

2-16-2023

## Hardware-in-the-loop Simulation Platform of Loop Control for Municipal Solid Waste Incineration Process

Tianzheng Wang

*1.Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;2.Beijing Laboratory of Smart Environmental Protection, Beijing 100124, China;3.Beijing Institute of Artificial Intelligence, Beijing 100124, China; WangTZ@emails.bjut.edu.cn*

Jian Tang

*1.Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;2.Beijing Laboratory of Smart Environmental Protection, Beijing 100124, China;3.Beijing Institute of Artificial Intelligence, Beijing 100124, China; freeflytang@bjut.edu.cn*

Heng Xia

*1.Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;2.Beijing Laboratory of Smart Environmental Protection, Beijing 100124, China;3.Beijing Institute of Artificial Intelligence, Beijing 100124, China;*

Junfei Qiao

*1.Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;2.Beijing Laboratory of Smart Environmental Protection, Beijing 100124, China;3.Beijing Institute of Artificial Intelligence, Beijing 100124, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Hardware-in-the-loop Simulation Platform of Loop Control for Municipal Solid Waste Incineration Process

## Abstract

**Abstract:** To accurately simulate and realize the multiple input multiple output (MIMO) loop control of municipal solid waste incineration (MSWI) process, a distributed hardware-in-the-loop simulation platform consisting of a real device layer and a virtual object layer is developed based on the actual industrial process. The mechanism model is qualitatively described, and *a data-driven virtual process object model in terms of loop control is established. The software subsystems of the platform and their cooperative operation mode are designed* based on the control requirement. *The hardware and software of the proposed platform are built* and experimentally verified based on actual industrial data. The results show that the platform provides a reliable engineering verification environment for the intelligent modeling and the control algorithm of MSWI process.

## Keywords

municipal solid waste incineration(MSWI), hardware-in-the-loop simulation platform, multiple input multiple output(MIMO) model, loop control

## Recommended Citation

Tianzheng Wang, Jian Tang, Heng Xia, Junfei Qiao. Hardware-in-the-loop Simulation Platform of Loop Control for Municipal Solid Waste Incineration Process[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(2): 241-253.

# 城市固废焚烧过程的回路控制半实物仿真平台

王天峥<sup>1,2,3</sup>, 汤健<sup>1,2,3\*</sup>, 夏恒<sup>1,2,3</sup>, 乔俊飞<sup>1,2,3</sup>

(1. 北京工业大学 信息学部, 北京 100124; 2. 智慧环保北京实验室, 北京 100124; 3. 北京人工智能研究院, 北京 100124)

**摘要:** 为精确模拟和实现城市固废焚烧(municipal solid waste incineration, MSWI)过程的多入多出(multiple input multiple output, MIMO)回路控制, 面向实际工业过程开发了由真实设备层和虚拟对象层组成的分布式半实物仿真实验平台。结合对 MSWI 工艺流程机理模型的定性描述, 建立了数据驱动的面向回路控制的虚拟过程对象模型, 依据回路控制需求设计了该平台的各软件子系统, 以及相互间的协同运行模式, 搭建了平台硬件和开发了平台软件, 并采用工业实际数据进行实验验证。结果表明: 该平台为 MSWI 过程的智能建模与控制算法的进一步研究提供了可靠的工程化验证环境。

**关键词:** 城市固废焚烧; 半实物仿真平台; 多入多出模型; 回路控制

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)02-0241-13

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1184

**引用格式:** 王天峥, 汤健, 夏恒, 等. 城市固废焚烧过程的回路控制半实物仿真平台[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(2): 241-253.

**Reference format:** Wang Tianzheng, Tang Jian, Xia Heng, et al. Hardware-in-the-loop Simulation Platform of Loop Control for Municipal Solid Waste Incineration Process[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(2): 241-253.

## Hardware-in-the-loop Simulation Platform of Loop Control for Municipal Solid Waste Incineration Process

Wang Tianzheng<sup>1,2,3</sup>, Tang Jian<sup>1,2,3\*</sup>, Xia Heng<sup>1,2,3</sup>, Qiao Junfei<sup>1,2,3</sup>

(1. Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Laboratory of Smart Environmental Protection, Beijing 100124, China; 3. Beijing Institute of Artificial Intelligence, Beijing 100124, China)

**Abstract:** To accurately simulate and realize the multiple input multiple output (MIMO) loop control of municipal solid waste incineration (MSWI) process, a distributed hardware-in-the-loop simulation platform consisting of a real device layer and a virtual object layer is developed based on the actual industrial process. The mechanism model is qualitatively described, and a data-driven virtual process object model in terms of loop control is established. The software subsystems of the platform and their cooperative operation mode are designed based on the control requirement. The hardware and software of the proposed platform are built and experimentally verified based on actual industrial data. The results show that the platform provides a reliable engineering verification environment for the intelligent modeling and the control algorithm of MSWI process.

**Keywords:** municipal solid waste incineration(MSWI); hardware-in-the-loop simulation platform; multiple input multiple output(MIMO) model; loop control

收稿日期: 2021-11-17 修回日期: 2021-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(62073006, 62021003, 618909305, 61873009); 北京市自然科学基金(4212032, 4192009)

第一作者: 王天峥(1997-), 男, 回族, 硕士生, 研究方向为城市固废焚烧过程仿真平台。Email: WangTZ@emails.bjut.edu.cn

通讯作者: 汤健(1974-), 男, 教授, 博士, 研究方向为小样本数据建模、固废处理智能控制。Email: freeflytang@bjut.edu.cn

## 0 引言

随着城镇人口的增长和城市化进程的加快,全球城市固废(municipal solid waste, MSW)的产生量预计在 2050 年达到 34 亿吨<sup>[1]</sup>。研究表明,MSW 的产生量受家庭大小、收入水平和教育程度等诸多因素的影响<sup>[2]</sup>,其组分也因产生环境的不同而存在差异性<sup>[3]</sup>。MSWI(municipal solid waste incineration)技术能够实现 MSW 的无害化、减量化和资源化处理并已经得到广泛应用<sup>[4-6]</sup>。与发达国家相比,我国 MSW 的回收机制尚不完善,存在有机组分高、热值低等特点<sup>[7]</sup>。与此同时,在处理技术和管理策略等方面也存在着诸多问题<sup>[8]</sup>。由于 MSWI 过程具有多变量、强耦合、强非线性等特点<sup>[9]</sup>,实现其智能优化控制具有巨大的挑战性。目前,污染物排放超标已成为业界的突出问题<sup>[10-13]</sup>。Zheng 等<sup>[14]</sup>指出,为预防烟气排放造成的二次污染,需研究适合我国 MSW 特性的污染排放优化控制技术。

显而易见,进行 MSWI 过程优化控制的研究需构建面向回路控制的过程对象模型予以支撑。针对 MSWI 过程建模,目前研究大多依据商业版数值仿真软件进行,如王克等<sup>[15]</sup>通过计算流体力学仿真 350 t/d 焚烧炉,表明通过富氧及烟气再循环机制可增强炉内平均湍流强度,进而保证烟气中有害物质的充分分解;Wang 等<sup>[16]</sup>仿真了炉排上固相 MSW 和炉膛内气相组分的燃烧过程;Elisa 等<sup>[17]</sup>利用 Simulink 建立了 MSWI 过程动力学模型,表明风量比炉排速度具有更快的动态响应;Mahlia 等<sup>[18]</sup>利用状态空间动态模型研究 MSWI 过程的控制策略;Alobaid 等<sup>[19]</sup>建立了 MSWI 过程动力学模型,并采用工厂设计数据进行了验证。但是,上述研究主要针对理想的 MSWI 过程进行建模,并未考虑实际被控对象的多入多出(multiple input multiple output, MIMO)特性。

此外,MSWI 过程的分布式控制系统具有很强的封闭性。工业现场为保证安全,不仅限制外部设备接入,而且也不允许在线进行先进控制算

法调试,这使得开发仿真实验平台已成为必然需求。针对这一情况,秦宇飞等<sup>[20]</sup>开发了用于污染排放监测的环境监测系统;严爱军等<sup>[21]</sup>开发了半实物仿真实验平台,采用结合案例推理和专家规则的风量智能设定算法验证了有效性。上述研究虽采用软硬件结合方式开发了实验平台,但并未用于多个回路控制算法的研究,也未考虑实际 MSWI 过程的 MIMO 特性,同时,也未将执行机构模型、过程对象模型和仪表装置模型相分离,忽略了工业现场信号传递的真实性和可能存在的干扰因素。面对复杂工业过程,传统的实物实验平台多以水箱、阀门、变频器等为基础,搭建简化的被控对象原型<sup>[22-23]</sup>,其因场地大小、安全性等问题存在诸多局限性<sup>[24]</sup>。因此,建立还原度高、面向 MSWI 过程 MIMO 特性的回路控制半实物仿真实验平台是非常必要的。

综上,本文在描述 MSWI 现状的基础上,设计开发了由真实设备层和虚拟对象层组成的面向 MSWI 过程的 MIMO 回路控制半实物仿真实验平台。

## 1 MSWI 过程描述与平台结构

### 1.1 面向 MSWI 过程对象建模的描述

北京某 MSWI 电厂的工艺流程如图 1 所示。首先,MSW 由市政环卫车辆运至,经地磅称重后排入固废池,经过 3~7 天的生物发酵脱水后,被抓斗抛入料斗;然后,进料器将 MSW 推向炉排,经过干燥、燃烧、燃烬 3 个阶段,产生的烟气经过炉膛、水平烟道和烟气处理后由烟囱排出;最后,焚烧产生的灰渣和烟气处理后产生的飞灰运输至指定地点后进行二次处理。

从机理视角,MSWI 过程包含炉排上固相 MSW 燃烧、炉膛内气相燃烧、炉膛内脱硝、烟气处理等模型。具体描述如下:

炉排上固相 MSW 燃烧模型以 MSW 的固体水分含量、固体温度、固相密度、氧气压力、物料

颗粒直径等为输入, 以水分蒸发速率、挥发分析出速率、CO和CO<sub>2</sub>浓度比率、焦炭燃烧反应速率为输出, 可表示为

$$\{C_{W,S}, T_s, \rho_s, P_{O_2}, d_p, \dots\} \xrightarrow{f_{\text{solid}}(\cdot)} \{R_{\text{evp}}, R_v, \alpha, R_c, \dots\}$$

其中,  $f_{\text{solid}}(\cdot)$ 为固相MSW燃烧机理模型。

伴随着燃烧过程的进行以及温度的变化, 炉膛气体中物质成分的含量逐渐发生变化。为将燃烧产生的二噁英等污染物在高温环境下分解, 其温度应控制在850°C以上并保证烟气停留2 s以上。气相组分燃烧模型以炉膛空气密度、气体流速、气体质量分数等为输入, 以气体成分含量、气体温度等为输出, 可表示为

$$\{\rho_{\text{furnace}}, v_{\text{air}}, Y_{\text{air}}, \dots\} \xrightarrow{f_{\text{air}}(\cdot)} \{\rho_{\text{air}}, T_{\text{air}}, \dots\}$$

其中,  $f_{\text{air}}(\cdot)$ 为气相组分燃烧模型。

同时, 炉膛中生成的NO<sub>x</sub>需进行脱硝处理。脱硝模型以温度、还原剂类型、空气系数等为输入, 以NO<sub>x</sub>含量为输出, 可表示为

$$\{T, R_{\text{type}}, \alpha_{\text{air}}, \dots\} \xrightarrow{f_{\text{SNCR}}(\cdot)} \{\rho_{\text{NO}_x}\}$$

其中,  $f_{\text{SNCR}}(\cdot)$ 为脱硝模型。

随后, 高温烟气经余热锅炉进入烟气处理阶段, 添加石灰、活性炭和水后, 利用烟气处理设备降低污染排放。烟气处理模型以处理前烟气含量、温度、气体流速等为输入, 以处理后烟气含量等为输出, 可表示为

$$\{\rho_{\text{gas}}^{\text{Before}}, T, v_{\text{air}}, \dots\} \xrightarrow{f_{\text{GAS}}(\cdot)} \{\rho_{\text{gas}}^{\text{After}}, \dots\}$$

其中,  $f_{\text{GAS}}(\cdot)$ 为烟气处理过程机理模型。

由此可知, MSWI过程涉及的相关机理均难以清晰地描述, 从而导致构建精确数学模型的难度很大。

## 1.2 面向MIMO回路控制的平台结构

基于上述定性机理分析, 结合实际MSWI过程的MIMO回路控制层级(如图1左侧), 本文提出由真实设备层和虚拟对象层组成的半实物仿真实

验平台, 结构如图1右侧所示。

真实设备层中包括监控系统设备与控制系统设备, 其中, 监控系统设备除进行MSWI过程运行状态的监控外, 还具有控制设备程序下载、MIMO回路设定值和控制器参数的修改等功能; 控制系统设备采用与实际工业现场相一致的控制器, 通过装载相关算法实现MIMO回路控制及变量转换功能:

$$\begin{cases} u_1 = f_1^{\text{control}}(sp_1, y_1^I, \theta_1^{\text{control}}, u_1^{\text{max}}, u_1^{\text{min}}) \\ u_2 = f_2^{\text{control}}(sp_2, y_2^I, \theta_2^{\text{control}}, u_2^{\text{max}}, u_2^{\text{min}}) \\ \dots \\ u_Q = f_Q^{\text{control}}(sp_Q, y_Q^I, \theta_Q^{\text{control}}, u_Q^{\text{max}}, u_Q^{\text{min}}) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\{u_1, u_2, \dots, u_Q\}$ 为真实设备层输出的电信号;  $\{y_1^I, y_2^I, \dots, y_Q^I\}$ 为虚拟对象层反馈的电信号。

虚拟对象层由执行机构模型、过程对象模型和仪表装置模型组成, 其中, 执行机构模型将真实设备层的电信号输出至过程对象模型:

$$\begin{cases} u_1^{\text{process}} = f_1^A(u_1) \\ u_2^{\text{process}} = f_2^A(u_2) \\ \dots \\ u_Q^{\text{process}} = f_Q^A(u_Q) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\{u_1^{\text{process}}, u_2^{\text{process}}, \dots, u_Q^{\text{process}}\}$ 为执行机构变量值。

过程对象模型通过接收执行机构模型的输出及其他相关过程变量模拟被控对象特性, 获得被控过程变量值并输出至仪表装置模型:

$$\{y_1, y_2, \dots, y_Q\} = f^{\text{process}}(z_1, z_2, \dots, z_M) \quad (3)$$

式中:  $\{z_1, z_2, \dots, z_M\}$ 为过程对象模型的输入;  $\{y_1, y_2, \dots, y_Q\}$ 为过程对象模型的输出。

仪表装置模型接收过程对象模型输出的被控变量值, 经特性模拟后以电信号方式反馈至真实设备层:

$$\begin{cases} y_1^I = f_1^I(y_1) \\ y_2^I = f_2^I(y_2) \\ \dots \\ y_Q^I = f_Q^I(y_Q) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\{y_1^I, y_2^I, \dots, y_Q^I\}$ 为过程变量电信号。



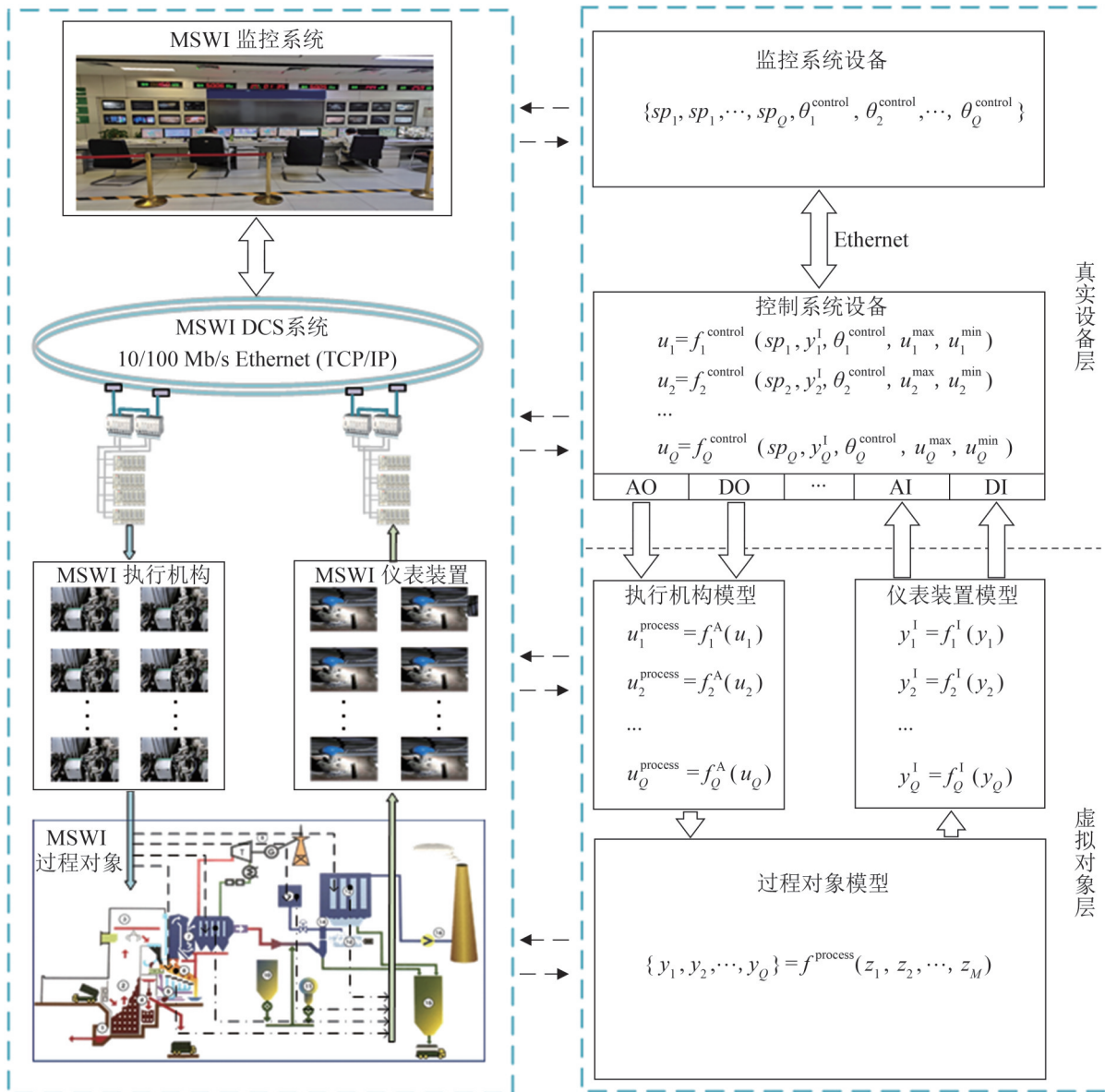


图 1 北京某 MSWI 电厂工艺流程与本文所提半实物平台结构  
Fig. 1 Process flow of a MSWI power plant in Beijing and platform structure of proposed hardware in-the-loop

真实设备层和虚拟对象层之间通过硬接线和数据采集卡实现通讯，能够真实模拟工业现场的双绞线传输方式，具体表现：控制系统设备通过硬接线输出工业过程中常用的电信号用以表征控制器输出，而不是一般仿真中采用基于网络的数字信号输出；可通过在信号传输过程中添加相关设备模拟实际工业现场存在的线缆损坏导致的通讯中断、传输延迟等问题；采用数据采集卡对电信号进行接收，也能够模拟执行机构存在的信号延迟、设备损坏等

现象；在信号反馈至真实设备的过程中，同样采用的是硬接线方式，也可模拟工业现场中可能存在的上述信号传递问题。层级内部之间基于 Ethernet 采用 OPC(OLE for process control)方式进行数据交换。

综上，通过硬接线方式实现真实设备层与虚拟设备层之间的连接，能够有效避免传统仿真实验平台中由于采用数字传输而缺失的通讯中断、传输延迟等故障问题，并能够依据需求模拟实际工业现场中可能存在的干扰因素。

## 2 MSWI过程虚拟对象层模型

### 2.1 MSWI过程执行机构模型

真实设备层与搭载执行机构模型的虚拟执行机构设备间传输标准工业电信号。以给料器为例, 信号转换公式为

$$u_{feeder}^{process} = \frac{P_{feeder}^{max} - P_{feeder}^{min}}{U_{feeder}^{max} - U_{feeder}^{min}} u_{feeder} \quad (5)$$

式中:  $P_{feeder}^{max}$  和  $P_{feeder}^{min}$  为给料器速度的上限和下限;  $U_{feeder}^{max}$  和  $U_{feeder}^{min}$  为转换后电信号输出的上限和下限;  $u_{feeder}$  和  $u_{feeder}^{process}$  为当前速度的电信号值和实际值。

执行机构模型采用带有时间常数的惯性环节表征。以给料器为例, 描述如下:

$$\dot{u}_{feeder}^{process} = -\frac{1}{T_{feeder}} u_{feeder}^{process} + \frac{K_{feeder}}{T_{feeder}} U_{feeder}^{process} (t - \tau) \quad (6)$$

式中:  $u_{feeder}^{process}$  和  $U_{feeder}^{process}$  为给料速度和电机电压;  $T_{feeder}$  为响应时间常数;  $K_{feeder}$  为稳态时电机电压与给料速度之间的比例关系;  $\tau$  为滞后时间。

### 2.2 面向控制的MIMO过程对象模型

#### 2.2.1 建模策略

针对MSWI过程进行契合工业实际的机理建模困难的问题, 本文选择关键被控参数建立数据驱动模型。以干燥炉排左1空气流量、干燥炉排右1空气流量等37个变量为输入, 以炉膛温度FT、烟气氧含量OC、主蒸汽流量BSF为输出, 建立了对随机森林<sup>[25-26]</sup>和梯度决策树<sup>[27-28]</sup>算法进行混合集成的MIMO过程对象模型, 其包括Bootstrap与随机子空间(random sub-space method, RSM)采样模块和模型构建模块, 策略如图2所示。

#### 2.2.2 建模算法

##### 2.2.2.1 Bootstrap与RSM采样模块

假设建模数据包含的输入特征个数为M, 由1.2节可知过程对象模型的输入为

$$\mathbf{Z} = \{z_i\}_{i=1}^N \in \mathbb{R}^{N \times M} \quad (7)$$

式中:  $z_i = [u_1^{process}, u_2^{process}, \dots, u_Q^{process}, y_1, y_2, \dots, y_P]$ , 存在  $M = Q + P$ 。

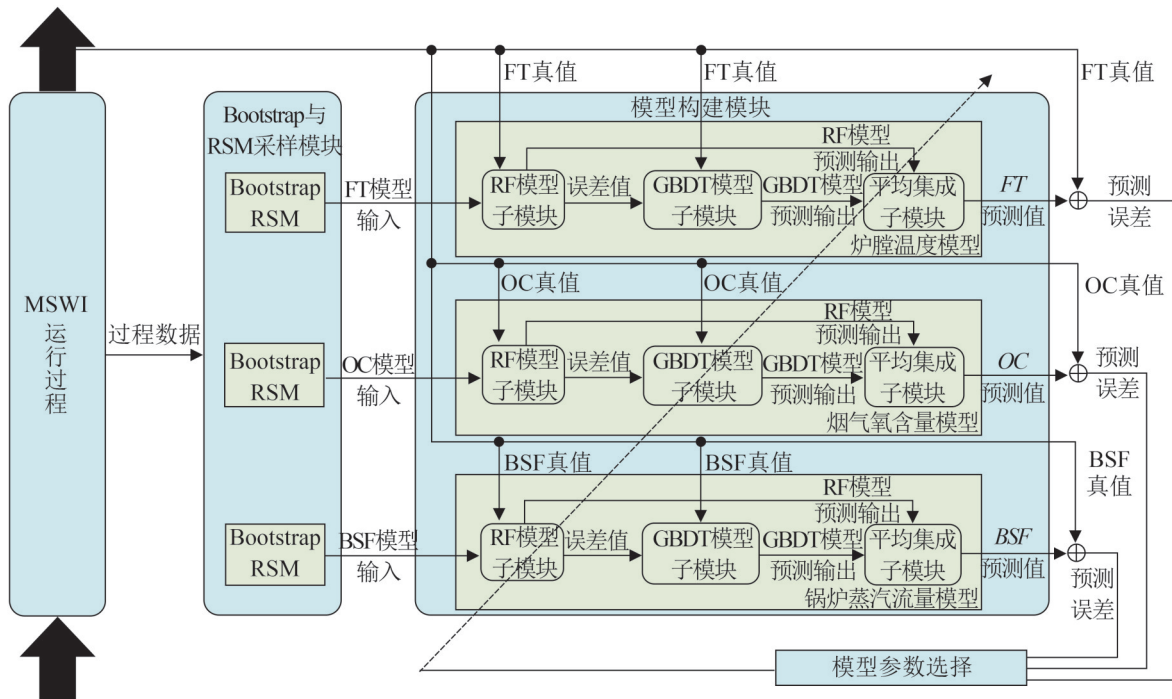


图2 过程对象模型建模策略  
Fig. 2 Modeling strategy of process object model

采用 Bootstrap 机制获得与建模数据具有相同样本数量的训练子集，并基于 RSM 机制随机选择特征，进而生成  $J$  个训练子集，其过程为

$$\mathbf{Z} \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{Z}_{M_{\text{type}}}^1 = \{(\mathbf{z}_{M_{\text{type}}}^1, M^1)_n\}_{i=1}^N \\ \dots \\ \mathbf{Z}_{M_{\text{type}}}^j = \{(\mathbf{z}_{M_{\text{type}}}^j, M^j)_n\}_{i=1}^N \\ \dots \\ \mathbf{Z}_{M_{\text{type}}}^J = \{(\mathbf{z}_{M_{\text{type}}}^J, M^J)_n\}_{i=1}^N \end{array} \right. \quad (8)$$

式中： $\mathbf{Z}_{M_{\text{type}}}^j$  为第  $j$  次选择的针对第  $M_{\text{type}}$  个被控变量的训练子集； $M^j$  为第  $j$  个训练子集中包含的输入特征数量。

### 2.2.2.2 模型构建模块

以 FT 模型的构建为例进行表述。

#### (1) RF 模型子模块

将去除重复样本的训练子集  $\{(\mathbf{z}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}}, M^{j_{\text{FT}}})_n\}_{n=1}^N$  标记为  $\{(\mathbf{z}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}}, M^{j_{\text{FT}}})_{n_{\text{sel}}}\}_{n_{\text{sel}}=1}^N$ ；以第  $m$  个输入特征  $\mathbf{z}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, m}$  作为分割变量，以第  $n_{\text{sel}}$  个样本对应的值  $\mathbf{z}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, m, n_{\text{sel}}}$  作为分割点，将输入特征空间分为两个区域  $R_1^{\text{FT}}$  和  $R_2^{\text{FT}}$ ，如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1^{\text{FT}}(m, \mathbf{z}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, m, n_{\text{sel}}}) = \{(\mathbf{z}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}}, M^{j_{\text{FT}}})_{n_{\text{sel}}} | \mathbf{z}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, m} \leq \mathbf{z}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, m, n_{\text{sel}}}\} \\ R_2^{\text{FT}}(m, \mathbf{z}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, m, n_{\text{sel}}}) = \{(\mathbf{z}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}}, M^{j_{\text{FT}}})_{n_{\text{sel}}} | \mathbf{z}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, m} > \mathbf{z}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, m, n_{\text{sel}}}\} \end{array} \right. \quad (9)$$

通过遍历获得最优分割变量和分割点，直到叶节点样本数小于经验设定阈值  $\theta_{\text{RF-FT}}$ ，准则如下：

$$\min_{m, \mathbf{z}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, m, n_{\text{sel}}}} \left[ \min_{\mathbf{z}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, m} \in R_1^{\text{FT}}(m, \mathbf{z}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, m, n_{\text{sel}}})} \sum (y_1^{j_{\text{FT}}} - C_1^{\text{FT}})^2 + \min_{\mathbf{z}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, m} \in R_2^{\text{FT}}(m, \mathbf{z}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, m, n_{\text{sel}}})} \sum (y_2^{j_{\text{FT}}} - C_2^{\text{FT}})^2 \right] \quad (10)$$

式中： $y_1^{j_{\text{FT}}}$  和  $y_2^{j_{\text{FT}}}$  分别为区域  $R_1^{\text{FT}}$  和  $R_2^{\text{FT}}$  中第  $j_{\text{FT}}$  个训练子集的真值； $C_1^{\text{FT}}$  和  $C_2^{\text{FT}}$  分别为区域  $R_1^{\text{FT}}$  和  $R_2^{\text{FT}}$  中真值的平均值。

将输入特征空间划分为  $K$  个区域并标记为  $R_1, R_2, \dots, R_k, \dots, R_K$ ，基于 CART 回归树构建的 RF 子模型：

$$\hat{y}_{\text{RF-FT}}^{j_{\text{FT}}} = f_{\text{RF-FT}}^{j_{\text{FT}}}(\cdot) = \sum_{k=1}^K c_{\text{RF-FT}}^k I(\mathbf{z}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}}, M^{j_{\text{FT}}} \in R_k) \quad (11)$$

$$c_{\text{RF-FT}}^k = \frac{1}{N_{R_k}} \sum_{n_{R_k}=1}^{N_{R_k}} y_{\text{FT}, n_{R_k}}^{j_{\text{FT}}}, N_{R_k} \leq \theta_{\text{RF-FT}} \quad (12)$$

式中： $N_{R_k}$  为区域  $R_k$  包含的样本数； $y_{\text{FT}, n_{R_k}}^{j_{\text{FT}}}$  为区域  $R_k$  第  $j_{\text{FT}}$  个训练子集的第  $n_{R_k}$  个真值； $I(\cdot)$  为指示函数，当  $\mathbf{z}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, M^{j_{\text{FT}}}} \in R_k$  存在时函数值为 1，否则为 0。

所构建的 RF 子模型预测误差为

$$\mathbf{e}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, 0} = \mathbf{y}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}} - \hat{\mathbf{y}}_{\text{RF-FT}}^{j_{\text{FT}}} = \{(\mathbf{e}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, 0})_n\}_{n=1}^N \quad (13)$$

得到预测误差集合  $\mathbf{e}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, 0}$ 。

#### (2) GBDT 模型子模块

首先，第 1 个子模型  $f_{\text{GBDT-FT}}^{j_{\text{FT}}, 1}(\cdot)$  为

$$\hat{\mathbf{y}}_{\text{GBDT-FT}}^{j_{\text{FT}}, 1} = f_{\text{GBDT-FT}}^{j_{\text{FT}}, 1}(\cdot) = \{(\mathbf{z}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}}, M^{j_{\text{FT}}})_n\}_{n=1}^N, \mathbf{e}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, 0} \quad (14)$$

上述子模型的损失函数定义为

$$L_{\text{GBDT-FT}}(\mathbf{y}^{j_{\text{FT}}}, \hat{\mathbf{y}}_{\text{GBDT-FT}}^{j_{\text{FT}}, 1}) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \left( (\mathbf{e}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, 0})_n - (\hat{\mathbf{y}}_{\text{GBDT-FT}}^{j_{\text{FT}}, 1})_n \right)^2 \quad (15)$$

式中： $(\hat{\mathbf{y}}_{\text{GBDT-FT}}^{j_{\text{FT}}, 1})_n$  为第  $j_{\text{FT}}$  个训练子集中第  $n$  个样本的预测值。

计算子模型  $f_{\text{GBDT-FT}}^{j_{\text{FT}}, 1}(\cdot)$  的输出残差：

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, 1} &= \mathbf{e}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, 0} - f_{\text{GBDT-FT}}^{j_{\text{FT}}, 1}(\cdot) = \\ & \mathbf{y}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}} - f_{\text{RF-FT}}^{j_{\text{FT}}}(\cdot) - f_{\text{GBDT-FT}}^{j_{\text{FT}}, 1}(\cdot) = \\ & \mathbf{y}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}} - \hat{\mathbf{y}}_{\text{RF-FT}}^{j_{\text{FT}}} - \hat{\mathbf{y}}_{\text{GBDT-FT}}^{j_{\text{FT}}, 1} \end{aligned} \quad (16)$$

将  $\mathbf{e}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, 1}$  作为第 2 个子模型  $f_{\text{GBDT-FT}}^{j_{\text{FT}}, 2}(\cdot)$  的建模数据真值。同理，第 2 个子模型为

$$\hat{\mathbf{y}}_{\text{GBDT-FT}}^{j_{\text{FT}}, 2} = f_{\text{GBDT-FT}}^{j_{\text{FT}}, 2}(\cdot) = \{(\mathbf{z}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}}, M^{j_{\text{FT}}})_n\}_{n=1}^N, \mathbf{e}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, 1} \quad (17)$$

可得到第  $i^{\text{FT}}$  个子模型  $f_{\text{GBDT-FT}}^{j_{\text{FT}}, i^{\text{FT}}}(\cdot)$ ，其残差计算为

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, i^{\text{FT}}} &= \mathbf{y}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}} - f_{\text{RF-FT}}^{j_{\text{FT}}}(\cdot) - f_{\text{GBDT-FT}}^{j_{\text{FT}}, 1}(\cdot) - \dots - f_{\text{GBDT-FT}}^{j_{\text{FT}}, i^{\text{FT}}}(\cdot) = \\ & \mathbf{y}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}} - \hat{\mathbf{y}}_{\text{RF-FT}}^{j_{\text{FT}}} - \hat{\mathbf{y}}_{\text{GBDT-FT}}^{j_{\text{FT}}, 1} - \dots - \hat{\mathbf{y}}_{\text{GBDT-FT}}^{j_{\text{FT}}, i^{\text{FT}}} \end{aligned} \quad (18)$$

在迭代  $(I^{\text{FT}} - 1)$  次后，第  $(I^{\text{FT}} - 1)$  个子模型的建模数据真值为

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}, I^{\text{FT}}-1} &= \mathbf{y}_{\text{FT}}^{j_{\text{FT}}} - \hat{\mathbf{y}}_{\text{RF-FT}}^{j_{\text{FT}}} - \hat{\mathbf{y}}_{\text{GBDT-FT}}^{j_{\text{FT}}, 1} - \dots - \\ & \hat{\mathbf{y}}_{\text{GBDT-FT}}^{j_{\text{FT}}, I^{\text{FT}}-1} - \dots - \hat{\mathbf{y}}_{\text{GBDT-FT}}^{j_{\text{FT}}, I^{\text{FT}}-1} \end{aligned} \quad (19)$$



因此, 第  $I^{FT}$  个子模型为

$$\hat{y}_{GBDT \cdot FT}^{j^{FT}, I^{FT}} = f_{GBDT \cdot FT}^{j^{FT}, I^{FT}} \left( \left\{ (z_{FT}^{j^{FT}, I^{FT}}, M^{j^{FT}})_n \right\}_{n=1}^N, e_{FT}^{j^{FT}, I^{FT}-1} \right) \quad (20)$$

全部基于第  $j^{FT}$  个训练子集的  $I^{FT}$  个子模型为

$$\left\{ f_{GBDT \cdot FT}^{j^{FT}, I^{FT}}(\cdot) \right\}_{j^{FT}=1}^{I^{FT}}, \text{ 其输出为 } \left\{ \hat{y}_{GBDT \cdot FT}^{j^{FT}, I^{FT}} \right\}_{j^{FT}=1}^{I^{FT}}。$$

(3) 平均集成子模块

由上述 2 个子模块的构建过程可知, 全部 RF 和 GBDT 子模型可表示为  $\{f_{RF \cdot FT}^{j^{FT}}(\cdot)\}_{j^{FT}=1}^{I^{FT}}$  和  $\{f_{GBDT \cdot FT}^{j^{FT}, I^{FT}}(\cdot)\}_{j^{FT}=1}^{I^{FT}}$ 。对于第  $j^{FT}$  个训练子集, 此处构建了  $I^{FT}$  个 RF 子模型和  $I^{FT}$  个 GBDT 子模型, 其预测输出之和为最终输出:

$$\begin{aligned} \hat{y}_{FT}^{j^{FT}} &= \hat{y}_{RF \cdot FT}^{j^{FT}} + \hat{y}_{GBDT \cdot FT}^{j^{FT}, 1} + \dots + \hat{y}_{GBDT \cdot FT}^{j^{FT}, I^{FT}} \\ \hat{y}_{GBDT \cdot FT}^{j^{FT}, I^{FT}-1} &= \hat{y}_{RF \cdot FT}^{j^{FT}} + \sum_{i^{FT}=1}^{I^{FT}} \hat{y}_{GBDT \cdot FT}^{j^{FT}, i^{FT}} \\ f_{RF \cdot FT}^{j^{FT}}(\cdot) &+ \sum_{i^{FT}=1}^{I^{FT}} f_{GBDT \cdot FT}^{j^{FT}, i^{FT}}(\cdot) \end{aligned} \quad (21)$$

由于  $J^{FT}$  个训练子集是平行的, 此处平均加权上述输出, 获得预测输出:

$$\begin{aligned} \hat{y}_{FT} &= \frac{1}{J^{FT}} \sum_{j^{FT}=1}^{J^{FT}} \hat{y}_{FT}^{j^{FT}} \\ &= \frac{1}{J^{FT}} \sum_{j^{FT}=1}^{J^{FT}} \left( f_{RF \cdot FT}^{j^{FT}}(\cdot) + \sum_{i^{FT}=1}^{I^{FT}} f_{GBDT \cdot FT}^{j^{FT}, i^{FT}}(\cdot) \right) \end{aligned} \quad (22)$$

### 2.3 MSWI 过程仪表装置模型

仪表装置采用比例环节近似。以一次风流量计为例:

$$y_{pri}^I = -\frac{1}{T_{pri}} y_{pri}^I + \frac{K_{pri}}{T_{pri}} u_{pri}^{process} \quad (23)$$

式中:  $y_{pri}^I$  和  $u_{pri}^{process}$  为单位时间流量和阀门开度;  $T_{pri}$  为风量响应时间常数;  $K_{pri}$  为稳态时阀门开度与单位时间流量之间的比例关系。

搭载仪表装置模型的虚拟仪表装置反馈标准工业电信号。以一次风流量计为例, 信号转换公式如下:

$$y_{pri}^I = \frac{U_{pri}^{max} - U_{pri}^{min}}{P_{pri}^{max} - P_{pri}^{min}} y_{pri} \quad (24)$$

式中:  $P_{pri}^{max}$  和  $P_{pri}^{min}$  为流量计的上限和下限;  $U_{pri}^{max}$  和  $U_{pri}^{min}$  为反馈电信号的上限和下限;  $y_{pri}^I$  和  $y_{pri}$  为流量计的电信号值和实际值。

## 3 半实物仿真平台软件设计

实验平台软件的设计结构如图 3 所示。

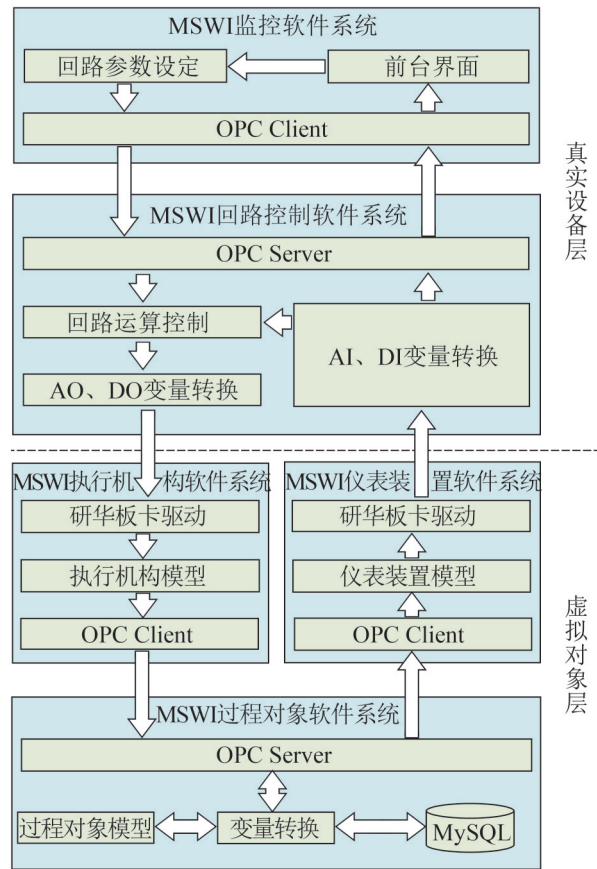


图 3 半实物仿真实验平台软件设计结构  
Fig. 3 Software design structure of hardware-in-the-loop simulation experiment platform

由图 3 可知, 真实设备层包括监控和回路控制软件系统; 虚拟对象层包括执行机构、过程对象和仪表装置软件系统。

### 3.1 真实设备层

MSWI 监控软件系统采用 OPC Client 获取回路控制系统中发送至 OPC Server 的过程变量值,

并以图形化的方式在焚烧过程、炉排运行状态等界面显示。同时，具备回路参数设定与修改功能，以实现监控功能。

MSWI回路控制软件系统主要运行回路运算控制算法，后者由监控设备下载至控制器中，其通过接收仪表装置软件系统的电信号，基于误差进行PID控制向执行机构输出电信号，以实现被控变量对设定值的跟踪。

针对操作变量与被控变量间的匹配关系，本文基于历史数据采用互信息确定，如图4所示。

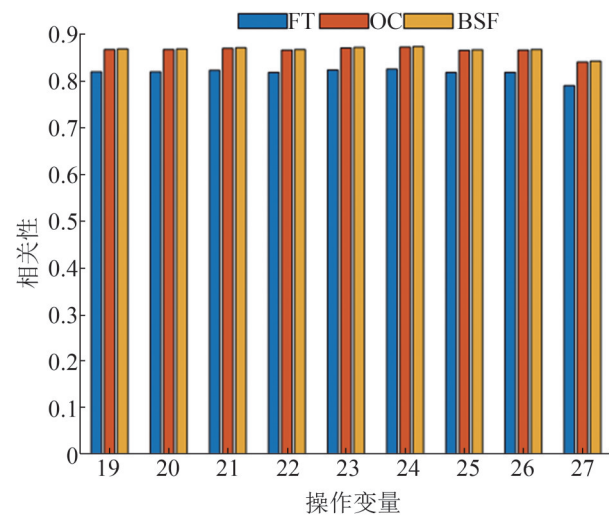


图4 基于互信息的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis based on mutual information

由图4可知，相较于其他过程变量而言，与FT、OC和BSF的互信息值相对较高的过程变量集中在第19-27个操作变量。结合现场实际经验，本文选择燃烧炉排左1-1段阀门开度、干燥炉排右2段阀门开度和干燥炉排左2段阀门开度作为操作变量。

### 3.2 虚拟对象层

MSWI执行机构软件系统通过数据采集卡及与其相关的程序，将真实设备层输出的电信号转换为模拟信号，并根据转换公式和执行机构模型转换成具有物理意义的执行机构变量值。

MSWI过程对象软件系统通过OPC Server实

现与执行机构和仪表装置间的数据传递，其具备模型选择、建模方式选择和相关参数设置等功能，通过OPC输出被控变量值至仪表装置。系统采用MySQL数据库实现数据的存储与展示。

MSWI仪表装置软件系统采用OPC Client与MSWI过程对象软件系统进行通信，并根据仪表装置模型、转换公式、数据采集卡及与其相关的程序，将被控变量值转换为标准工业电信号，反馈至真实设备层。

### 3.3 半实物仿真实验平台协同运行

本文所提出的实验平台的协同运行示意如图5所示。

由图5可知，协同运行步骤如下：

step 1: MSWI监控软件系统利用OPC通讯方式进行工艺参数显示以及回路参数(如PID控制器参数及其设定值等)的修改与下发；

step 2: MSWI回路控制软件系统接收MSWI过程监控软件系统的回路参数进行运算，并将PID控制器输出结果通过AO模块以电信号方式输出；

step 3: MSWI执行机构软件系统通过数据采集卡和执行机构模型将电信号转换为具有物理意义的操作变量值(如电机频率、阀门开度等)后写入OPC Server，并在前台界面显示；

step 4: MSWI过程对象软件系统以执行机构的操作变量值和其他过程变量值作为过程对象模型输入，进行模拟后输出被控变量值(如温度、氧含量等)，将其写至OPC Server并在前台界面显示，同时将相关变量实时保存至MySQL数据库；

step 5: MSWI仪表装置软件系统接收OPC Server中的被控变量值，基于仪表装置模型和数据采集卡转换为标准工业电信号，反馈至MSWI回路控制系统，同时在前台界面显示。

若被控变量未能跟踪设定值，则在MSWI回路控制系统中进行控制参数调节，重复上述过程

直至实现被控变量对设定值的跟踪。

## 4 平台验证

### 4.1 平台硬件设备

本文所提出的半实物仿真实验平台由 4 台工控机和 1 台控制器组成, 其硬件结构与实物图如图 6 所示。

图 6 中, MSWI 监控设备、执行机构模拟设备、过程对象模拟设备和仪表装置模拟设备的配置为 I5-6500 CPU, 8 GB 内存; 同时, 执行机构和仪表装置模拟设备配置数据采集卡, 回路控制设备硬件由直流电源、通信、CPU、模拟量输入/输出和数字量输入/输出模块组成。

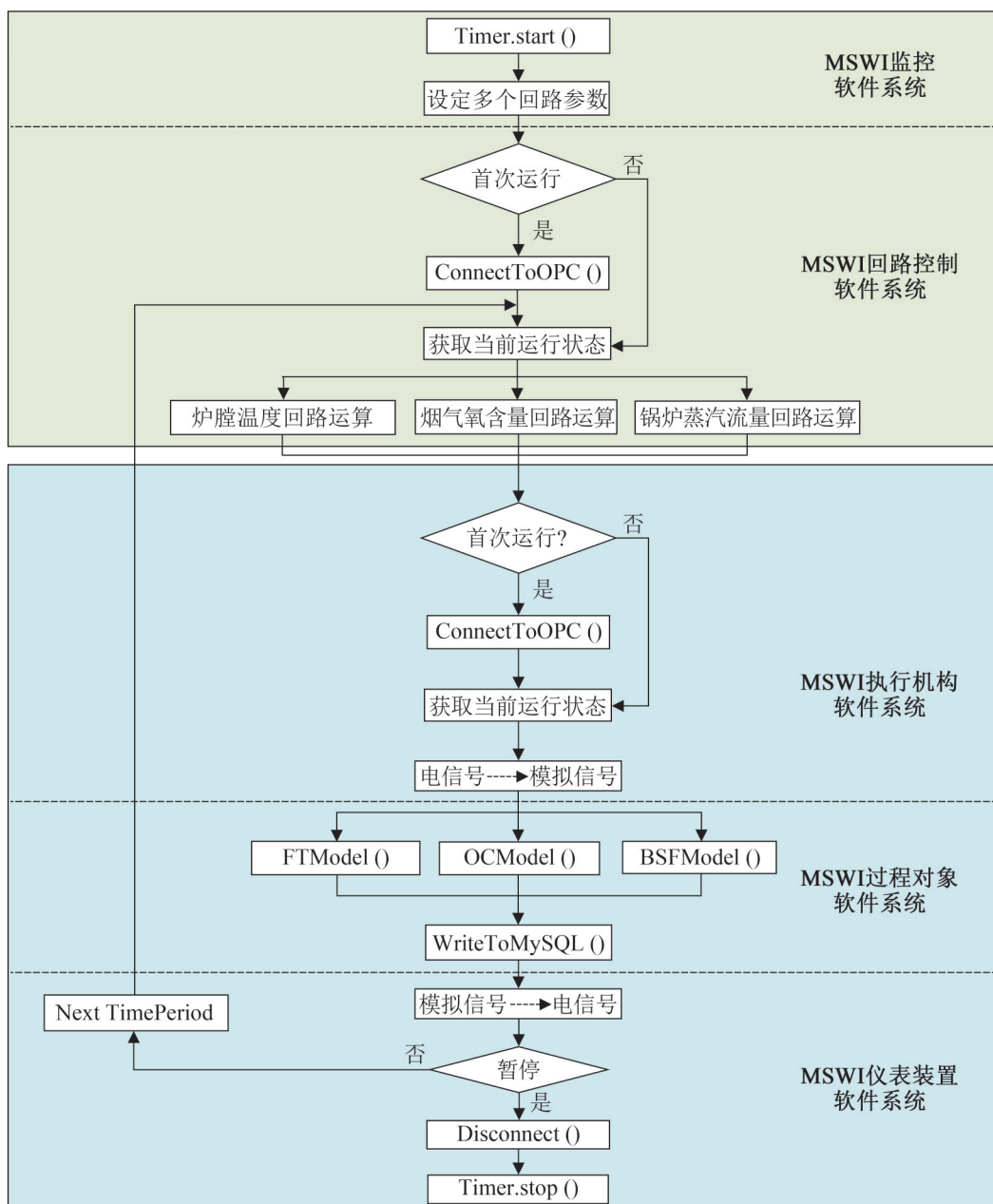


图 5 半实物仿真实验平台的协同运行方式  
Fig. 5 Operation mode of hardware-in-the-loop simulation experiment platform

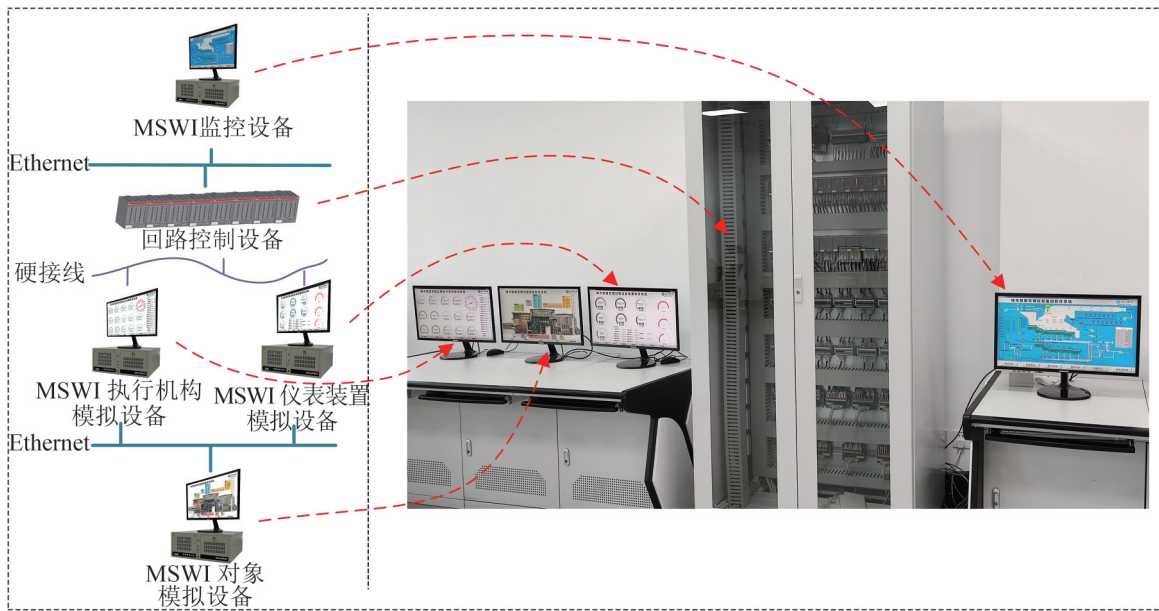


图6 半实物仿真实验平台的硬件结构与实物

Fig. 6 Hardware structure and physical image of hardware-in-the-loop simulation experiment platform

## 4.2 平台软件开发与验证

本文平台软件的运行环境为Windows 7专业版，开发环境为C#和MySQL，均配置OPC环境，

同时利用JavaScript开发Echarts图表。

为验证实验平台的有效性，本文对FT、OC和BSF回路进行验证，除3个操作变量外，其他变量所表征的工况如表1所示。

表1 相关运行工况

Table 1 Related running conditions

序号	标签名	取值	序号	标签名	取值
1	进料器左内侧速度	30%	18	燃烬炉排右侧速度	20%
2	进料器左外侧速度	100%	19	干燥炉排左1段挡板开度	100%
3	进料器右内侧速度	30%	20	燃烧炉排左1-2段挡板开度	58.2%
4	进料器右外侧速度	30%	21	燃烧炉排左2-1段挡板开度	31.7%
5	干燥炉排左内侧速度	20%	22	燃烧炉排左2-2段挡板开度	26.1%
6	干燥炉排左外侧速度	20%	23	燃烬炉排左段挡板开度	18.8%
7	干燥炉排右内侧速度	30%	24	干燥炉排右1段挡板开度	100%
8	干燥炉排右外侧速度	30%	25	燃烧炉排右1-1段挡板开度	100%
9	燃烧炉排1段左内侧速度	90%	26	燃烧炉排右1-2段挡板开度	55%
10	燃烧炉排1段左外侧速度	90%	27	燃烧炉排右2-1段挡板开度	30.1%
11	燃烧炉排1段右内侧速度	90%	28	燃烧炉排右2-2段挡板开度	24.4%
12	燃烧炉排1段右外侧速度	90%	29	燃烬炉排右段挡板开度	23.6%
13	燃烧炉排2段左内侧速度	100%	30	二次风流量/(km <sup>3</sup> N/h)	5.3
14	燃烧炉排2段左外侧速度	100%	31	一次空气加热器出口空气温度/°C	143
15	燃烧炉排2段右内侧速度	100%	32	燃烧段炉排进口空气温度/°C	201
16	燃烧炉排2段右外侧速度	100%	33	干燥段炉排进口空气温度/°C	189
17	燃烬炉排左侧速度	20%	34	二次空气加热器出口空气温度/°C	13

注：炉排速度都已经设置好了一个上限速度，30%就相当于取上限速度的30%，以下同理。



针对 FT、OC 和 BSF 回路在 MSWI 监控软件系统界面上进行参数设定, 其值如表 2 所示。

表 2 PID 参数设定值  
Table 2 PID parameter setting value

回路	SV	KP	KI	KD
FT	970.0	10.0	0	0
OC	7.8	10.0	0	0
BSF	74.0	8.5	0.2	0

仿真过程的运行状态界面、PID 回路跟踪曲线、执行机构软件系统和仪表装置软件系统前台界面如图 7 所示。

由图 7 可知, 左上图给出了 MSWI 过程监控界面, 可知当前运行状态下 3 个操作变量的取值为燃烧炉排左 1-1 段阀门开度为 81.6%、干燥炉排右 2 段阀门开度为 100%、干燥炉排左 2 段阀门开度为 100%; 被控变量 FT、OC 和 BSF 的值分别为 972°C、8.1% 和 74.8 t/h。

右上图给出了 PID 回路跟踪曲线, 其中左侧

为 PID 参数设定部分, 右侧为曲线跟踪部分, 曲线表征时间长度为 5 min, 绿色为设定值, 红色为被控变量值。可见, 在前文所描述工况下, 被控变量能够实现对设定值的跟踪, 但因对实际数据未进行更为详细的工况划分, 其跟踪精度有待提升, 针对相关算法的深入探讨不在本文研究之列。

左下图和右下图给出了执行机构和仪表装置前台界面, 全部变量值采用直观的仪表盘展现, 带有矩形框的仪表盘为 PID 控制相关操作变量和被控变量值, 即执行机构和仪表装置值。

以上实验结果表明, 本文提出的实验平台能够实现平台内部之间信号的有效传递, 对所构建的 MIMO 过程对象模型, 在特定工况下能够采用 3 个 PID 控制器实现对设定值的实时跟踪, 其精度的进一步提高有待深入研究。

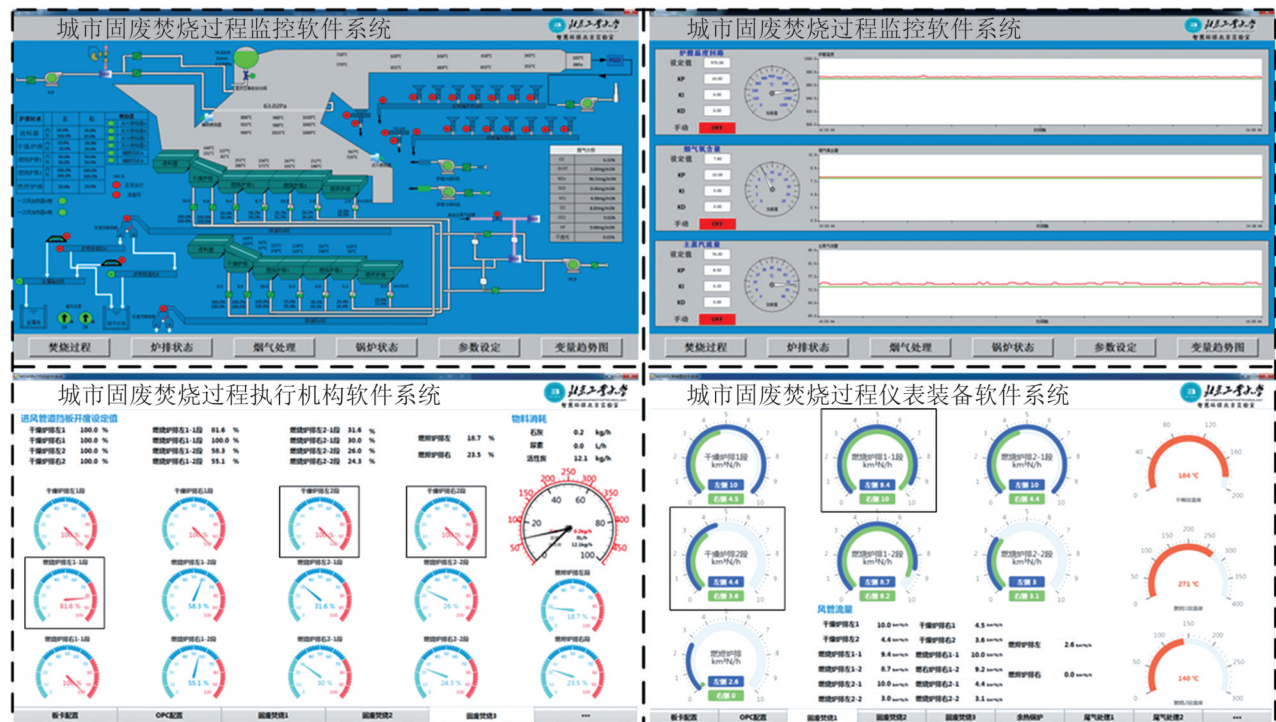


图 7 实验平台软件系统界面  
Fig. 7 Software system interface of experimental platform



## 5 结论

本文设计和开发了面向 MSWI 过程的 MIMO 回路控制半实物仿真实验平台，其特点体现在：将执行机构与仪表装置基于 2 台单独的工控机实现，并通过数据采集卡实现与回路控制系统间标准工业电信号传递，能够真实模拟工业现场中的电缆传输方式；搭建数据驱动的 FT、OC 和 BSF 模型模拟 MIMO 回路过程对象特性；基于实际数据所表征工况选取操作变量，通过真实设备装载 PID 回路控制算法实现多个设定值的跟踪控制，验证了实验平台的有效性，为智能建模与控制算法的研究提供了工程化的验证环境。

未来的研究将考虑如何构建 MSWI 过程多模态数据的同步模拟与验证平台，如何搭建能够移植于实际工业现场的优化算法验证平台，以及如何基于现有研究基础搭建数字孪生系统。

### 参考文献：

- [1] Silpa K, Lisa Y, Perinaz B, et al. What a Waste 2.0: a Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050 [M]. Washington, DC: World Bank, 2018.
- [2] Kolekar K A, Hazra T, Chakrabarty S N, et al. A Review on Prediction of Municipal Solid Waste Generation Models[J]. Procedia Environmental Sciences(S1878-0296), 2016, 35: 238-244.
- [3] Harshit K, Hiya D, Arun K T, et al. Application of Life Cycle Assessment in Municipal Solid Waste Management: A Worldwide Critical Review[J]. Journal of Cleaner Production(S0959-6526), 2019, 209: 630-654.
- [4] Zhou X, Zhou P, Zhao X Q, et al. Applicability of Municipal Solid Waste Incineration(MSWI) System Integrated with Pre-drying or Torrefaction for Flue Gas Waste Heat Recovery[J]. Energy(S0360-5442), 2021, 224: 120157.
- [5] Audrius V, Judita G, Ovidijus Š, et al. An Algorithm for the Use of MSWI Bottom Ash as a Building Material in Road Pavement Structural Layers[J]. Construction and Building Materials(S0950-0618), 2019, 212(10): 456-466.
- [6] 乔俊飞, 郭子豪, 汤健. 面向城市固废焚烧过程的二噁英排放浓度检测方法综述[J]. 自动化学报, 2020, 46(6): 1063-1089.
- Qiao Junfei, Guo Zihao, Tang Jian. Dioxin Emission Concentration Measurement Approaches for Municipal Solid Wastes Incineration Process: A Survey[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(6): 1063-1089.
- [7] Liu Y L, Xing P X, Liu J G, et al. Environmental Performance Evaluation of Different Municipal Solid Waste Management Scenarios in China[J]. Resources, Conservation and Recycling(S0921-3449), 2017, 125: 98-106.
- [8] Zhang D Q, Soon K T, Richard M. G. Municipal Solid Waste Management in China: Status, Problems and Challenges[J]. Journal of Environmental Management (S0301-4797), 2010, 91(8): 1623-1633.
- [9] 秦宇飞. 大型城市生活垃圾焚烧炉焚烧过程仿真及控制[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- Qin Yufei. Modeling and Control of Municipal Solid Waste Incineration Process in Large Scale Mechanical Grate-fired Boiler[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [10] Hu Y A, Cheng H F, Tao S. The Growing Importance of Waste-to-Energy(WTE) Incineration in China's Anthropogenic Mercury Emissions: Emission Inventories and Reduction Strategies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews(S1364-0321), 2018, 97: 119-137.
- [11] Huang Tao, Zhou Lulu, Liu Longfei, et al. Ultrasound-enhanced Electrokinetic Remediation for Removal of Zn, Pb, Cu and Cd in Municipal Solid Waste Incineration Fly Ashes[J]. Waste Management(S0956-053X), 2018, 75: 226-235.
- [12] Lu J W, Zhang S K, Hai J, et al. Status and Perspectives of Municipal Solid Waste Incineration in China: A Comparison with Developed Regions[J]. Waste Management(S0956-053X), 2017, 69: 170-186.
- [13] 汤健, 夏恒, 乔俊飞, 等. 深度集成森林回归建模方法及应用[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(11): 1219-1229.
- Tang Jian, Xia Heng, Qiao Junfei, et al. Modeling Method of Deep Ensemble Forest Regression with Its Application[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 47(11): 1219-1229.
- [14] Zheng L J, Song J C, Li C Y, et al. Preferential Policies Promote Municipal Solid Waste (MSW) to Energy in China: Current Status and Prospects[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews(S1364-0321), 2014, 36(C): 135-148.
- [15] 王克, 张世红, 付哲, 等. 垃圾炉排焚烧炉的富氧燃烧改造数值模拟研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(9): 2257-2264.
- Wang Ke, Zhang Shihong, Fu Zhe, et al. Numerical Simulation Research for the Oxyfuel Combustion Renovation of a MSW Grate Incinerator[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2016, 37(9): 2257-2264.

- [16] Wang J F, Xue Y Q, Zhang X X, et al. Numerical Study of Radiation Effect on the Municipal Solid Waste Combustion Characteristics Inside an Incinerator[J]. Waste Management(S0956-053X), 2015, 44: 116-124.
- [17] Elisa M, Olaf L T, Per C, et al. Dynamic Modeling of Municipal Solid Waste Incineration[J]. Energy (S0360-5442), 2020, 209: 118426.
- [18] Mahlia T M I, Abdulmuin M Z, Alamsyah T M I, et al. Dynamic Modeling and Simulation of a Palm Wastes Boiler[J]. Renew Energy(S0960-1481), 2003, 28(8): 1235-1256.
- [19] Falah A, Wisam A K, Thomas L, et al. Dynamic Simulation of A Municipal Solid Waste Incinerator[J]. Energy(S0360-5442), 2018, 149: 230-249.
- [20] 秦宇飞, 白焰, 张菊军, 等. 垃圾焚烧发电厂环境监测系统的设计与实现[J]. 热力发电, 2010, 39(10): 89-91.  
Qin Yufei, Bai Yan, Zhang Jujun, et al. Design and Realization of Environment Monitoring System for MSW Incineration Power Plant[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(10): 89-91.
- [21] 严爱军, 夏恒, 刘溪芷. 城市生活垃圾焚烧过程监控半实物仿真平台研发[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(6): 1427-1435.  
Yan Aijun, Xia Heng, Liu Xizhi. Development of Semi-physical Simulation Platform for Monitoring Municipal Solid Waste Incineration Process[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(6): 1427-1435.
- [22] 马平, 王凯宸, 李紫君. 基于半实物仿真平台的温度控制系统设计[J]. 实验科学与技术, 2017, 15(5): 10-14.  
Ma Ping, Wang Kaichen, Li Zijun. Design of Temperature Control System Using Semi-physical Simulation Platform[J]. Experiment Science and Technology, 2017, 15(5): 10-14.
- [23] 赵珊珊, 白焰, 黄从智. 化学水处理系统的半物理仿真[J]. 化工自动化及仪表, 2010, 37(1): 79-84.  
Zhao Shanshan, Bai Yan, Huang Congzhi. Semi-physical Simulation of Chemical Water Treatment System[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2010, 37(1): 79-84.
- [24] 汤健, 柴天佑, 片锦香, 等. 工业过程智能优化控制半实物仿真实验平台[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(11): 1530-1533.  
Tang Jian, Chai Tianyou, Pian Jinxiang, et al. A Hardware-in-the-loop Simulation Platform for Optimized Intelligent Control of Industrial Process[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2009, 30(11): 1530-1533.
- [25] 杜胜, 吴敏, 陈略峰, 等. 基于粒度聚类的铁矿石烧结过程运行性能评价[J/OL]. 自动化学报, (2020-09-18) [2021-12-03]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2109.TP.20200917.1156.002.html>.
- [26] Du Sheng, Wu Min, Chen Luefeng, et al. Operating Performance Assessment Based on Granular Clustering for Iron Ore Sintering Process[J/OL]. Acta Automatica Sinica, (2020-09-18) [2021-12-03]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2109.TP.20200917.1156.002.html>.
- [27] 常玉清, 孙雪婷, 钟林生, 等. 基于改进随机森林算法的工业过程运行状态评价[J]. 自动化学报, 2021, 47(9): 2214-2225.  
Chang Yuqing, Sun Xueting, Zhong Linsheng, et al. Industrial Operation Performance Evaluation of Industrial Processes Based on Modified Random Forest [J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(9): 2214-2225.
- [28] 程泽凯, 闫小利, 程旺生, 等. 基于梯度提升决策树的焦炭质量预测模型研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2021, 38(5): 55-60.  
Cheng Zekai, Yan Xiaoli, Cheng Wangsheng, et al. Research on Coke Quality Prediction Model Based on Gradient Boosting Decision Tree[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University(Natural Science Edition), 2021, 38(5): 55-60.
- [29] 谢少捷, 王伟, 何福善. 基于梯度提升决策树的特征筛选与钢卷力学性能预测[J]. 机械工程材料, 2021, 45(10): 104-110.  
Xie Shaojie, Wang Wei, He Fushan. Feature Selection and Prediction of Mechanical Properties of Steel Coils Based on Gradient Boosting Decision Tree[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45(10): 104-110.