

# 中水循环利用在高速公路场站中的应用与效果

杨 军 黄壬鹏

贵州高投生态产业有限公司 贵州 贵阳 550025

**摘要：**随着我国高速公路事业的蓬勃发展，场站水资源循环利用问题愈发凸显其重要性，已成为解决场站用水紧张的关键途径。本文聚焦于高速公路场站的中水循环利用系统，深入剖析了AO+MBR工艺在该类高速公路场站中的实际应用成效。通过引入智能化控制系统的精细化优化措施，显著提升了中水循环利用的效率水平，并有效降低了能源消耗。同时，系统还创新性地实施了谷电重点使用策略，进一步缩减了运行成本。研究数据充分证明，该系统不仅成功提高了中水循环利用率，还实现了可观的经济效益，为高速公路场站水循环利用系统的规划设计与日常运营提供了极具价值的参考依据。

**关键词：**高速公路场站；中水循环利用；AO+MBR工艺；智能化控制；谷电策略；经济效益

## 引言

近年来，随着中国经济的迅猛增长，其高速公路建设亦取得了长足的进展。这一交通网络已从初期的寥寥数条，发展成为如今覆盖全国的庞大体系，极大地促进了物资流通与人际互动。沿此网络，每隔60至80公里即设有服务站点，内含餐厅、卫生间、购物中心、加油站及休息区等设施，旨在为驾驶者与乘客提供便捷的休憩环境，同时保障货物运输与旅游活动的顺畅进行<sup>[1]</sup>。相较于传统的居民区、学校及公共设施，高速公路站点在中水循环利用方面的利用率相对较低。其污水主要源自过往行人使用的洗手间，且当面临水资源富余时，还需进行大规模的绿化作业。鉴于此，提升高速公路站点的中水循环利用率，不仅有助于优化资源配置，还能带来显著的经济效益。鉴于高速公路收费站多位于偏远地带，其产生的废水难以纳入城市供水系统进行处理。同时，我国众多省市正面临严峻的水资源短缺挑战。尽管收费站已配备污水处理设备，但操作与维护效率尚待提升。即便处理后的水质符合排放标准，允许外排，亦难免造成水资源的一定损失。因此，推广中水再利用技术，对于缓解水资源压力具有重要意义。

## 1 水处理工艺

在高速公路场站所实施的水回用系统中，该项目荣幸地成为了交通运输部首批遴选的水资源循环再利用试点项目之一。其综合体系涵盖了多项关键子系统，具体包括每日处理能力达到150立方米的雨水回收利用系统、

**第一作者简介：**杨军，男，1974.11，汉，四川通江人，大专，工程师，主要从事：生态环保

**第二作者简介：**黄壬鹏，男，1988.8，汉，贵州黔西人，本科，高级工程师，主要从事：生态环保

每日可处理220立方米的中水循环利用系统，以及环保高效的绿色喷洒系统<sup>[2]</sup>。目前，针对大型及中型规模的中水循环利用项目，AO+MBR技术已展现出广泛的应用价值。该技术之所以受到青睐，主要归因于其几大显著优势：首先，它实现了空间占用的最小化；其次，工作效率卓越，能够高效处理大量中水；再者，操作流程简便易行，降低了运维难度；最后，出水水质稳定可靠，达到了环保与实用的双重标准。关于AO+MBR工艺的具体实施步骤，请参照图1进行详细了解。

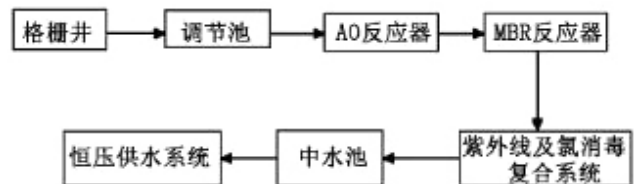


图1 AO+MBR中水处理工艺流程图

MBR（膜生物反应器）技术的引入，替代了传统技术中的二次沉淀池环节。该技术采用0.03 $\mu\text{m}$ 孔径的中空纤维膜进行精密过滤，有效去除了污水中的各类杂质。进一步地，MBR还展现出了对微生物、细菌及大分子有机物的强效清除能力，实现了出水浊度的显著降低，从而减轻了后续再利用管线的运行压力。

在深度消毒环节，我们综合考量后采用了氯消毒与紫外线消毒相结合的方案。其中，紫外线消毒以其高效、节能且无副产物的特性脱颖而出，成为消毒工艺中的亮点。而氯消毒的加入，则进一步增强了消毒效果，并且相较于单独使用氯消毒，整体消毒成本得到了有效控制<sup>[3]</sup>。

该系统产出的水质严格遵循《城市污水再生利用 城市杂用水水质》（GB 18920—2002）标准，确保了水质

的安全性及适用性。因此，该水可直接应用于卫生间清洁及公园绿化等场景，替代了传统自来水供应，有效降低了卫生间的用水成本，实现了水资源的节约与高效利用。

### 2 中水循环利用在高速公路场站中的应用与效果

原中水循环利用策略存在诸多弊端，包括但不限于使用效率低下、资源消耗过度、水费成本高昂、回报周期冗长以及维修与保养流程繁琐。然而，通过优化站点中水循环利用系统，我们成功实现了回用率的大幅提升，已超过70%，这一数值显著优于传统行业的60%平均水平<sup>[4]</sup>。同时，我们引入MBR技术以优化设备运营与维护管理，此举不仅极大提升了现场污水处理的效率，还简化了维修与保养流程，降低了维护成本。针对当前面临的能源消耗量大、水费成本高昂以及投入产出周期长等挑战，我们计划在控制、经济效益分析及策略三个核心层面进行深入剖析与改进，以期实现全面优化与提升。

#### 2.1 控制——智能化系统运行

一般而言，传统的废水处理流程普遍依赖于机械操作与逻辑控制机制，即严格遵循预设的时间控制模式，并借助PLC（可编程逻辑控制器）进行逻辑编码的执行。然而，在面临如人口流动、季节更替、节假日变动等复杂外部因素影响下，水质与水量常呈现显著波动，此类传统控制策略显得相对单一，且往往忽视了对能源消耗的有效管理<sup>[5]</sup>。

尽管PLC系统仍然是智能化废水处理体系中的核心操作架构，但鉴于其出色的可扩展性，我们已成功集成了更多的输入、输出模块及存储单元，此举显著增强了系统的感知灵敏度与反馈机制。具体而言，我们能够部署更多种类的传感器以实时捕捉水质参数、水量变化及供水需求动态，并依托预设于存储器中的优化策略，对污水处理流程进行智能调整，以期实现处理效率的最大化。关于具体的实施步骤，请参阅图2。

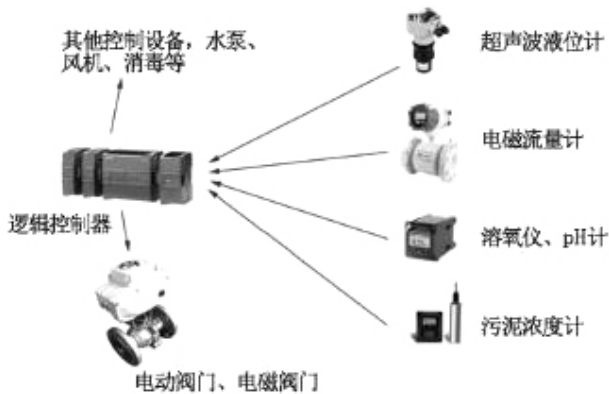


图2 智能化水处理控制系统结构

经过对废水处理设备的改良，我们发现，当面临各

种水质条件时，该设备展示出的是一条平稳的功率增长曲线，如图3所示。

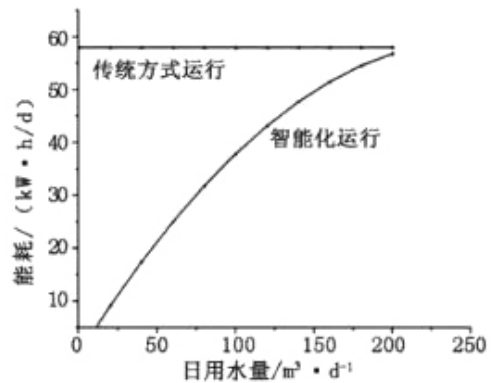


图3 智能化水处理和传统水处理能耗变化图

水源站的用水量呈现一种周期性循环变化的趋势，具体而言，即在周末时段，由于人流量的显著增加，用水量也相应达到高峰；随后，自周一开始，随着人流量的逐渐减少，用水量也呈现下降趋势；直至周五，当人流量降至最低点时，用水量也相应触及谷底；然而，紧接着周末的来临，用水量将再次攀升至新的高峰。以高速公路水源站为例，这一周期性变化规律可通过图形曲线的直观展示得以清晰体现（需特别说明，此处所描述的变化趋势排除了节假日等可能对用水量产生特殊影响的特殊情况），具体请参见图4。

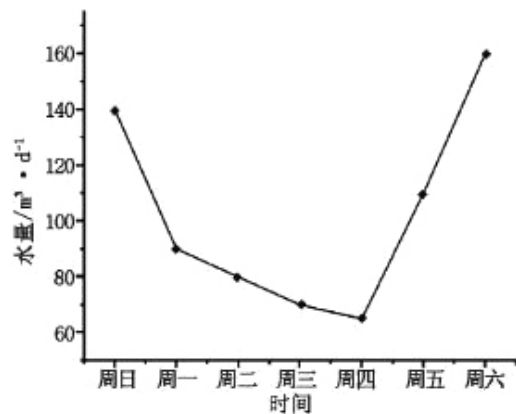


图4 以每周为周期的用水量变化

经过研究设备的能源消耗曲线与人口流动曲线的比较，相较于非智能化的系统操作方法，智能化的系统可以最多减少40%的能源消费。

#### 2.2 效益——中水循环利用

在水处理系统领域，中水循环利用的重要性显而易见，其作为项目投入与回报的直接体现，通过转化中水使用量为经济效益，实现了设备投资的回收。相较于仅满足排放标准的传统设备建设，中水循环利用设备需承担较高的初期投入。此策略的主要投入分为两个层面：

膜设备的投资及后续的维护与运营费用。

a) 膜设备投资现状：当前，膜设备在中水再利用策略中占据核心地位，其优势在于减少三级处理步骤、降低土地需求及减轻维护负担。通过采用中空纤维膜替代传统二沉池及沉淀装置，虽池体构建成本相近，但膜及其附属管道、设备的费用显著增加。以高速公路站220m<sup>3</sup>/d的设计水量为例，该部分投资预计增加32万元。

b) 后期维护运行费用概览：此费用涵盖MBR设备的物理及非物理清洁、消毒装置添加剂等。其中，MBR系统需按季度进行深度清洁，每日进行实体添加剂反洗，并添加次氯酸钠处理生成水。综合考虑人力成本与能源消耗，基于日平衡供水量110m<sup>3</sup>/d，计算得出每吨生产成本为2.41元，具体包括0.33元/t的离线清洁费、0.86元/t的在线清洁与消毒费、0.74元/t的能源使用费及0.48元/t的人力成本。随着生产水量的增加，上述成本有望降低。

为评估初期投入与中水再利用收益之间的动态关系，我们采用净现值（NPV）作为衡量标准。通过基本收益率（ $i_c$ ）将项目全生命周期内的净现金流折算至初始基准年的现值总和，NPV作为项目动态性能的关键指标，其计算公式如下：

$$NPV = \sum_{t=1}^n (C_t - C_o)(1 + i_c)^{-t}$$

在公式表达中，NPV代表净现值； $C_t$ 象征现金流入量； $C_o$ 则代表现金流出量；而 $(C_t - C_o)$ 特指第 $t$ 年度内的净现金流量，即该年度水循环利用方案效益与费用之间的差额； $n$ 为方案设定的计算年限； $i_c$ 则设定为基准投资收益率。

针对当前情境，我们选取当前膜材料的平均使用寿命作为整个计算周期的基准；同时，设定基础投资回报率为8%；并以80%的中水循环利用率作为计算基准。基于2018年山西省水费标准，我们估算每年节省的资源价值，等同于节省的中水用量所对应的水费，其中运营服务行业水费为4元/吨，水处理费为1元/吨，合计为5元/吨。现金流的评估则基于中水生成所节省的水费与相应水费的比较。

通常情况下，设备设计使用寿命为5年，但超出此期限后，仅需更换膜片即可恢复设备正常运作。基于220m<sup>3</sup>/d的设计规模，膜片更换成本为22.3万元。因此，在10年的运营周期内，设备总投入为初始投资32万元加上膜片更换费用22.3万元，共计54.3万元。我们有理由预期，在项目完成并通过验收后，首次膜设备更换成本即可通过项目盈利覆盖<sup>[6]</sup>。

### 2.3 策略——谷电重点使用策略

通常，传统的水处理设备采用自动化操作方式，其工作效率主要依据水量的波动进行调节。鉴于工厂供水量自中午起逐渐攀升，直至夜间交通流量减少后方才回落，污水处理设备的运行周期亦随之从中午启动，直至夜间废水处理完毕方告结束。然而，从电力使用的经济性角度考量，此操作模式的经济效益并不显著。若能有效利用谷时（即晚上11点至次日7点）电力资源，则有望在一定程度上降低电力消耗。

为实现谷电优化，调整池的调整成为关键步骤之一。然而，传统调整池存在两大潜在缺陷，严重制约了该战略目标的实现。其一，调整池容积有限，难以有效储存与管理水流；其二，采用浮球进行水位控制，其精度无法根据系统性能与负载需求进行精确调节，导致液面高度控制不够精准。

针对调控池体积问题，高速公路站设计中已配备有效体积为150m<sup>3</sup>的调整池，该体积基本能够满足最大用水量的需求。此外，AO+MBR技术的实际产水量取决于MBR系统的生产能力，即MBR系统的运行效率等同于整个污水处理系统的运行效率。目前，该系统的预期处理能力已提升至220m<sup>3</sup>/d，远超日均用水量的25%，甚至达到日均用水量的70%，因此具备充足的调节空间。

为解决液位管理难题，我们选用超声波液位计进行水位监测，其精度高达0.01m。同时，PLC系统负责收集液位数据，并根据每日实际用水量情况自动调节设备启动水位。此举旨在最大化利用谷时电力供应时间，同时确保系统运行的冗余性。经估算，每日约需73m<sup>3</sup>的水量即可满足谷电策略需求。以日均用水量110m<sup>3</sup>为基数，谷电单价为0.35元/度，而峰电平均单价为0.7元/度。通过此策略，我们预计每年可进一步降低30%的电力消耗，相当于节省电费约9000元。

### 3 结语

本篇论文针对高速公路场站的水循环系统进行深入研究，通过优化控制、评估效益、制定策略等三个核心维度的综合改良与深入探讨，成功解决了中水循环利用过程中面临的能源消耗过高、水价偏贵以及回收周期延长等关键问题。优化后的水处理系统融入了智能操作管理模式，并实施了以谷电为主要应用的节能策略，与传统的污水处理系统相比，其电力消耗实现了超过50%的显著改善。在净现值评估的基础上，我们充分考量了膜设备的使用寿命与更替周期，进而精确推算出设备投资的回报周期及预期盈利状况。这些详尽的分析与结论，为构建和完善高速公路站点内全面的水循环使用体系提供了坚实的数据支持与科学的规划指导，具有重要的实践

意义与参考价值。

#### 参考文献

[1]谢丽娟,徐苹.新型高效缓蚀阻垢剂在海绵钛厂水循环系统中的应用研究[J].四川冶金,2019,41(1):4.

[2]夏军,张永勇,余敦先,etal.城市水系统理论及其模型研制与应用[J].中国科学:地球科学,2024(003):054.

[3]张立伟,王孟,王彩峰,等.一种房屋建筑施工场地废水和雨水循环利用装置.CN202211354135.9[2024-08-13].

[4]夏蔓宏,董少刚,张涛,等.半干旱区域高速公路绿化带建设对地下水循环的影响:以京藏高速公路呼包段为例

[J].现代地质,2019,33(2):10.

[5]马建业,张扬,刘哲.高速公路建设对纸坊沟流域地下水补给的影响[J].西部大开发:土地开发工程研究,2019(1):6.DOI:CNKI:SUN:XBTG.0.2019-01-013.

[6]王阳,程琼,龚群星,等.水循环利用系统在施工现场的应用[C]//《施工技术(中英文)》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司.2022年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(上册).中国建筑第五工程局有限公司;河南省第二建设集团有限公司,2022:3.