

# 基于PCS7的锅炉多变量解耦控制系统研究与性能验证

周建宇

辽宁科技大学电子与信息工程学院, 辽宁 鞍山

收稿日期: 2026年3月18日; 录用日期: 2026年4月17日; 发布日期: 2026年4月24日

## 摘要

自然循环锅炉多变量强耦合控制一直是工业领域的难题, 考虑到完全解耦在工程实际应用的困难, 本文提出一种基于西门子PCS7多变量部分解耦控制策略。本研究首先通过工艺分析, 明确了汽包液位、过热蒸汽温度与压力等关键参数的控制要求与互相的耦合关系, 进而创新性地设计了以“汽包液位-前馈反馈串级”与“过热蒸汽温度-串级分程控制”为核心的部分解耦控制架构, 该设计不仅能够实现精准控温, 而且通过分程控制消除了给水调节过程中引发的汽包液位的二次扰动。本研究在PCS7中完成了硬件组态、工业以太网通信架构设计、连续功能图CFC和顺序功能图SFC编程。在SMPT-1000平台进行的仿真验证表明: 系统在额定负荷(21 kg/s)与变负荷(30 kg/s)工况下, 关键参数稳态误差均小于 $\pm 1\%$ , 并且具有很好的抗干扰能力, 为实现工业锅炉的高性能控制提供了兼具理论严谨性与工程实用性的解决方案。

## 关键词

自然循环锅炉, CFC, SFC, PCS7, SMPT-1000, 解耦控制

## Research and Performance Validation of Boiler Multivariable Decoupling Control System Based on PCS7

Jiangu Zhou

School of Electronic and Information Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning

Received: March 18, 2026; accepted: April 17, 2026; published: April 24, 2026

## Abstract

Multivariable strong coupling control of natural circulation boilers has long been a challenging

problem in the industrial field. Considering the difficulty of applying complete decoupling in practical engineering, this paper proposes a multivariable partial decoupling control strategy based on Siemens PCS7. Through process analysis, this study first identifies the control requirements and coupling relationships among key parameters such as drum level, superheated steam temperature and pressure. A partial decoupling control architecture is then innovatively designed, with drum level feedforward-feedback cascade control and superheated steam temperature cascade-split range control as the core. This design not only achieves precise temperature control but also eliminates the secondary disturbance to drum level caused by feedwater regulation through split range control. The hardware configuration, industrial Ethernet communication architecture design, continuous function chart CFC and sequential function chart SFC programming are completed in PCS7. Simulation verification on the SMPT-1000 platform shows that under rated load (21 kg/s) and variable load (30 kg/s) conditions, the steady-state errors of key parameters are all less than  $\pm 1\%$ , and the system has good anti-interference capability, providing a solution with both theoretical rigor and engineering practicality for high-performance control of industrial boilers.

## Keywords

Natural Circulation Boiler, CFC, SFC, PCS7, SMPT-1000, Decoupling Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

自然循环锅炉是流程工业中至关重要的热能转换设备，其运行过程长期面临多变量强耦合、非线性与大滞后的控制难题[1]。汽包液位、蒸汽压力与过热蒸汽温度等核心参数之间相互干扰显著，例如蒸汽流量的突变会引发汽包虚假水位现象，而调整过热蒸汽温度时又会牵连汽包液位产生二次波动，这些耦合关系使得锅炉控制系统设计成为工业自动化领域的经典挑战。为应对这一工程难题并实现复杂控制策略的可靠构建与验证，西门子 SIMATIC PCS7 (SIMATIC Process Control System 7)过程控制[2]系统凭借其集成的连续功能图 CFC (Continuous Function Chart)与顺序功能图 SFC (Sequential Function Chart)编程能力以及良好的工程扩展性，成为工业锅炉控制的理想平台。在策略验证阶段，高级多功能过程控制实训系统 SMPT-1000 [3] (Simulation and Modeling Platform for Training-1000)能够提供高保真的锅炉动态模型，使研究人员能够在安全经济的仿真环境中对控制系统进行充分的闭环测试与性能评估，为后续工业现场的一次性投运成功提供有力保障。

基于 PCS7 与 SMPT-1000 平台，已有学者开展了大量富有成效的研究工作。茹雪艳等[4]基于 SMPT-1000 设计并实现了过控全流程仿真系统，开发了改进型串级 - 比值控制等八个控制回路，为复杂流程的控制实现提供了重要参考。在安全控制层面，陈晓侠等[5]基于 PCS7 设计了环丁砜安全仪表系统 SIS，采用冗余设计和软联锁机制显著提高了系统的安全性与可靠性；邹立超等[6]开发的球磨工段智能报警系统，运用模糊逻辑实现实时监测与自动报警，这些思路为控制系统中的安全联锁设计提供了重要借鉴。值得注意的是，上述研究虽然在控制回路实现、顺序控制优化、安全联锁设计等方面取得了显著进展，但大多聚焦于单一控制目标或特定工况下的局部优化。对于锅炉控制的核心难题即多变量强耦合问题，理论上完备的完全解耦控制如多变量预测控制或解耦矩阵设计等，由于对精确数学模型的依赖以及参数整定的极端复杂性，在实际工程中往往难以实施，因此如何在保证工程可行性的前提下有效处理锅炉系统的

多变量耦合关系，仍是亟待深入研究的关键问题[7]。

针对上述研究空白，本文提出一种基于部分解耦思想的锅炉多变量控制系统设计方法。该方法的核心理念是不强求消除所有耦合，而是通过深入的工艺机理分析，集中力量识别并切断那些对系统性能影响最直接最显著的关键耦合链路。具体而言，本文首先明确了蒸汽流量与汽包液位之间的虚假水位耦合以及温度调节对汽包液位的二次扰动这两对最棘手的耦合关系，进而创新性地设计了以汽包液位-蒸汽流量前馈串级控制与过热蒸汽温度-串级分程控制为核心的部分解耦控制架构。前者通过前馈补偿主动抑制虚假水位扰动，后者则通过减温水阀与省煤器给水阀的协同反动作，在控制层面切断了温度调节对汽包液位的二次扰动路径。该架构在未引入复杂算法的前提下，精准破解了锅炉系统中最突出的耦合环节，为后续工程实现奠定了理论基础。基于西门子PCS7平台，本文完成了从硬件组态、工业以太网架构到CFC控制回路实现以及SFC冷态开车顺序控制的完整工程实现，并在SMPT-1000平台上进行了多工况仿真验证，旨在为工业锅炉的高性能控制提供一种兼具理论严谨性与工程实用性的解决方案。

## 2. 锅炉工艺过程分析与要求

### 2.1. 锅炉工艺过程分析

工业自然循环锅炉简图如图1所示，本研究将锅炉分为三个相互耦合又相对独立的子系统。

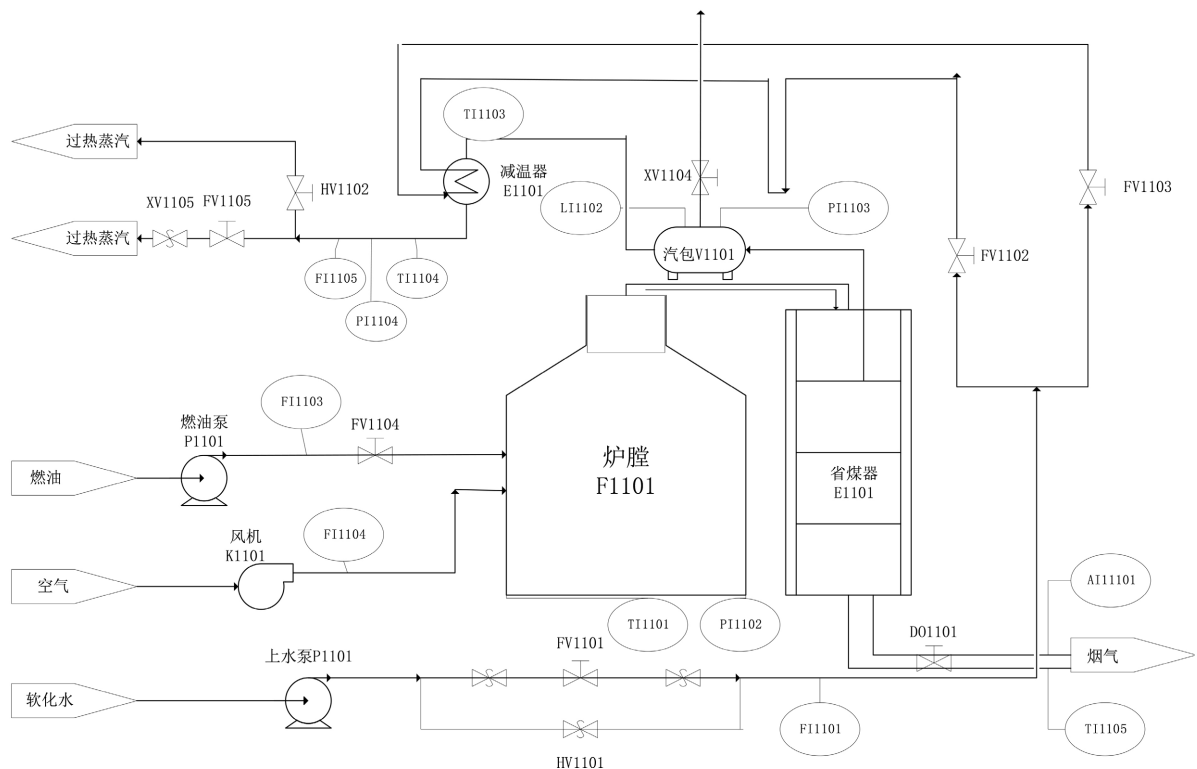


Figure 1. Process flow diagram of industrial natural circulation boiler

图 1. 工业自然循环锅炉工艺流程简图

以维持物质平衡为核心的水汽系统中，汽包液位 LI1102 是衡量锅炉安全运行的关键指标。当工况变化导致蒸汽流量 F1105 突变时，汽包内部压力瞬时波动会引发水体积膨胀或收缩，形成虚假水位现象。传统的微分控制虽能感知液位变化速率，但单独使用时往往无法区分真实水位与虚假水位，反而会放大

调节动作，导致液位反复震荡，影响稳态精度。

负责能量输入与蒸汽参数输出的燃烧系统承担着将燃料化学能转化为热能的核心任务。过热蒸汽出口温度 TI1104 和出口压强 PI1104 同时受燃料流量 FV1104 控制，两者存在强耦合关系。燃料量增加时炉膛热负荷上升，蒸汽温度和压力均会升高，但压力变化较快，温度则因金属管壁热惯性而滞后。为精准控制蒸汽温度，通常采用减温器给水流量阀 FV1103 进行喷水减温调节，但这一动作会改变锅炉总给水量，进而影响汽包进水流量，导致汽包液位 LI1102 出现二次扰动。

保障燃烧效率和锅炉安全的风烟系统负责提供助燃空气并维持炉膛负压。烟气含氧量 AI1101 是判断燃烧是否充分的关键指标，主要受燃料流量与空气流量比值影响。含氧量过低会导致燃烧不完全、热效率下降且污染物排放增加，过高则会带走过多热量并可能引发腐蚀。炉膛压力 PI1102 需通过调节引风烟道挡板 DO1101 的开度维持微负压，防止火焰外喷或炉膛吸风影响燃烧稳定性。

## 2.2. 工艺要求

根据工艺要求，锅炉各关键工艺参数需控制在表 1 所示的工艺范围之内。

Table 1. Key process parameters

表 1. 关键工艺参数表

序号	工艺说明	位号	单位	工艺参数
1	过热蒸汽出口流量	FI1105	kg/s	21~42
2	汽包水位	LI1102	%	48%~52%
3	过热蒸汽出口温度	TI1104	℃	447~453
4	烟气温度	TI1105	℃	<260
5	炉膛压力	PI1102	mmH <sub>2</sub> O	10~120
6	过热蒸汽出口压力	PI1104	kPa	3780~3820
7	烟气含氧量	AI1101	%	1%~3%

## 3. 解耦控制策略设计

### 3.1. 基于前馈补偿的汽包液位解耦控制

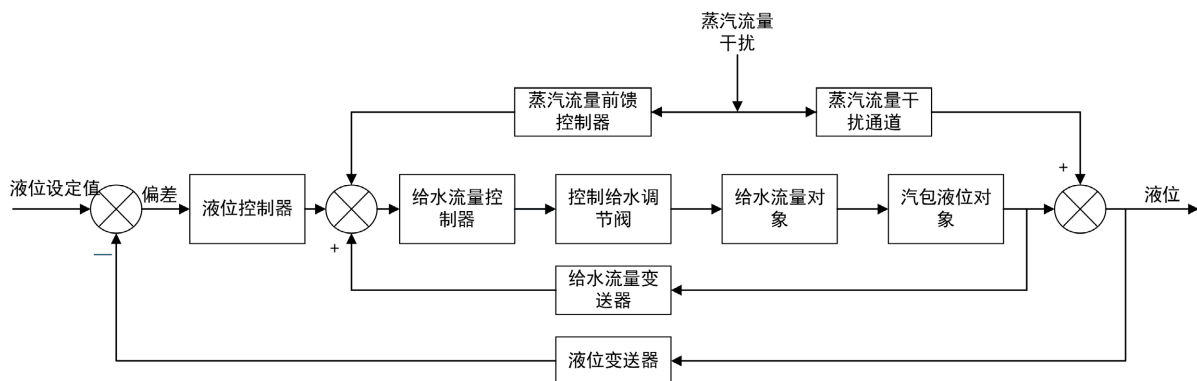


Figure 2. Principle diagram of drum level feedforward-cascade control

图 2. 汽包液位前馈 - 串级控制原理图

为适应系统不同工况下蒸汽负荷变化引发“虚假水位”现象，本研究采用图 2 所示前馈 - 串级控制策略(即三冲量控制) [8]，通过前馈通道实现了主动解耦。前馈补偿策略将主控制器的输出与主要扰动蒸汽流量 FI1105 相加作为副控制器的设定值，当蒸汽负荷变化时，副控制器能够立刻响应变化做出调整，从而能够抵消虚假水位现象，实现了对关键扰动的动态解耦。

### 3.2. 基于串级 - 比值的燃烧系统解耦与稳态优化

烟气含氧量 AI1101 是衡量燃烧经济性与环保性的关键指标。为实现燃烧过程的稳态优化并削弱其对后续汽水系统的耦合扰动，本设计采用图 3 所示的含氧量闭环控制系统，其本质上是一种带含氧量校正的串级 - 比值控制结构。

该系统以燃料流量 FI1103 为主动量，通过预设的空燃比系数  $K$  计算理论空气需求量，作为空气流量的前馈设定分量，实现燃料与空气的静态比值解耦——即确保燃料量变化时空气量按比例同步调整，避免因配风失衡导致的燃烧波动。同时，烟气含氧量校正调节器根据实测值与设定值的偏差，对空燃比进行在线修正，构成串级控制外环，以抑制燃料热值变化、空气温度波动等内扰，实现燃烧系统的动态解耦。

此策略的系统性解耦作用体现在两个层面：第一，在燃烧系统内部，通过串级 - 比值结构将燃料与空气两个强相关变量协调控制，保证风煤比始终处于最优区间，消除了因配风不当引发的燃烧脉动；第二，在全局层面，稳定的燃烧过程为锅炉主控系统提供了平稳的热输入，从而切断了燃烧侧向蒸汽压力、温度回路的扰动传递路径——压力控制回路无需应对频繁的燃烧波动，温度控制回路也能获得相对恒定的烟气热源，为过热蒸汽温度的精细调节创造了稳定的边界条件。这种分层解耦设计，使得原本相互耦合的燃烧系统与汽水系统得以相对独立地优化控制。

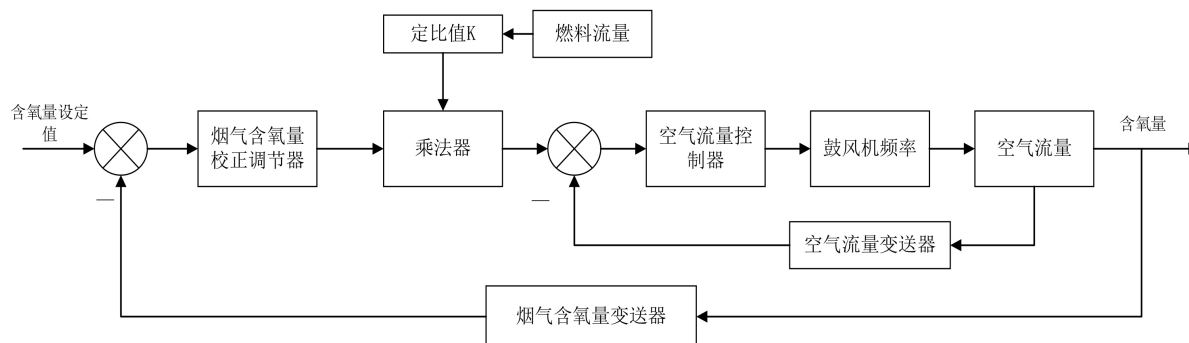


Figure 3. Principle diagram of flue gas oxygen content cascade-ratio control

图 3. 烟气含氧量串级 - 比值控制原理图

### 3.3. 过热蒸汽温度与汽包液位的结构解耦控制

过热蒸汽温度 TI1104 精准控制是锅炉控制的核心难题，在传统控制中，通过调整减温水量来调节会导致锅炉汽包总给水量变化，造成锅炉汽包液位的二次扰动和汽包温度的变化，形成了难以处理的“温度 - 液位”耦合回路，进而影响输出蒸汽流量品质，延长系统调节时间。

本文提出图 4 所示的串级 - 分程复合解耦控制策略[9]：串级控制精准调控蒸汽出口温度，内环控制响应更快的减温器出口温度 TI1103，以迅速克服烟气侧等主要热干扰。分程解耦控制通过减温水阀 FV1103 与省煤器给水阀 FV1102 协同工作，保证了减温水阀对出口温度进行精细调解时汽包给水总流量不变。由于两阀门特性相同，设置两阀门开度动作相反且开度之和保持恒定。该设计的解耦本质是结构性

的：它并非通过复杂算法去抑制已发生的耦合，而是在物理操纵层面，通过分程阀组的协同动作，主动“切断”了温度控制动作向汽包液位传递扰动的物理路径，从而实现了两个关键被控量之间的静态解耦。它没有采用复杂的解耦算法去实时计算耦合量并施加反向补偿，而是通过阀组之间的物理协同，在控制指令发出的那一刻就直接切断了扰动向液位传递的路径。这种结构层面的解耦方式相当于在系统的物理连接上嵌入了一个补偿机制，使得温度控制回路与液位控制回路从根源上解除了耦合关系，实现了两个关键被控量之间的静态解耦。

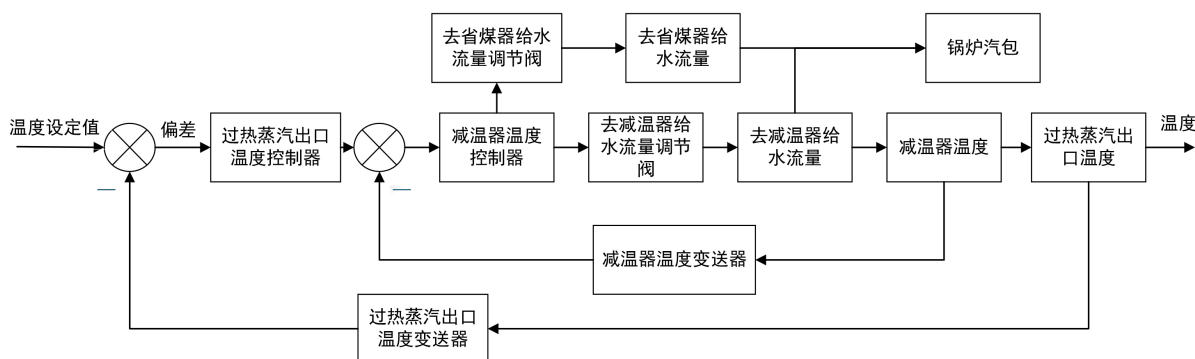


Figure 4. Principle diagram of superheated steam outlet temperature cascade-split range composite control  
图 4. 过热蒸汽出口温度串级 - 分程复合控制原理图

## 4. 控制系统工程实现

### 4.1. 基于 PCS7 的硬件冗余架构组态

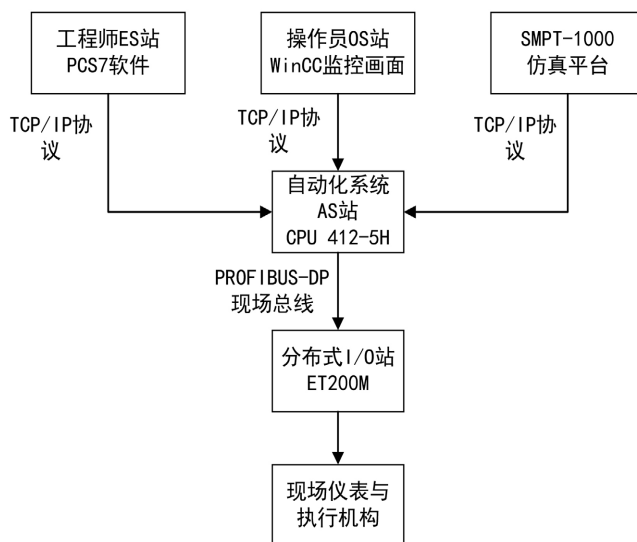


Figure 5. Industrial Ethernet architecture  
图 5. 工业以太网网络架构

为保证前馈 - 串级、分程等复杂解耦控制策略在连续生产中的高可靠性，本研究基于 SIMATIC PCS7 平台构建了一套分布式硬件冗余架构。在控制器选型上，核心采用了 S7-400 系列的 CPU 412-5H 冗余控制器对，主要考虑到其强大的处理能力和无缝冗余切换特性，能够确保控制逻辑的不间断执行。工业以

太网络架构如图 5 所示。通信架构方面,控制器通过 CP 443-1 模块接入工业以太网,同时经由 PROFIBUS-DP 现场总线连接 ET200M 分布式 I/O 站[10]。这样的配置旨在:利用 PROFIBUS-DP 的高确定性实时采集现场仪表信号并驱动调节阀。此硬件架构不仅为解耦控制算法的稳定运行提供了实体基础,其分布式 I/O 特点也便于未来针对锅炉其他测点的扩展。

## 4.2. CFC 组态

在本系统设计中,所有的控制策略均通过 PCS7 的连续功能图 CFC 进行实现。CFC 图形化编程使得控制回路搭建、PID 参数整定、数据实时监测等方面更加高效便捷,十分适用于工程实践。本复杂控制回路构建于一系列标准功能块之上:过程信号由模拟量输入模块 Pcs7AnIn 引入;控制逻辑由 PID 控制模块 PIDConL、乘法模块 Mul04、加法模块 Add04 共同完成;最终指令通过模拟量输出模块 Pcs7AnOu 送达现场执行机构。

本章节以烟气含氧量串级 - 比值校正回路为例, CFC 编程逻辑如图 6 所示。该回路实现了空燃比的动态优化与稳态解耦。具体信号流如下:烟气含氧量测量值 AI1101 经模拟量输入模块送入主控制器 AIC1101 的 PV 管脚,主控制器的设定值 SP 由操作员给定(含氧量目标值)。同时,燃料流量测量值 FI1103 作为主动量,经数据源进入乘法模块 Mul04,与预设的空燃比例系数 K 相乘,得到理论空气需求量。主控制器 AIC1101 的输出 OP 与乘法模块的输出在加法模块 Add04 中叠加,其运算结果作为副控制器 FIC1104 的外给定(SP\_Ext)。副控制器根据空气流量测量值 FI1104 进行快速调节,其输出 OP 通过模拟量输出模块控制鼓风机 K1101 的变频器频率 S1101。该结构形成了“含氧量主控 + 空燃比前馈 + 流量副控”的串级 - 比值控制,既保证了燃料变化时空气量的比例跟踪,又通过含氧量闭环校正消除了热值波动等扰动,从而实现了燃烧系统的动态解耦与稳态优化。

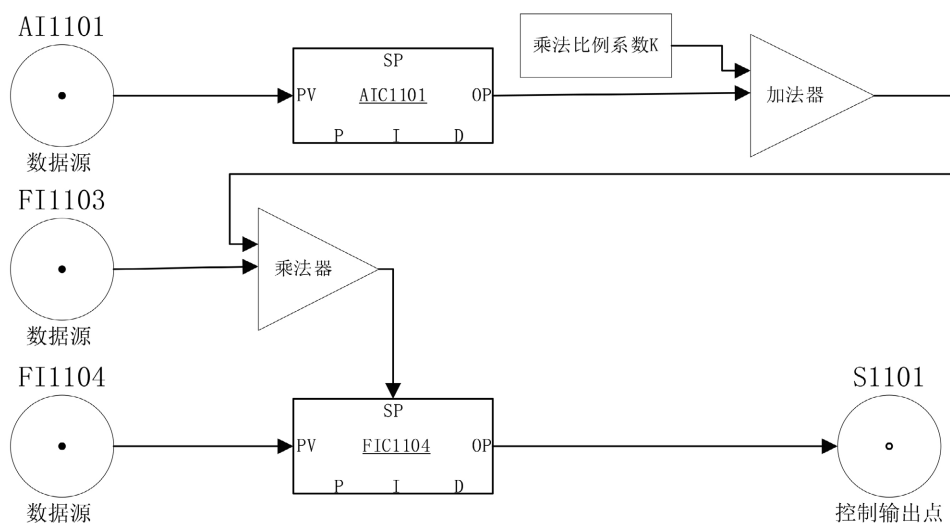


Figure 6. CFC implementation diagram of flue gas oxygen content cascade-ratio correction

图 6. 烟气含氧量串级 - 比值校正 CFC 实现图

## 4.3. SFC 冷态开车顺序控制

本系统设计中所有顺序控制均通过 PCS7 的顺序功能图 SFC 实现。SFC 是一种基于状态的图形化编程语言,以“步”(Step)和“转移条件”(Transition)为核心元素,能够清晰展现系统的步进逻辑与状态转换条件,特别适用于描述流程工业中的开车、停车、批次生产等具有明显阶段特征的控制任务。与传统

的文本逻辑相比，SFC 编程具有直观、易调试、可在线监控等优点，同时可在运行过程中实时检测和修改 CFC 中的模拟量与数字量信号，便于操作人员根据工况变化进行干预。

锅炉冷态开车流程采用基于过程状态的条件触发机制，即每一步的推进不再依赖于固定的时间延时，而是以实际过程变量是否达到预设阈值作为判断依据，从而有效避免按固定时序投运可能引发的系统振荡或参数超调。根据赛题提供的开车步骤要求，将启动过程划分为 5 个主要阶段，每个阶段均设定了明确的操作内容及转换条件，如表 2 所示。各步骤在 SFC 中通过顺序步进结构实现，当前步骤完成后自动判断条件是否满足，满足则进入下一步，否则保持当前步并继续监测。实践证明，该 SFC 顺序控制方案显著降低了冷态开车的操作难度，提高了系统的自动化水平与运行安全性。

**Table 2.** Cold start sequence control steps

**表 2.** 锅炉冷态开车顺序控制步骤表

步骤	操作内容	转换条件
1. 锅炉上水	开汽包放空阀，启上水泵 P1101，调给水阀使液位至 50%	液位稳定在 $50\% \pm 2\%$
2. 炉膛点火	启引风机 K1101，调烟道挡板维持负压，吹扫 300 s； 启燃料泵 P1102，点火	负压稳定，火焰确认
3. 升温升压	燃料量提升；关放空阀，开蒸汽出口阀	汽包压力 $\geq 1.5 \text{ MPa}$
4. 回路自动	顺序投自动：给水副回路→液位主回路→压力回路→ 温度回路	温度 $450^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ ， 压力 $3.8 \text{ MPa} \pm 20 \text{ kPa}$
5. 负荷提升	增大出口流量阀开度，提升处理量至 30 kg/s	关键参数在工艺范围内

在 SFC 实现中，上述每一步对应一个 SFC 步(Step)，步与步之间通过转移条件(Transition)连接。此外，系统设有独立的安全联锁监视任务，在任意步骤中若检测到汽包超压( $>4.5 \text{ MPa}$ )或水位超限( $<30\%$ 或 $>70\%$ )，立即中断顺序控制并执行紧急停车程序。

#### 4.4. PID 控制器参数整定

为确保各控制回路在解耦策略下获得良好的动态响应与稳态精度，本研究对关键 PID 控制器进行了参数整定。整定方法采用工程上广泛应用的临界比例度法(Ziegler-Nichols 法)结合现场经验微调，具体步骤如下：

临界增益测定：将控制器设置为纯比例作用(积分时间最大，微分时间为 0)，逐渐增大比例增益  $K_p$ ，直至系统输出出现等幅振荡，记录此时的临界增益  $K_u$  和临界振荡周期  $T_u$ 。

初始参数计算：根据 Ziegler-Nichols 整定规则，按表 3 的公式计算 PID 参数的初始值。

**Table 3.** Ziegler-Nichols tuning formulas

**表 3.** Ziegler-Nichols 整定公式

控制器类型	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5 K_u$	—	—
PI	$0.45 K_u$	$T_u/1.2$	—
PID	$0.6 K_u$	$T_u/2$	$T_u/8$

仿真微调：在 SMPT-1000 仿真平台上进行阶跃响应测试，依据超调量、调节时间和稳态误差对参数进行微调优化，使系统在额定工况(21 kg/s)下兼顾快速性与稳定性。表 4 中的数值为多次调试后的最终结果，保留了小数点后多位以反映实际整定精度。其中，汽包液位主控制器采用 PI 控制，避免微分作用放大虚假水位噪声；过热蒸汽温度主控制器采用 PI 控制以兼顾快速性与稳态精度；副控制器均采用 P 控制，强调响应速度，减小内环滞后。

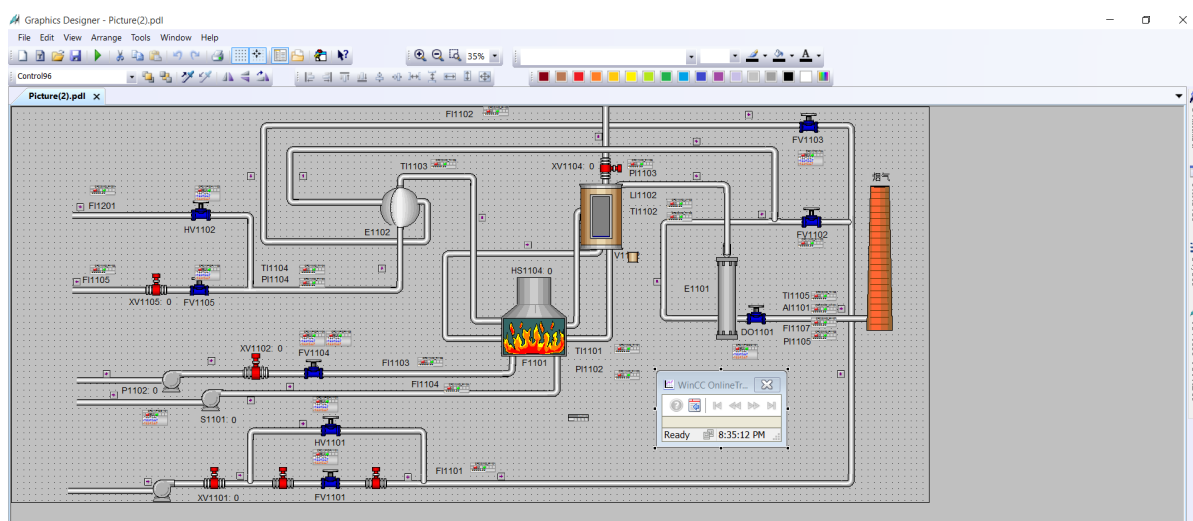
**Table 4.** PID parameters of key control loops  
**表 4.** 关键回路 PID 控制器参数

控制回路	控制器位号	控制类型	比例增益 $K_p$	积分时间 $T_i$ (s)
汽包液位主控	PID_LI1102	PI	0.83	126.5
给水流量副控	PID_FI1102	P	1.18	—
过热蒸汽温度主控	PID_TI1104	PID	2.46	78.3
减温器温度副控	PID_TI1103	P	1.76	—
烟气含氧量主控	PID_AI1101	PI	1.12	58.6
空燃比副控	PID_FI1104	P	1.05	—

上述参数在额定工况(21 kg/s)下整定完成，在变负荷工况(30 kg/s)下未作调整，系统仍能保持良好的动态性能，表明参数具有较好的工况适应性。在实际工程应用中，可在此基础上根据现场噪声和阀门特性进行微调，以达到最优控制效果。

#### 4.5. WINCC 组态设计

为实现锅炉多变量解耦控制系统的高效监视与操作，本系统选用西门子 SIMATIC WINCC 作为上位监控平台。其 WINCC 组态设计如图 7 所示。WINCC 与 PCS7 深度集成，不仅能实时呈现过程数据，还提供图形化界面、历史趋势记录、报警管理等功能，为操作人员构建了安全直观的控制环境。



**Figure 7.** WINCC configuration design  
**图 7.** WINCC 组态设计图

依据锅炉工艺流程与控制需求，设计了一套层级化的监控画面。以图形方式完整呈现水汽系统、燃烧系统及风烟系统，动态显示汽包液位、过热蒸汽温度、压力、烟气含氧量等关键参数的实时数值与趋势，并用颜色标识阀门开度、泵启停等设备状态。针对汽包液位前馈-串级控制、过热蒸汽压力串级控制、温度串级-分程控制等各个解耦回路，分别设计了专用操作面板，集中显示测量值、设定值和控制器输出，并提供手动/自动切换按钮及PID参数整定输入框。

### 5. 系统性能验证

本研究所有动态响应曲线均基于 SMPT-1000 仿真平台的实时运行数据直接绘制：依托平台自带的采集与导出功能，获取了系统从冷态开车、稳态运行到负荷提升全周期的原始运行数据，未经过任何人工拟合或修改，图 8 完整呈现了这些真实数据对应的关键变量变化过程。

如图 8 所示，冷态开车阶段集中于 0~400 s，各变量从初始值平稳爬升：过热蒸汽温度 TI1104 在 250 s 达到 455℃ 峰值，经小幅衰减振荡后于 400 s 稳定在 450℃ ± 1℃；过热蒸汽压力 PI1104 最高达 3820 kPa，随后稳定在 3800 kPa；汽包液位 LI1102 短暂超调至 52% 后恢复至 50% ± 0.5%，炉膛压力与含氧量也分别稳定在 60 mmH<sub>2</sub>O 和 2.0%，全程无剧烈振荡，体现了解耦控制的稳定性优势。

系统稳态运行约 600 s 后，在 1000 s 处触发负荷阶跃：出口蒸汽流量 FI1105 从 21 kg/s 提升至 30 kg/s。扰动下，各关键变量均表现出优异的动态响应性能：过热蒸汽温度 TI1104 最低降至 444.5℃ (相对偏差 1.2%)，经 80 s 恢复至额定值；压力 PI1104 瞬时最高达 3840 kPa，80 s 内回落至 3800 kPa；汽包液位先降至 47.5% (最大偏差 2.5%) 后快速回升至 50% ± 0.2%，无持续振荡，验证了前馈控制对虚假水位的抑制及分程控制的解耦效果；烟气含氧量短暂波动至 2.9% 与 1.8%，80 s 内恢复至 2.0%。所有关键变量的稳态误差均小于 ±1%，系统抗干扰能力突出。

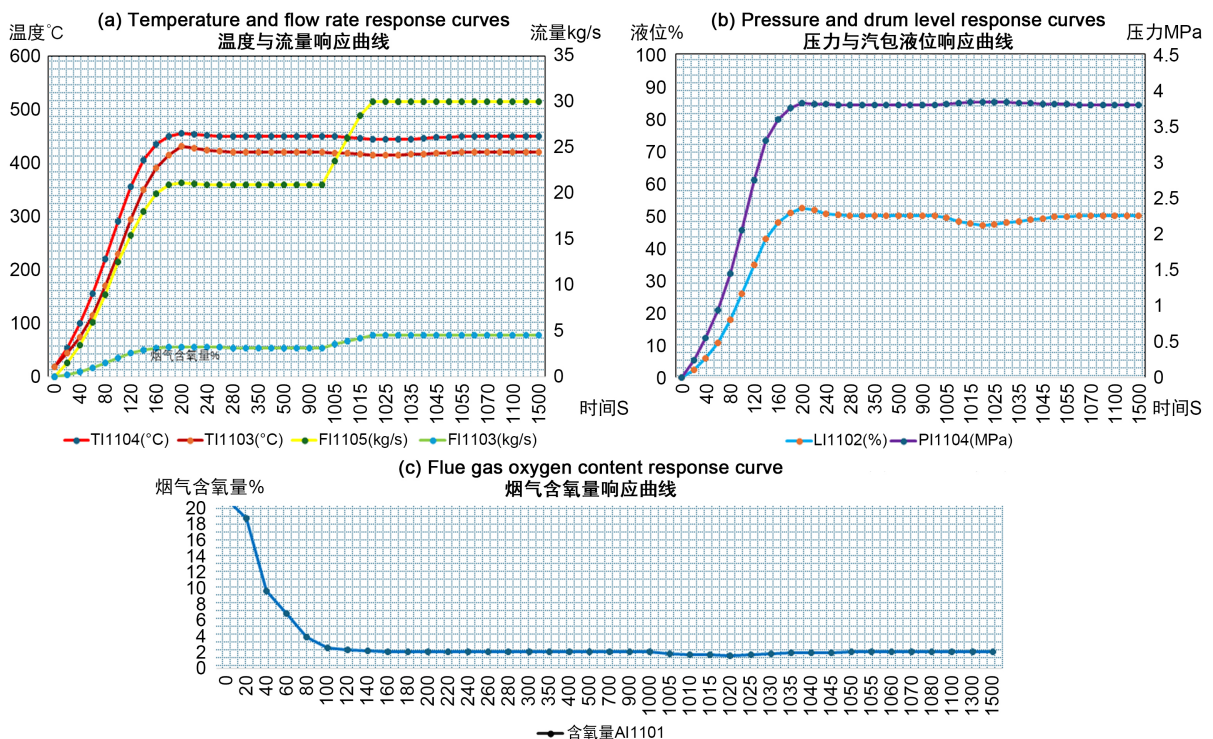


Figure 8. Dynamic response curves of key system variables  
图 8. 系统关键变量动态响应曲线

## 6. 结论

针对自然循环锅炉多变量强耦合的控制难题，本研究没有追求理论上完美但工程上难以实现的完全解耦，而是采取了一种更务实的“精准部分解耦”思路。我们将解耦目标明确锁定在对系统稳定性影响最直接的两个环节：由蒸汽负荷突变引发的“虚假水位”，以及因温度精细调节导致的汽包液位二次扰动。

相应地，控制策略的核心便围绕着这两个关键点展开：一方面，通过引入蒸汽流量前馈的三冲量串级控制，实现了对虚假水位扰动的主动补偿与快速抑制；另一方面，为了从根本上避免温度调节对液位的干扰，我们创新性地设计了一种串级-分程复合控制结构。该结构的妙处在于，它通过减温水阀与省煤器给水阀的协同反动作用，在物理层面“切断”了扰动传递的路径，从而实现了温度与液位系统的静态解耦。

上述策略在西门子 PCS7 平台上完成了从组态到编程的全流程工程实现，并依托 SMPT-1000 高精度仿真平台，系统进行了冷态开车与多种抗干扰工况的测试。仿真结果表明，系统在额定及变负荷运行下，汽包液位、蒸汽压力与温度等关键参数的稳态误差均可控制在 $\pm 1\%$ 以内，且动态过程平稳，印证了部分解耦策略的有效性。

本研究的主要价值在于，为处理类似复杂工业过程的多变量耦合问题提供了一条具有高度工程可行性的技术路径——即不必执着于全局解耦，而应精准识别并着力破解少数关键耦合链路。当然，目前的研究成果基于仿真环境取得，未来的工作将着眼于把本控制方案应用于实物锅炉控制系统，以检验其在真实噪声、建模误差及不确定干扰下的实际鲁棒性与适应能力。

## 参考文献

- [1] 纪超, 王晶, 于建梅. 基于 SMPT-1000 实验平台的锅炉控制实验设计[J]. 实验技术与管理, 2011, 28(7): 47-52.
- [2] 倪晓杰, 马彦霞, 薄翠梅, 等. 基于 PCS7 的锅炉控制系统的设计和实现[J]. 控制工程, 2011, 18(6): 927-930.
- [3] 窦元柯, 邵豫生, 王昊原, 等. 基于 SMPT-1000 的放热反应器控制系统[J]. 化工自动化及仪表, 2024, 51(4): 658-664, 705.
- [4] 茹雪艳, 薛大为, 杨春兰, 等. 基于 SMPT-1000 的过控全流程仿真系统的设计与实现[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2023, 39(2): 11-18.
- [5] 陈晓侠, 薛旭. 基于 PCS7 的环丁砜 SIS 系统设计与实现[J]. 工业仪表与自动化装置, 2025(4): 62-67.
- [6] 邹立超, 汪槩, 李然. 基于 PCS7 的球磨工段智能报警系统的开发及应用[J]. 世界有色金属, 2025(12): 41-43.
- [7] 汪槩. 铅锌选矿厂生产过程的 PCS7 自动化控制策略[J]. 世界有色金属, 2025(16): 41-44.
- [8] 刘春艳, 陈涛涛. 锅炉汽包水位的模糊 PID 控制研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(3): 100-105.
- [9] 李军, 徐志江, 陈斌. 浅谈分程控制系统在贮罐压力控制上的实际应用[J]. 仪器仪表用户, 2025, 32(10): 109-111, 116.
- [10] 曹锦江, 高世平. 基于 EtherNet/IP 工业以太网的 FANUC 机器人上下料单元系统集成应用研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(24): 94-101.