

文章编号: 1671-5896(2023)05-0793-08

四容水箱实验装置设计及其分散内模控制

于树友¹, 谭丽^{1,2}, 曹瑞丽¹, 侯成玉¹

(1. 吉林大学 通信工程学院, 长春 130012; 2. 长春大学 电子信息工程学院, 长春 130022)

摘要: 为提高自动控制相关课程的实验教学水平, 研制出一套四容水箱液位控制装置。该装置选用工业上常用的硬件设备, 软件部分设计了 Matlab/GUI (Graphical User Interface) 操作界面, 可允许在 Matlab 中直接编程实现对系统的控制。建立了四容水箱系统的数学模型, 并利用阶跃响应法辨识系统的模型参数。针对四容水箱系统设计了分散内模控制器, 仿真环节采用 Matlab/Simulink 完成, 实现了四容水箱系统液位的跟踪控制。实验结果表明, 采用内模控制器的四容水箱系统, 当其中一个水箱的水位发生变化时, 对其他水箱的水位影响很小, 系统具有满意的控制效果。在自控等相关课程中, 该装置可以作为一种新的实验设备, 并具有较好的实验教学效果。

关键词: 四容水箱系统; Matlab/GUI 操作界面; 内模控制; 分散控制

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI:10.19292/j.cnki.jdxxp.20230830.001

Design of Four-Tank System and Its Distributed Internal Model Control

YU Shuyou¹, TAN Li^{1,2}, CAO Ruili¹, HOU Chengyu¹

(1. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China;

2. College of Electronic and Information Engineering, Changchun University, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to improve the experimental teaching of relevant courses in automatic control, the design of a four-tank system is presented. The hardware is composed of general industrial components, while a Matlab programming environment is used for the software to directly control the system. A graphical user interface is also adopted to provide an easy way to run the system. The four-tank system model is built, and its parameters are identified based on a step response experiment. Furthermore, a distributed internal mode controller is designed for the liquid tracking control of the four-tank system. The results show that the four-tank system, using the internal mode controller, has little effect on the water level of the other tank when the water level of one tank changes, and the system has a satisfactory control effect. This experiment could play an important role in the teaching of relevant courses in automatic control.

Key words: four-tank system; Matlab/graphical user interface (GUI) operation interface; internal model control; distributed control

0 引言

多容水箱系统作为实验室典型的过程控制对象, 不仅可为自动化专业学生提供一个开放的实践平台, 同时也可用于验证先进控制算法, 为科研人员提供算法验证平台。多容水箱包括垂直或水平排列的两容水箱、垂直或水平排列的三容水箱、四容水箱等^[1]。其中四容水箱是具有时滞、非线性、耦合等

收稿日期: 2023-07-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1964202); 吉林大学课程思政“学科育人示范课程”基金资助项目(2021XYB118)

作者简介: 于树友(1974—), 男, 长春人, 吉林大学教授, 博士生导师, 主要从事预测控制、鲁棒控制研究, (Tel) 86-43504409392 (E-mail) shuyou@jlu.edu.cn。

特性的多输入多输出系统，而工业生产过程中的许多被控对象都可以抽象成四容水箱系统的数学模型^[2]，因此将四容水箱实验系统应用于自动控制相关课程的实验教学中，可以帮助学生更好地了解控制系统建模、掌握控制器设计等理论知识。

目前已有许多科研人员利用多容水箱进行了先进算法的验证，如预测控制^[3-5]、模糊控制^[6]、自抗扰控制^[7]和解耦控制^[8-9]等。贺宇^[2]基于四容水箱的最小相位系统结构设计了一种部分分散控制器，仿真结果表明，这种控制器具有与集中控制相近的效果，且控制结构简单。Bamimore 等^[3]采用两种人工神经网络方法，对三容水箱进行建模与预测控制，结果表明，模糊神经网络在调节时间上优于传统神经网络。贺宇等^[5]对双容水箱采用多模型自适应预测控制方法，并对其进行了仿真，仿真结果验证，与单模型相比多模型的响应速度更快，具有更好的性能。李志军等^[9]采用 PLC(Programmable Logic Controller)、模拟量输入、输出模块搭建了一套装置，并通过 OPC(Object linking and embedding for Process Control) 技术将 PLC 与仿真平台连接，从而实现水箱液位的控制。何迪^[10]提出了一种带有模糊解耦的神经网络预测控制策略，对不同的期望液位，均能达到较好的跟踪效果，且不需要改变系统内部参数，鲁棒性较强。然而这些研究仅限于仿真分析，并没有进行实物验证。赵一博^[11]利用 OPC 通讯技术将 Matlab 与 PLC/HMI(Human Machine Interface) 工业控制系统进行集成，开发出一套基于 Matlab/Simulink 实时网络控制的四容水箱实验系统，并分别验证了多变量内模 PID(Proportion Integral Differential) 控制算法和模型预测控制算法的有效性。研制出一套具有开放算法、操作简便、稳定可靠、人机交互界面友好等特点的四容水箱实验装置，对科研和教学均有很大助益。

笔者研究了一套自主设计开发的四容水箱实验装置，设计了分散内模控制器进行液位控制，该控制器具有结构相对简单、可调参数少、易于实现的优点。实验结果表明，该实验装置应用于自动化专业实验教学中，具有较好的教学和实验效果。

1 四容水箱实验装置设计

四容水箱实验装置设计分为硬件和软件 2 部分。图 1 给出了搭建的四容水箱实验装置的实物图，图 2 给出了四容水箱系统的物理模型示意图。该装置的 2 个水泵分别为水箱 1~4 供水，其中水泵 1 为水箱 1、4 供水，水泵 2 为水箱 2、3 供水。水箱 1~4 底部均设有 1 个排水阀，水箱 3 排出的水流入水箱 1 中，水箱 4 排出的水流入水箱 2 中。水箱 1、2 流出的水进入储水箱。管道内设有多个阀，通过调整阀门开启角度的大小，可实现对各水箱进、出水量的控制，能对水箱的性能进行相应的调整。

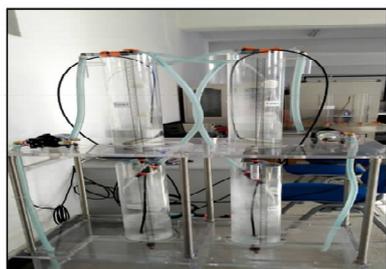


图 1 四容水箱实验装置实物图

Fig.1 Four tank experimental system

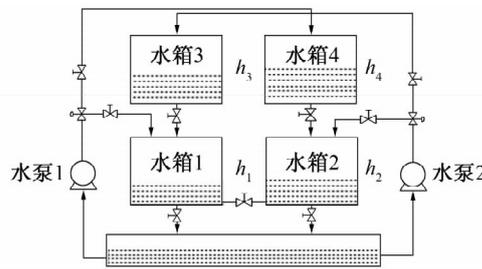


图 2 四容水箱系统物理模型示意图

Fig.2 Physical model of four tank system

1.1 实验装置硬件设计

选取工业上常用的硬件设备，主要包括工控机、PCI(Peripheral Component Interconnection) 数据采集卡、控制泵、差压传感器等。硬件主要选型及参数如表 1 所示。

图 3 为四容水箱系统控制流程图。该系统在工作过程中，由液位变送器对 4 个水箱的水位进行探测，并将其液位值输出为模拟电压。数据采集卡进行模数转换，然后通过 Matlab 编制的控制算法利用计算机对整个系统进行控制。控制器输出的控制量经过数据采集卡完成数模转换，通过控制直流电机调速器间接控制水泵的电压，进而实现水泵流量的精确控制。结合不同阀门开启关闭的配合情况，实现不同水箱水位的精确控制。

表 1 四容水箱实验装置硬件参数

Tab. 1 Parameters of four tank experiment device

名称	型号	主要特性参数
工控机	IPC 610L	处理器: Inter Core i3 3220 CPU@3.3 Hz; 主板: AIMB 701VG-00A1E
数据采集卡	PCI-1710U	16 通道单端输入或 8 通道差分输入, 2 通道模拟量输出
差压传感器	MPX5010DP	工作电压 5 V, 输出电压 0 ~ 5 V
水泵	SHRFlo 2088-343-435	内置止回阀, 最大流量 11.3 L/min
直流电机调速模块	DTS-V-10-24FS	控制电压 0 ~ 5 V

1.2 实验装置软件设计

软件系统主要通过 Matlab 编程实现。学生利用 Matlab/GUI 操作界面完成四容水箱系统液位的设置, 并实现数据采集和图形显示等不同的功能。

为使该实验装置可以提供一个开放性的算法验证平台, 选择采用模块化的方法完成四容水箱系统的软件设计。主要由参数设定、人机交互、控制功能、图形显示、算法选取和数据采集 6 个模块组成, 其总体结构如图 4 所示。每个模块的详细功能如下。

- 1) 参数设定模块。操作人员可在参数设定模块中, 设定基准液位的数值、采样时间和频率。
- 2) 人机交互模块。其是操作人员与四容式水箱系统进行互动的窗口, 其上设有其他 5 个功能模块的按键, 只需对相应按键进行操作即可实现相应的功能。该实验装置具有良好的人机交互画面, 能提高学生的学习兴趣, 具有良好的教学效果。
- 3) 控制功能模块。该功能模块实现了系统的初始化、启动、停止、退出等操作。
- 4) 图形显示模块。在人机交互界面中, 利用坐标轴的数据曲线显示, 能很容易地观测各个水箱中的水位变化情况及水泵 1、水泵 2 的流量情况, 并具有数值显示功能。
- 5) 算法选取模块。四容水箱系统可以实现多种控制算法, 操作者将不同的算法模块输入 Matlab 的算法程序中, 即可完成对四容水箱系统水位值的调整(用户可在 Matlab 中直接编程, 更改控制算法)。
- 6) 数据采集模块。实现对液位变送器模拟信号的采集, 以及对控制信号的输出, 通过人机交互画面, 完成数据存储和查看等功能, 为后续数据展开分析和处理提供了便利。

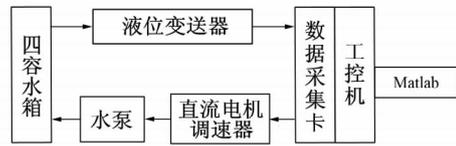


图 3 四容水箱系统控制流程

Fig. 3 Control flow of four tank systems

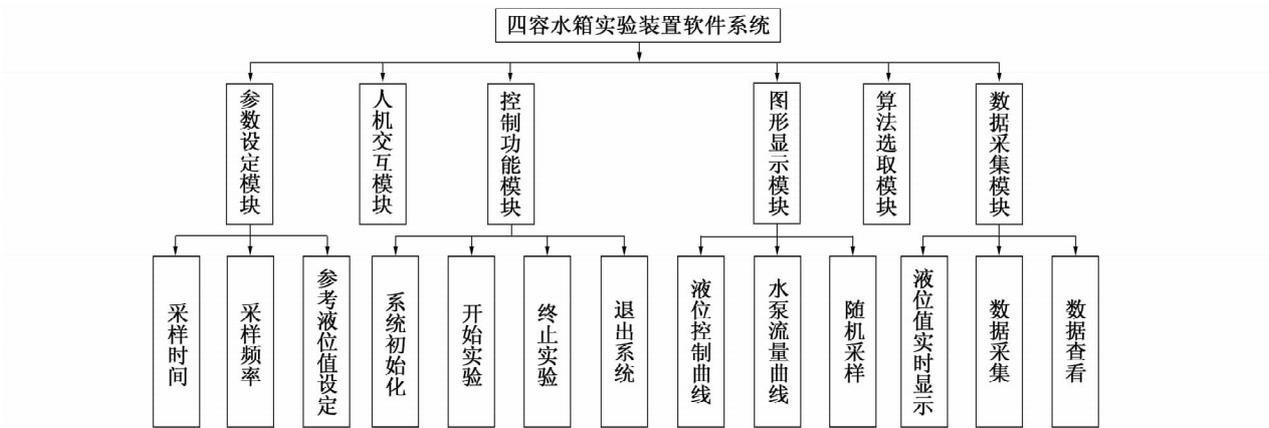


图 4 四容水箱系统软件系统结构图

Fig. 4 Software structure of four tank systems

为使四容水箱系统操作更简捷、友好, 利用 Matlab/GUI 设计了四容水箱系统的操作界面。如图 5 所示, 该操作界面主要包括控制、数据采集、图形显示和参数设定 4 个区域。各区域的详细功能如下。

1) 控制功能区域。该区域以启动、停止、退出为主要功能,完成对系统流程的控制。使用初始化功能,可将系统设定的参数写进注册表,并将实验装置的参数输入 Matlab 中。当按下停止键时,系统就会停止运行;当按下退出键时,离开本系统,同时清除本系统所设定的采样参数,但其数据会被自动保存。

2) 数据采集功能区域。该区域具有数据的存储、查看和打印功能。数据以*.mat和*.xls等格式保存在 Matlab 中,通过 Matlab 操作界面打开文件夹即可实现数据查看功能。

3) 图形显示区域。在该区域,学生通过观测系统状态的实时曲线,可以了解整个系统的控制流程,从而进一步加深对理论知识的理解。图形中有两个坐标轴以及复选框,通过对复选框的操作,可以实现水泵 1、水泵 2 流量变化曲线和水箱 1~4 水位高度变化曲线的显示。

4) 参数设定区域。该区域可针对数据采集卡的选型,设定不同的采样时间、采样频率和液位基准值,控制算法在下拉菜单中进行选取。

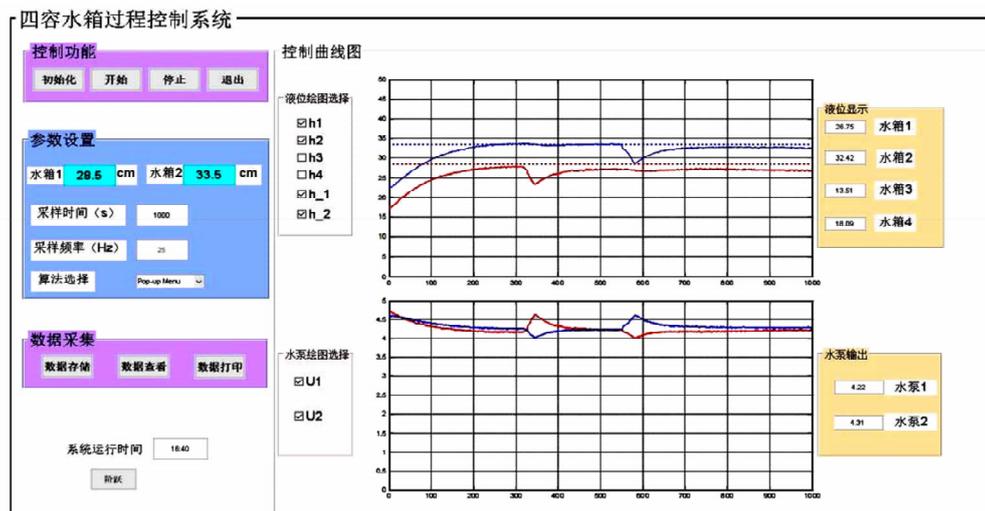


图 5 四容水箱系统操作界面

Fig. 5 Operation interface of four tank systems

2 四容水箱系统数学模型与参数辨识

2.1 四容水箱系统数学模型

根据动态物料平衡关系以及伯努力方程可得到四容水箱系统的非线性方程组^[12]:

$$\begin{aligned}
 A_1 \dot{h}_1 &= a_3 \sqrt{2gh_3} + \gamma_1 Q_1 - a_1 \sqrt{2gh_1}, & A_2 \dot{h}_2 &= a_4 \sqrt{2gh_4} + \gamma_2 Q_2 - a_2 \sqrt{2gh_2}, \\
 A_3 \dot{h}_3 &= -a_3 \sqrt{2gh_3} + (1 - \gamma_2) Q_2, & A_4 \dot{h}_4 &= -a_4 \sqrt{2gh_4} + (1 - \gamma_1) Q_1,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

其中 h_i 和 A_i 分别为 i 号水箱的液位高度和截面积, a_i 为 i 号水箱底部出水孔截面积, g 为重力加速度, 且满足 $Q_j = k_j v_j$, Q_j, v_j, k_j 分别为 j 号水泵的流量、控制电压和比例系数, $\gamma_j \in [0, 1]$ 。本文中, $i = 1, 2, 3, 4, j = 1, 2$ 。四容水箱系统参数如表 2 所示。

表 2 四容水箱系统参数

Tab. 2 Parameters of four tank systems

符号	数值	符号	数值
a_1, a_2	0.503 cm ²	A_1, A_2, A_3, A_4	176.33 cm ²
γ_2	0.548 5 cm ³ /s	a_3, a_4	0.283 cm ²
γ_1	0.532 7 cm ³ /s	g	981 cm/s ²

设系统的平衡点为 $(h_1^0, h_2^0, h_3^0, h_4^0, Q_1^0, Q_2^0)$, 定义状态量 $x = [h_1, h_2, h_3, h_4]^T$, 控制量 $u = [v_1, v_2]^T$, 输出量 $y = [h_1, h_2]^T$ 。将系统在平衡点处线性化, 其状态空间表达式如下:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} & 0 & \frac{A_3}{A_1 T_3} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_2} & 0 & \frac{A_4}{A_2 T_4} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_4} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{\gamma_2}{A_3} \\ 0 & \frac{1-\gamma_2}{A_3} \\ \frac{1-\gamma_1}{A_4} & 0 \end{bmatrix} \hat{\mathbf{u}}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}, \quad (2)$$

其中 $T_i = \frac{A_i}{a_i} \sqrt{\frac{2h_i^0}{g}}$ 。系统的传递函数为

$$\mathbf{G}(s) = \begin{bmatrix} \frac{c_1 \gamma_1}{A_1(1+sT_1)} & \frac{c_1(1-\gamma_2)}{A_1(1+sT_3)(1+sT_1)} \\ \frac{c_2(1-\gamma_1)}{A_2(1+sT_4)(1+sT_2)} & \frac{c_2 \gamma_2}{A_2(1+sT_2)} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中 $c_j = T_j k_j / A_j$ 。

2.2 四容水箱系统参数辨识

实验装置通过阶跃响应参数辨识法^[13]对四容水箱系统传递函数的参数进行辨识,首先要确定辨识模型结构,然后借助 Matlab 工具箱完成参数辨识。

以水泵 1、水泵 2 的电压控制量 v_1 、 v_2 作为输入量,水箱 1、水箱 2 的液位高度 h_1 、 h_2 作为输出量 y_1 、 y_2 ,则其对应的传递函数矩阵可写成:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

根据四容水箱系统的机理模型式(3), G_{11} 、 G_{22} 近似为一阶惯性滞后环节,因此选择辨识模型结构如下:

$$\frac{K \exp(-T_d s)}{1 + T_p s}. \quad (5)$$

G_{21} 、 G_{12} 近似为二阶环节,其模型结构如下:

$$\frac{K \exp(-T_d s)}{(1 + T_{p1} s)(1 + T_{p2} s)}. \quad (6)$$

通过辨识得到系统的传递函数如下:

$$G_{11} = \frac{7.1186}{107.11s + 1}, \quad G_{21} = \frac{8.6846}{(188.86s + 1)(51.519s + 1)} e^{-0.15s}, \quad (7)$$

$$G_{12} = \frac{7.4924}{(162.37s + 1)(72.269s + 1)}, \quad G_{22} = \frac{9.1065}{88.256s + 1}.$$

辨识得到传递函数 G_{11} 、 G_{12} 、 G_{22} 的时滞项 $T_d = 0$, 传递函数 G_{21} 的时滞项 $T_d = 0.15$, 由于时滞很小,设计控制器时可忽略不计,系统的传递函数如下:

$$G_{11} = \frac{7.1186}{107.11s + 1}, \quad G_{21} = \frac{8.6846}{(188.86s + 1)(51.519s + 1)}, \quad (8)$$

$$G_{12} = \frac{7.4924}{(162.37s + 1)(72.269s + 1)}, \quad G_{22} = \frac{9.1065}{88.256s + 1}.$$

3 四容水箱系统分散内模控制

分散内模控制又称为分布式内模控制或主回路内模控制^[14-15],将耦合回路视作对主回路的干扰,针对主回路,笔者提出一种基于单变量的内模控制器方案,该控制方案不需要对原系统进行解耦。

四容水箱系统为双输入双输出耦合系统,以分散内模控制的设计思想为基础,将水箱1水位受水泵1的影响,水箱2的水位受水泵2的影响作为主回路,将水箱2的水位受水泵1的影响,水箱1的水位受水泵2的影响视作干扰,以此设计控制器。控制结构如图6所示。图6中 $r_1(s)$ 、 $r_2(s)$ 为参考输入, $C_{IMC1}(s)$ 、 $C_{IMC2}(s)$ 为内模控制器, $G_{11}(s)$ 、 $G_{22}(s)$ 为过程模型, $P_{11}(s)$ 、 $P_{21}(s)$ 、 $P_{12}(s)$ 、 $P_{22}(s)$ 为被控制对象, $y_1(s)$ 、 $y_2(s)$ 为输出。

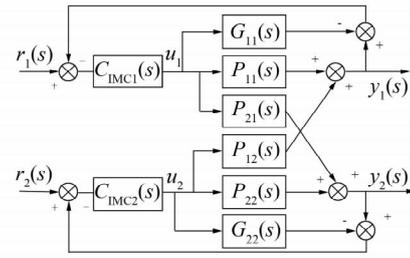


图6 四容水箱系统分散内模控制结构

Fig. 6 Distributed internal model control structure of four tank systems

假定过程模型与实际被控对象匹配,即 $P_{jj}(s) = G_{jj}(s)$ 。设计内模控制器 $C_{IMCj}(s)$ 分为两步。

第1步:模型分解。将过程模型 $G_{jj}(s)$ 分解成2部分:

$$G_{jj}(s) = G_{jj+}(s) G_{jj-}(s), \quad (9)$$

其中 $G_{jj+}(s)$ 为过程模型 $G_{jj}(s)$ 中的不可逆部分, $G_{jj-}(s)$ 为过程模型 $G_{jj}(s)$ 中可逆部分。由式(8)可知四容系统过程模型中不含有时滞、惯性环节及右半平面零点,即 $G_{jj+}(s) = 1$,所以

$$G_{11-}(s) = G_{11} = \frac{7.1186}{107.11s + 1}, \quad (10)$$

$$G_{22-}(s) = G_{22} = \frac{9.1065}{88.256s + 1}^\circ \quad (11)$$

第2步:设计 C_{IMCj} 。内模控制器结构如下:

$$C_{IMCj}(s) = G_{jj-}^{-1}(s) f_j(s), \quad (12)$$

其中 $f_j(s) = \frac{1}{(\alpha_j s + 1)^{n_j}}$, α_j 为滤波器参数, n_j 为滤波器阶数。

滤波器阶数的选择应保证 $C_{IMCj}(s)$ 正则有理。在设计内模控制器时,滤波器中的参数 α_j 是唯一可整定的参数,该方法不仅能有效地消除系统中的随机扰动,而且能有效地解决模型失配的问题。引入滤波器 $f_j(s)$ 使控制器具有较好的控制质量和较强的鲁棒性。因此,根据式(12)设计内模控制器如下:

$$C_{IMC1}(s) = G_{11-}^{-1}(s) f(s) = \frac{107.11s + 1}{7.1186(\alpha_1 s + 1)^{n_1}}, \quad (13)$$

$$C_{IMC2}(s) = G_{22-}^{-1}(s) f(s) = \frac{88.256s + 1}{9.1065(\alpha_2 s + 1)^{n_2}}^\circ \quad (14)$$

为保证内模控制器正则有理,这里取滤波器的阶数 $n_1 = n_2 = 1$,则式(13),式(14)可改写如下:

$$C_{IMC1}(s) = \frac{107.11s + 1}{7.1186(\alpha_1 s + 1)}, \quad (15)$$

$$C_{IMC2}(s) = \frac{88.256s + 1}{9.1065(\alpha_2 s + 1)}, \quad (16)$$

其中 α_1 和 α_2 的大小可调,其取值越小,系统的响应时间越短,相反系统的稳定性和鲁棒性越好。

4 四容水箱系统分散内模控制仿真与实验

为检验所设计的实验装置的合理性以及分散内模控制器的有效性,笔者分别进行了Matlab仿真与实物实验。

分散内模控制的仿真结果如图7所示。最初的水位设置值为水箱1的26 cm和水箱2的32.5 cm。在时间为910 s时,水箱1的水位值跳变到30 cm;在时间为1380 s时,液面水位值跳变到26 cm。在时间为700 s时,水箱2的水位值跳变到37.5 cm;在时间为1200 s时,液面水位值跳变到32.5 cm。如图7所示,分散式内模控制可以迅速追踪四容水箱系统设置的水位值,而不会出现超调。同时,该系统还可以对所设置的水位值进行快速跟踪,且一个水箱不同的液面水位设置值,对另一个水箱的影响

很小,因此,该系统具有良好的抗干扰性。

分散内模控制的实验结果如图8所示,与仿真情况类似,水箱1和水箱2的液位设定值与仿真相同。从图8可知,四容水箱系统采用分散内模控制时,在170 s内能跳变到所设置的水位值,并且两个水箱之间的液位变化对彼此影响很小,系统具有较好的控制结果。

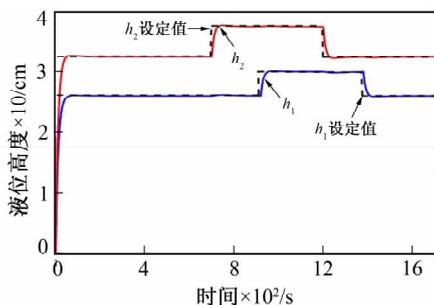


图7 四容水箱系统液位高度(仿真)

Fig. 7 Liquid levels of four tank systems (simulation)

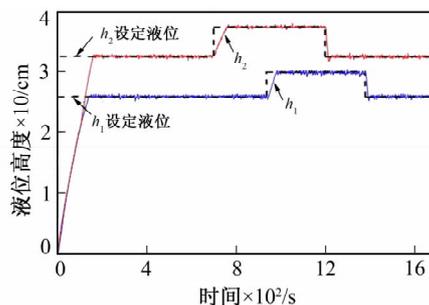


图8 四容水箱系统液位高度(实验)

Fig. 8 Liquid levels of four tank systems (experiment)

5 结 语

笔者自主研发设计的四容水箱实验装置具有操作简单、算法开放、性能稳定的特点。控制算法可直接在 Matlab 中编程,简化了对系统的操作。根据四容水箱系统辨识模型设计了分散内模控制器,在实验装置上进行液位控制实验。仿真和实验结果表明,内模控制器具有良好的动态性能和抗干扰能力,同时也验证了该四容水箱实验装置设计合理,达到了预期的设计目标。实验结果表明,该实验装置具有操作简单、稳定可靠的优点,在实验教学的应用中,取得了如下教学效果: 1) 熟练掌握 Matlab 的使用方法和利用其进行系统仿真和设计; 2) 掌握四容水箱数学建模方法及控制器的设计步骤,为学生日后设计类似控制系统打下基础; 3) 熟悉工控机、采集卡、传感器等常用的实验硬件,掌握实验技巧和流程。

学生对在计算机上完成的实验没有直观感受,而对亲自动手的实验会倾入极高的热情和积极性,四容水箱实验装置的研发能不断促进学生在实践中发挥主观能动性,进一步提高教学质量和教学效果。这种实验形式既能提高学生的科研兴趣,又能提升学生的动手操作能力,同时还能培养学生的团队合作精神。

参考文献:

- [1] KORTELA J. Model-Predictive Control for the Three-Tank System Utilizing an Industrial Automation System [J]. ACS Omega, 2022, 7(22): 18605-18611.
- [2] 贺宇. 四容水箱的多变量模型预测控制方法研究 [D]. 北京: 北方工业大学电气与控制工程学院, 2022.
HE Y. Multivariable Model Predictive Control Method for Quadruple-Tank [D]. Beijing: School of Electrical and Control Engineering, North China University of Technology, 2022.
- [3] BAMIMORE A, OSINUGA A B, KEHINDE-ABAJO T E, et al. A Comparison of Two Artificial Neural Networks for Modelling and Predictive Control of a Cascaded Three-Tank System-ScienceDirect [J]. IFAC-Papers Online, 2021, 54(21): 145-150.
- [4] MENG X X, YU H S, ZHANG J, et al. Disturbance Observer-Based Feedback Linearization Control for a Quadruple-Tank Liquid Level System [J]. ISA Transactions, 2021, 122: 146-162.
- [5] 贺宇, 吴力普. 基于多模型自适应预测控制的双容水箱液位控制系统研究 [J]. 工业控制计算机, 2022, 35(4): 26-28.
HE Y, WU L P. Research on Dual-Capacity Water Tank Level Control System Based on Multi-Model Adaptive Predictive Control [J]. Industrial Control Computer, 2022, 35(4): 26-28.
- [6] BHANDARE D S, KULKARNI N R, BAKSHI M V. An Intelligent Self-Tuning Fuzzy-PID Controller to Coupled Tank Liquid Level System [J]. International Journal of Information Technology, 2022, 14(4): 1747-1754.
- [7] GURJAR B, CHAUDHARI V, KURODE S. Parameter Estimation Based Robust Liquid Level Control of Quadruple Tank

- System-Second Order Sliding Mode Approach [J]. *Journal of Process Control*, 2021, 104: 1-10.
- [8] PRADHAN J K, GHOSH A. Design and Implementation of Decoupled Periodic Control Scheme for a Laboratory-Based Quadruple-Tank Process [J]. *Journal of Systems and Control Engineering*, 2022, 236(1): 212-224.
- [9] 李志军, 贺庆, 郭富民. 多变量四容水箱控制系统实验装置的设计 [J]. *制造业自动化*, 2013, 35(10): 122-125.
LI Z J, HE Q, GUO F M. Design on Laboratory Apparatus of Multivariate Quadruple Tank Control System [J]. *Manufacturing Automation*, 2013, 35(10): 122-125.
- [10] 何迪. 四容水箱神经网络预测控制 [D]. 北京: 北方工业大学电气与控制工程学院, 2011.
HE D. The Neural Network Predictive Control of Quadruple Tank [D]. Beijing: School of Electrical and Control Engineering, North China University of Technology, 2011.
- [11] 赵一博. 四容水箱过程控制装置设计与实现 [D]. 北京: 北方工业大学电气与控制工程学院, 2011.
ZHAO Y B. Design and Implementation of Process Control Device for Quadruple Tank [D]. Beijing: School of Electrical and Control Engineering, North China University of Technology, 2011.
- [12] 侯成玉. 四容系统实验装置设计及算法研究 [D]. 长春: 吉林大学通信工程学院, 2016.
HOU C Y. Four-Tank System Equipment Design and Algorithm Research [D]. Changchun: College of Communication Engineering, Jilin University, 2016.
- [13] CHEN P, ZHANG Y F, WANG J H, et al. Adaptive Internal Model Control Based on Parameter Adaptation [J]. *Electronics*, 2022, 11(23): 1-20.
- [14] WAFI M K, WIDJANTORO B L. Distributed Estimation with Decentralized Control for Quadruple-Tank Process [J]. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 2022, 9(1): 301-307.
- [15] GAO W, MOHAMMED MUNUDDIN, DONALD C WUNSCH, et al. Reinforcement Learning-Based Cooperative Optimal Output Regulation via Distributed Adaptive Internal Model [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2022, 33(10): 5229-5240.

(责任编辑: 刘俏亮)