

文章编号: 1001-0920(2007)04-0361-05

## 混杂系统的预测控制

邹媛媛, 邹涛, 李少远

(上海交通大学 自动化研究所, 上海 200240)

**摘要:** 因混杂系统预测控制(PC-HS)具有在线处理控制量和状态量的约束等优点,而成为学术界研究的一个热点.系统地论述了 PC-HS 的发展和研究现状,在介绍混杂系统的背景和模型的基础上,重点讨论了 PC-HS 的各种算法、性能等几个前沿问题,并对 PC-HS 目前研究中存在的问题进行了分析,对未来的一些研究方向进行了展望.

**关键词:** 混杂系统; 预测控制; 优化方法; 稳定性; 鲁棒性

**中图分类号:** TP13 **文献标识码:** A

### Predictive control for hybrid systems

ZOU Yuan-yuan, ZOU Tao, LI Shao-yuan

(Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China. Correspondent: ZOU Yuan-yuan, E-mail: yyz8059@sjtu.edu.cn)

**Abstract:** Predictive control for hybrid systems (PC-HS) has an ability to cope with hard constraints on controls and states, which is the focus of research in academic circles. The history and current research predictive control for hybrid systems are reviewed. Based on the background and models of hybrid systems, several challenging problems are presented such as different kinds of algorithms of PC-HS, stability, robustness and so on. Existing problems and future research directions are also discussed.

**Key words:** Hybrid systems; Predictive control; Optimization; Stability; Robustness

## 1 引言

随着科学技术的迅猛发展,人们所要处理的问题规模越来越大,结构越来越复杂,许多实际系统已无法用通常的微分或差分方程来描述.一类能够表现系统整体特性的模型——混杂系统(HS)<sup>[1-3]</sup>开始受到关注.

从系统控制角度看,复杂系统包含了大量的逻辑规则约束、不同模式间的切换等动态特性,这类在同一系统中同时包含连续动态与离散动态,并且两者之间存在着相互影响及相互作用的复杂控制系统也是混杂系统.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协调层优化过程<sup>[4]</sup>.目前,混杂控制系统已成功地应用于流程工业中的柔性生产线的调度监控、城市污水处理、空中交通管理、汽车电子油门控制以及电力运行控制<sup>[1,5]</sup>.

在控制理论或工程实际中,往往要求控制一个系统的输出能够跟踪一个给定的信号.混杂系统本

质上是非线性的甚至是不光滑的,因而对于混杂系统的控制,特别是对于具有输入约束情况下的控制相当困难,迄今尚没有公认的好的解决方法.预测控制由于其具有对模型的宽容、采用滚动优化以及能够处理连续和离散变量约束条件等优点<sup>[6]</sup>,为混杂系统控制问题的研究提供了新的途径.

1997年,Slupphaug等人<sup>[2]</sup>首先提出了混杂系统预测控制(PC-HS)问题.经过近10年的发展,混杂系统预测控制研究已取得了许多成果.文献[7]指出,PC-HS将成为未来几年预测控制研究的一个热点.本文主要从系统控制的角度,回顾了PC-HS的发展及现状,内容包括混杂系统的模型、PC-HS的各种算法、闭环性能以及各种应用.最后对PC-HS的未来发展作了展望.

## 2 混杂系统模型

混杂系统涉及的问题复杂多样,很难建立一个统一的模型.像切换模型<sup>[8]</sup>、自动机模型<sup>[9]</sup>、Petri网模型<sup>[10]</sup>等都是基于不同建模方法的混杂系统模型.

收稿日期: 2005-12-10; 修回日期: 2006-03-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60474051,60534020); 教育部新世纪优秀人才计划项目.

作者简介: 邹媛媛(1980—),女,山东烟台人,博士生,从事预测控制的研究; 李少远(1965—),男,河北枣强人,教授,博士生导师,从事预测控制、智能控制等研究.

本文涉及的是几种典型而且具有内在关系的混杂系统模型。

## 2.1 MPL 模型

Max-Plus-Linear (MPL) 模型是运用最大、加法运算建模的一类混杂子系统<sup>[5]</sup>,它在极大-加法代数意义下可看作如下的线性模型:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A \otimes x(k) \oplus B \otimes u(k), \\ y(k) &= C \otimes x(k). \end{aligned} \quad (1)$$

其中:  $\otimes$  表示运算“max”,  $\oplus$  表示运算“+”。

## 2.2 分段仿射(PWA)模型

分段仿射(PWA)模型<sup>[11]</sup>是切换模型中最为简单和最为重要的一种,其表达式为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A_i x(k) + B_i u(k) + f_i, \\ y(k) &= C_i x(k) + D_i u(k) + g_i. \end{aligned} \quad (2)$$

其中:  $u(k) \in U, x(k) \in X, [x(k) \ u(k)]^T \in \mathcal{X}_i, \mathcal{X}_i (i=1, 2, \dots)$  是  $X \times U$  的凸划分,即  $X \times U = \bigcup_i \mathcal{X}_i, \mathcal{X}_i \cap \mathcal{X}_j = \emptyset, i \neq j$ . 当系统的状态到达  $\mathcal{X}_i$  边界区域时,系统的切换发生。

## 2.3 混合逻辑动态(MLD)模型

混合逻辑动态(MLD)模型能够在统一的模型框架内,考虑系统的动态,动态之间的逻辑关系,动态之间的切换以及系统的约束<sup>[1]</sup>.其表达式为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B_1 u(k) + B_2 w(k) + B_3 z(k), \\ y(k) &= Cx(k) + D_1 u(k) + D_2 w(k) + D_3 z(k), \\ E_2 w(k) + E_3 z(k) &= E_1 u(k) + E_4 x(k) + E_5. \end{aligned} \quad (3)$$

其中:  $x = [x_1 \ x_c]^T, x_c \in \mathbb{R}^{n_c}, x_1 \in \{0, 1\}^{n_1}, y = [y_1 \ y_c]^T, y_c \in \mathbb{R}^{p_c}, y_1 \in \{0, 1\}^{p_1}, u = [u_1 \ u_c]^T, u_c \in \mathbb{R}^{m_c}, u_1 \in \{0, 1\}^{m_1}$  分别为系统的状态、输出,以及控制输入.它们既可以是连续变量,也可以是离散(逻辑)变量,也可以同时包含二者.  $z \in \mathbb{R}^{r_c}, \{0, 1\}^{r_1}$  是 MLD 模型引入的辅助变量。

## 2.4 线性互补(LC)模型

离散时间的线性互补(LC)模型的一般表达式为<sup>[12]</sup>

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B_1 u(k) + B_2 w(k), \\ y(k) &= Cx(k) + D_1 u(k) + D_2 w(k), \\ v(k) &= E_1 x(k) + E_2 u(k) + E_3 w(k) + g_3, \\ 0 &\leq v(k) \leq w(k) \leq 0. \end{aligned} \quad (4)$$

其中:  $v(k), w(k)$  为互补向量,  $\leq$  表示两向量的正交.  $v(k) \leq w(k)$  即为  $v(k)^T w(k) = 0$ .

## 2.5 扩展线性互补(ELC)模型

扩展线性互补(ELC)模型是在 LC 模型的基础上发展起来的,它与 LC 模型的主要区别在于线性

互补条件不同.其表达式为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B_1 u(k) + B_2 d(k), \\ y(k) &= Cx(k) + D_1 u(k) + D_2 d(k), \\ E_1 x(k) + E_2 u(k) + E_3 d(k) &= g_4, \\ &\vdots \\ (g_4 - E_1 x(k) - E_2 u(k) - E_3 d(k))_j &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

其中变量  $d(k)$  是系统引入的辅助变量.式(5)中最后的等式可看作是  $p$  组以下的等式,即

$$(g_4 - E_1 x(k) - E_2 u(k) - E_3 d(k))_j = 0. \quad (6)$$

该模型表明,模型中存在  $p$  组线性不等式,而在每一组的不等式中至少有一等式成立。

## 2.6 MMPS 模型

MMPS 模型<sup>[13]</sup>是通过最大、最小、加、标量乘等运算操作建立的.包含这些运算操作的表达式称为 MMPS 表达式,MMPS 模型的一般表达式为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \mu_x(x(k), u(k), d(k)), \\ y(k) &= \mu_y(x(k), u(k), d(k)), \\ \mu_c(x(k), u(k), d(k)) &= c, \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $\mu_x, \mu_y$  和  $\mu_c$  均为 MMPS 表达式。

上述基于不同背景建立的混杂系统模型,在描述混杂系统的行为特征方面,其能力各有强弱.文献[14]给出了 MLD, LC, ELC, PWA, LC, MMPS 等模型的等价关系,指出在满足一定条件的情况下这几种模型可以相互转化。

## 3 混杂系统预测控制(PC-HS)

### 3.1 混杂系统预测控制算法

由于混杂系统建模的复杂性和多样性,PC-HS 算法所要解决的问题比常规的 PC 要复杂得多,而且基于不同模型的 PC-HS 所要解决的具体问题也不一样.本文从模型的角度出发,介绍一些有代表性的 PC-HS 算法。

#### 3.1.1 基于 MPL 模型的预测控制算法(PC-MPL)

MPL 模型应用广泛,De Schutter 等人<sup>[5]</sup>在 2001 年首次提出了 PC-MPL.文献[15]对具有有界或随机噪声和干扰情形的 PC-MPL 进行了研究.文献[16]针对具有线性参数时变结构的 MPL 模型,利用 Greatest Subsolution 方法,通过求解一个线性多项式矩阵方程得到预测控制器。

考虑到实际对象的参数很难精确得到,文献[17]给出了基于输入输出模型参数估计的自适应 PC-MPL 算法,从而保证当模型参数变化时仍能使系统具有很好的性能.这项工作也为 MPL 模型的辨识奠定了基础。

### 3.1.2 基于 PWA 模型的预测控制算法(PC-PWA)

Morari 等人<sup>[1]</sup> 提出将预测控制应用到 PWA. 与目前的主要针对确定性 PWA 模型的 PC-PWA 算法不同,文献[18]采用 min-max MPC 方法,讨论了有摄动的 PC-PWA. 通过求解两级优化,即离线求解多参数线性规划问题和在线求解系列线性规划问题的方法有效求取控制律.

PC-HS 的分析和设计中遇到的主要困难是计算复杂,特别是当系统有输入或状态约束. 文献[19]给出了一种基于离散时间 PWA 模型的预测控制方法,在保证系统稳定性的前提下,能够从结构上降低算法的复杂性.

### 3.1.3 基于其他混杂系统模型的预测控制

基于 MLD 模型的预测控制算法(PC-MLD)是在 1999 年提出的<sup>[1]</sup>,但这种方法的计算量非常大. 文献[20]提出了一种将整个状态空间划分成若干个多面体子区域,从而将 MLD 模型分解成多个子模型的技术,能有效地降低 PC-MLD 算法的计算量.

文献[21,22]引入混合逻辑动态的建模方法,将系统的所有线性化模型集成在一个框架里,给出了基于 MLD 系统的非线性多模型预测控制方法. 该方法有利于消除模型切换时引起的抖动. 文献[23]针对实际过程控制系统中某些变量没有设定值要求而只有区域目标要求这一特点,将带有输出区域目标特性的预测控制问题转化成 PC-MLD 问题.

MMPS 模型是一类特殊的混杂系统模型, PWA,MLD,LC 和 ELC 四种模型在满足一定条件的情况下都可以用这种模型表示<sup>[14]</sup>. 因此,基于 MMPS 模型的混杂系统预测控制(PC-MMPS)的研究具有一定的代表性. 文献[13]讨论了有输入和状态约束情况下的 PC-MMPS.

## 3.2 混杂系统预测控制的优化算法

混杂系统预测控制的优化问题与常规预测控制优化问题的区别在于它的优化问题表现为定性和定量双重指标下的集成优化问题. 其中对每一时刻的开环优化不仅是一个非线性非凸优化问题,而且涉及到对连续变量和离散逻辑变量的混合处理. 这给求解带来了很大的困难. 目前,能够解决 PC-HS 优化问题的有效方法有以下几种.

### 3.2.1 非线性优化方法

文献[13]提出基于序列二次规划的多起点局部约束优化算法. 该算法可以用来直接求解 PC-HS 问题,但也存在以下问题:1) 要考虑选择大量的初始点;2) 要通过解若干个子优化问题来达到全局最

优,而且有些情况下这个全局最优解不一定能够找到;3) 算法复杂,需要大量计算时间.

### 3.2.2 扩展线性互补问题(ELCP)方法

ELCP 是一种数学规划方法,由 De Schutter 等人<sup>[24]</sup> 在 1995 年提出. 文献[5,13]指出 PC-MPL, PC-MMPS 优化问题可以转化成 ELCP 的一种特殊形式. 因此,要求 PC-HS 问题的可行解,只需要求解一个特殊的 ELCP,找到那些能够满足 PC-HS 问题中的目标函数  $J(k)$  和约束条件的 ELCP 参数值. 但 ELCP 方法的一个不足之处是计算时间随着系统维数的增大而呈指数增加. 这就意味着当控制时域  $N_c$  或混杂系统的输入输出数目较大时,这种方法是不可行的.

### 3.2.3 混合整数优化方法

混杂系统模型中经常会包含逻辑变量,因而所建立的针对混杂系统的预测控制算法,在每一时刻求解的优化问题可以用数学规划中的混合整数规划(MIP)方法求解. 文献[1]利用混合整数二次规划方法来求解 PC-MLD 和 PC-PWA 问题.

### 3.2.4 线性规划方法

前面介绍的几种方法都在一定程度上存在计算量大、在线计算时间长的缺点. 文献[3]提出了一种基于 MMPS 函数标准形式的线性规划方法,指出连续系统 PC-PWA 优化问题可以转化成 MMPS 函数的标准形式,即

$$f = \min_{i=1, \dots, K} \max_{j=1, \dots, n_j} ({}^T_{(i,j)} x + {}_{(i,j)}), \quad (8)$$

因此,要求 PC-PWA 优化问题的解,只要求出式(8)中每一个子线性规划问题  $\min t(k), s.t. t(k)$

${}^T_{(i,j)} x(k) + {}_{(i,j)}, j = 1, \dots, n;$  然后找出这  $K$  个解中使  $\max({}^T_{(i,j)} x + {}_{(i,j)})$  最小的那个解即可. 该方法避免了求解非线性非凸优化问题,降低了 PC-HS 中优化问题的复杂性.

### 3.2.5 多参数优化方法

文献[25]提出了一种离线优化方法——多参数规划方法(MPP). 运用该方法,得到了作用到系统的最优控制与系统的状态之间的显式函数关系(离线计算). 只要在线检测得到系统的当前状态值,再通过简单的函数计算(在线计算),便可得到该时刻的最优控制输入. 这种方法的主要不足是离线计算复杂,计算得到的状态分区的数目过多. 各种优化方法在 PC-HS 中的应用如表 1 所示.

## 3.3 混杂系统预测控制的闭环性能分析

PC-HS 闭环系统的性能分析问题是 PC-HS 研究的一个热点. 本文将从稳定性、鲁棒性和参数调节 3 方面给出有关 PC-HS 闭环性能分析的主要结果.

表1 优化方法在 PC-HS 的应用

优化方法	PC-HS 问题
非线性优化(NL)	PC-MPL, PC-PWA, PC-MMPS
扩展线性互补问题(ELCP)	PC-MPL, PC-PWA, PC-MMPS
线性规划(LP)	连续 PC-PWA, PC-MMPS
混合整数规划(MIP)	PC-MLD, PC-PWA
多参数规划(MPP)	PC-PWA

### 3.3.1 稳定性

近年来, PC-HS 的研究工作已取得了许多进展, 但有关其稳定性方面的研究结果却很少. 已有结果主要是通过 PC-HS 算法来保证稳定性. 为保证有限时域 PC-HS 的稳定性, 在开环优化问题中加入等式约束, 强制终端状态回到平衡点. 加入终端等式约束后的稳定性多是利用最优性能指标值的单调性来证明的<sup>[26,27]</sup>.

Lazar 等人<sup>[28]</sup>将传统 MPC 中通过终端指标和约束集来保证系统稳定性的方法应用到带有约束的 PWA 系统. 文献[29]针对带有约束的 PWA 系统, 讨论了带有终端状态加权的无穷范数形式性能指标的情况, 其优点在于求终端指标的同时可以得到终端约束集.

### 3.3.2 鲁棒性

目前的 MPC-HS 鲁棒性研究主要是混杂系统鲁棒预测控制的综合, 即在设计鲁棒 MPC 时, 将不确定性以显式的形式包含在约束优化问题中. 较常用的方法是用 min-max 问题代替 min 问题. 文献[18]给出了最小化最坏情况下的目标函数的方法, 以保证具有有界输入不确定性的混杂系统的鲁棒稳定性. 文献[30]讨论了有摄动的 PWL 系统的鲁棒预测控制问题. 为了扩大控制器的可行范围, 文章采用反馈 min-max 的双模预测控制方法设计了间断反馈控制器.

### 3.3.3 参数调节

与常规的预测控制相似, 通过调节参数, 可以使 PC-HS 系统达到良好的性能. 文献[31]针对 PC-MPL, 给出了参数调节的一些规则.

## 4 混杂系统预测控制的应用

混杂系统预测控制理论研究的出发点是实际应用. 近几年来, 混杂系统预测控制在实际中得到了广泛的研究和应用, 包括机器人控制、空中交通控制、工业过程控制、加工生产线、高速公路的智能机车调度等. 文献[32]介绍了壳牌石油公司重油分馏塔过程控制问题: 利用 MIQP 方法, 将复杂系统优化控制 CMMO 的软约束调整方法与目标协调问题有机地结合起来, 统一成一个混合整数规划问题, 在进行系统优化可行集构造的同时, 兼顾了系统期望目标的满意.

文献[5]针对离散型加工生产线, 建立了系统在极大-加法代数下的线性 MPL 模型, 应用 PC-MPL, 使得系统具有最优的原料输送时间.

文献[24]基于 3 个子系统的 PWL 模型, 采用混杂系统预测控制的方法, 通过求解 MP-MILP 问题, 控制炉温保持在合适的温度.

作为混杂系统预测控制应用的一个标志, 已出现了 PC-HS 商业应用软件产品. 例如文献[33]介绍的 HYSDEL 软件包. PC-HS 商业应用软件产品的开发和使用, 将有力地促进混杂系统预测控制的广泛应用.

## 5 混杂系统预测控制的展望

由于混杂系统的复杂性以及其具有的广泛的工程背景, 使得混杂系统控制研究成为系统工程与自动控制领域当前研究的热点与难点之一. 尽管 PC-HS 的研究工作近年来有了较大进展, 但仍有不少问题有待于进一步研究.

### 5.1 PC-HS 模型

为了系统的分析与综合的方便, 希望得到统一的模型形式; 为了实际应用的需要, 又应考虑针对具体问题提出特殊模型. 因此, 一般的混杂系统模型和特殊的混杂系统模型都需要加强研究.

本文中介绍的混杂系统模型之间的等价性, 给混杂系统预测控制的研究带来了启发: 1) 对于某一类混杂系统模型所建立的混杂系统预测控制器的设计理论与方法, 可以方便地转化并应用于其他混杂系统的模型; 2) 当需要求解混杂系统的预测控制问题时, 可以考虑采用合适的混杂系统模型, 基于该模型有可能建立有效的问题求解方法.

### 5.2 PC-HS 算法

混杂系统预测控制优化问题是基于定性和定量双重指标下的集成优化问题, 比常规预测控制的优化问题复杂得多. 从问题的特殊性出发, 希望找到最适合某种特殊的 PC-HS 有效优化方法; 从普遍性出发, 又试图找到能够适合多种 PC-HS 的统一的优化方法.

在实际过程中, 系统的输入变量和输出变量常会受到各种软硬约束. 预测控制方法是唯一能在控制器设计过程中系统地、显式地处理过程约束的控制方法. 因此, 同时考虑软硬约束条件下的 PC-HS 算法研究, 使算法更接近于实际对象的特性是一项有意义的工作.

### 5.3 PC-HS 性能分析

PC-HS 闭环系统的稳定性和鲁棒性研究还有大量工作要做.

1) 稳定性: 在优化问题中加入稳定性约束和终

端惩罚虽然保证了 PC-HS 的稳定性,但从工程应用意义上说,这种方法还不能完全令人满意.首先,稳定性约束是人为附加的,可能会影响控制性能指标的实现;其次,稳定性约束将引起优化问题的可行性问题;

2) 鲁棒性:目前,对于 PC-HS 鲁棒性的研究主要集中在混杂系统鲁棒预测控制的综合方面,对混杂系统预测控制性能的鲁棒性几乎没有讨论;

3) 参数调节:需要进一步研究 PC-HS 中参数的选择规律,将 PC-HS 理论研究成果应用于实际过程控制.

#### 5.4 PC-HS 的实际应用

一方面要扩展 PC-HS 应用领域,另一方面注重从实际应用中提出 PC-HS 需解决的问题.始终把 PC-HS 的理论研究与实际应用紧密结合起来,使其理论不断丰富和完善.

#### 参考文献(References)

- [1] Bemporad A, Morari M. Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints [J]. *Automatica*, 1999, 35(3): 407-427.
- [2] Li X G, Gao D J, Wang Y H, et al. Model predictive control for a class of hybrid system based on linear programming[C]. Proc of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation. Shanghai, 2002: 300-304.
- [3] De Schutter B, Van den Boom T J J. MPC for continuous piecewise-affine systems [J]. *Systems and Control Letters*, 2004, 52(3): 179-192.
- [4] 李秀改, 高东杰, 王宇红. 混杂系统基于混合逻辑动态模型的预测控制算法[J]. *控制与决策*, 2002, 77(3): 315-319.  
(Li X G, Gao D J, Wang Y H. Predictive control for hybrid system based on mixed logic dynamic model[J]. *Control and Decision*, 2002, 77(3): 315-319.)
- [5] De Schutter B, Van den Boom T J J. Model predictive control for max-plus-linear discrete event systems [J]. *Automatica*, 2001, 37(7): 1049-1056.
- [6] Carlos E G, David M P, Morari M. Model predictive control: Theory and practice — A survey [J]. *Automatica*, 1989, 25(3): 335-348.
- [7] Mayne D Q, Rawlings J B, Rao C V, et al. Constrained model predictive control: Stability and optimality [J]. *Automatica*, 2000, 36(6): 789-814.
- [8] Ge S S, Sun Z D, Lee T H. Reachability and controllability of switched linear discrete-time systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001, 46(9): 1437-1441.
- [9] Van der Schaft A, Schumacher H. An introduction to hybrid dynamical systems [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [10] Julvez J, Bemporad A, Recalde L, et al. Event-driven optimal control of continuous petri nets [C]. Proc of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control. Atlantis, 2004: 69-74.
- [11] Sontag E D. Nonlinear regulation: The piecewise linear approach [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1981, 26(2): 346-357.
- [12] Heemels W P M H, Schumacher J M, Weiland S. Linear complementarity systems [J]. *SIAM J of Applied Mathematics*, 2000, 60(4): 1234-1269.
- [13] De Schutter B, Van den Boom T J J. Model predictive control for max-min-plus-scaling Systems [C]. Proc of American Control Conf. Arlington: IEEE Press, 2001: 319-324.
- [14] Heemels W P M H, De Schutter B, Bemporad A. Equivalence of hybrid dynamical models [J]. *Automatica*, 2001, 37(7): 1085-1091.
- [15] Van den Boom T J J, De Schutter B. Model predictive control for perturbed max-plus-linear systems: A stochastic approach [J]. *Int J Control*, 2004, 77(3): 302-309.
- [16] Hiroyuki G, Kazuhiro T, Shiro M, et al. A gain scheduled model predictive control linear-parameter-varying max-plus-linear systems [C]. Proc of the American Control Conf. Denver, 2003: 4016-4021.
- [17] Van den Boom T J J, De Schutter B, Schullerus G, et al. Adaptive model predictive control for max-plus-linear discrete event Input-output systems [J]. *IEE Proc of Control Theory Application*, 2004, 151(3): 339-346.
- [18] Necoara I, De Schutter B, Van den Boom T J J, et al. Model predictive control for perturbed continuous piecewise affine systems with bounded disturbances [C]. Proc of the 43th IEEE Conf on Decision and Control. Paradise Island, 2004: 1848-1803.
- [19] Grieder P, Vasnica M, Morari M, et al. Stabilizing low complexity feedback control of constrained piecewise affine systems [J]. *Automatica*, 2005, 41(10): 1683-1694.
- [20] Jean T, dier D, Jean B. Predictive control of hybrid systems under a multi-MLD formalism with state space polyhedral partition [C]. Proc of American Control Conf. Boston, 2004: 2516-1512.
- [21] Xue Z K, Li S Y. Multi-model predictive control with local constraints based on model switching [J]. *J of Control Theory and Application*, 2005, 3(2): 150-156.

(下转第 372 页)

广义混杂 Petri 网模型的理论及其应用仍需做进一步研究,还需对其结构性质、稳定性等理论进行研究.如何在模型中描述系统的复杂存储策略,如何实现全局最优化控制算法等将是广义混杂 Petri 网模型在混杂系统应用中所要解决的关键问题.

### 参考文献(References)

- [1] 吴锋,刘文煌,郑应平,等. 混杂系统研究综述[J]. 系统工程,1997,15(2): 1-7.  
(Wu F, Liu W H, Zheng Y P, et al. An overview on hybrid system research[J]. System Engineer, 1997, 15(2): 1-7.)
- [2] David R, Alla H. Hybrid Petri nets [C]. European Control Conf. Grenoble, 1991: 1472-1477.
- [3] Demongodin I, Koussoulas N T. Differential Petri nets: Representing continuous systems in discrete event world [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1998, 43(4): 573-579.
- [4] Demongodin I, Prunet F. Batches Petri nets[C]. Proc of Computer in Design, Manufacturing and Production. Paris, 1993: 29-37.
- [5] Balduzzi F, Gúa A, Menga G. First-order hybrid Petri nets: A model for optimization and control [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2000, 16(14): 382-399.
- [6] Wieting R. Hybrid high-level nets[C]. Proc of the 1996 Water Simulation Conf. Coronado, 1996: 848-855.
- [7] Gribaudo M. Model-checking based on fluid petri nets for the temperature control system of the ICARO Cogenerative plant [C]. Int Conf on Computer Safety, Reliability and Security. Catania: Springer-Verlag, 2002: 273-283.
- [8] Julia S, de Oliveira F F. A p-time hybrid Petri net model for the scheduling problem of workflow management systems [C]. Systems, Man and Cybernetics. Hague: IEEE Press, 2004: 4947-4952.
- [9] Gu T L, Dong R S. Novel continuous model to approximate time Petri nets: Modeling and analysis[J]. J of Application Mathematic and Computer Science, 2005, 15(1): 141-150.
- [10] Liao W Z, Gu T L. Optimization and control of production systems based on interval speed continuous Petri nets[C]. IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics. Hawaii: IEEE Press, 2005: 1212-1217.
- (上接第 365 页)
- [22] 邹涛,李少远. 带有输出区域控制目标特性的多变量预测控制算法[J]. 控制与决策, 2005, 20(2): 203-206.  
(Zou T, Li S Y. Multi-variables predictive control with output zone goals [J]. Control and Decision, 2005, 20(2): 203-206.)
- [23] Zou T, Li S Y, Ding B C. A dual-mode nonlinear model predictive control with the enlarged terminal constraint sets[J]. Acta Automatica Sinica, 2006, 32(1): 21-27.
- [24] De Schutter B, De Moor B. The extended linear complementarity problem [J]. Mathematical Programming, 1995, 71(3): 289-325.
- [25] Bemporad A, Borrelli F, Morari M. Optimal controllers for hybrid systems: Stability and piecewise linear explicit form[C]. Proc of the 39 IEEE Conf on Decision and Control. Sydney, 2000: 1810-1815.
- [26] Lazar M, Heemels W P M H, Weiland S, et al. On the stability of quadratic forms based model predictive control of constrained PWA systems [C]. Proc of American Control Conf Portland, 2005: 575-580.
- [27] Leyla Ö, Mayuresh V K. Stability analysis of a multi-model predictive control algorithm with application to control of chemical reactors[J]. J of Process Control, 2006, 16(2): 81-90.
- [28] Lazar M, Heemels W P M H, Weiland S, et al. Stabilization condition for MPC of constrained PWA systems[C]. Proc of the 43rd IEEE Conf on Decision and Control. Paradise Island, 2004: 4595-4600.
- [29] Lazar M, Heemels W P M H, Weiland S, et al. Hybrid systems: Computation and control [M]. Berlin: Springer, 2005.
- [30] Necoara I, De Schutter B, Van den Boom T J J, et al. Robustly stabilizing MPC for perturbed PWL systems [C]. Proc of the 44th IEEE Conf on Decision and Control and European Control Conf 2005. Seville: IEEE Press, 2005: 3759-3764.
- [31] Van den Boom T J J, De Schutter B. MPC for max-plus-linear systems: Closed-loop behavior and tuning [C]. Proc of the American Control Conf. Arlington, IEEE Press, 2001: 325-330.
- [32] 邹涛,李少远. 复杂系统 CMMO 问题的软约束调整与目标协调[J]. 控制与决策, 2005, 20(4): 388-391.  
(Zou T, Li S Y. Constraints adjustment and objectives coordination of CMMO problem for complex system [J]. Control and Decision, 2005, 20(4): 388-391.)
- [33] Torrisi F D, Bemporad A. HYSDEL-A tool for generating computational hybrid models [J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2004, 12(2): 235-249.