

文章编号: 1001-0920(2004)01-0007-05

混杂系统的研究进展

郑刚¹, 谭民¹, 宋永华²

(1. 中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学重点实验室, 北京 100080; 2. Brunel 大学电子与计算机工程系, 英国伦敦)

摘要: 混杂系统理论和应用是近年来的一个研究热点. 在介绍混杂系统概念的基础上, 对混杂系统研究中的常用模型进行分类比较, 并对混杂系统的性质分析和混杂控制设计中的主要内容和主要研究方法进行总结, 最后对今后的研究方向做了总体展望.

关键词: 混杂系统; 建模; 分析; 混杂控制设计

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Research on hybrid systems: A survey

ZHENG Gang¹, TAN Min¹, SONG Yong-hua²

(1. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 2. Department of Electronic and Computer Engineering, Brunel University, London, U.K. Correspondent: ZHENG Gang, Email: gang.zheng@mail.ia.ac.cn)

Abstract: A survey on the current research on hybrid systems is presented. First of all, the concept of hybrid systems is introduced, and then some main and typical models and frameworks of hybrid systems are classified and compared. Moreover, main contents and techniques in the analysis of hybrid systems and in the hybrid control design are reviewed. Finally, the further research directions are given.

Key words: hybrid systems; modeling; analysis; hybrid control design

1 引言

混杂系统(HS)主要研究由连续性子系统和离散性子系统相互作用而构成的一类动态系统, 又称混杂动态系统(HDS). 连续性子系统的动态特征随时间发展不断演化, 离散性子系统的动态演化受事件的驱动. 二者相互作用, 使系统的运行轨迹整体上呈现离散位置的迁移, 局部上呈现连续状态的渐进演化. 在综合了连续变量动态系统(CVDS)和离散事件动态系统(DEDs)演化特征的基础上, 表现出更加复杂的动态行为.

混杂系统研究具有广泛的工程背景, 大多数复

杂工业控制系统都包含了由连续变量所描述的物理层的动态演化过程和以符号操作与离散监控决策为特征的高层协调优化过程. 另外, 现代计算机技术的高速发展和普及应用, 为系统的模型化、优化控制和决策问题提供了强有力的技术支持. 以一种统一的更一般化的模式对混杂系统进行系统深入的研究, 已成为当今控制与计算机科学界的前沿热点. 一个联系了控制科学、数学和计算机科学的新的学科体系正在形成.

2 系统建模

混杂系统涉及的领域广泛, 遇到的问题复杂多

收稿日期: 2002-09-09; 修回日期: 2002-11-27.

基金项目: 国家 863 计划基金资助项目(2001AA 422140); 中国科学院海外杰出青年学者基金资助项目.

作者简介: 郑刚(1974—), 男, 河南宜阳人, 博士生, 从事混杂系统理论及应用的研究; 谭民(1962—), 男, 广东新会人, 副所长, 研究员, 博士生导师, 从事机器人控制、系统可靠性理论等研究.

样,很难找到一种通用的模型来解决所有的问题。本文从以下几个方面对混杂系统的主要建模方法加以介绍。

2.1 基于 DEDS 的建模方法

离散事件动态系统主要由离散事件驱动,离散事件之间按照一定的逻辑规则相互作用,推动系统状态的发展演化。离散事件的发生具有不确定性和并发性。DEDS 通常从自动机、Petri 网、极大代数、排队论等多个角度进行研究。以 DEDS 的研究方法为基础,形成了以下几种主要模型:

(1) 自动机模型

利用自动机理论是基于 DEDS 研究混杂系统的一条重要途径。赋时自动机模型从形式语言理论的角度,解决对有限状态机实时性指标的自动验证问题^[1]。混杂自动机模型是赋时自动机模型的扩展^[2,3],系统中每一个状态的连续动态行为由一个微分方程集合描述。混杂自动机模型作为混杂系统形式描述和算法分析的一般框架,已解决了一些实际领域中的验证问题、可控性问题和优化问题。文献[3]中广义混杂自动机模型是对混杂自动机模型的推广,具有模块化的特征,多个子系统可以进行组合,用于对复杂大规模系统的研究。文献[2]以无限状态自动机为基础,提出用混杂 I/O 自动机模型来研究混杂系统。

(2) 层次结构模型

文献[2]提出一种层次结构模型。系统由三部分构成:控制器、接口和对象,如图 1 所示。控制器被看作一个由自动机描述的离散事件动态系统,它作为监控器通过接口接受事件,监督对象的行为;同时执行调度、优化等操作,并发出命令事件,通过接口控制底层对象的行为。对象是一个连续动态系统,受到监控器的控制,它的连续演化行为一般具有间歇性,通常用微分或差分方程描述。接口由一个事件生成器和一个执行器构成,完成离散变量与连续变量之间的相互转化。

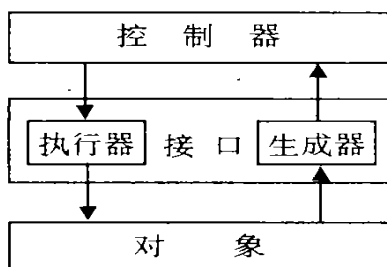


图 1 混杂系统的层次结构

(3) 混杂 Petri 网(HPN)

Petri 网是研究 DEDS 的重要工具,尤其适合对异步并发系统的建模和分析。混杂 Petri 网模型可分为两大类^[4]:具有连续位置的混杂 Petri 网和具有连续变量形式的混杂 Petri 网。连续位置的 HPN 模型包含离散和连续两类位置,分别对应于离散和连续状态。这类模型有 HPN 模型^[5]、流随机 Petri 网模型和微分 Petri 网模型等^[4]。

受混杂自动机模型的启发,在连续变量形式的 HPN 模型中,离散的 Petri 网描述事件驱动的动态过程,离散状态用网络中的状态标识表示;同时引入连续变量表示系统状态的连续部分,连续动态过程用微分代数方程表示,并不出现在网络结构中。这类模型有 HPN 模型^[6]、DA E-net 模型^[7]以及基于高层 Petri 网技术描述复杂连续过程行为的 HPN 模型^[8]等。

间歇 Petri 网模型介于前两类 Petri 网模型之间,模型中除具有连续和离散位置外,又引入了连续变量。该模型适合描述工件间歇加工过程^[9]。

混杂自动机和混杂 Petri 网模型总体上都是基于状态转换的思想提出的,但在处理复杂问题时,可能遇到状态爆炸的情况,使后面的分析工作无法进行下去。层次结构模型是在监督控制的思路下提出的一种自治系统结构,适用于监督控制系统的分析和设计。从 DEDS 角度研究混杂系统的模型还有:混杂符号动力学模型、相变迁系统模型、随机混杂模型^[10]等。

2.2 基于 CVDS 的建模方法

传统的系统与理论主要研究物理对象随时间的连续性演化规律,对象的数学模型用微分方程或差分方程表示,借助于数学理论对系统进行分析、控制和综合。以连续系统研究为基础,考虑离散行为并引入逻辑处理机制,便形成混杂系统研究的另一类方法。

(1) 切换系统模型

切换系统用多个控制器按切换方式控制一个连续对象。切换通常分为基于时间切换、基于空间切换和基于逻辑切换 3 种方式。基于时间的切换系统处理比较简单,基于空间的切换系统涉及状态空间划分、稳定性以及滑模控制等诸多问题。文献[11]提出一种基于逻辑切换的切换系统模型,并设计了基于逻辑切换的系统控制器。

(2) 混合逻辑动态系统模型(MLD)

Morari 提出的 MLD 模型是在连续性的基础上

进行的离散化扩展, 由相互依赖的物理规律、逻辑法则和操作约束共同描述系统。控制对象的操作约束、逻辑规则和连续动态特性集成为带有混合整数不等式约束的状态方程形式, 用于解决复杂工业过程系统的建模、仿真、优化、状态估计和故障检测等问题^[12, 13]。

(3) 事件-流公式(EFF)

EFF 模型是将描述系统中连续性特征的微分代数方程(称为流子句)和描述离散事件特征的状态转换关系(称为事件子句), 经逻辑“或”的运算组成布尔型公式, 在保证流子句和事件子句同时为真的情况下, 通过对系统解的分析来研究整个系统的动态过程^[3]。该模型除状态变量外, 还定义了通讯变量, 用于与外界发生相互作用。它具有模块化的特征, 各个模型间可通过逻辑运算以及通讯变量间的联系进行组合, 用于描述大规模系统。

基于 CVDS 的模型还有将线性跳系统与有限自动机结合的混杂控制模型^[14]、仿射型混杂控制模型^[15]等。

2.3 其他建模方法

除上述两大类建模方法外, 还有如下一些建模方法:

(1) 动态系统模型

Witsenhausen 最早研究了一类具有混杂状态的连续时间动态系统的优化问题^[16]。Tavernini 提出微分自动机模型, 用数字估计方法讨论了混杂系统轨迹的收敛性^[17]。Matveev 和 Savkin 以微分自动机模型为基础, 对服务器流网络进行分析^[18]。Branicky 提出了广义混杂动态系统和受控动态系统模型, 在此基础上讨论了可达性、轨迹计算、稳定性和最优控制问题^[19]。

(2) 多 Agent 模型结构

文献[2]提出了多 Agent 混杂系统结构 [20]。基于博弈论和最优控制, 提出多 Agent 的混杂系统设计与验证方法 [21]。利用博弈论中的冲突化解方法来研究多 Agent 系统, 用于空中交通管理系统和高速公路自动管理系统。

(3) 仿真模型

仿真模型利用高速发展的计算机技术, 用特定的语言体系(如 SIGNAL 语言和 SHIFT 语言)或专门仿真工具(如 HYTECH, CHARON)描述混杂系统, 编制程序对系统运行规律进行仿真验证^[2, 10, 22]。

3 混杂系统分析

本文重点对混杂系统分析中涉及的稳定性、可

达性和可行性等性质进行讨论。关于能控性与能观性、鲁棒性以及故障诊断等方面的研究, 可参阅文献 [3, 13, 23]。

(1) 稳定性

稳定性是混杂系统分析研究的热点问题, 焦点集中在如何将传统的 Lyapunov 稳定性理论扩展到混杂系统。一种处理方法是定义不变集及相应的稳定性概念, 结合连续系统稳定性理论来分析混杂系统。对于切换型混杂系统, 文献[19]采取寻找多重 Lyapunov 函数的方法进行分析。对于具有非线性特征的混杂系统, 文献[22]利用线性矩阵不等式理论, 将寻找分段二次 Lyapunov 函数作为一个凸优化问题予以解决。此外, 还可利用计算机进行仿真验证, 分析混杂系统的稳定性^[14]。

(2) 可达性

混杂系统可达性分析作为符号模型的检查方法, 研究系统能否到达预期状态, 是验证混杂系统安全性的重要技术。可达性问题可分为自动机可达性问题和连续时间线性系统可达性问题。前者处理相对简单, 但低维数系统的连续可达性问题仍没有完全解决^[3, 24]。计算不同类型系统的可达集成为一个研究热点, 它可用于验证混杂系统的安全性, 其部分结果还可用于控制综合。

(3) 可行性

混杂系统可行性是指系统发生无限多次离散变迁的能力, 用于表示系统状态轨迹的安全性和公平性。为保证可行性, 必须限制系统的演化行为, 使得离散迁移在可行核内发生。可行核是由迁移使能条件决定的系统状态空间子集。文献[25]对具有非确定性离散和连续行为的混杂系统, 给出了可行核的连续性属性以及计算可行核的条件, 并设计了一个混杂控制器来产生所有的可行性轨迹。

4 混杂控制设计

混杂控制设计的研究主要涉及系统安全性、可达性验证算法设计、混杂系统镇定、监控器设计、优化设计等。其他如递阶混杂控制器设计、鲁棒控制器设计等, 可参阅文献[12, 26]。

(1) 验证算法设计

混杂系统中验证的目的就是检查系统是否存在破坏系统技术指标的轨迹, 保证系统的安全性。系统可达集算法设计是验证算法设计的重要内容。可用博弈理论或受控不变性理论设计可达性算法, 以保证系统的安全性^[3]。对于非线性混杂自动机表示的混杂系统, 可采用互模拟技术近似为线性混杂自动

机,进而转换为近似的全离散有限自动机来设计验证算法;也可基于赋时自动机的定理证明方法进行验证算法设计.关于验证方法的详细综述参见文献[24].

(2) 系统镇定

混杂系统的镇定问题比较复杂,关于切换型混杂系统镇定的研究已取得了一定的进展.混杂控制对实现某些连续系统的镇定十分有效.文献[3]讨论了对切换系统的二次镇定问题,并讨论了一类非线性连续系统在不能通过连续状态反馈实现镇定的情况下,通过切换反馈控制可以实现镇定.文献[27]讨论了一类非线性系统设计混杂反馈控制器实现镇定的方法.

(3) 监控器设计

针对图1所示的混杂系统层次结构模型,可将底层连续系统和接口层看作一个DEDS对象,用DEDS理论中的方法设计监控器,通过接口层实现对底层连续系统的监控.也可利用计算机科学中的形式化描述方法,用严格的形式描述与推理进行自上而下的精化设计^[2,28].

(4) 混杂系统优化

优化是混杂系统研究的主要内容.优化目标是在一定的约束条件下,一方面通过对事件发生的逻辑选择来实现优化决策,保证系统在各个不同阶段的动态演进;另一方面要在允许的连续控制域中寻求控制律,保证系统以尽可能小的性能指标来消除状态误差.为此,需将传统的优化控制方法推广到混杂系统中.

Branicky从动态系统角度研究了混杂系统的最优控制问题^[19].文献[29]从DEDS的角度,利用变量计算技术和极大值原理研究了制造过程中的优化问题.[30]基于动态规划和凸优化的思想,将Bellman不等式离散化,设计最优反馈控制算法.[10]基于互模拟并用离散方法解决混杂系统优化控制问题.[12]基于混杂系统的MLD模型,采用混合整数线性规划方法解决混杂系统的在线优化和离线优化问题.[16]研究了混杂系统多目标优化问题,由系统安全性构造安全操作空间,然后结合非线性优化技术对性能目标进行优化.混杂系统的优化方法已应用于电力系统、化工系统的优化调度和稳定控制,保证了工业系统的经济安全运行,具有重要的实际意义^[31~35].

5 展望与结论

混杂系统理论及应用的研究已取得了很大的进

展,但混杂系统仍有许多问题需要解决,主要体现在以下几个方面^[3,10,12,32~36]:

1) 混杂系统的现有模型多是针对具体问题加以研究,从通用的角度进行建模,将离散事件理论和成熟的连续系统理论相结合,将是一条有效的途径.

2) 对实际系统过度抽象后得到的模型容易出现Zeno现象,使系统在某个时刻发生无穷多次状态迁移.由于实际物理系统中并不存在Zeno现象,建模时如何回避Zeno现象以及对Zeno现象发生后的处理方法,是混杂建模研究的另一个重要方向.

3) 描述实际大规模复杂系统应考虑模块化的建模方法,多个模块按某种方式组合起来构成大规模系统,在此基础上进行分析和控制.另外,研究递阶混杂系统或分散式混杂系统也是一条重要的解决途径.

4) 混杂系统的研究工作集中在对系统可达集的准确或近似计算方面,但由于混杂系统的复杂性,多数情况下难以给出显式解,系统可达性计算或停留在定性分析的概念层次,或算法十分复杂.如何计算系统可达集以及如何简化算法,将是一个重要的研究方向.

5) 混杂系统能控性和稳定性的研究,对于系统综合设计和优化控制具有决定性意义,但要获得一般性结果却存在着困难.在探索简化复杂性的一般方法的同时,也可针对具体问题,按照分散集约的方式获得相关结果.

6) 混杂系统应用研究相比理论研究显得有些滞后,但已在智能交通系统、空中交通控制、机器人系统、化工系统、制造系统、电力系统等领域取得了一定成果.除上述领域外,在大规模复杂工业系统、互联网系统、生物分子网络等领域也有广阔的应用前景.

混杂系统研究经过多年的发展,逐渐形成了较为成熟的理论和方法,在应用领域也取得了一定的成果.混杂系统研究的进一步发展,不仅需要在理论方面继续深入和完善,而且应注重于实际应用,展开系统的全方位的研究.

参考文献(References):

- [1] Alur R, Dill D. A theory of timed automata [J]. *Theoretical and Computer Science*, 1994, 126 (2): 183-235.
- [2] Grossman R L, Nerode A, Ravn A P, et al. *Hybrid Systems — Lecture Notes in Computer Science* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1993.

- [3] Van der Schaft A, Schumacher H. *An Introduction to Hybrid Dynamical Systems* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [4] Febraro A D, Giua A, Menga G. Special issue on hybrid Petri nets [J]. *Discrete Event Dynamical Systems: Theory and Applications*, 2001, 11(1/2): 5-8.
- [5] Le Bail J, Alla H, David R. Hybrid Petri nets [A]. *Proc 1st Int European Control Conf* [C]. Grenoble, 1991. 1472-1477.
- [6] Valentin Roubinet C. Modeling of hybrid systems: DAE supervised by Petri nets: The example of a gas storage [A]. *Proc 3rd Int Conf on Automation of Mixed Process* [C]. Reims, 1998. 142-149.
- [7] Champagnat R, Esteban P, Pingaud H, et al. Petri net based modeling of hybrid systems [J]. *Computers in Industry*, 1998, 36(1/2): 139-146.
- [8] Giua A, U sai E. Modeling hybrid systems by high-level Petri nets [J]. *European J of Automation A PII-JESA*, 1998, 32 (9/10): 1209-1231.
- [9] Caradec M, Prunet F. Modeling of hybrid flexible production systems by colored batches Petri nets [J]. *European J of Automation A PII-JESA*, 1998, 32 (9/10): 1255-1269.
- [10] Goos G, Hartmanis J, Van Leeuwen J. *Hybrid Systems: Computation and Control — Lecture Notes in Computer Science* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [11] Ilya Kolmanovsky, Elmer G Gilbert. Multimode regulators for systems with state and control constraints and disturbance inputs [A]. *Control Using Logic Based Switching — Lecture Notes in Control and Information Sciences* [C]. Berlin: Springer-Verlag, 1996. 105-117.
- [12] DiBenedetto M D, Sangiovanni Vincentelli A. *Hybrid Systems: Computation and Control — Lecture Notes in Computer Science* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2001.
- [13] Morse A, Pantelides C, Sastry S, et al. A special issue on hybrid systems [J]. *Automatica*, 1999, 35 (3): 347-535.
- [14] Alur R, Henzinger T A, Sontag E D. *Hybrid Systems III: Verification and Control — Lecture Notes in Computer Science* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996.
- [15] Lemmon M, Antsaklis P. Inductively inferring valid logical models of continuous-state dynamical systems [J]. *Theoretical Computer Science*, 1995, 138 (1): 201-210.
- [16] Witsenhausen H S. A class of hybrid-state continuous-time dynamical systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1966, 11(2): 161-167.
- [17] Tavernini L. Differential automata and their discrete simulators [J]. *Nonlinear Analysis Theory, Methods and Applications*, 1987, 11(6): 665-683.
- [18] M atveev A, Savkin A. *Qualitative Theory of Hybrid Dynamical Systems* [M]. Boston: Birkhauser, 1999.
- [19] Branicky M S, Borkar V, Mitter S. A unified framework for hybrid control: Model and optimal control theory [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43 (1): 31-45.
- [20] Lygeros J, Godbole D N, Sastry S. Multi-agent hybrid system design using game theory and optimal control [A]. *Proc 35th CDC* [C]. Kobe, 1996. 1190-1195.
- [21] Cassandras C D, Pepyne D L. Optimal control of a class of hybrid systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001, 46(3): 398-415.
- [22] Antsaklis P J, Nerode A. Special issue on hybrid control systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(4): 457-579.
- [23] Antsaklis P J, Kohn M, Lemmon M, et al. *Hybrid Systems V: Lecture Notes in Computer Science* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1999.
- [24] 萧德云, 莫以为. 混合系统的验证与控制综合 [A]. 第 21 届中国控制会议论文集 [C]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002. 635-641.
- [25] Deshpande A, Varaiya P. Viable control of hybrid systems [A]. *Proc 35th CDC* [C]. Kobe, 1996. 1196-1201.
- [26] 陈宗基, 杨振宇. 混合系统的描述、分析与设计 [J]. 高技术通讯, 1997, 7 (11): 50-55.
(Chen Zong-ji, Yang Zhen-yu. The description, analysis and design of hybrid systems [J]. *High Technology Letters*, 1997, 7(11): 50-55.)
- [27] Kolmanovsky I, McClamroch N H. Hybrid feedback laws for a class of nonlinear cascade systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1996, 41 (11): 1271-1281.
- [28] Antsaklis P J, Kohn W, Nerode A, et al. *Hybrid Systems II: Lecture Notes in Computer Science* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1995.

(下转第 16 页)

波器的存在条件和显式表达式 所得结果可将连续系统和离散系统 H_∞ 滤波的有关结果统一到Delta算子框架

参考文献(References):

- [1] 张端金, 王忠勇, 吴捷 系统控制和信号处理中的Delta算子方法[J]. 控制与决策, 2003, 18(4): 385-391.
(Zhang D J, Wang Z Y, Wu J. Survey on systems control and signal processing using the delta operator [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(4): 385-391.)
- [2] 邵锡军, 杨成梧 具有约束方差的不确定性Delta算子系统的鲁棒滤波器设计[J]. 兵工学报, 2001, 22(3): 312-316.
(Shao X J, Yang C W. Robust filter design of delta operator systems with time varying uncertainty and error variance constraints [J]. *Acta Automatica*, 2001, 22(3): 312-316.)
- [3] 张端金, 王忠勇, 吴捷 Delta算子描述的离散系统鲁棒滤波[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(1): 71-73.
(Zhang D J, Wang Z Y, Wu J. Robust filtering for delta operator formulated discrete time systems [J]. *System Engineering and Electronics*, 2003, 25(1): 71-73.)
- [4] Middleton R H, Goodwin G C. Improved finite word length characteristics in digital control using delta operators [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1986, 31(11): 1015-1021.
- [5] Wang Z, Huang B. Robust H_2/H_∞ filtering for linear systems with error variance constraints [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2000, 48(8): 2463-2467.
- [6] 张端金, 吴捷, 杨成梧 Delta算子系统圆形区域极点配置的鲁棒性[J]. 控制与决策, 2001, 16(3): 337-340.
(Zhang D J, Wu J, Yang C W. Robustness of pole assignment in a circular region for delta operator systems [J]. *Control and Decision*, 2001, 16(3): 337-340.)
- [7] Yang F, Hung Y S. Robust H_∞ filtering with error variance constraints for uncertain discrete time systems [A]. *Proc IEEE Int Conf on Control Applications* [C]. Anchorage, 2000. 635-640.
- [8] Zhang D J, Wu J. Robust H_∞ control for the delta operator formulated uncertain systems with circular pole constraints [A]. *Proc Int Conf on Control and Automation* [C]. Xiamen, 2002. 2377-2381.
- [29] Petyne D L, Cassandras C G. Optimal control of hybrid systems in manufacturing [J]. *Proc of the IEEE*, 2000, 88(7): 1108-1123.
- [30] Hedlund S, Rantzer A. Optimal control of hybrid systems [A]. *Proc 38th CDC* [C]. Phoenix, 1999. 3972-3977.
- [31] 秦世引, 宋永华 混杂控制系统的结构体系分析[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(11): 5-9.
(Qin Shi-yin, Song Yong-hua. The analysis of architecture of hybrid control systems [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2000, 24(11): 5-9.)
- [32] Antsaklis P J, Lemmon M D. Special issue on hybrid systems [J]. *Discrete Event Dynamical Systems: Theory and Applications*, 1998, 8(2): 99-131.
- [33] Henzinger T A, Sastry S. *Hybrid Systems: Computation and Control — Lecture Notes in Computer Science* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1998.
- [34] Vaandrager F W, Van Schuppen J H. *Hybrid Systems: Computation and Control — Lecture Notes in Computer Science* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1999.
- [35] Tomlin C J, Greenstreet M R. *Hybrid Systems: Computation and Control — Lecture Notes in Computer Science* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2002.
- [36] 郑大钟, 赵千川 离散事件动态系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.

(上接第11页)