

西门子杯  
全国大学生过程控制技能挑战赛  
——搅拌式反应器间歇反应过程控制

参赛队伍编号：23

2007年6月

## 前 言

针对大赛组委会给出的工艺流程，结合系统的特性，为了保证升温速率和保温时间，提出了基于多模型的预测函数控制方法，该控制策略通过在不同的反应区间采用不同的预测模型，以适应过程参数在不同区间发生的变化。该控制策略具有算法先进、易于工程实现等优点；为了保证生产的安全，当压力不合格时采用压力分程控制；为了保证产品质量，当组分不合格时采用基于神经网络的软测量模型预估推断控制；同时设计了基于安全仪表的紧急停车系统；为了消除人为操作干扰，设计了升温，保温，出料，清洗的顺序控制。

控制系统各部分设计均采用工业常用的控制策略，保证了该系统在稳定，安全的工况下运行，保证产品质量，提高经济效益。

关键词：预测函数控制 神经网络 软测量 安全仪表 顺序控制

## 目 录

第一章 被控对象工艺流程及控制目标要求 .....	1
1.1 被控对象工艺流程概述 .....	1
1.2 控制要求 .....	2
1.3 被控变量特性分析 .....	2
第二章 系统控制策略 .....	4
2.1 控制方案设计原则 .....	4
2.2 温度控制策略 .....	4
2.3 组分控制策略 .....	7
2.4 压力安全控制策略 .....	9
2.5 升温、保温、出料、清洗顺序控制方案 .....	11
2.6 安全连锁SIS控制策略 .....	13
2.7 温度、压力、组分的协调控制 .....	13
第三章 控制系统硬件设计 .....	14
3.1 控制系统硬件结构 .....	14
3.2 通讯网络 .....	19
3.3 执行器的选择 .....	19
3.4 仪表参数设定 .....	21
第四章 控制系统软件设计 .....	22
4.1 温度控制 .....	22
4.2 组分控制方案 .....	26
4.3 压力控制方案 .....	28
4.4 安全连锁SIS .....	31
4.5 温度、压力、组分选择器的实现 .....	32
4.6 控制软件的实施 .....	34
第五章 总结 .....	35
参考文献 .....	36



## 1.2 控制要求

### 1. 反应升温速度控制

在缩合反应阶段，由冷态常温逐渐诱发反应至温度达到 121℃左右。在此阶段要求选手设计控制系统，保证温度以 0.1~0.2℃/S 的速率上升。

本间歇反应过程中有主副反应的竞争，主反应的活化能较高，期望较高的反应温度。加热速率过慢会使反应停留在低温区，副反应会加强，影响主产物产率。因此提高反应温度有利于主反应的进行。但加热速率过猛会使反应后续的剧烈阶段失控而产生超压事故。

反应釜温度和压力是确保反应安全的关键参数，所以必须根据温度和压力的变化来控制反应的速率。

### 2. 反应保温温度控制

经过缩合反应后，在反应保温阶段要使反应釜温度始终保持在 120℃左右 5~10 分钟（实际为 2~3 小时），以使反应尽可能充分地进行，达到尽可能高的主产物产率。

### 3. 主产物产率控制

为得到一定的转化率的产品，要求对反应器最终产物的产率进行控制。注意，产率无法在线采集。

反应主产物 D 的产率主要受到升温速度、保温时间与温度的影响。

### 4. 反应器压力安全控制

如果加热过猛，会超压。为保证反应安全，需要对压力进行安全控制系统的设计。

### 5. 升温、保温、出料、清洗顺序控制

为实现从升温、保温至出料、清洗的整个过程的自动控制，需要设计顺序控制系统。

## 1.3 被控变量特性分析

### 1. 温度

温度的动态特性：

其一，惯性大，容量滞后性大；其二，温度对象通常是多容的。由于温度滞后大，控制起来不灵敏，温度控制需要增加微分作用。

在生产过程中温度控制就是对传热过程的控制，包括对流传热，传导传热和辐射传热。温度控制的操纵变量通常是流量，如加热介质的流量，冷却介质的流量燃料的流量等。

### 2. 压力

压力的动态特性：

对象类型中常见的类型有两类，其一是具有一定容量的器罐，此种情况，体积和容量较大，表征动态特性的时间常数较大，即惯性较大。其二是管道的压力，由于管道的容积小，所以时间常数较小，控制比较灵敏。

以上两种情况与温度对象相比都是比较快的过程，时间常数不大，都大致呈现单容特性，在控制中一般不用微分作用。

### 3. 流量

流量的动态特性：

流量的测量容易受到噪声的干扰，流量本身可能是平稳的，平均流量没有什么变化，但测量信号常常是频繁的变动。这是由于管道中的流量正常时都呈现湍流状态，流量虽然平稳，流体内部却存在骚动。特别是流体流过截流装置时，这种骚动就更大了，产生的噪声也比较大。噪声频率很高，变化无常，因此流量控制系统通常不能加微分，加上微分控制器输出容易出现波动，使系统不稳定。

流量过程自身滞后时间小，响应快，当手动调节阀门时，流量在几秒内就能变化完毕，反应比较灵敏。

## 第二章 系统控制策略

### 2.1 控制方案设计原则

根据控制要求，本控制方案可分为四部分来设计，反应温度控制，产品组分控制，压力安全控制，平稳生产顺序控制。

控制方案的设计要遵循可行性原则，所设计的方案要经过验证是可以实施的。在此基础上还要考虑方案的设计要具有一定的先进性。根据以上原则设计控制方案，采用工业上常见的预测控制策略设计了温度控制单元；采用工业上常用的软测量策略设计组分控制单元；采用分程控制策略设计压力控制单元；为了避免人为因素干扰，设计升温、保温、出料、清洗的顺序控制单元；考虑到生产过程的安全性，设计基于安全仪表的紧急停车单元。

### 2.2 温度控制策略

根据对被控对象分析，间歇化学反应温度的特点为：反应温度要求按照一定的温度轨迹运行；反应过程一般有反应热生成；反应过程为时变对象。这些特点使得间歇化学反应温度控制遇到困难，常规的控制很难取得满意的效果。针对这些特点，采用一种新型的模型预测控制算法——预测函数控制（PFC），这类控制算法采用了预测模型，滚动优化，反馈校正 3 项基本原理，适用于复杂的间歇反应过程，但这类算法存在的问题是，一般只采用一个固定的预测模型，一旦该预测模型与实际系统失配较大时，系统达不到要求的控制性能。

根据对被控对象的测试，整个间歇反应过程大致可以分为几个阶段进行，每一阶段要求的温度不同，对应的反应过程也不同，因此对温度的控制采用基于多模型的预测函数控制，反应的不同阶段有一个相应的失配较小的数学模型，针对不同的反应阶段和相应的数学模型设计出相应的 PFC 控制器输出，在实际的控制过程中，通过有效的切换使得在不同的过程阶段选择不同的控制器，从而确保有效的控制。

如图 2.1 所示，根据操作经验得到一条产率最高时优化的温度曲线，整个反应过程经过拟合可以分为六个阶段，每一阶段对应不同的升温速率，每一阶段都可以找到一个数学模型与之相对应。其中第一阶段由冷态常温 20℃ 上升到 45℃，这一阶段通过调节夹套蒸气阀来实现。对于后五个阶段设计五个 PFC 控制器与之相对应，通过模型有效切换确保温度有效跟踪设定的优化曲线。

- 第一阶段：20℃—45℃      升温速率 0.2℃/S
- 第二阶段：45℃—65℃      升温速率 0.1℃/S
- 第三阶段：65℃—90℃      升温速率 0.17℃/S

第四阶段：90℃—110℃ 升温速率 0.18℃/S

第五阶段：110℃-120℃ 升温速率 0.12℃/S

第六阶段：121℃ 保温阶段

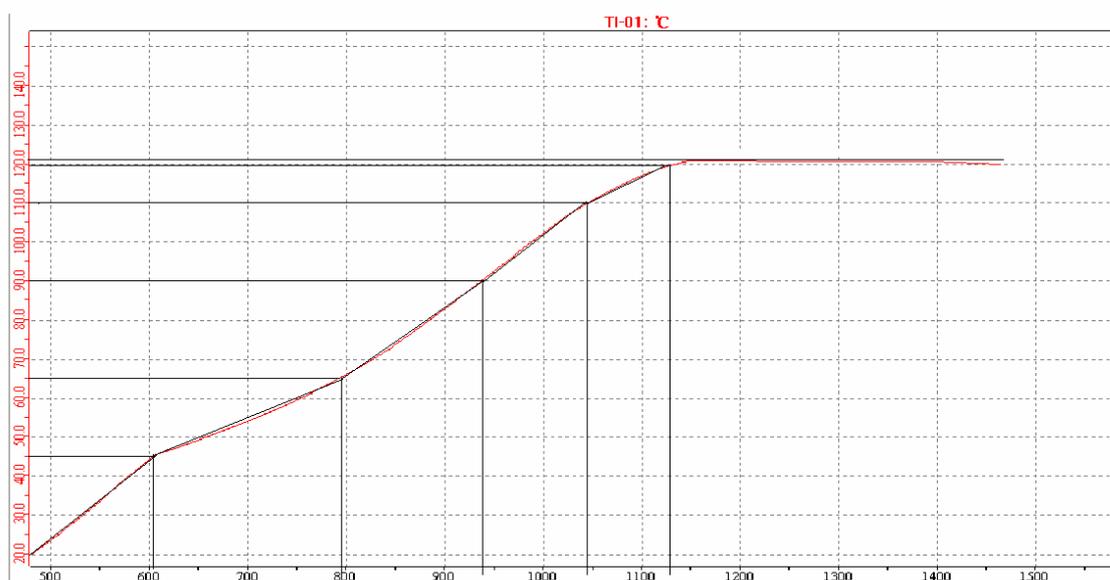


图 2.1 反应温度曲线

## 1、被控变量与操纵变量的选择

被控变量：反应温度 T1

操纵变量：夹套冷却水流量 F8

## 2、控制方案

### (1) 多模型预测函数控制

采用基于五个模型切换的预测函数控制来控制反应温度，温度设定曲线为由操作经验得到的一条最优曲线。为了克服水压带来的扰动，在预测函数控制器的底层设计一个夹套冷却水流量的 PID 控制器。

由于每一阶段要求按照操作工给定的最优曲线指定的升温速率等速升温，所以被控对象反应釜的输出值不是反应温度  $T_1(t)$ ，而是温度对时间的变化率  $\frac{dT_1}{dt}$ ，即升

温速度，将其离散化为  $y_p(t) = \frac{dT_1}{dt} = \frac{T_1(nT_s) - T_1[(n-1)T_s]}{T_s} = y_p(nT_s)$ 。此时的给定值

也不是温度，而是每一段的升温速度。

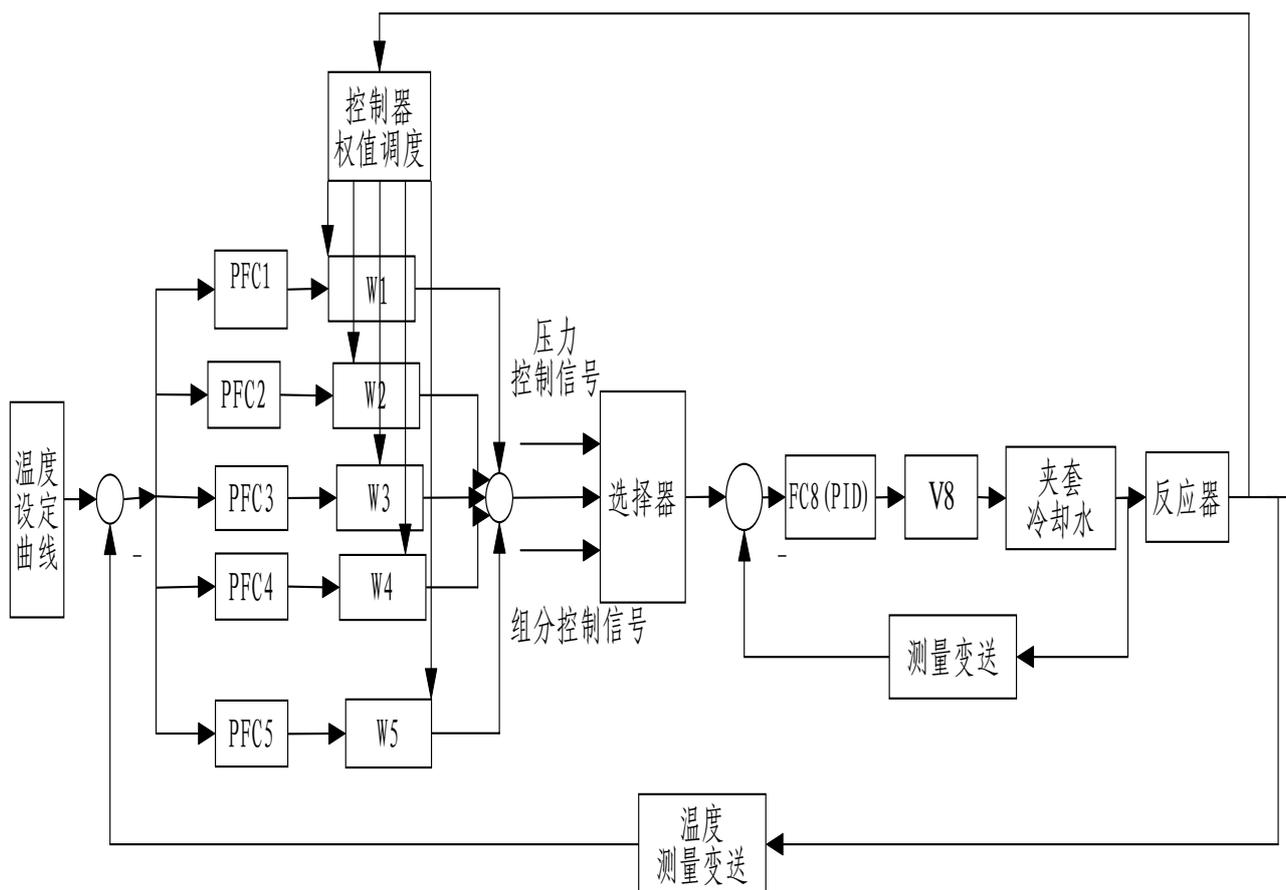


图 2.2 温度控制原理图

### (2) 夹套冷却水流量 PID 控制

冷却水流量的变化随阀门的开度变化较快、时间常数较小。当冷却水压力下降时，即使阀位不变，冷却水流量也会下降。因此，在反应温度预测函数控制器下层设计夹套冷却水流量 PID 控制回路，可有效抑制冷却水压力等干扰。

#### ① 被控变量与操纵变量的选择

被控变量：夹套冷却水流量 F8

操纵变量：夹套冷却水阀 V8

#### ② 控制方案

如图 2.2 所示，反应温度预测函数控制器下层设计简单的夹套冷却水流量 PID 控制回路。

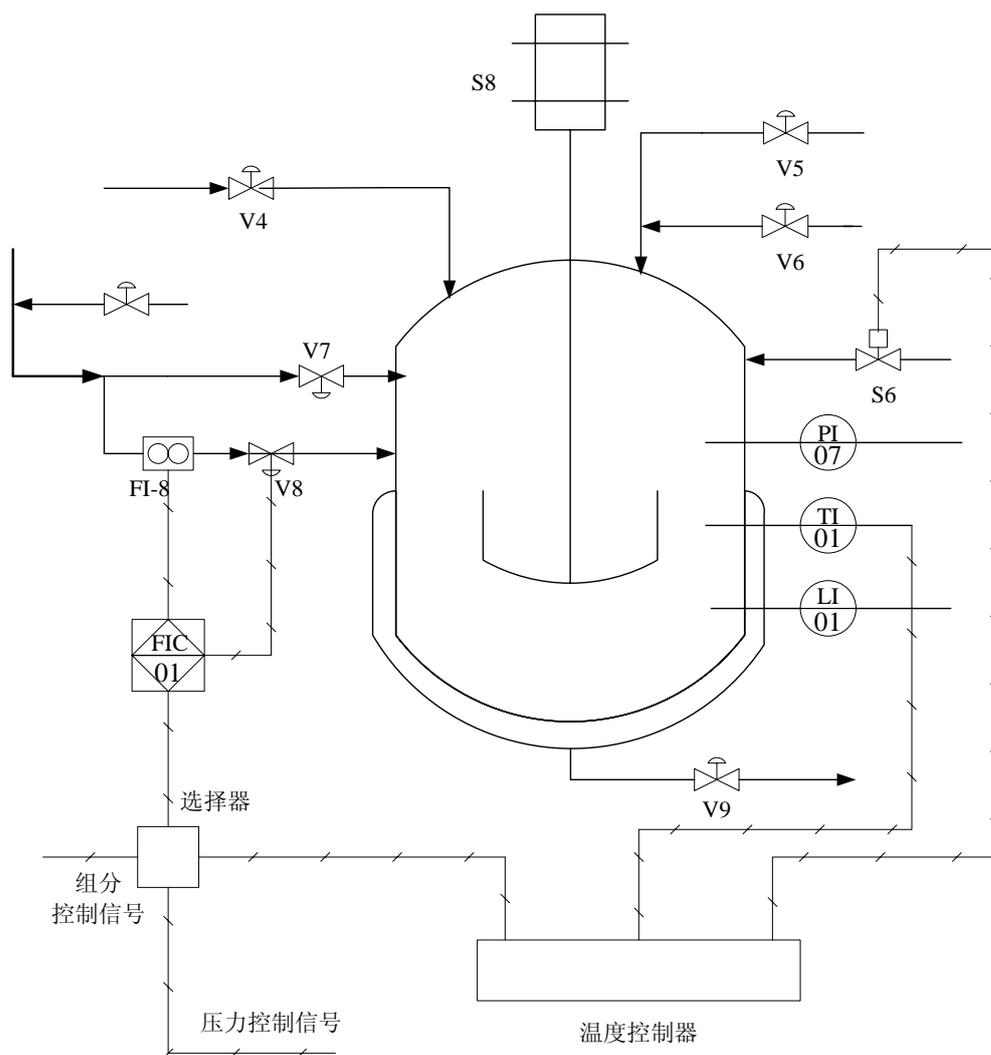


图 2.3 反应釜温度控制 P&amp;ID 图

### 2.3 组分控制策略

在间歇反应过程中，主副反应存在竞争，主反应得活化能较高，期望较高的温度，加热速率过慢会使反应停留在低温区，副反应会加强，影响主产物产率，所以要对主产物的产率进行控制。进料 A 和进料 B 在催化剂 C 的作用下生成主产物 D，同时进料 A 和进料 B 在温度较低时发生副反应生成产物 E，因此出口产品中包含未反应的反应物 A 和 B，还有副反应的生成物 E。出口物料的组分测量对于产品组分的控制十分重要，由于组分不能直接在线测量，因此采用软仪表技术，设计了基于神经网络的产品组分软测量系统。

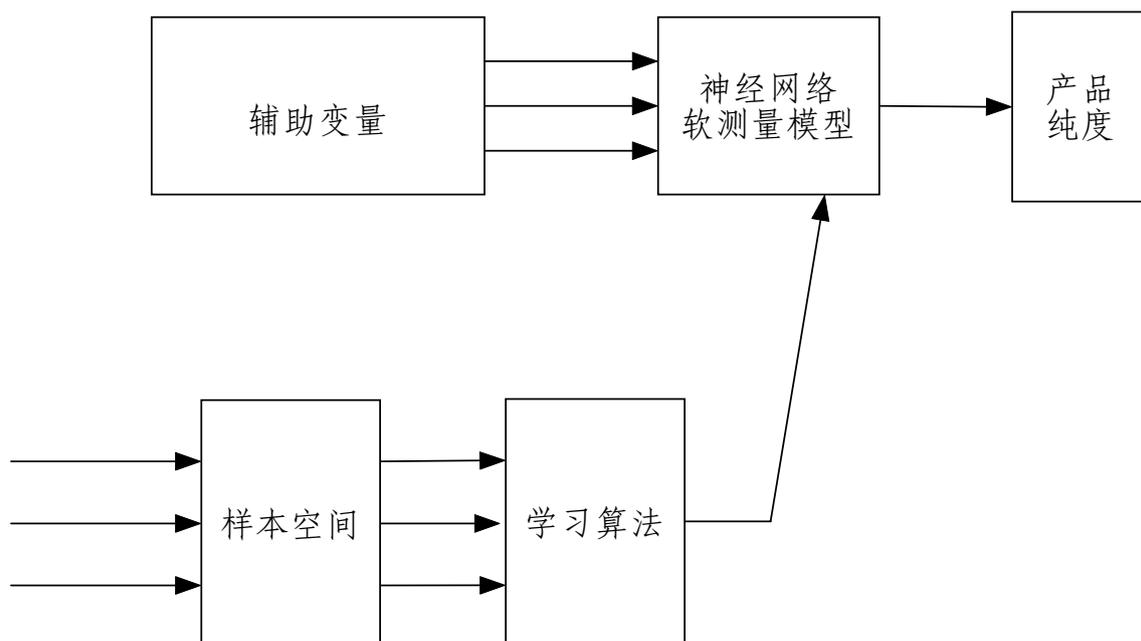


图 2.4 出口产品组分软测量策略

### 1、辅助变量的选择

根据工艺机理分析（物料、能量平衡关系），在可测变量集中，初步选择与被估变量有关的原始辅助变量，这些变量中部分可能是相关变量。然后根据工艺机理、测量仪表精度和数据相关性分析等对初始辅助变量降维。利用主元分析法，利用历史数据做统计分析计算，将原始辅助变量与被测量变量的关联度排序，实现变量的精选。

本系统影响出口产物 D 纯度的主要变量有：

- F7 蛇管冷却水流量
- F8 夹套冷却水流量
- T1 反应温度
- P7 反应压力
- t 保温时间

根据分析，反应主产物 D 的纯度主要受到升温速度、保温时间与温度的影响，因此选择反应温度 T1、反应压力 P7，保温时间 t 三个变量为辅助变量。

### 2、控制方案

由于组分不能实时在线测量，当温度控制器控制升温达到 121℃时，通过软测量模型的输出判断组分是否合格，当发现此时组分不合格时，由操作员输入当前温度期望的组分设定值，由组分控制器来控制冷却水流量，期望获得合格的组分。

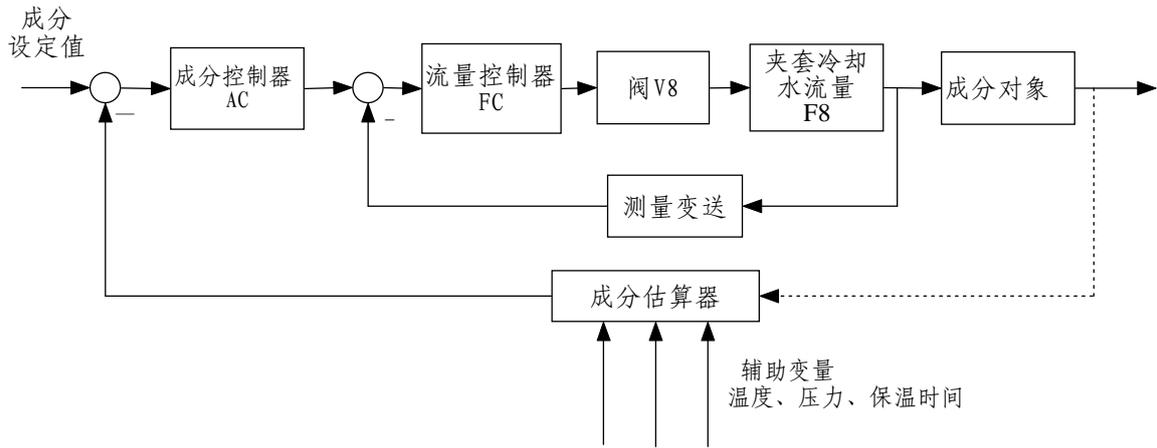


图 2.5 组分控制原理图

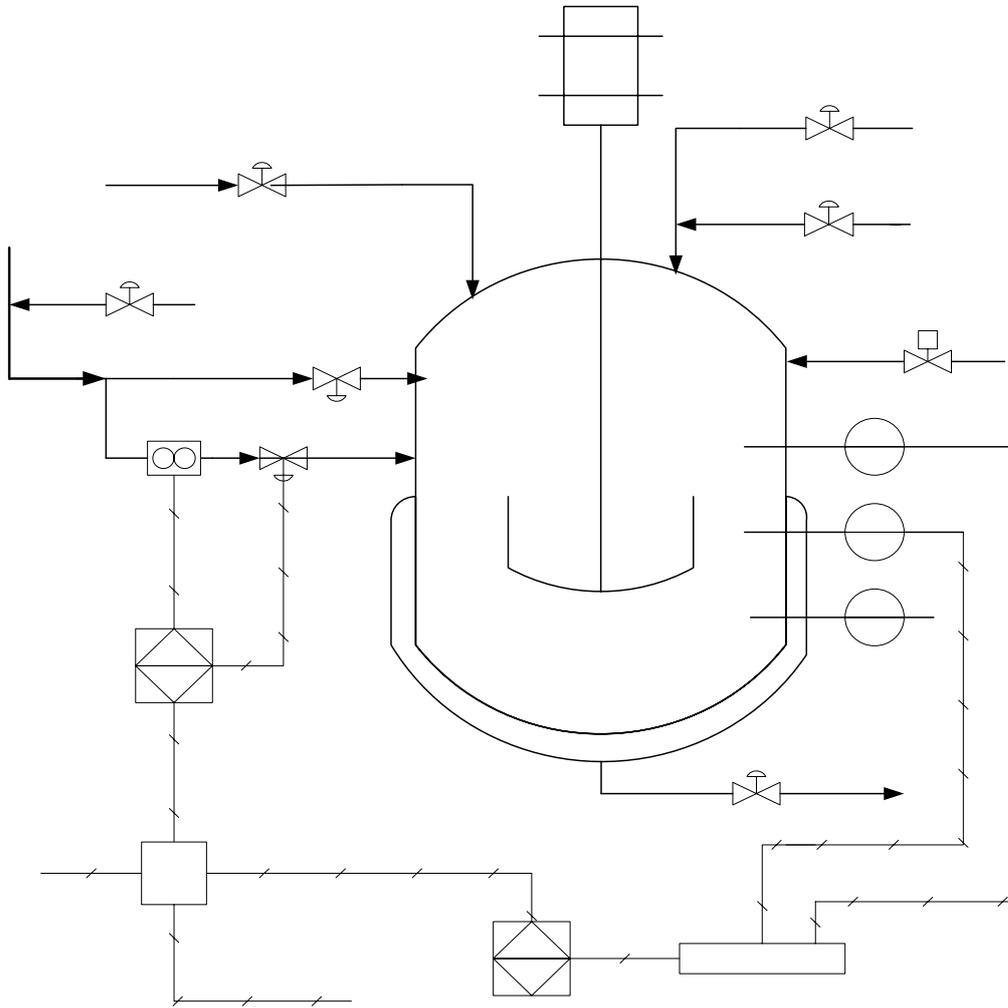


图 2.6 组分控制 P&ID 图

V4

## 2.4 压力安全控制策略

为了保证间歇反应的安全性，需要对压力进行安全控制系统设计。反应釜中压力达到 0.8Mpa 时(反应温度 128℃)将会高限报警，此时需要采取措

V7

S8

施使压力将下来，恢复到正常工况，若采取的措施不及时，当反应釜中压力达到 1.2MPa 时将会高高限报警，此时处于危险超压状态。为了保证整个间歇反应在安全工况下运行，需要对压力进行分程控制。

### 1、被控变量与操纵变量的选择

被控变量：反应压力 P7

操纵变量：V7，V8，V10，V5，S8

### 2、控制方案

压力控制器的五个输出分别控制蛇管冷却水阀 V7，夹套冷却水阀 V8，高压水阀 V10，搅拌电机开关 S8，放空阀 V5。在正常工况下，选择器的输出是预测函数控制器的控制信号，当压力超高时，选择器的输出是压力控制器的信号，对压力进行安全控制。

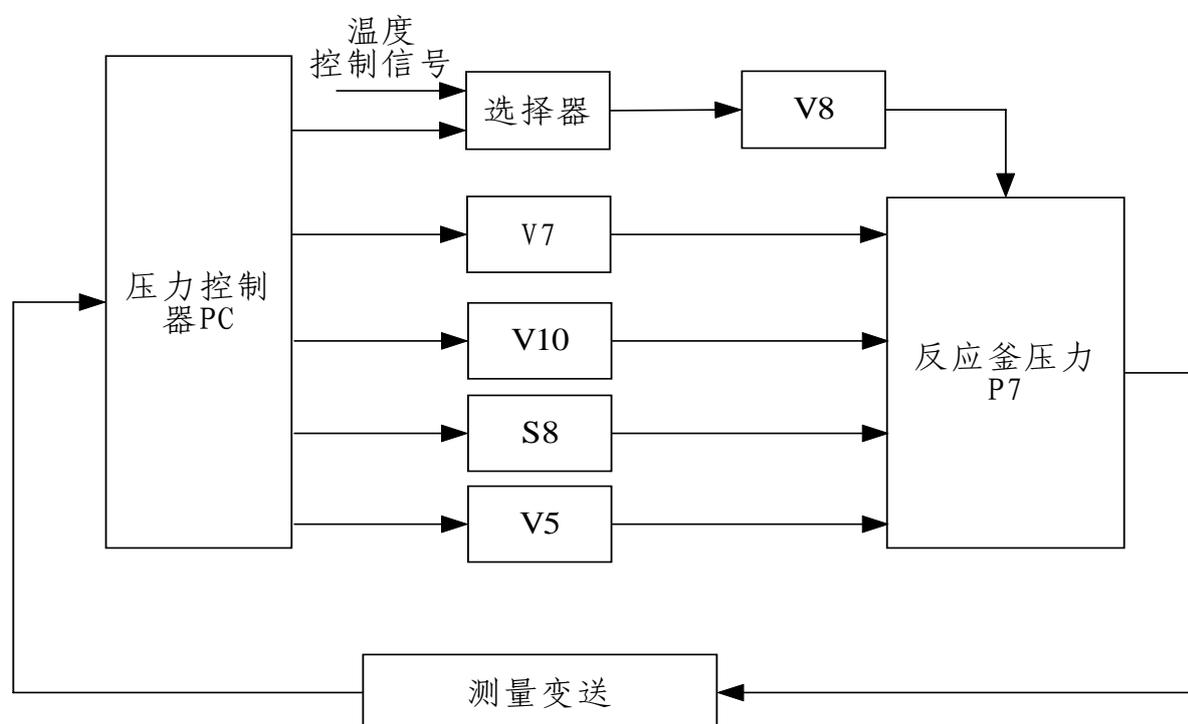


图 2.7 压力控制原理图

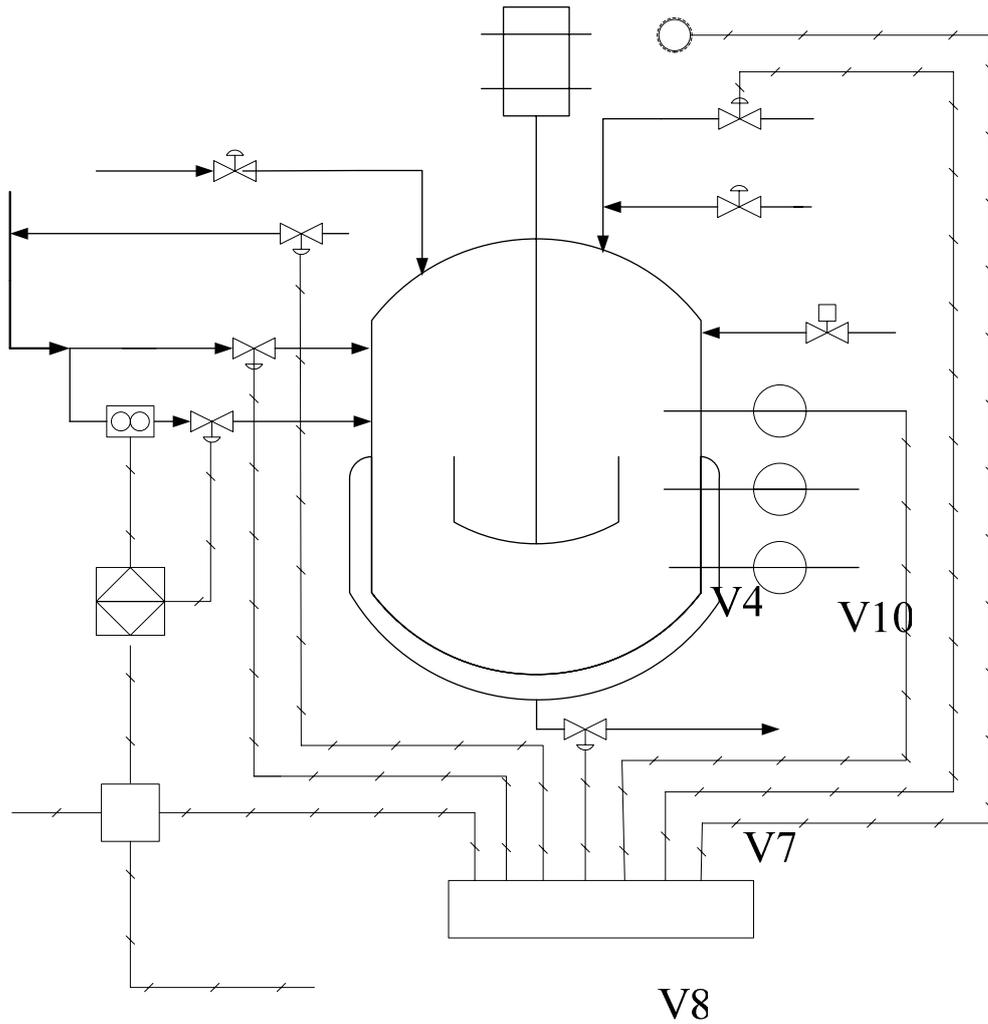


图 2.8 反应釜压力控制 P&amp;ID 图

### 2.5 升温、保温、出料、清洗顺序控制方案

- 1、检查并确认进料阀 V4, V5, V6, 出料阀 V9 关闭, 所有开关处于关闭状态。
- 2、打开搅拌电机开关 S8。
- 3、打开夹套蒸汽加热阀 S6, 以升温速率  $0.2^{\circ}\text{C}/\text{S}$  自动加热。
- 4、反应温度上升至  $45^{\circ}\text{C}$  左右, 关闭 S6, 温度控制投自动。
- 5、反应温度上升至  $121^{\circ}\text{C}$  时, 启动压力安全控制单元。
- 6、反应釜保温开始, 启动组分控制单元。
- 6、当反应釜温度 T1 保持在  $120^{\circ}\text{C}$  5~10 分钟左右, 打开放空阀 V5。
- 7、放空 10 秒钟左右关闭放空阀 V5。
- 8、开出料泵 S5, 出料阀 V9, 当反应釜液位下降至 0.0m 时, 关闭 S5 和 V9。
- 9、间歇反应一次操作完成。

组分  
控制信号

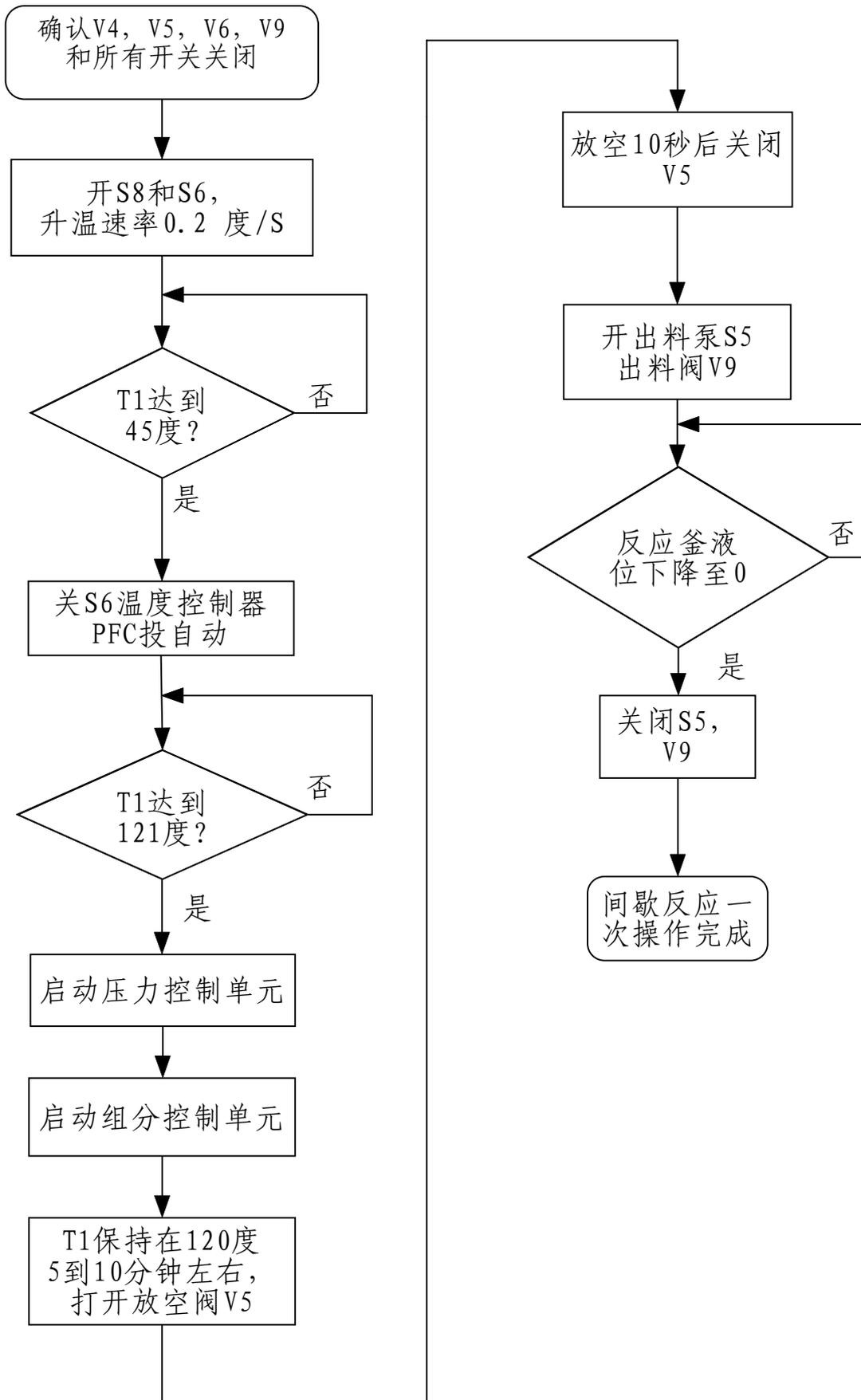


图 2.9 顺序控制流程图

## 2.6 安全连锁 SIS 控制策略

安全连锁是 SIS 的主要内容，对工艺过程、生产设备、人员、环境的保护就是通过一个或多个安全连锁在 SIS 中用逻辑的形式来实现。

在间歇反应过程中，当压力超过 1.2Mpa 时，反应处于危险超压状态，此时如果压力控制的各项措施都不能使反应恢复到正常工况下，当反应器压力超过 1.6Mpa 时会发生爆炸事故，为了防止爆炸事故发生，当压力超过 1.2Mpa，压力控制器的各项控制措施都失效时应启动紧急停车措施。

基于安全因素，设计紧急停车连锁，当压力测量变送器检测到反应釜内压力超过 1.2Mpa，由操作员启动紧急停车按钮，切断生产过程。流程框图如图 2.10 所示。

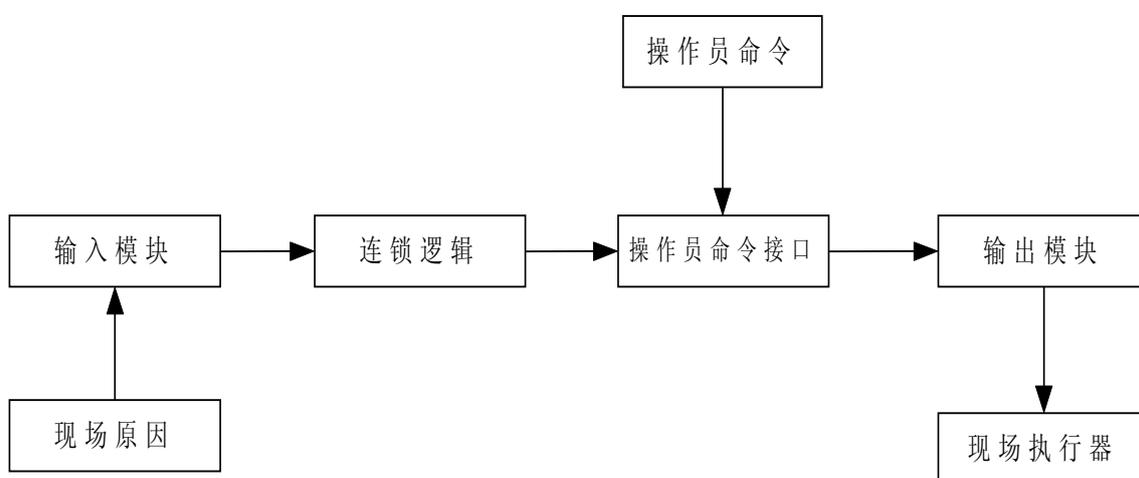


图 2.10 安全连锁信号流程框图

## 2.7 温度、压力、组分的协调控制

选择器有温度，压力，组分三个输入量，一个输出量。正常情况下，选择器的输出是温度控制信号，由温度控制器控制冷却水流量。当压力报警时，选择器的输出是压力控制信号，由压力控制器控制冷却水流量，压力恢复到正常工况后，选择器的输出为温度控制信号。当组分不合格时，选择器的输出是组分控制信号，由组分控制器控制冷却水流量，当组分值恢复后，选择器的输出为温度控制信号。

## 第三章 控制系统硬件设计

### 3.1 控制系统硬件结构

根据控制要求及 PCS7 技术资料, 可采用一种经济实用的控制方案, 系统配置如图 3.1 所示。

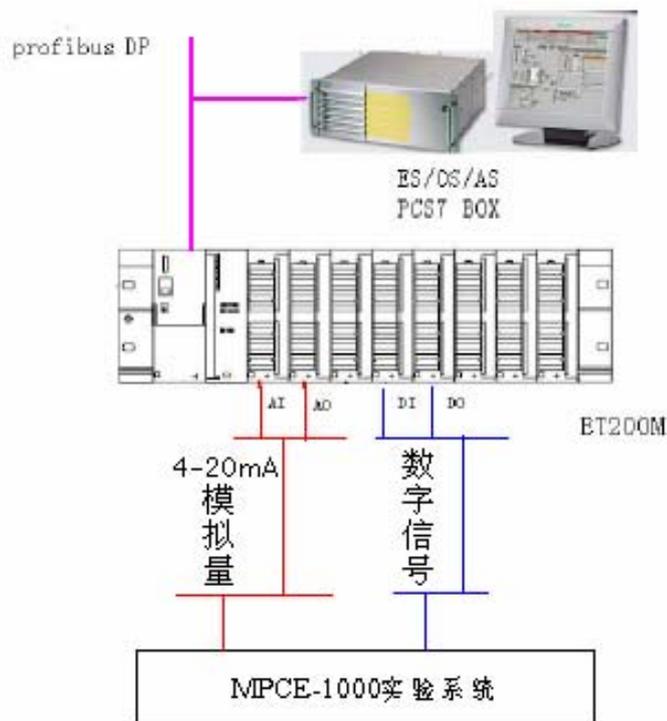


图 3.1 系统配置

系统硬件配置主要部件名称和相关参数见表 3.1。

表 3.1 系统硬件配置主要部件及参数表

符号	名称	规格	说明	单位	数量
CPU	CPU 模块	CPU416-2	PCI	块	1
ET 200M	接口模块	与 PROFIBUS DP 连接的		块	1
IM 153-2	分布式站点				
DO	数字量输入模块	SM 322	8*DC 24V/2A	块	1
AI	模拟量输入模块	SM 331	8*16BIT	块	1
AO	模拟量输出模块	SM 332	8*16BIT	块	1

本控制系统模块的主要组成如下：

## (1)PCS7 BOX 的中央处理单元模块

PCS7 BOX 的中央处理是 CPU416-2 PCI, 1.6MB RAM(0.8MB 程序,0.8MB 数据块),最大扩展 128K DI/DO 8K AI/AO 1 个 MPI/DP 接口,1 个 Profibus-DP 接口。

## (2) I/O 模块

① 采用 SM321 类型 8 通道\*16 位 24VDC 的数字量输出模块,用于控制泵的开和关。

② 采用 SM331 类型 8 通道\*16 位的模拟量输入模块,用于采集设备温度信号、流量信号、压力信号、液位信号等。

③ 采用 SM332 类型 8 通道\*16 位的模拟量输出模块,输出模拟信号用于控制阀门状态。

系统输入 / 输出数据如表 3.2 所示。

表 3.2 系统输入输出数据

序号	位号	单位	数据源	数据点备注	数据类型
1	FI-07	kg/h	F7	蛇管冷却水流量	AI
2	FI-08	kg/h	F8	夹套冷却水流量	AI
3	FI-09	kg/h	F9	反应物出口流量	AI
4	PI-07	MPa	P7	反应器压力	AI
5	LI-02	%	L2	A 物料计量罐液位	AI
6	LI-03	%	L3	B 物料计量罐液位	AI
7	LI-04	%	L4	反应器液位	AI
8	TI-01	℃	T1	反应温度	AI
9	V-02	%	V2	B 物料上料阀	AO
10	V-03	%	V3	A 物料上料阀	AO
11	V-04	%	V4	液相丙烯进料阀	AO
12	V-05	%	V5	液相己烷进料阀	AO
13	V-06	%	V6	C 物料进料阀	AO
14	V-07	%	V7	蛇管冷却水入口阀	AO
15	V-08	%	V8	夹套冷却水入口阀	AO
16	V-09	%	V9	反应器出料阀	AO
17	S-02	%	S2	B 物料上料阀开关	DO
18	S-04	%	S4	A 物料上料阀开关	DO

19	S-05	%	S5	反应物出口泵开关	DO
20	S-06	%	S6	诱发反应热水阀	DO
21	S-08	%	S8	搅拌电机开关	DO

④I/O 模块的接线图

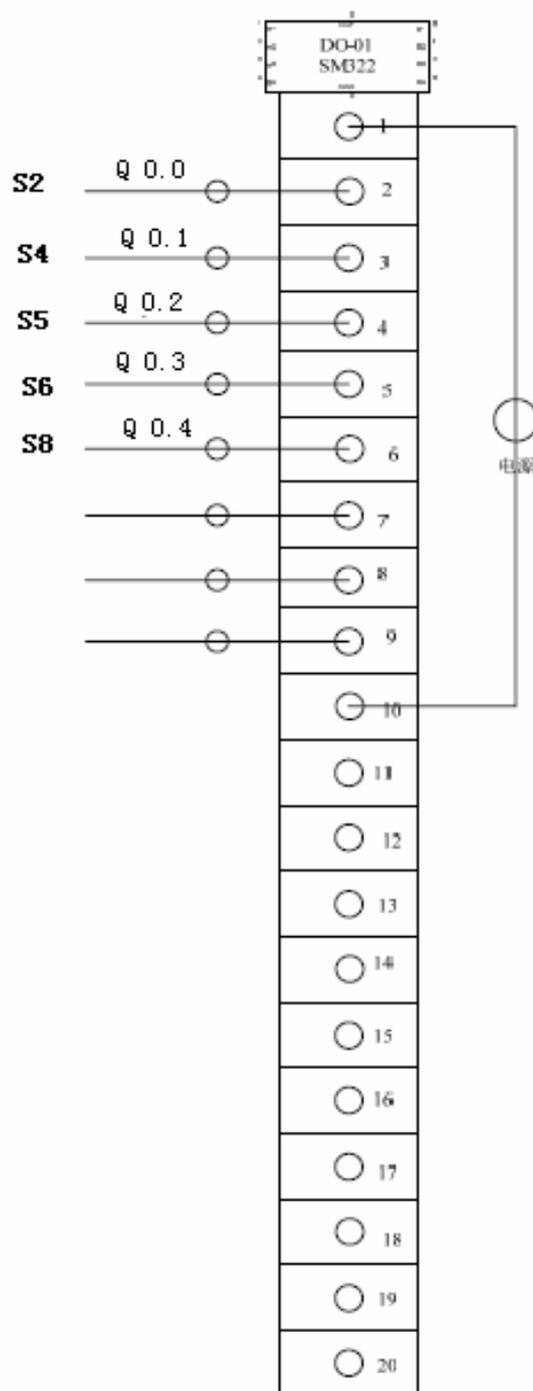


图 3.2 DO 模块接线图

DO 模块选用 SM322 型的开关量输出卡板，负责 5 个开关量。S2, S4, S5, S6, S8 这 5 路开关量以 0-24V 标准信号输出。

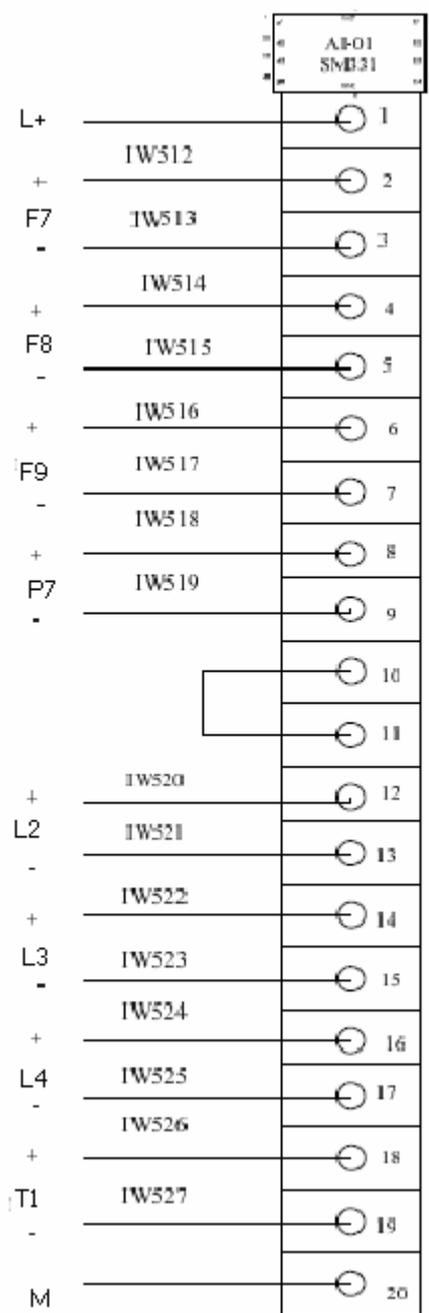


图 3.3 AI 模块接线图

AI 模块选用SM331 型的模拟量输入板卡1 块，负责接收8 个模拟量。F7, F8, F9, TI, P7, L2, L3, L4, , T1 这8路模拟量以4-20mA 标准信号输入。

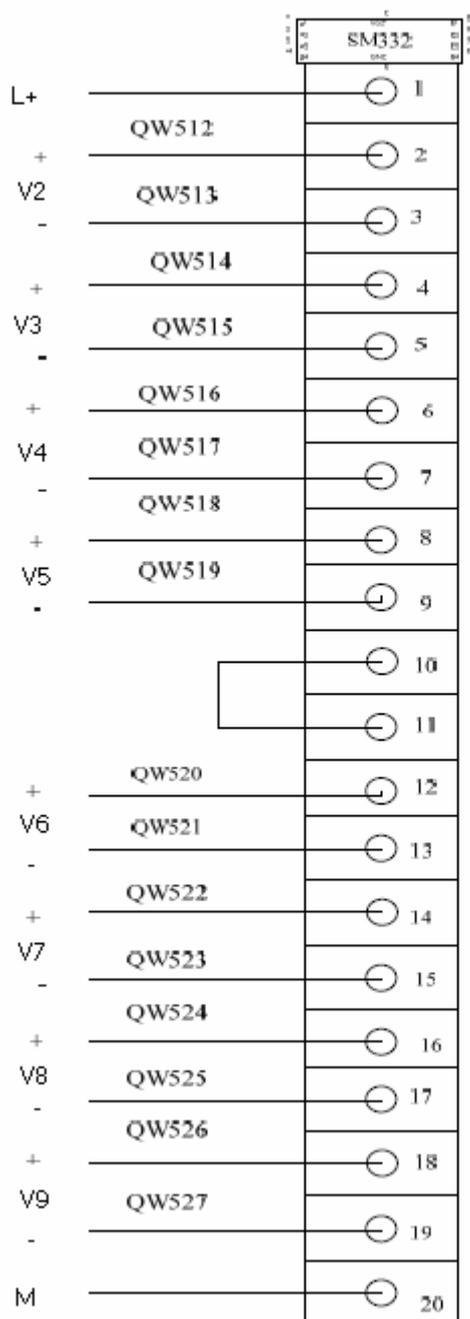


图 3.4 AO 模块接线图

AO 模块选用SM332 型的模拟量输出板卡，负责输出6 个模拟量。V2，V3，V4，V5，V6，V7 ，V8，V9这8 个阀门的开度以4-20mA 标准信号输出。

### 3.2 通讯网络

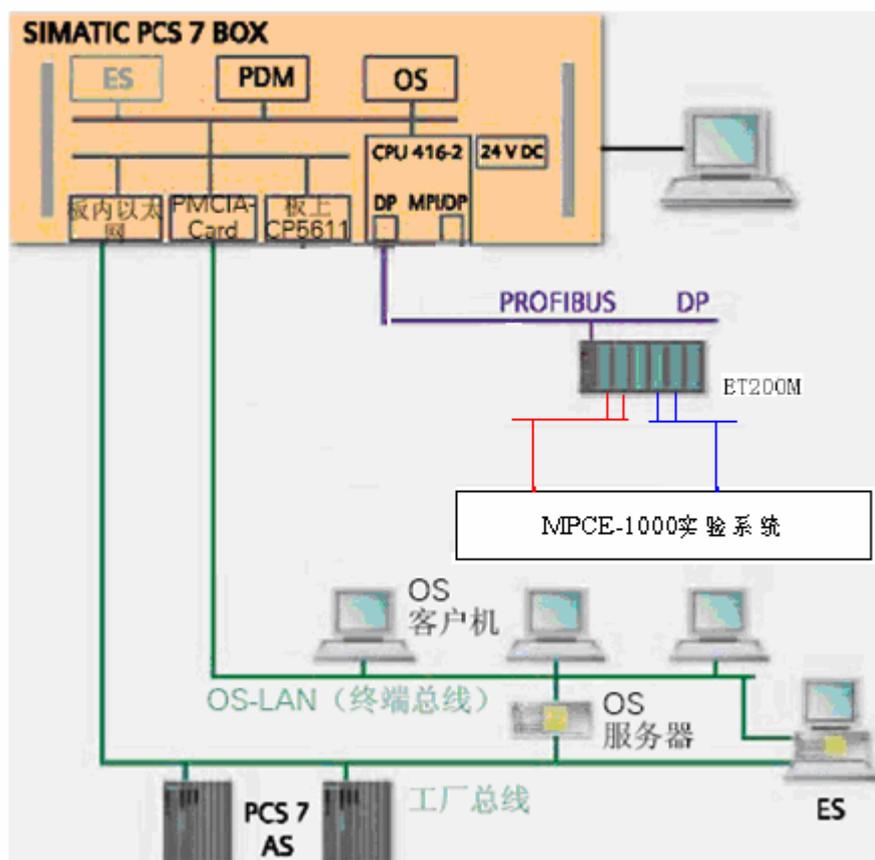


图 3.5 PCS 7 通讯网络

PCS 7 SIMATIC PCS 7 BOX 系统能够以通常方式连接到工业以太网总线,进而集成到整个工厂的通讯系统。在 SIMATIC PCS 7 网络中,通过 Box PC 的集成以太网接口,与其它 SIMATIC PCS 7 组件进行通讯,例如 AS、OS 或 ES 以及批处理或 MES 应用程序。通过 Slot CPU 416 中的 PROFIBUS-DP 接口,链接 IMATIC ET 200 分布式标准 I/O 设备。

### 3.3 执行器的选择

调节阀阀门形式的选择主要遵循三个原则:(1)事故条件下,工艺装置应尽量处于安全状态;(2)事故状态下,减少原料或动力消耗;(3)充分考虑流动介质的特性。

#### (1) 执行器的类型选择

① V4、V5、V6 三个阀为反应釜的进料阀,在失气时应该使阀门关闭,以保证生产安全,因此选择气开阀;V4, V5, V6 选择线性特性的调节阀;V-09、V-10 只做开关控制,要求动作迅速,因此选用快开流量特性;

② V9 为反应釜的出料阀,在失气时应该使阀门打开,以保证反应釜内压力及温

度在安全范围内，因此选择气关阀；V7、V8 为冷却水阀门，在失气时要求阀门打开，温度不宜过高，否则会导致压力增大到危险程度，所以选择气关阀。

### (2) 执行器流量特性选择

① 线性流量特性是指调节阀的相对流量与调节阀的相对位移（开度）成直线关系（即单位位移变化所引起的流量变换是常数），其数学表达式为：

$$\frac{d(Q/Q_{\max})}{d(l/L)} = k$$

式中  $k$ —调节阀的放大系数

将边界条件  $l=0$  时， $Q=Q_{\min}$ ； $l=L$  时， $Q=Q_{\max}$  代入整理得：

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{1}{R} \left[ 1 + (R-1) \frac{l}{L} \right] = \frac{1}{R} + \left( 1 - \frac{1}{R} \right) \frac{l}{L}$$

② 对数（或称等百分比）流量特性是指阀杆的单位相对位移（开度）变化所引起的相对流量变化与该点的相对流量成正比。其数学表达式为：

$$\frac{d(Q/Q_{\max})}{d(l/L)} = k \frac{Q}{Q_{\max}} = k_v$$

可见，调节阀的放大系数  $k_v$  是变化的，它随相对流量的变化而变化。

从过程控制看，利用对数（等百分比）流量特性是有利的，调节阀在小开度时  $k_v$  小，控制缓和 平稳，调节阀在大开度时  $k_v$  大，控制及时有效。

一个过程控制系统，在负荷变动的情况下，要使系统保持预定的品质指标，则要求系统总的放大倍数在整个操作范围内保持不变。一般变送器、调节器（已整定好）、执行机构等放大倍数基本为一个常数。但是过程特性往往是非线性的。若合理的选择调节阀的特性，以补偿过程的非线性，则可提高系统的质量，其选择的原则为：

$$k_v k_0 = \text{常数}$$

式中： $k_v$ —调节阀的放大系数；

$k_0$ —过程的放大系数；

根据被控对象的特性，流量控制对象的过程放大系数  $k_0$  为线性，所以 V4、V5、V6 的流量特性为线性阀；温度过程  $k_0$  为非线性，所以 V7、V8 的流量特性为等百分比。

根据上面的分析，控制器的选择如表3.3所示。

表 3.3 阀门参数

位号	说明	公称直径 Dg	最大流量	阀门形式	阀门特性
V-02	B 物料上料阀	Dg40mm	8.1t/h	气开阀	线性
V-03	A 物料上料阀	Dg40mm	9.72 t/h	气开阀	线性
V-04	A 物料下料阀	Dg40mm	9.05 t/h	气开阀	线性
V-05	B 物料下料阀	Dg40mm	8.68 t/h	气开阀	线性
V-06	C 物料下料阀		42.77 t/h	气开阀	线性
V-07	蛇管冷却水入口阀	Dg50mm	42.84 t/h	气关阀	等百分比
V-08	夹套冷却水入口阀	Dg65mm	72.84 t/h	气关阀	等百分比
V-09	反应物出口阀	Dg70mm	46.44 t/h	气关阀	快开
V-10	高压水入口阀			气关阀	快开

### 3.4 仪表参数设定

系统中各仪表参数如表 3.4 所示。

表 3.4 仪表参数

位号	单位	数据源	数据点备注	仪表下限	仪表上限
FI-07	kg/h	F7	蛇管冷却水流量	0	50
FI-08	kg/h	F8	夹套冷却水流量	0	80
FI-09	kg/h	F9	反应物出口流量	0	55
PI-07	MPa	P7	反应器压力	0	1.6
LI-04	m	L4	反应器液位	0	2
TI-01	℃	T1	反应温度	0	170
V-04	%	V4	反应 A 物料进料阀	0	100
V-05	%	V5	反应 B 物料进料阀	0	100
V-06	%	V6	催化剂进料阀	0	100
V-07	%	V7	蛇管冷却水入口阀	0	100
V-08	%	V8	夹套冷却水入口阀	0	100
V-09	%	V9	反应器出料阀	0	100

## 第四章 控制系统软件设计

### 4.1 温度控制

#### 一、冷态常温到 45℃ 的升温控制

反应物由冷态常温上升到 45℃ 这一过程中, 为了保证稳定升温, 要间歇打开夹套加热蒸气阀 S6, 根据最优操作曲线, 这一段的升温速率要控制在 0.2℃/S, 选择每间隔一秒打开 S6 一次, 这一阶段升温时间为 120 秒。

具体实现: 在 PCS7 中通过简单编程即可实现, 选择一时间脉冲信号, 每隔一秒控制 S6 打开一次, 实现间歇加热。

#### 二、基于多模型的升温、保温预测函数控制

##### 1、预测子模型选取与预测函数算法

###### (1) 预测子模型

用夹套加热蒸气加热到 45℃ 以后, 反应被深度诱发, 关闭 S6。45℃ 到保温过程共分为五个阶段, 每一阶段都可以拟合成一阶时滞对象。每个子模型的输入变量为夹套冷却水流量 F8, 输出变量为反应温度 T1 的变化率。可采用 M 序列辨识得到每一个预测子模型。M 序列是一种很好的辨识输入信号, 具有近似白噪声的性质, 可保证有好的辨识精度, 工程上易于实现, 且具有输入净扰动小, 幅值、周期、时钟节拍容易控制等优点, 目前已普遍被用作辨识输入信号。

辨识过程如下:

① 找到每一部分的稳定工作点 (温度变化率保持在一个相对稳定的值), 在输入变量 (夹套冷却水流量 F8) 上叠加小幅的 M 序列测试信号, 记录反应温度变化情况。

② 对多次测试得到的输入输出数据进行滤波、处理后, 可利用 Matlab 中提供的辨识工具得到系统在稳定工作点附近的预测模型

$$G_{im}(s) = \frac{K_{im}}{T_{im}s + 1} e^{-T_{imd}s}, \text{ 每个子模型用一阶纯滞后函数拟合即可。}$$

###### (2) 预测函数控制算法

预测函数控制基本原理如图 4.1 所示。

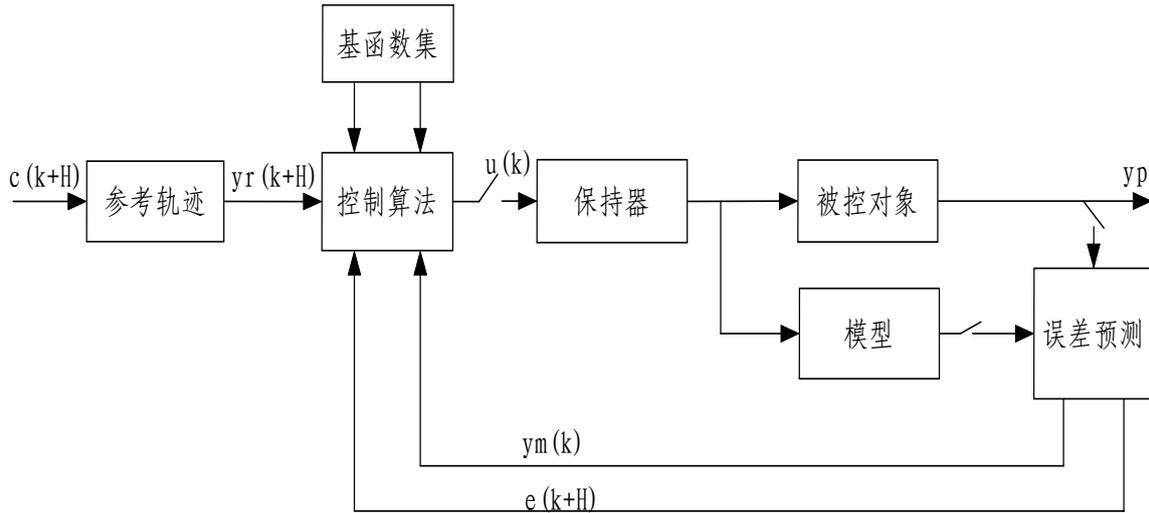


图 4.1 预测函数控制原理图

预测函数控制将控制输入结构化，把每一时刻的控制输入看作是若干事先选定的基函数的线性组合。基函数的选取依赖于设定值轨线和对象的性质，系统输出是上述基函数作用于对象的响应（过程模型已知，可事先算出）的加权组合。在线优化的目的是为了求出少量的线性加权系数，进而计算出未来的控制输入，在线计算工作量大大减少。

$G_{1m}, G_{2m}, G_{3m}, G_{4m}, G_{5m}$  对应不同工况下被控对象的预测子模型， $u_i (i=1,2,3,4,5)$  分别为每个子模型相对应的预测函数控制器的输出， $w_i$  为控制器调度（切换）的权值，通过计算在线误差匹配度决定。任意时刻预测函数控制器的输出是 5 个局部预测函数控制器输出的加权和。即：

$$u = \sum_{i=1}^5 w_i u_i$$

#### ① 预测函数控制器 PFC 的输出

对于任意一个预测子模型可以表示为：

$$G_{im}(s) = \frac{K_{im}}{T_{im}s + 1} e^{-T_{imd}s}$$

其中  $K_{im}, T_{im}, T_{imd}$  分别是每一个预测子模型的稳态增益，时间常数和模型的纯滞后时间。将其离散化，得到差分方程：

$$y_{im}(k+1) = \alpha_{im} y_{im}(k) + K_{im}(1 - \alpha_{im}) u_i(k-D)$$

$$\text{其中 } \alpha_{im} = e^{(-T_s/T_{im})}$$

$T_s$ ：采样时间

$$D = T_{imd} / T_s \quad \text{滞后时间}$$

在设定值做阶跃变化的情况下，采用一个基函数：

$$u_i(k+1) = u_1 = u_i(k) \quad i = 1, 2, \dots, H-1$$

先考虑  $D=0$  时 PFC 的算法，取预测步长为  $H$ ，则：

$$y_{im}(k+H) = \alpha_{im}^H y_{im}(k) + K_{im}(1 - \alpha_{im}^H) u_i(k)$$

根据单值预测思想，选取目标函数为：

$$J = \min((y_{im}(k+H) + e_{im}(k+H) - y_r(k+H))^2)$$

其中： $y_r(k+H) = c(k+H) - \beta^H [c(k) - y_p(k)]$ ， $c(k+H)$  为  $k+H$  时刻的设定值， $\beta = e^{(-T_s/T_r)}$   $T_r$  为参考轨迹的时间常数， $y_p(k)$  为  $k$  时刻过程实际输出值， $e_i(k+H) = y_p(k) - y_{im}(k-D)$ 。

优化目标函数可得  $D=0$  时  $k$  时刻每个控制器输出的控制量：

$$u_i(k) = \frac{c(k+H) - \beta^H c(k) - y_p(k)(1 - \beta^H)}{K_{im}(1 - \alpha_{im}^H)} + \frac{y_{im}(k)}{K_{im}}$$

$D \neq 0$  时，参考 Smith 预估器的思想，PFC 模型输出  $y_{im}$  仍然采用  $D=0$  的模型，但要对系统对象输出进行修正，其中  $y_p(k)$  分别由修正值  $y_{pav}(k)$  代替

$$y_{pav}(k) = y_p(k) + y_{im}(k) - y_{im}(k-D)$$

则相应的控制量为：

$$u_i(k) = \frac{c(k+H) - \beta^H c(k) - y_{pav}(k)(1 - \beta^H)}{K_{im}(1 - \alpha_{im}^H)} + \frac{y_{im}(k)}{K_{im}}$$

整个控制系统的输出为  $u_i$  的加权和：

$$u = \sum_{i=1}^5 w_i u_i$$

## ② 多模型切换权重 $W_i$ 的确定

控制权重  $W_i$  的值直接关系到模型切换的质量，考虑到模型每次只能在任意两个相近的工况下运行，因此只有误差匹配值最小的两个模型对应的  $W_i$  不为零，参与加权输出。且当最小误差足够小时，可认为此模型即为对象模型，仅其  $W_i$  不为零，

具体如下：

在系统运行过程中，设采样时刻为  $k$ ，这 5 个模型的预测输出为  $y_{im}(k)$ ，( $i=1, 2, \dots, 5$ )，被控对象的输出为  $y_p(k)$ ，即

$$e_i(k) = \frac{|y_{im}(k) - y_p(k)|}{|y_p(k)| + \rho}$$

其中： $\rho$  ( $0 < \rho \leq 1$ ) 的作用是防止分母为零。

定义匹配误差为  $e_i(k, l)$ ，其值为  $e_i(k, l) = \theta \sum_{j=k-l}^{k-1} e_i(j) + e_i(k)$

其中： $l$  为匹配误差长度， $\theta$  ( $0 < \theta < 1$ ) 为匹配误差遗忘因子，以降低历史信息的重要性。

控制权重  $W_i$  的确定规则为：

设  $e_a(k, l)$ ， $e_b(k, l)$  对应的集合  $\{e_1(k, l), e_2(k, l), \dots, e_5(k, l)\}$  中最小，次最小的两个匹配误差，当  $e_a(k, l) < 0.05$  时， $W_a = 1$ ， $W_i = 0 (i \neq a)$ ，否则控制权重为  $W_i = 0$

$$i \in [1, 2, \dots, 5], i \neq a, b, W_a = \frac{Wb}{W_a + W_b}, W_b = \frac{Wa}{W_a + W_b}$$

## 2、控制器的具体算法步骤

### (1) 算法初始化

整定下层 PID 参数，给定温度设定最优曲线，确定每个子模型的  $K_{im}$ ， $T_{im}$ ， $T_{imd}$ ，选择基函数的设定值，给定 PFC 控制的相关参数，参考轨迹时间常数  $T_r$ ，采样周期  $T_s$  和预测步长  $H$ ，并计算相关参数。

(2) 读入  $k$  时刻的过程输出值  $y_p(k)$ ，及  $k$  时刻和  $k+H$  时刻的工艺设定值  $C(k)$  及  $C(k+H)$ 。

(3) 计算  $k$  时刻的各子模型的控制量  $u_i(k)$ 。

(4) 计算  $k$  时刻的各子模型的控制权重  $W_i$ 。

(5) 计算  $k$  时刻控制量  $u(k)$

(6) 计算各预测子模型输出  $y_{im}(k+1)$  并执行  $u(k)$ 。

(7) 令  $k = k + 1$  转 (2)

### 三、底层 PID 控制器算法的实现

夹套冷却水阀 V8 选气关阀，流量控制器 FC8 选正作用。

底层夹套冷却水流量 PID 控制器采用基本的 PID 算法，根据控制方案直接使用 PCS7 中的 PID 模块来实现。

## 4.2 组分控制方案

### 1、软测量模型的建立

#### (1) 问题的描述

间歇反应混合液出口组分 D 的纯度的软测量模型可以描述为：

$$A(t) = f(T1(t), P7(t), t)$$

其中：f 为输入输出间的非线性函数关系。

#### (2) BP 神经网络

本设计采用 BP 神经网络来建立软测量模型。

设模型有一个输入向量  $X = \{x_i\} (i=1, \dots, n)$ 、一个隐含向量  $B = \{b_j\} (j=1, \dots, m)$ 、一个输出向量  $y$  和两个权重向量  $W = \{\omega_j\}$ 、 $V = \{v_{ij}\} (i=1, \dots, n) (j=1, \dots, m)$ ，其中权重向量是一些可变的系数。则对各层输入与权重系数乘积的和进行的非线性映射即为输出，可以由下式描述：

$$b_j = f\left(\sum_{i=1}^n v_{ij} x_i\right)$$

$$Y(X) = f\left[\sum_{j=1}^m \omega_j f\left(\sum_{i=1}^n v_{ij} x_i\right)\right]$$

一般的非线性映射  $f(\cdot)$  取 S 型函数，即  $f(x) = 1/[1 + \exp(-x)]$ 。

#### (3) 神经网络学习算法

BP 神经网络结构如图 4.2 所示。

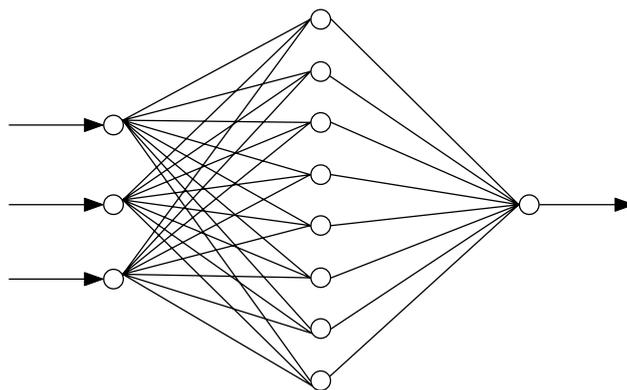


图 4.2 模型的网络结构图

BP 学习过程的目的是使希望输出与网络实际输出的均方差最小，算法如下：

令某一训练输入向量为  $X_k$ ，网络实际输出为  $Y_k$ ，其中

$X_k = (x_{k1}, \dots, x_{kn})^T$ ， $Y_k = (y_{k1}, \dots, y_{kq})^T$ ，对应输入  $X_k$  的理想输出为  $D_k$ ，

输出误差为  $E_k = \frac{\sum (d_{kl} - y_{kl})^2}{2}$ 。

若  $l$  为输出层中的第  $l$  个神经元，则由最速下降法知各层神经元的权系数的迭代方程为：

$$W(k+1) = \omega(k) - \mu \Delta E_k$$

$$\text{其中 } \Delta E_k = \frac{\partial E_k}{\partial \omega_{il}}, W = \{\omega_{il}\}$$

$$\text{且 } y_{kl} = f_l \left( \sum_i \omega_{il} x_{ki} \right)$$

$$\text{有 } \frac{\partial E_k}{\partial \omega_{il}} = \frac{\partial E_k}{\partial y_{kl}} \times \frac{\partial y_{kl}}{\partial W_{il}}$$

$$\text{对输出层有 } \frac{\partial E_k}{\partial y_{kl}} = -(d_{kl} - y_{kl})$$

$$\text{令 } N_{kl} = \sum_i \omega_{il} x_{ki}$$

$$\text{其中 } y_{kl} = f_l(N_{kl}), \frac{\partial N_{kl}}{\partial \omega_{il}} = x_{ki}$$

$$\text{令 } \delta_{kl} = -\frac{\partial E_k}{\partial N_{kl}}$$

$$\text{则 } \omega_{il}(k+1) = \omega_{il}(k) + \mu \delta_{kl} x_{ki}$$

$$\frac{\partial y_{kl}}{\partial N_{kl}} = f'_l(N_{kl})$$

$$\text{输出层 } \frac{\partial E_k}{\partial y_{kl}} = -(d_{kl} - y_{kl})$$

$$\text{所以 } \delta_{kl} = (d_{kl} - y_{kl}) f'_l(N_{kl}) = (d_{kl} - y_{kl}) f'_l(N_{kl}) [1 - N_{kl}]$$

$$\text{其中 } f(N_{kl}) = \frac{1}{1 + e^{-N_{kl}}}$$

#### (4) 模型训练与测试

从间歇反应系统中取用 200 组数据, 前 100 组用于 BP 神经网络的训练, 后 100 组用于测试所训练出来的模型。采样时要在稳态条件下选取数据。输入数据每 1 秒采样一次, 输出每 10 秒采样一次。训练时取与输出采样相对应的输入数据作为模型的输入。训练过程中 BP 的权值的训练更新选用梯度下降法。训练及测试利用 Matlab 工程计算软件实现。

#### 2. 控制器算法的实现

使用 MATLAB 语言编写神经网络测试程序, 和神经网络测试程序, 确定软测量模型。

组分控制器采用最基本的 PID 控制算法。根据组分控制的设计方案使用 PCS7 中的 SCL 语言直接编写代码来实现。

### 4.3 压力控制方案

反应釜中压力达到 0.8Mpa(反应温度 128°C)将会报警, 当压力达到报警值时, 开启蛇管冷却水阀 V7 和夹套冷却水阀 V8, 利用 F7 和 F8 的冷却作用来降温, 如果 V7, V8 已开到最大仍抑制不住压力上升, 则开启高压冷却水阀 V10 进行强制冷却, 如果 V10 全开仍抑制不住压力上升, 当压力继续上升到 0.83Mpa 时关闭搅拌电机开关 S8。此时如果强制冷却及停止搅拌奏效, 一旦压力出现下降趋势, 关闭 V10, 同时开启搅拌釜电机开关 S8。当压力达到 1.2Mpa 时, 打开放空阀 V5。如果前面的各项控制措施都抑制不住压力上升, 采用紧急停车措施, 开出料泵 S5, 全开出料阀 V9, 放空产物。

压力控制器的工作原理如图 4.3 所示。

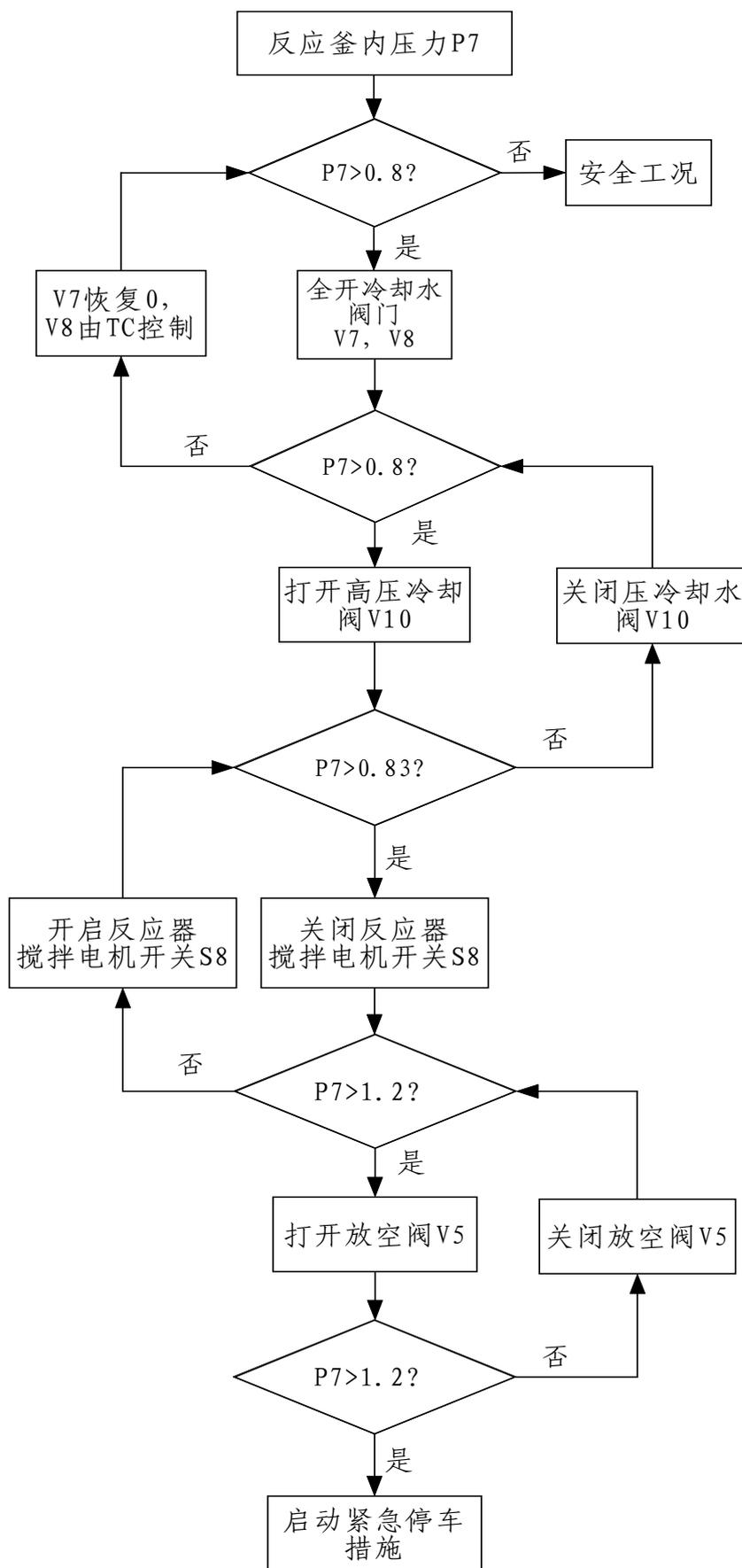


图 4.3 压力控制流程图

使用 PCS7 的 SCL 语言编写代码如下：

```
FUNCTION_BLOCK FB100
//定义静态变量
VAR
PRESSURE:REAL:=0;
FLAG1:BOOL:=0;//标示 V7, V8 是否全开
FLAG2:BOOL:=0;//标示 V10 是否打开
FLAG3:BOOL:=0;//标示搅拌电机开关是否关闭
FLAG4:BOOL:=0;//标示放空阀 V5 是否打开
END_VAR
//定义输入变量
VAR_INPUT
IN1:REAL:=0;//接受检测到的压力值 P7
END_VAR
//定义输出变量
VAR_OUTPUT
OUT1:REAL:=0;//控制阀门 V8 的开度
OUT2:REAL:=0;//控制阀门 V7 的开度
OUT3:REAL:=0;//控制高压冷却水阀 V10 的开度
OUT4:BOOL:=1;//搅拌电机开关, 输出为 1 打开, 输出为 0 关闭
OUT5:BOOL:=0;//控制放空阀 V5, 输出为 0 全关, 输出为 1 全开
END_VAR
//主程序
BEGIN
FOR (IN1<0.8) DO
  IF (FLAG1:=0) THEN
    OUT1:=0;
  END_IF
  FOR (IN1>0.8) DO
    IF (FLAG1:=0) THEN
      OUT1:=100;
      OUT2:=100;
      FLAG1:=1;
    END_IF
  END_IF
  FOR (IN1>0.8) DO
    IF (FLAG1:=1) THEN
      OUT3:=100;
      FLAG2:=1;
    END_IF
  END_IF
END
```

```
END_IF

FOR (IN1<0.83) DO
  IF (FLAG2:=1) THEN
    OUT3:=0;
    FLAG2:=0;
  END_IF

FOR (IN1>0.83) DO
  IF (FLAG2:=1) THEN
    OUT4:=0;
    FLAG3:=1;
  END_IF

FOR (IN1<1.2) DO
  IF(FLAG3:=1) THEN
    OUT4:=1;
    FLAG3:=0;
  END_IF

FOR(IN1>1.2) DO
  IF (FLAG3=1) THEN
    OUT5:=1;
    FLAG4:=1;
  END_IF

FOR(INT1<1.2);
  IF(FLAG4:=1) THEN
    OUT5:=0;
    FLAG4:=0;
  END_IF
END_FOR
END_FOR
END_FOR
END_FOR
END_FOR
END_FOR
END_FUNCTION_BLOCK
```

#### 4.4 安全连锁 SIS

考虑到间歇反应的安全因素，压力超过 1.2Mpa，压力控制器的控制作用失效

时启动安全连锁紧急停车措施。

紧急停车的顺序流程如图 4.4 所示。

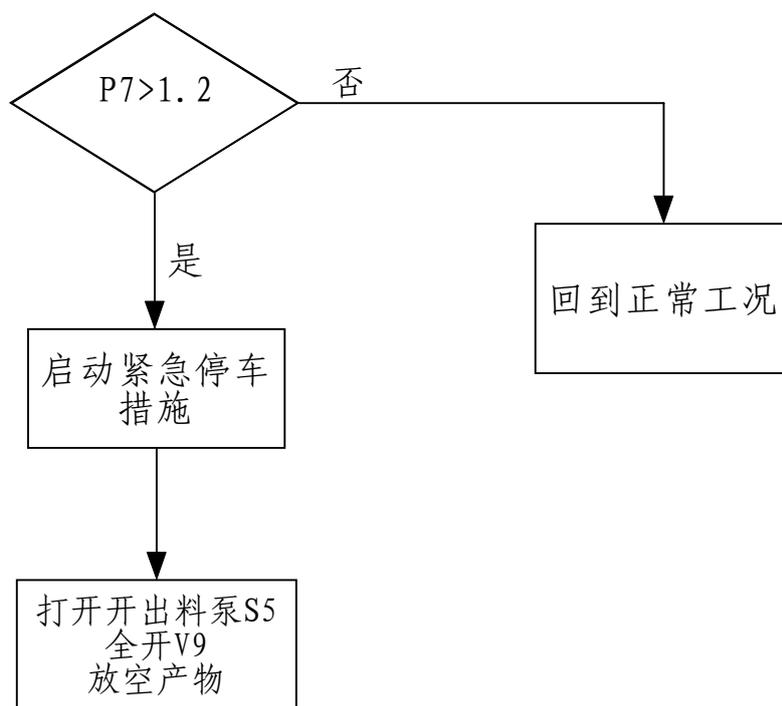


图 4.4 紧急停车流程图

安全连锁功能是一旦操作员启动了紧急停车开关，出料泵 S5 打开，出料阀 V9 全开，并送 DCS 报警，表示间歇反应的紧急停车系统已被激活。从工业实际生产过程考虑，对于紧急停车开关，中央控制室和现场操作站应各设置一个，并在中央控制室设置专门的现场控制站/中央控制室控制切换开关。当切换位置在现场工作站时只有现场控制站的紧急停车开关起作用，当切换位置在中央控制室时，只有中央控制室的紧急停车开关起作用。在开车结束后应将切换开关拨至中央控制室位置，避免两处开关位置不一致引起误操作。

连锁逻辑图如图 4.5 所示：

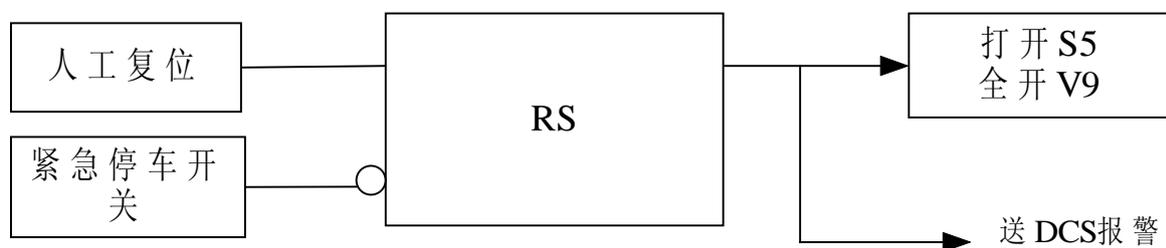


图 4.5 紧急停车逻辑图

#### 4.5 温度、压力、组分选择器的实现

选择器有三个输入，一个输出，其中三个输入分别用来接收温度控制器信号，

压力控制器信号和组分控制器信号。正常情况下，选择器的输出是温度控制信号，由温度控制器控制冷却水流量，当压力报警时，选择器的输出是压力控制信号，由压力控制器控制冷却水流量，当组分不合格时，选择器的输出是组分控制信号，由组分控制器控制冷却水流量。

使用 PCS7 的 SCL 语言编写代码如下：

```
FUNCTION_BLOCK FB101
//定义静态变量
VAR
PRESSURE:REAL:=0;
FLAG1:BOOL:=0;
FLAG2:BOOL:=0;
END_VAR
//定义输入变量
VAR_INPUT
IN1:REAL:=0;//温度控制器的输出
IN2:REAL:=0;//压力控制器的输出
IN3:REAL:=0;//组分控制器的输出
IN4:REAL:=0;//检测到的温度值
IN5:REAL:=0;//检测到的压力值
IN6:REAL:=0;//离线计算的组分值
END_VAR
//定义输出变量
VAR_OUTPUT
OUT1:REAL:=0;
END_VAR
//主程序
BEGIN
IF (FLAG1=0) THEN
  IF(IN4<121℃) THEN
    OUT1:=IN1;
  ELSE FLAG1:=1;
  END_IF
ELSE IF(FLAG2=0) THEN
  IF (IN5>0.8Mpa) THEN
    OUT1:=INT2;
  ELSE FLAG2:=1;
  END_IF
  ELSE OUT1:=INT3;
  END_IF
END_IF
END_FUNCTION_BLOCK
```

## 4.6 控制软件的实施

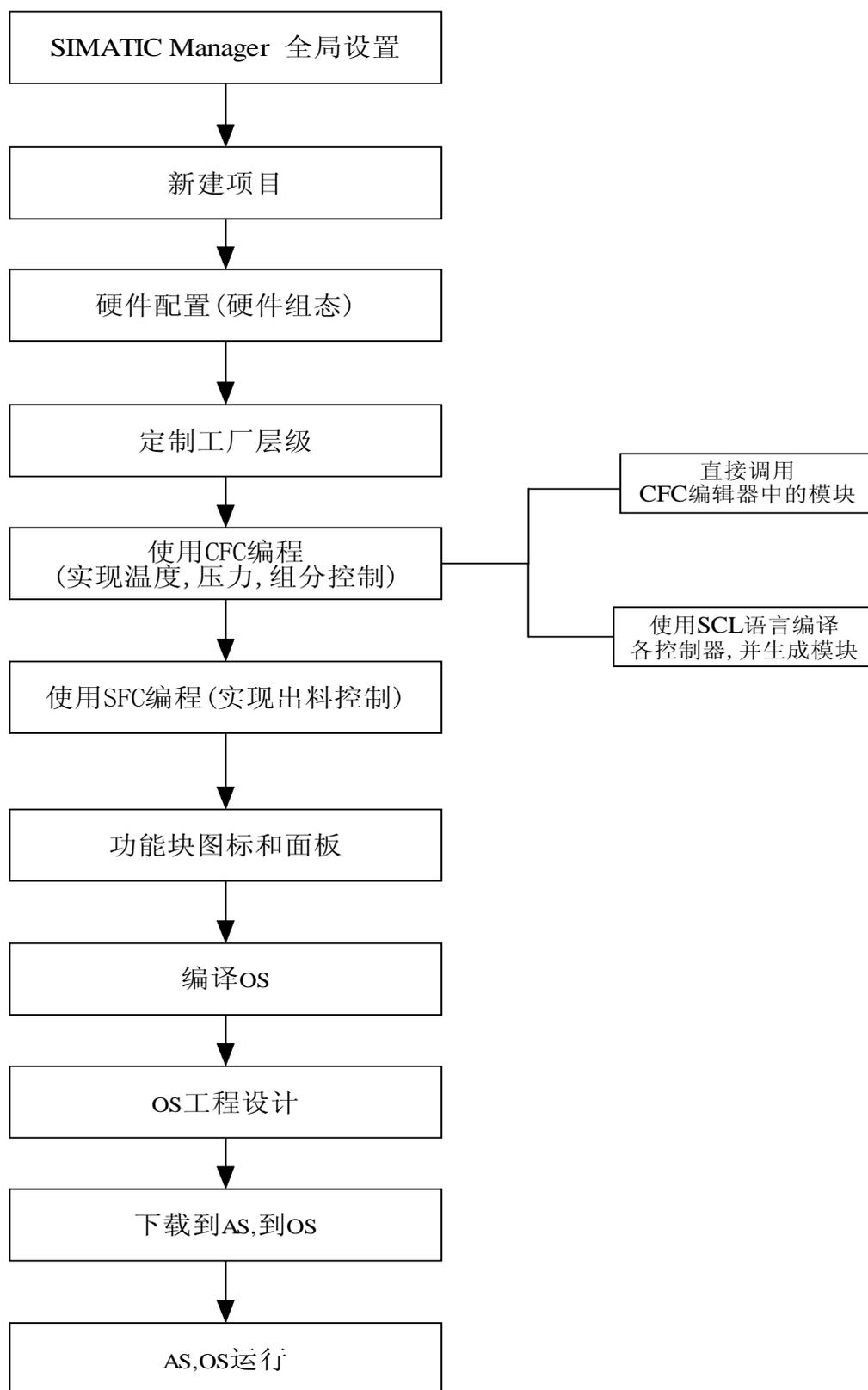


图 4.6 软件实施步骤

## 第五章 总结

综上所述，本方案在充分了解工艺和被控对象特性的前提下，采用工业上常见的控制方案为依据，设计了基于西门子 PCS7 的带搅拌釜式反应器的间歇反应控制系统。该方案控制规律简单，运行可靠，稳定，是一种切实可行的方案。针对温度控制要求设计了基于多模型切换的预测函数先进控制系统，避免了单一模型在工况发生变化导致控制品质下降，在不同温度下采用多模型切换的预测函数控制，有利于控制品质的提高。同时对于不能在线采集的组分，设计了基于神经网络的软测量预估推断控制，以保证获得合格的组分，提高产物产率，提高经济效益。

## 参考文献

- [1]贺国艳.预测控制算法及其仿真研究[D].杭州:浙江大学,2001.
- [2]吴建国,张培建.基于双模型预测函数控制的间歇化学反应温度系统得研究与应用[J].中国仪器仪表,2004,9.
- [3]齐晓慧,田庆民,董海瑞.基于Matlab 系统辨识工具箱的系统建模[J].兵工自动化,2006,25(10).
- [4]李少远.多模型预测控制的平滑切换[J].上海交通大学学报,1999,33(11).
- [5]张泉灵,王树青.化学反应器温度跟踪预测函数控制的研究及应用[J].控制理论与应用,2001,18(4).
- [6]张智焕,王树青.基于多模型切换的大范围预测函数控制[J].浙江大学学报,2002,36(3).
- [7]薄翠梅,张滢,李俊.基于软测量技术的推断控制在共沸精馏系统中的应用[J].计算机技术与自动化,2003,22(2).
- [8]黄凤良.基于软测量的检测技术[J].南京师范大学学报,2003,3(1).
- [9]丁兰蓉.聚乙烯项目安全仪表系统的设计和应用[J].石油化工自动化,2006,2(7).
- [10]张志刚,余齐杰.安全仪表系统的设计[J].炼油技术与工程,2005,35(5).
- [11]金以慧.过程控制[M].北京:清华大学出版社,1993.
- [12]蒋蕙孙,俞金寿.过程控制工程[M].北京,中国石化出版社,1999.