

## 模拟流程工业动态特性的集成组合式系统

李少阳, 纪兴权, 王鹏飞

(沈阳化工大学 信息工程学院, 沈阳 110142)



**摘要:** 集成组合式过程控制对象实验装置相当于一个水力模拟机, 在技术上有些进步且扩大了模拟功能。集成组合式过程控制实验装置的出现将传统的分立式结构改为集成式结构, 能快速高效解决实际生产中的问题。叙述了集成组合式过程控制对象实验装置的设计依据与水力模拟被控对象的基本原理、以及流程工业被控对象的特点和类型, 以及基本组成环节; 控制对象以液位、压力、流量、温度等为主控变量的过程控制实验系统, 实现过程控制中以单回路、串级、等典型控制方式的控制。并介绍了分布参数集总化方法, 实现多变量耦合过程多种动态特性模拟。

**关键词:** 流程工业; 过程控制实验装置

中图分类号: TP18

文献标识码: A

### Integrated Modular Control System Based on the Simulation of Dynamic Characteristics of Process Industry

LI Shao-yang, JI Xing-quan, WANG Peng-fei

(College of Information Engineering, Shenyang university of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

**Abstract:** Integrated modular process control device is a hydraulic simulator, it expands the function of simulation. The emergence of integrated modular process control experimental device has changed the traditional discrete structure to the integrated structure. It can quickly and efficiently solve some problems in the process of production. This paper describes the design basis of integrated modular process control device and the basic principle of hydraulic simulation of the controlled object, as well as the characteristics and the type of the controlled object in industrial processes and the basic component parts. Using the liquid level, pressure, flow, temperature as main control variables of the process control experiment system, the process control is used in the single loop and cascade control. The distributed parameter lumped method is introduced, and a variety of dynamic characteristics simulation of the multivariable coupling process is realized.

**Key words:** Process industry; process control device

### 1 引言

流程工业过程控制的控制手段是流体<sup>[1]</sup>(气、液、粉体)物质与电能的连续或间歇生产过程的控制, 其应用范围覆盖化工、石油、水力、电力、冶金、核能、建材、环境、生物化工、制药、食品、医疗、药、农林加工、饲养业等很多领域, 在国民经济中有重要地位。

过程控制实验是对过程自动化专业学生进行专业技能训练, 提高培养专业素养, 深入理解过程控制工程课主要内容、专业的概念、练习正确表达控制工艺过程、控制系统图形表达与构成实际常用控制系统和使用。实验装置的先进性对保障实验教学质量、学生获得好训练效果起关键性作用。

用一个及数个水槽构成被控对象的实验装置早在上世纪 60 年代末就使用。国内浙江大学等一些少数院校自动化实验用金属筒做水槽, 测量变送器、调节阀、水泵等构成控制对象。水槽尺寸很大(直径 0.4 m、0.5 m、0.7 m, 高 0.6 m、1.0 m)<sup>[2]</sup>。由于加工容易, 通过毕业环节老师和学生一起建设实验室, 用气动单元组合仪表、气动调节阀、气电转换器、大型长条记录仪构成自动控制系统和过程显示, 记录系统; 以电动单元组合仪表等构成的监控系统, 一直使用至今, 取得了良好得教学效果。

由于水槽数目少, 手动阀做液阻虽然使用方便, 但对象特性需测试才能知道, 进行多变量模拟

收稿日期: 2016-11-30; 修回日期: 2016-11-30

作者简介: 李少阳(1989-), 男, 辽宁沈阳人, 研究生, 主要研究方向为过程控制等; 纪兴权(1933-), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 主要从事过程控制等方面的教学与科研工作。

时很麻烦，因此我们就将水槽做成槽间无管路、无手动阀的集合组合式水力模拟实验装置<sup>[3]</sup>，并获得 3 个发明专利。

有的实验教材、厂商提供的使用说明书对使用水力模拟实验的命题值得考虑。例如：单容水箱液位控制、双容、三容水箱液位控制、锅炉水温控制、换热器水温控制、管道或容器压力控制实验等，实际工业中没有双容、三容水箱液位控制，会误导学生，本文首次提出了对这种物理模拟方法新的认识与用途。

## 2 水力模拟被控对象的依据与原理

### 2.1 流程工业被控对象（过程）的特点

从控制角度看生产操作参数常以流量、压力、液位、温度等为被控变量（输出）<sup>[4]</sup>，它们的运动状态是不能直接看到的。在设备、装置、机器中这些变量是连续运动在一定的空间中，用专业术语是分布参数过程；变量与时间、空间有关；而与空间无关仅与时间有关的过程，如有搅拌器的反应釜、罐，锅炉燃烧空间的温度；气罐压力、各种槽、罐液位同一横截上静压，管路中液体流量，可认为在其内的空间各参数值是相同的，称为集总参数过程。

### 2.2 分布参数过程集总化

对分布参数过程控制系统进行分析、设计时不方便，人们就想到如何处理它们，其中一种是分布参数集总化方法。把设备、装置、机器中各个部分变量性质相同、相近部分的参数及其值假设为一样的，化为集总参数过程。如有搅拌夹套式反应器的温度：划分成夹套内温度、间隔壁温度、反应内物料温度等三部分；精馏塔的塔上部温度对象，将有很多塔板的一大段，划分成几段处理；集总化后的动态特性描述就方便了，一般常用多个一阶特性来表征分布参数过程动态特性。

### 2.3 流程工业被控对象（过程）的类型

伴随大型工业生产自动化的盛行以及过程控制要求的更深化，DCS 综合控制系统应运而生；以 DCS 为基础，FSC 迅速发展起来，因它在控制分散、开放性等方面均优于传统的 DCS，是自动控制系统发展的大方向；由于故障检测与诊断技术(FDD, fault detection and diagnosis)能够节能减耗、减少安全隐患、降低设备维修成本和生产成本，大幅提高产品质量与生产效率，因此随着化工生产的规模化和流程化的普及，FDD 日益受到人们的关注，被广泛应用于现代化生产中。

设备管路中不能直接看到的被控过程，其运动

过程是多样复杂的，因此从对其动态特性角度看应当分成不同类型。

① 从运动中各个部分的相互作用关系分有：无相互作用（单向作用）、有相互作用的过程、二者兼有的过程。

a) 无相互作用的过程：运动过程各组成部分运动作用方向是单向的，前面的只对后面的有作用力，而后面部分不会对前面的部分有作用力。像锅炉的炉膛温度控制对象，燃料（压力）只对温度有影响，而炉温对燃料压力无影响。用动态特性传递函数表达时是如下只有极点的二阶数学模型。他们一般称为有自衡非扰荡过程。

$$G(S) = \frac{K}{(TS+1) \cdot (TS+2)}$$

b) 有相互作用的被控过程：前面的运动在向后运动过程中，后面的过程对前面的过程有反作用。如有搅拌加热夹套式反应釜的釜内温度被控对象。夹套内热量传给间隔层再传到反应釜内，至少由 3 个部分构成，温度梯度因有热阻及反向作用而减小，这类过程是多阶动态特性，传递函数为有零极点特性如：

$$G(S) = \frac{K(T_4S+1) \cdot (T_5S+1)}{(T_1S+1) \cdot (T_2S+1) \cdot (T_3S+1)}$$

也称为有自衡非震荡过程。

c) 既有相互影响又有无相影响的被控过程：用动态特性传递函数表达是有零极点多阶特性。

② 从稳定性划分被控过程类型，流程工业被控对象大多数是稳定有自衡的过程，但也有不稳定过程。用阶跃输入产生的过渡过程响应曲线，如图 1 所示。

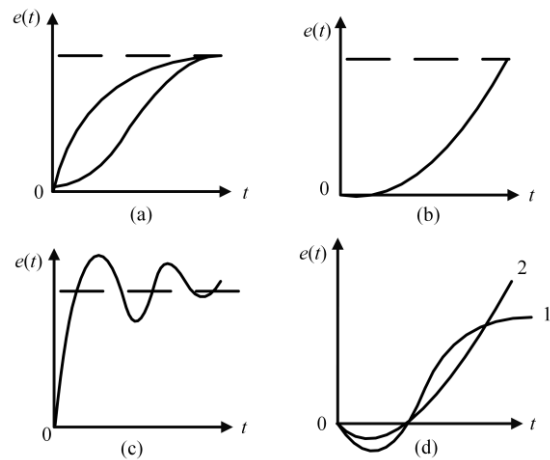


图 1 阶跃输入下的常见过程特性响应曲线类型

Fig. 1 The response curves under step inputs

a) 有自衡非震荡过程

自衡非震荡过程，如一般的液位、压力、温度

作为被控变量的过程。共同特点是被控变量与给定值的偏差  $e(t)$  无振荡地逐渐趋向新的稳态值  $e(\infty)$ ，(见图 1(a))。传递函数视具体情况 (或简化) 下列数学模型:

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1} \cdot e^{-\tau s}$$

$$G(s) = \frac{K}{(T_1s+1) \cdot (T_2s+1)} \cdot e^{-\tau s} \quad (1-1)$$

$$G(s) = \frac{K \cdot (T_3s+1)}{(T_1s+1) \cdot (T_2s+1)} \quad (1-2)$$

式中,  $K$  为稳态增益;  $T$  为时间常数;  $\tau$  为纯滞后时间, 若相对于时间常数很小时, 可忽略不计。式 (1-1) 就为 (1-2), 以简化工程实现。

b) 无自衡非震荡过程

这种过程的特点是在阶跃输入作用下  $e(t)$  一直上升 (或下降), (见图 1(b))。如有些液位对象, 若流出量是用泵抽出, 液位高度的静压差影响抽出量很小, 当输入流量增加, 液位将一直上升到溢出为止。其传递函数一般为

$$G(s) = \frac{K}{Ts} \cdot e^{-\tau s} \quad (2)$$

$$G(s) = \frac{K}{s \cdot (Ts+1)} \quad (3)$$

c) 有自衡震荡过程

这种过程的输出呈衰减震荡, 最后趋向新的稳态值, (见图 1(c))。其传递函数简单形式为

$$G(s) = \frac{K}{s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2} \quad (4)$$

式中,  $\xi$  为衰减系数;  $\omega_0$  为自然频率。

d) 暂态反向特性过程

在阶跃输入作用下, 输出  $e(t)$  是先降后升 (见图 1(d))。这类过程的控制有困难, 因为在变化初期, 原来的负反馈控制系统, 由于对象特性符号由 (+) 变为 (-), 变成暂时的正反馈控制系统, 控制作用反了向, 使控制质量大大降低。这类对象的传递函数大多为

$$G(s) = \frac{K_1}{T_1s} - \frac{K_2}{T_2s+1} \quad (5)$$

$$G(s) = \frac{K \cdot (1 - T_d s)}{(T_1s+1) \cdot (T_2s-1)} \quad (6)$$

### 3 水力模拟原理—相似理论

用阻容水槽模拟各种被控过程特性是一种用物理模拟方法, 相似论方法。等横截面的阻容水槽, 如图 2 所示。

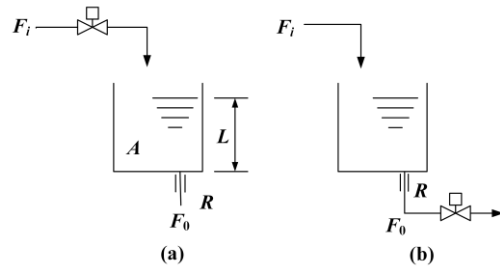


图 2 阻容水槽液位对象

Fig. 2 The water level object in the sink

设进入水槽水流量  $F_i$  为操纵变量 (输入), 液位高度  $L$  为被控变量 (输出), 它的数学模型传递函数为 (证明略)

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1} \quad (7)$$

$$G(s) = \frac{-K}{Ts+1} \quad (8)$$

式中,  $K$  为稳态增益;  $R$  为液阻;  $T=AR$  为时间常数;  $A$  为水槽等横截面积 (常数, 大小与液位高度无关)。

由流体力学知, 液位  $L$  静压使水经节流孔 (孔径为  $d$ ) 产生的流量  $F$  之间关系为

$$F = \alpha d^2 \sqrt{L} \quad (9)$$

式中,  $\alpha$  为节流系数 (这里还包含有水密度、重力加速度等)。

关系曲线, 如图 3 所示。

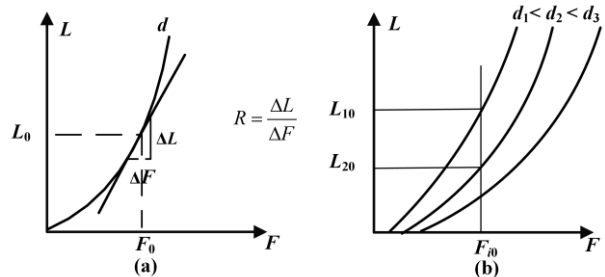


图 3 液位  $L$ -节流孔径  $d$ -流量  $F$  关系曲线

Fig. 3 The relationship curve of the level flow and the throttle aperture

上式为非线性关系, 为使其为线性关系, 进行线性化。用稳态工作点的液位  $L_0$ 、流量  $F_0$  交点做切线, 近似  $F$  与  $L$  关系式,  $F=L/R$ , 如图 3(a) 示。

用不同孔径  $d$  曲线, 如图 3(b) 所示。族供模拟实际题目使用, 如二阶对象根据  $L_{10}$ 、 $L_{20}$  和装置上的控制阀 40~60 % 开度下的流量值  $F_{10}$  与曲线交点  $a$ 、 $b$  得到 2 个节流孔径大小,  $R_1$ 、 $R_2$ 。根据已知  $T=AR$  就进一步得到水槽横截面积  $A_1$ 、 $A_2$ 。因此我们用这种方法可以事先知道每个水槽有具体数值动态特性。一个阻容水槽就作为模拟的一阶特性基本环节。

这个水槽特性本质上仍为分布参数过程, 因为

在不同高度取检测点时，其静压值是不一样的，有分布参数过程特点，只有在同一水面取压才是一样的，又有集总参数特性了。

如果控制阀装在水槽下部出口，稳态特性符号为(-)，注意：每个控制对象各组成环节都有(+)、(-)符号特征。模拟时应考虑应强调指出，这个小水槽动态特性，不仅可代替工业上的大水槽。而且工业生产各种罐、釜、器、室、窑池，不论大小，只要是动态特性为一阶时都可以用一个阻容水槽来模拟，如果是经过集总化后为多阶动态特性，则用多个阻容水槽来模拟。

如果水槽中放置不同的填充物，可以得到纯滞滞后动态特性。由此知道，用水力模拟被控对象时，像用计算机软件做数字模拟一样，都需要有被控对象的动态模型，但二者不同，下面举例进一步说明。如有搅拌器的夹套式加热反应器温度对象特性为

$$G(s) = \frac{1}{(0.5s+1) \cdot (2s+1)} \quad (10-1)$$

用目前计算机数学模拟时上式与下式模拟结果被控变量是一样的，没有唯一性。

$$G(s) = \frac{1}{(2s+1) \cdot (0.5s+1)} \quad (10-2)$$

若用水力模拟时，可用图 4(a)中 2 个水槽模拟，上水槽代表外夹层， $L_1$  代表其温度；下水槽代表器内， $L_2$  代表其温度（水槽宽度大小形象表示时间常数大小）。若仅从数学模型看式(10-1)可以用图 4(b)或(c)模拟，实际不对。因此模拟时要明确代表被控变量及过程变量间的关系。用水力模拟时必须考虑稳态值，如式(10-1)温度对象，加热器外夹层温度正常情况下为 90 °C，器内温度为 60 °C。量程为 100 °C。水槽液位量程为 30 °C，则液位稳态值为

$$L_1 = \frac{90}{100} \times 30 = 27 \text{ cm}, L_2 = \frac{60}{100} \times 30 = 18 \text{ cm}$$

### 4 水力模拟实验装置设计依据

过程控制实验装置既要满足过程控制工程专业课的一般实验还要考虑科研需要。

#### 4.1 实验装置的用途考虑

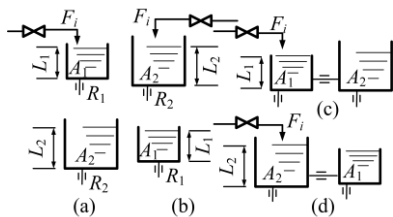


图 4 同一个动态特性数学模型水力模拟二种情况  
Fig. 4 A dynamic characteristic model for two cases

- ① 过程控制工程课的一般实验题目；
  - a) 对象特性测试；
  - b) 测量变送器、控制阀等特性实验；
  - c) 实现单回路、串级、前馈反馈、比值、选择性、分程、状态反馈等控制系统实验。
- ② 供专业课的课程设计、毕业环节设计；
- ③ 其他相关课程、科学研究，如：
  - a) 流程工业建模技术；
  - b) 故障诊断软件考核与验证；
  - c) 各种理论控制算法的控制器性能考核与验证；
  - d) 工业工艺过程数据采集、作为远程控制、监控对象提供相当于现场的条件。

#### 4.2 实验时间长短问题

过程工业被控对象多数是过程进行缓慢，即被控对象时间常数较大或很大，而水力模拟实验又有适时性特点—与实际工艺过程响应时间一样。但课程实验总时数有限，同时每个题目实验时间一般为 2~3 h。实验中一个阶跃输入下的响应过程平稳下来少则十数分钟，多则几十分钟。每个实验的阶跃输入实验次数一般要有 10 次左右。因此每个过程响应时间应设计在 10 min 左右为好。这就要求被控对象不论是一阶、二阶动态特性，总的时间常数不能超过 5~6 min。高阶对象只能用在课程设计，毕业环节或科研时使用。

#### 4.3 被控对象控制通道数考虑

一般的水力模拟实验装置只有一个控制通道即一个被控对象，不能满足多变量控制实验研究要求。能反映工业中实际设备、装置、机器的控制系统数目很少，只有一个控制系统。因此实验装置的控制对象数目多些为好。

一个控制对象，为研究分析方便常把控制对象划分为控制通道、干扰（扰动）通道（包括内扰、外扰）和耦合（关联）3 类通道。因此一个实验装置不但要有多个被控对象。而且每个对象应包含 3 类通道。特别是干扰通道数目，以考核控制效果抗干扰能力实验。一般控制器设计时被控对象多为 3 阶以下，本装置最大可达 12 阶。

#### 4.4 被控对象控制通道特性类型的考虑

从控制原理上看，控制通道特性分有：只有极点的、有零极点的。从被控过程作用类型看，有：有相互作用过程、没有相互作用过程和既有相互作用过程又有没有相互作用过程等多种。同时能反映出水力模拟实验装置模拟能力具有一定普遍性优点（其他物理模拟方法通常只有专一性）。①②③为只

有极点特性；④⑤⑥⑦有零极点特性；⑧⑨⑩只有极点又有零极点特性；⑪⑫⑬为耦合过程多变量过程， $\pi$ 符号表示液阻。几个例子，如图 5 所示。

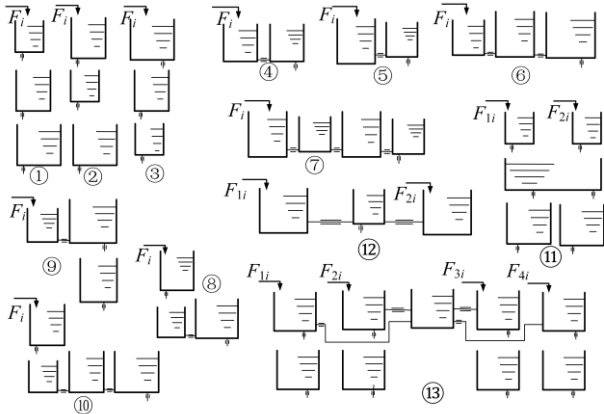


图 5 各种被控对象模拟例

Fig. 5 Simulation cases of various controlled objects

### 4.5 开放性维护性能设计问题

为培养学生动手能力，实验装置应具有一定限度的可拆装性、功能扩展性、方便性，以及能现场监视、检查装置运行状态。

① 装置本体部分应有可重复拆装并不易损坏，测量变送器安装位置可变动；② 水槽组合数目、方式应是“积木”式；③ 管、线与水槽连接应拆装方便，既有硬性又有软性连接；④ 信号传输连接、关系可视性，信号类型多样（模拟量、数字量、远程数字量）。

### 4.6 测量仪表、控制阀等选择问题

装置上应有现场仪表、远传仪表；测量仪表、控制阀等有实验室用和工业现场型，最好选用现场实用型。电信号应既有模拟量型又有现场总线数字型，用于 DCC、PLC、DCS、FCS、SCADA 等。

## 5 实验装置的特点、优点

### 5.1 实验装置结构、流程说明

实验装置有 4 个模拟控制通道、多个耦合通道、多个多种干扰通道。模拟被控过程的基本环节是一个阻容水槽。对多个水槽进行集成组合式设计：共上下 3 层，每层集成 8~12 个水槽，其中，4 个小面积水槽分别用来模拟检测传感器的一阶特性。水槽间（上下、左右、前后）下部有螺线可拆装的节流孔座、盖。无盖时  $R=0$ ，用来成倍调整水槽面积大小，即调整时间常数，或纵向关系时此层水槽相当于通向下面的管路。有盖无孔时  $R=\infty$ ，槽间不通、槽间无关；有盖有孔时  $R \neq 0$ ，孔径大小根据需要选择。每层水槽上下位置根据需要可以任意互换，增加模拟的灵活性。水通过水泵由循环水箱抽出，由上升总管一路经电动控制阀、转子流量计、测量流量用的节流孔板后进入上水槽、中水槽和下水槽后，进循环水箱，做控制通道用；一路经两个串联手动阀（一个用来调整干扰量大小，一个用来产生阶跃扰动）、转子流量计、节流孔板后进上水槽或中、下水槽（接塑料软管以实现干扰进不同位置），最后，同样进循环水箱。自动化工具是工业级，其工艺流程，如图 6 所示。

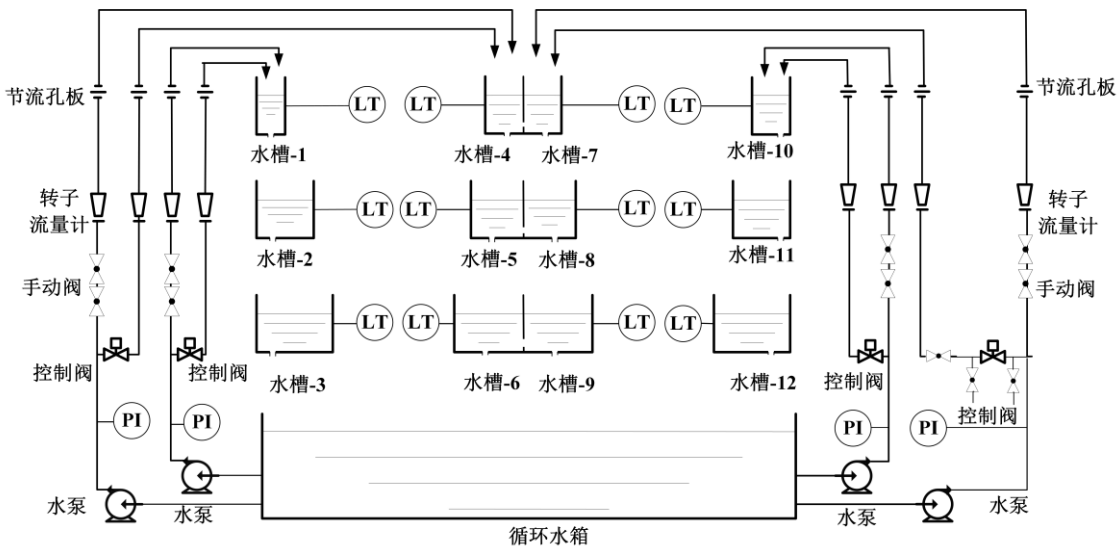


图 6 水力模拟过程控制实验装置流程图

Fig. 6 Flow chart of the hydraulic simulation process control experimental device

一个实验装置上有 4 个水泵供实验用水，4 个控制阀、8 个差压测量变送器用塑料软管与水槽检测点连接，放置框架上，位置可上下移动，一为实

现对用于不同液位检测点，还可以用孔板差压连接做流量测量节省仪表，使一表多用；二为对同一个检测点差压变送器放置不同高度的水槽有不同测量

值,体现分布参数过程特点。4 只压力表用来监测水泵工作情况和产生内扰大小。8 只转子流量计它们就地显示水流量,同时方便建立工作点,产生外干扰量大小。8 个测流量节流孔板为传感器与差压变送器配合,实现比值控制。做一般实验时本装置可同时供 4 个实验组使用,此外,还可做多输入多输出的多变量控制系统实验。

## 5.2 实验装置的特点、优点

### 5.2.1 特点

该实验装置有以下特点:

① 将用于手动阀产生节流液阻改为可易装、卸的大小不同孔径的节流件,可获得不同时间常数、不同稳定工作点,使被控对象特性不用测试就可通过计算准确知道。每个组成部分的时间参数、稳态增益都可以通过计算或查图得到。如时间常数  $T=AR$ ,可以用尺量出、计算出来。液阻  $R$  可由流量  $F$  节流孔径  $d$  与液位静压  $L$  关系曲线查找计算出来。而目前常用方法虽然灵活,但数值大小不知,必须通过实测才能得知被控对象的数学模型。

② 各水槽进行集成组合式设计,能构成多种类型、多种特性被控对象,为仿真设计带来方便。

③ 实现多变量耦合过程多种动态特性模拟。现有实验装置实现对多变量过程的物理模拟常用多个换热器办法<sup>[5]</sup>,这可能带来很多问题,如对象动态特性被限定,一个换热器就有一个动态特性,很难改变与调整。而一个阻容水槽虽为一阶环节,但通过选用不同节流孔径大小和水槽面积,水槽横截面积大小还可用充填物调整,可以得到不同数值的  $T$ 、 $K$ 。不同阶数的特性可用相同数目的水槽实现。

④ 手动阀少,每个实验组只有 2 个,用于产生定值的阶跃式干扰。目前其它类似的实验装置少则十几个,多则几十个手动阀。

### 5.2.2 优点

① 教学上直观易懂。实验目的之一是在实验过程中深入理解专业术语的概念,如时间常数、过程控制对象是集总参数或分布参数过程、集总化、可观性(完全、不完全、完全不可观),可控性(完全、不完全、完全不可控)状态,状态变量等问题。在装置上老师一讲、一指,学生一看就会明白。

② 启动实验进入稳态时间短(10 min 左右),有效实验时间利用率高。

③ 节能、环保、安全、干净。这种实验装置用电 0.5 kW 左右,用电量很小。实验介质仅为一般水,而且循环使用,干净、安全、环保性特好。

④ 经济性特别好。用一套实验装置可供 4 个

实验组使用,相当于 4 套同样其他功能的实验装置,性价比高。水槽制作容易、价格相对很低对经费少的院校很有实际意义。

⑤ 开放性好。装置可配用常规控制器<sup>[6]</sup>、数字控制器、PC-PLC 监控系统、DCS、FCS、SCADA 等。信号系统用端子接线,管路可方便拆装,水槽用软管连接差压变送器一表多用,位置可变;流量大小同时用两种仪表检测(为重复设置设计思想)。用于毕业设计环节、进行技术培训效果好。

⑥ 占地面积小:  $1.3 \times 0.65 \text{ m}^2$ , 高 1.9 m。

## 6 结 论

集成组合式过程控制实验装置的出现改变了传统的分立式结构,是一大技术进步,对自动化教育事业会有很大的贡献,是未来物理模拟被控对象特性的发展方向<sup>[7]</sup>。通过本文的介绍、说明,会使人们对用水力模拟实验方法,功能有更深一步认识,会开发出更多类型、动态特性被控对象。不过,像有逆向响应有特性等对象还没想出实现方法,希望共同研究、开发。

## 参考文献(References)

- [1] 杨棒,浦伟光,隋志军,等. 化工流程工业中计算机的应用技术与进展[J]. 计算机与应用化学, 2010, 27(2): 139-144.  
Yang B, Pu W G, Sui Z J, et al. Application of technology and the progress in the chemical process industry computer[J]. Computer and Applied Chemistry, 2010, 27(2): 139-144.
- [2] 庄兴稼,纪兴权,陈淼鑫. 过程控制工程[M]. 武昌:华中理工大学出版社, 1993.  
Zhuang X J, Ji X Q, Chen M X. Process control engineering[M]. Wuchang: Huazhong University of Science & Technology Press, 1993.
- [3] 冯毅萍,仲玉芳,曹峥. 过程控制工程实验[M]. 化学工业出版社, 2013.  
Feng Y P, Zong Y F, Cao Z. Process control engineering experiment[M]. Chemical Industry Press, 2013.
- [4] 冯丽辉,吕智愚,董乃飞,等. 水泥分解炉出口温度的多变量模糊控制[J]. 控制工程, 2014, 21(3): 77-80.  
Feng L H, LV Z Y, Dong N F, et al. Multivariable fuzzy control for cement decomposing furnace outlet temperature [J]. Control Engineering of China, 2014, 21(3): 77-80.
- [5] 张翔宇,李继庚,周平,等. 制浆氯漂过程运行优化控制系统[J]. 控制工程, 2014, 21(2): 303-308.  
Zhang X Y, Li J G, Zhou P, et al. Operational optimization control system for pulp chlorination process[J]. Control Engineering, 2014, 21(2): 303-308.
- [6] 季建华,赵平,顾巧论. 基于大规模定制的流程工业生产计划优化方法及应用研究[J]. 信息与控制, 2008, 37(3): 362-369.  
Ji J H, Zhao P, Gu Q L. Research on optimization method and application for production planning of process industries based on mass customization[J]. Information and Control, 2008, 37(3): 362-369.
- [7] 桂卫华,王成红,谢永芳,等. 流程工业实现跨越式发展的必由之路[J]. 中国科学基金, 2015, (5): 337-342.  
Gui W H, Wang C H, Xie Y F, et al. The only way for process industry to implement leap-forward development[J]. China Science Fund, 2015, (5): 337-342.