

无线传感自组网在电力监控中的应用动态

黄绪勇¹, 刘 沛¹, 苗世洪¹, 吴 昕²

(1. 华中科技大学电气工程学院, 湖北省武汉市 430074; 2. 黄石供电公司, 湖北省黄石市 435000)

摘要:介绍了当今无线局域网中具有广阔应用前景的无线传感自组网的发展历程及其主要特点, 以及将无线传感自组网应用于电力系统的关键技术及其体系结构, 并介绍了最新的无线传感自组网在电力监控中的应用动态。

关键词:无线传感自组网; 电力监控系统; 分布式信息处理; 故障诊断

中图分类号: TM734; TN929

1 无线传感自组网及其特点

过去 20 年中, 技术的发展促使计算功能的尺寸指数性 (size of computational functionality) 减少^[1]。微机电系统 (MEMS—micro-electro-mechanism system) 的发展使得低廉、自治的无线传感器节点从厘米级发展到微米级。MEMS 的迅速发展奠定了设计和实现片上系统 (SoC) 的基础。以上高度集成孕育了新的信息获取和处理模式, 无线传感自组网络就是其中的一种^[2]。

无线传感自组网综合了传感器技术、嵌入式计算技术、分布式信息处理技术和无线通信技术, 能够相互协作地实时检测、感知和采集各种对象信息, 并对其数据进行处理。无线传感自组网是由大量廉价、密集的智能无线传感节点构成的一种无线通信网络, 它没有固定的基础设施, 而是通过节点多跳 (multi-hop) 方式形成一种分布式无线通信网络。网络中所有节点地位相等, 都承担主机和路由的功能。每个传感器节点都具有报文的收发功能, 由于传输范围的限制, 当 2 个节点不能直接通信时, 可以通过中间节点进行转发。

1.1 无线传感自组网与现有无线网络的区别

无线传感自组网与传统的无线网络相比, 有不同的设计目标和要求: 传统的无线网络有固定的基站, 移动节点直接与基站通信, 相互之间不直接通信, 在高速移动的环境中通过优化路由和资源管理策略最大化带宽, 同时为用户保证服务质量; 而无线传感自组网是以被监控区域的数据为中心^[3], 但无线传感器节点的能量有限, 设计有效的策略来延长网络的生命周期成为无线传感器网络的核心问题。当然在某些特殊的场合下, 可以通过其他能源补充

传感器节点的电池能耗, 例如通过线圈的电磁感应产生能量供应传感器节点的能量消耗^[4]。传统网络设计遵循“端到端”的边缘论思想^[5], 强调将一切与功能相关的处理都放在网络的端系统上, 中间节点仅仅负责数据的分组转发。无线传感自组网与一般的 Ad Hoc 网络有不同的应用理念, 适用 Ad Hoc 网络设计的协议和算法一般不适合无线传感器网络的特点和应用要求。节点标识对无线传感自组网而言通常不具有实际意义, 应用程序不关心单节点上的信息, 中间节点上与具体应用相关的数据处理、融合和缓存也显得很有必要。在密集性的无线传感器网络中, 相邻节点间的距离非常短, 低功耗的多跳模式节省功耗, 同时增加了通信的隐蔽性, 也避免了长距离无线通信受外界的噪声干扰。

1.2 无线传感自组网的技术特点

1) 自组织性。传感器节点的位置通常都不能预先设定, 节点之间的相互邻居关系也不确定, 例如通过飞机播撒的大量传感器节点或者随意放置到危险区域的传感器节点。因此, 要求传感器节点具有自组织能力, 能够自动进行配置和管理, 通过拓扑机制和网络协议自动形成多跳无线网络系统, 网络的自组织性要求能够适应网络拓扑结构的动态变化。

2) 动态拓扑。网络的拓扑结构会因为以下原因导致变化: 环境的因素或者电能耗尽导致传感器节点出现故障或失效; 新节点的加入; 环境的变化可能造成无线通信链路带宽变化; 无线传感器网络中的传感器节点、感知对象和观察者这 3 个要素都可能具有移动性。

3) 大规模网络。体现在 2 个方面: 一方面是传感器节点分布在很大的地理区域内; 另一方面是传感器节点的部署很密集。无线传感自组网络的大规模性可以使通过不同空间视角获取的信号具有更大的信噪比, 提高监测的精确度, 同时能够增大监测区

域,减少洞穴或者盲区。

4)无线传感自组网是一个应用相关的网络。主要用来感知客观电力世界,获取相关的信息量。这就决定了不同的信息量需要用不同的无线传感器节点,不同的背景对无线传感自组网的要求也不同,其硬件平台、软件系统和网络协议会有很大区别。所以无线传感自组网不能像 Internet 一样,有统一的通信协议平台。关注无线传感自组网中的差异,才能设计出最高效的系统。

5)以数据为中心。无线传感自组网是一种任务型网络,用户使用传感自组网络查询事件时,直接将关心的事件通告给网络,而不是关注某个传感节点。

2 无线传感自组网的发展

无线传感自组网的发展依赖于传感技术、通信技术和计算机技术的发展^[6],它们分别完成被测量的提取、传输和处理。这 3 个方面的发展包括相关的硬件、软件和算法的发展。表 1 显示了无线传感自组网的发展历程。

表 1 无线传感自组网的发展
Table 1 Development of wireless sensors

特性	1980 年~1990 年	2000 年~2003 年	将来
尺寸	板卡	板卡	微尘
重量	千克级	克级	可以忽略
节点架构	传感,数据处理,通信分离结构	传感,数据处理,通信集成	传感,数据处理,通信集成
拓扑	点对点,星型	C/S,对等	对等结构
生命周期	小时,天	几天到几星期	几月到几年

无线传感自组网起步于 20 世纪 90 年代。由分布在海底的声学传感器构成一个噪声监控系统(SOSUS),用于监测、跟踪苏联潜艇^[7]。这类无线传感自组网采用分级处理结构,其中,人的操作是一个很关键的角色。早期的无线传感自组网为现代的传感自组网提供了一些关键性的处理技术。分布式无线传感自组网(DSN)起始于 1980 年前后,这类网络要求由随机分布的低廉的传感器节点组成,节点之间能相互协作,但是每个传感器节点都具有自治性,无论发送到哪一个节点的信息都能得到最佳利用。1978 年,确定了 DSN 中的各个技术组件:无线传感器、通信协议、处理技术和算法(包括传感器的自定位算法)、分布式软件系统^[8-9]。Carnegie Mellon 大学的研究人员开发出了一套面向通信的操作系统 Accent^[10],它支持开放式网络、系统的重新配置。MIT 的研究人员开发出了 SPLICE(signal processing language and interactive computing environment)用于 DSN 的数据分析和算法开发^[11]。MIT 林肯实验室和 Massachusetts 大学开

发了用于 DSN 的实时实验台^[12-13]。

3 在电力系统中的应用前景

有线网实施的布线及改线工程大、易受损、不可移动。在某些情况下,例如地理环境复杂、工作地点(施工现场)不确定、原预留端口不够用、突发性事故现场等,其应用在一定程度上将受到限制。而无线自组网络将可以保证用户在任何地点向任意具有无线通信接口的设备发送命令。针对电力系统监控、测量需求的不断提高,无线传感自组网在通信容量、延时、丢包率、能量损耗等方面的研究取得了一定进展^[14]。

3.1 电量监控

虽然近年来改善了电力管理部门需要下级部门层层上报地区用电要求、然后根据需求发配和输送的状况,但是仍有使用人工报表或者人机并用的报表方式,这种方式很难快速、准确统计这些数据,并有数据误差较大的情况出现。用自带电能计量功能的无线传感自组网来监控每一条馈线乃至每一个用电点的用电情况,形成一个一体化分布式无线传感自组网,在各种传感节点与控制设备之间建立快速通信链路,更好地监控分布区域中的电能使用情况,为调度部门提供更好的服务^[15]。

文献[16-17]提供的资料表明,美国加州如果采用这种无线传感自组网方式监控电力用电情况,电力调控中心每年将可以节省 7 亿美元~8 亿美元。近年来,一种有功电能和无功电能计量精度分别达到 0.5 级和 1 级以上(满足国家标准)的新型电能计量芯片问世^[18],显示带有电能计量和收、发等功能组成的无线传感自组网节点方式组建监控电力用电网络,较以往传统的抄表上报方式更为实用。

3.2 配电网继电保护

我国 110 kV 以下电网通常不配置母线保护,近年来也有用户要求装设,众多的馈线数量增加了传统集中式母线保护装置的造价。近年来,研究的分布式母线差动保护只要求在每一联结元件上装一个母线保护单元,并只跳本线路开关,它们需要通过通信得到其他连接元件的电流信息。其优点是某一单元故障不会影响全局,但对通信的快速可靠性要求较高^[19-20]。另一方面,采用电子式互感器后,保护将不受电流互感器饱和的影响,但对低压母线仍有出线多、干扰大等特殊。电流方向比较原理有传输量少(可以只交换已判断的方向信息)和对数据同步要求不高的优点,采用无线传输更为可靠^[16]。

基于无线传感自组网的配电网集成保护系统(以电子互感器为背景、集馈线和分布式母线方向保

护于一体),将使其在原理、技术及造价等方面具有更好的综合性能。

3.3 电机制造

在制造业中,使用分布式无线传感自组网的一个主要动机是监视和优化质量控制。电气系统及其部件的外形、功能及需要的功能越来越复杂,这不可避免地增加了系统的故障率。在电机制造中,可以使用无线传感自组网监视装配的尺度或者控制绕组的涂层厚度^[21]。

此外,无线传感自组网还能用在厂站及办公自动化、运行监控及管理系统,在环境复杂或地处偏远的情况下传送运行信息或监控电气设备的异常运行状态,协助传输大量的非实时数据(如遥视图像、故障录波数据等),减轻海量信息对现有电力通信网的压力,在紧急情况下还能提供后备服务。

4 应用实例

4.1 分布式电力系统故障检测^[22]

该系统在 Helsinki 大学的电力系统和高压工程实验室实施,其无线传感自组网架构如图 1 所示。

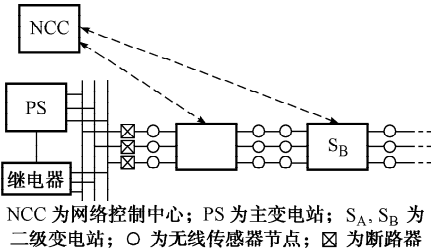


图 1 System architecture
Fig. 1 System architecture

假设二级变电站 S_1 和 S_j 之间发生了相间短路,如图 2 所示。

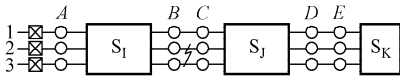


图 2 S_1 和 S_j 之间相间短路故障
Fig. 2 A short circuit between S_1 and S_j

用 $S[i(\alpha)]$ ($S=A, B, C, D, E$) 表示无线传感节点 S 的电流采样值。那么有以下关系:

$$\begin{cases} B_2[i(\alpha)] \gg B_1[i(\alpha)] \\ B_3[i(\alpha)] \gg B_1[i(\alpha)] \\ B_2[i(\alpha)] \gg C_2[i(\alpha)] \\ B_3[i(\alpha)] \gg C_3[i(\alpha)] \\ D_j[i(\alpha)] \approx E_j[i(\alpha)] \end{cases} \quad (1)$$

式中: $j=1, 2, 3$ 。

通过分析分布式无线传感器节点上的电流采样

值,就可以实现相间故障检测和定位。同样,利用无线传感自组网可以实现单项接地故障的检测和定位。系统结构如图 3 所示。

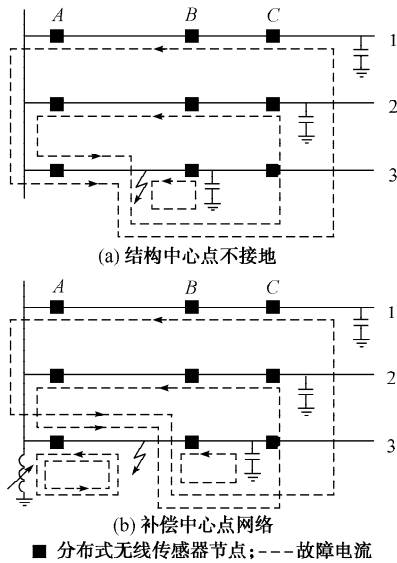


图 3 单相接地故障的检测和定位
Fig. 3 Detecting and locating single phase to earth faults

用 $S[i(\alpha)]$ 表示无线传感器节点 S 故障前的电流采样值, $S[i(\beta)]$ 表示故障期间的电流采样值, φ 表示它们之间的相位差,则有:

$$\Delta i(S) = \{S[i(\alpha)]^2 + S[i(\beta)]^2 - 2S[i(\alpha)]S[i(\beta)]\cos \varphi\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

各相的电流差分定义如下:

$$\begin{cases} \Delta^2(B_1, C_1) = |\Delta i(B_1) - \Delta i(C_1)| \\ \Delta^2(A_1, B_1) = |\Delta i(A_1) - \Delta i(B_1)| \\ \Delta^2(B_2, C_2) = |\Delta i(B_2) - \Delta i(C_2)| \\ \Delta^2(A_2, B_2) = |\Delta i(A_2) - \Delta i(B_2)| \\ \Delta^2(B_3, C_3) = |\Delta i(B_3) - \Delta i(C_3)| \\ \Delta^2(A_3, B_3) = |\Delta i(A_3) - \Delta i(B_3)| \end{cases} \quad (3)$$

根据图 3 和式(3),可以得到:

$$\begin{cases} \Delta^2(B_1, C_1) \approx \Delta^2(B_2, C_2) \approx \Delta^2(B_3, C_3) \\ K\Delta^2(A_1, B_1) \approx K\Delta^2(A_2, B_2) \approx \Delta^2(A_3, B_3) \end{cases} \quad (4)$$

式中: K 为相关系数。

根据 EMTP-ATP 仿真结果, K 值如表 2 所示。

表 2 不同网络类型的常数 K
Table 2 Constant K for different types of networks

中性点不接地		95% 补偿	
故障阻抗/ Ω	K	故障阻抗/ Ω	K
0	47	0	38
100	52	100	38
5 000	90	5 000	38

这样,根据式(2)~式(4)就可以很好地检测和定位故障。

4.2 配电设备在线监视与诊断系统^[23]

通过在线温度监控系统可以评估设备当前状况和检测设备的异常,还可以帮助调整设备的技术规范和等级,确定被监控设备的实际限度,优化操作。该系统由安装在4个中压断路器的6个导向盘中的无线温度传感器节点组成。无线传感器节点的位置和温度信息通过RF传送到控制室。该系统通过2年的温度监控和数据分析,得到了设备正常运行情况下的温度分布和各相电流与温度的对应关系。通常,A相、B相、C相之间的温度差异在 $5^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$ 之间。当在某相电流影响下发生热异常时,会导致热量分布发生偏移,如图4所示。A相引起的温度上升伴随着C相上温度的改变,这样,上端的导向盘比下端的温度更高,而在正常情况下则相反。

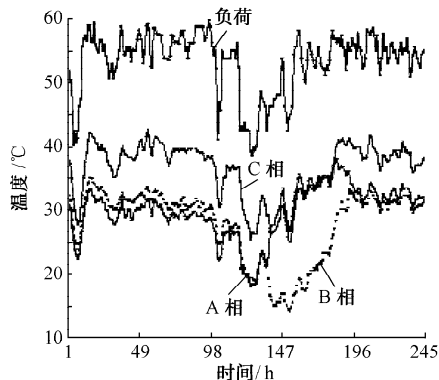


图4 A相引起的热异常下温度分布

Fig. 4 Thermal abnormality on phase A affects heat distribution

这样,就可以实现分布式配电设备的在线监控和诊断。由无线传感自组网组成的温度监控和分析系统,极大地提高了设备的可靠性,降低了设备受损率和维护工作。

5 在电力系统中应用的关键技术

无线传感自组网在电力系统中应用的关键技术涉及到通信、组网、管理、分布式信息处理、针对不同应用目标的服务质量描述、网络安全、与电力通信网络的融合等多方面的问题。

1)通信与组网。在电力系统中,无线传感器主要用来完成各种电气量、开关量、模拟量等的监控和检测,因此,基于电力系统网络的无线传感自组网的通信和组网,应该充分考虑电力系统本身的特点。无线频段的选择、调制技术和扩频技术都是无线通信需要解决的主要问题。节点的成本和能量供应方式是无线传感自组网的2个主要性能指标,设计基

于电力系统场合下能长期使用的无线传感器网络是物理层协议需要考虑的关键问题。无线传感自组网媒体访问控制(MAC)层要求低能耗、低通信延迟和可以动态扩展。考虑电力系统背景下分析无线传感节点的移动特性,设计相适应的网络拓扑结构。

2)管理和分布式信息处理。无线传感自组网必须保证时间的同步性,这是因为:①传感器之间需要通过协作来综合判断、分析检测的电气量信息,需要同步机制来保证各个传感器数据的同步性;②同步性有利于延长无线传感自组网的生命周期;③同步性可以确保数据在通信过程中避免因相互干扰而引起的数据丢失。无线传感自组网的通信带宽较低,网络拓扑结构动态变化,传统的时间同步机制难以适用。需要研究满足电力系统时间同步精度低通信开销的时间同步机制。由于电力系统中数据量大,不同类型的数据要求传输质量、响应时间都不同,而且需要进行不同的数据处理,单元级、域级、厂站级之内和之间的数据需要不同的交互和协作处理,这就需要建立有效的分层分布式处理机制。在电力系统中,只有结合位置信息,传感器获取的数据才有实际意义。例如,在变电站综合自动化系统中,电气量、开关量等数据信息只有确切知道具体位置信息,才能有效地进行分析监控。在满足电力系统定位要求的前提下,设计低开销、低成本的分分布式定位算法,也是无线传感自组网在电力系统中应用的关键课题之一。

3)电力通信网络接入和网络安全。从传感器节点获取到的电气量、开关量、模拟量等数据,可能需要上传到厂、站控制中心或者调度中心,以便分析和监控。因此,需要将无线传感自组网接入到现有电力数据通信网络,达到数据的共享和互补。电力信息数据在通信过程中,必须保证任务执行的机密性、数据产生的可靠性和数据产生的安全性,防止数据被窃听或者非法用户接入。由于传感器节点本身的特点,无线传感自组网通常是通过简单的邻居发现协议来初始化网络,而且通常没有采用硬件防护措施,这就导致网络易于被窃听,甚至被攻击^[24]。这就需要研究无线传感自组网框架的机密性、消息认证技术、完整性鉴别、密钥算法及其分布模型、节点间的耦合性等。

参考文献

- [1] WARNEKE B A, PISTER K S J. MEMS for distributed wireless sensor networks// Proceedings of 9th International Conference on Electronics, Circuit and Systems; Vol 1, Sep 15-18, 2002, Dubrovnik, Croatia. New York, NY, USA: IEEE, 2002: 291-294.
- [2] 任丰原,黄海宁,林闯.无线传感器网络.软件学报,2003,14(7):

- 1282-1291.
REN Fengyuan, HUANG Haining, LIN Chuang. Wireless sensor networks. Journal of Software, 2003, 14(7): 1282-1291.
- [3] GOVINDA R, HELLERSTEIN J, HONG W, et al. The sensor network as a database. Technical Report 02-771, Los Angeles, CA, USA; University of Southern California, 2002.
- [4] BROWN D R, SLATER J A, EMANUEL A E. A wireless differential protection system for air-core inductor. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 579-587.
- [5] SALTZER J, REED D, CLARK D. End-to-end arguments in system design. ACM Transactions on Computer Systems, 1984, 2(4): 195-206.
- [6] CHONG Chee-ye, KURNAR S P. Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(8): 1247-1256.
- [7] NISHIMURA C E, CONLOU D M. IUSS dual use: Monitoring whales and earthquakes using SOSUS. Marine Technology Society Journal, 1994, 27(4): 12-21.
- [8] LACOSS R, WALTON, R. Strawman design of a DSN to detect and track low flying aircraft// Proceedings of the Distributed Sensor Nets Workshop, Dec 7-8, 1978, Pittsburgh, PA, USA: 41-52.
- [9] SPROULL R F, COHEN D. High-level protocols. Proceedings of the IEEE, 1978, 66(11): 1371-1386.
- [10] RASHID R, ROBERTSON G. Accent: A communication oriented network operating system kernel// Proceedings of 8th Symposium on Operating System Principles, Dec, 1981, Pacific Grove, CA, USA. New York, NY, USA: ACM Press, 1981: 64-75.
- [11] MYERS C, OPPENHEIM A, DAVIS R, et al. Knowledge based speech analysis and enhancement// Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing; Vol 3, Mar 19-21, 1984, San Diego, CA, USA. New York, NY, USA: IEEE, 1984: 39A4.1-39A4.2.
- [12] Distributed sensor networks. Lexington, MA, USA: MIT Lincoln Laboratory, ESD-TR-88-175. 1986.
- [13] RLESSER V, CORKILL D D. The Distributed vehicle monitoring test bed: A tool for investigating distributed problem solving networks. AI Magazine, 1983, 4(3): 15-33.
- [14] 于宏毅. 无线移动自组织网. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
YU Hongyi. Wireless mobile ad hoc network. Beijing: Posts and Telecom Press, 2005.
- [15] GARBRIEL L C, OVIDIU L P. Integrating power quality sensors in a wireless network// Proceedings of 27th International Spring Seminar on Electronics Technology; Vol 1, May 13-16, 2004, Sofia, Bulgaria. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 153-157.
- [16] WARNEKE B, LAST M, LIEBOWITZ B, et al. Smart dust: Communicating with a cubic millimeter computer. IEEE Computer Magazine, 2001, 34(1): 44-51.
- [17] 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络. 北京: 清华大学出版社, 2005.
SUN Limin, LI Jianzhong, CHEN Yu, et al. Wireless sensor networks. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [18] 刘翔宇, 王文成. 基于 GPRS 网络的新型环网柜终端. 继电器, 2005, 33(17): 66-69.
LIU Xiangyu, WANG Wencheng. Research on the advanced switchgear cubicle for loop network based on GPRS network. Relay, 2005, 33(17): 66-69.
- [19] 刘勇. 新型分布式母线保护的研制[D]. 保定: 华北电力大学, 1999.
LIU Yong. New distributed busbar Protection[D]. Baoding: North China Electric Power University, 1999.
- [20] ILAR M, RELMANN B. REB500-decentralized numerical busbar protection with extend functionality. ABB Review, 1997(5).
- [21] EVANS J J. Wireless sensor networks in electrical manufacturing// Proceedings of Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, Oct 23-26, 2005, Indianapolis, IN, USA: 460-465.
- [22] NORDMAN M. An architecture for wireless sensors in distributed management of electrical distribution systems[D]. Helsinki, Finland: Helsinki University of Technology, 2004.
- [23] LIVSHITZ A, CHUDNOVSKY B H, BUKENGOLTS B. On-line condition monitoring and diagnostics of power distribution equipment// Proceedings of 2004 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition: Vol 2, Oct 10-13, 2004, New York, NY, USA. New York, NY, USA: IEEE, 2004: 646-652.
- [24] PARNO B, PERRIG A, GLIGOR V. Distributed detection of node replication attacks in sensor networks// Proceeding of the 2005 IEEE Symposium on Security and Privacy, May 8-11, 2005, Oakland, CA, USA. New York, NY, USA: IEEE, 2005: 49-63.

黄绪勇(1974—),男,博士研究生,主要从事自组网络在电力系统中的应用研究。E-mail: leafhuang@163.com

刘 沛(1944—),女,教授,博士生导师,研究方向为继电保护及变电站综合自动化等。

苗世洪(1963—),男,副教授,研究方向为电力系统继电保护及自动化。

Application of Wireless Sensor Networks in Power Monitoring System

HUANG Xuyong¹, LIU Pei¹, MIAO Shihong¹, WU Xin²

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(2. Huangshi Power Supply Company, Huangshi 435000, China)

Abstract: The research developments and characteristics of wireless sensor networks are introduced, which have wide application prospects in the wireless local area network (LAN). The key techniques and system architecture of the application of the wireless sensor networks in electrical power systems are expatiated. Two application examples of wireless sensor networks in power system monitoring are given.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50677024).

Key words: wireless sensor network; power monitoring system; distributed information processing; fault detection