

学号： 222040263
密级： _____

学校代码： 10336

杭州电子科技大学

硕士学位论文

(专业学位)



论文题目： 基于异构级联的远程控制海底观测
局域网研制

作者姓名： 许浩天
指导教师： 蔡文郁教授
第二导师： 杨勇教授
专业学位类别： 电子信息
专业领域： 新一代电子信息技术（含
量子技术等）
所在学院： 电子信息学院
完成时间： 2025 年 05 月

杭州电子科技大学硕士学位论文

基于异构级联的远程控制海底观测局域网研制

研 究 生： 许浩天

指导教师： 蔡文郁 教授

2025 年 5 月

**Dissertation Submitted to Hangzhou Dianzi University
for the Degree of Master**

**Development of Remote Control Seafloor
Observation Local Area Network Based on
Heterogeneous Cascade**

Candidate: Haotian Xu

Supervisor: Prof. Wenyu Cai

May, 2025

摘要

海洋空间广阔，底部资源丰富，是探索未知、获取资源和解决全球问题的重要区域。传统海洋观测技术在时空覆盖和深海极端环境下存在诸多限制，面临数据获取和传输挑战。因此，亟需开发高效、持续的海洋观测技术，以应对环境变化、生态监测及资源勘探等关键问题。为了克服传统技术的局限，本文研制了一种基于异构级联的海底观测局域网（Seafloor Observation Local Area Network, SOLAN）。该网络结合了卫星、光电复合缆和水声三种网络通信技术，通过异构级联方式，适配不同海洋环境条件下数据传输需求，从而构建了覆盖“海底-海面-岸基”的多层次网络架构。本文的主要工作和成果如下：

首先，本文详细分析了异构级联海底观测网络模型的需求和特性，针对海底数据采集及远程双向传输的实际需求，提出了基于异构级联通信技术的远程控制海底观测网络构建方案。为此，本文研制开发了观测节点和汇聚节点的硬件平台与功能软件，设计了具备数据存储和远程控制功能的岸基云存储平台。同时，为确保网络系统稳定运行与数据有效交互，设计了周期式供电方案及多节点同步唤醒机制。该网络方案有效克服了“海-空-岸”之间的远程跨区域数据传输障碍，保证了长期观测与远程控制的需求，为海底观测提供了技术保障。

然后，为满足传输多样化观测数据的需求，本文构建了统一标准化的基本帧结构，设计了适应多样化传输需求的数据交互协议。为提升该网络数据传输的可靠性和效率，提出了三种数据传输机制：1）提出了基于大数据接续重传技术的断续传输机制，以解决大数据传输过程中因中断导致重复传输问题；2）提出了基于链路状态感知与自适应数据包传输的时变信道传输策略，以应对水声和卫星链路的复杂性和不可靠性；3）提出了基于数据链路垂直切换技术的动态切换机制，以保证光电复合缆链路数据传输的连续性。上述设计的传输机制确保在复杂多变的环境中实现高效、稳定通信，为海底观测提供了切实可行的解决方法。

最后，本文对异构级联海底观测局域网进行测试，包括压力测试、同步唤醒测试、数据链路传输测试、数据传输机制测试、综合应用测试。测试结果表明异构级联海底观测局域网能在深海 6000m 的环境下实现数据采集上传和远程指令下发等功能，满足海底观测和远程控制的需求。本文设计的海底观测局域网已在西太平洋海域进行实际应用实验，长期运行良好。

综上所述，本文研制了一种基于异构级联的远程控制海底观测局域网，实现了对海底及深海环境的长期、连续、实时观测，解决了海底观测时空覆盖问题和深海极端环境下数据采集与传输的困难，为海底观测提供了高效、可靠的技术方案。

关键词：海底观测局域网，异构级联，交互协议，数据传输机制

ABSTRACT

With vast space and abundant resources at the bottom, the ocean is an important area for exploring the unknown, obtaining resources and solving global problems. Traditional ocean observation technology has many limitations in space-time coverage and extreme deep-sea environment, and faces challenges in data acquisition and transmission. Therefore, there is an urgent need to develop efficient and sustainable ocean observation technologies to address key issues such as environmental change, ecological monitoring and resource exploration. In order to overcome the limitation of traditional technology, a seafloor Observation Local Area Network (SOLAN) based on heterogeneous cascade is developed in this thesis. The network combines three kinds of network communication technologies, satellite, photoelectric composite cable and underwater acoustic, and adapts data transmission requirements under different Marine environmental conditions through heterogeneous cascade, thus constructing a multi-level network architecture covering "seafloor - surface - shore". The main work and achievements of this thesis are as follows:

Firstly, this thesis analyzes the requirements and characteristics of the heterogeneous cascade seafloor observation network model in detail. In view of the actual requirements of seabed data acquisition and remote two-way transmission, a construction scheme of the remote control seabed observation network based on heterogeneous cascaded communication technology is proposed. For this purpose, in this thesis, the hardware platform and functional software of the observation node and convergence node have been developed, and a shore-based cloud storage platform with data storage and remote control functions has been designed. Meanwhile, to ensure the stable operation of the network system and the effective interaction of data, a periodic power supply scheme and a multi-node synchronous wake-up mechanism were designed. This network solution effectively overcomes the obstacles of remote cross-domain data transmission among "sea - air - shore", guarantees the requirements of long-term observation and remote control, and provides technical support for seabed observation.

Then, in order to meet the needs of transmitting diverse observation data, a unified and standardized basic frame structure is constructed, and a data exchange protocol is designed to meet the diverse transmission requirements. In order to improve the reliability and efficiency of data transmission in this network, three data transmission mechanisms are proposed. 1) An discontinuous transmission mechanism based on big data retransmission technology is proposed to solve the

problem of repeated transmission caused by interruption in the process of big data transmission. 2) A time-varying channel transmission strategy based on link state awareness and adaptive packet transmission is proposed to cope with the complexity and unreliability of underwater acoustic and satellite links; 3) A dynamic handoff mechanism based on vertical handoff technology is proposed to ensure the continuity of data transmission. The transmission mechanism designed above ensures efficient and stable communication in a complex and changing environment, which provides a practical solution for seabed observation.

Finally, this thesis tests the heterogeneous cascaded SOLAN, including pressure test, synchronous wake up test, data link transmission test, data transmission mechanism test, comprehensive application test. The test results show that the heterogeneous cascaded SOLAN can realize the functions of data acquisition, upload and remote command delivery under the environment of 6000m deep sea, and meet the needs of seafloor observation and remote control. The SOLAN designed in this thesis has been applied in the western Pacific Ocean and has been running well for a long time.

To sum up, this thesis developed a remote control SOLAN based on heterogeneous cascade, which realized long-term, continuous and real-time observation of the seabed and deep-sea environment, solved the problem of space-time coverage of seabed observation and the difficulty of data collection and transmission under extreme deep-sea environment, and provided an efficient and reliable technical solution for seabed observation.

Keywords: seafloor observation local area network, heterogeneous cascade, interactive protocol, data transmission mechanism

目 录

1 绪论.....	1
1.1 课题研究背景意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 海底观测网络研究现状.....	2
1.2.2 通信网络技术研究现状.....	6
1.3 研究内容及安排.....	8
2 异构级联海底观测网模型分析	10
2.1 海底观测网络通信需求分析	10
2.2 海底观测网络通信技术和模型	12
2.2.1 水声通信信道模型.....	12
2.2.2 光电复合缆通信技术.....	13
2.2.3 卫星通信技术.....	16
2.3 海底观测网络布局架构分析	17
2.4 受控海底观测异构级联网络	19
2.5 本章小结.....	20
3 海底观测局域网系统设计	21
3.1 总体网络结构概述.....	21
3.2 观测节点设计.....	23
3.2.1 底层主观测节点设计.....	23
3.2.2 分布式观测节点.....	30
3.3 汇聚节点设计.....	36
3.3.1 卫星通信浮标节点设计.....	36
3.3.2 水声通信中继节点设计.....	40
3.4 岸基云存储平台.....	44
3.5 供电设计和远程唤醒.....	47
3.6 本章小结.....	49
4 异构级联海底观测局域网数据传输机制	50
4.1 引言.....	50
4.2 异构级联网络数据链路帧结构	51
4.3 异构级联网络数据链路交互协议	55
4.3.1 数据交互流程设计.....	55
4.3.2 面向大数据传输的断续传输机制.....	58
4.4 异构级联网络数据链路传输机制	60
4.4.1 面向卫星和水声链路的时变信道传输策略	60

4.4.2 面向光电复合缆链路的动态切换机制	68
4.5 本章小结.....	72
5 系统测试与验证	73
5.1 系统组成部件搭建.....	73
5.1.1 观测节点.....	73
5.1.2 汇聚节点.....	74
5.1.3 岸基云存储平台	75
5.2 仓体压力测试.....	76
5.3 同步唤醒功能测试.....	77
5.4 异构网络传输实验.....	79
5.4.1 链路传输测试.....	79
5.4.2 断续传输测试.....	82
5.4.3 时变信道传输策略测试.....	83
5.4.4 动态切换机制测试.....	87
5.5 综合测试.....	89
5.5.1 数据上传测试.....	89
5.5.2 远程控制测试.....	90
5.6 西太平洋试验.....	91
5.7 本章小结.....	93
6 总结与展望.....	94
6.1 研究工作总结.....	94
6.2 研究工作展望.....	95
参考文献.....	96

1 绪论

1.1 课题研究背景意义

从浩瀚宇宙俯瞰，我们的家园——地球因辽阔海洋的覆盖呈现出一片蔚蓝。海洋作为地球上最为广阔的自然环境，覆盖了超过 70% 的地球表面，并且占据了超过 95% 的生存空间^[1]。海洋的深邃和神秘驱使人类无尽的探索。海洋的平均深度超过 3000m，其中最深处为马里亚纳群岛附近的马里亚纳海沟，深度可达 11km^[2]。自人类探索海洋以来，其丰富的资源和未知性促使科学研究不断深入。时至今日，随着海洋探索技术进步，人类对海洋的认知逐步深化。但是对于更深处的海洋，我们仍有着许多的未知和面临着众多的挑战。

海洋作为一个动态的动力引擎，推动着能量和生态的循环交换，影响着生物更迭、气候变化和人类发展等方面^[3]。同时，海洋还是一个涵盖物理、化学及生物等学科的复杂系统。鉴于此，我们观测采集并分析海洋温度、盐度、深度、洋流变化和海底地形等数据，以更进一步探索 and 了解海洋^[4]。上述数据不仅反映海洋生态系统的动态变化，还直接关系到气候变化、海洋资源开发及自然灾害预测，为深入探索海洋及其地球系统作用提供重要支撑。此外，随着海洋在国家战略层面的重要性日益增强，各国的军事领域也将积极开展和推进海洋观测，并逐步提升海洋观测技术^[5]。

海洋观测对于人类了解海洋，勘探资源和预防自然灾害等方面具有重要意义。传统海洋观测手段，如科考船与浮标观测，受空间覆盖和时间持续性的限制，难以满足深海长期监测需求^[6]。科考船无法覆盖深海区域，并且仅能在有限的时间段内进行观测。浮标和传感器等设备缺乏大范围、长期的观测能力，无法有效获取海洋环境动态变化的数据。尤其在深海区域，传统的观测手段难以实现有效观测，并且面临着在深海复杂的环境下数据获取与传输的巨大挑战。因此，亟需一种更加高效、持续、可靠且大范围的海洋观测手段，对深海和海底进行观测，以便对海洋进行更加深入和全面的研究。

如图 1.1 所示，海底观测网络（Seafloor Observation Network, SON）利用先进的观测、通信和传感技术，实现对深海和海底环境长期、连续、可靠的观测^[7]。与传统的海洋观测手段相比，海底观测网络具备更大的覆盖范围和更高效的数据传输能力，不仅能克服空间与时间的限制，还能够提供多维度、全方位的海洋观测数据，对海底生态系统以及资源的研究具有重要的科学意义和实践价值^[8]。海底观测网络依靠多种通信网络技术异构级联实现有效可靠运行的同时，完成更广泛的观测覆盖和远程数据传输。岸基中心与观测节点之间双向交互

不仅实现数据采集和传输的功能，更承担着远程操控指令投递的任务。针对这一技术需求，本文探讨了如何运用异构级联网络技术构建一个具备远程控制功能的海底观测局域网。

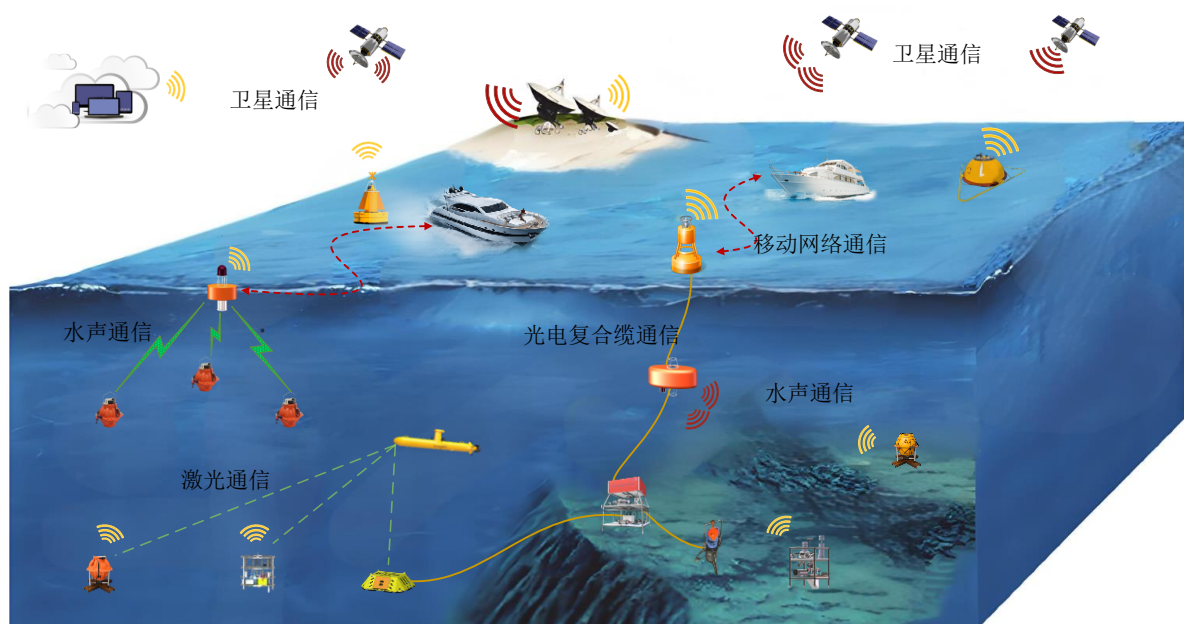


图 1.1 海底观测网络^[9]

1.2 国内外研究现状

1.2.1 海底观测网络研究现状

海底观测系统被誉为继陆地、空基观测之后的第三大地球观测平台，为各国预防海洋灾害和探索海洋提供了重要的科学支撑^[10]。鉴于此，包括欧洲各国、美国、日本和中国在内的诸多国家政府与科研机构纷纷投入大量资源，积极构建海底观测网络，极大地拓展了人类在海洋观测的深度、广度、时间分辨率和空间分辨率等方面的能力。

目前，全球已经建立了多个深海观测系统，涵盖了大部分海域^[11]。1999 年、2009 年和 2019 年，国际社会分别在法国、意大利和美国举办了三次“世界海洋观测大会”，推动全球海洋观测框架的建立。相较于国内，国外海底观测网络起步较早，日本、加拿大和美国等国家率先开展相关研究和技术尝试。

20 世纪末，此时刚处于海底观测网的初始研究和探索阶段。美国开始研究和探索采用海底缆线进行连接的近岸海底观测站，包括长期生态观测站（LEO-15）^[12]、夏威夷水下地学观测站（HUGO）^[13]、夏威夷-2 号观测站（H2O）^[14]、马萨葡萄园岛海岸观测站（MVCO）^[15]等。这些海底观测站搭载少量的传感器，进行限定范围内的数据采集和观测。同时，单节点系统形式导致这些海底观测站通信受限，扩展性和灵活性差。

21 世纪，多国推进小型海底观测网的发展，如美国 MARS^[16]和寡营养长期生态观测网（ALOHA）^[17]、加拿大维多利亚海底试验网（VENIS）^[18]、法国地中海海洋环境观测系统

(MOOSE)^[19]、意大利 NEMO-SN1 观测网^[20]、挪威 AWIPEV-COSYNA 观测网^[21]和 Lo Ve 观测网^[22]、西班牙 OBSEA 观测网^[23]、爱尔兰智能港湾观测网^[24]、德国北海及北极海域海岸观测系统 (COSYNA)^[25]、土耳其 MARmara SuperSITE^[26]等。此外,瑞典、希腊、阿曼等国也积极开展小型海底观测网的研究与建设。

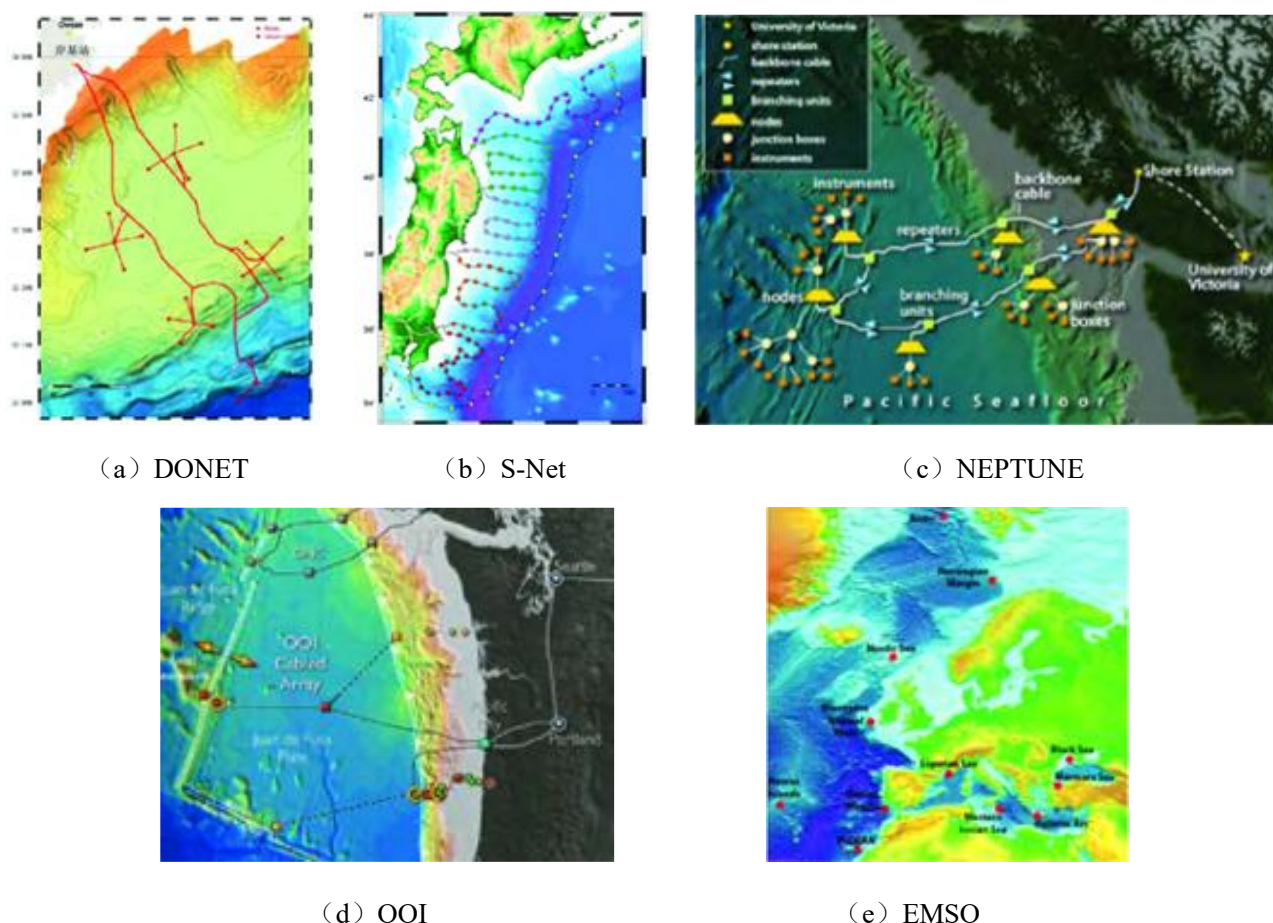


图 1.2 国外主要海底观测网络区域图

日本的 DONET 计划^[27]是用于监测伊豆半岛东南海域地震情况的实时海底观测系统。该系统布设有 20 个观测节点,各观测节点搭载有面向地震监测的多种传感器,其中包括地震仪、强震仪和水中地震检波器等。2011 年日本在发生 9.0 级地震后进一步推进 DONET 计划的升级版——地震及海啸预警网 (S-Net) 的建设。S-Net 显著提升了观测网络的整体性能,拥有 150 个观测节点,以实现整个日本海沟的观测覆盖。DONET 和 S-Net 分别如图 1.2 (a)、(b) 所示。

加拿大的综合海底观测网 NEPTUNE 具有线缆覆盖范围大和仪器种类众多等特点^[28]。网络如图 1.2 (c) 所示,位于不列颠哥伦比亚省温哥华岛西海岸,横跨胡安·德富卡板块,覆盖范围约 200000km²。该网络由 6 个节点组成,部署在浅海和深海取域范围内,同时配备上百种传感器,以便方便地观测。

美国于 2016 年开启如图 1.2 (d) 所示的海洋观测计划 (Ocean Observatories Initiative,

OOI), 计划建设一个能够进行长期观测的海底观测系统^[29]。OOI 分为三部分: 区域网、近岸网和全球网。OOI 包含 7 个观测节点和 850 余个观测仪器。观测节点之间依靠光电缆系统连接, 实现千瓦级别的电能传输和千兆带宽级别的双向数据传输。

欧洲的海底观测网络 EMSO^[30]是在 ESONET 项目的基础之上进行融合搭建, 由 12 个区域网络组合而成。EMSO 如图 1.2 (e) 所示, 部署范围在北极圈和黑海之间。该网络的管理机构众多, 涵盖 14 个国家的 50 多个研究机构^[31]。由于管理机构众多, 12 个区域网络在分布与功能实现上存在差异, 从而导致整体发展进度落后于美国、加拿大、日本的海底观测网。

上述主要海底观测网络归纳如表 1.1 所示。

表 1.1 国外主要海底观测网络

名称	国家或地区	区域	节点数	功能
DONET	日本	伊豆半岛东南海附近	20	地震海啸观测
S-Net	日本	日本海沟	150	地震海啸观测
NEPTUNE	加拿大	温哥华岛西海岸	5	综合性观测
OOI	美国	美洲大陆架邻近海域	6	综合性观测
EMSO	欧洲	从北极圈到黑海范围	15	综合性观测

中国的海底观测网研究和建设起步较晚, 整体进度相较于美国、加拿大、日本等发达国家略显滞后。然而, 国内多个单位已积极开展海洋观测网的研究与建设, 包括台湾大学、同济大学、浙江大学、中科院南海海洋研究所和中国科学院声学研究所等^[32]。这些机构长期从事相关关键技术的研发, 基本完成了海洋观测组网装备的研制, 并已开展小型海底观测网的部署试验, 为中国东海、南海区域的海洋观测网建设及相关海洋工程项目奠定了坚实的研究基础和实践经验。

近年来, 中国大力推动海底观测网络的发展, 并搭建了多个海底观测网络系统, 为后续的海底观测网研究、建设和发展指明方向。例如, 中国建成了以海底地震及海啸预警为主要目标的中国台湾地区水下观测网 (Marine cable Hosted Observator, MACHO)、中国东海小衢山海底观测系统、三亚海底观测示范系统、中国东海摘箬山海底观测系统和中国南海海底观测网实验系统等海底观测网络系统项目。这些观测网络的建立, 为中国未来海底观测网的升级与完善提供了重要支撑。

2011 年, 中国台湾地区的 MACHO 观测网成功搭建^[33]。其概要如图 1.3 所示, 分布在宜兰县头城镇向东南外海的区域, 在约 300m 深的海床上部署了一个观测节点, 并连接多种海底观测传感器, 包括地震仪、海啸压力计和温盐仪等。观测数据通过 45.199km 的海底光纤电缆传输至岸基平台, 实现监测地震与海啸活动功能的同时, 还可进行长期的海洋科学观测^[34]。MACHO 观测网系统的可实现 1kV 远距离供电, 大于 2Gbyte 带宽的节点间数据传输, 工作水深可达 300m, 为区域海洋监测提供了高效、稳定的数据支持。

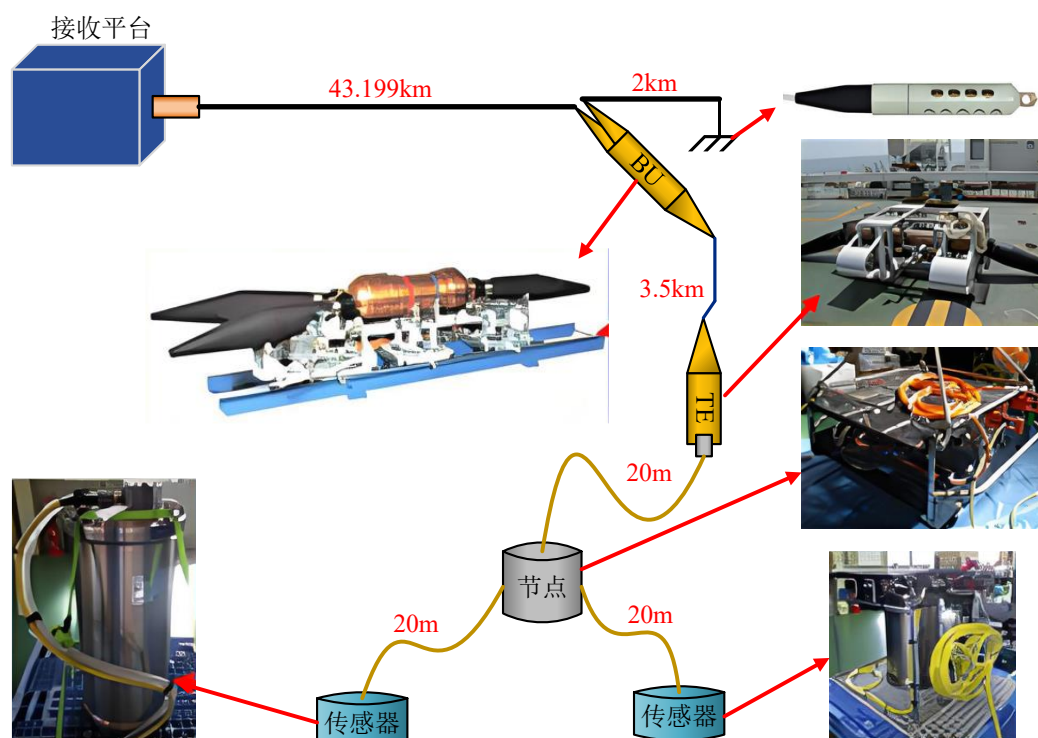
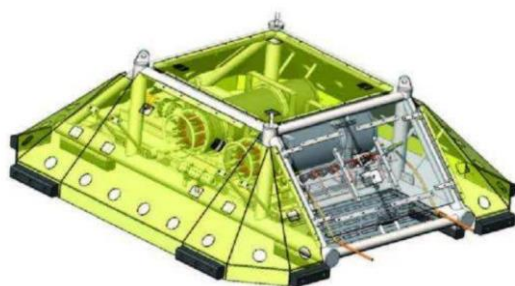
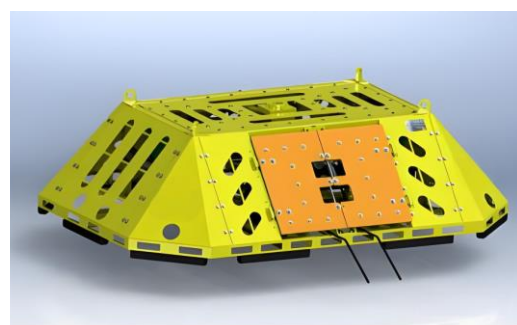


图 1.3 MACHO 观测网概要图

同济大学、浙江大学等研究单位在海底观测领域的研究处于国内领先地位，专注于海底观测节点装备的研发。其中，以同济大学为核心研制了如图 1.4 所示的海底观测网装备，其主要组成部分包括海底高压主基站和海底设备适配器等。与此同时，同济大学还主导开展了“东海海底观测小衢山实验站”项目^[35]。该项目是中国第一套海底观测试验系统，并于 2009 年投入运行。东海海底观测小衢山实验站在投入运行的一年后观测并记录下了由智利大地震引发海啸进而对东海近岸产生影响的数据^[36]。



(a) 海底高压主基站



(b) 海底设备适配器

图 1.4 同济大学研制的海底观测网装备^[37]

2013 年，中科院南海海洋研究所联合中科院沈阳自动化研究所和声学研究所等研究机构共同完成三亚海底观测示范系统并投入运行，标志着中国建成了首个功能完备的海底观测示

范系统，系统由 1 个岸基平台、1 个基于水声通信的网关节点与 3 个观测节点组成，实现 20m 水深的观测^[38]。

2014 年，浙江大学经过多年研究顺利完成了摘箬山海底观测网实验平台的搭建工作，并于同年 5 月在舟山摘箬山岛北部海域进行了试验系统的一期布放。该项目研究重点推动了海底接驳盒工程技术的发展，同时该技术的发展突破也保障了中国节点在美国 MARS 网络中的实验验证^[39]。

2016 年 9 月，中国科学院声学所牵头领导浙江大学和同济大学等共计 12 家单位在南海海域搭建了我国第一个深海海底观测网试验系统，并进行了南海试验^[40]。该海底观测网拥有多个主次接驳盒和观测设备及平台，观测深度可达 1800m。

2023 年，中国科学院海洋研究所建立常态化深海长期连续观测平台。该研究所研制的多代深海坐底长期观测系统（Long-term ocean observation platform, LOOP）在我国南海冷泉连续多年布放，实现了对该区域高清影像资料、近海底理化参数等数据的连续获取^[41]。

以上多所单位经过多年研究并搭建的海底观测网络推动了中国海底观测网的向前发展，同样证明了中国海底观测网的基建能力，为后续中国乃至全世界的海底观测网发展提供宝贵的技术经验，同时也为海洋领域的发展提供重要的数据支撑。

1.2.2 通信网络技术研究现状

为实现海底观测网的实际应用，需搭建并连接多个远离海岸的网络节点。这些节点根据不同需求分布于海洋不同深度，同时具有不同的功能和通信连接方式。各节点间需借助多种通信网络技术实现海底观测网络的有效运行。这些通信网络技术分为海上通信和水下通信两种方式。

海上通信方式主要包括卫星通信与无线通信。国外主要的卫星通信系统包括铱星系统和 Inmarsat 等典型代表^[42]。铱星系统是一种低轨卫星通信系统，由 66 颗卫星组成，提供高速数据传输，覆盖范围广，尤其适用于偏远海域和地区^[43]。Inmarsat 由国际海事卫星组织运营，其系统由岸基、船舶基站和卫星组成，为海上船舶及其他设备提供高效、稳定的通信服务，覆盖太平洋、大西洋和印度洋^[44]。国内卫星通信技术发展逾 30 年，主要集中在通信卫星和中继卫星领域^[45]。其中，“天通一号”是中国自主研发的卫星通信系统，覆盖中国及周边地区，具备终端小型化和便携化的特点^[46]。王彦钊^[47]等人利用北斗卫星短报文通信能力实现数据传输，尽管降低了通信成本，但受限于传输带宽，难以满足海底环境下的大数据传输需求。李冠宇^[48]等人提出了一种基于双卫星链路的数据传输策略：在数据量较小时，依旧采用北斗卫星短报文功能以节约通信成本；而在数据量较大时，则切换至高带宽卫星链路，以此提高数据传输的实时性表现。

随着无线通信技术的发展，蜂窝网络、Wi-Fi、LTE 等技术已在海上通信中得到应用与验证。例如，台湾海洋科技研究中心采用 Wi-Fi 与 GPS 定位，结合相关设备系统，构建无人

海上载具通信平台, 实现陆上远程控制^[49]。此外, 中国移动与爱立信联合研发, 并在青岛部署 TD-LTE 试验网, 其覆盖 30km 海域, 可提供 7Mbps 宽带数据传输和通信服务^[50]。

表 1.2 给出一些其他海上无线技术实现通信系统的参数指标。

表 1.2 部分无线通信系统传输技术及参数

参考	通信系统	频段	速率	距离
[51]	NAVTEX	MF/HF	100 bit/s	370 km
[52]	NAVDAT	MF/HF	25 kbit/s	463~648 km(天波传输)
[53]	AIS	VHF	9.6 kbit/s	18.5~37 km(稳定传输)
[54]	DSC	MF/HF/VHF	100 bit/s~1.2 kbit/s	55.6~92.6 km(VHF)
[55]	VDES	VHF	307.2 kbit/s	37~92.6 km(海面传输)

水下无线通信主要包括水下可见光通信、水下无线电通信和水下声波通信。这三种技术采用不同的传输介质和实现方式, 以适应复杂多变的水下环境。水下可见光通信采用蓝绿光波段进行通信, 具有带宽高和抗干扰性强的特性, 但受水质与光源的影响。水下无线电通信具有通信速率较高的特性, 但是因海水吸收效应而导致传输距离受限。水下声波通信技术较为成熟, 能够实现远距离通信, 但是传输带宽受到限制。表 1.3 对比了这三种水下无线通信技术的特性^[56]。

表 1.3 水下无线通信方式的特性参数

	水下声波通信	水下无线电通信	水下可见光通信
衰减	0.1~4 dB/km	3.5~5 dB/m	3.5~5 dB/m
传播速度	1500 m/s	$\approx 2.255 \times 10^8$ m/s	$\approx 2.255 \times 10^8$ m/s
通信速率	~kbps	~Mbps	~Gbps
传输距离	>km	10m	10~100m
频率	10~15kHz	30~300Hz	$10^{12} \sim 10^{15}$ Hz

意大利热那亚大学研究组构建了一种水下光通信系统, 模拟水下传感器网络通信。该研究组探究并分析了海水对光吸收和散射效应, 选择 420nm 紫光作为传输信号以降低水中光传播的损耗。结果表明, 系统有效通信距离最长为 1.8m, 数据传输速率达 100kb/s, 但距离超过 1.9m 时错误率显著增加^[57]。

英国利物浦约翰摩尔大学与西班牙瓦伦西亚理工大学等机构将 2.4GHz ISM 研究波段应用于水下无线传感网络监测。实验实现了 16cm 传输距离下 2.47GHz 载波频率和 11Mbps 近距离高速通信, 并在 20cm 传输距离测得 -60dBm 信号强度^[58]。

Li 等人在多输入多输出技术 (MIMO) 的基础上结合正交频分复用技术 (OFDM) 实现了水下近距离可靠通信, 通信速率为 125.7kbps^[59]。日本海洋技术研究所采用 Janus-Hammer Bell 换能器实现水下超远距离实验。日本海洋技术研究所实验的通信距离达到 1000km, 通

信速率为 100bps^[60]。此外，中科院声学所研制出采用相干水声通信技术的潜标数据实时回传通信系统。该系统的信号频带范围为 9kHz-15kHz，通信速率可达 6kbit/s，并在 1000m 的水深处工作了 252 天。

随着通信网络技术的不断发展，新兴技术的涌现为海底观测网的建设提供了坚实的技术基础。未来，为进一步提升海底观测网络的传输性能与可靠性，亟需探索如何合理集成多种通信技术，以适应复杂的水下环境。

1.3 研究内容及安排

本研究通过分析海底观测网络的通信技术与分布架构，综合采用卫星通信、光电复合缆通信和水声通信，设计了三种适应不同传输环境与需求的异构级联数据链路，并提出了一种远程可控的异构级联组网方案。同时，构建了多个功能不同、适应多种需求、适用于不同环境的网络节点。为适应不同数据传输的需求，本课题设计满足不同传输需求的，统一标准化的数据链路数据帧结构与数据交互协议，并进一步提出面向卫星和水声链路的时变信道传输策略、面向光电复合缆链路的动态切换机制以及面向大数据传输的断续传输机制，从而确保数据在复杂环境下的高效稳定传输。

本文共分为六章，论文的具体结构内容如下所示：

第一章：绪论。首先给出了本课题的研究背景，引出海底观测局域网的概念，指出海底观测局域网在海洋观测领域的优势。然后介绍了海底观测网络国内外研究现状，以及多种网络通信技术的分类和研究现状。最后明确了课题研究的理论价值与实践意义，并提出了具体的研究目标。

第二章：异构级联海底观测网模型分析。首先对海底观测网络通信技术进行分析，选择并介绍了卫星、光电复合缆和水声通信技术的理论、特性和可行性。然后对海底观测网络的布局 and 结构进行分析对比，探究了网络布局和架构的典型样式和理论特性。最后介绍了利用卫星、光电复合缆和水声通信技术实现异构级联组网的方案。

第三章：海底观测局域网系统设计。首先在前文研究分析的基础上，介绍了海底观测局域网系统的网络结构方案和网络节点分类。然后详细描述了每种网络节点的硬件平台与功能软件。最后还介绍了异构网络系统周期式的供电方案及多节点同步唤醒机制等工作与控制策略。

第四章：异构级联海底观测局域网数据传输机制。首先详细介绍了异构级联海底观测局域网的数据链路连接方案。然后介绍了满足不同传输需求的基础帧结构设计方案。接着在基础帧结构的基础上，介绍了适应不同传输需求的数据交互协议流程，并针对其中的大数据传输需求提出了断续传输机制解决方案。最后针对传输链路的特性，提出两种数据传输机制旨在提升链路传输的可靠性与质量：一是应对水声和卫星链路复杂性和不可靠性的时变信道传输策略，二是应对光电复合缆链路可能面临潜在故障问题的动态切换机制。

第五章：系统测试与验证。首先对该异构级联网络进行了系统性的测试，包括结构功能、数据链路性能指标、数据传输机制及综合性能，以验证方案的可行性与有效性。然后介绍了将该异构级联网络于西太平洋海域开展实际应用实验的过程，通过存储的数据证明了该异构级联网络的有效性。

第六章：总结与展望。首先对全文工作进行总结分析。然后指出本课题所存在的不足和问题，并提出具有针对性的改进办法。最后对未来研究工作进行展望。

2 异构级联海底观测网模型分析

部署于远离陆地的海底观测网络系统可自主完成分布式区域信息的本地采集与存储，并通过“海-空-岸”异构网络远程传输数据至岸基，供科研人员存储与分析。同时，科研人员可在岸基远程访问与控制观测设备，以适应复杂环境监测需求，并支持多样化的应用实验数据采集与分析。然而，连接“海-空-岸”的网络架构需结合多种通信技术级联构成，具体架构需依据实际需求优化。因此，除了研究与分析不同的网络通信技术，还需对比不同的网络布局方案与架构设计，以提升数据传输的稳定性与适应性。

2.1 海底观测网络通信需求分析

通信技术的相关特性，如传输延时、传输服务质量、传输带宽和传输距离等会影响通信网络的可靠性和稳定性。因此，根据局部区域的通信实际需求选取合适的通信技术至关重要^[61]。网络通信技术分为有线传输和无线传输两种传输方式。有线传输方式的传输介质为电磁波，具有信道带宽和稳定性高的特点。电磁波可沿着包含同轴电缆、光纤和双绞线在内的固态介质传输。无线传输方式通常运用于移动设备或不便于有线连接设备之间的通信，以避免传统线缆部署的麻烦^[62]。

经过通信技术多年的发展，现代有线通信技术的应用主要依靠由电线和光线组成的通信电路进行工作，实现数据的传输^[63]。现代有线通信技术涵盖许多领域，具有抗干扰强、稳定性好、传输带宽高和传输能量等特点^[64]。目前，在海洋观测领域的有线通信方式主要有基于电话线、双绞线、同轴电缆和光纤等的通信技术方式。其特性如表 2.1 所示。

表 2.1 有线通信技术特性

名称	通信距离	通信速率	抗电磁干扰能力	维护成本
电话线	~kbps	10-100Mbps	差	低
双绞线	~Mbps	1-10Gbps	较好	中等
同轴电缆	~Gbps	10M-100Gbps	较好	中等
光纤	Gbps~Tbps	1Gbps-1Tbps	极好	低

无线通信技术依赖电磁波在自由空间中的传播特性实现数据传输^[65]。该技术具有成本低、部署简便、灵活性强、可扩展性高等特点。在海洋观测领域，根据应用需求，无线通信技术可分为海上无线通信技术和水下无线通信技术。

海上通信技术主要包括微波技术、卫星通信技术、公共移动网络通信技术（3G/4G/5G）、2.4G 通信技术、蓝牙、Wi-Fi、Zigbee 等。水下无线通信的方式主要有水下声通信、水下电磁波通信以及水下光通信等^[66]。以上无线通信技术特性如表 2.2 所示。

表 2.2 无线通信技术特性

通信方式	名称	通信距离	通信速率	设备费用	网络流量费用
水上通信	微波通信	40-60km	4Mbps	高	无
	卫星通信	覆盖地球半球	384kbps	高	高
	移动网络	35km	2-20Mbps	较高	较高
	2.4G 通信	10-50m	2Mbps	低	无
	蓝牙	10-100m	1Mbps	低	无
	Wi-Fi	100m	2Mbps	低	无
	Zigbee	50m	250kbps	低	无
水下通信	水下声通信	1-10km	2kbps	较高	无
	水下电磁波通信	10m	2Mbps	低	无
	水下光通信	10-100m	2Gbps	低	无

为解决海底观测网络中“海底-海面-岸基”的多层次远距离传输难题和保证网络架构通信过程中的稳定性与可靠性，在构建海底观测异构网络架构时，结合通信网络技术的特点，以海面为分界点，将网络架构划分为空中传输网络与水下传输网络两部分。

(1) 空中传输网络

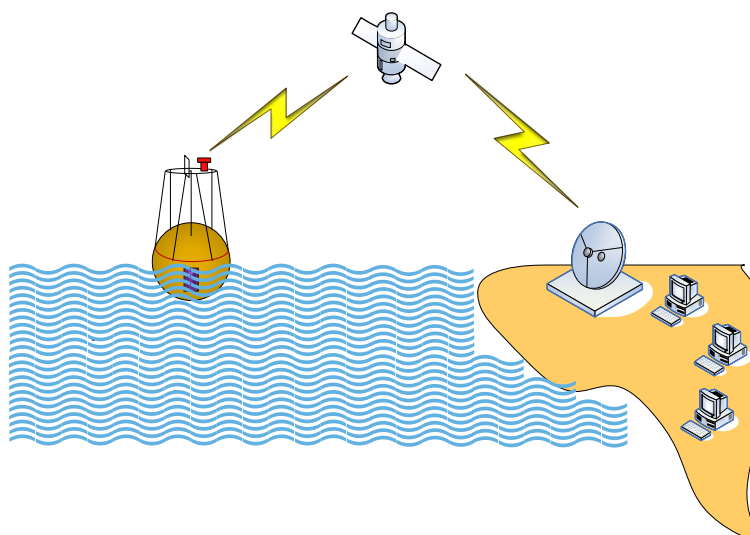


图 2.1 卫星通信技术作为空中传输网络的关键部分

由于海上环境复杂，有线传输设施的搭建难度大且成本高，因此可选用远距离无线通信技术，主要包括微波通信和卫星通信。微波通信虽可实现长距离传输，但在接收海面信号时，

其最大传输距离受限，且需额外建设固定基站，限制了其在远距离海洋观测中的应用。相比之下，卫星通信仅需天线连接卫星即可实现联网，覆盖范围可达地球半球，可作为空中传输的关键部分（如图 2.1 所示）。

（2）水下载传输网络

由于风浪对海面下设备的影响较小，因此水下数据通信可采用有线传输方式。然而，随着海洋深度的增加，缆线材料的耐压性、浮力控制及耐腐蚀性要求提高，进而增加建设成本。浮标通过有线方式连接水下中继节点，其中光纤凭借高带宽特性，可作为水下载传输网络的主干信道，而双绞线调制信号传输可作为辅助信道，增强系统的鲁棒性和抗干扰能力。水声通信因其大信道夹角、布放便捷、远距离传输能力及低成本等优势，可用于中继节点与海底节点的远程通信。如图 2.2 所示，水下载传输网络可集成光电复合有线传输与水声通信无线传输，实现不同环境下的高效数据传输。

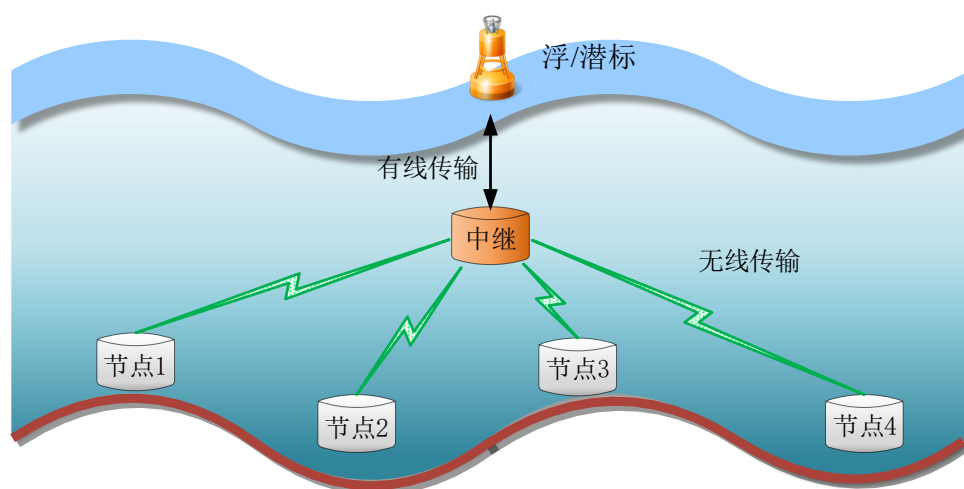


图 2.2 水下载传输网络组成

2.2 海底观测网络通信技术和模型

通过对海底观测系统网络架构的实际应用场景与功能需求进行分析，发现在实现远距离信号传输的基础上，亟待增强信道传输的鲁棒性能与稳定特性，从而提升数据传送的可靠性及成功率。运用多级异构级联的网络拓扑结构，充分发挥各类通信技术在特定海域环境中的优势特性。

2.2.1 水声通信信道模型

水声通信技术利用声波在水中传播的特性进行远距离数据传输^[67]。水声通信信道是发射和接收器之间的无线传输环境，受环境影响较大，情况复杂，具有信号衰减大、可用信号带宽窄、环境噪声影响大、多普勒效应严重等情况^[68]。

水声通信的传播损失尤为严重，这是由海水对于声波吸收和环境噪声共同作用的结果。海水是不均匀的介质，声波在传播过程中强度会随着距离的增加而逐渐衰减^[69]。水下声波传输中，采用传播损失（Transmission Loss, TL）参数对声波传播的衰减进行描述。声波的传播损失是扩展损失与吸收损失的和^[70]，即

$$TL = 10n \lg(10^3 r) + r\alpha(f) \quad (2.1)$$

式中， $10n \lg(10^3 r)$ 为扩展损失函数，其中， n 为常数， r 为传播距离，单位为 km ； $r\alpha(f)$ 为吸收损失函数，其中， $\alpha(f)$ 为海水的声吸收系数，单位为 dB/km ， f 为声波频率，单位为 kHz 。吸收损失等于海水的声吸收系数与传播距离的乘积，其中海水的声吸收系数 $\alpha(f)$ 可通过 Thorp^[71]给出的经验公式进行计算得到

$$\alpha(f) = \frac{0.109f^2}{1+f^2} + \frac{40.7f^2}{4100+f^2} + 3.01 \times 10^{-4} f^2 \quad (2.2)$$

如图 2.3 所示，（a）和（b）分别展示了由式（2.2）计算得到的海水吸收系数 $\alpha(f)$ 和声波的传播损失 TL 随频率的变化曲线。（a）显示海水吸收系数随声波的频率增加而增大。（b）在式（2.2）计算时令 $n=1.5$ （适用于海洋声传播），曲线结果显示了当传播距离固定时，传播损失随频率增大而增大；当声波频率固定时，传播损失随距离增加而快速增大。

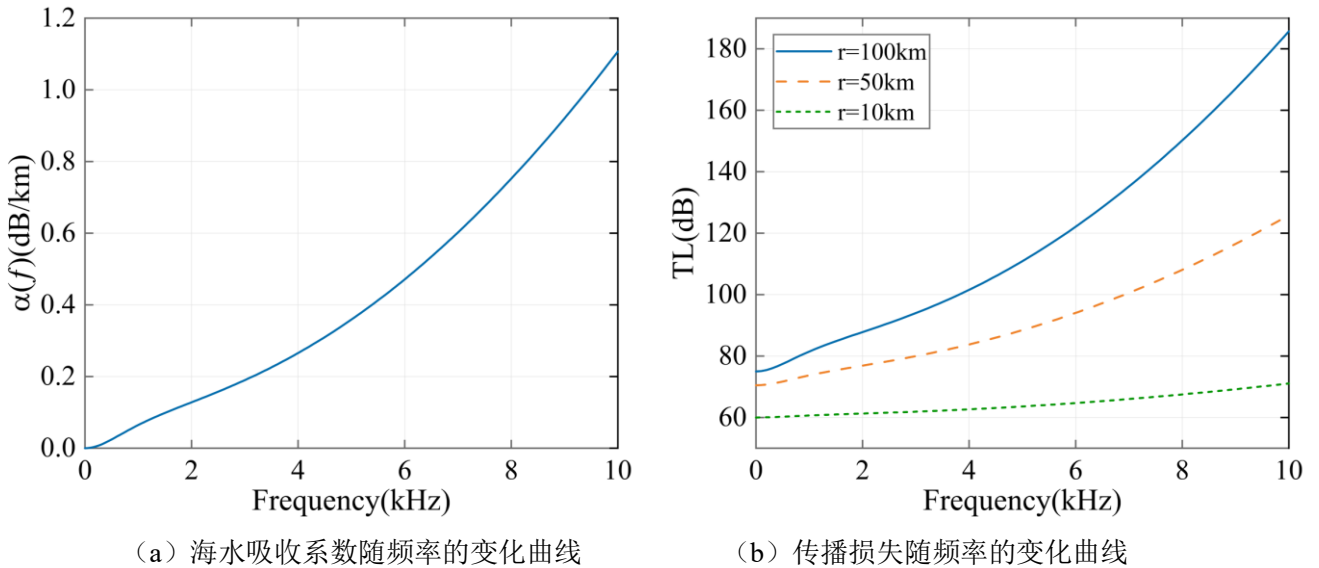


图 2.3 海水吸收系数和传播损失随频率的变化曲线

在理解水声通信信道的基础上可知，在考虑传输距离、传输带宽和传输频率等因素的情况下，使用水声通信技术可以实现水下远距离无线传输，作为搭建水下载传输网络的一部分。

2.2.2 光电复合缆通信技术

光电复合缆作为通信接入网的新型传输媒介，通过光纤与电线双通道实现光、电信号同步传输，具有体积小、带宽大、兼容性强等优势^[72]。该技术在海洋观测等领域得到广泛应用，

通信方式主要包括光纤通信与电线传输两类，其中双绞线通信技术因优异性能成为主流电线传输方案^[73]。

(1) 光纤通信技术

在当前网络系统主干网络应用中，光纤（optic fiber）因高传输速率、长距传输能力、低信号衰减及抗电磁干扰，成为高速稳定数据传输的关键介质。它是光纤通信核心媒介，由核心与包层构成，核心一般为高纯度石英玻璃，用于传输光信号，包层环绕核心，能保护与反射光信号，保障信号长距传输^[74]。光纤分单模与多模，单模多用于高传输速率、长距离场景，耗散小；多模适用于传输速率要求不高、短距离场景，耗散大。

光纤通信系统以激光器或 LED 为光源，经调制后通过光纤传输，接收端采用光电转换及信号处理技术确保信息完整性。性能提升主要依赖掺铒光纤放大器延长传输距离，以及波分复用技术提高传输容量。为保障传输可靠性，前向错误校正（FEC）技术通过添加校验信息实现纠错功能。

信号在光纤中传输时会不可避免地受到光纤链路中的线性和非线性损伤，这些损伤相互交织，会对信号质量造成非常严重与复杂的影响。这些信号受到的损伤主要包括：光纤损耗、光纤色散以及光纤非线性效应。

光纤损耗是指光信号的功率随着传输距离的增加而逐渐衰减的现象。通常光纤信号的衰减模型可以表示为指数衰减^[75]，如下所示：

$$P_{out}(z) = P_{in}(0) \cdot e^{-\alpha z} \quad (2.3)$$

式中， $P_{out}(z)$ 是信号在距离 z 处的输出功率； z 是传输距离； $P_{in}(0)$ 是输入信号功率； α 是光纤的衰减系数，单位为 dB/km。

光纤传输过程中的色散效应会导致不同频率分量和模式的光信号以不同的速度传播，从而出现非同步到达接收端的现象。色散主要有群速度色散和偏振模色散两种类型。群速度色散会使得信号的不同频率分量具有不同的传播速度，进而引起信号的时域展宽^[76]，公式如下：

$$\Delta t = \frac{D \cdot L \cdot \Delta \lambda}{\lambda_0} \quad (2.4)$$

式中 D 是色散参数， L 是传输距离， $\Delta \lambda$ 是信号波长的变化量， λ_0 是中心波长。可见，群速度色散在长距离传输时会显著影响系统性能。

光纤非线性效应是指在较高的传输功率密度下，由于光纤的非线性介质特性，光信号通过光纤时发生的相互作用效应。如图 2.4 所示，光纤的非线性效应主要可分为两类：一类是受激非弹性散射。该类效应涉及入射光和传输介质之间的能量传递，可被进一步细分为受激布里渊散射和受激拉曼散射；另一类则是克尔效应。该类效应表明光纤折射率随光强变化而变化，并包括自相位调制、交叉相位调制和四波混频^[77]。

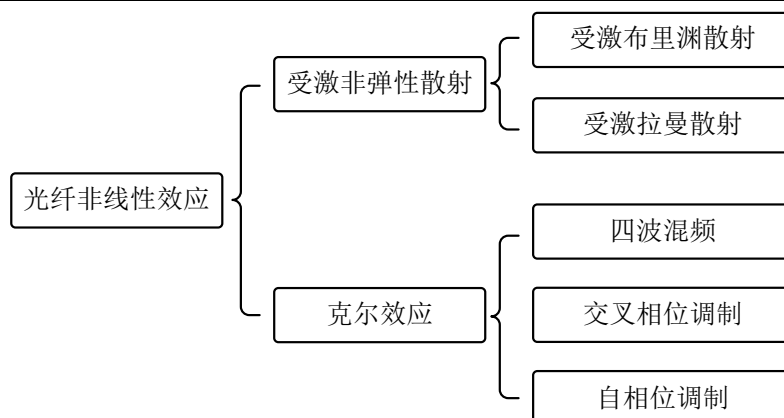


图 2.4 光纤非线性效应

(2) 双绞线通信技术

双绞线（twisted pair cable）是一种由两条电导线相互缠绕交织在一起的传输介质，被广泛应用在以太网和电话网中^[78]。如图 2.5 所示，基于双绞线的全双工通信系统利用双绞线及其两端的混合电路实现同一信道上的发送和接收。混合电路负责对信号进行滤波处理，从而实现同时同频的全双工通信。

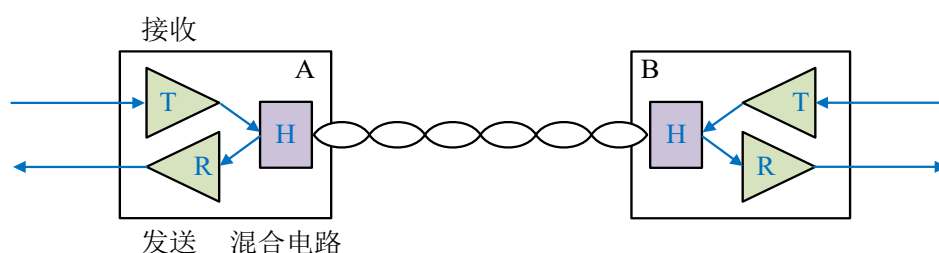


图 2.5 相交线全双工通信系统

双绞线传输信道模型通常通过分布参数模型进行描述，该模型分析了电线的电阻、电感、电容和电导等因素。上述参数决定了包括信号衰减、延迟和失真在内的传输特性。由于信号在双绞线中的传播是基于电场和磁场的相互作用，因此随着信号频率的增加，上述参数的影响会更加显著，导致高频信号的衰减更加严重。

双绞线作为常见传输介质，广泛应用于电话线和 CAT 线缆等领域。为提升电话线的数据传输能力，开发了数字用户线路（Digital Subscriber Line, DSL）技术，通过调制解调器实现数字化通信。随着互联网流量的指数级增长，传统 DSL 技术逐渐暴露出带宽受限、远距离传输性能下降等瓶颈。为应对这一挑战，自 20 世纪 80 年代起，xDSL 系列技术应运而生，为宽带通信提供了更优解决方案。

其中以太网数字用户线路（Ethernet Digital Subscriber Line, EDSL）是一种基于以太网连接技术发展的通信技术。EDSL 适用于局域网、城域网的汇聚层等场景。目前，EDSL 支持多种以太网标准，最广泛使用的标准包括 10BASE-T、100BASE-T 和 1000BASE-T，速率分

别为 10Mbit/s、100Mbit/s 和 1Gbit/s。EDSL 使用不同速率的终端设备的情况下，也能通过自适应方式实现传输匹配。

2.2.3 卫星通信技术

卫星通信技术是一种利用卫星实现地面站之间、地面站与用户终端之间以及地面站与网络服务端之间通信的技术。随着现代通信需求的不断增长，卫星通信在广域网络、远程通信和海洋观测领域等都得到了广泛的应用，具有抗干扰能力强、使用便捷、覆盖范围广等优点。

电磁波信号在卫星和地面端之间传播会经历自由空间、电离层、平流层和对流层等各类大气层。表 2.1 展示了在各层大气层中，对电磁波信号产生影响的传播损耗和衰减类型。

表 2.3 自由空间、电离层、平流层和对流层的传播损耗和衰减类型

大气层	传播损耗和衰减类型
自由空间 (3000km-36785km)	自由空间的路径损耗 (Free Space Path Loss, FSPL)
电离层 (50km-3000km)	电离层闪烁 路径损耗 (Path Loss, PL)
平流层和对流层 (0km-50km)	对流层闪烁
	云雾、降雨、大气衰落
	路径损耗
	多普勒频移
	多径效应

卫星电磁波信号传输的路径极长，其中在自由空间进行传输的路径长度占总传输路径长度的 95% 以上^[79]。自由空间的路径损耗 (*FSPL*) 定义式如下：

$$FSPL = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi df}{c} \right) \quad (2.5)$$

式中 *FSPL* 是传播损耗，*d* 是传播距离，*f* 是信号频率，*c* 是光速。当引入环境影响后，传输信道模型会有所变化。文献^[80]采用确定性信道模型对确定的传播环境进行描述，模型精确但仅适用于确定场景，通用性低，无法描述物理信道的传播特性。在随机性信道模型^[81]方面，Suzuki 模型^[82]、Loo 模型^[83]和 Lutz 模型^[84]等具有较高的通用性，在一定程度上为卫星通信提供了理论依据。

针对现代卫星通信系统所面临的信号衰减、多径效应及大气层干扰等技术挑战，研究领域普遍采用多维度的信号处理与抗干扰解决方案。通过引入纠错编码机制、数字调制技术以及频域/时域复用等处理方法，提升系统的传输可靠性及频谱利用效率。

2.3 海底观测网络布局架构分析

海底观测网络的布局关系着网络节点、传感器及数据采集设备的分布，影响观测的覆盖范围和数据的采集精度。海底观测网络的架构设计关系着不同位置设备和节点的有效连接以及数据传输过程中的实时性和可靠性。合理的海底观测网络布局与架构可提升网络的稳定性和可靠性，保障网络能在深海复杂环境下持续可靠的运行。

如表 2.4 所示为相关典型观测网的布局简述和特点。观测网络的布局设计面临着许多技术挑战：单节点观测受限于覆盖范围和数据获取难度；声学观测网受制于带宽限制；嵌缆式观测网虽具备高效传输能力，但部署复杂且成本高；缆线直连式网络则面临观测范围有限及扩展性不足的问题。

表 2.4 相关观测网的布局比较

观测网	布局简述	特点
原位海底观测基站系统 ^[85]	该系统通过单节点形式采集海底信息，连接多传感器，经串行接口将数据传至存储模块。	集成度高，但是数据回收困难。
声学无线物联网 ^[86]	该网络以声学通信为核心，通过声学设备无线互联。数据经水下声学链路传输至水面浮标。	无线节点部署灵活，但带宽低，数据回收困难。
嵌缆式海底观测系统 ^[87]	该网络通过一根海底光电缆线将多个观测节点与岸基连接，实现数据传输和供电。	缆线实现高效观测，但部署困难、范围受限且成本高。
海底观测网实时监控系统 ^[88]	采用海底光电缆线连接岸基站与水下设备，提供高压直流供电和高速数据传输。	缆线直连适合长期观测，但成本高、灵活性受限。
基于浮标的缆线海底观测系统 ^[89]	浮标与海底节点通过电缆相连，实现供能与通信，通过通信模块将观测数据上传至云端。	适用于浅海，但仅有单个观测节点，观测范围有限。

根据上述挑战，海底观测网络的优化设计应侧重提升节点部署的灵活性、增强网络扩展性、优化数据传输方式、提高传输效率，并扩大观测覆盖范围，同时有效控制建设成本，以全面提升观测网络性能。

局域网架构设计的核心在于网络拓扑结构的规划，网络拓扑结构指的是各节点之间的连接关系。常见的拓扑结构包括总线拓扑、星型拓扑、环形拓扑和网状拓扑等^[90]。

(1) 总线拓扑

如图 2.6 (a) 所示，总线拓扑以单一传输线为总线介质，各节点通过接口直连总线，总线上节点之间可相互通信。总线拓扑优势为结构简洁、实现便捷、扩展性强及可靠性佳，节点接入与脱离对网络影响较小。总线拓扑劣势为数据传输时，节点的等待时间不稳定，适用于对传输效率要求不高或网络负载较轻的场景。

(2) 星型拓扑

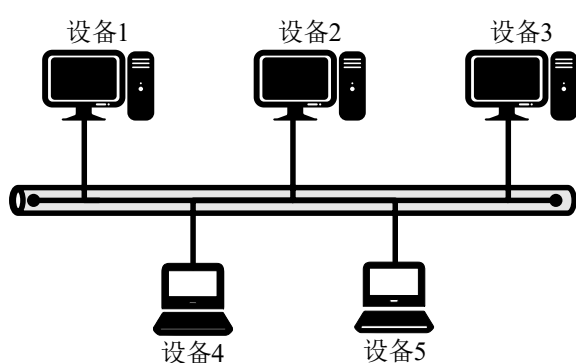
如图 2.6 (b) 所示, 星型拓扑以中央节点(集线器)为核心, 通过点对点线路与各节点相连, 形成辐射状网络架构。星型拓扑优势为: 中央节点便于网络管理和配置; 单节点故障仅影响局部; 各连接仅涉及中央节点与单一节点。然而, 一旦中央节点出现问题将会影响整个网络的运行。

(3) 环形拓扑

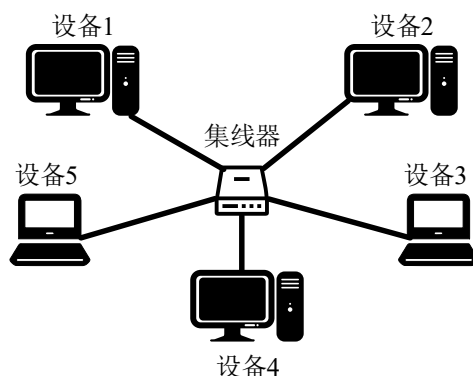
如图 2.6 (c) 所示, 环型拓扑结构由节点构成环形的封闭回路。在环型拓扑结构中, 信息采用单向传输方式。环型拓扑结构的优势在于高速运行和简单结构, 但是单节点发生故障会对全网造成影响。

(4) 网状拓扑

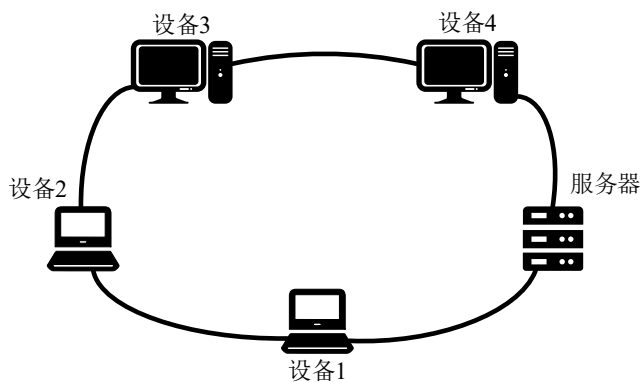
如图 2.6 (d) 所示, 网状拓扑通过点对点链路实现设备互连。该结构复杂但容错性强, 成本较高, 多用于骨干网络部分的互联方式。但是为节约成本, 实际应用中仅在重要节点处采用网状拓扑结构进行互联。



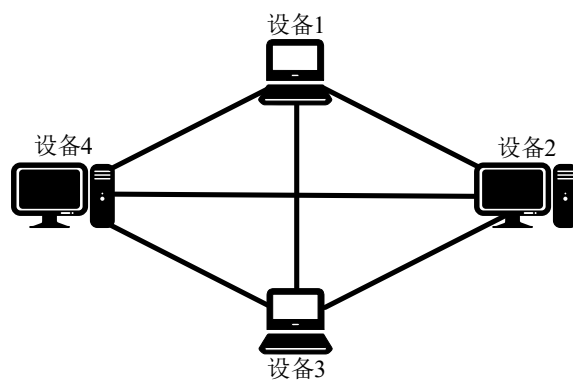
(a) 总线拓扑



(b) 星型拓扑



(c) 环形拓扑



(d) 网状拓扑

图 2.6 局域网典型拓扑结构

综上所述, 海底观测网络的架构形式可采用总线-星型拓扑结构, 同时结合异构级联技术以适应不同的传输环境。总线-星型网络的优点在于保证高速互联的同时提高网络的拓展性和灵活性。该架构形式综合了总线-星型拓扑结构的物理布局和异构级联技术的逻辑通信。

2.4 受控海底观测异构级联网络

构建稳定可靠的受控海底观测局域网络通信系统，首先需要通信链路能够完成“海-空-岸”之间长距离的通信连接，即远程通信信道建立。然后，通信系统还需承担远程控制指令发送、多级网络之间数据交互、多媒体信息数据传输等功能。

根据上述要求，“海-空-岸”之间的网络布局应由多个通信节点和多种网络通信进行异构级联组成。其中的网络节点应该包含岸基、浮标节点、中继节点和分布式底层观测节点。基于异构级联的远程控制海底观测局域网模型如图 2.7 所示。

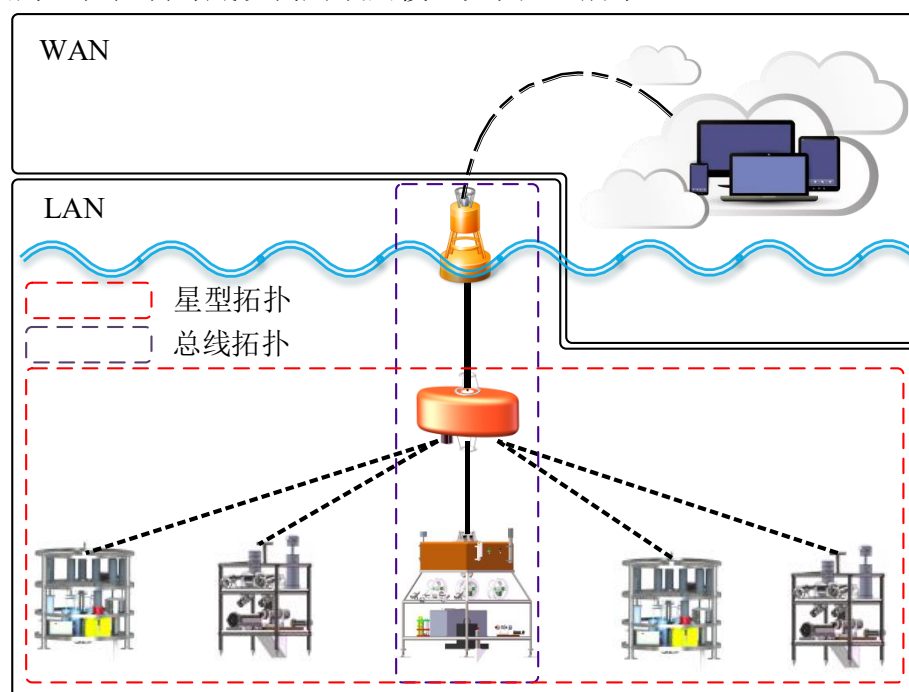


图 2.7 异构级联海底观测局域网模型

基于异构级联的远程控制海底观测局域网解决方案如下所示：

（1）采用卫星通信技术设计了海面浮标节点与岸基进行数据传输的空中传输网络。通过卫星通信技术将卫星链路连接到海面浮标节点，实现水下传输网络与空中传输网络的交汇。

（2）水下传输网络主要由光电复合缆通信技术和水声通信技术级联搭建。由海面浮标节点到海洋中间区域的中继节点之间采用光电复合缆通信技术，实现浮标节点与中继节点信号高速传输。为考虑灵活搭建网络和降低构建成本，部署在海底的分布式底层观测节点大部分采用水声通信技术实现与中继节点的通信。

（3）由于水下节点需在固定位置进行观测和数据传输，故采用质量较大的底层节点与中继节点物理连接，使得“浮标节点-中继节点-底层节点”结构锚定于海底。因此，中继节点与底层节点仍然采用光电复合缆连接。底层节点作为锚点稳定上方的浮标节点和中继节点，同时实现可靠的高速通信功能。

(4) 200m~1000m 的温跃层（垂直温度梯度较高的区域^[91]）使垂直水声通信产生极大的折射和衰减影响。因此，将浮标节点与中继节点之间的连接距离设计为大于 1000m 以实现水声通信网络处于温跃层之下，从而保证水声通信的稳定性。

(5) 采用总线-星型网络架构搭建网络拓扑结构。浮标节点、中继节点和底层主观测节点之间为总线拓扑；中继节点与分布式观测节点之间为星型拓扑，中继节点为星型拓扑的中央设备，从而保证总线拓扑结构上的节点互通又实现星型拓扑结构上的资源的统一管控和灵活接入和扩展。

通过以上异构级联网络设计，可将海空进行网络拓扑连接，实现“卫星-光电复合缆-水声”通信的异构连接。该异构网络垂直结构上的“光电复合缆-水声”通信网络连接方式可实现 6000m 水深的观测任务。同时，观测节点采用扩展性强、部署灵活的水声通信网络连接，实现大范围的海底观测覆盖。

部署在远海的海底观测局域网从浮标节点通过卫星通信链路接入部署在广域网（WAN）的岸基云存储平台，实现数据的传输与处理，从而实现对海洋环境的有效观测与分析。

2.5 本章小结

本章系统阐述了海底观测网络通信技术与分布架构的分析对比，并提出了异构级联海底观测局域网模型的设计方案。首先，分析了海底观测网络的通信技术，探讨了相关技术的理论基础、特性及其适用场景。随后，对海底观测网络的布局与架构进行了对比分析，归纳了典型布局方式及其理论特性。最后，提出了一种基于异构级联通信技术的远程控制海底观测网络模型，并阐述了其构建方案。

3 海底观测局域网系统设计

前文分析了异构级联海底观测网络的通信需求与架构布局，并提出了总线-星型网络拓扑结构与异构级联技术相结合的构建方案。在此基础上，本章将围绕基于异构级联通信技术的远程控制海底观测网络模型，对海底观测局域网系统进行深入设计，并提出相应的网络节点软硬件设计方案。

3.1 总体网络结构概述

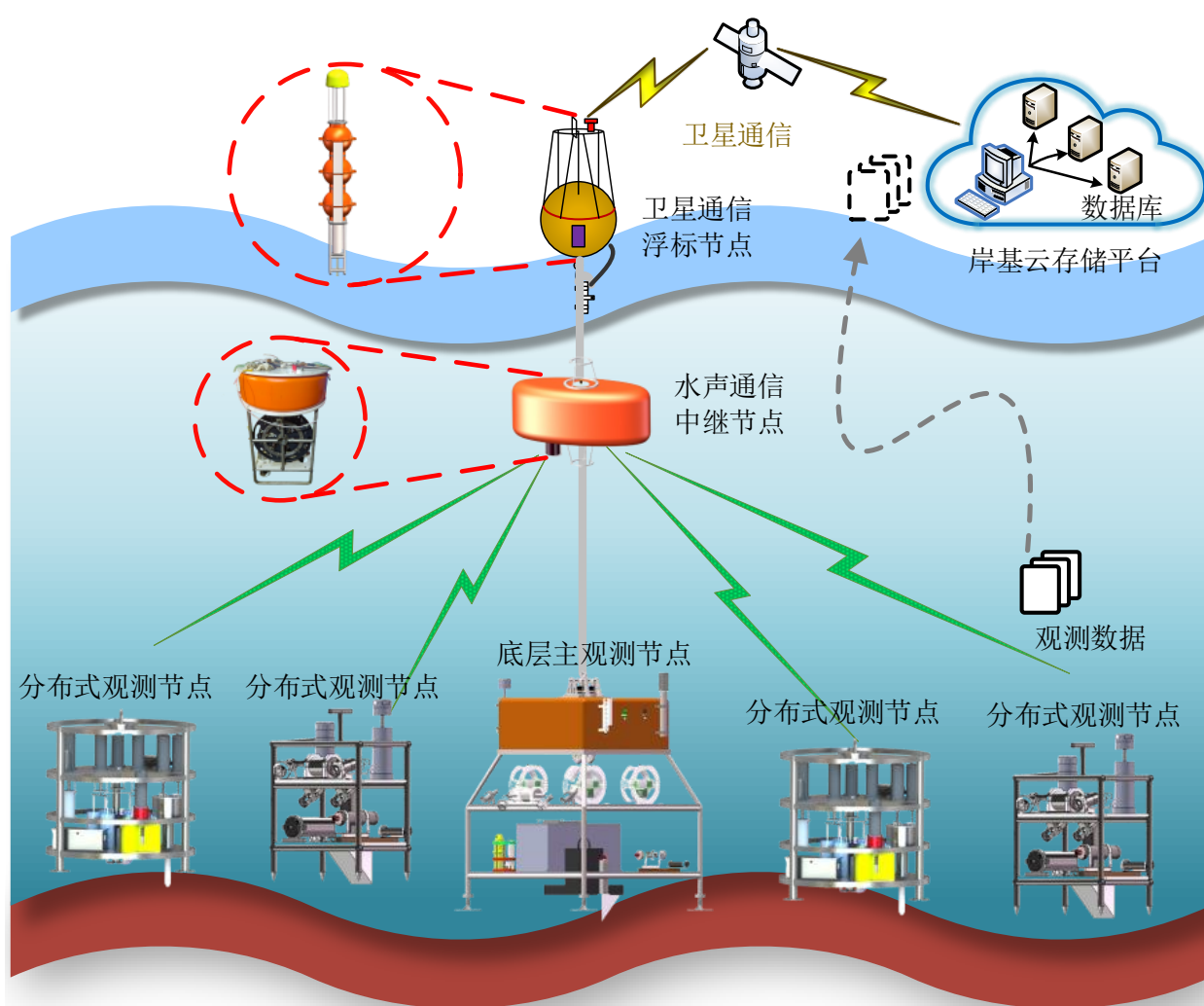


图 3.1 基于异构级联的远程控制海底观测局域网结构图

本课题目标是构建一个满足海底观测和远程控制需求，并且通信范围覆盖“海底-海面-岸基”的异构级联通信网络。该异构级联网络具有如下功能：（1）对海底水文要素、环境状

态和海底微生物分布等数据进行长期有效的观测。(2) 实现数据本地采集和存储, 通过远程通信将数据上传至岸基, 同时通过异构级联通信信道反向下发指令, 远程控制观测节点的采样策略。(3) 针对数据传输链路的特性, 采用对应的数据传输策略进行数据的动态分包和传输, 从而提高数据传输的效率和可靠性, 提升异构级联网络的传输性能, 保证异构级联网络有效性。

根据以上需求和实际应用考虑, 本文采用“卫星通信-光电复合缆通信-水声通信”三种异构通信技术在特定节点交汇级联的方式, 构建如图 3.1 所示的基于异构级联的远程控制海底观测局域网。该网络可部署在远离陆地的深海中, 垂直观测深度可达 6000m。

该网络由多个节点构成, 可分为汇聚节点和观测节点两类。汇聚节点有 2 个, 分别为卫星通信浮标节点和水声通信中继节点。观测节点包含 1 个底层主观测节点和多个分布式观测节点 2 类。节点的具体分类如表 3.1 所示。

表 3.1 网络节点分类

节点类型	节点名称	数量	位置	主要作用
汇聚节点	浮标节点	1	海面	数据转发, 连接公网
	中继节点	1	海洋中间	数据汇聚转发
观测节点	底层主观测节点	1	海底	海底观测
	分布式观测节点	>1	海底	海底观测

观测节点中的分布式观测节点采用无线水声通信技术与汇聚节点的中继节点相“连接”, 因此可方便灵活布放在海底区域, 实现大范围海底观测。另一方面, 因存在将主体结构“浮标节点-中继节点-底层主观测节点”固定在海底的需求, 所以观测节点中的底层主观测节点需要通过光电复合缆与中继节点进行实际连接, 从而实现将网络主体结构锚定以及主体链路高速稳定通信。观测节点搭载各种分析仪器和海底观测相机, 具备深海近底层颗粒物监测、水文成分状态监测及底栖生物图像分析测量等功能, 解决深海底层细粒度近距离原位资料匮乏的问题, 最终实现海洋环境特征的高分辨率图像采集、上传、存储和展示。

汇聚节点位于海洋区域的上层部分, 具有数据汇聚、保存和传输的功能。为了最大程度保证水声通信信道免受温跃层^[92]的影响, 汇聚节点中的中继节点部署于浮标节点下方 2000m 处的水深, 他们之间由光电复合缆相连。中继节点作为观测数据第一个途经点, 通过光电复合缆和水声通信技术与部署在海底的观测节点通信, 同时承担临时数据汇聚存储、时变信道监测、动态数据传输策略等任务, 保证数据可靠传输, 实现局部区域网络互联与远程控制。卫星通信浮标节点作为海底观测局域网与岸基云存储平台连接的关键桥梁, 核心职责为执行数据转发工作, 并实现与广域网的有效连接。具体而言, 浮标节点一方面借助卫星通信技术, 实现与岸基云存储平台的通信链路搭建; 另一方面, 凭借光电复合缆通信技术, 与中继节点构建起通信连接关系。

岸基云存储平台作为汇聚节点中总体数据上传的终点，通过卫星链路接收到浮标节点发来的数据解析整合后进行分类存储和显示。同时，岸基云存储平台还能通过该异构级联通信网络传输远程反向控制指令给浮标节点，再由网络路由至对应的观测节点，实现观测功能与观测策略的远程调整。

3.2 观测节点设计

观测节点处于本文所述异构级联网络空间的下层结构，包含底层主观测节点和分布式观测节点，是异构级联网络的主要部分，负责远程海底的数据获取和观测。本节将详细介绍各个观测节点的硬件电路设计，结构设计和软件结构设计。

3.2.1 底层主观测节点设计

本课题设计了可以多数据采集的底层主观测节点，配置多类型传感器监测系统实现底层环境的多维度实时感知；内置唤醒式电源模块，实现可控时序工作和数据记录；兼容支持大容量自容存储，能够解决深海底层区域细粒度近距离原位资料匮乏的问题。

(1) 电路框架和结构设计

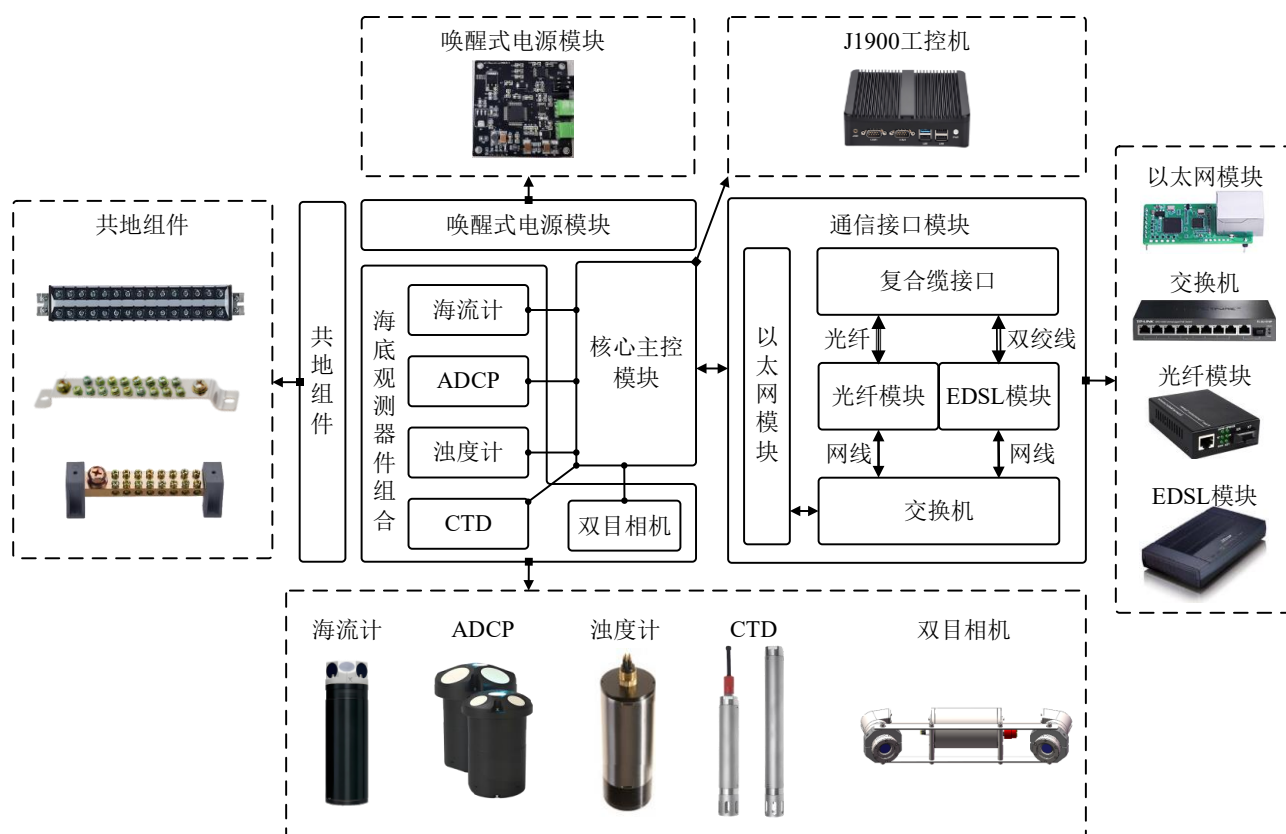


图 3.2 底层主观测节点电路框架

底层主观测节点的整体硬件电路结构如图 3.2 所示。该节点系统主要包括核心主控模块、海底观测器件组合、通信接口模块、唤醒式电源模块和共地组件，同时采用高容量密度锂电池作为节点系统的能量来源。

核心主控模块采用英特尔 J1900 处理器进行搭建。J1900 处理器具备 4GB 运行内存空间与 128GB 存储空间，配备 RS232、RS485、USB 和网口等多种通信接口，支持设备扩展和系统移植。同时，J1900 处理器采用四核四线程架构，最高主频可达 2.42GHz，可满足多传感器数据采集、处理、存储和传输的需求。

海底观测器件组合包含海流计、ADCP（声学多普勒流速剖面仪）、浊度计、CTD（温盐深剖面仪）以及双目相机。这些传感器可以在工作状态下长期连续采集包含盐度、温度、深度、电导率、海流速度、海流方向、海底图片等海底环境数据，同时通过 RS232 串行总线或 Ethernet 并行总线与核心主控模块相连，实现数据传输。海底观测器件组合中各类传感器的信息如表 3.2 所示。

表 3.2 传感器参数

器件名称	接入方式	供电电压	功能
海流计	RS232	12V	测量海水的流动速度和方向
ADCP	RS232	12V	测量水流速度和流速剖面
浊度计	RS232	12V	测量水体中悬浮物浓度
CTD	RS232	12V	测量海水电导率、温度和深度
双目相机	Ethernet	12V	拍摄双目照片

通信接口模块包含光纤模块和 EDSL（以太网数字用户线）模块。这两种通信模块一边通过光纤和双绞线接入光电复合缆接口与上方的中继节点相连，实现中继节点-底层主观测节点网络传输段的数据级联，另一边通过网线接入交换机。交换机再通过以太网模块与核心主控模块连接。通信接口模块包含器件如表 3.3 所示。

表 3.3 通信接口模块器件

器件名称	接入方式	供电电压	功能
光纤模块	光纤线	5V	建立光纤信道
EDSL 模块	双绞线	12V	建立电线通信信道
交换机	网线	5V	转发传输数据
以太网模块	网线、UART	5V	数据协议转换
光电复合缆接口	光电复合缆	-	连接光电复合缆信道

如图 3.3 所示，唤醒式电源模块包含电源控制单元和继电器单元两个关键组件，具有远程唤醒功能。唤醒控制线上的电平（唤醒触发电平为 24V）可触发继电器闭合，从而将电源和电源控制单元接通，为底层主观测节点系统供能。因此，异构级联网络上方的汇聚节点可

在唤醒控制线上输入 24V 电压从而开启底层主观测节点，从而控制数据采集时序。电源控制单元的功能是将输入电压转换为后续器件所需的电压。

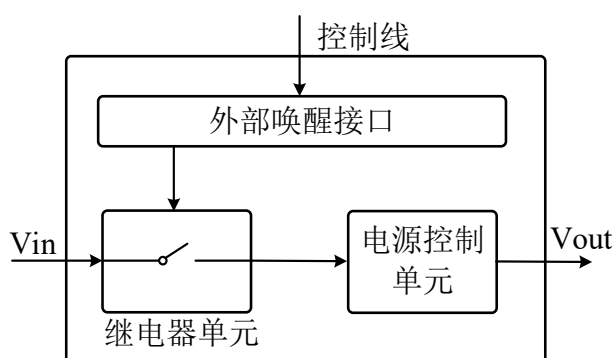


图 3.3 唤醒式电源模块

共地组件主要为唤醒式电源模块提供服务。其表现形式是将由光电复合缆连接的网络节点的信号地通过长距离缆线直接相连，实现共地，使得控制线和继电器单元能够形成回路，最终保证继电器单元的可靠触发。

底层主观测节点的结构如图 3.4 所示，整体呈梯台型，最大空间体积为 $2\text{m} \times 2\text{m} \times 2\text{m}$ ，重量为 500kg。底层主观测节点通过自身重量和通过光电复合缆连接上层汇聚节点的方式实现了锚定作用，从而保证该节点和上方相连节点的固定。

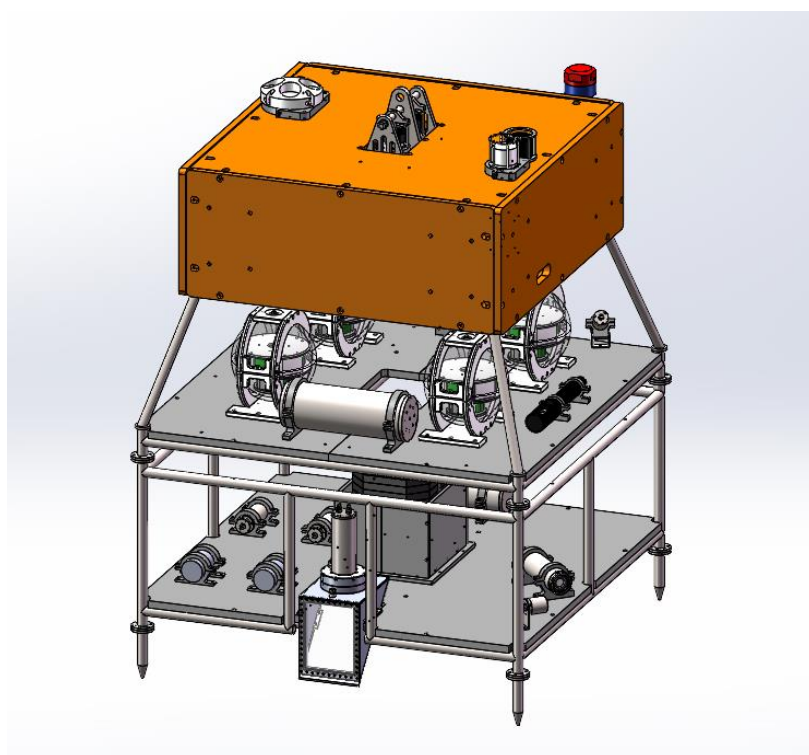


图 3.4 底层主观测节点

底层主观测节点的最上方部件为矩形浮体材料，可为整体结构提供浮力，协助节点回收。浮体材料层之下的两层平台结构可以搭载电路仓、电池仓和海底观测器件组合。电路仓装载上述的核心主控模块、通信接口模块、唤醒式电源模块和共地组件。电路仓为整体结构的中心，由电池仓通过缆线供电。电源再通过电路仓端盖上的接线孔与每个传感器仓体相连接，为每个传感器供电的同时建立通信信道。电路仓再通过如图 3.5 所示的光电复合缆通孔连接件连接到浮体材料中上方位的缆线固定器上，可与上方的汇聚节点建立连接。

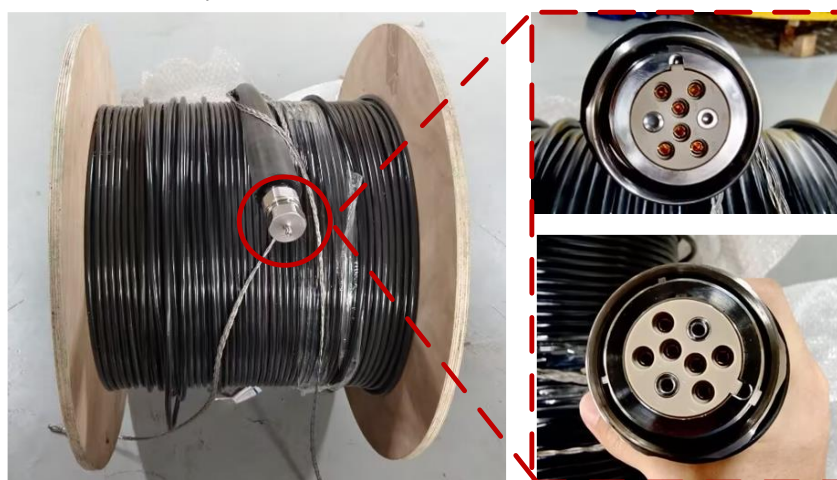


图 3.5 光电复合缆通孔连接件

节点工作在 6000m 的深海处，需要特别考虑密封仓体的密封性和耐压设计，以确保在深海高压条件下仓体不会发生渗水或遭受破坏^[93]。

在密封设计方面，采用能够承受高压的 O 型圈进行密封的同时还采用螺纹密封方式，确保仓体在高压环境下的可靠性。仓体的结构强度以及密封端盖的厚度决定着密封仓体的深海耐压能力。根据工程压力容器设计计算方式^[94]，密封仓体于深海高压工况下的仓壁厚度可根据如下公式计算：

$$S_l \geq \frac{P_{\max} \cdot D}{2[\sigma] - P_{\max}} \quad (3.1)$$

式中， S_l 为仓壁的厚度，单位为 mm； $P_{\max}$ 指的是密封仓承受的最大工作压力，单位为 Pa； $[\sigma]$ 为密封仓体材料的许用应力； D 为密封仓体内径，单位为 mm。其中，最大工作压力可由式如下液体压力公式计算，公式形式如下：

$$P = \rho g \cdot H \quad (3.2)$$

式中 ρ 为海水密度，单位为 kg/m^3 ； g 为重力加速度，单位为 m/s^2 ； H 为海水深度，单位为 m，则据上述课题要求取 6000m。最终，由式（3.2）可计算得

$$P_{\max} = 60\text{MPa} \quad (3.3)$$

在保证上述电路模块能放入电路仓的同时，还需留出减震和布放其他线路的冗余空间。由式（3.1）和式（3.3）可计算出电路仓壁厚 S_l 的最小值。

仓体端盖厚度计算主要考虑剪切力的影响，同样根据工程压力容器设计计算方式^[94]，端盖的计算如下式所示：

$$S_2 \geq d \sqrt{\frac{0.31P_{\max}}{[\sigma]}} \quad (3.4)$$

式中 d 为端盖直径，单位为 mm； $P_{\max}$ 指密封仓承受的最大工作压力，单位为 Pa。由式 (3.3) 和式 (3.4) 可计算出电路仓体端盖厚度 S_2 的最小值。

(2) 软件结构设计

底层观测节点的核心主控模块采用 J1900 处理器，同时搭载并运行 Ubuntu 22.04 操作系统。如图 3.6 所示，底层观测节点核心主控模块的软件架构采用垂直解耦的层级架构设计。该层级架构包括硬件层、硬件抽象层（HAL）、系统服务层（SSL）、核心服务层（CSL）与业务应用层（BAL），具有强内聚、低耦合和高通用性等优势，能够提升开发效率。



图 3.6 底层主观测节点软件结构

硬件层由处理器及配套硬件（RAM、ROM 和 MMU 等内存单元和 GPIO、RS232、Ethernet 和 USB 等外设接口）构成，作用是为上层软件的运行提供物理平台基础。硬件抽象层为系统服务层提供统一标准的设备驱动程序和调用接口。系统服务层实现进程调度和内存管理等服务组件，为应用层提供安全可靠的执行环境。核心服务层在操作系统之上以组件化形式搭建多个核心功能服务组件，为业务应用层的程序运行提供支撑。

业务应用层搭建在核心服务层功能模块的基础上，实现具体的业务流程和功能逻辑。底层主观测节点系统的业务应用层采用多线程方式编程，可分为节点状态控制、数据采集任务

和传输策略三部分。这三部分业务应用根据需求可分解为多个子业务线程的聚合。该节点系统的程序流程图如图 3.7 所示。

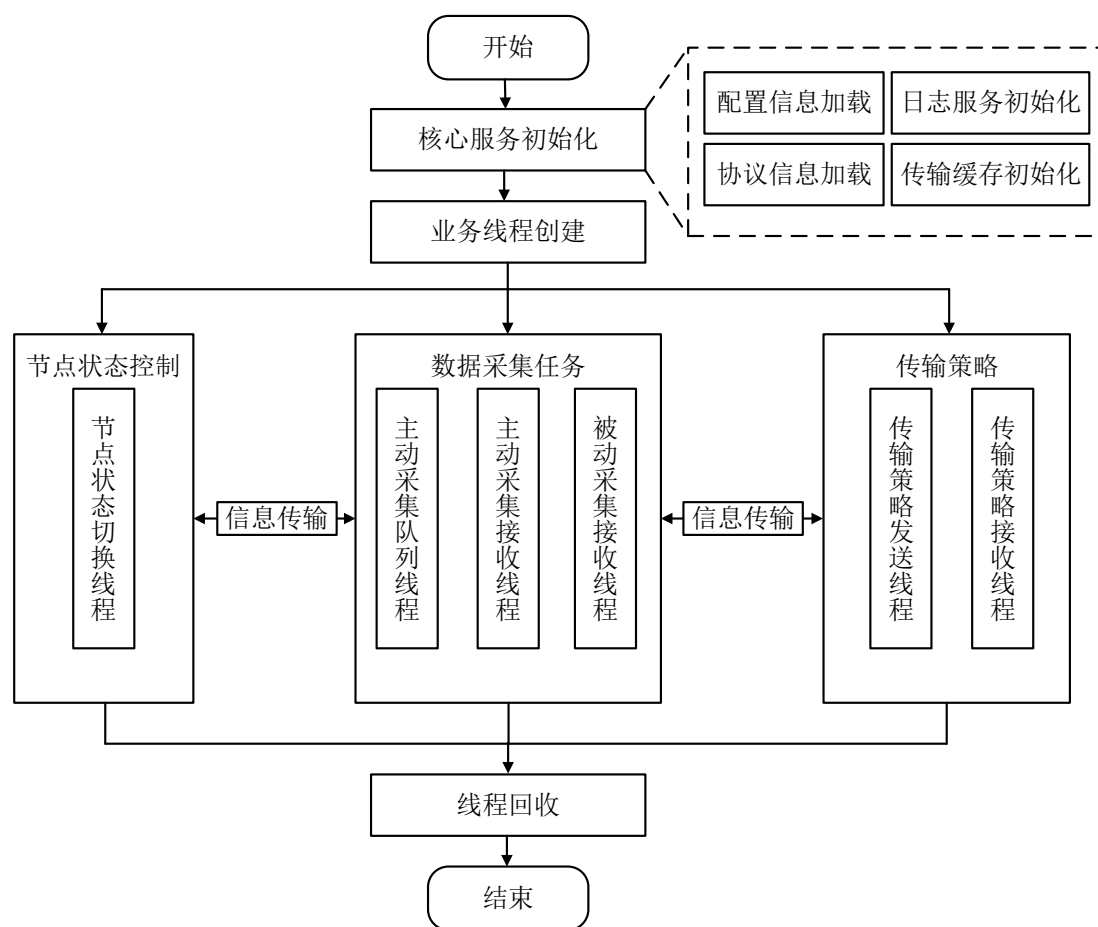


图 3.7 底层主观测节点程序流程图

节点状态控制业务采用状态机切换方式保证本节点运行的可靠性，当发生状态切换超时或者失败时，进入数据保存机制并重启节点程序。同时，状态机方式可以对当前工作状态进行标记指示，提高流程状态的清晰度，便于开发调试。如图 3.8 所示，状态图介绍如下：

- 1) 数据准备状态：初始化相关标志位、数据缓存、参数量，为程序正式运行做准备。
- 2) 端口监听状态：网口、串口等数据端口监听，根据端口进入对应的业务状态。
- 3) 传感器数据采集状态：进行传感器数据采集，可根据传感器的主动采集方式和被动采集方式进行数据采集。
- 4) 信道数据传输状态：如果网络端口侦听到数据则进入该状态。该状态负责与汇聚节点进行信道数据传输。通过解析接收到的指令分别进入数据发送状态进行数据上传或进入指令控制状态调整节点对应的参数。
- 5) 预结束状态：完成该节点所有任务或接收到结束指令，将会进入预结束状态进行日志、文件等数据的保存。

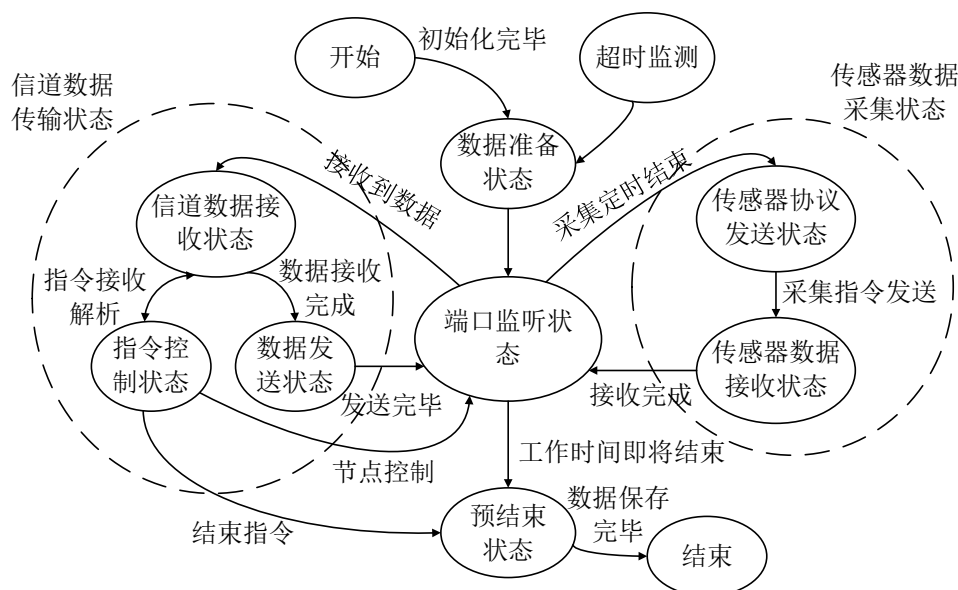


图 3.8 节点状态控制业务状态机

数据采集任务根据传感器采集方式的不同划分为主动采集和被动采集。主动采集为根据传感器协议进行问询式采集；被动采集为传感器持续性向通信接口发送数据。根据这种划分，数据采集任务划分了主动采集和被动采集两类线程。其中主动采集需历经发送和接收过程，故创建主动采集队列线程（包含发送过程）和主动采集接收线程（包含接收过程）；被动线程不需经历发送过程，则仅需一个接收线程。数据采集任务的运行流程时序如图 3.9 所示，主动采集的队列和接收线程协同配合。主动采集队列线程根据任务队列进行顺序采集，接收线程根据队列任务传感器进行对应接收，同时设置有超时计数，防止任务阻塞。被动采集接收线程则进行多端口侦听，根据端口编号或者传感器协议进行数据区分。

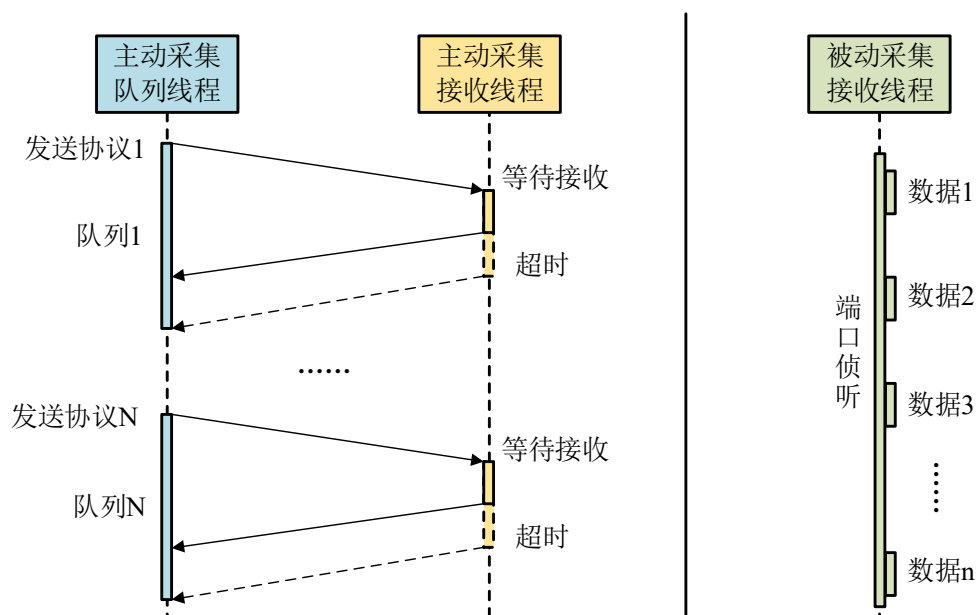


图 3.9 数据采集任务子线程流程时序

传输策略业务的子线程划分为发送和接收双线程。程序流程框图如图 3.10 所示，在程序开始后进行端口侦听，当需要传输数据时根据当前传输信道的质量进行传输策略的切换，改变相关参数，完成动态策略传输。相关更完善的传输策略在第 4 章详述。

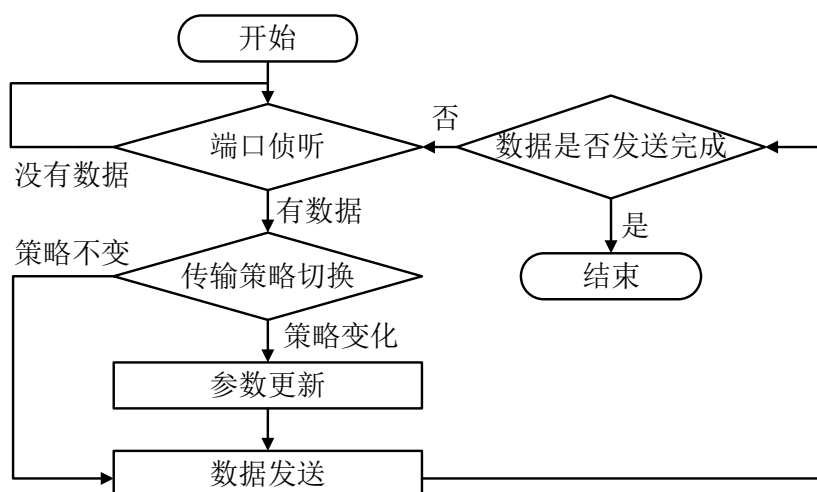


图 3.10 传输策略业务流程图

3.2.2 分布式观测节点

本课题设计了一种采用水声无线传输技术与汇聚节点进行组网的分布式观测节点。分布式观测节点的数量有多个，它们同样承担部分海底观测任务，同时能够携带其他生物仪器进行生物检测。因为分布式观测节点配备水声无线通信的组网方式，故可部署在底层主观测节点周围，形成大范围的海底观测区，获取更加全面的区域数据。

(1) 电路框架和结构设计

分布式观测节点的通用硬件电路结构如图 3.11 所示。该节点系统主要包括核心主控模块、海底观测器件组合、生物仪器、定时式电源模块和水声通信组件，同样采用高容量密度的锂电池作为节点系统的能量来源。

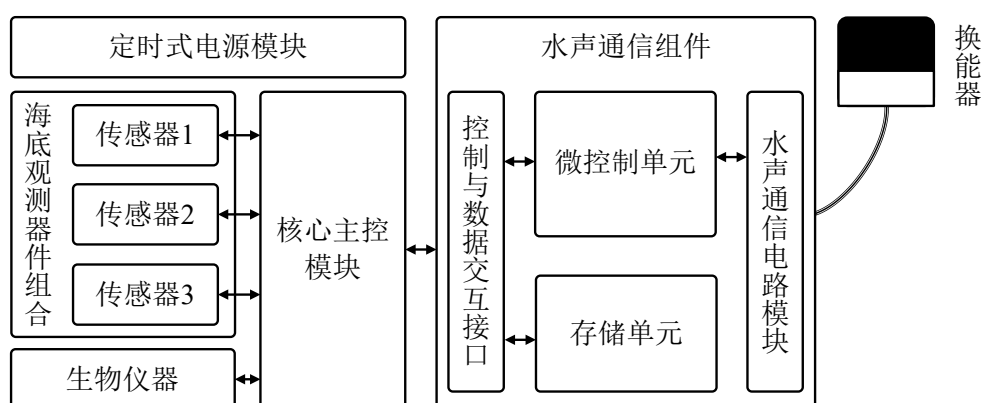


图 3.11 分布式观测节点通用电路框架

核心主控模块的配置与底层主观测节点一致，采用了 J1900 处理器的 SOC（System on Chip，片上系统）平台。海底观测器件组合平台通过多种数据接口与核心主控模块连接，能够有效采集广泛区域的海底观测数据。

搭载在分布式观测节点的生物仪器，承担着海底生物监测与数据采集的任务。这些仪器通过高精度的传感器和可靠的机械结构对海底环境进行采样分析的同时，还对海底生物进行采集并长时间保存。最终，随着分布式观测节点的打捞，采集的生物样本将用于后续的海洋生物分析研究。在分布式观测节点中，生物仪器可自容式存储数据在本地，也可以与分布式观测节点通信，上传相关数据。此时该仪器在电路中可以等效为传感器。部分生物仪器的类型如表 3.4 生物仪器类型示。

表 3.4 生物仪器类型

仪器名称	能否通信	通信方式	功能
底栖生物采样器	能	RS232	插入海底淤泥，采集泥土和生物
生物诱捕器	否	-	诱捕海底生物
浮游生物采样器	能	UART	浮游生物过滤后采样

如图 3.12 所示，定时式电源模块是一种电源管理设备，具有周期性控制电源通断的功能，休眠电流低至微安（ μA ）级别。定时式电源支持 RS232 通信配置定时策略，可通过岸基端远程调整开关时间，灵活制定多样化的工作策略。

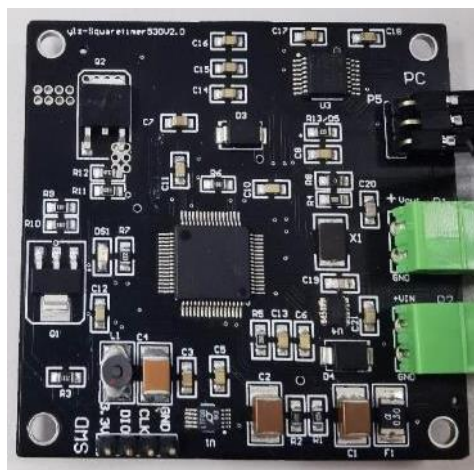


图 3.12 定时式电源模块

水声通信组件结构由微控制单元（MCU）、存储单元、控制与数据交互接口、水声通信电路模块和换能器等部分组成，作为分布式观测节点与汇聚节点通信的关键部分，负责观测数据的本地备份和数据双向传输。MCU 采用意法半导体公司的 STM32L 系列超低功耗微控制器。STM32L 系列控制器具备丰富的外设配置，可以承担水声通信组件的任务需求。为提供本地备份和大量数据传输，还为 MCU 设计配置了 SD、SRAM 单元，扩展电路的物理内存和运行内存。控制与数据交互接口负责连接分布式观测节点与水声通信组件，接口包含电源

控制线和数据传输线。水声通信电路模块和换能器为水声信道建立的关键，负责将电信号转换为声信号进行传输。本课题设计的水声通信组件电路图如图 3.13 所示。

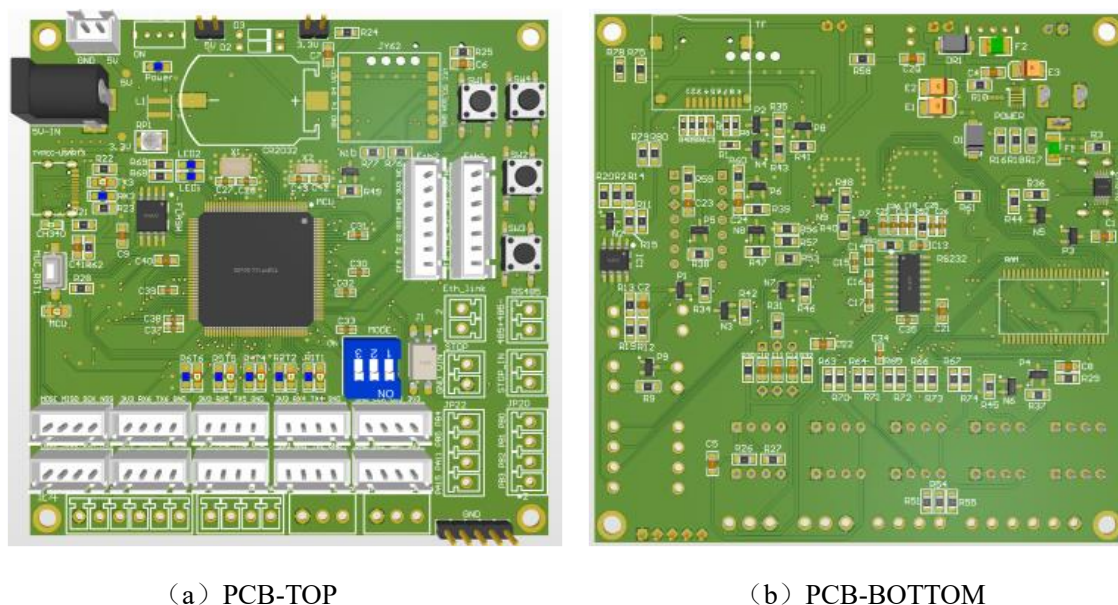


图 3.13 水声通信组件电路图

上述分布式观测节点的电路设备除传感器和生命仪器外分别装载在圆柱型电路仓和水声通信仓内。电路仓包含核心主控模块、定时式电源模块以及其他连接电路组件。水声通信仓装载水声通信电路模块，外部通过水密件与换能器和电路仓连接，连接方式采用如图 3.14 所示的仓段分开的方式。该连接方式具有以下优点：

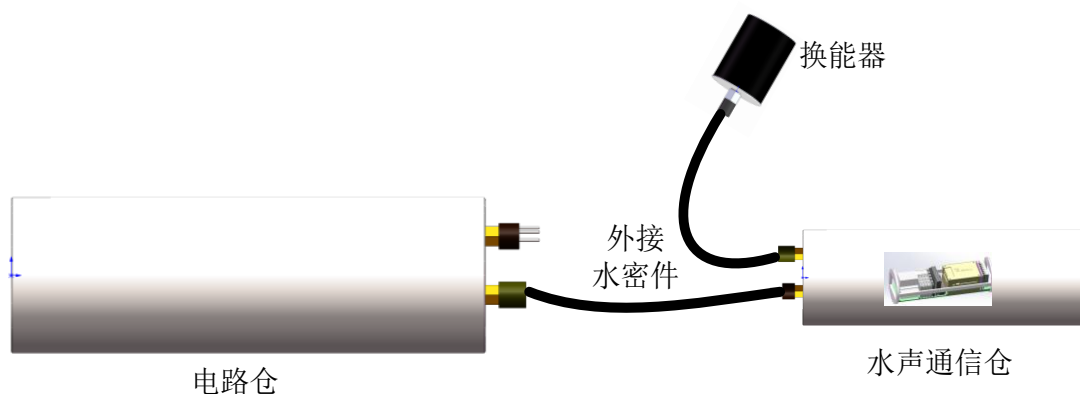


图 3.14 电路仓与水声通信仓连接方式

1) 降低成本。根据上文 3.2.1 节的式 (3.1) 计算出制造圆柱仓体所需材料的体积 V 和仓体直径 D 的关系如下：

$$V = \pi H \left(\frac{P_{\max}}{2[\sigma] - P_{\max}} \right)^2 D^2 \quad (3.5)$$

其中 H 为仓体高度。可见，圆柱仓体所需材料的体积 V 与仓体直径 D 的平方成正比。电路体积越大（具体为直径越大），所需材料体积的增长将成倍增加。因此将两部分单独成仓的设计在保证仓体可靠性的前提下，减少材料消耗。

2) 具备良好的扩展性。不同分布式观测节点只需接入水声通信仓段即可实现组网拓展，极大地降低了系统部署和维护的复杂性。

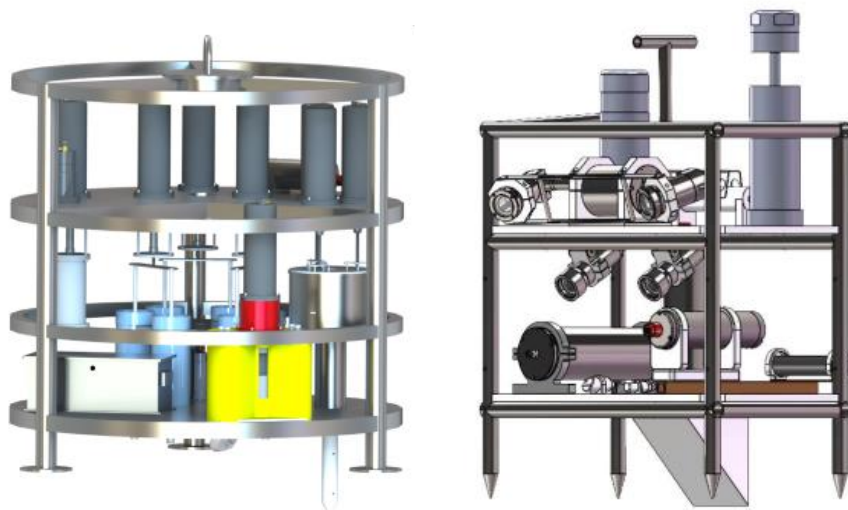


图 3.15 分布式观测节点结构

分布式观测节点的结构如图 3.15 所示，整体呈柱型。传感器和生物仪器根据采样需求搭建在节点框架上。例如，底栖生物采样器和生物诱捕器需要与海底接触，因此应固定在节点结构的底部，以尽量靠近海底表面。电路仓、水声通信仓、传感器组件、生命仪器、电源仓之间的连接均采用外接水密件和缆线的方式连接。最终将连接好的仓段安装于分布式观测节点的结构框架上。分布式观测节点仓段连接图 3.16 如所示。

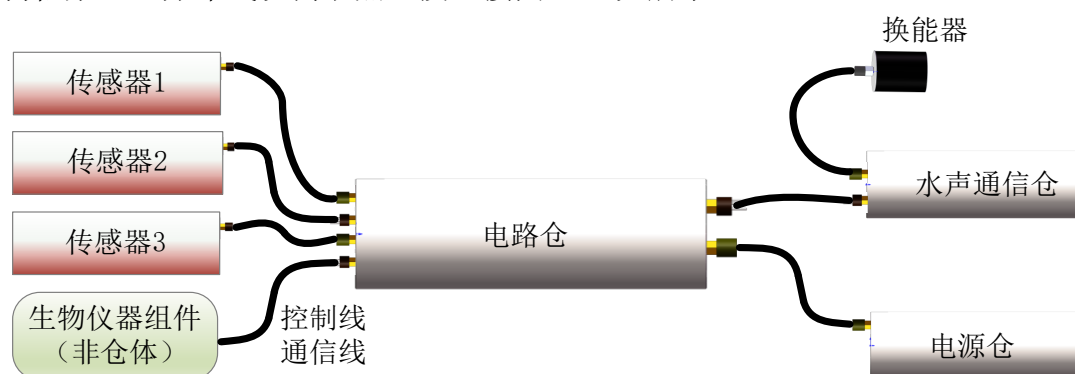


图 3.16 分布式观测节点仓段连接图

(2) 软件结构设计

分布式观测节点的核心主控模块搭载 Ubuntu 22.04 操作系统。分布式观测节点的软件结构和应用层线程如图 3.17 所示。软件结构包含应用层、服务层和操作系统。操作系统提供底

层硬件和操作系统的支撑；服务层封装应用层所需的服务功能模块；应用层实现具体的功能业务。

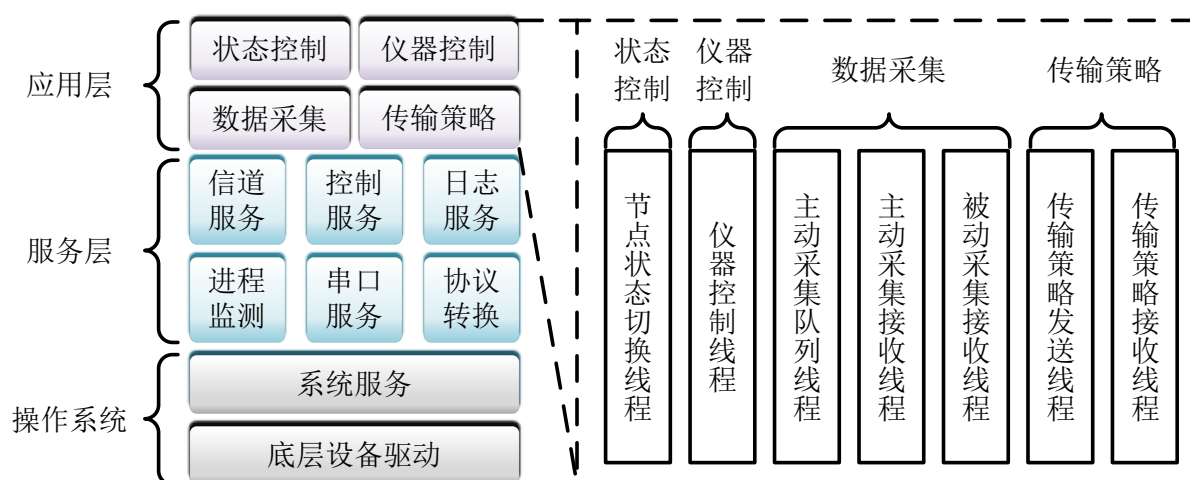


图 3.17 分布式观测节点软件结构

与底层主观测节点相比，分布式观测节点软件结构在服务层功能模块新增信道服务和控制服务，以适配水声通信组件及生物仪器装载。信道服务根据相关协议控制检测水声信道，平衡传输能量与数据质量，应对信道不稳定的情况；控制服务根据任务及设备配置封装控制流程协议并提供接口，实现设备状态便捷可靠控制。其余功能服务与底层主观测节点相同。

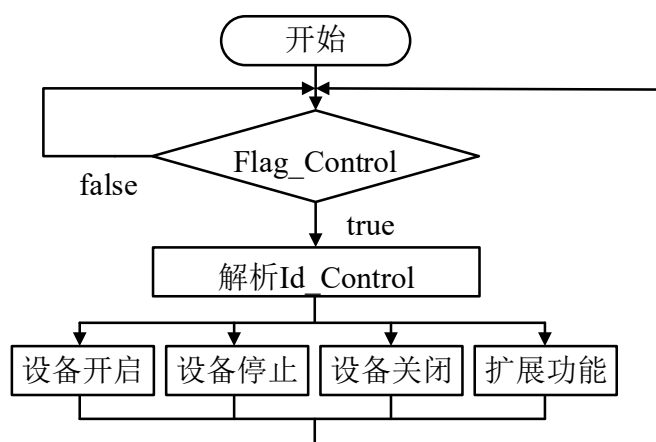


图 3.18 仪器控制线程程序流程图

应用层的仪器控制业务应用创建了仪器控制线程，该线程主要负责生物仪器的控制。仪器控制线程的程序流程如图 3.18 所示，在线程循环中，持续检测 bool（布尔）类型的控制标志位 Flag_Control 是否置位。如果置位（true），则根据控制标识符 Id_Control 判断执行对应的控制程序，例如，设备开启、设备关闭、设备停止等。控制标识符 Id_Control 参数对应设备控制功能如表 3.5 所示。控制标识符 Id_Control 参数对应的设备控制功能可以根据不同设备所需的不同功能进行扩展添加。

表 3.5 控制标识符 Id_Control 参数定义

Id_Control	执行程序功能
0x01	设备电源开启
0x02	设备运行
0x03	设备暂停
0x04	设备关闭
.....	

水声通信组件由 MCU 程序调度控制。MCU 搭载具有实时性任务调度功能的 FreeRTOS 操作系统，软件结构如图 3.19 所示。在该软件结构中，自底向上分别为驱动层、抽象层和应用层。驱动层负责底层相关硬件外设的逻辑和时序驱动；抽象层根据底层驱动封装功能组件；应用层负责实现应用业务功能。以下是对各部分的详细介绍：

1) 驱动层。水声通信组件的驱动层包含 GPIO、UART、SD 和 SDRAM 等模块驱动，涵盖了控制、通信和存储等功能。为规范化和标准化开发程序，采用意法半导体公司提供的硬件抽象层库（Hardware Abstraction Layer，HAL）进行基础驱动开发，结合特殊要求进行个性化开发，以适配任务需求。其中，MCU 的 GPIO 控制水声组件的电源开关等功能；UART 负责通信和数据传输；SD 和 SRAM 负责存储数据。

2) 抽象层。抽象层将底层驱动进行组合封装为应用程所需的基础功能组件。GPIO 控制是对 GPIO 驱动的进一步封装，更接近实际使用；文件读写为数据存储提供可靠支撑；通信协议将来自驱动层的协议数据包转换为应用层所需的报文格式；Tickless 将 MCU 的硬件低功耗模式进行封装，适配任务调度系统。

3) 应用层。应用层基于 FreeRTOS 的任务调度系统创建设备控制任务、文件存储任务、数据传输任务、电源管理任务和其他辅助任务等。最终实现以下功能：（1）通过串口通信或引脚触发，实现对水声通信电路的开关控制。（2）实现分布式观测节点数据的备份。（3）通过水声信道与汇聚节点实现数据交互，完成数据上传和反向指令接收。（4）空闲任务下进入休眠模式，降低功耗。

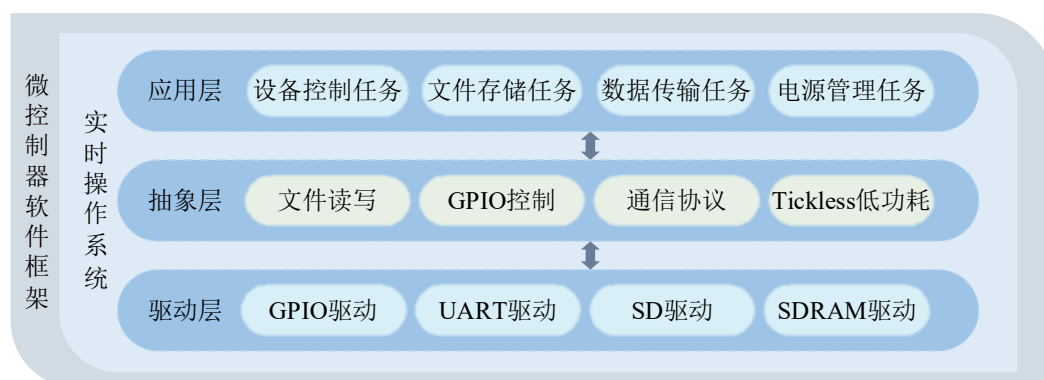


图 3.19 水声通信组件软件结构

水声通信组件的系统任务以时间片调度为主，辅以部分优先级调度。系统任务调度逻辑如图 3.20 所示。在该系统中，将看门狗设置为相对高优先级，低功耗任务设置为相对最低优先级，其他设置为同优先级。同优先级下时间片调度的最小单元为 1ms。在系统中，设备控制任务每 100ms 依据控制标识符参数向指定任务发送信号量，以实现任务间的同步，进而有效地协调任务的时间顺序，确保程序运行的可靠性。此外，设置每 10s 的看门狗线程以监控程序状态，防止程序陷入异常而导致失效。

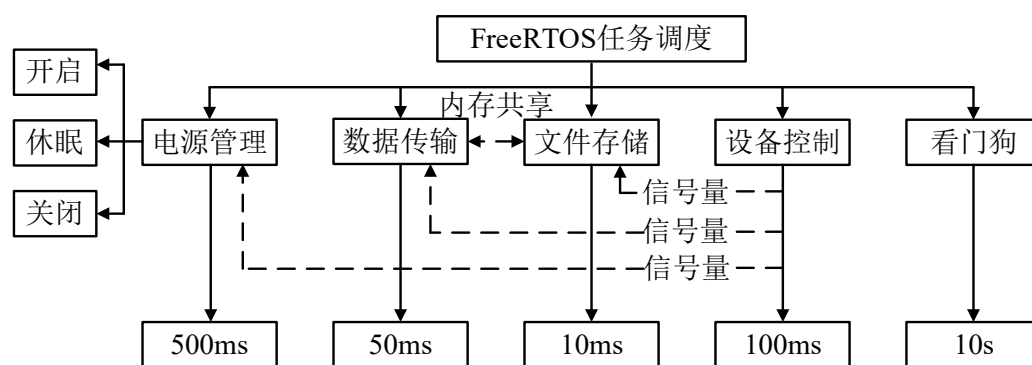


图 3.20 水声通信组件系统任务调度

3.3 汇聚节点设计

汇聚节点部署在异构级联网络的上层架构中，其中包括卫星通信浮标节点和水声通信中继节点。汇聚节点负责连接观测节点和岸基云存储平台实现组网任务，同时还负责观测数据的汇聚、存储和传输。

3.3.1 卫星通信浮标节点设计

本课题设计了一种具备卫星通信功能的卫星通信浮标节点。该节点部署在海洋表面，连接着海上通信网络与水下通信网络，实现海上通信网与水下通信网络的跨域传输。

(1) 电路框架和结构设计

浮标节点的硬件电路框架如图 3.21 所示，主要由作为中央控制的核心主控模块、用于设备电源控制的子模块控制单元、负责姿态数据采集的姿态数据采集模块、实现卫星与光电复合缆通信功能的外部通信类模块和周期性控制节点工作流程的定时式电源模块组成。在设计中，采用高能量密度的锂电池为浮标节点电路系统供电。

核心主控模块使用 J1900 处理器实现节点系统的运行和数据交互。核心主控模块通过包含 I/O 口、串口和网口的多端口类型通信方式与姿态数据采集模块、子模块控制单元以及外部通信类模块进行数据交互。

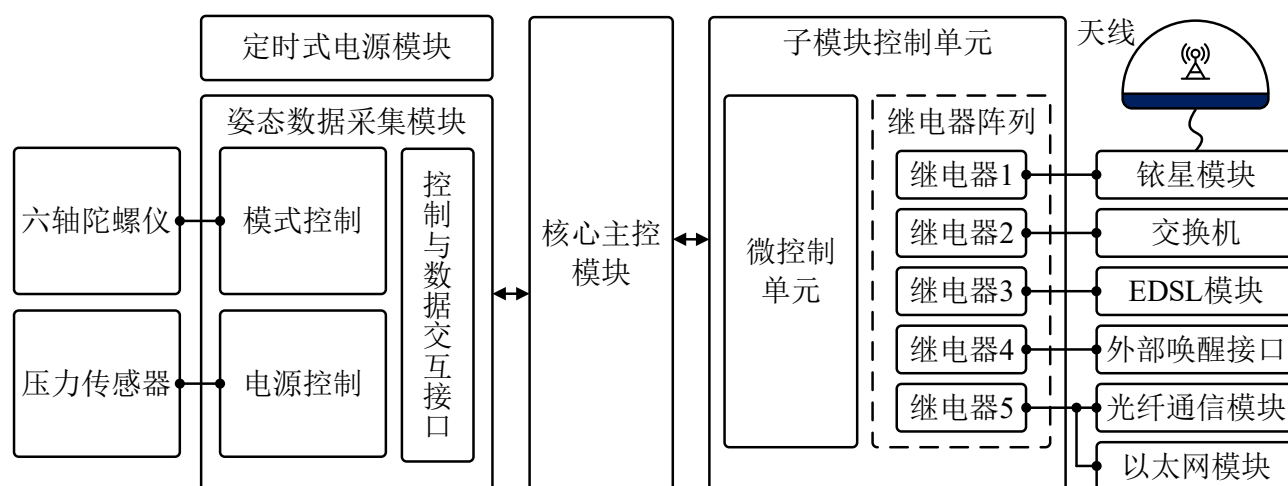


图 3.21 浮标节点硬件电路框架

姿态数据采集模块的功能是通过六轴陀螺仪和压力传感器监测浮标节点自身的姿态数据，可间接评估当前状态下所处海域的风浪情况。六轴陀螺仪采集加速度与角速度信息，解算出节点当前的姿态信息。压力传感器采集水压信息，解算出节点所处的深度信息。传感器器件参数如表 3.6 所示。浮标节点的核心主控模块通过获取姿态数据采集模块的数据，对前状态下的风浪强度进行评估，然后将评估结果传输至岸基云存储平台，为后续观测策略调整提供参考依据。

表 3.6 姿态数据采集模块传感器器件参数

器件名称	通信方式	供电电压	功能
六轴陀螺仪	UART	5V	采集角速度和加速度，计算姿态
压力传感器	RS232	12V	获取水深数据

子模块控制单元采用继电器阵列模块实现外部通信类模块的电源管理。具体而言，在特定功能任务下，子模块控制单元仅开启所需的模块设备，保持其余模块设备关闭，从而降低电量消耗。不仅如此，子模块控制单元还对外部唤醒接口进行控制，可将 24V 唤醒电压传至下方节点，实现远程唤醒功能。继电器阵列的电路方案中采用了 TLP521 光耦隔离器件实现 MCU 引脚与高压电路的隔离，保障 MCU 芯片的不被击穿。

由子模块控制单元电源控制的外部通信类模块包含卫星通信组件和光电复合缆通信组件。一方面，卫星通信组件采用铱星模块构建卫星通信通道，通过卫星接入公共网络，从而建立“岸基云存储平台-浮标节点”之间的卫星通信链路。另一方面，包含光纤通信和双绞线通信的光电复合缆通信组件通过缆线连接下方的中继节点，搭建“浮标节点-中继节点”段的有线通信链路。

如图 3.22 所示，浮标节点的结构包括铱星天线、普通浮球、电路仓浮球、电池仓和底部支架等。上述的核心主控模块、子模块控制单元、姿态数据采集模块以及部分通信组件放置

在电路仓浮球内。为采集水深数据，压力传感器固定安装在外部，于电路仓浮球内部完成接线与数据存储。为实现卫星通信以及方便安装，铱星天线采用独立仓体设计安装在节点上部，通过电缆与电路仓连接。

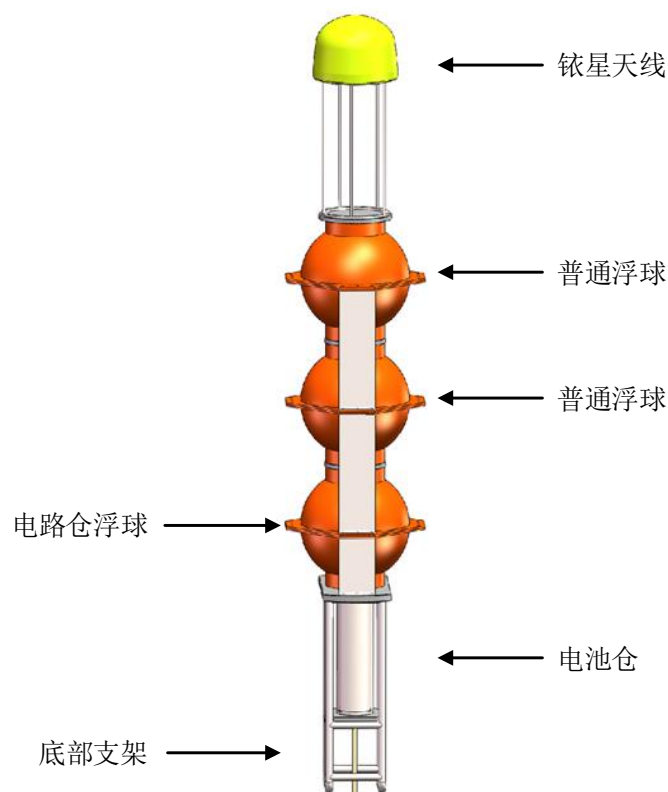


图 3.22 浮标节点结构

为了保证通讯性能，铱星卫星天线安装在浮标节点的顶端。在浮标节点的整体架构设计中，将电路仓浮球配置于浮标节点结构的中下部，将电池仓配置于浮标节点结构的底部区域，从而确保重心低于浮心。节点的部件结构之间通过支架连接，底部支架用于连接光电复合缆的承载部分并用螺栓连接在电路仓浮球的底部。此种设计保证了浮标节点在水面上的稳定性，降低了在海浪作用下发生倾覆的可能性。

（2）软件结构设计

浮标节点的核心主控模块搭载 Ubuntu 22.04 操作系统。核心主控模块的软件架构如图 3.23 所示，采用多线程方式编写并划分功能任务，其中包含数据采集线程、姿态计算线程、数据传输线程和设备控制线程。多个线程之间通过共享内存机制实现线程间数据交互与任务协同。

如图 3.24 所示，数据采集线程与姿态计算线程相互协作，共同完成姿态数据的采集、计算以及实现对风浪强度的评估计算。数据采集线程通过循环读取串口数据并解析计算得到角速度值、加速度值和水深值，然后将数据更新与缓存。在进行数据更新后，通过线程间通信

机制向姿态计算线程发送信号量，使得姿态计算线程实现同步计算。姿态计算线程在完成姿态和水深计算后得到角速度值、加速度值和水深值，再进行融合估计得到风浪值。

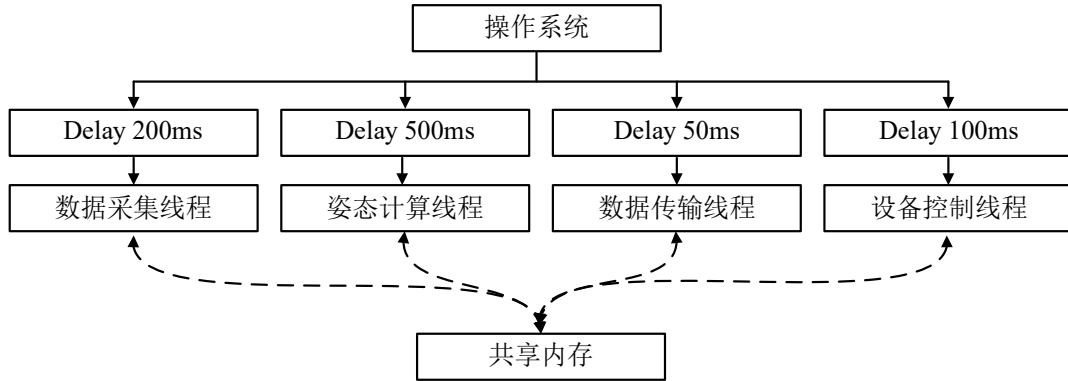


图 3.23 浮标节点核心控制模块多线程软件架构

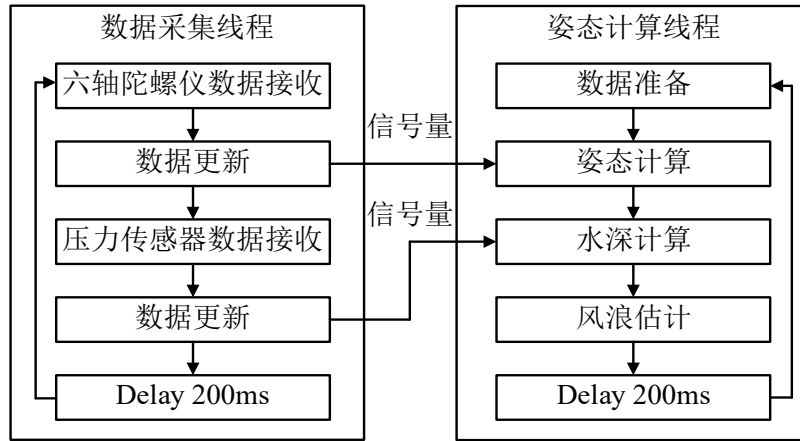


图 3.24 数据采集线程与姿态计算线程相互协作

姿态计算线程软件流程通过角速度、加速度和水深数据融合计算得到风浪值。六轴陀螺仪可以采集 XYZ 三轴的加速度 $Accel$ 和角速度 $Gyro$ 。首先由三轴加速度计算动态加速度的幅值 A_{acc} ，公式如下：

$$A_{acc} = \sqrt{X_{Accel}^2 + Y_{Accel}^2 + Z_{Accel}^2} \quad (3.6)$$

再使用角速度数据，通过互补滤波，计算节点的横摇角 θ 和纵摇角 ϕ ，公式如下：

$$\theta = \gamma(\theta_{prev} + X_{Gyro} \cdot t) + (1 - \gamma) \arctan(Y_{Accel} / Z_{Accel}) \quad (3.7)$$

$$\phi = \gamma(\phi_{prev} + Y_{Gyro} \cdot t) + (1 - \gamma) \arctan(X_{Accel} / Z_{Accel}) \quad (3.8)$$

其中， γ 为 0 到 1 之间的常数； θ_{prev} 和 ϕ_{prev} 分别为横摇角 θ 和纵摇角 ϕ 的上一时刻数值，初始设置为 0； t 为采样时间间隔。本课题取 γ 为 0.9，表示互补滤波公式中主要采用角速度数据，加速度计数据承担校正漂移作用。再结合水深的变化值 ΔH 得到以下加权计算的风浪值 τ_{wave} 。

$$\tau_{wave} = k_1 A_{acc} + k_2 (\Delta\theta + \Delta\phi) + k_3 \Delta h \quad (3.9)$$

式中， k_1 、 k_2 、 k_3 权重系数。本课题取 $k_1=0.35$ 、 $k_2=0.3$ 、 $k_3=0.35$ 。

数据传输线程主要负责与下方的节点进行通信，即接收上传数据和下发指令。同时，数据传输线程还负责与岸基云存储平台建立连接，实现观测数据上传和控制指令获取。数据传输线程中配置有时变信道传输策略，针对卫星链路做出动态传输参数自适应，以达到可靠高效传输的目的。

设备控制线程根据如表 3.7 所示的变量参数向子模块控制单元发送设备控制指令，从而控制通信模块的设备电源。变量参数采用 bool 型数据进行指示，true 表示触发继电器闭合，即开启设备，false 表示断开继电器，即关闭设备。

表 3.7 设备控制变量参数

参数名	控制设备
Ctl_YX	铱星模块
Ctl_SWITCH	交换机
Ctl_EDSL	EDSL 模块
Ctl_GX_ETH	光纤模块、以太网模块
Ctl_EXWAKEUP	外部唤醒接口

3.3.2 水声通信中继节点设计

水声通信中继节点在该课题的水下传输网络中承担着至关重要的角色。作为所有观测节点的第一个汇聚节点，承担着连接各个观测节点与浮标节点进行组网的任务。水声通信中继节点在实现数据备份和转发基本功能的同时，接收和整合各个观测节点的数据，并将岸基云存储平台下发的指令传输至对应的节点。

(1) 电路框架和结构设计

中继节点的硬件电路框架如图 3.25 所示，主要由核心主控模块、唤醒式电源模块、存储模块、水声通信模块、通信接口模块以及共地组件等部分组成。核心主控模块通过水声通信模块实现与分布式观测节点的数据交互的同时，还通过通信接口模块连接光电复合缆与浮标节点建立光电复合缆通信链路。在硬件电路结构中，为核心主控模块配备了外部存储模块，用以备份数据和日志。唤醒式电源模块一般处于休眠状态，由浮标节点的远程唤醒信号进行唤醒。当唤醒式电源模块被唤醒后，接通电源继电器，为节点系统供电。

通信接口模块包含交换机和光电复合缆通信组件，其中光电复合缆通信组件分为光纤模块、EDSL 模块和光电复合缆接口。交换机支持多个网络端口接入，使得不同设备能够有效互联，提升设备的扩展性。由于交换机分别与连接浮标节点、连接底层主观测节点的光电复合缆组件相连，浮标节点与底层主观测节点即可实现远距离光电复合缆的直接通信。同时，中继节点通过以太网模块接入交换机，实现“浮标节点-中继节点-底层主观测节点”总线型拓扑结构的建立。

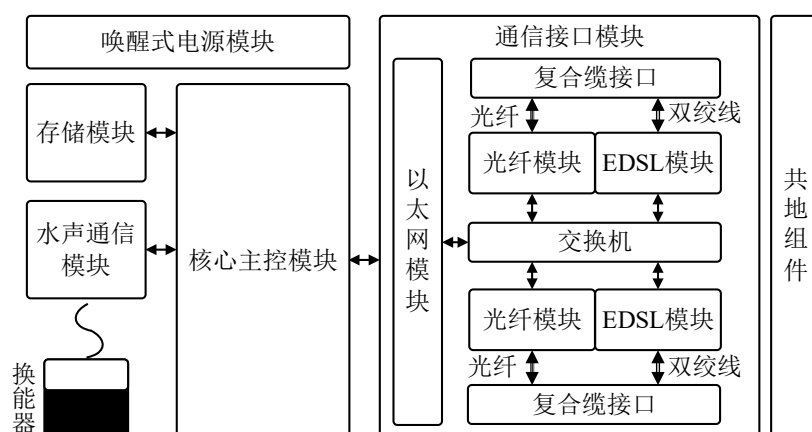


图 3.25 中继节点硬件电路框架

中继节点的结构设计如图 3.26 所示，主要由浮体材料、整体支撑框架、盘缆绞车结构、水声通信机换能器、电路仓和电池仓等组成，实现浮标节点与观测节点之间的数据中继，同时满足多节点数据中继功能。

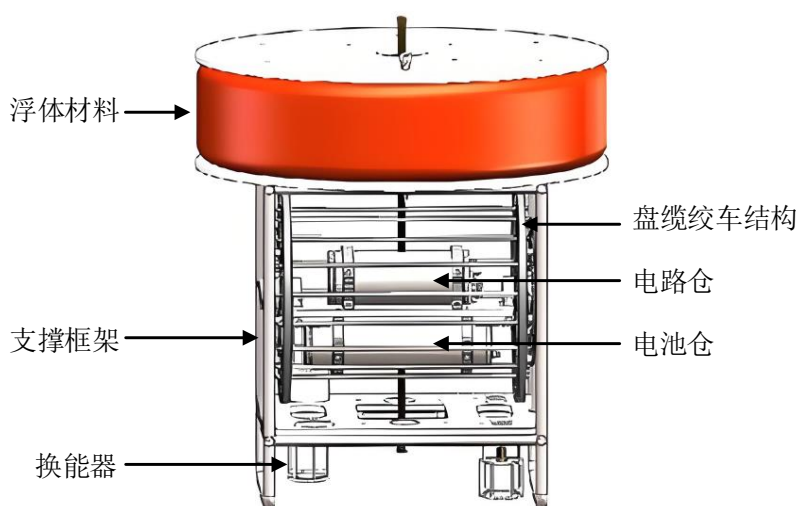


图 3.26 中继节点结构

作为中继节点的核心支撑体系，整体支撑框架被安置于浮体材料的底部。框架内部装载了盘缆绞车结构、电路仓、电池仓和换能器。电路仓和电池仓均内置于盘缆绞车结构中，连接线缆通过盘缆绞车侧边预留的通道进行敷设。盘缆绞车的主要功能是有顺序收卷并存储冗余线缆。该结构将电路仓和电池仓置于支撑框架的中心位置，支撑框架安置在底部，从而确保重心沿中轴线对齐，避免中继节点在水下倾覆。

电路仓内部放置包含核心主控模块、唤醒式电源模块、存储模块、水声通信模块、通信接口模块以及共地组件在内的电路结构。水声通信模块的换能器为与下方的观测节点通信被放置在支撑框架的底部，通过缆线与电路仓端盖连接。

(2) 电路框架和结构设计

中继节点的核心主控模块采用 J1900 处理器，同时搭载 Ubuntu 22.04 操作系统。中继节点软件任务调度如图 3.27 所示，采用多线程编写方式创建了设备控制线程、数据传输线程和数据存储线程。设备控制线程负责控制中继节点的状态转换；数据传输线程负责实现上下层级节点之间的数据传输；数据存储线程负责将数据传输过程中的数据进行备份存储。线程之间通过共享内存实现线程间数据交互和通信，通过信号量实现线程间同步。

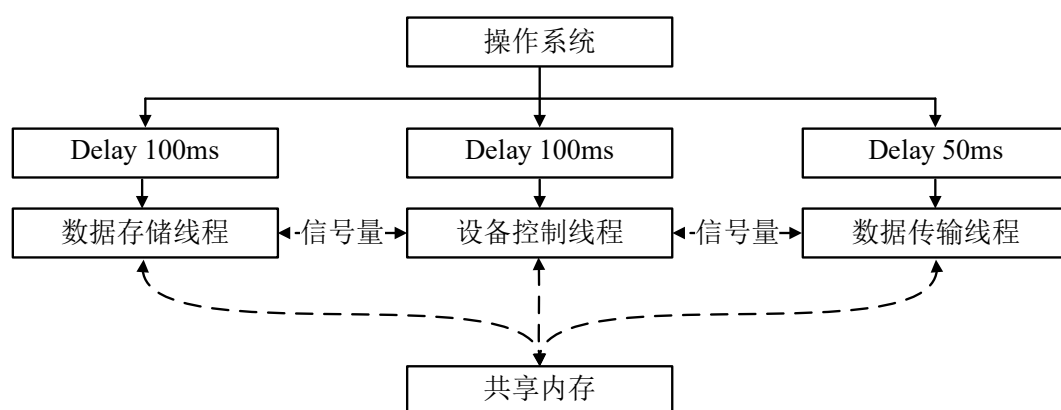


图 3.27 中继节点软件任务调度

设备控制线程采用如图 3.28 所示的状态机转换方式，设置有传输状态、文件保存备份、休眠模式和设备控制等状态。设备控制线程的状态与图 3.27 所示的任务线程相对应，数据传输线程对应传输状态；数据存储线程对应文件保存备份状态。通过状态机转换方式，中继节点能够根据当前传输状态和设备状态调整操作，保证中继节点的可靠运行。

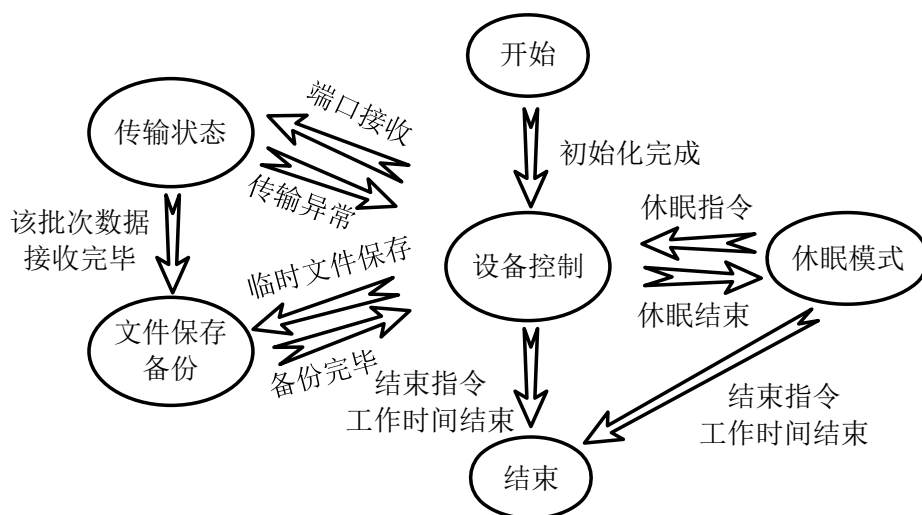


图 3.28 设备控制任务状态转换图

为实现多个分布式观测节点的有效接入和准确区分识别，本课题为数据传输线程设计如表 3.8 所示的节点 ID 号节点管理方式。每个分布式观测节点都有唯一的由 1 字节构成的 ID

标识符。中继站通过解析数据帧内的 ID 位信息区分识别节点，同时结合数据传输线程的主动和被动式传输模式，实现多节点有序通信。

表 3.8 节点 ID 号定义

节点 ID 号	节点描述
0x00	浮标节点
0x01	中继节点
0x02	底层主观测节点
0x03	分布式观测节点 1（携带底栖生物采样器）
0x04	分布式观测节点 2（携带生物诱捕器）
.....	

在节点 ID 号定义的基础上，中继节点在数据传输线程中设置如图 3.29 所示的主动和被动两种形式的数据传输模式，以实现获取各个分布式观测节点观测数据的功能。1) 主动式数据传输模式用于周期性或者临时性数据采集，保证观测数据的及时获取。主动式数据传输模式设置有采集任务队列，可根据采集任务队列的排序，主动向分布式观测节点发起数据请求。2) 被动式数据传输模式下，中继节点侦听端口的数据，等待由观测节点发起数据传输请求。由于多分布式节点之间存在水声信道竞争，从而导致吞吐率下降。为此，在被动式下，设置节点锁定机制，以解决该问题。中继节点根据 ID 号进行观测节点锁定。如果在短时间内范围内有多个观测节点数据请求，中继节点根据优先级锁定观测节点，从而建立与该观测节点的数据交互，忽略其他观测节点的数据请求。并且通过延长观测节点的数据请求间隔，减小水声信道竞争。

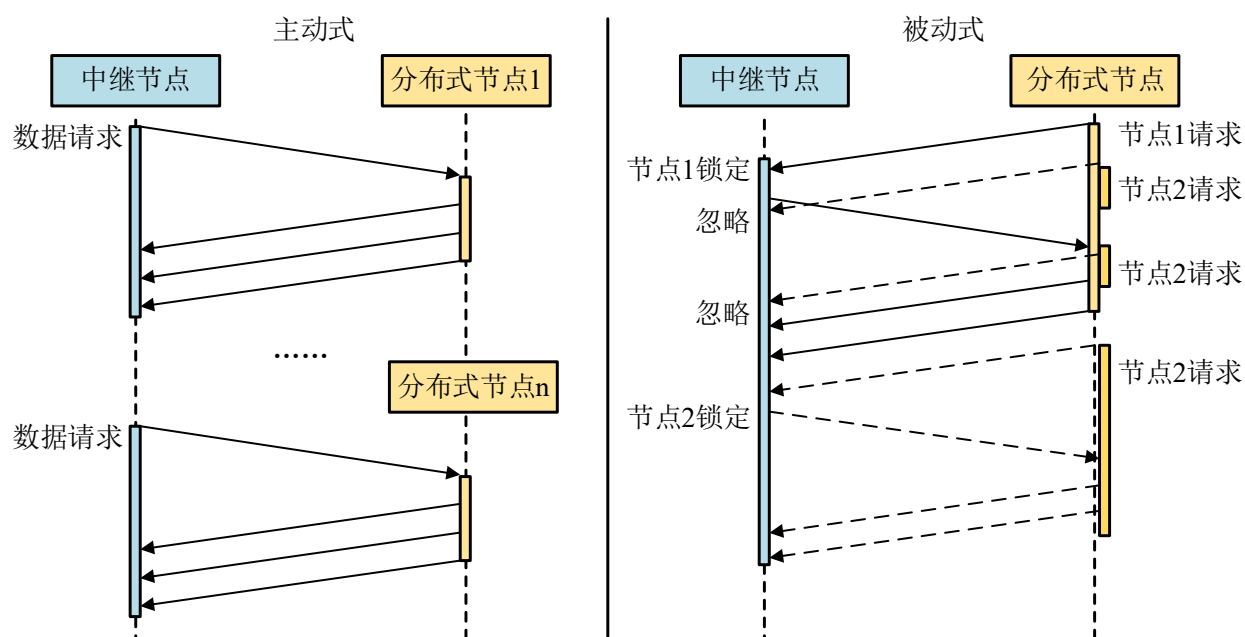


图 3.29 数据传输线程的两种传输模式

在实际应用中,中继节点被远程唤醒后,数据传输线程首先进入主动数据传输模式,以确保首次观测数据的有效获取。随后,数据传输线程切换到被动数据传输模式,持续等待接收观测节点上传的数据。此时,被动模式有助于节省能耗。工作人员可以通过岸基云存储平台远程配置节点的数据传输模式,以适应不同的任务需求。

3.4 岸基云存储平台

岸基云存储平台是本课题设计的基于异构级联的远程控制海底观测局域网的重要组成部分。该平台建立在云服务器之上,主要负责实现对观测数据的接收、存储与可视化。它一方面承担了汇聚节点的终端接收功能,另一方面为异构级联通信网络提供控制平台,使用户能够远程管理和控制海底观测节点。

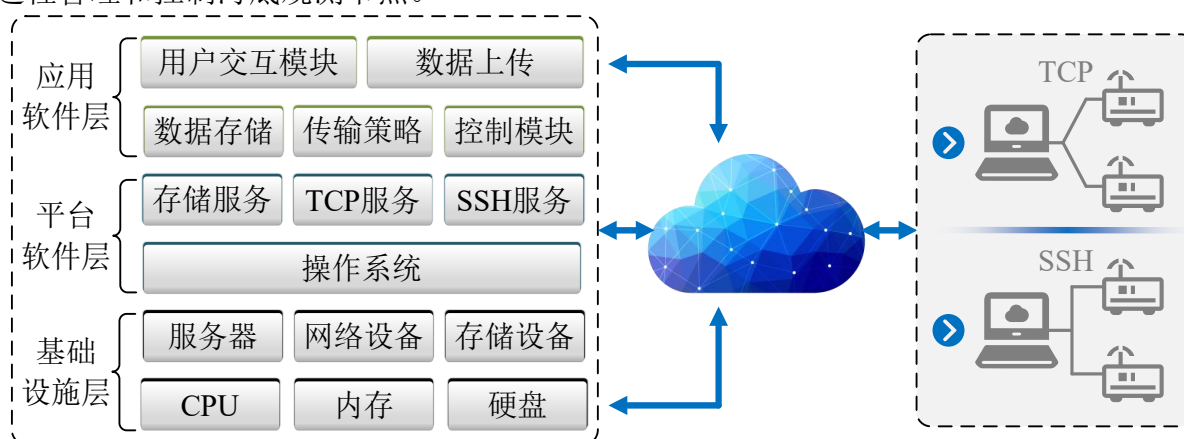


图 3.30 岸基云存储平台架构

岸基云存储平台采用如图 3.30 所示的物理服务器架构,自下而上划分为基础设施层、平台软件层和应用软件层。

基础设施层为上层软件提供硬件平台,其中包含基础硬件资源(CPU、内存、硬盘等)以及设施设备(服务器、网络设备、存储设备等)。这些硬件资源和设施设备不仅为操作系统提供运行环境,还为操作系统之上的平台软件层和应用软件层提供支撑,保证软件层稳定运行。

平台软件层搭载了 Ubuntu 操作系统。该操作系统一方面管理着基础设施层所提供的各类硬件资源,保障硬件资源的最大化利用;另一方面,为上层应用软件封装了一系列标准化的服务接口。此层包括用于数据存储分类的存储服务、用于远程可靠连接的 TCP 服务以及用于远程登录和管理的 SSH 服务。这些服务共同构成了该平台的数据管理、传输和控制的机制。

应用软件层由下层的业务应用程序模块以及上层的用户交互模块和数据上传业务模块组成。数据上传业务模块用于接收海底观测数据,并分类存储至本地。用户通过交互模块浏览海底数据,同时进行数据输策略配置和控制管理。

在岸基云存储平台的架构中，岸基云存储平台通过 TCP 和 SSH 协议与海面的浮标节点建立远程连接，确保可靠的数据传输和远程控制。岸基云存储平台的软件设计使用平台软件层的 TCP 服务和 SSH 服务功能模块，实现完整的数据上传业务流程。

如图 3.31 所示，数据上传业务流程是一个独立的进程，通过 TCP 和 SSH 协议与浮标节点建立连接，从而实现远程观测数据的传输。该业务流程在进行程序初始化和存储空间检测后，对存储空间的文件分类结构进行检测，确保数据上传的目标路径有效。然后程序进入等待连接流程，等待浮标节点的接入。待连接成功后，数据上传业务流程将创建数据接收、存储控制和分类存储三个任务线程。其中，数据接收线程负责数据接收与指令下发；存储控制线程负责协同数据接收与分类存储线程，保证程序可靠运行；分类存储线程负责数据存储备份管理。

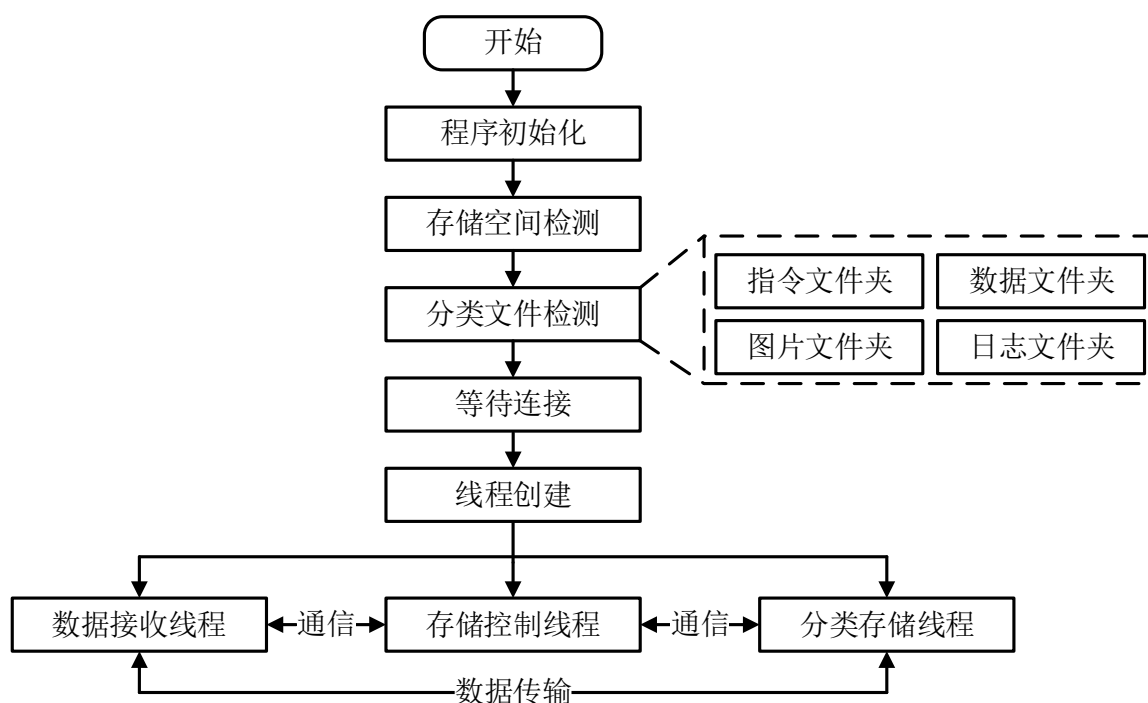


图 3.31 数据上传业务流程图

在数据上传业务中，分类文件检测阶段主要是负责针对文件存储路径的进行检验。具体的分类文件存储路径如图 3.32 所示，包含指令文件夹（cmd）、数据文件夹（data）、图像文件夹（picture）以及日志文件夹（log）四个模块。

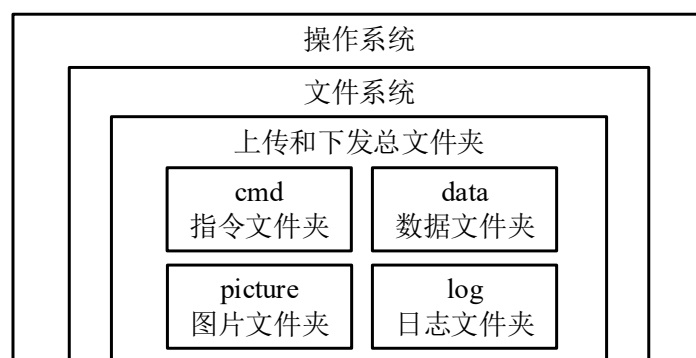


图 3.32 文件分类

在数据上传业务中，数据接收线程、存储控制线程和分类存储线程之间的协同交互如图 3.33 所示。数据接收线程接收到数据后，首先将数据暂存，然后向分类存储线程发送存储请求。分类存储线程进行空间检测，并将空间信息反馈给存储控制线程。空间信息分为“空间充足”和“空间异常”两种情况。如果空间充足，数据接收线程在接收到反馈后，直接与分类存储线程建立数据交互通道，实现数据分类存储。如果空间异常，则执行异常处理操作，处理完成后继续执行数据存储流程。

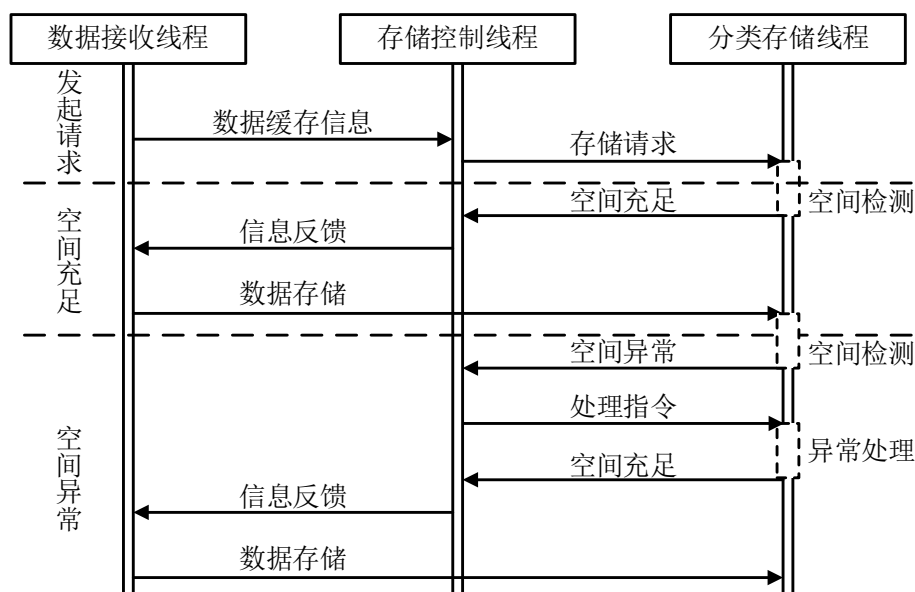


图 3.33 数据上传业务中线程协同交互方式

为实现用户交互的功能，该课题选择 Qt Creator 集成开发环境编写并实现的上位机程序。用户交互模块负责岸基云存储平台与用户之间的交互，为用户提供图形用户界面（GUI）以实现用户操作和浏览数据等功能。用户交互模块程序流程如图 3.34 所示，在程序运行后，进行 MainWindow 类实例化和应用初始化操作，搭建初始运行环境。然后进行槽函数关联，显示 GUI 界面的操作控件。接着进行存储数据检测，检测路径有效性和剩余空间信息。之后，程序建立 TCP 连接，并为控制信息传输提供连接信息。控制信息流程根据 TCP 连接信息，

判断是否立即进行信息传输。如果 TCP 未连接，则数据会被保存至本地，待下一次连接或由数据上传业务进程进行传输。

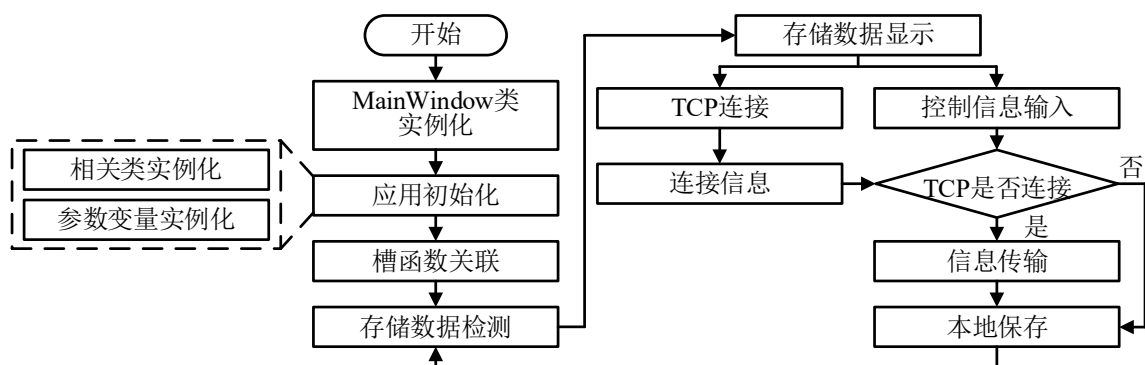


图 3.34 用户交互模块流程图

3.5 供电设计和远程唤醒

本课题所设计的网络节点由高容量密度锂电池供电，同时搭配低功耗处理和智能关断技术，以满足深海长周期观测的需求。各个节点的供电方案如图 3.35 所示。为保证各节点（浮标节点、中继节点、底层主观测节点、分布式观测节点）正常运行，本课题为每个节点配备电源模块。其中，浮标节点和分布式观测节点配备周期性管理电源供电的定时式电源模块；中继节点和底层主观测节点配备可被远程唤醒的唤醒式电源模块。定时式电源模块根据微控制芯片集成的定时电路搭配继电器模组实现周期性电源管理。唤醒式电源模块根据继电器触发闭合原理设计了远程触发机制，以实现远程控制。不论是定时式电源模块，还是唤醒式电源模块，它们接通后的电源电压都会流经各个节点的电源管理单元实现电平转换，为节点设备和模块供电。电源管理单元中包含 DC-DC 降压模块和 LDO 降压元件，将输入电压转换为后续设备和模块所需的 3.3V 到 24V 的典型电压。

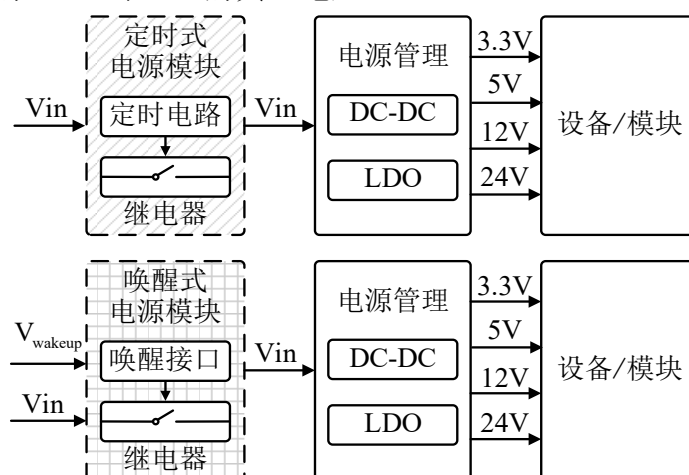


图 3.35 节点供电方案

定时式电源模块的工作模式如图 3.36 所示,能够预先设置定时参数 $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 。设定方式为向定时式电源模块的 RS232 接口输入设定指令 $\text{Set_Time}(T1, T2, T3)$ 。其中, $T1$ 表示预保留时间,即定时式电源模块初次接通电源,运行程序后仍保持断开状态的时间,此时程序还没正式进入循环通断的工作状态,目的是为实验布放预留时间窗口。 $T2$ 表示工作时间,即定时式电源模块触发继电器,为后续电路供电,网络节点开始工作。 $T3$ 表示断电时间,即定时式电源模块不闭合继电器,不为后续电路供电,网络节点关机。

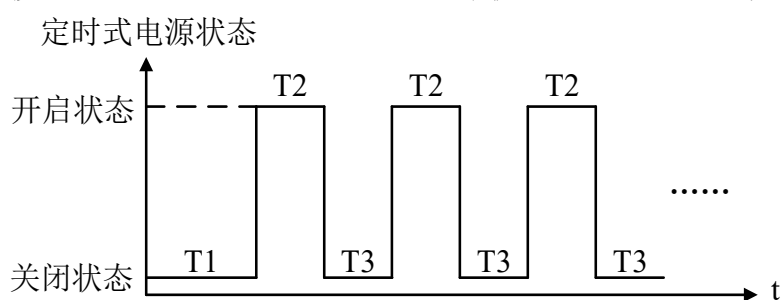


图 3.36 定时式电源模块工作模式

本课题的异构通信网络工作流程由定时式电源模块控制。浮标节点和分布式观测节点的定时式电源模块配置相同参数。当它们进入工作状态后,浮标节点同时将中继节点和底层主观测节点远程唤醒,进而整个异构通信网络进入工作状态。然后中继节点等待一段时间后进行主动式数据交互,完成初次数据采集,再进入被动式数据交互,节约功耗。工作时间进入最后 5 分钟时,定时式电源模块通知搭载的节点进行数据备份,浮标节点则通知中继节点和底层主观测节点进入关机准备阶段。然后等待电源模块电路断电,即完成一次任务流程。最后再等待下一次的工作开启。

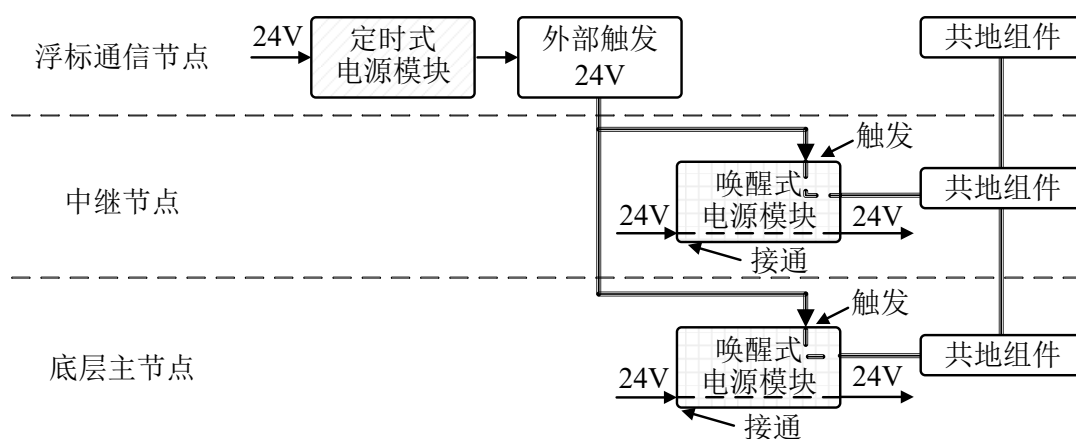


图 3.37 远程唤醒方式

如图 3.37 所示,上述提及的远程唤醒方式由浮标节点的外部触发功能和中继节点、底层主观测节点的唤醒式电源模块组成。浮标节点进行外部 24V 触发,具体为触发闭合继电器,使得 24V 电压加载在与下方连接的缆线上。因为三个节点的共地组件相互连接,浮标节点向

下延伸的 24V 电压能在中继节点和底层主观测节点的唤醒式电源模块上产生电位差，触发继电器，实现中继节点和底层主观测节点的电源接通。最终实现远程唤醒。

因硬件差异，定时式电源模块之间存在时钟漂移情况，对同步唤醒产生影响。本课题通过如图 3.38 所示的时钟同步方案减少时钟误差。该方案主要实现方式为：在每次系统同步唤醒后，浮标节点将自身定时式电源模块的时钟信息下发至分布式观测节点，再由分布式观测节点对自身的定时式电源模块进行时钟更新，以达到减少时钟偏移误差的目的。中继节点在接收到时钟信息后，开启定时器，记录时钟偏移，再向分布式观测节点发送时钟信息与当前实时更新的时钟偏移信息。分布式观测节点最后将接收到的时钟信息和时钟偏移信息与水声通信传输距离对应的时间补偿进行解算，并更新定时式电源模块的时钟信息。该方案周期式更新分布式观测节点的定时式电源模块时钟信息，确保浮标节点和分布式观测节点的定时式电源模块在秒级，从而减少对同步唤醒的影响。

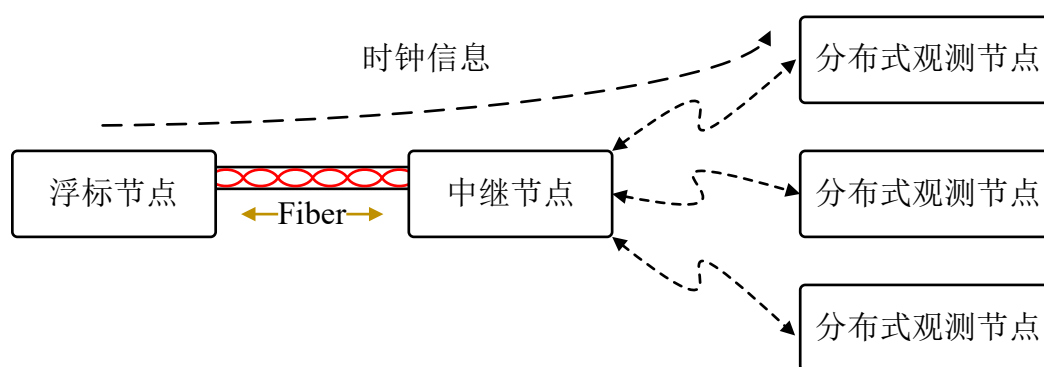


图 3.38 定时式电源模块时钟同步

3.6 本章小结

本章详细介绍了海底观测局域网系统的网络结构、网络节点的软硬件设计以及外形结构。首先，介绍了系统的网络结构。然后，根据功能不同，将网络节点分为观测节点和汇聚节点。接着，阐述了网络节点的硬件电路和结构设计，并介绍了各节点的软件功能设计。最后，讲解了该异构网络的供电设计及远程唤醒机制。

4 异构级联海底观测局域网数据传输机制

海底观测采用单一的通信方案难以满足复杂环境和多样化传输的需求。为此，在前文的叙述中，本课题介绍了通过异构级联方式将卫星通信、光电复合缆通信和水声通信等技术结合，构建了多层次的网络架构。为进一步实现该架构下数据的高效可靠传输，本章将探讨如何在异构级联海底观测局域网中提升数据传输的质量、效率和可靠性。

4.1 引言

本课题采用总线-星型拓扑结构作为海底观测局域网的基础拓扑结构。为进一步适应海底观测的环境需要和完成目标需求，本课题设计了一种将多种不同类型的数据链路进行异构级联的网络结构解决方案：

（1）基于卫星通信链路设计了浮标节点到岸基云存储平台之间的远程空中传输网络，通过卫星链路接入广域网，实现观测数据到云服务器远距离、便捷、可靠的传输。浮标节点的核心主控模块经以太网端口和交换机连接铱星电路实现中央与外部设备数据传输。铱星电路再通过同轴电缆连接天线，在 SIM 卡激活后接入卫星通信系统，最终连接到岸基云存储平台构建起卫星数据链路。

（2）基于光电复合缆通信链路设计了浮标节点到中继节点再到底层主观测节点之间的水下传输网络，实现垂直方向上的总线式数据节点互通，提高数据传输效率。该链路采用总线拓扑结构，通过光纤模块和 EDSL 模块构建光电复合缆通信系统，实现浮标节点、中继节点与底层主观测节点的互联。该链路提供两种端口接入方式：网口直接接入和以太网模块转换接入。其中，节点间 EDSL 链路通过以太网模块实现 TCP 协议配对，光纤链路则采用网口配对，最终建立 EDSL 与光纤的并行独立传输体系，实现三节点互联互通。

（3）基于水声通信链路设计了中继节点到多个分布式观测节点之间的星型式数据汇聚网络结构，实现集中管理，提升网络结构的扩展性和可靠性。分布式观测节点的核心主控模块与水声通信组件的微控制单元通过 UART 进行数据交互。微控制单元借助 RS232 与水声通信电路相连接，随后利用缆线与换能器相连，达成节点内部从中央到外部通信设备的数据传输工作。分布式观测节点的换能器把电能转化为声能并于水中传播。中继节点的换能器负责接收，随后通过水声通信电路将声学信号转换为数字信息，最后输送至中继节点的核心主控模块。

该数据链路设计方式将这三种通信技术结合，实现了从海底到海面再到岸基的全方位数据传输，并确保观测数据能够高效、可靠地传输到岸基云存储平台。异构级联网络的数据链路连接方案如图 4.1 所示。

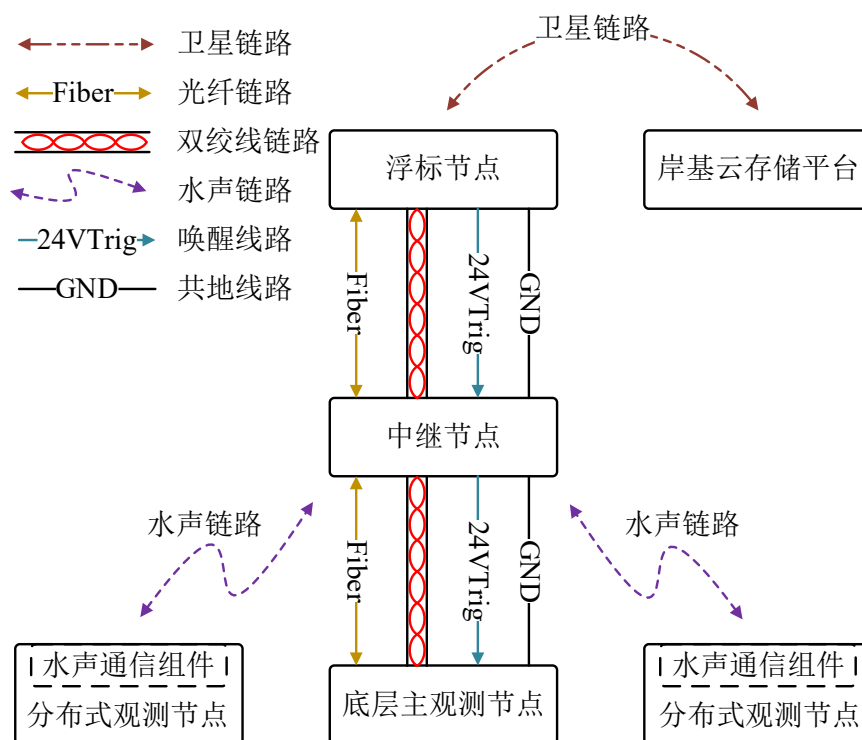


图 4.1 异构级联网络数据链路连接方案

基于此链路连接方案，本章分别介绍异构级联海底观测局域网的数据链路帧结构、交互协议设计方案以及面向不同传输需求的数据传输机制。其中，4.2 节介绍异构级联网络的基础帧结构设计，该结构支持少量数据的单帧传输和大量数据的分包传输。4.3 节在基础帧结构的基础上，介绍了数据交互协议的设计方案，并面向大数据传输需求提出了断续传输机制。4.4 节从链路特性角度出发，提出了面向卫星与水声链路的时变信道传输策略和面向光电复合缆链路的动态切换机制，以提升数据链路传输的效率和可靠性。

4.2 异构级联网络数据链路帧结构

在异构级联网络节点之间传输的数据类型可划分为三类：（1）轻量级数据（指令、响应）；（2）文件类数据（传感器数据集合、日志）；（3）图像类数据。在对大容量文件和图像等数据类型进行传输时，网络节点需进行数据分包操作。

为此，本课题为异构级联网络的卫星链路、光电复合缆链路和水声链路设计了如表 4.1 所示的基本帧结构。该数据帧在实现轻量级数据信息传输的同时，也能实现文件类和图像类大数据分包传输。

表 4.1 基本帧结构

帧头	节点号	功能位	数据包编号	帧长位	数据位	校验位	帧尾
2Byte	1Byte	1Byte	4Byte	2Byte	可选	1Byte	1Byte

(1) 帧头是数据帧的起始部分，用于接收端识别数据帧的开始，设置为 0x5A、0xA5。

(2) 节点号是对异构级联网络节点进行编号，每个节点唯一编号。水中主体部分浮标节点、中继节点和底层主观测节点分别为 0x00、0x01 和 0x02，分布式观测节点从 0x03 到 0xFE 按顺序排列，故分布式观测节点的接入最大数量为 251。其中岸基云存储平台为特殊节点，取 0xFF。

(3) 功能位是指示该数据帧的作用，如表 4.2 所示。

表 4.2 功能位描述（部分）

功能位	描述
0xFF	不携带 CMPs 信息的应答信号
0xFE	携带 CMPs 信息的应答信号
0x00	保留
0x01	链路状态测试请求
0x02	链路状态测试帧
0x03	链路测试结束信号
0x04	普通数据传输
0x05	文件数据传输请求
0x06	图像数据传输请求
0x07	数据传输帧
0x08	当前批次数据传输结束信号
0x09	下发指令信号
0x0A	传输结束信号
0x0B	重传上一帧请求
0x0C	准备休眠信号
.....	

(4) 数据包编号用于指示数据传输流程中数据包的先后顺序与归属关系，确保信息在传输过程中的完整性和可追溯性。具体而言，数据包编号长 4Byte，理论上可连续传输 4G 个数据包。每个需要传输数据的数据帧至少需要传输 1Byte 的有效信息，那么一次传输流程至少可以传输 4GB 数据，可以满足大文件数据传输的需求。

(5) 帧长位的数据表示该帧从帧头到帧尾长度。

(6) 数据位携带需要传输的有效数据。为适应下文具体的数据传输机制，数据位的长度可变。但是实际应用时根据硬件限制最大数量。

(7) 校验位用于检测数据传输过程中是否出错。本课题采用异或 (XOR) 校验方式，具体操作是将帧头到帧尾的字节数据进行逐一异或操作，如下所示，

$$Y = x_1 \oplus x_1 \oplus x_1 \cdots \oplus x_{n-2} \oplus x_n \quad (4.1)$$

表示帧长为 n 的数据帧校验位计算方式，第 $n-1$ 位为检验位数据，不参与计算。

(8) 帧尾是数据帧的结束部分，用于接收端识别数据帧的结尾，设置为 0x40。

帧结构的功能号中的相关传输部分包含了该海底观测局域网所需的数据上传和指令下发两个关键功能。具体而言，数据上传包含请求类功能 (0x05、0x06 等)、传输类功能 (0x04、0x07 等) 和结束类功能 (0x08、0x0A 等)；指令下发的信息量少仅需单帧传输，故只包含传输类功能 (0x09)。

其中，指令下发的数据帧由功能号和节点号确定。当目标节点接收到对应自身节点号的指令信息时，根据内部预设指令集进行相对应的控制。控制方式分为直接控制和间接控制，直接控制为目标节点直接进行硬件控制，比如开关电源等；间接控制则是向目标设备传输指令帧中数据位的内容，间接控制对应的设备。部分下发指令数据位内容举例如表 4.3 所示。

表 4.3 指令帧数据位内容示例 (部分)

指令帧的数据位内容	控制方式	描述
Set_Time (T1, T2, T3)	间接控制	定时式电源模块参数调整
Set_Trans_Mode: 0	间接控制	中继节点采用被动式传输
Set_Trans_Mode: 1	间接控制	中继节点采用主动式传输
0x01	直接控制	生命仪器设备电源开启
0x02	直接控制	生命仪器设备运行
0x03	直接控制	生命仪器设备暂停
0x04	直接控制	生命仪器设备关闭
.....		

如图 4.2 所示，当帧的数据位出现帧头数据或帧尾数据情况时，现有的 PPPoE 协议（一种宽带上网使用的链路层协议）采用转义方式解决，即在数据前加上一个转义字符（1 字节，比如 0x7D）。但是此方式就会占用数据空间，在带宽受限的水声链路中这难以接受。



图 4.2 帧结构数据部分出现帧头帧尾

为此, 本课题采用帧结构中帧头、帧尾和帧长位结合接收端的数据帧接收状态机方案解决。因 SOC 和 MCU 的硬件资源和物理架构存在差异, 该方案在这两平台上的实现方式有些许差异。

在 SOC 平台上的数据帧接收状态转移如图 4.3 所示。本课题为 SOC 平台设计了 4 个状态以实现数据帧接收的功能。SOC 的数据接收机制采用先进先出 (FIFO) 缓冲策略。在使用对应端口的接收函数进行数据接收时, 由于 SOC 的接收特性, 接收的数据长度具有不确定性。因此, 在设置接收状态时, 需要充分考虑接收数据可能出现的多种分段情况。各状态的解释如下:

- (1) **data_none**: 无数据接收状态。该状态下程序进行信道侦听, 等待端口数据。
- (2) **data_receiverd_5A**: 接收到 5A 的状态。该状态下, 程序在首次接收函数调用后, 仅接收到 1 个字节 0x5A。
- (3) **data_receiverd**: 接收状态。该状态下, 程序持续调用接收函数进行数据接收。
- (4) **data_receiverd_finish**: 接收完成状态。该状态表示数据帧接收完成。

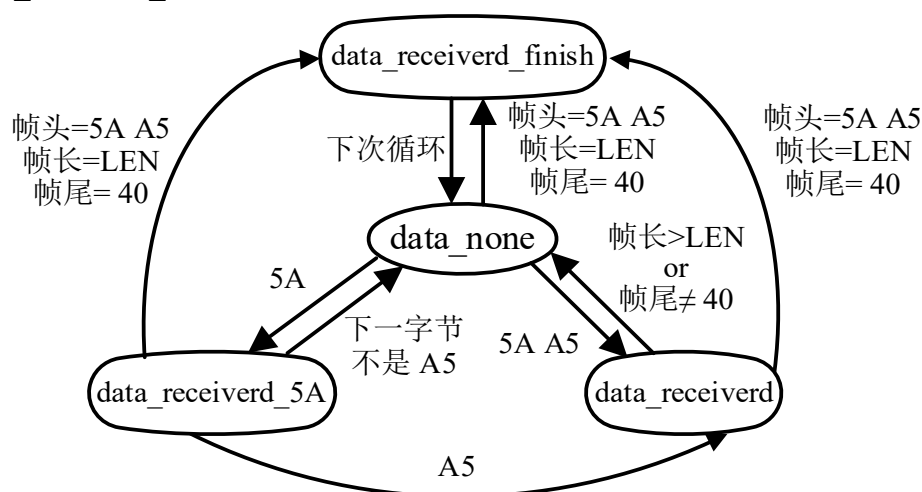


图 4.3 接收端 (SOC 平台) 的数据帧接收状态转移

基于图 4.3 所示的状态转移流程, SOC 平台上的数据帧接收流程如下:

(1) 初始时, 接收程序处于 **data_none** 状态, 等待数据接收。当接收数据仅有 1 字节 0x5A 时, 进入 **data_receiverd_5A** 状态; 当接收数据字节数大于等于 2, 同时前两位数据为 0x5A 和 0xA5 时, 即可进入 **data_receiverd** 状态。

(2) 在 **data_receiverd_5A** 状态中, 以下一个接收数据为依据, 决定下一个状态转移。如果是 0xA5, 则进入 **data_receiverd** 状态, 如果不是, 则清除缓存返回 **data_none** 状态。

(3) 在 **data_receiverd** 状态中, 程序一直调用接收函数, 持续接收数据。同时, 程序还持续判断接收长度是否超过帧长位。当接收到最后一位数据时, 进行帧尾判断。如果满足接

收长度等于帧长位数据，并且帧尾为 0x40，则进入 `data_receiverd_finish` 状态。反之，则返回 `data_none` 状态。

(4) 进入 `data_receiverd_finish` 状态表示数据帧接收完成，以进行下一步操作。值得注意的是，数据帧接收完成指标是帧头、帧尾和帧长符合要求。校验流程在后续程序中进行。

在 MCU 平台上的数据帧接收状态转移如图 4.4 所示。MCU 的接收由硬件外设管理，程序上体现的是用户访问映射的寄存器。一般而言，MCU 的数据接与 SOC 的数据接收差别是 MCU 的接收函数逐字节返回接收数据。因此，相比于 SOC 平台上的数据帧接收状态，MCU 平台上的数据帧接收状态多一个 `data_receiverd_5A_A5` 状态。该状态承接 `data_receiverd_5A` 状态和 `data_receiverd`，表示接收到 0x5A 和 0xA5，可以继续接收数据帧内容。MCU 的逐字节接收方式，可以使得接收程序在接收字节数据时，同步进行异或校验。

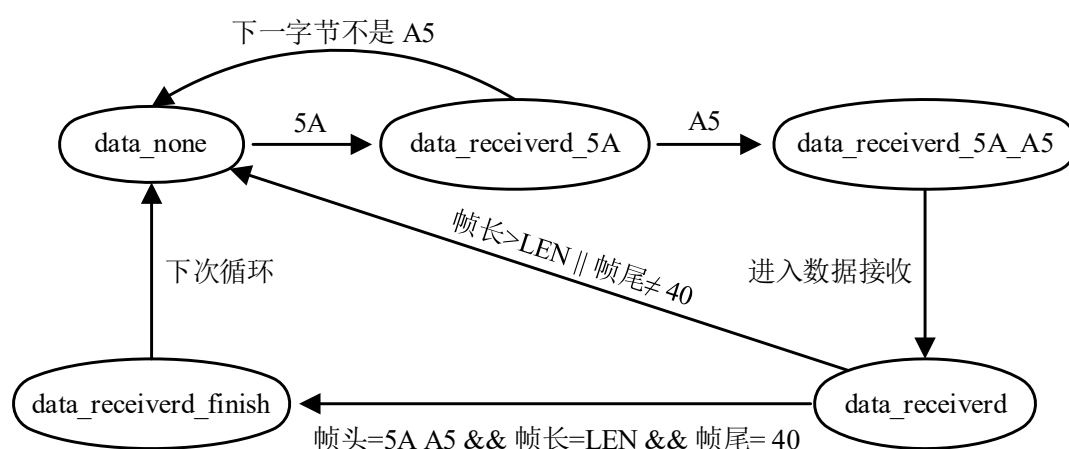


图 4.4 接收端（MCU 平台）的数据帧接收状态机

4.3 异构级联网络数据链路交互协议

4.3.1 数据交互流程设计

数据链路交互流程是网络通信协议的关键，确保数据在物理链路上可靠传输，为上层协议提供支持。该交互流程采用选择重传 SR-ARQ 的协议思想，发送端以流水线式批量发送文件或图像的数据帧，接收端持续接收数据，即使出错后还是继续进行接收和确认操作。当前批次传输结束后，接收端会反馈携带关键丢失数据包（Critical Missing Packets, CMPs）信息的 ACK 数据帧。发送端再接续重传 CMPs 信息指向的数据帧。

为实现少量与大量数据传输的功能，本课题设计了分别针对少量数据和大量数据的数据交互协议流程。少量数据包括指令和回应等简单数据，而大量数据则包括文件和图像等大数据。在交互协议流程中，涉及发送端、接收端和存储设备之间的完整传输流程。

面向少量数据的数据交互协议流程如图 4.5 所示。发送端向接收端发送功能号为 0x05 或 0x09 的数据帧以进行数据信息传输。接收端在接收到数据后，进行解析，并向存储设备申请存储

空间。存储设备在进行检测后，向接收端返回存储状态信息。接收端则根据存储状态信息向发送端反馈 ACK 数据包。接收端与存储设备之间的交互流程为可选：当接收端接收的数据为传输传感器单帧数据信息时，才需执行存储操作；当接收端接收的数据为指令信号时，无需执行存储操作。

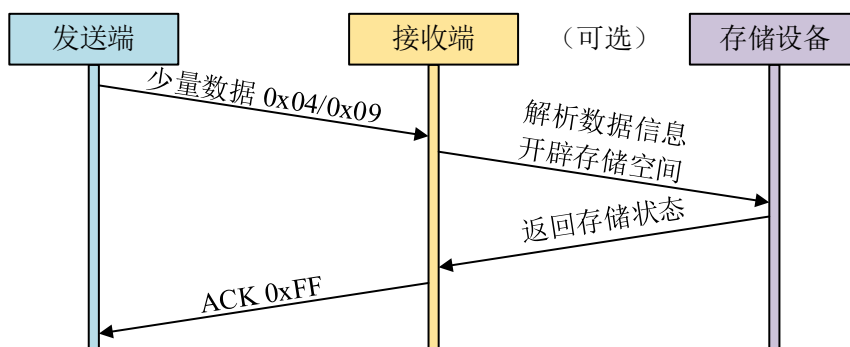


图 4.5 针对少量数据的交互协议流程

以下介绍的面向大量数据的交互协议流程为基础交互协议流程。在实际应用中，将会在该基础交互流程上实现多种数据传输机制以适应不同的传输需求。

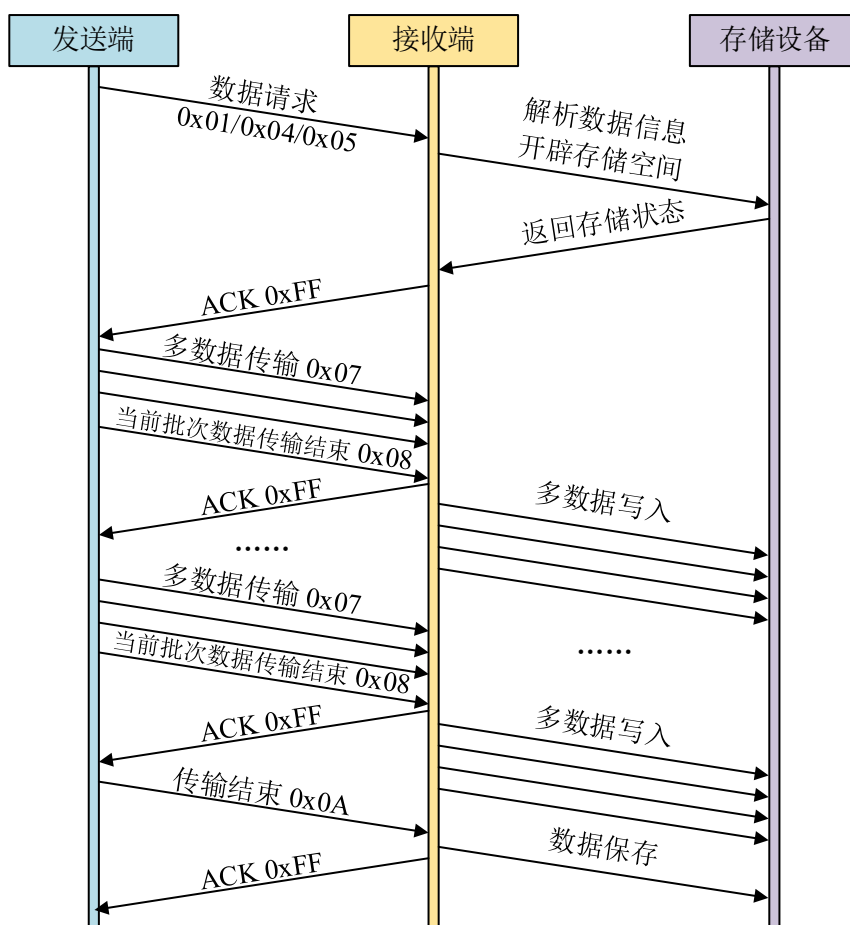


图 4.6 针对大量数据的交互协议流程（接收无错误）

面向大量数据的交互协议流程如图 4.6 所示，具体流程如下：

(1) 在面向大量数据的交互协议流程中, 发送端向接收端发送功能号为 0x01、0x04 或 0x05 的数据帧以发起数据传输请求。接收端则进行解析, 提取请求数据帧内的文件信息, 并以此向存储设备申请开辟存储空间。接收端再根据存储设备反馈的存储状态信息, 反馈给接收端。最终接收端根据 ACK 数据帧, 进行下一步传输, 从而完成大量数据传输链路的建立。

(2) 当数据传输链路建立并完成初始化后, 发送端将依照流程, 开启单批次的数据流水线式传输。此阶段传输数据帧的功能号为 0x07。数据接收端会不间断地获取数据, 并同时执行校验操作。一旦数据完整接收且校验无误, 接收端将发送 ACK 确认包作为响应, 随后把数据写入存储设备。

(3) 后续的交互流程将持续循环 (2) 的单批次数据传输流程, 即“发送端多数据传输-接收端接收校验回应-写入存储设备”的流程, 直至所有数据传输完毕。

(4) 当数据传输完毕后, 发送端会生成并发送功能号为 0x0A 的传输结束信息帧, 以此向接收端传达数据存储信号。随后, 接收端通过返回确认帧的方式, 实现整个交互协议的终止。

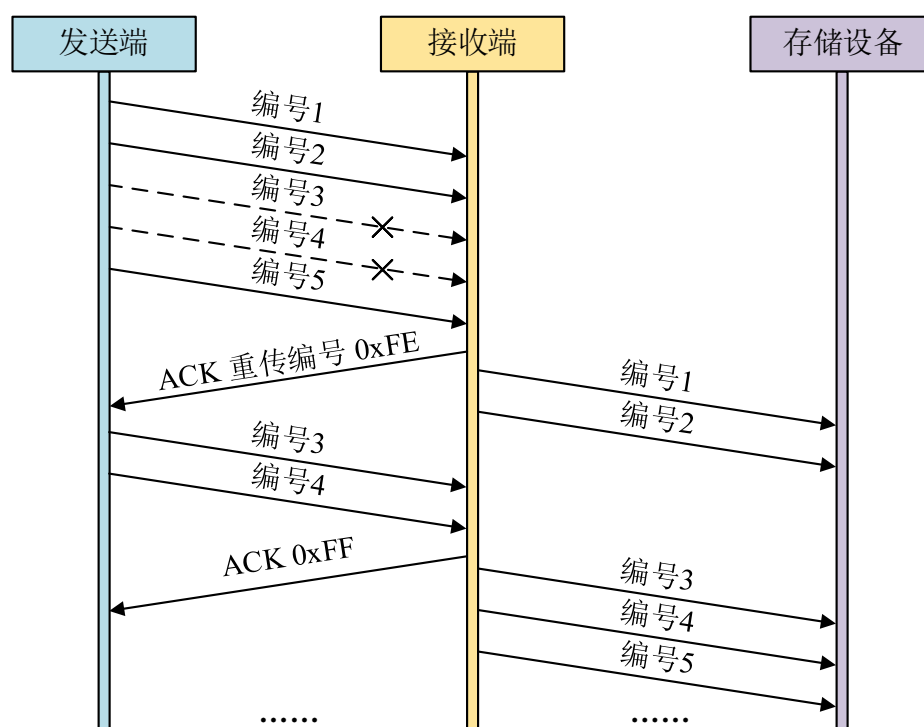


图 4.7 针对大量数据的交互协议流程 (接收有错误)

上述交互协议流程是基于接收端数据接收与校验无误的前提条件。当接收端检测到数据帧存在错误时, 将触发选择重传机制, 具体协议流程如图 4.7 所示。

(1) 在多数数据传输阶段, 发送端连续发送了 5 个数据帧, 编号依次为 1 至 5。经接收端检测, 编号为 3 和 4 的数据帧传输失败, 此时接收端反馈携带 CMPs 信息的 ACK 数据包 (功

能号为 0xFE), 同时存储写入已通过完整性校验的数据帧。需要特别说明的是, 编号 5 的数据帧虽已接收, 但仍暂存于缓存区, 尚未写入存储设备。

(2) 发送端在接收到携带 CMPs 信息的 ACK 数据包后, 将解析内容, 准确定位并重传指定数据包。在本例中, 即对传输失败的编号 3 和 4 数据帧进行重传。

(3) 若接收端成功接收重传数据帧, 则将编号 3 至 5 的数据帧写入存储设备, 完成整个选择性重传流程。倘若重传仍失败, 系统将持续执行选择重传, 直至所有数据帧传输完成。

本节所设计的数据链路交互协议流程包含分包传输和选择重传机制, 虽然能提升大数据传输的成功率, 但是在通信链路的信道状况严重恶化, 简单的重传也难以完成大数据传输任务。在此情况下, 本课题限制了超时重传机制的最大重传次数, 中断数据传输, 减少资源浪费的同时保证后续任务流程和其他功能的正常执行。

4.3.2 面向大数据传输的断续传输机制

在实际应用中, 大量数据传输中断的原因除重传次数达到上限外, 还包括传输环境变化引发通信链路随机性中断。环境变化引发通信链路随机性中断的表现形式是物理链路的瞬时中断, 网络节点系统会直接检测到链路中断信号。在发生大量数据传输中断后, 可能会执行重传操作。但是重传操作中的已接受数据重复传输操作会浪费网络资源, 导致传输效率低下, 影响异构级联网络的整体性能。为解决这一问题, 本课题提出了一种面向大数据传输的断续传输机制。

本课题的断续传输机制主要应用于文件和图像的传输过程。与少量数据传输不同, 大数据传输通常需要将文件进行分包拆解, 通过多次数据传输协议流程才能完整传输大数据文件。断续传输机制的核心思想借鉴了断点续传技术, 即在文件和图像上传过程中周期性或实时地记录上传状态^[95]。然而, 当前的断点续传技术多应用于 Web 开发, 依赖于前端与后端的协同交互。针对这一点, 本课题对断点续传技术进行改进, 以适配海底异构级联网络的节点系统, 满足海底异构级联网络的实际需求。

断点续传机制的实现关键在于精确记录数据传输中断的位置, 并能够在重新传输过程中定位断点, 重新建立传输流程, 继续传输。其技术实现流程如图 4.8 所示。在大数据传输过程中, 数据接收端通过对历史数据的检索和比对的方法, 校验当前传输数据是否存在历史数据, 防止重复传输, 提高传输效率。当接收端在检索和比对阶段检测到当前传输数据存在历史数据, 则会根据历史数据中存储的信息定位断点位置, 然后从最新位置接续传输。如果接收端在检索和比对阶段检测到当前传输数据不存在历史数据, 则建立新文件并完整传输, 同时记录历史数据, 为后续历史数据检测做准备。

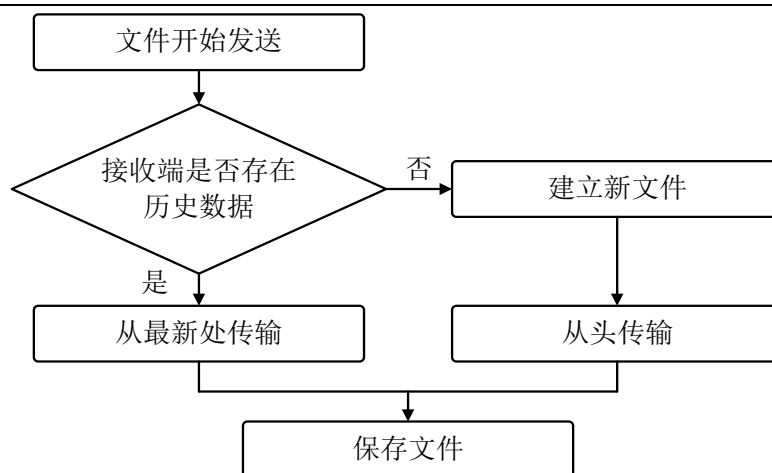


图 4.8 断点续传技术实现流程

本课题的所研究的传输环境关注于节点之间的通信，因此设计了如图 4.9 所示的断续传输模式，以适应该实际传输需求。断续传输实施过程具体如下：

(1) 在进行数据传输之前，发送节点需做好准备工作，包括加载前文提到的数据传输交互协议，并根据不同的链路类型执行时变信道传输策略或动态切换机制。

(2) 发送节点通过发送文件信息（实际为包含文件信息的请求信号）与接收节点建立文件数据传输流程。该文件信息应包含文件名、文件类型以及文件大小等参数。接收节点在接收到文件后，根据这些信息建立一个临时文件.tmp，用于记录接收通过校验的数据。

(3) 发送节点将文件数据进行分包，并以多批次方式发送。接收端则不断接收并进行校验，待传输批次结束后，进行数据统计并反馈。同时，接收端将校验通过的数据存储在临时文件中。

(4) 在数据传输过程中若传输信道质量下降，接收节点在超过数据帧重传机制最大时，将退出当前流程。退出传输流程之前，接收节点将保存临时文件，并把中断的文件传输任务信息记录到临时文件查询表中。该查询表以.txt 文件形式存在，记录未完成的文件传输任务信息，信息格式为“文件名（空格）文件类型（空格）文件大小（空格）文件指针偏移量”，多个信息之间由“\n”字符分隔。

(5) 当开始新的文件传输流程时，发送节点可能会重新执行之前的文件传输过程，传输重复的文件信息。接收端在确认该文件属于未完成的传输任务时，将相应反馈信息连同文件指针偏移量的值发送给发送节点，从而建立断续传输流程。

(6) 发送节点从指定的偏移位置开始接续数据包的传输。接收节点将接续接收的数据存入历史临时文件中，延续中断时的传输流程，最终实现接续传输的目标。

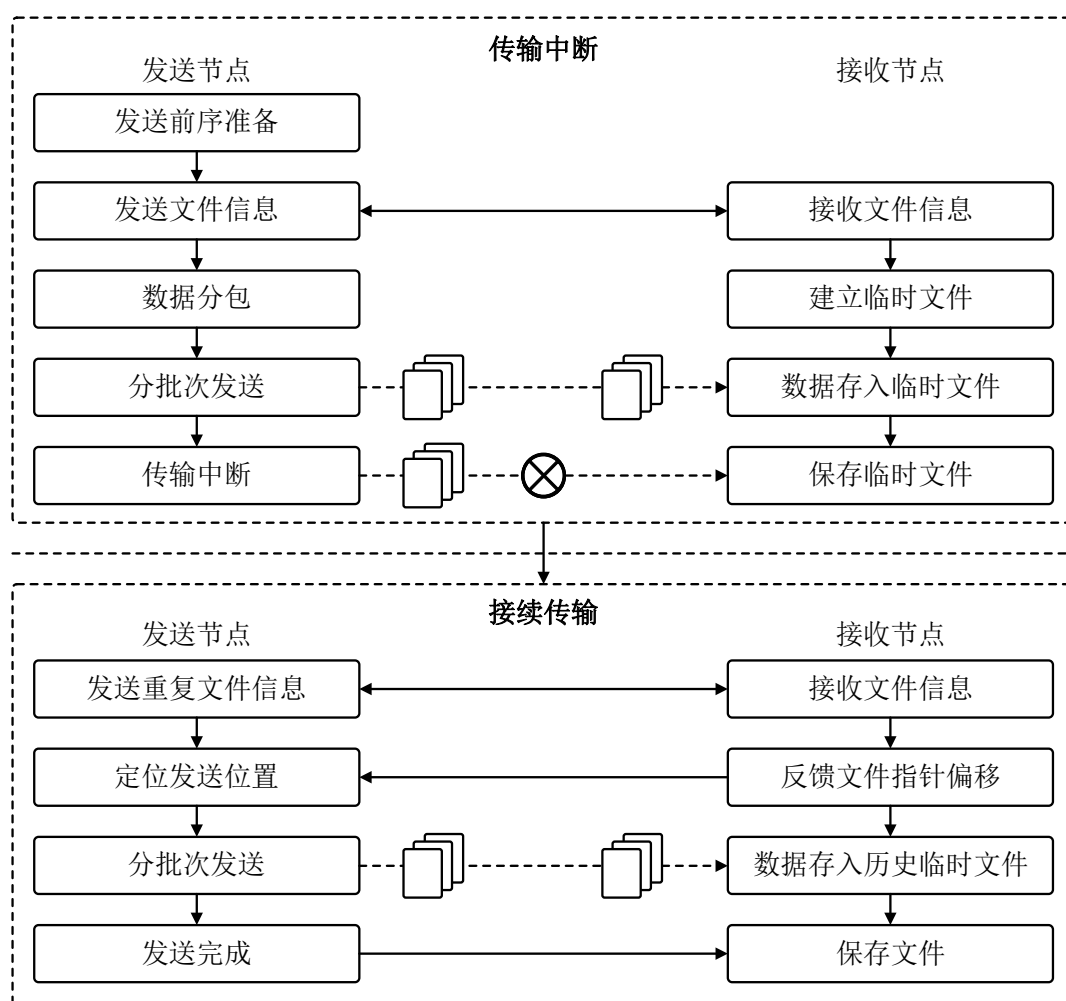


图 4.9 断续传输流程

4.4 异构级联网络数据链路传输机制

针对异构级联网络数据链路在不同应用场景下呈现的传输信道特性差异，需建立与信道特性相匹配的传输机制，从而实现链路传输性能的优化。本节将介绍基于上述传输协议而设计的两种异构级联网络数据传输机制：（1）是面向卫星和水声链路的时变信道传输策略；（2）是面向光电复合缆链路的动态切换机制。

4.4.1 面向卫星和水声链路的时变信道传输策略

在本课题设计的异构级联通信网络中，水下“中继节点-分布式观测节点”的水声通信链路和海上“岸基云存储平台-浮标节点”的卫星通信链路相比于“浮标节点-中继节点-底层主观测节点”段的光电复合缆链路具有信道时变性和不可靠性。在复杂条件下，水声通信链路和卫星通信链路中传输的无线电信号，因为受到周围环境变化和噪声干扰等因素影响而产生变化，从而影响数据链路的通信质量。

为解决时变信道导致数据传输可靠性降低的问题，本小节将提出一种时变信道数据传输策略，提高数据传输的可靠性。该策略方案考虑如图 4.10 所示时变信道数据传输场景，一种分布式观测节点和中继节点之间的点对点水声通信，另一种是浮标节点和岸基云存储平台之间的点对点卫星通信。

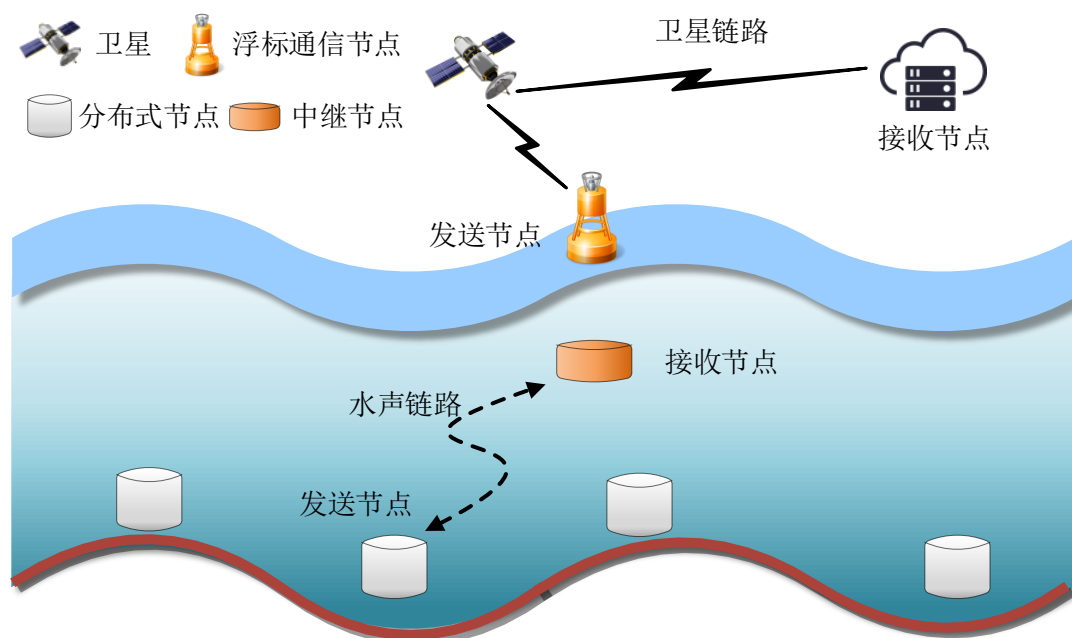


图 4.10 时变信道数据传输场景

在调整传输策略之前，需借助链路状态感知技术对信道质量进行有效评估，以获取信道的质量状态信息，为后续传输策略的调整奠定基础。传统的信道质量评估主要依据发射功率、接收功率、路径损耗和噪声强度等参数。然而，这些参数难以全面准确采集，同时也不能直接反映链路的实际传输效能。例如，在实际应用中，可能会出现无线信号强度参数指示良好，但实际的数据传输带宽却并不高的情况。这是因为这些参数指标只是从单方面以较为宽泛的方式反映链路的传输质量，不能全面评估信道质量。

本文采用的链路状态感知技术建立以实际传输效率为标准的信道质量评价体系：首先实时监测评估信道传输质量，然后利用实际的数据传输效果对评价指标进行调整。在设备能够提供支持的情况下，在进行数据传输前，通过链路测试数据提前获取较为准确的链路质量参数数据。以此为参考制定对应的传输策略。

基于此，本课题提出了一种实时传输统计的链路状态感知方法，具体步骤为：发送方短时间内以流水线方式传输一系列数据帧；接收方根据接收情况统计投递率和传输延时等信息，生成确认消息（ACK）数据包反馈给发送方。

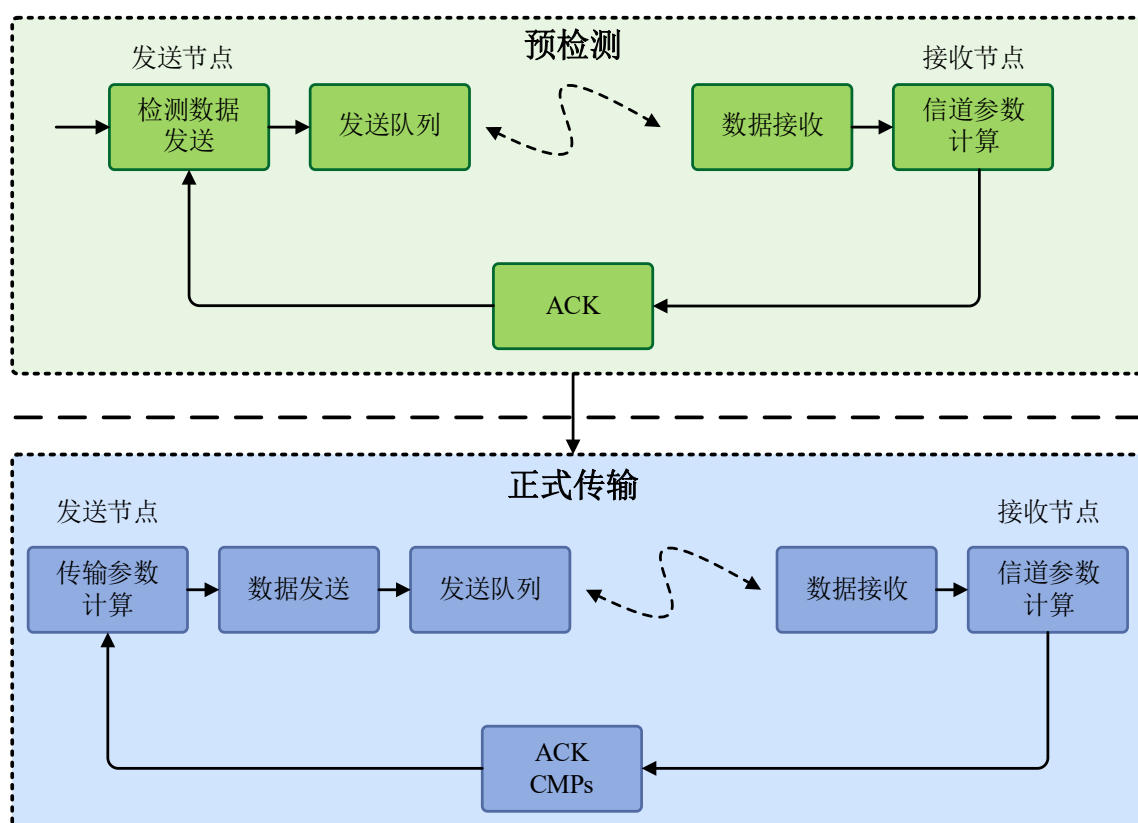


图 4.11 时变信道传输策略

基于上述链路状态感知方案，本课题提出了如图 4.11 所示的时变信道传输策略。在正式数据传输之前，首先进行信道预检测，即采用链路状态感知方案。发送节点生成固定样式的协议帧信号，并将其输入发送队列，发送给接收节点。接收节点接收到数据后，计算初始信道参数，并制作 ACK 数据包反馈给发送节点，完成预检测过程。接下来，发送节点根据初始信道参数计算传输参数，并据此调整数据帧的发送控制，增加或减少冗余信息。如此，传输便进入正式传输状态。在正式传输过程中，发送节点按照调整后的参数继续发送数据帧，接收方计算并更新信道参数，并将反馈信息传递给发送方。

正式传输和预检测的主要区别在于：

- (1) 正式传输阶段发送的数据为任务传输所需的正式数据，而预检测发送的是特殊的测试协议帧数据。
- (2) 在正式传输阶段，接收方反馈的 ACK 数据包中除信道参数外还包含 CMPs 的信息为丢失数据包选择重传做准备。而在预检测阶段，接收方反馈的 ACK 数据包中不包含 CMPs 信息。
- (3) 在正式传输阶段，需要持续经过传输反馈这一流程，目的是实时监测信道质量，进而动态调整传输策略。而在预检测阶段，仅需完成一次链路状态感知，目的是获取初始传输时的信道状态。

链路状态感知方案监控的参数是流水线式传输一系列数据帧的投递率（Packet Delivery Rate, PDR）和数据帧传输的平均延时，参数符号为 PDR 和 $\bar{T}$ 。计算方式如下：

$$PDR = \frac{N_{recv}}{N_{sent}} \quad (4.2)$$

$$\bar{T} = \frac{\sum T_i^{recv}}{N_{recv}} \quad (4.3)$$

式中 N_{sent} 为发送节点进行链路状态感知时发送的数据包数量或者单批次数据帧传输的总数据包数量； N_{recv} 为接收节点接收到的数据包数量， T_i^{recv} 为接收到第 i 个数据包的延时； $\sum T_i^{recv}$ 为接收到数据包的总延时。因为信道存在干扰，接收到的数据包数量小于等于发送的数据包数量。在传输时，数据帧携带数据包编号，可用于判断所缺失数据包的位置。计算时，总延时 $\sum T_i^{recv}$ 仅累加真正接收到的数据包的延时 T_i^{recv} 。因此，最终计算得出的平均延时 $\bar{T}$ 是接收到的数据包的平均延时，而非发送数据包的平均延时。单次延时 T_i^{recv} 所包含的时间如以下公式：

$$T_i^{recv} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (4.4)$$

t_1 表示发送节点发送多个数据包时，数据包与数据包之间的延时； t_2 表示发送节点发射器接收到数据再转换为无线信号的发射处理时间； t_3 表示无线信号在介质间传输的时间； t_4 表示接收节点接收到信号并解析转换为数据的时间。

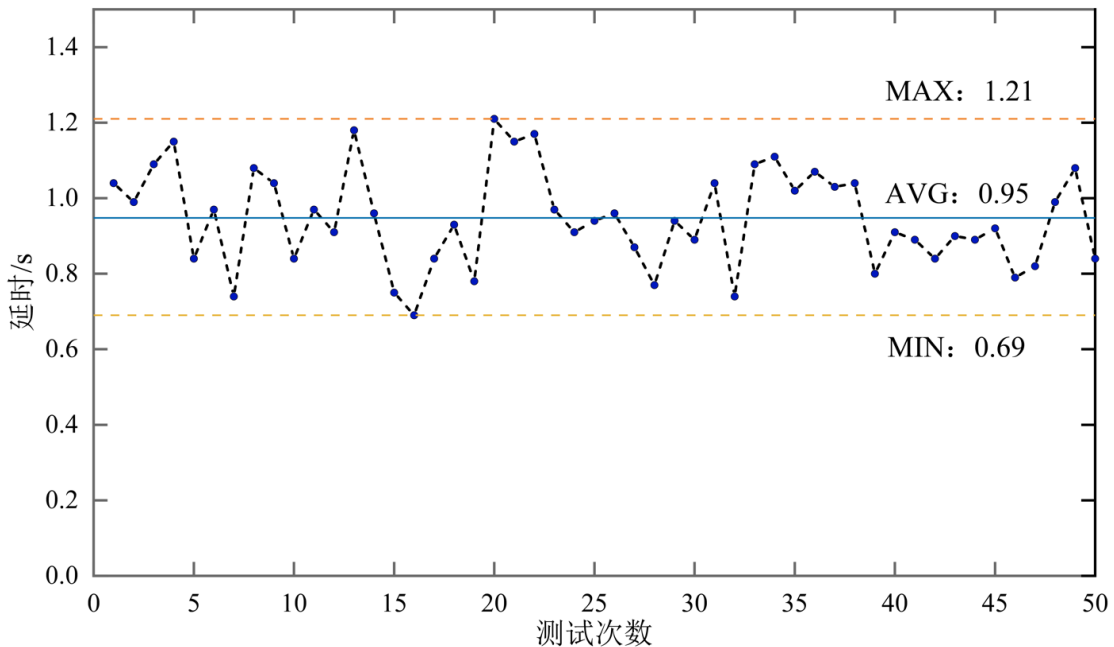


图 4.12 水声通信链路延时测试图

在实际应用中,为得到水声通信链路的延时时间的部分数据,本课题进行了测试。测试场景是把发送节点和接收节点的换能器紧贴放置,距离小于 10cm,因此,此时无线信号在介质间传输的时间 t_3 极小,可忽略。测试代码中设定固定延时 t_1 ,然后发送节点持续发送。接受节点持续接收并记录时间戳,即可计算出每次发射到接收的时间,即 t_2+t_4 的时间。测试结果如图 4.12 所示,由测试可知 t_2+t_4 的时间波动范围为 $\pm 0.3s$ 之间,器件传输性能相对稳定。平均时间为 0.95s 左右。

传输过程中,发送节点在得到接收节点反馈的信道参数 PDR 和 $\bar{T}$ 后,进一步调整数据帧的发送策略。相关传输策略参数为单批次数据传输的数据包数量 N 和每包数据的帧长 K ,计算公式如下:

$$N = \begin{cases} N_{\max}, & N > N_{\max} \text{ or } PDR = 1 \\ N_b \cdot \frac{PDR}{1-PDR} \cdot \frac{1}{1+\bar{T}}, & N_{\min} \leq N \leq N_{\max} \\ N_{\min}, & N < N_{\min} \end{cases} \quad (4.5)$$

$$K = \begin{cases} K_{\max}, & K > K_{\max} \text{ or } PDR = 1 \\ K_b \cdot \frac{T_b}{\bar{T}} \cdot \frac{PDR}{1-PDR}, & K_{\min} \leq K \leq K_{\max} \\ K_{\min}, & K < K_{\min} \end{cases} \quad (4.6)$$

表 4.4 相关参数符号说明

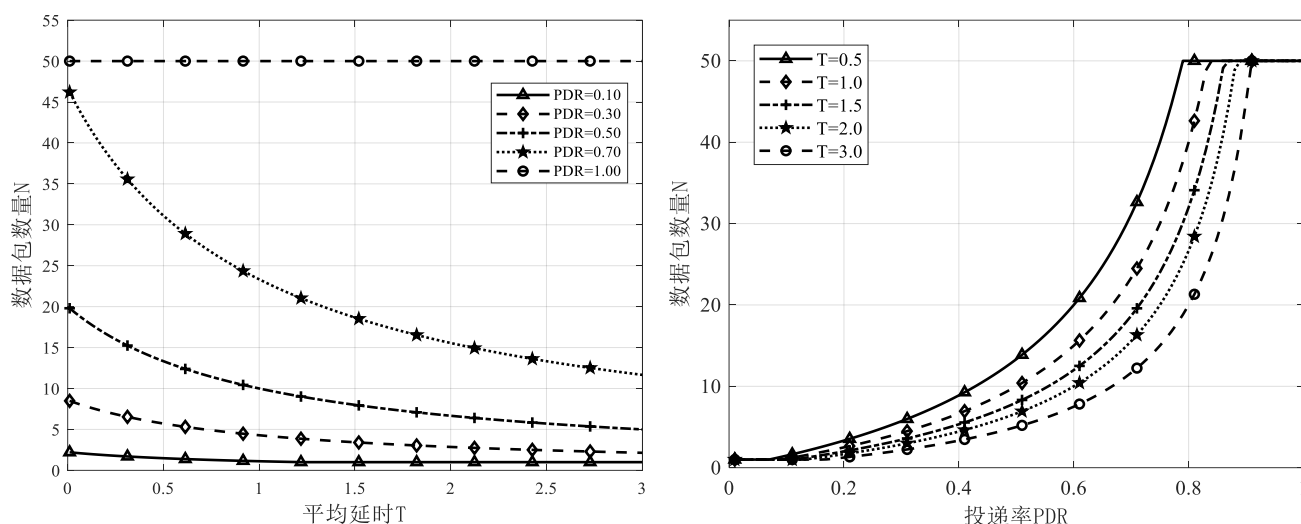
参数	描述
N	单传输批次的数据包数量
N_b	基准数据包数
$N_{\max}$	单传输批次最大允许的数据包数
$N_{\min}$	单传输批次最小允许的数据包数
K	数据帧长
K_b	基准数据帧长度
$K_{\max}$	最大允许的数据帧长
$K_{\min}$	最小允许的数据帧长
T_b	基准延时
$\bar{T}_b$	单传输批次的平均延时
PDR	单传输批次的投递率

式(4.5)和式(4.6)中,相关参数符号的含义如表 4.4 所示。式(4.5)是单传输批次的数据包数量 N 的调整策略,式(4.6)是传输数据帧长 K 的调整策略,它们主要受单传输批次的平均延时 $\bar{T}$ 和投递率 PDR 影响。随着平均传输延时 $\bar{T}$ 的降低,反映出两节点间的传输

距离缩短, 或者两点之间的传输介质的干扰状况得到改善, 遮挡物数量减少, 进而导致无线信号在传播过程中的路径损耗得到有效抑制, 信道链路在该维度上的质量得以提升。此种情形下发送节点可适当提升单次传输的数据包数量 N 并扩展数据帧长度 K 。

在本课题的研究中, 平均传输延时 $\bar{T}$ 不仅体现着不同分布式观测节点和中继节之间点有着不同的传输距离, 还体现着水声链路和卫星链路受遮挡的情况。投递率 PDR 的变化情况, 所体现的是水声链路和卫星链路因受到干扰而出现信号失真的情形。投递率 PDR 降低时, 发送节点可适当降低单次传输的数据包载荷量 N 并减小数据帧长度 K , 以适应信道不稳定的情况, 提高投递率。在式 (4.5) 和式 (4.6) 中, 对 N 和 K 设置了调整范围, 该范围根据硬件传输能力进行制定。

如图 4.13 是根据式 (4.5) 描绘的信道参数 PDR 和 $\bar{T}$ 与单批次数据传输的数据包数量 N 的关系。图 4.13 (a) 体现了在投递率 PDR 不变时, 随平均延时 $\bar{T}$ 的增加, 数据包数量 N 在减少; 反之, 随平均延时 $\bar{T}$ 的减小, 数据包数量 N 在增加。图 4.13 (b) 体现了在平均延时 $\bar{T}$ 不变时, 随投递率 PDR 的增加, 数据包数量 N 在增加; 反之, 随投递率 PDR 的减小, 数据包数量 N 也在减少。

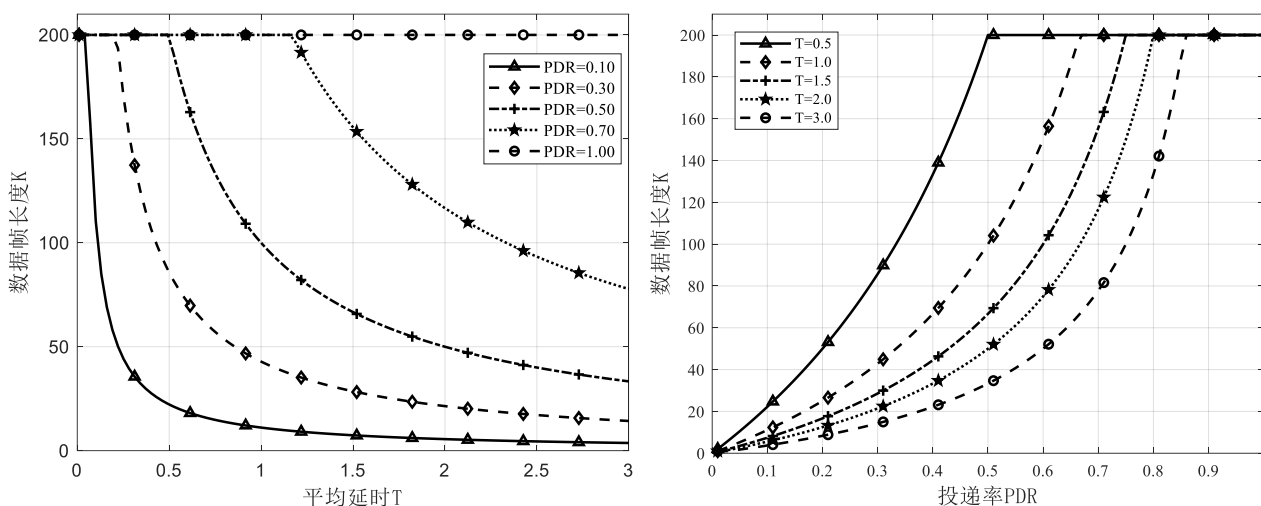


(a) 平均延时与数据包数量的关系

(b) 投递率与数据包数量的关系

图 4.13 信道参数与数据包数量的关系

如图 4.14 所示, 根据公式 (4.6) 绘制了信道参数 PDR 和 $\bar{T}$ 与单次数据传输所需数据帧长度 K 之间的关系。图 4.14 (a) 表明, 投递率 PDR 保持不变的情况下, 平均延时 $\bar{T}$ 的增大导致数据帧长度 K 的减少; 反之, 平均延迟 $\bar{T}$ 的减小则使数据帧长度 K 增加。图 4.14 (b) 表明, 在平均延迟 $\bar{T}$ 保持恒定时, 投递率 PDR 的提高会使数据帧长度 K 增加; 相对的, 投递率 PDR 的降低则会引起数据帧长度 K 的减小。



(a) 平均延时与数据帧长度的关系

(b) 投递率与数据帧长度的关系

图 4.14 信道参数与数据帧长度的关系

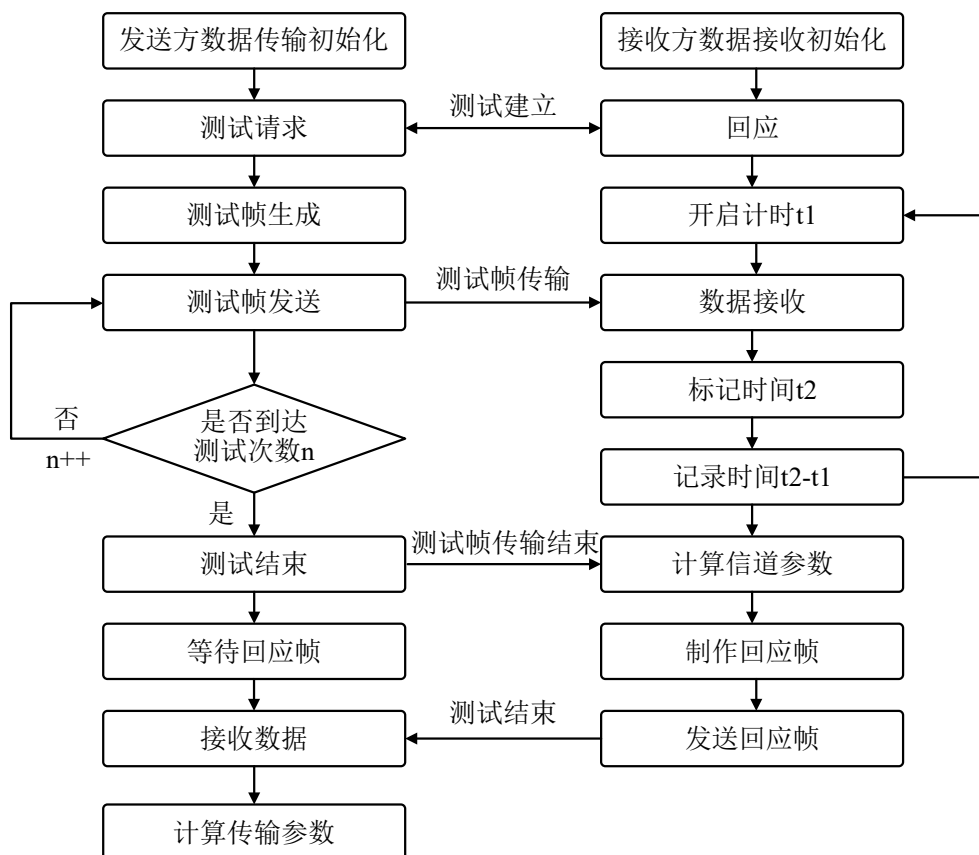


图 4.15 预检测流程图

发送节点和接收节点在集成链路状态感知方案和传输参数调整策略后,可执行如图 4.11 的时变信道传输策略。具体而言,发送节点进行数据传输前,需进行如图 4.15 所示的预检测流程。发送节点进行数据初始化,然后发送测试请求与初始化后的接收方建立测试。然后发

送如表 4.5 所示的测试帧结构, 该帧结构帧长为 62; 数据位为 50Byte, 每个 Byte 均设置为 0xAA; 数据包编号从 0x01 至 0x14 连续设置, 即表示连续传输 20 包测试数据帧。数据包编号在这里表示当前测试帧的编号。发送节点根据预设测试次数, 流水线式发送测试帧。接收节点则在每次接收前开启计时, 在接收测试帧后记录时间间隔, 统计平均延时。当最后一帧测试帧发送完成后, 接收节点进行信道参数计算。具体而言, 此时接收节点统计接收到的测试帧数 N_{recv} , 然后采用式 (4.2) 和式 (4.3) 即可计算出信道参数 PDR 和 $\bar{T}$ 。最后接收节点再制作回应帧 (不包含 CMPs 信息的 ACK 数据包) 并反馈给发送节点。

表 4.5 链路测试帧结构

帧头	节点号	功能位	数据包编号	帧长位	数据位	校验位	帧尾
5A A5	可选	01	可选	00 3E	可选	可选	40

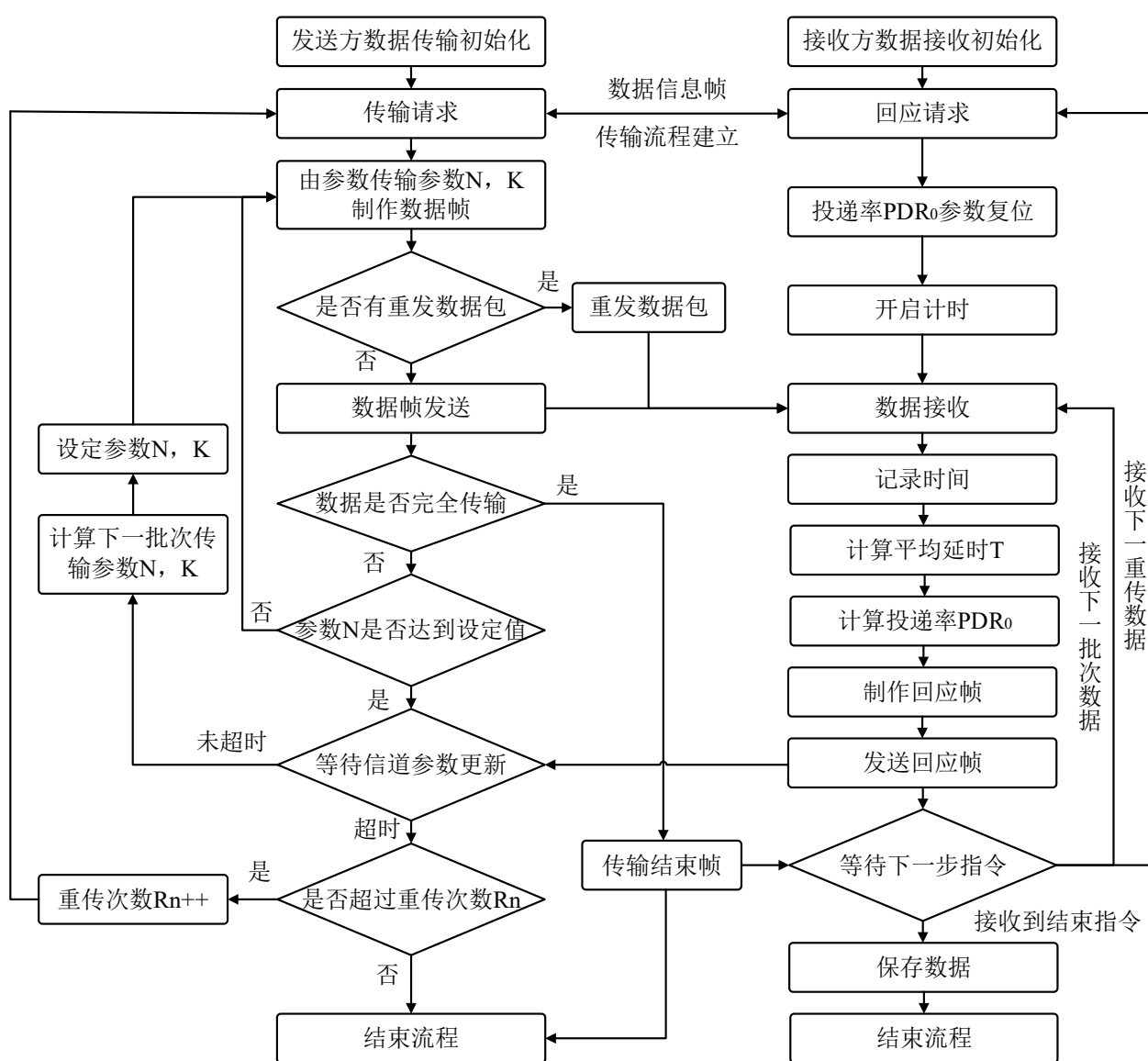


图 4.16 正式传输流程图

完成预检测后,即可获取正式传输时的初始传输参数值 N_0 和 K_0 ,开启如图 4.16 所示的正式传输流程。发送节点同样需要向接收节点发送传输请求建立传输流程,但是此时发送节点向接收节点发送数据的信息,用于接收节点采用对应的方式保存和备份。发送节点根据传输参数 N 和 K 制作数据帧并传输给接收节点。此时,接收节点则持续接收并校验数据,将通过校验的数据包解析后进行缓存,同时检查数据包编号的连续性,以此记录延时和是否投递成功。在传输完 N 个数据包后,即可传输一个当前批次结束的数据帧信号。接收节点即可进行信道参数计算和缺失数据包统计,然后通过回应帧(携带 CMPs 信息的 ACK 数据包)反馈给发送节点。发送节点则计算下一次的传输参数,继续传输。如果有需要重传的数据包,那么优先传输重传数据包。在流程中,发送节点仍持续在每次传输数据时判断数据是否完全发送,如果没有,再判断当前批次传输是否完成以决定下一包数据的种类。在传输流程中还设定了超时重传机制,以等待接收节点反馈的回应帧,如果超时,则继续发送对应信息的数据帧给接收节点。正式传输流程设置了重传次数,防止流程长时间处于等待状态。

4.4.2 面向光电复合缆链路的动态切换机制

本课题为异构级联海底观测局域网设计了卫星链路、光电复合缆链路和水声链路。卫星链路、光电复合缆链路和水声链路在实际应用场景下具有特定的传输优势,使得异构级联海底观测局域网能够实现海底观测和远程控制的功能。

光电复合缆链路包括光纤和双绞线两条链路,通过增加冗余链路的方式提高光电复合缆链路的可靠性。在光纤和双绞线两条链路的基础上,本课题针对不同的数据传输需求和环境状况,提出一种动态切换机制,实现合理的链路切换策略,充分发挥光纤链路与双绞线链路的各自优势^[96]。

在异构级联网络架构中,数据链路切换机制是一种保证数据持续性传输的重要技术。当前通信链路发生中断或者通信质量下降时,该技术可将发送节点和接收节点之间连接的数据链路切换为另一个数据链路,保证数据传输连续、不中断。在通信网络中,根据分类标准的不同,切换技术的划分也不同:

- (1) 根据网络接入技术的不同,可分为同构网络间的水平切换与异构网络间的垂直切换^[97]。
- (2) 根据切换执行方式的不同,可分为软切换、硬切换以及继电器切换。
- (3) 按照切换的实时性要求,可分为紧急执行的强制性切换与灵活调度的选择性切换。

水平切换技术和垂直切换技术是在通信网络切换中对应存在的技术。同构网络架构下的水平切换主要发生在采用相同接入技术的网络节点之间。而垂直切换作为异构网络的重要技术,主要发生在不同网络技术接入点之间的切换过程。具体到本课题研究范围,垂直切换表现为光电复合缆链路中光纤链路与双绞线链路之间的链路切换。

光纤链路与双绞线链路之间的切换问题如图 4.17 所示，主要分三个关键步骤，分别是链路质量测试、链路切换裁决和链路切换执行。

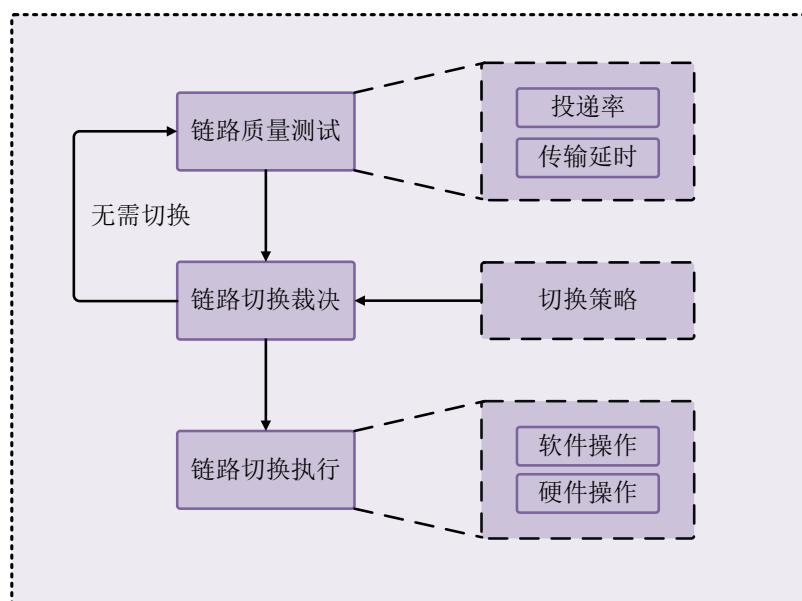


图 4.17 链路垂直切换流程

链路质量测试步骤的作用是实时检测当前通信链路的传输指标，关注数据传输链路的实时状态。链路质量测试的指标包括误码率、丢包率和传输延迟等多方面，为后续的链路切换裁决步骤提供参数支撑。

链路切换裁决步骤的作用是依据链路质量测试步骤提供的通信链路传输指标参数做出切换裁决。切换裁决的关键是设定合理的切换策略。切换策略主要包含链路优先级评估方案与切换判定标准。链路优先级评估方案可设定在某种条件下链路的优先级排序。切换判定标准则可结合链路优先级评估方案和相关通信链路传输指标参数，对是否执行链路切换做出判断。

链路切换执行步骤的作用是根据链路切换裁决的判断结果执行链路切换操作。链路切换执行步骤包含硬件操作和软件操作。硬件和软件的操作可实现不同通信技术间的快速切换，保证节点间通信的连续性。

光电复合缆的光纤链路与双绞线链路均具备高速数据传输能力。在复杂海洋的环境中，光电复合缆链路可能会遭受缠绕弯折和海流冲击等多种物理冲击，进而导致光纤链路产生随机性中断。但是双绞线链路凭借电磁信号传输时的固有稳定性，展现出更强的抗干扰能力。根据上述光纤链路与双绞线链路的链路特性结合链路垂直切换流程，设计了一套基于垂直切换技术同时面向光电复合缆链路的数据链路动态切换方案，以实现不同链路间的选择与实时切换，保证在复杂环境下数据传输的连续性。

为实现垂直切换方案，设计了表 4.6 所示的数据链路切换标志位。该标志位能够表示和指明当前通信链路的链路测试是否完成以及链路切换方向。链路切换标志位的参数类型为布尔型，包含 True 和 False 两种值。链路切换标志位包括 Flag_CH 和 Flag_CH_TEST，含义分

别为链路选择标志位和链路测试完成标志位。**Flag_CH** 指明链路切换方向，即链路切换的裁决结果。**Flag_CH_TEST** 指明当前通信链路的链路测试步骤的完成状态。

表 4.6 链路切换标志位

标志位	标志位含义	值	值含义
Flag_CH	链路选择标志位	True	采用光纤链路
		False	采用双绞线链路
Flag_CH_TEST	链路测试完成标志位	True	链路测试完成
		False	链路测试未完成

面向光电复合缆的动态切换机制需经历如上述图 4.17 的链路质量测试、链路切换裁决和链路切换执行三个步骤阶段。在链路质量测试阶段，本课题采用 4.4.1 节设计的链路状态感知方案对光电复合缆链路进行测试。因为在有线传输状态下传输延时 T 波动小、相对稳定，故传输延时 T 参数不作为测试的参考标准，仅采用投递率 PDR 作为测试参数。链路质量测试的帧结构内容采用如表 4.7 所示的形式，设置数据位长度为 100Byte，数据位为 100 个 0xAA，测试循环为 50。

表 4.7 动态切换机制链路质量测试阶段的测试帧结构

帧头	节点号	功能位	数据包编号	帧长位	数据位	校验位	帧尾
5A A5	可选	01	可选	00 70	可选	可选	40

在链路切换裁决阶段，本课题在上述链路切换标志位（表 4.6）和链路质量测试的基础上，提出了如图 4.18 所示的链路切换策略。因为光纤链路的传输速率优于双绞线链路，所以在链路切换策略的链路优先级排序中，光纤链路的优先级被设定为高于双绞线链路的优先级。链路切换策略的具体流程如下：

（1）在数据传输的开始，链路切换策略首先对光纤链路的传输质量进行测试，即采用链路质量测试阶段的测试方案，对投递率 PDR 进行测试。

（2）当光纤链路的投递率低于 50%时，表明光纤链路的传输质量差。链路切换策略则进行双绞线链路的传输质量测试。

（3）如果双绞线链路的投递率也低于 50%，这表明复合缆链路当前正在遭受剧烈的外部环境干扰和冲击。链路切换策略将对两个链路的传输质量进行循环测试。

（4）如果其中一个链路通过测试，则根据结果将 **Flag_CH** 设置为相应的值（True 表示采用光纤链路；False 表示采用双绞线链路）。

（5）链路切换策略将 **Flag_CH_TEST** 设置为 True，表明链路切换策略完成链路质量测试，进入链路裁决和切换阶段。

（6）链路切换策略根据 **Flag_CH** 和 **Flag_CH_TEST**，确定链路是否切换和切换方向，并执行切换操作。

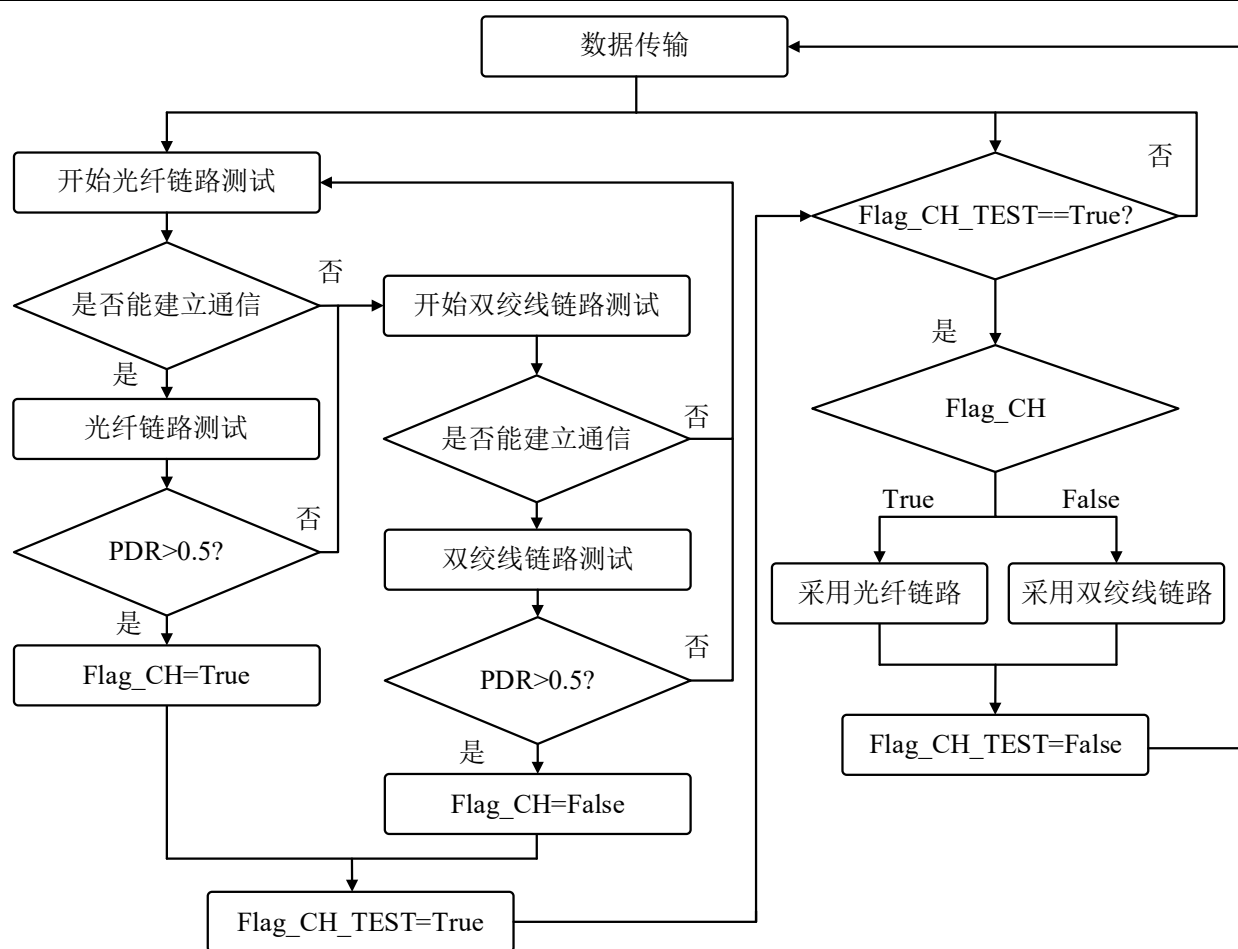


图 4.18 链路切换策略

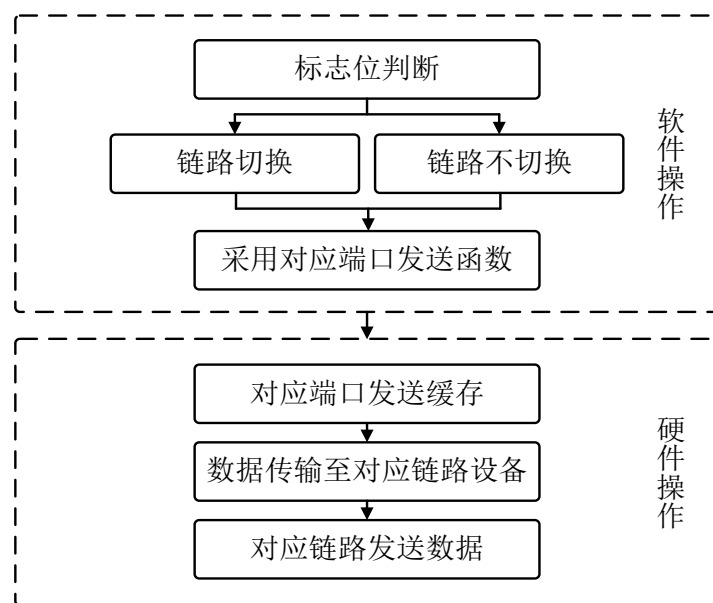


图 4.19 链路切换执行

在链路切换策略流程完成链路裁决判断后，进一步执行如图 4.19 所示的链路切换执行步骤，完成最后的链路切换操作。链路切换执行步骤依靠软硬件的协同操作。在软件操作中，

节点的系统程序根据 Flag_CH 和 Flag_CH_TEST 标志位判断是否需要执行链路切换以及链路切换的方向，然后系统程序调用对应的端口发送函数进行数据传输。在硬件操作中，节点的控制底板将发送缓存区的数据传输至对应的链路设备。链路设备再将数据发送，即可实现整体的链路切换流程。

4.5 本章小结

本章阐述了异构级联海底观测局的数据链路帧结构、交互协议设计方案和多种具有特定使用场景的数据传输机制。首先，介绍了异构级联海底观测局的数据链路连接方案。然后，设计了支持不同类型传输的数据链路基础帧结构。接着，进一步设计了面向不同数据传输需求的交互协议，同时提出了面向大数据传输的断续传输机制。最后，针对不同链路的传输特性，提出了面向卫星与水声链路的时变信道传输策略和面向光电复合缆链路的动态切换机制，以提升链路传输的效率和可靠性。

5 系统测试与验证

本课题根据上述异构级联海底观测局域网及数据通信链路设计方案，搭建了相应的硬件平台。然后本章节将在此基础上对硬件平台的结构强度和功能进行测试验证，同时还对异构级联海底观测局域网数据链路的交互功能、传输性能和传输机制等方面进行测试。接着展示各方面测试的功能验证及测试结果。最后进行海上布放测试，验证异构级联海底观测局域网的实际功能及效果。

5.1 系统组成部件搭建

异构级联海底观测局域网系统的硬件部分主要包括观测节点和汇聚节点：观测节点包括底层主观测节点和分布式观测节点；汇聚节点包括浮标节点、中继节点。此外，岸基云存储平台也同步完成搭建。

5.1.1 观测节点

图 5.1 是基于前文设计的底层主观测节点及电路仓。底层主观测节点的梯台结构以及底部四个锥形的支撑脚结构使其能牢固的稳扎在海床上，增强锚定能力。电路仓、电池仓和各种传感器搭载在每层的隔板之上，并用夹具紧固，防止脱落。



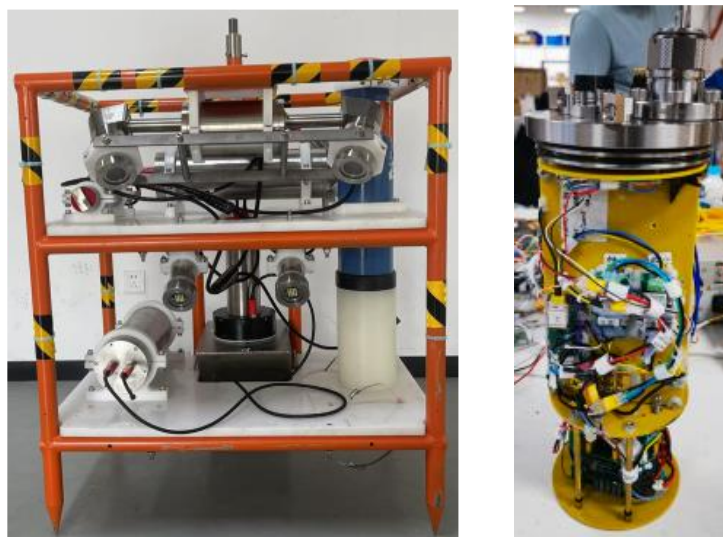
(a) 底层主观测节点



(b) 电路仓

图 5.1 底层主观测节点和电路仓

图 5.2 展示了分布式观测节点及电路仓。分布式观测节点采用立方体框架结构，分为两层结构，可搭载电池仓、电路仓和各种观测器件。分布式观测节点底部采用四组锥形支撑结构，实现稳定的固定于海底。



(a) 分布式观测节点

(b) 电路仓

图 5.2 分布式观测节点和电路仓

5.1.2 汇聚节点

图 5.3 展示了浮标节点以及电路仓。部分电路装载于浮球内部的球形玻璃罩内，实现浮标节点通信功能的同时，防止海水浸入。球形玻璃罩中间横置环氧树脂隔板，以供电路器件固定。球形玻璃罩和环氧树脂隔板的贴合处采用灌封处理以增强密封性，同时防止环氧树脂隔板因冲击振动而脱落。电路与外部连接的缆线通过预留的缆线过孔实现连接，保证了电路与外部设备的数据交互和能量传输。

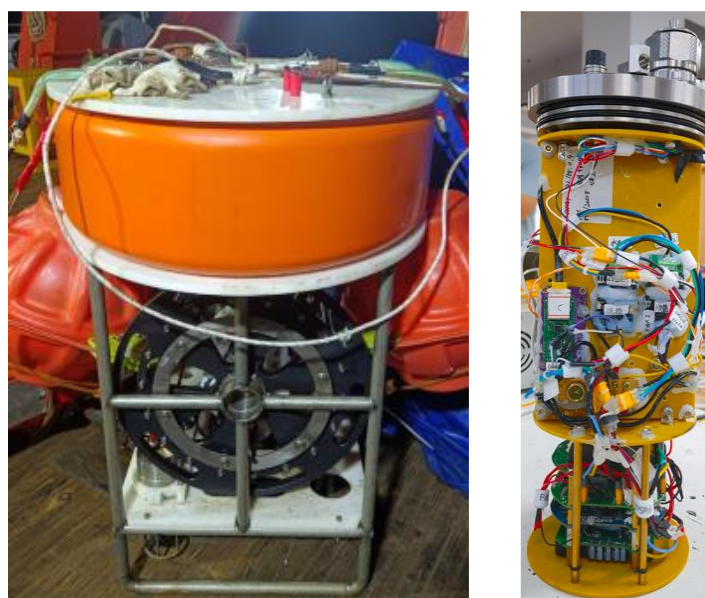


(a) 浮标通信节点

(b) 电路仓

图 5.3 浮标节点和电路仓

图 5.4 展示了中继节点及电路仓。中继节点的上部分为橘色的浮体材料，下部分为整体支撑框架。支撑框架内部为盘缆绞车结构，用以盘卷收纳多余的缆线。盘缆绞车的滚筒结构内部装载电路仓和电池仓。仓体的缆线通过盘缆绞车结构两侧的预留孔伸出，可与上下节点进行连接。



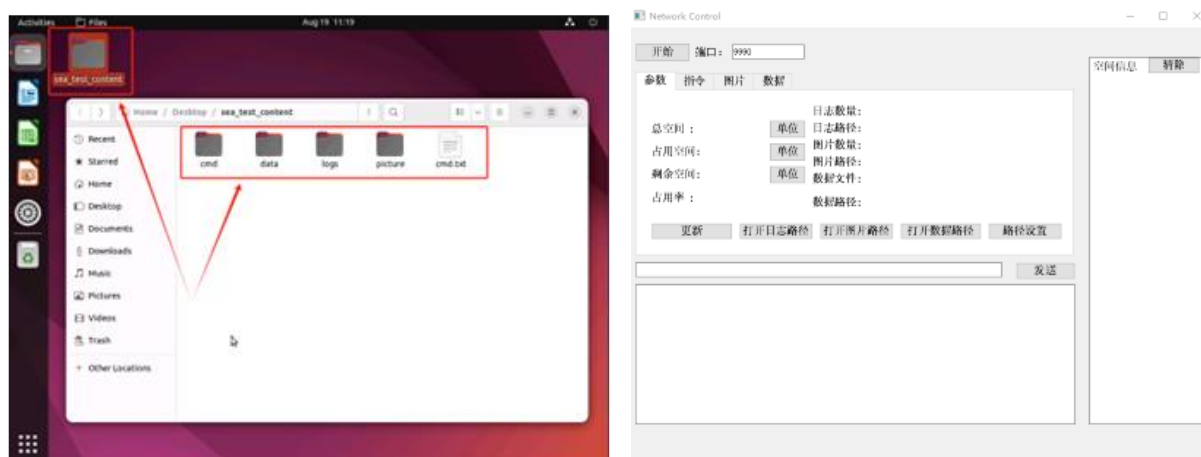
(a) 中继节点

(b) 电路仓

图 5.4 中继节点结构和电路仓

5.1.3 岸基云存储平台

采用华为云服务器构建了如图 5.5 (a) 所示的岸基云存储平台，基于 Ubuntu 桌面版本的操作系统实现数据存储与展示，用户可以通过如图 5.5 (b) 所示的用户交互界面程序浏览数据和获取存储信息，同时还可在指令窗口中输入并保存指令，等待节点连接并获取。



(a) 岸基云存储平台

(b) 用户交互界面

图 5.5 岸基云存储平台和用户交互界面

5.2 仓体压力测试

随着海洋深度的增加，网络节点仓体受到海水的压力也不断增加。本课题对网络节点仓体进行压力测试，检测仓体是否能满足深海工作的需求。具体的压力测试流程如下：

- (1) 将空仓体进行密封处理，同时使用对应的堵头封闭仓体裸露的连接件。
- (2) 将整个密封处理的仓体放入如图 5.6 (a) 所示的压力测试仪器，并紧闭封盖。
- (3) 调整压力值至目标数值，启动压力测试仪器。
- (4) 如图 5.6 (b) 所示，在测试压力值到目标数值后，进行 8 小时的保压测试。

(5) 保压测试完成后，取出仓体，检查仓体外壁和端盖是否存在裂痕，并打开端盖检查是否存在渗水现象。

若仓体外壁和端盖没有裂痕，且仓体内部无渗水，则判定该仓体通过压力测试。本课题所需的仓体的测试结果详见表 5.1。实验结果表明，所有仓体均成功通过压力测试，满足实际应用需求。



(a) 仓体和压力测试仪器



(b) 测试压力值

图 5.6 仓体压力测试

表 5.1 仓体压力测试结果

仓体		测试压力值	是否通过测试
浮标节点	电池仓	5Mpa	是
中继节点	电路仓	30Mpa	是
	电池仓	30Mpa	是
底层主观测节点	电路仓	60Mpa	是
	电池仓	60Mpa	是
通用	水声通信仓体	60Mpa	是

5.3 同步唤醒功能测试

本课题设计了运用于异构级联网络总线拓扑结构部分（浮标节点-中继节点-底层主观测节点）的同步唤醒功能。为验证该功能的可行性与可靠性，本节将介绍同步唤醒功能的测试方案和测试结果。

步唤醒测试连接如图 5.7 所示，光电复合缆通过连接件接入测试电路；计算机通过串口连接测试电路，实现控制和显示。测试电路分为主动唤醒方和被唤醒方。主动唤醒方和被唤醒方的电路基于 3.5 节所述的远程唤醒原理设计，包含定时式电源模块、唤醒式电源模块以及实现控制和数据记录的 MCU。在测试电路中，定时式与唤醒式电源模块实现具体的同步唤醒功能；主动唤醒方的 MCU 负责发送唤醒信号；被唤醒方的 MCU 负责被唤醒后记录数据；主动唤醒方和被唤醒方进行单次唤醒触发测试后，分别将对应的信息发送至计算机。

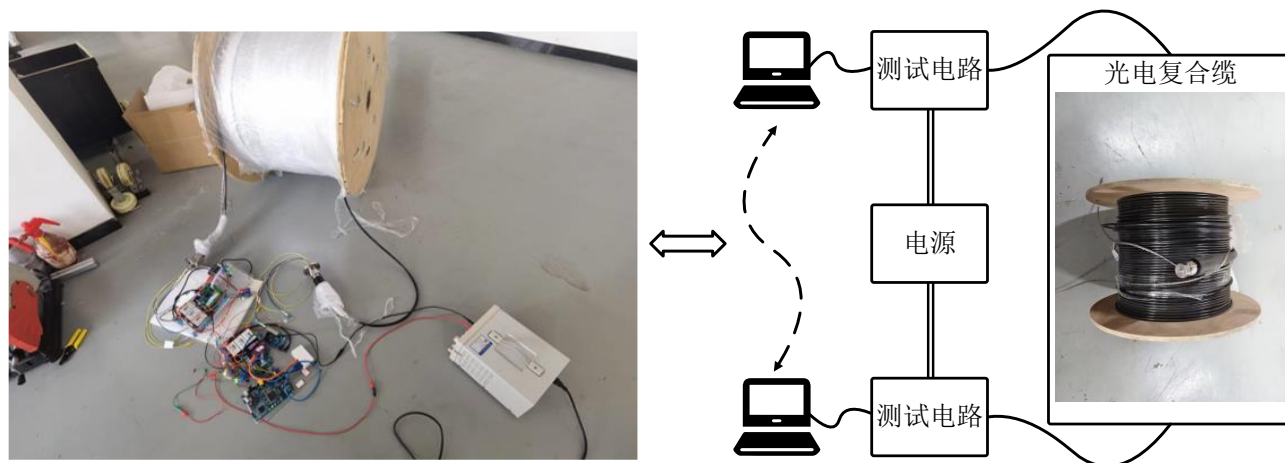


图 5.7 同步唤醒测试

测试方式分为可行性测试和可靠性测试。可行性测试主要验证同步唤醒的功能是否能够实现。可行性测试将会对 2000m 和 4000m 的光电复合缆进行测试，具体测试方式为：

- （1）在搭建测试环境后，保持被唤醒方处于关机断电状态。
- （2）让主动唤醒方的 MCU 触发外部唤醒模块，闭合继电器。
- （3）等待电流传至被唤醒方，以触发被唤醒方的唤醒继电器。观察被唤醒方是否通电。
- （4）被唤醒方成功唤醒后，观察串口数据并检测测试电路当前的参数。

唤醒参数测试结果如表 5.2 所示，在 2000m 和 4000m 缆线的远程唤醒方案测试中，均能以低于 1mW 的功率实现远程唤醒功能。低于 1mW 的功率的触发功率在满足可行性的前提下，实现了能量节省。

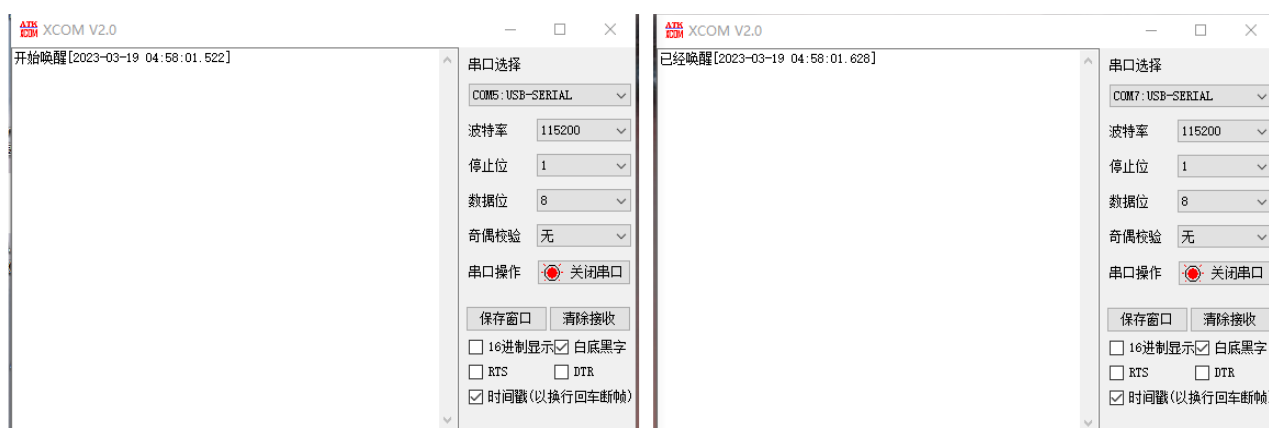
表 5.2 唤醒参数测试结果

缆长 m	主动方电压 V	被触发电压 V	电压差 V	电流 mA	功率 mW
2000	23.67	23.61	0.06	2.6	0.156
4000	23.70	23.52	0.18	3.0	0.540

可靠性测试主要验证远程唤醒功能的可重复性和同步效率。在可靠性测试中，仅采用 4000m 缆线进行测试，因为 4000m 缆线的测试结果可体现 2000m 缆线的测试结果。具体实施过程如下：

- (1) 主动唤醒方触发唤醒信号时，向计算机发送开始唤醒的信息。
- (2) 被唤醒方在被通电唤醒后，向计算机发送已经唤醒的信息。
- (3) 通过如图 5.8 所示的双方串口显示的信息时间差，计算得出单次唤醒所需的时间。
- (4) 进行多次循环测试，收集多组数据。

最终根据多次测试数据绘制了如图 5.9 所示的唤醒时间测试结果图。实验结果表明，远程唤醒功能在多次测试中均能成功实现，验证了该功能具有极高的可重复性；远程唤醒功能在 4000m 缆线的唤醒时间约为 100ms，展现了良好的同步性。测试结果均满足本课题的应用需求。



(a) 主动唤醒方

(b) 被唤醒方

图 5.8 唤醒测试串口显示

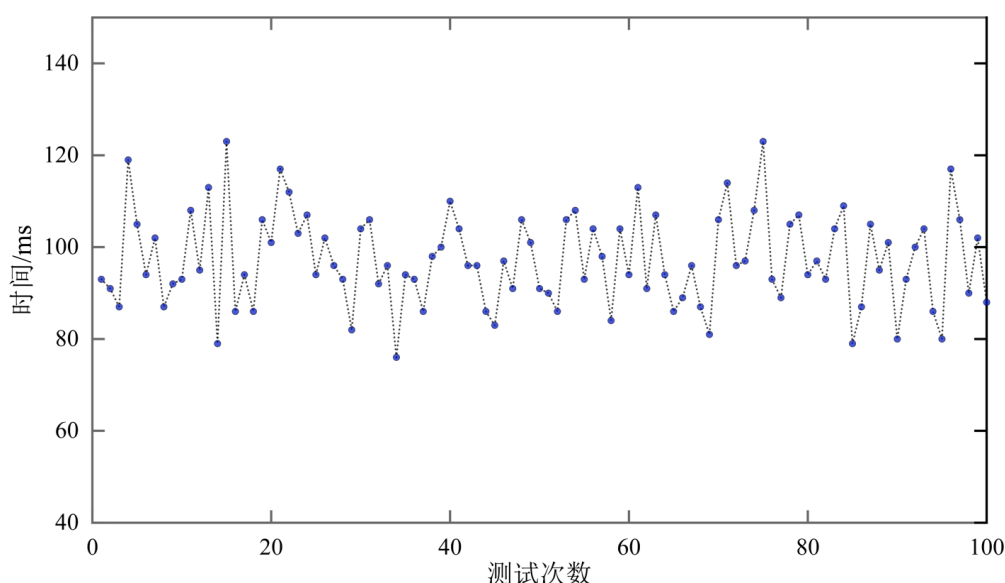


图 5.9 唤醒时间测试结果

5.4 异构网络传输实验

为了验证异构级联网络方案的有效性，本课题在实物平台上进行光电复合缆链路、水声链路和卫星链路的数据传输实验，同时对异构级联网络的断续传输机制、时变信道传输策略以及动态切换机制进行测试。

5.4.1 链路传输测试

(1) 光电复合缆链路传输测试

由于光电复合缆链路的接口采用以太网通信模块通信方式，因此本课题使用针对以太网性能测试工具 iperf3 进行传输性能测试。因为光电复合缆链路中存在光纤链路和 EDSL 链路，所以在单独测试时需要将另一链路屏蔽以免影响测试结果。光电复合缆链路两端分接入计算机模拟两端节点通信，一端启动 iperf3 工具并配置为服务器，另一端配置为客户端，再分别利用 TCP 和 UDP 传输协议进行通信带宽和传输延时的测试。光纤链路和 EDSL 链路测试过程如图 5.10 和图 5.11 所示。

```
Server listening on 8001
Accepted connection from 192.168.183.1, port 14577
[ S] local 192.168.183.128 port 8001 connected to 192.168.183.1 port 14578
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
[ 5] 0.00-1.00 sec  107 MBytes  895 Mbits/sec
[ 5] 1.00-2.00 sec  108 MBytes  907 Mbits/sec
[ 5] 2.00-3.00 sec  118 MBytes  989 Mbits/sec
[ 5] 3.00-4.00 sec  123 MBytes  1.03 Gbits/sec
[ 5] 4.00-5.00 sec  109 MBytes  916 Mbits/sec
[ 5] 5.00-6.00 sec  117 MBytes  977 Mbits/sec
[ 5] 6.00-7.00 sec  113 MBytes  952 Mbits/sec
[ 5] 7.00-8.00 sec  112 MBytes  942 Mbits/sec
[ 5] 8.00-9.00 sec  114 MBytes  959 Mbits/sec
[ 5] 9.00-10.00 sec 114 MBytes  960 Mbits/sec
[ 5] 10.00-10.05 sec 4.38 MBytes 797 Mbits/sec
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
[ 5] 0.00-10.05 sec 0.00 Bytes  0.00 bits/sec
[ 5] 0.00-10.05 sec 1.11 GBytes 952 Mbits/sec
sender
receiver
```

(a) TCP 传输速率测试

```
Server listening on 8001
Accepted connection from 192.168.183.1, port 14746
[ S] local 192.168.183.128 port 8001 connected to 192.168.183.1 port 53503
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth    Jitter    Lost/Total Datagrams
[ 5] 0.00-1.00 sec  120 KBytes  980 Kbits/sec  1.384 ms  0/15 (0%)
[ 5] 1.00-2.00 sec  128 KBytes  1.05 Mbits/sec  1.199 ms  0/16 (0%)
[ 5] 2.00-3.00 sec  128 KBytes  1.05 Mbits/sec  1.460 ms  0/16 (0%)
[ 5] 3.00-4.00 sec  128 KBytes  1.05 Mbits/sec  1.777 ms  0/16 (0%)
[ 5] 4.00-5.00 sec  128 KBytes  1.05 Mbits/sec  1.515 ms  0/16 (0%)
[ 5] 5.00-6.00 sec  128 KBytes  1.05 Mbits/sec  1.211 ms  0/16 (0%)
[ 5] 6.00-7.00 sec  128 KBytes  1.05 Mbits/sec  0.881 ms  0/16 (0%)
[ 5] 7.00-8.00 sec  128 KBytes  1.05 Mbits/sec  0.869 ms  0/16 (0%)
[ 5] 8.00-9.00 sec  128 KBytes  1.05 Mbits/sec  1.507 ms  0/16 (0%)
[ 5] 9.00-10.00 sec 128 KBytes  1.05 Mbits/sec  1.416 ms  0/16 (0%)
[ 5] 10.00-10.06 sec 0.00 Bytes  0.00 bits/sec  1.416 ms  0/0 (0%)
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth    Jitter    Lost/Total Datagrams
[ 5] 0.00-10.06 sec 0.00 Bytes  0.00 bits/sec  1.416 ms  0/159 (0%)
```

(b) UDP 延时测试

图 5.10 光纤链路传输测试

```
Server listening on 8001
Accepted connection from 192.168.183.1, port 1299
[ S] local 192.168.183.128 port 8001 connected to 192.168.183.1 port 1300
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
[ 5] 0.00-1.00 sec  660 KBytes  5.40 Mbits/sec
[ 5] 1.00-2.00 sec  746 KBytes  6.11 Mbits/sec
[ 5] 2.00-3.00 sec  732 KBytes  6.00 Mbits/sec
[ 5] 3.00-4.00 sec  732 KBytes  5.99 Mbits/sec
[ 5] 4.00-5.00 sec  732 KBytes  5.99 Mbits/sec
[ 5] 5.00-6.00 sec  732 KBytes  6.01 Mbits/sec
[ 5] 6.00-7.00 sec  732 KBytes  5.99 Mbits/sec
[ 5] 7.00-8.00 sec  732 KBytes  6.00 Mbits/sec
[ 5] 8.00-9.00 sec  732 KBytes  6.00 Mbits/sec
[ 5] 9.00-10.00 sec 732 KBytes  6.00 Mbits/sec
[ 5] 10.00-10.07 sec 0.00 Bytes  0.00 bits/sec
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
[ 5] 0.00-10.07 sec 0.00 Bytes  0.00 bits/sec
[ 5] 0.00-10.07 sec 7.09 MBytes 5.91 Mbits/sec
sender
receiver
```

(a) TCP 传输速率测试

```
Server listening on 8001
Accepted connection from 192.168.183.1, port 1561
[ S] local 192.168.183.128 port 8001 connected to 192.168.183.1 port 54376
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth    Jitter    Lost/Total Datagrams
[ 5] 0.00-1.00 sec  120 KBytes  982 Kbits/sec  2.996 ms  0/15 (0%)
[ 5] 1.00-2.00 sec  120 KBytes  983 Kbits/sec  1.797 ms  0/15 (0%)
[ 5] 2.00-3.00 sec  128 KBytes  1.05 Mbits/sec  2.209 ms  0/16 (0%)
[ 5] 3.00-4.00 sec  128 KBytes  1.05 Mbits/sec  1.528 ms  0/16 (0%)
[ 5] 4.00-5.00 sec  128 KBytes  1.05 Mbits/sec  1.059 ms  0/16 (0%)
[ 5] 5.00-6.00 sec  120 KBytes  982 Kbits/sec  0.883 ms  0/15 (0%)
[ 5] 6.00-7.00 sec  128 KBytes  1.05 Mbits/sec  1.054 ms  0/16 (0%)
[ 5] 7.00-8.00 sec  128 KBytes  1.05 Mbits/sec  1.158 ms  0/16 (0%)
[ 5] 8.00-9.00 sec  120 KBytes  983 Kbits/sec  1.869 ms  0/15 (0%)
[ 5] 9.00-10.00 sec 128 KBytes  1.05 Mbits/sec  1.826 ms  0/16 (0%)
[ 5] 10.00-10.06 sec 0.00 Bytes  0.00 bits/sec  1.826 ms  0/0 (0%)
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth    Jitter    Lost/Total Datagrams
[ 5] 0.00-10.06 sec 0.00 Bytes  0.00 bits/sec  1.826 ms  0/156 (0%)
```

(b) UDP 延时测试

图 5.11 EDSL 链路传输测试

经过多次测试后，计算得到如表 5.3 所示的光电复合缆链路性能测试结果。光纤链路的平均传输速率为 943.254Mbps，平均延时为 1.327ms。EDSL 链路的平均传输速率为

5.933Mbps，平均延时为 1.963ms。在传输链路不被干扰的情况下，光纤链路的性能优于 EDSL 链路。

表 5.3 光电复合缆链路传输性能测试结果

链路	平均传输数据量 (Bytes)	测试次数	平均传输速率 (Mbps)	平均延时 (ms)
光纤链路	1.12G	20	943.254	1.327
EDSL 链路	7.08M	20	5.933	1.963

(2) 水声链路传输测试

水声链路的传输测试环境如图 5.12 所示，在水池环境中进行。由于水声链路使用串口方式通信，因此采用文件数据传输的方式进行测试。测试搭建方式如图 5.13 所示，发射端的水声通信组件和发射换能器放在水中；接收端的换能器也放于同一区域内，但是该端的换能器连接着岸上的计算机以记录测试数据。



图 5.12 水声链路传输测试环境

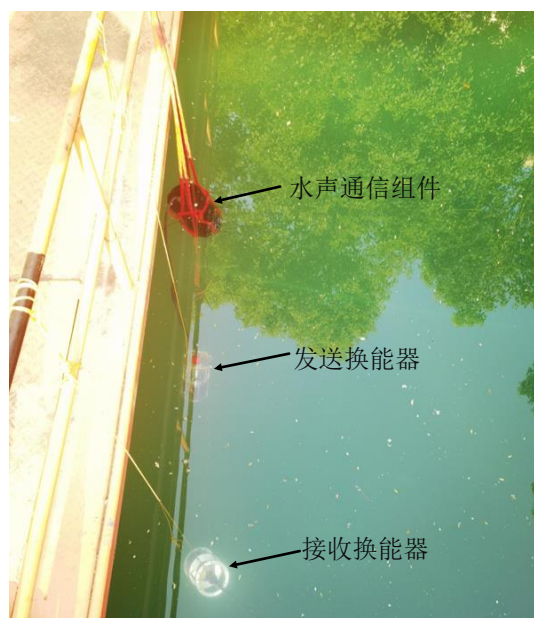


图 5.13 水声链路传输测试

在发送端与接收端建立通信连接后,发送端将 12.7kB 的文件数据按照 100Bytes 的固定帧长进行分组传输。通过多次重复实验,水声链路的性能测试结果如表 5.4 所示,平均传输速率为 0.842kbps。

表 5.4 水声链路传输性能测试结果

链路	文件大小 (kB)	帧长 (Byte)	测试次数	平均传输速率 (kbps)
水声链路	12.7	100	20	0.842

(3) 卫星链路传输测试

卫星链路传输测试如图 5.14 所示,通过计算机-卫星-云服务器的连接方式进行实验,即计算机通过卫星链路将数据传输至云服务器。卫星链路可通过图 5.15 所示的显示界面观察卫星连接状态,而在实际应用中则通过 TCP 或 SSH 连接的成功与否验证卫星链路的有效性。



图 5.14 卫星链路传输测试

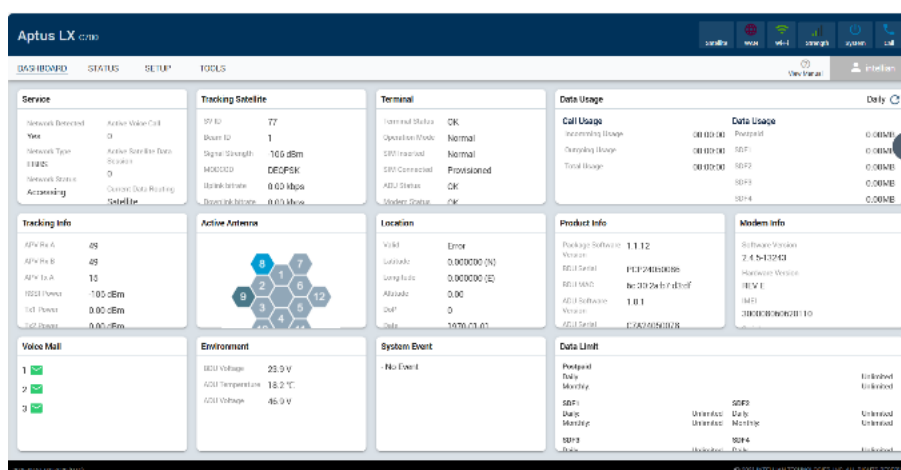


图 5.15 卫星连接显示界面

卫星链路传输测试方式为：计算机通过 TCP 协议与云服务器建立连接，然后利用文件传输程序向服务器发送一个大小为 12.7kB 的图片文件，并记录测试结果。在进行多次测试后，得到了如表 5.5 所示的卫星链路传输性能测试结果。结果显示，卫星链路的平均传输速率为 156.485kbps。

表 5.5 卫星链路传输性能测试结果

链路	文件大小 (kB)	帧长 (Byte)	测试次数	平均传输速率 (kbps)
卫星链路	12.7	100	20	156.485

5.4.2 断续传输测试

断续传输测试的目的是验证在进行大数据传输时，该功能的运行效果。断续传输测试的测试流程为：

- (1) 发送端向接收端传输图像文件。
- (2) 人为设置干扰因素导致传输中断，记录中断时程序和文件的状态。
- (3) 排除干扰因素后，开启重传任务直至文件传输完成，记录最后的程序和文件状态。

```

[04:32:09.564]文件file_043.jpg打开成功
[04:32:09.732]Received 1 packets of data...
[04:32:28.831]Received 10 packets of data...
[04:32:47.382]Received 20 packets of data...
[04:33:07.033]Received 40 packets of data...
[04:33:26.437]Received 60 packets of data...
[04:33:38.718]Picture file(file_043.jpg) received overtime:63.
[04:33:38.719]Picture file(file_043.jpg) received false.
[04:33:39.103]Picture file(file_043.jpg) save.
[04:33:39.104]chance to Idle State.
[04:33:39.235]wait 1s.
[04:35:05.684]文件file_043.jpg打开成功
[04:35:21.942]Received 80 packets of data...
[04:35:40.730]Received 100 packets of data...
[04:36:01.006]Received 120 packets of data...
[04:36:11.597]Picture file(file_043.jpg) received finish(131).
[04:36:12.124]Picture file(file_043.jpg) save.

```

图 5.16 测试程序记录

在断续传输测试实验过程中，人为引入干扰导致文件传输中断。接收端系统在超过重传上限后，进行临时文件存储，并记录了临时文件指针的偏移量。如图 5.16 所示，接收节点的传输日志记录了第 63 个数据包的接收出现超时现象，表明数据传输在此时中断。此时的传输中断状态如图 5.17 所示，文件夹中存在临时文件和任务查询表。临时文件的部分显示状态，表明数据传输没有完成。任务查询列表记录下传输中断时的文件名称、文件类型、文件大小和文件指针偏移量信息。其中，指针偏移量值为 0x1838，表明已经传输并接收存储了 0x1838 字节的数据。

在排除干扰因素后，程序重新进入文件传输。此时，发送端根据接收端的反馈信息，成功执行断续传输流程。图 5.16 的传输日志显示在重传操作后，文件传输实现了从数据中断位置进行接续传输的功能，并最终完成了全部传输流程。传输流程完成后，断续传输结果如图

5.18 所示：图像文件完整显示；文件名后缀已经正常；同时任务查询列表已清空。

上述实验结果表明本课题设计的断续传输机制功能有效，并且在文件传输中断的情况下，避免了已传输数据的重复发送，提高了传输效率。

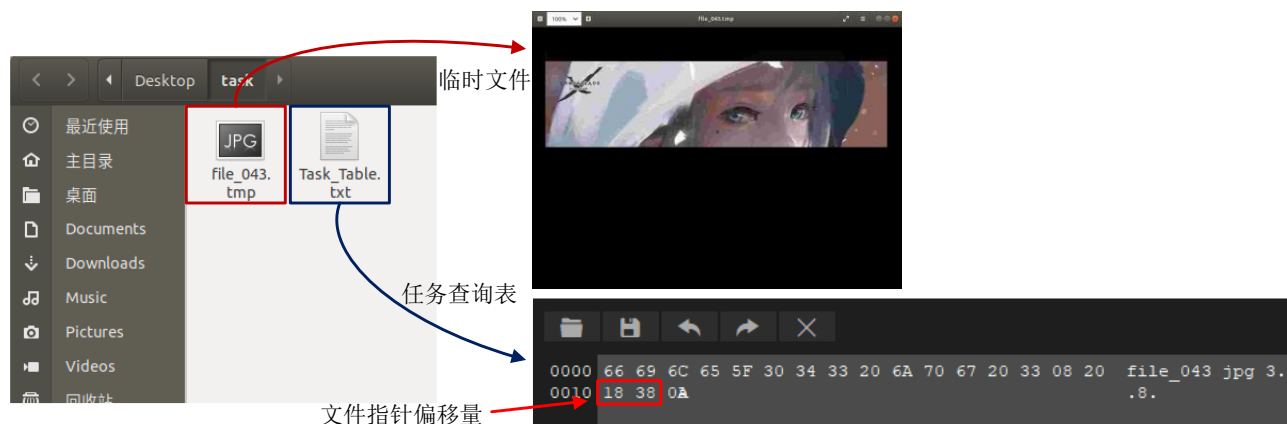


图 5.17 传输中断状态

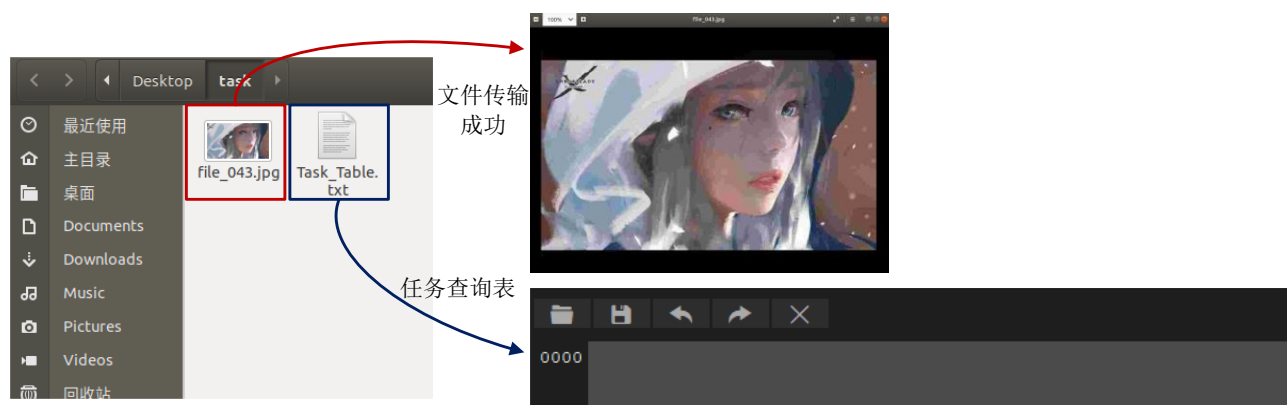


图 5.18 断续传输结果

5.4.3 时变信道传输策略测试

本课题在千岛湖和菲律宾海区域对时变信道传输策略进行相关测试。上述场景具备时变信道的环境特征，可评估该传输策略在实际应用中的效果。测试过程中，需要将时变信道传输策略与无反馈传输策略和停止-等待传输策略进行比较。无反馈传输策略为发送端持续发送数据，接收端不做反馈，仅接收校验。停止-等待传输策略为发送端每发送一包数据都等待接收端的数据反馈，然后再执行下一包数据的传输。为保证持续传输，停止-等待传输策略的发送端引入超时重传机制。

(1) 千岛湖测试

千岛湖测试的测试平台为停泊在千岛湖水域中央的实验船。传输策略的实验方案包含垂直方向与水平方向两个测试维度，以实现传输策略性能的全面评估。

垂直方向测试方案如图 5.19 所示，A 端设备的电路部分放置在测试平台上，换能器通过缆线部署于水面以下 1 至 2m 的深度区间。B 端设备通过绳索固定并下放至 50m 水深处。测试实验过程中，对无反馈传输策略、停止-等待传输策略和本课题的时变信道传输策略分别进行 12.7kB 的图像数据传输测试，并记录传输数据。

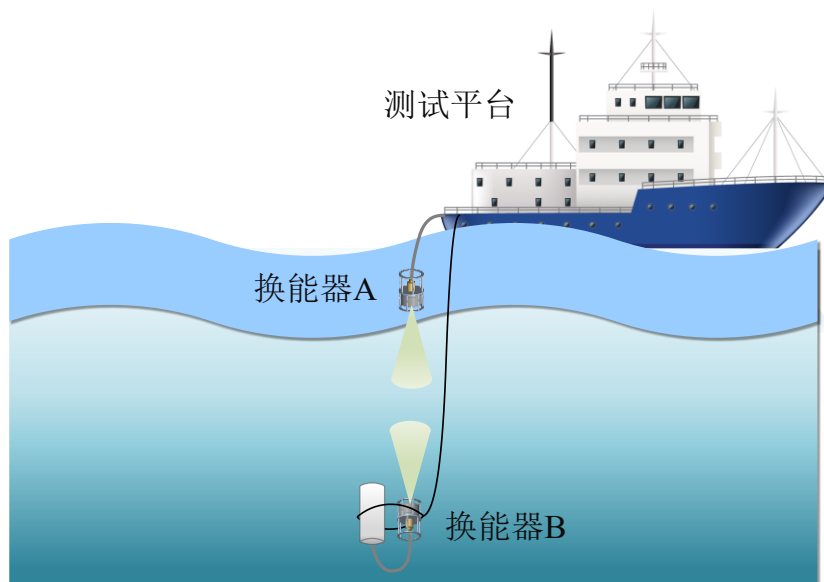
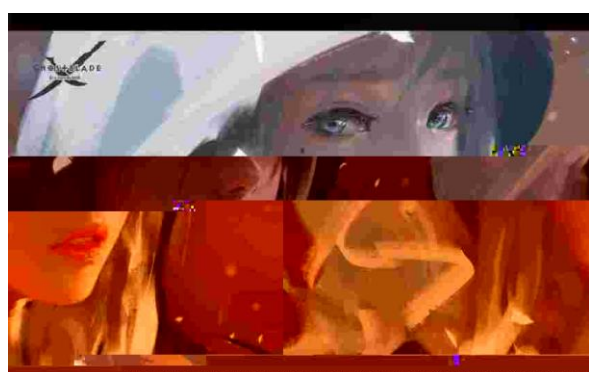
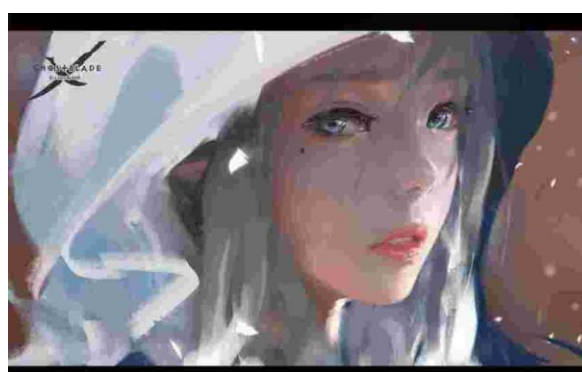


图 5.19 垂直方向测试

对每种传输策略进行 10 次测试后，得到了如表 5.6 所示的垂直方向传输策略测试结果。测试中，平均传输速率的计算方法为成功完成传输的数据量与传输时间的比值，而未成功接收的数据包则不计入该计算之中。丢包率仅计算最终未投递成功的数据包数量。成功次数表示图像完整传输到接收端的次数。在测试中，接收成功与否的图片文件效果如图 5.20 所示，未成功传输图像会导致显示混乱，从而获取不到完整信息。



(a) 未成功传输



(b) 成功传输

图 5.20 图像文件传输成功与否对比

表 5.6 的数据显示，水声信道环境下数据传输过程易产生误码现象，进而影响数据包的完整性。无反馈传输策略的发射端持续发送，可实现传输速率最大化，但是由于误码现

象导致传输成功率降低。停止-等待传输策略的等待反馈机制保证了数据的可靠传输，但是频繁的发送-反馈流程降低了平均传输速率。本课题提出的时变信道传输策略在保证数据完整传输的同时，提升了平均传输速率。

表 5.6 垂直方向传输策略测试结果

传输策略	测试次数	平均传输时间 (s)	平均传输速率 (kbps)	平均丢包率 (%)	成功次数
无反馈策略	10	148.64	0.678	3.1	6
停止-等待策略	10	306.78	0.339	0	10
时变信道传输策略	10	152.11	0.684	0	10

水平测试方案如图 5.21 所示，A 端设备的水声电路组件搭载在小艇上，缆线连接的换能器部署于小艇后的水面下。B 端设备的电路部分仍固定于测试平台，换能器部署于测试平台后的水面下。小艇与测试平台之间的距离为 500m。水平测试同样对对无反馈传输策略、停止-等待传输策略和本课题的时变信道传输策略分别进行 12.7kB 的图像数据传输测试，并记录传输数据。

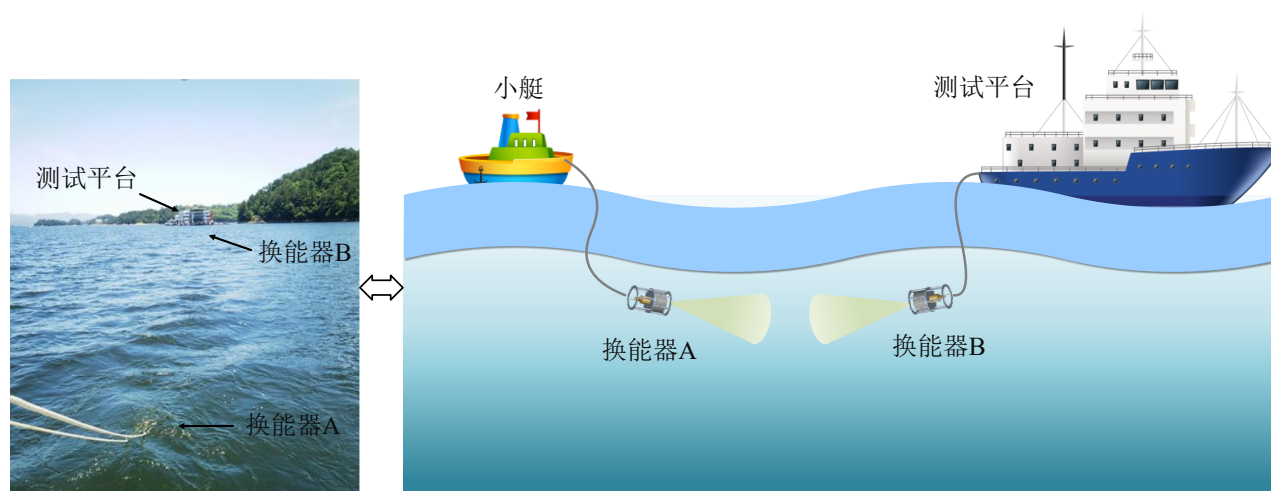


图 5.21 水平方向测试

表 5.7 水平方向传输策略测试结果

传输策略	测试次数	平均传输时间 (s)	平均传输速率 (kbps)	平均丢包率 (%)	成功次数
无反馈策略	10	-	-	7.7	0
停止-等待策略	10	362.91	0.286	0	10
时变信道传输策略	10	176.32	0.590	0	10

水平方向传输策略测试结果如表 5.7 所示，更长距离的水声信道导致了信号衰减加剧。无反馈传输策略在丢包率更高的情况下无法实现数据完整传输，故无法计算平均传输时间和平均传输速率。停止-等待传输策略虽然完成了测试，但是传输效率则进一步下降。相比之

下，本课题提出的时变信道传输策略在成功完成了数据传输测试的同时，平均传输速率仅略有下降。

(2) 菲律宾海测试

如图 5.22 所示，菲律宾海测试对时变信道传输策略采用垂直方向测试方案。图 5.22 (a)、(b)、(c) 展示了节点 A 端在船舷处的布设情况，其中换能器布放在水面下约 8m 的深度，避免科考船底对水声信号反射的影响。图 5.22 (d) 则展示了节点 B 端通过船尾 A 柱的千米长缆布设至水下 500m 处的过程。待节点 B 端到达预定深度后，展开测试工作。



(a) 节点 A (数据监测端)



(b) 节点 A (连接缆线)



(c) 节点 A (换能器从舷边投放)



(d) 节点 B (准备从船尾投放)

图 5.22 菲律宾海测试

首先进行的是时变信道传输策略的可靠性测试。水下节点 B 端分别采用固定帧长传输与时变信道传输策略向节点 A 端进行数据投递。节点 A 端统计成功投递的数据包数量，并进行反馈。时变信道传输策略测试时，水下节点 B 端会根据节点 A 端的反馈动态调整数据传输的策略。数据传输的可靠性测试结果如表 5.8 所示。时变信道传输策略的投递率为 86%，高于固定帧长传输模式的投递率 77%，即证明时变信道传输策略保证了数据传输的可靠性。

表 5.8 数据传输的可靠性测试结果

传输方式	发送次数	成功次数	投递率
固定帧长传输	200	154	77%
时变信道传输策略	200	172	86%

然后对无反馈传输策略、停止-等待传输策略和本课题的时变信道传输策略分别进行 12.7kB 的图像数据传输测试，并记录传输数据。菲律宾海的垂直方向传输策略测试结果如表 5.9 所示。因海水温跃层的影响，此时的水声信道质量更差，数据传输会产生更多的误码。无反馈传输策略没有成功传输完整的图像数据，故无法计算平均传输时间和平均传输速率。停止-等待传输策略完整图像数据的成功率下降，同时平均传输速率也降至 0.224kbps。但是本课题的时变信道传输策略仍保证了图像数据的完整传输，同时平均传输速率相比于停止-等待传输策有所提升，为 0.487kbps。

表 5.9 垂直方向传输策略测试结果（菲律宾海）

传输策略	测试次数	平均传输时间 (s)	平均传输速率 (kbps)	平均丢包率 (%)	成功次数
无反馈策略	5	-	-	30.8	0
停止-等待策略	5	463.76	0.224	-	3
时变信道传输策略	5	213.54	0.487	0	5

以上测试显示了时变信道传输策略提升了数据传输在具有时变性和不可靠性的信道环境中的效率和可靠性。

5.4.4 动态切换机制测试

本节的测试主要验证动态切换机制的可靠性和切换效率。动态切换机制的可靠性为数据链路完成多次垂直切换操作的成功率。动态切换机制的切换效率为数据链路完成垂直切换操作的时间。

动态切换机制的可靠性测试方案如下：

- （1）节点 A 与节点 B 分别接入光电复合缆通信链路的两端，然后进行数据传输。
- （2）节点 A 与节点 B 进行数据传输的过程中，通过对正在进行传输的链路接口实施插拔操作，模拟当前通信链路中断场景。但是，保持另一通信链路正常连接。
- （3）重复测试 80 次，并记录数据。

最终动态切换测试数据如表 5.10 所示，动态切换机制的成功率为 97.5%，表明动态切换机制有极高的可靠性。

表 5.10 动态切换测试结果

功能	测试次数	成功切换次数	成功率
动态切换机制	80	78	97.5%

动态切换机制的切换效率测试流程如图 5.23 所示。节点 A 主要负责发起链路切换请求，节点 B 负责根据指令执行链路切换操作。测试流程如下：

- (1) 节点 A 和节点 B 进行初始化配置，均设置为光纤链路工作模式。
- (2) 节点 A 进行切换准备并开启计时器，向节点 B 发送切换指令。
- (3) 节点 B 在接收指令后执行切换操作并反馈执行信息，完成切换过程。
- (4) 节点 A 根据节点 B 的反馈信息关闭定时器中断，并记录光纤链路切换为 EDSL 链路的时间 T1。
- (5) 根据上述方式，再进行 EDSL 链路切换为光纤链路的流程，并记录时间 T2。
- (6) 进行多次测试，记录多组数据。在动态切换机制的切换效率测试中设置了超时机制，当切换失败并超时后，节点 A 自动重启计时器并重新发送切换指令，直至测试流程全部完成。

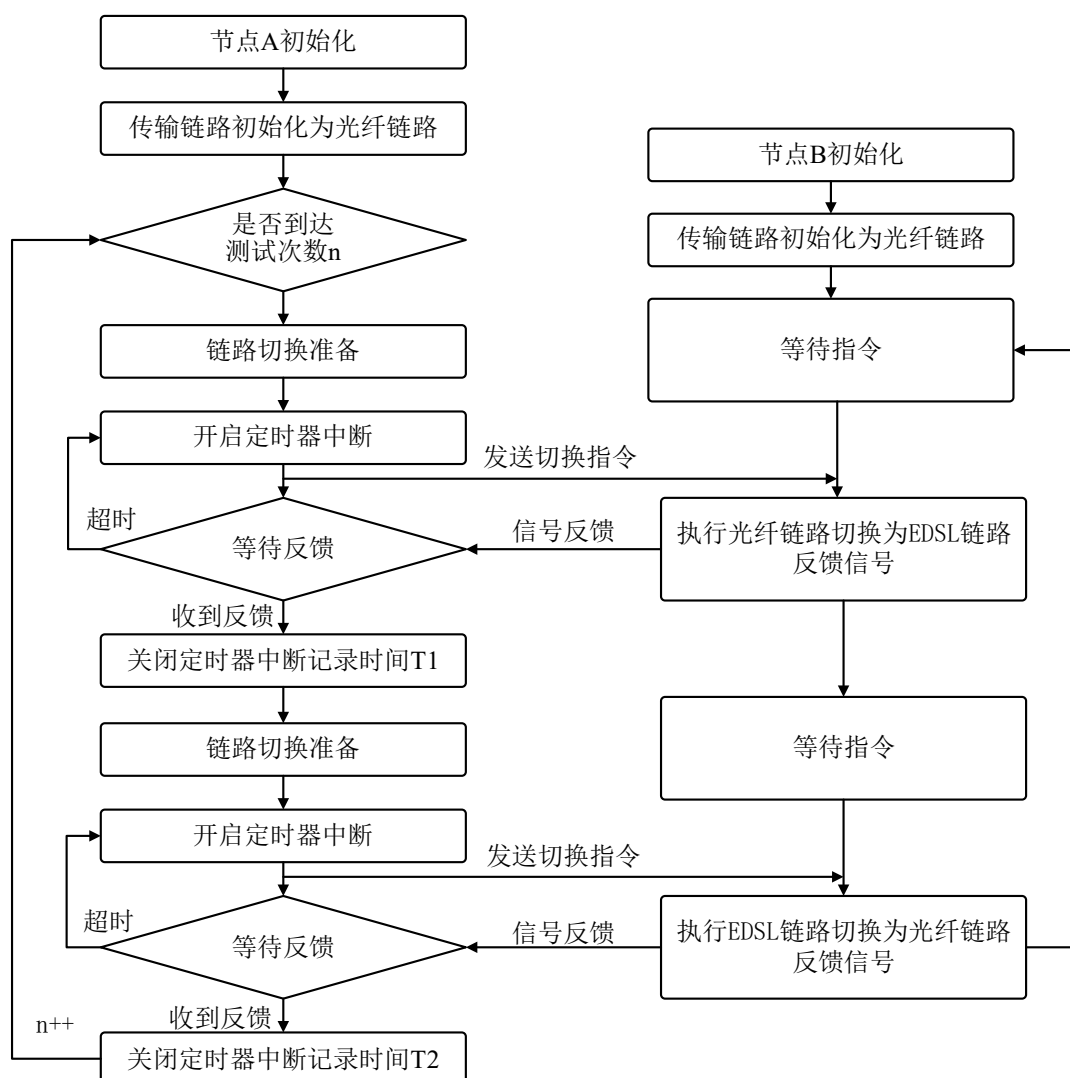


图 5.23 动态切换测试流程

根据切换效率的实际测试, 计算得到从光纤链路切换至 EDSL 链路的平均切换时间和从 EDSL 链路切换至光纤链路的平均切换时间。动态切换时间测试结果如图 5.24 所示, 动态切换机制的切换时间处于毫秒级别, 其中 T1 为 334.74ms, T2 为 194.52ms。相比较而言, 从 EDSL 链路切换至光纤链路的平均切换时间略低于从光纤链路切换至 EDSL 链路的平均切换时间。

根据上述实验结果, 动态切换机制在链路质量下降的情况下, 能够有效地执行链路切换操作, 切换时间达到毫秒级别, 能够满足光电复合缆链路持续稳定通信的要求。

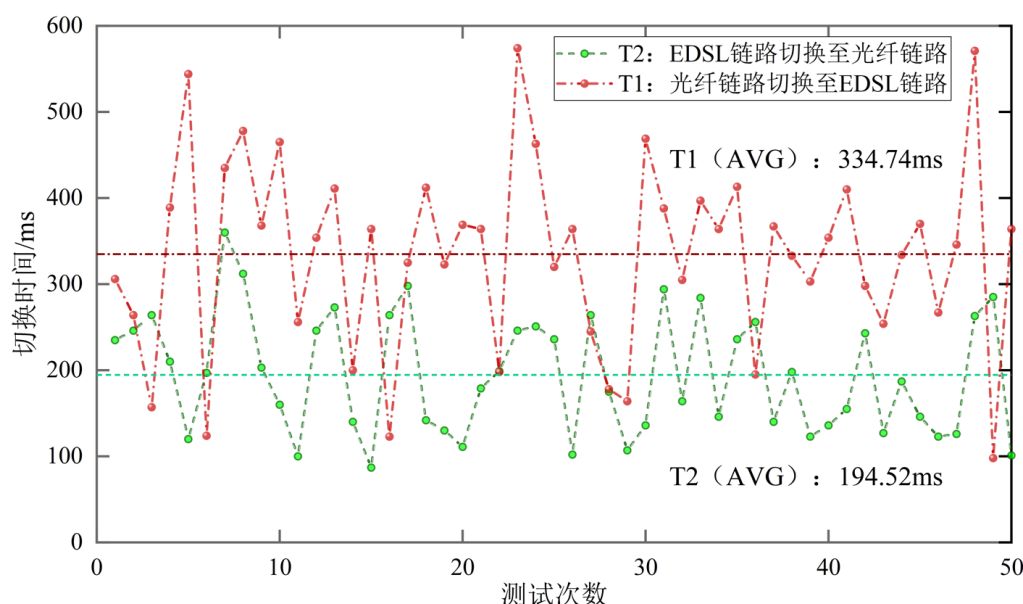


图 5.24 动态切换时间测试结果

5.5 综合测试

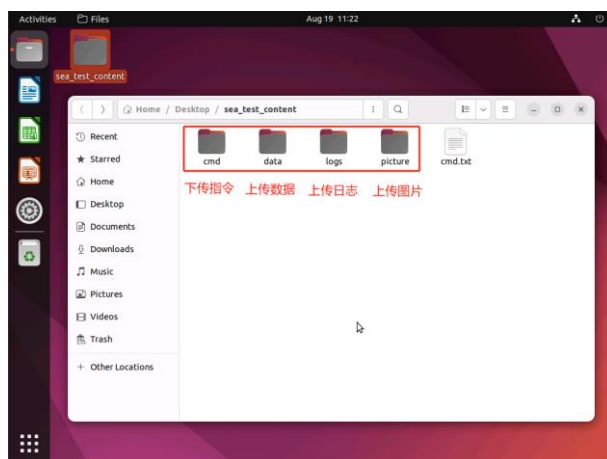
为验证异构级联网络系统的有效性, 本节对异构级联网络的数据上传功能和远程控制功能进行测试。观测节点置于水池中, 建立水声信道。卫星天线置于水池边上的空旷区域以建立卫星信道。操作人员在实验楼内登入云存储平台进行操作控制。

5.5.1 数据上传测试

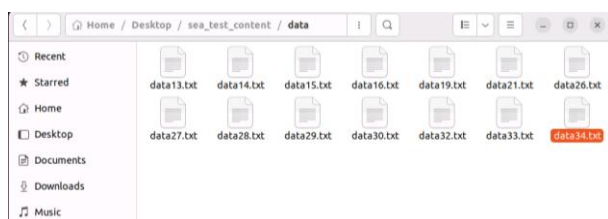
在系统测试过程中, 在定时式唤醒电源触发浮标节点从而唤醒整个网络系统后, 观测节点执行数据采集任务, 并按照既定协议完成数据传输。当操作人员访问云存储平台时, 可获取如图 5.25 所示的观测数据上传结果。



(a) 用户交互界面



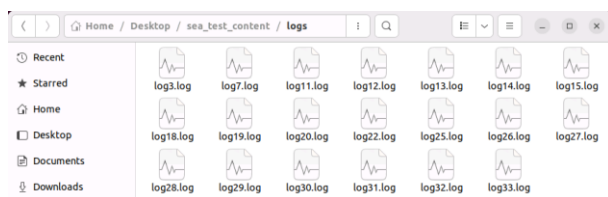
(b) 数据存储



(c) 传感器数据文件夹



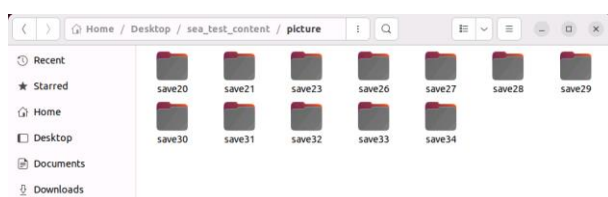
(d) 传感器数据



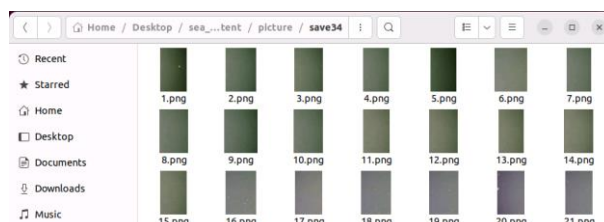
(e) 日志文件夹



(f) 日志



(g) 图片文件夹



(h) 图片

图 5.25 数据上传测试结果图

在上述实验过程中，数据在上传至云存储平台后，被分类存储于传感器数据、日志以及图像文件的相应文件夹中。表明该系统实现了数据远程上传的功能需求。

5.5.2 远程控制测试

系统数据上传后，操作人员通过用户交互界面向远程部署的节点发送控制指令。如图 5.26 所示，该指令被用户交互界面程序存储在 cmd.txt 文件中。指令功能为配置定时式唤醒

电源的运行参数以调节网络系统的工作频率。指令格式为 `Set_Time (10, 2400, 1200)`，参数依次表示保留时长、运行时长及休眠时长，单位为秒。值得注意的是，定时唤醒电源的默认配置参数为 `Set_Time (10, 2400, 1800)`。



图 5.26 指令存储文件

指令的修改具体含义是将系统的关机时间由 1800 秒调整为 1200 秒，即缩短网络系统的关机时长，提升网络的工作频率。文件数据文件上传时间结果如图 5.27 所示，显示默认配置参数的状态下，第 27 至 29 号测试任务间的文件上传时间间隔为 70 分钟，与初始设定的运行时长和休眠时长的总和一致。在第 29 号测试任务中完成指令下发后，第 29 至 31 号测试任务间的时间间隔缩减至 60 分钟，与修改后的参数设定值对应。上述实验结果表明，该网络系统实现了远程控制功能。

-rw-rw-r--	1	xxx	xxx	0	8月	17	10:44	log27.log
-rw-rw-r--	1	xxx	xxx	0	8月	17	11:54	log28.log
-rw-rw-r--	1	xxx	xxx	0	8月	17	13:03	log29.log
-rw-rw-r--	1	xxx	xxx	0	8月	17	14:03	log30.log
-rw-rw-r--	1	xxx	xxx	0	8月	17	15:04	log31.log

图 5.27 文件数据文件上传时间结果图

5.6 西太平洋试验

本课题构建的异构级联海底观测局域网已在西太平洋区域完成部署验证。布放采用分层投放策略，依次投放浮标节点、中继节点和底层主观测节点。在投放前，需要配置定时式唤醒电源模块的保留时长参数 T_1 ，以确保与布放时间相匹配；同时，必须检查并确保节点间缆线连接稳固，以避免投放过程中发生缆线脱落。具体投放流程如图 5.28 (a) 和 (b) 所示：浮标节点、中继节点及底层主观测节点通过科考船尾 A 柱吊装后入海释放，分布式观测节点则由船载布放型 ROV 进行深海定点投放。通过这些步骤，成功实现了异构级联海底观测局域网的海上布放。

异构级联海底观测局域网在西太平洋区域开展了数据采集实验，成功实现了数据上传及远程控制功能测试。实验结束后，由原科考船执行回收作业。回收过程如图 5.28 (c)、(d) 所示。实验期间获取的图片数据已上传至岸基云存储平台，如图 5.29 所示。

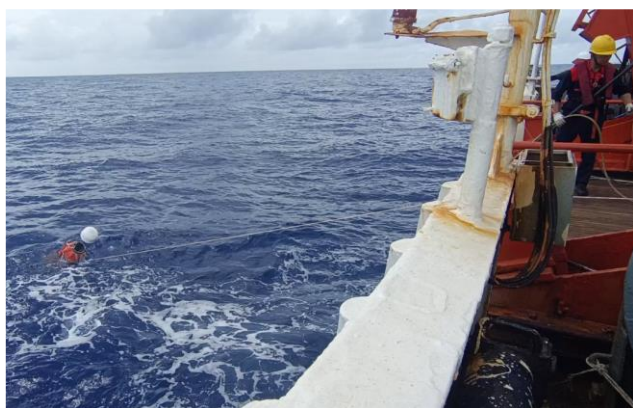
此次海洋实际布放验证了异构级联海底观测局域网的有效性。



(a) 布放一



(b) 布放二

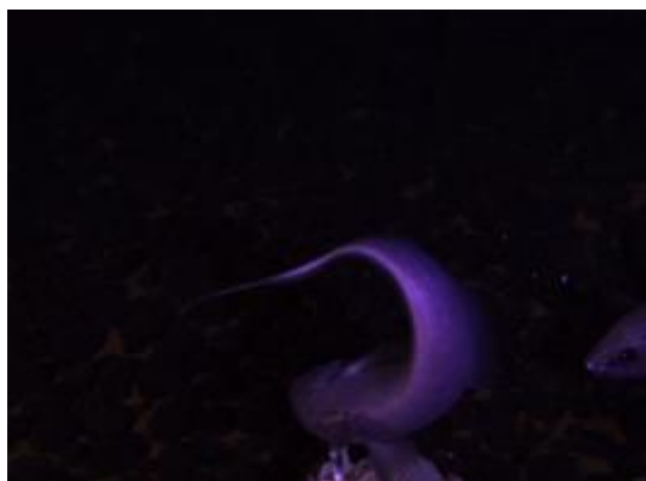


(c) 回收一

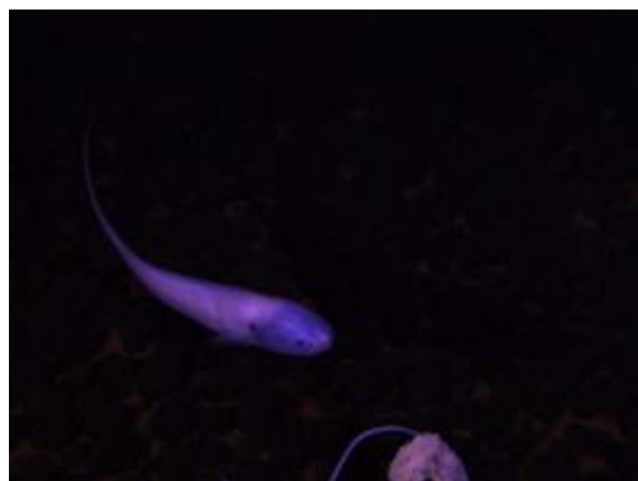


(d) 回收二

图 5.28 布放与回收



(c) 上传图片一



(d) 上传图片二

图 5.29 上传图片

5.7 本章小结

本章构建了异构级联海底观测局域网的硬件平台，并对异构级联海底观测局域网的结构性功能、数据链路性能指标、数据传输机制和综合功能进行了系统的测试与验证。最后，本课题开展了实际应用实验，将异构级联海底观测局域网部署于西太平洋海域进行数据采集实验。最终结果验证了该异构网络的可行性和可靠性。

6 总结与展望

6.1 研究工作总结

本文以远距离海底观测的实际应用为研究背景，基于网络通信技术和数据传输技术，研究了网络节点之间以及网络节点与岸基平台之间的异构通信网络。结合海底观测、数据传输和远程控制的任务需求，本文搭建了卫星、光电复合缆和水声三种异构网络通信链路，并将这三种链路异构级联于海底观测局域网中，以提升其传输能力和覆盖范围。通过实验验证，证明了该异构级联网络的可行性和可靠性。本文的主要工作包括以下几个方面：

（1）详细分析了异构级联海底观测网络模型的通信技术和布局架构的需求和特性，针对海底数据采集及远程双向传输的实际需求，选择了卫星通信、光电复合缆通信和水声通信等网络通信技术并结合总线-星型网络拓扑结构，以此给出了基于异构级联通信技术的远程控制海底观测网络模型的构建方案。

（2）针对海底数据采集及远程双向传输的实际需求，开发了观测节点和汇聚节点的硬件平台与功能软件，设计了具备数据存储和远程控制功能的岸基云存储平台。同时，为确保网络节点的数据有效交互与系统稳定运行，设计了该网络系统周期式的供电方案及多节点同步唤醒机制等工作与控制策略。

（3）为了满足数据链路传输多样化海底观测数据的需求，构建了统一标准化的基本数据链路帧结构，进而针对性地设计了满足少量和大量数据传输需求的数据交互协议。针对数据链路内不同的传输需求与挑战，同时为提升该异构级联网络的数据传输可靠性和效率，提出了三种数据传输机制：1）面向大数据传输的断续传输机制；2）面向卫星链路和水声链路的时变信道传输策略；3）面向光电复合缆链路的动态切换机制。实验结果表明，上述机制有效提升了数据传输的可靠性和效率。

（4）在异构级联海底观测局域网硬件平台基础上，进行了包括结构功能、数据链路性能指标、数据传输机制及综合性能的系统测试，验证了网络的可行性与有效性。水下节点的仓体通过压力测试，确保其能在深海环境中正常工作。同时，验证了同步唤醒功能的可行性和可靠性，并详细测试了异构网络的数据传输性能，结果证明其链路性能满足数据传输需求。三种数据传输机制也进行了测试，结果显示它们提升了网络的数据传输效率和可靠性。

（5）通过远洋科考船将该异构级联网络部署在西太平洋海域，进行实际布放实验，验证了网络的可行性和可靠性。

6.2 研究工作展望

面向海底观测的异构级联通信网络研究在不断进行和发展，但由于时间和能力的限制，仍存在许多待改进的问题：

（1）目前该异构级联网络系统在深海环境观测领域已取得阶段性成果，成功实现了海底多参数数据的长期采集与稳定上传，但受限于深海复杂环境下的带宽限制、信号衰减等因素，系统尚未进一步实现实时性的高清视频传输功能，视频数据采集仍停留在静态图像或低帧率视频的间歇性采集模式。后续可采用适配性更高的硬件配置，以实现实时视频传输。

（2）针对实际应用需求提出的异构级联网络总线-星型拓扑模型中，水声传输网络采用了星型点对点结构。这种结构虽然在一定程度上简化了网络设计和部署，但没有完全利用分布式节点之间的通信功能，没有充分利用网络资源。后续可针对分布式节点之间的通信功能进行优化，进而实现分布式传感网络，利用多跳传输，提高网络资源利用率的同时实现更大的观测覆盖范围。

（3）本课题仅在数据帧的层面上提出三种针对不同传输需求的数据传输优化方案，后续可以进行信道传输设备硬件方面的改进，考虑解决数据帧比特级别的误码率问题，以进一步提升数据传输的性能。

参考文献

- [1] Von Schuckmann K, Moreira L, Cancet M, et al. The state of the global ocean[J]. State of the Planet, 2024, 4: 1-30.
- [2] Shen Z, Wang H, Chen Y, et al. Sedimentary dynamics in southern Mariana Trench and its controlling factors in past 440 kyr[J]. Frontiers in Marine Science, 2024, 111463564-1463564.
- [3] Tjiputra J F, Couespel D, Sanders R. Marine ecosystem role in setting up preindustrial and future climate[J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 2206.
- [4] Zhong C, Lu J, Kang D, et al. Design of a multiparameter data acquisition and control system for in situ seabed observation base stations[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2023, 18(1):33-47.
- [5] 曹宇,薛昱. 深耕海洋产业, 发展蓝色经济[J]. 环境经济, 2017(7): 64-65.
- [6] Skålvik A M, Saetre C, Frøysa K E, et al. Challenges, limitations, and measurement strategies to ensure data quality in deep-sea sensors[J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1152236.
- [7] 李德威,丁忠军,景春雷,等. 国际海底观测网络的发展及现状[J]. 海洋开发与管理, 2020, 37(11): 13-18.
- [8] 杨锦坤,孔敏,杨扬,等. 国内外海洋科考现状及发展趋势[J]. 船舶, 2024, 35(06): 15-28.
- [9] 吴立新,陈朝晖,林霄沄,等. “透明海洋” 立体观测网构建[J].科学通报, 2020, 65(25): 2654-2661.
- [10] 汪品先.从海底观察地球:地球系统的第三个观测平台[J].自然杂志,2007,29(3):125-130.
- [11] 陈建冬,张达,王潇等.海底观测网发展现状及趋势研究[J].海洋技术学报,2019,38(06):95-103.
- [12] Schofield O, Bergmann T, Bissett P, et al. The Long-term Ecosystem Observatory: An Integrated Coastal Observatory[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, 27(2): 146-154.
- [13] Duennebie F K. HUGO : The Hawaii Undersea Geo-Observatory[C]. International Workshop Multidisciplinary Observatories on the Deep Sea Floor. 1995.
- [14] Petit R A, Harris D w, Wooding B, et al. The Hawaii-2observatory[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, 27(2):245-253.

- [15] Austin T C, Edson J B, Micilis W R, et al. A netwonoased felemery achtectre developed for the Martha's Vineyard Coastal Observatory[J]. IEEE Joural f oceanic Engineering, 2002, 27(2):223-228.
- [16] Massion G, Raybould K .MARS: The Monterey accelerated research system[J].Sea Technology, 2006, 47(9):39-42.
- [17] Uffelen L V, Duennebie F, Lukas R, et al. The Aloha Cabled Observatory[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 129(4).
- [18] Gang N, Persinger M A. Correlations between ocean water temperature and related parameters from the Victoria experimental network under the sea (VENUS) and geomagnetic activity: Implications for climate change[J]. International Journal of Physical Sciences, 2012, 7(4): 660-663.
- [19] Céline Quentin, Barbin Y, Bellomo L, et al. High Frequency Surface Wave Radar in the French Mediterranean Sea: an element of the Mediterranean Ocean Observing System for the Environment[C]. 4 TH MEETING OF THE GEO GLOBAL HF RADAR TASK. 2015.
- [20] Favali P, Beranzoli L, Italiano F, et al. NEMO-SN1 observatory developments in view of the European Research Infrastructures EMSO and KM3NET[J]. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 2010, 626:S53-S56.
- [21] Fischer P, Brix H, Baschek B, et al. Operating Cabled Underwater Observatories in Rough Shelf-Sea Environments: A Technological Challenge[J]. Frontiers in Marine Science, 2020, 7551.
- [22] Godo R O, Johnsen S, Torkelsen T. The LoVe Ocean Observatory is in Operation[J]. Marine Technology Society journal, 2014, 48(2):24-30.
- [23] Aguzzi J, Mánuel A, Condal F, et al. The New Seafloor Observatory (OBSEA) for Remote and Long-Term Coastal Ecosystem Monitoring[J]. Sensors, 2011, 11(6):5850.
- [24] Gaughan P, Berry A, Malley C O. The dual roles of smartbay, a multi-disciplinary subsea observatory delivering sustainable long term coastal marine observations and marine technology development[C]. OCEANS 2019-Marseille. IEEE, 2019: 1-8.
- [25] Baschek B, Schroeder F, Brix H, et al. The coastal observing system for northern and arctic seas (COSYNA)[J]. Ocean science, 2017, 13(3): 379-410.
- [26] Ozel N M, Necmioglu O, Ergintav S, et al. MARSite-MARMARA SUPERSITE: accomplishments and Outlook[C]. EGU General Assembly 2017. 2017, 19: EGU2017-18891.

- [27] Nanjo K Z, Yamamoto Y, Ariyoshi K, et al. Earthquake detection capacity of the Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis (DONET)[J]. *Journal of Seismology*, 2024, 28(3): 787-810.
- [28] Barth J A, Allen S E, Dever E P, et al. Better regional ocean observing through cross-national cooperation: a case study from the Northeast Pacific[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 93.
- [29] Smith L M, Barth J A, Kelley D S, et al. The ocean observatories initiative[J]. *Oceanography*, 2018, 31(1): 16-35.
- [30] Favali P, Beranzoli L, De Santis A, et al. From ESONET multidisciplinary scientific community to EMSO novel European research infrastructure for ocean observation[J]. *Seafloor observatories: A new vision of the earth from the abyss*, 2015: 531-563.
- [31] Carapuço M M, Silveira T M, Stroynowski Z, et al. Portuguese European Multidisciplinary seafloor and water column observatory initiative[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 849150.
- [32] 马蕊,赵修涛,柳存根. 海洋水下立体观测技术装备发展研究[J]. *中国工程科学*, 2020, 22(06): 19-25.
- [33] Fang Y Y, Chou S E, Chen C, et al. Low frequency ambient noise variation of underwater acoustic data from MACHO hydrophone[C]. *OCEANS 2014-TAIPEI. IEEE*, 2014: 1-7.
- [34] 翟方国,李培良,顾艳镇,等. 海底有缆在线观测系统研究与应用综述[J]. *海洋科学*, 2020, 44(08): 14-28.
- [35] Xu H, Zhang Y, Xu C, et al. Coastal seafloor observatory at Xiaoqushan in the East China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(26):2839-2845.
- [36] 朱俊江,孙宗勋,练树民,等. 全球有缆海底观测网概述[J]. *热带海洋学报*, 2017, 36(03): 20-33.
- [37] 吕枫,翦知潜. 海底观测网技术研究与应用进展[J]. *前瞻科技*, 2022, 1(02): 79-91.
- [38] 王宁,李燕,杨鹏程,等. 海洋生态在线监测技术研究进展[J]. *应用海洋学学报*, 2023, 42(01): 178-186.
- [39] Li D, Wang J, Feng J, et al. Study and design of a heat dissipation system in a junction box for Chinese Experimental Ocean Observatory Network[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2016, 50(2):63-74.
- [40] 朱林,连尉平. 国际海底地震观测最新进展分析[J]. *防灾博览*, 2023, (06): 52-56.

- [41] Zengfeng D, Xiong Z, Chao L , et al. The development and applications of a controllable lander for in-situ, long-term observation of deep sea chemosynthetic communities[J]. Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2023, 193: 103960.
- [42] 唐超.浮标卫星通信系统关键技术研究[实现[D].国防科学技术大学,2016.
- [43] Ilcev S D. The Iridium LEO Satellite System for Global Mobile Communications[J]. Microwave Journal, 2022, 65(2): 68-80.
- [44] 商志刚,徐晓帆,梁萱卓,等.基于卫星链路的空海跨域通信系统设计[J].信息通信技术与政策,2021,(10):63-67.
- [45] Zhao B, Kong H, Liu X, et al. Transmit diversity and performance analysis for aeronautical broadband satellite communication systems[J]. Physical Communication, 2021, 48: 101424.
- [46] Alam T, Almutairi A F, Samsuzzaman M, et al. Metamaterial array based meander line planar antenna for cube satellite communication[J]. Scientific reports, 2021, 11(1): 14087.
- [47] 王彦钊,丛犁,黄成斌,等.基于北斗短报文的无人机巡检通信技术研究[C].吉林省电机工程学会.吉林省电机工程学会 2023 年学术年会获奖论文集.国网吉林信通公司,2023:65-70.
- [48] 李冠宇,王亚丁,石治国等.基于双卫星智能通讯的船载水文气象系统设计[J].海洋技术学报,2023,42(03):29-36.
- [49] Yang W R, Chen C Y, Hsu C M, et al. Multifunctional Inshore Survey Platform with Unmanned Surface Vehicles[J]. International Journal of Automation and Smart Technology, 2011, 1(2):19-25.
- [50] 方子骞.岸海通信现状和发展前景[J].中国科技信息,2023,(02):85-88.
- [51] IEC 61097-6-2019.Global Maritime Distress and Safety System (GMDSS) – Part 6:Narrowband Direct-printing Telegraph Equipment for the Reception of Navigational and Meteorological Warnings and Urgent Information to Ships (NAVTEX) (Edition 2.2;Consolidated Reprint)[S]. 2019.
- [52] ITU-RM 2010-1-2019.Characteristics of a Digital System,Named Navigational Data for Broadcasting Maritime Safety and Security Related Information from Shore-to-ship in the 500 kHz Band[S]. 2019.
- [53] Recommendation ITU-R M.1 371-5. Technical Characteristics for an Automatic Identification System Using Time-division Multiple Access in the VHF Maritime Mobile Band [S]. ITU, 2014.
- [54] ITU-R Recommendation M. 493-15.Digital Selective-caling System for Use in the Maritime Mobile Service [S]. 2019.

- [55] ITU-R. Recommendation ITU-R M. 2092-0 Technical characteristics for a VHF data exchange system in the VHF maritime mobile band[S]. 2015.
- [56] 付伟成.水下可见光通信发射机技术的研究与实现[D].北京: 北京邮电大学,2024.
- [57] Xu J, Kong M, Lin A, et al. OFDM-based broadband underwater wireless optical communication system using a compact blue LED[J]. Optics Communications, 2016, 369:100-105.
- [58] Zoksimovski A, Rappaport C, Sexton D, et al. Underwater electromagnetic communications using conduction: Channel characterization[C].Proceedings of the 7th International Conference on Underwater Networks & Systems. 2012: 1-7.
- [59] Li B, Jie H, Zhou S, et al. MIMO-OFDM for high-rate underwater acoustic communications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2009, 34(4):634-644.
- [60] Mosca F, Matte G, Shimura T. Low-frequency source for very long-range underwater communication[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 133(1): EL61-EL67.
- [61] Ge J, Li T, Geng T. The wireless communications for unmanned surface vehicle: An overview[C].Intelligent Robotics and Applications: 11th International Conference, ICIRA 2018, Newcastle, NSW, Australia, August 9–11, 2018, Proceedings, Part I 11. Springer International Publishing, 2018: 113-119.
- [62] 刘建,陈小康,刘明春等. 局域网组网实用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2024: 39-40.
- [63] 史媛,张莹莹,王玉莹.有线通信技术应用现状与发展趋势分析[J].科技创新导报,2020,17(01):136-138.
- [64] 冯洗睿.无线网络中无线通信和有线通信的整合研究[J].中国新通信,2024,26(23):7-9.
- [65] 李敏仪,胡镨显,刘韬,等.探究无线通信技术智能化现状与发展趋势[J].信息记录材料,2023,24(09):30-33.
- [66] Furqan Ali M, Jayakody N K, D Ponnimbaduge Perera T, et al. Underwater communications: Recent advances[C]. ETIC conference, 2019.
- [67] 贾宁,黄建纯.水声通信技术综述[J].物理, 2014, 43(10):650-657.
- [68] Yang J M, Wang J H, Qiao G, et al. Review of underwater acoustic communication and network technology[J]. Journal of Electronics&Information Technology, 2024, 46(1):1-21.
- [69] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理(第二版)[M].哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2009: 30-35.
- [70] Huang J, Wang H, He C, et al. Underwater acoustic communication and the general performance evaluation criteria[J]. Frontiers of IT & EE, 2018, 19(8):951-971.

- [71] Thorp W H. Analytic description of the low frequency attenuation coefficient[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1967, 42(1): 270.
- [72] 韩剑,刘强,李浩,等.光电复合缆应用解析[J].中国新通信,2015,17(02):78-79.
- [73] 穆维新,张慎武,袁浩. 数据路由与交换技术[M].北京: 清华大学出版社, 2018:40.
- [74] 赵斌.光纤有线通信技术在数据中心中的应用研究[J].信息与电脑(理论版),2024,36(22):128-130.
- [75] Bottacchi S. Noise and signal interference in optical fiber transmission systems: an optimum design approach[M]. John Wiley & Sons, 2008.
- [76] Ellis A D, McCarthy M E, Al Khateeb M A Z, et al. Performance limits in optical communications due to fiber nonlinearity[J]. Advances in Optics and Photonics, 2017, 9(3): 429-503.
- [77] Liang X, Kumar S, Shao J. Ideal optical backpropagation of scalar NLSE using dispersion-decreasing fibers for WDM transmission[J]. Optics express, 2013, 21(23): 28668-28675.
- [78] 陶智勇.综合宽带接入技术(第2版)[M]. 北京: 北京邮电大学出版社,2011.
- [79] ITU-R P.525-4-2019, Calculation of free-space attenuation[R].2019.
- [80] Döttling M, Jahn A, Wiesbeck W. A comparison and verification of 2D and 3D ray tracing propagation. Models for land mobile satellite communications[C]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Transmitting Waves of Progress to the Next Millennium. 2000 Digest. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting (C. IEEE, 2000, 1: 434-437.
- [81] Loo C. Land mobile satellite channel measurement at Ka band using Olympus[C]. Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC). IEEE, 1994: 919-923.
- [82] Suzuki H. A Statistical Model for Urban Radio Propagation[J]. IEEE Transactions on Communications, 1977, 25(7):673-680.
- [83] Loo C. A statistical model for a land mobile satellite link[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 1985, 34(3): 122-127.
- [84] Lutz E, Cygan D, Dippold M, et al. The land mobile satellite communication channel-recording, statistics, and channel model[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 1991, 40(2): 375-386.
- [85] Zhong C, Lu J, Kang D, et al. Design of a multiparameter data acquisition and control system for in situ seabed observation base stations[J]. IET Science, Measurement & Technology (SMT), 2024, 18(1):15.

- [86] Stiansen J E. A Modular Smart Ocean Observatory for Development of Sensors, Underwater Communication and Surveillance of Environmental Parameters[J]. Sensors, 2024, 24.
- [87] Kanazawa T, Shinohara M, Sakai S, et al. New innovative ocean bottom cabled seismometer system and observation in the Sea of Japan[C]. 2011 IEEE Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies. IEEE, 2011: 1-3.
- [88] 王俊,李德骏,肖举林,等.海底观测网水下环境实时监控系统设计及实现[J].浙江大学学报(工学版),2016,50(02):193-200.
- [89] Zhou W, Li Y, Zhang Y, et al. Design and Analysis of a Buoy-Based Cable Seafloor Observatory System Response under Extreme Weather Conditions[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(6):889-889.
- [90] 张玉兰. 组网技术与网络管理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 75.
- [91] 李子运.海水温跃层模拟装置设计及实验研究[D].广东: 广东海洋大学,2020.
- [92] 江伟,邢博,楼伟,等.海洋温跃层分析方法比较[J].海洋预报,2016,33(03):41-49.
- [93] 李建国.压力容器设计的力学基础及其标准应用[M].机械工业出版社,2004.
- [94] 王心明,W·Z·麦克.工程压力容器设计与计算[M].国防工业出版社,2011.
- [95] 史若曦,马俊才,田园静,等.生物数据分析平台中的大文件多线程传输方案[J].计算机系统应用,2021,30(09):317-321.
- [96] Stevens-Navarro E, Wong V W S. Comparison between vertical handoff decision algorithms for heterogeneous wireless networks[C]. 2006 IEEE 63rd vehicular technology conference. IEEE, 2006, 2: 947-951.
- [97] Agyare* M, Kponyo J J, Opare B A K, et al. An Optimized Vertical Handover Decision Model for the Heterogeneous DSRC/LTE Vehicular Networks[J]. Journal of Communications, 2023,18(8).