

李志彤,董凌宇,陆凯,等. 深海拖曳系统水下控制技术研究[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(3): 30-39.

LI Zhitong, DONG Lingyu, LU Kai, et al. Research on underwater control technology of deep-sea towing system[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(3): 30-39.

深海拖曳系统水下控制技术研究

李志彤^{1,2,3}, 董凌宇^{1,2}, 陆凯^{1,2}, 单瑞^{1,2}, 周吉祥^{1,2}

(1 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237; 2 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237; 3 自然资源部海底科学重点实验室, 杭州 310012)

摘要: 深海拖曳系统是人类开发利用海洋的一项重要手段。在众多深海探测装备中, 深海拖曳系统以探测面积广、作业效率高、操控性能好等优势而得到了广泛应用。针对深海拖曳系统水下控制技术, 从控制手段和控制策略 2 个方面对其发展历程、国内外研究现状等进行梳理, 分析对比不同控制手段的优缺点, 并对深海拖曳系统水下控制技术未来的研究方向进行展望, 以期对深海拖曳系统的应用与发展提供参考。

关键词: 深海拖曳系统; 水下控制技术; 控制手段; 控制策略

中图分类号: P736; P71

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.037

0 引言

深海探测是人类实现可持续发展的战略途径和重要手段^[1], 而海洋观测探测技术的水平, 决定着海洋科学的发展水平^[2]。在建设海洋强国^[3]、聚焦深海探测、加快壮大海洋装备产业的政策导向下, 深海探测装备迅猛发展。作为深海探测技术的一项重要手段, 深海拖曳系统由拖体、拖缆和专用绞车等设备组成, 拖体内部可搭载各种海洋物理或化学探测传感器^[4], 广泛应用于海洋环境探测^[5]、海洋地质调查^[6]、海底地图绘制^[7]、海洋资源勘探^[8]、军事侦察^[9]、水声对抗^[10-11]等军用和民用领域。

在实际作业中, 海水密度、盐度等物理参数的变化可能造成拖曳系统的平衡状态失稳, 洋流、内波等复杂深海环境及拖曳母船的升沉运动时刻干扰深海拖曳系统的稳定运行, 并且拖曳母船、拖缆、拖体及绞车设备之间也存在极为复杂的相互作用,

都将严重影响系统的探测效果^[12]。以主动式声呐列阵拖曳系统为例, 当拖体的姿态快速变化时, 几乎不能接收到声波的反射, 导致声呐的探测能力下降^[13]。因此, 深海拖曳系统的运动稳定性会对探测精度产生重要影响, 甚至直接关系到任务的成败。

随着国家对深海探测开发的重视, 复杂作业环境下的海底精细探测和深海高精度调查任务日益增多, 亟需提高深海探测设备的数据采集质量。同时, 拖体搭载的声呐、深海摄像系统、重磁测量系统等高精度探测设备的工作性质也要求拖体在作业过程中必须保持姿态稳定, 并且具备灵活快速的姿态和深度调节能力^[14]。因此, 深海拖曳系统水下控制技术的可行性与可靠性成为保证拖体作业稳定及数据采集质量的关键。

鉴于此, 本文将从深海拖曳系统水下控制技术的控制手段和控制策略 2 方面开展综述, 简述其发展历程与研究现状, 分析不同控制技术的优缺点, 并对其未来发展方向进行展望。

1 深海拖曳系统水下控制手段

深海拖曳系统水下控制手段的可靠性直接关系到拖体的运动稳定性^[15]。为了实现对深海拖曳系统的良好控制, 学者已经开展了相关水下控制手段的研究^[16-17]。如图 1 所示, 目前深海拖曳系统水

收稿日期: 2022-02-10

资助项目: 国家自然科学基金“深海拖体主被动姿态调节及定深控制方法研究”(42106186); 自然资源部海底科学重点实验室开放基金“面向复杂海况的深海拖体自适应主被动姿态调节及定深控制技术研究”(KLSG2104); 中国地质调查局项目“深海调查、测量”(DD20191003)

作者简介: 李志彤(1994—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事海洋观测探测装备方面的研究工作。E-mail: lizhitong199488@163.com

下控制手段可分为拖缆控制手段、拖体控制手段和二级深拖系统 3 种^[18]。

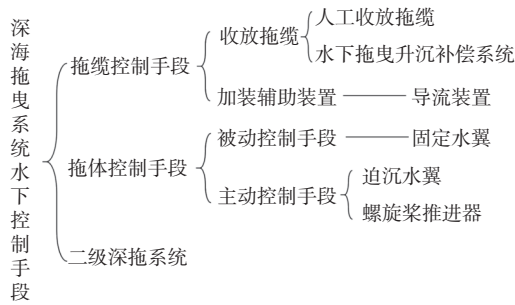


图 1 深海拖曳系统水下控制手段分类

Fig.1 Classification of underwater control means for deep-sea towing systems

1.1 拖缆控制手段

深海拖曳系统的拖缆长达几千米,在拖曳过程中,系统受到非常大的流体阻力,其中绝大部分为拖缆受到的阻力,拖缆阻力会直接影响到深海拖体的水下姿态和拖曳深度。此外,受材料特征、水动

力载荷以及外界环境干扰的影响,整个拖缆系统非常复杂,具有强非线性及时变性等特点,导致拖缆控制手段的研究一直是难点问题。

拖缆控制手段主要包括收放拖缆和加装辅助装置 2 种方式。其中,通过人工收放拖缆^[19]调节拖体的拖曳深度是最常见的拖缆控制手段,但该手段存在操作繁琐、时滞性高等缺点;针对这一问题,李世振等^[20]、王海波等^[21]在绞车上加装了水下拖曳升沉补偿系统^[22](图 2a),能够根据母船的升沉运动自适应收放拖缆,实现了对拖曳深度的自适应调节。而辅助装置主要指的是导流装置(图 2b)^[23],为了降低拖缆的拖曳阻力,研究人员基于空气动力学理论发明了导流装置,其基本原理是将导流装置加装在拖缆上,利用其良好的水动力性能降低拖缆阻力^[24],常用的导流装置包括发状导流装置、包裹式导流装置、夹式导流装置以及流线型导流装置^[25]。研究表明,导流装置可有效降低拖缆阻力与拖缆抖动,从而提高拖体的运动稳定性^[26]。

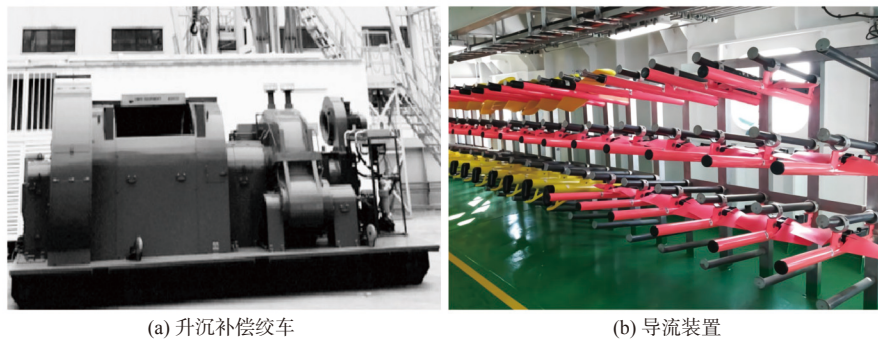


图 2 两种拖缆控制手段

Fig.2 Two streamer control means

虽然目前的拖缆控制手段具有较好的深度调节能力,但是该手段为间接调节方式,无法精确调控拖曳深度,且难以直接有效调节拖体姿态,不能满足深海高精调查对高质量探测数据的需求。因此,拖缆控制手段适用于对拖体运动稳定性要求不高的情况。

1.2 拖体控制手段

相比于拖缆控制手段,拖体控制手段具有更好的可拓展性和应用前景。拖体控制手段主要是通过一定的技术手段实现对拖体水下姿态和拖曳深度的控制,分为主动控制手段和被动控制手段 2 种^[27]。

1.2.1 拖体被动控制手段

被动控制手段是指拖体的姿态与深度取决于拖体的重量或固定水翼^[28-29],当拖体的拖曳速度和拖缆长度一定时,拖体将具有恒定的拖曳深度。早期的拖体多采用被动控制手段,通过安装固定水翼被动地控制拖体姿态或深度,“TowCam”型拖体^[30](图 3a)是一种深海摄像系统,通过安装流线型翼板使其能够在距离海底一定高度范围内定高航行。丹麦的“TIAXUS”型拖体^[18](图 3b)采用 NACA 流线型翼板作为首尾升降舵,可以实现垂直方向上的定高航行。国外其他比较典型的采用被动控制手段的深海拖体还包括美国的“ARGUS”^[31]和“ARGO”^[32]以及日本的“SHINKAI2000”^[33]等一

系列产品。国内对于深海拖曳系统的研究起步较晚,上海交通大学研发了一套“ST-6000”深海光学深拖系统(图3c)^[34-35],采用基于固定水翼的被动控制手段。此外,苑志江等^[36]设计出了一种双三角

翼型拖体(图3d),具有良好的定深性能。类似于拖缆控制手段,由于无法进行主动调控,拖体的被动控制手段存在灵活性与作业适应性差、可靠性与准确性低、抗干扰能力弱等缺点。



图3 采用被动控制手段的深海拖体

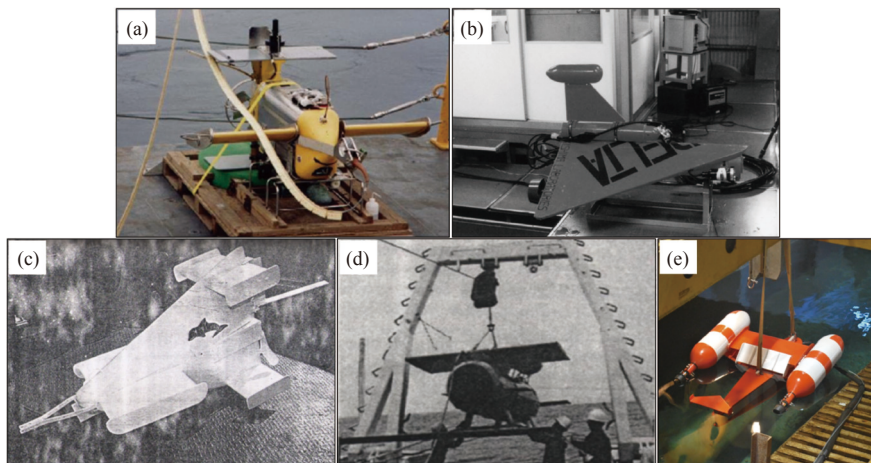
Fig.3 Deep-sea towing body with passive control means

1.2.2 拖体主动控制手段

随着研究的深入,学者们发现比起被动控制,主动调控具有更好的灵活性和作业适应性。主动控制手段是指通过加装主动控制机构,使拖体产生足够的迫沉力、侧向力或俯仰力,从而实现对拖体深度或姿态的控制^[37]。其中,大多数拖体主动控制手段是通过调节迫沉水翼的攻角实现对拖体的控制^[38]。英国的“Sea Soar”型拖体^[39](图4a)在艏部安装了一台用于辅助推进的螺旋桨推进器,通过内置于本体的液压装置驱动迫沉水翼,使得拖体在拖曳过程中具有良好的运动稳定性。SCHUCH等^[40]借助2个独立的电机通过链条/链轮组件驱动2个水平翼,从而实现了水翼攻角的调控。但由于拖曳过程中水翼受到的阻力较大,这种控制方式需要安装在拖体内的电机具有很高的驱动扭矩才能调节迫沉水翼的攻角,对电机的输出功率要求较高。

进一步,为简化控制机构,降低对电机功率的要求,日本九州大学研制的“Delta”型拖体^[41](图4b)安装了固定控制翼面,通过拖体内部的纵倾调节滑块调节拖体重心位置,从而改变了水翼攻角。类似地,WOOLSEY和GARGETT^[42]利用内置于拖体的螺杆机构调节拖体的重心位置,通过改变固定水翼攻角实现了拖体的定深控制。

然而,以上的拖体主动控制手段仅能实现对姿态或深度中某单一变量的调控,无法同时调控拖体的水下姿态与拖曳深度,导致作业适应性较差。针对这一不足,加拿大的“Batfish”型拖体(图4c)^[43]通过调节迫沉水翼攻角产生一定的迫沉力,实现拖体定深拖曳,基于水平尾翼调节拖体纵倾,保证拖体的纵稳性;同样,日本九州大学研发的“Flying Fish”拖曳系统(图4d)^[44-45]通过改变主水平控制面的攻角进行深度调节控制,并通过改变尾水平控制



(a) “Sea Soar”型拖体; (b) “Delta”型拖体; (c) “Batfish”型拖体; (d) “Flying Fish”型拖体; (e) 多自由度可操纵拖体

图4 采用主动控制手段的深海拖体

Fig.4 Deep-sea towing body with active control means

面的攻角实现横摇、转向等姿态控制。

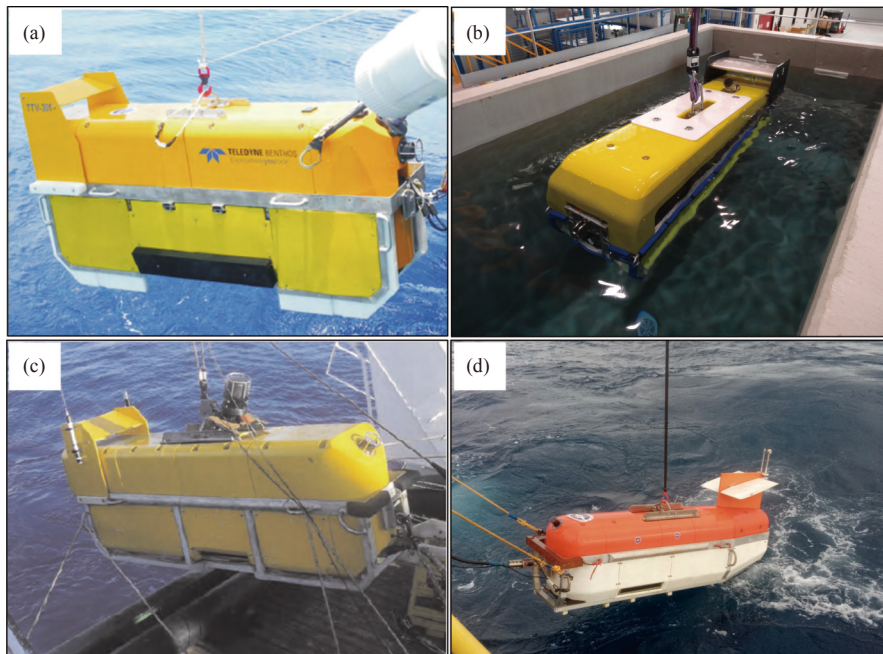
国内学者也开展了拖体主动控制手段的研究。杨晓帆等^[46]通过程序控制机翼的攻角以改变升力, 从而控制拖体下潜、上升和定深。吴家鸣团队^[47]设计了一种多自由度可操纵水下拖体(图 4e), 具有航向稳定性好、自稳定能力强等优点。孙焯等^[48]为了进一步提高拖曳系统的深度调节性能, 设计了一种类似于滑翔机原理的拖体, 通过内部机构调节拖体重心来改变拖体的运动姿态和工作深度。

通过拖体本身水翼攻角的变化调控拖体姿态和深度是一种实时快捷的控制手段, 但是为了保持拖体的运动稳定性, 需要不断地调节水翼攻角, 因此需要较为复杂的控制机构和控制方法, 大大增加了拖曳系统的复杂程度与操作难度^[49]。此外, 加装主动控制机构也会使系统的成本相应增加^[50], 这些缺点导致该控制手段难以得到推广与应用。

1.3 二级深拖系统

国内外学者已对二级深拖系统开展了深入的理论与应用研究^[51-52]。二级深拖系统由“母船—

级拖缆(重缆)—一级拖体(中继器)—二级拖缆(轻缆)—二级拖体”组成^[53]。在系统入水期间, 由一级拖体承受重缆和流体施加的各种外力, 释放二级拖体后, 一级拖体吸收母船和重缆的升沉运动, 保证了二级深拖系统良好的定深性能^[54-55]。目前, 国内外比较典型的二级深拖系统包括美国 Teledyne Benthos 公司生产的“TTV-301”声学深拖系统^[56](图 5a)、法国 iXblue 公司生产的“SAMS-DT6000”深海综合拖曳观测系统^[57](图 5b)、中科院声学所研发的“DTA-6000”声学拖曳系统^[58](图 5c)以及青岛海洋地质研究所研发的 3 000 m 级声学深拖系统^[59](图 5d)等一系列产品, 其中, “TTV-301”声学深拖系统和“SAMS-DT6000”深拖系统在正常作业环境下均具有很强的姿态稳定性: 最大横摇和纵摇角度为 1°, 最大横摇和纵摇周期为 5 s, 最大升沉量为 0.15 m。但二级深拖系统的自主姿态调节功能欠佳, 针对这一不足, SCHUCH 等^[40]研发了一种包括艏水平翼和艉稳定翼的二级拖体, 能够在拖曳过程中通过自主调节艏水平翼保持姿态稳定, 具有自主调节姿态的功能。



(a) “TTV-301”型拖体; (b) “SAMS-DT6000”深拖系统; (c) “DTA-6000”声学拖曳系统; (d) 3 000 m 级声学深拖系统

图 5 二级深拖系统

Fig.5 Two-stage deep towing system

虽然二级深拖系统具备良好的姿态稳定性, 但由于集成了中继器、二级轻缆等设备, 增加了系统的复杂程度, 系统存在成本高、布放回收困难、安全性低等缺点, 有待在理论与应用上进一步优化

提升。

1.4 小结

深海拖曳系统不同水下控制手段的对比如表 1

表1 深海拖曳系统不同水下控制手段对比

Table 1 The comparison of different underwater control means of underwater towed systems

水下控制手段		文献	应用与提升	优缺点	
拖缆控制手段	收放拖缆	人工收放 [19]	简单有效	简单有效,深度调节作用显著;无法精确调控拖曳深度与拖曳姿态,控制精度低(能实现数米内的升沉波动)	
		水下拖曳升沉补偿系统 [20-22]	自适应调节拖曳深度		
	加装导流装置 [23]	有效降低拖缆阻力与拖缆抖动			
拖体控制手段	被动控制手段	安装固定水翼 [18,30,31-35]	加装流线型翼板	技术简单,调节能力有限,可靠性与准确性低(能实现数米内的升沉波动)	
		[36]	加装双三角翼型翼板		
	[39]*	推进器——辅助推进液压装置——驱动水翼转动			
	[40]*	电机-链条-链轮组件——驱动水翼转动			
	[41]*	纵倾调节滑块——调节拖体重心位置			
	主动控制手段	调节迫沉水翼攻角或加装推进器	[42]*		螺杆机构——调节拖体重心位置
			[60]*		内部机构——调节拖体重心
[43]^			调节迫沉水翼攻角——定深拖曳;水平尾翼——调节纵倾角		
[44-45]^			深度、横摇、转向等多自由度控制		
[47]^	多自由度可操纵水下控制				
二级拖曳系统	被动控制手段	安装固定水翼 [56-59]	良好的运动稳定性	姿态稳定性高(正常海况下,横摇和纵摇角度可 $\leq 1^\circ$,横摇和纵摇周期可 ≤ 5 s,升沉量可 ≤ 0.15 m);成本高,布放回收困难,系统复杂	
	主动控制手段	调节迫沉水翼攻角 [40]	电机驱动尾翼调节拖体俯仰角		

注:标记*的解释为仅能调节单一拖曳自由度;标注^的解释为能够调节多个拖曳自由度。

所示。总体来看,拖缆控制手段简单有效,具有较好的深度调节能力,但是存在无法精确调控拖曳深度,且难以直接有效调节拖体姿态等缺陷。拖体控制手段中的被动控制手段具有和拖缆控制手段类似的优缺点,而对于拖体主动控制手段,该方法是一种精准可靠的拖体水下姿态和拖曳深度控制方法,但是受制于系统复杂度、控制响应以及成本因素限制,导致该控制手段难以得到推广与应用。二级拖曳系统可以很好地弥补拖缆控制手段和拖体控制手段的不足,但是二级拖曳系统复杂程度高、成本高、布放回收困难、安全性低。

2 深海拖曳系统水下控制策略

深海拖曳系统水下自适应控制的基本思路为通过安装一定的控制机构,配合先进的自适应控制理论、人工算法等控制策略,实现对拖体姿态或深度的有效调控,而明确拖体在姿态调节过程中的动力学特征并准确描述和预测拖体的运动状态是设计高鲁棒性水下控制策略,从而实现复杂作业环境下对拖体水下姿态与拖曳深度精确调控的先决条件。由于拖曳母船、拖缆和拖体之间存在强耦合作用,有必要开展整个拖曳系统的运动学研究。

针对拖缆的运动学研究方法中,有限差分法和

集中质量法是应用最为广泛的2种方法^[61]。其中,ABLOW和SCHECHTER^[60]利用有限差分法建立的模型最具有代表性,能够预测拖缆系统在大多数工况下的运动状态。李英辉等^[62]以ABLOW和SCHECHTER提出的拖缆模型为基础,对有限差分法进行了改进,得到了比较稳定的描述拖缆运动特征的控制方程。GOMES等^[63]提出了一种用于拖缆系统动态建模的新方法,进一步预测了拖缆系统的运动学特征。对拖体而言,CHAPMAN^[64]首先提出了关于拖体的二维运动控制方程,其他学者又进一步扩展到三维运动。经过不断改进优化,目前最完整和常用的水下拖体运动学方程是由GERTLER和HARGEN^[65]首先提出,后经ABKOWITZ^[66]改进的水下航行器六自由度运动学方程。为解决拖曳系统各部分之间的耦合问题,SUN等^[67]通过耦合母船-拖缆建立了整个系统的运动学模型,分析了母船的航速和航向对拖缆结构和动力学特性的影响。为了更加准确地描述深海拖曳系统的运动特征,苑志江等^[68]建立了母船-拖缆-拖体三者耦合模型,进一步提高了对不同情况下拖曳系统运动响应的预测精度。

受控制理论的限制,早期的控制策略多采用经典的PID控制,BUCKHAM等^[69],KOTERAYAMA等^[70],卢祎斌等^[71],郑智林等^[72]分别设计了相应的

PID 控制器。由于拖体是强耦合强非线性系统, 仅利用 PID 控制策略难以实现拖体在强烈干扰下的精确控制。随着控制理论的发展, 自适应控制策略开始应用于拖体的水下控制, KATO 等^[73-74]设计了一种深海拖体模糊控制器, 并提出了一种模糊控制规则。TEIXEIRA 等^[75]设计了一种非线性自适应控制器, 通过仿真分析验证了该控制器的优异性能。GOBAT 等^[76]设计的非线性求解器采用自适应的松弛因子来改善结果的鲁棒性。

进一步, 为提高拖体的抗扰动能力, 强鲁棒性自适应控制策略被广泛应用于深海拖体的姿态与深度控制^[77], CAMPA 等^[78]通过自适应方法选择控制器的权重系数, 较好地克服了系统的非线性效应。日本的“Flying Fish”和“Delta”型拖体采用 LQI 线性二次积分控制法控制拖体的深度和纵摇, 并设计了 H_{∞} 控制器以改进对深度和纵摇的控制效果^[43]。WU 和 CHWANG^[79]提出了一种拖体控制模型, 并验证了该模型能够实现对垂直和水平水翼的自适应控制, 但该模型未考虑风和浪的干扰。考虑到波浪和涌的影响, KATO 等^[80]提出了一种耦合水平和垂直面的控制模型, 通过仿真验证了拖体具有良好的自适应控制性能。

为进一步提高拖体的自适应控制性能, FRANCISCO 等^[81]设计了一种基于李雅普诺夫函数的非线性自适应输出反馈控制律, 仿真结果显示, 当拖体受到海浪干扰时, 拖体具备良好的运动稳定性。MINOWA 等开展了关于拖体鲁棒控制的研究, 提出了一种基于高增益观测器的鲁棒运动控制器^[82], 并根据前期研究成果, 针对高阶系统开展了更深入的研究, 提出了一种 LQI 控制器^[83], 均实现了对拖体姿态的良好控制。

近年来, 随着人工智能的发展与应用, 神经网络、遗传算法等人工智能算法也开始应用于深海拖曳系统的控制策略中。吴家鸣等^[84]基于神经网络理论建立了水下拖体的流体动力数值模型, 并验证了计算模拟的结果是真实可靠的。井安言等^[85]设计了一种基于 RBF 神经网络的水下拖体直接自适应控制器, 实现了良好的拖体姿态控制, 并针对拖体动力学模型的动态非线性与不确定性及外部环境干扰问题, 提出了一种基于自适应神经网络和映射修正自适应律的补偿控制系统, 实现了对拖体控制系统状态变量的实时观测与补偿控制^[86]。

尽管学者已对深海拖曳系统水下控制策略开展了深入研究, 但是大多数的研究成果仅聚焦于对

单一维度的调控, 并且现有的控制策略未充分考虑在控制机构输入饱和、水动力参数不确定、动力学模型耦合以及时变海流干扰等多因素共同作用下拖体的抗干扰能力。

3 深海拖曳系统水下控制手段和控制策略研究展望

国内外学者已提出了一系列保证拖体运动稳定性的深海拖曳系统水下控制技术, 但现有的控制手段和控制策略仍存在灵活性与作业适应性差、准确性低、抗扰动能力弱等缺点, 亟需开展更加深入的研究与改进, 进一步提高深海拖曳系统的运动稳定性, 支撑水下高精度探测设备的搭载与应用。

3.1 设计主被动复合控制手段

对于拖体控制手段, 被动控制手段存在作业适应性差、准确性低等缺点, 主动控制手段存在系统复杂度高、操纵繁琐等缺点, 2 种控制手段的优缺点互补。因此, 融合拖体主动控制手段与被动控制手段的优点, 提出一种新型深海拖体主被动复合控制手段, 配合强鲁棒性自适应控制策略, 使深海拖体兼具强姿态调节与定深控制功能, 是实现深海拖体在复杂作业环境下稳定航行, 提高搭载设备数据采集质量的有效途径。

3.2 发展拖缆-拖体联合控制手段

拖缆控制手段可大大减少系统的流体阻力, 并具备良好的深度调节能力, 而拖体控制手段可以实现对拖体姿态和深度的快速、精确调控。在目前的海洋调查作业中, 单一的控制手段已无法满足深海高精探测的需求, 因此有必要设计一种拖缆-拖体联合控制手段, 融合 2 种控制手段的优点, 实现对拖缆与拖体的同时控制, 突破单一控制手段对拖体运动稳定性的制约。

3.3 优化深海拖曳系统运动学模型和动力学模型

深海拖曳系统的水下自适应调节依赖于精确的运动学模型和动力学模型, 然而, 目前针对深海拖体姿态调节过程中的动力学研究较少, 尤其是缺乏控制机构的机构动力学和水动力学分析, 难以支撑深海拖体水下姿态和拖曳深度的精确调控。因此, 有必要建立精确的深海拖曳系统运动学模型和

动力学模型,分析姿态调节机构对于提高拖体姿态稳定性的水动力作用机理,阐明动力学模型之间的耦合机制,明确深海拖体姿态调节的动力学特征。

3.4 融合智能算法的自适应控制策略

已有的拖体自适应控制策略虽然具备一定的抗干扰能力,但是深海拖曳系统的作业环境复杂多变,在内外多因素的共同作用下,系统的鲁棒性较弱。随着人工智能的兴起,将神经网络算法、遗传算法等智能算法应用于自适应控制策略中,提高系统在复杂作业环境下的鲁棒性,将是一个新的研究方向。

4 总结

目前的深海拖曳系统水下控制手段主要分为拖缆控制手段、拖体控制手段以及二级拖曳系统三种。人工收放拖缆是最为简单直接的手段,但是耗时耗力、控制手段粗放;水下拖曳升沉补偿系统可以克服这些缺点,但是成本高且占用很大的甲板空间;由于拖缆阻力和拖缆抖动会严重影响拖曳系统稳定性,加装拖缆导流装置成为一种有效的手段,但是容易产生侧漂现象^[87]。拖体控制手段又分为被动控制手段和主动控制手段,被动控制手段主要是加装固定水翼,类似于拖缆控制手段,该方法简单有效,但调节能力有限,灵活性与作业适应性差、可靠性与准确性低、抗干扰能力弱;主动控制手段主要是指在拖体上加装迫沉水翼或推进器,该方法精准可靠,但是需要复杂的控制机构和控制策略,时滞性较高,且成本较高。二级拖曳系统具备良好的姿态稳定性,但是系统复杂程度高,成本高、布放回收困难、安全性低。

海洋拖曳系统水下控制策略主要是针对拖体运动姿态与拖曳深度的控制,由于拖体是强耦合强非线性系统,简单的PID控制已无法满足拖体的精确控制,因此,为提高控制精度与控制鲁棒性,学者们将模糊控制、非线性自适应控制等控制算法应用于拖体控制策略中,并计及洋流和涌等外界环境的干扰;神经网络等智能算法的兴起也为进一步优化拖体控制策略提供了理论支撑。尽管学者已对海洋拖曳系统水下控制策略开展了深入研究,但是受拖曳系统复杂作业环境的限制,在海洋拖曳系统水下控制策略的可靠性和鲁棒性等方面仍有待进一步提高。

随着国家对海洋开发的重视,各种海洋观测探测技术飞速发展。作为一项重要的海洋探测手段,深海拖曳系统在海洋探测开发的诸多领域中仍起着重要的作用,深海拖曳系统水下控制技术的研究具有重要的理论与应用意义。本文系统地总结了深海拖曳系统水下控制手段和控制策略的发展历程、研究现状及优缺点,并展望了未来发展方向,为深海拖曳系统的进一步应用与发展提供了有益的指导。

参考文献:

- [1] 丁忠军,任玉刚,张奕,等. 深海探测技术研发和展望[J]. *海洋开发与管理*, 2019, 36(4): 71-77.
- [2] 陈鹰. 海洋观测方法之研究[J]. *海洋学报*, 2019, 41(10): 182-188.
- [3] 朱心科,金翔龙,陶春辉,等. 海洋探测技术与装备发展探讨[J]. *机器人*, 2013, 35(3): 376-384.
- [4] BEASLEY B, BEST C, DAVIS D. Design of flying eye remotely operated vehicle for deep water surveillance[J]. *Ocean Conference Record (IEEE)*, 2000: 2075-2099.
- [5] 罗进华,朱友生,张宝平,等. 深拖系统在南海深水工程勘察中的应用[J]. *物探装备*, 2013, 23(6): 393-396.
- [6] 单瑞,董凌宇,杜凯,等. 超短基线定位系统在深拖探测中的应用[J]. *海洋地质前沿*, 2019, 35(9): 29-35.
- [7] 徐建,郑玉龙,包更生,等. 基于声学深拖调查的海山微地形地貌研究:以马尔库斯-威克海岭一带的海山为例[J]. *海洋学研究*, 2011, 29(1): 17-24.
- [8] 冯强强,温明明,牟泽霖,等. 声学深拖系统在海底冷泉调查中的应用[J]. *测绘工程*, 2018, 27(8): 49-52, 59.
- [9] ALAN L, GRAEME S, BLAIR H, et al. Multi-dimensional water quality assessment of an urban drinking water source elucidated by high resolution underwater towed vehicle mapping[J]. *Water Research*, 2016, 93: 289-295.
- [10] CHOU Y C, WANG C C, CHEN H H, et al. Seafloor characterization in the southernmost Okinawa Trough from underwater optical imagery[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2019, 30(5): 717-737.
- [11] 刘晓东,赵铁虎,曹金亮,等. 用于天然气水合物调查的轻便型声学深拖系统总体方案分析[J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(6): 8-16.
- [12] 王飞. 海洋勘探拖曳系统运动仿真与控制技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
- [13] VU H X, DAVEY S J, FLETCHER F K, et al. Track-before-detect for an active towed array sonar[C]//Proceedings of Acoustics 2013. Victor Harbor, Australia: Australian Acoustical Society, 2013: 1-7.
- [14] 金晓东. 水下拖曳系统水动力性能分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [15] NGUYEN T D, EGELAND O. Stabilization of towed cables[C]//Proceedings of the 43rd IEEE Conference on De-

- cision and Control. Nassau: IEEE, 2004: 5059-5064.
- [16] ZHANG H T, GU H T, LIN Y, et al. Design and hydrodynamic analysis of towing device of the automated recovery of the AUV by the USV[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Information and Automation. Wuyi Mountain, China: IEEE, 2018: 416-421.
- [17] PEDERSEN E, SORENSEN A J. Modelling and control of towed marine seismic streamer cables[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2001, 34(7), 89-94.
- [18] 裴铁群. 深海拖曳系统运动性能分析与定高控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [19] 马伟, 师子锋. 收放拖缆对拖体深度影响的仿真分析[J]. 水雷战与舰船防护, 2012, 20(3): 67-69.
- [20] 李世振, 魏建华, 胡波, 等. 主动式水下拖曳升沉补偿系统的非线性控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(3): 612-617.
- [21] 王海波, 王庆丰. 水下拖曳升沉补偿系统设计及其内模鲁棒控制[J]. 机械工程学报, 2010, 46(8): 128-132.
- [22] 王福贵, 张强, 梁顺安. 1000 hp主动钻井升沉补偿绞车的研制[J]. 机械工程师, 2018(11): 115-117, 121.
- [23] 王威, 徐华源, 孙波, 等. 高分辨率多道地震勘探技术在南海天然气水合物调查中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(9): 19-24.
- [24] WINGHAM P J. Comparative steady state deep towing performance of bare and faired cable systems[J]. Ocean Engineering, 1983, 10(1): 1-32.
- [25] 易杏甫, 王岩峰, 王成, 等. 海洋监测拖曳系统中拖缆导流套设计[J]. 海洋工程, 2005, 23(4): 120-124.
- [26] 刘天威, 黄国梁. 拖缆导流套顺流性能及流体动力测试报告[R]. 上海: 上海交通大学, 1992.
- [27] 苑志江, 金良安, 田恒斗, 等. 海洋拖曳系统的水动力理论与控制技术综述[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(2): 408-415, 420.
- [28] LI B B, HUANG W, LIANG H. An efficient method to assess effect of fin on the course stability of towing system[J]. Ocean Engineering, 2020, 217: 108005.
- [29] 褚宏宪, 梅赛, 史慧杰, 等. 海洋短排列高分辨率地震拖缆沉放深度测试分析[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(12): 65-71.
- [30] FORNARI, DANIEL J. A new deep-sea towed digital camera and multi-rock coring system[J]. EOS, Transactions American Geophysical Union, 2003, 84(8): 69-76.
- [31] COLEMAN D F, NEWMAN J B, BALLARD R D. Design and implementation of advanced underwater imaging systems for deep sea marine archaeological surveys[C]//Proceedings of the OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Providence: IEEE, 2000.
- [32] BALLARD R D, YOERGER D R, STEWART W K, et al. Argo/Jason a remotely operated survey and sampling system for full-ocean depth[C]//Proceedings of the OCEANS 91 Proceedings. Honolulu: IEEE, 1991.
- [33] OTSUKA K, MOMMA H S, IIOTTA H. Jamstec/deeptow camera system[R]. Japan Marine Science and Technology Center, 1991.
- [34] ZHU J M. Deep ocean research activity in China[C]//Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference. Stavanger, Norway: ISOPE, 2001.
- [35] 葛彤, 朱继懋. 6000米深海光学深拖系统升级改造课题研究报告[R]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [36] 苑志江, 金良安, 迟卫, 等. 双三角翼型拖曳体定深特性的水动力实验研究[J]. 中国测试, 2013, 39(3): 108-112.
- [37] 高国章, 张家赫. 基于ADRC参数优化的拖曳式水下航行器定深控制分析[J]. 大连海事大学学报, 2020, 46(2): 17-25.
- [38] ABBOTT I H, VON DOENHOFF A E. Theory of wing sections[R]. New York: Dover Publications, 1959.
- [39] GWYN G, POLLARD R. Modern tools for upper ocean surveys[J]. Journal of Naval Science. 1993, 18(1): 66-80.
- [40] SCHUCH E M, LINKLATER A C, LAMBETH N W, et al. Design and simulation of a two stage towing system[C]//Oceans. IEEE, 2005.
- [41] NAKAMULA M, KAJIWARA H, KOTERAYAMA W. Development of an ROV operated both as towed and self-propulseeve vehicle[J]. Ocean Engineering, 2001, 28: 1-43.
- [42] WOOLSEY C A, GARGETT A E. Passive and active attitude stabilization for a tow-fish[C]//Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control. Las Vegas: IEEE, 2002.
- [43] DESSUREAULT J G. "Batfish" A depth controllable towed body for collecting oceanographic data[J]. Ocean Engineering, 1976, 3(2): 99-100, IN5-IN6, 101-111.
- [44] YAMAGUCHI S, KOTERAYAMA W, YOKOBIKI T. Development of a motion control method for a towed vehicle with a long cable[C]//Proceedings of the 2000 International Symposium on Underwater Technology. Tokyo: IEEE, 2000: 491-496.
- [45] YAMAGUCHI S, KOTERAYAMA W, YOKOBIKI T. Effects of unsteady lift and cable tension on design of a control system of a towed vehicle[C]//Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference. Stavanger, Norway, 2001: 339-345.
- [46] 杨晓帆, 周凯. 拖曳式剖面探测拖体系统构成及运动控制试验[J]. 海洋工程, 2009, 27(3): 122~126.
- [47] 金晓东, 吴家鸣. 多自由度控制水下拖曳体水动力响应分析[J]. 广东造船, 2013, 32(5): 61-65.
- [48] 孙焯, 司先才, 裴建新, 等. 一种水下拖曳体的运动特性模拟研究[J]. 船舶工程, 2018, 40(增刊1): 336-340.
- [49] TORE J, BERNT J. Numerical and experimental studies of submerged towing of a subsea template[J]. Ocean Engineering, 2012, 42: 147-154.
- [50] 刘启帮. 水下高速拖体流体动力性能研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2016.
- [51] WU J, CHWANG A T. Experimental Investigation on a Two-part Underwater Towed System[J]. Ocean Engineering, 2001, 28(6): 735-750.
- [52] GROSENBAUGH M A. Transient behavior of towed cable systems during ship turning maneuvers[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(11): 1532-1542.

- [53] 庞师坤, 刘旌扬, 王健, 等. 二级深拖系统的回转运动特性[J]. *船舶工程*, 2017, 39(9): 71-77.
- [54] 冯苏, 朱克强. 水下拖曳系统运动姿态仿真研究[J]. *海洋工程*, 2005, 11(4): 56-63.
- [55] 庞师坤, 刘旌扬, 王健, 等. 深海拖曳系统自稳定二级拖体姿态控制研究[J]. *船舶工程*, 2018, 40(3): 62-67.
- [56] 郭军, 冯强强, 温明明, 等. Teledyne Benthos TTV-301声学深拖系统在海底微地形地貌调查中的应用[J]. *测绘工程*, 2018, 27(10): 46-51.
- [57] 单晨晨, 温明明, 刘斌, 等. 基于合成孔径声学深拖调查的海底浅表层流体活动研究: 以SAMS DT6000深拖在琼东南海域调查为例[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(12): 4451-4462.
- [58] 曹金亮, 刘晓东, 张方生, 等. DTA-6000声学深拖系统在富钴结壳探测中的应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(4): 173-181.
- [59] 中船. 青岛成功研发3000m级声学深拖系统[J]. *军民两用技术与产品*, 2016(1): 30.
- [60] ABLOW C M, SCHECHTE R S. Numerical simulation of undersea cable dynamics[J]. *Ocean Engineering*, 1983, 10(6): 443-457.
- [61] 郑荣, 辛传龙, 汤钟, 等. 无人水面艇自主部署自主水下机器人平台技术综述[J]. *兵工学报*, 2020, 41(8): 1675-1687.
- [62] 李英辉, 李喜斌, 戴杰, 等. 拖曳系统计算中拖缆与拖体的耦合计算[J]. *海洋工程*, 2002, 20(4): 37-42.
- [63] da SILVA GOMES S, PINHEIRO GOMES S C. A new dynamic model of towing cables[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 220: 107653.
- [64] CHAPMAN D A. The adjustment of fin size to minimize the ship induced pitching motion of a towed fish[J]. *Ocean Engineering*, 1984, 11: 23-64.
- [65] GERLER M, HARGEN G L. Standard equations of motions for submarine simulation[R]. Washington: Technical Report DTMB 2510 David Taylor Research Center, 1967.
- [66] ABKOWITZ M A. Stability and motion control of ocean vehicles[M]. MA: MIT Press, 1969: 32-50.
- [67] SUN H B, CHEN G Q, LIN W J. A hydrodynamic model of bridle towed system[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2019, 24(1): 200-207.
- [68] 苑志江, 金良安, 迟卫, 等. 海洋拖曳系统的船/缆/体耦合模型研究[J]. *船舶力学*, 2016, 20(10): 1252-1261.
- [69] BUCKHAM B, NAHON M, SETO M, et al. Dynamics and control of a towed underwater vehicle system, part I model development[J]. *Ocean Engineering*, 2003, 30(4): 453-470.
- [70] WATARU K, SATORU Y, TAKASHI Y, et al. Space-continuous measurements on ocean current and chemical properties with the intelligent towed vehicle "Flying Fish" [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2000, 25(1): 130-138.
- [71] 卢祎斌, 高占胜, 金良安, 等. 拖曳系统的水翼控制运动模型及仿真[J]. *指挥控制与仿真*, 2012, 34(6): 89-95.
- [72] 郑智林, 苑志江, 金良安, 等. 舰船机动中拖曳系统建模与定深控制研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2016, 37(4): 106-110.
- [73] KATO N. Underwater towed vehicle maneuverable in both vertical and horizontal axis[J]. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1991(169): 111-122.
- [74] KATO N. Guidance and control of underwater towed vehicle maneuverable in both vertical and horizontal axis[C]//Proc. Second Int. Offshore Polar Eng. Conf. US: ISOPE, 1992.
- [75] TEIXEIRA F C, AGUIAR A P, PASCOAL A M. Nonlinear control of an underwater towed vehicle[C]//7th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft. Lisbon: IFAC, 2006.
- [76] GOBAT J I, Grosenbaugh M A. Time domain numerical simulation of ocean cable structures[J]. *Ocean Engineering*, 2006, 33: 1373-1400.
- [77] LEONARD J W, KARNOSKI S R. Simulation of tension controlled cable deployment[J]. *Applied Ocean Research*, 2001, 12(1): 34-42.
- [78] CAMPA G, WILKIE J, INNOCENTI M. Robust control and analysis of a towed underwater vehicle[J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 1988, 12: 689-716.
- [79] WU J M, CHWANG A T. Investigation on a two-part underwater maneuverable towed system[J]. *Ocean Engineering*, 2001, 28: 1079-1096.
- [80] KATO N. Underwater towed vehicle maneuverable in both vertical and horizontal planes[C]//First International Offshore and Polar Engineering Conference. Edimburgh, UK, The International Society of Offshore and Polar Engineers, 1991: 85-92.
- [81] FRANCISCO C T, ANTÓNIO P A, ANTÓNIO P. Nonlinear adaptive control of an underwater towed vehicle[J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37: 1193-1220.
- [82] MINOWA A, TODA M. Motion control of towed underwater vehicles with movable wings using a high-gain observer based approach[C]. 2015 IEEE 10th Conference on. IEEE. US: IEEE, 2015: 1893-1898.
- [83] MINOWA A, TODA M. A high gain observer based approach to robust motion control of towed underwater vehicles[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2018(99): 1-14.
- [84] 吴家鸣, 叶家玮. 自主稳定可控制水下拖体的设计及控制性能[J]. *华南理工大学学报*. 2005, 33(5): 69-73.
- [85] 井安言, 裴武波. 水下拖体姿态角自适应控制器设计[J]. *数字海洋与水下攻防*, 2019, 2(4): 80-86.
- [86] 井安言, 余湖清. 基于神经网络观测器的水下拖体输出反馈姿态控制[J]. *兵工学报*, 2020, 41(12): 2504-2513.
- [87] 刘启帮, 艾艳辉, 王盟, 等. 基于CFD仿真的导流缆侧漂分析[J]. *大连海事大学学报*, 2016, 42(2): 41-45.

Research on underwater control technology of deep-sea towing system

LI Zhitong^{1,2,3}, DONG Lingyu^{1,2}, LU Kai^{1,2}, SHAN Rui^{1,2}, ZHOU Jixiang^{1,2}

(1 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China;

2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China;

3 Key Laboratory of Submarine Geosciences, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The deep-sea towing system is an important mean for mankind to develop and utilize the ocean. Among many types of deep-sea detection equipment, the deep-sea towing system has been widely used due to its advantages such as wide detection area, high operation efficiency, and good control performance. Aiming at the underwater control technology of deep-sea towing system, its development history and research status at home and abroad in two aspects: control means and control strategy were summarized and the advantages and disadvantages of different control means were analyzed and compared, and in the future research direction on the underwater control technology of deep-sea towing system was prospected, which will provide references for the application and development of deep-sea towing system.

Key words: deep-sea towing system; underwater control technology; control means; control strategy