

【引用格式】王凡瑜, 魏海鹏, 孔德才, 等. 衡重参数对水下航行体铅垂面机动特性影响[J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6(3): 274-278.

衡重参数对水下航行体铅垂面机动特性影响

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

摘要 掌握衡重参数对水下航行体机动特性影响对结构布局与总体方案设计极有帮助。针对铅垂面机动问题, 建立了经过试验验证的回转外形航行体水下运动动力学模型, 获得了不同衡重参数匹配关系下的机动弹道特性, 分析了衡重参数及控制策略对机动性能的影响规律。研究发现, 综合考虑机动方向等因素利用重力矩增大可用舵角是改善机动特性的关键。对铅垂面内向上机动, 使质心位于浮心后方较远处, 配合短时无控策略能够显著提升机动性能。

关键词 衡重参数; 水下航行体; 机动

中图分类号 TJ760.1

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2023)03-0274-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2023.03.002

Effects of Weighing Parameters on Vertical-plane Maneuver Property of an Underwater Vehicle

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

Abstract Knowledge of the effects of weighing parameters on the maneuver property of an underwater vehicle is beneficial to structure layout and systematic design. Aiming at vertical-plane maneuver problem, an experiment-verified dynamic model applicable to underwater motion of axis-symmetric vehicle is established. Maneuver trajectory properties under different match relationships of weighing parameters are obtained, and the effects of weighing parameters and control strategies on maneuver performance are analyzed. Study indicates that increasing useable elevator angle is the key of maneuver property improvement, considering maneuver direction and other factors and exploiting gravity moment. As for upward maneuver within the vertical plane, arranging the center of mass far behind the center of buoyancy could significantly improve maneuver performance with the use of short-time free control strategy.

Key words weighing parameter; underwater vehicle; maneuver

0 引言

水下航行体是重要的海上装备^[1-2], 随近年来相关领域对其性能需求的发展变化, 水下航行体铅垂面机动性愈发受到关注。衡重参数主要包括质

量、浮力、质心与浮心相对位置关系, 对航行体的稳定性、操纵性和机动性有重要影响^[3]。掌握衡重参数影响规律能够有效支撑水下航行体总体方案设计, 具有显著的工程价值。

国内外关于水下航行体机动特性已有一些研

收稿日期: 2023-02-28

作者简介: 王凡瑜 (1996-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事跨介质航行体动力学研究。

基金项目: 国防基础科研计划项目 (JCKY2021203B003)。

究: 宋海龙^[4]研究了水弹道建模与仿真方法, 但航行体姿态变化幅度较小, 不涉及大范围机动问题; 叶衍权^[5]等研究了发射速度和水平舵角对运载器铅垂面机动后出水参数的影响规律, 未讨论正浮力大小、重心浮心间距的作用。

本文建立了回转外形航行体水下运动的六自由度动力学模型, 计算分析了质量、质心位置对弹道特性的影响规律, 重点针对铅垂面内向上机动问题研究了衡重参数匹配关系与控制策略对改善机动性能的耦合作用。

1 数学模型

1.1 坐标系定义

固定坐标系 O_0xyz : 坐标原点 O_0 位于航行体初始位置; O_0x 轴在航行体初始位置当地水平面内, 指向瞄准方向; O_0y 轴沿航行体初始位置当地铅垂

$$M = \begin{bmatrix} m + \lambda_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m + \lambda_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m + \lambda_{33} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -mx_c + \lambda_{53} \\ 0 & mx_c + \lambda_{62} & 0 \end{bmatrix}$$

式中:

- 1) $\vec{V} = [v_{x1}, v_{y1}, v_{z1}, \omega_{x1}, \omega_{y1}, \omega_{z1}]^T$, 其中 v_i 表示随体系速度分量, ω_i 表示随体系角速度分量。
- 2) \vec{F}_λ 包含附加力项和交叉项^[6]。
- 3) \vec{F}_{BG} 表示重力、浮力(矩)。
- 4) \vec{F}_f 表示流体动力(矩)。在满足线性假设时, 有

$$\vec{F}_f = qS \begin{bmatrix} -C_x \\ C_y^\alpha \alpha + C_y^{\delta_e} \delta_e + C_y^{\bar{\omega}_z} \bar{\omega}_z \\ C_z^\beta \beta + C_z^{\delta_r} \delta_r + C_z^{\bar{\omega}_y} \bar{\omega}_y \\ (m_x^{\delta_d} \delta_d + m_x^{\bar{\omega}_x} \bar{\omega}_x) L \\ (m_y^\beta \beta + m_y^{\delta_r} \delta_r + m_y^{\bar{\omega}_y} \bar{\omega}_y) L \\ (m_z^\alpha \alpha + m_z^{\delta_e} \delta_e + m_z^{\bar{\omega}_z} \bar{\omega}_z) L \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: q 为动压头; S 为参考面积, 通常取最大横截面积; C_x 、 C_y^α 、 $m_x^{\delta_d}$ 等为水动力系数; L 为参

线指向上方; O_0z 轴与 O_0x 、 O_0y 轴组成右手直角坐标系。

随体坐标系 $O_1x_1y_1z_1$: 坐标原点 O_1 位于航行体浮心; O_1x_1 轴沿航行体纵轴指向艏部; O_1y_1 轴在航行体纵对称面内, 垂直于 O_1x_1 轴, 水平停放时指向上方; O_1z_1 轴与 O_1x_1 、 O_1y_1 轴组成右手直角坐标系。

1.2 动力学建模

受结构尺寸约束和抗空化性能要求影响, 航行体外形一经确定, 浮力、浮心也随之确定, 工程实践中质量及质心位置较易调整。对热动力航行体, 运动过程中质量及质心位置还随燃料消耗不断变化。故在以浮心为坐标原点的随动坐标系中展开动量(矩)定理, 对具有回转外形的航行体, 可忽略不对称性引入的惯性矩和耦合项, 水下运动的动力学方程简化为

$$M\dot{\vec{V}} = \vec{F}_\lambda + \vec{F}_{BG} + \vec{F}_f + \vec{F}_T \quad (1)$$

$$J_{x1} + \lambda_{44} \quad \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & mx_c + \lambda_{26} \\ 0 & -mx_c + \lambda_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{y1} + \lambda_{55} & 0 \\ 0 & 0 & J_{z1} + \lambda_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

考长度。

- 5) \vec{F}_T 表示推进力(矩)。
- 6) m 表示质量, J_i 表示转动惯量。
- 7) λ_{11} 、 λ_{26} 、 λ_{44} 等表示附加质量、附加惯性矩和附加转动惯量。

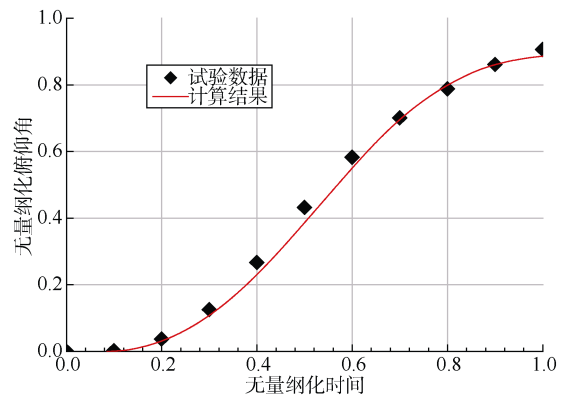


图 1 水下机动过程计算结果与试验数据对比^[7]
Fig. 1 Comparison between calculation results and experiment data of underwater maneuver^[7]

采用 4 阶 Runge-Kutta 方法显式推进求解上述动力学方程, 计算结果与航行体机动试验数据吻合良好, 表明此模型合理、有效。

2 研究对象

本文以具有回转外形、采用十字形尾舵布局的航行体为研究对象, 主要流体动力参数如表 1 所示。横向-偏航通道流体动力参数与法向-俯仰通道具有旋转对称性。

表 1 主要流体动力参数^[8]
Table 1 Main hydrodynamic parameters^[8]

符号	数值
C_x	0.094 9
C_y^α	2.208
$C_y^{\delta_e}$	1.467
$C_y^{\bar{\omega}_z}$	1.228
$m_x^{\delta_d}$	-0.022
$m_x^{\bar{\omega}_x}$	-0.011 6
m_z^α	0.434
m_z^α	-0.615
$C_z^{\bar{\omega}_z}$	-0.647

为研究浮力、浮心与重力匹配关系对水下航行体小攻角转向性能的影响, 考虑工程上易于实现的平衡特性调节, 开展不同工况航行体水下机动弹道仿真如表 2 所示。表中质心位置指质心相对浮心的轴向位置, 质心靠近艏部为正。航行体水平释放, 预期机动后铅垂向上运动, 初始姿态、姿态角速度及舵偏角均为零。航行体自释放后 5 s 起实施机动。

表 2 计算工况
Table 2 Calculation conditions

序号	无量纲化质量	无量纲化质心位置	前 5 s 控制策略
1	1.000	-0.006	稳定控制
2	1.000	-0.364	稳定控制
3	1.000	0.353	稳定控制
4	1.000	-0.006	无控自由航行
5	1.000	-0.364	无控自由航行
6	1.093	-0.006	稳定控制
7	0.907	-0.006	稳定控制

假设推进力作用线与航行体轴线重合, 不产生附加力及失衡力矩, 保持

$$\vec{F}_T = [T \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (4)$$

3 结果与讨论

3.1 质心位置影响

工况 1-工况 3 用于研究质心位置对水下航行体机动特性影响, 计算结果如图 2 所示。从图中可以看出, 质心后移对机动性能影响较小, 航行体转弯半径小, 在较短的水平运动范围内完成了机动动作。质心前移时, 航行体转弯半径显著增大, 机动性能不佳。

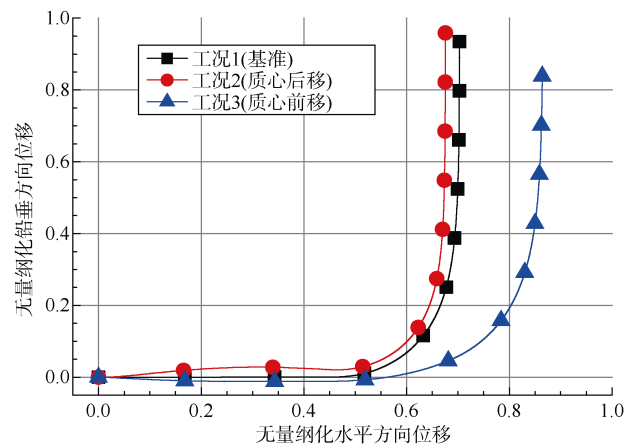


图 2 不同质心位置运动轨迹

Fig. 2 Motion trajectories of different positions of the center of mass

工况 1-工况 3 中升降舵舵偏角时间变化历程如图 3 所示, 在以浮心为原点的随体坐标系下, 质心位置通过决定重力矩大小影响航行体运动特性。基准状态下质心与浮心距离较近时, 平衡重力矩使用的舵偏角较小, 可用于调姿转向的舵偏角较大, 操纵性较好。质心后移时, 重力矩量值增大, 平衡舵角随之增大并饱和。质心前移至浮心前方时, 重力矩反向, 具有使航行体艏部下沉的趋势, 平衡舵角相应变号, 提供正向俯仰力矩维持姿态稳定。

从图 3 中还可以看出, 航行体在铅垂面内向上机动需要负向升降舵偏, 质心前移时平衡舵角已使负向舵偏接近饱和, 可用舵角不足, 故此时转弯半径较大、机动性能不佳。质心后移时, 重力矩使航

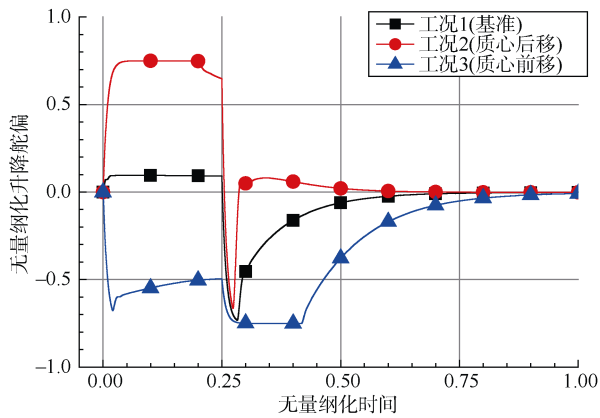


图 3 不同质心位置升降舵偏随时间变化历程

Fig. 3 Elevator angle variation with time of different positions of the center of mass

行体艏部抬升且量值较大,用于调姿转向的负向舵偏较大,使此时机动性能略好于基准状态。

3.2 控制策略影响

工况 4 和工况 5 用于对比研究控制策略对水下航行体机动特性影响,计算结果如图 4 所示。基准状态下质心位于浮心后方,重力矩具有使航行体抬头的趋势,有利于在铅垂面内向上机动,故无控(不操舵平衡重力矩)能够进一步减小转弯半径。由于质心与浮心距离较近,重力矩量值较小,此时控制策略影响较小。质心后移时,重力矩量值显著增大,转弯半径明显减小,有效提高了机动性能。

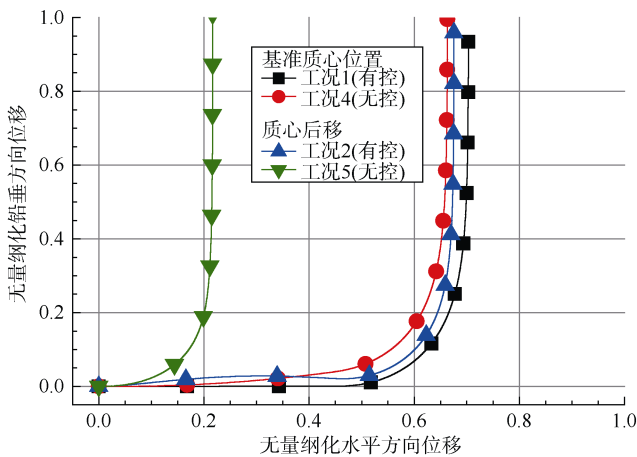


图 4 不同控制策略运动轨迹

Fig. 4 Motion trajectories of different control strategies

不同控制策略升降舵舵偏角时间变化历程如图 5 所示,质心后移状态下,采取释放后短时无控

策略时,机动全过程中升降舵舵偏角保持在较小量值,符号亦与其它工况相反。(受滚转运动影响,无控状态仍需操纵升降舵,但舵偏角很小。)

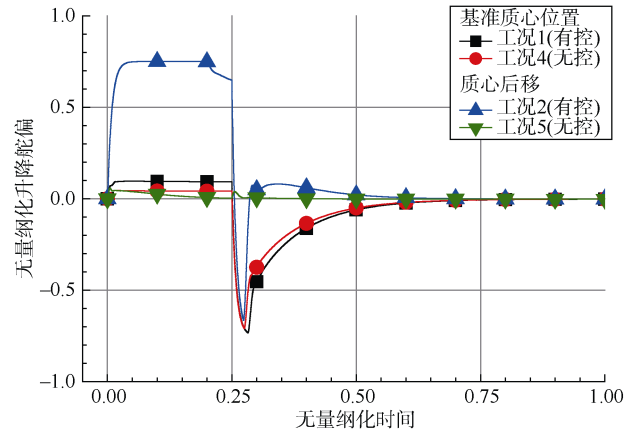


图 5 不同控制策略升降舵偏随时间变化历程

Fig. 5 Elevator angle variation with time of different control strategies

工况 5 (质心后移配合短时无控策略) 舵偏角符号与其它工况不同的原因在于其转向机理不同。工况 1、2、4 中,航行体姿态变化较慢,负向升降舵偏产生正向俯仰力矩,使航行器抬头进入正攻角状态,俯仰角在正攻角水动力矩作用下逐渐变化至期望值。工况 5 中,重力矩未经操舵平衡,使航行体姿态迅速变化,此时需要正向升降舵偏抵消正攻角水动力矩作用,以避免角速度过大导致航行体姿态发散。

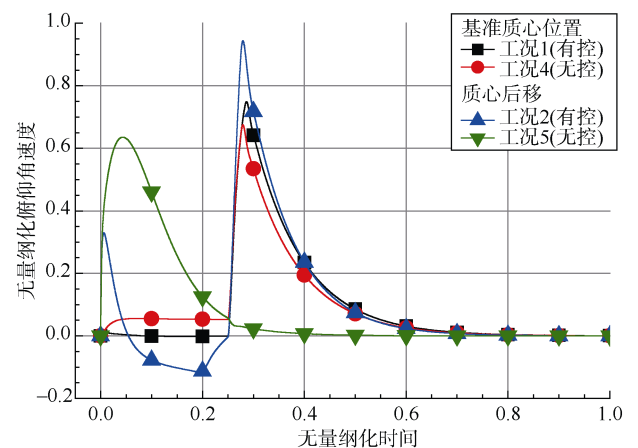


图 6 不同控制策略俯仰角速度随时间变化历程

Fig. 6 Pitch angular velocity variation with time of different control strategies

3.3 质量影响

工况6和工况7研究质量对水下航行体机动特性影响,计算结果如图7所示。从图中可以看出,不同工况下运动轨迹差别较小,说明在工程上易于调节的范围内,质量对机动性能的影响相对较小。在质心位于浮心后方的条件下,重力矩产生正向俯仰角加速度,有利于在铅垂面内向上机动,故此时质量增加能够小幅改善机动性能,使转弯半径略有减小。

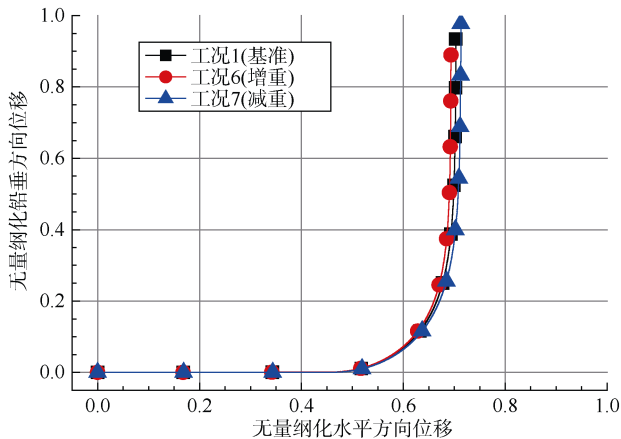


图7 不同质量运动轨迹

Fig. 7 Motion trajectories of different masses

4 结束语

本文针对具有回转外形的航行体建立了水下运动的六自由度动力学模型,计算了不同质量、质心位置、控制策略的铅垂面机动弹道,分析了衡重参数匹配关系对机动特性的影响。研究表明:

1) 为在铅垂面内获得较好的机动性能,净浮力正负、质心与浮心相对位置等衡重特性需要考

虑机动方向操舵需求、稳定航行操纵性等因素综合设计;

2) 在工程上易于调节的范围内,质量对机动特性的影响相对较小,分析重力矩与俯仰力矩需求的关系,通过增减重提高可用舵角能够小幅改善机动性能;

3) 对于铅垂面内向上机动问题,使航行体质心位于浮心后方并适当远离浮心,采取释放后短时无控自由运动的控制策略,利用衡重参数匹配关系能够有效减小转弯半径。

参考文献

- [1] 徐同乐, 刘方, 肖玉杰, 等. 国外无人反水雷装备及技术发展[J]. 兵工学报, 2022, 43(2): 64-70.
- [2] 刘大庆, 赵云飞, 吴超, 等. 美军水下无人作战力量发展趋势及启示[J]. 数字海洋与水下攻防, 2021, 4(4): 257-263.
- [3] 古鉴霄, 党建军, 黄闯, 等. 衡重参数对超空泡射弹有效射程的影响[J]. 兵工学报, 2022, 43(6): 1376-1386.
- [4] 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.
- [5] 叶衍权, 马宇. 潜射无人机运载器的水弹道仿真[J]. 计算机仿真, 2020, 37(6): 322-327.
- [6] 黄寿康. 流体动力·弹道·载荷·环境[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1991.
- [7] 李明华, 权晓波, 魏海鹏, 等. 高机动水下航行体运动控制技术研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2023, 9(1): 1-6.
- [8] 严卫生. 鱼雷航行力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.

(责任编辑: 张曼莉)