



文章栏目：工程创新与行业动态

DOI 10.12030/j.cjee.202004020

中图分类号 TU992.3

文献标识码 A

尤立, 王本洋, 李磊, 等. 不停产条件下污水处理设施提标改造工程实例[J]. 环境工程学报, 2021, 15(9): 3168-3173.

YOU Li, WANG Benyang, LI Lei, et al. An upgrade and reconstruction project of sewage treatment facilities under non-stop production conditions[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(9): 3168-3173.

不停产条件下污水处理设施提标改造工程实例

尤立¹, 王本洋², 李磊², 胡春明¹, 刘平¹, 周莉^{2,*}

1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

2. 北京清环科技有限公司, 北京 100083

第一作者: 尤立(1989—), 男, 硕士, 工程师。研究方向: 水资源与环境工程。E-mail: liyou@rcees.ac.cn

*通信作者: 周莉, 女, 硕士, 高级工程师。研究方向: 水污染控制。E-mail: 30927284@qq.com

摘要 根据北京市顺义区水务局的相关要求, 因首都机场航空净化站原有污水处理设施不能达标, 需升级改造以满足新的排放要求。在不停产施工和不新增构筑物的前提下, 提标改造工程的内容包括: 投加优势菌种, 现有生化系统按 A/O 方式运行, 厌氧池按缺氧池运行, 二沉池后增加化学除磷系统(磁絮凝+砂滤工艺)。提标改造工程完成后, 出水达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB11/890—2012)标准中表 1B 标准。目前该工程已正常运行 12 个月, 出水水质稳定达标。

关键词 首都机场; 提标改造; 生化系统; 磁絮凝

2015 年国家颁布的《水污染防治行动计划》(简称“水十条”)提出改善水环境质量, 水路统筹、河海兼顾, 系统推进水污染防治、水生态保护和水资源管理, 对污水中污染物的排放限值提出了更高要求。作为水环境敏感区域, 为改善各流域的水环境质量, 北京市推行了更为严格的地方标准^[1]。首都机场是“中国第一国门”, 承担着对外展示国家形象、传播绿色和可持续发展理念的使命。在践行绿色机场理念的过程中, 首都机场飞机区、航站楼以及公共区域的废水排放问题, 显得尤为关键^[2-4]。根据北京市生态环境局提高城镇污水处理厂水污染物排放标准的要求, 首都机场航空净化站自 2018 年 12 月 31 日起须执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB11/890—2012)标准中表 1B 标准^[5], 同时要求在提标改造期间, 不影响正常运行, 厂区内不新增构筑物, 出水稳定达标。

目前, 我国城镇污水处理厂提标改造工程案例很多^[6-10], 新建或改造污水厂为了实现总氮和悬浮物达标, 大多在二级处理系统后端增加深度处理工艺, 如为了提高 SS 去除率, 使用 MBR 膜或 UF 膜; 为了去除总氮, 增加反硝化深床滤池, 或曝气生物滤池等构筑物, 但上述工艺都涉及停产施工或增加厂区内构筑物。

为实现不停产条件下首都机场污水处理设施的提标改造, 选用“利用现有生化系统调整运行方式保证脱氮, 后增加磁分离工艺保证总磷达标”的方案。项目于 2018 年 9 月 15 日进场施工, 12 月 21 日完成调试出水达标。目前, 已正常运行 1 年多, 出水水质稳定达标。本项目的顺利实施可为不停产扩容条件下的污水厂提标改造提供参考。

1 污水处理设施改造前概况

1.1 工程建设背景

1999年，首都机场T2航站楼扩建时，在原有污水厂的西侧天竺新村南500m修建新的首都机场西航空净化站污水处理设施，用于处理T1、T2航站楼工作区、机场生活区以及周边商业区域的污水。净化站日处理量为 2×10^4 t，采用“曝气沉砂池+初沉池+曝气池+二沉池”工艺，占地 1.5×10^4 m²，于1999年11月投入运行。此后，净化站在2008年进行过一次改造，增加厌氧池及砂滤池，出水可达到《城镇污水处理厂水污染排放标准》(DB11/890-2012)表2B标准，最终排入温榆河。目前，净化站已运营约20a，部分设备设施严重老化，性能下降严重，效率低下，已不能满足水质稳定达标排放需求，均影响后期运行效率。本次提标改造，要求在不停产、不新增构筑物的条件下将出水水质进一步提高，满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB11/890—2012)表1B标准。

1.2 原工艺的运行情况及存在的问题

2018年1月至6月污水处理设施出水水质见表1。由表1可知，出水水质达到了(DB11/890—2012)中表2B标准，但不能满足表1B标准要求，特别是TN、TP和SS与表1B排放限值的差距较大，因此后期工艺改造应强化脱氮除磷及悬浮物的去除。提标改造前，净化站存在的主要问题如下。

1) 活性污泥系统异常。系统原有填料使用多年，已出现破碎，好氧池污泥质量浓度仅为 $2.3 \sim 2.8$ g·L⁻¹，污泥浓度偏低，这导致活性污泥有效微生物量不足，从而影响对BOD₅和NH₃-N的去除效果，其他水质指标也会产生影响。同时，系统污泥沉降性能不佳，从出水SS可知，北京市地方标准中的表1B标准对出水SS要求更严格(见表1)，原工艺无法满足新的排放要求。

2) 脱氮除磷能力较差。原有工艺对总氮和总磷的去除效果有限，难以达到高排放标准的处理要求。由于净化站缺氧池容积负荷偏低，且不能保证严格的缺氧环境，生化系统脱氮受到制约；生化池内微孔曝气器下放深度不一致，曝气强度没有梯变化，造成缺氧段的ORP数值偏高，反硝化能力较差。同时，厌氧池污泥释放磷效果不佳，厌氧池上清液磷含量仅为进水的1.5倍，从而影响了好氧池中聚磷菌的除磷作用，使得整个工艺对磷的去除主要依靠投加药剂；现有快速滤池静态管道混合器的运行效果欠佳，混合时间短，投加的硫酸铝没有与生化处理过的污水充分反应，因此系统除磷效果并不稳定。

2 污水处理设施改造工程

2.1 改造方案及工艺流程设计

改造前，出水水质不能满足表1B标准要求，特别是TN、TP、SS与表1B排放限值的差距较大，针对脱氮除磷及悬浮物的去除，提标改造工程设计的进、出水水质见表2。为使各指标达到设计的减排效果，制定了有针对性的工艺改造措施。

1) 脱氮工艺。针对脱氮工艺的选择，考虑后接生物脱氮工艺及基于现有工艺进行强化脱氮。然而，根据厂区现有施工条件，因“不可停产新增构筑物”的要求，难以进一步在后段增加反硝化深床滤池，故将原有厌氧池改造为缺氧池，使二级生化系统专注于脱氮功能。同时，参考文献

表1 2018年1月至6月首都机场西航空净化站原有工艺的出水水质

Table 1 Effluent quality of the original process from January to June 2018

水质指标	质量浓度 平均值/(mg·L ⁻¹)	达标率/%	
		执行表2B标准	执行表1B标准
COD	22.30	100	100.00
BOD ₅	5.50	100	93.73
SS	13.80	100	84.11
氨氮	0.77	100	92.6
总氮	14.20	100	74.32
总磷	0.76	100	69.47

[11] 报道的思路, 为进一步提高污水脱氮效率并在一定程度上减少污泥产率, 可采取利用污水中的碳源并强化内源反硝化脱氮等措施, 投加优势菌种以保障硝化及反硝化效果。

2) 脱磷及过滤工艺。原有添加铝盐除磷药剂和助凝剂的方式难以满足出水标准, 因此, 在三级处理中可通过磁混凝沉淀工艺实现化学除磷及悬浮物去除。据文献报道, 向废水中投加絮凝剂及磁粉, 使得形成的絮凝体和磁粉结合形成磁絮体, 可实现高效的固液分离^[12-14]。沉淀后含有磁粉的污泥一部分回流, 一部分通过磁分离系统回收磁粉并循环使用, 以节省运行成本。

2.2 工程改造内容

基于上述设计, 工程的具体改造思路分如下3个方面: 1) 在保留原有污水处理工艺(格栅、初沉、A²/O、二沉池及污泥处理系统)的前提下, 改变污泥及混合液回流位置, 将现有A²/O工艺按A/O运行, 以解决原有缺氧池池容不足的问题; 2) 投加优势菌种(硝化菌)和碳源, 以保障生化过程的硝化、反硝化效果; 3) 利用提升泵将二沉池出水泵入专用磁絮凝设备, 通过投加磁种和混凝剂将污水中的磷从水中分离出来, 其中污泥直接进入污泥处理系统, 清水进入中间水池, 中间水池的水部分通过过滤泵提升至新建砂滤器, 以去除剩余悬浮物后排放, 多余污水可溢流至现有砂滤池。砂滤器利用除磷设备出水作为反冲洗用水, 反冲洗后排入缺氧池。

为满足不停产条件下净化站的提标改造, 改造过程中将原有4格初沉池的其中1格改造为剩余污泥池, 另1格作为中间水池放置磁絮凝设备, 其余2格仍作为初沉池正常使用, 不新增构筑物。因初沉池深度较大, 且为半地下结构, 故可增大磁絮凝反应的停留时间, 以保证除磷效果, 同时解决系统保温的问题。初沉池南侧空地放置新增的砂滤器, 该新增设备不占用现有净化站道路, 对现有净化站的运行影响最小。净化站提标改造后的工艺流程图如图1所示。

2.3 工艺改造关键

1) 活性污泥系统的改造。原有系统中, 污泥龄较短导致硝化菌生长速度缓慢; 进水碳源和缺氧池池容不足, 导致系统反硝化作用较差。因此, 将厌氧池改造为缺氧池, 加入菌剂, 保证系统脱氮的稳定性。改造过程中不涉及现状池体的改造, 仅在池体外部增加回流点, 不影响施工期间净化站的正常运营。

2) 除磷工艺的改造。除磷工艺段新增磁分离工艺, 节约占地面积, 运转灵活, 固液分离效果

表2 提标改造工程设计进、出水水质

Table 2 Design influent and effluent quality of the upgrade and reconstruction project

项目	质量浓度/(mg·L ⁻¹)		去除率/%
	进水	出水	
COD	300	30	90.0
BOD ₅	200	6	97.0
总氮	60	15	75.0
氨氮	40	1.5	96.0
SS	200	5	97.5
总磷	7	0.3	95.7

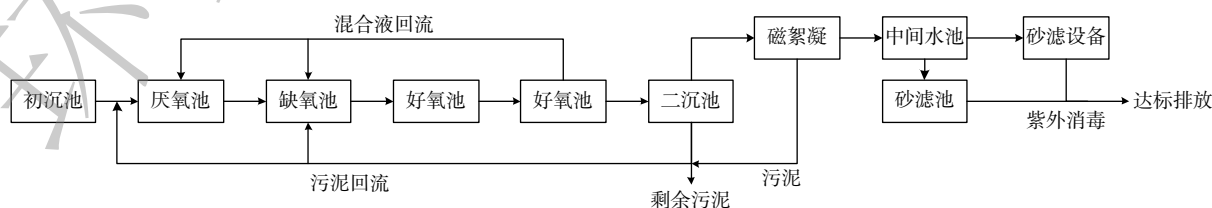


图1 首都机场西净化站工艺流程图

Fig. 1 Process flow chart of west purification station of capital airport

较好^[15]。通过高效加载絮凝设备，使磁种与污染物结合，然后通过高密度沉淀把废水中磁性悬浮物分离出来，以到达去除的目的^[16]。改造项目在磁絮凝沉淀池中投加了质量密度为 $4.8\sim 5.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的稀土永磁材质磁种。稳定运行期间，日投加磁种4包，每包25 kg，折合补充磁种量约为 $5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

首都机场西净化站提标改造主要设计参数见表3。

表3 工艺单元技术参数
Table 3 Main design parameters of the upgrade project

改造对比	除磷工艺				脱氮工艺						
	工艺选择	加药类型	平面尺寸/ (m×m)	污泥产量/ (kg·d ⁻¹)	过滤 单元	滤速/ (m·h ⁻¹)	工艺 选择	总停留 时间/h	污泥浓 度/(mg·L ⁻¹)	污泥回 流比/%	混合液 回流比/%
改造前	混凝沉淀	铝盐除磷剂+助凝剂	4.5×4.5	1 000(含水量85%)	4	20	A ² O	8.0	2 500	100	200
改造后	磁混凝	磁种+混凝剂+助凝剂	20.0×7.0	800(含水量80%)	5	12.5	A/O	10.8	3 000	100	300

3 工艺改造后污水处理设施的运行效果

3.1 工艺改造后实际工程运行效果

污水处理设施改造于2018年9月完工，2018年12月21日完成调试，随后稳定运行。设施出水口安装有在线监测仪表，监测指标包括COD、氨氮、总氮和总磷。2019年1月至4月记录的月均出水水质见表4。

表4 2019年1月至4月均出水水质指标
Table 4 Monthly effluent water quality from January to April in 2019 mg·L⁻¹

月份	COD		氨氮		总氮		总磷	
	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
1月	180.18	11.34	30.05	0.68	53.42	12.86	6.06	0.10
2月	217.68	13.10	35.43	0.49	50.28	11.74	5.67	0.04
3月	217.44	12.35	31.47	0.76	48.21	11.11	5.80	0.03
4月	166.24	11.81	21.45	0.45	52.28	12.19	6.21	0.07

除在线监测外，首都机场委托第三方检测机构每月对其他出水水质指标进行了检测，结果如表5所示。

表5 2019年1月至4月第三方检测机构的水质监测结果
Table 5 Daily monitoring results from January to April in 2019

日期	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	总氮/(mg·L ⁻¹)	色度/倍	SS/(mg·L ⁻¹)	总磷/(mg·L ⁻¹)
2019-01-03	4.5	12.10	2	<4	0.156
2019-02-12	4.6	11.30	8	<4	0.039
2019-03-05	4.9	9.57	2	<4	0.011
2019-04-08	3.8	9.06	2	4	0.018
2019-05-12	4.2	12.70	2	4	0.022
2019-06-10	3.1	9.43	2	4	0.031
排放标准	6	15	15	5	0.3

在线监测及日常检测的出水水质数据均表明，改造后污水处理设施的出水稳定达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB11/ 890—2012)中表1B标准要求。

3.2 改造前后运行效果对比

将污水处理设施改造完成后2019年1至2月的出水水质与改造前2015年对应月份的出水水质进行对比分析,结果见图2。由图2可知,改造完成后,总氮、总磷及SS去除率明显提升,比改造前提升约10%;COD去除率小幅提高,提高约4%;氨氮去除率变化不明显,总体来讲,改造后各项出水指标符合预期效果。

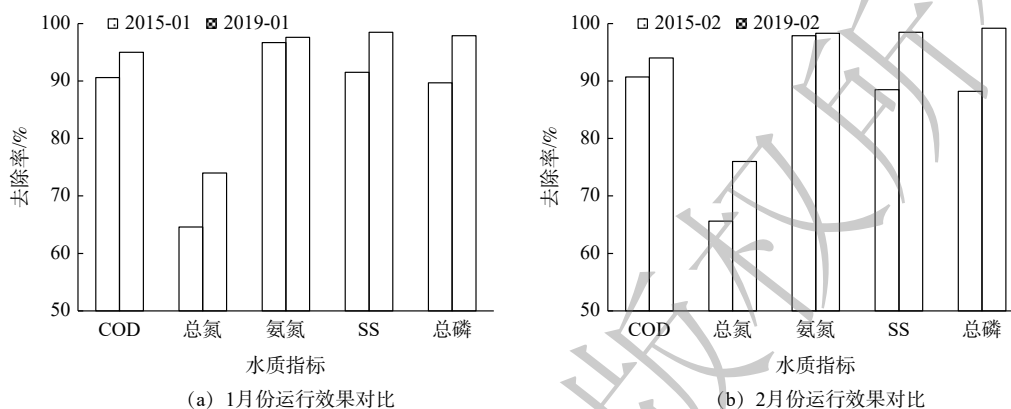


图2 提标改造前后运行效果对比

Fig. 2 Comparison of the treatment performances before and after the process upgrade

3.3 工程改造投资及运行费用分析

1) 建设投资: $1\ 620.18 \times 10^4$ 元。其中工程费用为 $1\ 444.24 \times 10^4$ 元, 工程建设其他费用为 98.79×10^4 元, 基本预备费为 77.15×10^4 元。对于新增工艺, 主要改造单元磁絮凝反应池建设费用占总投资 53.2%, 生化工艺中沉淀池改造占总投资 15.5%, 其他费用主要用于全自动砂滤建设, 污泥泵房改造以及自动化控制及仪表工程改造等内容。

2) 运行费用: 提标改造部分吨水运行费用为 $0.96 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$, 主要包括电费、水费、药剂费用(磁种、碳源、硝化菌、混凝剂和助凝剂投加)以及定员人工费用等。本项目单位水量耗电量为 $0.168 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ 。运行费用与北京市现有的提标改造工程对比, 如“生物强化+化学除磷+反硝化深床滤池”工艺(运行成本 $1.54 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$)和“ A^2O +中空纤维膜深度处理”工艺(运行成本 $1.35 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$), 成本相对较低, 节能效果较好。

4 结语

针对实施的不停产污水处理厂改造工程, 需首先明确改造工艺重点和施工技术难点, 通过合理安排新建设施与改造设施的建设时序, 分阶段实施, 以实现不停产改造。本工程改造核心是将原有4格初沉池其中2格依次改造为磁絮凝池和剩余污泥池, 施工过程中将该格水量通过管渠分散到其他并联格, 不会产生污水外溢的问题。工程的顺利实施可为类似的小型污水处理工程实现不停产改造提供参考。

参考文献

- [1] 田颖, 梁云平, 郭婧, 等. "水十条"对北京市地表水环境质量改善分析[J]. 环境工程, 2019, 37(4): 1-6.
- [2] 尤洋, 张青, 李文攀, 等. 不同类型机场项目环保管理问题分析[J]. 环境监控与预警, 2017, 9(01): 59-62.
- [3] 吴聪. 基于可持续发展的绿色机场评价体系研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [4] 张志广, 于京沧, 杨军. 北京首都机场污水处理厂自动化控制系统[J]. 环境工程, 2003, 21(4): 28-30.
- [5] 北京市环境保护局. 城镇污水处理厂污染物排放标准: DB11/890—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.

- [6] 瞿露, 张华伟. 重庆地区A-A²/O工艺污水处理厂提标改造工程实例[J]. 中国给水排水, 2019, 35(6): 72-75.
- [7] 张鹤清, 朱帅, 吴振军, 等. 城镇污水处理厂"准IV类"标准提标改造技术简析[J]. 环境工程, 2019, 37(6): 26-30.
- [8] SHANNON M A, BOHN P I W, ELIMELECH M, et al. Science and technology for water purification in the coming decades[J]. *Nature*, 2008, 452(20): 301-310.
- [9] 刘亦凡, 陈涛, 李军. 中国城镇污水处理厂提标改造工艺及运行案例[J]. 中国给水排水, 2016, 32(16): 36-41.
- [10] 李亮, 汪德金, 杨雪, 等. 大型污水处理厂采用MBR工艺不停产扩能提标改造[J]. 中国给水排水, 2019, 35(14): 52-58.
- [11] 孙月鹏, 王火青, 孙广垠, 等. 不同污泥龄条件下多级AO工艺强化生物脱氮性能研究[J]. 水处理技术, 2014, 40(10): 47-52.
- [12] 肖波, 王吉白, 潘国强, 等. 超磁分离技术在污水厂除浊去磷中的应用研究[J]. *环境保护科学*, 2015, 41(6): 63-68.
- [13] 孙少群. 磁絮凝沉淀用于漳浦污水处理厂一级A升级改造[J]. 中国给水排水, 2019, 35(14): 95-100.
- [14] 王东升, 张明, 肖峰. 磁混凝在水与废水处理领域的应用[J]. 环境工程学报, 2012, 6(3): 705-713.
- [15] LALLEY J, HAN C, XUAN L, et al. Phosphate adsorption using modified iron oxide-based sorbents in lake water: Kinetics, equilibrium, and column tests[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 284: 1386-1396.
- [16] VOHLA C, KOIV M, BAVOR H J, et al. Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands—A review[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37: 70-89.

(责任编辑: 靳炜)

An upgrade and reconstruction project of sewage treatment facilities under non-stop production conditions

YOU Li¹, WANG Benyang², LI Lei², HU Chunming¹, LIU Ping¹, ZHOU Li^{2*}

1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2. Thwater Environment Technology Beijing Co. Ltd., Beijing 100083, China

*Corresponding author, E-mail: 30927284@qq.com

Abstract According to the relevant requirements of the water bureau in Shunyi district, Beijing, the original sewage treatment facilities at capital airport need to be upgraded to meet the new discharge requirements. With the objective of non-stop project and non-add structures, upgrading reconstruction project includes adding superior bacteria in biochemical systems, operating the existing biochemical system in A/O mode, transforming the anaerobic tank into an anoxic tank, adding chemical phosphorus removal system (magnetic flocculation + sand filtration process) after the secondary sedimentation tank. The effluent meets the Class 1B level according to the Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant (DB 11/890-2012). The project has been running for 12 months producing stable effluent quality compliant with the discharge standard.

Keywords Capital airport; upgrade and reconstruction; biochemical systems; magnetic flocculation