

# 基于 PCS7 的带搅拌釜式反应器系统的 过程控制设计

参赛队伍编号：59

**摘要：**带搅拌釜式反应器系统是一种常见的化工设备，工业生产时，为了保证生产安全、产品质量，需要对反应温度，釜压等重要参数进行监控。本文针对釜式反应器的工艺特点和控制要求，给出了一套基于西门子 PCS 7 的控制方案。首先，本文给出了控制系统相应的网络拓扑结构及硬件配置。其次，详细介绍了各个控制单元的设计方案。在这些控制方案中用到了单回路控制系统、串级控制系统、补偿控制系统；针对升温控制的复杂性，又使用了模糊自适应 PID 先进控制算法；并采用西门子 S7-300 PLC 来实现反应釜的监测和控制。最后，针对本控制系统提出了相应的安全和节能降耗措施。

**关键词：**带搅拌釜式反应器，PCS7，S7-300 PLC，模糊自适应 PID，串级控制

## The Process Control System Design of Stirred-tank Reactor System Based on PCS7

**Abstract :** Stirred-tank reactor system is widely used in chemical production and some crucial parameters, as reaction temperature and reactant pressure, must be controlled to ensure safety in production and the quality of products. In this Paper, an integrated control system based on Siemens PCS7 is designed according to the system characteristic and control requirement. Firstly, network structure and specific hardware configuration is given. Then, the design project of every control cell is introduced detailedly in this Paper. In these design projects, single-loop control system, cascade control system and compensation control system are used. Because of the complexity of temperature control, advanced control algorithms of adaptive fuzzy-PID is used to control the temperature. At the same time, S7-300 PLC of Siemens is used to monitor and control Stirred-tank reactor. At last, the security and energy-saving measures for this control system are given.

**Keywords:** stirred-tank reactor, PCS7, S7-300 PLC, adaptive fuzzy-PID  
cascade control

## 目录

一 控制系统分析.....	1
1 控制对象简介.....	1
2 工艺过程简介.....	2
二 网络及硬件配置.....	3
1 系统网络层次图.....	3
2 管理/监控层.....	4
3 工业以太网.....	4
4 控制层.....	5
5 现场总线.....	5
6 分布式远程 I/O.....	6
7 现场设备.....	11
三 控制方案.....	12
(一) 反应升温速度控制单元.....	12
1 控制要求.....	12
2 控制方案设计.....	13
(二) 反应保温温度控制.....	18
1 控制要求.....	18
2 控制方案设计.....	18
(三) 主产物产率控制.....	19
1 控制要求.....	19
2 控制方案设计.....	19
(四) 反应器压力安全控制.....	21
1 控制要求.....	21
2 控制方案设计.....	21
(五) 升温、保温、出料、清洗顺序控制.....	23
1 控制要求.....	23
2 控制方案设计.....	23
四 平稳安全生产.....	24
1 PLC 冗余结构.....	24
2 采用 UPS 供电.....	24
3 安全防爆.....	24
4 以太网和现场总线信息安全.....	25
五 经济/节能.....	25
1 优化控制系统.....	25
2 冷却水的回收利用.....	25
3 采用变频技术节约反应釜用电.....	25
4 软启动节能.....	26
六 总结.....	26
参考文献.....	27
附录.....	28

## 一 控制系统分析

### 1 控制对象简介

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：

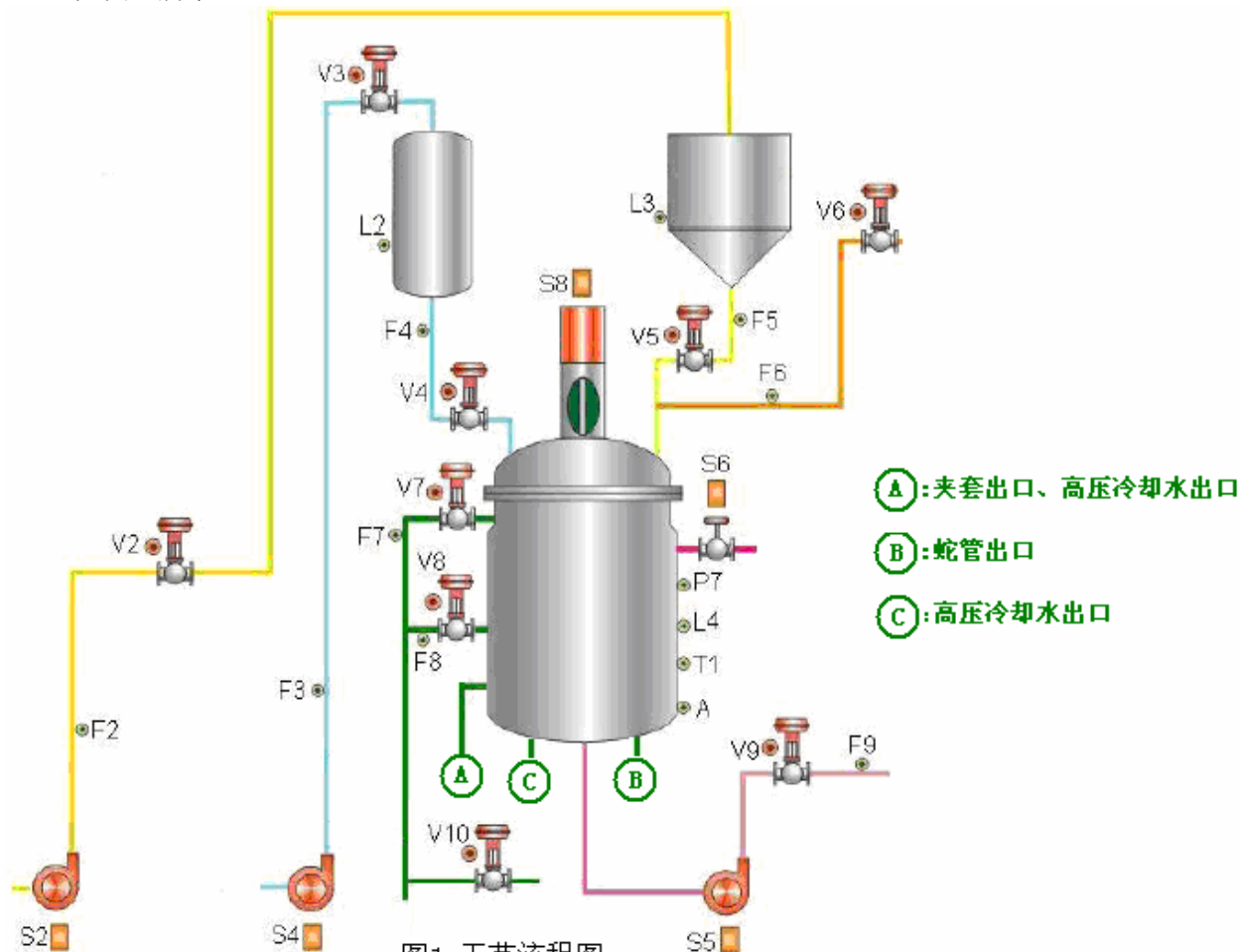


图1 工艺流程图

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。

表 1：测控参数一览表

测控参数标号	代表含义	指标说明
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）
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

表 2: 设备一览表

设备标号	标号含义
S2	B 物料上料泵开关
S4	A 物料上料泵开关
S5	反应物出口泵开关
S6	反应器夹套加热蒸汽阀 (开关阀)
S8	反应器搅拌电机开关
V2	B 物料上料阀
V3	A 物料上料阀
V4	A 物料下料阀
V5	B 物料下料阀
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
V10	高压水入口阀

## 2 工艺过程简介

### (1) 准备工作

检查各开关、手动阀门是否关闭。

### (2) A、B 物料计量备料

检查并确认 A、B 物料计量罐下料阀是否关闭，打开其各自的上料泵和上料阀，随后观察 A、B 物料计量罐液位是否达到溢流管指定高度，并及时关闭 A、B 物料的上料泵和上料阀。

### (3) 向缩合反应釜加入三种物料

打开 A、B 物料计量罐下料阀，将 A、B 物料放入釜中后打开 C 物料阀 V6，将料液打入反应釜。注意反应釜的最终液位 L4 等于 1.37m 时，必须及时关 V6。

### (4) 缩合反应操作

迅速检查并确认进料阀 V4、V5、V6，出料阀 V9 是否关闭，开启反应釜搅拌电机 S8，观察釜内温度 T1 已经略有上升。适当打开夹套蒸汽加热阀 S6，观察反应釜内温度 T1 逐渐上升。注意加热量的调节应使温度上升速度在 0.1~0.2℃/s 以内。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。反应此时已被深度诱发，并逐渐靠自身反应的放热效应不断加快反应速度。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。反应预计在 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，这一阶段既要大胆升压，又要谨慎小心防止超压。

### (5) 反应保温阶段

如果控制合适，反应历经剧烈阶段之后，压力 P7、温度 T1 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）。

### (6) 出料及清洗反应器

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。至此，全部反应岗位操作完毕，可进入操作下一批反应的准备工作。

## 二 网络及硬件配置

本控制系统采用西门子 SIMATIC 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 与 PLC 控制系统的优点相结合，它是面向所有过程控制应用场合的先进过程控制系统。PCS7 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。

SIMATIC PCS7 采用优秀的上位机软件 WinCC 作为操作和监控。利用开放的现场总线和工业以太网实现现场信息采集和系统通讯，采用 S7 自动化系统作为现场控制单元实现过程控制，以灵活多样的分布式 I/O 接受现场传感检测信号。

SIMATIC PCS7 是基于全集成自动化思想的系统，其集成的核心是统一的过程数据库和唯一的数据库管理软件，所有的信息系统都存储于一个数据库中而且只需输入一次，这样就大大增强了系统的整体性和信息的准确性。

PCS7 由以下部分组成：

- (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：操作员站的组态

SIMATIC PCS7 采用符合 IEC61131-3 国际标准的编程软件和现场设备库，提供连续控制、顺序控制及高级编程语言。现场设备库提供大量的常用的现场设备信息及功能块，可大大简化组态工作，缩短工程周期。SIMATIC PCS7 具有 ODBC, OLE 等标准接口，并且应用以太网、PROFIBUS 现场总线等开放网络，从而具有很强的开放性，可以很容易地连接上位机管理系统和其它厂商的控制系统。

按照要求本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。

### 1 系统网络层次图

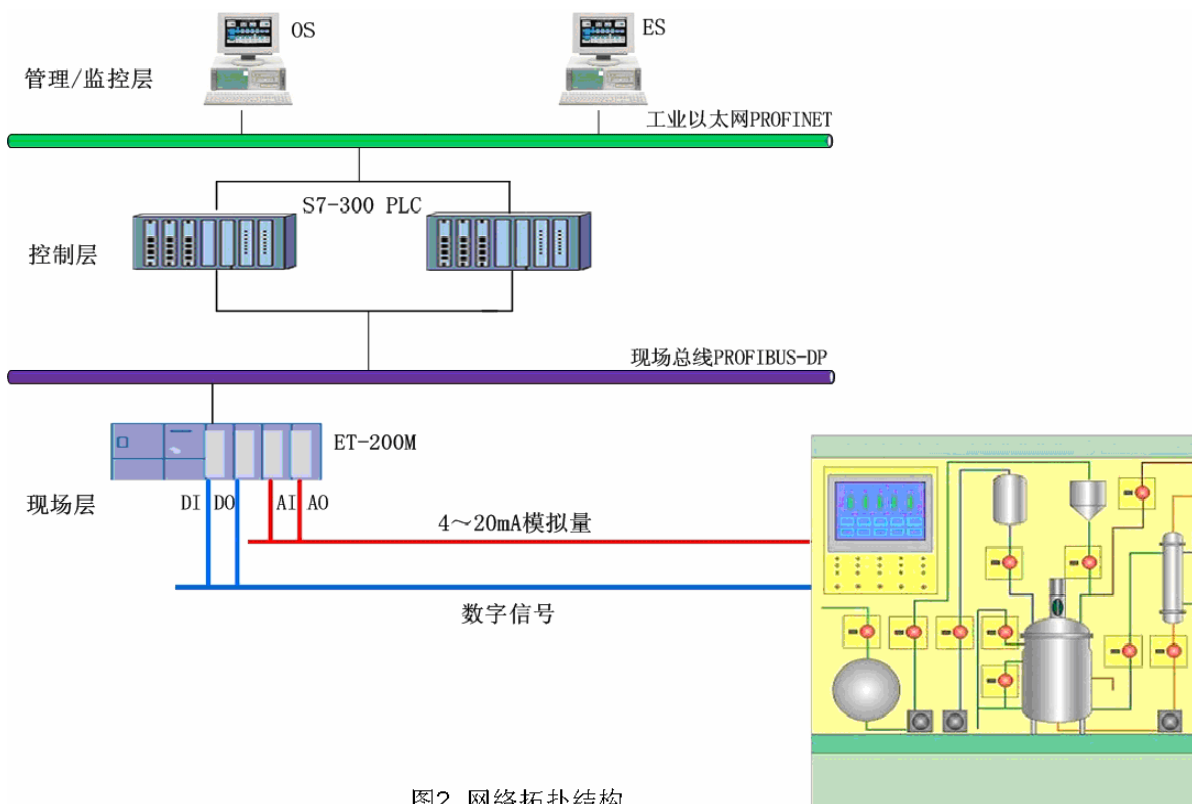


图2 网络拓扑结构

上图是选用 SIMATIC PCS7 组建的控制系统网络拓扑结构图。该系统的各个层级之间采用不同的通讯方式，主要包括：工业以太网，PROFIBUS 现场总线，远程分布式 I/O，从而构成了一个大的通信网络，实现上位机对现场的信息收集与处理，控制现场设备进行相应的动作。

控制系统结构根据可靠性高和开放性好的原则进行配置。为提高系统的可靠性，控制站采用 S7-300 PLC 冗余系统；为提高系统的开放性，网络结构采用监控和现场设备两层网络体系结构，监控层网络采用工业以太网，现场设备层网络采用 Profibus-DP 分布式网络。控制系统的硬件配置和网络拓扑结构如图 2 所示。

## 2 管理/监控层

在工程师站 ES/操作员站 OS 中安装有本网络控制系统应用程序的开发平台 STEP7-MICRO 和运行软件平台 WinCC。

STEP 7-MICRO 是基于 Windows NT 的 S7-300 的 PLC 标准软件包，通过 STEP 7 用户可以进行系统的配置和程序的编写，调试，在线诊断 PLC 的硬件状态，控制 PLC 状态及接口信息。

WinCC 是基于 Windows NT 的面向对象的 32 位应用软件，它提供了基于生产过程的图形显示，信息处理，信息处理，归档，报表等基本功能模块。WinCC 数据管理器采用结构化的数据存储方式，存储组态数据和过程数据，这种数据存储方式保证了无论是过程数据还是组态数据都可以准确无误的读取。基于 WinCC 的计算机图形显示界面的监控软件系统，需要在上位机中安装 WinCC 监控软件以及配套的通讯卡，来实现 WinCC 和 PLC 之间的通信。在 PLC 的 CPU 模块上有一个标准化的基于 S7 协议的 MPI 口，通过该接口 PLC 可与上位计算机运行的 WinCC 进行数据传输，构成 MPI 网络。建立 WinCC 与 S7-300 PLC 之间通信的步骤如下：

(1) 建立一个 WinCC 项目，然后添加 PLC 驱动程序(在 WinCC 中，驱动程序也指通道，通过它可在自动化系统和 WinCC 中的变量管理器之间建立连接，以便能向 WinCC 变量提供过程值)。若建立一个多接口网络 MPI，则选择支持 S7 协议的通信驱动程序 SIMATIC S7 Protocol Suite.CHN。然后，在其中的“MPI”项下建立 PLC 连接，并且设置 MPI 地址等参数，MPI 地址必须与 PLC 中设置相同。这样便建立了 WinCC 和 PLC 之间的通信。

(2) 在已经组态好的 S7-300 下设置标签，每个标签有 3 个设置项：标签名、数据类型、地址。地址是最重要的，它与 S7-300 中的具体地址一一对应。设置此地址可以直接利用 Step 7 中配置的变量表，将 S7-300 与 WinCC 需要通信的数据建立连接。

(3) 根据工艺的要求，在图形编辑器中绘制出符合工艺流程的控制界面，并且通过报警记录编辑器组态报警。

## 3 工业以太网

工业以太网符合国际标准 IEEE 802.3，是功能强大的区域和单元网络，它传输速率快，可达到 100Mbps，网络最大范围达 150km，并且容易并入其他网络，便于网络的扩充，所以在管理级用工业以太网连接工程师站、管理员站和现场控制站。

本控制系统采用工业以太网 PROFINET。工业安装工艺、实时能力、分布式现场设备的集成、同步运动控制应用、简单网络管理与诊断、防止未授权访问、高效、跨供应商的工程与组态，以及高度的机器及工厂可用性—所有这些需求都可由 PROFINET 这一开放的、跨供应商的标准来实现。

(1) PROFINET 是实时以太网，PROFINET 基于集成的通讯和实时技术，完全支持开放的 IT 标准及 TCP/IP。PROFINET 的实时功能适用于对信号传输时间有苛刻要求的场合，其响应时间可以和当前现场总线系统相媲美。

(2) PROFINET 网络的安装不需要专门的网络知识。除星形连接外，PROFINET 还支持总线形和环形结构，大大降低了布线费用，保证了高度的网络可用性，我们选用的布线方式是光线环网结构。

(3) 对数据与通讯技术来说，网络安全的重要性迅速提高。安全意味着保护系统免受恶意破坏的侵袭，防止对敏感数据的未授权访问。PROFINET 集成的安全概念，可以使自动化网络的安全风险降至最低，同时不会对生产造成不必要的影响。

(4) PROFINET 可以满足对人员、设备和环境的全面安全概念。借助于故障安全通讯的标准

行规 PROFIsafe, PROFINET 既可用于标准应用, 也可用于故障安全应用, 即使用一个网络满足各种需求。并且, 可自由编程的安全逻辑采用标准工具来简化调试与编程。

#### 4 控制层

本次工程为了降低工程费用, 通过使用高效的工程工具 STEP7, 模块化的组态编程降低维护费用 (采用 MMC 微存储卡, 无需后备电池工程项目可以在 MMC 卡中归档, 简单地更换 MMC 卡即可完成项目替换), 故采用的是西门子 S7-300 型号 PLC。

S7-300 是模块化的 PLC 系统, 采用标准的以太网通讯, 每个控制器可以控制 2048 个 I/O 口, 其中模拟量 I/O 口的数量为 256 个。与上位机通讯采用工业以太网, 通讯速率较高。

表 3: PLC 模块配置

模块	配置说明
电源模块 PS307 (5A)	输出电流 5A, 输出电压 24 VDC
	防短路和开路保护
	连接单相交流系统 (输入电压 120/230 VAC, 50/60Hz)
	可用作负载电源
中央处理模块 CPU315-2DP	集成 PROFIBUS-DP 接口
	I/O 系统采用 ET 200M
数字量输入模板 SM 321	额定输入电压 24 VDC
	16 个输入点, 带隔离, 16 点为一组
	DI 16/24 VDC, 采集现场设备运转及故障
数字量输出模板 SM 322	DO 16/24 VDC/0.5A 控制现场设备停转
	16 个输出点带隔离 1 点为一组
	16 个输出点带隔离 2 点为一组
	额定输入电压 24 VDC
模拟量输入模板 SM 331	AI 8*12 位, 压力温度液位采集信号
	4 通道 8 输入
	被测值精度每组可设定取决于所设定的积分时间
	每个通道组的可选测量方法
模拟量输出模板 SM 332	AO 4*12, 通过 PID 程序调节
	4 通道 4 输出
	每个输出通道可以编程为电压输出或电流输出
通讯处理器 CP343-1	TCP/UDP 连接, 最多 16 个
	S7 连接, 最多 16 个
	PG/OP 连接, 最多 16 个
PROFIBUS 通讯处理器 CP342-5	S7 通讯, 最多 16 个连接
	S5 兼容通讯 (Send/Receive), 最多 16 个连接
	PG/OP 通讯, 最多 16 个
	124 个 DP 从站

#### 5 现场总线

PROFIBUS 是一种国际化、开放式、不依赖于设备生产商的现场总线标准, 是一种用于工厂自动化车间级监控和现场设备层数据通信与控制的现场总线技术。可实现现场设备层到车间级监控的分散式数字控制和现场通信网络, 从而为实现工厂综合自动化和现场设备智能化提供了可行的解决方案。与其它现场总线系统相比, PROFIBUS 的最大优点在于具有稳定的国际标准 EN50170 作保证, 并经实际应用验证具有普遍性。PROFIBUS 由三个兼容部分组成, 即 PROFIBUS-DP (Decentralized Periphery), PROFIBUS-PA (Process Automation), PROFIBUS-FMS (Fieldbus Message Specification)。本控制系统的现场网络层选择 PROFIBUS-DP 现场总线。

PROFIBUS-DP 用于现场层的高速数据传送。主站周期地读取从站的输入信息并周期地向从站发送输出信息。总线循环时间必须要比主站 (PLC) 程序循环时间短。除周期性用户数

据传输外，PROFIBUS-DP 还提供智能化设备所需的非周期性通信以进行组态、诊断和报警处理。

- ①传输技术：RS-485 双绞线、双绞电缆或光缆。波特率从 9.6K bit/s 到 12M bit/s
- ②总线存取：各主站间令牌传递，主站与从站间为主-从传送。支持单主或多主系统。总线上最站点（主-从设备）数为 126
- ③通信：点对点（用户数据传送）或广播（控制指令）。循环主-从用户数据传送和非循环主-主数据传送
- ④运行模式：运行、清除、停止
- ⑤同步：控制指令允许输入和输出同步。同步模式：输出同步；锁定模式：输入同步
- ⑥功能：DP 主站和 DP 从站间的循环用户有数据传送。各 DP 从站的动态激活和可激活。DP 从站组态的检查。强大的诊断功能，三级诊断信息。输入或输出的同步。通过总线给 DP 从站赋予地址。通过部线对 DP 主站（DPM1）进行配置，每 DP 从站的输入和输出数据最大为 246 字节
- ⑦可靠性和保护机制：所有信息的传输按海明距离  $HD=4$  进行。DP 从站带看门狗定时器（Watchdog Timer）。对 DP 从站的输入 / 输出进行存取保护。DP 主站上带可变速器的用户数据传送监视
- ⑧设备类型：第二类 DP 主站（DPM2）是可进行编程、组态、诊断的设备。第一类 DP 主站（DPM1）是中央可编程控制器，如 PLC、PC 等。DP 从站是带二进制值或模拟量输入输出的驱动器、阀门等

## 6 分布式远程 I/O

针对控制室与控制现场的距离大小，在 I/O 模块的选择上有两种方案：如果现场设备和现场传感器分布集中且离控制室很近，那么可以选择直接把信号接到与 CPU 所在的基站的 I/O 模块上；如果生产现场离控制室比较远，或者生产现场环境危险，对 CPU 的安全威胁大，则可采取分布式 I/O 模块。本控制系统就选用的是分布式 I/O 模块 ET 200M。ET 200M 放置在现场传感器和执行器附近，通过 PROFIBUS-DP 现场总线将 ET 200M 与控制室的 CPU 相连，这样也可以大大节约电缆等材料。

ET 200M 分布式 I/O 站主要由以下几部分组成：

- (1) DIN 安装轨道
- (2) BM 总线模版
- (3) IM153 通信接口模块
- (4) 高可靠的 I/O 信号接口模块

由于 ET 200M 分布式 I/O 站的 IM153-2 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版的机架上，有源总线模版具有“插入/取出”特点，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插拔更换。

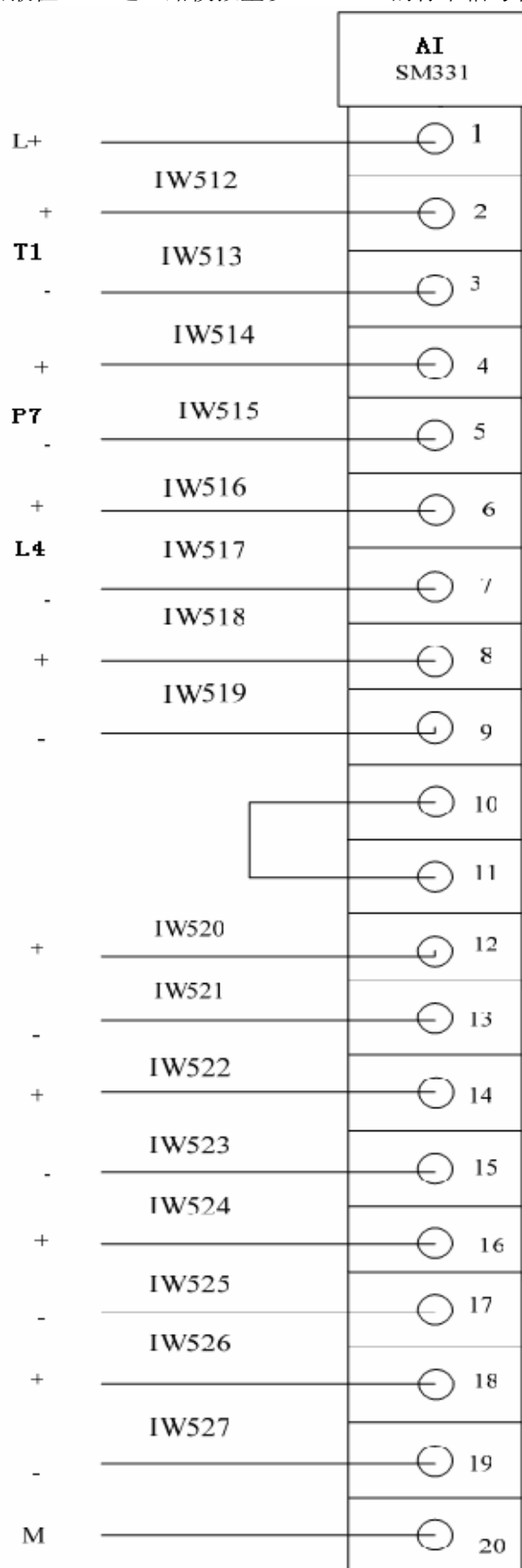
### 6.1 模块说明

表 4: ET 200M 中模块选型

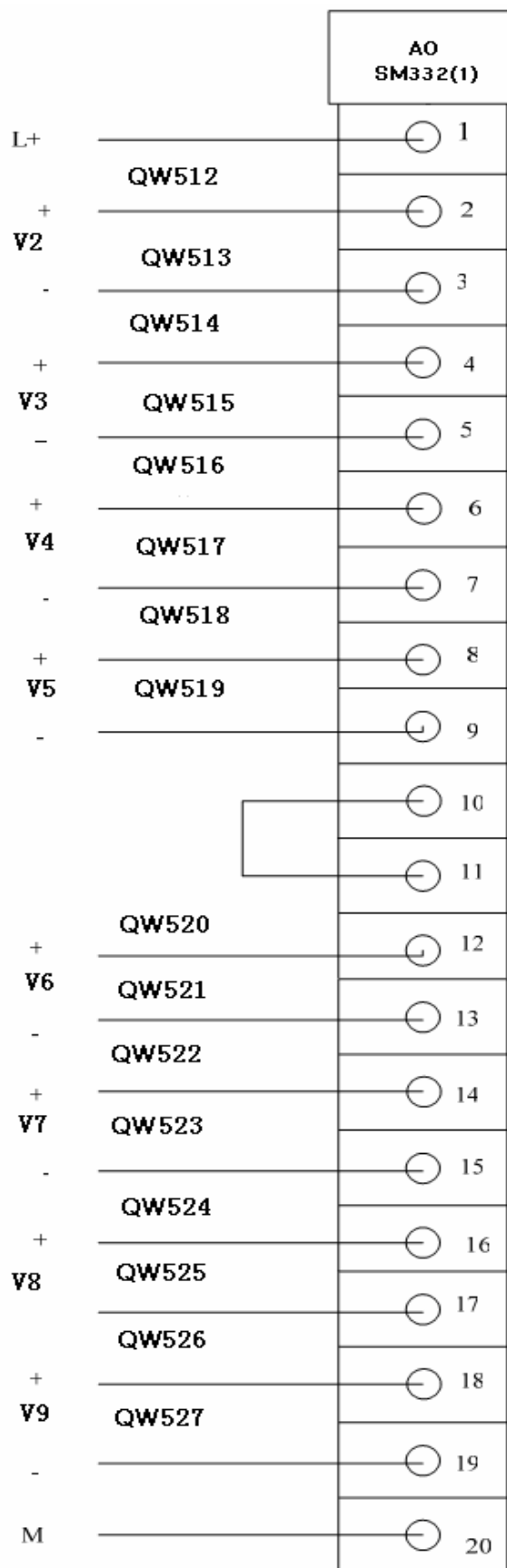
模块/型号	数量	说明
IM153-2 接口模块	2	与 PROFIBUS-DP 连接
模拟量输入模块 SM 331	1	用于采集变送器送来温度、压力、液位信号 8 路模拟量输入（4~20mA） DC24V
模拟量输出模块 SM 332	2	用于控制阀门及电机的状态 8 路模拟量输出（4~20mA） DC24V
数字量输出模块 SM322	1	用于控制泵、电机和指示灯的开关状态 16 路开关量输出（0~24V）

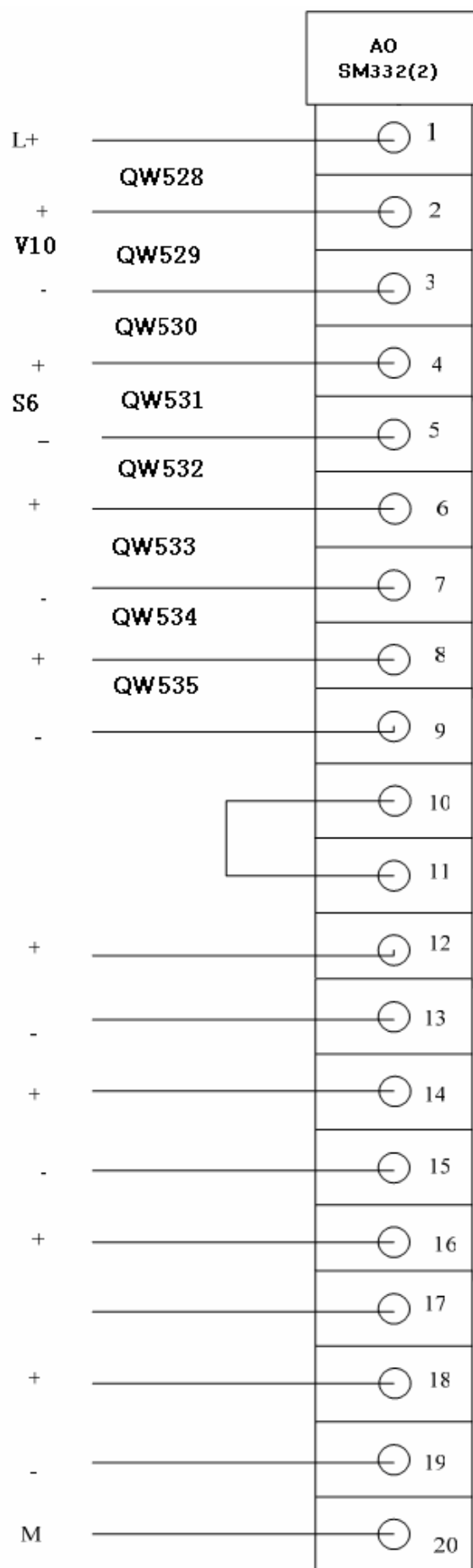
### 6.2 I/O 模块连接图

(1) AI 模块选用 SM331 型的模拟量输入板卡 1 块, 负责接受 3 个模拟量: 反应温度 T1、反应压力 P7、反应器液位 L4。这 3 路模拟量以 4~20mA 的标准信号输入。

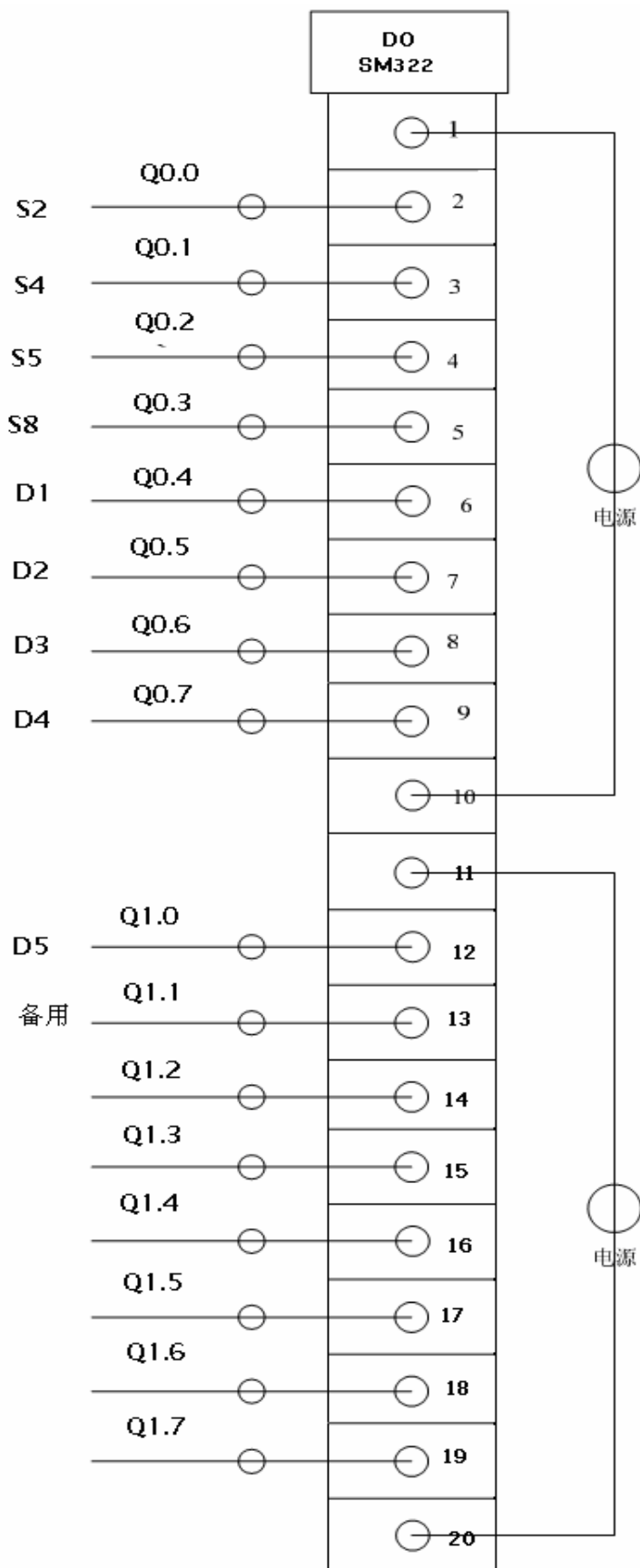


(2) A0 模块选用 SM332 型的模拟量输出板卡 2 块, 负责输出 10 个模拟量: 阀门 V2、V3、V4、V5、V6、V7、V8、V9、V10 及夹套蒸汽加热阀 S6 的开度。模拟量以 4~20mA 的标准信号输出。





(3) DO 模块选用 SM322 型的开关量输出板卡 1 块, 负责输出 9 个开关量: 泵 S2、S4、S5, 搅拌电机 S8, 升温速率报警灯 D1、反应釜液位报警灯 D2、压力超过 0.8Mpa 报警灯 D3、压力超过 1.2Mpa 报警灯 D4、压力超过 1.6Mpa 报警灯 D5。并以 0~24V 标准信号输出。



## 7 现场设备

### 7.1 阀门的选择

气动调节阀在过程控制工业中的使用最为广泛，气动执行器具有结构简单，动作可靠，性能稳定，维修方便，价格便宜，适用于防火防爆场合等特点，它不仅能与 QDZ 仪表配用，而且通过电—气转换器或阀门定位器与 DDZ 仪表配用。所以，它广泛应用于石油、化工、冶金、电力、轻纺等工业部门，尤其适用于易燃易爆等生产场合。

#### (1) 选择合适的流量特性

依据流量特性可分为线形型，等百分比型（对数）型，快开型和抛物线型等。在具体选择调节阀的流量特性时，根据被控过程特性来选择调节阀的工作流量特性，其目的是使系统的开环放大系数为定值。若过程特性为线性时，可选用线性流量特性的调节阀；若过程特性为非线性，应选用对数流量特性的调节阀。

在过程控制系统的工程设计中，既要解决理想流量特性的选取。也要考虑阻力比 S 值的选取： $S = \Delta P / \Sigma \Delta P$ （其中， $\Delta P$  为系统总压差， $\Sigma \Delta P$  是阀、全部工艺设备和管路系统上的各压差之和）。当  $S > 1$ ，比较接近 1 时，可以认为理想特性与工作特性的曲线形状相近，此时工作特性选什么类型，理想特性就选相同的类型；当  $S < 6$  时候，理想特性有显著变化。调节阀流量特性无论是线性的或对数的，均应选择对数的理想流量特性。

被控对象可以分为流量、液位、温度、压力四个部分，根据不同对象的不同特性，采用不同的控制方法。流量、液位、压力滞后时间小响应快，线形控制，一发生变化阀门马上要响应，温度响应较慢，需要用加入微分特性。

#### (2) 选择合适的调节阀开/关形式

进料调节阀一般选用气开式，这样，在事故状态下调节阀关闭，停止进料，以减少原料损耗；而出口调节阀选用气关式，在事故状态下使调节阀全开，保证系统的安全。冷却水调节阀采用气关式，一旦事故发生，可保证温度过高状态下调节阀处于全开位置，排除爆炸危险。

#### (3) 选择合适的调节特性

蝶阀的特点：流体阻力小，全开时，阀座通道有效流通面积较大，因而流体阻力较小，适用于大口径的阀门。价格比较便宜，出于成本考虑在上料阀选择蝶阀。

ZJHP 气动单座调节阀，流通能力强，公压较高，其余阀门选择 ZJHP 气动单座调节阀。

表5：各阀门的选型

阀门及名称	类型	气开气关	流量特性	阀门直径	安装方式	输入输出
B 物料上料阀 V2	气动调节蝶阀	气开式	线性	Dg40	法兰	A0
A 物料上料阀 V3	气动调节蝶阀	气开式	线性	Dg40	法兰	A0
A 物料下料阀 V4	ZJHP 气动单座调节阀	气开式	线性	Dg40	法兰	A0
B 物料下料阀 V5 (V5 又做放空阀)	ZJHP 气动单座调节阀	气开式	线性	Dg40	法兰	A0
C 物料下料阀 V6	ZJHP 气动单座调节阀	气开式	线性	Dg40	法兰	A0
蛇管冷却水阀门 V7	ZJHP 气动单座调节阀	气关式	等百分比	Dg50	法兰	A0
夹套冷却水阀门 V8	ZJHP 气动单座调节阀	气关式	等百分比	Dg65	法兰	A0
出料阀 V9	ZJHP 气动单座调节阀	气关式	线性	Dg70	法兰	D0
高压水阀门 V10	ZJHP 气动单座调节阀	气关式	等百分比	Dg65	法兰	A0
B 物料上料泵 S2	开关阀					D0
A 物料上料泵 S4	开关阀					D0
出料泵 S5	开关阀	气关式				D0
夹套蒸汽加热阀 S6	调节阀	气开式	等百分比			A0
反应釜搅拌电机 S8	开关阀	气开式				D0

## 7.2 变送器的选择

表6: 变送器的选型

变送器类型	性能说明	
温度变送器TT	采用西门子SITRANS T 温度变送器	
	适用于此对温度精度要求较高场合	
	选择形式: Pt25 ~Pt500	
	测量范围: -200℃~+ 850℃	
	最小量程: 10	
压力变送器PT	数字精度: 0.1度	
	选用反应釜压力变送器: 西门子SITRANS P COMPACT	
	适用于压力较高场合, 安全性能较出色	
	量程: 0~40Bar	
	膜片材质: 不锈钢	
液位变送器LT	输出: 4~20mA模拟信号	
	被测介质的温度: 最大200℃	
	精度: 0.2%	
	西门子 超声波xps-10 标准液位传感器	
	量程: 0.3~10	
流量变送器FT	电缆: 双绞/编织金属屏蔽, 0.5mm <sup>2</sup> (20AWG) PVC 护套	
	距离: 365米	
	两线制信号传输	
	夹套内冷却水 流量变送器	采用西门子 SITRANS FC MASSFLO DN65
		流量量程: 0~87000Kg/h
		连接方式: 法兰
		材质: 不锈钢
		液体温度: -50℃~+180℃
		防爆型: EEx ia IICT3-T6
	信号转换器规格: MASS 6000	
	蛇管内冷却水 流量变送器	采用西门子 SITRANS FC MASSFLO DI40
		流量量程: 0~52000Kg/h
连接方式: 法兰		
材质: 不锈钢		
液体温度: -50℃~+180℃		
防爆型: EEx ia IICT3-T6		
信号转换器规格: MASS 6000		

## 三 控制方案

在明确了控制要求并且确定了被控量之后, 同时深入分析了各个被控量的影响因素、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, 设计了一套完备合理的控制方案, 并画出了控制方案的总体 P&ID 图 (见附录 1)。

### (一) 反应升温速度控制单元

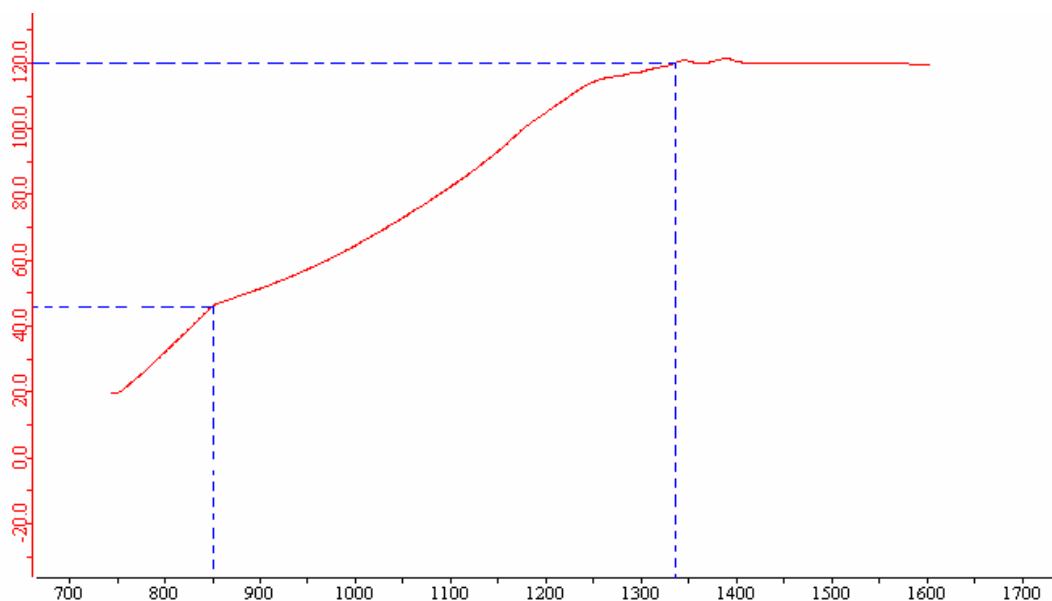
#### 1 控制要求

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 控制方案设计



温度是各种矛盾的焦点，温度基本能够体现反应质量情况。该缩合反应先要预先加热来诱发反应，然后依靠反应自身放出的热量来持续升温。这个过程有三个重要的动态环节：反应器内的热容量；反应器壁的热容量；夹套内冷却液的热容量。

温度动态特性：(1) 惯性大，容量滞后大，时间常数有的过程达到十几分钟，由于温度滞后大，控制起来不灵敏 (2) 温度对象通常是多容的 (3) 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。

看了上面的温度曲线图，我们将本反应阶段（常温~120℃）设计分两个阶段的控制，即预热阶段（常温~45℃）和升温阶段（65℃~120℃）

### 2.1 阶段一（预热阶段）

**过程分析：**本缩合反应开始后，先适当打开夹套蒸汽加热阀 S6，对反应进行预热，观察反应釜内温度 T1 逐渐上升。注意加热量的调节应使温度上升速度在 0.1~0.2℃/s 以内。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。

**动力学特性：**本阶段如果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。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。

**总设计思想：**单独设计一个控制单元来控制此预热阶段。

#### 2.1.1 控制系统

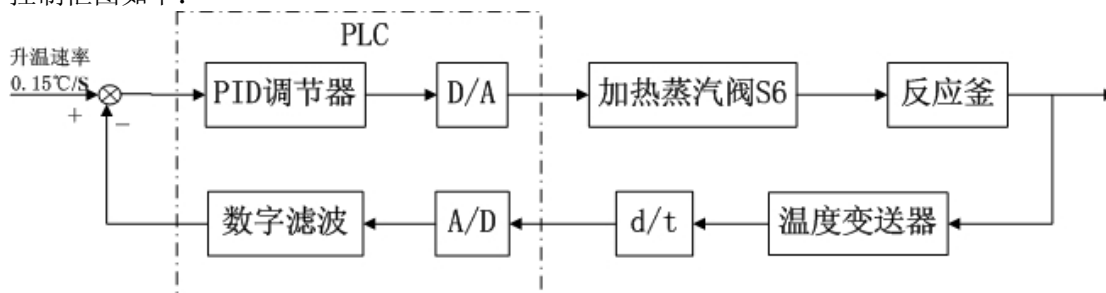
本阶段控制采用单回路控制系统

被控量：反应器内温度 T1

操控量：夹套加热蒸汽阀 S6 的开度

#### 2.1.2 控制系统框图

预热阶段直接用 PLC 中的 PID 模块实现，并且 PLC 的 PID 模块比较容易实现本控制。控制框图如下：



### 2.1.3 PID 控制 PLC 梯形图 (见附录 2)

## 2.2 阶段二 (升温阶段)

**过程分析:** 经过预热阶段, 反应此时已被深度诱发, 并逐渐靠自身反应的放热效应不断加快反应速度, 进入升温阶段。要控制反应釜温度 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。反应预计在 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, 这一阶段既要大胆升压, 又要谨慎小心防止超压。

**动力学特性:** 本反应属于放热反应, 属于非自衡过程。当反应温度过高时, 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, 则反应温度进一步升高。这种“正反馈”将导致爆炸事故。由于反应的强烈放热效应, 系统不仅具有滞后特点, 而且参数处于时变和非线性状态, 控制模型很难得到。

**总设计思想:** 采用简单的 PID 控制不能得到很好的控制, 因此必须采用不基于系统模型的模糊控制算法。同时考虑到升温阶段压力的因素, 这里采用了串级控制, 用压力辅助控制温度。并且采用串级控制, 能够提前感受到扰动的影 响, 提前产生控制作用, 克服反应釜的滞后, 提高控制的精度。

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。容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。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。

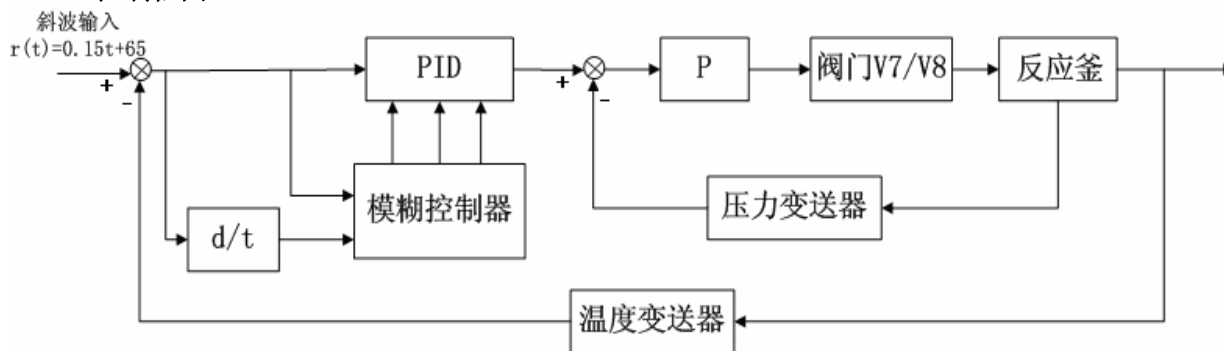
### 2.2.1 控制系统

本阶段控制采用温度—压力串级控制系统

被控量: 反应器内温度 T1

操控量: 夹套冷却水阀门 V8 开度, 蛇管冷却水阀门 V7 开度

### 2.2.2 控制框图



### 2.2.3 控制算法

控制器的选择

主控制器: 模糊自适应 PID 控制器      副控制器: P 控制器

主控制器用自适应模糊 PID 控制器; 副调节器参数的设置是为了保证主参数的控制质量, 可以在一定范围内变化, 因此副调节器只要选 P 控制规律即可, 一般不引入积分控制规律 (若采用积分控制规律, 会延长控制过程, 减弱副回路的快速作用), 也不引入微分控制规律 (因为副回路本身起着快速作用, 再引入微分规律会使调节阀动作过大, 对控制不利)。主控制器用自适应模糊 PID 算法, 传统增量式 PID 控制器离散形式:

$$\Delta y(k) = y(k) - y(k-1) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$$

式中,  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  分别为比例、积分和微分系数;  $y(k)$  为控制器的输出。

自校正模糊 PID 控制器是在传统 PID 控制器的基础上, 在运行过程中, 每一步都要根据  $e(k)$  和  $\Delta e(k)$  来查询模糊控制规则, 计算一次  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  然后计算  $y(k)$ 。成对 PID 参数的在线自校正, 从而使系统具有良好的动、静态性能。

### 2.2.4 模糊控制器的设计

(1) 模糊控制器的输入输出

模糊控制器的输入变量：设定值与实测温度的偏差  $e(k) = r(k) - y(k)$

温度偏差变化率  $ec = e(k) - e(k-1)$

模糊控制器的输出变量： $\Delta K_p$ ,  $\Delta K_i$ ,  $\Delta K_d$

为跟踪温度曲线，我们给斜波输入  $r(t) = 0.15t + 65$ （近似温度曲线为线性的）作为温度输入设定值。考虑到两个因素：假定温度爬升曲线的斜率为 0.15，控制的初始温度为 65℃，因为按要求 65℃才开始对阀门 V7/V8 调节，并且温度低于 60℃时开启冷却阀门会在出水口有结晶现象，从而影响产率。

(2) 模糊化过程

(a) 输入输出的论域及对应的模糊子集：

$e$ 、 $ec$ 、 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  量化论域取  $[-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]$

$e$ 、 $ec$ 、 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  对应的模糊语言值[NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB]

(b) 隶属度函数：

通常情况下，我们取三角型的隶属度函数，故  $e$ 、 $ec$ 、 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的隶属度均如下图所示：

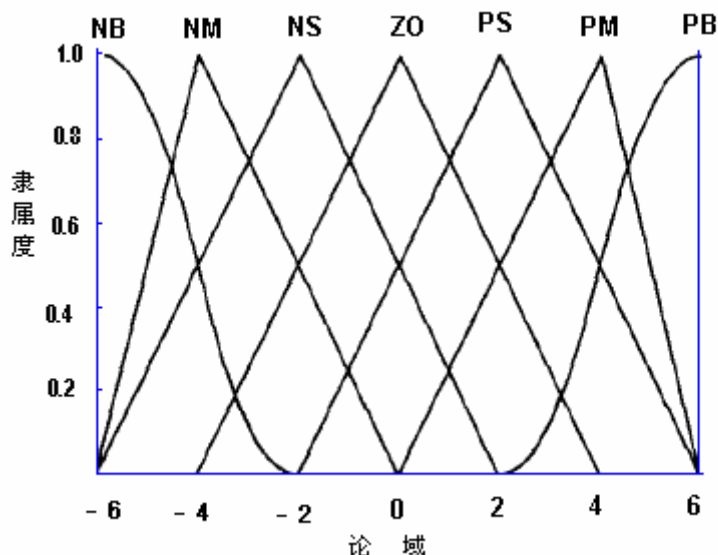


表 7:  $e$ ,  $ec$ ,  $\Delta K_p$ ,  $\Delta K_i$ ,  $\Delta K_d$  的隶属度表

	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
NB	1	0.9	0.5	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NM	0	0.5	1	0.75	0.5	0.25	0	0	0	0	0	0	0
NS	0	0.25	0.5	0.75	1	0.75	0.5	0.25	0	0	0	0	0
ZO	0	0	0	0.25	0.5	0.75	1	0.75	0.5	0.25	0	0	0
PS	0	0	0	0	0	0.25	0.5	0.75	1	0.75	0.5	0.25	0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0.5	0.75	1	0.5	0
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.5	0.9	1

(3) 模糊推理

从系统的稳定性、响应速度、超调量和稳态精度等各方面来考虑， $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的作用如下：(a) 比例系数  $K_p$  的作用是加快系统的响应速度，提高系统的调节精度。 $K_p$  越大，系统的响应速度越快，系统的调节精度越高，但易产生超调，甚至会导致系统不稳定；(b) 积分作用系数  $K_i$  的作用是消除系统的稳态误差。 $K_i$  越大，系统的静态误差消除越快。但  $K_i$  过大，在响应过程的初期会产生积分饱和现象，从而引起响应过程的较大超调；(c) 微分作用系数  $K_d$  的作用是改善系统的动态特性，其作用主要是在响应过程中抑制偏差向任何方向的

变化，对偏差变化进行提前预报。但  $K_d$  过大，会使响应过程提前制动，从而延长调节时间，而且会降低系统的抗干扰性能。

针对不同的  $e$  和  $ec$ ， $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的整定原则如下：(a) 当  $|e|$  较大时，为使系统具有较好的跟踪性能，应取较大的  $K_p$  与较小的  $K_d$ ，同时为避免系统响应出现较大的超调，应对积分作用加以限制，通常取  $K_i=0$ ；(b) 当  $|e|$  和  $|ec|$  中等大小时，为使系统具有较小的超调， $K_p$  取值应当小一些，在这种情况下， $K_d$  的取值对系统的影响较大，应取的小一些， $K_i$  的取值要适当；(c) 当  $|e|$  较小时，为使系统具有较好的稳定性， $K_p$  和  $K_i$  均应取大些，同时为避免系统在设定值时出现振荡，并考虑系统抗干扰性能，当  $|ec|$  较大时， $K_d$  可取的小些； $|ec|$  较小时， $K_d$  可取的较大些，通常  $K_d$  为中等大小。 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的模糊规则表如下：

$\Delta K_p$  的模糊校正规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

$\Delta K_i$  的模糊校正规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO	
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

$\Delta K_D$  的模糊校正规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

(4) 解模糊

模糊推理后得到的输出量 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ 是个模糊子集，它反映了控制语言规则的不同取值的一种集合。而被控对象只能接受一个确切的控制信号，因此把决策值转换成相应的精确量，称为模糊判决或解模糊。常用的模糊判决方法有最大隶属度法、加权平均法、取中位法和重心法等。本设计采用最大隶属度法，其特点是计算简单。具体做法是把待判决的模糊子集中隶属度最大的那个元素作为判决结果。

模糊关系矩阵 R 是一个庞大的矩阵，而 PLC 控制系统难以完成这么大量的实时矩阵运算，并且严重影响控制速度。但是，我们可以事先把模糊关系矩阵 R 离线计算好，写成模糊控制表。在实际使用时，只要根据输入量查表就可得精确的输出控制量，这种方法简单易行。

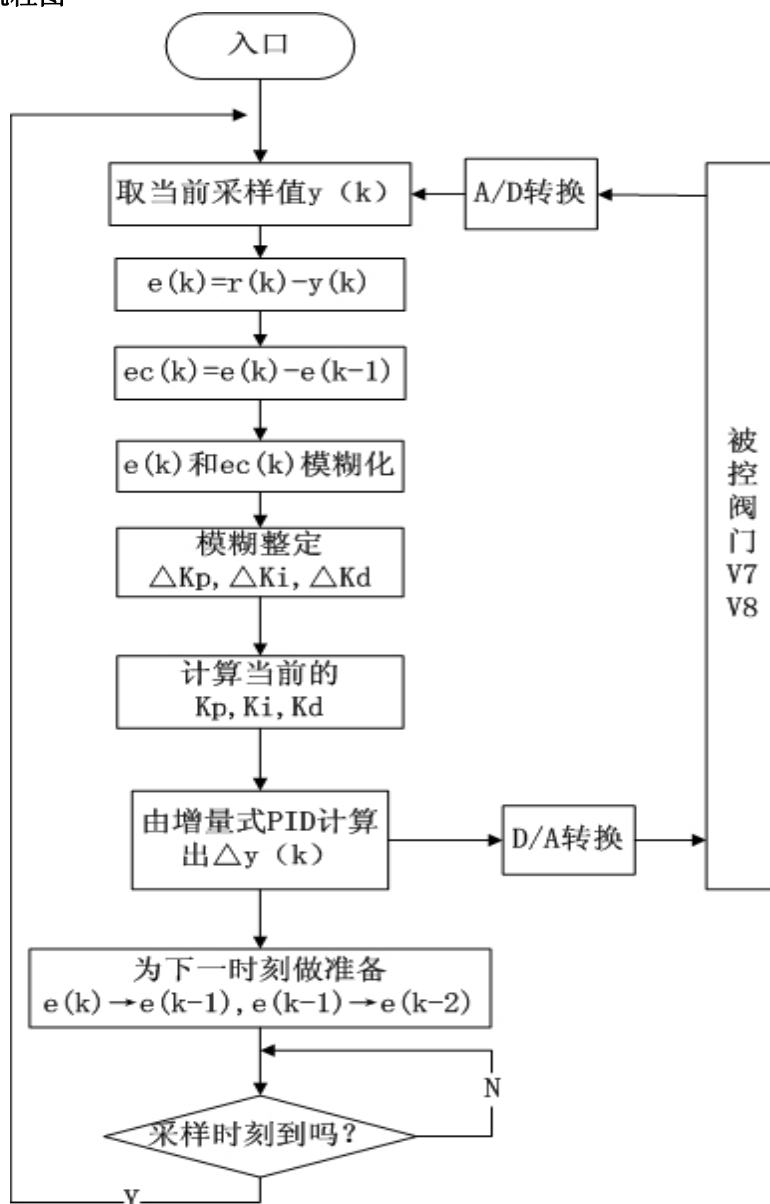
模糊控制器根据采样得到的输入量进行模糊判决，得到的控制量属于模糊集合量化论域。这个结果还不能直接作用于被控对象，还必须乘上一个适当的比例因子，才能把它转换到控制对象所能接受的基本论域中去。如： $\Delta K_p$ 的基本论域是 $[-U, U]$ ，其量化论域 $[-6, 6]$ ，比例因子 $\alpha = U / 6$ ，那么实际的控制输出量 =  $\alpha \times$ 量化值。

经过模糊控制器输出的 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ 是个增量值，在线修正 PID 参数：

$$K_p = K_p' + \Delta K_p, \quad K_i = K_i' + \Delta K_i, \quad K_d = K_d' + \Delta K_d$$

其中  $K_p'$ 、 $K_i'$ 、 $K_d'$  是原始的 PID 参数。

2.2.5 软件流程图



## (二) 反应保温温度控制

### 1 控制要求

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℃左右或压力维持再 0.69MPa 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。

### 2 控制方案设计

**过程分析：**缩合反应经过预热阶段、升温阶段，最后升温到 120℃。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 120℃5~10 分钟。

**动力学特性：**对于此类反应釜，由于容量大、热效应强，而传热效果不理想，因此，要克服这类反应器滞后特性，提高对反应温度的控制精度，采用一般单回路控制难以满足工艺要求。

**总设计思想：**根据压力与温度的变化的规律可知，压力变化超前于温度的变化，一般可采用温度—压力串级控制系统。而本阶段控制中对温度控制的精度要求较高，且温度控制存在着较大的滞后性，故采用压力测量去补偿温度测量的方法。补偿后的控制质量可比一般的串级控制效果要好。

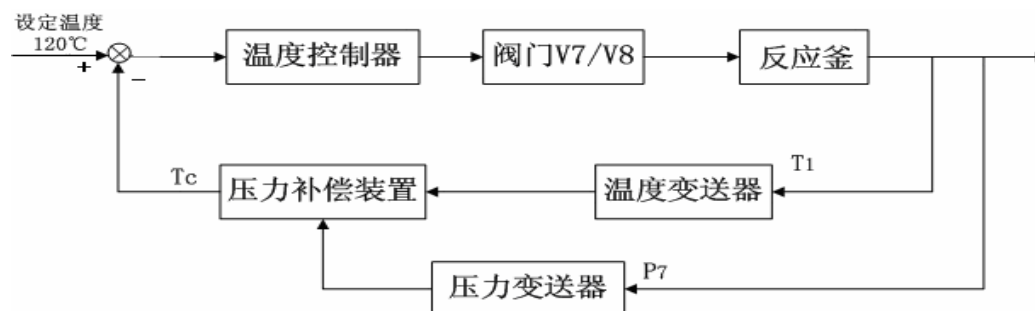
#### 2.1 控制系统

本控制阶段采用压力补偿温度控制系统

被控量：反应器内温度 T1

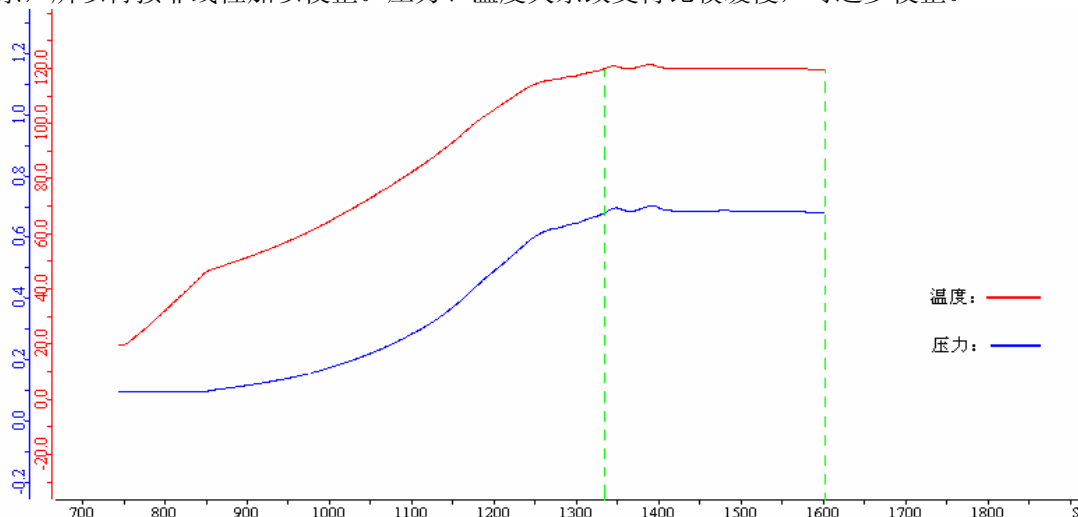
操控量：夹套冷却水阀门 V8 开度，蛇管冷却水阀门 V7 开度

#### 2.2 控制框图

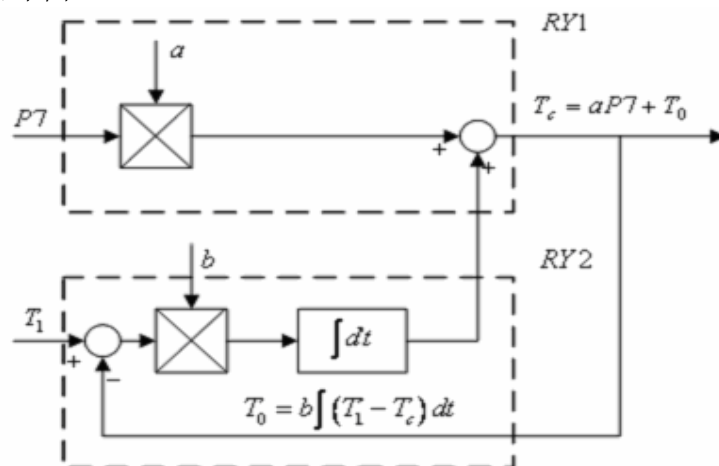


#### 2.3 控制算法

压力补偿校正的思路是这样的：首先我们从下图中 120℃恒温阶段（绿线之间）可以看到，温度与压力貌似具有线性关系，根据压力算出对应的温度值。实际上两者存在非线性关系，所以再按非线性加以校正。压力、温度关系改变得比较缓慢，可逐步校正。



控制框图中的温度控制器可以用简单的 PID 控制器（为了提高控制精度也可以用模糊 PID 控制器），引入补偿后的温度作为控制器的温度测量信号。采用反应器内压力测量信号去补偿温度的测量，控制系统的温度测量  $T_c$  信号不是反应器内温度测量值，而是经过釜压校正后的值。校正的计算装置由 RY1 和 RY2 两个运算装置组成。RY1 是计算温度的，其运算式为： $T_c = aP7 + T_0$ ，RY2 是校正计算值用的，其运算式为： $T_0 = b \int (T_1 - T_c) dt$ ，压力补偿的计算框图如下图：



### (三) 主产物产率控制

#### 1 控制要求

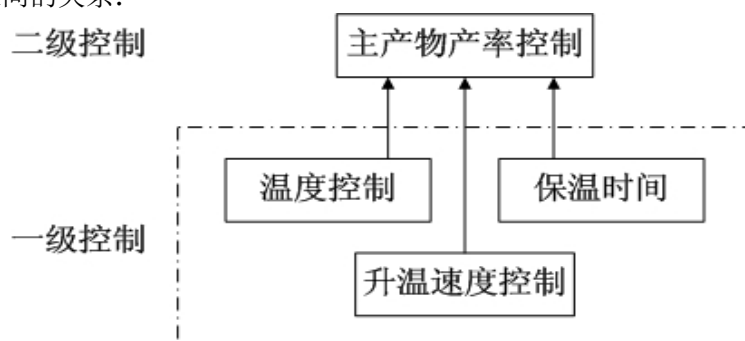
为得到一定的转化率的产品，要求对反应器最终产物的产率进行控制。注意，产率无法在线采集。反应主产物 D 的产率主要受到升温速度、保温时间与温度的影响。

#### 2 控制方案设计

**过程分析：**产率控制是贯穿在整个生产过程中的，且产率无法在线采集。

**动力学特性：**对主产物的产率进行控制，目的在于获得一定的转化率。而影响主产物的产率的因素很多，包括温度、压力、停留时间等。显然本产率控制系统是典型的大滞后，非线性，随机干扰，多变量强耦合的复杂系统。

**总设计思想：**从升温速度、保温时间与温度对产率的影响来设计产率控制。如下图我们可以看到它们之间的关系：



一级控制是主要的控制阶段，升温速度控制、温度控制和保温时间效果直接影响着二级产率控制的效果。设计的主要目标是减少副产物的生成，提高主产物的产率，因此我们在做好一级控制的同时，要考虑此缩合反应影响产率的几个因素：

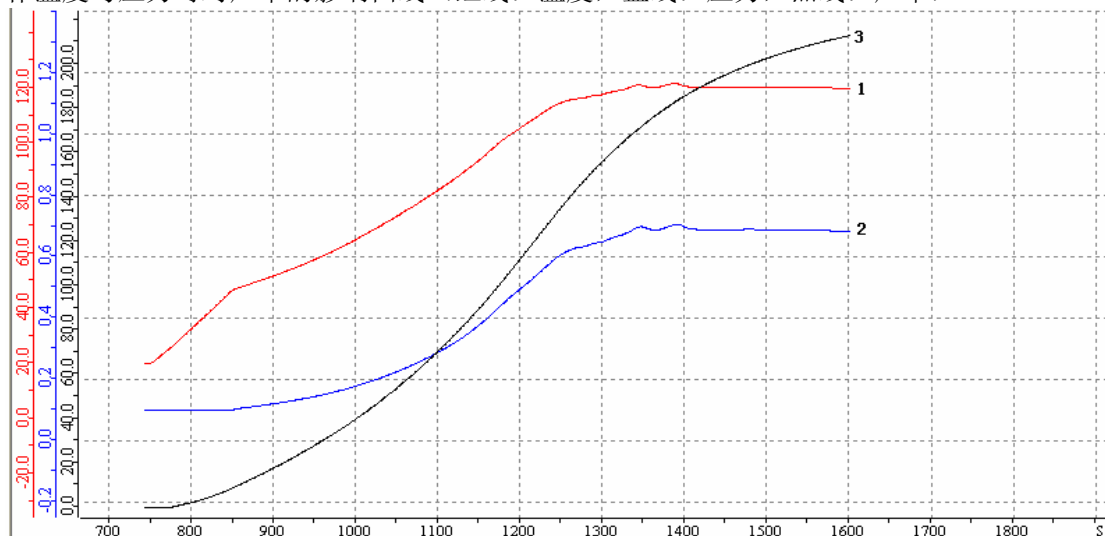
(1) 首先；在开启 V7 和 V8 时，夹套冷却管和蛇管冷却管出口温度不能低于 60℃。（副产物会在低于 60℃ 的冷却管出口处结晶）我们在升温阶段的开车流程中用软件程序的方法严格保障了这一点，只有判定温度超过 65℃ 才开启 V7 和 V8。

(2) 反应釜的温度在 90℃ 以上（90℃ 以下，副反应起主导作用，90℃ 以上，主反应起主导作用）。对于这部分的控制，我们通过 65~95℃ 细分模糊控制规则来实现：在 60~90℃ 之间大胆升温（升温速率可在 0.15℃/S 或 0.2℃/S），保障尽快让主反应起作用；但是过了 95℃，

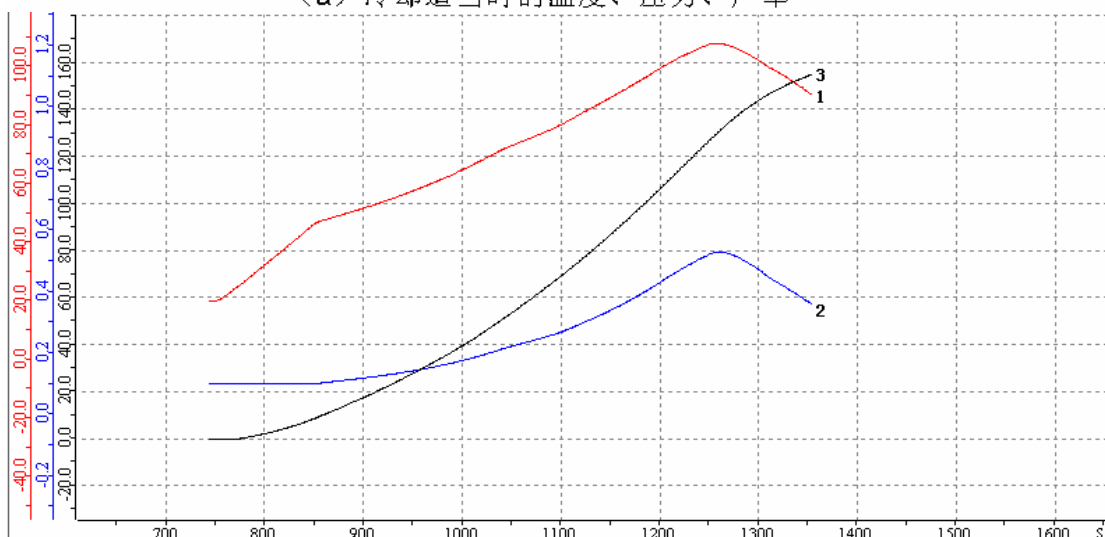
为保障系统的平稳安全反应，就要谨慎升温(升温速率在  $0.1^{\circ}\text{C}/\text{S}$ )。

(3) 保温时间要充分长，以使反应充分而达到较高的产率；所以，就要在恒温阶段尽量做好保温并按要求维持 10 分钟。

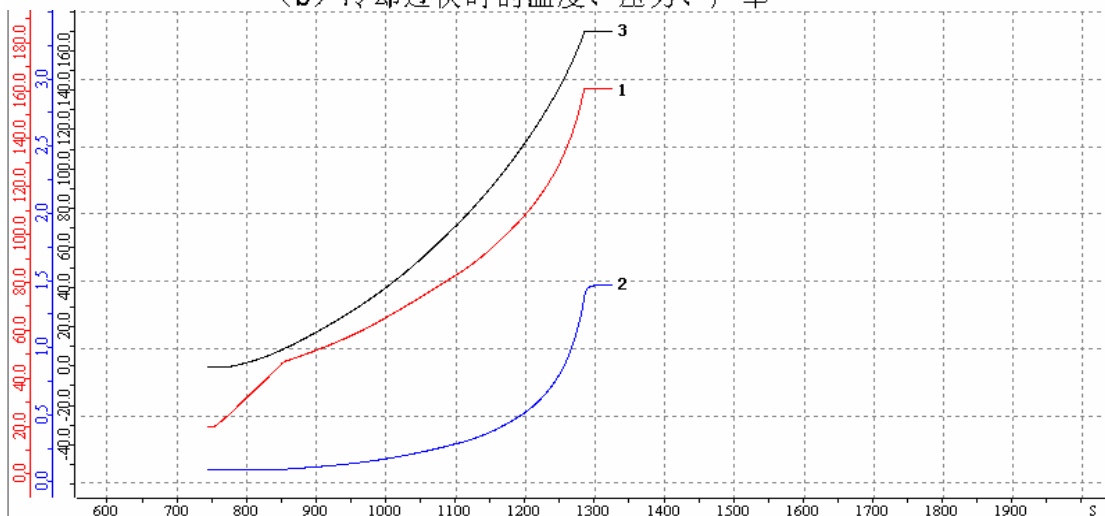
(4) 同时适当的冷却时的温度压力也会对产率有影响，下图给出了缩合反应阶段冷却量操作温度与压力时对产率的影响曲线(红线：温度，蓝线：压力，黑线：产率)



(a) 冷却适当时的温度、压力、产率



(b) 冷却过快时的温度、压力、产率



(c) 冷却过缓时的温度、压力、产率

从图中我们可以看出在升温阶段到保温阶段适当的冷却对压力和温度起到至关重要的作用，进一步影响产率。

#### (四) 反应器压力安全控制

##### 1 控制要求

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。

##### 2 控制方案设计

**动力学特性：**压力并不是我们的直接数值上的被控量，虽然压力很重要，压力不像温度一样，在整个升温阶段和保温阶段我们都把温度作为被控量；当然，压力要检测，实质上压力和温度是一回事，压力和温度的变化趋势是一样的，只不过压力比温度变化要敏感或明显。

**总设计思想：**所以，当压力不超限时，不针对压力值进行调控，以保证温度性能指标为准则进行控制。升温阶段我们通过温度—压力串级控制单元，已经实现了压力的监测和控制。保温阶段我们通过压力补偿的办法也实现了温度压力的控制。但是，一旦压力超限，就要有专门的压力控制单元了，进入压力控制单元并进行紧急报警，然后通过程序实现紧急控制(或由工作人员手动操作)。下面的压力控制单元是在升温阶段和保温阶段当压力超限后，设计的压力控制单元。

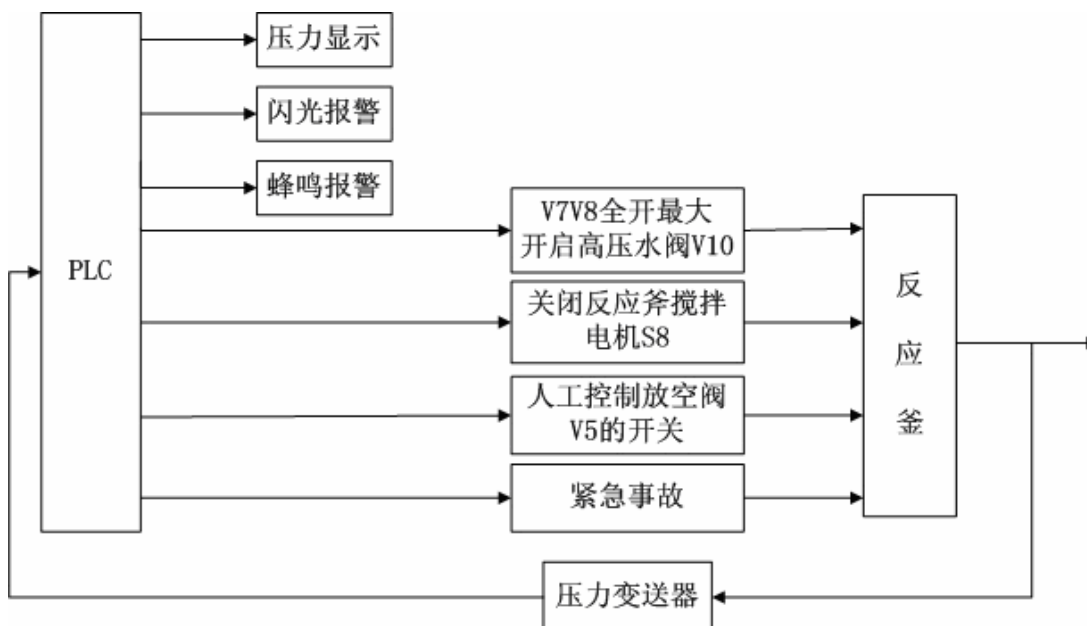
##### 2.1 控制系统

本控制阶段采用单回路控制系统

被控量：反应器内压力 P7

操控量：夹套冷却水阀门 V8 开度，蛇管冷却水阀门 V7 开度，高压冷却水阀 v10 开度，反应器搅拌电机 S8 开关

##### 2.2 控制框图



##### 2.3 方案流程图

###### (1) 超压流程描述

当压力超过 0.8MPa，温度超过 128℃时候，由高选选择器选择进入超压控制，温度控制不起作用，具体控制过程分一下三个阶段，对应三个子程序：

第一个阶段（压力超过 0.8MPa）：当 P7 上升过快时候，V7 和 V8 开大，同时打开高压水阀门 V10。这么做的原因是为了减少一个微分器，多一个硬件会多一个故障，同时做以上步骤可以减少硬件差错和成本，本身两者不互相影响。当压力小于 0.8MPa 时候，进入正常温度控制单元。



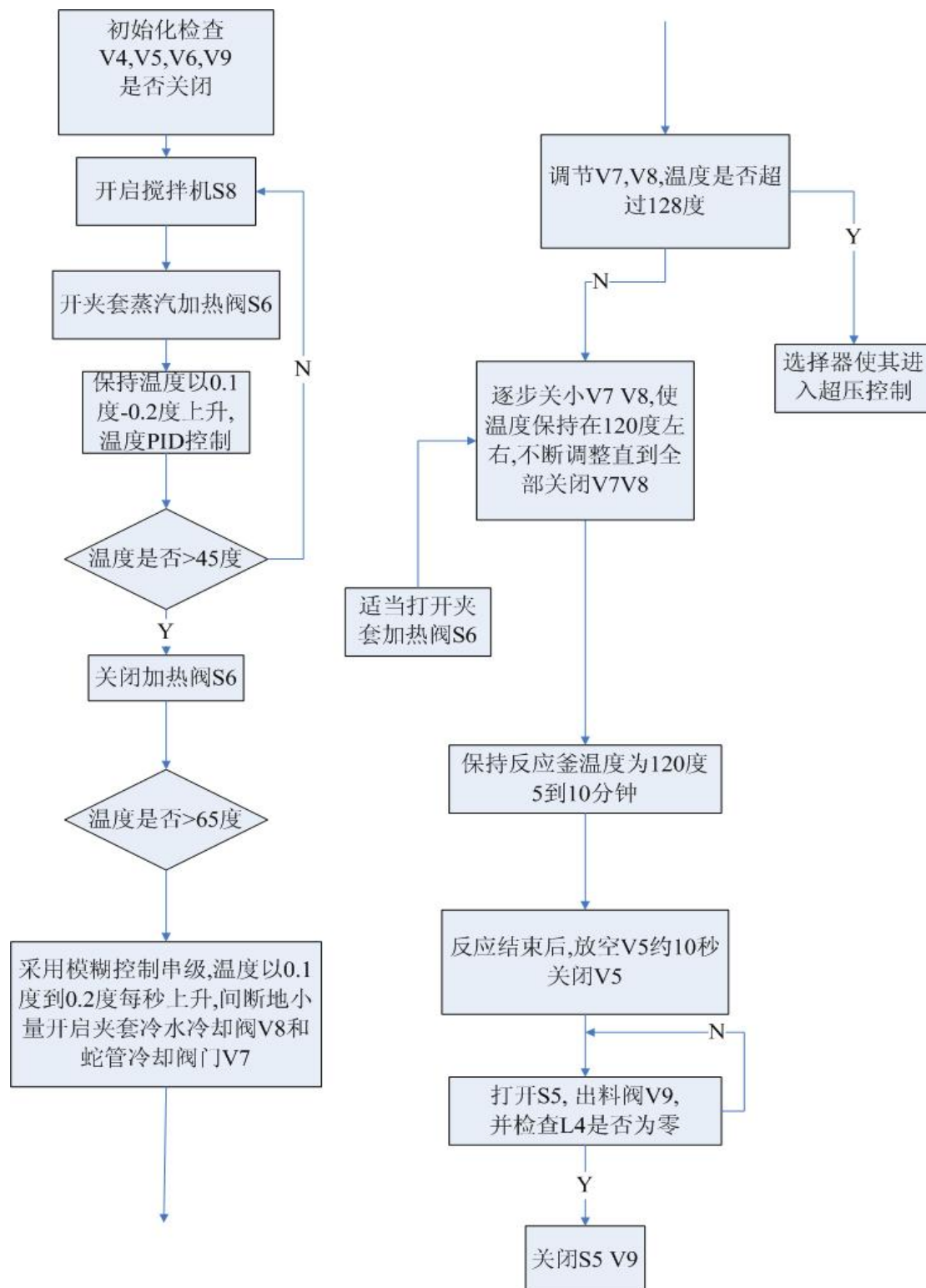
## 2.4 超压控制 PLC 梯形图（见附录 3）

### （五）升温、保温、出料、清洗顺序控制

#### 1 控制要求

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



## 四 平稳安全生产

### 1 PLC 冗余结构

在本控制系统的设计过程中,为考虑安全平稳生产,控制器 PLC 选用 1:1 冗余方式:即用 2 个完全相同的控制器,其中一个作为主控制器承担全部监视控制任务,另一个备用。在主控制器故障情况下,无须人工干预即可自动切换至备用控制器工作,使整个系统不会发生停滞。

本设计的控制器主要由西门子的 S7-300 PLC 来担当,基于冗余设计,PLC 控制系统包括两个 S7-300,A 站和 B 站每个站都含有一个 CPU315-2DP,与一般 S7-300 PLC CPU 所不同的是:它除了具有一个用于编程和与其它 PLC 或 OP 进行 MPI 通讯的接口外,还有一个 PROFIBUS-DP 主/从接口,作为 DP 主站,通过 CP342-5 通讯处理器,A 站和 B 站被连接到 PROFIBUS 网络上而互相交换信息。分散式 I/O 装置 ET 200M 上的两个 IM153-2 DP 从站分别连接到 A 站和 B 站的 CPU315-2DP 上,这样,即使其中的一个 DP 站出现故障时,也能从一个站切换到另一个站,从而,确保系统的可靠运行。

在本系统中,为了防止由于 PS 电源出现异常而导致主站故障,我们在每个主站都选了一个 PS 电源模块,以保证系统达到冗余效果(如果要在 ET200M 上分别为两个 IM153-2 提供电源模块,则系统可靠性更高)。

### 2 采用 UPS 供电

本间歇式缩合反应工艺流程复杂,生产过程高温高压,物料有毒有害、易燃易爆,由于供电量大且集中,企业内部往往形成相对独立的 6~35kV 企业配电网,其供电系统网络复杂,电力负荷密度大,供电可靠性要求高,如果使用环境由于污染、腐蚀而较为恶劣。则该带搅拌釜式反应器的配电系统就易受雷击、绝缘破坏、大容量负荷合闸冲击的影响而发生电网电源的波动、脉冲干扰和瞬时中断等现象,致使生产装置的控制系统、仪表设备所要求的电源高可靠性和不间断性得不到满足,导致化工生产波动甚至停车,由此造成重要设备损坏、环境污染甚至人身伤亡,对企业的安全生产构成严重威胁。

不间断电源简称 UPS,UPS 作为电网与用电设备的接口,保证电源供应的连续性和可靠性,能有效地消除以上各种电源扰动和短时停电带来的影响,它已逐渐成为化工生产装置中过程控制、现场仪表、通讯设备的标准电源。

综合考虑多重因素,我们为本控制系统 UPS 供电的选择提出了如下方案:(1)本控制系统负载比较集中且电力线布线较方便,可考虑采用集中式供电方式。(2)本设计方案中采用了 PLC 冗余方式工作,则对每个冗余单元系统宜单独分开供电或采用冗余并联供电。(3)采用双路供电可大大提高系统的可靠性。在有双路供电的场合,宜采用旁路功能的 UPS。如果在 UPS 输入前级具备双路电源自动切换装置,可提高系统的可靠性。(4)因本反应釜是间歇反应过程,没必要采用 UPS 的多机并联方式供电。但对于化工生产中,工艺控制系统、重要单机设备或关键仪器仪表等一旦掉电,会造成装置生产流程连续性破坏、重要设备损坏、物料浪费甚至发生安全、环保事故,其产生的损失远大于 UPS 的价格,有必要采用多机并联供电。

### 3 安全防爆

本间歇式缩合反应是具有爆炸危险区域的系统,在过程控制设计中,我们不得不考虑安全防爆措施。在各种防爆方法中本质安全防爆法以其独特的限制能量的方式被广泛地应用,安全栅是本安防爆系统中最常用的关联设备。安全栅是介于现场设备与控制室设备之间的一个限制能量的电路,用来把控制室供给现场仪表的电能量限制在既不能产生足以引爆危险气体的火花,又不能产生足以引爆危险气体的仪表表面温度,从而消除了引爆源,所以安全栅的选用是考虑安全生产很重要的步骤。

现场总线技术的产生对本质安全系统技术提出了新的挑战。现场总线的基本优点是在一条通信总线上可以挂接许多台现场总线设备,但是这就需要从总线吸取更大的电流,如果套用现有的安全参数认证方法(所谓的“整体认证”方法,国内也称“参数认证”),在一条总线上只能挂接为数不多的设备,从而使现场总线的优点大打折扣。我们这次设计的就是基于 PROFIBUS-DP 现场总线的控制系统,为适应现场总线本质安全防爆系统的需要,可以采用被

业界普遍接受的现场总线本质安全概念的观点(fieldbus intrinsically safe concept, FISCO): (1)系统中只有一个有源的供电设备,而且它具有梯形或近似矩形的伏安特性。最大开路电压小于 15V,最大短路电流小于 220mA (2)总线其他节点只能是不少于 10mA 纯耗电设备,最多 10 个节点 (3)每台设备的未保护电容小于 5nF,未保护电感小于 10 $\mu$ H (4)电缆长度小于 1000m,每公里电阻 R、电容 C 和电感 L 应符合如下要求:  $R/\text{km}=15\sim 150\Omega$ ;  $C/\text{km}=80\sim 200\text{nF}$ ;  $L/\text{km}=0.4\sim 1\text{mH}$  (5)总线两端配终端匹配器应满足,  $90\Omega < R < 100\Omega$ ;  $0 < C < 2.2\mu\text{F}$ 。

FISCO 的贡献是在保证安全的条件下允许给危险侧总线提供更多的能量以及忽略电缆的计算而简化了防爆设计的工作量。在 FISCO 的要求中后 4 项是对本质安全现场设备的要求,这些要求就目前的技术而言不难实现。只有第 1 项是对安全栅的要求。较低的最大开路电压和较大的最大短路电流恰恰是为满足现场总线连接需要较大电流的要求。与传统安全栅不同,尽可能低的最大开路电压将允许更大的负载电容,这将给现场总线本质安全系统现场设备和电缆的设计带来宽松的环境。

#### 4 以太网和现场总线信息安全

工业以太网: Ethernet 用于工厂级的信息管理,主要包括生产管理、经营管理和工厂总体管理。除工厂内部的管理计算机和数据库之间的信息交换外,还通过 Web 服务器与 Internet 相连。这样使得 Ethernet 的信息安全问题变得很严峻,其中主要是网络病毒和黑客问题。防治网络病毒所要采取的措施有:在网络中尽量多用无盘工作站,不用或少用软驱工作站;工作站采用防病毒芯片,可防止引导型病毒;正确设置文件属性,合理规范用户访问权限;采用在 Internet 入口就封杀“毒源”的高效益的网关防毒产品已成为防病毒措施的首选。

现场总线: PROFIBUS 采用令牌控制方式与主从轮询相结合的存取控制方式,监视各过程管理和过程控制站的所有信息,集中显示操作、控制回路组态和参数修改,优化过程处理等。PROFIBUS 级的信息安全问题主要是计算机病毒和设备故障造成的数据破坏。对于防治 FCS 内部的计算机病毒,使用防、杀病毒软件是最简单的办法。防治病毒除了使用防病毒软件外,加强管理也非常重要,完善的管理可大大减轻病毒的危害程度。设备故障问题包括硬件故障和软件故障两方面。硬、软件故障应及时发现、报警和维修,要有一系列故障应急措施。因故障引起的重要数据被破坏是很难恢复的,解决的办法是应用备份技术。

### 五 经济节能

化学工业是耗能大户,要进一步提高对节能降耗的认识,节能不仅是经济问题,更是能源安全问题;节能降耗是提高产品市场竞争能力,提高企业经济效益的重要措施。

#### 1 优化控制系统

我们设计的控制系统改传统的模拟仪表为现场总线控制系统(FCS)。利用计算机丰富的硬件和软件功能,可完成工艺变量的调节、指示、设定、记录、报警、动态图表显示等操作。在对主要工艺参数优化控制、开停车智能控制、联锁先进控制系统和管控一体化的开发应用方面均有新的策略,有利于装置安全、稳定、优化运行,具有显著节能效果。

有效的反应釜的自动控制策略可以最大限度的降低由于人为因素造成的反应釜效率的降低,在釜的本体和输配系统上安装必要的压力、温度流量监测仪表,并与自动控制系统共同实现根据终端用户需要实现程序控制,使反应釜系统处于最佳运行状态。当然,优良的控制算法在这时就显出好处了,不仅可以得到良好的控制效果保证生产,同时可以保护设备,更能够节能降耗。本控制系统就应用了工业中常用的自适应模糊 PID 先进算法。同时,采用自动控制系统就节约了人力资源,人力资源方面也是企业必须考虑的经济因素。

#### 2 冷却水的回收利用

在通常的反应釜冷却水回收过程中,夹套、蛇管、高压冷却水出口排出的高温冷凝水在冷却以后才回到给水系统被加以利用,目前国外较先进的回收技术是直接将高温的冷却水送回给加热蒸汽管内,用于预热阶段加热诱发反应,减少了冷凝水降温造成的能源损失。

#### 3 采用变频技术节约反应釜用电

化学工业的反应器及其系统在运行中耗电量也是很大的,所以节约电能也是相当的关键。

在上/下料泵、给水泵、出料泵上采用变频技术，配合检测系统，减少以阀门阻力调节压力、流量所造成的功率损失，实现节电的目的。用变频节能可以采用在用阀门，挡板等泵类和压缩机上的原本定速控制的系统里。使用定速传动时，实际工作在一条直线上，电机恒速运行，其能耗始终在一个较高的状态。而使用变速传动时，实际工作在多条曲线上，随着流量变化，电机运行速度变化，能耗也降低。

变频节电装置结合计算机自控系统主要调整上料泵、加热电机、搅拌电机等速度达到反应釜运行最佳速度，以达到最节能的状态。

#### 4 软启动节能

由于电机为直接启动或Y/D启动，启动电流等于(4-7)倍额定电流，这样会对机电设备和供电电网造成严重的冲击，而且还会对电网容量要求过高，启动时产生的大电流和震动时对挡板和阀门的损害极大，对设备、管路的使用寿命极为不利。而使用变频节能装置后，利用变频器的软启动功能将使启动电流从零开始，最大值也不超过额定电流，减轻了对电网的冲击和对供电容量的要求，延长了设备和阀门的使用寿命。节省了设备的维护费用。

### 六 总结

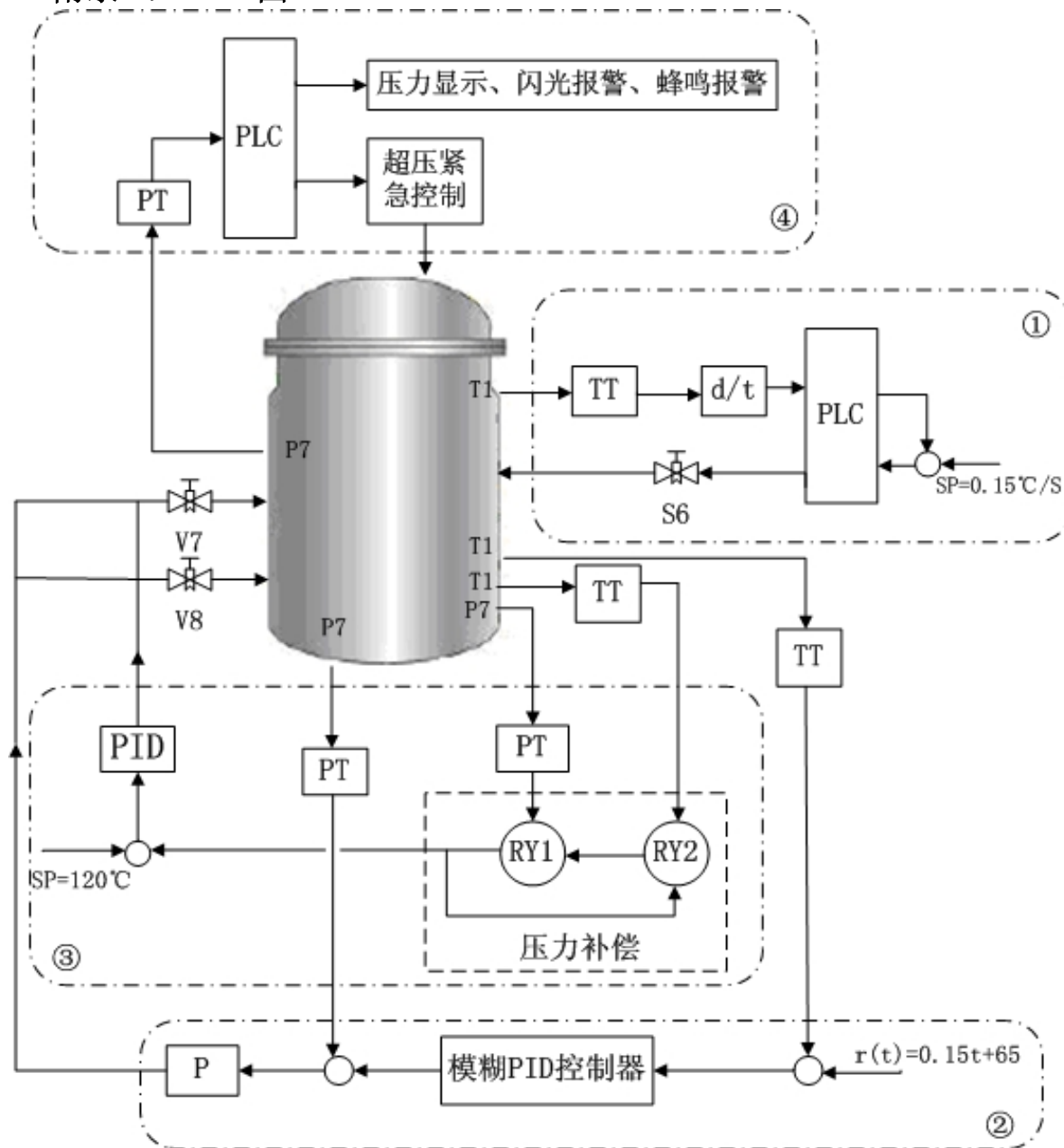
综上所述，本文根据釜式反应器的工艺流程和控制要求，设计了一套基于西门子 PCS7 的过程控制系统。在明确控制要求并且确定了被控量之后，为了取得更好的控制效果，在深入分析各个被控量的影响因素、各个被控量间的制约关系以及各个被控对象的特性的基础上，结合经典控制理论和先进控制方法，设计了一套完备合理的控制方案。方案中以单回路控制系统、串级控制系统及补偿控制系统为基本方案，并经过验证这样可以保证方案简单，具有较高的工业可实施性。加上了自动开车，紧急停车环节，减少人为干预，并消除了安全隐患。反应釜温度控制是反应釜控制方案设计中的一个关键问题，因此把温度控制作为整个控制方案的重点。经过分析，把温度控制阶段细分为：预热阶段、升温阶段、保温阶段，并采用不同的控制算法，以期能够得到最佳的控制效果。

本控制系统大部分控制要基于 S7-300 PLC 来实现，同时，对上层网络组建及硬件配置也做了较详细的介绍。最后，谈到了对于企业不可忽视的经济节能和安全因素。

## 参考文献

- [1] 金以慧, 过程控制, 清华大学出版社, 1991
- [2] 蒋慰孙 俞金寿, 过程控制工程, 烃加工出版社, 1988 年第一版
- [3] 刘锴, 周海, 深入浅出西门子 S7-300PLC, 北京航空航天大学出版社, 2004 年 8 月第一版
- [4] 廖常初, S7-300/400 PLC 应用技术, 机械设计出版社, 2005 年 1 月第一版
- [5] 骆德汉, 可编程控制器与现场总线网络控制, 科学出版社 2005 年 8 月第一版
- [6] 施仁, 刘文江, 郑辑光, 自动化仪表与过程控制, 电子工业出版社 2006 年 3 月第 3 版
- [7] 王伟, 热处理炉模糊自整定 PID 温度控制器的设计及其仿真, 常熟高专学报, 2004 年 11 月, 第 6 期
- [8] 李磊 白瑞祥, 模糊 PID 在热水锅炉温度控制系统中的应用, 工业控制计算机, 2007 年, 第 20 卷 第 2 期
- [9] 于海英 侯九阳 乔付, 化学反应釜温度控制系统的研究, 黑龙江科技学院学报, 第 12 卷 第 4 期, 2002 年 12 月
- [10] 张筱萱, 西门子 S7-300 PLC 软冗余系统在重催气压机上的应用, 兰州石化职业技术学院学报, 第 2 卷第 3 期, 2002 年 9 月
- [11] 孙法文, 浅谈化工生产供电系统 UPS 的选配, 中氮肥, 2005 年 7 月 第 4 期
- [12] 曲阳 王建辉 徐林 顾树生, 现场总线本质安全概念安全栅的研究开发, 仪器仪表学报, 2006 年 9 月, 第 17 卷, 第 9 期
- [13] 徐鹿眉, 现场总线控制系统信息安全问题, 电气时代, 2005 年第 5 期
- [14] S7-300 和 M7-300 可编程序控制器模板规范 参考手册
- [15] SIMATIC S7-300 模块数据手册
- [16] SIMATIC ET200M 用于过程自动化的信号模块 配置手册
- [17] 张万忠, 可编程控制器入门与实例 (西门子 S7-200 系列), 中国电力出版社, 2005 年 1 月第一版
- [18] 厉玉鸣, 化工仪表及自动化, 化学工业出版社, 1997 年
- [19] 王骥程 祝和云, 化工过程控制工程, 化学工业出版社, 1991
- [20] 王文杰, 模糊控制理论在温度控制中的应用, 西北纺织工学院学报, 1995 年 6 月
- [21] 紧急停车系统的有关问题探讨, 炼油化工自动化, 1996 年第 5 期
- [22] 林锦国, 过程控制系统. 仪表. 装置, 东南大学出版社, 2001 年
- [23] 冯斌 须文波等, 反应釜系统中的模糊串连控制策略, 无锡轻工业大学学报. 1999(4):72-75
- [24] 宋伯生, PLC 编程理论. 算法及技巧, 机械工业出版社, 2005 年 4 月第一版
- [25] 李少远 王景成, 智能控制, 机械工业出版社
- [26] 李惠君, SIMATIC PCS7 系统在燃料乙醇装置中的应用, 科技广场, 2005 年 12 月
- [27] 李轶 曹小红, SIMATIC PCS7 在 350 m<sup>3</sup> 高炉本体自动化系统中的应用, 中国锰业, 2001 年 8 月, 第 19 卷第 3 期

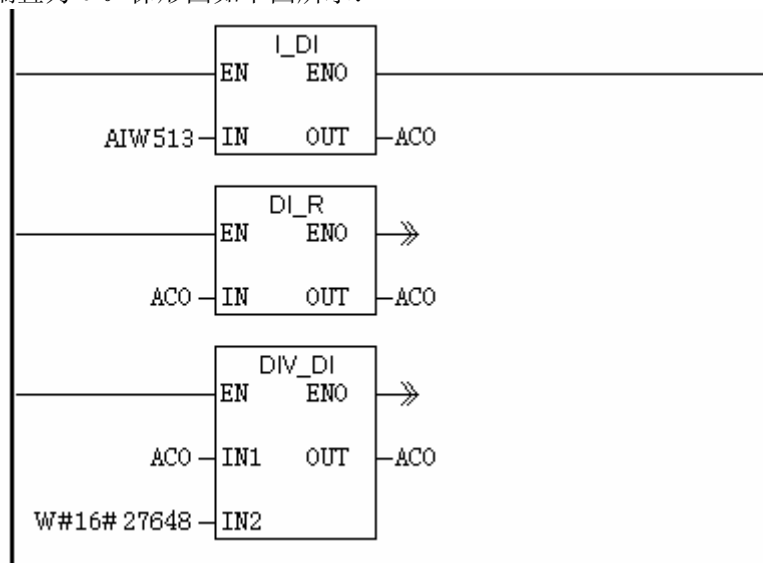
附录 1: PI&D 图



说明：为便于看图，将整个 P&ID 图分为四个区域，分别是：①反应预热温度速率控制单元  
②自升温温度速率控制单元③反应保温温度控制单元④压力安全控制单元

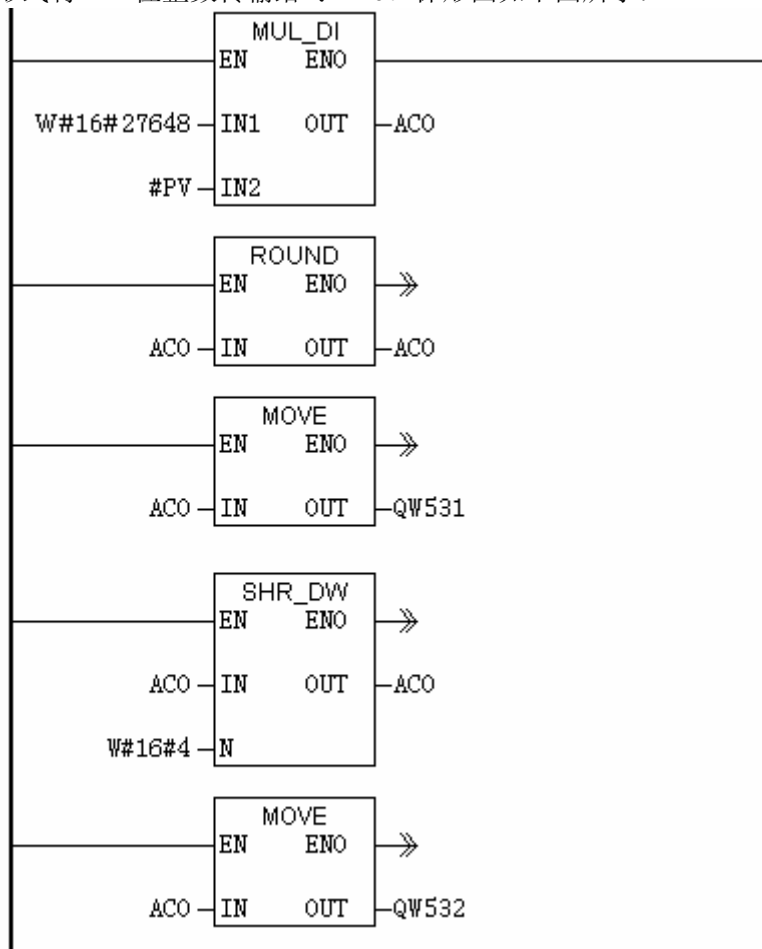
## 附录 2: PID 控制 PLC 梯形图

程序说明：把输入值转化为双整数，再将 3 2 位双整数转化为实数；后是累加值的标准化，偏置为 0。梯形图如下图所示：



中间用 CALL 指令调用中断进行 PID 运算（CALL FSB41, DB35）。

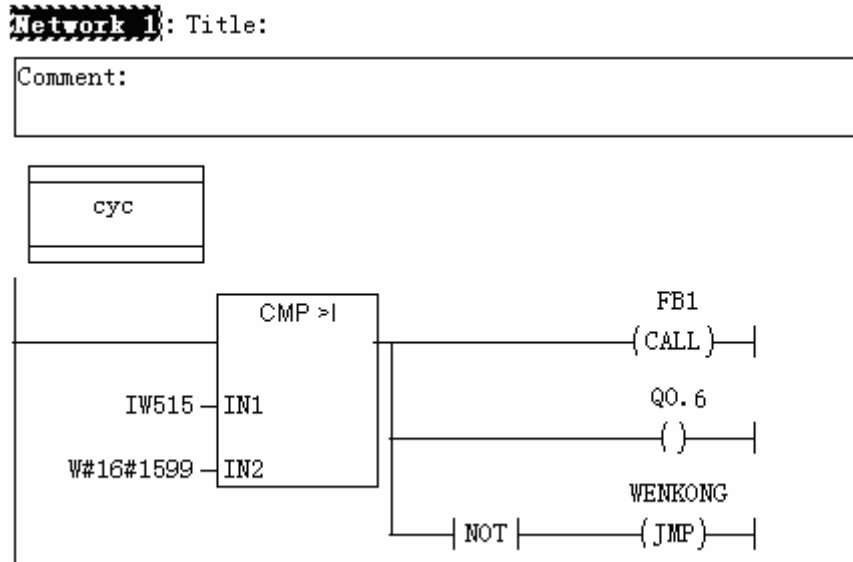
程序说明：按工程标量计算，将实数转化成双整数；先输出低 1 6 位，再右移 4 位；周期性形式将 3 2 位整数传输给 Q W10。梯形图如下图所示：



### 附录 3：超压控制 PLC 梯形图

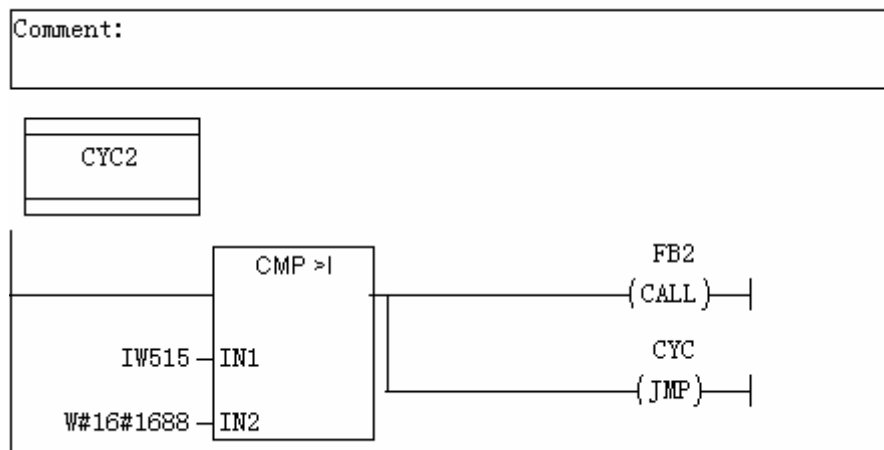
1: 主程序

程序说明：比较反应釜的压力 P7 是否到了 0.8Mpa。如果压力 P7 到了 0.8Mpa 则调用子程序 1，并且指示灯 D3 亮；如果压力 P7 没有到 0.8Mpa 就跳出超压控制。具体的梯形图如下图所示：



程序说明：比较反应釜的压力 P7 是否达到了 0.83Mpa。如果压力 P7 到了 0.83Mpa 则调用子程序 2；如果压力 P7 没到 0.83Mpa 就跳到超压控制开始程序(即 Network 1 程序图)。梯形图如下图所示：

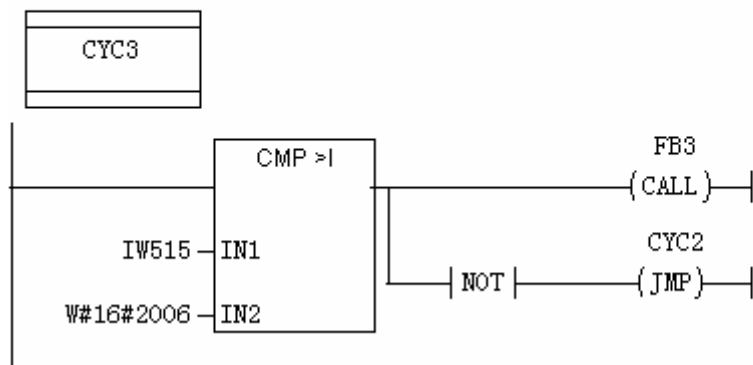
**Network 2:** Title:



程序说明：比较反应釜的压力 P7 是否到达 1.2MPa。如果压力 P7 到了 1.2Mpa 则指示灯 D4 亮，人工调试 V5 来降压；如果压力 P7 没有到 1.2Mpa，则返回 Network 2 程序图。梯形图如下图所示：

**Network 3**: Title:

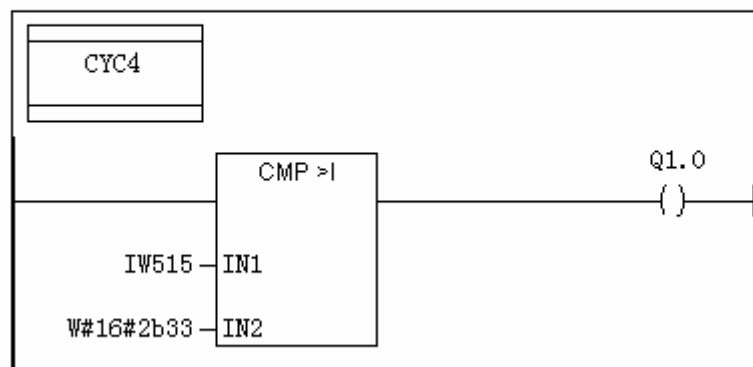
Comment:



程序说明：比较反应釜的压力 P7 是否到达 1.6MPa，如果反应釜的压力 P7 到达 1.6MPa，则指示灯 D5 亮，此时反应处于冻结状态；如果压力 P7 没有到 1.6Mpa，则返回 Network 3 程序图。梯形图如下图所示：

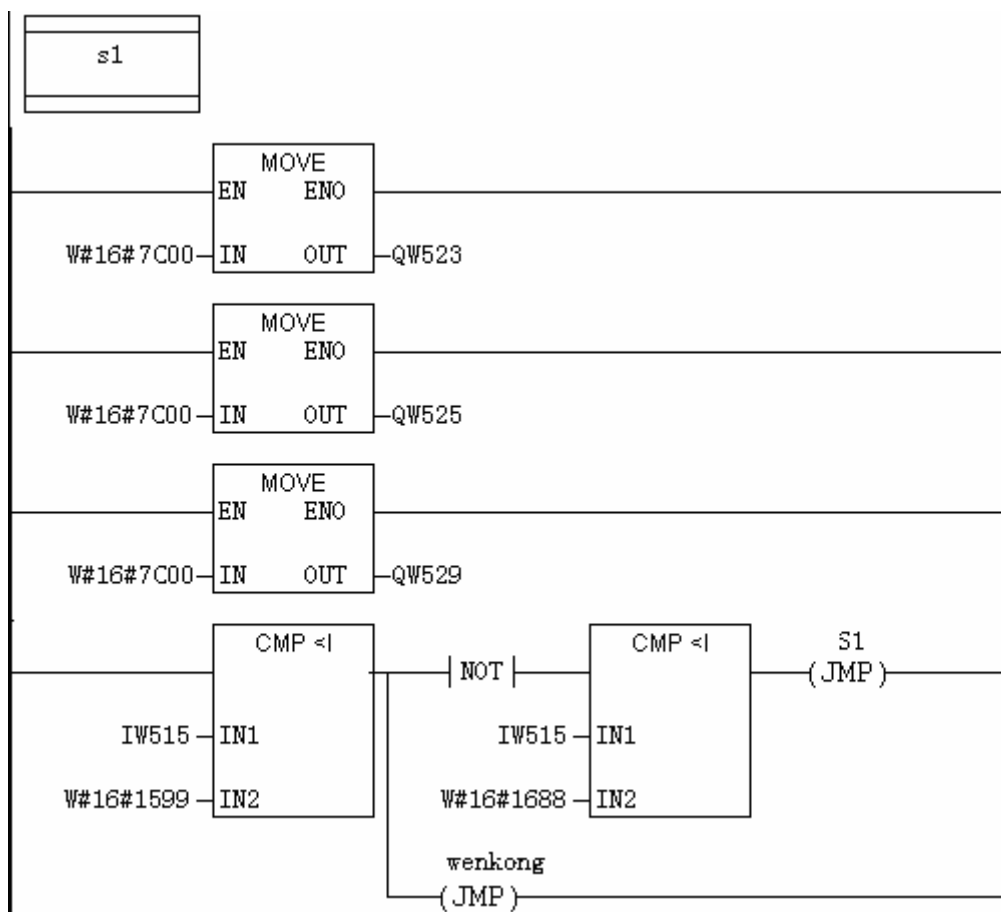
**Network 4**: Title:

Comment:



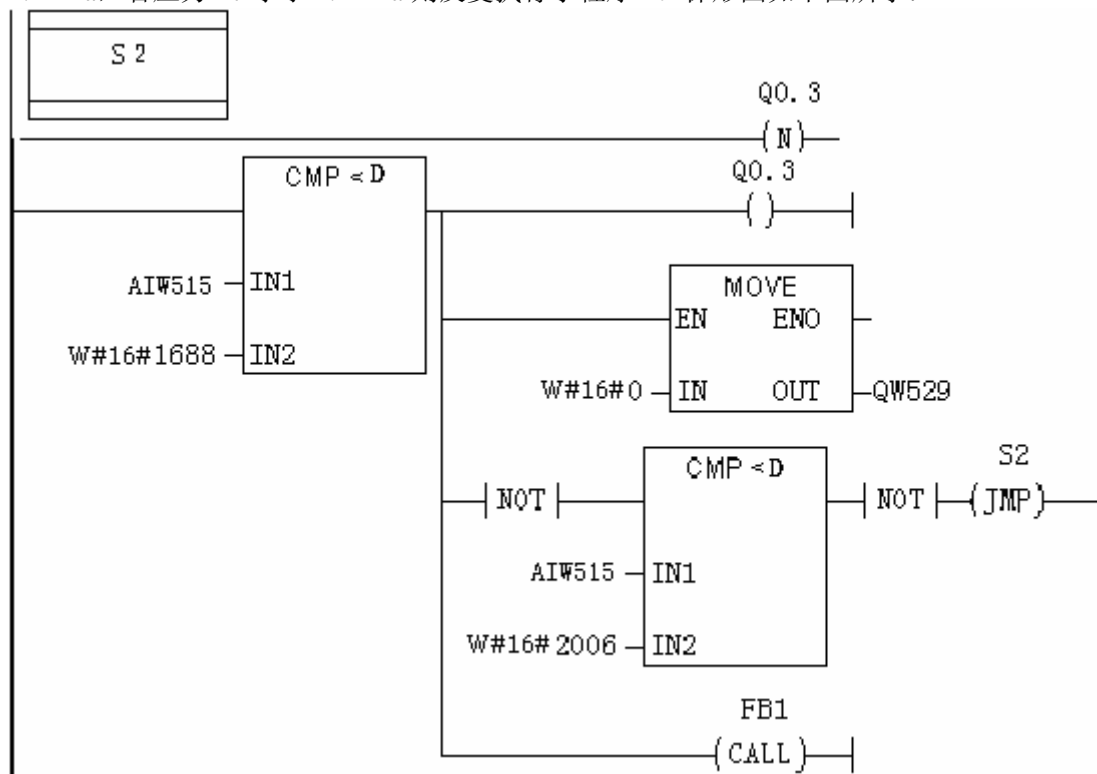
2: 子程序 1

程序说明：全开 v7, v8, v9。接下来比较反应釜的压力 P7 是否到达 0.8MPa，如果反应釜的压力 P7 到达 0.8MPa，再比较压力 P7 是否到达 0.83MPa，如果压力 P7 没有到达 0.83MPa 则返回子程序 1；如果反应釜的压力 P7 没有到达 0.8MPa，则跳出超压控制。梯形图如下图所示：



3: 子程序 2

程序说明：关闭 S8，比较反应釜的压力 P7 是否大于 0.83MPa。如果压力 P7 小于 0.83MPa，则打开 V10，关闭 S8，调用子程序 1；如果压力 P7 大于 0.83MPa，比较压力 P7 是否大于 1.2MPa，若压力 P7 小于 1.2MPa 则反复执行子程序 2。梯形图如下图所示：



4: 子程序 3

程序说明: 指示灯 D4 亮, 人工控制。比较反应釜的压力 P7 是否大于 1.2MPa, 如果压力 P7 小于 1.2MPa, 则调用子程序 2。梯形图如下图所示:

