

过程控制系统中多条件约束的多传感器故障检测与诊断

秦健勇, 尚雪莲

(新疆工程学院 计算机工程系, 乌鲁木齐 830013)

摘要: 针对工业过程控制系统中的故障具有类型多样、时空独立和非线性等特点, 使得检测与诊断效率降低, 系统性能下降等问题, 提出了一种基于自定义多条件约束的多传感器故障检测与诊断机制; 该机制, 首先考虑了系统的稳态和时空特征建立了非线性过程控制系统多故障模型, 并给出了满足条件判定法则; 然后对于系统中的单故障, 并发故障和通信故障等类型给出了多条件约束法则及独立性判断; 最后提出了通过自定义多条件约束的多传感器故障检测与诊断机制; 实验结果表明, 在平均检测概率、稳态特征保持能力和系统功耗等方面明显优于无条件约束的机制, 可以显著改善过程控制系统性能。

关键词: 过程控制系统; 多条件约束; 多传感器故障; 故障检测与诊断

Multi-sensor Fault Detection and Diagnosis Scheme with Multiple Constraints for Process Control System

Qin Jianyong, Shang Xuelian

(Department of Computer Engineering, Xinjiang Engineering College, Urumqi 830013, China)

Abstract: For industrial process control system fault has diverse, independent and non-linear temporal characteristics, making the detection and diagnosis of reduced efficiency, system performance and other issues, we propose a multi-sensor based on a custom multi-fault detection and diagnosis of constraints mechanisms. This mechanism, first consider the steady-state and temporal characteristics of the system to establish a nonlinear process control system multi-fault model, and gives the condition judgment rule; then for a single fault in the system, concurrent failures and communication failures and other types of shows multi-constraint rules and independent properties judgment; concludes with a multi-sensor fault detection and diagnosis mechanisms by customizing multiple constraints. Experimental results show that the average probability of detection, the ability to maintain steady-state characteristics and system power consumption, significantly better than the unconditional restraint mechanisms can significantly improve the performance of the process control system.

Keywords: process control system; multiple constraints; multi-sensor fault; fault detection and diagnosis

0 引言

随着非线性多传感器系统的自动化程度和过程控制系统的监控与自适应程度的提高, 在具有连续工业生产特点的业务中得到广泛应用^{[1][2]}, 在过程控制系统中如何解决非线性多传感器系统和过程控制系统的故障检测与诊断问题, 成为其工业化应用的关键问题。

G. Bumiller 等人^[3]针对包含数十个甚至数百个组件分布在相对较宽区域的传感, 控制和自动化过程控制系统, 文献^[4]通过鲁棒控制实现故障检测, 并通过线性矩阵不等式关系规则设计了 H_∞ 最优控制器。文献^[5]基于 RFID (Radio Frequency Identification) 技术提出了一种适用于离散制造车间生产过程控制系统的实施方案。文献^[6]提出了航空发动机非线性全包线模型并结合网络通信需求建立了输出时延感知的分布式过程控制系统模型。

此外, 针对过程控制系统中易出现未知扰动的问题, 文献^[7]建立了一种 UIO 最优故障诊断算法。文献^[8]经过改进多模自适应滤波方法后既可以检测故障类型又能够确定故障程

度。文献^[9]对于工业过程中的建模与故障诊断、模型预测和数据性能评估等方面综述了过程控制系统的研究成果。基于软测量烧穿点和垂直烧结速度的烧结过程, 文献^[10]提出了一种层次化的智能控制系统, 该系统具有两个级别的分级配置。

针对过程控制系统的不确定性和未知因素, 集合多传感器故障检测研究成果存在的不足, 本文提出了一种适用于非线性过程控制系统的基于多条件约束的多传感器故障检测与诊断机制, 根据系统稳态特征、时间和空间特征等因素基于时间的线性序列建立多故障感知模型。

1 非线性过程控制系统多故障模型

工业生产过程控制系统的稳态非线性状态描述如公式 (1) 所示, 该非线性系统具有稳态特征向量 v , 根据非线性函数 $P \parallel \frac{x-\mu}{\sigma} \parallel$, 其中考虑了多输入信号向量 x 、多传感器空间增益 σ 和天线功率损耗占总功耗比 μ 。

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(x, v, t) + B(|T-t|) \\ \dot{y}(t) = f(x, t) + \kappa(v, t) + \frac{x-\mu}{\sigma} \varphi(x, v) \\ v = P \parallel \frac{x-\mu}{\sigma} \parallel \end{cases} \quad (1)$$

其中, 非线性函数 $A(x, v, t)$ 可以根据多输入信号 x

收稿日期: 2014-09-12; 修回日期: 2014-10-23。

作者简介: 秦健勇 (1978-), 男, 河南荥阳人, 硕士研究生, 讲师, 主要从事计算机应用方向的研究。

结合稳态特征 v 跟踪多传感器节点随时间变化情况, 同时考虑了工业过程控制系统生产时间与多传感器故障延时通过函数 $B(|T-t|)$ 分析得到, T 表示工业控制系统稳态下流水线时长。在计算系统多输出信号向量时, 不仅考虑了过程控制系统的稳态特征系数而且结合了实时监测向量即 $\varphi(x, v)$ 。多传感器之间的协同增益和损耗由函数 $\kappa(v, t)$ 计算得到。

多故障发生时间 F_i 、检测时间点 D_i 与工业过程控制系统作业时间 T 之间存在如下关系:

$$\begin{cases} B(F_i - D_i) < B(|T-t|) & 0 < t < \frac{1}{3}T \\ B(F_i - D_i) = B(|T-t|) & \frac{1}{3}T \leq t < \frac{1}{2}T \\ B(F_i - D_i) \geq B(|T-t|) & \frac{1}{2}T \leq t \end{cases} \quad (2)$$

如果多故障并发, F_i 和 D_i 成为向量按照时间序列线性记录故障时间点和检测点, 并由公式 (2) 判断其在时间线性上是否满足过程控制系统非线性条件。如果不满足, 将工业过程控制流水时间 T 分为几个独立时间区间, 使其满足上述约束条件。过程控制系统稳态时间特征符合图 1 所示趋势。

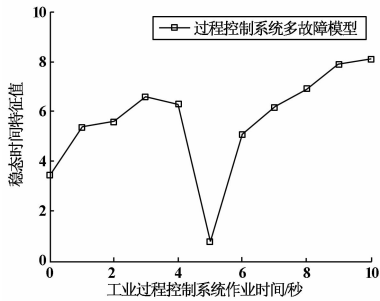


图 1 稳态时间特征曲线

对于多传感器监测的过程控制系统空间区域, 设定 $x = R^n$, 故障权重系数 $w = R^m$, 此处 n 表示并发故障个数, m 表示多传感器系统规模且 $n \leq m$ 。多故障模型从多角度以多种模式感知工业过程控制系统作业情况及多传感器监测工作状态, $C_{od}(n, m, w)$ 表示故障传感器节点在过程控制系统中的空间坐标及其权重, 定义如下:

$$C_{od}(n, m, w) = C_{od}[\dot{x}(t)\dot{y}(T-t)] = \int_{F_i}^{D_i} \Phi(f(x, t) + \kappa(v, t)) \quad (3)$$

其中: 函数 Φ 可以得到故障节点的功率谱密度分布情况。过程控制系统稳态空间特征符合图 2 所示趋势。

2 多条件约束的多传感器故障检测与诊断

基于多传感器的工业过程控制系统的监测与控制对象具有多条件约束, 例如过程控制系统状态、传感器间信号交互时延、多输入多输出信号强度、故障节点定位精度等方面, 而且工业应用对于多传感器故障并发下的过程控制系统的性能有多方面需求和限制, 例如作业效率、工业产品合格率、生产控制成本和环境等方面, 这些因素对于过程控制系统必须具有多条件约束下多传感器故障检测与诊断能力, 并能够感知系统性能变化。

无论基本的故障点判定还是传感器节点之间信号交互失败

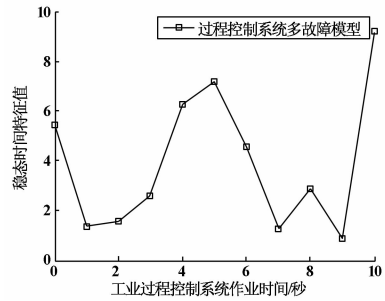


图 2 稳态空间特征曲线

分析, 对于多传感器故障检测和诊断有重要影响, 检测时的两个主要干扰源是工业环境加性噪声干扰和发送节点物理或电气属性变化, 因此在 1 节中建立的多故障模型下的对具有以上 2 方面干扰的非线性过程控制系统诊断决策定义如下结构:

1) 虽然过程控制系统对故障较为敏感而实时性要求不高, 因此每个故障传感器节点作为信号源的时空增益和损耗近似恒定值, 对 n 个故障信号源的统计值计算均值, 以便降低干扰的影响, 并使得系统信道信噪比得到 λ 倍增益;

2) 对于 n 个故障信号源的测量值的统计满足随机过程特性, 经压缩和组合后可降低信号源的固有物理或电气属性对系统信道的干扰程度。

基于以上两点诊断依据, 假设工业过程控制系统中 n 个故障传感器的 n_F 个采样本统计向量 l_F 均值化后在 R^n 空间内具有如下关系:

$$l_F = \frac{\lambda}{n_F} \sum_{i=1}^n R_i^n s_k \quad (4)$$

其中, s_k 表示在 R^n 空间内故障节点采集样本向量均值, $k = 1, 2, \dots, n$ 。

多传感器故障及对系统性能影响建立条件约束法则, 定义如表 1、2 和 3 所示。其中, 表 1 给出了传感器常见故障及约束法则, 表 2 给出了多故障并发对系统性能影响的条件约束法则, 表 3 给出了多传感器信号传输对系统性能影响的条件约束。

表 1 传感器常见故障及约束条件

故障点	描述	约束模型
F1	传感器天线故障	$R_{eF} = \lambda \lfloor l_F - n_F \rfloor$
F2	传感器计算故障	$R_{eF} = \lambda + \lfloor l_F - n_F \rfloor$
F3	传感器存储故障	$R_{eF} = \lambda \oplus \lfloor l_F - n_F \rfloor$
F4	传感器内部衰减	$R_{eF} = \lambda \sqrt{\lfloor l_F - n_F \rfloor}$
F5	传感器外部腐蚀	$R_{eF} = \lambda - \sqrt{\lfloor l_F - n_F \rfloor}$
F6	传感器堵塞	$R_{eF} = \frac{\lambda}{\sqrt{\lfloor l_F - n_F \rfloor}}$

表 2 多故障并发及约束条件

并发故障	描述	约束模型
FC1	天线与堵塞	$R_{eF} = \lambda \min\{\lfloor l_F - n_F \rfloor, \frac{1}{\sqrt{\lfloor l_F - n_F \rfloor}}\}$
FC2	计算与存储	$R_{eF} = \lfloor l_F - n_F \rfloor \pm \lambda$
FC3	衰减与腐蚀	$R_{eF} = \gamma_F \sqrt{\lfloor l_F - n_F \rfloor}$
FC4	天线与存储	$R_{eF} = \varphi_F \lfloor l_F - n_F \rfloor$
FC5	天线与衰减	$R_{eF} = \varphi_F \min\{\lfloor l_F - n_F \rfloor, \sqrt{\lfloor l_F - n_F \rfloor}\}$

其中，对于 FC3 描述的传感器衰减与腐蚀的并发故障时 λ 处于不确定状态，计算时间复杂度较高，因此根据公式 (4) 的空间约束条件得到稳态因子 γ_F ，在此基础上对并发故障进行约束。同理 FC4 和 FC5 中依据 φ_F 对故障并发进行约束。

表 3 多传感器信号传输及约束条件

传输故障	描述	约束模型
FT1	加性干扰	$R_{eF} = s_k(t)n_F$
FT2	转发节点堵塞	$\begin{cases} R_{eF} = \dot{x}(t)\kappa(v,t) \\ v = P \ x - \mu \ \end{cases}$
FT3	转发节点天线	$\begin{cases} R_{eF} = \dot{x}(t)\kappa(v,t) \\ v = P \ \frac{1}{\delta} \ \end{cases}$
FT4	接收节点计算	$R_{eF} = \ R^n \ - \sum_{t=1}^T \lambda \dot{y}(t)$
FT5	信号源节点电气衰竭	$R_{eF} = \frac{\ R^n \ }{\sqrt{ I_F - n_F }}$

在对故障类型分类识别、多故障并发特征、过程控制系统稳态特征和多条件约束的基础上，给出适用于非线性工业过程控制系统的多传感器故障检测与诊断机制，其架构如图 3 所示。该机制在实际应用中，基于多条件约束进行故障检测与诊断时，需要注意以下几点：

- 1) 在空间 R^n 内，每个故障节点检测 $\kappa(v,t)$ 随时间分布是一个随机过程，统计相对独立；
- 2) 对于不同类型故障，其检测约束统计具有独立性；
- 3) 不仅要具备稳态特征值而且要满足如图 4 所示的空间独立性。

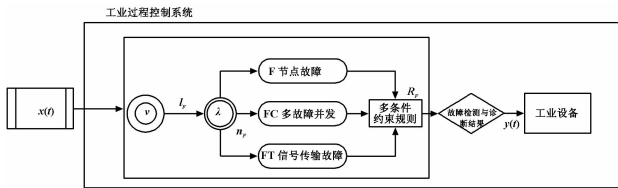


图 3 多传感器故障检测与诊断机制架构

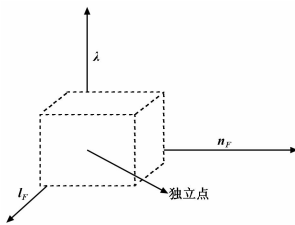


图 4 空间独立性

3 实验结果

为了验证和分析所提基于多条件约束的多传感器故障检测与诊断机制的性能，设计两组实验：实验一用于分析随着信噪比的增加，有约束与无约束的平均故障检测概率；实验二中基于统计样本数对比分析多条件约束在故障检测与诊断系统稳态特征权重系数 ω 和发生故障时系统功耗增加率的变化情况。

实验一，假设多故障并发，其动态模型如 (5) 所示。

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(x,1,t) + B(|T-t|) \\ \dot{y}(t) = f(x,t) + \kappa(1,t) + \frac{x-1}{\delta}\varphi(x,1) \end{cases} \quad (5)$$

其中：工业设备流水时间 t 从 50~500 s。

实验结果如图 5 所示，分别给出了 $\delta = 0.5$ 和 $\delta = 1$ 时，故障平均检测概率随信噪比的变化情况。从中可以看出， δ 值越大平均检测概率越低，高信噪比情况下平均故障检测概率较高，这是因为此时过程控制系统稳态特征受到影响，加性干扰等因素对信号源较强，多故障并发概率增加，但多条件约束的故障检测与诊断的检测概率明显低于无约束机制，表明所提机制可以有效降低故障率及其对工业过程控制系统性能的干扰。

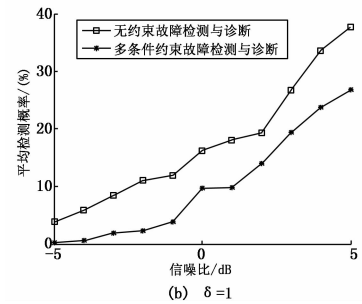
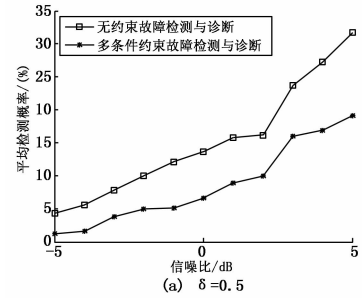


图 5 平均检测概率对比

实验二，在实验一设定的工业过程控制系统中，统计 t 从 50~500 s 之间的样本数，分析故障检测与诊断系统稳态特征权重系数 ω 和发生故障时系统功耗增加率的变化情况，如图 6 所示。从图 6 中发现，随着样本数的增加，多条件约束的

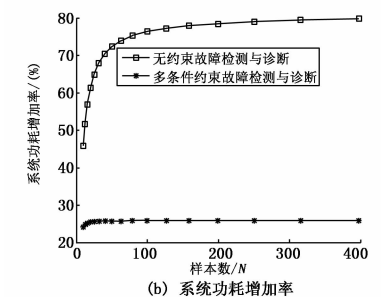
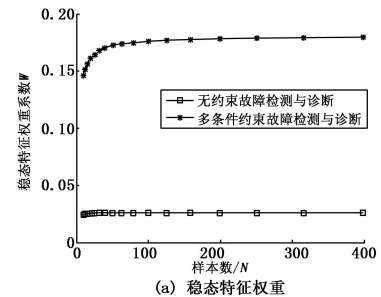


图 6 过程控制系统性能分析

从表 3 中可以看出通过 LSSVM 预测得到的预测值再经过 HMM 状态识别便可以直接得到系统的预测状态，并且二者的组合能够得到很高的状态预测精度，本文的状态预测精度为 93.3%。从表 3 中还可以看出即使状态预测中出现了错误的判断，但都是将当前应该所处状态判断为下一个或两个退化状态，从维修角度考虑，这样判断的结果是提前对系统进行维修，同样可以降低维修费用，并保证系统的安全运行。

表 3 状态预测结果

状态	5	6	7	8	9	10
5	9	1				
6	8	1	1	7	10	
7			10			
8	10	9	9	1		
9					9	1
10						10

4 结论

针对现有故障预测方法不能对电子设备直接进行退化状态预测，本文提出了 LSSVM 与 HMM 组合故障预测方法，充分利用了 LSSVM 良好的非线性回归预测能力和 HMM 较强的解码功能，二者的结合能够直接预测模拟电路的故障状态，为状态维修提供了可靠的理论依据，且该方法具有一定的实际应用性，能够实现电子设备的状态预测。

参考文献:

[1] 康建设, 尹健, 王希星. CBM 系统与设备状态监测 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27 (6): 1748 - 1751.

(上接第 1484 页)

故障检测与诊断机制下过程控制系统前期稳态特征值线性增大并逐步趋于高稳态且功耗增加率较低，而无条件约束的故障检测与诊断机制使得过程控制系统始终处于低稳态，易受到故障、干扰等因素的影响，从而增加过多系统功耗，系统性能较差。

4 结束语

为了满足工业过程控制系统的稳定性需求和保障安全可靠的生产过程，研究了一种具有自定义多条件约束的多传感器故障检测与诊断机制。首先建立多输入多输出的非线性过程控制系统，加入稳态、时间和空间特征分析，得出多故障模型；然后在 R^n 空间内给出单故障、并发故障和通信故障描述及其约束规则及空间独立特性法则；最后给出了基于自定义多条件约束的多故障检测与诊断机制。实验分析结果表明，所提多故障检测与诊断机制不仅可以降低平均检测概率，避免并发故障导致系统性能下降，而且可以在统计测量过程中保持高稳态特性，并不增加过多系统功耗。

参考文献:

[1] Jong M L, S. Joe Qin, In-Beum Lee. Fault detection and diagnosis based on modified independent component analysis [J]. AIChE

[2] 彭宇, 刘大同, 彭喜元. 故障预测与健康管理技术综述 [J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24 (1): 1 - 9.

[3] 文莹, 肖明清, 胡雷刚, 等. 基于粗神经网络的航空电子设备故障预测研究 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (4): 807 - 809.

[4] Wang Q, Zhang S, Kang R. Research of small samples avionics prognostics based on Support Vector Machine [A]. Prognostics and System Health Management Conference (PHM - Shenzhen) [C]. 2011, 2011: 1 - 5.

[5] 范庚, 马登武, 邓力, 等. 基于灰色相关向量机的故障预测模型 [J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34 (2): 424 - 428.

[6] 冯辅周, 司爱威, 江鹏程. 小波相关排列熵和 HMM 在故障预测中的应用 [J]. 振动工程学报. 2013, 26 (2): 269 - 275.

[7] 程进军, 夏智勋, 胡雷刚. 基于遗传神经网络的航空装备故障预测 [J]. 空军工程大学学报, 2011, 12 (1): 15 - 19.

[8] Jiang H, Li X W, Liu C J. Large margin hidden Markov models for speech recognition [J]. IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing, 2006, 9 (5): 1584 - 1594.

[9] 黄景德, 郝学良, 黄义. 基于改进 HMM 的潜在电子故障状态识别模型 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32 (11): 2481 - 2486.

[10] 谭晓东. 基于 HMM 的滚动轴承故障预测技术 [D]. 北京: 国防科学技术大学, 2008.

[11] 许丽佳. 电子系统的故障预测与健康管理技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.

[12] Lee J M, et al. Diagnosis of mechanical fault signals using continuous hidden Markov model [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 27 (6): 1065 - 1080.

[13] 连光耀, 吕晓明, 黄考利, 等. 基于最小二乘支持向量机的复杂装备故障预测模型研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (5): 1030 - 1032.

[1] Journal, 2006, 52 (10): 3501 - 3514.

[2] Ligang W, Peng S, Hui J G. State Estimation and Sliding-Mode Control of Markovian Jump Singular Systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55 (5): 1213 - 1219.

[3] Bumiller, G., Lampe, L., Hrasnica, H. Power line communication networks for large-scale control and automation systems [J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48 (4): 106 - 113.

[4] 曲春绪, 霍林生, 李宏男. 基于 LMI 的结构主动控制系统故障诊断与隔离设计 [J]. 振动与冲击, 2012, 31 (10): 53 - 58.

[5] 王猛, 唐敦兵, 顾文斌, 等. 基于 RFID 离散制造业车间生产过程控制系统研究与开发 [J]. 中国制造业信息化, 2012, 41 (11): 13 - 17.

[6] 翟旭升, 谢寿生, 苗卓广, 等. 基于 T-S 模糊模型的航空发动机非线性分布式控制系统故障诊断 [J]. 航空动力学报, 2013, 28 (6): 1429 - 1435.

[7] 孙蓉, 刘胜, 李冰. 基于 UIO 的减摇鳍控制系统故障诊断算法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45 (12): 105 - 110.

[8] 贾彩娟, 许晖. 基于改进多模滤波算法的控制系统故障诊断 [J]. 火力与指挥控制, 2012, 37 (3): 51 - 58.

[9] 柴天佑, 李少远, 王宏. 网络信息模式下复杂工业过程建模与控制 [J]. 自动化学报, 2013, 39 (5): 469 - 470.

[10] Wang C S, Wu M. Hierarchical Intelligent Control System and Its Application to the Sintering Process [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9 (1): 190 - 197.