第18卷 第6期
1992年11月

自 动 化 学 报
ACTA AUTOMATICA SINICA

Vol. 18, No. 6
Nov., 1992

部分同步离散事件系统的分散监控[1)]

杨小军 郑应平
(中国科学院自动化研究所,北京 100080)

摘 要

本文研究一类部分同步离散事件系统分散监控与集中监控等价的条件，得到按控制指标自然分解的分散监控实现方式,由此提出了整体、局部目标最优实现一致性问题，并讨论了分散监控闭合回路的两种控制作用机理. 最后给出了一种辅助分散监控的协调方案.

关键词: 离散事件系统,分散监控,自动机组合,形式语言,协调.

一、引 言

考虑到离散事件系统(DES)的地理分散性,也是出于设计简便与减小规模、易于实现的需要,文献[1,2]提出了分散监控方法. 分散监控由一系列互不通信的局部监控器对受控 DES 并行施加控制构成,其中每个局部监控器只相应观测、处理受控系统的部分信息，这就使分散监控系统的行为可能少于集中方式的行为，因此采用分散监控的关键是分散监控与集中监控等效. 文献[1]基于局部控制指标进行分散监控设计，而文献[2]是基于整体控制指标进行分散监控设计，它们所得出的关于分散监控与集中监控等效的条件均针对一般 DES，因而较笼统，也难于判别.

由于 DES 固有的结构特征（通常由若干离散事件过程组合而成的 DES）作者针对一类部分同步 DES,研究其分散监控与集中监控等效的条件；和文献[3]一样，系统监控的控制指标应该能反应整体的利益,故本文的研究是基于整体控制指标的分散监控.

二、可分解语言及部分同步系统的语言特性

设 $\Sigma=\bigcup_{i=1}^{n}\Sigma_i$, $\Sigma_i\neq\phi$, $L_i\subset\Sigma_i^*$ $(1\leqslant i\leqslant n)$；记屏蔽映射为 $T_i:\Sigma^*\to\Sigma_i^*$，即，

$T_i(\varepsilon)=\varepsilon$, $T_i(s\sigma)=\begin{cases}T_i(s)\sigma, & 若\ \sigma\in\Sigma_i\\ T_i(s), & 否则,\end{cases}$ 则语言 $\{L_1,L_2,\cdots,L_n\}$ 的广义织积为

本文于1991年5月6日收到.
1) 本文受到国家863高科技计划CIMS主题和中国科学院自动化研究所复杂系统控制开放实验室的资助.

$\|_{i=1}^{n} L_i = \{s \in \Sigma^* \mid \forall_i, T_i(s) \in L_i\}$，显然有

$$\|_{i=1}^{n} L_i = \bigcap_{i=1}^{n} T_i^{-1}(L_i). \tag{1}$$

定义 1. 设$\phi \neq L \subseteq \Sigma^*$，$\phi \neq L_i \subseteq \Sigma_i^*(1 \leqslant i \leqslant n)$，若 $L = \|_{i=1}^{n} L_i$，则称L对$\{\Sigma_1, \Sigma_2, \cdots, \Sigma_n\}$ 可分解. $\{L_1, L_2, \cdots, L_n\}$ 称为L的分解语言集(一般L的分解语言集并不唯一).

命题 1. 若L可分解,则$L = \|_{i=1}^{n} T_i(L)$.

证明. $\because L$可分解, $\exists \phi \neq L_i \subseteq \Sigma_i^*$ $(1 \leqslant i \leqslant n)$,使 $L = \bigcap_{i=1}^{n} T_i^{-1} L_i$,

$$又 \because\ T_j(L) = T_j\left(\bigcap_{i=1}^{n} T_i^{-1} L_i\right) \subseteq T_j(T_j^{-1} L_j)\ \ (1 \leqslant j \leqslant n),$$

$$T_j(L) \subseteq L_j; \tag{2}$$

$$又 \because T_j^{-1}(T_j(L)) \supseteq L(1 \leqslant j \leqslant n), \therefore L \subseteq \bigcap_{j=1}^{n} T_j^{-1}(T_j(L));$$

根据式(2) $L \subseteq \bigcap_{j=1}^{n} T_j^{-1}(T_j(L)) \subseteq \bigcap_{j=1}^{n} T_j^{-1} L_j$，而由式(1) $\bigcap_{j=1}^{n} T_j^{-1} L_j = L$，故

$$L = \|_{i=1}^{n} T_i(L).$$

命题 2. 若$L \cap H$可分解,则$L \cap H$也可分解.

证明. $\because L$、H可分解, $\therefore L \cap H = \left(\bigcap_{i=1}^{n} T_i^{-1} L_i\right) \cap \left(\bigcap_{i=1}^{n} T_i^{-1} H_i\right)$；又 $\because T_i^{-1} L_i \cap T_i^{-1} H_i = T_i^{-1}(L_i \cap H_i)$，$\therefore L \cap H = \|_{i=1}^{n} (L_i \cap H_i)$,这说明可分解语言对交运算封闭.

设部分同步 DES G 由 n 个离散事件过程 G_i 组合而成,即 $G = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m)$, $G_i = (Q_i, \Sigma_i, \delta_i, q_{0i}, Q_{mi})$,其中 $Q = Ac(Q_1 \times Q_2 \cdots \times Q_n)$，$q_0 = (q_{01}, q_{02}, \cdots, q_{0n})$，$Q_m = Ac(Q_{m1} \times Q_{m2} \cdots \times Q_{mn})$，$\Sigma = \bigcup_{i=1}^{n} \Sigma_i$, $\Sigma_c = \bigcup_{i=1}^{n} \Sigma_{ic}$，$\Sigma_{uc} = \bigcup_{i=1}^{n} \Sigma_{iuc}$，$\delta: \Sigma \times Q \to Q$，记 $I(\sigma) = \{i \mid \sigma \in \Sigma_i\}$，$\forall (q_1, q_2, \cdots, q_n) \in Q$,

$$\delta(\sigma, (q_1, q_2, \cdots, q_n)) = \begin{cases} (q_1', q_2', \cdots, q_n'), 若\ \forall i \in I(\sigma),\ \delta_i(\sigma, q_i)! \\ 无定义;否则 \end{cases}$$

其中
$$\begin{cases} q_i' = \delta_i(\sigma, q_i), & 当\ i \in I(\sigma) \\ q_i' = q, & 当\ i \notin I(\sigma) \end{cases}$$

显然, $L(G) = \|_{i=1}^{n} L(G_i)$. 为了简化研究,以下假设共享事件不含不可控事件，即 $i \neq j$ 时, $\Sigma_{iuc} \cap \Sigma_{juc} = \phi$.

命题 3. 设 $L \subseteq L(G)$，若L对 $L(G)$ 可控,则 $T_i(L) \subseteq L(G_i)$，且对 $L(G_i)$ 可控 $(1 \leqslant i \leqslant n)$.

证明. $\because L \subseteq L(G), L \subseteq \bigcap_{i=1}^{n} T_i^{-1} L(G_i)$，$\therefore T_i(L) \subseteq L(G_i)$. 用反证法，假设

$\exists s \in \overline{T_i(L)}$，$\sigma_i \in \Sigma_{iuc}$，且 $s\sigma_i \in L(G_i)$，使 $s\sigma_i \notin \overline{T_i(L)}$. $\because \overline{s \in T_i(L)} s \in T_i(\bar{L}), \exists t \in \bar{L}$,

使 $T_i(t)=s$, $T_i(t\sigma_i)=s\sigma_i$; $\because$ $s\sigma_i \notin \overline{T_i(L)}$, $T_i(t\sigma_i)\notin T_i(\bar{L})$, $\therefore$ $t\sigma_i\notin\bar{L}$; 又 $\because s\sigma_i\in L(G_i)$, $T_i(t\sigma_i)\in L(G_i)$, $\therefore t\sigma\in T_i^{-1}L(G_i)$; $\forall j\neq i$, $1\leqslant j\leqslant n$, $\because \sigma_i\in\Sigma_{iuc}$, $\Sigma_{iuc}\cap\Sigma_{juc}=\phi$, $T_j(t\sigma_i)=T_j(t)$, 而 $T_j(t)\in T_j(\bar{L})$, $T_j(L)\subseteq L(G_j)$, $L(G_j)$ 闭, 有 $T_j(t)\in L(G_j)$, $\therefore$ $t\sigma_i\in T_j^{-1}L(G_j)$, $t\sigma_i\in\bigcap_{i=1}^{n}T_i^{-1}L(G_i)$, 即 $t\sigma_i\in L(G)$, 这与 L 对 $L(G)$ 可控矛盾, 故原命题成立.

命题 4. 设 $L_i\subseteq L(G_i)$ $(1\leqslant i\leqslant n)$, 且 L_i 闭, 对 $L(G_i)$ 可控, 记 $L=\|_{i=1}^{n}L_i$, 则 $L\subseteq L(G)$, 且 L 闭, 对 $L(G)$ 可控.

证明. $\because$ $L_i\subseteq L(G_i)$ $(1\leqslant i\leqslant n)$, $\bigcap_{i=1}^{n}T_i^{-1}L_i\subseteq\bigcap_{i=1}^{n}T_i^{-1}L(G_i)$, $\therefore$ $L\subseteq L(G)$. L 的闭性显然. $\because L_i$ 闭 $\bar{L}\Sigma_{uc}\cap L(G)=\left(\bigcap_{i=1}^{n}T_i^{-1}\bar{L}_i\right)\Sigma_{uc}\cap L(G)=\bigcap_{i=1}^{n}(T_i^{-1}\bar{L}_i\Sigma_{uc})\cap L\times(G)$. 又 $\because$ $T_i[(T_i^{-1}\bar{L}_i)\Sigma_{uc}]=\bar{L}_i\Sigma_{iuc}$, 有 $(T_i^{-1}\bar{L}_i)\Sigma_{uc}\subseteq T_i^{-1}(\bar{L}_i\Sigma_{iuc})$; $\therefore \bar{L}\Sigma_{uc}\cap L(G)\subseteq\bigcap_{i=1}^{n}T_i^{-1}(\bar{L}_i\Sigma_{iuc})\cap T_i^{-1}L(G_i)$, 据 L_i 对 $L(G_i)$ 的可控性, 有 $\bar{L}\Sigma_{uc}\cap L(G)\subseteq\bigcap_{i=1}^{n}T_i^{-1}\bar{L}_i$, 又由 $\bar{L}_i$ 的闭性, 得 $\bar{L}\Sigma_{uc}\cap L(G)\subseteq\bar{L}$.

三、分 散 监 控

对 G 的每个子过程 G_i 相应设计监控器 $S_i(\phi_i)$, 则整体的闭合系统为 $\|_{i=1}^{n}S_i|G_i$, 记为 $\tilde{S}/G$, 并 $\tilde{K}=L(\tilde{S}/G)$, 显然 $L(S_i/G_i)$ 闭、且对 $L(G_i)$ 可控; $\tilde{L}(S/G)$ 也闭且对 $L(G)$ 可控. 设整体控制指标为 $L\subseteq\Sigma^*$, 并设 $L=\bar{L}$, $L(G)\cap L\neq\phi$, 记 $K=\sup C(L(G)\cap L)$, 则 K 闭; 虚设集中监控器 S 使 $L(S/G)=K$, 若 $\tilde{K}\subseteq L$, 则 $\tilde{K}\subseteq K$, 参见文献[1], 这表明分散监控的行为不会多于集中监控的行为.

定理 1. 存在 $S_i(1\leqslant i\leqslant n)$ 使 $\tilde{K}=K$ 的充要条件是 K 对 $\{\Sigma_1, \Sigma_2,\cdots,\Sigma_n\}$ 可分解.

证明. 必要性: $\because\tilde{K}=K$, $\therefore K=\|_{i=1}^{n}L(S_i/G_i)$, 故 K 可分解; 充分性: $\because K$ 可分解; 据命题 1, $K=\|_{i=1}^{n}T_i(K)$, 由命题 3, $T_i(K)\subseteq L(G_i)$ $(1\leqslant i\leqslant n)$, 且对 $L(G_i)$ 可控, 又 $\because L$ 闭, 则 K 闭, $T_i(K)$ 也闭, $\therefore$ 可设计 S_i 使 $L(S_i/G_i)=T_i(K)$, $\tilde{K}=\|_{i=1}^{n}L(S_i/G_i)$, 故 $\tilde{K}=K$.

用上述定理判别分散、集中监控的等效性, 需计算 K, $L(G)$, 而 G 的组合结构特征, 将导致计算不可行, 本文将给出更实用的判别条件.

定理 2. 设 $L\subseteq\Sigma^*$ 可分解, $L=\|_{i=1}^{n}L_i$, 且 $L_i=\bar{L}_i(1\leqslant i\leqslant n)$, 记

$$K_i=\sup C_i(L(G_i)\cap L_i),$$

则存在 $S_i(1\leqslant i\leqslant n)$ 使 $L(S_i/G_i)=K_i$, 且 $\tilde{K}=K$.

证明. $\because K_i$ 闭可控, 则存在 S_i, 使 $L(S_i/G_i)=K_i$, $\because\tilde{K}=\|_{i=1}^{n}K_i=\bigcap_{i=1}^{n}T_i^{-1}K_i\subseteq$

$\bigcap_{i=1}^{n} T_i^{-1}L_i$，$\therefore \widetilde{K}\subseteq L, \widetilde{K}\subseteq L(G)\cap L$. 由命题 4，$\widetilde{K}$ 可控，$\therefore \widetilde{K}\subseteq K$. $\because K$ 可控，据命题 3，T_iK 可控，且 $T_iK\subseteq L(G_i)$；又 $\because K\subseteq L, K\subseteq \bigcap_{i=1}^{n} T_i^{-1}L_i$，有 $T_i(K)\subseteq L_i$，$\therefore T_iK\subseteq L(G_i)\cap L_i$，$T_iK\subseteq K_i$，$K\subseteq T_i^{-1}K_i$，$K\subseteq \bigcap_{i=1}^{n} T_i^{-1}K_i$，故 $K\subseteq\widetilde{K}$，从而 $\widetilde{K}=K$.

若用文献[1]的基于局部目标分散监控方法对部分同步 DES 进行控制，则分散、集中监控等效. 另外对于集中的 G，若 $L(G)$ 可分解，则可用 $T_iL(G)$ 虚构 G_i，以沿用上述结论. 总之，对于闭可分解的 L，把 T_iL 作为局部控制指标设计 S_i，就将基于整体目标的分散监控转化为基于局部目标的分散监控. 不过若用 T_iK 作为局部控制指标，则不仅 $\widetilde{K}=K$，而且 $T_i\widetilde{K}=K_i$，这时整体目标与局部目标具有一致性. 而用 L 的闭分解语言集分配局部控制指标时，虽然保持 $\widetilde{K}=K$，但一般 $T_i\widetilde{K}\subseteq K_i$. 说明由于共享事件同步机制的制约，虽然 S_i 是局部最优监控器，但从整体看，局部子过程实际上并没有实现运行. 因为部分同步的 DES，其局部过程的行为，不仅由 S_i 决定，也与共享事件在关联子过程是否被禁止发生有关，因此用不同的闭分解语言集分配局部控制指标时，由 S_i 限定的局部过程形为虽然有所不同，但共享事件同步机制的限制作用却使 $\widetilde{K}=K$. 通常闭分解语言集越大，所需同步机制的补充作用越大.

命题 5. 若 $\Sigma_i\cap\Sigma_j=\phi(i\neq j)$，则 $T_i\widetilde{K}=K_i$.

四、协 调 分 案

若给定控制指标 $L\subseteq\Sigma^*$ 不可分解，定义 L 的一类可分解超语言为 $SCC(L)=\{H|H\supseteq L, H=\|_{i=1}^{n}T_i(H), H=\overline{H}$，且 $T_i(H)$ 对 $L(G_i)$ 可控$\}$，有

命题 6. $SCC(L)$ 存在最小元素，记为 $SCC(L)\downarrow$.

证明. $\forall, F, H\in SCC(L)$，$\because H$ 闭，$T_i(H)$ 闭；由命题 4，H 对 $L(G)$ 可控；据命题 2，$H\cap F$ 可分解，由闭语言的非冲突性[4]，$H\cap F$ 闭可控，再根据命题 3，$T_i(H\cap F)$ 对 $L(G_i)$ 可控，故 $SCC(L)$ 的元素对交运算封闭，$SCC(L)\downarrow$ 存在.

记 $L\cap L(G)$ 的最大闭可控子语言为 $K=\sup C(L\cap L(G))$.

定理 3. 存在局部监控器 S_i 使 $L(S_i/G_i)=T_i(SCC(L)\downarrow)$，并存在协调器使 $L(S_h/\|_{i=1}^{n}S_i/G_i)=K$.

证明. 由定理 2，$L(S_i/G_i)=T_i(SCC(L)\downarrow)$，由命题 4，$L(\|_{i=1}^{n}S_i/G_i)=SCC(L)\downarrow$，记为 $L(G_h)=SCC(L)\downarrow$，$\because L(G_h)\subseteq L(G)$，$\overline{K}\Sigma_{uc}\cap L(G_h)\subseteq\overline{K}\Sigma_{uc}\cap L(G)\subseteq\overline{K}$，$\therefore K$ 关于 G_h 可控，上述 S_h 存在.

采用这种分散——协调监控方案，不仅实现整体最优监控，也使协调器对分散 S_i 干预最小.

参 考 文 献

[1] Lin, F. and Wonham, W. M., Decentralized Supervisory Control of Discrete Event Systems, Int. J Infor. Sci., 44(1988), 199—224.

[2] Cieslak, R. et al., Supervisory Control of Discrete-event Processes with Partial Observations, *IEEE Trans.* AC-33(1988), 249--260.

[3] Rudie, K. and Wonham, W. M., Supervisory Control of Communicating Processes, System Control Group Report, Univ. Toronto, 1990, 6.

[4] Wonham, W. M and Ramadge, P. J., Modular Supervisory Control of Discrete-event Systems, *Math. Control Signals Systems*, 1(1988), 13—30.

DECENTRALIZED SUPERVISORY CONTROL OF DISCRETE EVENT SYSTEMS WITH PARTIAL SYNCHRONIZATION

YANG XIAOJUN ZHENG YINGPING

(*Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)

ABSTRACT

In this paper, the equivalent conditions between decentralized and centralized supervisory control of discrete event system with partial synchronization are studied, then the decentralized supervisory control can be realized according to natural separation of control specification. Moreover, the consistency of optimal realization between global and local goal is proposed, and two kinds of control functions for the closed-loop of decentralized supervisory control are also discussed. Finally, a coordination scheme is presented.

Key words: Discrete event systems; decentralized supervisory control; composition of automata; formal language; coordination.