

基于互信息的无线传感器网络节点故障自诊断

雷霖, 代传龙, 王厚军

(电子科技大学自动化工程学院 成都 610054)

【摘要】故障自诊断和故障监控能提高WSN的可维护性和可靠性, 延长WSN节点的使用寿命。该文提出一种无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)节点故障自诊断的新方法。首先, 可从粗糙集理论中基于互信息的属性约简算法获得故障诊断决策的约简, 进而建立一套以属性匹配为核心思想的WSN节点故障自诊断技术, 对WSN节点的各个模块分别进行具体的故障诊断和定位。仿真实验表明, 该方法在WSN节点中实现故障自诊断时, 通信代价小, 能耗低, 诊断的误判率低。

关键词 属性约简; 故障自诊断; 互信息; 粗糙集; 无线传感器网络

中图分类号 TP206.3

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.05.030

Fault Self-Diagnosis Based on Mutual Information of Wireless Sensor Network's Node

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

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

Abstract The fault self-diagnosis and fault monitoring can improve the maintainability and reliability of wireless sensor network (WSN) and prolong the lifetime of WSN. In this paper, a novel method of fault self-diagnosis for the nodes of WSN is brought forward. The attribute reduction for decision-making of fault diagnosis is obtained based on mutual information algorithm for reduction of knowledge in rough set theory. A set of node's fault self-diagnosis techniques based on attribute matching in WSN are built. Finally, the faults for each module of nodes in WSN are diagnosed and located in detail. The simulation shows that this method only needs a little expenditure of communication, very low energy of nodes in WSN and low misdiagnosis rate when fault self-diagnosis is implemented in WSN.

Key words attribute reduction; fault self-diagnosis; mutual information; rough set; wireless sensor network

故障诊断能及时地、正确地对各种异常状态或故障状态给出诊断, 预防或消除故障, 保证无线传感器网络发挥最大的设计能力, 延长其使用寿命。WSN节点的能量有限, 而远距离诊断时, 需要消耗许多能量同节点交互信息, 对于具有分布式计算能力且能量有限的WSN节点来说, 是很不必要的。所以, 在线自诊断技术是WSN节点故障自诊断的首选技术。从目前查阅的各种文献资料来看, 涉及无线传感器网络节点故障自诊断的文献少^[1-2], 利用Rough set理论来研究无线传感器网络节点故障自诊断的文献尚未发现。本文提出一种基于Rough set理论的无线传感器网络节点故障自诊断方法。首先利用Rough set理论的属性约简技术^[3-6], 产生一种基于互信息的属性约简算法(mutual information based on algorithm for reduction of knowledge, MIBARK算法)

来简化故障诊断决策表, 然后提出一种基于属性匹配思想的故障分类算法, 并进行了仿真实验。该算法经过反复的仿真实验, 其实验结果令人较为满意。

1 WSN节点故障自诊断技术

一个典型的WSN系统的体系结构一般包括以下几部分^[1-4]: 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, 传感器节点结构如图1所示, 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。

从系统级的角度进行故障自诊断, 根据传感器节点结构, 其故障也相应地分为: 电源供应模块故障、传感模块故障、CPU故障、片内RAM故障、定

时器故障(定时器是为节点定时而设置)和通信模块故障。不同模块发生故障时,其故障征兆类型不同,属性值也不尽相同。对不同模块进行诊断,须采取不同自诊断策略。

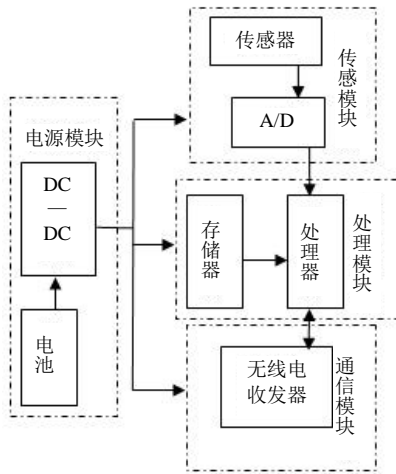


图1 WSN传感器节点结构

1.1 节点各模块的硬件自诊断^[7-8]

1) 传感模块自诊断:可采用if...then规则来进行自诊断。设测量数据为 ζ ,阈值为 ε ,平均值为 θ ,设定差值大于 δ 为离群数据。

具体的诊断算法为:

if $|\zeta-\theta|>\delta$, then 传感器探头失效或A/D故障

if $\zeta>\varepsilon$, then 传感器探头失效或A/D故障

if $\zeta=0$, then 传感器探头失效或A/D故障

2)处理模块自诊断:处理模块自诊断又可详细分为如下3个方面。

(1) 指令系统自诊断。指令系统能否被正确执行是诊断CPU中指令译码器是否有故障的基本方法。应设计一段涉及指令尽可能多的程序来测试CPU。

(2) 片内RAM自诊断。先将RAM中内容读出保存副本,取反后写入原地址,再读出进行具体比较。如果相同,则认为无故障。

(3) 定时器自诊断。设计一定时中断程序,如能按时溢出并清除溢出标志位,则定时器无故障,否则定时器有故障。

3) 通信模块自诊断:发出询问相邻节点的命令,能否收到回应。如果能收到回应,则认为通信模块无故障,否则通信模块有故障。

4) 由于电源模块一旦发生故障,WSN节点就死掉,无法进行自诊断。但文献[1]中的方法可以用来有效地诊断电源故障。它的基本思想是通过相邻节点发出一个诊断信号,通过探测节点有没有反馈来诊断电源故障。故本文中假定电源模块始终能进行

正常的供电。

1.2 WSN节点自诊断的启动策略

(1) 自适应自启动方式:每当节点自己察觉运行异常时,节点就自行启动进行一次自诊断操作。如当测量数据 ζ 发生突变或通信突然中断时,就启动自诊断操作。(2) 周期性自诊断:由节点时钟设置周期性的自诊断,但这种诊断不适合能量有限的WSN节点故障自诊断,因为它会增加不必要的能量消耗。(3) 由中心节点下达节点自诊断启动命令。

1.3 节点测量数据自诊断属性表的建立

通过对WSN的结构和故障自诊断技术分析,为了快捷地进行WSN的节点故障自诊断,分别建立了WSN的节点故障征兆及其对应属性表(如表1所示)和WSN的节点故障类型及其相应征兆表(如表2所示)。

表1 WSN的节点故障征兆及其对应属性值表

编号	征兆类型	属性值
m[1]	测量数据是否远离平均值	m[1]=0 (不是)
		m[1]=1 (是)
m[2]	测量数据是否大于一个阈值	m[2]=0 (不是)
		m[2]=1 (是)
m[3]	测量数据是否一直为0	m[3]=0 (不是)
		m[3]=1 (是)
m[4]	指令系统执行结果是否与预期相同	m[4]=0 (是)
		m[4]=1 (不是)
m[5]	RAM读写操作是否无误	m[5]=0 (是)
		m[5]=1 (不是)
m[6]	定时器能否按时溢出并清除标志位	m[6]=0 (能)
		m[6]=1 (不能)
m[7]	发出询问相邻节点的命令能否收到回应	m[7]=0 (能)
		m[7]=1 (不能)

表2 WSN的节点故障类型及其相应征兆表

编号	故障类型	相应征兆
d1	无故障	所有模块均正常
d2	传感器模块故障	m[1],m[2], m[3]
d3	CPU模块故障	m[4]
d4	RAM故障	m[5]
d5	定时器故障	m[6]
d6	无线收发模块故障	m[7]

2 基于互信息的故障自诊断信息约简

数据约简是Rough Set理论的核心技术之一。本文中用数据约简处理决策表的属性约简中一种基于

互信息^[2, 9]的属性约简算法来实现故障诊断信息的约简, 经过约简处理的决策表中的决策规则有较高的适应性。

定义 1 设 P, D 在 U 上导出的划分分别为 X 和 Y , $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$, 则 P, D 在 U 上的划分可看作是定义在 U 的幂集中的随机变量, 其概率分布可通过如下方法确定:

$$(U/P:p) = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & \dots & X_n \\ p(X_1) & p(X_2) & \dots & p(X_n) \end{bmatrix}$$

$$(U/D:p) = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 & \dots & Y_m \\ p(Y_1) & p(Y_2) & \dots & p(Y_m) \end{bmatrix}$$

式中 $p(X_i) = |X_i|/|U|$; $i = 1, 2, \dots, n$; $p(Y_j) = |Y_j|/|U|$; $j = 1, 2, \dots, m$ 。有了知识的概率分布定义后, 根据信息论就可以定义知识的熵与条件熵的概念。

定义 2 知识 P 的熵 $H(P)$ 定义为:

$$H(P) = -\sum_{i=1}^n p(X_i) \lg(p(X_i))$$

定义 3 知识 D 相对于知识 P 的条件熵 $H(D|P)$ 定义为

$$H(D|P) = -\sum_{i=1}^n p(X_i) \sum_{j=1}^m \lg(p(Y_j|X_i))$$

式中 $p(Y_j|X_i) = |Y_j \cap X_i|/|X_i|$; $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$ 。 $H(D|P)$ 反应了知识 D 相对于知识 P 的依赖程度。

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 $P = \{m[i] | i = 1, 2, \dots, k\}$ 和 $D = \{d\}$ 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, $m[i](x_j)$ 是样本 x_j 在属性 $m[i]$ 上的取值。具体算法如下: (1) 计算决策表 S 中条件属性 P 和决策属性 D 的互信息 $I(P, D) = H(D) - H(D|P)$; (2) 计算 P 相对于 D 的核 $\text{CORED}(P)$; (3) 设 $T = \text{CORED}(P)$; (4) 对 $P \setminus T$ 中的每个属性 m , 计算条件互信息 $I(m, D|T)$; (5) 选择使条件互信息 $I(m, D|T)$ 最大的属性, 计为 m (若同时存在多个属性达到最大值, 则从中选取一个与 T 的属性值组合数最少的属性作为 m); 并且 $T = T \cup \{m\}$; (6) 若 $I(T, D) = I(P, D)$, 则停止程序; 否则转到步骤(4); (7) 最终的 T 就是 P 相对于 D 的一个相对约简。

3 基于属性匹配的故障分类算法

本文提出在属性约简的基础上进行故障分类的算法。令 (U, A) 是一个信息系统, 对于属性 $m[1], m[2], \dots, m[k] \in A$, 有分类 $U/A = \{V[1], V[2], \dots, V[r]\}$; 现对 $u \in U$ 在 U/A 下进行分类。具体的算法

如下: (1) 设标志 $t=0$; (2) 设循环变量 $j=1$; (3) 设循环变量 $i=1$; (4) 当 $m[i](u) = m[i](V[j])$ 且 $i < k+1$ 时, 执行 $i=i+1$, 并返回步骤(4); (5) 如果 $i=k+1$, 输出 u 属于 V_j 类, 并令 $t=1$, 转到步骤(8); (6) $j=j+1$, 如果 $j < r+1$, 转到步骤(3); (7) 如果 $t=0$, 输出 u 属于不明故障; (8) 结束程序。

该算法采取属性匹配的思想实现了故障分类, 具有分类准确、计算复杂度低、不易出误判的特点。

4 仿真实验及结果分析

在一个 WSN 实验系统中, 传感器节点选用 AD μ C812 的 8 位 MCU 作为内核^[10], 工作电压为 3 V, 使用额定工作频率 12 MHz, 每个机器周期为 1 μ s。利用 Matlab 建立基于属性匹配的故障分类算法来仿真进行故障诊断。利用表 1 和表 2, 可以建立 WSN 的节点故障样本决策表, 如表 3 所示。本文利用 MIBARK 算法来约简决策表 3。先计算出 $I(P, D) = 0.7591$; 然后找出该决策表的相对核 $T_1 = \text{CORED}(P) = \{m[4], m[5], m[6], m[7]\}$; 计算 $I(T_1, D) = 0.4792$; 令 $T = T_1$, 对 $m[1], m[2], m[3]$ 计算条件互信息 $I(m, D|T)$, 得表 4。

表3 WSN的节点故障样本决策表

参数	U						
	1	2	3	4	5	6	7
$m[1]$	0	1	1	0	0	0	0
$m[2]$	0	1	0	0	0	0	0
$m[3]$	0	0	1	0	0	0	0
$m[4]$	0	0	0	1	0	0	0
$m[5]$	0	0	0	0	1	0	0
$m[6]$	0	0	0	0	0	1	0
$m[7]$	0	0	0	0	0	0	1
D	d_1	d_2	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6

注: 表3中 U 表示样本个体; m 表示属性类型; D 表示决策类型。

表4 条件互信息取值表

属性 m	$m[1]$	$m[2]$	$m[3]$
$I(m, D T)$	0.279 9	0.107 9	0.107 9

使条件互信息最大的属性为 $m[1]$, 所以, 更新后的 $T = \{m[1], m[4], m[5], m[6], m[7]\}$, $I(T, D) = I(T_1, D) + I(m[1], D|T) = 0.4792 + 0.2799 = 0.7591$

此时, $I(T, D) = I(P, D)$, 程序终止。因此, 属性集 $T = \{m[1], m[4], m[5], m[6], m[7]\}$ 就是该决策表的一个相对约简, 约简后的决策表如表 5 所示。

表5 约简后WSN的节点故障诊断决策表

U	m					D
	m[1]	m[4]	m[5]	m[6]	m[7]	
1	0	0	0	0	0	d1
2	1	0	0	0	0	d2
3	0	1	0	0	0	d3
4	0	0	1	0	0	d4
5	0	0	0	1	0	d5
6	0	0	0	0	1	d6

注: 表5中U表示样本个体; m表示属性类型; D表示决策类型。

对200组故障诊断数据进行故障分类。经过Matlab仿真实验, 其统计结果显示, 本文提出的诊断算法故障诊断正确率达到99.6%。

直接利用决策表生成规则算法进行自诊断和利用本文算法进行自诊断能耗对比如表6所示。其中能耗节省百分比为 $\Delta E / ((E_{max} + E_{min}) / 2) \times 100\%$ 。如果直接利用决策表生成规则算法进行自诊断时, 则每次自诊断最多需耗时420 μs , 最少耗时70 μs , 最多耗能 $1.517 \times 10^{-6} J$, 最少耗能 $0.253 \times 10^{-6} J$ 。而利用本文提出的算法进行自诊断时, 每次最多需耗时为300 μs , 最少需耗时50 μs , 最多耗能为 $1.08 \times 10^{-6} J$, 最少耗能 $0.18 \times 10^{-6} J$ 。在选定AD μ C812的8位MCU内核上进行自诊断时, 在最多耗能的情况下, 本算法比传统的单纯选用决策表生成规则算法进行自诊断要省时120 μs , 节省能量49.4%; 在最少耗能的情况下, 要省时20 μs , 节省能量8.2%。

表6 不同算法能耗对比表

	决策表算法		本文算法	
	决策表算法	本文算法	能耗节省 (ΔE)	能耗节省 百分比(%)
$E_{max} \times 10^{-6} J$	1.517	1.08	0.437	49.4
$E_{min} \times 10^{-6} J$	0.253	0.180	0.073	8.200
$T_{max} / \mu s$	420	300	/	/
$T_{min} / \mu s$	70	50	/	/

5 结论

本文提出的基于Rough set 理论的故障自诊断算法, 能准确快速地解决无线传感器网络的节点故障自诊断。相对于传统的单纯使用决策表方法来进行故障自诊断, 该方法具有降低算法复杂性, 耗能小的特点; 从而有效地解决了在能量有限无线传感器网络中, 其节点故障自诊断的技术问题。实验结果证实了该方法的有效性。

参考文献

- [1] STEFANO C, PAOLO S. Crash faults identification in wireless sensor networks [J]. Computer Communications, 2002, 25: 1273-1282.
- [2] KRISHNAMACHARI B, LYENGAR S. Distributed Bayesian algorithms for fault-tolerant event region detection in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2004, 53(3): 241-249.
- [3] XU Jiu-cheng, SHEN Jun-yi, WANG Guo-yin. Rough set theory analysis on decision subdivision [J]. Lecture Notes in Artificial Intelligence, 2004: 340-345.
- [4] SOHRABI K, GAO J, AILAWADHI V, et al. Protocols for self-organization of a wireless sensor network[J]. IEEE Personal Comm, 2000: 16-27.
- [5] HONG T P, WANG T T, WANG S L, et al. Learning a coverage set of maximally general fuzzy rules by rough sets[J]. Expert Syst Appl, 2000, 19(2): 97-103.
- [6] 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.
- [7] 雷霖. 微机自动检测与系统设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [8] 雷霖. 微机自动检测系统故障自诊断研究[J]. 仪表技术, 1999, 04: 12-14.
- [9] 徐菲菲, 苗夺谦, 魏 莱, 等. 基于互信息的模糊粗糙集属性约简[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1372-1375.
- [10] 刘书明, 冯小平. 数据采集系统芯片AD μ C812原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.

编辑 税红



雷霖, 教授, 工学博士。中国计算机学会、中国自动化学会、中国计量测试学会会员, 四川省自动化与仪器仪表学会理事。发表教学研究论文8篇, 编写教材和著作6部。获得学校优秀科技成果奖、优秀教学成果奖、优秀实验教学成果奖、优秀教材奖及“最受欢迎的基础课教师”奖等16项。负责或主研国家863等高科技科研项目10多项, 在国内外重要学术期刊和国际会议上发表学术论文70余篇, 其中被SCI、Ei等收录30多篇。主要研究方向是: 智能测控技术、现场总线技术、无线传感器网络、嵌入式系统等。