

实时数据及时态知识的表示

郭宏飞 周建常

(东北大学计算机系 沈阳 110006)

摘要 在实时专家系统中引入时间概念后,涉及时间的知识的表示成为值得注意的问题,本文在分析一些典型事例的基础上,着重探讨以下3个问题,如时间数据的有效表示;知识中时间特征的表示;推理中知识的时间一致性检验等。

关键词 人工智能,实时系统,专家系统,数据处理,知识表达,时间推理。

在实时系统中,对象的数据经常是随时间变化的,为了准确描述系统的当前状态和预测未来,必须记录关于过去的信息,并且引入时间概念来处理涉及时间的数据信息,使问题求解建立在理解系统演变的基础上。这样,在设计与开发实时专家系统时,需要考虑如下一些新问题。第1,如何有效地表示具有时间特征的对象连续数据,即实时数据。第2,如何有效地表示含有时间特征的知识,即时态知识。特别地,在因果模型中的时态知识。第3,如何检验时态知识在推理过程中的时间一致性问题。目前,国际上已经有许多文献对实时专家系统的时间推理方式进行了阐述^[1,2],但是,较少对上述3个问题进行深入研究,然而这些问题对于一个实时专家系统的设计和实现是非常重要的。本文以实时系统“高炉炉况诊断和操作决策专家系统”为背景,着重讨论在因果模型下实时数据及时间在知识中的表达。

1 实时数据的状态表示法

在实时系统中,一个对象的数据是随时间连续产生的,保存这些数据需要非常大的存储空间。为了减少存储量,一般地,把时间轴分成时间片,对每一时间片的数据进行特征化处理,成为一个状态特征值,具有 $\langle value(S), Ord(t) \rangle$ 的元组形式,其中 $value(S)$ 代表状态的特征值, $Ord(t)$ 代表 t 时刻所在的时间片序号。但是,这样的存储量仍很可观,进一步地可以把一段时间内(如一些时间片内)状态值连续保持不变的状态放在同一个存储单元内。

定义1. 状态开始时间, $t_begin(S) =$ 对象的状态由其它值变为当前值 S 的时刻,为一时间点。状态持续时间, $t_dur(S) = \sum_{\text{特征值不变}} \text{时间片}$,为一时间间隔。

于是,实时数据可用三元组 $\langle value(S), t_begin(S), t_dur(S) \rangle$ 表示, $\langle t_begin(S),$

* 作者郭宏飞,1966年生,讲师,主要研究领域为专家系统,实时系统,时态推理。周建常,1933年生,教授,主要研究领域为人工智能,专家系统,知识库。

本文通讯联系人:郭宏飞,沈阳110006,东北大学计算机系

本文1996-01-08收到修改稿

$t_dur(S)$ 反映了状态 S 的生存期.

在实时系统中,对象间经常存在因果关系,并且,这种因果关系经常有明显的时间特征.例如,作为原因的对象 A ,其状态 S 刚出现时,可能并不影响对象 B 的状态,但经过一段时间之后, S 对 B 的一个状态 S' 产生了影响,我们称这种现象为状态的延迟现象.甚至,有时延迟现象发生时,状态 S 已经消失.这样,我们只有以某种方式事先保留状态 S 至一段时间,系统才可能确定对象间 A 与 B 的关系.下面,我们将研究对象间这种关系的时间特征.令 $STATES(A)$ 为对象 A 的全体状态的集合,我们把所有受状态 $S(S \in STATES(A))$ 影响的对象的全体状态集合称为 S 的影响集,记为 $CS(A, S)$.

定义 2. 状态间的延迟时间:为一时间间隔,表示原因状态 S 的出现与结果状态 S' 的出现之间的时间流逝量,记为 $td(S, S')$,其中 $S \in STATES(A), S' \in CS(A, S), td(S, S') = t_begin(S') - t_begin(S)$.

由定义 2 知,状态的延迟时间 $td(S, S')$ 是一个在系统运行时才能确定的值,并且在不同场合下 $td(S, S')$ 是可变的.从保存数据的角度看,我们需要的是状态的最小延迟时间和最大延迟时间.

定义 3. 令 $S \in STATES(A), S' \in CS(A, S)$. 状态间的最小延迟时间是指在各种情况下,状态 S 与 S' 间的所有可能的延迟时间的最小量,记为 $min_td(S, S'), min_td(S, S') = inf(\{td(S, S')\})$, (inf 为集合的下确界,下同). 状态间的最大延迟时间是指在各种情况下,状态 S 与 S' 间的所有可能的延迟时间的最大量,记为 $max_td(S, S'), max_td(S, S') = sup(\{td(S, S')\})$ (sup 为集合的上确界,下同).

由定义 3 知:(1) $max_td(S, S'), min_td(S, S')$ 是一种需要统计各种场合下的 $td(S, S')$ 才能获取的事实型知识.虽然这一获取过程可能并不简单,但是,我们将会看到,它是十分必要的.另外,在多数情况下,我们只关心 $CS(A, S)$ 的一个特定子集的状态延迟情况,例如在下节将提及的知识表示中的那些状态,这时,确定 (S, S') 的最小(大)延迟时间将变得简单一些.(2)令 $max_td(A, S, CS) = sup(\{max_td(S, S') | S \in STATES(A), \forall S', S' \in CS(A, S)\})$, $min_td(A, S, CS) = inf(\{min_td(S, S') | S \in STATES(A), \forall S', S' \in CS(A, S)\})$,显然, $max_td(A, S, CS)$ 是从对象 A 的状态 S 出现时刻起,到 S 影响其它对象的最大时间间隔; $min_td(A, S, CS)$ 是从对象 A 的状态 S 出现时刻起,到 S 影响其它对象的最小时间间隔.于是, $max_td(A, S, CS) \geq min_td(A, S, CS) \geq 0$; 当 $min_td(A, S, CS) > 0$ 时,表示状态 S 有延迟;当 $max_td(A, S, CS) = 0$ 时,表示状态 S 无延迟,对象只需要保存当前数据即可. $max_td(A, S, CS) - min_td(A, S, CS)$, 反映了状态 S 的影响期.(3) $sup(\{max_td(A, S, CS) | \forall S, S \in STATES(A)\})$, 说明了对象 A 的每一个实时数据需要保留的最长时间,也隐含说明了对象 A 为保留实时数据而需要的最大空间. $inf(\{min_td(A, S, CS) | \forall S, S \in STATES(A)\})$, 说明了对象 A 的每一个实时数据需要保留的最短时间,也隐含说明了对象 A 为保留实时数据而需要的最小空间.由此可见,在实时系统中不必保留每个对象产生的所有状态.

综上,一个含有时间信息的对象,可以形式化表示为:

对象 ::= (〈状态延迟表〉〈时间数据序列〉)

〈状态延迟表〉 ::= (〈〈状态 (S, S') 延迟〉 | $S \in STATES(A), S' \in CS(A, S)$ 〉)

$\langle \text{状态}(S, S') \text{ 延迟} \rangle = \langle \min_td(S, S'), \max_td(S, S') \rangle$
 $\langle \text{时间数据序列} \rangle ::= \langle \text{状态} \rangle | (\langle \text{状态} \rangle \langle \text{时间数据序列} \rangle)$
 $\langle \text{状态} \rangle = \langle \text{特征值, 开始时间, 持续时间} \rangle$

2 事件时间及其在知识中的表示

在实时系统中,通常所说的状态都是指特定对象在特定时间下的状态特征值,可简记为状态|[时间词]. 状态|[时间词]可能具有的含义为:(1)某一时刻具有状态 S ;(2)或某一时间区间内出现状态 S ;(3)或某一时间区间内保持状态 S . 在知识中,我们既可以用真实时间词直接给出时间轴上的一点或时间区间,例如,在一小时前或在一小时内;也可以使用状态来描述[时间词],例如,在具有因果关系的系统中,经常看到这样的描述:a)在对象 A 的状态 S_1 出现后,对象 B 出现状态 S_1' ;b)在对象 A 的状态 S_1 出现后几小时,对象 B 出现状态 S_1' . 这里对象 A 和对象 B 具有时间上的先后顺序,并且对象 B 的状态 S_1' 的出现时间实际上用对象 A 的状态 S_1 的出现时间描述和标定. 我们把这种时间描述称为事件时间词,前面的直接描述称为普通时间词. 从语义角度看,这些时间词都是相对于一个时间参照点而言,并且能够映射到时间轴上的某一点或区间上. 显然,普通时间词的时间参照点就是推理时的当前时刻,事件时间词的时间参照点就是事件时间. 然而,事件时间的确定是一个复杂的过程.

定义 4. 事件:为对象 A 的特殊状态 S , S 对当前指定的一些状态有影响. 由这些状态组成的集合称为事件约束集,记为 $ECS(A, S)$, $ECS(A, S) \subseteq CS(A, S)$. 事件记为 $E(A, S, ECS)$. 事件时间:事件 $E(A, S, ECS)$ (即状态 S)的出现时间.

显然,引入事件约束集是想用事件时间标定其中的状态.

令 $ECS_D = \inf(\{\max_td(S, S') | S \in STATES(A), \forall S', S' \in ECS(A, S)\})$, ECS_D 称为事件约束集延迟上限, $ECS_d = \sup(\{\min_td(S, S') | S \in STATES(A), \forall S', S' \in ECS(A, S)\})$, ECS_d 称为事件约束集延迟下限. 由事件的定义可推知,作为事件主体的对象 A ,其状态 S 要能够影响 ECS 集中的状态,只需满足 $ECS_D > 0$. 这意味着,在时间轴上允许出现许多事件 $E(A, S, ECS)$,即对象 A 的那些满足状态值= S 的状态. 但是,在推理的当前时刻,能够影响 ECS 的事件 $E(A, S)$ 不会有许多,因为有一个时间约束(延迟). 于是有下述定义.

定义 5. 令 T_c 为推理的当前时刻, T_f 为对象 A 在 T_c 时刻保存的所有状态中的最早出现时间, $volume(A) = T_c - T_f$. 若事件 $E(A, S, ECS)$ 满足: $ECS_D \geq ECS_d$,并且 $ECS_d \leq volume(A)$,则 $te1 = T_c - \min(ECS_D, volume(A))$, $te2 = T_c - ECS_d$. 区间 $[te1, te2]$ 称为事件的期望出现区间. 有效事件:在 $[te1, te2]$ 区间内出现的事件 $E(A, S, ECS)$. 最早事件时间:从 $te1$ 开始至 $te2$ 止,顺时间轴方向搜索到的第1个有效事件的开始时间. 最近事件时间:从 $te2$ 开始至 $te1$ 止,逆时间轴方向搜索到的第1个有效事件的开始时间.

由定义5可知,上述2个时间定义说明了2种确定事件时间参照点的方式. 由此定义的事件分别称为最早有效事件和最近有效事件. 现在,事件可形式化表示为:

事件 = $\langle \text{对象名, 状态特征值, 事件约束集, 事件特征, 事件临时代码} \rangle$

其中事件特征 ::= 最早有效事件 | 最近有效事件; 事件临时代码是赋予事件的一个编码,以

区别普通时间和事件时间. 这样时间参照点可由普通时间标记或事件临时代码方便表示.

现在开始讨论时间词的形式化, 为在知识中描述状态 S 在时间坐标轴上某一点或某一区间的存在情况, 我们需要使用一个三元组〈时间参照点, 时间算子, 时间量〉. 其中时间量由序偶 $(t1, t2)$ 表示, $t1$ 是相对于时间参照点的时间偏移量, 表示相对时刻; $t2$ 是相对于 $t1$ 的时间流逝量, 表示希望状态 S 出现/保持的时间范围, $t1, t2 \geq 0$. 时间算子用于描述时间参照点与时间量在时间轴上的映射关系. 时间算子把由 $(t1, t2)$ 表示的时间量映射为时间坐标轴上的一个具体区间 $[T1, T2]$. 我们称这个区间为状态 S 的期望出现区间. 时间算子有 2 个: BEFORE 算子意为“在时间参照点之前”; AFTER 算子意为“在时间参照点之后”.

若时间参照点记为 t_ref , 时间算子记为 t_op , 令 O' 代表时间参照点在时间轴上的坐标, 则 $[T1, T2]$ 由下面方法确定:

- (1) 对于 $t_op = BEFORE, T1 = BEFORE(O', t1) = O' - t1, T2 = T1 + t2$;
- (2) 对于 $t_op = AFTER, T1 = AFTER(O', t1) = O' + t1, T2 = T1 + t2$;

当 $t1 = 0$ 时, 有 $T1 = O'$, 此时, BEFORE 算子与 AFTER 算子作用相同; 当 $t2 = 0$ 时, 有 $T1 = T2, [T1, T2]$ 区间退化为时间轴上的一点, 即代表时刻. 对于普通时间词, 时间算子只有 1 个, 即 BEFORE 算子, 代表过去时间. 对于事件时间词, 时间算子也只有 1 个, 即 AFTER 算子, 代表事件发生后.

为了完整地描述状态 | [时间词] 的内容, 还需要在 [时间词] 中添加状态算子 (s_op) 项. 状态算子用于说明时间与期望出现的状态之间的关系. 若 $[T1, T2]$ 为状态 S 的期望出现区间, 则存在算子 $Exist_op$, 定义为: 在区间 $[T1, T2]$ 内, 存在状态 S . 即 $\exists t, t \in [T1, T2]$, 使状态 $|t = S$. 当 $T1 = T2$ 时, 表示该时刻具有状态 S .

保持算子 $Keep_op$, 定义为: 在区间 $[T1, T2]$ 内, 一直保持状态 S . 即 $\forall t, t \in [T1, T2]$, 使状态 $|t = S$. 当 $T1 = T2$ 时, 与存在算子相同, 表示该时刻具有状态 S . 时间词可形式化定义为: 时间词 = 〈时间参照点, 时间算子, 时间量, 状态算子〉. 作为例子, 我们说明知识“在对象 A 的状态 $S1$ 出现后 2 小时, 对象 B 出现状态 $S1'$ ”的表示. 定义“对象 A 的状态是 $S1$ ”为事件, 其事件临时代码记为 $A1$. 令时间词 $TT1 = \langle A1, AFTER, (120, 0), Exist_op \rangle$ (时间以分为单位), 则 $S1' | TT1$ 代表事件 $A1$ 发生后 2 小时对象 B 的状态为 $S1'$.

显然, 上述的事件时间、普通时间与时间数据的表示相一致, 状态 | [时间词] 可以引用时间轴上的任一有效时间数据, 并能反映 2 个对象间的时间关系. 在此基础上, 我们现在能够表示实时系统中的时态知识. 以基于规则的知识为例, 在知识库中, 规则可形式化定义如下:

- 规则 ::= ((事件表) 〈前件〉 〈后件〉)
- 事件表 ::= ({ 事件 })
- 前件 ::= (AND { 前提 }) / * 此处假定前提间的关系为与关系 * /
- 前提 = 〈对象名, 属性名, 关系算子, 状态特征值, 时间词〉
- 后件 ::= ({ 结论 })
- 结论 = 〈对象名, 属性名, 关系算子, 状态特征值, 时间词〉
- 时间词 = 〈时间参照点, 时间算子, 时间量, 状态算子〉

3 推理中知识的时间一致性

由前节讨论而知, 为了准确地描述实时系统中与时间有关的知识, 状态 | [时间词] 中所包含的各项因子是必不可少的. 然而, 在形如状态 | [时间词] 的知识表示中, 状态的期望出现

区间 $[T1, T2]$ 的确定与推理的当前时刻有关,因为,当时间参照点是普通时间时, O' 即为推理时的当前时刻 Tc ;当时间参照点是事件时间时,有效事件的搜索区间 $[te1, te2]$ 的确定与 Tc 有关.因此,在建立知识库时,我们对所描述的知识,无法准确地判断出其 $[T1, T2]$ 是否合理,只有在进行时间推理过程中才能最终完成对 $[T1, T2]$ 的合理性检验,即检验推理时知识与事实在时间上是否一致.为了叙述方便,我们把知识表示状态 $|$ [时间词]中的状态称为知识状态,以区别于事实状态.

准则. 令 Tc 是推理的当前时刻, Tf 是在 Tc 时刻对象 A 保存的所有状态中的最早出现时间, $[T1, T2]$ 为对象 A 的状态 S 的期望出现区间.推理过程中知识状态与事实状态是时间一致的,当且仅当 $Tf > 0$ 并且 $[T1, T2] \subseteq [Tf, Tc]$.

在推理过程中,当所有的知识状态都是时间一致的,则推理过程是时间一致的.

4 一个时态知识表示的例子

我们以实时系统“高炉炉况诊断和操作决策专家系统”为例,说明时态知识的表示及使用.高炉是一个大滞后系统,一个异常炉况的出现常会引起连锁反应,因此,对当前炉况的异常诊断需要追溯以前的炉况.下面例举系统中的一条规则.

(1) 规则内容

系统中有如下一条规则(记为 $r1$),其条件:从[严重崩料]发生后半小时开始,至当前时刻,[#送风压力#]出现[大波动](称为前提1,记为 $P1$),并且从[严重崩料]发生后1小时开始,至当前时刻,[#下部炉墙温度#]一直处于[低温水平](称为前提2,记为 $P2$).其结论:[炉缸大凉]发生.在 $r1$ 中,用符号对[# #]标记对象,[]标记状态特征值.[严重崩料]是对象[#崩料#]的一个状态特征值,同样地,[炉缸大凉]对应[#向凉#],[大波动]对应[#送风压力#],[低温水平]对应[#下部炉墙温度#].

(2) $r1$ 的知识表示

首先要确定时间参照点.由规则 $r1$ 的内容可以看出,对象[#送风压力#]和[#下部炉墙温度#]的状态的出现时间是由状态[严重崩料]标定的.因此,我们需要使用事件时间.我们把状态[严重崩料]定义为 $r1$ 的一个事件,简记为 E_slip1 ,其当前事件约束集为{[大波动],[低温水平]},简记为 $ECS(slip1)$;根据系统的实际情况, E_slip1 的事件特征应选择最近有效时间,即选择离推理当前时刻最近的有效事件; E_slip1 的事件临时代码为 $E1$.于是,事件 E_slip1 描述为 \langle [#崩料#], [严重崩料], $ECS(slip)$, 最近有效时间, $E1$ \rangle .其次,对于使用事件时间的时间词,要确定时间量 $(t1, t2)$.因 $t1$ 是相对于时间参照点的时间偏移量,故在 $P1$ 中 $t1=30$,在 $P2$ 中 $t1=60$;因 $t2$ 是相对于 $t1$ 的时间流逝量,并且在 $r1$ 的前提 $P1, P2$ 中都含有“至当前时刻”的描述,故在 $P1, P2$ 中,有 $t2=Tc-t1$,其中 Tc 是推理当前时刻.由于在前几节中我们要求 $t2 \geq 0$,但是, Tc 是一个在推理时才能确定的量,因此,无法预先知道是否满足 $t2 \geq 0$.然而,这种时间描述是常见的,必须能够简单地表示出.于是,在实际应用中,我们引入 $t2=-1$ 表示由 $t1$ 至推理当前时刻的时间流逝量,这时 $t2$ 起一个标记的作用(这与 $t2 \geq 0$ 要求不矛盾),在推理时由系统对 $t2$ 进行解释.这样,规则 $r1$ 表示如下:事件表 $= \{E_slip1\}$;条件部分: $P1 = \langle$ [#送风压力#], =, [大波动], $TT1$ \rangle ,其中 $TT1$

$= \langle E1, AFTER, (30, -1), Exist_op \rangle, P2 = \langle [\# \text{下部炉墙温度} \#], =, [\text{低温水平}], TT2 \rangle$, 其中 $TT2 = \langle E1, AFTER, (60, -1), Keep_op \rangle$. 结论部分: $C1 = \langle [\# \text{向凉} \#], =, [\text{炉缸大凉}], TT3 \rangle, TT3 = \langle T0, BEFORE, (0, 0), Exist_op \rangle$, $T0$ 为普通时间标记, 时间词 $TT3$ 的语义是推理当前时刻存在状态[炉缸大凉].

(3)推理中的 $r1$

在推理过程中,若推理机选择了规则 $r1$,则首先确定事件 E_slip1 期望出现区间 $[te1, te2]$,然后在区间内搜索最近有效事件;若最近有效事件存在;则分别确定 $P1, P2$ 的状态期望出现区间,并根据一致性检验准则,判别 $P1, P2$ 是否是时间一致的;若都是时间一致的,则对于 $P1$,系统在其状态期望出现区间内寻找满足 $Exist_op$ 条件的状态,对于 $P2$,系统在其状态期望出现区间内寻找满足 $keep_op$ 条件的状态,以确定规则 $r1$ 的条件是否匹配,其结论是否成立.

5 结 语

本文通过对状态|时间词|内涵的分析,对引言中提出的3个问题,给出了一个有效的解决方法.正如文中所述,我们给出的时间算子和状态算子,已经能够较好地表示实时系统中的那些含时间特征的知识.有时,为了实际使用方便,可以利用这些基本算子,构造出更通用的时间算子和状态算子.同样地,由时间一致性检验准则,我们可以推导出一些原则,对处于静态的知识作时间合理性的初步检查,以增强知识的正确性.最后,文中所述方法为进一步研究时间推理中的其它问题提供了方便.

参考文献

- 1 Console L *et al.* Fuzzy temporal reasoning on causal models. In: J. of Intelligent System, 1991,6:107~133.
- 2 Console L *et al.* Dealing with time in diagnostic reasoning based on causal models. In: Rus Z, Saitta L Eds., Methodologies for Intelligent System 3, North Holland, 1988. 230~239.

THE REPRESENTATION OF REAL-TIME DATA AND TEMPORAL KNOWLEDGE

GUO Hongfei ZHOU Jianchang

(Department of Computer Science Northeastern University Shenyang 110006)

Abstract When the temporal concept is introduced into the real-time expert system, how to represent the knowledge dealing with time (that is, temporal knowledge) should be concerned about deeply. Based upon the analysis of typical examples, the paper tackles three problems, such as the representation of real-time data, the representation of temporal knowledge, and the criteria to verify the temporal consistency in knowledge and facts during reasoning.

Key words Artificial intelligence, real-time systems, expert systems, data processing, knowledge representation, temporal reasoning.