

间歇反应的过程控制系统设计

一、被控对象工艺流程概述

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：

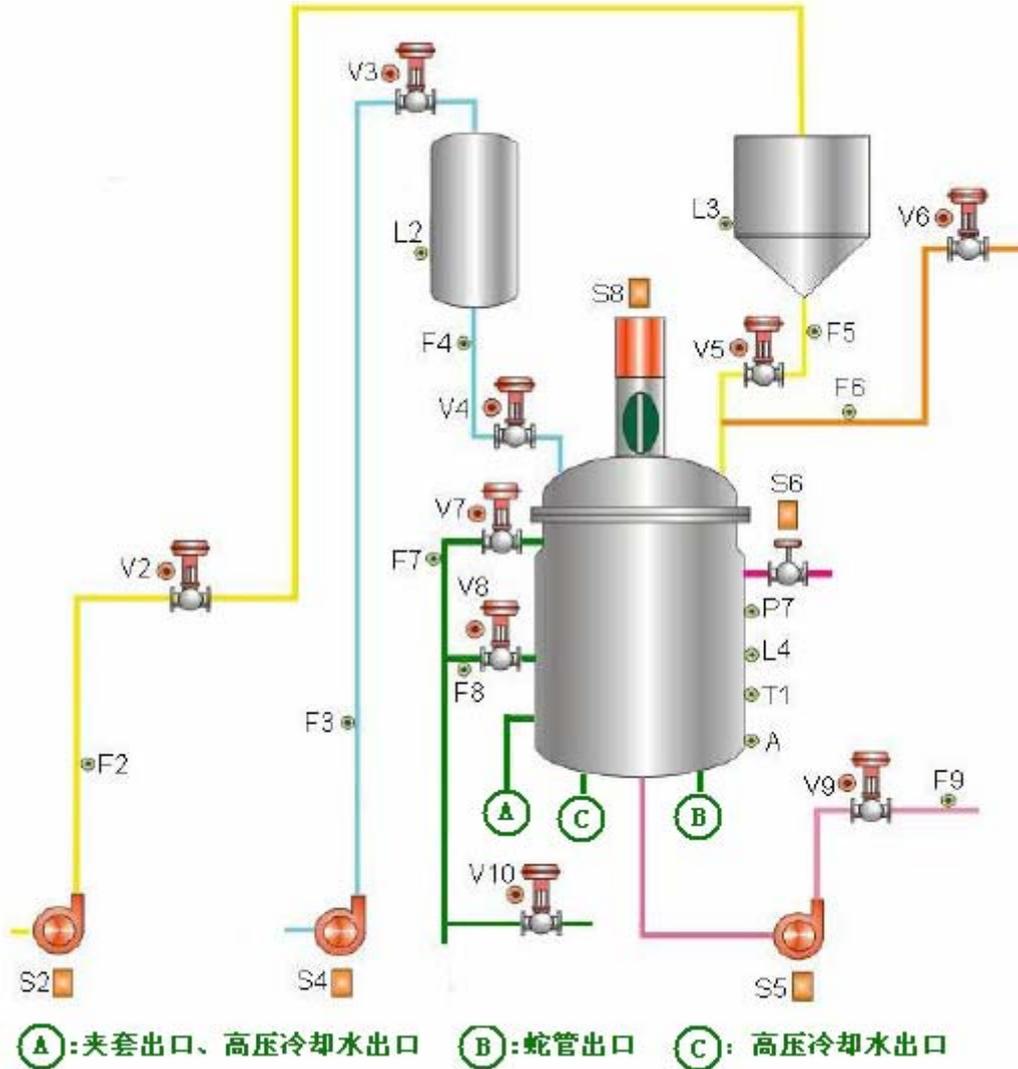


图 1 间歇反应工艺流程图

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。

间歇反应流程中相关设备尺寸如下：

(1) 反应器（釜）

每釜容积 2500 升（最大容积 2800 升），直径 1400mm，高度 2000mm，浆式搅拌器（体积忽略不计），转速 90r.p.m，搅拌电机功率 4.5kw

(2) A 物料计量罐

容积 180 升，直径 500mm，高度 900mm，正常液位 640mm（溢流管高度）

(3) B 物料计量罐

容积 270 升，直径 600mm，圆筒形部分高度 800mm，圆锥形部分高度 520mm，正常液位 1000mm（溢流管高度）

(4) A 物料计量罐、B 物料计量罐底到反应釜顶高差 1500mm

(5) A 物料上料管、下料管，B 物料上料管、下料管的公称直径 Dg40mm

(6) 反应器蛇管冷却水水管公称直径 Dg50mm

(7) 反应器夹套冷却水水管公称直径 Dg65mm

(8) 反应物出料管公称直径 Dg70mm

其测控条件如表 1.1 所示：

表 1.1 测控条件一览表

| | | |
|----|--------------|-------------|
| L2 | A 物料计量罐液位 | 最高 640mm |
| L3 | B 物料计量罐液位 | 最高 1000mm |
| L4 | 反应器液位 | 最高 1600mm |
| T1 | 反应温度 | ℃ |
| P7 | 反应压力 | MPa（绝压） |
| F2 | B 物料上料流量 | 最大 8.1t/h |
| F3 | A 物料上料流量 | 最大 9.72t/h |
| F4 | A 物料下料流量 | 最大 9.05t/h |
| F5 | B 物料下料流量 | 最大 8.68t/h |
| F6 | C 物料下料流量 | 最大 42.77t/h |
| F7 | 反应器蛇管冷却水入口流量 | 最大 42.84t/h |
| F8 | 反应器夹套冷却水入口流量 | 最大 72.84t/h |

其设备参数如表 1.1 所示：

表 1.1 设备参数一览表

| | | |
|-----|-----------------|---------|
| S2 | B 物料上料泵开关 | 开、关两种状态 |
| S4 | A 物料上料泵开关 | 开、关两种状态 |
| S5 | 反应物出口泵开关 | 开、关两种状态 |
| S6 | 反应器夹套加热蒸汽阀（开关阀） | |
| S8 | 反应器搅拌电机开关 | 开、关两种状态 |
| V2 | B 物料上料阀 | 开、关两种状态 |
| V3 | A 物料上料阀 | 开、关两种状态 |
| V4 | A 物料下料阀 | 开、关两种状态 |
| V5 | B 物料下料阀 | 开、关两种状态 |
| V6 | C 物料下料阀 | |
| V7 | 反应器蛇管冷却水入口阀 | |
| V8 | 反应器夹套冷却水入口阀 | |
| V9 | 反应物出料阀 | 开、关两种状态 |
| V10 | 高压水入口阀 | 开、关两种状态 |

二、被控对象分析及控制系统综述

缩合反应工序历经下料、升温、保温、出料及反应釜清洗阶段，最重要的是升温和保温两个阶段。

本反应中需要控制的变量有：反应温度，反应釜压力，反应釜内液面高度，其中温度是最重要的控制量，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。保温阶段之目的是尽可能多地获得所期望的产物。因此温度是决定缩合反应是否成功的关键。反应釜内压力控制是为了保证反应安全。

可以将控制系统分为一下几个控制：

1. 反应升温速度控制

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，这个过程中要保证温度以 0.1~0.2℃/s 的速率上升。

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℃左右一段时间，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. 反应器压力控制

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。

4. 整个过程的顺序控制

对整个过程中的进料、升温、保温、出料、清洗各个阶段实行顺序控制。

温度控制的详细过程如下：

当反应釜内的温度低于 45℃时适当打开夹套蒸汽加热阀 S6，使温度上升速度在 0.1~0.2℃/s 以内。当温度高于 45℃时停止加热。温度继续上升，当温度达到 65℃时，适当打开夹套冷却水阀门 V8 及蛇管冷却水阀门 V7，保持温度上升速率在 0.1~0.2℃/s 以内，同时得保证夹套冷却水出口温度和蛇管冷却水出口温度不得低于 60℃。接下来通过对 V8 和 V7 的调节使温度以 0.1~0.2℃/s 以内的速率上升至 121℃。然后反应经过激烈阶段之后温度会下降，此时还是通过对 V8 和 V7 的调节使温度保持在 120℃。当关闭 V8 和 V7 后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℃约 5~10 分钟。这样温度控制结束。

压力安全控制过程如下：

当反应釜内压力维持在 0.69Mpa 左右时为正常情况，此时不需要压力安全控制部分不需要任何动作。一旦压力超过 0.8Mpa（反应温度超过 128℃），且上升很快，而 V8 和 V7 都开至最大，此时需要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 0.83Mpa（反应温度超过 130℃）以上时，应立刻关闭反应釜搅拌电机开关 S8。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。若不奏效，当压力超过 1.20Mpa 时应迅速打开放空阀 V5（代替），强行泄放反应釜压力，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。

整个控制过程是一个顺序的控制，在不同的控制阶段采用不同的控制器来完成各自阶段的控制要求。

三、各控制器的设计

1. 温度控制器的设计

升温阶段和保温阶段可以使用同一个温度控制器只是控制器的输入不同。升温阶段控制器的输入为一定斜率的斜坡信号，保温阶段输入为一恒定值。

我们选用灰色预测 PID 控制。灰色预测 PID 超调量小，抗干扰能力好，尤其使用于具有大滞后的被控对象。控制原理图如图 2 所示。

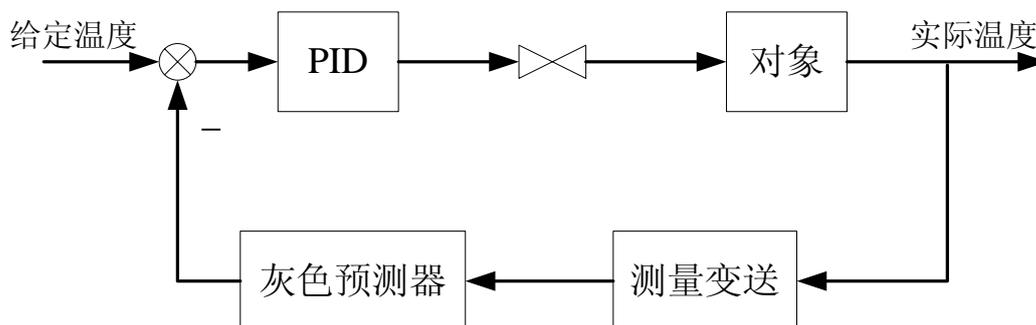


图 2 温度控制器原理图

通过仿真来确定灰色预测器的预测步数，使控制效果达到最好。

因为在升温 and 保温时在不同阶段都需要分别控制夹套蒸汽加热阀 S6 和夹套冷却水阀门 V8 及蛇管冷却水阀门 V7，因此我们设计了温度控制器 1 和温度控制器 2，他们的原理图都如图 2 所示，只是 PID 控制器的输出信号控制的阀门不同。控制器 1 对 S6 进行控制，控制器 2 对 V8 和 V7 进行控制。两个控制器由顺序控制来负责切换。

2. 液位控制器的设计

反应釜内液位的控制是通过 C 物料来控制。通过阀 V6 来控制 C 物料的流量，使反应釜内液位保持在 1.2m 与 1.37m 之间。

我们选用 PID 控制器来进行液位的控制。原理图如图 3 所示。

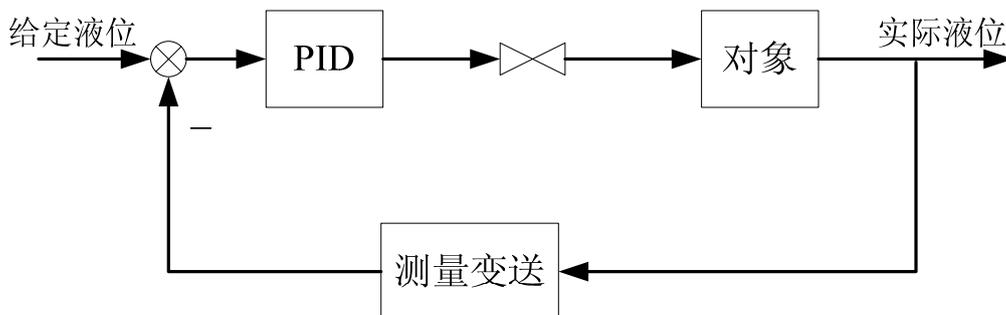


图 3 液位控制器原理图

3. 压力控制器的设计

本反应中，压力的控制只是为了保证反应的安全。需要做的就是根据当前的压力值来作出适当的动作，以保证间歇反应能够安全，高效的进行，因此可以采用顺序控制的思路来设计压力控制器，流程图如图 4 所示

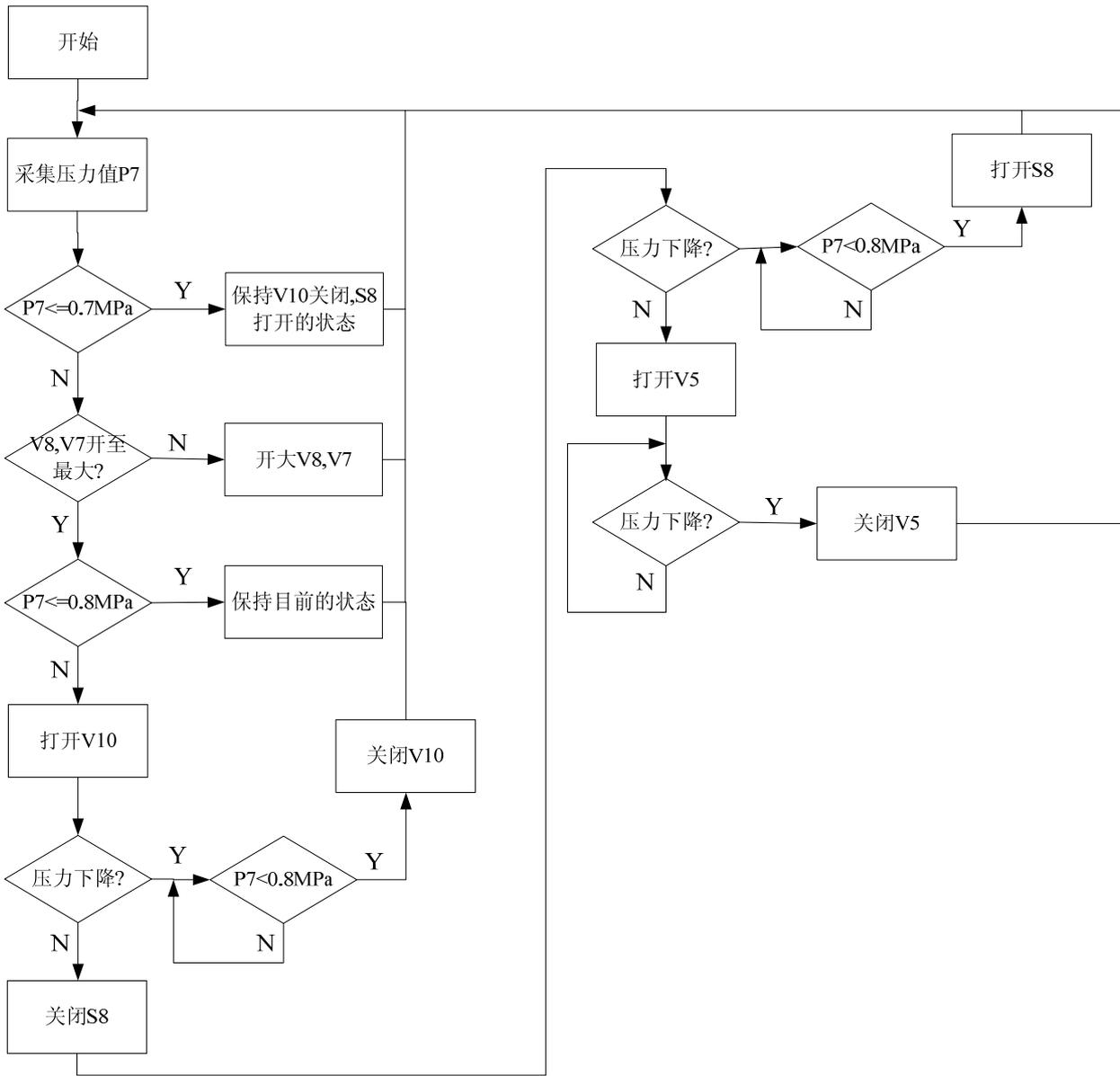


图 4 压力控制器流程图

4. 顺序控制的设计

图 5 所示是整个反应过程的顺序控制流程图。

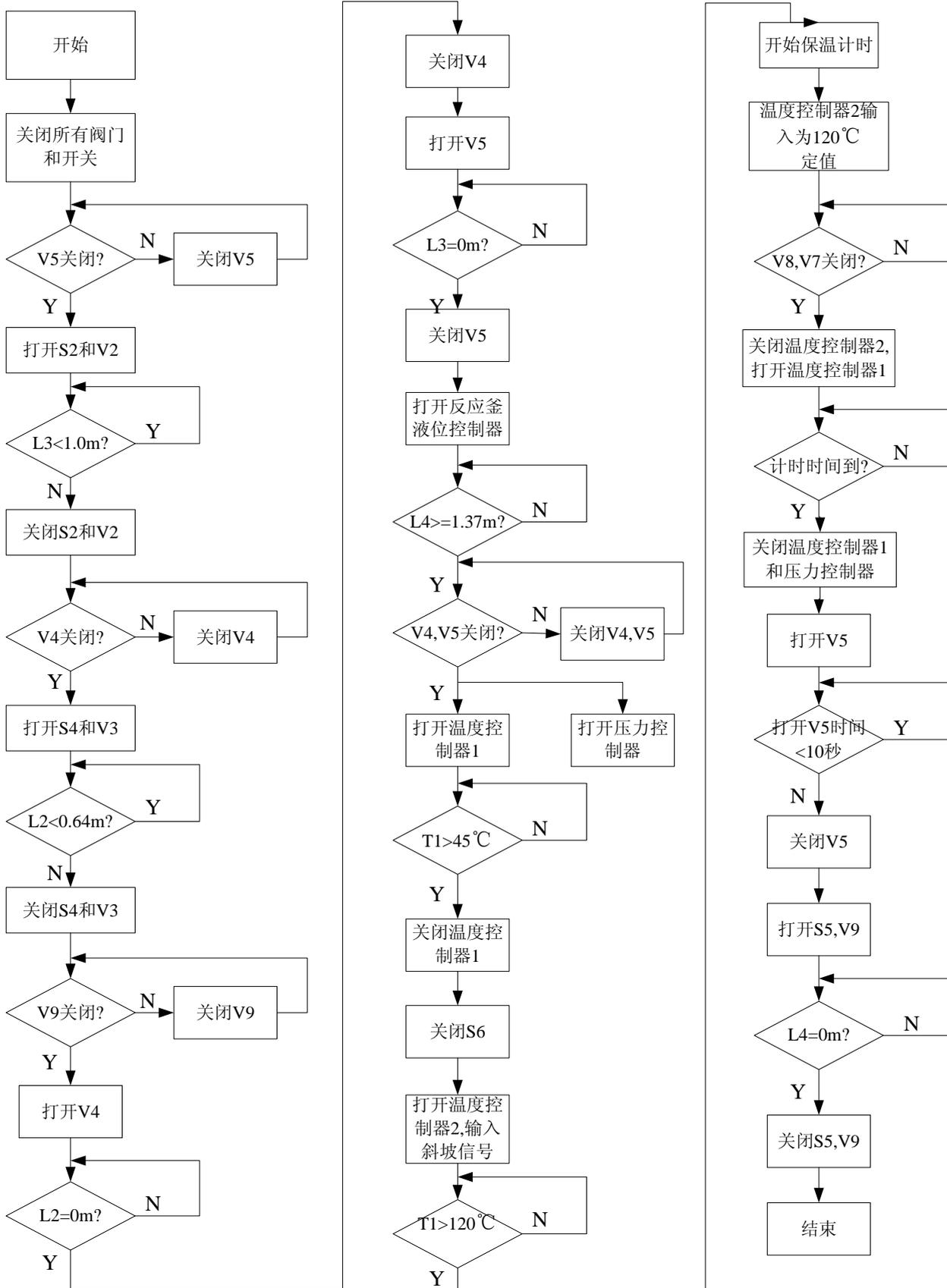


图 5 顺序控制的流程图

四、控制阀门的选择

1. 阀门的流量特性

控制阀的流量特性是指流过阀门的调节介质的相对流量与阀杆的相对行程（即阀门的相对开度）之间的关系。其数学表达式为：

$$\frac{q}{q_{\max}} = f\left(\frac{l}{l_{\max}}\right)$$

式中， q/q_{\max} 表示控制阀某一开度的流量与全开时流量之比，称为相对流量； l/l_{\max} 表示控制阀某一开度下阀杆行程与全开时阀杆全行程之比，称为相对开度。

流量特性通常用两种形式表示：

(1) 理想特性，即在阀的前后压差固定的条件下，流量与阀杆位移之间的关系，它完全取决于阀的结构参数；

(2) 工作特性，是指在工作条件下，阀门两端压差变化时，流量与阀杆位移之间的关系。

理想流量特性主要有线性、抛物线、对数（等百分比）及快开四种。直线特性是指控制阀的相对流量与相对开度成直线关系，即阀门阀芯的单位行程变化引起的流量变化是一常数；抛物线特性是指阀芯单位行程变化引起的相对流量变化与此点的相对流量值的平方根成正比关系；等百分比特性是指阀芯单位行程变化引起的流量变化与该点的相对流量成正比，即控制阀的放大系数是变化的，它随相对流量的增大而增大，而相对流量变化的百分比是相等的，故称之为等百分比特性；快开特性是指阀芯单位行程变化所引起的相对流量变化与该点相对流量成反比，显然，它与等百分比特性是相反的。可定性理解为：当开度很小时，流量即迅速增大至接近最大值，故称快开特性。各种特性曲线如图 6 所示。

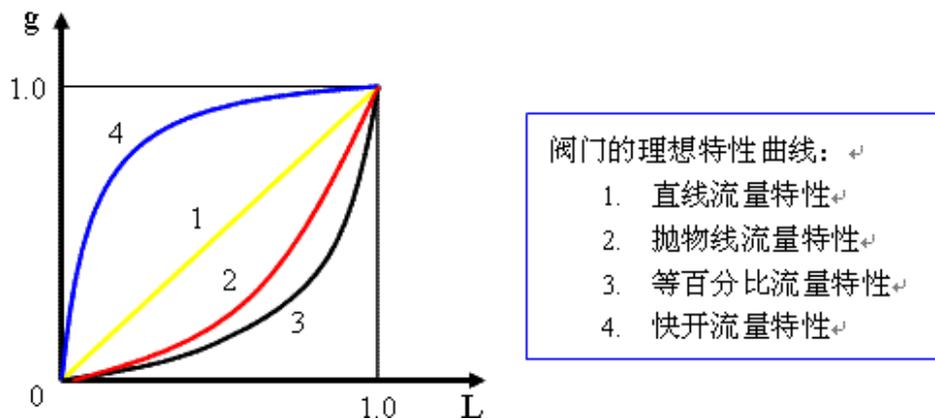


图 6 控制阀的理想流量特性

2. 阀门的选择

实际工程项目中，常用控制阀的理想流量特性有直线、等百分比和快开三种，这是由于

抛物线流量特性介于直线与等百分比之间，一般可用等百分比特性来代替；而快开特性主要用于双位调节（即开关调节）及程序控制中。因此，控制阀的流量特性选择实际上是指如何选择直线和等百分比特性，这要综合考虑系统的需要及所需控制对象的要求。一般是希望以调节阀的非线性补偿调节对象的非线性。

本反应中假设所有的控制阀都是理想的，即都按照理想流量特性来选择控制阀。

除了蛇管冷却水阀 V7，夹套冷却水阀 V8 和 C 物料下料阀 V6，其余的阀门都选择为快开特性。

C 物料下料阀 V6 是用来控制反应釜的液位，其中关系都是线性的，因此选择线性流量控制阀。

蛇管冷却水阀 V7 和夹套冷却水阀 V8 是用来控制反应釜内的温度。应该通过分析反应釜与冷却水之间的热交换关系来选择阀门类型。由热交换公式可知，冷却水的流量与温度不是线性的关系，所以蛇管冷却水阀 V7 和夹套冷却水阀 V8 选择对数（等百分比）流量控制阀。

五、硬件结构

1. 硬件结构

整个控制系统的结构如图 7 所示。客户机是普通的 PC；PCS7 BOX 通过 PROFIBUS DP 与标准 I/O 设备 ET 200M 相连接，仿真器件的各种信号由 ET 200M 转化后进入 PCS7 BOX。

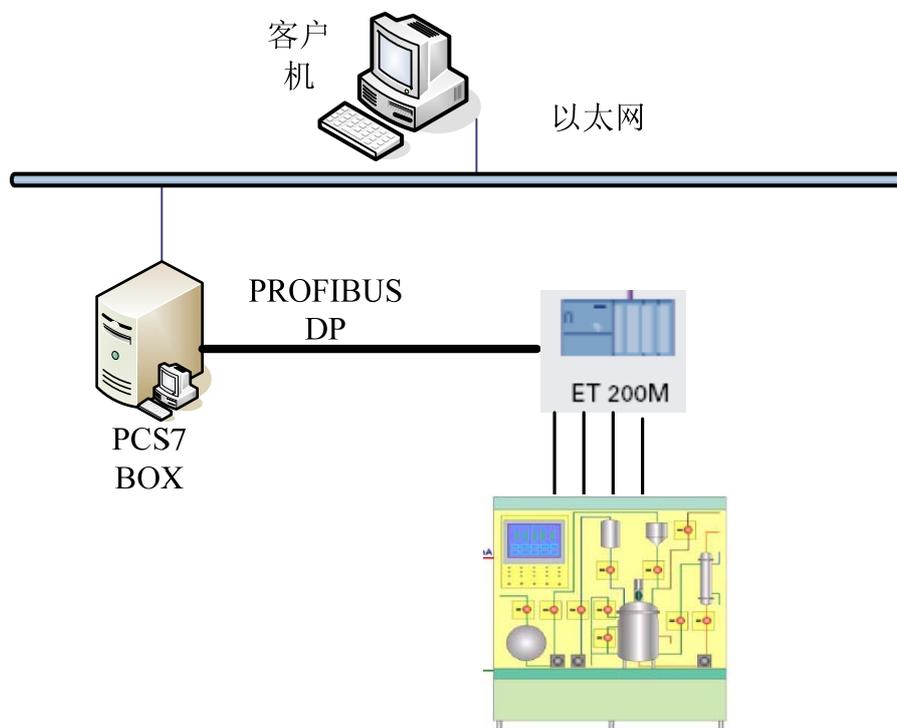


图 7 硬件连接图

2. I/O

控制系统中的 I/O 分为：模拟输入、模拟输出、数字输出。

模拟输入包括：A 物料计量罐液位 L2，B 物料计量罐液位 L3，反应器内液位 L4，反应温度 T1，反应器内压力 P7，C 物料下料流量 F6，反应器蛇管冷却水入口流量 F7，反应器夹套冷却水入口流量 F8；

模拟输出包括：C 物料下料阀 V6 控制信号，蛇管冷却水阀 V7 控制信号，夹套冷却水阀 V8 控制信号；

数字输出包括：A 物料计量罐入口阀 V3 控制信号，A 物料计量罐出口阀 V4 控制信号，A 物料泵及泵电机开关 S4 控制信号，B 物料计量罐入口阀 V2 控制信号，B 物料计量罐出口阀 V5 控制信号，B 物料泵及泵电机开关 S2 控制信号，反应物出口阀 V9 控制信号，反应物出口泵及出口泵开关 S5 控制信号，高压冷却水阀 V10 控制信号，反应器夹套加热蒸汽阀 S6 控制信号，反应器搅拌电机开关 S8 控制信号。

六、结束语

本文设计了间歇反应控制过程，给出了温度，液位，压力控制器的原理图以及整个过程的顺序控制图。同时对所用的硬件设备进行了初步选择。

参考文献

- [1] 王再英，刘淮霞，陈毅静. 过程控制系统与仪表. 北京：机械工业出版社，2006
- [2] 俞金寿. 过程自动化及仪表. 北京：化学工业出版社，2003
- [3] 周明. 现场总线控制. 北京：中国电力出版社，2002
- [4] 熊和金，灰色控制. 北京：国防工业出版社，2005