

新一代多功能过程与控制仿真实验系统

北京化工大学

计算机模拟与安全工程研究室

一、 背景

多年来过程控制专业的教师一直期待着有一种理想的实验系统，该系统能够任意组合多种控制方法和控制方案，并针对多种不同动态特性的工艺对象进行控制实验。然而，在新一代多功能过程与控制仿真实验系统研制成功之前，这一理想只能部分得以实现。因为，传统的过程控制实验系统存在着如下无法克服的弱点：

1. 装置的尺寸过小，导致系统时间常数比真实系统小得多，因此，动态特性与实际系统差异很大。
2. 由于尺寸过小的原因，流动特性受管壁边界层的影响大，流动非线性强无法稳定，导致测试结果偏差大、没有重复性。例如，小尺寸储槽的液位当入口流量较大时，相对波动很大，稳定性差；小尺寸控制阀无法达到要求的特性（线性、等百分比、抛物特性等）；小尺寸的离心泵特性多变，和工业级离心泵特性相差悬殊，正因为如此，国家标准（包括国际标准）规定，只有管径大于 50 毫米，流动达到一定的流速才有标准可言。
3. 工艺介质一般用水，物理性质单一，表达不了实际工艺物料复杂多样的物理化学特性，因此，除了流体流动与传热实验外，化学反应、气体压缩、组分变化、酸碱度变化、物料混合、复杂的传质过程等都无法实现。因此，实验内容单调、知识点少。
4. 由于实验过程简单、实验介质单一，因此，只能进行比较简单的数量有限的过程与控制实验，无法进行多种多样的复杂控制和先进控制实验。
5. 无法进行高危险性、超极限性过程的安全保护控制实验。因为，传统的过程实验系统本身十分简单，一般没有高危险性、超极限性过程（如反应超温、超压、爆炸等），即使包含有高危险性、超极限性过程，基于安全要求也不允许进行破坏性实验。
6. 难于对实验流程、实验项目、实验内容进行重组和变化。因为，实验装置部件有限重组和变化的内容有限，重组和变化需要附加管路和阀门，实验内容变化初始化时间长（例如，等待系统降温时间很长），而且全面的重组和变化必须对设备进行重新机电组装，这对参与实验的师生几乎没有可行性。
7. 水泵、电机运行时机械振动较大（如果设计不当，机械振动非常大），有些实验装置需要 380 伏交流电源，能耗大，安全性低。
8. 难于对全部变量和操作进行实时监测，因此无法实现高完备性和高分辨率故障诊断，因此也无法实现智能化实验。

以上弱点，在新一代多功能过程与控制仿真实验系统中几乎都得到解决。多功能过程与控制仿真实验系统，通过将小型半实物过程系统、微机控制系统与全数字仿真技术结合，实现了集多种教学和实验功能于一身、真实感强、一机多用、既可以进行初级与中等复杂程

度的过程与控制实验、也可以进行高级复杂的过程与控制实验、维修简单、节能、安全、环保等理想实验系统的要求，是高等教学实验技术的一个新的飞跃。

二、 实验系统构成

多功能过程与控制仿真实验系统由小型流程设备盘台、数字式软仪表与接口硬件、系统监控软件及过程模型软件四部分组成。四部分通过实时数字通信协调运行，完成复杂的半实物模拟实验。

1. 小型流程设备盘台

见图 1 所示，在钢制的盘台上安装着由不锈钢制的比例缩小的流程设备模型。主设备包括：一台卧式储罐（D-101）、两台高位计量罐（D-102、D-103）、一台带搅拌器的釜式反应器（T-104）、一台列管式热交换器（E-105）、三台离心泵（P-106、P-107、P-108）、十个手动/自动双效阀门和若干管路系统。在垂直的仪表盘面上分布有压力（P）、流量（F）、温度（T）、物位（L）、功率（N）、组成（A）和阀位（VL）等数字式软仪表。本盘台是学生直接操作和运行过程系统的环境。本环境给学生以全真实的空间位置感觉、全真实的操作力度感觉和过程变化的时间特性感觉。由于真实过程装置的压力、流量、温度、物位、功率、组成也是无法直接观察的，必须通过仪表检测，因此，本系统和真实系统的观测界面完全一致。

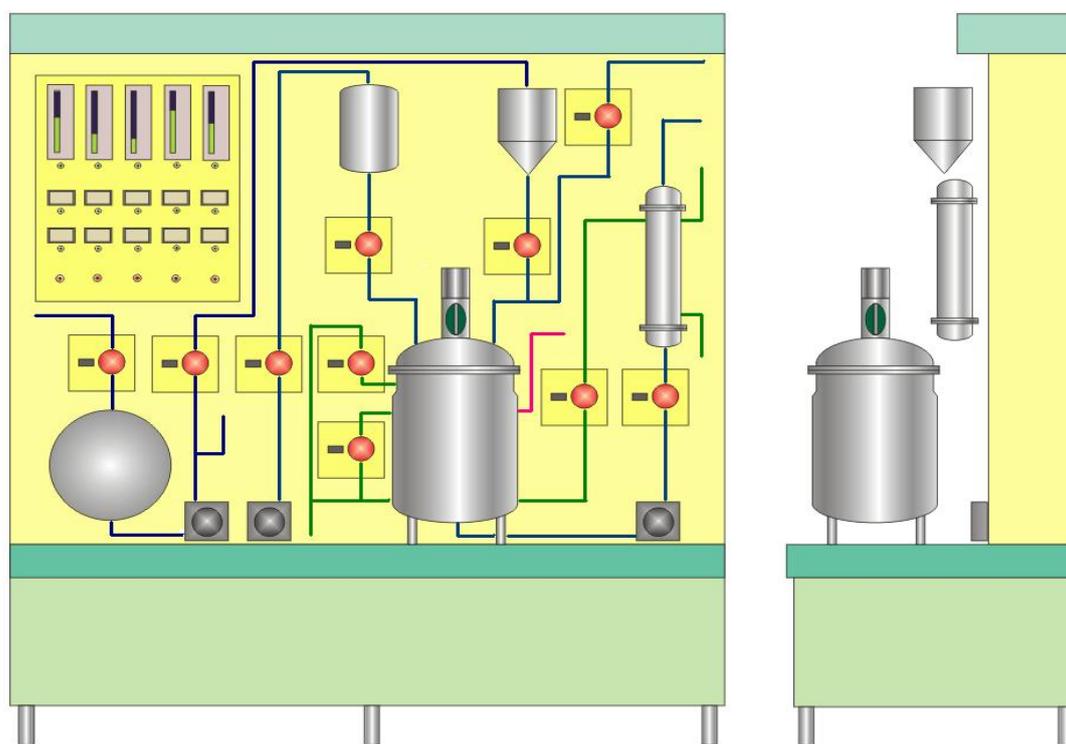


图 1 多功能过程与控制仿真实验系统外观

由于采用了半实物模拟新技术，在同一个实验盘台上可以通过计算机软件控制，自动组合成多种工艺过程实验项目。实验内容可以全面重组和变化，重组和变化不需要附加管路和阀门、不必对设备进行重新机电组装，只需通过软件初始化，一秒钟即可实现，易如反掌。

盘台上的所有操作和显示变量都能由软件控制，可以在瞬间设定新的状态，我们称其为状态“全恢复”功能。本功能是实验系统的一大特色，利用本特点可以任意设定干扰、故障状态或某一特定状态、重演过去记录的状态及某时间段落的变化状态等。全系统的工艺流程见图 2 所示。主要工艺过程实验项目如下：

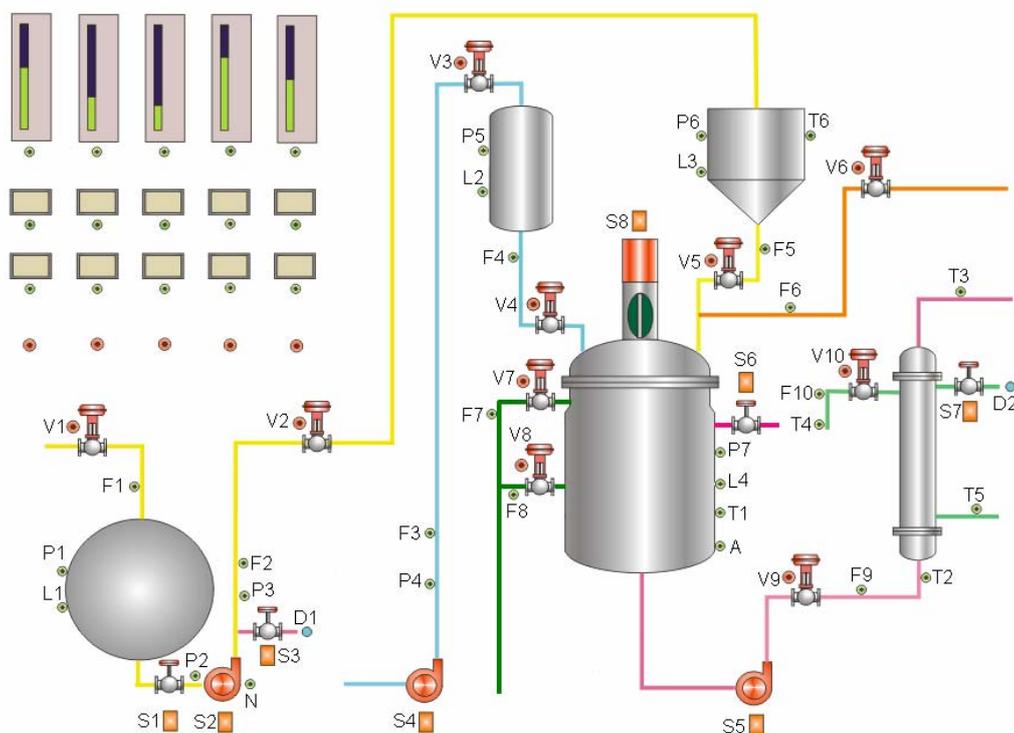


图 2 小型流程设备盘台工艺流程图

(1) 离心泵及特性实验系统

本系统在图 2 中的部位是：卧式储罐（D-101），其上游的双效阀 V1，入口流量 F1，储罐压力 P1，储罐液位 L1，储罐下部出口快开阀 S1（开关），离心泵（P-106），离心泵入口压力 P2，离心泵出口压力 P3，离心泵出口流量 F2，离心泵高点排气阀 S3（开关），排气完成指示灯 D1，离心泵出口双效阀 V2。

本实验系统可以进行非线性液位特性测试、单容液位控制实验、非线性 PID 调节器实验、离心泵开、停；离心泵特性测试；离心泵故障实验；离心泵相关的控制系统实验；离心泵与相关设备联合后的控制系统实验及 SDG 法故障诊断等。

(2) 三级液位及温度实验系统

本系统在图 2 中的部位是：第一级液位系统，卧式储罐（D-101），其上游的双效阀 V1，入口流量 F1，储罐压力 P1，储罐液位 L1，储罐下部出口快开阀 S1（开关），离心泵（P-106），离心泵入口压力 P2，离心泵出口压力 P3，离心泵出口流量 F2，离心泵高点排气阀 S3（开关），排气完成指示灯 D1，离心泵出口双效阀 V2；第二级液位系统，高位非线性计量罐（D-103），该罐的上部是直圆桶型，其液位变化为线性特性，下部为圆锥型，其液位变化为非线性特性，罐内压力 P5，温度 T6，液位 L3，罐出口流量 F5，出口双效阀 V5；第三级液位系统，釜式反应器（T-104），反应器内压力 P7，温度 T1，液位 L4，罐出口流量 F9，出口双效阀 V9，出口泵（P-108），出口泵开关 S5（开关）。

与常规三级液位实验系统相比，特别增加了非线性环节、变容，变时间常数、变物料特性、或系统加压等无法实现的内容，因此也为复杂控制方法的实验及 SDG 法故障诊断实验提供了可能。

(3) 压力实验系统

本系统在图 2 中的部位是：透平式气体压缩机 (P107)，压缩机出口压力 P4，出口流量 F3，出口双效阀 V3，气体缓冲罐 (D-102)，罐内压力 P5，罐出口流量 F4，罐出口双效阀 V4，釜式反应器 (T-104)，反应器内压力 P7。本系统可以进行关联多容系统特性实验、本质自衡特性实验、透平式气体压缩机特性试验、气体大口径管道输送测量及控制试验、设备惰性气体置换充压过程及多点气体压力与流量控制试验。

(4) 流体混合及溶液浓度配制实验系统

本系统在图 2 中的部位是：两台高位计量罐 (D-102、D-103)、D-102 罐内液位 L2，罐出口流量 F4，罐出口双效阀 V4，D-103 罐液位 L3，罐出口流量 F5，出口双效阀 V5，带搅拌器的釜式反应器 (T-104)、反应器内溶液混合浓度 A (或 PH 值)，温度 T1，液位 L4，罐出口流量 F9，出口双效阀 V9，出口泵 (P-108)，出口泵开关 S5 (开关)。实验包括流体混合成分及温度变化、强非线性 PH 值溶液配制。为比值控制、分程控制、非线性控制、顺序控制及 SDG 法故障诊断实验提供了可能。

(5) 传热过程实验系统

本系统在图 2 中的部位是：列管式热交换器 (E-105) 和带搅拌器的釜式反应器 (T-104)，E-105 管程

传热过程在本系统中涉及反应器中的蛇管传热、夹套传热、列管式热交换器传热，既可以加热，也可以冷却，可以改变传热面积、传热系数、介质流动状态，为相关因素对传热的影响和多种温度控制方案的实验及 SDG 法故障诊断提供了可能。

(6) 间歇反应实验系统

本实验选择了间歇反应过程中最为复杂的一种，具有主副反应的竞争、放热剧烈、压力随温度急剧变化等特点，是当前工艺全实物实验根本无法进行的高危险性实验，又是非常需要的反应动力学实验内容。此外，全实物实验还面临物料消耗、能量消耗、反应产物的处理、废气废液的处理和环境污染问题。国内现有的间歇反应实验系统实际上都是水位及流量系统，根本没有反应现象。本项目解决了工艺过程实验的一项重要空缺。本间歇反应过程是工业常见的典型的间歇过程，可以进行计算机顺序控制、批量控制实验，进而可以进行模糊控制、优化控制、间歇过程的 SDG 法故障诊断等高级控制实验。本间歇反应实验系统动力学模型可以完成全工况、高精度、实时模拟，是本仿真中心的专有技术。

(7) 连续反应 (CSTR) 实验系统

本实验与间歇反应系统一样，是当前工艺全实物实验根本无法进行的高危险性实验，又是非常需要的反应动力学实验内容。此外，全实物实验还面临物料消耗、能量消耗、反应产物的处理、废气废液的处理和环境污染问题，以上各项问题比间歇反应更严重，因为连续反应的处理量大大超过间歇过程。国内现有的连续反应实验系统实际上都是水位及流量系统，根本没有反应现象。本项目解决了工艺过程实验的另一项重要空缺。本连续反应过程是工业常见的典型的带搅拌的釜式反应器 (CSTR) 系统，同时又是高分子聚合反应。除了进行常

规控制系统实验外，还可以进行模糊控制、优化控制、SDG 法故障诊断等高级控制实验。

(8) 小型流程级过程控制设计实验系统

二、过程控制实验项目

本系统由于能够组合成多种工艺过程的对象，因此可以进行多种多样的控制系统实验与研究。本实验平台对外提供标准接口，实时输出过程数据，实时接收外部控制数据。被控过程变量和控制阀可在现有的位号中通过信号线插接自定义。因此，在本平台上可自行设计多种多样的控制方案，既可以进行初级与中等复杂程度的过程与控制实验、也可以进行高级复杂的过程与控制实验、还可以进行故障诊断实验。以下是可以进行的部分过程控制实验项目的提示：

1. 偏差预估型防积分饱和 PID 算法实验
2. PID 参数在线整定
3. 各种单回路控制系统实验
4. 大惯性大滞后系统控制实验
5. 串级控制系统实验
6. 均匀控制实验
7. 协调控制实验
8. 比值控制实验
9. 分程控制实验
10. 解耦控制实验
11. PH 控制实验
12. 取代（超驰）控制实验
13. 前馈控制实验
14. 非线性控制实验
15. 批量控制实验
16. 程序控制实验
17. 模糊控制实验
18. 安全保护控制实验
19. 事故连锁系统实验
20. 紧急停车系统实验
21. 优化控制实验
22. 模型控制实验
23. DCS 组态实验
24. 工业微机监控系统组态实验
25. 信号滤波实验
26. 低通滤波实验
27. 控制阀特性实验（快开、直线、等百分比、抛物线特性）
28. 自动开车系统设计和实验
29. 自适应控制系统实验
30. 神经网络故障诊断实验
31. 定性趋势分析故障诊断实验
32. SDG 建模及测试

33. SDG 法故障诊断实验
34. SDG 深层数据挖掘实验
35. SDG 推理优化实验
36. SDG 危险与可操作性分析
37. 系统辨识方法实验
38. 控制结构与参数自组织新一代过程控制系统试验与研究

三、十大优点

综上所述，MPCE-1000 多功能过程与控制仿真实验系统有如下十大优点。

1. 具有过程控制实验和工艺过程实验双重用途
2. 有限的设备可实现多种过程实验的最佳组合
3. 可实现多种过程控制方法和多种方案选择实验
4. 首家真正实现了间歇和连续反应动力学实验
5. 无须投料、安全、节能、环保
6. 电脑智能化教学实验技术的全面升级
7. 模块化、组装化、数字化、标准化
8. 易使用、易维护、低功耗、无污染
9. 高可靠性
10. 高性价比

2. 盘台自组合检测点、操作与控制点

- (1) 模拟阀门：10 个 (V1-V10)
- (2) 电子开关：4 个 (S2、S4、S5、S8)
- (3) 开关阀：4 个 (S1、S3、S6、S7)
- (4) 流量检测点：10 个 (F1-F10)
- (5) 液位检测点：4 个 (L1-L4)
- (6) 压力检测点：7 个 (P1-P7)
- (7) 温度检测点：6 个 (T1-T6)
- (8) 功率检测点：1 个 (N)
- (9) 组份检测点：1 个 (A)
- (10) 指示灯：2 个 (D1、D2)

五、系统软件功能

1. 数据监测、显示

实现从实验操作台的手动阀门、开关等可操作单元，以及外挂控制器输出的模拟量及数字量信号的监测和显示。详细地说，主要分为以下几项功能：

- (1) 数据点组态

提供数据点的组态画面，可以由学生自定义位号，并指定通道号、仪表上下限、报

警上下限（两级）等属性。

(2) 数据采集

负责采集实时数据，并作数据的缓存。

(3) 流程图数据显示

对当前实验的流程作显示，并提供在图上进行参数的调整。

(4) 趋势图数据显示

对当前实验中涉及的数据由曲线图显示其趋势。该数据支持打印及导出。

(5) 报警画面显示

当数据超出数据点组态中定义的报警限时，提供报警。报警状态分为正常、报警以及报警已确认三种状态。

(6) 控制器画面

对学生自定义的控制器，提供 PV、SP、OP 以及手/自动状态等属性的显示或设置。

2. 仿真虚拟工厂

运用动态定量仿真模型，模拟真实工艺流程，并提供各变量当前值。具体分为以下流程的仿真模型：

- (1) 离心泵及特性仿真模型
- (2) 三级液位及传热仿真模型
- (3) 压力系统仿真模型
- (4) 溶液浓度值配制仿真模型
- (5) 热交换器过程仿真模型
- (6) 间歇反应仿真模型
- (7) 连续反应（CSTR）仿真模型

3. 控制方案组态

提供类似 SimuLink 的图形化控制方案组态功能。提供以下具体功能：

- (1) 提供常见的 PID 控制算法，允许学生配置参数
- (2) 控制方案的设计
允许学生自行设计控制方案，包括控制与被控制变量的选择、算法的选择以及串级控制实验等。
- (3) 控制算法组态
提供两种方式的控制算法组态：提供图形化控制算法组态工具，使学生可以对传递函数进行自定义；提供标准 DLL 工程，将学生用其它计算机语言所写的控制算法动态链接到当前控制回路中。
- (4) 信号发生器组态
提供常用的信号发生器，对当前的现场信号进行叠加。
- (5) 信号输出组态
提供信号输出显示、文件保存等功能，以进行信号后处理。

4. 实验管理

对每一项实验提供工程管理，便于学生选择不同的实验，以及对当前的实验进行管理。

具体分为以下功能：

- (1) 实验开始、暂停、恢复功能
- (2) 实验切换
- (3) 实验项目快照存储
- (4) 参数运行时动态改变
- (5) 多画面切换

六、系统硬件功能

1. 叠加干扰信号

在 4~20mA 输出通道上可以叠加若干种干扰信号。

2. 硬件组态

15 个数据显示单元（5 个棒图和 10 个液晶），每个显示单元都有一个数据输入插孔。另外在设备和管道上布置了若干个数据输出插孔。通过导线连接数据输入插孔和数据输出插孔，则完成了对显示单元显示数据内容的确定。

5 个自动阀控制输出插孔，可以连接任意的阀门控制输入插孔。连接后该阀门设定为自动阀，手动操作不能改变阀位。

3. 硬件单元的自摘除

在本系统上可以完成规模不同的试验，每次进行试验的过程中投入使用的设备种类和数量可以通过组态软件定义。没有通过组态软件定义的数据采集点不能进行数据采集，该设备在试验进行的过程中不投入使用。没有通过硬件组态定义的数据采集点的数据不显示，同时也不能输出模拟信号。

没有通过组态软件定义的阀门不投入使用。所有投入使用的阀门如果没有连接控制信号输出插孔，则自动设定为手动阀门。

系统运行的过程中发生故障的硬件单元自动退出运行，不影响其它硬件单元的正常工作。

4. 即插即用

硬件单元必须通过地址开关设定地址。

同类型的硬件单元可以互换。

5. 现场全恢复

现场的全部硬件设备可以通过软件设定为任意的工作状态。

实验项目分类：

- 一. 过程特性及测试实验
- 二. 过程开、停车实验
- 三. 故障及排除实验
- 四. 基础控制实验
- 五. 复杂控制实验
- 六. 全流程控制综合设计实验

- 七. 先进控制实验
- 八. 智能控制实验
- 九. 安全分析实验
- 十. 故障诊断实验

一. 过程特性及测试实验

- 1. 自衡系统
- 2. 非自衡系统
- 3. 单容系统
- 4. 隔离多容系统
- 5. 关联多容系统
- 6. 液位系统
- 7. 流量系统
- 8. 压力系统
- 9. 温度与传热系统
- 10. 成分系统
- 11. 过程非线性系统
- 12. 离心泵特性
- 13. 离心式鼓风机特性
- 14. 调节阀特性（线性、等百分比、抛物、快开）
- 15. 连续反应动力学特性
- 16. 间歇反应动力学特性

二. 过程开停车实验

- 1. 离心泵及液位系统
- 2. 三级液位系统
- 3. 压力实验系统
- 4. 溶液浓度值配制系统
- 5. 热交换系统
- 6. 间歇反应系统
- 7. 连续反应（CSTR）系统
- 8. 盘面全流程系统

三. 故障及排除实验

- 1. 离心泵及液位系统
- 2. 三级液位系统
- 3. 压力实验系统
- 4. 溶液浓度值配制系统
- 5. 热交换系统
- 6. 间歇反应系统
- 7. 连续反应（CSTR）系统
- 8. 盘面全流程系统

四. 基础控制实验

1. 流量 PID 单回路控制
2. 液位 PID 单回路控制
3. 压力 PID 单回路控制
4. 温度 PID 单回路控制
5. 成分 PID 单回路控制
6. PID 参数整定 (4-6 种方法)
7. 调节阀选用计算及测试 (液体、气体)
8. 标准孔板计算及测试 (液体、气体)
9. PLC 单回路控制
10. DCS 单回路控制

五. 复杂控制实验

1. 串级控制系统
2. 比值控制系统
3. 超驰控制系统
4. 前馈控制系统
5. 分程控制系统
6. 非线性控制系统

六. 全流程控制综合设计实验

(盘台全部设备流程, 结构尺寸与分类实验不同)

1. 初步设计 (控制方案)
2. 调节阀计算选型
3. 节流装置计算选型
4. 控制系统连线及检验
5. 控制系统组态
6. 系统试运行及 PID 参数整定
7. 控制质量检验
8. 安全保护系统设计及检验

七. 先进控制实验

1. 纯滞后补偿控制:
Smith 预估补偿器, 各种改进 Smith 预估补偿器, 观测补偿器, 采样控制, 内模控制, 达林控制等。
2. 多变量关联 (解耦) 系统:
被控变量与操纵变量正确匹配; 参数整定; 减少控制回路; 多变量解耦控制。
3. 自适应控制, 鲁棒控制
4. 多变量预测控制: 预测模型、反馈校正、滚动优化
5. 推理控制及软测量
6. 数据校正, 动态预测, 在线校正

八. 智能控制实验

智能控制与传统控制方法相结合:

1. 模糊变结构控制(FVSC)

2. 自适应模糊控制(AFC)
3. 自适应神经网络控制(ANNC)
4. 神经网络变结构控制 (NNVAC)
5. 神经网络预测控制(ANNPC)
6. 模糊预测控制(FPC)
7. 专家模糊控制(EFC)
8. 模糊神经网络控制(FNNC)
9. 专家神经网络控制(ENNC)

九. 安全分析实验

1. SDG-HAZOP 建模
2. 计算机辅助 HAZOP 分析
3. 安全控制方案设计

十. SDG 故障诊断实验

1. 数据采集
2. 建立实时数据库
3. SDG 诊断模型建模
4. SDG 在线故障诊断实验

多功能过程与控制实验系统（MPCE）与当前市场商品化过程 控制实验系统的比较

一、实验过程的种类			
序号	比较项目	MPCE	商品化实验系统
1	过程与控制双重用途	可	否
2	气体压缩机特性	有	无
3	气体关联多容特性	有	无
4	大直径长距离管道流体阻力特性	有	无
5	组份（成分）变化特性	有	无
6	非线性液位特性	有	无
7	PH 非线性特性	有	无
8	连续反应动力学特性	有	无
9	间歇反应动力学特性	有	无
10	生物化学反应动力学特性	可能	无
11	列管式热交换特性	有	无
12	流程级过程特性（复杂流程系统）	有（可能）	无（不可能）
13	实验过程的可组合（组态）性	有	无
14	超极限实验（事故、超温、超压或爆炸等）	可能	无
二、过程控制实验种类			
15	自动控制阀（执行机构）	10 个	2 个（调速代 1 个）
16	控制阀流通能力（Cv 值）	可选	无
17	控制阀特性实验	4 种	无
18	手动阀位测量指示（数据分析及故障诊断需要）	有	无
19	数据测试平均精度（相对百分误差）	≤1.5%	≥5%
20	变量可测点数	69-200 个	10 个
21	可组合控制实验项目	>100 种	<15 种
22	复杂控制方案组合	任意	<5
23	先进控制方案组合	任意	<2
24	时间常数可变	可	否
25	高阶过程特性	有	无
26	非线性控制	有	无
27	故障分析实验	有	无
28	故障诊断实验	有	无
29	智能“专家”系统实验	有	无
30	实验结果的重复性	高	低
31	实验结果的可审核性（工业设计计算标准审核）	高	低

三、过程与控制软件平台功能			
序号	比较项目	MPCE	商品化实验系统
32	专用监控、仿真软件平台	有	无
33	控制方案桌面图形组态功能	有	无
34	过程模型实时连网功能	有	无
35	多种控制方案组态用计算模块	有	无
36	常用数学模块模块	有	无
37	嵌入自编控制算法程序功能	有	无
38	数据叠加随机扰动设定及滤波功能	有	无
39	常用干扰信号输入功能	有	无
40	模型参数调整功能	有	无
41	小型实时数据库管理功能	有	无
42	“示波器”曲线任定和显示功能	有	无
43	数学模型可变、可组合功能	有	无
44	实验自动评分功能	有	无
45	运行状态记忆和重演功能	有	无
46	在线实时智能推理“发动机”功能	有	无
47	系统状态自动全恢复功能	有	无
48	时标可变功能	有	无
49	软仪表显示及组态功能	有	无
50	实验项目自动选择切换功能	有	无
51	多种故障软设定功能	可	否
四、过程与控制硬件平台			
52	全不锈钢设备	是	部分
53	工艺介质及泄漏的可能性	无	水, 可能泄漏
54	腐蚀与结垢	无	长期运行可能
55	运行时的噪音和振动	无	强
56	装置的电力功耗	<300W	>5000W
57	380V 交流电	无	有
58	系统安全性	高	有隐患
59	硬件状态初始化	自动且快速	手动且迟缓
60	实验连线	直观、简捷	间接
61	硬件可组态功能	有	无
62	硬件自摘除功能	有	无
63	即插即用功能	有	无
64	硬件状态全恢复功能	有	无
65	硬件状态自检验功能	有	无
66	硬件可互换性	有	无
67	实验设备可变, 硬件电路系统不变(通用)	可	否
68	附加的与实验主流程无关的切换管路及阀门	无	较多

序号	比较项目	MPCE	商品化实验系统
69	流程结构清晰度	高	低
70	控制系统硬件连接清晰度	高	低
71	系统运行操作	简便	较复杂
72	系统硬件维修	简便	复杂
73	系统可靠性	高	较低
74	使用寿命	高	低
75	系统搬运后是否需要重新调校	否	是