

文章编号: 1000-8152(2002)01-0001-08

混合动态系统及其应用综述*

莫以为 萧德云

(清华大学自动化系·北京,100084)

摘要: 在概述混合动态系统产生背景与发展近况的基础上,主要综述了混合动态系统研究中的若干重要问题,包括描述混合动态系统的常见工具,如自动机和 Petri 网,以及混合动态系统的模型描述方法及用于描述混合动态系统的递阶结构模型和混合逻辑动态模型,对混合动态系统控制器的设计和验证及其在故障诊断等方面的应用研究也作了介绍,同时对混合动态系统的一些主要研究成果进行初步评价。

关键词: 混合动态系统; 离散动态系统; 连续动态系统; 自动机; Petri 网

文献标识码: A

Overview of Hybrid Dynamic System and Its Application

MO Yiwei and XIAO Deyun

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing, 100084, P. R. China)

Abstract: After the background and up-to-date development of hybrid dynamic system are introduced, a summary including some major problems in hybrid dynamic system study is given. Firstly, popular tools for describing the hybrid dynamic system, such as automaton and Petri nets, are introduced. Along with description approaches of the hybrid dynamic system, the hybrid system model, e. g. hierarchical model and mixed logic dynamic model, are explained in detail. Then controller design, verification and fault diagnosis of hybrid dynamic system are presented, and their primary results are summarized as well. Finally, some remarks on these issues are given.

Key words: hybrid dynamic system; discrete dynamic systems; continuous dynamic systems; automaton; Petri nets

1 引言(Introduction)

包含离散事件动态系统 DEDS(discrete event dynamic systems)和连续变量动态系统 CVDS(continuous variable dynamic systems)、两者又相互作用的系统称混合动态系统 HDS(hybrid dynamic systems)。一些系统本身特性的不连续、嵌入式系统的广泛应用,以及对控制系统性能要求不断提高,在处理系统模型不确定性的同时需要克服对象、环境、控制目标等不可预测的变化,根据系统连续量变化与离散事件的发生来改变控制算法,这些都是混合系统研究受到重视的原因。为简单起见,本文把被控混合动态系统(controlled hybrid dynamic system)也简称混合系统。

第一篇研究混合系统的文献出现于 1966 年(Witsenhausen)^[1], 1979 年瑞典人 Cellier 第一个引入混合系统结构的概念,把系统分为离散、连续和接口三个部分^[2], 1989 年 Golli 针对计算机磁盘驱动器模型引入混合系统的概念,把连续部分和接口结合起来进行研究^[3]。总的说来,混合系统的研究尚处于开拓阶段,其理论基础和应用研究都是研究的热点。混合系统的种类繁多、研究范围广泛,需要跨学科合作,应该集控制、辨识、估计、通讯、计算机科学、人工智能等多领

域理论和技术方法才可能获得突破。混合系统专题讨论会的论文集收集了该领域近几年研究进展与成果^[4~9],很有参考价值。国外比较有影响的学者有 Nerode A., Henzinger T. A., Varaiya P., Grossman R. L., Antsaklis P. J., Stiver J. A., Lemmon M. D., Krogh B. H., Branicky M. S., Lygeros J., Peleties P., Lennartson B., Mosterman P. J., Sastry S., Alur R. 和 Kohn W. 等,他们分别来自数学、计算机科学、控制工程等领域。在国内,这方面研究也已开始起步,相关文献还不太多^[10~15]。

本文主要介绍混合系统近年来一些重要的研究成果。本文第 2 部分讨论混合系统的模型描述,第 3 部分介绍混合系统的分析与设计,第 4 部分介绍混合系统的应用研究,第 5 部分给出结论。

2 混合系统的模型描述(Model description of hybrid system)

在混合系统研究中,人们引入不同的模型,大都是用一组常微分方程来描述系统连续部分特性,用离散事件模型来表示系统离散部分特性,区别是在出于不同领域和研究目的,对离散特性及离散与连续部分接口的描述方式不尽相同,有各自独特的结构。

* 基金项目:国家 863 计划 CIMS 主题(511-45-010-98)资助项目。
收稿日期:2000-01-24; 收修改稿日期:2001-04-16。

2.1 描述混合系统的常见工具 (Popular tools for describing hybrid system)

用于描述混合系统离散部分最常见的工具是自动机和 Petri 网及其变种.

2.1.1 自动机 (Automaton)

有限状态自动机是用于描述离散事件最常见的模型,也用于描述混合系统.自动机是从计算机科学继承来的,用若干顶点和顶点间的弧来表示系统的状态(以标识——Marking 表示)和状态间的转移(用逻辑表达式控制),可用来分析系统诸如锁死、存活和安全等性质.显然,要对传统自动机进行扩展才能用来描述混合系统.被广泛接受的模型是 Alur 等人提出的把动态特性引入自动机结点且状态转移依赖于结点状态值而得到的定时自动机 (timed automata) 和混合自动机 (hybrid automata) [16,17],常用三元组 (N, Δ, L) 表示,其中 N 表示离散事件子系统的有向图, Δ 代表系统的连续动态特性(目前多为积分过程), L 表示 N 和 Δ 的关系.利用自动机模型可以分析、研究和设计混合系统 [18,19],如 Stiver 利用有限自动机将逻辑监控框架扩展到混合系统 [20].相对 Petri 网而言,自动机的规则较简单、直观,但用于混合系统建模、分析和综合时,有显著的局限性,主要表现在模型的复杂性上(其离散状态空间数随过程数目按指数方式增加),对并发过程进行建模时尤为突出.

2.1.2 Petri 网 (Petri nets)

Petri 网可看作广义有限状态自动机,亦可看作有向图,有库所 (Place) 和转换 (Transition) 两类顶点.与自动机不同, Petri 网的标识规则比较复杂,但允许对系统的同步现象进行处理,是对复杂系统的并发及冲突现象建模的好工具,被广泛应用 [12,21-25],其表达形式紧凑(顶点少),且结合使用局部顺序语义学,可用一种比自动机更加有效的方式对 Petri 网状态进行搜索.经扩展得到各种变种的 Petri 网,如文 [23] 定义微分库所、微分转移以及适当规则,构成微分 Petri 网,以解决系统性能分析和监控设计等问题.

2.1.3 其它工具 (Other tools)

下面给出另外两个用于描述混合系统有代表性的工具.

1) Grafset 图.

Grafset 称顺序功能图,是用于描述离散事件的工具,也能作为描述和实施顺序算法的图形语言.包括步 (Step——与状态有关,若状态是活的,相应的活动被执行) 和转换 (Transition 条件满足时,转换就激活,使下一步处于活动状态) [21,22,26,27].

2) 混合键图.

混合键图法 (hybrid bond graph) 是由 Mosterman 等人提出 [28-30],与前述工具不同,是从连续系统建模方法扩展而来,在传统键图建模方法基础上,引入用于表示离散事件的理想开关和控制结点来描述系统中连续量与离散量的互作用.

2.2 混合系统模型描述 (Model description of hybrid system)

对混合系统的处理方法可大致分为两类:“聚合” (aggre-

gation) 和“延拓” (continuation).“聚合”法将整个系统看成离散事件动态系统(如自动机)的某种扩展,只考虑系统的聚合动态特性,通过对连续系统状态空间进行分区来实现.“延拓”法将整个系统当作一个微分方程(组)来处理,实现方式:或将离散活动“嵌入”常微分方程(如后介绍的 MLD 模型),或将离散活动看作微分方程的干扰(如未建模动态特性、慢变系统等)或者独立的连续系统.这两种方法都过于保守,“聚合”方法经常遇到因分区而导致自动机非确定性问题;“延拓”法或可导致现有工具不能处理的非线性,或离散动态特性连续化后需要用鲁棒控制、增益调度、跳跃线性系统来进行控制设计,由于存在相互冲突会导致保守的设计

2.2.1 递阶结构混合系统模型 (Hierarchical hybrid system model)

这是较典型的混合系统模型,属于“聚合”法模型.模型连续部分用微分方程表示,离散部分以自动机形式描述,两者间有两个接口(一个把事件映射到实数向量,另一个相反).下面以 Antsaklis [31], Lemmon [32], Stiver [20,33,34] 考虑的系统为例说明这种模型的结构,如图 1.此外, Nerode 和 Kohn 也提出一种递阶结构混合系统模型 [19],其本质上与 Stiver 的模型是一样,只是接口部分的形式稍异,下面是递阶结构混合系统模型描述:

对象模型: $\dot{x} = f(x, r), z = g(x)$, 其中 $x \in \mathbb{R}^n, r \in \mathbb{R}^m, z \in \mathbb{R}^p$ 分别是状态、输入和输出, $f: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n, g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$.

接口:包括两个无记忆映射 γ 和 $\alpha, \gamma: \bar{R} \rightarrow \mathbb{R}^m$ 称执行函数,将控制器符号序列转为分段保持恒定的对象输入 $r(t) = \gamma(\bar{r}[n])$; $\alpha: \mathbb{R}^n \rightarrow \bar{Z}$ 为对象符号发生函数,将对象状态空间分为不同区域, $x(t)$ 进入时就产生相应事件即映射到对象符号集 $\bar{z}[n] = \alpha(x(t))$.

控制器:自动机 $(\bar{S}, \bar{Z}, \bar{R}, \delta, \phi)$, 其中 \bar{S} 为状态集, \bar{Z} 为对象符号集, \bar{R} 为控制符号集, $\delta: \bar{S} \times \bar{Z} \rightarrow \bar{S}$ 是状态转移函数, $\phi: \bar{S} \rightarrow \bar{R}$ 是输出函数.控制器的活动由方程 $\bar{s}[n] = \delta(\bar{s}[n-1], \bar{z}[n]), \bar{r}[n] = \phi(\bar{s}[n])$ 决定.

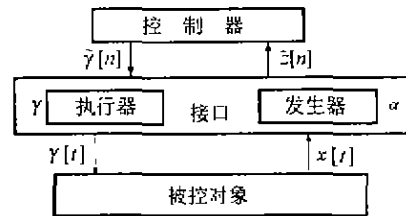


图 1 递阶结构模型

Fig. 1 Hierarchical structure model

2.2.2 Branicky 混合系统模型 (Branicky's hybrid system model)

Branicky 提出一种针对混合系统分析设计的模型框架 [35-38],是比较一般化的规范描述形式,目的是把现有控制理论成果融入混合系统研究中.被控混合动态系统模型形式为 $H_c = [Q, \Sigma, A, G, V, C, F]$, 其中 V ——离散控制, C ——被控跳变集, F ——被控跳变目标集.在某些条件下,该系统

将变成混合动态系统 $H = [Q, \Sigma, A, G]$, 式中 Q ——离散状态, Σ ——连续系统, A ——自治跳变集, G ——自治跳变转移映射. Branicky 模型能表达连续状态在断点处的数值, 但无明确的输出函数, 且不讨论由于模型通过各种连接关系构成不同模型的问题(见图 2). Branicky 在该框架下将李雅普诺夫函数应用于切换混合系统的稳定性分析, 并将传统优化控制策略应用到混合系统设计中.

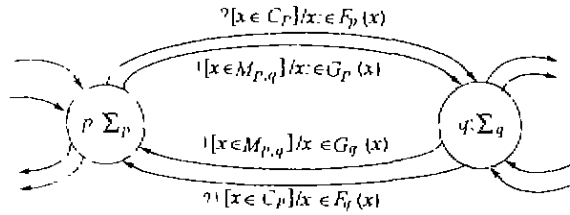


图 2 Branicky 模型

Fig 2 Branicky's model

2.2.3 Lennartson 混合系统模型(Lennartson's hybrid system model)

在 Alur 提出混合自动机基础上^[16], Lennartson 提出一混合系统模型^[39]. 其特色是将开环对象和闭环系统分开, 适合于控制系统分析和综合. 模型由混合对象和离散控制器组成, 用九元自动机描述 $HP = (Q_h, \Sigma_h, \delta_h, X, W, f, g, \gamma_p, \alpha)$, 包括离散子系统 (Q_h ——离散状态集, Σ_h ——混合对象事件和 $\delta_h: Q_h \times \Sigma_h \rightarrow Q_h$ ——转移函数); 连续子系统 ($X \subseteq \mathbb{R}^n$ ——实值状态空间, $W \subseteq \mathbb{R}^m$ ——实值输入信号空间, $f: X \times W \rightarrow X$ 连续状态向量 $x(t)$ 的变化规律和 $g: X \times Q_h \times \Sigma_h \rightarrow X$ 连续状态切换转移规律); 连续与离散相互作用 ($\gamma_p: X \rightarrow \Sigma_p$ ——事件发生器, $\alpha: Q_h \rightarrow W$ ——从离散状态集 Q_h 到输入信号 $u(t)$ 的映射).

2.2.4 混合逻辑动态模型(Mixed logic dynamical model)

Bemporad 等提出一种属于“延拓”法的混合系统建模方法^[40-43], 利用不等式来描述命题逻辑关系和系统中存在的固有特性等约束关系, 并加入系统差分方程中, 形成一种可描述多种类型混合系统描述方法, 称为混合逻辑动态 MLD (mixed logical dynamical) 模型描述法, 目的是将传统控制技术(如优化、预测等技术)引入混合系统中. MLD 模型可描述线性混合系统、序列逻辑系统(有限状态机、自动机)、与组合逻辑一起表达本身特性的非线性系统、某类离散事件系统、有约束的线性系统等. 混合逻辑动态模型一般可描述为:

$$\begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + B_1u(t) + B_2\delta(t) + B_3z(t), \\ y(t) = Cx(t) + D_1u(t) + D_2\delta(t) + D_3z(t), \\ E_2\delta(t) + E_3z(t) \leq E_1u(t) + E_4x(t) + E_5. \end{cases}$$

其中, x, u, y 分别是系统的状态、输入、输出. 状态变量分连续和离散两部分, 即 $x = [x_c \ x_d]^T \in \mathbb{R}^n, x_c \in \mathbb{R}^n, x_d \in \{0, 1\}^n, u \cong u_c + u_d$. 模型采用差分方程来描述带来的好处: 首先可避开系统一些复杂行为如 Zeno 特性(极短时间内在不同模式间切换无限次); 其次, 在离散时间处考虑不等式限制合理且除一些二位值外把动态特性限制在线性范围, 极大

简化了对象. MLD 模型也有缺点, 如模型不唯一; 因变量中加入整数量, 在使用连续系统常规理论工具方法来分析设计系统时, 遇到计算复杂性问题(NP 问题).

2.2.5 其它模型(Other models)

① Witsenhausen 模型^[1], 包括连续动态特性, $x(t) = f(x(t), m(t), u(t)), m^+(t) = \phi(x(t), m(t), u(t), \delta(t))$, 切换集 $S_{i,j} = \{x \in \mathbb{R}^n \mid m_j = \phi(x, m_i)\}_N, i \in I_N, j \in I$. 该模型没有对系统离散输入, 离散状态完全依赖连续和离散变量.

② Tavernini 模型^[44], 不包括任何输入, 是一个自治系统, 如图 3 所示. 每个结点代表系统的一个模式(与 $x = f_i$ 相联系), 转移条件是 σ_{ij} .

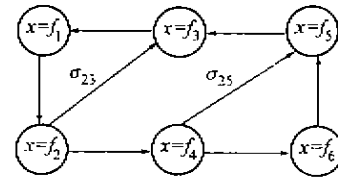


图 3 Tavernini 模型

Fig. 3 Tavernini's model

③ Peleties-DeCarlo 模型^[45]. 系统连续特性用一阶非线性微分方程描述, 离散事件部分用 Petri 网建模的决策系统表示(连续部分由离散事件部分监控). 从连续动态特性产生的事件对离散事件系统特性产生影响, 反之离散事件决策也对连续动态特性产生影响.

④ Alur 模型^[16,17]. 对自动机的每一状态引入连续状态, 其变化由确定的函数(微分方程)来表示, 系统离散状态的改变依赖于连续变量和离散变量的变化.

⑤ Pettersson 模型^[46]. $H = (\mathbb{R}^n \times M, \mathbb{R}^p \times \Sigma, f, \phi)$, 如图 4 所示, 每一项的含义不赘述, 通过串、并、反馈等方式可构成各种复杂的混合系统.

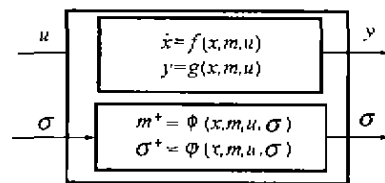


图 4 Pettersson 模型

Fig. 4 Pettersson's model

⑥ Do gruel 模型^[47]. 与模型⑤相似, 区别是离散状态的输出不考虑输入量的影响.

3 混合系统的分析与设计(Analysis and design of hybrid system)

3.1 混合系统分析(Analysis of hybrid system)

对于混合系统, 除要分析研究一般问题如稳定性、可控性和可达性外, 还要研究其一些特殊问题, 如建模的分区和系统综合的控制器验证等.

3.1.1 混合系统的一般问题(General problems in hybrid system)

与其它领域一样, 混合系统的稳定性是首要问题, 相应

文献较多^[14,24,35,37,41,46-54]。利用李雅普诺夫稳定性定理得到的结果见文[35]和文[46]。文[37]给出多系统切换稳定充分条件:如存在类李雅普诺夫函数族(若第 j 模式中 V_j 是非增的,称 V_j 为类李雅普诺夫函数族),那么在李雅普诺夫意义上系统是稳定的;文[51]利用线性矩阵不等式(LMI)来确定分段二次类李雅普诺夫函数;为了将切换律对系统稳定性的影响也考虑在内,文[50]将混合系统的基本“周期”特性考虑进李雅普诺夫函数中,提出先鉴别系统基本“周期”,然后用LMI确定类李雅普诺夫函数;文[48]也是利用李雅普诺夫函数对一类混合系统的稳定性进行分析,文[52]则从另外的角度进行研究;文[54]利用不变集与李雅普诺夫函数研究一般混合系统,给出稳定性的充分条件。可控性与可达性与一般系统的没有本质区别,不作过多叙述(见文[18,55,56])。Heemels等研究了一类混合系统存在唯一解的适定性问题^[57]。

3.1.2 混合系统分区(Partition in hybrid system)

混合系统建模中一个特殊问题是函数 α 的选择(见图1), α 将对象的状态空间划分为不同区域,产生对象符号以判别当前状态可否接受,并可确定将状态控制至可接受区域的输入。因此函数 α 关系到控制器综合及验证,必须选择适当:在为控制器提供足够信息进行控制的同时,要避免过细而导致系统太复杂,或者过于简单使系统退化为常规控制系统。分区的设计从一个可在状态空间中确定所有期望运行区域的原始分区开始,在控制目标指导下进行精炼得到最终分区,以此设计出可将对象状态控制到任一区域的控制器。最终分区的一个重要要求是所得的DES(discrete event system)对象(从接口看连续系统)是确定的,以保证控制器获得对象行为的全部信息,在文[31]中对这个问题有比较深入的讨论。

3.1.3 混合系统模型辨识(Identification of hybrid system)

混合系统动态特性十分复杂,建模困难,与一般动态系统相似也有辨识问题。Hoffman提出用局部线性方法的混合系统建模算法^[58,59],其实质是用过去的信息来预测系统未来事件,即用统计方法来确定连续动态特性中的离散变化,得到混合系统模型的四部分:模式间的切换面,离散特性切换表,各模式的连续动态特性 M_i ,模式切换后重新初始化函数。

3.2 混合系统的综合(Synthesis of hybrid system)

混合系统的综合包含连续和离散两部分的综合,同时又要解决独特的问题。Godbole等证实,简单地单独设计的连续系统控制器和离散系统监控器结合起来,不能确保系统获得理想的性能^[60]。

3.2.1 基于李雅普诺夫函数的设计方法(Design based on Lyapunov's function)

利用李雅普诺夫函数方法的设计目标是设计出控制器的切换集,使混合系统在这些集合间切换时,既保证了系统的稳定性也满足了性能要求。

① Malmberg设计方法^[61,62]。假设每一控制器(向量域)

在相应的一定区域(所有区域构成整个状态空间)内有一能量下降的李雅普诺夫函数,提出最少切换策略(min-switch strategy),从所有控制器中选择具有最小李雅普诺夫函数的控制器。

② Peleties设计方法^[59,63]。设计目标是在一组单个不稳定的向量域间进行切换,使得系统渐进稳定。提出了保证线性混合系统稳定性的条件,并通过找到满足这些条件的正定二次李雅普诺夫函数,可以设计出切换集。

③ Pettersson设计方法^[46]。与Peleties方法相似,不同的是利用LMI(linear matrix inequality)计算方法来确定李雅普诺夫函数,实现混合系统的控制器设计。

3.2.2 其它设计方法(Other schemes)

1) “聚合”方法。

如Stiver提出的方法^[30],将混合系统的连续部分和接口抽象为DES,将其和控制器看作相互作用的两部分按照离散事件监控设计方法设计出控制器。前提是确保原系统满足一些性质(如可控性、可观性),因为这种抽象简化会使系统内部动态特性信息损失而导致DES对象可能是非确定性的。

2) “延拓”方法。

① Bemporad等基于混合逻辑动态模型,把混合系统看作一个连续系统,利用传统的预测控制和优化控制方法对系统进行分析和综合^[40-43]。

② 文[64]提出用形式幂谱(如Lie-Fliess series)来表示由混合系统产生的状态轨迹,抽象出有限状态自动机得到混合系统理想的切换逻辑完成控制器综合,并得到应用^[65]。

③ Lemmon等一种基于增益调度原理^[65,66]的设计方法。增益调度是指对象在操作范围发生变化时,控制器在一组控制器间进行切换,使系统满足性能要求。它缺点是不太关心切换逻辑及其对系统稳定性和性能的影响。

人们在努力寻找一个解决系统连续和离散部分综合的集成框架:文[67]将模糊模型引入混合系统中;Lygeros等人将博弈论和优化理论应用于监控与控制器设计中^[68,69],从理论上讲比较完善,但也存在固有的实现障碍,其它主要工作不在此赘述^[27,36,49,70,71]。

3.3 混合系统验证与仿真(Verification and simulation of hybrid system)

控制器验证是混合系统研究中一个较活跃的分支^[29,41,62,69,72-78]。该研究领域源于计算机科学,借用计算机科学中对程序安全性验证的概念,混合系统的验证问题可表达为:给出定义系统自动机集合和定义性能要求的时间逻辑表达式集合,验证就是推导出系统满足性能要求的条件。出于安全的考虑,工程界对控制器验证技术的需求很强烈。混合系统控制器的验证是利用在系统建模所得到的离散模型(包括事件检测器和信号转换器)和在设计阶段所得的控制器,通过可达性分析,把系统的连续和离散两部分的轨迹与所提出的性能要求相比较,以检查是否满足要求。

目前,控制器验证技术大都是通过计算机仿真来实现的,故混合系统计算机仿真也是混合系统研究的一个热

点^[2,44,70,79-83],并与系统建模、控制器设计和验证相辅相成。除了通用的仿真软件 Matlab 外,处理混合系统仿真的软件有 SHIFT、DYMOLA、COSPAR、KRONOS^[79]、Ptolemy II^[80]、UPPAAL 及 HYTECH^[81]等。

4 混合系统的应用 (Applications of hybrid system)

4.1 混合系统的故障诊断 (Fault diagnosis in hybrid system)

在混合系统中,利用观测到的事件和状态信息判断某类不可观事件是否发生,这是 DEFS 的可诊断性问题。利用混合系统进行故障诊断有比较大的优势,因为模型把故障变量显式表达出来。

4.1.1 基于 Petri 网的故障诊断方法 (Petri-nets-based fault diagnosis)

在 Aghasaryan 提出利用部分随机 Petri 网对分布式系统进行故障诊断基础上^[21],Tromp 等在 1999 提出一种基于 Petri 网的故障诊断与分离方法^[25]。第一步推导出整个系统的离散状态模型(包括随机性故障事件和确定性控制事件及其相互作用),其中故障事件被建模为系统隐藏的离散状态;第二步建立连续状态部分模型,通过某些观测量统计生成残差,并与隐藏的离散事件相关联;第三步用类维特比算法进行诊断,根据残差序列来估计最为可能的隐藏故障事件的状态序列。

4.1.2 基于混合键图模型的故障诊断方法 (Fault diagnosis based on hybrid bond graphics)

Mosterman 提出一种混合键图模型^[28]和基于这种模型的故障诊断方法。该模型是在传统键图建模方法基础上,引入表示离散量的理想开关和控制结点得到的。首先由混合键图求出系统因果关系图,然后根据测量的偏差产生一个假设故障集,并预测每一故障下系统未来的状态(利用这些量的各阶导数的变化趋势及对其进行预测),根据对系统观测量的下连续、幅值偏差、斜率偏移和稳态状态等行为特性进行前向监控,并进行比较,对假设故障集进行甄别逐渐减小故障集,最后确定真正故障。

4.1.3 基于 MLD 模型的故障诊断方法 (Fault diagnosis based on mixed logic model)

MLD 模型框架具有表示复杂系统中离散信号和逻辑关系的能力,Bemporad 等提出不仅可利用混合整数二次优化技术、退缩域控制(Receding Horizon Control)技术解决混合系统控制问题^[40-43],还可利用已知的输出和输入,对不可测的离散量进行估计,实现故障诊断。

4.2 混合系统在监控设计中应用 (Application of hybrid system in supervisor system)

一般说来,一个系统存在不同的运行模式,都可分别用连续动态特性来描述,对这样的系统进行监控和协调就产生了系统的监控问题。这在过程控制、电力配送网络系统和分布式制造系统中大量存在。设计一个高层离散事件监控器,用来协调不同子系统的运行,使得整个系统性能达到要求。监控系统可以看作是由离散事件监控器产生切换规则用于控制连续动态特性的混合系统,它包含连续和离散两类截然

不同的动态过程。Petri 网可解决并发和冲突问题,在混合系统表示、稳定性分析和监控设计方面是一种比较好的工具。下面是一些应用例子,更多的评论见文^[84];

① Peleties 基于 Wonham-Ramadge 框架提出一种混合系统模型^[53],将对象状态空间分区而抽象为 Petri 网,切换是否发生依赖于由连续动态特性推导出的条件,分析是建立在从连续状态空间到符号状态空间的适合投影上。监控器含两个 Petri 网,一个担当标识识别任务;另一个通过选择下一个要激活的系统结构来执行实际控制和监控任务。某些假定条件下,在由满足不变量性质的状态空间的分区所组成的区域中,通过一些切换序列可达指定区域。

② Eker 用 Grafset 图法讨论了一类混合系统的监控策略^[27]。系统有若干控制器并行工作,通过监控器来选择其中一个的输出来控制被控对象,使系统能对设定值的变化和扰动有较好的控制效果。其策略是通过选择一组控制器中李雅普诺夫函数中最小的输出作为控制,并证明了系统的稳定性。

③ Titus 针对批处理过程给出了一种递阶结构监控器^[85],建模时将资源考虑在内,具有在执行并发处方时能够避免锁死的特点。

④ 文^[24]讨论一个供电系统的监控问题,系统有若干运行模式,要求系统响应快、抗干扰能力强,切换模式间有一定约束。应用 Antsaklis 等提出的基于 Petri 网库所不变量的监控技术^[86],设计系统要满足离散特性的要求,确定可行切换线路。

4.3 其它应用 (Applications in other areas)

混合系统在汽车工业中的应用^[87,88];文^[87]用混合控制设计方法设计用于协调汽车发动机和传动系统的控制策略,以性能指标指导设计离散控制和连续控制,使系统在有模型误差、干扰和结构不确定性等情况下,保持闭环鲁棒稳定性和性能,并提高了系统整体性能和节油指标。自动高速公路(AHS)是混合系统应用中研究比较多的领域^[60,68-70,83];如文^[70]提出一种混合系统集成设计与仿真方法,先将设计分为离散与连续部分分别进行,然后在集成机构中进行融合和仿真,并用于汽车队列建模与策略选择。文^[89,90]讨论了混合系统在机器人中的应用,将神经网络结合混合系统理论加以应用^[49,91];如文^[49]采用经训练的神经网络在线对混合系统稳定域与控制器性能进行监控,对控制器进行切换调度。

5 结论 (Conclusions)

本文主要介绍混合系统研究中一些问题和重要成果。混合系统常用的描述方法是 Petri 网和自动机,各自有其长处和缺点,混合系统模型问题总是人们比较关心的领域,但还无统一模式,要根据具体情况来确定。混合系统稳定性问题主要利用李雅普诺夫函数来研究,它是混合系统研究的一个热点。混合系统控制器综合问题要借助连续和离散系统的设计理论基础^[40],它和控制器的验证是当前混合系统研究的重点之一。混合系统理论框架还可以用于众多的传统研究领域,如可用于系统的故障诊断等。

参考文献(References)

- [1] Witsenhausen H S. A class of hybrid-state continuous-time dynamic systems [J]. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1966, 11(6):665 - 683
- [2] Cellier F E. Combined continuous/discrete system simulation by use of digital computer: Techniques and tools [D]. Zurich, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 1979
- [3] Golli A and Varaiya P. Hybrid dynamical systems [A]. In Proc. of the 28th IEEE Conference on Decision and Control [C], Tampa, Florida, USA, 1989, 2708 - 2712
- [4] Grossman R L, Nerode A and Ravn A P, et al (Eds.). *Lecture Notes in Computer Science (Hybrid Systems)* [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 1993, Vol. 736
- [5] Antsaklis P J, Kohn W and Nerode A, et al (Eds.). *Lecture Notes in Computer Science (Hybrid Systems II)* [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 1995, Vol. 999
- [6] Alur R, Henzinger T A and Sontag E (Eds.). *Lecture Notes in Computer Science (Hybrid Systems III: Verification and Control)* [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 1996, Vol. 066
- [7] Antsaklis P J, Kohn W and Nerode A, et al (Eds.). *Lecture Notes in Computer Science (Hybrid Systems IV)* [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1997, Vol. 1273
- [8] Henzinger T A and Sastry S (Eds.). *Lecture Notes in Computer Science (Hybrid Systems: Computation and Control - Proceedings of the First Int. Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control (HSCC'98)*, Berkeley, California, USA, April 1998) [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1998, Vol. 1386
- [9] Vaandrager F W and Schuppen J H (Eds.). *Lecture Notes in Computer Science (Hybrid Systems: Computation and Control - Proceedings of the Second Int. Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control (HSCC'99)*, Nijmegen, The Netherlands, March 1999) [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1999, Vol. 1569
- [10] Li Zhengguo, Li Yanping and Xu Xinhe. Modeling and analysis of a kind of hybrid dynamic systems [J]. *Control and Decision*, 1996, 11(Suppl.): 167 - 171 (in Chinese, English)
- [11] Xie Dong. Research on modeling and performance analysis hybrid dynamic system and its applications [D]. Beijing: Tsinghua University, 1996 (in Chinese)
- [12] Xu Xinhe, Li Zhengguo and Li Yanping. Generalized Petri net model for a class of hybrid systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1997, 23(3):297 - 301 (in Chinese)
- [13] Wu Zhaochun, Wang Meisheng and Xu Xinhe. Model structure of hybrid control systems with discrete decider [J]. *Control and Decision*, 1997, 12(Suppl.):500 - 503 (in Chinese)
- [14] Wang Xiaojie, Han Cunwu and Wei Chuanyuan. Stability of class of hybrid dynamic systems [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1997, 23(6):698 - 702 (in Chinese)
- [15] Wu Zhaochun, Wang Meisheng and Xu Xinhe. Principle of a class of hybrid system modelling [J]. *Journal of Northeastern University*, 1998, 19(2): 195 - 197 (in Chinese)
- [16] Alur R, Courcoubetes C and Henzinger T A, et al. Hybrid automata: An algorithmic approach to the specification and verification of hybrid systems [A]. In Grossman R L, et al (Eds.). *Hybrid Systems* [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 1993, 209 - 229
- [17] Alur R and David L D. The theory of timed automata [J]. *Theoretical and Computer Science*, 1994, 126(2): 183 - 235
- [18] Henzinger T A and Rusu V. Reachability verification for hybrid automata [A]. In Henzinger T A, Sastry S (Eds.). *Hybrid Systems: Computation and Control (HSCC'98)* [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1998, 190 - 204
- [19] Nerode A and Kohn W. Models for hybrid systems: automata, topologies, controllability, observability [A]. In Grossman R L, et al (Eds.). *Hybrid Systems* [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 1993, 317 - 356
- [20] Stiver J A, Antsaklis P J and Lemmon M D. An invariant based approach to the design of hybrid control systems containing clocks [A]. In Alur R, et al (Eds.). *Hybrid Systems III: Verification and Control* [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 1996, 464 - 474
- [21] Aghasaryan A, Fabre E and Benveniste A, et al. Fault detection and diagnosis in distributed systems: An approach by partially stochastic Petri nets [J]. *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, 1998, 8(2):203 - 231
- [22] David R and Alla H. *Petri-Nets and Grafset: Tools for Modelling Discrete Events Systems* [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1992
- [23] Demongodin I and Koussoulas N T. Differential Petri nets: Representing continuous systems in a discrete-event world [J]. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1998, 34(4):573 - 579
- [24] Koutsoukos X D, He K X and Lemmon M D, et al. Timed Petri nets in hybrid systems: Stability and supervisory control [J]. *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, 1998, 8(2):137 - 173
- [25] Tromp L, Benveniste A and Basseville M. Fault detection and isolation in hybrid systems: A Petri-net approach [A]. In 14th IFAC World Congress [C], Beijing, 1999, 79 - 84
- [26] Charbonnier F, Alla H and David R. The supervised control of discrete-event dynamic systems [J]. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 1999, 17(2):175 - 187
- [27] Eker J and Malmberg J. Design and implementation of hybrid control strategy [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1999, 19(4):12 - 21
- [28] Mosterman P J. Hybrid dynamic systems: A hybrid bond graph modeling paradigm and its application in diagnosis [D]. Nashville, Tennessee, USA: Vanderbilt University, 1999
- [29] Mosterman P J, Biswas G and Szűpanovits J. A hybrid modeling and verification paradigm for embedded control systems [J]. *Control Engineering Practice*, 1998, 6(4):511 - 521
- [30] Mosterman P J and Biswas G. Building hybrid observers for complex dynamic systems using model abstractions [A]. In Proc ICBGM'99 (International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation) [C], San Francisco, California, USA, 1999, 157 - 162
- [31] Antsaklis P J, Stiver J A and Lemmon M D. Hybrid system model-

- ing and autonomous control systems [A]. In Grossman R L, et al (Eds.). Hybrid Systems [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 1993, 366 - 392
- [32] Lemmon M D and Antsaklis P J. Event identification and intelligent hybrid control [A]. In Grossman R L, et al (Eds.). Hybrid Systems [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 1993, 268 - 296
- [33] Stiver J A and Antsaklis P J. Modeling and analysis of hybrid control systems [A]. In Proc. of the 31st IEEE Conference on Decision and Control [C], Tucson, Arizona, USA, 1992, 3748 - 3751
- [34] Stiver J A, Antsaklis P J and Lemmon M D. Interface and controller design for hybrid control systems [A]. In Antsaklis P J, et al (Eds.) Hybrid Systems II [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 1995, 462 - 492
- [35] Branicky M S. Studies in hybrid systems: modeling, analysis, and control [D]. Massachusetts, UK: Massachusetts Institute of Technology, 1995
- [36] Branicky M S, Borkar V S and Mitter S K. A unified framework for hybrid control model and optimal control theory [J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 1998, 34(1): 31 - 45
- [37] Branicky M S. Multiple Lyapunov functions and analysts tools for switched and hybrid systems [J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 1998, 34(4): 475 - 482
- [38] Branicky M S. General hybrid dynamical systems: modeling, analysis, and control [A]. In Alur R, et al (Eds.). Hybrid Systems III. Verification and Control [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 1996, 186 - 200
- [39] Lennartson B, Titus M and Egardt B, et al. Hybrid systems in process control [J]. IEEE Control Systems Magazine, 1996, 16(5): 45 - 56
- [40] Bemporad A, Mignone D and Morari M. Moving horizon estimation for hybrid systems and fault detection [A]. In Proceedings of ACC'99 [C], San Diego, CA, USA, 1999, 2471 - 2475
- [41] Bemporad A, Torrisi F D and Morari M. Optimization - based verification and stability characterization of piecewise affine and hybrid systems [R]. Switzerland: Automatic Control Lab, ETH Zurich, Tech. Report AUT99 - 17, 1999
- [42] Bemporad A and Morari M. Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints [J]. Automatica, 1999, 35(3): 407 - 427
- [43] Mignone D, Bemporad A and Morari M. A framework for control, fault detection, state estimation, and verification of hybrid systems [A]. In Proceedings of ACC'99 [C], San Diego, CA, USA, 1999, 134 - 138
- [44] Tavernini L. Differential automata and their discrete simulators [J]. Nonlinear Analysis, Theory, Models & Applications, 1987, 11(6): 665 - 683
- [45] Peleties P and DeCarlo R. Modeling of interacting continuous-time and discrete systems [A]. In Proc. of the 28th IEEE Conference on Decision and Control [C], Tampa, Florida, USA, 1989, 1308 - 1313
- [46] Pettersson S. Analysis and design of hybrid systems [D]. Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 1999
- [47] Doğruel M and Özgüner U. Stability of hybrid systems [A]. In IEEE International Symposium on Intelligent Control [C], Columbus, Ohio, USA, 1994, 129 - 134
- [48] Doğruel M and Özgüner Ü. Modelling and stability issues in hybrid systems [A]. In Antsaklis P J, et al (Eds.) Hybrid Systems II [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 1995, 148 - 165
- [49] Ferreira E D and Krogh B H. Switching controllers based on neural network estimates of stability regions and controller performance [A]. In Henzinger T A, et al (Eds.). Hybrid Systems: Computation and Control (HSCC'98) [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1998, 126 - 142
- [50] He K X and Lemmon M D. Lyapunov stability of continuous-valued systems under the supervision of discrete-event transition Systems [A]. In Henzinger T A, Sastry S (Eds.). Hybrid Systems: Computation and Control (HSCC'98) [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1998, 175 - 189
- [51] Johansson M and Rantzer A. Computation of piecewise quadratic Lyapunov function for hybrid systems [J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 1998, 34(4): 555 - 559
- [52] Kourjanski M and Varaiya P. Stability of hybrid systems [A]. In Alur R, et al (Eds.) Hybrid Systems III: Verification and Control [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 1996, 413 - 423
- [53] Peleties P and DeCarlo R. Asymptotic stability of m -switched systems [A]. In Proc. ACC'91 [C], Boston, USA, 1991, 1679 - 1684
- [54] Ye H, Michel A and Hou L. Stability Theory for hybrid dynamical systems [J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 1998, 34(4): p461 - 474
- [55] Lafferriere G, Pappas G J and Sastry S. Reachability analysis of hybrid systems using bisimulations [A]. In Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control (CDC'98) [C], Tampa, FL, USA, 1998, 1623 - 1628
- [56] Schuppen J H. A sufficient condition for controllability of a class of hybrid Systems [A]. In Henzinger T A, et al (Eds.). Hybrid Systems: Computation and Control (HSCC'98) [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1998, 374 - 383
- [57] Heemels W P M H. Linear complementarity systems: A study in Hybrid Dynamics [D]. Eindhoven: Technology University, 1999
- [58] Hoffmann I and Klatk K U. Modeling hybrid dynamical systems [A]. In Alur R, et al (Eds.). Hybrid System III: Verification and Control [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 1996, 401 - 412
- [59] Hoffman I and Engell S. Identification of hybrid systems [A]. In Proc. of the ACC'98 [C], Philadelphia, USA, 1998, 711 - 712
- [60] Godbole D N, Lygeros J and Sastry S. Hierarchical hybrid control: A case study [A]. In Antsaklis P J, et al (Eds.). Hybrid Systems II [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 1995, 166 - 190
- [61] Malmberg J, Bernhardsson B and Aström K J. A stabilizing switching scheme for multi controller systems [A]. In Proc. of 13th IFAC [C], San Francisco, USA, 1996, 229 - 234
- [62] Malmberg J. Analysis and Design of Hybrid Control Systems [D]. Lund, Sweden: Lund Institute of Technology, 1998

- [63] Wicks M, Peleties P and DeCarlo R. Switched controller synthesis for the quadratic stabilization of a pair of unstable linear systems [J]. *European Journal of Control*, 1998, 4(2):140-147
- [64] Nerode A and Kohn W. Multiple agent hybrid control architecture [A]. In Grossman R L, et al (Eds.). *Hybrid Systems [M]*. New York, USA: Springer-Verlag, 1993, 297-316
- [65] Lemmon M D and Bett C J. Safe implementations of supervisory commands [J]. *Int. J. Control*, 1998, 70(2): 271-288
- [66] Bett C J and Lemmon M D. Bounded amplitude performance of switched LPV systems with applications to hybrid systems [J]. *Automatica*, 1999, 35(3): 491-503
- [67] Palm R and Drankov D. Fuzzy switched hybrid systems-modeling and identification [A]. In Proceedings of the 1998 IEEE Int. Symposium on Intelligent Control [C], Gaithersburg, Maryland, USA, 1998, 130-135
- [68] Lygeros J, Godbole D N and Sastry S. Game-theoretic approach to hybrid system design [A]. In Alur R, et al (Eds.) *Hybrid Systems III: Verification and Control [M]*. New York, USA: Springer-Verlag, 1996, 1-12
- [69] Lygeros J. Hierarchical, hybrid control of large scale systems [D]. Berkeley, USA: University of California at Berkeley, 1996
- [70] Lehrenfeld G, Naumann R and Rasche R, et al. Integrated design and simulation of hybrid systems [A]. In Henzinger T A, Sastry S (Eds.). *Hybrid Systems: Computation and Control (HSCC'98) [M]*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1998, 219-236
- [71] Titus M and Egardt B. Control design for integrator hybrid system [J]. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1998, 34(4): 491-500
- [72] Boluajjan A, Echahed R and Robbana R. On the automatic verification of systems with continuous variables and unbounded discrete data structures [A]. In Antsaklis P J, et al (Eds.). *Hybrid Systems II [M]*. New York, USA: Springer-Verlag, 1995, 64-85
- [73] Chutinan A and Krogh B H. Verification of hybrid systems using polygonal flowpipe approximations [A]. In Vaandrager F W, Schuppen J H (Eds.). *Lecture Notes in Computer Science (Hybrid Systems: Computation and Control (HSCC'99)) [M]*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1999, Vol.1569:76-90
- [74] Chutinan A. Hybrid system verification using discrete model approximations [D]. Pittsburgh, PA, USA: Carnegie Mellon University, 1999
- [75] Livadas C and Lynch N A. Formal verification of safety-critical hybrid systems [A]. In Henzinger T A, et al (Eds.). *Hybrid systems: Computation and Control (HSCC'98) [M]*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1998, 253-272
- [76] Pun A and Varaiya P. Verification of hybrid systems using abstraction [A]. In Antsaklis P J, et al (Eds.). *Hybrid Systems II [M]*. New York, USA: Springer-Verlag, 1995, 350-369
- [77] Rausch M and Krogh B H. Formal verification of PLC programs [A]. In Proc of ACC'98 [C], Philadelphia, USA, 1998, 234-238
- [78] Stursberg O, Engell S and Kowalewski S. Timed approximations of hybrid processes for controller verification [A]. In 14th Triennial World Congress [C], Beijing, China, 1999, 73-78
- [79] Daws C, Olivero A and Tripakis S, et al. The tool KRONOS [A]. In Alur R, et al (Eds.) *Hybrid Systems III: Verification and Control [M]*. New York, USA: Springer-Verlag, 1996, 208-219
- [80] Lau J, Lin X and Koo T J, et al. Hierarchical Hybrid system simulation [A]. In Proc. 38th IEEE Conference on Decision and Control [C], Phoenix, AZ, USA, 1999
- [81] Henzinger T A and Ho P H. HYTECH: The cornell hybrid technology tool [A]. In Antsaklis P J, et al (Eds.). *Hybrid Systems II [M]*. New York, USA: Springer-Verlag, 1995, 265-293
- [82] Wen Chuanyuan. Modeling problems of hybrid event dynamic systems [J]. *Simulation Practice and Theory*, 1998, 6(4):413-422
- [83] Lygeros J, Godbole D and Sastry S. Simulation as a tool for hybrid control [A]. In Fifth IEEE Conference on AI Simulation, and Planning in High Autonomy Systems (AI'94) [C], Florida, USA, 1994, 6-12
- [84] Lemmon M D, He K and Markovskiy I. Supervisory hybrid systems [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1999, 19(4):42-55
- [85] Titus M and Lennartson B. Hierarchical supervisory control for batch process [J]. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 1999, 7(5): 542-554
- [86] Yarnalidou K, Moody J and Lemmon M D, et al. Feedback control of Petri nets based on place invariants [J]. *Automatica*, 1996, 32(1):15-28
- [87] Beydoun A, Wang L Y and Sun J, et al. Hybrid control of automotive powertrain system: A case study [A]. In Henzinger T A, et al (Eds.) *Lecture Notes in Computer Science (Hybrid Systems: Computation and Control (HSCC'98)) [M]*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1998, Vol.1386:33-48
- [88] Balluchi A, Benedetto M D and Pinello C, et al. Hybrid control for automotive engine management: The cut-off case [A]. In Henzinger T A, et al (Eds.) *Lecture Notes in Computer Science (Hybrid Systems: Computation and Control (HSCC'98)) [M]*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1998, Vol. 1386:13-32
- [89] Raven A P, Rischel H and Holdgaard M, et al. Hybrid control of a robot - A case study [A]. In Antsaklis P J, et al (Eds.). *Hybrid Systems II [M]*. New York, USA: Springer-Verlag, 1995, 391-404
- [90] Zhang Y and Mackworth A K. Synthesis of hybrid constrain-based controller [A]. In Antsaklis P J, et al (Eds.). *Hybrid Systems II [M]*. New York, USA: Springer-Verlag, 1995, 552-566
- [91] DeClaris N and Su M C. A self-learning neuro-fuzzy system [A]. In Antsaklis P J, et al (Eds.). *Hybrid System II [M]*. New York, USA: Springer-Verlag, 1995, 106-127

本文作者简介

莫以为 1966年生,清华大学自动化系博士研究生,主要从事流程工业 CIMS 体系结构,混合动态系统,故障诊断等方面的研究

萧德云 1945年生,1970年毕业于清华大学,现任清华大学自动化系教授,博士生导师,长期从事辨识建模,故障诊断,混合动态系统,多传感器融合理论,计算机应用和大型连续过程工业 CIMS 等领域的教学和科研. Email: xiaody@mail. tsinghua. edu. cn