

队伍编号: 10

# 2007 年西门子杯全国大学生过程控制技能 挑战赛

## 初赛方案



# 目录

1. 被控对象和控制要求.....	3
1.1 被控对象的工艺流程.....	3
1.2 工艺过程简介.....	4
1.3 控制要求.....	5
2. 控制方案设计.....	6
2.1 反应升温速率控制与保温控制.....	6
2.1.1 温度控制系统任务综述.....	6
2.1.2 温度控制器结构设计.....	7
2.1.3 控制算法设计.....	9
2.2 反应器压力安全控制.....	13
2.3 升温、保温、出料、清洗顺序控制.....	13
2.4 阀门特性选择.....	16
3. 控制方案实施.....	19
3.1 基于SIMATIC PCS7 搭建自动控制系统 .....	19
3.1.1 硬件配置和网络层次设计.....	19
3.1.2 输入输出组态.....	20
3.2 安全连锁保护系统(SIS系统).....	21
3.2.1 硬件配置和网络层次设计.....	21
3.2.2 标准过程控制与SIS系统的集成.....	23
4.总结.....	23

# 1. 被控对象和控制要求

## 1.1 被控对象的工艺流程

本次比赛的题目是，对带搅拌的釜式反应器中的间歇式反应全过程进行控制。其工艺流程图如图 1 所示：

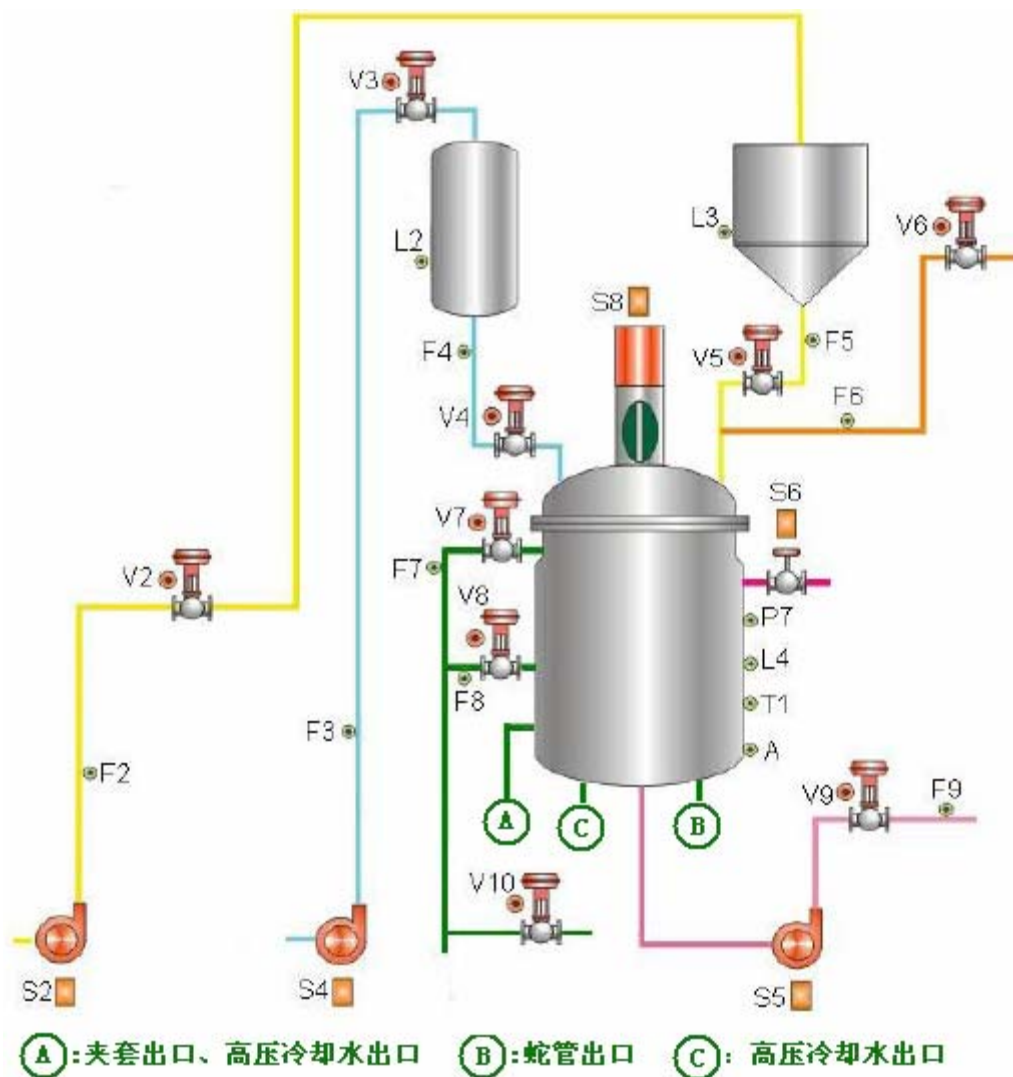


图 1 间歇式反应工艺流程图

工艺设备包括：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。

## 1.2 工艺过程简介

本间歇反应过程的开车包括如下主要步骤：

### 1. 备料工序

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。

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 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。

## 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 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。

## 2. 控制方案设计

### 2.1 反应升温速率控制与保温控制

#### 2.1.1 温度控制系统任务综述

温度控制可分为升温 and 保温两个阶段，控制任务各有不同：

##### 1、升温阶段

温度控制系统中，反应升温速度与安全生产之间是一对相互制约的矛盾。由于反应存在着主副反应之间的竞争，为了促进主反应，抑制副反应，应使釜温较快升高；但过快的升温速度会导致后期温度失控，产生过高的釜压，威胁到生产设备及人身安全。因此，权衡二者之间的关系，选择最优的升温速率是温度控制的关键。根据本次比赛的设备条件及反应物料特性，将升温速度设定在  $0.1 \sim 0.2$   $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。

##### 2、保温阶段

如果升温控制得当，反应温度可以顺利过渡到  $121^{\circ}\text{C}$  左右。保温阶段的任务就是将温度维持在该温度，直至反应物得到充分转化。保温初期反应剧烈，此时控制系统应克服系统干扰，避免釜温出现较大波动；保温阶段后期，反应随物料减少而逐渐平缓，控制系统应减少冷却量，同时可适当开启蒸汽阀门，以维持釜温。

因此，整个间歇过程的理想温度曲线可以用图 2.1 描述，以此为温度设定曲线，控制问题归结为对该设定曲线的跟踪问题。

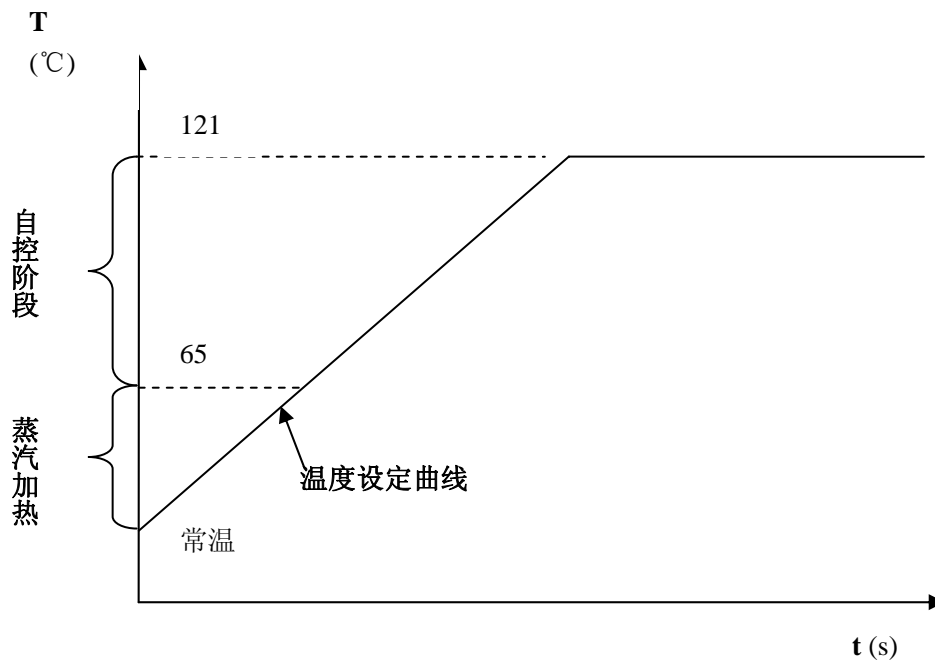


图 2.1 理想温度设定曲线

## 2.1.2 温度控制器结构设计

反应起始阶段，即反应温度从常温到 65℃，先用蒸汽加热到 45℃，再靠反应自身产热上升到 65℃。本阶段反应较为缓慢，控制较为容易，所以完全可以采用手动调节方式。以下内容主要介绍在反应中后期，即当反应温度大于 65℃ 时，系统投入自控以后的控制系统结构

根据所提供的设备以及测控条件，本文设计了一种分程透明控制结构，控制变量为夹套冷却水流量 F8 和蛇管冷却水流量 F7，被控对象为釜内反应温度。以下详细介绍设计方案及理由。

### 1) 夹套——蛇管分程控制结构

设计理由：冷却水的来源包括蛇管冷却水和夹套冷却水两部分，分别由调节阀 V7 和 V8 调节各自流量，每个阀门所能提供的最大调节流量分别为 42.84t/h 和 72.84t/h。对于整个间歇过程所经历的大范围工况，尤其到了反应剧烈阶段，需要的冷却量非常大。在现有阀门调节能力有限的条件下，单一靠蛇管或夹套进行冷却，很难完成整个控制动作。

采用蛇管、夹套分程控制结构，用一个控制器控制蛇管和夹套的调节阀的开度，二者采用同向开闭形式，各自工作在不同的区段，可以扩大调节阀的调节范



围，提高控制精度。随着反应加快，夹套冷却水阀门开到最大，随后开启蛇管阀；反应后期，随着反应剧烈程度减弱，先关小蛇管阀，再关小夹套阀。

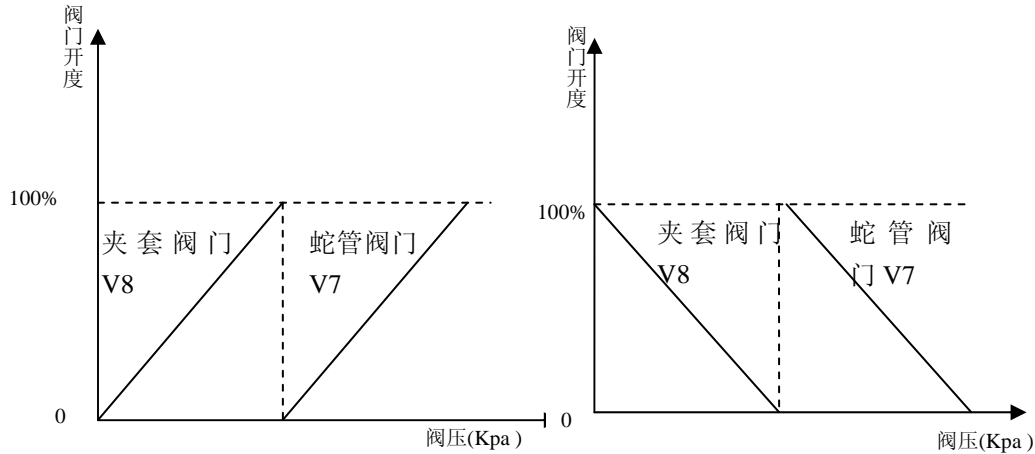


图 2.2(a) 控制阀同向开分程动作

图 2.2(b) 控制阀同向关分程动作

## 2) DMC-PID 透明控制结构

设计理由：从冷却水阀门到反应釜之间存在着夹套冷却水、槽壁、釜内物料三个热容积，整个被控对象表现为大惯性和大时滞。同时，系统的主要干扰来自于冷却水的入口温度和流量。冷却水的扰动，需经过三个热容才影响到釜内温度，严重的系统滞后将恶化控制效果，特别是在保温控制阶段，扰动对于控制精度的影响尤为明显。

在无法找到合适的中间量或过程中间量不可测时，就无法构成串级控制结构。在这种情况下，本文给出了一种将动态矩阵控制与 PID 相结合的方法，即 DMC—PID 透明控制结构，如图 2.3 所示，将被控对象输出直接反馈，而不是某中间量。与串级控制相同，透明控制包括内、外两个回路，分别起到不同的控制作用。内环回路以密集 PID 控制作用尽快抑制系统扰动；外环在此基础上用预测控制实现优化，给出 PID 的优化设定值。DMC 所特有的滚动优化和反馈校正的特点，使得控制器对于模型失配具有更好的鲁棒性。

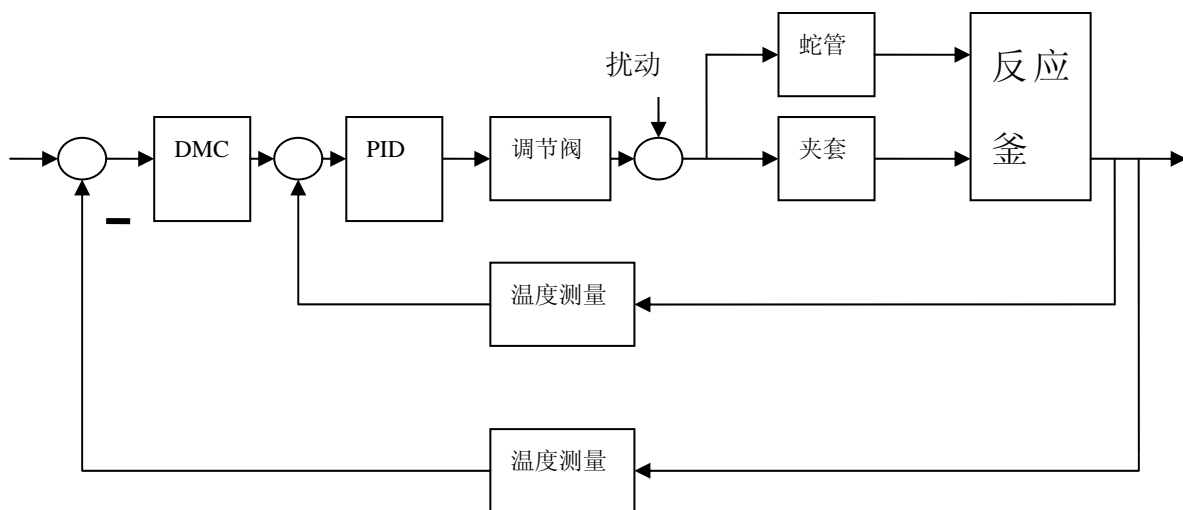


图 2.3 温度控制器的分程透明控制

温度控制系统的分程—串级控制结构的 P&ID 图如图 2.4 所示

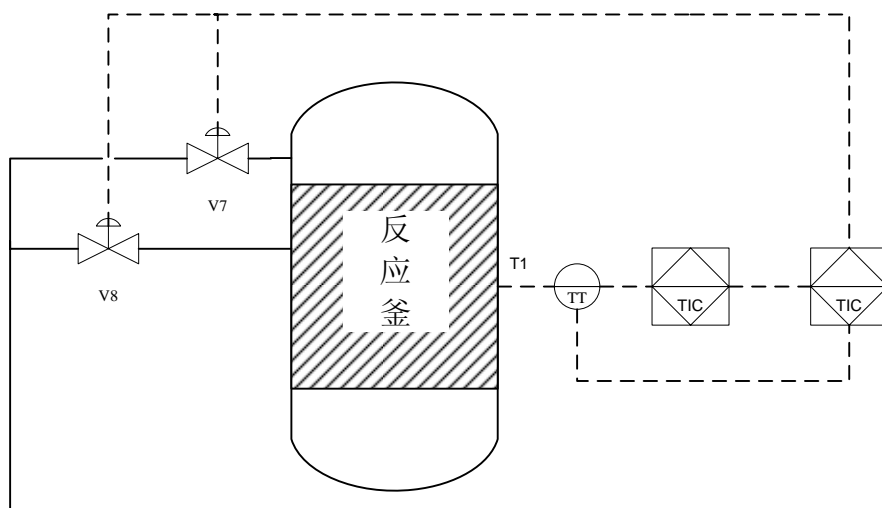


图 2.4 透明控制结构 P&ID 图

### 2.1.3 控制算法设计

给出了控制器结构以后，算法设计的主要任务就是给出透明控制的算法实现及参数整定方法。

内环 PID 控制器应该具有较高的采样频率，尽快抵消来自冷却水的干扰，这也弥补了单一 DMC 采样率不易过高，抗干扰性能差的缺点。另外，由于间歇过程是非自平衡过程，通过内环 PID 环节先使得被控对象渐进稳定，也是应用 DMC

进行上层优化的前提条件。具体实施过程中，PID 控制器不必追求参数最优，选用 PI 或 P 控制即可。

外环的控制对象是包括 PID 控制器和反应釜在内的广义控制对象，控制任务是使得反应釜温度按图 2.1 所示曲线变化，分为上升阶段和恒温阶段，要求系统有良好的跟踪性能。

预测控制作为一种先进的控制策略已经被广泛应用于化学工业中，对反应器等慢过程表现出了良好的控制效果。其中，DMC 控制策略以其结构简单、算法实时性好、不需要精确的过程数学模型等特点，被广泛应用。设计过程包括以下三个内容：

1)确定采样时间：由于对于系统干扰的抑制主要靠内环来完成，因此外环的采样频率并不要求很高，只要能满足最基本的采样定理，并结合常见对象选择采样周期的经验数值即可整定。

2)预测模型：DMC 的预测模型的确定，首先需要对广义被控对象进行阶跃测试。对于复杂的间歇反映过程来说，在难以得到准确的数学模型的情况下，DMC 的实用性充分体现出来。同时也应当注意到，由于采用了分程控制结构，不同的分程区段里，控制信号分别送给夹套阀门 V8 和蛇管阀门 V7，这就造成了前后控制对象特性的改变。如果采用一个阶跃响应构建预测模型，那么在分程过渡以后势必造成预测模型的严重失配，影响控制精度。因此应在蛇管和夹套各自作用阶段分别做阶跃测试，进而得到预测模型。如图 2.5 所示，首先，在蛇管工作区段，取设定值为 T01，温度进入稳态以后，给蛇管阀门一个阶跃信号，得到模型向量  $[a_1, a_2, \dots, a_N]$ ；然后调整温度设定值，使得夹套达到最大开度，并转到蛇管工作区段，此时选定设定值为 T02，温度进入稳态以后，给蛇管阀门一个阶跃信号，得到模型向量  $[b_1, b_2, \dots, b_N]$ ；由于釜温将较长时间工作设定值为 121℃，因此在温度稳定在 121℃时，再给蛇管阀门一个阶跃信号，得到模型向量  $[c_1, c_2, \dots, c_N]$ 。通过三个阶跃响应即可构造夹套分程区段、蛇管分程区段和 121℃恒温阶段的预测模型。

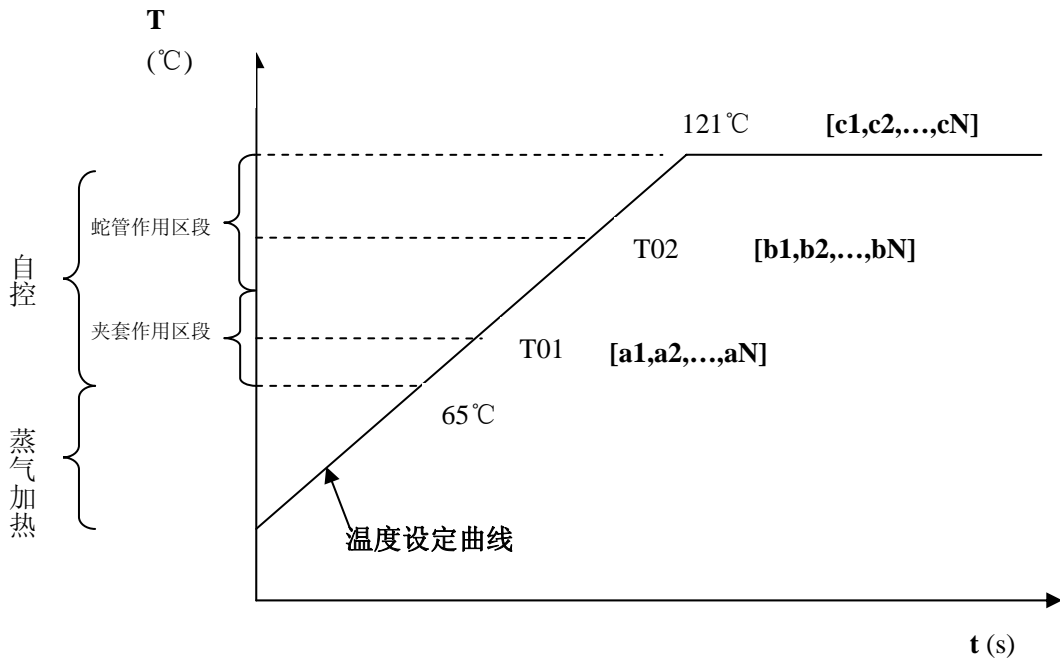
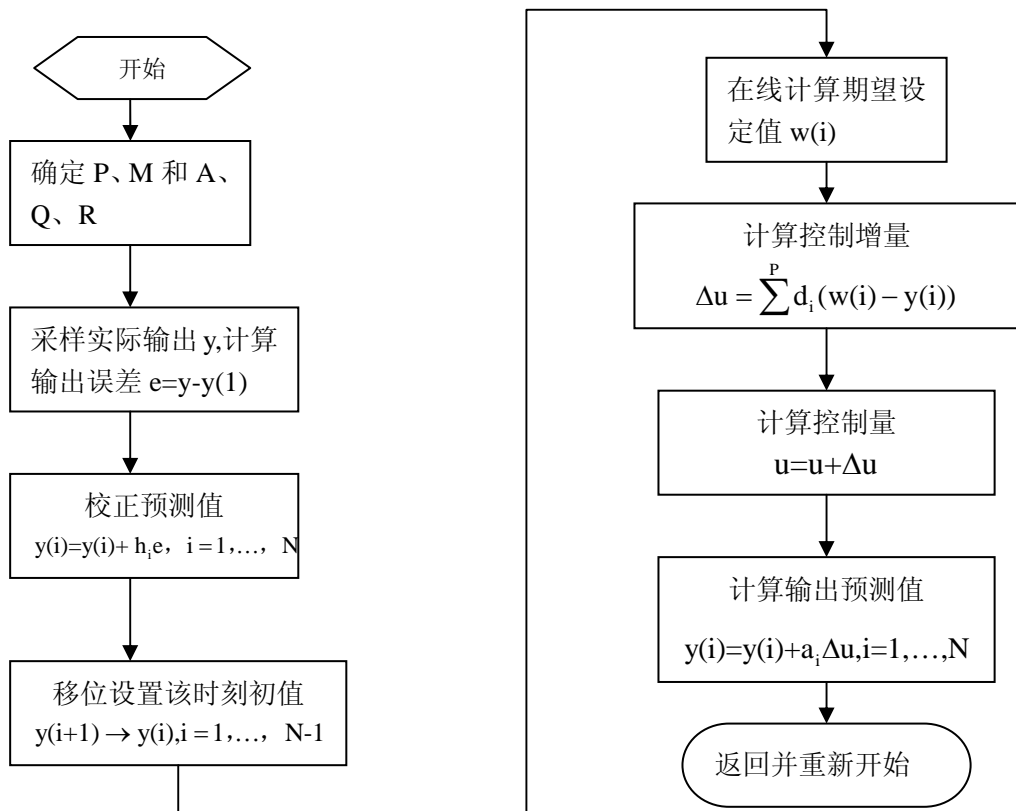


图 2.5 DMC 控制器的多个阶跃模型

## 2) 算法实现

动态矩阵控制的算法步骤如下：



其中，控制系数  $[d_1, \dots, d_p] = c^T (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q$ 。算法流程中还包括了一个

参考轨线模块，用于给定预测时域内的每个采样时刻的参考值  $w(i), i=1, \dots, P$ ，若采样时间为  $T_s$ ，在升温阶段，保证升温速率为  $0.1^\circ\text{C}/\text{s}$ ，恒温阶段维持在  $121^\circ\text{C}$ 。

$$w(i) = \begin{cases} y(k) + 0.1iT_s, & y(k) + 0.1iT_s < 121_s \\ 121, & y(k) + 0.1iT_s > 121_s \end{cases} \quad i=1, \dots, P$$

具体设定方法的程序流程如图 2.6 所示。

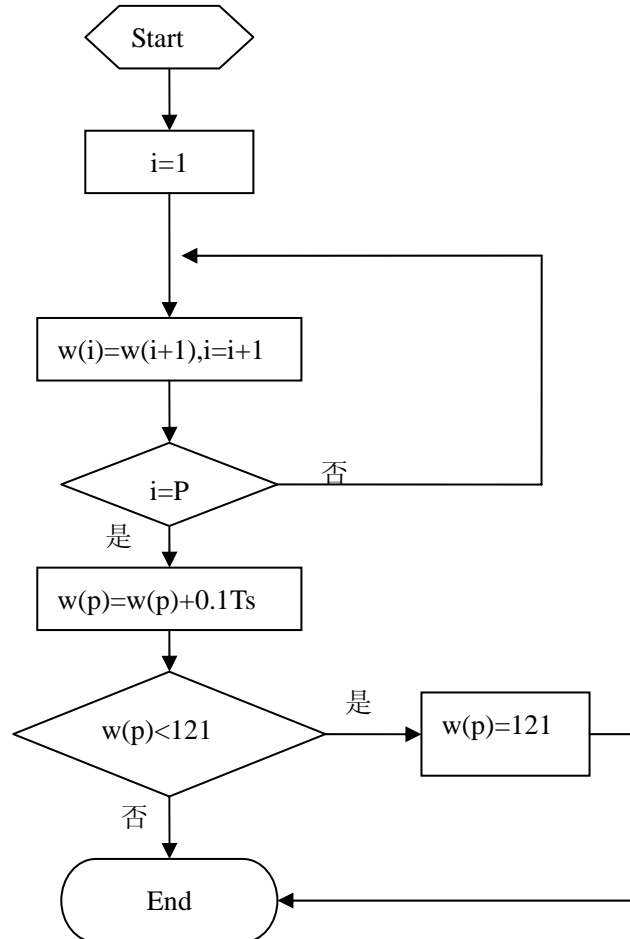


图 2.6 设定值更新程序流程图

综上所述，采用 DMC-PID 透明控制器，可以通过频繁的内环 PID 控制快速抑制来自冷却水的干扰。同时又发挥了 DMC 滚动优化和反馈校正的算法优势，在外环回路有效的处理大时滞，并获得良好的跟踪性能和鲁棒性。由于采用了分层结构，不同的性能要求被分到不同的层次进行处理，不但解决了单层次 DMC 对扰动抑制不利的问题，又使得控制器参数易于整定。

## 2.2 反应器压力安全控制

反应过程中 A 物料的饱和蒸汽压随温度升高而迅猛上升，若温度控制效果不好，反应升温过快，会导致反应剧烈阶段釜压急剧上升，对安全生产造成极大威胁。因此，压力安全保护的核心是在紧急时刻，自动控制系统无法控制反映正常进行时，控制系统由自动切换为安全控制模式，启动紧急控制措施以保证设备安全。这就是通常所说的超驰控制。

为了兼顾生产效率，紧急操作方案分为不同级别，前一级别的操作不能解除安全警报时，再执行下一级别。压力连锁保护的逻辑如下图 2.8 所示

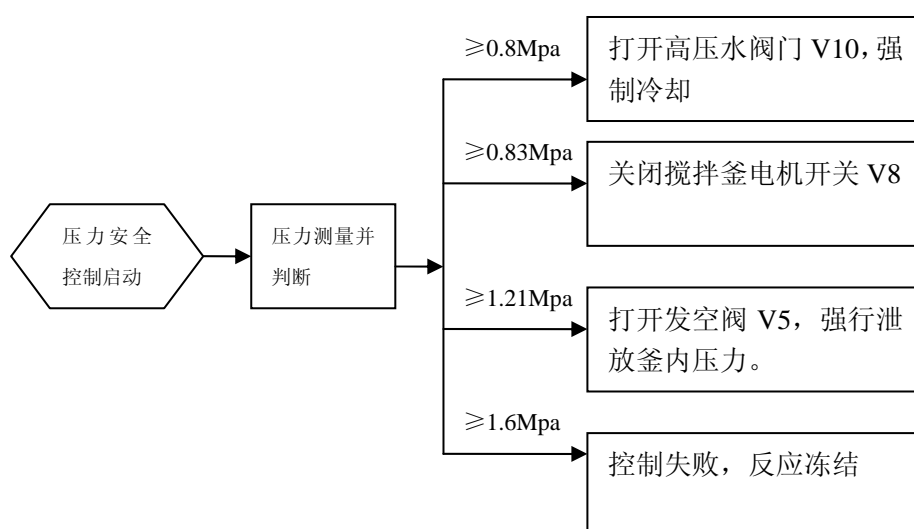
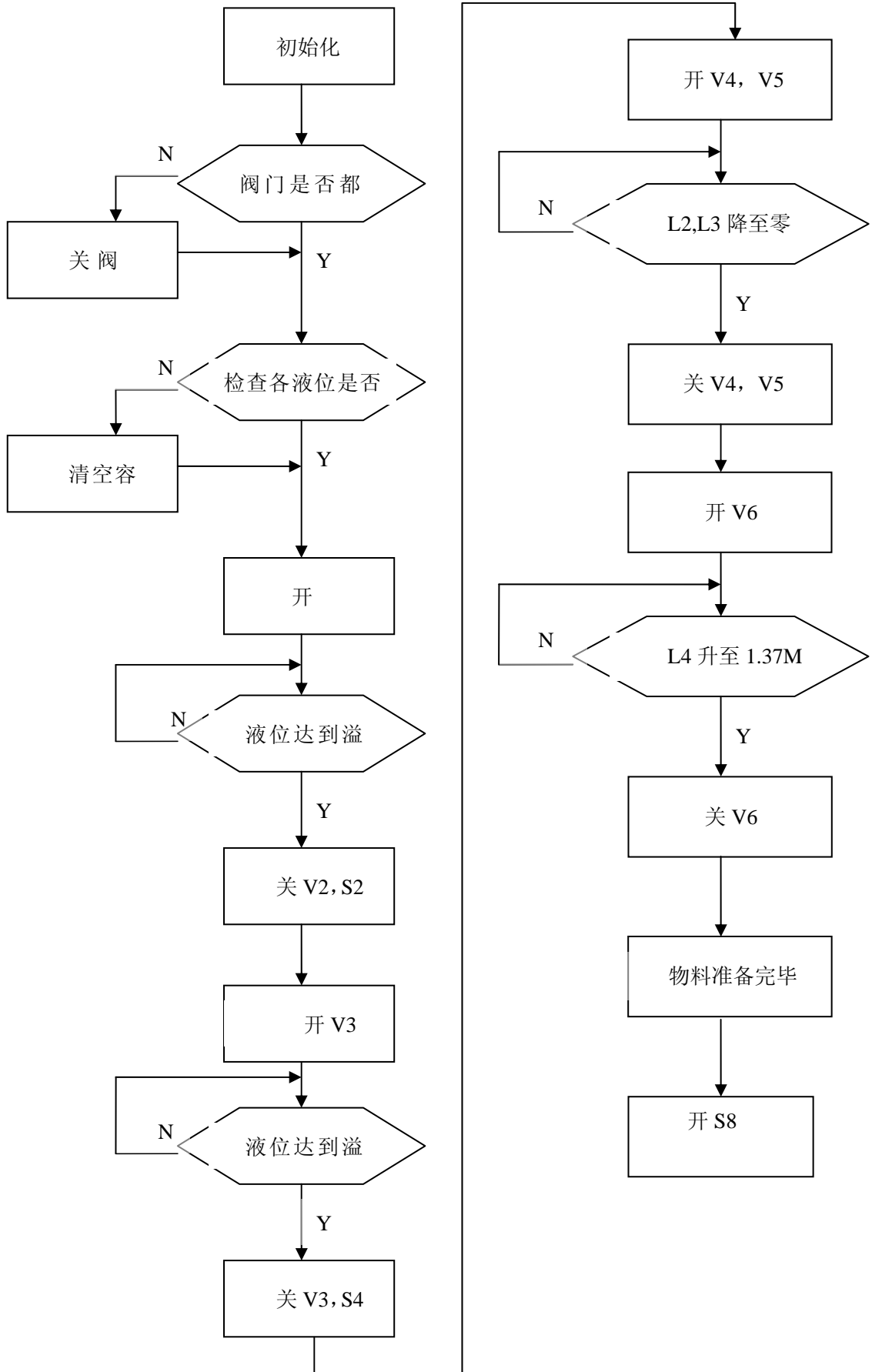


图 2.8 压力连锁保护逻辑

保护措施奏效以后，即釜内压力回到正常水平，应立即回到正常的控制操作中，反应继续进行。

## 2.3 升温、保温、出料、清洗顺序控制

全部工序的顺序控制流程图如下图 2.9 所示。



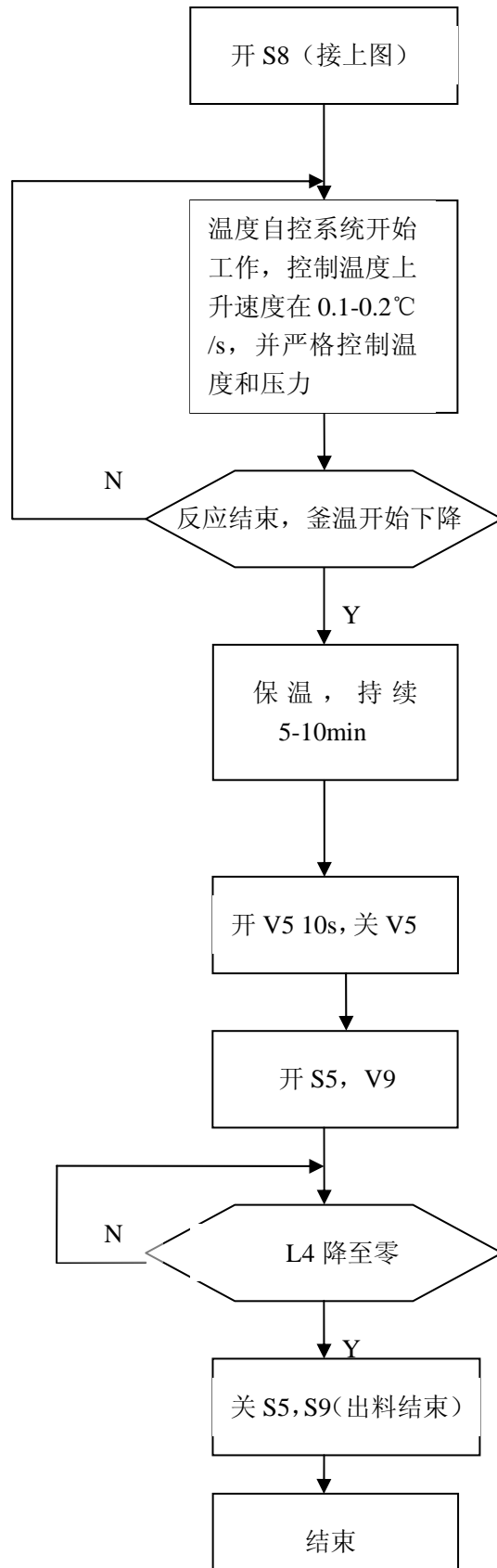


图 2.9 全过程顺序控制流程图



## 2.4 阀门特性选择

调节阀的流量特性，是在阀两端压差保持恒定的条件下，介质流经调节阀的相对流量与它的开度之间关系。调节阀的流量特性有线性特性，等百分比特性及抛物线特性三种。三种流量特性的意义如下：

### (1) 等百分比特性

等百分比特性的相对行程和相对流量不成直线关系，在行程的每一点上单位行程变化所引起的流量的变化与此点的流量成正比，流量变化的百分比是相等的。所以它的优点是流量小时，流量变化小，流量大时，则流量变化大，也就是在不同开度上，具有相同的调节精度。优先选用等百分比特性阀的场合为：①实际可调范围大；②开度变化，阀上差压变化相对较大；③；管道系统压力损失大；④工艺系统负荷大幅度波动；⑤调节阀经常在小开度下运行。

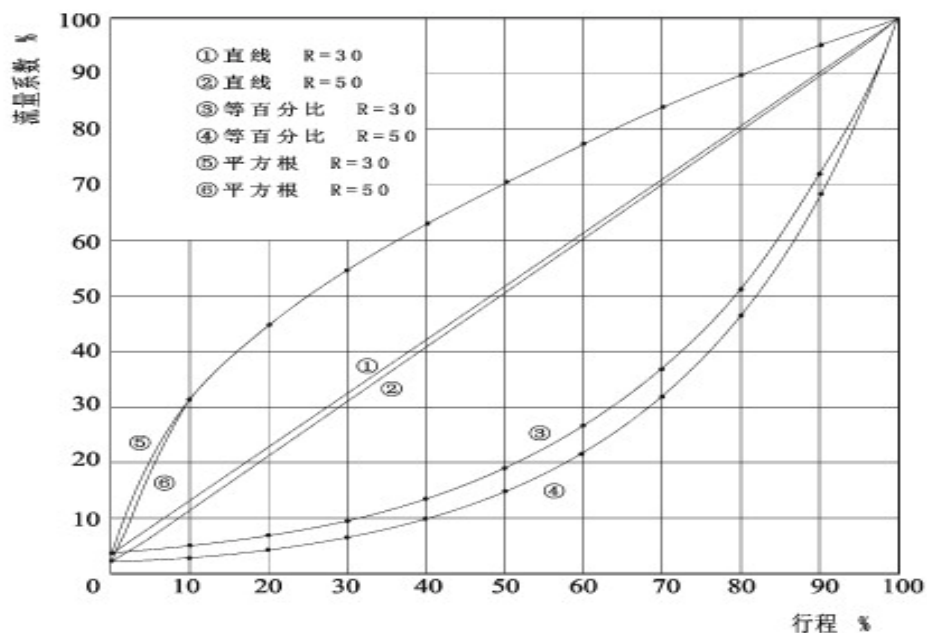
### (2) 线性特性

线性特性的相对行程和相对流量成直线关系。单位行程的变化所引起的流量变化是不变的。流量大时，流量相对值变化小，流量小时，则流量相对值变化大。选用直线性流量特性阀的场合一般为：①差压变化小，几乎恒定；②工艺系统主要参数的变化呈线性；③系统压力损失大部分分配在调节阀上（改变开度，阀上差压变化相对较小）；④外部干扰小，给定值变化小，可调范围要求小的场合。

### (3) 抛物线特性

流量按行程的平方成比例变化，大体具有线性和等百分比特性的中间特性。从上述三种特性的分析可以看出，就其调节性能上讲，以等百分比特性为最优，其调节稳定，调节性能好。而抛物线特性又比线性特性的调节性能好，可根据使用场合的要求不同，挑选其中任何一种流量特性。

阀门的流量特性曲线如下图所示：



调节阀固有流量特性曲线

根据以上的阀门理论结合本次过程控制的实际要求，可对阀门做出如下的选择：

**对于阀门 V2、V3、V4、V5、V6、V9 的选择：**

由于此几处物料的流体特性以及参数均为线性，物料的进出属于一次性过程，不要求有动态调整，且对物料的可调范围要求小，基本保证物料在阀门的可调范围内进料以及出料即可。且此几处流体在阀门前后压差变化小，外部干扰较小，使用线性阀均可满足以上对阀门的要求，且线性阀相对于对数阀较为经济。故此处可以选择线性阀作为调节阀。

以上物料阀门根据生产安全角度考虑，当工厂发生断电或其他事故引起信号压力中断时，调节阀的开闭状态应避免损坏设备和工作操作人员。故此处宜选择气开阀，防止信号中断时仍不断有物料的流入引起非正常情况下液位超限。

**夹套、蛇管冷却水阀 V7、V8：**

该反应在诱发前需要加热诱发，诱发之后反应放热。所以需要反应釜进行及时的冷却，这样才能保证反应的顺利进行，才能保证反应釜内的压力在反应釜所能承受的压力极限内。所以对反应温度的控制是整个反应的关键，而控制反应温度的主要手段是通过冷却反应放出的热量。根据过程要求，反应温度达到约 65℃ 时，为了防止反应温度上升幅度过快而失控，同时考虑到釜温对象的非线性

特征，即在初始阶段冷却水需求量小，随着反应得进行，对冷却水的需求呈非线性上升趋势，所以为了补偿被控对象的非线性，以获得良好的控制效果，我们选择 V7、 V8 为对数阀。

同样考虑安全因素，在信号压力中断时，为保证冷却水不会中断，应选用气闭阀。

#### 高压水入水阀 V10:

高压水入水阀 V10 主要控制的是高压冷却水的介入反应，目的在于防止反应釜压力上升过快，已将 V8 和 V7 开到最大，仍压制不住压力的上升而准备。故此处冷却水的流量应是在阀门开度较小的情况下，流量有较大的变化，随着开度增大，流量很快达到最大值。所以高压冷却水阀 V10 的固有流量特性为快开特性。故此处可以选用快开阀。

全部阀门的类型和流量特性一览表 2.1

阀门	类型	流量特性
V2	气开	线性阀
V3	气开	线性阀
V4	气开	线性阀
V5	气开	线性阀
V6	气开	线性阀
V7	气闭	对数阀
V8	气闭	对数阀
V9	气开	线性阀
V10	气开	快开阀

## 3. 控制方案实施

### 3.1 基于 SIMATIC PCS7 搭建自动控制系统

#### 3.1.1 硬件配置和网络层次设计

本文控制系统的搭建将基于西门子 PCS7 过程控制系统。PCS7 是一种模块化的新一代过程控制系统，它将过程控制所需的软硬件集成到统一的构架中，实现了从 ES/OS 到自动化站 AS，从通讯总线到 I/O 接口之间的无缝连接，并提供了统一的组件管理平台，丰富的软硬件资源、组件间良好的兼容性、方便简洁的操作，PCS7 是理想的过程控制系统解决方案。

控制系统的硬件构成与网络结构如图 3.1 所示

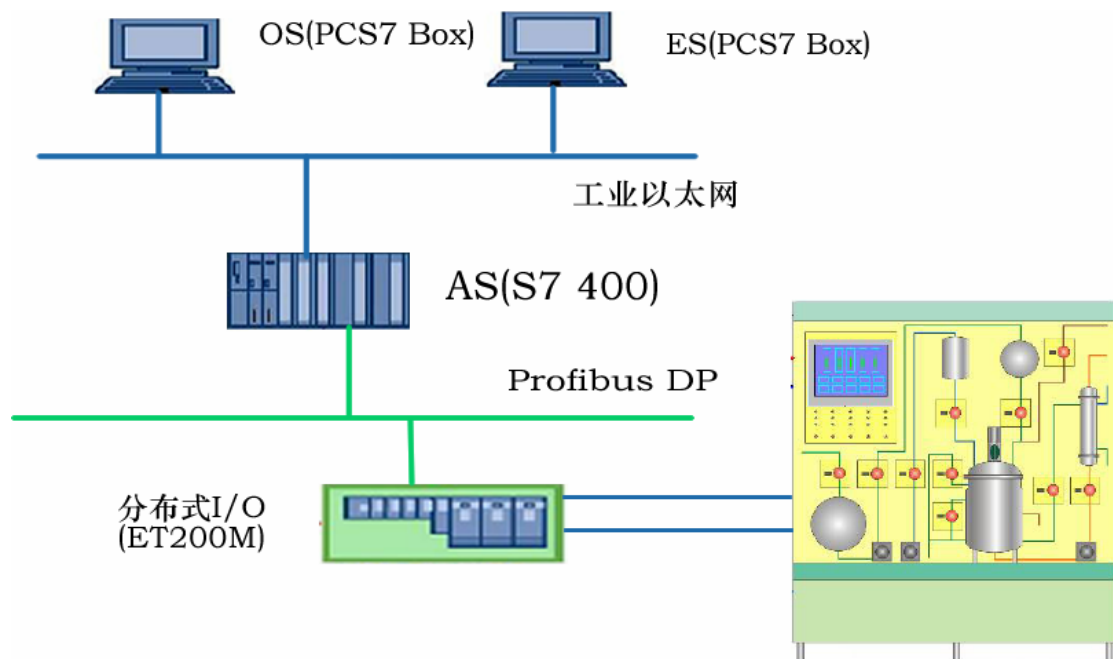


图 3.1 控制系统得硬件设备与网络结构

硬件配置：

#### 1) PCS7 Box

PCS7 Box 是一台集成了 PCS7 所有软硬件资源的工控机，包括以太网卡，Profibus 总线控制卡，以及 PCS7 组态软件平台。在系统中用作操作员站(OS)或工程师站(ES)

## 2) 可编程控制器 S7 400

S7 400 是高效能的逻辑控制器，在系统中用作自动化站，用于运行控制程序。

## 3) ET200M

ET200M 作为分布式 I/O 从站，用于接收传感器测量值和发送控制信号给执行器。ET200M 的 I/O 通讯模块选用 IM 153-2，可分配 DI/DO, AI/AO 通道给过程变量。

## 4) 工业以太网

100M 高速以太网用于工厂级数据通讯。

## 5) Profibus DP

用于建立自动化主站与从站设备之间的通讯，在本系统中主站为 S7 400 模块，从站是 I/O 设备 ET200M。

### 3.1.2 输入输出组态

本系统得输入输出点的类型如表 3.1 所示。

表 3.1 系统 I/O 变量

I/O 类型	变量
模拟量输入 AI (6 个)	A 物料计量罐液位 L2, B 物料计量罐液位 L3 反应物液位 L4, 反应温度 T1, 产物浓度 A, 反应压力 P7
模拟量输出 AO (8 个)	A 物料上料流量 F3, B 物料上料流量 F2, A 物 料下料流量 F4, B 物料下料流量 F5, C 物料下 料流量 F6, 蛇管冷却水入口流量 F7, 夹套冷 却水入口流量 F8, 反应物出口流量 F9
数字量输入 DI (5 个)	B 物料上料泵开/关 (s2), A 物料上料泵开/ 关 (s4), 反应出口泵开/关 (s5), 蒸汽阀开/ 关 (s6), 电机开/关 (s8)
数字量输出 DO (5 个)	同上

I/O 模块的类型选择如表 3.2 所示

I/O 模块	说明
SM331 AI8*12bit	8 路模拟两输入
SM332 AO8*12bit	8 路模拟两输出
SM321 DI8*DC24	8 路开关量输入
SM321 DO8*DC24	8 路开关量输出

## 3.2 安全连锁保护系统(SIS 系统)

### 3.2.1 硬件配置和网络层次设计

设计 SIS 系统的目的是为了保证可靠地执行安全操作和安全功能，保障整个控制系统的安全。需要设计冗余、容错以确保生产过程步停产，当系统出现故障时，诊断工具能及时检测，将故障局部化，并能及时修复。

在设计冗余系统时，节省成本是一个需要关注的问题。在设计过程中，将标准模块和故障安全模块安装在同一个站上，就可以削减硬件的数量、节约布线、减小机柜空间。备件数量也得到了减少，有效地降低了整个物流、仓储费用。可以使用通过认证的基于标准PROFIBUS的PROFIsafe故障安全通信协议进行通信，而不需要单独的安全总线。

SIS 系统的硬件配置和网络结构：

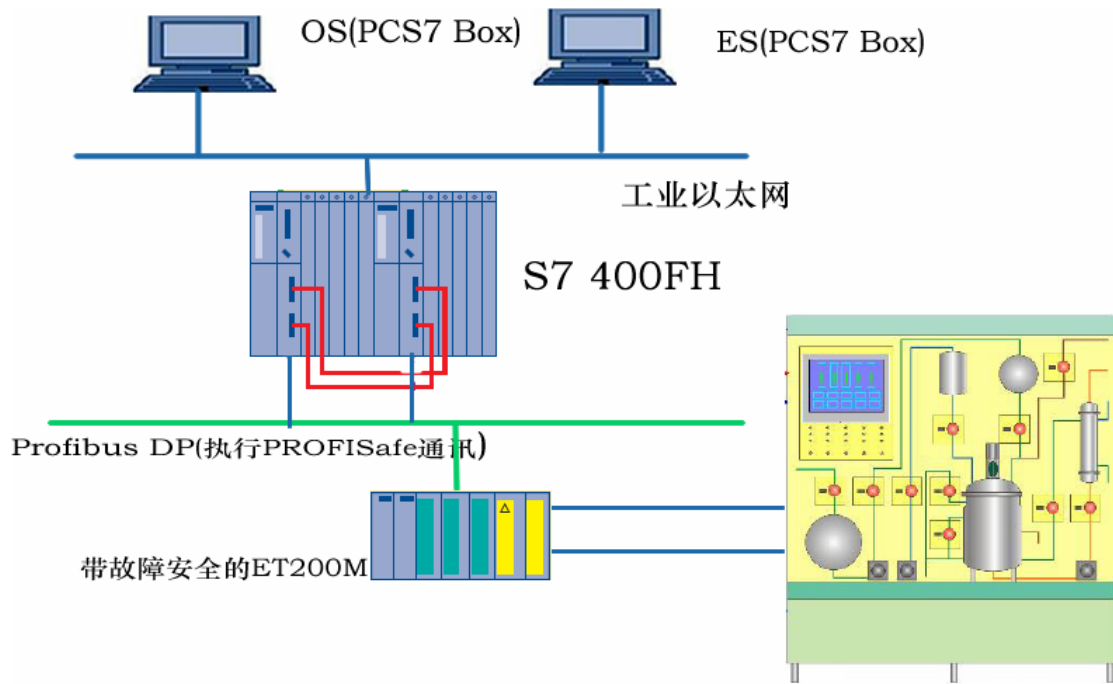


图 3.2 SIS 系统结构

硬件配置：

与标准自动控制相比，sis 系统中有三点不同。

### 1) S7 400FH

自动化站采用 S7 400FH 控制器，符合 IEC 61508(SIL 3)和 IEC 61511 等国际安全标准，专门用于执行和安全生产有关的功能。针对本控制对象，可以将压力安全控制的相关功能，通过组态 CFC 或安全矩阵的形式，由 S7 400FH 站来执行这些重要的安全操作。同时，为了更可靠的保证 SIS 系统正常运行，本文采用了冗余设计，包括了两个 S7 400FH 站。

### 2) 故障安全 ET200M

专门用于采集与 S7 400FH 需要的安全相关过程量，在本系统中为压力 P，和温度 T1。并将安全操作型号，如高压冷却阀 S6 的开关，搅拌机的开关等。

### 3) 执行 PROFISafe 的通讯的 Profibus

PROFISafe 开发式协议，使得 ProfiBus 能够满足过程自动化的故障安全通讯要求。

### 3.2.2 标准过程控制与 SIS 系统的集成

要说明的是，SIS 系统与过程控制系统虽然在功能方面各司其职，但考虑到节约成本的要求，可以将两个独立的系统集成在一起，即用标准过程控制与安全控制在同一个自动化站中执行，同时将标准与故障安全 I/O 模块集成到 ET200M 中。这样做的好处是：

- 1) 省略了 DCS 与 SIS 之间的复杂的通信；
- 2) 减少了布线，节约成本；
- 3) 组态整个系统变得十分方便，可以统一组态标准控制和安全控制系统。

## 4.总结

本文针对带搅拌的釜式反应器，根据控制要求设计了基于 PCS7 的自动控制系统和安全仪表系统（SIS 系统），并对各种控制设备的选取和网络层次进行了描述。在过程控制策略方面，对温度对象设计了 DMC-PID 透明控制器，对压力对象设计了安全控制系统，以及对全过程设计了顺序控制系统。整个控制系统的设计完全基于 PCS7 过程控制系统，我们自信该控制方案可以很好的完成对釜式反应器的控制，并获得良好的控制效果。