

引用格式: 吴哲, 杜廷朋, 许庆祥, 等. 基于矢量推进的深海航行器有动力下潜技术试验研究[J]. 中国舰船研究, 2026, 21(2): 205–211.

WU Z, DU T P, XU Q X, et al. Experimental study on powered diving technology for deep-sea vehicles based on vectored propulsion[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2026, 21(2): 205–211 (in Chinese).

基于矢量推进的深海航行器有动力下潜技术试验研究



扫码阅读全文

吴哲*, 杜廷朋, 许庆祥, 何鄂龙, 羊云石

杭州应用声学研究所, 浙江 杭州 310024

摘要: [目的] 为研究深海航行器在矢量推进器驱动下的大深度纵向航渡运动特性, [方法] 首先, 搭建运动方程, 初步求解稳态螺旋下潜过程的运动参数; 然后, 基于已有矢量推进型深海航行器样机, 在湖上开展定常回转直径、回转横倾、多参数影响下的有动力螺旋下潜测试, 以探究下潜过程的运动特征; 最后, 在南海水域开展 3 650 m 大深度有动力下潜测试。 [结果] 根据湖试结果, 该矢量推进型深海航行器的稳定空间回转直径仅为 4 倍平台总长, 回转横倾在 2.5° 以内; 根据海试结果, 其深海下潜平均速度 0.6 m/s, 俯仰角标准差仅 0.42°, 3 650 m 下潜过程的水平面偏移为 442 m, 运动特性稳定可控, 验证了深海航行器采用矢量推进方法的可行性。 [结论] 研究结果可为深海航行器下潜技术提供参考。

关键词: 海洋工程; 无人潜航器; 深海航行器; 矢量推进; 动力下潜

中图分类号: U661.31³

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04555

0 引言

深海是海洋开发的新领域, 鉴于其高压、低温等严苛环境, 采用无人潜航器(UUV)进行远程自主作业已成为当前的主流^[1-3]。与浅海航行器作业不同, 深海航行器需经过较长时间的纵向航渡才能到达目标区域, 该过程中航行器需依靠自身机动能力进行持续的螺旋轨迹下潜运动, 以保证到达指定深度时的水平面偏移在可控范围之内。

根据下潜时是否采用自身推进器驱动进行区分, 深海航行器的下潜方法可分为无动力下潜与有动力下潜^[4-7]。无动力下潜即通过在航行器艏部压载形成纵倾角及襟翼调向的手段来实现空间螺旋运动, 从而节省能源, 但缺点是依赖预先的浮力调配及抛载装置, 且复杂度较高; 有动力下潜则直接通过航行器动力驱动下潜, 可以实时控制自身姿态, 缺点是耗能较大。目前, 国外以 BLUEFIN-21 深海航行器为代表, 实现了矢量推进驱动的有动力下潜功能, 最大作业深度为 4 500 m^[8]; 而国内相关研究主要集中在无动力下潜方向, 少量的有动力下潜则主要基于主推加舵翼形式予以实现。

矢量推进型航行器与传统舵翼驱动航行器在操纵性、航向稳定性等方面差异巨大, 所以无法直接类比其下潜运动特性。为研究该类平台的有动力下潜运动特性, 并探索其应用潜能, 本文拟通过仿真、湖试、深海海试来逐步分析其机动能力、下潜能力、控制精度、变浮力控制能力等, 用以为矢量推进型深海航行器的研究提供技术参考与数据支撑。

1 研究对象

本文将自研的某矢量推进型深海航行器样机(图 1)为对象, 开展有动力下潜研究工作。



图 1 深海航行器外形示意图

Fig. 1 Deep-sea vehicle schematic shape

航行器总长 5.5 m, 主体直径 0.533 m, 外部壳体由碳纤维构成, 整体为湿式结构, 呈微正浮力。在操纵形式上, 采取单矢量推进器代替传统的舵翼, 尾部形式简洁。该矢量推进器可在水平面及垂直面 2 个自由度独立转动, 对应角度即为水

收稿日期: 2025-06-12 修回日期: 2025-12-08 网络首发时间: 2026-03-26 17:51

作者简介: 吴哲, 男, 1991 年生, 硕士

杜廷朋, 男, 1993 年生, 硕士

*通信作者: 吴哲

平面控制角与垂直面控制角。在水下通信定位方面,航行器携带了超短基线信标以及远距离通信声呐,用以及时采集试验数据。

2 控制方法

在航行器下潜过程中,应保持矢量推进器的水平面控制角不变并实时调节垂直面控制角,从而使航行器保持固定的纵倾角进行螺旋下潜。基于前期工程经验,本文采用双环比例积分微分(PID)方法进行下潜控制,其中内环为俯仰角速度控制环,用于提升下潜控制系统的灵敏度,并快速对海流等干扰做出响应;外环为俯仰角控制环,用于保持航行器以固定俯仰角下潜的稳定性,具体控制策略如下:

$$\begin{cases} \dot{p}_d = k_{p1}(\theta_d - \theta) + k_{i1} \int (\theta_d - \theta) + k_{d1} \dot{\theta} \\ \delta_d = k_{p2}(p_d - p) + k_{i2} \int (p_d - p) + k_{d2} \dot{p} \end{cases} \quad (1)$$

式中: p_d 为期望下潜角速度; k_p, k_i, k_d 为PID控制参数,其中下标1,2分别表示外环、内环; θ_d 为期望下潜角度; θ 为俯仰角度; $\dot{\theta}$ 为俯仰角速度; δ_d 为矢量推进器控制量; $p = \dot{\theta}$,为俯仰角速度; \dot{p} 为俯仰角加速度。

下潜控制原理如图2所示,首先,通过上位机将期望下潜角度下发至航行器控制系统,由惯导反馈航行器当前的俯仰角度和角速度;然后,使用双环PID控制器来计算航行器保持定俯仰角下潜的需求控制角度;最后,由矢量推进器来完成控制要求。内外环的协同工作可以有效抑制干扰,使航行器在各种工作条件下均能保持稳定下潜,从而提升控制品质。

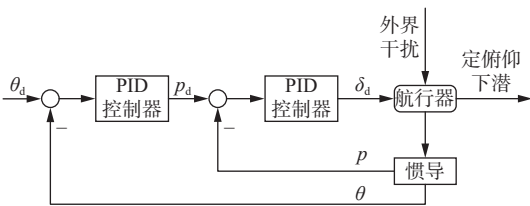


图2 下潜控制方法

Fig. 2 Diving control method

由于航行器自身回复力矩及流体力的存在,控制艏部向上与向下旋转所需的控制量必然有所不同,故需根据旋转方向将控制参数分为2种工况分别进行整定。同时,控制参数应根据不同的角速度和速度区间进行适应性匹配。

3 下潜运动仿真

3.1 运动方程

为初步评估航行器的操控特性,需对航行器

进行受力分析并建立运动方程。本文采用国际船模水池会议(international towing tank conference, ITTC)推荐的右手坐标系,纵轴指向航行器艏部,横轴指向航行器右舷,垂直轴指向航行器底部。航行器的运动方程为

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{F} \quad (2)$$

式中: \mathbf{M} 为质量矩阵; $\dot{\mathbf{v}}$ 为加速度矩阵; \mathbf{F} 为航行器各方向的受力。本文的仿真环境为静止水域,不考虑海流;航行器受力中的流体力项将由数值仿真辨识水动力参数而获得,为简化计算,大多仅保留了线性项;而操纵力项、推力项的阐述则详见下文。

3.2 推进器受力

矢量推进器在运动过程中,通过改变导管的空间位置来产生操纵力,包括导管自身产生的侧向升力及螺旋桨推力的侧向分量。图3所示为导管局部坐标系,其中 D 为阻力, L 为升力, U_D 为导管速度, α 为攻角。

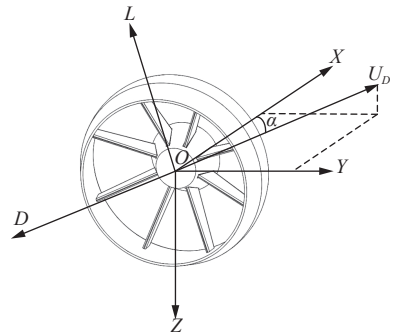


图3 导管局部坐标系

Fig. 3 Duct local coordinate system

计算导管力时,优先建立2个坐标系,即升阻力坐标系与导管坐标系^[9]。通过导管速度与攻角即可得到当前状态导管产生的升力与阻力,然后分解至导管坐标系,再根据实时推进器转角变换到航行器的体坐标系,转换关系如下:

$$\mathbf{F}_B = \mathbf{T}_{B/R} \mathbf{T}_{R/LD} \mathbf{F}_{LD} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{F}_B = [F_x, F_y, F_z]^T$,其中 F_x, F_y, F_z 为升阻力在体坐标系的3个方向分量; $\mathbf{T}_{B/R}$ 为导管坐标系转换到航行器体坐标系的变换矩阵; $\mathbf{T}_{R/LD}$ 为升阻力坐标系转换到导管坐标系的变换矩阵; $\mathbf{F}_{LD} = [-D, L, 0]^T$ 。

导管所受的升阻力为

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2} \rho A U_D^2 C_{L}(\alpha) \\ D &= \frac{1}{2} \rho A U_D^2 C_{D}(\alpha) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: ρ 为流体密度; A 为侧投影面积; $C_L(\alpha)$ 为升力系数; $C_D(\alpha)$ 为阻力系数。

计算螺旋桨力时, 可以采用式(5)求出导管坐标系下的推力 T_p , 再通过一级坐标系变换至体坐标系。

$$T_p = \rho n^2 d^4 K_T \quad (5)$$

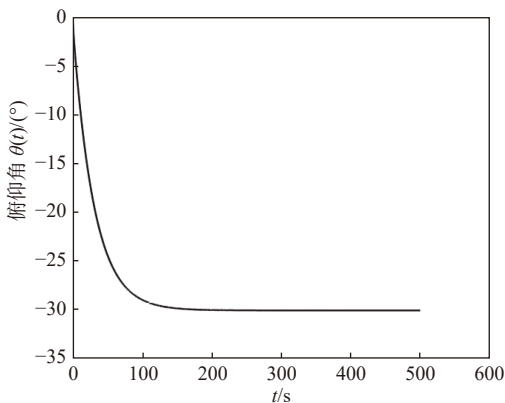
式中: n 为转速; d 为直径; K_T 为推力系数。

3.3 仿真分析

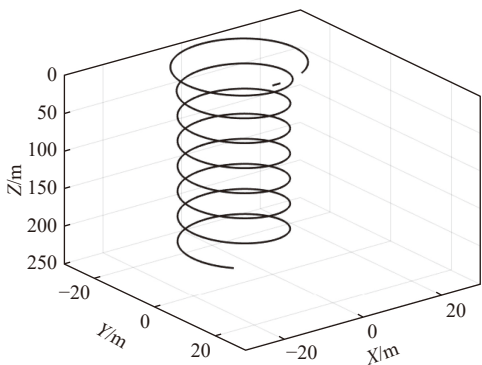
首先在 Matlab 软件中编写上述操纵方程, 然后通过时间离散来迭代求解不同时刻下航行器的受力、姿态、位置。仿真时取深海航行器的净浮力为 6 kg(微正浮力), 矢量推进器的水平面转角为 15° 、垂直面转角为 2.75° , 即可得到 3 kn 直航对应转速下的下潜特征曲线。

3.4 仿真结果

当航行器进入稳定回转之后, 回转直径仅为 22 m, 具有较好的水平面机动能力。而在俯仰调控能力方面, 2.75° 小控制角所对应的稳定俯仰角为 30° , 这表明矢量推进器在正浮力环境下可以较好地控制深海航行器下潜。图 4 为矢量推进型深海航行器的稳态螺旋下潜仿真结果。



(a) 俯仰角随时间的变化曲线



(b) 螺旋下潜轨迹曲线

图4 矢量推进型深海航行器的稳态螺旋下潜仿真结果

Fig. 4 Simulation results of steady-state spiraling dive for vector-propelled deep-sea vehicle

4 湖上试验

4.1 湖上试验内容

上述操纵方程在求解过程中进行了大量的线性简化, 为进一步验证矢量推进有动力下潜方法的可行性, 以适配控制算法与整定控制参数, 本文在设备集成后开展湖试, 内容包括定常回转特性测试以及有动力螺旋下潜测试, 其中定常回转特性测试主要用于评估矢量推进航行器的定常回转直径与回转横倾, 有动力螺旋下潜测试则主要用于评估不同转速、推进器转角、期望俯仰角下的下潜速度。

4.2 定常回转特性测试

1) 定常回转直径。

首先, 需测试航行器的定常回转直径, 以评估平台在矢量推进器驱动下的机动性。在试验过程中, 航行器预先调整主机转速至稳定值(与 3 kn 航速匹配), 并保持直航, 然后进行矢量推进器最大水平面偏角下的回转, 直至进入定常状态。根据实测结果, 矢量推进器在水平面内向左侧旋转最大偏角与向右侧旋转最大偏角对应的机动能力近似, 且定常回转直径约 18.5~20.3 m, 不到 4 倍平台长度, 优于传统舵面控制航行器(通常 >6 倍船长), 体现了较好的回转性能, 与仿真结果接近。从机理层面分析, 矢量推进形式抛弃了舵片结构, 大幅降低了深海航行器的航向稳定性, 从而得到了突出的机动能力, 所以矢量推进型深海航行器的控制要求也相对较高, 更依赖于角速度反馈控制。

2) 水下回转横倾。

左回转与右回转的定常回转直径几乎没有偏差, 但在横倾角上存在明显的区别。与潜艇回转横倾类似, 航行器在水下定常回转时受艇体横向力与附体横向水动力的联合作用, 呈内倾状态^[10], 不同回转方向导致的横倾方向也有所不同。而矢量推进器采用单桨形式, 所以桨产生的横倾力矩方向在航行器前行时是保持恒定的。当该航行器螺旋下潜时, 针对右旋螺旋桨, 应有意识地采用顺时针(俯视)回转形式, 使 2 个力矩方向相反, 即可抵消并得到较好的航行器横倾角, 从而使航行器上的声呐(包括多普勒速度仪、通信声呐、声信标等)发挥更好的工作性能。一般航行器要求横倾角幅值控制在 5° 以内, 根据实测结果, 本平台进行水下顺时针回转的横倾角幅值约为 2.5° , 而逆时针回转的横倾角幅值约为 7° , 差异较为明显。

4.3 有动力螺旋下潜测试

本文在 70 m 水深区域开展了下潜试验(图 5), 考虑到近底安全性, 实际上允许的螺旋下潜深度仅为 45 m。为了探究不同参数对矢量推进型航行器螺旋下潜的影响, 本文将通过设定不同的主推转速、水平面控制角、期望纵倾角度, 对下潜特性进行对比分析, 其中下潜速度的计算方法为由稳定回转后深度计反馈的深度差除以耗费时间。



图 5 湖中下潜试验

Fig. 5 Lake diving test

受湖中水深限制, 航行器的稳定回转数据量偏少, 无法测试较大下潜速度下的运动情况。从表 1 的测试结果可以看出, 仅需非常小的水平面转角, 即可驱动矢量推进型航行器进行空间螺旋运动, 其中 1.5° 为稳定回转的临界值, 所以因推进器旋转而造成的前向速度损失仅为一个较小的量。考虑到后续海洋环境下潜过程中海流的扰动影响, 为防止在较浅深度海洋区域发生较大的水平偏移, 本文还增加了 2.5° 的水平面转角工况。在后续海试中, 均采用了第 6 组工况的配置参数。

表 1 下潜特性
Table 1 Diving characteristics

工况编号	转速 $/(r \cdot \text{min}^{-1})$	水平面 控制角/ $(^\circ)$	下潜俯仰角 $/(^\circ)$	下潜速度 $/(m \cdot s^{-1})$
1	2 280	2.5	15	0.141
2	2 280	2.5	30	0.344
3	2 280	1.5	15	0.248
4	2 280	1.5	30	0.435
5	2 950	2.5	30	0.57
6	3 050	2.5	30	0.6

在下潜过程中, 增加纵倾角、提升转速都可以有效提升航行器的下潜速度, 但考虑到控制稳定性与安全性, 本试验对上述参数均进行了限制。需注意的是, 上文提及的下潜速度均为航行器进入稳定回转阶段之后的定常下潜速度, 而非初始回转阶段的下潜速度, 由于稳定后的回转速度下降, 所以下潜速度也相应偏低。

5 深海试验

完成湖上调试后, 本文在南海 3 700 m 水域进

行了深海下潜试验(图 6), 以探究实际海洋环境下的运动特性。在下潜过程中, 母船采用通信声呐主动监测航行器的状态数据, 同时使用超短基线 (ultra-short baseline, USBL) 进行航行器的准确定位。

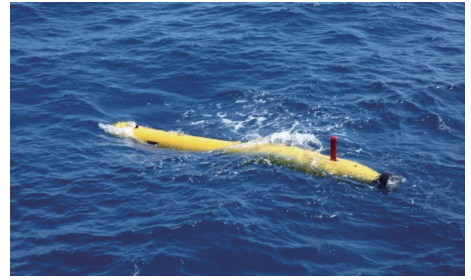


图 6 深海试验

Fig. 6 Deep-sea test

如图 7 和图 8 所示, 根据深度计测得的深度数据, 航行器的最大下潜深度为 3 650 m, 平均垂直向速度约为 0.6 m/s, 且航行器的下潜速度稳定, 受海流扰动影响较小。在下潜过程中, 虽然航行器的净浮力逐渐上升, 但矢量推进器对深海航行器俯仰角的控制并没有影响其下潜速度。不论是水平面还是竖直面, 矢量推进器都体现了小角度操控的特点, 这种操控角对前向推力的影响在设计中可忽略不计。

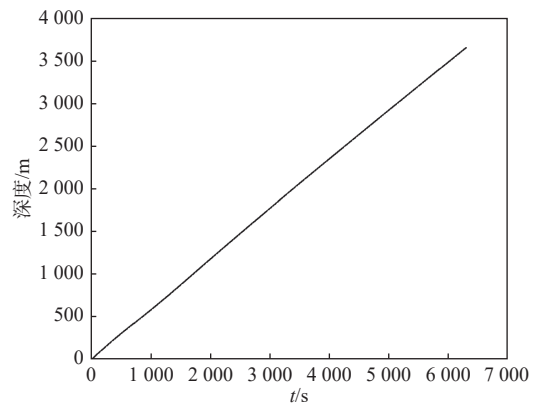


图 7 下潜深度随时间的变化曲线

Fig. 7 The curve of diving depth versus time

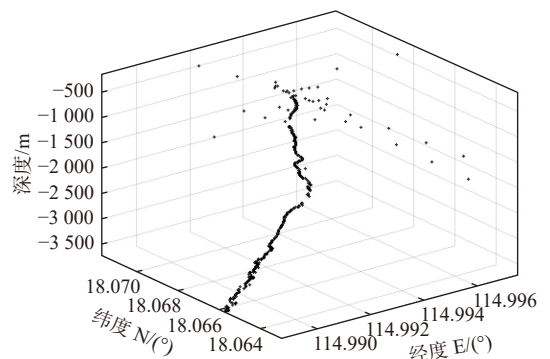


图 8 超短基线上报的航行器实时下潜位置

Fig. 8 Real-time diving position of the vehicle reported by ultra-short baseline system

试验过程中,使用 USBL 进行了全程监控。当水深较浅时,航行器处于基阵正常测试开角之外,存在较多的野值;随着下潜深度的增加,测试精度将逐渐提升。经统计,在下潜阶段末期,航行器水平面的最大偏移为 442.17 m,相对于约 1.7 h 的纵向航渡时间而言,该水平面偏移量较小,证实了采用矢量推进器进行有动力精准下潜航渡的可行性。

试验过程中,航行器自带的电导率-温度-深度剖面仪 (conductivity, temperature, depth profiler, CTD) 进行了完整记录,得到了 3 650 m 深海范围内的温度与盐度变化,如图 9 和图 10 所示,环境温度最低降至 2.3℃,而盐度在 1 500 m 深度后基本为固定值 34.7 (盐度无量纲)。根据密度推算公式^[11],可知 3 650 m 处的密度上升至 1 042.47 kg/m³。鉴于温度、压力带来的浮力损失,可知 3 650 m 水深相对于水面航行器净浮力的增加量约为 7~8 kg,变为原净浮力的近 2 倍^[12]。

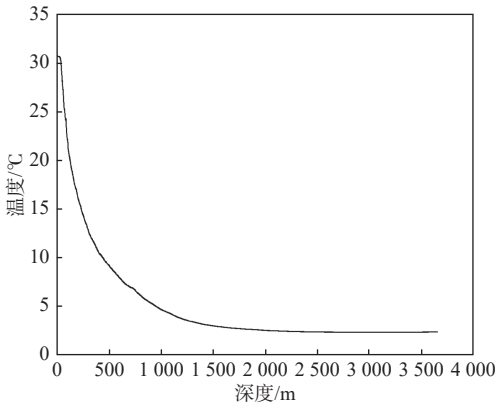


图 9 温度随深度的变化曲线

Fig. 9 The curve of temperature versus depth

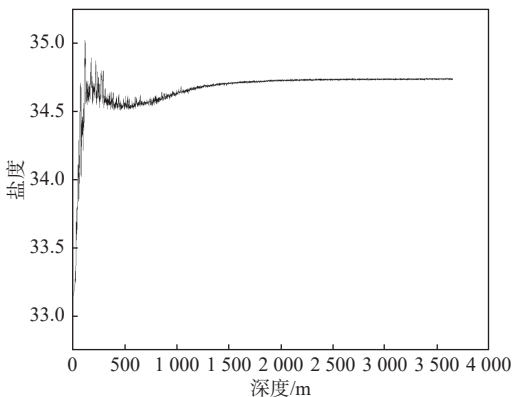


图 10 盐度随深度的变化曲线

Fig. 10 The curve of salinity versus depth

下潜过程中,主控板记录了惯导实时反馈的俯仰角与航向角,以及下达的矢量推进器控制角,如图 11 和图 12 所示。通过矢量推进器的主动操控,即使在多扰动的海洋环境中进行螺旋下潜,

航行器的俯仰角仍能较好地期望角度保持在 30°,标准差仅 0.42°。同时,矢量推进器的垂直面操控角在 3 650 m 的深度变化跨度下,未发生明显变化,可见矢量推进器具备较好的净浮力变化适应能力,这将直接简化下潜过程中净浮力的主动调节需求。以上结果主要与矢量推进器的高机动特性有关,且与传统舵翼操控方式有所不同,本文方法不依赖于相对速度,更稳定可靠。

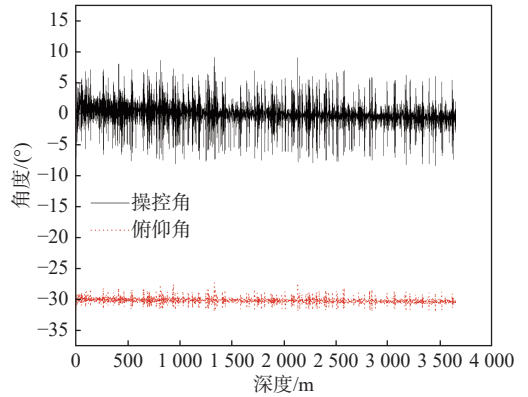


图 11 俯仰角与垂直面操控角随时间的变化曲线

Fig. 11 The curves of pitch angle and vertical control angle versus time

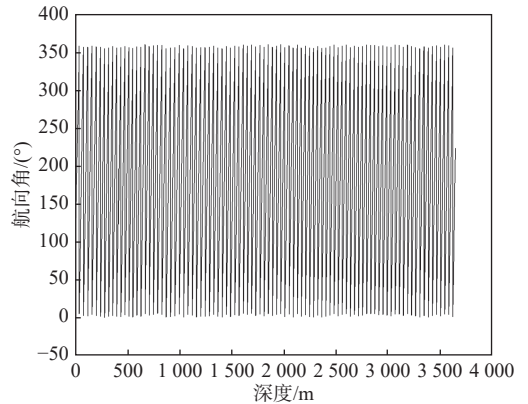


图 12 航向角随时间的变化曲线

Fig. 12 The curve of heading angle versus time

航行器的艏向角在下潜过程中基本呈现匀速稳定变化的趋势,回转运动未出现因海流扰动而失控的情况,其中回转角平均速度为 5.1°/s,对应矢量推进器的水平面固定转角为 2.5°。

6 结 论

本文围绕矢量推进型深海航行器有动力下潜技术,分析了下潜过程中的运动与控制特性,并开展了湖试和海试验证,为后续研究提供了试验数据支撑,主要结论如下:

- 1) 通过操纵方程推算,得到了矢量型航行器在 3 kn 直航对应转速下的空间下潜曲线,其回转直径仅为 22 m,且仅用 2.75°垂直面控制角即可实

现航行器 30°俯仰角的稳定下潜,体现了矢量推进方法的高机动能力。

2) 在湖试定常回转特性试验中,测得航行器的水面回转直径为 18.5~20.3 m,与仿真结果相对应;同时,通过回转横倾扭矩与螺旋桨旋转扭矩的相互抵消,航行器在下潜过程中的横倾角稳定为 2.5°。

3) 在湖试下潜试验中,通过改变矢量推进转速、水平面操控角、下潜俯仰角,可以对下潜速度造成明显的影响。例如水平面操控角 2.5°,转速 3 050 r/min,俯仰期望 30°,此时下潜速度为 0.6 m/s。

4) 在深海下潜试验中,航行器的最大深度潜至 3 650 m,俯仰角、航向角呈稳定变化趋势,俯仰角标准差仅 0.42°,净浮力的改变与海流扰动对航行器下潜特性的影响较小。同时,相对于 1.7 h 的纵向航渡时间,测得 3 650 m 下潜过程的水平面偏移为 442 m,验证了使用矢量推进器进行稳定精准航渡的可行性。

该研究结果证实了矢量推进型航行器可以实现稳定可控的有动力下潜,且具有良好的抗海流扰动与净浮力变化容忍度。随着未来能源密度的提升,该技术途径将体现更大的应用价值。受限于研究时间,本文仅对航行器在单一下潜速度下的运动特性进行了探索,后续将针对不同速度开展对比分析。

参考文献:

- [1] 胡庆玉,舒国平,冯朝. 深海 AUV 发展趋势研究 [J]. 水雷战与舰船防护, 2018, 1(1): 77-80, 89.
HU Q Y, SHU G P, FENG Z. Research on development trend of deep-sea AUV[J]. Mine Warfare & Ship Self-Defence, 2018, 1(1): 77-80, 89 (in Chinese).
- [2] 李硕,刘健,徐会希,等. 我国深海自主水下机器人的研究现状 [J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(9): 1152-1164.
LI S, LIU J, XU H X, et al. Research status of autonomous underwater vehicles in China[J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2018, 48(9): 1152-1164 (in Chinese).
- [3] 卢冠宇,张铁栋,李整林,等. 深海拖曳式自主水下航行器发展现状与关键技术 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(3): 1-13.
LU G Y, ZHANG T D, LI Z L, et al. Development status and key technologies of deep-sea towing autonomous underwater vehicles[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(3): 1-13 (in Chinese).
- [4] 高伟,张玮,谷海涛,等. 大型深海 AUV 无动力螺旋下潜运动特性分析 [J]. 工程设计学报, 2022, 29(3): 370-383.
GAO W, ZHANG W, GU H T, et al. Analysis of motion characteristics of large deep-sea AUV unpowered spiral diving[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2022, 29(3): 370-383 (in Chinese).
- [5] 李硕,燕奎臣,李一平,等. 6000 米 AUV 深海试验研究 [J]. 海洋工程, 2007, 25(4): 1-6.
LI S, YAN K C, LI Y P, et al. Deep-sea test of 6000m AUV[J]. The Ocean Engineering, 2007, 25(4): 1-6 (in Chinese).
- [6] 林杨. 小襟翼对自治式水下机器人潜浮运动的影响 [J]. 机器人, 1997, 19(1): 35-43.
LIN Y. Qualitative analysis on the influence of winglets on diving and recovering motion locus of autonomous underwater vehicle[J]. Robot, 1997, 19(1): 35-43 (in Chinese).
- [7] 冯朝,肖婷. 深海 AUV 有动力螺旋下潜技术及试验研究 [J]. 无人系统技术, 2019, 2(4): 15-19.
FENG Z, XIAO T. Technology and experimental study of powered and spiral diving test on deepsea AUV[J]. Unmanned Systems Technology, 2019, 2(4): 15-19 (in Chinese).
- [8] 耿君毅. 水下无人航行器矢量推进系统设计与分析 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
GENG J Y. Unmanned underwater vehicle single vectored thruster system's design and analysis[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016 (in Chinese).
- [9] MCEWEN R, STREITLIEN K. Modeling and control of a variable-length AUV[C]//Proceedings of the 12th international Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology. [S.l.]: [s.n.], 2001.
- [10] 施生达. 潜艇操纵性 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
SHI S D. Submarine maneuverability[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995 (in Chinese).
- [11] FOFONOFF N P, MILLARD R C. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater[J]. UNESCO Technical Papers in Marine Science, 1983, 44: 53.
- [12] 武建国,徐会希,刘健,等. 深海 AUV 下潜过程浮力变化研究 [J]. 机器人, 2014, 36(4): 455-460.
WU J G, XU H X, LIU J, et al. Research on the buoyancy change of deep-sea autonomous underwater vehicle in diving process[J]. Robot, 2014, 36(4): 455-460 (in Chinese).

Experimental study on powered diving technology for deep-sea vehicles based on vectored propulsion

WU Zhe*, DU Tingpeng, XU Qingxiang, HE Elong, YANG Yunshi

Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou 310024, China

Abstract: [**Objective**] This study investigates the motion characteristics of deep-sea vehicles during deep vertical transit under vectored propulsion. [**Method**] First, the motion equations were established to obtain preliminary solutions for the parameters of helical diving. Subsequently, a series of lake trials were conducted using a vectored-propulsion deep-sea vehicle prototype, including steady-state turning diameter tests, heeling angle measurements, and powered helical diving experiments under multiple control parameters, in order to analyze the diving motion characteristics. Finally, a 3 650 m powered diving test was performed under real operating conditions at a depth of 3 700 m in the South China Sea. [**Results**] The lake trial results show that the steady turning diameter of the vector-propelled deep-sea vehicle is only 4 times the overall length of the platform, while the turning heel angle remains within 2.5°. The sea trial results indicate that, under the selected control parameters, the average deep-sea diving speed reaches 0.6 m/s, the standard deviation of the pitch angle is only 0.42°, and the horizontal offset during the 3 650 m diving process is 442 m. These results demonstrate stable and controllable motion characteristics, verifying the feasibility of the powered diving technology for deep-sea vehicles based on vectored propulsion. [**Conclusion**] The results provide a reference for the research on diving technologies for deep-sea vehicles.

Key words: ocean engineering; unmanned underwater vehicle; deep-sea vehicles; vectored propulsion; powered diving

相关论文

- [1] 石伏龙, 田宇, 李润博, 等. 双航行体在并联形式下的高速斜入水数值模拟 [J]. 中国舰船研究, 2026, 21(1): 132–145. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.04580>
- [2] 张天浩, 池晴佳, 林永水, 等. 基于人工势场法改进 MADDPG 算法的 AUV 协同应召搜潜航路规划研究 [J]. 中国舰船研究, 2026, 21(1): 362–373. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.04229>
- [3] 陈盼召, 郭凯, 葛彤, 等. 外部扰动下无人水下航行器鲁棒快速轨迹跟踪控制 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(6): 294–303. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.04194>
- [4] 卢冠宇, 张铁栋, 李整林, 等. 深海拖曳式自主水下航行器发展现状与关键技术 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(3): 1–13. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03752>
- [5] 黄文华, 李飘, 李旭, 等. 基于内聚力模型的潜航器浮力材料集成结构界面脱黏扩展研究 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(3): 194–201. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03620>
- [6] 张翔鸢, 花吉. 国外超大型无人潜航器发展与运用研究 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(5): 17–27. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03493>
- [7] 张强, 姜宇桢, 郭高阳, 等. 水下打捞机器人执行器部分失效的有限时间轨迹跟踪控制 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(5): 57–64. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03430>