

# 基于水面无人艇的拖曳声呐系统综述

张开元 董昊 李爽 刘淞佐  
哈尔滨工程大学 黑龙江哈尔滨 150001

**摘要:** 全球对海洋资源的需求快速增长,海洋资源的开发利用已经成为各国重点关注的技术革命领域。基于水面无人艇(USV)的海洋空间观测技术得以不断发展,其中利用USV搭载拖曳声呐进行水下探测是一个新的研究方向。本文将对基于USV的拖曳声呐系统进行综述;从拖曳稳定性、对接准确性和排缆密实性3个方面来阐述设计一个基于USV拖曳声呐系统所需要的主要技术,并总结如何提高拖曳系统的定深性能,最后对USV拖曳声呐系统的发展方向进行展望。

**关键词:** 水面无人艇;拖曳声呐

## Review of towed sonar system based on USV

Kaiyuan Zhang, Hao Dong, Shuang Li, Songzuo Liu  
Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001

**Abstract:** With the growing global demand for marine resources, the development and utilization of marine resources has become a key field of technological revolution. The ocean space observation technology based on surface unmanned vehicle (USV) has been developing continuously, and the underwater detection using the towed sonar carried by USV has become a new research field. The development of underwater towing system based on USV is reviewed; This paper expounds the main technology and application of the towing system based on USV from three aspects: towing stability, docking accuracy and cable arrangement compactness, summarizes how to improve the depth determination performance of the towed system, and finally prospects the development direction of the USV towing sonar system.

**Keywords:** water surface unmanned boat; towed sonar

### 引言:

海洋具有丰富的资源,合理开采利用海洋资源将有效缓解资源和能源短缺问题,并为经济开发注入新的活

力;海洋也因在军事防御上也有着重要国防意义,逐渐成为世界各国竞争的主要战场<sup>[1]</sup>,全面认识海洋、开发利用和维护海洋更具有战略意义。拖曳声呐不同于舰载声呐,它将声呐拖在运载平台尾后进行探测,可以装备在舰船、直升机上,通过改变拖曳深度使声呐可以工作于有利水层。由于拖曳声呐基阵远离平台,所受到的自噪声干扰小,可以作用更远的距离;且拖曳声呐基阵可随时收回进行维修。因此,拖曳声呐在军事对抗、资源勘探等领域得到了广泛的应用。但是普通拖曳声呐的收放系统会占用很大的空间,不具有模块化且需要人工收放,高昂的设备成本和人力成本极大的限制了拖曳声呐的应用。所以,发展无人化自主拖曳声呐系统有着极大的实际应用价值。

无人水面艇(USV)作为一种有力的搭载工具,在海洋科学中被广泛应用。现如今,USV在载荷、续航以及航行速度上性能越来越好,是拖曳声呐的优良搭载设

**基金项目:** 国家级大学生创新训练项目:基于力感知技术的小型水面无人艇侧扫声呐自主拖曳系统;项目编号:202110217091。

### 作者简介:

张开元(2001-),男,汉族,江苏镇江人,本科,哈尔滨工程大学,研究方向:电子信息工程(水声);  
董昊(2002-),男,汉族,山西大同人,本科,哈尔滨工程大学,研究方向:电子信息工程(水声);  
李爽(2002-),女,汉族,黑龙江省牡丹江人,本科,哈尔滨工程大学,研究方向:水声工程;  
刘淞佐(1986-),男,汉族,安徽涡阳人,博士,教授,哈尔滨工程大学,研究方向:水声通信技术。

备。为了能够更好地执行任务, USV需要和拖曳声呐之间进行有效的数据传输, 下载处理声呐设备上采集到的信息, 上传新的任务指令, 并为拖曳声呐提供能源, 保证拖曳声呐长期有效的工作。为满足以上的任务需求, 需要搭建一套完善的基于水面无人艇的拖曳声呐系统。其中, USV自主布放拖曳声呐包括3个过程: USV释放拖曳声呐、USV巡航、USV回收拖曳声呐。其中拖曳声呐的布放与回收互为逆过程。

### 1. 拖曳声呐发展现状

拖曳系统的收放平台从机械结构上可以分为吊索型和入坞型; 拖体声呐的主要收放形式有A架式收放系统、吊臂式收放系统、桥式收放系统<sup>[2]</sup>。中船重工海声科技有限公司设计的拖体布放回收装置采用的是吊放式布放和回收<sup>[3]</sup>, 这种方式相对来说整体重心较高, 且需要补偿稳定装置。

拖曳声呐可以通过改变声呐的工作深度来获取最佳声道进行水下探测通信。因其具有工作频率低、探测距离远、定位准确等优势, 可以有效探测安静型潜艇, 现已普遍装备在各国海军中<sup>[4]</sup>。该类声呐往往将主动低频声源安装在一个具有低阻力、拖曳稳定的拖体中, 通过拖缆拖曳及收放使用。但如果拖体拖曳时遇到不规则水流干扰以及拖船航行变向, 会出现大幅度漂移, 或产生大幅度的深浅变化的情况, 使拖体难以长期稳定工作在有利水层, 严重影响拖体声呐的声探测性能<sup>[5]</sup>。拖曳声呐壳体需要具有稳定的流体力学特性和自主姿态调节功能才能使拖曳过程中有良好的稳定性和定深性<sup>[6]</sup>。近年来, 主动拖曳声呐在低频探测领域发展迅速。随着硬件优化和拖壳材料的进步, 拖曳声呐的体积和质量不断减小; 波束形成技术、左右舷方位分辨技术等获得了明显提升<sup>[7]</sup>。

### 2. USV拖曳声呐系统的关键技术

现如今, USV在载荷、续航以及航行速度上性能越来越好, 是拖曳声呐的优良搭载设备。为了保证USV能够将拖曳声呐放置到理想的工作水域并及时高效地回收, 拖曳系统需要具有良好的定深能力和准确性的同时, 拖缆需要做到整齐排绕。下面将从拖体定深、精准对接和自动排缆技术展开阐述USV拖曳声呐系统的关键技术。

#### 2.1 拖体定深技术

系统稳定性分为两个基本标准: 静稳定性和动稳定性。拖曳声呐系统需要有较好的动稳定特性才能保证较好的拖体定深功能; 同时恰当的静稳定特性能保证拖体声呐具有灵活调节姿态的能力, 因此拖曳系统的运动模型包含多个复杂的动力方程。我们需要正确分析拖体在复杂流场中的受力情况并结合自动化控制原理, USV平台才能更好地控制拖体以合适的姿态长期工作在有利水层。

#### 2.1.1 流体动力学模型

在拖曳系统流体动力分析时大多将系统分为三个部分: 拖船、拖缆、拖体, 将它们综合在一起进行考虑, 分析各自的流体动力性能和相互作用<sup>[8]</sup>。USV拖曳声呐平台的主要基阵结构有拖体声呐和线阵声呐两种。对水下拖体水动力特性模拟, 其运动模型主要使Abkowitz改进后的六自由度运动方程<sup>[9]</sup>, 并通过回归拟合水下实验数据来求解, 李志印等提出了一种三维的水下拖曳系统数学模型, 由Ablow and Schechter模型给出拖缆的控制方程, 由六自由度运动方程描述拖体的水动力状态, 该模型特别适用于非回转体、非流线型的拖体模型, 或必须考虑拖曳系统各部分之间相互作用力的情况<sup>[10]</sup>。但这种方法往往实验成本较高、周期长, 不利于数据更新。随着CFD的不断发展, 拖体流体力学性能的估算可以由实验测量转变为数值计算<sup>[11]</sup>。CFD包含流体力学、数学和计算机科学等多门学科, 也是研究拖体航行过程中流体力学问题中的重要分析工具。通过应用CFD方法和Star CCM软件, 李雪剑等计算了拖体航行时受到的流体阻力, 在验证数值算法的准确性的同时, 根据计算结果及边界约束条件, 对拖壳结构外形进行改进, 在使用数值方法进行计算后发现拖体总阻力值产生了明显下降<sup>[12]</sup>。唐东生等设计的V型拖曳装置, 用CFD分析了V型翼流场中的动力特性, 在简化舵力、拖缆拉力等外力影响的情况下, 通过相关性和显著性分析建立了V型翼在直线航性下的流体动力学模型, 基于V型翼直航流体动力学模型, 在考虑了舵角、拖缆拉力等其他因素后, 建立了纵倾角和舵角之间的响应模型, 并与实测数据进行对比分析, 发现模型计算值与实测相符<sup>[13]</sup>。

在进行作业时, 拖体需要按一定深度稳定运行。但是母船受海况、作业范围变化等因素影响, 往往无法保持稳定航线, 若缆绳牵引状态不变, 将带来拖体深度变化。缆绳在受到海浪影响时, 也会带来拖体深度波动。因此拖缆的受力情况和瞬时状态同样对系统稳定性有着重要影响。在拖缆系统的受力分析中, 最主要使用的数学模型可以分为两类: 有限差分法和统一凝集参数分析法<sup>[14]</sup>。有限差分法把拖缆抽象为一组可以自由运动的柔性细杆相串联, 对每个柔性细杆进行受力和运动分析, 建立偏微分方程组, 通过差分法进行求解。统一凝集参数分析法对类缆体系采用离散质量—弹簧模型, 由牛顿第二定律和欧拉公式来构建缆绳的受力运动方程。李英辉等将拖曳系统分为拖缆和拖体, 拖缆部分Ablow和Schechter的运动数学模型进行建模, 拖体部分采用六自由度运动方程进行建模, 联立求解后获得拖曳系统的运行状态<sup>[15]</sup>。

#### 2.1.2 运动响应特性

USV在进行拖曳航行时还需要不断调整拖体的运动

姿态和工作深度。其运动响应主要有2个方面：直线运动响应和曲线运动响应。廖世俊等通过研究拖船运动对拖体定深性能影响中发现：在单拖系统中拖船水平航速变化和垂荡对拖体的水平运动影响较小，但对拖体竖直方向上的运动会产生较大的影响，在实际海况下拖船的水平航速变化和垂直振荡叠加将会导致拖体产生与拖船等量级的垂直振荡；如果采用双拖系统则可以有效减小这种垂直振荡<sup>[16]</sup>。在王志博建立的多级拖曳系统模型中，通过对振动传递的衰减定性模型的定性分析发现：利用拖缆低张力时的隔振特性，可以有效抑制拖船沿缆对拖体的振动影响<sup>[17]</sup>。郑智林等在考虑到拖体和拖船相互作用的前提下，建立了耦合数学模型，通过使用数值计算和经典PID算法发现：在调节拖体水翼攻角后，可以实现拖体在拖船航行过程中的定深控制<sup>[18]</sup>。

王数新等在长度可变的拖缆动力学模型中，研究了拖船速度和拖缆长度对拖体工作深度的影响<sup>[19]</sup>。王海波在数值计算和仿真中发现：通过及时收放拖缆长度释放缆上张力能够有效削弱母船垂荡对拖体定深性能的影响<sup>[20]</sup>。此外，USV的急转弯、缓转弯对拖缆的可操纵性会产生不同的影响，与此同时拖体工作深度随时间变化也将具有不同的运动特征<sup>[21]</sup>。

由以上的研究成果可知，影响拖体航行姿态和定深能力的因素有：拖曳方式、拖缆张力、航速以及USV航行轨迹等。因此为了保证USV在不同海况下航行时拖曳声呐均能够稳定工作在有利水层，有以下3个措施：

#### 1. 使系统具有更好的海况适应性：

采取双拖系统并适度增加拖缆长度，同时在USV上要装备一台具有力感知能力绞车，这样才能实现力矩补偿功能<sup>[22]</sup>。在理想状态下，由波浪引起的拖船纵向震荡可通过力矩补偿技术被拖缆的松紧释放，使拖曳声呐保持平稳。

#### 2. 使系统更高速地进行拖曳对接任务：

在拖体后端加设导流翼来减小扰流导致拖曳摇摆漂移，理论上拖曳速度越高，导流翼的抗干扰能力越强，系统稳定性越高<sup>[23]</sup>。

#### 3. 使系统具有调节定深功能：

安装尾舵，通过调节水平舵角来改变拖体的流体力学特性，同时动态调整拖缆的长度和USV的航行速度，进而改变拖体的工作深度。

#### 2.2 拖曳对接准确性技术

在USV拖曳平台稳定情况下，保证拖曳声呐能够顺利入坞回收也是一个重要问题。由于拖曳声呐的定位误差及回收过程中螺旋桨扰流的影响，拖曳声呐一次性完成回收对接的概率较小。在对接回收的中后期主要受两方面影响：回收装置外形结构和导引方式、定位精度等

控制因素。

对接可以分为静态对接和动态对接。USV拖曳声呐采用的通常是滑道式布放回收，由排缆绞车、液压装置、滑轨、起升架等机械结构组成，通过计算绞车力矩由液压系统驱动绞车实现缆绳的收放，通过液压系统驱动起升架、滑轨和滑台实现多级布放回收<sup>[24]</sup>。在此过程中，机械间接触碰撞不可避免，需要分析碰撞过程，设计合理的回收仓和回收引导方式来减小声呐因机械碰撞导致的损坏。接触碰撞受力问题主要通过恢复系数法和等效弹簧阻尼法解决<sup>[25]</sup>。恢复系数法将碰撞对象抽象为刚体，使用牛顿恢复系数分析碰撞的法向冲击力。弹簧阻尼法将碰撞对象抽象为弹性体。因此碰撞能等效成弹簧阻尼过程，可以将碰撞现象划归为连续动力学问题。但是，该方法较难处理复杂物体间的碰撞问题。史剑光等模拟入坞过程中拖体水下受力情况，并仿真了拖体入坞时的碰撞情况，仿真得出：小开角导向罩、光滑的表面材质有利于拖体与拖船的顺利对接<sup>[26]</sup>。在实际试验中，导向罩开角、表面材料物理特性、拖体姿态、拖体速度等因素对回收碰撞均有着一定的影响。

在USV对拖曳声呐进行回收时，周围流场的快速变化也会给回收对接带来不确定的干扰。通过使用流体动力干扰理论和CFD仿真技术，可以较好地模拟对接过程中导向罩与拖曳声呐之间的流体干扰情况。杜俊等通过CFX进行数值仿真发现：在对接过程中拖体收到的总阻力是先大后小<sup>[27]</sup>。

为了提高对接的准确性，在设计USV拖曳声呐系统时需要综合考虑碰撞和流场影响，通过提高USV对拖曳声呐的可操作性，改进机械结构等，对随机的扰动提前做出有效响应。

#### 2.3 自动排缆技术

在拖曳系统中，拖缆需要做到整齐排绕。但在海上作业时排缆效果往往会受到复杂海况的影响。当拖缆不能整齐地排在储缆卷筒上时，卷筒上将会出现挤压、磨损、咬绳等现象，同时将会造成下次出缆的卡顿问题，影响拖缆的使用寿命和作业安全。

基于模糊PID算法和电机变速控制理论，可以实现排缆机构和储缆卷筒之间的配合运作，通过协调导缆丝杠和卷筒之间的转速比，实现自动排缆技术，使得在绞车的运作下拖缆可以整齐储存在卷筒上。PID算法是一套成熟控制算法，因不需建立专门模型、控制结果好、稳定性高而被广泛应用<sup>[28]</sup>。黄沛良等为了提高传统排缆系统的精度和实时性，设计了智能排缆控制系统，以STM32和FPGA为控制单元，伺服电机为驱动单元，基于模糊PID控制策略，实现了高精密度，高稳定性的实时排缆<sup>[29]</sup>。

### 3. 总结与展望

水面无人艇 (USV) 和拖曳声呐结合是新兴的工程应用技术, 本文阐述了设计一套基于无人艇的拖曳声呐系统所需要的关键技术, 并提出了提高拖曳声呐系统定深能力的方法。本文认为, 基于USV的拖曳声呐系统涉及多学科领域, 仍需进行大量的研究和实践, 今后可以考虑从以下四个方面进行完善:

1) 进一步考虑风浪的综合影响, 从更全面的角度来分析预测高海况下USV拖曳声呐的运动响应。

2) 深入研究在变速、变深、变向情况下的拖曳系统理论。

3) 从整体上对机械结构进行优化, 并改进现有的USV自动控制理论, 使系统达到理想状态。

4) 提高拖曳声呐和USV的自主协同控制能力, 使系统功能一体化。

#### 参考文献:

[1]陈健瑞, 王景璟, 侯向往, 方政儒, 杜军, 任勇. 挺进深蓝: 从单体仿生到群体智能[J]. 电子学报, 2021, 49(12): 2458-2467.

[2]杨凯. 水下机器人收放系统机械结构设计及分析[D]. 导师: 周东辉. 杭州电子科技大学, 2015.

[3]孙莉娟, 辛树伟, 赵亮, 等. 回转拖鱼收放装置[P]. 中国专利: CN204250311U, 2015-04-08.

[4]洪有财, 陈小星, 龚凯, 朱城海. 声呐拖体拖曳稳定性研究[J]. 声学与电子工程, 2013, (02): 24-27.

[5]洪有财, 陈小星, 龚凯, 朱城海. 声呐拖体拖曳稳定性研究[J]. 声学与电子工程, 2013, (02): 24-27.

[6]洪有财, 陈小星, 龚凯, 朱城海. 声呐拖体拖曳稳定性研究[J]. 声学与电子工程, 2013, (02): 24-27.

[7]王鲁军. 国外低频主动拖曳声呐发展现状和趋势[J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(03): 193-199.

[8]郑荣, 辛传龙, 汤钟, 宋涛. 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(08): 1675-1687.

[9]ABKOWITZ M A. Stability and motion control of ocean vehicles [M]. Cambridge, MA, US: MIT Press, 1969: 32 - 50.

[10]李志印, 吴家鸣. 水下拖曳系统水动力特性的计算流体力学分析[J]. 中国造船, 2007(02): 9-19.

[11]JOHN D A. Computational fluid dynamics: the basics with applications[M]. New York, NY, US: McGraw-Hill Education, 1995: 1 - 20.

[12]李雪剑, 刘志军, 刘戈, 林焰. 考虑自由表面的组合拖曳体阻力计算与设计优化[J]. 大连理工大学学报, 2017, 57(04): 376-382.

[13]唐东生, 谷海涛, 冯萌萌, 孟令帅, 陈佳伦,

高伟. 面向AUV自主回收的拖曳装置水动力特性研究[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(05): 107-114.

[14]李英辉, 戴杰, 李喜斌, 庞永杰, 徐玉如. 拖曳系统静态构型的快速算法[J]. 船舶工程, 2001, (04): 36-38+60-3.

[15]李英辉, 李喜斌, 戴杰, 庞永杰, 徐玉如. 拖曳系统计算中拖缆与拖体的耦合计算[J]. 海洋工程, 2002, (04): 37-42.

[16]廖世俊, 顾云冠, 朱继懋. 6000m深海拖曳系统动力响应计算[J]. 海洋工程, 1995, (02): 31-37.

[17]王志博. 多段式拖曳系统低张力缆段隔振方法研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(08): 255-262.

[18]郑智林, 苑志江, 金良安, 谢田华. 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(04): 106-110.

[19]王树新, 王延辉, 李晓平. Dynamic Analysis of Towed and Variable Length Cable Systems[J]. China Ocean Engineering, 2007, (02): 331-341.

[20]王海波. 水下拖曳升沉补偿液压系统及其控制研究[D]. 导师: 王庆丰. 浙江大学, 2009.

[21]Mark A. Grosenbaugh. Transient behavior of towed cable systems during ship turning maneuvers[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(11):

[22]Weicai Quan, Yinshui Liu, Aiqun Zhang, Xufeng Zhao, Xiaohui Li. The nonlinear finite element modeling and performance analysis of the passive heave compensation system for the deep-sea tethered ROVs[J]. Ocean Engineering, 2016, 127(127):

[23]刘启帮. 水下高速拖体流体动力性能研究[D]. 导师: 艾艳辉. 中国舰船研究院, 2016.

[24]宋涛, 郑荣, 梁洪光. 水下拖曳体自主布放回收装置设计与研究[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(07): 96-101.

[25]安雪斌, 潘尚峰. 多体系统动力学仿真中的接触碰撞模型分析[J]. 计算机仿真, 2008, (10): 98-101.

[26]史剑光, 李德骏, 杨灿军, 蔡业豹. 水下自主机器人接驳碰撞过程分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(03): 497-504.

[27]杜俊, 谷海涛, 孟令帅, 白桂强. 面向USV的AUV自主回收装置设计及其水动力分析[J]. 工程设计学报, 2018, 25(01): 35-42.

[28]谭加加, 刘鸿宇, 黄武, 吴先华. PID控制算法综述[J]. 电子世界, 2015(16): 78-79.

[29]黄良沛, 易武志. 电驱动海洋绞车智能排缆控制系统设计[J]. 机械工程师, 2015(09): 14-17.