

浙江理工大学

ZHEJIANG SCI-TECH UNIVERSITY

硕士学位论文

(专业学位)



适应变电站的电力无线混合组网及

低功耗协议栈研究

Research on power wireless hybrid networking and

low-power protocol stack adapted to substations

作者：韩泽琳

类别（领域）：电子信息（计算机技术）

指导教师：李祥珍 教授 童基均 教授

所在学院：计算机科学与技术学院（人工智能学院）

完成日期：二〇二三年八月

摘 要

现阶段变电站内各设备监测系统多采用短距离微功率无线通信技术实现，大多依靠星型、树型或链状组网方案独立建网，智能自组网能力、网络连接性能、健壮性和部署的便易性不足，难以满足电力物联网以及智慧变电站的建设需求；与此同时，在变电站内，嵌于设备内部或粘贴在设备表面的，用于监测变压器、电缆温度、开关触点机械特性等的传感器常常面临一二次传感电气集成复杂、取电困难等问题，进而导致仅能依靠电池供电的传感器设备持续的能量供给受到限制。因此，要保障变电设备在线监测系统的长时间可靠运行，不仅需要选择合适的通信技术，更要尽可能满足工作过程的低功耗以维持传感设备长期工作所需的能量消耗。

基于此，本文针对智慧变电站的应用需求，对变电站全域的自组网无线网络及低功耗通信协议栈开展深入分析和研究：

1、对电力无线传感器网络普遍通用的无线网络协议进行详细分析，总结其各自的特点、网络架构、通信过程以及与终端监测节点的能耗设计相关的协议规约。

2、研究智慧变电站全域覆盖的自组织网络建设方法，提出一种星型与 Mesh 网双层混合拓扑结构，深入研究了混合网络的初始化构建、自组织组网以及网络自动更新等网络运行及维护的策略及技术。

3、研究设计基于混合组网架构的低功耗通信协议栈。针对星型网络层的终端监测节点数据链路层，规划设计低功耗通信策略以保证节点通信全过程的低功耗运行；针对 Mesh 网络层的路由/接入节点，研究设计基于 MAC 地址的下一跳节点地址层级匹配、路由路径选择、路由地址域解析与更新的路由寻址方法，建立终端监测节点与接入节点之间的可靠链路，实现节点之间高效低耗的数据传输。与此同时研究设计网络冲突与阻塞控制、时间同步策略，在避免冲突的同时最大限度降低路由节点工作能耗。

4、运用网络仿真软件 OMNeT++对设计的通信协议进行仿真验证，参照实际场景配置仿真参数，仿真实验结果表明：针对本文设定的仿真网络条件，供能受限节点单位小时通信能量消耗仅 0.004623mAh，充分满足使用寿命大于 10 年的工作需求；基于 MAC 地址路由与基于路由表的最短路径路由相比，相同网络拓扑不同帧长下端到端时延更低，下一跳路由选择效率更高；于此同时对其

他网络性能（网络平均跳数、信道利用率、网络丢包率）以及时间同步精度与能耗等结果进行分析评估，均充分表明本文设计研究的通信协议在提升网络健壮性、鲁棒性同时，有效减低了网络节点能耗。

关键词：低功耗通信；电力无线传感网络；Mesh 网络；混合网络；MAC 地址域路由

Abstract

At the present stage, the equipment monitoring system in the substation is mostly realized by short-range micropower wireless communication technology, and most of them rely on star, tree or chain networking scheme to build the network independently, with insufficient intelligent self-organizing ability, network connection performance, robustness and ease of deployment, which makes it difficult to satisfy the requirements of the Internet of Things in electric power as well as the construction of the intelligent substation; At the same time, in the substation, the sensors embedded in equipment or pasted on equipment surfaces for monitoring transformer, cable temperature, switch contact mechanical characteristics, etc. often face problems such as complex electrical integration of primary and secondary sensing, and difficulty in accessing power, which leads to limitations in the continuous energy supply of sensor equipment that can only rely on battery power. Therefore, in order to guarantee the long-term reliable operation of the online monitoring system for substation equipment, it is not only necessary to choose the appropriate communication technology, but also to meet the low power consumption of the working process as much as possible in order to maintain the energy consumption required for the long-term operation of the sensing equipment.

Based on this, this article focuses on the application requirements of smart substations and conducts in-depth analysis and research on the wireless communication network and low-power communication protocol stack of self-organized networks for the whole area of substations:

1. A detailed analysis of the wireless communication network protocols that are commonly used in electric power wireless sensor networks is conducted to summarize their respective characteristics, network architecture, communication process, and protocol statutes related to the design of energy consumption of terminal monitoring nodes.

2. The construction method of self-organizing network covering the whole area of smart substation is studied, a two-layer hybrid topology of star and mesh network is proposed, and the strategies and techniques for network operation and maintenance,

such as initial construction, self-organized networking, and automatic network updating of the hybrid network, are studied in depth.

3. A low-power communication protocol stack based on hybrid networking architecture is studied and designed. For the data link layer of the terminal monitoring nodes in the star network layer, low-power communication strategies are planned and designed to ensure the low-power operation of the nodes in the whole process of communication. Aiming at the routing/access nodes in the mesh network layer, this paper designs a routing addressing method based on MAC address to achieve next-hop node address level matching, routing path selection, resolution and update of routing address domains, and establish a reliable link between terminal monitoring nodes and access nodes to achieve efficient and low-cost data transmission between nodes. At the same time, network conflicts, blocking control, and time synchronization strategies are studied and designed to minimize the energy consumption of routing nodes while avoiding conflicts.

4. The network simulation software OMNeT++ is used to simulate and verify the designed communication protocol, and the simulation parameters are configured with reference to the actual scenarios. The simulation results show that: For the simulation network conditions set in this paper, the energy supply constrained nodes consume only 0.004623mAh of communication energy per unit hour, which fully meets the working requirements of service life greater than 10 years. MAC address-based routing has lower end-to-end delay and more efficient next-hop routing with different frame lengths for the same network topology compared to routing table-based shortest path routing. At the same time, other network performance (average network hop count, channel utilization, network packet loss rate) as well as time synchronization accuracy and energy consumption are analyzed and evaluated, all of which fully demonstrate that the communication protocols designed and studied in this paper effectively reduce the energy consumption of network nodes while improving the robustness of the network.

Keywords: Low-power communication protocols; Power wireless sensor networks; Mesh networks; MAC address domain routing

目 录

第 1 章 引言.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 无线组网技术研究现状.....	2
1.2.2 无线传感网络低功耗技术研究现状.....	3
1.2.3 电力无线传感网络研究及应用现状.....	5
1.3 存在的问题.....	7
1.4 论文主要研究内容及组织结构	8
1.4.1 论文主要研究内容.....	8
1.4.2 论文组织结构.....	8
第 2 章 无线通信网络协议及特点	10
2.1 常用无线通信协议.....	10
2.1.1 LoRaWAN.....	11
2.1.2 ZigBee	14
2.2 输变电设备物联网无线通信协议	18
2.2.1 Q/GDW 12020-2019 输变电设备物联网微功率无线网通信协 议	18
2.2.2 Q/GDW 12021-2019 输变电设备物联网节点设备无线组网协 议	21
2.3 本章小结.....	25
第 3 章 适应于变电站的电力无线混合组网设计	27
3.1 传统网络拓扑结构.....	27
3.2 混合组网网络拓扑结构.....	27
3.3 网络建立及组网流程设计	29
3.3.1 网络建立的设计.....	29
3.3.2 组网设计.....	29
3.4 网络更新及远程升级维护	32
3.4.1 网络更新设计.....	32
3.4.2 远程升级维护.....	33
3.5 本章小结.....	34
第 4 章 适应于变电站场景下的低功耗通信协议栈设计	35
4.1 低功耗通信协议栈架构设计	35
4.2 终端监测节点 MAC 层协议设计	36
4.2.1 分频分时策略.....	36

4.2.2 时间同步策略.....	37
4.2.3 休眠/激活策略.....	38
4.3 MAC 地址控制层协议优化设计	42
4.3.1 MAC 地址控制层帧结构.....	42
4.3.2 Mesh 网节点 MAC 地址优化设计.....	42
4.3.3 Mesh 网节点上下行路由过程.....	45
4.3.4 网络冲突与拥塞控制.....	47
4.3.5 基于 Mesh 组网的路由节点时间同步算法研究.....	48
4.4 本章小结.....	51
第 5 章 实验仿真与验证	52
5.1 OMNeT++ 仿真软件及运用框架介绍	52
5.1.1 OMNeT++ 仿真软件.....	52
5.1.2 INET 框架.....	53
5.1.3 FLoRa 框架.....	53
5.2 仿真网络参数配置及仿真实现	54
5.2.1 仿真参数配置.....	54
5.2.2 仿真实现.....	55
5.3 终端监测节点通信能耗分析	56
5.3.1 各状态节点电流消耗配置.....	56
5.3.2 通信能耗结果分析.....	57
5.4 Mesh 层时间同步算法实验验证.....	58
5.4.1 校正精度分析.....	58
5.4.2 路由节点同步过程能耗分析.....	60
5.5 网络性能分析.....	61
5.5.1 网络标量结果分析.....	61
5.5.2 端到端延时.....	63
5.6 本章小结.....	65
第 6 章 总结与展望	67
6.1 总结.....	67
6.2 展望.....	68
参考文献.....	69

第1章 引言

1.1 研究背景

变电站是电力系统发电、输电、变电、配电、用电环节中的重要组成部分，是电力系统的传输枢纽。

随着电力系统的更新迭代变电站也经历了从传统变电站到综合自动化变电站、智能变电站、智慧变电站等的发展进化。智慧变电站是在智能变电站基础上，采用新一代物联网、大数据、云计算、新型智能感知等技术建立起来的，主要用于对变电站内变压器、开关、动力环境、消防等主辅设备进行全面感知、智能巡视，实现站内设备自动巡检、作业及人员智能管控、设备间智慧联动等。

在智慧变电站内，电量、非电量传感数量巨大、种类繁多、应用系统众多。站内主要包括了变压器在线监测系统、开关在线监测系统、容性设备及避雷器在线监测系统、消防监控系统、动力环境监测系统、电子围栏、智能站房、智能巡视系统、人员及作业监管系统等几十种不同时期、不同技术方式、不同厂家建立的系统，这些站内安装的在线监测系统根据应用场合的不同可选择采用光纤、有线、电力无线专网、公网、微功率无线等不同类型的通信方式，而对于设备表面及触头温度、环境温湿度、SF₆ 气体泄漏、高压设备振动信号、噪声信号、电缆及设备局部高频放电信号、避雷器及套管泄漏电流等信号的数据采集及传输，大多是通过短距离微功率无线通信技术实现，应用星型、树状或链状组网方案独立建网。此组网方案下的节点没有智能自组网能力，网络连接性能、健壮性和部署的便易性不足，难以满足电力物联网以及智慧变电站的建设需求，因此业内亟待寻求一种能够覆盖变电站全站所有设备、动力环境以及应用场景的统一无线通信网络，以实现变电站内全域覆盖、传感器节点之间智能自组网、网络统一管理、简捷高效安全的变电站无线通信网络。

除此之外，站内监测变压器、电缆表面温度、触点温度，容性设备表面压力、开关触点机械特性等传感器往往需要内嵌于设备内部或粘贴设备表面，常常面临一二次传感电气集成复杂、取电困难等问题，尽管传感器周边布满了高压线路，但却无法为其提供可使用的低电压。传感器节点仅能通过感应取电、环境取能、电池或外部电源给自身供电，而由于高压设备安全、尖端放电、尺

寸及安装方式限制，纽扣电池供能往往成为传感器节点的唯一选择，进而导致传感器供能受到限制。因此，要保障变电设备在线监测数据的长时间可靠传输，不仅需要选择合适的通信技术提升网络健壮性，更要尽可能满足工作过程低功耗的要求。随着变电站监测数据类型的增加，监测节点组成的传感器网络规模也不断扩大，在保障传感器网络的鲁棒性、健壮性的条件下，尽最大可能降低传感器监测终端的功率消耗，成为电力工程应用中需要面对及解决的重大问题。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 无线组网技术研究现状

目前针对输变电设备的无线监测系统多数还依靠集中式无线网络，此类网络内基站作为中心节点，各个终端监测节点都与基站直接相连，网络拓扑结构简单易部署，但网络链路脆弱，若其中某个终端监测节点与基站之间链路失效或基站出现故障，即会导致终端监测节点失效甚至网络瘫痪；且随着电力设备的各类型监测数据增多，各类传感器的大量使用，网络规模逐渐扩大，亟待构建一个适用于多参量、覆盖变电站全域、监测节点众多的健壮性更佳的网络拓扑结构。

无线 Mesh 网络作为一种动态的自组织、自配置、自治愈的无线移动互联网络具有相对稳定的拓扑结构，网络内没有中央节点，网络内任意节点都具有路由和中继功能，在进行数据传输时存在多条可供选择的路径，当某一路由路径失效时，网络会自动选择新的路径进行消息路由^[1]，网络间的通信通过无线多跳实现，大大扩展了无线网络的覆盖范围，提升网络链路健壮性同时使得传输过程更加可靠。随着无线 Mesh 组网技术的普及与应用，众多国内外研究将现有无线通信网络协议与 Mesh 组网技术结合应用于不同领域的无线传感网络中，取得了较好的效果。张明明^[2]在农业信息监测领域，将 LoRaWAN 通信协议与 Mesh 自组网协议结合，在扩展网络监测范围的同时增加了节点 Mesh 路由协议与定位算法的研究，有效提升了农业信息采集效益。文献[1]用低功耗蓝牙通信协议结合 Mesh 组网技术设计了一种应用于物联网的组网方案，对安卓手机控制端及低功耗蓝牙设备进行软件开发并基于此对所设计组网方案性能进行验证测试，与 Zigbee 及 Wi-Fi 相比在降低组网成本的同时有效降低了网络节点设备功耗。文献[3]为对电力系统输电线路覆冰情况进行实时监测，利用 ZigBee 通信协

议结合 Mesh 网络拓扑结构,配合 F-AODVjr 路由算法建立了 ZigBee 无线通信 Mesh 网络,利用 ZigBee 技术低功耗及 Mesh 网络的自组织可扩展性,在降低监测节点功耗的同时有效提升了网络健壮性。

1.2.2 无线传感网络低功耗技术研究现状

目前国内外研究无线传感网络的低功耗技术主要是通过软、硬件设计时,引入一些能量管理机制以达到减少节点能量消耗、延长节点工作时间及网络整体寿命的目的。在电力无线传感网络中,传感器节点的能量管理是从耗能和供能两个方面进行优化控制的^[4],其中传感器节点的能耗管理是研究的重中之重。组成电力无线传感网络中传感器节点的传感器模块、处理器模块以及无线通信模块三个模块中最大的耗能模块在于无线通信模块。文献[4]中指出节点处于发送状态时的能耗为接收状态时的两倍多,传感器节点在空闲、接收、发送三种模式下的能耗比率为 1:1:2.7,据估计,传感器节点在侦听状态下所消耗的能量占节点整体能量消耗的 90%以上,可见,射频模块在发送和接收模式下消耗的能量最多,而在空闲模式下运行时,多数能量被白白浪费。周尧等^[5]就是根据上述节点的耗能特性,在设计功耗模型时将传感网中每个节点完成不同目标状态下产生的功耗以及目标状态转变过程中产生的功耗进行归纳分类建模,节点在非数据传输状态下立即关闭射频模块,让传感器节点处于休眠状态以减少功耗。

现有文献中针对电力无线传感网络的低功耗技术研究主要分三个层级进行展开,即分别对传感器节点的节点级、网络级和应用级三个层级建立相应的能量管理机制。节点级的能量管理策略主要是针对单个传感器节点的低功耗技术。设计低功耗硬件使硬件电路的能耗最小化、使用动态能量管理等技术策略使得软件系统的能耗最优化^[6],通过以上两种方式以达到组成传感器节点各模块运行在节能模式下,进而节约大量能量。周洋^[7]从硬件电路层面分析节点的射频发射电路结构及功耗特点,针对发射电路中功率消耗最大的功率放大器部分进行谐波控制网络设计,同时结合自设计的基于时间准同步技术的轮询协议及基于时分策略的退避算法,降低节点的能量消耗。使用动态能量管理技术策略的核心问题是状态调度策略。不同的状态有不同的功耗特征,且状态转换也有能量和时间开销。在节点活跃状态下,可以采用动态电压调节(DVS)技术来节省能量。其降低功耗的主要思路是根据芯片的工作状态来改变电源管理模式,

从而在保证性能的同时降低功耗。工作电压可以在不同的模式下进行调整。为了准确控制 DVS, 需要一个电压调度模块, 该模块可实时改变工作电压, 并通过分析当前和以前状态下的系统运行差异来预测电路的工作负载^[8]。或者可以在节点操作系统中使用动态电压调节技术, 由于应用程序的各项性能需求都可以被操作系统获取到, 可直接控制底层硬件资源, 从而在性能和控制能耗两者之间找到合适的平衡点^[4]。操作系统负责调度给定的任务集合, 使任务满足时间和性能需求, 通过在任务调度中考虑节能问题, 能够有效减少节点的能量消耗, 网络节点的生存时间会明显延长。

网络级能量管理需要考虑的问题是处在本地无线传感网络中的节点与网络内其他节点通信时如何找到一条节能的多跳路由。节能路由是在普通路由协议的基础上, 考虑能耗因素, 引入新的与能量消耗有关的衡量指标, 实现能耗的降低。例如, 对于冗余数据进行本地计算或网内处理可以大幅减少网络的能量消耗, 即中间节点在转发数据之前, 首先在节点内部进行数据融合, 去除冗余信息, 在满足应用要求的前提下使得需要传输的数据量最小化。李云亮^[9]就是基于 SEP 层次路由协议, 提出了一种基于主成分分析法的数据融合方法, 减少网络中簇头节点发送的数据量, 同时结合基于迪杰斯特拉算法的簇间多跳通信方式, 在选择路径权值中增加了节点剩余能量与节点路径两个指标, 综合选出簇头与汇聚节点之间最优路径, 从而有效降低簇头发送消息所消耗的能量, 极大延长了网络的使用寿命。文献[10-13]也有效利用现有能源, 分析研究出了适用于供能受限的无线传感网络的路由通信协议, 也在一定程度上降低了节点通信过程中的能耗。

应用级能量管理机制主要是为节点设计休眠机制或外接其他供能硬件。休眠机制是为节约节点能量, 提高整体网络能量的有效利用, 在不影响网络正常运行的前提下, 引入节点休眠机制; 外接其他供能硬件是让节点从其他能源中获取能量, 例如太阳能取能、电磁取能等。

除上述三种情况外, 还有一些文献结合以上三个低功耗技术研究方向, 提出针对不同应用场景下的系统级低功耗模型研究, 旨在系统性、有针对性的为不同应用场景下的无线传感网络内的终端节点设计低功耗模型。刘建等^[14]利用自开发的典型无线传感器设备节点结合其同类无线独立设备工作特征, 针对蓝牙设备实际工作状态定义了无线数据吞吐率及工作占空比两个基本参数并基于上述参数建立了一般功耗模型。文献[15]建立两层的系统级功耗模型, 包括底

层硬件部分基于部件的功耗模型与软件上层的指令级的功耗模型。部件级功耗模型主要用于设计优化系统体系结构，指令级功耗模型是用于指导编译器进行低功耗指令选择和调度，指令的基本功耗为其执行时相关数据通路上各个功能部件的功耗之和。

1.2.3 电力无线传感网络研究及应用现状

在电力系统的输电、变电、配电及用电各环节，部署了大量的用于电气量、运行状态及环境、气象等监测的传感器，组成了不同用途的输变电无线传感通信网络，形成了 GB/T 40287-2021 电力物联网信息通信总体架构^[16]、GB/T 35697-2017 架空输电线路在线监测装置通用技术规范^[17]、Q/GDW 12082 输变电设备物联网无线传感器通用技术规范^[18]、Q/GDW 12184-2021 输变电设备物联网传感器数据规范^[19]、Q/GDW 12020-2019 输变电设备物联网微功率无线网通信协议^[20]、Q/GDW 1242-2015 输电线路在线监测装置通用技术规范^[21]、Q/GDW 12021-2019 输变电设备物联网节点设备无线组网协议^[22]、Q/CSG 1205031-2020 输电线路在线监测通信规约及信息交互规约^[23]等国家标准、国网公司企业标准及南方电网公司企业标准。其中，《Q/GDW 12020-2019 输变电设备物联网微功率无线网通信协议》、《Q/GDW 12021-2019 输变电设备物联网节点设备无线组网协议》应用最为广泛。

《Q/GDW 12020-2019 输变电设备物联网微功率无线网通信协议》是国家电网公司企业标准，由国网江苏电力科学研究院等单位联合提出，国家电网公司科技部发布，该协议已经广泛应用于国网江苏电力公司各电压等级的输变电设备在线监测、配电站房智能化管理、低压物联测控系统等场景，并逐渐推广至国家电网公司所属的其他电网公司。该协议适用于输变电设备在线监测中的本地传感终端与基站（汇聚节点，即本文的路由节点 RN）之间的通信过程，主要应用于供能受限条件下传感器信息传送不太频繁的场合，通过休眠机制等方式实现微功率通信。协议规定了输变电设备物联网传感终端微功率无线接入协议，包含物理层协议规范和媒体接入控制层协议规范^[20]。

《Q/GDW 12021-2019 输变电设备物联网节点设备无线组网协议》也属于国家电网公司企业标准，由国网江苏电力科学研究院等单位联合提出，国家电网公司科技部发布。该协议主要用于规范输变电设备物联网感知层节点设备在组网通信时的通信过程，涵盖的通信设备包括接入节点、汇聚节点以及传感器，

适用于传感器数据传输频繁，响应速度要求较高的场合，要求应用现场能够提供电池以外的电源供给，该协议基本不采用休眠机制。协议定义了输变电设备物联网节点组网协议的物理层、媒体接入控制层和网络层，适用于输变电设备物联网的节点设备间组网通信和低功耗传感器接入通信。换句话说，无线组网协议除规定本地局域网内终端节点与汇聚节点之间的通信协议外，还涉及了汇聚节点与上行接入节点的通信过程，与物联网微功率无线网通信协议相比涉及的层次更多，范围更广。

上述两个网络标准中，《Q/GDW 12020-2019 输变电设备物联网微功率无线网通信协议》仅支持星型网络模型、《Q/GDW 12021-2019 输变电设备物联网节点设备无线组网协议》可支持树状网络拓扑和多跳网络拓扑两种传统网络拓扑结构。

1) 星型网络

网络拓扑结构包含汇聚节点和传感终端，网络配置为星型网络模型，即多个传感终端与一个汇聚节点直接相连，如图 1.1(a)所示。

2) 树状网络

如图 1.1(b)所示，接入节点、汇聚节点与底层终端节点三种节点呈树状结构分布，接入节点作为树的根节点，与网络中的汇聚节点直接相连，每个汇聚节点向下直接相连数个传感器节点，三者通过给定信道的上下层链路进行通信。

3) 多跳网络

受无线通信功率限制节点之间只能在有限的距离内通信，因此，针对一些相距较远的节点会将一部分汇聚节点作为中间节点将接入节点与其他汇聚节点、接入节点与底层终端节点之间进行链接，形成多跳的网络结构，完成各个节点间可靠的通信传输，如图 1.1(c)所示即为多跳网络的拓扑结构。

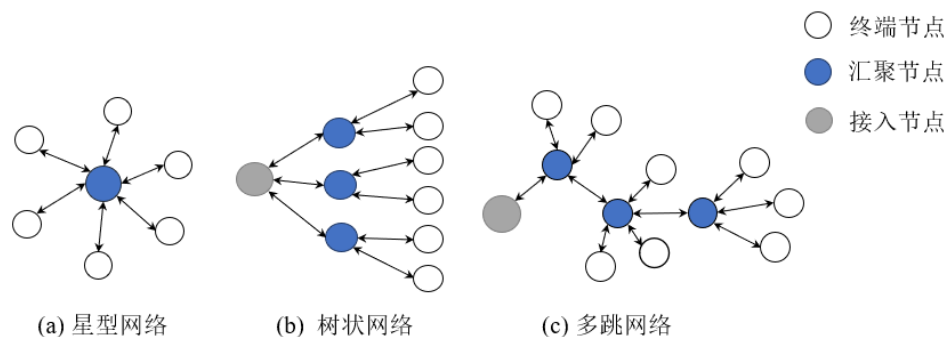


图 1.1 传统网络拓扑结构

1.3 存在的问题

目前国家电网公司、南方电网公司出台了多部电力无线传感网络的通信协议及标准，对电力传感器网络及低功耗定义了规范、技术要求及测试要求，基本上能够满足电力设备在线监测及智能分析的需要。但仍然存在许多问题，其中主要问题表现在网络架构及低功耗能力不足。针对网络架构问题，现有标准基本局限于单跳星型网络、多跳树状网络或链状网络，网络简单，组网能力差，抗毁性差，难以满足大规模海量传感器应用场合，特别是针对智慧变电站场合，需要研究一种适用于变电站全域应用的星型、Mesh 混合无线自组网技术，实现功耗最优、健壮性较高、覆盖广、部署容易的无线通信网络。

在优化组网技术、提升网络健壮性的同时，还需要着重关注网络内供能受限节点的工作能耗问题，对通信协议中的低功耗技术策略需要进一步深化。针对低功耗设计问题，现阶段应用于市场的混合组网技术多数在扩充网络后，忽略供能受限节点的低功耗运行问题，导致节点在监听消息、网络碰撞等过程中额外消耗过多能量，致使工作寿命大大缩短；除此之外，混合组网后网络规模更大，往往会涉及节点的多跳传输，此时需要进一步设计针对供能受限节点的、满足通信需求的低功耗、高效率路由协议，而现阶段路由协议的设计大多通过中间路由节点完成路由计算、路由选择、路由表查询、更新及维护，复杂的路由寻址过程进一步加速了节点能量消耗。因此，需要研究一种适应于变电站场景下、特殊混合网络的低功耗高效路由协议，能够大幅减低节点路由计算、路由表查询的开销，实现最优路径寻址的同时降低网络资源消耗和计算资源消耗，从而实现传感器免维护超长工作寿命（>10年）工作。

另外，目前针对电力无线传感网络低功耗技术研究主要针对网络层节能路由协议的设计上，忽略了传感网络节点通信过程中的时间同步机制及其降耗。时间同步是无线传感网的重要支撑技术，很多通信协议技术实现的前提条件即是制定满足精度且低功耗的时间同步机制，例如数据融合技术、节点定位技术等。文献[24]也提到，电力无线传感网中一些节能方案也需要利用时间同步机制才能有效实现。例如，传感器节点在适当的时候休眠，在需要时再被唤醒。此时，时间同步机制设置的目的是保证本地网络内的所有节点拥有相同的时间戳。因此，设计节能有效的的时间同步算法不仅能节约网络能耗，提升节点同步精度，最主要的是能够为电力无线传感网络设计的低功耗技术策略实现提供有力支撑。

1.4 论文主要研究内容及组织结构

1.4.1 论文主要研究内容

本论文基于上述的问题，针对智慧变电站的应用需求，对变电站全域的自组网无线通信网络及低功耗通信协议栈开展深入分析和研究，论文主要研究内容如下：

（1）研究智慧变电站全域覆盖的自组织网络建设方法，提出一种星型与 Mesh 双层混合拓扑结构，并对混合网络内网络建立、组网过程、网络更新及升级维护进行详细研究设计。

（2）基于混合组网架构研究设计适用于变电站场景下的低功耗通信协议栈，优化终端监测节点数据链路层的低功耗通信策略，对 Mesh 网络层路由/接入节点规划 MAC 地址控制层，设计基于 MAC 地址的路由协议。中间路由节点利用基于 MAC 地址路由协议可有效完成下一跳节点地址层级匹配、路由路径选择以及路由地址域解析与更新，建立终端监测节点与接入节点之间的可靠链路，将源节点发送的数据消息通过上下行路由高效低耗传至目的节点。

（3）进一步优化 Mesh 网络层通信协议栈设计，针对 Mesh 网络层通信过程中可能面临的网络冲突和阻塞，加入 CSMA/CA（Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance，载波监听多点接入/碰撞避免）协议，在避免冲突的同时有效降低路由节点工作能耗；针对 Mesh 网络层内的节点设计高精度、低功耗时间同步机制，Mesh 网络层各节点的同步精度很大程度影响终端监测节点时隙调度策略的有效完成。设计算法在提升同步精度的同时有效延长每次同步完成后的作用时间，以降低整个网络完成同步过程产生的通信能耗。

（4）运用网络仿真软件 OMNeT++对设计通信协议进行仿真验证，设计消融实验，重点针对节点能耗及网络性能仿真结果进行研究分析，综合验证本文设计研究的通信协议在提升网络健壮性、鲁棒性同时，有效减低了网络节点的能耗。

1.4.2 论文组织结构

第一章 引言。首先介绍了课题的研究背景，之后针对无线组网技术、低功耗技术、电力无线传感网络现有标准三个主要方面分析国内外研究现状，分析现有研究中存在的问题，最后阐述本文的主要研究内容及组织结构安排。

第二章 无线通信网络协议及特点。重点对 LoRaWAN、ZigBee 两种常用无线通信协议、两种电网输变电设备物联网无线通信协议进行详细分析，总结四种协议各自的特点、通信过程以及与节点能耗设计相关的协议规范。此章节的理论分析是后续协议研究设计的重要基础。

第三章 适应于变电站的电力无线混合组网设计。针对现有变电站无线监测网络覆盖范围小、网络链路脆弱与供能受限监测节点低能耗运行两个重点问题，研究设计智慧变电站全域覆盖的自组织网络建设方法，提出一种星型与 Mesh 网双层混合拓扑结构。最后根据混合网络不同层级节点实际需求设计网络初始化建立、组网、更新及远程升级维护方法。

第四章 适应于变电站场景下的低功耗通信协议栈设计。首先介绍低功耗通信协议栈整体架构设计，之后对星型网络层级终端监测节点 MAC 层协议研究设计分频分时、时间同步以及休眠/激活策略低功耗策略；对 Mesh 网络层级内节点设计 MAC 地址控制层，并在此层级详细设计基于 MAC 地址的路由寻址方法，配合防冲突策略与低功耗时间同步算法设计，实现 MAC 地址控制层低功耗优化设计。

第五章 实验仿真与验证。首先对所使用的 OMNeT++ 仿真软件平台及相关框架进行简要介绍，对仿真网络参数配置及具体实现依照实际情形进行详细设计；之后分别对混合网络拓扑及低功耗通信协议内各项网络性能指标、终端监测节点通信能耗、时间同步算法校正精度及运行能耗进行仿真测试与对比分析，验证本文所研究设计的通信协议的有效性。

第六章 总结与展望。主要是对本文所做工作的归纳总结以及对后续研究工作的展望。

第2章 无线通信网络协议及特点

本章简要介绍电力无线通信网络中常用的几种无线通信技术，内容主要包括：调制方式、应用频段、数据传输速率、通信协议标准，以及各自适用的应用场景。重点分析研究输电线路、变电站等应用场景下电力设备监测系统所适用的无线通信网络协议，总结各协议的特点。

2.1 常用无线通信协议

通信模块是电力传感网络的核心部分，也是耗能最多的部件。由于电力传感器安装位置特殊（位置偏僻、环境恶劣、一次高压设备表面及内部等），常常面临一二次传感电气集成复杂、取电困难等问题，进而导致传感器节点供能受到限制。因此，要支撑起输变电设备在线监测数据的长时间可靠传输，不仅需要选择合适的通信技术，更要尽可能满足工作过程低功耗的要求。

目前，应用在电力系统中的通信技术主要有电力载波通信技术和光纤通信技术和无线通信技术。其中，电力载波通信技术和光纤通信技术都属于有线通信，需要利用现有电力线或搭建光缆作为传输媒介，信息传输相比无线通信传输可靠且安全性更高，但载波通信仅适用于中低压配电系统，光纤通信布设难度大，造价高；无线通信技术以电磁波作为传输媒介进行信息传递，功耗成本低、扩展方便，成为变电站、高压输电线路设备、线路运行状态及环境在线监测系统通信方式的重要选择^[24]。

现阶段在输电线路、变电站输变电设备在线监测系统中，4G、LoRa、2.4G微功率、蓝牙及 NB-IoT 等通讯制式较为常见。通用的无线通信协议包括 LoRaWAN、ZigBee 等，电力专用的通信协议包括 Q/GDW 12082 输变电设备物联网无线传感器通用技术规范^[18]、Q/GDW 12184-2021 输变电设备物联网传感器数据规范^[19]、Q/GDW 12020-2019 输变电设备物联网微功率无线网通信协议^[20]、Q/GDW 12021-2019 输变电设备物联网节点设备无线组网协议^[22]、Q/CSG 1205031-2020 输电线路在线监测通信规约及信息交互规约^[23]等国家标准、国网公司企业标准及南方电网公司企业标准。本章节将就 LoRaWAN、ZigBee，以及广泛应用于国家电网的 Q/GDW 12020-2019 输变电设备物联网微功率无线网通

信协议、Q/GDW 12021-2019 输变电设备物联网节点设备无线组网协议进行系统分析。

2.1.1 LoRaWAN

LoRaWAN 是在 LoRa 物理层协议基础上配套设计的一套低功耗广域网标准，可以理解为是 MAC 层的组网协议。本节主要介绍 LoRaWAN 协议中终端与网关组成的本地局域网相关的协议内容。

2.1.1.1 协议特点

(1) 网络拓扑结构

LoRaWAN 网络本地局域网终端节点与基站之间通常采用与输变电设备物联网微功率无线网通信协议相同的星型网络拓扑，基于 LoRa 长距离特性，一个基站与多个终端节点直接相连采用单跳方式传输，终端节点之间没有通信连接。

(2) 协议栈结构

LoRaWAN 协议栈结构如图 2.1 所示，主要分为 LoRa Modulation、LoRa MAC、Application 三个层级，分别表示物理层、数据链路层以及应用层。其中在 LoRa MAC 层规定了 Class A/B/C 三类终端设备，这三类终端设备也同时对应传感器在 MAC 层的三种上下行通信方式。

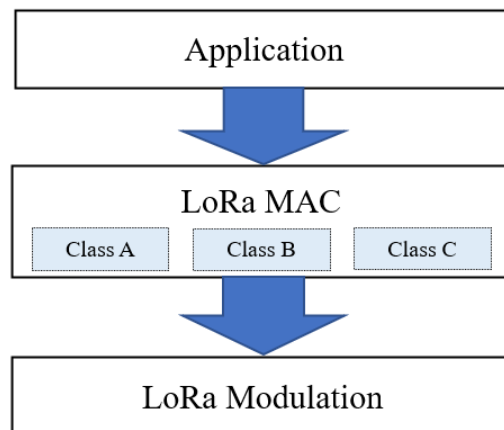


图 2.1 LoRaWAN 协议栈结构

(3) LoRa Modulation

LoRa 是 LoRaWAN 网络物理层中使用的调制技术，基本上是采用线性调频扩频（Chirp Spread Spectrum, CSS）调制，其用于使用不同的扩频因子提供不

同的数据速率。CSS 在固定的信道带宽内平衡了数据速率和灵敏度，既保持了像频移键控（Frequency Shift Keying, FSK）调制相同的低功耗特性，又明显地增加了通信距离；与此同时，提高了网络效率并消除了干扰，即不同扩频序列的终端即使使用相同的频率同时发送也不会相互干扰^[8]。在 1GHz 以下的非授权频段运行，其中欧洲常用在 433MHz、868MHz 频段，美国通常在 915MHz 频段，我国通常在 470MHz 频段。应用数据可双向传输，传输距离在城镇可达 2-5km，郊区可达到 15-20km。

(4) LoRa MAC

1) MAC 层组成

MAC 层在物理层提供服务的基础上向上层提供服务，MAC 层与物理层帧结构如图 2.2 所示：

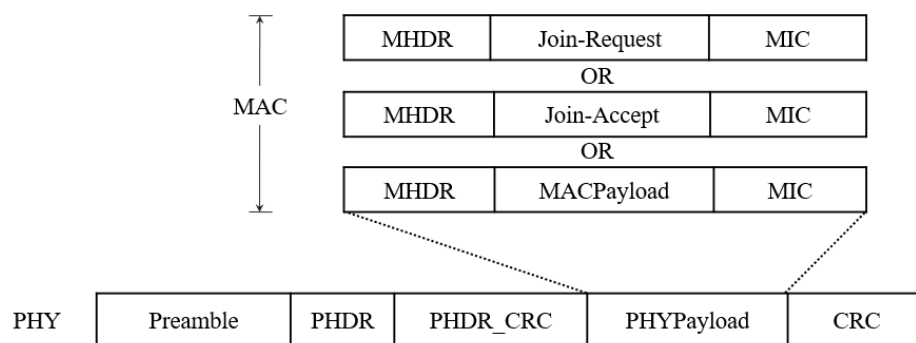


图 2.2 各层帧结构关系

其中，MAC 层三种帧结构中，Join-Request 与 Join-Accept 仅适用于空中入网过程。本文仅讨论本地激活入网方式。

2) MAC 层帧结构

如图 2.3 所示，MAC 层帧结构包括 MAC 头字段（MHDR）、MAC 层负载（MACPayload）以及 MIC（Message Integrity Check，信息完整性校验）。

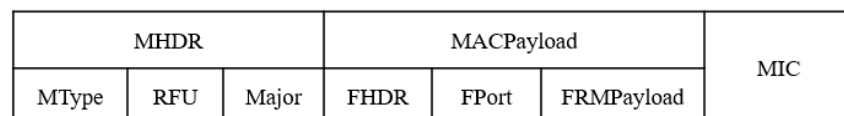


图 2.3 MAC 层帧结构

其中 MHDR 字段中包含消息类型（MType）字段，协议版本号 Major 字段。Mtype 字段将 MAC 帧分成了六种类型，分别为入网请求帧（Join-Request）、入

网确认帧（Join-Accept）、未确认上行数据帧（unconfirmed data uplink）、未确认下行数据帧（unconfirmed data downlink）、确认上行数据帧（confirmed data uplink）以及确认下行数据帧（confirmed data downlink）。其中确认数据帧需要接收方回复应答，未确认帧无需回复应答。

MACPayload 字段包含帧头（FHDR）、端口（FPort）以及帧载荷（FRMPayload）字段。其中端口字段和网络协议的端口号类似，取值范围为 0~255，当值为 0 时，表示帧载荷字段只存放了 MAC 命令；1~223 用于应用层特殊情形使用；224 表示用于 LoRaWAN 测试协议。帧载荷字段作为 MAC 帧的有效载荷用于存放 MAC 命令或用户数据，若数据帧携带了帧载荷，帧载荷必须在 MIC 计算前进行加密，加密机制采用 AES128 算法。

2.1.1.2 通信过程

针对 MAC 层三种不同的终端设备，与上级网关节点的通信过程也有差异。

（1）Class A 的终端节点采用双向通信，每个终端节点的向上传输业务数据时会跟随两个短暂的下行链路接收窗口，传输时隙基于终端节点自身通信需求会具有随机时间的微小变化。而网关仅能在终端节点开放下行链路接收窗口时进行下行链路有效通信，在任何其他时间从网关下行链路通信必须等下一个调度的上行链路。A 类终端设备是三类中最低功耗的终端系统。

（2）Class B 的终端节点除了 Class A 的终端节点随机开放的接收窗口，还会在指定时隙再次打开接收窗口接收服务器消息，指定时隙的确认由网关向终端节点发送时间同步信标决定，B 类终端设备每次向上传输业务数据后按照网关设备规定的时间间隔启动接收窗口，接收来自网关设备的下行数据，因此下发延时有所提高。

（3）Class C 的终端设备几乎持续处在监听接收消息状态，仅在向上传输业务数据时关闭接收窗口。因此，Class C 比上述两种类型终端设备都要更加耗能，但可以与网关设备实时通信，交互实时性强。

LoRaWAN 所规定的三种终端设备最满足低功耗需求的是 A 类终端，但在通信协议设计上，终端节点每次上传业务数据都需要额外开放两个等待窗口，等待接收的过程势必会消耗额外的能量，长此以往会加速节点能量耗尽，因此这类通信方式更适用于对实时性响应要求较高的监测网络。

2.1.2 ZigBee

ZigBee 是一种基于 IEEE 802.15.4 无线标准开发的短距离、低复杂度、低功耗、低数据速率、低成本的无线网络技术，是一种介于无线标记技术和蓝牙之间的技术提案，主要用于自动控制和远程控制领域近距离无线连接。

2.1.2.1 协议特点

(1) 网络拓扑结构

ZigBee 具有强大的组网能力，可支持星型、树状和网状三种拓扑结构。图 2.4(a)表示的星型网络是最简单的拓扑结构，包含一个协调器与一系列路由器及终端设备，每个终端设备只能与协调器进行通信，节点之间的数据路由只有一条唯一的路径。图 2.4(b)表示的是树状拓扑结构，协调器直连数个路由器和终端设备，路由器可以向下继续连接多层级的路由器和终端设备，终端节点不能有子节点。树状拓扑中每个节点只能与其父、子节点进行通信，若需要从一个节点向另一个节点发送数据，则数据首先要沿着树的路径向上传递到最近的祖先节点，之后再向下传递给目标节点，节点间传递数据的路由路径也是唯一的。图 2.4(c)表示的是网状网络（Mesh 拓扑），网络内由一个协调器和多个路由器及终端设备组成，网状网络路由节点之间可以相互直接通信，节点间有多条路由路径传输消息，因此此种网络具备更为灵活的路由规则，具备自组织和自愈功能。

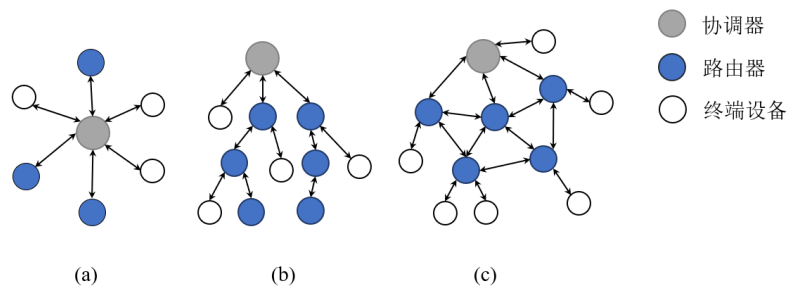


图 2.4 ZigBee 网络拓扑结构

(2) 协议架构

ZigBee 技术是基于 IEEE 802.15.4 标准的无线技术。如图 2.5 所示，ZigBee 协议架构的物理层和 MAC 层都遵照 IEEE 802.15.4 的协议技术规范，网络层及应用层相关协议规定由 ZigBee 联盟负责。

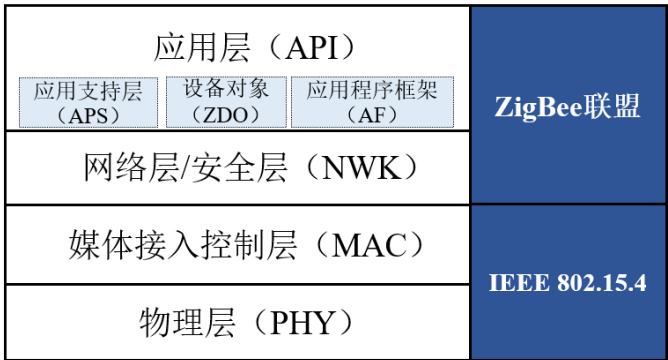


图 2.5 ZigBee 协议架构

(3) IEEE 802.15.4 通信层

1) 物理层

物理层协议提供了全球免许可证的 2.4GHz、北美的 868MHz 以及欧洲 915MHz 三种工作频段，分别支持 240kbps、20kbps 以及 40kbps 三种不同数据速率，采用直接序列扩频 (DSSS) 技术，在 868MHz/915MHz 频段采用二相相移键控 (BPSK) 调制方式，2.4GHz 频段采用偏移正交相移键控 (O-QPSK) 调制方式。

2) 媒体接入控制层

(a) MAC 层帧结构

如图 2.6 所示即为 ZigBee 协议 MAC 层帧结构。其中，帧控制字段中帧类型用于区分信标帧、数据帧、应答帧及命令帧四种帧类型；网内/网际表示是否在同一个 PAN 网络中传输数据；目的/源地址模式包含没有目的地址、预留、16 位短地址、64 位长地址四种类型。

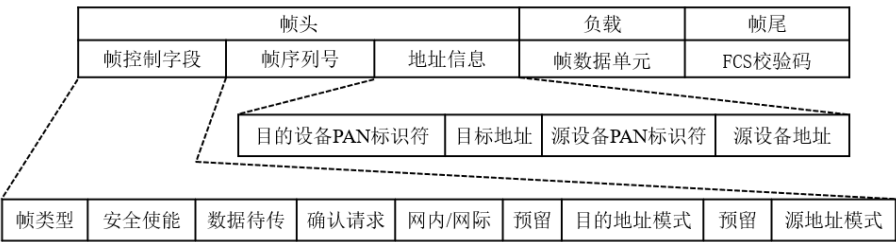


图 2.6 ZigBee 协议 MAC 层帧结构

(b) MAC 层规范

IEEE 802.15.4 标准将 ZigBee 媒体接入控制层分成了逻辑链路子层 (LLC)、介质控制访问子层 (MAC) 两个子层，根据网络配置不同提供两种信道访问机

制：在无信标使能的网络中采用无时隙的 CSMA/CA 机制，在信标使能的网络中采用带时隙的 CSMA/CA 机制。在信标使能的网络中，规定了超帧的格式，超帧是用于对组织网络通信时间分配的逻辑结构，它将通信时间分为了活跃和不活跃两个时段，活跃时段包括信标帧发送阶段、竞争访问时段和非竞争访问时段，总共被均匀划分为 16 个等长时隙。

首先，活跃时段每个时隙长度由协调器决定后通过信标帧广播至整个网络，之后进入竞争访问时段（CAP），此时段所有设备以竞争方式访问信道，再之后进入非竞争访问时段（CFP），这一时段所有设备采用时分复用访问信道，最终进入非活跃期，所有设备变为休眠态，等待下一个信标帧周期到来。无信标使能的网络较灵活，协调器无需发送信标帧，仅在设备向上请求时发送，设备间以竞争方式访问信道。

（4）网络层

ZigBee 网络层主要负责网络拓扑的搭建和维护，以及设备寻址、路由等，除通用的网络层功能范畴以外，还需要为 MAC 层提供支持，为应用层提供合适的服务接口。实现与应用层的连接需要将网络层从逻辑层面分成数据实体与管理实体，数据实体接口负责向上层提供所需的常规数据服务，管理实体接口负责向上层提供访问接口参数、配置和管理数据的机制，例如加入/离开网络、邻居发现、路由发现、接收控制等^[32]。

（5）应用层

应用层包括应用支持子层、应用框架以及 ZigBee 设备对象三部分。应用支持子层用于维护绑定表及在绑定设备间传送消息；ZigBee 设备对象用于定义网络中的角色（协调器、路由器、终端设备），可以发起和响应绑定请求，可以在网络内各设备中建立安全机制。应用框架内的对象通过应用支持子层数据实体服务访问点收发数据，应用对象通过 ZigBee 设备对象公开接口实现对网络内设备各协议的控制与管理，以及标准网络功能的初始化。

2.1.2.2 路由算法及机制

（1）路由算法

ZigBee 协议采用 AODV（Ad-Hoc On-Demand Distance Vector，按需距离矢量路由）与树型网络结构路由结合作为自己的路由算法。实际应用时采用的是简化版的 AODV 算法—AODVjr（AODV Junior）。AODVjr 具有 AODV 的主要

功能，但在节省一定网络资源的同时网络功耗更低。树型网络结构路由算法包括地址的分配与寻址路由两部分，包括子节点的 16 位网络短地址分配，以及根据目的节点的网络地址计算下一跳的算法。

（2）路由机制

ZigBee 拥有四种路由机制，路由表路由（Table Routing）、广播路由（Broadcast Routing）、组播路由（Multicast Routing）以及源路由（Many-to-one/Source Routing）。

1) 路由表路由

源节点发送路由发现请求到目的节点形成路由表，路由建立后，节点之间通过路由表实现数据传输。中间节点通过查表将数据传输到下一跳节点，直至到达路由表中的目的节点地址，若路由过程失败则发送路由错误消息给源节点，源节点则再次发送路由发现请求建立新的路由表。

2) 广播路由

ZigBee 网络层广播机制可以随机选择广播的目的设备，广播地址为 0xFFFF 表示网络中所有设备、0xFFFD 表示网络中的非休眠设备、0xFFFC 表示网络中的协调器和所有路由设备。广播消息会在路由设备之间重复广播三次，以保证顺利转送至目标设备。但需要注意，重复广播可能会影响网络中其他节点的通信过程，应有节制使用广播路由。

3) 组播路由

组播路由提供一对多的通信路由服务，同广播路由类似，此类路由没有应答帧，适用于网络内一个设备向网络内多个设备组成的一组设备发送数据消息的情形，组中的设备才能接收此消息，网内其余节点负责路由转发。相当于受限的广播机制，也应有节制使用。

4) 源路由

源路由过程主要可分成两个阶段。第一阶段，由协调器向网内其他设备发送多对一路由请求，每个收到请求的设备将收到的最优路径存储到本地路由表并标记为多对一路径，目的节点为协调器节点。创建完成网内其余设备到协调器设备的路径后，此时进行第二阶段，由网内其余设备发送路由记录消息命令到协调器，中间经过的路由设备将自己的地址加入中继列表中，协调器收到命令后根据生成的中继列表以源路由方式原路发送给网内其余设备，由此创建完毕反向路径，完成源路由过程。

2.2 输变电设备物联网无线通信协议

2.2.1 Q/GDW 12020-2019 输变电设备物联网微功率无线网通信协议

2.2.1.1 协议特点

输变电设备物联网微功率无线网通信协议是专门针对本地局域网中采用星型拓扑结构、供能受限的终端监测节点设计的物理层、MAC 层协议规范，协议设计的侧重点是保证节点全通信过程低功耗。因此基于此协议对网络各层级、节点各工作环节的低功耗设计特点，使本文后续针对终端监测节点低功耗通信策略的设计选择在此协议基础上进行优化实现。

(1) 协议栈结构

微功率无线网通信协议分为物理层（PL）和媒体接入控制层（MAC）两部分，如图 2.7 所示。物理层用于物理比特流的数据传输，媒体接入控制层用于数据链路的连接和通信协议决定。图中的网络层在更上层的协议中规定。

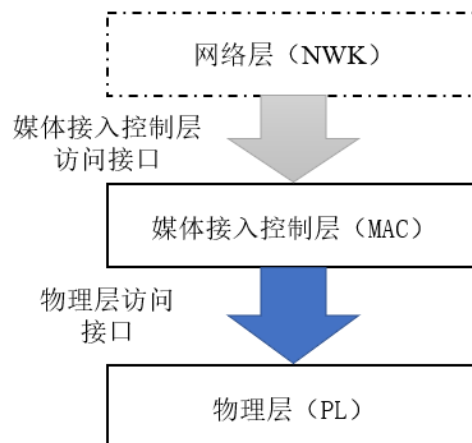


图 2.7 微功率无线网通信协议架构

(2) 物理层帧结构

物理层帧结构如图 2.8 所示，图中所示可选字段根据物理层协议的不同有所差异，例如 CSS 物理层，物理层头、物理层头校验、以及物理层负载校验字段为必选字段；而 IEEE802.15.4 物理层帧结构不需要物理层头校验字段和物理层负载校验字段，物理层头为必选。



图 2.8 物理层帧结构

(3) 媒体接入控制层 (MAC 层) 组成及帧结构

1) 组成

媒体接入控制层在物理层提供服务的基础上向上层提供服务，媒体接入控制层与物理层帧结构如图 2.9 所示：

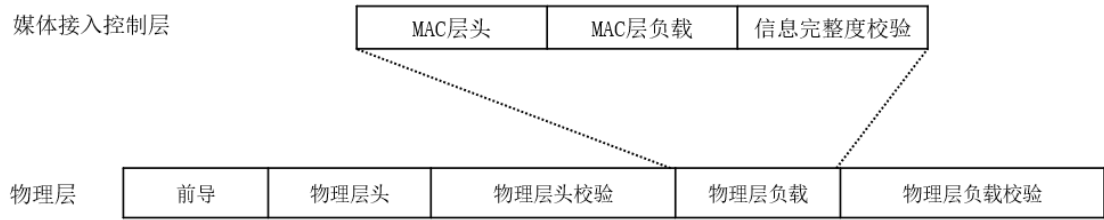


图 2.9 各层帧结构关系

2) 帧结构

如图 2.10 所示，即为媒体接入控制层帧结构。

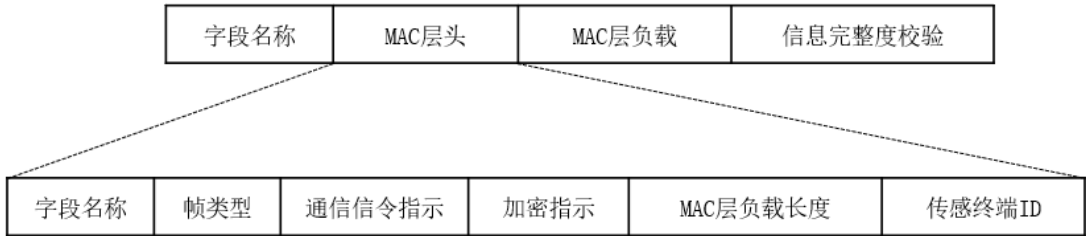


图 2.10 媒体接入控制层帧结构

其中，MAC 层头占据 8 个字节，包含帧类型、通信信令指示、加密指令、MAC 层负载长度、传感终端 ID。

帧类型在 MAC 层头中占据 4 比特，用于定义发送帧的具体类型和功能。根据具体的比特序列对应不同的帧类型，主要包含七种帧类型，分别是业务信道信息帧 (MESSAGE)、控制信道请求帧 (REQ)、控制信道应答帧 (RSP)、控制信道应答终帧 (RSP_END)、突发数据帧 (BURST)、控制信道确认帧 (ACK)、保留备用 (RFU)，根据通信的需求发送不同的帧。

通信信令指示在 MAC 层头中占据 1 比特，用于标识媒体接入控制层负载是

业务指令或通信指令，取值 0b1 表示控制报文，取值 0b0 表示通信指令。此标识只在帧类型为控制信道应答帧（RSP）或控制信道应答终帧（RSP_END）时有效。

加密指示占据 3 比特，验证是否对 MAC 负载及信息完整度校验进行了加密，取值 0 表示加密，取值 1 表示未加密。

传感终端 ID 占据 6 个字节，是传感终端设备节点在网络中的唯一标识，每个传感器终端都会被分配一个唯一的传感终端地址。

2.2.1.2 通信过程

基站（汇聚节点）将时间分段，再将每段时间平均分配成多个时隙，且时隙的数量远远小于网络中传感终端的数量，与此同时，每个时隙的长度大于单个传感终端发送一次业务信息的时间长度，协议规定业务周期长度 5min，业务周期时隙数为 200 个；控制周期长度 1h，等待回复周期根据频段的不同周期有所差异，频段在 470-510MHz 等待回复周期是 150ms，频段在 2400-2483MHz 等待回复周期是 30ms。

（1）业务信道通信过程

业务信道通信过程是由传感终端向上进行的无回复的单向传输，传感终端在特定时隙内向汇聚节点发送业务信道信息帧，帧内容为节点实时采集到的监测数据，汇聚节点在此通信过程中处于等待接收状态，接收成功业务信道信息帧则记录下此帧中的监测数据，接收不成功就丢弃该帧。基站（汇聚节点）接收到业务信道信息帧后，立即记录接收到的时间，为控制信道中时间同步过程做准备。

（2）控制信道通信过程

控制信道通信过程主要包含控制信道请求与控制信道应答双向传输过程。传感终端在固定时隙激活后向基站（汇聚节点）发送控制信道请求帧，发送完毕后进入等待接收状态，等待时间可根据实际情况随意设置。汇聚节点在接收到终端节点发送的控制信道请求帧后进行白名单地址匹配，匹配成功向终端节点发送控制信道应答帧或控制信道应答终帧，若匹配不成功，则汇聚节点继续处于等待接收状态。传感终端成功收到一个控制信道应答帧后，进入下一个等待回复周期，继续等待接收下一帧直到成功接收到控制信道应答终帧后，向汇聚节点发送控制信道确认帧结束通信。

2.2.2 Q/GDW 12021-2019 输变电设备物联网节点设备无线组网协议

2.2.2.1 协议特点

(1) 协议栈分层结构

输变电设备物联网节点设备无线组网协议分为网络层（NWK）、媒体接入控制层（MAC）、物理层（PHY）三层模型，如图 2.11 所示，最顶层为网络层用于端到端的包传输；中间层为媒体接入控制层用于支持设备的接入和调度；最底层的为物理层。

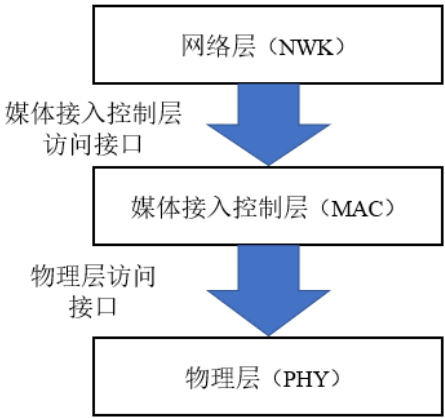


图 2.11 输变电设备物联网节点设备无线组网协议栈

(2) 帧结构关系

物理层主要负责处理比特流的物理传输，包括发送和接收。媒体接入控制层在物理层提供服务的基础上向网络层提供服务，规定了帧格式、信道类型以及通信过程等。网络层定义了端到端的数据传输格式，拓扑建立过程以及路由过程。如图 2.12 为物理层、媒体接入控制层以及网络层之间的数据帧结构映射关系。

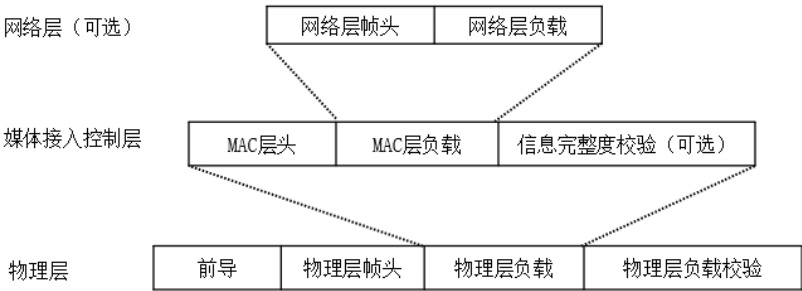


图 2.12 各层的数据帧结构映射关系

(3) 媒体接入控制层（MAC 层）帧结构

MAC 帧结构包含 MAC 层帧头、MAC 层负载以及信息完整度。MAC 层帧头内部又包含了 MAC 类型以及负载长度两部分。而在 MAC 类型中又包括信道类型、网络层指示、应答指示、MIC 指示以及加密指示。如图 2.13 所示即为 MAC 层完整的帧结构内容。

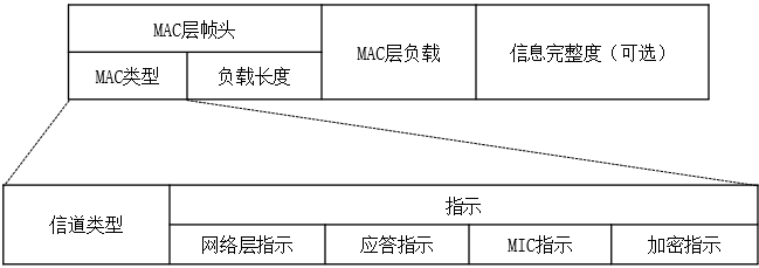


图 2.13 MAC 层帧结构

1) MAC 类型

不同的信道类型对应不同的二进制编码以及不同的 MAC 负载内容，下行信道的类型主要分为四种，分别是 BCH（Broadcast Channel，广播信道）：用于系统消息广播和时间同步、DCCH（Downlink Control Channel，下行控制信道）：主要用于上行数据应答、上行时隙资源的调度以及随机接入应答等、MCH（Multicast Channel，多播信道）：用于给多个传感器的组播下发指令或数据，例如对需要同步工作的从设备通信、DSCH（Downlink Shared Channel，下行共享信道）：用于下行点对点的数据或信令传输；上行信道的两种信道类型分别是 URCH（Uplink Random Channel，上行随机竞争信道）：用于上行随机接入以及资源请求等、USCH（Uplink Shared Channel，上行共享信道）：用于上行点对点的数据或信令传输。

指示定义又分为四种指示类型。其中，网络层指示用于说明数据帧负载内容是否为网络层数据；信道类型为广播信道与多播信道时应答指示取值为 0，表示无需应答。加密指示用于说明是否对负载部分进行了加密。

2) 负载长度

MAC 负载部分的字节数。

3) MAC 负载

用于承载相关控制、数据内容。

4) 信息完整度校验

针对 MAC 帧头和负载 CRC 校验, 采用 CRC16 算法。

(4) 网络层帧结构

网络层定义了端到端的数据传输格式, 拓扑建立过程, 以及路由过程。网络层帧承载在上行共享信道和下行共享信道上, 对应为通信数据字段。如图 2.14 所示为通用网络层帧结构。

网络层帧头				网络层负载	
网络层帧类型	接入节点端口号 (可选)	末端汇聚节点EID (可选)	末端传感器EID (可选)	网络层指令类型	指令内容

图 2.14 网络层帧结构

网络层帧类型包含全网广播指示、上下行指示、指令/数据指示、末端汇聚节点 EID (Equipment Identification, 设备标识) 指示、末端传感器 EID 指示、接入节点端口号指示及其他保留类型定义。其中, 全网广播在网络层仅广播至汇聚节点, 不再继续向终端节点广播。

网络层负载每种指令类型都有对应的指令内容定义。根据指令的类型及作用可对指令类型进行进一步的归类划分, 归类后将众多指令类型分为拓扑路由指令、设备注册指令、节点通道状态、节点设备工作状态、网络层应答、传感器黑白名单下发、传感器同步采集指令下发、下属传感器通信参数。

2.2.2.2 拓扑建立过程

与微功率无线通信协议不同, 本协议涉及节点类型更多, 层级更丰富, 增加了网络层拓扑建立以及多跳路由的相关规定。

无线传感网络各节点无论是树状拓扑还是多跳拓扑结构, 统一由接入节点发起, 逐步将其他汇聚节点与终端节点加入网络。拓扑建立具体过程如下:

(1) 接入节点通过广播组网消息, 周围的邻居汇聚节点根据信号强度有选择性进行随机接入; 随机接入成功的汇聚节点通过接入节点完成注册, 未接入成功的汇聚节点重新尝试接入。

(2) 汇聚节点加入网络后, 由接入节点发送控制消息调度汇聚节点继续向下广播组网消息到下一层节点。循环往复, 直到所有设备完成局域组网。

(3) 对于具备多个接入节点的电力无线传感网络, 汇聚节点可根据到达不同接入节点的通信距离、跳数等信息选择某接入节点下的网络加入。

2.2.2.3 路由过程及更新

(1) 路由过程

1) 上行路由

由于协议规定的网络拓扑结构为树状结构，因此在网络中的所有汇聚节点及终端节点都可以找到自己的主设备，而其本身也可以成为其他节点的主设备，网络内部依靠主从关系完成向上的数据传递。

2) 下行路由

网络内每个接入节点都存有其下所有汇聚节点与终端节点的树状路由表，同时每个汇聚节点也存有与其具有主从关系的本地终端节点路由表。当接入节点要向下发送控制指令时，分为两种情形：第一种是下行数据发送目标是某终端节点，则先通过查阅下行树状路由表找到与终端节点直接通信的汇聚节点，汇聚节点再通过查阅本地终端节点路由表下发给目标终端节点；第二种是下行数据发送目标是某汇聚节点，则直接查阅下行树状路由表找到目标汇聚节点进行数据下发即可。

(2) 路由地址更新

路由地址更新分为静态路由地址更新与动态路由地址更新。静态路由地址更新由接入节点发起，更新内容包括节点组网路由表和传感器增量更新路由表两类，更新后发送给对应汇聚节点；动态路由地址更新由汇聚节点发起，更新内容包括将下属汇聚节点拓扑变更信息上传至接入节点以及将下属终端节点的拓扑变更信息上传至接入节点。

2.2.2.4 通信过程

(1) 节点广播过程

主设备在广播周期内定时向从设备发送广播信息。利用广播信道进行传输，从设备通过广播信道，获取与主设备的时间同步消息进行同步。

(2) 随机接入过程

主设备通过下行控制信道或广播信道向从设备发送上行时隙配置，以及可用于随机竞争的时隙消息，从设备选择随机竞争时隙通过上行随机竞争信道（URCH）向主设备发送随机接入请求，若主设备成功接收到请求则立即通过下行控制信道进行从设备注册，主设备成功注册从设备后通过下行控制信道发布从设备的通信地址及调度从设备上信道或 DRX（Discontinuous Reception，

非连续接收) 休眠。

(3) 预分配注册过程

此通信过程只适用于初始组网过程中, 主设备已具备从设备的设备标识及通信地址映射关系, 并已在接入节点完成注册后, 未接入网络的从设备可以采用预分配注册, 主设备通过下行控制信道向从设备发送对应通信地址, 从设备存储好通信地址后根据主设备分配的指定时隙位置回复注册确认消息。

(4) 上行共享控制信道(USCH)的调度通信过程

主设备在本地维护从设备的上行调度表, 调度表通过下行控制信道对从设备的上传周期、上传数据长度等信息进行采集配置, 或通过随机信道请求增加临时的调度进行采集配置。从设备读取上行时隙配置, 获取上行共享控制信道的时隙位置, 并根据此位置发送消息给主设备, 主设备收到业务信息后再通过下行控制信道发送确认应答消息。

(5) DRX 调度通信过程

主设备通过下行控制信道下达非连续接收休眠指令, 并同时开始唤醒时间计时; 从设备根据本地工作状态, 决定是否立即休眠, 若本地工作处理完毕即立即进入休眠状态; 当达到下一次唤醒时间, 从设备自动唤醒并进入接收状态。

(6) 下行共享控制信道(DSCH)的通信过程

主设备本地维护对从设备的下行调度表。首先主设备通过下行控制信道向从设备发送上行时隙配置及下行数据或指令, 从设备成功接收到后, 根据下行数据类型决定是否通过上行共享控制信道进行反馈。

2.3 本章小结

本章重点分析了应用于电力设备监测物联网系统的几种通讯制式及无线通信协议。经对比分析发现:

Q/GDW 12021-2019 输变电设备物联网节点设备无线组网协议可支持多种网络拓扑模型, 支持节点间多跳通信, 并具备完善的网络层节点路由设计规则, 可应用于网络规模较大、节点类型更丰富的电力无线传感器网络; 但针对终端传感器节点要求“随发随收随响应”, 不设置节点休眠, 由此需要为节点提供电池外的能量来源供给, 并未有效考量供能受限的传感器节点网络能量消耗的问题。

LoRaWAN 协议的 Class A 类作为最低功耗的终端系统, 有效考量了终端节

点能量消耗问题，设置了相应的节点休眠策略，一定程度减少了节点能耗，但终端节点在发送完毕业务消息后还需要开放两次接收窗口等待接收服务器下发的数据消息，此固定等待接收的过程也会一定程度上消耗终端节点能耗；另外，此通信类型仅适用于星型网络拓扑，存在网络健壮性不足的问题。

ZigBee 协议可支持三种网络拓扑结构，适用场景更广泛，尤其网状拓扑结构设计可以有效增强网络自配置、自愈合性，提升节点利用率及网络健壮性，但在终端节点通信过程中存在较多竞争信道上传数据的情形，监听等待、碰撞重传等状况可能会额外消耗终端节点能量。

Q/GDW 12020-2019 输变电设备物联网微功率无线网通信协议从协议层级设计、节点通信过程等各个环节充分考虑了终端监测节点工作能耗问题，满足供电受限节点低功耗工作需求，但也导致此协议应用的网络拓扑结构单一，网络可扩展性与健壮性不足，无法应用于网络结构复杂的多跳场景。

根据以上分析，本文拟选择输变电设备物联网微功率无线网通信协议作为本文后续通信协议设计的基础，在此基础上进一步设计适应于变电站场景下的电力无线混合组网技术及低功耗通信协议，旨在保证终端监测节点低功耗运行的同时，扩充网络规模、提升网络健壮性。

第3章 适应于变电站的电力无线混合组网设计

本章从网络拓扑结构、自组织网络建立及组网过程、网络更新及维护三个方面研究设计适用于变电站的电力无线混合组网技术，所设计的自组织网络建设方法旨在保证网络内供能受限终端监测节点低功耗运行的同时，提升网络自身健壮性以及数据帧传输的可靠性。

3.1 传统网络拓扑结构

计及传感器节点供能受限、系统建设规划不统一等种种原因影响，目前应用于变电站场景下的电力物联网系统，大多采用星型网络。此类传统网络拓扑结构简单、易部署，终端监测节点与汇聚节点（基站）直接相连，网络覆盖范围小，一旦直连的单链路失效，终端监测节点则无法继续完成数据传输，导致网络连接性能、健壮性不足。随着智慧变电站的不断发展，传统网络拓扑结构已无法满足现阶段节点种类数量不断增多、应用系统不断扩充的智慧变电站的实际应用需求，本文由此设计提出了一种基于星型网络与 Mesh 网络混合组网网络拓扑结构，在满足终端监测节点低功耗运行基础上提升网络整体鲁棒性，以实现变电站内全域覆盖、传感器节点间智能自组网、网络统一管理、简捷高效安全的变电站无线通信网络架构。

3.2 混合组网网络拓扑结构

本论文所设计的混合网络如图 3.1 所示，以变电站被监测的电力设备为中心，由终端监测节点 SN 与路由节点 RN 组成星型网络架构、单跳方式通信的混合网络底层的网络层级；在路由节点 RN 与路由节点 RN、路由节点 RN 与接入节点 AN 之间采用 Mesh 组网方式组成星型网络层级上一层的自组织网络。

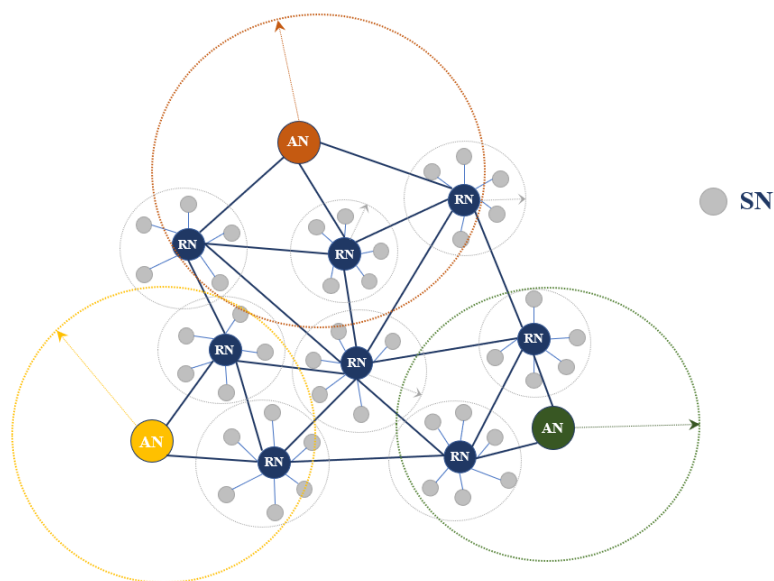


图 3.1 本地局域网网络拓扑结构图

其中，终端监测节点 SN 向上仅能连接一个路由节点 RN，且不与接入节点 AN 直接相连，当终端监测节点在向上传输业务数据时可以通过直连的路由节点在 Mesh 网络层级选择最优路由路径向上传输至接入节点。最后，接入节点将本地局域网内收到的数据信息通过电力光纤、公网或电力无线专网接入更上层的网络。

在本文中，假定终端监测节点 SN 依靠电池供电，能量有限，为延长终端节点的使用寿命，降低终端节点整体功耗，通常情况下，使其处于休眠状态，网络建立初期，终端监测节点周期性唤醒发送注册请求消息，成功入网后由上层节点分配工作时隙，在时隙内定时上传业务消息、接收控制消息；路由节点 RN 通常情况下处在监听状态，没有采集监测数据的任务，主要作用是作为终端监测节点与接入节点通信的桥梁，为两者之间提供可靠的路由，提升网络连通性；接入节点 AN 一般设在供能便利的机房或站房，对其功耗不作苛刻的限制，主要作用是处理本地局域网内节点的各类请求、上传业务监测数据至更上层网络以及不定时对网络进行更新及维护等。

3.3 网络建立及组网流程设计

3.3.1 网络建立的设计

基于上述星型与 Mesh 网混合组网的网络拓扑结构所构建的电力传感网络内部各类型节点一般是静止的，一旦成功部署完成，其物理位置不会轻易发生变化，网络拓扑结构也保持相对稳定。在网络建立初期，所有节点根据监测对象的不同随机分布在变电站内各个位置，网络建立的过程即是传感器网络节点自组织的过程，通过网络拓扑建立可以将随机分布的节点按层级有序连接起来，从而进行有效的管理。

网络建立初期，所有节点都处于未注册状态，在 Mesh 网络层级，接入节点作为根节点首先向周围邻居路由节点发起广播，路由节点始终保持监听状态，在收到广播后的邻居路由节点向上层节点发出注册请求，请求成功后将上层节点层级号加 1 作为自身层级号，加入网络后继续向下广播以完成新拓扑结构的建立，最终形成分层次的拓扑结构。在后续组网过程中，一个路由节点可能被分配多个层级号，拥有不同层级的父节点，网络在分层次拓扑结构基础上构建成一个多父节点层级关系树，这样做的目的是为通过路由节点的数据帧的上下行路由提供多路径选择。在星型网络层级，终端监测节点能量有限，多数情况下处在休眠状态，终端监测节点周期性唤醒并向外发送注册请求，收到请求的上层路由节点会查阅初始设定好的黑白名单，若发送请求的终端监测节点 ID 在白名单中，则同意其加入网络；若在黑名单中，则丢弃此帧。

3.3.2 组网设计

在本文设计的网络拓扑中（图 3.1），网络内节点主要可以分为两个层级，由接入节点与路由节点组成的 Mesh 网络层级，以及由路由节点与终端监测节点组成的星型网络层级，网络层级不同导致网络内节点的组网过程也存在差异，本节主要对两种网络层级下三种节点的组网过程进行详细设计。

3.3.2.1 Mesh 网络层级组网过程

Mesh 网络层级中各路由节点之间、路由节点与接入节点之间的组网采用构建父子层级关系树来实现。本文设计的组网过程如图 3.2 所示，组网初期，接入节点首先向其通信范围内的下一级路由节点进行广播，所有路由节点在未入网之前处于扫描监听状态，等待入网广播发现消息。接入节点下一级路由节点在

收到广播发现消息后，向接入节点发送入网注册请求帧，之后在等待周期内等待接入节点回复同意入网确认帧；接入节点在收到路由节点的注册请求帧后，会先查看是否接收过此节点的注册请求，若接收过则丢弃此帧；若未曾接收过则继续判断自身层级 MAC 地址资源是否可容纳此子节点，若资源足够则向此节点发送注册确认帧，注册确认帧中包含父节点自身节点层级、为子节点分配的 MAC 地址及对应掩码，子路由节点收到入网确认帧后，根据父节点层级标记自身层级信息并存储此父节点分配的 MAC 地址及对应掩码地址作为后续路由寻址的依据。入网成功的路由节点继续按照上述过程向下一层级路由节点发送广播发现消息，下一级子节点在入网成功后继续在父节点层级数基础上加 1，更新自身层级信息，并重复向下广播直至 Mesh 网络内所有路由节点入网成功。

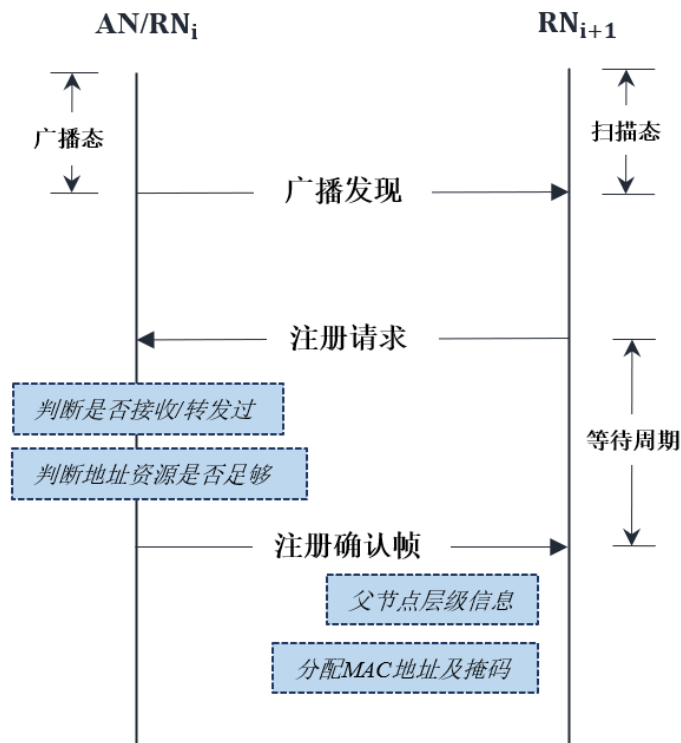


图 3.2 Mesh 网络层级组网过程图

当所有路由节点入网成功后，父子层级关系树也成功建立。此时在 Mesh 网络层级内的中间路由节点可能会存在多个父节点，而每个父节点可能会向下分配不止一个 MAC 地址，随着网络层级的增加节点被分配的 MAC 地址会呈指数型增长，进而导致地址信息内爆造成网络阻塞，为防止上述情况发生，协议要求每个节点仅能选择自身的一个 MAC 地址作为分配给下一层级子节点的 MAC

地址前缀，此地址称为节点的默认地址。默认地址的选择通常是根多个父节点到当前节点的信号强度及到达接入节点的最短路径综合衡量后进行选择确认的。子节点在获得父节点默认地址的前缀后再由其分配一个非重复变量（非零）放置在 MAC 地址本层级位，两者共同组成子节点的 MAC 地址。在 Mesh 网络内各节点组网成功后，所有网内的接入节点与路由节点都被至少分配一个 MAC 地址，MAC 地址具体地址结构及分配方法在 4.3.2 小节详细阐述，此地址也作为后续路由协议实现的重要前提。

3.3.2.2 星型网络层级组网过程

结合变电站实际应用场景需求，电力传感网络内各节点位置都相对固定，基本不会存在网络结构动态变化的情形，因此为简化组网过程，降低网络整体功耗，初始设计时即会在路由节点程序中设置各自的黑白名单，其中，白名单存储的是可以向上与此路由节点通信的终端监测节点 ID；黑名单中记录的是路由节点不进行转发的终端监测节点 ID。路由节点将设置好的黑白名单作为后续终端监测节点能否成功注册入网以及上传数据的判定标准。网络建立初期路由节点中的黑白名单是提前规定好的，在组网完成后，接入节点也可通过应用层完成黑白名单更新和网内节点系统升级任务。

本文设计的本地星型网络层级组网流程如图 3.3 所示，终端监测节点在入网时首先向上层发送入网注册请求，收到请求的路由节点会查看自身的黑白名单，若此终端监测节点 ID 在此路由节点白名单中，则向终端监测节点发送入网成功确认帧，同时为节点分配发送业务信息的时隙，终端节点收到后立即发送应答帧，并在下次规定时隙发送数据前进入休眠状态；若此终端监测节点地址在路由节点黑名单中，则丢弃此数据帧。若终端监测节点 ID 都不在两种名单中，则路由节点接收此节点业务信息后，向上层传递，之后由上层接入节点决定当前终端监测节点在此路由节点的黑白名单属性。通常情形下，每个终端节点仅有一个路由节点作为向上传输数据的父节点。

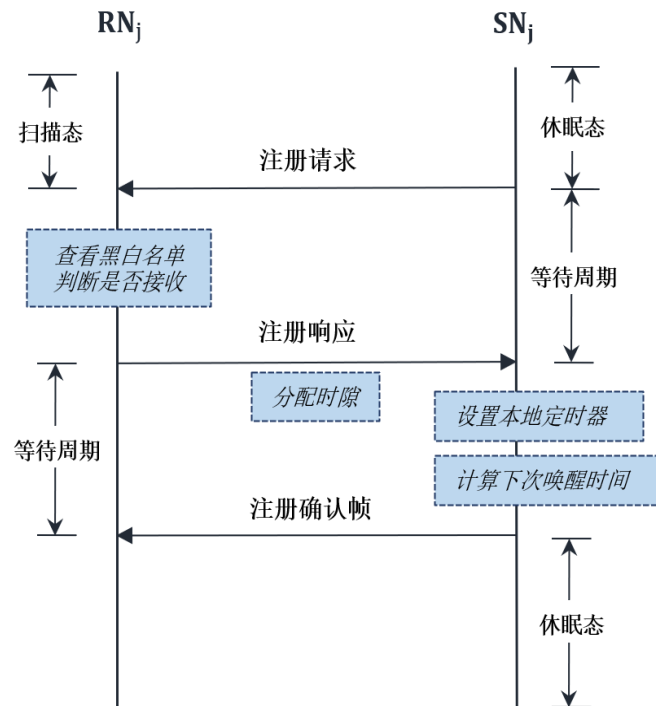


图 3.3 星型网络层级组网过程图

3.4 网络更新及远程升级维护

3.4.1 网络更新设计

本文设计了基于接入节点的混合网络更新机制，内部各类型节点注册加入、更新、退出网络都需要告知接入节点，由接入节点对网络拓扑状态进行实时更新与维护。网络内的接入节点根据向上传输的消息类型，决定相对应的处理方式。

3.4.1.1 旧节点淘汰

旧节点移除可以分为终端监测节点移除与路由节点移除两种情形。

(1) 终端监测节点移除

终端监测节点的直接上层路由节点若在设定时间内未收到节点在固定时隙内上传的业务消息或上传的空负载的数据帧，则按照默认路由路径发送消息至接入节点，通知其有子节点离网，接入节点此时需要发送“黑白名单更新”控制帧，将脱离网络的终端监测节点ID从网络内所有路由节点各自的黑/白名单中

去除。

(2) 路由节点移除

当接入节点在设定时间周期内未收到来自某路由节点的数据消息，则接入节点需要向网络内相关节点进行重新分配，并发出一个“地址更新”控制帧给所有相关节点，对离网的路由节点的所有子路由节点需要重新分配 MAC 地址、掩码地址，变更为新分配父节点树下的子节点地址。

3.4.1.2 新节点加入

新加入节点可以分为新加入终端监测节点与新加入路由节点两种情形。

(1) 新加入终端监测节点

与网络建立初期终端监测节点入网方式相同，新加入节点周期性唤醒并向外发送注册请求消息，接收到此请求的路由节点在查阅自身黑白名单后找不到新终端节点的 ID，则会通过已建立的路由路径将此请求传至接入节点，接入节点因此可能会收到多条路径传来的请求信息，这时接入节点根据跳数和信号强度综合考虑选择一条路径发送注册响应，此路径中与新加入节点直连的上层路由节点成为其唯一的父节点并将新终端节点的 ID 号记录在自身白名单中；与此同时接入节点通知网络内其余路由节点将此新加入节点 ID 号加入黑名单中。

(2) 新加入路由节点

新加入的路由节点首先发送一个入网请求消息，收到请求消息的网内路由节点根据已建立默认路径向上转发此消息至接入节点，同样此请求可能通过多路径被上传，接入节点根据跳数及信号强度为新加入路由节点分配父子层级关系树中的层级及掩码地址，之后通过注册响应消息发送给新节点，若新加入路由节点替换了某路由节点的父节点，则接入节点需要再发送一个“地址更新”的控制消息给所有需要变更掩码地址的子节点，包括被替换节点的子路由节点消息的变更。若所替换路由节点本身有直连的终端监测节点，则需要接入节点为终端监测节点分配新的直连路由节点，并更改网内路由节点的黑/白名单。

3.4.2 远程升级维护

远程升级主要用于上级对本地局域网内终端监测节点不定时的远程升级业务，以保证系统长期平稳运行。升级过程采用专用的升级频段，在控制周期内使用控制信道完成，有效避免终端监测节点之间产生碰撞。本文设计的升级维

护过程为:

在控制周期内终端监测节点首先向路由节点发送控制请求帧,路由节点收到请求后,判断当前是否有上级派发的远程升级业务,若有则立即向目标终端监测节点发送升级请求报文,报文内容包含升级文件总包数,以及包长,并每隔1秒发送一帧请求传输文件命令;若10次未收到确认,即退出本次升级文件传输,若10s内成功收到终端监测节点应答,则基站开始持续发送文件内容,发送间隔设置为20ms,终端监测节点也进入接收升级文件模式,准备接收升级文件;路由节点发送完成后,向传感器发送升级文件发送完成报文,终端监测节点若正确接收到了所有升级包,则应答升级结束报文,否则发送丢失的升级包序号,路由节点根据传感器节点的升级结束报文决定发送补包还是结束升级任务。在升级任务完成后将频段切换为控制频段,结束升级过程。

3.5 本章小结

本章主要分析研究了适用于变电站场景下的电力无线混合组网技术,研究旨在扩充网络规模,提升网络健壮性的同时尽可能使供能受限的终端监测节点低功耗运行。由此提出了星型与Mesh网络双层混合拓扑结构,此网络拓扑结构在终端监测节点与路由节点之间,采用星型网络组网,每个终端监测节点有且仅有一个路由节点与之相连,终端监测节点之间不进行通信,尽可能降低终端监测节点工作以外的无效能耗;在接入节点与路由节点之间、路由节点与路由节点之间采用Mesh组网,保证终端监测节点有多路由选择上传数据至接入节点,提升网络健壮性。根据所设计网络拓扑结构,进一步深入分析研究混合网络的建立、更新以及维护过程中的规范策略,保证网络内各节点能够长期规范有效运行。

第4章 适应于变电站场景下的低功耗通信协议栈设计

本章基于混合组网架构进一步研究设计适用于变电站场景下的低功耗通信协议栈,在 Q/GDW 12020-2019 输变电设备物联网微功率无线网通信协议^[20]物理层设计基础上,针对星型网络层级内终端监测节点数据链路层设计分频分时、休眠/激活等低功耗通信策略有效降低终端监测节点工作能耗;与此同时在 Mesh 网络层级内为路由、接入节点设计基于 MAC 地址的路由协议方法,有效减少路由节点进行路由选择过程中节点路径寻址和网络延迟产生的能量消耗,大幅降低路由节点维护路由表产生的路由控制开销。

4.1 低功耗通信协议栈架构设计

如图 4.1 所示即为本文所设计研究的低功耗通信协议栈架构。主要包括物理层、数据链路层以及 MAC 地址控制层三个层级。其中,物理层具体功能是规定各模块的驱动、休眠激活射频收发器、设定通信的传输信道等,本文针对物理层级的设计完全遵照 Q/GDW 12020-2019 输变电设备物联网微功率无线网通信协议^[20]实现,不作为本章节研究的重点。

数据链路层是低功耗通信协议栈的关键层级,主要作用是规定如何实现网络中无线信道的共享、在供能受限的终端监测节点之间合理分配有限的无线通信资源、提供可靠传输。本文在 Q/GDW 12020-2019 输变电设备物联网微功率无线网通信协议^[20]数据链路层基础上进一步设计终端监测节点与其上层直连的路由节点之间的低功耗通信策略,尽可能使终端监测节点处于休眠状态以延长节点使用寿命。

MAC 地址控制层主要是针对 Mesh 网络层级内节点路由协议的设计。在 Mesh 网络层级为保证终端监测节点与接入节点间数据的多跳传输,本文在路由节点与接入节点协议栈架构中增设了 MAC 地址控制层。控制层的实现方式是在 Mesh 网络层级节点数据链路层帧结构中额外添加 MAC 地址字段,地址字段中包含节点父子层级信息,路由/接入节点可通过此地址进行相关运算,在 Mesh 网络中完成下一跳节点地址层级匹配、路由路径选择以及路由地址域解析与更新,构建源目的节点间数据传输可靠的上下行路由链路。

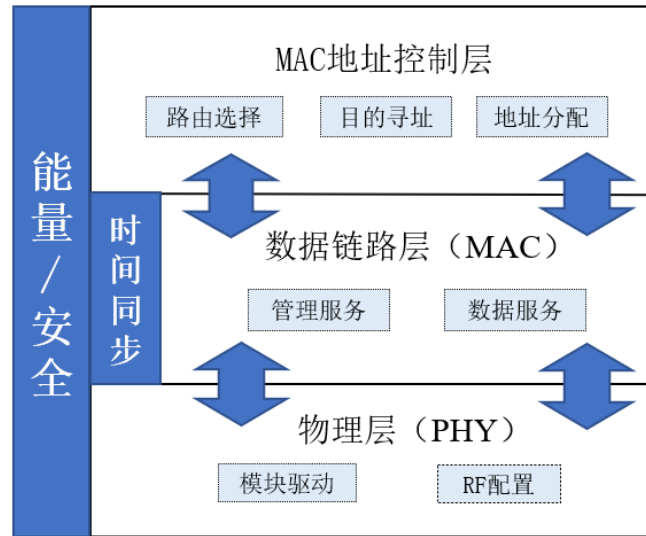


图 4.1 通信协议栈架构图

4.2 终端监测节点 MAC 层协议设计

无线信道具有广播特性，电力无线传感网络中的任意节点可将数据传输给周围其他节点，使得终端监测节点要与广播范围内其他节点共享信道。因此，由路由节点与其广播范围内的终端监测节点所组成网络的媒体接入控制层研究的主要内容是如何实现网络中无线信道的共享，在供能受限的终端监测节点之间分配有限的无线通信资源，提供可靠传输，这即需要设计低功耗的 MAC 协议和差错控制。

4.2.1 分频分时策略

本文设计的协议采用 FDMA（Frequency Division Multiple Access，频分多址）技术将传感器节点工作频段划分为业务频段、控制频段与升级频段。其中，业务频段的工作过程在业务信道内执行，控制频段与升级频段的工作过程在控制信道内执行。同时，在业务信道上采用模糊时分多址（Imprecise Time Division Multiply Access，模糊 TDMA）机制解决信息接入的问题。模糊时分多址基于 TDMA（Time Division Multiply Access，时分多址）的时间段划分，时间段远大于单个用户实际需求的传输时间，在同一时间段内可支持多个终端节点随机竞争进行数据传输。

终端监测节点在接入网络成功后采用 TDMA 技术在两种信道中与路由节点

进行数据传输，即路由节点将信道中的时间分割成周期性的帧，每个帧再分割成若干个时隙，每个终端监测节点在接入网络后由路由节点分配固定时隙，在满足定时和同步的条件下，路由节点可以分别在各时隙中接收到各终端节点的信号而不产生混扰。与此同时，路由节点发向多个终端节点的信号都按顺序安排在预定的时隙中传输，各个移动终端只要在规定的时间隙内接收，就能在混合的信号中把发给它的信号区分并接收下来。此种方式进行数据传递可以减少数据的碰撞，且极大节约了节点能量，节省了由于碰撞重传所产生的能量消耗。

4.2.2 时间同步策略

不同频段终端监测节点时隙的划分及分配全部由上层路由节点完成，终端监测节点本地通过定时器执行维护。为保证终端节点时分多址策略的有效实现，路由节点会定时判断网络内各个终端监测节点是否正常在所分配时隙内发送接收消息，即要在路由节点与其网络内的终端监测节点之间进行时间同步。具体时间同步过程如下：

终端监测节点每次在业务周期向上层路由节点上传业务信息时，路由节点都会在本地图录下收到数据时的本地时间戳，之后会根据此时间值计算判定此节点是否正常在所分配时隙内上传监测数据，若终端监测节点本地时间戳偏离路由节点所分配时隙且超过一个时隙，路由节点即会在本地计算新的延时参数通过控制信道发送给终端监测节点，延时参数的值为节点下次发送时间与当前接收时间的差值，若差值小于零则再加一个业务周期长度，终端监测节点收到后会更改本地时间戳并应用于下次数据发送时。整个时间同步过程都在控制信道内进行，有效确保分时策略在网络中有效执行。如图4.2所示即为路由节点控制报文处理程序实现流程图。

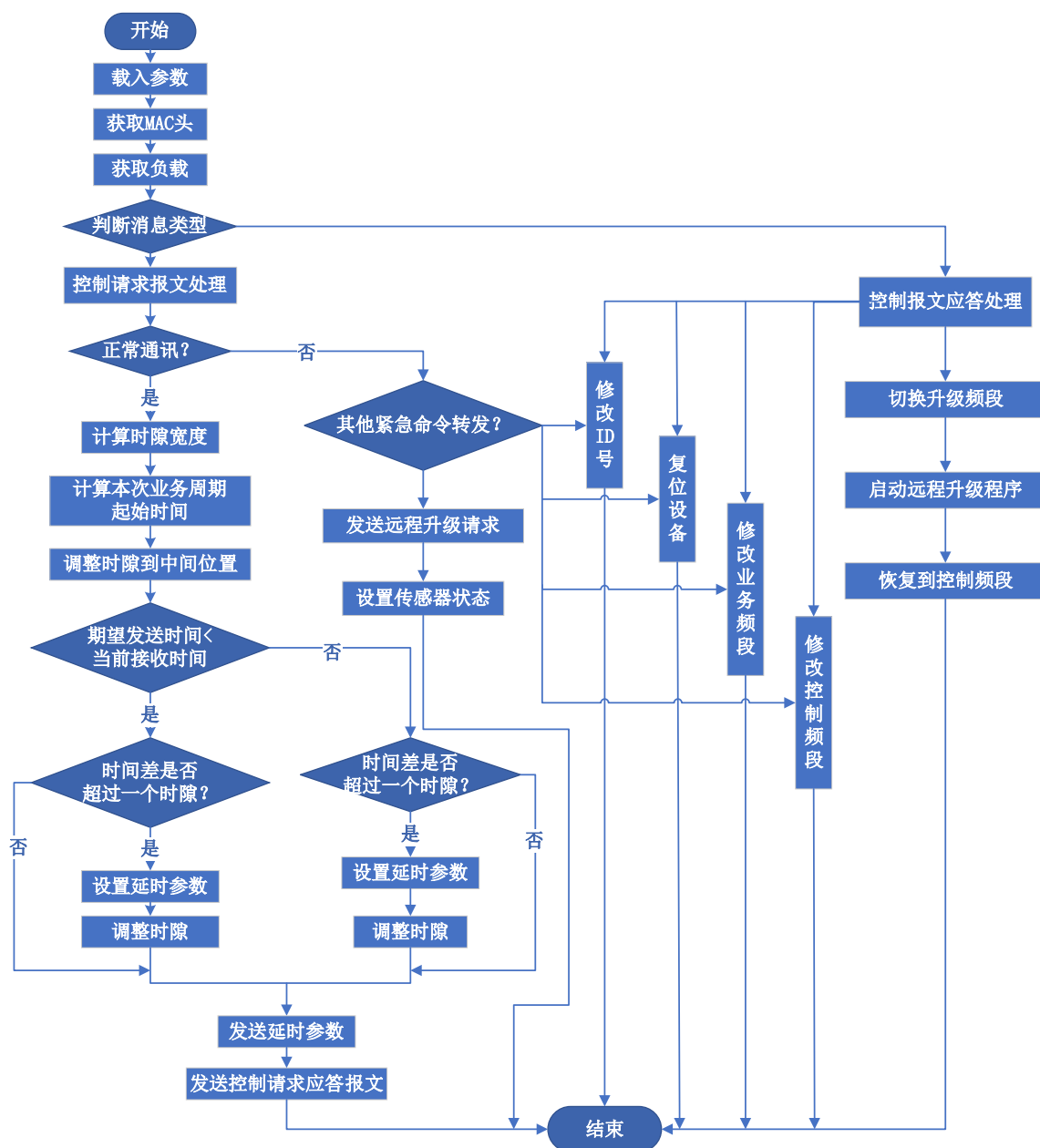


图 4.2 路由节点控制报文处理程序实现流程图

4.2.3 休眠/激活策略

终端监测节点节省能耗、达到最优利用率的关键在于，除完成必要的监测、汇报数据等业务工作以外，其余的时间都尽可能的处于休眠状态，即尽可能省去节点除工作以外的无效能耗。因此，设计合适的传感器休眠/激活策略对于节点低功耗设计至关重要。

基于此，对于终端监测节点的周期性监测业务，在业务周期固定时隙内定时上传，发送完毕后无论是否发送成功都立即进入休眠状态，直到下一个业务周期到来再次发送。节点根据状态监测业务的周期性特点，借助时间同步机制定时同步网络内各节点时间戳，可以有效减少节点信道监听、冲突碰撞、串扰、控制开销等情形下所产生的能量消耗。

4.2.3.1 状态转换流程

终端监测节点仅有三种工作状态：设备初始化（INI）、休眠（SLP）、激活（ACT）。初始化状态用于完成设备在本地局域网中的注册、端口、时隙分配等初始化配置；休眠状态时终端监测节点关闭业务信道与控制信道数据收发端口，使终端设备供电保持最低水平；当处于活动状态时，终端监测节点可以进行数据的收发。如图4.3所示为终端监测节点工作状态转换图，节点休眠与激活状态的保持时间由相对应的定时器和特定的触发条件决定。本协议规定电力无线传感网络内的所有终端监测节点初始接入时，由路由节点分配到时间段内的不同固定时隙中传递数据，其余时间都进入休眠状态。

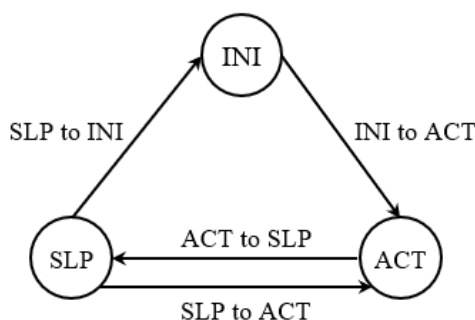


图 4.3 终端监测节点工作状态转换图

状态转换条件基本介绍如下：1) INI to ACT：终端监测节点加入进附近路由节点网络并完成注册后，立即由初始化状态切换为激活态，在分配的特定时间隙通过业务信道向路由节点进行无回复的单向传输，或立即由传感器终端向路由节点发送控制信道请求帧，与路由节点完成控制信道通信过程。2) ACT to SLP：节点在业务信道或控制信道数据传输完毕，或因信道忙碌导致发送异常则立即进入休眠态，直至下一次定时周期到来。3) SLP to ACT：节点根据业务/控制周期被分配时隙设置对应的定时器，定时激活节点完成对应的信道通信过

程。4) SLP to INI: 当终端节点在休眠状态下出现掉电等异常故障时, 重新启动后, 立即进入初始注册状态。

4.2.3.2 软件设计流程

本文节点的休眠/激活策略软件设计使用软定时器设置业务周期与控制周期触发时间及触发条件。如图 4.4 即为终端监测节点工作周期示意图。以业务周期为单位, 软定时器规定控制周期为零时不发送控制请求帧; 控制周期为 1 时, 每个业务周期发送一次控制请求帧, 不发送业务信息帧; 控制周期为 m 时, 每 m 个业务周期, 发送一次控制信道请求帧, 发送 $m-1$ 次业务信息帧。

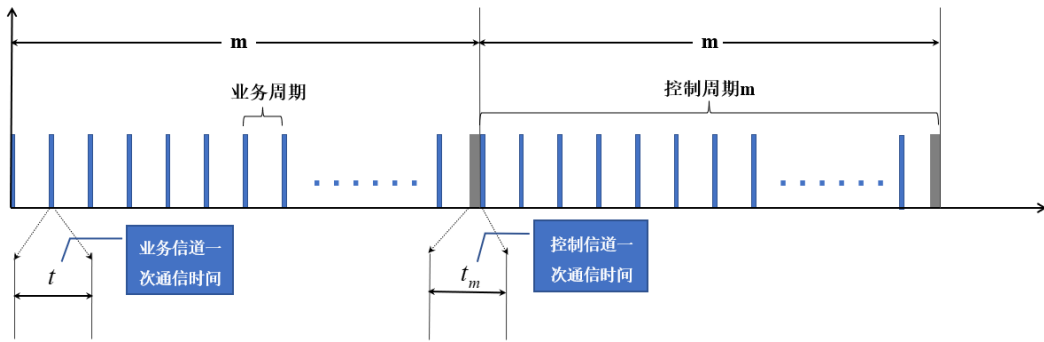


图 4.4 终端监测节点工作周期示意图

终端节点初始化接入网络后, 通过定时器中断程序触发响应事件, 根据回调函数发送的消息类型执行不同消息对应的程序任务。终端节点与路由节点中间通信过程都采用在固定时隙主动问询、主动上传监测数据的方式, 发送完毕即立即进入休眠状态, 极大减少终端节点被动等待路由节点发送命令消息过程中所产生的不必要的能量消耗, 如图 4.5 所示为终端节点主程序执行流程图。

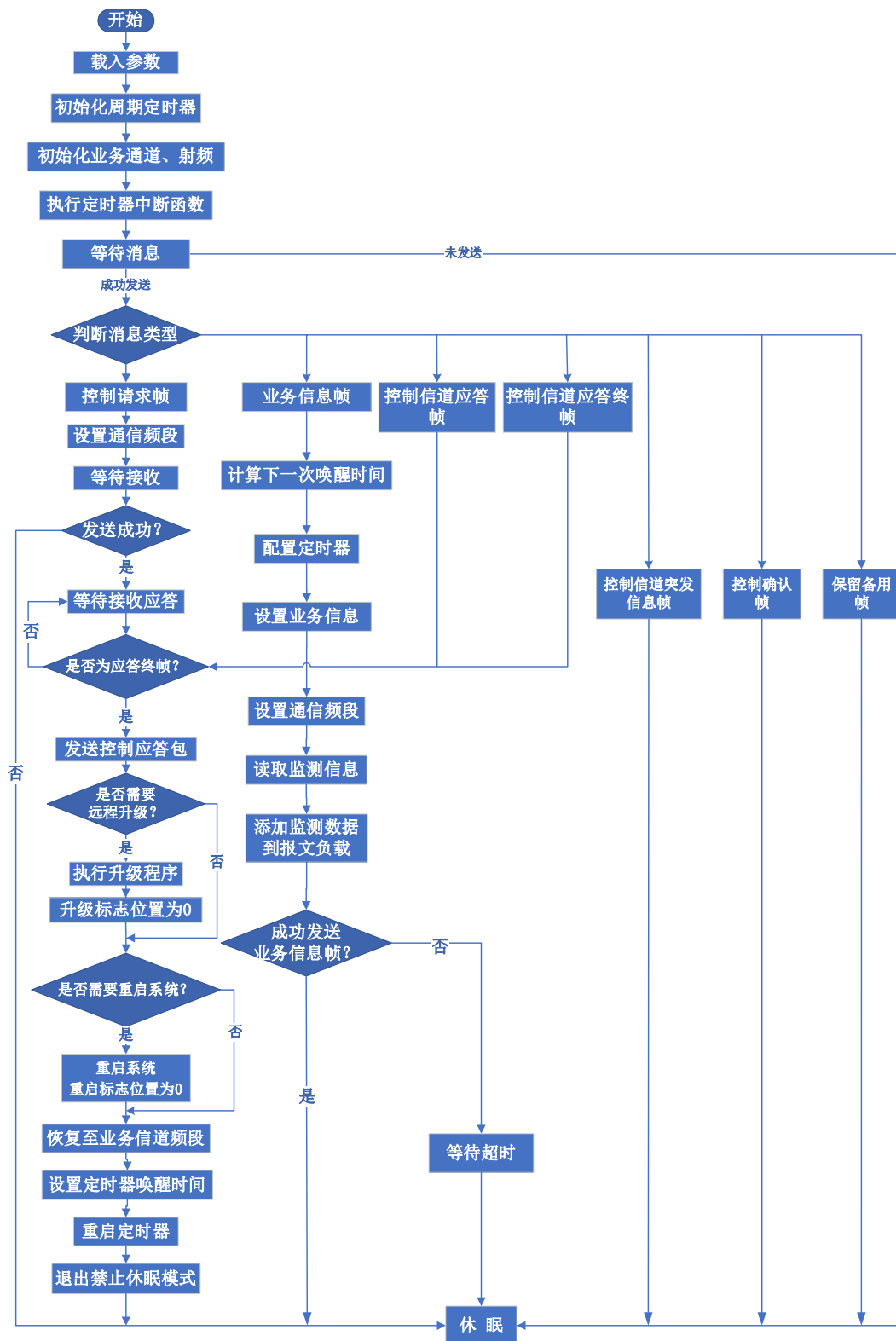


图 4.5 终端节点主程序执行流程图

4.3 MAC 地址控制层协议优化设计

本节针对 Mesh 网络层级内路由节点及接入节点 MAC 地址控制层通信协议进行分析，重点是在此层级设计基于 MAC 地址的路由协议。协议主要研究路由节点 MAC 地址结构与分配、上下行路由选择及地址域路径寻址相关方法，保证终端监测节点与接入节点之间数据帧的高效路由传输；与此同时在此路由协议设计基础上，引入网络冲突与拥塞控制、时间同步策略，保证 Mesh 网络层级内路由节点高效上下行路由的同时，最大限度节约路由节点工作能耗。

4.3.1 MAC 地址控制层帧结构

路由节点之间、路由节点与接入节点之间采用 Mesh 组网方式，终端监测节点上传数据需要通过路由节点上传至接入节点等的上层网络。路由节点之间的多跳传输决定节点之间需要依靠相应的路由协议，以实现节点之间数据的有效传输。本文通过在路由节点 MAC 层帧结构中加入 MAC 地址字段构建 MAC 地址控制层，设计基于 MAC 地址的路由协议，路由过程免去路由表存储及查询，有效降低路由节点数据负载及网络吞吐量。路由节点 MAC 地址控制层帧结构如图 4.6 所示。

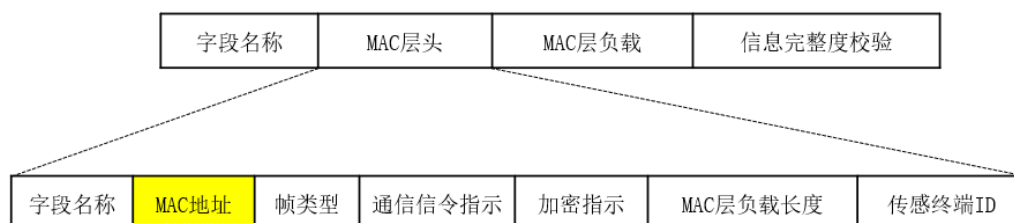


图 4.6 路由节点 MAC 地址控制层帧结构

4.3.2 Mesh 网节点 MAC 地址优化设计

4.3.2.1 MAC 地址结构

在网络建立初期，组网过程完成后，本地局域网中所有路由节点及接入节点至少被分配一个 MAC 地址。地址长度为预先设定好的字节长度，之后将 MAC 地址按照层级分段，每段地址都表示不同的层级信息。本文将 MAC 地址分成了四段，包含一层接入节点地址段，三层路由节点地址段。具体地址示意图如 4.7 所示。

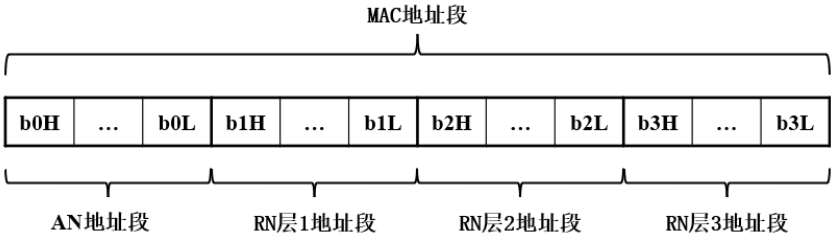


图 4.7 路由节点 MAC 地址段结构

例如某个掩码地址分配为 3d.15d.15d.15d，表示包含 2bit 接入节点（AN），三层路由节点（RN），每层路由节点分配 4bit，由此可得此网络内最多可容纳 3 个接入节点，3 层路由节点，每个接入节点与中间路由节点可以容纳 15 个子路由节点。

4.3.2.2 MAC 地址分配

本文设计的 MAC 地址给定 3 个字节长度，接入节点根据网络层级的前期设定，为网络内每个层级的路由节点（RN）分配一个掩码地址段，此掩码地址全网通用。各个地址段全 1 表示广播地址，全 0 表示上层父节点地址。根据掩码规则设定，每层的掩码为本层及以上所有位全为“1”，本层以下全为“0”；在本文默认的掩码规则下，第二层的掩码为 1111.11111.00000000.00000000，用十六进制表示即为 0xFF8000。

如下表 4.1 所示即为本文设计的路由节点与接入节点所组成 Mesh 网络的 MAC 地址分段及对应掩码设计。

表 4.1 Mesh 网各层级 MAC 地址分段及掩码

	接入节点	路由节点 1	路由节点 2	路由节点 3
比特数/bits	4	5	7	8
掩码	15	31	127	255

其中，路由节点 1、2、3 分别表示节点层级次序。掩码地址分配为 15d.31d.127d.255d，表示 Mesh 网络中包含至多 15 个接入节点（4bits）、三层路由节点，每个接入节点与一二层级中的路由节点最多可以分别容纳 31、127、255 个子路由节点，每层级路由节点下面都可以连接多个终端监测节点，与其组成星型网络。

接入节点、路由节点与终端监测节点在组网过程中，除终端监测节点仅有

一个路由节点作为向上的父节点外，中间路由节点在组网过程中会获得多个父节点为其分配的 MAC 地址，MAC 地址具体分配过程如下：

假设 $MA(a,b)$ 表示父节点 a 分配给子节点 b 的 MAC 地址，此地址仅取其父节点 a 本地的默认地址作为其 MAC 地址的前缀，之后再由父节点 a 随机向子节点 b 分配一个非重复变量值（非零） $v(a,b)$ 与父节点默认地址 $MA(*,a)$ 利用公式(4-1)进行计算后，子节点 b 即可获得由父节点 a 分配的地址 $MA(a,b)$ 。

$$MA(a,b) = MA(*,a) | (v(a,b) \ll !m_b) \quad (4-1)$$

其中， $v(a,b)$ 在与父节点默认地址进行或运算之前，需要判定此值是否在本层规定的最大地址区间内，公式中的 m_b 表示的是子节点 b 所在层级的掩码地址，取反后从高层级位开始比较，若此层级位数值若大于 $v(a,b)$ ，则向前一层级位移位继续进行比较，直至某层级位数值小于 $v(a,b)$ ，则将此变量值放进此地址层级位，进行下一步运算。

通过图 4.8 所示网络结构实例具体说明如何根据公式(4-1)为节点分配 MAC 地址。如图所示，AN 节点表示接入节点，其余节点表示路由节点，Mesh 网络层级每个节点都至少会被分配一个 MAC 地址，当某个路由节点有 n 个父节点时，路由节点会根据到达接入节点的最短路径作为判定标准选择一个上层父节点分配的地址作为默认地址，此默认地址在图 4.8 中表示为带星号的地址；若仅有一个父节点则节点的默认地址为此父节点分配的地址。

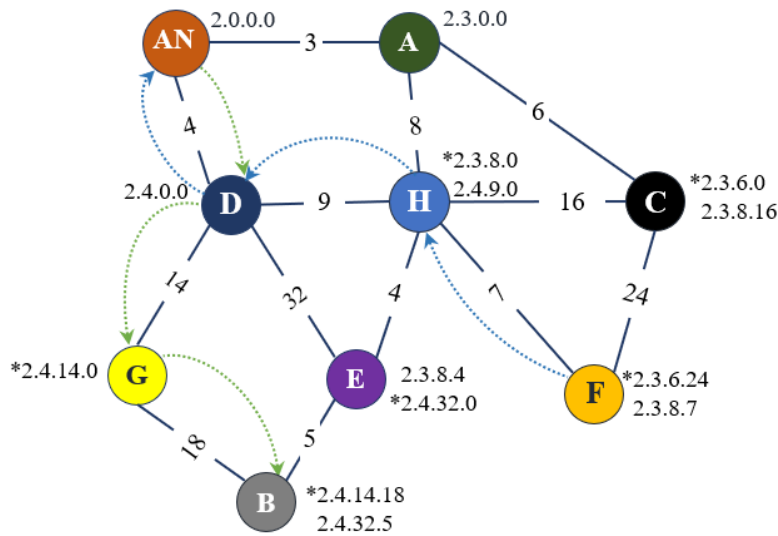


图 4.8 Mesh 网内节点地址分配示意图

以图 4.8 中路由节点 C 为例，C 的默认地址由其上层节点 A 分配。将节点 A 的 MAC 地址、A 节点分配的非重复变量值（非零）及 C 节点本层掩码地址代入公式(4-1)，可得 $MA(A,C) = 2.3.0.0|(6 \ll 0.0.0.255) = 2.3.0.0|0.0.6.0 = 2.3.6.0$ ；同理，C 节点还有一个父节点 H，其为子节点 C 分配的 MAC 地址为 $MA(H,C) = 2.3.8.0|(16 \ll 0.0.0.0) = 2.3.8.0|0.0.0.16 = 2.3.8.16$ 。但由于经过父节点 A 的路径是到达接入节点的最短路径，所以节点 C 最终选择节点 A 分配的地址作为默认地址。

网络内地址分配过程在建立层次型网络时进行，网络建立完毕后网络内所有路由节点都应至少分配有一个 MAC 地址，此地址会作为后续传输数据上下行路由寻址的重要依据。

4.3.3 Mesh 网节点上下行路由过程

数据帧通过 Mesh 网络层级传输时，从接入节点下达控制及应答消息到目的终端监测节点的过程称为下行路由；从源终端监测节点上传监测数据等消息到接入节点的过程称为上行路由。此时会在上下行路由过程中产生一个带有路由路径信息的 MAC 地址域地址消息，目的节点只需要分层解析此地址域消息即可完成源地址寻址，并由此建立终端监测节点与接入节点之间的可靠链路，实现两种节点之间低功耗、高效率的数据传输。基于 MAC 地址的路由协议无需路由节点路由寻址和额外建立路由表，与现有路由协议相比，有效避免了由于路由节点路由寻址和查表产生的端到端延迟及工作能耗。

4.3.3.1 上行路由

Mesh 网内上行路由过程主要是规定路由节点如何将下级终端监测节点上传的业务信息数据帧经过层层路由、有效上传至接入节点。Mesh 网内各节点采用多跳路由，上层父节点 a 收到子节点 b 传输的数据帧后，需要分两步对数据帧中的 MAC 地址路由信息进行处理。首先，需要确认父节点层级，满足层级要求后再进行地址匹配。匹配公式如公式(4-2)所示，

$$MA(*,a) = RA \& m_a \quad (4-2)$$

其中， RA 表示子节点 b 向上传送数据包时使用的 MAC 地址域，与上层父节点 a 掩码地址 m_a 做与运算后获得上层父节点的默认 MAC 地址，若匹配通过，

此父节点 a 应当承担此数据帧转发任务，否则丢弃此数据帧。之后此父节点可以再利用公式(4-2)继续寻找更上层的父节点的默认地址传输数据包，过程同上。但受到网络信道质量、父节点信号强度以及到达接入节点的最短路径等因素影响，此路由地址也可选择非默认 MAC 地址向上传输数据帧到分配此非默认 MAC 地址对应的父节点处，此时需要利用公式(4-3)对 RA 路由路径地址域进行更新，

$$RA = MA(a', b) | (RA \& !m_{a'b}) \quad (4-3)$$

上述公式中 $MA(a', b)$ 表示所选中的非默认地址， $m_{a'b}$ 为子节点 b 层级的掩码地址，取反后与 RA 地址做与运算，所得结果再与非默认地址进行或运算。此过程目的是将当前节点的地址前缀更换为选中父节点 a' 的地址，由此完成更改路由路径 RA 地址域的过程。需要注意的是，由于每个路由节点可能被父节点分配到不同层级的 MAC 地址，因此非默认地址的使用也要首先满足层级及地址匹配的要求。

依照上述过程，数据帧不断更新 RA 地址域直至上传至接入节点，接入节点对此数据帧进行接收，并保存其 RA 地址域，地址域内保存的地址即代表此数据帧上传所使用的路径信息。

以示意图 4.8 中蓝色虚线箭头描述的一条上行路由为例，此上行路由路径是从节点 F 开始，经过节点 H、D，最终到达接入节点 AN。上传的数据帧的路由路径 RA 地址域依次被更新为 2.3.8.7、2.4.9.7、2.4.9.7， RA 地址域最终保留地址 2.4.9.7 包含了上行数据帧的路由路径。

4.3.3.2 下行路由

Mesh 网内下行路由过程主要是描述接入节点如何将下达的控制信息数据帧、应答数据帧等通过中间路由节点可靠向下传输至目标节点。接入节点首先使用一个 RA 地址填充数据帧中的 MAC 地址字段，该地址表示上行 RA 路由路径地址的目标终端节点最可能使用的路径，接入节点可以保留最近接收或频繁使用的上行 RA 路径路由地址信息，以便能够快速为目标节点选择一个下行路由。

Mesh 网内下行路由过程主要分两步走：1) 中间层路由节点收到下行数据帧取出数据帧中的 MAC 地址，首先同上行路由过程一致进行层级检验及地址匹配，匹配公式如公式(4-4)所示，

$$MA(x,b) = RA \& m_b \quad (4-4)$$

$MA(x,b)$ 表示 b 路由节点的一个 MAC 地址, 地址前缀为其父辈 x , m_b 表示 b 路由节点所在层级的掩码地址。 RA 与 b 路由节点掩码地址做与运算, 确认是否为 RA 地址内上层父节点所分配的子节点地址匹配, 若匹配, 则负责此数据帧的下行转发, 否则丢弃此帧; 2) 若此路径是使用非默认地址进行数据传输的, 则需要将 RA 路径地址进行更新, 保证其与下一跳 MAC 地址相匹配, 即通俗得讲是将此 RA 掩码地址段置成本层节点默认地址的掩码段, 置换公式如公式 (4-5) 所示。

$$RA = MA(*,b) | (RA \& !m_b) \quad (4-5)$$

其中, $MA(*,b)$ 表示路由节点 b 的默认 MAC 地址, RA 地址与路由节点 b 掩码地址取反后的地址做与运算后与节点默认 MAC 地址进行或运算, 以此置换完毕掩码地址段。之后重复上述操作不断向下转发数据帧, 直至到达直连终端目标节点的最后一个中间路由节点, Mesh 网下行路由过程结束。

以示意图 4.8 中绿色虚线箭头描述的一条下行路由为例, 此下行路由路径是从接入节点开始, 经过节点 D、G, 最终到达路由节点 B。上传的数据帧的路由路径 RA 地址域依次被更新为 2.4.14.18、2.4.14.18、2.4.14.18, RA 最终保留地址 2.4.14.18 包含了下行数据帧的路由路径。但可以看出, RA 的值在此过程中始终没有发生变化, 由此可知此路由路径始终是按照每层节点的默认地址向下寻址的。

4.3.4 网络冲突与拥塞控制

终端监测节点上传业务数据到接入节点、接入节点下达控制指令到终端节点的数据帧传输过程中, 经过由路由节点组成的 Mesh 网络层级时, 数据帧会使用相同的频段进行上下行路由, 此时网络信道极有可能产生网络冲突与拥塞。为有效避免可能发生的网络冲突与拥塞情况导致网络额外的能量消耗, 本文采用 CSMA/CA 协议避免上下行数据帧在 Mesh 网络层级通信过程中产生的碰撞, 为路由节点增加监听状态, 在传输数据帧前及时监听网络信道状态。

路由节点在转发某上/下行数据帧前, 首先监测信道是否空闲, 若监测信道空闲, 则发出传输请求, 若监测到信道忙则继续等待; 下一跳路由节点收到传

输请求后，发送准备接收响应；发送端的路由节点收到下一跳路由节点的接收响应后开始发送数据帧，与此同时，通知其他路由节点自己正在占用信道进行数据传输，并告知占用信道的时间；下一跳路由节点收到数据后，使用 CRC 循环冗余校验码判断接收数据正确性，若正确则向发送端的路由节点回复数据确认帧；发送端的路由节点收到数据确认帧后继续发送下一帧，若没有收到，启动重传机制，直至到最大重传次数 16 次为止。

4.3.5 基于 Mesh 组网的路由节点时间同步算法研究

时间同步是无线传感网络一项关键的技术，传感器网络中典型的服务功能节点定位、数据融合、休眠及时隙调度都以时间同步技术作为基础^[33]，因此为使电力传感网络中的各个节点能够长期稳定运行，设计功耗低且满足精度要求的同步算法至关重要^[34]。由 4.2.2 小节内容可知，星型网络层级各终端监测节点由直连路由节点划分时隙，终端监测节点在各自固定时隙内上传数据，为维持网络的有序运行，路由节点不仅要保证子星型网络内各节点在规定时隙内工作，还要保证自身与 Mesh 层级内其他节点保持较高的同步精度，但完成时间同步的过程会额外消耗节点能量，因此时间同步算法的设计需要在保证同步精度的同时尽可能降低完成同步过程产生的能量消耗。

根据上述需求，结合变电站在线监测的实际应用场景，本节运用文献[42]中的 TPSN(Timing-Sync Protocol for Sensor Network)协议内的双向时间戳交换思想对 Mesh 网络层级内的节点进行时钟相偏校正，保证同步校正精度；与此同时，增加电力无线通信低功耗网络设计。双向时间戳交换算法虽具有良好的校正精度，但节点在同步过程中相互频繁交换数据包会消耗大量能量^[41]，因此在两个节点之间进行时间戳交换时，对导致时偏产生的频率偏移，利用温度-频率关系公式进行进一步修正，消除导致频率偏移产生的最主要原因—温度变化产生的影响，进而有效延长每次同步完成后的作用时间，增加同步算法执行的间隔，以有效降低整个网络完成同步过程产生的通信能耗。

4.3.5.1 双向成对同步算法

Mesh 网络层级中有两种节点，分别是接入节点（基站）和路由节点。接入节点（基站）采用本地时钟作为网络基准时钟，无线传感网络内的路由节点都参照接入节点的时间修正自身本地时钟。时间同步过程主要分为两个步骤：（1）

已同步节点与待同步节点使用双向时间戳交换的同步算法校正时间相偏；(2) 在双向时间戳交换的同时结合温度-频偏关系公式进行频偏补偿。

首先使用双向成对同步算法校正时间相偏，如图 4.9 所示，

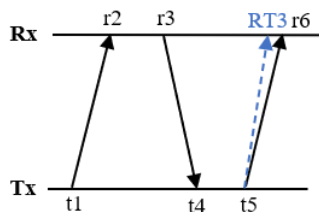


图 4.9 双向时间戳交换

其中，Tx 端相当于被同步节点，Rx 端相当于待同步节点。Tx 端在本地时刻 t_1 向 Rx 发送同步报文，Rx 在本地时间 r_2 收到报文后记录该时刻并在 r_3 时刻向 Tx 发送一个响应数据包，此数据包中同时还包含节点当下测得的温度数据；Tx 在本地时刻 t_4 收到响应数据包，利用公式(4-6)对数据包中数据进行计算，算出传播延时($delay$)、时间相偏($offset$)；在 t_5 时刻再次向 Rx 发送本轮的同步校正报文，包含传播延时、时间相偏、频率比等数据，Rx 在 r_6 时刻收到该报文，根据公式(4-7)计算出校正时间相偏的时间 RT3。

$$\begin{cases} delay = \frac{(r_2 - t_1) + (t_4 - r_3)}{2} \\ offset = \frac{(r_2 - t_1) - (t_4 - r_3)}{2} \end{cases} \quad (4-6)$$

$$RT3 = t_5 + delay + offset \quad (4-7)$$

4.3.5.2 温度-频偏公式补偿时间频偏

Mesh 网络层级中每个路由节点周围温度的不断变化是其振荡器频率发生偏移的主要原因。网络中每个传感器节点维护自身的本地时钟，节点利用晶体振荡器驱动微处理器中的计数器，由晶体震荡频率进行计数。本文根据式(4-8)所示的温度-频偏关系公式进行频率校正，

$$f(T_{use}) = -0.035 \times (T_{use} - 25)^2 T_{yp} \times 10^{-6} \quad (4-8)$$

其中， T_{use} 表示路由节点当前环境温度， T_{yp} 表示标称频率。结合双向时间戳交换同步算法，在双向时间戳交换过程中传递补偿时间频偏的必要参数，在

下一次同步前校正待同步节点的本地时钟频率偏移，校正过程如图 4.10 所示：

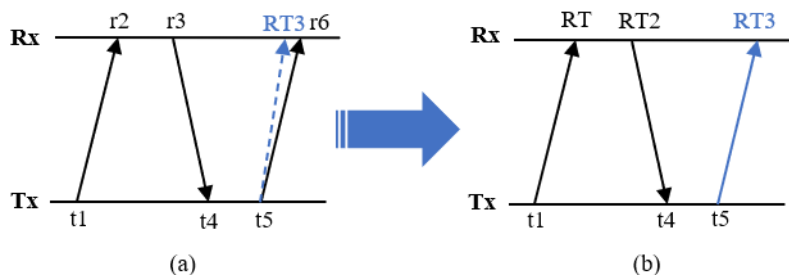


图 4.10 校正本地时间

图中(a)过程表示两个节点初次同步时，(b)过程表示间隔一段时间后两节点再次同步时。Tx 在本地时刻 t_4 收到数据包，依据公式(4-8)得到的频偏结果，带入公式(4-9)在本地计算出两同步节点当前频率的比值 $fratio$ ，

$$fratio = \frac{f(T_{tx}) + Typ}{f(T_{rx}) + Typ} \quad (4-9)$$

其中， $f(T_{tx})$ 表示被同步节点的频偏值、 $f(T_{rx})$ 表示待同步节点当前的频偏值、 Typ 表示标称频率。

随后在 t_5 时刻将 $fratio$ 打包进数据帧中发给 Rx，Rx 在 r_6 时刻收到该报文，依据式(4-7)及式(4-9)可以计算出待同步节点下次时戳交换时校正后的本地时间 RT、RT2 的值，计算公式如式(4-10)所示，

$$RT = fratio \times (t_1 - t_0) + PRT \quad (4-10)$$

其中，PRT 表示待同步节点在本地寄存器存储的时刻 t_0 时校正完时间相偏及时间频偏后的时间，RT 表示待同步节点在本地寄存器存储的时刻 t_1 时校正完成相偏和频偏后的时间。

两个路由节点初次进行双向时间戳交换同步算法时，默认初始状态下两个节点不存在频率偏移，仅需要修正时间相偏，即图 4.10 中所示的(a)过程。被同步节点和待同步节点都使用的是各自的本地寄存器中存储的计数值表示当下的本地时间；经过一段设定的间隔时间后，两个节点再次同步，待同步节点改用公式(4-10)计算得到的 RT 值与被同步节点进行时间戳交换同步，即图 4.10 中所示的(b)过程。由于自定义的修正时间变量 RT 无法实时更新，待同步节点在时戳交换时也需要实时记录当下寄存器内存储的计数值来通过公式(4-10)计算新一

轮同步开始时 Rx 端的时间 RT。例如，要计算图 4.10 中所示的(b)过程中 RT 的值，带入公式(4-10)可以得到： $RT = fratio \times (r_2' - r_6) + RT3$ ，其中 r_2' 、 r_6 就是即时记录的本地的寄存器值。

4.4 本章小结

本章在上一章电力无线混合组网技术研究的基础上，继续研究设计适用于变电站场景下的低功耗通信协议栈，重点对网络内不同层级内不同类型节点的数据链路层进行针对性的优化设计。首先，简要介绍研究设计的通信协议栈的整体架构以及各个层级实现的主要功能。

之后，分别针对不同网络层级不同类型节点的 MAC 层进行分类优化设计，对星型网络层级终端监测节点的 MAC 协议设计频分多址与时分多址结合的通信策略，结合休眠/激活、时间同步策略，保证终端监测节点运行能耗降到最低；对 Mesh 网络层级内节点设计增加 MAC 地址控制层，在 MAC 地址控制层为路由节点、接入节点设计基于 MAC 地址的路由协议，为 Mesh 网络层级内的每个节点分配一个包含层级消息的 MAC 地址，数据传输时通过 MAC 地址运算得到的 MAC 地址域保留上下行路由路径信息、完成上下行路由选择，实现无路由表的路由协议，配合网络冲突与拥塞控制策略，在减少网络资源消耗的同时有效提升节点路由选择效率。

最后，研究设计 Mesh 网络层级内节点时间同步算法，在提升节点同步精度的同时有效降低了全网节点整个同步过程完成产生的运行功耗。

第5章 实验仿真与验证

本章运用网络仿真软件 OMNeT++对本文研究设计的混合组网网络及低功耗通信协议栈进行仿真设计，重点是验证所设计的混合组网技术与低功耗通信协议栈在扩充网络规模的同时有效保证供电受限终端节点低功耗运行的有效性。仿真实验以实际场景下某变电站无线测温系统为参照样本，配置模拟仿真网络及通信协议的相关仿真参数，对所构建混合网络的网络性能（路由平均跳数、信道利用率、网络丢包率、端到端延迟等）以及节点、算法、网络通信过程的能量消耗结果进行仿真测试与分析。结合部分对比实验分析，验证本文所研究的通信协议各方法设计的有效性。

5.1 OMNeT++仿真软件及运用框架介绍

5.1.1 OMNeT++仿真软件

OMNeT++（Objective Modular Network Testbed in C++）是开源的基于组件的模块化开放网络仿真平台，其作为一款面向对象的离散事件网络仿真器，具备强大完善的图形界面接口及可嵌入式仿真内核，与市面上常见的 NS3、OPNET、TOSSIM 等仿真平台相比，OMNeT++可运行于多个操作系统平台，可以简便定义网络拓扑结构，具备编程、调试以及跟踪支持等功能，以实现有线/无线通信网络、协议、硬件体系结构验证、复杂软件系统多方面性能评估等多种实际场景的仿真应用^[58]。

OMNeT++主要由网络描述语言的编译器（nedc）、图形化的网络编辑器（GNED）、仿真程序的命令行用户接口（Cmdenv）、仿真程序的图形化接口（Tkenv）、图形化的输出工具 Plove 与 Scalar、仿真内核库（Sim）六部分组成。其中 Sim 仿真内核库占据最核心的地位，用户编写的仿真程序都需要与 Sim 连接。一个用户编写的 OMNeT++模型通常包括三个部分：（1）NED 拓扑描述语言：使用参数、门、子模块、链接等描述模块结构，在项目文件中表示为.ned 文件。（2）消息定义：定义各种消息类型，可以在消息中添加多种数据，在项目文件中表示为.msg 文件，实际运行时会转化为.cc 类型文件。（3）简单模块源：

用于编写网络内各个模块、协议功能实现的具体代码，在项目中体现为.h 或.cc 后缀的 C++文件。

5.1.2 INET 框架

INET 框架是 OMNeT++仿真环境中一个非常重要的开源模型库，它为从事通信网络工作的研究人员、学生提供协议、代理和其他模型。尤其适用于在设计与验证新协议或探索新的方案的情况下。现阶段框架中包含有一些互联网协议栈（TCP、UDP、IPv4、IPv6 等）、有线和无线链路层协议（以太网、PPP、IEEE802.15.4 等）的模型，可支持移动性、城域网协议等多个应用模型及众多其他协议及组件。

INET 是围绕模块的概念建立的，模块之间通过消息传递进行通信，代理和网络协议由组件表示，这些组件可以自由组合成路由器、主机等其他网络设备，用户可以对新的组件进行编程，也可以有效利用现有组件进行改写。本文所设计网络协议即是基于此框架中特定的模型方法进一步开发与实现的，例如能量消耗模块、网络拓扑模块等。与此同时，借助框架中已有的基于路由表路由实现的最短路径路由协议与本文设计的基于 MAC 地址的路由协议设计对比试验，完成进一步的实验验证。

5.1.3 FLoRa 框架

FLoRa（Framework for LoRa）是一个用于对 LoRa 网络进行端到端模拟的仿真框架。它的编写基于 OMNeT++网络模拟器，同时也运用了 INET 框架中的组件。框架中包括 LoRa 物理层的精确模型、网络中一个或多个网关的模拟仿真、端到端模拟（包含回程网络的精确建模）、网络中能量消耗统计。

FLoRa 使用 LoRa 节点、网关及网络服务器模块构建 LoRa 网络。网络服务器和节点通过自适应数据速率（ADR）支持配置参数的动态管理。最后，每个节点都会收集能耗统计数据用于能量消耗的结果分析。由于本文物理层与数据链路层的设计是基于输变电设备物联网微功率无线网通信协议执行的，且此协议物理层设计与 LoRaWAN 协议基本一致，数据链路层也在 LoRaWAN 协议基础上进行了低功耗优化。因此本文可直接利用 FLoRa 中的终端节点与网关间本地局域网内的相关模块组件，构建本文仿真模拟网络星型网络层级终端监测节点与路由节点的物理层与数据链路层，并在此基础上修改 MAC 层相关模块行为

的设计，完成对本文所设计低功耗数据链路层协议的进一步设计开发。

5.2 仿真网络参数配置及仿真实现

5.2.1 仿真参数配置

在网络各个模块及相关通信行为定义建立完毕后，将对网络拓扑结构及通信协议中定义的仿真属性进行统一的实例化配置。单独的实例化统一配置在更换网络仿真参数进行网络对比和应用时，可以直接在配置文件中修改相应参数，或者建立一个新的配置文件用于新设置参数的网络进行仿真，增强了网络仿真代码的通用性及可移植性。本文以实际场景下某变电站无线测温系统为参照样本，配置模拟仿真网络相关仿真参数；与此同时参考 Q/GDW 12020-2019 输变电设备物联网微功率无线网通信协议的相关协议标准配置通信协议仿真参数。

5.2.1.1 模拟仿真网络

根据某变电站下的无线测温系统本地监测节点网络实际部署情况，仿真设计一个终端监测节点 100 个、路由节点 15 个、接入节点 1 个，覆盖区域 1km×1km 的模拟网络，如表 5.1 所示。

表 5.1 模拟网络配置

编号	仿真属性	参数配置
1	仿真场景	1km×1km
2	仿真时间	24h
3	节点总数	116
4	接入节点数	1
5	路由节点数	15
6	终端监测节点数	100

通过 omnetpp.ini 配置文件对网络仿真环境参数进行统一配置，网络内各类型节点在仿真开始阶段被随机分布到网络中。其中，在网络仿真建立时，在 Mesh 网络层级中的路由节点会随机选中其中一个节点作为目的节点担任接入节点的任务，经过其余路由节点的数据帧都要传输至此接入节点到达更上层的网络。

5.2.1.2 通信协议仿真参数配置

根据本文低功耗通信协议栈设计，同样地在仿真配置文件 `omnetpp.ini` 中对 OMNeT++ 中的仿真网络及节点的通信协议相关仿真属性进行参数配置，主要仿真属性的参数配置如表 5.2 所示。其中，通信频段根据分频策略设置为控制频段（默认中心频率 2403.0MHz）、业务频段（默认信道频点 2427.0MHz），控制周期与业务周期可以随仿真实际记录测试情况进行调整，以便短时间内获取更多有效结果数据。

表 5.2 通信协议仿真参数配置

编号	仿真属性	参数配置
1	网络带宽	812.5kHz
2	通信频段	2.4G
3	扩频因子	8
4	编码率	CR4/5
5	控制周期	1h
6	业务周期	5min
7	发射功率	<10dBm
8	信号接收灵敏度	-137dBm

5.2.2 仿真实现

网络仿真建立过程主要分为三个阶段：（1）网络拓扑结构建立。为终端监测节点、路由节点、接入节点及混合网络分别建立模块及其子模块，定义相关参数、门、链接等，构建网络基本模型；此时网络内节点没有具体的通信协议及事件支持，无法完成具体的通信功能。（2）编写实现各个模块的 C++ 类。C++ 文件的作用即是为模块定义行为，包括初始化、处理消息等函数，是完成通信协议及相关算法的主要文件。（3）根据仿真网络的具体情况在配置文件 `omnetpp.ini` 中实例化相关参数。当仿真程序启动时，系统首先加载 NED 文件，随后加载配置文件 `omnetpp.ini`，以确定所要执行的网络，最后网络仿真依据 C++ 文件开始运行，实现仿真网络按照所设计协议有效运行。

本文基于 OMNeT++ 中的 INET、FLoRa 框架，对所研究设计的混合网络、节点及通信协议规约进行扩展的模块仿真设计，每个节点模块包含多个子模块，子模块之间通过网络接口建立连接，消息到达节点后按顺序进入子模块进行消

息处理，处理完毕后由负责转发消息的子模块将消息通过无线信道传输到下一个目标节点模块。如图 5.1 所示为本文仿真运行的混合网络组网过程（左图）及路由路径建立完毕（右图）的实时状态，图示中的界面由 OMNeT++Tkenv 图形运行界面生成。

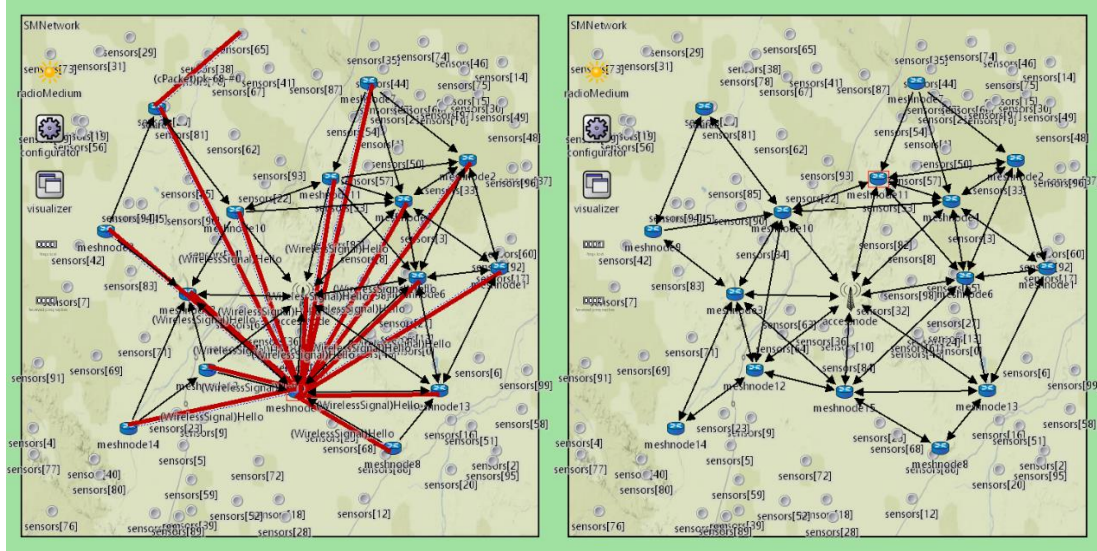


图 5.1 仿真网络拓扑结构图

5.3 终端监测节点通信能耗分析

基于 INET 框架中的能量消耗模块为网络内终端监测节点设计 Power Consumption 子模块，用于实时统计节点的能量消耗情况。根据给定的每个状态下无线电功率值及实时记录的不同状态下节点运行时间计算出总的平均功耗值，以此判断传感器是否可达到超长工作寿命（>10 年）工作。本节仿真过程重点统计分析供能受限节点的无线通信模块的能量消耗情况。

5.3.1 各状态节点电流消耗配置

在网络仿真运行时，终端监测节点状态包括发送、等待接收以及休眠三种状态，其中发送状态根据节点通信过程与需求不同又可以分为业务帧发送、控制帧发送。在网络仿真运行前需要另外在配置文件 omnetpp.ini 中配置节点电池容量（设定为 500mAh、电压为 3.3V），假定监测终端采用射频芯片 SX1280，参考其开发手册中给出的电流消耗参数值来配置节点不同状态下平均电流的消耗值，具体配置如表 5.3 所示。

表 5.3 节点各状态下平均电流消耗参数配置

节点状态	平均电流消耗/mA
业务帧发送	10
控制帧发送	12
等待接收	10
休眠	0.0015

5.3.2 通信能耗结果分析

相关参数配置完成后，加速运行仿真网络 24h，随后关闭仿真运行界面终止仿真，打开项目文件中的 **result** 文件查看仿真结果。如图 5.2 所示即为网络内某路由节点下的星型网络层级中的 10 个终端监测节点随仿真时间变化的平均能量消耗（Mean of Power consumption）图。在初始网络建立阶段，所有终端监测节点需要在集中时间内发送注册请求入网等消息，此时节点能量消耗急剧上升，波动明显；在与上层路由节点建立连接，被分配时隙正常运行后，10 个终端监测节点的平均通信能量消耗都趋向于平稳。被测终端监测节点平均通信功耗值基本在 $17.1\mu\text{W}$ 附近上下波动。

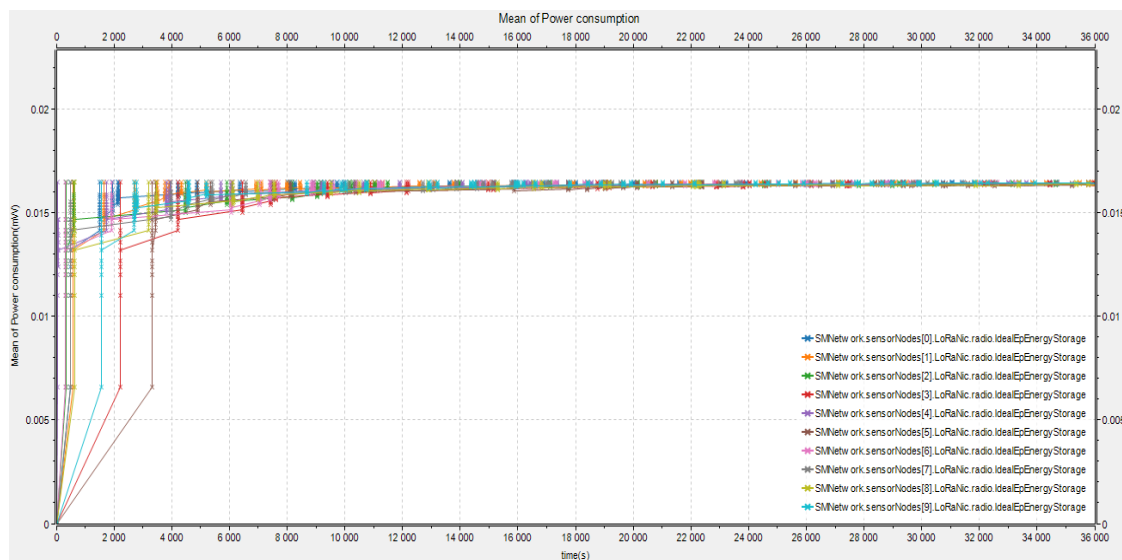


图 5.2 终端监测节点平均能量消耗

根据仿真实验结果，可以得到传感器节点在不同通信状态下的工作时长、工作间隔、节点电流消耗值，进而可以计算出单位时间（1h）内节点通信总能量消耗值，表 5.4 所示为终端监测节点通信功率消耗情况分析。

表 5.4 终端监测节点通信功率消耗分析表

节点状态	平均电流/mA	工作时长/ms	工作间隔/min	总能耗/mAh
业务帧发送	10	90	5	0.00275
控制帧发送	12	90	60	0.0003
等待接收	10	30	60	0.000083
休眠	0.0015	3599790		0.00149
合计				0.004623

通过对单位时间（1h）内节点各个状态下的平均电流及工作时长相关实验数据，可以得到节点单位时间通信模块消耗的总能耗值 0.004623mAh。配合实际情形下传感器 MCU 低功耗运行与低功耗数据采集方式，该低功耗协议可以满足电池容量为 500mAh(3.3V)情形下使用寿命大于 10 年的工作需求。对于实际的混合网络，可以根据上述原理进行仿真分析，能够得出在实际网络参数条件下，传感器节点使用寿命大于 10 年条件下电池容量的配置，或者在既定的电池容量条件下，传感器节点的通信参数及协议配置。

5.4 Mesh 层时间同步算法实验验证

对 Mesh 网络层级应用于路由节点的时间同步算法进行独立仿真验证。实验分析过程从时钟校正精度及传播功耗两个维度对设计算法进行分析验证，于此同时设计 TPSN 算法与本文算法进行对比实验验证本文算法的有效性。在仿真环境中，需要为每个使用同步算法的节点随机预设环境温度变量，模拟实际情景下温度对晶振频率的影响。

5.4.1 校正精度分析

依次设定不同的同步时间间隔（上一次同步过程完成与下一次同步过程开始触发之间的时间间隔，以下简称同步时间间隔），比较本文算法与 TPSN 算法的时钟误差。每次利用上一次同步时交换的校正参数计算下一次同步前的待同步节点的本地时间戳，此时间戳与被同步节点加上时间延迟和相位偏移后的差值，即为所要计算的时钟误差。当以某个确定同步间隔对两节点进行定时同步时，取 20 组时钟误差值计算平均值作为此同步间隔下产生的时钟误差值。仿真实验结果如图 5.3 所示，将双向时间戳交换算法同温度补偿过程结合确实一定程度降低了时钟误差，并且随着同步间隔的增加，这个优势更加显著。

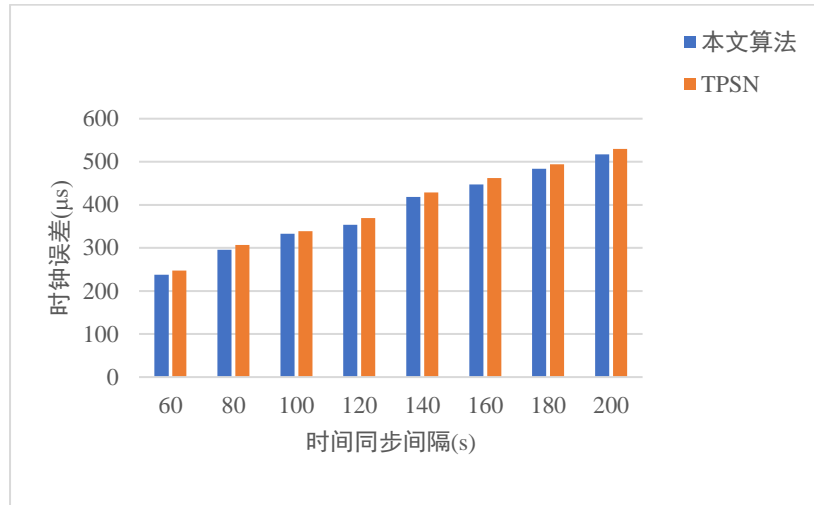


图 5.3 TPSN 与本文算法时钟误差对比图

除此之外，在两个待同步节点进行同步后，在下一次同步时，继续使用此次同步计算出的校正参数对两个待同步节点进行后续同步操作，在设定的时间间隔，观察两节点同步后的时钟误差。本文设定 140s 作为同步间隔进行实验，最终测试结果如图 5.4 所示：

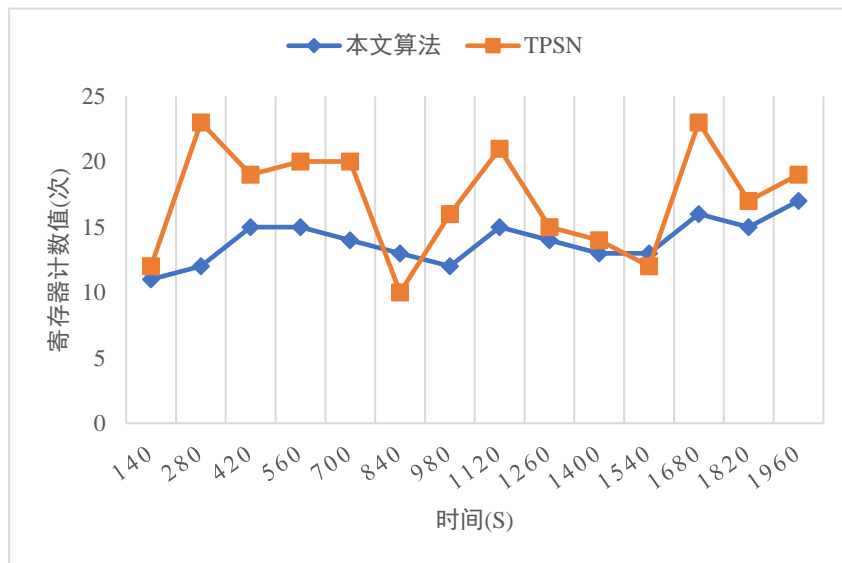


图 5.4 一次同步校正后 TPSN 与本文算法时钟误差变化图

其中，纵坐标表示同步节点计数值，30.517 微秒计数一次；横坐标表示时间。从图 5.4 可以看出，未经过温度-频率公式补偿过的 TPSN 算法时钟误差更大，且变化波动较大不稳定；而本文算法由于及时校正频偏使得整体时钟误差下降且变化趋于平稳。这说明新算法的设计在进行一次同步校正后的时钟误差

明显低于 TPSN 算法的，校正精度明显提升。由此也可以将此情景假设为网络内某两个节点受某些因素影响无法再次交换同步信息、更新修正参数时，本文的同步算法修正效果能够维持更长的时间且有更好的表现。

5.4.2 路由节点同步过程能耗分析

依次设定不同同步时间间隔，比较本文算法与 TPSN 算法的一次同步过程完成后消耗的功耗值。依据下式(5-1)可计算出两节点一次同步结束后发送端与接收端各自消耗的实际能量。

$$E = Wt = UIt \quad (5-1)$$

其中， E 是实际的能量消耗， U 表示电压恒为 3.3V， t 表示传输同步数据帧消耗的时间， I 表示节点传输数据帧消耗的总电流。

总电流 I 包含发送过程消耗电流(I_{Tx})和接收过程消耗电流(I_{Rx})，参照表 5.3 选择 $I_{Tx} = 12mA$ ， $I_{Rx} = 10mA$ 。通信速率是 1 Mbps。明确同步过程所要传输的数据帧长，并与通信速率相乘即可得到传输同步数据帧消耗的总时间 t ，最后带入公式(5-1)计算出实际的能量消耗 E 。

本文使用的同步数据包帧格式如下图 5.5 所示，无线射频依据从左到右发送数据包中的不同字段，MAC 层头占据 11 个字节（包含 MAC 地址字段），CRC 可以配置其有无、位数、多项式，占据 1 个字节。负载（PAYLOAD）中的自定义内容即是两个传感器节点同步阶段实际要传输的数据，共占据 37 个字节。

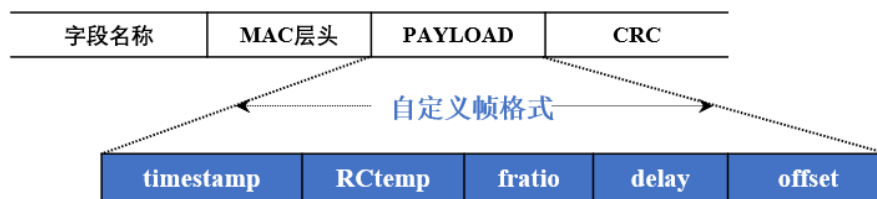


图 5.5 同步数据帧格式

与此同时，频偏修正过程需要在时间戳交换过程中传递温度(RCtemp)和频率比(fratio)的信息，致使两个待同步节点使用本文算法进行同步时交换的数据帧长度要比使用 TPSN 算法的数据帧长度略长，因此带入公式(5-1)计算所得的传播功耗相较于单纯使用 TPSN 算法也略微升高。由表 5.5 可以直观看出两种算法在一次同步完成后接收节点和发送节点各自消耗的传播总功耗 E (单位: μWh)。

表 5.5 一次同步完成传播功耗

Method	被同步端功耗/ μWh	待同步端功耗/ μWh
TPSN	0.01023	0.00963
本文算法	0.01221	0.01149

但是由图 5.3 可以看出, 与 TPSN 算法相比, 本文提出的新算法在相同同步时间间隔下利用温度补偿过程校正过频偏之后时钟误差更小。且由图 5.4 所反映出的结论可知一直利用上一次同步的校正参数执行同步, 间隔一段时间后, 在下次同步过程开始前的时钟误差也是明显小于 TPSN 算法的。

由此可知, 虽然两个待同步节点一次同步完成传播功耗高于 TPSN 算法, 但由于本文算法频偏补偿过程对频偏的及时修正, 算法可在保证给定精度的同时有效减少双向时间戳频繁交换进行同步的次数, 同步次数的减少又进一步降低了无线传感网络节点同步过程产生的通信功耗。因此将同步范围延伸至整个电力无线传感网络中所有节点全部同步完成, 同时将时间延长至所有节点完成数十次同步后, 使用本文算法进行同步所产生的通信功耗会远远低于 TPSN 算法的通信功耗。

5.5 网络性能分析

5.5.1 网络标量结果分析

5.5.1.1 路由平均跳数

网络建立阶段, Mesh 网络层级路由节点随机部署在网络中进行路由转发, 终端监测节点上传数据帧到达上级的路由节点后, 通过中间路由节点多跳传输至接入节点。如图 5.6 所示, 分别随机设置 5 个 Mesh 网络层级的节点作为接入节点, 记录其余路由节点到达的平均跳数。运行仿真网络发现, 随机部署网络节点后, 实际仿真运行时接入节点所处位置越接近网络中心, 路由平均跳数会明显下降, 例如图中紫色矩形代表的节点 7 最接近中心, 平均跳数仅有 1.87 跳; 而蓝色矩形代表的节点 0 最偏离网络, 平均跳数达到了 3 跳。由此可知, 在实际网络建立时, 接入节点应布设在网络中间位置, 以提升网络传输效能, 节约节点能耗。

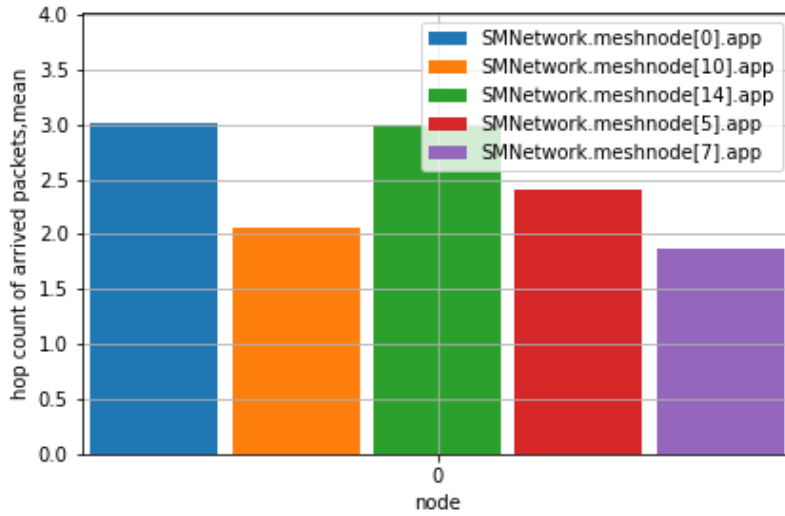


图 5.6 路由节点平均跳数直方图

5.5.1.2 信道利用率

在 OMNeT++ 中，为在结果记录中将结果数据的生成过程以及记录过程分割，需要运用基于信号的统计结果记录将信号机制与 NED 属性结合起来^[58]，实际编写程序时使用 `@statistics` 声明统计量 `channelUtilization`，相关模块利用信号机制使用 `emit()` 函数发射统计量数值，仿真框架将特定的结果文件添加为信号的收听者，实时记录结果数据。如图 5.7 所示为星型与 Mesh 网混合网络仿真运行过程中实时统计得到的本文混合网络信道利用率的标量结果为 0.303284。与本文类似网络架构的标准蓝牙 Mesh 协议信道利用率 0.176 相比，有明显提升。

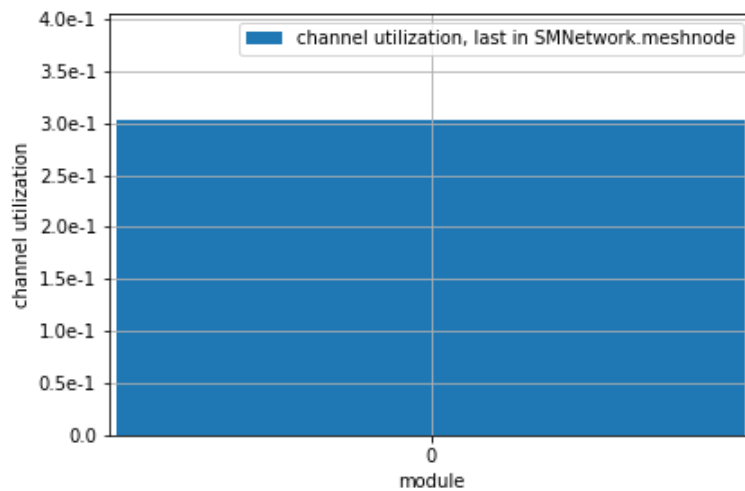


图 5.7 网络信道利用率

5.5.1.3 网络丢包率

为判定 Mesh 网络层级基于 MAC 地址路由协议建立的多跳路由性能, 进一步设计实验, 对 Mesh 网络层级网络丢包率性能进行测试。同样使用@statistics 声明统计量发送数据包总数 (packetSent) 及丢失数据包数量 (numLost), 跟踪 Mesh 网络层级内路由节点转发数据包至目的节点 (接入节点) 的情况。根据统计到的路由节点转发数据包总数及丢失数据包数量实时计算出网络丢包率 (PacketLossRate)。如图 5.8 所示为统计的不同数据包总数下网络丢包率的变化折线图。

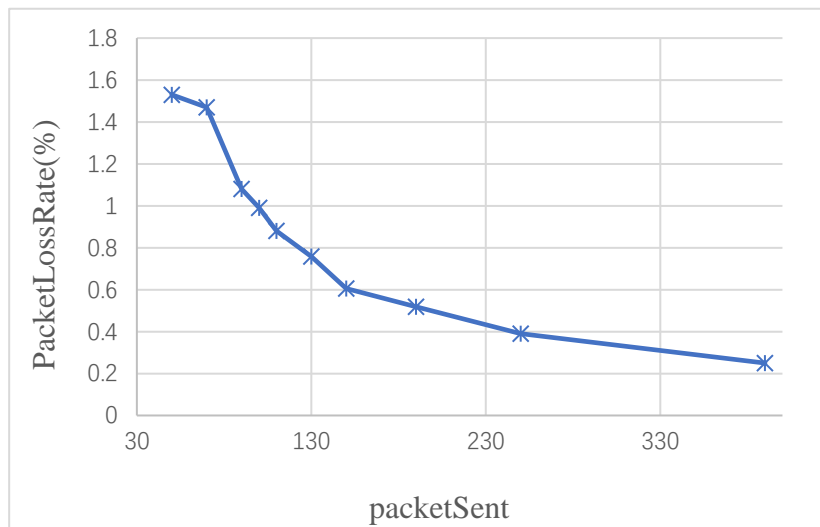


图 5.8 网络丢包率

由折线图可知, 随着网络仿真时间增加, 路由节点转发的数据包总数不断增加, 而网络丢包率随着仿真时间的增加不断下降最后趋近于一个较低的稳定值。在网络仿真初期网络丢包率达到了 1.53%, 分析其主要原因是网络内一些路由节点受到距离接入节点位置较远、无线多跳路由路径建立不完全等因素影响, 上层节点无法稳定接收其转发的数据包导致数据包被丢弃; 随着网络仿真时间增加, 网络内路由路径充分建立完毕, 每个路由节点均有多条抵达接入节点的路由路径, 此时结合通信协议中的网络冲突与拥塞控制策略, 使得丢包率逐渐稳定至较低水平。

5.5.2 端到端延时

网络延迟性能指标主要用于评估网络内源节点到目的节点的端到端延时,

在网络仿真环境中定义为路由发现时间、传输时延与传播时延的总和^[59]，很大程度上反映出了网络质量及路由协议的性能优劣，文献[59-61]也均利用端到端延时网络性能指标结果分析网络阻塞状况以及路由选择时间、下一跳路由选择效率等。

5.5.2.1 平均端到端延时

实验仿真时，配置默认数据帧长度为 25 个字节，选择 Mesh 层级节点 0 与节点 7 两个节点并配置为路由目的地址（相当于定义两个接入节点到网络中）。如图 5.9 所示，记录了从仿真开始到结束整个过程中，其余节点到目的节点 0 与目的节点 7 的平均端到端延时。分析仿真结果可知，节点的端到端延时在传输的开始阶段有所起伏，后回归平稳，但由于仿真中随机 Mesh 网络的设置，受到目的节点本身部署位置的影响导致到达不同目的节点路径选择差异较大，但都基本稳定在 $590\mu\text{s}$ 左右。

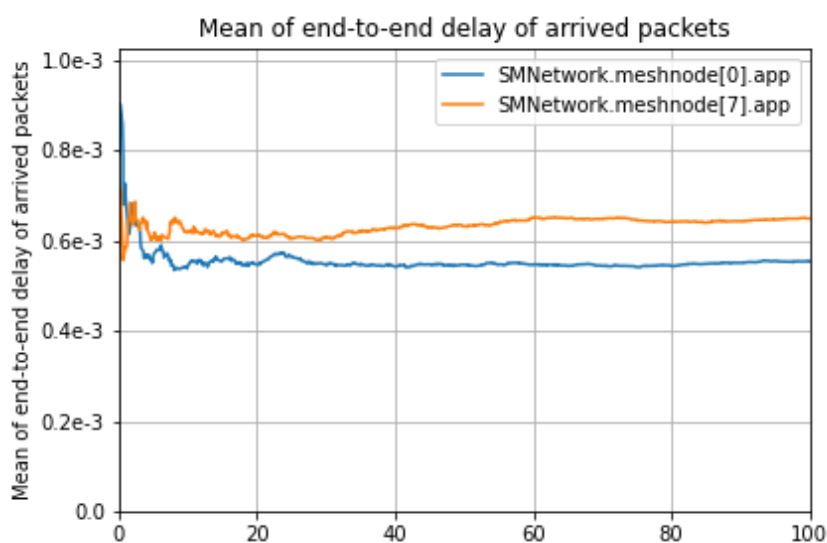


图 5.9 混合网络平均端到端延时

5.5.2.2 对比实验

基于上述实验结果进一步设计对比实验，将本文设计的基于 MAC 地址的路由协议与 INET 框架实例中利用路由表寻址的最短路径路由协议进行对比，将两种路由协议分别用于 Mesh 网络层级路由节点路由过程，统计传输不同数据帧长度下数据帧到目的节点的平均端到端延时。由图 5.10 可以看出，本文基于 MAC 地

址的路由协议在传输不同数据帧长下的端到端延时均远小于利用路由表实现的最短路径路由协议。并且随着帧长的增加,平均延时增长速率也明显小于路由表路由。

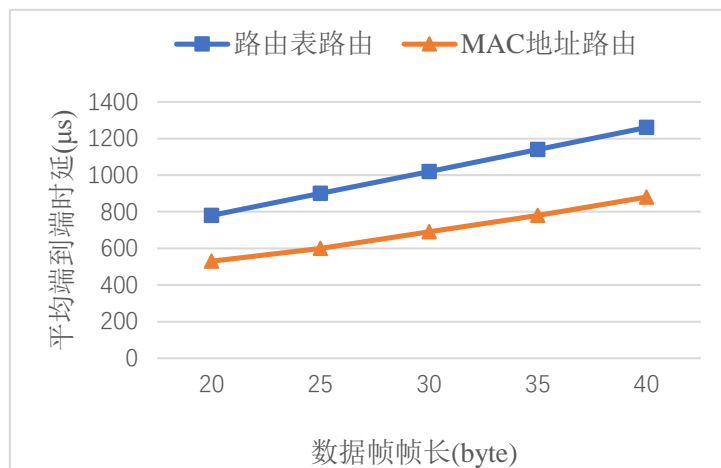


图 5.10 不同路由协议下平均端到端延时

由于上述两种路由使用的网络拓扑结构及信道条件完全一致,进而数据包发送的传播时延与传输时延也相同,因此可以得出导致两种协议端到端延时不同的是网络中中间路由节点路由发现与选择的时间。根据对比实验结果可知,本文设计的基于 MAC 地址的路由协议与利用路由表实现的最短路径路由相比路由发现与选择效率更高。

5.6 本章小结

本章运用网络仿真软件 OMNeT++对适用于变电站的电力无线混合网络拓扑及通信协议进行仿真实验。

仿真实验结果可知,在本文设定的模拟网络环境下,供能受限的终端监测节点仿真运行期间平均通信功耗值为 $17.1\mu\text{W}$,单位小时内节点通信电流消耗仅为 0.004623mA ,可以满足使用寿命大于 10 年的工作需求;对于实际的混合网络,可以根据上述原理进行仿真分析,进而得出在实际网络中,满足使用寿命大于 10 年条件下的传感器节点电池容量的配置,或者在既定的电池容量条件下传感器节点的通信参数及协议配置。Mesh 层级时间同步算法通过对比 TPSN 算法验证了此算法在提升一次同步精度的可有效减少了执行同步算法的频次,进而有效降低了网络内节点双向时间戳交换产生的功耗;基于 MAC 地址的路由协

议与基于路由表的最短路径路由相比端到端时延更低，路由发现与选择效率更高，在高效路由的同时有效节约了网络能耗，提升了网络健壮性。上述实验结果表明通过仿真实现的通信协议及相关算法均能实现预定功能。

第6章 总结与展望

6.1 总结

现有的网络规模较大、可应用于智慧变电站的通信协议往往忽视了变电站监测系统内部供能受限节点的低功耗运行问题，而现有的考虑供能受限节点低能耗运行的通信协议往往网络拓扑结构简单，不适用于多节点、多参量的智慧变电站的大规模监测网络。

本文针对智慧变电站实际应用与发展需求，开展适应于变电站场景下的电力无线传感网络组网技术及低功耗通信协议的研究，具体的研究工作如下：

(1) 研究智慧变电站全域覆盖的自组织网络建设方法，提出一种星型与 Mesh 双层混合拓扑结构，并对混合网络内网络建立、组网过程、网络更新及升级维护进行详细研究设计。

(2) 提出一种星型网络层级内终端监测节点数据链路层优化分频分时、时间同步、休眠/激活的低功耗通信策略。对于本文设定的模拟网络，仿真实验结果表明，终端监测节点在网络运行期间，平均通信功耗值为 $17.1\mu\text{W}$ ，配合传感器 MCU 低功耗运行与低功耗数据采集方式的使用，应用本文设计的低功耗协议可以满足电池容量为 $500\text{mAh}(3.3\text{V})$ 情形下，传感器节点使用寿命大于 10 年的工作需求；对于实际的混合网络，可以根据上述原理进行仿真分析，进而得出在实际网络运行环境下，传感器节点使用寿命大于 10 年条件下电池容量的配置，或者在既定的电池容量条件下，传感器节点的通信参数及协议配置。

(3) 对 Mesh 网络层级内路由/接入节点规划 MAC 地址控制层，设计基于 MAC 地址的路由协议。中间路由节点利用基于 MAC 地址路由协议可有效完成下一跳节点地址层级匹配、路由路径选择以及路由地址域解析与更新，建立终端监测节点与接入节点之间的可靠链路，将源节点发送的数据消息通过上下行路由传至目的节点。仿真实验结果表明，对于本文设定的模拟混合网路，路由平均跳数最优达到 1.87 跳、信道利用率达到 0.303284，平均端到端延时在帧长为 25 字节时仅为 $590\mu\text{s}$ ，在不同帧长情况下，本文设计的基于 MAC 地址的路由协议端到端时延的路由发现与选择的效率要优于利用路由表实现的最短路径路由。

(4) 针对 Mesh 网络层级内的节点设计了高精度、低功耗时间同步机制。算法根据节点实际应用环境将影响节点频率偏移的主要因素温度的校正过程加入到节点时间同步过程中。通过对校正精度与通信能耗实验结果分析, 算法在提升节点同步精度的同时有效增加了同步算法执行间隔, 进而有效降低了节点频繁交换时间戳产生的通信能耗。

6.2 展望

本文通过 OMNeT++网络仿真平台对所设计的适应于变电站场景下的电力无线混合组网与低功耗通信协议栈进行了网络拓扑结构与网络性能指标的设计与分析, 仿真实验结果符合预期目标。后续在浙江维思无线网络技术有限公司实验室技术人员协助下, 作者利用实验室现有电力无线测温系统搭建了星型网与 Mesh 网的混合网络, 对本文设计的终端监测节点低功耗协议、Mesh 网络层级时间同步算法的精度及能耗进行了验证。实验结果表明, 实际测试结果与仿真模拟实验的结果在既定误差允许范围内基本一致, 进一步说明本文所设计的模拟仿真实验基本符合现实情况。

虽然本文设计的低功耗通信协议栈在仿真与实际验证阶段结果符合预期, 但受到作者个人能力及时间的限制, 协议栈在实际功能和性能测试上还需要进一步的设计和完善, 主要分为以下两个方面:

(1) 在利用仿真软件 OMNeT++对网络性能指标端对端时延、时间同步算法进行对比分析验证时, 对比算法选取了仿真软件中易于编写实现的各自领域内的经典算法, 未来可以在仿真环境及实际测试时配置本领域内较为前沿的算法进行对比, 加强验证设计通信协议中相关算法的有效性。

(2) 实际应用场景下的测试及验证。现阶段本文研究的无线混合组网技术及低功耗通信协议栈仅涉及电力无线监测系统中本地局域网内的应用, 因此在实际监测系统的具体性能及可能存在的各种问题还有待实际的检验和发现。未来可以继续与更上层网络进行连接配置, 在真实的变电站场景中进行完整的系统测试及应用。

参考文献

- [1] 万光耀. 一种应用于物联网的低功耗蓝牙 Mesh 组网方案设计[D].西安电子科技大学, 2018.
- [2] 张明明. 基于 LoRa 无线 Mesh 网络路由协议及节点定位算法研究[D].东北农业大学, 2020.
- [3] Zefeng Yi, Hui Hou, Zhaoyang Dong, Xiongkai He, Zeyan Lv, Chengzhi Wang, Aihong Tang, ZigBee Technology Application in Wireless Communication Mesh Network of Ice Disaster[J]. Procedia Computer Science, 2015, 52: 1206-1211.
- [4] 熊书明,欣燕,王良民. 无线传感网与 TinyOS[M].北京: 清华大学出版社, 2017: 182-207.
- [5] 周尧,韩江洪,卫星等.基于功耗模型的无线传感器网络节点生存模式评估[J].传感器与微系统, 2014, 33(11): 19-22.
- [6] 李祥珍,刘柱,张翼英. 电力无线传感与电气集成技术[M].北京: 科学出版社, 2020: 82-85.
- [7] 周洋. 无线传感网节点低功耗控制技术研究[D].苏州大学, 2019.
- [8] 曾凡太,边栋,徐胜朋. 物联网之芯: 传感器件与通信芯片设计[M].北京: 机械工业出版社, 2018: 330-390.
- [9] 李云亮. 无线传感网络的能量优化算法研究[D].华北电力大学(北京), 2021.
- [10] J. Jabari Lotf, M. Nozad Bonab and S. Khorsandi. A Novel cluster-based routing protocol with extending lifetime for wireless sensor networks[C] 2008 5th IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN'08). IEEE, 2008:1-5.
- [11] Yadav Rakesh Kumar and Mahapatra R.P.. Energy aware optimized clustering for hierarchical routing in wireless sensor network[J]. Computer Science Review, 2021, 41: 100417.
- [12] Ding Qianao et al. An Overview of Machine Learning-Based Energy-Efficient Routing Algorithms in Wireless Sensor Networks[J]. Electronics, 2021, 10(13): 1539-1539.
- [13] 富立琪,王华倩,乔学工.基于 k-means 分簇和灰狼优化的无线传感网络路由算法[J].电子设计工程, 2021, 29(23): 1-6.
- [14] 刘建,欧阳曾恺,田正其等.典型低功耗无线智能设备的一般功耗模型[J].科学技术与工程, 2021, 21(20): 8515-8521.
- [15] 李曦,王志刚,周学海等.面向低功耗优化设计的系统级功耗模型研究[J].电子学报, 2004, 32(2): 205-208.
- [16] GB/T 40287-2021 电力物联网信息通信总体架构[S].
- [17] GB/T 35697-2017 架空输电线路在线监测装置通用技术规范[S].
- [18] Q/GDW 12082 输变电设备物联网无线传感器通用技术规范[S].
- [19] Q/GDW 12184-2021 输变电设备物联网传感器数据规范[S].

- [20] Q/GDW 12020-2019 输变电设备物联网微功率无线网通信协议[S].
- [21] Q/GDW 1242-2015 输电线路在线监测装置通用技术规范(国网 I1)[S].
- [22] Q/GDW 12021-2019 输变电设备物联网节点设备无线组网协议[S].
- [23] Q/CSG 1205031-2020 输电线路在线监测通信规约及信息交互规约[S].
- [24] 林俊. 面向电力物联网的无线通信技术研究[D].西安电子科技大学, 2020.
- [25] 郭晓玲. 无线传感器网络[M].上海: 中国铁道出版社, 2018.
- [26] B. Chai, H. Zou, R. Liu, W. Chen and J. Li. Energy Efficient Protocol Design for the WSN Integrated Supporting System of the Smart Grid[C]. 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe). Espoo: Finland, 2021: 1-6.
- [27] 张家正. ZigBee 无线传感器网络休眠策略研究与设计[D].内蒙古大学, 2015.
- [28] 徐勇军. 集成电路功耗估计及低功耗设计[D].中国科学院研究生院(计算技术研究所), 2006.
- [29] 刘伟伟. 嵌入式系统低功耗技术的研究和应用[D].郑州大学, 2012.
- [30] 何杰. 输变电设备物联网关键技术研究[D].湖南大学, 2013.
- [31] 徐一鸣. 面向电力物联网的通信技术研究[D].华北电力大学(北京), 2016.
- [32] 刘伟荣. 物联网与无线传感器网络(第2版)[M].北京: 电子工业出版社, 2021: 89-98.
- [33] 沈明玉, 艾治雄. 无线传感网络低能耗时间同步的研究[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(8): 112-115.
- [34] 杜永文, 冯珂, 彭冲. 多层动态分簇的 WSN 时间同步算法[J]. 传感技术报, 2017, 30(7): 1070-1075.
- [35] 金梦, 陈晓江, 房鼎益, 汤战勇, 刘晨, 徐丹, 王薇. 一种温度自适应无线传感网络时间同步方法[J]. 软件学报, 2015, 26(10): 2667-2683.
- [36] 吴宝明, 李声飞. 基于最优线性拟合的 WSN 时间同步算法研究[J]. 传感技术学报, 2010, 23(12): 1787-1791.
- [37] 张超, 黄友锐, 陈珍萍. 一种低能耗多跳无线传感器网络时间同步算法[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(5): 102-107.
- [38] 刘学超, 郭改枝, 潘亮. 基于机器学习方法的无线传感网络时钟同步算法[J]. 现代电子技术, 2018, 41(5): 65-68.
- [39] 谷呈星, 赵训威, 张春玲. 基于接收者的无线传感器网络时间同步算法研究[J]. 无线互联科技, 2022, 19(6): 1-4.
- [40] T. Schmid, Z. Charbiwala, R. Shea and M. B. Srivastava. Temperature Compensated Time Synchronization[J]. IEEE Embedded Systems Letters, 2009, 1(2): 37-41.
- [41] Castillo-Secilla JM, Palomares JM, Olivares J. Temperature-Compensated Clock Skew Adjustment[J]. Sensor, 2013, 13(8): 10981-11006.
- [42] Ganeriwal S, Kumar R, Srivastava M B. Timing-sync protocol for sensor networks [C]//Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems.

- ACM, 2003: 138-149.
- [43] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]// Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on system sciences. Maui: IEEE Computer Society, 2000: 3005-3014.
- [44] Elsharief, Mahmoud, Mohamed A. Abd El-Gawad, Hyungwon Kim. Density table-based synchronization for multi-hop wireless sensor networks[J]. IEEE Access 2017, 6: 1940-1953.
- [45] ELSHARIEF, Mahmoud, et al. LPSRS: Low-power multi-hop synchronization based on reference node scheduling for Internet of Things[J]. Energies, 2022, 15(6): 2289.
- [46] 钱志鸿,王义君. 物联网技术与应用研究[J].电子学报, 2012, 5(5): 1024-1029.
- [47] 张长悦. 基于时隙资源分配的车载自组织网络 MAC 协议优化研究[D]. 济南大学, 2022.
- [48] 夏露源. 基于业务感知的 Ad hoc 网络智能动态 TDMA MAC 协议研究[D]. 电子科技大学, 2022.
- [49] 王浩,吴礼华,周鹏程.基于 TDMA 和定向天线的无线 Mesh 网络广播技术[J].无线电通信技术, 2021, 47(2): 193-199.
- [50] 武靖飞. 基于 TDMA 的无线 Mesh 网络跨层协议研究与实现[D]. 西安电子科技大学, 2020.
- [51] 孙曼,张乃谦,金立标,余少波. 基于 LoRa 标准的 MAC 层协议研究[J]. 电视技术, 2016, 40(10): 77-81.
- [52] 彭飞飞. 低功耗长距离无线收发模块设计与实现[D]. 电子科技大学, 2016.
- [53] 李俭. 基于 ZigBee 的无线传感器网络节能方法研究[D]. 辽宁大学, 2021.
- [54] 陈方亭. 基于 LoRa 的窄带无线自组网路由协议研究[D]. 西安电子科技大学, 2018.
- [55] 李杨杨. 无线传感器网络的低功耗路由协议分析与设计[J]. 卫星电视与宽带多媒体, 2019, (16): 26-27.
- [56] 叶梦雄. 无线传感器网络节能路由协议研究[J]. 微型电脑应用, 2018, 34(11): 92-94.
- [57] 李琦. 低占空比 WSN 节点休眠调度方法研究[D]. 西北师范大学, 2018.
- [58] 王俊义. OMNeT++网络仿真[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014: 2-6.
- [59] 李俊潞. 基于 OPNET 的水下传感器网络 MAC 及路由协议研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2018.
- [60] 季晓莉. 低功耗蓝牙自组织网络能量优化路由协议的设计与实现[D]. 东南大学, 2020.
- [61] 胡星星. 蓝牙 Mesh 网络路由机制以及路由算法研究[D]. 成都理工大学, 2023.
- [62] IDRIS, Sadiq, Thenuka KARUNATHILAKE, Anna FÖRSTER. Survey and comparative study of LoRa-enabled simulators for internet of things and wireless sensor networks[J]. Sensors, 2022, 22(15): 5546.
- [63] Mukherjee, Sankar, Ruhul Amin, and G. P. Biswas. Design of routing protocol for multi-sink based wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2019, 25: 4331-4347.
- [64] KIM, Beom-Su, et al. An Enhanced Tree Routing Based on Reinforcement Learning in Wireless Sensor Networks[J]. Sensors, 2022, 23(1) : 223.