

自动供水系统中的无模型自适应控制方法研究

孙 晓¹, 卢祥江¹, 武宇龙¹, 刘永彬²

(1. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 将无模型自适应控制方法应用到供水系统压力调节和流量控制中。该系统控制器的设计不依赖于具体的数学模型, 是直接基于一个伪偏导数的向量; 该伪偏导数是通过一个参数估计算法, 并根据供水系统中已有的相关信息在线导出; 最后, 利用 Matlab 软件进行仿真分析。仿真分析验证了该控制方法可以提高自动供水系统的灵敏度和稳定性, 使整个系统快速地达到稳定的工作状态。

关键词: 无模型自适应控制; 供水系统; 非线性系统; PID 控制

中图分类号: TP273+.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)05-0076-05

Study of Model-Free Adaptive Control in Automatic Water Supply System

Sun Xiao¹, Lu Xiangjiang¹, Wu Yulong¹, Liu Yongbin²

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. School of Electrical and information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: The model-free adaptive control method is applied to the water supply system pressure regulating and flow control. The design of the system controller does not depend on the specific mathematical model, it is directly based on the pseudo-partial-derivative vector; Through a parameter estimation algorithm and according to the correlation information in the water supply system, the pseudo-partial-derivative is on-line derived; The simulation and analysis with Matlab software verifies that the control method can improve the sensitivity and stability of the automatic water supply system and enable the whole system fast to achieve the work steady state.

Keywords: model-free adaptive control; water supply system; nonlinear system; PID control

0 引言

恒压供水已经成为当前重要研究课题之一, 该技术的优劣将直接影响人们日常生活质量。在高楼数量以及高度不断增加的趋势下, 向高层楼层供应恒定压力水源的技术难度也相应地增加, 因此, 如何改良及优化该技术, 使其更科学、更环保、更节能的完成最终目标显得格外重要。目前, 恒压供水

大多采用基于传统的 PID (proportional-integral-differential) 控制模式来实现。在一般的供水需求情况下, 该控制方法可满足其使用需求, 但当供水环境比较复杂时, 就容易出现各种异常状况, 如: 机组频繁切换、系统异常停机、水压波动大、能耗大等。同时, 传统的 PID 控制对于一些参数不确定性的系统, 其控制效果不甚理想, 且参数整定也比较困难^[1]。

收稿日期: 2013-07-12

基金项目: 湖南省科学技术厅科技计划基金资助项目 (2013GK3038)

作者简介: 孙 晓 (1972-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学教授, 硕士生导师, 主要从事机电控制与计算机技术方面的研究, E-mail: sxbug@163.com

无模型自适应控制方法(model-free adaptive control, MFAC)不需要被控系统建立精确的数学模型,仅用受控系统的输入和输出数据来设计系统的控制器,并且控制器中不包含任何受控系统数学模型信息。当受控系统模型的不确定性很大,或是受控系统的数学模型完全未知,很难用一个具体的数学模型来描述系统,或是建模成本过高时,可以考虑使用MFAC来对整个系统进行控制^[2]。因此,本文针对恒压供水控制过程中经常会碰到的时变、大滞后、非线性等状况,提出了将MFAC方法运用于供水系统中。

1 无模型学习自适应控制设计

控制系统可通过非线性离散时间方程描述^[3],即

$$y(k+1) = f(y(k), y(k-1), \dots, y(k-n_y), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n_u)), \quad (1)$$

式中: $u(k)$ 和 $y(k)$ 分别表示被控系统在时间 k 时的系统输入量、输出量; n_u 和 n_y 分别表示系统未知的输入及输出阶数; f 表示未知的非线性函数。

1.1 影响系统的因素及系统功能

受材料特性、环境及其它一些相关的物理或化学因素的变化,可能导致与之相应的生产或监控设备的传递函数阶次改变或参数值的变化,同时系统还会受到各种各样的随机扰动干扰,这些都将对整个控制系统的设计和之后的运行产生非常大的影响。因此,一些对系统影响比较大的因素,在系统设计时必须将其考虑在内^[4]。

在具体设计自适应控制系统时,需考虑以上的一些相关因素的同时,也需具备以下功能:在系统正常运行过程中,可在线实时的对系统结构和相关参数进行辨识或是对系统的一些性能指标进行度量,从而可以得到系统当前状态的一些改变量^[5];在系统采集了当前状态数据的情况下,对于一些参数或是相关信号出现偏差过大的,系统可以在线实时修改系统控制器的相应参数或调整可调系统的输入信号,从而使系统可以在外在干扰的情形下,实现系统的自我调节^[6];在系统当前状态确定的情况下,系统可根据当前的状态按照一定的规律确定之后的控制策略,从而实现系统的智能反应。

1.2 单输入单输出非线性系统的线性化

假设1 式(1)所示的非线性系统的输入量和输出量是可观测、可控制的。具体可描述为:对于某系统有界的期望的输出信号 $y^*(k+1)$ 存在有界的、

可行的控制输入信号 $u^*(k)$,该系统在 $u^*(k)$ 的控制下,使得系统输出量等于期望的输出量。

假设2 式(1)所示系统的控制输入信号 $u(k)$, $u(k-1), \dots, u(k-L+1)$ 都存在连续的偏导数,即偏导数是连续的。

假设3 式(1)所示系统满足广义利普希茨(lipschitz)条件。可具体描述如下:对于任意的常数 k 和 $\Delta u(k) \neq 0$,满足关系

$$|\Delta y(k+1)| \leq b |\Delta u(k)|. \quad (2)$$

式中: b 是常数; $\Delta y(k+1)$, $\Delta u(k)$ 分别表示系统在2个连续时间点下的输出量和输入量的变化值,即 $\Delta y(k+1) = y(k+1) - y(k)$, $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ 。

定理1 式(1)所示的非线性系统,如果同时满足以上3个假设,则可得当 $\Delta u(k) \neq 0$ 时,存在一个伪偏导数(pseudo-partial-derivative, PPD)向量 $\phi(k)$,且存在关系

$$\Delta y(k+1) = \phi(k) \Delta u(k), \quad (3)$$

式中, $\phi(k)$ 满足 $|\phi(k)| \leq b$,其中 b 为常数。

1.3 控制率算法

为使非线性系统(1)合理地转化为动态线性化方程式(3),须对控制系统的输入量的变化量 $\Delta u(k)$ 加以限制。同时,由于整个自适应控制系统工作在动态闭环环境下,因此,在整个算法的过程中保证 $\Delta u(k) \neq 0$ 的同时,可以加入一些可调参数来限制 $\Delta u(k)$ 的变化,使整个系统的控制处于合理的范围内。为此,引入控制输入准则函数,即

$$J(u(k)) = |y^*(k+1) - y(k+1)|^2 + \lambda |u(k) - u(k-1)|^2, \quad (4)$$

式中, λ 为权重系数。式(4)中引入了 $\lambda |u(k) - u(k-1)|^2$ 惩罚项,既限制了输入量变化范围,又克服了系统的稳态跟踪误差。

将式(3)代入式(4)中,同时对输入量 $u(k)$ 两边求导并令其为零,可得

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho_k \phi(k)}{\lambda + |\phi(k)|^2} (y^*(k+1) - y(k)), \quad (5)$$

式中, $\rho_k \in (0, 2)$ 为步长序列。权重因子 λ 的作用是限制系统输入变化量 $\Delta u(k)$ 的变化,保证动态线性系统式(3)对非线性系统式(1)拥有一个合理的替代范围,因此,其间接地限制了伪偏导数的变化范围,同时可避免式(5)中分母为零的情况。 λ 是一个非常重要的参数,其取值能够改变系统的动态特性,其值可取很大,为可调参数。

由式(5)可知,控制系统的输入量直接影响系

统的输出量,且输出量很少受其它因素的干扰。换句话说,就是该系统控制的控制率与受控系统参数数学模型的具体结构、系统阶数大小无关,仅依靠控制系统的输入输出(I/O)数据设计系统,这正好显示出无模型自适应控制系统的优势。

1.4 伪偏导数估计算法

通过大量的实践证明,采用传统的参数估计准则函数推导的参数估计算法估计参数,会出现估计值变化过快,或者是对一些突变的采样数据反应过于敏感的现象。在自适应控制系统中,非线性系统参数估计算法必须满足在线控制的快速性要求,且其线性化范围不能太大,因此,得出新的估计准则函数为

$$J(\phi(k)) = (y^*(k) - y(k-1) - \phi(k)\Delta u(k-1))^2 + \mu(\phi(k) - \hat{\phi}(k-1))^2, \quad (6)$$

式中: $y^*(k)$ 表示被控系统在 k 时刻的真实输出;

μ 为正的权重系数,选取合适的 μ 值可限制非线性系统线性替代的范围。

式(6)中引入了 $\mu(\phi(k) - \hat{\phi}(k-1))^2$ 来惩罚参数 ϕ 的变化,即限制 k 时刻伪偏导数 $\phi(k)$ 的变化范围,其中, $\hat{\phi}(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻 $\phi(k-1)$ 的在线估计值。通过极小化推导过程,可得伪偏导数(pseudo-partial-derivative, PPD)估计算法如下:

$$\hat{\phi}(k) = \hat{\phi}(k-1) + \frac{\eta_k \Delta u(k-1)}{\mu + \Delta u(k-1)^2} \left(\Delta y(k) - \hat{\phi}(k-1) \Delta u(k-1) \right), \quad (7)$$

$$\hat{\phi}(k) \leq \varepsilon \text{ 或 } |\Delta u(k-1)| \leq \varepsilon. \quad (8)$$

式中: $\eta_k \in (0, 2)$ 为步长序列; μ 是权重因子; ε 是充分小的正数^[7]。

式(8)是为了使定理1的条件得到满足,同时也可使参数估计算法具有更强的时变参数跟踪能力。

相比于传统的自适应控制方案,以上所述的控制方案具有以下优势:其计算量较小,在线所需调整参数少,伪偏导数作为重要的系统参数能够通过相关已知量快速在线估计,这符合系统快速响应的需求,且易于实现。

2 部分系统控制模型的建立

本供水系统的硬件主要是由水泵、供水箱、电动机、相关管道和阀门等构成。其恒压供水是通过异步电动机驱动水泵旋转供水,将电机和水泵连成一体,调节变频器改变异步电机的转速,改变水泵出水口水流量的大小,从而最终实现供水管网中水压

力值的恒定,即实现恒压供水,保证用户的正常用水需求。恒压供水系统中变频作为重要的操作,其实质是通过对异步电动机的变频调速实现。异步电动机变频调速的具体原理,是通过改变电机中定子的实际供电频率来改变电机的同步转速 n' 而实现最终调速^[8]。异步电机的同步速度 n' 可以通过以下形式描述:

$$n' = 60u(t)/p. \quad (9)$$

式中: p 为电机的极对数;

$u(t)$ 为电机定子电源频率。

通过上式可知,当电机的极对数 p 不变时,异步电机的同步速度 n' 与电机定子电源频率 $u(t)$ 成正比,比例系数 $60/p$ 为不变值。因此,通过适当改变异步电机供电电源的频率,可改变 n' 的值,进而改变异步电机的转速 n 。在此,通过电机的转差率 S ,将 n' 和 n 联系起来,异步电机的转差率 S 定义为

$$S = 1 - n/n'. \quad (10)$$

由式(9)和式(10)可知, n 可描述为

$$n = 60u(t)(1-S)/p. \quad (11)$$

从以上各式可知,当电机的极对数 p 不变时,异步电机的转速 n 通过电机定子电源频率 $u(t)$ 和电机的转差率 S 两个变量确定。电机在变频调速时,从高速到低速的整个过程中,能保持有限的转差率,即电机的转差率 S 在大多情况下可以将其视为一个定值。因此,异步电机的转速 n 由电机定子电源频率 $u(t)$ 确定。

根据水泵变速运行的相似定律,变速前后流量 Q 、扬程 H 、功率 P 与转速 n 之间的关系为

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1}, \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2, \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3,$$

式中: Q_1, H_1, P_1, n_1 分别为变速前的流量、扬程、功率、转速; Q_2, H_2, P_2, n_2 分别为变速后的流量、扬程、功率、转速。

由以上式子可知,功率与转速的立方成正比,流量与转速成正比,损耗功率与流量成正比,所以调速控制方式要比阀门控制方式的供水功率要小得多,节能效果显著。

根据伯努利方程,单位重量流体在管道中流通的机械能可表示为

$$\frac{v_1^2(t)}{2g} + z_1 + \frac{y_1(t)}{\rho g} = \frac{v_2^2(t)}{2g} + z_2 + \frac{y_2(t)}{\rho g}, \quad (12)$$

式中: $v_1(t), z_1, y_1(t)$ 分别为某时刻管道一端面的流体流速、高度、压强; $v_2(t), z_2, y_2(t)$ 分别为同一管道在相同时刻下另一端面的流体流速、高度、压强; ρ, g 分别为流体的密度和当地的重力加速度。

式(12)表明,理想的不可压缩流体在稳态流动过程中,总机械能守恒。

在某一时刻,流体在任意横截面上的流量和流速关系式为

$$Q(t)=gv(t)A, \quad (13)$$

式中: $Q(t)$, $v(t)$ 分别为某时刻下流体的具体流量和流速大小; A , g 分别为流体管道的横截面积和当地的重力加速度。

受实际用水需求的影响,某一个供水节点在不同时刻的用水量 $Q(t)$ 是不断变化的。同时,在同一管道中不同供水节点的工作状况也不一样,这也将影响到最终的用水量 $Q(t)$ 的变化。因此,在这些相关因素的影响下,将导致供水系统的用水量 $Q(t)$ 随机变化,很难找出其具体的变化规律。由此可知,通过式(9)~(13)所建立的供水系统的数学模型呈现出非线性的特性。

3 仿真研究及性能分析

通过以上分析可知,供水系统为非线性时变系统,故采用无模型自适应控制方案。无模型自适应控制方法非常适用于一些实际的模型参数难以辨识,或是很难建立精确数学模型的时变非线性系统。本系统通过控制率式(5)进行最终地控制。伪偏导数在此作为重要的中间变量,将通过式(7)~(13)在线估计得出。因此,整个系统的控制将不依赖于相关技术参数,即系统自身参数发生变化对控制器并无直接影响,仅仅只依靠系统的输入输出数据(I/O)来对整个复杂的系统进行有效地控制。

系统参数设置为:电机极对数 $p=2$, $\rho=1\,000\text{ kg/m}^3$, $g=9.8\text{ m/s}^2$, $A=17\,662.5\text{ mm}^2$, $Z_1=Z_2=0$ 。

仿真初值设为: $u(1)=u(2)=20$, $y(1)=0$, $y(2)=y(3)=0.005$, $\varepsilon=0.000\,01$, $\eta_k=1$, $\rho_k=1$, $\mu=1$, $\lambda=3\,000$ 。

在Matlab软件中,系统仿真结果如图1~4所示。

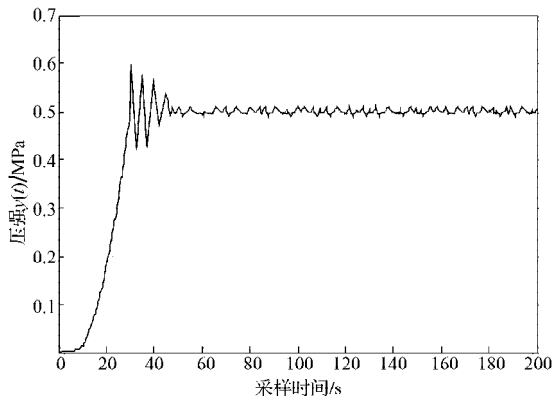


图1 系统输出变量的仿真结果

Fig. 1 The simulation results of the system output variables

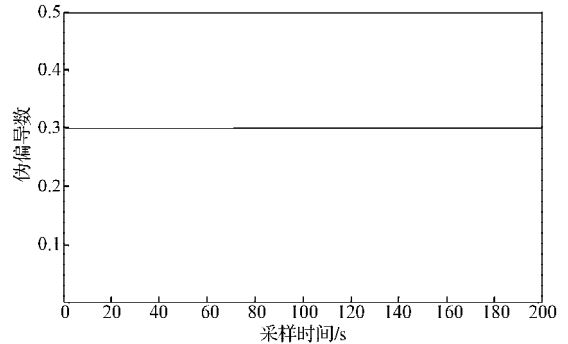


图2 伪偏导数的估计值

Fig. 2 The estimated value of the pseudo-partial derivative

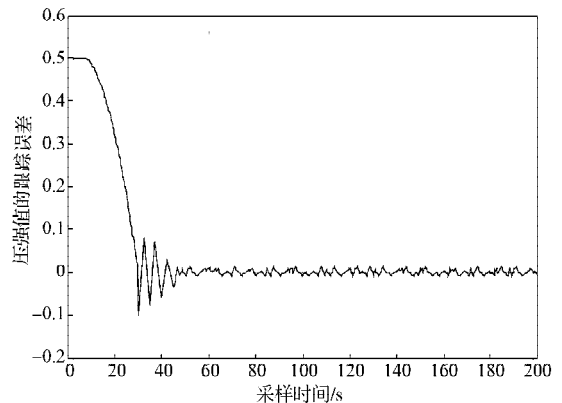


图3 系统输出误差变化趋势

Fig. 3 The system output error changing tendency

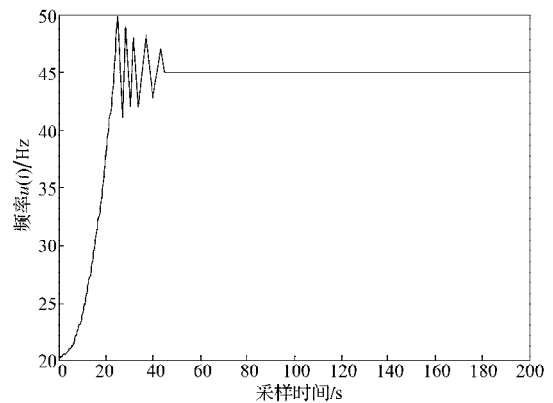


图4 系统输入变量的仿真结果

Fig. 4 The simulation results of the system input variables

由上图可知: 1) 当电机刚启动时, 整个系统可在较短的时间内达到稳定的工作状态, 说明本方法能有效地改善系统的大滞后问题; 2) 从图2可知, 在系统运行中, 其伪偏导数维持在一个恒定的值; 3) 从图3可知, 系统的误差可以在极短的时间内得以调节, 之后维持在一个较小的范围内。这些说明了本系统稳定性较好, 并具有较小的跟踪误差和良好的控制效果。

4 结语

本文将无模型自适应控制方法应用到供水系统

压力调节和流量控制中,并利用 Matlab 软件对系统进行仿真分析,验证了该控制方法能有效地解决了大滞后、供水压力值不稳定等相关难题。在现有供水系统模型基础上,所设计的系统控制器不依赖于具体的数学模型,只需要系统的 I/O 数据在线导出相关的中间变量并得到最终的控制结果。整个控制过程中所需的调整参数少、计算量较小,在控制应用中便于使用和实现。

参考文献:

- [1] 刘宜,方桂笋,李晨晨,等.基于 PLC 的泵站供水控制系统的设计[J].排灌机械,2007,25(6):17-20.
Liu Yi, Fang Guisun, Li Chenchun, et al. Design of Water Supply Control System Based on PLC[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2007, 25(6): 17-20.
- [2] 曹荣敏,侯中生. pH 值中和反应过程的无模型学习自适应控制[J]. 计算机工程与应用,2006,42(28):191-194.
Cao Rongmin, Hou Zhongsheng. Model-Free Learning Adaptive Control of a PH Neutralisation Process[J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(28): 191-194.
- [3] Tan K K, Lee T H, Huang S N, et al. Adaptive-Predictive Control of a Class of SISO Nonlinear Systems[J]. Dynamics and Control, 2001, 11(2): 151-174.
- [4] 艾永乐,赵荣国,高子余.基于模型参考自适应系统理论的异步电机矢量控制系统研究[J].湖南工业大学学报,2010,24(3):57-59.
- Ai Yongle, Zhao Rongguo, Gao Ziyu. The Vector Control System of Asynchronous Motor Based on Model Reference Adaptive System Theory[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2010, 24(3): 57-59.
- [5] 李建平,黄宜山,刘东南. Lorenz 系统的自适应反同步控制及其应用[J].湖南工业大学学报,2011,25(1):93-97.
Li Jianping, Huang Yishan, Liu Dongnan. Adaptive Anti-Synchronization Control of Lorenz Chaotic System and Its Application[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2011, 25(1): 93-97.
- [6] 吴士昌,吴忠强.自适应控制[M].北京:机械工业出版社,2005:6-15.
Wu Shichang, Wu Zhongqiang. Adaptive Control [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2005: 6-15.
- [7] 赵士军.基于无模型自适应控制的温度控制实验平台设计与实现[D].北京:北京交通大学,2011.
Zhao Shijun. The Design and Implementation of Temperature Control Experiment Platform Based on Model-Free Adaptive Control[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [8] 初乃茂.变频恒压供水系统的研究与应用[D].大连:大连理工大学,2007.
Chu Naimao. Research and Application of Frequency Constant Pressure Water-Supply System[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.

(责任编辑:邓彬)