

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20181366

多阶段间歇过程无穷时域优化线性二次容错控制

王立敏¹, 卢丽彬¹, 高福荣², 周东华³¹ 海南师范大学数学与统计学院, 海南海口 571158; ² 香港科技大学化学与生物分子工程系, 中国香港;³ 山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东青岛 266590

摘要: 针对具有输入时滞的多阶段间歇过程, 考虑执行器故障影响, 提出了无穷时域优化混杂容错控制器设计方法。该方法首先将给定具有输入时滞的模型转化为新的无时滞的状态空间模型, 接着再将此模型转换为包含状态变量误差和输出跟踪误差的扩展状态空间模型, 并用切换系统模型表示, 然后引入有限时域的二次目标函数, 利用最优控制理论, 设计出在无穷时域中容错控制器。为获得最小运行时间, 针对不同阶段设计依赖于Lyapunov函数的驻留时间方法。创新之处在于, 控制律设计简单, 计算量小, 且每一阶段时间求取不需要引用任何其他变量, 简单易行。最后, 以注塑成型过程为例, 仿真结果证明所提出方法具有可行性和有效性。

关键词: 间歇过程; 切换系统; 过程控制; 控制; 系统工程; 执行器故障

中图分类号: TB 114.43

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2019) 02-0541-07

Infinite horizon linear quadratic hybrid fault-tolerant control for multi-phase batch process

WANG Limin¹, LU Libin¹, GAO Furong², ZHOU Donghua³

¹ School of Mathematics and Statistics, Hainan Normal University, Haikou 571158, Hainan, China; ² Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China; ³ College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China

Abstract: A hybrid fault-tolerant controller with infinitely adjustable time-domain parameters is designed to ensure fault-tolerant control performance. Firstly a multi-phase state space model by acquiring input and output data is established, and further the state space model is into transformed an extended state space model containing state variables and output tracking errors, and the switched system model is used to represent it, so as to design the controller in an infinite horizon. Then, to obtain the minimum running time, the dwell time method depending on the Lyapunov function is proposed for different stages. Finally, taking the injection molding process as an example, the system simulation is carried out. The simulation shows that the proposed method is feasible and effective.

Key words: batch processes; switched systems; process control; control; systems engineering; actuator failure

引言

人们对高品质批次生产要求的日益提升, 导致了生产需要在更加精确复杂的条件下进行, 且执行

器在执行过程中不可避免地会出现一些故障, 这导致它很难完成指定目标, 保证系统性能。如果故障没有被及时地检测并校正, 生产性能必然会恶化, 甚至会导致设备和人员的安全问题。随着对系统

收稿日期: 2018-11-07 修回日期: 2018-11-23

通信作者及第一作者: 王立敏 (1976—), 女, 博士, 副教授, wanglimin0817@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61773190)

引用本文: 王立敏, 卢丽彬, 高福荣, 周东华. 多阶段间歇过程无穷时域优化线性二次容错控制[J]. 化工学报, 2019, 70(2): 541–547

Citation: WANG Limin, LU Libin, GAO Furong, ZHOU Donghua. Infinite horizon linear quadratic hybrid fault-tolerant control for multi-phase batch process[J]. CIESC Journal, 2019, 70(2): 541–547

稳定性和安全性需求的不断提升,容错控制问题引起了学术界和工业界的高度关注。为此涌现了大量的理论研究成果,在间歇过程领域,涵盖了线性系统与非线性系统^[1-21],时不变系统与时变系统^[22-27]等容错控制。

目前针对间歇过程的单一阶段,在系统发生执行器故障,设计相应的控制器以抵制故障给系统带来的影响,其研究成果已经成熟,如上述的大部分文献。但单一过程不涉及前一阶段发生故障对后一阶段的影响,不涉及从一个阶段切换至下一阶段需满足的切换条件,也不会涉及每个阶段应该运行的时间。针对多阶段间歇过程,尽管有一定的研究成果^[28-31],但是在整个过程中大部分控制器增益不能调节,即使有成果可以调节,但未考虑多阶段的执行器故障对每阶段的输入、输出响应、运行时间以及跟踪性能的影响。除了解决多阶段的执行器故障,还需要设计一款实时适应改变的控制器,在无穷时域内保证系统具有最优容错控制性能。而预测容错控制恰好可应用在这方面,本文预设计的新型容错控制器就是在预测控制的基础上进行。

根据以上问题,本文设计基于无穷时域优化的参数可自由调节的混杂容错控制器,保证系统的容错控制性能。该方法首先通过给定具有输入时滞多阶段间歇过程建立其无时滞状态空间模型,进一步将此模型转换为包含状态变量误差和输出跟踪误差的扩展状态空间模型,并用切换系统模型表示,引入二次指标函数,进而在无穷时域中设计控制器。该方法不仅保证系统在执行器故障情况下有良好的跟踪性能,同时也保证了控制律设计形式简单并满足工业过程。接着针对不同阶段,设计依赖于 Lyapunov 函数的驻留时间方法,并求出系统的运行时间。此方法得出的结果不需要引用任何其他变量,简单易行,还提高生产效率。最后,以注塑成型过程为例进行了系统的模拟仿真,仿真结果证明所提出方法具有可行性和有效性。

1 问题描述

本文的批次过程是针对多阶段特性提出的,批次过程中含有部分执行器故障的状态空间模型,形式如下

$$\begin{cases} x^i(t+1, k) = \bar{A}^i x^i(t, k) + \bar{B}^i u^{iF}(t-d, k) \\ y^i(t, k) = \bar{C}^i x^i(t, k) + w^i(t, k) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $0 < t \leq L$, L 是每批次操作的结束时间点; $x^i(t, k) \in R^n$, $y^i(t, k) \in R$, 分别为在 t 时刻第 i 阶段第 k 个批次的状态变量和输出变量, d 是输入的滞后信息, $\{\bar{A}^i, \bar{B}^i, \bar{C}^i\}$ 分别为适当维数的系统矩阵; $u^{iF}(t, k) = \alpha^i u^i(t, k)$, 其中 $u^i(t, k)$ 是系统控制输入且 $u^i(t, k) \in R$, $u^{iF}(t, k)$ 为执行器的实际输出, α^i 为第 i 阶段执行器故障系数, 且满足 $0 < \underline{\alpha}^i \leq \alpha^i \leq \bar{\alpha}^i$ 。

在很多状况下,不同阶段的状态表达含义不同且不同阶段所要控制的参数不同,从而不同阶段的维数可能不同,但相邻阶段的某个状态可以相互关联。那么,切换时刻相邻阶段状态可表示为

$$x^{i+1}(T_{i,k}^i) = J^i x^i(T_{i,k}^i) \quad (2)$$

其中, J^i 表示状态转移矩阵, $T_{i,k}^i$ 表示不同阶段的状态切换时间,如果在不同阶段的状态都相同,那么 $J^i = I^i$ 。

研究每一阶段到底运行多长时间具有实际意义,在此,要找到前一阶段的运行时间和切换状态,然后用依赖于 Lyapunov 函数的驻留时间方法求未来每阶段的时间,从而求出整个阶段的运行时间,最终达到系统输出跟踪给定的输出。

在实际工业生产过程中,间歇过程具有非线性特性,本文用线性模型进行初步的研究,非线性问题可视为在线性模型下有干扰的问题,对非线性特性,将在后续工作中进行研究。此外,本文所研究的故障是有一定范围的,假定在某一范围内常值,本文设计的控制器在故障的某一范围内常值是可控的,即具有一定的鲁棒性。实际上,执行器故障是可在时间轴和批次轴上变化的某一变量,在此文中并没有考虑,未来工作将考虑此问题。

2 建立被控对象以状态空间模型为基础的新的切换模型

2.1 新的状态空间模型

将模型式(1)作处理,引进 Δ 差分算子,定义

$$\Delta x(t, k) = x^i(t, k) - x^i(t-1, k) \quad (3)$$

并选取新的状态空间变量 $\Delta x_m^i(t, k)^T$, 形式如下

$$\Delta x_m^i(t, k)^T = [\Delta x^i(t, k)^T \quad \Delta u^i(t-1, k)^T \quad \cdots \quad \Delta u^i(t-d, k)^T] \quad (4)$$

由上得到一个新的第 i 个阶段状态空间模型,形式如下

$$\begin{cases} \Delta x_m^i(t+1, k) = A_{jm}^i \Delta x_m^i(t, k) + B_{jm}^i \Delta u^i(t, k) \\ \Delta y^i(t, k) = C_m^i \Delta x_m^i(t, k) \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$A_{fm}^i = \begin{bmatrix} \bar{A}^i & \bar{0} & \bar{0} & \cdots & \bar{0} & \bar{B}_f^i \\ \underline{0} & \underline{0} & \underline{0} & \cdots & \underline{0} & \underline{0} \\ \underline{0} & \alpha^i & \underline{0} & \cdots & \vdots & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{0} & \alpha^i & \underline{0} & \underline{0} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \underline{0} & \underline{0} & \cdots & \underline{0} & \alpha^i & \underline{0} \end{bmatrix},$$

$$B_m^i = [\underline{0} \quad I^i \quad \underline{0} \quad \cdots \quad \underline{0}]^T, C_m^i = [\bar{C}^i \quad \underline{0} \quad \underline{0} \quad \cdots \quad \underline{0}],$$

$$\bar{B}_f^i = \bar{B}^i \alpha^i, B_{fm}^i = B_m^i \alpha^i$$

其中, T 为矩阵的转置符号, $\bar{0}$ 和 $\underline{0}$ 均为适当维数的零矩阵。

为了有较好的跟踪性能, 针对第 i 阶段, 定义输出跟踪误差

$$e^i(t, k) = y^i(t, k) - y_r^i(t, k) \quad (6)$$

结合模型式(6)可得

$$e^i(t+1, k) = e^i(t, k) + C_m^i A_{fm}^i \Delta x_m^i(t, k) + C_m^i B_{fm}^i \Delta u^i(t, k) \quad (7)$$

其中, $y^i(t, k)$, $y_r^i(t, k)$ 分别为 t 时刻、第 i 阶段、第 k 个批次的实际输出值和跟踪设定值, $e^i(t, k)$ 为 t 时刻、第 i 阶段、第 k 个批次的输出误差。

针对第 i 阶段, 将式(5)和式(7)中得到的状态空间模型进一步扩展为包含状态变量误差和输出跟踪误差的新的状态空间模型, 形式如下

$$z^i(t+1, k) = A_f^i \Delta z^i(t, k) + B_f^i \Delta u^i(t, k) \quad (8)$$

其中, $z^i(t+1, k) = \begin{bmatrix} \Delta x_m^i(t+1, k) \\ e^i(t+1, k) \end{bmatrix}$, $z^i(t, k) = \begin{bmatrix} \Delta x_m^i(t, k) \\ e^i(t, k) \end{bmatrix}$, $A_f^i = \begin{bmatrix} A_{fm}^i & \underline{0} \\ C_m^i A_{fm}^i & I^i \end{bmatrix}$, $B_f^i = \begin{bmatrix} B_{fm}^i \\ C_m^i B_{fm}^i \end{bmatrix}$; 矩阵 A_f^i 中的 $\underline{0}$ 表示零矩阵。

上面提出的新模型在以后的控制器设计中提供更多的维度。

2.2 建立基于新的状态模型的切换模型

将上述模型式(8)再现为新的切换系统模型

$$z(t+1, k) = A_f^{\sigma(t, k)} z(t, k) + B_f^{\sigma(t, k)} \Delta u(t, k) \quad (9)$$

其中, $\sigma(t, k): Z^+ \rightarrow N: = \{1, 2, \cdots, N\}$ 表示的是切换信号, 它可能与时间或系统状态相关, N 是子系统的阶段数, 切换序列定义为 $S: = \{T_0, T_0^1, \cdots, T_0^N, T_1, \cdots, T_1^N, \cdots, T_k, \cdots, T_k^N\}$, 其中 $T_0^N = T_1$ 所有连续间断的时间间隔满足 $T_j^i - T_{j-1}^{i-1} \geq \tau^i, i \in k, j \in N$. T_k 代表第 k 个批次起始时间, T_k^N 代表第 k 个批次第 N 阶段的运行时间。 τ^i 为不同阶段的驻留时间并且它的取值依赖于 Lyapunov 函数。 $A_f^{\sigma(t, k)}$ 、 $B_f^{\sigma(t, k)}$ 对应模型式(8)的不同阶段。为了研究其控制性能, 引出间歇过程 i 阶段的目标函数, 形式

如下

$$J^i = \sum_{t=t_0^i}^{\infty} [z^i(t, k)^T Q^i z^i(t, k) + \Delta u^i(t, k)^T R^i \Delta u^i(t, k)] \quad (10)$$

$$Q^i = \text{diag}\{q_{j1}^i, q_{j2}^i, \cdots, q_{jn}^i, q_{ju1}^i, \cdots, q_{jud}^i, q_{je}^i\} \quad (11)$$

其中, $Q^i > 0$, $R^i > 0$ 分别为过程状态的加权矩阵、输入加权矩阵, $q_{j1}^i, q_{j2}^i, \cdots, q_{jn}^i, q_{ju1}^i, \cdots, q_{jud}^i, q_{je}^i$ 为过程状态的权重系数, q_{je}^i 为输出跟踪误差的权重系数并且取 $q_{je}^i = 1$ 。

3 控制器的算法设计

定理 1 当目标函数取得最优解时, 无穷时域线性二次控制律给出形式如下

$$\Delta u^i(t, k) = -R^{-i} B_f^{iT} [I^i + K_{\infty}^i B_f^i R^{-i} B_f^{iT}]^{-1} K_{\infty}^i A_f^i z^i(t, k) \quad (12)$$

$$K_{\infty}^i = A_f^{iT} [I^i + K_{\infty}^i B_f^i R^{-i} B_f^{iT}]^{-1} K_{\infty}^i A_f^i + Q^i = A_f^{iT} K_{\infty}^i A_f^i - A_f^{iT} K_{\infty}^i B_f^i (R^i + B_f^{iT} K_{\infty}^i B_f^i)^{-1} B_f^{iT} K_{\infty}^i A_f^i + Q^i \quad (13)$$

其中, K_{∞}^i 来自 Riccati 方程。

证明: 首先考虑有限时域的多阶段间歇过程的目标函数, 形式如下

$$J^i = \sum_{t=t_0^i}^{t_f^i-1} [z^i(t, k)^T Q^i z^i(t, k) + \Delta u^i(t, k)^T R^i \Delta u^i(t, k)] + z^i(t_f^i, k)^T Q_f^i z^i(t_f^i, k) \quad (14)$$

其中, $t \in [t_0^i, t_f^i]$ 为优化时域, 结合 Pontryagin 最小值原理将目标函数式(10)写成如下形式

$$H_t^i = [z^i(t, k)^T Q^i z^i(t, k) + \Delta u^i(t, k)^T R^i \Delta u^i(t, k)] + p_{t+1}^{iT} [A_f^i z^i(t, k) + B_f^i \Delta u^i(t, k)] \quad (15)$$

其中, p_{t+1}^i 为第 i 阶段 Lagrange 乘子; 由于最优控制律的必要条件如下

$$P_t^i = \frac{\partial H_t^i}{\partial z^i(t, k)} = 2Q^i z^i(t, k) + A_f^{iT} p_{t+1}^i, \quad P_{t_f^i}^i = 2Q_f^i z^i(t_f^i, k) \quad (16)$$

$$\text{令 } \frac{\partial H_t^i}{\partial \Delta u^i} = 0, \text{ 可得}$$

$$\frac{\partial H_t^i}{\partial \Delta u^i} = 2R^i \Delta u^i(t, k) + B_f^{iT} p_{t+1}^i = 0 \quad (17)$$

$$\Delta u^i(t, k) = -\frac{1}{2} R^{-i} B_f^{iT} p_{t+1}^i \quad (18)$$

其中, $\frac{\partial^2 H_t^i}{\partial^2 \Delta u^i} = 2R^i$, 因此 H_t^i 是关于 $\Delta u^i(t, k)$ 的正定二次型, 而当满足控制律式(18)时, 系统的二次型性能指标取极小值时, 即为最优控制。

联合 $p_t^i = 2K_{t, t_f^i}^i z^i(t, k)$ 及扩展状态空间模型式(8), 再联合式(17)可得

$$\Delta u^i(t, k) = -R^{-i} B_f^{iT} [I^i + K_{t+1, t_f^i}^i B_f^i R^{-i} B_f^{iT}]^{-1} K_{t+1, t_f^i}^i A_f^i z^i(t, k)$$

$$K_{i,t_f}^i = A_f^T \left[I^i + K_{i+1,t_f}^i B_f^T R^{-i} B_f \right]^{-1} K_{i+1,t_f}^i A_f^i + Q^i =$$

$$A_f^T K_{i+1,t_f}^i A_f^i - A_f^T K_{i+1,t_f}^i B_f^T (R^i +$$

$$B_f^T K_{i+1,t_f}^i B_f)^{-1} B_f^T K_{i+1,t_f}^i A_f^i + Q^i$$

$$K_{i,t_f}^i = Q_f^i \quad (21)$$

其中, R^{-i} 表示第 i 阶段输入加权矩阵的逆矩阵。

对式(19)~式(21), 令 K_{i,t_f}^i 趋于正无穷大即为无穷时域, 则定理 1 得证。

接着引入一个新的依赖于 Lyapunov 函数的驻留时间, 结合

$$V^i(t, k) = z^T(t, k) P^i(t, k) z(t, k), \quad i \in N \quad (22)$$

其中驻留时间 τ^i 来自于矩阵 $P^i(t, k)$, $i \in N$, 形式如下

$$P^i(t, k) = \begin{cases} P_h^i, h^i = t - T_i^{j-1}, t \in [T_i^{j-1}, T_i^{j-1} + \tau^i) \\ P_\tau^i, t \in [T_i^{j-1} + \tau, T_i^j) \end{cases}, i \in k, j \in N \quad (23)$$

定理 2 结合切换系统式(9), 如果存在一系列正定矩阵 $P_h^i > 0, i \in N, 0 \leq h^i \leq \tau^i$, 形式如式(24)所示

$$\Delta V^i(t, k) = \begin{cases} z^T(t, k) \left((A_f^i - B_f^i K^i)^T P_{h+1}^i (A_f^i - B_f^i K^i) - P_h^i \right) z(t, k), h^i = t - T_i^{j-1}, t \in [T_i^{j-1}, T_i^{j-1} + \tau^i) \\ z^T(t, k) \left((A_f^i - B_f^i K^i)^T P_\tau^i (A_f^i - B_f^i K^i) - P_\tau^i \right) z(t, k), t \in [T_i^{j-1} + \tau, T_i^j) \end{cases} \quad i \in k, j \in N \quad (24)$$

若切换系统稳定, 必有 $V^i(t, k) < 0$, 其等价于式(24)的前两个不等式。结合式(12)、式(13), 求解上述不等式, 便可求出不同阶段的 τ^i , 即第一阶段为 89, 第二阶段为 90。此方法优点不需要其他参数的设定, 直接得驻留时间的值。

4 仿 真

注塑成型过程主要包含注射段、保压段、冷却段三个阶段。在注射段, 模腔压力达到一定值时, 过程进入保压段, 且前一个阶段的控制性能对下一个阶段的控制目标和运行时间产生影响, 最终会影响产品的质量。另外, 由于每个阶段控制目标不同会导致带有不确定性干扰的系统有不同的维度。本文以注塑过程为例, 同时考虑执行器增益故障,

$$\begin{cases} x^1(t+1, k) = \begin{bmatrix} 0.9291 & 0.0319 & 0 & -5.617\alpha \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1054 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t, k) \\ x_2(t, k) \\ x_3(t, k) \\ u(t-1, k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 8.687 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u^{1F}(t, k) \\ y^1(t, k) = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] x^1(t, k) \end{cases} \quad (31)$$

$$(A_f^i - B_f^i K^i)^T P_{h+1}^i (A_f^i - B_f^i K^i) - P_h^i < 0, 0 \leq h^i \leq \tau^i - 1, \forall i \in N$$

$$(A_f^i - B_f^i K^i)^T P_\tau^i (A_f^i - B_f^i K^i) - P_\tau^i < 0, \forall i \in N$$

$$P_0^i - \bar{P}_\tau^i \leq 0, i \neq j, \forall i, j \in N \quad (25)$$

那么系统在驻留时间 τ^i 时逐渐稳定。由于不同阶段系统维数不同, 此处的 $\bar{P}_\tau^i$ 应该是式(24)中求得的正定对称矩阵左右乘以相应阶段的转移矩阵后的形式。

证明: 针对不同阶段设计切换信号为 $\sigma(t, k)$ 。

首先针对切换系统式(9), 设

$$\Delta u^i(t, k) = -K^i z^i(t, k) \quad (26)$$

其中

$$\Delta u^i(t, k) = -R^{-i} B_f^{iT} \left[I^i + K_\infty^i B_f^i R^{-i} B_f^{iT} \right]^{-1} K_\infty^i A_f^i z^i(t, k), K^i = -R^{-i} B_f^{iT} \left[I^i + K_\infty^i B_f^i R^{-i} B_f^{iT} \right]^{-1} K_\infty^i A_f^i$$

则对每一个阶段, 切换 i 系统可变为

$$z(t+1, k) = (A_f^i - B_f^i K^i) z(t, k) \quad (27)$$

接着对第 i 个子系统, 选择下面的 Lyapunov 函数

$$V^i(t, k) = z^T(t, k) P^i z(t, k) \quad (28)$$

其中, $P^i(t, k)$, $i \in N$, $N = \{1, 2, \dots, N\}$ 是依赖于驻留时间 τ^i 的矩阵。则

在这部分中, 以系统从注射阶段到保压阶段的切换进行说明。因而需要建立注塑成型过程注射段与保压段的混杂状态空间模型。在注射阶段, 相应于阀门开度(VO)的注射速度(IV)模型可描述为

$$IV(t+1, k) - 0.9291 IV(t, k) - 0.0319 IV(t-1, k) = 8.687 VO(t, k) - 5.617 VO(t-1, k) \quad (29)$$

且相当于注射速度的喷嘴压力(NP)模型为

$$NP(t+1, k) - NP(t, k) = 0.1054 IV(t, k) \quad (30)$$

$$\text{令 } x^1(t+1, k) = \begin{bmatrix} x_1^1(t+1, k) \\ x_2^1(t+1, k) \\ x_3^1(t+1, k) \\ u(t, k) \end{bmatrix}, x_1(t, k) = IV(t, k),$$

$x_2(t, k) = IV(t-1, k)$, $x_3(t, k) = NP(t, k)$, $u(t, k) = VO(t, k)$, 则在阀门开度出现故障的情况下, 注射阶段的状态空间模型, 形式如下

类似地,在保压阶段,相应于阀门开度的喷嘴压力模型为

$$NP(t+1, k) - 1.317NP(t, k) + 0.0326NP(t-1, k) = 171.8VO(t, k) - 156.8VO(t-1, k) \quad (32)$$

$$\text{同理, 令 } x^2(t+1, k) = \begin{bmatrix} x_1^2(t+1, k) \\ x_2^2(t+1, k) \\ u(t, k) \end{bmatrix}, x_1^2(t, k) =$$

$NP(t, k)$, $x_2^2(t, k) = NP(t-1, k)$, $u(t, k) = VO(t, k)$, 则在阀门开度出现故障的情况下,注塑过程的保压阶段状态空间模型,形式如下

$$\begin{cases} x^2(t+1, k) = \begin{bmatrix} 1.317 & -0.326 & -156.8\alpha \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^2(t, k) \\ x_2^2(t, k) \\ u(t-1, k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 171.8 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u^{2F}(t, k) \\ y^2(t, k) = [1 \ 0 \ 0] x^2(t, k) \end{cases} \quad (33)$$

其中,切换条件为 $[0 \ 0 \ 1 \ 0]x^1(t, k) \geq 350$,表示一旦喷嘴压力大于350,该过程将从注射阶段转向保压阶段。利用定理1、定理2,可以得到第一阶段时间为89,第二阶段时间为90,与计算相符。取 $\alpha = 0.8$ 。为显示本文的设计效果,仅以20批次进行仿真。仿真结果如图1所示。

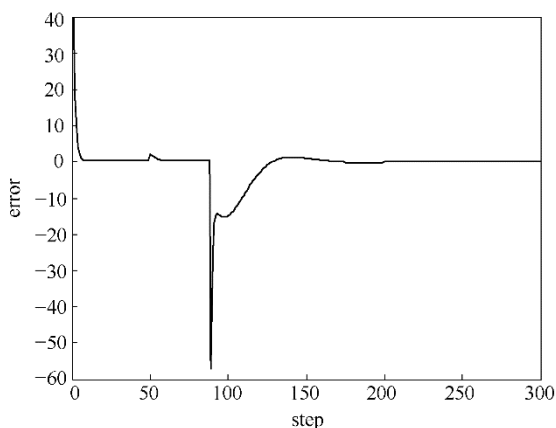


图1 第20个批次的跟踪误差

Fig.1 Tracking error of the 20th batch

由图1可以看出系统误差从第7步开始趋于稳定,系统实现很好的跟踪。在第50步发生故障时,误差变大,且经过一段运行后系统的性能回到故障前的指标;在第89步进行切换时误差发生变化,到100步趋于稳定。可以看出,本文设计的线性二次容错控制器在故障发生的情况下仍能很好地保证系统性能。

由图2可知,输入开始有明显跳跃,从第17步

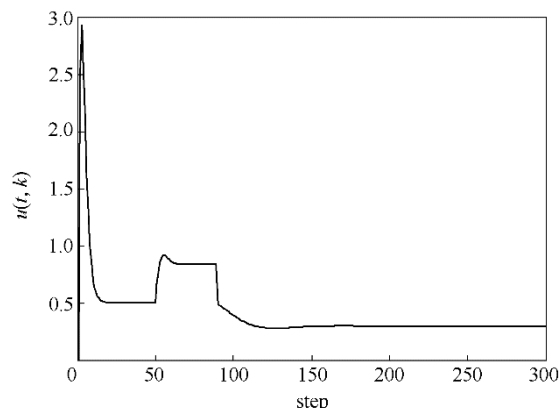


图2 第20个批次一维输入

Fig.2 The 20th batch of one-dimensional input

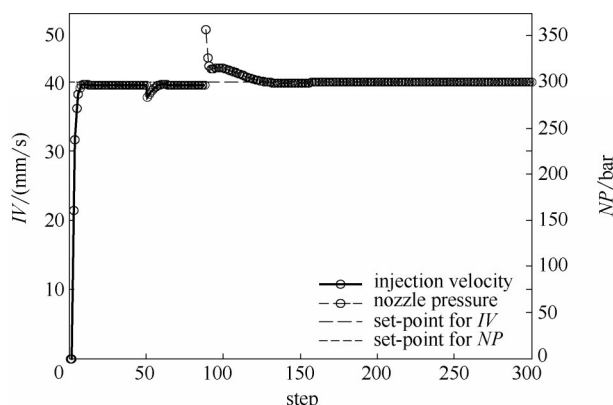


图3 第20个批次一维输出

Fig.3 The 20th of batch one-dimensional output

(1bar=0.1 MPa)

开始趋于稳定为0.5108。在第50步发生故障时,控制器为了调节系统,输入出现了跳跃,克服故障后趋于稳定。在切换后,很快系统达到稳定状态趋于某一定值。

由图3可知,在第50步发生故障时,明显系统输出响应变差,但是经过一段运行以后使系统的输出响应趋于稳定。在第89步进行切换后,实际输出又完全达到了原来没有故障时的输出,实现了完美跟踪。总体上看,线性二次容错控制系统的性能是有效的。

5 结 论

故障会对工业生产造成严重的影响,因此降低发生故障的概率,减少故障发生的风险是十分必要的。随着对间歇生产过程的重视,间歇过程的容错控制问题必是不可忽略的研究对象。本文在执行器发生故障的情况下,以多阶段间歇过程为研究对

象,设计基于无穷时域优化的参数可自由调节的混杂容错控制器,针对不同阶段,设计依赖于Lyapunov函数的驻留时间。不仅能够保证系统在故障允许范围内平稳运行,以实现节能减耗、降低成本等目标,甚至还可以实现降低危害人身安全事故发生等目标。本文只在一维上进行研究,从仿真可看出,在切换时刻出现明显跳跃,为了进一步强化控制性能,可在二维上深入研究,这是未来的研究方向。

参考文献

- [1] Wang Y Q, Shi J, Zhou D H, et al. Iterative learning fault-tolerant control for batch processes[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2006, **45**(26): 9050–9060.
- [2] Wang Y Q, Zhou D H, Gao F R. Iterative learning reliable control of batch processes with sensor faults[J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, **63**(4): 1039–1051.
- [3] Wang Y Q, Zhou D H, Gao F R. Generalized predictive control of linear systems with actuator rearrange faults[J]. *Journal of Process Control*, 2009, **19**(5): 803–815.
- [4] Aumi S, Mhaskar P. Robust model predictive control and fault handling of batch processes[J]. *AIChE Journal*, 2011, **57**(7): 1796–1808.
- [5] Wang L M, Dong W W. Optimal iterative learning fault-tolerant guaranteed cost control for batch processes in the 2D-FM model[J]. *Abstract and Applied Analysis*, 2014, **2012**(5): 919–929.
- [6] Zhang R D, Gan L Z, Lu J Y, et al. New design of state space linear quadratic fault-tolerant tracking control for batch processes with partial actuator failure[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, **52**(46): 16294–16300.
- [7] Wang L M, Chen X, Gao F R. An LMI method to robust iterative learning fault-tolerant guaranteed cost control for batch processes[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2013, **21**(4): 401–411.
- [8] Zhang R D, Lu J Y, Qu H Y, et al. State space model predictive fault-tolerant control for batch processes with partial actuator failure[J]. *Journal of Process Control*, 2014, **24**(5): 613–620.
- [9] Zhang R D, Zou H B, Xue A K, et al. GA based predictive functional control for batch processes under actuator faults[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2014, **137**(1): 67–73.
- [10] Zhang R D, Lu R Q, Xue A K, et al. Predictive functional control for linear systems under partial actuator faults and application on an injection molding batch process[J]. *Ind.Eng.Chem. Res.*, 2014, **53**(2): 723–731.
- [11] Zhang R D, Jin Q B, Gao F R. Design of state space linear quadratic tracking control using GA optimization for batch processes with partial actuator failure[J]. *Journal of Process Control*, 2015, **26**: 102–114.
- [12] Zhang R D, Gao F R. Improved infinite horizon LQ tracking control for injection molding process against partial actuator failures[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2015, **80**: 130–139.
- [13] Zhang R D, Lu R Q, Xue A K, et al. New minmax linear quadratic fault-tolerant tracking control for batch processes[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, **61**(10): 3045–3051.
- [14] Wang L M, Liu F F, Yu J X, et al. Iterative learning fault-tolerant control for injection molding processes against actuator faults[J]. *Journal of Process Control*, 2017, **59**: 59–72.
- [15] Zou T, Wu S, Zhang R D. Improved state space model predictive fault-tolerant control for injection molding batch processes with partial actuator faults using GA optimization[J]. *ISA Transactions*, 2018, **73**: 147–153.
- [16] Wang Y Q, Zhou D H, Gao F R. Active fault-tolerant control of nonlinear batch processes with sensor faults[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2007, **46**(26): 9158–9169.
- [17] Peng K, Zhang K, You B, et al. A quality-based nonlinear fault diagnosis framework focusing on industrial multimode batch processes[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, **63**(4): 2615–2624.
- [18] Wang L M, Zhu C J, Yu J X, et al. Fuzzy iterative learning control for batch processes with interval time-varying delays[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, **56**(14): 3993–4001.
- [19] Altin B, Barton K. Exponential stability of nonlinear differential repetitive processes with applications to iterative learning control[J]. *Automatica*, 2017, **81**: 369–376.
- [20] Wang L M, Li B Y, Yu J X, et al. Design of fuzzy iterative learning fault-tolerant control for batch processes with time-varying delays[J]. *Optimal Control Applications & Methods*, 2018, **39**: 1887–1903.
- [21] Lu J Y, Cao Z X, Zhang R D, et al. Nonlinear monotonically convergent iterative learning control for batch processes[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, **65**(7): 5826–5836.
- [22] Liu T, Gao F. A generalized relay identification method for time delay and non-minimum phase processes[J]. *Automatica*, 2010, **45**(4): 1072–1079.
- [23] Wang L M, Mo S Y, Zhou D H, et al. Robust delay dependent iterative learning fault-tolerant control for batch processes with state delay and actuator failures[J]. *Journal of Process Control*, 2012, **7**(22): 1273–1286.
- [24] Wang L M, Mo S Y, Zhou D H, et al. Delay-range-dependent method for iterative learning fault-tolerant guaranteed cost control for batch processes[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, **52**(7): 2661–2671.
- [25] Liu C. Optimal control of a switched autonomous system with time delay arising in fed-batch processes[J]. *IMA Journal of Applied Mathematics*, 2015, **80**(2): 569–584.
- [26] Wang Y M, Zhao D H, Li Y Y, et al. Unbiased minimum variance fault and state estimation for linear discrete time-varying two-dimensional systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*,

- 2017, **62**(10): 5463–5469.
- [27] Tao H, Paszke W, Rogers E, et al. Iterative learning fault-tolerant control for differential time-delay batch processes in finite frequency domains[J]. Journal of Process Control, 2017, **56**: 112–128.
- [28] Wang L M, He X, Zhou D H. Average dwell time-based optimal iterative learning control for multi-phase batch processes[J]. Journal of Process Control, 2016, **40**: 1–12.
- [29] Gao M, Sheng L, Zhou D H, et al. Iterative learning fault-tolerant control for networked batch processes with multi-rate sampling and quantization effects[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2017, **56**(9): 2515–2525.
- [30] Wang L M, Sheng Y T, Yu J X, et al. Robust iterative learning control for multi-phase batch processes: an average dwell-time method with 2D convergence indexes[J]. International Journal of Systems Science, 2018, **49**(2): 324–343.
- [31] Lu J Y, Cao Z X, Gao F R. A multi-point iterative learning model predictive control for batch processes[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, DOI: 10.1109/TIE.2018.2873133.