

文章编号:1006-2467(2021)S2-0060-04

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.S2.009

基于 ESP-Mesh 网络的变电站物联信息汇聚

倪阳旦¹, 卢东祁², 喻 谦², 徐一洲², 谢妮娜²

(1. 国网浙江省电力有限公司信息通信分公司, 杭州 310007;

2. 国网浙江省电力有限公司台州供电公司, 浙江 台州, 318000)

摘 要: 随着国家智能电网的建设, 变电站中各种传感器日益增多, 且变电站占地面积大, 如何实现变电站设备的统一管理、监控和维护, 成为越来越迫切的需求. 无线 Mesh 网络具有自组网和自愈合能力, 能够单独控制各节点, 满足上述需求. 以 ESP32 芯片为硬件节点模块, 利用其自带的 WIFI 模块配置 Mesh 网络并进行组网, 实现了传感器与 ESP32 的连接和通信、Mesh 网络下层级之间的数据透传以及上层级之间的数据解析和数据库保存操作, 建立了完整的 Mesh 网络框架. 经测试, 该系统结构简单清晰、部署快捷、便于维护, 基本满足在变电站环境下的物联网实现.

关键词: Mesh 组网; 变电站; 电力物联网; ESP32

中图分类号: TM 76

文献标志码: A

Internet of Things Information Gathering of Substation Based on ESP-Mesh Network

NI Yangdan¹, LU Dongqi², YU Qian², XU Yizhou², XIE Nina²

(1. Information and Communication Branch, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd.,

Hangzhou 310007, China; 2. Taizhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang

Electric Power Co., Ltd., Taizhou 318000, Zhejiang, China)

Abstract: With the construction of the national smart grid, there are more and more sensors in substations, and due to the large area of substations, how to unify the management, monitoring, and maintenance of substation devices has become an urgent need. Wireless mesh network has the ability of self-organization of network and self-healing, and can independently control each node to meet the above requirements. In this paper, ESP32 was used as the hardware node module, and its own WIFI module was used to configure and network the Mesh network. The connection and communication between the sensors and ESP32, the data transfer from lower computer, and the data analysis and database saving operations from upper computer were realized. In addition, a complete Mesh network framework was established. The test results show that the system has a simple and clear structure, quick deployment, easy maintenance, which basically meets the implementation of the Internet of things (IoT) in a substation environment.

Key words: Mesh network; substation; power Internet of things (IoT); ESP32

收稿日期: 2021-10-26

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (5211TZ1900S6)

作者简介: 倪阳旦 (1986-), 男, 浙江省绍兴市人, 高级工程师, 从事电力信息通信技术研究.

通信作者: 卢东祁, 男, 工程师, 电话 (Tel.): 18505867560; E-mail: ldq_2019@qq.com.

散布于变电站的哑终端存在交互壁垒高和访问接口难统一等问题,电力物联网为其提供了一种智能化集成方式,使其可以通过智能化改造接入物联网中,实现统一感知、统一监控和统一管理.目前,在智能电网的要求下,变电站的感知设备日益增多,针对变电站占地面积大、采集信息量大和传感器分布广等特点,需要一种能够在建设维护成本较低和可靠性较高的前提下,进行传感器设备统一感知和统一接入的新方法.

Mesh 网络是一种多跳无线网状网络,一般以边缘设备为中心节点,可以自动选出与边缘设备之间信号最强的节点为父节点,并自行组网^[1].相较于传统有线组网方式,Mesh 组网无需布线,后续维护少;相较于 WIFI 无线局域网,Mesh 组网更简单、高效,而且去中心化的设计使其不会因中心节点故障造成大量设备脱网;相较于红外射频和 ZigBee(一种短距离无线通信技术)组网,Mesh 组网覆盖范围更广、抗干扰能力更强且兼容性更好^[2].

1 ESP-Mesh 组网

1.1 变电站组网特点

变电站环境下的物联设备联网及其运行要求特点:①变电站的占地面积往往较大,有线网络连接的方式会导致布线复杂、维护困难等问题;②变电站的强电环境和电磁环境较复杂,场地中存在较强电磁干扰,节点与接入点距离越远,受干扰程度越大,信号越差^[3];③组网结构能够在无人监管和维护的情况下保持长期稳定运行.

Mesh 网络具有自动组网和自愈合特性,契合变电站中物联信息可靠接入的需求,当网络故障时,其仍能够保证业务的稳定性.

1.2 Mesh 网络优势

无线 Mesh 网络中的每个节点均可以作为子节点和父节点,整个网络中仅有一个节点与边缘设备相连,其余节点仅需连接已组网的相邻设备即可.这一特性解决了变电站中因各感知节点距离中心节点较远造成的信号不能全面覆盖问题.此外,Mesh 网络具有一定的自愈能力,能够在任意父节点甚至根节点离线的情況下自动重新组网,能够在一段时间后重新上线并发送之前产生的数据,实现真正意义上的网络自愈^[4].Mesh 网络是一种动态网络,因此其能够定期检测网络中各节点的信号强度,并在信号强度变弱的情況下,自动重新组网,自动维护网络层级及其与边缘设备之间的信号稳定^[5].

1.3 ESP-Mesh 简介

ESP32(上海乐鑫信息科技有限公司)是一种微控制单元芯片,其将天线开关、功率放大器、滤波器和电源管理模块等功能集于一体,支持 WIFI 和蓝牙功能,具备强大的计算能力和较高的安全性.本文将 ESP32 作为 Mesh 网络节点,利用其将变电站存量的哑终端变为智能终端,ESP32 Mesh 网络层级结构如图 1 所示.

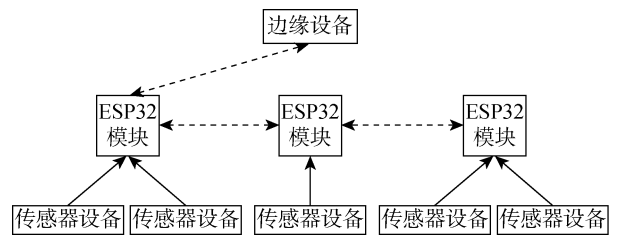


图 1 ESP32 Mesh 网络层级
Fig. 1 Network hierarchy of ESP32 Mesh

2 系统功能实现

2.1 传感器信息采集与传输

ESP32 提供了 40 组通用输入/输出(GPIO)接口,其中包括 I2C 和 SPI 等多种协议接口.乐鑫 ESP-SDK(一个免费开源的软件开发工具包)封装了 GPIO 接口的设置和读写接口:使用结构体 gpio_config_t 对接口进行配置;然后使用 gpio_set_direction(·)函数对 IO 口配置其输入/输出方向;最后使用 gpio_get_level(·)函数读取开关量的电平值.

此外,ESP-SDK 提供了 mwifi_write(·)函数用以传输数据.函数传入时,发送数据的内容、长度和数据类型以及目标地址等参数实现数据透传.为便于业务数据打包和解包,将数据封装为 JSON 格式,其基本结构如下:

```
"{"
  "Node ID": "节点标识"
  "Type": "数据类型"
  "Time": "数据时标"
  "Data": "数据内容"
}"
```

其中:Node ID 为产生业务数据的节点唯一标识;Type 定义业务数据的格式类型,由通信双方约定含义;Time 为数据产生的时标;Data 为业务数据内容,如传感器信息.业务数据内容既可以直接封装上传由传感器设备上传的信息的二进制,也可以按照终端设备协议进行简单解析处理后,仅上传有效数据

载荷的某些部分,从而提升通信效率,减轻边缘设备的协议处理负担.

2.2 ESP-Mesh 组网

Mesh 组网拥有自组网、自愈合、接入快速和稳定性强等特性,支持设备的异步上电和节点的动态加入.其系统能够根据信号强弱,自动选取根节点并重新组网,而不需要断开网络或重新手动配置网络设置.其组网的主要流程如图 2 所示.

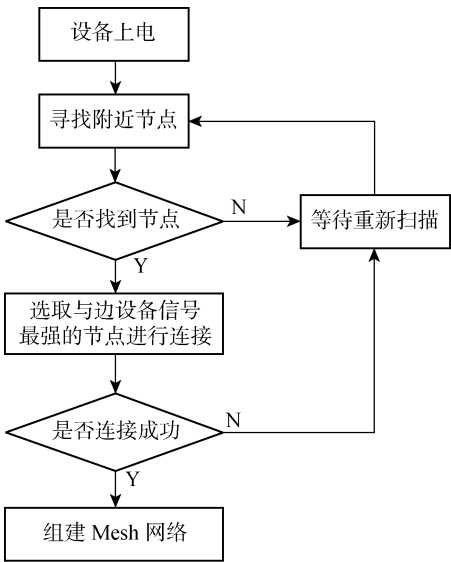


图 2 Mesh 组网流程
Fig. 2 Mesh networking process

2.3 ESP-Mesh 安全性

在 Mesh 网络传输中,默认使用 WPA 预共享密钥(WPA2-PSK)对通信内容进行加密.在实际使用过程中,还可以对业务内容进行 AES-128/AES-192/AES-256 算法加密,确保通信信道上数据的机密性.ESP32 自带硬件级的高级加密标准(AES)加速器,可以有效提升加解密性能.

在 Mesh 组网阶段,利用 AES 算法进行 Mesh 组网密码的加密,防止密钥被窃取;在端设备接入 Mesh 网络后,鉴权端设备的媒体存取控制位址和设备唯一 ID 等身份信息.如果鉴权失败则可以拒绝端设备组网,以防止未授权、过期甚至恶意设备并入本地 Mesh 网络中,从而有效提升 Mesh 网络和联网端设备的安全性.

3 ESP-Mesh 网络性能分析

Mesh 网络虽然可以通过增加汇聚点和调整层内节点个数来控制网状网络的层级数量和节点个数,但其网络性能仍然受制于同频竞争和层级转发等固有不利因素,导致响应速度和丢包率等方面受

到影响.

3.1 多跳网络节点响应时间

对远端同一节点发送 1 K 数据包并统计数据之间返回时的时间差,得到其响应时间.在末端传感器设备与边缘设备之间加入或减少 ESP32 Mesh 节点,组成不同跳数的网络结构,测试在不同跳数下传感器设备到边缘设备之间的的响应时间^[6].每组试验重复 30 次,取平均值后得到 Mesh 节点与其通信目标之间的跳数(n)和响应时间(t)关系,如图 3 所示.可知,当 $n \leq 3$ 时,即使对于大数据包,响应时间依然较短;而当 $n = 4$ 时,即流量经过 5 个设备节点时,响应时间达到 330 ms 左右.因此,在 Mesh 网络组网下,过多的跳数会导致响应时间延长,最终造成通信链路可靠性下降.

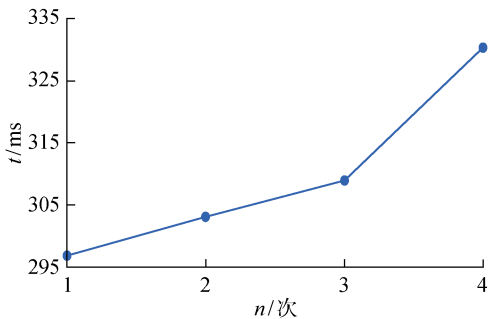


图 3 Mesh 节点跳数与响应时间关系
Fig. 3 Mesh node hops versus response time

3.2 多跳网络节点丢包率

在 Mesh 网络中,除根节点外,其他所有节点与边缘设备之间的通信均需要经过其他节点转发,导致响应时间延长,丢包率上升.不同跳数 Mesh 网络的测试结果如图 4 所示.当 $n = 2$ 时,丢包率极低;但随着 n 值增大,丢包率也逐渐上升.在模拟的测试环境下,当 $n = 6$ 时,丢包率维持在 20% 左右;当 $n = 7$ 时,丢包率快速上升至 30%.丢包率上升,使得网络中存在大量重发报文,通信效率严重下降.

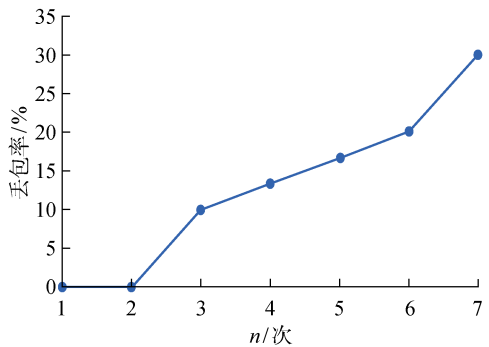


图 4 Mesh 节点跳数与丢包率关系
Fig. 4 Mesh node hops versus packet loss rate

4 结论

本文介绍 Mesh 组网技术,分析其在变电站环境下用于组建传感器物联网的优势.设计并建立变电站内的 Mesh 传感器物联网网络,并通过试验分析其在实际环境中存在的一些问题.具体结论如下:

(1) Mesh 网络在处理规模较大的网络组网时,存在响应时间延长和可靠性下降等问题.对此,可以增加 Mesh 网络汇聚点和单层节点数,改进传输协议引入排序方法的优化,以及在物理距离较近的设备之间使用蓝牙 Mesh 网络组网等方式予以解决或缓解^[6-8].

(2) 针对变电站中的终端设备,相较于传统的有线组网和 WIFI 组网,Mesh 组网更灵活、方便,建设和维护投入均较少,易于部署和扩展,使用功耗低等特点,能够更好地满足变电站无人值守、电磁干扰性和地域范围广的实际情况.此外,Mesh 网络具有自组织、自愈合的动态适配能力,可以应对单节点和心节点故障,可以满足变电站物联信息汇聚需求,应用前景广阔^[9-10].

参考文献:

- [1] 杨峰,黄俊,罗小华.无线 Mesh 网络综述[J]. *广西通信技术*, 2009(2): 12-14.
YANG Feng, HUANG Jun, LUO Xiaohua. Overview on wireless mesh networks[J]. *Guangxi Communication Technology*, 2009(2): 12-14.
- [2] ZHAO Z H, WU X X, ZHANG X, *et al.* ZigBee vs WiFi: Understanding issues and measuring performances of their coexistence[C]// *2014 IEEE 33rd International Performance Computing and Communications Conference*. Austin, USA: IEEE, 2014: 1-8.
- [3] 马鸿娟,涂新奇,贾寅森,等.变电站 4G 传输安全电磁干扰研究[J]. *南京师范大学学报(工程技术版)*, 2019, 19(4): 38-43.
MA Hongjuan, TU Xinqi, JIA Yinsen, *et al.* Research on safety electromagnetic interference of 4G transmission in substation[J]. *Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition)*, 2019, 19(4): 38-43.
- [4] 沈强,方旭明,宋文.无线 Mesh 网络路由协议研究

[J]. *数据通信*, 2005(4): 30-33.

SHEN Qiang, FANG Xuming, SONG Wen. Investigation on routing design for wireless Mesh networks [J]. *Data Communications*, 2005(4): 30-33.

- [5] 蒋小奎.无线网状网与协作中继技术[J]. *中兴通讯技术*, 2008, 14(2): 21-24.

JIANG Xiaokui. Wireless mesh networks and cooperative relaying technologies[J]. *ZTE Communications*, 2008, 14(2): 21-24.

- [6] 杨路,李玉洁,王诗言,等. WMN 中的干扰避免部分重叠信道分配算法[J]. *计算机工程与设计*, 2020, 41(2): 301-306.

YANG Lu, LI Yujie, WANG Shiyan, *et al.* Partially overlapping channel based interference-avoid channel assignment algorithm for wireless mesh networks[J]. *Computer Engineering and Design*, 2020, 41(2): 301-306.

- [7] 唐孝舟,翟剑华,王建锋,等. 蓝牙 5.0 mesh 组网技术及其在光伏电站中的应用[J]. *电力工程技术*, 2019, 38(6): 31-36.

TANG Xiaozhou, ZHAI Jianhua, WANG Jianfeng, *et al.* Bluetooth 5.0 mesh technology and its application in photovoltaic power station[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2019, 38(6): 31-36.

- [8] 彭艺,李启骞,朱豪,等.一种基于排序蚁群算法的无线 Mesh 多径路由协议[J]. *通信技术*, 2020, 53(3): 634-640.

PENG Yi, LI Qiqian, ZHU Hao, *et al.* Wireless mesh multipath routing protocol based on sorted ant colony algorithm [J]. *Communications Technology*, 2020, 53(3): 634-640.

- [9] 石治国,高爱国.无线 Mesh 网络在遥测传输中的应用[J]. *兵工自动化*, 2020, 39(4): 53-56.

SHI Zhiguo, GAO Aiguo. Application of wireless mesh network in telemetry transmission [J]. *Ordinance Industry Automation*, 2020, 39(4): 53-56.

- [10] 洪耀球.基于无线 Mesh 网络的城市环境监测系统研究[J]. *现代信息科技*, 2020, 4(4): 194-196.

HONG Yaoqiu. Research on urban environmental monitoring system based on wireless mesh network [J]. *Modern Information Technology*, 2020, 4(4): 194-196.

(本文编辑:孙伟)