第 20 卷 第 2 期　　自 动 化 学 报　　Vol. 20, No. 2
1994 年 3 月　　ACTA AUTOMATICA SINICA　　Mar., 1994

短 文

实时离散事件系统的动态反馈控制[1)]

李勇华　高为炳
（北京航空航天大学第七研究室　100083）

摘　　要

本文研究了一类含确定性状态时间的实时离散事件系统的动态反馈控制问题．基于一定语言的实时可控性的概念，证明了对给定实时离散事件系统 G，存在完备监控器 φ 使 $L(\varphi/\dot{G}_T)=K$ 的充分必要条件是 K 是闭及实时可控的，并得到了有关实时监控问题解存在的充要条件．

关键词：离散事件系统，实时控制，动态反馈控制，可控性．

1　引言

关于实时离散事件系统的控制，最早的研究始于 Li 和 Wonham，文[1]主要讨论了存在观测与控制信号时延时系统的适定性问题．本文作者发展了有关结果，提出了性能适定性的概念[2]．Brave 和 Heymann 讨论了含确定性事件时间的实时离散事件系统的控制问题，用钟自动机这一新模型来表述受控系统，并发展了实时可控性的思想[3]． Golaszewski 和 Ramadge 在文[3]的基础上进一步讨论了有关的控制问题[4]．这些研究侧重的是事件时间及其有关的性能测度与控制观测问题．至于状态时间，只有文[4]中有涉及，但对其作用机制没有深入研究．有鉴于此，文[5]提出了一类含确定性状态时间的实时离散事件系统模型，并讨论了有关的静态状态反馈控制问题，这一结果被推广到含位置时间的实时 Petri 网的控制中[6]．

本文在文[5,6]工作的基础上，进一步探讨这类实时离散事件系统的动态反馈控制问题．

2　模型及问题的提出

2.1　含状态时间的实时离散事件系统模型

文献[7]讨论了关于含位置时间的赋时 Petri 网．从这一工作出发，我们相应地定义含状态时间的有限状态自动机．

定义 2.1． 含状态时间的有限状态自动机是一个五元组

1）国家自然科学基金 69104003 资助，本文曾在 1991 年控制理论与应用年会上宣读．
本文于 1991 年 6 月 25 日收到

$$G_T=(\sum,Q,\delta,q_0,T),$$

这里 $\sum$, Q, δ, q_0 定义同文献[1]. $T:Q\to N$ 是一个状态时间函数，N 是正整数集合. $q\in Q$. $T(q)$ 表征在 q 状态下,只有 $T(q)$ 个时间单位以后，q 所含的事件集合 $\sum(q)$(定义为所有使 $\delta(\alpha,q)$ 有定义的 α 的集合)中的事件才有可能发生.

2.2 问题的提出

例 1. 给定闭环系统结构如图 1,其中 G 是本节提出的模型,T_a,T_b 分别是观测及控制信号时延. 令 G 具有图 2 的状态转移结构.

当 $T_a=T_b=0$ 时,不难看出,状态时间的存在对闭环系统逻辑行为并无影响. 但是,在 T_a 与 T_b 非零的场合,状态时间却起着非常重要的作用. 不妨设 $T_a=T_b=1$.

令目标语言为 $K=L(G)-\langle q_3\rangle$, $\langle q_3\rangle=\{s|s\in\sum^*,\delta(s,q_0)=q_3\}$,显然 K 是可控的. 但是,由于 $T(q_2)=1$,可以看出,在有关禁止 α 发生(从而系统不到达 q_3)的控制信号到达之前,α 即已有可能发生. 因此,在对这类系统进行反馈综合时，同时考虑信号时延与系统固有的状态时间是必要的.

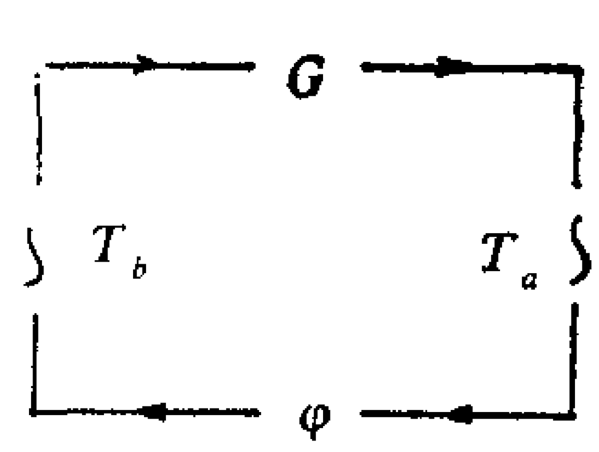

图 1 闭环系统结构

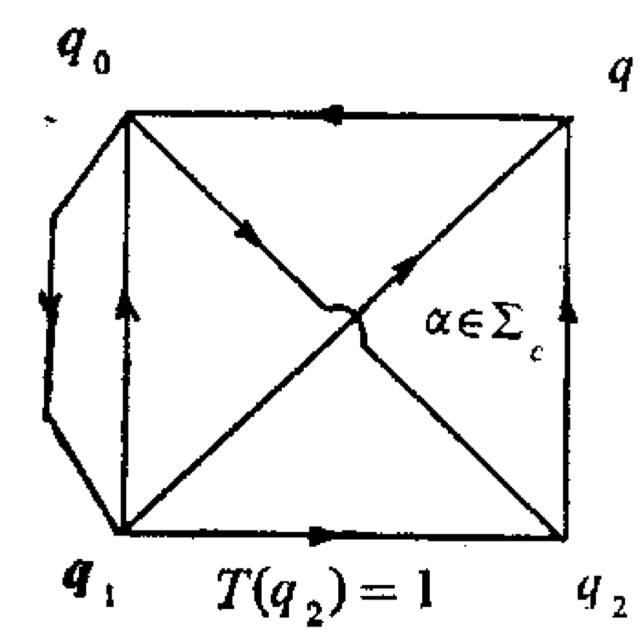

图 2 一个 DES 转移结构

这类系统的静态状态反馈控制问题见文[5].

3 实时可控性

定义 3.1. 给定 $K\subset\sum^*$. K 称为是封闭的,若 $\tilde{K}=K$; K 称为是可控的,若 $s\in K$, $\sigma\in\sum_u,s\sigma\in L(G)\to s\sigma\in K$. K 称为是实时可控的,若

1) $s\in K,\sigma\in\sum_u,s\sigma\in L(G)\to s\sigma\in K$;

2) $s\in K,\sigma\in\sum_c,s\sigma\in L(G),s\sigma\notin K,\to T(q)\geqslant T_a+T_b(q=\delta(s,q_0))$.

在下面的讨论中,记 $T(q)\geqslant T_a+T_b(q-\delta(s,q_0))$ 为 RTC 条件.

定理 3.1. 对给定对象 $G_T=(\sum,Q,\delta,q_0,T)$ 及信号时延 T_a,T_b, 存在完备监控器 φ 使 $L(\varphi/G_T)=K$ 的充要条件是 K 是闭及实时可控的.

证明. 充分性

由 K 闭可控，在不计信号时延及状态时间的情况下可以构造完备监控器 φ 使 $L(\varphi/G_T)=K$[9]. 令

$$S_T=(\sum,X,\eta,x_0,T_x),$$

其中 $S=(\sum,X,\eta,x_0)$ 为 K 的识别器，$T_x:X\to N$ 为一个时间映射，满足 $T_x(x)=T(h(x))$,这里 h 是从 X 到 Q 的一个映上的映射[9]. 从 K 是实时可控的这一事实出发，可

以知道,对任意 $s\in K$,必有

1) 若存在 $\sigma\in\sum_u, s\sigma\in L(G)\rightarrow s\sigma\in K$;

2) 若 $\sigma\in\sum_c, s\sigma\in L(G), s\sigma\notin K, \rightarrow T(q)>T_a+T_b$.

上述 2) 可以表述为

2)′　　$\sigma\in\sum_c, s\sigma\in L(G), s\sigma\notin K\rightarrow T_x(x)\geqslant T_a+T_b$.

由 2)′,对于任意 $x\in X$,可以保证控制信号 $f(x)(\sigma)=0$ 即使在 $T_a+T_b>0$ 的情况下仍能真正起到阻止 σ 发生的作用. 从而,对于具有图 1 特征的闭环系统,只要 K 是闭及实时可控的,总能找到一个完备监控器 φ 使

$$L(\varphi/G_T)=K.$$

必要性

设 K 闭可控但不是实时可控的. 由 K 闭可控,必有完备监控器 φ 存在使 $L(\varphi/G_T)=$ $=K$ (在不考虑时延的情况). 令 $G_T=(\sum, Q, \delta, q_0, T)$,且 T_a, T_b 均大于零. 不妨设对某 $\sigma\in\sum_c$,存在 $s\in\sum^*$,使 $s\sigma\in L(G), s\sigma\notin K$,且 $T_x(x)<T_a+T_b$,亦即 $T(q)<T_a+T_b$. 从而,在控制信号 $f(x)(\sigma)=0$ 到达受控系统 G_T 之前,事件 σ 即有可能已经出现,这导致 $s\sigma\in L(\varphi/G_T)$,但是 $s\sigma\notin K$. 因此与 $L(\varphi/G_T)=K$ 相矛盾.

4　设计问题

记 $C(L)=\{K\mid K\subset L, K$ 是闭及实时可控的$\}$,对语言类 $C(L)$,有

命题 4.1.　$C(L)$ 对任意并及交运算都是封闭的.

基于命题 4.1,有

命题 4.2.　对于任意 $K, K\neq\varphi, K\subset L(G)$,总有 $K_{\max}$ 存在,这里 $K_{\max}$ 是 K 所含的最大闭及实时可控子语言.

现在,考虑如下设计问题:

给定系统如图1. 记 $A\subset L(G)$ 为"最小可接受性能",$E\subset L(G)$ 为"最大合法性能",A, E 均为闭. 找到一个完备监控器 φ 使 $A\subset L(\varphi/G_T)\subset E$.

对于这一问题,有

定理 4.1.　对图 1 所示系统,存在完备监控器 φ 使上述问题有解的充要条件是

$$A\subset E_{\max}.$$

限于篇幅,具体的计算方法就不在此讨论.

本文讨论了含状态时间的实时离散事件系统的动态反馈控制问题. 主要结果包括一定语言的实时可控性及其综合设计. 由于处理的时间是确定性的, 更一般的实时离散事件系统,如随机时间实时离散事件的研究,有待于进一步探讨.

参　考　文　献

[1] Li Y, Wonham W M. Supervisory Control of Real Time Discrete Event Systems. *Information Sciences*. 1988, **46**: 159—183.

[2] 李勇华,高为炳. 离散事件系统实时监控的性能适定性. 控制与决策, 1990,**5**(4): 1—5.

[3] Brave I, Heymann M. Formulation and Control of Real Time Discrete Event Systems. Proc.

1988 IEEE CDC, 1131—1132.
[4] Golaszewski C, Ramadge P J. Control of Real Time Discrete Event Systems. Proc 1989 Conference on Information Sciences and Systems.
[5] 李勇华、高为炳,实时离散事件系统的状态反馈逻辑,航空学报,1992,**13**(12).
[6] Li Yonahua, Gao Weibing. Control of Real Time Petri Nets with Application to Manufacturing. Proc. IFAC DES'91 Workshop, Sheng Yang, China, 129—131.
[7] Marsan M A *et al.* Performance Models of Multiprocessor Systems. MIT Press, 1986.
[8] 李勇华,高为炳. 实时离散事件系统适定监控的最优解. 控制理论与应用,1993,**10**(1).
[9] Ramadge P J, Wonham W M. Supervisory Control of a Class of Discrete Event Processes. *SIAM J Control and Optimization*, 1987, 25(1).
[10] 李勇华,高为炳. 共享资源系统的监控问题. 北航学报,1990,(2): 88—96.

DYNAMICAL SUPERVISORY CONTROL OF A CLASS OF REAL TIME DISCRETE EVENT SYSTEMS

Li Yonghua Gao Weibing
(*The Seventh Research Division, Beijing University of Aero. and Astro.* 100083)

Abstract

Dynamical supervisory control of a class of real time discrete event systems with deterministic state sojourn times is studied in this paper. Based on the concept of real time controllability of certain languages with respect to a given plant is defined. It is shown that for a given real time discrete event system G. there is a complete supervisor φ such that $L(\varphi/G)=K$ if and only if K is closed and real time controllable. Necessary and sufficient conditions ensuring the existenee of solution to a real time supervisory synthesis problem is given.

Key words: Discrete Event Systems; Real Time Control; Dynamical Feedback Control; Controllability.