

# 协同监控和诊断中一致性求解技术研究

夏敬华 葛红宇 陆宝春 张世琪

(南京理工大学制造工程学院 南京 210094)

**摘 要:** 针对制造过程及设备状态监控问题, 提出了监控对象的模糊量状态空间的表示方法, 在此基础上提出了一种协同一致性融合求解技术, 基于监控对象的模糊量状态空间, 将各求解结果一致性融合问题转化为群决策环境下的梯形模糊数表示的模糊意见的综合问题. 文中最后通过 FMS 中加工系统状态监控的实例对算法进行了验证, 证明了方法的有效和可行性。

**关键词:** 模糊量状态空间, 协同监控, 一致性求解, Agent

**中图分类号:** TP202

**文献标识码:**

## 1 引言

制造过程及设备的监控和诊断过程实质上是一个从征兆域提取特征信息并实现从特征信息到过程及设备状态的映射过程, 在动态变化、不完全信息的环境下如何对过程及设备状态采取合适的方式进行表达, 是进行状态监控和故障诊断需要首先解决的问题. 过程及设备状态具有模糊, 在状态分类问题上, 可分性是基本的, 但类别间往往无确定的边界, 客观上存在模糊区, 另外对各种状态的主观判断上也存在不确定性与模棱两可性, 这都决定了决策的模糊性. 传统的很多方法如阈值判定, 可能性表达方法等都不能完全适应对模糊信息的表示和处理, 本文在模糊量状态空间概念<sup>[1]</sup>的基础上, 首先对系统、设备、过程等监控对象的工作状态进行描述, 在此基础上进行状态监控和诊断求解.

另外, 制造系统的设备与过程状态监测和诊断是一在高度集成环境下对高度复杂、高度柔性的多设备、多过程的多参数评判分类与决策, 继而转化为对设备与过程的评估与诊断的过程<sup>[2]</sup>. 由于制造系统存在着内在的复杂性、多变性、关联性、协调性等, 过去传统单因素监控和单一模型处理评判已显落后. 代之而来的是多传感器、多参数模型、多求解模型问题, 从不同侧面、不同征兆域、不同监控诊断方法角度来进行监控问题联合求解.

这样如何合理、有效地融合利用各个不同传感器拾取的不同信号、不同征兆域的特征信息, 不同的求解方法进行协同监控和诊断便成为急待解决的问题. 在这方面有很多融合求解算法, 如多传感器信息融合理论<sup>[3,4]</sup>、多专家意见综合方法<sup>[5]</sup>等, 但如果任何情况下都对各决策意见进行调整和融合处理, 而假如调整时计算量又比较大, 这样无疑会增加系统求解的计算量. 由此本文针对协同监控和诊断问题, 在定义监控对象模糊量状态空间的基础上, 提出一种在协同监控求解一致性判定条件下的一致性融合求解技术, 即首先判定系统求解的一致性, 再给出相应的一致性融合求解策略, 以尽量增强系统求解的快速、有效和准确, 满足实时工业环境下的协同监控和诊断的要求.

## 2 监控对象的模糊量状态空间

通常一个监控对象的状态可用其能够继续工作的可能性来进行描述, 以  $ST$  来对监控对象的工作状态进行定量的描述,  $ST \in [0, 1]$ , 它表达了监控对象的状态和它内部异常和故障之间的关系,  $ST$  作为监控对象工作状态的特征值, 通常这种特征值是很难准确获取的, 在某些实时监控与决策的场合下, 不可能在诊断出监控对象所发生的所有故障后, 再进行加权融合求出监控对象的状态特征值, 而是寻找相关监控变量向状态空间上一种直接映射. 所以这里在给出状态特征值  $ST$  内涵的基础上, 利用模糊量状态空间的概念, 对监控对象的工作状态进行模糊表达.

**定义 1** 监控对象工作状态特征值为它发生的各种异常和故障的可信度与其权重乘积之和, 表示为  $ST = \sum F_i \times W_i$ , 且满足  $\sum W_i = 1$ ,  $ST$  越大, 工作状态越差. 其中,  $F_i$  表示系统异常或故障发生的可信度,  $W_i$  是对应的权重, 表示其对监控对象工作状态的影响程度,  $W_i$  越大, 影响程度越高.

**定义 2** 监控对象的工作状态是其工作状态特征值  $ST$  在其模糊量状态空间上的模糊数描述.

通常, 一个凸模糊数可表示成四元组  $[a, b, \alpha, \beta]$ <sup>[1]</sup>, 如图 1 所示, 并定义为:

$$u_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a - \alpha \\ \alpha^{-1}(x - a + \alpha), & x \in [a - \alpha, a] \\ 1, & x \in [a, b] \\ \beta^{-1}(b + \beta - x), & x \in [b, b + \beta] \\ 0, & x > b + \beta \end{cases}$$

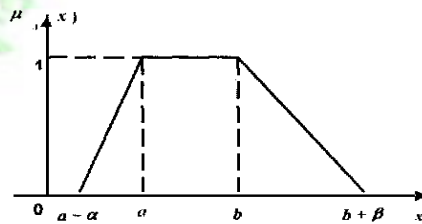


图 1 凸模糊数的四元组表达形式

在本文中, 一个监控对象的状态被划分为完全正常状态( $AN$ ), 轻微异常状态( $LA$ ), 一般故障状态( $GF$ ), 严重故障状态( $BF$ ), 危急故障状态( $CF$ ) 四种, 则模糊量状态空间  $Q_F = \{AN, LA, GF, BF, CF\}$ , 状态特征值  $ST$  的取值范围为  $[0, 1]$ , 每个模糊量状态定义为上述的模糊数形式, 如图 2 所示, 满足:

$$\begin{aligned} AN &= [0.0, 0.0, 0.0, 0.0] \\ LA &= [0.0, 0.2, 0.0, 0.2] \\ GF &= [0.4, 0.6, 0.1, 0.1] \\ BF &= [0.7, 0.8, 0.1, 0.1] \\ CF &= [0.9, 1.0, 0.1, 0.0] \end{aligned}$$

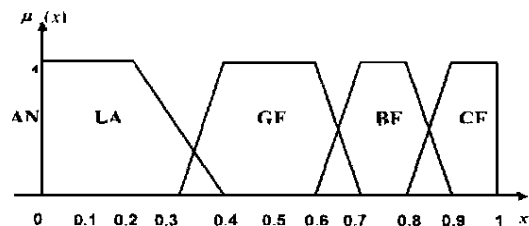


图 2 监控对象的模糊量状态空间

## 3 协同监控求解结构

本文针对某一监控对象, 建造多 Agent 协同监控的问题求解结构, 每个求解节点构成一个 Agent, 它们可以是专家系统、也可以是神经网络, 关键在于其求解方法要适合领域问题的特点. 系统求解时, 每个 Agent 按照其自身的知识, 对监控对象的状态进行识别和判断, 给出自己的观点, 然后再由融合中心进行一致性处理以求得对监控对象状态更准确一致的认识. 协

同监控求解结构如图3所示. 本文重点就一致性判定和一致性融合求解方法进行研究.

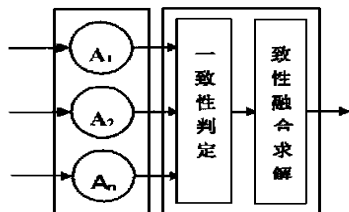


图3 协同监控求解结构

一般一个多 Agent 求解系统由求解 Agent 和领域问题两部分组成, 可表示为  $S = \langle A, P \rangle$ , 假设该系统中有  $n$  个 Agent, 用来求解  $m$  个问题, 则 Agent 集合表示为  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$  相应的权重为  $W(A) = \{w(A_1), w(A_2), \dots, w(A_n)\}$ , 表示 Agent 在系统中的重要程度, 满足  $\sum_{i=1}^n w(A_i)/n = 1$ ; 问题集合表示为  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ , 相应的权重为  $W(P) = \{w(P_1), w(P_2), \dots, w(P_m)\}$ , 表示问题在系统中的重要程度, 满足  $\sum_{i=1}^m w(P_i)/m = 1$ .

本文统一用决策变量模型来表示各个 Agent 对监控问题的求解结果. 对每一问题都存在一定的决策空间, 设决策空间由一组决策向量构成, 决策向量的一组取值就给出了一个具体的决策方案. 对于协同监控问题, 按照上面的 5 维模糊量状态空间, 用变量  $X$  表示其监控决策方案为  $X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ ,  $X$  的分量表示各个不同的决策变量, 有一定取值范围, 考虑到决策问题的模糊性, 这里用  $[0, 1]$  之间的数来表示对象属于状态空间  $Q_F = \{AN, LA, GF, BF, CF\}$  的可能性, 且满足  $\sum_{i=1}^5 x_i = 1$ . 如某一 Agent 对状态监控的求解结果为“一般故障状态 (GF)”, 则  $X = (0, 0, 1, 0, 0)$ . 这样, 对于该协同监控问题,  $n$  个 Agent 协同监控求解的结果可

用协同矩阵表示, 为  $CM = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{15} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{n5} \end{bmatrix}$ . 在各个 Agent 求解结果基础上, 需要首先对

Agent 求解结果的协调一致性进行判定, 在此基础上再采用相应的一致性融合求解策略进行协同监控求解.

#### 4 协同监控求解一致性判定

在多 Agent 协同监控系统中, 由于问题求解存在广泛的不确定性, 不仅各 Agent 的重要程度不同, 问题表现的方式也各有差别, 而且 Agent 对问题的求解结果也是用模糊方式描述的, 所以这里在决策相似度的基础上, 采用模糊方法表达多 Agent 协同监控系统的求解一致性.

**定义 3** 当多 Agent 协同监控系统中大多数 Agent 对监控问题的求解结果都相同时, 称该多 Agent 协同监控系统的求解是一致的.

**定义**  $u(x) = \begin{cases} 1, & x \geq \lambda_1 \\ \frac{x - \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}, & \lambda_2 < x < \lambda_1 \\ 0, & x \leq \lambda_2 \end{cases}$ , 其中,  $x$  表示协调性值,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为充分协调性和充分不协调性阈值,  $0 \leq \lambda_2 \leq \lambda_1 \leq 1$ , 当  $x \geq \lambda_1$  时表示系统求解是协调一致的, 当  $x \leq \lambda_2$  时表示求解肯定不协调,  $\lambda_2 < x < \lambda_1$  表示介于两种情况之间, 求解存在一定的不一致性.

定义 4 Agent 决策相似度 任意两个监控 Agent 求解决策方案之间相似性的量度. 若问题决策空间为  $l$  维, 则决策相似度可表示为

$$r_{ij} = 1 - \frac{\sum_{k=1}^l (x_{ik} - x_{jk})^2}{l} \quad (1)$$

在进行系统协同监控求解一致性的判定时, 首先求系统中任两个监控 Agent 监控求解的一致性, 在此基础上便可得到系统中大多数监控 Agent 问题求解的一致性, 从而得到多 Agent 监控求解一致性的判据. 具体算法如下:

#### 4.1 求任两 Agent 监控求解的一致性

##### ① Agent 决策相似度计算

$A_i$  和  $A_j$  求解形成了两个决策方案, 应用式(1)对两个决策方案进行相似度计算, 为:

$$r_{ij} = 1 - \frac{\sum_{k=1}^l (x_{ik} - x_{jk})^2}{5}$$

##### ② 一致性计算

在求得  $r_{ij}$  的基础上, 得  $A_i$  和  $A_j$  监控问题求解的一致性的值为

$$H(A_i, A_j) = u(r_{ij}) = \begin{cases} 1, & r_{ij} \geq \lambda_1 \\ (r_{ij} - \lambda_2) / \lambda_1 - \lambda_2, & \lambda_2 < r_{ij} < \lambda_1 \\ 0, & r_{ij} \leq \lambda_2 \end{cases} \quad (2)$$

#### 4.2 求大多数 Agent 监控求解的一致性

① 首先求得所有 Agent 监控求解的一致性, 为:

$$H = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n H(A_i, A_j) \times w_{ij} \quad (3)$$

其中  $w_{ij} = (w(A_i) + w(A_j)) / 2$

② 求平均得所有 Agent 监控求解的平均协调性:  $\bar{H} = H / C_n^2$  (4)

③ 对上式进行模糊处理得大多数 Agent 监控求解的协调性:

$$H_F = u(\bar{H}) \quad (5)$$

这样便得到多 Agent 协同监控求解一致性的判据:  $H_F = u(\bar{H})$ : 1) 当  $H_F \geq \lambda_1$  时, 多 Agent 协同监控系统的求解是一致的, 可直接取权重最大的监控 Agent 的求解结果作为最终的监控结果; 2) 当  $\lambda_2 < H_F < \lambda_1$  时, 多 Agent 协同监控系统求解具有一定的不一致性, 需要进行适当协调; 3) 当  $H_F \leq \lambda_2$  时, 多 Agent 协同监控系统求解存在严重的不一致性, 需要进行较大调整. 本文下面给出一种在系统监控求解不一致的情况下多 Agent 一致性融合求解的方法.

## 5 协同监控一致性融合求解

在系统监控求解不一致的情况下, 便要对多个求解结果采取合适的方法进行一致性融合, 在融合求解之前, 首先需要实现从 Agent 决策方案向模糊量状态空间  $Q_F$  上的映射. 模糊数四元组  $[a, b, \alpha, \beta]$  可表达成梯形模糊数的形式, 为  $[a, -\alpha, a, b, b+\beta]$ . 不失一般性, 一个梯形模糊数表示为  $R = [a, b, c, d]$ , 其中  $0 \leq a \leq b \leq c \leq d \leq 1$ , 则运行状态监控模糊量状态空间  $Q_F = \{AN, LA, GF, BF, CF\}$  中各状态的模糊数表示为梯形模糊数形式如下:

$$AN = [0.0, 0.0, 0.0, 0.0]$$

$$LA = [0.0, 0.0, 0.2, 0.4]$$

$$GF = [0.3, 0.4, 0.6, 0.7]$$

$$BF = [0.6, 0.7, 0.8, 0.9]$$

$$CF = [0.8, 0.9, 1.0, 1.0]$$

若一决策方案为  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}, x_{i5})$ , 则其在模糊量状态空间  $Q_F$  上的模糊数映射为:

$$R_i = X_i \otimes Q_F = x_{i1} \otimes AN \oplus x_{i2} \otimes LA \oplus x_{i3} \otimes GF \oplus x_{i4} \otimes BF \oplus x_{i5} \otimes CF \quad (6)$$

在进行一致性融合求解时, 需要综合考虑监控 Agent 的重要程度以及监控 Agent 求解结果受到其它 Agent 的支持程度. 假设监控 Agent 的重要程度的权重为  $y_1 \in [0, 1]$ , Agent 决策受到其它 Agent 支持程度的权重为  $y_2 \in [0, 1]$ , 这样可得到一个监控 Agent 的融合系数为:

$$C(A_i) = \frac{y_1}{y_1 + y_2} * \frac{w(A)}{\sum_i w(A_i)} + \frac{y_2}{y_1 + y_2} * RU(A_i) \quad (7)$$

其中  $RU(A_i)$  代表  $A_i$  的决策意见受到其它 Agent 的相对支持度, 下面具体给出其计算过程.

① 计算两梯形模糊数之间的相似度<sup>[6]</sup>

$$S(R_i, R_j) = 1 - \frac{|a_i - a_j| + |b_i - b_j| + |c_i - c_j| + |d_i - d_j|}{4} \quad (8)$$

② 计算  $A_i$  受到的平均支持度

$$U(A_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n S(R_i, R_j) \quad (9)$$

③ 计算  $A_i$  受到的相对支持度

$$RU(A_i) = \frac{U(A_i)}{\sum_{i=1}^n U(A_i)} \quad (10)$$

将  $RU(A_i)$  代入公式(7), 可得到监控 Agent 融合系数  $C(A_i)$  的值, 由此得到多 Agent 协同监控一致性融合求解的结果为:

$$R = C(A_1) \otimes R_1 \oplus C(A_2) \otimes R_2 \oplus \dots \oplus C(A_n) \otimes R_n \quad (11)$$

④ 计算  $R$  与模糊量状态空间  $Q_F = \{AN, LA, GF, BF, CF\}$  中各状态模糊数间的相似性, 利用式(8), 满足  $\max_{Q_F} [S(R, AN), S(R, LA), S(R, GF), S(R, BF), S(R, CF)]$  的模糊量状态即为所求的监控对象的监控状态.

## 6 例子

在 FMS 系统运行中需要对加工系统的运行状态进行监测和判断, 其模糊量状态空间为  $Q_F = \{AN, LA, GF, BF, CF\}$ . 首先从振动故障分析的角度分别从时域和频域两个征兆域中提取得到两类样本, 用 BP 算法进行训练, 得到对应于时域和频域的两个 BP 算法求解 Agent ( $a_1$  和  $a_2$ ), 对加工系统的运行状态进行监控; 另外从电机驱动系统提取特征信号, 并采用模糊决策方法对加工系统运行状态进行判断, 得到求解 Agent ( $a_3$ ). 由此得到一个三个 Agent 进行协同监控问题求解的多 Agent 系统. 综合考虑提取信号部位状态对系统运行的影响程度和求解方法的不确定性得到各求解 Agent 权重, 取为  $W(A) = \{1.0, 1.2, 0.8\}$ , 若三个 Agent 的协



同监控求解的协同矩阵为:  $CM = \begin{vmatrix} 0.1 & 0.3 & 0.2 & 0.3 & 0.1 \\ 0 & 0.1 & 0.5 & 0.4 & 0 \\ 0.2 & 0.5 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \end{vmatrix}$ , 选择  $\lambda_1 = 0.9, \lambda_2 = 0.6$ . 系统协同监控求解一致性判定和协同监控一致性融合求解步骤如下.

### 6.1 协同监控一致性判定

①利用式(1)求得Agent决策相似度为:  $r(A_1, A_2) = 0.82, r(A_1, A_3) = 0.86, r(A_2, A_3) = 0.70$ ;

②利用式(2)求得:  $H(A_1, A_2) = 0.73, H(A_1, A_3) = 0.87, H(A_2, A_3) = 0.33$ ;

③利用式(3)、(4)、(5)求得:  $\bar{H} = 0.64, H_F = 0.13 < 0.6$ , 说明系统求解肯定不一致, 需要进行一致性融合求解.

### 6.2 协同监控一致性融合求解

①首先将决策方案映射成模糊量状态空间  $Q_F$  上的模糊数, 由式(6)可得:

$$R_1 = (0.32, 0.38, 0.52, 0.63)$$

$$R_2 = (0.39, 0.48, 0.64, 0.75)$$

$$R_3 = (0.17, 0.2, 0.34, 0.46)$$

②计算两梯形模糊数之间的相似度, 由式(8)得:

$$S(R_1, R_2) = 0.9, S(R_1, R_3) = 0.83, S(R_2, R_3) = 0.73$$

③计算  $A_i$  受到的平均支持度, 由式(9)得:

$$U(A_1) = 0.87, U(A_2) = 0.82, U(A_3) = 0.78$$

④计算  $A_i$  受到的相对支持度, 由式(9)得:

$$RU(A_1) = 0.35, RU(A_2) = 0.33, RU(A_3) = 0.32$$

⑤取  $y_1 = 0.9, y_2 = 0.6$ , 由式(7)得:

$$C(A_1) = 0.34, C(A_2) = 0.37, C(A_3) = 0.29$$

⑥计算协同监控一致性融合求解结果, 由式(11)得:

$$R = 0.34 \odot (0.32, 0.38, 0.52, 0.63) \oplus 0.37 \odot (0.39, 0.48, 0.64, 0.75) \oplus 0.29 \odot (0.17, 0.20, 0.34, 0.46) = (0.3, 0.36, 0.51, 0.62)$$

⑦由式(8)计算  $R$  与  $Q_F = \{AN, LA, GF, BF, CF\}$  中各状态模糊数的相似度得到:

$$S(R, AN) = 0.55, S(R, LA) = 0.70, S(R, GF) = 0.95,$$

$$S(R, BF) = 0.70, S(R, CF) = 0.52$$

所以, 加工系统的运行状态为  $GF$ , 即“一般故障状态”.

## 7 结论

利用多传感器信息、多参数模型、多求解方法, 从不同侧面、不同征兆域、不同监控方法角度对制造过程及设备进行协同监控求解是克服过去传统单因素监控和单一模型处理评判不足的主要策略和手段, 如何合理、有效地融合利用各个不同传感器拾取的不同信号、不同征兆域的信号特征, 不同的求解方法的决策结果是协同监控求解中急待解决的问题.

本文针对制造过程及设备状态固有的模糊特征, 提出了监控对象模糊量状态空间的表示方法, 并由此建立了包含了多监控 Agent 求解、求解一致性判定和一致性融合求解三个求解模块的协同监控求解结构. 为提高监控决策求解的快速和有效, 提出了一种在协同求解一致性

判定条件下的一致性融合求解技术,用模糊集理论和定义决策相似度的方法建立了多监控 Agent 求解的一致性判定算法,并基于监控对象的模糊量状态空间,将各求解结果一致性融合求解问题转化为群决策环境下的梯形模糊数表示的模糊意见的综合问题.该方法具有简单、快速的特点,并很好地解决了领域问题求解中的模糊决策信息的融合问题,文中最后通过一个 FMS 加工系统运行状态监控的例子对方法进行了验证,证明了方法的可行.本文的方法对制造领域其它有关决策信息融合问题也提供了一种可参考的手段.

### 参 考 文 献

- 1 Qian Shen, Roy Leitch. Fuzzy Qualitative Simulation. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, **23**(4): 1038~ 1061
- 2 邱 静,温熙森,唐丙阳. 制造系统的状态监测与多传感器信息融合. 中国机械工程,1996, **7**(1): 18~ 20
- 3 Tahani H, Keller J M. Information Fusion in Computer Vision using the Fuzzy Integer. IEEE Trans SMC, 1990, **20**(3): 733~ 741
- 4 Thompouls S C A. Sensor Integration and Data Fusion. Journal of Roboti c and System s, 1990, **7**(3): 337~ 372
- 5 Zhang C Q. Cooperation under Uncertainty in Distributed Expert System s. Artificial Intelligence, 1992, **56**: 21~ 69
- 6 SHYI-MING CHEN. Aggregation Fuzzy Opinions in the Group Decision-Making Environment. Cybernetics and System s: An International Journal, 1998, **29**: 363~ 376

## STUDY OF CONSISTENT PROBLEM SOLVING IN COOPERATIVE MONITORING AND DIAGNOSIS

XIA Jing-hua GE Hong-yu LU Bao-chun ZHANG Shi-qi

(School of Manufacturing Engineering, Nanjing University of Science & Technology Nan Jing 210094)

**Abstract:** Aiming at the state monitoring of manufacturing process and equipment, the paper presents the representation method of monitoring object's fuzzy quantity space. The paper then puts forwards a consistent problem solving technique. The consistency-identifying algorithm is discussed by adopting fuzzy set theory and defining the degree of decision similarity, and the consistent problem solving algorithm is designed by translating the consistent problem solving into the fuzzy opinion aggregation of several experts' estimates represented by trapezoidal fuzzy numbers in group decision-making environment. Finally the method is applied to the state monitoring application of FMS, whose availability and feasibility are testified.

**Keywords:** fuzzy quantity space, cooperative monitoring, consistent problem solving, Agent

### 作者简介

夏敬华(1975-),男,博士生.研究领域为智能监控和诊断技术、现场总线技术等.

葛红宇(1970-),男,讲师.研究领域为CIMS/CIPS,现场总线控制系统等.

陆宝春(1966-),男,讲师.研究领域为CIMS/CIPS、人工智能技术、现场总线技术等.