

一种结合时间区间代数建模的主动系统的故障诊断方法^{*})

赵相福 欧阳丹彤

(吉林大学计算机科学与技术学院,符号计算与知识工程教育部重点实验室 长春 130012)

摘要 研究了在全局时钟、线性观测、串行事件触发的主动系统的故障诊断,在原有主动系统的自动机建模的基础上,引入时间区间代数表达更为详细的时间约束信息,构成带有时间的自动机对系统组件建模;同样在所得观测中也加入相应的更为详细的时间信息。由于加上了时间的约束,可使得诊断的解释空间进一步缩小,从而在一定情况下可提高诊断效率。最后讨论了非线性不确定观测或并发等一般情形下的处理方法。

关键词 基于模型的诊断,主动系统,离散事件系统,时间区间代数,自动机

Diagnosis of Active Systems Modeling with Time Interval Algebra

ZHAO Xiang-fu OUYANG Dan-tong

(School of Computer Science and Technology, Key Laboratory of Symbolic Computation and Knowledge Engineering of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract Diagnosis of serial event driven active systems with global clock and linear observation was studied. Time interval algebra was introduced for representing detailed time information into automata. And active systems can be modeled by this kind of timed automata. At the same time, the corresponding time information was added to observation. As a result of detailed time information, space of the interpretation of the active system is further reduced, and diagnosis efficiency is improved as well. Finally, approaches to deal with non-linear uncertain observation or concurrent events were discussed.

Keywords Model-based diagnosis, Active systems, Discrete event systems, Time interval algebra, Automata

1 引言

在动态设备故障诊断的研究中,有一种称为离散事件的系统^[1-4],受到越来越多的学者的关注。这是由于离散事件的系统在各状态中接近于静态系统,而许多混合或者连续的系统又可以使用离散事件系统来近似地表达。采用基于模型的推理方法来对离散事件系统进行诊断也取得了较多的研究成果^[5-13]。其中,比较著名的有 Lamperti 等人在文献[5]中研究的一种称为“主动系统”的基于模型的故障诊断方法。该方法的基本思想为,给定系统的自动机模型及顺序的观测,并且对于观测来说,仅关心每一组件的观测的相对顺序而不关心不同部件之间的观测的相对顺序。于是,由自动机模型及其初始状态出发,考虑接口约束来确定某一转移是否可触发从而重建与观测顺序相一致的所有可能的“历史”(或称轨迹);然后从这些一致的历史中找到可能的故障组件(浅诊断)或更详细的故障原因(深诊断)。

然而在该方法中,由于仅考虑每一部件之间的观测的顺序关系,而没考虑组件之间的观测顺序,因而有可能造成组合顺序的情形,使得搜索空间增大;另一方面,由于实际观测中可能有较为详细的时间信息,如观测所发生的时刻或时间区间、各(不同)组件的事件之间较为详细的相对时间关系等,这些信息在该方法均未被充分利用,因而也可能使得搜索空间

增大。

于是,我们提出在原自动机模型及所得观测中,使用时间区间代数增加可能的详细的时间信息表示,类似于带时间的自动机^[14,15]的表示,并充分利用时间区间代数的推理方法,从而可缩小诊断的解释空间;在某些情况下可提高诊断的效率。

本文第2节首先简介时间区间代数,然后给出带时间的自动机模型的形式化描述;第3节给出带时间的自动机的解释算法,并进行了简单的正确性和复杂性分析,然后通过一个实例与原方法进行了比较;第4节给出了进一步研究的相关讨论;最后对本文进行了简单总结。

2 带时间的自动机表示

为了更详细地表达时间信息,在原来自动机的基础上,加入了时间的信息,引入时间的表示及推理方法,从而更好地表达系统的模型。

关于时间的表示,按照文献[16]可有多种划分方法,如使用状态序的方法、公制的时间表示方法等等,文献[5]中可看作是状态序隐含表达时间的方法。而从精确粒度来说,使用状态序的方法可看作比较“粗糙”的表示方法,公制的时间表示方法则可看作较为精确的粒度表示方法。另外,关于时间的表示及推理的研究,比较著名的为 Allen 的区间代数方

^{*})国家自然科学基金重大项目基金(60496320,60496321),国家自然科学基金(60773097,60873148),新世纪优秀人才支持计划项目基金,吉林省科技发展计划项目基金(20060532,20080107),欧盟项目基金 TH/Asia Link/010(111084)和吉林大学“985工程”研究生创新基金(20080115)。赵相福 博士研究生,主要研究方向为基于模型的诊断;欧阳丹彤 教授,博士生导师,主要研究方向为基于模型的诊断、自动推理、模型检测等。

法^[17]。时间区间代数将所有的时间使用区间来表示,总结出各时间区间之间的13种联合完备不相交的区间关系: before; b(或者“<”); meet; m; overlap; o; start; s; during; d; finish; f; equal; e(或者“=”); finished by; fi; contain; di; started by; si; overlapped-by; oi; met-by; mi; after; bi(或者“>”); 并给出了这些时间区间关系的推理框架。随后,我们将在加入的时间表示中,引入相关的时间区间关系。

首先,将要使用到的概念等给出对应的带有时间表示的形式化描述。为简化研究起见,假设了在全局时钟、线性观测、串行事件情况下的主动系统的故障诊断,这些假设在最后的讨论部分都进行了分析,并分别给出了一般情形下的转化处理方法。

定义1(组件模型) (加入时间约束,不再假设状态转移是即时的)组件 C 的模型 M 为一个有限状态自动机(FSM) $M = (S, \epsilon^m, I, \epsilon^o, O, T, T_1)$, 其中 S 为状态的集合, ϵ^m 为输入事件的集合, I 为输入终端的集合, ϵ^o 为输出事件的集合, O 为输出终端的集合, T_1 为转移所经历的时间区间的集合, T 为转移函数: $S \times \epsilon^m \times I \times \epsilon^o \times O \times T_1 \mapsto 2^S$ 。

注1:转移 T 的值域为 S 的幂集 2^S 。也就是说,通常转移是允许非确定的。任意一个从状态 S_1 到状态 S_2 的转移 T 通过一个输入事件 $\alpha = (E, I)$ 在输入端 I 触发,并且通常在输出端 O_1, \dots, O_n 分别产生输出事件 $\beta = \{(E_1, O_1), \dots, (E_n, O_n)\}$, 表示为: $T = S_1 \xrightarrow{\alpha|\beta|t_1} S_2$ 。当 α 在相关的输入端时, S_2 经过时间 t_1 可达(加上了时间的约束),并且输出事件集在相关的输出端产生(同时 α 被消耗掉)。一个输出终端 O 可以最多一次出现在 β 。4种虚拟的终端被潜在定义在一个模型中:标准输入 $In \in I$; 标准输出 $Out \in O$; 消息终端 $Msg \in O$; 以及故障终端 $Flt \in Out$ 。一个输出事件 (E, Msg) 被称为一个消息。如果转移 T 标签为一个消息,则 T 是可观测的; 否则 T 是 *silent* (不可观测)。在所有事件当中,只有消息是可以从系统外部看见的。一个事件 (E, Flt) 称为故障事件,相关的转移称为故障转移。一个模型 M 假设是完备的,即它包含了所有可能的行为。

路径 $p \in M$ 为一个(可能为空的)连续转移序列, $P = \langle T_1, \dots, T_n \rangle: S_0 \xrightarrow{\alpha_1|\beta_1|t_1} S_1 \xrightarrow{\alpha_2|\beta_2|t_2} S_2 \rightarrow \dots \rightarrow S_{n-1} \xrightarrow{\alpha_n|\beta_n|t_n} S_n$, 其中 $T_i = S_{i-1} \xrightarrow{\alpha_i|\beta_i|t_i} S_i, T_i \in p$ 。同时, $S_0 \rightsquigarrow S_n$ 也表明一条从 S_0 到 S_n 的路径,其中 S_0 称为路径的根。

定义2(链) 设 C 和 C' 为两个组件。 O 和 I' 分别为 C 的一个输出终端及 C' 的输入终端。一个链 $L = \langle C, O, C', I' \rangle$ 为一个连接,通过此连接在时间 t 于 O 产生的每一个事件 E 都可以在时间 t' 于端口 I' 得到,其中 $t' > t$ 。此处假设 $[t, t']$ 的长度远小于任意一个转移持续的时间长度。

注2: E 可看作链 L 中的一个内部的依附事件。在任一时间实例,只有有限数目的依附事件可以缓存在 L , 称为 L 的容量。在给定时间内的 L 的依附事件集表示为 $\|L\|$, $\|L\|$ 的势用 $|L|$ 来表示。如果 $|L|$ 等于 L 的容量,则 L 是饱和的。当 L 是饱和的时候,若在 C, O 又产生一个新的事件,将被丢掉。若两个事件 (E_1, O) 和 (E_2, O) 分别在时刻 t_1 和 t_2 产生, $t_1 < t_2$, 则它们可以分别在 t_1' 和 t_2' 在 C', I' 可得,其中 $t_1' < t_2'$, 即事件 E_1 不能在同一链中超过 E_2 ; 因此, $\|L\|$ 为一个依附事件的队列,其中第 i 个产生的事件表示为 $L[i]$ 。第一个事件 $L[1]$ 称为候选事件,它将首先被消耗掉。当一个候选事件 α 被消耗掉以后,它将从 $\|L\|$ 中移出。每一个输

出终端被连接到仅一个输入终端,反之亦然。假设虚拟终端可以通过虚拟链连接到外部世界,若虚拟链中的事件到达,假设其经历的时间长度为0。

定义3(主动系统) 一个主动系统 A 为一个在输入输出终端之间由链相互连接的组件集。

注3:若 $\alpha = (E, v)$ 为一个事件,则 $Link(\alpha) = Link(v)$ 。

定义4(带时间的系统的线性观测) 一个包含组件 C_1, \dots, C_m 的系统 ξ 的观测 $Obs(\xi)$ 为在 ξ 中的所有组件的观测的带有时间标签的消息序列 $Obs(\xi) = \langle (m_1, t_1), \dots, (m_n, t_n) \rangle$ 。在 $Obs(\xi)$ 中消息的数目表示为 $|Obs(\xi)|$ 。 $Obs(\xi)$ 的第 i 个消息表示为 $Obs(\xi)[i]$ 。一个 k -部分观测 $Obs_{(k)}(\xi), 0 \leq k \leq |Obs(\xi)|$, 为 $Obs(\xi)$ 在它的前 k 个消息的投影,即 $Obs_{(k)}(\xi) = \langle (m_1, t_1) \dots, (m_k, t_k) \rangle$ 。

定义5(时间关系的可满足性) 假设对于任意一条带有时间标签的可能路径 p 表示为如下状态转移关系:

$S_0 \xrightarrow{\alpha_1|\beta_1|t_1} S_1 \rightarrow \dots \rightarrow S_i \xrightarrow{\alpha_n|\beta_n|t_{n+1}} S_{i+1} \rightarrow \dots \rightarrow S_j \rightarrow \dots \rightarrow S_n$, 并且设初始状态 S_0 时刻为0, 则:

(1)若已知各观测的时间信息时,如在状态 S_i 有观测 (m_i, t_{mi}) , 在状态 S_j 有观测 (m_j, t_{mj}) 等。则由初始状态出发直到第一个观测所在的状态 S_{m_1} , 其间的每一个状态的到达的时间,可以按照时间区间值的加法求得; 然后检测对应的实际观测 (m_1, t_{m_1}) 中的时间与该状态计算所得时间(设为 t_{m_1}) 的可满足性: 若 $t_{m_1}(s, d, e, f) t_{m_1}$, 则可满足; 否则该历史路径不可满足。若某实际的观测与该对应状态时间可满足,则在系统状态中将该状态时间修改为: $t_{m_1} = t_{m_1}$ 。其后的各状态的时间的计算,则以该观测的新的时间为基础进行计算并判断可满足性。

(2)若未知各观测的时间信息,而仅知观测 (m_i, t_{mi}) (对应状态 S_{m_i}) 与 (m_j, t_{mj}) (对应状态 S_{m_j}) 之间的相对时间信息 Δt 时,并设状态 S_{m_i} 到状态 S_{m_j} 的所经历的转移的时间为 t_T , 则时间信息的可满足性判定变为: 若 $\Delta t(s, d, e, f) t_T$, 则可满足; 否则该历史路径不可满足。

(3)记每一全局状态 S_i 与观测 m_j 的时间可满足性为 $TSAT(S_i, m_j)$: 某一转移产生观测 m_j 同时到达全局状态 S_i , 若 $t_{mj}(s, d, e, f) t_s$, 则可满足; 否则不可满足。若满足,同时需修改该全局状态的时间为 $t_{mj} := t_s$ 。

(4)记全局观测的状态 S_i, S_j 间相对时间关系的可满足性为 $STSAT(S_i, S_j)$: 设全局状态 S_i, S_j 分别对应于产生的观测 $(m_i, t_{mi}), (m_j, t_{mj}), \Delta t = t_{mj} - t_{mi}$, 由状态 S_i 到状态 S_j 的所经历的转移的时间为 t_T , 若 $\Delta t(s, d, e, f) t_T$, 则可满足; 否则不可满足。

(5)注: 此处的时间可满足是指观测所持续的时间段必然包含在所对应的状态的持续时间段以内,约束比较强,因而时间区间关系为 (s, d, e, f) ; 若考虑观测的不确定性,可以放宽约束: 只要观测所持续的时间段与包含在所对应的状态的持续时间段交集不为空即可。本文只考虑前者强约束的情形,后者可以非常容易地改变区间关系得到。

定义6(诊断解释) 设 $Obs(\xi)$ 为一个带时间的系统观测, $\{C_1, \dots, C_n\}$ 为 ξ 中的组件集, $M_i = (S_i, \epsilon_i^m, I_i, \epsilon_i^o, O_i, T_i, T_{i_1})$ 为组件 C_i 的模型, $\Sigma = S_1 \times \dots \times S_n$ 为组件状态域的笛卡尔乘积, K 为 K 的域满足 $Obs_{(K)}(\xi)$ 为一个 K -部分的系统观测, D 为 $Dang(\xi)$ 的域, 并且 $\xi_0 = (S_{0_1}, \dots, S_{0_n})$, 其中 $\forall i \in \{1, \dots, n\} (S_{0_i}(S_i))$ 。观测 $(Obs(\xi), \xi_0)$ 的似解释 \mathcal{S} 为一个

FSM: $\mathcal{F}(Obs(\xi), \xi_0) = (S, \epsilon, T, S_0, T_1)$, 其中, $S \subseteq \Sigma \times K \times D$ 为状态集, ϵ 为事件的集合, T 为转移函数, S_0 为初始状态。

S_0, ϵ, S' 定义如下:

$$S_0 = (\xi_0, (0 \cdots 0), (\phi \cdots \phi))$$

$$\epsilon = \bigcup_{i \in \{1, \dots, n\}} T_i$$

$$S' = \{S_0\} \cup \{S' \text{ 满足 } S \xrightarrow{T_i} S' \in T\}$$

其中的转移函数 $T: S' \times \epsilon \times T_i \mapsto S'$ 定义如下:

$$(\sigma, K, D) \xrightarrow{T_i} (\sigma', K', D') \in T$$

如果:

$$(1) \sigma = (S_1, \dots, S_{i-1}, S_i, S_{i+1}, \dots, S_n), \sigma' = (S_1, \dots,$$

$$S_{i-1}, S'_i, S_{i+1}, \dots, S_n), T_{ij} = S_i \xrightarrow{\alpha|\beta|t_i} S'_i \in T_i;$$

(2) K' 满足:

(a) 若 T_{ij} 为 silent, 则 $K' = K$,

(b) 若 T_{ij} 为可观测的且 $Obs(\xi)[K+1] \in \beta$, 并且状态 S'_i 的时间关系与观测 $Obs(\xi)[K+1]$ 的时间关系可满足, 即 $TSAT(S'_i, Obs(\xi)[K+1])$, 则 $K' = K + 1$, 且新状态 S'_i 的时间约束改为此时实际的观测的时间约束;

(3) 记 $L_\alpha = Link(\alpha)$ 且 $L_\beta = \{L_\beta = Link(B), B \in \beta, L_\beta$ 是非饱和的), D' 满足:

(a) 若 $\alpha = (E, v)$ 为一个内部事件, 且 $D[L_\alpha, 1] = E$, 则 $\forall x \in \{1 \cdots |D[L_\alpha]| - 1\}$ ($D'[L_\alpha, x] = D[L_\alpha, x+1]$), $|D'[L_\alpha]| = |D[L_\alpha]| - 1$;

(b) 对于任一内部事件 $(E, v) \in \beta$, ($L_\beta = Link(v)$, $L_\beta \in L_\beta$, $\forall x \in \{1 \cdots |D[L_\beta]| - 1\}$ ($D'[L_\beta, x] = D[L_\beta, x+1]$), $D'[L_\beta, |D[L_\beta]| + 1] = E$, $|D'[L_\beta]| = |D[L_\beta]| + 1$;

(c) $\forall L \in \xi, L \notin (\{L_\alpha\} \cup L_\beta)$ ($D'[L] = D[L]$).

称一个状态 $S = (\sigma, K, D) \in S'$ 为静止的, 如果 $K = l$ 并且 $D = (\phi \cdots \phi)$. 称一个状态 $S \in S'$ 是一致的, 如果存在一条(可能为空的)路径 $P = S \rightsquigarrow S_q$ 在 $\mathcal{F}(Obs(\xi), \xi_0)$ 中, 满足 S_q 是静止的。称转移 $S \xrightarrow{T} S' \in T^S$ 是一致的, 如果状态 S 和 S' 都是一致的。

$(Obs(\xi), \xi_0)$ 的诊断解释 \mathcal{Z} 是一个 FSM: $\mathcal{Z}(Obs(\xi), \xi_0) = (S, \epsilon, T, S_0, S_f, T_1)$, 其中 S 为状态集, ϵ 为事件集, T 为转移函数, S_0 为初始状态, S_f 为 S' 中静止的状态集, T_1 为转移所经历的时间区间的集合。

3 方法描述

3.1 带时间的自动机的解释算法

在给定的相应的概念的形式化描述以后, 在原文献[5]相应算法(更多详细内容请见文献[5]中算法 1)的基础上, 加上时间关系的约束, 得到如下的算法表示。函数 *Interpreter* 为主要算法, 其中调用了函数 *IStep* 并首先对其进行了描述(详见 1-51 行); 然后开始描述函数 *Interpreter* (详见 52-68 行)。

算法的正确性分析: 主要分析与原算法的不同之处, 即算法的第 5, 7 和 25 行, 主要是涉及到的时间关系的可满足性, 分别解释如下:

(1) 第 5 行 $((t_\alpha + t_l) (b, m, si, di, e, fi) t_{m_{K+1}})$ 用于判定该转移是否满足时间的约束关系, 即该状态转移若为 silent 转移, 则必然不能超过下一个观测的时间 (b, m) ; 若为可观测的消息, 则满足可达状态与相应消息的时间关系为 (si, di, e, fi) (即正好与 (s, d, e, f) 相对)。

(2) 第 7 行 $t_{\sigma'} = t_\sigma + t_l$ 用于对所达到的新的全局状态的时间关系赋值。

(3) 第 25 行! $TSAT(\sigma', m_{k'})$ 用于判定产生的消息的时间与此时达到的全局状态的时间关系是否满足。

由于原算法的基本接口约束关系没有改变, 只是加上了新的时间约束关系, 则进一步约束了原来的诊断解释, 使得更为精确。

Function Interpreter($Obs(\xi), \xi_0$) // 观测的解释 $\mathcal{Z}(Obs(\xi), \xi_0) = (S, \epsilon, T, S_0, S_f, T_1)$, 其中 $S \subseteq \Sigma \times K \times D$

Input

Obs(ξ) = $((m_1, t_{m_1}), (m_2, t_{m_2}), \dots, (m_l, t_{m_l}))$ // 系统 ξ 的线性观测

观测

$\xi_0 = (S_0, \dots, S_0)$ // 系统 ξ 的初始状态

$t_{\xi_0} = 0$ // 初始状态时间设为 0

$t_{m_{l+1}} = \infty$ // 观测时间的界限, 设为一个极大值, 用于比较判定

function IStep($\sigma, K, D, \mathcal{K}$) // (可能为空的) 一个解释子图的根

input

$\sigma = (S_1, \dots, S_i, \dots, S_n) \in \Sigma$

$K \in K, 0 \leq K \leq l$ // 线性观测序号

$D \in D$ // 依附集

$\mathcal{K} \subseteq \Sigma \times K \times D$ // 直到当前函数 IStep 已访问过的节点的集合

output

\mathcal{K} // 已经更新的访问过的节点集

1. begin

2. 插入节点 $N = (\sigma, K, D)$ 到 \mathcal{K} 并标识为 unknown;

3. for each 事件 (E, v) 满足 $((E, v) \in \text{Cand}(D) \text{ or } (E, v) \text{ 为 } \xi \text{ 的一个外部事件})$ do

4. for each $S_i \in \sigma$ do

5. for each 转移 $T_{ij} = S_i \xrightarrow{\alpha|\beta|t_i} S'_j, T_{ij} \in M_i$, 其中 M_i 为 C_i 的模型, 满足: $\alpha = (E_\alpha, v_\alpha) = (E, v)$ 且 $((t_\alpha + t_l) (b, m, si, di, e, fi) t_{m_{K+1}})$ do

6. begin

7. $\sigma' = (S_1, \dots, S'_i, \dots, S_n); t_{\sigma'} = t_\sigma + t_l$; // 更新状态的新的时间

8. $K' = K; D' := D; N' = (\sigma', K', D')$; // 更新节点

9. $L_\alpha := Link(v_\alpha)$;

10. if $(E, v) \in \text{Cand}(D')$ then

11. begin

12. for each $x \in \{1 \cdots |D[L_\alpha]| - 1\}$ do

13. $D'[L_\alpha, x] := D[L_\alpha, x + 1]$;

14. $D'[L_\alpha, |D[L_\alpha]|] := \text{nil}$

15. end;

16. for each $(E_\beta, v_\beta) \in \beta$ 满足 E_β 为 ξ 的一个内部事件 do

17. begin

18. $L_\beta := Link(v_\beta)$;

19. if L_β is not saturated then

20. $D'[L_\beta, |D[L_\beta]| + 1] := E_\beta$ // 加入链的依附集

21. end;

22. if $\exists (m, \text{Msg}) \in \beta$ then // 产生观测到的消息事件

23. begin

24. $K' = K' + 1; t_{\sigma'} := t_{mk'}$;

25. if $(mk' \neq m \text{ or } (! TSAT(\sigma', m_{k'})))$ then // 不是与观测对应的事件或时间关系不可满足

26. goto 5

27. end;

28. $N_3' := \text{IStep}(\sigma', K', D', \mathcal{K})$;

29. if $N_3' \neq \text{nil}$ then

```

30.     begin
31.         if 节点 N 标识为 unknown 且 N' 标识为 consistent
           then
32.             标识 N 为 consistent;
33.             创建一条边:  $N \xrightarrow{T_i} N'$ 
34.         end
35.     end;
36.     if  $N = (\sigma, l, (\phi \cdots \phi))$  then
37.         begin
38.             标识节点 N 为 consistent;
39.             return N
40.         end
41.     else
42.         begin
43.             if 在 Line 33 创建了至少一条边 then
44.                 return N
45.             else
46.                 begin
47.                     标识 N 为 inconsistent;
48.                     return nil
49.                 end
50.             end
51.         end IStep;
52.     begin Interpreter
53.         K := 0; D := ( $\phi \cdots \phi$ );  $\mathcal{K} := \phi$ ;
54.          $N_0 := \text{IStep}(\xi_0, K, D, \mathcal{K})$ ;
55.          $G_3 :=$  根节点为  $N_0$  的图;
56.         for each  $N \in \mathcal{K}$  满足 N 以被标识为 unknown do
57.             if !  $\exists$  路径  $P = N \rightsquigarrow N_f, P \in G_3$ , 满足:  $(N_f = (\sigma_f, l, (\phi \cdots \phi)))$  then
58.                 从图  $G_3$  中删除节点 N;
59.                 从图  $G_3$  中删除所有的未定边; //即删除所有未在任何一条路径上的边
60.                 S := 图  $G_3$  中的节点的集合;
61.                  $\epsilon :=$  图  $G_3$  中的标签的集合;
62.                 T := 图  $G_3$  中的边的集合;
63.                  $S_0 :=$  图  $G_3$  的根;
64.                  $S_f \subseteq S :=$  节点  $N_f$  的集合 =  $(\sigma_f, l, (\phi \cdots \phi))$  满足  $K = l$ ;
65.                  $T_1 :=$  图  $G_3$  中的节点的时间标签的集合;
66.                  $\mathcal{K} := (S, \epsilon, T, S_0, S_f, T_1)$ ;
67.                 return  $\mathcal{K}$ 
68.             end Interpreter

```

3.2 形式化分析其优缺点及复杂度

通过与原文献中的算法比较可以看出,本算法引入时间区间代数使用自动机中分别对系统和观测建模,充分利用了详细的时间信息进行表示和推理,从而可以缩小可能的解释空间。

另一方面,引入时间表示和推理,不会使得算法变得太过复杂,因为只是加入了时间区间代数的表示及其简单的时间关系推理比较。

综合考虑,在某些情况下,若仅考虑序关系信息所得较多的组合冗余诊断解释空间时,可以引入时间表示和推理来进一步缩小诊断解释空间。

3.3 实例分析

例 1 仍然以原文献[5]中所提到的主动系统为例,其组件连接方式及其 FSM 模型如图 1 表示。其中,各组件 C_1, C_2, C_3, C_4 的组件模型分别为 M_1, M_2, M_3, M_4 ; 链 L_1, L_2, L_3 ,

$L_4, L_5; I (I_i), O (O_i)$ 分别表示了组件的输入和输出端口。

(1)若使用原文的仅考虑状态序的诊断方法,观测为 $(\langle A_1, B_1 \rangle, \langle A_2 \rangle, \langle A_3 \rangle, \langle A_4 \rangle)$ 时,其诊断解释的搜索空间如图 2 所示(原文献[5]143 页中的图 2),其中粗环节点 N_1 为初始状态, N_{23}, N_{25} 为终止状态,虚的状态和转移不在诊断解释路径上,只有实线转移在解释路径上。最终所得诊断解释如表 1 所示(来自原文献[5]146 页中的表 3,其中的 N_6 与 N_5 相互之间的循环执行仅一次),即诊断的解释为 11 种情形: $\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_{11}$ 。

(2)而假设各个转移的时间长度为 1,且已知线性观测的消息: $(\langle A_1, 1 \rangle, \langle A_1, 2 \rangle, \langle A_2, 3 \rangle, \langle A_3, 8 \rangle, \langle B_1, 11 \rangle)$,则使用带有时间的自动机建模(在原来的各个组件的自动机模型上的各个转移加上持续时间“1”的标识即得,此处省略),使用本文的带时间的自动机的解释算法,可得诊断解释为仅 Ψ_8 和 Ψ_9 且其中的 N_6 与 N_5 相互之间的循环执行仅一次时的两种情形,大大简化解释空间。

例 2 和例 1 类似,假设各个转移的时间长度为 1,不含具体时间信息的观测消息事件为 $(\langle A_1, B_1 \rangle, \langle A_2 \rangle, \langle A_3 \rangle, \langle A_4 \rangle)$,虽然未知线性观测的具体时间关系,仅知道消息 A_3 和消息 B_1 之间的间隔为 3。

同样,可以使用全局状态之间的相对时间关系的可满足性将原 11 种诊断进一步约简为:诊断解释同样仅为 Ψ_8 和 Ψ_9 且其中的 N_6 与 N_5 相互之间的循环执行仅一次时的两种情形,同样简化解释空间,而比起例 1 使用了更少的时间约束。

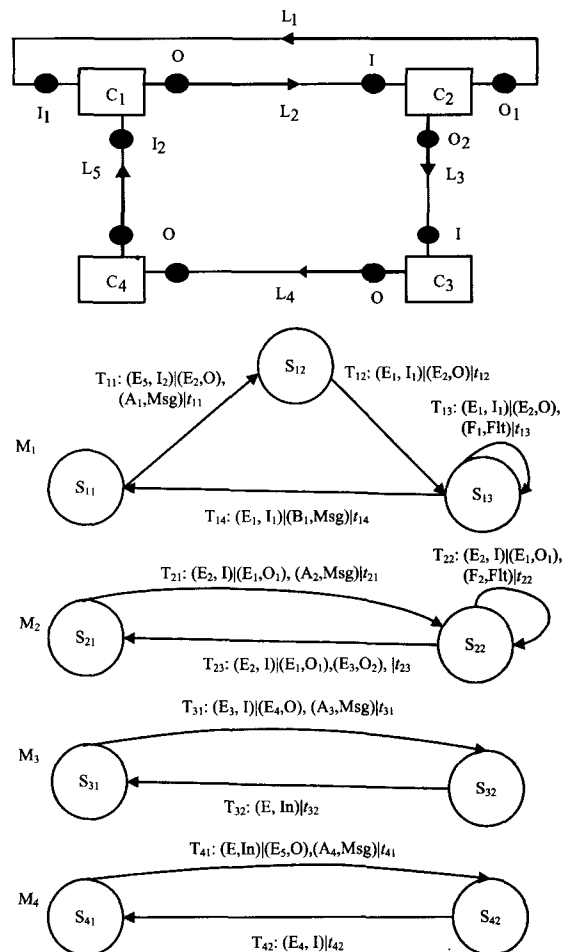


图 1 一个主动系统及其相关的组件模型

表 1 所有可能的诊断解释

ψ_1	$N_1 \xrightarrow{T_{12}} N_2 \xrightarrow{T_{11}} N_3 \xrightarrow{T_{12}} N_4 \xrightarrow{T_{12}} N_5 \xrightarrow{T_{12}} N_6 \xrightarrow{T_{12}} N_5 \xrightarrow{T_{12}} N_8 \xrightarrow{T_{12}} N_{20}$ $\xrightarrow{T_{12}} N_{21} \xrightarrow{T_{12}} N_{25}$
ψ_2	$N_1 \xrightarrow{T_{12}} N_2 \xrightarrow{T_{11}} N_3 \xrightarrow{T_{12}} N_4 \xrightarrow{T_{12}} N_5 \xrightarrow{T_{12}} N_6 \xrightarrow{T_{12}} N_5 \xrightarrow{T_{12}} N_8 \xrightarrow{T_{12}} N_{20}$ $\xrightarrow{T_{12}} N_{21} \xrightarrow{T_{12}} N_{25} \xrightarrow{T_{12}} N_{23}$
ψ_3	$N_1 \xrightarrow{T_{12}} N_2 \xrightarrow{T_{11}} N_3 \xrightarrow{T_{12}} N_{22} \xrightarrow{T_{12}} N_5 \xrightarrow{T_{12}} N_6 \xrightarrow{T_{12}} N_5 \xrightarrow{T_{12}} N_8 \xrightarrow{T_{12}} N_{20}$ $\xrightarrow{T_{12}} N_{21} \xrightarrow{T_{12}} N_{22} \xrightarrow{T_{12}} N_{23}$
ψ_4	$N_1 \xrightarrow{T_{12}} N_2 \xrightarrow{T_{11}} N_3 \xrightarrow{T_{12}} N_4 \xrightarrow{T_{12}} N_5 \xrightarrow{T_{12}} N_6 \xrightarrow{T_{12}} N_5 \xrightarrow{T_{12}} N_8 \xrightarrow{T_{12}} N_{29}$ $\xrightarrow{T_{12}} N_{21} \xrightarrow{T_{12}} N_{25}$
ψ_5	$N_1 \xrightarrow{T_{12}} N_2 \xrightarrow{T_{11}} N_3 \xrightarrow{T_{12}} N_4 \xrightarrow{T_{12}} N_5 \xrightarrow{T_{12}} N_6 \xrightarrow{T_{12}} N_5 \xrightarrow{T_{12}} N_8 \xrightarrow{T_{12}} N_{29}$ $\xrightarrow{T_{12}} N_{21} \xrightarrow{T_{12}} N_{25} \xrightarrow{T_{12}} N_{23}$
ψ_6	$N_1 \xrightarrow{T_{12}} N_2 \xrightarrow{T_{11}} N_3 \xrightarrow{T_{12}} N_4 \xrightarrow{T_{12}} N_5 \xrightarrow{T_{12}} N_6 \xrightarrow{T_{12}} N_5 \xrightarrow{T_{12}} N_8 \xrightarrow{T_{12}} N_{29}$ $\xrightarrow{T_{12}} N_{21} \xrightarrow{T_{12}} N_{22} \xrightarrow{T_{12}} N_{23}$
ψ_7	$N_1 \xrightarrow{T_{12}} N_2 \xrightarrow{T_{11}} N_3 \xrightarrow{T_{12}} N_4 \xrightarrow{T_{12}} N_5 \xrightarrow{T_{12}} N_6 \xrightarrow{T_{12}} N_5 \xrightarrow{T_{12}} N_8 \xrightarrow{T_{12}} N_{29}$ $\xrightarrow{T_{12}} N_{38} \xrightarrow{T_{12}} N_{22} \xrightarrow{T_{12}} N_{23}$
ψ_8	$N_1 \xrightarrow{T_{12}} N_2 \xrightarrow{T_{11}} N_3 \xrightarrow{T_{12}} N_4 \xrightarrow{T_{12}} N_5 \xrightarrow{T_{12}} N_6 \xrightarrow{T_{12}} N_5 \xrightarrow{T_{12}} N_8 \xrightarrow{T_{12}} N_{29}$ $\xrightarrow{T_{12}} N_{38} \xrightarrow{T_{12}} N_{44} \xrightarrow{T_{12}} N_{23}$
ψ_9	$N_1 \xrightarrow{T_{12}} N_2 \xrightarrow{T_{11}} N_3 \xrightarrow{T_{12}} N_4 \xrightarrow{T_{12}} N_5 \xrightarrow{T_{12}} N_6 \xrightarrow{T_{12}} N_5 \xrightarrow{T_{12}} N_8 \xrightarrow{T_{12}} N_{29}$ $\xrightarrow{T_{12}} N_{48} \xrightarrow{T_{12}} N_{44} \xrightarrow{T_{12}} N_{23}$
ψ_{10}	$N_1 \xrightarrow{T_{12}} N_2 \xrightarrow{T_{11}} N_3 \xrightarrow{T_{12}} N_4 \xrightarrow{T_{12}} N_5 \xrightarrow{T_{12}} N_6 \xrightarrow{T_{12}} N_5 \xrightarrow{T_{12}} N_8 \xrightarrow{T_{12}} N_{29}$ $\xrightarrow{T_{12}} N_{48} \xrightarrow{T_{12}} N_{25}$
ψ_{11}	$N_1 \xrightarrow{T_{12}} N_2 \xrightarrow{T_{11}} N_3 \xrightarrow{T_{12}} N_4 \xrightarrow{T_{12}} N_5 \xrightarrow{T_{12}} N_6 \xrightarrow{T_{12}} N_5 \xrightarrow{T_{12}} N_8 \xrightarrow{T_{12}} N_{29}$ $\xrightarrow{T_{12}} N_{48} \xrightarrow{T_{12}} N_{25} \xrightarrow{T_{12}} N_{23}$

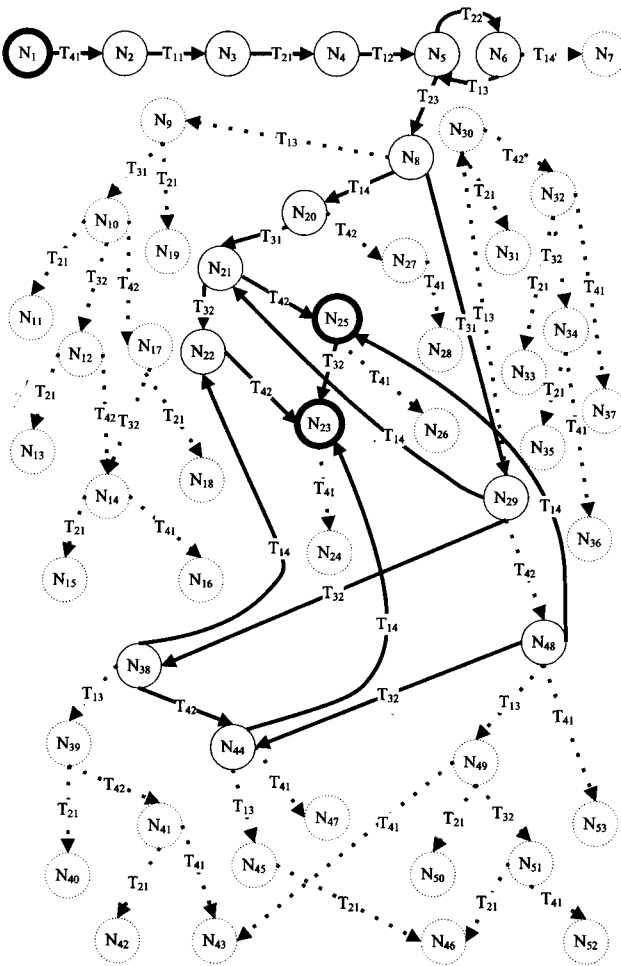


图 2 图 1 所示主动系统的诊断解释的搜索空间

4 讨论

原文献[5]可看作对于时间的一种较为“粗糙”粒度的表示,而若考虑时间的各种详细粒度的表示,如时刻点到时间区间等情形下的表示及推理,则诊断解释的结果可能更为精确空间也更小。如此一来,诊断的解释空间可与时间的不同表示(精确的时间点、时间区间、不确定表示的时间区间、状态序表示的时间等)形成一个包含关系的格集,类似于文献[18]中对各种不同情形下诊断结果的分析,可以做进一步的研究。

原文献[5]中后来提到的模型分解的方法,通过各子簇并行解释然后合并的处理方法来提高效率;在加入时间的约束以后,需要在推理的要求上稍作改动(即,子簇内部的状态之间的时间关系改为 b(小于)关系),这是由于各子簇的各个连续状态之间在全局状态空间中未必是直接相连续的,它们之间可能有其他子簇的状态。

本文所给出的带时间的自动机建模表示,仅考虑转移事件串行执行的情形,而未考虑并发情形;若考虑并发情形,则同样可以考虑模型分解的方法,将所有的并发情形按照串行事件进行分解,每一模块仅含有串行的事件观测,在每一子模块中使用本文的方法,然后考虑各模块之间的协作时间关系进行合并,这也是需要进一步研究的内容。

当含有不确定的时间的非线性观测时(如非全局的时钟关系等),还可以类似文献[6]将使用 DAG 图表示的不确定的观测表示为所有可能的线性观测的集合,从而可以使用本文的方法进行处理。

结束语 在原来文献[5]中的算法基础上,对时间关系的表示进一步限定,分别在模型及线性观测中加入较为详细的时间表示,使用成熟的时间区间代数表示和推理,从而加入有关的时间约束推理,进一步缩小了诊断解释空间。

参考文献

- [1] Sampath M, Sengupta R, Lafortune S, et al. Diagnosability of discrete event systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1995, 40(9): 1555-1575
- [2] Sampath M, Sengupta R, Lafortune S, et al. Failure diagnosis using discrete event systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1996, 4(2): 105-124
- [3] 郑应平. 离散事件系统理论研究和应用进展(I). *控制与决策*, 1996, 11(2): 233-241
- [4] 郑应平. 离散事件系统理论研究和应用进展(II). *控制与决策*, 1996, 11(3): 329-333
- [5] Baroni P, Lamperti G, Pogliano P, et al. Diagnosis of large active systems. *Artificial Intelligence*, 1999, 110(11): 135-183
- [6] Lamperti G, Zanella M. Diagnosis of discrete-event systems from uncertain temporal observations. *Artificial Intelligence*, 2002, 137(1/2): 91-163
- [7] Lamperti G, Zanella M. *Diagnosis of Active Systems: Principles and Techniques*. vol. 741 of the Kluwer International Series in Engineering and Computer Science, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL, 2003
- [8] Pencolé Y, Cordier M-O. A formal framework for the decentralised diagnosis of large scale discrete event systems and its application to telecommunication networks. *Artificial Intelligence*, 2005, 164(1/2): 171-208

表1 测试函数 F1—F5

函数名称	函数表达式(求最小值)	维数	变量范围	最优值
Sphere 函数	$f(X) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	30	$[-100, 100]^n$	0
Griewank 函数	$f(X) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	30	$[-600, 600]^n$	0
Rastrigin 函数	$f(X) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10)$ $f(X) = 0.5 +$	30	$[-5.12, 5.12]^n$	0
Schaffer 函数	$\frac{\sin^2 \sqrt{x_1^2 + x_2^2} - 0.5}{[1 + 0.001(x_1^2 + x_2^2)]^2}$	2	$[-100, 100]^n$	0
Ackley 函数	$f(X) = 20 + e - 20e^{-\frac{1}{5} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)$	100	$[-30, 30]^n$	0

表2 HBSOMA 与 SOMA 的比较

f	f _{min}	最优解的平均值		达到最优解的次数		平均函数评价次数	
		HBSOMA	SOMA	HBSOMA	SOMA	HBSOMA	SOMA
F1	0	0.0000	0.0000	20	20	39639	49503
F2	0	0.0000	0.0070	20	9	57777	152722
F3	0	0.0995	2.6870	18	1	124802	261141
F4	0	0.0000	0.0011	20	18	27485	44396
F5	0	0.0440	3.8805	19	0	198402	238881

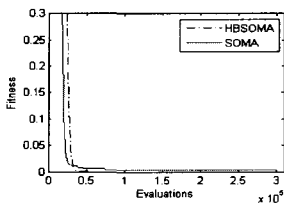


图1 函数 F2 算法的平均收敛曲线

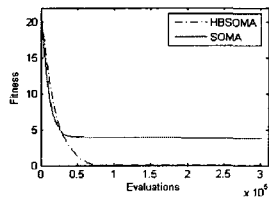


图2 函数 F5 上算法的平均收敛曲线

从上述实验数据可以得出以下结论:

(1)表1清晰地展示了 HBSOMA 的稳定性。HBSOMA 的收敛比率远远高于 SOMA 算法, HBSOMA 在 5 个标准测试函数上的 20 次运行几乎每次都能成功地达到最优解。SOMA 在单峰函数或低维函数表现稳定,但在振荡强烈的多峰函数上则容易陷入局部最优解。

(2)图1和图2显示 HBSOMA 的收敛速度也相当快。在前期 HBSOMA 的收敛速度与 SOMA 接近,而在后期明显要优于 SOMA。这主要是因为 HBSOMA 能够一直较好地保持多样性,从而为迁移操作提供更有效的操作。而 SOMA 前

期虽然收敛很快,但到后期由于多样性的缺失,收敛速度就大大降低。

(3)从表1同样可以看出,除函数 F1 外, HBSOMA 所需要的代价(平均评价次数)要比 SOMA 算法少得多。这说明 HBSOMA 能以较小的代价获得较好的结果,主要原因是它采用了多种迁移方式,较好地维持了多样性。

从以上分析可以看出,基于混合迁移行为的自组织迁移算法要优于基本的自组织迁移算法。

结束语 本文提出了基于混合迁移行为的自组织迁移算法 HBSOMA,多种迁移方式的运用使得个体的行为具有多样性,在保证种群多样性的同时,也加速了算法在复杂函数下的寻优过程。通过对经典数值优化问题的测试,显示出优异的性能,能以较大概率搜索到全局最优解。我们下一步的研究目标是研究算法的收敛性并将它应用在其他领域的优化;此外,算法参数的设置和其它迁移方式对本算法性能的影响也是下一步实验的重点。

参考文献

- [1] Ivan Z, Jouni L. SOMA-Self-Organizing Migrating Algorithm// Mendel, 6th International Conference on Soft Computing. Brno, Czech Republic, 2000
- [2] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 58-73
- [3] Dorigo M, Maniezzo V, Colnari A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics-Part B, 1996, 26(1): 29-41
- [4] Červenka M, Ivan Z. Parallel computation for SOMA[R]// Proceeding 19th European Conference on Modeling and Simulation. Riga, Latvia, 2005
- [5] Zelinka I. SOMA-Self-organizing migrating algorithm [M]. New Optimization Techniques in Engineering. Berlin, Springer, 2004: 167-217
- [6] Oplatková Z, Zelinka I. Investigation On Shannon-Kotelnik Theorem Impact On Soma Algorithm Performance [A]// Proceedings 19th European Conference on Modelling and Simulation. Yuri Merkurjev, Richard zobel, Eugène Kerckhoffs. ECMS [C], 2005
- [7] 柯晶, 李歧强, 乔谊正. 采用随机变异步长的改进自组织迁移算法. 计算机工程与应用[J], 2006, 35: 41-44
- [8] Eberhart R C, Shi Y H. Evolving Artificial Neural Networks[R] // Proceedings of Int'l Conference on Neural Networks and Brain. Beijing, 1998

(上接第 141 页)

- [9] Lamperti G, Zanella M. Flexible diagnosis of discrete-event systems by similarity-based reasoning techniques. Artificial Intelligence, 2006, 170(3): 232-297
- [10] Cordier M-O, Grastien A. Exploiting independence in a decentralised and incremental approach of diagnosis//Proc. 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-07). Hyderabad, India, 2007: 292-297
- [11] Schumann A, Pencolély Y. Scalable diagnosability checking of event-driven systems//Proc. 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-07). Hyderabad, India, 2007: 575-580
- [12] Cerutti S, Lamperti G, Scaroni M, et al. A diagnostic environment for automaton networks. Software-Practice & Experience, 2007, 37(4): 365-415

- [13] Lamperti G, Zanella M. On monotonic monitoring of discrete-event systems//Proc. 18th International Workshop on Principles of Diagnosis (DX-07). Nashville, TN, USA, 2007: 130-137
- [14] Alur R, Dill D L. A theory of timed automata. Theoretical Computer Science, 1994, 126(2): 183-235
- [15] Tripakis Z S. Fault diagnosis for timed automata // Lecture Notes in Computer Science, 2469. 205-221
- [16] Brusoni V, Console L, Terenziani P, et al. A spectrum of definitions for temporal model-based diagnosis. Artificial Intelligence, 1998, 102 (1): 39-79
- [17] Allen J. Maintaining knowledge about temporal intervals. Communications of the ACM, 1983, 26(11): 832-843
- [18] Panati A, DupréD T. State-based vs. simulation-based diagnosis of dynamic systems//Proc. 14th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-00). Berlin, Germany, 2000: 176-180