

绪 论

1.1 研究背景和意义

城市固废(municipal solid waste, MSW)高达 8%~10%的全球年增长率使得具有无害化、减量化和资源化等特点的 MSW 焚烧(MSW incineration, MSWI)技术成为目前世界各国处理“垃圾围城”困境的主要技术手段^[1-2]。作为典型流程工业^[3-4], MSWI 过程在实现所需能源自给自足的基础上,可向外提供电能、热能等多种形式的能源,同时具有较低的环境污染排放风险^[5-6]。研究表明,MSWI 技术的减质率、减容率和能量回收率可达到 70%、90%和 19%^[7-8],其在经济和环保方面所呈现的潜在价值已被发展中国家所认可^[7]。我国 MSWI 技术起步于 1988 年深圳引进的 2 台日本三菱 150t/d 的马丁炉排焚烧炉,在经“十二五”的着力推广和“十三五”的无废城市规划后,MSW 处理能力占比(超过 50%)已居世界首位^[9]。同时,MSWI 过程在低碳、环保和可持续能源等领域均具有关键作用^[10],已成为新时期生态文明建设和循环经济体系中的托底工业^[11]。

运行经验表明,针对 MSWI 过程固有的多阶段、多因素和机理复杂等特性^[12-13],采用“3T+E”的原则能够有效保证烟气中有害物质的分解和燃烧^[14],即炉膛温度(temperature)大于 850℃、烟气停留时间(time)大于 2s、足够的烟气湍流强度(turbulent)和适当的过量空气系数(excess air-coefficient)。在该原则下,国外研究学者将主要操纵变量确定为 MSW 进料量、炉排速度和供风流量等“料、风、水”的量,主要被控变量确定为炉膛温度、烟气含氧量、蒸汽流量和燃烧线长度,进而研发出适合自身国情的自动燃烧控制(automatic combustion control, ACC)系统^[2,15-18],其能够长周期稳定运行的前提是具有稳定的 MSW 成分和热值。基于世界银行的统计^[19]和谷^[20]与 Yamada 等^[21]提供的数据可知,国外 MSW 源于分类后的可燃组分,其热值波动范围较小。相比较而言,我国 MSW 的分类政策和相应管理制度仍在逐步完善和推广中,导致所收集 MSW 的组分具有不确定性强、热值低和波动性大等特点^[2]。因此,国外 ACC 系统难以直接应用于我国 MSWI 过程的智能优化控制^[22]。

目前,国内 MSWI 电厂主要采用领域专家(知识型工作者)先凭借机理和经验感知认知运行工况,并对可能的漂移现象进行判断后,再针对多场景需求采用区别化的手动操作规则,即具有领域专家具身智能的手动控制模式^[23]。该模式从本质上是依据结构化的过程数

据、非结构化的火焰视频图像与操作记录文本甚至语言交流等多模态数据判断场景需求后调整操纵变量,其基础是对 MSWI 过程机理的掌握与经验的积累以及对运行工况漂移变化的感知认知^[2]。显然,该模式存在专家精力有限性、经验差异性和控制主观性等缺点,难以保证 MSWI 电厂长期稳定运行,进而影响减污降碳效率^[24-25]。由“生活垃圾焚烧发电厂自动监测数据公开平台”可知,自 2020 年以来,我国已关闭 MSWI 电厂 21 家,涉及焚烧炉 50 余台^[2]。因此,需将我国 MSW 特性和 30 余年运行经验相结合,自主研发定制化及本地化的智能建模、控制与优化等算法,进而形成具有我国 MSWI 行业特色的工业软件^[26]。然而,工业现场对运行安全性的考虑和分布式控制系统(distributed control system,DCS)固有的封闭特性导致其难以与外部智能算法进行交互,即不能对 MSWI 控制系统进行直接的数据采集和参数下装操作,从而使得针对 MSWI 过程所研究的建模、控制和优化等智能算法难以验证。通常离线研究的智能算法与工业过程的融合均需要经过工程初试验证和中试调试等多个环节的测试与评估才能落地应用^[2]。因此,智能算法测试与验证平台是实验室研究的相关理论与技术能够在工业现场落地应用不可或缺的重要手段^[27]。

针对类似 MSWI 过程的具有连续性特点的流程工业而言,其通常拥有机理复杂不清且涉及多种物理、化学反应的被控对象,从而难以采用精确数学模型进行描述^[28-29]。同时,生产过程会分解甚至产生具有不同危害性和差异性的有毒有害物质^[30-31],导致难以在实验室环境内构建相应的实物平台^[32]。对此,科贾埃利大学(Kocaeli University)提出了 DOPC(distributed OLE for process control)概念,利用仿真模型搭建实验平台^[33];东北大学提出了由管理优化层、控制层和被控对象层组成的包括真实控制器与虚拟被控对象的制粉系统智能解耦仿真平台^[34];燕山大学提出了利用 Q8 卡接入电阻炉进行计算机控制的简化仿真平台^[35];上海大学提出了利用软件模拟搭建间歇生产过程优化控制的仿真平台^[36]。此外,相关企业也对仿真平台进行了研究,如北京灵思创奇科技有限公司提出的构建虚实结合的多功能工业过程控制实验装置,其特点是能够更换仿真模型,覆盖液位控制、温度控制和虚拟仪表监测等各项实验内容,其既能够在实验室环境下使用,也能应用于具有宽温、振动等特点的恶劣环境;大风科技研发的 SimuWorks 大型科学计算与仿真支撑平台由仿真引擎、图形化建模工具、模块资源管理器、模块资源库和其他仿真功能软件组成,能够用于大型科学计算、动态特性建模研究、仿真系统开发和优化设计与验证等。上述平台并不能满足高运行安全性、强现场相似性的基于多模态数据驱动的智能建模、控制和优化算法研究的需求。此外,不同的工业现场在难测参数检测、关键参数预测、智能化自主控制、运行指标优化等方面具有不同需求^[37],有必要研究具有模块化组合功能的半实物仿真平台以满足上述不同要求^[27]。笔者认为,实验室离线研究的智能算法应该先以某种形式逐步得到工业现场领域专家的认可,再逐步实现落地应用。因此,首先需要采取具备安全隔离功能的数据采集和工艺参数反传方式以避免对生产端的运行安全造成影响;其次,要使得离线开发的智能算法在实验室内就具有类实际工业现场的测试与验证场景;最后,相关智能算法及其对其进行承载的软硬件系统能够以原型机方式移植至工业现场,进而推进 MSWI 过程工业软件的落地应用。

1.2 城市固废焚烧(MSWI)过程智能建模、控制与优化的研究现状

1.2.1 MSWI 工艺、机理、难点简述

1.2.1.1 MSWI 工艺简述

我国引进的某典型炉排炉 MSWI 过程的工艺流程如图 1.1 所示。

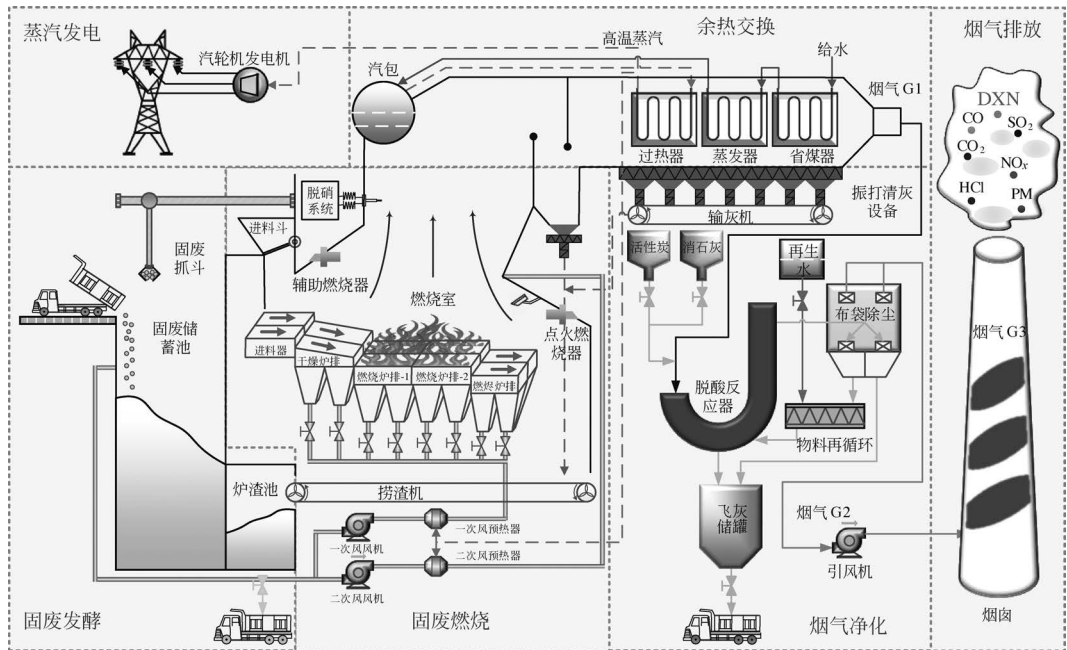


图 1.1 某典型炉排炉 MSWI 过程的工艺流程

由图 1.1 可知,MSWI 过程先后经过固废发酵、固废燃烧、余热交换、蒸汽发电、烟气净化和烟气排放 6 个主要阶段。

1) 固废发酵阶段:原生 MSW 包含大量水分不利于燃烧,需在固废储蓄池中经 3~7 天的生物发酵,完成初步脱水后达到入炉焚烧条件再由机械抓斗投入料斗,由进料器推送至焚烧炉内,进入固废燃烧阶段。该阶段的主要辅助变量为 MSW 热值,其是影响 MSWI 过程优化决策的关键因素之一。

2) 固废燃烧阶段:本质是在固气液等多相和热流场等多场的耦合交互作用下将 MSW 转变成高温烟气和固态残渣,可分为干燥、燃烧和燃烬 3 个过程。

(1) 干燥过程:从 MSW 进入焚烧炉到在干燥炉排上完成全水分(表面和内在水分)析出至着火的阶段,其内涵是:表面水分随炉内温度升高而逐渐蒸发,当温度上升至 100°C 时被完全蒸发;内在水分随炉温的进一步升高而逐步析出并吸收大量热能。因此,MSW 的全水分含量与入炉热值相关,进而影响燃烧状态乃至全流程的运行工况。

(2) 燃烧过程:从 MSW 开始着火经强烈发光发热直至氧化反应结束的阶段,包括强氧化、热解和原子基团碰撞反应。强氧化反应表示可燃组分与氧气发生完全燃烧反应;热解反应表示在无氧或接近无氧的条件下,热辐射能量破坏含碳高分子化合物元素间的化学键

或对其进行重组,析出挥发分后再进行氧化反应;原子基团碰撞反应表示原子基团电子能量的跃迁、分子的旋转和振动等行为产生红外热辐射、可见光和紫外线,进而形成火焰形态。因此,燃烧过程涉及的反应复杂多变、相互间存在强耦合性且具有多反应同步运行的特性。显然,燃烧风量和炉排速度对稳定燃烧过程至关重要。

(3) 燃烬过程:从燃烧结束至燃烧完全停止的过程。经燃烧过程后,MSW 中的可燃成分以焦炭为主;之后,在高温和一次风的作用下,焦炭与 O_2 发生氧化反应,与 CO_2 、水蒸气等发生气化反应;随后,惰性物质(气态的 CO 、 H_2O 和灰渣)逐渐增加,直至炉排上的 MSW 全部成为灰渣,进而减弱燃烧直至完全停止^[38]。因此,该过程具有燃度降低、惰性物质增加、氧化剂含量相对较大、反应区温度较低等特点,延长该过程可有效提高 MSW 的热灼减率,提升减量化水平。

为保证烟气中有害物质的分解和燃烧,该阶段常采用“3T+E”的原则^[14],即炉膛温度大于 $850^\circ C$ 、烟气停留时间大于 2s、烟气湍流强度及过量空气系数保持适当取值。该阶段的主要操纵变量为 MSW 进料量、炉排速度和进风量等,主要被控变量为炉膛温度、烟气含氧量、蒸汽流量和燃烧线等。

3) 余热交换阶段:首先,高温烟气经水冷壁进行初步降温;其次,利用过热器、蒸发器和省煤器等设备将热能通过辐射和对流的方式传递至锅炉;再次,锅炉中的水转变为高压过热蒸汽进入蒸汽发电阶段;最后,锅炉出口烟气温度降至 $200^\circ C$ 。该阶段需要严格控制降温速率,主要操纵变量为锅炉给水量,主要被控变量为锅炉蒸汽流量。

4) 烟气净化阶段:首先,脱硝系统在 $850\sim 1100^\circ C$ 的温度下脱除 NO_x ;其次,半干法脱酸工艺通过注入石灰和水对酸性气体(HCl 、 HF 、 SO_2)进行中和;再次,活性炭对烟气中的 DXN 及重金属等物质进行吸附;最后,通过布袋除尘器脱除烟气中的颗粒物、中和反应物及活性炭吸附物,完成烟气净化。该阶段的主要操纵变量为尿素、活性炭、石灰等环保物料的消耗量,主要被控变量为污染物排放浓度。

5) 烟气排放阶段:符合国家排放标准(GB 18485—2014)等环保指标的烟气通过引风机牵引经烟囱排入大气。颗粒物、 NO_x 、 SO_2 、 HCl 和 CO 等污染物的排放指标是目前所关注的重点。

1.2.1.2 固废燃烧机理简述

固废燃烧机理的本质是在多相(固、气、液)多场(热、流、力)的耦合交互作用下将 MSW 转变成高温烟气和固态残渣,其示意如图 1.2 所示。

由图 1.2 可知,固废燃烧可分为干燥、燃烧和燃烬 3 个过程。

(1) 从 MSW 进入焚烧炉到在干燥炉排上完成全水分(表面和内在水分)析出至着火的阶段为干燥过程。水分蒸发机理通常采用阿伦尼乌斯模型^[39]、恒温模型^[40]和平衡模型^[41]表征,其内涵是:表面水分随炉内温度升高而逐渐蒸发,当温度上升至 $100^\circ C$ 时被完全蒸发;内在水分以蒸汽形态析出并吸收大量热能,其随炉温的进一步升高而逐步析出,在完成后将进入燃烧过程。由此可知,发酵后 MSW 的全水分含量会影响入炉热值,进而影响燃烧状态乃至全流程的运行工况。

(2) 从 MSW 开始着火经强烈发光、发热直至氧化反应结束的阶段为燃烧过程,其在强氧化、热解和原子基团碰撞等 3 个基础反应的融合交叉中进行,其中:①强氧化反应表示可燃组分与氧气发生完全燃烧反应,产生 CO_2 、 HCl 和 H_2O ;②热解反应表示在无氧或接近无氧的条件下,热辐射能量破坏含碳高分子化合物元素间的化学键或对其进行重组,析出挥发分(包含气态的 CO 、 CH_4 、 H_2 或分子量较小的 $C_m H_n$ 等可燃成分)后再进行氧化反应的

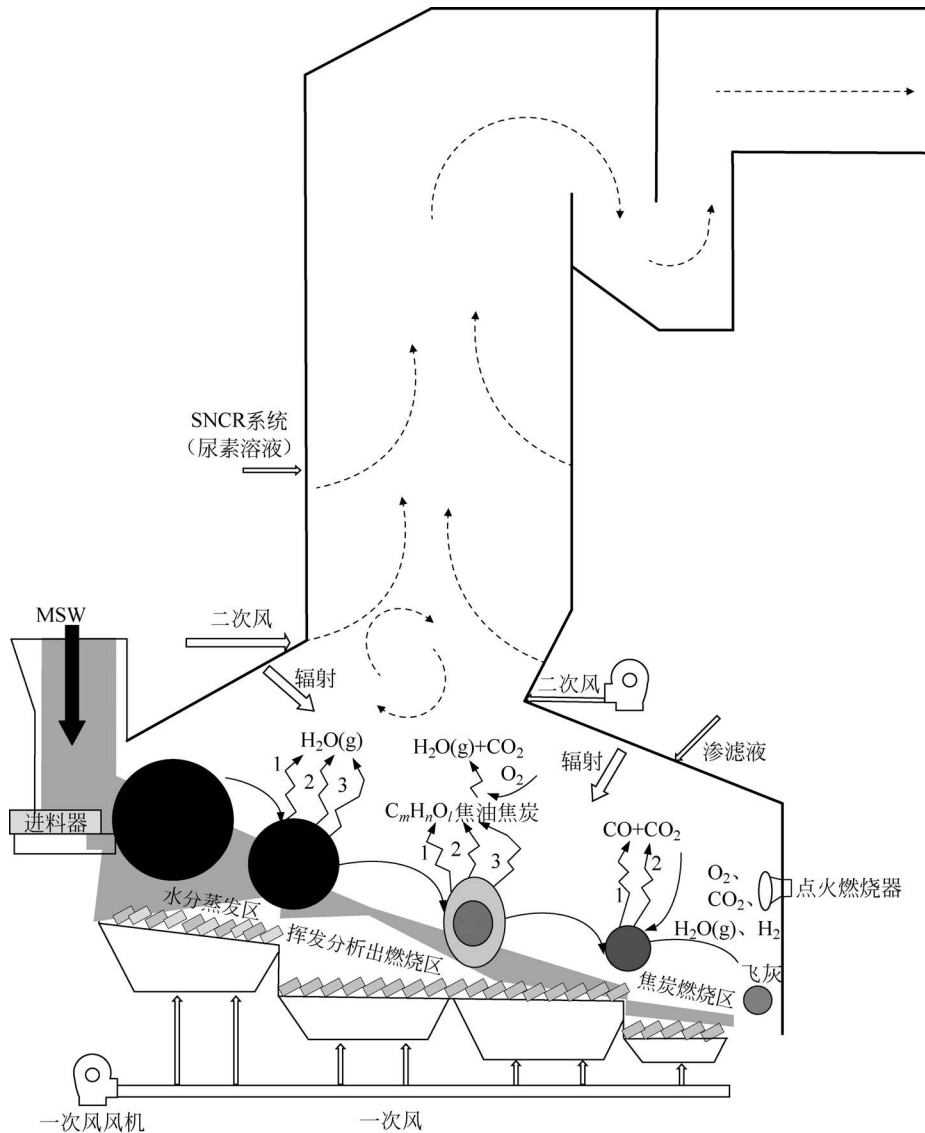


图 1.2 MSW 燃烧机理示意图

过程；③原子基团碰撞反应表示原子基团电子能量的跃迁、分子的旋转和振动等行为产生红外热辐射、可见光和紫外线，进而形成火焰形态，其中原子基团气流包括单原子形态的 H、C、Cl 等元素，双原子的 CH、CN、OH、C₂ 等化合物，以及多原子的 HCO、NH₂、CH₃ 等成分，其相互之间的碰撞又促进了 MSW 的热分解过程。可见，燃烧过程的机理复杂多变、相互间存在强耦合性且具有多反应同步运行的特性。在此过程中，燃烧风量和炉排速度对稳定燃烧过程至关重要。

(3) 从燃烧结束至燃烧完全停止的过程称为燃烬过程。经燃烧过程后，MSW 中的可燃成分以焦炭为主；之后，在高温和一次风的作用下，焦炭与 O₂ 发生焦炭氧化反应，与 CO₂、水蒸气等发生焦炭气化反应；惰性物质（气态的 CO、H₂O 和灰渣）逐渐增加，直至炉排上的 MSW 全部成为灰渣，进而减弱燃烧直至完全停止^[39]。由此可知，该过程具有燃度降低、惰

性物质增加、氧化剂含量相对较大、反应区温度较低等特点。因此,延长燃烬过程可有效提高 MSW 的热灼减率,提升减量化水平。

1.2.1.3 国内 MSWI 过程运行控制特性简述

基于世界银行最新的统计数据^[19]和谷等^[20]、Yamada 等^[21]提供的数据,各地域 MSW 组分占比如图 1.3 所示,其中我国 MSW 组分以北京市为例。

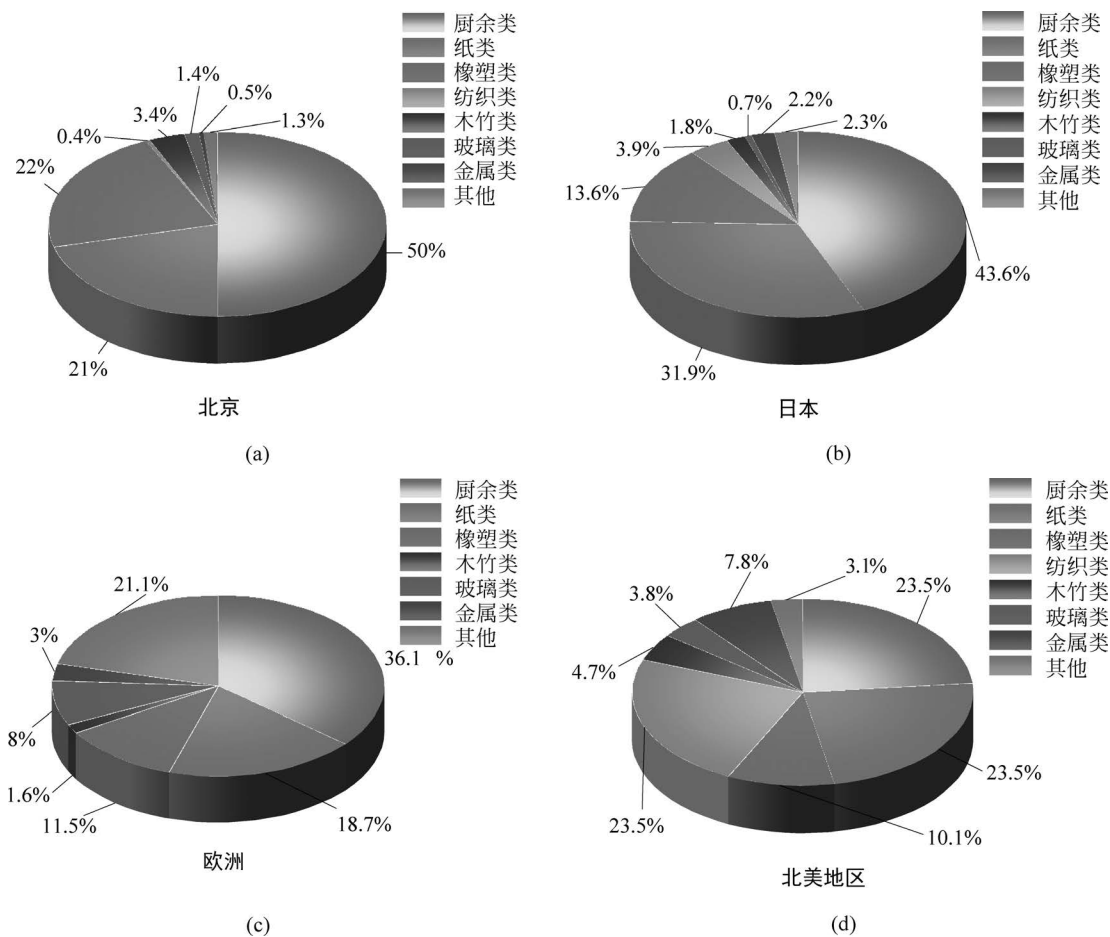


图 1.3 不同国家、地区、城市的 MSW 组分占比

由图 1.3 可知,在 MSW 成分的长时段平均统计数据中,国内 MSW 中的厨余类组分的占比远高于日本、欧洲和北美地区,原因在于:上述发达国家和地区在 20 世纪中期开始施行 MSW 分类,公众环保意识强;我国 MSW 的分类政策和制度目前还在完善和推广中,MSW 组分存在较大不确定性。因此,国内 MSW 的热值量级和稳定性远低于上述区域,原因在于:国外 MSW 源于分类后的可燃组分,其热值能够控制在较小范围内波动;国内相应管理制度还不够完善,所收集的 MSW 的热值低且波动性较大。

除在 MSW 组分与热值上的差异性外,国内在领域专家技能水平和设备运维技术方面也与国外存在差距。众所周知,日本的炉排炉技术是引自欧洲,其在进行本土化改造后才达到当前领先水平。因此,我国 MSWI 过程的运行也是无法直接照搬国外技术的,目前国内各厂主要采用的是依赖于领域专家(知识型工作者)的手动控制模式,其示意如图 1.4 所示。

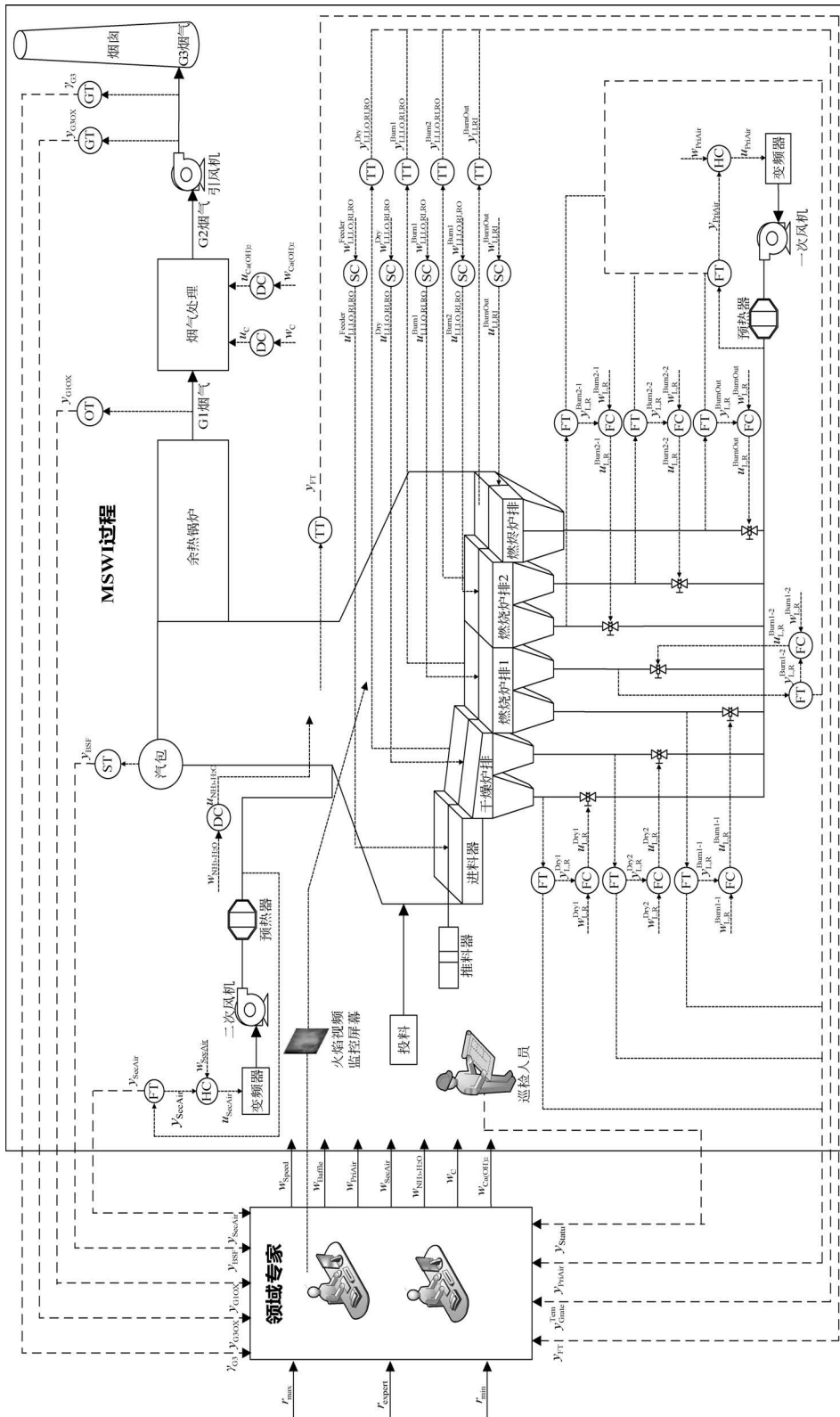


图 1.4 MSWI 过程的领域专家手动控制示意图

图 1.4 中的符号物理含义如表 1.1 和表 1.2 所示。

表 1.1 图例含义

序号	符号	物理含义
1	Ⓣ	流量检测仪表
2	Ⓢ	蒸汽检测仪表
3	Ⓞ	氧气含量检测仪表
4	ⓖ	烟气检测仪表
5	Ⓣ	温度检测仪表
6	Ⓚ	剂量控制器
7	Ⓜ	变频器控制器
8	Ⓢ	炉排速度控制器
9	Ⓚ	挡板开度控制器

表 1.2 符号物理含义

符号	物理含义	符号	物理含义
r_{\max}	被控变量设定值上限	$\omega_{L,R}^{\text{Burn1-2}}$	燃烧炉排 1-2 段左、右进风管道挡板开度
r_{\min}	被控变量设定值下限		
r^*	被控变量设定值		
ω_{Speed}	炉排速度	$\omega_{L,R}^{\text{Burn2-1}}$	燃烧炉排 2-1 段左、右进风管道挡板开度
ω_{Baffle}	一次风挡板开度	$\omega_{L,R}^{\text{Burn2-2}}$	燃烧炉排 2-2 段左、右进风管道挡板开度
ω_{PriAir}	一次风流量		
ω_{SecAir}	二次风流量	$\omega_{L,R}^{\text{BurnOut}}$	燃烬炉排左、右进风管道挡板开度值
$\omega_{\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}}$	氨水喷入量	$u_{L,I,LO,RI,RO}^{\text{Feeder}}$	进料器左内、左外、右内、右外速度控制器输出值
ω_{C}	活性炭值		
$\omega_{\text{Ca(OH)}_2}$	消石灰值	$u_{L,I,LO,RI,RO}^{\text{Dry}}$	干燥炉排左内、左外、右内、右外速度控制器输出值
$\omega_{L,I,LO,RI,RO}^{\text{Feeder}}$	进料器左内、左外、右内、右外速度		
$\omega_{L,I,LO,RI,RO}^{\text{Dry}}$	干燥炉排左内、左外、右内、右外速度	$u_{L,I,LO,RI,RO}^{\text{Burn1}}$	燃烧 1 段炉排左内、左外、右内、右外速度控制器输出值
$\omega_{L,I,LO,RI,RO}^{\text{Burn1}}$	燃烧 1 段炉排左内、左外、右内、右外速度		
$\omega_{L,I,LO,RI,RO}^{\text{Burn2}}$	燃烧 2 段炉排左内、左外、右内、右外速度	$u_{L,I,RI}^{\text{BurnOut}}$	燃烬炉排左内、右内速度控制器输出值
$\omega_{L,I,RI}^{\text{BurnOut}}$	燃烬炉排左内、右内速度值		
$\omega_{L,R}^{\text{Dry1}}$	干燥炉排 1 段左、右进风管道挡板开度	$u_{L,R}^{\text{Dry1}}$	干燥炉排 1 段左、右进风管道挡板开度控制器输出值
$\omega_{L,R}^{\text{Dry2}}$	干燥炉排 2 段左、右进风管道挡板开度		
$\omega_{L,R}^{\text{Burn1-1}}$	燃烧炉排 1-1 段左、右进风管道挡板开度	$u_{L,R}^{\text{Burn1-2}}$	燃烧炉排 1-2 段左、右进风管道挡板开度控制器输出值
$\omega_{L,R}^{\text{Burn1-2}}$	燃烧炉排 1-2 段左、右进风管道挡板开度		

续表

符号	物理含义	符号	物理含义
$u_{L,R}^{\text{Burn2-1}}$	燃烧炉排 2-1 段左、右进风管道挡板开度控制器输出值	$y_{L,R}^{\text{Dry2}}$	干燥炉排 2 段左、右进风管道挡板开度检测值
$u_{L,R}^{\text{Burn2-2}}$	燃烧炉排 2-2 段左、右进风管道挡板开度控制器输出值	$y_{L,R}^{\text{Burn1-1}}$	燃烧炉排 1-1 段左、右进风管道挡板开度检测值
$u_{L,R}^{\text{BurnOut}}$	燃烬炉排左、右风管挡板开度控制器输出值	$y_{L,R}^{\text{Burn1-2}}$	燃烧炉排 1-2 段左、右进风管道挡板开度检测值
u_{PriAir}	一次风流量控制器输出值	$y_{L,R}^{\text{Burn2-1}}$	燃烧炉排 2-1 段左、右进风管道挡板开度检测值
u_{SecAir}	二次风流量控制器输出值		
$u_{\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}}$	氨水控制器输出值	$y_{L,R}^{\text{Burn2-2}}$	燃烧炉排 2-2 段左、右进风管道挡板开度检测值
u_{C}	活性炭控制器输出值		
$u_{\text{Ca(OH)}_2}$	消石灰控制器输出值	$y_{L,R}^{\text{BurnOut}}$	燃烬炉排左、右进风管道挡板开度检测值
$y_{\text{Grate}}^{\text{Tem}}$	炉排温度检测值		
$y_{\text{LI,LO,RI,RO}}^{\text{Dry}}$	干燥炉排左内、左外、右内、右外温度检测值	y_{PriAir}	一次风流量检测值
		y_{SecAir}	二次风流量检测值
$y_{\text{LI,LO,RI,RO}}^{\text{Burn1}}$	燃烧 1 段炉排左内、左外、右内、右外温度检测值	y_{FT}	炉膛温度检测值
		y_{BSF}	锅炉蒸汽流量检测值
$y_{\text{LI,LO,RI,RO}}^{\text{Burn2}}$	燃烧 2 段炉排左内、左外、右内、右外温度检测值	y_{G1OX}	G1 烟气含氧量检测值
		y_{G3OX}	G3 烟气含氧量检测值
$y_{\text{LI,RI}}^{\text{BurnOut}}$	燃烬炉排左内、右内温度检测值	γ_{G3}	G3 烟气污染物浓度
$y_{L,R}^{\text{Dry1}}$	干燥炉排 1 段左、右进风管道挡板开度检测值		

在图 1.4 中,排放气体 γ_{G3} 、炉排温度 $y_{\text{Grate}}^{\text{Tem}}$ 、炉排速度 w_{Speed} 和挡板开度 w_{Baffle} 向量可分别表示为

$$\gamma_{\text{G3}} = \{\gamma_{\text{NO}_x}, \gamma_{\text{CO}}, \gamma_{\text{CO}_2}, \gamma_{\text{Acid}}\} \quad (1.1)$$

$$y_{\text{Grate}}^{\text{Tem}} = \left\{ y_{\text{LI,LO,RI,RO}}^{\text{Dry}}, y_{\text{LI,LO,RI,RO}}^{\text{Burn1}}, y_{\text{LI,LO,RI,RO}}^{\text{Burn2}}, y_{\text{LI,RI}}^{\text{BurnOut}} \right\} \quad (1.2)$$

$$w_{\text{Speed}} = \left\{ w_{\text{LI,LO,RI,RO}}^{\text{Feeder}}, w_{\text{LI,LO,RI,RO}}^{\text{Dry}}, w_{\text{LI,LO,RI,RO}}^{\text{Burn1}}, w_{\text{LI,LO,RI,RO}}^{\text{Burn2}}, w_{\text{LI,RI}}^{\text{BurnOut}} \right\} \quad (1.3)$$

$$w_{\text{Baffle}} = \left\{ w_{L,R}^{\text{Dry1}}, w_{L,R}^{\text{Dry2}}, w_{L,R}^{\text{Burn1-1}}, w_{L,R}^{\text{Burn1-2}}, w_{L,R}^{\text{Burn2-1}}, w_{L,R}^{\text{Burn2-2}}, w_{L,R}^{\text{BurnOut}} \right\} \quad (1.4)$$

其中, γ_{NO_x} 、 γ_{CO} 、 γ_{CO_2} 和 γ_{Acid} 分别表示 NO_x 、 CO 、 CO_2 和酸性气体的排放浓度。

MSWI 过程的操纵变量集分为炉内燃烧过程(furnace combustion process, FCP)和烟气处理过程(flue gas clean process, FGCP)两部分,可表示为

$$u_{\text{MSWI}} = \{u_{\text{FCP}}, u_{\text{FGCP}}\} \quad (1.5)$$

$$u_{FCP} = \left\{ \begin{array}{l} u_{LI,LO,RI,RO}^{Feeder}, u_{LI,LO,RI,RO}^{Dry}, u_{LI,LO,RI,RO}^{Burn1} \\ u_{LI,LO,RI,RO}^{Burn2}, u_{LI,RI}^{BurnOut}, u_{L,R}^{Dry1}, u_{L,R}^{Dry2} \\ u_{L,R}^{Burn1-1}, u_{L,R}^{Burn1-2}, u_{L,R}^{Burn2-1}, u_{L,R}^{Burn2-2} \\ u_{L,R}^{BurnOut}, u_{PriAir}, u_{SecAir}, u_{NH_3 \cdot H_2O} \end{array} \right\} \quad (1.6)$$

$$u_{FGCP} = \{u_C, u_{Ca(OH)_2}\} \quad (1.7)$$

进一步,领域专家的决策过程 $f_{expert}(\cdot)$ 可描述为

$$\left\{ \begin{array}{l} w_{Speed}, w_{Baffle}, w_{PriAir}, w_{SecAir}, \\ w_C, w_{Ca(OH)_2}, w_{NH_3 \cdot H_2O}, u_{FCP}, u_{FGCP} \end{array} \right\} = f_{expert} \left(\begin{array}{l} r_{max}, r^*, r_{min}, y_{FT}, y_{G1OX}, y_{BSF}, \\ y_{PriAir}, y_{SecAir}, \gamma_{G3}, \gamma_{G3OX}, y_{Grate}^{Tem}, y_{Statu}, \gamma \end{array} \right) \quad (1.8)$$

其中, r_{max} 和 r_{min} 分别表示被控变量设定值上限和下限; r^* 表示由领域专家基于多模态信息和累积经验进行决策的被控变量设定值; y_{Statu} 表示巡检人员实时反馈的状态信息; γ 表示火焰视频信息。

本质上,这是根据 ACC 系统的控制逻辑而归纳总结的经验,可简述为:机械抓斗操作工程师凭经验完成 MSW 储池分区整备、操作抓斗均匀混合和拆解大件固废、控制发酵周期和入炉区域 MSW 热值稳定,依据料位视频监控画面凭经验控制投料频率;运行工程师基于多模态信息识别和预判工况变化,凭经验对固废燃烧、余热交换和烟气净化等阶段的操纵变量进行设定。主要的操作经验可归纳为:勤看火焰,控制料层和火床;勤调整进料量、供料速度和燃烧风量;依据料层厚度、烟气含氧量和 MSW 特性确保稳定燃烧^[42]。显然,手动操作难免会存在差异性和任意性,是影响 MSWI 过程稳定运行的关键因素。因此,在该模式下数据中蕴含的优秀规则知识和领域专家的人脑认知机制是进一步研究 MSWI 过程智能优化控制的基础。

1.2.1.4 MSWI 过程智能优化控制的难点

综上所述,国内 MSWI 过程的智能优化控制存在以下问题:①MSW 的组分多变、热值不稳定且难以实时检测;②MSW 燃烧机理随其组分的多变性使得已有数值仿真难以刻画真实燃烧过程且缺少全流程模拟;③MSWI 过程的炉内温度场、料层厚度、物料燃烧线等被控变量和锅炉/烟囱出口二噁英、炉渣热灼减率等运行指标的可靠实时检测设备缺失;④MSWI 过程的操纵变量与被控变量众多、相互耦合且不同运行工况下的控制关注点存在差异性,难以确保稳定运行;⑤MSWI 过程长周期的运行特性导致其具有动态时变漂移特性,现有传感设备无法全面覆盖全流程,过程状态难以有效监测和表征;⑥国内多采用单厂多线的大型焚烧炉并行运行模式,炉温多以牺牲经济性保证安全性和环保达标而长期处于高位,缺失有效的全流程管理决策优化。

基于上述问题,笔者认为,针对我国 MSW 的特性,实现具有本土特色的智能优化控制需要进一步研究以下难题:

1) 燃烧过程被控对象建模难

通常,精准构建被控对象模型是进行工业过程智能控制研究的基础^[43-45]。MSWI 与其他热处理工业(如燃煤电厂、高炉炼铁厂等)的显著区别在于该过程的原料成分波动大且异