计算机自动测量与控制. 2000. 8(2)
Computer Automated Measurement & Control

文章编号: 1007 - 0257 (2000) 02 - 0051 - 03

专家系统的实时性分析

潘爱华　范志杰　柳春图
(中国科学院力学所, 北京　100080)

摘要: 在一些复杂控制系统中, 专家系统作为一个决策控制器, 满足整个系统的性能需要, 因此研究专家系统的推理时间是必要的。专家系统的推理时间与其推理模式、知识库结构等因素有关。针对知识库结构, 通过专家系统的推理时间研究了实时性问题, 利用时间齐次马尔可夫链为专家系统知识库进行建模, 并给出了相应的时间估计模型及其排列准则。

关键词: 专家系统; 实时性; 马尔可夫链; 推理时间
中图分类号: TP182　　**文献标识码**: A

Real Time Analysis on Expert Systems

PAN Ai-hua　FAN Zhi-jie　LIU Chun-tu
(Institute of Mechanics, China Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract: In some complex control systems, expert systems, as a decisive controller, consist in the whole systems, so much more studies on inferring time are necessary for them. Inferring time in expert systems relates to its inference mode, knowledge-base architecture, computer performance, and provided languages. This paper takes the knowledge-base architecture as an example to study the corresponding problem of the alignment. At last, Temporally homogeneous Markov chain is used to modeling for knowledge-base. Time assessing mathematics model is given, which can provide proof for the complex control system.

Key words: expert systems; real time; markov chain; inferring time

1　引言

一个专家系统开发出来以后,需要对其进行试验与评价[1]。所谓试验通常是通过一些实验来观察系统的反应是否符合应有的结果,而评价则是要对专家系统的整个工作作出一个量的判断。因此试验是评价的基础,对专家系统的评价总是通过对其试验来完成的。试验的结果不仅可以判定系统性能的优劣,更重要的是可以作为对它进行修改和完善的依据或出发点。对专家系统的评价内容主要有:专家系统推理的结果是否正确; 专家系统界面友好程度如何; 专家系统推理的效率如何; 专家系统的开发成本如何。其中专家系统推理的效率取决于专家系统的推理时间。当专家系统的推理过程较快时, 则其推理结果在规定的时间内满足要求, 否则就难以保证。因此研究专家系统的推理时间模型是研究专家系统效率的一种有效途径。

目前所设计的许多专家系统, 由于一般是起咨询作用, 处于离线状态下工作, 因此较少考虑专家系统的推理时间。而在某些复杂系统中[2-5], 例如在水泥回转窑人工智能控制系统中, 专家系统是作为决策环节, 服从于整个系统的运行, 这样推理时间就得要考虑了。专家系统的推理时间与其自身推理模式、知识库结构、计算机性能以及专家系统支持语言等因素有关[6]。下面是以知识库结构为对象研究专家系统推理时间估计模型。由于知识库结构是与知识库的丰富程度, 知识库的组织方式等有关, 因此下面将具体研究推理时间估计模型与知识库中知识基的数量及排列规则的关系。

知识库中的知识基由事实或规则所组成, 若干多条知识基构成了知识库。专家系统知识库中的知识基在组织上可以分为两大类: 一类为静态排列, 另一类为动态排列。所谓静态排列是指在知识库中, 各条知识基间的相对位置不发生变化; 相反, 动态排列则是指整个知识库中的知识基间相对位置是随着专家系统的使用而作动态变化, 本文讨论后一种方式, 即动态排列方式。由于动态排列在使用过程中知识基的相对位置不断地变化, 因此如何变化以调整知识基的排列对提高系统的推理效率将是十分重要的。本文所研究的优先排列是按照以知识基在知识的推理过程中被使用的概率为依据, 按照一定的准则顺序排列, 以减少系统的推理时间。

收稿日期: 1999-08-09

作者简介: 潘爱华 (1968 -), 男, 浙江海宁人, 中科院力学所博士生, 主要从事生产过程控制研究。

2　独立知识基排列准则及时间估计模型

设专家系统的知识库由 s 条相互独立的知识基组成，分别用 K_i, $i \in S$ 表示，其中：$S = \{1, 2, \Lambda, s\}$，知识基在知识库中的排列顺序为：(K_1, K_2, Λ, K_s)，i 的序号就是知识基依次排列顺序。

已知各知识基在知识推理过程中被使用的概率分别为：(p_1, p_2, Λ, p_s)，对应知识基推理所使用的时间为 $(\tau_1, \tau_2, \Lambda, \tau_s)$，则每推理一步所使用的平均时间估计模型可以用式 (1) 表示：

$$\overline{T_1} = \sum_{i=1}^{s} \tau_i \cdot p_i \tag{1}$$

因此，当一个问题求解需要推理 n 步时，则其平均时间估计模型可以用式 (2) 表示：

$$\overline{T_n} = n \cdot \sum_{i=1}^{s} \tau_i \cdot p_i \tag{2}$$

从式 (1) 不难分析，当知识基的排列准则满足 $p_1 \geq p_2 \geq \Lambda \geq p_s$ 时，$\overline{T_1}$ 达到最小，这样的排列准则可以提高专家系统的运行效率。由此可见，这种模型中的知识基排列顺序较为简单，只要遵循其被使用的概率从大到小排列即可。

3　关联知识基排列准则及时间估计模型

在实际中，知识基之间不完全是独立的，而是在若干条知识基之间存在着因果关系，因此使用上述独立知识基时间估计模型就不能准确地反映实际情况，因而代之以另一种模型。下面进行详细研究：

设知识推理过程中知识基首次被使用的概率分别为：$p_1 \geq p_2 \geq \Lambda \geq p_s$，各条知识基间的关联关系可以用状态有限的马尔可夫链来表示。并且，一般情况下不考虑知识的推理模式受时间影响而产生差异，因而该马尔可夫链又是齐次的，其转移关系就可以用一步转移概率矩阵 $P \overset{\Delta}{=} \{p_{ij}\}$ 来表示，如式(3)所示。其中 p_{ij} 表示从第 i 条知识基推理到第 j 条知识基的条件概率。

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \Lambda & p_{1s} \\ p_{21} & p_{22} & \Lambda & p_{2s} \\ & \Lambda & \Lambda & \\ p_{s1} & p_{s2} & \Lambda & p_{ss} \end{bmatrix} \tag{3}$$

在这种情况中，各知识基的排列顺序既要考虑到初始概率 p_1，同时还需要考虑到一步转移概率 p_{ij}。并且，知识基的排列准则还与知识的推理步数有关。下面进行分析：

当专家系统仅起查询作用，每次推理仅需执行一步即可完成时，则知识基的排列准则为：$p_1 \geq p_2 \geq \Lambda \geq p_s$，即其排列顺序就是初始概率 p_i 的大小顺序。

当专家系统用于复杂问题求解时，其每次求解一个问题需要推理很多步时，可以不考虑初始概率的影响，其排列的准则为：

$$\sum_{i=1}^{s} p_{i1} \geq \sum_{i=1}^{s} p_{i2} \geq \Lambda \geq \sum_{i=1}^{s} p_{is} \tag{4}$$

特殊地，当一步转移概率矩阵 P 有平稳分布时，则其排列准则为：

$$\pi_1 \geq \pi_2 \geq \Lambda \geq \pi_s \tag{5}$$

下面进一步分析知识推理时间估计模型：

当推理步数 $\mu = 1$ 时，其平均推理时间为：

$$\overline{T_1} = \sum_{i=1}^{s} \tau_i \cdot p_i \tag{6}$$

可以看出，式 (6) 与式 (1) 是一致的。即当知识推理只需一步就可完成时，独立知识基时间估计模型与关联知识基时间估计模型是一致的。

当推理步数 $\mu = 2$ 时，其平均推理时间为：

$$\begin{aligned} \overline{T_2} &= \sum_{i=1}^{s} \left(\tau_i \cdot p_i + \sum_{j=1}^{s} p_i \cdot p_{ij} \cdot \tau_j \right) \\ &= \sum_{i=1}^{s} \tau_i \cdot p_i + \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{s} p_i \cdot p_{ij} \cdot \tau_j \\ &= \overline{T_1} + \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{s} p_i \cdot p_{ij}^{(1)} \cdot \tau_j \end{aligned} \tag{7}$$

同理可得，当推理步数 $\mu = n$ 时，其平均推理时间为：

$$\overline{T_n} = \overline{T_{n-1}} + \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{s} p_i \cdot p_{ij}^{(n-1)} \cdot \tau_j \tag{8}$$

其中 $p_i \cdot p_{ij}^{(n-1)}$ 为知识基 i 经过 $n-1$ 步推理到知识基 j 的概率。

所以可推导出式 (9)：

$$\begin{aligned} \overline{Tn} &= \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{s} p_i \cdot \left(1 + p_{ij}^{(1)} + p_{ij}^{(2)} + \Lambda + p_{ij}^{(n-1)}\right) \cdot \tau_j \\ &= \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{s} p_i \cdot p_{ij}^{(k-1)} \cdot \tau_j \end{aligned} \tag{9}$$

下面证明式 (9) 的普遍性。

证：使用归纳法对式 (9) 加以证明：

当 $n = 1$ 时有：$\overline{T_1} = \sum_{i=1}^{s} \tau_i \cdot p_i$　　(10)

满足式 (6) 的要求。

设当 $n = m$ 时式 (9) 成立：

$$\overline{Tm} = \sum_{k=1}^{m} \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{s} p_i \cdot p_{ij}^{(k-1)} \cdot \tau_j \tag{11}$$

则当 $n = m + 1$ 时有：

$$\begin{aligned} \overline{T_{m+1}} &= \overline{T_m} + \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{s} p_i \cdot p_{ij}^{(m)} \cdot \tau_j \\ &= \sum_{k=1}^{m} \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{s} p_i \cdot p_{ij}^{(k-1)} \cdot \tau_j + \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{s} p_i \cdot p_{ij}^{(m)} \cdot \tau_j \end{aligned}$$

$$= \sum_{k=1}^{m+1}\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{s} p_i \cdot p_{ij}^{(k-1)} \cdot \tau_j \tag{12}$$

所以式 (9) 得到证明。

从式 (8) 可以看出, 知识推理每增加一步所耗费的平均时间为:

$$\Delta \overline{T}_n = \overline{T}_n - \overline{T}_{n-1} = \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{s} p_i \cdot p_{ij}^{(n-1)} \cdot \tau_j \tag{13}$$

其中 $\Delta \overline{T}_n$ 为进行 n 步推理时所增加的时间, 也就是推理第 n 步所需要的时间。并且从式 (13) 可以分析, 由于一般情况下 $p_{ij}^{(n-1)}$ 是 n 的非恒值函数, 因而知识推理每一步增加的时间 $\Delta \overline{T}_n$ 是变化的。

设该马氏链有平稳分布存在, 且为 $[\pi_1\ \pi_2\ \Lambda\ \pi_s]$, 那么当推理步数 $\mu \to +\infty$ 时, 有:

$$\lim_{n\to+\infty} \Delta \overline{T}_n = \lim_{n\to+\infty} \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{s} p_i \cdot P_{ij}^{(n-1)} \cdot \tau_j \tag{14}$$

所以有:

$$\lim_{n\to+\infty} \Delta \overline{T}_n = \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{s} p_i \cdot \pi_j \cdot \tau_j = \sum_{j=1}^{s} pi \cdot (\sum_{j=1}^{s} \pi_j \cdot \tau_j) = \sum_{j=1}^{s} \pi_j \cdot \tau_j \tag{15}$$

从式 (15) 可以看出, 当推理步数大到一定程度, 使该马氏链具有平稳分布时, 则每一步推理所增加的时间是相等的, 且为 $\sum_{j=1}^{s} \pi_j \cdot \tau_j$.

4　时间估计模型计算量

从式 (8) 的时间估计模型计算方法可以看出, 整个计算过程为一递推过程, 共分两个部分: 一是 $p_{ij}^{(n-1)}$ 的递推, 它是通过一步转移概率矩阵 P 经过 $n-1$ 次自乘后的对应元素得到, 具体的递推公式可见文献; 二是 $\overline{T}_n$ 的递推, 它是通过式 (8) 求解所得到。确定上述方法中的计算量是衡量该方法有效性的关键, 这也是一个十分关心的问题, 因此下面来分析一下上述模型中的计算量:

$p_{ij}^{(n-1)}$ 每步递推的计算量 C_1 为:

$$C_1 = s^2[(s-1)^+ + s^\times] = s^2(s-1)^+ + s^{3\times} \tag{16}$$

式中: $()^+$ 为加法的次数, $()^\times$ 为乘法的次数。

$\overline{T}_n$ 每步递推的计算量 C_2 为:

$$C_2 = (s^2-1)^+ + 2s^{2\times} \tag{17}$$

则每步递推总的计算量 C 为:

$$C = C_1 + C_2 = s^2[(s-1)^+ + s^\times] + (s^2-1)^+ + 2s^{2\times} = [s^2(s-1) + (s^2-1)]^+ + (s^3+2s^2)^\times \tag{18}$$

例: 当 $s = 10^3$ 时, 则 $C \approx 10^{9+} + 10^{9\times}$

从上例看出, 该算法存在着计算量大的问题, 这主要来源于一步转移概率矩阵的高维数。因为为满足解决实际中的许多问题, 都将专家系统知识库设计得比较完善与丰富, 因而知识库中知识基的总数将是一个很大的数, 一步转移概率矩阵也将是一个高维的矩阵, 这样的矩阵在计算过程中就面临着计算量的问题。对于这种情况可以采用并行计算的方法, 并且从上述的分析也可以看出, 其并行性是很高的, 因为大部分计算均可化为向量或矩阵计算, 便于并行求解, 以加快计算速度。

5　结论

文中所建立的优先排列知识库专家系统排列准则可以提高专家系统在推理过程中的工作效率, 但这需要专家系统具有一定的自学习能力, 能在其自身的使用过程中对各知识基作不断的频率统计, 并根据统计结果, 按照文中所确定的排列准则进行排列。这样多次运行后, 根据概率论的原理, 统计后的使用频率就趋于使用概率了。这里还存在这样的一个问题: 即根据统计后的使用频率进行重新排列, 这样的排列过程也是需要耗费时间的。为了不影响专家系统的正常工作时间, 可以在每次推理工作完成之后而在系统退出之前进行重新排列。文中所提出的时间估计模型可以从定量的角度较为准确地反映该类专家系统在知识推理过程中所耗费时间的多少, 因而这种模型在复杂系统及实时性仿真中都将有很好的分析价值。

参考文献

[1]马玉祥, 武波. 专家系统[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1994.
[2]高玉琦, 李友善, 马家辰. 水泥回转窑的计算机控制[J]. 自动化学报, 1991, 17(2): 166 - 173.
[3]Rao Ming and Jing Tsung-Shan, Integrated Intelligent Simulation Environment[J]. Simulation, 1990, (6): 291～295.
[4]Ruby C. W. A New Approach To Expert Kiln Control[C], IEEE Cement Industrial Technical Conference1987: 399～412.
[5]Umbers I. G, King P.J., An analysis of human decision - making in cement kiln control and the implications for automation [J]. Int.J. Man - machine Studies, 1980, 12(1).
[6]关守平. 实时专家系统技术[J]. 计算机工程与科学, 1996, 18(4).