

Research of ZigBee WSN and Its QoS in Aluminum Electrolytic Industry*

LIU Yufang¹, WANG Shaoyuan^{1*}, WU Mianli²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. China Railway Resources Group Co, LTD, Beijing 410083, China)

Abstract: Considering the problems of high cost and difficult maintenance in aluminum factory computer control system which uses wire network, this paper proposed a solution of ZigBee WSN delivered in aluminum factory where are strong electric field, strong temperature field and strong magnetic field environment. The key feature of this arousing method is attaining the demand of network coverage and QoS. Furthermore, the backlog data deterministic upper bound is given to enhance link throughout and backlog data in the means of a rate adjustment algorithm. The experiment results illustrate this approach not only can maintain network connectivity in high efficiency, but also significantly improves the performance of the network QoS.

Key words: wireless sensor network; connectivity; quality of service; arousing method; rate adjustment

EEACC: 6150P

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2010.10.022

铝电解工业中 ZigBee 无线传感器网络及其 QoS 研究*

刘玉芳¹, 王绍源^{1*}, 吴免利²

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082;
2. 中铁资源集团有限公司, 北京 100039)

摘要: 针对目前铝厂计算机控制采用的有线网络成本高、维护不方便等问题, 提出了在铝厂强电场、强热场、强磁场环境下 ZigBee 无线传感器网络 (WSN) 解决方案; 并对其连通性覆盖和服务质量 (QoS) 问题, 提出了覆盖唤醒方法; 采用基于积压数据确定上界的速率调整算法改善链路吞吐量和降低积压数据。仿真结果表明, 唤醒方法有效保证了网络连通性覆盖, 而速率调整算法明显改善了网络 QoS 性能。

关键词: 无线传感器网络; 连通; 服务质量; 唤醒方法; 速率调整

中图分类号: TP393.06

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)10-1471-05

自 80 年代初我国开始研制铝电解计算机控制系统以来^[1-2], 大部分铝厂已实现了计算机控制。在铝厂实际生产中, 不仅工人需要现场了解生产情况, 生产管理人员也需要远程监测铝电解槽状况。目前数据的传输基本是有线网络, 如 RS-485, CAN 等。这些有线网络一般具有成本高、维护不方便等缺点, 而无线传输在这些方面则拥有明显优势。因此, 在现有的检测系统的基础上充分发挥无线通信的潜能, 对于监测分析铝电解现场实时电解槽情况、实现检测系统和管理系统的一体化集成和提高铝电解生产控制水平都无疑是很有价值和必要的。由于环境恶劣且要求数据可靠, 因此如何保证覆盖连通和 QoS (Quality of Service) 成为铝厂无线网络目前需

要解决的任务。

本文针对铝电解环境是强电场、强热场、强磁场和高噪声^[3]等特点, 提出一种适用于“三场”(即电场、热场和磁场)的 WSN (Wireless Sensor Network) 的铝电解工业参数监控系统设计思路, 并在如何改善连通性覆盖和服务质量的问题上进行了探讨。

1 铝厂无线传感器网络模型

本文设计的铝电解工业参数监控系统是基于 ZigBee 的 WSN^[4], 利用其分布性和自组织性, 实现一定数量节点网络的实时、分布式处理。系统由 WSN (ZigBee 采集节点)、数据处理中心 (槽控机) 和监控中心等部分组成。

项目来源: 国家“十一五”科技支撑计划项目资助 (2007BA12B01)

收稿日期: 2010-01-27 修改日期: 2010-06-07

图1是铝电解工业参数监控系统整体框架,方框表示铝电解工业参数监控的 ZigBee 网络。实现直接控制级^[5-6]的功能扩展(由 ZigBee 节点模块实现):铝电解参数测量、无线通信和兼容操控机。

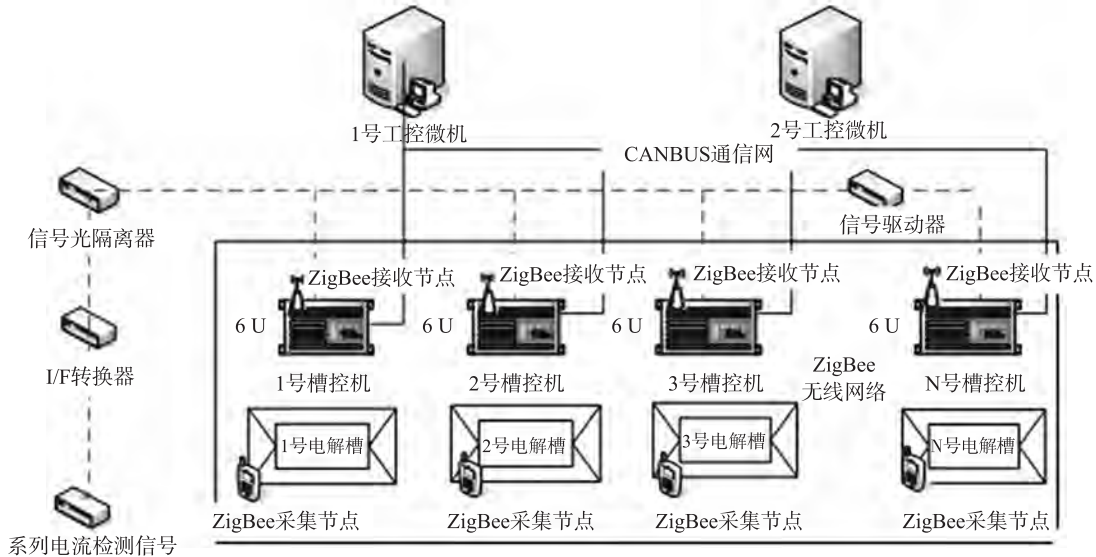


图1 ZigBee网络整体结构图

(1) WSN 的 ZigBee 网络具有通用无线自组织网络特点,可以用无向图 $G = (N, L)$ 表示^[7],其中 N 表示节点集合, L 表示无向链路集合。当两个节点处在各自通信范围之内时认为链路存在。

(2) 节点特性 所有节点随机分布在感兴趣区域^[8](槽控机附近),不考虑其移动性;所有节点初始状态相同,数据处理能力相同,初始能量相同;节点通信半径与感知半径相同,感知范围是以节点为圆心, R 为半径的圆;节点采用布尔感知模型,感知半径内信息能被节点接收,反之则不能。

(3) 链路特性 $B(i, j)$ 表示被链路 (i, j) 阻塞的所有其他链路的集合,意味着链路 (i, j) 被调用需要所有属于集合 $B(i, j)$ 的链路处于空闲;采用随机接入的 CSMA/CA 链路协议,其中不采用二进制退避算法而是固定窗口 CW_{max} 退避算法;链路调度满足泊松分布,参数为 λ_{ij} ;数据包传输时延为 $1/\mu_i$, 确认包传输时延忽略。

2 “三场”恶劣环境下的网络连通

2.1 在“三场”环境下接收信号

每个传感器无线节点的物理层都有个接收阈值,如果一个包的接收信号功率低于此接收阈值,将其标记错误并被媒体接入层丢弃。针对模拟“三场”无线传播环境的需求,提出有一定预测精度的“三场”接收信号计算方法。依据 Okumura 电波传播衰减模型,该模式是以准建筑物的路径损耗作为

此系统完成了工业铝电解参数测试、处理、监控等功能。基于 ZigBee 网络连通和 QoS 研究,本文假设该系统的 WSN 模型具有如下节点特性和链路特性:

参考,对其他因素分别以校正因子的形式进行修正。“三场”WSN 主要需要矫正的损耗因素有障碍物阻挡损耗和“三场”综合损耗。因此,假设“三场”传播模型如下:

$$\left[\frac{P_r(d_0)}{P_r(d)} \right]_{dB} = -10\beta \lg\left(\frac{d_0}{d}\right) + X_{dB} + Y_{dB} \quad (1)$$

其中障碍物损耗 X_{dB} 主要是铝厂电解槽等设备一般是 8 ~ 10 dB,“三场”损耗 Y_{dB} 确定主要基于铝厂停产车间和生产车间测量的数据比较,一般为 4 ~ 5 dB,路径损耗指数 β 由基准路径 d_0 及其接收功率 $P_r(d_0)$ 和相对路径 d 及其接收功率 $P_r(d)$ 计算得到。

2.2 网络连通覆盖

传感器节点典型工作状态分为两种:Sleep 状态和 Active 状态。节点在 Sleep 状态下可以节省能量,防止产生过多的冗余信息;而在 Active 状态下节点负责收集信息并与邻居节点通信传输数据等。自组织网络中,在节点的通信区域内的每个点,看它是否被其他节点所覆盖,如果所有节点都被其他节点覆盖,确定该节点为冗余节点,进入 Sleep。否则,进入 Active。

根据文献[9]中证明:当节点的无线通信半径大于等于其 2 倍感知半径时,该覆盖集是连通的;但受到器件本身和周围环境等限制,各自有不同要求,当节点的无线通信半径小于 2 倍感知半径时,不能保证该覆盖集的连通性。一般情况认为传感器节点通信半径大于感知半径。在此,假定在最差情况下,即网络通信半径等于感知半径的情况下,提出铝厂

“三场”无线网络的连通性覆盖保证机制,首先,根据活动(Active)节点的路由表信息,计算网络覆盖概率 P_n ,当覆盖概率满足期望的覆盖概率时,Active 节点进入工作状态;否则,Active 节点发送 Awake 命令,唤醒 WSN 内的休眠(Sleep)节点实现网络覆盖连通,保证通信畅通。算法过程如下:

```

Active 节点:用户设定好期望的覆盖概率  $P_{n\_average}$ ;
While(true)
{
    IF( $P_n > P_{n\_average}$ )
    进入工作状态;
    Else
        发送 Awake 命令;
}
Sleep 节点:
While(true)
{
    IF(command = Awake)
        确定 Sleep 节点能量和接收功率,激活最佳唤醒节点;
}

```

根据铝电解 WSN 节点特性,每个传感器节点的监控区域为 πR^2 ,则每个传感器能监控整个感兴趣区域的概率为: $P_1 = \frac{\pi R^2}{S}$,其中, S 表示整个兴趣区域。两个传感器节点所能达到的覆盖概率为 $P_2 = 1 - (1 - P_1)^2$,则 n 个节点的覆盖概率为 $P_n = 1 - (1 - P_1)^n$ 。

Sleep 节点通过接收信号功率和节点本身剩余能量来确定总体性能,接收信号功率最强和剩余能量最大为最佳唤醒节点。本文采用给节点剩余能量和接收信号功率分别加权的方法确定唤醒节点。例如第 i 工作节点唤醒第 k 个节点的计算公式为式(2),选择对应最大的 Sleep 状态节点唤醒。

$$H_{ik} = w_1 \times E_k + w_2 \times P_{rik} \quad (2)$$

其中, w_1 和 w_2 为加权系数; P_{rik} 表示节点 i 到 k 信号接收功率,可以由式(1)确定; E_k 为节点剩余电量,通过内部传感器可以测得。

3 “三场”恶劣环境下的 QoS 机制

传感器网络不同业务有不同的 QoS 需求,比如文献[10]根据传输模型的不同分为 3 种业务类型:基于事件驱动的应用、基于查询驱动的应用和持续不断传输的应用,它们对于吞吐量的 QoS 需求依次提高。根据铝厂对于生产安全的重要性和对于持续不断传输的要求,WSN 的 QoS 首要保证的是端到端

的数据传输性能^[11],因此,本文讨论的 QoS 焦点在链路吞吐量和积压数据两个方面,提出基于节点积压数据调整链路上数据速率方法来提高网络可靠性和平均吞吐量。

3.1 链路吞吐量

根据无线传感器网络模型链路特性,根据文献[10]和文献[12]中 PASTAT (Poisson Arrivals See Time Averages Theorem) 定理,推导“三场”WSN 的链路吞吐量模型如下:

$$x_{ij} = \frac{\lambda_{ij} P(B(i,j))}{\mu_{ij}} = \rho_{ij} \frac{\sum_{Q \subseteq B(i,j)} (\prod_{(i,j) \in Q} \rho_{ij})}{\sum_{Q \subseteq E} (\prod_{(i,j) \in Q} \rho_{ij})} \quad (3)$$

$P(B(i,j))$ 为 $B(i,j)$ 空闲概率,链路调度概率

$$\rho_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{\mu}, C \text{ 为信道带宽, } T_{slot} \text{ 为链路时隙, } \lambda_{ij} = \frac{1}{E(cw)T} = \frac{2}{(CW_{min} + CW_{max})T} \circ$$

3.2 积压数据上界

假定 WSN 里数据流服从 (σ_i, ρ) 漏桶管制和速率-延迟 (R_i, T) 服务曲线,文献[13]推出 WSN 节点的积压数据上界 Q_i^{bound} :

$$Q_i \leq \sigma + \rho \sigma / R_i \quad (4)$$

当漏桶容量 $\sigma = \delta$,节点 Q_i^{bound} 最小;当服务速率 R_i 最小($R_i = x_{ij}$)时,最小积压数据上界为网络积压数据上界。文献[14]推导出整个网络的节点积压数据上界:

$$Q_{net} \leq \delta + \rho (CW_{min} + CW_{max}) CT_{slot} \max_{1 \leq i \leq N} \frac{\sum_{Q \subseteq E} (\prod_{(i,j) \in Q} \rho_{ij})}{2 [\sum_{Q \subseteq B(i,j)} (\prod_{(i,j) \in Q} \rho_{ij})]} \quad (5)$$

3.3 积压数据上界调整速率算法

针对 WSN 的资源预留问题,提出依据积压数据上界调整数据产生速率,改善 QoS 性能,提高 WSN 链路信息传输的可靠性。通过分析可知,发送节点的数据产生率越大,其接收节点的积压数据就越多。当接收节点积压数据超过其上界时,会导致数据堵塞,QoS 质量下降。因此采取降低临近一级发送节点的数据产生率对系统 QoS 性能提高有显著帮助,而减小数据产生率到最低标准时,则需减少更上一级的发送节点的数据产生率,逐级往上,直至满足系统积压数据的要求。算法过程如下:

设定期待的积压数据上界 OSDr,OSD 为积压数据,设定好一个最小数据产生率 CBR_{min} , CBR_i 为节点 i 数据产生率,每次调整的数据产生率调整量为 Δi ;SUB 命令为要求减少数据产生率命令。

接收节点上运行如下算法:

```
While(TRUE)
{
    计算出当前的 OSD ;
    If(OSD > = OSDr)
        给发送节点发送 SUB 命令;
}
```

发送节点上运行如下算法:

```
While(TRUE)
{
    接收到接收节点发送的命令 Command
    If(Command == SUB)
        If(CBRi ≥ CBRmin)
            减少该传感器节点的数据产生率;
            使之 CBRi = CBRi - Δi ;
        Else
            发送 SUB 命令给上一个发送节点;
}
```

OSD 反映了单个节点状况,随着节点数据产生率 CBR 的增加,OSD 增加,QoS 质量下降。因此通过某种机制,如 SUB 命令减少数据产生率,达到提高 QoS 参数的效果。减少到一定程度还达不到 QoS 要求时,则减少它上一级发送节点流量的产生率。

4 实验仿真

在 Network Simulator(NS2)^[14] 平台上进行仿真实验,加入 LR - WPANs 网络包实现 ZigBee 的 WSN。禁用二进制退避算法,加入并启用了固定退避延时算法。利用此仿真平台,依照上述“三场”环境,在 500 m × 500 m 区域内,建立通信距离为 100 m 且具有连通性覆盖保证机制的网络模型。图 2 是保证通信半径大于 2 倍感知半径情况下,没有使用唤

醒机制和使用唤醒机制下的网络覆盖率仿真图。在图中,没有使用唤醒机制,开始的覆盖率为 100%,当有节点开始失效时,覆盖率明显下降,网络生存时间不长的问题凸显出来。使用唤醒机制后,广播 REQ 信息周期性查询网络覆盖概率,保证期望的覆盖概率前提下节省网络的能耗,网络生存时间得到了有效延长。

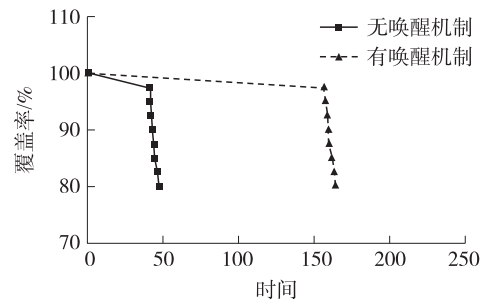


图2 唤醒机制覆盖率仿真图

为得到节点的 OSD,可以对整个仿真范围内的节点进行跟踪,然后对仿真结束后得到的 TRACE 文件进行分析,选取所需观测节点在仿真过程中 OSD 的最大值作为该节点的积压数据仿真值上界(OSD_{r_S})。依据上述积压数据上界公式求得其估计值(OSD_{r_E})。

图 3 和图 4 分别为“三场”WSN 中选取四条平行链路 A、B、C 和 D,它们的接收节点分别是 1、3、5、7,分析应用积压数据上界调整速率算法调整前和后的链路的吞吐量和积压数据变化情况,积压数据上界的确定,有利于控制整个网络端到端性能,当网络通信质量较差,接近积压数据上界时,节点通过积压数据上界为基础调整速率算法,可在保证信息正确传输的要求下,提高链路吞吐量和降低积压数据,改善网络 QoS 参数。

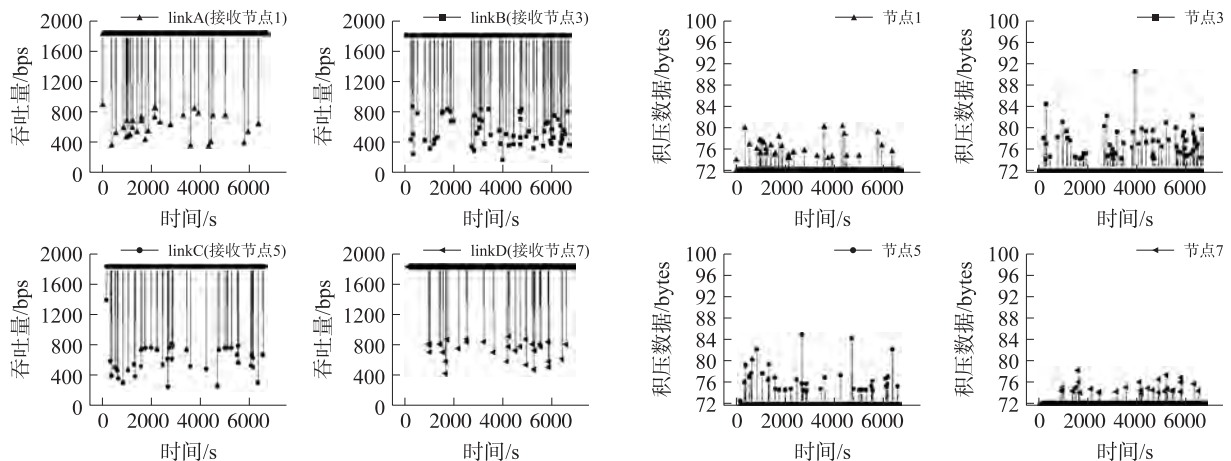


图3 调整前链路吞吐量与节点积压数据

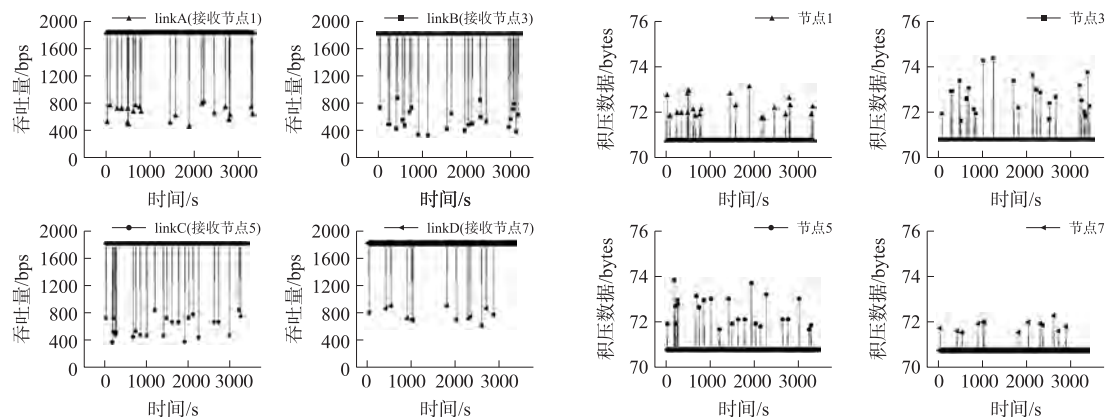


图 4 调整后链路吞吐量与节点积压数据

5 结束语

对铝厂“三场”环境下 WSN 的 QoS 性能进行研究。对系统总体结构进行了规划;介绍了信号传播模型和“三场”WSN 连通性覆盖唤醒方法;阐述了 WSN 链路吞吐量和积压数据计算方法,提出了基于积压数据确定上界调整速率算法。仿真结果表明,在满足“三场”WSN 最差情况下的连通性覆盖要求的基础上,通过考虑接收信号强度和剩余能量的唤醒机制使得工作节点达到了网络连通的目的,提高了网络覆盖率。以积压数据确定上界为依据调整节点发送速率算法,提高了链路吞吐量和减少节点积压数据,改善“三场”WSN 的 QoS 指标。

参考文献:

- [1] 吴成东,李界家,刘国怀. 铝电解计算机控制系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置,2001,(5):35-38.
- [2] 王光军,杨志杰,王天然,等. 现场总线控制系统在铝电解工业中的应用[J]. 计算机工程,2001,27(7):14-15.
- [3] 毛继红,陈焯超,陈晓光. 190KA 电解槽“三场”测试分析报告[R]. 三门峡,2001.
- [4] 于海斌,曾鹏. 智能无线传感器网络系统[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [5] 李劫,肖劲,张泰山. 铝电解槽点式下料的专家模糊控制方法[J]. 中南工业大学学报,1998,1(29):32-35.
- [6] 边友康,刘刚,丁凤其. 大型预焙铝电解槽现代工艺技术条件的选择[J]. 轻金属,2000,11:34-38.
- [7] Kwang Yong Lim. A Performance Analysis of An AD-HOC Ocean Sensor Network[D]. Canada: Naval Postgraduate School, 2006: 24-63.
- [8] 刘爱平,刘忠,罗亚松. 一种水下无线传感器网络的连通性覆盖算法[J]. 传感技术学报,2009,1(22):116-120.
- [9] Sanjay Shakkottai, Srikant R, Ness Shroff. Unreliable Sensor Grids: Coverage, Connectivity and Diameter[C]//Proceedings of IEEE Infocom, 2003: 1073-1082.
- [10] Chen Dazhi, Pramod K, Varshney. QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey[C]//Proceedings of the 2004 International Conference on Wireless Networks, LasVegas, Nevada, USA, June, 2004: 227-233.

- [11] 文浩,林闯,任丰原. 无线传感器网络的 QoS 体系结构[J]. 计算机学报,2009,32(3):432-440.
- [12] Chuan H Foh, M Zukerman. Poisson Arrivals See Time Averages [DB/OL]. <http://links.jstor.org/sici?sici=0030-364X%28198203%2F04%2930%3A2%3C223%3APASTA%3E2.0.CO%3B2-O,1982>.
- [13] Leboundec J Y, Thiran P. Network Calculus[M]. London, Britain: Springer Verlag, 2004.
- [14] 李庆华,陈志刚,张连明,等. 基于网络演算的无线自组网 QoS 性能确定上界研究[J]. 通信学报,2009,29(9):32-39.
- [15] 朱畅,金心宇,张昱,等. 基于速率调整和区分服务的 WSN QoS 机制[J]. 传感技术学报,2009,22(5):694-699.
- [16] 胥楚贵,邓晓衡,邹豪杰. 无线传感器网络覆盖空洞修复策略[J]. 传感技术学报,2010,23(2):256-259.



刘玉芳(1984-),女,长沙人,湖南大学电气与信息工程学院在读硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络,嵌入式系统及应用,liuyufang336@126.com;



王绍源(1968-)男,常德人,湖南大学工作,博士,副教授,主要研究方向为无线传感器网络,嵌入式系统及应用等;



吴免利(1984-),男,硕士研究生,供职于中铁资源集团公司,主要研究方向为冶金工程与冶金自动化控制方面的研究。