

沈振中. 现状污水处理厂改扩建工程设计优化要点 [J]. 净水技术, 2025, 44(1): 178-184.

SHEN Z Z. Design and optimization key points for reconstruction and expansion project of existing WWTP [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(1): 178-184.

现状污水处理厂改扩建工程设计优化要点

沈振中*

(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司,上海 200092)

摘 要 【目的】 为了掌握现状污水处理厂改扩建工程的难点,提出切实可行的设计优化方案,为其他类似工程提供参考。【方法】 结合污水处理厂改扩建工程案例,总结提升泵房、沉砂池、生反池和污泥处理系统改扩建过程中的痛点难点,并提出针对性的解决方案和设计优化建议。【结果】 进水泵房结合近远期发展,通过分格便于后期设备安装、通过进水调配实现有效配水,并结合片区雨污分流情况考虑旱雨季不同工况条件下的水泵组合情况,满足污水处理厂稳定运行要求。预处理系统构筑物数量尽量与二级处理构筑物数量一致,便于分组;确实存在不一致情况时,可以通过配水堰实现不等量配水,满足后续运行要求。在出水标准日益严格的背景下,充分挖掘生反池去除有机物、脱氮、除磷效能是最经济有效的手段,通过对现状生反池进水点位、功能布局的调整,激发生反池潜力。在污泥深度脱水的基础上增加污泥干化段,要充分评估现状脱水设备的状态及其与后续干化系统的匹配度,因地制宜地选取技术可行、经济合理的设计方案,最终实现提标或扩容的需求。【结论】 污水处理厂在设计过程中要充分考虑分期建设和改扩建的需要,充分预留实施条件;在改扩建过程中要因地制宜地选择设计方案,确保污水处理厂稳定运行。

关键词 改扩建工程 现状污水处理厂 设计优化 生反池改造 污泥处理系统

中图分类号: TU992 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-0177(2025)01-0178-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.01.022

Design and Optimization Key Points for Reconstruction and Expansion Project of Existing WWTP

SHEN Zhenzhong*

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract [Objective] To identify the challenges in renovation and expansion of wastewater treatment plants (WWTPs), propose practical design optimization solutions, and provide references for similar projects. [Methods] By analyzing cases of WWTP renovation and expansion projects, this study summarizes the pain points and difficulties encountered during the renovation and expansion of lift stations, grit chambers, biological reaction tanks, and sludge treatment systems. Targeted solutions and design optimization suggestions are then proposed. [Results] For the lifting pump room, considering both short-term and long-term development, compartments should be created to facilitate future equipment installation, effective influent distribution should be achieved through intake allocation, and pump combinations under different dry and wet season conditions should be considered based on the rainwater and wastewater diversion situation in the area to meet the stable operation requirements of the WWTP. The number of structures in the pretreatment system should be kept consistent with the number of secondary treatment structures for easy grouping; when inconsistencies do exist, unequal water distribution can be achieved through water distribution weirs to meet subsequent operational requirements. In the context of increasingly stringent effluent standards, fully tapping the potential of biological reaction tanks for organic removal, nitrogen removal, and phosphorus removal is the most economical and effective means. By adjusting the influent points and functional layout of existing biological reaction tanks, their potential can be unleashed. When adding a sludge drying stage on top of sludge deep dewatering, it is necessary to fully assess the status of the existing dewatering equipment and its

[收稿日期] 2024-02-23

[通信作者] 沈振中(1982—),男,高级工程师,主要从事污水处理厂、管网、流域整治、海绵城市等给排水设计工作,E-mail:39076900@qq.com。

compatibility with the subsequent drying system. Based on local conditions, a technologically feasible and economically rational design scheme should be selected to ultimately meet the requirements for standard upgrading or capacity expansion. [Conclusion] During the design of WWTPs, sufficient consideration should be given to phased construction and renovation and expansion needs, with adequate provisions for implementation conditions. During the renovation and expansion process, design solutions should be selected according to local conditions to ensure the stable operation of WWTPs.

Keywords reconstruction and expansion project existing wastewater treatment plant design optimization reconstruction of biological reaction tank sludge treatment system

随着城市建设的快速发展和人口剧增、排水管网日益完善,城市污水收集处理量不断攀升,污水处理面临扩容需求。据住房城乡建设部官网发布《2021 年城乡建设统计年鉴》显示,截至 2021 年底,我国城市污水处理厂数量达到 2 827 座,较 2016 年增长 38.65%;污水处理厂处理能力达到 20 767.22 万 m^3/d ,较 2016 年增长 39.28%。2016 年—2021 年,我国城市污水处理厂数量和处理能力分别增加 788 座和 5 857 万 m^3/d ^[1]。截至 2021 年底,广东省城市污水处理厂以数量为 343 座,处理能力为 2 889.2 万 m^3/d ,均排名第一。

同时,国家对水污染控制要求越来越高,城市污水处理厂处理排放标准不断升级,污水处理厂面临提标任务。以广东省深圳市为例,其城市污水处理厂的排放标准从国家标准《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)和广东省地方标准《水污染物排放限值》(DB44/26—2001)的较严值,逐步提高至《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)准Ⅳ标准、流域标准《茅洲河流域水污染物排放标准》(DB 44/2130—2018)、深圳市地方标准《水质净化厂出水水质规范》(DB4403/T 64—2020)等,出水排放标准不断提高。

在城市污水处理厂扩容和提标的过程中,需要在现状污水处理厂的基础上进行扩容或者提标。结合近几年广东省污水处理厂改扩建工程成功案例,对设计过程中遇到的问题及解决方案进行梳理,提炼总结出设计要点及优化建议,以期类似工程提供指导和借鉴。

1 进水泵房改造

1.1 进水泵房分格

ST 污水处理厂一期工程于 2009 年建成投产,设计规模为 4 万 m^3/d ,污水总变化系数(K_z)为 1.41,粗格栅及提升泵房土建按照远期 8 万 m^3/d 建设,设备按照近期 4 万 m^3/d 配置。雨季设计流

量为 0.926 m^3/s (4 台泵全开),旱季最大流量为 0.653 m^3/s (3 用 1 备),旱季平均日流量为 40 000 m^3 (2 用 2 备),其中 2 台为变频。

随着近十几年片区雨污分流工作的开展,经测算,二期建成后 ST 污水处理厂的雨季最大进水流量为 1.25 m^3/s ,因此二期工程设计按照旱季规模配置进水提升泵即可。2022 年二期工程扩建 4 万 m^3/d , K_z 为 1.32(立项阶段执行旧规范,沿用),粗格栅及提升泵房利用一期工程预留土建条件。二期工程新增 4 台潜污提升泵(3 用 1 备),单台水泵参数流量(Q)= 204 L/s,扬程(H)= 19.6 m(18.90 ~ 20.40 m),泵房改造平面布置如图 1 所示。

由于一期工程为社会资本特许经营,二期工程当地水务集团建设和运行,一、二期共用泵房进水管,一、二期工程配水问题尤为关键。由于一、二期工程细格栅与提升泵房的距离不同、污水处理工艺和所需水头损失不同,导致细格栅前水深不同,一期工程细格栅前水面液位为 8.37 m,二期工程细格栅前水面液位为 8.70 m,进水泵的 H 也存在差异。

设计及优化要点:(1)污水厂进水泵房若考虑远期预留,应考虑分格,便于后期工程建设时设备安装。本项目一期工程充分考虑,二期工程安装方便快捷,且不需要一期工程停水改造,极大提高工作效率;(2)由于一、二期工程的运营主体和收费模式不同,在共用进水泵房进水管的情况下,一、二期水量分配尤为重要。因此,二期工程提升泵全部采用变频,在保障最低液位的前提下运行液位可灵活调节,实现二期配水调度方便,满足水量分配;(3)一、二期工程由于处理工艺和细格栅位置不同导致提升泵后压力要求不同,必须精细化计算水泵扬程,需要对原预留的水泵基础等土建条件进行局部改变满足水泵稳定运行的要求。

1.2 进水泵房原位扩容

2007 年 ZJS 污水处理厂一期工程粗格栅及提升泵



注:图中尺寸标注单位为mm;标高标注单位为m。

图1 ST污水处理厂粗格栅及提升泵房改造

Fig. 1 Coarse Grille and Lifting Pump Reconstruction of WWTP ST

房合建,提升泵房旱季设计规模为10万 m^3/d (雨季最大提升能力为24万 m^3/d),提升泵房内设置了4台潜污泵(其中2台变频),单台 $Q=2\,500\text{ m}^3/\text{h}$, $H=17\text{ m}$ 。

2022年二期工程扩建规模为10万 m^3/d 。由于厂区用地和工期限制,需要将现状一期工程粗格栅及提升泵房改造为20万 m^3/d 合用构筑物,并按照《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)要求兼顾旱雨季流量^[2]。

扩建后一、二期工程总规模为20万 m^3/d ; $K_z=1.50$,旱季设计 $Q_{\text{旱高(一、二期)}}=K_z \times Q_{\text{旱平}}=3.48\text{ (m}^3/\text{s)}$,雨季截流量: $Q_{\text{雨截(一、二期)}}=1.28\text{ (万 m}^3/\text{d)}=0.14\text{ (m}^3/\text{s)}$,雨季设计流量 $Q_{\text{雨高(一、二期)}}=Q_{\text{旱高}}+Q_{\text{雨截}}=3.48+0.14=3.62\text{ (m}^3/\text{s)}$ 。一、二期工程各承担50%处理任务,旱季、雨季流量分别为1.74、1.81 m^3/s 。

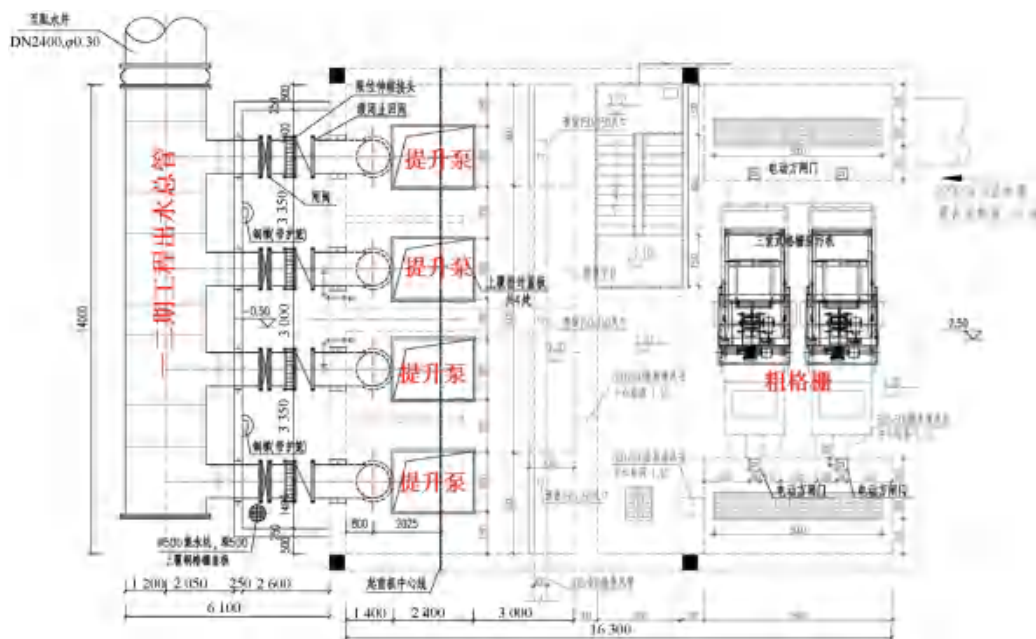
经复核集水池容积、水泵安装条件和运行液位后通过原位更换提升泵实现原位扩容。提升泵房更换4台水泵(3用1备,变频),单台 $Q=1\,207\text{ L/s}$, $H=20.6\text{ m}$ ($H_{\text{max}}=21.80\text{ m}$, $H_{\text{min}}=19.40\text{ m}$)。ZJS污水处理厂粗格栅及提升泵房改造后平面如图2所示。

设计及优化要点:(1)污水处理厂进水泵房应考虑分格,便于后期水泵检修和更换。因为本工程进水泵房未有效分格,在不停产的要求下更换水泵需要带水作业,工作难度和危险性增大^[3];(2)一、

二期工程共用提升泵后的出水母管,要增设配水井,通过配水堰对一、二期工程进行均匀配水;(3)在调试过程中,由于进水流量较小,导致泵后母管流速较低,砂子沉积严重。经讨论,在DN2400母管一端增设带阀门控制的DN500回流管至进水泵房,不定期开启控制阀门,可有效解决沉积问题;(4)复核改造后工况下,进水管充满度、集水池有效容积、水泵安装条件等满足新标准的要求,粗格栅、检修起重机等均应进行适应性改造。

2 沉砂池改造

2012年GM污水处理厂一期工程建设规模为15万 m^3/d ,其中粗格栅及提升泵房、细格栅及曝气沉砂池预处理构筑物均按照旱季远期为25万 m^3/d 、雨季为30万 m^3/d 建设。2017年二期工程扩建规模为15万 m^3/d (不含预处理系统),其中新建4.25万 m^3/d 工业废水预处理系统,10.75万 m^3/d 生活污水预处理系统利用现状一期预留。预处理后工业废水与预处理后的生活污水混合后进入二期生化处理系统(设计规模为15万 m^3/d)进行处理。由于用地受限,一、二期工程分别布置在整个厂区的东侧和西侧,共用一期预处理系统,本次改造后预处理系统设计规模为25.75万 m^3/d ($K_z=1.3$)。曝气沉砂池共4条廊道,系统出水区设置5段出水堰向一、二



注:图中尺寸标注单位为 mm;标高标注单位为 m,下同。

图 2 ZJS 污水处理厂粗格栅及提升泵房改造

Fig. 2 Coarse Grille and Lifting Pump Reconstruction of WWTP ZJS

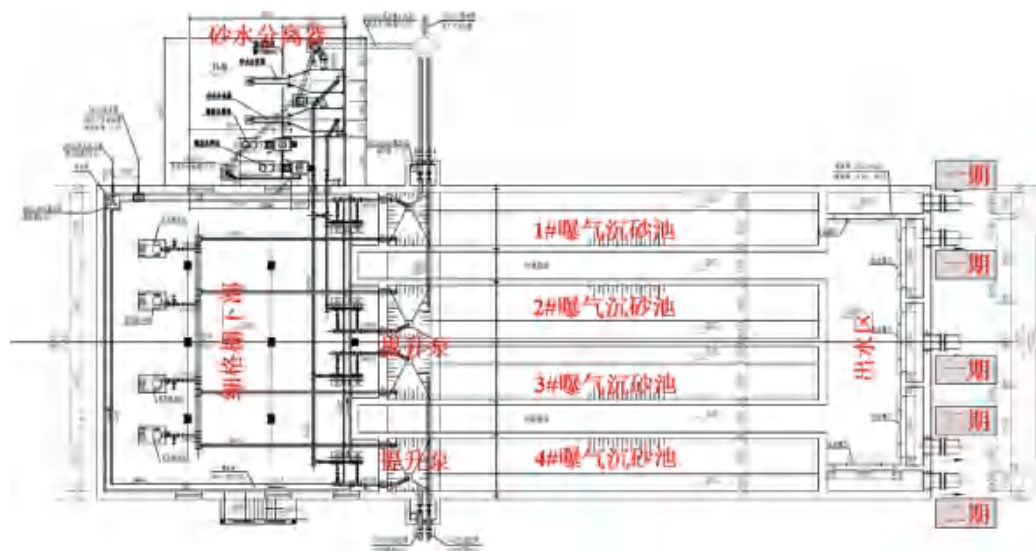


图 3 曝气沉砂池出水区平面布置

Fig. 3 Layout Plan of Effluent Area of Aerated Sand Settling Tank

期工程配水,其中一期工程 3 座生反池,每座设计规模为 5 万 m^3/d ,二期工程 2 座生反池,每座设计规模为 5.375 万 m^3/d 。曝气沉砂池出水区平面布置如图 3 所示,沉砂池配水管线如图 4 所示。

曝气沉砂池为 1 座 4 格,平面净尺寸为 48.45 $\text{m} \times 18.2 \text{ m}$ 。单格有效长度为 25.0 m ,净宽为 4.0 m ,设计水深为 3.0 m 。曝气量按 0.2 m^3 空气/ m^3

污水配置,在细格栅的架空渠道下设鼓风机房间,内设 4 台罗茨风机(3 用 1 备),单机风量为 900 m^3/h ,风压为 4.5 m ,功率为 15 kW 。改造后,曝气沉砂池雨季高峰设计流量为 3.87 m^3/s (旱季设计流量为 25.75 万 m^3/d , $K_z = 1.3$),停留时间约为 5.17 min ,曝气量为 7.5 $\text{L}/(\text{m} \cdot \text{s})$,均满足规范要求。

由于一、二期生反池距离较远,曝气沉砂池出水

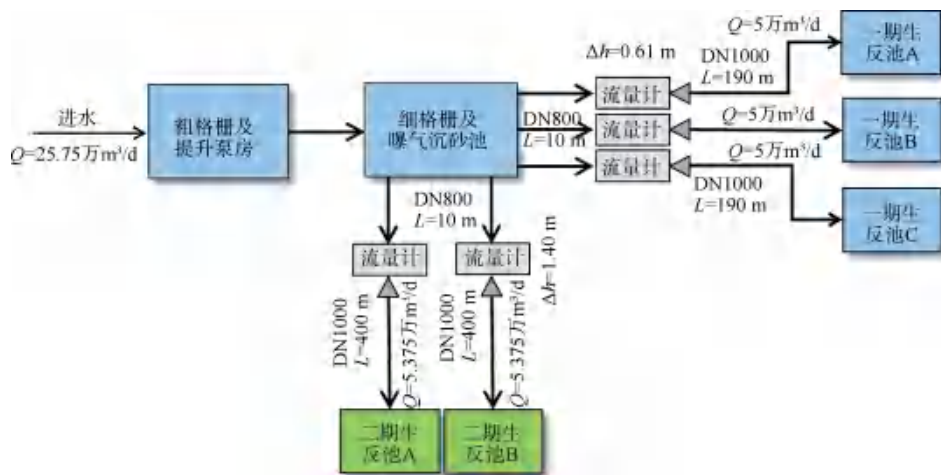


图4 曝气沉砂池配水管线

Fig. 4 Water Distribution Pipeline for Aerated Sand Settling Tank

区至一期生反池的距离约为 200 m,距二期生反池的距离约为 400 m,且每座生反池的设计水量不同,因此曝气沉砂池的水量分配和水位控制就显得尤为重要。

曝气沉砂池出水区水位标高为 15.00 m,曝气沉砂池至一期生反池水头损失为 0.61 m,一期生反池进水渠水位标高为 13.60 m,曝气沉砂池出水渠后计算水位为 14.21 m,现状水头满足要求。曝气沉砂池至二期生反池水头损失为 1.40 m,二期生反池进水渠水位标高为 13.15 m,曝气沉砂池出水渠后计算水位为 14.55 m,现状水头满足要求。曝气沉砂池水位为 15.00 m,通过水力计算可知:一期 3 根出水管前堰门的堰上水头为 243 mm 时,过堰流量为 752 L/s,也即堰顶标高设置为 14.76 m;二期 2 根出水管前堰门的堰上水头为 255 mm 时,过堰流量为 809 L/s,也即堰顶标高设置为 14.75 m。同时,通过出水流量计监控流量情况,必要时进行二次调整。

设计及优化要点:(1) 对于预留远期处理能力的构筑物,要在末端构筑物处设置配水设施,满足后续构筑物处理需求;(2) 由于一、二期工程平面布置较远,沉砂池至生反池的水头损失差异较大,导致前端出水堰和后端生反池进水液位均不相等,需要经过严格的水力复核计算;(3) 由于二期工程的投运,导致一期处理构筑物的运行液位发生变化,需及时复核和调整;(4) 改造时,按照设计规范要求复核相关参数,必要时更换鼓风机等设备,确保改造后运行效果。

3 生反池改造

2012 年 GM 污水处理厂一期工程建设规模为 15 万 m^3/d ,共 3 座生反池,每座设计规模为 5 万 m^3/d ,生反池采用改良型厌氧/缺氧/好氧(AAO)工艺,出水水质要求达到国家一级 A 标准。由于 2017 年环境要求提高,需要将污水处理厂出水水质提高至准 IV 类水标准。为进一步提升生反池的总氮(TN)($\text{TN} \leq 10 \text{ mg/L}$)去除效果,需要将生反池进行改造。

经复核,生反区现有水力停留时间(HRT) 13.57 h 不足,生反池前端现状设有初沉池。原设计初沉池主要是去除进水中不可降解有机物,以减少后续生物反应池的负荷,提高生反池运行效率。在实际运行过程中,初沉池去除不可降解有机物极少,长期超越运行,基本处于闲置状态。本次改造将初沉池改为厌氧区,可增加 HRT 为 1.09 h,改造后总停留时间为 14.65 h,其中厌氧段 HRT 为 1.09 h,缺氧段 HRT 为 3.70 h,好氧段 HRT 为 9.86 h,生物反应池可以满足出水要求,且有较大的抗冲击负荷能力;另外应对远期进一步对 TN 提标也可以满足要求。

原设计进水点为厌氧区(前端预缺氧区和厌氧区),按照“预缺氧-厌氧区-缺氧区 1-好氧区 1-缺氧区 2-好氧区 2”的模式运行,由于停留时间较短、进水点位单一和碳源投加成本较高,导致脱氮效率难以经济有效地提升。本次提标将改造后的生物反应池调整为“厌氧池-缺氧池 1-好氧池 1-缺氧池 2-好氧池 2”的多点进水多段缺氧/好氧(AO)运行模式(厌氧区、2 个缺氧区均可进水),以提高原水中

碳源利用率,提高生反池的反硝化脱氮效果;在碳源不足的时候,在缺氧池2中投加碳源,可以降低碳源的投加量,从而实现碳源利用的最大化。由于多段AO采用多点进水,可以优先充分利用进水中碳源完成脱氮,从而提高进水中碳源利用率,减少外部碳源投加^[4]。在不扩大池容的情况下,利用现状生反池条件,仅通过内部分配的调整充分挖掘和发挥原有生反池处理系统的潜能,提高对TN的去除效果^[5],生反池改造前后平面布置如图5所示。深圳某水质净化厂生反池设计总HRT为14.8h,与本工程改造后总HRT接近,其出水水质稳定达标地表水Ⅳ类标准^[6]。



图5 生反池改造

Fig. 5 Reconstruction of Biochemical Reaction Tank

设计及优化要点:(1)初沉池在本工程中已经丧失了原设计的功能,不符合现状污水处理厂运行的要求,需要进行改造;(2)由改良AAO调整为多点进水多段AO工艺,需要对进水渠道、碳源投加点等进行改造;(3)由于生反池对于TN处理需求的提高,需要结合工程实例和理论计算,确定合适的停留时间分配比例及进水比例;(4)如果要进一步提高生反池处理效率,可以通过增加填料或改造为高效厌氧/好氧/缺氧(AOA)工艺段。

4 污泥处理系统改造

现状污水处理厂污泥处理标准相对较低,在提标改造过程中,存在不同形式的以新带老改造方案。

4.1 保留现状作为应急,新建污泥脱水干化段

案例1:ZJ污水处理厂一期工程建于1998年,二期工程建于2006年,处理规模均为10万m³/d,污泥处理系统规模为200t/d(按含水率为80%计),处理后污泥含水率至80%外运处置。一、二期共用污泥脱水机房,处理系统采用离心脱水机,共4台,单台处理能力为50m³/h。2022年进行三期扩建工程,设计规模为20万m³/d,污泥处理规模为26tDS/d(绝干污泥)。按照相关工作要求,新建工程以及现状污泥处理系统的污泥含水率需降至40%以下外运处置。考虑到现状污泥脱水机房距离三期较远(560m)且现状脱水机房内部空间无法满足一、二、三期污泥处理需求。因此,现状污泥脱水机房及设备作为应急备用。新建脱水干化车间处理一、二、三期污泥,车间内安装5台离心浓缩机(4用1备),单台处理能力为80m³/h。同时,新增带式干化系统,设计处理能力为200t/d(以80%含水率计),5台干化机(4用1备),每台去水量为38t/d,处理后污泥含水率不超过40%后外运处置。

4.2 保留现状脱水段,增加污泥干化段(含水率由80%降至40%)

案例2:ZJS污水处理厂建于2009年,设计规模为10万m³/d,污泥处理系统土建规模为10万m³/d(按远期),设备规模为12.4tDS/d(按近期),进脱水机污泥含水率为99.3%,处理后污泥含水率降至80%以下外运处置。污泥处理采用离心脱水机,共3台(2用1备),单台处理能力为45m³/h,车间内预留2个机位。2022年污水处理厂进行二期扩建改造,按照相关工作要求,新建工程以及现状污泥处理系统的污泥含水率需降至40%以下外运处置。经过分析研究,改造方式是增加2台同规格离心机,外部就近新建污泥干化系统,增加中间污泥料仓和污泥泵等配套设施。

设计及优化要点:(1)充分利用现有土建条件和一期现状设备,降低投资、节省占地;(2)复核储泥池、聚丙烯酰胺(PAM)制备系统的能力,本工程新增2座储泥池和更换PAM制备系统;(3)考虑好新老衔接以及污泥脱水与干化系统的衔接问题,要考虑冗余和应急措施。

4.3 保留现状,增加干化段(含水率由70%降至40%)

案例3:QF污水处理厂分三期建设,目前处理

规模为 40 万 m^3/d 。污泥处理系统建成于 2012 年,处理系统采用板框压滤机,共 10 台(预留 2 个机位),总处理能力为 240 t/d (含水率为 80%),处理后污泥含水率降至 60% 外运处置。2018 年进行扩建改造,按照相关工作要求,现状污泥脱水系统将污泥含水率处理至 70% 然后通过新建污泥干化段将含水率降至 40% 以下外运处置。

本次污泥干化工程设备按照污水处理厂 40 万 m^3/d 污水处理规模配置,污泥干化采用带式干化机,总处理量按 240 t/d (折合为含水率 80% 计)设计,折合干基污泥为 48 $\text{t DS}/\text{d}$;土建一次完成,干化设备近期安装 3 套,单台去湿量为 1 200 kg/h ,处理规模为 200 t/d (折合为含水率 80% 计),预留 1 套设备的土建安装条件(去湿量为 1 000 kg/h)。

设计及优化要点:(1)当初基于前端板框压滤机污泥脱水系统特许经营未到期,考虑后端增加污泥干化段,在一定程度上节省了投资;(2)从实际运行来看,考虑到含水率为 60% 的污泥不便于切条进行干化,将板框压滤机处理后含水率从 60% 调整至 70%,运行工况发生变化,且存在设备老化情况,对污泥处理系统的稳定运行带来隐患;(3)在投资和用地可以满足的情况下,建议脱水和干化段可以统筹考虑,可以采用一体化设备也可以采用两段式,但是一体化设备在内部转输和设备匹配方面的稳定性更好。

5 结论

现状污水处理厂改扩建工程需要基于现有边界条件开展后续工作,存在较多的制约因素。为实现提标或扩容的需求,可以从以下方面做好设计优化。(1)进水泵房考虑近远期发展时,要通过分格便于后期设备安装、通过进水调配实现有效配水,并结合服务范围内的雨污分流情况考虑旱雨季不同工况条件下的水泵组合情况,满足污水处理厂稳定运行要求。(2)预处理系统构筑物数量尽量与二级处理构筑物数量一致,便于分组;确实存在不一致情况时,可以通过配水堰实现不等量配水,满足后续运行要求。(3)在出水标准日益严格的背景下,充分挖掘生反池去除有机物、脱氮、除磷效能是最经济有效的手段,通过对现状生反池进水点位、功能布局的调

整,激发生反池潜力。(4)在污泥深度脱水的基础上增加污泥干化段,要充分评估现状脱水设备的状态及其与后续干化系统的匹配度,因地制宜地选取技术可行、经济合理的设计方案。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2021 年城乡建设统计年鉴[EB/OL]. (2022-10-12) [2023-09-01]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/index.html>. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Statistical yearbook of urban and rural construction in 2021[EB/OL]. (2022-10-12) [2023-09-01]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/index.html>.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室外排水设计标准:GB 50014—2021[S]. 北京:中国计划出版社, 2021. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of outdoor wastewater engineering GB 50014—2021[S]. Beijing: China Planning Press, 2021.
- [3] 华伟, 蒋岚岚, 张钦林, 等. 无锡市城北污水厂二期工程进水泵房的改造设计[J]. 中国给水排水, 2007, 23(12): 33-35. HUA W, JIANG L L, ZHANG Q L, et al. Reconstruction design of pump house in second-stage project of Chengbei wastewater treatment plant in Wuxi[J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(12): 33-35.
- [4] 鲍任兵, 高廷杨, 宫玲, 等. 污水生物脱氮除磷工艺优化技术综述[J]. 净水技术, 2021, 40(9): 14-20. BAO R B, GAO T Y, GONG L, et al. Review of process optimization of biological denitrification and phosphorus removal in wastewater treatment[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(9): 14-20.
- [5] 王磊. 反硝化滤池+臭氧活性炭在高标准城镇污水处理厂原位提标改造中的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(7): 160-167, 182. WANG L. Application of denitrification filter and ozone activated carbon in in-situ upgrading of high-standard urban WWTP[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(7): 160-167, 182.
- [6] 周合喜, 张金松, 张庆珮. 多级 AO 工艺在某高排放标准污水厂的优化探讨[J]. 中国给水排水, 2022, 38(20): 8-13. ZHOU H X, ZHANG J S, ZHANG Q P. Discussion on optimization of multi-stage AO process in a wastewater treatment plant under high discharge standards[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(20): 8-13.