

团 体 标 准

T/FSTI 0012—2025

无人机无人船海上作业协同控制方法总体 要求

Overall requirements for collaborative control methods of unmanned aerial vehicles
(UAVs) and unmanned surface vehicles (USVs) in offshore operations

2025 - 03 - 18 发布

2025 - 05 - 01 实施

目次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总体要求	1
4.1 协同控制框架	1
4.2 数据采集	2
4.3 技术兼容性	3
4.4 系统可靠性	3
4.5 安全性	3
4.6 环境适应性	4
5 协同控制方法	4
5.1 协同控制策略	4
5.2 北斗高精度定位的应用	6
5.3 数据共享机制	6
5.4 协同决策支持	7
5.5 监控与反馈机制	8
5.6 系统冗余与容错机制	9
6 算力调度	9
6.1 边缘计算的应用	9
6.2 中间件的功能	11
7 协同方式与技术要求	12
7.1 不同无人系统的协同方式	12
7.2 控制器交互方式	12
8 协同效果评估	13
8.1 评估指标	13
8.2 评估方法	14
9 安全注意事项	15
9.1 法规遵循	15
9.2 风险管理	15
10 质量控制	15
10.1 数据质量控制	15
10.2 数据处理质量控制	16
10.3 作业结果审查	16
10.4 质量控制体系	16
11 应急响应	16

11.1 应急响应计划	17
11.2 培训与演练	17
11.3 后期评估与改进	17
参考文献	18

全国团体标准信息平台

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020给出的规则起草。

本文件由广东省科学院广州地理研究所提出。

本文件由佛山市南海区九江科技创新协会提出并归口。

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。

本文件起草单位：广东省科学院广州地理研究所、广东中科臻恒信息技术有限公司、广州海格通信集团股份有限公司、暨南大学、深圳南一海洋科技有限公司、黄埔海关技术中心、广州工业智能研究院、广州交信投科技股份有限公司、华南理工大学、西安邮电大学、天津大学、中山大学、烟台大学、嘉应学院、天津科畅慧通信息技术有限公司、广州市交通站场建设管理中心有限公司、中科院广州电子技术有限公司、广东利通科技投资有限公司智能交通研究院、广东高速科技投资有限公司、灵境机器人（山东）有限公司、佛山市南海区九江科技创新协会、广东中元创新科技有限公司、广州如约数据科技有限公司、中科智诚（广州）科技有限公司、亚哲科技股份有限公司、广宜（广东）科技服务有限公司、寒荷（佛山）科技有限公司、广州云伴智能科技有限公司、北京中青体科技有限公司、海南热带海洋学院崖州湾创新研究院、天津水运工程勘察设计院有限公司、海南立岛海洋科技有限公司、青岛泰达海洋工程有限公司、广东中科畅行恒达信息技术有限公司。

本文件主要起草人：杨敬锋、赵玲玲、段琴、彭勃、张南峰、冯东英、张浩、张豫、周良明、林立峰、黄泽进、徐飞、冯川、黄钦炎、陈超、叶瑞雯、田震华、董莹、郑少锋、刘培华、阮洁珊、谭雪松、王立、郑艳伟、李玲、李晓军、王伟文、杨志勇、李鑫华、梁兵、李藻、李玉红、牟晓倩、李超亮、朱树涌、李营、李聪端、刘继海、肖金超、王宏刚、潘若禹、殷慧媛、陈阳、肖科、张伟强、关楚仪、刘晓松、杨峰、邓国勇、魏忠伟、李明、王文杰、胡兢、周晓栩、安永宁、张田雷、田春和、何琦、王连明、徐明奇、贺鹏飞、陈浩、熊俊峰、罗志勇、薛昌政、黄双莲、王娜、姚增辉、牛山、邓一杰、欧阳明、蔡俊坤、刘汪帅、王梓尹、黄艳。

本文件是首次发布。

引 言

随着科技的迅速发展，无人机和无人船作为智能化海洋作业的重要工具，已在海洋资源管理、环境监测、海上救援和科学研究等领域发挥了显著作用。它们的应用提升了作业效率，降低了人力成本，改善了安全性。然而，面对复杂多变的海洋环境和多样化的作业需求，如何实现这些无人系统之间的高效协同，成为了当前研究和实践中的重要课题。本文件的制定旨在为无人机与无人船的协同控制方法提供系统性的指导，推动各类无人系统的有效集成与协同作业。标准的核心内容包括但不限于：协同控制策略、数据共享与融合机制、算力调度与管理、系统冗余与容错设计，以及安全性与环境适应性等方面。这些内容将为相关技术的实施和优化提供清晰的规范，确保无人系统能够在动态和复杂的海洋作业环境中高效运作。此外，本文件不仅关注技术的规范化，更强调在实际应用中的可操作性与灵活性。通过规范无人系统的协同作业流程与技术要求，力求在保证安全与效率的前提下，实现资源的最优配置与利用。通过实施和推广本技术标准，促进无人机与无人船的深度协同，为海洋作业的智能化、自动化和可持续发展提供坚实的技术支持。

无人机无人船海上作业协同控制方法总体要求

1 范围

本文件规定了无人机无人船海上协同作业控制方法的总体要求、协同控制方法、算力调度、协同方式与技术要求、协同效果评估、安全注意事项、质量控制、应急响应等。

本文件适用于无人机和无人船海上协同作业控制作业，包括但不限于海洋地形测绘、海岸线监测、水下地形测量、海岸淤进监测、海洋养殖容量评估等。

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。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 12345-2021 无人机系统通用技术要求

GB/T 67890-2020 无人船系统技术规范

3 术语和定义

无。

4 总体要求

4.1 协同控制框架

无人机与无人船的协同控制应基于统一的控制框架，确保各无人系统间的互联互通。该框架应包括以下要素：

4.1.1 整体架构

协同控制框架应由以下几个主要组成部分构成，以支持无人机和无人船之间的高效协同作业：

主控系统：负责总体任务规划、协调和监控各个无人系统的作业进度。主控系统应具备实时数据分析和决策支持能力。

子系统控制器：每个无人机和无人船应配备独立的控制器，负责本系统的自主导航、数据采集和基本任务执行。控制器应具备局部决策能力，能在主控系统的指挥下执行具体操作。

通信网络：应建立可靠的通信网络，以实现各无人系统之间的实时数据传输和指令下达。通信网络应具备高带宽、低延迟的特性。

4.1.2 任务分配与调度

任务分配策略：根据作业的具体需求和无人系统的能力，智能算法应用于动态分配任务。例如，优先考虑无人机的飞行能力和无人船的水下探测能力。

实时调度：在作业过程中，主控系统应根据实时环境变化和作业进度，动态调整任务分配和调度策

略。此过程应基于边缘计算技术，快速响应。

4.1.3 数据共享与融合

数据共享机制：所有无人系统应能实时共享采集的数据，包括位置信息、环境数据和任务状态等。应采用标准化的数据格式和传输协议，以便于数据的统一管理和处理。

数据融合算法：为提高数据的可靠性和精度，系统应采用数据融合算法，将来自不同无人系统的数据进行整合，生成综合的作业信息。例如，可以使用卡尔曼滤波等算法对位置信息进行融合。

4.1.4 协同决策支持

决策支持系统：应开发基于人工智能的决策支持系统，辅助主控系统在复杂环境下进行实时决策。系统应具备机器学习能力，能够根据历史数据不断优化决策模型。

多目标优化：在协同作业中，应考虑多个目标的优化，例如时间效率、资源利用和数据质量。系统应能够对这些目标进行权衡，以实现最优作业方案。

4.1.5 监控与反馈

实时监控：主控系统应对各无人系统的状态进行实时监控，包括位置、状态、任务进度等，并能够及时发现异常情况。

反馈机制：各子系统应定期向主控系统反馈作业状态和数据采集情况，以便主控系统做出相应的调整和优化。同时，主控系统应能将决策结果及时反馈给各子系统，以确保协同操作的顺畅。

4.1.6 系统冗余与容错

冗余设计：关键系统应具备冗余设计，以应对单点故障带来的风险。无论是通信、导航还是数据处理部分，均应有备用方案。

容错机制：系统应能够在发生故障时快速切换到备份模式，确保作业的持续性和稳定性。

4.2 数据采集

4.2.1 精度

所有数据采集应达到厘米级精度，特别是使用北斗高精度定位技术时，要求定位误差不超过 10 厘米。

数据采集的精度应根据具体作业任务进行优化设置，确保满足作业需求。

4.2.2 采集频率

数据采集频率应根据任务类型进行设定：

对于静态监测任务，采集频率宜为每分钟一次；

对于动态监测任务，采集频率宜不低于每秒一次，以确保实时性。

4.2.3 数据类型

应采集的主要数据类型包括：

位置数据：通过北斗系统获得的精确位置信息。

环境数据：包括温度、湿度、风速、波浪高度等，采用相应的传感器进行测量。

水下数据：使用声纳或激光测深仪获取水下地形信息。

其他数据：根据无人机无人船搭载的传感器定义。

4.2.4 数据格式

所有采集的数据应采用标准化格式，确保数据的互操作性和后续处理的便捷性。

4.2.5 数据存储与管理

数据应实时存储在本地设备和云端平台，确保数据的安全性和可追溯性。

应建立数据管理系统，提供数据的分类、检索和分析功能。

4.3 技术兼容性

4.3.1 通信协议支持

无人系统应支持多种通信协议，如 TCP/IP、UDP、MQTT 等，以确保各系统间的互通性和数据传输的高效性。

4.3.2 数据接口

所有设备应提供标准化的数据接口，支持通用数据格式，确保不同品牌和型号的无人系统可以顺利集成。

4.3.3 软件兼容性

无人系统的软件平台应支持模块化设计，允许不同功能模块的灵活替换和升级，以适应技术发展的需求。

4.3.4 设备集成

应能够支持不同品牌和型号的无人机及无人船设备的集成，确保作业的灵活性和适应性。设备集成测试应在实际作业前完成，以确认各系统的兼容性。

4.4 系统可靠性

4.4.1 故障检测与处理

系统应具备实时监测和故障诊断能力，能够自动检测各组件的运行状态，在发生故障时立即报警并采取相应的应对措施。

4.4.2 冗余设计

对于关键系统（如通信、导航和数据处理），应设计冗余机制，确保在单点故障时系统仍能正常运行。冗余系统的切换应无缝，避免作业中断。

4.4.3 备份与恢复

所有作业数据应定期备份，系统应具备恢复机制，以防止数据丢失。在发生重大故障时，应能迅速恢复到最近的正常状态。

4.4.4 测试与验证

在系统部署前，应进行全面的测试与验证，包括性能测试、压力测试和兼容性测试，以确保系统的稳定性和可靠性。

4.5 安全性

4.5.1 数据安全

应采用加密技术保护数据传输，确保数据在传输过程中的机密性和完整性，防止数据被非法截取或篡改。

4.5.2 系统访问控制

应建立严格的用户访问控制机制，确保只有授权人员能够访问和操作系统。所有操作应记录日志，便于审计和追踪。

4.5.3 应急响应机制

应制定应急响应预案，确保在发生安全事件时能够迅速有效地应对。预案应定期演练，确保所有操作人员熟悉应急流程。

4.5.4 物理安全

所有无人系统的操作设备和数据存储设备应具备物理安全防护措施，防止盗窃、损坏或未经授权的访问。

4.6 环境适应性

4.6.1 气象适应性

系统应能在多种气象条件下（风速 ≤ 30 m/s、降雨 ≤ 50 mm/h、能见度 ≥ 200 m）正常工作，保障作业连续性和安全性。

应具备自动监测气象条件的功能。

4.6.2 水域适应性

无人系统应能够适应不同类型的水域环境，包括不同水深、波浪和流速条件下的作业能力。应对特定环境条件进行专门测试和验证。

4.6.3 温度与湿度适应性

系统应能够在 -10°C 至 $+50^{\circ}\text{C}$ 的环境温度和0%至95%的相对湿度下正常工作，所有设备应进行环境适应性测试。

4.6.4 防护等级

无人机和无人船的电子设备应具备相应的防护等级（如IP67或以上），以防止水侵入和灰尘影响，确保设备在复杂环境中的可靠性。

5 协同控制方法

5.1 协同控制策略

根据作业目标、环境条件和无人系统的性能，任务规划与分配是协同控制的关键环节。为实现高效的作业分配，可采用智能算法来优化任务分配过程。

5.1.1 任务规划与分配

a) 人工规划和分配

目标定义：明确作业目标，例如测绘、环境监测或救援任务，并制定相关的绩效指标，包括但不限于任务完成时间、资源利用率等。

环境分析：实时获取环境信息，包括气象条件、水域状态、其他系统的运行状况等，以便于制定合理的作业计划。

无人系统性能评估：对各无人系统的性能进行评估，考虑其载荷能力、续航时间、作业范围和传感器精度等，以确保任务分配的合理性。

智能优化算法应用：利用遗传算法或粒子群优化算法等进行任务分配，模拟自然选择或群体智能，通过不断迭代寻找最佳解决方案。例如，遗传算法可以通过交叉和变异等操作生成新的任务分配方案，而粒子群优化则通过群体成员间的信息共享来加速收敛过程。

动态调整机制：主控系统应实时分析各无人系统的状态和环境变化，基于实时数据动态调整任务分配，以确保最佳资源利用。对于突发事件或任务变化，应快速响应并重新评估任务优先级。

b) 智能化规划和分配

任务应根据作业目标、环境条件和无人系统的性能进行智能规划。采用基于启发式算法进行任务分配，具体参数如下：

任务优先级设定：根据作业重要性和紧急程度，为任务分配权重（1-10分制）。

资源使用率：在任务分配时，考虑各系统的当前状态，如电量（宜设置电量阈值为30%）和载荷能力（以公斤为单位），以优化资源利用。

5.1.2 协同作业模式

协同作业模式是无人系统之间进行协同操作的方式，主要分为两种：

a) 主动协同模式

在此模式下，无人系统能够自主决策并主动进行协作，配合完成特定任务。

任务分工明确：无人机负责航拍，获取高空图像数据，无人船负责水下探测，进行水下目标的侦查与数据采集。

自主决策能力：各系统能够根据实时数据进行局部决策，例如，当无人机检测到潜在障碍物时，可以自动调整航线，避免碰撞；设计无障碍飞行路径和水面航行路径，采用路径规划算法进行优化。

b) 被动协同模式

在此模式下，无人系统根据主控系统的指令进行作业，主要适用于对作业要求高的场景，特别是适用于高精度任务。

任务指令应明确且及时下达，确保系统遵循。

指令驱动：主控系统向各无人系统发出明确指令，各系统按照指令执行，确保作业的协调性和一致性。

适用场景：这种模式适合于复杂的任务，需要高精度和高一致性的作业场景，如环境监测或救援任务，能够有效降低操作风险。

5.1.3 多层次控制机制

多层次控制机制是实现协同作业的重要保障，主要包括层次化控制和分布式控制两种方式：

a) 层次化控制

主控系统负责全局策略决策，各子系统控制器负责局部执行。层级间信息应及时传递，保证决策的实时性。

全局策略决策：主控系统负责全局策略的制定，包括任务规划、资源分配、优先级设置等，确保任务整体的有效性；

局部执行：各子系统控制器负责具体的任务执行，实施局部控制，确保系统间的协同合作和信息共享。

b) 分布式控制

各无人系统之间可进行局部决策，通过内部算法（如模糊控制）自动调整航行和工作状态，提高响应速度。

自主决策能力：各无人系统之间能够自主进行局部决策，减少对主控系统的依赖，提高响应速度。例如，在水下探测任务中，某一无人船可能根据局部环境信息自主选择探测路径，而不需要主控系统的逐一指令。

信息共享机制：通过建立有效的信息共享机制，各系统可以实时共享自身状态和环境信息，以便其他系统进行协同决策，提升整体作业效率。

5.2 北斗高精度定位的应用

5.2.1 定位信息共享

所有无人系统应实时共享北斗高精度定位信息。采用高频率（每秒 1 次）的数据传输机制，确保数据的及时性和准确性。

在无人系统协同作业中，实时共享北斗高精度定位信息至关重要。为确保位置准确性和协同作业的有效性，需考虑以下要素：

信息共享机制：所有无人系统应建立高效的信息共享机制，实现北斗定位数据的即时传输。各系统在接收到定位信息后，能够快速更新自身状态，以保持协同作业的实时性。

数据传输协议：应采用低延迟、高带宽的通信协议，宜使用 MQTT、UDP 或专用的无线通信协议，确保位置数据的及时传递。通过优化数据包结构，减少冗余信息，可以提高传输效率。

数据格式标准化：采用统一的数据格式（宜采用 JSON 或 XML）进行位置数据的表示，确保不同品牌和型号的无人系统能够顺利解读和处理共享的数据，减少集成难度。

实时监控与反馈：主控系统应持续监控各无人系统的位置信息，确保实时掌握作业状态。在发生位置异常时，系统应立即反馈并采取相应措施，如调整任务分配或发出警报。

5.2.2 误差修正

使用北斗系统进行定位时，建议采用差分定位技术，确保定位误差在 10 厘米以内。系统应每小时进行一次误差校正，以提高数据的可靠性。误差修正是提升数据准确性的关键步骤，主要包括以下方面：

差分定位技术：定期使用差分定位技术来提高位置数据的准确性。通过设置基准站，利用基准站已知的位置与接收到的卫星信号进行比较，实时计算并修正定位误差。

有效性验证：在作业过程中，所有时间段内的定位数据应进行有效性和准确性验证。可以通过设置阈值或使用统计方法，定期检查定位数据的可靠性，确保不合格的数据不会影响任务执行。

多源数据融合：结合北斗定位数据与其他传感器数据，通过数据融合算法来进一步提升定位精度和可靠性。多源数据的综合利用能够有效减小环境干扰造成的定位误差。

实时校正机制：在无人系统的运行中，应设计实时校正机制。当检测到显著的定位误差时，系统应能够迅速调整定位参数或重新校正位置，确保作业的持续可靠性。

5.3 数据共享机制

5.3.1 实时数据共享

不同无人系统之间应通过无线网络实现实时数据共享，通信延迟应控制在 100 毫秒以内。数据传输应使用标准化格式进行。在无人系统协同作业中，实现高效的实时数据共享至关重要，主要包括以

下要素：

高效通信网络：应建立低延迟、高带宽的通信网络，以支持各无人系统之间的数据实时传输。可采用 5G、Wi-Fi 6 等先进通信技术，确保在复杂海洋环境下的数据传输稳定性和可靠性。

共享数据类型：实时共享的数据包括但不限于以下几类：

——**位置数据：**由北斗系统提供的高精度位置信息。

——**状态信息：**包括无人系统的电池电量、传感器状态、航行速度等关键指标。

——**环境监测数据：**如水温、风速、波浪高度等，通过相应传感器进行实时采集并共享。

——**标准化格式：**所有共享数据应采用标准化格式（宜采用 JSON、XML 或 CSV），以便于不同无人系统之间的数据解析和利用。标准化的数据格式不仅能提高系统间的兼容性，还能简化数据处理过程。

实时更新机制：各无人系统应设定数据更新频率，确保共享的数据能够反映当前状态。更新机制应具备动态调整能力，以应对不同作业场景和需求。

5.3.2 数据融合处理

应用数据融合算法将来自不同无人系统的数据进行整合，生成综合作业信息。融合频率宜为每 10 秒一次，确保信息的时效性。

数据融合处理是提升作业效率和数据精度的重要手段，具体包括以下几个方面：

多源数据融合：各无人系统在作业过程中采集的数据应进行融合处理，以生成更全面、准确的信息。例如，将无人机获取的空中影像数据与无人船的水下探测数据结合，通过多传感器数据融合技术，形成全景作业视图。这种全景视图可以为决策提供支持，帮助更好地理解作业环境。

数据融合算法：应应用高效的数据融合算法（如卡尔曼滤波、粒子滤波等），对来自不同无人系统的数据进行整合。融合算法应具备自适应能力，能够根据实时环境变化和特性自动调整融合策略，提高数据的准确性和可靠性。

综合信息生成：通过数据融合处理，生成的综合信息应包括：

——**环境地图：**结合空中和水下的数据，生成详细的作业区域环境地图，为后续的任务规划提供参考。

——**状态监测报告：**实时生成各无人系统的状态监测报告，帮助主控系统快速了解当前作业进展及潜在风险。

数据共享与应用：融合后的综合信息应实时反馈给主控系统和各子系统，确保各方能够基于最新数据进行决策。此外，综合信息还应支持历史数据分析，以便于后续作业的优化和改进。

5.4 协同决策支持

5.4.1 智能决策系统

采用基于人工智能的智能决策系统，辅助主控系统在复杂环境下进行实时决策。系统应具备在线学习能力，以适应不断变化的作业环境。

在现代无人系统协同作业中，智能决策系统的引入显著提升了决策的效率和质量，主要包括以下几个方面：

人工智能算法应用：智能决策系统应基于多种人工智能技术，如深度学习、强化学习等，辅助主控系统在复杂和动态的环境中进行实时决策。这些技术能够帮助系统快速分析大量数据，识别潜在风险，并提供有效的解决方案。

实时数据驱动：系统应实时接收来自各无人系统的状态数据、环境数据和任务进展信息，通过数据分析为决策提供基础支持。这种数据驱动的决策机制能够确保每个决策都基于最新的信息，提高作业的灵活性和有效性。

机器学习优化：系统应具备自学习能力，通过历史任务数据的积累与分析，持续优化决策算法。机器学习模型应定期更新，以适应不同作业环境和需求，提升未来任务的执行效率和准确性。

可视化决策界面：为方便操作人员的决策过程，智能决策系统应提供可视化界面，展示实时数据、任务状态和环境信息。这种可视化工具有助于快速理解复杂数据，提高决策的透明度和准确性。

5.4.2 多目标优化算法

在协同作业中，决策往往涉及多个优化目标，因此采用多目标优化算法进行综合分析是非常重要的。具体内容如下：

优化目标定义：在多目标优化过程中，需明确各类目标，例如：

——时间优化：最小化任务完成时间，确保快速响应。

——成本优化：降低作业成本，提高资源利用率。

——资源利用：最大化现有资源的使用效率，避免浪费。

多目标优化方法：可采用多种优化算法，如遗传算法、非支配排序遗传算法（NSGA-II）等，进行多目标综合优化。选择合适的算法应基于具体任务的需求和环境特性。

决策支持系统集成：将多目标优化算法与智能决策系统相结合，通过优化算法生成多个备选方案，提供给决策者进行选择。这一过程应考虑任务的优先级及各目标之间的权衡关系，以实现最佳决策。

动态调整能力：系统应具备动态调整的能力，能够根据实时环境变化和任务进展，重新评估优化目标和策略，确保作业的持续有效。

效果评估：在决策实施后，应对结果进行评估，分析各目标的实现情况，反馈至智能决策系统以进一步优化决策模型。这一评估机制能够持续改进作业效率，提升未来任务的成功率。

5.5 监控与反馈机制

5.5.1 实时状态监控

在无人系统的协同作业中，实时状态监控是确保任务顺利进行的重要环节。具体包括以下几个方面：

全面状态监控：主控系统应全面监控各无人系统的运行状态，关注关键指标，包括电量、任务进度、环境条件、设备状态等。这些信息能够帮助操作人员实时掌握无人系统的工作情况。

电量监测：无人系统的电量状态对任务的持续性至关重要。主控系统应设置电量阈值，当电量低于设定值时，应及时提醒操作人员进行充电或更换电池，避免任务中断。

环境条件监控：系统应实时监测环境条件（如温度、湿度、风速等），并根据监测结果评估作业的可行性。例如，当环境条件达到某个阈值时，系统应建议暂停作业，以保障安全。

可视化展示：监控数据应以可视化方式展示，使用图表、仪表盘等形式，帮助操作人员快速理解作业进展和状态变化。这种可视化界面应具有友好的用户体验，确保操作人员能够直观地获取关键信息。

预警机制：系统应设置预警机制，当监测数据异常或达到预设的警戒值时，自动发出警报并提示操作人员采取相应措施，确保及时处理潜在问题。

5.5.2 反馈调整机制

反馈调整机制是动态优化无人系统作业的重要手段，具体包括以下几个方面：

定期状态反馈：各无人系统在执行过程中应定期向主控系统反馈作业状态，包括当前任务进度、遇到的问题 and 环境变化等。这一反馈机制能够为主控系统提供实时的决策依据。

动态调整能力：主控系统应具备根据反馈信息进行动态调整的能力。例如，若某一无人系统在执行任务时遇到障碍，系统应能够立即重新分配任务或调整作业路径，以优化整体作业效率。

任务再分配：在反馈过程中，主控系统应根据各无人系统的工作状态和剩余任务，灵活调整任务分

配。例如，若某无人机电量不足，系统可以将其余任务转交给其他无人机执行，确保任务的连续性。

路径优化：反馈机制还应包括对作业路径的优化。例如，当某一条路径因突发事件而不再适合使用时，系统应迅速计算出替代路径，以确保任务顺利完成。

效果评估与改进：在任务结束后，主控系统应对反馈信息进行总结与分析，评估作业效果。这些评估结果将用于优化未来的作业策略和决策模型，提升系统的整体性能和可靠性。

5.6 系统冗余与容错机制

5.6.1 冗余设计

冗余设计是保障无人系统可靠性和稳定性的重要措施，具体包括以下几个方面：

关键控制系统冗余：对于关键控制系统（如导航、通信等），应设计冗余机制，以确保在单点故障情况下系统仍能正常运行。例如，导航系统可以配置主备两个独立的定位系统（如北斗和 GPS），在主系统出现故障时，自动切换至备用系统，保证定位信息的连续性。

通信系统冗余：无人系统的通信网络应配置多条通信链路，支持不同通信协议（如 TCP/IP、UDP 等）。在一条通信链路故障时，系统应能迅速切换到其他链路，确保数据传输的可靠性和及时性。

定期冗余测试：冗余系统应进行定期测试，确保其在需要时能够可靠切换。这些测试包括功能测试、性能测试和极限条件下的测试，以验证冗余系统的有效性和响应能力。

冗余组件监控：主控系统应实时监控冗余组件的状态，一旦发现冗余系统处于异常状态，立即发出警报，并记录相关数据，以便后续分析。

5.6.2 容错能力

容错能力是无人系统面对故障时的重要保障，具体包括以下几个方面：

自动切换机制：系统应具备自动切换到备用方案的能力，以确保作业持续进行。例如，在导航系统故障时，系统应能自动启用备用导航方案，以避免任务中断。

实时故障检测：无人系统应实施实时故障检测，监测关键组件的工作状态。一旦发现异常，系统应迅速做出响应，采取必要措施进行故障隔离或修复。

故障状态记录：所有无人系统应进行故障状态记录，便于后续分析和改进。故障记录应包括故障类型、发生时间、持续时间、处理措施等信息，以帮助工程师进行原因分析和系统优化。

故障恢复机制：系统应设计故障恢复机制，在发生故障后能够迅速恢复到正常工作状态。例如，当系统检测到故障后，应能通过重启系统或切换到备用模块等方式快速恢复功能。

应急响应流程：应制定详细的应急响应流程，以指导操作人员在发生故障时的处理措施。该流程应包括故障检测、通知机制、应对措施及后续恢复步骤，以确保快速有效地应对各种突发情况。

6 算力调度

6.1 边缘计算的应用

6.1.1 定义与目的

边缘计算是一种将数据处理任务从集中式云端转移到离数据源更近的边缘设备上的计算模型，旨在提升无人机与无人船在海上作业中的响应速度和数据处理能力，确保实时控制与协作。

6.1.2 技术要求

a) 延迟控制

实时处理要求：边缘节点可以进行数据的初步清洗、去噪和格式转换，减少冗余数据的传输量，从而降低延迟；边缘计算需保证数据处理延迟 $\leq 20\text{ms}$ ，以实现快速反应，尤其是在动态海洋环境下。

响应时间：无人系统对环境变化的响应时间应 $\leq 100\text{ms}$ ，以确保作业的及时性和安全性。

b) 处理能力

边缘节点处理能力：每个边缘设备应至少具备 10 GFLOPS 的计算能力，以支持复杂的任务调度和数据分析。

多任务并发处理：能够同时处理至少 5 个实时数据流，支持无人机和无人船的协同作业。

c) 带宽需求

带宽优化：边缘计算应确保每个设备每秒处理数据量 $\geq 1\text{ MB}$ ，带宽利用率应控制在 30% 以下，以减少对中心服务器的依赖。

数据传输要求：采用低延迟、高带宽的通信协议，确保位置、状态及环境数据的实时传输。

d) 快速决策

边缘计算使得无人系统能够在本地快速分析数据并进行决策，例如在检测到障碍物时，立即调整飞行或航行路径，避免碰撞。

e) 数据存储

本地存储能力：边缘设备应具备 $\geq 1\text{ TB}$ 的存储容量，确保实时数据的存储与分析，并支持快速读写（读写延迟 $\leq 5\text{ms}$ ）。

f) 分布式任务执行

多个无人系统可以并行处理不同的数据，进一步提高作业效率。

6.1.3 安全性要求

a) 数据隐私保护

所有处理的敏感数据应在本地加密，使用 AES-256 加密算法以保护数据的机密性。

数据在传输过程中应使用 SSL/TLS 加密协议，确保信息传递的安全。

b) 访问控制

实施基于角色的访问控制（RBAC），确保只有授权人员可访问敏感信息，所有操作需记录日志以便审计。

6.1.4 系统集成

通信协议支持：边缘计算节点需支持 MQTT、HTTP/2、WebSocket 等协议，以便于与无人机和无人船的实时数据交互。

API 接口：提供标准化 API 接口，以便于不同品牌和型号的无人系统集成。

6.1.5 性能监测

自动性能监测：系统应定期评估边缘计算的响应时间、处理能力、带宽使用率和存储性能，评估周期为每月一次。

可视化展示：监测结果以图表形式展示，便于操作人员实时了解作业状态。

6.1.6 故障处理机制

故障检测与恢复：边缘设备需实时监测自身状态，自动检测关键组件故障，并在故障发生时能够自动切换至备用方案，确保作业不间断。

故障记录：所有故障信息应记录，便于后续分析与改进，确保系统的稳定性与可靠性。

6.2 中间件的功能

中间件是连接不同软件组件和系统的中介软件，能够在无人系统中提供任务调度、数据整合和资源管理的功能。其核心目的是增强系统的互操作性和灵活性，其主要功能包括：

6.2.1 任务调度

动态任务分配：中间件应具备实时任务调度能力，根据环境变化、无人系统状态及任务优先级自动分配任务，确保资源的最优利用。

任务优先级管理：中间件应支持设定任务优先级，以便在资源紧张时合理分配任务，确保关键任务得到及时处理。

资源使用监控：实时监控每个无人系统的 CPU、内存和电池状态，确保任务分配在资源限制内。

6.2.2 数据整合

标准化数据格式：中间件应支持多种数据格式，以实现不同无人系统之间的数据有效解析和共享。

实时数据融合：中间件应整合来自不同传感器的数据，采用数据融合算法，生成综合信息，以提升决策的准确性和实时性。

数据聚合与分析：中间件应实现从不同无人系统收集数据的功能，并进行聚合。通过数据分析工具对聚合数据进行处理，以提取关键信息。

数据转换与清洗：提供数据转换和清洗功能，确保整合后的数据符合分析要求。应使用 ETL（提取、转换、加载）流程，将原始数据转换为标准化格式。

6.2.3 资源管理

资源监控：中间件应实时监控系统资源的使用情况，包括计算能力、通信带宽和电力消耗，确保资源的有效利用。

动态调整：中间件应根据实时数据和任务需求，自动调整资源分配策略，以优化系统性能。

资源调度策略：根据作业需求和资源状态，中间件应自动调整资源配置，以优化系统性能。例如，在电量低于 20% 时，自动减少任务负载，确保无人系统能够安全返回。

6.2.4 通信协调

多协议支持：中间件应支持多种通信协议，确保无人系统之间的高效数据传输与指令下达。

高可用性通信：中间件应具备冗余通信链路和动态路由功能，以提升通信的可靠性，确保在各种环境下均能实现稳定的通信。

6.2.5 状态监控与反馈

实时状态监控：中间件应持续监测各无人系统的状态，包括电量、位置、速度和任务进度，提供可视化展示。

反馈调整机制：中间件应定期接收各无人系统的状态反馈，根据反馈信息动态调整作业计划，确保任务的灵活性与适应性。

6.2.6 安全性管理

数据安全与隐私保护：中间件应实施数据加密措施，保护数据传输过程中的机密性与完整性。

访问控制：中间件应建立用户权限管理机制，确保只有授权人员可以访问和操作系统，并记录所有操作日志。

6.2.7 适应性与扩展性

模块化设计：中间件应采用模块化架构，允许功能模块的灵活替换与扩展，以适应技术发展的需求。

兼容性测试：中间件应在部署前进行全面兼容性测试，确保与各种无人机和无人船的无缝集成。

7 协同方式与技术要求

7.1 不同无人系统的协同方式

7.1.1 信息共享

实时数据共享：无人机和无人船应通过高速通信网络（如 4G/5G、LoRa 等）实时共享作业相关数据，包括位置、状态、环境信息和任务进度。

数据格式：所有共享的数据应采用标准化格式（如 JSON 或 XML），确保不同系统之间的互操作性。

环境信息整合：在作业过程中，无人船可以提供水下环境数据（如水深、温度、浑浊度等），而无人机则提供空中气象信息（如风速、气温、湿度），通过数据融合算法（如卡尔曼滤波）生成综合的环境模型。

7.1.2 任务协作

协同作业规划：在开始作业之前，主控系统应根据任务需求和系统能力制定协同作业计划，明确各个无人系统的角色和责任。

任务分配：例如，指派无人机进行区域勘测，同时让无人船负责水下探测，确保作业效率最大化。

动态调整：在作业过程中，主控系统应根据实时监测数据和反馈信息，动态调整任务分配。例如，在发现某一区域信号不佳时，系统可以临时调整无人机的飞行路径或无人船的航行方向。

7.1.3 路径规划与协调

自主路径规划：无人机和无人船应具备自主路径规划能力，根据预设的作业目标和环境信息，自动生成最优航行路径。

航行协同：在接近作业区域时，应协调航行路径，避免相互干扰，采用算法（如 A* 或 Dijkstra 算法）进行路径优化和避障。

7.2 控制器交互方式

7.2.1 信号传输

无线通信：无人机和无人船的控制器之间应采用高效的无线通信协议（如 MQTT、UDP 等），以实现快速、可靠的数据传输。通信延迟应控制在 50 毫秒以内。

数据传输安全性：所有信号传输应采用加密技术，确保数据的机密性和完整性，防止被非法截取或篡改。

7.2.2 指令下达

指令格式：控制器之间的指令下达应采用标准化的指令格式，确保指令的明确性和可解析性。例如，指令应包括任务类型、目标位置、执行时间等信息。

指令优先级：不同类型的指令应设定优先级，确保关键任务（如紧急避障）能够迅速执行。例如，关键指令的优先级可设定为 10，普通指令设定为 5。

7.2.3 反馈机制

状态反馈：无人系统应定期（宜每 5 秒）向主控系统反馈当前状态，包括电量、任务进度、环境数据等，以便于主控系统进行动态调整。

故障报告：在发生故障时，系统应立即向主控系统报告故障信息，并提供故障类型和严重程度，以便采取相应措施。

7.2.4 用户接口

人机交互界面：操作人员应能够通过直观的用户界面实时监控无人系统的状态、接收任务指令和反馈作业结果。界面应显示关键信息（如电量、任务状态、环境数据等）并提供可视化支持。

7.2.5 冗余与容错机制

关键控制系统（包括但不限于导航、通信等）应设计冗余机制，确保在出现故障时，系统能够无缝切换至备用方案。

所有无人系统应记录故障状态，以便后续分析和系统优化。

7.2.6 环境适应性要求

无人机与无人船应具备在多种气象条件（如风速、降雨、能见度等）下的作业能力，并具备自动监测气象条件的功能。

系统需经过环境适应性测试，以确保在不同水域（如海洋、河流、湖泊等）环境下的稳定性和可靠性。

8 协同效果评估

8.1 评估指标

评估协同效果应基于以下关键指标，确保作业的高效性和数据的可靠性。

8.1.1 数据采集精度

定义：数据采集精度是指采集到的数据与真实值之间的接近程度。

测量方法：使用高精度参考设备（如专业水深仪、气象站）对比无人系统采集的数据，计算其相对误差。

要求：在使用北斗高精度定位时，定位误差应控制在 5 厘米以内；对于环境数据（如温度、湿度等），相对误差应小于 5%。

8.1.2 作业效率

定义：作业效率是指完成任务所需的时间与资源使用的比率。

测量方法：记录每次作业的实际时间和消耗的资源（如电量、工作小时等），并计算作业效率。

使用以下公式进行计算：

作业效率=任务完成量所用时间×资源消耗/任务完成量

要求：作业效率应至少达到 80%，并与历史数据进行比较，确保持续改进。

8.1.3 任务完成率

定义：任务完成率是指在预定时间内成功完成的任务数量与总任务数量的比率。

测量方法：在每次作业结束后，记录成功完成的任务数量，并与计划任务总数进行对比。

要求：任务完成率应达到 95%以上，以确保协同作业的有效性。

8.1.4 安全性指标

定义：安全性指标是指在作业过程中未发生任何安全事故或故障的次数。

测量方法：对每次作业进行安全评估，记录安全事件的发生情况。

要求：在每次作业后应进行安全性评估，确保安全事件发生率为 0。

8.1.5 用户满意度

定义：用户满意度是指操作人员对协同作业的满意程度。

测量方法：通过问卷调查或访谈的方式收集用户反馈，使用 1-5 分制进行评分。

要求：用户满意度评分应达到 4 分以上，以确保操作人员对系统和流程的认可。

8.2 评估方法

评估协同效果的方法包括实地测试和模拟评估，具体步骤如下：

8.2.1 实地测试

测试准备：在特定的海域选择测试区域，确保区域内的环境条件符合预设要求（如风速、波浪等）。确保所有无人机和无人船的设备正常运行，且已完成必要的校准。

测试过程：进行实际作业任务，例如海洋测绘或环境监测，记录任务的每个环节，包括起飞、航行、数据采集和返回等时间。实时监控数据采集的准确性，使用参考设备进行对比，以验证数据的精度。

数据记录：详细记录各项指标的数据，包括实际数据采集精度、作业时间、资源消耗和任务完成情况。测试结束后，进行数据整理与分析。

8.2.2 模拟评估

评估准备：使用仿真软件构建虚拟环境，设置模拟参数（如风速、流速、障碍物分布等）。

评估过程：在模拟环境中运行无人机和无人船的协同作业任务，记录任务执行过程中的各项性能指标。通过对比模拟数据与实地测试数据，分析协同作业的有效性和潜在改进点。

结果分析：根据模拟评估结果，应用统计分析方法（如方差分析、回归分析）对不同参数对作业效果的影响进行深入研究，优化作业策略。

8.2.3 数据分析与报告编制

数据整合：将实地测试和模拟评估的结果进行整合，形成全面的评估数据集。

报告编制：根据评估结果，编制综合评估报告，内容应包括各项指标的实际数据、对比分析、存在的问题和改进建议。报告应提供数据可视化图表，便于相关人员快速理解评估结果，并据此进行后续决策。

8.2.4 后续改进措施

持续改进：根据评估结果和用户反馈，制定后续改进措施，针对数据采集、作业效率和用户满意度等方面进行优化，确保不断提升协同作业的效果。

9 安全注意事项

9.1 法规遵循

合规性要求：所有作业应确保符合当地和国家的法律法规，包括但不限于航空、航海、环境保护等相关法律。特别注意以下法规：

航空法规：确保无人机的飞行高度、空域使用和操作程序符合民航总局的规定。

水域管理法规：遵循地方水域管理部门的相关规定，确保无人船的航行安全。

许可证要求：所有操作人员需持有有效的操作许可证，确保其具备必要的培训和资质。相关许可证应定期审查和更新。

9.2 风险管理

风险识别：在作业前，进行全面的风险识别，包括以下几个方面：

环境风险：如恶劣天气（风速、降水、能见度等）对作业的影响。

设备风险：如无人机和无人船的机械故障、通信故障等。

安全风险：如与其他船只、飞行器的碰撞风险。

风险评估：对识别出的风险进行评估，评估方法包括：

定性评估：根据专家意见和历史数据评估风险的严重程度和发生概率。

定量评估：使用风险矩阵或概率模型量化风险水平，制定应对策略。

风险控制措施：

制定详细的风险控制措施，例如：

对于环境风险，设定天气阈值，当风速超过设定值时立即暂停作业。

对于设备风险，定期进行设备检查和维护，确保其正常运行。

对于安全风险，实施航行和飞行区域的实时监控。

10 质量控制

10.1 数据质量控制

10.1.1 数据采集精度验证

目标：确保数据采集的准确性，特别是在使用北斗高精度定位时。

实施步骤：

——使用高精度参考设备（如专业水深仪、气象站）对比无人系统采集的数据。

——采用标准误差评估方法，计算采集数据的平均误差和标准偏差。

——设定数据采集精度的评估标准，确保定位误差不超过 5 厘米，其他环境数据的相对误差小于 5%。

10.1.2 数据完整性检查

目标：确保在数据采集过程中没有丢失或损坏的数据记录。

实施步骤：

——在数据采集完成后，使用完整性检查工具（如 Checksum、哈希算法）对数据进行验证。

——记录数据采集的开始和结束时间，确保所有时间段内的数据均被采集。

——定期进行数据备份，确保在数据丢失时能够恢复。

10.2 数据处理质量控制

10.2.1 处理流程监控

目标：确保数据处理过程中的每一步骤符合预定标准。

实施步骤：

- 设置关键处理环节的监控节点，例如数据清洗、分析和报告生成等，实时检查数据处理的结果。
- 对处理过程进行日志记录，确保每个步骤都有可追溯的记录。

10.2.2 数据分析验证

目标：确保数据分析的准确性和有效性。

实施步骤：

- 采用交叉验证法，通过独立数据集对分析模型进行验证，确保分析结果的可靠性。
- 定期审查和更新数据分析算法，确保其适应性和有效性，必要时引入新的分析工具或方法。

10.3 作业结果审查

10.3.1 成果复核机制

目标：确保采集和分析的成果符合预期标准。

实施步骤：

- 由独立的第三方进行作业结果的复核，检查数据的准确性和完整性。
- 进行结果的对比分析，与历史数据进行对比，确保新成果的可信度。

10.3.2 反馈与改进

目标：通过反馈机制识别潜在的质量问题，并进行改进。

实施步骤：

- 在作业结束后，收集操作人员和数据分析人员的反馈，识别问题和不足。
- 根据反馈信息，制定针对性的改进措施，例如调整数据采集方法或更新设备。

10.4 质量控制体系

10.4.1 质量管理计划

目标：建立系统化的质量管理计划，确保各项质量控制措施得以实施。

实施步骤：

- 制定质量管理目标，包括数据采集精度、作业效率和任务完成率等。
- 设定质量审查频率（如每季度进行一次全面审查），确保持续监控和改进。

10.4.2 培训与意识提升

目标：提高所有参与人员对质量控制的重视程度。

实施步骤：

- 定期组织质量控制培训，确保操作人员和数据分析人员了解质量控制标准和流程。
- 通过案例分享和讨论会，提高团队对质量管理重要性的认识。

11 应急响应

11.1 应急响应计划

制定应急预案：根据可能出现的紧急情况（如设备故障、极端天气、人员伤害等），制定相应的应急预案，确保在发生突发事件时能够快速反应。

应急响应流程：

——事件识别：操作人员应及时识别突发事件并报告主控系统。

——应急决策：主控系统应快速评估情况，制定应急响应策略，如调整任务、暂停作业或启动撤离程序。

11.2 培训与演练

定期培训：定期对操作人员进行应急响应培训，提高其应对突发情况的能力，确保每位成员了解其职责和操作流程。

演练计划：每年至少进行一次全员参与的应急演练，模拟不同的紧急情况，评估应急响应机制的有效性。

11.3 后期评估与改进

事件后评估：在应急事件处理后，应进行事件后评估，分析应急响应的有效性和效率，识别改进点。

更新应急预案：根据评估结果，定期更新应急响应预案，确保其适应性和有效性。

参 考 文 献

- [1] 《北斗卫星导航系统技术规范》
-

全国团体标准信息平台