

三容水箱液位控制系统的设计与仿真

冯鹏辉, 谭 兮, 刘国营

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412008)

摘要: 在分析了三容水箱液位控制系统结构和相应数学模型的基础上, 基于MATLAB/simulink环境建立了系统的仿真模型, 并对其PID参数进行了整定, 提出以分段变参数PID和自适应模糊PID相结合的方法来实现系统的控制。最后利用虚拟仪器搭建控制系统平台设计控制程序, 实现对整个控制过程的监控和动态模拟。仿真研究结果验证了所设计的控制策略的有效性和正确性。

关键词: 三容水箱; 液位控制; 自适应模糊控制; 仿真

中图分类号: TH122 TH137.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2011)06-0051-05

Design and Simulation of Three-Tank Liquid Level Control System

Feng Penghui, Tan Xi, Liu Guoying

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

Abstract: By analyzing the structure of three-tank liquid level control system and the corresponding mathematical model, establishes the system simulation model based on the simulink of MATLAB. Tunes the parameters PID and proposes the combined method of segmented variable parameters PID and adaptive fuzzy PID for the control of system. Finally, builds the control platform and designs control program with the virtual instruments to realize the control process monitoring and dynamic simulation. The simulating result verifies the devised control strategy correct and effective.

Keywords: three-tank; level control; adaptive fuzzy control; simulation

三容水箱液位控制系统是工业生产过程中多容流量对象的抽象模型, 具有较强的代表性, 可模拟工业生产过程中一阶或多阶次、线性或非线性、单容或多容、耦合或非耦合等特性, 以判别或验证各种控制策略性能的优劣。因而, 对三容水箱的控制系统进行研究有重要的理论意义和实际应用价值。

本文拟在分析三容水箱液位控制系统结构和工作机理的基础上, 建立该系统结构的非线性模型; 采用NI公司PCI-6251数据采集卡和LABVIEW图形化开发界面, 设计三容水箱液位控制系统的硬件和软件, 并采用人机交互界面对控制过程进行监控和动态模拟, 以验证本设计的可靠性。

1 液位控制系统结构及数学模型

三容水箱液位控制系统由水箱主体、差压变送器、气动调节阀、电磁阀、流量传感器、电气转换器、空气压缩机、水泵、多功能采集卡、计算机等组成, 硬件结构示意图见图1。

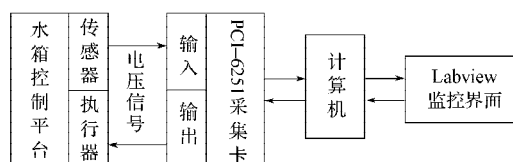


图1 系统结构图

Fig. 1 The chart of system structure

收稿日期: 2011-09-09

作者简介: 冯鹏辉(1988-), 男, 河南洛阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电气过程自动化,

E-mail: 15115326391@163.com

三容水箱的控制系统首先通过差压变送器测量3号水箱的液位，再通过采集卡将3号水箱的液位信号送入计算机，并通过计算机运算处理得到电磁阀开度的实时控制值。最后，通过PCI-6251采集卡的输出端子，将所得控制值送给控制阀，以控制给水流量，从而实现对3号水箱的水位控制。水箱控制对象模型^[2]如图2所示。

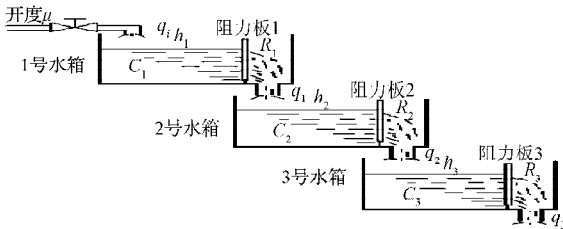


图2 三容水箱实验模型

Fig. 2 Three-tank experimental model

对图2所示模型进行数学分析，可得该系统的动态方程^[2]为：

$$\begin{cases} q_i - q_1 = C_1 dh_1/dt, & q_1 = f_1(h_1); \\ q_1 - q_2 = C_2 dh_2/dt, & q_2 = f_2(h_2); \\ q_2 - q_3 = C_3 dh_3/dt, & q_3 = f_3(h_3). \end{cases}$$

上式中： C_1 、 C_2 和 C_3 分别为3个水箱的液容，且 $C_1=C_3=166\ 585\text{ mm}^3$ ， $C_2=169\ 510\text{ mm}^3$ ； $f_1(h_1)$ 、 $f_2(h_2)$ 、 $f_3(h_3)$ 分别为3个水箱的出水流量，由所设置的阻力板流量特性决定。

分析单个水箱，取阻力板底边直线为 x 轴，底边中点垂直向上为 z 轴，非线性阻力板结构见图3。

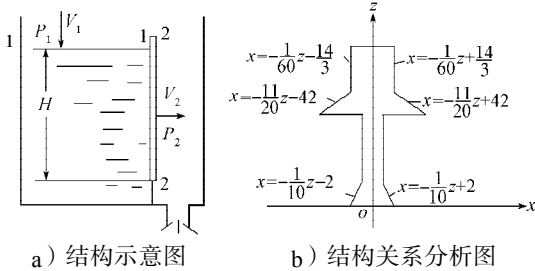


图3 非线性阻力板结构图

Fig. 3 The structure of non-linear resistant plate

由理想伯努力方程可得

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{1}{\rho g} P_1 + h = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{1}{\rho g} P_2 + z,$$

由于 $P_1=P_2$ ， $V_1^2/(2g)$ 相对于 $V_2^2/(2g)$ 很小，可忽略，故可得 $V_2 = \sqrt{2g(h-z)}$ 。

对图2所示模型建立直角坐标系，实际液位高度为 h ，取 z 为积分变量，它的变化区间为 $[0, h]$ ，采用定积分元素法可求得水箱不同液位高度 h 时流过阻力板的液体流量 Q 。其计算式为：

$$dQ = \sqrt{2g(h-z)} 2x dz.$$

积分可得：

$$\begin{cases} Q = -\frac{4}{75}\sqrt{2g}h^{\frac{5}{2}} + \frac{8}{3}\sqrt{2g}h^{\frac{3}{2}}, & 0 \leq h \leq 10; \\ Q = -\frac{4}{75}\sqrt{2g}h^{\frac{5}{2}} + \frac{8}{3}\sqrt{2g}h^{\frac{3}{2}} + \frac{4}{75}\sqrt{2g}(h-10)^{\frac{3}{2}}h - \frac{8}{15}\sqrt{2g}(h-10)^{\frac{3}{2}}, & 10 \leq h \leq 60; \\ Q = -\frac{4}{75}\sqrt{2g}h^{\frac{5}{2}} + \frac{8}{3}\sqrt{2g}h^{\frac{3}{2}} + \frac{4}{75}\sqrt{2g}(h-10)^{\frac{3}{2}}h - \frac{8}{15}\sqrt{2g}(h-10)^{\frac{3}{2}} - \frac{22}{75}\sqrt{2g}(h-60)^{\frac{3}{2}}h + \frac{424}{15}\sqrt{2g}(h-60)^{\frac{3}{2}}, & 60 \leq h \leq 70; \\ Q = -\frac{4}{75}\sqrt{2g}h^{\frac{5}{2}} + \frac{8}{3}\sqrt{2g}h^{\frac{3}{2}} + \frac{4}{75}\sqrt{2g}(h-10)^{\frac{3}{2}}h - \frac{8}{15}\sqrt{2g}(h-10)^{\frac{3}{2}} - \frac{22}{75}\sqrt{2g}(h-60)^{\frac{3}{2}}h + \frac{424}{15}\sqrt{2g}(h-60)^{\frac{3}{2}} + \frac{64}{225}\sqrt{2g}(h-70)^{\frac{3}{2}}h - \frac{896}{45}\sqrt{2g}(h-70)^{\frac{3}{2}}, & 70 \leq h \leq 100. \end{cases}$$

由于实际的液体有黏性，在流动过程中有能量损失，所以进行流量计算时，需加入修正系数 β 。笔者通过多次试验，最终确定 β 的近似值如下：

$$\beta = \begin{cases} 0.9, & 0 \leq H \leq 60; \\ -0.005(H-60) + 0.9, & 60 \leq H \leq 100. \end{cases}$$

根据以上分析，我们可在MATLAB/Simulink环境下，结合M函数，建立如图4所示的三容水箱控制系统仿真模型。其中，进水阀门最大比例度对应流量 Q_{max} ，其值为 $233\ 219\text{ mm}^3/s$ 。

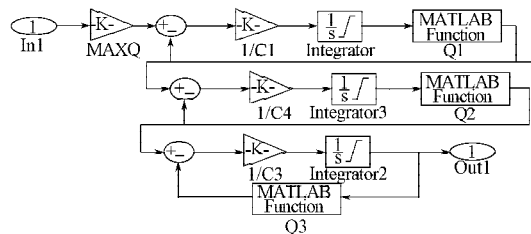


图4 三容水箱仿真模型

Fig. 4 Three-tank simulation model

2 PID 参数整定

因三容水箱控制系统结构的数学模型具非线性特点，常规PID (proportion integration differentiation) 算法只使用一组PID参数，不能满足本系统动、静态性能的需要，故可对其划分控制区间，采用多组PID参数进行控制，从而提高控制效果。

通过对控制系统模型的分析，可得水箱的控制系统流量与液位曲线图。通过对该曲线进行分析，可将曲线近似分成斜率相等的4段，即可将水箱控制过程划分为4个控制区间，分别在各区间中找出一个关键点进行人工PID整定，故可得到4组PID参数（见

表1), PID 整定效果如图5所示。

表1 各区间PID参数整定结果
Table1 The tuning results of parameters PID

| 水位/mm | PID参数 | | |
|-------|----------|-----------|-----------|
| | K_p | K_i | K_d |
| 15 | 0.400 00 | 0.000 100 | 60.000 00 |
| 45 | 0.530 00 | 0.000 038 | 60.000 00 |
| 65 | 1.600 00 | 0.000 050 | 90.000 00 |
| 80 | 2.400 00 | 0.000 050 | 45.000 00 |

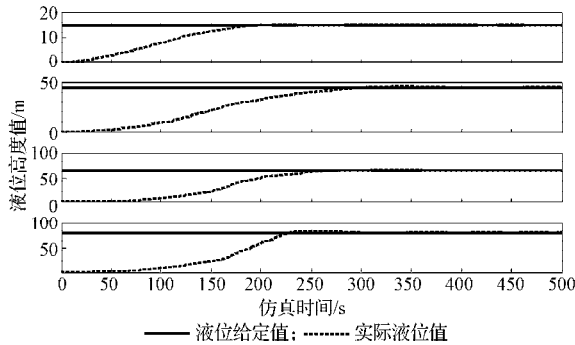


图5 PID整定曲线

Fig. 5 PID setting curves

由图5所示仿真控制过程曲线可看出, 控制系统在液位高度为15, 45, 65, 80 mm处的调整时间分别为250, 350, 310, 275 s, 最大超调量分别为3.5%, 4.5%, 3.8%, 3.7%, 无静差。这一结果表明, PID参数整定的效果均达到本系统的设计要求。

3 控制算法实现

3.1 非线性变参数PID

常规PID算法较简单, 且易于实现, 但由于本控制系统的流量随水位变化造成的非线性问题, 使得常规PID控制性能不佳, 而采用分段变参数PID^[3]可在不同控制区域中变化参数, 能较好地解决这一问题。因此, 本设计中采用非线性的分段变参数PID控制方法, 其仿真结构见图6。

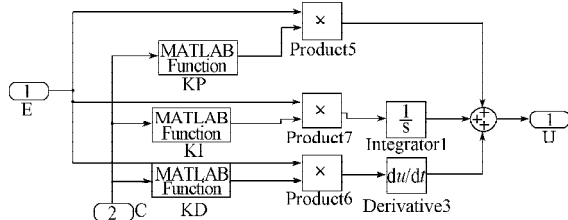


图6 非线性变参数PID仿真模型

Fig. 6 The simulation model of nonlinear variable parameters PID

采用分段变参数PID仿真分析时, 应使给定信号处于不同水位, 观察系统的稳态性能; 而水位变化时, 观察系统的动态性能, 结果见图7。由图7可看出, 液位在小范围内变化时, 其给定值和实际液位

值的跟随性较好, 可取得较好的控制效果; 但水位在大范围内变化时, 会出现较大的超调, 且水位下降时, 系统响应速度过慢。通过分析上述控制问题, 可采用改进PID控制算法以达到更好的控制效果。

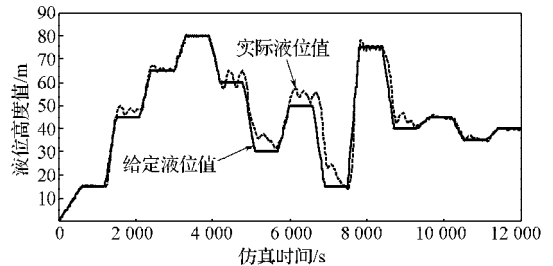


图7 非线性变参数PID响应曲线

Fig. 7 Response curve of nonlinear variable parameters PID

积分作用可消除静态误差, 提高系统精度, 但在液位上升或下降阶段, 短时间内会有较大偏差, 会使得PID运算的积分积累, 引起系统较大超调, 为此, 引入对变积分的PID控制算法、抗积分饱和的PID控制算法与分段式PID相结合, 以减小超调, 提高系统的响应速度。利用S函数编写变积分模块和抗积分饱和模块。变积分PID积分项系数如下:

$$f_{ie(k)} = \begin{cases} 1, & |e(k)| \leq 1; \\ (9 - |e(k)| + 1)/9, & 1 < |e(k)| \leq 10; \\ 0, & |e(k)| \geq 10. \end{cases}$$

变速积分PID通过改变积分系数来改变系统偏差: 系统偏差越大, 则积分越慢, 反之则越快。抗积分饱和PID是在系统存在一个方向上偏差时, PID控制器的输出由于积分作用的不断累加而加大, 从而导致执行机构达到极限位置。各算法的液位控制仿真如图8所示。

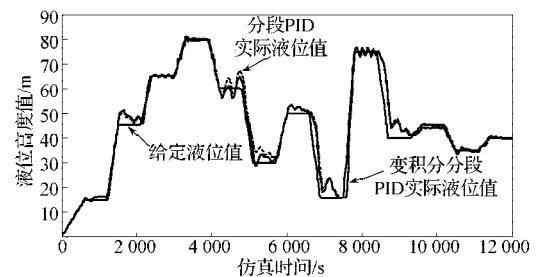


图8 非线性变参数PID优化比较

Fig. 8 The comparison of nonlinear variable parameters PID optimization

3.2 非线性变参数自适应模糊PID

由于水箱流量随水位变化时, 具有非线性、大惯性和控制对象参数变化等问题, 传统的改进PID控制策略不能达到很好的效果。模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础的计算机智能控制。自适应模糊控制运用现代控制理论, 在线辨识对象特征参数, 实时改变其控制策略, 且不

依赖对象的数学模型,对象在大范围内变化时,系统仍可自动地工作于最优或接近于最优的运行状态,因此,本设计中采用自适应模糊控制。自适应模糊PID的结构如图9所示。

利用人工智能方法,总结操作人员的经验并存入知识库,建立合适的控制规则,设计模糊控制器。同时,利用分段变参数实现控制系统PID参数的粗调,自适应模糊控制器通过不断辨识当前的对象特征来进行PID参数精调,最终合成一组最佳PID参数,

保证液位给定大范围变化情况下的快速性和准确性。本研究所设计的控制模型如图10所示。

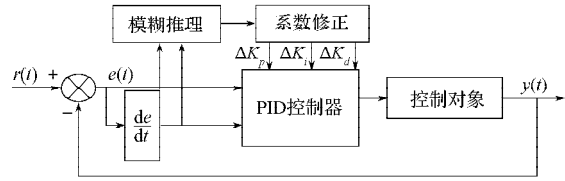


图9 自适应模糊PID控制结构图

Fig. 9 The control structure of adaptive fuzzy PID

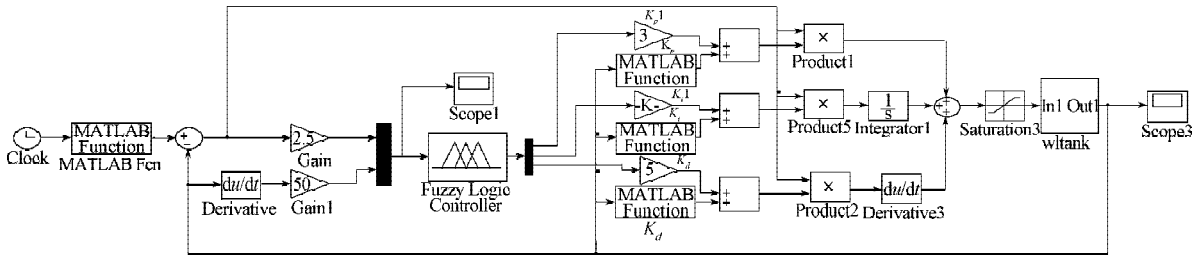


图10 非线性变参数模糊PID仿真图

Fig. 10 The simulation chart of nonlinear variable parameters fuzzy PID

三容水箱控制系统中采用二维输入、三维输出的模糊控制器,将水位偏差变化量和水位偏差变化率作为输入, $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 作为模糊控制器的输出。论域分别为 $[-3, +3], [-3, +3], [-0.3, +0.3], [-0.06, +0.06], [-3, +3]$, 模糊语言变量均使用7个语言变量值[NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB]来表示。隶属函数均采用工程中常用的等分三角形隶属函数,液位偏差 E 的隶属函数如图11所示。

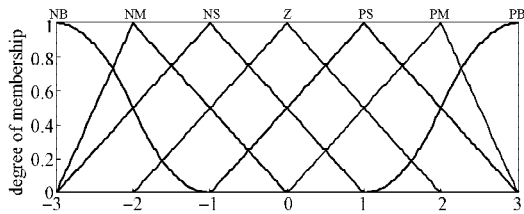


图11 输入变量的隶属函数

Fig. 11 Membership function of input variables

模糊规则表由手动操作人员长期积累的经验得出,其中 ΔK_p 的模糊规则见表2。

表2 模糊控制规则表

Table 2 The table of fuzzy control rules

| ΔK_p | EC | | | | | | |
|--------------|----|----|----|----|----|----|----|
| | NB | NM | NS | Z | PS | PM | PB |
| NB | PB | PM | PS | NS | NM | NM | NB |
| NM | PM | PS | PS | PS | PM | PM | PM |
| NS | Z | NS | NS | Z | PS | PS | PM |
| Z | PS | PS | Z | Z | Z | PS | PS |
| PS | PM | PS | PS | Z | NS | NS | Z |
| PM | PM | PM | PS | PS | PS | PS | PM |
| PB | NB | NM | NM | NS | PS | PM | PB |

通过分析实际输入输出与模糊论域之间的关系, E 的量化因子取 2.5, EC 的量化因子取 50, ΔK_p 的比例因子为 3, ΔK_i 的比例因子为 0.000 2, ΔK_d 的比例因子为 1.3, 系统的仿真结果如图12所示。从图12中可看出,通过将自适应模糊PID与分段变参数PID结合,使得系统具有响应速度更快、更准确,超调更小,振荡更少,鲁棒性更强的特点。

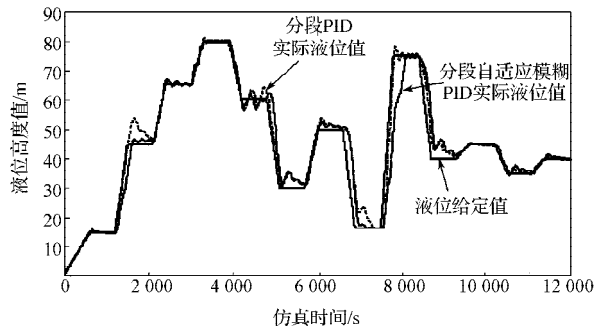


图12 非线性变参数模糊PID与变参数PID仿真比较

Fig. 12 The simulation comparison of nonlinear variable parameters fuzzy PID and variable parameter PID

4 Labview 控制程序及监控界面

4.1 数据采集

NI PCI-6251 是一款 M 系列的多功能智能数据采集和智能设备,带有 16 路模拟输入和 2 路模拟输出通道,同时还提供 24 门数字 I/O, 32 位计数器。三容水箱控制系统采用其中的两路模拟输入、一路模拟输出。

模拟输入的连续采集驱动程序见图13。

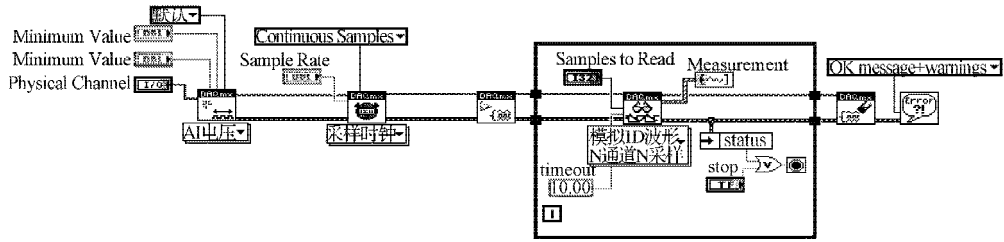


图13 模拟输入的连续采集的驱动程序

Fig. 13 The analog input of continuous acquisition driver program

4.2 控制程序

本设计中, 利用 Labview^[4]控制仿真设计工具包和模糊逻辑工具包编写控制程序, 其可模拟三容水箱控制系统的动态过程。其中, 高级控制算法和水箱控制对象建模^[5], 通过 MathScript^[4]节点和创建子程序来实现。通过控制程序与采集驱动程序结合可以对数据进行实时处理, 实现对控制过程的监控。

水箱模拟控制程序如图 14 所示。

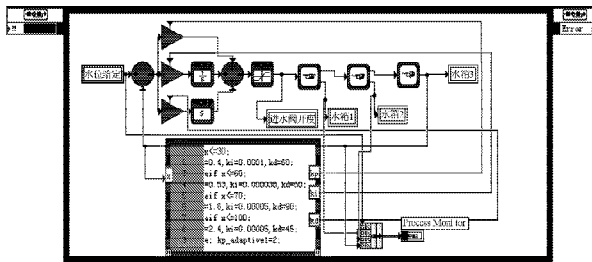


图14 水箱动态模拟控制程序

Fig. 14 The dynamic simulation program of tank-level

4.3 监控界面

监控界面实时监控水箱的整个控制过程, 并可设定水箱的工作方式和 3 号水箱的水位, 显示各水箱液位的变化趋势。通过监控界面选项板可使控制系统工作在不同的工作状态。模拟监控界面见图 15。

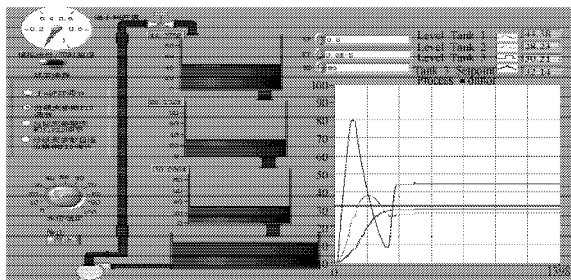


图15 模拟控制界面

Fig. 15 The main interface of simulation control

动态模拟工作方式可进行半实物仿真, 实时观察 3 个水箱的水位变化, 其中的趋势图可记录水箱水位的变化, 当水位设为 30 cm 时, 由水位变化趋势图可观察到水箱的液位约在 300 s 左右达稳定, 3 号水箱液位偏差在 1 cm 左右, 动态模拟控制效果与 MATLAB 仿真分析结果一致。其中, 稳定后 3 个水箱的水位值

与实测值接近, 具有较好的半实物仿真效果。

5 结语

通过分析三容水箱液位控制系统的结构和运行过程, 利用 MATLAB 建模仿真研究系统的运行特点, 将变参数 PID 与自适应模糊 PID 结合, 设计出非线性变参数自适应模糊 PID 控制器, 仿真效果较好。在此基础上, 利用虚拟仪器软件结合控制工具包, 设计了水箱控制系统的控制程序和人机交互界面, 最终完成了整个控制系统的设计, 仿真结果表明, 系统在该设计条件下取得了较好的控制效果。

参考文献:

- [1] 蔡文智, 陈德为. LabVIEW及其在电气控制方面的应用现状[J]. 电气开关, 2007(5): 46-48.
Cai Wenzhi, Chen Dewei. LabVIEW and Its Application in Electrical Control[J]. Electric Switchgear, 2007(5): 46-48.
- [2] 赵科, 王生铁, 张计科. 三容水箱的机理建模[J]. 控制工程, 2006, 13(6): 521-524.
Zhao Ke, Wang Shengtie, Zhang Jike. Mechanism Modeling for Three-Tank Water[J]. Control Engineering of China, 2006, 13(6): 521-524.
- [3] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 115-129.
Liu Jinkun. Advanced PID Control and MATLAB Simulation[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2003: 115-129.
- [4] 陈锡辉, 张银鸿. LabVIEW 8.20 程序设计从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 32-266.
Chen Xihui, Zhang Yinhong. LabVIEW 8.20 Program Design from Entry to Master[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 32-266.
- [5] 吴异卉, 王启志. 基于 LabVIEW 的模型参考自适应控制的实现[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(11): 180-182.
Wu Yihui, Wang Qizhi. Realization of Adaptive Control Reference Model Based on LabVIEW[J]. Computer Technology and Development, 2008, 18(11): 180-182.

(责任编辑: 廖友媛)