第 25 卷第 1 期
2008 年 2 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 25 No. 1
Feb. 2008

文章编号: 1000−8152(2008)01−0014−07

离散事件系统的混合可靠分散监控

王 飞[1], 冯祖仁[1], 胡奇英[2]

(1. 西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 复旦大学 管理学院, 上海 200433)

摘要: 在研究基于混合信息的分散监控时, 由于部分监控器与部分控制器发生失败, 故提出了一种新型的混合可靠分散监控问题. 通过修改局部可控事件集与不可控事件集, 提出新的可控语言与可靠联合可观察语言定义, 进而得到混合可靠分散监控器存在的充分必要条件就是整体约束语言是可靠联合可观察, 可控闭的. 之后, 又通过研究整体约束与混合子约束之间的关系, 给出了判别混合可靠分散监控器存在的一个充分条件, 即混合子约束分别满足基于谓词的可观察, 可控性与基于语言的联合可观察, 可控封闭性.

关键词: 离散事件系统; 混合分散监控; 可控; 可靠联合可观察; 可靠控制

中图分类号: TP271.8 **文献标识码**: A

Mixed reliable decentralized supervisory control of discrete event systems

WANG Fei[1], FENG Zu-ren[1], HU Qi-ying[2]

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China;
2. School of Management, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: A new mixed reliable decentralized supervisory control problem is formulated to tackle the failures of partial supervisors and controllers in decentralized supervisory control with mixed information. By the modification of the sets of local controllable and uncontrollable events, new definitions of controllable and reliable co-observable languages are given. A necessary and sufficient condition that ensures the existences of mixed reliable decentralized supervisors is achieved by a central constraint which is closed, controllable and reliable co-observable language. Then, by showing the relation between the central constraint and mixed sub-constraints, a sufficient condition that mixed sub-constraints is satisfied by controllable and observable predicates and closed, controllable and co-observable languages is given to show the existences of mixed reliable decentralized supervisors.

Key words: discrete event systems; mixed decentralized supervisory control; controllability; reliable co-observability; reliable control

1 引言(Introduction)

监控理论是Ramadge和Wonham[1,2]提出用来控制离散事件系统(DES)的一个数学模型, 它通过监控器(控制器)来动态地控制可控事件的发生, 使闭环系统的行为达到系统的期望. 对于分布式系统, 如通讯系统, 制造系统等, 分散控制较集中控制更为适合. 而分散监控方法按照控制方式的不同, 主要有基于语言的事件反馈分散监控方法[3,4]与基于谓词的状态反馈分散监控方法[5,6], 但是当系统的描述信息表现为既有语言又有谓词的情形下, 则有必要讨论此混合分散监控问题, 文献 [7] 就是基于文献 [8] 与文献 [9] 提出的混合信息下的监控模型, 研究并解决了带有混合信息的分散监控问题, 并由此分别扩展而得了单独基于语言与基于谓词的分散监控的新判别条件. 随着分散监控的研究深入, 当多个局部监控器控制系统时, 部分监控器会发生失败的情形也引起了注意, 于是Takai与Ushio在分散监控中引入了可靠性(reliability)[10]的概念. 文献 [10] 首次提出的可靠分散监控的思想就是在当部分监控器失败的时候, 保证剩余的监控器仍然能够控制系统在规定的行为集中正常运行. 之后, Takai与Ushio在文献 [11] 中又完善了文献 [10] 的可靠分散监控的

收稿日期: 2006−03−07; 收修改稿日期: 2007−03−19.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60475023); 高等学校博士点基金资助项目(20050698032).

控制思想, 并且给出在受控行为不满足综合条件时, 利用正规(normal)语言代替联合可观察语言或者使用协调器(coordinator)等方法来解决问题. 文献 [12] 放松了文献 [11] 中的可靠分散监控问题, 并且另给了两种获得综合问题解的方法, 即综合适当的正规子语言与采用合适定义的完备分散监控器(fully decentralized supervisor). 在Yoo与Lafortune [13] 提出基于交与并两种运算混合的新的分散监控模型后, Takai与Ushio [14] 又一次将可靠性引入到这个新模型中, 并且取得了很好的结果, 在给定事件划分的条件下, 获得了可靠分散监控器存在的充分必要条件, 并给出事件划分的具体方法. 由于可靠分散监控本身暗含了监控器的非阻塞性, 但是由于某些实际应用中阻塞性的解决比较容易, 故在有些情况下, 会出现放松非阻塞的约束来简化控制综合的条件, 文献 [15] 就是基于此提出了弱化的可靠(weaker reliable)分散监控器的定义, 虽然其可能导致阻塞, 但却将约束条件放松到了非闭的标识约束.

本文在文献 [7] 提出的带有混合信息的分散监控模型中也考虑了部分子监控器与部分子控制器失败的情形, 显然文献 [7] 中提出的判别条件与综合方法已经不能适用于此时的情形, 故为了能更好的控制该系统, 本文引入了可靠性的概念, 讨论了即定可靠能力条件下的监控综合问题.

2　预备知识(Preliminaries)

DES监控理论是以自动机与形式语言为基础, 通过引入连续控制系统中的可控、可观察等性质, 用来控制一些由事件驱动的人造系统的一门控制理论. 通常此系统以自动机$G=(Q,\Sigma,\delta,q_0)$的生成语言$L(G)$来表示, 其可理解为系统可能产生的所有行为. 为了引入控制机制, Σ被分为两个互不相交的子集Σ_u,Σ_c, 并称$\Gamma=\{\gamma\in 2^{\Sigma}|\Sigma_u\subseteq\gamma\}$为控制模式(control pattern)集, 其中2^{Σ}是Σ的幂集. 称映射$f:L(G)\rightarrow\Gamma$为DES G上的监控器, 将f施加于DES上, 根据所观察的事件串, 形成Γ中的一个序列, 使系统按照预定的方式运行, 即可完成控制任务. 语言K的前缀闭包为$\overline{K}$, 如果$\overline{K}=K$, 则称K是闭的. 如果语言K满足$\overline{K}\Sigma_u\bigcap L(G)\subseteq\overline{K}$, 则称$K$是可控的. 如DES是基于事件部分可观察的, 其可观察函数记为$M:\Sigma\rightarrow\Sigma_o\bigcup\{\varepsilon\}$, 其中$\Sigma_o$为可观察事件集. 如由$s,s'\in K,\sigma\in\Sigma_c$, $s\sigma\in K,s'\sigma\in L(G),M(s)=M(s')$, 可得$s'\sigma\in K$, 则称$K$是$(\Sigma_c,M)$–可观察的.

称状态子集为谓词. 对于谓词P, 引入谓词变换$wlp_\sigma(P)$: $wlp_\sigma(P)(q)=1$当且仅当$\delta(\sigma,q)\in P$或无定义. 如果记$\mathrm{Re}(G,P)$为在G中从初始状态q_0出发经由P所到达的状态所组成的集合, 则称满足$P\leqslant\mathrm{Re}(G,P)\wedge wlp_\sigma(P)(\sigma\in\Sigma_u)$的$P$为可控谓词. 而称映射$g:Q\rightarrow\Gamma$为DES G的控制器, 其控制方式类似于监控器. 如DES是基于状态部分可观察的, 其可观察函数记为$h:Q\rightarrow Y$, 其中Y为状态所能观察到的符号集, 对于谓词P如有$P\geqslant h^{-1}(h(sp_\sigma(P)\wedge P))\wedge sp_\sigma(P),\sigma\in\Sigma_c$, 则称$P$是$(\Sigma_c,h)$–可观察的, 其中$sp_\sigma(P)$是在事件$\sigma$下从$P$中的状态出发所到达的状态集合, 其被称为$P$在$\sigma$下的最强后置条件(strongest postcondition of P under σ).

对于谓词P, 称$Le(P)=\{s\in L(G)|\forall t\leqslant s,\delta(t,q_0)\in P\}$为$P$的合法语言, 显然$Le(P)$是闭的. 在$L(G)$上定义的等价关系[7] $h\delta:h\delta(s)=h\delta(s')\Leftrightarrow h(\delta(s))=h(\delta(s')),s,s'\in L(G)$. 对任意谓词$P$, 则$Le(P)$为$(\Sigma_c,h\delta)$–可观察[7]的当且仅当$q_1,q_2\in P,h(q_1)=h(q_2),\sigma\in\Sigma_c,\delta(\sigma,q_1)\in P,\delta(\sigma,q_2)!\Rightarrow\delta(\sigma,q_2)\in P$成立. 由谓词的可观察性知, P是(Σ_c,h)–可观察的当且仅当$Le(P)$是$(\Sigma_c,h\delta)$–可观察的.

以上的内容是熟知的, 也可参见文献 [16].

3　混合可靠分散监控的综合问题(Synthesis problem of mixed reliable decentralized supervisory control)

给定序列集$I_m=\{1,2,\cdots,m\},I_n=\{m+1,m+2,\cdots,m+n\}$, $\forall i\in I_m\bigcup I_n$, 利用可观察函数$M_i$, 相应子系统的可控事件与不可控事件为$\Sigma_{ic}=M_i(\Sigma_c),\Sigma_{iu}=M_i(\Sigma_u)$, 对于事件$\sigma$, 引入序列集记号$I_m(\sigma)=\{i\in I_m|\sigma\in\Sigma_{ic}\},I_n(\sigma)=\{i\in I_n|\sigma\in\Sigma_{ic}\}$.

混合可靠分散监控问题　当系统有m个局部监控器与n个局部控制器被综合时, 由于部分的监控器(设不超过$m-k_1$个, $1\leqslant k_1\leqslant m$)和部分的控制器(设不超过$n-k_2$个, $1\leqslant k_2\leqslant n$)失败, 则剩余的局部监控器(至少$k_1$个)和剩余的局部控制器(至少$k_2$个)仍然能够获得控制目标, 称这样的问题为混合的$(k_1,k_2)$–可靠分散监控问题. 并把这些剩余的监控器与控制器称作是(k_1,k_2)–可靠的.

为了引入可靠性, 下面修改并重新定义局部可控事件与局部不可控事件.

定义 1 [11]　$\forall i\in I_m\bigcup I_n$, 构造基于可靠性的局部可控事件集与不可控事件集如下:

$$\widetilde{\Sigma}^m_{ic}=\{\sigma\in\Sigma_{ic}||I_m(\sigma)|\geqslant m-k_1+1\},$$
$$\widetilde{\Sigma}^m_{iu}=\Sigma_i-\widetilde{\Sigma}^m_{ic}=\Sigma_{iu}\bigcup\{\sigma\in\Sigma_{ic}||I_m(\sigma)|\leqslant m-k_1\},$$
$$\widetilde{\Sigma}^n_{ic}=\{\sigma\in\Sigma_{ic}||I_n(\sigma)|\geqslant n-k_2+1\},$$
$$\widetilde{\Sigma}^n_{iu}=\Sigma_i-\widetilde{\Sigma}^n_{ic}=\Sigma_{iu}\bigcup\{\sigma\in\Sigma_{ic}||I_n(\sigma)|\leqslant n-k_2\}.$$

利用上面修改后的局部可控事件集与不可控事件集, 分别基于集合I_m, I_n构造如下集合.

定义 2 [11] 对于集合I_m, I_n, 给出如下的可控事件集与不可控事件集描述:

$$\begin{aligned}
&\widetilde{\Sigma}_{I_m c} = \bigcup_{i\in I_m} \widetilde{\Sigma}_{ic}^m = \\
&\{\sigma \in \bigcup_{i\in I_m} \Sigma_{ic} || I_m(\sigma)| \geqslant m - k_1 + 1\} = \\
&\{\sigma \in \Sigma_{I_m c} || I_m(\sigma)| \geqslant m - k_1 + 1\}, \\
&\widetilde{\Sigma}_{I_m u} = \Sigma_{I_m} - \widetilde{\Sigma}_{I_m c} = \\
&\Sigma_{I_m u} \bigcup \{\sigma \in \Sigma_{I_m c} || I_m(\sigma)| \leqslant m - k_1\}, \\
&\widetilde{\Sigma}_{I_n c} = \bigcup_{i\in I_n} \widetilde{\Sigma_{ic}^n} = \\
&\{\sigma \in \bigcup_{i\in I_n} \Sigma_{ic} || I_n(\sigma)| \geqslant n - k_2 + 1\} = \\
&\{\sigma \in \Sigma_{I_n c} || I_n(\sigma)| \geqslant n - k_2 + 1\}, \\
&\widetilde{\Sigma}_{I_n u} = \Sigma_{I_n} - \widetilde{\Sigma}_{I_n c} = \\
&\Sigma_{I_n u} \bigcup \{\sigma \in \Sigma_{I_n c} || I_n(\sigma)| \leqslant n - k_2\}.
\end{aligned}$$

其中记

$$\Sigma_{I_m c} = \bigcup_{i\in I_m} \Sigma_{ic}, \Sigma_{I_n c} = \bigcup_{i\in I_n} \Sigma_{ic},$$
$$\Sigma_{I_m u} = \bigcap_{i\in I_m} \Sigma_{iu}, \Sigma_{I_n u} = \bigcap_{i\in I_n} \Sigma_{iu}.$$

为了解决混合可靠分散监控问题, 引入基于可靠性的可控与可观察的定义.

定义 3 给定语言K, 如果满足$\overline{K}(\widetilde{\Sigma}_{I_m u} \bigcap \widetilde{\Sigma}_{I_n u}) \bigcap L(G) \subseteq \overline{K}$, 则称$K$是$(\widetilde{\Sigma}_{I_m u}, \widetilde{\Sigma}_{I_n u})$–可控的.

给定序列集合A, 如果满足$\overline{K}\Sigma_{Au} \bigcap L(G) \subseteq \overline{K}$, 则称$K$是$\Sigma_{Au}$–可控的[11], 显然当$\Sigma_{Au} = \Sigma_c$时, K是可控的[16].

为了研究系统的可靠性, 下面根据文献 [11] 中提出的可靠性概念, 将其引入文献 [7] 的n–联合可观察概念中, 于是如下概念被提出了.

定义 4 给定语言K, 设$s, s' \in K, \sigma \in \widetilde{\Sigma}_{I_m c} \bigcup \widetilde{\Sigma}_{I_n c}$, 如$K$满足如下3个条件:

1) 当$\sigma \in \widetilde{\Sigma}_{I_m c} \bigcap \widetilde{\Sigma}_{I_n c}$, 存在$A_{s,\sigma}^m \subseteq I_m, A_{s,\sigma}^n \subseteq I_n$且$|A_{s,\sigma}^m| \geqslant k_1, |A_{s,\sigma}^n| \geqslant k_2$, $\forall i \in A_{s,\sigma}^m, j \in A_{s,\sigma}^n$, 由$s\sigma \in K, s'\sigma \in L(G), M_i(s) = M_i(s'), h_j(\delta(s)) = h_j(\delta(s'))$可得到$s'\sigma \in K$.

2) 当$\sigma \in \widetilde{\Sigma}_{I_m c} - \widetilde{\Sigma}_{I_n c}$, 存在$A_{s,\sigma}^m \subseteq I_m$且$|A_{s,\sigma}^m| \geqslant k_1$, $\forall i \in A_{s,\sigma}^m$, 由$s\sigma \in K, s'\sigma \in L(G), M_i(s) = M_i(s')$可得到$s'\sigma \in K$.

3) 当$\sigma \in \widetilde{\Sigma}_{I_n c} - \widetilde{\Sigma}_{I_m c}$, 存在$A_{s,\sigma}^n \subseteq I_n$且$|A_{s,\sigma}^n| \geqslant k_2$, $\forall j \in A_{s,\sigma}^n$, 由$s\sigma \in K, s'\sigma \in L(G), h_j(\delta(s)) = h_j(\delta(s'))$可得到$s'\sigma \in K$.

则称K是$(\widetilde{\Sigma}_{I_m c}, \widetilde{\Sigma}_{I_n c}, \{f_i\}_{i\in I_m}, \{g_j\}_{j\in I_n}, k_1, k_2)$–可靠联合可观察的, 简记为$(k_1, k_2)$–可靠联合可观察的.

注 1 上述定义保证至少k_1个基于语言的可控事件或k_2个基于状态的可控事件满足文献 [7]中的定义2.

推广如上定义可得:

定义 5 当$n = 0$时, 如K满足定义4中的条件, 则称K是$(\widetilde{\Sigma}_{I_m c}, \{f_i\}_{i\in I_m}, k_1)$–可靠联合可观察的, 简记为$k_1$–可靠联合可观察的.

当$m=0$时, 如K满足定义4中的条件, 则称K是$(\widetilde{\Sigma}_{I_n c}, \{g_i\}_{j\in I_n}, k_2)$–可靠联合可观察的, 简记为$k_2$–可靠联合可观察的.

当$k_1 = m, k_2 = n$时, 如K仍满足定义4中的条件, 则称K是$(\Sigma_{I_m c}, \Sigma_{I_n c})$–联合可观察的.

由定义4与定义5显然可知, 文献 [11] 中的可靠联合可观察语言与文献 [7]中的n–联合可观察语言均为定义4的特例, 并且定义4还把文献 [11]中的可靠联合可观察概念给扩展到了状态反馈中(当$m = 0$时).

定义 6 给定序列集$A \subseteq I_m, B \subseteq I_n$, 系统$G$在监控器$\{f_i\}_{i\in A}$与控制器$\{g_j\}_{j\in B}$的监控下的闭环行为可利用如下递推公式得到:

· $\varepsilon \in L(\{\{f_i\}_{i\in A}, \{g_j\}_{j\in B}\}/G)$.

· $s\sigma \in L(\{\{f_i\}_{i\in A}, \{g_j\}_{j\in B}\}/G) \Leftrightarrow$
$s \in L(\{\{f_i\}_{i\in A}, \{g_j\}_{j\in B}\}/G), s\sigma \in L(G),$
$\sigma \in f_i(s), \sigma \in g_j(s), \forall i \in A, j \in B.$

基于定义3和定义4, 混合可靠分散监控的存在性问题可用如下定理解决.

定理 1 给定语言K, 则存在k_1–可靠监控器f_i与k_2–可靠控制器g_j使得$L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m}, \{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G) = K$的充分必要条件为$K$是$(\widetilde{\Sigma}_{I_m u}, \widetilde{\Sigma}_{I_n u})$–可控, (k_1, k_2)–可靠的联合可观察闭语言(其中$I'_m \subseteq I_m, I'_n \subseteq I_n, |I'_m| \geqslant k_1, |I'_n| \geqslant k_2$).

证 设存在k_1–可靠监控器f_i与k_2–可靠控制器g_j使得$L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m}, \{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G) = K$, 则$K$必是可控闭语言.

下证$(\widetilde{\Sigma}_{I_m u}, \widetilde{\Sigma}_{I_n u})$–可控.

设$\forall s \in K, \sigma \in \widetilde{\Sigma}_{I_m u} \bigcap \widetilde{\Sigma}_{I_n u}$使得$s\sigma \in L(G)$. 当$\sigma \in (\Sigma_{I_m u} \bigcap \widetilde{\Sigma}_{I_n u}) \bigcup (\widetilde{\Sigma}_{I_m u} \bigcap \Sigma_{I_n u}) \subseteq \Sigma_u$时, 由$K$是可控知$s\sigma \in K$. 当$\sigma \in \{\sigma \in \Sigma_{I_m c} || I_m(\sigma)| \leqslant m - k_1\}$时, 则$\exists I''_m \subseteq I_m, |I''_m| \geqslant k_1$使得$I''_m \bigcap I_m(\sigma) = \phi$, 故$\forall i \in I''_m$均有$\sigma \in f_i(s)$. 同理, 当$\sigma \in \{\sigma \in \Sigma_{I_n c} || I_n(\sigma)| \leqslant n - k_2\}$时, $\exists I''_n \subseteq I_n, |I''_n| \geqslant k_2$使得$I''_n \bigcap I_n(\sigma) = \phi$, 故$\forall j \in I''_n$均有$\sigma \in g_j(s)$. 故当$\sigma \in \{\sigma \in \Sigma_{I_m c} || I_m(\sigma)| \leqslant m - k_1\} \bigcap \{\sigma \in \Sigma_{I_n c} || I_n(\sigma)| \leqslant n - k_2\}$时, 有$\sigma \in f_i(s), \sigma \in g_j(s)$, 再

由$s \in K = L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m},\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G)$及定义6可知$s\sigma \in L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m},\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G) = K$. 故$K$是$(\widetilde{\Sigma}_{I_mu},\widetilde{\Sigma}_{I_nu})$–可控的.

下证(k_1,k_2)可靠的联合可观察.

$\forall s,s'\in K$, 取$\sigma\in\widetilde{\Sigma}_{I_mc}\bigcup\widetilde{\Sigma}_{I_nc}$, 当$\sigma\in\widetilde{\Sigma}_{I_mc}\bigcap\widetilde{\Sigma}_{I_nc}$, $\exists A^m_{s,\sigma}=I'_m\subseteq I_m, A^n_{s,\sigma}=I'_n\subseteq I_n$且$|A^m_{s,\sigma}|\geqslant k_1, |A^n_{s,\sigma}|\geqslant k_2, \forall i\in A^m_{s,\sigma}, j\in A^n_{s,\sigma}$, 再设$s\sigma\in K$, $s'\sigma\in L(G), M_i(s)=M_i(s'), h_j(\delta(s))=h_j(\delta(s'))$, 则可得$f_i(s)=f_i(s'), g_j(\delta(s))=g_j(\delta(s'))$. 由$s\sigma\in K = L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m},\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G)$知$\sigma\in f_i(s)=f_i(s'),\sigma\in g_j(\delta(s))=g_j(\delta(s')), i\in I'_m, j\in I'_n$. 而又已知$s'\in K=L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m},\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G), s'\sigma \in L(G)$, 再由$L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m},\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G)$的定义可得$s'\sigma\in L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m},\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G)=K$. 当$\sigma\in\widetilde{\Sigma}_{I_mc}-\widetilde{\Sigma}_{I_nc}$, 取$A^m_{s,\sigma}=I'_m\subseteq I_m$, $\forall i\in A^m_{s,\sigma}$, 设$s\sigma\in K=L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m},\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G), s'\sigma\in L(G), M_i(s)=M_i(s')$, 则$\sigma\in f_i(s)=f_i(s'), i\in I'_m$. 再由$\sigma\overline{\in}\widetilde{\Sigma}_{I_nc}$, 及可控性的证明知, 当$\sigma\in\Sigma_{I_nu}\bigcup\{\sigma\in\Sigma_{I_nc}||I_n(\sigma)|\leqslant n-k_2\}$时, 则$\exists I'_n\subseteq I_n$, $|I'_n|\geqslant k_2$有$\sigma\in g_j(\delta_j(s)), j\in I'_n$. 再由$L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m},\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G)$的定义可得$s'\sigma\in L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m},\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G)=K$. 同理可知, 当$\sigma\in\widetilde{\Sigma}_{I_nc}-\widetilde{\Sigma}_{I_mc}$时, 也有$s'\sigma\in L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m},\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G)=K$. 故$K$是$(k_1,k_2)$–可靠的联合可观察语言.

(充分性)

记

$$E_M(s)=\{s'|\exists i\in I_m, M_i(s')=M_i(s)\},$$
$$E_h(s)=\{s'|\exists j\in I_n, h_j(\delta(s'))=h_j(\delta(s))\},$$
$$\forall I'_m\subseteq I_m, I'_n\subseteq I_n, |I'm|\geqslant k_1, |I'n|\geqslant k_2,$$

构造监控器与控制器如下:

$$f_i(s)=$$
$$\Sigma_{iu}\bigcup\{\sigma\in\Sigma_{ic}|\exists s'\in E_M(s)\bigcap E_h(s),$$
$$M_i(s)=M_i(s'), s'\sigma\in K\}, i\in I'_m.$$
$$g_j(\delta(s))=$$
$$\Sigma_{ju}\bigcup\{\sigma\in\Sigma_{jc}|\exists s'\in E_M(s)\bigcap E_h(s),$$
$$h_j(\delta(s))=h_j(\delta(s')), s'\sigma\in K\}, j\in I'_n.$$

已知K是$(\widetilde{\Sigma}_{I_mu},\widetilde{\Sigma}_{I_nu})$–可控, (k_1,k_2)–可靠的联合可观察语言, 下证$L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m},\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G)=K$.

· 显然$\varepsilon\in L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m},\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G)\bigcap K$成立.

· 设$s\in L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m},\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G)\bigcap K$, 取$\sigma\in\Sigma$, 下证$s\sigma\in L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m},\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G)\Leftrightarrow s\sigma\in K$.

当$s\sigma\in L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m},\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G)$时, 则$s\sigma\in L(G), \sigma\in f_i(s), \sigma\in g_j(\delta(s)), i\in I'_m, j\in I'_n$.

当$\sigma\in\widetilde{\Sigma}_{I_mu}\bigcap\widetilde{\Sigma}_{I_nu}$时, 由$(\widetilde{\Sigma}_{I_mu},\widetilde{\Sigma}_{I_nu})$–可控及封闭性知$s\sigma\in K$.

当$\sigma\in\widetilde{\Sigma}_{I_mc}\bigcap\widetilde{\Sigma}_{I_nc}$时, 由$\sigma\in f_i(s), \sigma\in g_j(\delta(s))$知$\exists s'$使得$M_i(s)=M_i(s'), h_j(\delta(s))=h_j(\delta(s')), s'\sigma\in K, i\in I'_m, j\in I'_n$, 取$A^m_{s,\sigma}=I'_m, A^n_{s,\sigma}=I'_n$, 再由$K$是$(k_1,k_2)$–可靠的联合可观察语言可知, $s\sigma\in K$.

当$\sigma\in\widetilde{\Sigma}_{I_mc}-\widetilde{\Sigma}_{I_nc}$时, 由$\sigma\in f_i(s)$可知$\exists s'$使得$M_i(s)=M_i(s'), s'\sigma\in K, i\in I'_m, j\in I'_n$, 取$A^m_{s,\sigma}=I'_m$, 则由$K$是$(k_1,k_2)$–可靠的联合可观察语言可知, $s\sigma\in K$. 同理, 当$\sigma\in\widetilde{\Sigma}_{I_nc}-\widetilde{\Sigma}_{I_mc}$时, 有$s\sigma\in K$. 故$L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m},\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G)\subseteq K$.

当$s\sigma\in K\subseteq L(G)$时, 考虑如下4种情形.

当$\sigma\in\widetilde{\Sigma}_{I_mu}\bigcap\widetilde{\Sigma}_{I_nu}$时, 由必要性中$(\widetilde{\Sigma}_{I_mu},\widetilde{\Sigma}_{I_nu})$–可控的证明知, 必有$s\sigma\in L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m},\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G)$成立.

当$\sigma\in\widetilde{\Sigma}_{I_mc}\bigcap\widetilde{\Sigma}_{I_nc}$时, 由$K$是$(k_1,k_2)$–可靠的联合可观察语言可知, $\exists s'\in K$, 当取$A^m_{s,\sigma}=I'_m$, $A^n_{s,\sigma}=I'_n$时, $\forall i\in A^m_{s,\sigma}, i\in A^m_{s,\sigma}$, 由$M_i(s)=M_i(s'), h_j(\delta(s))=h_j(\delta(s'))$可获得$s'\sigma\in K$, 根据$f_i, g_j$的构造可知, $\sigma\in f_i(s)=f'_i(s'), \sigma\in g_j(\delta(s))=g_j(\delta(s'))$. 故$s\sigma\in L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m},\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G)$.

当$\sigma\in\widetilde{\Sigma}_{I_mc}-\widetilde{\Sigma}_{I_nc}$时, 由$K$是$(k_1,k_2)$–可靠的联合可观察语言可知, $\exists s'\in K$, 当取$A^m_{s,\sigma}=I'_m$时, $\forall i\in A^m_{s,\sigma}$有$M_i(s)=M_i(s')$可获得$s'\sigma\in K$, 再由$f_i$的构造可知, $\sigma\in f_i(s)=f'_i(s')$. 而$\sigma\overline{\in}\widetilde{\Sigma}_{I_nc}$, 则$\sigma\in\widetilde{\Sigma}_{I_nu}$, 再由必要性中$(\widetilde{\Sigma}_{I_mu},\widetilde{\Sigma}_{I_nu})$–可控的证明知, $\exists I'_n\subseteq I_n, |I'_n|\geqslant k_1$使得$\forall j\in I'_n$, 有$\sigma\in g_j(\delta(s))$. 故由$L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m},\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G)$的定义可知$s\sigma\in L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m},\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G)$. 同理可知, 当$\sigma\in\widetilde{\Sigma}_{I_nc}-\widetilde{\Sigma}_{I_mc}$时, 有$s\sigma\in L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m},\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G)$. 综上可知

$$K\subseteq L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m},\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G).$$

证毕.

由以上定理, 显然可获得如下结论.

推论 1 给定非空语言K, 则存在k_1–可靠的监控器f_i使得$L(\{\{f_i\}_{i\in I'_m}\}/G)=K$的充分必要条件为$K$是$\widetilde{\Sigma}_{I_mu}$–可控, k_1–可靠的联合可观察闭语言(其中$I'_m\subseteq I_m, |I'_m|\geqslant k_1$).

推论 2 给定非空语言K, 则存在k_2–可靠的控制器g_j使得$L(\{\{g_j\}_{j\in I'_n}\}/G)=K$的充分必要条件为$K$是$\widetilde{\Sigma}_{I_nu}$–可控, k_2–可靠的联合可观察闭语言(其中$I'_n\subseteq I_n, |I'_n|\geqslant k_2$).

当没有监控器与控制器失败时, 即$k_1=m, k_2=n$, 则所得如下推论与文献 [7]中定理3相似.

推论 3 给定语言K, 则存在监控器$f_i(i=1,2,\cdots,m)$与控制器$g_j(j=m+1,m+2,\cdots,m+n)$, 使得$L(\{\{f_i\}_{i\in I_m},\{g_j\}_{j\in I_n}\}/G)=K$的充分必要条件为$K$是一$(\Sigma_{I_mc},\Sigma_{I_nc})$–联合可观察的, $(\Sigma_{I_mu},\Sigma_{I_nu})$–可控闭语言.

4 基于混合子约束的可靠分散监控(Reliable decentralized supervisory control based on mixed sub-constraints)

当系统用来描述系统约束的不是整体约束, 而是混合子约束的时候, 则有必要寻找一种可以用来判别可靠混合分散监控器存在, 并且与整体约束相等价的判别条件. 记整体约束为K, 混合子约束为$K_1,K_2,\cdots,K_m,P_1,P_2,\cdots,P_n$, 并且满足等式$K=K_1\bigcap K_2\bigcap\cdots\bigcap K_m\bigcap Le(P_1)\bigcap Le(P_2)\bigcap\cdots\bigcap Le(P_n)$. 为了寻找在混合局部约束条件下的判别条件, 根据文献 [16] 中的相应的概念, 先引入如下一系列定义.

定义 7 给定语言K, $\forall s,s'\in K,i\in A,\sigma\in\Sigma_{Ac}$, 如有$s\sigma\in K,M_i(s)=M_i(s')$可得$s'\sigma\in K$, 则称语言$K$是$(\Sigma_{Ac},\{M_i\}_{i\in A})$–联合可观察的.

定义 8 给定谓词P, 如果有

$$P\leqslant \mathrm{Re}(G,P)\wedge wlp_\sigma(P)(\sigma\in\Sigma_{Au}),$$

则称P是Σ_{Au}–可控谓词.

定义 9 给定谓词P, 如有

$$P\geqslant h_j^{-1}(h_j(sp_\sigma(P)\wedge P))\wedge sp_\sigma(P),\sigma\in\Sigma_{Ac},$$

则称P是$(\Sigma_{Ac},\{h_j\}_{j\in A})$–可观察谓词.

注 2 显然当$\Sigma_{Au}=\Sigma_u,\Sigma_{Ac}=\Sigma_c$时, 则上述定义均为文献 [16] 中的经典定义(也可参见预备知识).

由文献 [7] 知, 当谓词P是(Σ_c,h)–可观察, 可控谓词, 则$Le(P)$是(Σ_c,h)–可观察, 可控闭语言. 显然有如下定理成立.

定理 2 当谓词P是$(\Sigma_{Ac},\{h_j\}_{j\in A})$–可观察, Σ_{Au}–可控谓词, 则$Le(P)$是$(\Sigma_{Ac},\{h_j\}_{j\in A})$–可观察, Σ_{Au}–可控闭语言.

定理 3 当谓词$P=P_1\bigcap P_2\bigcap\cdots\bigcap P_n$, 则$Le(P)=Le(P_1)\bigcap Le(P_2)\bigcap\cdots\bigcap Le(P_n)$成立.

证 先证$Le(P)\subseteq Le(P_1)\bigcap Le(P_2)\bigcap\cdots\bigcap Le(P_n)$.

$\forall s\in Le(P)$, 则$\forall t\leqslant s,\delta(t,q_0)\in P=P_1\bigcap P_2\bigcap\cdots\bigcap P_n$, 即$\forall i\in\{1,2,\cdots,n\},\forall t\leqslant s,\delta(t,q_0)\in P_i$, 故$s\in Le(P_i)$, 即

$$Le(P)\subseteq Le(P_1)\bigcap Le(P_2)\bigcap\cdots\bigcap Le(P_n).$$

再证$Le(P_1)\bigcap Le(P_2)\bigcap\cdots\bigcap Le(P_n)\subseteq Le(P)$.

$\forall s\in Le(P_1)\bigcap Le(P_2)\bigcap\cdots\bigcap Le(P_n)$, 则$\forall i\in\{1,2,\cdots,n\},s\in Le(P_i)$, 有$Le(P_i)$的定义可知$\forall t\leqslant s,\delta(t,q_0)\in P_i$, 由$i$的任意性, 知$\forall t\leqslant s,\delta(t,q_0)\in P_1\bigcap P_2\bigcap\cdots\bigcap P_n=P$, 故$s\in Le(P)$.

综上可知,

$$Le(P)=Le(P_1)\bigcap Le(P_2)\bigcap\cdots\bigcap Le(P_n).$$

证毕.

当系统的约束为混合子约束时, 则下述定理描述了子约束与整体约束之间的关系.

定理 4 对于给定的混合约束条件$K_1,K_2,\cdots,K_m,P_1,P_2,\cdots,P_n$, $\forall A\subseteq I_m,B\subseteq I_n,|A|\geqslant k_1,|B|\geqslant k_2$, 如果$K_i(i\in I_m)$是$(\Sigma_{Ac},\{M_i\}_{i\in A})$–联合可观察, Σ_{Au}–可控闭语言, $P_j(j\in I_n)$是$(\Sigma_{Bc},\{h_j\}_{j\in B})$–可观察, Σ_{Bu}–可控谓词, 则$K=K_1\bigcap K_2\bigcap\cdots\bigcap K_m\bigcap Le(P_1)\bigcap Le(P_2)\bigcap\cdots\bigcap Le(P_n)$是$(\widetilde{\Sigma}_{I_mu},\widetilde{\Sigma}_{I_nu})$–可控, (k_1,k_2)–可靠的联合可观察闭语言.

证 由$\forall i\subseteq I_m,K_i$是闭的, 知$\bigcap\limits_{i\in I_m}K_i$是闭的, 又由谓词的合法语言均是闭的可知$\bigcap\limits_{j\in I_n}Le(P_j)$是闭的, 故$K$也是闭的.

($(\widetilde{\Sigma}_{I_mu},\widetilde{\Sigma}_{I_nu})$–可控).

$\forall s\in K,\sigma\in\widetilde{\Sigma}_{I_mu}\bigcap\widetilde{\Sigma}_{I_nu},s\sigma\in L(G)$, 下证$s\sigma\in K$. 由$K\subseteq K_i,i\in I_m,K\subseteq Le(P_j),j\in I_n$知$s\in K_i,s\in Le(P_i)$.

当$\sigma\in\Sigma_{I_mu}\bigcap\Sigma_{I_nu}$时, 显然$\Sigma_{I_mu}\subseteq\Sigma_{Au}$, $\Sigma_{I_nu}\subseteq\Sigma_{Bu}$, 再由$K_i,P_j(i\in I_m,j\in I_n)$分别是关于$\Sigma_{Au},\Sigma_{Bu}$是可控的, 则知$s\sigma\in K_i,s\sigma\in Le(P_j)$, 故$s\sigma\in K$.

当$\sigma\in(\widetilde{\Sigma}_{I_mu}-\Sigma_{I_mu})\bigcap\Sigma_{I_nu}$时, 由前知$\forall j\in I_n$有$s\sigma\in Le(P_j)$. 而由$\sigma\in(\widetilde{\Sigma}_{I_mu}-\Sigma_{I_mu})$可知$\exists A\bigcap I_m(\sigma)=\phi$, 故$\sigma\in\Sigma_{Au}$, 再由$K_i(i\in I_m)$分别是关于$\Sigma_{Au}$–可控的, 知$s\sigma\in K_i$, 故$s\sigma\in K$成立.

同理, 当$\sigma\in(\Sigma_{I_mu}\bigcap\widetilde{\Sigma}_{I_nu}-\Sigma_{I_nu})$时, 有$s\sigma\in K$成立.

当$\sigma\in(\widetilde{\Sigma}_{I_mu}-\Sigma_{I_mu})\bigcap(\widetilde{\Sigma}_{I_nu}-\Sigma_{I_nu})$时, 由前知对于$\sigma\in(\widetilde{\Sigma}_{I_mu}-\Sigma_{I_mu})$可知$\exists A\bigcap I_m(\sigma)=\phi$, 故$\sigma\in\Sigma_{Au}$, 再由$K_i(i\in I_m)$分别是关于$\Sigma_{Au}$–可控的, 知$s\sigma\in K_i$, 类似的, 对于$\sigma\in(\widetilde{\Sigma}_{I_nu}-\Sigma_{I_nu})$可知$\exists B\bigcap I_n(\sigma)=\phi$, 故$\sigma\in\Sigma_{Bu}$, 再由$P_j(j\in I_n)$分别是关于$\Sigma_{Bu}$–可控的, 知$s\sigma\in Le(P_j)$, 故$s\sigma\in K$成立.

((k_1,k_2)–可靠的联合可观察).

$\forall s,s'\in K$, 则$s,s'\in K_i,i\in I_m,s,s'\in Le(P_j),j\in I_n$.

当$\sigma\in\widetilde{\Sigma}_{I_mc}\bigcap\widetilde{\Sigma}_{I_nc}$, 取$A=A^m_{s,\sigma}\subseteq I_m,B=$

$A^n_{s,\sigma} \subseteq I_n$且$\forall i \in A^m_{s,\sigma}, j \in A^n_{s,\sigma}$, 设$s\sigma \in K, s'\sigma \in L(G), M_i(s) = M_i(s'), h_j(\delta(s)) = h_j(\delta(s'))$, 则$s\sigma \in K_i, s\sigma \in Le(P_j)$, 因为$K_i$关于$\Sigma_{Ac}$是可观察的, 则$s'\sigma \in K_i$, 再由$P_j$是$\Sigma_{Bc}$–可观察的, 知$Le(P_j)$是$(\Sigma_{Bc}, h\delta)$–可观察的, 故$s'\sigma \in Le(P_j)$, 综上及$K$的构造可知$s'\sigma \in K$.

当$\sigma \in \widetilde{\Sigma}_{I_mc} - \widetilde{\Sigma}_{I_nc}$, 取$A = A^m_{s,\sigma} \subseteq I_m, \forall i \in A^m_{s,\sigma}$, 设$s\sigma \in K, s'\sigma \in L(G), M_i(s) = M_i(s')$, 则$s\sigma \in K_i, s\sigma \in Le(P_j)$. 再由$K_i$是$\Sigma_{Au}$–可观察的知$s'\sigma \in K_i$. 由$\sigma \overline{\in} \widetilde{\Sigma}_{I_nc}$, 知$\sigma \in \widetilde{\Sigma}_{I_nu}$, 当$\sigma \in \Sigma_{I_nu} \subseteq \Sigma_{Bu}$时, 由$s' \in Le(P_j)$及$Le(P_j)$是$\Sigma_{Bu}$–可控的(由$P_j$是$\Sigma_{Bu}$–可控)知$s'\sigma \in Le(P_j)$. 当$\sigma \in \widetilde{\Sigma}_{I_nu} - \Sigma_{I_nu}$时, 则$\exists B \subseteq I_n$, 使得$B \bigcap I_n(\sigma) = \phi$, 即$\sigma \in \Sigma_{Bu}$, 再由$P_j$的$\Sigma_{Bu}$–可控及$s' \in Le(P_j)$知, $s'\sigma \in Le(P_j)$成立. 故$s'\sigma \in K$.

同理可知, 当$\sigma \in \widetilde{\Sigma}_{I_nc} - \widetilde{\Sigma}_{I_mc}$时, 也有$s'\sigma \in K$. 综上可知, K是(k_1, k_2)–可靠的联合可观察语言.

证毕.

由前定理1与定理4, 可得如下定理.

定理 5 给定系统G, 任取$A \subseteq I_m, B \subseteq I_n$, 并且有$|A| \geqslant k_1, |B| \geqslant k_2$, 设子语言$K_1, K_2, \cdots, K_m$是$(\Sigma_{Ac}, \{M_i\}_{i\in A})$–联合可观察, Σ_{Au}–可控闭语言, 子谓词$P_1, P_2, \cdots, P_n$是$(\Sigma_{Bc}, \{h_j\}_{j\in B})$–可观察, Σ_{Bu}–可控谓词, 则存在k_1–可靠的监控器f_i与k_2–可靠的控制器g_j 使得

$$L(\{\{f_i\}_{i\in A}, \{g_j\}_{j\in B}\}/G) = K_1 \bigcap K_2 \bigcap \cdots \bigcap K_m \bigcap Le(P_1) \bigcap Le(P_2) \bigcap \cdots \bigcap Le(P_n) = K.$$

由定理4知$K_i (i \in I_m)$是$(\Sigma_{Ac}, \{M_i\}_{i\in A})$–联合可观察, Σ_{Au}–可控闭语言与$P_j (j \in I_n)$是$(\Sigma_{Bc}, \{h_j\}_{j\in B})$–可观察, Σ_{Bu}–可控谓词生成的语言必是$(\widetilde{\Sigma}_{I_mu}, \widetilde{\Sigma}_{I_nu})$–可控, (k_1, k_2)–可靠的联合可观察闭的, 故定理5中的判别条件强于定理4的判别条件.

当k_1, k_2, m, n取特殊值时, 显然有如下推论.

推论 4 给定系统G(令$n = 0$), 任取$A \subseteq I_m$, 并且有$|A| \geqslant k_1$, 设子语言$K_1, K_2, \cdots, K_m$ 是$(\Sigma_{Ac}, \{M_i\}_{i\in A})$–联合可观察, Σ_{Au}–可控闭语言, 则存在k_1–可靠监控器f_i使得

$$L(\{\{f_i\}_{i\in A}\}/G) = K_1 \bigcap K_2 \bigcap \cdots \bigcap K_m.$$

推论 5 给定系统G(令$m = 0$), 任取$B \subseteq I_n$, 并且有$|B| \geqslant k_2$, 设子谓词$P_1, P_2, \cdots, P_n$是$(\Sigma_{Bc}, \{h_j\}_{j\in B})$–可观察, Σ_{Bu}–可控谓词, 则存在与k_2–可靠控制器g_j 使得

$$L(\{\{g_j\}_{j\in B}\}/G) = Le(P_1) \bigcap Le(P_2) \bigcap \cdots \bigcap Le(P_n).$$

推论 6 给定系统G(令$m = k_1, n = k_2$), 设子语言$K_1, K_2, \cdots, K_m$ 是$(\Sigma_{I_mc}, \{M_i\}_{i\in I_m})$–联合可观察, Σ_{I_mu}–可控闭语言, 子谓词$P_1, P_2, \cdots, P_n$是$(\Sigma_{I_nc}, \{h_j\}_{j\in I_n})$–可观察, Σ_{I_nu}–可控谓词, 则监控器f_i与控制器g_j 使得

$$L(\{\{f_i\}_{i\in I_m}, \{g_j\}_{j\in I_n}\}/G) = K_1 \bigcap K_2 \bigcap \cdots \bigcap K_m \bigcap Le(P_1) \bigcap Le(P_2) \bigcap \cdots \bigcap Le(P_n) = K.$$

5 例子(Example)

给定一个系统G如图1所示, 设G中事件集为$\Sigma = \{a, b, c, d, e\}$, 可控事件集为$\Sigma_c = \{a, b, d, e\}$, 不可控事件集为$\Sigma_u = \{c\}$, 设

$$m = n = 2(m + n = 4), \Sigma_1 = \{a, b, c\}, Q_1 = Q, \Sigma_{1c} = \{a, b\}, \Sigma_{1u} = \{c\}; \Sigma_2 = \{a, d\}, Q_2 = Q, \Sigma_{2c} = \{a, d\}, \Sigma_{1u} = \phi; \Sigma_3 = \Sigma, Q_3 = \{A, B, C, E, H\}, \Sigma_{3c} = \Sigma_c, \Sigma_{3u} = \Sigma_u; \Sigma_4 = \Sigma, Q_4 = \{A, B, E, F, G, H\}, \Sigma_{4c} = \Sigma_c, \Sigma_{4u} = \Sigma_u.$$

目标行为$K = \overline{a + b + dc + ec}$, 利用前述的方法综合一个$(1, 1)$–可靠的分散监控器. 修改后的事件集为

$$\widetilde{\Sigma}_{I_mc} = \{a\}, \widetilde{\Sigma}_{I_mu} = \{b, c, d\};$$
$$\widetilde{\Sigma}_{I_nc} = \{a, b, d, e\}, \widetilde{\Sigma}_{I_nu} = \{c\}.$$

易证K是$(\widetilde{\Sigma}_{I_mu}, \widetilde{\Sigma}_{I_nu})$–可控, $(1, 1)$–可靠的联合可观察闭语言. 由定理1中充分性的分散监控器的构造方法可知其包含两个子监控器与两个子控制器, 其构造如下:

$$f_1(s) = \begin{cases} \{a, b, c\}, s \in \{\varepsilon\}, \\ \{c\}, \quad 其他, \end{cases}$$

$$f_2(s) = \begin{cases} \{a, d\}, s \in \{\varepsilon\}, \\ \phi, \quad 其他, \end{cases}$$

$$g_3(q) = \begin{cases} \{a, b, c, d, e\}, q \in \{A\}, \\ \{c\}, \quad 其他, \end{cases}$$

$$g_4(q) = g_3(q),$$

则分散监控器$\{f_1, f_2, g_3, g_4\}$是$(1, 1)$–可靠的, 并且其可以满足$L(\{f_1, f_2, g_3, g_4\}/G) = K$.

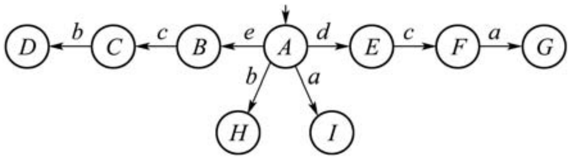

图 1 系统G

Fig. 1 System G

6 结论(Conclusions)

本文主要讨论了混合分散监控的可靠性问题. 通过修改正常的可控事件集与不可控事件集, 然后基于修改后的形式, 重新定义了有关可控, 可观察语言, 并通过引入(k_1, k_2)–可靠联合可观察语言, 给出了混合可靠分散监控器存在的充分必要条件是保证目标语言满足$(\widetilde{\Sigma}_{I_m u}, \widetilde{\Sigma}_{I_n u})$–可控, (k_1, k_2)–可靠的联合可观察闭的条件. 最后又通过讨论整体约束条件与子约束条件的等价关系, 获得了基于子约束条件判别混合可靠分散监控器存在的一个充分条件.

参考文献(References):

[1] RAMADGE P J, WONHAM W M. Supervisory control of a class of discrete event processes[J]. *SIAM J of Control and Optimization*, 1987, 25(1): 206 – 230.

[2] WONHAM W M, RAMADGE P J. On the supremal controllable sublanguage of a given language[J]. *SIAM J of Control and Optimization*, 1987, 25(3): 637 – 659.

[3] LIN F, WONHAM W M. Decentralized supervisory control of discrete-event systems[J]. *Information Sciences*, 1988, 44(3): 199 – 224.

[4] RUDIE K, WONHAM W M. Think globally, act locally: decentralized supervisory control[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1992, 37(11): 1692 – 1708.

[5] TAKAI S, KODAMA S, USHIO T. Decentralized state feedback control of discrete event systems[J]. *Systems & Control Letters*, 1994, 22(5): 369 – 375.

[6] TAKAI S, USHIO T, KODAMA S. The infimal controllable and N-observable superpredicate of a given predicate[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1995, 40(7): 1249 – 1253.

[7] 王飞, 胡奇英. 离散事件系统的混合分散监控[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(2): 277 – 280.
(WANG Fei, HU Qiying. Mixed decentralized supervisory control of discrete event systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(2): 277 – 280.)

[8] 王飞, 胡奇英. 事件反馈与状态反馈的混合模监控[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 901 – 906.
(WANG Fei, HU Qiying. Mixed modular supervisory control for event feedback and state feedback[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(6): 901 – 906.)

[9] 王飞, 胡奇英. 基于事件非阻塞与基于状态非阻塞的等价性[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(3): 479 – 482.
(WANG Fei, HU Qiying. Equivalence of nonblockings for event-based and state-based[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(3): 479 – 482.)

[10] TAKAI S, USHIO T. Reliable decentralized supervisory control of discrete event systems[C] // *Proc of the 38th IEEE Conf on Decision and Control*. Phoenix, Arizona, USA: IEEE Press, 1999, 3: 2224 – 2229.

[11] TAKAI S, USHIO T. Reliable decentralized supervisory control of discrete event systems[J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 2000, 30(5): 661 – 667.

[12] TAKAI S, USHIO T. Synthesis of reliable decentralized supervisor for discrete event systems[J]. *IEICE T Fundamentals*, 2000, E83-A(11): 2212 – 2218.

[13] YOO T S, LASFORTUNE S. A general architecture for decentralized supervisory control of discrete-event systems[J]. *Discrete Event Dynamic Systems:Theory and Applications* , 2002, 12(3): 335 – 377.

[14] TAKAI S, USHIO T. Reliable decentralized supervisory control of discrete event systems with conjunctive and disjunctive fusion rules[J]. *IEICE T Fundamentals*, 2003, E86-A(11): 2731 – 2738.

[15] TAKAI S, USHIO T. Reliable decentralized supervisory control of discrete event systems with marked languages specifications[C] // *IEEE Int Conf on Systems, Man, and Cybernetics*. Nashville, Tennessee, USA: IEEE Press, 2000, 3: 2180 – 2185.

[16] 徐国华, 胡奇英. 离散事件动态系统的监控理论[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1994.
(XU Guohua, HU Qiying. *Method of Supervisory Control for Discrete Event Dynamical Systmes*[M]. Zhengzhou: Henan Press of Science & Technology, 1994.)

作者简介:

王 飞 (1977—), 男, 西安交通大学控制科学与工程专业博士研究生, 主要研究方向为离散事件系统的监控理论, E-mail: feiw545@163.com;

冯祖仁 (1953—), 男, 现为西安交通大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为机器人控制、智能系统、机器人导航, E-mail: fzr9910@mail.xjtu.edu.cn;

胡奇英 (1965—), 男, 现为复旦大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为离散事件系统的监控理论、供应链管理等, E-mail: huqiying@sina.com.