

DOI:10.13205/j.hjgc.202507007

王伟龙,张蒙纳,刘兆鹏,等. 双碳背景下AI耦合太阳能技术的污泥干化系统应用[J]. 环境工程, 2025, 43(7):64-72.

WANG W L, ZHANG M N, LIU Z P, et al. Application of a sludge drying system with AI-coupled solar technology under Dual Carbon goal [J]. Environmental Engineering, 2025, 43(7):64-72.

双碳背景下AI耦合太阳能技术的污泥干化系统应用

王伟龙^{1,2} 张蒙纳^{1,2} 刘兆鹏^{1,2} 甄胜利^{1,2} 李 骏^{1,2} 龙少鹏^{1,2*}

(1. 北京高能时代环境技术股份有限公司, 北京 100095; 2. 天津高能时代水处理科技有限公司, 天津 300041)

摘 要: 研究AI对污泥太阳能干化系统的赋能作用, 用智能视觉系统提升污泥太阳能干化系统运行效率和安防智能化程度, 简化配置, 提升系统安全性和稳定性。以此为基础, 运用大数据孪生模型, 分层次自动比对分析各层因子的影响作用, 找出关键表征性控制指标, 简化控制流程, 提升系统运行效率, 加强节能降耗效果。运行结果表明, 出泥含水率可以用造粒干化区长度高度表征调控, 二者具有高度线性关系; 在系统孪生最佳运行工况下, 系统非冬季污泥日处理量达设计值2.4倍, 日脱水量4.85 t, 平均脱水能力达8.84 kg/(m²·d); 系统冬季运转较非智慧化污泥太阳能干化系统能耗降低29.9%, 较低温带式干化技术能耗降低49.4%, 出泥含水率均达标; 系统运转稳定, 目标出泥含水率控制精准, 综合节能降耗效果明显。

关键词: 人工智能; AI; 孪生; 太阳能; 污泥干化; 优化调控; 智能视觉

Application of a sludge drying system with AI-coupled solar technology under Dual Carbon goals

WANG Weilong^{1,2}, ZHANG Mengna^{1,2}, LIU Zhaopeng^{1,2}, ZHEN Shengli^{1,2}, LI Qin^{1,2}, LONG Shaopeng^{1,2*}

(1. Beijing GeoEnviron Engineering & Technology, Inc., Beijing 100095, China;

2. Tianjin GeoEnviron Water Treatment Technology Co., Ltd., Tianjin 300041, China)

Abstract: In the context of clean energy development, AI intelligent innovation, and achieving carbon neutrality, there is an increasing amount of research on the application of artificial intelligence technology in energy conservation and consumption reduction in water treatment. However, there are currently no cases of integrating artificial intelligence technology with solar sludge drying technology. This study explores the application of AI in a sludge solar drying system, aiming to enhance the efficiency and security, simplify the system configuration, and improve safety and stability with intelligent visual systems. Based on this, the study applied a big data digital twin model to automatically compare and analyze the influence of each layer factor, identified key representative indicators for control, simplified the control process, and enhanced system efficiency. The results showed that the dewatered sludge moisture content could be efficiently regulated by the length of the granulation drying zone, which exhibited a highly linear relationship; under the optimal operating conditions, the non-winter sludge treatment capacity increased from the designed 3.00 t/d to 7.21 t/d (2.4 times the design value), the water removal amount reached 4.85 t/d, and the average water removal capacity was 8.84 kg/(m²·d). The energy consumption of the system during winter operation decreased from 240.5 kW·h/t to 168.5 kW·h/t, which was 29.9% lower than that of the non-smart sludge solar drying systems and 49.4% lower than that of low-temperature belt drying systems. The system operated stably, the target sludge moisture content was controlled accurately, and the comprehensive energy-saving and emission-reduction effects were significant. Through a comparative analysis of multiple cases, the economical ranking of various sludge drying technologies is

收稿日期: 2024-09-03; 修改日期: 2024-10-26; 接收日期: 2024-11-15

第一作者: 王伟龙(1988—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为工业污水强化生化处理关键技术及装备。dwl1021@163.com

* 通信作者: 龙少鹏(1986—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为双碳背景下节能降碳型环保新技术。lsp@bgechina.cn

as follows: solar drying > low-temperature belt drying > steam aeration drying > thin-layer drying machine.

Keywords: artificial intelligence; AI; digital twin; solar energy; sludge drying; optimization and regulation; intelligent vision

0 引言

2023年,全国污水处理量达641亿 m^3 ,处理率98%以上^[1],年度泥量超7000万t。污泥含有大量的水分、有机胶体、细菌、病毒等有害物质,易腐败恶臭及造成病原体传播,需稳定化、无害化处置,避免二次污染。污泥最终处置用于好氧堆肥及土地利用时,含水率应 $\leq 65\%$;用于混合填埋时,含水率应 $\leq 60\%$;用于覆盖土时,含水率应 $\leq 45\%$;用于生物质协同燃料时,含水率应 $\leq 50\%$,且越低越好;用于建材协同利用,含水率应 $\leq 40\%$ 。污泥机械脱水后含水率可降至80%~85%,达不到各处置路径含水率要求,需要进一步干化处理。目前,中国污泥填埋处置率高达65%,而环保绿色处置方式——有机能源化利用或土地利用占比仅15%,远低于发达国家60%~80%的水平^[2]。“十三五”至“十四五”期间我国大力推进垃圾减量化、资源化、无害化,垃圾及污泥协同焚烧发电静脉产业园建设的同时,大量垃圾填埋厂停止使用,污泥填埋处置路径紧缩,土地利用成为更优推荐方式。土地利用要求选用环保清洁的污泥干化方式以保障良好泥质,热干化可有效避免生物消化过程中病原消杀不彻底,高压机械干化石灰、混凝剂等药剂加入造成有机泥质破坏等问题,成为响应当下高效率干化、高程度保障泥质的综合优势突出的优选污泥干化方式。在清净能源开拓、AI智能创新、碳中和达成环境下,太阳能污泥热干化技术得以广泛研究^[3-9],也有越来越多关于人工智能技术应用于水处理等环境领域的节能降耗研究^[10-12],但大多为概念或实验阶段,目前还没有将人工智能技术与太阳能污泥干化技术相融合的案例。本文目的是以工程应用为实例,提出一种以智能化视觉方案为基础的AI赋能型污泥太阳能干化优化应用例,探索人工智能赋能下污泥太阳能干化效能的提升,为AI在环境治理领域应用提供参考借鉴。

1 工作原理及初始设计

1.1 污泥太阳能干化系统简介

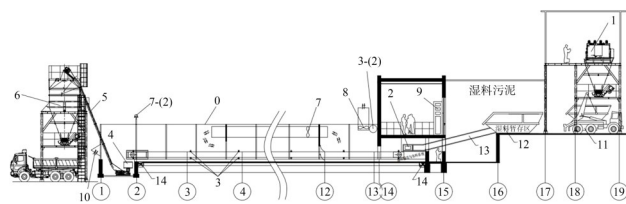
系统含温室、内外气象站、电控仪系统等。温室主体为阳光房,内有气流循环系统、湿料布料系统、污泥搅拌/运输系统,并连接有湿料暂存区、干料收集机械、干料输送与储存系统等^[5,9]。污泥太阳能干化,

就是利用温室效应及透光辐照作用,使污泥的表面水、间隙水、结合水进一步脱除、蒸发、干化达到污泥最终处置的含水率要求。

1.2 初始设计

新疆阜康某污泥太阳能干化系统为某工业园区2万 m^3/d 污水处理厂配套的污泥干化系统,日产80%含水率污泥12.00 t,即4380 t/a,出泥含水率按照35%设计,年度干化出水量3032 t/a。根据实际泥量及运转需求,需实现可10%~50%灵活调节(达标标准 $\leq 50\%$)。

阜康县蒸发量为2064 mm/a ^[13],设计按阳光房蒸发系数0.75,需求干化区面积为1958.9 m^2 ,设计4条干化生产线,有效长度为68 m,有效宽度为8.1 m,实际总干化面积为2203.2 m^2 。系统初始设计配置如图1、图2所示。



注:①~⑨为污泥太阳能干化系统建构筑物的纵向建筑轴线号;设备系统包括:0阳光房,1脱水机,2湿泥水平进料机(双向螺旋输送),3推抛机,4水平出泥机,5倾斜出泥机,6干泥料仓,7内循环风机,8外循环风机,9总控柜,10干空气进口,11湿泥进料铲车,12湿料暂存料槽+湿料污泥棚,13湿泥倾斜进料机,14污水源热泵系统;仪控系统包括:F进料机一急停开关,G进料机二急停开关;A第一门急停开关,B第二门急停开关,C第三门急停开关,D第四门急停开关,E第五门急停开关,3-(2)超声波泥位计,3-(1)推抛机电磁式诱导传感器,6-(1)防尘防爆料位计,4-(1)水平出泥机电磁式诱导传感器,5-(1)倾斜出泥机电磁式诱导传感器,H推抛机第一急停箱,I推抛机第二急停箱,7-(1)室内风速仪+温湿温度计,7-(2)室外风速仪+温湿温度计+辐照强度计等。下同。

图1 新疆阜康某污泥太阳能干化系统流程(侧剖面)

Figure 1 Flow diagram of a solar drying system for sludge in Fukang, Xinjiang (side section)

2 AI耦合赋能型污泥太阳能干化系统优化设计

AI耦合赋能型污泥太阳能干化系统是基于上述新疆阜康某污泥太阳能干化系统的典型设计及运营实例,进行定向的优化设计、改造并对比运营。

2.1 优化升级概述

基于AI赋能的污泥太阳能干化系统,对智慧化

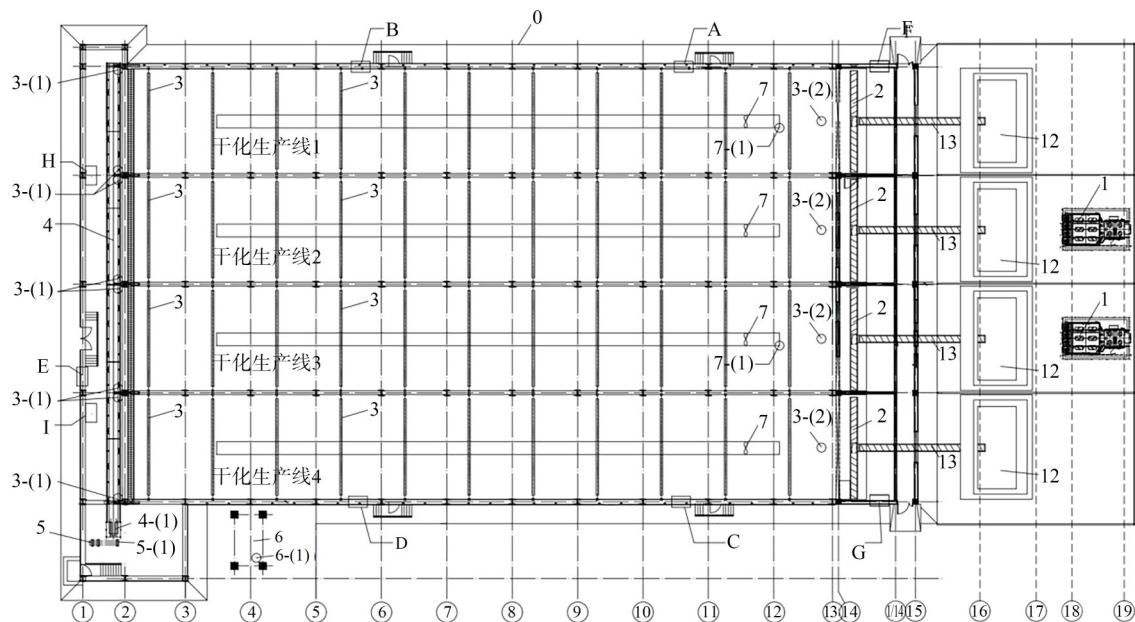


图2 新疆阜康某污泥太阳能干化系统项目平面

Figure 2 Plan of a sludge solar drying system project in Fukang, Xinjiang

配置进行升级,同时对机械系统简化,如表1所示。升级的总体流程见图3,升级的双向行进往复布料机运转示意图4。

2.2 AI矩阵式因子权重分析及大数据孪生

2.2.1 建立影响指标树状分层模型

基于智能视觉均分布料系统实现条件下,结合长期运行积累的各影响因子数据及实际干化效果数据,建立出泥含水率影响指标的树状分层模型,如图5所示,各指标因子含义见表2。

2.2.2 建立AI矩阵式因子对比分析模型

采用Delphi-AHP法^[14,15]逐层建立AI矩阵式因子对比分析模型。以指标层一的S6(见表3)为例, $i=1,5,9,12$,依次类推,不一一列举;其中,矩阵式交错比对重要性采用1~9标度法^[15],以上数值为初始录入示例值,运行中,通过调整一对指标的相对重要性,其他指标重要性联动变化,通过跟踪模型自动测算结果向实测真实结果的趋近或远离趋势及程度,判定调整措施为真值或假值。系统根据运行结果自动逐级修正重要性标度及分项权重,使各级模型测算趋于精准。

2.2.3 建立系统化数据采集、模型分析及系统综合调控AI模型

基于以上模型及设备系统,建立系统化数据采集、模型分析及系统综合调控AI模型,并预设留出模

型自动孪生升级空间,详见图6。

2.3 智能视觉系统

基于以上智慧化控制模型及2处高清球机系统、4处雷达摄像头系统,结合智能视觉实时算法,形成包括智能视觉均分布料、视觉辅助双向行进往复布料机智能化运行、智能视觉黏滞区结束线判断、智能视觉防水凝、智能视觉巡检安防、智能视觉推抛布料及输送等在内的智能视觉系统,详见图7。其中,以智能视觉巡检安防系统为例说明,不一一列举,当系统检测A—G门开启,或相应区域有巡检人员活动时,系统自动判断并关闭相应区域机械设备运转,保障人员安全,并在条件安全的情况下,自动开启系统运转。

3 结果与分析

3.1 初始相关性分析

从2022年8月—2023年7月运行典型统计数据中,筛选出室内相对湿度、进泥量、进泥含水率条件基本一致(分别为50%~60%、3.00 t/d、81%~85%)的不同室内温度下的运行数据,初步评价出泥含水率与温度、黏滞区长度、造粒干化区长度之间的相关性,统计趋势结果如图8所示。

由图8可知:针对本项目,黏滞区污泥含水率为 $\geq 65\%$,后续区域为造粒干化区;在进泥含水率、进泥量及相对湿度基本一致的情况下,温度变化对黏滞

表 1 智慧化升级及设备简化对比

Table 1 Comparison of intelligent upgrades and equipment simplification

编号	常规配套	阜康项目设计及实例	AI赋能型污泥太阳能干化
0	温室	0 阳光房	一致
12	湿料暂存区	12 湿料暂存料槽+湿料污泥棚, 配套 11 湿泥进料铲车	优化取消本项
2	湿料布料系统	2 湿泥水平进料机(双向螺旋输送), 配套 13 湿泥倾斜进料机 用于巡检人员安全保护的 F 进料机一门急停开关和 G 进料机二门急停开关 用于布料厚度监控的 3-(2)超声波泥位计	优化取消 13 湿泥倾斜进料机; 2 湿泥水平进料机优化替代为自动视觉调控的双向行进往复布料机 优化取消本项, 视觉方案兼顾实现 优化取消本项, 视觉方案兼顾实现, 替换为 3-(3) 雷达摄像头
3	污泥搅拌/运输系统	3 推抛机 用于推抛速度监控的 3-(1)推抛机电磁式诱导传感器 用于巡检人员安全保护的 A 第一门急停开关; B 第二门急停开关; C 第三门急停开关; D 第四门急停开关; E 第五门急停开关	一致 优化取消本项, 视觉方案兼顾实现, 替换为 3-(4) 360°高清球机摄像头 优化取消本项, 视觉方案兼顾实现
15	干料收集机械	——未配置, 3 推抛机具备自动推移输送出料能力, 无需在干化区进行干料收集	一致—不需要
4、5、6	干料输送与储存系统	4 水平出泥机; 5 倾斜出泥机; 6 干泥料仓 用于高料位报警的 6-(1)防尘防爆料位计 用于出泥输送速度监控的 4-(1)水平出泥机电磁式诱导传感器; 5-(1)倾斜出泥机电磁式诱导传感器	一致 一致 一致
7、8、10	气流循环系统	7 内循环风机; 8 外循环风机; 10 干空气进口	一致
7-(2)	气象站	用于气象监测的室外风速仪、温湿度计、辐照强度计等	一致
7-(1)	其他控仪 1	用于温室环境监测的室内风速仪、温湿度计	一致
H、I	其他控仪 2	用于手动急停的 H 推抛机第一急停箱和 I 推抛机第二急停箱	一致
9	电控系统	O1 总控柜	增设 O ₂ 智能柜; 实现智能视觉均分布料、智能视觉黏滞区结束线判断、智能视觉防水凝、智能视觉巡检安防、智能视觉推抛布料及输送、智能辅热及气流循环调控、AI 矩阵式因子权重分析及大数据孪生等功能
14	辅热系统	14 污水源热泵系统	一致

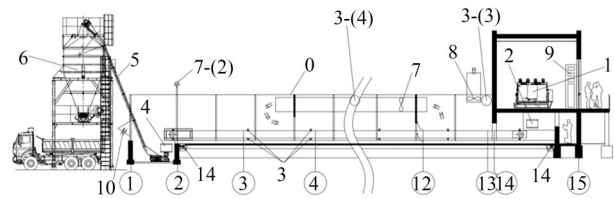


图 3 升级的项目系统运转流程(侧剖面)

Figure 3 System flow chart of the upgraded project (side section)

区长度、造粒干化区长度、出泥含水率等的影响非常显著。38~58℃时,出泥含水率与黏滞区长度/造粒干化区长度呈现明显的线性相关性(几乎平行),随着黏滞区长度降低(53 m→18 m)/造粒干化区长度增加(15 m→50 m),出泥含水率线性降低(48%→11%),此区间也是造粒干化区长度平稳增长,出泥含水率显著降低的区间,可视为污泥高效干化控制条件区间,全年平均运行温度在 40~55℃;温度<33℃时(仅冬季且需开启辅热),干化区几乎全部为黏滞区(长

度受工程实际长度制约,黏滞区长度与出泥含水率线性相关性破坏,曲线出现交叉点),出泥含水率>65%,甚至接近 80%,干化效果极差;温度>58℃接近 60℃时(仅夏季),温室温度难以进一步升高,因维持高温,减少空气外循环量,造成室内相对湿度骤升(约 82%),室内出现水雾、水凝现象,造成进一步干化困难(黏滞区长度与出泥含水率线性相关性破坏,曲线出现交叉点),出泥含水率反而升高至 24.2%,黏滞区随温度升高,未进一步缩短。

3.2 造粒干化区长度对出泥含水率的表征

根据 3.1 节分析,可将造粒干化区长度作为出泥含水率控制的重要表征指标,运行 1 个月以后,结合数字化模型的缓冲控制自动计算与数字孪生纠缠,得出如下结果:

1)造粒干化区长度与污泥出料含水率存在线性关系模型见式(1):

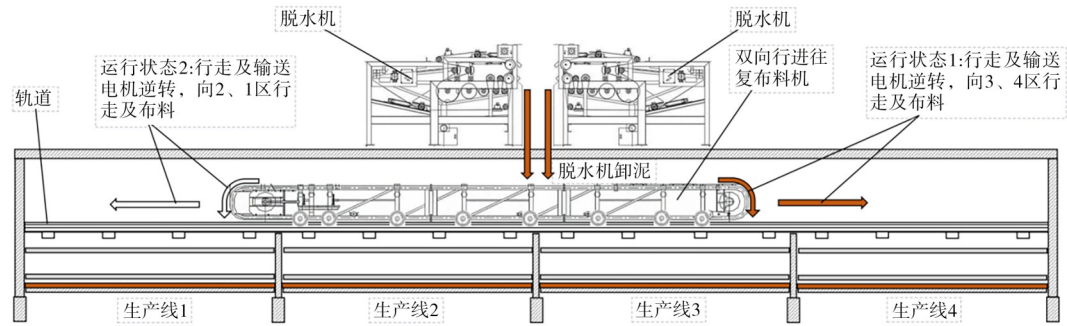


图4 双向行进往复布料机示意

Figure 4 Schematic diagram of the two-way reciprocating distributor



图5 出泥含水率影响指标树状分层模型

Figure 5 Tree-structured hierarchical model of indicators affecting dewatered sludge moisture content

表2 出泥含水率影响指标代码及含义

Table 2 Codes and definitions of indicators affecting dewatered sludge moisture content

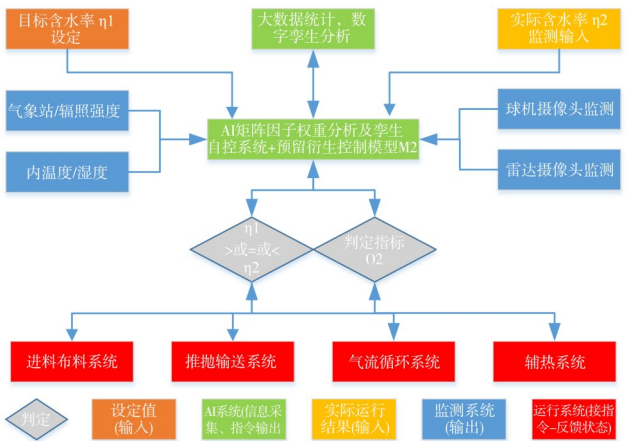
代码	指标项(数据来源)	代码	指标项
0	出料含水率(实验检测/系统孪生测算预估)	T1	室外温度
S1	室外温度(气象站)	T2	室外湿度
S2	室外湿度(气象站)	T3	室外风速
S3	室外风速(气象站)	T4	室外气压
S4	室外气压(气象站)	T5	辐照强度
S5	辐照强度(气象站)	T6	室内温度
S6	室内温度(内温湿度计)	T7	推抛输送系统运行参数
S7	室内湿度(内温湿度计)	T8	内循环风机频率
S8	室内风速(气流循环系统参数转换)	T9	外循环风机频率
S9	外循环交换风量(气流循环系统参数转换)	T10	脱水机运行参数
S10	污泥进料量(脱水机及进料布料系统参数转换)	T11	污泥进料含水率
S11	污泥进料含水率(实验检测)	T12	辅热系统功率
S12	泥层厚度(雷达摄像头)	T13	进料布料系统运行参数
S13	造粒干化区长度(球机摄像头)		

注:0 目标层代码;S影响指标层一代码;T影响指标层二代码。

表3 S6的二级权重

Table 3 The second level weight of S6

S6	T1	T5	T9	T12	几何平均	权重 W_{Ri}
T1	1	2	4	3	2.213	0.477
T5	1/2	1	2	2	1.189	0.257
T9	1/4	1/2	1	1	0.595	0.128
T12	1/3	1/2	1	1	0.639	0.138



注:M2为预留孪生模型计算及控制系统自动衍生能力;O2为预留衍生目标控制比判定指标;见3.2节运行分析。

图6 智慧化控制模型

Figure 6 The intelligent control model

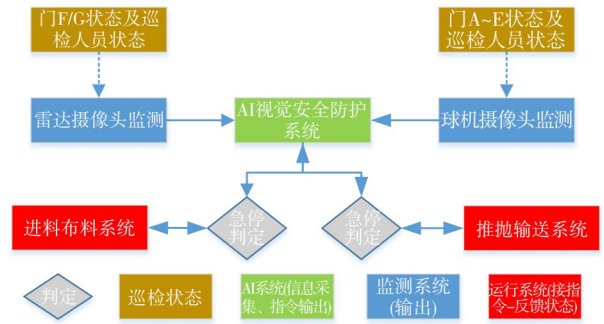


图7 智慧视觉巡检安防系统原理

Figure 7 Schematic diagram of the intelligent visual inspection and security system

$$\eta = aL_{\text{粒}} + b \quad (1)$$

式中: η 为出料含水率,%; a 为线性系数,-0.96; b 为常数,61.9; $L_{\text{粒}}$ 为造粒干化区长度,m;

2)孪生模型建立:将上述线性模型作为确定模型固定至衍生控制模型如图6所示的M2中,将模型反算结果 $L_{\text{粒算}} = (\eta - b)/a$, $L_{\text{粒算}}$ 与 $L_{\text{粒}}$ 实测大小关系,作

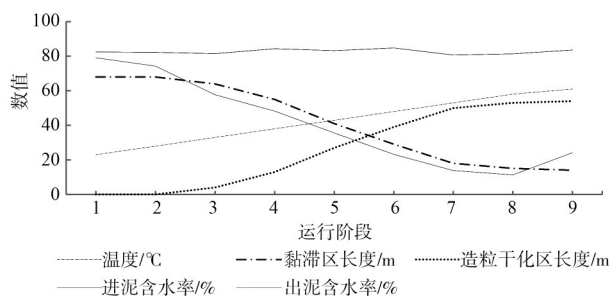


图8 初始运行趋势分析

Figure 8 Trend analysis of initial operation

为同步判定条件写入如图6所示的O2中,并将 a 、 b 值设定为缓冲纠偏对象,进一步纠偏优化模型。

值得注意的是,3.1、3.2节,以及3.3.1—3.3.3节与线性模型比对优化分析相关的章节,均以单条生产线(设计处理能力3.00 t/d 含水率80%污泥)为研究对象及核算基础;而其他章节均以全工程(4条干化生产线,总处理能力12.00 t/d 含水率80%污泥)为研究对象及核算基础。

3.3 造粒干化区长度对出料含水率表征验证及综合干化效能优化

3.3.1 模型运行情况概述

模型运行结果表明:温度变化、进料量变化对造粒干化区长度影响较大,但与出泥含水率没有绝对线性相关性;相同条件下,相对湿度和辐照强度对污泥干化效果及出料含水率存在一定影响,但出料含水率总体与造粒干化区长度呈现良好线性关系;控制造粒干化区长度是达成目标含水率的根本手段,温度、进料量、相对湿度、辐照等因素的综合影响情况仍需进一步探究。

3.3.2 非冬季运行

非冬季运行规律总体上也符合上述各规律及3.2节线性模型。 $\eta = aL_{\text{粒}} + b$, $a = -0.96$, $b = 61.9$;总误差 $\leq 4\%$ 。以夏季运行为例,综合效能关键指标趋势见图9。

夏季最佳工作工况为2、3组工况,温度控制在48~53℃、相对湿度控制在64%~75%,造粒干化区长度控制13~18 m,可实现进泥含水率83%、出泥含水率47%~48%情况下,日处理污泥7.21 t(达到设计值2.4倍),日脱水量4.85 t,平均脱水能力达8.84 kg/(m²·d);通过自动控制造粒干化区长度为13~18 m,保障出泥含水率,在自动调控最佳温湿度情况下,自动调节进料量的上限值,实现最大化的污泥干化处

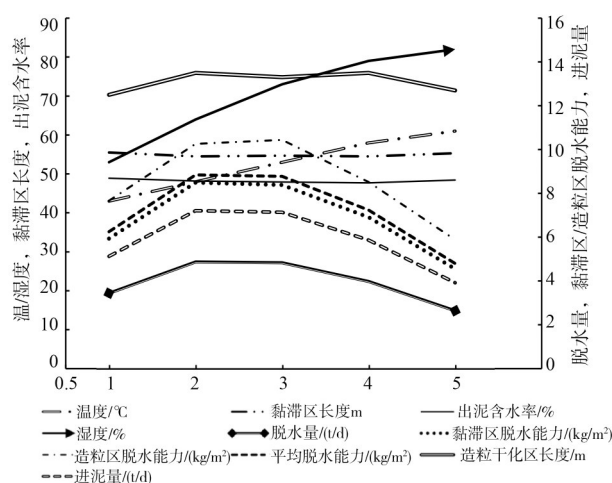


图9 非冬季运行综合效能关键指标趋势

Figure 9 Key indicators trend chart of non-winter operation comprehensive efficiency

理量,发挥最佳的单位处理能力和用地效率。1组与2、3组相比,低温(43℃)导致干化效果差,低相对湿度(52%)无法弥补提升干化能力;4、5组与2、3组相比,虽然温度更高,但是相对湿度过高(79%~82%)严重影响了挥发干化效果。就总体趋势而言,污泥干化效果主要受温度的控制,相对湿度对污泥干化性能的影响较小(相对湿度控制在水凝起雾点以下即可)。

运行中发现,要使以上最佳工况得以实现,在进泥量加到7.21 t/d的同时,要同步注重干化区污泥摊铺的厚度和翻抛推移速度调节,摊铺厚度应控制在3~7 cm,厚度超过7 cm,干化效果会明显降低;而翻抛推移的速度,宜从0.05 m/s的最低速,调整到1.0~1.5 m/s。

3.3.3 冬季运行

冬季综合效能关键指标趋势见图10。可知:冬季运行规律基本符合上述规律及3.3节的线性模型。 $\eta = aL_{\text{粒}} + b$,但系数有一定修正,其中 $a = -0.94$, $b = 64.3$,修正后,总体误差 $\leq 5\%$ 。非冬季更强的太阳辐射强度,对含水率的额外降低贡献率约为3%,达到同等出泥含水率需求(47%~48%),冬季需求的造粒干化区最小长度为16 m,而夏季仅需13 m。最佳工作工况为2组,温度控制在39℃、相对湿度控制在75%以下,造粒干化区长度控制16~20 m,可实现进泥83%含水率、出泥含水率47%~48%情况下,污泥处理量3.00 t/d左右(满足设计需求),脱水量2.00 t/d,平均脱水能力达3.62 kg/(m²·d),水源热泵功耗14 kW,

吨水功耗 168.5 kW·h。

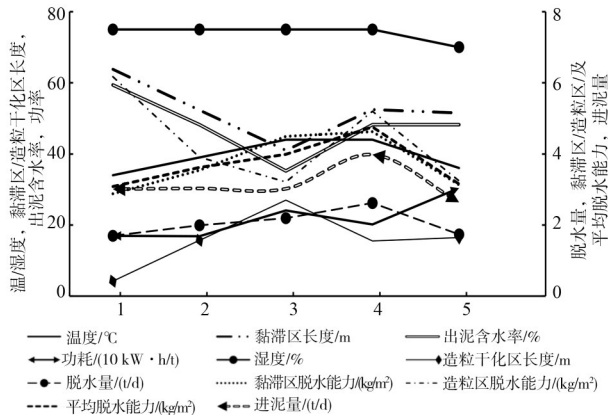


图10 冬季运行综合效能关键指标趋势

Figure 10 Key indicators trend chart of winter operation comprehensive efficiency

1) 1组相比2组,温度过低,导致黏滞区过长,造粒干化区不足,出泥含水率超标;3组相比2组,处理能力基本一致,水源热泵功耗22 kW满负荷开启,吨水功耗240.5 kW·h,经济性低于2组,但在温度更高达44℃情况下,其出泥含水率更低,达到35%,可以应用于对出泥含水率有更高要求的场景;4组与3组温度一致,与2组黏滞区长度及出泥含水率控制一致,水源热泵功耗22 kW满负荷开启,吨水功耗201.5 kW·h,经济性强于3组,弱于2组,但是带来了更高的污泥处理量,约4 t/d;5组相比4组,尝试加大外循环,以降低温室湿度,并通过水源热泵功耗22 kW满负荷开启维持系统需求温度,结果显示,相对湿度从75%降至70%,温度从44℃骤降至36℃,如果继续追求降低湿度,将造成温度进一步骤降,温度骤降造成污泥处理量从4.00 t/d降至2.64 t/d,相对湿度的轻微降低不足以抵消温度降低造成的损失,而此时吨水功耗增至303.8 kW·h,接近低温带式干化系统功耗(333.3 kW·h/t)(参考高能环境大理凤仪污水处理厂及湖南邵阳污泥处置中心实际数据,以及同臣环保贵阳污水处理厂与越南胡志明市污水处理厂污泥干化处理实际数据),经济性优势不突出。

2) 综合1)对比:最佳工况为2组,冬季运行温度必须控制39℃以上,干化造粒区控制16 m以上,相对湿度控制在接近但不高于75%即可,并尽量减少外循环,避免温室内热量流失;热泵全负荷开启能实现的最高温室温度为44℃,加大功率处理更多的污泥量比追求更低的污泥含水率更具有性价比;在湿度

满足基本干化需求的情况下,增加功率追求更大的空气外循环以降低温室湿度,只会得不偿失。

3) 相比原运行系统,冬季运行能耗节省 $8 \times 4 \times 24 \times 30 \times 4 = 92160$ kW·h;夏季处理污泥量可增加 $4 \times 4.2 \times 30 \times 4 = 2016$ t,相应处理能耗 $1374.55 \times 333.3 = 458138$ kW·h(外承接原低温干化系统污泥);总体经济节省达38.52万元/a[电费0.7元/(kW·h)],总体碳减排达518.3 t/a[0.9419 kg/(kW·h)]。

3.3.4 综合干化效能分析

将本优化升级运行例与优化前系统,及其他污泥太阳能干化系统运行情况作对比,其综合能耗等指标对比情况如表4所示。可知:对比1、4组,智慧化运营后,系统年度处理能力从4380 t提升至7966 t,单位脱水能力由3.77 kg/(m²·d)提升至6.73 kg/(m²·d),提升78.5%;功耗节省达70.8%;对比4、5、7组,智慧化运营后,相比同类型太阳能干化系统例,其全年处理能力可提升12.2%~64.9%,功耗节省5.6%;对比2、6组,智慧化运营后,相比同类型太阳能干化系统例,其夏季处理能力可提升23.8%;对比3、1组,智慧化运营后,冬季室外最低温场景下,相比非智慧化运营的全年平均水平仍可节省能耗达29.9%;对比3、13组,智慧化运营后,相比低温带式干化技术,可节省能耗49.4%;对比1—10组,国内污泥太阳能干化系统应用已经十分成熟,其单位处理能力达4.08~7.14 kg/(m²·d),高于德国1.90~2.30 kg/(m²·d)的平均水平;全面对比可知:相比蒸汽曝气干化、低温带式干化、薄层干化机等热干化工艺,太阳能污泥干化具有绝对的节能降耗优势,优势顺序为太阳能污泥干化>低温带式干化>蒸汽曝气干化>薄层干化机。

3.4 智能视觉系统应用

智能视觉辅助控制系统相关功能均高效实现,运行稳定,除必要机械检修外,智能控制故障率为0。

1) 智能视觉均分布料系统:实现4条生产线进料端泥垛高度精确控制在(41±2) cm范围内,且生产线间进料端泥垛高度差≤4 cm,同步人员、机械设备精简。

2) 视觉辅助双向行进往复布料机智能化运行:实现定点无级均匀布料,行走和皮带输送速度分别在0.01~0.10 m/s、1.0~4.0 m/s范围内可调。

3) 智能视觉黏滞区结束线判断:实现黏滞区结束线自动判断误差达±8 cm,精度满足总体控制需求。

4) 智能视觉防水凝:通过摄像头画面水凝、水雾

表 4 污泥干化不同运行实例对比

Table 4 Comparison of different operating cases for sludge drying

组别	项目地-批注	工艺类型	进泥量/ (t/a)	干化区面 积/m ²	电耗/ (kW·h/t)	单位脱水 能力/[kg/ (m ² ·d)]	优化例相对 参考例处理 能力提升 率/%	优化例相 对参考例 能耗节 省/%	备注	文献
1	阜康-优化前	循环耙齿推抛太 阳能温室干化	4380	2203.2	240.5	3.77	78.5	70.8		-
2	阜康-优化后非 冬季	AI功能耦合型太 阳能温室干化	10527	2203.2	0.0	8.84	100*	-		-
3	阜康-优化后冬季	同上	4380	2203.2	168.5	3.77	-	-		-
4	阜康-优化后全年	同上	7966	2203.2	70.2	6.73	100	100		-
5	吴忠-全年	循环耙齿推抛太 阳能温室干化	14400	5880	74.3	4.08	64.9	5.6	31.2 元/t	[9]
6	吴忠-夏季	同上	22680	5880	-	7.14	23.8*	-		[9]
7	河南民权	滚筒叉刀翻抛机 太阳能温室干化	3600	1000	-	6.00	12.2	-		[5]
8	德国北部	琥珀双壳翻抛机 太阳能温室干化	1000	900	-	1.90	254.4	-		[4]
9	德国中部	同上	1000	804	-	2.13	216.6	-		[4]
10	德国南部	同上	1000	744	-	2.30	192.9	-		[4]
11	广东	蒸汽曝气干化	108000	12420	787.0	14.49	-53.6	91.1		[6]
12	上海	薄层干化机	72000	-	1080.6	-	-	93.5	出泥含水 率 30%~ 50%	[6]
13	-	低温带式	-	-	333.3	-	-	78.9		[16,17]

注:各案例进泥含水率均约为 80%;*表示非冬季或夏季运行数据。

产生迹象提前预判,可高效防止水凝水雾制约污泥干化效果问题,与高颖等研究结果一致,此时室内相对湿度<80%^[4],冬夏季略有区别。

5)智能视觉巡检安防:系统运行稳定,急停响应率 100%。

6)智能视觉推抛布料及输送:实现干化区泥层厚度 3~11 cm 可调,精度≤1cm。

4 结论与展望

本文研究 AI 对污泥太阳能干化系统的赋能作用,结合新疆阜康某污泥太阳能干化系统实例,通过智慧化与数据孪生升级应用,得到以下主要结论:

1)智能视觉系统应用于污泥太阳能干化系统场景是高效可行的,可有效降低系统设备、建构物投入成本,提高系统自动化运行效率,降低人员投入,同时能提高系统安防智慧化程度,提升安全性、稳定性。

2)以智能视觉系统为基础,引入大数据孪生模型,能进一步提高系统智慧化程度;通过孪生分析,初步判断出造粒干化区长度是表征出泥含水率的关键指标,以此简化系统控制过程,提升系统效率。

3)系统具备更好的节能降碳效果,夏季可提升

处理量至设计值 2.4 倍,冬季室外最低温场景下相比非智慧化运营的全年平均水平仍可节省能耗达 29.9%,相比低温带式干化技术,可节省能耗 49.4%。

4)在保证出泥含水率达标前提下,系统运行寻求更高的干化处理量的脱水经济性,远高于等处理量下寻求更低的出泥含水率。

5)在不产生水凝、水雾等严重制约污泥干化效率现场的情况下,污泥干化效率对相对湿度变化不敏感,但是温度变化会显著影响干化效率。

6)各工艺综合能耗优势大小顺序为薄层干化机>蒸汽曝气干化>低温带式干化>太阳能污泥干化。

7)在双碳目标及 AI 快速发展的大背景下, AI 对环境治理的智慧化及减污降碳赋能,不会仅限于污泥太阳能干化场景,其大规模应用情景值得期待。

参考文献

[1] 中华人民共和国生态环境部. 2023 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. [2024-05-24]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/>.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2023 China Ecological Environment Status Bulletin. [EB/OL]. [2024-05-24]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/>.
[2] 韦伯产业分析,韦伯咨询. 2024 年污泥处理行业深度报告[EB/

- OL]. [2024-10-30]. [http://www. weibozixun. com/page15? article_id=4056&pagenum=all](http://www.weibozixun.com/page15?article_id=4056&pagenum=all). Weibo Industry Analysis, Weibo Consulting. In-depth report on the sludge treatment industry in 2024 [EB/OL]. [2024-10-30]. http://www. weibozixun. com/page15? article_id=4056&pagenum=all.
- [3] LOMBARDI L, CARNEVALE E, CORTI A. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste[J]. Waste Manage, 2015, 37: 26-44.
- [4] 高颖, 黄志强. 德国太阳能污泥干化处理系统[J]. 太阳能, 2012(7): 21-26.
- GAO Y, HUANG Z Q. German solar powered sludge drying treatment system[J]. Solar Energy, 2012(7): 21-26.
- [5] 宋国华, 张振涛, 杨鲁伟, 等. 温室太阳能污泥干化系统的设计及试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(5): 141-145.
- SONG G H, ZHANG Z T, YANG L W, et al. Design and experiment of solar greenhouse sludge drying system[J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(05): 141-145.
- [6] 陈成, 司丹丹, 陈清武, 等. 集热式太阳能污泥干化系统能效评估与适应性分析[J]. 广东化工, 2016, 43(22): 60-62, 85.
- CHEN C, SI D D, CHEN Q W, et al. Evaluation of sludge drying using solar collector by costs and application [J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, 43(22): 60-62, 85.
- [7] 周亮. 污水厂污泥干化技术的运用研究[J]. 资源节约与环保, 2018(7): 106-107.
- ZHOU L. Research on the application of sludge drying technology in sewage treatment plants [J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2018(7): 106-107.
- [8] 毛梦梅, 刘嘉南. 薄层干化机污泥干化过程能耗及污染物特性研究[J]. 环境卫生工程, 2019, 27(3): 37-40.
- MAO M M, LIU J N. Energy consumption and pollutants characteristics of sludge drying process in thin film evaporator [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2019, 27(3): 37-40.
- [9] 谭明, 罗奇, 石文政, 等. 太阳能大棚污泥干化案例分析[J]. 环境工程, 2019, 37(增刊1): 335-337.
- TAN M, LUO Q, SHI W Z, et al. Case study on sludge drying in solar greenhouse[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(S1): 335-337.
- [10] 高磊. 基于人工智能优化混凝剂投加量研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- GAO L. Optimization of coagulant dosage based on artificial intelligence[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [11] 曾祥吉, 鄢锋, 李勇刚, 等. 基于智能视觉的流动水体污染监控方法及应用[J]. 环境工程, 2023, 41(11): 78-83, 122.
- ZENG X J, YAN F, LI Y G, et al. Monitoring methods and their application of flowing water pollution based on intelligent vision [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(11): 78-83, 122.
- [12] 胡鹤轩, 孙昕远. 人工智能技术在模拟预测和优化污水处理中的应用[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(11): 1587-1590, 1602.
- HU H X, SUN X Y. Application of artificial intelligence technology in simulation, prediction and optimization of wastewater treatment [J]. Environmental Pollution & Control, 2023, 45(11): 1587-1590, 1602.
- [13] 国家气象信息中心, 中国气象数据网. 中国地面气象观测历史数据集[EB/OL]. [2023-11-03]. [https://data. cma. cn](https://data.cma.cn). National Meteorological Information Center, China Meteorological Data Network. Historical dataset of China's ground meteorological observations [EB/OL]. [2023-11-03]. <https://data. cma. cn>.
- [14] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- DENG X, LI J M, ZENG H J, et al. Research on computation methods of AHP wight vector and its applications[J]. Mathematics in Practice And Theory, 2012, 4207: 93-100.
- [15] 王伟龙, 徐梦莹, 高艳梅, 等. 2008-2012年北京市区域循环经济评价研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(11): 258-264.
- WANG W L, XU M Y, GAO Y M, et al. Study on regional circular economy evaluation of Beijing from 2008 to 2012 [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(11): 258-264.