

仿生海洋探测器集成BDS的导航与控制系统设计

徐梓涵 石屿晨 李广伟*
黑龙江工商学院 黑龙江 哈尔滨 150016

摘要: 随着海洋资源开发的不断深入,仿生海洋探测器作为一种高效、智能的水下探索工具,其导航与控制系统性能成为关键。本文设计了一种集成北斗卫星导航系统(BDS)的仿生海洋探测器导航与控制系统,通过详细的技术实现和系统测试,验证了该系统的可行性和有效性。该系统具有高精度定位、自主导航、智能避障和稳定通信等特点,适用于海洋资源勘探、水下考古、水下救援等多个领域。

关键词: 仿生海洋探测器; BDS; 导航与控制系统

引言

海洋环境的复杂性和不可预测性对水下探测器的导航与控制系统提出了严峻挑战。北斗卫星导航系统(BDS)作为中国自主研发的全球卫星导航系统,具有高精度、全天候、全天时的定位、导航和授时服务,为仿生海洋探测器的导航与控制提供了有力支持。本文将BDS与仿生海洋探测器相结合,设计了一种新型的导航与控制系统,旨在提高探测器的自主导航能力和智能化水平。

1 系统总体设计

1.1 系统架构

仿生海洋探测器集成BDS的导航与控制系统主要由探测器本体、BDS接收模块、控制模块、通信模块和电源模块组成。探测器本体采用仿生设计,模仿真实鱼类的外形,优化形态参数,降低水流阻力。BDS接收模块负责接收卫星信号,并进行解算以获取探测器的位置、速度和时间信息^[1]。控制模块根据BDS提供的信息和探测器的任务需求,规划出最优路径,并进行导航控制。通信模块负责探测器与上位机或其他设备的数据交换。电源模块为整个系统提供稳定的电力供应。

1.2 仿生海洋探测器集成BDS的导航与控制系统关键模块详细设计

1.2.1 BDS接收模块

BDS接收模块作为仿生海洋探测器的导航核心,其设计需确保在水下复杂环境中实现高精度、低功耗的定位。以下是具体设计建议:

芯片选择: 选用北斗三代导航芯片,如某型号的高精度GNSS接收芯片,该芯片支持B1、B2、B3频点接

收,具备多路径抑制和抗干扰能力,适用于水下环境。芯片需具备高灵敏度捕获和跟踪卫星信号的能力,特别是在低信噪比环境下,如水下深处,仍能保持稳定的信号接收。选择具有低功耗模式的芯片,当探测器处于静止或低速运动时,可切换至低功耗模式以延长工作时间。

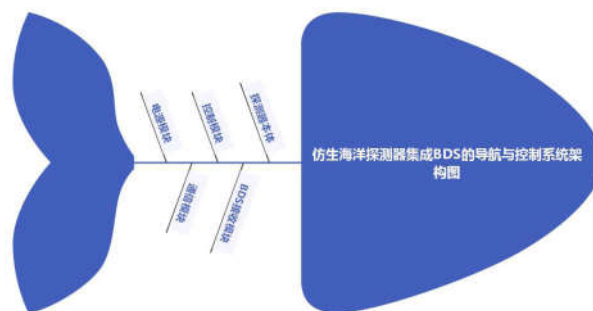


图1 仿生海洋探测器集成BDS的导航与控制系统架构图

天线设计: 天线采用柔性硅胶材料制作,以适应探测器在水下的旋转、倾斜等运动状态。天线表面涂覆防水涂层,防止水分渗透。天线布局采用四元阵列设计,通过优化阵列元素间的距离和相位差,确保在探测器各个运动方向上都能稳定接收卫星信号。设计天线匹配电路,提高天线的接收效率和信号质量。同时,考虑天线的阻抗匹配和驻波比,确保信号传输的稳定性。

差分定位实现: 通过接收地面站发送的实时动态差分信号(RTK),进行差分定位计算。地面站需布设在探测器作业区域附近,以确保差分信号的稳定性和准确性。设计差分定位算法,考虑水下环境的水流、温度、盐度等因素对信号传播的影响,进行算法优化。如采用卡尔曼滤波算法对差分信号进行平滑处理,提高定位精度。实现实时差分定位功能,探测器上的BDS接收模块需支持RTK解算,能够实时输出厘米级精度的位置信息。

1.2.2 控制模块

控制模块负责探测器的运动控制和路径规划,其设计

大创项目: 本文系黑龙江省2024年大学生创新创业校级项目“基于BDS的仿生海洋探测器(AUV)”

项目编号: X202413300123

需具备高度的自适应性和智能性。以下是具体设计建议：

控制算法设计：结合模糊控制和神经网络算法，设计自适应控制策略。模糊控制用于处理探测器运动过程中的不确定性和非线性问题，如水流影响、探测器姿态变化等。设计模糊控制器，根据探测器的当前状态和环境信息，输出相应的控制指令。神经网络算法用于学习和优化控制参数。通过训练神经网络模型，使控制器能够根据环境变化自动调整控制策略。如采用深度强化学习方法，让探测器在模拟环境中进行试错学习，优化控制参数^[2]。设计控制算法的实现流程，包括输入信号处理（如传感器数据滤波、归一化等）、控制策略计算（如模糊推理、神经网络前向传播等）、输出信号生成（如控制指令的编码、发送等）等步骤。

路径规划算法：采用A*算法进行全局路径规划。设计启发式函数，考虑路径长度、安全性、能耗等因素，评估不同路径的优劣程度。同时，结合实时环境信息（如水流方向、速度、障碍物位置等），对全局路径进行动态调整。实现局部路径调整功能。当探测器遇到未预见的障碍物或环境变化时，能够迅速调整路径规划策略，避开障碍物或适应环境变化。如采用动态窗口法（DWA）进行局部路径规划，根据探测器的当前速度、加速度限制以及障碍物信息，实时计算可行的运动方向。设计路径规划的评估指标，如路径长度、行驶时间、能耗等，用于评估不同路径规划算法的性能。

避障决策机制：通过内置的声呐、机器视觉等传感器实时监测周围环境。声呐用于远距离障碍物检测，提供障碍物的位置和距离信息。设计声呐信号处理算法，如滤波、峰值检测等，提高声呐数据的准确性。机器视觉用于近距离障碍物识别和分类。采用卷积神经网络（CNN）等深度学习算法对机器视觉图像进行处理和识别，提取障碍物的特征信息，如形状、大小、类型等。设计避障决策算法。根据传感器数据和控制算法进行避障决策。如采用有限状态机（FSM）或行为树（BT）等决策模型，根据探测器的当前状态和环境信息，选择合适的避障策略。同时，考虑探测器的运动学和动力学约束，确保避障决策的合理性和有效性。

1.2.3 通信模块

通信模块负责探测器与远程控制中心之间的数据传输，其设计需适应水下复杂的通信环境。以下是具体设计建议：

水下通信技术：采用声波通信技术。设计适应水下环境的通信协议，如采用自组织时分多址（STDMA）协议，确保多个探测器之间能够有序地进行通信。数据编

码方式采用前向纠错编码（FEC）和交织编码等技术，提高通信距离和速率。设计声波信号的调制和解调电路，确保声波信号的稳定发射和接收。考虑水下环境的噪声和干扰问题，设计声波通信的抗干扰技术。如采用扩频通信、跳频通信等技术提高通信的抗干扰能力。

卫星通信技术：利用BDS卫星通信功能实现探测器与远程控制中心之间的实时通信。设计数据压缩算法，如采用哈夫曼编码、LZW编码等压缩技术，减少数据传输量，降低通信成本。设计加密算法，如采用AES、RSA等加密算法，确保数据传输的安全性。同时，考虑卫星通信的延时和丢包问题，设计数据重传和错误纠正机制。实现卫星通信的自动切换功能^[3]。当探测器运动到不同卫星的覆盖范围内时，能够自动切换到最合适的卫星进行通信。设计卫星选择和切换算法，考虑卫星的信号强度、覆盖范围、通信质量等因素。

1.2.4 电源模块

电源模块负责为探测器提供稳定的电能供应，其设计需兼顾能量密度、寿命和安全性。以下是具体设计建议：

电池选择与管理：选用高能量密度、长寿命的锂电池作为电源。考虑电池的低温性能，选择能够在低温环境下正常工作的锂电池型号。设计电池管理系统（BMS），对电池进行充放电管理、温度监测和保护等功能。BMS需具备过充保护、过放保护、短路保护、过温保护等功能，确保电池的安全可靠使用。实现电池的智能管理功能。根据探测器的工作状态和能耗需求，动态调整电池的充放电策略。如采用智能充电算法，根据电池的当前电量和充电速率，优化充电过程，延长电池的使用寿命。

节能设计：通过优化系统功耗、采用低功耗器件和休眠模式等方式降低系统能耗。如采用低功耗的微控制器、传感器等器件，减少系统的整体功耗。设计节能算法。根据探测器的运动轨迹和环境信息，预测探测器的能耗需求，并提前调整系统的工作状态以节能。如当探测器处于静止或低速运动时，将部分不必要的模块置于休眠状态以减少能耗。采用能量回收技术。如利用探测器的运动动能或水流能量进行能量回收，为探测器提供额外的电能供应。设计能量回收电路和储能装置，将回收的能量存储起来供探测器使用。

2 系统实现与测试

2.1 硬件实现

在硬件实现方面，首先着手于探测器本体的制造。选用了碳纤维复合材料作为主要材料，这是因为它具有轻质、高强度和耐腐蚀等优良特性，非常适合用于水

下探测器的制造。进行了详细的结构设计,包括探测器的外形、内部布局以及各部件的安装位置等。接下来是模块集成与连接的工作。将BDS接收模块、控制模块、通信模块和电源模块等核心部件一一集成到探测器本体中。在集成过程中,特别注意各模块之间的连接可靠性,采用高质量的连接器和线缆,确保信号传输的稳定性^[4]。同时,还对模块之间的接口进行精心的设计,使得各模块能够协同工作,共同实现探测器的各项功能。传感器配置与校准也是硬件实现中的重要环节。为探测器配置了声呐、机器视觉等传感器,这些传感器能够实时监测周围环境,为探测器的导航和避障提供准确的数据支持。在配置过程中,对传感器进行了精心的选择和安装,确保了其工作性能和稳定性。随后,还对传感器进行了校准和测试,通过对比实际测量值和传感器输出值,调整了传感器的参数,使得其数据更加准确可靠。

2.2 软件实现

在软件实现方面,首先选择了嵌入式操作系统作为软件平台。这个操作系统支持多任务处理和实时性要求,非常适合用于水下探测器的软件开发。根据系统的需求,对操作系统进行了配置和裁剪,去除了不必要的组件和服务,提高了系统的运行效率和稳定性。接着,开始软件模块的设计与开发工作。BDS信号处理模块是其中的核心之一,设计了信号接收、解码和处理算法,实现了探测器位置、速度和时间信息的解算。通过不断优化算法,提高了信号处理的准确性和实时性。路径规划模块也是软件实现中的重要组成部分。根据BDS提供的位置信息和探测任务需求,设计了路径规划算法。这个算法能够综合考虑全局和局部的环境信息,为探测器规划出最优的路径。

2.3 系统测试

在系统测试方面,首先进行了实验室测试。在实验室环境下,对仿生海洋探测器的导航与控制系统进行了全面的功能测试和性能测试。测试内容包括BDS信号接

收与处理、路径规划、导航控制、避障功能和通信性能等。通过测试,验证了系统的各项功能和性能指标,为后续的测试工作奠定了基础。接着,进行了水池测试。在水池环境中,设置了不同形状和位置的障碍物,对探测器的避障功能和自适应导航能力进行了测试。通过观察探测器的避障行为和路径调整情况,验证了避障算法的有效性和导航控制的准确性。同时,还对探测器的运动性能和稳定性进行了评估,为开放水域测试做好了准备。最后,进行了开放水域测试。在开放水域环境下,对探测器的整体性能进行了综合测试。测试内容包括定位精度、导航控制能力、避障功能和通信性能等。通过测试,验证了探测器在实际环境中的性能和稳定性,为后续的应用和推广提供了有力的支持。同时,还对测试过程中发现的问题进行了记录和分析,为系统的进一步优化和改进提供了宝贵的参考意见。

结语

本文设计了一种集成北斗卫星导航系统(BDS)的仿生海洋探测器导航与控制系统,通过详细的技术实现和系统测试,验证了该系统的可行性和有效性。该系统具有高精度定位、自主导航、智能避障和稳定通信等特点,适用于海洋资源勘探、水下考古、水下救援等多个领域。未来,将进一步优化系统性能,提高探测器的智能化水平。

参考文献

- [1]曾思远,王煜天.仿生水下航行器的设计分析[J].工程与试验,2016,56(02):56-58.
- [2]江希.基于单片机的海洋温深探测器设计开发[J].中国新技术新产品,2017,(13):16-17.
- [3]邓东浩.适用于光电集成芯片级海洋传感器的AlInP/GaInP红光探测器关键技术研究[D].山东大学,2022.
- [4]李锋,陈毓伟.北斗卫星通信系统在海洋探测平台上的应用[J].数字海洋与水下攻防,2023,6(06):699-705.