

间歇生产过程的自动机模型

吴 锋 刘文煌

郑应平

(清华大学国家 CIMS 研究中心·北京, 100084) (中国科学院自动化所·北京, 100080)

摘要: 在间歇生产过程中, 过程的信息结构由离散状态和连续状态构成. 本文以自动机为工具, 研究具有混合信息结构的间歇生产过程的描述、控制与优化等问题.

关键词: 间歇生产过程; 混杂自动机; 自动机; 定性/定量集成指标

1 引言

在很多应用领域尤其在化工、冶金行业中, 间歇生产过程的比重日渐增大, 但至今却没有合适的描述工具、控制策略与优化算法^[1]. 在间歇生产过程中, 由于控制策略涉及许多程序操作且被控对象的特性是变动的, 所以完全沿用连续过程或离散过程的方法, 是不可取的. 在间歇生产过程中, 过程的在线信息既包含了连续变量值, 同时也包含了离散状态(事件)信息, 即定量的和定性的混合信息. 针对这种过程的控制与优化问题, 本文提出以自动机为工具的模型方法, 它包括三方面内容: 1) 含混合信息的间歇生产过程, 需要用混杂自动机^[2]模型描述; 2) 根据过程控制的定性/定量的集成指标^[4], 基于过程的混杂自动机综合另一混杂自动机即直接控制器; 3) 根据过程优化的定性指标, 综合有限自动机即优化控制器. 最后, 结合一个实例, 给出了本模型的应用说明.

2 基本定义

为了下面研究的需要, 先给出一些定义.

定义 1 间歇生产过程的连续状态定义为完全表征连续时间域行为的一个最小内部变量组, 组成这个变量组的变量 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 称为过程变量.

定义 2 由过程变量构成的列向量在某一瞬时的取值称为过程的连续状态值, 用 v 表示, 所有的取值构成一个集合, 用 Σ_v 表示.

定义 3 间歇生产过程的离散状态由一批号码或离散位置变量 $l_1, l_2, \dots, l_n$ 所表征, 并且只能在异步的离散瞬时发生变化. 任一号码或离散位置 $l_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 表达了过程变化中的某一阶段.

自动机只能描述离散行为, 为了用于间歇生产过程, 必须对自动机模型进行某些扩展, 即将连续变量引入模型, 构成所谓混杂自动机^[2].

定义 4 混杂自动机 $HA = (L, V, T, f, g, \theta)$ 由下列元素组成:

- 有限离散位置变量集 L ;
- 有限变量集 $V, V = \{x_1, x_2, \dots, x_n, t\}$, 其中 t 为一特殊的时钟变量; 间歇过程的任一状态由两类元素组成, 表示为 (l, v) , 其中 $l \in L$, 则所有状态集 $\Sigma = L \times \Sigma_v$;
- 有限转移集 T , 任一转移 $\tau = (l, \mu, l')$, 其中: l 为源位置, μ 为连续状态变化关系, 且 $\mu \subseteq \Sigma_v, l'$ 为目标位置; 一般地, μ 有下列定义:

$$\mu = \begin{cases} x_i = f(x), & \text{转移发生,} \\ \text{未定义,} & \text{转移不发生.} \end{cases}$$

- 标记函数 $f, f(l)$ 表示了过程的连续行为, 常用一组微分方程表示;
- 标记函数 $g, g(l)$ 给出了过程变量和时钟变量在 l 位置的取值范围, 常用一组不等式表示;
- 初始条件 θ , 刻划了过程开始运行的状态, 例如, $\theta: l = 1 \wedge x = 0 \wedge y = 0$.

定义 5 过程事件是过程变量从某一特定条件转换为另一特定条件时直接反映在离散观测空间中的瞬时事件.

定义 6 有限自动机 $FSA = (Q, E, C, \delta, \xi)$, 其中 Q 为离散状态集, E 为过程事件集, C 为命令事件集, $\delta: Q \times E \rightarrow Q$ 为离散状态转移函数, $\xi: Q \rightarrow C$ 为输出函数.

3 过程控制结构

间歇生产过程往往是由许多工艺设备(称之为过程单元)按一定方式组合, 依照一定工艺流程的运行规律而构成的. 这些过程单元相互独立但必须相互协调, 以确保安全、优质、高产. 设计的过程控制结构呈递阶层次, 如图 1 所示, 它由直接控制层、监督优化层、高层所组成. 直接控制层实现过程控制, 解决过程的基本控制问题. 监督优化层监督过程的较大变化和大幅度干扰行为, 优化设定值或参考模型. 高层由计划调度、经营决策等层组成, 实现对整个生产过程计划目标的调度和工程决策.

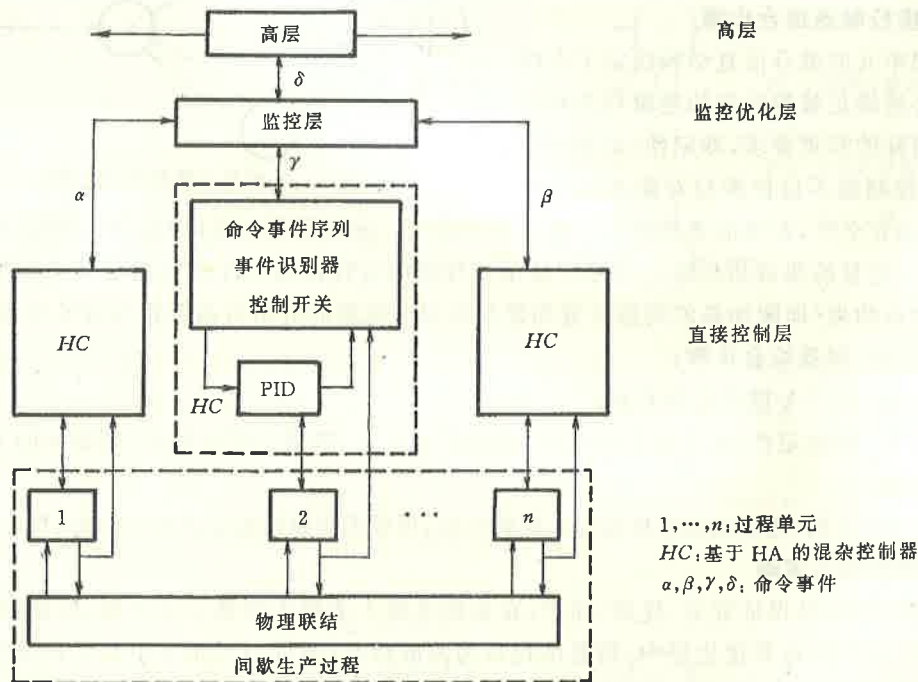


图 1 过程控制结构

与连续过程、离散过程相比, 由于间歇过程的底层对象的差异, 相应的描述工具、控制与优化综合方法应有所不同, 但计划调度、经营决策等高层所体现的特征和实现的功能是一致的. 因此, 有关高层的综合内容不在本文讨论的范围之内. 此外, 由于每个过程单元的相对独立性, 可以其中一个过程单元为例, 讨论它的描述、控制与优化等问题.

4 过程控制与优化综合

考虑一个过程单元的控制结构, 如图 2 所示, 直接控制器和过程单元 P_i 经过程变量的输出反馈组成一个基本控制回路. 与常规控制结构相比, 不同之处在于直接控制器即有连续控制部分(如 PID), 也有离散事件部分(命令事件序列), 它们之间通过两接口即事件识别器 Ψ 和控

制开关 ϕ 进行信息的传递与转换. 这种结构的形成主要是由于被控对象状态的特殊信息结构所致. 直接控制器的行为表现为混杂自动机. 在过程控制中, 命令序列的选取由上层监控器进行, 监控器监督优化过程工况, 参与过程的开、停车控制, 设定点控制及监测. 下面分别给出进一步的说明.

4.1 过程单元的描述

过程单元中的信息结构为 (l, v) , 其演化需用 HA 方能刻画. 图 3 表示某一过程单元 P_i 的 HA 模型, 其中: $1, 2, \dots, 5$ 表示不同连续状态 (用方程 $\dot{X}$ 表示) 下的各个阶段, 其中 A, B, C 为常数矩阵.

4.2 直接控制器综合步骤

过程单元的混合信息结构决定了在线控制器必须满足被控对象的逻辑行为和实时定量指标的双重要求, 即定性/定量的集成指标. 控制器不仅使被控对象满足定性指标 (例如安全性, 希望的逻辑顺序性等), 也要满足一定的定量指标 (如超调量、稳态误差等). 根据定性/定量的集成指标综合控制器就是在得到的过程模型 HA 上以附加约束的形式引入逻辑和数值约束 (即附加新的离散位置和常规控制), 使新的混杂自动机行为满足性能要求. 下面给出直接控制器综合步骤:

Step 1 用 HA 描述过程单元;

Step 2 根据定性/定量的集成指标, 检验模型行为, 如满足指标要求, 则得到的 HA 即为过程控制器;

Step 3 否则, 先根据定性指标引入逻辑约束, 再根据定量指标引入数值约束, 重复 Step 2.

4.3 监控器综合策略

监控的目标是保证安全、优质、高产, 在监控手段上表现为调整工艺参数、控制设定值, 以达到最优工况. 在监督优化层中, 信息结构只为离散状态 (事件), 可用有限自动机描述监控器的行为. 自动机的状态演化由过程事件和高层事件共同驱动 (对高层事件, 本文未予以考虑).

5 在啤酒发酵过程中的应用

啤酒发酵过程是典型的间歇生产过程, 文 [5] 介绍了它的生产工艺流程. 发酵时需将糖化后的麦汁充入发酵罐, 发酵温度控制是否严格是制约啤酒质量的重要因素. 温度工艺曲线如图 4 所示, 在每一阶段, 当实际温度高于曲线温度值 0.2°C 时, 打开冷却阀, 而低于 0.1°C 时; 关闭冷却阀.

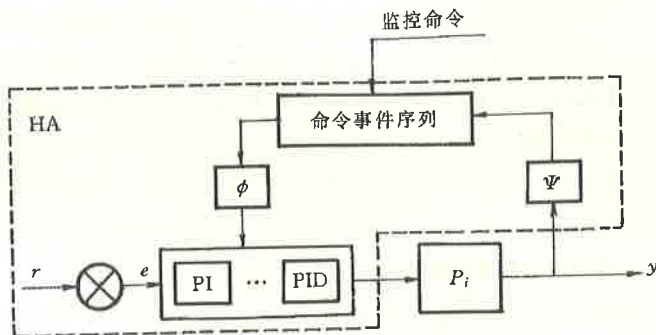


图 2 过程单元的控制结构

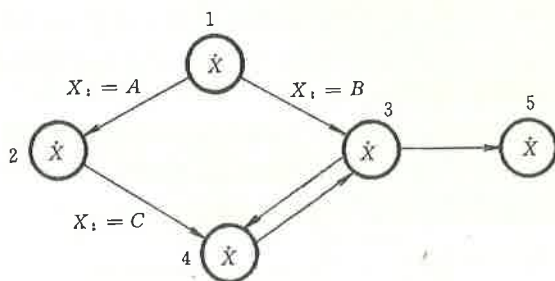


图 3 过程单元演化的 HA 模型

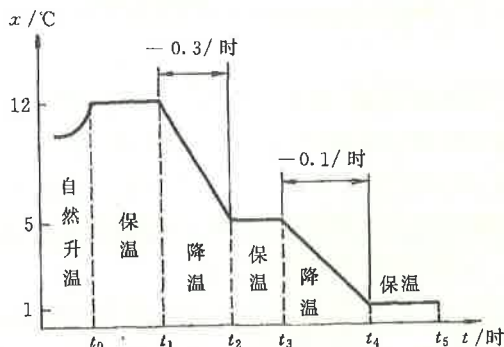


图 4 温度工艺曲线

该过程客观上存在不同的变化阶段,且每一变化阶段需要不同的数学模型描述.根据以上工艺要求,用 HA 模型表示,如图 5 所示.

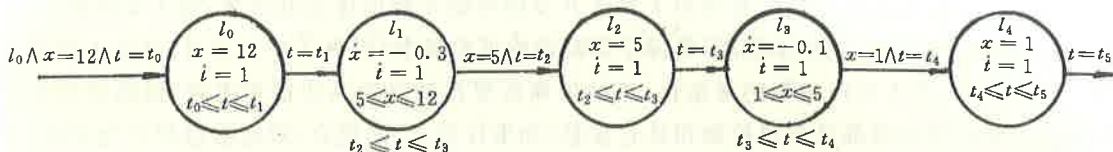


图 5 过程模型 $HA = (\{l_0, l_1, l_2, l_3, l_4, l_5\}, \{x, t\}, T, f, g, l_0 \wedge x = 12 \wedge t = t_0)$

由于各种因素如干扰的存在,这种模型表示的过程在实际生产中是不能工作的.每一阶段下的实际温度总有或高或低的偏离.对偏离的处理,根据控制要求和直接控制器的综合步骤,一方面引入新的离散位置(如图 6 中的 l_1, l_3, l_5, l_7, l_9),另一方面在每一位置下引入相应的常规控制(如 PI 或 PID 等,按经验选取).在图 6 中,以 $l_0 \rightarrow l_2$ 为例,可用下面的语句简要表示控制算法:

IF $x = 12.2$ THEN PI
IF $t = t_1$ THEN PID.

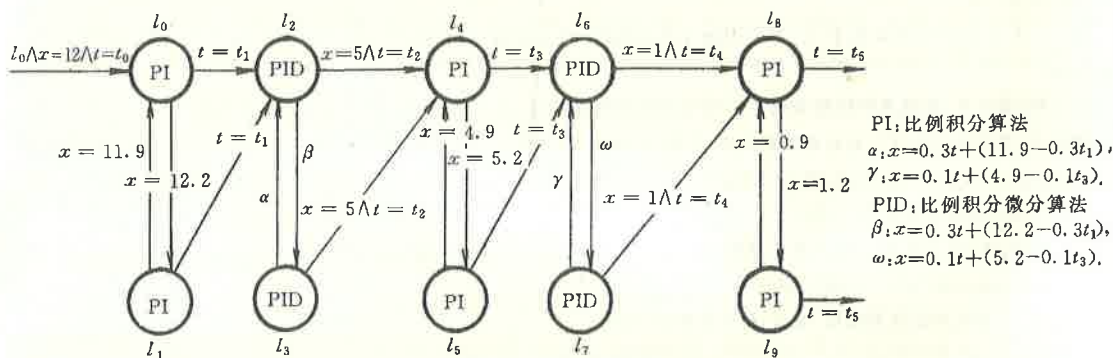


图 6 过程控制器

上述控制设计只能满足基本控制要求,优化设计是必需的.根据优化策略,监控器 FSA 除保证过程沿正常最优迹线 $q_0 \rightarrow q_1 \rightarrow q_2 \rightarrow q_3 \rightarrow q_4$ 运行外,还需监控对温度偏高或偏低时的保质处理(q_5),如图 7 所示.如果 $FSA = (Q, E, C, \delta, \xi)$, 则

$$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4\}, \quad E = \{a, b, c, d, e, f, g, h\}, \quad C = \{c_0, c_1, c_2, c_3, c_4\},$$

每个 c_i 为相应状态下的设定值命令,如 c_0 :“设定 $x = 12$ 且 $t = t_0$ ”.

各状态:

- q_0 : 保温(12°C), 阀关闭; q_1 : 降温, 阀关闭;
- q_2 : 保温(5°C), 阀关闭; q_3 : 降温, 阀关闭;
- q_4 : 保温(1°C), 阀关闭; q_5 : 保质处理, 阀打开.

各事件:

- a : 保温($x = 12$); b : 降温(-0.3);
- c : 保温($x = 5$); d : 降温(-0.1);
- e : 保温($x = 1$); f : 结束;
- g : 偏高 0.2°C , 打开阀; h : 偏低 0.1°C , 关闭阀.

6 结束语

通过有关应用进一步证明,由于间歇生产过程存在明显的变化阶段以及每一阶段需要不同的控制策

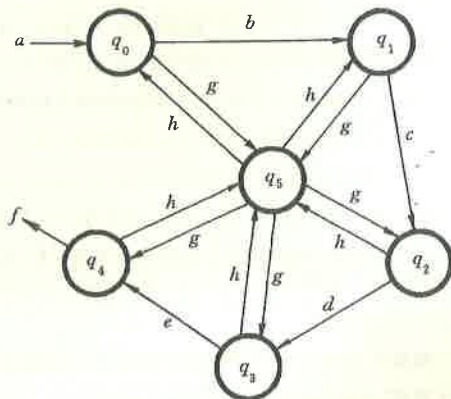


图 7 过程优化控制器 FSA

略,自动机模型的提出正是为了在常规控制下引入离散事件控制提供了集成框架,使得这类过程一方面保证按正常阶段变迁,另一方面保证在每一阶段下沿最优迹线变化。

借助本文提出的自动机模型及相关算法开发的啤酒发酵温度控制系统,用于某啤酒厂 27 个 250 吨发酵罐控制,经初步使用,确保了每阶段的恒温调节,提高了啤酒质量,降低了酒损。

应当指出,由于生产过程的复杂性,单纯依靠常规控制方法往往很难凑效,目前开发的各种控制系统在控制级都是常规控制和其它控制(如事件控制)的混合,对间歇过程尤为如此。本文只是相关工作的总结。以上所做的工作仅是初步的,还有许多问题,如利用文[6,7]提出的离散事件系统监控理论及优化算法进一步规范优化控制器等,有待于进行更深入的研究。

参 考 文 献

- 1 蒋慰孙. 2000 年化工自动化展望. 化工自动化及仪表. 1994, 21(1): 1-9
- 2 Alur, R., Courcoubetis, C., et al., The algorithmic analysis of hybrid systems. Theoretical Computer Science, 1995, (138): 3-34
- 3 Stiver, J. A. and Antsaklis, P. J.. Modeling and analysis of hybrid control systems. Proc. of the 31st CDC, 1992, 3748-3751
- 4 法京怀, 郑应平. 离散事件控制系统定性/定量性能的集成优化. 第三届中国 CIMS 学术会议论文集, 1994
- 5 翁拔炎. 微型计算机在工业控制中的应用. 广州: 中山大学出版社, 1987, 91-100
- 6 Ramadge, P. J. and Wonham, W. M.. Supervisory control of a class of discrete event process. SIAM J. Control and Optimization, 1987, 25(1): 206-230
- 7 Wonham, W. M. and Ramadge, P. J.. On the supremal controllable sublanguage of a given language. SIAM J. Control and Optimization, 1987, 25(3): 637-659
- 8 何成武. 自动机理论及其应用. 北京: 科学出版社, 1990

An Automaton Model for Batch Process

WU Feng and LIU Wenhua

(Center of State CIMS Research, Tsinghua University • Beijing, 100084, PRC)

ZHENG Yingping

(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences • Beijing, 100080, PRC)

Abstract: In batch process, message structure of process consists of discrete state and continuous state. This paper researches on problems such as description, control and optimization in batch process which has hybrid message structure by means of the automaton model.

Key words: batch process; hybrid automaton; automaton; integrated qualitative/quantitative index

本文作者简介

吴 锋 1965 年生. 1993 年和 1996 年分别在清华大学自动化系和中国科学院自动化所获硕士和博士学位. 现在清华大学国家 CIMS 工程研究中心做博士后研究工作. 主要从事离散事件系统, 混杂系统理论及应用, CIMS 工程应用研究工作.

刘文煌 1947 年生. 1970 年毕业于清华大学自动化系. 现为清华大学自动化系副教授. 主要研究方向为工业自动化及 CIMS 工程应用等.

郑应平 1941 年生. 1963 年毕业于北京大学数力系, 1967 年在中国科学院自动化所研究生毕业. 现为该所研究员, 博士生导师. 主要研究方向为系统与控制理论, 多人决策与动态对策理论, 离散事件系统理论, CIM 方法论及应用等.