



舰载导弹垂直冷发射耦合内弹道建模与仿真

李国钦*, 王合久, 何小英
(北京机械设备研究所, 北京 100854)

摘要: 针对舰船摇摆条件下导弹的垂直冷发射动力学问题, 基于经典内弹道理论, 建立了考虑舰船摇摆运动耦合作用的导弹垂直冷发射内弹道理论模型, 并编写了仿真程序。采用耦合与非耦合内弹道模型, 对典型发射场景中舰船单向运动和复合运动下的内弹道特性进行计算与对比分析。结果表明: 6 级海况下, 相比于非耦合模型, 舰船单独作横摇运动时, 耦合模型得到的导弹出筒速度波动范围的上、下限分别变化了 -0.04 m/s 和 0.05 m/s; 舰船单独作纵摇运动时, 耦合模型的出筒速度波动范围的上、下限分别变化了 -0.46 m/s 和 0.48 m/s; 舰船单独作垂荡运动时, 耦合模型的出筒速度波动范围的上、下限分别变化了 -0.43 m/s 和 0.47 m/s; 舰船作纵摇、横摇和垂荡复合运动时, 耦合模型的出筒速度波动范围的上、下限分别变化了 -1.02 m/s 和 0.98 m/s。相对于非耦合模型, 该文建立的耦合内弹道模型, 导弹出筒速度的波动范围明显收窄, 可为舰船运动下的导弹垂直冷发射内弹道仿真计算提供参考。

关键词: 舰船运动; 舰载导弹; 内弹道; 垂直冷发射

中图分类号: TJ762.3 文献标志码: A 文章编号: 1004-499X(2025)02-0122-07

Modeling and Simulation of Coupled Interior Ballistics of Vertical Cold Launch Ship-borne Missiles

LI Guoqin*, WANG Hejiu, HE Xiaoying
(Beijing Institute of Mechanical Equipment, Beijing 100854, China)

Abstract: Aiming at the dynamic characteristics of missile vertical cold launch under ship swaying motion, based on the theory of interior ballistics, a coupled interior ballistic theoretical model under ship swaying motion was established. Based on coupled and uncoupled interior ballistic models, interior ballistic calculations of ship unidirectional and composite motion were carried out for typical scenarios. The results imply that under six-level sea condition, compared to the uncoupled model, the upper and lower limit of the range of the outlet velocity obtained by the coupled model change by -0.04 m/s and 0.05 m/s, when the ship performs rolling motion. When the ship performs pitching motion, the upper and lower limit of the range of the outlet velocity obtained by the coupled model change by -0.46 m/s and 0.48 m/s. When the ship performs heaving motion, the upper and lower limit of the range of the outlet velocity obtained by the coupled model change by -0.43 m/s and 0.47 m/s. When the ship performs a composite motion of roll, pitch and heave, compared to uncoupled model, the upper and lower limit of the range of the outlet velocity obtained by the coupled model change by -1.02 m/s and 0.98 m/s. Compared to the uncoupled model, the range of outlet velocity obtained by the coupled model is significantly narrowed. The model can provide reference for the simulation of vertical cold launch interior ballistics of missiles under ship motion.

Key words: ship motion; ship-borne missile; interior ballistics; vertical cold launch

随着攻防技术的发展,舰载导弹在海防领域的重要性日益明显。许多国家在舰船上广泛采用了导弹垂直发射系统^[1-3]。受舰船摇摆的影响,舰载导弹的动力学特性发生改变。为保证舰载导弹发射的安全性,其出筒运动参数应当维持在一定的范围内。因此,有必要对舰载摇摆运动耦合作用下的导弹发射过程进行研究。

目前,针对舰载导弹发射的数值仿真方面的研究,学者们通常通过建立舰载导弹运动模型^[4-7]或借助动力学软件^[8-11]开展。对于垂直冷发射的舰载导弹,导弹发射过程的运动不仅受舰船运动的影响,同时也与内弹道特性相互作用。然而在对舰载导弹运动的有关研究中,大多数研究采用曲线拟合或建立函数等方式设置弹射曲线,忽略了舰船运动对内弹道特性的影响,以及导弹发射过程运动与内弹道特性的耦合关系。这类非耦合模型无法很好地描述舰载导弹的垂直冷发射过程。

为了研究舰船耦合运动下的导弹垂直冷发射过程,本文以舰载导弹垂直冷发射系统为研究对象,基于零维内弹道模型,考虑舰船运动对内弹道特性的影响以及导弹发射过程运动与内弹道特性的相互作用,建立舰船摇摆下的导弹垂直冷发射耦合内弹道模型(以下简称“耦合模型”),并编写仿真程序进行仿真分析。

1 坐标系与舰船运动模型的建立

1.1 坐标系

为研究舰船摇摆下的导弹内弹道模型,建立如图1所示的相关坐标系。

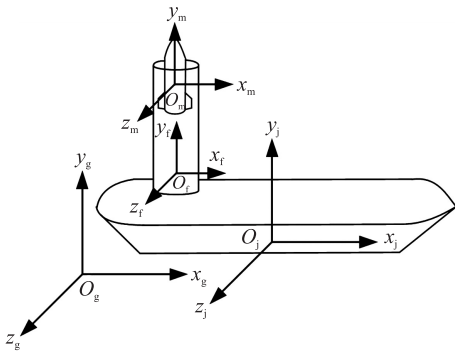


图1 舰载导弹运动的坐标系

Fig. 1 Coordinate systems of ship-borne missile motion

假设舰船、导弹和发射筒均为刚体,导弹发射方式为垂直冷发射,发射筒固联于舰船,忽略导弹相对发射筒产生的转角和角速度,导弹在完全离开发射

筒前只在发射筒的轴线上运动。

如图1所示, $O_gx_gy_gz_g$ 为大地坐标系, $O_jx_jy_jz_j$ 为舰船坐标系, $O_fx_fy_fz_f$ 为发射坐标系, $O_mx_my_mz_m$ 为弹体坐标系。其中,大地坐标系是惯性坐标系;舰船坐标系与舰船固联,其原点位于舰船摇心;发射坐标系与发射筒固联,其原点位于初始时刻导弹的质心处, O_my_m 轴与发射筒轴线重合,指向发射筒出口方向;弹体坐标系与导弹固联,其原点位于导弹质心,初始时刻与发射坐标系重合。

1.2 舰船运动模型

舰船在海浪的作用下作六自由度运动,这些运动分别为纵荡、横荡、垂荡、纵摇、横摇和艏摇,其中舰船的纵荡、横荡以及艏摇对导弹的发射影响很小^[12]。因此,本文只考虑舰船的垂荡、纵摇和横摇运动,并假设3种运动间不存在耦合关系。垂荡、纵摇和横摇的运动方程均可描述为正弦函数的形式^[13]:

$$\begin{cases} \eta = \eta_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T_\eta}t + t_\eta\right) \\ \theta = \theta_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T_\theta}t + t_\theta\right) \\ \gamma = \gamma_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T_\gamma}t + t_\gamma\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: η 、 θ 和 γ 分别对应垂荡、纵摆和横摇运动时的角度, η_0 、 θ_0 和 γ_0 分别为垂荡、纵摆和横摇运动幅度; T_η 、 T_θ 和 T_γ 分别为垂荡、纵摇和横摇运动的周期; t_η 、 t_θ 和 t_γ 分别为垂荡、纵摇和横摇运动的初相位。

在舰船坐标系,舰船的角速度为

$$\begin{cases} \omega_{jx} = \dot{\gamma} \\ \omega_{jy} = \dot{\theta} \sin \gamma \\ \omega_{jz} = \dot{\theta} \cos \gamma \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω_{jx} 、 ω_{jy} 和 ω_{jz} 分别为舰船角速度在舰船坐标系的投影分量。

在舰船坐标系,舰船的角加速度为

$$\begin{cases} \varepsilon_{jx} = \ddot{\gamma} \\ \varepsilon_{jy} = \ddot{\theta} \sin \gamma + \dot{\gamma} \dot{\theta} \cos \gamma \\ \varepsilon_{jz} = \ddot{\theta} \cos \gamma - \dot{\gamma} \dot{\theta} \sin \gamma \end{cases} \quad (3)$$

式中: ε_{jx} 、 ε_{jy} 和 ε_{jz} 分别为舰船角加速度在舰船坐标系的投影分量。

由于发射筒与舰船固联,因此弹射器与舰船的加速度、角速度和角加速度相等。

2 舰载导弹垂直冷发射耦合内弹道模型

2.1 舰船摇摆下的高压室方程组

在零维内弹道模型的假设下,高压室的压强、温度和自由容积等参数均与发射筒的运动无关。因此,舰船运动下的高压室方程组与零维内弹道模型的高压室方程组^[14]一致:

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = \frac{RT_1}{V_1}(\dot{m}_b - \dot{m}_{t1}) \\ V_1 = V_{10} - \frac{m_p}{\rho_p} \left(1 - \frac{m_b}{m_p}\right) \\ \dot{m}_b = \rho_p S_b u \\ \dot{m}_{t1} = \varphi_{21} K_0 \frac{p_1 S_{t1}}{\sqrt{RT_1}} \\ \frac{de}{dt} = u \\ u = ap_1^n \\ K_0 = \sqrt{k} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: p_1 为高压室压强, R 为燃气气体常数, T_1 为高压室温度, V_1 为高压室自由容积, $\dot{m}_b$ 为燃气生成速率, $\dot{m}_{t1}$ 为高压室喷管喉部燃气流量, V_{10} 为初始时刻高压室自由容积, m_p 为装药质量, ρ_p 为火药密度, S_b 为火药燃烧面积, u 为火药燃烧线速度, φ_{21} 为高压室喷管流量修正系数, S_{t1} 为高压室喷管喉部面积, e 为火药已燃厚度, a 为燃速系数, n 为燃速压强指数, k 为燃气比热比, K_0 为与燃气比热比有关的参数。

2.2 舰船摇摆下的低压室方程

在舰船摇摆的条件下,设置于舰船上的发射筒随着舰船运动而运动,使导弹受到由舰船运动引起的过载。在发射筒轴向方向上,过载对导弹的轴向相对加速度产生作用,进而影响导弹相对于发射筒的速度。导弹相对速度的变化改变了低压室自由容积,使得低压室的压强产生了波动,最终导致导弹受到的推力发生变化,并影响导弹的相对加速度。

在舰船摇摆下的低压室方程组中,需要考虑舰船运动引起的过载对导弹运动的影响。基于零维内弹道模型的低压室方程组^[13],可得舰船摇摆下的低压室方程组:

$$\begin{cases} p_2 = \frac{m_{t1} RT_2}{V_{20} + S_2 l_{my}} \\ T_2 = \chi_2 k RT_1 - \frac{(k-1)p_2 S_2 v_{my}}{R \dot{m}_{t1}} \\ \frac{dl_{my}}{dt} = v_{my} \\ \frac{dv_{my}}{dt} = a_{ry} \end{cases} \quad (5)$$

式中: p_2 为低压室的压强, T_2 为低压室温度, V_{20} 为初始时刻低压室容积, l_{my} 为导弹相对发射筒在发射筒轴向的运动距离, v_{my} 为导弹相对发射筒在发射筒轴向的速度, χ_2 为散热修正系数; S_2 为低压室承压面积, a_{ry} 为导弹相对发射筒的加速度在发射筒轴向的投影分量。

2.3 舰船运动与内弹道耦合参数推导

耦合运动与低压室内弹道的影响通过相对加速度体现,因此需重点对导弹的相对加速度进行推导。根据加速度的合成定理,得导弹相对发射筒的加速度为

$$\mathbf{a}_r = \mathbf{a} - \mathbf{a}_k - \mathbf{a}_e \quad (6)$$

式中: $\mathbf{a}$ 为导弹的绝对加速度, $\mathbf{a}_k$ 为导弹受到的哥氏加速度, $\mathbf{a}_e$ 为导弹受到的牵连加速度。

2.3.1 牵连加速度

牵连加速度由垂荡运动引起的加速度 $\mathbf{a}_0$ 、横摇和纵摇引起的法向加速度 $\mathbf{a}_n$ 和切向加速度 $\mathbf{a}_t$ 组成,即:

$$\mathbf{a}_e = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_n + \mathbf{a}_t \quad (7)$$

根据式(7),有

$$\mathbf{a}_e = \boldsymbol{\omega}_f \times (\boldsymbol{\omega}_f \times \mathbf{r}_f) + \boldsymbol{\varepsilon}_f \times \mathbf{r}_f + \mathbf{a}_0 \quad (8)$$

式中: $\boldsymbol{\omega}_f$ 为发射筒的角速度, $\mathbf{r}_f$ 为舰船摇心到导弹质心的矢径, $\boldsymbol{\varepsilon}_f$ 为发射筒的角加速度。

2.3.2 哥氏加速度

当导弹在动系中作相对运动时,将会受到哥氏加速度的作用,即

$$\mathbf{a}_k = 2\boldsymbol{\omega}_f \times \mathbf{v}_m \quad (9)$$

式中: $\mathbf{v}_m$ 为导弹相对发射筒的速度。

2.3.3 绝对加速度

忽略气动力的影响,导弹在发射过程中受到的外力有燃气产生的推力、导弹的重力、适配器的支反力和导弹受到的摩擦力。为简化计算模型,做出如下假设:适配器的支反力垂直于发射筒的轴线;导弹的摩擦力作用于导弹质心,其大小等于导弹质量的

一定比例,方向指向发射坐标系的 $O_f y_f$ 轴负方向;推力平行于发射筒轴线。

通过受力分析,在发射坐标系下,导弹受到的合外力为

$$ma = F_e + G - F_f + F_N \quad (10)$$

式中: m 为导弹质量, F_e 为导弹受到的推力, G 为导弹受到的重力, F_f 为导弹受到的摩擦力, F_N 为导弹受到支反力。

由式(10),并结合导弹的受力分析,导弹的绝对加速度在发射坐标系的投影为

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = \frac{1}{m} \begin{pmatrix} 0 \\ p_2 S_2 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -g \sin \theta \\ -g \cos \gamma \cos \theta \\ g \sin \gamma \cos \theta \end{pmatrix} + \frac{1}{m} \begin{pmatrix} 0 \\ -\mu mg \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{1}{m} \begin{pmatrix} F_{Nx} \\ 0 \\ F_{Nz} \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中: μ 为导弹与发射筒内壁摩擦的阻力系数, g 为重力加速度常数, F_{Nx} 和 F_{Nz} 分别为支反力在发射坐标系 $O_f x_f$ 轴和 $O_f z_f$ 轴的投影。

2.3.4 相对加速度 a_r

将导弹相对发射筒的加速度投影到发射坐标系,在发射坐标系下,导弹相对弹射器的加速度为

$$a_r = \begin{pmatrix} a_{rx} \\ a_{ry} \\ a_{rz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a_{ex} \\ a_{ey} \\ a_{ez} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a_{kx} \\ a_{ky} \\ a_{kz} \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中各项矢量均投影在发射坐标系的三轴。由假设的条件,导弹只相对于弹射器作轴向方向的运动。导弹相对发射筒的速度在发射筒轴线方向的投影分量为

$$\frac{dv_{my}}{dt} = a_{ry} = \frac{p_2 S_2}{m} - g \cos \gamma \cos \theta - \mu g - a_{ey} - a_{ky} \quad (13)$$

$$a_{ey} = \ddot{\eta} \cos \theta \cos \gamma + \ddot{\theta} \cos \gamma x_1 - (\dot{\theta}^2 \cos^2 \gamma + \dot{\gamma}^2) y_1 - (\ddot{\gamma} - \dot{\theta}^2 \cos \gamma \sin \gamma) z_1 \quad (14)$$

$$a_{ky} = 2(\dot{\theta} \cos \gamma v_{mx} - \dot{\gamma} v_{mz}) \quad (15)$$

式中: x_1 、 y_1 和 z_1 分别为舰船摇心到导弹质心的矢径 r_1 在发射坐标系中的投影分量, $\ddot{\eta}$ 为垂荡运动的加速度; v_{mx} 和 v_{mz} 分别为导弹相对发射筒在发射坐标系 $O_f x_f$ 轴和 $O_f z_f$ 轴的投影分量。

由模型的假设可知,导弹相对发射筒仅在其轴线方向运动。因此有 $v_{mx} = 0$, $v_{mz} = 0$, 所以 $a_{ky} = 0$ 。

上式即为舰船摇摆下低压室方程组中的导弹相对加速度方程。

3 仿真计算与结果分析

根据舰船摇摆下的导弹垂直冷发射耦合内弹道模型,使用 Matlab 语言编写了仿真程序,与 Simulink 和 ADAMS 的联合仿真结果对比,导弹出筒的结果如表1所示,表中 v_0 为导弹相对发射筒的出筒速度。根据动基座摇摆台弹射试验测量得到的数据与运用耦合内弹道仿真程序的结果做对比(结果已无量纲化),结果偏差低于1%,程序可用于进行计算和分析。

表1 试验数据与仿真结果

Table 1 Test data and simulation results

参数	测量值	仿真值
出筒速度(相对发射筒)	v_0	$0.987 \ 1 v_0$
出筒速度(相对地面)	$1.053 \ 0 v_0$	$1.041 \ 8 v_0$

导弹出筒时相对发射筒的速度(以下简称出筒速度)是重要的发射参数,因此,本文重点对耦合模型和非耦合模型的出筒速度进行仿真研究。

3.1 舰船单向运动下的仿真结果

根据相关文献,可得船舶在不同海况下的运动幅值以及周期^[15],在4级~6级海况下,舰船的横摇、纵摇和垂荡运动的参数如表2所示。

表2 不同海况下舰船的运动参数

Table 2 Motion parameters of ships in sea states

海况	横摇幅 度/(°)	横摇周 期/s	纵摇幅 度/(°)	纵摇周 期/s	垂荡幅 度/(°)	垂荡周 期/s
4级	6	8	1.25	5	0.95	5
5级	12	8	2.5	5	1.9	5
6级	16	8	4	5	2.5	5

初始时刻,导弹质心在舰船坐标系的位置为(36 m, 8 m, -5 m)。设舰船静止时的导弹出筒速度为 v_0 。在4级~6级海况下,针对舰船单独作横摇、纵摇和垂荡运动的情况,等间距地选取若干初相位进行仿真实验。6级海况下,通过耦合和非耦合模型得到的导弹出筒速度与 v_0 的差值 Δv_{my} 随初相位的变化见图2。4~5级海况下出筒速度变化规律与在6级海况下的变化规律相似。

导弹出筒速度相对 v_0 的波动范围如表3所示。由仿真结果,可知:①相较于纵摇运动和垂荡运动,横摇运动对出筒速度的影响较小。②随着海况等级的提升,导弹出筒速度的波动范围增大,耦合模型和非耦合模型的出筒速度波动范围差距增大。③相较于非耦合模型,耦合模型的出筒速度波动范围较小。

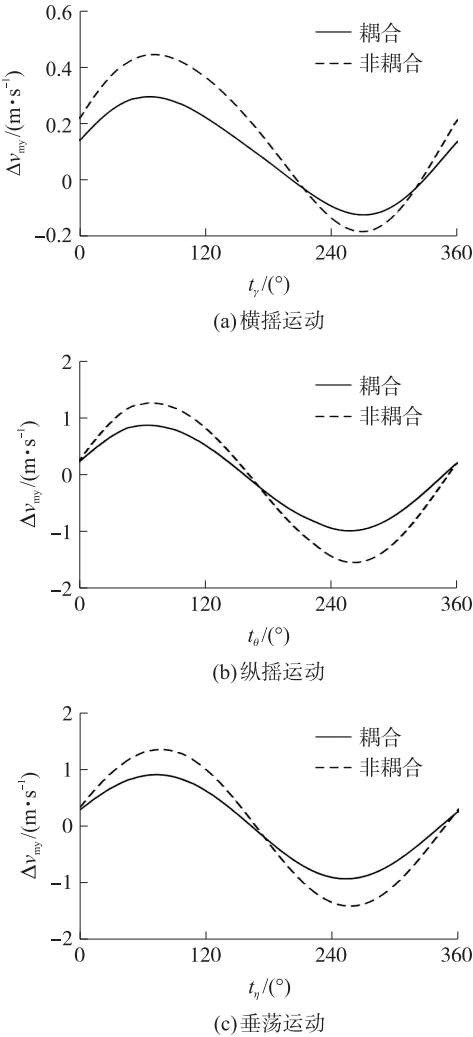


图 2 6 级海况下出筒速度随舰船运动初相位的变化

Fig. 2 Variation of outlet velocity with the initial phase of ship motion in sea state 6

表 3 单相运动下弹丸出筒速度的波动范围

Table 3 Fluctuation range of the outlet velocity of projectile under unidirectional motion

舰船单 向运动	海况 等级	$\Delta v_{my}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	
		耦合模型	非耦合模型
横摇 运动	4 级	-0.06~0.09	-0.10~0.14
	5 级	-0.11~0.20	-0.16~0.31
	6 级	-0.12~0.30	-0.18~0.45
纵摇 运动	4 级	-0.30~0.29	-0.45~0.44
	5 级	-0.60~0.59	-0.90~0.88
	6 级	-0.96~0.94	-1.44~1.40
垂荡 运动	4 级	-0.36~0.35	-0.54~0.53
	5 级	-0.72~0.70	-1.10~1.06
	6 级	-0.98~0.96	-1.45~1.39

3.2 舰船复合运动下的仿真结果

舰船的复合工况分为纵摇-垂荡复合运动、横摇-纵摇复合运动、横摇-垂荡复合运动、横摇-纵摇-垂荡复合运动。在 4 级~6 级海况下,针对各个复合工况,均匀地取若干组舰船运动的初相位组合,并使用耦合模型和非耦合模型对每个初相位组合进行仿真计算。6 级海况下,纵摇-垂荡复合运动的出筒速度仿真结果如图 3 所示,横摇-纵摇复合运动的仿真结果如图 4 所示,横摇-垂荡复合运动的仿真结果如图 5 所示。4~5 级海况下的出筒速度变化规律与图 3~图 5 类似。

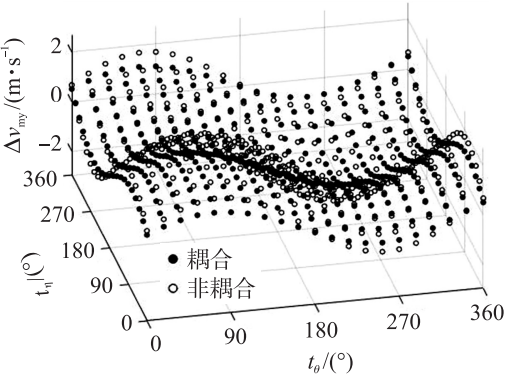


图 3 6 级海况下舰船作纵摇-垂荡复合运动时的仿真结果

Fig. 3 Simulation result of ship pitching-heaving motion in sea state 6

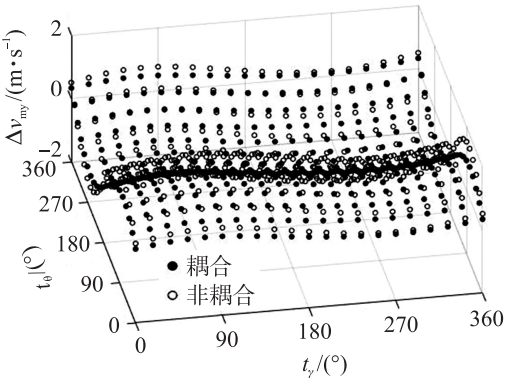


图 4 6 级海况下舰船作横摇-纵摇复合运动时的仿真结果

Fig. 4 Simulation result of ship rolling-pitching motion in sea state 6

在各复合工况下,导弹出筒速度相对 v_0 的波动变化范围如表 4 所示。

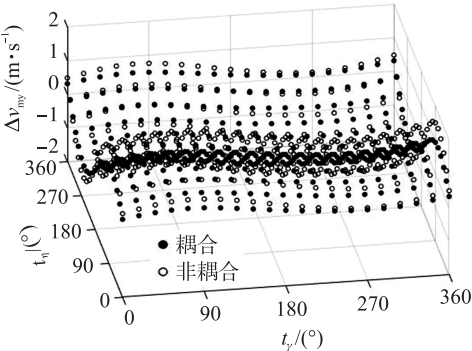


图5 6级海况下舰船作横摇-垂荡复合运动时的仿真结果

Fig.5 Simulation result of ship rolling-heaving motion in sea state 6

表4 复合运动下弹丸出筒速度波动范围

Table 4 Range of the outlet velocity of projectile under composite motion

舰船运动	海况等级	$\Delta v_{my}/(m\cdot s^{-1})$	
		耦合模型	非耦合模型
横摇-纵摇-垂荡复合运动	4级	-0.79~0.67	-1.09~0.95
	5级	-1.49~1.39	-2.20~1.99
	6级	-2.20~1.99	-3.18~3.01
纵摇-垂荡复合运动	4级	-0.73~0.58	-0.99~0.97
	5级	-1.40~1.22	-2.02~1.91
	6级	-2.03~1.76	-2.97~2.70
横摇-纵摇复合运动	4级	-0.42~0.32	-0.54~0.58
	5级	-0.76~0.71	-1.04~1.16
	6级	-1.09~1.12	-1.61~1.77
横摇-垂荡复合运动	4级	-0.49~0.38	-0.63~0.67
	5级	-0.88~0.83	-1.24~1.33
	6级	-1.10~1.11	-1.63~1.75

由仿真结果可知:①相较于非耦合模型,耦合模型的出筒速度波动范围较小。②随着海况等级的提升,导弹出筒速度的波动范围增大,耦合模型和非耦合模型的出筒速度波动范围差距增大。③相比于单向运动,舰船作复合运动时,导弹的出筒速度波动范围较大,且耦合模型和非耦合模型的出筒速度的波动范围有更大的差距。

4 结论

本文建立了舰载导弹垂直冷发射耦合内弹道模型与计算程序,通过开展舰船单向运动和复合运动的内弹道仿真分析,得到如下结论:

①相对于非耦合模型,耦合内弹道模型得到的导弹出筒速度的波动范围明显收窄。6级海况下,相比于非耦合模型,舰船单独作横摇运动时,耦合模

型的出筒速度波动范围的上、下限分别变化了-0.04 m/s 和 0.05 m/s;舰船单独作纵摇运动时,耦合模型的出筒速度波动范围的上、下限分别变化了-0.46 m/s 和 0.48 m/s;舰船单独作垂荡运动时,耦合模型的出筒速度波动范围的上、下限分别变化了-0.43 m/s 和 0.47 m/s;舰船作纵摇-横摇-垂荡复合运动时,耦合模型的出筒速度波动范围的上、下限分别变化了 -1.02 m/s 和 0.98 m/s。

②随着海况等级的提升,导弹出筒速度波动范围变大。舰船作横摇-纵摇-垂荡运动时,相较于非耦合模型,耦合模型计算得到的6级海况下的出筒速度波动范围为-2.20 m/s~1.99 m/s,4级海况下的出筒速度波动范围为-0.79 m/s~0.67 m/s。

③舰船运动的复合程度越大,导弹出筒速度波动范围就越大。6级海况下,舰船作横摇-纵摇-垂荡运动时,相较于非耦合模型,耦合模型计算得到的出筒速度波动范围为-2.20 m/s~1.99 m/s;舰船作横摇-纵摇运动时的出筒速度波动范围为-1.09 m/s~1.12 m/s。

参考文献

[1] 刘永亮,任克强,马旭轮,等. 新形势下舰载垂直发射装置发展趋势[J]. 装备环境工程,2019,16(7):60-63.
LIU Yongliang, REN Keqiang, MA Xulun, et al. Development tendency of ship launcher in new situation [J]. Equipment Environmental Engineering,2019,16(7):60-63. (in Chinese)

[2] 邹本贵,曹延杰,孙学锋,等. 一种新型舰载导弹垂直发射技术[J]. 固体火箭技术 2013,36(15):586-589.
ZOU Bengui, CAO Yanjie, SUN Xuefeng, et al. A new type vertical technology for shipborne missile [J]. Journal of Solid Rocket Technology,2013,36(15):586-589. (in Chinese)

[3] 芮守祯,邢玉明. 导弹发射动力系统发展研究[J]. 战术导弹技术,2009,137(5):4-9.
RUI Shouzhen, XING Yuming. Development research on missile launching power system [J]. Tactical Missile Technology, 2009, 137(5):4-9. (in Chinese)

[4] 齐强,李善高. 海情对导弹离轨姿态的影响[J]. 弹箭与制导学报,2000(4):51-56.
QI Qiang, LI Shangao. Sea influence on the initial ballistics of ship-launched missiles[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance,2000(4):51-56. (in Chinese)

[5] 赵龙波,石德平,敖百强. 海情对舰空导弹离轨姿态的影响分析及补偿方法[J]. 现代防御技术,2008,36(6):81-85.
ZHAO Longbo, SHI Deping, AO Baiqiang. Analysis of influence of sea condition on the take-off attitude of ship to air missile and compensation[J]. Modern Defence Technology,2008,36(6):73-8381-85. (in Chinese)

- [6] 孙船斌,马大为,任杰. 冷发射平台垂直弹射响应特性研究[J]. 南京理工大学学报,2015,39(5):516-522.
SUN Chuanbin, MA Dawei, REN Jie. Study on vertical launching response characteristics of cold launch platform[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2015, 39(5): 516-522.
- [7] 欧阳福蕾,李磊,龚春林,等. 垂直发射舰载火箭弹出筒姿态研究[J]. 导弹与航天运载技术,2020,377(6):50-54.
OUYANG Fulei, LI Lei, GONG Chunlin, et al. Research on the ejection attitude of vertical launching ship-borne rocket[J]. Missiles and Space Vehicles, 2020, 377(6): 50-54. (in Chinese)
- [8] 李翔,毕世华,陈阵. 舰船摇摆下舰载火箭弹初始扰动可能域研究[J]. 舰船科学技术,2011,33(12):89-92.
LI Xiang, BI Shihua, CHEN Zhen. Research on presumable range of initial disturbances of ship-borne rocket under ship swaying motion[J]. Ship Science and Technology, 2011, 33(12): 89-92. (in Chinese)
- [9] 陈余军,姜毅,赵刚练. 舰载导弹发射数值模拟与点火时机研究[J]. 固体火箭技术,2011,34(6):698-702.
CHEN Yujun, JIANG Yi, ZHAO Ganglian. Research on numerical simulation and ignition time for ship-based missile launch[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2011, 34(6): 698-702. (in Chinese)
- [10] 刘广,王琳娜,张保刚,等. 舰船摇摆对导弹发射出筒姿态的影响[J]. 装备环境工程,2019,16(8):39-44.
LIU Guang, WANG Linna, ZHANG Baogang, et al. Influences of ship swaying motion on missile launching outlet attitude[J]. Equipment Environment Engineering, 2019, 16(8): 39-44. (in Chinese)
- [11] 迟鑫鹏,郑旺辉. 高海情舰载导弹发射安全区域仿真[J]. 现代防御技术,2022,50(4):73-83.
CHI Xinpeng, ZHENG Wanghui. Simulation of launch safety zone of shipborne missile under high sea conditions[J]. Modern Defence Technology, 2022, 50(4): 73-83. (in Chinese)
- [12] 姚昌仁,张波. 火箭导弹发射装置设计[M]. 北京:北京理工大学出版社,1998.
YAO Changren, ZHANG Bo. Design of rocket missile launch system[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1998. (in Chinese)
- [13] 周云华,彭松江,邱群先,等. 舰船海况模拟平台等效摇摆参数研究[J]. 舰船科学技术,2013,35(9):71-73.
ZHOU Yunhua, PENG Songjiang, QIU Qunxian, et al. Research on the equivalent swing parameters of ship motion simulation platform[J]. Ship Science and Technology, 2013, 35(9): 71-73. (in Chinese)
- [14] 谭大成. 弹射内弹道学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2015.
TAN Dacheng. Internal ballistics of catapults[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2015. (in Chinese)
- [15] 李显龙,瞿军. 推力对舰载导弹出筒姿态的影响研究[J]. 火力与指挥控制,2019,44(4):22-26.
LI Xianlong, QU Jun. A study on how thrust affects the attitude angle of missiles[J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(4): 22-26. (in Chinese)

(上接第 75 页)

- [14] 郑文全. 变体飞行器的非线性控制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
ZHENG Wenquan. Research on nonlinear control method of morphing aircraft[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [15] 陆秋秋. 滑翔增程制导炮弹弹道优化设计与制导律研究[D]. 南京:南京理工大学,2021.
LU Qiuqiu. Research on ballistic optimization design and guidance law of glide extended range guided artillery projectile[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [16] 韩庆田. 基于改进 PSO 的多 UAV 协同任务分配研究[J]. 兵器装备工程学报,2019,40(11):74-78.
HAN Qingtian. Research on cooperate task allocation of multiple UAVs based on PSO algorithm[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(11): 74-78. (in Chinese)
- [17] 谷晓琳,黄明,梁旭,等. 一种改进惯性权重的混沌粒子群优化算法[J]. 大连交通大学学报,2020,41(3):102-106.
GU Xiaolin, HUANG Ming, LIANG Xu, et al. A chaotic particle swarm optimization algorithm with improved inertia weights[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2020, 41(3): 102-106. (in Chinese)