

基于多跳 WSN 的母线监测系统研究

孙 林¹, 邹国伟², 李 飞¹, 陈丹宁²

(1. 大全集团有限公司, 江苏 镇江 212211;

2. 清华大学软件学院, 北京 100084)

摘 要: 采用多跳无线传感器网络(WSN)技术对母线温度进行监测, 通过在母线系统上的关键位置部署带有温度传感器的无线监测节点, 实现对母线全方位、实时的温度监测, 为母线监测中心提供母线状况集中监测、母线运行状况预警、母线故障分析诊断、母线故障知识库维护等功能。应用结果表明, 该系统中每个节点的收包率可达 97%以上, 24 h 内所有节点的收包率能够维持在 96%以上, 且系统运行稳定。

关键词: 无线传感器网络; 母线; 温度监测; 智能电网; 汇集树协议; 多跳

Research on Busbar Monitoring System Based on Multi-hop Wireless Sensor Network

SUN Lin¹, ZOU Guo-wei², LI Fei¹, CHEN Dan-ning²

(1. Daqo Group, Zhenjiang 212211, China;

2. School of Software, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

【Abstract】 This paper designs centralized monitoring system of busbar temperature using Wireless Sensor Network(WSN) technology. By deploying several wireless nodes with temperature sensors in the key position of busbar, the running temperature of busbar can be monitored in real time with multi-dimension. Monitoring center provides functions such as centralized monitoring busbar running status, early warning, analysis and diagnosis of busbar fault, maintenance of busbar fault database, etc. Application results show the packet reception ratio of each node is above 97%, and the packet reception ratio of all nodes keeps above 96% in 24 hours. The system is stable.

【Key words】 Wireless Sensor Network(WSN); busbar; temperature monitoring; smart grid; Collect Tree Protocol(CTP); multi-hop

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.02.035

1 概述

随着供电可靠性要求的提高, 电网朝着智能化方向发展。智能电网是将先进的传感量测技术、信息通信技术、分析决策技术和自动控制技术与能源电力技术以及网络基础设施高度集成而形成的新型现代化电网。智能电网将实现对电网全景信息的获取, 以可靠的物理电网和信息交互平台为基础, 整合各种实时生产和运营信息, 通过加强对电网业务流的动态分析、诊断和优化, 为电网运行和管理人员展示全面、完整和精细的电网运营状态图, 同时能够提供相应的辅助决策支持、控制实施方案和应对预案^[1]。

在传统电网中, 母线是其中用来连接各级电压配电装置及其变压器之间的输电设备, 它是电网系统中的一个关键组成部分。随着智能电网对实时监测、控制、诊断和分析等需求不断增加, 出现了母线智能化技术。母线的正常安全运行是保障电力传输的必要条件, 一旦母线系统发生故障, 将会导致输电中断甚至安全事故, 而若能实时了解母线系统的运行状态, 在故障发生前发现问题排除隐患, 则能够避免不必要的损失。母线温度是反映母线系统运行状况的重要参数, 当母线发生故障如接触不良等发生时, 由于故障点电阻增大, 会使局部大量产热, 使表面温度上升超过正常阈值, 因此对母线温度的监测在实际系统中非常必要。

当前, 已有的母线温度监测系统常采用 CAN 总线方式或光纤传感器等技术。这 2 种方式存在部署困难、信号干扰和

高成本等问题。而无线传感网具有部署方便、抗电磁干扰和成本优势, 因此, 本文采用多跳无线传感网技术对母线进行监控, 从而在实际应用中有效地监测母线温度。

2 相关工作

目前存在下面 3 种方式对母线温度进行监测。

2.1 CAN 总线方式

CAN 总线是国际上应用广泛的现场总线之一, 是一种多主方式的串行通信总线。图 1 是基于 CAN 总线的母线温度监测系统结构。

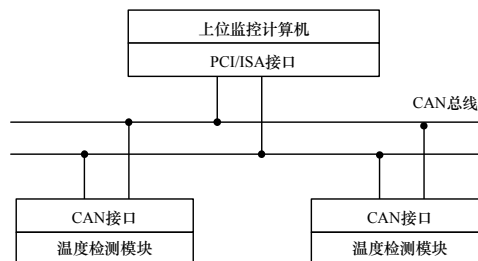


图 1 基于 CAN 总线的母线温度监测系统结构

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61073168)

作者简介: 孙 林(1974—), 女, 工程师、硕士, 主研方向: 无线传感器网络; 邹国伟(通讯作者), 硕士研究生; 李 飞, 工程师; 陈丹宁, 硕士研究生

收稿日期: 2011-07-12 **E-mail:** zgwwm@yahoo.com.cn

CAN 适配卡通过 PCI 和 ISA 总线与上位机通信，而温度监测模块通过 CAN 接口实时地将节点的数据发送到 CAN 总线^[2]。

但是基于 CAN 总线方式的母线温度监测系统存在布线及改线工程大、不可移动、部署的工作量较大等问题。

2.2 光纤传感器

光纤传感器是一种把被测参数转变为可测的光信号的装置，以光作为敏感信息的载体，以光纤作为传递敏感信息的媒质。

光纤传感器由光发送器、敏感元件、光接收器、信号处理系统以及光纤构成。光纤传感器的基本工作原理是将来自光源的光经过光纤送入调制器，使待测参数与进入调制区的光相互作用后，导致光的光学性质发生变化，再经过光纤送入光探测器，经解调后，获得被测参数。

光纤传感器耐高温、不受电磁干扰、电绝缘性能好，在强电磁场等恶劣环境中能够稳定工作^[1]。但光纤传感器的缺点是成本高，不适合大规模部署。

2.3 单跳无线传感网

文献[3]利用无线传感网技术监测变电站的母线温度，采用 Zigbee 协议传输数据，组成星型的网络，即多个传感器节点与基站节点直接通信，因此该网络是个单跳的网络。采用单跳的网络与实际的应用场景有关，变电站环境比较空旷，没有建筑物遮挡，传感器节点采集的数据直接发送给基站节点。

而本文的应用场景之一是监测楼宇的母线温度，楼宇的结构复杂，无线信号很容易受到墙壁和楼层的遮挡，因此单跳无线传感网在该环境下信号传输效果变差。

综上所述，母线温度监测系统采用 CAN 总线方式部署工作量大，采用光纤传感器方式价格较高，而单跳无线传感网在楼宇中效果不好，因此本文提出了采用多跳无线传感网来监测母线温度的解决方案。

3 系统设计与实现

本文系统主要用于监测楼宇内的母线温度。楼宇内母线在横向部署时要穿过墙壁，在纵向部署时要穿过楼板。因此，相应的架构设计既要满足母线温度检测中对无线多跳传感技术的需求，也要解决本文系统在该环境中部署遇到的信号遮挡问题，以提高系统的可扩展性。

3.1 总体架构设计

母线温度监测系统是一个分布式系统，根据分散监控、集中管理的思想，同时为了提高本文系统的可扩展性和在楼宇环境运行效果，设计了如图 2 所示的系统架构。

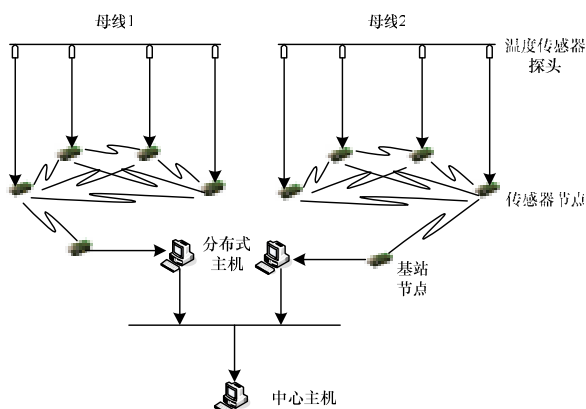


图 2 母线温度监测系统架构

系统分为传感器节点、基站节点、分布式主机和监控中心主机 4 个部分。每一层母线部署若干个传感器节点、1 个基站节点和 1 个分布式主机，分布式主机通过有线网络与监测中心主机通信。

本文系统采用的无线传感器硬件为 CrossBow 公司开发的 TelosB。节点与基站程序使用 TinyOS 操作系统和 NesC 语言，网络层使用 CTP 协议构建路由。

3.2 系统设计

3.2.1 系统软件设计

(1) 传感器节点程序设计

传感器节点部分的主要功能是感测温度数据，将温度数据根据路由表通过无线信道发送给下一跳的中继节点，同时每个节点也为其他节点转发数据包，直至数据包到达基站。传感器节点以一定的周期间隔读取温度传感器的数值。当温度读取完成后，使用无线通信模块把数据发送出去。

传感器节点程序和基站节点程序利用事件驱动方式的设计。事件驱动是指当一个任务完成后，就可以使其触发一个事件，然后 TinyOS 自动地调用相应的处理函数。

在图 3 中，定时器 Timer 定时时间到调用 Timer.fired() 处理函数，该函数调用读取温度 TemperatureReader 接口。温度读取完成后，TemperatureReader.readDone() 处理函数被执行，在该函数中调用无线通信 Send 接口把带有温度的数据包发送出去。

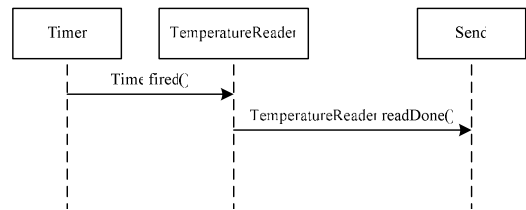


图 3 传感器节点一个周期内的事件序列图

(2) 基站节点程序设计

基站节点与传感器节点使用相同的无线模块。

另外，它还具有利用串口同计算机进行通信的功能，主要负责实时收集由传感器节点利用多跳传回来的带有温度信息的数据包，并把数据包通过串口通信方式传输给上位机，如图 4 所示。

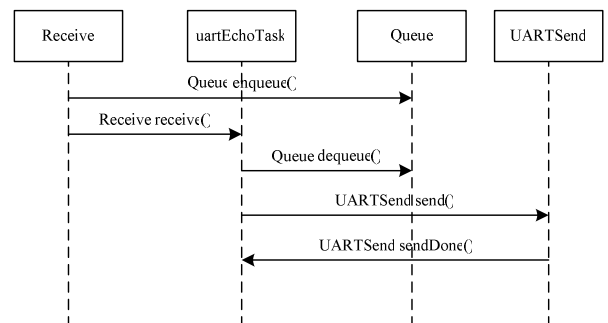


图 4 基站节点数据采集的事件序列图

(3) 上位机程序设计

上位机部分包括分布式主机和监控中心主机。

分布式主机部分通过串口通信收集基站节点发送的数据包，通过网络通信的方式发送给远程主机。

本文采用 C/S 架构，创建一个读取串口数据的线程，每隔一段时间读取串口数据，并发送给监测中心主机，如图 5 所示。

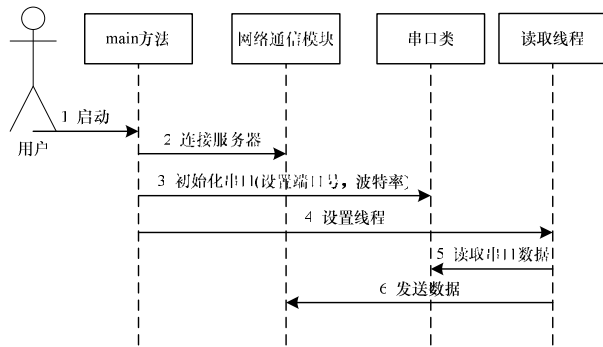


图 5 分布式主机业务逻辑序列图

监控中心主机软件部分包括 2 个模块: 数据处理模块和监测预警模块。

数据处理模块获取客户端数据, 对数据包进行解析, 存储在数据库中。监测预警模块连接数据库, 读取母线测温点上的实时温度数据, 对数据进行立体化的直观展示, 并且给管理人员提供数据分析、趋势异常提示等管理功能。

3.2.2 保障性设计

母线温度监测系统在设计部署中要注意下面 2 个问题:

(1)容错设计。在母线温度监测系统的运行过程当中, 个别节点出现故障的情况可能会时有发生, 系统应保证少量的节点工作异常不会影响到整个网络的通信性能。

本文系统提出增加纯中继节点数目来提高通信的可靠性。在接近基站附近的节点上, 由于存储转发的数据包数目很大, 而且路由协议在选择路由时可能会由于特殊的网络拓扑而偏好于某些关键节点(该类节点中转负荷远高于周围节点的节点), 容易造成局部某些节点的拥塞和丢包。利用故障诊断获得的信息, 定位一些容易出现负载过大的区域, 在其中增加纯中继节点, 这些节点不参与感知温度数据, 仅参与路由和数据转发过程, 从而达到增加下一跳节点冗余的目的。

(2)母线穿过墙壁时的通信方案。本文系统在实际楼宇中部署时, 由于无线传感器节点在母线上的部署沿着母线呈线性, 在同一楼层的母线需要穿过多个房间, 然而, 实际楼宇的墙壁上留有仅供母线穿过的洞, 但无线信号在穿过该墙壁时却会有非常大的强度衰减。当隔墙两侧间需要通信的无线节点间的信号强度低于稳定传输的阈值时, 会使得传输丢包概率大大增加, 影响网络通信质量。为了解决通信穿墙的问题, 本文提出了有线桥接方法, 即墙壁两侧的节点通过有线的方式传输数据。

3.2.3 多跳与路由协议

无线传感器网络协议负责将各个独立的节点形成一个多跳的数据传输网络, 分为网络层协议和数据链路层协议 2 个部分。网络层的路由协议决定监测信息的传输路径; 数据链路层的介质访问控制用来构建底层的基础结构, 控制传感器节点的通信过程和工作模式^[4]。

本文采用汇集树协议(Collection Tree Protocol, CTP)^[5]作为网络层协议。CTP 协议分为 3 个部分: 链路估计器, 路由引擎和转发引擎。其中, 链路估计器负责估计节点与邻居节点间的单跳链路质量, 并维护一个邻居表。路由引擎使用链路估计器提供的信息选择到根节点传输代价最小的节点作为父节点, 并维护一个路由表。转发引擎维护本地包和转发包的发送队列, 选择适当的时间把队列中的包发送给父节点。

CTP 链路质量估计由链路估计交换协议(Link Estimation Exchange Protocol, LEEP)来完成。在 LEEP 中, 节点根据接

收数据的成功率来估计到某个邻居节点的入站链路质量。以节点 A、B 为例, A 向 B 发送的总包数为 $total_A2B$, 其中, B 成功接收到的包数为 $success_A2B$, 从而计算 B 的入站链路质量为:

$$d_r = success_A2B / total_A2B \quad (1)$$

同理地, B 向 A 发送的总包数为 $total_B2A$, 其中, A 成功接收到的包数为 $success_B2A$, 从而计算 B 的出站链路质量为:

$$d_f = success_B2A / total_B2A \quad (2)$$

因此, 节点 A 与 B 双向的链路质量 lq 为:

$$lq = d_f \cdot d_r \quad (3)$$

CTP 路由引擎使用期望传输值 ETX 作为路由梯度:

$$ETX = 1 / (d_f \cdot d_r) \quad (4)$$

ETX 越小, 表示链路质量越好。根节点的 ETX 为 0, 其他节点的 ETX 为其父节点的 ETX 值加上到父节点链路的 ETX 。节点选择 ETX 最小的作为其父节点。整个网络形成以基站节点为根的多叉树, 节点采集的数据最终汇集到基站节点。

以图 6 为例说明路由构建策略, A 为根节点, 其 ETX 为 0; B 邻居节点为 A 和 D, A 和 B 链路的 ETX 为 b , B 和 D 链路的 ETX 为 d_1 , 由于 D 的 ETX 未计算, 其数值为一个最大 16 位正整数, 因此 B 选择 A 为父节点, B 的 ETX 为 b ; 同理, C 选择 A 为父节点, C 的 ETX 为 c ; D 的邻居节点为 B 和 C, D 和 B 链路的 ETX 为 d_1 , D 和 C 链路的 ETX 为 d_2 , 因此 D 的 ETX 为 $\min(b+d_1, c+d_2)$, 同时 D 选择最小的 ETX 作为父节点。

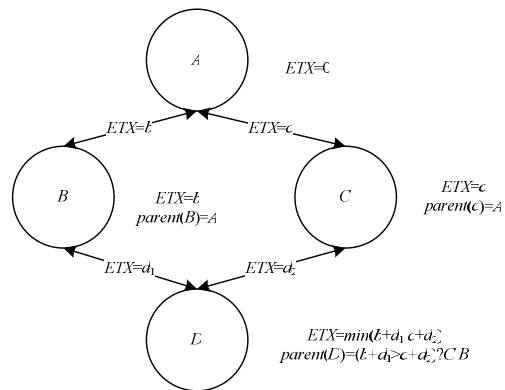


图 6 ETX 求解与路由构建

3.3 可视化监控

本文系统开发了相应的传感器节点程序、基站节点程序和上位机程序。其中母线造型系统作为上位机监控软件, 提供三维展示节点在母线上布局、母线状态监测和母线运行状态报警功能。图 7 为节点在母线上的三维分布。其中, 圈中是传感器节点。

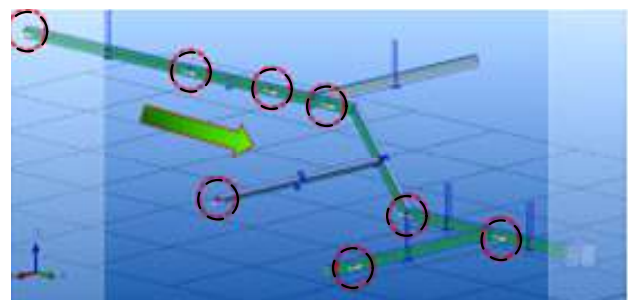


图 7 传感器节点在母线上的部署情况

图 8 展示了母线状态预警的功能。系统提供了显示多条历史数据的功能，反映温度变化的趋势。当母线的温度大于一定阈值时，系统提供预警功能，通知操作人员做出决策。

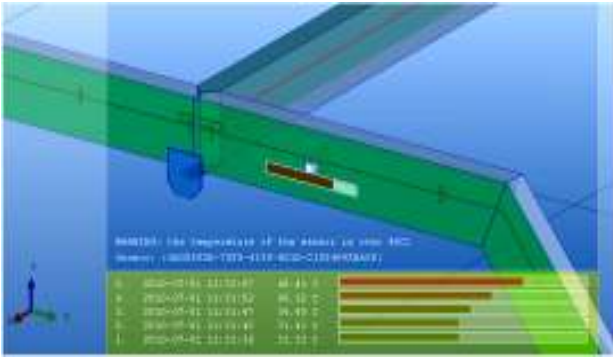


图 8 母线运行状态报警

4 应用分析

本文开发的母线温度监测系统在镇江西门子母线公司开展了应用部署，在一些实际的部署应用中测试了系统的运行性能情况。其中，数据包跳数分布、收包率是反映系统的重要性能指标。本文采集了同一个楼层的母线上 15 个节点运行大约 24 个小时的数据，下面分析这些节点的数据包跳数分布和收包率情况。

跳数分布图记录每个节点在某个跳数上发送数据包个数。各节点的跳数分布如图 9 所示，图中点的大小代表相应数据包数目所占比例的大小。由图可见，大部分节点发送一段时间内的数据包可能具有不同的跳数到达基站，即数据包经过路径不同，由此可见 CTP 协议构建的多跳路由是动态的，随环境状况变化而变化的。

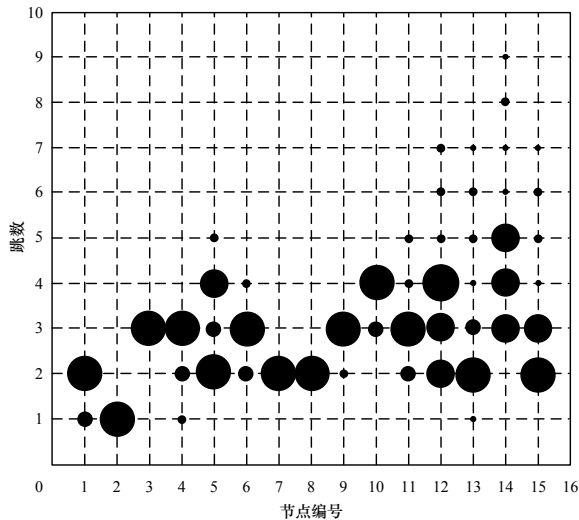


图 9 跳数分布

各节点的收包率如图 10 所示，每个节点的收包率为 97% 以上，系统的可靠性可以得到保证。图 11 为所有节点的收包率随时刻的变化趋势。所有节点的收包率在这 24 h 内维持在 96% 以上，由此可见，系统在各个时间段的通信状况是稳定且满足应用需求的。

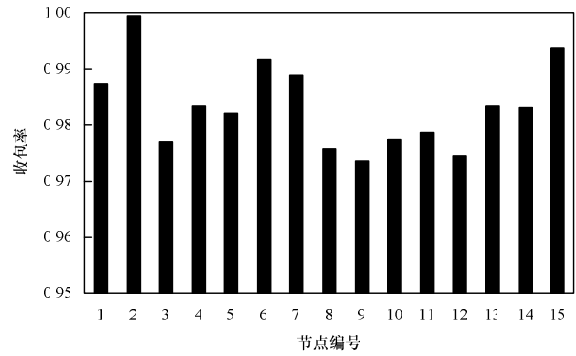


图 10 各节点的收包率

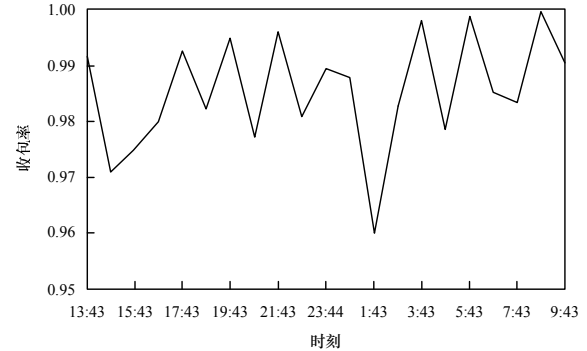


图 11 收包率随时刻变化趋势

5 结束语

本文提出一种基于多跳无线传感网的母线温度监测的解决方案，在检测能力和系统成本之间作出有效平衡，采用有线桥接的方式解决在楼宇内无线通信受到墙壁及楼层的阻挡问题，部署中继节点以解决负载不平衡性，并提高系统稳定性，开发母线造型系统三维展示母线分布及母线上的传感器节点。测试结果表明，该系统具有较高的运行效率和可靠性。下一步工作将实现无线重编程的功能，远程地对传感器节点进行代码更新和配置，同时完善监测中心母线运行状态预警系统为操作人员提供更好的决策。

参考文献

- [1] 刘振亚. 智能电网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 刘如峰, 李世平, 宋 兵, 等. 基于 CAN 总线和 AVR 单片机的温度检测模块设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2010, (3): 58-60.
- [3] Long Hainan, Zhang Leyang, Pang Jiao, et al. Design of Substation Temperature Monitoring System Based on Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Advanced Computer Control. Shenyang, China: [s. n.], 2010.
- [4] 孙利民, 李建中, 陈 渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [5] Omprakash G, Rodrigo F. Collection Tree Protocol[C]//Proc. of the 7th ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. Berkeley, USA: ACM Press, 2009.

编辑 陈 文