

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1755.TJ.20230213.1113.001.html>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 石晴晴, 牛文栋, 张润锋, 等. 水下滑翔机路径规划研究综述及展望[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(1): 29–42, 51.
SHI Q Q, NIU W D, ZHANG R F, et al. Review and prospects of underwater glider path planning[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(1): 29–42, 51.

水下滑翔机路径规划研究综述及展望



扫码阅读全文

石晴晴¹, 牛文栋^{*1,2}, 张润锋¹, 杨绍琼^{1,2}, 张连洪^{1,2}

1 天津大学 机械工程学院 机构理论与装备设计教育部重点实验室, 天津 300350

2 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋观测与探测联合实验室, 山东 青岛 266237

摘要:水下滑翔机(UG)是一种新型的水下无人航行器,具有能耗低、效率高、续航力长、成本低、可重复使用等优点,能够满足长时序、大范围的海洋观测与探测需求。水下滑翔机作为一种观测探测平台,合理的路径规划是其执行海洋观测与探测任务的重要保障。首先,综述近年来有关水下滑翔机路径规划方法,将水下滑翔机路径规划算法的内容系统性地分为传统算法、智能优化算法和多算法融合3类,并结合实际应用场景对不同的路径规划算法性能进行比较;然后,对水下滑翔机路径规划过程中所涉及到的环境重构技术、环境感知技术、智能决策技术和水下定位技术等关键技术进行凝练与总结;最后,基于现有的发展趋势,对水下滑翔机路径规划未来的发展方向,如多算法共融规划、多机协同路径规划、融合时空和目的约束的多维空间路径规划和复杂非稳态环境下的精准路径规划等进行展望。

关键词:水下滑翔机; 路径规划; 环境重构; 避障

中图分类号: U674.941

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02435

Review and prospects of underwater glider path planning

SHI Qingqing¹, NIU Wendong^{*1,2}, ZHANG Runfeng¹, YANG Shaoqiong^{1,2}, ZHANG Lianhong^{1,2}

1 Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education,
School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China

2 The Joint Laboratory of Ocean Observing and Detection, Pilot National Laboratory for Marine Science and
Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China

Abstract: The underwater glider (UG) is a new type of underwater vehicle driven by buoyancy, which has the advantages of low energy consumption, high efficiency, long-endurance, low cost, reusability and so on. The UG can also meet the needs of long-term and large-scale ocean observation and exploration. As an observation platform, the UG needs to carry out path planning and correction continuously in the early stages and during missions in order to better serve the requirements of ocean observation and exploration. First, this paper summarizes the relevant literatures on path planning research methods for UG in recent years. UG path planning algorithms are mainly divided into three categories: traditional algorithms, intelligent optimization algorithms and multi-algorithm fusions. Combined with practical application, the performance of different path planning algorithms is compared. The key technologies of UG path planning, such as environment reconstruction, environment perception, intelligent decision-making and underwater positioning, are then summarized. Finally, the development direction of UG multi-algorithm integration, multi-glider cooperation, multi-dimensional integration of spatiotemporal constraints and high-precision in complex and unsteady environments are prospected.

Key words: underwater glider (UG); path planning; environment reconstruction; obstacle avoidance

收稿日期: 2021-06-30

修回日期: 2021-09-15

网络首发时间: 2023-02-13 17:01

基金项目: 天津市新一代人工智能科技重大专项资助项目(19ZXZNGX00050)

作者简介: 石晴晴, 女, 1997年生, 硕士生。研究方向: 复杂环境下的无人设备路径规划与智能决策。

E-mail: shiqq@tju.edu.cn

牛文栋, 男, 1988年生, 博士, 讲师, 硕士生导师。研究方向: 水下机器人稳定性控制与路径规划, 水下机器人设计。

E-mail: niuwendongtj@163.com

*通信作者: 牛文栋

0 引言

海洋是地球上最广阔水体的总称,拥有着丰富的生物资源、空间资源和能源资源,对人类的生存和发展具有重要意义。海洋发展与经济发展紧密相连,如今,以海洋经济为代表的蓝色经济正逐步引领着全球经济的发展^[1]。在世界海洋发展的大趋势下,各国都在不断对海洋进行探索与研究,以发展海洋经济,提高国家综合实力,由此,水下滑翔机(underwater glider, UG)应运而生。水下滑翔机是一种新型的水下机器人,能够通过调整自身的净浮力与姿态角,在机翼(升力)的共同作用下,在海洋中以“锯齿”型的轨迹滑翔,具有能耗低、噪声小、活动范围广、能长时序连续观测等优点。水下滑翔机可以在运动的过程中采集水下温度、盐度、洋流等信息,为海洋数据分析、数据预报及模型构建与优化等提供精准、实时的测量数据。此外,水下滑翔机在海洋安全保障等方面也发挥着重要作用^[2]。

水下滑翔机作为一种依靠浮力驱动的水下机器人,对海洋环境有着极大的依赖性,海洋中一些复杂的洋流和极端的气象条件都会使其偏离预定的航线^[3]。但是,在实际观测任务中,若要水下滑翔机尽可能精准地到达目标采样点进行采样,就需要其在执行任务期间能够以最小的偏差按照预定航线航行。当偏差值小于观测与探测任务所要求的精度时,则可认为水下滑翔机的路径规划技术是合理、可行的。为保障水下滑翔机按照设定的航线顺利执行任务,采用路径规划算法对其进行合理的路径规划可以提高精度、缩短工作时间、降低能耗,对未来常态化的应用具有重要意义。

进入 21 世纪以来,海洋经济迅速发展,各国科研人员对水下滑翔机进行了大量研究。水下滑翔机工作在非稳态海洋环境中,其中海洋生物漂浮不定,海洋洋流变幻莫测,海底地形错综复杂^[4],因此将合适的海洋环境建模与智能优化算法相结合进行路径规划就显得至关重要。本文将水下滑翔机的路径规划算法分为了传统算法、智能优化算法和多算法融合 3 类^[5]。其中,传统算法主要针对结构化、有明确条件描述的问题,常见的传统算法有 Dijkstra 算法、A*算法、人工势场法、迭代算法、快速探索随机树算法等。智能优化算法一般针对较为普适、缺乏结构信息的问题,常见的智能算法有遗传算法、粒子群优化算法、模糊逻辑算法、人工蜂群算法和神经网络算法等^[6]。多算法融合将 2 个或多个算法进行融合,具有多算

法组合的优点,也是近年来路径规划研究的一个热点。

合理的路径规划能够使水下滑翔机高效、准确地到达指定位置,执行定点观测与探测任务,并可减少航行过程中产生的漂移。此外,智能与多算法组合路径规划算法还有助于弥补因模型高度非线性与控制算法欠缺所导致的控制误差^[7-9]。

本文旨在通过综述近年来在水下滑翔机路径规划方面的研究成果,总结不同种类算法的优缺点、关键技术及发展趋势,进而促进水下滑翔机路径规划的研究与应用。

1 水下滑翔机路径规划算法

水下滑翔机路径规划的合理性是观测与探测任务能否取得成功的关键一步。在对水下滑翔机进行路径规划之前,需要根据实际的任务要求建立相应的海洋模型,之后,再将算法应用于路径规划,以确保水下滑翔机能够避开障碍物从而安全到达终点^[10-12]。目前,有关水下滑翔机在路径规划研究方面文献的发表趋势如图 1 所示,其中左侧气泡图显示的是不同种类算法研究的数量,右侧柱状图显示的是近年来关于水下滑翔机路径规划发表文献的数量。可以看出,自 2015 年后,关于水下滑翔机路径规划研究方面文献的数量显著增长,更多的专家学者开始关注到水下滑翔机路径规划领域。

下面,本文将针对传统算法、智能优化算法和多算法融合这 3 类算法进行研究及归纳。

1.1 传统算法

传统的路径规划算法通常需要提前载入环境等基本信息^[13],其过程简单、易于实现,但处理速度慢,动态避障能力不足^[14]。本文将传统算法分为了基于几何模型的搜索算法、虚拟力法、基于概率的抽样算法、基于数学模型的算法和其他算法 5 种类型^[15-16],具体的分类如图 2 所示。

1.1.1 基于几何模型的搜索算法

基于几何模型的算法主要用于最优离散规划领域,其实现和发展相对容易。该算法主要包括 Dijkstra 算法、A*算法、快速行进(fast marching, FM)算法和水平集算法。

1) Dijkstra 算法。

Dijkstra 算法是以起始点为中心源点层层向外扩散直至搜索所有节点^[17]。2009 年, Eichhorn^[18]运用 Dijkstra 算法的思想解决了水下滑翔机加权有方向的单源最短路径问题。该方法可用于解决水下滑翔机路径最短的问题,算法简单,但需要

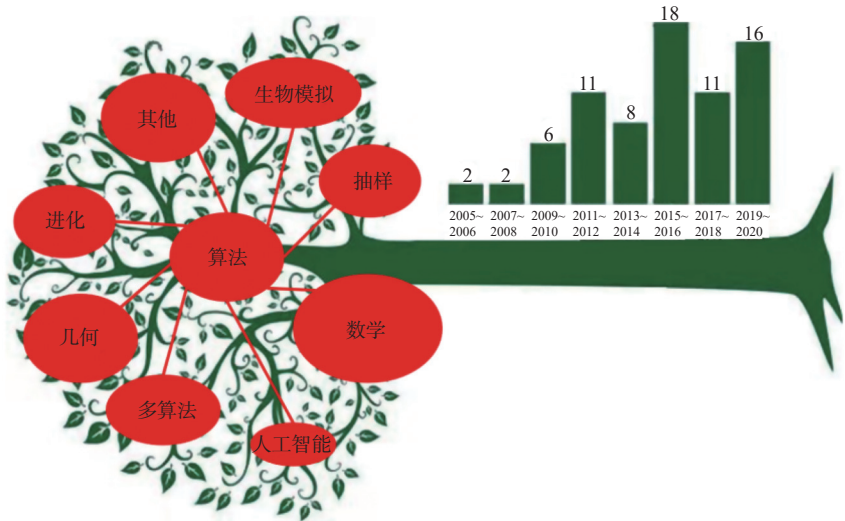


图 1 水下滑翔机路径规划相关文献发表数量

Fig. 1 The number of publications related to path planning for UG

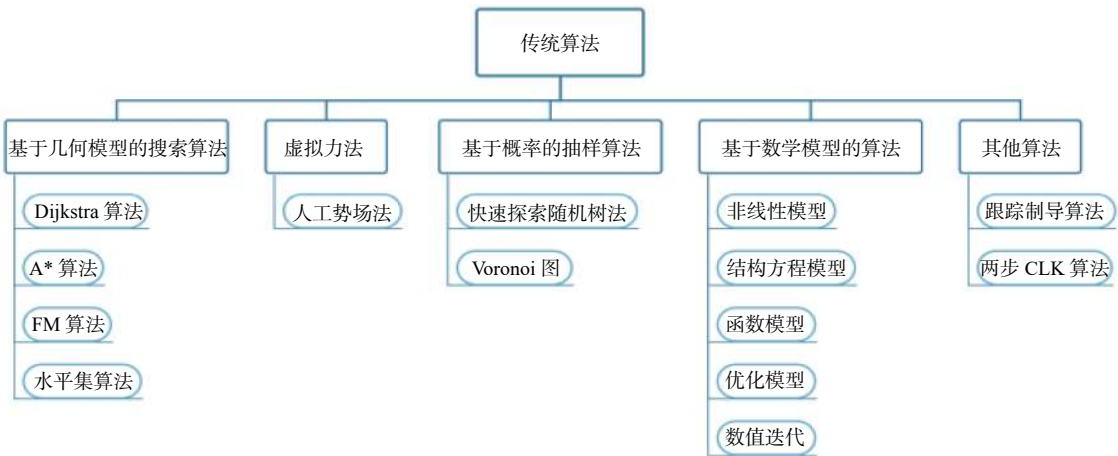


图 2 传统的路径规划算法结构

Fig. 2 Structure of traditional path planning algorithm

遍历所有地图点以获得最短路径,耗时长。

2) A*算法。

A*算法是 Dijkstra 算法的优化算法。2011 年, Fernández-Perdomo 等^[19]将 A*算法与概率框架相结合,通过采样滚转角,集成了一条时间最优、采样点最少的水下滑翔机轨迹。2012 年, Fernández-perdomo 等^[20]将时间引入 A*算法(CTS-A*),同时考虑洋流旋涡等因素,得到了更精确的水下滑翔机输出路径。2013 年, Wang 等^[21]在大西洋中部进行海试试验,验证了采用 A*算法所得水下滑翔机路径的可靠性与可达性。2015 年, Eichhorn^[22]在 A*算法中引入时间和航向,使算法具有实时性和航向性,并在纽芬兰海试任务中取得了理想的结果。2012 年, Isern-González 等^[23]利用 A*优化算法解决了水下滑翔机在固定天数内最大限度地目标点移动的距离问题。2018 年,周耀鉴等^[24]将 CTS-A*迭代算法应用到了构造流场的水下滑翔机路径规划中,使其能适用于强洋流的情况。

A*算法主要用于解决水下滑翔机路径最短的问题,采用该方法在实际海试中能够找到最短路径,但有陷入局部最优的风险。

3) FM 算法。

FM 算法是基于机器学习的一类算法。2010 年, He 等^[25]在 FM 算法中利用局部实时环境信息对每个局部区域进行了优化,以高收敛性和可靠性的方式生成了水下滑翔机全局最优路径。2019 年, Yoo 等^[26]利用 FM 算法推导了一组以安全为约束的状态概率和预期旅行成本的递推方程,在安全和成本之间建立了明确的平衡。FM 算法可用于路径跟踪问题,仿真结果的收敛性与可靠性较好,但还需要进一步的海试来验证仿真结果。

4) 水平集算法。

水平集是一种用于界面追踪和形状建模的数值技术。2012 年, Tomaszewski 等^[27]利用水平集方法求解 Jacobi 方程来精确控制可达性前沿演化,用以确定水下滑翔机的航行轨迹。2014 年,

Lolla 等^[28]针对水下滑翔机远程航行、运行速度有限、对洋流敏感等问题,采用水平集方法将时间最优、短期可达性和协调性集于了一体。水平集算法可用于时间最优的路径规划问题,其在预测菲律宾群岛地区的无碰撞和最快时间轨迹问题中效果良好^[27]。

1.1.2 虚拟力法

人工势场法最早由 Khatib 提出并运用于移动机器人路径规划领域^[29-30]。2019 年,李沛伦等^[31]引入速度势场函数将静态势场转变为动态势场,并考虑水下滑翔机的运动特性及海流影响,克服了局部极值与目标不可达的问题。虚拟力法可用于避障问题,仿真结果表明当存在海流时,可成功避开静态和动态障碍物^[30]。

1.1.3 基于概率的抽样算法

基于概率的抽样算法通常需要预先知道海洋环境中的深度洋流等信息,然后以一组节点或其他形式对环境进行采样,通过映射环境或随机搜索找到最优路径。该抽样方法主要包括快速探索随机树法和 Voronoi 图。

1) 快速探索随机树法。

Lavalle 等^[32]首次提出了快速探索随机树(rapidly exploring random trees, RRT)算法。2015 年, Hernández 等^[33]在八叉树环境模型的基础上,使用任意算法和惰性碰撞评估优化了快速探索随机树算法,提高了水下滑翔机在感知障碍物和重新规划路径方面的能力。快速探索随机树算法适用于对未知环境的路径规划,能在模拟和实际场景中完成避障任务^[33]。

2) Voronoi 图。

Voronoi 图由一组连续的多边形组成^[34]。2015 年, Marino 等^[35]将 Voronoi 图和高斯过程交叉使用,成功完成了 2 台水下滑翔机的采样和巡逻试验。2016 年, Candeloro 等^[36]将 Voronoi 图用于三维空间,生成了初始连接的路径点,各路径点之间留有一定的间隙可避免与障碍物或地面发生碰撞。Voronoi 图适用于路径规划中的避障问题,在海试试验中已成功完成采样巡逻任务^[35]。

1.1.4 基于数学模型的算法

基于数学模型算法的规划机制和计算高度复杂。数学模型方法是通过对环境和物体建模,考虑运动学和动力学约束,最后将代价函数与不等式或方程相结合来得到最优解^[13]。基于数学模型的算法主要分为非线性模型、结构方程模型、函数模型、优化模型、数值迭代以及其他。

1) 非线性模型。

非线性模型可反映自变量与因变量之间的非

线性关系。2005 年, Inanc 等^[37]利用拉格朗日相干结构对动态海洋环境进行数学建模,利用所得水下滑翔机的非线性轨迹表达式,解决了控制问题。2008 年, Zhang 等^[38]利用洋流二维时变 B 样条模型,寻找了水下滑翔机的非线性最优轨迹表达式。2017 年, Ramos 等^[39]通过拉格朗日相干结构对海洋环境进行实时建模,生成了模糊粒子非线性轨迹方程。该非线性模型适用于洋流信息已知的路径规划问题,由于洋流具有高度复杂性,该方法的应用难度较高。

2) 结构方程模型。

结构方程模型是一种融合了因素分析和路径分析的多元统计技术。2009 年, Davis 等^[40]以时间为约束得到了水下滑翔机的轨迹射线方程,能最大限度地映射被测场。2020 年, Kulkarni 等^[41]以时间为目标建立了理论方案,并求解了真实的三维海洋路径规划方程。结构方程模型适用于时间最优路径规划问题,因其依赖于电流预测,具有不稳定性。

3) 函数模型。

函数在数学中是 2 个不为空集的集合间的一种对应关系。2012 年, Hernandez 等^[42]将多个海洋预测模型相结合,并通过贝叶斯函数对水下滑翔机的路径轨迹进行了优化。2013 年, Stuntz 等^[43]使用最小二乘算法实时估计了水下滑翔机在部署过程中所走的路线,减少了导航定位误差。2019 年, Cadmus 等^[44]使用流线转向函数快速边缘评估算法对水下滑翔机的控制区域进行降维,提高了计算效率。2021 年,何柏岩等^[45]利用最小二乘路径规划算法指导水下滑翔机进行了有效航向修正。该函数模型方法适用于局部路径规划问题,具有计算量小和实时性等优点,不过还需要进一步进行海试试验来予以验证。

4) 优化模型。

2010 年, Mahmoudian 等^[46]研究了水下滑翔机稳态转弯运动的表达式,通过正则理论优化参数,得到了一种节能路径的规划策略。2014 年, Wehbe 等^[47]对水下滑翔机进行动力学优化并将水下滑翔机与推进式水下航行器予以了结合。2017 年, Liu 等^[48]利用优化理论推导出了—种新的水下滑翔机三维最优路径规划方案并扩展到了三维空间。该优化模型适用于特殊点的探测任务,需要根据具体的问题来决定优化方法。

5) 数值迭代。

数值迭代的基本思想是逐次逼近。2010 年, Binney 等^[49]优化了递归贪婪算法,采用该算法在生成最优路径时可确保水下滑翔机远离高流量区

域。2011 年, Isern-González 等^[50] 利用迭代优化了水下滑翔机的路径, 结果显示在路径质量和计算成本方面效果均较好。2011 年, Fernández-Perdomo 等^[51] 通过水下滑翔机感知了洋流的速度和方向, 结果显示通过迭代所得轨迹收敛时间短、鲁棒性强。2015 年, Huang 等^[52] 使用迭代路径跟踪方法, 解决了水下滑翔机在无洋流信息时能自动沿着预定路线行驶的工程问题。2020 年, Sofge 等^[53] 将长期迭代路径规划与短期迭代路径优化相结合, 用于解决水下滑翔机的轨迹问题。该数值迭代方法可解决的问题类型取决于目标函数与约束条件, 采用该算法可能会产生不能收敛和无解的状况。

6) 其他。

2012 年, Smith 等^[54] 利用卡尔曼滤波和海洋模型, 使路径偏差被限制在了给定的阈值。2013 年, Pereira 等^[55] 引入了马尔可夫决策过程, 用于提高水下滑翔机操作的安全性和可靠性。2018 年, Hou 等^[56] 采用流量消除策略计算了水下滑翔机的转向角, 以达到实际路径差最小的目的。

1.1.5 其他算法

除以上算法外, 传统算法还包含跟踪制导算法、两步 CLK 算法、细胞分解法等一些其他的算法。1994 年, Carof^[57] 将差分延迟及多普勒声学定位和制导技术应用到了自主水下滑翔机路径规划中。2016 年, Yang 等^[58] 在考虑海流影响的基础上, 提出了具有洋流补偿的水下航行器跟踪制导算法。

两步 CLK 算法是在 L-K(Lin-Kernighan)算法和 CLK(chained Lin-Kernighan)算法的基础上提出的。2011 年, 朱心科等^[59-60] 提出了基于两步链式算法的水下滑翔机海洋环境参数采样优化方

法, 次年, 又在路径规划算法中考虑了时间优化准则。

2010 年, Thompson 等^[61] 使用时变洋流下水下滑翔机路径规划的波阵算法提高了路径跟踪精度。2015 年, Zhang 等^[62] 提出了一种新的水下滑翔机器鱼采样方案, 通过采用闭环控制提高了水下滑翔机器鱼的路径跟踪性能。2016 年, 于茂升等^[63] 提出了一个基于地理信息系统(GIS) 引擎的水下滑翔机路径显示与规划系统。

1.1.6 传统算法小结

传统算法的应用时间早、应用范围广, 具有算法简单、成本低、易实现等特点, 但是效率较低。表 1 对传统算法的优缺点进行了归纳总结。

表 1 传统的路径规划算法总结		
Table 1 Summary of traditional path planning algorithms		
算法类型	优点	缺点
基于几何模型的搜索算法	容易实现、可靠性高、成本低	时间长、效率低、缺乏避障能力
虚拟力法	简单实用、能实时控制	容易陷入局部最优、很难到达目标点
基于概率的抽样算法	算法简单、运行速度快	建模过程复杂、容易陷入局部最优解
基于数学模型的算法	算法清晰、可靠性高	建模过程复杂、数学函数计算困难

1.2 智能优化算法

传统的路径搜索算法存在路径优化效果差、处理速度慢等问题, 因而在处理复杂动态环境下的路径规划问题时, 智能仿生学路径搜索算法逐渐成为主流算法^[12]。智能优化算法主要包括生物遗传进化算法、人工智能算法、生物行为模拟算法等, 具体的算法结构如图 3 所示。

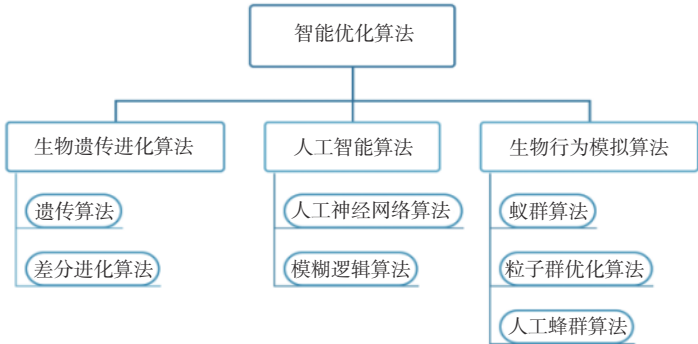


图 3 路径规划智能优化算法结构

Fig. 3 Structure of intelligent optimization algorithm for path planning

1.2.1 生物遗传进化算法

生物遗传进化算法是一种通过模拟达尔文生物进化论中有关自然选择和遗传机理生物进化过程的计算模型, 其通过模拟自然进化过程来搜索最优解。生物遗传进化算法包括遗传算法和差分

进化算法 2 种。

1) 遗传算法。

遗传算法是一种通过模拟自然进化过程来搜索最优解的方法^[64]。2012 年, Cheng 等^[65] 通过将随机的交叉算子替换为确定性交叉算子, 为水下

滑翔机提供了更高的适应度。2015 年, Cao 等^[66]将改进的三维杜宾斯曲线(Dubins)与遗传算法相结合,使路径具有能耗更优性。2016 年, Lucas 等^[67-68]将非主导排序遗传算法 II 用于解决水下滑翔机的多目标优化问题,并于 2019 年对其进行了优化。2017 年, Cao 等^[69]将改进的三维杜宾斯方案与遗传算法相结合,解决了多水下滑翔机三维空间最佳交会的问题。2017 年和 2020 年, Shih 等^[70-71]先后将指数有效函数作为适应度函数应用到了混合遗传算法中,并在此基础上将并行遗传应用到了解决多水下滑翔机部署中的路径规划问题,以降低上游洋流效应。遗传算法可用于解决存在洋流条件的路径规划能耗问题,仿真结果显示其在能耗和效率方面性能优异。

2) 差分进化算法。

差分进化算法是由 Store 和 Price^[72]于 1997 年提出的一种基于群体差异的启发式并行搜索方法。2016 年, Zamuda 将^[73-74]差分进化、微分演化和水下滑翔机路径规划相结合,并于 2018 年选择出最适合的算法参数,满足了水下滑翔机在亚中尺度涡流中航行的要求,随后于 2019 年予以进一步优化,提高了决策能力。2018 年, Zadeh 等^[75]将交会问题转化为非线性最优控制问题,采用差分进化算法为最优控制问题提供了数值解。采用该差分进化算法可以解决存在洋流涡流情况的路径规划问题,并在场景测试中表现出了好的轨迹拟合性。

1.2.2 人工智能算法

人工智能是用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术以及应用系统的一门新的技术科学,主要包括人工神经网络算法和模糊逻辑算法。

1) 人工神经网络算法。

人工神经网络系统受构成动物大脑的生物神经网络的启发而产生。2014 年, Zang 等^[76]将 Deep Q Network(DQN)算法与三维自由度动力学模型相结合并应用于水下滑翔机的路径规划,提高了路径精度。2016 年, Ni 等^[77]将生物神经网络用于路径规划,使水下工作环境网格图的每个位置与三维神经网络中的每个神经元一一对应,从而为水下滑翔机通往目标找到了一条平滑和最短路径。人工神经网络算法可以用于轨迹跟踪及避障问题,仿真结果表明该算法的实时性好,但真实效果还需进一步采用海试加以验证。

2) 模糊逻辑算法。

模糊逻辑是研究模糊性思维、语言形式及其规律的科学。2020 年, Su 等^[78]在水下滑翔机路径决策中引入模糊逻辑算法,使水下滑翔机在不进

行过度计算的情况下做出了有效的路径决策。模糊逻辑算法可以用于水下滑翔机的避障问题,算法计算量小,其精度与模糊化分类有关。

1.2.3 生物行为模拟算法

生物行为模拟算法是指通过模仿生物的功能和行为来建造技术系统的一种科学方法。它打破了生物和机器的界限,将不同的系统沟通起来。生物行为模拟算法主要包括蚁群算法、粒子群优化算法和人工蜂群算法。

1) 蚁群算法。

蚁群算法是 Dorigo 等^[79]受蚁群觅食行为的启发而设计的一种由初始化、解构建和信息素更新组成的智能仿生优化算法。2018 年, Xiong 等^[80]将 Delaunay 三角剖分集成到蚁群算法中,充分考虑了洋流,用以解决水下滑翔机自适应海洋采样问题。2020 年, Han 等^[81]利用蚁群算法设计出一种避障与完全覆盖路径规划相结合的算法,保证了温跃层海域水下滑翔机的避障性能。同年, Li 等^[82]将蚁群算法中的初始点和目标点设置了初始信息素浓度,通过优化信息素更新、增加传递因子和优化传递方式,加快了算法的全局收敛速度并减少了局部最优解的产生。蚁群算法主要用于时间最优的路径规划问题,也可以用于全覆盖避障问题,在运用该方法时需考虑洋流和能耗的影响^[82]。

2) 粒子群优化算法。

粒子群优化算法是一种基于鸟群聚集模型的仿真算法^[83]。2015 年, 赵宝强^[84]利用粒子群改进算法解决了水下滑翔机的路径规划问题,并在效率最优的原则下对水下滑翔机到达指定位置的路径进行了优化。2018 年, Mahmoudzadeh 等利用粒子群优化算法对水下滑翔机的交会问题进行了求解,结果显示具有鲁棒性与高效性。2020 年, 于文举等^[85]利用粒子群优化算法,通过考虑水下滑翔机路径的长度、障碍物的危险度和路径平滑度这 3 个因素,实现了性能与效率的双优。粒子群优化算法可以用于具有多个约束条件的路径规划问题,具有全局最优性,不过对于复杂海流情况下的路径规划,还需要做更多的研究。

3) 人工蜂群算法。

人工蜂群算法由土耳其学者 Karaboga^[86]于 2005 年提出,最初被应用于数值优化问题。2020 年, 宋大雷等^[87]利用改进的人工蜂群算法,解决了水下滑翔机路径规划过程中的混合非凸多目标优化问题,通过对综合航行指标最均衡的控制参数进行求解,使得路径具备较好的局部和全局寻优能力。人工蜂群算法可以用于能耗最优的路径规划

问题, 其仿真结果与海试数据相符, 表明优化性能较好。

1.2.4 智能优化算法小结

智能优化算法是近年来的热门算法, 具有路径搜索速度快、自适应能力强等优点, 但实现成本可能较高。表 2 对智能优化算法的优缺点进行了归纳与总结。

表 2 路径规划智能优化算法总结
Table 2 Summary of intelligent optimization algorithms for path planning

算法	优点	缺点
生物遗传进化算法	鲁棒性强、搜索能力强、实现成本低	收敛速度慢、容易陷入局部最优、参数优化复杂
人工智能算法	自适应能力强、自我学习、稳定性强	处理时间长、实现成本高
生物行为模拟算法	全局搜索能力强、设置参数少、成本低	容易陷入局部最优、参数选择影响较大、后期收敛速度慢

1.3 多算法融合

多算法融合是指一种算法与另外一种或几种算法相组合, 以将多种算法的优点相结合或者弥补某一种算法缺点的算法。迄今, 越来越多的学者倾向于将多种算法相结合来实现某种功能。将多算法进行融合主要分为 3 种类型: 多传统算法融合、传统算法与智能优化算法融合、多智能优化算法融合。

1.3.1 多传统算法融合

2015 年, Zhu 等^[88] 在研究强洋流海洋环境时, 采取将 A*算法与波阵算法相结合的方法来解决水下滑翔机的路径规划问题, 所得路径具有时间最优与航程最短的特点, 同时, 还能适应整个路径规划和分段路径规划。2016 年, Zhang 等^[89] 采用将 A*算法与人工势场法相结合的方法来解决水下滑翔机的路径规划问题, 其将 A*算法用于规划具有多个约束的全局规划路径问题, 然后采用人工势场法的思想建立障碍物成本函数以解决障碍物的成本问题。2017 年, Li 等^[90] 利用一种称为 RBVG(rubber band visibility graph)的可视图算法来生成路线图, 最后将 A*算法与 RBVG 可视图相结合, 规划出了一条最优路径。多传统算法融合可以用于全局最优路径规划, 因考虑了多种影响因素, 所得路径平滑, 已在海试中取得理想效果。

1.3.2 传统算法与智能优化算法融合

2012 年, Zhang 等^[91] 将数学模型与改进的蚁群算法予以了结合, 其中数学模型完整保存并大大压缩了环境信息, 改进后的蚁群算法能够与障

碍物保持安全距离, 既保证了规划路径的安全性, 同时也提高了局部路径规划的效率。2013 年, Zhang 等^[92] 将数学模型与蚁群优化算法相结合, 同时满足了规划路径的安全性和局部路径规划的高效性。传统算法与智能优化算法的融合可以用于全局与局部的最优路径规划, 组合算法能同时满足 2 个甚至是多个需求, 具有极大的现实意义。

1.3.3 多智能优化算法融合

2008 年, 唐旭东等^[93] 提出利用基于专家经验和蚁群优化算法的模糊神经网络控制系统来解决水下滑翔机的非线性路径规划问题, 该系统融合了模糊控制、蚁群和专家经验方法的优点, 既有模糊的广泛映射能力, 也有蚁群算法的并行性和高运算效率特性, 同时还兼具专家经验的简化性。2018 年, Zhou 等^[94] 提出了一种将粒子群优化算法与模糊逻辑控制算法相结合的组合算法, 即将模糊逻辑应用于决策的路径重新规划系统, 同时利用多目标粒子群算法对路径规划系统进行目标优化, 增强鲁棒性。多智能优化算法融合可以用于解决复杂环境下的局部路径规划问题, 是近年来新兴的一种组合算法, 效果还有待进一步的验证。

1.4 路径规划算法总结

由以上叙述可以看出, 在 20 世纪末 21 世纪初, 这些算法并不成熟完善。传统算法由于具有简单、容易实现等优点, 在水下滑翔机路径规划初期占据着主要地位。之后, 智能优化算法逐步成熟并被应用于水下滑翔机的路径规划。近年来, 水下滑翔机的观测探测任务更加复杂多样, 随着人工智能大数据的飞速发展, 多种智能算法相融合取长补短成为目前效果最优的主流算法。

本文将传统算法、智能优化算法与多算法融合进行了优缺点对比, 具体见表 3。从表中可以看出, 不同类型算法其优缺点不同, 在实际应用中需应根据实际要求以及所具备的条件予以选择。传统算法过程简单且易于实现, 但搜索的时

表 3 路径规划算法总结
Table 3 Summary of path planning algorithm

算法类型	优点	缺点
传统算法	算法简单、速度快、容易实现	效率低、建模复杂、搜索时间长
智能优化算法	鲁棒性强、稳定性强、搜索能力强	容易陷入局部最优、处理时间长、成本高
多算法融合	可靠性强, 可防止过拟合与欠拟合、准确度高、稳定性强	建模复杂、成本高

间较长,对计算的要求较高;智能优化算法建模相对较复杂,但搜索能力及稳定性较好;多算法融合在前期建模时需要的成本较高,但其综合能力最强。在实际探测观测任务中,需使用综合性能最优的算法来获得实用性最高的路径轨迹。在以后的研究中,需要将不同算法进行优化组合,以使所得路径在能量成本、长度与时间等各个方面相互协调,达到实用性最高。

2 水下滑翔机路径规划关键技术

2.1 环境感知技术

所谓环境感知技术,是指水下滑翔机在执行任务的过程中对自身所处环境进行分析与感知的一种技术。海洋环境复杂多变,海洋生物动态多样,海洋洋流因受多种因素的综合影响而变幻莫测,这些因素都会加大水下滑翔机对海洋环境探测与感知的难度。环境感知技术对于水下滑翔机在执行任务过程中的障碍躲避、定点采样、反潜侦察具有很大的影响,因此,提升水下滑翔机的环境感知技术意义重大^[95]。在环境感知这个过程中,任务传感器是最关键的一步。目前,水下滑翔机在执行任务的过程中主要通过携带的温盐深传感器(CTD)来测量海洋环境中海水的导电率、温度和深度等参数,不同的观测任务需要水下滑翔机携带的附加传感器类型不同,任务传感器系统获取信息能力的强弱与精度直接决定了水下滑翔机感知能力的强弱。此外,实时获取水下滑翔机自身的位置、速度和姿态等信息也能更好地进行环境感知^[96]。在以后的研究中,还需要将任务传感器所测得的信息与算法进行信息融合,实现水下滑翔机在复杂海洋环境中对目标及其自身运动信息准确、可靠、鲁棒的理解。与此同时,利用声学与光学传感器,可测得水下滑翔机及其海洋环境的实时数据,将数据中的关键特征信息予以提取并对数据进行处理,可分别在大范围大尺度和局部区域小尺度上进行海洋环境的建模,保障水下滑翔机在复杂海洋环境下实现可靠、准确、鲁棒的环境感知与理解^[96]。

2.2 环境重构技术

环境重构技术是指水下滑翔机在进行路径规划之前,需要将航行所处海洋环境的洋流、温度、盐度等参数尽可能精确地进行数学物理建模,将原始的外部信息更改为适于路径规划的内部环境工作形式^[8]。但是,初始构建的数学物理模型与

真实的海洋环境存在一定的差异,这就需要水下滑翔机在到达海面后,通过 GPS 将其在该水下滑翔周期所获得的参数信息传输至电脑端,在电脑端经处理后再用于修正初始数学物理模型,达到精确反映真实海洋环境的效果。准确、合理的建模方法对于路径规划至关重要,合理的建模方式能够有效减少路径规划中的计算量,减少水下滑翔机重新规划路径所需要的时间。现有的海洋建模技术主要分为 2 种形式:数学建模和图形建模^[8]。数学建模主要有拉格朗日海流建模和 B 样条曲线等,图形建模主要有 Delaunay 和可见性图空间模型等。水下滑翔机的任务多种多样,包括长航程采样、短航程不同深度的采样等。对于长航程探测任务,一般要求海洋模型中洋流的精确度高;对于短航程不同深度的采样,则一般要求海洋模型中温盐参数的精确度高。根据水下滑翔机任务的不同,路径规划选用的方法不同,所需环境模型的类型与精度也不同,因此需要根据任务的需求选用合理的环境模型。将现有的模型融合,同时开发新型的环境建模方法对于水下滑翔机的路径规划发展具有里程碑式的意义。

2.3 水下通信与定位技术

水下滑翔机的运行周期分为水面悬浮接收信号发送所测数据与水下滑翔采样两部分,其中水下工作时间约占整个滑翔周期的 80% 以上^[17]。若能实现水下滑翔机在水下的精确通信与定位,路径规划的精度将会得到大跨度的跃升。然而,深海通信与定位面临着环境复杂、信息源缺乏的局面,技术突破难度大,导致当前的深海通信在通信质量与稳定性等方面均不理想。发展高精度、高效率、高可靠性的新型深海通信与定位技术成为未来深海探测的关键环节^[97]。目前,水下滑翔机的水下通信主要涉及液体介质中信号的传播以及液体到气体的跨介质信号传播,其中存在的技术难题均使水下通信技术难以真正应用到工程航行中。当前,利用声学进行水下定位是最通用的方式,该方式采取的是将一个紧凑、小巧的声基阵搭载于载体上来实现水下定位,适合远距离通信,但是信号有所延迟,会受到噪声干扰。光视觉技术也被研究用于水下通信,其在水中的精度高,能够近距离引导,但效果会受到光背景变化的影响。电磁在水中定位与通信方面具有全方向传播的优点,但传播距离小于 30 m^[98]。未来,可融合不同方式来进行探测,或将不同方式所获取的信息融合处理,以实现水下滑翔机在水下的

精确定位。水下滑翔机的水下精确定位能同时解决水下精确点采样和路径跟踪等问题, 但该项技术还需要进行大量的研究与试验, 以验证其可行性。

2.4 智能决策技术

智能决策技术主要是指将人工智能与决策支持技术相结合, 以使决策支持系统能够充分学习人类知识的一种技术, 如关于决策问题的描述性知识、决策过程中的过程性知识、求解问题的推理性知识等, 通过逻辑推理, 来帮助解决复杂的决策问题。智能决策技术将人机交互、模型库系统、数据库系统有机地结合了起来^[99]。水下滑翔机在海洋中运行时会遇到大量的决策问题, 例如当遇到一个动态障碍时, 是继续航行还是避让等。决策问题体现在水下滑翔机的路径规划、定点采样与障碍避让等任务执行的各个方面。针对不同的决策问题, 需要训练不同的模型。目前, Q Learning, DQN, Sarsa 以及迁移学习等方法均具有完备的成熟训练框架。在应用过程中, 可将水下滑翔机所处的海洋模型以及自身运动模型引入训练框架, 利用以往的滑翔数据训练出高准确率快速决策模型; 对于滑翔运动方式, 则利用以往的滑翔数据训练出高准确率快速决策模型。错误的决策会导致水下滑翔机与动态障碍相撞而产生不可弥补的损失, 智能决策是水下滑翔机路径规划的核心技术, 对路径规划具有重要意义。人工智能技术发展迅速, 尤其是深度学习和神经网络的发展, 可使机器决策的准确率得到极大提升。在接下来的发展中, 还需模仿人类的直觉预测方式, 并对行为展开相应的调整, 以真正适应水下滑翔机所处的动态海洋环境, 从而使水下滑翔机能够在海洋深处的更复杂环境中正常工作。

图 4 所示为对水下滑翔机路径跟踪相关关键技术分析与总结。水下滑翔机主要通过历史剖面数据进行环境建模, 通过传感器对海洋数据进行测量分析来完成海洋环境重构, 通过水声通信技术和微波通信技术对其进行水下定位, 最终通过算法实现对水下滑翔机的智能决策控制。

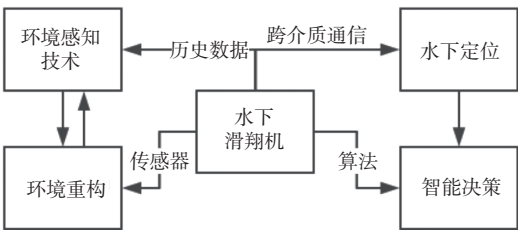


图 4 水下滑翔机关键技术
Fig. 4 Key technologies of underwater glider

3 水下滑翔机路径规划发展趋势

3.1 多算法共融规划

随着深度学习与人工智能技术的飞速发展, 水下滑翔机正朝着智能化的方向跃进。在世界人工智能以及大数据发展的大趋势下, 利用人工智能解决水下滑翔机的路径规划问题受到了高度关注。通过人工智能, 可以得到多种智能优化算法, 例如遗传算法、蚁群优化算法、神经网络算法等。利用单一的算法解决水下滑翔机的路径规划问题能够使所得路径在某一方面性能最优, 但在其他方面有可能会出现问题。例如, 当所得路径具有时间最优时, 水下滑翔机可能需要多次穿过强洋流区域, 从而导致能耗为原来的 2 倍甚至更多。而将不同的算法进行共融, 取长补短, 使所得路径在效率、时间、稳定性等各个方面性能优良, 从而达到综合性能最优是水下滑翔机路径规划问题发展的目标。例如, 将粒子群优化算法与模糊逻辑控制算法相结合的组合算法用于水下滑翔机路径规划, 可以提高采样效率, 降低功耗, 增强鲁棒性^[94]。因此, 多算法融合将是水下滑翔机路径规划研究的主要方向之一。

3.2 多机协同路径规划

随着水下滑翔机作业范围的扩展, 除单一水下滑翔机执行任务的模式外, 还需要多台水下滑翔机协同来承担更加复杂而艰巨的任务, 即通过大规模、多平台的组网作业来增强观测探测能力。多机协同需要根据环境及其目标任务来自行调整航行方式和滑翔参数, 以实现海洋高分辨率的观测与探测需求, 同时, 也是实现一定区域目标探测的有效手段之一^[100]。根据任务的不同, 水下滑翔机群的编排方式多种多样, 它们可能采取固定的队形来观测不同平行线之间海洋参数的变化规律, 也可能采用变换的队形来观测渐变区域海洋参数的差异。多机协同路径规划技术已成为当今水下滑翔机路径规划的热点问题之一。多机协同路径规划与单一的水下滑翔机路径规划不同, 单一的水下滑翔机路径规划只需要考虑时间、能耗、鲁棒性等问题即可, 而多机协同路径规划除此之外, 还需要考虑水下滑翔机群在水下滑行时编队的空间问题, 以及多台水下滑翔机之间的通信、间隔变换、队形变换等问题。多水下滑翔机协同路径规划的发展依赖于水下通信与水下精确定位的发展。如何使多机协同路径规划具有

准确性和高效性,是水下滑翔机路径规划研究的另一个主要方向。

3.3 融合时空和目的地约束的多维路径规划

随着水下滑翔机不断地向更远的航程和更深的水底发展,其更需要注重精度与能耗。实现远与深的目标意味着还需要更大容量的电池提供动力支持,而容量的增大会使电池的质量与体积增大,进而增加水下滑翔机的体积与质量,由此,也就出现了不可调和的矛盾。因此,在进行水下滑翔机的路径规划时,需要综合考虑时间、空间、目的地等多种约束条件。通过考虑空间与目的地等约束条件,使所得路径满足精度的要求;考虑时间等约束,则满足能耗的需求。在满足多种约束条件的情况下,制定出合理的多维路径规划方案是未来发展的方向。目前,对水下滑翔机路径规划的约束主要有时间约束、能耗约束、起始点与终点约束等,在进行路径规划时,通常只考虑起始点、目的地与时间约束,或是起始点、目的地与能耗约束,很少综合考虑到多种约束条件,因而导致所得路径在某一方面性能良好而综合性却很差。在以后的路径规划中,需注重综合考虑以上多种约束条件,使水下滑翔机能够跟随预定的轨迹从起点到达目的地,也即融合时空和目的地约束的多维路径规划。融合时空和目的地约束的多维路径规划技术研究可广泛用于工程任务,以最小的成本满足工程的要求,具有极大的现实意义。所以,融合时空和目的地约束的多维路径规划也是水下滑翔机路径规划研究的一个主要方向。

3.4 复杂非稳态环境下的高精度路径规划

海洋环境具有特殊性与复杂性,主要表现为海洋气象状况和海水运动的多变、深海中的高压与低温,以及海水腐蚀性强等。此外,海洋环境中还存在暗礁、暗流等一些无法观测的复杂环境。一些中尺度、亚中尺度涡流也是海洋研究中最重要的一部分,海洋科学家和海洋地质学家都需要这些涡流地区的探测数据来进行科学研究。当水下滑翔机在复杂的非稳态环境中执行观测探测任务时,其自身也面临着极大的风险。在复杂的非稳态环境下,水下滑翔机面向目标搜索时极易受到涡流洋流的影响而偏离预定航线,然而探测任务却需要水下滑翔机的航向能时刻沿着目标方向、沿着预定的轨迹移动,直至到达目标点进行采样。当水下滑翔机出现偏离航线的问题时,会极大地影响所测剖面数据的准确性。对复

杂非稳态环境下的水下滑翔机进行高精度路径规划是水下滑翔机圆满完成任务的前提。高精度路径规划技术的提高依赖于水下通信和水下定位技术的发展,同时,也要求路径规划算法具有高稳定性与鲁棒性。因此,复杂非稳态环境下的高精度路径规划是必要的,它是水下滑翔机路径规划的主要研究方向之一。

4 结 语

路径规划是水下滑翔机领域的研究热点和难点,也是保障其在大范围海洋环境中自主完成观测任务的关键技术。由于水下滑翔机工作时间长,自身携带能源有限,因此,需进行合理的路径规划以减少能耗,并延长其有效工作时间,同时,帮助水下滑翔机的安全航行及正常工作与回收。本文主要对近年来水下滑翔机路径规划方面的相关文献进行了综述分析,将路径规划算法分为传统算法、智能优化算法与多算法融合 3 类,并分别针对这 3 类算法进行了讨论,对比分析了各算法的优缺点,总结凝练出了水下滑翔机路径规划的关键技术。最后,对水下滑翔机路径规划的发展趋势进行了展望,归纳了多算法共融、多机协同、多约束与高精度等水下滑翔机的路径规划技术发展方向。

参考文献:

- [1] 郭满,文莉莉.国内外海洋经济发展经验与趋势分析[J].中国国土资源经济,2021,34(10):60-66.
WU M, WEN L L. Analysis on the development experience and trend of marine economy at home and abroad[J]. *Natural Resource Economics of China*, 2021, 34(10): 60-66 (in Chinese).
- [2] 方尔正,周子凌,桂晨阳.水下滑翔机原理与应用[J].国防科技工业,2020(8):66-68.
FANG E Z, ZHOU Z L, GUI C Y. Principle and application of underwater glider[J]. *National Defense Science and Technology Industry*, 2020(8): 66-68 (in Chinese).
- [3] 李沛伦.水下滑翔机的路径规划研究[D].上海:上海交通大学,2019.
LI P L. Research on path planning of underwater glider[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019 (in Chinese).
- [4] 杜沛,任利锋,刘善伟,等.基于海洋环境要素的动态航行风险评估[J].中国安全生产科学技术,2021,17(2):171-176.
DU P, REN L F, LIU S W, et al. Dynamic navigation risk assessment based on marine environmental elements[J]. *Journal of Safety Science and Technology*,

2021, 17(2): 171–176 (in Chinese).

[5] 李永丹, 马天力, 陈超波, 等. 无人驾驶车辆路径规划算法综述 [J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(6): 72–79. LI Y D, MA T L, CHEN C B, et al. Review of path planning algorithm for unmanned vehicles[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(6): 72–79 (in Chinese).

[6] 姜凯文. 传统优化算法 VS 智能优化算法 [EB/OL]. (2020-12-20)[2021-06-10]. https://blog.csdn.net/qq_43641765/article/details/111414848. JIANG K W. Traditional optimization algorithm and intelligent optimization algorithm[EB/OL]. (2020-12-20)[2021-06-10]. https://blog.csdn.net/qq_43641765/article/details/111414848 (in Chinese).

[7] 赵涛, 刘明雍, 周良荣. 自主水下航行器的研究现状与挑战 [J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(6): 1–6. ZHAO T, LIU M Y, ZHOU L R. A survey of autonomous underwater vehicle recent advances and future challenges[J]. Fire Control & Command Control, 2010, 35(6): 1–6 (in Chinese).

[8] 沈新蕊, 王延辉, 杨绍琼, 等. 水下滑翔机技术发展现状与展望 [J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(2): 89–106. SHEN X R, WANG Y H, YANG S Q, et al. Development of underwater gliders: an overview and prospect [J]. Journal of Unmanned Undersea System, 2018, 26(2): 89–106 (in Chinese).

[9] 温浩然, 魏纳新, 刘飞. 水下滑翔机的研究现状与面临的挑战 [J]. 船舶工程, 2015, 37(1): 1–6. WEN H R, WEI N X, LIU F. Research of current situation and future challenges of underwater glider[J]. Ship Engineering, 2015, 37(1): 1–6 (in Chinese).

[10] LI D L, WANG P, DU L. Path planning technologies for autonomous underwater vehicles-a review[J]. IEEE Access, 2018, 7: 9745–9768.

[11] MCCOLGAN J, MCGOOKIN E W, MAZLAN A N A. A low fidelity mathematical model of a biomimetic AUV for multi-vehicle cooperation[C]//OCEANS 2015-Genova. Genova, Italy: IEEE, 2015.

[12] FORNEY C, MANII E, FARRIS M, et al. Tracking of a tagged leopard shark with an AUV: sensor calibration and state estimation[C]//2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Saint Paul, MN, USA: IEEE, 2012: 5315–5321.

[13] 陈麒杰, 晋玉强, 韩露. 无人机路径规划算法研究综述 [J]. 飞航导弹, 2020(5): 54–58. CHEN Q J, JIN Y Q, HAN L. Overview of UAV path planning algorithm[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2020(5): 54–58 (in Chinese).

[14] 郭银景, 孟庆良, 孔芳, 等. AUV 路径规划算法研究现状与展望 [J]. 计算机科学与探索, 2020, 14(12): 1981–1994. GUO Y J, MENG Q L, KONG F, et al. Research status and prospect of AUV path planning algorithm[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2020, 14(12): 1981–1994 (in Chinese).

[15] YANG L, QI J T, XIAO J Z, et al. A literature review of UAV 3D path planning[C]//Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation. Shenyang, China: IEEE, 2014.

[16] HADI B, KHOSRAVI A, SARHADI P. A review of the path planning and formation control for multiple autonomous underwater vehicles[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2021, 101(4): 67.

[17] 李全涌, 李波, 张瑞, 等. 基于改进 Dijkstra 算法的 AGV 路径规划研究 [J]. 机械工程与自动化, 2021(1): 23–25, 28. LI Q Y, LI B, ZHANG R, et al. Research on AGV path planning based on improved Dijkstra algorithm[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2021(1): 23–25, 28 (in Chinese).

[18] EICHHORN M. A new concept for an obstacle avoidance system for the AUV "SLOCUM Glider" operation under ice[C]//Oceans 2009-Europe. Bremen, Germany: IEEE, 2009: 1–8.

[19] FERNÁNDEZ-PERDOMO E, CABRERA-GÁMEZ J, HERNÁNDEZ-SOSA D, et al. Adaptive bearing sampling for a constant-time surfacing A* path planning algorithm for gliders[C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai, China: IEEE, 2011.

[20] FERNÁNDEZ-PERDOMO E, CABRERA-GÁMEZ J, HERNÁNDEZ-SOSA D, et al. Path planning for gliders using regional ocean models: application of Pinzón path planner with the ESEOAT model and the RU27 transatlantic flight data[C]//Oceans'10 IEEE Sydney. Sydney, NSW, Australia: IEEE, 2012: 1–8.

[21] WANG X C, CHAO Y, THOMPSON D R, et al. Multi-model ensemble forecasting and glider path planning in the mid-atlantic bight[J]. Continental Shelf Research, 2013, 63(Supp 1): S223–S234.

[22] EICHHORN M. Optimal routing strategies for autonomous underwater vehicles in time-varying environment[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2015, 67: 33–43.

[23] ISERN-GONZÁLEZ J, HERNÁNDEZ-SOSA D, FERNÁNDEZ-PERDOMO E, et al. Application of optimization algorithms to trajectory planning for underwater gliders[M]//MORENO-DÍAZ R, PICHLER F, QUESADA-ARENCIBIA A. Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2011. Eurocast: Springer, 2012: 433–440.

[24] 周耀鉴, 刘世杰, 俞建成, 等. 基于局部流场构建的水下滑翔机路径规划 [J]. 机器人, 2018, 40(1): 1–7. ZHOU Y J, LIU S J, YU J C, et al. Underwater glider path planning based on local flow field construction[J].

- Robot, 2018, 40(1): 1–7 (in Chinese).
- [25] HE B, ZHOU X. Path planning and tracking for AUV in large-scale environment[C]//2010 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR 2010). Wuhan, China: IEEE, 2010.
 - [26] YOO C, ANSTEE S, FITCH R. Stochastic path planning for autonomous underwater gliders with safety constraints[C]//2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Macau, China: IEEE, 2019.
 - [27] TOMASZEWSKI C, VALADA A, SCERRI P. Planning efficient paths through dynamic flow fields in real world domains[C]//2013 Oceans-San Diego. San Diego, CA, USA: IEEE, 2012.
 - [28] Lolla T, HALEY JR P J, LERMUSIAUX P F J. Time-optimal path planning in dynamic flows using level set equations: realistic applications[J]. *Ocean Dynamics*, 2014, 64(10): 1399–1417.
 - [29] Lolla T, HALEY P J, LERMUSIAUX P F J. Path planning in multi-scale ocean flows: coordination and dynamic obstacles[J]. *Ocean Modelling*, 2015, 94: 46–66.
 - [30] KABIT O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. *The International Journal of Robotics and Research*, 1986, 5(1): 90–98.
 - [31] 李沛伦, 杨启. 基于改进人工势场法的水下滑翔机路径规划[J]. *舰船科学技术*, 2019, 41(4): 89–93.
YANG P L, YANG Q. Path planning for underwater glider based on improved artificial potential field method[J]. *Ship Science and Technology*, 2019, 41(4): 89–93 (in Chinese).
 - [32] LAVALLE S M, KUFFNER JR J J. Randomized kinodynamic planning[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2001, 20(5): 378–400.
 - [33] HERNÁNDEZ J D, VIDAL E, VALLICROSA G, et al. Online path planning for autonomous underwater vehicles in unknown environments[C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Seattle, WA, USA: IEEE, 2015: 1152–1157.
 - [34] 陈香敏, 吴莹. 基于 Voronoi 图的 UAV 攻击多移动目标的路径规划算法研究[J]. *信息通信*, 2020(6): 36–37.
CHEN X M, WU Y. Research on path planning algorithm of UAV attacking multiple moving targets based on Voronoi diagram[J]. *Information & Communications*, 2020(6): 36–37 (in Chinese).
 - [35] MARINO A, ANTONELLI G. Experiments on sampling/patrolling with two autonomous underwater vehicles[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, 67: 61–71.
 - [36] CANDELORO M, LEKKAS A M, HEGDE J, et al. A 3D dynamic Voronoi diagram-based path-planning system for UUVs[C]//Oceans 2016 MTS/IEEE Monterey. Monterey, CA, USA: IEEE, 2016.
 - [37] INANC T, SHADDEN S C, MARSDEN J E. Optimal trajectory generation in ocean flows[C]//Proceedings of the 2005, American Control Conference. Portland, OR, USA: IEEE, 2005.
 - [38] ZHANG W Z, INANC T, OBER-BLOBAUM S, et al. Optimal trajectory generation for a glider in time-varying 2D ocean flows B-spline model[C]//2008 International Conference on Robotics and Automation. Pasadena, CA, USA: IEEE, 2008.
 - [39] RAMOS A G, GARCÍA-GARRIDO V J, MANCHO A M, et al. Lagrangian coherent structure assisted path planning for transoceanic autonomous underwater vehicle missions[J]. *Science Reports*, 2017, 8(1): 4575.
 - [40] DAVIS R E, LEONARD N E, FRATANTONI D M. Routing strategies for underwater gliders[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2009, 56(3/4/5): 173–187.
 - [41] KULKARNI C S, LERMUSIAUX P F J. Three-dimensional time-optimal path planning in the ocean[J]. *Ocean Modelling*, 2020, 152: 101644.
 - [42] HERNANDEZ D, ADLER L, ISERN J, et al. Data uncertainty management in path planning for underwater ocean gliders[C]//Oceans 2014-Taipei. Taipei, China: IEEE, 2012.
 - [43] STUNTZ A, LIEBEL D, SMITH R N. Enabling persistent autonomy for underwater gliders through terrain based navigation[C]//Oceans 2015-Genova. Genova, Italy: IEEE, 2013.
 - [44] CADMUS TO K Y, LEE J J H, YOO C, et al. Streamline-based control of underwater gliders in 3D environments[C]//2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC). Nice, France: IEEE, 2019.
 - [45] 何柏岩, 杜金辉, 杨绍琼, 等. 基于 VMD-LSSVM 的水下滑翔机深平均流预测[J]. *天津大学学报*, 2021, 54(4): 388–396.
HE B Y, DU J H, YANG S Q, et al. Prediction of underwater glider depth-averaged current velocity based on VMD-LSSVM[J]. *Journal of Tianjin University*, 2021, 54(4): 388–396 (in Chinese).
 - [46] MAHMOUDIAN N, GEISBERT J, WOOLSEY C. Approximate analytical turning conditions for underwater gliders: implications for motion control and path planning[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2010, 35(1): 131–143.
 - [47] WEHBE B, SHAMMAS E, ZEAITER J, et al. Dynamic modeling and path planning of a hybrid autonomous underwater vehicle[C]//2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2014). Bali, Indonesia: IEEE, 2014.
 - [48] LIU Y J, MA J, MA N, et al. Path planning for underwater glider under control constraint[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, 9(8): 1–9.
 - [49] BINNEY J, KRAUSE A, SUKHATME G S. Informat-

ive path planning for an autonomous underwater vehicle[C]//2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Anchorage AK, USA: IEEE, 2010.

[50] ISERN-GONZÁLEZ J, HERNÁNDEZ-SOSA D, FERNÁNDEZ-PERDOMO E, et al. Path planning for underwater gliders using iterative optimization[C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai, China: IEEE, 2011.

[51] FERNÁNDEZ-PERDOMO E, HERNÁNDEZ-SOSA D, ISERN-GONZÁLEZ J, et al. Single and multiple glider path planning using an optimization-based approach[C]//Oceans 2011 IEEE. Santander, Spain: IEEE, 2011.

[52] HUANG Y, YU J C, ZHAO W T, et al. A practical path tracking method for autonomous underwater gliders using iterative algorithm[C]//Oceans 2015 - MTS/IEEE Washington. Washington, DC, USA: IEEE, 2015.

[53] SOFGE D A, WHITMAN J S. Long-range near-optimal path planning for gliders in complex high-energy environments[C]//2010 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles. Monterey, CA, USA: IEEE, 2020.

[54] SMITH R N, KELLY J, SUKHATME G S. Towards improving mission execution for autonomous gliders with an ocean model and Kalman filter[C]//2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Saint Paul, MN, USA: IEEE, 2012.

[55] PEREIRA A A, BINNEY J, HOLLINGER G A, et al. Risk-aware path planning for autonomous underwater vehicles using predictive ocean models[J]. *Journal of Field Robotics*, 2013, 30(5): 741–762.

[56] HOU M X, LIU S J, ZHANG F M, et al. A combined path planning and path following method for underwater glider navigation in a strong, dynamic flow field[C]//2018 Oceans-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). Kobe, Japan: IEEE, 2018.

[57] CAROF A H. Acoustic differential delay and doppler tracking system for long range AUV positioning and guidance[C]//IEEE Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology. Cambridge, MA, USA: IEEE, 1994.

[58] YANG C J, PENG S L, FAN S S, et al. Study on docking guidance algorithm for hybrid underwater glider in currents[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 125: 170–181.

[59] 朱心科, 俞建成, 王晓辉. 能耗最优的水下滑翔机采样路径规划 [J]. *机器人*, 2011, 33(3): 360–365.

ZHU X K, YU J C, WANG X H. Sampling path planning of underwater glider for optimal energy consumption[J]. *Robot*, 2011, 33(3): 360–365 (in Chinese).

[60] 朱心科, 俞建成, 王晓辉. 多水下滑翔机海洋采样路径规划 [J]. *信息与控制*, 2012, 41(4): 433–438.

ZHU X K, YU J C, WANG X H. Path planning of multiple underwater gliders for ocean sampling[J]. *Information and Control*, 2012, 41(4): 433–438 (in Chinese).

[61] THOMPSON D R, CHIEN S, CHAO Y, et al. Spatiotemporal path planning in strong, dynamic, uncertain currents[C]//2010 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Anchorage, AK, USA: IEEE, 2010.

[62] ZHANG F T, EN-NASR O, LITCHMAN E, et al. Autonomous sampling of water columns using gliding robotic fish: control algorithms and field experiments[C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Seattle, WA, USA: IEEE, 2015: 517–522.

[63] 于茂升, 韩雷, 宋大雷. 水下滑翔机路径显示与规划系统的设计与实现 [J]. *电子设计工程*, 2016, 24(7): 4–7, 10.

YU M S, HAN L, SONG D L. Design and implementation of path display and planning system for underwater glider[J]. *Electronic Design Engineering*, 2016, 24(7): 4–7, 10 (in Chinese).

[64] 李少波, 宋启松, 李志昂, 等. 遗传算法在机器人路径规划中的研究综述 [J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(2): 423–431.

LI S B, SONG Q S, LI Z A, et al. Review of genetic algorithm in robot path planning[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(2): 423–431 (in Chinese).

[65] CHENG C T, FALLAHI K, LEUNG H, et al. A genetic algorithm-inspired UUV path planner based on dynamic programming[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2012, 42(6): 1128–1134.

[66] CAO J L, CAO J J, ZENG Z, et al. Optimal path planning of underwater glider in 3D Dubins motion with minimal energy consumption[C]//Oceans 2016-Shanghai. Shanghai, China: IEEE, 2015.

[67] LUCAS C, HERNÁNDEZ-SOSA D, CALDEIRA R. Multi-objective four-dimensional glider path planning using NSGA-II[C]//2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV). Porto, Portugal: IEEE, 2016.

[68] LUCAS C, HERNÁNDEZ-SOSA D, GREINER D, et al. An approach to multi-objective path planning optimization for underwater gliders[J]. *Sensors*, 2019, 19(24): 5506.

[69] CAO J L, CAO J J, ZENG Z, et al. Toward optimal rendezvous of multiple underwater gliders: 3D path planning with combined sawtooth and spiral motion[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2017, 85(1): 189–206.

[70] SHIH C C, HORNG M F, PAN T S, et al. A genetic-based effective approach to path-planning of autonomous underwater glider with upstream-current avoidance in variable oceans[J]. *Soft Computing*, 2017, 21(18): 5369–5386.

[71] SHIH C C, HORNG M F, PAN T S. A parallel genetic approach to path-planning with upstream-current avoid-

- ance for multi-AUG deployment[J]. *Soft Computing*, 2020, 24(11): 8427–8441.
- [72] STORN R, PRICE K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. *Journal of Global Optimization*, 1997, 11(4): 341–359.
- [73] ZAMUDA A, SOSA J D H, ADLER L. Constrained differential evolution optimization for underwater glider path planning in sub-mesoscale eddy sampling[J]. *Applied Soft Computing*, 2016, 42: 93–118.
- [74] ZAMUDA A, SOSA J D H. Success history applied to expert system for underwater glider path planning using differential evolution[J]. *Expert Systems with Applications*, 2019, 119: 155–170.
- [75] ZADEH S M, YAZDANI A M, SAMMUT K, et al. Online path planning for AUV rendezvous in dynamic cluttered undersea environment using evolutionary algorithms[J]. *Applied Soft Computing*, 2018, 70: 929–945.
- [76] ZANG W C, NIE Y L, SONG D L, et al. Research on constraining strategies of underwater glider's trajectory under the influence of ocean currents based on DQN algorithm[C]//Oceans 2019 MTS/IEEE Seattle. Seattle, WA, USA: IEEE, 2014.
- [77] NI J J, WU L Y, WANG S H, et al. 3D real-time path planning for AUV based on improved bio-inspired neural network[C]//2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics. Nantou, China: IEEE, 2016.
- [78] SU Y S, ZHANG L, LI Y, et al. A glider-assist routing protocol for underwater acoustic networks with trajectory prediction methods[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 154560–154572.
- [79] DORIGO M. The ant system: an autocatalytic optimizing process[C]//First European Conference on Artificial Life, 1991.
- [80] XIONG C K, ZENG Z, LIAN L. Path planning of multi-modal underwater vehicle for adaptive sampling using delaunay spatial partition-ant colony optimization[C]//2018 Oceans-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). Kobe, Japan: IEEE, 2018, 522–537.
- [81] HAN G J, ZHOU Z R, ZHANG T W, et al. Ant-colony-based complete-coverage path-planning algorithm for underwater gliders in ocean areas with thermoclines[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(8): 8959–8971.
- [82] LI J, WANG H X. Research on AUV path planning based on improved ant colony algorithm[C]//2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Beijing, China: IEEE, 2020.
- [83] 江霓. 智能路径优化方法综述 [J]. *信息技术*, 2016(4): 187–189.
- JIANG N. The summarizing for intelligent path optimization method[J]. *Information Technology*, 2016(4): 187–189 (in Chinese).
- [84] 赵宝强. 基于粒子群改进算法的水下滑翔机路径优化 [J]. *舰船科学技术*, 2015, 37(8): 140–145.
- ZHAO B Q. Underwater glider path optimization based on improved particle swarm algorithm[J]. *Ship Science and Technology*, 2015, 37(8): 140–145 (in Chinese).
- [85] 于文举, 丁军航, 官晟, 等. 考虑障碍物避让的水下滑翔机局部路径规划方法 [J]. *传感器与微系统*, 2020, 39(9): 60–62, 65.
- YU W J, DING J H, GUAN S, et al. Local path planning method of underwater glider considering obstacle avoidance[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2020, 39(9): 60–62, 65 (in Chinese).
- [86] KARABOGA D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, TR06[R]. Kayseri, Turkey: Erciyes University, 2005.
- [87] 宋大雷, 臧文川, 郭亭亭, 等. 水下滑翔机长航程全局路径规划 [J]. *控制工程*, 2020, 27(10): 1679–1685.
- SONG D L, ZANG W C, GUO T T, et al. Global path planning for long range voyage of underwater gliders [J]. *Control Engineering of China*, 2020, 27(10): 1679–1685 (in Chinese).
- [88] ZHU X K, JIN X L, YU J C, et al. Path planning in stronger ocean current for underwater glider[C]//2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems. Shenyang, China: IEEE, 2015.
- [89] ZHANG H H, GONG L M, CHEN T, et al. Global path planning methods of UUV in coastal environment[C]//2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, China: IEEE, 2016.
- [90] LI J H, KANG H, PARK G H, et al. Real time path planning of underwater robots in unknown environment [C]//2017 International Conference on Control, Artificial Intelligence, Robotics & Optimization (ICCAIRO). Prague, Czech Republic: IEEE, 2017.
- [91] ZHANG G L, JIA H M. Global path planning of AUV based on improved ant colony optimization algorithm[C]//2012 IEEE International Conference on Automation and Logistics. Zhengzhou, China: IEEE, 2012.
- [92] ZHANG G L, JIA H M. 3D path planning of AUV based on improved ant colony optimization[C]//Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference. Xi'an, China: IEEE, 2013.
- [93] 唐旭东, 庞永杰, 李晔, 等. 基于蚁群优化的水下机器人 FNN 控制方法 [C]//第 27 届中国控制会议论文集. 昆明: 中国自动化学会, 2008.
- TANG X D, PANG Y J, LI Y, et al. FNN control method of underwater vehicle based on ant colony optimization[C]//Proceedings of the 27th China Control Conference. Kunming: Chinese Association of Automation, 2008 (in Chinese).