

适于井下 WSN 节点的故障诊断算法研究

张美金, 蔡 鹏

(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘 要: 井下传感器分布的特点对 WSN 节点分簇式 DFD 故障诊断算法的分簇方式、簇头节点选择方法及各簇稳定后信息传递方式等做了改进, 提出一种适合井下无线传感器网络特点的节点故障诊断算法。由于井下环境相比普通应用环境有其特殊性, 所以环境监测传感器一般为呈长条形的链式分布在巷道内, 不能按照普通的随机分布网络结构进行诊断。本算法符合井下无线传感器网络节点的故障诊断对故障定位精度、算法低能耗和高度稳定的要求。最后并通过仿真验证相比普通算法其能耗更小, 精度较高, 从而拥有更强的生存能力。

关键词: 井下无线传感器网络; 节点故障诊断; 链式布局 WSN; 改进的分簇式 DFD 诊断算法; 能量阈值; 簇头通信链

中图分类号: TP31

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)04-0152-05

Research on Node Failure Diagnosis Algorithms for Coal Mine Wireless Sensor Networks

ZHANG Mei-jin, CAI Peng

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: This paper puts forward a suited wireless sensor network node fault diagnosis algorithm to the characteristics of the underground wireless sensor network, according to the characteristics of the distribution of downhole sensor fault diagnosis algorithm for WSN node clustering DFD clustering way, cluster head node selection method, as well as improving on the stable ability after the clustering. Aimed at the specialties of the downhole application environment; the environment monitoring sensor is usually a long chain distribution within the roadway, cannot be carried out in accordance with the normal random distribution network structure. This algorithm meets the underground wireless sensor network node fault diagnosis algorithm for fault location accuracy, low energy and high stability. At the end, this paper compares between common algorithm and the improved algorithm by computer simulation and verifies the advantage of the improved algorithm; less energy consumption, high precision, thus have a stronger ability to survive.

Key words: The coal mine wireless sensor network (WSN); node fault diagnosis; chain layout WSN; the improved clustering type DFD diagnosis algorithm; energy threshold; cluster communication chain

1 引言

典型的 WSN 节点分布式故障诊断算法有是由 Jinran Chen 等人提出的 DFD 算法^[1], 还有基于中值的算法、基于加权的算法以及由某几种算法进行结合的混合算法, 如 WMFDS 等^[2-6]。DFD 算法利用

空间或时间相关性针对网络中邻节点测量数据进行故障诊断的方法。一个区内随机分布的每个 WSN 节点实时的检测温度、甲烷浓度、氧气含量等各种环境数据。通过远程检测得到的临近节点数据的时空相关性进行故障分析。DFD 节点故障诊断算法的诊断过程: 由于相邻节点 S_i 和 S_j 是距离很近, 在相同

的某一 t 时刻所感知的统一参数的数据也比较接近,两个节点检测到的数值之差 d_{ij}^t 不超过某个阈值定为 θ_1 ;而在另一 $t+1$ 时刻,两相邻节点感知的相同参数的差值 d_{ij}^t 和 d_{ij}^{t+1} 的差值 Δd_{ij}^t ,也不会超过另一阈值定为 θ_2 . 只有以上两个条件都满足,才判定被诊断节点为正常节点,此时令测试结果 C_{ij} 为 0,否则令 C_{ij} 为 1. 如果节点 S_i 与它所有的邻节点的测试结果为 1 的节点数大于邻节点数目的一半,则判定节点 S_i 的初步诊断状态为可能故障,否则判断为可能正常. 依次对网络中每个节点数据进行诊断得到整个网络所有节点的初步诊断状态,按此时并不能对网络节点的诊断结果下最后结论,还须对每个节点进行进一步判断. 还是以某一节点 S_i 为例:用节点 S_i 的所有邻节点中状态为可能正常的节点的个数减去可能故障的节点的个数,所得结果与 S_i 的邻节点个数 N 对比,只有大于 $N/2$ 才认为 S_i 是正常节点,否则判定 S_i 为故障节点. 对节点的故障检测结果可能分为以下 4 种情况:把正常节点诊断为正常节点;把正常节点诊断为故障节点;把故障节点诊断为正常节点;把故障节点诊断为故障节点. 故障节点随着节点故障率的提升而增加,如果发生误判将故障节点诊断为正常节点,这些故障的节点会提供更多的错误信息,从而导致节点诊断精度的急剧下降.

蒋鹏针对邻居节点少、故障率高的 WSN 提出改进的 DFD 算法^[2],DFD 改进算法通过放宽 DFD 对节点状态的最终判断条件进行适当放宽,进一步提高了算法在较高故障率情况下的性能. 改进后的判断条件:对任意节点 S_i ,考虑相邻节点中初步诊断状态为可能正常的节点个数, S_i 若与间测试结果为 0 的节点数大于或等于与 S_i 间测试结果为 1 的节点数,则认为 S_i 的状态为正常,反之 S_i 的状态为故障. 由改进的 DFD 算法可知,当相邻节点中,网络的节点故障率较大时,改进的 DFD 算法仍然能比较准确地判断节点的状态. 改进的 DFD 算法同样适用于网络节点的相邻节点个数较少的情况. 但改进的 DFD 算法与 DFD 算法一样,仍然存在网络能量消耗较大的问题,不利于像井下环境监测无线传感器网络节点这样对能量要求较高的环境.

刘凯通过引入分簇算法提出能耗低的分簇式 DFD 算法^[3]. 分簇算法每一轮分为簇建立和稳定运行两个阶段. 在簇建立阶段,选出较为均匀分布的簇头节点自动分簇,分簇完成后进入进行数据的传输和处理的稳定运行阶段. 选簇头时,让节点按规律生成 0 到 1 之间的随机数,把生成随机数小于阈值

$T(n)$ (由式(1)得到)的节点选为簇头节点.

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p(r \bmod \frac{1}{p})}, & n \in G \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中, p 为网络中簇头所占的比例, r 为目前进行的轮数, G 为在过去的 $1/p$ 轮中没有成为簇头的节点,并且是在前几轮故障诊断中确定为正常的节点的集合. 簇头节点将自己被选为簇头节点的消息以广播形式告知其他节点,其他节点根据广播信息信号的强弱选定簇头节点后,并向该簇头节点发送加入请求信息. 簇头节点接收到请求信息后,根据 TDMA 方式与簇内节点进行通信,网络进入稳定工作阶段. 过一段时间后,整个网络再次进行重新分簇的循环,以达到均匀消耗能量的效果. 这样就避免了簇头节点由于不仅要进行故障诊断而且要与汇聚节点进行通信而消耗太多能量导致过早失效,即热点效应.

2 井下无线传感器网络特点与传统算法分析

由于地形的限制,井下无线传感器部署形式不同于传统的无线传感器网络. 井下巷道少则长几公里,多则长达几十公里,宽不过几米到十几米. 这就导致井下无线传感器网络的布置形式呈长条形结构. 可根据需要在巷道内的固定无线传感器网络节点上接各类环境传感器,实时监测各种参数如 CO 浓度、粉尘浓度、风速等. 在狭长的井下巷道内安装,只有将节点链式结构等距离间隔布置巷道内. 视情况不同在主巷道与坑道中间隔一百到二十米不等,将节点固定在有立柱的一侧,并对其连续编号. 每个传感器网络节点内置嵌入式操作系统,根据监控需要写入监控程序. 每个节点都具有智能接口识别、无线通讯、计算、存储、自动识别传感器类型和型号、自动调用相应的监控程序驱动传感器工作、根据传输距离的长短调整发射功率的大小、计算出自己的能量剩余、根据两节点间能根据信号的强弱判定距离远近的功能,且能够由定位系统获得自己的位置信息. 人员车辆携带的节点可移动切定时补充能量或由设备持续供电,环境检测等固定节点的能量有限且很长时间(长达一两年)内不会得到补充. 采集到的各种数据一般传输给分布在井下的少数基站,再由基站传至地面中心,基站能量充足^[4]. 由于人员车辆等携带的传感器几点能量充足而又经常有人操作能够及时发现故障,现只考虑固定节点的环境监测传感器节点. 井下环境恶劣设备故障率较高而相邻

节点又只有两个,若相邻节点都失效则 DFD 故障诊断算法或改进的 DFD 故障诊断算法都会失效.而且链式结构下节点传递信息时,由于距离基站距离不等,距离远的节点就要消耗更多能量,更远的则需要通过中间节点转发,导致网络节点能量消耗不平衡.由于几乎所有节点的信息都要经由距离基站近的节点转发,由于“热区效应”,这些节点的能量会很快消耗殆尽,最终失效,导致网络无法工作.而且 DFD 或改进的 DFD 算法耗能都很高,更不适用与井下的这种环境.至于分簇式 DFD 算法,它的前提假设是每个簇首节点都能够直接和基站进行通信.而这在井下的链式结构 WSN 中是不可能的,由于分簇算法是随机选择簇首,这样选出的簇首节点很有可能会距离基站较远,导致无法直接连接到基站,即使能够连到,高耗能的远距离通信也会使簇首节点的能量很快耗尽,导致网络失效^[5-6].

3 改进的分簇式 DFD 算法

针对井下特殊情况,本文将条形区域分成若干段,每段长度不大于传感器节点通信最大距离的一半,大致形式如图 1 所示.然后在个区域内应用改进的分簇算法,再由簇首形成一条骨干节点通信链条,将信息传递到基站.这个过程分为三步.

3.1 簇的形成

根据地型将井下无线传感器网络划分成相邻且不重叠的一个个条形区块,为了使相邻条形区域中的任意两个节点都可以直接通讯,将每个条形区块的长度限定在无线传感器节点最大通讯距离的一半.每个条形区块分一个簇,包含区块内所有节点,簇首的选择也仅限于各条形区块内的节点.

3.2 簇首的选择与故障检测

给簇首节点设定一个能量阈值,簇首节点的选择遵循两个原则:(1)所选节点能量水平大于阈值;(2)离基站距离最近.每轮选择符合条件的节点为簇首节点.如果经诊断,所选每个簇首节点均正常,进行下一步,否则重新进行簇首节点选择.选定簇首节点后,簇首节点将自己的编号及位置信息广播给簇内其他节点.簇内的其他节点根据自己与簇首节点的距离长短,视情况选择直接方式与簇首通讯,或是通过簇内其他节点中继进行信息传递.通过数据融合处理后,簇首节点再将接收到数据传递出去,以减少传输信息的长度和能量消耗.能量阈值可根据节点消耗水平定期调整.其中网络节点故障诊断具体过程如下:第 i 簇的簇头 i 与该簇内第 j 个节点 j

在 t 时刻检测到的相同参数的数据进行对比,阈值取 $\theta_{j,i}$,将差值记为 Δd_{ij}^t .如果 $\Delta d_{ij}^t > \theta_{i,1}$,则判断此节点为可能故障节点,令结果 $C_{ij} = 1$,计算下一节点.如果 $\Delta d_{ij}^t \leq \theta_{i,1}$,再计算两节点在 t 时刻与 $t+1$ 时刻各自同一参数的差值的差值 Δd_{ij}^{t+1} 与另一设定阈值 $\theta_{i,2}$ 比较:如果 $\Delta d_{ij}^{t+1} > \theta_{i,2}$,判断此节点为可能故障节点,令 $C_{ij} = 1$;否则判断此节点为可能正常节点,记为 $C_{ij} = 0$.然后计算下一个节点.其中,阈值 $\theta_{i,1}, \theta_{i,2}$ 视所处区段特点根据经验数据设定.

为了减少比较通信的次数,首先确保完成分簇后的各簇首节点是正常的,这样就可以用各簇的簇首节点作为标准诊断簇内其他节点,而省去了让所有节点两两比较产生的大量通信耗能.

3.3 簇首链建立阶段

将狭长结构的 WSN 中若相邻区域的簇首组成一条通信链用于数据传输,能够有效为减轻信息转发过程中的能耗和延时问题.为使相邻条形区块的簇首可以与相邻区域的节点也能相互通讯,本文将每个条形区域的长度值规定为不能大于节点最大通讯距离的一半.确定区块的簇首后,由各区块的簇首与相邻区块簇首广播自己的身份.通过簇首节点相互传递簇内所有节点的信息,组成巷道内的簇首链,最终将信息传送到基站,由基站传到地面中心站.这样只由簇首节点负责信息传输,其他节点不用进行高耗能的长距离信息传输,节约了其他节点的能量.

4 仿真实验

仿真场景如下:选用 Matlab 作为仿真工具,为了测试条形区域长度对稳定性的影响分别在 500 m 和 1 000 m 长度巷道内部署 100 个节点,并选取其中 50 m 长度内节点进行仿真测试.根据现实情况,实验中发送信号功耗模型选用自由空间信道模型.发送和接受过程能耗计算公式分别为式(2)和式(3).节点参数是:节点的初始能量为 1 J,广播信息的长度为 50 个字节,数据包长度为 1 000 个字节.仿真实验中各参数取值如下:发送和接收电路能耗都是 50 nJ/bit;发送器功率 ϵ 为 $10 \text{ pJ} \cdot \text{b}^{-1} \cdot \text{m}^2$;节点数据融合能量消耗 E_f 为 5 nJ/bit.

$$E_{tx} = \lambda \times E + \epsilon \times \lambda \times d^2 \quad (2)$$

$$E_{rx} = \lambda \times E \quad (3)$$

$$E_{gr} = \lambda \times E_f \quad (4)$$

以上两式中 λ 为发送或接收数据包的长度 d 为通信距离, E_{gr} 为数据融合消耗能量.井下无线传感

器网络分布及区域划分示意图 1.

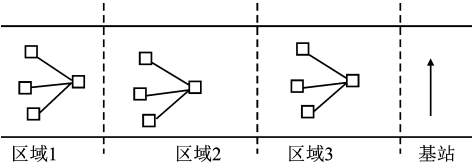


图 1 井下无线传感器网络分布及区域划分示意图

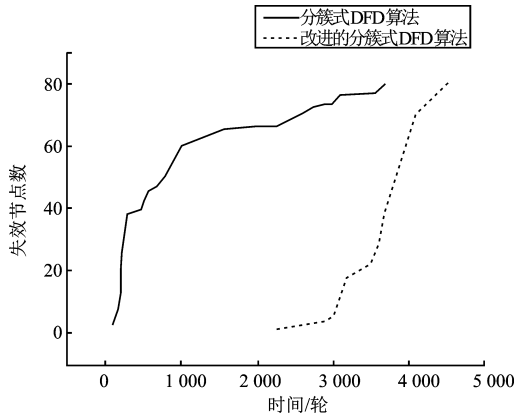


图 2 区域 500 m 长度下稳定性比较

由仿真结果图 2 可见,改进的分簇式 DFD 节点故障诊断算法比分簇式 DFD 节点故障诊断算法出现失效节点的时间明显更晚(2 000 轮之后才出现失效节点),更加稳定.由图 3 可知,运行轮数相同的情况下,改进的分簇式 DFD 无线传感器网络节点故障诊断算法能耗更低,能耗下降趋势平缓的时间更长(进算法出现在 2 500 轮之后才出现拐点),拥有更长的网络运行寿命(相比普通算法的 500 轮,改进算法可以坚持运行到 4 000 轮以上),从而更符合井下无线网络节点对能量的要求.

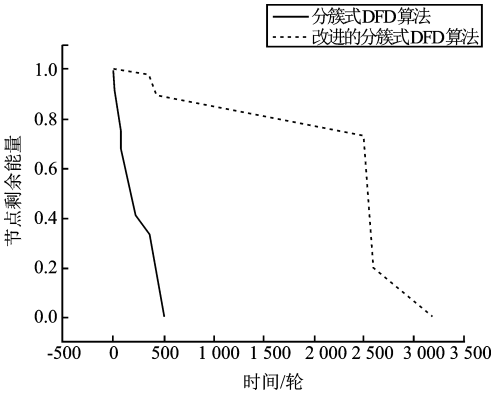


图 3 区域 500 米长度下能耗比较

本算法改进的目的不仅要实现消耗能量的节约,同时也要保证诊断精度.本文根据节点所处位置环境的不同,参考历史经验选取相应的阈值,对各个簇进

行故障检测仿真结果如图 4 所示.从图 4 中可以看出,改进的分簇式 DFD 算法相较分簇式 DFD 节点故障诊断算法,由于针对井下环境的特殊情况对簇头节点和阈值的选择进行了改进,使得诊断精度随着节点的故障率的增高,受错误节点数据的影响有所减弱.由图 5 和图 6 可知,在分布区域更长的情况下,改进算法更加稳定,优势显著.因此,改进的分簇式 DFD 诊断算法在确保更符合井下载感器网络能量节约的要求前提下,确保能得到较高的诊断精度.

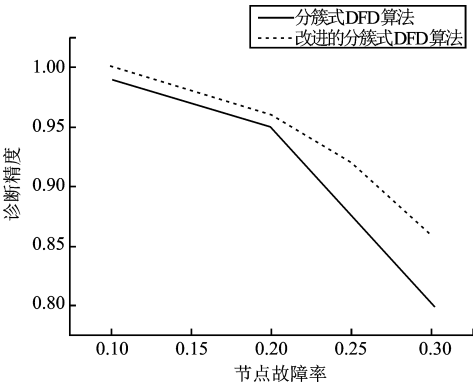


图 4 精度比较

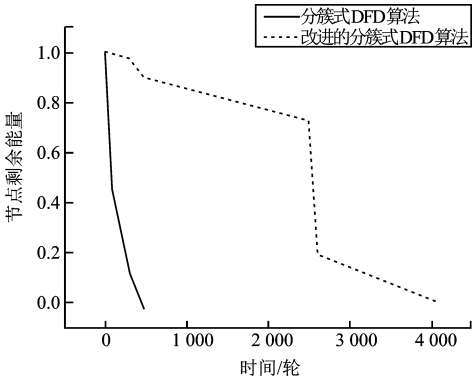


图 5 区域 1 000 m 长度下能耗比较

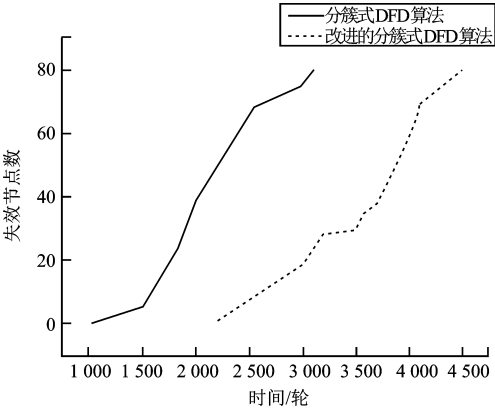


图 6 区域 1 000 m 长度下稳定性比较

5 结束语

如何更好地保障煤矿的生产安全,有效可靠的无线传感器网络节点故障诊断方法扮演着很重要的角色.由于井下无线传感器网络的特殊性,所以必须采取合适的故障诊断算法.因为井下 WSN 节点能量有限,又承担着环境监测、通信联络及故障检测等繁重的任务,对节约能耗以及系统稳定要求较高,要求故障诊断算法要节能、稳定又精确.本章提出的改进的分簇式 DFD 节点故障诊断算法,针对井下特殊的情况,利用划分区域并按能量阈值形成簇首节点骨干通信链的方法,实现了适合于井下环境的能耗小、精度高的比较稳定的节点故障诊断算法.优化了能耗较高的信息传递方式,减少了网络节点的信息处理总量,降低了能源消耗,同时诊断精度也有所提高.经过仿真检验,基本达到了预期目的.

参考文献:

[1] Chen Jinran, KHER Shubha, ARUN Somani. Distributed fault detection of wireless sensor networks[C]. Proc. of the ACM Int’l Conf. on International Con-

ference on Mobile Computing and Networking. New York:ACM Press,2006: 65-72.

[2] 蒋鹏. 一种改进的 DFD 无线传感器网络节点故障诊断算法研究[J]. 传感技术学报, 2008, 21(8): 1417-1421.

[3] 刘凯,彭力. 分簇式无线传感器网络节点故障诊断算法研究[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(4): 37-41.

[4] 乔钢柱. 基于无线传感器网络的煤矿安全综合监控系统设计与关键技术研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.

[5] 李蓉. 关于无线传感器网络在煤矿井下中的应用[J]. 煤炭技术. 2011(11):68-71 .

[6] 王俊,刘刚. 基于时间序列和神经网络的温室传感器节点故障诊断[J]. 中国农业大学学报. 2011(6): 112-115.

作者简介:

张美金 男,(1970-),副教授,硕士. 研究方向为计算机技术,测控技术;

蔡 鹏(通讯作者) 男,(1988-),硕士. 研究方向为智能检测技术,无线传感器网络. E-mail:909627251@qq. com

(上接第 151 页)

参考文献:

[1] 徐冠南,嘉辰,陈虹,等. 一种极低功耗的 CMOS 带隙基准源[J]. 中国集成电路, 2011, 20(2): 27-30.

[2] Sobhy E A, Hoyos S, Snchez-Sinencio E. High-PSRR low-power single supply OTA[J]. Electronics letters, 2010, 46(5): 337-338.

[3] Cao T, Han Y, Liu X, et al. A 0. 9-V high-PSRR bandgap with self-cascode current Mirror[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Circuits and Systems. Kuala Lumpur:IEEE, 2012: 267-271.

[4] 周庆波,龚敏,邬齐荣. 一种宽电源电压的高精度带隙基准电路的设计[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(10):128-131.

[5] Andreou C M, Koudounas S, Georgiou J. A novel

wide temperature range, 3. 9 ppm/°C CMOS bandgap reference circuit[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuit, 2012, 47(2): 574-581.

[6] 夏晓娟,张洪俞,顾巍. 基于 LED 驱动芯片的低温漂 CMOS 基准电压源[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(5):138-142.

作者简介:

于全东 男,(1989-),硕士研究生. 研究方向为电源管理芯片设计、模拟集成电路的研究. E-mail:960321551@qq. com.

杨 琦 男,(1990-),硕士研究生. 研究方向为模拟集成电路芯片设计研究.

张国俊 男,(1960-),教授. 研究方向为新型功率半导体器件与集成电路和系统设计.