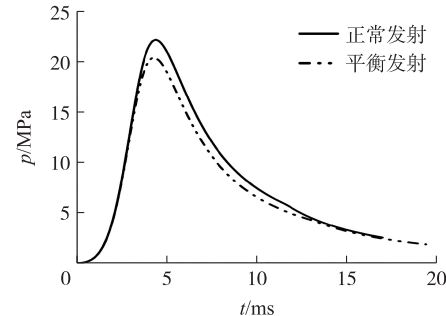
Table 2 Simulation results under different launching methods

发射方式	最大偏转角/(°)	最大姿态变化率/(rad·s ⁻¹)
正常发射	0.189	0.5
平衡发射	0.015	0.023

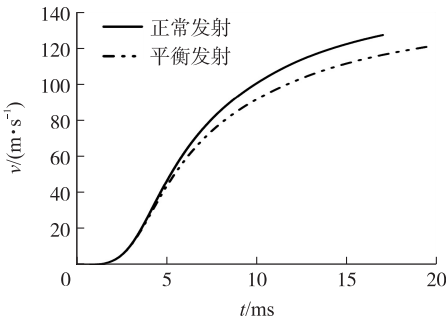
图5给出了不同发射方式下的内弹道曲线。



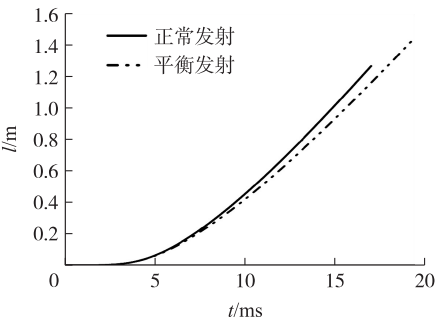
(a) 平台和平衡体轴向速度曲线



(b) 膛压曲线



(c) 载体轴向速度曲线



(d) 载体轴向位移曲线

图5 不同发射方式下的内弹道曲线

Fig. 5 Curves of internal ballistics under different launching methods

从图5(a)可以看出,正常发射工况下,水动力对平台的轴向运动影响显著,速度仅达到-15 m/s;平衡发射工况下,平衡体速度可达到-40 m/s。因此,正常发射工况下弹后空间增长速率较低。从图5(b)可以看出,正常发射的膛压峰值高于平衡发射;由于载体受到平台的保护,轴向上只受到内弹道的压力作用。从图5(c)可以看出,正常发射时载体速度高于平衡发射。从图5(d)可以看出,正常发射时平台向水下运动,载体出筒行程较平衡发射更短,发射过程用时更少。

3.3 不同海浪等级对发射系统的影响

令平台的初始偏转角为0°,初始速度为0。研究不同海浪等级对平衡发射的影响。不同等级的海浪通过设置不同的波长、波高实现。本文主要考虑前5级海浪,波浪参数如表3所示^[18]。

Table 3 Parameters of waves at all levels		
海浪等级	波高/m	波长/m
2级	0.3	10
3级	0.9	18
4级	2.0	32
5级	3.5	46

图6和图7给出了不同海浪等级下平台与载体偏转角的变化规律。由于波浪沿x方向传播,且发射系统初始位于波节附近,4种波浪等级下平台的偏转角均呈现从0°逐渐减小的趋势。不同等级波浪对平台的影响存在差异,波浪等级越大,对平台偏转角的影响越大。在2级和3级海况下,平台受到的影响较小;在4级和5级海况时,由于波高增大,平台受到的影响显著增强。由图7可以看出,在适配器作用力下,载体前15 ms的偏转角与平台保持高度一致。随着载体逐渐脱离平台,适配器开始脱落并引发载体震荡,当仅剩载体尾部的适配器作用

时,震荡幅度达到峰值状态。

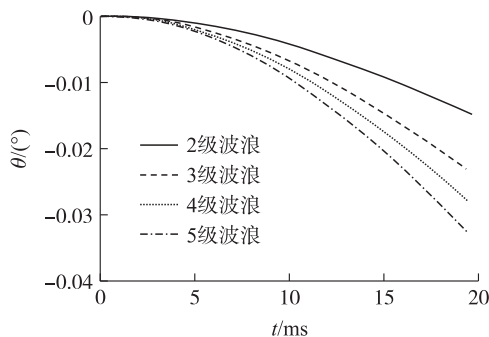


图 6 不同海浪等级下平台偏转角曲线

Fig. 6 Curves of the platform deflection angle under different wave levels

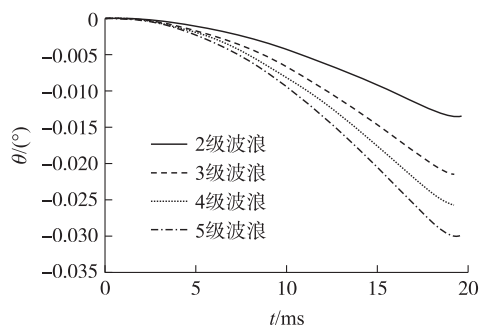
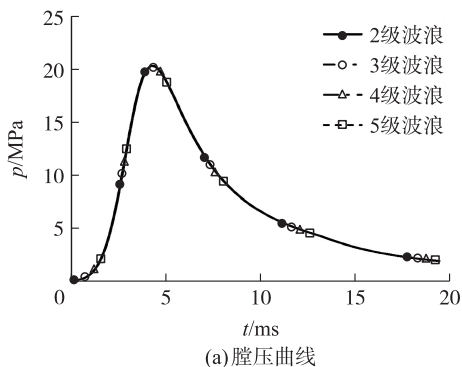


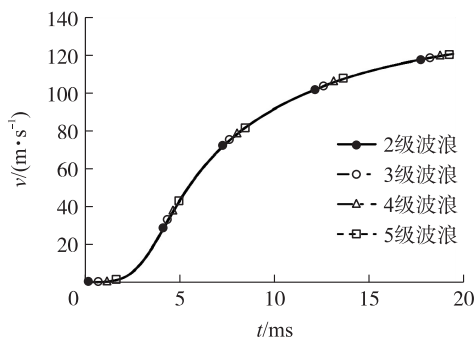
图 7 不同海浪等级下载体偏转角曲线

Fig. 7 Curves of the carrier deflection angle under different wave levels

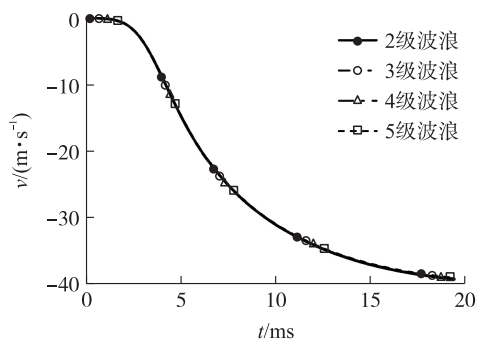
图 8 给出了不同波浪等级下平衡发射的内弹道曲线。



(a) 膛压曲线



(b) 载体轴向速度曲线



(c) 平衡体轴向速度曲线

图 8 不同海浪等级下的内弹道曲线

Fig. 8 Curves of internal ballistics under different wave levels

不同波浪等级下,水质点的速度和加速度存在差异,但由此产生的水动力变化与内弹道压力相比仍极小。由图 8(a)可知,不同波浪等级下内弹道膛压基本一致,膛压峰值均为 20 MPa 左右。载体受到平台的保护,轴向上只受到内弹道的压力作用,速度增加到 120 m/s 左右,且各波浪等级下其轴向速度基本一致。平衡体的速度达到 -40 m/s 左右,不同海况等级对平衡体的轴向速度几乎无影响。

不同波浪等级下发射结束时的具体仿真结果如表 4 所示。

表 4 不同海浪等级下的仿真结果

Table 4 Simulation results under different wave levels

海浪等级	平台偏转角/(°)	载体偏转角/(°)	平衡体速度/(m·s ⁻¹)	载体速度/(m·s ⁻¹)
2 级	0.015	0.014	-39.290	120.467
3 级	0.024	0.021	-39.250	120.473
4 级	0.028	0.026	-39.208	120.478
5 级	0.033	0.030	-39.173	120.482

3.4 不同初始偏角对发射系统的影响

海浪对发射系统的影响不仅与浪级有关,还与发射初始偏转角有一定关系。令平台的初始偏转角分别为 -20°, -10°, 0° 和 10°, 海况等级为 2 级,其余条件不变。

图 9 和图 10 给出了不同初始偏角下平台与载体的偏转角变化率。从图 9 可以看出,不同初始偏角对发射过程中平台的偏转有不同的影响。初始偏角为 0° 时,平台受到 x 向波浪力,产生较小的负向偏转;初始偏角为 -10° 时,平台受到浮囊提供的恢复力矩,产生正向偏转;初始偏角为 -20° 时,右侧浮囊的吃水深度较初始偏角为 10° 时有所增加,平台的正向偏转继续增大;初始偏角为 10° 时,浮囊位置和波浪相位导致左侧浮囊吃水深度较大,平台产生

负向偏转,且幅度最大。从图 10 可以看出,在适配器的作用力下,15 ms 前载体与平台的偏转角几乎相同,随着载体逐渐运动离开平台,适配器逐渐脱落,导致载体产生震荡,发射系统偏转角的变化率越大,载体产生的震荡越剧烈。

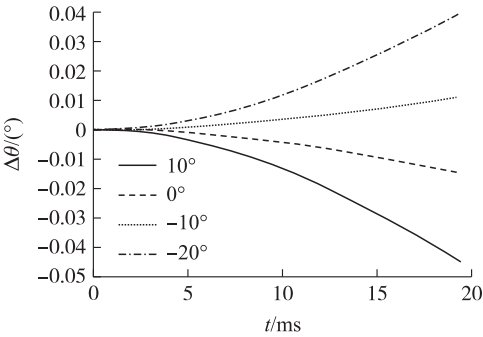


图 9 不同初始偏角下平台偏转角曲线
Fig. 9 Curves of the platform deflection angle under different initial declination

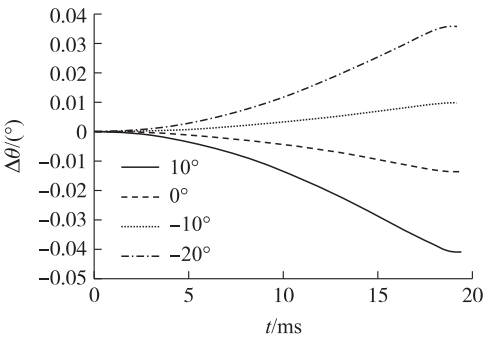
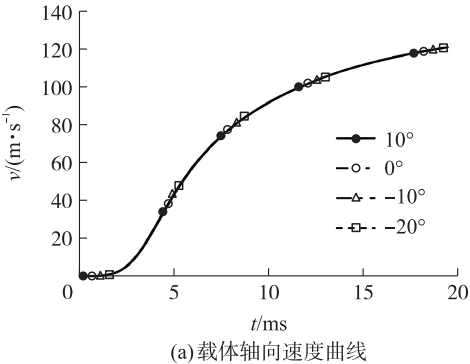
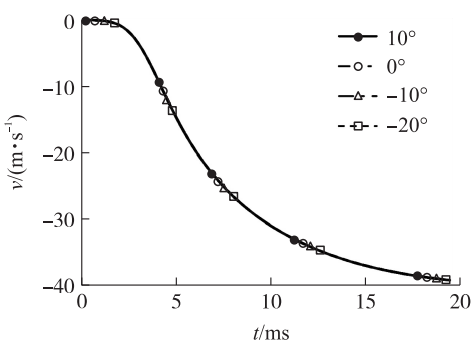


图 10 不同初始偏角下载体偏转角曲线
Fig. 10 Curves of the carrier deflection angle under different initial declination

图 11 给出了不同初始偏角下平衡体和载体的轴向速度曲线。不同初始偏角下,水质点的速度和加速度存在差异,但由此产生的水动力变化与内弹道压力相比仍极小。从图 11 可以看出,不同初始偏角下,载体和平衡体的轴向速度基本一致。



(a) 载体轴向速度曲线



(b) 平衡体轴向速度曲线

图 11 不同初始偏角下的速度曲线
Fig. 11 Curves of the velocity under different initial declination

4 结束语

本文建立了波浪扰动下水面发射的动力学模型,并提出了水面平衡发射的新型发射方式。在此基础上,对处于波节位置的发射筒在不同波浪等级以及初始偏角下水面平衡发射的动力学特性进行了仿真,主要结论如下:

- ①平衡发射时平台的偏转角较正常发射时显著减小,主要原因是平衡发射时平台加速度小,水惯性力对平台的影响较小。正常发射时弹后空间增长速率较低,膛压峰值和载体速度高于平衡发射。
- ②不同波浪等级对平衡发射系统的影响主要体现在平台的偏转角上,波浪等级越高,平台的偏转角越大,导致载体在出筒过程中产生更强烈的震荡;由于水动力与内弹道压力相比较小,不同波浪等级对发射系统的内弹道特性几乎无影响。
- ③当平台有初始偏角时,受浮囊恢复力矩的影响,平台逐渐向垂直方向偏转,偏转幅度与初始偏角大小以及波浪相位有关。浮囊的吃水深度越大,平台的偏转幅度越大。不同初始偏角对对发射系统的内弹道特性几乎无影响。

参考文献

[1] 马溢清,李欣. 潜射导弹水下垂直发射方式综述[J]. 战术导弹技术,2010(3):124-128.
MA Yiqing,LI Xin. Review on underwater vertical-launching mode for submarine-launched missiles[J]. Tactical Missile Technology, 2010(3):124-128. (in Chinese)

[2] SUN P N,ZHANG A M,MARRONE S, et al. An accurate and efficient SPH modeling of the water entry of circular cylinders[J]. Applied Ocean Research,2018,72:60-75.

[3] PAMADI B N,NEIRYNCK T A,HOTCHKO N J,et al. Simulation

- and analysis of stage separation of two-stage reusable launch vehicles[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2007, 44(1): 66-80.
- [4] 彭正梁. 运载器水下发射及弹器水面分离弹道计算[D]. 北京:中国舰船研究院, 2011.
PENG Zhengliang. The numerical simulation on the trajectory of capsule underwater-launching and capsule separating near the free surface[D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy, 2011. (in Chinese)
- [5] 李晶, 李吉, 陆宏志. 基于筒式保护结构的导弹出水分离过程研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2016, 2(1): 13-16.
LI Jing, LI Ji, LU Hongzhi. Investigation on water surfacing process separation of submarine missile-in-container[J]. Missiles and Space Vehicles, 2016, 2(1): 13-16. (in Chinese)
- [6] 顾媛媛, 薛志刚, 宋志平. 航行器水下筒式发射过程中浮筒水面分离运动仿真[J]. 弹道学报, 2018, 30(2): 86-89.
GU Yuanyuan, XUE Zhigang, SONG Zhiping. Simulation on water-surface separation of vehicle-in-container launched under water[J]. Journal of Ballistics, 2018, 30(2): 86-89. (in Chinese)
- [7] 曾培高, 姜毅, 杨哩娜. 上浮式水面发射筒弹射内弹道特性[J]. 兵工学报, 2022, 43(6): 1266-1276.
ZENG Peigao, JIANG Yi, YANG Lina. Interior ballistics of independent water-surface launching canister[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(6): 1266-1276. (in Chinese)
- [8] 陆辰昱, 王鑫, 周志坛, 等. 运载器式潜射导弹水面分离运动特性[J]. 宇航学报, 2021, 42(4): 496-503.
LU Chenyu, WANG Xin, ZHOU Zhitan, et al. Separating kinematic characteristics of submarine-launched missile near the free surface[J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(4): 496-503. (in Chinese)
- [9] 刘冰, 刘科, 薛瑞娟, 等. 含弹性适配器的运载器式潜射导弹分离研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(3): 136-144.
LIU Bing, LIU Ke, XUE Ruijuan, et al. Research on separation of submarine-launched missile with elastic adapter[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(3): 136-144. (in Chinese)
- [10] 刘冰, 程栋, 卢丙举, 等. 含适配器的潜射导弹载体跨介质发射分离建模与仿真[J]. 兵工学报, 2023, 44(5): 1237-1250.
LIU Bing, CHENG Dong, LU Bingju, et al. Modeling and simulation of transmedia separation of missile ejected from carrier with adapter[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(5): 1237-1250. (in Chinese)
- [11] 卢昱锦. 无动力运载器水下发射弹道建模与数值模拟研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2018.
LU Yujin. Trajectory modeling and numerical simulation of unpowered carrier underwater launching[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [12] 袁阔. 典型轴对称航行体入水冲击及动力响应特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2024.
YUAN Kuo. Investigation on impact and dynamic response characteristics of the typical axisymmetric vehicle water entry[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2024. (in Chinese)
- [13] 王树青, 梁丙臣. 海洋工程波浪力学[M]. 青岛:中国海洋大学出版社, 2013: 13-17.
WANG Shuqing, LIANG Bingchen. Wave mechanics for ocean engineering[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2013: 13-17. (in Chinese)
- [14] LI Y, GUI F, TENG B. Hydrodynamic behavior of a straight floating pipe under wave conditions[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(3-4): 552-559.
- [15] 谢克峰, 查冰婷, 张合, 等. 水面小尺度漂浮平台动力学响应分析[J]. 船舶力学, 2019, 23(5): 548-557.
XIE Kefeng, ZHA Bingting, ZHANG He, et al. Analysis on dynamics response of offshore small floating platform[J]. Journal of Ship Mechanics, 2019, 23(5): 548-557. (in Chinese)
- [16] 倪宝玉, 孙士丽, 孙龙泉, 等. 弹体落水过程中附加质量变化影响研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(14): 171-176.
NI Baoyu, SUN Shili, SUN Longquan, et al. Influence of additive mass variation of a missile during its entering into water[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(14): 171-176. (in Chinese)
- [17] 张晓强, 冯金富, 吝科, 等. 跨介质运动物体的附加质量[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(4): 821-828.
ZHANG Xiaoqiang, FENG Jinfu, LIN Ke, et al. Added mass of trans-media moving object[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(4): 821-828. (in Chinese)
- [18] 马如相, 洪亮, 刘新月, 等. 不同海况等级对某水下航行体发射影响的仿真分析[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(7): 203-208, 246.
MA Ruxiang, HONG Liang, LIU Xinyue, et al. Simulation analysis of impact of different sea conditions on launch of a submarine-launched vehicle[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(7): 203-208, 246. (in Chinese)