

1-2-2019

Discrete Control Simulation of Agitation Tank Based on Taylor Finite Difference

Yunong Zhang

School of Data and Computer Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;

Yaqiong Ding

School of Data and Computer Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;

Le Li

School of Data and Computer Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;

Deyang Zhang

School of Data and Computer Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Discrete Control Simulation of Agitation Tank Based on Taylor Finite Difference

Abstract

Abstract: Zhang dynamics is used to solve the system equations of the agitation tank to get controllers. At the same time, Taylor finite difference method is used in the computer discrete control simulation for the agitator tank system. In addition, the convergence stability of Zhang dynamics applied to the agitation tank is proved through theoretical analysis. In order to achieve the draining purpose for the agitation tank, the computer discrete control simulation is conducted by means of MATLAB. For comparison, the computer simulation based on the neural network predictive controller is carried out. The comparative simulation results substantiate the effectiveness and high precision of the presented method. Moreover, compared with the ode45, Taylor finite difference method can decrease system functional evaluations and has easier software and hardware implementations.

Keywords

Zhang dynamics, agitation tank, Taylor finite difference, discrete control

Authors

Yunong Zhang, Yaqiong Ding, Le Li, Deyang Zhang, and Binbin Qiu

Recommended Citation

Zhang Yunong, Ding Yaqiong, Li Le, Zhang Deyang, Qiu Binbin. Discrete Control Simulation of Agitation Tank Based on Taylor Finite Difference[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 1023-1029.

基于泰勒有限差分的搅拌罐的离散控制仿真

张雨浓, 丁亚琼, 李乐, 张德阳, 邱斌斌

(中山大学数据科学与计算机学院, 广东 广州 510006)

摘要: 通过利用张动力学来处理搅拌罐的系统方程得到一组控制器,同时结合泰勒有限差分方法,对搅拌罐系统进行计算机离散控制仿真实验。此外,理论分析证明了张动力学应用到搅拌罐系统的收敛稳定性。最后,利用 MATLAB 仿真工具,以排空搅拌罐为例,进行了计算机离散化控制仿真实验。为了比较,基于神经网络预测控制的计算机仿真实验被给出,对比仿真实验结果证明了利用泰勒有限差分方法对搅拌罐系统进行离散化控制仿真的有效性和高精度。此外,相较于利用 ode45 对搅拌罐系统进行计算机控制仿真,该方法具有减少系统函数取值和易于软硬件实现的优点。

关键词: 张动力学; 搅拌罐; 泰勒有限差分; 离散控制

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 03-1023-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803032

Discrete Control Simulation of Agitation Tank Based on Taylor Finite Difference

Zhang Yunong, Ding Yaqiong, Li Le, Zhang Deyang, Qiu Binbin

(School of Data and Computer Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Zhang dynamics is used to solve the system equations of the agitation tank to get controllers. At the same time, Taylor finite difference method is used in the computer discrete control simulation for the agitator tank system. In addition, the convergence stability of Zhang dynamics applied to the agitation tank is proved through theoretical analysis. In order to achieve the draining purpose for the agitation tank, the computer discrete control simulation is conducted by means of MATLAB. For comparison, the computer simulation based on the neural network predictive controller is carried out. The comparative simulation results substantiate the effectiveness and high precision of the presented method. Moreover, compared with the ode45, Taylor finite difference method can decrease system functional evaluations and has easier software and hardware implementations.

Keywords: Zhang dynamics; agitation tank; Taylor finite difference; discrete control

引言

搅拌罐的排空已成为现代工业中一个重大问题^[1],而现行的方法较多关注于如何排空搅拌罐内的沉淀物,而且仅仅将其作为液体废料排出造成一

定程度上的浪费和工业污染。通过对废料的回收利用和有效处理来达到提高资源利用效率以减少或避免污染物产生,是可持续发展战略的一种体现^[2]。故本文提出一种能够使搅拌罐输出液体浓度快速收敛到期望搅拌罐输出液体浓度,配制出期望浓度的液体,同时排空搅拌罐的方法是非常有必要的。

通常搅拌罐液位高度和浓度的动态方程均为非线性方程。文献[3]中,在液位高度控制方面,研究者假设液体的流出速率和液体高度为线性关



收稿日期: 2016-03-07 修回日期: 2016-06-28;
基金项目: 国家自然科学基金委员会面上项目(61473323), 广州市科技计划(2014J4100057), 自主系统与网络控制教育部重点实验室开放基金(2013A07);
作者简介: 张雨浓(1973-), 男, 河南信阳, 博士, 教授, 博导, 研究方向为人工神经网络、机器人、科学计算与优化等。

<http://www.china-simulation.com>

• 1023 •

系, 这种处理方法往往忽略了被控系统的非线性特征。文献[4]应用神经网络对搅拌罐系统进行控制, 这种方法需要完整的学习样本^[4], 这对于工业实践来说是不便利的。本文中利用张动力学^[5-11] (Zhang dynamics, ZD)处理搅拌罐非线性系统方程得到一组控制器, 同时利用泰勒有限差分方法对搅拌罐系统进行计算机离散控制仿真。相较于利用 ode45 对搅拌罐系统进行计算机控制仿真, 泰勒有限差分方法对搅拌罐系统进行计算机离散控制仿真具有减少系统函数取值和易于软硬件实现的优点。

1 搅拌罐动态系统

本节主要介绍搅拌罐的动态系统方程^[12]以及系统参数。搅拌罐的系统方程如式(1)和(2):

$$\dot{h}(t) = w_1(t) + w_2(t) - 0.2\sqrt{h(t)} \quad (1)$$

$$\dot{C}_b(t) = (C_{b1} - C_b(t)) \frac{w_1(t)}{h(t)} - \frac{\kappa_1 C_b(t)}{(1 + \kappa_2 C_b(t))^2} + (C_{b2} - C_b(t)) \frac{w_2(t)}{h(t)} \quad (2)$$

式中: κ_1 、 κ_2 为有关于系统的动态过程的流出速率常数; $h(t)$ 为搅拌罐液位高度; $w_1(t)$ 和 $w_2(t)$ 为搅拌罐的两种流入液体的流速; $C_b(t)$ 为输出液体的浓度。如图 1 所示, 搅拌罐的参数包括搅拌罐的两种流入液体的浓度 C_{b1} 和 C_{b2} , $w_0(t)$ 为搅拌罐流出液体流速, 期望搅拌罐输出液体浓度 C_{bd} , C_{bd} 为常量, 搅拌罐液位高度降为零的期望轨迹 $h_d(t)$, $C_{b1} \neq C_{b2}$ 。

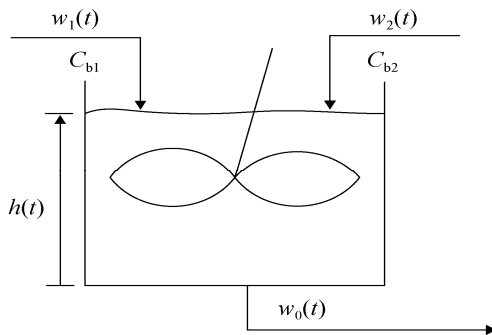


图 1 搅拌罐的结构图

Fig. 1 Structure chart of agitation tank

2 ZD 控制方法

线性系统控制理论的发展和研究已相当成熟, 但是非线性系统控制领域中仍有许多难点亟需解决, 而 ZD 是一种能够面向多输入多输出非线性系统跟踪控制的控制方法^[5]。

利用 ZD 控制方法处理搅拌罐的系统方程, 得到控制器组的步骤如下。

1) 首先定义如下不定的误差监测函数为

$$z_1(t) = h(t) - h_d(t) \in \mathbb{R} \quad (3)$$

$$z_2(t) = C_b(t) - C_{bd} \in \mathbb{R} \quad (4)$$

然后采用如下张动力学设计公式:

$$\dot{z}_1(t) = -\gamma_1 z_1(t) \quad (5)$$

$$\dot{z}_2(t) = -\gamma_2 z_2(t) \quad (6)$$

式中: γ_1 和 $\gamma_2 > 0 \in \mathbb{R}$ 是用来调节张动力学求解的收敛速率。

将公式(3)和(4)分别代入(5)和(6)可得

$$\dot{h}(t) - \dot{h}_d(t) = -\gamma_1(h(t) - h_d(t)) \quad (7)$$

$$\dot{C}_b(t) = -\gamma_2(C_b(t) - C_{bd}) \quad (8)$$

2) 将式(1)和(2)分别代入式(7)和(8)可得

$$w_1(t) + w_2(t) = 0.2\sqrt{h(t)} + \dot{h}_d(t) - \gamma_1(h(t) - h_d(t))$$

$$(C_{b1} - C_b(t))w_1(t) + (C_{b2} - C_b(t))w_2(t) =$$

$$\frac{\kappa_1 C_b(t)h(t)}{(1 + \kappa_2 C_b(t))^2} - \gamma_2(C_b(t) - C_{bd})h(t)$$

$$\text{则} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ C_{b1} - C_b(t) & C_{b2} - C_b(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1(t) \\ w_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2\sqrt{h(t)} + \dot{h}_d(t) - \gamma_1(h(t) - h_d(t)) \\ \frac{\kappa_1 C_b(t)h(t)}{[1 + \kappa_2 C_b(t)]^2} - \gamma_2(C_b(t) - C_{bd})h(t) \end{bmatrix}$$

3) 根据克雷姆法则求解上述二元线性方程,

因条件 $C_{b1} \neq C_{b2}$, 则可获得控制器组方程如下所示。

$$w_1(t) = \frac{(0.2\sqrt{h(t)} + \dot{h}_d(t))(C_{b2} - C_b(t))}{C_{b2} - C_{b1}} - \frac{\gamma_1(h(t) - h_d(t))(C_{b2} - C_b(t))}{C_{b2} - C_{b1}} - \frac{\frac{\kappa_1 C_b(t)h(t)}{(1 + \kappa_2 C_b(t))^2} - \gamma_2(C_b(t) - C_{bd})h(t)}{C_{b2} - C_{b1}}$$

$$w_2(t) = \frac{\kappa_1 C_b(t) h(t)}{(1 + \kappa_2 C_b(t))^2} - \gamma_2 (C_b(t) - C_{bd}) h(t) - \frac{C_{b2} - C_{b1}}{C_{b2} - C_{b1}} + \frac{(0.2\sqrt{h(t)} + \dot{h}_d(t))(C_{b1} - C_b(t))}{C_{b2} - C_{b1}} + \frac{\gamma_1 (h(t) - h_d(t))(C_{b1} - C_b(t))}{C_{b2} - C_{b1}}$$

按照控制器组方程设置搅拌罐的两种流入液体流速 $w_1(t)$ 和 $w_2(t)$, 使得搅拌罐输出液体浓度 $C_b(t)$ 快速收敛到期望搅拌罐输出液体浓度 C_{bd} , 以及搅拌罐液位高度 $h(t)$ 快速收敛到搅拌罐液位高度降为零的期望轨迹 $h_d(t)$, 达到使搅拌罐排空的同时能够配置出期望浓度的液体的目的, 以减少工业浪费。

为了进一步说明利用 ZD 方法处理搅拌罐系统方程得到的控制器的有效性, 给出如下定理。

定理 1 对于一个有界并且连续可微的期望轨迹 $h_d(t)$ 和 C_{bd} , 从正的且有界的一个初始状态 $[h(0), C_b(0)]$ 开始, 采用了控制器组的搅拌罐系统的跟踪误差 $z_1(t)$ 和 $z_2(t)$ 会指数收敛于零。

证明 设 $\mathbf{z} = [z_1, z_2]^T \in \mathbb{R}^2$, 然后我们定义如下所示的一个李雅普诺夫候选函数为

$$Z = \frac{1}{2} \|\mathbf{z}\|_2^2 = \frac{1}{2} \mathbf{z}^T \mathbf{z} = \frac{1}{2} (z_1^2 + z_2^2) \geq 0$$

式中: $\|\cdot\|_2$ 表示为向量的二范数。当 $\mathbf{z} \neq \mathbf{0}$ 时 $Z > 0$, 仅当 $\mathbf{z} = \mathbf{0}$ (也即 $z_1 = 0$ 和 $z_2 = 0$) 时 $Z = 0$, 因此 Z 是正定的。 Z 关于时间 t 的导数为

$$\dot{Z} = \frac{dZ}{dt} = z_1 \dot{z}_1 + z_2 \dot{z}_2 = -\lambda_1 z_1^2 - \lambda_2 z_2^2 \leq 0$$

当 $\mathbf{z} \neq \mathbf{0}$ 时 $\dot{Z} < 0$, 当且仅当 $\mathbf{z} = \mathbf{0}$ 时 $Z = 0$ ($0 < \lambda_1, 0 < \lambda_2$)。另外, $\|\mathbf{z}\|_2 \rightarrow \infty$ 时, $Z \rightarrow \infty$, 因此根据李雅普诺夫定理 \mathbf{z} 收敛于 0, 由此可得出搅拌罐系统的跟踪误差 $z_1(t)$ 和 $z_2(t)$ 会收敛于 0。

下面进一步的证明跟踪误差指数收敛到零的特性。对于上述公式分以下两种情况讨论: $\lambda_1 \geq \lambda_2 > 0$; $0 < \lambda_1 \leq \lambda_2$ 。

第一种情况: $\lambda_1 \geq \lambda_2 > 0$, 则可得 $\lambda_1 = \lambda_2 + \Delta\lambda$,

其中 $\Delta\lambda > 0 \in \mathbb{R}$, 那么公式以上可以被重新写为

$$\begin{aligned} \dot{Z} &= -\lambda_1 z_1^2 - \lambda_2 z_2^2 = -\lambda_2 (z_1^2 + z_2^2) - \Delta\lambda z_1^2 \leq \\ &= -\lambda_2 (z_1^2 + z_2^2) = -\lambda_2 \mathbf{z}^T \mathbf{z} = -2\lambda_2 Z \end{aligned} \quad (9)$$

从式(9)可知, 随着时间 t 趋向于无穷大, 向量 \mathbf{z} 会指数收敛于 0。

第二种情况: $\lambda_2 \geq \lambda_1 > 0$, 则可得 $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda$, 那么相似的公式可以被重新写为

$$\dot{Z} = -\lambda_1 (z_1^2 + z_2^2) - \Delta\lambda z_2^2 \leq -\lambda_1 \mathbf{z}^T \mathbf{z} = -2\lambda_1 Z \quad (10)$$

从式(10)可知, 随着时间 t 趋向于无穷大, 向量 \mathbf{z} 会指数收敛于 0。

综合以上两种情况可知, 搅拌罐系统的跟踪误差 $z_1(t)$ 和 $z_2(t)$ 会指数收敛于 0, 换句话说, 搅拌罐的液位高度 $h(t)$ 会指数收敛于搅拌罐液位高度的期望(或者说设置)轨迹 $h_d(t)$ 和搅拌罐流出液体的浓度 $C_b(t)$ 会指数收敛于搅拌罐流出液体的期望浓度 C_{bd} 。证明完毕。

3 泰勒有限差分与系统离散化

在本节中我们主要介绍泰勒有限差分方法在搅拌罐系统中的应用, 即将搅拌罐系统离散化^[11]。

3.1 泰勒有限差分公式

泰勒公式在数学上是被当作函数展开的工具来使用的^[13-16]。泰勒公式能够利用一个足够光滑的函数在某一点的各阶导数值来构建一个以各阶导数的值为系数的多项式以近似这个函数在此点的邻域中的值^[14-16]。在工程 and 实际应用中通常使用有限项来近似一个函数。因此, 在本节中一个新的泰勒有限差分公式被给出。在下面定理 2 中, 符号 $C^n[a, b]$ 表示函数 f 的 n 阶导数在区间 $[a, b]$ 上是连续的^[13]。

定理 2 假设 $x \in C^3[a, b]$ 且 t_{k-2}, t_{k-1}, t_k 和 $t_{k+1} \in [a, b]$ 。则新的泰勒有限差分公式为

$$\dot{x}(t_k) \approx \frac{2x(t_{k+1}) - 3x(t_k) + 2x(t_{k-1}) - x(t_{k-2}))}{2\tau} \quad (11)$$

其截断误差为 $O(\tau^2)$ 。

3.2 搅拌罐系统离散化

基于搅拌罐系统方程(1)和系统方程(2), 对搅

拌罐系统进行离散化, 得到离散系统状态方程为

$$\dot{h}(t_k) = w_1(t_k) + w_2(t_k) - 0.2\sqrt{h(t_k)} \quad (12)$$

$$\dot{C}_b(t_k) = (C_{b1} - C_b(t_k)) \frac{w_1(t_k)}{h(t_k)} - \frac{\kappa_1 C_b(t_k)}{(1 + \kappa_2 C_b(t_k))^2} + (C_{b2} - C_b(t_k)) \frac{w_2(t_k)}{h(t_k)} \quad (13)$$

利用泰勒有限差分方法对搅拌罐系统离散化的步骤如下。

1) 令

$$w_1(t_k) + w_2(t_k) - 0.2\sqrt{h(t_k)} = f_1(t_k, C_b(t_k), h(t_k))$$

$$(C_{b1} - C_b(t_k)) \frac{w_1(t_k)}{h(t_k)} + (C_{b2} - C_b(t_k)) \frac{w_2(t_k)}{h(t_k)} - \frac{\kappa_1 C_b(t_k)}{(1 + \kappa_2 C_b(t_k))^2} = f_2(t_k, C_b(t_k), h(t_k))$$

将上述公式带入公式(12)和(13), 可得

$$\dot{h}(t_k) = f_1(t_k, C_b(t_k), h(t_k)) \quad (14)$$

$$\dot{C}_b(t_k) = f_2(t_k, C_b(t_k), h(t_k)) \quad (15)$$

2) 将公式(11)结合(14)和(15)可得

$$\frac{2h(t_{k+1}) - 3h(t_k) + 2h(t_{k-1}) - h(t_{k-2}))}{2\tau} = f_1(t_k, C_b(t_k), h(t_k))$$

$$\frac{2C_b(t_{k+1}) - 3C_b(t_k) + 2C_b(t_{k-1}) - C_b(t_{k-2}))}{2\tau} = f_2(t_k, C_b(t_k), h(t_k))$$

将上述公式整理可得

$$h(t_{k+1}) = (f_1(t_k, C_b(t_k), h(t_k)))\tau + \frac{3h(t_k) - 2h(t_{k-1}) + h(t_{k-2}))}{2} \quad (16)$$

$$C_b(t_{k+1}) = (f_2(t_k, C_b(t_k), h(t_k)))\tau + \frac{3C_b(t_k) - 2C_b(t_{k-1}) + C_b(t_{k-2}))}{2} \quad (17)$$

式中: $\tau > 0$ 代表采样间隔, $k = 0, 1, 2, \dots$ 为更新次数。结合 Euler 前向有限差分方法^[17]得到的 3 个初始值, 代入公式(16)和(17)即可迭代的求出 $h(t_{k+1})$ 和 $C_b(t_{k+1})$ 。

4 计算机离散控制仿真

以排空搅拌罐为例, 假设搅拌罐系统的液位高度逐渐下降直至趋于 0, 而搅拌罐系统的浓度在液位下降过程中保持不变, 以达到在排空搅拌罐的同时输出固定浓度的溶液, 从而减少工业浪费的目的。以此为工业背景, 设置搅拌罐的期望液位轨迹为 $h_d(t_k) = 3\exp(-0.04t_k)$, 期望浓度为 $C_{bd} = 10$, 调节张动力学求解的收敛速率为 $\gamma_1 = 1$ 和 $\gamma_2 = 1$, 关于系统的动态过程的流出速率常数为 $\kappa_1 = 1$ 和 $\kappa_2 = 1$, 搅拌罐系统的两种流入液体的浓度为 $C_{b1} = 24.9$ 和 $C_{b2} = 3.0$, 采样区间为 $[0, 600]$, 采样间隔 $\tau = 0.1$ s。所有参数设定之后, 基于 MATLAB^[18] 仿真平台进行了计算机离散控制仿真实验, 并展示了相应的仿真结果图。

为了清晰直观地展示出应用泰勒有限差分方法对搅拌罐系统进行计算机离散化, 能够使搅拌罐输出液体浓度 $C_b(t_k)$ 快速收敛到期望搅拌罐输出液体浓度 C_{bd} , 以及能够使搅拌罐液位高度 $h(t_k)$ 快速收敛到期望搅拌罐运动轨迹 $h_d(t_k)$, 以达到使搅拌罐排空的同时能够配置出期望浓度的液体的目的, 我们给出了仿真实验结果如图 2~6 所示。值得特别说明的是, 在图 5~6 中, 液位高度绝对值误差为 $|z_1(t_k)| = |h(t_k) - h_d(t_k)|$, 以及液体浓度绝对值误差为 $|z_2(t_k)| = |C_b(t_k) - C_{bd}|$ 。其中, 从图 2 中可以看出: 两种液体流速 $w_1(t_k)$ 和 $w_2(t_k)$ 能够有效地控制, 同时能够相对快速进入较为平缓的下降状态, 其方便于工业实现; 从图 3 中可以看出: 搅拌罐液位高度 $h(t_k)$ 能够相对快速收敛(10 s 以内)到搅拌罐液位高度降为零的期望轨迹 $h_d(t_k)$, 其达到排空搅拌罐的目的; 从图 4 中可以看出: 搅拌罐输出液体浓度 $C_b(t_{k+1})$ 能够快速收敛到(10 s 以内)期望搅拌罐输出液体浓度 C_{bd} , 从而减少工业浪费; 从图 5 和图 6 中可以看出: 误差能够快速降为 0(其中浓度绝对值误差的对数值基本上在 10^{-10} 数量级及以下, 高度绝对值误差的对数值基本上在 10^{-5} 数量级及以下)。

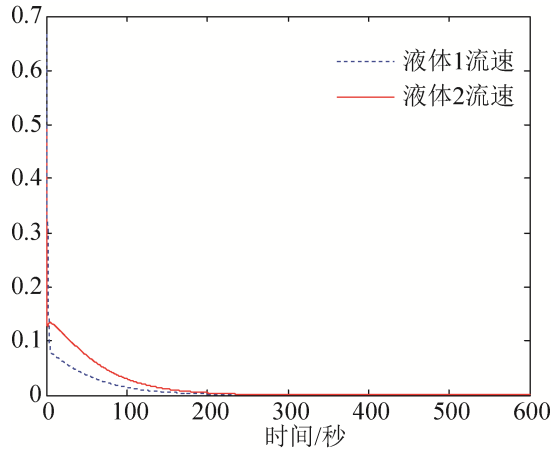


图 2 搅拌罐的两种流入液体流速图
Fig. 2 Flow velocities of two liquids in agitator tank

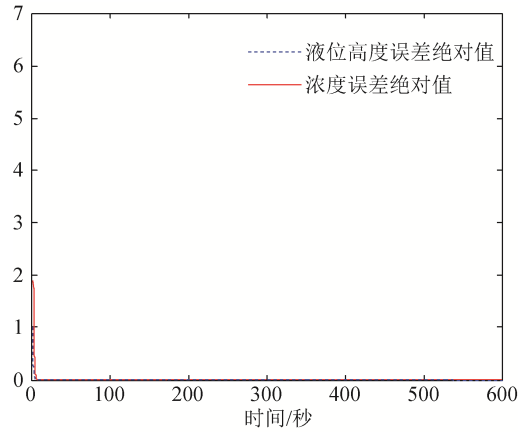


图 5 搅拌罐的浓度和高度绝对值误差图
Fig. 5 Absolute value errors of concentration and height for agitator tank

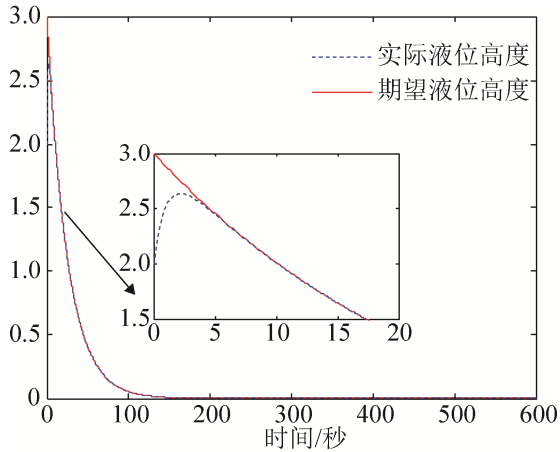


图 3 搅拌罐液位随时间下降图
Fig. 3 Liquid level of agitator tank decreasing with time

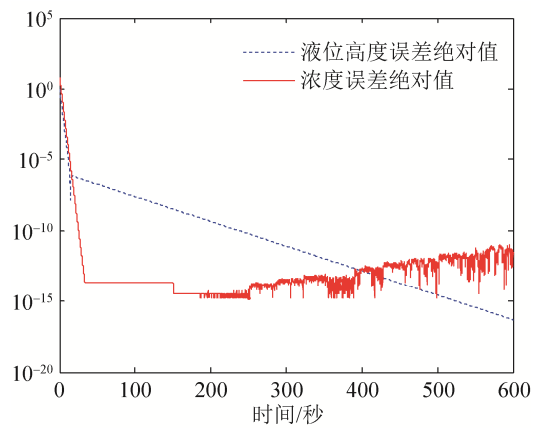


图 6 搅拌罐的浓度和高度绝对值误差对数图
Fig. 6 Logarithmic plot of absolute value errors of concentration and height for agitator tank

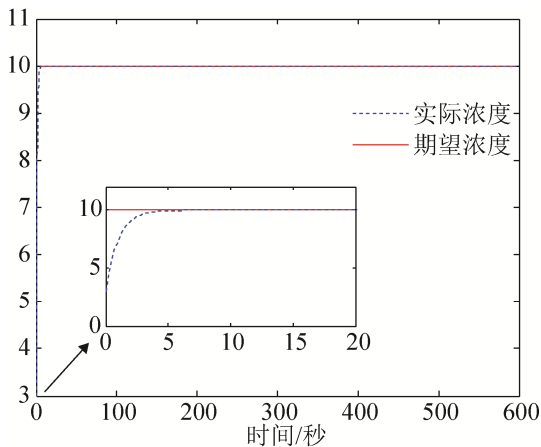


图 4 搅拌罐输出液体浓度图
Fig. 4 Output liquid concentration of agitator tank

5 对比仿真

为了进一步证明应用泰勒有限差分方法对搅拌罐系统进行离散化控制仿真的有效性, 基于神经网络预测控制方法^[12]对搅拌罐系统进行计算机仿真的对比实验被给出。由于空间限制, 这里仅展示了两组液体浓度的仿真结果图。

利用神经网络预测控制器模块^[12]对搅拌罐系统进行仿真(训练样本为 8 000 个), 液体浓度(取 $C_{bd}=20$)的仿真结果如图 7。从图 7 可以看出, 应用神经网络预测控制器模块^[12]对搅拌罐系统进行仿真, 需要大量的样本来获得神经网络模型, 且计算机仿真的结果精度不高。

利用泰勒有限差分方法对搅拌罐系统进行离散化控制仿真,液体浓度(取 $C_{bd}=20$)的仿真结果如图8。从图8可以看出,搅拌罐输出液体浓度 $C_b(t_k)$ 能够快速收敛到期望搅拌罐输出液体浓度 C_{bd} ,且仿真结果精度较高。

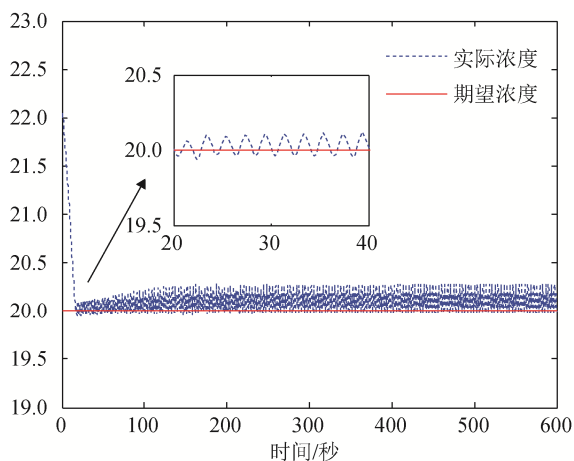


图7 基于神经网络预测控制的计算机仿真

Fig. 7 Computer simulation based on neural network predictive control

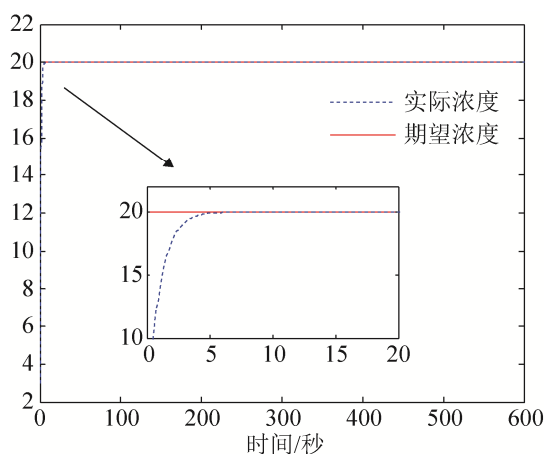


图8 基于泰勒有限差分的计算机离散化控制仿真

Fig. 8 Computer discretization control simulation based on Taylor finite difference

从对比仿真实验可以看出,应用泰勒有限差分方法对搅拌罐系统进行离散化控制仿真是有效的且高精度的。

6 结论

本文通过将ZD方法和泰勒有限差分方法进行

结合,尝试对搅拌罐系统进行计算机离散控制仿真实验。仿真实验结果表明应用泰勒有限差分方法对搅拌罐系统进行计算机离散化,能够使搅拌罐输出液体浓度 $C_b(t_k)$ 快速收敛到期望搅拌罐输出液体浓度 C_{bd} ,以及能够使搅拌罐液位高度 $h(t_k)$ 快速收敛到搅拌罐液位高度降为零的期望轨迹 $h_d(t_k)$,达到使搅拌罐排空的同时能够配制出期望浓度的液体的目的,以减少工业浪费。此外,理论分析证明了张动力学方法应用到搅拌罐系统的收敛稳定性,对比仿真实验进一步地证明了该方法是有效的且高精度的。相较于利用ode45对搅拌罐系统进行计算机控制仿真,泰勒有限差分方法具有减少系统函数取值和易于软硬件实现的优点。

参考文献:

- [1] 肖洋轶, 石万凯, 刘敬, 等. 混砂车搅拌罐内混合过程的数值模拟 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2014, 34(2): 120-126.
Xiao Yangyi, Shi Wankai, Liu Jing, et al. Numerical simulation of mixing process in stirred tank of blender truck [J]. Journal of Chang'An University(Natural Science Edition), 2014, 34(2): 120-126.
- [2] 晁冰, 程继夏. 中国清洁生产的发展进程及存在问题探讨 [J]. 绿色科技, 2013 (2): 141-143.
Chao Bing, Cheng Jixia. Development process and existing problems of clean production in China [J]. Journal of Green Science and Technology, 2013(2): 141-143.
- [3] Bi J, Liu D, Zhan K. PID parameters optimization for liquid level control system based on genetic algorithm [J]. International Journal of Digital Content Technology and its Applications (S1975-9339), 2012, 6(1): 361-368.
- [4] Ge S S, Hang C C, Zhang T. Nonlinear adaptive control using neural networks and its application to CSTR systems [J]. Journal of Process Control (S0959-1524), 1999, 9(4): 313-323.
- [5] 任竞尧, 邱俊乔, 王英, 等. 多输入多输出非线性系统ZG控制方法框架展望 [J]. 大连大学学报, 2014, 35(6): 27-29.
Ren Jingyao, Qiu Junqiao, Wang Ying, et al. Framework and outlook of ZG control method for multiple-input and multiple-output nonlinear systems [J]. Journal of Dalian University, 2014, 35(6): 27-29.
- [6] Zhang Y, Li M, Yin Y, et al. Controller design of

- nonlinear system for fully trackable and partially trackable paths by combining ZD and GD [C]// Proceedings of the 25th Chinese Control and Decision Conference, 2013: 209-214.
- [7] Zhang Y, Chen D, Yin Y, et al. ZG tracking control of Lu system with multiple inputs and with division-by-zero problem solved [C]// Proceedings of the 2014 IEEE Chinese Control Conference, 2014: 3477-3482.
- [8] Zhang Y, Chen J, Yu X, et al. ZG controllers of z2g0 and z2g1 types for tracking control of IPC mathematical model [C]// Proceedings of the 3rd IFAC International Intelligent Control and Automation Science Conference, 2013: 472-477.
- [9] Zhang Y, Yu X, Yin Y, et al. Singularity-conquering ZG controllers of z2g1 type for tracking control of the IPC system [J]. International Journal of Control (S0020-7179), 2014, 87(9): 1729-1746.
- [10] Zhang Y, Luo F, Yin Y, et al. Singularity-conquering ZG controller for output tracking of a class of nonlinear systems [C]// Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference, 2013: 477-482.
- [11] Zhang Y, Liu J, Yin Y, et al. Zhang-gradient controllers of Z0G0, Z1G0 and Z1G1 types for output tracking of time-varying linear systems with control-singularity conquered finally [C]// Proceedings of the 10th International Neural Networks Conference, 2013: 533-540.
- [12] Hagan M T, Demuth H B, De Jesus O. An introduction to the use of neural networks in control systems [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control (S1049-8923), 2002, 12(11): 959-985.
- [13] 孙彪, 孙秀霞. 一种新的趋近律离散滑模控制方法及仿真 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22(10): 2422-2425.
Sun Biao, Sun Xiu-xia. New algorithm of reaching-law discrete-time sliding mode control and simulation [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(10): 2422-2425.
- [14] Zhang Y, Jin L, Guo D. Taylor-type 1-step-ahead numerical differentiation rule for first-order derivative approximation and ZNN discretization [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics (S0337-0247), 2015, 273: 29-40.
- [15] 董海峰, 孔文聪. 泰勒公式及其应用 [J]. 课程教育研究, 2013 (30): 185-187.
Dong Haifeng, Kong Wencong. Taylor's formula and its application [J]. Course Education Research, 2013 (30): 185-187.
- [16] 苗文静, 王昕. 关于泰勒公式及其应用的思考与讨论 [J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2013, 29(5): 18-21.
Miao Wenjing, Wang Xin. The thinking and discussion on the Taylor's theorem and its application [J]. Natural Science Journal of Harbin Normal University, 2013, 29(5): 18-21.
- [17] Mathews J H, Fink K D. Numerical Methods Using MATLAB [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 2004.
- [18] 张雨浓, 杨逸文, 陈轲, 等. 梯度神经网络求解 Sylvester 方程之 MATLAB 仿真 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(13): 4028-4031, 4037.
Zhang Yunong, Yang Yiwen, Chen Ke, et al. MATLAB simulation of gradient-based neural network for Sylvester equation solving [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(13): 4028-4031, 4037.