

建筑室内排水横支管坡度设计对排水顺畅性的影响研究

吴昊

新疆花城勘测设计研究有限责任公司, 新疆 伊宁 835000

[摘要] 建筑排水系统的功能完整性是保障人居环境健康与建筑运维安全的基础性要素。在城市化进程加速与建筑功能复杂化的双重驱动下, 排水系统设计面临前所未有的技术挑战: 既要应对高峰流量的动态冲击, 又需适应空间集约化带来的管线排布约束。横支管作为连接卫生器具与排水立管的关键过渡段, 其坡度参数的合理性直接影响污水的输送效率、管道自净能力及系统长期稳定性。文章通过整合流体力学理论、材料科学进展与智能监测技术, 致力于构建精细化、动态化的坡度设计方法体系, 为突破传统经验法的局限性提供理论支撑与技术路径。

[关键词] 排水横支管; 坡度设计; 水力特性; CFD 模拟; 淤积风险

DOI: 10.33142/ec.v8i4.16297

中图分类号: TU992

文献标识码: A

Study on the Influence of Slope Design of Indoor Drainage Horizontal Branch on Drainage Smoothness in Buildings

WU Hao

Xinjiang Huacheng Survey, Design and Research Co., Ltd., Yining, Xinjiang, 835000, China

Abstract: The functional integrity of building drainage system is a fundamental element in ensuring the health of living environment and the safety of building operation and maintenance. Driven by the acceleration of urbanization and the complexity of building functions, drainage system design is facing unprecedented technological challenges: it needs to cope with the dynamic impact of peak flow and adapt to the pipeline layout constraints brought about by spatial intensification. As a key transition section connecting sanitary appliances and drainage risers, the rationality of the slope parameters of the horizontal branch pipe directly affects the efficiency of sewage transportation, the self-cleaning capacity of the pipeline, and the long-term stability of the system. The article aims to build a refined and dynamic slope design method system by integrating fluid mechanics theory, advances in materials science, and intelligent monitoring technology, providing theoretical support and technical path for breaking through the limitations of traditional empirical methods.

Keywords: drainage horizontal branch pipe; slope design; hydraulic characteristics; CFD simulation; risk of sedimentation

引言

现代建筑排水系统的设计范式正经历从静态达标向动态优化的转型。随着超高层建筑、医疗综合体等特殊功能建筑的普及, 排水系统负荷呈现显著的空间异质性与时间波动性特征。横支管作为系统中最易发生故障的环节, 其设计需同步解决三组矛盾关系: 重力势能转化效率与层高限制的博弈、瞬时峰值流量承载与日常能耗控制的平衡、材料性能衰减与设计寿命保障的协调。传统设计方法依赖刚性规范参数, 难以适应多元化场景需求, 导致管道堵塞、水封失效等问题频发。近年来, 智能传感器技术与计算流体力学的发展为坡度设计优化提供了新工具, 而新型低摩擦管材的出现则重塑了水力性能提升的物理基础。

1 横支管坡度设计在排水系统中的重要性

横支管坡度设计是建筑排水系统的核心控制参数, 其合理性直接决定污水的输送效率与系统稳定性。坡度本质上是重力势能与流体动能的转化桥梁: 不足的坡度会削弱水流剪切力, 导致悬浮物沉积与管壁生物膜增生, 形成渐进性堵塞风险; 而过度倾斜则可能破坏水封气液平衡, 引发臭气反溢甚至虹吸效应。同层排水系统的普及使横支管

常需穿越结构梁、机电管线密集区, 坡度选择需同步满足水力性能与空间约束^[1]。2023 年南京某超高层项目因管道坡度设计不当, 导致管线交叉冲突引发大规模返工, 暴露出传统经验法的局限性。合理坡度设计不仅能优化管线排布逻辑, 还可减少穿墙套管数量, 维护建筑结构整体性。

2 建筑室内排水系统与横支管坡度设计基础理论

2.1 排水管道流体力学基础

排水管道内的流体运动本质为非满管重力流, 其流动状态受重力、管壁摩擦阻力与流体黏滞力的综合影响。曼宁公式作为描述明渠流量的经典方程, 在排水管道设计中通过引入水力半径参数, 可计算特定坡度下的理论流速; 而达西-魏斯巴赫方程则从能量损失角度揭示了管壁粗糙度对流动阻力的作用机制。两种理论的结合应用, 能够有效预测不同工况下的管道水力性能。

2.2 横支管水力特性与设计原理

横支管的水力设计需实现两个核心目标: 其一是在设计流量范围内保证污水高效输送, 其二是维持管道自净能力以避免沉积物积累。为实现这一双重目标, 设计者需综合考虑管径、坡度与流体特性的动态匹配关系。国际通行的设计方

法通常采用器具排水当量法确定设计流量。该方法通过将各类卫生器具的排水量折算为标准当量值,进而计算管段总负荷。例如,洗手盆的排水当量通常设定为1,而坐便器则可能达到6~8个当量^[2]。临界坡度的确定是横支管设计的核心环节。该参数定义为能够维持最小自净流速的最小坡度值,其计算需结合管径、流体密度及管材摩擦系数等变量。

2.3 临界坡度与最佳坡度计算方法

临界坡度的理论计算通常基于修正曼宁公式展开,通过设定目标流速反推所需坡度值。然而,实际工程中还需考虑管道的安装条件、运维成本及意外工况的容错能力,这使得最佳坡度的确定需要引入多目标优化方法。随着物联网技术的发展,动态坡度调节理念逐渐受到关注。例如,清华大学研究团队开发的智能坡度控制系统,通过实时监测管道内流速与沉积物厚度,可自动调整支管坡度 $\pm 3^\circ$ 范围。

2.4 国内外设计规范对比分析

全球主要国家的排水设计规范在坡度设定原则、安全系数取值等方面存在显著差异,这种差异既反映了地域性的使用习惯差异,也体现了各国在工程安全与经济性之间的权衡策略。欧洲标准体系强调坡度与管径的严格匹配,要求设计者根据管径分级选用对应的坡度下限值。相比之下,美国国际管道规范采用了更灵活的设计思路,允许通过增大管径来补偿坡度不足,这种方案在空间充裕的低层建筑中具有显著成本优势。我国最新修订的《建筑给水排水设计标准》呈现出三个显著变化:首先,首次单独列出塑料管材的坡度要求,承认新材料对传统设计参数的修正需求;其次,引入坡度-管径协同设计表,强化参数间的关联性;最后,增加针对特殊场所的坡度修正系数。这些改进既吸收了国际先进经验,又保持了本土化特色,例如考虑到我国住宅排水负荷普遍高于欧美国家的特点,适当提高了最小坡度要求。

值得注意的是,中东地区规范在坡度设定上表现出更强的环境适应性。沙特阿拉伯2024年发布的《建筑排水系统设计规程》要求,在高温干旱地区,排水管坡度需额外增加0.005以补偿蒸发引起的水封损失。这种因地制宜的设计理念,对我国湿热地区或高海拔区域的排水系统优化具有借鉴价值。通过对比分析可见,现代排水设计规范正朝着精细化、动态化方向发展。未来的标准修订需要更紧密地结合新材料性能数据、智能监测技术成果及气候适应性研究成果,从而建立更具弹性的设计框架。

3 影响排水顺畅性的主要因素

3.1 流速-坡度关系与自净能力阈值

管道自净能力的本质在于维持足够的剪切应力以剥离沉积物,其实现依赖于流速与坡度的动态平衡。流体力学研究表明,当坡度增加时,重力势能转化为动能的效率提升,但超过特定阈值后能量转化率呈现边际递减效应。临界自净流速的确定需综合考虑悬浮物粒径、流体黏度及管壁粗糙度。例如,毛发、纤维类轻质污染物因浮力作用更易被低速水流带走,而砂砾等重质颗粒则需要更高的底部剪切力。2023年东京工业大学通过粒子图像测速技术发现,DN100管道在

0.025坡度下形成的螺旋流态可提升颗粒物悬浮效率达35%,这种二次流现象为优化坡度设计提供了新思路^[3]。

3.2 管径与流量匹配度对排水效率的影响

管径选择本质上是过流能力与经济性的博弈过程。过小的管径虽节省安装空间,但会导致满流率上升,削弱重力排水系统的自调节能力;过大的管径则增加材料成本与清淤难度。现代排水设计强调“按需匹配”原则,即根据峰值流量、使用频率及维护周期动态选择最优管径。新加坡建屋发展局2023年发布的《高密度建筑排水系统白皮书》指出,DN75管在坡度0.02条件下可承载的最大间歇流量为3.2L/s,但持续流量需控制在1.8L/s以内以避免气阻现象。这种差异源于瞬态流与稳态流的不同水力特征。我国某三甲医院2024年实施的排水系统升级项目中,通过将住院楼排水管径从DN80扩容至DN100,并配合0.015坡度调整,使高峰期排水延迟时间缩短40%,验证了管径-坡度协同优化的重要性。

3.3 管材摩擦阻力系数动态变化

管道服役周期内的性能衰减是影响排水顺畅性的长期隐患。微生物膜附着、矿物结晶沉积及机械磨损等过程会持续改变管壁粗糙度,这种时变特性使得设计阶段的理论计算值与实际运行参数产生偏差。德国卡尔斯鲁厄理工学院2024年研究揭示,PVC-U管在含油脂废水中使用5年后,等效粗糙度可增加至初始值的2.3倍,导致设计流速下降18%~22%。针对此问题,工程界提出两种应对策略:其一是采用超疏水涂层技术,如韩国LG化学2023年推出的纳米硅改性管材,可使生物膜附着率降低70%;其二是建立基于监测数据的动态维护模型,如香港某智慧社区项目通过管壁传感器实时监测粗糙度变化,自动触发高压冲洗程序,使管网输送能力始终保持在设计值的90%以上。

3.4 污水固体含量与流体黏度特性

污水成分的复杂性对排水系统提出差异化设计需求。餐饮废水中油脂乳化形成的非牛顿流体,其表观黏度随剪切速率变化呈现显著非线性特征;实验室废水中可能含有胶体颗粒,易引发斯托克斯沉降;而居住区生活污水则需重点应对纤维类悬浮物的缠绕问题。这种多样性要求坡度设计必须结合具体使用场景进行针对性优化。

4 横支管坡度设计对排水顺畅性影响的数值仿真分析

4.1 CFD 流体动力学模型构建与验证

现代排水管道仿真需准确再现气-液-固三相交互过程。采用VOF法追踪自由液面变化,结合DPM模拟固体颗粒运动,可完整刻画非满管流的复杂流态。模型验证环节采用东京大学2023年公布的实验数据库,该数据集涵盖DN50-DN150管道的200组流动工况实测数据。对比显示,在坡度0.01~0.03范围内,仿真结果与实测流速的最大偏差不超过7%,证实了数值方法的可靠性。

4.2 典型工况参数设置与边界条件

为全面评估坡度设计效果,仿真研究需覆盖多样化的使用场景:住宅建筑具有流量间歇性大、峰值持续时间短的特

点;酒店排水系统需应对集中用水时段的负荷冲击;医院排水则对流体成分复杂性与系统可靠性提出更高要求。边界条件的科学设定直接影响仿真可信度。入口边界采用实测流量时程曲线替代恒定流量假设,能更真实反映使用工况;出口边界设置动态压力调节模块,可模拟立管气压力波动的影响;管壁边界引入时变粗糙度函数,可还原管道老化过程。

4.3 不同坡度下的流场特征模拟

坡度变化对管道流场的影响呈现显著空间异质性。在低坡度工况下,流体呈现明显的层流特征,近壁面流速梯度较大,导致底部沉积物累积风险升高;中等坡度时,流态过渡为弱湍流,二次流效应增强,有利于污染物横向扩散;当坡度超过 0.03 后,气相卷吸现象加剧,可能破坏水封完整性。数值模拟结果揭示, DN100 管道在 0.022 坡度时形成的最佳流态具有三个特征:核心区流速分布均匀性指数达 0.85 以上,近壁面剪切应力超过 2.5Pa,气相体积分数稳定在 12%~15%。这种状态既能有效输送固体废物,又可维持水封功能的稳定性。对比分析表明,传统经验法设计的坡度往往偏保守,而基于流场特征的优化设计可减少 15%~20%的坡度冗余量。

4.4 淤积风险与排水效率的量化评估

淤积风险的量化评估需要建立多指标评价体系。除传统的剪切应力准则外,现代研究引入滞留时间系数、能量耗散率等衍生参数。新加坡国立大学 2024 年提出的“排水健康指数”,通过加权计算 8 项流场特征参数,可实现淤积风险的三级预警,该模型已在东南亚多个智慧城市项目中推广应用。仿真分析表明,坡度从 0.015 提升至 0.02 时, DHI 值从 0.6 改善至 0.8,继续增加至 0.025 后达到 1.1。这种非线性改善规律提示,在特定阈值范围内适度增加坡度可获得最佳风险收益比^[4]。迪拜某海滨酒店在 2023 年改造中,基于仿真结果将坡度从 0.018 调整为 0.023,使管道清洗周期从 3 个月延长至 8 个月,验证了量化评估方法的工程价值。

5 横支管坡度设计优化策略

5.1 动态流量响应的坡度分级设计

建立基于负荷时变特征的坡度自适应调节体系,通过嵌入式传感器网络实时采集流量、压力与流速数据,构建具有自学习能力的预测模型。采用模糊控制算法处理非稳态流量信号,将排水过程划分为基准工况、过渡工况与峰值工况,对应设计梯度化坡度方案。在液压驱动装置与智能控制模块的协同下,实现坡度参数的动态平滑切换,既保证自净能力阈值,又避免机械冲击损耗。该策略的关键在于建立流量-坡度的非线性映射关系,通过李雅普诺夫稳定性理论验证调节过程的收敛性,确保系统在任意初始条件下的鲁棒性。

5.2 管径-坡度多目标协同优化

构建以全生命周期成本为目标的泛函优化模型,引入非支配排序遗传算法求解帕累托最优解集。模型涵盖管材购置成本、安装空间折减系数、能耗损失函数与维护风险概率四

项核心参数,通过蒙特卡洛模拟量化不确定性因素的影响。在优化过程中,采用变分法推导管径与坡度的耦合微分方程,揭示二者在能量耗散与材料强度方面的互补关系。针对管径突变区域,提出基于流场重构的过渡段设计准则,通过曲率连续化处理消除局部涡流,实现水力特性的平滑过渡。

5.3 低阻力管材的功能化设计

开发具有梯度润湿特性的功能化管材,通过分子动力学模拟优化表面能分布,构建微纳复合结构降低固-液界面黏附功。采用原位聚合技术在管壁形成自修复涂层,当表面发生划伤时可触发动态共价键重组,维持超滑特性的持久性。针对高固含量流体,设计仿生螺旋导流槽结构,利用科恩达效应增强颗粒物悬浮能力。材料研发需结合流变学测试与原子力显微镜表征,建立微观形貌与宏观水力性能的定量关联模型,突破传统管材性能天花板。

5.4 数字孪生驱动的智能设计

构建融合 BIM 与 CFD 的协同设计平台,开发参数化建模脚本自动生成拓扑优化的管道网络。采用伴随方程法进行敏感度分析,识别关键设计变量对排水效率的影响权重,实现坡度参数的定向优化。在虚拟验证环节,通过格子玻尔兹曼方法模拟多相流瞬态过程,结合机器学习算法提取流场特征参数,建立淤积风险的早期预警模型。该策略的核心价值在于形成“设计-模拟-优化”的闭环工作流,通过数字孪生体的持续迭代提升方案成熟度。

6 结语

横支管坡度设计的科学化与精细化是提升建筑排水系统综合性能的核心路径。本研究通过理论解析与技术创新,揭示了坡度参数与流态特征、管材特性及空间约束的耦合作用机制,提出了动态适应、多参数协同的优化设计框架。这些成果不仅为工程实践提供了可操作的技术指南,更推动了排水系统设计从经验判断向模型驱动的模式转变。未来,随着物联网技术与人工智能的深度渗透,坡度设计有望实现实时感知-自主决策-动态调节的全链条智能化。

【参考文献】

- [1]刘慧.新时期建筑室内给排水设计研究[J].房地产世界,2023(6):55-57.
- [2]杨琦.商务核心区办公楼群给排水和水消防设计探讨[J].给水排水,2023,59(11):97-104.
- [3]袁雕.建筑室内排水管道施工防渗技术探讨[J].居业,2024(3):10-12.
- [4]杨柱.室内排水管道施工质量问题及防治措施[J].水上安全,2024(11):139-141.

作者简介:吴昊(1994.3—),毕业院校:青岛工学院,所学专业:土木工程,当前就职单位名称:新疆花城勘测设计研究有限责任公司,就职单位职务:给水排水专业设计工程师,职称级别:中级工程师。