

6-1-2020

Adaptive Steady State Feedback Control Method of Remote Control Console of Well Control Simulation System

Ruimin Ma

College of Computer and Information Technology, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

Wenjing Zhang

College of Computer and Information Technology, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

Fangzhou Zhang

College of Computer and Information Technology, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

Ruixue Sun

College of Computer and Information Technology, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, 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.

Adaptive Steady State Feedback Control Method of Remote Control Console of Well Control Simulation System

Abstract

Abstract: In order to effectively protect and control right the process of drilling well control equipment and ensure the safety of the well control, it is necessary to do the drilling well control simulation training for employees. *The well control remote physical simulation* was designed, which created the real drilling environment for training personnel and objectively reflected the skill levels of training personnel. In order to the simulate operating close to the real environment of well control equipment, the adaptive state feedback control was applied to the remote computer simulation system of well control. According to the system characteristics, combined with PID adaptive control, *an adaptive well control remote pressure oil preparation simulation of steady state feedback control algorithm* was proposed. In order to verify the feasibility of the method chosen to actual project an oilfield drilling companies as the background simulation design, simulation experiment results show that this method can realize the remote console check and run the content such as the actual operation training function.

Keywords

well control remote console, pressure oil preparation, hardware simulation, adaptive steady state feedback

Authors

Ruimin Ma, Wenjing Zhang, Fangzhou Zhang, Ruixue Sun, and Li Qiang

Recommended Citation

Ma Ruimin, Zhang Wenjing, Zhang Fangzhou, Sun Ruixue, Li Qiang. Adaptive Steady State Feedback Control Method of Remote Control Console of Well Control Simulation System[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(2): 387-392.

远程台仿真系统的自适应稳态回馈控制方法

马瑞民, 张文晶, 张方舟, 孙瑞雪, 李强

(东北石油大学计算机与信息技术学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要: 在钻井过程中为了有效保护和正确控制井控设备, 同时确保井控安全, 需要钻井从业人员进行井控仿真培训。为了给培训人员创造真实的钻井环境并客观反映培训人员的技能水平, 设计了井控远程台实物仿真系统。为了在与真实相近的环境下模拟操作井控设备, 将自适应稳态回馈控制应用到井控远程台仿真系统中。根据系统特性, 结合 PID 自适应控制, 提出自适应井控远程台压力油制备仿真的稳态回馈控制算法。为验证方法的可行性, 选取以某油田钻井公司的实际项目为背景进行仿真设计。试验结果表明, 此方法能够实现远程控制台的检查与运行等内容的真实操作训练功能。

关键词: 井控远程台; 压力油制备; 实物仿真; 自适应稳态回馈

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 02-0387-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201702021

Adaptive Steady State Feedback Control Method of Remote Control Console of Well Control Simulation System

Ma Ruimin, Zhang Wenjing, Zhang Fangzhou, Sun Ruixue, Li Qiang

(College of Computer and Information Technology, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: In order to effectively protect and control right the process of drilling well control equipment and ensure the safety of the well control, it is necessary to do the drilling well control simulation training for employees. *The well control remote physical simulation* was designed, which created the real drilling environment for training personnel and objectively reflected the skill levels of training personnel. In order to the simulate operating close to the real environment of well control equipment, the adaptive state feedback control was applied to the remote computer simulation system of well control. According to the system characteristics, combined with PID adaptive control, *an adaptive well control remote pressure oil preparation simulation of steady state feedback control algorithm* was proposed. In order to verify the feasibility of the method chosen to actual project an oilfield drilling companies as the background simulation design, simulation experiment results show that this method can realize the remote console check and run the content such as the actual operation training function.

Keywords: well control remote console; pressure oil preparation; hardware simulation; adaptive steady state feedback

引言

近几年来, 随着钻井工艺的发展, 现场井控装



收稿日期: 2015-05-07 修回日期: 2015-08-25;
基金项目: 中国石油天然气集团公司重大专项
(2013E-38-09), 黑龙江省高等教育教学改革项目
(JG2013010153);
作者简介: 马瑞民 (1958-), 男, 河北清苑, 本科,
教授, 研究方向为计算机应用技术。

备及其配套设备变得日趋繁杂, 以现有的井控装备为依托的井控工况在生产实践过程中显露出很多问题。尤其是当发生溢流、井喷等紧急情况时, 需要多名井控工人配合完成关井操作, 同时各操作环节之间需要依次传递手势信息, 从而对操作情况进行逐一确认^[1]。这是一个复杂的操作流程模式, 一旦某个操作流程出现错误必然导致最佳井控操作时机

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

的延误,给石油钻井井控安全带来很大隐患和危害。因此,提高员工井控素质和井控安全意识刻不容缓。其中,对于井控远程台的培训尤为关键。

远程控制台是地面防喷器的控制装置,是控制液压防喷器,液动压井阀开、关动作的专用设备,更是石油天然气钻井过程中防止井喷失控不可缺少的装备。使用远程台操作的多个井控工况都是依附于压力油完成的,所以在保证井控设备完好的前提下,核心问题是始终保持足够的控制压力和油量。那么,远程台电泵制备压力油这一操作工况,已然成为了井控员工最需要掌握的基础操作之一。与此同时,随着计算机技术的迅猛发展,实物仿真越来越得到工业发展的青睐,与虚拟仿真相比,实物仿真是培训人员最贴近真实的操作环境的培训方法^[2]。因此,基于某油田钻井公司工作的需要,将目前的液压控制的井控远程台实物装备改为液压和电信号同时控制的设备。本文研讨了该设备中井控远程台实物仿真系统的自适应稳态回馈控制方法,并在此基础上提出了一种自适应井控远程台压力油制备仿真的稳态回馈控制算法。

1 井控远程台实物仿真系统原理

对某油田钻井公司中原有的井控远程台设备进行改造是本仿真培训系统设计的关键,并在已有的远程控制台中操作电气泵制备压力油^[3];操作三位四通换向阀进行防喷器及放喷阀开关操作^[4];操作手动与气手动减压阀压力调节以及远程控制台待命状态下工况检查等功能的基础上,添加教师培训系统、机械随动和音效仿真系统,并且增添重点部位影像投放系统等功能,实现实际设备上的仿真培训功能,即井控远程台实物仿真培训系统。系统主要由以下几个部分构成:

(1) 在手动和气手动减压阀阀门上加装编码器,通过检测阀门旋转度,模拟操作者对阀门的准确控制的动作过程;加装磁力传感器,检测手动阀门位置,从而模拟操作者的控制动作;加装红外传传感器,模拟操作者的视角变化。

(2) 将远程台上的蓄能器、环形防喷器供油、闸板防喷器供油等压力信号仪表改为电信号仪表,通过利用 PLC 控制系统和计算机对采集的阀门位置检测信号进行分析和逻辑运算,输出电信号控制电压表指针动作,模拟气压、油压等变化过程。PLC 控制器完成模拟量的输入和数字化转换、开关量的输入、逻辑功能的运算和控制、开关量的输出、模拟量的输出和转换,以及与教师控制计算机的通信和对音效仿真系统的操作等功能。

(3) 分别在培训人员的头盔和井控实物仿真环境的关键部位配备无线摄像头和影像投放系统,对教师所讲解的重点内容所涉及的设备部位进行图像采集和识别,并通过投影系统进行投放,同时结合基于虚拟现实技术的三维动画进行详细剖析和讲解。

(4) 设计音效仿真系统,通过录制实际工况的音响效果并进行实时播放,对操作者实际操作设备所产生的声音进行仿真。

(5) 设计机械随动环节,采用电传动机械随动技术,实现对闸板防喷器的锁紧杆进出、液动平板阀开关的控制。

(6) 教师控制计算机可实现教师对培训过程的控制和评价。教师可通过培训任务的选择,设定不同工艺工况和参数;可采集 PLC 系统反馈的信号,采用相应的组态软件设计软件部分,能够更好地对操作人员的动作过程进行评价。仿真培训系统原理如图 1 所示。

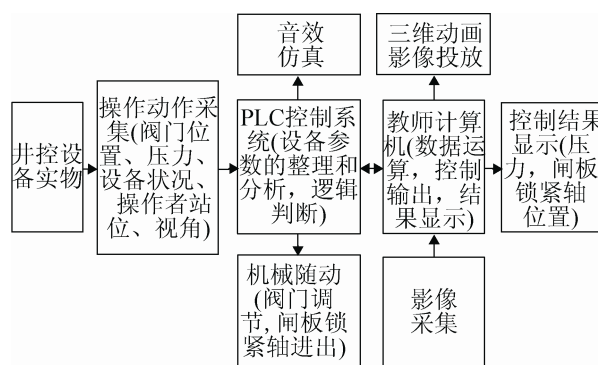


图 1 仿真培训系统图

Fig. 1 Simulation Training Systems Diagram

2 自适应井控远程台压力油制备仿真的稳态反馈控制算法

随着自适应控制理论研究的飞速发展, 在社会各个领域自适应控制理论得到了广泛的应用^[5]。在很多工业控制中都采用 PID(比例积分微分—即 Proportion Integration Differentiation)自适应控制解决动态过渡过程的控制。PID 自适应控制吸取了自适应控制和传统 PID 控制的长处, 取长补短使控制算法更精良。

一些研究基于传统的 PID 反馈学习方法, 针对线性的、时滞的操作过程提出了加权开环 D 型, PD 型等算法^[6], 但是该方法存在很多的局限性, 在每次反馈的开始, 重置系统的状态为零, 但系统的实际运作的特点具有实时性和连续性并且反馈选取的最理想目标轨迹成固定的比例关系, 但其类型很难达到一致, 缺乏灵活性而且很难满足目标轨迹的要求。

由于实际井控远程台操作流程动态工况的高度非线性性和复杂性, 这样的控制取得动态过程较好的品质非常难^[7]。所以针对井控远程台压力油制备的操作工况, PID 自适应控制并不实用, 它不能更好的解决本系统中的较强非线性、时变不确定性的动态性能和静态性能之间、设定值和抑制扰动之间的矛盾^[8]。为此, 控制系统需引入智能控制体系, 在 PID 初值基础上通过增加修正参数进行整定, 改善系统动态和静态性能^[9]。

为探索适宜于本系统的控制算法, 完成算法设计与系统仿真, 则在基于 PID 自适应控制算法上, 提出了自适应井控远程台压力油制备仿真的稳态反馈控制算法。采用自适应稳态反馈控制对其稳态优化中的动态过程进行控制。根据目标轨迹初始化技术, 保证经过多次自适应稳态反馈学习后, 全程追踪井控远程台压力油制备系统的期望目标轨迹, 让系统达到较好的动态性能指标, 更好的完善井控远程台压力油制备仿真系统的反馈学习控制, 最终达到与实际操作一致的实物仿真培训效果。其控制结构如图 2 所示。

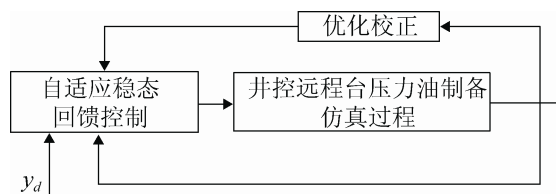


图 2 控制器结构
Fig. 2 The Structure of Controller

设井控远程台压力油制备仿真控制系统的动态方程为参数化严格反馈型(PSF)如下:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + \varphi_1(x_1)^T \theta \\ \dot{x}_2 &= x_3 + \varphi_2(x_1, x_2)^T \theta \\ &\vdots \\ \dot{x}_{n-1} &= x_n + \varphi_{n-1}(x_1, \dots, x_{n-1})^T \theta \\ \dot{x}_n &= \beta(x)u + \varphi_n(x)^T \theta \\ y &= x_1 \end{aligned} \tag{1}$$

其中: x_1, x_2, \dots, x_n 为系统的状态变量(即足以完全表征系统运动状态的最小个数的一组变量), $\theta \in R^p$ 为未知常量的参数向量, $\beta(x)$ 和 $\varphi_i(x_1, \dots, x_i)$ 为已知非线性的函数, $\beta(x) \neq 0$ 。y 是系统输出, u 是系统外部的输入^[10]。当 $u = 0$ 时, 式(1)为井控远程台压力油制备仿真过程的闭环系统方程^[11]。

假定在远程台制备压力油过程稳态优化过程中, 会出现序列为 $c_1, c_2, \dots, c_n, \dots$ 的不等的设定值, 这一稳态优化会呈现阶跃的变化趋势, 而且每次阶跃均会对应一个 c_k , 本仿真系统中存在一个动态过渡过程, 现在对系统的一系列动态响应过程实行反馈学习控制, 让系统输出的函数 $y_k(t)$ 逐渐跟踪理想的目标响应轨迹曲线 y_d^k 便于得到更好的动态性能。 $y_d^k(t)$ 通过设定值 c_{k-1} 过渡到设定值 c_k , 同时在 $[0, T]$ 上是连续的, n 阶可导的, 将每个动态过程响应的调节时间上界设为 T。

基于自适应控制的调节函数逆向递进推导设计的思想^[12], 提出自适应稳态反馈算法,

控制律:

$$u^k(t) = \frac{1}{\beta(x)} [\alpha_n^k + y_d^{k(n)}] \tag{2}$$

参数的自适应律:

$$\dot{\theta}^k = \Gamma \tau_n^k, \quad t \in [0, T] \tag{3}$$

回馈的变量设置如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} z_i^k = x_i^k - y_d^{k(i-1)} - \alpha_{i-1}^k \\ \alpha_i^k = -z_{i-1}^k - c_i z_i^k - w_i^{kT} \hat{\theta}^k + \\ \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{\partial \alpha_{i-1}^k}{\partial x_j^k} x_{j+1}^k + \frac{\partial \alpha_{i-1}^k}{\partial y_d^{k(j-1)}} y_d^{k(j)} \right) - \\ k_i |w_i^k|^2 z_i^k + \frac{\partial \alpha_{i-1}^k}{\partial \hat{\theta}^k} \Gamma \tau_i^k + \\ \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{j-1}^k}{\partial \hat{\theta}^k} \Gamma w_i^k z_j^k \\ \tau_i^k = \tau_{i-1}^k + w_i^k z_i^k \\ w_i^k = \varphi_i^k - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}^k}{\partial x_j^k} \varphi_j^k \end{array} \right. \quad (4)$$

其中: k 表示回馈的次数, $i=1, \dots, n$, $z_0=0$, $\alpha_0=0$, $\tau_0=0$, y_d 是参考的输出, 设 $\bar{x}_i=(x_1, \dots, x_i)$, $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$, $z=(z_1, z_2, \dots, z_n)$ 。

设定自适应回馈的初始条件:

$$\left\{ \begin{array}{l} x^k(0) = x^{k-1}(T) \\ \hat{\theta}^k(0) = \hat{\theta}^{k-1}(T) \end{array} \right. \quad (5)$$

对目标轨迹实施初始设置: 设 $y_{d0}^k(t)$ 为第 k 次回馈中预定轨迹, $\delta_d^k(t)$ 作为一个附加的衰减信号用来修改和更正目标轨迹 $y_{d0}^k(t)$, 设计井控仿真系统的跟踪参考轨迹为 $y_d^k(t) = \delta_d^k(t) + y_{d0}^k(t)$, 当回馈第 k 次, 即 k 值确定时, $\delta_d^k(t) \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$, 同时满足 $\lim_{k \rightarrow \infty} \delta_d^k(t) = 0, \forall t \in [0, T]$ 。

$\delta_d^k(0), \delta_d^k(0), \dots, \delta_d^{k(n-1)}(0)$ 作为选取量, 使轨迹 $y_d^k(t)$ 能够在每一次回馈开始具备一定的初值, 且初值为:

$$y_d^{k(i)}(0) = h_i(\bar{x}_{i+1}^k(0), \hat{\theta}^k(0)), i=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

其中:

$$h_0(x_1) = x_1, h_i(\bar{x}_{i+1}, \theta) = \sum_{k=1}^i \frac{\partial h_{i-1}}{\partial x_k}(\bar{x}_i, \theta)(x_{k+1} + \varphi(\bar{x}_k)^T \theta)$$

其中: $\delta_d^k(t)$ 可以由渐进稳定的二维线性系统的第一个状态产生, $\delta_d^k(t) = \delta_1^k(t)$ 。

$$\delta^k = A\delta^k(t) + B_0\delta^{k-1}(t) \quad (7)$$

其中, $A = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ \vdots & \dots & \dots & I_{n-1} \\ 0 & & & \\ -m_0, \dots, & & & -m_{n-1} \end{bmatrix}$ 为常数矩阵, 其指数

具有稳定的特性, (A, B_0) 能够完全达到能控性, 并且在回馈中满足线性式子曲半径 < 1 。

$$\delta^k = [\delta_1^k, \delta_2^k, \dots, \delta_n^k],$$

具有初始条件 $\delta_i^k(0) = \delta_d^{k(i-1)}(0)$ 。文献[12]中, 利用式(6)所表示的初始化方式对预设的轨迹做初始化, 是为了确保在每次回馈时都有 $z^k(0) = 0$, 且 $z^k(0) = 0$, 还可以更提升一个层次去完善每一次的回馈自适应过程的动态品质。

回馈学习控制通常要求在目标轨迹上进行初始状态重置, 由于工业生产过程具有连续性, 所以不能中断系统重置初始状态, 但可以通过式(6)所示的初始化方式进行初始化, 可使系统避免重置。

3 自适应井控远程台压力油制备仿真的稳态回馈控制算法的收敛性

采用上文所提出的算法对井控远程台压力油制备仿真这个动态系统进行回馈学习控制时, 系统通过练习且达到一定的次数, 就能使压力油制备实物仿真流程以更精准的跟踪预设的目标轨迹输出。下面给出算法的收敛性^[13]。

给定井控远程台压力油制备仿真控制系统式(1), 其稳态优化中应用算法式(3)和式(4)以及起始条件式(5)和式(6)进行自适应回馈学习控制, 则

(1) 在闭环系统中, 在 $N \times [0, T]$ 上所有信号 $x^k, y^k, u^k, \hat{\theta}^k$ 都是一致有界的。

(2) 随着自适应回馈次数 k 的累加, 输出 $y^k(t)$ 一致趋向于目标轨迹 $y_d^k(t)$, 即

$$\sum_{k=1}^{\infty} \left\| y^k(t) - y_d^k(t) \right\|_{L_2[0, T]}^2 < \infty$$

由文献[10]可知, 第 k 次回馈时定义 Lyapunov 函数为

$$W_k = \frac{1}{2} z^{kT} z^k + \frac{1}{2} (\theta - \hat{\theta}^k) \Gamma (\theta - \hat{\theta}^k) \quad (8)$$

利用自适应反步法设计出 $\dot{W}_k \leq -\sum_{i=1}^n c_i z_i^{k^2}$

通过起始条件式(5)和式(6)可知:

$$W_{k+1}(0) \leq W_k(T) \tag{9}$$

由文献[14]可知, 变化系统的 Lyapunov 稳定性定理的条件成立, 即该系统是稳定的。因为误差

$$\begin{aligned} y^k - y_d^k &= z_1^k \text{ 则} \\ \sum_{k=1}^N c_1 \int_{L_2[0, T]} \|y^k - y_d^k\|^2 dt &\leq \sum_{k=1}^N \int_{t=0}^T \sum_{i=1}^n c_i z_i^{k^2} dt \\ \sum_{k=1}^N \int_{t=0}^T \sum_{i=1}^n c_i z_i^{k^2} dt &\leq \sum_{k=1}^N W_k(0) - W_k(T) \leq \\ W_1(0) - W_N(T) &\leq W_1(0) < \infty \tag{10} \\ \therefore \lim_{k \rightarrow \infty} \|y^k - y_{d0}^k\|_{L_2[0, T]} &\leq \\ \lim_{k \rightarrow \infty} \|y^k - y_d^k\|_{L_2[0, T]} + \lim_{k \rightarrow \infty} \|\delta^k(t)\|_{L_2[0, T]} &= 0 \end{aligned}$$

所以 k 达到一定大时, 实物仿真培训系统输出会从始至终跟踪上预定的轨线。

同理, 对 $\forall(k, t) \in N \times [0, T]$ 有

$$\begin{aligned} W_k(t) &\leq W_k(0) \leq W_{k-1}(T) \leq \\ W_{k-1}(0) &\leq W_1(0) < \infty \tag{11} \end{aligned}$$

所以在 $N \times [0, T]$ 上, 该仿真反馈系统的所有信号都是有界的、一致的, 同时随着不断增加的反馈次数 k , 输出 $y^k(t)$ 一定收敛于预定轨迹 $y_{d0}^k(t)$ 。

4 井控远程台实物仿真系统的自适应稳态反馈控制试验

井控远程台制备压力油仿真过程的动态方程为:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -m \sin(x) + n \\ y &= x \end{aligned}$$

其中: m 为未知参数; y 为系统输出; n 为外部的反馈学习输入; 依据本系统的内部特征, 选取 $\sin(x)$ 为动态方程的非线性函数; 选取设在稳态优化过程中设置某点的一组值分别为: $c_1=5.5, c_2=6, c_3=6.5, c_4=7.5, c_5=8.5$ 。

对系统施行反馈学习控制, 应用基于上文提出的自适应稳态反馈算法, 在实际仿真中, 启动气泵时蓄能器压力变化目标轨迹取为:

$$\begin{aligned} y_d^1 &= 5.5 - 0.0023t^2 + 0.6t, \\ y_d^2 &= 6 - 0.002t^2 + 0.6t, \\ y_d^3 &= 6.5 - 0.0018t^2 + 0.6t, \\ y_d^4 &= 7.5 - 0.016t^2 + 0.6t, \\ y_d^5 &= 8.5 - 0.016t^2 + 0.6t, \\ t &\in [0, 50] \end{aligned}$$

如图 3 所示的仿真结果, 给出了 5 次反馈的跟踪轨迹。在每次反馈的开始, 并没有对事先设定好的流程路线做初始化设置, 但仿真结果依然具有良好的动态性能。其中, 启动电泵时整个稳态优化过程输出动态响应轨线如图 4 所示。

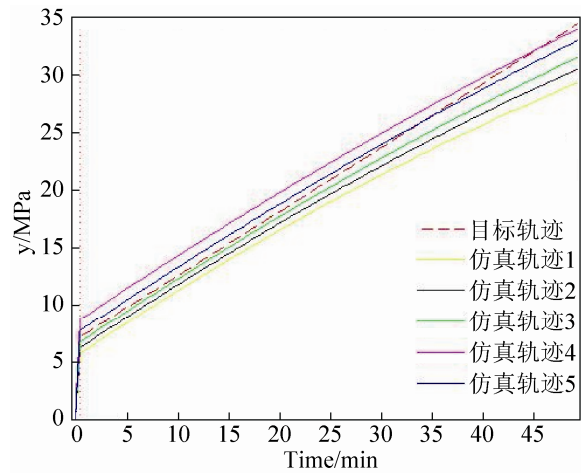


图 3 蓄能器气泵制备压力油仿真过程的动态响应曲线
Fig.3 Dynamic Response Curve of Simulation Process of Pressurized Oil Preparation by Pump of Accumulator

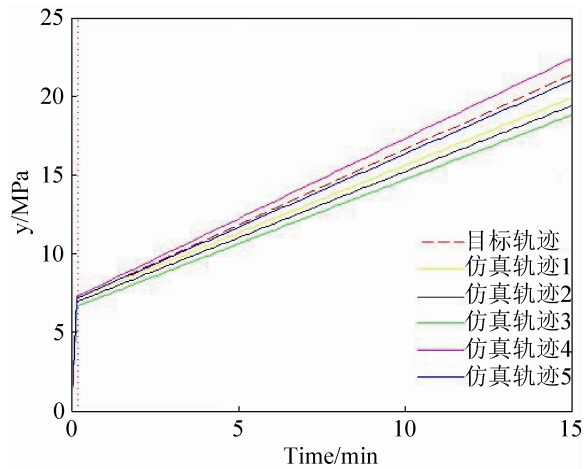


图 4 蓄能器电泵制备压力油仿真过程的动态响应曲线
Fig. 4 Dynamic Response Curve of Simulation Process of Pressurized Oil Preparation by Electric Pump of Accumulator

在井控远程台实物仿真研究中,由于井控操作对象参数的变化缓慢,在本实物仿真系统每一次回馈中,系统参数会出现一定的震荡,其对应于系统的稳态值为 $c_0 \rightarrow c_1 \rightarrow \dots \rightarrow c_n$ 。经过试验,算法实现了在系统每次回馈中产生固定的稳态值。本文提出的自适应井控远程台压力油制备仿真的稳态回馈控制算法更接近真实系统,能够更好地利用远程台制备压力油的实物仿真完成相应的培训项目,更接近真实的操作工况,从而达到提高培训人员井控技术和井控素质的目的。

5 结论

井控培训对钻井井控的操作过程以及操作人员的安全起着举足轻重的作用,钻井井控人员的培训工作一直是石油钻井井控系统教育工作的重点内容。同时,随着计算机技术的发展与应用,与虚拟前台操作相比,利用仿真系统培训能使培训人员得到大量的演练、训练与考核,其实物仿真操作更加逼近真实操作,使操作者真实地接触操作设备,也能提高培训人员的技术水平,实物前台操作的仿真培训将成为石油行业防井喷作业的新的发展方向。本文就这一发展需求,为井控远程台压力油制备仿真系统研制了自适应稳态回馈控制方法,给出了控制器结构与算法,并讨论了算法的收敛性和稳定性。该方法能提高实物仿真系统的动态性能,可达到与真实操作逼近的效果,有利于提高培训效率,减少井控的安全隐患。

参考文献:

- [1] 郝立军, 邵玉田, 黄振富, 等. 石油天然气钻井井控 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 4-12. (Hao Lijun, Shao Yutian, Huang Zhenfu, et al. Oil and Gas Drilling Well Control [M]. Beijing, China: Petroleum Industry Press, 2008: 4-12.)
- [2] 屠毅, 肖翔, 李楠. 大型飞机起落架收放控制系统仿真 [J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(5): 595-599. (Tu Yi, Xiao Xiang, Li Nan. Computer Analysis of Large-scale Aircraft Landing Gear Retraction and Extension Control System [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(5): 595-599.)
- [3] 集团公司井控培训教材编写组. 钻井技术、管理人员井控技术 [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2013: 248-249. (Compilation of Group Company Well Control Training Teaching Materials. Drilling Technology and Manager and Well Control Technology [M]. Dongying, China: China University of Petroleum Press, 2013: 248-249.)
- [4] 胡丰金. 井控设备远程控制台三位四通换向阀手柄位置探讨 [J]. 石油钻探技术, 2014, 42(3): 8-12. (Hu Fengjin. Discussion on the Handle Position of Three Position Four Way Steering Valve on Remote Control Console of Well Control Equipment [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(3): 8-12.)
- [5] 刘幸, 刘潇. 自适应控制系统的发展与应用 [J]. 物联网技术, 2011, 9(3): 61-63. (Li Xing, Li Xiao. The Development and Application of Self-adaptive Control Systems [J]. Internet Technology, 2011, 9(3): 61-63.)
- [6] 孙瑜, 李志安. 一类非线性系统在任意初值下的开环 D 型迭代学习控制 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(24): 6767-6770. (Sun Yu, Li Zhian. A Class of Nonlinear Systems under Arbitrary Initial Value of the Open Loop D-Type Iterative Learning Control [J]. System Simulation (S1004-731X), 2008, 20(24): 6767-6770.)
- [7] 万百五, 黄正良. 大工业过程计算机在线稳态优化控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 97-99. (Wan Baiwu, Huang Zhengliang. Stable Computer Online Optimal Control for Large-scale Industrial Processes [M]. Beijing, China: Science and Technology Press, 1998: 97-99.)
- [8] 殷云华, 樊水康, 陈闽鄂. 自适应模糊 PID 控制器的设计和仿真 [J]. 火力与指挥控制, 2008, 13(2): 97-99. (Yin Yunhua, Fan Shuikang, Chen Mine. The Design and Simulation of Adaptive Fuzzy PID Controller [J]. Fire Control & Command Control, 2008, 13(2): 97-99.)
- [9] Yuditomo M, Shigemasa T, Baba Y, et al. A Two Degrees of Freedom PID Control System its Features and Applications [J]. Control Conference (S1520-6416). 2004, 1(11): 456-459.
- [10] 刘之涛. 非线性系统控制理论若干问题研究及其应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010: 32-34. (Liu Zhitao. Study on Nonlinear System Control Theory and Application [D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2010: 32-34.)

(下转第 401 页)

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