

智能解耦控制在过程控制实验装置上的设计与实现

麦雪凤

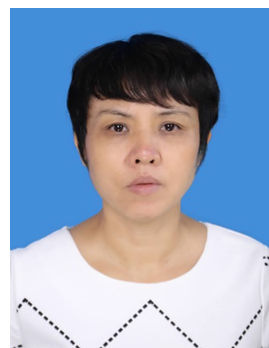
(广西科技大学 电气与信息工程学院, 广西 柳州 545006)

摘要:针对只能开设常规过程控制实验,而无法开展智能解耦控制实践教学的现状,运用西门子编程软件 STEP7 和组态王软件,在已有 A3000 过程控制实验装置上设计开发压力-流量智能解耦控制系统。介绍智能解耦控制策略、程序开发、监控界面设计及系统运行调试等。该实验改善了智能解耦控制缺乏实验验证的现状,对工业智能控制实验室建设具有重要意义。

关键词:智能解耦控制;过程控制;实验装置;A3000

中图分类号:TP 273.4 **文献标志码:**A

文章编号:1006-7167(2017)05-0139-05



The Design and Realization of the Intelligent Decoupling Control Experiment for the Process Control Experimental Device

MAI Xuefeng

(School of Electrical and Information Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, Guangxi, China)

Abstract: The current status can only open process control routine experiment, but cannot carry out the practice of teaching intelligent decoupling control. By using Siemens STEP7 programming software and configuration king software, the existing A3000 process control experimental devices were modified to develop a pressures-flow intelligent decoupling control system. Intelligent decoupling control strategy was introduced, program was developed, monitoring interface was designed and system debugging was operated. The experiment improved experimental conditions for intelligent decoupling control, it is meaningful for our hospital laboratory construction.

Key words: intelligent decoupling control; process control; experimental device; A3000

0 引言

以多变量、强耦合、非线性为特点的复杂工业过程解耦控制,一直是控制理论与控制工程领域的研究热点和前沿^[1]。在日益复杂的被控对象(过程)面前,传统的基于精确模型的解耦控制系统设计理论受到了严峻挑战^[2]。而智能解耦控制与传统解耦控制相比,具有不需要建立被控对象精确的数学模型等优点,更适用于工业现场的实时控制,因此智能解耦控制在工业

过程控制得到了越来越广泛应用。

目前,电气学院的 A3000 实验设备只能进行一些常规过程控制系统(如单闭环 PID 控制、串级控制等)的实验,无法开展智能解耦控制实践教学和相关科学研究工作。因此,在 A3000 装置上开发了智能解耦控制系统,这对完善我院的工业智能控制实验室建设具有重大的意义与必要性。

1 耦合系统构成

设计的智能解耦控制系统以我院现有的 A3000 过程控制实验装置上的水管压力和流量为耦合对象,控制流程如图 1 所示。原有系统设置有压力、流量单回路控制系统,当两个控制系统同时投运时,压力 p_1 用调节阀 PV101 控制,流量 q 用变频器 FH101 控制。

收稿日期:2016-09-25

作者简介:麦雪凤(1966-),女,广西柳州人,副教授,主要从事过程控制、智能控制教学及科研工作。

Tel.: 18172145110; E-mail: mxfl806@aliyun.com

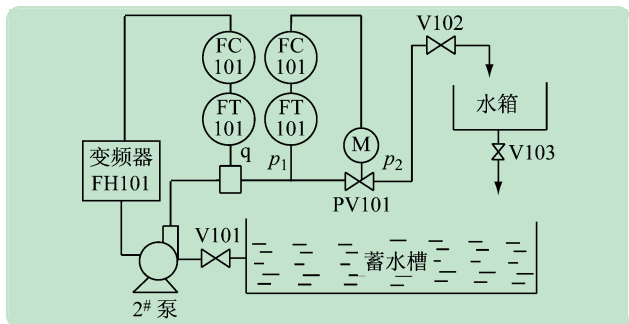


图1 压力-流量耦合系统

由于在同一个装置上,设置了两个控制系统,出现了关联耦合现象。如果直接采用常规 PID 控制而不进行解耦,则会在参数受到扰动(例如改变设定值、有干扰信号等)均会使压力、流量相互影响、大幅波动,实际运行时压力、流量经常在大于设定值 $\pm 10\%$ 的大范围波动(而工艺一般要求控制在设定值 $\pm 2\%$ 左右),无法满足控制要求。

要获得满意的控制效果,必须对压力-流量系统进行解耦,针对压力、流量耦合系统数学模型及传递函数难以精确获得的问题,采用模糊解耦方法可以使对象模型不确定的耦合系统实现解耦控制^[3],而且这种方法设计、计算比较简单,易于实现(在工业控制普遍采用的 PLC 上即可实现)。

2 模糊解耦补偿控制原理

压力-流量模糊解耦控制系统由 A3000 上的压力变送器 PT101、电磁流量计 FT101、变频器 FH101、电动调节阀 FV101、压力调节器 PC101、流量调节器 FC101 和模糊解耦控制器(调节器和模糊解耦控制器用西门子 S7-300 PLC 来实现)等组成。

模糊解耦算法的实质是通过模糊规则在原始控制结果的基础上增加一个合适的补偿量,从而最大程度消除多个控制变量之间的耦合作用,实现压力只受调节阀控制,流量只受变频器控制的目的^[4]。方法是在原有单回路 PID 控制的基础上,采用模糊解耦补偿控制器对 PID 控制得到的调节阀和变频器输出控制增量 U_1 、 U_2 进行补偿、修正,得到调节阀和变频器补偿值 V_1 、 V_2 。解耦补偿后的实际控制输出分别为: $H_1 = U_1 + V_1$ 、 $H_2 = U_2 + V_2$, H_1 送调节阀, H_2 送变频器,控制原理如图 2 所示。

本系统重点和难点是模糊解耦补偿控制器,在此采用两输入两输出结构形式的二维模糊控制器来表示模糊解耦补偿控制器,最终达到控制目的。整个控制系统原理如下:

2.1 压力、流量首先进行单回路 PID 控制

压力变送器、电磁流量计的输入信号分别送至 PLC 的 AI0、AI1, PID0、PID1 直接调用 FB41 功能块^[5]

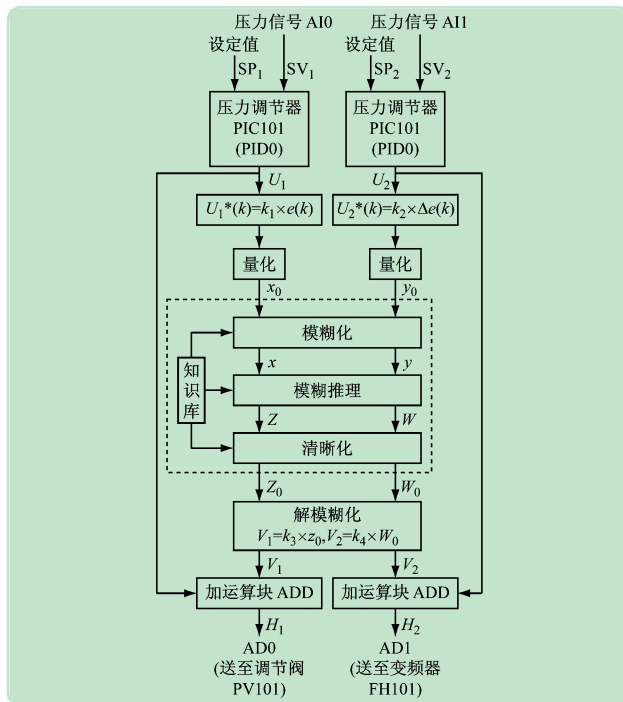


图2 模糊解耦补偿控制原理图

实现, PID0 和 PID1 的输出 U_1 、 U_2 再送到模糊解耦补偿控制器中进行解耦补偿运算。

2.2 模糊解耦补偿控制器的设计

根据过程控制实验对该压力、流量控制系统的现场操作经验,采用模糊控制方法构建模糊解耦补偿控制器。以 U_1 、 U_2 为二维模糊解耦补偿控制器的输入量,输出量为补偿量 V_1 、 V_2 。模糊解耦补偿控制器的基本结构包括模糊化、模糊解耦规则库、模糊推理、解模糊化等部分^[6]。

(1) 模糊化。PID 控制得到的 U_1 和 U_2 首先进行尺度变换和论域变换(量化), U_1 、 U_2 的变化范围均取 $[0, 100\%]$, 论域均取为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。按照耦合模糊模型确定补偿量的论域及隶属度, 补偿量 V_1 、 V_2 的变化范围取 $[-40, 40\%]$, 论域均取为 $\{5, 4, 3, 2, 1, 0, -1, -2, -3, -4, -5\}$ 。则尺度变换因子 $k_1 = k_2 = u/n = 100/4 = 25$, $k_3 = k_4 = v/n = 40/5 = 8$, k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 的值对系统性能有较大影响, 如果不合适调试时在线调整。尺度变换式为:

$$U_1^*(k) = k_1 \times U_1(k), \quad U_2^*(k) = k_2 \times U_2(k)$$

然后用均匀量化法将 U_1^* 变换到离散论域 $x_0 \in [-6, +6]$, U_2^* 变换到 $y_0 \in [-6, +6]$ 。最后将经过尺度变换和论域变换的输入量 x_0 、 y_0 进行模糊化处理, 常用的模糊化方法有单点模糊集合和非单点型模糊集合, 在此采用单点模糊集合方法, 该模糊集合分别用 A' 和 B' 表示, 则有: 当 $x = x_0$ 时, $\mu_{A'}(x) = 1$, 当 $x \neq x_0$ 时, $\mu_{A'}(x) = 0$; 当 $y = y_0$ 时, $\mu_{B'}(y) = 1$, 当 $y \neq y_0$ 时, $\mu_{B'}(y) = 0$ 。

(2) 确定输入、输出语言变量的空间分割和隶属度函数。根据被控参数波动对控制精度的要求, U_1 、 U_2 的语言变量 x 、 y 均分割为 7 个模糊语言, 分别为负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(0)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)。将补偿量 V_1 、 V_2 的语言变量 z 、 w

分割为 7 个模糊语言, 分别为: 大增(IB), 中增(IM), 小增(IS), 不增(0), 小减(SS), 中减(SM), 大减(SB)。每个模糊语言对应一个模糊集合, 用数值表示的语言变量 x 、 y 、 z 、 w 在其离散论域上各元素的隶属度^[7] 分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 x 、 y 的隶属度函数

模糊集合	量化等级													
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	
NB	1.0	0.7	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
NM	0.4	0.7	1.0	0.7	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	
NS	0	0	0.4	0.7	1.0	0.7	0.4	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0.4	0.7	1.0	0.7	0.4	0	0	0	0	
PS	0	0	0	0	0	0	0.4	0.7	1.0	0.7	0.3	0	0	
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.7	1.0	0.7	0.3	
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.7	1.0	

表 2 z 、 w 的隶属度函数

模糊集合	量化等级										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
SB	1.0	0.6	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0
SM	0.3	0.6	1.0	0.6	0.3	0	0	0	0	0	0
SS	0		0.3	0.6	1.0	0.6	0.3	0	0	0	0
0	0	0	0	0.3	0.6	1.0	0.6	0.3	0	0	0
IS	0	0	0	0	0.3	0.6	1.0	0.6	0.3	0	0
IM	0	0	0	0	0	0	0.3	0.6	1.0	0.6	0.3
IB	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.6	1.0

(3) 确定模糊解耦补偿规则。压力、流量的耦合性问题通过模糊解耦补偿规则体现, 模糊解耦规则是模糊解耦控制器的核心, 它基于模糊概念, 将过程控制实验的实际操作经验加以总结和描述^[6], 可得采用 IF-THEN 形式的模糊解耦补偿规则 R_i 和 J_j , 它们分别最多总共有 49 条, 因为 x 、 y 的模糊分割数均为 7。 R_i 依次为“ R_1 : 如果 x 是 NB and y 是 NB, 则 z 是 0; \dots ; R_{49} : 如果 x 是 PB and y 是 PB, 则 z 是 0”。 J_j 依次为“ J_1 : 如果 x 是 NB and y 是 NB, 则 w 是 0; \dots ; J_{49} : 如果 x 是 PB and y 是 PB, 则 w 是 0”。如某条规则: IF $U_1 = \text{PB}$ and $U_2 = \text{NB}$ THEN $V_1 = \text{SB}$ $V_2 = \text{IB}$, 则表示当压力 $U_1 = \text{PB}$ (很大), 流量 $U_2 = \text{NB}$ (很小) 时, 要在 U_1 的基础上增加一个 $V_1 = \text{SB}$ (大减), 在 U_2 的基础上增加一个 $V_2 = \text{IB}$ (大增), 因为压力 p_1 的升高, 2#泵前后压差减小, 当其开度未变时, 流量 q 却减小了, 因此, 压力调节阀开度应该相应减小, 而变频器开度应该相应增加。

如果 x 、 y 、 z 的语言变量值分别用 A_i 、 B_i 和 C_i 表示, 则第 i 条规则“如果 x 是 A_i and y 是 B_i , 则 z 是 C_i ”的模糊蕴含关系 R_i 定义为^[8]:

$$R_i = (A_i \text{ and } B_i) \rightarrow C_i, \quad i = 1, 2, \dots, 7$$

如果 w 的语言变量值用 D_i 表示, 则第 j 条规则“如果 x 是 A_j and y 是 B_j , 则 w 是 D_j ”的模糊补偿蕴含关系 J_j 定义为:

$$J_j = (A_j \text{ and } B_j) \rightarrow D_j, \quad j = 1, 2, \dots, 7$$

则所有规则的总模糊补偿蕴含关系分别为 R 和 J 。

(4) 确定模糊补偿查询表。基于上述模糊补偿规则进行模糊推理, and 运算采用求交, 合成运算采用最大-最小合成, 模糊补偿蕴含“ \rightarrow ”用求交, 所有规则的输出用取并的方法得到总的输出, 从而得到补偿量的模糊集合分别为^[9]:

$$C' = (A' \times B') \circ R = (A' \times B') \circ \bigcup_{i=1}^{49} R_i =$$

$$\bigcup_{i=1}^{49} (A' \times B') \circ [(A_i \times B_i) \rightarrow C_i] =$$

$$\bigcup_{i=1}^{49} [A' \circ (A_i \rightarrow C_i)] \cap [B' \circ (B_i \rightarrow C_i)] =$$

$$\bigcup_{i=1}^{49} C'_{iA} \cap C'_{iB} = \bigcup_{i=1}^{49} C'_i$$

$$D' = (A' \times B') \circ J = (A' \times B') \circ \bigcup_{i=1}^{49} J_i =$$

$$\bigcup_{i=1}^{49} J_i = \bigcup_{i=1}^{49} (A' \times B') \circ [(A_i \times B_i) \rightarrow D_i] =$$

$$\bigcup_{i=1}^{49} [A' \circ (A_i \rightarrow D_i)] \cap [B' \circ (B_i \rightarrow D_i)] =$$

$$\bigcup_{i=1}^{49} D'_{iA} \cap D'_{iB} = \bigcup_{i=1}^{49} D'_i$$

求出某个输入组合 x_0, y_0 时的模糊补偿集合 C' 、 D' 后,再分别进行清晰化计算(用最大隶属度法)^[10],

将模糊补偿量 $C'、D'$ 分别变换为清晰量 $Z_0、W_0$ 。按上述方法,得到各种输入组合下对应的补偿量,形成表 3 所示的模糊解耦补偿查询表。

表 3 模糊解耦补偿查询表

X_0		Y_0												
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	Z_0	0	0	-1	-1	-2	-2	-2	-3	-3	-4	-4	-5	-5
	W_0	0	0	1	1	2	2	2	3	3	4	4	5	5
-5	Z_0	0	0	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-3	-4	-4	-5
	W_0	0	0	1	1	1	2	2	2	2	3	4	4	5
-4	Z_0	1	1	0	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-3	-4	-4	-4
	W_0	-1	-1	0	1	1	2	2	2	2	3	4	4	4
-3	Z_0	1	1	0	-1	-1	-1	0	-1	-1	-2	-3	-4	-4
	W_0	-1	-1	0	1	1	1	0	1	1	2	3	4	4
-2	Z_0	2	2	1	0	0	0	0	0	-1	-1	-2	-3	-3
	W_0	-2	-2	-1	0	0	0	0	0	1	1	2	3	3
-1	Z_0	2	2	1	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-3	-3
	W_0	-2	-2	-1	0	0	0	0	0	0	1	2	3	3
0	Z_0	2	2	1	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-2	-2
	W_0	-2	-2	-1	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2
1	Z_0	3	3	2	1	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-2
	W_0	-3	-3	-2	-1	0	0	0	0	0	0	1	2	2
2	Z_0	3	3	2	2	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-2
	W_0	-3	-3	-2	-2	0	0	0	0	0	0	1	1	2
3	Z_0	4	3	3	2	1	1	0	1	1	1	0	-1	-1
	W_0	-4	-3	-3	-2	-1	-1	0	-1	-1	-1	0	1	1
4	Z_0	4	4	3	3	2	2	2	2	1	1	0	-1	-1
	W_0	-4	-4	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-1	-1	0	1	1
5	Z_0	5	4	4	3	2	2	2	2	1	1	1	0	0
	W_0	-5	-4	-4	-3	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-1	0	0
6	Z_0	5	5	4	4	3	3	2	2	2	1	1	0	0
	W_0	-5	-5	-4	-4	-3	-3	-2	-2	-2	-1	-1	0	0

(5) 模糊补偿查询表的在线查询、实时修正。将模糊查询表 3 中的 $x_0、y_0$ 信号作为离线模糊解耦查询表的输入,通过在线查询预先存入 PLC 的查询表即可得补偿量的模糊值 $Z_0、W_0$,最后经解模糊化得到补偿量 $V_1、V_2$ (用线性变换 $V_1 = k_3 \times Z_0, V_2 = k_4 \times W_0$)。

2.3 最终输出处理

用加法功能块 ADD 计算 $H_1 = U_1 + V_1、H_2 = U_2 + V_2$,再用量程转换功能块将 $H_1、H_2$ 转换为 0 ~ 27 648 的数字量。最后由 PLC 的 AO0、AO1 通道将数字量 0 ~ 27 648 转换为 4 ~ 20 mA 信号分别送至调节阀和变频器,进而分别控制压力和流量。

3 系统实现与运行

用西门子编程软件 Step7 完成系统应用程序编写后,用组态王设计监控界面,包括控制流程图、调节阀、变频器调节画面以及压力、流量、变频器频率、调节阀开度及趋势曲线的显示等。西门子 MM420 变频器设置为 4 ~ 20 mA 工作方式(参数设置为: P0010 = 0、P0700 = 2、P1000 = 2)^[11],压力-调节阀控制回路的 PID0 为反作用(P 值为正),流量-变频器控制回路的 PID1 为正作用(P 值为负)。

首先系统置于手动,手动将电动调节阀的开度设

为60%,变频器频率设为60%(30 Hz),直到系统平衡。系统稳定一段时间后,将系统平衡时的压力、流量值作为设定值,这时压力设定值为27%(即40.5 kPa,满量程150 kPa)、流量设定值设为20%(0.6 m³/h,满量程3 m³/h),并根据过程控制压力、流量单回路实验经验设置好两个单回路PID的初始PID参数,PID1参数设为: $P = -3, I = 160\ 000, D = 0$;PID2参数设为: $P = 2, I = 150\ 000, D = 0$,然后将系统切换到自动运行(投入模糊解耦控制)。经调试,当PID1的参数为: $P = -2, I = 150\ 000, D = 0$;PID2的参数: $P = 3, I = 180\ 000, D = 0$ 时,约在第12 min压力、流量测量值就可稳定运行在设定值范围,约93%采样点控制精度在 $\pm 2\%$ 以内,控制效果良好。为测试解耦效果,约在第18 min 17 s做设定值扰动实验,如图3所示。首先改变压力设定值(由27%变为30%),从图3曲线可看出,系统快速响应,压力迅速上升且无超调量,并约在30 s内重新稳定在新的设定值范围内,控制精度能达到 $\pm 2\%$ 范围内,而流量仅在压力设定值改变的瞬间有较小波动便迅速稳定下来,可见流量受压力控制回路影响很小,几乎没有有明显变化。系统重新稳定后,改变流量设定值(由20%变为22.5%),从图3曲线可看出,流量迅速上升超调量很小,并约在15 s内迅速达到并稳定在新的设定值范围,而压力几乎始终未受流量控制回路的影响,始终保持在设定值范围内稳定运行。

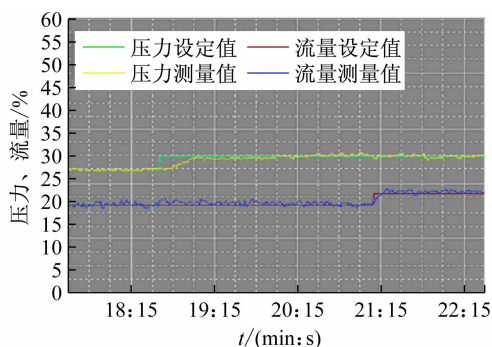


图3 模糊解耦控制运行画面

而采用常规PID方法的原有系统对该压力、流量控制时的运行曲线如图4所示,系统运行了24 min压力仍然不能稳定运行在设定值范围内,压力波动较大,难以获得满意的控制效果。当改变压力设定值时,不但压力测量值的波动较大,不能重新稳定在新的设定值范围内,运行过程85%以上采样点的偏差达到6~8%以上;受压力设定值改变的影响流量值也明显下降且与设定值的偏差越来越大,根本无法重新回到设定值范围,可见流量受压力的影响很大。当改变流量设定值时,流量跟随设定值变化的幅度很小,稳态偏差达到10%以上,完全不能达到设定值范围。受流量变化的影响压力也有1个很明显的超调量,其波动也越来

越大。由图4可见,系统运行较长时间也无法重新稳定在设定值范围,控制效果差,无法满足工艺要求。

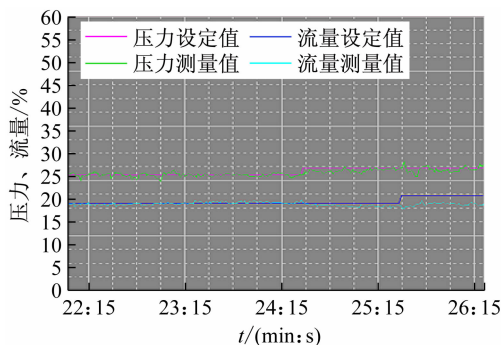


图4 单回路PID运行画面

通过比较可见,采用模糊解耦控制与原有闭环单回路控制相比具有良好的解耦和控制效果,模糊解耦控制提高了系统的控制精度、响应速度、抗干扰能力等^[12],有效解决了压力、流量间的复杂耦合干扰,控制性能明显提高^[13]。

4 结 语

本文介绍的压力-流量模糊解耦控制系统,融合了PID控制、模糊控制和解耦控制技术,在不增加硬件成本前提下,利用软件编程在原有实验装置上进行二次开发来实现智能解耦控制,弥补了传统A3000过程控制实验装置的不足^[14],满足了开展智能解耦控制创新实践教学的需要,能让学生将过程控制领域的理论知识与工程实践得到有机结合^[15],具有推广应用价值。

参考文献 (References):

- [1] 朱林,吴冬雪,赵倩.多变量耦合系统PID神经网络控制方法研究[J].制造业自动化,2014,36(2):125-128.
- [2] 李学锋,杨先发,周凤歧.多变量模糊解耦控制系统研究与应用[J].西北工业大学学报,1995,13(1):56-59.
- [3] 董洪光,李新光.混合液温度流量解耦控制算法及系统虚拟[J].自动化与仪器仪表,2004(3):8-9.
- [4] 徐迎曦,张雷,李传锋,等.压力和流量关联的神经网络解耦控制[J].河南科技大学学报(自然科学版),2003,24(3):82-84.
- [5] 廖常初.S7-300/400PLC应用技术[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [6] 俞金寿,蒋慰孙.过程控制工程[M].北京:电子工业出版社,2007.
- [7] 李国勇.智能控制及其MATLAB实现[M].北京:电子工业出版社,2005.
- [8] 麦雪凤.基于A3000的模糊-PI双模控制实验设计与开发[J].实验室研究与探索,2013,32(8):89-92.
- [9] 师黎,陈铁军,李晓媛.智能控制理论及应用[M].北京:清华大学出版社,2009.
- [10] 俞金寿.工业过程先进控制技术[M].上海:华东理工大学出版社,2008.

(下转第263页)

建基于物联网技术的感知层、应用层和网络层的信息系统处理平台;同时,借助于GIS空间分析功能,建立一种基于GPS/GIS的公共安全监测系统,GIS实现的是对安全监测信息进行整合和有效的管理,同时可以实现对不同空间和时间尺度上进行分析,确定所发生的安全信息与周围环境因素之间的关系,并确定其发生安全事故的内在原因。

3 创新实验平台建设成效

丰富了实验课程的设计,其中包括炸药爆炸应力场测试、工业爆炸参数测定、井下通风系统模型实验、矿井通风网络解算实验、矿山三维数字化模型、矿内空气参数测定实验、可燃液体燃点测定装置、矿井安全监测模拟系统、粉尘润湿性实验、矿山地表无人机监测检测实验、高精度工程变形监测实验、卫星导航定位安全监测应急实验系统、矿区人员安全定位等实验,这些实验不是在单一的实验平台上展开的,而是在多元化创新实验平台上进行,同时创新实验平台提供了交叉实验融合体制,并对相似实验进行了整合,从而提高了学生对多元化实验的理解能力,也加深了学生对书本知识的掌握。

经过该多元化创新实验平台的构建,本科生利用该创新实验平台,获得了安全实践大赛一等奖,参赛名称为气体与粉尘爆炸可视化系统开发,并在边坡可靠度分析及岩体强度参数的模糊评估项目中获得了中国科学院院长奖学金优秀奖、及武汉理工大学大学生节能减排社会实践与科技竞赛一等奖和武汉理工大学教学研究成果特等奖。

4 结 语

建设多元化的创新实验平台,培养安全领域创新人才是一项系统工程,在教育改革不断深入的过程中,多元化创新实验平台的构建将会面临诸多学科交叉及融合问题^[15-16]。这些问题的解决需要不同方向相似实验之间的融合,多元化创新实验平台的完成将以学术创新及与市场接轨的实践能力为出发点,为本科生及硕士生提供安全领域的创新发展的优势资源,并在此基础上提供适合不同学生的个性化实验设计方案,从安全学科的软件、硬件及环境等多方面考虑,围绕安全领域不同方向的专业人才和创新人才培养模式,改

革以往的实验手段和方案,通过对已有的实验内容进行整合或更新,自主研发适合多元化安全的硬件和软件。在实践项目的基础上,加强学生的创造性及自主设计能力,并最终建立科学研究和实验项目结合的实践创新能力培养方法,实现安全不同学科的资源共享,推动理论与实践结合,最终在各种大学生创新基金的支持下,借助该多元创新实验平台,使本科教育培养出更多适应国家发展需要的创新人才。

参考文献 (References):

- [1] 刘 潜,杨书宏,虞和泳.在《授予博士、硕士学位的学科专业目录》中设立“安全科学与工程”一级学科的论证报告[J].中国安全科学学报,2003,13(5):5-8.
- [2] 韩雅静,原续波,李宝银,等.材料科学与工程专业教学平台实验室综合实验课程改革初探[J].高等工程教育研究,2005(12):55-57.
- [3] 徐格宁.构建地方高校实验教学大平台的探索与实践[J].实验室研究与探索,2010,29(5):1-3.
- [4] 杨永良,李增华,候世松,等.构建安全科学与工程实验教学平台的探索与实践[J].实验室科学,2013,16(1):153-156.
- [5] 许家瑞,周 勤,陈步云,等.构建创新实验教学体系的探索与实践[J].实验技术与管理,2009(5):1-4.
- [6] 刘嘉南,潘信吉.实验教学研究和改革资源共享平台的搭建[J].实验科学与技术,2009(8):82-84.
- [7] 钱 洁,刘志学,唐吉吉,等.开放式研究型实验教学平台建设[J].实验室研究与探索,2009,28(6):155-158.
- [8] 秦昌明.构建大学教学实验室开放管理体系[J].实验室研究与探索,2009,28(3):138-139.
- [9] 成 丽,杨祖幸,汤 洁,等.创新实验平台的建设与管理机制创新[J].实验科学与技术,2010,8(3):166-168.
- [10] 初汉芳,李 锋.实验教学示范中心管理模式与运行机制的研究[J].实验技术与管理,2011,28(7):127-129.
- [11] 王艳平,崔 岗.加强我国工业安全生产综合监测的思路及措施[J].工业安全与环保,2010,36(12):3-4.
- [12] 李 娜,马向阳,钟志良,等.基于无线传感器网络的天然气工业安全监测[J].仪表与自动化,2013,31(2):79-83.
- [13] 冯仁剑,张帅锋,于 宁,等.应用于天然气管网安全监测无线传感器网络节点设计与实现[J].传感技术学报,2009,22(10):1492-1497.
- [14] 冯宝红,高俊强,余学祥.基于GPS/GIS的公共安全监测系统的研究[J].南京工业大学学报,2006,28(6):43-46.
- [15] 成 丽,杨祖幸,汤 洁,等.创新实验平台的建设与管理机制创新[J].实验科学与技术,2010,8(3):166-168.
- [16] 白广梅.关于创新实验室建设的思考[J].实验技术与管理,2007,24(2):136-138.

(上接第143页)

- [11] 北京华晟高科教学仪器公司编制.A3000高级过程控制系统实验指导书V3,2010.
- [12] 马克茂,朱 奕.带有前馈补偿的模糊控制系统及其在锅炉水位控制中的应用[J].计算机测量与控制,2004,12(6):537-539.
- [13] 杨 杰,齐向东.单容水箱液位模糊控制系统的设计与研究[J].

机械工程与自动化,2013(6):135-137.

- [14] 王 娟.A3000系统在化工自动化及仪表实验中的应用[J].实验室研究与探索,2006,25(9):1079-1080.
- [15] 陈 曦,丁跃尧.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(自然科学版),2011,24(1):76-78.