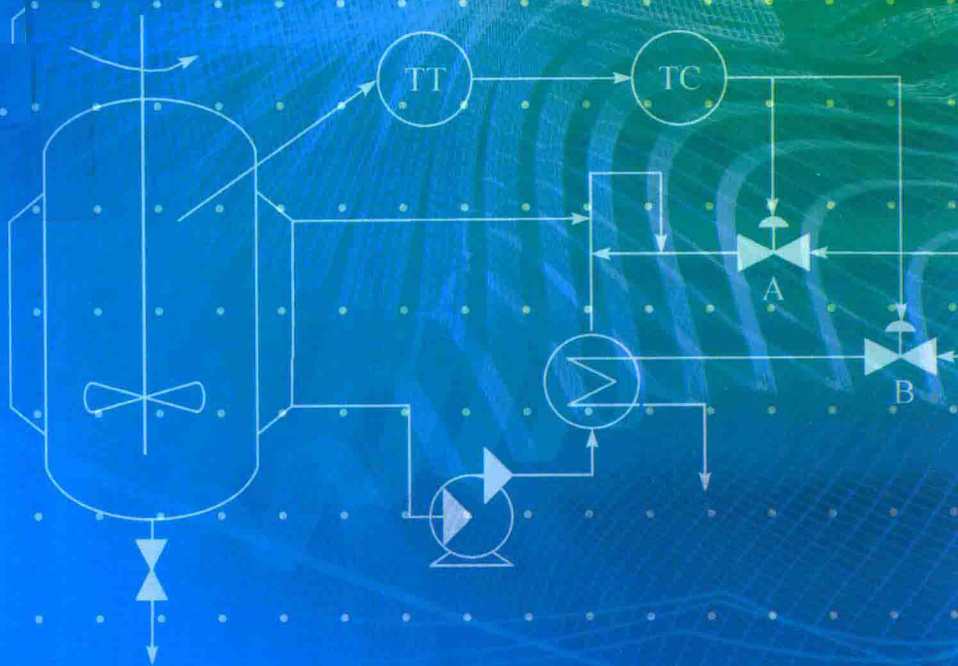




虚拟过程控制系统 仿真实验教程

杨春曦 王后能 黄凌云 郭 丽 编著



科学出版社

虚拟过程控制系统仿真实验教程

杨春曦 王后能 编著
黄凌云 郭 丽

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以过程装备为控制对象,使用亚控公司的组态王软件和MathWorks公司的Matlab软件进行虚拟过程控制系统的操作界面、功能设置、底层控制系统模块和界面通信设置等方面的二次开发,构建出能够覆盖常见复杂过程控制方案的13个虚拟过程控制仿真实验。这些实验具有工艺流程直观、动画效果逼真、反馈及时等特点。

本书适合普通本科及高等职业院校化学工程、过程装备与控制工程、过程控制等相关专业学生使用,也适合相关培训机构和从业人员进行过程控制知识的学习。

图书在版编目(CIP)数据

虚拟过程控制系统仿真实验教程/杨春曦等编著. —北京:科学出版社, 2017.9

ISBN 978-7-03-054590-9

I. ①虚… II. ①杨… III. ①过程控制-系统仿真-教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第236602号

责任编辑:张帆 张丽花 / 责任校对:钟洋

责任印制:吴兆东 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017年9月第一次印刷 印张:11 1/2

字数:255 000

定价:42.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



序 言

过程控制系统是指在如石油、化工、电力、冶金等过程工业中,对生产过程的某一或某些物理参数进行自动控制所需要的仪表、设备与控制算法的统称。在现代工业控制中,过程控制技术是一个历史较久的分支,在 20 世纪 30 年代就有应用。过程控制技术发展至今,在控制方式上经历从人工控制到自动控制两个发展时期。在自动控制时期内,过程控制系统又经历四个发展阶段,即分散控制阶段、集中控制阶段、集散控制阶段和现场总线控制系统阶段。几十年来,工业过程控制取得惊人的发展,无论是在大规模的结构复杂的工业生产过程中,还是在传统工业过程改造中,过程控制技术对提高产品质量以及节省能源等均起着十分重要的作用。

本书是作者在为昆明理工大学过程装备与控制工程专业、化学工程专业、食品质量与安全专业和轻化工程专业讲授“化工仪表及自动化”“化工测量与控制”课程和相关实验的讲义基础上编写而成。其主要目的是开发出一个既能够准确反映过程控制的基本概念和要点,又能够绕过许多复杂高深的理论,以形象直观的方式展示不同控制算法作用于具体过程控制系统的实验平台。同时,为了让学生进行实验时容易上手,本书还具有图文并茂、易于操作的特色。作者采用以组态监控界面结合底层控制算法构建虚拟过程仿真实验平台的模式,即以组态王设计组态操作界面,实现显示、动画、监测与操作等功能,通过 Matlab 的 Simulink 工具箱搭建出典型的过程控制系统,然后采用 OPC 接口实现两部分的数据交换。通过这种方式,非自动化专业的学生就可以专注于过程控制系统的原理、操作和结果,而不必费心于控制算法的构建,大大节约学习时间和精力,对过程控制的教学与实践起到积极的作用。

本书涉及的虚拟过程实验平台采用软件虚拟的方式实现了过程控制现场的构建、测量显示和控制操作全场景,符合信息化大融合的发展趋势,具有较好的前瞻性。同时,该虚拟平台可以采用单机、局域网或者远程访问的模式进行实验与操作,有效节约了设备购置、维护和场地费用,具有较好的经济效益。

本书以形象、简洁和易操作为目标,按照虚拟平台构建、经典过程控制方法及原理、基础过程控制实验和智能过程控制实验的顺序,由浅入深地讲解过程控制学习与实验需要的基础知识和操作过程,形成一个从理论到实践的过程控制学习闭环,使学生在较短时间掌握过程控制的基本原理与应用。

本书的出版,对转换过程控制教学视角、改善教学条件、创造个性化教学环境起到一定的积极作用。但由于各方面条件所限,本书从整体结构到知识组成可能存在不当之处,还请使用本书的广大教师、学生及各界人士不吝批评指正。

作 者

2017年6月

前 言

过程工业也称流程工业,泛指在生产过程中,需要通过物理变化和化学变化进行连续生产的行业,覆盖石油、化工、冶金、医药等行业,对国民经济影响巨大。科学技术的飞速前进,特别是信息技术、计算机网络和控制理论与方法的发展,推动了过程控制对象、方法与手段的推陈出新,为过程工业向大规模、多参数、高复杂度的工业生产过程迈进提供了强有力的支撑。

以“化工仪表及自动化”“化工测量与控制”为代表的仪表类课程是昆明理工大学过程装备与控制工程专业几十年来为生命科学与技术学院、化学工程学院及食品安全研究院本科高年级学生开设的专业课程。为使非自动化类专业学生了解、学习过程控制基础知识,强化基本操作能力,作者与本专业同事和同行以相关课程讲义、实验讲义和本科生毕业设计说明书为基础,编写了本书。

本书共分6章。其中,杨春曦编写了《虚拟过程控制系统仿真实验教程》的大纲,确定了各章节的详细内容纲要,编写了第1章,并审核全书内容。第2章由郭丽编写,介绍了过程控制最基本的内容。第3章由王后能编写,介绍过程控制中常用的一些控制算法及相关特性。第4章至第6章为本书的核心内容,包括过程控制中常见的串级控制等13个虚拟仿真实验,由参与编著的四位老师,带领硕士生孙超、范莎、武宁、杨凡妮、赵峰、刘华、谢可心,以及张梓琪、郑帅等过程装备与控制工程专业本科生的毕业设计资料为基础加工完善而成,其中前10个实验为复杂过程控制系统基础实验,基本囊括了过程控制系统中常用的控制算法;后3个为智能过程控制实验,用于了解新型智能控制算法在过程控制中的应用,主要用于拓展过程控制的思路。第6章汇集了虚拟仿真实验中所需填写的表格,方便学生在实验报告撰写时按需选择。

本书遵循简单明了、形象生动、操作性强的写作特色,绕开繁冗的数学推导,在讲清基本概念的同时,给出了图文并茂的实验操作说明和详细的实验内容与思考题;着重启发和培养学生的实践操作能力,以及能够结合掌握的专业知识来分析实验数据和图表的能力。

本书所用实验软件(除Matlab系统、组态王6.55学习版)以及与各实验单元配套的Matlab程序和组态工程文件均可在昆明理工大学化学工程学院网站下载。

本书的实验基本覆盖了过程控制系统中常见的控制架构和控制算法,在使用本书时,可以根据需要选择合适的实验项目组合来辅助课堂教学。

本书在编写过程中,一直得到昆明理工大学化学工程学院、学院实验中心,以及过

程装备与控制工程系领导和同事的关心与支持，在此表示诚挚的感谢。由于作者水平有限，疏漏与不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

杨春曦

2017年6月于昆明理工大学

目 录

第 1 章	虚拟过程仿真实验平台概述	1
1.1	虚拟过程仿真实验平台架构	1
1.1.1	虚拟过程仿真系统组成	1
1.1.2	操作组态界面	1
1.1.3	控制系统构建	3
1.2	仿真系统软件	4
1.2.1	Matlab 简介	4
1.2.2	Simulink 简介	5
1.2.3	组态王简介	5
1.2.4	OPC 技术简介	7
1.3	虚拟过程仿真实验平台运行步骤	15
1.3.1	组态程序与 Simulink 程序的匹配	16
1.3.2	虚拟仿真实验系统启动顺序	17
1.3.3	虚拟仿真实验系统停止顺序	17
1.3.4	仿真实验平台运行注意事项	17
第 2 章	过程控制系统	18
2.1	简单控制系统	18
2.2	过程控制动态性能指标	19
2.3	串级控制系统	20
2.3.1	基本概念	20
2.3.2	串级控制系统的设计	22
2.3.3	串级控制系统的投运和整定	23
2.4	常用的过程整定	24
2.4.1	比例积分微分控制整定	24
2.4.2	串级控制 PID 参数整定	27
2.5	前馈-反馈控制系统	30
2.5.1	前馈-反馈控制系统的概念	30
2.5.2	前馈-反馈控制系统的设计	31
2.5.3	前馈-反馈控制系统的参数整定	32
2.6	选择控制系统	33
2.6.1	选择控制系统的概述	33
2.6.2	选择控制系统的分类	33
2.6.3	选择控制系统的设计	34

2.6.4 选择控制系统的参数整定	35
2.7 比值控制系统	35
2.7.1 比值控制系统的定义	35
2.7.2 比值控制系统的分类	36
2.7.3 比例控制器的参数整定	42
2.8 均匀控制系统	43
2.8.1 均匀控制系统的由来	43
2.8.2 均匀控制系统的简介	44
2.8.3 均匀控制系统的实现方案	45
2.8.4 均匀控制的参数整定	48
2.9 三冲量控制系统	48
2.9.1 锅炉三冲量简介	48
2.9.2 锅炉三冲量的工作原理	49
2.9.3 锅炉三冲量的调节过程	50
2.10 Smith 预估控制系统	50
2.10.1 大滞后系统简介	50
2.10.2 大滞后系统的特点及常规控制策略	51
2.11 解耦控制系统	53
2.11.1 耦合现象	53
2.11.2 解耦控制系统的应用	53
2.12 分程控制系统	55
2.12.1 分程控制系统的概念	55
2.12.2 分程控制系统的实现	55
2.12.3 分程控制系统的应用	55
2.12.4 分程控制系统的设计与控制器参数的整定	58
第3章 控制算法	59
3.1 PID 控制器原理及特点	59
3.1.1 常规 PID 控制	59
3.1.2 增量 PID 控制	60
3.2 串级 PID 控制	61
3.3 神经网络 PID 控制	61
3.3.1 函数信号与误差信号的计算	63
3.3.2 神经网络训练算法	63
3.4 模糊 PID 控制	65
3.4.1 模糊 PID 控制方式简介	65
3.4.2 模糊 PID 算法	65
3.4.3 模糊 PID 参数调试	66
3.5 预测控制	67

3.6	前馈-反馈控制	68
3.7	解耦控制	71
第 4 章	复杂过程控制虚拟实验	74
4.1	双容水箱液位串级 PID 控制及抗干扰实验	74
4.1.1	实验目的	74
4.1.2	实验设备	74
4.1.3	实验工艺流程	74
4.1.4	实验内容与实验步骤	75
4.1.5	实验结果分析	80
4.1.6	实验注意事项	80
4.1.7	思考题	80
4.2	双容水箱双闭环比值 PID 控制实验	81
4.2.1	实验目的	81
4.2.2	实验设备	81
4.2.3	实验工艺流程	81
4.2.4	实验内容与实验步骤	82
4.2.5	实验结果分析	87
4.2.6	实验注意事项	87
4.2.7	思考题	87
4.3	电加热水箱温度与流量的前馈-反馈控制实验	88
4.3.1	实验目的	88
4.3.2	实验设备	88
4.3.3	实验工艺流程	88
4.3.4	实验内容与实验步骤	89
4.3.5	实验结果分析	93
4.3.6	实验注意事项	93
4.3.7	思考题	94
4.4	锅炉三冲量控制实验	94
4.4.1	实验目的	94
4.4.2	实验设备	94
4.4.3	实验工艺流程	94
4.4.4	实验内容与实验步骤	95
4.4.5	实验结果分析	100
4.4.6	实验注意事项	100
4.4.7	思考题	100
4.5	大型储罐分程控制实验	101
4.5.1	实验目的	101
4.5.2	实验设备	101

4.5.3	实验工艺流程	101
4.5.4	实验内容与实验步骤	102
4.5.5	实验结果分析	105
4.5.6	实验注意事项	105
4.5.7	思考题	105
4.6	双位水箱液位与流量均匀控制实验	105
4.6.1	实验目的	105
4.6.2	实验设备	106
4.6.3	实验工艺流程	106
4.6.4	实验内容与实验步骤	107
4.6.5	实验结果分析	110
4.6.6	实验注意事项	110
4.6.7	思考题	111
4.7	反应釜温度与液位解耦控制实验	111
4.7.1	实验目的	111
4.7.2	实验设备	111
4.7.3	实验工艺流程	111
4.7.4	实验内容与实验步骤	112
4.7.5	实验结果分析	120
4.7.6	实验注意事项	121
4.7.7	思考题	121
4.8	三容水箱的 Smith 预估控制系统实验	121
4.8.1	实验目的	121
4.8.2	实验设备	121
4.8.3	实验工艺流程	121
4.8.4	实验内容与实验步骤	123
4.8.5	实验结果分析	130
4.8.6	实验注意事项	131
4.8.7	思考题	131
4.9	锅炉液位选择控制系统实验	131
4.9.1	实验目的	131
4.9.2	实验设备	131
4.9.3	实验工艺流程	131
4.9.4	实验内容与实验步骤	133
4.9.5	实验结果分析	136
4.9.6	实验注意事项	136
4.9.7	思考题	137

4.10	三容水箱的多变量控制系统实验	137
4.10.1	实验目的	137
4.10.2	实验设备	137
4.10.3	实验工艺流程	137
4.10.4	实验内容与实验步骤	138
4.10.5	实验结果分析	142
4.10.6	实验注意事项	142
4.10.7	思考题	142
第 5 章	智能过程控制虚拟实验	143
5.1	双容水箱液位串级神经网络控制实验	143
5.1.1	实验目的	143
5.1.2	实验设备	143
5.1.3	实验工艺流程	143
5.1.4	实验内容与实验步骤	145
5.1.5	实验结果分析	150
5.1.6	实验注意事项	150
5.1.7	思考题	150
5.2	双闭环比值 BP 神经网络 PID 控制实验	151
5.2.1	实验目的	151
5.2.2	实验设备	151
5.2.3	实验工艺流程	151
5.2.4	实验内容与实验步骤	152
5.2.5	实验结果分析	159
5.2.6	实验注意事项	159
5.2.7	思考题	159
5.3	三容水箱模糊 PID 控制实验	160
5.3.1	实验目的	160
5.3.2	实验设备	160
5.3.3	实验工艺流程	160
5.3.4	实验内容与实验步骤	161
5.3.5	实验结果分析	166
5.3.6	实验注意事项	166
5.3.7	思考题	166
第 6 章	虚拟仿真实验附表	167
6.1	单 PID 控制器调试	167
6.2	双 PID 控制器调试	167
6.3	Smith 预估控制系统	168
6.4	三容水箱模糊 PID 控制系统	169

6.5 分程控制系统	169
6.6 三冲量控制系统.....	170
6.7 三容水箱多变量控制系统	170
6.8 选择控制系统	171
参考文献.....	172

第 1 章 虚拟过程仿真实验平台概述

为了让读者对本实验教程有一个系统的认识，本章首先简单介绍虚拟过程仿真平台的框架、运行机制，并进一步介绍虚拟过程仿真平台用到的相关仿真软件和组态软件。

1.1 虚拟过程仿真实验平台架构

1.1.1 虚拟过程仿真系统组成

本书中的所有虚拟实验不需要添加任何外在设备，均可以在单台计算机上完成。一个完整的虚拟过程仿真实验的组成包括三部分：操作组态界面、底层控制系统和数据通信接口。三部分的连接关系如图 1.1 所示。

构建一个完整的虚拟过程控制仿真实验需要三个步骤：首先，采用组态软件完成操作界面的开发，使虚拟实验系统的操作界面具有与集散控制系统(DCS)系统中的操作站相似的功能；其次，利用 Matlab 中 Simulink 工具箱强大的数据处理和丰富的控制算法模块搭建相应的虚拟过程控制实验的底层控制系统；最后，采用通用的

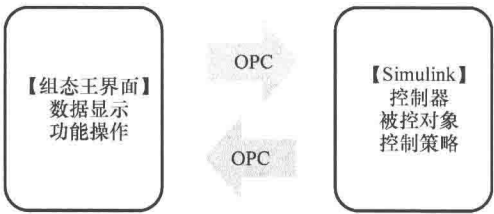


图 1.1 虚拟过程仿真系统关系图

OPC(Object Linking and Embedding for Process Control)标准接口把界面与底层系统连接起来，实现控制信号与操作信号的交互作用，最终实现过程实验的虚拟运行与操作。

需要注意的是，虚拟系统采用全计算机模拟，没有真实的工艺过程与设备，故系统设备特性不能与真实设备完全对应，但其动态趋势和控制过程是与真实过程控制系统保持一致的。此外，本实验平台还可以利用组态王的发布功能实现远程访问登录，并进行远程自主实验。

1.1.2 操作组态界面

操作组态界面是以亚控公司的组态王软件为开发工具，设计与实际设备一一对应的、用于监测与操作的人机接口画面。该画面一般包括工艺流程模块、响应曲线显示模块、控制模块、报表模块和报警模块等多个功能模块。以三容水箱的多变量控制系统虚拟实验为例，其三容水箱操作组态界面如图 1.2 所示。

根据功能模块进行大致划分，图 1.2 可以分成工艺流程、响应曲线显示、控制功能三个模块，其具体功能如下。

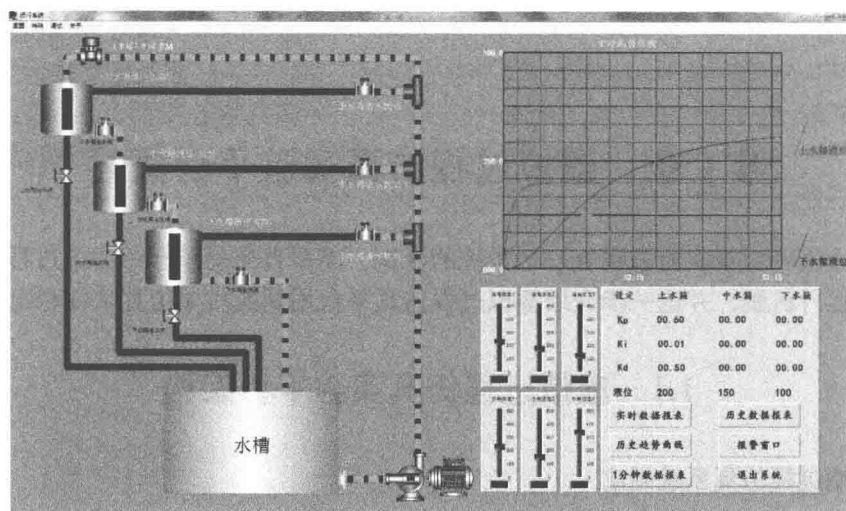


图 1.2 组态王-三容水箱

(1) 工艺流程模块。该子模块搭建了与实际设备高度对应的工艺流程，同时设计了液体流动、阀门的开关动作和电机启停等多个动画功能，增强画面的逼真程度，其工艺流程如图 1.3 所示。

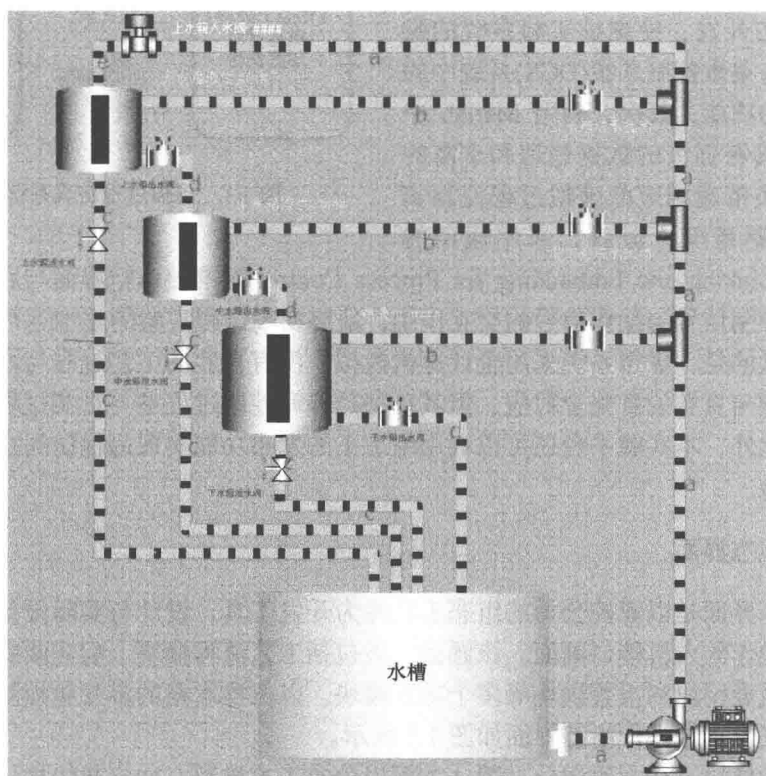


图 1.3 三容水箱工艺流程

(2) 响应曲线显示模块。图 1.4 为实时趋势曲线图，该子模块的功能是显示整个工艺流程中需要显示或控制参数的实时响应曲线，为过程参数的监测和控制参数的调试提供参考。

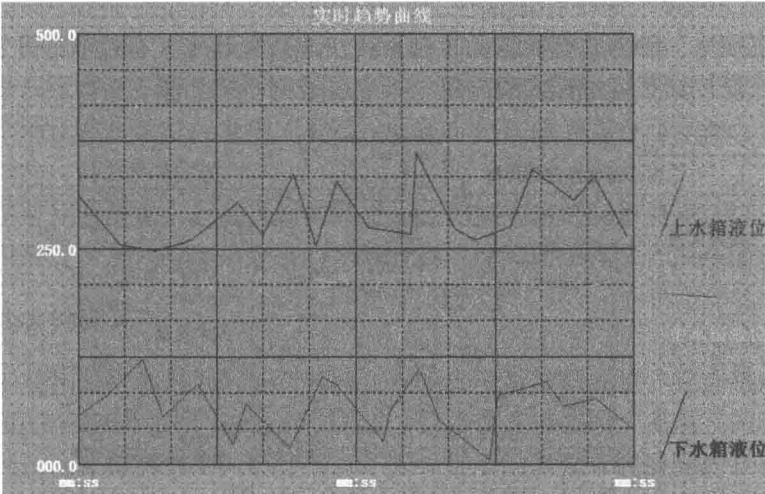


图 1.4 实时趋势曲线图

(3) 控制功能模块。该子模块包括控制参数操作部分、过程参数显示部分和功能画面切换部分。其中，上半部分为控制参数操作部分，这里可以采用游标或数字输入两种方式对 PID 参数或液位进行设定与调试；而过程参数显示部分以游标的形式显示过程参数的实时值；功能画面切换部分设置了多个常用按键，方便在操作过程中根据需要进行画面切换，如图 1.5 所示。

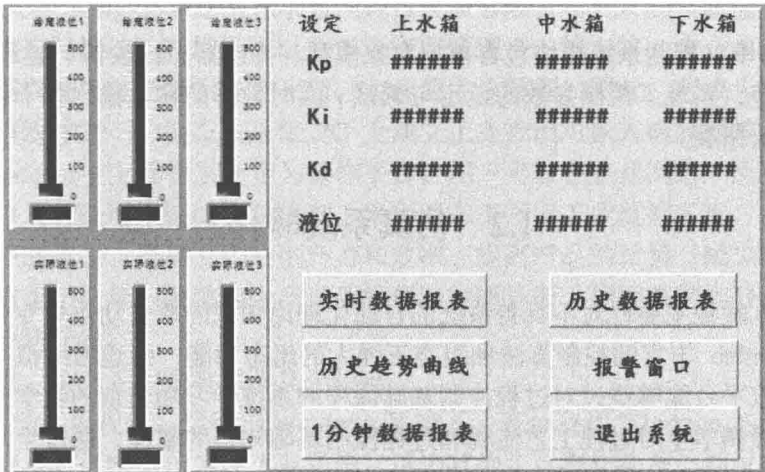


图 1.5 主界面键位、游标设置

1.1.3 控制系统构建

底层控制系统是虚拟过程仿真实验的核心，它接收从操作界面传输过来的参数设定，

并按照控制算法运算得到实时系统状态值，然后把这些值通过 OPC 接口传输到操作界面进行界面显示和图形显示。

为较准确模拟过程控制系统的特点、实现多种过程控制算法，这里采用 Matlab 软件的 Simulink 工具箱来完成系统构建工作。Simulink 工具箱是一种模块化的组态工具，可以采用“搭积木”的方式把所需的控制系统快速搭建起来，有效节约开发周期。以三容水箱的多变量控制系统虚拟实验为例，其底层控制系统如图 1.6 所示。

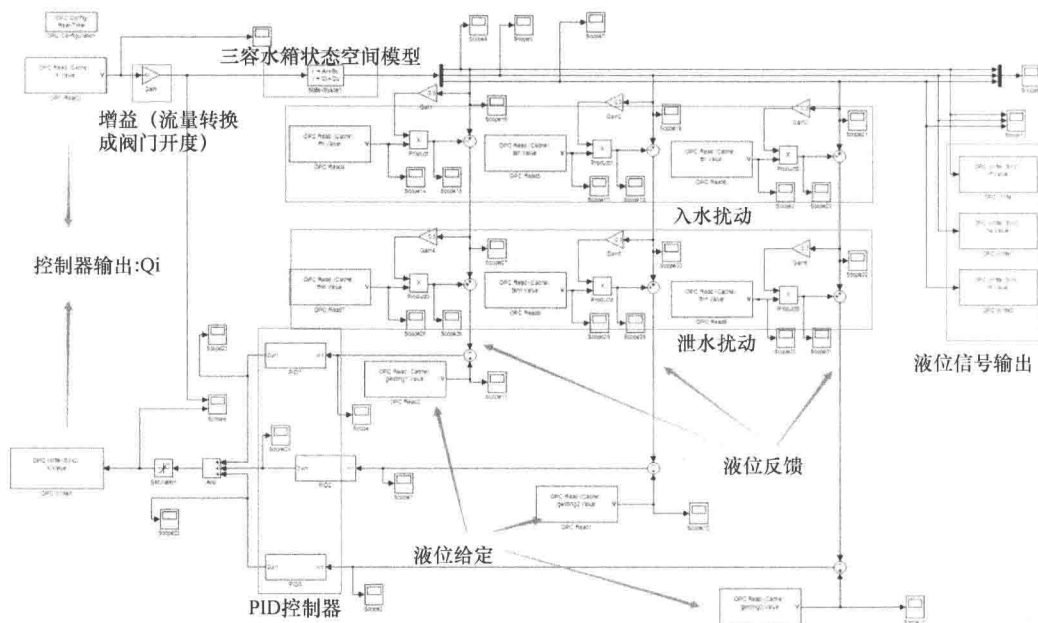


图 1.6 三容水箱系统多变量控制模块组态图

在图 1.6 中，控制系统模块包含被控对象模型、控制器、比较器、显示器和 OPC 接口等多个环节，实现了控制参数的设定与调试、实时数据的输入输出和干扰、显示等多种功能的有效拓展。

1.2 仿真系统软件

考虑到本教程主要针对不具备系统的自动化理论知识的非自动化类专业学生，故本教程利用 Matlab 丰富的控制算法和组态王强大的组态功能，构建出虚拟过程控制仿真实验平台。该平台能够绕过对过程控制基础课程的系统学习和繁杂的数学推导，以实用性为目的，强调学生对过程工艺流程和过程控制基础知识的掌握，通过生动、形象的实验加深相关知识理解，并培养一定的动手能力。

1.2.1 Matlab 简介

Matlab 是一款由美国 MathWorks 公司开发的仿真软件，其名字是由 Matrix 和