

啤酒罐装机储液缸内液位控制系统设计

李晨晓, 左小五
(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 为了提高产业中啤酒罐装的质量和效率, 精准控制储液缸内液位。**方法** 利用双容水箱建立实验数学模型, 在PID串级控制和DMC控制等2种算法下仿真, 并进行参数整定, 对比分析仿真结果。应用OPC技术实现King ACT和组态王数据通信来设计监控界面。**结果** DMC控制汲取PID的快速性和串级控制响应快的特点, 使得整体具有响应快、稳定性好和超调量小的特性。监控界面可以实时形象地反映控制过程。**结论** 该控制系统控制性能佳, 鲁棒性强, 且成本较低, 可用来提高啤酒罐装机灌装效率。

关键词: 双容水箱; 液位; 预测控制; 组态王; OPC

中图分类号: TB486 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)23-0167-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.23.025

Design of Liquid Level Control System in the Storage Cylinder of Beer Filling Machine

LI Chen-xiao, ZUO Xiao-wu

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the quality and efficiency of beer canning in the industry, so as to precisely control the liquid level in liquid storage tank. The mathematical model of the experiment was established with the double-holding tank. The simulation was carried out under the two algorithms of PID cascade control and DMC control, and the parameters were tuned. The simulation results were compared and analyzed. OPC technology was applied to achieve the data communication between King ACT and King View, so as to design the monitoring interface. The results showed that, DMC control absorbed such characteristics as PID rapidity and fast response of cascade control, which made the whole system featured by fast response, good stability and small overshoot. The monitoring interface could visually reflect the control process in real time. Characterized by good control performance, strong robustness and low cost, the control system can be used to improve the efficiency of beer canning machine.

KEY WORDS: dual-holding tank; liquid level; predictive control; King View; OPC

目前, 灌装设备已呈集成化发展, 一系列动作可在同台设备高速完成。储液缸内液位是一个重要参数, 关系灌装机整体效率。传统灌装机储液缸内液位均采用PID控制, 但由于工业过程中大惯性、大延时特性的存在, 使得普通反馈控制和PID算法类的修正作用滞后严重, 从而极大恶化了控制系统的品质^[1]。

很久以来, 人们都在设法改善这种现象, 例如Smith补偿就是其中之一, 但其要求事先知道过程的参数模型, 给应用带来了不便^[2]。自适应控制应用于时变系统性能佳, 它是辨识与控制的结合, 是提高品质和鲁棒性的有效手段, 但其在工艺系统发生故障, 如卡泵卡阀、传感器等故障时, 容易产生误操作^[3]。神经网络

收稿日期: 2019-05-26

作者简介: 李晨晓(1995—), 女, 上海理工大学硕士生, 主攻控制工程等。

通信作者: 左小五(1971—), 男, 上海理工大学讲师, 主要研究方向为嵌入式系统等。

络等智能控制则成本高、门槛高,实际加工生产中实用性不强。

基于上述原因,文中研究预测控制,其采用多步测试、滚动优化和反馈校正等控制策略,较适用于不易建立精确数字模型且较复杂的工业生产过程^[4]。全过程采用仿真环境来进行研究分析,以双容水箱为研究对象,设计控制策略,提高灌装过程中的液位控制性能,搭建实时监控画面,对于啤酒罐装有一定现实意义。

1 双容水箱液位控制系统模型设计

1.1 控制系统组成

液位控制系统也是一种自动控制系统,双容水箱控制系统的组成见图 1。

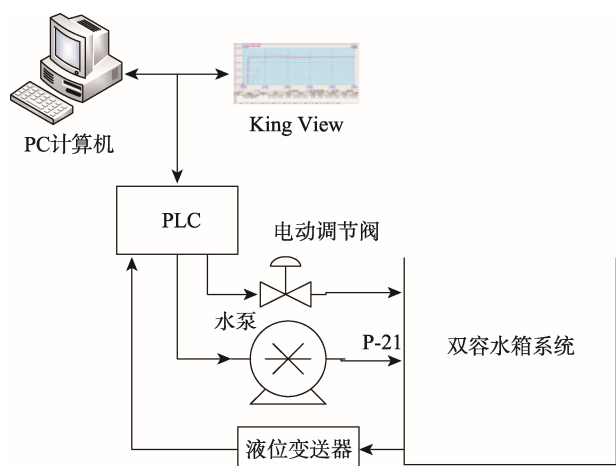


图 1 双容水箱控制系统的组成

Fig.1 Composition of control system for dual-holding tank

双容水箱控制系统是由多个不同功能的模块组成:PLC 是控制器,当其自身线路连接改变后,可改变被控对象;双容水箱是此过程的被控对象,被控量是其液位;PC 计算机可设计复杂算法、设定不同参数、采集数据以及实时监控;组态王可建立监控画面,实时监控系统运作,其中利用 OPC 技术实现组态王和 King ACT 之间的通讯,保证工作进行顺利。

1.2 双容水箱系统建模

单容水箱模型见图 2,其中:LT 为液位传感器; h_1 为此水箱的被控液位; q_1 为进水流量, q_2 为出水流量;FV1 为电动调节阀,进水量由此来控制;F1 为手动调节阀,出水量由其手动控制^[5]。师展^[5]、李小平^[6]对液位控制系统建模做出了详细描述。

设比例系数为 K ,液位高度为 h ,液阻为 R ,水箱横截面积为 B ,可得单容水箱传递函数为:

$$\frac{H(s)}{U(s)} = \frac{K_u R}{BRs + 1} \quad (1)$$

双容水箱系统见图 3。图 3 中新增量 h_2 为下水箱的液位高度, q_3 为下水箱出水量。 q_1 和 q_2 则分别为上水箱进水量和出水量; h_1 表示上水箱液位高度。

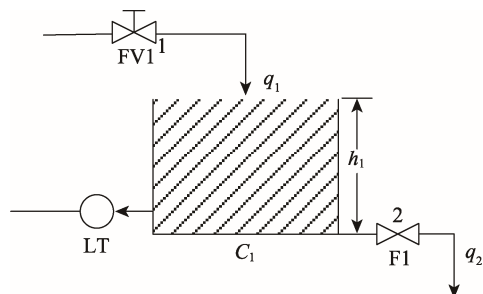


图 2 单容水箱示意

Fig.2 Schematic diagram of single-holding tank

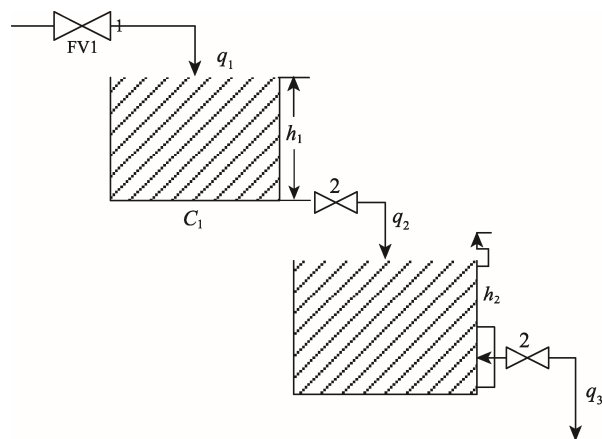


图 3 双容水箱示意

Fig.3 Schematic diagram of double-holding tank

双容水箱传递函数为:

$$\frac{H_2(s)}{Q_1(s)} = \frac{K_u R_2}{(1 + BR_1 s)(1 + BR_2 s)} \quad (2)$$

上水箱规格为 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$,下水箱规格为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 。液位高度标准值设定为 0.3 m ,实际传递函数为:

$$W_0 = \frac{125}{(20s + 1)(31.25s + 1)} \quad (3)$$

虽然阶梯式双容水箱有一定的自平衡能力,但其稳态误差过大,稳定性差^[7]。另外,此系统是开环系统,输出误差若出现,便无法补偿,且抗干扰性较差,故难以达到稳态,需要加入相应的控制器进行校正,满足要求的控制性能指标。

2 双容水箱液位控制系统硬件设计

2.1 控制系统的硬件组成及工作流程

水箱系统工作原理见图 4。PLC 与计算机形成通信,作为控制器发送指令;控制信号传输给电动调节

阀，控制上水箱的进水流量；流量的变化被液位传感器感知，并转换为电流或者电压信号传入 PLC，达到实时监控的效果^[8]。

2.2 硬件电路设计

选用 S7-200PLC 作为主控制器，其硬件接线设计见图 5。其 I/O 地址分配见表 1。

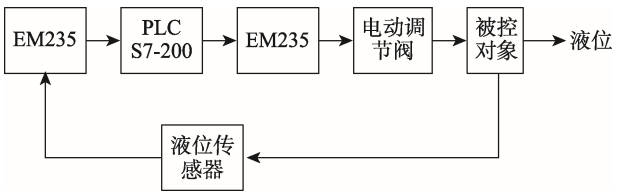


图 4 水箱系统工作原理
Fig.4 Working principle of water tank system

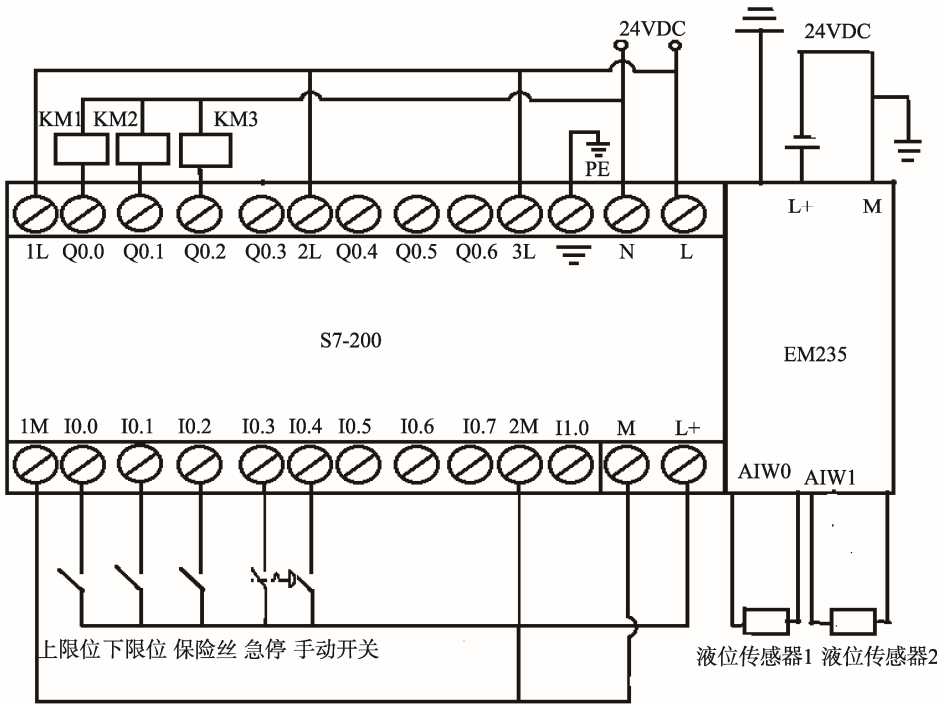


图 5 硬件接线
Fig.5 Hardware wiring

表 1 模拟 I/O 分配
Tab.1 Analog I/O allocation

I0.0	I0.1	I0.2	I0.3	I0.4	Q0.0	Q0.1	Q0.2	AIW0	AIW1
上限位	下限位	保险丝	急停	手动	报警灯	调节阀	水泵	传感器 1	传感器 2

3 双容水箱液位控制律以及监控界面设计

3.1 基于 PID 串级的液位控制律设计

控制系统中，在不能通过改变某些确定参数来适应系统整体要求的情况下，PID 控制是首要选择^[9]。运用 PID 控制律进行控制过程中，通过参数整定可获得效果更佳的控制律^[10]。参数整定思路：利用 Matlab 仿真功能中的线性分析工具，对系统加入 2 个零点和 1 个极点；调节系统根轨迹来找到最佳效果的响应，查看此时的参数，即最优控制的参数。

依照上述参数整定方法，先在内环中加入比例控制，见图 6。

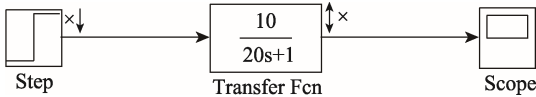


图 6 内环仿真模型
Fig.6 Inner loop simulation model

双容水箱系统为二阶系统，二阶系统处于欠阻尼状态，即阻尼系数大于 0 小于 1 时，综合性能较佳。为平衡超调量和调节时间，可根据物理意义，在根轨迹图中从负实轴开始顺时针移动 45°，调节主导极点到此角度线上（或逼近此线），即最佳阻尼比，计算得值为 0.707。依照上述过程并协调幅相曲线操作后，Matlab 工具箱中的控制界面见图 7。

获得比例系数 $K_p=7.5576$ 。

按照参数整定方法，再在外环中加入 PID 控制，见图 8。

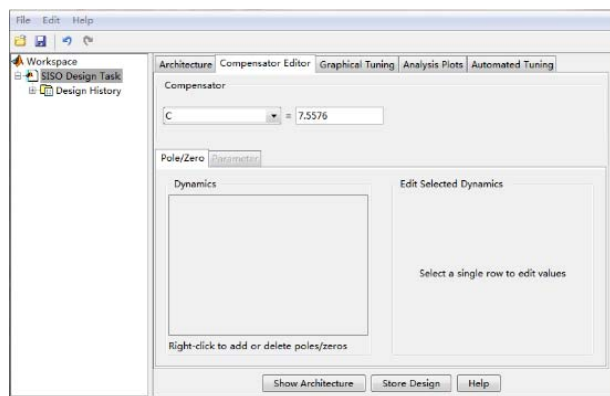


图7 比例控制界面

Fig.7 Proportional control interface

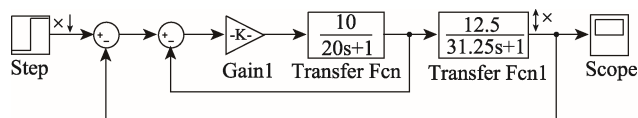


图8 外环仿真模型

Fig.8 External loop simulation model

调节后的根轨迹、幅频曲线和相频曲线见图9—11, 相应的响应曲线见图12。

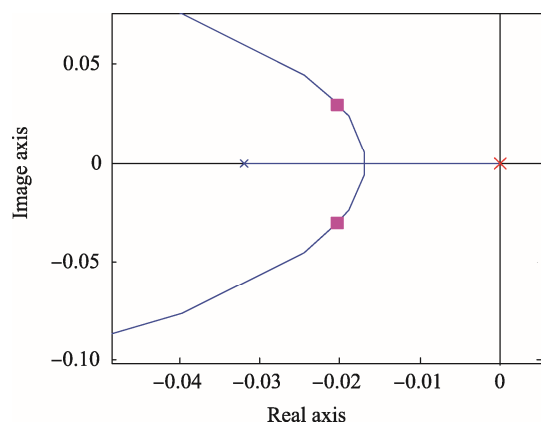


图9 根轨迹曲线

Fig.9 Root locus curve

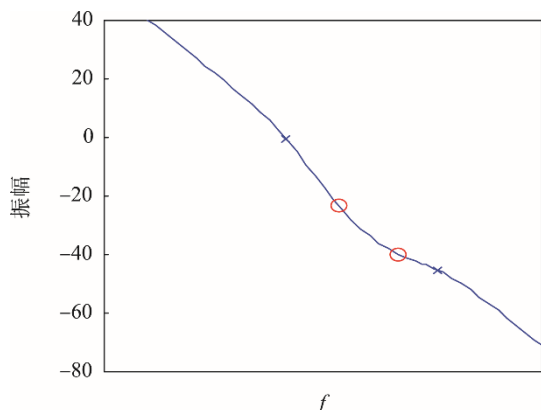


图10 幅频曲线

Fig.10 Amplitude-frequency curve

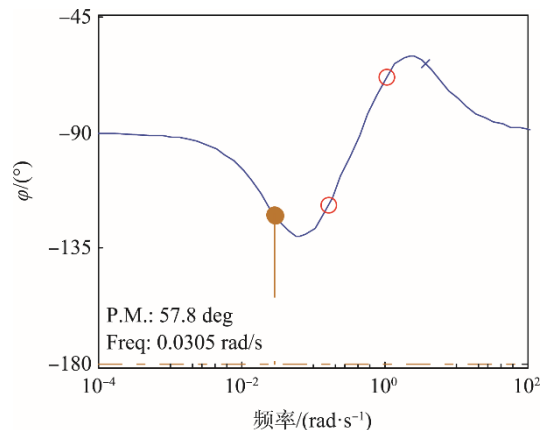


图11 相频曲线

Fig.11 Phase frequency curve

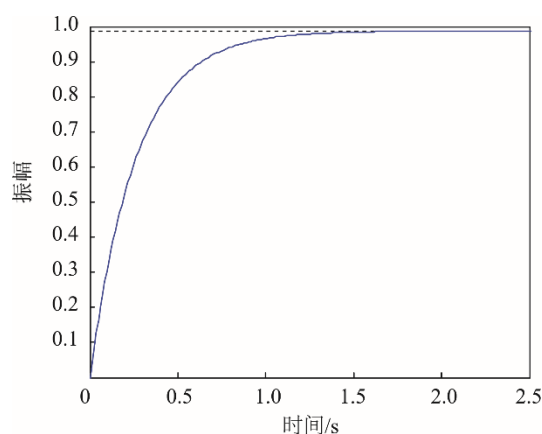


图12 PID 串级调节响应曲线

Fig.12 PID cascade adjustment response curve

此时, Matlab 工具箱中的控制界面见图13。获得比例、积分、微分系数分别为: $K_p=0.022\ 916\ 56$, $K_i=0.003\ 360\ 2$, $K_d=0.018\ 239\ 17$ 。将相应的PID控制加入到系统中, 仿真见图14。响应曲线见图15。

由响应曲线得, 输出最大值为0.3377 m, 计算出超调为12.57%, 超调偏大, 难以满足较高的工艺要求, 稳定性较差; 调节时间为138.885 s, 达到稳态时

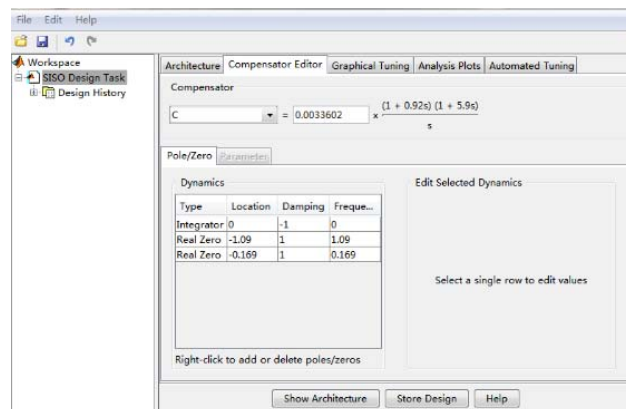


图13 PID 串级控制界面

Fig.13 PID cascade control interface

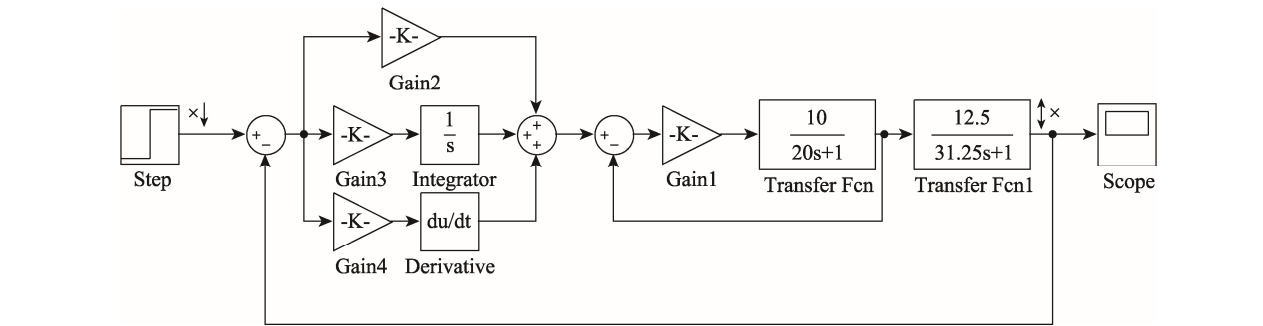


图 14 PID 串级控制仿真模型
Fig.14 PID cascade control simulation model

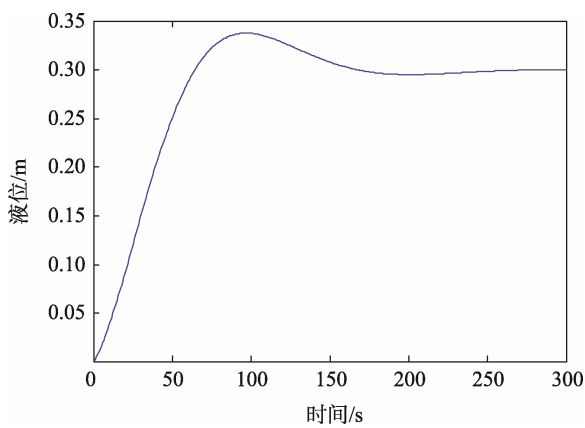


图 15 PID 串级控制响应曲线
Fig.15 PID cascade control response curve

间偏长，快速性一般，动态特性较差。整体控制性能仍需进一步提高。

3.2 基于模型预测控制的液位控制律设计

预测控制是一种控制性能较佳的算法，它参数计算较为简单，鲁棒性强且控制精度较高^[11]。其中动态矩阵控制不是传统的全局优化，而是反复地在线滚动优化，期间不断利用邻域实际输出值来进行反馈校正^[12]，以此来解决参数的时变性带来的二次扰动，增强了鲁棒性。将动态矩阵控制算法与串级控制相结合，既克服了单纯 PID 鲁棒性差的缺点，又克服了单纯 DMC 的抗干扰能力弱的缺点^[13]。选用 MATLAB 中的预测控制工具箱进行控制器设计。导入 DMC 数学模型后，设置输入输出变量属性，设置仿真场景，见图 16。仿真结果见图 17，控制作用见图 18。

导出控制及保存：将控制器导出到工作区，在 Simulink 仿真中加入预测控制器，见图 19，仿真结果见图 20。

由图 20 响应曲线可得，响应的最大值为 0.3035 m，超调量=1.167%，较串级控制超调量 12.57%大大减小，稳定性提高；调节时间为 19.7 s，较串级控制调节时间 138.885 s 大大缩短，快速性较高，具有更好的静态和动态特性。由此可见，利用预测控制工具箱进行的预测控制效果极佳且简单有效，整体控制性能

优于 PID 以及串级控制，有很好的发展前景，对于提高工业效率有重要的实用价值。至此，预测控制实验仿真结束，可见控制效果较好，符合理论推理。

3.3 基于 King ACT 与组态王的液位监控界面设计

OPC 是一个过程控制领域的工业标准，可为自动化过程控制领域的用户提供标准接口及数据等服

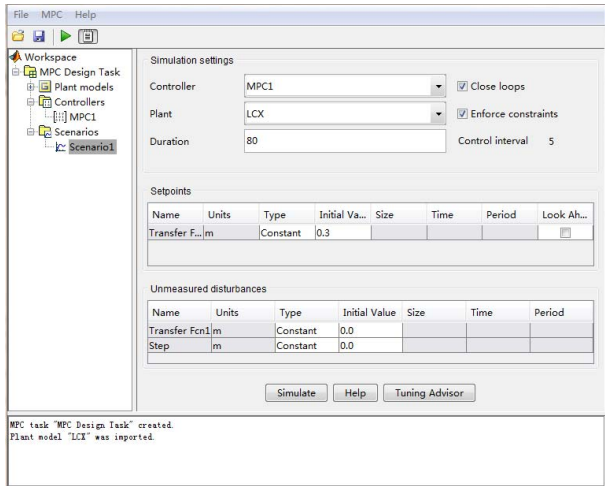


图 16 仿真场景
Fig.16 Simulation scene

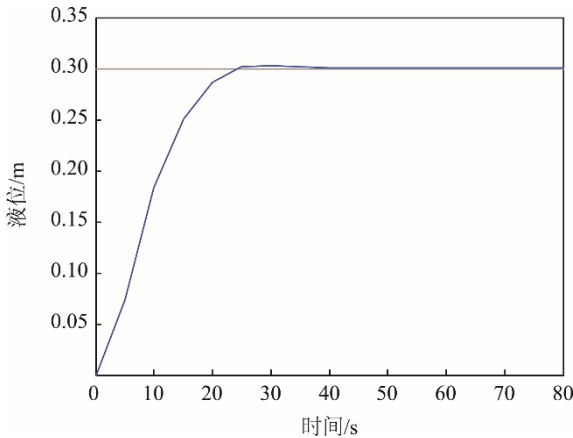


图 17 预测控制响应曲线
Fig.17 Predictive control response curve

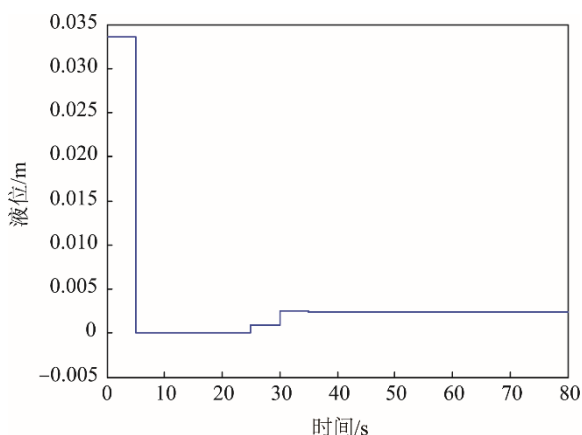


图 18 控制作用
Fig.18 Control action

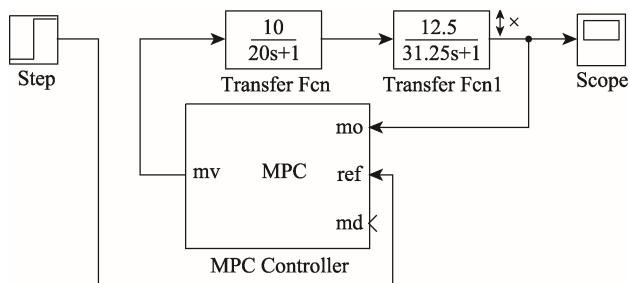


图 19 预测控制仿真模型
Fig.19 Predictive control simulation model

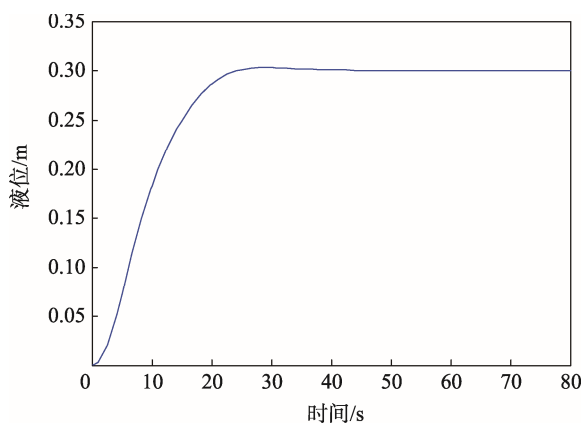


图 20 预测控制系统响应曲线
Fig.20 Response curve of predictive control system

务^[14]。King View 组态王是一种工业中通过建立人机界面来实现状态监控的软件^[15]。利用 OPC 技术, 可实现 PLC 与 King View 组态王软件之间的通信。

以 PID 控制为例来设计监控系统, 见图 21。

完成监控系统搭建后, 启动仿真, 组态王中显示动画效果。双容水箱液位控制的动态监控界面见图 22, 其中比例与积分微分参数、标准液位等均可在线修改, 直观监控的同时又提高了控制效率。

历史趋势曲线可实时显示水箱液位中的数据, 系统输出的实时响应曲线见图 23。

如图 23 所示, 较细曲线是下水箱的液位值曲线, 较粗水平线是设定值。在实际仿真过程中, 可以观察到液位值曲线随时间实时动态变化, 结合图 22 所示的监控画面, 形象直观, 且控制参数可直接修改, 方便维护人员远程监控系统运作。

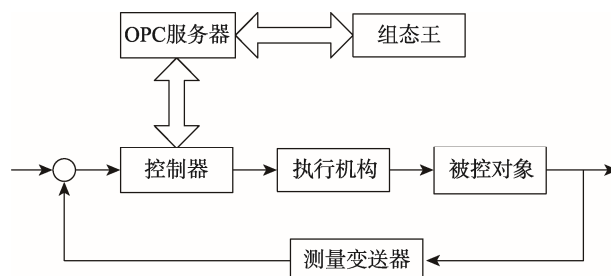


图 21 监控系统框图
Fig.21 Block diagram of monitoring system

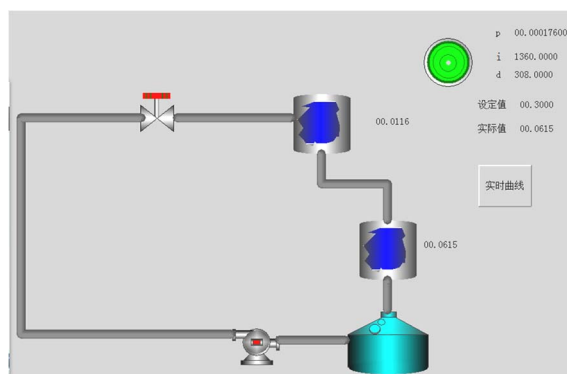


图 22 监控画面
Fig.22 Monitored picture

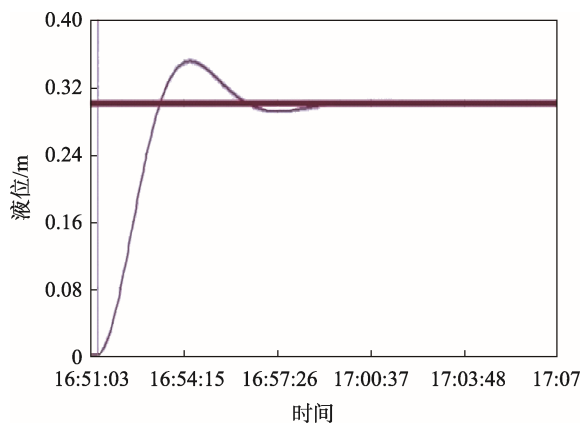


图 23 液位曲线
Fig.23 Liquid level curve

4 结语

双容水箱液位控制系统作为该次实验的研究对象, 具有耦合、非线性以及大滞后等特征, 使得对其建立精确的数学模型十分困难, 传统的 PID 控制技术实现效果及控制性能不佳, 改用预测控制的设计方法进行了实验仿真, 控制性能得到大幅提高, 理论推测

得到了实质验证。但是,实际生产过程是十分复杂多变的,该设计在细节方面还有许多不足,需要进一步研究:在控制过程中不免存在外界的干扰,这将会引起模型变化,此算法的鲁棒性在要求较高的系统中仍不达标;其次,在实际生产中,大部分控制系统是非线性的,但目前大多数控制均是围绕一线性化点附近来设计算法,此操作具有很大局限性,对此,研究人员应逐渐重视模型建设,对于参数设定及调节做到更加灵活,使得预测控制技术可以适应更多的场合;另外,此次研究皆是在仿真实验中分析讨论,因研究条件限制并未进行实际工程测试,实操性和说服力不足,后期应补充实际试验以得验证。

参考文献:

- [1] 席裕庚. 预测控制(第2版)[M]. 上海: 国防工业出版社, 2012: 4—16.
XI Yu-geng. Predictive Control[M]. Shanghai: National Defense Industry Press, 2012: 4—16.
- [2] 刘浩. 广义预测算法在三容水箱液位过程控制中的应用[J]. 工业仪表与自动化装置, 2015, 21(5): 21—24.
LIU Hao. Application of Generalized Predictive Algorithms in Process Control of Three-tank Water Level [J]. Industrial Instruments and Automation Devices, 2015, 21(5): 21—24.
- [3] DUNG T A, THANG N T. Adaptive Controller of the Major Functions for Controlling a Drive System with Elastic Couplings[J]. Energies, 2018, 11(3): 513.
- [4] COPP D A, HESPANHA J P. Simultaneous Nonlinear Model Predictive Control and State Estimation[J]. Automatica, 2017, 77: 143—154.
- [5] 师展. 基于预测控制算法的三容水箱液位控制[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2013.
SHI Zhan. Liquid Level Control of Three-tank Water Tank Based on Predictive Control Algorithm[D]. Shenyang: Shenyang University of Science and Technology, 2013.
- [6] 李小平. 液位控制系统建模及其控制算法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
LI Xiao-ping. Research on Modeling and Control Algorithms of Liquid Level Control System[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [7] 罗庚兴. 基于 PLC 的液位模糊自适应 PID 控制研究与应用[J]. 机床与液压, 2012, 40(14): 107—111.
LUO Geng-xing. Research and Application of Fuzzy Self-adaptive PID Control of Liquid Level Based on PLC[J]. Machine Tool and Hydraulic Pressure, 2012, 40(14): 107—111.
- [8] 李立新. 基于自适应控制的三容水箱液位控制[J]. 科技通报, 2015, 31(12): 105—106.
LI Li-xin. Level Control of Three-tank Water Tank Based on Adaptive Control[J]. Bulletin of Science and Technology, 2015, 31(12): 105—106.
- [9] 盖文东, 张婧, 赵伟志. 基于 OPC 技术的过程控制仿真实验设计[J]. 实验技术与管理, 2015, 32(10): 132—135.
GAI Wen-dong, ZHANG Jing, ZHAO Wei-zhi. Design of Process Control Simulation Experiment Based on OPC Technology[J]. Experimental Technology and Management, 2015, 32(10): 132—135.
- [10] MUSKINJAN, RIZNARM. Optimized PID Position Control of a Nonlinear System Based on Correlating the Velocity with Position Error[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015: 1—11.
- [11] 周荣强. 双容水箱液位 DMC-PID 串级控制仿真研究[J]. 自动化仪表, 2011, 32(10): 63—65.
ZHOU Rong-qiang. Simulation Study on DMC-PID Cascade Control of Double-tank Level[J]. Automation Instrument, 2011, 32(10): 63—65.
- [12] COPP D A, VAMVOUDAKIS K G, HESPANHA J P. Distributed Output-feedback Model Predictive Control for Multi-agent Consensus[J]. Systems & Control Letters, 2019, 127(5): 52—59.
- [13] 杨奕飞, 吴艳艳, 谈敏佳. DMC-PID 串级控制在拖轮动力定位系统中的应用[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(5): 141—144.
YANG Yi-fei, WU Yan-yan, TAN Min-jia. Application of DMC-PID Cascade Control in Tugboat Dynamic Positioning System[J]. Machinery Manufacturing and Automation, 2018, 47(5): 141—144.
- [14] 樊冲. 工业过程 PLC 回路控制软件功能测试平台的设计与开发[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
FAN Chong. Design and Development of Functional Test Platform for Industrial Process PLC Loop Control Software[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [15] 陈曦. 基于 PLC 和组态王的单容水箱液位定值控制实验[J]. 湖南理工学院学报, 2011, 24(1): 76—78.
CHEN Xi. Control Experiment of Liquid Level of Single Tank Based on PLC and Kingview[J]. Journal of Hunan Institute of Technology, 2011, 24(1): 76—78.