

WSN 中故障诊断性能与平均节点度研究

季 赛^{1,2}, 袁慎芳², 李含光¹

(1. 南京信息工程大学计算机与软件学院, 南京 210044; 2. 南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室, 南京 210016)

摘要: 在基于无线传感器网络的结构健康监测中, 故障节点产生并传输的错误数据将消耗节点的能量和带宽, 同时会形成结构健康监测的错误决策。针对该问题, 提出一种节点故障诊断算法, 利用节点感知传感数据的空间相似性, 通过对邻节点所感知的传感数据进行比较, 确定检测节点的状态, 将测试状态向网络中其他相邻节点进行扩散, 实现网络中全部节点的故障检测。同时介绍在不同平均节点度下改善故障诊断率的方法。实验结果表明, 该算法能够获得较好的性能。

关键词: 结构健康监测; 无线传感器网络; 故障诊断; 故障检测; 空间相似性; 平均节点度

Research on Fault Diagnosis Performance and Average Node Degree in WSN

Ji Sai^{1,2}, Yuan Shen-fang², Li Han-guang¹

(1. School of Computer and Software, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044;

2. Aeronautic Science Key Laboratory for Smart Materials & Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

【Abstract】 In structural health monitoring of Wireless Sensor Network(WSN), a faulty sensor may produce incorrect data and transmit them to the others. It consumes the limited energy and bandwidth of WSN. The base station may make inappropriate decision when it receives the incorrect data. Aiming at this problem, a distributed fault detection algorithm for WSN is presented. Faulty sensor nodes are identified based on comparisons between neighboring nodes and dissemination of the decision made at each node. The whole node detection is implemented. The method to improve fault diagnosis rate in different average node degree is proposed. Experimental results show that sensor nodes with permanent faults are identified with high accuracy for a wide range of fault rates.

【Key words】 structural health monitoring; Wireless Sensor Network(WSN); fault diagnosis; fault detection; spatial correlation; average node degree

1 概述

结构健康监测指利用现场的无损传感技术, 通过对包括结构响应在内的结构系统特性分析, 达到检测结构损伤或退化、制定延长结构寿命策略的目的^[1]。结构健康监测分为整体监测和局部监测。而无论哪种监测, 都是以传感器准确采集传输数据为前提和基础, 各种结构健康监测的数据采集主要采用的是传统“有线”传感器来实现。

近年来, 无线传感器网络在结构健康监测领域得到快速的发展和應用。1996年, Kenneth M等人将无线传感器应用于大型桥梁的监测; 2000年在美国举行的MCEER高科技防震减灾会议上, Lynch J P等人详细阐述了无线传感在土木工程健康监测领域的应用和前景^[2]; 2002年5月在纽约召开的结构健康工程研讨会上, 大多数人同意采用无线系统进行监测是未来的方向; 笔者所在的实验室从事智能材料和结构健康监测的研究, 目前已研发了适合于结构健康监测的传感器节点^[3], 项目组成员叶伟松等人针对复合材料结构健康监测的特点和需求, 实现了基于无线传感器网络的结构健康监测系统^[4]。在结构健康监测的应用过程中, 节点的故障会消耗网络的能量, 同时故障节点会导致的传感数据的不准确, 从而对结构健康监测产生错误的决策。

本文在实验室已有研究的基础上, 分析节点故障的模型, 提出节点故障检测的算法, 比较网络中节点的分布密度和节

点故障率之间的关系, 并通过实验验证算法的有效性。

2 节点的故障模型

2.1 网络模型

无线传感器网络中节点的状态可分为正常和故障。故障是“永久”和“静态”的, 所谓“永久”是指故障节点将持续故障直到该节点被维修或替代, 所谓“静态”是指在节点故障诊断过程中不产生新故障^[5]。

无线传感器网络的节点故障^[5]分为2类:

(1)硬故障是指传感器节点的某一模块发生故障, 以至不能和其他节点通信(例如由于节点通信模块故障、节点能量耗尽、节点移动而脱离了整个网络的通信范围等原因造成的无法通信);

(2)软故障是指传感器节点虽然发生故障, 但仍可以继续工作并与其他节点通信(通信模块的软硬件都正常并具有路由信息), 但节点所感知的或传送的数据不正确, 或者传感器

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60772072); 航空科学基金资助项目(04A52002)

作者简介: 季 赛(1976—), 男, 讲师、博士研究生, 主研方向: 计算机测控, 无线传感器网络, 网络安全, 数据挖掘; 袁慎芳, 教授、博士生导师; 李含光, 副教授

收稿日期: 2009-11-20 **E-mail:** jisai@nuist.edu.cn

节点瞬时发生通信故障。

在无线传感器网络的故障诊断中，针对的主要是节点软故障的检测。假设 n 个传感器节点随机地部署在预设区域内，并且都具有相同的传输距离。

定义 \bar{p} 为传感器网络中所有节点发生故障的概率(包括软、硬件故障)，则传感网络中故障节点的个数为 $n\bar{p}$ ；定义所有故障节点中发生软故障的概率为 r ，其数目为 $n\bar{p}r$ ，因此，网络中被用于故障诊断的有效节点的总数为

$$n(1-\bar{p})+n\bar{p}r$$

定义新的概率

$$p = \frac{n\bar{p}r}{n(1-\bar{p})+n\bar{p}r} = \frac{\bar{p}r}{1-\bar{p}+\bar{p}r}$$

作为本文研究故障诊断算法的一个重要参数。

对于给定通信距离的无线传感器网络，网络的平均节点度 d 也是本文研究诊断过程的另一个重要的参数。网络的平均节点度是指节点拥有的相邻节点的平均数，取决于网络中节点的分布密度和有效节点的个数 n 。当网络中出现失效节点，需要重新计算网络的平均节点度。

2.2 数据模型

在无线传感器网络中，节点和其邻节点之间具有空间的相似性，即网络中无故障的相邻传感器节点之间具有相同或相似的测量值。因此，可以通过邻节点感知的传感数据来诊断当前节点的状态。设节点 v_i 和 v_j 互为无故障的邻节点， x_j 和 x_i 分别为对应节点的测量值，2 个节点应当满足：

$$|x_i - x_j| \leq \xi$$

其中， $0 \leq \xi \leq 1$ ，阈值 ξ 取决于不同的结构健康监测的应用领域。

3 节点的故障诊断方法

3.1 网络通信图和节点状态定义

定义 $G(V, E)$ 为无线传感器网络的通信图，其中， V 为所有传感器节点的集合； E 为所有相邻节点边的集合。在传感器网络中，当相邻节点 v_i 和 v_j 之间的距离 $d(x_i, x_j)$ 小于网络的通信半径 l 时，称 2 个相邻节点在通信图 $G(V, E)$ 中具有相连接的边。对于无线传感器网络 $G(V, E)$ ， $v_i \in V$ 且 $1 \leq i \leq n$ ， v_i 节点的邻节点的集合可以表示为

$$N(v_i) = \{v_j \in V : (v_i, v_j) \in E\}$$

在对节点 v_i 的故障诊断的过程中，用 F_i 表示节点的状态， $F_i = 0$ 表示 v_i 为无故障节点，而 $F_i = 1$ 时表示 v_i 节点存在故障。根据相邻节点测量值的空间相似性的原理，将 v_i 的测量值和其所有的邻节点进行比较，根据比较的结果来诊断节点的状态给定 2 个相邻节点 $(v_i, v_j) \in E$ ， $v_j \in N(v_i)$ ，定义 $C(v_i, v_j)$ 为 v_i 和其邻节点的比较函数，简记为 C_{ij} ，则：

$$C_{ij} = C(v_i, v_j) = \begin{cases} 0 & \text{if } |x_i - x_j| \leq \xi \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

当 v_i 和其邻节点比较结果相似时，返回结果为 0，否则返回为 1。记 C_i 为所有相邻节点中 $C_{ij} = 0$ 的个数， $0 \leq C_i \leq |N(v_i)|$ ，则 C_i 反映的是节点 v_i 和相邻节点间相似的程度；如果 $|C_i| \geq \theta$ (θ 为预设的阈值)，则可以诊断 v_i 为无故障节点，并令 $F_i = 0$ 。

3.2 节点故障诊断算法

本文提出的故障诊断过程分成 2 个阶段。第 1 阶段是阈值测试阶段，对于给定的阈值 θ ，对每个传感器节点 v_i 进行阈值测试；当 $|C_i| \geq \theta$ 时，令 $F_i = 0$ ；如果 $|C_i| < \theta$ ，表示该节点未能通过阈值测试，不做任何操作，并退出阈值测试。第 2 阶段是无故障节点的状态扩散阶段，对于通过阈值测试的无故障节点 v_i ($F_i = 0$)，如果其邻节点 v_j 的 $C_{ji} = C_{ij} = 0$ ，则令 $F_j = 0$ ，直到将节点状态扩散到所有的邻居节点。节点故障检测的算法如下：

算法 节点故障检测的算法

Step1 对每个被检测的传感器节点 v_i ，生成该节点的邻节点的集合 $N(v_i)$ ，初始化 $F_i = 0$ ，初始化阈值 θ 。

Step2 For $j=1$ to $|N(v_i)|$ {计算 $C_{ij} = C(v_i, v_j)$ 的返回值;}

统计 C_i 的值;

If $(|C_i| \geq \theta)$ { $F_i = 0$;

For $j=1$ to $|N(v_i)|$

{If $(C_{ji} = C_{ij} = 0)$ $F_j = 0$;}

Step3 对于剩下未处理的节点 $V_i = V - \{v_i | v_i \in V, F_i = 0\}$

For each v_k in V_i

If $(C_{ki} = C_{ik} = 0$ and $F_i = 0$ and $F_k = 1)$

{ $F_k = 0$; 将 $F_k = 0$ 状态扩散到其邻节点; }

Step4 标志所有 $F_k = 1$ 的节点为故障节点。

4 仿真实验及结果分析

通过网络仿真软件 NS-2 对无线传感器网络的节点故障检测算法进行仿真，并对其性能进行分析。分析在不同网络平均节点度下，故障诊断精度(Correct Detection Rate, CDR)和虚警率(False Alarm Rate, FAR)的变化以及平均节点度和阈值 θ 对 CDR 和 FAR 的影响。

当无线传感器网络中节点发生的故障的概率为 p 时，故障诊断精度可用 $\frac{\alpha}{np}$ 来表示，其中， np 为网络中所有的故障节点数； α 为所有的故障节点中被正确诊断的节点数目；同理，故障诊断的虚警率可用 $\frac{\beta}{n(1-p)}$ 来表示，其中， $n(1-p)$ 为网络中无故障节点的数目； β 为无故障节点中被错误的检测为故障节点的数目。很明显，要提高节点故障检测的算法的性能，必须要提高故障诊断率，同时将故障的虚警率控制在较低的范围。

仿真实验中，将 1 024 个传感器节点随机部署在 512×512 的区域内，所有的传感器节点具有相同的传输距离。并分别模拟网络节点故障率 p 为 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 时节点检测的状况。

图 1 和图 2 反映的是无线传感器网络中平均节点度 $d \approx 7.6$ 时，在故障率 p 和阈值 θ 变化下，传感器节点故障诊断精度和虚警率。

从图 1、图 2 可以发现，在故障检测过程中，故障检测精度和故障检测的虚警率会随着 θ 的增大而增大，合理的设置 θ 阈值可以使得检测精度和检测的虚警率达到较好的平衡。在给定的平均节点度 $d \approx 7.6$ 下，随着节点故障率 p 的增大，要想使得故障检测达到较好的性能，阈值 θ 也应该随之增大。例如，当故障率 $p = 0.30$ 时，阈值 $\theta = 8$ 可以使 CDR 达

到 97.6%，同时将 FAR 控制在 6.5%，这要比其他阈值的性能要好。但是同时也发现，随着节点故障率 p 的减小，要想 CDR 和 FAR 达到满意的值， θ 也应该同时减小。例如，当故障率 $p=0.10$ 时，阈值 $\theta=5$ 可以使得 CDR 的值接近 100%，同时 FAR 的值减小到 0.8%。

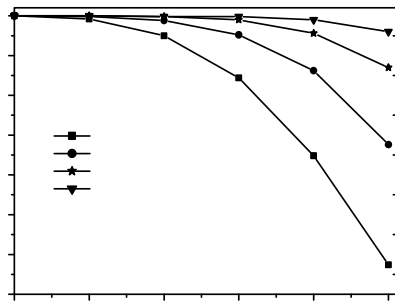


图 1 平均节点度 $d \approx 7.6$ 的故障诊断精度

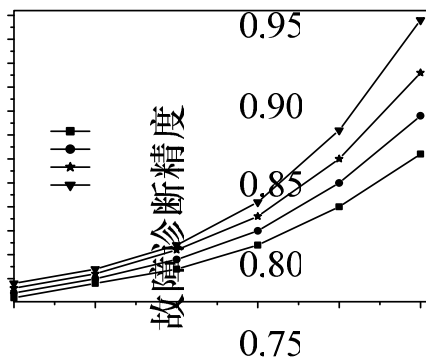


图 2 平均节点度 $d \approx 7.6$ 的故障诊断虚警率

因此，在节点的故障诊断中，当故障率较高时应设置高 θ 阈值，从而能获得满意的检测性能；同理，故障率较低时应设置低 θ 阈值。在实验过程中，还发现当网络平均节点度较低，随着节点故障率的增大，无论怎么调节 θ 阈值，节点故障的检测的效果急剧下降。这是因为平均节点度 d 的降低，导致传感器网络中不易生成节点的连通图，检测算法中节点的扩散功能难以有效的实现。因此，当 p 较高而 d 很低时，应当增加传感器网络中节点的数目或者提高节点的通信距离，从而提高平均节点度 d 。

为了分析网络的平均节点度 d 对阈值和检测性能的影响，在实验中改变网络的平均节点度，分别分析 $d \approx 10.3$ 和 $d \approx 14.8$ 下的不同阈值对应的检测精度和虚警率。实验结果如表 1、表 2 所示。

从表 1、表 2 可以发现，当无线传感器网络的平均节点度 d 相对较高时，网络的节点故障检测达到了很高的 CDR 和极低的 FAR。同时还发现随着平均节点度的增大，阈值 θ 可选择的范围也随之增大。例如在平均节点度 $d \approx 14.8$ 的情况下，阈值 θ 可选择 13、14、15、16 中的任意一个，都使得故障检测达到较好的效果。因此，在节点的故障诊断中，当平均节点度较高时，节点的故障率对 CDR 和 FAR 的影响很小，

FAR 的值总能控制在极低的范围内；而对于 CDR，可以通过对阈值 θ 的控制来达到最佳的值，实验结果表明，当 $\theta \approx d$ 时结果最令人满意。

表 1 在平均节点度为 10.3 和 14.8 时的故障检测精度

平均节点度 d	阈值 θ	节点故障率 p					
		0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300
$d \approx 10.3$	10	1.000	1.000	1.000	0.998	0.993	0.960
	11	1.000	1.000	1.000	0.999	0.996	0.984
	13	1.000	1.000	1.000	0.998	0.992	0.910
$d \approx 14.8$	14	1.000	1.000	1.000	1.000	0.996	0.934
	15	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.995
	16	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.996

表 2 在平均节点度 10.3 和 14.8 下的故障检测虚警率

平均节点度 d	阈值 θ	节点故障率 p					
		0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300
$d \approx 10.3$	10	0.001	0.001	0.001	0.002	0.004	0.007
	11	0.001	0.001	0.002	0.003	0.005	0.008
	13	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$d \approx 14.8$	14	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
	16	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002

5 结束语

本文介绍一种基于无线传感器网络的结构健康监测的节点故障诊断方法，分析网络的平均节点度、阈值以及节点故障率之间的关系。实验结果表明该算法简单，在节点的故障检测过程中具有良好的故障诊断的性能。该算法在提高故障检测精度的同时将故障检测的虚警率控制在较低的范围内。同时该算法具有较好的鲁棒性，能容忍较大范围的节点故障率。本文主要针对节点所感知的或传送的数据不正确的软故障进行的检测，而对于传感器节点瞬时发生通信故障的检测有待于进一步研究。

参考文献

- [1] 袁慎芳. 结构健康监测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [2] Lynch J P, Law K H, Stinger E G, et al. The Development of a Wireless Modular Health Monitoring System for Civil Structures[C]//Proc. of MCEER Mitigation of Earthquake Disaster by Advanced Technology Workshop. Las Vegas, NV, USA: [s. n.], 2000.
- [3] Wu Jian, Yuan Shenfang, Zhao Xia, et al. A Wireless Sensor Network Node Designed for Exploring a Structural Health Monitoring Application[J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(5): 1898-1906.
- [4] 叶伟松, 袁慎芳. 无线传感器网络在结构健康检测中的应用[J]. 传感技术学报, 2006, 19(3): 890-894.
- [5] Chessa S, Santi P. Comparison-based System Level Fault Diagnosis in Ad-hoc Networks[C]//Proc. of the 20th IEEE Symp. on Reliable Distributed Systems. New Orleans, USA: IEEE Press, 2001.

编辑 陈文