

---

# 2007西门子杯全国大学生过程控制技能挑战赛

## 12号参赛方案

2007年6月30日

---

# 目录

1 被控对象工艺流程概述.....	错误! 未定义书签。
1.1 被控对象工艺流程.....	1
1.2 工艺简介.....	3
1.3 控制要求.....	4
1.4 反应过程对象特性测试及分析.....	4
1.4.1 反应温度对压力和产物组分的影响.....	4
1.4.2 反应压力对反应温度和产物组分的影响.....	5
1.4.3 蒸汽对反应温度的影响.....	5
1.4.4 冷却水流量对反应温度的影响.....	6
1.4.5 反应温度、压力对产品组分的影响.....	7
1.4.6 测试总结.....	8
2 系统控制策略设计.....	9
2.1 进料阶段.....	9
2.1.1 操纵变量与被控变量的选择.....	9
2.1.2 阀门的选择.....	11
2.1.3 控制方案.....	10
2.2 升温阶段.....	12
2.2.1 操纵变量与被控变量的选择.....	12
2.2.2 阀门的选择.....	12
2.2.3 控制方案.....	13
2.2.4 串级控制器中正、反作用的选择.....	15
2.2.5 计算动词控制器的设计.....	15
2.2.6 副回路的设计.....	21
2.3 保温阶段.....	22
2.3.1 操纵变量与被控变量的选择.....	22
2.3.2 阀门的选择.....	22
2.3.3 控制方案.....	22
2.3.4 串级控制器中正、反作用的选择.....	24
2.3.5 免疫PID控制器的设计.....	24
2.3.6 副回路的设计.....	27
2.4 出料阶段.....	28
2.4.1 操纵变量与被控变量的选择.....	28
2.4.2 阀门的选择.....	28
2.4.3 控制方案.....	28
2.5 反应器压力安全控制及联锁保护.....	30
2.5.1 压力安全控制器.....	30
2.5.2 紧急停车方案.....	31
2.5.3 安全联锁.....	31
3 控制系统硬件设计.....	34

---

3.1	PCS7 过程控制系统.....	34
3.2	间歇反应釜硬件控制结构.....	34
3.2.1	输入输出点的选取.....	34
3.2.2	硬件配置 .....	36
3.2.3	系统网络设计 .....	37
3.2.4	硬件组态 .....	37
3.3	阀门选型.....	38
4	监控系统设计 .....	39
5	结论.....	42

# 第一章 被控对象工艺流程概述

## 1.1 被控对象工艺流程

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 1.1 所示：

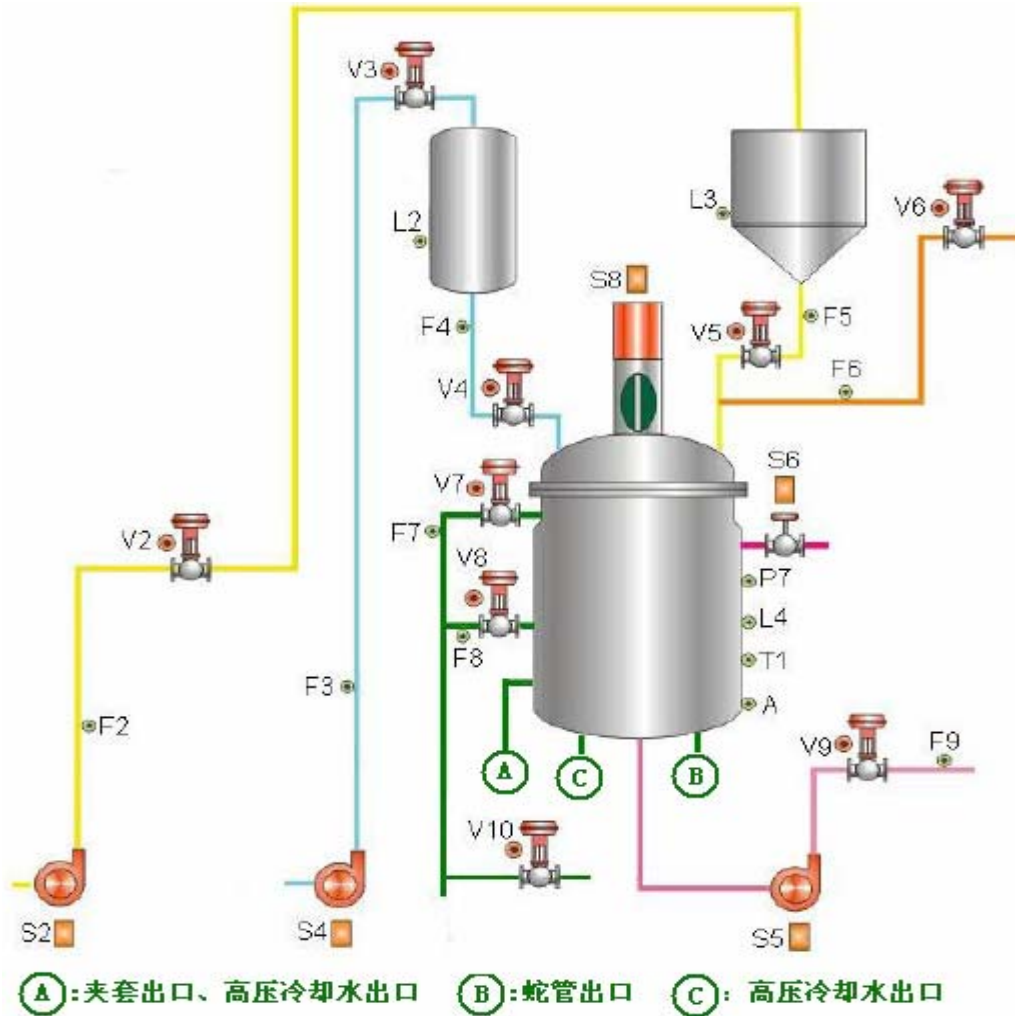


图1.1 对象工艺流程图

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。

工艺给出的测控条件见表1.1，给出的相应设备参数见表1.2

表1.1 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	℃
5	A	反应器内主产物浓度	kg
6	P7	反应压力	Mpa(绝对)
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	反应物出口流量	最大 42.84t/h
13	F8	蛇管冷却水入口流量	最大 72.84t/h
14	F9	夹套冷却水入口流量	最大 46.44t/h

表1.2 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	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

## 1.2 工艺简介

本间歇反应过程的开车包括如下主要步骤：

### 1. 备料工序（不包括在本次考题范围内）

备料工序包括 A、B、C 三种物料的计量。

- (1) A 物料计量。A 物料易燃易爆，不溶于水，密度大于水。因此，可以采用水封隔绝空气保障安全。同时还能利用水压将储罐中的 A 物料压至高位槽。高位槽具有夹套水冷系统。
- (2) B 物料计量。B 物料熔点为 31.5℃，不溶于水，常温下呈固体状态。为了便于管道输送和计量，必须将其熔化，并保存于具有夹套蒸汽加热的储罐中。
- (3) C 物料计量是在反应釜中加入 A 物料和 B 物料后，通过离心泵打入，控制物料总液位(1370mm)的方法实现。

### 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。用料量见表 1.3。

A、B、C 三种物料在反应釜中经夹套蒸汽加入适度的热量后，将发生复杂的化学反应，产生反应最终产物 D 及其副产物。缩合反应不是一步合成，实践证明还伴有副反应发生。缩合收率的大小与这个副反应有密切关系。主反应的活化能高于副反应，因此提高反应温度有利于主反应的进行。但在本反应中若升温过快、过高，可能造成爆炸而产生危险事故。

表 1.3 每釜反应原料用量

序号	名称	纯物质量(kg)
1	A 物料	140
2	B 物料	237
3	C 物料	942

保温阶段之目的是尽可能多地获得所期望的产物。为了最大限度地减少副产物的生成，必须保持较高的反应釜温度。操作员应经常注意釜内压力和温度，当温度压力有所下降时，应向夹套内通入适当蒸汽以保持原有的釜温、釜压。

缩合反应历经保温阶段后，接着用离心泵将缩合釜内的料液打入下道工序。出料完毕，本间歇反应岗位操作即告完成。

本间歇反应的物料特性差异大，反应属于放热过程，由于 A 物料的饱和蒸汽压随温度上升而迅猛上升，冷却操作不当会发生剧烈爆炸；反应过程中有主副反应的竞争，必须设法抑制副反应，然而主反应的活化能较高，又期望较高的反应温度。如此多种因素交织在一起，使本间歇反应具有典型代表意义。

## 1.3 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 121℃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，要求选手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。

## 1.4 反应过程对象特性测试及分析

### 1.4.1 反应温度对压力和产物组分的影响

该反应属于放热反应，反应温度的高低代表了反应速度的快慢。当反应速度加快时，放出的热量增加，导致系统温度升高；反之，系统温度下降。

升温结束后，温度基本维持在 121℃ 保持不变，利用手操控制温度降低 10℃，压力和组分的响应曲线如图 1.2，压力从原 0.69MPa 降到 0.58MPa，组分响应曲线斜率也明显变小，表明产率在下降。

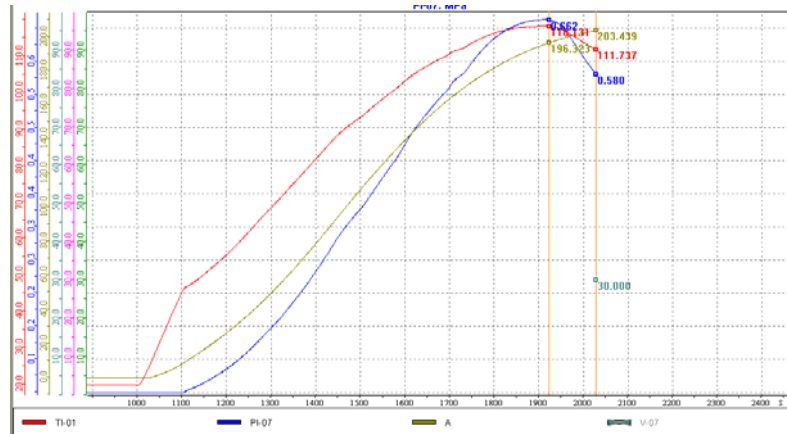


图1.2 反应温度对压力和产物组分的影响

#### 1.4.2 反应压力对反应温度和产物组分的影响

反应压力的高低主要取决于反应温度。当温度达到150°C时，反应压力已经超过1.2MPa，这时已经属于危险超高压状态，如果压力继续上升，甚至可能导致爆炸。因此，在反应器中必须防止反应温度过高的情况发生。

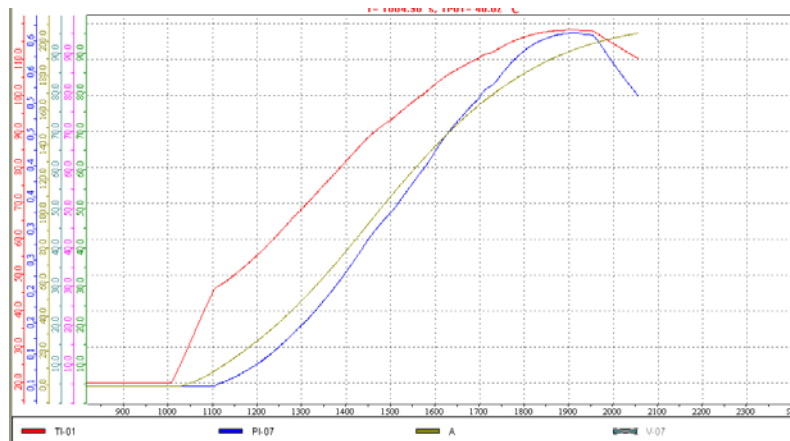


图1.3 反应压力对反应温度和产物组分的影响

当压力维持在0.66MPa时，用手操控制降低压力0.1MPa，温度和组分的响应曲线如图，温度从118.03°C降到110.19°C。由图1.3可见，两组响应曲线基本一致。

实验结论：反应压力和产品产出速率与温度变化趋势一致，温度降低时，反应压力降低，产品产出速率减慢；温度升高时，反应压力升高，产品产出速率加快。因此，只要将温度控制平稳，以适当的升温数率上升，即可达到控制压力的目的，并且产率也可最优。

#### 1.4.3 蒸汽控制阀S6对反应温度的影响

反应初期，应打开蒸汽提高反应釜内温度，诱发缩合反应。当反应温度上升到45°C时，反应已被深度诱发，这时可以关闭蒸汽，逐渐靠自身反应的放热效应不断加快反应速度。图1.4就是反应初期蒸汽全开时温度、压力和组分的响应曲线，可以看出此时温度上升的比较快，要注意加热量的调节。



这两个过程特性主要是无自衡的非振荡过程，具有无自衡非振荡过程的特性可以用  $G(s) = \frac{K}{s} e^{-sT}$  来描述。由图1.4可以计算出蒸汽与温度的过程动态特性参数：  $K = 0.68$ ，  $T \approx 0$ ，  $\tau \approx 6s$ 。

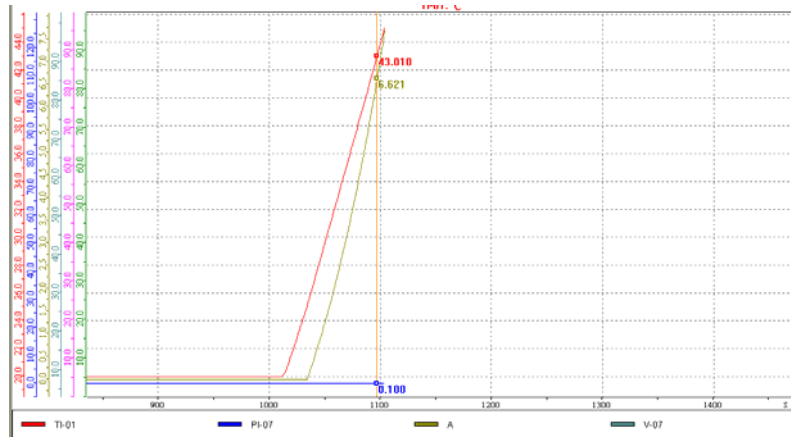


图1.4 蒸汽控制阀S6对反应温度的影响

#### 1.4.4 冷却水流量对反应温度的影响

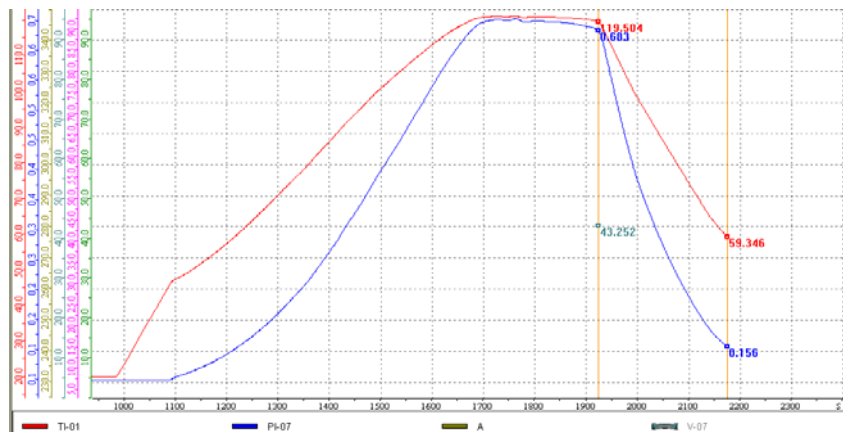


图1.5 冷却水控制阀V7对反应温度的影响

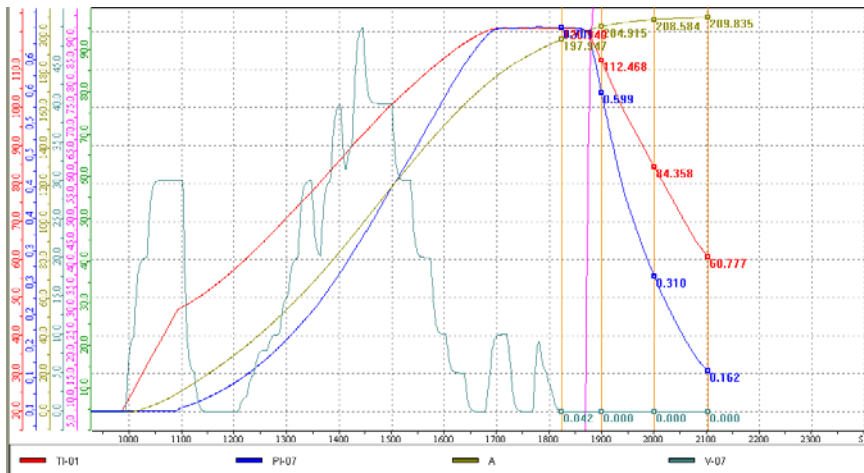


图1.6 冷却水控制阀V8对反应温度的影响

反应稳定在121℃后，关闭蒸汽阀，全开蛇管冷却水阀V7，温度和压力的响应曲线如图1.5。

由图可见，反应温度从121℃不断下降，下降到60℃左右时，大约经过250s，图1.6是121℃时，全开夹套冷却水阀V8的温度、压力响应曲线。这是连续反应温度的反向非自衡现象。此情况虽然没有危险，但反应会减弱直到停止，此时必须按开车规程加热重新开车处理。

这两个过程特性主要是无自衡的非振荡过程，具有无自衡非振荡过程的特性可以用  $G(s) = \frac{K}{s} e^{-s\tau}$  来描述。由图1.5可以计算出蛇管冷却水阀V7与温度的过程

动态特性参数： $K = 0.240632$ ， $T \approx 19$ ， $\tau \approx 24s$ 。

由图1.6可以计算出夹套冷却水阀V8与温度的过程动态特性参数： $K = 0.2811$ ， $T \approx 28$ ， $\tau \approx 30s$

实验结论：夹套冷却水和蛇管冷却水的换热能力不同，对于控制升温速率和恒温，应选择不同的阀门，以达到良好的控制效果。

#### 1.4.5 反应温度、压力对产品组份的影响

本装置的主要目的是得到尽可能多的得到产品，图1.7是达到控制要求响应

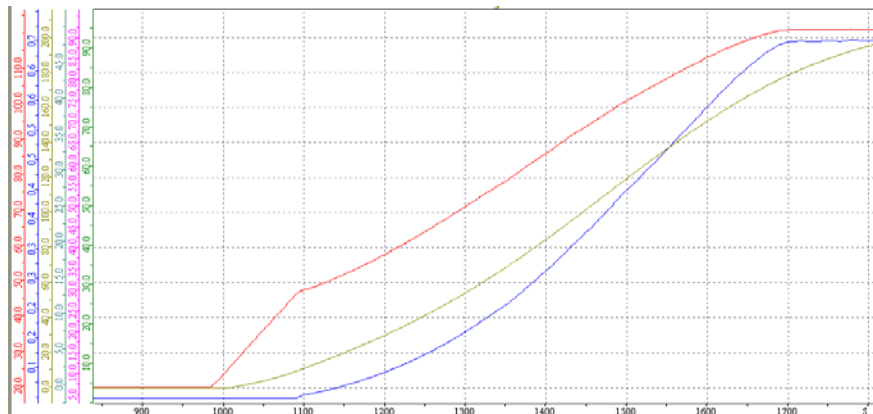


图1.7 反应温度、压力对产品组分的影响（正常）

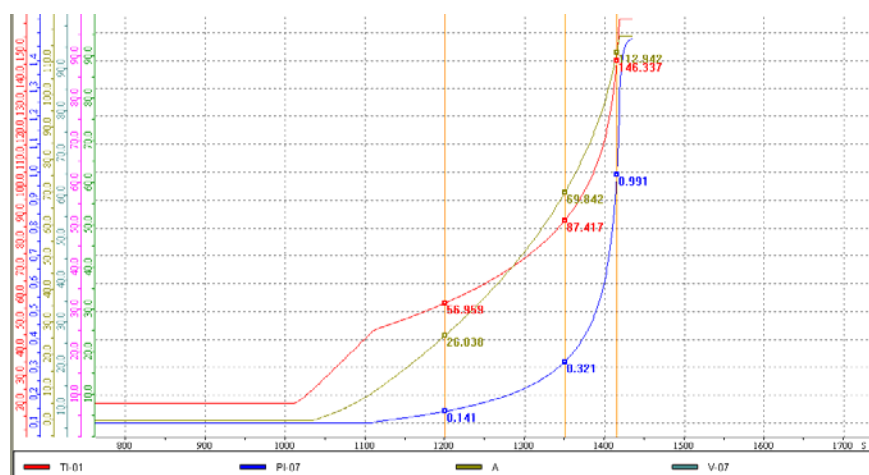


图1.8 反应温度、压力对产品组分的影响（无冷却）

曲线，图1.8是无冷却时的响应曲线。由图1.7可知，当温度升到恒温所要求的121℃左右时，达到控制要求的反应产品组分是180.5kg；而对于无冷却的反应中，反应温度达到146℃时，产品组分为112.9kg。

实验结论：有效的升温控制所得到的产品比没有控制时的要大的多。按控制要求及时有效的控制升温速率，即可获得较优的产率。

#### 1.4.6 测试总结

1. 升温阶段应注意加热量的调节应使温度上升速度在0.1~0.2℃/s以内。加热过猛会使反应后续的剧烈阶段失控而产生超压事故。加热过小会使反应停留在低温区，副反应会加强，影响主产物产率。

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. 操作时应根据具体情况，主要是根据反应釜温度T1上升的速率，在0.1~0.2℃/s以内，当反应釜温度上升至65℃左右（釜压0.18Mpa左右），间断小量开启夹套冷却水阀门V8及蛇管冷却水阀门V7，控制反应釜的温度和压力上升速度，提前预防系统超压。

3. 反应在95~110℃（或釜压0.41~0.55Mpa）进入剧烈难控的阶段。此时应充分加强对V8和V7的调节，既要大胆升压，又要谨慎小心防止超压。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）。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。

通过对对象的全面测试，基本了解控制对象的特性，为得到良好的控制品质做好了充分的准备。

## 第二章 系统控制策略设计

控制方案的设计要遵循可行性的原则,即所设计的控制方案一定要经过验证可以实施的,按照这个原则,所设计的方案基本以工业上常见的控制方案为依据,以串级,单回路控制为基本方案,并经过实验验证。这样可以保证方案简单,具有较高的可实施性。

系统从冷态开车到最后出料,可分为进料、升温、保温、出料等四个阶段。按照以上要求设计了五个控制单元:进料控制单元,升温控制单元,保温温控制单元,和压力安全控制单元。同时,还设计了紧急停车及安全联锁,更接近于实际工业现场控制。

还有就是要有有一定的先进性,遵照这个原则,控制方案中加入了计算动词算法和免疫PID算法,通过先进的控制手段,使得控制品质得到进一步提高。

### 2.1 进料阶段

本阶段的主要任务是将A、B、C三种物料加入到缩合反应釜中,为下一步的缩合反应做好准备。

工艺要求首先将B、A两种物料先后用泵分别打入两个计量槽中,然后将B物料从B计量槽中放入到釜内,接着同样将A放入釜内,最后加入C物料,使釜内液位达到1.37m。

#### 2.1.1 操纵变量与被控变量的选择

被控变量: A物料计量罐液位L2、B物料计量罐液位L3

操纵变量: B物料上料阀 V2、下料阀 V5、A物料上料阀 V3、下料阀 V4、C物料下料阀 V6

图2.1为进料控制P&ID图,图中SFC-01即为进料顺序控制器。

#### 2.1.2 阀门的选择

考虑到安全因素,B物料上料阀 V2、下料阀 V5、A物料上料阀 V3、下料阀 V4、C物料下料阀 V6 都需要在失气的时候关闭,因而选用气开阀。同时,下料

阀 V5 又兼为放空阀，当压力过高时将使用以降低反应压力，所以综合考虑下料阀 V5 应该为气关阀，即在失气的情况下开启。

表 2.1 进料阶段阀门选型表

阀门名称	公称直径Dg	阀门形式	阀门特性
V2	Dg40	气开	线性
V3	Dg40	气开	线性
V4	Dg40	气开	线性
V5	Dg40	气关	快开
V6	Dg40	气开	线性

V2、V3、V4、V6 都选用线性阀，即可满足过程要求。同上所述，下料阀 V5 应为快开阀。

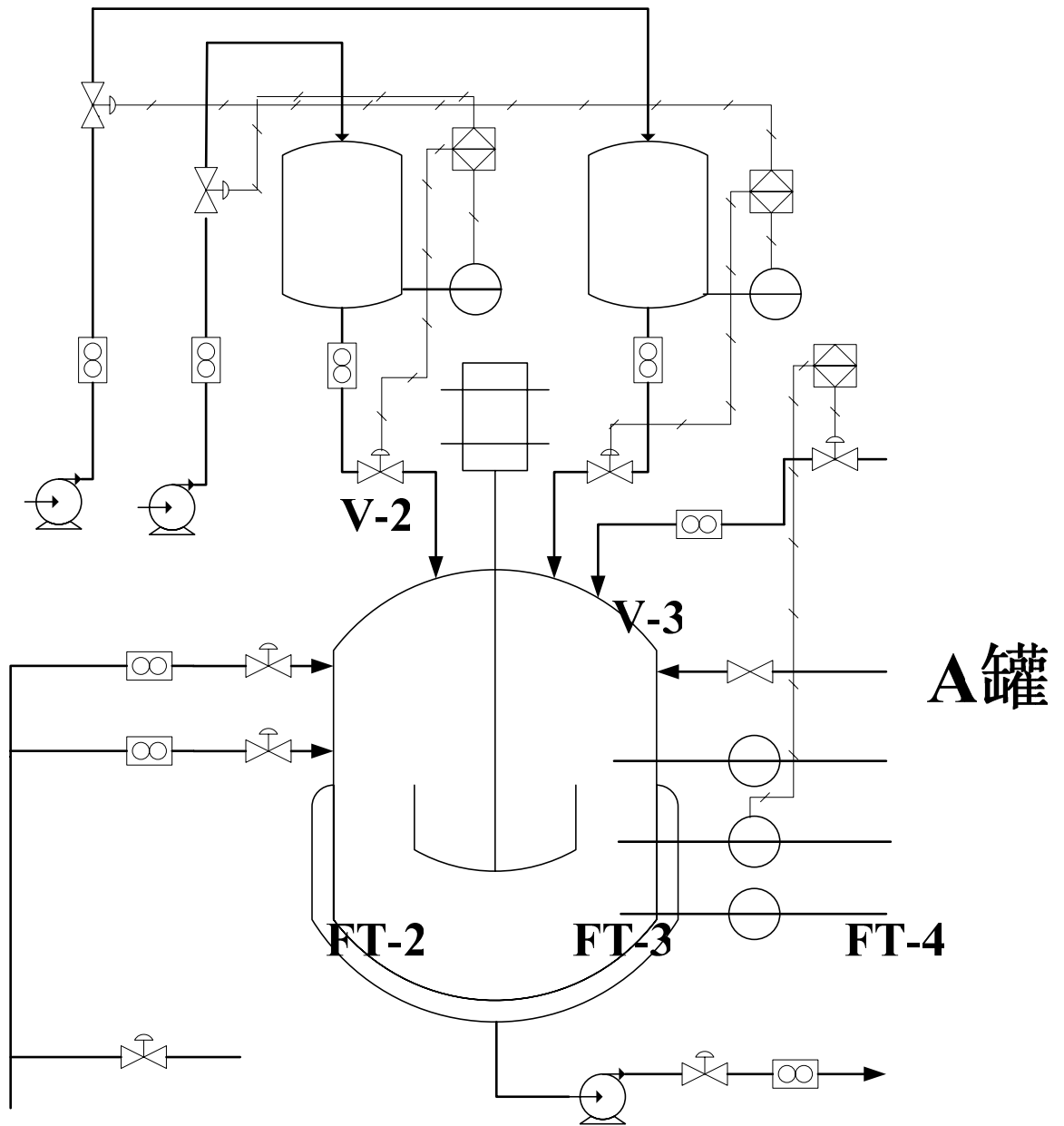


图2.1 进料控制P&ID图

### 2.1.3 控制方案

本文采用带专家知识的顺序控制方案，实现方便、安全可靠。其顺序控制流程如图2.2所示：其中，尤其要注意的是在工业现场中，泵和阀门的开关顺序非常重要。以本次大赛被控对象为例，B物料泵在入口阀之前，如果先开泵后再开阀门，就会造成设备损坏，甚至是阀门、泵的损坏，这种现象也就是现场中俗称的“闷打”。在实际工业设计过程中，设计人员往往会忽视这方面的问题，造成重大经济损失。所以，开泵前先开阀，关泵后再关阀。在本控制方案中，运用联锁方式来实现，使得开泵前开阀、关泵后关阀，具体见2.5.2中安全联锁。

V-4

FT-7

FT-8

V-8

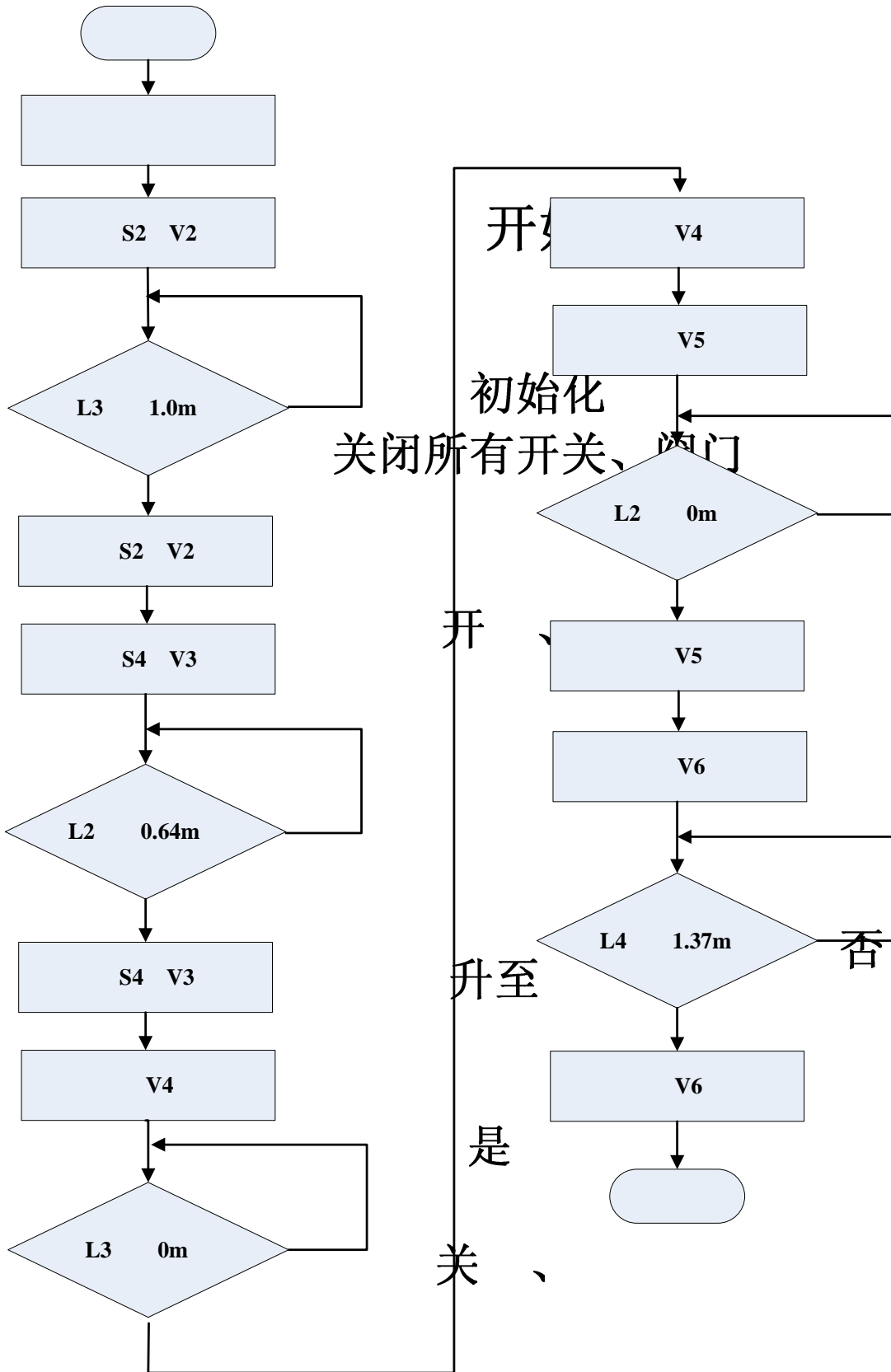


图2.2 进料控制流程图

其中，关闭V2、V3、V6时都将采用专家知识控制方案，具体规则如下：

```

V2: IF L3=0.8m, THEN V2=70%;
      IF L3=0.9m, THEN V2=50%;
      IF L3=0.95m, THEN V2=30%;
      IF L3=1.0m, THEN V2=0%;
V3: IF L2=0.5m, THEN V2=70%;
      IF L2=0.55m, THEN V2=50%;
      IF L2=0.6m, THEN V2=30%;
      IF L2=0.64m, THEN V2=0%;
V6: IF L3=1.2m, THEN V2=70%;
      IF L3=1.3m, THEN V2=50%;
      IF L3=1.35m, THEN V2=30%;
      IF L3=1.37m, THEN V2=0%

```

## 2.2 升温阶段

本阶段的主要任务是将釜内温度升到121℃左右，主要是要求控制加热速率在0.1~0.2℃/s以内。此反应是放热反应，放热反应属于非自衡的危险过程，反应温度过高时，反应速度加快，使得反应放出的热量增加，如果热量无法及时移走，则反应速度进一步升高。这种“正反馈”作用将导致反应器温度急剧上升，同时反应器压力飞升。如果反应器内压力超过反应器所能耐受的极限，将发生爆炸与火灾事故。加热过猛会使反应后续的剧烈阶段失控而产生超压事故；而加热过慢会使反应停留在低温区，副反应加强，影响主产物产率。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。

### 2.2.1 操纵变量与被控变量的选择

被控变量：反应温度的速率、反应釜压力P7

操纵变量：蛇管冷却水阀门V7、夹套冷却水阀门V8、高压水入口阀V10

### 2.2.2 阀门的选择

V7为蛇管冷却水阀门，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。蛇管冷却水阀V7在该反应中反应釜采用了蛇管冷却和夹套冷却。其中蛇管冷却对反应温度的控制起到了主要的作用。同样，V7开度小时，控制缓和平稳；开度大时，控制应灵敏、有效。所以，冷却水阀V7的固态流量特性选为等百分比流量特性。

对于夹套冷却水阀V8，按照以上原理，同样选择气关阀、等百分比流量特性。

使用高压水时一般是温度压力都超过了上限，这时首要任务是响应迅速，将温度、压力降下来，因而选用快开阀，使其在小开度时流量就比较大，随着开度



的增大，流量很快达到最大。所以对于 V10，按照以上原理，选择气关阀、快开流量特性。

表 2.2 升温阶段阀门选型表

阀门名称	公称直径Dg	阀门形式	阀门特性
V7	Dg50	气关	对数
V8	Dg65	气关	对数
V9	Dg70	气关	线性
V10	/	气关	快开

### 2.2.3 控制方案

由于反应升温过程属于时间常数大的高阶特性。冷却水流量的变化随阀门的开关变化较快、时间常数小，这时用常规控制来控制升温的速率是不合适的，它很可能造成反应过快而失控或者“浇灭”反应。根据控制要求和经验，选用计算动词串级控制来实现对升温速率和反应釜压力的控制，控制结构如图2.3所示：

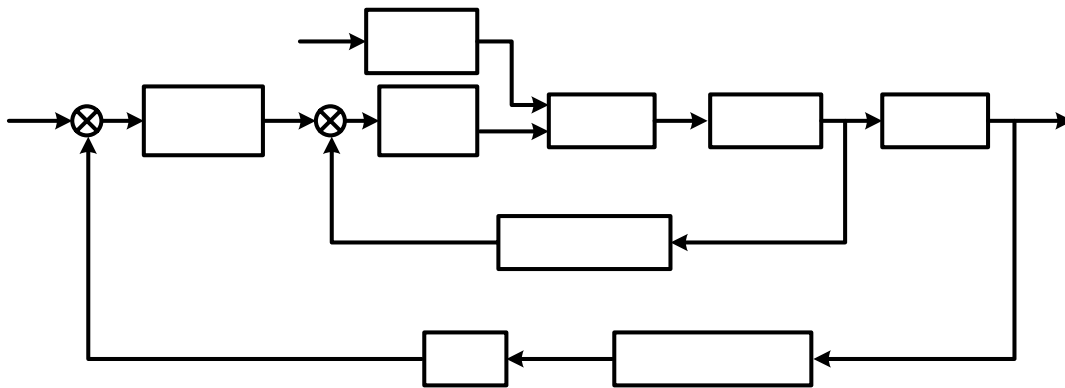
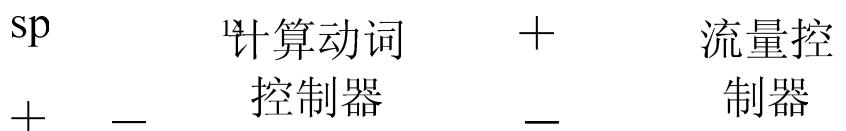


图2.3 升温速率和反应釜压力串级控制方块图

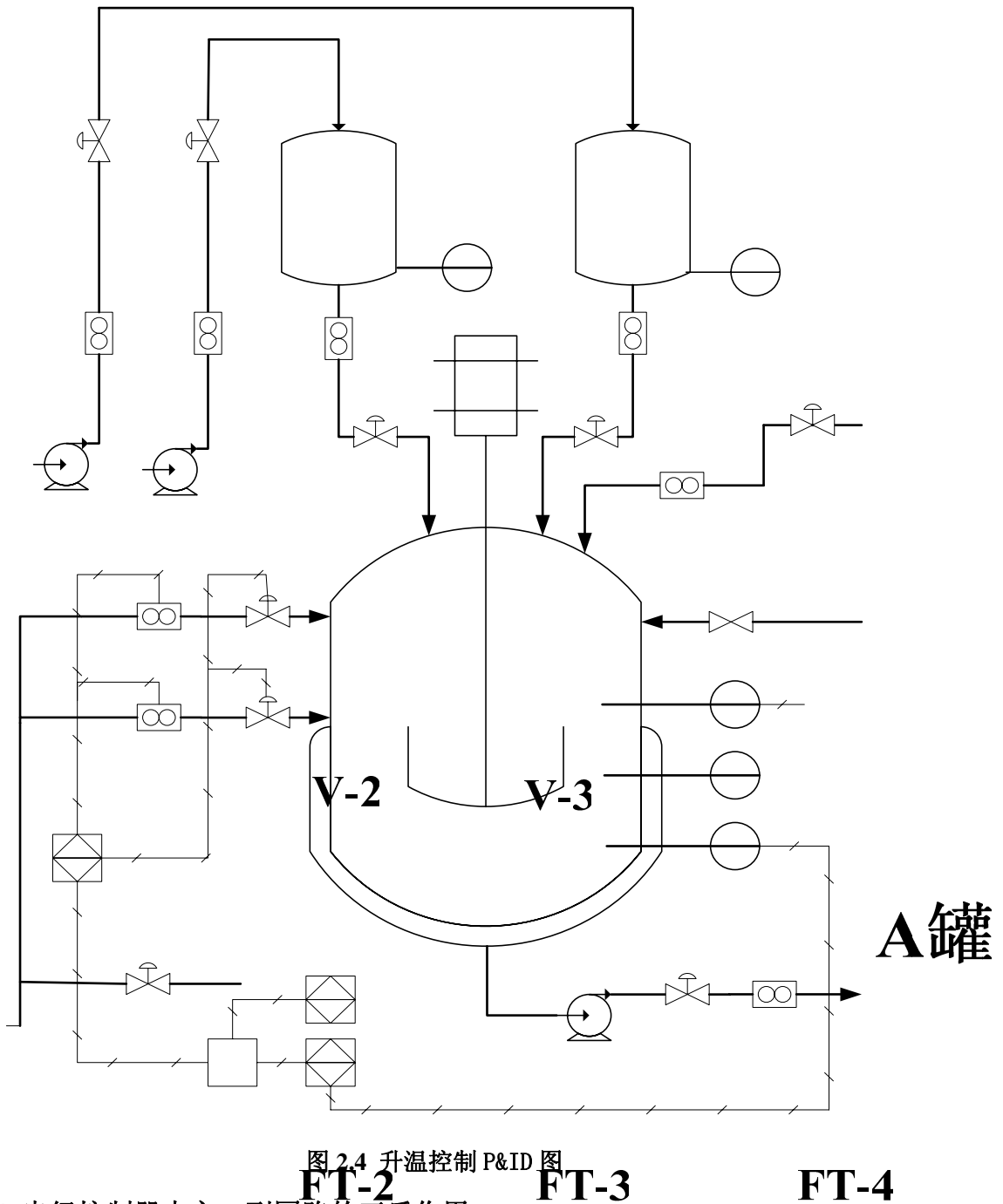
串级控制系统可以选择一个滞后时间较小的辅助参数组成副回路，使等效副对象的时间常数减小，以提高系统的工作效率，加快响应速度，缩短控制稳定时间，从而获得较好的控制质量。对化学反应器这样容量滞后大、负荷和干扰变化比较剧烈、比较频繁的场所，串级控制系统使用最为普遍，串级控制系统是改善过程控制品质的有效方法之一，串级控制系统可以迅速控制副回路的扰动。副回路起迅速的粗调的作用，主回路起进一步的细调的作用。允许副回路内各个环节的特性在一定范围内变动而不影响整个系统的控制品质。当采用单回路控制质量达不到要求时，采用串级控制系统可以获得较为满意的效果。

升温控制器由串级控制和压力安全控制器组成。在串级控制器中：温度变化率设定值由外部给定，与温度变化率的偏差作为计算动词控制器TIC-01的输入，流量控制器的设定值是计算动词控制器输出。当温度变化率偏高的时候，压力安全水流量的设定值增大一点，当温度变化率低的时候，冷却水流量的设定值应当减少一点。这



里采用串级形式不仅仅为了提高主参数升温数率的控制质量，流量副回路得引入同时还克服控制阀前后压力的波动对流量的影响，使流量变化平缓。这样既能迅速克服一些影响流量的扰动作用，同时又能使升温速率在其他扰动作用下保持设定值。

控制器在正常工况(压力 $<0.73\text{MPa}$ )下，输出串级控制器的信号，压力超高时，输出压力安全控制器的信号。此控制系统不仅能有效得控制升温速率，还考虑到了反应器压力的安全。



### 2.2.4 串级控制器中主、副回路的正反作用

主、副控制器正、反作用的选择顺序应该是先副后主。

副回路：副控制器的正、反作用要根据副回路的具体情况决定，而与主回路无关。根据安全要求控制阀应选气关式，其放大倍数符号为负；副对象是流量对象，当阀门开大时，流量将上升，副对象放大倍数为正；副变送器放大倍数符号为正。根据副回路开环放大倍数符号为负的要求，副控制器应选正作用。

主回路：主控制器的正、反作用只取决于主对象放大倍数符号。主对象的输入信号为冷却水的流量，输出信号为反应釜的温度，当冷却水流量增大时，温度降低，因此，主对象放大倍数符号为负。主控制器放大倍数符号应取主对象放大倍数符号的反号，因此主控制器应选正作用。

### 2.2.5 计算动词控制器的设计

动词控制是应用动词集合理论，以动词语言变量和动词逻辑推理为基础的一种计算机数字控制的方法，提供一种实现基于知识规则的，甚至是语言描述的控制规律的机理。

与模糊相比，模糊系统只是提供一种形容词和名词的计算框架，是一种名词性质即静态的计算平台。模糊控制只是根据当前采样得到的输出偏差和偏差变化情况，对模糊控制器中的控制参数按照一定的模糊控制规则做出相应的调整，是一种静态的控制策略；动词控制不仅根据当前采样得到的输出偏差，还利用当前时刻之前的一个时间段内的输出偏差情况，对这一段时间内的偏差及其变化做出评测，然后对动词控制器中的控制参数按照一定的动词控制规则做出相应的调整，是一种动态的控制策略。

由于动词控制是在全局角度上对系统输出偏差变化曲线进行描述，制定相应的动词控制规则，更能正确反应偏差的实际变化情况，获得更好的控制效果，而且减少了存储资源的浪费。动词控制也是一种智能控制算法，因而对于被控对象有良好的适应性。

#### 一、动词控制器的结构设计

PID 控制器的控制量表达式一般是

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2-0a)$$

为实现计算机控制，对上式离散化后得到：

$$u(k) = K_p e(k) + TK_i \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{K_d}{T} [e(k) - e(k-1)] \quad (2-0b)$$

计算动词控制器的参数整定是根据实际偏差  $e$  的变化曲线和规则中的偏差  $e$  的变化曲线的相似度，计算出相应的参数调整值，不断对  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  进行调整，使得被控对象具有良好得动态和静态性能。计算动词控制器结构如图 2.5 所示，设定采样时间  $T=1s$ ，每个采样时刻的反应温度为  $t(n)$ ，则温度变化速率为

$tc(n) = t(n) - t(n-1)$ ,  $n=1, 2, \dots, k$ 。反应温度变化速率设定值为  $0.15^\circ\text{C}/\text{s}$ ，则输入变量为反应温度变化速率设定值  $T_{csp}$  与温度变化速率  $tc(n)$  的偏差  $e$ ，经过动词化、动词规则推理、去动词化三个步骤，输出为 PID 控制器的参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ ，使 PID 控制器不断修改参数，以达到良好的控制效果。

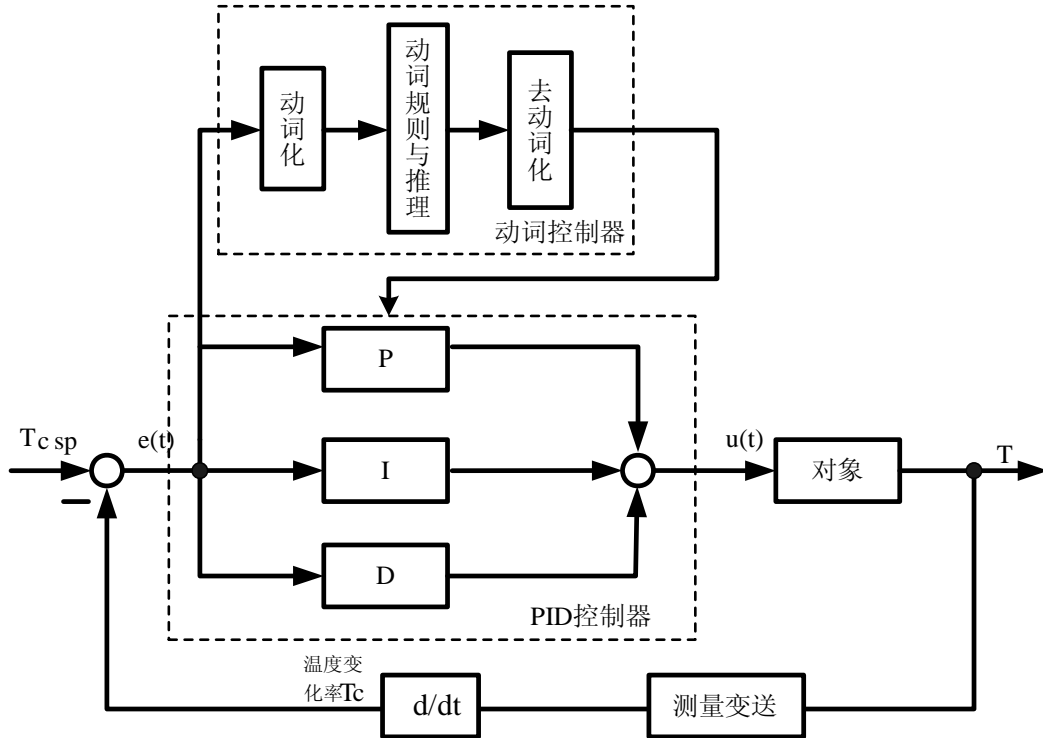


图 2.5 计算动词控制器原理图

## 二、定义偏差绝对值 $e$ 的模糊集

根据偏差变化曲线在不同时间段上所对应的曲线间的相似性，以及模糊集区间的对称性，对偏差  $e$  的模糊集定义可转化为对误差绝对值  $|e|$  的模糊集定义，其定义为  $\{ZO, NS, NM, NB\}$ 。

根据已知条件，可得到  $e \in [-\max|e|, \max|e|]$ ，首先偏差  $e$  归一化，将其区间变到  $[-1, 1]$  的区间内，再将该数值区间选取适当的隶属度函数按照前面定义的模糊集进行划分，得到七个模糊区间，具体如下：

$$\mu_{PB}(|e|) = \max(0, 1 + (\frac{|e|}{\max|e|} - 1) - |\frac{|e|}{\max|e|} - 1|) \quad (2-1)$$

$$\mu_{PM}(|e|) = \max(0, 1 + (\frac{|e|}{\max|e|} - 0.5) - 3|\frac{|e|}{\max|e|} - 0.5|) \quad (2-2)$$

$$\mu_{PS}(|e|) = \max(0, 1 - 4|\frac{|e|}{\max|e|} - 0.25|) \quad (2-3)$$

$$\mu_{zo}(|e|) = \max(0, 1 - 4 \left| \frac{|e|}{\max |e|} \right|) \quad (2-4)$$

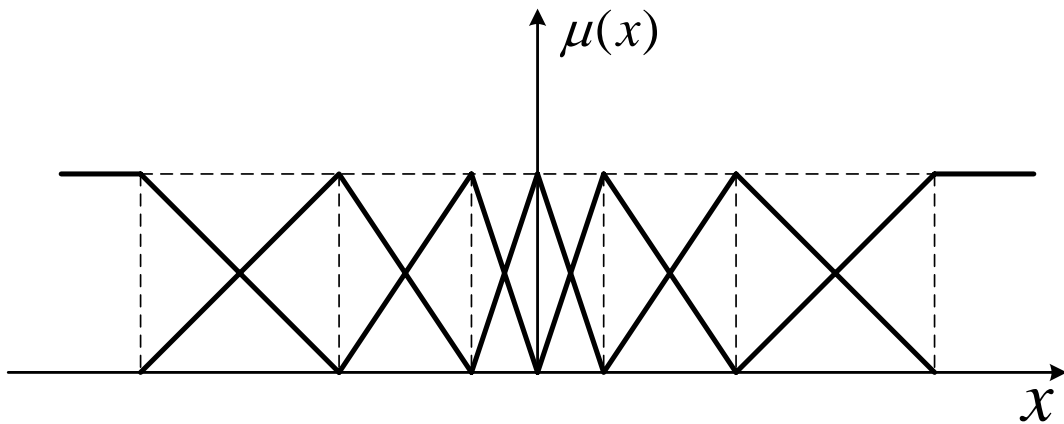


图2.6 升温速率偏差e隶属函数曲线

### 三、计算动词控制规则的建立

根据上述定义的模糊集和误差变化情况，制定出七条动词控制规则：

- |  |           |           |           |          |
|--|-----------|-----------|-----------|----------|
|  | <b>NB</b> | <b>NM</b> | <b>NS</b> | <b>Z</b> |
|--|-----------|-----------|-----------|----------|
1. IF  $e|k|$  **stays big**,  
 THEN  $K_p$  **increases fast to big**,  
 $K_i$  **decreases to zero**,  
 $K_d$  **increases fast to big**;
  
  2. IF  $e|k|$  **decreases from big to medium**,  
 THEN  $K_p$  **decreases from big to medium**,  
 $K_i$  **increases from zero to small**, -1 -0.5 -0.25 0  
 $K_d$  **decreases from big to medium**;
  
  3. IF  $e|k|$  **decreases from medium to small**,  
 THEN  $K_p$  **decreases from medium to small**,  
 $K_i$  **increases from small to medium**,  
 $K_d$  **decreases from medium to small**;
  
  4. IF  $e|k|$  **decreases from small to zero**,

- THEN  $K_p$  **decreases** from small to zero,  
 $K_i$  **increases** from medium to big,  
 $K_d$  **decreases** from small to zero;
5. IF  $e|k|$  **increases** from zero to small,  
 THEN  $K_p$  **increases** from zero to small,  
 $K_i$  **decreases** from big to medium,  
 $K_d$  **increases** from zero to small;
6. IF  $e|k|$  **increases** from small to medium,  
 THEN  $K_p$  **increases** from small to medium,  
 $K_i$  **decreases** from medium to small,  
 $K_d$  **increases** from small to medium;
7. IF  $e|k|$  **increases** from medium to big,  
 THEN  $K_p$  **increases** from medium to big,  
 $K_i$  **decreases** from small to zero,  
 $K_d$  **increases** from medium to big;

#### 四、动词推理

##### (1) 建立规则的数学描述

为了计算的需要，必须将动词规则的语言描述转化为相应的数学表达式。其数学描述如下：

$$\mathcal{E}_{become(state1,state2)}(t) = \begin{cases} \mu_{state1(x(t))}, & t \in [0, T_w/2] \\ \mu_{state2(x(t))}, & t \in [T_w/2, T_w] \end{cases} \quad (2-5)$$

为了能用计算机编程实现，对上述得规则数学描述离散化。在此选用数据窗口长度为  $2n=10$ ，并满足  $T_w = 2nT$ 。同时，为了简化计算，选用满足式条件的线性方程作为规则的具体实现。因此，七个动词控制规则所对应的数学描述如下：

$$\mathcal{E}_{stay}^{big}(i) = 1 - \frac{0.1i}{2n}, i = 1, \dots, 2n \quad (2-6)$$

$$\mathcal{E}_{decrease(big,medium)}(i) = \left\{ \mathcal{E}_{decrease}^{big}(i), \mathcal{E}_{decrease}^{mediuml}(i) \right\} \quad (2-7)$$

$$\mathcal{E}_{decrease(medium,small)}(i) = \left\{ \mathcal{E}_{decrease}^{medium}(i), \mathcal{E}_{decrease}^{small}(i) \right\} \quad (2-8)$$

$$\mathcal{E}_{decrease(small,zero)}(i) = \left\{ \mathcal{E}_{decrease}^{small}(i), \mathcal{E}_{decrease}^{zero}(i) \right\} \quad (2-9)$$

$$\mathcal{E}_{increase(zero,small)}(i) = \left\{ \mathcal{E}_{increase}^{zero}(i), \mathcal{E}_{increase}^{small}(i) \right\} \quad (2-10)$$

$$\mathcal{E}_{increase(small,medium)}(i) = \left\{ \mathcal{E}_{increase}^{small}(i), \mathcal{E}_{increase}^{medium}(i) \right\} \quad (2-11)$$

$$\mathcal{E}_{increase(medium,big)}(i) = \left\{ \mathcal{E}_{increase}^{medium}(i), \mathcal{E}_{increase}^{big}(i) \right\} \quad (2-12)$$

其中：

$$\text{对于式 2-7 中, } \mathcal{E}_{decrease}^{big}(i) = \begin{cases} 1 - \frac{0.5i}{n}, i = 1, \dots, n \\ don't\ care, i = n + 1, \dots, 2n \end{cases}; \quad (2-7a)$$

$$\mathcal{E}_{decrease}^{medium}(i) = \begin{cases} don't\ care, i = 1, \dots, n \\ 0.5 + \frac{0.5(i-n)}{n}, i = n + 1, \dots, 2n \end{cases} \quad (2-7b)$$

其余规则中的数学描述于公式相同，在此就不一一列出。

## (2) 计算相似度 S

$$\mathcal{E}_{decrease}^{state1}(k) = \mu_{state1}(|e(k)|); \quad (2-13)$$

$$a1 = \sum_{i=1}^n [\mathcal{E}_{become}^{state1}(i) \wedge \mathcal{E}_{observe}^{state1}(k - 2n + 1 + i)]; \quad (2-14)$$

$$a2 = \sum_{i=n+1}^{2n} [\mathcal{E}_{become}^{state2}(i) \wedge \mathcal{E}_{observe}^{state2}(k - 2n + 1 + i)]; \quad (2-15)$$

$$\mathcal{E}_{observe}^{state1}(k) \square \mu_{state1}(e(k)); \quad (2-16)$$

$$b1 = \sum_{i=1}^n [\mathcal{E}_{become}^{state1}(i) \vee \mathcal{E}_{observe}^{state1}(k - 2n + 1 + i)]; \quad (2-17)$$

$$b2 = \sum_{i=n+1}^{2n} [\mathcal{E}_{become}^{state2}(i) \vee \mathcal{E}_{observe}^{state2}(k - 2n + 1 + i)]; \quad (2-18)$$

$$\varpi = 2 \min\left(\frac{a1}{b1 + b2}, \frac{a2}{b1 + b2}\right); \quad (2-19)$$

$$S(become(state1, state2), observe) = \frac{a1 + a2}{b1 + b2} \varpi; \quad (2-20)$$

$2n$  为数据窗口长度,  $e(k)$  为偏差的当前采样值, **state1** 和 **state2** 为  $|e|$  的四个模糊区间, 即 **big**、**medium**、**small**、**zero**, **become** 对应两种趋势, 即 **increase** 和 **decrease**, 与用语言描述的规则中的状态相对应。

将当前偏差绝对值  $|e|$  的变化情况进行匹配计算, 即将当前时刻与之前  $2n-1$  个时刻的采样值代入公式进行计算, 得到 7 个相似度值, 然后采用最大值原理选取相似度值, 与该值相对应的规则即我们所采用的控制规则。

(3)  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的实时计算

$$K_p(k+1) = K_p(k) + \alpha^l S(become, observe) \quad (2-21)$$

$$K_i(k+1) = K_i(k) + \alpha^l S(become, observe) \quad (2-22)$$

$$K_d(k+1) = K_d(k) + \alpha^l S(become, observe) \quad (2-23)$$

其中,  $\alpha$  表示调整系数, 通过调整  $\alpha$  可以改变计算动词的输出作用的强弱, 从而可以调整控制器的敏感度。

### 2.2.6 副回路的设计

单纯从控制的角度看, 副回路最好为夹套温度或者蛇管出口温度, 但本次控制对象中没有这个测量点。从设计的角度看, 当设备条件已知的情况下, 夹套和蛇管的换热能力与冷却介质质量相关性最大。从以前笔者在工业现场的经验可知, 选择将蛇管冷却水入口流量 F7 和夹套冷却水入口流量 F8 的和作为副回路的反馈, 而且通过分程控制来协调蛇管入口阀 V7 和夹套入口阀 V8 之间的协调动作。

副回路是一个随动系统, 它的给定值随主控制器输出的变化而变化, 为了能快速跟踪, 副控制器 FIC-01 最好不带积分作用, 因为积分作用会使跟踪变得缓慢。



FIC-01的微分作用也是不需要的，因为当副控制器有微分作用时，一旦主控制器和输出稍有变化，控制阀就将大幅度变化，这对控制也是不利的。因此副控制器 FIC-01只是纯比例控制器。

不同的工况需要不同的控制手段，由1.4节中的对象特性测试可知，在0~90℃时，蛇管冷却水的换热能力已经足够；但在90~121℃之间时，由于温度的升高，导致压力随之增大，就需要加用换热效果更好的夹套冷却水，使温度及时控制在规定的范围之内，防止超温。当反应温度超过130℃时，应立即开启高压水阀门。由于冷却水阀门又有蛇管冷却水阀门V7、夹套冷却水阀门V8、高压水入口阀V10之分，它们换热能力不同，所以副回路采用分程控制，将副控制器流量控制器FIC-01的输出到两个阀门V7、V8，分程控制图如图2.7所示。

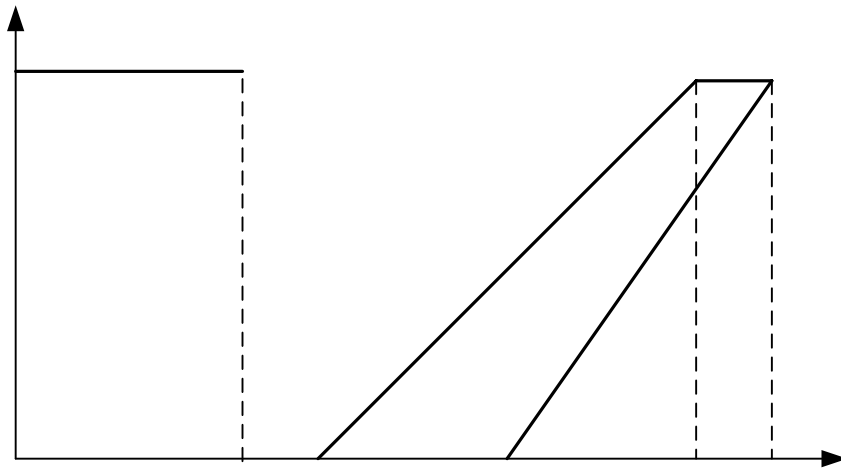


图2.7 副回路分程控制图

1、当流量控制器FIC-01的输出小于30%，表明升温速率很小甚至为负时，这时就要开蒸汽将升温速率提高，所以这种情况下，将控制器的输出信号送到蒸汽阀门开关S6；

2、当流量控制器FIC-01的输出在30%到40%之间，夹套升温速率小于设定值但又不是过小，这时不需要开蒸汽和冷却水，通过自身反应产生的热量就可以把升温速率提高，因此这时的输出是100%；

3、当流量控制器FIC-01的输出在40%到100%之间，表明升温速率在增加，这时将FIC-01的输出同时送往V7和V8。但值得注意的是，V7和V8的广义对象特性(包括增益)通常总是不同的。这样，在越过分程点时，广义对象特性将产生突变，对调节过程品质会带来不利的影响。

为了缓和在分程点出现的增益突变，采用信号重叠方法，蛇管冷却水阀V7在40%~90%内动作，夹套冷却水阀V8可以设为在65%~100%区段内动作，有

一段重叠区域作为过渡。

对于高压水阀门V10，只能是用于安全控制而不宜作为连续过程控制量。因此将高压水阀门V10的控制交由压力安全控制器来控制，在副回路分程控制中将不再使用。

## 2.3 保温阶段

保温阶段的目的是尽可能多地获得期望地产物，为了最大限度地减少副产物的生成，必须保持较高的反应釜温度。当温度压力有所下降时，应向夹套内通入适当蒸汽以保持原有的釜温、釜压。

### 2.3.1 操纵变量与被控变量的选择

被控变量：反应温度的速率、反应釜压力P7

操纵变量：蛇管冷却水阀门V7、夹套冷却水阀门V8、高压水入口阀V10

### 2.3.2 阀门的选择

同2.2.2中阀门的选择

### 2.3.3 控制方案

在自动升温控制结束后，将自动进入保温控制器。在此将免疫PID串级控制器应用到保温阶段，控制结构图如图2.8所示，可实现对反应温度121℃工作点附近的区间控制，以达到尽可能多的期望产物。

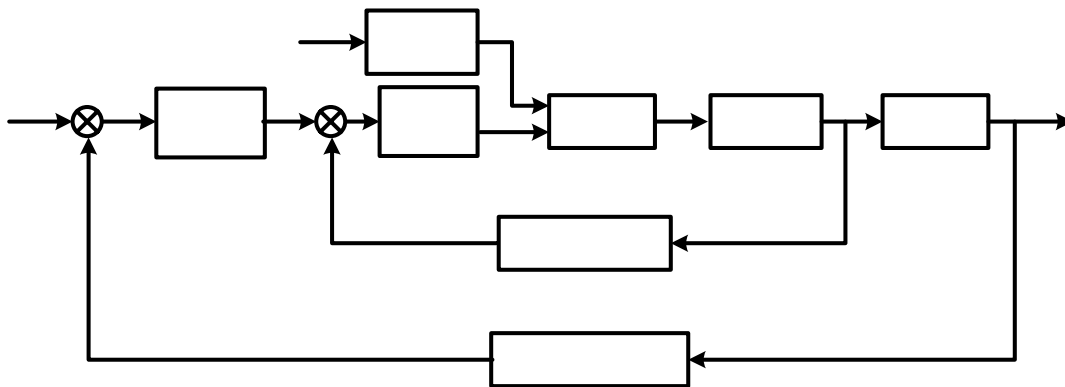


图2.8 保温串级控制方块图

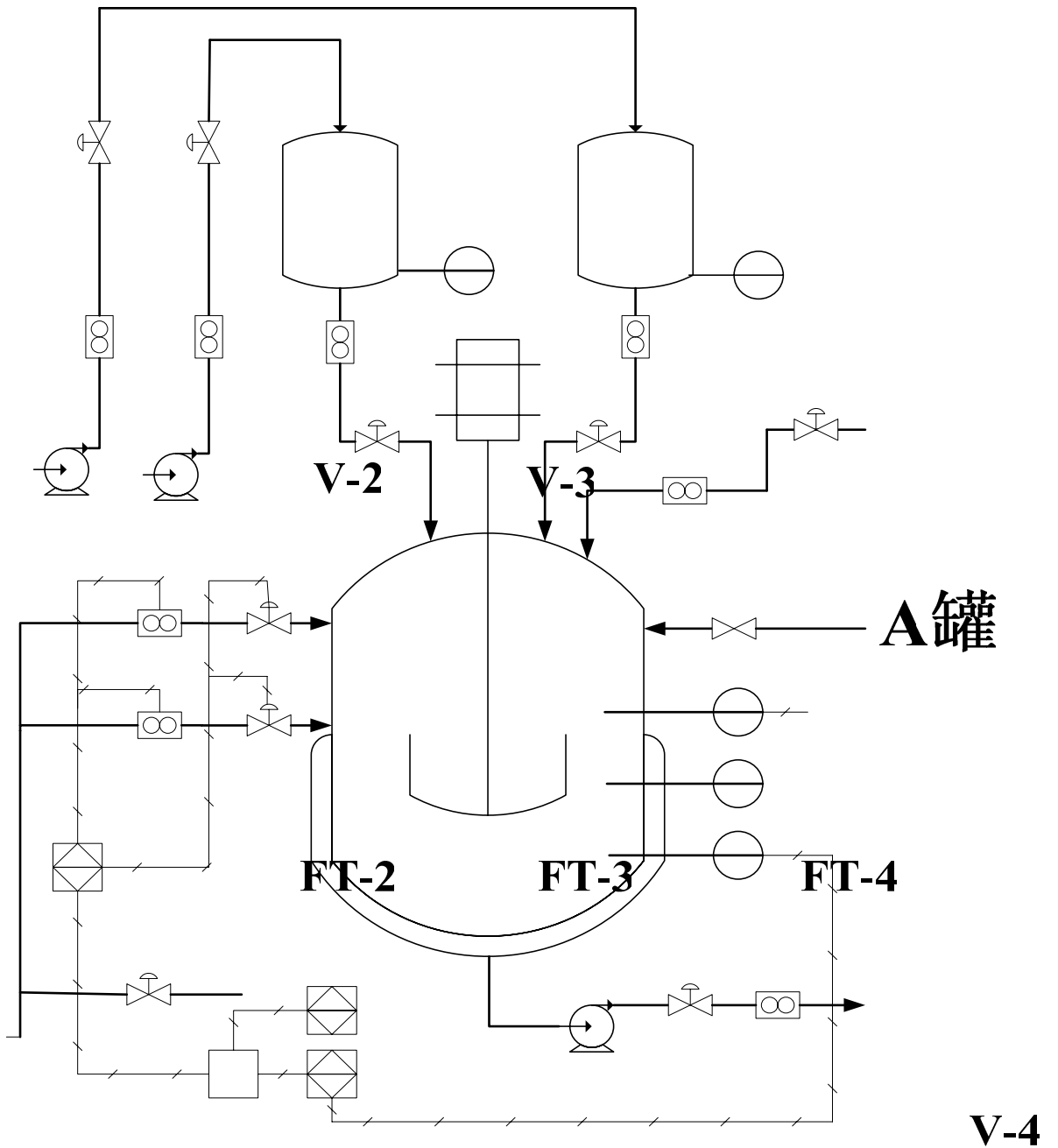


图 2.9 恒温控制 P&ID 图

保温串级控制器由串级控制(S2)和压力安全控制器(S4)组成。在串级控制器中，主控制器为免疫PID控制器TIC-02，温度设定值由人为给出，与温度测量值的偏差作为免疫PID控制器的输入。副控制器为流量控制器，流量控制器的设定值由免疫PID控制器输出。当温度偏高的时候，把冷却水流量的设定值减小一点；偏低的时候，冷却水流量的设定值应当增加。这里采用串级形式不仅仅为了提高主参数反应温度的控制质量，流量副回路得引入同时还克服控制阀前后压力的波动以及自衡作用对流量的影响，使流量变化平缓。这样既能迅速克服一些影响流量的扰动作用，同时又能使温度在其他扰动作用下保持设定值。

由于要求温度控制在121℃，这时的温度已经较高，离报警温度128℃非常接近。所以设计压力安全控制器，控制器在正常工况(压力<0.73MPa)下，输出串级控制器的信号，压力超高时，输出安全控制单元的信号。此控制系统不仅能有效得控制反应温度，还考虑到了反应器压力的安全。

### 2.3.4 串级控制器中主、副回路的正反作用

主、副控制器正、反作用的选择顺序应该是先副后主。

副回路：副控制器的正、反作用要根据副回路的具体情况决定，而与主回路无关。根据安全要求控制阀应选气关式，其放大倍数符号为负；副对象是流量对象，当阀门开大时，流量将上升，副对象放大倍数为正；副变送器放大倍数符号为正。根据副回路开环放大倍数符号为负的要求，副控制器应选正作用。

主回路：主控制器的正、反作用只取决于主对象放大倍数符号。主对象的输入信号为冷却水的流量，输出信号为反应釜的温度，当冷却水流量增大时，温度降低，因此，主对象放大倍数符号为负。主控制器放大倍数符号应取主对象放大倍数符号的反号，因此主控制器应选正作用。

### 2.3.5 免疫 PID 控制器的设计

免疫PID 控制器是借鉴生物系统的免疫机理而设计出的一种非线性控制器。免疫是生物体的一种特性生理反应。在免疫系统中，由于抗原的入侵， $B$  细胞一方面受到  $T_H$  细胞的活化作用，另一方面也接受  $T_S$  细胞的抑制作用，这样第  $k$  代  $B$  细胞的浓度可以表示为

$$B(k) = T_H(k) - T_S(k) \quad (2-24)$$

其中 
$$T_H(k) = k_1 \varepsilon(k) \quad (2-25)$$

$$T_S(k) = k_2 f[\Delta B(k-d)] \varepsilon(k) \quad (2-26)$$

式中， $\varepsilon(k)$  为第  $k$  代抗原浓度； $\Delta B(k)$  为  $B$  细胞的浓度变化； $d$  为免疫响应的延迟时间； $f(\square)$  为一非线性函数，与  $B$  细胞的浓度变化有关，表示在第  $(k-d)$  代时， $B$  细胞分泌的抗体与抗原相互作用后的免疫效果。

由式(1)-(3)，可得到  $B$  细胞的浓度与抗原浓度的关系式

$$\begin{aligned} B(k) &= k_1 \varepsilon(k) - k_2 \{f[\Delta B(k-d)]\} \varepsilon(k) \\ &= K \{1 - \eta f[\Delta B(k-d)]\} \varepsilon(k) \end{aligned} \quad (2-27)$$

其中， $K = k_1$ ， $\eta = k_1 / k_2$ ，表示  $T_S$  与  $T_H$  作用的比例系数。

式(2-16)可看作为以下免疫控制器

$$u(k) = K \{1 - \eta f[\Delta u(k-d)]\} e(k) \quad (2-28)$$

式中， $e(k) = y_s(k) - y(k)$ ， $y_s(k)$ 为控制系统的给定值， $y(k)$ 为控制系统的实际输出值；第 $k$ 个控制周期，控制器的输出 $u(k)$ 对应于式(2-16)中第 $k$ 代 $B$ 细胞的浓度 $B(k)$ ，偏差 $e(k)$ 对应着式(4)第 $k$ 代抗原浓度 $\varepsilon(k)$ 。式(2-17)是带有可变比例增益的P型免疫控制器。

进一步与常规PID控制器结合可构成免疫PID控制器，其结构如图2.10所示，可以相互取长补短，能进一步提高系统的控制性能

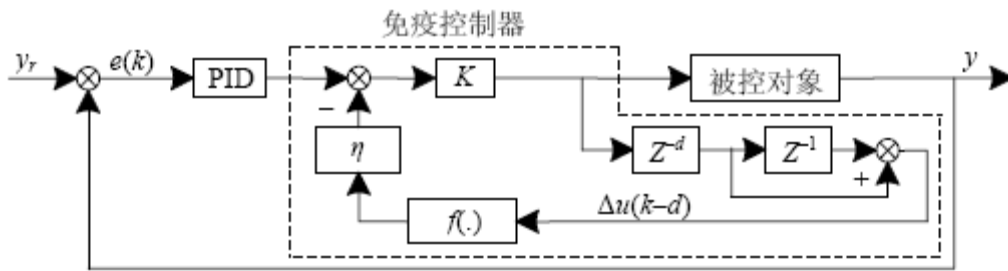


图2.10 免疫控制器结构方块图

免疫PID控制器的输出为

$$u(k) = K\{1 - \eta f[\Delta u(k-d)]\}u_{PID}(k) \quad (2-29)$$

可以看出免疫PID控制器是一个非线性PID控制器。免疫PID控制器的调节作用 $f(\square)$ 不仅与抗原的浓度有关，也与抗体的浓度大小有关。在实际的控制系统中，控制器输出变化量 $\Delta u(k-d)$ ，相当于抗体浓度的变化。

根据其调节作用，这里为了实际编程的方便，选择如下的非线性函数

$$f[\Delta u(k-d)] = \begin{cases} K|\Delta u(k-d)|, & 0 \leq |\Delta u(k-d)| \leq L \\ KL, & \end{cases} \quad (2-30)$$

其函数图形如图2.11所示：

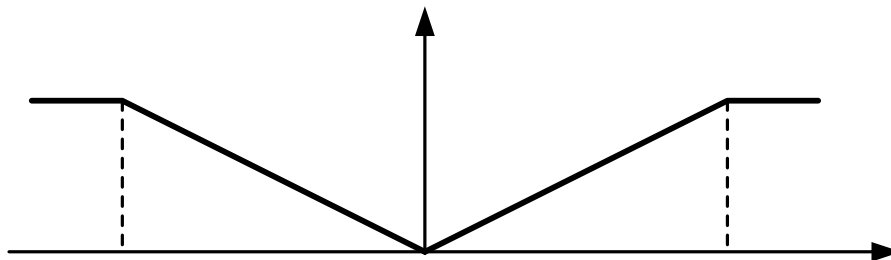


图2.11 T细胞的非线性函数

由图2.10的免疫PID控制结构图，可得到该控制器的算法流程如图2.12所示。

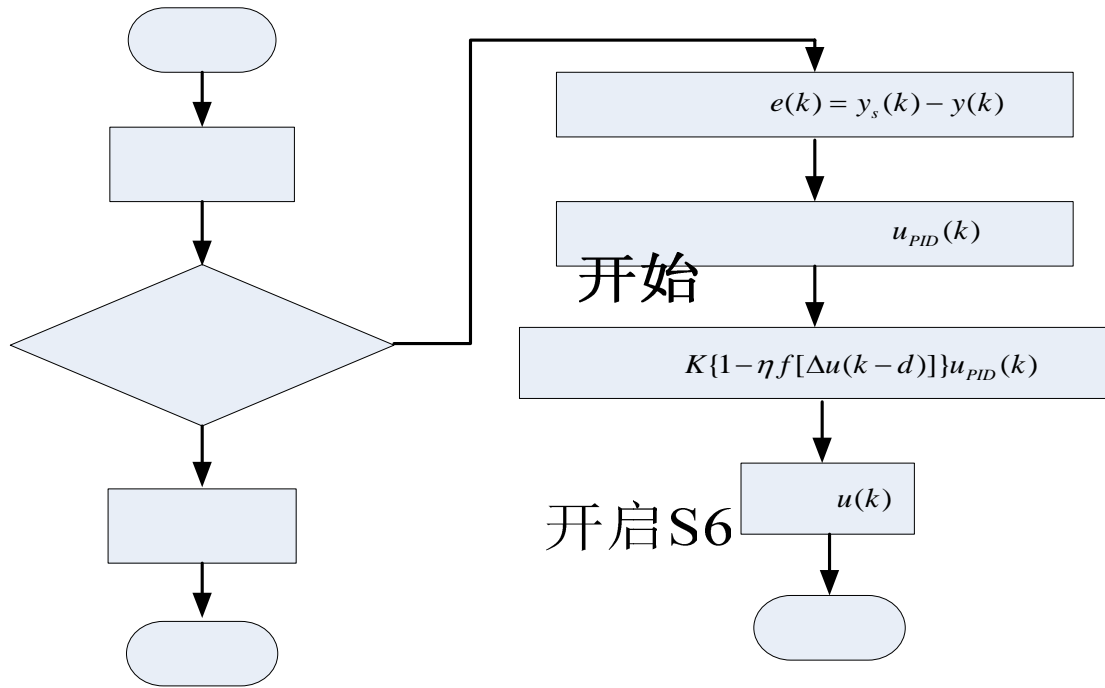


图2.12 免疫控制器算法流程图

在免疫控制器中,要调整的参数有  $K$  和  $\eta$ 。在这里利用 MATLAB 仿真来研究  $K$  和  $\eta$  对系统性能的影响。运用 ACR 聚合反应釜反应模型,得到一个相似的系统传

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} e^{-0.5s}$$

其中纯滞后时间  $\tau$  为 0.5s。将该函数作为被控对象进行仿真试验,用阶跃输入响应测试系统性能。

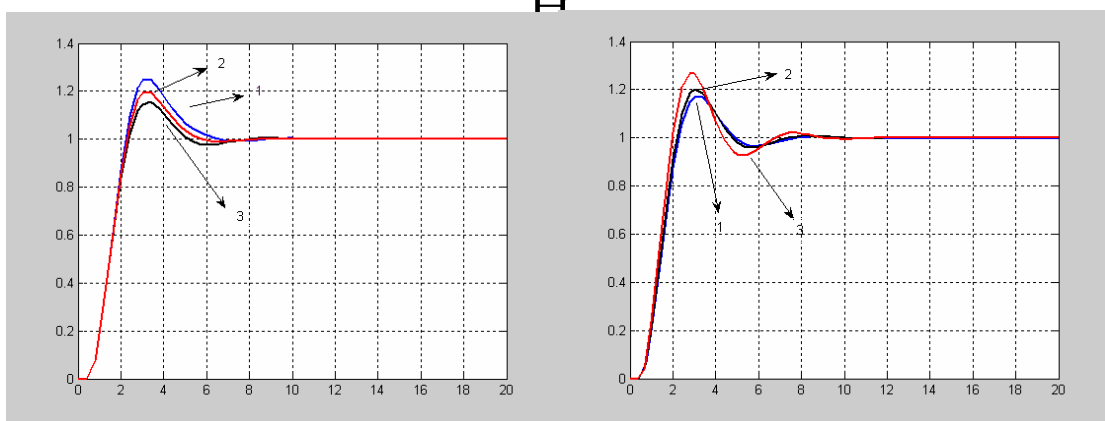


图 2.13  $K$  和  $\eta$  对控制影响对比图

图为不同  $K$  和  $\eta$  值的情况下,免疫控制器的响应曲线。如图2.13所示,左图为在保持  $K$  相同的情况下,改变  $\eta$  的取值所得到的不同响应曲线,其中1:  $\eta=0.2$ ; 2:  $\eta=0.1$ ; 3:  $\eta=0$ 。由此可知,当保持  $K$  相同不变的情况下,  $\eta$  越大,超调越大,但响应时间会缩短。右图为在保持  $\eta$  相同的情况下,改变  $K$  的取值所得到的

不同响应曲线，其中1:  $K=1$ ; 2:  $K=1.1$ ; 3:  $K=1.5$ 。由此可知，当保持参数  $\eta$  不变的情况下，参数  $K$  越大，系统超调也就越大，但另一方面，当参数  $K$  越大时，系统响应所恢复稳定的时间也相应地减少。因此，在控制中，应该适当选择参数  $K$  和  $\eta$  使系统上述两大特性保持平衡，以达到最好的控制效果。

### 2.3.6 副回路的设计

副回路是一个随动系统，它的给定值随主控制器输出的变化而变化，为了能快速跟踪，副控制器 FIC-02 最好不带积分作用，因为积分作用会使跟踪变得缓慢。FIC-02 的微分作用也是不需要的，因为当副控制器有微分作用时，一旦主控制器和输出稍有变化，控制阀就将大幅度变化，这对控制也是不利的。因此副控制器 FIC-02 只是纯比例控制器。

不同的工况需要不同的控制手段，由 1.4 节中的对象特性测试可知，保温阶段要适当加热，才能将温度保持在  $121^{\circ}\text{C}$  左右。由于冷却水阀门又有蛇管冷却水阀门 V7、夹套冷却水阀门 V8、高压水入口阀 V10 之分，它们换热能力不同，所以副回路采用分程控制，将主控制器 TIC-02 的输出同时送到蒸汽阀开关 S6、蛇管冷却水阀 V7 和夹套冷却水阀 V8。

1、当流量控制器 FIC-02 的输出小于 40%，表明温度低于保温设定值，这时就要开蒸汽将升温速率提高，所以这种情况下，将控制器的输出给到蒸汽阀开关 S6；

2、当流量控制器 FIC-02 的输出在 40% 到 100% 之间，表明升温速率在增加，这时将 FIC-01 的输出同时送往 V7 和 V8。但值得注意的是，V7 和 V8 的广义对象特性（包括增益）通常总是不同的。这样，在越过分程点时，广义对象特性将产生突变，对调节过程品质会带来不利的影响。

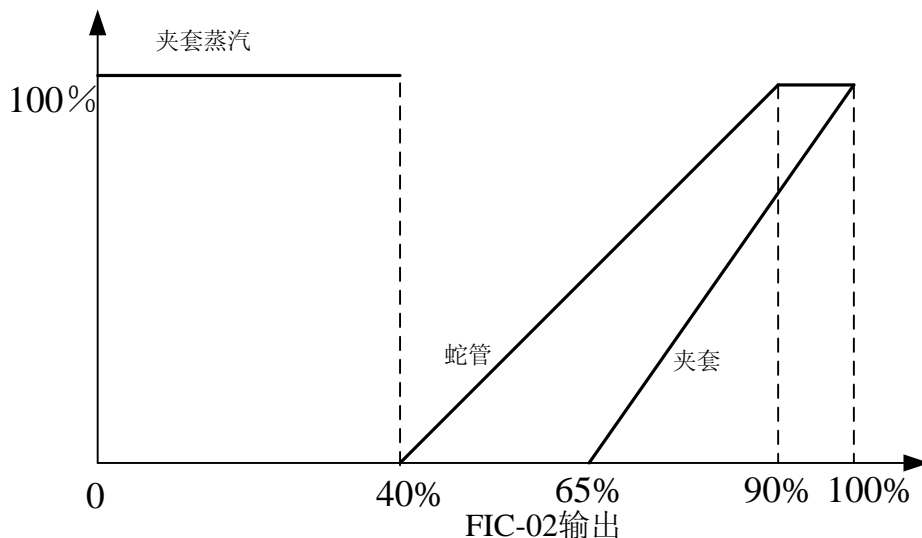


图2.13 副回路分程控制图

为了缓和在分程点出现的增益突变，采用信号重叠方法，蛇管冷却水阀 V7

在40%~90%内动作，夹套冷却水阀V8可以设为在65%~100%区段内动作，有一段重叠区域作为过渡。

FIC-02与FIC-01不同之处就在于没有输出30%~40%之间的输出为0的区间，这是因为升温过程中反应剧烈，可以在偏差较小时可以通过反应放热来达到升温的目的，同时也起到了节约能源的作用。而在保温过程中反应没有升温时刻那么剧烈，因此没有这个过渡区间。

对于高压水阀门V10，只能是用于安全控制而不宜作为连续过程控制量。因此将高压水阀门V10的控制交由压力安全控制器来控制，在副回路分程控制中将不再使用。

## 2.4 出料阶段

缩合反应历经保温阶段后，接着用离心泵将缩合釜内的料液打入下道工序。出料完毕，本间歇反应岗位操作即告完成。

### 2.4.1 操纵变量与被控变量的选择

被控变量：反应器液位L4

操纵变量：反应物出料阀 V9

### 2.4.2 阀门的选择

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。

出料时对流量没有精确的要求，因而选用线性阀，使其控制阀的相对流量与阀芯的相对开度成直线关系。

图 2.14 为出料料控制 P&ID 图，图中 SFC-02 即为出料顺序控制器。

### 2.4.3 控制方案

当保温阶段结束后，即可进入出料及反应釜清洗阶段：

1. 打开放空阀 V5；
2. 10 秒后，关闭放空阀 V5；
3. 打开反应物出口泵 S5、反应物出料阀 V9，待反应器液位 L4 为零后，关闭反应物出口泵 S5、反应物出料阀 V9，出料完毕，本次操作结束。



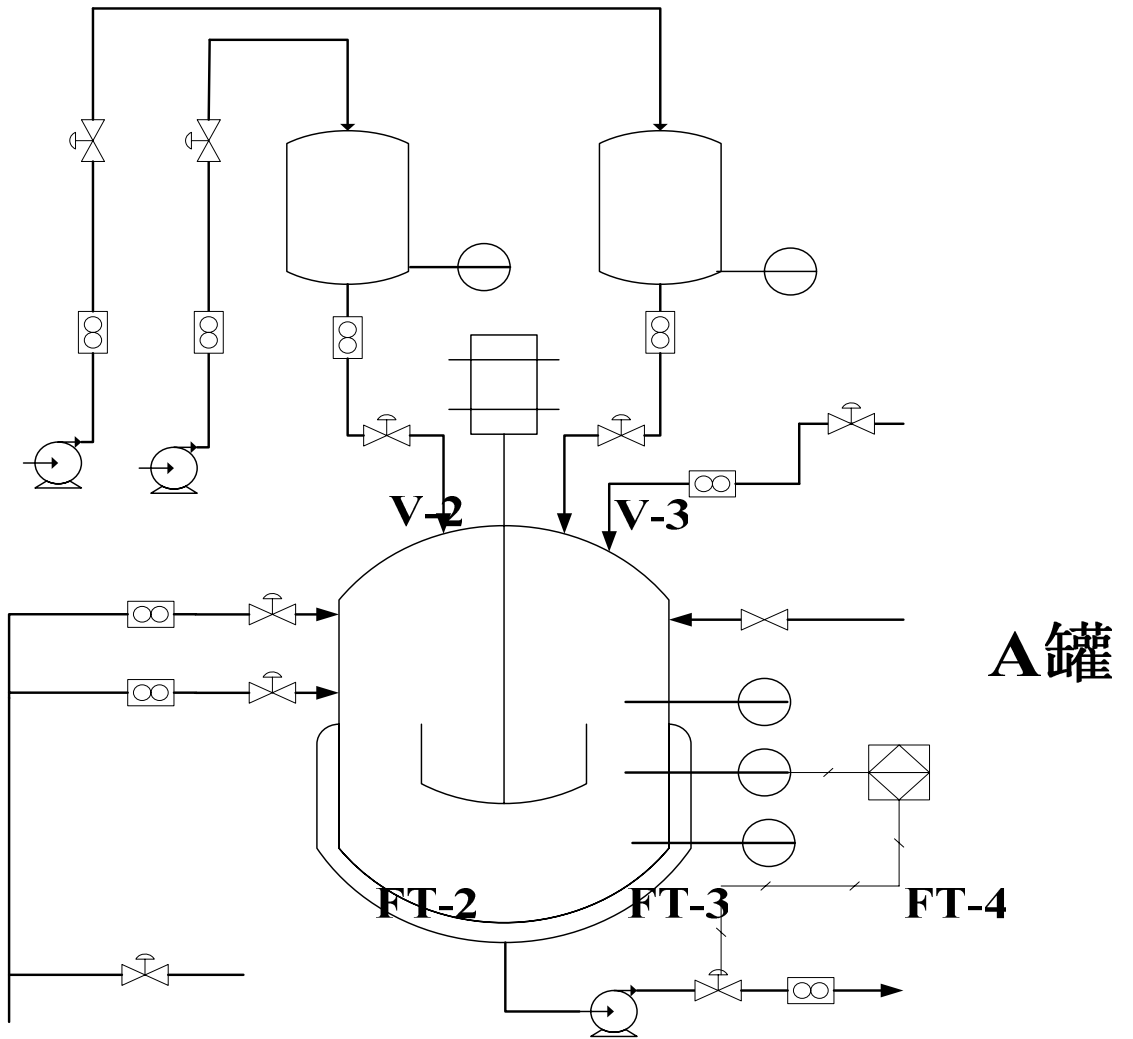


图 2.14 出料控制 P&ID 图

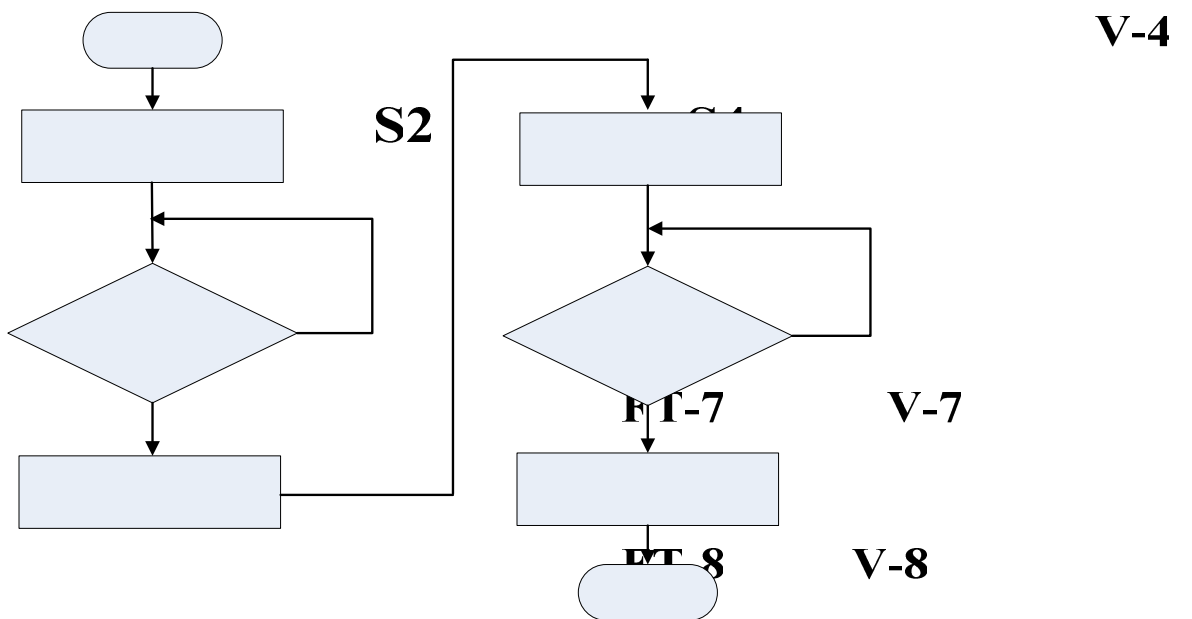


图2.15 出料顺序控制流程图

## 2.5 反应器压力安全控制及联锁保护

### 2.5.1 压力安全控制器

为了保证反应釜内的反应安全，需将釜内压力保持在一定的范围之内，一方面，反应压力随反应温度的变化而变化，即反应温度上升，反应压力也同步上升，反应温度下降，反应压力也同步下降。控制好釜内反应温度也是控制釜内压力的手段，在投入釜内温度控制系统之后，只要将釜内反应温度控制在和合理的升温速率或是保温阶段控制在 $121^{\circ}\text{C}$ 左右，即可将釜内压力值保持在安全的范围内。

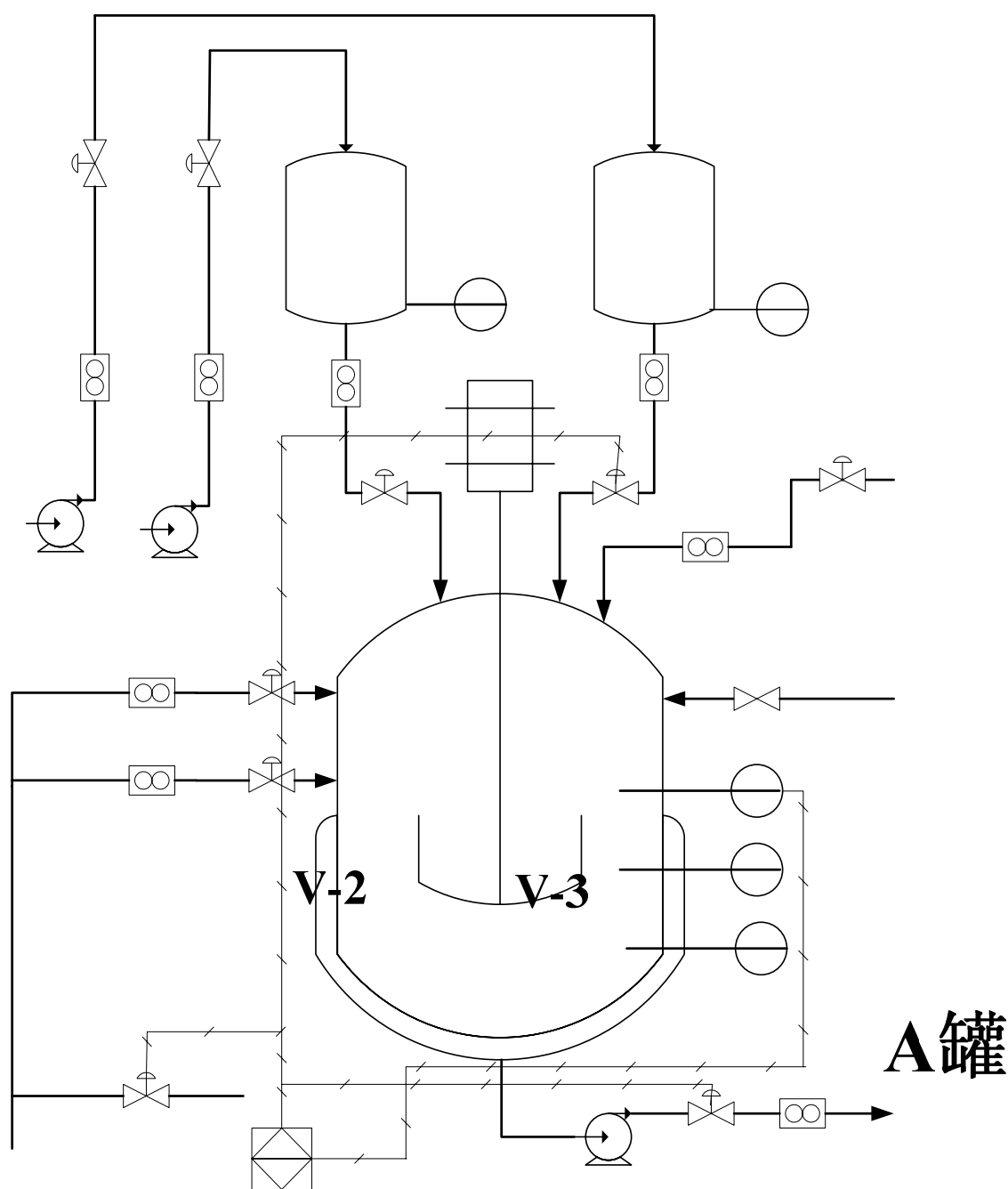


图2.16 压力安全控制P&ID图

FT-2

31

FT-3

FT-4

同时，应保证反应器在系统开、停车过程中压力不超过1.5MPa，根据此要求设计釜内压力报警和联锁保护系统。当压力超过0.8MPa时，上位机监控系统产生压力实时报警信息。当压力超过1.40MPa时，此时需联锁停整个系统。

在此，主要是由一个IF-THEN结构的逻辑运算单元所构成的控制器，其输入为反应压力P7，其输出是被控对象的控制输入，也就是直接给出蛇管冷却水阀门V7、夹套冷却水阀门V8及高压水入口阀V10的阀门开度。具体控制策略描述如下：

- 1) 当压力到达0.80MPa，高限报警，V7、V8、V10开100%
- 2) 当压力到达0.83MPa，关闭S8；
- 3) 当压力降至0.73MPa，稳定V7阀位，将其切到自动，以便温度重新回到121℃；
- 4) 当压力到达1.20MPa，高高限报警，开启放空阀V5；
- 5) 当压力降至1.1MPa，关闭放空阀V5；
- 6) 当温度回到121℃时，将V7、V8、V10的控制交予保温温控制器，由它控制温度T1；
- 7) 当压力到达1.40MPa，启动停车方案。

压力安全控制单元P&ID图见图2.16，图中PIC-01为压力安全控制器。

### 2.5.2 紧急停车方案

当温度、压力过高，或发生意外情况时，需紧急停车，具体如下：

- 1) 所有控制器停止输出，全部切到手动；
- 2) 关闭搅拌电机S8，开启放空阀V5；
- 3) 将蛇管冷却水阀门V7、夹套冷却水阀门V8及高压水入口阀V10开到100%；
- 4) 将出料阀V9开到100%；
- 5) 开启出口泵开关S5；
- 6) 待釜内液位到0后，关闭V7、V8、V10。

### 2.5.3 安全联锁

由2.1.3节中分析可知，A物料泵与入口阀V3、B物料泵与入口阀V2、出口泵与出口阀V9之间都存在这样的安全问题，必须遵照“开泵先开阀、关泵再关阀”的原则，所以将A物料泵电机开关S4与A物料入口阀V3、B物料泵电机开关S2与A物料入口阀V2、出口泵电机开关S5与出口阀V9之间设立安全联锁。

图2.17是A物料泵电机开关S4与A物料入口阀V3之间的安全联锁，左图是开泵的联锁，也就是要得到开泵指令后，判断V3是否开启，是则允许开S4；否则要先开V2后才能开S4。同理如右图的关系泵联锁，得到关闭V3的指令后，判断S4是否在开启状态，如否则允许关S4；是则要先关S4后才能关V3。

同理可以得出B物料泵电机开关S2与A物料入口阀V2、出口泵电机开关S5与出口阀V9之间设立安全联锁。

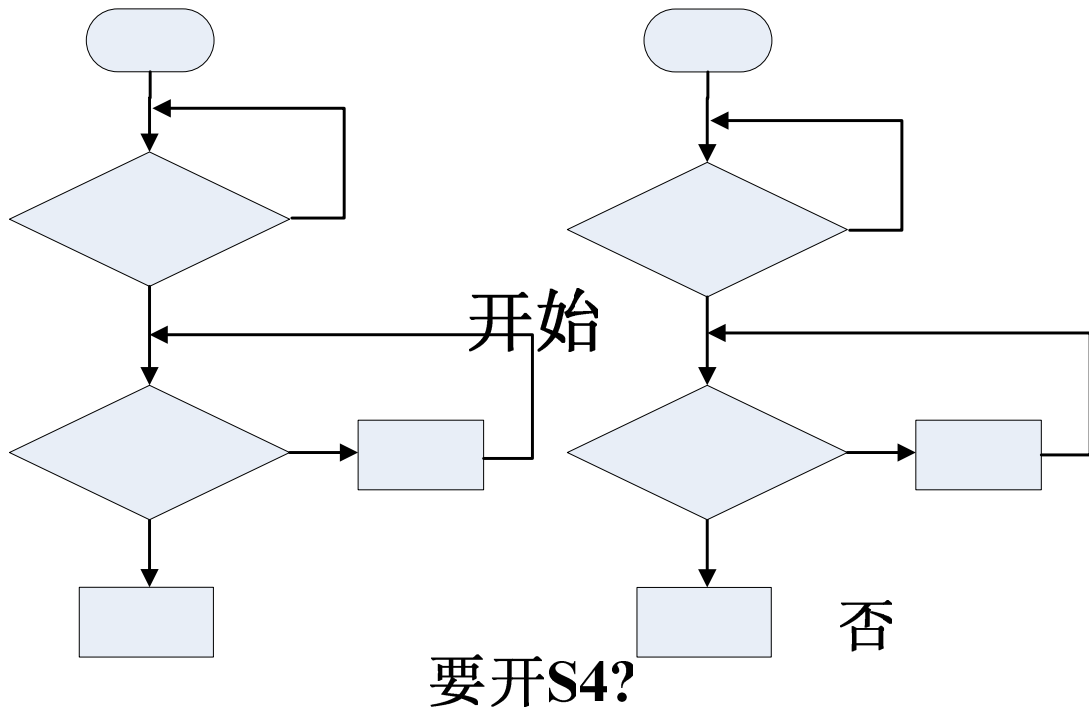


图2.17 S4、V3安全联锁流程图

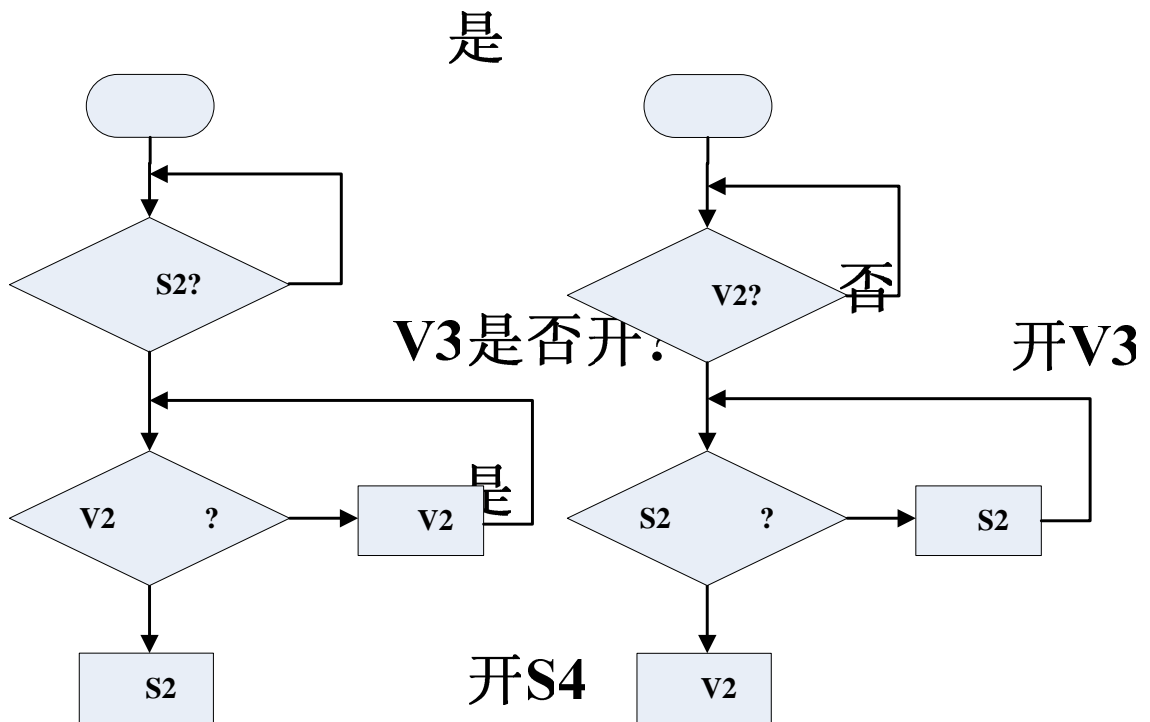


图2.18 S2、V2安全联锁流程图

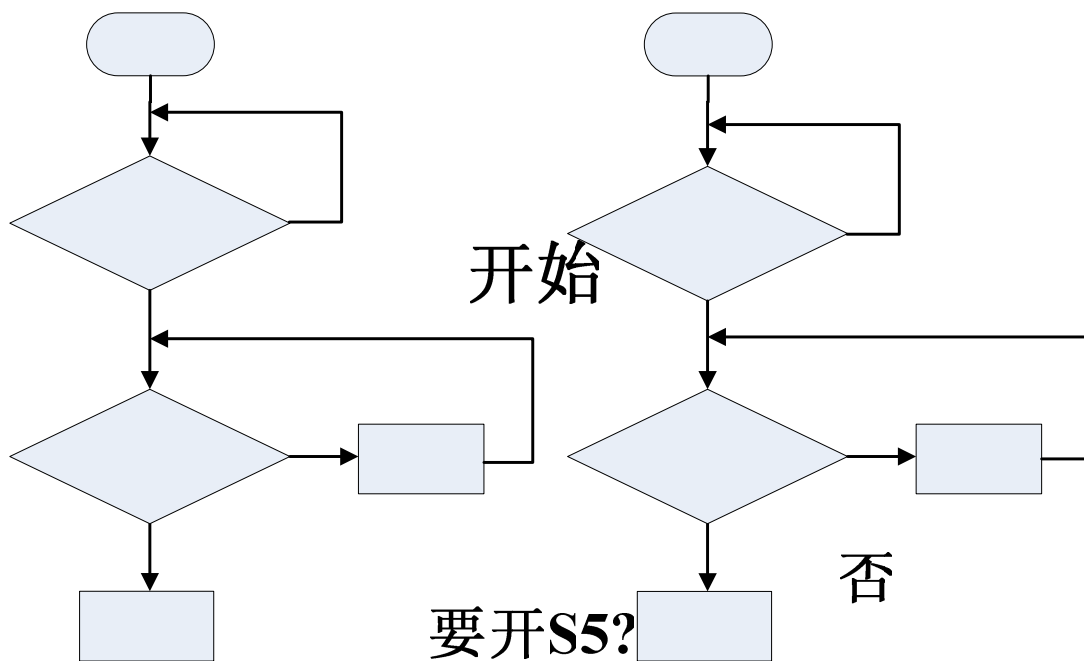


图2.19 S5、V9安全联锁流程图

是

V9是否开?

否

开V9

是

开S5

## 第三章 控制系统硬件设计

此系统选用SIMATIC PCS7 系列产品进行监视和控制。PCS7 作为硬件基础及软件开发平台,进行过程控制系统设计,具有很好的可靠性、稳定性和先进性。

### 3.1 PCS7过程控制系统

控制系统采用西门子PCS7过程控制系统,PCS7是一种模块化的基于现场总线的新一代过程控制系统,将传统的DCS和PLC控制系统的优点相结合,系统所有的硬件都基于统一的硬件平台,可以根据需要选用不同的功能组件进行系统组态。所有的软件也都全部集成在SIMATIC程序管理器下,有统一的软件平台。它采用了现代化的软件体系结构,对项目进行管理、处理、归档和建立文件,在软件开发方面,采用了面向对象的技术。在项目管理上,以系统硬件和工艺过程两个不同的视角,同时进行管理。这两个视角在程序管理器中分别称为标准分级(Standard\_Hierarchy)和工艺分级(Plant\_Hierarchy)。其中,标准分级主要管理系统的硬件,如控制器、系统总线、I/O系统等;工艺分级主要管理工艺过程,它将整个工厂按工艺过程的要求,分为各个子系统,然后将各子系统映射到控制器上。与传统DCS系统相比,DCS的组态直接面向工艺过程。在SIMATIC程序管理下,有多种组态工具可以使用,无论采用何种组态工具,生成的组态数据都自动存到一个统一的数据库中。这些组态工具是:CFC(连续功能图)、SFC(顺序功能图)、STEP7(SIMATIC S7系列PLC编程语言)、SCL(结构化的控制语言)和WinCC(SIMATIC视窗控制中心)等。

系统采用大量新技术,在网络配置上采用标准工业以太网和Profibus网络,消除了DCS和PLC系统间的界限,真正实现了仪控和电控的一体化,充分体现了全集成自动化的特点,使系统应用范围变广,是一种面向所有过程控制应用场合的开放型过程控制系统。

PCS7有以下组成部分:

- 1) SIMATIC Manager: 核心应用程序,用于建立或访问PCS7项目应用程序。
- 2) HW-Config: 组态系统硬件结构。
- 3) CFC和SFC编辑器: 建立连续功能图和顺序功能图。
- 4) 带有各种编辑器的PCS7 OS: 操作员站(OS)的组态。

### 3.2 间歇反应釜控制系统硬件结构

#### 3.2.1 输入输出点的选取

根据系统的工艺过程、测控参数和控制要求,本系统的输入输出点如表所示。

表3.1 系统输入输出点

序号	位号	备注	类型	信号	单位	量程
1	FT-02	B物料上料流量	AI	4~20mA	t/h	20
2	FT-03	A物料上料流量	AI	4~20mA	t/h	20
3	FT-04	A物料下料流量	AI	4~20mA	t/h	20
4	FT-05	B物料下料流量	AI	4~20mA	t/h	20
5	FT-06	C物料下料流量	AI	4~20mA	t/h	50
6	FT-07	蛇管冷却水入口流量	AI	4~20mA	t/h	100
7	FT-08	夹套冷却水入口流量	AI	4~20mA	t/h	160
8	FT-09	反应物出口流量	AI	4~20mA	t/h	100
9	PT-07	反应压力	AI	4~20mA	MPa	2
10	LT-02	A物料计量罐液位	AI	4~20mA	m	1
11	LT-03	B物料计量罐液位	AI	4~20mA	m	1.5
12	LT-04	反应器液位	AI	4~20mA	m	2
13	T-01	反应温度	AI	4~20mA	℃	200
14	A	反应器内主产物浓度	AI	4~20mA	kg	500
15	V-02	B物料上料阀	AO	4~20mA	%	100
16	V-03	A物料上料阀	AO	4~20mA	%	100
17	V-04	A物料下料阀	AO	4~20mA	%	100
18	V-05	B物料下料阀	AO	4~20mA	%	100
19	V-06	C物料下料阀	AO	4~20mA	%	100
20	V-07	蛇管冷却水入口阀	AO	4~20mA	%	100
21	V-08	夹套冷却水入口阀	AO	4~20mA	%	100
22	V-09	反应物出料阀	AO	4~20mA	%	100
23	V-10	高压水入口阀	AO	4~20mA	%	100
24	S-02	B物料上料泵开关	DO	/	/	/
25	S-04	A物料上料泵开关	DO	/	/	/
26	S-05	反应物出口泵开关	DO	/	/	/
27	S-06	夹套加热蒸汽开关阀	DO	/	/	/
28	S-08	反应器搅拌电机开关	DO	/	/	/
29	S-02F	B物料上料泵开关反馈	DI	/	/	/
30	S-04F	A物料上料泵开关反馈	DI	/	/	/
31	S-05F	出口泵开关反馈	DI	/	/	/
32	S-06F	加热蒸汽开关阀反馈	DI	/	/	/

### 3.2.2 硬件配置

根据控制要求及PCS7技术资料，可采用一种经济实用的硬件配置方案，系统硬件配置如表所示。

表3.2 硬件配置表

序号	设备名称	数量	说明
1	SIMATIC PCS 7 BOX	1	ES/OS/AS
2	ET 200M IM 153-2	1	集中式外围设备模板
3	SM 323 DI8/DO8 DC24V 0.5A	1	8路数字输入/8路数字输出
4	SM 331 AI8*16BIT	2	8路模拟量输入(4-20mA)
5	SM 332 AO8*12BIT	2	8路模拟量输出(4-20mA)
6	SM 332 AO2*12BIT	1	2路模拟量输出(4-20mA)

控制系统采用结构紧凑、设计独立的SIMATIC PCS7 BOX来实现的。

SIMATIC PCS7 BOX是西门子公司在充分利用了SIMATIC PCS7的所有标准组件并秉承了全面的可伸缩性、无缝兼容的可扩展性和组网能力等优势的基础上专门设计用于小型应用的紧凑而经济的过程控制系统。

SIMATIC PCS7 BOX 在一台紧凑设计的工控机中整合了一个最优秀过程控制系统（DCS）的所有组件，诸如可视化系统、工程师站、现场总线、基于 SQL 的归档系统以及集成的硬件控制器。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，还可与其它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 中的两个集成 PROFIBUS-DP 接口，还可链接过程I/O以及 SIMATIC ET 200M分布式标准 I/O设备。

本控制系统正是通过SIMATIC PCS7 BOX集成的PROFIBUS-DP接口与 SIMATIC ET200M进行连接通信。ET 200M是PROFIBUS-DP现场总线的从一个从站，最大数据传输率是12Mbit/s。由于ET 200M分布式I/O站的IM153通讯接口模块或SM系列I/O信号接口模块都安装在一个配有有源总线模板的机架上，有源总线模板具有“插入/取出”特性，使得ET 200M分布式I/O站的每个模块能够在系统运行过程中带电热插拔更换。

主要I/O模块包括：

- 1、SM323 类型 8通道24VDC 的数字量输入、8通道24VDC 的数字量输出模块，用于采集设备的状态信号以及电机、开关阀的开启关闭。
- 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。

### 3.2.3 系统网络设计

系统通讯图如图所示，ES/OS通过工业以太网与AS相连，AS与外围设备模板ET 200M之间是用PROFIBUS DP连接。现场的4~20mA信号以及数字量信号通过输入输出模块连接在ET 200M上。

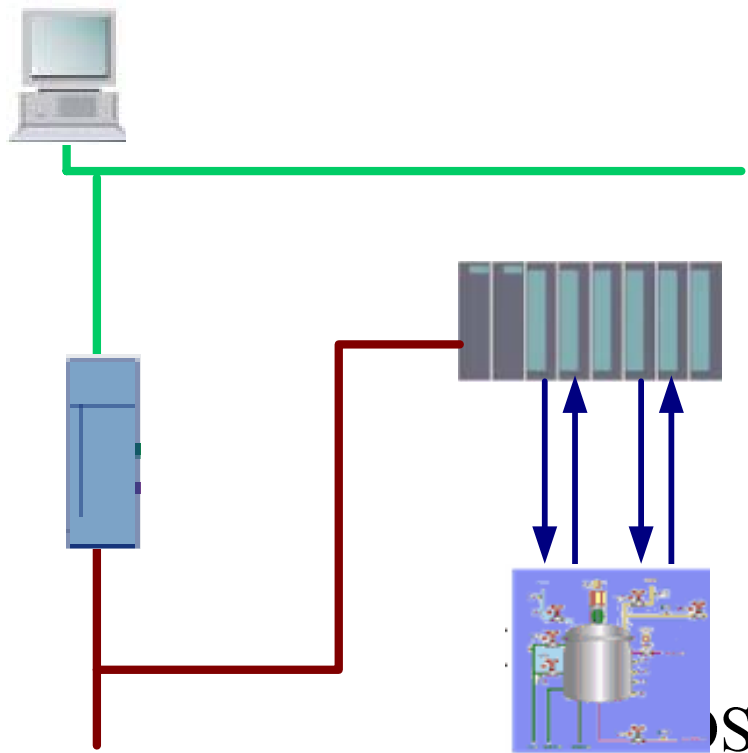


图3.1 系统网络结构图

如图所示，SIMATIC PCS7 BOX单机就可以实现工程师站和操作员站的功能，同时它还集成硬件控制器（Slot CPU 416），因此它只需通过PROFIBUS-DP就可以实现与ET 200M的通信，大大简化了上层网络，使网络结构变得简洁，清晰。

### 3.2.4 硬件组态

使用SIMATIC MANAGER中的“New project wizard”插入一些硬件组件，如图3.2所示。到达HW-Config界面时，可以根据实际的物理设置来编辑组件这里首先将WINCC Application添加到其中，然后选取前文中选择的硬件ET 200M，添加到其中。

然后在ET 200M按照表3.2中所选择的I/O卡件，选取对应的选项添加到其中，如图3.3所示：

PCS7 BOX

ES/OS/AS

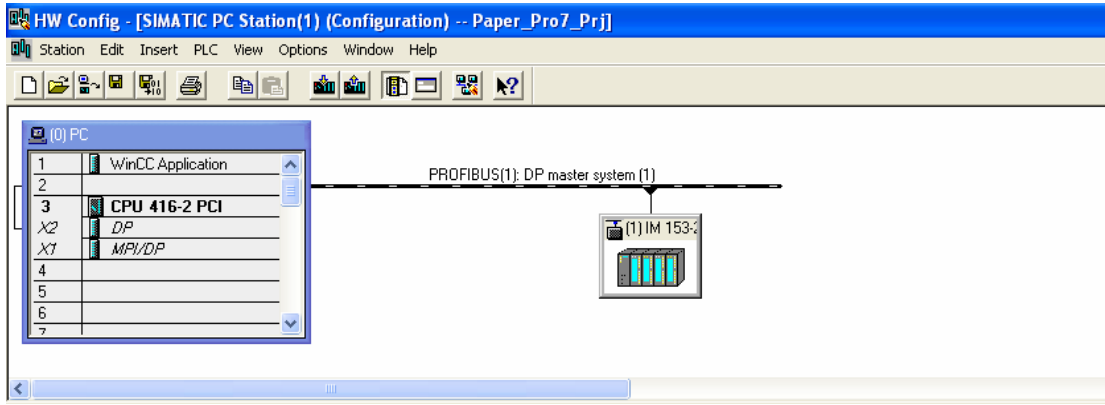


图3.2 系统硬件组态图

Slot	Module	Order Number	I Address	Q Address	Comment
1					
2	IM 153-2	6ES7 153-2AA02-0XB0	16380		
3					
4	DIB/DO8xDC24V/0.5A	6ES7 323-1BH01-0AA0	0	0	
5	AI8x16Bit	6ES7 331-7NF00-0AB0	512...527		
6	AI8x16Bit	6ES7 331-7NF00-0AB0	528...543		
7	AO4x12Bit	6ES7 332-5HD01-0AB0		512...519	
8	AO4x12Bit	6ES7 332-5HD01-0AB0		520...527	
9	AO2x12Bit	6ES7 332-5HB01-0AB0		528...531	
10					
11					

图3.3 系统I/O卡件组态图

### 3.3 阀门选型

综合考虑全局控制，以安全生产为出发点，有效的控制对象，以得到良好的生产效率，结合第二章的分析，阀门的选择见表3.3

表3.3 阀门选型表

阀门名称	公称直径Dg	阀门形式	阀门特性
V2	Dg40	气开	线性
V3	Dg40	气开	线性
V4	Dg40	气开	线性
V5	Dg40	气关	快开
V6	Dg40	气开	线性
V7	Dg50	气关	对数
V8	Dg65	气关	对数
V9	Dg70	气关	线性
V10	/	气关	快开

## 第四章 监控系统设计

西门子WinCC 是一个基于32位WINDOWS95/98/NT 标准操作系统的工控组态监控软件，具有强大的功能，包括图形编辑、报警处理、报表编辑、变量管理等。WinCC 主要通过绘制现场主要元件、分配变量、对元件属性进行动态连接、调试等步骤来实现对故障的监控。

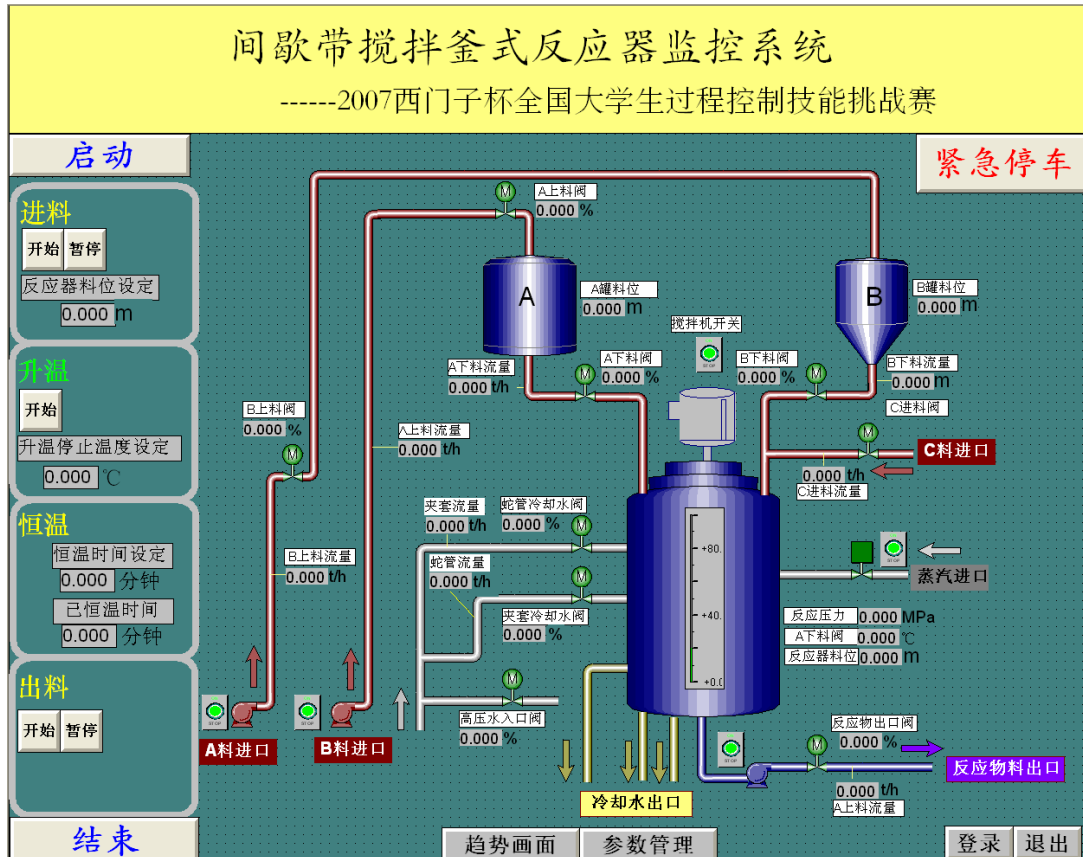


图4.1 监控系统画面

针对本次大赛控制要求，以及前文中所设计的控制方案及软硬件实现，现设计出间歇带搅拌釜式反应器监控系统。如图4.1所示，窗口的右半部分是流程图画面，反映出过程的整体流程，形象地显示阀门、泵、搅拌电机等设备的启动、运行状态，以及温度、压力、流量等现场仪表的测量值，并且在需要时可由操作人员直接点击画面中的阀门、电机等来操控系统。

窗口的右半部分是工艺控制面板，根据对象的工艺流程而从上到下分为进料、升温、恒温、出料四个部分。当开始本次操作时，首先点击最上方的“启动”按钮，这时，所有设备都恢复初始状态，准备本次生产。

进料阶段：点击进料部分中的“开始”按钮可开始进料阶段的自动控制，如中途需要暂停进料可点击“暂停”按钮。点击“反应器料位设定”，可设定或修

改反应釜的液位设定值，方便生产工艺条件的改变。

**升温阶段：**当进料完毕后，系统会提示操作员，“进料结束，进入升温阶段”，这时，可点击升温部分的“开始”按钮，升温控制器自动运行。由图上可以看到，“升温”这两个字是绿色，有别于“进料”、“恒温”、“出料”的黄色，这表明现在系统正处在升温阶段。点击“升温停止温度设定”，可设定或修改升温停止的温度，方便生产工艺条件的改变。

**恒温阶段：**当升温完毕后，系统会提示操作员，“升温结束，进入恒温阶段”，这时，恒温控制器自动运行。点击“恒温时间设定”，可设定或修改恒温时间，方便生产工艺条件的改变；而“已恒温时间”则记录了从恒温开始到现在的时间长度，可以帮助操作员了解本次反应结束的大致时间。

**出料阶段：**当恒温完毕后，系统会提示操作员，“恒温结束，进入出料阶段”。这时，可点击出料部分的“开始”按钮，出料控制器自动运行。如中途需要暂停出料可点击“暂停”按钮。

当出料完成时，系统会提示操作员，“出料结束，本次操作完毕”，点击“结束”按钮，本次反应结束。

**紧急停车：**如操作过程中发生意外，可点击“紧急停车”按钮，经确认后系统自动紧急停车。

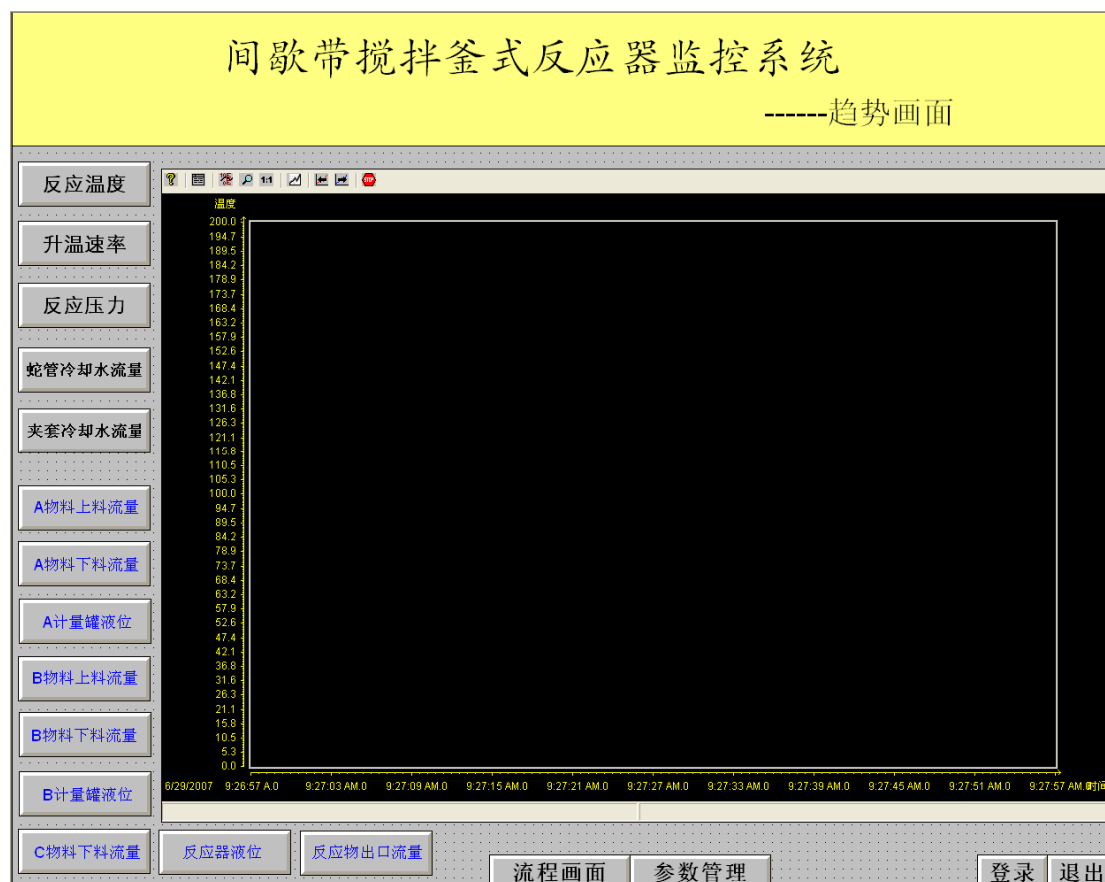


图4.2 趋势画面

窗口的下方有画面快捷按钮，点击“趋势画面”按钮可直接进入趋势画面，如图4.2所示，显示现场仪表的读数在一段时间内的变化趋势，现场仪表的读数都在变量记录里进行归档。点击“参数管理”按钮可直接进入参数管理画面，如图4.3所示，显示控制系统运行的工艺参数和仪表读数，修改工艺、控制参数。

点击右下角的“登陆”按钮，可选择不同权限的用户登陆，对系统的安全性进行保护。点击“退出”按钮，则关闭监控系统，（需要较高的权限用户）。



图4.3 参数管理画面

针对本次大赛，本方案还设计了其他一些画面，最大限度方便操作者，满足用户需要。但限于篇幅的关系，在此就介绍这些。

## 第五章 结论

本文以间歇带搅拌式反应釜为对象，分析控制要求，测试系统特性，设计控制策略，采用进料出料的顺序控制实现进出料的自动控制；针对升温过程的剧烈反应特性，设计了一种基于动态控制策略的计算动词串级控制器，用于对升温速率进行精确控制；针对该缩合过程保温阶段的特性，利用免疫算法对于扰动的二次响应、能够快速消除偏差的特点，设计了免疫PID串级控制器，满足该过程保温阶段的温度控制精度要求；同时从安全生产的角度出发，设计了压力安全、安全联锁及自动紧急停车系统，从多个方面确保生产的安全性。

本方案可以使整个反应过程的质量指标能够达到工艺要求，实现控制目的。