

6-23-2021

Development of Semi-physical Simulation Platform for Monitoring Municipal Solid Waste Incineration Process

Aijun Yan

1. School of Artificial Intelligence and Automation, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; ;2. Engineering Research Center of Digital Community, Ministry of Education, Beijing 100124, China; ;3. Beijing Laboratory for Urban Mass Transit, Beijing 100124, China;

Xia Heng

1. School of Artificial Intelligence and Automation, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; ;2. Engineering Research Center of Digital Community, Ministry of Education, Beijing 100124, China; ;3. Beijing Laboratory for Urban Mass Transit, Beijing 100124, China;

Xizhi Liu

1. School of Artificial Intelligence and Automation, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; ;2. Engineering Research Center of Digital Community, Ministry of Education, Beijing 100124, China; ;3. Beijing Laboratory for Urban Mass Transit, 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.

Development of Semi-physical Simulation Platform for Monitoring Municipal Solid Waste Incineration Process

Abstract

Abstract: In order to research and test the modeling, control and optimization of MSW (Municipal Solid Waste) incineration process, a semi-physical simulation platform with three-layer structure by combining the physical control system with the virtual object is developed. *The physical control system of the platform is composed of an intelligent control optimization layer and basic control layer; and the virtual object layer includes simulated instrument, actuator and incineration process model.* The software for man-machine interface with OPC (Object Linking and Embedding (OLE) for Process Control), equipment/parameter monitoring, and incineration process model are developed. The functions of intelligent control optimization layer and basic control layer are tested. The results show that the software and hardware of the platform operate stably and reliably and can effectively and correctly reflect the changes in the incineration process.

Keywords

Municipal Solid Waste(MSW), incineration process, monitoring, semi-physical simulation

Recommended Citation

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.

城市生活垃圾焚烧过程监控半实物仿真平台研发

严爱军^{1,2,3}, 夏恒^{1,2,3}, 刘溪芷^{1,2,3}

(1. 北京工业大学 信息学部人工智能与自动化学院, 北京 100124; 2. 数字社区教育部工程研究中心, 北京 100124;
3. 城市轨道交通北京实验室, 北京 100124)

摘要: 为了城市生活垃圾焚烧过程建模、控制、优化等方法的研究测试, 将实物控制系统与虚拟对象结合起来研发了一种具有三层结构的半实物仿真平台。该平台的实物控制系统由智能控制优化层和基础控制层组成; 虚拟对象层包括软件模拟的仪表、执行机构装置和焚烧过程模型。开发了人机界面、设备与参数的监控、焚烧过程模型以及 OPC 通讯等软件。测试了智能控制优化层和基础控制层的各项功能, 结果表明: 该平台的软、硬件部分运行稳定而可靠, 能够有效而正确反映焚烧过程的变化。

关键词: 城市生活垃圾; 焚烧过程; 监控; 半实物仿真

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X (2021) 06-1427-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0134

Development of Semi-physical Simulation Platform for Monitoring Municipal Solid Waste Incineration Process

Yan Aijun^{1,2,3}, Xia Heng^{1,2,3}, Liu Xizhi^{1,2,3}

(1. School of Artificial Intelligence and Automation, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Engineering Research Center of Digital Community, Ministry of Education, Beijing 100124, China;
3. Beijing Laboratory for Urban Mass Transit, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to research and test the modeling, control and optimization of MSW (Municipal Solid Waste) incineration process, a semi-physical simulation platform with three-layer structure by combining the physical control system with the virtual object is developed. *The physical control system of the platform is composed of an intelligent control optimization layer and basic control layer; and the virtual object layer includes simulated instrument, actuator and incineration process model.* The software for man-machine interface with OPC (Object Linking and Embedding (OLE) for Process Control), equipment/parameter monitoring, and incineration process model are developed. The functions of intelligent control optimization layer and basic control layer are tested. The results show that the software and hardware of the platform operate stably and reliably and can effectively and correctly reflect the changes in the incineration process.

Keywords: Municipal Solid Waste(MSW); incineration process; monitoring; semi-physical simulation

引言

城市生活垃圾(Municipal Solid Waste, MSW)焚烧发电是实现垃圾减量化、资源化、无害化的典型处理方式^[1-2]。焚烧过程主要包括垃圾进料、干

燥、燃烧、燃烬等环节。由于该过程具有干扰众多、参数间耦合严重等复杂特性, 使得该过程的控制效果并不理想。因而, 垃圾焚烧过程控制领域各种方法的研究及其效果测试得到了广泛关注^[3]。由于仿真实验是测试各种方法效果的一种重要手段, 特别

收稿日期: 2020-03-24 修回日期: 2020-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(61873009); 北京市自然科学基金(4192009)

第一作者: 严爱军(1970-), 男, 博士, 教授, 研究方向为过程建模与控制、人工智能及应用。E-mail: yanaijun@bjut.edu.cn

是半实物仿真实验是置信度最高的一种测试方法,因此,研发一套MSW焚烧监控半实物仿真实验平台对研究该过程的建模、控制与优化方法具有重要意义。

现有的针对焚烧过程的监控技术相关研究文献较少,主要基于OPC (Object Linking and Embedding (OLE) for Process Control)和Modbus 2种通讯协议,采用组态软件和非组态软件2种方式开发焚烧过程监控系统。其中文献[4]以MATLAB搭建OPC客户端,实现对过程数据的采集,进而对焚烧炉进行了数据监控和故障诊断;文献[5]将Modbus技术、通用分组无线服务技术、大屏幕显示技术、数据库技术等有机地结合起来设计了一套垃圾焚烧电厂环境指标监测系统;文献[6]采用面向对象的程序设计理念开发了基于OPC接口技术的垃圾焚烧数据采集系统。该系统能同时访问多个OPC服务器进行数据采集,并提供COM接口、共享内存技术以及人机界面。而上述文献的研究主要面向焚烧过程利用纯软件实现数据监测,因而无法单独用于实现智能优化设定方法的仿真研究。在控制领域,相比单纯采用软件实现的仿真实验来说,半实物仿真实验平台增加了实物控制系统^[7],并将其和软件模拟的虚拟对象连接起来,不仅可以进行各种方法的效果测试,也能检验各种软件程序在实物控制系统中的运行状况,因而平台的搭建与开发得到了广泛应用。文献[8]以分布式计算机控制系统结合虚拟的工业过程对象软件平台研发了分布式仿真实验平台,平台由生产过程、虚拟过程两个控制系统组成,实现了工业过程的高效仿真。文献[9-12]在文献[8]的平台基础上增设了智能优化控制计算机,使半实物仿真实验平台增加了对输入参数进行优化选择的功能,对平台在算法应用上有了进一步的拓展,使得半实物仿真实验平台能有效地从工程角度验证智能优化控制系统的性能。上述实验平台均以实物控制系统结合虚拟被控对象软件仿真的方法研发半实物仿真实验平台,并通过实验测试了平台的仿真性能。由于MSW焚烧过程变量众多,实验平台需要处理大量的

数据,而现有的仿真平台存在数据点读写局限的问题,不能同时处理大量数据,而且所使用的通信网络均基于有线局域网,不利于移动端电脑的协同操作,在功能上不能满足MSW焚烧过程控制的仿真实验需要,所以,不能直接将现有平台进行移植使用。因此,研发一套新的半实物实验平台具有必要性。

基于上述分析,本文将计算机、可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)控制系统以及虚拟对象模型通过有线结合无线的OPC异步通讯方式搭建了一个半实物仿真实验平台。其中虚拟对象模型包括仪表、执行机构装置和焚烧过程模型。通过人机界面、设备与参数的监控软件、通讯软件、焚烧过程模型软件等实现了监测、控制等各项功能,并以现场历史数据和风量智能设定方法测试了该实验平台的运行状态和设计的功能,达到了稳定可靠、测试方便等预期目标。

1 MSW 焚烧过程

以北京某垃圾焚烧公司的生产线为例,图1给出了MSW焚烧流程,详细描述如下:

垃圾通过车辆运输到地磅称重后卸入垃圾池,经过3~7天的生物发酵、脱水,由垃圾抓斗投放到加料斗,经进料器将垃圾推送到焚烧炉排上,先后经过干燥炉排、燃烧炉排1、燃烧炉排2和燃烬炉排4个部分^[13]。垃圾在燃烧炉排1和燃烧炉排2处通过一次风机输送的助燃空气开始着火燃烧,其中的可燃成分随之完全燃烧,未完全燃烧的部分在燃烬炉排完全燃烬,产生的灰渣从炉排末端落至输渣机上排出炉膛。燃烧过程产生的高温烟气在一燃室的温度可控制在850℃以上,以保证有害气体的分解。烟气经过二燃室时,通过二次风机输送的空气能够保证烟气产生高度湍流,使有害气体进一步分解。烟气随后经过余热锅炉、烟气净化系统处理,最后通过引风机经烟囱排放到大气中。在上述过程中,余热锅炉的受热面,即过热器、蒸发器、省煤器等吸收烟气降温所释放出的热量后,产生过热蒸汽经由汽轮发电机转变成电能。

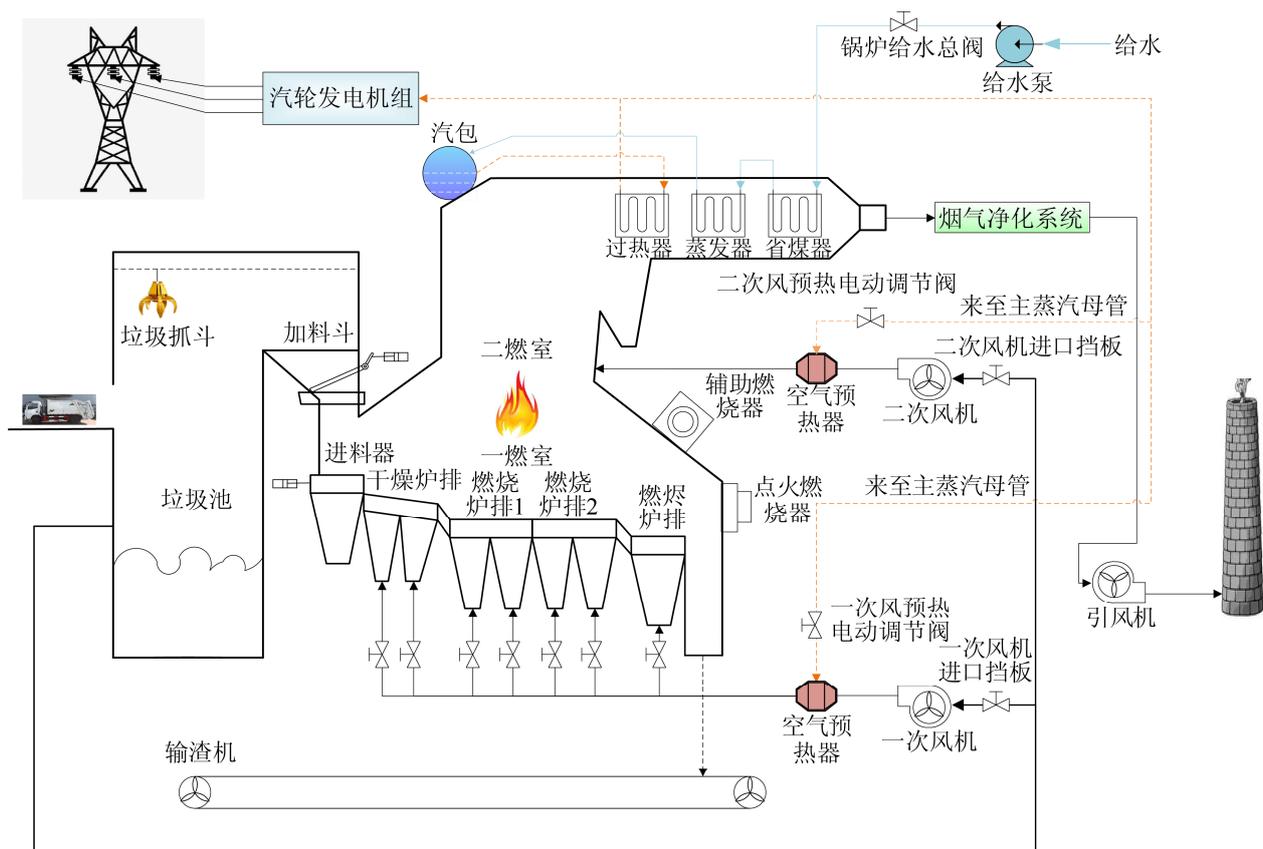


图 1 MSW 焚烧流程

Fig. 1 MSW incineration process

该过程设备和变量众多,例如炉膛内部包含超过 30 个温度传感器、炉排下方包含 28 个进风管道阀门等。其中,需要监控的设备包括执行机构、检测仪表、电气设备、工艺设备等,这些设备和焚烧过程模型将通过软件进行模拟;需要监控的变量有开关量和模拟量,开关量包括执行机构、电气设备的启停状态,模拟量包括温度、流量、压力、速度等,这些变量将通过 PLC 控制系统的程序实现监控功能。

2 半实物仿真实验平台研发

2.1 需求分析

由于半实物仿真实验平台可为过程建模、控制与优化方法的研究和效果测试提供准工业级的验证平台和环境,能在一定程度上避免实际应用时出现安全事故的风险,因而平台的搭建与研发具有很

强的应用需求。针对 MSW 垃圾焚烧过程垃圾热值波动、垃圾组分变化等干扰众多,炉温、炉排速度、进风量、主蒸汽流量、过氧空气系数等参数之间耦合严重等复杂特性,仿真实验平台的研发应具有系统安全管理、主要参数控制与优化、过程状态监测与记录、网络通讯连接、人员操作管理、实时报警等主要功能。平台软、硬件系统应达到实时性、可靠性、稳定性、快速性等性能指标。平台运行过程中需要处理的数据主要有各种设备的开关量和一些变量的温度、压力、流量、速度、排放浓度等模拟量。

2.2 平台结构设计

为了实现上述各项功能和处理数据的需要,设计了图 2 所示的 MSW 焚烧过程监控半实物仿真实验平台,包括智能控制优化层、基础控制层和虚拟对象层。其中,智能控制优化层由多台计算机组成,

可以根据各种智能控制算法和优化算法开发出相应的程序,实现焚烧过程主要参数的智能优化和稳定控制;基础控制层包括一台组态监控计算机和PLC控制系统。其中的PLC控制系统包括控制柜、电源模块、CPU模块、以太网模块、输入输出(I/O)模块和设备通讯模块等,其主要功能有软硬件组态、数据处理、网络通讯、设备运行状态监测与报警、常规回路控制、设备启停逻辑控制等;虚拟对象层则包括软件模拟的仪表、执行机构和焚烧过程模型计算机,以实现参数检测、执行机构动作、焚烧过程模型操作等功能,并为智能控制优化层、基础控制层提供不同工况下的模拟数据。实验平台的网络通讯以有线结合无线的方式配置局域网络,从而实现各种设备的连接和不同软件之间的网络通讯功能。

2.3 平台软件开发

根据图2所示的硬件结构,应用软件的开发主要包括智能控制优化层、基础控制层和虚拟对象层

的各种软件以及通讯软件,以下是这些软件的详细介绍。

(1) 软件组成。实验平台各种软件的结构关系如图3所示,主要分为系统开发环境和应用软件两部分。

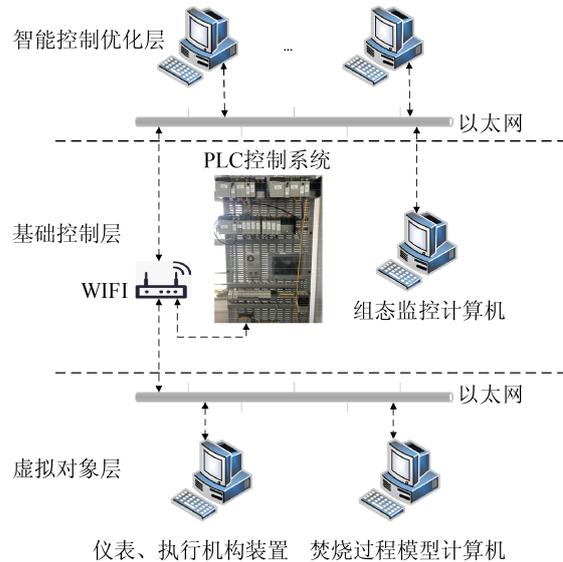


图2 半实物仿真实验平台结构

Fig. 2 Structure of semi-physical simulation platform

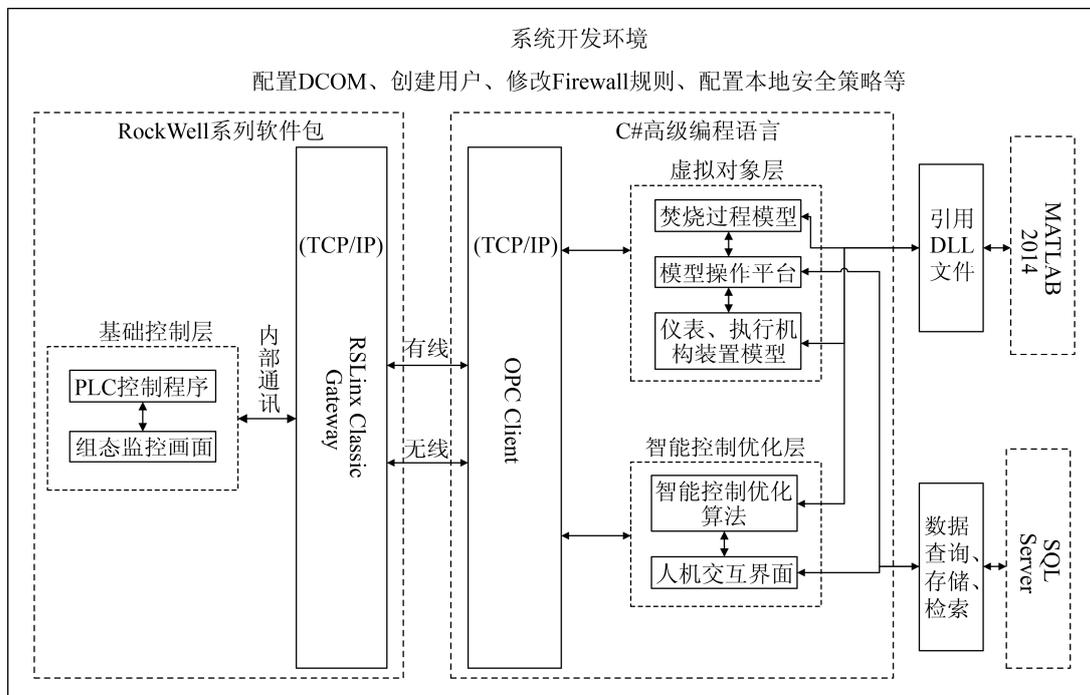


图3 实验平台软件结构关系

Fig. 3 Software structure of simulation platform

(2) 系统开发环境是指基于 Windows 平台的 RockWell 系列软件包、C#高级编程语言、MATLAB 和 SQL Server。所使用的 RockWell 系列软件包主要包括 PLC 编程软件 RSLogix5000、组态软件 FactoryTalk View 和通讯软件 RSLinx Classic Gateway。为了开发应用软件,对计算机操作系统和开发环境所做的主要配置是,首先利用 OPC Foundation 提供的运行分发包给每台计算机配置分布式组件对象模型(Distributed Component Object Model, DCOM),以供设备之间的远程通讯使用;创建一个 OPCUser 新用户,并赋予此用户运行和使用操作系统 DCOM 程序的权限;修改操作系统 Firewall (防火墙)关于 DCOM 和 OPC 的规则,开放 DCOM 访问权限;创建 OPC 程序进站规则;配置 DCOM 的安全属性;配置本地安全策略。

(3) 智能控制优化层软件。利用 C#高级编写语言开发前台人机交互界面,后台运行的则是 MATLAB 环境下编写的智能控制与优化程序。前、后台应用程序通过调用动态链接库(Dynamic Link Library, DLL)文件的方式实现数据传输的无缝连接,再通过 OPC 远程通讯实现与其他软件、硬件之间的数据读写功能,最后以 SQL Server 作为数据管理中心实现查询、存储和检索功能。通过以上基础配置,实验人员可以将焚烧过程的参数智能控制与优化方法编制成 MATLAB 程序,然后打包成 DLL 文件给软件后台,就能直接通过.NET 的数据接口及网络通讯对智能控制与优化方法的效果进行测试和不断改进。本文在实验部分展示了焚烧过程风量智能设定方法的实验,以说明智能控制优化层软、硬件的运行状态是否达到了实验平台的功能需求。

(4) 基础控制层软件。该层软件包括 PLC 控制程序和组态监控画面。其中,PLC 控制程序采用 RSLogix5000 软件开发,包含除铁与灰渣处理系统、锅炉飞灰输送系统、袋式除尘器预热系统、燃烧器升温控制系统、脉冲清扫与石灰喷射系统、垃圾进料控制系统、垃圾升温控制系统、燃烧控制系

统、一次风量 PID 控制系统、二次风温 PID 控制系统和炉膛负压控制系统等 12 个周期性梯形图程序,实现了电气设备的启停控制、顺序控制、联锁保护和参数的闭环回路控制功能;组态监控画面采用组态软件 FactoryTalk View 及其内嵌的 VBA 脚本开发,主要内容包含焚烧过程工艺参数的实时采集、设备控制模式的选择功能、炉排运行方向的显示、参数报警记录、主参数趋势显示以及打印功能、实时数据存储到 ODBC 数据库、PID 参数设置调试、登录用户管理等模块,实现了整个焚烧过程的实时动态跟踪和监控,能为实验人员提供灵活直观的操作界面。

(5) 虚拟对象层软件。以 C#高级编程语言结合 MATLAB 与 SQL Server 开发完成,包括软件模拟的仪表、执行机构装置和焚烧过程模型及其操作平台,其中,模型操作平台开发了前台用户交互界面,后台可扩展的 Matlab 模型库,前、后台应用程序数据传输接口,与外部通讯的 OPC Client 和 SQL Server 的数据存储和查询功能。操作平台可以实现参数输入方式的选择、焚烧过程模型的选择和切换、远程通讯连接、前后台数据传输、主参数曲线显示和历史数据存储等功能;仪表、执行机构装置和焚烧过程模型在 MATLAB 环境下编写各自的模型程序,然后打包成单独的 DLL 文件嵌入操作平台底层进行数据交换和数值计算。仪表、执行机构虚拟装置模拟了现场热电偶、流量传感器、压力传感器等检测仪表和电动阀、角行程电动执行机构等,与 PLC 之间均通过 4~20 mA 的标准工业信号传递过程数据,焚烧过程则模拟了焚烧炉运行时不同工况下的数据变化。

(6) 通讯软件。采用 RSLinx Classic Gateway 软件开发平台通讯功能。通过 PLC 的 IP 地址配置软件 Ethernet 设备驱动,然后建立仿真实验平台的 OPC 主题名并与 PLC 的 CPU 进行连接,至此 OPC Server 搭建成功。监控系统与 RSLinx Classic Gateway 通过内部通信方式连接 CPU 读取标签值进行数据交换。平台其他计算机和软件采用有线或

无线的方式接入局域网络,再通过 OPC Client 与搭建的 OPC Server 进行数据交换。

3 实验测试

3.1 实验设计

为了测试本文研发的仿真实验平台的功能和仿真效果,设计了如下2个实验:

(1) 基础控制层实验。测试本文所研发的仿真实验平台的组态监控功能,以现场历史数据结合虚拟对象层的软件运行进行焚烧过程的模拟实验。

(2) 智能控制优化层实验。将 MSW 焚烧过程风量智能设定方法编制成程序进行实验测试。

在下面的实验测试中,将利用独立开发的 OPC Client 软件,通过无线连接方式接入局域网络中,将北京某垃圾焚烧发电厂的历史工况数据,以 OPC 远程通讯方式传输到 PLC 的控制器标签中。

3.2 基础控制层实验

将 PLC 控制程序下载到 CPU 模块中,并转动控制钥匙进入到 RUN 状态,在 RSLinx Classic Gateway 中设置实验项目的 OPC Topic,OPC Client 软件以定时触发的方式将焚烧过程数据写入 Topic 相应的标签中,虚拟对象层从 OPC Server 中读取模型需要的过程变量,通过软件后台的 MATLAB 模型计算得出焚烧过程数据和仪表、执行机构数据,然后再将计算结果回传给 OPC Server,FactoryTalk View 监控系统通过 RSLinx Classic Gateway 软件的内部通讯协议连接到控制器标签,进行数据的采集与趋势显示。系统运行后主要界面如图4所示。可以看出,监控系统可以实时监测设备的运行状态和过程参数,实现了图3所示实验平台各层所设计的功能。

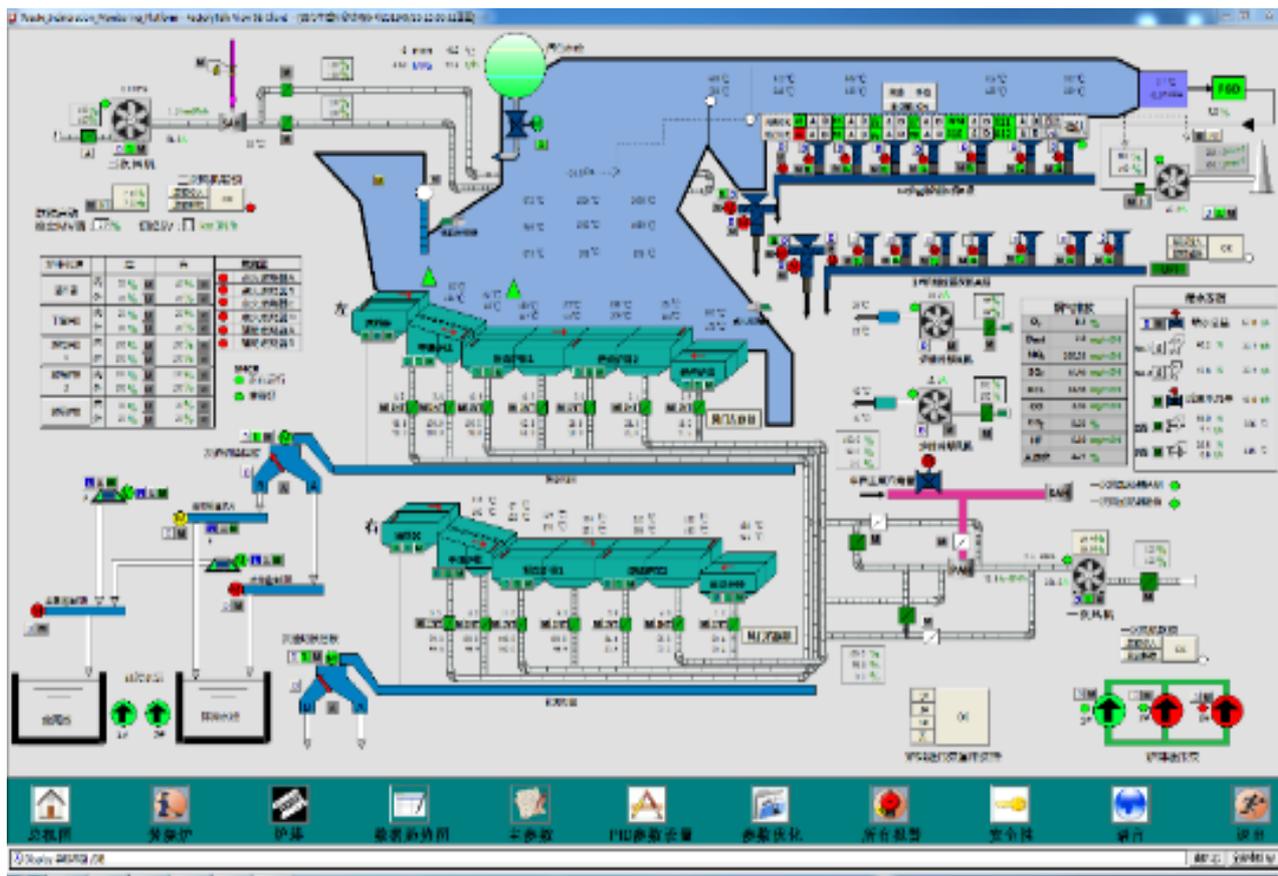


图4 焚烧过程监控运行画面

Fig. 4 Monitoring interface for incineration process operation

<http://www.china-simulation.com>

• 1432 •

图 5 是一次风量的 PID 控制曲线。实验过程如下:

- (1) 通过组态监控画面手动设定一次风量 SV;
- (2) 风量控制程序通过采集设定值 SV 和仪表模型程序输出的当前风量 PV, 计算控制误差;

(3) 执行机构模型程序根据上述误差计算出一台风机运行频率并传送至焚烧过程模型程序;

- (4) 转到第(2)步重复执行。

从图 5 中可以看出, 能够实现一次风量的稳定控制。

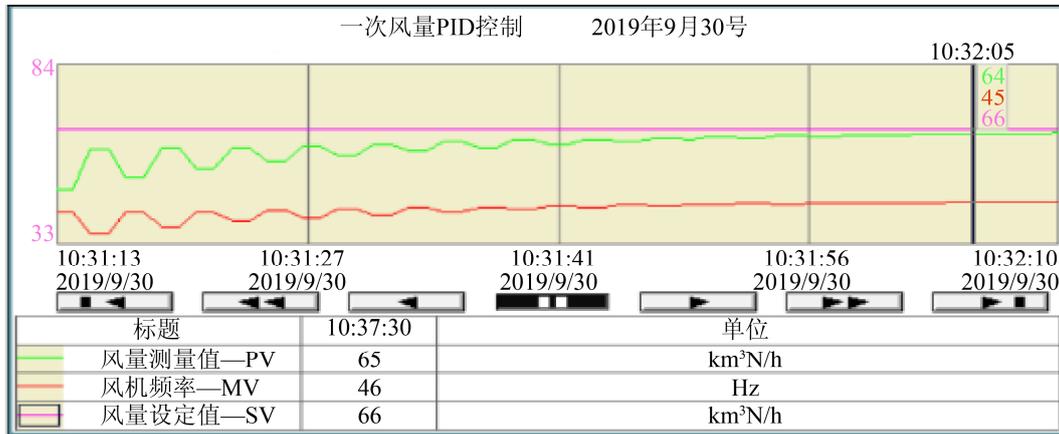


图 5 一次风量 PID 控制

Fig. 5 Effect of PID control of primary air flow

以上实验结果表明, 该实验平台的软、硬件部分运行稳定且可靠, 能够正确反映焚烧过程的变化, 最大程度上模拟了工业现场环境。由于实验平台是基于真实 PLC 控制系统, 所以在该平台上验证的控制算法更容易在现场应用和实施, 这也是该实验平台与基于软件的仿真实验平台本质的区别。

3.3 智能控制优化层实验

MSW 焚烧过程所需要的空气由一次风机、二次风机等设备提供, 如图 1 所示。一次风机输送的一次风具有垃圾干燥、提供焚烧所需要的氧气等功能。二次风机输送的二次风主要作用是促进烟气在二燃室能够充分燃烧, 有利于污染物的有效分解。合理的一、二次风量可以保证垃圾焚烧过程的正常运行^[14]。对一、二次风量的控制目前一般是通过操作员手动设定其大小, 然后采用 PID 实现风量的稳定控制, 为了避免手动设定的主观性和不准确性, 本部分实验将案例推理^[15]和专家规则结合起来实现了风量的智能设定方法, 算法步骤如下(具体算法将另文详述):

step 1: 参数初始化。设置 OPC Client 的采样间隔、欧氏距离阈值、风量补偿值、一、二次风的总量上限值等;

step 2: 数据处理。从 RSLinx Classic Gateway 中获取影响风量设定的当前工况数据, 并将其与从 SQL Server 中读取的源案例数据一起进行归一化处理;

step 3: 案例检索。采用基于欧氏距离的相似性度量方法, 计算当前工况数据与每一条源案例的欧氏距离, 从中检索出距离值最小的源案例;

step 4: 案例重用。根据工况数据的变化率及评价指标(一燃室温度和烟气含氧量)的变化, 根据专家规则对风量的设定值进行补偿, 从而得到一、二次风量的设定值;

step 5: 案例修正。根据一、二次风的总量上限值, 利用专家规则对一、二次风量进行补偿调整, 并分别将得到的一、二次量设定值写入到 PLC 控制器中;

step 6: 案例储存。根据预设的采样间隔, 将满足评价指标要求的运行工况数据及一、二次风量

作为一条新的源案例进行存储，并转 step 2。

根据以上算法，采用 MATLAB 编写出案例推理设定程序并打包成 DLL 文件嵌入到软件后台程序，调用 .NET 接口实现前后台通讯功能，以 OPC Client 实现智能设定计算机和硬件、软件之间的通讯连接，利用 SQL Server 实现工况数据的筛选、储存和读取等功能。利用 C# 高级编程语言开发的风量智能设定平台通过监控计算机的 IP 地址连接至 OPC Server，从控制器中选取设定程序需要的 OPC 标签值进行读取。点击“开始”按钮后，OPC Client 以预设的采样间隔采集实时焚烧过程数据。

运行结果如图 6 所示，其中，Primary_Air_1 和 Second_Air_1 分别是来自于现场一、二次风量的历史数据；Primary_Air_2 和 Second_Air_2 分别是智能设定程序计算出的一、二次风量设定值。从图中的对比曲线可以看出，风量智能设定的计算结果与实际数据之间的一次风量的均方根误差为 7.532 7，二次风量的均方根误差为 27.446 0，说明智能设定平台能根据当前运行状况对焚烧过程需要的一、二次风量进行设定，结果表明智能控制优化层的软、硬件部分均能够正常运行，实现了该层所设计的功能。

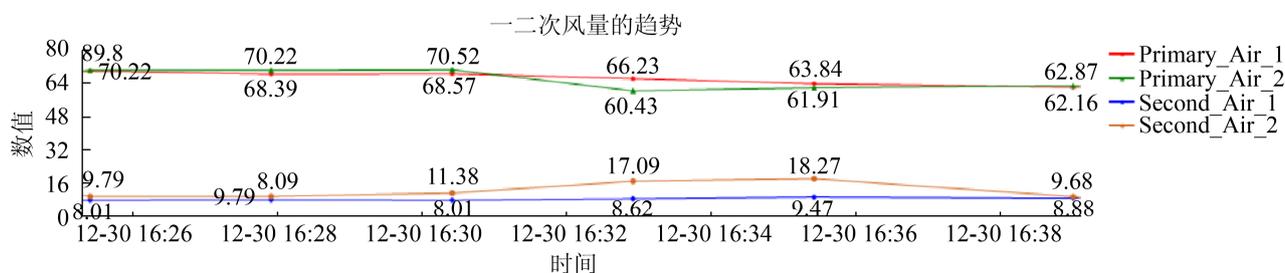


图 6 MSW 风量智能设定平台
Fig. 6 Intelligent setting interface for MSW air flow

4 结论

本文基于 RockWell 系列软件包、SQL Server 数据库、C# 高级编程语言和 MATLAB 等软件，研发出一种由智能控制优化层、基础控制层和虚拟对象层组成的城市生活垃圾焚烧过程监控半实物仿真实验平台。该平台通信结合了有线、无线两种方式，采用了基于 COM 和 DCOM 技术的 OPC 技术，使得其具有数据传送性能高、安全性管理性好、开发成本低和实时远程通讯等优点。通过实验测试，表明该实验平台能够高度还原真实的焚烧过程运行状态，设计的功能均得以实现，软、硬件部分运行稳定而可靠，有利于降低各种方法在现场直接测试时发生安全事故、影响过程正常运行的风险，为进一步深入研究垃圾焚烧过程的建模、控制、优化等方法提供了一个高置信度的研究和测试平台。

参考文献:

- [1] Cheng H, Hu Y. Municipal Solid Waste (MSW) as a Renewable Source of Energy: Current and Future Practices in China[J]. Bioresource Technology (S0960-8524), 2010, 101(11): 3816-3824.
- [2] Li Y, Zhao X, Li Y, Li X. Waste Incineration Industry and Development Policies in China[J]. Waste Management (S0956-053X), 2015, 46(12): 234-241.
- [3] Lia X, Zhanga C, Lia Y, et al. The Status of Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) in China and its Clean Development[J]. Energy Procedia (S1876-6102), 2016, 104(1): 498-503.
- [4] 文晶. 基于主元分析的焚烧炉系统在线过程监控[J]. 科技经济导刊, 2017(28): 51-42.
Wen Jing. On-line Process Monitoring of Incinerator System based on Principal Component Analysis [J]. Science and Technology Economics Guide, 2017(28): 51-42.
- [5] 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 Implementation of Environmental Monitoring System for Waste Incineration Power Plant[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(10): 89-91.
- [6] 钱晨. 基于 OPC 技术垃圾焚烧数据采集系统的设计与实现[J]. 自动化与仪表, 2020, 35(1): 100-104.
- Qian Chen. Design and Implementation of data Collection System for Waste Incineration based on OPC Technology[J]. Automation and Instrumentation, 2020, 35(1): 100-104.
- [7] 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 Edition), 2009, 30(11): 1530-1533.
- [8] 柴天佑. 工业过程控制系统研究现状与发展方向[J]. 中国科学(信息科学), 2016, 46(8): 1003-1015.
- Chai Tianyou. Industrial Process Control Systems: Research Status and Development Direction[J]. Scientia Sinica Informationis, 2016, 46(8): 1003-1015.
- [9] Dai W, Zhou P, Zhao D, et al. Hardware-in-the-loop Simulation Platform for Supervisory Control of Mineral Grinding Process[J]. Powder Technology (S0032-5910), 2016, 288(1): 424-434.
- [10] 片锦香, 柴天佑, 贾树晋, 等. 层流冷却系统过程优化控制仿真实验平台[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(24): 5667-5671.
- Pian Jinxiang, Chai Tianyou, Jia Shujin, et al. Simulation Platform for Optimal Control of Laminar Cooling System[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(24): 5667-5671.
- [11] 李健, 岳恒, 郭向红, 等. 铝酸钠叶滤过程控制仿真实验平台[J]. 化工学报, 2011, 62(8): 2089-2094.
- Li Jian, Yue Heng, Guo Xianghong, et al. Simulation Experiment Platform for Sodium Aluminates Solution Filtrating Process[J]. CIESC Journal, 2011, 62(8): 2089-2094.
- [12] 周平, 代伟, 柴天佑. 竖炉焙烧过程运行优化控制系统的开发及实验研究[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(12): 1565-1572.
- Zhou Ping, Dai Wei, Chai Tianyou. Exploration of Operational Optimization Control System for Shaft Furnace Roasting Process and its Experiment Study[J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(12): 1565-1572.
- [13] Liu Y C, Liu Y B. Human-simulated Intelligent Control Technique for Incineration Treatment of Municipal Solid Waste[J]. Information Technology Journal (S1812-5638), 2013, 12(23): 7758-7761.
- [14] 陈鹏, 李军, 陈竹. 垃圾焚烧炉配风比对燃烧过程影响的数值模拟研究[J]. 环境卫生工程, 2015, 23(5): 29-32.
- Chen Peng, Li Jun, Chen Zhu. Numerical Simulation Study About Impact of Air Distribution on Combustion Process in Waste Incinerator[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2015, 23(5): 29-32.
- [15] Yan A, Zhang K, Yu Y, et al. An Attribute Difference Revision Method in Case-based Reasoning and its Application[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence (S0952-1976), 2017, 65(10): 212-219.