

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.24.021

污水处理厂尾水发电强化能源回收工程实例

李航^{1,2}, 董立春¹, 李其昌³, 黄德智², 吕利平⁴

(1. 重庆大学 化学化工学院, 重庆 401331; 2. 重庆市三峡水务渝北排水有限责任公司, 重庆 401120; 3. 国家电投集团重庆狮子滩发电有限公司, 重庆 401220; 4. 长江师范学院 化学化工学院, 重庆 408100)

摘要: 为积极响应国家“双碳”战略,全面提升污水处理厂再生水资源利用水平,重庆市某污水处理厂采用“污水处理厂+小水电”模式,仅对污水处理厂原尾水排放管进行技术改造,利用经处理达标后的尾水发电,实现尾水资源再利用。主要介绍了工程选型、工程布置、工程设计、调试运行以及能耗评价。经调试运行后,该工程平均发电量为1 950 kW·h/d,约占污水处理厂每日用电量的15%,预计投资收益率为11.2%,投资回收期约9年,工程综合能耗指标仅占全国万元GDP能耗指标的4.45%。该工程可为大量存在的分散式小型污水处理厂尾水资源化利用,实现污水处理行业绿色循环发展提供理论支撑与案例参考。

关键词: 污水处理厂; 尾水发电; 能源回收; 调试运行; 能耗评价

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)24-0122-05

Case of Tailwater Power Generation Project in a WWTP for Enhancing Energy Recovery

LI Hang^{1,2}, DONG Li-chun¹, LI Qi-chang³, HUANG De-zhi², LÜ Li-ping⁴

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 401331, China; 2. Chongqing Three Gorges Water Yubei Drainage Co. Ltd., Chongqing 401120, China; 3. SPIC Chongqing Shizitan Power Generation Co. Ltd., Chongqing 401220, China; 4. School of Chemistry and Chemical Engineering, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China)

Abstract: In order to actively respond to the national “carbon peaking and carbon neutrality” strategy and comprehensively improve the utilization level of recycled water resources, a wastewater treatment plant (WWTP) in Chongqing adopted the “WWTP and small hydropower” mode, which only conducted technical transformation on the original tailwater discharge pipe, and used the tailwater after treatment to generate power and achieve its reuse. The project type selection, project layout, project design, commissioning operation, as well as energy consumption evaluation are introduced. After commissioning operation, the average power generation of the project is 1 950 kW·h/d, accounting for about 15% of the daily electricity consumption of the WWTP. The expected investment return rate is 11.2%, and the investment payback period is about 9 years. The comprehensive energy consumption index of the project only accounts for 4.45% of the national 10 000 yuan GDP energy consumption index. This

基金项目: 重庆市教委科学技术研究计划青年项目(KJQN202101417)

通信作者: 董立春 E-mail: lcdong72@cqu.edu.cn

project could provide theoretical support and case reference for the utilization of tailwater resource from a large number of dispersed small WWTPs, and achieve green circular development in the sewage treatment industry.

Key words: wastewater treatment plant; tailwater power generation; energy recovery; commissioning operation; energy consumption evaluation

1 污水处理厂概况

重庆市某污水处理厂设计规模为 $6\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,采用A²/O+V型砂滤池工艺,服务面积约32.4 km²,服务人口约41万人,主要负责收集处理服务区内

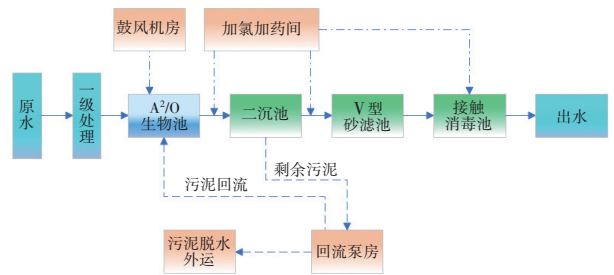


图1 污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process

该污水处理厂出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。设计进、出水水质^[1]如表1所示。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality of the wastewater treatment plant mg·L⁻¹

项目	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TN	TP	SS
进水	350	150	30	40	3	350
出水	50	10	5(8)	15	0.5	10

2 尾水发电工程

污水处理厂尾水发电是利用污水处理厂出水口至尾水排放口之间存在的较大落差,将水力势能转化为水轮机的动能,再借助水轮机为原动力推动发电机产生电能的过程^[2]。尾水发电是对污水处理厂净化水的二次利用,产生的电能可就地消纳。虽然污水处理厂尾水发电案例并不少见,但几乎都用在大中型污水处理厂^[3],而占据污水处理厂产能规模80%左右的小型污水处理厂却鲜有应用报道。为此,对“污水处理厂+小水电”模式进行了技术与

效能分析,将尾水发电实践引入分散式小型污水处理厂工程应用领域,以期为大量存在的小型污水处理厂尾水资源化利用、实现污水处理行业绿色循环发展提供理论支撑与案例参考。

2.1 工程选型

2.1.1 有效水头

该工程能源回收利用装置的安装高程不低于尾水排放口高程。经现场高程复核,原污水处理厂出水口至尾水排放口高程差为29.29 m,考虑到沿程损失,最大有效水头选定为28.5 m,实际有效水头随尾水流量变化而变化,经计算最低有效水头为26 m。

2.1.2 发电机参数

发电机的定子、转子绕组和定子铁芯均采用F级绝缘材料。定子为整体结构,定子铁芯采用低损耗、无时效、优质冷轧薄硅钢片叠片而成。主引出线和中性点引出线均为线电压级全绝缘。发电机至并网柜之间一次电缆均选用单芯铜制带铠电缆,电缆每芯截面面积不小240 mm²。发电机的冷却采用水冷式结构,机组采用齿盘测频。测速装置转动部件的设计应能承受包括能源回收装置最大飞逸转速和突然甩负荷在内的全部工况下所产生的最大应力。测速信号通过4~20 mA模拟量信号传输至监控系统。发电机具体参数如表2所示。

表2 发电机参数

Tab.2 Parameters of electric generator

项目	额定容量/ kW	额定电流/ A	额定电压/ V	额定功率 因数	额定频率/ Hz	额定转速/(r· min ⁻¹)	飞逸转速/(r· min ⁻¹)
数值	200	388	400	0.8(滞后)	50	1 000	1 500

2.1.3 装机容量

根据污水处理厂历年尾水排放流量分布规律,以流量平均值确定特征流量工况;根据水轮机模型综合特性曲线与有效水头确定装置效率;根据流量、有效水头、装置效率、发电机效率确定装置出

力。10种不同工况下的能源回收利用装机容量计算结果见表3。其中,有效水头为28.5 m时,平均出力为145 kW,最大出力为195 kW。为充分利用尾水资源,综合考虑后最大装机容量选择200 kW。

表3 各工况下装机容量

Tab.3 Device capacity under various operating conditions

工况	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	发电机 效率/%	有效水头 28.5 m		有效水头 26 m	
			装置效率/%	出力/kW	装置效率/%	出力/kW
1	0.972	87.8	82.0	195	82.0	178
2	0.899	87.8	86.0	189	83.7	168
3	0.843	87.8	87.0	180	86.0	162
4	0.784	87.8	89.0	171	89.0	156
5	0.713	87.8	89.0	155	89.0	142
6	0.662	87.8	89.0	144	89.0	131
7	0.605	87.8	86.3	128	86.3	116
8	0.548	87.8	83.0	111	83.0	101
9	0.498	87.8	82.0	100	78.0	86
10	0.431	87.8	78.0	82	76.0	73

2.2 工程布置

工程现场布置如图2所示。

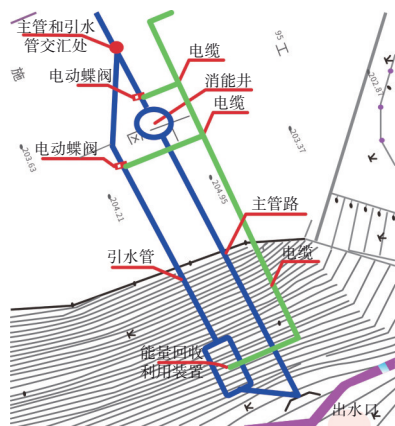


图2 工程布置

Fig.2 Layout of the project

本工程是在已建尾水排放管道上进行技术改造,增加旁路,引用现状尾水进行发电。工程需增加1路引水管(约85 m)、2套电动蝶阀(DN1 400、DN1 000)、1套伸缩节、1套能源回收利用装置及附属电气设备。

结合污水处理厂尾水排放系统布置现状,本工程取水口布置在原消能井前4 m处(可结合消能井及前端管路实际布置调整位置),分岔角为45°,引

水管管径为1 000 mm,与原尾水排放管平行布置,两管中心距离为4.8 m;分别在消能井前端管道与分岔口之间和引水管前端各装设1套电动蝶阀,用于切换尾水的引用;利用后尾水直接通过原排放口排出,不新增排放口。所有管道在安装完成后进行掩埋处理,电气设备布置在污水处理厂原配电房内。该工程建成后只永久保留2个阀门井和1个设备井。

2.3 工程设计

① 引水管设计

发电管路与引水管道采用岔管相接,钢材采用压力容器用钢Q245R,钢的弹性模量为 $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,泊松比为0.3,重度为 $7.85 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^3$,屈服强度为245 N/mm²,抗拉强度为400~520 N/mm²。

岔管管壁厚度(t_0)按下式计算:

$$t_0 = \frac{K_1 Pr}{[\sigma]_1 \varphi \cos \alpha} \quad (1)$$

式中: K_1 为系数,取值1.5; P 为内水压强,N/mm²; r 为该节钢管最大内半径,mm; $[\sigma]_1$ 为允许应力,N; φ 为焊缝系数; α 为钢管半锥顶角。

经计算,管壁厚度为4.95 mm。钢管壁厚应在计算壁厚的基础上增加2 mm防腐厚度,因此本次设计岔管壁厚为7 mm,安全值为10 mm,实际取值为12 mm。

② 镇墩设计

镇墩是设置在管道水平转角处防止管线移位的水工建筑物,通常为钢筋混凝土结构。根据机组及岔管布置情况,在岔管及转弯段处各设置镇墩,尺寸为3 m×3 m×3 m,体积为27 m³。

③ 设备井设计

设备井主要用于布置能源回收利用装置(卧式),底板采用1.5 m厚C30W6F50钢筋混凝土衬砌,侧壁采用1 000 mm厚C30W6F50钢筋混凝土衬砌,顶部高程依据选定位置确定,采用轻型屋面结构,与整个厂区风格相协调。

④ 并网电源柜设计

并网电源柜分上下两层。上层为系统供电部分,采用双电源接入,设置UPS电源1套,额定容量为2 kVA,持续运行时间2~4 h。下层为测量机组,电机正常运行后,实时监测电机的运行参数,并将运行参数传输给监控系统;电机运行异常时,及时断开断路器,将电机与电网脱离。

⑤ 发电机并网设计

发电机出口通过并网电源柜接入厂内母线,母线电压为 400 V。并网电源柜内设置空气断路器,用于异步发电机的并网/解列。为将发电机并网瞬间冲击电流控制在允许限度内(低于 1.5 倍额定电流),确保得到一个平滑的并网瞬态过程,增加并网的安全性及稳定性,在异步发电机定子与电网之间每相串入一只双向晶闸管,双向晶闸管的两端与并网自动开关的动合触头并联。

⑥ 监控系统设计

监控系统包含 PLC 系统、测量仪表及通信网络。配置工程师站主机及组态软件,实现对整个发电系统的远程监测和自动控制。监控系统主要用于监测进水阀的开度,发电机的轴承温度及绕组温度,发电机的实际转速,各开关的状态,发电机配电柜的电流、电压、功率等参数,控制各发电机组的并网与解列,完成与各保护系统和计量系统的通信。监控系统页面如图 3 所示。

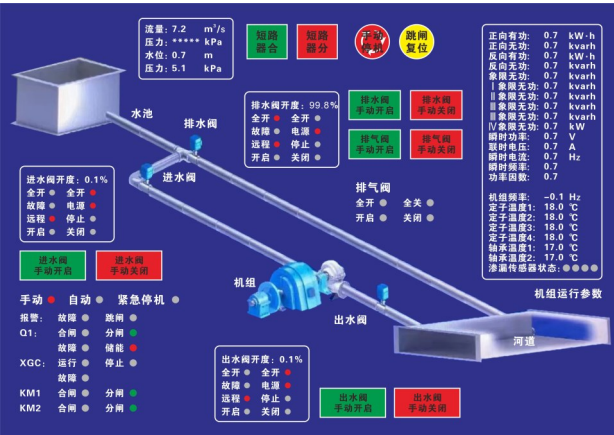


图 3 监控系统页面

Fig.3 Page of monitoring system

3 调试运行

3.1 手动启用能源回收利用装置

- ① 打开能源回收利用装置进水口阀门,关闭其出水阀门,缓慢关闭原尾水排放管主管路阀门。
- ② 调节能源回收利用装置出口阀门开度,使转速稳定达到设计值(50 Hz)后开始并网发电。在此期间,注意检查能源回收利用装置的出口阀门开度是否灵敏,设备压力、电流、轴承温度等是否正常,电机是否有转速反馈和功率反馈等。

3.2 手动关停能源回收利用装置

缓慢关闭能源回收利用装置的出口阀门,同时

打开原尾水排放主管路阀门,当发电量为 10 kW 时手动分开断路器,再缓慢关闭装置进口阀门。当装置停运后,应立即检查装置进口阀门是否关闭。

3.3 自动启停能源回收利用装置

- ① 当接触池水位达到 0.59~0.80 m 时,能源回收利用装置进入自动启动程序。
- ② 当接触池水位低于 0.59 m 或高于 0.8 m 时,能源回收利用装置进入自动停机程序,设备停机后进入 30 min 延时保护,之后通过水位条件判断是否自动开机。

该工程自调试运行以来,发电量如图 4 所示。可以看出,该工程平均发电量为 1 950 kW·h/d,约占污水处理厂每日用电量的 15%。

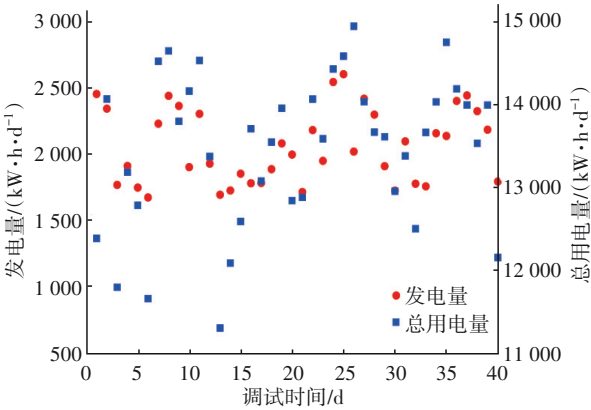


图 4 调试运行期间发电量

Fig.4 Power generation during commissioning operation

4 能耗评价

4.1 能耗统计

工程能耗主要包括水力机械、电气设备及通信、建筑能耗等。工程各系统及设备的能耗统计如表 4 所示。

表 4 能耗统计

Tab.4 Statistical of energy consumption

项目	能耗/(10 ⁴ kW·h·a ⁻¹)	折合标准煤/(t·a ⁻¹)
水力机械	0.040	0.049
电气设备及通信	0.050	0.062
建筑能耗	0.869	1.069
合计	0.959	1.180

4.2 节能评价

工程综合能耗指标按下式计算:

$$\eta = E/B \tag{2}$$

式中: η 为工程综合能耗指标; E 为工程计算期

内总能耗,包括施工期与运行期的能耗总和,施工期约3个月,可忽略不计,运行期50年,工程总能耗为59 t标准煤; B 为计算期内产生的国民经济净效益,约1 500万元。

经计算得出 $\eta=0.039$ t标准煤/万元。而据新浪财经公开资料显示,2022年全国万元GDP能耗约为0.877 t标准煤。可以看出,该工程综合能耗指标仅占全国万元GDP能耗指标的4.45%,远低于全国平均水平。因此,本工程对降低GDP能耗具有积极的推动作用与示范效应。

5 经济性分析

该工程总投资约265万元,结合我国水电站运维成本标准0.04~0.09元/(kW·h),考虑污水能源回收工程点多分散的情况,运维成本取0.1元/(kW·h),按照发电量 71×10^4 kW·h/a进行经济测评,预计投资收益率为11.2%,投资回收期约9年。

6 结论

随着国家“双碳”战略的提出,污水处理行业面临传统的能源单向消耗模式转型,能源输出成为污水处理行业亟需突破的关键变革,而尾水发电是其中重要一环。

① 该工程创造性地采用“污水处理厂+小水电”模式,仅对污水处理厂原尾水排放管进行技术改造,便可实现尾水资源化利用,投资费用少,建设周期短,改造难度低,环境效益高。

② 该工程平均发电量为1 950 kW·h/d,约占污水处理厂每日用电量的15%,预计投资收益率为11.2%,投资回收期约9年,综合能耗指标仅占全国万元GDP能耗指标的4.45%。

③ 该工程的建成投运,对大量存在的小型污水处理厂尾水资源化利用具有较强的示范意义与推广应用价值。

参考文献:

- [1] 罗本福, 杨曦. 污水厂改扩建项目设计进水水质的确定[J]. 中国给水排水, 2013, 29(9):117-119,124.
LUO Benfu, YANG Xi. Determination of design influent quality in renovation and expansion project of wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(9):117-119,124 (in Chinese).
- [2] 杨秀维, 俞晓东, 张磊, 等. 设置尾水连通管的抽水蓄能电站引水发电系统小波动稳定分析[J]. 水利学报, 2019, 50(9):1145-1154.
YANG Xiuwei, YU Xiaodong, ZHANG Lei, et al. Stability analysis of hydroelectric generating system of the pumped storage power plant with connection pipe between tailrace tunnels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(9):1145-1154 (in Chinese).
- [3] 王鹏. 尾水发电在重庆市鸡冠石污水处理厂的应用[J]. 中国给水排水, 2010, 26(6):69-71,84.
WANG Peng. Application of tailwater power generation technology in Chongqing Jiguanshi wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(6):69-71,84 (in Chinese).

作者简介:李航(1986—),男,重庆綦江人,博士研究生,高级工程师,主要从事废水资源化利用技术研究工作。

E-mail:lihang0213@163.com

收稿日期:2023-06-29

修回日期:2023-10-20

(编辑:衣春敏)

全面推行河长制湖长制,维护河湖健康生命