

# 数字孪生系统在污泥处置中的实践应用

曹红 田淑霞 金浩 朱旭坤  
上海城投污水处理有限公司  
DOI:10.12238/eep.v7i5.2092

**[摘要]** 以污泥焚烧运行管理平台为例,结合数字化转型背景,论述了数字孪生系统解决方案的架构和主要功能应用,为后期污泥干化焚烧厂的生产运营数字化设计与转型提供部分借鉴作用。

**[关键词]** 污泥干化焚烧; 数字孪生; 物理模型; 工艺评估

**中图分类号:** G633.7 **文献标识码:** A

## Practical application of digital twin system in sludge disposal

Hong Cao Shuxia Tian Hao Jin Xukun Zhu  
Shanghai Chengtou Sewage Treatment Co., Ltd

**[Abstract]** Taking the sludge incineration operation management platform as an example, combined with the background of digital transformation, this paper discusses the architecture and main function application of the digital twin system solution, which provides some reference for the digital design and transformation of the production operation of sludge drying incineration plant in the later period.

**[Key words]** process evaluation of digital twin physical model for sludge drying and incineration

## 引言

近年来,在经济持续发展以及对环境要求越来越高的前提下,国内污水处理能力得到快速提升,产生的污泥量也不断增加,随着“泥水并重”发展思路的提出,污泥的处理处置越来越得到各方的重视。目前我国在污泥处理处置技术方面形成了两条示范模式,即北京的高级厌氧消化-土地利用模式和上海的干化焚烧-灰渣建材利用模式,这两种为我国的污泥处理处置行业发挥了积极的示范引领作用<sup>[1]</sup>。根据上海市水务局发布的《推进建筑信息模型技术水务应用三年行动计划》指导思想,要求贯彻落实城市数字化转型发展战略,推动实现水务工程领域高质量建设、智能化运维、精细化监管数字化转型。

在数字化转型政策背景下结合污泥处理处置实际生产,本文以上海某污水厂的污泥焚烧数字孪生系统为例,探讨在污泥处理处置过程中使用该技术的应用实践情况。

## 1 设计理念和预期需求

随着新一代信息技术,如物联网技术、大数据分析、人工智能等等,更多的工业产品、工业设备具备了智能的特征,这些技术的发展为虚拟数字化提供更加便利的条件。数字孪生利用基于BIM的三维数字物理模型、传感协议数据传输、原始运行数据,在数字化的虚拟空间中完成污泥焚烧设施的物理映射,形成物理维度上的实体世界和信息维度上的数字世界共生共存、虚实交融的格局<sup>[2]</sup>。

新技术的开发应用除了要满足当前生产管理需求外还要

兼顾可持续发展的目标,能够在常态监控、信息反馈的同时进行数据整合分析,提高对生产状态的预判,弥补传统运行方式中的缺陷<sup>[4]</sup>。数字孪生技术极大地改变了传统生产模式,在考虑到生产管理的适用性、整合性以及拓展性的前提下,实现了对生产运行的全生命周期管理,提高了对风险运行的管控能力。

## 2 数据构成

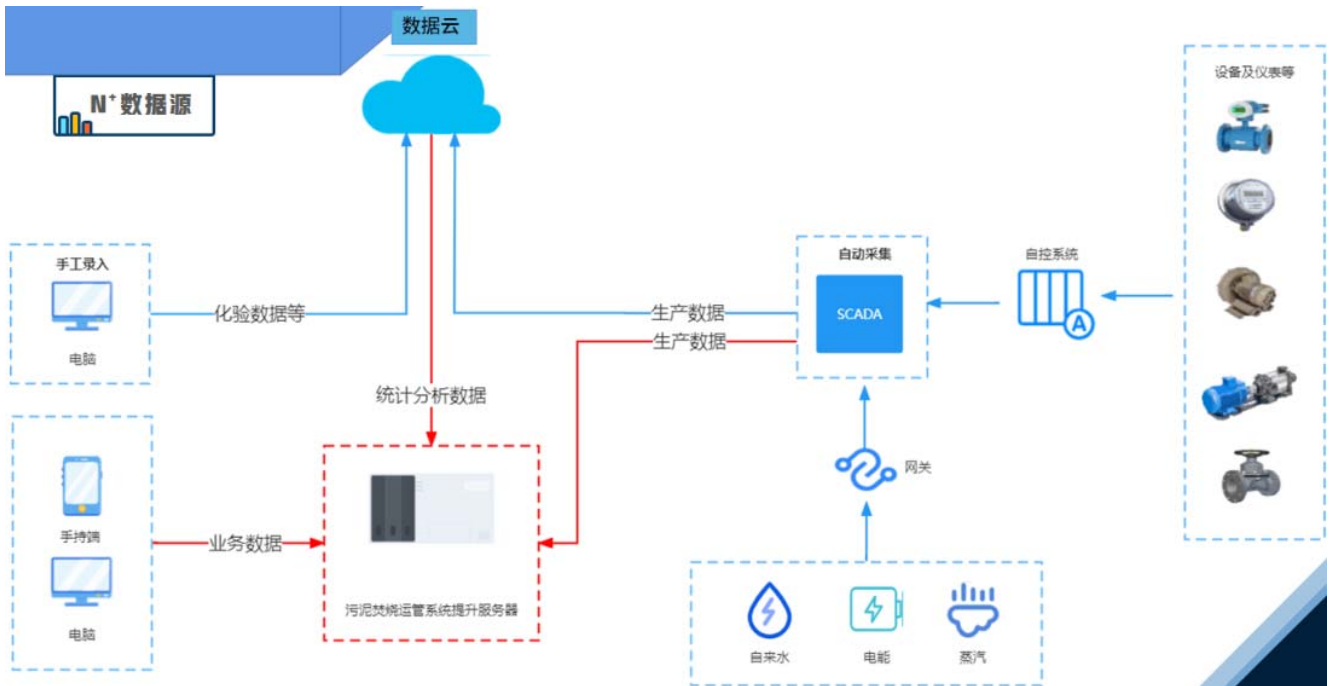
该污泥车间新建时期设有3D数字化展示模型,已实现设备数字场景、数字巡检及人员定位轨迹展现功能。结合既有的构筑物 and 运行部件,根据相关BIM分类和编码标准对模型构件录入模型信息和编码,将设备整理分类,建立多元信息数据库<sup>[3]</sup>。在此基础上将原自控系统、智能管理系统、安防监控系统等进行集成,在虚拟空间中完成对实体制造的镜像映射,同时融入实时数据,构建污泥干化焚烧工艺过程孪生物理模型,通过模型预测结果指导工艺运行,建立各工艺段设备能效评估及运行评价模型,打造数字孪生系统。

## 3 功能介绍

### 3.1 数字车间

围绕污泥处理工艺流程依次展示污泥从进泥至烟气排放的工艺过程,综合构筑物、管线、设备,虚拟呈现焚烧数字车间,包括三维展示、参观游览、主要生产数据、各关键设备的运行情况等。通过数据传输和画面配置,实时掌握运行情况。

### 3.2 工艺数据巡视



数据结构图



工艺数据巡视界面

针对污泥干化焚烧过程中的关键设备参数,如污泥含水率、干燥机温度、压力、燃烧炉温度、烟气排放指标参数等,进行数据巡视,包括:数据异常报警、上下限报警、数据变化规律。在数据变化规律研究基础上,将历史运行数据采用人工神经网络、随机森林、支持向量机等机器学习算法,建立不同运行工况下干化蒸汽耗量/干化尾气参数、辅助燃料投加量/燃烧温度、蒸汽产量等预测模型。

### 3.3 设备能效评估诊断

污泥处理离心脱水、干化焚烧等过程中重要旋转机械设备,基于流体力学理论,建立了相应的效率评估模型,对设备运行性能进行评估,包括一次风机、给水泵和螺杆泵等。

污泥处理主关键设备,通过分析所监测温度、压力等工艺参数变化,对其运行工况进行诊断,具体包括:干化过程中,通过分析历

史运行过程中不同污泥进泥量、蒸汽参数情况下出口载气温度、压力等变化规律,对运行工况进行诊断,发现设备效能降低时,可及时预警,提醒现场工艺人员进行检查;焚烧过程中,通过对焚烧炉不同位置温度分析,如焚烧带平均温度及温度随时间的变化趋势,进而对其运行工况进行诊断。在发现设备效能降低时,及时预警,提醒现场工艺人员进行检查。

### 3.4 工艺运行评价

从技术性能、经济效益和环境效益三个方面筛选出评价指标,建立污泥处理系统运行综合评价指标体系。基于所确定的污泥处理系统评价指标,采用层次分析、灰色关联分析、主成分分析等方法确定各评价指标的权重,构建污泥处理系统综合评价体系,计算不同处理工况下的综合评价得分,对污泥处理工艺进行评价。



工艺运行评价总览

技术性能指标包含干化、焚烧系统和焚烧炉的主要性能指标,包括干燥机的进泥量、含水率,焚烧系统的干基进泥量、湿污泥及干污泥的进泥含水率,焚烧炉的各部位温度显示等。

技术性能评价内容及要求

工艺段	评价内容	要求
/	污泥处理量	处理的污泥重量
干化系统	维持必要的干燥温度	干燥机内的温度
	环境维护(干燥机内维持负压)	机内压力: -0.05~0.1kPa
焚烧系统	维持炉内良好流动状态	炉膛内砂床高度
	稀相段温度	840~860℃
	砂层温度	650~750℃
	炉出口温度	830~850℃
	维持氧气浓度	炉出口烟气氧气浓度>5%
	炉膛出口压力	压力: -0.5~-1.5kPa

经济效益指标包含电单耗、水单耗、气单耗、蒸汽单耗及药单耗按工艺段进行日度、月度和年度的统计、对比分析。其中,电单耗为污泥处置产线各工艺段吨污泥处理电耗,水单耗为污泥处置产线各工艺段吨污泥处理水耗,气耗主要为天然气/烟气的吨污泥处理单耗;药单耗包括离心脱水系统PAM絮凝剂的单耗、烟气处理系统中尿素、消石灰及氢氧化钠溶液的单耗,蒸汽单耗为污泥干化过程所消耗的吨污泥处理单耗。

环境效益指标包含烟气排放中的一氧化碳、二氧化硫、氮氧化物等气体的指标。根据《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB1818-2002)及《生活垃圾焚烧大气污染物排放标准》(DB31/768-2013)的排放要求,选择多种气体的排放量对环境效益进行评价。

环境效益评价指标

评价内容	要求	
一氧化碳 CO (mg/Nm <sup>3</sup> )	小时均值: 100	日均值: 50
二氧化硫 SO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> )	小时均值: 100	日均值: 50
氮氧化物 NO <sub>x</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> )	小时均值: 250	日均值: 200
氯化氢 HCl (mg/Nm <sup>3</sup> )	小时均值: 50	日均值: 10
氨气 NH <sub>3</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> )	厂界污染物监控浓度限值: 0.03	排气筒污染物排放限 制: 5

### 3.5 精细化管理

#### 3.5.1 安全管理

针对污泥处理现场所发生某一异常并制定相应预案的安全预案管理功能,在预案处置模式下进行演练,提升安全应急处置能力。主要包括:

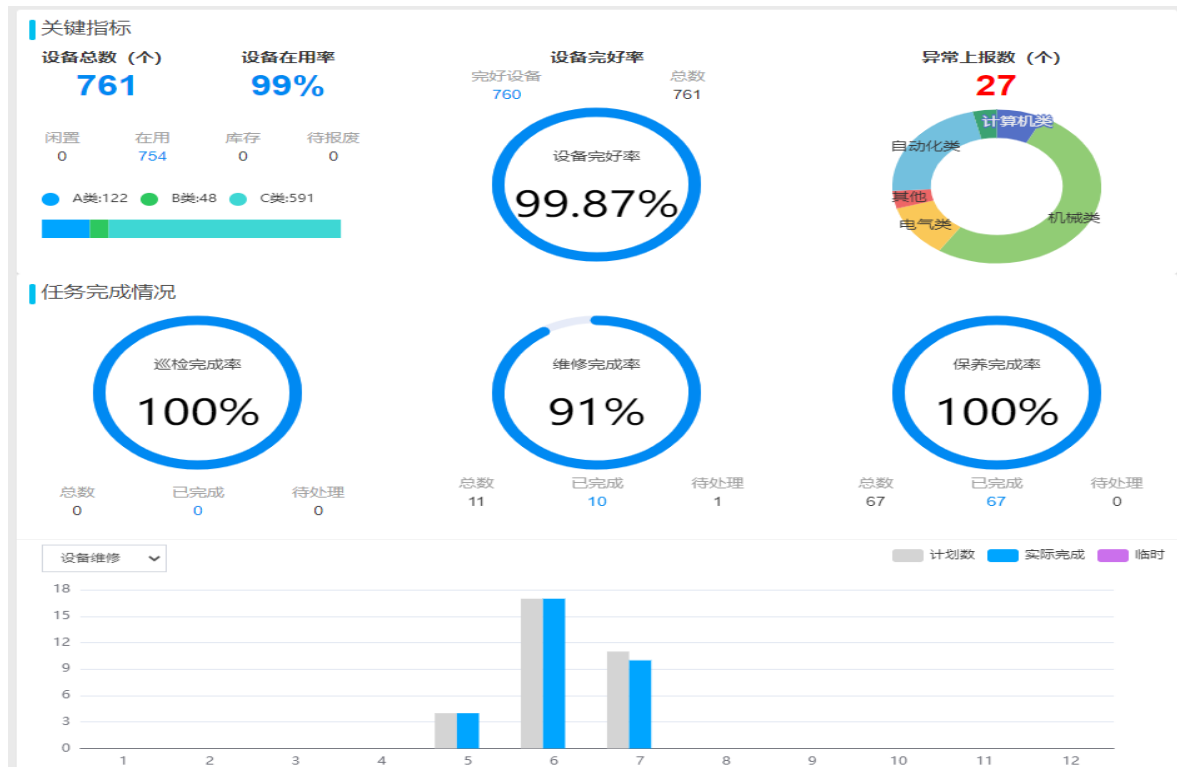
预案配置: 设置了预案等级、负责人和各阶段操作步骤等信息;

预案演练: 人为进行预案的演练,演练过程中有操作指导和计时等功能,可以帮助人员熟悉并优化应急处置流程,历史演练记录均可查询;

预案触发: 关联设定条件、信号异常等事件进行应急预案的自动触发,也可根据突发事件手动启动应急预案。

#### 3.5.2 设备管理

通过设备运行数据管理为模型预测提供正确数据来源,并响应模型的数据联动;在原有设备管理二期台账管理、工单管理、运行记录等基础上,接入一期设备台账、老线设备台账;新增设备运行时间、维修情况、强检情况、智能维护提醒功能。



设备管理总界面

### 3.5.3 能源管理

基于污泥处理系统运行评价所涉及的经济效益指标分析包含电单耗、水单耗、气单耗、蒸汽单耗及药单耗按工艺段进行日度、月度和年度的统计、对比分析等,在数字孪生平台上开发相应功能界面,实时展示相应计算结果,为现场工艺人员提供相应指导。

## 4 应用效果与展望

数字孪生平台投入运行后整体比较稳定,基本达到预期目标。污泥焚烧运管系统按照数据标准化规范将设备信号点位规范梳理,将零碎的信息汇总,直观展示了目前的运行情况。利用先进的数据判断模型,将生产中可能发生的故障在第一时间主动呈现给操作人员,提高了生产稳定运行。通过污泥焚烧运管系统功能提升,将行业的多源数据做逻辑关联和管理,打破各系统之间的壁垒,实现互联互通和业务的整合,将工业化和信息化深度融合,提高污泥车间自动化和信息化水平,提供污泥处理工艺段生产数据预测、设备能效评估、运行效果评价等服务,提升了污泥车间能源利用率,达到了节能降耗的目的。

通过本项目的研究与实施,建立了污泥车间工艺预警模型、生产预测模型、设备能效评估模型和生产运行评价模型,基于上述模型构建并部署的数字孪生平台,提升污泥车间的信息化和智能化水平,为该厂以后的精益化运营转型提供一定的理论支撑。以历史运行数据为基础,考虑污泥干化焚烧的多源数据,包括污泥处理量、蒸汽参数、载气入口流量、出口温度、压力、

冷凝水温度,在原始数据集上进行了样本重采样和数据清洗的数据预处理工作。数字孪生平台实时展现污泥干化焚烧实时数据,并展示各模型的预测结果,提升了污泥车间的信息化和智能化水平。对于设备智能化运行研究,利用部署于现场的蒸汽量预测模型,结合烟气流、烟气湿度等数据,利用模型计算的蒸汽流量,达到了对工艺优化运行的指导作用。

由于污泥车间各种管路的复杂性,对于后续研究,可以考虑完善其他管道建模并进行分析研究。同时增加各工艺段仪表硬件和测量数据,为日后模型更新积攒更多的优质的有效数据,取得更好的使用效果。

## 5 结论

本项目的推广应用有助于提升水务行业精细化运行、数字化运营和智慧化生产的能力和水平,引领水务行业从粗放式运营管理模式向精细化、数字化和智能化方向转型发展,实现了数字化管理模式的革新,具有良好的行业示范作用。

### [参考文献]

- [1]高卫民,程寒飞.我国污泥处理处置技术研究进展[J].化工矿物与加工,2023,52(1):71-79.
- [2]郑宇祺.污水处理厂的智能化改造[J].新型工业化,2022,(6):234-238.
- [3]龚利民,林峰.基于数字孪生的智慧污水处理厂建设和应用实践[J].给水排水,2023,49(11):138-143.
- [4]张引玉.基于BIM的污水厂智慧运维数字孪生系统设计与应用[J].造纸选材与环保,2023,52(220):153-155.