

航行体出水俯仰双态特征研究

王占莹,冯健华,程少华,魏海鹏,尤天庆

(北京宇航系统工程研究所,北京 100076)

摘要:水下航行体垂直发射水弹道参数设计是水下发射技术研究的重要内容。在试验研究中发现,水下垂直发射时出水过程水弹道会出现俯仰双态特征,为了分析出水姿态变化规律,基于水下垂直发射水弹道理论模型并结合试验结果,对造成出水俯仰双态特征的机理进行了分析,获得了造成出水俯仰双态的原因及影响规律,为水弹道规律研究和参数设计奠定了基础。

关键词:水弹道;水下垂直发射;俯仰双态

本文引用格式:王占莹,冯健华,程少华,等.航行体出水俯仰双态特征研究[J].兵器装备工程学报,2016(3):163-166.

Citation format:WANG Zhan-ying, FENG Jian-hua, CHENG Shao-hua, et al. Study on Binary-State Pitching Movement of Water-Exit Trajectory of Underwater Vehicles[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016(3):163-166.

中图分类号:V19;TJ7

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2016)03-0163-04

Study on Binary-State Pitching Movement of Water-Exit Trajectory of Underwater Vehicles

WANG Zhan-ying, FENG Jian-hua, CHENG Shao-hua,
WEI Hai-peng, YOU Tian-qing

(Beijing Institute of Astronautical System Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The design of water trajectory parameters is an important part of underwater vertical launch technology. Water-exit trajectory will appear binary-state pitching movement when being launched vertically in experimental study. In order to analyze the changing rules of water posture, the mechanism analysis of binary-state pitching movement can be clarified based on water trajectory model and experimental results and the influencing laws and causes to binary-state pitching movement were obtained. The method and results have a certain reference value for engineering studies of water trajectory parameter design.

Key words: water-exit trajectory; vertical launch underwater; binary-state pitching movement

对于水下发射航行体,出水姿态参数是水弹道设计的重要指标^[1-3],而水下发射过程中,在流体动力、浮力等复杂外力作用下,水弹道变化规律异常复杂,尤其在出水过程中,航行体的出水弹道参数变化是一个短暂、变化激烈而又复杂的过程。航行体的出水姿态与轴向运动参数密切相关,俯仰运动与轴向、法向运动参数强烈耦合,甚至初始发射速度会对出水姿态造成直接影响。

在试验研究发现,水下无控垂直发射时航行体在出水过程会出现俯仰双态特征,这对出水姿态参数设计影响很大。

为了深入分析水下垂直发射航行体出水姿态变化特性,本研究基于水下垂直发射水弹道理论模型并结合试验结果,对造成出水俯仰双态特征的机理进行了分析,为水下垂直发射水弹道研究和参数设计奠定了基础。

1 水下弹道模型建立

1.1 航行体垂直发射水弹道模型

航行体水下发射过程中,在初始艇速影响下,航行体主

要受到重力、浮力、流体动力等外力作用^[4-10],在综合外力作用下,航行体位移和姿态参数不断变化,其运动学方程满足

$$Q_A \frac{dX}{dt} = R_A + \Delta G + W_A \quad (1)$$

式中

$$Q_A = \begin{bmatrix} m + \lambda_{11} & 0 & 0 & 0 & mz_c & -my_c \\ 0 & m + \lambda_{22} & 0 & 0 & 0 & mx_c + \lambda_{26} \\ 0 & 0 & m + \lambda_{33} & my_c & -mx_c + \lambda_{35} & 0 \\ 0 & -mz_c & my_c & J_x + \lambda_{44} & 0 & 0 \\ mz_c & 0 & -mx_c + \lambda_{35} & 0 & J_y + \lambda_{55} & 0 \\ -my_c & mx_c + \lambda_{26} & 0 & 0 & 0 & J_z + \lambda_{66} \end{bmatrix}$$

其中: m 为航行体质量; J_x 、 J_y 和 J_z 为航行体体轴系3个方向转动惯量; x_c 、 y_c 和 z_c 为航行体体轴系3个方向的质心坐标; $X = [v_{x1} \ v_{y1} \ v_{z1} \ w_{x1} \ w_{y1} \ w_{z1}]$; R_A 为所受的定常流体力和部分非常定常流体力; ΔG 为重力 and 浮力作用项; W_A 为运动交叉项。

水下发射航行体通常为轴对称体,因此以上的数学模型可以简化为俯仰平面内的运动模型,其理论运动方程展开为

$$\begin{aligned} (m + \lambda_{11})a_{x1} &= F_{\text{底部推力}} - F_{\text{静压力}} - F_{\text{阻}} - F_{\text{重力}} \\ m\dot{V}_{y1} &= -\lambda_{22}\dot{V}_{y1} - \lambda_{26}\dot{\omega}_{z1} + (B - G)_{y1} + R_{y1} - m\omega_{z1}V_{x1} \\ J_z\dot{\omega}_{z1} &= -\lambda_{26}\dot{V}_{y1} - \lambda_{66}\dot{\omega}_{z1} + L_{z1} + (X_b \times B)_{z1} \end{aligned} \quad (2)$$

其中: R_{y1} 为法向定常流体动力(包括定常法向力和定常法向附加力); λ_{ii} 为附加质量项; B 为浮力; G 为重力; X_b 为浮心距离质心间距; L_{z1} 为定常流体力矩(包含俯仰力矩和俯仰阻尼力矩)。

1.2 模型验证

为了验证本研究提出的数学模型和数值计算方法,开展了航行体水下垂直发射水下弹道研究试验,并通过上述水弹道数学模型的建立,进行仿真计算,将通过理论模型得到的俯仰角速度仿真结果与试验结果进行了比对分析,结果见图1所示,理论模型计算获得的俯仰角速度与试验结果十分相近,由此验证了本文水弹道出水俯仰双态特征研究问题理论模型中外力因素和数值计算方法的准确性。

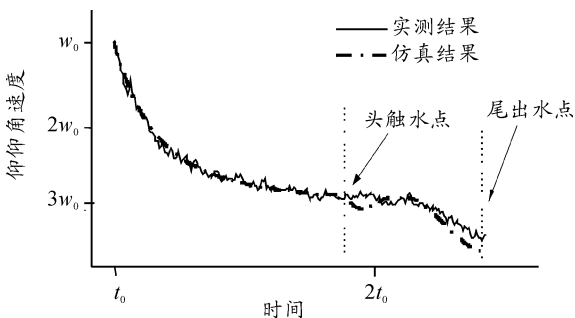


图1 某航行体垂直发射俯仰角速度时间历程曲线

2 出水俯仰双态特征研究

2.1 出水俯仰双态现象及仿真实验

研究发现,水下垂直发射过程中航行体出水过程俯仰角速度出现分叉变化特性,本文称其为俯仰双态特征,如图2中试验测得俯仰角速度时间历程,航行体出水过程俯仰角速度分别呈现上升和下降两种截然不同的变化趋势。此俯仰双态现象的出现是水弹道参数重要变化规律,为了分析出水俯仰双态特征的变化规律和影响因素,通过水弹道理论模型的建立和仿真计算,分析研究了造成出水过程俯仰角速度不同变化趋势。

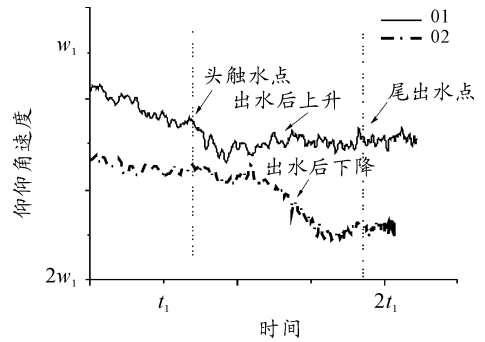


图2 航行体垂直发射出水俯仰双态现象

为了分析水下垂直发射状态下出水姿态变化规律差异性产生的原因,对出现不同出水俯仰姿态特性的试验工况进行了理论计算复现,理论计算结果呈现出与试验结果一致的出水俯仰双态特征,具体可见图3所示。

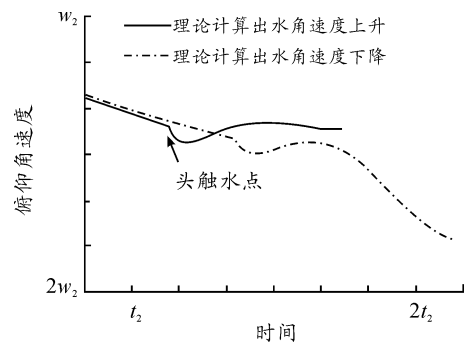


图3 理论计算出水姿态俯仰双态结果

通过对理论计算模型中产生俯仰姿态变化的外力矩因素进行分析,获得了产生俯仰姿态出水过程差异的原因在于出筒速度量值的不同,即在无控水下发射过程中,不同的出筒速度会造成相同发射状态下的航行体在出水过程中出现俯仰姿态的差异性,轴向弹道参数与俯仰方向姿态运动具有耦合性。出筒速度相对高时出水过程俯仰角速度会呈上升变化,出筒速度较低时,出水过程俯仰角速度会发生下降现象。造成此现象的直接原因具体分析为以下几个方面:

1) 从式(2)可以看出,水下发射时出水过程俯仰角速度的主要影响因素为定常流体俯仰力矩和浮力矩。定常流体俯仰力矩中包含俯仰力矩和俯仰阻尼力矩,俯仰力矩与攻角和动压头有关,在出水过程由于压心后移俯仰力矩为正;俯仰阻尼力矩与动压头和俯仰角速度有关,同样为正。因此定常流体俯仰力矩在出水过程中是正向的;

2) 由于航行体在初始法向运动速度作用下俯仰姿态呈向负向发展特征,因此出水时俯仰姿态角偏差为负,而浮力矩作用点在出水过程逐渐向航行体尾部推进,基本为负向,因此俯仰角速度变化趋势由定常流体俯仰力矩和浮力矩两项符号相反的力矩量值决定;

3) 出筒速度低时,在航行体出水时速度也会相对较低,因此动压头量值较小,造成了定常流体力矩和定常流体力矩量值都较小,可见图4和图5中不同出筒速度下各项定常流体力矩对比以及图6和图7中不同出筒速度下各项定常流体力矩对比;

4) 出水过程中式(2)右侧项 $-m\omega_{z1}V_{x1}$ 为正,而浮力项在出水过程中为负,出筒速度越小, $-m\omega_{z1}V_{x1}$ 项越小,抵消不住浮力的作用,因而法向速度减小导致攻角减小,进而定常流体力矩减小,浮力矩产生的作用更加起到主导作用,因而综合作用下俯仰角速度会在出筒速度低时发生下降现象;

5) 相反,当出筒速度较大时,出水过程中影响弹体法向速度增加的 $-m\omega_{z1}V_{x1}$ 项量值较大,能够抵消浮力项在出水过程中起减小法向速度的作用,因而造成法向速度增大,攻角增大,定常流体力矩产生作用增大,因而俯仰角速度发生上升现象。

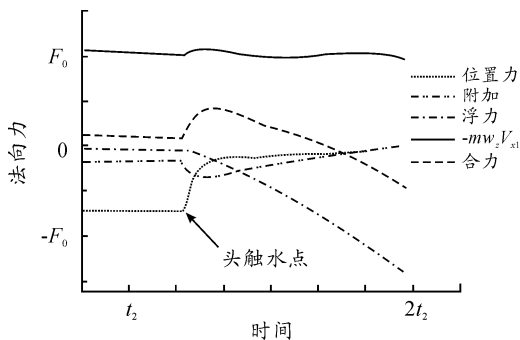


图4 出筒速度较低时各项法向力影响因素

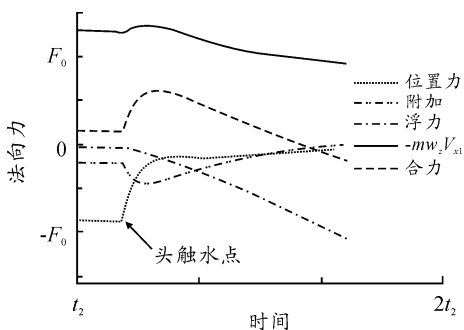


图5 出筒速度较高时各项法向力影响因素

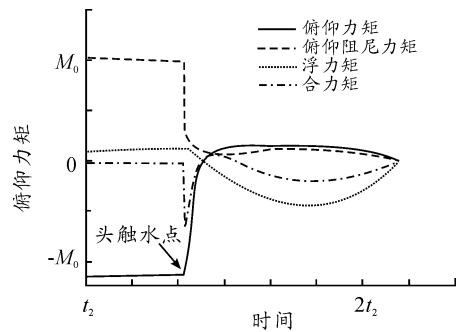


图6 出筒速度较低时各项俯仰力矩影响因素

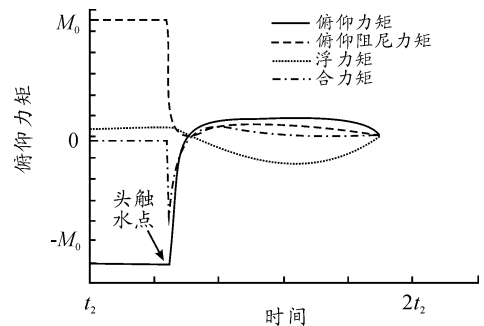


图7 出筒速度较高时各项俯仰力矩影响因素

2.2 出水俯仰双态特征机理分析

为了进一步分析出水过程俯仰姿态的影响机理,进行了出筒速度更广泛范围量值下的水弹道仿真分析,从图8不同出筒速度下水过程俯仰角速度仿真结果的变化趋势中可以发现,出筒速度越小,出水过程俯仰角速度下降现象越明显,相反,出筒速度高到一定量值时出水过程俯仰角速度会上升,并且在出筒速度增加时,俯仰角速度上升的也更加明显。

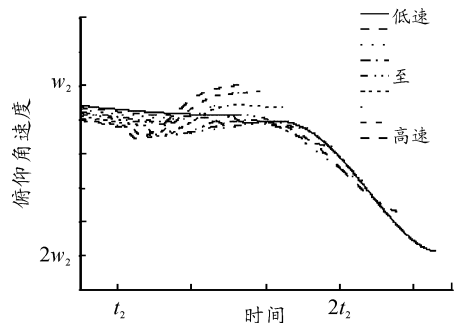


图8 出筒速度对出水过程俯仰角速度影响

这说明出水俯仰双态的发生存在一个出筒速度的临界值,在临界出筒速度发射时出水过程俯仰角速度基本保持不变,而这个出水速度临界值取决于出水过程定常流体力矩与浮力矩的平衡点,即

$$L_{z1} = - (X_0 \times B)_{z1} \quad (3)$$

暂不考虑流体力矩 L_{z1} 中的阻尼力矩项后,将式(3)各项展开后为

$$L_{z1} = QM_z^{\alpha} \alpha L S = 0.5 \rho_{\text{水}} V^2 M_z^{\alpha} \frac{V_{z1}}{V_{x1}} L S \approx$$

$$0.5\rho_{\text{水}} V_{x1} V_{y1} M_z^\alpha LS - (X_b \times B)_{z1} = B \sin(\Delta\varphi) X_b = \rho_{\text{航体}} LS \sin(\Delta\varphi) X_b \quad (4)$$

其中: Q 为动压头; M_z^α 为定常俯仰力矩系数对攻角的导数; α 为攻角; L 为航行体长度; S 为航行体横截面积; $\rho_{\text{水}}$ 为水的密度; V 为航行体运动速度; V_{y1} 为航行体法向速度; V_{x1} 为航行体轴向速度, $\Delta\varphi$ 为俯仰角偏差; $\rho_{\text{航体}}$ 为航行体密度。

将式(4)中两项相除,则有

$$\frac{L_{z1}}{-(X_b \times B)_{z1}} \approx \frac{0.5\rho_{\text{水}} V_{x1} V_{y1} M_z^\alpha}{\rho_{\text{航体}} \sin(\Delta\varphi) X_b} = V_{x1} V_{y1} \cdot \frac{0.5\rho_{\text{水}}}{\rho_{\text{航体}}} \cdot \frac{M_z^\alpha}{\sin(\Delta\varphi) X_b} \quad (5)$$

从式(5)可以看出,流体力矩和浮力矩的相对量值影响因素主要为:

a) 航行体和水之间的密度比 $\frac{\rho_{\text{航体}}}{\rho_{\text{水}}}$;

b) 航行体的流体动力布局,这决定了浮心位置和流体动力特性参数;

c) $V_{x1} V_{y1}$ 主要与出筒速度有关,因此在航行体垂直发射时决定出水俯仰双态出现的分叉点出筒速度就与上述两点因素有关,而俯仰双态分叉点能否出现,需要满足发射条件范围,式(5)中定常流体力矩和浮力矩相当, $\frac{L_{z1}}{-(X_b \times B)_{z1}}$ 量值在1附近变化。

3 结论

本文通过水下垂直发射弹道理论计算模型的建立,进行了出水弹道参数仿真分析,并结合理论分析获得了水下垂直发射水弹道出水姿态参数变化规律以及影响出水姿态变化的主要因素和机理:

1) 水弹道理论数学模型可以从量值和变化规律上模拟水下发射过程航行体的水弹道参数,为出水姿态变化规律提供理论分析方法和支撑;

2) 对于水下垂直发射,出筒速度的差异会导致出水俯仰角速度产生分叉特性,而分叉点取决于出水过程定常流体

力矩与浮力矩的平衡点,具体影响因素包括航行体相对水的密度比和流体动力特性参数(流体结构布局);

3) 在决定出水俯仰双态特征出现的出筒速度平衡点以下,出筒速度越低,出水角速度下降越明显,反之,出筒速度越高,俯仰角速度会上升越明显。

参考文献:

- [1] 袁绪龙,张宇文. 运载器垂直出水弹道姿态角奇异性问题研究[J]. 弹箭与制导学报,2005(2):83-87.
- [2] 袁绪龙,张宇文,殷崇一,等. 无动力潜射导弹运载器出水弹道建模与实验验证[J]. 弹箭与制导学报,2003(S5):187-189.
- [3] 郑邦涛. 潜射导弹出水过程水弹道及流体动力研究进展[J]. 导弹与航天运载技术,2010(5):8-12.
- [4] 黄寿康. 流体动力弹道载荷环境[M]. 北京:宇航出版社,1991.
- [5] 马震宇,刘曜. 无动力运载器水弹道特性计算[J]. 四川兵工学报,2011(6):4-7.
- [6] 刘曜,马震宇. 潜载导弹垂直发射水弹道和分离弹道研究[J]. 船舶工程,2005(3):6-9.
- [7] 方宁,宋召青. 潜载垂直发射导弹水下弹道建模与仿真[J]. 海军航空工程学院学报,2010(3):311-314.
- [8] 韩锋,张宇文,栗夫园. 无动力运载器水下弹道的建模与仿真[J]. 计算机仿真,2014(3):51-54.
- [9] 宋海龙. 水弹道建模与仿真方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [10] 仲维国,张嘉钟. 潜射航行体的水下弹道模拟[J]. 弹道学报,2005(1):8-12.
- [11] 陈柯勋,吴瑞斌,韦冰峰,等. 分布式测量技术在航行体水下试验中的应用[J]. 强度与环境,2014,41(5):45-50.

(责任编辑 唐定国)