

雨污分流改造下排水管网管径—坡度协同优化与结构设计

刘华倩

中冶京诚工程技术有限公司, 中国·北京 100176

摘要: 针对雨污分流改造中空间受限、投资控制严的实际约束, 管径与坡度作为重力流管道的两个核心参数, 其实存在一种此消彼长的经济耦合关系——加大管径能降低坡度要求却推高材料成本, 加大坡度虽能减小管径但会显著增加土方量和埋深, 传统依靠经验试算或单参数优化的做法, 很难真正找到经济上最优的解。本文立足于改造工程实际需求, 建立了一套管径—坡度的协同优化方法, 以全生命周期成本最小化为目标, 统筹水力约束、施工可行性与结构安全性, 具体明确了设计流量的确定原则、规范约束体系, 以及离散管径与连续坡度的联合优化求解策略, 并针对雨水和污水管道不同的水力工况给出了设计侧重点; 在结构设计方面, 也系统梳理了管材选型、荷载组合、腐蚀防护与附属设施优化等环节的协同要点。最后提出了协同优化在改造工程中的实施流程, 并指出了常见设计误区。本文不依赖具体城市案例, 所提供的通用性设计流程与优化思路可广泛应用于同类工程。

关键词: 雨污分流; 排水管网; 管径优化; 管道坡度; 协同设计; 结构耐久性

Collaborative Optimization of Pipe Diameter and Slope and Structural Design for Rainwater and Sewage Diversion Retrofit Drainage Network

Liu Huaqian

China Metallurgical Jingcheng Engineering Technology Co., Ltd., China Beijing 100176

Abstract: In response to the practical constraints of limited space and strict investment control in rainwater and sewage diversion renovation, pipe diameter and slope, as two core parameters of gravity flow pipelines, actually have an economic coupling relationship in which one increases while the other decreases—enlarging the pipe diameter can reduce the slope requirement but increases material costs, while increasing the slope can reduce the pipe diameter but significantly increases earthwork and burial depth. Traditional methods relying on empirical trial calculations or single-parameter optimization make it difficult to truly find the economically optimal solution. Based on the actual requirements of renovation projects, this paper establishes a set of collaborative optimization methods for pipe diameter and slope, aiming to minimize life-cycle costs while coordinating hydraulic constraints, construction feasibility, and structural safety. It specifically clarifies the principles for determining design flow, the normative constraint system, and the integrated optimization strategy of discrete pipe diameters with continuous slopes, and provides design focal points for different hydraulic conditions of rainwater and sewage pipelines. In terms of structural design, it also systematically reviews the key points of collaboration in pipe material selection, load combinations, corrosion protection, and optimization of auxiliary facilities. Finally, it proposes the implementation process of collaborative optimization in renovation projects and points out common design pitfalls. This paper does not rely on specific city cases, and the general design process and optimization approach provided can be widely applied to similar projects.

Keywords: Separation of rainwater and sewage; Drainage pipe network; Pipe diameter optimization; Pipe slope; Collaborative design; Structural durability

0 引言

在既有道路下方实施雨污分流改造, 空间局促、管线交错、施工期间交通干扰显著, 这些现实因素对设计形成了较高约束。管径与坡度作为两个可直接调控的参数, 彼此之间存在典型的经济权衡关系: 管径加大可以适度放缓

坡度, 但管材成本随之上升; 坡度变陡虽然可以选用较小管径, 却会明显增加埋深, 进而推高土方开挖、施工降水以及检查井的造价。这意味着, 对于给定的设计流量, 理论上存在一组管径与坡度的最优组合, 能够使全生命周期成本最低。然而传统设计往往先根据地形条件拟定一个

坡度,再反算所需管径并向上圆整为标准规格,或者直接按规范中的最小坡度选取管径,这类经验做法很少系统考虑管径与坡度之间的经济耦合,容易导致投资浪费或后期运维困难。因此,有必要建立一套管径—坡度的协同优化方法,在水力约束、施工可行性和结构安全均能保障的前提下,实现设计参数的经济匹配。

本文系统阐述协同优化的数学模型、约束条件、求解策略以及配套的结构设计要点,旨在为雨污分流改造工程提供可操作的技术框架。

1 水力设计基本约束与管径—坡度耦合关系

1.1 设计流量的确定原则

雨水管道与污水管道的设计流量来源不同,这决定了优化问题的基础边界。雨水管道设计流量根据汇水面积、径流系数和设计重现期计算,其中设计重现期的选取与工程重要性、当地气候条件有关,规范给出了超大城市中心城区重现期为3~5年,非中心城区为2~3年,重要地区为5~10年,地下通道及下沉式广场为30~50年;大城市中心城区为2~5年,非中心城区为2~3年,重要地区为5~10年,地下通道等为20~30年^[1]。污水管道设计流量则根据服务人口、人均排水量及变化系数确定,通常以最高日最高时流量作为设计工况。

雨污分流改造后,两类管道的运行状态差别很明显:雨水管道在非降雨期基本处于干涸状态,而污水管道则是全天持续过水,且流量有明显的日变化规律。这个运行特征上的差异,意味着协同优化中两种管道应当采用不同的控制工况。具体来说,雨水管道应以设计重现期下的峰值流量作为主控工况,同时需要验证最小流速是否满足要求,以防止旱季淤积;污水管道则应以最大时流量作为控制工况,并同步评估低流量时段的沉积风险。

1.2 管径与坡度的水力耦合机制

在重力流、均匀流的假定下,圆形管道的水力计算通常采用谢才公式与曼宁公式的组合形式。管道过流能力与管径的某次幂及坡度的平方根成正比,这种指数关系意味着管径的微小变化会引起所需坡度的明显波动:管径缩小时,为维持同样的流量,坡度必须以更大比例增加;反过来,管径放大时则可以放松对坡度的要求。这个耦合关系正是协同优化的物理基础。在实际工程中需要认识到,管径与坡度并不是两个独立的决策变量,而是一对需要经济权衡的参数。每一个管径都对应一个满足设计流量的最小坡度,该坡度通常不低于规范规定的最小坡度^[1]。如果采用比该最小坡度更缓的坡度,管道实际过流能力将不

足,可能导致上游壅水甚至地面溢流;而采用更陡的坡度虽然能满足过流要求,却会额外增加埋深和土方量,并不经济。

1.3 规范中的关键约束参数

我国《室外排水设计标准》(GB 50014-2021)中提出了若干强制性或建议性的设计约束^[1],这些约束直接构成了优化模型的边界条件。

流速约束。雨水管道在设计充满度下的最小设计流速为0.75 m/s,污水管道为0.6 m/s,以防止悬浮物沉积。最大设计流速根据管材不同有所差异:金属管道为10 m/s,非金属管道为5 m/s。对于塑料管,实际工程中常控制流速不超过5 m/s以避免过度磨损。

充满度约束。污水管道按非满流设计,最大充满度随管径变化:管径200~300 mm时为0.55,350~450 mm时为0.65,500~900 mm时为0.70,≥1000 mm时为0.75。雨水管道按满流设计。

最小坡度约束。规范给出了不同管径的最小设计坡度,例如:污水管和合流管(最小管径300 mm)的最小设计坡度为0.003;雨水管(塑料管,最小管径300 mm)为0.002,其他管材为0.003;雨水口连接管(最小管径200 mm)为0.010。最小坡度的设定主要为保证在设计充满度下达到最小设计流速(污水管0.6 m/s,雨水管0.75 m/s),同时兼顾施工精度和管道维护的可行性。

埋深约束。规范规定管顶最小覆土深度,在车行道下一般为0.7 m,非车行道下可适当减小。最大埋深则受地质条件、地下水位、施工方法及经济性综合制约,通常不宜超过7~8 m,超过时需考虑顶管施工或设置提升泵站。

上述约束中,流速约束与充满度约束直接由管径与坡度共同决定,最小坡度约束则为管径对应的坡度设置了下限,埋深约束则将坡度与起点覆土、管段长度联系起来。

2 管径—坡度协同优化模型

2.1 优化目标与成本构成

协同优化的目标是在满足水力与施工约束的前提下,使管道工程的全生命周期成本最小化。全生命周期成本主要包括以下几个部分:

管材购置成本。管材成本与管径、管长及管材类型直接相关。不同管径对应不同的单位长度价格,且价格随管径增大呈非线性增长。对于塑料管,大口径管道的单位成本增幅往往超过管径的线性比例。

沟槽开挖与回填成本。土方工程量取决于管道埋深,而埋深由起点覆土深度、管道坡度和管段长度共同决定。

坡度越大,管道终点埋深越深。此外,沟槽断面宽度与管径有关,管径越大所需的工作面越宽,土方量相应增加。

检查井成本。检查井的深度随管道埋深增加而增加,井筒加高、井室加深均会提高造价。在管段起终点及坡度变化处均需设置检查井,因此管道坡度的选择直接影响沿线各井的深度分布。

附属构筑物成本。当管道坡度较大或落差集中时,需设置跌水井、消能设施;当管道穿越不良地质段时,需进行地基处理。这些费用同样与优化参数相关。

长期运维成本。流速过低会增加清淤频率,流速过高则会加速管壁磨损。腐蚀性环境下的管道还需考虑定期修复或更换成本。运维成本难以精确量化,需要在优化中作为惩罚项或通过约束条件间接控制。

需要强调的是,不同地区的材料单价、人工费用、土方单价差异较大,优化时应采用工程所在地的实际造价数据,而非统一标准值。

2.2 决策变量与约束条件

本优化中的决策变量为:管径(从标准规格集中选取的离散变量)和管道坡度(连续变量,受施工精度限制通常保留至小数点后四位)。

约束条件包括:

第一,流量约束。在选定管径与坡度下,管道在设计充满度内的实际过流能力应不小于设计流量。对于给定的管径,存在一个临界坡度,使管道在设计充满度下恰好达到设计流量;实际选用的坡度不得低于该临界坡度。

第二,流速约束。实际流速应介于规范规定的最小流速与管材允许的最大流速之间。需要注意的是,最小流速约束往往比流量约束更为严格,尤其在管径较大、流量较小的工况下。

第三,充满度约束。实际充满度不得超过规范规定的上限值,且对于污水管道,不同管径区间对应不同限值。

第四,坡度界限。坡度不得小于该管径对应的规范最小坡度,也不得大于工程实践允许的最大坡度。

第五,埋深协调约束。对于较长的管段,终点覆土深度不宜过大,以避免与深层管线冲突或增加不必要的土方;同时起点覆土深度应满足最小覆土要求。

第六,节点衔接约束。上下游管段在检查井处衔接时,上游管末端内底高程不得低于下游管起点内底高程,应采用管顶平接或水面平接,避免产生逆坡或过大的跌落^[1]。

上述约束中,除管径离散性外,其余均为连续非线性约束,构成一个典型的混合整数非线性规划问题。

2.3 优化数学模型

基于上述分析,可建立如下数学模型。

决策变量:

D: 管径,取自离散集合 $D = \{D_1, D_2, \dots, D_m\}$ (如 300, 400, 500, ... mm)。

S: 管道坡度,连续变量, $S > 0$ 。

目标函数(全生命周期成本最小化):

$$\min C(D, S) = C_p(D) + C_c(H(D, S)) + C_m(H(D, S)) + C_o(S)$$

其中:

$C_p(D)$: 管材购置成本(随管径增大而增加);

$C_c(H)$: 沟槽开挖与回填成本(随埋深 H 增加);

$C_m(H)$: 检查井成本(随井深增加);

$C_o(S)$: 附属构筑物成本(如跌水井,当 S 较大时)。

约束条件:

(1) 流量约束:

$$Q(D, S) = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \geq Q_{des}$$

其中 A, R 按设计充满度计算(雨水满流,污水按规范限值)。

(2) 流速约束:

$$v_{min} \leq v(D, S) = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \leq v_{max}$$

v_{min} : 污水 0.6 m/s, 雨水 0.75 m/s; v_{max} : 金属管 10 m/s, 非金属管 5 m/s。

(3) 充满度约束(仅污水):

$$\frac{h}{D} \leq \left(\frac{h}{D}\right)_{max}(D)$$

按 GB 50014-2021 表 5.2.4 取值。

(4) 坡度下限约束:

$$S \geq \max(S_{hyd}(D), S_{min,code}(D))$$

其中 $S_{hyd}(D)$ 为满足流量所需的最小坡度, $S_{min,code}(D)$ 为规范最小坡度。

(5) 埋深约束:

$$H_{min} \leq H(D, S) = H_{start} + S \cdot L \leq H_{max}$$

L 为管段长度, H_{start} 由起点最小覆土深度决定。

(6) 节点衔接约束:

$$E_{up,out} \geq E_{down,in}$$

上游管末端内底高程不低于下游管起点内底高程。

求解策略:采用离散枚举法,对每个 $D \in D$,反算满足流量约束的临界坡度 S_{crit} ,依次检验流速、充满度、埋深等约束,计算成本,最后比较各可行管径的总成本,选取最小值对应的管径与坡度。

2.4 优化求解策略

鉴于排水管道设计中管径规格有限（通常不超过15种），一个实用的求解策略是对每个候选管径分别求解最优坡度，然后比较各管径下的最小成本^[9]。

对于某一固定管径，设计流量已确定，满足流量约束的最小坡度可以通过水力计算公式反算得出。该最小坡度即为该管径下经济性最优的坡度，原因在于：增大坡度不会带来任何管材节省，反而会增加土方量与井深，从而推高成本。因此，在无特殊约束（如为避开障碍物而人为加大坡度）的情况下，最优坡度就是恰好满足设计流量要求的最小坡度。

然而，这一结论成立的前提是该最小坡度同时满足流速约束、充满度约束及埋深约束。如果该最小坡度导致流速超过最大允许值，则需适当降低坡度（但不得低于临界坡度），这基本不现实，因为降低坡度会进一步降低流速。若流速超过最大限值，表明管径选型偏小，应放大管径。若最小坡度导致终点埋深超出允许范围，则需考虑放大管径以减小所需坡度，或调整起点覆土深度。

因此，实际优化流程为：对每一候选管径，计算满足流量约束的最小坡度；检验该坡度下的流速是否在允许范围内，检验终点埋深是否可接受；若均满足，则计算该方案的总成本；若不满足，则排除该管径或调整设计（如增设跌水井）。最后比较各可行管径的总成本，选取最小值对应的管径与坡度。

该策略避免了在连续坡度区间内盲目搜索，物理意义清晰，计算量小，适合工程设计手算或简单编程实现。

2.5 多管段协同的初步考虑

实际排水管网由若干管段串联或并联组成，上游管段的设计结果会直接影响下游管段的起点高程。因此，单管段优化需扩展为管段间协同优化。

一种有效的处理方式是将管网划分为若干独立的设计流域，每个流域内从最上游管段开始逐段优化，优化时需将下游管段可接受的起点高程范围作为上游管段的终点埋深约束。当上游优化结果导致下游无法满足最小覆土或衔接要求时，需回溯调整上游坡度或管径。这种动态规划思想在管网优化设计中已有成熟应用^[9]。

3 不同水力工况下的设计考量与结构协同

3.1 雨水管道的设计特点

雨水管道在雨污分流改造中承担快速排除地面径流的任务，其设计流量大、峰值历时短。由于管道在大多数时间内处于空管或低流状态，淤积风险相对较低，但峰值冲

刷风险较高。

在设计重现期下，雨水管道内的流速通常能达到1.5~3.0 m/s，足以实现自清。然而，当实际降雨强度超过设计标准时，管道可能进入压力流状态，流速骤增，对管壁、接口及转弯处产生强烈冲击。因此，在协同优化中，对雨水管道不宜过度追求最小管径而采用较大坡度，以免在超标降雨时产生过高的流速。适当放大管径、放缓坡度，虽然增加管材成本，但可降低流速峰值，降低冲刷风险延长管道使用寿命。

此外，雨水管道出口常直接排入河道或调蓄设施，管道坡度与出口高程的协调至关重要。若出口处河道水位较高，还需考虑壅水影响，此时水力计算应改为受下游水位控制^[1]。

3.2 污水管道的设计特点

污水管道流量相对平稳，但存在日变化和季节性变化。在夜间低流量时段，流速可能降至最小设计流速以下，导致悬浮物沉积。因此，污水管道设计对坡度要求更为严格，尤其是管径较大的干管，需保证在任何设计工况下流速不低于0.6 m/s。

污水管道内由于有机物降解，容易产生硫化氢气体，在管道上部空间与水汽结合形成硫酸，对混凝土管及水泥砂浆内衬产生严重腐蚀^[4]。这一化学腐蚀问题与管径、坡度间接相关：坡度较缓时，污水在管内停留时间延长，硫化氢生成量增加；管径较大时，气相空间体积增大，腐蚀面积扩大。因此，在污水管道的协同优化中，应优先选用耐腐蚀管材（如塑料管、内衬PVC的复合管），或对混凝土管采取防腐涂层措施，而不能仅依赖水力参数选择。

3.3 结构设计中的协同要点

水力优化得到的最优管径和坡度，必须与管材的力学性能相匹配。当前雨污分流改造中常用的管材包括：高密度聚乙烯（HDPE）双壁波纹管、聚氯乙烯（PVC-U）实壁管、钢筋混凝土管以及球墨铸铁管。不同管材的粗糙系数、允许流速、环刚度及耐腐蚀性能差异显著^[5]。

塑料管（HDPE、PVC）水力粗糙度小，相同管径与坡度下过流能力高于混凝土管，且耐腐蚀、重量轻、接口密封性好，适用于污水管道及中小口径雨水管道。但其环刚度有限，深埋或重荷载条件下需选用高环刚度等级（如SN8、SN12.5、SN16）。因此，当协同优化得出较大埋深时，必须校核所选塑料管的环刚度是否满足要求；若不足，需改用钢筋混凝土管或调整优化方案（如放大管径以减小埋深）。

钢筋混凝土管抗外压能力强, 价格相对低廉, 但内壁粗糙度大, 且不耐硫化氢腐蚀。在污水管道中应用时, 需做内防腐处理。因此, 在协同优化中, 若采用混凝土管, 应在水力计算中采用较高的粗糙系数, 这将导致所需临界坡度增大, 进而影响埋深与成本。

管道结构设计需考虑的主要荷载包括: 管顶竖向土压力、地面活荷载、地下水浮力、管道自重及管内水重^[9]。管顶土压力与埋深直接相关, 地面活荷载根据管道所在位置(车行道下或非车行道下)按规范取值。当协同优化得到的埋深较大(如超过4 m)时, 竖向土压力显著增加, 对管材环刚度要求提高, 同时沟槽支护成本大幅上升。此时应重新评估是否可放大管径以减小坡度, 从而降低埋深。

检查井的间距、深度及构造形式与管径、坡度密切相关。规范规定检查井最大间距随管径增大而增加^[1]。当管道坡度较大(如大于0.10)时, 常规检查井内水流跌落能量大, 易造成井底冲刷和噪音, 需设置跌水消能设施或选用消能井, 这增加了额外造价, 应在优化中予以考虑。

污水管道内壁的腐蚀防护是结构设计的重要组成部分。研究表明, 管道内硫化氢的生成速率与污水流速、温度、管道坡度及气相空间体积有关^[4]。在协同优化中, 如果选择较大管径(导致气相空间增大)或较缓坡度(导致流速降低、停留时间延长), 都会加剧腐蚀风险。这种情况下, 即使水力经济性更优, 也应从全生命周期角度评估腐蚀损失。常用防护措施包括: 采用耐腐蚀管材(HDPE、PVC); 对混凝土管内壁喷涂环氧树脂或聚氨酯涂层; 设置通风井以降低硫化氢浓度。

4 改造工程实施流程与常见设计误区

4.1 协同优化实施流程

实施协同优化前, 要收集以下基础资料: 设计流量(来自水力计算)、管段长度、起点允许最小覆土深度、终点允许最大埋深、沿线地形纵断面、地下水位情况、土质类别及工程造价信息(管材单价、土方单价、检查井单价等)。这些数据应来源于勘察报告、设计任务书或当地造价信息。

第一步, 可行管径筛选。根据设计流量大小, 初步筛选可能满足过流要求的管径范围。小管径因过流能力不足可直接排除, 过大管径因经济性差也可优先排除, 通常候选管径不超过5~6种。

第二步, 各管径下的坡度求解与约束检验。对于每个候选管径, 按照规范规定的设计充满度上限(雨水管取1, 污水管按管径对应限值), 反算满足设计流量所需的最小坡

度。这一计算可采用标准水力计算图表或简易公式完成^[1]。然后, 检验该坡度下的流速是否介于最小与最大允许值之间, 并计算终点埋深, 判断是否超过允许上限。若流速超过最大允许值, 该管径应淘汰; 若流速低于最小允许值, 可尝试提高充满度(但不得超过上限)或增加坡度, 但增加坡度会加大埋深, 需综合权衡; 若终点埋深过大, 可考虑放大管径重新计算。

第三步, 成本估算与方案比选。对通过约束检验的每个管径方案, 估算工程总成本。成本估算应采用当地真实单价。管材成本按管长乘以单价计算; 土方成本根据平均挖深、沟槽断面及放坡系数计算; 检查井成本根据井深按当地定额估算。将各方案总成本排序, 选取成本最低者作为推荐方案。

第四步, 结构安全性复核。优化确定管径与坡度后, 应进行结构设计复核: 根据最终埋深与地面荷载, 计算管顶竖向压力, 选定管材环刚度等级或混凝土管壁厚; 验算管道变形率(对于柔性管)或强度(对于刚性管); 对于污水管道, 根据预估的硫化氢浓度确定是否需要增加内防腐层; 对于坡度较大的雨水管道, 在转弯及跌水处设置防冲刷构造。

第五步, 多管段协同的迭代调整。在实际管网中, 上游管段优化结果会影响下游管段的起点高程。若下游管段因起点高程过低而导致埋深不足或无法衔接, 需返回上游, 适当加大上游管段的坡度(抬高终点高程)或放大上游管径, 这一迭代过程直至全线衔接协调为止。

4.2 常见设计误区与改进建议

在雨污分流改造实践中, 一些常见的设计误区值得警惕。

误区一: 盲目采用规范最小坡度。部分设计人员无论管径大小, 一律取规范规定的最小坡度, 认为这样埋深最浅、土方最少。但实际上, 对于流量较大的管段, 规范最小坡度往往远小于满足设计流量所需的最小坡度, 若强行采用, 将导致管道过流能力不足。正确做法是先计算水力所需坡度, 再与规范最小坡度比较, 取较大值。

误区二: 为节省管材过度缩小管径。有些方案倾向于采用较小管径配合较大坡度, 认为管材节省可以抵消土方增加。但是, 当坡度增大到一定程度后, 埋深迅速增加, 土方成本呈指数上升, 且检查井深度增加、施工降水难度加大, 综合成本反而更高。协同优化的价值就在于找到这一拐点。

误区三: 忽略上下游衔接约束。单独优化某一管段而

不考虑其对下游的影响,可能导致下游管段起点高程过低,需要深埋甚至无法接入下游管道。改造工程中应始终从上游向下游顺序设计,或采用逆向高程控制法。

误区四:忽视污水管道的腐蚀问题。仅从水力角度选择大管径、缓坡度组合,虽然短期建设成本可能较低,但长期腐蚀导致的修复费用可能数倍于初期节省。对于污水管道,应优先采用耐腐蚀管材,并将预期维护成本纳入方案比选。

5 结语

本文针对雨污分流改造工程中排水管网设计的关键问题,系统阐述了管径—坡度的协同优化方法,并给出了配套的结构设计要点。得出以下结论:

第一,管径与坡度存在显著的经济耦合关系。对于任何给定的设计流量,存在一个最优管径—坡度组合,使全生命周期成本最小。该最优解通常位于满足流量约束的最小坡度附近,而非规范规定的最小坡度。

第二,协同优化的实施应采用离散管径枚举与临界坡度求解相结合的策略,依次检验流速、充满度、埋深等约束,最后比较各方案成本。该方法物理意义清晰,计算量小,适合工程应用。

第三,雨水管道与污水管道在设计控制工况上存在差异:雨水管道应关注峰值流速冲刷,污水管道应关注低流速沉积与硫化氢腐蚀。这些差异应在优化模型中通过不同的约束条件或惩罚项体现。

第四,结构设计应与水力优化形成闭环。管径与坡度的选择影响埋深、荷载及腐蚀环境,进而决定管材等级、基础形式及防护措施;反之,结构约束也会反馈修正优化方案。

第五,在改造工程中应避免盲目采用规范最小坡度、过度缩小管径以及忽略上下游衔接等常见误区。协同优化不是简单的数学最小化,而是综合考虑水力、施工、结构与耐久性的系统决策过程。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室外排水设计标准: GB 50014-2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
- [2] Wiese J, Schmitt T G. Cost optimization of sewer networks using dynamic programming and heuristic algorithms [J]. *Water Science and Technology*, 2013, 68(8): 1799-1806.
- [3] 赵冬泉, 陈吉宁, 佟庆远. 基于 GIS 的排水管网优化设计系统研究[J]. *环境工程*, 2008, 26(4): 45-48.
- [4] 刘建勇, 王晓昌. 污水管道内硫化氢腐蚀机理与控制对策[J]. *给水排水*, 2015, 41(2): 105-109.
- [5] ASTM F894. Standard Specification for Polyethylene (PE) Large Diameter Profile Wall Sewer and Drain Pipe[S]. ASTM International, 2018.
- [6] 北京市市政工程设计研究总院有限公司. 给水排水管道结构设计规范: GB 50332-2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.