

大型产业园雨水回用系统的工艺优化与运行效能

郑伟斌

上海建工一建集团有限公司 上海 200437

摘要: 本文针对当前大型产业园雨水回用系统普遍存在的“设计运行脱节、综合效能低下”的工程实际问题,开展全链条优化研究。通过构建动态水量平衡模型,优化关键设施规模;提出“混凝强化+自适应过滤+复合消毒”的模块化工艺链,提升出水水质稳定性。研究结果表明,经优化后的系统雨水收集率达86.5%,自来水替代率达76.5%,出水浊度稳定优于国标,并实现了可量化的经济与环境效益。

关键词: 雨水回用, 产业园, 运行效能, 工艺优化

引言: 近年来, 国家层面相继推出“海绵城市”建设与“双碳”目标战略, 为建筑给排水行业带来了革命性的导向^[1]。大型产业园区具有汇水面积大、绿化及杂用水需求稳定、管理相对集中等特点, 是实施规模化雨水回用的理想场景。然而, 在笔者参与的多项实践中发现, 许多已建系统普遍存在“重建轻管、效能低下”的问题。具体表现为: 系统设计粗放, 与实际水文条件及用水需求脱节; 工艺选择不当, 运行稳定性差; 缺乏智能监控与专业维护, 导致运行成本高企甚至系统闲置。因此, 本研究立足于工程实践一线, 旨在通过对典型产业园雨水回用系统的深度剖析与优化实践, 探索一套从精准设计、高效建造到智慧运维的全过程效能提升策略, 对推动雨水回用技术从“有形覆盖”到“有效运行”的转型升级, 具有重要的现实意义与工程价值。

1 产业园雨水回用系统全流程剖析与关键问题诊断

本章旨在建立系统性分析框架, 基于工程实践, 精准识别当前雨水回用系统从设计到运维全链条中的共性痛点, 为后续优化提供明确靶向。

1.1 系统全流程解构与效能制约框架

一个完整的产业园雨水回用系统是一个动态的水量-水质耦合系统。其效能制约存在于“源头收集-过程处理-末端回用-运维管理”四个环节。

1.2 源头收集环节: 汇流效率与初雨污染问题

1.2.1 汇水区规划不合理: 在许多早期项目中, 汇水区划分往往仅依据总图雨水管网, 未充分考虑屋面(水质较好)、路面(污染较重)、绿地(渗透损失)等不同下垫面的水质差异, 导致后续处理难度和成本增加。

1.2.2 初期弃流装置形同虚设: 初期雨水携带了大部分污染物, 但固定容积或时间控制的弃流装置常因调试不当或维护缺失而失效。调研发现, 超过60%的项目弃流装置未根据降雨特征进行校准, 导致要么弃流不足影响

水质, 要么弃流过度浪费水资源。

1.3 过程处理环节: 工艺适配性与运行稳定性问题

1.3.1 工艺选择与进水水质不匹配。许多设计直接套用标准图集, 采用简单的“沉淀+砂滤+氯消毒”工艺, 对含有较高溶解性有机物或油污的园区路面径流处理效果有限。杭州菜鸟产业园项目运行初期, 砂滤罐快速板结、反冲洗频繁, 正是由于对物流园区路面径流中油脂类污染物估计不足。

1.3.2 处理单元容量与降雨冲击负荷不匹配: 处理设施设计规模多基于平均日处理量, 但降雨是间歇性的, 在高峰流量冲击下, 水力停留时间不足, 导致处理效果骤降。调查反馈, 约40%的系统在强降雨后1-2天内出水水质不达标。

1.3.3 自动化程度低, 依赖人工干预: 多数系统缺乏基于水质、水量的智能控制, 反冲洗、加药等操作依赖人工经验, 运行稳定性差。

1.4 末端回用环节: 供需失衡与管网二次污染风险

1.4.1 用水需求测算不准, 清水池“晒太阳”或溢流: 设计时对绿化灌溉、道路冲洗等回用水量的估算过于理想化, 未考虑季节性变化和管理实际。部分项目清水池长期满水位, 被迫溢流, 而旱季又因储水不足无法连续供水, 系统利用率低。

1.4.2 回用水管网独立性与水质保障风险: 部分项目为节省成本, 回用水管网未保持完全独立, 存在与市政供水管网误接的风险。同时, 管网中余氯衰减导致的微生物滋生问题也常被忽视。

1.5 运维管理环节: 标准缺失与长效性不足

1.5.1 “重建轻管”现象普遍: 项目移交后, 业主方缺乏专业运维团队, 现有物业人员不具备系统维护技能, 导致设备损坏、药剂投加不及时。

1.5.2 缺乏关键运行数据监测与记录: 绝大多数系统

未安装在线水质水量监测仪表,或数据未记录分无法进行效能评估和故障预警,系统长期在“盲运行”状态。

2 基于动态水量平衡的系统规模优化方法

本章针对第二章识别的“供需失衡”问题,提出从静态估算向动态模拟优化的设计方法转型,并以具体案例演示,为核心参数的确定提供科学工具。

2.1 传统静态水量平衡计算方法的局限性传统设计主要依据《建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范》,采用经验系数和平均数据进行估算。这种方法无法反映降雨事件的随机性、间歇性与用水需求的动态变化,是导致储水池容积和处理规模不合理的主要原因。

2.2 日尺度动态水量平衡模型的构建

为解决上述问题,本研究构建基于日尺度的动态水量平衡模型,其核心方程如下:

$$V_t = V_{t-1} + R_t * A * \Phi - U_t - E_t - O_t$$

其中:

V_t, V_{t-1} : 分别为第t日和第t-1日蓄水池的需水量 (m^3)

R_t : 第t日的降雨量 (m)

A : 综合集雨面积 (m^2)

Φ : 综合径流系数

U_t : 第t日的回用水量 (m^3),由灌溉、冲洗等用水规律决定

E_t : 第t日的水面蒸发损失量 (m^3)

O_t : 第t日的溢流量 (m^3 ,当 $V_t > V_{max}$ 时发生)

2.3 案例模拟与优化分析:以杭州菜鸟产业园为例

2.3.1 基础参数输入:收集项目地过去20年的逐日降雨数据、园区内屋面、道路、绿地的面积及径流系数。回用水需求依据园区绿化面积、气象数据计算的蒸发蒸腾量(ETO)及道路冲洗计划进行逐日分配。

2.3.2 多情景模拟与效能评估:设定不同的储水池容积(V_{max} ,如 $500m^3, 800m^3, 1000m^3$)和处理规模(日处理能力,如 $50m^3/d, 100m^3/d$)组合,进行长时间序列模拟。评估指标包括:雨水利用率、溢流率、系统缺水率。

2.3.3 技术经济优化与决策:模拟结果(表3-1)显示,容积过大虽能提高利用率,但投资和蒸发损失增加;处理规模过大则设备闲置率高。通过引入单位雨水收集成本进行边际分析,可以为项目确定“经济最优规模点”。本例模拟表明,原设计 $1000m^3$ 容积利用率仅比 $800m^3$ 方案提高5%,但成本增加30%, $800m^3$ 容积配 $100m^3/d$ 处理规模为更优解。

2.4 优化设计导则

基于模拟分析,提出针对产业园区的优化设计导则:

1) 必须进行基于长序列降雨数据的动态模拟; 2) 储水

池容积应优先满足旱季调蓄需求,而非无限追求单场降雨收集率; 3) 处理规模应与用水负荷匹配,并可考虑“基流连续处理+峰流旁路暂存”的运行模式。

3 核心处理工艺链的适应性优化与比选研究

本章旨在建立“水质特征-处理目标-工艺选择”的匹配逻辑,解决第二章提出的工艺适配性问题。

3.1 产业园雨水水质特征谱分析

综合分析本项目调研及文献数据,产业园雨水水质具有以下特征: 1) 悬浮物(SS)浓度高,特别是路面径流; 2) COD以溶解性成分占比升高,源于汽车尾气、油脂等; 3) 可能含有重金属(如Zn、Cu)及氮磷营养物^[2]。传统以去除SS为核心的工艺对溶解性污染物去除有限。

3.2 模块化工艺链设计与比选提出“预处理模块+核心处理模块+消毒保障模块”的灵活组合思路,以适应不同园区特点和回用用途(绿化、景观、冲洗)。

3.3 智能运行控制策略

为应对冲击负荷并节能降耗,提出以下控制策略: 1) 基于浊度在线监测的过滤与反冲洗控制,变定时反冲洗为按需反冲洗; 2) 基于降雨预报和池位的前馈控制,在降雨前降低清水池水位,预留调蓄空间; 3) 处理系统的变频与间歇运行,在非降雨期低功耗维持。

4 工程案例实证与全生命周期效能评估

本章以优化后的方案视角,对一个典型项目进行复盘式深度分析,全面展示优化措施的应用效果与综合价值。

4.1 案例概况:苏州某高新绿色产业园雨水回用系统项目背景:项目位于苏州高新区,项目占地面积约15万平方米。

初期设计工艺为建筑屋面及地面雨水排水在基地内汇总后收集,经过弃流,沉淀,过滤,消毒提升,供地块内绿化浇灌、道路浇洒及车库地面冲洗。核心问题:运行初期暴露出过滤系统易堵塞、雨季处理能力不足、出水水质波动大、运维成本高等问题。

优化改造措施

1. 工艺升级:在沉砂池后增加“混凝加药装置”,将核心过滤工艺升级为“自动反冲洗滤布滤池”,消毒方式改为“紫外线+次氯酸钠精确投加”^[3]。

2. 容量优化:根据动态模拟分析,将储水池有效容积调整为 $800m^3$,并增设峰流旁通管,超设计雨量时直接进入生态滞留设施,减轻系统负荷。

3. 智慧控制:加装在线浊度仪、流量计和余氯分析仪,实现混凝剂投加量与反冲洗频率的自动联动控制。

4.2.2 水量效能分析:收集、利用与替代率基于2022-2023水文年实测数据,系统水量平衡分析如下:

(1) 月度水量平衡分析

关键指标计算:

雨水收集率 = 年收集量 / (年降雨量 × 综合集雨面积 × 径流系数) = 10,879 / (1.2365 × 65,000 × 0.85) ≈ 86.5%

雨水处理利用率 = 年回用量 / 年收集量 = 9,894 / 10,879 ≈ 90.9%

自来水替代率 = 年替代自来水量 / 年总杂用水需求 = 8,571 / (绿化灌溉 + 道路冲洗年总需求约 11,200 m³) ≈ 76.5%

(2) 核心结论: 系统实现了对降雨资源的高效捕获与利用。在非冬季月份, 自来水替代率超过90%, 即使在旱季(10-11月), 800m³的优化容积也保障了连续供水。冬季(12-2月)绿化休眠期间, 系统收集的雨水储存以备春季使用, 实现了季节性调蓄。

4.2.3 水质保障分析: 全流程处理效能与稳定性

对2023年5-10月(运行季)每周的定点水质监测数据进行分析, 关键指标变化如下:

各工艺单元处理效果统计

水质指标	原水(范围)	混凝沉淀后(去除率)	滤布过滤后(总去除率)	出水标准(GB/T 18920)	达标率
悬浮物(SS)	80-320mg/L	15-50mg/L(80%±5%)	≤ 5mg/L(98%±1%)		
化学需氧量(COD)	35-120mg/L	20-60 mg/L(45%±8%)	8-20mg/L(85%±5%)		
浊度(NTU)	40-150NTU	10-30NTU	≤ 3NTU	≤ 5NTU	100%
余氯(mg/L)	0mg/L	0mg/L	0.3-0.6mg/L	管网末端 ≥ 0.2mg/L	100%

(2) 核心结论: 升级后的“混凝+滤布过滤”工艺对SS和浊度去除效果极佳且稳定, 出水浊度始终低于3NTU, 远优于国标。对溶解性COD的去除效率因混凝环节而大幅提升, 保障了出水水质的全面达标。智能加氯系统确保了管网末端的持续消毒能力。

4.2.4 评估总结

通过以上详实的数据分析, 苏州某高新绿色产业园雨水回用系统经优化后, 成功实现了“高效、稳定、智能”的运行目标。水量上, 平衡了收集与需求; 水质上, 实现了稳定达标; 整体上, 展现了良好的环境效益和可行的长期经济性。此案例充分证明了基于动态模拟和工艺适配的优化方法是提升雨水回用系统效能的关键, 为同类产业园区的设计与改造提供了可量化的实践范本。

结语

雨水回用是实现城市可持续发展不可或缺的一环。本

研究证实, 通过精细化的设计、适配性的工艺和系统性的管理, 完全可以让产业园雨水回用系统真正成为一座“运行高效、经济合理、环境友好”的绿色基础设施。作为一名长期奋战在项目一线的给水排水工程师, 笔者期望本研究不仅是一篇论文, 更能成为推动行业实践进步的一份切实参考, 让我们共同为建造更绿色的城市未来贡献专业力量。

参考文献

[1]赵泰翔.室外雨水回收系统设计与海绵城市建设研究[J].佛山陶瓷, 2025,35(1):83-85.
 [2]范建洪.厦大访客中心防洪防涝及雨水回收利用系统分析[J].山西建筑, 2024,50(24):115-118.
 [3]陈雪.绿色建筑雨水回收再利用设计与施工技术研究[J].中国建筑金属结构,2025,(20):10-12.