

**2007 年西门子杯**

**全国大学生过程控制技能挑战赛**

**控制方案设计**

**参赛队伍编号 14**

**2007.06**

目 录

一、控制系统分析.....	1
二、自动控制系统方案的确定.....	4
三、自控系统方案设计.....	6
1、反应升温速度控制.....	6
2、反应保温温度控制.....	7
3、反应器压力安全控制.....	9
4、主产物产率控制.....	10
5、顺序控制系统.....	10
6、搅拌釜式反应器整个系统 PI&D 图.....	15
五、自控方案的实施设计.....	16
1、硬件软件配置.....	16
2、I/O 模块接线图.....	18
3、控制器的选型.....	19
六、结束语.....	21

## 带搅拌釜式反应器系统控制方案

**摘要:** 在 SIEMENS 公司的 SIMATIC PCS7 体系结构下, 对过程工业常见的间歇带搅拌釜式反应器进行分析, 提出了与温度、压力及组分控制相应的控制要求和方案. 尤其对温度和压力的控制是整个过程安全的关键, 本文采用模糊控制和 PID 控制相结合的方法进行控制的思想.

**[关键词]:** 间歇反应 温度 压力 模糊控制和 PID 控制 安全和通信

### 引言:

在工业生产过程中, 反应釜是一种十分常见的反应容器, 过程的特征参量一般为温度、压力和浓度等, 并且反应过程表现出非线性和时滞性, 因此要对这些参量进行控制使系统稳定, 同时也是生产质量和安全的保证。

## 一、控制系统分析

被控对象为过程工业常见的带搅拌釜式反应器系统, 属于间歇反应过程。其工艺流程图如图 1 所示

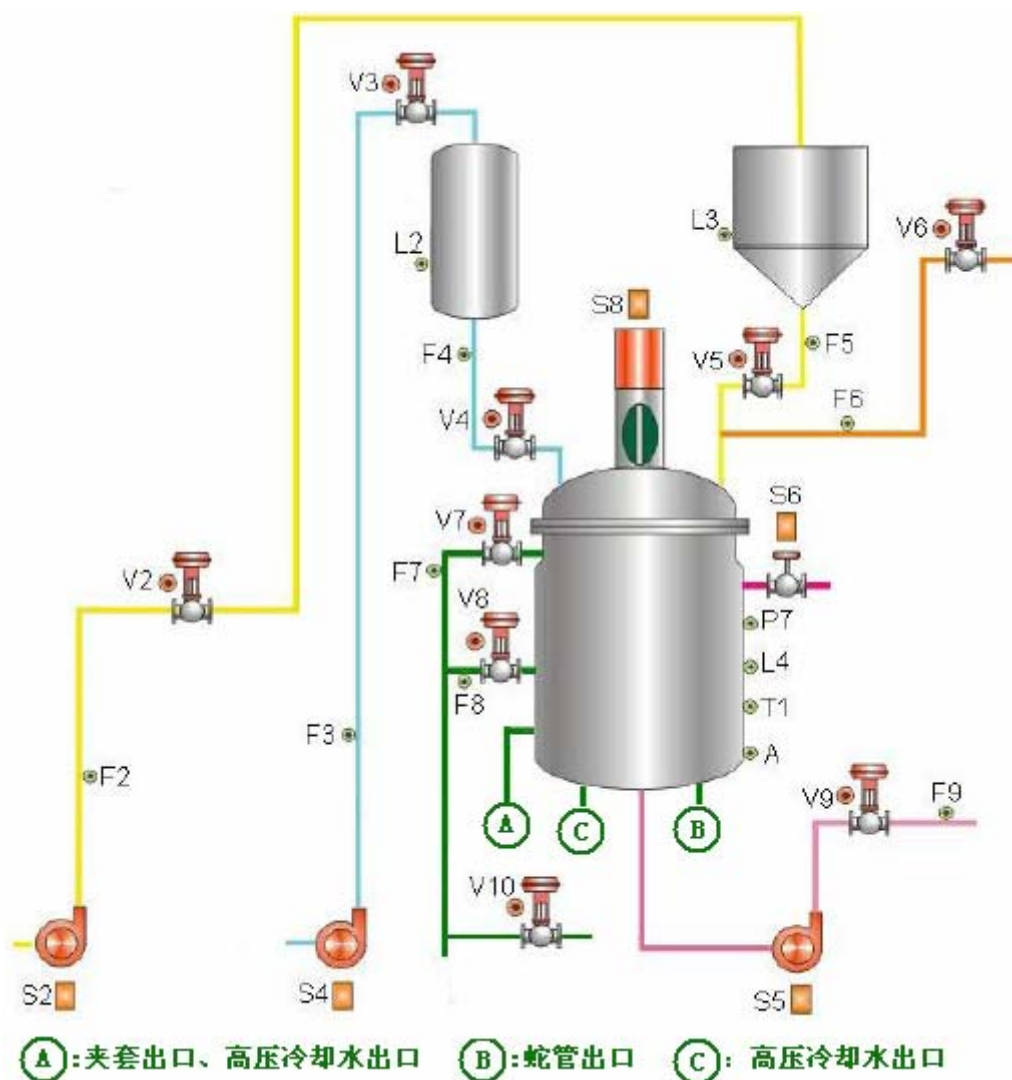


图 1 间歇反应工艺流程图

工艺设备包括：两台高位计量罐，其中 A 物料计量罐液位 L2，入口阀 V3，出口阀 V4，A 物料泵及泵电机开关 S4；B 物料计量罐液位 L3，入口阀 V2，出口阀 V5，B 物料泵及泵电机开关 S2。C 物料下料流量 F6，C 物料下料阀 V6。带搅拌器的釜式反应器，反应器内主产物浓度 A，反应温度 T1，液位 L4，反应物出口流量 F9，出口阀 V9，出口泵及出口泵开关 S5（开关）。反应器蛇管冷却水入口流量 F7，蛇管冷却水阀 V7；反应器夹套冷却水入口流量 F8，夹套冷却水阀 V8；反应器夹套加热蒸汽阀 S6（开关）。反应器放空阀 V5，反应器搅拌电机开关 S8，高压冷却水阀 V10。

## 测控条件一览表:

1.	L2	A 物料计量罐液位	最高 640mm
2.	L3	B 物料计量罐液位	最高 1000mm
3.	L4	反应器液位	最高 1600mm
4.	T1	反应温度	°C
5.	A	反应器内主产物浓度	kg
6.	P7	反应压力	MPa (绝压)
7.	F2	B 物料上料流量	最大 8.1t/h
8.	F3	A 物料上料流量	最大 9.72t/h
9.	F4	A 物料下料流量	最大 9.05t/h
10.	F5	B 物料下料流量	最大 8.68t/h
11.	F6	C 物料下料流量	最大 42.77t/h
12.	F7	反应器蛇管冷却水入口流量	最大 42.84t/h
13.	F8	反应器夹套冷却水入口流量	最大 72.84t/h
14.	F9	反应物出口流量	最大 46.44t/h

## 设备参数一览表 (四种阀门特性任选):

1.	S2	B 物料上料泵开关
2.	S4	A 物料上料泵开关
3.	S5	反应物出口泵开关
4.	S6	反应器夹套加热蒸汽阀 (开关阀)
5.	S8	反应器搅拌电机开关
6.	V2	B 物料上料阀
7.	V3	A 物料上料阀
8.	V4	A 物料下料阀
9.	V5	B 物料下料阀
10.	V6	C 物料下料阀
11.	V7	反应器蛇管冷却水入口阀
12.	V8	反应器夹套冷却水入口阀
13.	V9	反应物出料阀

## 14. V10 高压水入口阀

本间歇反应过程包括

- (1) 备料工序（不包括在本次考题范围内）
- (2) 缩合反应工序

缩合工序历经下料、升温、保温、出料及反应釜清洗阶段。需根据间歇反应过程动力学特性，总结出最佳操作方法。即对反应升温速度、反应保温温度、主产物产率和反应器压力安全进行控制系统的设计及顺序控制系统。

## 二、自动控制系统方案的确定

根据对反应釜的特性分析可知，反应釜的温度对化学反应有极大的影响。事实上作为被控对象的反应釜的温度与一般的工业对象相比，主要有以下几方面的特点。

1)时滞性很大。对间歇式反应釜，一般在反应之初往夹套中通以热蒸汽使釜内达到所需的温度。在反应过程中伴有很强热效应，导致反应釜内温度急剧升高，此后在夹套中通以冷却水带走多余的热量，以使釜内温度降低。但由于反应釜内与外界热交换主要依靠反应釜的间壁进行热传导，内壁对整个釜内加热也需要一定的时间，所以导致系统表现出很大的时滞效应。

2)时变性。反应釜内的温控特性主要取决于釜内化学反应的激烈程度，而整个生产过程从起始升温、中间恒温到最后降温，对象具有明显的时变性。并且，就某一个具体的阶段而言，由于化学反应的速度不稳定，导致过程的增益、惯性时间和纯滞后也会发生相应的变化。

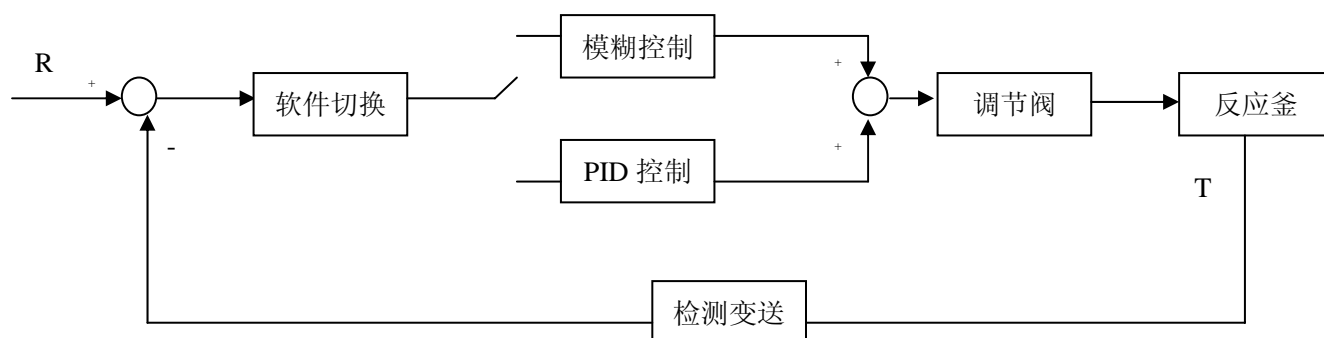
3)测量环境恶劣，参数测量困难。要保证一个控制系统的准确性，首先必须保证参数测量的准确性。化工生产多处于恶劣的工业环境之中，现场往往存在大量的电磁波和交、直流干扰等，对整个系统的影响很大。所以，采取必要的软、硬件措施保证测量精度，也是控制器设计中要解决的一个问题。

4)非线性。对于一个温度过程系统，都并存着导热、对流和辐射三种形式的传热，只是在不同的阶段各种传热形式所占的比例不同。事实上，只有一维导热可以看作是线性的，辐射热量是绝对问题的四次方函数，对流传热受多种因素的影响，一般也是非线性。

性的。在整个温区内，被控对象的动态参数随着温度的变化而变化，在工作点附近的小温度范围内，其动态特性可以看成近似线性的。

针对被控对象的上述特点，应选择合理的控制方案，针对被控对象的时变效应和大时滞效应，应综合考虑系统的鲁棒性和快速性的要求。提高温度测量的精度和测量稳定性。最终设计和开发出可靠性、稳定性好，系统的性价比高的控制器。

传统的反应釜过程控制器多采用 PID 控制算法，它的控制原理简单、实现方便、参数易于调整。但是，由于反应釜控制对象具有非线性、时变、大时滞等特点，过程模型难以确定，参数整定往往比较困难，因此，针对反应釜温控对象的特性，本方案采用模糊控制算法与传统的 PID 算法相结合，使系统既具有模糊控制灵活而适应性强的优点，又具有 PID 控制稳态精度高的特点，使被控变量具有良好的动态和静态特性。具体做法是：根据设定值与测量值之间的误差大小，分段采取不同的控制算法。当温差较小时，采用模糊控制算法，使系统具有良好的动态性能；在温差接近很小接近零时，采用 PID 控制，使系统在取得较好的动态性能下，达到期望的稳态性能。控制原理图如下：



在升温阶段，对系统的精度要求不是很大，控制器的首要目的是使误差尽快的减小。当差值逐渐减小到某一值时，逐步关小蒸汽阀门，即采取常规 PID 控制。当快要接近设定温度时，完全关闭蒸汽阀门。由于反应釜有较大的时滞且反应放热，停止加热后釜温依然会上升。此时，开启冷剂阀门，即切换到恒温段控制。恒温段是整个工艺的关键，高精度模糊控制器的实现较为困难，不但建立精确的规则库相当困难，而且过细的控制规则反而容易使控制量变化太大而出现超调。所以当误差很小的时候，可采用 PID 控制。保证温度以  $0.1\sim 0.2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  的速率上升。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。

按照以上要求设计各个环节，同时还设计了顺序开车自动控制单元，使开车自动化，

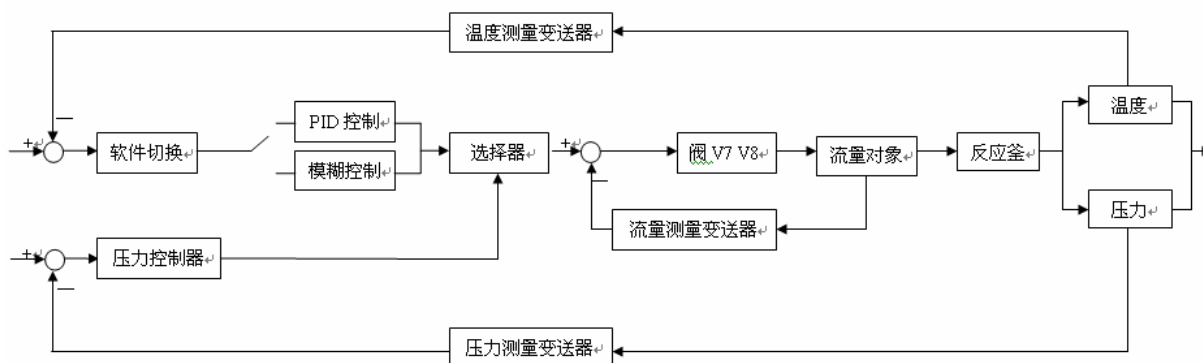
并稳步进行，避免人为因素的干扰。

## 三、自控系统方案设计

### 1、反应升温速度控制

在反应停留时间相同、催化剂量相同的条件下，反应的转化率由反应温度所决定。控制反应温度的主要手段是夹套冷却水的流量 F8 及蛇管冷却水流量 F7。当温度 T1 上升至 45℃左右应停止加热，关闭夹套蒸汽加热阀 S6，并逐渐靠自身反应的放热效应不断加快反应速度。反应釜温度 T1 上升的速率在 0.1~0.2℃/s 以内，此时压力不能维持过高，为使主反应充分进行，并尽量减弱副反应，应使反应温度维持在 121℃（或压力维持再 0.69Mpa 左右）。但压力维持过高，将会报警。因此要监控压力的变化，温度和压力共同控制来确保反应安全。

升温控制方框图如下：



被控变量：T1、P7

操作变量：V8、V7

阀门特性：V8、V7 为气闭式（从安全角度考虑，在无信号输入的情况下保证冷却作用，避免温度超限），线性阀反应升温速度控制工作原理具体代码示例如下（以 pcs7 的 scl 语言为例）。

```
FUNCTION_BLOCK      FB999
```

```
//静态变量定义
```

```
VAR
```

```
TEMPERATURE:REAL:=121;
```



```
END_VAR
//输入变量定义
VAR_INPUT
IN1:REAL:=0;
END_VAR
//输出变量定义
VAR_OUTPUT
OUT1:REAL:=0;
OUT2:REAL:=0;
//主程序
BEGIN
IF (IN1<121) THEN
    OUT1:=0;
ELSE
    IF ((IN1-TEMPERATURE)>0.1) THEN //升温速率大于 0.1，信号采集间隔为一秒
        OUT1:=OUT1+1;//逐步开大 v8、V7 阀
    ELSE
        IF ((IN1-TEMPERATURE)<0.0) THEN
            OUT1:=OUT1-0.5;
        END_IF;
    END_IF;
END_IF;
TEMPERATURE:=IN1;//将上一次采集的温度保存起来
END_FUNCTION_BLOCK
```

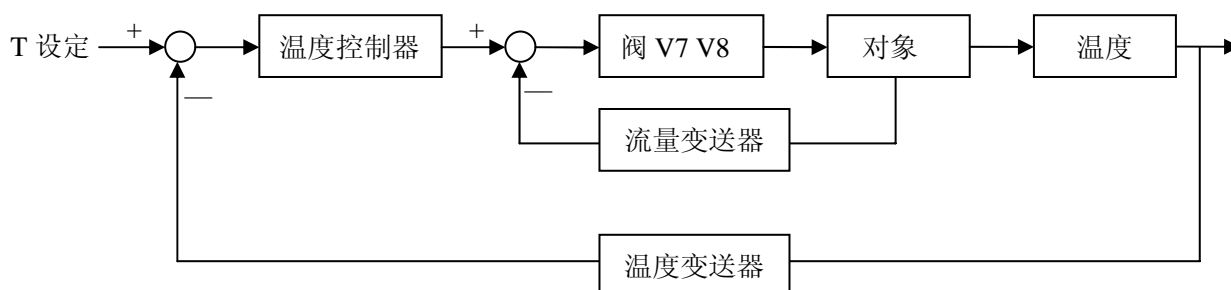
本文中其他控制原理基本相同，不再赘述。

## 2. 反应保温温度控制

如果控制合适，反应历经剧烈阶段之后，压力 P、温度 T 会迅速下降。此时应逐步关小冷却水阀 V8 和 V7，使反应釜温度保持在 120℃（压力保持在 0.68~0.70Mpa 左右），

不断调整直至全部关闭 V8 和 V7。当关闭 V8 和 V7 后出现压力下降时，可适当打开夹套蒸汽加热阀 S6，使反应釜温度始终保持在 120℃（压力保持在 0.68~0.70Mpa）5~10 分钟（实际为 2~3 小时）。保温之目的在于使反应尽可能充分地进行，以便达到尽可能高的主产物产率。

保温温度控制方框图如下：



被控变量：T1

操作变量：V8、V7

阀门特性：V8、V7 为气闭式

恒温阶段是保证高主产物产率的关键，由于误差很小，故采用了 PID 控制器。但对其算法进行了改进。采用一种不完全微分的 PID 算法，这种方法是在标准 PID 算法的微分环节上加一个一阶惯性环节。它以克服完全微分的缺点。其 PID 参数整定仍可用连续 PID 控制器的参数整定方法。

具体方法是：首先根据经验参数值设定 PID 的各参数，然后投入闭环运行。然后根据各参数对系统响应的影响，反复凑试各参数，观察曲线的变化规律，最终得到满意的响应曲线，从而得到最终各个参数。对于温度控制，PID 各参数的经验值范围为  $K_p$ : 1.6~5  $T_i$ : 3~10min  $T_d$ : 0.5~3min. 具体凑试步骤如下：

(1)先调比例:将  $K_p$  值从小变大，并观察相应的响应曲线，直至得到响应快、超调量小的曲线。

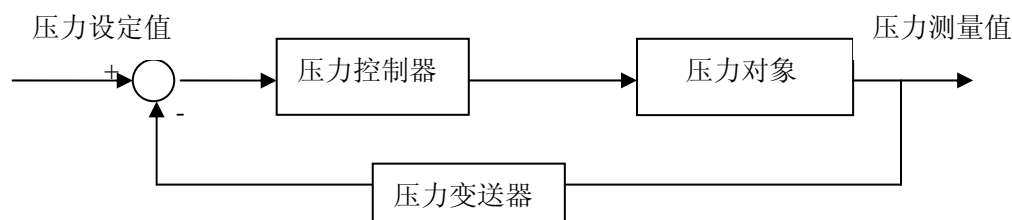
(2)再调积分:先取较大的  $T_i$  值，并将上步所得  $K_p$  值略微减小，然后逐步减小  $T_i$ ，使系统在保持良好的动态特性的情况下，消除静差。根据响应曲线，反复修改  $K_p$  和  $T_i$ 。

(3)最后调微分:先取  $T_d=0$ ，然后逐步调大  $T_d$  值，同时适当地改变  $K_p$  和  $T_i$  值，逐步调试，最终得到满意的响应曲线，即可得整定后的各参数。

### 3、反应器压力安全控制

为保证反应安全，需要对压力进行安全控制系统的设计。压力高限报警为  $0.8\text{MPa}$ 。如果反应釜压力  $P7$  上升过快，已将  $V8$  和  $V7$  开到最大，仍压制不住压力的上升，可迅速打开高压水阀门  $V10$ ，进行强制冷却。如果开启高压水泵后仍无法压制反应，当压力继续上升至  $0.83\text{Mpa}$ （反应温度超过  $130^\circ\text{C}$ ）以上时，应立刻关闭反应釜搅拌电机开关  $S8$ 。此时物料会因密度不同而分层，反应速度会减缓，如果强制冷却及停止搅拌奏效，一旦压力出现下降趋势，应关闭  $V10$ ，同时开启反应釜搅拌电机开关  $S8$ 。如果操作不按规程进行，特别是前期加热速率过猛，加热时间过长，冷却又不及时，反应可能进入无法控制的状态。即使采取了第 7、第 8 项措施还控制不住反应压力，当压力超过  $1.20\text{Mpa}$  已属危险超压状态，将会再次报警扣分。此时应迅速打开放空阀  $V5$ （代替），强行泄放反应釜压力。由于打开放空阀会使部分 A 物料蒸汽散失（当然也污染大气），所以压力一旦有所下降，应立即关闭  $V5$ ，若关闭  $V5$  压力仍上升，可反复数次。需要指出，A 物料的散失会直接影响主产物产率。如果第 7、第 8、第 9 项三种应急措施都不能见效，反应器压力超过  $1.60\text{Mpa}$ ，将被认定为反应器爆炸事故。此时紧急事故报警闪光，反应处于冻结状态。

反应器压力安全控制方框图如下：



被控变量：P7

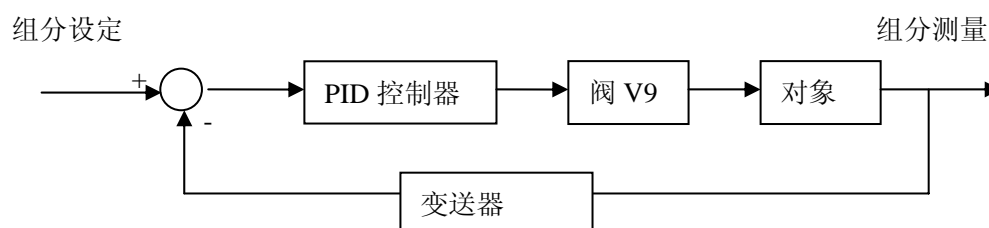
操作变量：V8、V7、V10、放空阀 V5（代替）

阀门特性：均为气闭式

## 4、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组分进行控制。完成保温后，即可进入出料及反应釜清洗阶段。首先打开放空阀 V5 约 10 秒（实际为 2~5 分钟），放掉釜内残存的可燃气体关闭放空阀 V5 开出料泵 S5，出料阀 V9，观察反应釜液位 L4 逐渐下降，当液位下降至 0.0m 时，关闭 S5 和 V9。

组分控制方框图如下：



被控变量：L4

操作变量：V9

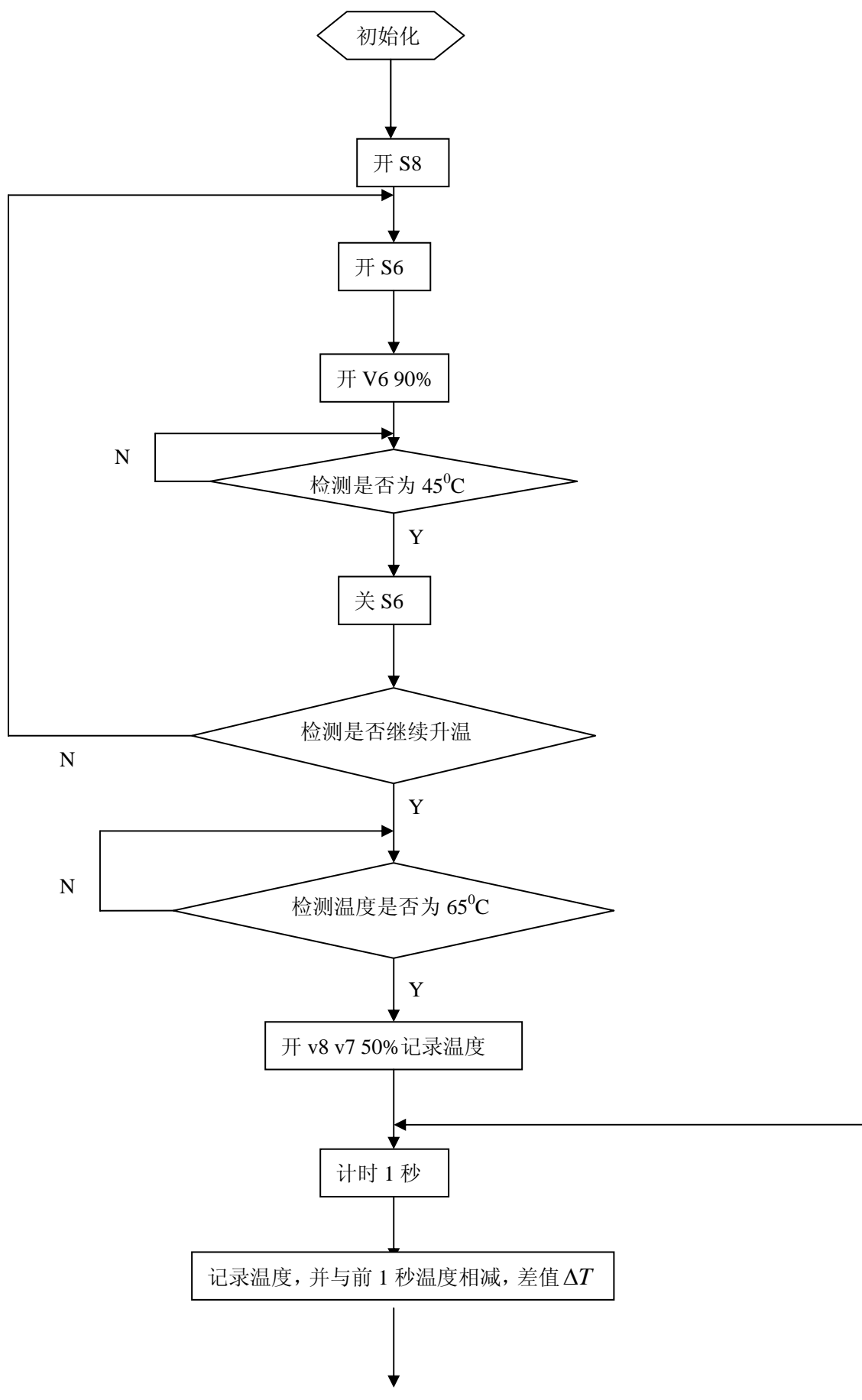
阀门特性：为气开式 线形阀

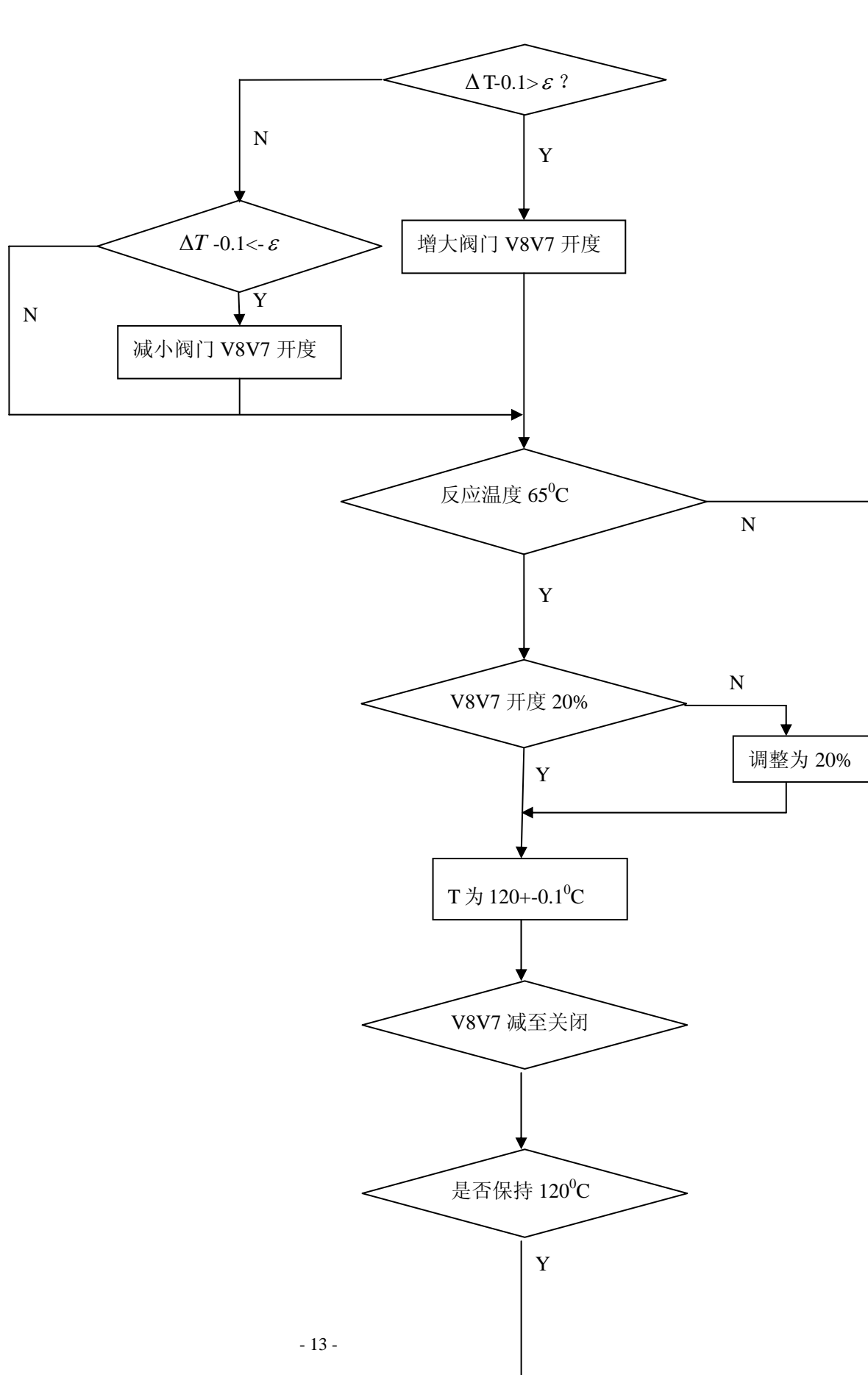
反应主产物 D 的产率主要受到升温速度、保温时间与温度的影响。（注产率无法在线采集。）

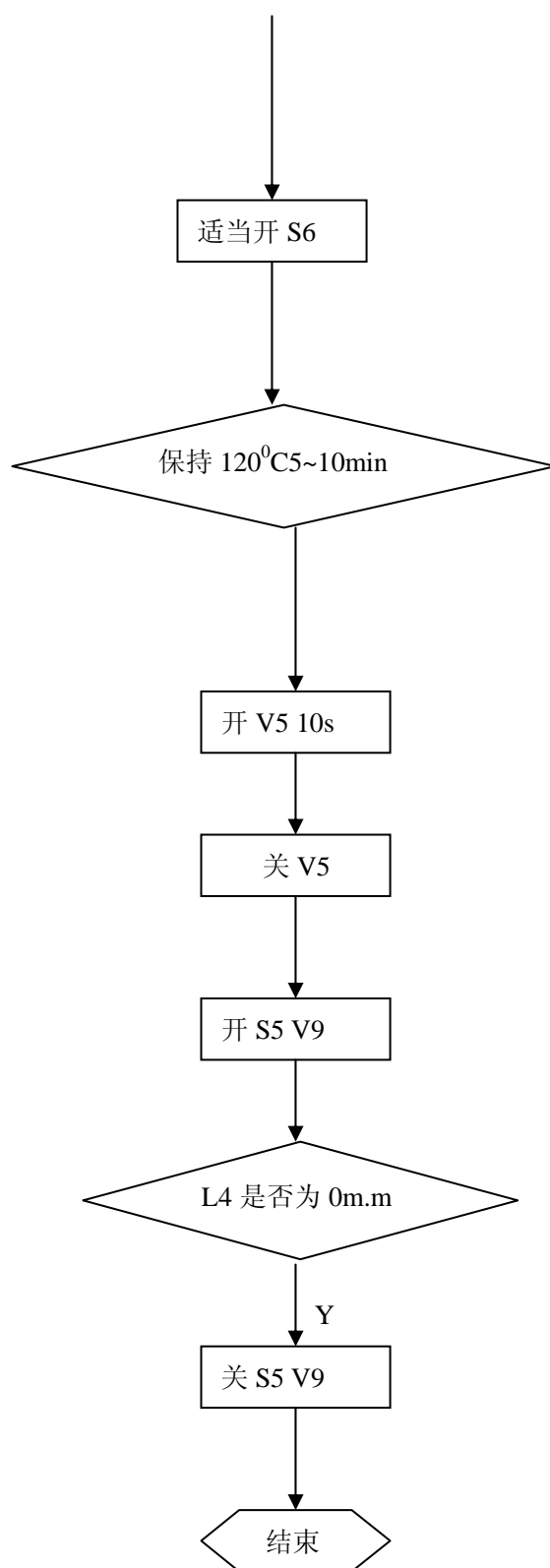
## 5、顺序控制系统

顺序控制系统流程图如下：











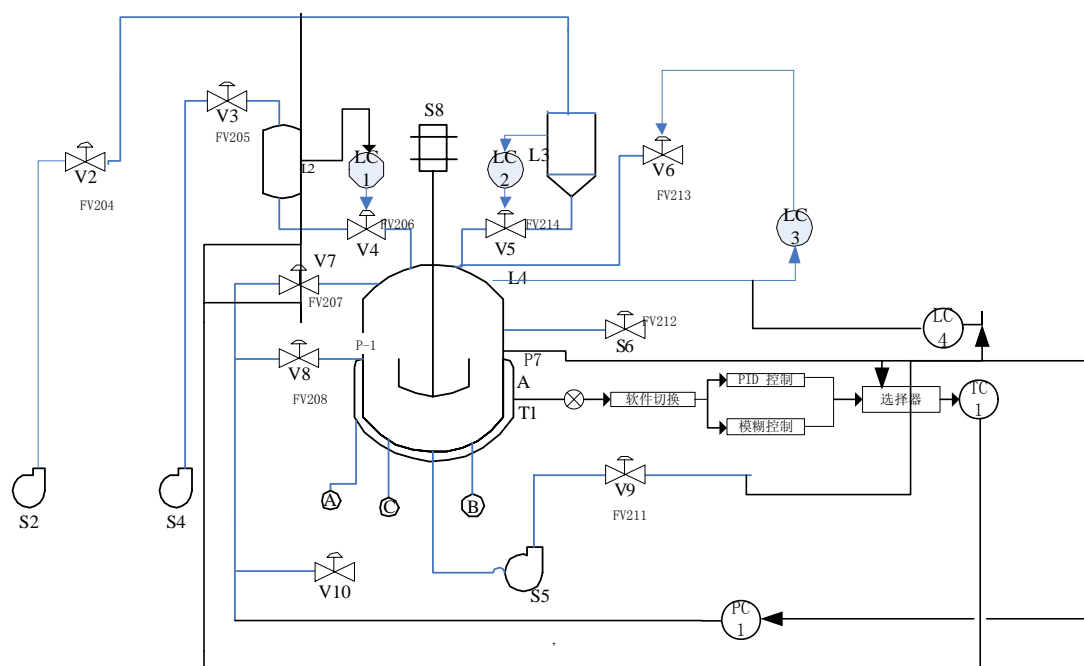
流程图中的符号注释：

$\Delta T$  反应釜内的升温速率

$\varepsilon$  设定升温速率的误差

T 反应釜内反应温度

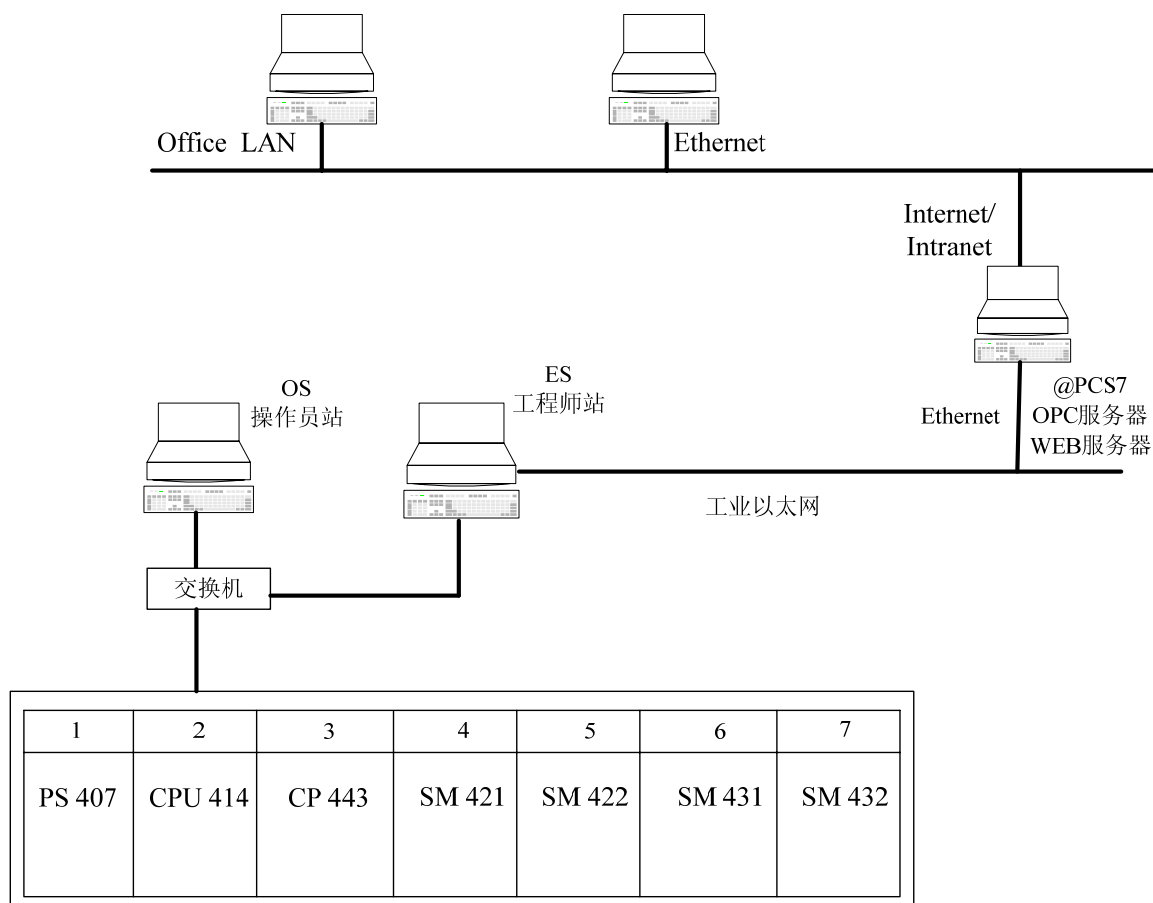
## 6、搅拌釜式反应器整个系统 PI&D 图



系统 PI&D 图

## 五、自控方案的实施设计

### 1、硬件软件配置



网络结构图

用户可以通过该控制系统的 WEB 服务器浏览系统运行情况、各测控点设备参数等。系统操作站和服务器之间采用 100M 标准工业以太网，充分开放的结构使得系统具有很好的扩展性，可以与其他各种网络（MIS、ERP）进行连接。

通过 S7 CPU-414-3 有自带的 PROFIBUS-DP 接口，与远程站连接，实现与各部分分布式 I/O 站的连接。需提供的软件：

Microsoft Windows 2000 Professional+SP4 中文版 1 套

PSC7 软件英文版 操作员站 1 套

PSC7 软件英文版 工程师站 1 套

操作员站键盘的功能:

修改参数

调节回路

打印

工程师站键盘功能和软件内容:

键盘功能: 在线/离线修改参数、调节系统控制回路、打印各种报表等

软件内容: Windows 2000 Professional、WinCC 开发版、Step 7

计算机能使用的语言:

支持 IEC1131-5 所有五种 IEC 语言, 并内置 32 位模拟仿真器。

梯形图 (LAD)、功能块图 (FBD) 和语句表 (STL)

网络通讯方式、通讯速度、最大通讯距离和通讯协议:

网络通讯方式: 环形光纤工业以太网

通讯速度: 100M

最大通讯距离: 200Km

通讯协议: TCP/IP

系统对电源线、信号线的敷设和接地的要求:

输入电源(V): 220VDC

信号线的敷设: 模拟量信号线需要尽量避免干扰源; 光纤需要远离高温设备, 不可有 90 度大拐角。

接地电阻( $\Omega$ ):  $<4$

该系统的特点:

- 1) 系统的核心设备选用了世界知名牌品的德国 SIEMENS 公司的 SIMATIC 系统, 充分保证了整个系统的高可靠性、技术先进性、灵活扩展性、标准开放性 & 高性能价格比
- 2) 现场控制站、远程站的控制器和 I/O 信号接口模块设备均选用了高档的、集中式的 SIMATIC S7-400 系列控制器产品。该控制器采用了标准模块化和无风扇设计, 结构坚固, 性能可靠, 所有模块均具有自动诊断功能, I/O 接口模块均可带电插拔, 便于在线维护。

- 3) 用于连接系统操作员站和现场控制站的工业以太网采用了光纤电缆, 充分保证了系统通讯的可靠性。该工业以太网采用了 TCP/IP 协议, 通讯速率可达 100Mbit/s。
- 4) 现场控制站所有数字量 I/O 信号都经过了继电器进行隔离和驱动, 从而保证了所有数字量 I/O 信号之间是相互隔离的, 这种 “24VDC 模块+继电器” 的结构模式与 “单一采用 220VAC 电压等级数字量 I/O 模块” 的结构模式相比, 具有更高的安全性、可靠性及性能价格比。
- 5) 系统中央控制室的 1 台操作员站和 1 台工程师站互为全冗余热备, 其中任意一台操作站发生故障时, 另一台操作站可接替其工作, 提高了系统的可靠性。
- 6) 系统中央控制室操作员站设有多种操作级别, 具有很好的操作安全性, 并采用全中文界面设计, 简单易用。
- 7) 系统具有很好的扩展性, 并已充分考虑了扩展容量, 可很方便地进行后续扩展, 以适应更大规模的扩展需要。而且系统扩展或升级时, 不需要更换现有设备, 可为用户节约升级或扩展费用。另外, 系统采用了标准数据接口, 并应用了标准通讯网络, 具有很好的开放性, 可以很方便地与其他计算机系统相连接, 构成一个管控一体化的全厂大系统。

## 2、I/O 模块接线图

编号	仪表代号	模拟输入端	模拟输出端	数字输入端	数字输出端
		口数	口数	口数	口数
1	FV204	1	-	-	-
2	FV205	1	-	-	-
3	FV206	1	-	-	-
4	FV207	1	-	-	-
5	FV208	1	-	-	-
6	FV209	1	-	-	-
7	S2	-	-	1	-
8	S4	-	-	1	-
9	S5	-	-	1	-

10	S6	-	-	1	-
11	阀门 FV211	1	1	-	-
12	阀门 FV212	1	1	-	-
13	阀门 FV213	1	1	-	-
14	阀门 TV214	1	1	-	-
15	阀门 TV208	1	1	-	-
16	阀门 LV209	1	1	-	-
17	开车开关	-	-	1	-
18	TC1	1	1	-	-
19	PC1	1	1	-	-
20	LC1	1	1	-	-
21	LC2	1	1	-	-
22	LC3	1	1	-	-
23	热水开关	-	-	1	-
24	统计	17	14	6	-

注：“-”代表器件无此端口

### 3、控制器的选型

#### 1) 所用 PLC 为 S7-400 系列

电源模块 (PS407/10A)

规格型号: PS 407 10A

额定输入电压: 110/230VAC

输入电压范围: 85~264VAC

额定电源频率: 60/50Hz

电源频率范围: 47~63Hz

额定输出电压: 5.1VDC 和 24VDC

额定输出电流: 5VDC: 10A, 24VDC: 或 1A

后备电池: 可选装 2 节 3.6V/1.9Ah

中央处理模块 (CPU)

规格型号: CPU 414-3

RAM:384KB 用于程序

384KB 用于数据

装载存储器: 最大可扩至 64MB;

执行时间: 0.1us~0.6us

PROFIBUS-DP 波特率: 12Mbit/s;

工业以太网接口模块

规格型号: CP 443-1

通讯协议: 工业以太网 TCP/IP;

通讯接口: 15 针 Sub-D 和 RJ45 插座;

通讯波特率: 10/100Mbit/s;

数字量输入 (DI) 接口模块

规格型号: SM 421

输入点数: 16 点

输入信号: 24VDC

电气隔离: 光耦合器隔离

数字量输出 (DO) 接口模块

规格型号: SM 422

输出点数: 16 点

输入信号: 220VAC

电气隔离: 光耦合器隔离

模拟量输入模块 (AI)

规格型号: SM 431

输入点数: 16 点

片数: 2

输入信号: 4~20mA

输入阻抗: 80  $\Omega$

分辨率: 14 位

电气隔离： 有

故障自动诊断： 有

其他相关参数可查阅手册。

## 2) 测量仪表及控制仪表的选型

阀门 (FV204) : 恒星 ZJHP 型气动单座调节阀

阀门 (FV205) : 恒星 ZJHP 型气动单座调节阀

阀门 (FV206) : 恒星 ZJHP 型气动单座调节阀

蛇管内冷却水流量变送器: 西门子 SITRANS FC MASSFLO DI25

阀门 (FV207) : 恒星 ZJHP 型气动单座调节阀

夹套内冷却水流量变送器: 西门子 SITRANS FC MASSFLO DI40

阀门 (FV208) : 恒星 ZJHP 型气动单座调节阀

阀门 (FV209) : 恒星 ZJHP 型气动单座调节阀

反应釜温度传感器 (TC1) : 西门子 Pt100 (DIN IEC 751) 热电阻

反应釜压力变送器 (PC1) : 西门子 SITRANS P COMPACT

反应釜液位变送器 (LC1) : 西门子 超声波 xps-10 标准液位传感器

热水阀 (S6) : 恒星 金属硬密封蝶阀

采用的电气转换器均为 QZD1000i 型电气转换器

## 六、结束语

反应釜是一种常用的化学反应容器,通过控制其过程参数而达到控制其化学反应的外界条件,以提高产品的收率和质量, 本文根据釜式反应器的工艺流程和控制要求,设计了一套基于西门子 PCS7 的过程控制系统。在明确控制要求并且确定了被控量之后,为了取得更好的控制效果,在深入分析各个被控量的影响因素、各个影响因素之间的制约关系、各个被控量间的制约关系以及各个被控对象的特性的基础上,结合经典控制理论和先进控制方法,设计了一套控制方案。由于我们水平有限,肯定存在许多不足之处,对于工艺流程、对象特性、PCS7 系统组态软件以及其它的一些细节问题,还有待于现场进行试验测试,从而根据测试数据对被控对象更进一步了解的基础上,改进和修正控制方案,以期能非常出色实现控制功能,达到控制要求。