

# 面向智能电网的物联网信息聚合技术

李娜<sup>1</sup> 陈晰<sup>2</sup> 吴帆<sup>1</sup> 李祥珍<sup>2</sup>

1 北京邮电大学 无线电技术与电磁兼容实验室 北京 100876

2 国网信息通信有限公司 通信传输实验室 北京 100761

**摘要** 物联网应用于智能电网是信息通信技术发展到一定阶段的必然结果,利用物联网技术将能有效整合电力系统基础设施资源,提高电力系统信息化水平,改善现有电力系统基础设施的利用效率。本文针对物联网技术和我国智能电网建设规划,研究面向智能电网应用的物联网网络架构及关键技术,总结了技术特点。在阐明网络架构的基础上,进一步针对智能电网应用中海量设备终端和海量采集信息的特点,详细论述物联网信息聚合技术,分析信息聚合技术带来的网络收益,提出信息聚合技术基本功能框架及实现方式。物联网信息聚合技术在采集原始数据的同时进行大量的信息处理和计算,从海量的、杂乱无章、难以理解的原始数据中抽取并推导出对于智能电网一体化管理平台具有特定意义和判决参考价值的数据,并且能够降低网络数据传输总量、减少网络拥塞发生、提高网络性能,是物联网发展的重要技术方向之一。本文针对智能电网目前相对薄弱的配用电环节提出配变电设备监测物联网的主要功能与信息聚合方案。

**关键词** 智能电网; 物联网; 信息聚合; 数据融合

近两年,物联网受到广泛关注,虽然学术界对于物联网的定义在某种程度上还未完全达成一致,大部分学者认为物联网是通过RFID技术、无线传感器技术以及定位技术等自动识别、采集和感知获取物品的标识信息、物品自身的属性信息和周边环境信息,借助各种信息传输技术将物品相关信息聚合到统一的信息网络中,并利用云计算、模糊识别、数据挖掘以及语义分析等各种智能计算技术对物品相关信息进行分析融合处理,最终实现对物理世界的高度认知和智能化的决策控制。

随着全球社会经济的发展,用电需求不断增加,电网规模不断扩大,影响电力系统安全运行的不确定因素和潜在风险也随之增加,而用户对电力供应的安全可靠性和质量要求越来越高,电力发展所面临的资源和环境压力越来越大,市场竞争迫使电力经营者不断提高企业运营效率,21世纪初智能电网在欧美的发展,为全世界电力工业在安全可靠、优质高效、绿色环保等方面开辟了新的发展空间。智能电网提供了一种激励环境:电能

消费者和第三方资产的合作,这种合作利用电网设施来控制费用和改善供电的可靠性,启发人们随时随地参与进来;通过实时共享电网的必要数据信息供大家利用,宽带通信的信息网络使信息共享成为现实;智能电网为实现供需合作提供盈利的机会和工具,通过高速、先进的分布式控制和电子商务应用来实现实时数据的显示和提交。智能电网建设是全球在能源领域的重要战略部署,美国、欧洲等国家都针对智能电网建设制订了战略规划,我国也在智能电网建设上投入大量精力,制订了详细的战略发展规划。物联网应用于智能电网最有可能实现原创性突破、占据世界制高点的领域。智能电网建设将逐步推动我国电力基础生产模式的改变,定位于利用先进的通信、信息和控制技术,构建以信息化、自动化、互动化为特征的国际领先、自主创新、中国特色的智能电网,是电力行业的发展方向。智能电网的实现,首先依赖于电网各个环节重要运行参数的在线监测和实时信息掌控,基于此,物联网作为“智能信息感知末

梢”，可成为推动智能电网发展的重要技术手段。

## 1 面向智能电网应用的物联网网络结构

图1描述了物联网应用与智能电网生产过程的全程监测网络架构。物联网技术应用于智能电网生产过程监测，能够解决的主要问题有：输电线路在线监测、设备全方位防护、现场作业管理、户外设施防盗等<sup>[1-3]</sup>。底层的终端设备完成智能电网的信息获取与汇集、数据融合处理与传输功能。图2描述了物联网应用于智能电网用户服务的网络架构。针对智能电网用户服务，物联网技术主要应用于智能家电传感网络系统、智能家居系统、无线传感安防系统、用户用能信息采集系统等，主要硬件设备包括智能交互终端、智能交互机顶盒、智能插座等。该系统与外部的通信主要通过电力线通信(PLC)、电力复合光纤到户(PFTTH)、无线宽带通信等通信方式相结合的宽带通信平台来实现。智能交互终端是实现家庭智能用户服务的关键设备，其通过利用先进的信息通信技术，对家庭用电设备进行统一监控与管理，对电能质量、家庭用电信息等数据进行采集和分析，指导用户进行合理用电，调节电网峰谷负荷，实现电网与用户之间智能用电。此外，通过智能交互终端，

可为用户提供家庭安防、社区服务、互联网服务等增值服务。

笔者认为面向智能电网应用的物联网应当主要包括感知层、网络层和应用服务层。感知层主要通过无线传感网络、RFID等技术手段实现对智能电网各应用环节相关信息的采集；网络层以电力光纤网为主，辅以电力线载波通信网、无线宽带网，实现感知层各类电力系统信息的广域或局部范围内的信息传输；应用服务层主要采用智能计算、模式识别等技术实现电网信息的综合分析和处理，实现智能化的决策、控制和服务，从而提升电网各个应用环节的智能化水平。

面向智能电网的物联网将具有多元化信息采集能力的底层终端部署于监测区域内，利用各类仪表、传感器、RFID射频芯片对监测对象和监测区域的关键信息和状态进行采集、感知、识别，并在本地汇集，进行高效的数据融合，将融合后的信息传输至中间一层的网络接入设备；中间层网络接入设备负责底层终端设备采集数据的转发，负责物联网与智能电网专用通信网络之间的接入，保证物联网与电网专用通信网络的互联互通。在物联网中，网络设备之间的数据链路可采用多种方式并存的链路连接，并依据智能电网的实际网络部署需

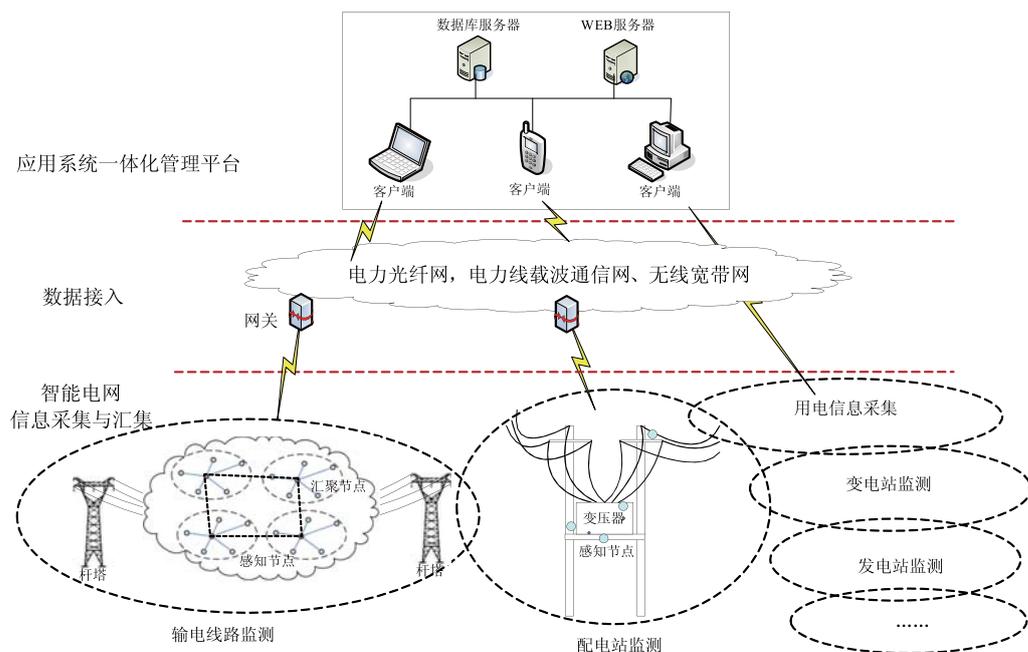


图1 面向智能电网生产应用的物联网架构

求，调整不同功能网络设备的数量灵活控制目标区域/对象的监测密度和监测精度，以及网络覆盖范围和网络规模。

向用户提供物理世界信息的传输工具，同时还在网络内部对节点采集数据进行融合处理，是一个具有高度计算能力和处理能力的云计算信息加工厂，用户端得到的数

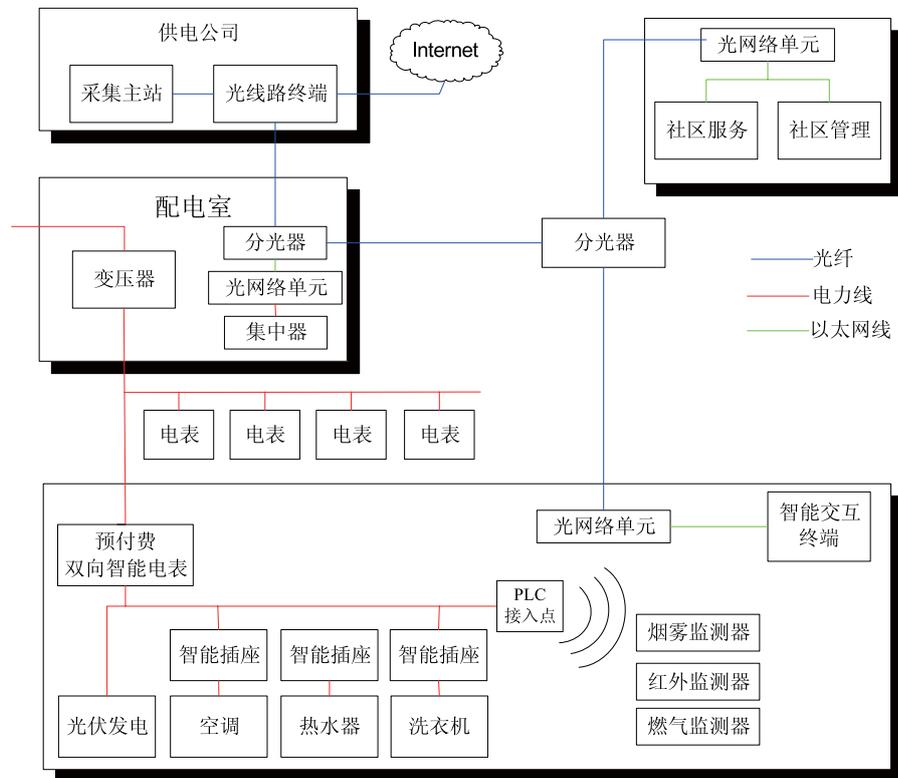


图2 面向智能电网用户服务应用的物联网架构

近来，物联网技术的发展突飞猛进<sup>[4-5]</sup>，在网络架构、工作机制、传输协议等方面已具备较成熟的理论体系。面向智能电网的物联网从技术方案的角度来讲，网络功能仍集中于数据的采集、传输、处理三个方面，其技术特点总结如下：

1) 数据采集倾向于更多新型业务。由于宽带接入技术的支持，物联网应用不局限于数据量的限制，在未来的大规模应用中可以提供更多的数据类型业务，如重点输电线路监测防护、大规模实时双向用电信息采集。

2) 网内协作模式的数据传输。以网内节点的协作互助为基本方式，解决数据传输问题。以各种成熟的接入技术为物理层基础，从MAC层以上，通过多模式接入、自组织的路由寻址方式、传输控制、拥塞避免等技术实现节点协作数据传输模式。

3) 网内数据融合处理技术。物联网不仅仅是一个

据是经过大量融合处理的非原始数据。

## 2 面向智能电网的物联网信息聚合技术

### 2.1 物联网信息聚合技术简介

物联网信息聚合技术是在传输数据的同时对数据进行处理，传输与融合并行。数据在由采集终端到用户终端的传输过程中，完成了复杂的信息处理流程，而具体的信息处理方法则根据不同的网络应用需求进行设计和实现。

网内协作模式的信息聚合以网内节点的协作互助为基本方式，解决物联网的数据传输问题，通过协作模式补偿传感器节点能力和能量受限的问题。目前，对于信息聚合技术的研究从技术手段上来看可分为两个阵营：空间策略的信息聚合和时间策略的信息聚合。

物联网中边传输边处理的总体信息聚合策略决定了

网络层路由“以数据为中心”的特点，如何选择适合信息处理的最佳传输路径，数据流相遇时是否应该进行融合处理，不同的拓扑结构中如何选择最优聚合点，是数据聚集的空间策略所解决的主要问题。显而易见，数据聚集的空间策略与网络的拓扑结构、数据传输路径存在非常紧密的联系。基于层次的分簇网络是一种适合于网内信息处理的网络结构<sup>[6]</sup>，在分簇结构的路由协议中，簇首节点则是理想的数据聚合点，所有的簇内节点都会将本地采集到的数据发送给簇首节点。而且簇成员节点因为地理位置比较接近，相关性比较大，数据冗余度相对较高，适宜在簇内进行数据处理以消除冗余。另一种数据收集方法是采用树状的网络结构，以数据融合相关参数为路由启发，生成最优化路由，在数据传输过程中，进行数据融合。文献[7]提出一种以邻居节点之间的数据相关度为选路标准，便于相关度较高的节点进行数据合并压缩，降低传输能量消耗的路由算法。文献[8]对大数据量的感知信息在路由过程中的融合处理考虑了融合代价问题，即融合处理和直接转发在能量上的权衡，对数据在传输过程中最优化的聚合点和聚合条件做出详细的决策依据。

数据聚集的时机控制决定中间节点合并下游节点传来数据的最优时机，以及对本地数据、转发数据、合并数据的发送需要等待时间的长短等。关于聚集时机的选择有很多种方案。文献[9]提出一种周期性简单的聚合时机控制方法，节点等待一个规定的固定长度的时间，对已经接收到的数据执行数据聚合，然后向下一跳发送聚合后的数据包。文献[10]根据节点在拓扑结构中的位置，确定数据聚合的时机，距离汇聚节点近的节点等待时间长，距离汇聚节点远的节点等待时间短，所有节点的等待时间形成一种级联效应，即处于同一层次的节点，其数据聚合时机相同。这种选择方法在保证数据准确性及时延的情况下，可以使所有传感器节点采集的数据在沿已知路径回传时，最大程度地聚合，有效节省了传感器网络的能量。但是，这种选择机制有可能造成很多节点采集的大量数据几乎同时到达汇聚节点，即使有的节点距离汇聚节点很近，其数据也不能快速回传，在

数据回传时延较大的情况下，不能快速响应用户，所以聚合时机的选择要根据网络对时延的要求等情况确定。

## 2.2 面向智能电网的信息聚合技术优势

面向智能电网的物联网中，由信息聚合技术带来的直接收益主要体现在以下两个方面：

1) 从面向智能电网的物联网网络结构来看，数据经过大量底层的采集和感知设备层层聚集，传输到汇聚设备，这种网络数据流量分布特性称为“漏斗效应”<sup>[11-12]</sup>。网络规模越大，数据流量越多，“漏斗”的瓶颈压力也就越大，发生阻滞和拥塞的可能性也越大，将会严重影响网络性能<sup>[13-15]</sup>。在智能电网的实际应用中，位置相近的传感器节点采集到的环境信息往往具有较高的相似性，重复的发送冗余信息会造成严重的额外消耗，因此，将具有较高相关度的多个感知设备信息先进行合并处理，得到高质量数据再进行发送将会减小网络中传输的数据总量，节省网络带宽。网内信息聚合技术针对底层节点庞大的数据流量，随着网内处理和数据汇聚程度的增加，保证基本信息不丢失的前提下，降低数据总量、减小网络冗余、提高网络性能。

2) 网内信息聚合技术对原始采集数据进一步包装整合。将大量的信息处理和计算移植到物联网内部进行，从而简化对用户端的设备要求，用户侧可以使用更加低端和简易的设备感知信息的读取和应用<sup>[16]</sup>。网内信息聚合技术使智能电网具有更高级、更完善的信息处理能力，监测现场的感知信息将更易理解，高度契合智能化的信息需求。网内信息融合技术还扩展了单个感知小区内数据的连通性，通过协同工作的工作模式，感知设备之间信息交互，能够进行数学计算，得到网络管理、移动性管理、业务管理、数据传输等优化结果，辅助上层的业务操作、传输选路、用户决策等。

## 2.3 物联网的数据融合

数据融合是物联网信息聚合技术中必不可少的部分，面向智能电网的物联网实现的不仅仅是感知数据的采集与透明传输，网络在实时、可靠地传输数据的同时，在原始采集数据采集的基础上，网络内部进行了大量数据融合工作，传输到管理平台的感知信息将是中海

量的、可能是杂乱的、难以理解的原始数据中抽取并推导出对于特定的智能电网管理者来说具有价值、具有意义的处理后数据。

网内数据融合处理与智能电网的应用模式密切相关，涉及到多种数据处理功能。针对不同信息获取需求，选择不同的数据融合功能，从而满足对于特定应用场景的需求。按照操作对象的特点，网内数据融合分为数据级、特征级、融合级、表示级。

1) 数据级处理。包括数据存储和数据备份等。采集的数据可以选择性地进行分布式或者中央集控式的存储，在网内数据处理中，处理的结果可以实时传输到终端用户，也可以进行数据备份，制作历史记录以备查询。

2) 特征级处理。包括特征提取、数据分类、数据排序、数据筛选等。同一个模拟信息源有不同特征的提取方法，根据不同的应用场景选择需要提取的特征，利用提取的不同数据特征，可以把采集的数据按不同需求整理分类，按数据属性、数据包长度、数据内容等多种规则进行分类，通过筛选，有针对性地将有用信息提取出来，屏蔽不需要的数据。

3) 融合级处理。包括数据关联、数据变换、数据合并、数据加密等。关联分析的目的是找出数据中隐藏的关系，用多个数据协同表示物体的特性，或按照关联规则进行数据项的合并。考虑到智能电网的安全问题，应对敏感数据以加密格式进行存储和传输。

4) 表示级处理。包括数据重构、数据表示、压缩编码等。提取网内数据的结构描述，根据需求通过相应的映射函数对数据结构进行转换，按照特定的编码机制用少量的数据位元或其它信息相关单位表示信息，针对不同的数据特征可以采用数据压缩算法。

### 3 智能电网系统中的信息聚合解决方案

#### 3.1 配变电智能监测物联网主要功能

智能电网中配变电环节占据生产过程的极大比重，针对配变电网的电力设备监测是保障电网安全运行的必要工作，是智能电网建设的重要内容。由于配变电设备

分布点多面广，且大部分曝露在室外，易受设备老化、天气及人为破坏等因素影响而引发故障，必须针对各种电力设备日常运行过程中的设备运行参数、设备状态异常、设备破损、性能降低等项目进行监测和记录，并在各种隐患发生前采取应对措施，避免电网设备出现故障。配用电环节的信息通信技术在智能电网发、输、变、配、用、调度等环节的通信中处于相对薄弱环节，亟待加强。尤其随着我国电网规模的扩大，配变电电力设备数量及异动量迅速增多且运行情况复杂，迫切需要以物联网技术为手段，实现智能电网的信息化、智能化，进一步提升工作效率。

智能电网配变电监测系统的主要功能如下：

1) 监测电力设备运行环境和状态信息。部署在配变电设备上的传感器节点能够精确采集运行环境和设备状态信息，代替人工观测，提供更准确的检测结果，提高工作质量。

2) 为电力设备状态检修提供辅助手段。通过实时监测设备运行环境和状态信息，便于进行设备故障的早期诊断，提高配变电设备预防故障发生的能力。

3) 提供标准化作业指导功能。在传感器节点上集成射频识别功能，存储设备自身的相关信息(设备履历、巡视标准作业指导书等)，在现场作业过程中，提供给现场人员，有利于现场作业指导和后续数据统计。

4) 对现场工作人员的定位功能。通过射频识别对巡查人员进行定位，监督规范巡查人员按预定路线行进，避免设备漏检。

#### 3.2 配变电设备监测物联网的信息聚合方案

基于物联网技术的智能电网配变电设备监测系统的网络架构，如图3所示。该系统的网络实体包括传感器节点、固定sink节点和移动sink节点。

其中，传感器节点部署于配变电设备的安全部位，负责获取并采样电力设备的运行状况以及电力设备周围环境的信息，并具有基本的运算控制和数据处理能力。另外，为实现设备管理和监督巡查路线的功能，部署于巡查路线旁的传感器节点上需加载RFID标签。传感器节点可通过配置多种不同的传感模块，获知多种类型

的状态信息,针对配变电环节的电力设备监测,最基本的感知信息类型有:

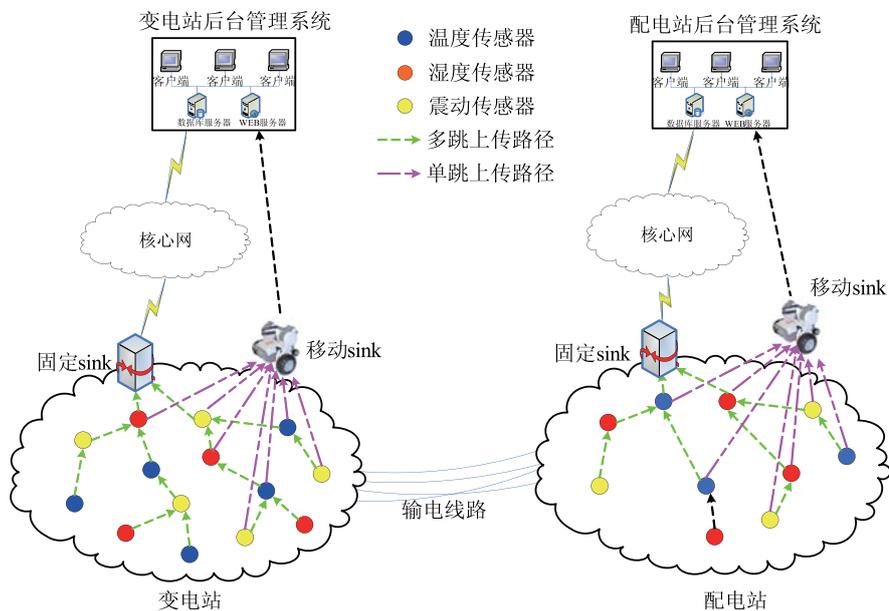


图3 基于物联网技术的智能电网配变电设备监测系统信息聚合方案

1) 设备自身的温度信息。设备的运行温度是表征设备是否正常的一个重要参数,为保证设备安全运行,特别是避免过热导致热损老化,必须对相关线路和设备的温度进行监测。

2) 设备运行环境的湿度信息。潮湿条件可能引起凝露形成,引发设备放电漏电,因此,必须对设备运行环境的湿度情况进行监测。

3) 设备的震动信息。设备的缺陷故障或隐患通常通过设备的异常震动表现出来,及时有效发现设备的异常震动能够确保设备健康良好运行。

4) 设备的泄漏电流信息。变电站避雷器投入运行后随着动作次数的增加和工作时间的延长会导致泄漏电流的增加,而这种劣化是离散的、不确定的,表征避雷器是否正常的主要参数是总泄漏电流、阻性泄漏电流和泄漏电流的三次谐波分量,所以,必须对泄漏电流进行监测,在其劣化到发生事故前进行更换,以避免事故的发生。

移动sink节点通过搭载智能机器人或由工作人员随身携带,用于电力设备的日常维护和巡查。当移动sink节点在无线传感器网络中移动时,将主动扫描其通信范

围内的传感器节点,获取传感器节点的感知数据。同时,读取传感器节点上RFID标签信息,将感知数据与

RFID标签信息进行本地存储。在移动sink节点对整个无线传感器网络扫描和数据采集之后,通过预留接口将数据导入后台管理系统,从而实现全网数据的收集以及对巡查路线的监督功能。

固定sink节点部署于配变电站内,负责紧急突发情况(如电力设备起火等)或者特定需求情况下变电站、配电站级传感器网络的全网信息汇聚,并通过核心网发送给远端的后台管理系统。在紧急状况下,可以利用无线传感器网络的多跳自组织优势,将全网数据以多跳路由方式向固定sink节点传输,从而迅速对每一个电力设备工作状态信息取得全景式了解。固定sink节点具备较强的数据处理能力和完善的通信能力,负责将收集到的数据进行汇聚、聚合、处理和判决,然后将数据通过核心网接入(无线宽带接入、TD网、WiFi或802.3无线局域网等)手段上传至后台管理系统。

## 4 结束语

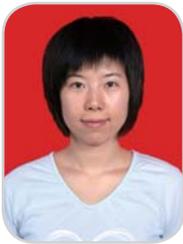
物联网应用于智能电网中将成为推动智能电网发展的重要技术手段,有助于解决电网各个环节重要运行参数的在线监测和实时信息掌控。而针对智能电网中需要

采集、感知和识别的海量终端信息，物联网的信息聚合技术在网络传输的过程中对数据计算处理，通过数据融合方法，消除信息冗余，降低网络传输数据量，避免网络拥塞，提供更精确、全面、易理解的信息。本文针对智能电网目前相对薄弱的配用电环节提出了配变电设备监测物联网的主要功能与信息聚合方案。

## 参考文献

- [1] León R A, Vittal V, Manimaran G. Application of Sensor Network for Secure Electric Energy Infrastructure[J]. IEEE Tran. Power Delivery, 2007, 22(2): 1021–1028
- [2] Lu J, Xie D, Ai Q. Research on Smart Grid in China, Transmission & Distribution Conference & Exposition[C]. Asia and Pacific, 2009(10)
- [3] Gungor V C, Lu B, Hancke G P. Opportunities and Challenges of Wireless Sensor Networks in Smart Grid – A Case Study of Link Quality Assessments in Power Distribution Systems[J]. IEEE Tran. Industrial Electronics, 2010
- [4] Shen C, Srisathapornphat C, Jaikaeo C. Sensor Information Networking Architecture and Applications[J]. IEEE Pers. Commun, 2001(8): 52–59
- [5] Tilak S, Abhu-Gazhaleh N, Heinzelman W R. A Taxonomy of Wireless Micro-Sensor Network Models[C]. ACM SIGMOBILE Mobile Comp. Commun, 2002, 6(2): 28–36
- [6] 胡德文, 王正志, 张良起. 神经计算机及其研究进展[J]. 国防科技大学学报, 1992, 14(1): 63–68
- [7] Chen H, Megerian S. Efficient Data Collection through Compression-Centric Routing[C]. IEEE GLOBECOM, 2006(9): 1–6
- [8] Luo H, Liu Y, Das S K. Distributed Algorithm for En Route Aggregation Decision in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Tran. Mobile Computing, 2009, 8(1): 1–13
- [9] 李宏, 于弘毅, 杨白薇. 无线传感器网络的一种聚合时机控制算法[J]. 计算机工程与应用, 2006(13): 1–4
- [10] Fei H, Ma C, Cao X. Data aggregation in distributed sensor networks towards an adaptive timing control//Information Technology: New Generations[C]. Third International Conference on, 2006: 256–261
- [11] Yang G, Tong B, Qiao D, et al. Sensor-Aided Overlay Deployment and Relocation for Vast-Scale Sensor Networks[C]. IEEE INFOCOM, 2008(4): 2216–2224
- [12] Chen H, Tse C K, Feng J. Source Extraction in Bandwidth Constrained Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Tran. Circuits and Systems II, 2008, 55(8): 947–950
- [13] Chen X, Wong S C, Tse C K. Adding randomness to Modeling Internet TCP-RED Systems with Interactive Gateways[J]. IEEE Tran. Circuits and Systems II, to appear
- [14] Chen X, Wong S C, Tse C K, et al. Stability Analysis of RED Gateway with Multiple TCP Reno Connections[C]. IEEE ISCAS 2007, New Orleans, USA, May 2007: 1429–1432
- [15] Chen X, Wong S C, Tse C K, et al. Oscillation and period doubling in TCP/RED system: analysis and verification[J]. Int. J. of Bif. and Chaos, 2008, 18(5): 1459–1475
- [16] Chen H, Tse C K, Feng J. Minimizing Effective Energy Consumption in Multi-Cluster Sensor Networks for Source Extraction[J]. IEEE Tran. Wireless Commun, 2009, 8(3): 1480–1489

## 作者简介



### 李娜

北京邮电大学无线电技术与电磁兼容实验室在读博士研究生，主要研究方向是物联网、传感器网络关键技术。



### 陈晰

博士，国网信息通信有限公司通信传输实验室工程师，2009年香港理工大学博士，2005年英国伦敦大学国王学院硕士，主要研究方向为非线性系统、复杂网络及其应用、智能电网、物联网及其应用。



### 吴帆

博士，北京邮电大学电子工程学院讲师，主要研究方向为物联网、无线分布式网络。



### 李祥珍

博士后，教授级高级工程师，“新世纪百千万人才工程”国家级人选，享受国务院政府特殊津贴，中国电机工程学会高级会员、CIGRE中国国家委员会委员，IEEE TC-PLC技术委员会成员。现从事电力无线宽带通信、下一代通信网络、物联网应用技术、智能电网信息通信技术的研究工作。

## Study of Information Aggregation Technology on the Internet of Things for Smart Grid

Li Na<sup>1</sup>  
Chen Xi<sup>2</sup>  
Wu Fan<sup>1</sup>  
Li Xiangzhen<sup>2</sup>

1 Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China  
2 Communication Transmission Lab State Grid Information & Telecommunication Co. Ltd, Beijing 100761, China

**Abstract** In this paper, we study the key technologies of hierarchical information aggregation which is applied in the Internet of Things (IoT) for smart grid. Most original data of IoT is collected by sensors and RFIDs. Decisions applied to the smart grid integrated management platform are based on the abstraction of mass rough data. By applying hierarchical information aggregation technology, the demand of data transmission is cut down. Therefore, the network congestion is prevented and the network performance is enhanced. Hence, the hierarchical information aggregation technology is one of the most important issues in IoT and smart grid.

**Keywords** Smart Grid; the Internet of Things (IoT); Information Aggregation; Data Fusion