

· 自动化技术 ·

粗糙集-神经网络集成的WSN节点故障诊断

雷霖, 代传龙, 王厚军, 赵旭

(电子科技大学自动化工程学院 成都 610054)

【摘要】提出一种粗糙集-神经网络集成的无线传感器网络(WSN)节点故障诊断新方法。根据无线传感器网络的应用环境和故障特征得到诊断决策表,利用改进的粗糙集中的归纳属性约简算法对诊断决策表进行属性约简,用Hamming网络建立一套故障分类的方法。仿真实验结果显示,该诊断算法在进行WSN节点故障诊断时,诊断准确性高,通信代价小,能耗低,鲁棒性高。

关键词 故障诊断; Hamming网络; 粗糙集; 无线传感器网络
中图分类号 TP206.3 **文献标识码** A

Fault Diagnosis of Node in WSN Based on Integration of Rough Sets and Neural Network

LEI Lin, DAI Chuan-long, WANG Hou-jun, and ZHAO Xu

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract In the paper, a novel fault diagnosis method integrating rough sets and neural network in wireless sensor network (WSN) is presented. Firstly, the decision-making table of fault diagnosis can be gained by application environment and fault characteristic in WSN. Secondly, the attribute reduction of the table of decision-making is implemented by inductive attribute reduction algorithm in rough sets theory. Finally, a set of method for fault classification is founded by hamming network. The result of simulation shows that this method has the feathers such as high veracity of diagnosis, a little expenditure of communication, low energy consumption, and strong robustness.

Key words fault diagnosis; Hamming network; rough sets; wireless sensor network

准确、及时地对WSN节点进行故障诊断,可以保障获得信息的可靠性,提高WSN的可维护性,加强中心节点或上位机路由规划的有效性,开展WSN的远程维护,从而延长WSN的使用寿命。但从目前查阅的文献来看,鲜有涉及对WSN节点故障诊断的研究,在文献[1]中仅有对节点压碎故障识别方法的研究,这远远不能解决智能化程度高、应用环境恶劣、故障征兆和种类多样的WSN节点故障诊断。算法融合是近年来国际上流行的一种研究方向,本文提出一种粗糙集-神经网络集成的WSN节点故障诊断新方法。

1 WSN节点架构及故障分类

一个典型的WSN系统^[2-4]的体系结构如图1所示,图中实心圆代表选中传输路径传感器。体系包括分布式传感器节点(群)、汇聚节点(sink node)、互

联网(可包括卫星)和任务管理节点。其中,高度模块化的WSN节点包括4个模块:传感器模块(包括模数转换功能模块)、处理模块(包括CPU、存储器和嵌入式操作系统等)、无线通信模块和电源模块。采用从系统级进行故障诊断,其故障也相应地可分为4类:传感器模块故障、处理模块故障、无线通信模块故障和电源模块故障。

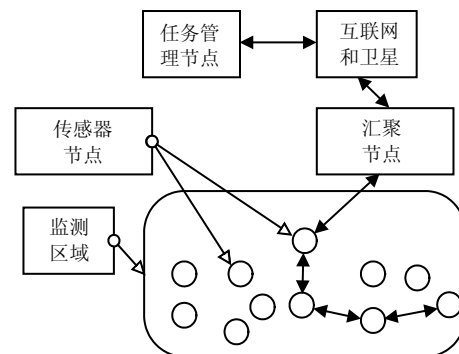


图1 无线传感器网络体系结构

收稿日期: 2006-11-07; 修回日期: 2007-04-10

作者简介: 雷霖(1964-), 男, 教授, 主要从事智能测控技术、传感器与网络技术等方面的研究。

2 改进的基于Rough sets理论的归纳属性约简算法

粗糙集理论^[5-7]的归纳属性约简算法以其卓越的数据约简功能而著称，易于解决在WSN节点能量有限的前提下，在线故障诊断的低能耗问题。本文改进了基于粗糙集理论的归纳属性约简算法^[8-9]，并用该算法来剔除故障的冗余征兆，以求得最小属性约简。

定义 1 设 U 为一个论域， P 为定义在 U 上的一个等价关系簇， P 中所有绝对必要关系组成的集合称为关系 P 的绝对核，记作 $CORE(P)$ 。

定义 2 设决策表系统为 $S = \langle U, R, V, f \rangle$ ， $R = P \cup D$ 是属性集合，子集 $P = \{a_i | i = 1, 2, \dots, k\}$ 和 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_l\}$ (l 为决策类型总数) 分别称为条件属性集和决策属性集， $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是论域， $a_i(x_j)$ 是样本 x_j 在属性 a_i 上的取值； $POS_p(D)$ 表示根据分类 U/P 信息可以正确地划分到关系 D 的等价类中去的对象集合。

定义 3 设 $P = \{a_i | i = 1, 2, \dots, k\}$ 为有限元素集合， $T_1(P) = \{\{a_i\} | a_i \in P\}$ 为集合 P 的一阶幂集； $T_2(P) = \{\{a_i, a_j\} | a_i, a_j \in P \wedge i \neq j\}$ 为集合 P 的二阶幂集； $T_i(P)$ ($1 \leq i \leq m$) 为集合 P 的 i 阶幂集；作为特例 $T_0(P) = \phi$ 。

具体改进的约简算法如下：

1) 求取 P 的 D 核 $CORE_D(P)$ 。判断等式 $POS_{(P \setminus \{a_i\})}(D) = POS_p(D)$ 成立与否，如果成立，则 a_i 不为核属性；否则是核属性。所有核属性的集合组成 $CORE_D(P)$ 。

2) 求取 P 的最小属性约简 $mred_D(P)$ 。(1) 令 $X = CORE_D(P)$ ， $H = P \setminus X = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ ， $T_i(H)$ 为 H 的 i ($1 \leq i \leq m$) 阶幂集。(2) 令 $t = \log_2 l - (k - m)$ ，如果 $t < 0$ ，则 $i = 0$ ；否则 $i = \text{int}(t)$ (取整)； $\text{flag} = 0$ ， $\text{suffix} = 1$ 。(3) $Y = T_i(H)$ 。(4) 任取 $y \in Y$ ， $A = X \cup \{y\}$ ，如果 $POS_{(A)}(D) = POS_p(D)$ 且 $\text{flag} = 0$ ，则 $Z(\text{suffix}) = A$ ， $\text{flag} = 1$ ；如果 $POS_{(A)}(D) = POS_p(D)$ 且 $\text{flag} = 1$ ，则 $\text{suffix} = \text{suffix} + 1$ ， $Z(\text{suffix}) = A$ 。(5) $Y = Y - \{y\}$ ，如果 $Y \neq \phi$ ，转(4)。(6) 如果 $\text{flag} = 1$ ，则 $mred_D(P) = Z$ ，转(9)。(7) $i = i + 1$ ，如 $i \leq m - 1$ ，则转(3)。(8) $mred_D(P) = P$ 。(9) 结束。

改进的归纳属性约简算法是一种效率极高的启发式算法。其实质仍是一种对属性组合的搜索，采用了启发式知识来减小搜索的空间。属性核是所有

约简的交，所以它一定在约简结果中。先得到属性核，可避免对属性核之间的组合情况重复搜索。同时，因为目标是求其最小属性约简，所以从属性核出发，逐步增加属性，直到得到约简结果，这样就避免了对超出最小属性约简属性个数的属性组合情况搜索。另外，在算法中，因为考虑后面应用场景的条件属性值全部为-1或1，由组合数学知识知道， n 位2元最多可表达 2^n 种类型故障，所以在第(2)步中加入了控制；在第(7)步中，把对 i 的搜索从 m 降到了 $m - 1$ ，进一步降低了搜索的空间；在第(4)步的改进中，打破了常规的仅能得到一种最小属性约简的限制。总之这种属性约简算法提高了搜索的有效性，并能保证得到所有最小属性约简。

3 故障诊断算法

本文提出利用属性约简后的样本并基于Hamming网络^[10]的故障分类算法。设存在 p 个 n 维标准样本 c^1, c^2, \dots, c^p ，求待测 n 维向量 x 的分类。Hamming网络如图2所示。

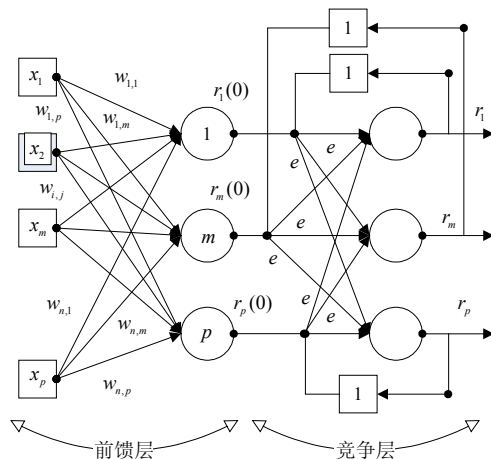


图2 Hamming网络

算法如下：(1) 设前馈层连接权值 $w_{i,j} = c_i^j / 2$ ($j = 1, 2, \dots, p$; $i = 1, 2, \dots, n$)， c_i^j 代表第 j 个标准样本模式向量 c^j 的第 i 个元素值；前馈层中每个处理单元的阈值定为 $\theta_j = -n/2$ ($j = 1, 2, \dots, p$)；前馈层的激活函数设为 $f_1(x) = x/n$ ； $t = 0$ 。(2) 经过前馈层后 $r_j(t) = (\sum_{i=1}^n w_{i,j} x_i - \theta_j) / n$ ($j = 1, 2, \dots, p$)。(3) 设竞争层中处理单元的阈值均为0，激活函数为：

$$f(k) = \begin{cases} 0 & k < 0 \\ k & k \geq 0 \end{cases}$$

(4) 任取一个满足 $0 < e < 1/(p-1)$ 的 e 值。(5) $r_j(t+1) = f(r_j(t) - e \sum_{m \neq j} r_m(t))$ ($j = 1, 2, \dots, p$)。(6) $\delta = \sum_{j=1}^p (r_j(t) -$

$r_j(t+1)$)。(7) 如果 $\delta \neq 0$, $t = t + 1$, 转到(5)。(8) 输出 $r_j(t+1)$ 为正值的项, 即为 x 对应的分类。(9) 结束。

网络中前馈层和竞争层神经元数目与分类样本数目相同, 神经元的位置与具体的分类相对应。该算法的实质是并行计算 n 减去每个Hamming距离的值。Hamming神经网络能调节成具有最小误差的故障模式分类器, 并且它总能给出一个故障模式来匹配未知的输入故障模式, 不会出现不匹配的结果。

4 仿真实验及结果分析

现假定用WSN对图1监测区域的温度和压力进行检测; MAC协议采用竞争方式使用共享的短波信道; 在汇聚节点处运行故障诊断程序, 假设在诊断程序运行期间, 大多数WSN节点是正常的。建立WSN的节点故障征兆及其对应属性值表1和WSN的节点故障诊断决策表2。利用Matlab在pentium(R)M处理器频率为1.6 GHz的笔记本平台上进行仿真, 调

用改进的基于rough sets理论的归纳属性约简算法, 可得到 $\{a_2, a_3, a_4, a_5\}$, $\{a_2, a_3, a_4, a_9\}$, $\{a_2, a_3, a_4, a_{10}\}$ 等9个所有最简属性约简, 计算耗时0.1 s, 这在真实应用环境中是可以接受的。但随着约简属性的增加, rough sets理论约简算法的计算效率会有所降低。在本例中选取约简 $\{a_2, a_3, a_4, a_5\}$ 作为下一步故障诊断的样本。经过该约简可得到约简后的5个标准故障样本, 如表3所示。

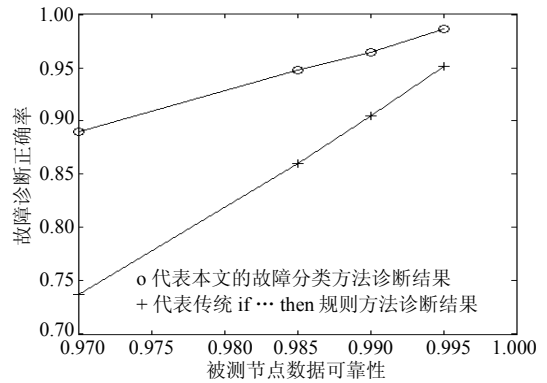


图3 仿真结果图

表1 WSN的节点故障征兆及其对应属性值表

征兆类型	属性值	征兆类型	属性值
发出询问命令被测节点是否有响应?	$a[1] = -1$ (有), $a[1] = 1$ (无)	被测节点传回温度值是否远离平均值 δ ?	$a[6] = 1$ (是), $a[6] = -1$ (不是)
被测节点定期有无信号返回?	$a[2] = -1$ (有), $a[2] = 1$ (无)	被测节点与相邻节点传回的温度差是否大于 ξ ?	$a[7] = 1$ (是), $a[7] = -1$ (不是)
被测节点能否正确执行汇聚节点发送的指令?	$a[3] = 1$ (能), $a[3] = -1$ (不能)	接收到被测节点的数据是否有误码?	$a[8] = 1$ (是), $a[8] = -1$ (不是)
被测节点气压值是否远离平均值 μ ?	$a[4] = 1$ (是), $a[4] = -1$ (不是)	重发询问命令后, 被测节点能否有响应?	$a[9] = -1$ (能), $a[9] = 1$ (不能)
被测节点能否传递其他节点的数据?	$a[5] = 1$ (能), $a[5] = -1$ (不能)	改变发射频率后, 发出询问命令有无响应?	$a[10] = -1$ (有), $a[10] = 1$ (无)

表2 WSN的节点故障诊断决策表

决策属性D	条件属性P									
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
无故障 d_1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
电源模块故障 d_2	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1
传感器模块故障 d_3	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1
处理器模块故障 d_4	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
无线通信模块故障 d_5	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1
无故障 d_1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1
传感器模块故障 d_3	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1
传感器模块故障 d_3	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1
处理器模块故障 d_4	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1
无故障 d_1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1
无故障 d_1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1

最后, 利用Matlab建立基于Hamming网络的故障诊断算法来仿真进行故障诊断。由于WSN的使用环境复杂, 短波信道易受电离层状态变化和气象情况的干扰, 加之噪声等因素使无线传感器获得的数

据产生偏差。现分别在故障诊断的每个数据的可靠性达到99.5%、99%、98.5%和97%时, 对200组数据进行故障分类。使用传统的单纯利用决策表(即if...then规则)与本文粗糙集-神经网络集成的故障

分类方法作比较, 经过Matlab仿真实验, 其统计结果如图3所示。从图3中可以看出, 当故障诊断使用的数据可靠性为99.5%时, 本文提出的故障诊断算法的诊断正确率比单纯利用决策表诊断的正确率要高出3.5%; 当数据的可靠性降为98.5%时, 本文提出的算法诊断正确率比传统的单纯利用决策表诊断的正确率要高出8.8%。这是因为故障诊断的过程实际是一个搜索属性匹配的过程, 而在作为判断依据的WSN数据很难100%得到保证, 传统的单纯利用决策表来诊断时, 由于其依赖的属性众多, 故障诊断时节点通信量大, 受故障数据影响的程度也大。而本文提出的rough sets-Hamming神经网络集成算法则通过粗糙集可以简化神经网络训练样本, 消除冗余数据, 减少输入层神经元个数, 简化网络结构, 从而提高学习效率和诊断精度。Hamming神经网络能调节成具有最小误差的故障模式分类器, 进一步提高了诊断的正确率。Hamming神经网络的并行计算能力也比传统的if... then规则速度大大提高, 因此在同等情况下该算法能快速正确地完成WSN节点故障诊断的任务。

表3 标准故障样本

D	P			
	a_2	a_3	a_4	a_5
无故障 d_1	-1	-1	-1	-1
电源模块故障 d_2	1	1	-1	1
传感器模块故障 d_3	-1	-1	1	-1
处理器模块故障 d_4	-1	1	-1	-1
无线通信模块故障	-1	1	-1	1

5 结 论

大量实验表明, 基于rough sets-Hamming神经网络集成的故障诊断算法揭示了WSN节点故障特征信息的内在冗余性, 能准确快速地解决具有显著不确定性的WSN节点的在线故障诊断问题。在获得的信息不完整或部分信息有误的情况下, 也能给出WSN节点的合理故障诊断; 在诊断特征数据可靠性

降低时, 愈加凸显出该算法在诊断正确率和诊断速度上的优势; 从而提高了故障诊断的鲁棒性, 增强了能量有限的WSN的实用性。

参 考 文 献

- [1] CHESSA S, SANTI P. Crash faults identification in wireless sensor networks[J]. Computer Communications 2002, 25(14): 1273-1282.
- [2] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y. Wireless sensor networks: a survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- [3] ASADA G, DONG M, LIN T S, et al. Wireless integrated network sensors (WINS) for tactical information systems [C]//Proceedings of the 1998 European Solid State Circuits Conference. New York: ACM Press, 1998: 15-20.
- [4] NOURY N, HERVE T, RIALE V, et al. Monitoring behavior in home using a smart fail sensor[C]//IEEE-EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology. Lyon: IEEE Computer Society, 2000: 607-610.
- [5] PAWLAK Z. Rough sets[J]. International Journal of Computer and Information Science, 1982, 11: 341-355.
- [6] PAWLAK Z, SKOWRON A. Rough sets and Boolean reasoning[J]. Information Sciences, 2007, 177(1): 41-73.
- [7] LIU Min, CHEN De-gang, WU Cheng, et al. Reduction method based on a new fuzzy rough set in fuzzy information system and its applications to scheduling problems[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2005, 51(9-10): 1571-1583.
- [8] 张文修, 吴伟志, 梁吉业, 等. 粗糙集理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
ZHANG Wen-xiu, WU Wei-zhi, LIANG Ji-ye. Rough set theory and method[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [9] 王国胤. 粗糙集理论与知识获取[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
WANG Guo-yin. Rough set theory and knowledge acquire[M]. Xi'an: Xi'an JiaoTong University Press, 2001.
- [10] HAGAN M T, DEMUTH H B, BEALE M H. 神经网络设计[M]. 戴 葵, 译. 北京: 机械工业出版社, 2002.
HAGAN M T, DEMUTH H B, BEALE M H. Neural network design[M]. Translated by DAI Kui. Beijing: China Machine Press, 2002.

编辑 漆 蓉