



## 比值控制实验仿真平台建设

黄立华, 高国刚, 贺 娇

(中国石油大学(北京)克拉玛依校区 重质油国家重点实验室克拉玛依分室, 克拉玛依 834000)

**摘要:** 针对目前学生普遍对双闭环比值控制原理和调节过程理解困难, 开发一款被控对象虚拟、控制器真实的硬件在环仿真平台。该平台由工艺流程分析、双闭环比值控制方案组态、流程图组态、PID 参数整定和仿真操作模块组成。仿真平台实现了双闭环比值控制系统过程对象分析、传感器与执行器选择、控制方案设计、自控回路投用环节模拟。测试结果表明, 该实验仿真平台较全面地涵盖了双闭环比值控制理论知识, 实验流程清晰、可操作性强、交互性好。理论知识与实际问题深度融合, 培养了学生解决问题的能力。

**关键词:** 过程控制; 过程对象; 双闭环比值控制; 仿真平台

中图分类号: TP13

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230525

## Construction of a Ratio Control System Experiment Simulation Platform in the Process Control Engineering Course

HUANG Lihua, GAO Guogang, HE Jiao

(Karamay Branch of State Key Laboratory of Heavy Oil, China University of Petroleum-Beijing at Karamay, Karamay 834000, China)

**Abstract:** Aiming at the difficulty in understanding the control principle and adjustment process of the double closed-loop ratio control, a hardware-in-the-loop simulation platform has been developed. The platform is composed of process flow analysis, double closed-loop ratio control scheme configuration, flow chart configuration, proportional-integral-derivative (PID) parameter tuning, and simulation operation modules. On this platform, the process analysis, sensor and actuator selection, control scheme design and automatic control loop operation of the double closed-loop ratio control system can be conducted. The results show that the platform developed comprehensively covers the theoretical knowledge of double closed loop control and has good interactivity, and the experimental process is clear and highly operable. The platform illustrates the deep integration of theoretical knowledge and practical problems, which is conducive to cultivating students' problem-solving ability.

**Key words:** process control; process object; double closed loop ratio control; simulation platform

过程控制系统一般由被控对象(装置)、传感器、执行机构、调节器(控制器)组成。国内大多数院校过程控制实验平台是将实际生产装置缩小并简化而成, 受制造条件约束, 其缩小过程很难满足相似原理, 实验平台的传递函数与真实生产装置差异较大<sup>[1]</sup>, 部分控制规律和动态调节过程无法演示, 实验平台难以完成双闭环比值控制等复杂控制方案实验, 且教学实验设备庞大、费用高, 实验不灵活、理论知识与工程结合不充分<sup>[2]</sup>。

虚拟仿真技术被广泛应用到过程控制教学

中, 目前针对过程控制方案的仿真主要有三类。一是软件在环(software-in-the-loop, SIL)仿真, 即被控对象和控制器均为虚拟的。文献 [3-4] 利用 MATLAB 中 Simulink 工具箱研究了双容水箱液位调节过程及特点, 这种单纯的软件模拟仅演示控制规律, 未构建被控对象、执行机构、传感器、调节器之间的耦合关系。二是快速控制原型仿真, 即被控对象为真实微缩装置。文献 [5] 采用单片机+Labview 软件搭建了温度单回路控制系统, 文献 [6] 采用西门子 PLC 控制器+Visual C++开发

收稿日期: 2023-11-07

基金项目: 中国石油大学(北京)克拉玛依校区教改项目(JG2022017); 新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2022D01A251)。

作者简介: 黄立华, 硕士, 高级工程师, 主要从事先进过程控制教学与科研工作。E-mail: 269855214@qq.com

了单回路锅炉温度控制系统。这类实验平台对学生编程能力要求较高，使学生将较多时间和精力投入到控制算法和人机界面编程中，对控制方案相关理论知识未充分展示<sup>[7-8]</sup>。三是基于数字孪生技术的过程控制系统仿真，如西门子的数字化虚拟平台 Simt，从信号、设备、工艺装置 3 个层级实现被控对象、执行机构、传感器和调节过程的仿真。该仿真系统需要事先获取工艺流程中所有设备及管网详细参数，要求使用者有一定的工程经验，不太适合学生学习<sup>[9]</sup>。

本文采用硬件在环(hardware-in-the-loop, HIL)仿真方式搭建仿真平台<sup>[10]</sup>，控制器采用横河 DCS 系统，被控对象以液氨配置工艺流程为背景，构建了双闭环比值控制系统仿真平台。实验平台依据过程控制系统设计流程逐步引导学生完成被控对象(工艺流程)分析、控制方案设计、控制方案组态、仿真、控制回路投用、参数整定。

将变送器和执行器选型、比值控制方案主/从动量选择、不同比值控制方案特点、比值控制系统控制原理、参数整定等知识较好地融入实验过程中，通过仿真演示双闭环比值控制系统动态调节过程，帮助学生理解双闭环比值控制算法。

### 1 工艺流程设计

燃煤锅炉燃烧过程产生大量烟气，烟气中的 SO<sub>2</sub> 直接排放会对大气造成污染。氨法烟气脱硫装置利用一定浓度的氨水与烟气中 SO<sub>2</sub> 发生中和反应，实现烟气脱硫。氨水浓度一般要求控制在 15%~25% 之间，浓度过低会导致脱硫效果差，装置运行过程中塔物料平衡不易维持；浓度过高则未反应的氨气易造成二次污染，同时氨水具有一定腐蚀性，会加剧设备腐蚀。氨水是通过高纯度液氨和除盐水按一定比例混合得到的，液氨配置单元流程图如图 1 所示。

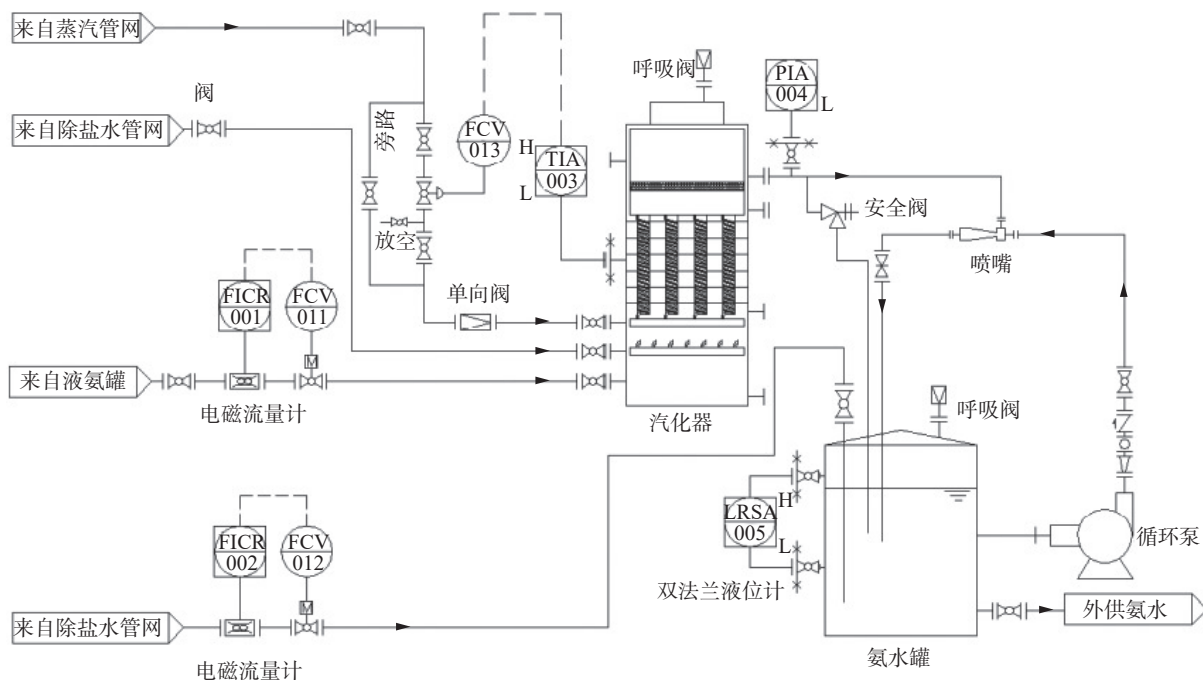


图 1 液氨配置流程图

汽化器通过水浴加热将液氨汽化，氨气在氨水罐中按照一定比例与除盐水进行混合，得到所需浓度的氨水。装置在开工之前开启阀 1，向汽化器壳程中注入一定除盐水，建立水浴加热初始液位。汽化器温度调节采用单回路 PID 控制，温度调节器 TIA-003 控制气动调节阀 FCV-013 阀门开度，调整进入汽化器蒸汽流量，控制汽化器温度。液氨来自液氨储罐，液氨流量调节器 FICR-

001 控制气动薄膜调节阀 FCV-011 开度，调节去汽化器液氨流量。为了配置一定浓度氨水，进入氨水罐的除盐水流量需要根据液氨流量按一定比例进行调节，FICR-002 为除盐水流量调节器，FCV-012 为除盐水流量调节阀。在汽化器出口对氨气压力进行检测，汽化温度过高时，气化过程剧烈。汽化器出口氨气压力过高，触发安全阀动作，泄放的氨气直接进入氨水罐，防止汽化器超

压。氨水经过循环泵从喷嘴一端进入, 另一端射出。在喷嘴喉管位置形成真空将氨气吸入氨水罐中。在了解工艺流程及控制需求的前提下, 由学生完成流量变送器的选型, 气动调节阀流量特性、结构及气开/关形式选择, 控制器的正/反作用、控制规律确定。

## 2 控制方案设计

比值控制系统设计首先要完成主动量、从动量的选择。根据主导作用的物质流量选为主流量, 跟随变化的物质流量选为副流量; 经济价值高的物料选为主流量, 有利于节约资源的原则。选择液氨流量为主流量  $Q_1$ , 除盐水流量作为副流量  $Q_2$ 。比值控制系统类型包括开环比值控制系统、单闭环控制系统、双闭环控制系统以及变比值控制系统, 针对液氨配置流程结合不同比值控制方案的特点, 学生需要自主确定合适的比值控制方案, 并完成控制方框图设计。为了灵活控制每班次配氨量同时确保所配氨水浓度的精度, 系统采用双闭环比值控制方案, 液氨流量调节主回路和除盐水流量调节副回路都具有抗干扰能力。当液氨流量  $Q_1$  受一定干扰时, 主回路依靠自身调节作用能重新稳定。液氨流量  $Q_1$  经过比值器计算输出作为除盐水流量调节回路设定值, 除盐水流量  $Q_2$  及时跟随液氨流量变化。当除盐水流量  $Q_2$  受一定干扰时, 副回路闭环负反馈可以克服干扰, 维持除盐水流量  $Q_2$  稳定。

液氨配置双闭环比值控制系统方框图如图 2 所示, 采用电磁流量计检测液氨流量, 液氨流量调节器比较当前液氨流量与设定值的偏差, 经过 PID 运算后输出 4~20 mA 信号至液氨流量调节阀, 调节阀 FCV-011 的开度。改变进入汽化器液氨流量, 使液氨流量当前值与设定值相等或接近。液氨流量当前值同时进入比值器, 乘以比例系数  $K$  作为除盐水流量调节回路设定值, 除盐水副回路闭环控制过程与主回路相似。

## 3 DCS 软、硬件系统设计

### 3.1 DCS 硬件组态

控制方案设计完成后, 学生需要将控制方案通过软、硬件进行实现。液氨配置双闭环比值控制系统采用横河 CENTUM VP 系列 DCS 作为控制器, 系统由设备层、网络层、监控层构成。现场

控制站类型选择 AFS40D, 域号和站号均设置为 1。液氨配置系统输入输出点数、卡件类型数较少, 仅需一个节点 NODE1。卡件有 16 通道电流输入卡件 AAI141S, 12 通道热电阻卡件 AAR181S, 16 通道电流输出卡件 AAI543-S, 槽号依次从 1 到 3。液氨配置系统现场设备通道地址分配如表 1 所示。

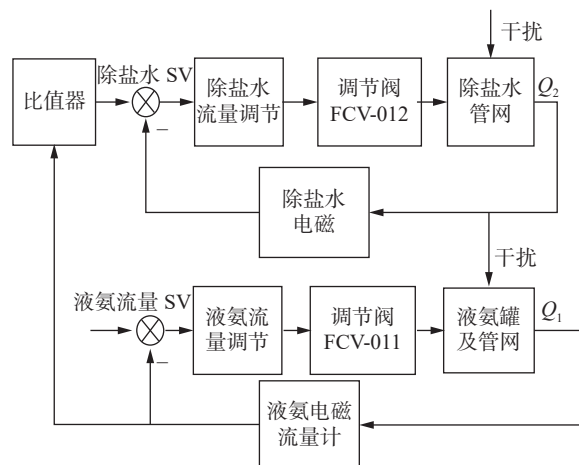


图 2 液氨配置双闭环比值控制方框图

表 1 设备通道地址分配

位号	地址	描述
FI-001	%Z011101	液氨流量
FI-002	%Z011102	除盐水流量
PI-004	%Z011103	汽化器出口压力
LI-005	%Z011104	氨水罐液位
TI-003	%Z012101	汽化器温度
FCV-011	%Z013101	液氨流量调节阀
FCV-012	%Z013102	除盐水流量调节阀
FCV-013	%Z013103	汽化器温度调节阀

### 3.2 控制方案组态

将双闭环比值控制方案在 DCS 中通过模块化编程完成算法组态, 组态结果如图 3 所示。主回路液氨流量调节采用 PID 控制, 调节器为 FICR-001, 输入为液氨流量, 对应通道地址为 %Z011101。调节器 FICR-001 计算后输出 4~20 mA 至液氨流量调节阀, 对应通道地址为 %Z013101。液氨流量当前值 PV(present value)进入比值器算法模块 RATIO, 将液氨流量乘以比值系数  $K$ , 其结果作为副回路除盐水流量调节器的设定值 SV(set value)。副回路同样采用闭环负反馈控制, 调节器为 FICR-002, 调节器输入为除盐水流量, 计算后输出 4~20 mA 至除盐水流量调节阀, 对应通道地址为

%Z013102。学生通过控制方案组态，掌握了计算机控制系统模拟量输入、输出与控制器的连接，PID 控制器设定值内给定和外给定的区别，双闭环比值控制系统信号传递过程。

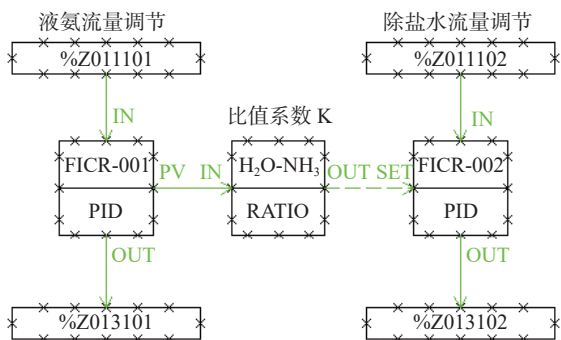
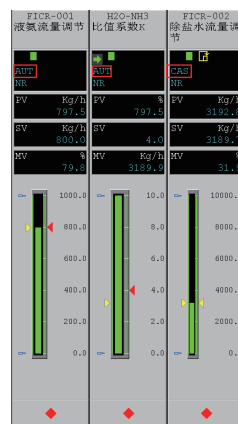
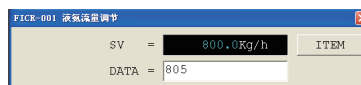


图 3 双闭环比值控制系统算法组态图



(a) 双闭环比值控制仪表盘



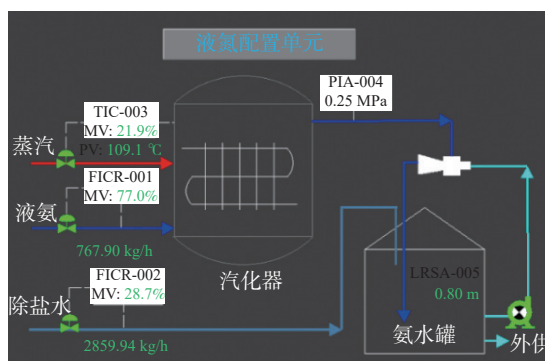
(b) 双闭环比值控制生产负荷调整

## 4 控制方案仿真与参数整定

### 4.1 控制方案仿真

系统完成控制方案组态及程序下载后，对双闭环比值控制系统进行仿真运行。利用两台信号发生器模拟液氨流量和除盐水流量，观察液氨流量调节阀和除盐水流量调节阀的调节过程。如图 4(a)所示，工艺要求液氨浓度为 20%，即比值系数  $K$  设为 4.0。液氨流量主回路设定值  $SV$  为 800 kg/h，主回路投 AUT(automatic)自动运行模式，稳定状态下液氨调节阀阀门开度  $MV$ (manipulated value)为 79.8%，液氨流量当前值  $PV$  为 797.5 kg/h。液氨当前值乘以比值系数 4.0 等于 3189.8 kg/h，作为除盐水副回路设定值  $SV$ 。副回路设定值来自外部，除盐水流量调节器运行模式为串级 CAS(cascade)。稳定状态下除盐水调节阀开度  $MV$  为 31.9%，除盐水实际流量为 3192.8 kg/h，配得氨水浓度为 19.98%，满足工艺需求。调整液氨流量设定值  $SV$  如图 4(b)所示，主回路闭环控制液氨流量将达到一个新的稳态平衡，除盐水流量设定值也随之改变，可方便调整每天液氨配置总量。双闭环比值控制方案在控制精度和生产负荷调整方面具有优势，液氨配置装置运行操作界面如图 4(c)所示。

通过 DCS 硬件在环系统仿真，学生可以直观地观察到从动量(除盐水流量)跟随主动量(液氨流量)调节的过程，除盐水给定值等于液氨流量与比值系数的乘积。



(c) 液氨配置流程运行仿真

图 4 双闭环比值控制系统仿真界面

### 4.2 回路投用和参数整定

经典控制论是建立在线性系统的基础之上的，化工装置的被控对象多数情况下为非线性系统。双闭环比值控制系统主、副回路分别在各自流量设定值操作点对系统脉冲响应函数进行泰勒展开，在一定的调节范围内系统近似为线性系统，经典控制论相关知识是适用的。仿真实验第一步先将液氨流量调节器 FICR-001 和除盐水流量调节器 FICR-002 运行模式切换至 MAN(manual)手动模式，手动调整阀门 FCV-011、FCV-012 的开度，使得液氨流量和除盐水流量分别接近 800 kg/h 和 3200 kg/h，调节器手动运行模式如图 5 所示。第二步将液氨调节器和比值模块投 AUT(automatic)自动运行模式，除盐水调节器投串级 CAS 运行模式，双闭环比值控制回路投自动。回路投用过程中融入自动控制理论知识，理论指导实际操作，加深学生对自动控制原理知识

的理解。通过功能块运行模式设定进一步强化设定值内给定与外给定的区别。

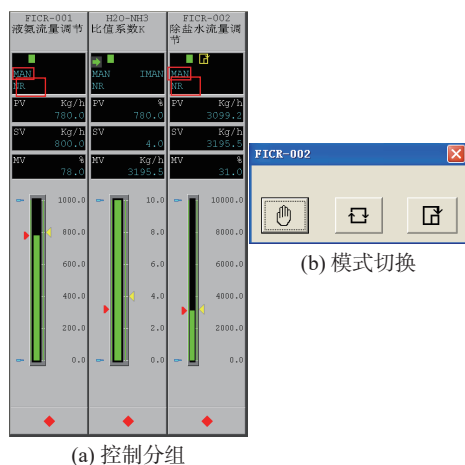


图5 双闭环比值控制手动控制界面

本仿真系统中将被控对象近似看作一阶惯性环节, PID 参数整定采用动态特性参数法。通过改变液氨或除盐水流量设定值 SV(相当于给系统施加一个阶跃信号), 观察当前值 PV、阀位输出 MV 的曲线变化(阶跃信号响应), 设置液氨流量调节器和除盐水流量调节器 PID 参数值。为了实现主、副回路参数整定过程解耦, 先整定副回路, 后整定主回路。将液氨调节器置于 MAN 手动运行模式, 然后将除盐水投 AUT 自动运行模式, 整定除盐水调节器参数。整定液氨调节器参数时, 主回路投 AUT 自动运行模式, 除盐水副回路投串级 CAS, 除盐水调节器参数整定过程如图 6 所示。通过实验使学生理解了干扰信号对被控量的影响, 及参数整定主、副控制器解耦原理。

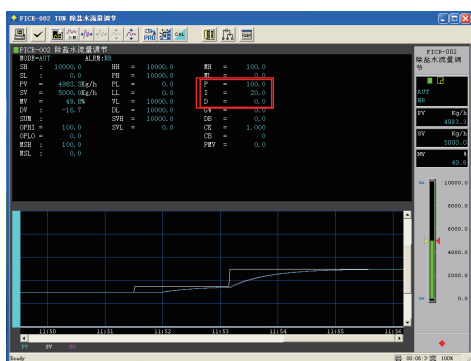


图6 除盐水调节器参数整定界面

学生实验考核采用现场操作和实验报告相结合的方式, 实际操作主要考核学生控制回路接线和控制方案组态操作能力。实验报告主要考核学生对工艺流程、双闭环比值控制原理的认知, 控

制方案设计能力和调节过程实验数据分析能力。通过实验将双闭环比值控制理论从认知到工程实践进行转化, 对比值控制理论教学进行补充和拓展。

## 5 结束语

仿真实验平台将工程问题与比值控制理论知识相结合, 覆盖比值控制方案设计的各个环节。学生通过完成控制方案、软/硬件系统设计及系统仿真, 将理论知识融入实验中, 通过动态仿真直观展示控制过程。该仿真平台还可以从仿真回路无缝切换到真实回路中, 培养了学生工程实践能力。学校化学工程与工艺、能源化学工程、油气储运、过装备与控制工程、自动化专业均开设了过程控制课程, 该实验平台在多个专业教学中得到了应用, 取得了很好的教学效果。

## 参考文献

- [1] OLIVEIRA-SILVA E, PRADA C D, NAVIA D. Simulation platform of an industrial propylene-propane splitter integrated to Advanced Process Control for Real Time Optimization experiments[J]. 13th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems, 2022, 55(7): 673-678.
- [2] 杨乐, 丁芝侠, 李赛. 自动化专业计算机网络课程实验的教学研究[J]. 实验科学与技术, 2023, 21(4): 111-117.
- [3] 王新, 张圆圆, 张将将, 等. 基于 LabWindows CVI 的双容水箱虚拟实验系统开发[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(9): 113-115.
- [4] 孙悦, 恒庆海. 基于 DCS 的双容水箱液位控制系统仿真[J]. 计算机仿真, 2020, 37(12): 219-223.
- [5] 王贵成, 马向华, 张敏, 等. 基于“新工科”工程认知与实践的自动化工程综合实训平台建设模式探索[J]. 化工高等教育, 2019, 36(5): 64-68.
- [6] 薄迎春, 刘宝, 张欣. 过程控制实验装置的先进控制接口平台[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(8): 92-96.
- [7] 李妍, 高宏伟, 郭永亮. 基于虚拟实验平台的自动化仪表与过程控制课程教学探索[J]. 教育教学论坛, 2020, 495(49): 389-390.
- [8] 蔺凤琴, 杨旭, 李擎, 等. 面向新工科建设的加热炉智能燃烧控制虚拟仿真平台的开发[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(3): 108-113.
- [9] 顾亚, 高珏, 刘继承. “过程控制技术”综合实训改革与探索[J]. 电气电子教学学报, 2021, 43(6): 174-178.
- [10] 孙良, 张欣, 涂玲. 基于单片机的被控对象仿真装置的设计与开发[J]. 实验科学与技术, 2017, 15(6): 65-69.