

连续冲击条件下水下潜器运动姿态估计方法

李智生

(中国人民解放军 91550 部队, 辽宁 大连 116023)

摘要 基于潜器水下状态的平衡方程, 建立了潜器运动模型。通过对水锤压力的数值仿真计算, 建立了潜器航行体发射时的运动控制模型。根据这一数学模型, 计算分析了潜器在完整火箭发射后效(发射冲击与完整的水锤效应)作用下的运动响应和运动控制。结果表明: 发射单枚航行体对潜器运动姿态有较长时间的影响, 潜器的初始速度越大, 影响程度越小, 影响时间越短。通过操舵和压载水舱的调节, 可以对潜器的运动进行较满意的控制, 在一定范围内控制效果随着初始航速递增。

关键词 潜器运动方程; 航行体发射; 水锤效应; 姿态估计

中图分类号 U674.7

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2022)02-0099-04

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.02.001

Estimation Method of Underwater Vehicle Motion Attitude Under Continuous Impact Condition

LI Zhisheng

(No. 91550 Unit of PLA, Dalian 116023, China)

Abstract In this paper, a motion model of the underwater vehicle is established based on the balance equation of the underwater state. Through the numerical simulation calculation of the water hammer pressure, the motion control model of the underwater vehicle during launch is established. According to this mathematical model, the motion response and motion control of the vehicle under the aftereffect of the complete rocket launch (launch impact and complete water hammer effect) are calculated and analyzed. The results show that launch of a single vehicle has a longtime impact on the motion attitude of the vehicle. The greater the initial speed of the vehicle, the smaller the degree of impact and the shorter the impact time. Through steering and the adjustment of the ballast tanks, the motion of the underwater vehicle can be controlled satisfactorily, and the control effect increases with the initial speed within a certain range.

Key words motion equation of the underwater vehicle; vehicle launch; water hammer effect; attitude estimation

0 引言

作为发射平台的水下潜器必须满足苛刻的平衡状态才能为被发射的水下航行体提供良好的初始状态。但是被发射的水下航行体一旦点火, 水下

潜器受到剧烈冲击, 引起升沉、纵倾、横倾等一系列运动和姿态变化, 使其平衡状态遭到破坏, 这直接影响后续所发射的水下航行体的发射状态和精度^[1-2]。因此, 如何对连续冲击载荷环境下的水下潜器姿态进行估计和控制, 为其所发射的水下航行体

收稿日期: 2021-11-30

作者简介: 李智生(1975-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水下测量技术研究。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“基于深度神经网络的水下垂直发射航行体出水姿态预测方法研究”(61971424)。

提供良好的初始状态,是一个值得研究的问题。程嘉欢^[3]通过对潜器的受力分析、近水面因素的考虑以及发射载荷的导入,分别系统地计算了潜器在水下一定深度和近水面范围内2种情况下的运动响应与运动控制。李文龙^[4]建立了潜艇发射导弹时垂直面运动和控制的数学模型,并进行了连续水下发射导弹仿真。陈建军^[5]分析了导弹垂直发射对发射平台和耐压壳体结构的动态响应。邹鸿超^[6]分析了几种发射条件对潜射导弹出筒过程中弹体载荷的影响。在航行体出筒后产生的水锤效应方面,文献^[7-9]分别对水锤产生的机理、水锤对发射筒的影响过程及导弹齐射出筒时的水锤效应进行了研究。上述研究分别针对导弹发射或水锤效应进行研究,事实上,航行体发射时对潜器的反冲力和航行体出筒后产生的水锤效应是同时发生的,需要将两者结合分析计算完整发射冲击载荷下潜器的运动规律与控制。

本文通过分析水下潜器的运动响应情况,基于其六自由度运动方程和动力学方程,结合水下潜器水下状态的平衡方程,建立了水下潜器低速定深航行运动仿真模型。考虑连续发射水下航行体时产生的连续冲击载荷,添加发射水下航行体的反冲力和水锤效应模型,对连续冲击载荷下的水下潜器运动姿态进行估计,并建立相应的水下潜器深度与纵倾的PID姿态控制方法。

1 潜器水下状态平衡方程

水下潜器漂浮于水面任一水线或者潜伏于水下保持平衡的充分必要条件^[3]:1)水下潜器受到的重力等于所受到的浮力;2)重力与浮力的作用线在同一条铅垂线上。

水下潜器漂浮于水面或者潜伏于在水中的姿态称为水下潜器的浮态。对于每一种浮态,上述平衡条件均可表述为平衡方程,基于平衡方程建立水下潜器运动方程模型。用 ϕ 、 θ 分别表示潜器水下状态的横倾和纵倾角,横倾右上为正,纵倾艇艏向上为正。水下潜器处于无横倾、无纵倾($\phi=0$ 、 $\theta=0$)的潜伏状态称为正浮状态,其平衡方程为

$$\begin{cases} W \downarrow = \Delta \downarrow g = \rho g \nabla \downarrow \\ x_G \downarrow = x_B \downarrow \\ y_G \downarrow = y_B \downarrow \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Delta \downarrow$ 为水下状态的水下潜器排水量,简称水下排水量; $\nabla \downarrow$ 为水下状态的水密艇体排体积; $x_G \downarrow$ 、 $y_G \downarrow$ 为水下状态时水下潜器重心 G 的横纵坐标; $x_B \downarrow$ 、 $y_B \downarrow$ 为水下状态时水下潜器浮心 B 的纵坐标; \downarrow 表示水下状态。

水下潜器处于有横倾($\phi \neq 0$)、无纵倾($\theta = 0$)的潜伏状态称为横倾状态,其平衡方程为

$$\begin{cases} W \downarrow = \rho g \nabla \downarrow \\ x_G \downarrow = x_B \downarrow = 0 \\ y_G \downarrow - y_B \downarrow = (z_B \downarrow - z_G \downarrow) \tan \theta \end{cases} \quad (2)$$

潜器处于任意状态时,其平衡方程为

$$\begin{cases} W \downarrow = \rho g \nabla \downarrow \\ x_G \downarrow - x_B \downarrow = (z_B \downarrow - z_G \downarrow) \tan \theta \\ y_G \downarrow - y_B \downarrow = (z_B \downarrow - z_G \downarrow) \tan \phi \end{cases} \quad (3)$$

由水下潜器处于水下状态时满足的平衡方程可以看出:水下状态的潜器不具有自行调整平衡的能力。因此,潜器在水下状态时受到的重力和浮力有微小的变化就会导致潜器平衡状态的破坏,并会引起潜器的下潜或者上浮。

2 潜器运动方程

根据动量定理和动量矩定理,基于潜器的运动参数与受力之间的关系,得到潜器的水下空间运动方程为

$$A_{m\lambda} \begin{bmatrix} \dot{v}_{ox} \\ \dot{v}_{oy} \\ \dot{v}_{oz} \\ \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} + \frac{dA_{m\lambda}}{dt} \begin{bmatrix} v_{ox} \\ v_{oy} \\ v_{oz} \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = -A_{v\omega} \left\{ A_{m\lambda} \begin{bmatrix} \dot{v}_{ox} \\ \dot{v}_{oy} \\ \dot{v}_{oz} \\ \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} \right\} + A_{FM} \quad (4)$$

式中: \dot{v}_{ox} 、 \dot{v}_{oy} 、 \dot{v}_{oz} 为潜器浮心处的线加速度在3个坐标轴上的分量; $\dot{\omega}_x$ 、 $\dot{\omega}_y$ 、 $\dot{\omega}_z$ 为潜器角加速度在3个坐标轴上的分量; v_{ox} 、 v_{oy} 、 v_{oz} 为潜器浮心处的线速度在3个坐标轴上的分量; ω_x 、 ω_y 、 ω_z 为潜器角速度在3个坐标轴上的分量。

在垂直发射水下航行体时,对作为发射平台的水下潜器的平衡造成冲击的主要因素为推力。

推力包括 2 个方面^[10]: 1) 水下航行体出筒后点火发射时对水下潜器产生的发射反力; 2) 水下潜器离筒时海水倒灌产生的振幅不断震荡的水锤压力。这 2 个方面的力均会使水下潜器产生下沉运动。从作用时间看来, 前者会产生巨大的瞬时作用力, 不会使水下潜器产生后期的位移, 而后者是负浮力的叠加, 将对水下潜器的位移与姿态产生长期的影响。

水锤压力的计算公式^[11]为

$$P = \rho \cdot c \cdot v \quad (5)$$

式中: ρ 为海水密度; v 为发射筒内涌入海水到达发射筒底的水流速度; c 为水锤压缩波传播速度。由于 3 个参数较难测定, 该压力值一般依赖于试验方法获取, 在发射筒内进水可按线性规律计算:

$$P(t) = \frac{\Delta P_{ds}}{t_2 - t_1} (t - t_1), \quad t_1 \leq t \leq t_2$$

式中 ΔP_{ds} 为弹水重量差。水锤压力会产生横倾力矩和纵倾力矩, 即

$$K(t) = P(t) y_{ins}$$

$$M(t) = P(t) x_{ins}$$

式中: $K(t)$, $M(t)$ 为横倾力矩和纵倾力矩; y_{ins} , x_{ins} 分别为水锤压力作用潜器在 y 方向和 x 方向的距离。

在发射水下航行体前, 水下潜器的初始位置可通过定位装置测量得到, 因此在发射前其运动参数是已知的。发射水下潜器后, 在各个离散时刻, 基于压力传感器采集的数据得到发射反冲力, 根据式 (5) 计算水锤压力, 并将水下潜器的运动方程进行离散化, 采用迭代的方式对每个时刻的各个运动参数进行近似求解, 从而得到各个运动参数的估计值。

为使发射水下航行体后的水下潜器处于动力平衡状态, 需要操纵升降舵对其姿态进行控制, 控制方式采用 PID 方式来对其深度与纵倾进行控制。在每个离散时刻, 根据水下空间运动方程组估计得到当前水下潜器运动参数, 并根据运动参数计算其姿态角和倾角变化率, 利用水下潜器上的深度计测量该时刻其所处的深度, 将计算得到的姿态角和倾角变化率、测量得到的深度与设定的目标姿态角、倾角变化率和深度进行比较, 利用 PID 算法计算达

到设定的姿态角和深度所需要的指令控制舵角:

$$\begin{cases} \delta_h = K_h (H_d - H) + K_{v_y} v_y + K_\theta (\theta_d - \theta) + K_{\omega_z} \omega_z \\ \delta_v = K_\psi (\psi_d - \psi) + K_{\omega_y} \omega_y \end{cases} \quad (6)$$

式中: δ_h , δ_v 为指令控制舵角; H_d 为设定的潜器位置; ψ_d , θ_d 为设定的潜器姿态角; H 为测量到的潜器深度; θ 为计算得到的潜器姿态角; ω_z 和 ω_y 为变化率; K_h , K_{v_y} , K_θ , K_{ω_z} , K_ψ , K_{ω_y} 为 PID 控制参数。指令控制舵角的饱和舵角为 30° 。潜器姿态角与运动参数之间的表达式为

$$\psi = \frac{v_{oy}}{\sqrt{v_{ox}^2 + v_{oy}^2 + v_{oz}^2}} \quad (7)$$

$$\theta = v_{oz} / \sqrt{v_{ox}^2 + v_{oy}^2 + v_{oz}^2} \quad (8)$$

倾角变化率 ω_y 和 ω_z 通过计算倾角 θ 和 ψ 的时间变化率得到。根据 PID 算法计算得出的指令控制舵角, 操纵升降舵对水下潜器的姿态进行控制。

3 仿真计算

假设潜器在水下某深度发射单枚航行体时, 航行体完全出筒前瞬间开始仿真, 此刻筒内剩余压力 0.54 MPa、温度 206.85 $^\circ\text{C}$, 航行体在 $T_p=20$ s 时点火发射, 发射静载差 $\Delta P=0.4$ kg, 潜器受到的发射反力为 50 t, 作用时间为 20 ms。设定潜器的航行速度为 3~5 kn, 分别计算潜器平台的运动响应和姿态变化。设定发射筒位于潜器坐标系原点前方 10 m 处的右舷, 运用建立的数学仿真模型, 对潜器运动响应进行分析。

图 1 所示为潜器的深度变化曲线。航行体离筒后, 由于静载差的存在, 潜器做下潜运动, 航行体点火发射时, 潜器受到巨大的发射反力作用, 产生较大的下潜速度, 航行深度迅速下降。随后, 由于海水倒灌而产生的水锤压力作用, 深度变化曲线产生较大的频率的震荡, 但是继续下降。当水锤压力衰减后, 深度曲线开始产生幅度较大的低频震荡, 并且逐渐上浮。这是因为潜器在航行过程中受到回复力矩以及舵角控制的效果。由图 1 可知, 潜器航行速度越大, 深度变化越小, 恢复到初始深度所需的时间也越短。

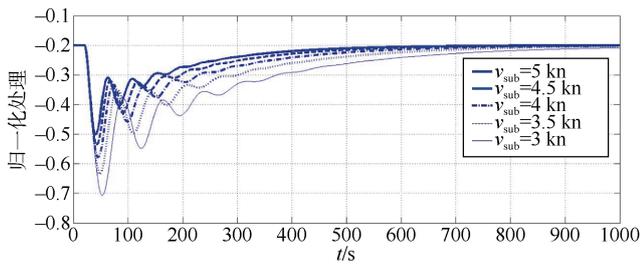


图 1 潜器深度变化曲线

Fig. 1 Depth changing curve of the underwater vehicle

图 2 所示为潜器纵倾角的变化情况。由图中可以看出，在航行体出筒后，潜器在水锤压力作用下开始下潜，并在点火发射后，较大的发射反冲力使得潜器下倾速度进一步加快。随后，水锤压力逐渐衰减，潜器受回复力矩以及控制舵角作用，艏倾角开始变小，并在惯性作用下开始产生艏倾，长时间内以逐渐衰减的振幅来回震荡，在发射后 200 s 左右全部稳定在一定范围内。与深度变化曲线一致，潜器的航速越大，控制效果越好，倾角震荡周期越短，恢复初始状态所需时间越短。

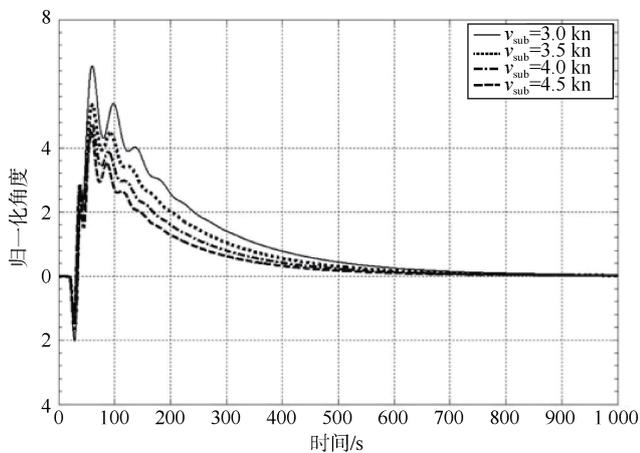


图 2 纵倾角变化曲线

Fig. 2 Changing curve of pitch angle

4 结束语

通过建立模型潜器在水下的六自由度非线性

运动模型，根据这一数学模型，计算分析了潜器在完整航行体发射后效（发射冲击与完整的水锤效应）作用下的运动响应和运动控制。结果表明：发射载荷对潜器的运动有较长时间的显著影响，潜器的初始速度越大，影响程度越小，影响时间越短。通过操舵和压载水舱的调节，可以对潜器的运动进行较满意的控制，在一定范围内控制效果随着初始航速递增。对于真实的潜器，则建议加装辅助动力以辅助潜器更好地进行控制。

参考文献

- [1] 李强. 水下航行体连续垂直发射出筒过程多相流动特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [2] 周笑飞, 姜毅, 牛钰森, 等. 水下发射发射筒注水情况仿真分析[J]. 现代防御技术, 2014, 42(1): 123-126.
- [3] 程嘉欢. 低速潜器在连续冲击载荷下的水动力研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [4] 李文龙, 徐亦凡. 水下连续发射导弹时潜艇深度与状态控制仿真[C]// 2004 中国控制与决策学术年会论文集. 北京: 中国控制与决策学术年会, 2004.
- [5] 陈建军. 潜载导弹垂直发射对耐压壳体结构的冲击响应分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [6] 邹鸿超. 发射环境及结构参数对潜射导弹出筒载荷影响分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [7] 李杰, 鲁传敬. 潜射导弹尾部燃气后效建模及数值模拟[J]. 弹道学报, 2009, 12(4): 6-8.
- [8] 李智生, 刘可, 阎肖鹏. 水下航行体垂直出筒时水锤压力分析与研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2019, 2(2): 39-42.
- [9] 魏英杰, 武雨嫣, 王聪, 等. 水下航行体齐射出筒“水锤”特性分析[J]. 宇航总体技术, 2020, 4(5): 22-32.
- [10] 黄建春, 叶取源, 朱世权. 不同发射深度下导弹水下点火气水流体动力计算[J]. 应用力学学报, 1994, 11(3): 19-25.
- [11] 倪火才. 潜载导弹水下垂直发射时的“水锤”压力研究[J]. 舰船科学技术, 2000, 22(5): 46-49.

(责任编辑: 曹晓霖)