基于WIA-PA无线技术在智能配电网移动终端巡检系统中的应用研究

智能配电网监测设备种类繁多，设备状态监测、环境状态监测、安全监测等都需要大量的传感器等监测设备。传统有线的方式连接每个监测点显然不符合智能化发展需求，布点布线都会受到地理位置的限制，无线技术为首选方式。移动巡检终端通信模块的无线传输效率、组网及巡检是难点所在。故采用工业无线（WIA-PA）方式应用于智能配电网移动终端巡检系统中，分层的体系架构、混合组网架构、逐跳多径路由协议和空间角度定位方法等技术，提高了通信系统数据传输效率，降低敷设成本，并能准确定位巡检人员位置信息，保证人员安全。

李峰 张海峰 姚安川 李晓冬/国网山东省电力公司德州供电公司

李峰/工程师

关键词/Keywords
无线·
配电网·
巡检·
移动终端·

0 引言

随着配电网规模的扩大化和智能化的提升，物联网传感技术覆盖配网领域的每个角落，各种类型传感器实时监测设备及环境的状态，通过高效的无线通信技术手段上传采集信息，准确的定位手段，保证巡检人员安全。随坏随报，随检随修，提升配网系统的自主分析、预警、自愈及灾害预防能力。通过算法及协议的改进，提升无线传感网性能，充分发挥其优势，有效提高配网事故处理响应时间，提升运维和管理水平。

1 智能配电网多类移动终端应用需求

智能配电网需要对系统内各个环节的设备信息进行监控，传统的设备已经不满足智能电网的要求，需要采用以光纤感应器为代表的新型反映设备对电力系统设备进行全方位监测。物联网技术体系分为感知层、数据采集层、网络层技术和应用层技术组成，数据采集是感知延伸层的重要功能。数据采集层采集的数据主要分为环境状态监测、设备状态监测、防盗监测。对配网电气设备(开闭所、环网柜等)的环境监测包括配网环境温湿度监测、配网设施水浸状态监测、配网设备噪声监测、配网环境氧含量监测、配网环境烟雾监测、配网设施视频监控。配电终端应用对象主要有开关站、配电站、前置环网装置、配电变压器、配电线路等。主要包括配电终端监测、设备温度监测、杆塔倾斜监测、避雷器泄漏电流监测、配电变压器运行数据综合监测、配网线路故障监测。在环网柜、分支箱、箱式变压器门上安装门磁传感器，实现对柜门打开次数和打开时间的实时监测。传感器采集配电设备的运行环境数据和运行状态数据，然后通过自身的无线通信模块传输到就近的短距离无线传输中心汇聚节点，通过多个汇聚节点组成的自组织网络传输到数据传输基站，最后传入配网后台主站系统。

配网巡检人员通过移动数据终端读取设备采集数据，并通过无线方式和后台主站双向互动。移动数据终端是一种手持式小型数据处理设备，具有灵活、可靠、便携等特点，通过无线通信功能模块，广泛应用与配网抢修业务中。巡检工作主要流程如下：巡检人员手持PDA设备，PDA终端通过无线方式下载后台管理系统中的巡检任务，任务下载到PDA上面后，工作人员带到现场进行工作处理，对现场不合格项进行拍照，快速扫描定位单元，并断定巡检结果，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

现场处理的所有数据集中到PDA，再通过无线方式上传到PC上。

巡检的点及内容越来越丰富，传感器种类不断增加，如果采用有线固定方式进行巡检，明显不符合实际需求，因此PDA移动终端应用于巡检系统中是发展现状的首选解决方案。

2　WIA-PA工业无线通信技术

目前配电网监控采集信息传输的通信手段主要有光纤、公网无线和电力无线专网等。由于配网工作环境特殊，接入点繁多，实现智能化工作量非常大，投入极高。如果采用光纤等有线方式连接，布线布点位置很难确定，线缆走位复杂，无法实现配网的灵活组网性能；而公网无线数据传输速率低，安全性较差，对电力系统来说是不可取的；无线专网虽然满足安全性能，但是仅为配电网敷设一套无线专网设备，从成本角度考虑略有浪费。综合考虑，采用低成本、高传输速率、有限范围内无缝覆盖的WIA-PA无线通信技术是首选方案。

WIA-PA是基于IEEE 802.15.4标准的用于工业过程测量、监视与控制的无线网络系统。为了满足我国工业需求而推出的具有自主知识产权的技术，是面向设备间短程、低速率信息交互的无线通信标准。由于使用了扩频通信、多跳路由、mesh组网等技术，具有强抗干扰能力、超低能耗、实时通信等特征，适合在电网这种恶劣的工业现场环境中使用。

WIA-PA系统主要工作在433 MHz、470 MHz等低频段，采用星形和网状相结合的两层网络拓扑结构，实现手持设备、网关设备及后台主站之间的互联互通，传输的可靠性可以达到99%以上。WIA-PA网络主要具有以下三大特点：

1）基于IEEE 802.15.4协议体系，使其物理层和MAC层遵循其规范，网络层、数据链路层及应用层可以根据采用的协议自行定义，使其具有协议兼容性。

2）混合型拓扑结构，上层为网状结构，由网关和各采集器构成，下层为星形结构，由采集器和各种采集终端组成。这样采集终端不必选择传输路径，一跳即可将采集信息传给采集器，克服了网状拓扑的延迟性，上层利用网状结构的灵活性和多路径抗干扰能力，平衡了无线传输的确定性和可靠性的矛盾。

3）混合的管理模式，采用集中式管理和分布式管理相结合的管理模式。集中管理由网络管理者和安全管理集中完成，直接管理网关及采集器等现场设备。分布式管理由网络管理和安全管理共同完成，并把管理权限下放给路由设备。这样客服了全网状结构的网管集中管理的弊端，便于长期可靠运行维护。

3　基于WIA-PA技术的配电网移动巡检系统通信架构

智能配电网系统架构一般由感知层、网络层和应用层组成，如图1所示。感知层由大量的移动

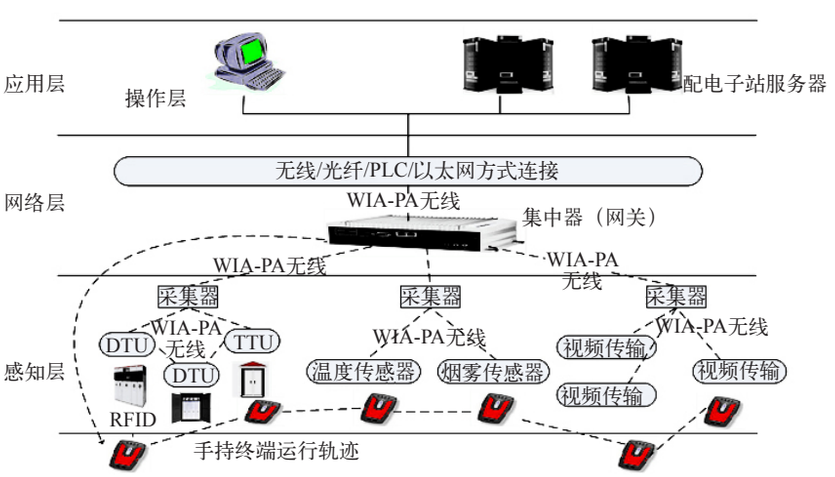

图1　基于WIA-PA技术的配电网移动巡检系统通信架构

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

手持终端、监控单元和采集器组成。移动手持终端是带有WIA-PA无线通信功能的终端，当值人员在巡检开始进行情况登入和迁出，从集中器通过无线下载任务工单，按照巡检任务路径对每个监控单元信息进行读取，对抢修业务信息实时反馈给后台主站，并能智能化下发简单的抢修方案，如热启动、升级等操作。配电网设备（开关站、环网柜和柱上开关等）及环境状态监测依靠性能好的传感器，监测设备的模拟量值、开关量值及周围的动力环境，采集信息上传到采集器，设备的基本固有信息通过RFID直接由移动终端读取，网络拓扑、计算分析和地理位置等相关信息通过WIA-PA方式传到移动终端，帮助巡检人员排除故障、恢复正常供电。每个采集器只负责管理附近的监控单元，并与其进行信息交互。监控单元的增加或减少都会引起网络的变化，WIA-PA网络具有mesh网络路由机制，提供一种自组织、自治愈功能，应对这种应用条件和动力环境的变化，保持网络性能的可靠性和稳定性。网络层主要由集中器（网关）及远距离传输设备组成，负责采集信息的集中及远传。集中器类似于整个网络中的警察，它起到承上启下的关键作用，既能指导巡检工单及智能决策的下发，也能将采集的信息实时上传到配电子系统后台。应用层主要指配电子站系统，监控配网电能质量及供电水平，并通过操作台可以实时查看现场巡检状况，远程下发决策手段，使巡检效率得到提高。

4 基于WIA-PA技术的配电网移动巡检组网方式研究

针对配电网络超大规模、高可靠、高实时和低能耗的要求，建立了工业无线网络总体通信框架，针对工业无线网络分布式、大规模的特点，以及高可靠、高实时和低能耗的性能要求，设计了mesh+star结构体系，不但可以提高网络的可扩展性，而且降低了管理和维护开销；该体系结构支持了WIA-PA国家标准和IEC国际标准的制定，并已被IEEE 802.15.4e所采纳，并设计了实现簇内通信和簇间通信的超帧结构，提出了一种逐跳多径路由模式。在此基础上，针对大规模工业无线网络规划困难，以及传输调度算法设计缺乏理论指导的问题，分析了mesh+star混合结构的无线网络完成配网通信所需通信资源的下限。

（1）mesh+star混合拓扑结构

针对具有确定性性能需求的大规模工业应用，提出了网状及星形混合的工业无线网络体系结构，具体包括：

第一层为星形（star）（mesh）网络，由采集器和传感器节点构成；传感器监测节点之间不直接通信，传感器节点只和一个采集点通信。

第二层为网状（mesh）网络，由采集节点和网关节点构成；采集节点至少和一个传感器节点通信，采集节点和汇聚节点通信，或者采集由节点至少和一个其他采集节点通信。

（2）扩展超帧结构

对应于mesh+star混合拓扑结构，本文研究的通信组织方式基于IEEE 802.15.4—2006超帧，并对其进行了扩展。扩展的超帧将IEEE 802.15.4—2006超帧非活动期的时隙用于簇内通信、簇间通信以及休眠，如图2所示。

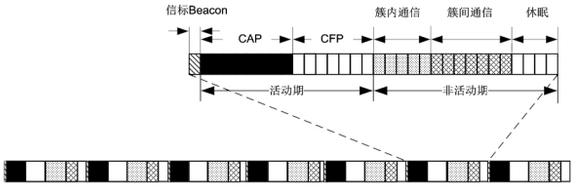

图2 超帧结构

（3）逐跳多径路由

现有的路由协议大都是针对无线Ad Hoc网络。在Ad Hoc网络中，节点的移动性会导致网络拓扑频繁变化，而多径路由可均衡网络通信负载，提高报文转发的可靠性，增强网络的容错能力，所以用于配网工业监测的无线传感器网络可采用多径路由，以解决链路不可靠等问题。

PHMP以MintRoute为基础，重点改进了链路质量估计模块和选路模块，使每个节点都可通过多条路径将报文转发给下一跳节点。在实时链路质量估计模块的帮助下，如果一条路径断开或者质量下降，就立即切换到其他路径。与已有工作相比，PHMP的特点在于：①端到端的多径需维护

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

全局路由状态，每个节点进行大量的路由广播来传递路由信息，而PHMP采用逐跳多径，使节点只需本地维护到下一跳节点的路径信息，大大减少了路由存储和广播的数量，从而达到减少路由开销的目的，而且可大大提高路由的可靠性；②在选路标准上摒弃了传统的最小跳数，而采用期望传输次数(ETX)，提高了路径的可靠性；③在链路质量估计方面，综合利用定期估计器和实时估计器，降低了链路质量估计开销，增强了系统对链路质量变化的快速反应能力；④在进行路由选择时，根据QoS需求，在路由性能(如吞吐量和实时性)和节点能耗的均衡性之间进行折衷，从而在不影响应用需求的情况下尽可能地延长网络的生存时间。

5 基于WIA-PA技术的配电网巡检移动终端定位方式研究

配网巡检系统包括主站服务器，网络层通信网关，多个无线监测点、采集点，手持移动终端。手持移动终端为手持设备，用于工作人员站内巡检与检修时系统内智能无线装置的参数配置、数据查询与监听、现场调试与巡检登记，也可以用于无线基准点（采集点AP）的参数配置、校准以及无线AP的无线访问。本文采用空间四点定位法、采样测速法和加权平均值法建立数学模型准确定位站内工作人员以及持手持设备的巡检人员的空间坐标，从空间角度监测工作人员的位置，结合手持设备的功能实现配网系统内巡检定位网络化，保证工作人员不仅远离地面危险区域，而且远离空间危险区域。

如图3所示，基于WIA-PA技术的无线移动定位系统及其方法用于巡检人员准确定位及通过手持终端预警。主站服务器与数据通信网关安装在控制室内，无线天线引出控制室固定在控制室外屋顶。无线基准点均匀布设在配网系统内的绝缘杆体、建筑物以及门型钢结构上，地面层无线基准点安装距离地面1.5 m处，高空层基准点安装在门结构顶端横担处，采用高能锂电池供电。无线AP均匀分布监控设备上，每三个间隔区域配置一个无线AP，采用控制柜电源或太阳能供电。

移动定位基准点与无线AP安装后向周围发送

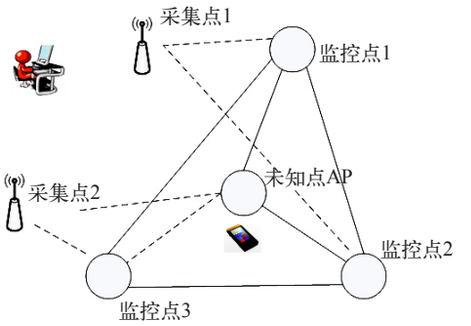

图3 配网移动终端无线定位系统网络结构图

广播信号，移动定位基准点与区域内RSSI最大的无线AP组成区域簇，无线AP与通信网关组成mesh或star网络。移动定位基准点加入区域簇后与区域无线AP信息交互，无线AP记录簇内子节点地址并建立邻居列表，将簇内子节点地址上传至主站服务器，主站服务器根据初始安装时记录的节点坐标建立站内空间模型。

无线基准点采用休眠唤醒工作方式，每30 s与无线AP进行心跳信号交互，每10 min与无线AP进行时间同步校准，无线AP每5 s向区域簇内发送广播信号，探测是否有移动节点进入，无线AP每10 min与通信网关进行时间同步校准。

手持巡检人员进入巡检区后，移动定位与预警节点或手持移动终端每2 s发出一次心跳信号，无线AP监测到移动定位与预警节点或手持移动终端进入区域则唤醒区域内无线基准节点停止休眠唤醒模式进入工作模式进行移动节点定位。

移动节点进入移动定位区域后无线基准节点与移动节点进行信息交互计算时间同步误差，并将无线基准节点与移动节点的RSSI信息、与时间同步误差信息通过AP上传至站控层服务器，站控层服务器根据各节点初始坐标及其反馈的RSSI值选取一个高空层无线基准点与三个地面层无线基准点构建空间四面体模型，使移动节点位于空间四面体内部并选取高空无线基准点在地面投影与地面层三个基准点构成的三角形中心点距离最近的三组空间四面体作为定位计算模型。监测控制台控制空间模型的四个基准节点之间进行信号交互并结合初始坐标计算当前空气介质下空间四面体内基准点之间的无线信号传播速度并取均值，得出每个四面体内无线信号传播速度。监测控制

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

台根据移动节点与四个基准节点的信息传送时间以及时间同步误差，计算的四面体内空间无线电波速度分别在三个四面体数学模型下计算出移动节点与基准节点的空间距离，进一步计算三组数据模型下移动节点坐标并进行加权均值处理求得最后移动节点坐标。

6 结束语

本文针对配电网巡检系统的复杂应用环境，提出一种基于WIA-PA工业无线技术的配网巡检系统通信方案，并借鉴物联网分层结构的理念，提出了mesh+star的混合拓扑组网模式，利用多径路由协议方式，使网络结构更加灵活，采用空间四点定位方法准确巡检人员位置，有效地解决了巡检作业人员的安全问题，实现配网巡检工作的智能化，提高工作效率，保障配网设备安全运行。

参考文献

[1] 卢新波，侯思祖. 基于 GPRS 的配网自动化系统性能分析[J]. 电力系统通信, 2006, 27(1): 25-27.

[2] IEEE. IEEE Std. 802.15.4—2006 Wireless medium access control(MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (WPANs)[S].

[3] ZigBee Standards Organization. ZigBee alliance document 053474r17[S]. 2008.

[4] 李晓维. 无线传感器网络技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.

[5] 张华，徐原春，姚晓春，等. 一种配网巡检管理系统的开发[J]. 技术与应用, 2012, (12).

作者简介

李峰（1978-），男，工程师，主要研究方向为电力系统及自动化、用电信息采集。

（收稿日期：2015-12-10）EA

（编辑：鞠佳）

（上接第687页）

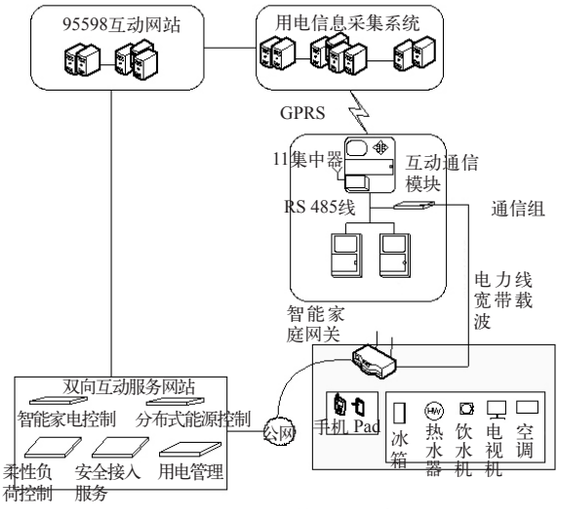

图5 RS 485通信组网示意图

3 结束语

基于双模通信技术的智能双向交互网关和智能电能表双模通信现阶段处于现场调测阶段。根据现场应用测试结果，运行效果不太理想。电力线载波与微功率无线通信模式自动切换的过程中延时较长，切换出现中断。所以在两种通信模式切换、协议兼容性方面仍需要进一步探索、改进和完善。双模通信技术在直接双向互动系统的应用范围非常广泛，智能双向交互网关和双模通信模块仅是其中的一小部分，微功率无线与电力线载波也仅是其中的小部分通信方式，其他产品以及其他通信方式，还有待于开发、研究，最终实现“一品多通”，实现用户个性化互动服务的目标。

参考文献

[1] 韩玉，高丽媛，吕文涛，等. 基于能效分析的双向互动用电信息服务系统设计[J]. 科技致富向导, 2015(2): 255-256.

[2] 王继业，李思维. 基于智能用电互动服务平台的智能家庭能效管理系统设计[J]. 电力信息与通信技术, 2012(12): 25-30.

[3] 刘旭生，何颖，吴润泽，等. 面向智能电网双向互动信息服务的通信组网方案设计[J]. 电子设计工程, 2011, 19(23): 78-82.

作者简介

李丽丽（1983-），女，工程师，主要研究方向为用电信息采集系统、电动车运营服务平台、电力无线通信系统。

（收稿日期：2015-12-10）EA

（编辑：鞠佳）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net