



离散事件系统的一种 N 步在线监控策略¹⁾

古天龙

(桂林电子工业学院计算机系 桂林 541004)

高衿畅 周春晖

(浙江大学工业控制技术研究所 杭州 310027)

摘 要 文中给出了离散事件系统的一种 N 步在线监控策略. 其特点是控制策略取决于系统当前运行的 N 步后继运行投影或预测, 无需计算非能控语言的上限能控子语言, 通过适当选取 N , 仍可保证系统的最优运行. 同时还给出了与之相关的一些理论结果.

关键词 离散事件系统, 监控器, 综合.

1 引言

对于具有事件集 Σ ($\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_u$, $\Sigma_c \cap \Sigma_u = \emptyset$, Σ_c 为能控事件集, Σ_u 为不能控事件集) 和状态集 Q , 始于初态 $q_0 \in Q$, 依据 $\delta: \Sigma \times Q \rightarrow Q$ (状态转移函数, $\delta(\sigma, q) = q'$ 表示事件 σ 将状态 q 转移至状态 q') 变化的离散事件问题可用自动机 $G = (\Sigma, Q, \delta, q_0)$ 描述. 以 Σ^* 表示事件集 Σ 上的事件串集 (包括控串 ϵ), δ 则可扩展为 $\delta: \Sigma^* \times Q \rightarrow Q$ ^[1,2]. 离散事件问题 G 的运行特性为语言 $L(G) = \{s | s \in \Sigma^*, \delta(s, q_0) \text{ 有定义}\}$. 对于事件串 $s = \sigma_1 \sigma_2 \cdots \sigma_k \in \Sigma^*$, 称事件串 $\sigma_1 \sigma_2 \cdots \sigma_j$ ($j \leq k$) 为事件串 s 的前缀, 以 $\text{pre}(s)$ 表示事件串 s 的所有前缀构成的集合. 以 $|s|$ 表示事件串 s 的长度 (事件串中事件出现次数), $|s| = \sigma_1 \sigma_2 \cdots \sigma_k = k$. 语言 $K \subseteq \Sigma^*$ 的闭包定义为 $\bar{K} = \{s | (\exists t \in \Sigma^*) t \in K \wedge s \in \text{pre}(t)\}$. 对于 $K \subseteq \Sigma^*$, 如果 $\bar{K} \Sigma_u \cap L(G) \subseteq \bar{K}$, 则称 K 为能控语言 (对于 $L(G)$ 和 Σ_u). 对于非能控语言 K , 可用其上限能控子语言 K^\uparrow 来近似^[2]. 离散事件问题 G 的监控器为 $\Gamma: \Sigma \rightarrow 2^\Sigma$, 或者 $\Gamma: \Sigma^* \rightarrow 2^\Sigma$. 以 $\gamma(s)$ 表示事件串 s 后的监控策略 (能发生事件的集合). 受控离散事件问题 G 的运行特性用 $L(G, \gamma)$ 表示.

在 Ramadge 和 Wonham 等学者提出的离散事件问题的逻辑监控理论中^[1,2], 监控器的综合要求: 受控对象以及期望合法运行特性的有限自动机模型. 对于非能控语言性能指标, 还需要计算上限能控子语言. 如果问题的规模较大, 则会出现计算困难、甚至不可能. Chung 等提出了 LLP 在线监控的思想^[3]. 本文给出一种较之于 LLP 在线监控策略更为有效的 N 步在线监控策略.

1) 广西自然科学基金资助项目.

收稿日期 1994-12-19

2 N 步在线监控

2.1 监控策略的描述

N 步在线监控策略的基本思想是:根据系统当前运行(设执行完事件串 s)下后继运行的 N 步投影或预测(时变、非确定离散事件问题的 N 步后继运行只能通过预测而获得)和指标语言 K ,求解当前运行历史 s 下的控制策略 $\gamma^N(s)$ (后继运行情况的 N 步投影或预测为一 N 级树).对于语言 $L(G) \subseteq \Sigma^*$,事件串 $s \in \Sigma^*$, $N \in \mathbb{Z}^+$ (正整数),引入如下语言运算

$$\begin{aligned} L(G)/s &= \{t \mid \exists t \in \Sigma^* \} st \in L(G)\}, \\ L(G)|N &= \{t \mid \exists t \in \Sigma^* \} t \in L(G) \wedge |t| \leq N\}, \\ L(G)/s|N &= \{t \mid \exists t \in \Sigma^* \} st \in L(G) \wedge |t| \leq N\}. \end{aligned}$$

进一步定义如下受阻止事件串集(子语言)

$$\begin{aligned} F_1^{/s|N} &= \{t = \sigma u \mid (\exists \sigma \in \Sigma_c)(\exists u \in \Sigma_u^*) \sigma u \in L(G)/s|N \wedge \sigma u \in K/s|N \wedge |\sigma u| = N\}, \\ F_2^{/s|N} &= \{\sigma \in \Sigma_c \mid \sigma \in L(G)/s|1 \wedge \sigma \notin K/s|1\}, \\ F_3^{/s|N} &= \{t = \sigma w \sigma' \mid (\exists \sigma \in \Sigma_c)(\exists w \in \Sigma_u^*)(\exists \sigma' \in \Sigma_u) \sigma w \in K/s|N \wedge \sigma w \sigma' \\ &\quad \in L(G)/s|N \wedge \sigma w \sigma' \notin K/s|N\}. \end{aligned}$$

系统运行至 s 下的反馈控制策略(允许发生事件集合)为

$$\gamma^N(s) = L(G)/s|1 - (F_1^{/s|N} \cup F_2^{/s|N} \cup F_3^{/s|N})|1$$

离散事件系统在给定语言指标 K 下的 N 步在线监控运行特性为

$$\varepsilon \in L(G, \gamma^N),$$

$$(\forall s \in L(G, \gamma^N)(\forall \sigma \in \gamma^N(s))s\sigma \in L(G, \gamma^N).$$

2.2 一些理论结果

命题 1. 当且仅当 $\bar{K}^\dagger \neq \Phi, L(G, \gamma^N) \subseteq \bar{K}^\dagger$.

命题 2. 当且仅当 $(\forall \sigma \in \Sigma_u \cap L(G)|1)(\forall w \in \Sigma_u^*) \sigma w \in L(G) \wedge \sigma w \in \bar{K}$, 则 $\bar{K}^\dagger \neq \Phi$.

命题 3. $L(G, \gamma^N) \subseteq L(G, \gamma^{N+1})$.

命题 4. 如果 $\bar{K}^\dagger \neq \Phi, N \geq N_u(L(G)) + 2$, 则 $L(G, \gamma^N) = \bar{K}^\dagger$. 其中 $N_u(L(G)) = \max\{|t| \mid \exists t \in \Sigma_u^* \} (\exists u, v \in \Sigma^*) utv \in L(G)\}$.

为了将 N 步在线监控策略同 LLP 监控策略进行比较,以 $\gamma_{\text{cons}}^N(s), \gamma_{\text{optm}}^N(s)$ 分别表示 LLP 监控器中保守、乐观策略下,系统运行至事件串 s 的反馈控制(允许发生事件集合).LLP 监控的保守和乐观策略是对 N 级树中悬挂(pending)^[3]串所采取的“极端”决策(阻止或者发生). N 步在线监控策略则是充分利用悬挂串所含信息(串的能控性)的一种折衷决策(如果某悬挂串中包含多于一个能控事件,则称其为能控悬挂串;反之,则称为不能控悬挂串.能控悬挂串可以发生、不能控悬挂串受到阻止).显然 $\gamma_{\text{cons}}^N(s) \subseteq \gamma^N(s) \subseteq \gamma_{\text{optm}}^N(s)$, 并有如下命题.

命题 5. $L(G, \gamma_{\text{cons}}^N) \subseteq L(G, \gamma^N) \subseteq L(G, \gamma_{\text{optm}}^N)$.

命题 5 表明,在保证系统可靠运行下, N 步在线监控策略较之于 LLP 监控策略允许系统有更大限度的运行(由文献[3]知, $L(G, \gamma_{\text{cons}}^N) \subseteq K^\dagger$ 以及 $K^\dagger \subseteq L(G, \gamma_{\text{optm}}^N)$, 亦即乐观

控制策略 $\gamma_{\text{optm}}^N(s)$ 下受控系统会出现受禁运行特性).

由于篇幅所限,上述几个命题的证明从略(可参阅文献[4]的有关章节).

示例. 图 1a 所示离散事件系统 G , 其中事件集为 $\Sigma = \{\alpha, \theta, \beta\}$, 能控事件集为 $\Sigma_c = \{\alpha, \theta\}$. 控制指标语言 $K = (\beta^2 + \alpha\beta)\theta\beta$.

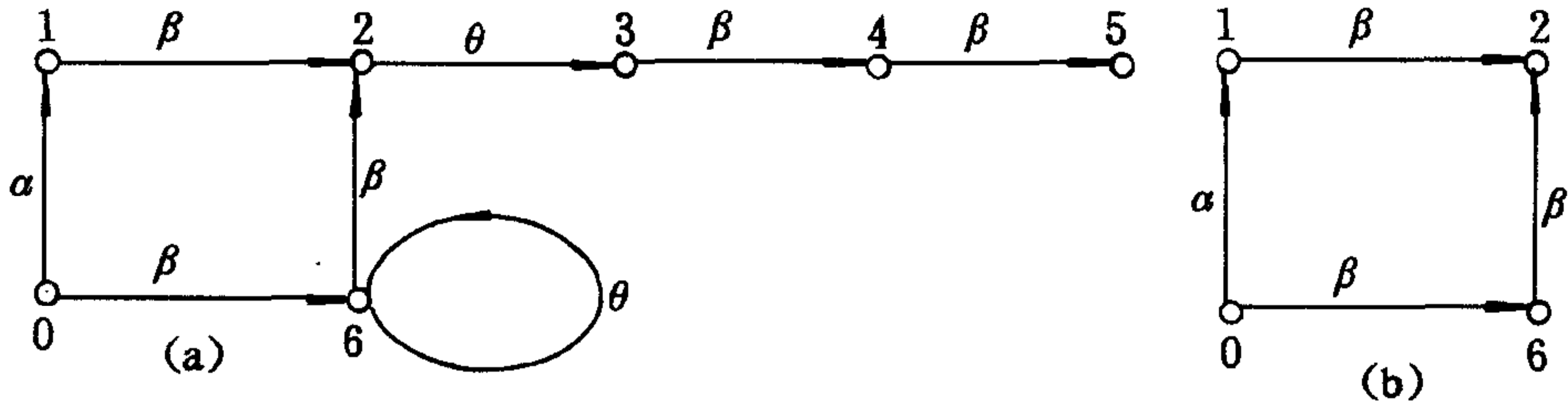


图 1 离散事件系统的例

由命题 2, 因为 $\{\beta, \beta^2\} \subseteq \bar{K} = \overline{\beta^2 + \alpha\beta}\theta\beta$, 所以 $\bar{K} \uparrow \neq \Phi$. 本例中 $N_u(L(G)) = 2$, 选取 $N = 4$. 监控策略综合如下:

- $s = \epsilon (q = 0): F_2^{s|N} = F_3^{s|N} = \Phi, \gamma^4(\epsilon) = L(G)/\epsilon|1 = \{\alpha, \beta\};$
- $s = \alpha (q = 1): F_2^{s|N} = F_3^{s|N} = \Phi, \gamma^4(\alpha) = L(G)/\alpha|1 = \{\beta\};$
- $s = \alpha\beta (q = 2): F_2^{s|N} = \Phi, F_3^{s|N} = \{\theta\beta\beta\}, \gamma^4(\alpha\beta) = L(G)/\alpha\beta|1 - \{\theta\} = \Phi;$
- $s = \beta (q = 6): F_3^{s|N} = \Phi, F_2^{s|N} = \{\theta\}, \gamma^4(\beta) = L(G)/\beta|1 - \{\theta\} = \{\beta\};$
- $s = \beta\beta (q = 2): F_2^{s|N} = \Phi, F_3^{s|N} = \{\theta\beta\beta\}, \gamma^4(\beta\beta) = L(G)/\beta\beta|1 - \{\theta\} = \Phi.$

同理可计算出其它事件串 s 下当前运行的控制策略. 系统在 N 步在线监控策略下的运行特性 $L(G, \gamma^4)$ 示于图 1b, 显然 $L(G, \gamma^4) = \bar{K} \uparrow$.

3 讨论

N 步在线监控策略中, 系统当前运行 s 下的控制策略是基于该运行历史的后继运行的 N 步投影或预测. 在这一点上类似于文献[3]中 LLP 监控的思想. 但是, 由于 N 步在线监控中所采取的控制策略的不同, 使其体现出较 LLP 监控有如下两方面优点: (1) 在保证系统可靠运行下, 允许系统有更大限度的运行(命题 5); (2) 监控策略综合时, 无需计算非能控指标语言的上限能控子语言, 但通过适当选取 N 仍可保证系统的最优运行 $K \uparrow$ (命题 4).

N 步在线监控策略综合中, $F_1^{s|N}, F_2^{s|N}$ 和 $F_3^{s|N}$ 的计算工作量相当于 LLP 监控综合中 f_K^N 和 $f_a^{N[3]}$ 的计算工作量. 由于 N 步在线监控策略的综合无需实施 $f_a^{N[3]}$ 的计算, 故 N 步在线监控策略较 LLP 监控策略在计算上更为有效.

N 的选取对于 N 步在线监控策略的运行效果有较大的影响. 对于运行特性 $L(G)$ 可完全预知的离散事件问题, 可通过命题 4 选取 N , 以确保系统的最优运行. 然而, 对于时变非确定离散事件问题, $L(G)$ 是无法完全预知的, N 步在线监控策略就不一定能保证系统的最优运行. 只能通过选取尽可能大的 N (计算或在线实施允许下), 来达到较好的系统运行.

参考文献

- [1] Ramadge P J, Wonham W M. Supervisory control of a class of discrete event processes. *SIAM J. Control Optim.*, 1987, **25**(1):206—230.
- [2] Wonham W M, Ramadge P J. On the supremal controllable sublanguage of a given language. *SIAM J. Control Optim.*, 1987, **25**(3):637—659.
- [3] Chung S L, Lafortune S, Lin F. Limited lookahead policies in supervisory control of discrete event systems. *IEEE Trans. on Automa. Control*, 1992, **37**(2):1921—1935.
- [4] 古天龙. 复杂工业过程中离散事件问题的若干新研究[学位论文]. 杭州:浙江大学, 1995.

N -STEP ON-LINE SUPERVISORY CONTROL OF DISCRETE EVENT SYSTEMS

GU TIANLONG

(*Department of Computer, Guilin Institute of Electronic Technology, Guilin 541004*)

GAO JINCHANG ZHOU CHUNHUI

(*Institute of Industrial Process Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027*)

Abstract A N -step on-line supervisory control method for discrete event systems is proposed. This method is characterized by calculating the next control action on the basis of a N -step projection of the behavior and achieving optimal supervisory control without calculating the supremal controllable sublanguage. Some theoretic problems about this method are also discussed.

Key words Discrete event systems, supervisors, synthesis.