

一种传感器故障诊断的无中心自组织算法

王世强¹, 邢建春¹, 李决龙², 杨启亮^{1,3}

(1 解放军理工大学 国防工程学院, 江苏 南京 210007; 2 海防工程技术研究中心, 北京 100841;

3 计算机软件新技术国家重点实验室(南京大学), 江苏 南京 210093)

摘 要: 基于无中心智能控制系统, 提出了传感器故障诊断的无中心自组织算法. 以系统出现故障的传感器数目总是少数为假设条件, 通过物理基本原理建立约束方程, 利用各相邻节点的等式和不等式约束, 通过假设检验, 投票统计来对传感器故障进行诊断. 与传统的集中式和分布式算法不同, 该算法无需构建中心节点, 不必增加硬件或时序冗余, 因而不局限于时空相似性判定. 通过大量仿真实验, 验证了该算法对单个或多个传感器故障均能做出正确的判定.

关键词: 控制系统; 传感器; 故障诊断; 约束方程; 无中心算法

中图分类号: TP393.02

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)05-0080-05

A Decentralized and Self-Organizing Algorithm for Sensors Fault Diagnosis

WANG Shi-qiang¹, XING Jian-chun¹, LI Jue-long², YANG Qi-liang^{1,3}

(1 College of Defense Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China;

2 Technical Management Office of Naval Defense Engineering, Beijing 100841, China;

3 State Key Laboratory for Novel Software Technology(Nanjing University), Nanjing 210093, China)

Abstract: Based on the decentralized computing platform, a decentralized and self-organizing algorithm for sensor fault diagnosis is proposed. The basic idea of the method is to detect the equality and inequality constraints of the adjacent variables under the hypothesis that the fault sensors are always less. Unlike traditional centralized and distributed algorithms, the algorithm does not need to build a central node, without increasing hardware or time-series redundancy, and regardless of spatial similarity. This method is very effective o detect the fault of Single or multiple sensors through simulation result.

Key words: control system ; sensor; fault diagnosis ; constraints; decentralized algorithm

1 引言

在控制系统中, 传感器是信息获取的主要装置, 是控制系统进行控制的基础和依据. 传感器故障诊断非常重要.

现有传感器故障诊断方式可分为集中式和分布式诊断. 其中集中式诊断是指节点将信息采集完之后, 以统一的方式将所有信息传给一个地理或逻辑上的中心节点(中央监控站)^[1]. 统一进行诊断, 由于传感器往往

分布在空间的各个角落, 集中式诊断方法更是显现出很多不足. 而分布式诊断大多数是需要硬件冗余^[2], 造成该方法成本较高, 且需额外的物理设备, 并且在有些情况下是不容许的. 另外基于贝叶斯网络的分布式诊断方法过度依赖于节点之间的相互影响^[3], 需要较强的因果关系, 所以检测能力有限.

从诊断方法上来说, 现有传感器故障诊断方法大多是基于数学模型的, 需要中心节点建模, 但往往难以获得精确的数学模型^[4]. 对于温漂、时漂、安装

收稿日期: 2015-06-27; 修回日期: 2015-08-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(61321491); 国家高技术研究发展计划(“八六三”)(2013AA01A213); 计算机软件新技术国家重点实验室(南京大学)开放课题(KFKT2014B12)

位置错误等引起的故障,由于传感器输出特性和正常传感器的输出特性完全一样,使用信号处理的方法^[5],很难对这种故障进行检测. 另外,基于历史数据学习与专家规则的各种智能算法^[6],受季节、天气等的影响,容易形成漏检和误检,适应性差. 所以,以上诊断方法在实际工程中应用还比较少.

本文针对现有传感器故障诊断方法在工程可用性、置信度等方面的不足,提出传感器无中心故障诊断原理及其实现方法(Decentralized and Self-organizing Algorithm for Fault Detection, DSAFD). 该方法基于清华大学设计的无中心智能控制系统,无需构建中心节点,使数据在系统底层就能自组织地完成校核与共享,避免了繁琐的上传下达与存储等传输任务,实时性强. 另外,基于物质相关和能量守恒的客观规律,建立各个节点之间的约束关系,无需设置检测阈值,不增加额外硬件开销,适应性强,能够实时检测出传感器故障,服务于控制系统安全运行,方便工程实施.

2 基本原理

2.1 问题描述

控制系统中若干测量变量之间存在相关性,该相关性由能量守恒定律、质量守恒定律和热平衡原理、压力、流量平衡原理等基本物理规律所制约.

给定一个控制系统传感器测量网络,每个传感器感测一组参数向量,不妨设传感器 i 感测到的向量为 $\mathbf{x}_i$ (此处 $\mathbf{x}_i$ 可以蕴含温度、湿度等信息). 采用图论的术语,将每一个低智能的传感器看作一个网络节点(agent 节点),每个节点本地都有与邻居节点相关的约束函数. 若传感器 i 与传感器 j 之间存在约束关系,则用无向边 $\{i, j\}$ 连接. 由于温度场、湿度场等状态场具有渐变性,属于空间近距离相互作用,即仅能对邻居节点产生影响,因此要求每个节点只能与邻居节点相连. 用一个无向图来描述该传感器网络,如图 1 所示,其中每个节点都是平等的.

根据控制系统各个节点物理量(温湿度、酸碱度等)之间的关系可得每个节点所应当满足的等式和不等式(线性或非线性)约束,所有约束只涉及到本地节点与相邻节点:

$$\begin{aligned} g_i(x_i, x_{i_1}, \dots, x_{i_m}) &\leq 0, \\ h_i(x_i, x_{i_1}, \dots, x_{i_m}) &= 0. \end{aligned}$$

式中, x_i 是本地测量变量, $x_{i_1}, \dots, x_{i_m}$ 是相邻节点 $i_1, \dots, i_m$ 的测量变量.

如果传感器网络中有一个或多个传感器发生故

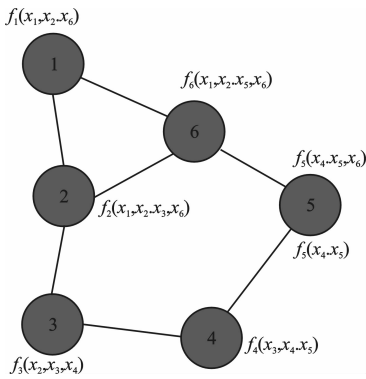


图 1 传感器网络拓扑图

障,将会违反相关约束条件. 但是,由于大部分约束条件是多个相关变量的函数,故只能将故障范围限定在某一个故障集合内,且问题本身具有随机性,并不能精确地指出产生故障的传感器节点.

基于传感器网络拓扑,无中心自组织诊断算法运行于各传感器节点,其目标是通过相邻节点的交互,无需构建中心节点和增加硬件或时序冗余,找到测量网络中发生错误的节点,即远离正常测量误差的节点.

提出的基于节点信誉的无中心自组织诊断算法的基本思想可以用一个简单的例子来阐述. 假设有一组人在进行批评与自我批评,以期做出最公平公正的评价. 一种直观的方法是,每个人先通过进行自我评价得到某种意见,然后再根据周边其他人的意见来调整自己的意见,如此循环多次,即可期望大家都能得到最合理的鉴定.

通过假设检验,发现产生错误的相关约束(称为故障约束),触发校核机制,进入诊断网络,具有很强的实时性.

2.2 假设检验

设对传感器节点的状态有两种假设: H_0 和 H_1 , 现要根据 $(0, T)$ 时间内的观测量 $z(t)$ 判决 H_0 为真或 H_1 为真.

在故障诊断中, H_0 表示无故障, H_1 表示有故障. 有四种可能性:

- (1) H_0 为真,判断 H_1 为真,称为误检;
- (2) H_1 为真,判断 H_0 为真,称为漏检;
- (3) H_0 为真,判断 H_0 为真,称为无误检;
- (4) H_1 为真,判断 H_1 为真,称为正确诊断.

设观测值 z 构成的观测空间为 Z , 将 Z 划分为两个互不相交的子空间 Z_0 和 Z_1 , 如图 2 所示.

判决规则是:当 $z \in Z_0$ 时,判断 H_0 为真;当 $z \in Z_1$ 时,判断 H_1 为真.

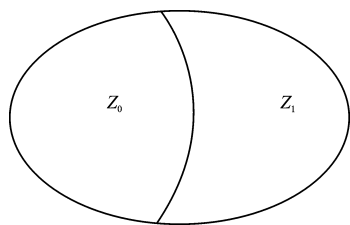


图2 判决区域图

2.2.1 等式约束

不妨给定一个等式约束 f , 在正常测量的情况下, 误差 e 较测量值 z 本身而言较小. 同时, 假设各个节点的测量过程相互独立, 服从正态分布.

需要特别指出, 由于物理系统的相互影响性, 所测数据之间势必存在关联, 但测量本身是独立的, 例如空调系统回风温度出现错误导致送风量增加, 但送风量测量值的准确性并不受温度测量错误的影响.

那么在正常测量的情况下, 测量值应满足

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, \dots, x_m) &= f(z_1 + e_1, \dots, z_m + e_m) \\ &= f(z_1, \dots, z_m) + \\ &\quad \frac{\partial f(z_1, \dots, z_m)}{\partial x_1} e_1 + \dots + \\ &\quad \frac{\partial f(z_1, \dots, z_m)}{\partial x_m} e_m. \end{aligned}$$

由于误差相互独立, 且 $e_i \sim N(0, \sigma_i^2)$, 那么设计统计量 T_f 有

$$T_f(e) = f(z_1, \dots, z_m).$$

易知

$$T_f \sim N(0, \sigma_f^2),$$

且有

$$\sigma_f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_1^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_m}\right)^2 \sigma_m^2.$$

构建假设检验问题

$$H_0: T_f = 0.$$

设置信概率为 α , 那么很容易得到拒绝域为

$$|T_f| > \sigma_f Z_{\alpha/2}.$$

其含义是, 如果等式 f 内的所有节点的测量值都是正常的, 那么 $f(z_1, \dots, z_m)$ 应该接近 0, 并在误差限定的范围内. 而一旦假设检验不成立, 那么就说明这些变量中至少存在一个点发生了严重的错误, 使等式约束 f 不成立.

2.2.2 不等式约束

与此同理, 对于不等式的情况, 检验量的设定方法不变, 假设检验问题为

$$H_0: T_f \geq 0$$

设置信概率为 α , 对应的拒绝域为

$$T_f < -\sigma_f Z_{\alpha}.$$

对于不等式的情况, 理论上讲, 拒绝域应该是 $T_f < f(x_1, x_2, \dots, x_m) - \sigma_f Z_{\alpha}$.

由于真值不可知, 所以当 $T_f \geq 0$ 时, 就自然接受 H_0 假设, 而当 $T_f < 0$ 时, 只能作保守估计, 即

$$T_f < \inf\{f(x_1, x_2, \dots, x_m) - \sigma_f Z_{\alpha}\} = -\sigma_f Z_{\alpha}.$$

所以, 对于等式约束, 其假设检验的结果比较明确, 置信概率是 $1 - \alpha$; 然而对于不等式的情况, 置信概率其实是小于 $1 - \alpha$ 的. 反过来讲, 当不等式的假设检验不通过时, 说明存在的测量错误已经很严重了. 另一方面, 由于不等式的单边性, 使得与不等式同向的错误不易被发现.

综合考虑以上因素, 当等式的假设检验不满足时, 对测量错误的指向性比不等式要强, 故需要对等式和不等式诊断的可能错误做区别对待, 分别记为 1 和 γ , 其中 $1 < \gamma \leq 2$.

2.3 投票理论

2.2.2 节分析了当一个测量点发生错误时, 对等式和不等式分别造成的影响, 以及通过假设检验对这种影响的反响识别. 那么, 对于一个发生错误的节点 x_i , 它会收到来自各方的检验结果, 有的是接受检验, 有的是不接受, 那么如果大多数相关的检验都表示不接受, 则说明 x_i 出现错误的可能性较大.

投票理论主要研究如何把每个投票者的个体偏好聚合成集体偏好, 而投票过程不仅充分尊重投票者的意愿, 还要公平对待每个投票对象^[7].

对于一个发生故障的节点 x_i , 假设检验后, 会收到来自各个邻居的投票结果, 如果接受检验, 则投赞成票; 如果不接受检验, 则投反对票. 那么如果收到的反对票数较多, 则说明 x_i 出现故障的可能性较大.

设与 x_i 相关的等式约束有 k 个, 不等式约束有 l 个, 其中有 k' 个等式和 l' 个不等式对 x_i 假设检验不通过, 那么 x_i 在全局出错的可能性就是

$$p_i = \frac{k'\gamma + l'}{k\gamma + l} \quad (1)$$

同时, 还应考虑到 x_i 在不同的约束函数 f 中的影响程度是不同的. 当通过假设检验发现某约束不成立时, 会怀疑 f 中的所有元素. 然而, 由于每一个元素对 f 的影响程度不同, 即 $\partial f / \partial x_i$ 不等, 那么对各个元素 (各个传感器) 的怀疑程度也应该有所不同.

因此, 定义权系数

$$\psi_i = \frac{|\partial f/\partial x_i|}{\sum_{j=1}^m |\partial f/\partial x_j|} \tag{2}$$

除此之外,因各传感器的敏感程度、可靠性及精度不同,所以引入传感器的精度信息,其中传感器 i 的初始精度表示为 p_{ir} , 即 $p_i(0) = p_{ir}$, 后续计算以每次得出的故障概率为权值进行迭代.

$$\psi_i = \frac{p_i(k) |\partial f/\partial x_i|}{\sum_{j=1}^m p_j(k) |\partial f/\partial x_j|} \tag{3}$$

综上所述,故障概率函数应为 $\frac{k\gamma + l}{k\gamma + l}$ 与怀疑度 ψ_i 的综合:

$$p_i = \frac{\gamma \sum_k \psi_i + \sum_l \psi_i}{\gamma \sum_k \psi_i + \sum_l \psi_i} \tag{4}$$

3 无中心自组织算法

设测量网络中,每一个节点感测一个参数 x_i , 与此节点相邻的节点为 $x_{j1}, \dots, x_{jm}$, 每个节点的数据处理模式和能力相同,算法具体步骤如下:

- (1) 本地节点获得本地测量结果 z_i , 并将自己的测量值传递给邻居节点;
- (2) 本地收取相邻节点的测量结果 $z_{j1}, \dots, z_{jm}$;
- (3) 根据测量值,计算每一个节点在每一个约束的权值,完成表 1.

表 1 各节点在不同约束中的权值

约束	序号	x_i	x_{j1}	...	x_{jm}
等式	i_1	$\psi_i^{i1}\gamma$	0	...	$\psi_{jm}^{i1}\gamma$
	...				
	i_k	$\psi_i^{ik}\gamma$	$\psi_{j1}^{ik}\gamma$	...	0
不等式	i_1	ψ_i^{i1}	ψ_{j1}^{i1}	...	0
	...				
	i_l	ψ_i^{il}	ψ_{j1}^{il}	...	ψ_{jm}^{il}

表 1 中为 0 项表示该约束中没有此元素.

- (4) 依次对本地的等式约束和不等式约束进行假设检验,完成表 2.

表 2 假设检验结果

约束	序号	H_0	x_i	x_{j1}	...	x_{jm}
等式	i_1	✓	0	0	...	0
	...	...				
	i_k	×	$\psi_i^{ik}\gamma$	$\psi_{j1}^{ik}\gamma$	...	0
不等式	i_1	×	ψ_i^{i1}	ψ_{j1}^{i1}	...	0
	...	...				
	i_l	×	ψ_i^{il}	ψ_{j1}^{il}	...	ψ_{jm}^{il}

表 2 中的每一行对应一个约束,如果该约束接受 H_0 ,则全部为 0; 否则拒绝 H_0 ,则等于表 1 中对应行.

- (5) 对任何一个相邻节点 $x_{jk}(x_{j1}, \dots, x_{jm}), x_i$ 节点将其表 1 和表 2 中对应的列发送给我相邻节点 x_{jk} , 其中若表 1 中某一项为 0, 则可除去该点. 即节点 x_i 向点 x_{jk} 发送, 如表 3 所示.

表 3 各节点向邻居节点发送数值表

权值	$\psi_{jk}^{i1}\gamma$	$\psi_{jk}^{ik}\gamma$	...	ψ_{jk}^{il}
检验	0	$\psi_{jk}^{ik}\gamma$	...	0

- (6) 节点 x_i 收到所有相邻节点关于自己的表 3, 根据式(4) 计算综合概率 p_i ;
- (7) 同步迭代如图 3 所示, 错误节点的概率随着迭代次数的增加趋向于 100%, 正确节点的概率随着迭代次数的增加趋向于 0.



图 3 同步迭代示意图

以上算法运行于各个节点,对于每个节点都是完全一样的. 该算法具有以下特点.

- (1) 并行性: 多个节点并行地进行计算, 增加处理速度;
- (2) 简单性: 算法中只需要将信息传送给邻居即可且数据量与计算量小, 无需存储链路信息, 不必在中央节点建立整个问题的模型, 且适应动态变化的网络拓扑.
- 需要说明的是, 上述算法只能找出测量错误的节点, 并不能估计错误的大小. 根据判别结果, 如果 x_i 未出错, 可以设定 $x_i = z_i$, 即 $e_i = 0$, 以此可得到关于出错节点的一系列等式和不等式. 如果这些等式和不等式相容、正定, 则恰好可以根据正常测量的节点求解出错误的节点; 如果欠定或过定, 则根据误差最小二乘原则或误差绝对值最小, 估计错误的大小.

4 仿真实验与分析

4.1 仿真条件

为验证所提算法的正确性和通用性, 给定某控制系统的 6×10 的传感器网络, 通过设置多组单个与多个节点故障进行诊断. 篇幅所限, 仅以多节点 10, 27, 44 为故障节点为例进行说明: 误差 $|e| > Z_{0.975}$, 约束条件全部为随机生成的等式和不等式 (实际工程中根据控制系统物理知识建立, 本文为体

现算法在不同场合下的适应性,选择随机生成),共 36 个等式约束,300 个不等式约束(每个节点平均 5 个),设定 $\gamma = 1.5, \alpha = 0.1$. 图 4 为传感器网络及故障节点示意图,各点测量及测量误差见图 5.

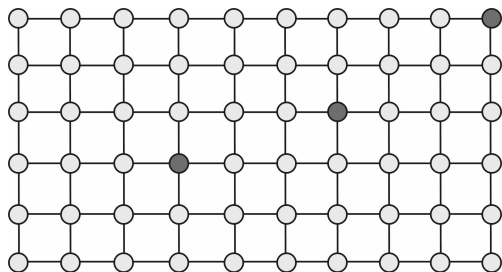


图 4 传感器网络及故障节点示意图

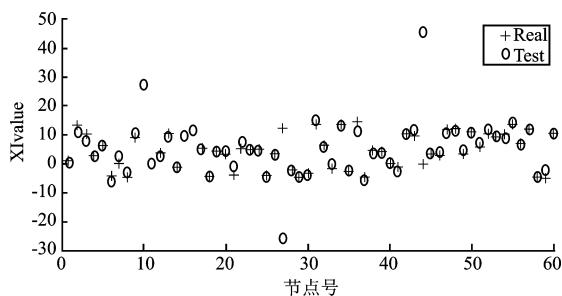


图 5 各点测量值及测量误差

4.2 仿真结果

设定传感器精度为 70%,即传感器初始故障概率为 0.3. 每个节点通过假设检验,与邻居节点互动,计算得到自己的故障概率.

由仿真结果可以看出,在迭代过程中,故障节点的概率值逐渐增大,正常节点的概率值逐渐减小. 第 30 次迭代后,预先设置的故障节点 10 概率值为 0.997 5,故障节点 27 概率值为 0.999 9,故障节点 44 的概率值为 0.963 3,即故障传感器的判定概率趋于 1. 其他大部分正常传感器故障概率趋于 0,只有节点 3 概率值为 0.205 5,节点 35 概率值为 0.305 5,节点 41 概率值为 0.237 0,节点 50 概率值为 0.259 3,节点 51 概率值为 0.227 2,这部分节点由于与故障节点约束较强,距离较近,由故障节点引发一定的故障概率. 但是并不影响判定过程,故障节点被识别出来,算法有效.

5 结束语

通过数学分析与实例计算,可见无中心自组织算法具有以下优点.

(1)实时性:DSAFD 方法在系统底层完成数据校核,且仅需根据当前时刻的测量值进行检测与诊

断,克服了传统算法的滞后性,且简单易行,具有较强的可操作.

(2)适应性:DSAFD 方法基于客观的物理规律建立约束关系式,不易受到不同工况、不同天气条件等的影响,但可靠性在很大程度上取决于各测量参数之间关系的完备性,约束条件越强,判定结果越准确,算法鲁棒性越好.

(3)并行性:多个节点并行地进行计算,能对单个或多个传感器同时故障做出精确诊断.

参考文献:

- [1] Cohen K, Leshem A. Energy-efficient detection in wireless sensor networks using likelihood ratio and channel state information [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(8): 1671-1683.
- [2] Liu W J, Zhang S K, Fan J X. A diagnosis-based clustering and multipath routing protocol for wireless sensor networks [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2012, 9(1): 1-11.
- [3] Luo X, Dong M, Huang Y. On distributed fault-tolerant detection in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Computers, 2006, 55(1): 58-70.
- [4] Wang H, Chai T Y, Ding J L, et al. Data driven fault diagnosis and fault tolerant control: Some advances and possible new directions[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(6): 739-747.
- [5] Bashi A, Jilkov V P, Li X R. Fault detection for systems with multiple unknown modes and similar units and Its application to HVAC[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19 (5): 957-968.
- [6] Francisco S, Edwin L, Kurt P, et al. Fault detection in multi-sensor networks based on multivariate time-series models and orthogonal transformations [J]. Information Fusion, 2014, 20(11): 272-291.
- [7] 张楠, 陈荣, 郭世凯. 投票理论研究现状及其展望 [J]. 计算机科学, 2015, 42(5): 1-9.

作者简介:

王世强 男, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为无中心智能控制系统故障诊断. E-mail: swiptwsq@163.com.

邢建春 男, (1964-), 博士, 教授, 博士生导师. 研究方向为复杂智能信息系统.

李决龙 男, (1957-), 博士, 博士生导师. 研究方向为复杂信息系统.

杨启亮 男, (1975-), 博士, 副教授. 研究方向为软件模糊自适应、分布式控制系统.