
ICS号

中国标准文献分类号

团 体 标 准

自主水下航行器导航控制关键技术
及应用指南

Key technology and application guide
for navigation control of autonomous
underwater vehicle

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX发布

XXXX-XX-XX实施

中国自动化学会发布

目 录

前 言	4
1 范围	5
2 规范性引用文件	5
3 术语、定义和缩略词	5
3.1 术语和定义	5
3.1.1 自主水下航行器 Autonomous Underwater Vehicle (AUV)	5
3.1.2 声呐 Sound Navigation and Ranging	6
3.1.3 惯性测量单元 Inertial Measurement Unit (IMU)	6
3.1.4 实时动态定位技术 Real-Time Kinematic (RTK)	6
3.1.5 全球导航卫星系统 Global Navigation Satellite System (GNSS)	6
3.1.6 运动规划 Path Planning	6
3.1.7 动态感知 Dynamic Perception	6
3.1.8 信息融合 Information Fusion	7
3.1.9 避障 Obstacle Avoidance	7
3.1.10 自动导航系统 Automatic Navigation Control System	7
3.2 缩略词	7
4 总体设计	8
4.1 基本原则	8
4.2 自主水下航行器导航控制关键技术总体思路介绍	8
4.3 自主水下航行器环境感知策略	9
4.3.1 自主水下航行器环境感知策略概述	9
4.3.2 自主水下航行器传感器部署	9
4.3.3 多异构传感器信息融合技术	10
4.4 不确定事件威胁度评估	11
4.4.1 不确定事件类型判别	11
4.4.2 不确定事件威胁度评估	11
4.5 自主水下航行器路径规划技术	12
4.5.1 自主水下航行器路径规划技术概述	12
4.5.2 自主水下航行器路径规划	12
4.5.3 自主水下航行器避障策略	13

4.5.4	自主水下航行器运动控制技术	14
5	技术要求	15
5.1	接口	15
5.1.1	一般要求	15
5.1.2	电气接口	15
5.1.3	机械接口	16
5.1.4	接口通信	16
5.2	安全性	16
5.3	可靠性	17
5.4	维修性	17
5.5	环境适应性	17
附录A	(资料性附录) 自主水下航行器导航典型应用场景	18
(1)	军事应用	18
(2)	水下结构体检测	18
(3)	科学考察	18
(4)	搜寻与救助打捞	18
(5)	水产养殖与渔业服务	18
(6)	水下考古	19

前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国自动化学会提出并归口。

本标准起草单位：安徽大学、芜湖造船厂有限公司、合肥中科深谷科技发展有限公司、重庆川仪自动化股份有限公司、东南大学。

本标准主要起草人：孙长银、黄大荣、曹翔、任璐、张钊、石正鹏、陈锋、吴朋、刘晓黎、刘剑、董璐

本标准为首次发布。

自主水下航行器导航控制关键技术及应用指南

1 范围

本文件规定了自主水下航行器导航控制关键技术及应用的术语和定义、航行器环境感知、航行路径规划、航行器运动控制等关键技术；本文件适用于自主水下航行器导航控制的研究、设计、测试和运行维护，可作为自主水下航行器设计与研究的技术依据。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注明日期的引用文件，仅注明日期的版本适用于本文件。凡是未注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 36896.1-2018 轻型有缆遥控水下机器人 第1部分：总则

GB/T 36896.3-2018 轻型有缆遥控水下机器人 第3部分：导管螺旋桨推进器

GB/T 36896.4-2018 轻型有缆遥控水下机器人 第4部分：摄像、照明与云台

GJB 10258-2021 水下无人航行器光电侦察设备规范

GB/T 13407-1992 潜水器与水下装置术语

CB/Z 216-1987 潜艇船模水下阻力、自航试验规程

GB/T 39624-2020 机载激光雷达水下地形测量技术规范

3 术语、定义和缩略词

3.1 术语和定义

3.1.1 自主水下航行器 Autonomous Underwater Vehicle (AUV)

自主水下航行器是一种综合了人工智能和其他先进计算技术的任务控制器，集成了深潜器、传感器、环境效应、计算机软件、能量储存、转换与推进、新材料与新工艺、以及水下智能武器等高科技，军事上用于反潜战、水雷战、侦察与监视和后勤支援等领域。简化的AUV三维运动学模型为：

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\theta & \cos\psi \sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\psi \cos\theta & \sin\psi \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\cos\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， x, y, z 表示自主水下航行器在惯性坐标系下的 x 轴分量、 y 轴分量、 z 轴分量； u, w 表示自主水下航行器在载体坐标系下的进退速度、潜浮速度； q, r 表示自主水下航行器在载体坐标系下的纵倾角速度、转艏角速度； θ, ψ 表示自主水下航行器的纵倾角、艏向角。

3.1.2 声呐 Sound Navigation and Ranging

利用声波在水中的传播和反射特性，通过电声转换和信息处理进行导航和测距的技术，也是指利用这种技术对水下目标进行探测（存在、位置、性质、运动方向等）和通信的电子设备，是水声学中应用最广泛、最重要的一种装置，有主动式和被动式两种类型。

3.1.3 惯性测量单元 Inertial Measurement Unit (IMU)

测量物体三轴姿态角（或角速率）以及加速度的装置。一个IMU包含三个单轴的加速度计和三个单轴的陀螺，加速度计检测物体在载体坐标系统独立三轴的加速度信号，而陀螺检测载体相对于导航坐标系的角速度信号，测量物体在三维空间中的角速度和加速度，并以此解算出物体的姿态。在导航中有着很重要的应用价值。

3.1.4 实时动态定位技术 Real-Time Kinematic (RTK)

基于载波相位观测值的实时差分GPS定位测量技术。

3.1.5 全球导航卫星系统 Global Navigation Satellite System (GNSS)

集GPS、GALILEO、BDS、低轨卫星为一体，全球范围内应用的卫星导航和定位系统。

3.1.6 运动规划 Path Planning

运动规划由路径规划和轨迹规划组成，连接起点位置和终点位置的序列点或曲线称之为路径，构成路径的策略称之为路径规划。

3.1.7 动态感知 Dynamic Perception

利用传感器、测量装置及智能数据终端设备，实现自主水下航行器设施、设备运行状态信息的在线采集、监测和预警，感知包括深度、流速、障碍物、水质及设备工况等。

3.1.8 信息融合 Information Fusion

信息融合也称为传感器信息融合或多传感器信息融合，是一个对从单个和多个信息源获取的数据和信息进行关联、相关和综合，以获得精确的位置和身份估计，以及对态势和威胁及其重要程度进行全面及时评估的信息处理过程；该过程是对其估计、评估和额外信息源需求评价的一个持续精练过程。同时，也是信息处理过程不断自我修正的一个过程，以获得结果的改善。

3.1.9 避障 Obstacle Avoidance

当外界的障碍阻碍到设备的运动时，设备自动做出各种躲避障碍的动作，通过障碍后继续执行躲避前的动作。

3.1.10 自动驾驶系统 Automatic Navigation Control System

自动驾驶控制系统主要技术分为三个部分：硬件部分，即如何利用各种导航定位传感器对水下航行器的位姿进行精确测量；路径部分，即如何规划出合适的作业路径，该路径是水下航行器导航瞄准的路径，规划的好坏直接影响导航的效果；算法部分，即如何根据偏差计算出水下航行器的位姿，从而修正偏差。

3.2 缩略词

下列缩略语适用于本文件。

INS: 惯性导航系统 (Inertial Navigation System)

GSF: 高斯滤波 (Gaussian Filter)

EKF: 扩展卡尔曼滤波 (Extended Kalman Filter)

UKF: 不敏卡尔曼滤波 (Unscented Kalman Filter)

MCMC: 马尔科夫链蒙特卡罗 (Markov Chain Monte Carlo)

D-S: 证据理论 (Dempster-Shafer)

GPS: 全球 (卫星) 定位系统 (Global Positioning System)

AUV: 自主水下航行器 (Autonomous Underwater Vehicle)

IMU: 惯性测量单元 (Inertial Measurement Unit)

RTK: 实时动态定位技术 (Real-Time Kinematic)

GNSS: 全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System)

GALILEO: 伽利略卫星导航系统 (Galileo Satellite Navigation System)

BDS: 北斗卫星导航系统 (Beidou Navigation Satellite System)

4 总体设计

4.1 基本原则

(1) 对标国家重大需求。以国家需求为研究命题导向，以研究成果实转化落地为研究目标。

(2) 紧跟学科和工程前沿。以前沿科学技术驱动自主水下航行器的发展创新，加速实现水下无人航行器的自主决策。

(3) 密切联系实际水下环境和复杂的航行器导航控制系统。以向信息化、高速化、多样化、标准化、系统化、智能化和轻量化方向发展为目标。

4.2 自主水下航行器导航控制关键技术总体思路介绍

自主水下航行器是探索海洋、开发海洋的重要装备。其导航控制是水下目标搜救、水下地形地图构建、水下目标捕获的关键技术。由于水下环境复杂、航行器模型的非线性、以及自身状态的不确定性，导致航行器水下作业性能受到影响。自主水下航行器导航控制关键技术与应用一直是提高作业效率的关键途径，亦是水下航行器自主化升级的重点难点问题。

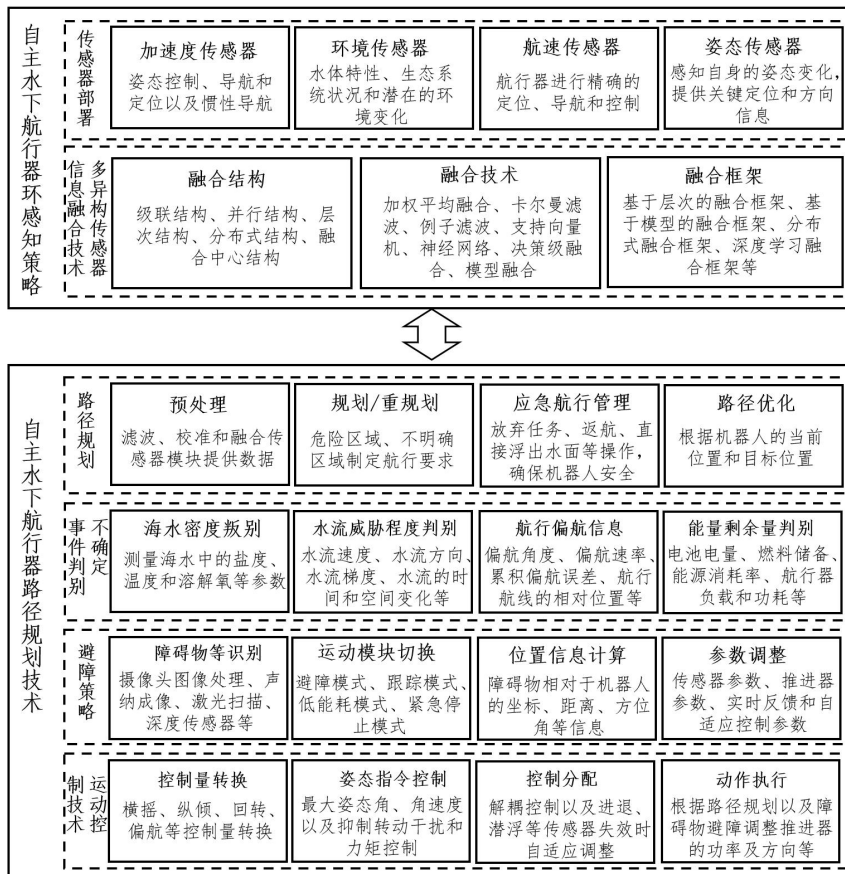


图1 总体路线图

面向自主水下航行器导航控制关键技术研究，应从航行器感知环境出发，结合路径规划、导航决策和运动控制，实现对自主水下航行器的精准导航。最后，为贯彻产研相结合的理念，将该导航控制技术应用于不同的自主水下航行器中，以应用实践反馈作用为改进方向，形成良性循环。值得说明的是，本文件所提供的是一种自主水下航行器导航控制的通用技术构架，所涵盖的应用对象为典型对象，即与如图1所示的相同或类似的对象。

4.3 自主水下航行器环境感知策略

4.3.1 自主水下航行器环境感知策略概述

环境感知是实现航行器导航的前提，必须面对的技术挑战。对导航控制而言，了解环境信息，确定障碍物位置、水流变化等情况，才能规划航行路径、控制航行器沿规划路径运动。在导航控制的逐步发展中，提高环境感知的准确度尤为重要，传感器部署与信息融合对航行器感知环境的性能提升有显著效果。下文将对自主水下航行器环境感知策略进行论述。

4.3.2 自主水下航行器传感器部署

自主水下航行器在水下作业，不仅要感知环境的信息，并且通过感知环境确定自身的状态。航行器搭载的传感器主要包括感知速度、感知姿态、感知障碍物等几类组成。表1给出了水下航行器所需的传感器种类。

表1 自主水下航行器使用的传感器总览

传感器种类	应用数量	传感器使用功能
加速度传感器	1~3个	测量航行器加速度、角速度
距离传感器	1~4个	测量航行器与水面或海底的距离
航速传感器	1~2个	测量航行器航行速度
姿态传感器	1~3个	测量航行器姿态
环境传感器	1~6个	感知周围物体和地形
航向传感器	1~4个	感知航向信息

具体的传感器包括：

- (1) 可提供用于测量航行器的加速度、角速度的传感器组合，如惯性传感器；
- (2) 可提供用于测量航行器与水面或海底距离的传感器组合，如深度传感器；

- (3) 可提供航速信息的传感器或传感器组合，如多普勒；
- (4) 可提供姿态信息的传感器或传感器组合，如陀螺仪；
- (5) 可提供用于感知周围的物体和地形的传感器组合，如摄像头、声呐；
- (6) 根据需要选配可提供航向信息的传感器或传感器组合，如磁力计、重力计。

4.3.3 多异构传感器信息融合技术

本文件提供了如图2所示的多异构传感器信息融合模型。航行器感知的环境和状态信息包括来自外部环境的障碍物、水流、磁场等信息，以及航行器航行时的速度、姿态、位置信息，这些信息可由各相关传感器采集，并通过系统进行的数据融合和处理获得；同时按照一定的标准规范对这些动态数据进行格式化和标准化处理，形成统一的特征表述，实现特征层信息融合并进行相应的分析；然后利用系统模型和知识库，通过对数据挖掘，最终提供必要的决策支持；最后通过人机交互，将结果信息进行智能化分析处理，制定最优计划方案，对作业流程加以改进。

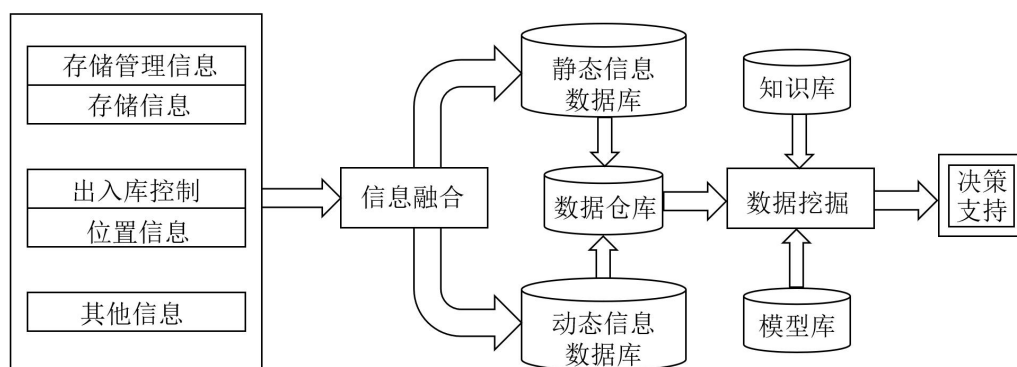


图2 传感器信息融合模型

多源信息融合方法种类繁多，每种方法都各有优缺点，各种方法相互之间也具有一定的互补性。按照多源信息融合算法的数学基础可分为估计理论方法、不确定性推理方法和人工智能和模式识别方法。

(1) 估计理论方法，包括线性估计和非线性估计技术。常见的线性估计技术有最小二乘、加权平均、Kalman滤波等，非线性估计技术如Gauss滤波（GSF），扩展的Kalman 滤波（EKF）等。目前已经有很多学者开始研究UKF滤波，基于随机采样技术的粒子滤波和Markov链Monte Carlo（MCMC）等非线性估计技术被提出，并且在这些领域取得了突破性的成果。另外，通过建立一定的优化指标，可以借助最优化方法来获得参数的最优估计，典型的算法有极小化风险法以及极小化能量法。

(2) 不确定推理方法主要包括主观贝叶斯方法、D-S证据推理方法、模糊数学理论方法和可能性推理方法等。其中，主观贝叶斯方法是早期使用的一种高效率的信息融合方法；D-S证据理论能够较好解决未知所引起的不确定问题。

(3) 人工智能方法主要包括遗传算法、模糊逻辑、基于规则的推理、神经网络、专家系统、逻辑模板法、质因数法等。

4.4 不确定事件威胁度评估

4.4.1 不确定事件类型判别

自主水下航行器作业环境中存在密度差、时变水流以及动态障碍物等不确定因素。同时，自主水下航行器存在推进器故障、控制仓漏水以及能量不足等潜在的不确定事件。导航过程中需要准确判别不确定事件且做出正确应对，这是自主水下航行器安全航行的保障。不确定事件的判别主要完成六项任务：

- (1) 可判别海水密度不确定事件；
- (2) 可判别水流不确定事件；
- (3) 可判别移动障碍物不确定事件；
- (4) 可提供能量的剩余量不确定事件；
- (5) 可判别航行器偏航不确定事件；
- (6) 可判别深度不确定事件。

4.4.2 不确定事件威胁度评估

判决不确定事件的类型以后，需要评估不确定事件的威胁度，从而为路径重规划提供依据，保障自主水下航行器的安全。不确定事件威胁评估方法种类繁多，每种方法都各有优缺点，各种方法相互之间也具有一定的互补性。常用的不确定事件评估方法：

- (1) 联合记忆模糊算法通过模糊判断能够对不确定事件进行快速的威胁评估；
- (2) 神经网络算法充分利用事件的信息，明显减少决策过程中多源信息的不确定性，使结果更加准确合理；
- (3) 贝叶斯算法可以描述变量间的因果关系，在不确定性推理方面更有优势，具有灵活的双向推理能力，能够处理缺失值的数据。

贝叶斯公式描述了先验概率和后验概率的关系,表达式为：

$$P(H = h | E = e) = \frac{P(H = h)P(E = e | H = h)}{P(E = e)} \quad (2)$$

设 E 和 H 分别为两个随机变量，并且 $H = h$ 为一组假设， $E = e$ 为一组证据，不考虑证据 $E = e$ 时，对 $H = h$ 进行的主观确定的概率值 $P(H = h)$ 称为先验概率；考虑证据 $E = e$ 后，对 $H = h$ 进行的概率估计的值 $P(H = h | E = e)$ 称为后验概率。

4.5 自主水下航行器路径规划技术

4.5.1 自主水下航行器路径规划技术概述

自主水下航行器的路径规划技术所选取的主要研究对象包括路径规划、不确定事件判别、避障策略，在下文将分别进行分析论述。

4.5.2 自主水下航行器路径规划

路径规划是自主水下航行器根据感知到的环境信息规划出一条从起点到终点的路线。路径规划的目标是保证航行器安全的到达终点。其规划过程如图3所示。

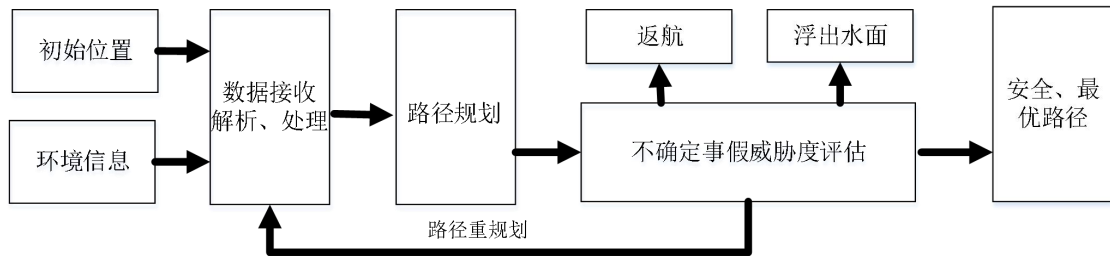


图3 自主水下航行器路径规划

路径规划主要完成四项任务：

- (1) 可接收、解析和处理传感器模块提供的数据，例如进行滤波、校准和融合；
- (2) 对路径进行规划/重规划避开危险区域且满足航行要求；
- (3) 不确定事件对机器人产生威胁时，评估威胁程度，进行应急航行管理，通过放弃任务、返航、直接浮出水面等操作，确保机器人安全；
- (4) 根据机器人的当前位置和目标位置，计算最优的路径或轨迹。

路径规划方法种类繁多，每种方法都各有优缺点，各种方法相互之间也具有一定的互补性。常用的路径规划算法：

(1) 传统的路径规划方法主要是路线图构建法，主要包括可视图法、Voronoi图法、栅格法、四叉树法、八叉树法、A*、D*算法、人工势场算法等。传统的路径规划算法可以是牺牲搜索精度保证搜索速度，进而在较短时间内找到最优解。同时，一些学者通过将多种算法结合的方式改善传统方法的性能。

(2) 基于群体智能路径规划方法主要包含遗传算、蚁群算法、萤火虫算法、生物地理学优化算法等。群体智能算法能更有效地解决大规模复杂问题。

(3) 基于机器学习的路径规划方法，主要包含神经网络算法、强化学习算法、深度强化学习算法等。基于机器学习的路径规划算法通过与环境的交互学习并迭代使累计奖励值达到最大，无需先验知识，适合解决自主水下航行器的路径规划。

深度强化学习中迭代网络权值为

$$L_i(\theta_i) = E_{e \sim D} [(y_i - Q^{\theta_i}(s_i, a_i))^2] \quad (3)$$

其中， $y_i = r + \gamma Q^{\theta^*}(s_{i+1}, \arg \max_a Q^{\theta^*}(s_{i+1}, a))$ 是更新目标的分离目标网络 Q 参数 θ^* 。通过梯度下降来执行更新

$$\nabla_{\theta_i} L_i(\theta_i) = E_{e \sim D} [(y_i - Q^{\theta_i}(s_i, a_i)) \nabla_{\theta_i} Q^{\theta_i}(s_i, a_i)] \quad (4)$$

$$\theta_{i+1} \leftarrow \theta_i - \alpha \nabla_{\theta_i} L_i(\theta_i) \quad (5)$$

其中， α 是学习速率。不是计算整个重置缓冲区的准确期望，而是通过计算获得对抽样批次经验的期望，并使用一个小批量梯度下降。每次迭代中通过一个小更新系数 τ 实现目标网络缓慢同步其权重。

4.5.3 自主水下航行器避障策略

避障是指自主水下航行器在靠近障碍物或者其他航行器时能够避免碰撞发生，保障航行器的安全。避障主要完成五项任务：

- (1) 可识别水下障碍物和其他航行器；
- (2) 提供各种运动模式的切换；
- (3) 可计算机器人与障碍物的位置关系；
- (4) 可调整传感器和推进器参数；
- (5) 可避免与水下障碍物的碰撞，通过调整航行器的航向或深度避开障碍物。

自主水下航行器避障方法种类繁多，每种方法都各有优缺点，各种方法相互之间也具有一定的互补性。常用的不确定事件判别方法：

(1) 向量场直方图法是将自主水下航行器所处环境建立局部栅格地图，同时计算每个方向的前向代价，根据代价值的不同建立直方图,选择最低代价的方向前进，同时引入平衡函数来平衡最低代价与目标方向，最终确定最优避障路径。向量直方图法计算高效，具有较好的鲁棒性，适用与多障碍物避障。

(2) 动态窗口法是一种在线避障算法，主要依靠实时探测的局部信息，以滚动的方式进行在线规划，用启发式方法生成优化子目标，随着窗口不断滚动不停地获得新的局部信息,然后在滚动中实现优化与反馈的结合，最终实现局部路径规划。

(3) 速度障碍法是在航行器与障碍物之间在速度空间构建一个三角区域，进行避障必须从非三角区域中找到最优的速度矢量，从而找到最优避障路径。

(4) 碰撞锥法，根据航行器与障碍物之间的地理位置，实时计算出两者可能发生碰撞的危险区域并在避障路径进行规避，如果不会发生碰撞则按原来路径前进。该算法具有模型简单、实时性高、应用广泛等优点，对于静态障碍物和动态障碍物都能快速给出高安全的避障路径。

(5) 快速扩展随机树法，采用树结构代替有向图结构，在规定控制率时，通过对状态空间的采样点进行碰撞检测，避免空间建模，应用于高维多自由度航行器在复杂环境下的路径规划问题。

4.5.4 自主水下航行器运动控制技术

运动控制是控制自主航行器沿着规划的路径到达终点。运动控制需要完成六项任务：

- (1) 可将航行器横摇、纵倾、回转、偏航等控制量转换为执行机构的控制量；
- (2) 控制分配具有对航行器横摇、纵倾、回转、偏航的解耦控制和进退、潜浮、横移的速度、深度等传感信息失效时进行自适应调整；
- (3) 根据姿态指令控制自主水下航行器的各种姿态，限制最大姿态角和角速度，抑制转动干扰和力矩；
- (4) 根据路径规划和障碍物避障的结果，控制自主水下航行器的动作执行，例如调整推进器的功率和方向；
- (5) 按照性能最优原则，控制自主水下航行器航行速度、姿态、加速度等参数，实现最优的路径航行；
- (6) 可扩展功能，如悬浮、滑翔等。

运动控制方法种类繁多，每种方法都各有优缺点，各种方法相互之间也具有一定的互补性。常用的运动控制方法：

(1) PID控制算法，根据给定值和实际输出值构成控制偏差，将偏差按比例、积分和微分通过线性组合构成控制量，对被控对象进行控制。算法简单、鲁棒性好、可靠性高。

(2) 反步控制算法将复杂的非线性系统分解成不超过系统阶数的子系统，然后为每个子系统设计部分Lyapunov函数和中间虚拟控制量，一直“后退”到整个系统，将它们集成起来完成整个控制律的设计。反步法通过反向设计使控制函数和控制器的设计过程系统化、结构化；可以控制相对阶为 n 的非线性系统，消除了经典无源性设计中相对阶为1的限制。

(3) 滑模控制算法是一种非线性控制方法，控制规律与其它控制方法的不同之处在于系统的“结构”并不固定，可以根据不同的状态自动调整 and 变化。

(4) 自适应控制算法参数自动调整特性，使航行器能够在水动力参数不确定性的情况下，依然能跟踪所需的动态目标。

(5) 神经网络控制算法的并行处理和适应性特征非常适合航行器动态控制。

(6) 模型预测控制算法对于模型不确定和控制约束的目标跟踪问题具有独特的优势。

(7) 强化学习控制算法的智能学习特性、无模型特性能够解决AUV非线性与模型不确定性问题，非常适合目标跟踪控制。

5 技术要求

5.1 接口

5.1.1 一般要求

自主水下航行器导航控制系统制相关的接口技术规范包括：

- (1) 接口的类型与数量；
- (2) 相关的电气特性、机械特性、接口标识和接口通信；
- (3) 功能与性能描述；
- (4) 接插件和线材等。

5.1.2 电气接口

自主水下航行器导航控制系统应对所有电气接口特性进行定义。除另有规定，电气接口特性应包括：

- (1) 供电方式；
- (2) 适用供电电压、电流与功率范围；
- (3) 供电电压波动、抗干扰与冲击电压要求；
- (4) 接口信号工作频率与负载能力；
- (5) 信号接口电平、波形、极性与相位关系；
- (6) 信号的输出输入属性；
- (7) 阻抗与绝缘阻抗。

对于支持用户操作的接口，宜采取可靠的防反接设计和热插拔保护设计。对于向外供电接口，宜采取防短接设计和电流防倒灌设计。

5.1.3 机械接口

(1) 接口分类

根据用户对接口的可观察性和可操作性，接口可分为：

- a) 不支持用户插拔接口；
- b) 支持用户插拔接口：
 - 1) 用户易于检查与操作的接口；
 - 2) 用户不易检查与操作的接口。

对于a)类和b)类中的2)类接口，接口与连接器之间的最小保持力应能够抵御在正常运输、搬运和航行过程中所可能遭遇的振动、冲击、跌落等不利机械环境条件的影响。对于b)类中的1)类接口，接口与连接器之间的最小保持力应能够抵御在正常航行过程的振动环境和正常水中轻微碰撞过程中的冲击力。

(2) 机械接口要求

机械接口宜考虑如下要求：

- a) 接口防错插，如采取防反插设计、接口标识等；
- b) 防腐、防锈，特别是与航行安全相关的接口；
- c) 不易损性，对于用户经常操作的机械接口，在规定的使用条件下和预期的使用时间内，接口与连接器之间的保持力不得低于规定的最小保持力。

5.1.4 接口通信

接口通信要求应包括：

- a) 采用接口标准类型，如UART、CAN等；
- b) 接口通信宜采取特定协议进行封装，并具有数据校验功能和对流量、丢包与错包的监控功能；
- c) 对于某些需要防止恶意篡改的信息，如全球导航信息等，系统应采取可靠的信息安全措施，如签名认证、信息加密等技术。

5.2 安全性

系统应支持典型故障的自动处理，以提高使用安全性，如：传感器故障后使用故障安全值、测控失效后自动上浮或自动返航等。

系统中电气设备和机械设备应分别按专用规范中安全技术要求规定进行设计，以确保制造和使用中设备的安全。

5.3 可靠性

系统可靠性设计制定产品的可靠性设计准则，按需开展可靠性分配、预计和验证工作。

5.4 维修性

系统设计和安装应使维修时间尽量缩短，宜提供便于完成维修的相关手段，实现运行检查、故障检测与隔离、外场可更换单元的拆卸与更换，对需要维修、更换的零部件留有足够的操作空间。

5.5 环境适应性

自主水下航行器导航控制系统应要求能够承受相关规范规定的温度、霉菌、盐雾、湿热、水压等自然环境条件，并在使用寿命周期内能够正常工作。

附录A

(资料性附录)

自主水下航行器导航典型应用场景

(1) 军事应用

在军事领域，自主水下航行器对提高海军作战能力有着举足轻重的作用。在未来的水下战略战术中，通过提高自主水下航行器导航能力来增强其在水下作战中的自主性、隐蔽性及精确性等性能。

其需要不仅具备声学、北斗信号等单一的导航方式，还需要具备 INS/地磁匹配组合导航、INS/重力匹配组合导航等地球物理辅助导航等。

(2) 水下结构体检测

作为水下结构体检测的重要工具和技术，要求自主水下航行器能够对船舶、水库、桥墩、水利水电和核电站的故障、裂痕、排污口以及附着物等进行准确检测，并能精确定位，提高检测效率。

其需要自主水下航行器具备路径规划、避障等功能，能够在航行器作业时保证其安全，进而降低检测工作的成本。

(3) 科学考察

对于海洋的探索，人类通过观测、取样，从而对海洋有更深入的认识和研究。使用水下航行器探索海洋具有更优良的性能，高性价比。

其需要航行器搭载各类导航传感器，如全向扫描声呐，多波束成像声呐，多普勒计程仪，水下定位系统，光谱摄像机等，实现海底测量，建模海底地图，海洋及海底目标的测量，水下机器人位置及运动的精准测量。

(4) 搜寻与救助打捞

自主水下航行器作为搜寻与救助打捞的重要方式，逐步替代了潜水员作业的方式。能够提供更长的搜寻时间，并且能够规避潜水作业带来的风险。尤其是在较险恶的作业环境中，能大幅度的提升作业效率。

要求其能够针对不同环境，不同的搜救目标，规划出不同的导航路径，并且能够及时与岸上控制系统进行交互保证更好的完成搜救任务。

(5) 水产养殖与渔业服务

水下航行器通过搭载 1080P 高清摄像头，多自由度机械臂，高流明度补光灯等有利于水下观测的设备，可以实现对水下养殖及渔业的有效观测，同时可通过机械

臂对海产品进行取样，了解水下养殖的具体情况，以利于对下一步的养殖计划进行部署。

其需要具备水下观察、路径规划、协同规划、多传感器信息同步共享等功能。

(6) 水下考古

水下考古学是陆地田野考古向水域的延伸。它以人类水下文化遗产为研究对象，对淹没于江河湖海下面的古代遗迹和遗物进行调查、勘测和发掘。自主水下航行器被用作前期对古迹的探测和观察。

其需要具备水下观察、导航、协同规划、远距离操作、多传感器信息融合和共享等功能。