

基于无线传感器网络的 电力设施冰灾实时监测与预警系统

王阳光, 尹项根, 游大海, 徐天奇, 华煌圣, 向寒冰

(电力安全与高效湖北省重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

A Real-Time Monitoring and Warning System for Electric Power Facilities Icing Disaster Based on Wireless Sensor Network

WANG Yang-guang, YIN Xiang-gen, YOU Da-hai, XU Tian-qi, HUA Huang-sheng, XIANG Han-bing

(Electric Power Security and High Efficiency Lab (Huazhong University of Science and Technology),
Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: A complete and reliable icing-disaster monitoring and warning system for electric power facilities can offer reliable data for disaster prevention, disaster reduction and disaster relief measures. Under extreme frost climate, due to the interruption of communication network the existing icing disaster monitoring and warning system for power facilities could not complete its predetermined mission. For this reason, it is proposed to apply wireless sensor network (WSN) in icing-disaster monitoring and warning system for power facilities. Combining the objective of the monitoring and warning system with the feature of transmission corridor and under the presupposition of spreadability of the disaster prevention system, the configuration of various types of sensors are optimised and a two-layer network structure, in which the intra-tower is the bottom layer and the inter-tower is the top layer, is designed, at the same time, to supply power to the nodes of sensor network the combination of special CT with accumulator is adopted, meanwhile, to improve data transmission efficiency, the query-based routing protocol and corresponding data fusion technology are used. It also pointed out that how to enhance the reliability and security of monitoring system as well as how to interconnect the monitoring system with existing power communication network could be regarded as key problems to be researched.

KEY WORDS: frost climate; monitoring and warning system; wireless sensor network (WSN); two-layer network structure; nodal energy supply; routing protocol; data fusion

摘要:一套完整可靠的电力设施冰灾监测预警系统可以为各项防灾、减灾、救灾措施提供可靠数据。在极端冰冻气候下, 通信网络中断会使现有电力设施冰灾监测预警系统不能发挥预定作用。为此, 文章提出了将无线传感器网络应用于电力设施冰灾监测预警系统, 结合监测系统的目标与输电走廊的特点, 在满足系统覆盖性的前提下, 优化了各类传感器节点的部署, 设计了一种塔内为底层且塔间为顶层的二层架构网络拓扑结构, 同时将小 CT 取能装置与蓄电池结合, 解决了传感器网络节点的能量供给, 采用基于查询的路由协议以及相应的数据融合技术提高了数据传输的效率。文中还指出今后可将保证监测系统的可靠性、安全性, 解决其与现有电力通信网络的互联问题作为研究重点。

关键词: 冰冻气候; 监测预警系统; 无线传感器网络(WSN); 二层网络结构; 节点供能; 路由协议; 数据融合

0 引言

2008 年 1 月中旬至 2 月初, 我国南方大部分地区遭遇了历史上罕见的持续大范围低温、雨雪和冰冻天气。冰雪灾害给贵州、广西、云南、广东、湖南、安徽、江西等 17 个省(直辖市、自治区)的电力设施造成了不同程度地损害。输变电设施的覆冰厚度普遍超过 30 mm, 局部地区输变电设施的覆冰厚度达到 80~100 mm, 远远超过规定的设计标准。多条输电线路由于覆冰严重导致停运抢修, 上千条不同电压等级的电力杆塔因无法承受覆冰重量而倒塌, 包括 500 kV 主网架在内的数千条线路停运, 甚至出现多次电网解列运行的情况, 电网运行面临前所未有的考验。在此次冰雪灾害中, 仅南方区域

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2005AA001200)。

The National High Technology Research and Development of China
863 Program (2005AA001200).

全网受停电影响的县市就达 90 个。这次冰雪灾害造成了重大的经济财产损失和人员伤亡。

我国南方大部分地区具有低温、高湿的气候环境,在持续性低温雨雪冰冻天气的影响下,电力设施易覆冰。覆冰后的输电线路荷载增加,在一定风速条件下导线产生舞动,造成断线、倒塔等事故。严重的绝缘子覆冰引起绝缘子闪络,甚至掉串,最终导致线路跳闸。线路跳闸后,重合闸失败,线路被判为永久事故退出电网,电网结构发生频繁的变动,操作人员不能及时采取有效措施导致故障进一步扩大,部分系统解列,致使大面积停电事故发生。

对于这次冰雪灾害,气象部门提前一个星期即做出了预报,但气象预报发布后,电力系统没有一个专门用于电力设施实时监测与预警的系统,这导致最终发生大面积停电事故。如果能够建立一套冰冻气候下的电力设施实时监测与预警系统,就可以检测各种环境参数,结合各种理论模型,给出冰情预报信息,提前做好各项防灾、减灾、抗灾工作,同时也有助于操作人员及时做出最优的决策,避免发生大面积停电事故。

1 现有监测预警系统的问题及对策

长期以来,国内外电力工作者对输电线路覆冰进行了大量的研究,但主要集中在覆冰机理、导线冰风荷载的计算等方面^[1-7]。对电力设施覆冰实时监测的研究相对较少。早期主要采用人工巡检,通过观冰站、小型气象站等方式^[8]监测电力设施覆冰情况。随着计算机网络与通信技术的发展,文献^[9]利用电力通信网络研制了电力设施计算机监测系统^[9];海康雷鸟信息技术有限公司将 GPRS (GSM/CDMA) 技术与视频技术引入到输电设施的监测中,开发出了架空输电线路覆冰实时监测系统^[10],湖南省电力试验研究院研制了输电线路灾情监测系统^[11],西安交通大学研制了覆冰在线监测系统^[12],这些装置都已用于现场并取得了一定的效果。但在 2008 年的冰雪灾害中,这些监测预警系统的通信网络也遭受了不同程度地损坏,监测数据不能准确地传送给监控中心,所以这些监测预警系统未能很好地发挥作用。现有监测预警系统的通信网络还存在如下问题:

1) 用人工巡检、观冰站、小型气象站等监测

手段需耗费较大的人力、物力资源,且不能实现 24h 的实时观测,同时由于布线范围广,有些布线区域地理环境恶劣,不可能实现全范围监测。

2) 冰雪灾害引起电力线路倒塔和断线的同时使大量通讯光缆断裂,公用通讯网络与电力通信网络均发生了不同程度的中断,监测数据无法可靠地送往监控中心。

3) 当冰雪灾害严重时, GPRS(GSM/CDMA) 网络基站会出现停电事故,这导致基站无法工作,数据不能转发,监测作用失效。

因而,在建立有效的实时监测预警系统时,必须提高通信网络在冰雪灾害条件下的可靠性。为此本文提出应用无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)建立新型电力设施实时监测与预警系统。无线传感器网络是多跳网络,具有无主站、自组织、自治、自适应、体积小、价格便宜等优点^[13-14],可解决现有监测预警系统的通信网络依赖有线通道或基站传送数据的缺点,提高极端冰雪灾害条件下监测预警系统通信网络的可靠性。

2 采用无线传感器网络的冰灾监测预警系统

2.1 监测内容

一套可靠的电力设施冰灾监测预警系统必须集成 3 个方面的内容:气象条件的监测;电力设施覆冰情况的监测;电力设施覆冰后运行情况的监测。表 1 列出了一套电力设施冰灾监测预警系统的监测数据。

表 1 电力设施冰灾监测预警系统的监测数据

Tab. 1 The monitoring data of monitoring and pre-alarmed system of electric power infrastructure

| 监测类型 | 监测对象 | 监测内容 | 监测目的 |
|--------|--------|---------|--|
| 气候条件 | 铁塔运行环境 | 环境温度 | 实时监测输电设施的气候环境,结合各种理论模型,对可能出现的冰灾做出预报。 |
| | | 环境湿度 | |
| | | 环境风速 | |
| | | 环境风向 | |
| 设备覆冰情况 | 铁塔绝缘子 | 绝缘子覆冰厚度 | 实时监测输电设施的覆冰情况,以便采取相应的除冰措施。 |
| | 输电导线 | 导线覆冰厚度 | |
| 设备运行情况 | 铁塔绝缘子 | 绝缘子盐密 | 实时监测输电设施覆冰后设备运行情况,以便对覆冰后导线舞动、绝缘子的健康情况及铁塔的安全运行情况进行分析。 |
| | | 绝缘子泄漏电流 | |
| | 输电铁塔 | 塔顶位移 | |
| | | 振动加速度 | |
| | 输电导线 | 导线张力 | |
| 导线弧垂 | | | |
| 导线温度 | | | |
| | | 导线摆动加速度 | |

2.2 传感器的选择

基于 WSN 的电力设施冰灾监测预警系统的数据采集通过一系列的传感器节点实现，这些传感器节点最重要的任务是完成对监测内容的数据采集。电力设施冰灾监测预警系统所需的各种传感器及其作用见表 2。这些传感器在市场上均有成熟的产品，其工作原理不再赘述。

表 2 电力设施冰灾监测预警系统所需的传感器及其作用
Tab. 2 The sensors and its function of monitoring and pre-alarmed system of electric power infrastructure

| 传感器类型 | 传感器名称 | 传感器的作用 |
|------------|-----------|-----------------------|
| 气候监测用传感器 | 温度传感器 | 准确测量环境温度 |
| | 湿度传感器 | 准确测量环境湿度 |
| | 风速传感器 | 准确测量环境风速 |
| | 风向传感器 | 准确测量环境风向 |
| 覆冰情况监测用传感器 | 绝缘子覆冰传感器 | 准确测量绝缘子的覆冰厚度 |
| | 导线覆冰传感器 | 准确测量导线的覆冰厚度 |
| | 盐密监测传感器 | 准确测量绝缘子的污秽分布 |
| | 泄漏电流监测传感器 | 准确测量绝缘子的泄漏电流 |
| | 塔顶位移传感器 | 准确测量杆塔的倾斜程度 |
| 运行情况监测用传感器 | 加速度传感器 | 准确测量杆塔的振动与倾斜趋势或导线舞动趋势 |
| | 导线张力传感器 | 准确测量导线覆冰后的张力情况 |
| | 导线弧垂传感器 | 准确测量导线覆冰后的最大弧垂 |
| | 导线温度传感器 | 准确测量运行中导线的温度 |

2.3 传感器节点的布置

整个监测预警系统由许多传感器节点组成，如何根据输电系统的结构特点合理布置传感器节点的位置是整个系统能否准确反映电力设施运行情况的基本前提。传感器节点的布置遵循 2 个原则：一是要保证系统的覆盖范围，即保证系统能获取满足监测目标所需的全部数据，且有一定的冗余度；二是要考虑经济性，即减少功能相关节点的布置，以免造成浪费。下文结合输电系统的特点，在满足覆盖性的条件下，充分考虑经济性的要求，合理布置整套监测预警系统的传感器节点。

温度传感器、湿度传感器主要用于测量输电系统的气候环境，主要根据区域气候的差异进行布置。一般选择在气候差异比较明显的区域布置温度传感器，考虑到节点可能损坏，可以在每个区域布置 2 套节点，以实现冗余配置。

风速传感器、风向传感器用于测量风速与风向，因此可根据地理位置和历史经验确定的风向作为节点布置的依据，在风向不同的区域同时布置风速传感器节点与风向传感器节点。在同一区域内

也布置 2 套传感器节点，以实现冗余配置。

绝缘子覆冰传感器、导线覆冰传感器利用厚度传感器测量绝缘子与导线上的覆冰情况，一定区域内的设备覆冰厚度应相差不大，但受风向等因素的影响，覆冰厚度可能出现较大的偏差，所以在成本允许的情况下，争取在每个绝缘子串和每条导线都布置这两种传感器节点。

盐密监测传感器、泄漏电流监测传感器反映绝缘子覆冰后的运行状况，每个绝缘子串都必须配置这两种传感器节点。

塔顶位移传感器用于检测杆塔是否发生倾斜以及倾斜的程度，该传感器装于每个杆塔的顶部。

加速度传感器用于测量杆塔的振动与倾斜趋势，在每个杆塔主体上可安装一个加速度传感器节点。如果成本允许，也可在导线表面上布置一个加速度传感器，以便优化导线的舞动情况。

导线覆冰后，荷载增加，在风的影响下，导线和杆塔将承受很大的拉力或张力。在输电系统中，输电导线常用的支撑结构有耐张杆塔和直线杆塔 2 种。耐张杆塔承受导线的拉力使线路分段，能防止杆塔级联事故的发生；直线杆塔主要用于悬挂导线，只承担导线的自重。但直线杆塔比耐张杆塔成本低，所以进行输电系统设计时，通常采用直线杆塔，在直线段，一般每隔 5~10km 布置一座耐张杆塔。鉴于导线覆冰后的自重和张力会以几何倍数增加，耐张杆塔将承受很大的拉力，所以对于耐张杆塔，导线张力传感器节点将布置在杆塔两边所有导线的表面。对于直线杆塔，为防止出现孤立的导线断线故障，仍然需要安装导线张力传感器节点，但其故障率低于耐张杆塔，所以建议每一相导线相隔 3 个直线杆塔安装 2 个导线张力传感器节点，并将其分列于直线杆塔的两侧，这种方式虽然只监测单相导线，但并不影响监测的完整性，因为未被监测的相可以通过相邻杆塔的节点进行监测^[15]。

利用导线的倾角可计算出导线的弧垂^[10]，故建议在每根导线的悬挂点安装导线弧垂传感器节点。

在相对较长的线路上，由于负荷是一致的，因此可根据负荷的一致性来简化导线温度传感器节点的布置。在成本允许的前提下，建议在每根导线上都安装导线温度传感器节点。

图 1 给出了一套完备的监测预警系统中各传感器节点的布置示意图。图中塔 N 给出了完整的传感器节点布置情况，其余各塔只画出了区别于塔 N 的传感器节点布置情况。

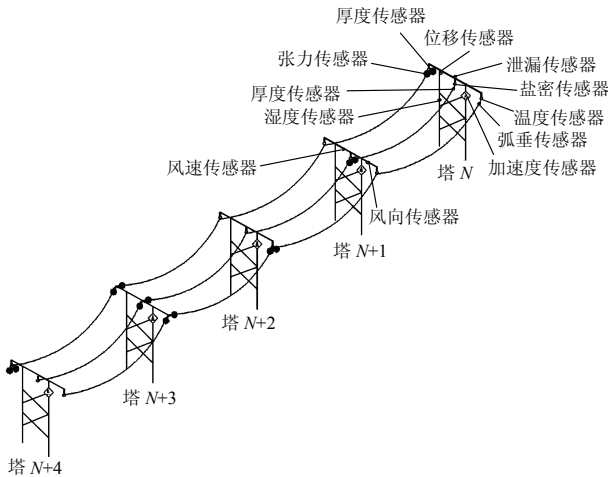


图 1 监测预警系统中各传感器节点的布置示意图
Fig. 1 A sketch map of the sensor placement in monitoring and pre-alarming system

2.4 冰灾监测预警系统的 WSN 拓扑结构

传感器节点的成本取决于待传送物理量的多少与无线收发器件的成本 2 个方面，无线收发器件的成本是一个固定投资，而传输的物理量越多，节点成本就越高。因而，减少测量数据的传输量，就能提高通信速度与通信效率，降低成本。根据上述传感器节点的布置情况可知，各传感器节点已经沿导线或杆塔被预先布置在固定位置上；同时，无线传感器网络是一个多跳网络，数据之间的通信可以通过多跳的方式传递。输电线路具有线性传输的特点，这个特点也决定了监测预警系统传感器网络的拓扑结构。各杆塔之间的数据一般采用单跳传输方式，即一个杆塔传递给另一个杆塔，从杆塔和导线上监测到的数据通过各中间节点一直传送至变电站。为避免个别节点失效的情况，允许采用最多两跳的方式进行数据传递，这种拓扑结构简化了整个通信系统。

各传感器节点一般布置在杆塔塔身或与杆塔连接处的导线表面，同一杆塔周围各传感器节点之间的距离一般在 30 m 以内，而各杆塔之间的距离一般在 100m 以上。根据输电走廊的特点与传感器节点的布置方案，监测预警系统传感器网络适合采用二层架构的拓扑结构。在这种体系结构下，传感

器节点被分为多个簇，每个簇至少有一个簇头，簇内为第一层，簇间为第二层。在监测预警系统传感器网络中，同一杆塔上的传感器节点可以化分为一个簇，即本地通信簇(local communication cluster, LCC)。在一个 LCC 中必然有一个簇头，它用来整合簇内各节点的数据并进行转发。关于簇头节点(cluster header node, CHN)的选举有很多算法，常见的有 TopDisc、GAF、LEACH 等。因簇内各节点地位平等且具有相同的通信功能，所以建议采用一个处理能力和通信能力较强的专有节点作为簇头，簇内其它节点的数据经过该节点处理后，再完成杆塔之间的协调通信。各个杆塔的簇头节点之间形成第二层，即塔间层(inter-tap cluster, ITC)，这一层主要按要求处理与传递各簇头节点之间的数据，维护它们之间的路由表，负责转发报文，并用“接力”的方式将数据传递给变电站。图 2 为监测预警系统传感器网络的二层架构示意图。图中：S 为张力传感器；H 和 T 为温度传感器；W 为风速传感器；D 为位移传感器。

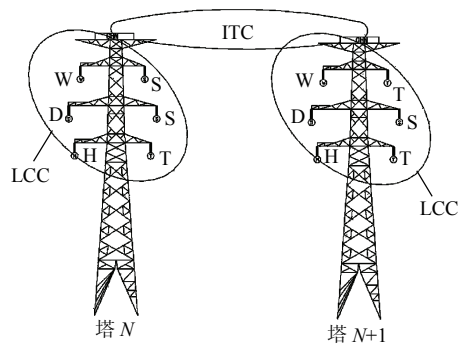


图 2 监测预警系统传感器网络的二层结构模型
Fig. 2 Two layers model of WSN of monitoring and pre-alarming system

3 实用过程中的关键技术

3.1 传感器节点的能量供给

传感器节点通常由电池供电，电池的容量一般不大，一旦电池用完，节点就失去了作用，从而影响到整个监测系统的性能。这要求在无线传感器网络运行的过程中，每个节点都要最小化自身的能量消耗，节点的能量消耗成为协议选择、数据传输的重要参考指标。电力设施冰灾监测预警系统要监测的数据量非常大，在保证通信速度的前提下，节点的能量消耗也非常大。电力设施冰灾监测预警系统具有节点分布区域广、部署区域环境复杂等特点，

通过更换电池的方式来补充传感器节点的能量不大的现实。分析整个监测预警系统的节点布置方案,发现大部分的节点都部署在杆塔塔身或输电导线表面,因而可利用电磁感应原理采用小 CT 取能装置从被监测的输电导线上获取节点所需的能量。

小 CT 取能的原理是在传感器安装侧设备的线路上安装特制的 CT, CT 二次侧输出的感应电压经整流、滤波、稳压等后续电路处理后给节点提供必须的工作电源。设计这种方案时需重点考虑 2 个问题:一是在系统电流很小的时候能够提供足够大的功率,以驱动电子电路;二是在系统出现短路大电流时,要避免 CT 铁心深度饱和。小 CT 取能方式的原理如图 3 所示。当输电线电流较小时,开关 S 断开,主线圈 N_1 感应电流,整流输出供能;当输电线电流较大时,开关 S 闭合,由 N_2 绕组感应小电流供给能量。

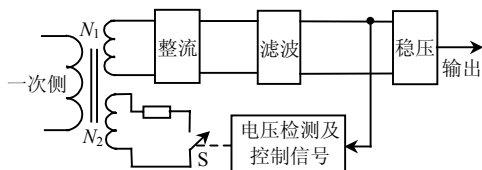


图 3 小 CT 取能方式的原理

Fig. 3 The principle of energy supply by small CT

这种供能方式的优点是功率较大,可以满足传感器节点的能耗需求,缺点是电源可靠性与输电线工作状况直接相关,且在线路故障及空载时不能提供电源,从而导致节点失效。解决这个问题的方法是让传感器节点额外携带一个蓄电池,采用小 CT 取能装置与蓄电池联合给节点供电的方式。图 4 给出了传感器节点供电的整体结构。在线路正常工作时,小 CT 取能装置的输出电压高于蓄电池的电压,二极管截止,节点由小 CT 供给能量;在线路故障或空载时,二极管导通,节点切换至蓄电池供电,二极管的导通与截止是一个瞬间变化过程,切换速度很快,能保证任何情况下节点的正常工作。线路故障的时间并不会太长,蓄电池供电的时间较

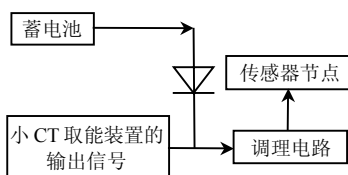


图 4 传感器节点的供电结构

Fig. 4 Power supply structure for sensor node

短,消耗不大,因此采用将这两种供能方式相结合完全可以满足节点对能耗的要求。

3.2 路由协议

路由协议负责将数据分组从源节点通过网络转发到目的节点,无线传感器网络具有很强的应用相关性,不同应用中的路由协议可能差别很大^[13]。应用于电力设施冰灾监测预警系统的传感器网络需要不断查询传感器节点的采集数据,汇聚节点(查询节点)发出任务查询命令,各节点向查询节点报告采集的数据,因而适合采用基于查询的路由协议。应用于电力设施冰灾监测预警系统的传感器网络采用二层结构体系,但是根据实际情况,第一层内的节点是固定部署的,簇头节点也是预先确定的专有节点,因而并不适合采用 TopDisc、GAF、LEACH 等层次型查询协议。依据系统特点,可以定向扩散与谣传路由为基础,设计与监测预警系统联系紧密的路由协议。

在整个监测预警系统中,变电站内的监控终端是汇聚节点,杆塔及导线上的传感器节点是数据源,每个杆塔附近的节点形成一个簇,并有确定的簇头节点,每一个簇相当于谣传路由中的事件区域,簇头节点类似于代理消息经过的传感器节点,因而在建立数据传输路径时,可以避免定向扩散路由的洪泛传播,提高了效率。路由开始时,由线路一端的变电站监控终端发出兴趣消息,查询最近的簇头节点。兴趣消息中包含了任务类型、目标区域、数据发送速率、时间戳、数据融合等参数。每个簇头节点都保存有一个兴趣列表,列表中有一个表项记录发来该兴趣消息的簇头节点、数据发送速率和时间戳等任务相关信息,以建立该节点向汇聚节点传递数据的梯度关系。当簇头节点接收到的兴趣消息与兴趣列表中的参数有相同表项时,该节点收集簇内各节点的相关数据至簇头节点。兴趣传播的过程与梯度关系建立的过程对应,二者确定了命令发送与数据传输的方向。当变电站监控终端开始收集数据时,发出兴趣消息,将监控终端的地址设定为 0,并决定下一接收节点的地址为 1,这指示第一个簇头节点处理兴趣消息并将消息广播至下一个簇头节点,依次传播,当兴趣消息到达线路另一端的变电站监控终端时,记该节点的地址为 $N+1$,同时将其触发为发送节点,进入梯度建立阶段,并标记

下一接收节点的地址为 N ，以此反推建立梯度关系。按照梯度信息，将各簇头节点收集到的数据传播到汇聚节点。图 5 给出了路由的确立机制。

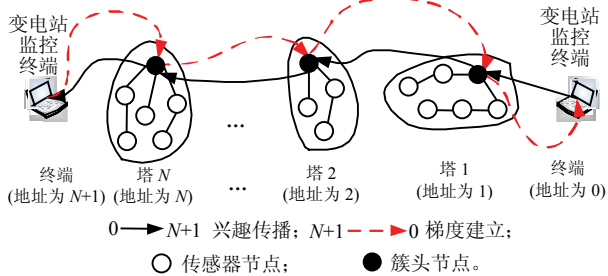


图 5 路由确立机制
Fig. 5 Routing established mechanism

3.3 多传感器的数据融合

应用于电力设施冰灾监测预警系统的传感器网络有许多传感器，如果将每个传感器采集到的原始数据都传送到监控终端，会造成通信宽带的浪费，降低信息收集效率。为避免上述问题，必须采用多传感器数据融合技术去除冗余数据。本文采用以下数据融合技术处理传感器节点的原始数据：

1) 数据级融合。对一些数据设定阈值，只有被监测的数据在一定范围内才进行传送，如可以只传送低于 0 摄氏度的环境温度值，查询时，在传播的兴趣消息中可采用类似 SQL 的语言风格编写如下查询请求：

```
SELECT Temp
FROM Sensors
WHEN Temp<0
```

2) 特征级融合。特征级融合是指通过一些特征提取手段将数据表示为一系列的特征向量，如监测温度时，对温度传感器数据进行综合并表示成地区范围、最低气温、低于 0 摄氏度的天数的形式。

3) 决策级融合。通过对监测对象进行判别、分类和简单的运算，执行满足应用需求的决策。如电力设施的覆冰一般出现在环境温度低于 0 摄氏度、空气相对湿度高于 85%、风速为 1~10m/s 的情况下，当上述条件同时出现时，可以预判该地区出现了覆冰现象，并开始传送该地区出现覆冰的信号。当导线张力变为 0 时，可以判断该导线断线，此时可发送断线信号，以便及时指导开展救灾工作。

4 结论

1) 本文提出了采用传感器网络设计电力设施

冰灾监测预警系统。利用传感器网络具有多跳、无主站的优点，结合输电系统的特点，提出了分簇路由的二层网络结构，通过将小 CT 取能装置与蓄电池相结合，解决了节点的供能问题，基于查询的路由协议以及相应的数据融合技术提高了数据传输的效率。该监测预警系统的通信网络具有很好的可靠性，保证了监测数据的准确传输，其不仅可结合各种理论模型给出冰情预报结果，还可在灾害出现后，及时指导开展抢修救灾工作。

2) 考虑监测环境非常恶劣，将无线传感器网络应用于冰灾监测预警系统仍有些技术问题待研究，主要包括研究实用的可靠性技术与安全技术、监测系统与电力通信网络互联的问题。

参考文献

- [1] 刘和云, 周迪, 付俊萍, 等. 导线雨淞覆冰预测简单模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 44-47.
Liu Heyun, Zhou Di, Fu Junping, et al. A simple model for predicting glaze loads on wires[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 44-47(in Chinese).
- [2] 蒋兴良, 易辉. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 4-5.
- [3] 李鹏, 范建斌, 李武峰, 等. 高压直流输电线路的覆冰闪络特性[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 74-78.
Li Peng, Fan Jianbin, Li Wufeng, et al. Icing flashover performance of HVDC transmission lines[J]. Power system technology, 2006, 30(17): 74-78(in Chinese).
- [4] 黄强, 王家红, 欧名勇. 2005 年湖南电网冰灾事故分析及其应对措施[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 16-19.
Huang Qiang, Wang Jiahong, Ou Mingyong. Analysis on accidents caused by icing damage in hunan power grid in 2005 and its countermeasures[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 16-19(in Chinese).
- [5] 刘煜, 孙新良, 刘基勋. 一种覆冰污秽绝缘子闪络电压的理论计算模型[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 73-75.
Liu Yu, Sun Xinliang, Liu Jixun. A theoretical calculation model for flashover voltage of ice-coated and polluted insulators[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 73-75(in Chinese).
- [6] Zsolt P, Masoud F, László I K. Assessment of the current intensity for preventing ice accretion on overhead conductors[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(1): 565-574.
- [7] Masoud F, Konstantin S. Statistical analysis of field data for precipitation icing accretion on overhead power lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 1080-1087.
- [8] 黄绍培, 余伯平. 200kV 输电线路重冰区观冰综合分析[J]. 高电压技术, 1993, 19(1): 54-57.
Huang Shaopei, Yu Boping. An comprehensive analysis about the observation of freezing phenomena on 220kV transmission line in heavy frost zone[J]. High Voltage Engineering, 1993, 19(1): 54-57(in Chinese).

(下转第 35 页 continued on page 35)