

无线传感网络在预装式智能变电站中的应用设计

张 雷，徐大可

(南京国电南自城乡电网自动化工程有限公司，江苏 南京 211100)

摘 要：通过无线传感网络实现预装式智能变电站内各种设备的状态监测，如智能变压器、智能断路器和开关柜的局放、温湿度、油色谱、机械特性以及微水密度等，选用 IEEE802.15.4 作为私有无线传感网络协议并通过 NXP JN5148 芯片来实现，同时中心节点采用 Samsung S3C2440A ARM9 MCU 来实现整预装式智能变电站状态监测与控制。对典型 35kV 预装式智能变电站中的无线传感网络应用进行设计并评估其实际效果，实现的无线传感网络满足预装式智能变电站状态监测对通信传输的需求。

关键词：无线传感网络；预装式智能变电站；状态监测

0 引言

预装式智能变电站^[1-2]是在不降低稳定运行可靠性的条件下，采用先进的设计理念，将智能一次设备、智能二次设备及其配套设施与土建进行紧凑化、小型化、智能化以及经济化的一体化设计，预装于同一箱体内，它是传统箱变的发展方向，也是传统配网变电站的发展方向。箱变集中在 10kV 及以下的配电终端，预装式智能变电站主要是 35kV 及以上的配电网，与传统变电站相比，它具有占地面积小，投入运行周期快、免维护、外观与环境协调、可深入负荷中心等特点。

为了进一步减少预装式智能变电站的大量电缆的施工量、降低整体成本及其占用面积，给无线传感网络^[3-7]带来新的机会。无线传感网络通过无线通信、低功耗技术以及嵌入式技术的融合，将各种传感信息量都通过无线传感网络进行实时监控，在预装式智能变电站中，将各种设备的状态监测与部分控制纳入到无线传感网络中进行，它具有低成本、低功耗、网络容量大、安全、短时延等特点。

本文以 35kV 预装式智能变电站为例进行设计，

在其他电压等级的预装式智能变电站的设计与本文类似，采用 NXP 公司的 JN5148 芯片来实现 IEEE802.15.4 无线网络协议栈，将所需监测的传感状态数据挂接在该无线传感网络来实现整站状态信息的监测与控制。

1 预装式智能变电站与无线传感网络典型设计

1.1 预装式智能变电站典型设计

35kV 预装式智能变电站典型设计由 35kV 配电室、主变压器室、10kV 配电室和综控室组成（见图 1），采用 35kV 电缆进线和 10kV 电缆出线。35kV 配电室主要由 35kV 开关柜组成，开关柜集 35kV 智能断路器、35kV 智能隔离开关、PT、CT、氧化锌避雷器以及保护装置等设备于一体；主变压器室由智能变压器和散热装置等设备组成；10kV 配电室由无功补偿系统、10kV 开关柜以及直流屏等设备组成；综控室由远动、综自、通信等组成。

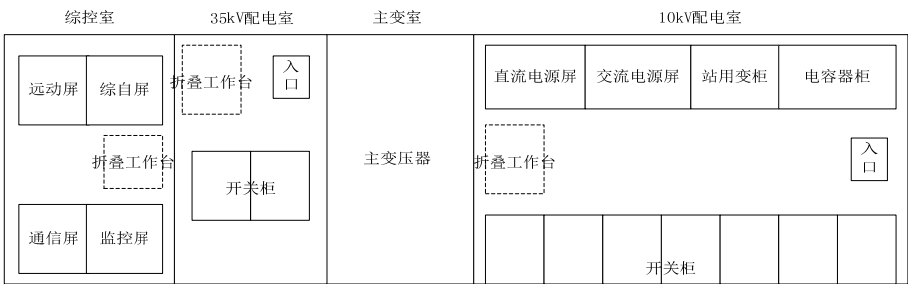


图 1 35kV 预装式智能变电站典型设计平面图

变电站电气主接线的方式影响着 35kV 预装式智能变电站的典型设计,同时影响到需要在线监测的设备状态信息数量,本文以图 2 的电气主接线图进行设计,需要监测的信息量主要包括室内环境状态信息、变压器各种状态信息、断路器各种状态信息、开关柜内的各种状态信息、无功补偿的各种状态信息、视频图像信息等。

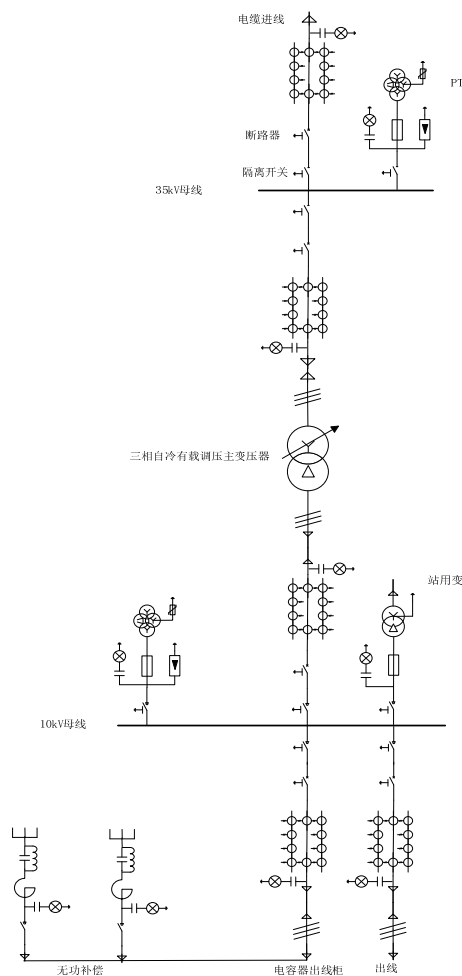


图 2 35kV 预装式智能变电站典型设计电气主接线图

1.2 无线传感网络典型设计

无线传感网络采用无线进行传输,因无线信号传输的不确定性^[5],其可靠性比有线光纤传输差,又因无线传感网络时延包括空中信息传输的时延、编码解码以及调制解调的时延,同等距离下,其时延比光纤或网线传输长。因此,用于继电保护控制的信息量和控制量还不适合放在无线传感网络中进行传输,但是智能变电站辅助监控系统的绝大部分设备的状态监测信息量都可以放在无线传感网络上进行传输。

物理层和MAC层采用IEEE802.15.4 协议^[4,8],网

络以及应用数据直接建立在该协议之上,不增加网络层,目的是为了减少控制的环节、增加数据吞吐量和减少时延。35kV预装式智能变电站箱体的长度一般在 15m左右,对无线传感网络来说,该通信距离比较小,网络拓扑的层次只需两层即可(见图 3),无需路由节点作为无线路由中继,第一层只有唯一的网络节点,即中心节点,负责网络的建立、维护以及上位机的通信,第二层由若干终端节点组成,每个终端节点负责一个或多个传感信息量的采集与传输。协议数据采用 2.4GHz免许可频段作为无线通道。

中心节点布置在综控室内,终端节点紧靠需要采集状态信息的设备布置。

2 基于嵌入式技术的中心节点控制单元与终端节点控制单元

2.1 中心节点控制单元设计

采用模块化设计理念,对中心节点进行设计,将其主要分为中心处理模块、无线传感通信模块、电源模块、上位机接口模块、LCD 显示模块,参见图 4。

中心处理模块采用 32 位 RISC 微处理器,该 MCU 选用 Samsung S3C2440A ARM9 CPU,配套 NOR Flash、NAND Flash 和 SDRAM 三种存储器,用于程序和数据存储以及为程序的运行提供内存空间。该模块主要处理来自上位机的数据配置、响应控制命令等,同时将来自无线传感通信模块的传感数据封装成 Modbus 的数据帧上送给上位机,也负责传感信息数据的处理。在该 ARM 芯片上运行 Linux 操作系统,对 Linux 操作系统进行裁剪以满足接口和最小化程序系统的要求,应用程序以线程的方式在 Linux 操作系统上运行。

无线传感通信模块(电路图参考图 5)采用 NXP 公司的 JN 5148 芯片,该芯片用于处理 IEEE802.15.4 协议栈,负责无线信号的编码与解码、调制与解调,天线采用 50 Ω 匹配的天线, UART0 与 Samsung S3C2440A 的 UART 引脚对接。该模块负责无线信号的发送与接收,所发送和接收数据的格式采用 IEEE802.15.4 协议的帧格式,将来自中心处理模块的数据或控制命令封装成空口帧,发送给终端节点,同时接收的无线信号经解码后得到数据,该数据通过 UART 接口送往中心处理模块。

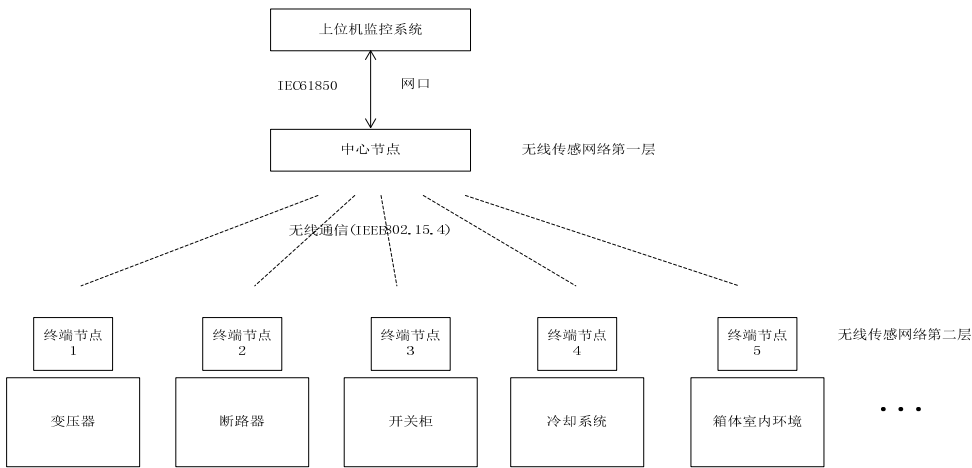


图3 无线传感网络层次拓扑图

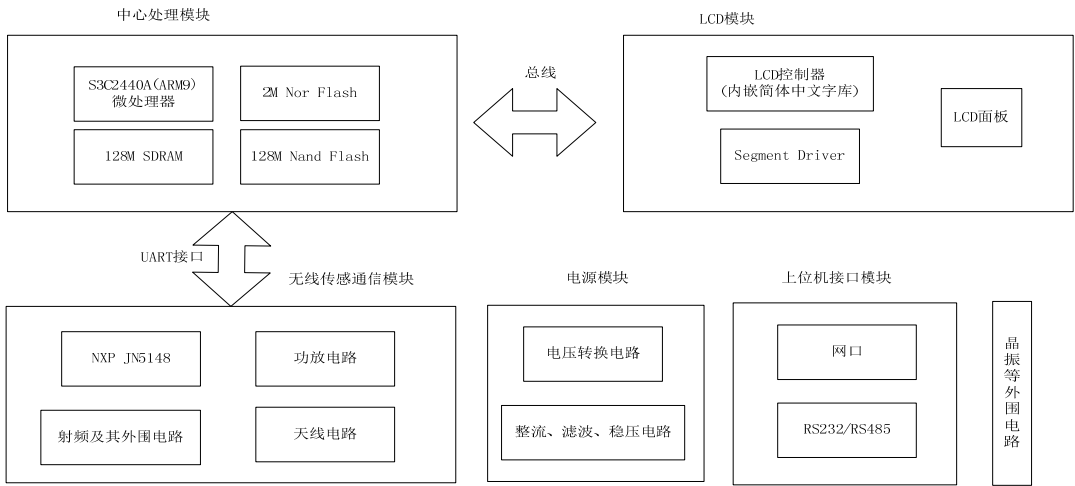


图4 中心节点模块化硬件设计

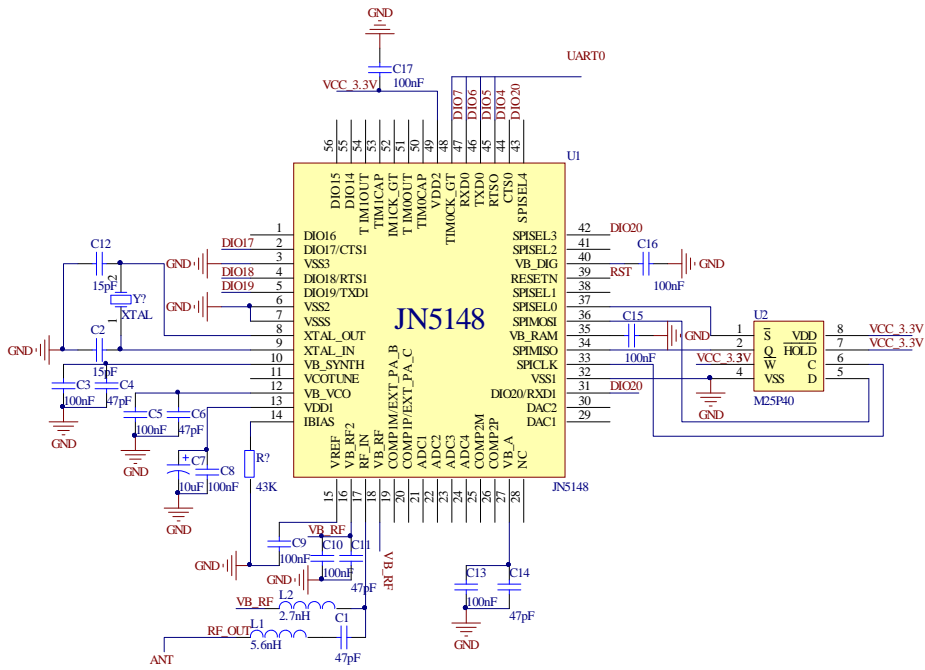


图5 无线传感通信模块电路原理图

电源模块给各个模块提供稳定的电源，提供一对端子接 220V 交流电源，经过电源变压器进行电压转换后，经整流、滤波和稳压处理，提供稳定的 24V 直流电源，同时提供 24V 直流电源接口，将 24V 直流电源经过降压、稳压等处理给各个元器件供电。

上位机接口模块提供以太网接口和 RS232/RS485 串行接口，通过该接口与上位机监控系统通信。

LCD 显示模块采用 4.3 寸 TFT LCD 液晶屏幕，通过 SITRONIX 公司的 ST7920/ST7921 芯片组合实现 LCD 控制器来驱动液晶屏^[12]，与 S3C2440A 通信的引脚从 ST7920 芯片上引出。

2.2 终端节点控制单元设计

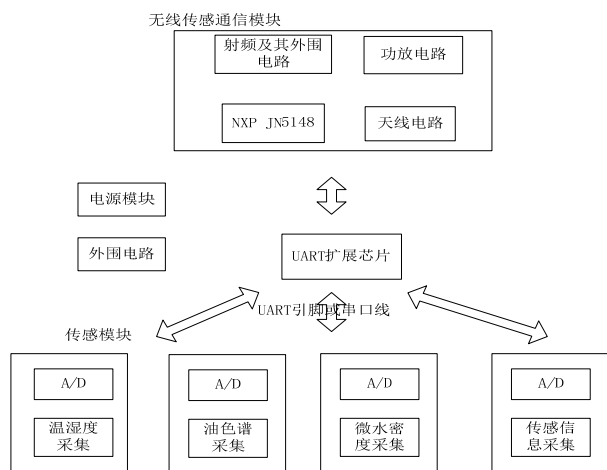


图 6 终端节点模块化硬件设计

终端节点负责传感数据的收集与发送，同时接收来自中心节点数据与控制命令，该节点控制单元（见图 6）采用模块化设计理念，将传感信息采集与无线传输分开，主要包括无线传感通信模块、传感模块和电源模块。一个终端节点可能承载着多个状态信息的采集与传输，JN5148 只有 2 个 UART 引脚，需要对 UART 引脚进行扩展，使其支持 4 或 8 个 UART 引脚，采用的扩展芯片是 FOSVOS 公司的 VK3214 芯片。无线传感通信模块的硬件设计与中心节点相同，用该模块的 CPU 作为整个控制单元的 CPU，其 UART0 引脚接在 VK3214 芯片上；传感模块由将信息量转化为电信号部分、信号放大电路、A/D 等组成，该传感模块可以单装置的形式存在，通过串口线接到终端节点的串行接口上，也可直接通过 UART 引脚接在 VK3214 芯片上。

预装式智能变电站内需要对智能变压器、断路器和开关柜的局放、温湿度、油色谱、机械特性以

及微水密度等状态的进行实时监测^[9-10]，同时需要对室内环境温湿度、空气质量以及视频安防等进行监控，不同的状态信息量需要采用不同传感采集装置或模块，该传感采集部分将通过 UART 引脚或串口线与无线传感通信模块对接。

3 控制单元软件设计

3.1 中心节点控制单元软件设计

3.1.1 中心处理模块软件设计

该模块负责无线传感网络中所有终端节点下状态监测的显示、告警处理、操作日志记录、历史数据存储等，同时负责与上位机的通信。

中心处理模块与上位机采用网口通信，发送和接收都采用 Modbus 协议，在该协议的负荷数据上承载的是 Modbus^[11] 格式的报文，其发送和接收报文的流程图参见图 7。一方面，接收来自上位机监控系统发来的 Modbus 帧，根据接口协议解码后得到命令数据，如果命令控制对象为中心节点，则根据命令控制做相应的控制操作，并记录操作日志，否则将命令发送到终端节点；另一方面，来自空口的数据经过无线传感通信模块后，通过 UART 接口达到中心处理模块，该模块对该内部数据报文进行解码，根据传感数据的类型进行分类处理，超过配置的告警值并超过波动范围时，进行告警，当数据存在变更时，也需上报，除了数据变更的上报外，还存在周期性的上报，上报周期可从上位机配置。

3.1.2 无线传感通信模块软件设计

中心节点上的该模块负责无线传感网络的建立与维护（见图 8）、无线信号的发送与接收以及 IEEE805.15.4 协议栈的处理。

在无线传感网络的建立与维护中，涉及到信道的选择^[6]，即在哪个信道上建立无线传感网络，本设计采用信道扫描后，根据信道质量优先来选择信道，在所有信道质量相差不超过 30% 的时候，优先选择信道 15、25 和 26，这三个信道可以完全避开 WIFI 和 Bluetooth 对 ISM 2.4G 频段的占用干扰。

3.2 终端节点控制单元软件设计

终端节点上的传感模块可独立存在，由传感模块将变压器、断路器和开关柜等设备需要采集的状态量转换成数字量通过 UART 接口传输给无线传感通信模块，无线传感通信模块采用 10ms 定时器进行周期性发送，帧长控制在 127 字节，带数据负载

能力为一帧 80 字节，将状态监测的数据按照 IEEE802.15.4 协议的帧格式封装进行发送，其发送与接收数据帧的流程图参见图 9。

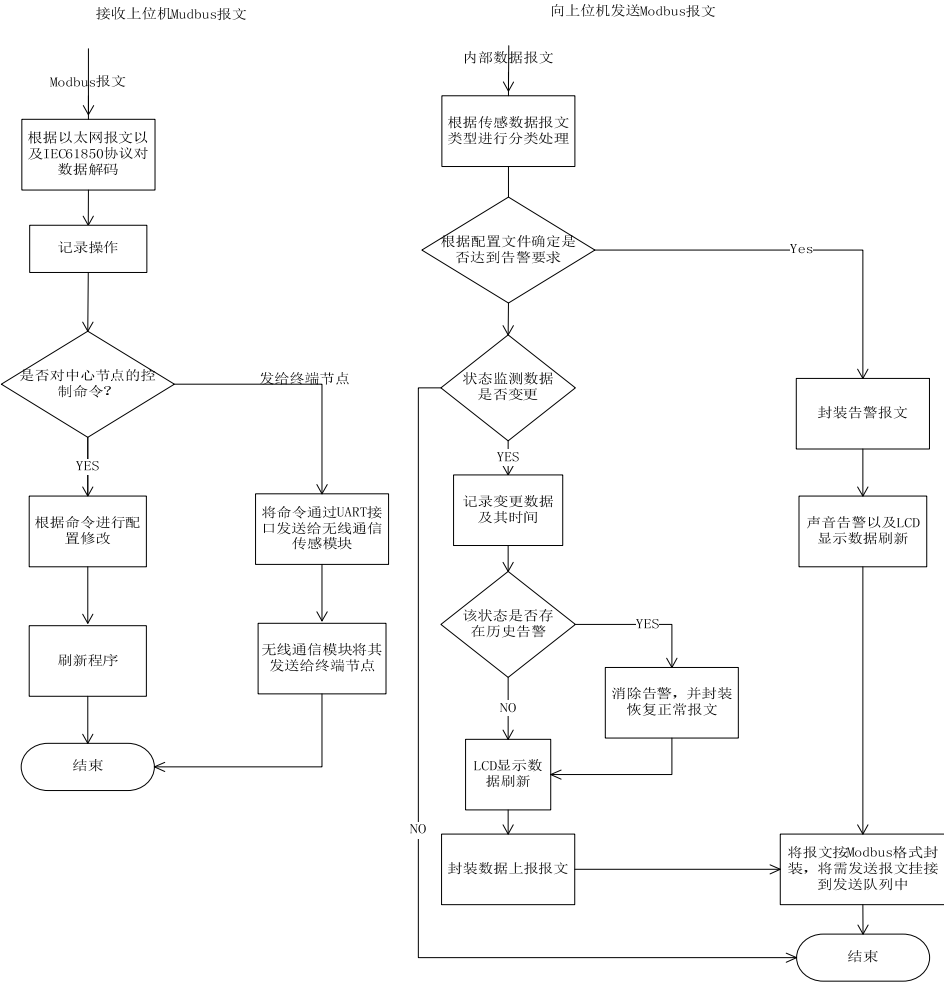


图 7 中心节点与上位机通信软件流程

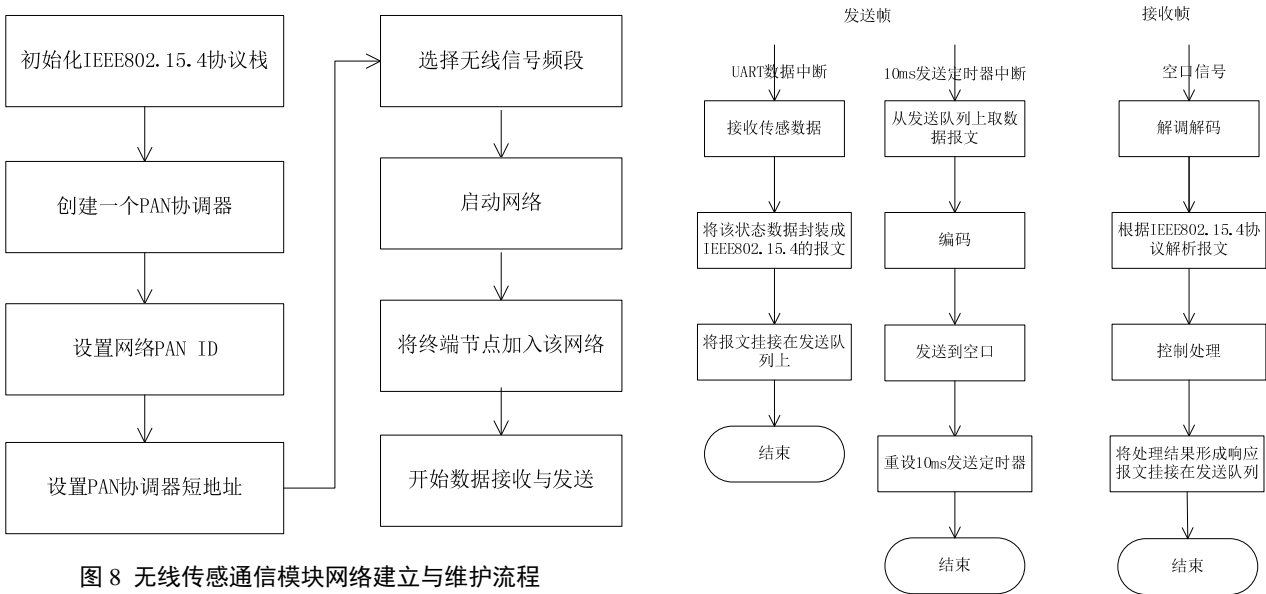


图 8 无线传感通信模块网络建立与维护流程

图 9 无线传感通信模块发送与接收帧流程

4 实际效果分析

在预装式智能变电站箱体中进行实际测试运行，箱体为钢筋混凝土结构，它对 2.4G 无线信号的吸收能力比较强，中心节点和终端节点都采用 3dbm 的发射功率，不开功放，天线采用 6dbi 增益的全向天线，将中心节点布置在箱体的综控室内，终端节点根据测试要求放在各个隔室内或箱体外。

对可靠传输距离进行实际评估，中心节点固定，移动终端节点使两者距离为 5m 的倍数，节点双向收发，每 10ms 发送一帧 127Bytes 的满帧数据，统计传输时间为 2h，即 72 万次数据传输，统计实际丢包率（见图 10），不计算重传次数。在离中心节点 30m 内的通信，丢包率非常低，而预装式智能变电站整体长度也就在 15m 左右，能满足其对状态数据传输的要求。

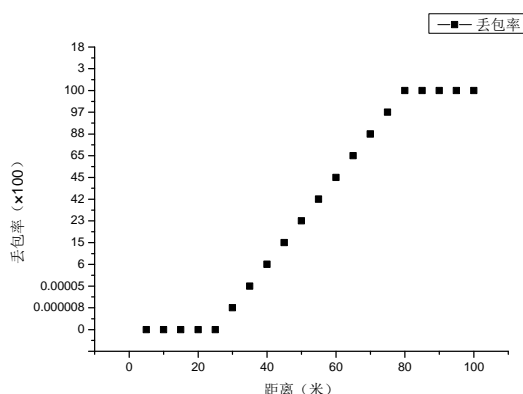


图 10 不同距离下节点通信的丢包率统计

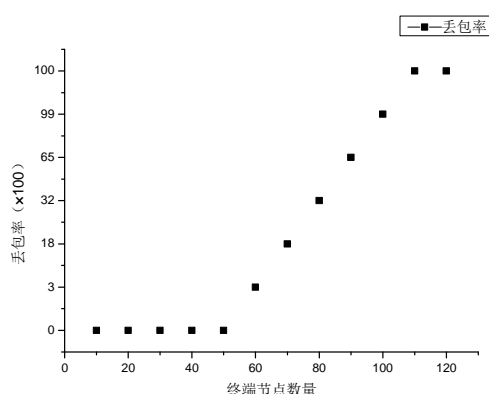


图 11 不同终端节点数量下节点通信的丢包率统计

对网络容量节点数进行实际评估，因传感数据通常都只有几个字节，因此假定每个节点传输数据一次为 20Bytes，传输周期为 1s，统计网络中终端节点数量为 5 的倍数的情况下的丢包率（见图 11），

在预装式智能变电站对终端节点的需求量一般不超过 50。

对网络总流量进行实际评估，理论流量与帧格式和其所使用的编码方式 QAM16、QAM64 或 QPSK 等相关，本设计中取 O-QPSK 方式，理论流量在 250kb/s，但是除去开销实际携带数据的能力在 110kb/s 左右，预留 20kb/s 的余量，所以实际设计时，所有终端节点网络流量之后要不超过 90kb/s，如果超过了，则可能出现网络拥塞而导致丢包率增加、时延变长，需要增加中心节点和新增的无线网络来承载。

对网络传输时延的实际评估，在中心节点发送环回报文，由终端节点收到后，发回给中心节点，多次测试平滑抖动，实际传输时延大约在 50ms 左右，实际应用中还需要增加中心节点与上位机交互的时间和终端节点与传感采集装置交互的时间，因此其时延性能比有线要差，一旦有丢包数据重传，时延将更长。

根据上述测试结果可知，无线传感网络在预装式智能变电站中能够满足状态监测对传输可靠性的要求，但是不可避免存在丢包可能性，尽管概率很低，但是比有线传输要高很多，而且时延性能也较差，因此对于用于继电保护的电压、电流和开入开出等不能放在该无线传感网络进行传输，以避免丢包所导致的不及时动作。

5 结束语

阐述了无线传感网络在预装式智能变电站中状态在线监测的应用设计，该设计满足了状态数据对通信的要求，实现了数据通过无线传感网络进行传输，克服了有线成本和布线施工的烦恼，可有效提高预装式智能变电站内设备的紧凑性，提高其应用价值。

参考文献：

- [1] GB17467-2010 高压/低压预装式变电站[S].2010.
- [2] 刘振亚.智能电网技术[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [3] Jun Zheng,Abbas Jamalipour, Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective [M].Wiley-IEEE Press, 2009.
- [4] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) [S].2011.

- [5] Meguerdichian, S., Koushanfar, F., Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks [J]. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE, 2001(3):1380-1387.
- [6] MacLeod, H., Loadman, C., Experimental studies of the 2.4-GHz ISM wireless indoor channel [J]. Communication Networks and Services Research Conference, 2005(3):63-68.
- [7] Robert Faludi, Building Wireless Sensor Networks: with ZigBee, XBee, Arduino, and Processing [M]. O'Reilly Media, 2010.
- [8] Holger Karl, Andreas Willig, Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks [M]. Wiley-Interscience, 2007.
- [9] McArthur, S.D.J., Strachan, S.M., The design of a multi-agent transformer condition monitoring system [J]. Power Systems, IEEE Transactions, 2004(4):1845-1852.
- [10] Han, Y., Song, Y.H., Condition monitoring techniques for electrical equipment—a literature survey [J]. Power Delivery, IEEE Transactions, 2003(1):4-13.
- [11] MODBUS over Serial Line Specification and Implementation Guide [S]. 2006.
- [12] 孙永林, 王贵恩, 郭志锋. LED 屏开发实训教程 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

作者简介:

张 雷 (1982-), 男, 江西九江人, 硕士, 从事无线传感网络和预装式智能变电站产品研发, E-mail: leizhang.cv@gmail.com;

徐大可 (1973-), 男, 江苏南京人, 博士, 从事智能电网技术产品研发与管理, E-mail: xdk@sac-china.com。