

节能减排

# 城市污水厂全流程节能降耗示范工程分析

刘礼祥<sup>1,2</sup>, 张金松<sup>1</sup>, 黄凌军<sup>1</sup>, 施汉昌<sup>2</sup>, 何苗<sup>2</sup>

(1 深圳市水务<集团>有限公司, 广东 深圳 518031; 2 清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084)

**摘要:** 以深圳市某污水处理厂为案例, 全面介绍了全流程节能降耗技术的应用, 包括节能关键点识别方法、离心风机精确曝气控制与转刷时序控制等技术。运行实践表明, 加强对运行操作人员的培训对建立节能降耗长效机制非常重要; 全流程节能降耗工作的开展, 要以水质稳定达标为前提, 在此基础上首先应尽量通过工艺优化手段节能, 然后再通过评估确定硬件升级的必要性。

**关键词:** 城市污水厂; 节能降耗; 精确曝气控制; TURBO 风机; 三沟式氧化沟

**中图分类号:** X703.1 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2010)18-0134-05

## Case Analysis on Energy Saving and Consumption Reduction Technologies throughout Entire Process in WWTP

LIU Lixiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jinsong<sup>1</sup>, HUANG Lingjun<sup>1</sup>, SHI Hanchang<sup>2</sup>, HE Miao<sup>2</sup>  
(1. Shenzhen Water Group Co. Ltd., Shenzhen 518031, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** As a case of WWTP in Shenzhen City, the application of energy saving and consumption reduction technologies throughout entire process in WWTP was comprehensively introduced including key energy-saving identification methods, centrifugal blower precise control, rotating brush aeration time-sequence control and other technologies. The operation practice shows that strengthening the training of operators is very important to establish long-term mechanism for energy saving. The implementation of energy saving and consumption reduction activities throughout entire process should be based on reaching the effluent standard. First of all, energy saving should be performed as far as possible through process optimization, and then the necessity for upgrading hardware should be determined by assessing

**Key words** municipal WWTP, energy saving and consumption reduction, precise aeration control, TURBO air-blower, triple oxidation ditch

国家“十一五”科技支撑计划重点项目——“城市污水处理厂的节能降耗技术”课题是针对我国污水处理行业的具体状况, 通过新工艺的研发应用、运行的优化调控、设施设备的改造、先进控制手段的采

用, 开展相关节能降耗关键技术研究, 并在此基础上进行城市污水处理厂全流程节能降耗技术集成, 为全国污水处理厂的节能降耗及运营优化提供技术支持<sup>[1]</sup>。该课题在深圳某污水处理厂进行了节能降

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点项目 (2006BAC19B06)

耗综合示范。

## 1 示范工程背景介绍

考核指标要求示范工程经技术改造优化运行后,稳定运行半年以上,出水水质达到国家一级B排放标准,其中氨氮达到一级A排放标准,污水处理总能耗比现有系统降低10%以上。示范工程所在厂隶属于深圳市水务(集团)有限公司,是深圳市政府进行环境治理的重要工程之一,总占地面积为14.53 hm<sup>2</sup>,服务人口为65万。该厂总设计规模为35×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,分两期建设:一期采用AB工艺(其中B段为MUCT工艺),设计规模为10×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,于1998年投入运行;二期采用厌氧池/三沟式氧化沟工艺,设计规模为25×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,于2001年投入运行。该厂有多年稳定运行经验,积累了大量的历史数据,便于节能降耗对比分析,且该厂所采用的MUCT工艺及氧化沟工艺,在国内应用较多,选择该厂开展全流程节能降耗工作较为理想。

主要工艺设备、仪表的正常运行是节能降耗优化运行的先决条件。在开始示范改造之前,课题组对该厂主要设备及仪表状况进行了全面调研。调研结果表明:该厂主体设备均为进口设备,现状设备基本能够满足正常生产需要;由于原有仪表使用及维护频率较低,且进口仪表维护成本较高,所以原有仪表已经基本报废;近两年,深圳水务集团为强化内部管理与精细化控制,正分批对下属各污水厂的在线仪表进行更新,目前该厂DO及MLSS等在线仪表已更新完毕,基本能满足课题需要。

## 2 全流程节能降耗单元技术改造

### 2.1 全流程节能降耗关键要素识别

全流程节能降耗工作开展的前提是进行节能关键要素识别<sup>[2]</sup>。一般污水处理厂污水提升能耗占总能耗的10%~20%,污水生物处理能耗(主要用于曝气供氧)占总能耗的50%~70%,污泥处理占总能耗的10%~25%<sup>[3,4]</sup>。根据调研及该厂实际生产数据,将节能降耗工作分配到一期MUCT单元(含鼓风机房)、二期三沟式氧化沟单元、脱水机房及提升单元四部分,工作重点放在供氧能耗较高的MUCT单元及三沟式氧化沟单元。该厂MUCT单元采用TURBO风机供氧,氧化沟采用转刷与水下推进器进行供氧与混合推流。图1为未实施转刷时序控制前典型的三沟式氧化沟处理水量与溶解氧24 h变化曲线。

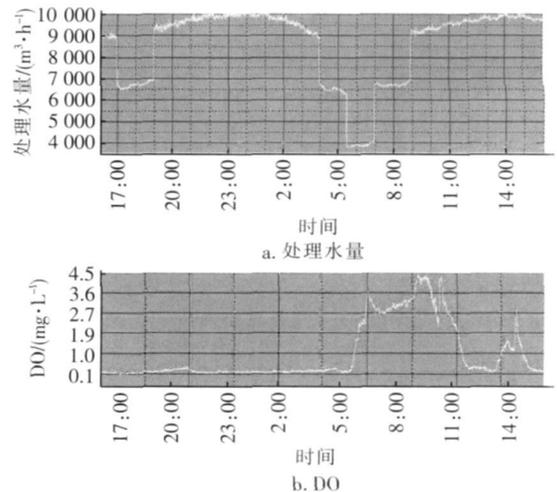


图1 三沟式氧化沟工艺处理水量与溶解氧24 h变化曲线

Fig. 1 Change of wastewater quantity and 24 h DO

由图1可知,三沟式氧化沟全天水量变化幅度较大,峰值一般出现在24:00,谷值一般出现在3:00—8:00。氧化沟内DO在6:00—11:00出现明显突跃现象,这是由于转刷未进行时序控制而无法实时响应进水负荷变化产生的,通过转刷时序控制有望在此段时间降低供氧能耗。一期MUCT虽然处理水量基本稳定,但受进水水质变化的影响,在6:00—12:00期间也会出现类似峰值现象。据此,确定生化单元节能关键要素为根据进水负荷的时变化规律,通过风机精确曝气控制及转刷时序控制大幅降低供氧能耗。

由于MUCT工艺吨水处理单耗较低而氧化沟能耗较高,2007年该厂通过水量调度,让MUCT工艺满负荷运行而三沟式氧化沟变负荷运行,以期降低全厂综合单耗。从2007年的实际处理结果看,一期MUCT工艺单耗确有大幅下降(降低26.51%),但二期氧化沟工艺由于尚未开展转刷时序控制工作而单耗显著上升(上升13.62%),从而导致全厂综合单耗降低非常有限(仅0.86%);对比两组工艺出水水质还发现,氧化沟工艺出水水质明显优于MUCT工艺。因此,确定一、二期节能优化运行的总体调控思路如下:一期MUCT维持低能耗满负荷运行,通过工艺优化提高出水水质;二期氧化沟在保证出水水质的同时,降低运行能耗。以期在稳定提高出水水质的同时,实现全流程节能降耗目标。

### 2.2 一期MUCT精确曝气控制技术改造

该厂在一期工程设计中对AB工艺均考虑了精

确曝气控制 (见图 2), 且主体设备基本安装到位, 但在调试过程中出现了较多问题, 最终未能实现。

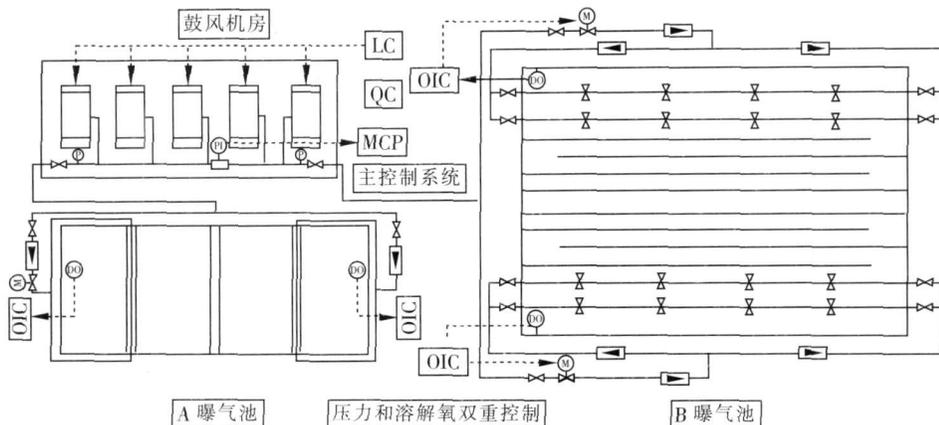


图 2 一期工艺原有精确曝气控制系统

Fig 2 Original design of precision aeration control system for first-stage process

通过现场调研发现, 当时调试中出现的主要问题是在线溶氧仪运行不稳定, 且 AB 工艺各单元均参与控制, 从而导致整个控制系统较为复杂; 另外, 溶解氧反馈控制的配气阀门线性度较差, 难以满足控制要求; 最后, 由于阀门的频繁调整, 导致风管内风压显著变化, 风机经常性出现喘振等不稳定现象。

针对以上问题, 课题组对原有系统进行了如下调整: 首先, 由于 A 段供气量仅为 B 段的供气量的 1/10 且 A 段曝气量对整体处理效果影响较小, 因此仅对 B 段 (即 MUCT 工艺) 进行精确曝气, 简化控制系统以提高控制稳定性; 其次, 针对两组 MUCT 池配气阀门线性度较差的实际情况, 抛开 DO 信号对阀门的直接控制, 消除因阀门线性度差而出现的控制稳定性问题, 仅用手动调整配气阀门以改善配气均匀性; 最后, 将两组 MUCT 池在线 DO 信号直接接入主控制柜, 通过编程计算转换为设定风压值, 让主控制柜根据实际风压与设定风压差异调整各台风机导叶开度, 从而实现改良型的压力与溶解氧的双重反馈控制系统。该新型精确曝气控制系统通过 4 个多月的调试运行, 经历了水质、水量等负荷变化, 虽然 DO 曲线并不能稳定呈线性变化, 但在出水水质稳定达标的前提下大幅降低了处理供氧单耗。图 3 为二期工艺 2008 年与 2009 年 (运行精确曝气控制系统) 同期水量与风机电耗对比。

由图 3 可知, 二期工艺采用精确曝气控制后, 虽然处理水量下降了  $0.42 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  但供氧单耗由  $0.0667 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$  降至  $0.0480 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ , 下降了 27.95%, 仅 100 余天就节电  $20.70 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$  节

能效果显著。尤其值得一提的是, 该系统的优化改造几乎没有增加任何硬件设施, 仅通过改变原有控制策略即实现了可观的节能效果, 值得类似污水厂在全流程节能降耗技改中推广应用。

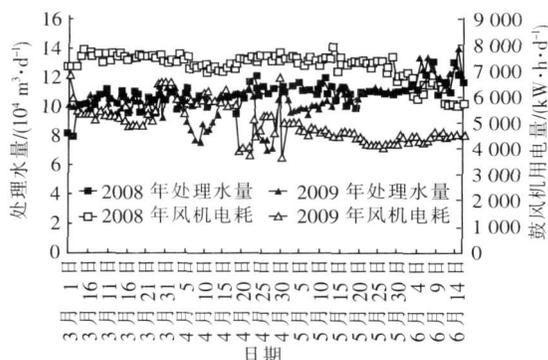


图 3 二期工艺 2008 年与 2009 年同期处理水量与风机电耗对比

Fig 3 Comparison of wastewater quantity and blower electricity consumption between 2008 and 2009

### 2.3 二期三沟式氧化沟转刷时序控制技术改造

示范工程中三沟式氧化沟为深沟型氧化沟 (有效水深为 5.8 m), 采用转刷曝气与水下推进器混合推流, 运行模式为 8 h 的 6 阶段交替运行 (每半个周期时间依次为 1.5 h-1.5 h-1 h)。每组氧化沟配置了 28 台转刷 (其中边沟各 10 台, 中沟 8 台) 及 16 台水下推进器 (其中边沟各 6 台, 中沟 4 台)。为实现对三沟式氧化沟的节能优化控制, 必须对控制系统进行相应的简化: 首先, 由于水下推进器功率远小于转刷, 且对于深沟型氧化沟而言, 水下推进器对混合搅拌更为有利, 因此在节能优化控制中不对水下

推进器进行时序控制, 实现转刷曝气与水下推进器推流功能的相对独立, 转刷时序控制不受水力流态限制, 而仅取决于需氧量, 此控制方式使得氧化沟的曝气与混合能量控制更为简单合理; 其次, 由于边沟转刷在一个周期内仅曝气 1.5 h 在整个氧化沟转刷能耗中所占比例较小, 且其曝气效果直接决定出水水质, 因此在控制策略中, 不对边沟转刷进行时序控制, 而仅对中沟连续运行转刷进行控制。通过以上简化思路, 将整个氧化沟内 28 台转刷与 16 台下推进器控制简化至中沟 8 台转刷控制。但转刷数量仍较多, 且转刷运行台数与位置对氧化沟内 DO 分布影响非常大, 为此, 研究了 5 台转刷以不同布置方式运行时氧化沟内的 DO 分布规律 (见图 4)。

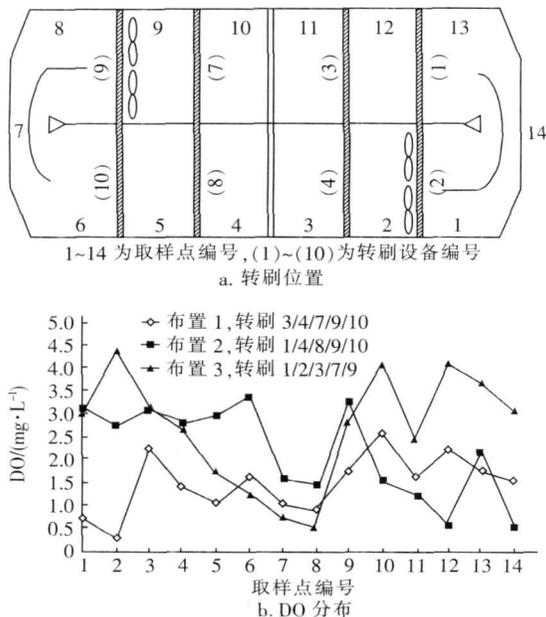


图 4 氧化沟内不同转刷布置形式对 DO 分布的影响

Fig 4 Effect of rotary brush layouts on DO distribution

由图 4 可知, 氧化沟内 DO 分布受转刷开启位置影响较大, 在不同转刷布置形式下, 整个氧化沟内各取样点 DO 重现性非常差, 难以依靠单点安装在线 DO 来实现精确曝气控制。由于各点 DO 都无法代表整个氧化沟内溶解氧总体水平, 因此即使在多点安装在线 DO, 也无法利用 DO 曲线进行转刷精确曝气控制。

虽然单点 DO 绝对值无法代表氧化沟内溶解氧水平, 但需要指出的是, 转刷开启台数的变化还是会影响到各点 DO 的整体水平; 且在相同的转刷开启台数下, 水量大幅波动也会直接影响各点 DO 的整

体水平。鉴于此, 在对转刷进行时序控制时, 保证在线 DO 安装点上方转刷长期处于开启状态 [该厂在线 DO 仪安装在 2 号取样点, 因此维持 (2) 号转刷长期开启], 通过 2 号取样点在线 DO 整体水平变化可以间接反映沟内溶解氧水平, 由此解决了氧化沟内 DO 分布不均对控制稳定性的影响。需要指出的是, 本控制方法不是利用在线 DO 直接反馈控制转刷开启台数, 而是将在线 DO 作为转刷开启数量的判据之一。

由于氧化沟内溶解氧水平在一天之内的时变化规律主要取决于进水量的大幅波动, 其次是进水水质的波动, 因此在实际控制过程中, 转刷的开启台数主控因子为进水提升泵的开启台数 (该厂进水提升泵均未安装变频器), 在提升泵开启台数发生变化时 (考虑 1 h 左右的滞后性), 操作人员可以根据改变提升泵开启台数后的 DO 总体变化规律对转刷进行时序控制: 当提升泵数量增加时, 若 DO 明显下降则增开转刷; 当提升泵数量减少时, 若 DO 明显上升则减少转刷开启台数; 若 DO 相对稳定则维持转刷开启台数不变。

此控制策略虽然没有利用在线 DO 实现对转刷的闭环控制, 也没有一期 MUCT 工艺精确曝气控制精度高, 但抓住了氧化沟转刷能耗控制的关键点, 通过进水量的大幅波动及在线 DO 的间接判断调整转刷开启台数, 实现转刷时序控制; 在不增加额外的硬件设备条件下, 仅通过操作人员每天为数不多的几次优化调整, 即可达到较为理想的节能效果。图 5 为二期氧化沟工艺 2008 年与 2009 年同期用电量与单耗对比。

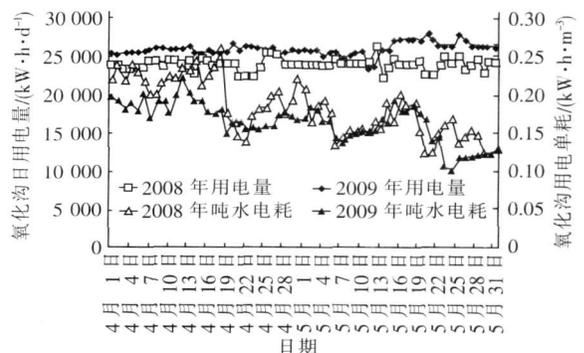


图 5 二期氧化沟工艺 2008 年与 2009 年同期用电量与单耗对比

Fig 5 Comparison of power consumption and power unit consumption between 2008 and 2009

由图 5 可知,采用转刷时序控制可在一定程度上降低氧化沟处理单耗(由 2008 年的  $0.1739 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$  下降至 2009 年同期的  $0.1587 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ), 总体下降 8.76%, 下降幅度不如风机精确曝气控制, 2 个月仅节电  $15.18 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。需要指出的是, 2009 年氧化沟吨水处理单耗还与氧化沟日均处理水量大幅上升 ( $2.58 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ) 有关。

下降幅度偏低的原因一方面是由于控制精度有限, 另一方面也和该控制策略在很大程度上依赖于操作人员控制而不是计算机控制有关, 部分操作人员对时序控制系统尚不够理解, 这也在一定程度上降低了该控制策略节能空间的发挥。这实际上也是节能降耗工作开展过程中的一大难题, 很多节能降耗工作在技术上研究得很透彻, 但由于所有的节能降耗工作最终还是要通过运行人员去实施, 如果运行管理人员不能很好地理解控制策略, 就会影响节能效果, 而且难以保证长效运行; 因此, 在开展全流程节能降耗工作过程中, 一定要加强对一线运行管理人员的培训与沟通, 只有让运行管理人员完全理解并接受, 才能使得各项节能降耗措施落到实处, 并可以长期稳定低耗运行。

### 3 全流程节能降耗综合示范效果

“城市污水厂全流程节能降耗技术集成与工程示范”课题自 2007 年在深圳某污水厂运行 3 年多来, 先后开展了全流程能耗物耗审计、全流程节能降耗关键控制要素识别、氧化沟曝气与搅拌设备优化配置研究、TURBO 风机精确曝气控制研究、MUCT 工艺优化模拟研究、三沟式氧化沟转刷时序控制研究、三沟式氧化沟工艺优化模拟研究、厂际水量调度对全厂综合处理能耗影响研究、智能电量采集系统构建关键技术研究、全流程综合控制平台构建等关键技术研究。

在此基础上, 课题组还相继开展了 TURBO 风机精确曝气控制系统改造、MUCT 工艺回流系统优化改造、三沟式氧化沟转刷时序控制系统改造、氧化沟转刷与推进器优化配置改造、氧化沟转刷导流板安装方式优化调整、氧化沟污泥回流系统优化改造、污泥处理系统设备升级改造、全厂智能电量采集系统建设、全流程节能降耗综合控制平台建设等单元技术改造工作。与此同时, 为配合全流程节能降耗工作的顺利进行, 深圳水务集团及所在生产单位还相继开展了 A 级曝气池清淤、细格栅与中沉池吸泥

桁车大修、TURBO 风机大修、厌氧池清淤、三沟式氧化沟清淤、离心脱水机大修等工作, 并新增了一批在线 DO 仪、ORP 仪、风量计、智能电表等仪器仪表, 保证示范工程的全面实施与稳定运行。经过 3 年多的工艺优化与技术改造, 已基本完成全厂各工艺单元的节能优化改造, 并通过技术集成, 构建了全流程节能降耗综合控制平台, 有效保证该示范工程的长期稳定低耗运行。自 2007 年在该厂开展全流程节能降耗工作以来, 该厂吨水处理单耗显著下降, 截至 2009 年底, 已累计节电  $628.59 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ , 节能效果显著。

### 4 结语

节能降耗有一个重要前提——稳定达标, 节能降耗工作绝不能以牺牲水质为代价, 这也是很多单位在生产中开展节能降耗工作时最大的阻力来源, 因此节能降耗工作首先要对现有工艺运行进行评估与优化, 然后才能开展具体工作。另外, 在投入大笔经费进行硬件设施升级改造之前, 建议先通过工艺优化控制来降低运行能耗, 再评估投入与产出的经济合理性以确定是否进行大范围技改。由于污水生物处理过程是多变量、非线性、大滞后的不确定系统, 并不一定要建立完全的闭环自控系统, 可根据工艺现状、设备自控支持程度、运行人员操作方便与否等综合考虑, 能够通过简单易行的控制策略来协助运行人员合理调控运行的模式, 也不失为一种良好的节能降耗措施。

### 参考文献:

- [1] 刘礼祥, 张金松, 施汉昌, 等. 城市污水处理厂全流程节能降耗优化运行策略 [J]. 中国给水排水, 2009, 25(16): 11-15.
- [2] 杨凌波, 曾思育, 鞠宇平, 等. 我国城市污水处理厂能耗规律的统计分析 with 定量识别 [J]. 给水排水, 2008, 34(10): 42-45.
- [3] 高旭, 龙腾锐, 郭劲松. 城市污水处理能耗能效研究进展 [J]. 重庆大学学报 (自然科学版), 2002, 25(6): 143-148.
- [4] OWEN W F. 污水能效与能耗 [M]. 章北平等译. 北京: 能源出版社, 1989.

E-mail lk1998@yahoo.com.cn

收稿日期: 2010-06-17