

实验教学改革与研究

基于 MPC 的三容水箱液位跟踪控制的快速实现

于树友^{1,2}, 徐明生², 王 严², 许 芳^{1,2}

(1. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 吉林 长春 130022;

2. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 针对三容水箱系统大时滞、动态响应慢问题, 研究了三容水箱系统的液位跟踪控制。采用模型预测控制策略, 设计了三容水箱的液位跟踪控制器, 并通过 FPGA 加以实现。控制器硬件和软件系统采用基于 Nios II 嵌入式软核处理器的 FPGA/SOPC 方案, 在基于 FPGA 和 dSPACE 的平台上, 进行了实时联合仿真。实验结果表明, 基于 FPGA 的模型预测控制器能够实现对三容水箱系统的液位跟踪控制。该实验可应用于自动控制、过程控制等相关课程教学, 方便高效, 具有较好的实验演示效果。

关键词: 三容水箱系统; 模型预测控制; 现场可编程门阵列; 可编程片上系统; 实时仿真实验

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-4956(2020)07-0145-05

Rapid implementation for liquid level tracking control of three-tank based on MPC

YU Shuyou^{1,2}, XU Mingsheng², WANG Yan², XU Fang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: In view of the problem about the large time delay and slow dynamic response of the three-tank system, the liquid level tracking control of the three-tank system is studied. By using the model predictive control strategy, the liquid level tracking controller of the three-tank water tank is designed and implemented by FPGA (field programmable gate array). FPGA/SOPC (system on programmable chip) scheme based on Nios II embedded soft core processor is adopted for the hardware and software system of the controller. The real-time joint simulation is carried out on the platform based on FPGA and dSPACE. The simulation results show that the model predictive control based on FPGA can drive the three-tank system to track a predefined liquid level. This experiment is convenient and efficient in the teaching of relevant courses of automatic control and process control, which has good experimental demonstration effect.

Key words: three-tank system; model predictive control; FPGA; SOPC; real-time simulation experiment

三容水箱系统可以模拟多容器流程系统中的多输入多输出、时变、强耦合、非线性系统^[1], 并能够模拟过程控制中的复杂对象, 对三容水箱液位控制方法的研究对实际工程应用有重要意义。目前针对三容水箱系统液位跟踪控制的研究已有不少成果。文献[2]

分别利用数字 PID 控制器和 BP 神经网络 PID 控制器对三容水箱液位控制系统进行离线仿真。结果表明, 数字 PID 控制器反应速度较快, 但系统容易出现较大的超调, 而在 BP 神经网络 PID 控制器作用下, 系统具有良好的动态特性, 但响应速度相对较慢。文献[3]将三容系统的控制问题归结为约束系统的干扰抑制问题, 并在讨论滚动优化的 Hinfinity 控制方法的基础上进行了三容系统的液位控制实验。实验结果表明, 所设计的闭环系统能够在满足时域约束的条件下保证系统的抗干扰性能。文献[4]讨论了约束离散时间系

收稿日期: 2019-11-16

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流重点项目“面向安全性的电动化汽车能效滚动优化”(61520106008)

作者简介: 于树友(1974—), 男, 天津, 博士, 教授, 研究方向为模型预测控制、非线性控制。

E-mail: shuyou@jlu.edu.cn

统的准无限时域模型预测控制 (model predictive control, MPC) 算法, 同时在三容水箱系统中进行了数值仿真实验, 并验证了算法的有效性。控制器在保证系统稳定性同时又满足时域硬约束的条件下, 使三容水箱闭环系统达到理想的动态性能。文献[5]的研究对象是与三容水箱类似的四容水箱系统, 其通过仿真实验对比得出, 不论在最小相位还是非最小相位情况下, 基于内模控制 (IMC) 的比例积分 (PI) 控制器都能够得到较好的性能。文献[6]对四容水箱系统分别设计了线性和非线性的模型预测控制器, 并进行了离线仿真实验。

本文主要研究三容水箱系统模型预测控制器的硬件实物实现。由于预测控制需要根据系统当前时刻的状态在线求解优化问题, 因此要求控制器具有很强的计算能力。而在计算能力受限的环境, 预测控制器的在线计算速度可能会受到较大的限制, 导致控制器不具有期望的实时性。FPGA 因其内部存在大量的可编程逻辑门阵列, 而且可以进行并行的逻辑运算和赋值, 运算速度很快, 便于算法在较短的时间内完成。因此, 基于 FPGA 实现预测控制器有利于提高实际控制器的实时性能。

本文采用 Altera 公司的 Cyclone II 系列 FPGA, 同时基于 Nios II 嵌入式软核处理器, 设计并构建了 SOPC 硬件系统和软件系统, 实现了基于 FPGA/SOPC 的模型预测控制器。为了验证控制器的有效性, 本文在基于 FPGA 和 dSPACE 的实验平台上, 进行了控制器的实时联合仿真实验。实验结果表明, 基于 FPGA 的预测控制器能够实现对三容水箱系统的液位设定跟踪控制。该方法可应用于自动控制、过程控制等相关课程的实验教学, 加强学生对控制系统建模、控制器设计等理论知识的理解。

1 三容水箱系统

三容水箱主要由两个水泵和底部相互联通的三个完全相同的圆柱体组成, 其整体结构如图 1 所示。

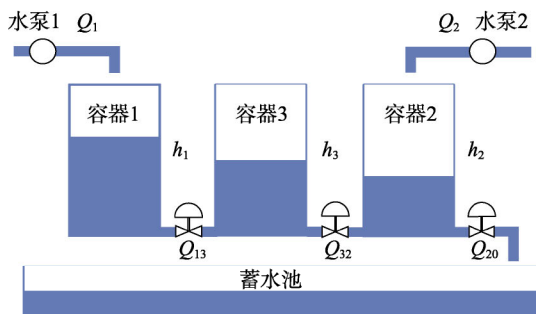


图 1 三容水箱系统结构

两个水泵分别给容器 1 和容器 2 供水, 容器 3 只

能通过底部的联通管从容器 1 和容器 2 中获得水源, 同时容器 2 右侧的阀门是常开状态, 使水持续流出。在三个容器下方有个蓄水池, 用来为水泵提供水源以及回收从容器 2 中流出的水。系统的输入变量是 Q_1 和 Q_2 , 即两个水泵的流量, 输出变量是 h_1 和 h_2 , 即容器 1 和容器 2 的液位高度。由于三容水箱系统具有大时滞、动态响应缓慢、开环稳定等特点, 三容水箱的典型控制问题可以描述为: 在尽可能短的时间内, 使系统稳定在期望的平衡状态。

根据物料平衡, 三容水箱系统可由如下微分方程描述:

$$\begin{cases} S \frac{dh_1}{dt} = Q_1 - Q_{13} \\ S \frac{dh_2}{dt} = Q_2 + Q_{32} - Q_{20} \\ S \frac{dh_3}{dt} = Q_{13} - Q_{32} \end{cases} \quad (1)$$

其中 Q_{ij} 为水从容器 i 流进容器 j 时的流量, Q_{20} 为水从容器 2 流入下方蓄水池时的流量, S 是容器的横截面积。根据 Torricelli 规则有:

$$\begin{cases} Q_{13} = a_{z1} S_n \operatorname{sgn}(h_1 - h_3) (2g |h_1 - h_3|)^{1/2} \\ Q_{32} = a_{z3} S_n \operatorname{sgn}(h_3 - h_2) (2g |h_3 - h_2|)^{1/2} \\ Q_{20} = a_{z2} S_n (2gh_2)^{1/2} \end{cases} \quad (2)$$

其中, h_i 为容器 i 的液位高度, a_{zj} ($j=1, 2, 3$) 为流量系数, g 是重力加速度, S_n 是连接管的横截面积。

令 $x_i = (h_i - h_{0i}) / h_{0i}$, $i=1, 2, 3$, $u_i = (Q_i - Q_{0i}) / Q_{0i}$,

$i=1, 2$, 在 $h_0 = (h_{01}, h_{02}, h_{03})^T$, $Q_0 = (Q_{01}, Q_{02})^T$ 处线性化, 得到系统连续线性状态空间方程:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_l x(t) + B_l u(t) \\ y(t) &= C_l x(t) \end{aligned} \quad (3)$$

其中:

$$A_l = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} \\ 0 & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & 0 \end{bmatrix}, \quad C_l = \operatorname{diag}\{1, 1, 1\}$$

矩阵 A_l 中各元素如下:

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\frac{a_{z1} S_n g}{S \sqrt{2g(h_{01} - h_{03})}}, \quad a_{13} = \frac{a_{z1} S_n g h_{03}}{S h_{01} \sqrt{2g(h_{01} - h_{03})}}, \\ a_{22} &= -\frac{a_{z3} S_n g}{S \sqrt{2g(h_{03} - h_{02})}} - \frac{a_{z2} S_n g}{S \sqrt{2g h_{02}}}, \\ a_{23} &= \frac{a_{z3} S_n g h_{03}}{S h_{02} \sqrt{2g(h_{03} - h_{02})}}, \end{aligned}$$

$$B_l = \begin{bmatrix} -\frac{a_{z1}\sqrt{2gh_{01}}}{Sh_{01}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{a_{z2}\sqrt{2gh_{02}}}{Sh_{02}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{a_{z3}\sqrt{2gh_{03}}}{Sh_{03}} \end{bmatrix}$$

$$a_{31} = \frac{a_{z1}S_n g h_{01}}{Sh_{03}\sqrt{2g(h_{01}-h_{03})}},$$

$$a_{32} = \frac{a_{z3}S_n g h_{02}}{Sh_{03}\sqrt{2g(h_{03}-h_{02})}};$$

2 MPC 控制器设计

预测控制是从工业过程控制中发展起来的一种新型计算机控制算法^[1], 是近年来广泛讨论的反馈控制策略^[7]。由于模型预测控制可以处理具有非线性、多变量、有时域硬约束等特性的复杂系统的控制问题, 因此在工业过程控制中得到了广泛应用。预测控制的基本思想是在线求解开环优化问题, 从而获得闭环控制问题的一个可行解, 即在每个采样瞬间, 根据当前采样信息在线求解一个有限时域内的开环最优控制问题, 然后将所得控制序列的第一个元素作用于被控对象, 下次采样之后再重复这个过程, 即使用最新的采样信息重新求解当前开环最优控制问题^[1-4]。

将式(3)离散化后得到三容水箱系统的离散模型, 再整理得到其增量模型:

$$\begin{aligned} \Delta x(k+1) &= A\Delta x(k) + B\Delta u(k) \\ y_c(k) &= C\Delta x(k) + y_c(k-1) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\Delta x(k) = x(k) - x(k-1)$, $k \geq 1$, 是状态变量增量, $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$, $k \geq 1$, 是控制输入增量, $y_c(k)$ 是被控输出量, 并且 $\Delta x(0) = 0$, $\Delta u(0) = 0$ 。设模型预测时域为 p , 控制时域为 m ($m \leq p$), 当 $p > m$ 时控制量保持不变。系统未来 p 步输出的预测为^[8]:

$$Y_p(k+1|k) = S_x \Delta x(k) + \tau y_c(k) + S_u \Delta u(k) \quad (5)$$

其中, $k+i|k$ ($i=1, 2, \dots$) 表示 k 时刻对 $k+i$ 时刻的预测,

$$Y_p(k+1|k) = [y_c(k+1|k) \quad y_c(k+2|k) \quad \dots \quad y_c(k+p|k)]^T$$

$$\tau = \begin{bmatrix} I_{n_c \times n_c} & I_{n_c \times n_c} & \dots & I_{n_c \times n_c} \end{bmatrix}^T$$

$$S_x = \begin{bmatrix} CA & \sum_{i=1}^2 CA^i & \dots & \sum_{i=1}^p CA^i \end{bmatrix}^T$$

$$S_u = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ \sum_{i=1}^2 CA^{i-1}B & CB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^m CA^{i-1}B & \sum_{i=1}^{m-1} CA^{i-1}B & \dots & CB \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^p CA^{i-1}B & \sum_{i=1}^{p-1} CA^{i-1}B & \dots & \sum_{i=1}^{p-m+1} CA^{i-1}B \end{bmatrix}_{p \times m}$$

目标函数表达了对系统性能的要求, 希望被控输出量越接近给定的参考输入越好, 并且控制动作不要变化太大。

开环优化问题可以描述如下:

$$\underset{\Delta U(k)}{\text{minimize}} J(x(k), \Delta U(k), m, p) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} J &= \sum_{i=1}^p \left\| \Gamma_{y,i} (y_c(k+i|k) - r(k+i)) \right\|^2 + \\ &\quad \sum_{j=1}^m \left\| \Gamma_{u,j} \Delta u(k+j-1) \right\|^2 \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\Delta U(k)$ 为系统未来 m 步输入向量。

将目标函数写成矩阵向量的形式:

$$J = \left\| \Gamma_y (Y_p(k+1|k) - R(k+1)) \right\|^2 + \left\| \Gamma_u \Delta U(k) \right\|^2 \quad (8)$$

其中, $R(k+1) = [r(k+1), r(k+2), \dots, r(k+p)]^T$ 是参考输入。 $\Gamma_y = \text{diag}(\Gamma_{y,1}, \Gamma_{y,2}, \dots, \Gamma_{y,p}) > 0$ 是在 k 时刻预测 $k+i$ 时刻的输出与参考输入误差的加权系数, Γ_y 越大表示期望得到的输出与参考输入之间的误差越小; $\Gamma_u = \text{diag}(\Gamma_{u,1}, \Gamma_{u,2}, \dots, \Gamma_{u,m}) > 0$ 是求得的控制增量的加权系数, Γ_u 越大则控制量变化率越小。

对上述的开环优化问题进行求导并取其极值, 则可以获得第 k 个时刻的最优控制增量为:

$$\Delta U^*(k) = \left(S_u^T \Gamma_y^T \Gamma_y S_u + \Gamma_u^T \Gamma_u \right)^{-1} S_u^T \Gamma_y^T \Gamma_y E_p(k+1|k)$$

其中,

$$E_p(k+1|k) = R(k+1) - S_x \Delta x(k) - \tau y_c(k) \quad (9)$$

将优化解的第一个元素作用于系统:

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= \begin{bmatrix} I_{n_u \times n_u} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \Delta U^*(k) = \\ &\quad K_{mpc} E_p(k+1|k) \end{aligned} \quad (10)$$

其中,

$$K_{mpc} = \begin{bmatrix} I_{n_u \times n_u} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \left(S_u^T \Gamma_y^T \Gamma_y S_u + \Gamma_u^T \Gamma_u \right)^{-1} S_u^T \Gamma_y^T \Gamma_y \quad (11)$$

为预测控制增益。如果 Γ_y 和 Γ_u 是与时间无关的常数, 则 K_{mpc} 可由上式离线计算。

模型预测控制思想的三个基本步骤为: 首先预测系统未来动态, 然后求解优化问题, 最后将解的第一个元素作用于系统; 基本运行机制为: 在有限时域内重复进行滚动优化。根据上述思想和机制, 可以获得无约束线性模型预测控制算法流程如下^[8]:

- (1) 初始化 $p, m, S_x, S_u, \Gamma_u, \Gamma_y$, 计算 K_{mpc} ;
- (2) 获得测量值 $x(k)$ 计算 $\Delta x(k)$ 和 $y_c(k)$;
- (3) 计算误差 $E_p(k+1|k)$;
- (4) 计算控制变化量 $\Delta u(k)$;
- (5) 将控制量 $u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$ 作用于系统;
- (6) 在 $k+1$ 时刻测量 $x(k+1)$, 并且令 $k = k+1$, 返回第 (2) 步。

3 MPC 控制器实现

现场可编程门阵列 (FPGA) 具有研发时间短、体积小、可编程、高集成度、高速和高可靠性等优点, 目前被广泛应用于通信、高性能计算、汽车电子、航空航天等各个领域。

综合考虑在 FPGA 芯片中实现 MPC 算法的开发难度、计算速度、开发成本等多种因素, 本文采用基于 Nios II 软核处理器的 SOPC 方案。Nios II 是 Altera 公司为 FPGA 设计者研发的可灵活优化硬件编程语言的嵌入式软核处理器。SOPC 系统即在可编程芯片上设计硬件和软件构建成的整个复杂系统。Nios II 嵌入式软核处理器具有较好的定制特性, 用户可以通过 Nios II 嵌入式处理器开发软件包 SOPC Builder 添加和配置标准 IP 核 (intellectual property cores), 在 FPGA 芯片上构建符合实际需求的系统, 从而组成专用处理器。

为了实现基于 FPGA/SOPC 的控制器, 首先需要在 Matlab/Simulink 中搭建控制器和被控对象的模型, 同时进行离线仿真分析; 然后在 FPGA 中组建 SOPC 系统、配置硬件资源、生成处理器; 最后在基于 Eclipse 的开发平台中设计程序。

控制器的硬件系统设计是在 Quartus II 软件和 SOPC Builder 中完成的, 包括 Nios II 处理器的配置、IP 核配置、引脚适配、综合编译、程序下载和硬件系统测试。本文构建的 Nios II 处理器架构如图 2 所示。Avalon 总线是 FPGA 的内部总线, 主要负责 Nios II 处理器与外部硬件设备之间的通信。本文根据系统的实际需求配置了 Nios II 软核 (CPU)、片上存储器 (on-chip memory)、系统 ID (system id peripheral)、通用异步接收器/发送器 (JTAG UART) 核和并行输入/输出 (PIO) 核等。

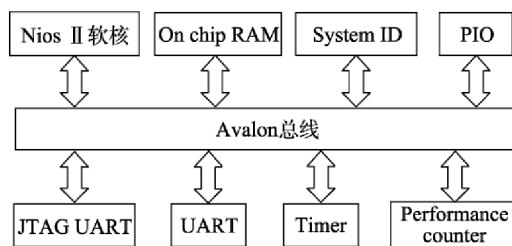


图 2 Nios II 嵌入式处理器架构

完成 SOPC 的硬件系统构建之后, 便可在设计好的 Nios II 嵌入式处理器上进行软件设计。软件系统的设计主要是在 Nios II 集成开发环境 (IDE) 中进行。Nios II 嵌入式处理器支持标准的 C/C++ 程序开发, 以及合适嵌入式系统软件开发且源码开放的 C 标准库^[9-10]。Altera 为 Nios II 程序设计提供硬件抽象层系统库 (HAL), 开发者可以用 C 语言编写代码。软件设计具体实现流程如图 3 所示, 主要包括编写 Nios II 系统和控制器初始化程序、串口通信程序、算法程序、外设驱动程序等, 最后完成程序的编译和调试^[11-12]。

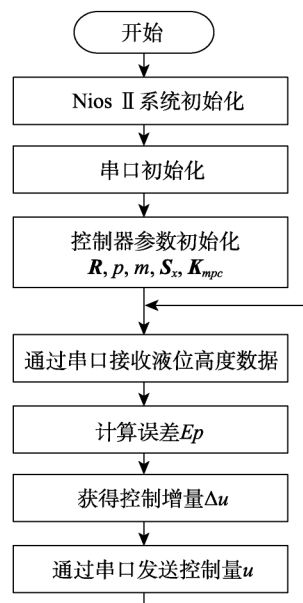


图 3 SOPC 软件系统实现流程

4 实时仿真实验

为了验证基于 FPGA 的三容水箱系统液位控制器的有效性和实时性, 本文选用 dSPACE 实时仿真系统进行实时仿真实验。

实验中三容水箱系统的平衡点选择为 $h_{01}=30.00$ cm, $h_{02}=24.00$ cm, $h_{03}=26.97$ cm, 液位平衡时水泵流量为 $Q_{01}=17.86$ mL/s, $Q_{02}=55.34$ mL/s。系统的连续线性状态空间方程离散化的采样周期为 $T_s=0.1$ s。模型预测控制器的相关参数初始化如下: 输入量个数 $n_u=2$, 输出量个数 $n_y=2$, 状态量个数 $n_x=3$, 预测时域 $p=10$, 控制时

域 $m=10$, 假设无干扰量。加权矩阵选为 $\Gamma_y = \mathbf{I}_{p \times p}$, $\Gamma_u = 0.01 \times \mathbf{I}_{m \times m}$, 其中 $\mathbf{I}$ 为单位方阵。矩阵 $\mathbf{S}_u$ 、 $\mathbf{S}_x$ 和 Γ 则可以由离线计算获得。参考输入中, $\mathbf{r}(k+1) = \mathbf{r}(k+2) = \dots = \mathbf{r}(k+p) = [h_{01} \ h_{02}]^T$ 。

本文的联合实时仿真实验平台由 dSPACE、PC 以及 FPGA 开发板组成, 实物如图 4 所示。其中, FPGA 是实物控制器, dSPACE 中用于快速原型设计的单板硬件 DS1104PPC 配合 PC 中的软件构成了功能强大的开发系统。这个可以用来完成快速原型设计的系统的工作机制是^[13-15]: 在 PC 中运行 Matlab 软件, 将三容水箱系统的 Simulink 模型通过 PCI 通信接口下载到 dSPACE DS1104PPC 中, dSPACE 通过 RS232 串口向 FPGA 发送三容水箱当前液位高度值, FPGA 芯片中的控制器程序算出的控制量再通过串口发送给 dSPACE 用于控制其中的三容水箱系统模型。实时仿真实验的启动、停止以及所有的过程、结果都可以通过 PC 中 Control Desk 软件进行管理和监测。

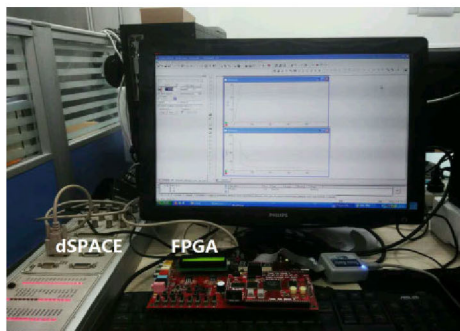


图 4 FPGA 与 dSPACE 联合实时仿真平台

为了提高数据的准确性, 本文数据都设置为 32 位二进制数, 这样一个数据需要 RS232 串口发送或接收 4 次, 每次发送或接收 8 位。为了缩短数据传输时间, 本文波特率设置为 115 200 bps。

图 5 是容器 1 和容器 2 的液位高度曲线, 图 6 是水泵 1 和水泵 2 的流量曲线, 可以看出, 在控制器的作用下, 容器 1 中的液位高度大约在 50 s 时就达到了期望值, 容器 2 中的液位大约在 80 s 内就跟踪上期望

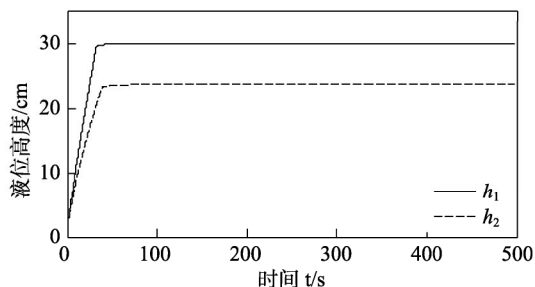


图 5 容器 1 和容器 2 的液位高度

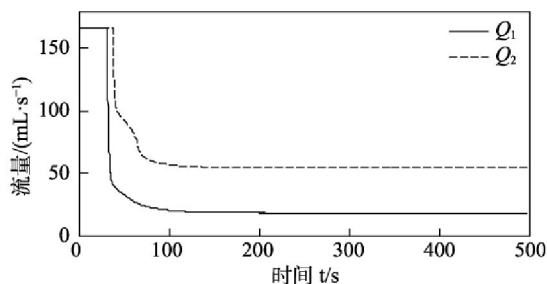


图 6 水泵 1 和水泵 2 的流量

的高度。系统运行 100 s 后达到了平衡状态, 且系统的动态响应没有超调。

5 结语

本文采用基于 Nios II 嵌入式软核处理器的 SOPC 设计方案, 为三容水箱控制系统设计了模型预测控制器。在 FPGA 开发板上实现了控制器所需硬件资源分配以及控制算法的 C 语言程序设计, 并在由 FPGA、dSPACE 和 PC 机组合而成的联合仿真平台上对控制器的性能进行了验证。

仿真结果表明, 基于 FPGA 的模型预测控制器能够使三容水箱系统在较短时间内达到并一直稳定在平衡状态, 且系统的动态响应没有超调。

通过实验验证所设计的 MPC 控制器具有有效性, 同时基于 FPGA 的实现能够提高实际控制器的实时性能。该平台操作简单、稳定、可靠。将该实验应用于教学, 达到了以下教学目的:

(1) 建立系统数学模型, 掌握控制算法的设计过程, 为学生今后在分析类似控制系统、设计算法时提供思路。

(2) 使学生熟悉 Matlab 编程环境, 掌握 Matlab 仿真实验设计与分析。

(3) 使学生掌握三容水箱的工作原理及简单的工业液位调节系统的应用, 同时通过该实验使学生初步掌握 FPGA 的编程方法及 dSPACE 的使用方法。

该三容水箱液位调节实验教学在自动控制、过程控制相关课程中的应用, 大大提高了教学质量和效果。

参考文献 (References)

- [1] 段光华. 基于 FPGA 实现预测控制算法[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [2] 卢娟. BP 神经网络 PID 在三容系统中的控制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- [3] 于树友, 陈虹, 张鹏, 等. 三容系统的滚动优化控制及其实验研究[J]. 东北大学学报, 2007(28): 82-91.
- [4] 于树友, 陈虹, 赵海艳. 非线性离散时间系统的准无限时域 NMPC[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(4): 1002-1006.

(下转第 172 页)

“教材/技术一体化”的教学理念,通过创建创新电子工艺加工“校中工厂”,学院探索出以“SMT 工艺为主线”的实践教学体系。

“校中工厂”不仅承担部分课程设计、实习、劳动、勤工俭学等任务,而且鼓励学院师生参与全流程设计,包括板级开发、PCB 制板、元器件插装、SMT 过程管理、成品检测、故障排除等,其设计出的产品在厂内进行试制、集成、检测等过程之后,交由企业进行销售。“校中工厂”不仅落实了德智体美劳中的“劳”,而且落实了 CDIO 教学体系中 I(实现)和 O(运作)。

4 结语

在贯彻执行“产教融合、校企合作、联合培养”指导思想过程中,学院先后与深圳杨森、苏州合润、黄河同力、河南铜牛等企业签订校外实习、产学研合作、联合培养等合作协议,完成共建 20 余个优质基地。通过与企业展开深度合作,师生团队充分融入企业生产和研发过程,改变了自我循环的局面,精准对接了行业需求和社会需求。经过多年的探索与实践,学生实践应用能力显著提升,企业满意度逐年提高,学生从“能用”向“管用”方向转变,整体实现了“好就业、就好业”。

参考文献 (References)

[1] 杨希. 三部门联合印发《关于引导部分地方普通本科高校向

应用型转变的指导意见》[J]. 陕西教育(高教), 2015(12): 33, 35.

- [2] 王秋玉. 地方本科院校深化产教融合运行机制研究[J]. 中国成人教育, 2017(13): 36-39.
- [3] 苏志刚. 应用型大学高水平建设特征的思考与实践[J]. 中国高等教育评论, 2018, 9(1): 121-128.
- [4] 夏建国. 深化产教融合 加快建设高水平工程应用型大学[J]. 中国高等教育, 2018(2): 25-26.
- [5] 王新武, 王北方. 新建本科院校转型发展中三位一体实践教学平台的建设与应用[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(11): 164-166, 216.
- [6] 钟丽萍, 施俊侠, 张文峰. 卓越工程师培养背景下机械类专业“3+1”应用型人才培养探究[J]. 科技管理研究, 2011, 31(16): 158-160, 165.
- [7] 李尧, 余五新, 左治江. 应用型高校“3+1”人才培养模式的实践探索[J]. 教育与职业, 2010(26): 24-25.
- [8] 张丽娟, 葛运旺, 王新武. 基于优质基地联合培养高素质应用型人才探索与实践: 以洛阳理工学院为例[J]. 改革与开放, 2018(14): 121-123.
- [9] 谷再秋, 于福. 独立学院“2+1+1”人才培养模式的构建[J]. 现代教育科学, 2010(3): 152-154.
- [10] 王文发, 武忠远, 侯业智. 软件工程专业“2+1+1”校企联合人才培养模式的探索与实践[J]. 中国大学教学, 2015(10): 25-28.
- [11] 曹俊武, 张军. 地方高校实行“2+1+1”合作办学模式培养应用型人才的探索[J]. 教育与职业, 2011(6): 29-30.
- [12] 石继连, 周逸群, 肖嫩群, 等. 中药学专业“2+1+1”人才培养模式的构建与实践[J]. 时珍国医国药, 2017, 28(6): 1463-1465.

(上接第 149 页)

- [5] RAMADEVI C, VIJAYAN V. Design of decoupled PI controller for quadruple tank system[J]. International Journal of Science and Research, 2012: 318-323.
- [6] SRINIVASARAO P, SUBBIAH P. Linear and nonlinear model predictive control of quadruple tank process[J]. International Journal of Computer Applications, 2013: 28-34.
- [7] 季冬冬, 陈虹, 许月亭, 等. MPC 控制器的 FPGA 实现及其应用[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2014, 32(4): 361-368.
- [8] 陈虹. 模型预测控制[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [9] 刘明星. 基于 FPGA/SOPC 的预测控制器研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [10] 胡云峰, 陈虹, 刘明星, 等. 基于 FPGA/SOPC 的预测控制器设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(6): 1241-1248.

- [11] NUMSOMRAN A, TIPSUWANPORN V, TRISUWANNAWAT T, et al. Design of PID controller for the modified quadruple-tank process using inverted decoupling technique[C]. International Conference on Control, Automation and Systems, 2011.
- [12] 杨艳丽. 三容实验系统的网络化控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [13] 张荣, 黄海莹, 李春枝, 等. 基于 NIOS II 软核处理器的嵌入式测试系统软硬件设计研究[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(2): 303-306.
- [14] 许芳. 快速模型预测控制的 FPGA 实现及其应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [15] 许月亭, 季冬冬, 许芳, 等. 基于 FPGA 的电子节气门控制器硬件设计与实现[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2014, 32(3): 229-238.