

文章编号: 1000-8152(2005)02-0277-04

## 离散事件系统的混合分散监控

王 飞<sup>1</sup>, 胡奇英<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学 电子与信息工程学院, 陕西 西安, 710049; 2. 上海大学 国际工商与管理学院, 上海 201800)

**摘要:** 研究了混合信息下的分散监控综合问题. 首先提出  $\delta$ -可观察 ( $h\delta$ -可观察) 可控闭语言是 (状态部分可观察下) 状态反馈综合解存在的充要条件, 并由此得到  $n$ -联合可观察、可控闭的系统约束是保证混合分散监控器存在的充要条件, 进而得到纯分散监控器 (控制器) 存在的充要条件为  $n$ -可观察 ( $n$ - $h\delta$ -可观察) 可控闭语言被满足. 最后, 又通过研究系统约束与混合约束的关系, 提出混合分散监控器存在的充分条件是可观、可控闭语言与可观可控谓词被满足.

**关键词:** 离散事件系统; 状态反馈;  $n$ -联合可观察; 混合分散监控

**中图分类号:** TP271 **文献标识码:** A

## Mixed decentralized supervisory control of discrete event systems

WANG Fei<sup>1</sup>, HU Qi-ying<sup>2</sup>

(1. School of Electronics & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China;

2. College of International Business & Management, Shanghai University, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** The synthesis of mixed decentralized supervisory control is investigated. Firstly, a closed, controllable and  $\delta$ -observable ( $h\delta$ -observable) language is proposed as the necessary and sufficient condition for the existence of a solution to the synthesis of state feedback (with partial state-observation). And a necessary and sufficient condition that ensures the existence of mixed decentralized supervisor is given by a global constraint which is closed, controllable and  $n$ -coobservable. Moreover, a necessary and sufficient condition for the existence of pure decentralized supervisor (decentralized controller) is shown by a closed, controllable and  $\delta$ -observable ( $n$ - $h\delta$ -observable) language. Finally, by presenting a relation between global constraints and mixed ones, a sufficient condition obtained for the existence of mixed decentralized supervisor is that the language which is close, observable and controllable and the predicate which is observable and controllable are both satisfied.

**Key words:** discrete event systems; state feedback;  $n$ -coobservable; mixed decentralized supervisory control

### 1 引言 (Introduction)

监控理论是 Ramadge 和 Wonham<sup>[1,2]</sup> 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, 使得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. 文献 [3~8] 分别基于事件反馈<sup>[3~6]</sup> 与状态反馈<sup>[7,8]</sup> 讨论了局部监控器间无通讯的分散监控, 如文献 [4] 提出了可控与联合可观察闭语言是分散监控器存在的充要条件, 文献 [5] 则给出了可控可观察语言与文献 [4] 中所提出的联合可观察语言的关系, 文献 [6] 讨论了在部分可观察条件下并发系统的分散监控的存在条件, 同时在并发的条件下延伸了文献 [3,4] 中的结论. 文献 [7,8] 讨论了基于状态

的分散监控的情况, 其中文献 [7] 通过引入  $n$ -可观察谓词, 提出了可控,  $n$ -可观察谓词是分散状态反馈存在的充要条件; 而文献 [8] 则更进一步地讨论了最小可控,  $n$ -可观察谓词的存在性, 为部分可观察的分散状态反馈的存在提供了理论基础.

迄今, 大多数的研究者都将研究重点集中在事件反馈或者状态反馈的分散监控上, 而当系统既是部分事件可观察又是部分状态可观察时的分散监控却很少涉及. 文献 [9,10] 讨论了系统所知的信息既有事件又有状态的情况, 并给出了相应情况下监控器存在的条件. 本文利用文献 [9] 中所提出的  $n$ -联合可观察语言的定义, 给出了系统在所知的信息既有事件又有状态的情况下混合分散监控存在的充要条件.

## 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  $G = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m)$  的生成语言  $L(G)$  与标识语言  $L_m(G)$  来表示,分别可理解为系统可能产生的所有行为及在完成“任务”后所产生的行为.为了引入控制机制,将  $\Sigma$  分为两个互不相交的子集  $\Sigma_u, \Sigma_c$ , 称  $\Gamma = \{\gamma \in 2^\Sigma \mid \Sigma_u \subseteq \gamma\}$  为控制模式(control pattern)集,其中  $2^\Sigma$  是  $\Sigma$  的幂集.称映射  $f: L(G) \rightarrow \Gamma$  为 DESG 上的监控器,将  $f$  施加于 DES 上,根据所观察的事件串,形成  $\Gamma$  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,具体的控制实例可见文献[1, 11].语言  $K$  的前缀闭包为  $\bar{K}$ , 如果  $\bar{K} = K$ , 则称  $K$  是闭的.如果语言  $K$  满足  $\bar{K}\Sigma_u \cap L(G) \subseteq \bar{K}$ , 则称  $K$  是可控的.设 DES 是基于事件部分可观察的,其可观察函数为  $M: \Sigma \rightarrow \Sigma_o \cup \{\epsilon\}$ , 其中  $\Sigma_o$  为可观察事件集,如  $s, s' \in K, \sigma \in \Sigma_c, s\sigma \in K, s'\sigma \in L(G), M(s) = M(s')$ , 可得  $s'\sigma \in K$ , 则称  $K$  是  $M$ -可观察的(或称是可观察的);而  $L(G)$  所观察到的行为  $M(L(G))$  可用  $G$  的一个局部模型  $G_o$  来表示,使其满足  $L(G_o) = M(L(G)), L_m(G_o) = M(L_m(G))$ .同时称  $G_o$  中的可控闭语言为  $G$  的局部可控闭语言.显然对于可控可观察闭语言  $K$ ,  $M(K)$  必是局部可控闭的.

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  $Re(G, P)$  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  $P \subseteq Re(G, P) \wedge wlp_\sigma(P)(\sigma \in \Sigma_u)$  的  $P$  为可控谓词.而称映射  $g: Q \rightarrow \Gamma$  为 DESG 的控制器,其控制方式类似监控器.如 DES 是基于状态部分可观察的,其可观察函数为  $h: Q \rightarrow Y$ , 其中  $Y$  为状态所能观察到的符号集,对于谓词  $P$  如有  $P \supseteq h^{-1}(h(sp_\sigma(P) \wedge P)) \wedge sp_\sigma(P)$ , 则称  $P$  是  $h$ -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,被称为  $P$  在  $\sigma$  下的最强后置条件(strongest postcondition of  $P$  under  $\sigma$ ).显然对于可控可观察谓词  $P$ ,  $h(P)$  必是局部可控的.

对于谓词  $P$ , 称  $Le(P) = \{s \in L(G) \mid \forall t \leq s, \delta(t, q_0) \in P\}$  为  $P$  的合法语言,显然  $Le(P)$  是闭的.对于语言  $K$ , 称  $R(K) = \{q \in Q \mid \exists s \in K,$

$\delta(s, q_0) = q\}$  为  $K$  的可达谓词,同时若语言  $K$  是可控闭的,则  $R(K)$  必是可控谓词.

以上的内容是熟知的,也可参见文献[11].

## 3 基于语言的状态反馈综合(Synthesis of state feedback based on language)

**定义 1** 对于任意的语言  $K$ , 如由  $s, s' \in K, \delta(s) = \delta(s'), \sigma \in \Sigma_c, s\sigma \in K, s'\sigma \in L(G)$ , 可得  $s'\sigma \in K$ , 则称  $K$  是  $\delta$ -可观察的.

显然对于任意的谓词,其合法语言均是  $\delta$ -可观察的.以下定理给出了基于语言的状态反馈综合.

**定理 1** 对于任意的语言  $K$ , 存在一状态反馈  $g$  使得  $L(g/G) = K$  的充分必要条件为  $K$  是一  $\delta$ -可观察可控闭语言.

**证** 必要性显然成立.

充分性.由  $K$  是可控闭知,可构造事件反馈  $g(s) = \Sigma_u \cup \{\sigma \in \Sigma_c \mid s\sigma \in \Sigma^* - (L(G) - K)\}$ ,  $s \in K$ , 使得  $L(g/G) = K, R(g/G) = R(K)$ , 且  $Le(R(K)) = K$ .再由  $\delta$ -可观察性知,对于  $s, s' \in K$ , 有  $\delta(s) = \delta(s')$  及  $\{\sigma \in \Sigma_c \mid s\sigma \in (L(G) - K)\} = \{\sigma \in \Sigma_c \mid s'\sigma \in (L(G) - K)\}$ , 则  $g(s) = g(s')$ .故  $g$  为一状态反馈<sup>[12]</sup>.

设 DES 基于状态是部分可观察的,  $h$  为可观察函数,如果状态反馈(控制器)  $g$  满足  $h(q) = h(q') \Rightarrow g(q) = g(q')$ , 则称  $g$  为  $h$ -状态反馈( $h$ -控制器),定义  $L(G)$  上的等价关系  $h\delta: h\delta(s) = h\delta(s') \Leftrightarrow h(\delta(s)) = h(\delta(s')), s, s' \in L(G)$ .对任意谓词  $P$ , 则  $Le(P)$  为  $h\delta$ -可观察的当且仅当下式成立:

$$q_1, q_2 \in P, h(q_1) = h(q_2), \sigma \in \Sigma_c,$$

$$\delta(\sigma, q_1) \in P, \delta(\sigma, q_2) \notin P.$$

由谓词的可观察性知,  $P$  是  $h$ -可观察的当且仅当  $Le(P)$  是  $h\delta$ -可观察的.相对于定理 1, 可得

**定理 2** 对于状态部分可观察的 DES, 给定任意的语言  $K$ , 存在一  $h$ -状态反馈  $g$  使得  $L(g/G) = K$  的充分必要条件为  $K$  是  $h\delta$ -可观察可控闭的.

**证** 必要性.显然由  $L(g/G)$  是可控闭的, 知  $K$  是可控闭的.下证  $K$  是  $h\delta$ -可观察的.因为  $g$  为一  $h$ -状态反馈, 故  $R(g/G) = R(K)$  是可控、 $h$ -可观察谓词, 再由  $Le(R(g/G)) = Le(R(K)), Le(R(g/G)) = L(g/G) = K$  知  $Le(R(g/G)) = Le(R(K)) = K$  是  $h\delta$ -可观察的, 故  $K$  是  $h\delta$ -可观察可控闭的.

充分性由定理 1 的证明可知, 显然成立.

#### 4 混合分散监控 (Mixed decentralized supervisory control)

给定一个部分可观察系统  $(G, \{M_i\}, \{h_i\}) (i = 1, 2, \dots, n)$ , 其中  $\{M_i\}, \{h_i\}$  分别为基于事件与基于状态的可观察函数集且  $M_i: \Sigma \rightarrow \Sigma_i, h_i: Q \rightarrow Y_i$ , 则对于每一  $M_i, h_i$  均存在  $G_i$  使得  $L(G_i) = M_i(L(G)), L_m(G_i) = M_i(L_m(G)), R(G_i, Y_i) = h_i(R(G, Q))$ , 并称  $G_i$  为  $G$  的一个局部系统. 对于系统约束  $K$ , 记  $K_i = M_i(K) (i = 1, 2, \dots, m-1), P_j = h_j\delta(K) (j = m, \dots, n)$ , 则  $K$  可由局部约束  $K_1, K_2, \dots, K_{m-1}, P_m, \dots, P_n$  的同时实现达到, 即

$$K = \left[ \bigcap_{i=1}^{m-1} M_i^{-1}(K_i) \right] \cap \left[ \bigcap_{j=m}^n (h_j\delta)^{-1}(P_j) \right].$$

对于约束  $K$ , 通过引入以下 3 个引理得到一个可以用来判别混合分散监控器存在的定理 3.

**定义 2** 若  $s, s' \in K, \sigma \in K, s'\sigma \in L(G), M_i(s) = M_i(s'), i = 1, 2, \dots, m-1; h_j\delta(s) = h_j\delta(s'), j = m, \dots, n$ , 可得  $s'\sigma \in K$ , 则称  $K$  是  $n$ -联合可观察的<sup>[9]</sup>. 如系统基于状态是完全可观察的, 则称  $K$  是  $n$ -可观察的. 如系统基于事件是完全可观察的, 则称  $K$  是  $n$ - $h\delta$ -可观察的.

**定义 3** 如语言  $K$  是  $n$ -联合可观察的, 并且满足  $\bar{K} = K$  及  $\bar{K}\Sigma_u \cap L(G) \subseteq \bar{K}$ , 则称  $K$  是  $n$ -联合可观察的可控闭语言.

**引理 1** 给定谓词  $P$ , 设存在状态反馈  $g$ , 使得  $R(g/G) = P$ , 则  $Le(P) = \delta^{-1}(P)$ . 其中  $\delta^{-1}(P) = \{s \mid \delta(s) \in P\}$ .

**证**  $Le(P) \subseteq \delta^{-1}(P)$  显然成立, 下证  $\delta^{-1}(P) \subseteq Le(P)$ .

$\forall s \in \delta^{-1}(P)$ , 则  $\delta(s) \in P$ . 而  $P = R(g/G)$ , 由  $R(g/G)$  的定义知,  $\forall t \in \bar{s}$ , 均有  $\delta(t)!$ , 且有  $\delta(t) \in R(g/G) = P$ , 再由  $Le(P)$  的定义可知,  $s \in Le(P)$ . 由  $s$  的任意性可知,  $\delta^{-1}(P) \subseteq Le(P)$ . 综上所述,  $Le(P) = \delta^{-1}(P)$ .

**引理 2** 对任一  $i (i = 1, 2, \dots, m-1)$ , 给定  $G$  和  $M_i$ -可观察可控闭语言  $K$ , 设  $f'_i$  为局部系统  $G_i$  的局部监控器, 有  $L(f'_i/G_i) = M_i(K)$ , 则总存在  $G$  的全局监控器  $f_i$  使得  $L(f_i/G) = M_i^{-1}M_i(K)$ .

证明可参见文献[12].

显然, 由定理 1, 引理 2, 立即可得如下引理.

**引理 3** 对任一  $i (i = 1, 2, \dots, m-1)$ , 给定  $G$  和  $h_j\delta$ -可观察可控闭语言  $K$ , 设  $g'_i$  为  $G_i$  的局部控制器, 有  $R(g'_i/G_i) = h_j\delta(K)$ , 则总存在  $G$  的全局监

控器  $g_i$  使得  $R(g_i/G) = h_i^{-1}h_j\delta(K)$ .

**定理 3** 给定语言  $K$ , 则存在监控器  $f_i (i = 1, 2, \dots, m-1)$  与控制器  $g_j (j = m, \dots, n)$ , 使得  $L(f \wedge g/G) = K$  的充分必要条件为  $K$  是一  $n$ -联合可观察的可控闭语言. 为了简单记  $\{f_i\}$  为  $f, \{g_j\}$  为  $g$ .

**证** 必要性. 设存在  $f_i (i = 1, 2, \dots, m-1), g_j (j = m, \dots, n)$  使得  $L(f \wedge g/G) = K$ , 由于  $L(f \wedge g/G)$  是闭的, 故  $K$  也是闭的.

下证  $K$  是可控的. 设  $s \in K, \sigma \in \Sigma_u, s\sigma \in L(G)$ , 只需证  $s\sigma \in K$  即可. 由于  $s \in L(f \wedge g/G) = K, \sigma \in \Sigma_u, s\sigma \in L(G)$ , 又因为  $L(f \wedge g/G)$  是可控的, 故  $s\sigma \in L(f \wedge g/G)$ . 而  $L(f \wedge g/G) = K$ , 则易知  $s\sigma \in K$ . 再证  $K$  是  $n$ -联合可观察的. 由于  $s, s' \in K = L(f \wedge g/G), s\sigma \in K = L(f \wedge g/G), s'\sigma \in L(G)$ , 则  $\delta_i(s'\sigma)!, \delta_i(s\sigma)!$ . 设  $s'\sigma \in K = L(f \wedge g/G)$ , 则  $(f \wedge g)(s')(\sigma) = 0$ . 而  $s\sigma \in K = L(f \wedge g/G)$ , 则  $(f \wedge g)(s)(\sigma) = 1$ . 由  $M_i(s) = M_i(s')$ , 可得  $f_i(s) = f_i(s')$ ; 同时又由  $h_i\delta(s) = h_i\delta(s')$ , 可得  $f_i(s) = f_i(s')$ , 其中  $i = 1, 2, \dots, n$ . 由上可得  $(f \wedge g)(s) = (f \wedge g)(s')$ . 至此产生矛盾, 故  $s'\sigma \in K$ . 所以,  $K$  是一  $n$ -联合可观察的可控闭语言.

充分性.  $K$  是  $n$ -联合可观察可控闭的, 则  $K$  是  $M_i$ -可观察可控闭的, 同时也是  $h_j\delta$ -可观察可控闭的. 由引理 1 知, 存在  $G$  的一全局监控器  $f_i (i = 1, 2, \dots, m-1)$ , 使得  $L(f_i/G) = M_i^{-1}M_i(K)$ . 又由引理 3 知, 存在  $G$  的一全局控制器  $g_j (j = m, \dots, n)$ , 使得  $R(g_j/G) = h_j^{-1}h_j\delta(K)$ , 相应地, 有  $L(g_j/G) = Le(h_j^{-1}h_j\delta(K))$ . 又由引理 1 知  $Le(R(g_j/G)) = \delta^{-1}(R(g_j/G))$ , 故  $L(g_j/G) = \delta^{-1}h_j^{-1}h_j\delta(K) = (h_j\delta)^{-1}(h_j\delta)(K)$ , 因为控制器(状态反馈)总可认为是某一监控器(事件反馈), 且

$$K = \left[ \bigcap_{i=1}^{m-1} M_i^{-1}(M_i(K)) \right] \cap \left[ \bigcap_{j=m}^n (h_j\delta)^{-1}(h_j\delta)(K) \right],$$

故

$$L(f \wedge g/G) = \left[ \bigcap_{i=1}^{m-1} L(f_i/G) \right] \cap \left[ \bigcap_{j=m}^n L(g_j/G) \right] =$$

$$\left[ \bigcap_{i=1}^{m-1} M_i^{-1}(M_i(K)) \right] \cap \left[ \bigcap_{j=m}^n (h_j\delta)^{-1}(h_j\delta)(K) \right] = K.$$

由定理 3, 易得以下推论.

**推论 1** 给定语言  $K$ , 则存在监控器  $f_i (i = 1, 2, \dots, n)$  使得  $L(\{f_i\}/G) = K$  的充分必要条件为  $K$  是一个  $n$ -可观察的可控闭语言.

**推论 2** 给定语言  $K$ , 则存在控制器  $g_j (j = 1, 2, \dots, n)$  使得  $L(\{g_j\}/G) = K$  的充分必要条件为  $K$  是一个  $n$ - $h\delta$ -可观察的可控闭语言.

当一个系统的约束条件不是由整体约束  $K$  表示, 而是由一系列子语言  $K_1, \dots, K_n$  与子谓词  $P_1, \dots, P_n$  所构成的混合约束来表示时, 可由如下定理得到整体约束与混合约束的关系.

**定理 4** 设  $K_i$  是  $M_i$ -可观察可控闭语言,  $P_i$  是  $h_i$ -可观察可控谓词, 其中  $i = 1, 2, \dots, n$ , 则

$$\bigcap_{i=1}^n (K_i \cap Le(P_i))$$

是  $n$ -联合可观察可控闭的.

**证 令**

$$L = \bigcap_{i=1}^n (K_i \cap Le(P_i)),$$

因为  $P_i$  是  $h_i$ -可观察可控的, 所以  $Le(P_i)$  是  $h_i\delta$ -可观察可控闭的. 由于  $K_i$  是可控闭的, 而  $Le(P_i)$  也是可控闭的, 则  $K_i \cap Le(P_i)$  是可控闭的, 故可知  $L$  也是可控闭的.

下证  $L$  是  $n$ -联合可观察的. 显然有,  $s, s' \in K_i$ ,  $s\sigma \in K_i, s'\sigma \in L(G), M_i(s) = M_i(s')$ , 而  $K_i$  是  $M_i$ -可观察的, 则  $s'\sigma \in K_i (i = 1, 2, \dots, n)$ . 显然又有  $s, s' \in Le(P_i), s\sigma \in Le(P_i), s'\sigma \in L(G), h_i\delta(s) = h_i\delta(s')$ , 且  $Le(P_i)$  是  $h_i\delta$ -可观察的, 从而  $s'\sigma \in Le(P_i) (i = 1, 2, \dots, n)$ , 所以  $s'\sigma \in K_i \cap Le(P_i) (i = 1, 2, \dots, n)$ . 进一步可得  $s'\sigma \in L$ .

综上所述,  $L$  是  $n$ -联合可观察可控闭的.

再由定理 3 与定理 4 可得

**定理 5** 给定系统  $G$ , 设  $K_l$  是  $M_l$ -可观察可控闭语言,  $P_l$  是  $h_l$ -可观察可控谓词, 其中  $l = 1, 2, \dots, n$ , 则存在监控器  $f_i (i = 1, 2, \dots, m-1)$  与控制器  $g_j (j = m, \dots, n)$ , 使得

$$L(\{f_i\} \wedge \{g_j\}/G) = \bigcap_{l=1}^n (K_l \cap Le(P_l)).$$

## 5 结论(Conclusion)

本文主要讨论了混合分散监控器存在的问题. 通过提出完全可观察与部分可观察离散事件系统基于语言的状态反馈综合问题, 及引入  $n$ -联合可观察语言, 给出了混合分散监控器存在的充分必要条件, 即系统约束是  $n$ -联合可观察可控闭的. 进而又通过给出系统约束与混合约束的关系, 提出了当系统约束为混合约束时, 混合分散监控器存在的充分条件. 最后, 又分别获得事件反馈的分散监控与状态反馈的分散监控存在的充分必要条件.

## 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 languages [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] KUMAR R, SHAYMAN M A. Formulae relating controllability, observability, and co-observability [J]. *Automatica*, 1998, 34(2): 211 - 215.
- [6] JIANG S B, KUMAR R. Decentralized control of discrete event systems with specializations to local control and concurrent systems [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 2000, 30(5): 653 - 660.
- [7] TAKAI S, KODAMA S, USHIO T. Decentralized state feedback control of discrete event systems [J]. *Systems & Control Letters*, 1994, 22(5): 369 - 375.
- [8] 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.
- [9] 法京怀. 离散事件动态系统的状态补偿观测控制[J]. 自动化学报, 1993, 19(3): 300 - 306.  
(FA Jinghui. State compensator for supervisory control of DEDS [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1993, 19(3): 300 - 306.)
- [10] CAO C, LIN F, LIN Z H. Why event observation: observability Revisited [J]. *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, 1997, 7(2): 127 - 149.
- [11] 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 Qiyong. *Theory on Supervisory Control of Discrete Event Systems* [M]. Zhengzhou: Henan Press of Science & Technology, 1994.)
- [12] 王飞. 离散事件系统的混合监控[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2004.  
(WANG Fei. *Mixed supervisory control of discrete event systems* [D]. Xi'an: Xidian University, 2004.)

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, Email: feiw545@163.com;

胡奇英 (1965—), 男, 上海大学教授, 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, Email: huqiyong@sina.com.