

绿色公共建筑雨水回收利用系统设计与工程应用分析

刘清华

中国葛洲坝集团机械船舶有限公司 湖北 宜昌 443007

摘要:为践行绿色建筑节水减排理念,本文依托相关国家规范,阐述绿色公共建筑雨水回收系统的核心理论、设计原则与技术原理,搭建“收集-净化-存储-回用”一体化系统架构。结合华东地区实际工程案例,测算系统运行成效,剖析设计、施工及运维阶段现存问题,针对性提出智能调控、标准化施工、常态化管护等优化策略,有效提升雨水资源化利用率,助力绿色建筑低碳发展与城市雨洪管控。

关键词:绿色公共建筑;雨水回收利用;系统设计;工程应用

引言:双碳背景下,绿色建筑成为城乡建设发展主流,水资源短缺与城市内涝问题凸显,雨水资源化利用成为公共建筑节能的关键路径。当前雨水回收系统存在适配性不足、运维不完善等问题,难以充分发挥节水减排效能。基于绿色建筑评价标准与行业技术规范,本文系统探究雨水回收系统的全套设计方案,结合工程实践复盘应用效果,挖掘现存短板并优化升级,为同类绿色公共建筑雨水工程提供参考。

1 绿色公共建筑雨水回收利用系统核心理论与设计依据

1.1 相关核心概念界定

(1) 绿色公共建筑:依据《绿色建筑评价标准》,指在全寿命期内节约资源、保护环境、减少污染,为人们提供健康适用高效使用空间的公共建筑。其节水节能核心要求包括非传统水源利用率不低于20%、管网漏损率控制在5%以内,并适配办公、商业、教育等人员密集场景的用水特征。(2) 雨水回收利用系统:由屋面及地面雨水收集管网、初期弃流装置、过滤沉淀净水单元、调蓄存储设施及供水回用管网五部分构成。其工作原理为:汇水面径流雨水经拦截杂物后进入弃流装置,再经物化处理达标后存入清水池,通过变频泵组供给冲厕、绿化等用水末端,形成“收集—处理—存储—回用”闭环流程^[1]。(3) 雨水资源化利用:技术逻辑在于将降雨径流转化为替代城市自来水的非传统水源,其绿色低碳核心价值体现在两方面:一是削减雨洪排放量,降低城市内涝风险;二是减少自来水取水过程中的能源消耗与碳排放,每利用1万立方米雨水约可减少碳排放量3.2吨。

1.2 系统设计基本原则与规范依据

(1) 设计基本原则:遵循节水高效(最大化雨水替代率)、安全稳定(保障供水水质与水量连续)、经济适用(全生命周期成本最优)、绿色环保(避免二次污染)、适配建筑整体布局(与景观、结构协调统一)五项原则。(2) 国家及行业规范依据:主要依据《建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范》(GB50400)、《绿色建筑评价标准》(GB/T50378)及《城镇雨水调蓄工程技术规范》(GB51174),明确系统设计参数选取方法、水质处理目标及验收标准。(3) 地域适配设计依据:须结合项目所在地年均降雨量确定收集规模,依据初期雨水水质COD浓度调整弃流量,根据气候特征选择防冻、防蒸发措施,并考量市政排水管网负荷能力确定溢流排放衔接方案。

1.3 雨水回收利用核心技术原理

(1) 雨水收集技术原理:硬质屋面依靠重力流和坡度导引径流,初期冲刷效应明显,径流系数达0.85~0.95;透水铺装通过空隙渗透降低径流峰值,利用基层蓄水层延长汇水时间,径流系数约0.29~0.45,二者协同可有效调控雨水径流总量与峰值流量。(2) 雨水净化处理原理:初期弃流利用前2~5mm降雨冲洗屋面污染物后自动切换收集;多级净化采用重力沉淀去除悬浮物、过滤拦截细微颗粒、紫外/氯消毒灭活微生物,通过调节沉淀池表面负荷率与滤速保障出水达到《城市污水再生利用城市杂用水水质》标准。(3) 雨水存储与回用原理:调蓄储水设备依据“削峰填谷”运行逻辑,非降雨期稳压供水、降雨期优先蓄满,通过液位联动控制水泵启停。雨水回用适配冲厕、绿化灌溉、景观补水及道路冲洗等杂用水场景,以公共建筑日均用水量为准确

定清水池有效容积。

2 绿色公共建筑雨水回收利用系统整体设计

2.1 系统总体架构与参数计算

(1) 系统整体架构: 采用“收集—净化—存储—回用”全流程一体化设计架构, 由屋面及地面雨水收集子系统、多级物化净水子系统、调蓄存储子系统及变频供水回用子系统组成。各子系统通过智能控制中心实现联动, 以“优先利用雨水、自来水补充”为运行策略, 确保系统安全稳定高效运行^[2]。(2) 核心参数测算: 设计降雨量依据当地暴雨强度公式及 2~5 年重现期确定, 汇水面积 F 按屋面水平投影面积与硬化地面面积叠加取值, 综合径流系数 Ψ 按各类汇水面加权平均 (屋面 0.85~0.90、路面 0.80~0.85、绿地 0.15~0.30)。可收集雨水量 $W = \Psi \times F \times H \times \alpha$ (α 取 0.85), 据此确定系统设计规模及储水容积。按年均降雨量核算, 雨水收集替代率应达到 30%~50%。(3) 用水需求匹配计算: 公共建筑非饮用水用水主要包括绿化浇洒、道路冲洗及冲厕用水三部分。绿化用水按浇洒面积与浇洒定额 ($2 \sim 3 \text{ L/m}^2 \cdot \text{d}$) 核算, 道路冲洗按冲洗面积与定额 ($1 \sim 2 \text{ L/m}^2 \cdot \text{d}$) 核算, 冲厕用水按使用人数与冲水定额 (办公楼每人每日约 25~30L) 计算。将各项用水量叠加得出日均用水需求总量, 以此作为清水池容积和供水泵组选型的设计基准。需求不足时以自来水补充, 确保供水连续性。

2.2 系统各模块专项设计

(1) 雨水收集模块设计: 汇水面优化采用屋面优先、地面辅助策略, 雨水斗沿屋面天沟均匀布置, 收集管道坡度不小于 0.003, 管材选用耐腐蚀的 UPVC 给水管。初期弃流装置选用流量控制型弃流井, 弃流量按 2~5mm 初期降雨厚度确定, 通过浮球阀与电动蝶阀联控实现降雨初期自动弃流、降雨中后期自动切换收集。(2) 雨水净化模块设计: 分级净化工艺选用“格栅拦截—沉砂—过滤—消毒”四级流程。格栅间隙 5mm 拦截粗大杂物; 沉砂池表面负荷率取 $1.2 \sim 1.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 去除可沉悬浮物; 过滤设备采用石英砂过滤器, 滤速 8~12m/h, 反冲洗周期 24h; 消毒采用紫外线消毒器 (剂量不低于 40 mJ/cm^2) 配合在线余氯监测, 确保出水水质符合《城市污水再生利用城市杂用水水质》(GB/T18920) 标准^[3]。(3) 雨水存储模块设计: 储水池采用现浇钢筋混凝土结构, 有效容积按日均用水量的 3~5 倍确定, 池内设置导流隔墙防止死水区。模块化储水设备选用 PP 蓄水模块, 外包防渗土工膜, 抗压强度不低于 400 kN/m^2 。池顶覆土厚度不小于 0.8m, 设置检修人孔、通气孔及溢流管, 防渗等级 P6, 池周设防护栏

杆及安全警示标识。(4) 回用输送模块设计: 回用管网采用枝状布置, 支管管径按设计秒流量计算确定。增压设备选用变频恒压供水泵组 (一用一备), 工作扬程满足最高用户用水压力要求, 回用管网与市政给水管网之间须设置倒流防止器。分质供水控制系统通过电动阀自动切换雨水和自来水补水, 优先使用雨水, 水池低液位时自动补入自来水, 各用水支管设置水表独立计量。

2.3 系统配套优化设计

(1) 防污染与安全设计: 在收集管入口设置格栅拦截装置, 沉砂池前端增设初沉隔油措施。清水池内设置在线浊度仪、pH 计及余氯传感器, 实时监测出水水质。储水池溢流管设防虫网罩, 检修孔采用密闭双层盖板, 管道低点设泄水阀, 防止积水腐败产生二次污染。(2) 节能降噪设计: 水泵选用高效节能型电机 (能效等级不低于二级), 管网管径放大一级以降低沿程阻力, 弯头及三通处采用顺水配件减少局部阻力。水泵基础设置橡胶减振垫, 进出水管安装软接头, 管道穿墙处采用柔性填料密封, 产噪设备集中布置于设备间内并设隔声罩^[4]。(3) 智能管控设计: 配置 PLC 自动控制系统, 集成液位、流量、水质多参数在线监测, 根据水池液位自动控制弃流阀切换、水泵启停及反冲洗周期。水量水质数据通过 4G 模块远传至中控管理平台, 实现远程监控与故障报警。系统设置异常工况自动保护功能, 故障时自动切换至自来水供应并发送告警信息, 确保供水安全可靠。

3 工程应用案例分析与优化策略

3.1 工程案例概况

(1) 项目基本信息: 某绿色公共建筑项目位于我国华东地区, 总建筑面积约 4.8 万 m^2 , 涵盖办公主楼、会议中心及配套服务设施, 建筑功能以行政办公与公共服务为主。项目所在区域年均降雨量约 1100mm, 汛期集中于 5—9 月, 地下水位较高, 市政排水管网能力有限, 雨季易出现路面积水现象。(2) 项目设计目标: 雨水回收利用系统设计目标为实现年均雨水替代率不低于 35%, 年收集利用雨水量约 1.2 万 m^3 。同时需满足场地年径流总量控制率达到 85% 以上, 对应设计降雨量不低于 32mm/d, 助力项目达到绿色建筑三星级评价标准。(3) 系统建设条件: 建筑场地内屋面汇水面积约 1.6 万 m^2 , 硬化地面约 0.9 万 m^2 , 可用地下空间约 600 m^2 用于布置储水池及设备间。市政给水、排水接口位于场地北侧, 施工期间场地开阔, 具备良好的设备吊装及管道敷设条件。原给排水系统预留了中水管道接口, 便于雨水回用系统接驳。

3.2 系统工程施工与运行效果分析

(1) 关键施工工艺: 施工流程依次为“储水池基坑开挖与结构浇筑—收集管道敷设—净化设备安装—回用管网连接—控制系统调试”。重难点在于储水池抗浮设计与防水施工, 采用抗浮锚杆配合 P8 级防水混凝土浇筑, 施工缝处设置止水钢板。质量控制措施包括管道闭水试验压力达到工作压力的 1.5 倍、设备安装水平度偏差控制在 0.1% 以内。(2) 运行效果监测: 系统投入运行后连续监测 12 个月, 年均实际收集雨水量约 1.15 万 m^3 , 达到设计值的 95.8%。净化出水水质各项指标达标率为 98.3%, 其中浊度平均值为 2.1NTU、余氯稳定在 0.3~0.5mg/L。实际节水效率核算显示, 年均替代自来水约 1.08 万 m^3 , 雨水替代率为 32.6%。(3) 综合效益分析: 经济效益方面, 年节省自来水费及排污费合计约 5.8 万元, 静态投资回收期约 9.2 年; 环境效益方面, 年削减雨水外排量约 1.0 万 m^3 , 减少 COD 排放约 0.38t; 社会效益方面, 项目作为本地绿色建筑示范工程, 累计接待行业参观交流 500 余人次, 发挥了良好的宣传推广作用。

3.3 工程应用现存问题分析

(1) 设计层面问题: 初期弃流量按固定 3mm 设定, 未能根据实际降雨间隔动态调整, 导致小雨天收集率偏低; 储水池容积按日均用水量 4 倍设计, 但实际连续降雨期储水溢出频次较高, 容积匹配合理性不足; 控制系统仅具备本地自动控制功能, 缺乏远程运维管理平台。(2) 施工层面问题: 部分收集支管坡度未严格达到设计要求, 局部管段存在倒坡现象, 影响雨水自流速; 设备间内管道连接处柔性接头安装角度偏差, 导致运行期振动传递至建筑结构; 储水池侧壁防水层在穿墙套管处收口处理粗糙, 存在渗漏隐患。(3) 运维层面问题: 日常管护机制尚未建立制度化标准, 过滤器反冲洗周期仅凭经验判断, 导致滤料板结加速; 加药设备投加系统维护不及时, 消毒剂投加精度下降; 缺乏专业化运维团队, 日常巡检记录不完整, 故障响应时效较长。

3.4 系统优化与改进策略

(1) 设计优化策略: 引入降雨间隔智能识别算法, 根据雨前干燥天数动态调整弃流量 (2~8mm 区间可调); 结合当地降雨频率分布优化储水容积, 将容积倍数由 4 倍调整为 3 倍并增加应急补水响应速度; 升级 PLC 控制系统, 增加云平台远程运维接口。(2) 施工优化策略: 编制专项施工方案, 对收集管道坡度采用激光测坡仪逐段复核, 确保坡度 ≥ 0.003 ; 设备安装采用三维激光对中技术, 柔性接头安装角度偏差控制在 $\pm 2^\circ$ 以内; 防水层穿墙套管处采用双重密封构造并做 24h 蓄水试验验证^[5]。(3) 运维优化策略: 建立“日巡检、周保养、月检修”三级常态化运维机制, 制定过滤器反冲洗周期标准 (根据进出水压差 $\Delta P \geq 0.05\text{MPa}$ 触发反洗), 编制设备养护操作手册并配备专职运维人员, 定期委托第三方检测机构对出水水质进行全指标复核, 确保系统长期稳定高效运行。

结束语

本文完成了绿色公共建筑雨水回收利用系统的完整设计与工程应用分析, 明确了系统核心技术与设计要点, 验证了其节水、减涝、降碳的综合价值。通过梳理工程应用中的各类问题, 形成了全流程优化改进方案。研究表明, 精细化、智能化、规范化的雨水回收系统, 可有效提升非传统水源利用率, 契合绿色建筑发展需求, 具备良好的工程推广与实践应用前景。

参考文献

- [1] 陈志强, 王晓东. 基于 BIM 的雨水回收系统全生命周期管理研究 [J]. 建筑科学, 2022, 38(02): 78-84.
- [2] 苏逸凡. 绿色建筑雨水收集与中水回用一体化技术研究 [J]. 建筑科学, 2024, 40(03): 123-128.
- [3] 王健, 李萌. 海绵城市视角下公共建筑雨水回收系统优化设计与应用 [J]. 给水排水, 2023, 49(07): 98-103.
- [4] 翁振. 建筑雨水收集与利用系统在给排水中的应用 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, 11(35): 55-57.
- [5] 祁文荟. 海绵城市建设中建筑雨水回收系统设计难点与优化对策 [J]. 中国住宅设施, 2024, 9(12): 67-69.