

综述与评论

离散事件动态系统的状态 反馈控制理论进展¹⁾

刘 勇 胡奇英

(西安电子科技大学经济管理学院 西安 710071)

摘 要 综述了离散事件动态系统(DEDS)的状态反馈控制理论方面所取得的进展,讨论了几个主要研究方向,并探讨了进一步的研究内容.

关键词 DEDS, 状态反馈控制, 控制综合, 稳定性, 可观性, 最优控制.

PROGRESS IN THEORETIC RESEARCH ON STATE FEEDBACK CONTROL OF DISCRETE EVENT DYNAMICAL SYSTEMS

LIU Yong HU Qiying

(School of Economics & Management, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract This paper introduces the development of state feedback control theory of discrete event dynamical systems (DEDS), then shows some important results in some main topics. Finally, some future research work on state feedback control of DEDS are proposed.

Key words DEDS, state feedback control, control synthesis, stability, observability, optimal control.

1 引言

离散事件动态系统的控制理论是由 Wonham 和 Ramadge^[1,2]提出的,是在逻辑层次上对 DEDS 实施控制的一种有效方法.其中事件和状态是系统的两个最基本的要素,这两者都是离散的集合,因此系统所用的大多数是离散数学的模型,例如有限自动机和形式语言, Petri 网等. Wonham 和 Ramadge 提出的基于自动机模型的控制理论已得到了较为完善的发展,从 DEDS 的两个要素出发,可以从两个方面考虑 DEDS 的控制:一种是事件

1) 国家自然科学基金资助课题.

反馈控制^[1,2],也就是通常所说的监控,监控器是根据系统产生的事件串(自动机所产生的语言)来控制系统的.在这方面,国内外许多学者已对监控的研究成果进行了综述,可参见文献[3~5];另一种是状态反馈控制^[2],它是根据系统所处状态来确定控制输入使系统保持在预定的状态子集(谓词)中.

本文主要讨论 DEDS 的状态反馈控制理论的研究进展.由于谓词和谓词变换^[6](谓词到谓词的映射函数)的优点在于可精确地描述具有无限状态空间的复杂系统,因此状态反馈控制理论为这类系统提供了有效的综合控制器的方法.

2 状态反馈控制的基本问题

DEDS 状态反馈控制所基于的模型是一个四元组自动机,其详细描述可见文[7].在状态反馈控制中,系统的控制目标是以谓词形式给出的,通常称该谓词为合法谓词.

2.1 控制综合问题

控制综合问题是状态反馈控制中最基本的问题,一般假定系统的初始状态为合法状态,主要包括以下几种.

控制综合问题之一:给定系统的控制目标(一个合法谓词),求一个状态反馈控制器,使由其控制的系统的可达状态集保持在合法谓词中.

当给定合法谓词是控制不变谓词^[2]时,存在满足问题一的控制器,文[2]中给出了具体的计算公式.一般来说,满足问题一的控制器不只一个,我们关心最大的控制器(允许发生的事件最多),它的唯一性是与控制模式相关的^[8].

控制综合问题之二:给定系统的合法谓词,求一个状态反馈控制器,使由其控制的系统的可达状态集等于合法谓词.

问题二不仅要求受控系统的可达状态集保持在合法谓词中,而且要求受控系统可访问合法谓词中的所有状态.当给定合法谓词是可控谓词^[6]时,存在这样的控制器,且其计算可转化为问题一中对控制不变谓词的 controllers 的计算,它的最大性与唯一性的讨论同问题一.

控制综合问题之三:给定系统的合法谓词不是可控谓词(或控制不变谓词),求一个最大的状态反馈控制器,使受控系统的可达状态集仍保持在合法谓词中.

问题三是最普遍的一种控制综合问题.当给定合法谓词不是可控谓词时,对该谓词的一个可控子谓词,由问题二的讨论可知必存在一个状态反馈控制器使受控系统的可达状态集等于该子谓词;进一步,在合法谓词中,希望受控系统的可达状态集越大越好,所求的状态反馈控制器允许发生的事件越多越好,此时,可以将问题三转化为计算给定合法谓词的最大可控子谓词的最大状态反馈控制器.对可控谓词的 controllers 的计算以及最大控制器的唯一性问题已在问题一、二中解决了,则剩下的问题就是计算给定合法谓词的最大可控子谓词(或最大控制不变子谓词).计算最大可控子谓词的方法主要有:1)文[2]中利用不动点概念,通过迭代逐步求解;2)利用网络的最大流、最小割定理进行分划计算^[9];3)对于某些具有特殊结构的系统,如向量离散事件系统^[10](系统状态用向量的形式表示),可采用线性整数规划方法来计算最大控制不变子谓词.

另外,胡奇英^[11]提出用马氏决策过程方法(MDP)解决状态反馈控制综合问题,不同

的是:并不需事先判断给定合法谓词的可控性或控制不变性,而是对该谓词,导出其最优方程,通过求解该最优方程直接确定出相应的控制器,并在求解的过程中验证了控制器的存在性和唯一性. Brave 等^[12]针对一种基于等级状态自动机模型,通过以在线或离线方式直接构造状态反馈控制器.

2.2 模控制综合

在很多问题中,系统控制的总目标可分解为若干个子目标,即控制目标是由多个分谓词(component predicate)的交集或并集表示的,这里将交并运算称为模运算. 当其中某些分谓词改变时,模控制器^[2,10]是比较容易重新构造的,从这个意义上说,模控制器是很有用的. 在谓词的模运算中,交运算是模问题中最常用到的,模控制综合问题与一般控制综合问题的提法相同. 一般考虑问题三,即模控制综合问题中的合法谓词常常是由多个分谓词的交集构成的且该合法谓词是不可控的,求一个最大状态反馈控制器使受控系统的可达状态集仍保持在合法谓词中.

在交运算下,合法谓词的最大可控子谓词和最大控制器都可以转化为对各分谓词的最大可控子谓词和最大控制器的计算,这里对各个分谓词是没有条件限制的,因此解决模控制综合问题主要有两种思路^[2]:1)在计算谓词交集的最大可控子谓词时,可先求各分谓词的最大可控子谓词,然后求它们的交集就是给定合法谓词的最大可控子谓词,最后求该子谓词的最大状态反馈控制就是模控制综合问题的解. 2)可将模控制综合问题分解为若干个分谓词的控制综合问题,先求出各自的解,然后将这些控制器连接起来便可得到给定合法谓词的最大状态反馈控制器.

2.3 稳定性问题

系统稳定性^[13,14]讨论系统初始状态不合法时,系统能否经有限次运行后位于合法状态集中的问题. 在稳定性问题中称合法状态集为稳定域. 杨小军、郑应平等^[15]对稳定性问题进行了综述.

按系统在进入稳定域后能否保持在其中的特点,可将稳定性分为静态稳定性^[13]和动态稳定性^[14]:静态稳定性要求系统在有限次转移后到达指定稳定域,并保持在其中;动态稳定性并不要求系统到达稳定域后仍保持在其中,却要求总能经有限次转移后恢复到该区域,即无限多次地访问该区域. 按系统在达到稳定性的过程中是否需要控制的特点,可将稳定性分为固有稳定性^[13,14](开环稳定性)和受控稳定性^[13,14]. 归结起来共有四种稳定性:静态固有稳定性,静态受控稳定性,动态固有稳定性和动态受控稳定性.

对任何一种稳定性,将最终能到达(自发或受控情况下)稳定域的那些状态集合称为吸引域. 只要给定系统的初始状态或运行中的某个状态在吸引域中,则可保证系统(自发或受控系统)是稳定的. 因此在这四类稳定性问题中,主要考虑如何计算吸引域,面临的主要困难是计算的复杂度.

2.3.1 静态稳定性

在静态稳定性中,描述固有稳定性和受控稳定性的谓词分别是强吸引子(域)和弱吸引子(域). 静态稳定性问题最终可归结为计算强、弱吸引域的问题. Brave 等^[13]提出了利用系统可吸引状态计算强、弱吸引域,其中需要对有无环路进行判断,且要求先判断稳定域本身是否是强吸引子或弱吸引子,而且文[13]中涉及到控制时,均未给出具体的控制方案. 针对这一点,本文的作者采用了马氏决策过程方法,它不仅可以简单地计算出强、弱吸

引域,而且不需判断有无环路,也不需事先判断稳定域是否是强吸引子或弱吸引子,而且在计算出弱吸引域的同时可求出一个稳定的控制方案.

2.3.2 动态稳定性

动态稳定性因其侧重考虑恢复性能,因此要确保系统或受控系统无死锁.简单地说,就是保证系统中任一状态均有后继状态.动态稳定性问题可分为两个阶段进行研究:动态预稳定和动态稳定,它最终也可归结为计算强(弱)动态预吸引域和强(弱)动态吸引域的问题.Ozveren 等^[14]采用迭代方法来计算这些吸引域,并给出了具体的控制方案,其构造过程是比较复杂的.其中需保证受控系统无死锁是一个比较强的条件,能否减弱这一条件还有待于进一步研究.

2.3.3 其它稳定性

Passino 等^[16,17]沿用传统观念,在状态集上给出距离,定义了 Lyapunov 稳定性^[16]和 Lagrange 稳定性^[17],通过选取适当的李氏函数,将其应用于制造系统及计算机网络的负载均衡问题的分析中.李氏方法的优点在于计算复杂度低,但难点是李氏函数的定义.

2.4 阻塞问题

有时系统的控制目标不仅包括合法状态集而且还包括目标状态集,一般地,目标状态集包含在合法状态集中.这时若系统运行在合法状态集中经有些状态轨迹不能到达目标状态集时,就称该系统是阻塞的.Lin 等^[18]在监控理论的框架下研究了阻塞问题,称状态是“阻塞”的是指从该状态出发无法到达目标状态集而且只考虑系统的有限行为;而 Takai 等^[19]处理了一类意义更为广泛的阻塞问题并且考虑了具有无限行为的系统,这里称某个状态是“阻塞”的是指从该状态出发从某些状态转移下是无法到达目标状态集的,但经过其它状态转移是有可能到达目标状态集的.

当把目标状态集看作是稳定域,可以发现阻塞问题与动态稳定性问题是极为相似的.Takai 等学者就是通过动态稳定性来研究阻塞问题的:利用动态稳定性的概念来定义系统的阻塞,以及阻塞与非阻塞的控制器.对给定系统,阻塞中的状态反馈控制问题主要是讨论如何使受控系统在尽量大的合法状态子集合中运行,同时尽量减少系统发生阻塞的次数,这不同于控制综合问题及稳定性问题中的“精确”控制的含义.Takai^[19]提出了一种折衷的方法来处理阻塞控制问题,即适当地扩大弱动态吸引域,或适当地缩小弱动态预吸引域.当系统的阻塞情况在实际应用中易于处理时,则阻塞控制器是比较有效的.

2.5 状态反馈与事件反馈控制的关系

一般认为事件反馈是一种动态控制方法,而状态反馈是一种静态控制方法.事件反馈控制的动态性体现在它是通过包含有历史和当前信息的事件串来进行控制的,监控器本身是一个确定性可达自动机,其中的状态转移是由系统所产生的事件串支配的,而监控器是根据这些状态来确定控制输入的,因此它在本质上仍是一种状态反馈.它比一般的状态反馈多了一个记忆功能,利用这一点,在状态反馈控制中可引入动态反馈控制^[6],这时的控制器将历史和当前状态信息结合起来确定下一步的控制输入.从综合的角度看,这两种方法是等价的,它们之间的关系具体可参见文献[20~22].

胡奇英^[11]将两种控制方法统一地用马氏决策过程来描述.监控器相当于马氏决策过程中的确定性策略,状态反馈控制器相当于马氏决策中的平稳策略,并用马氏决策方法解决了事件反馈控制综合问题与状态反馈控制综合问题.而马氏决策过程是随机离散事件

系统最优控制的一种方法,属性能层次,这说明了 DES 性能层与逻辑层有着密切的关系.

3 复杂系统的状态反馈控制

3.1 部分可观察系统

这里讨论的部分可观察系统是指状态不能直接被观察到,能观察到的只是状态的输出(由观察函数确定的),所以控制是基于所观察到的输出符号(而不是状态)来确定的.

3.1.1 控制综合问题

部分可观察系统的状态反馈控制是在文[23]中提出的,部分可观察系统的控制综合问题与 2.1 节中所提的控制综合问题基本上是一样的,不同之处仅在于这里的控制综合问题中要求控制器对输出符号相同的状态应采取相同的控制输入,称这样的控制器为 M-控制器.

当系统给定的合法谓词是可控可观察谓词^[23]时, Li 等^[23]和 Takai 等^[24]分别在观察函数需满足一定条件和对观察函数无任何要求的情况下,研究了 M-控制器存在的条件,且该控制器控制下的系统的可达状态集等于该谓词. 可观察谓词的定义有许多种,如 LW-可观谓词^[23], 1-可观谓词^[25], M-可控谓词^[24,26]以及动态可观察谓词^[6]等. 胡奇英等^[25]指出上述各种可观察谓词是等价的,且它们构造控制器的方法也是有一定联系的. 文[23]和[9]通过将部分可观察系统化为基于可控可观察谓词的完全可观察系统,然后构造完全可观察系统中可控谓词的状态反馈控制器,对该控制器进行推广就可以得到可控可观察谓词的状态反馈控制器.

当给定合法谓词不是可控可观察谓词时,与完全可观察系统控制综合问题三类似,可转化为计算给定谓词的最大可控可观察子谓词,然后构造相应的控制器的的问题. 但一般地,给定谓词的最大可控可观察子谓词不一定存在. 作者在这个问题上提出了一种近似的方法,证明了在一定条件下可用给定谓词的最大可控正规子谓词来近似可控可观察子谓词,而且谓词的最大可控正规子谓词一般是存在的,从而将计算最大可控可观察子谓词转化为计算最大可控正规子谓词,并给出了相应的计算公式,这里的条件比文[23]中提出的条件弱得多.

3.1.2 模控制综合

Takai 等^[24]基于 M-可控谓词研究了部分可观察系统的模状态反馈控制综合问题,提出了模控制器存在的充要条件,该条件比完全可观察系统的模控制器^[2,10]存在的条件要强一些,它主要体现在对各分谓词而言不再是任意的,而需要它们满足一定条件.

3.1.3 能观性

从一般意义上讲,部分可观察是针对系统状态和事件两者而言的,有的系统^[27]假设可观察到部分状态和全部事件;有的系统^[28,29]不存在对状态直接测量,而只能观察到一部分事件. 能观性^[27~29]就是讨论确定系统当前状态的问题. 文[27]与[28,29]提出的能观性的本质区别在于:前者要求在每一次事件之后可精确地重构系统目前状态,而后者可在若干事件之后确定出当前状态. 文[27~29]本质上是不考虑控制的,它们与 3.1.1 节讨论的部分可观察系统是有一定差异的,但从确定当前信息这一点上,它们又与 Kumar 等^[6]提到的部分可观察系统的动态反馈控制类似,这二者之间的关系还有待于进一步的探讨.

3.2 分散状态反馈控制

在制造系统和通信系统等分布式系统中分散控制比集中控制更为方便、有效。在分散状态反馈控制^[30]中,系统的总体控制目标是由每个局部状态反馈控制器根据观察到的局部的状态信息进行控制来共同完成的,将这些局部控制器集成后的控制器称为分散状态反馈控制器。

Takai 等^[30]将文[31]中的可观性进行推广得到了 n -可观性,并指出如果表示系统总体控制目标的合法谓词是可控且 n -可观的,那么必存在一个分散状态反馈控制器,使其控制下系统的可达状态集等于给定的合法谓词。构造分散状态反馈控制器,需首先构造出各个局部控制器,因为各局部子系统相当于一个部分可观察系统,局部控制器的构造方法类似于部分可观察系统状态反馈控制器的构造方法,可采用 3.1.1 节提到的方法;然后将这些局部反馈控制器集成,就可得到所需的分散状态反馈控制器。

3.3 并发系统的状态反馈控制

并发现象是并行和分布结构中的主要问题之一,近些年来研究的较多的两类受控并发系统为:一类是 Ushio, Li 和 Wonham^[32~36]提出的基于自动机的受控并发系统,简称 ULW 系统;另一类是受控 Petri 网^[37]。并发系统的特点主要体现在事件的并发上。

3.3.1 ULW 并发系统

ULW 并发系统是基于自动机表示的非并发系统推广而来的,它的受控系统的并发控制模式都是由原非并发受控系统控制模式中的单点事件集生成的,称该性质为控制依赖性。这种性质是 ULW 并发系统所特有的。并发系统的控制综合问题与 2.1 节中所提的控制综合问题基本上是一样的,不同之处仅在于并发系统的控制模式是并发模式。

ULW 并发系统中的状态反馈控制有两种方式:确定性和非确定性并发控制。

在确定性控制中, Li. Y 等^[33]指出当给定谓词是可控且具有良好并发结构时,则必存在一个确定性并发控制器,使其控制下并发系统的可达状态集与该谓词相等。Ushio 提出的弱交互性^[37,38]保证了控制不变谓词的所有并发控制器对并运算是封闭的,并在 ULW 并发系统中证明了弱交互性与良好并发结构的等价性^[35,36],从而保证了最大并发控制器是唯一的。当给定合法谓词不是可控的或不具有良好并发结构时,其控制综合问题的最优解不一定存在,因为该谓词的最大可控且具有良好并发结构的子谓词不一定存在。

在非确定性并发控制^[34]中,控制器对同一状态的控制可以从并发控制模式中任意选取一种控制输入。对一给定的谓词,存在一个非确定性并发控制器使其控制下系统的可达状态集仍为合法谓词的充要条件是该谓词是可控的。这里并不要求该谓词具有良好的并发结构。Li. Y 等^[34]还讨论了对可控谓词构造具有最大(允许最多事件并发)的非确定性并发控制器的方法。对于非确定性并发控制综合问题,易知其最优解一定存在,因为给定合法谓词的最大可控子谓词总是存在的。

ULW 并发系统中控制模式的控制依赖性一般来说并不一定满足,因此在一定程度上限制了对它的进一步推广。

3.3.2 受控 Petri 网

Krogh^[39]首先将状态反馈控制理论应用于受控 Petri 网的研究中。胡奇英等^[40]将受控 Petri 网与 ULW 并发系统归为统一的受控并发系统模型。Takai 等^[41]提出了受控 Petri 网中按事件分配或资源分配两种控制方法,并给出在两种控制方法下存在唯一的最

大允许反馈控制器的充要条件. 受控 Petri 网理论中主要讨论了禁止状态及其控制问题^[42~45](其中邢科义等^[44]讨论了实时系统的实时控制问题), Petri 网的死锁问题^[46~48]和活性问题^[49].

禁止状态是与合法状态是相对的, 是从另一个角度考虑控制问题, 即控制目标可以是给定禁止状态集, 此时的控制是使系统无法到达禁止状态集中, 文^[42~45]基于受控 Petri 网, 通过外部输入库来进行控制, 并提出了相应的控制方法.

死锁是并发系统中的一种不理想情形, 是指有多项任务都在无限地等待其它任务的完成来释放资源. 死锁的发生可导致系统整个陷于瘫痪, 因此采取避免死锁的策略是很重要的. 文^[46~48]针对柔性制造系统(FMS)中的一些具体系统, 给出了避免死锁的控制方法.

活性是指系统中任一事件都可无限多次地发生, 这体现了系统中各个事件发生的公平性. 而且 Screenivas^[49]指出具有活性的系统一定不会发生死锁, 因此解决死锁问题的另一个方法就是通过保持系统活性来实现, Screenivas 利用 KM-树及其覆盖图很好地解决了对使系统保持活性的控制策略存在性的条件判断, 并给出了具体计算的算法.

特别指出的是, 避免死锁和保持活性问题在柔性制造系统中有很大的应用价值.

作者进一步对 RW 基本模型, ULW 模型, 无并发可控 Petri 网以及并发可控 Petri 网之间的关系进行了探讨, 并将它们用一个统一的模型来描述.

4 最优控制问题

在 RW 理论框架下研究的最优控制问题^[50~55]要求通过控制使系统不仅保持在合法状态集中, 而且使合法状态的性能指标达到最优. 这些数量指标实际上就是有关控制的一些费用, 最优控制的目标函数是某一控制器控制下的系统的控制总费用函数, 约束条件是该控制器为满足映射定义的控制器, “最优”的含义是, 保证受控系统在合法状态集中运行的前提下, 使控制总费用最小.

Passino 和 Antsaklis^[50], Sengupta 和 Lafortune^[54]等学者主要是基于事件反馈研究了最优控制问题. 以下一些学者主要是在状态反馈控制领域中研究最优控制问题的.

Brave 和 Heymann 把文^[50]的思想用于静态稳定优化问题^[51]中, 与文^[50]类似, 定义了状态转移费用函数, 最优控制目标是找出从任意状态出发到达稳定域中的状态转移费用最小的路径, 并给出了具体构造该状态反馈控制器的方法.

李勇华^[52]给出了两个性能指标: 受控系统的可达状态费用和控制费用, 最优控制目标是找出允许的状态反馈控制使得受控系统的可达状态费用最大而控制费用最小. 与前面的最优控制不同的是, 这里引入可达状态费用后, 使所求的控制器更接近最大状态反馈控制器的含义.

Kumar 和 Garg^[53]定义了两类费用函数: 控制费用函数和惩罚函数(均为一次性费用). 这两类函数的定义与文^[52]类似, 不同的是这里的惩罚费用包括对达到不理想状态和未达到理想状态的惩罚. 系统控制的总费用是这两部分费用之和, 最优控制的目的是使总费用最小. Kumar 等^[53]采用网流技术中的最大流、最小割方法确定最优控制. 其中还提到了部分可观察系统的最优控制问题, 解决方法是将其转化为完全可观察系统来进行

求解. 特别是, 在适当定义控制费用和惩罚函数后, 此方法还可以计算监控问题中的最大可控子语言和最大可控正规子语言. 在文[9]中指出该方法也可以计算状态反馈控制中的最大可控子谓词和最大可控正规子谓词.

另外, 最优控制可分为静态和动态的最优控制. 前者是对同一事件的多次控制中, 取其中一次的控制费用做为该事件的全部控制费用, 如文[52]和[53]; 后者对某一事件的全部控制费用包括对该事件的每次的控制费用, 如文[50]、[51]和[54]. 显然, 动态最优控制问题更接近实际情况.

5 状态反馈控制理论的进一步研究内容

控制综合问题是离散事件系统控制中最基本的问题之一, 需进一步简化相应的求解算法. 在分散状态反馈控制中, 还未考虑相应的控制综合问题及模控制问题.

在稳定性方面, 与静态稳定性相比, 动态稳定性处理了一种意义上更为广泛的稳定性问题, 但其控制方案的设计过程是比较复杂的, 因此需进一步研究简单的算法.

在阻塞问题中, 可进一步讨论(非)阻塞控制器与稳定控制器之间的关系, 考虑能否将阻塞问题统一到动态稳定性问题中.

受控 Petri 网是应用于大型复杂系统控制的一种有效方法, 对其中的死锁和活性等问题的进一步研究仍是目前应用领域中最迫切的任务之一.

最优控制是比较有活力的研究方向, 因为在实际问题中, 不仅要求系统合法运行, 而且追求一定的性能指标. 但由于系统的性能指标与实际背景有联系, 需考虑如何从实际背景中抽象出这些性能指标, 以及如何与控制联系在一起.

状态反馈控制理论以其独有的特点与优势, 已构成了一个相对完善的控制体制, 其最终目的是为实践服务的. 但其应用领域还不是十分广泛, 仍有一定的局限性, 如计算复杂度等. 该理论的进一步发展在很大程度上也取决于该领域中新的应用背景的产生与发展, 必须从实际出发, 不断完善该理论, 使其具有更好的发展前景.

参 考 文 献

- 1 Ramadge P J, Wonham W M. Supervisory control of a class of discrete event processes. *SIAM J. Control and Optimization*, 1987, **25**:206~230
- 2 Ramadge P J, Wonham W M. Modular feedback logic for discrete event system. *SIAM J. Control and Optimization*, 1987, **25**:1202~1218
- 3 Ramadge P J, Wonham W M. The control of discrete event systems. In: Proceedings of IEEE, 1989, **77**:81~98
- 4 郑应平. 离散事件系统理论研究和应用进展(I). 控制与决策, 1996, **12**(2):233~241; (II). 控制与决策, 1996, **12**(3):329~333
- 5 徐心和, 戴连贵, 李彦平. DEDES 监控理论的最新发展. 控制与决策, 1997, **12**(增刊):396~401
- 6 Kumar R, Garg V, Marcus S I. Predicates and predicate transformers for supervisory control of discrete event dynamical systems. *IEEE Trans. On AC*, 1993, **38**(2):232~247
- 7 徐国华, 胡奇英著. 离散事件动态系统的监控方法. 河南科学技术出版社, 1996
- 8 Ushio T. Feedback logic for discrete event system with arbitrary control patterns. *Int. J. Control*, 1990, **52**(1):159~174
- 9 刘勇, 李桂莲. DEDES 控制综合问题的费用优化算法. 西电学报, 1999, **26**(4)

- 10 Li Y, Wonham W M. Control of vector discrete-event system I — the base model. *IEEE Trans. On AC*, 1993, **38**(8):1214~1227; II — controller synthesis. *IEEE Trans. On AC*, 1994, **39**(3):269~279
- 11 胡奇英. 离散事件动态系统监控与马氏决策过程. 中国控制会议论文集, 国防大学出版社, 1997:685~688
- 12 Brave Y, Heymann M. Control of discrete event systems modeled as hierarchical state machines, *IEEE Trans. On AC*, 1993, **38**(12):1803~1819
- 13 Brave Y, Heymann M. Stabilization of discrete-event processes, *Int. J. Control*, 1990, **51**(5):1201~1217
- 14 Ozveren, C. M. and Willsky, A. S. Analysis and control of discrete event dynamics systems: A state space approach. Ph. D Dissert, MIT, Laboratory for Information and Decision Systems, 1989, 8
- 15 杨小军, 郑应平, 杨章钺. 可控 DEDS 的几类稳定性问题. 控制与决策, 1992, **7**:169~175
- 16 Passino M, Antsaklis P J. Lyapunov stability of a class of discrete event systems, *IEEE Trans. On AC*, 1994, **39**(2):269~279
- 17 Passino K M, Burgess K, Michel A N. Lagrange stability and boundedness of discrete event systems. *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, 1995, **5**: 383~403
- 18 Lin F, Wonham W M. Verification of nonblocking in decentralized supervision. *Control-Theory Adv. Technol.*, 1991, **7**(1):19~29
- 19 Takai S, Ushio T, Kodama S. Stabilization and blocking in state feedback control of discrete event systems. *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, 1995, **5**:33~57
- 20 Ushio T. On controllable predicates and languages in discrete-event systems. Oric. In: Proc. Of 28th CDC, 1989:123~124
- 21 杨小军, 郑应平. 离散事件系统监控与状态反馈方法的等价性, 自动化学报, 1993, **19**(6) :670~677
- 22 胡奇英. 离散事件动态系统中的控制综合问题. 控制理论与应用, 1994, **12**(5):557~563
- 23 Li Y, Wonham W M. Controllability and observability in the state feedback control of discrete-event systems. In: Proc. Of 27th IEEE CDC, 1988:203~208
- 24 Takai S, Ushio T, Kodama S. Static-state feedback control of discrete-event system under partial observation. *IEEE Trans. On AC*, 1995, **40**(12):1950~1954
- 25 胡奇英, 刘勇. 部分可观察离散事件系统的状态反馈控制. 中国控制会议论文集, 国防大学出版社, 1998:513~518
- 26 Takai S, Kodama S. M-controllable subpredicates arising in state feedback of discrete event systems. *Int J control*, 1997, **67**(4):553~566
- 27 Ramadge P J. Observability of discrete event dynamic systems. In: Proc. Of 25th CDC, 1986:1208~1212
- 28 Ozveren C M, Willsky A S. Observability of discrete event dynamic system. *IEEE Trans. on AC*, 1990, **35**(7):797~806
- 29 Caines P E, Wang S. Classical and logical based regulation design and its complexity for partially observed automata. In: Proc. Of 28th CDC, 1989:132~137
- 30 Takai S, Kodama S. Decentralized state feedback control of discrete event systems. *Systems & Control letters*, 1994, **22**:369~375
- 31 Takai S, Ushio T, Kodama S. State feedback control of discrete event systems with arbitrary control patterns under partial state observation. In: Proc. 6th Karuizawa Workshop on Circuits and Systems, 1993:267~272
- 32 Li Y, Wonham W M. A state-variable approach to the modeling and control of discrete-event systems. In: Proc. Of 26th Annual Allerton Conf. On Commun. Control and computing, 1988:1240~1249
- 33 Li Y, Wonham W M. Concurrent vector discrete-event systems. *IEEE Trans. On AC*, 1995, **40**(4):628~637
- 34 Li Y, Wonham W M. Concurrent and nondeterministic control of discrete-event systems. In: Proc. Of 28th on CDC, 1989:2731~2736
- 35 Ushio T, Li Y, Wonham W M. Basis feedback, weak interaction, and concurrent well-posedness in concurrent discrete-event systems. In: Proc. Of 28th CDC, 1989:127~131
- 36 Ushio T, Li Y, Wonham W M. Concurrency and state feedback in discrete-event systems. *IEEE Trans. On AC*, 1992, **37**(8):1280~1284

- 37 Ushio T. Maximally permissive feedback and modular control synthesis in Petri nets with external input places. *IEEE Trans. on AC*, 1990, **35**:844~848
- 38 Ushio T, Matsumoto R. State feedback and modular control synthesis in controlled Petri nets. In: Proc. Of 27th CDC, 1988:1502~1507
- 39 Krogh B H. Controlled Petri nets and maximally permissive feedback logic. In: Proc. of 25th Annual. Allerton Conf. University Illinois, Urbana, Sept. , 1987
- 40 胡奇英, 徐国华, 丁振国. 可控并发系统的模型及其状态反馈控制. 陕西师范大学学报(自然科学版), 1995, **23**(增刊):27~31
- 41 Takai S, Ushio T, Kodama S. Concurrency and maximally permissive feedback in Petri nets with external input places. *Int. J. Control*, 1994, **60**(4):617~629
- 42 Holloway L E, Krogh B H. Synthesis of feedback control logic for a class of controlled Petri nets. *IEEE Trans. on AC*, 1990, **35**:514~523
- 43 原忠虎, 徐心和. 离散事件系统的协调反馈控制. 控制理论与应用, 1994, **12**(6):738~742
- 44 邢科义, 胡保生, 陈浩勋, 实时离散事件系统的反馈控制策略, 控制与决策, 1995, **10**(2):170~174
- 45 Holloway L E, Xiaoyi G, Lan Z. A generalization of state avoidance policies for controlled Petri nets. *IEEE Trans. On AC*, 1996, **41**(6):804~815
- 46 Viswanadham N, Narahari Y, Johnson T L. Deadlock prevention and deadlock avoidance in flexible manufacturing systems using Petri net models. *IEEE Trans. On Robotics and Automation*, 1990, **6**(6):713~723
- 47 Ezpeleta J, Jose Manuel Colom, Javier Martinez. A petri net based deadlock prevention policy for flexible manufacturing systems. *IEEE Trans. On Robotics and Automation*, 1995, **12**(2):173~184
- 48 Hsieh F S, Chang S C. Deadlock avoidance controller synthesis for flexible manufacturing systems. In: Proc. 3rd Int. Conf. Integrated Manufacturing, 1992:252~261
- 49 Screenivas R S. On the existence of supervisory policies that enforce liveness in discrete-event dynamic systems modeled by controlled Petri nets. *IEEE Trans. On AC*, 1997, **42**(7):928~945
- 50 Passino K M, Antaklis P J. On the optimal control of discrete event systems. In: Proc. of 28th Conf. On CDC, 1989:2713~2718
- 51 Brave Y, Heymann M. On optimal attraction in discrete event processes. Tech. report CIS 9010, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, Israel 32000, 1990
- 52 李勇华. 离散事件系统的一类最优控制问题. 见:1993年中国控制与决策学术年会论文集, 1993:642~646
- 53 Kumar R, Garg V K. Optimal supervisory control of discrete event dynamical systems. *SIAM J. Control & Optimization*, 1995, **33**(2):419~439
- 54 Sengupta A, Lafortune S. An optimal control problem for discrete event systems, In: Proc. IFAC Symp. On Distributed Intelligent Systems, Arlington, VA, 1991
- 55 Tsitsiklis J N. On the control of discrete event dynamical systems. *Math. Control Signal Systems*, 1989, **2**:95~107

刘 勇 女,生于1974年,1996年毕业于西安电子科技大学,1999年于西安电子科技大学获得系统工程硕士学位,现留校任教,主要研究领域是离散事件动态系统的控制,随机运筹学。

胡奇英 生于1965年,1984年毕业于杭州大学数学系,1987年毕业于西安电子科技大学应用数学系,获硕士学位,现为西安电子科技大学经济管理学院教授、博士生导师,主要研究方向为随机运筹学、离散事件动态系统等,在国内外刊物上发表论文50余篇,出版专著和研究生教材3部。