

【引用格式】杨振鑫. 小型水下无人航行器的下潜过程研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6(6): 749-756.

小型水下无人航行器的下潜过程研究

杨振鑫^{1, 2}

(1. 中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003;
2. 清江创新中心, 湖北 武汉 430076)

摘要 以小型水下无人航行器(UUV)为研究对象, 研究旨在探讨和分析关键参数变化对UUV下潜过程的影响, 并采用控制变量法来研究单一因素对UUV下潜过程的影响。研究表明: 在UUV行进过程中, 水流对舵翼产生升力, 从而产生扭矩促使其下潜。因此, 在UUV下潜时, 姿态应尽量平稳, 且俯仰角和下潜深度不宜过大。为了确保UUV在逆流和复杂环境下成功下潜, 要求在保留一定余量的基础上, 尽可能减小舵板舵角和螺旋桨转速。

关键词 水下无人航行器(UUV); 下潜过程; 螺旋桨转速; 舵板角度

中图分类号 U674 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2023)06-0749-08

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2023.06.014

Research on Submergence Process of Small Unmanned Underwater Vehicles

YANG Zhenxin^{1, 2}

(1. No. 710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China;
2. Qingjiang Innovation Center, CSSC, Wuhan 430076, China)

Abstract This study focuses on small unmanned underwater vehicles (UUVs) and aims to investigate and analyze the effects of key parameter variations on UUV's diving process. The controlled variable method is employed to analyze the influence of a single factor on UUV's diving process. The research results indicate that during navigation, water flow generates lift force on the rudder, resulting in a torque that causes UUV to dive. Therefore, it is advisable to maintain a smooth attitude and avoid excessive pitch angle and diving depth during UUV's descent process. To ensure successful diving in adverse currents and complex environments, it is necessary to minimize the deflection angle of the rudder and the propeller speed, while retaining a certain margin.

Key words underwater unmanned vehicle (UUV); diving process; propeller speed; rudder plate angle

0 引言

无人水下航行器是一项具有重要战略意义的武器系统, 其可在边境地区或受到敌方潜艇威胁的区域执行监视和侦察任务。随着海洋强国战略的不断发展和人们对水下世界的持续探索, 学者们对水

下无人航行器的研究兴趣日益增长^[1-6]。通常情况下, 水下无人航行器的任务执行阶段可以划分为上浮阶段、下潜阶段和定深航行阶段。其中, 下潜阶段在水下无人航行器的航行中具有重要意义, 因为它直接影响任务执行的效率。然而, 目前关于水下无人航行器下潜阶段的研究成果却非常有限。

收稿日期: 2023-02-06

作者简介: 杨振鑫(1997-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事水下无人航行器的总体结构设计。

无人水下航行器的下潜平稳性和下潜姿态对其后续操作过程具有重要影响^[7]。大型无人水下航行器通常配备有浮力调节舱或浮力调节装置,而小型无人水下航行器由于其体积和结构的限制,很难装备浮力调节装置来调整自身的浮力以实现下潜。因此,小型水下无人航行器主要通过水平舵和螺旋桨的配合来实现下潜阶段的任务。

为了填补对小型水下无人航行器下潜阶段研究的空白,本文首先介绍了小型无人水下航行器的基本参数和试验条件。然后,通过试验研究了小型水下无人航行器在不同舵角和螺旋桨转速下的下潜姿态,以期为后续研究提供参考。

1 航行器基本参数介绍

本文试验所用到的水下无人航行器主要由艏部探测段、通信浮标段、导航控制段、能源段、推进段构成,具体实物外观如图 1 所示。

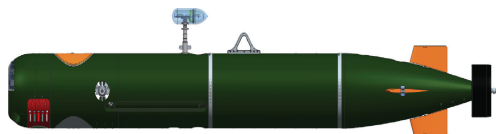


图 1 水下无人航行器外形图
Fig. 1 Outline drawing of an UUV

水下无人航行器的主要参数包括几何参数、最大舵角和航行时的最大速度。本试验所用水下无人航行器的航行参数列于表 1 中。

表 1 航行器主要航行参数
Table 1 Main navigation parameters of an UUV

长度/mm	直径/mm	质量/kg	最大舵角/(°)	最大速度/kn
2 980	324	176	25	8

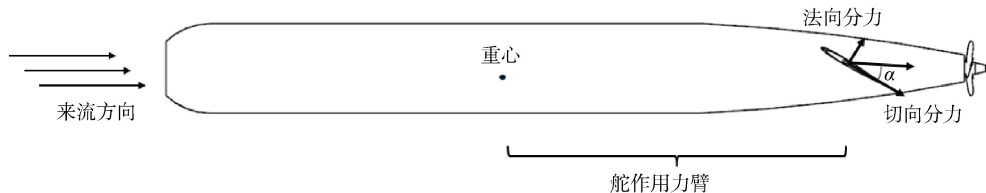


图 2 水下无人航行器舵板受力示意图
Fig. 2 Diagram of force on UUV's rudder plate

本试验中定义舵板逆时针旋转时舵角为正,顺时针旋转时舵角为负,假设此时舵角为 α 。对舵板

水下无人航行器螺旋桨转速与航速的关系如表 2。

表 2 航行器螺旋桨转速与航速关系
Table 2 Relationship between UUV's propeller speed and navigation speed

转速/(r/min)	航速/kn
300	1.0
400	1.7
500	2.3
600	2.6
700	2.9
800	3.2
900	3.6
1 000	4.0

影响航行器下潜阶段的水平舵板的尺寸如表 3。

表 3 水平舵板基本尺寸
Table 3 Basic dimensions of horizontal rudder plate

舵高/mm	舵宽/mm	舵面积/mm ²	展弦比
0.071	0.260	0.018 5	0.273

2 下潜过程机理介绍

通常情况下,航行器的剩余浮力与其质量存在关联。当剩余浮力过小时,航行器容易下潜,导致水面航行变得困难;而当剩余浮力过大时,航行器则难以下潜,无法进行水下作业。本研究中所使用的航行器的剩余浮力一般在 0~3 kg 之间。根据以往的试验经验,本次试验中将航行器的剩余浮力调整为 1.5 kg。在这种试验条件下,航行器在静水中的俯仰角约为 0.3°。此时,航行器的头部仅有极小的面积和尾部舵板露出水面。当航行器在水面上漂浮时,螺旋桨的转速为 0,航行器的重心与浮心在一条垂直线上,略高于浮心。具体的受力示意图如图 2 所示。

进行受力分析,发现切向分力对航行器产生使其上浮的力矩,该力矩的法向分力对航行器产生使其下

潜的力矩。当舵角大于 0° 时, 切向分力大于法相分力, 舵板对航行器产生上浮的力矩; 舵角小于 0° 时, 法向分力大于切向分力, 舵板对航行器产生下潜的力矩。

当航行器的航行速度较低时, 航行所受阻力与航行速度基本呈线性关系。然而, 随着航行速度的增加, 航行所受阻力的增加速率也增加, 导致航行所受阻力与航行速度之间呈现高次方的正比关系。航行器在行进过程中, 水流对舵翼产生升力, 从而对航行器施加扭矩, 促使其下潜^[8]。由于下潜过程中存在复杂的力学因素, 影响因素众多, 因此很难进行准确的定量分析^[9-11]。

本次试验中使用的航行器具有 2 种操作模式, 即人为手动遥控模式和预先编程模式。在人为手动遥控模式下, 操作人员通过手动输入下潜参数、调整螺旋桨转速和舵板舵角来控制航行器。需要说明的是, 本文中的舵角指的是影响俯仰的水平方向上的升降舵角, 并不包括垂直方向上的方向舵角。此外, 航行器还配备了应急措施, 即当连续 5 s 内无法接收到信号时, 航行器会进入应急状态。应急措施包括停止螺旋桨转动并自动调整舵角为 20° 。因此, 若舵角为 20° , 则表示航行器进入了应急状态。通过观察深度和俯仰角的变化, 可以判断航行器是否成功进行了下潜。

在本次试验中, 航行器的下潜模式包含 2 种。第 1 种下潜模式是先设定舵角, 然后再设定转速。具体而言, 首先调整舵板以使其达到所需的舵角数值, 然后给螺旋桨设定特定的转速。第 2 种下潜模式是先设定转速, 然后再设定舵角。具体来说, 首先使螺旋桨转速达到指定值且保持稳定, 然后再调整舵板的角。在本节中, 本文将对这 2 种下潜模式进行研究和讨论, 分别探究它们在航行器下潜过程中的效果 and 影响。

3 下潜过程试验研究

3.1 下潜参数选择

在本次试验中, 本文选取经验值 600 r/min 作为螺旋桨的转速, 并通过调整舵角来改变 UUV 的下潜姿态。当螺旋桨转速达到给定值且航速稳定

时, 本文开始计时下潜时间。

图 3 展示了在不同舵角条件下 (0° 、 -2° 、 -5°), 螺旋桨转速从 0 逐渐加速至 600 r/min 的加速下潜过程。横坐标表示时间, 左纵坐标表示螺旋桨转速, 右纵坐标表示升降舵角。图中蓝色线上端水平段所对应的时间即为 600 r/min 螺旋桨转速持续的时间, 也即下潜时间。

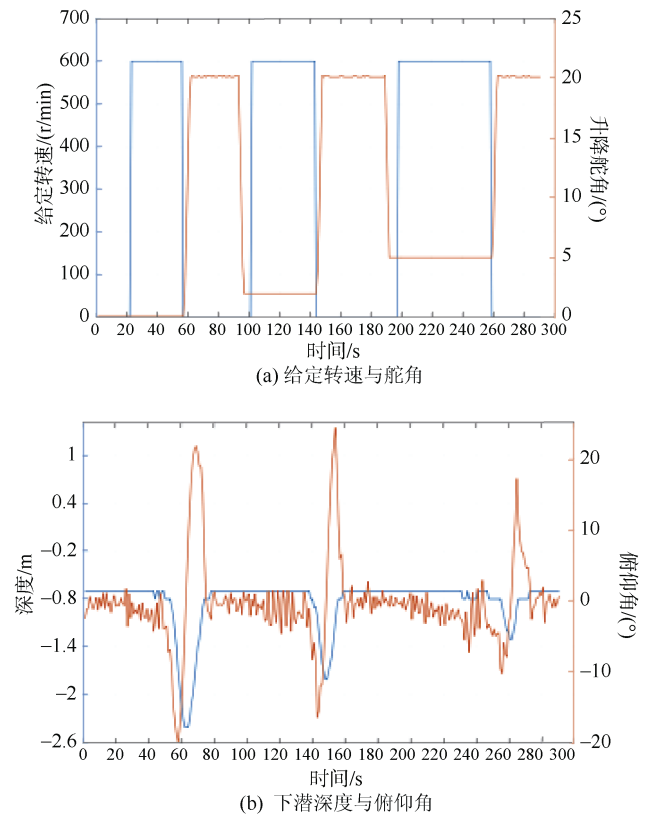


图 3 螺旋桨从 0 加速到 600 r/min 时舵角对航行器下潜过程的影响

Fig. 3 Influence of rudder angle on submergence process of an UUV when propeller accelerates from 0 to 600 r/min

需要注意的是, 当 UUV 静止在水中时, 对应的深度为 -0.65 m 。此外, 螺旋桨从 0 加速到 600 r/min 所需的时间约为 1 s, 在下潜过程中可以忽略不计。

根据试验数据分析, 本文得出以下结论:

1) 当舵角为 0° 时, UUV 的下潜时间约为 35 s, 下潜深度为 2.4 m, 最大俯冲角为 -20° 。从水面观察, UUV 下潜时间较短, 一次下潜成功且下潜姿态良好。

2) 通过改变舵板角度以增大下潜阻力, 本文测试了螺旋桨在从 0 加速到 600 r/min 时对 UUV 产生的转矩, 并通过转矩计算得出所需的正舵角。这个测试可以为后续航行起步加速过程中所需的最小舵角提供参考。当舵角为 2° 时, 下潜时间约为 42 s, 下潜深度为 1.8 m, 最大俯冲角为 -16°。UUV 下潜所需时间变长, 下潜深度和最大俯冲角减小, 但仍然能够顺利下潜。

3) 当舵角为 5° 时, 下潜时间约为 60 s。从水面观察到, UUV 下潜较为困难, 在多次尝试后才缓慢下潜。此时的下潜深度已降到 1.2 m, 最大俯冲角为 -12°。然而, UUV 刚进入水中就开始上浮, 推测此时处于刚好能够下潜的临界值。

表 4 不同舵角下螺旋桨转速 0~600 r/min 时的下潜结果

Table 4 Diving results at different rudder angles when propeller speed is from 0 to 600 r/min

螺旋桨转速/(r/min)	舵角/(°)	是否下潜成功
0~600	0	是
0~600	2	是
0~600	5	临界状态

通过以上分析, 本文对 UUV 在不同舵角条件下的下潜表现有了更详细的了解, 这些数据和观察结果对后续的研究和操作提供了重要的参考。

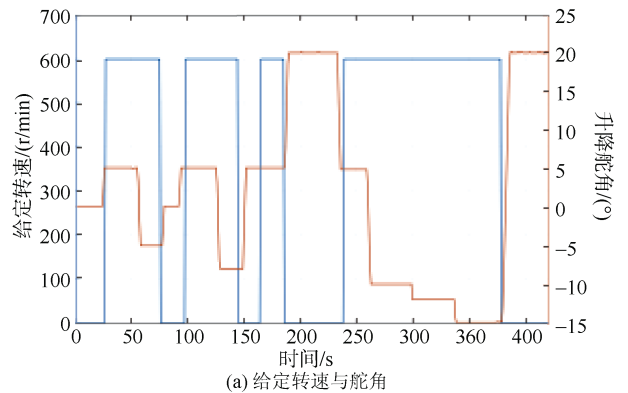
在第 2 种试验方案中, 本文采用了以下步骤: 首先设置螺旋桨转速为 600 r/min, 并等待螺旋桨转速达到给定值且航速稳定; 然后通过调整舵角来实现下潜, 并在舵角改变到指定值后开始计时。根据图 4 的分析结果, 本文得出以下观察和实验过程。

1) 起始舵角设定为 5°。一旦速度稳定, 将舵角设置为 -5°。经过一段时间观察后, 本文注意到 UUV 没有下潜的迹象, 因此本文停止了螺旋桨的转速。

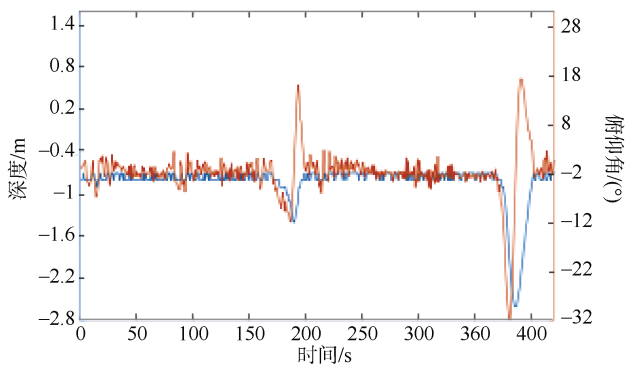
2) 本文将舵角设置为 -8°, 但 UUV 仍然没有下潜的迹象。本文继续尝试不同的舵角设置, 直到将舵角设置为 -15° 时, UUV 才成功下潜。

通过以上观察和实验过程, 本文得出结论: 在第 2 种试验方案中, 为了实现下潜, 需要将舵角逐渐增大。仅在将舵角设置为 -15° 时, UUV 才能成功下潜。这表明在给定的螺旋桨转速下, 较大的舵

角对于 UUV 的下潜是必需的。这一结果为后续操作和研究提供了重要的参考。



(a) 给定转速与舵角



(b) 下潜深度与俯仰角

图 4 主推转速 600 r/min 时舵角对航行器下潜的影响

Fig. 4 Influence of rudder angle on submergence when main thrust speed is 600 r/min

表 5 600 r/min 时不同舵角的下潜结果

Table 5 Diving results at different rudder angles when propeller speed is 600 r/min

螺旋桨转速/(r/min)	舵角/(°)	是否下潜成功
600	-5	否
600	-8	否
600	-10	否
600	-12	否
600	-15	是

在本节试验中, 本文采用了 2 种不同的试验方案: 第 1 种是先设定转速再设定舵角, 第 2 种是先设定舵角再设定转速。这 2 种方案在 UUV 的下潜参数上存在明显差异。

当螺旋桨转速从 0 加速至 600 r/min 时, 螺旋桨会对 UUV 产生一个扭矩, 使其下潜。此时, 下潜所需的舵角较小。当螺旋桨转速达到 600 r/min

时, UUV 处于水面平稳行驶的状态, 保持匀速前进。在这种情况下, 舵角的改变主要影响舵力的变化。因此, 在此时下潜所需的舵角较大。

需要注意的是, UUV 的舵角范围为 $-25^{\circ}\sim 25^{\circ}$, 在该范围内的舵角都是有效的, 即舵力仍然有效。因此, 不会出现舵力失效的情况。

综上所述, 2 种试验方案下潜所需的舵角存在差异。螺旋桨转速的变化对下潜参数产生影响, 而舵角的改变主要调整舵力。这些结果对后续操作和研究提供了重要的参考。

3.2 下潜最低转速

当螺旋桨转速由 0 升至 600 r/min 时, UUV 下潜时舵角最小为 5° , 该现象说明螺旋桨提供的推力足够大, 因此推断螺旋桨的转速仍有降低空间, 于是本小节将开展测试螺旋桨转速为 0~500 r/min 时 UUV 的下潜参数。

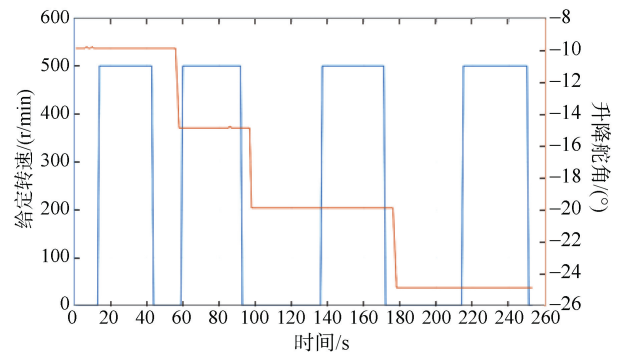
在测试螺旋桨转速为 0~500 r/min 时, 对 UUV 的下潜参数进行了分析。根据图 5 的结果, 采用第一种方案, 即先设定转速再设定舵角, 在螺旋桨转速为 0~500 r/min 的范围内, 无论舵角设置为 -10° 、 -15° 、 -20° 、 -25° , UUV 都无法成功下潜。这表明螺旋桨提供的推力和舵板产生的压力不足以克服 UUV 的剩余浮力, 导致 UUV 一直在水面漂浮。

图 5 中, 深度和俯仰角的变化在 30 s 处发生了变化, 这是由于被浪拍击造成的。

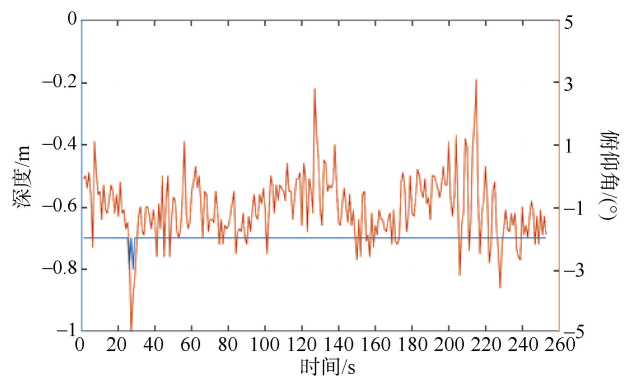
根据试验结果, 第 1 种试验方案下潜所需的舵角较小, 即舵角设置为最大值时仍无法使 UUV 成功下潜。因此, 推断第 2 种试验方案也无法使 UUV 成功下潜。

综上所述, 通过对螺旋桨转速为 0~500 r/min 时的试验分析, 发现目前所采用的方案无法使水下无人航行器成功下潜。可能需要进一步调整螺旋桨的转速或采用其他的控制策略来实现下潜。

进一步测试螺旋桨转速为 0~550 r/min 时, 即使舵角设置为 -25° , UUV 仍无法成功下潜。这表明螺旋桨提供的推力和舵板产生的压力不足以克服 UUV 的剩余浮力, 导致 UUV 一直在水面漂浮。



(a) 给定转速与舵角



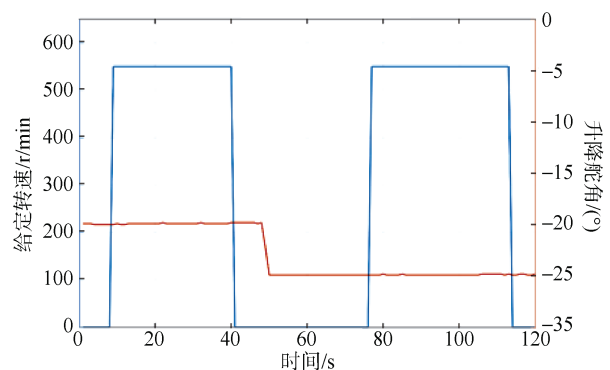
(b) 下潜深度与俯仰角

图 5 螺旋桨从 0 加速到 500 r/min 时舵角对航行器下潜过程的影响

Fig. 5 Influence of rudder angle on submergence process when propeller accelerates from 0 to 500 r/min

继续增大螺旋桨转速到 580 r/min, 当舵角达到最大值 -25° 时 UUV 成功下潜, 此时下潜深度为 1.4 m, 最大俯冲角为 -25° 。当减小舵角为 -20° 时, UUV 无法下潜, 增大到 -22° 时 UUV 仍无法下潜。

可以认为, 该 UUV 下潜所需的最低转速为 580 r/min, 但此时下潜所需舵角过大, 且 UUV 下潜姿态不理想。



(a) 给定转速与舵角

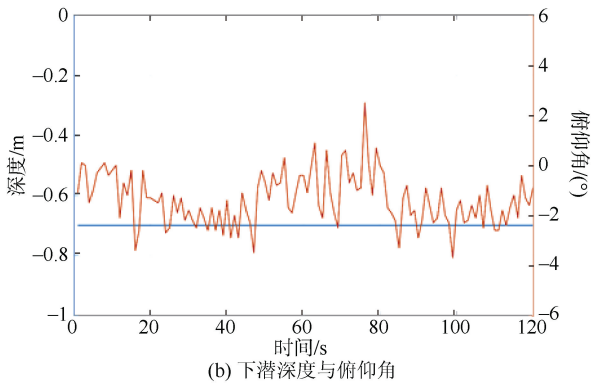


图 6 螺旋桨从 0 加速到 550 r/min 时舵角对飞行器下潜过程的影响

Fig. 6 Influence of rudder angle on submergence process when propeller accelerates from 0 to 550 r/min

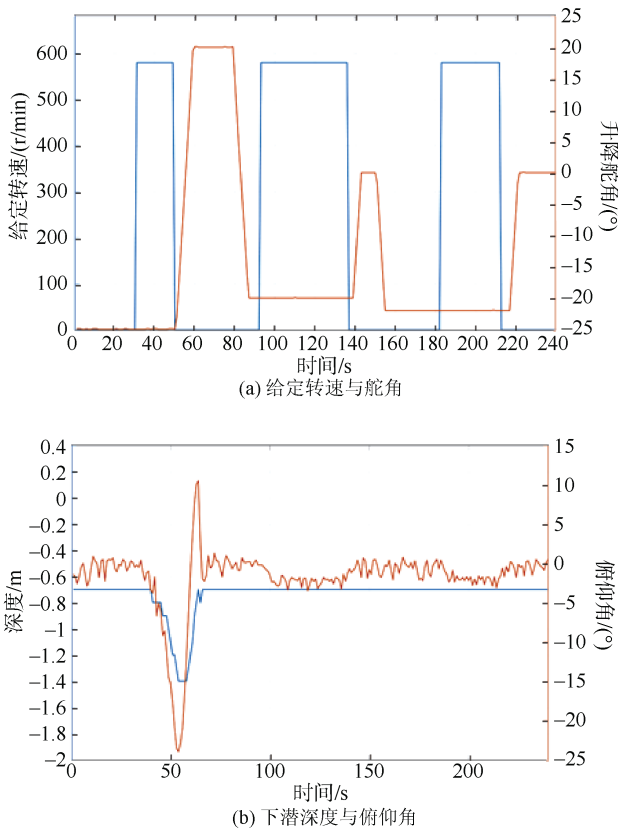


图 7 螺旋桨从 0 加速到 580 r/min 时舵角对飞行器下潜过程的影响

Fig. 7 Influence of rudder angle on submergence process when propeller accelerates from 0 to 580 r/min

3.3 下潜最小舵角

本小节研究的目的是增大螺旋桨转速来测试 UUV 下潜所需的最小舵角。由上文可知，螺旋桨转速为 0~600 r/min 时，UUV 下潜舵角最小为 5°，

该现象说明螺旋桨提供的推力足够大，因此当螺旋桨转速继续增大时，UUV 下潜所需的舵角会继续减小。

表 6 不同舵角下的下潜结果

Table 6 Diving results at different rudder angles

螺旋桨转速/r/min	舵角/(°)	是否下潜成功
0~500	-10	否
0~500	-15	否
0~500	-20	否
0~500	-25	否
0~550	-20	否
0~550	-25	否
0~580	-25	是
0~580	-20	否
0~580	-22	否

测试螺旋桨转速为 0~700 r/min 时 UUV 的下潜参数并将结果绘制于图 8 中。通过图 8 分析得，当舵角从 0°增加到 10°时，UUV 始终可以下潜，当舵角增大到 12°时 UUV 无法下潜。

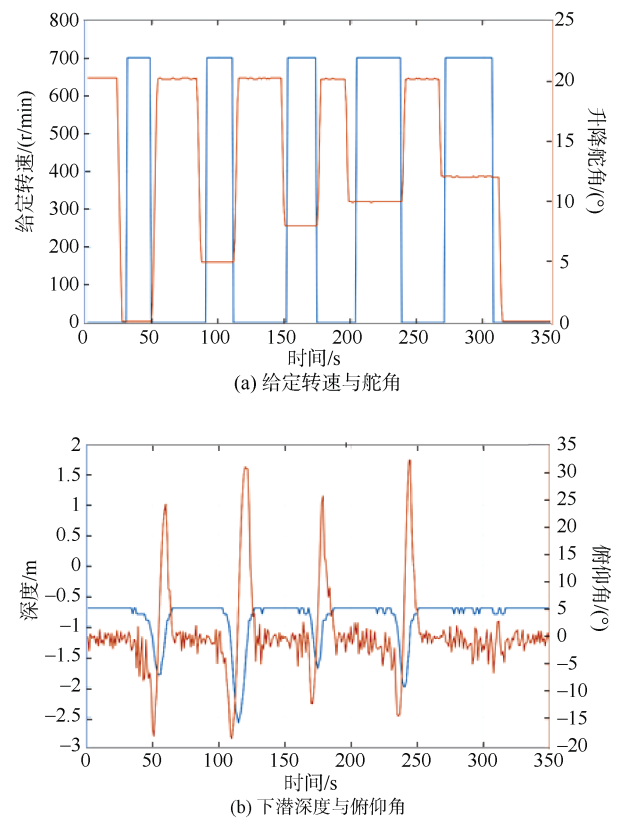


图 8 螺旋桨从 0 加速到 700 r/min 时舵角对飞行器下潜过程的影响

Fig. 8 Influence of rudder angle on submergence process when propeller accelerates from 0 to 700 r/min

表 7 不同舵角下 0~700 r/min 时的下潜结果

Table 7 Diving results at different rudder angles when propeller speed is from 0 to 700 r/min

螺旋桨转速/(r/min)	舵角/(°)	是否下潜成功
0~700	0	是
0~700	5	是
0~700	10	是
0~700	12	否

根据实验结果可知,随着舵角的增加,UUV下潜深度和最大俯冲角都在减小,下潜姿态变得越来越平稳。综上,螺旋桨转速为 0~700 r/min 时航行器所需的下潜舵角为 10°。第 1 种试验方案 UUV 下潜所需的舵角较小,因此可知此时第 2 种方案下潜舵角小于 10°。

3.4 最佳下潜参数

在 UUV 下潜过程中,保持平稳的姿态是一项重要考虑因素。俯仰角和下潜深度应控制在适度范围内,因此在下潜过程中,需要尽量减小舵板舵角和螺旋桨转速,以实现平缓的下潜。然而,为了适应逆流和复杂环境条件下的下潜要求,还需要保留一定的余量。

针对螺旋桨转速为 700 r/min 的 UUV 下潜情况,使用的下潜舵角为 10°,这还有一定的余量可供调整。因此,进行了螺旋桨转速为 0~650 r/min 的下潜参数测试。在 650 r/min 时,螺旋桨的推力大于 600 r/min,而理论下潜所需的舵角为 5°。然而,根据图 9 的观察,即使将舵角从 8°减小至-2°,仍无法实现下潜。经过分析,这是由于 UUV 受到风浪因素的影响,湖面上的风浪明显增大。即使改变航向并再次尝试,仍然无法成功下潜。

因此,对于 UUV 的下潜过程,需要综合考虑舵角、螺旋桨转速和外部环境因素,以确保安全下潜的实现。

鉴于 UUV 在实际工作中常面临恶劣天气条件,为确保其在恶劣海况下成功下潜并具备一定的冗余能力,本文进一步增大螺旋桨转速来测试 UUV 的下潜参数。

本文进行了螺旋桨转速从 0 到 680 r/min 的测试,并将结果列于图 10 中。通过对图 10 数据的分

析,实验发现当螺旋桨转速达到 680 r/min 时,UUV 的航速为 2.6 kn。当舵角为 5°时,UUV 能够成功下潜;而当舵角为-2°时,UUV 的下潜姿态较为理想,并具备一定的冗余能力,螺旋桨推力和舵角均大于所需的最小下潜参数。从水面观察,UUV 的下潜过程平稳且下潜时间较短。

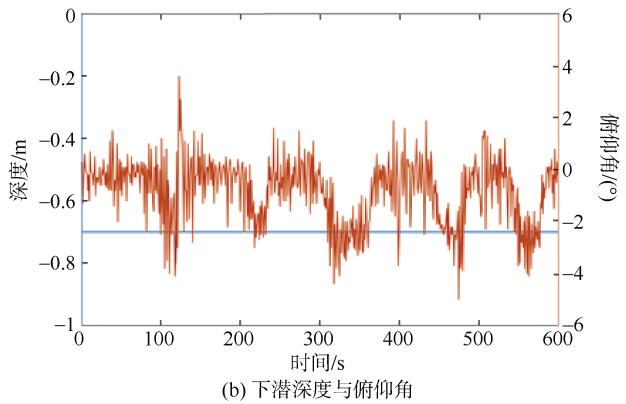
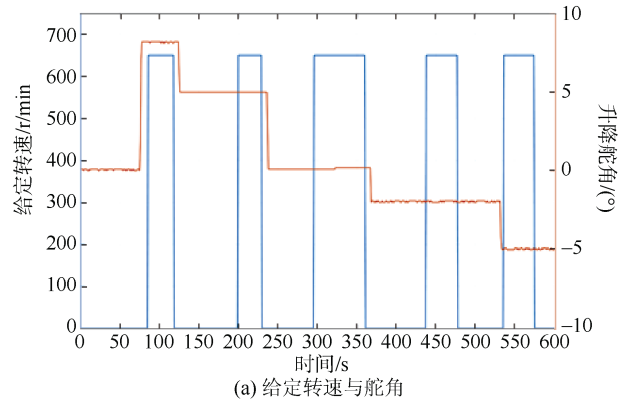
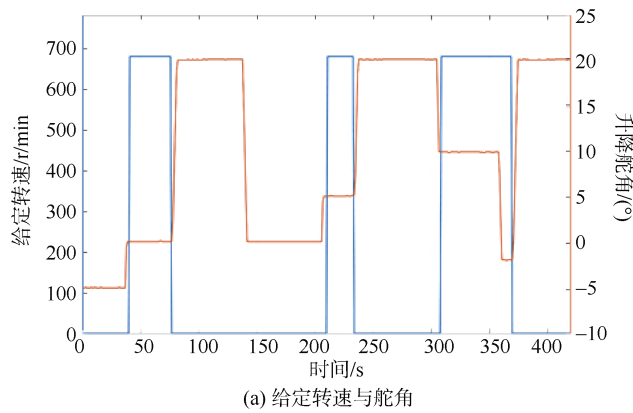


图 9 螺旋桨从 0 加速到 650 r/min 时舵角对航行器下潜过程的影响

Fig. 9 Influence of rudder angle on submergence process when propeller accelerates from 0 to 650 r/min



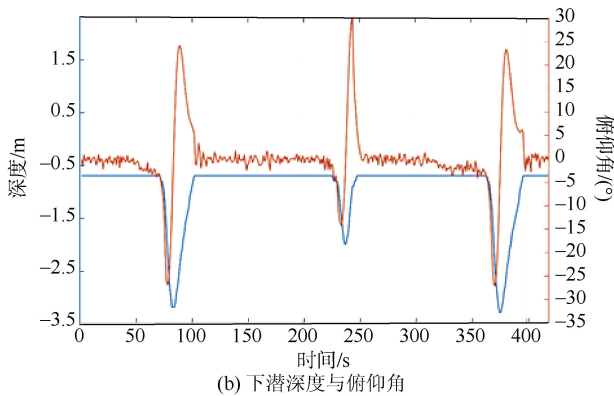


图 10 螺旋桨从 0 加速到 680 r/min 时舵角对飞行器下潜过程的影响

Fig. 10 Influence of rudder angle on submergence process when propeller accelerates from 0 to 680 r/min

表 8 不同舵角下 0~680 r/min 时的下潜结果

Table 8 Diving results at different rudder angles when propeller speed is from 0 to 680 r/min

螺旋桨转速/(r/min)	舵角/(°)	是否下潜成功
0~680	0	是
0~680	5	是
0~680	10	否

综合考虑,本文选择了螺旋桨转速为 680 r/min 和舵角为 -2° 作为 UUV 的下潜参数,并在多种环境条件下进行了 UUV 的下潜试验。试验结果较为理想, UUV 的下潜成功率高达 95%。

4 结束语

本研究通过在湖上进行试验,对小型水下无人飞行器在不同螺旋桨转速和舵角下的下潜过程进行了研究,并得出以下结论:在保持其他条件不变的情况下, UUV 的最小下潜转速为 580 r/min,低于该转速时无法实现下潜。随着螺旋桨转速的增加, UUV 下潜所需的舵角减小。当螺旋桨转速高于 680 r/min 时,即使是正舵角也能够实现下潜,这为 UUV 在水面航行时提供了不下潜所需最小舵角的参考。

随着转速的增加, UUV 的下潜姿态先变好后变差。因此,在选择 UUV 的下潜参数时,应尽量选择较低的螺旋桨转速和接近水平的舵角,以实现最佳的下潜姿态和较短的下潜时间。本研究选择了螺旋桨转速为 680 r/min 和舵角为 -2° 作为该 UUV

的最佳下潜参数。

螺旋桨转速的增加对于 UUV 的下潜过程起正向作用,舵板角度的增加对于 UUV 的下潜过程起反向作用,通过二者的配合才能使得航行器实现平稳下潜。对于不同的 UUV 来说,由于使用场合的不同,螺旋桨的直径和转速以及舵板的结构都存在差异,因此文中提到的螺旋桨转速和舵板角度不具有可直接复制的条件。本文中 UUV 螺旋桨转速对应的航速和下潜时的姿态可作为参考,对于小型水下无人水下航行器来说,下潜时航速控制在 2~3 kn,俯仰角控制在 $-15^\circ\sim-25^\circ$ 之间,舵板角度控制在 $-5^\circ\sim5^\circ$ 之间,可以使得航行器平稳下潜,所用时间较短,且下潜姿态较为理想,并具备一定的冗余能力。

参考文献

- [1] 肖玉杰,邱志明,石章松. UUV 国内外研究现状及若干关键问题综述[J]. 电光与控制, 2014, 21(2): 46-49, 89.
- [2] 伍尚慧. 国外无人潜航器的发展现状与趋势分析[J]. 军事文摘, 2018, 25(5): 18-20.
- [3] 刘乐华,赵蛟龙,巩天成. 美国水下无人系统发展趋势分析[J]. 数字海洋与水下攻防, 2019, 2(1): 18-23.
- [4] 智达. 国外海军无人潜航器发展综述[J]. 船舶工程, 2022, 44(8): 170-172.
- [5] HEO J, KIM J, KWON Y. Technology development of unmanned underwater vehicles (UUVs)[J]. Journal of Computer and Communications, 2017, 5(7): 28-35.
- [6] NOMAN A A, TUSAR M H, UDDIN K Z, et al. Performance analysis of an unmanned underwater vehicle using CFD technique[C]// 8th BSME International Conference on Thermal Engineering. Dhaka: American Institute of Physics, 2019.
- [7] 龚旒德. 无人水下航行器姿态控制研究[D]. 上海:上海第二工业大学, 2021.
- [8] 钱卫忠. 谈船舶在受限水域中操纵临界点评价参数研究及应用[J]. 航海, 2021, 42(6): 33-36.
- [9] 李文颖,郭睿男,咎英飞. 入水角对无人水下航行器自由入水影响的数值模拟[J]. 船舶工程, 2021, 43(10): 160-165.
- [10] 高伟,谷海涛,冯萌萌. 水下机器人舵翼参数设计与优化[J]. 海洋技术学报, 2021, 45(4): 74-83.
- [11] 章乐多. 水下航行器基础运动控制仿真研究[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(3): 157-161.

(责任编辑:肖楚楚)