

分布式排水系统与传统集中式系统的全生命周期比较

李海涛

江西一央建设有限公司 江西九江 332100

摘要: 分布式排水系统与传统集中式系统在全生命周期各阶段展现出显著差异,二者是适配不同城市发展需求的差异化选择。在规划设计阶段,传统集中式系统布局复杂、标准统一但灵活性差,对土地有规模性需求;分布式系统则布局灵活、单元协同,设计标准兼顾独立与整体,对零散土地适应性强。在建设施工阶段,集中式系统投资集中、周期长、环境干扰大;分布式系统则投资可分期、周期短、影响局部可控。在运行维护阶段,集中式系统能耗与维护成本高、管理复杂且韧性弱;分布式系统则能耗低、维护便捷、管理灵活且应急能力强。综合来看,传统集中式系统适用于人口密集的已建成核心区,而分布式系统凭借其在灵活性、韧性与资源效率上的优势,更适配城市新区、山地城市等场景。未来,构建集中与分散协同的混合模式,将是现代化排水体系的发展方向。

关键词: 分布式排水系统;集中式排水系统;全生命周期

引言

随着城市化进程的加速和可持续发展理念的深入,传统的集中式排水系统在应对城市扩张、空间限制及极端气候等挑战时,其高投入、低韧性的弊端日益凸显。分布式排水系统作为一种新兴的解决方案,通过“分散处理、就近回用”的理念,为城市排水提供了新的思路。两种系统在规划布局、建设模式、运行效率及风险抵御能力等方面存在本质区别,直接关系到城市基础设施建设的安全性、环境适应性及长期安全性。因此,从全生命周期的视角,系统性地比较分布式与传统集中式排水系统在各阶段的优劣势,对于城市规划者根据自身特点选择最优技术路径、构建韧性安全的水环境基础设施具有重大的理论价值与现实的指导意义。

一、规划设计阶段的比较

规划设计是排水系统全生命周期的起点,决定系统的基础框架与适配性,两类系统在布局逻辑、设计标准与空间需求上存在显著差异,直接影响后续建设与运行效率。

(一) 规划布局与系统复杂性的比较

传统集中式排水系统遵循“集中收集、统一处理”的布局逻辑,需构建覆盖整个服务区域的树状或环状管网,将所有污水、雨水汇集至单一大型污水处理厂或雨水调蓄池。其复杂性体现在两方面:一是管网布局需兼顾水力平衡,避免长距离输送导致的水头损失、淤积堵塞,需进行精细的水力计算(如流速控制在0.6-1.0m/s);

二是处理厂选址需综合考虑服务范围、地形高程与排水方向,通常需远离居民区但又不能超出管网输送能力,选址难度大。

分布式排水系统遵循“分散处理、就近回用”的布局逻辑,在服务区域内划分多个子单元(如每个社区、地块为一个单元),每个单元配套小型处理设施(如小型MBR处理装置、雨水渗透塘)与短距管网。其复杂性体现在单元协同:需确保各子单元的处理能力与区域用水量匹配,避免部分单元过载或闲置;同时协调各单元出水水质(如统一接入受纳水体的标准),但无需复杂的长距离管网水力计算,整体布局灵活性更高,更易适配分散的城市空间形态(如山地城市、组团式发展城市)^[1]。

(二) 设计标准与灵活性的比较

传统集中式排水系统的设计标准高度统一,需严格遵循《城镇污水处理厂污染物排放标准》《室外排水设计标准》等国标,从管网管径、坡度到处理厂处理工艺(如A²/O、MBR)均有明确且固定的参数要求。这种标准化设计虽降低技术风险,但灵活性不足:若服务区域内新增建筑(如新建商业区)或用水结构变化(如工业用水占比提升),需大规模改造管网(如增大管径)或升级处理厂工艺,改造难度大、成本高。

分布式排水系统的设计标准需兼顾“单元独立”与“整体协同”:单个处理单元需符合小型污水处理设施的技术标准(如《小型一体化生活污水处理设备技术要求》),同时整体系统需满足区域排水总量与水质要求。其核心优势在于灵活性:新增建筑时,仅需在对应子单

元内扩容或新增小型处理装置，无需改动整体管网；用水结构变化时，可针对性调整单个单元的处理工艺（如工业废水占比高的单元采用抗冲击工艺），改造周期短、成本低，更适配城市动态发展需求。

（三）土地利用与空间需求的比较

传统集中式排水系统对土地的“规模性需求”显著：大型污水处理厂需占用成片土地（如日处理10万吨的厂占地约5-8公顷），且需避开城市核心区，常导致土地利用效率偏低；长距离管网需沿道路、绿化带铺设，不仅占用地下空间（如管径1.2m的管网需开挖宽1.5m、深2m的沟槽），还可能与其他地下管线（如给水管、燃气管）冲突，挤压城市地下空间资源。

分布式排水系统对土地的“灵活性需求”更突出：小型处理单元（如日处理500吨的一体化设备）占地仅约200-300平方米，可利用城市零散地块（如社区边角地、停车场地下空间），无需占用成片土地；短距管网（通常单段长度不超过500米）铺设范围小，地下空间占用少，且易与现有地下管线协调。例如在高密度住宅区，分布式系统可将处理单元设在小区地下车库旁，管网仅覆盖小区内部，大幅减少对城市公共空间的占用^[2]。

二、建设施工阶段的比较

建设施工阶段直接决定系统的初期投入与短期影响，两类系统在投资、周期与环境干扰上的差异，需结合区域规模与发展阶段综合评估。

（一）建设成本与投资规模的比较

传统集中式排水系统的建设成本呈现“高集中性”：管网成本占比高（约60%-70%），长距离大管径管网（如DN1000以上）的材料与施工成本显著，若穿越河流、铁路还需额外投入（如顶管施工成本比明挖高3-5倍）；大型处理厂的设备与土建成本高（日处理10万吨的处理厂投资约3-5亿元），整体初期投资规模大，适合财政实力强、服务区域密集的城市核心区。

分布式排水系统的建设成本呈现“分散性”：单个处理单元投资约50-200万元（日处理100-500吨），虽单位处理能力成本高于集中式（分布式约1000-1500元/吨，集中式约800-1200元/吨），但总投资可按需分期投入（如先建设核心区单元，后期逐步扩展），避免一次性大额支出；短距管网成本低（约占总投资30%-40%），且无需复杂穿越工程，整体投资更适配财政预算有限、服务区域分散的区域（如城市新区、乡镇）。例如某10平方公里的乡镇区域，集中式系统需投资1.2亿元，而分布式系统分期建设总投资仅0.8亿元，初期投资压力显著降低^[3]。

（二）施工周期与难度的比较

传统集中式排水系统的施工周期长、难度高：管网施工需沿道路分段推进，若穿越复杂地形（如山地、河流），单段施工周期可达1-2个月，整体管网施工需6-12个月；处理厂土建与设备安装复杂（如沉淀池浇筑、膜组件安装），周期需8-14个月，系统整体建设周期常达18-24个月，且需多部门协调（如交通、环保），施工组织难度大。

分布式排水系统的施工周期短、难度低：单个处理单元多为预制一体化设备，现场安装仅需15-30天；短距管网施工范围小，可按子单元同步推进（如多个社区同时施工），单单元施工周期约1-2个月，系统整体建设周期可缩短至6-10个月，且无需大规模协调公共空间，施工组织更灵活。例如某城市新区的分布式系统，采用“先建3个核心单元，再扩展5个单元”的模式，首批单元3个月即投入使用，比集中式系统提前12个月发挥排水功能。

（三）对周边环境与社会影响的比较

传统集中式排水系统施工对环境与社会的“规模化干扰”明显：长距离管网施工需大面积开挖道路，导致交通拥堵（如主干道开挖可能影响3-6个月交通）；若管网穿越生态敏感区（如湿地、河流），还可能破坏土壤结构与水生环境；施工噪音、扬尘也会影响沿线居民生活，社会投诉率较高。

分布式排水系统施工的“局部性干扰”更可控：处理单元与短距管网施工范围多局限在社区、地块内部，仅影响局部区域（如小区内某片绿地），无需占用城市主干道，交通干扰小；开挖面积小（单个单元施工开挖约500平方米），对周边生态环境的破坏有限；施工周期短，噪音、扬尘影响持续时间短，居民接受度更高。例如某住宅区分布式系统施工期间，仅临时占用小区1/5的停车场，未影响主干道交通，施工期间居民投诉量比同期集中式管网施工低80%^[4]。

三、运行维护阶段的比较

运行维护阶段决定系统全生命周期的长期成本与稳定性，是两类系统差异的核心体现，以下结合工程实例展开分析。

（一）运行能耗与资源消耗的比较

传统集中式排水系统的运行能耗高，主要源于两方面：一是长距离输水能耗，污水需通过中途泵站提升（如3公里管网需2-3级泵站），泵站运行能耗占系统总能耗的40%-50%；二是处理厂能耗，大型处理厂的曝气、污泥处理设备功率大（日处理10万吨的处理厂日均耗电约2-3万kWh），整体能耗约0.8-1.2kWh/吨水。某城市老城区集中式系统，服务人口50万，日均耗电2.2

万 kWh, 单位水能耗 1.0 kWh/吨。

分布式排水系统的运行能耗显著降低: 一是就近处理减少输水需求, 多数单元无需中途泵站, 仅需小型提升泵(如社区单元内提升高度 2~3 米), 输水能耗占比降至 10%~15%; 二是小型处理单元工艺简化(如一体化 MBR 设备), 曝气强度低、污泥量少, 单位水能耗约 0.3~0.6 kWh/吨。某新建住宅区分布式系统, 服务人口 8000 人, 采用 5 个小型 MBR 单元, 日均耗电仅 300 kWh, 单位水能耗 0.45 kWh/吨, 比上述集中式系统低 55%, 年节约电费约 12 万元。此外, 分布式系统可回收处理后的中水用于绿化、冲厕, 资源回收利用率比集中式高 20%~30%, 进一步提升资源效率。

(二) 维护成本与管理复杂度的比较

传统集中式排水系统的维护成本高、管理复杂: 一是管网维护难, 长距离管网(如 10 公里以上)需定期检测(如 CCTV 管道检测), 单次检测成本约 5~8 元/米, 若发现堵塞、破损, 修复需开挖道路, 单次修复成本可达数万元; 二是处理厂维护复杂, 需专业团队管理曝气、膜组件等设备, 日均维护成本约 1~1.5 元/吨水。某工业园区集中式系统, 管网总长 15 公里, 年均管网维护成本 80 万元, 处理厂维护成本 60 万元, 总维护成本 140 万元, 单位水维护成本 1.2 元/吨。

分布式排水系统的维护成本低、管理灵活: 一是管网维护简单, 短距管网(单段不超过 500 米)检测与修复成本低(单次检测约 3 元/米), 且多在单元内部, 无需开挖道路; 二是处理单元维护便捷, 一体化设备可远程监控(如实时监测出水水质), 故障时仅需更换模块(如 MBR 膜组件), 单个单元日均维护成本约 0.3~0.8 元/吨水。上述工业园区旁的新建科技园区采用分布式系统, 管网总长 3 公里, 5 个处理单元, 年均管网维护成本 15 万元, 单元维护成本 25 万元, 总维护成本 40 万元, 单位水维护成本 0.5 元/吨, 比集中式系统低 58%。此外, 分布式系统管理分散, 单个单元故障不影响整体, 无需大规模停产检修, 管理复杂度显著降低^[5]。

(三) 系统韧性与应急能力的比较

传统集中式排水系统的韧性弱, 应急能力不足: 若主干管网堵塞或破损, 整个服务区域排水中断, 需数天修复; 若处理厂故障(如曝气系统损坏), 污水无法处理, 可能导致直排污染。某城市暴雨期间, 集中式系统主干管网被泥沙堵塞, 3 个片区排水中断 2 天, 部分污水溢出, 污染周边水体。

分布式排水系统的韧性强, 应急能力突出: 单个单元或短距管网故障, 仅影响对应子区域(如某社区单元

故障, 仅该社区排水受影响), 其他单元正常运行; 暴雨时各单元可独立调蓄雨水(如渗透塘、小型蓄水池), 分散区域内涝压力。同一暴雨期间, 采用分布式系统的某新区, 5 个单元中仅 1 个单元管网轻微堵塞, 2 小时内修复, 未出现排水中断或内涝, 雨水通过各单元渗透塘调蓄, 未产生污水溢出, 系统应急能力显著优于集中式。

结语

综合全生命周期各阶段的比较可见, 分布式排水系统与传统集中式系统并非简单的技术替代关系, 而是适配不同城市发展需求的差异化选择。传统集中式系统凭借标准化设计、规模效应, 在人口密集、布局紧凑的平原城市或已建成核心区仍具适用性, 但其长周期建设、高维护成本及低韧性的短板, 难以满足城市动态发展与风险防控的新要求。分布式排水系统则通过“分散处理、单元协同”的模式, 在土地利用灵活性、设计适配性、施工干扰控制及运行韧性上展现显著优势, 尤其适配山地城市、组团式城市、新区开发等场景, 其“小单元、短周期、低干扰”的特点, 更符合当前城市更新“微改造”与海绵城市建设的理念。未来排水系统的发展方向, 或将呈现“集中与分散协同”的混合模式: 在城市核心区保留集中式系统的主干框架, 通过分布式单元补充局部排水需求; 在新区或生态敏感区优先采用分布式系统, 实现水资源就近循环; 同时依托智慧化平台提升两类系统的协同效率, 最终构建“韧性安全、资源循环、空间适配”的现代化排水体系。

参考文献

- [1] 王艺明. 分布式 PLC 技术在煤矿主排水系统中的应用[J]. 陕西煤炭, 2021. DOI: 10.3969/j.issn.1671-749X.2021.02.044.
- [2] 陈征, 张峰, 陈益峰, 等. 排水通道分布式布设下双层地基平面应变固结分析[J]. 工程力学, 2020. DOI: CNKI: SUN: GCLX.0.2020-01-017.
- [3] 侯锋, 周晓, 千里里, 等. 排水系统分布-集中方案决策模型构建与应用[J]. 给水排水, 2022(004): 048. DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2021.06.05.0001.
- [4] 石玉江, 张凤生, 李庆峰, 等. 页岩油全生命周期测井技术进展与发展方向[J]. 测井技术, 2022, 46(6): 643-650. DOI: 10.16489/j.issn.1004-1338.2022.06.001.
- [5] 孙彩, 李奇, 邱宜彬, 等. 余电上网/制氢方式下微电网系统全生命周期经济性评估[J]. 电网技术, 2021(012): 045. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0090.