

技术总结

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.17.006

考虑多消防工况的旅游古城镇供水管网优化设计

杨佳莉¹, 杜坤¹, 侯邑¹, 宋志刚¹, 许丁²

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南省设计院集团有限公司, 云南 昆明 650000)

摘要: 针对旅游古城镇市政管网消防供水能力不足, 而传统方法存在消防设计流量取值偏小、消防工况选取不合理等问题, 提出考虑多消防工况供水管网优化设计方法。在旅游古城镇不同片区选取典型建筑物, 采用 ISO 法计算其消防需水量并构建消防工况, 将不同工况下最小要求水压作为约束条件, 以管网中所有管道管径作为决策变量, 构建以管网造价为目标函数的优化问题, 采用差分进化算法求解满足不同工况约束且经济上最优的设计方案。将所提出的方法用于丽江大研古镇供水管网优化设计, 结果表明, 优化后的管网方案较传统方案的整体消防供水能力提升约 6 L/s, 而管网造价较传统方案减少约 8%, 且优化后典型建筑物消防供水能力达到了设计要求, 这表明所提出的方法可行。通过分析管网布局及节点水压变化发现, 对于地形高差较大、火灾风险较高的旅游古城镇供水管网设计, 主管应向消防用水量大、地势高的控制点敷设, 这样有利于提高管网整体消防供水能力并降低管网造价。

关键词: 旅游古城镇; 供水管网; 多消防工况; 差分进化; 优化设计

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)17-0038-06

Optimal Design of Water Distribution System in Ancient Tourism Town Considering Multiple Fire-fighting Conditions

YANG Jia-li¹, DU Kun¹, HOU Yi¹, SONG Zhi-gang¹, XU Ding²

(1. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Yunnan Design Institute Group Co. Ltd., Kunming 650000, China)

Abstract: Municipal water distribution systems (WDSs) in ancient tourism towns usually have insufficient fire-fighting capacity, and traditional design method has the problems of relatively small value of fire-fighting design flow rate and unreasonable selection of fire-fighting conditions. A method for optimal design of WDS considering multiple fire-fighting conditions was thus proposed. The proposed method first selected typical buildings in different areas of ancient tourism towns and calculated their fire water demand by ISO method to build fire-fighting conditions, and then took the minimum required water pressure under different conditions as the constraint and the pipe diameter as the decision variable to formulate the optimization problem with network cost as the objective function. Differential evolution

基金项目: 云南省重点研发计划项目(202003AC100001); 国家自然科学基金资助项目(51608242); 云南省应用基础研究青年项目(2017FD094)

通信作者: 杜坤 E-mail: dukun_cq@foxmail.com

algorithm was applied to solve the optimization problem which satisfied the constraints of different design conditions and minimized the network cost. The proposed method was applied to the optimal design of WDS in Dayan ancient town, Lijiang. Overall fire-fighting capacity of the optimized scheme was about 6 L/s higher than that of the traditional scheme, and the network cost was about 8% lower than that of the traditional scheme. Besides, the fire-fighting capacity of the WDS for typical buildings met the design requirements after optimization, indicating that the proposed method was feasible. The WDS layout and nodal pressure changes were analyzed. For design of WDS in ancient tourism towns with large elevation variation and high fire risk, the main pipe should be laid to the control points with large fire water demand and high elevation, which was conducive to improving the overall fire-fighting capacity of the WDS and reducing the network cost.

Key words: ancient tourism town; water distribution system; multiple fire-fighting conditions; differential evolution; optimal design

随着商业经济的迅速发展,古城镇成为了热门旅游地,但受历史条件限制,古城镇消防基础设施薄弱,火灾事故频发^[1]。作为主要消防水源,由于早期设计标准较低,古城镇市政供水管网消防供水能力普遍无法满足当前灭火要求。例如:2014年云南香格里拉独克宗古城大火,虽有数千人投入救火,但由于火灾扑救时市政管网供水不足,导致千年古城被毁,最终火灾损失及重建费用合计13亿元^[2]。通过前期调研发现,对消防供水能力不足的旅游古城镇供水管网设计,现行技术标准及相关方法存在3方面问题:①消防设计流量取值偏小的问题。在确定市政管网消防设计流量时,传统方法一般以城镇人口数为依据,选取《消防给水及消火栓系统技术规范》3.2.2条规定的下限值。然而,我国城镇火灾平均消防用水量为89 L/s,大型火灾消防用水量高达150~450 L/s。再者,李冰可^[3]的研究表明,由于中小城镇基础设施薄弱,其火灾规模、经济损失、人员伤亡往往超过大城市。由此可见,对人口规模较小但火灾风险较高的旅游古城镇,简单地按人口数确定消防设计流量会导致管网消防供水能力严重不足。②消防工况选取不合理的问题。为保证市政管网消防供水能力,传统设计方法先根据最高日最大时流量确定一组管径,然后校核该组管径是否满足消防工况。在进行消防工况校核时,传统方法通常将水力最不利点作为消防工况点,但旅游古城镇中不同片区的火灾风险差异较大,仅选取水力最不利点作为消防工况点并不能保证管网供水能力满足实际灭火要求。③管网设计方法的问题。供水管网设计是复杂的大规模非线性优化问题,为简化计算,传

统方法大多套用经济流速确定管径,并只针对少量几十根主管进行设计。但经济流速只兼顾了管网造价与管理费用,未考虑管网消防供水能力;再者,凭主观经验的主管定线结果不一定合理,且只针对少量几十根主管进行设计而忽略管网中支管,可能会导致主管管径偏大、造价过高的问题^[4]。

针对上述问题,提出考虑多消防工况的供水管网优化设计方法,在旅游古城镇不同片区选取典型建筑物并采用ISO法计算其消防需水量构建消防工况,将不同工况下最小要求水压作为约束条件,以管网中所有管道管径作为决策变量,构建以管网造价为目标函数的优化问题,采用差分进化算法求解满足不同工况约束且经济上最优的设计方案。

1 旅游古城镇供水管网改造优化方法

1.1 建筑物消防需水量计算及消防工况点构建

ISO法是美国保险事务所总结出用于确定城市消防流量的方法,在美国被消防局、保险公司、自来水厂及工程设计人员广泛采用。与我国“消规”中基于人口数的城镇消防流量计算方法相比,ISO法根据建筑物消防流量确定城镇消防设计流量。实践表明,随着大城市中人口越来越分散、小城镇中大型超市的出现,ISO法计算的消防流量更符合实际,而基于人口数的消防流量计算法越来越不可靠^[5]。基于上述原因,根据ISO法计算古城镇不同片区典型建筑物消防需水量并构建消防工况,具体包括4个步骤。步骤一,对古城镇进行消防片区划分,划分过程中应兼顾片区服务功能和建筑物构造特点,其目的是区分不同区域火灾风险及与之对应的消防需水量。步骤二,是在不同片区中选取典型建筑,ISO

法建议可选取区域内顺序排位第五建筑物消防需水量作为区域的消防设计流量。考虑到旅游古镇火灾会导致巨大经济损失及社会负面影响,本研究选取片区中火灾损失最大的建筑作为典型建筑。步骤三,通过收集建筑资料并采用 ISO 法计算消防需水量,需要收集的建筑材料包括建筑类型、场所类型、建筑面积、暴露程度和连通类型等。步骤四,为市政管网消防工况构建,本研究在 EPANET 中构建管网水力模型,将典型建筑物消防水量添加到水力模型中构建管网的消防工况点。

1.2 基于差分进化算法的供水管网优化设计

供水管网优化设计是复杂的非线性、离散组合优化问题,Mansouri 等^[6-7]认为,差分进化算法在求解该问题上具有独特优势。鉴于此,本研究采用差分进化算法并结合 EPANET 进行供水管网优化设计,其基本原理是将管道管径作为决策变量,构建以管网造价为目标函数、以节点水压为约束条件的优化问题,通过差分进化得到满足约束且经济最优的解。具体地,最小化管网造价的目标函数可写为:

$$\min f(D_1, D_2, \dots, D_i) = \sum_{i=1}^{N_p} C_i(D_i) \times L_i \quad (1)$$

式中: $C_i(D_i) \times L_i$ 代表长度为 L_i 、管径为 D_i 的管道 i 的造价; N_p 为管网中管道数量。供水管网优化设计的约束条件包括管网水力约束与设计条件约束,具体如下:

$$\sum_{j=1}^{N_n} Q_j = 0 \quad (2)$$

$$\sum h_f = 0 \quad (3)$$

$$H_j(D) \geq H_{\min} \quad j = 1, 2, \dots, N_n \quad (4)$$

$$D_{\min} \leq D_i \leq D_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_p \quad (5)$$

式(2)、(3)分别为节点连续性方程与管网能量守恒方程,其中 h_f 为管道水头损失;式(4)为节点水压约束; D_i 为管道 i 可选用的管径, D_{\min} 和 D_{\max} 为可选用的最小与最大管径。

基于 EPANET 的供水管网差分优化设计流程如图 1 所示,其中 EPANET 用于求解管网水力方程并计算解的约束违反度,差分进化通过优胜劣汰驱使种群达到最优。在差分优化中采用 Deb^[8] 提出的锦标赛选择策略处理约束,具体为:①在可行解与非可行解间选择可行解;②在两个可行解之间优先选择目标函数值较小的解;③在两个非可行解之间优先选择违反约束较小的解。采用式(6)计算解的约束违反度。

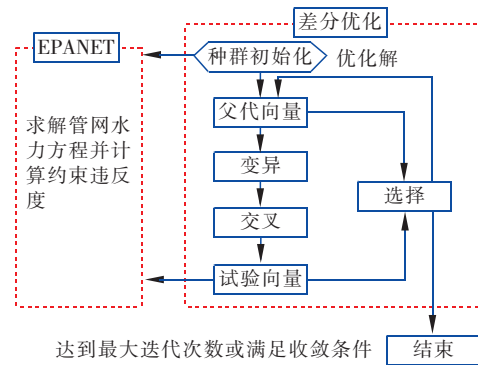


图 1 基于 EPANET 的供水管网差分优化设计流程

Fig. 1 Differential evolution of water distribution systems based on EPANET

$$q(D) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_c} [h_{\min} - h_i^j(D)] \quad (6)$$

式中: $q(D)$ 为解的约束违反度,对可行解 $q(D) = 0$; $h_i^j(D)$ 为工况 j 下 i 节点的水压; h_{\min} 为水压约束,对最大用水时 $h_{\min} = 20$ m,对消防工况 $h_{\min} = 10$ m; N 为工况数,包括最大用水时工况以及所有消防工况; n_c 为违反约束的节点数。

2 案例分析——以丽江大研古镇为例

丽江大研古镇具有大量高火灾风险木结构建筑,2014 年期间 9 d 内甚至发生 3 起火灾。在火灾扑救过程中,发现原市政管网管径偏小,接近零压出流。为此,当地政府新修建高位水池并对市政管网进行设计。在案例中,采用所提出方法对大研古镇市政管网进行优化设计,并从消防供水能力、管网造价、管网布局多个方面与传统设计方案进行比较。

2.1 大研古镇片区划分及典型建筑物选取

图 2 为大研古镇分区及典型建筑均分布情况。



图 2 丽江大研古镇分区及典型建筑物分布示意

Fig. 2 Schematic diagram of zones and typical buildings distribution of Dayan ancient town in Lijiang

从图2可以看出,丽江大研古镇包括新义社区、光义社区、义尚社区、五一社区、七一社区及新区6个社区。通过实地调研,分别在五一社区选取始建于明代恒裕公博物馆、光义社区选取建于明代嘉靖年间的木府万卷楼、七一社区选取涵三阁别院、义尚社区选取懿源人家客栈作为典型建筑物,其中恒裕公博物馆与木府万卷楼是重要的历史文物遗迹,涵三阁别院与懿源人家两座客栈人流量大,火灾时容易导致群死群伤事件。

2.2 不同片区典型建筑物消防需水量计算

ISO法通过考虑建筑类型、场所类型、建筑面积、暴露程度和连通类型等因素计算单体建筑消防需水量^[9],其计算式为:

$$NFF_i = C_i O_i (X + P)_i \quad (7)$$

式中: NFF_i 为消防需水量; C_i 为与结构类型相关的因素; O_i 为与场所类型相关的因素; X 为与暴露建筑物相关的因素; P 为与建筑物之间的联系有关的因素。

ISO法的计算步骤为:①确定建筑物结构类型和相关因素(F);②确定有效面积(A_i);③将“ F ”和“ A_i ”代入式 $C_i = 18F(A_i)^{0.5}$,计算结构因素(C_i);④将结构因素(C_i)用15.77 L/s舍入取整;⑤确定主要场所类型和相关因素(O_i);⑥通过识别建筑物的类型、长和高以及与其他建筑物之间的距离来确定是否有暴露;⑦考虑对面建筑物墙壁开口及相关保护等因素确定建筑物的暴露系数(X);⑧通过确定通道的可燃性、通道是打开还是关闭、通道的长度以及在通道开口中提供的保护措施,确定建筑物之间的连通系数(P);⑨把上述系数代入式(7)中,确定消防需水量。对4个典型建筑物尺寸进行实地测量,根据上述步骤计算典型建筑消防需水量,恒裕公博物馆消防需水量为78.75 L/s、懿源人家客栈消防需水量为78.75 L/s、木府万卷楼消防需水量为141.75 L/s、涵三阁别院消防需水量为94.5 L/s。上述4个典型建筑物可对应到管网水力模型中的节点56、254、336、267,消防设计流量分别取75、75、80及80 L/s。

2.3 基于传统与所提出优化方法的管网设计方案

图3为基于传统方法的大研古镇供水管网设计方案。针对大研古镇供水管网,传统设计方法先根据经验确定主干管为DN250~DN400,然后在管网外围采用DN200管道进行成环,最后采用DN150支

管将主管连接,并选取20 L/s的消防设计流量校核水力最不利点消防供水能力。不同于传统设计方法,所提出的方法采用差分进化算法优化所有管道管径(非主观确定主管布局),同时考虑最大用水时以及4个消防工况下的水压约束。由于差分算法优化结果具有随机性,重复运行10次得到10个设计方案。经对比,10个设计方案的整体布局基本相似,不同方案造价差异小于1%。限于篇幅原因,仅列出其中4种设计方案,如图4所示。经分析比较,选取布局一作为最终设计方案,虽然其造价不是最低的,但相较其他方案,不存在小管套大管等不合理情况,其布局更合理。

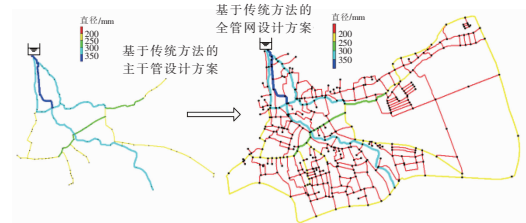


图3 基于传统方法的大研古镇供水管网设计方案

Fig.3 Traditional design scheme of water distribution system in Dayan ancient town

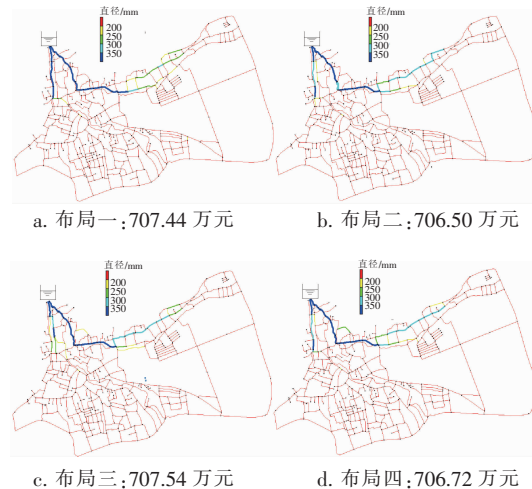


图4 考虑多消防工况的大研古镇供水管网差分优化设计方案

Fig.4 Design scheme of water distribution systems in Dayan ancient town taking into account multiple fire-fighting conditions

2.4 管网消防供水能力、造价及布局分析

根据文献[10]提出的方法评估不同设计方案的管网消防供水能力,图5给出了基于传统方法与所提出方法的管网消防供水能力评估结果,表1列出了两种方案的造价及管径分布。

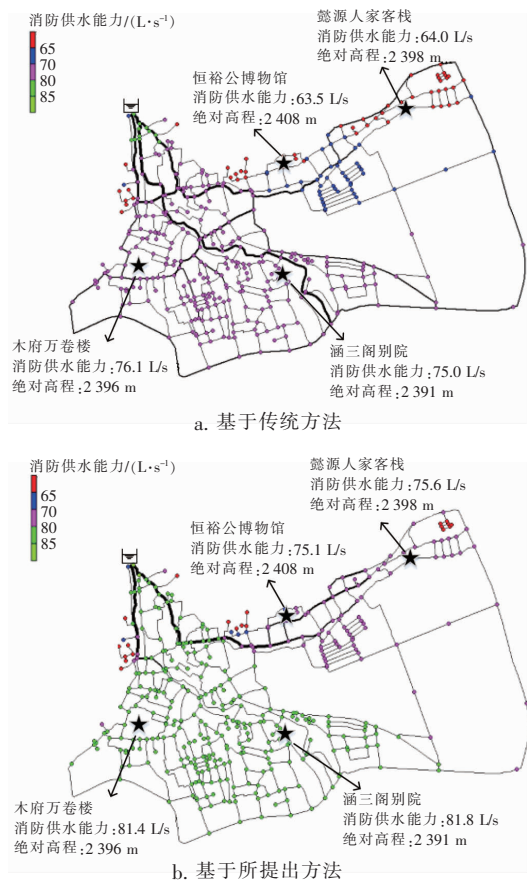


图 5 基于传统方法与所提出方法的管网消防供水能力评估结果

Fig. 5 Evaluation results of fire water supply capacity of pipe network obtained by traditional and proposed methods

表 1 基于传统与所提出方法的管网造价及管径分布

Tab. 1 Pipe network cost and pipe diameter distribution based on traditional and proposed methods

项目		基于传统方法的设计方案		基于所提出方法的设计方案	
管径/mm	1 m 管长 造价/元	管长/m	造价/元	管长/m	造价/元
150	164.3	26 484.47	4 351 398	35 489.70	5 830 958
200	222	7 881.62	1 749 720	780.32	173 231
250	289	893.12	258 112	764.49	220 938
300	364.1	2 810.92	1 023 456	139.05	50 628
350	456.5	500.83	228 629	308.36	140 766
400	533	145.20	77 392	1 234.24	657 850

相较于传统方案,所提出方案中恒裕公博物馆、懿源人家客栈、木府万卷楼、涵三阁别院 4 个典型建筑物对应的管网消防供水能力由 63.5、64.0、76.1、75.0 L/s 增大到 75.1、75.6、81.4、81.8 L/s,其他节点消防供水能力平均增大 6 L/s,而管网造价由

768.87 万元减小到 707.44 万元(降低约 8%),这表明所提出的方法不仅提高了管网的消防供水能力,同时还能降低管网造价。从管网布局来看,传统方案的主管从高位水池引出后向地势较低的南面敷设,而所提出方案的主管向地势较高的东面敷设。

图 6 给出了主管布局对管网节点水压的影响,按水压变化的大小对节点进行排序。可以看出,相较于传统方案,所提出方案中地势较高的 A 区域节点水压普遍增大,而地势较低的 B 区域节点水压普遍降低,整个管网的节点水压均匀性增大。值得注意的是,虽然 B 区域节点水压降低,但该区域内节点消防供水能力增大。这是由于 B 区管网消防供水能力取决于控制点水压(A 区域红色标注点)。

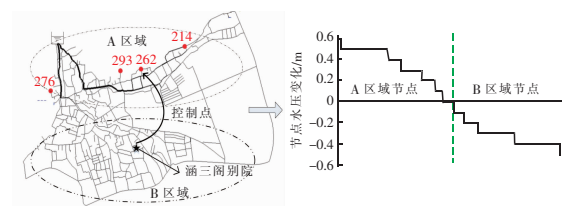


图 6 主管布局对节点水压的影响

Fig. 6 Influence of main pipe layout on water pressure of pipe network

进一步而言,规范要求消防供水时管网中所有节点水压不应低于 10 m,因此管网消防控制点通常为消防供水时水压最快下降到 10 m 的节点。从图 6 可以看出,节点 276、293、262 及 214 为管网消防控制点,这些控制点地势较高,正常用水时节点水压仅略大于设计值 20 m。当其他节点发生消防用水时,这些控制点水压最快下降到 10 m,对整个管网消防供水能力起着决定性作用。例如,涵三阁别院节点的控制点为 262,传统方案中节点 262 的水压为 20.1 m,所提出方案中节点 262 的水压为 20.7 m,虽然涵三阁别院节点水压下降约 0.4 m,但其消防供水能力增大 6 L/s。

3 结论

① 针对传统供水管网设计方法中存在消防设计流量取值偏小、消防工况选取不合理等问题,提出适用于旅游古城镇供水管网的多消防工况优化设计方法。相较于传统方法,所提出的优化设计方法具有如下优点:根据古城镇不同片区中典型建筑物消防需水量确定多消防工况,使管网消防供水能力与实际灭火需求相符;将管网中所有管道管径作为决策变量(非主观判定的少量主管),构建以最小化管

网造价为目标的优化问题,以多消防工况下的水压作为约束条件,在差分优化过程中直接淘汰不满足约束的管径组合方案,使得管网设计方案在经济上最优且满足不同消防工况下的用水量。

② 将所提出的方法应用于丽江大研古镇供水管网优化设计,结果表明,优化后管网方案的消防供水能力提升约6 L/s,对于典型建筑物消防供水能力达到了设计要求,且优化后管网造价较传统改造方案减少约8%,表明所提出的方法可行。此外,通过分析优化后管网布局及节点水压的变化发现,对水力条件较好的供水区域,其消防供水能力主要取决于对应的消防控制点,而消防控制点通常为消防用水量较大、地势较高的管网节点,在消防用水时这些节点水压通常最快下降到10 m。在优化设计改造时,主管应考虑向消防用水量大、地势高的控制点敷设,有利于提高管网整体消防供水能力并降低管网造价。

参考文献:

- [1] 张家忠,周宝坤. 古城镇消防安全问题及对策[J]. 中国公共安全(学术版),2014(3):57-61.
ZHANG Jiazhong, ZHOU Baokun. Problems and countermeasures of fire safety in ancient towns[J]. China Public Security (Academy Edition), 2014(3): 57-61 (in Chinese).
- [2] 范一凡. 独克宗古城灾后恢复重建与文化变迁研究[D]. 昆明:云南大学,2016.
FAN Yifan. The Ancient City of Dukezong: Post Disaster Reconstruction and Cultural Changes [D]. Kunming: Yunnan University, 2016 (in Chinese).
- [3] 李冰可. 中小城市火灾统计分析[J]. 科技信息, 2012(20):159,161.
LI Bingke. Statistical analysis of fire in small and medium-sized cities [J]. Science & Technology Information, 2012(20):159,161 (in Chinese).
- [4] KANG D, LANSEY K. Revisiting optimal water-distribution system design: issues and a heuristic hierarchical approach[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2012, 138(3):208-217.
- [5] 陈民,邢玉军. ISO 城市消防流量计算方法浅析[J]. 消防科学与技术, 2006, 25(3):334-336.
CHEN Min, XING Yujun. Analysis of ISO's methods of calculating city fire suppression flow [J]. Fire Science and Technology, 2006, 25(3):334-336 (in Chinese).
- [6] MANSOURI R, TORABI H, MORSHEDZADEH H, et al. Optimization of water distribution networks with differential evolution (DE) and mixed integer linear programming (MILP) [J]. Journal of Water Resource and Protection, 2015, 7(9):715-729.
- [7] SIRSANT S, REDDY M J. Reliability-based design of water distribution networks using self-adaptive differential evolution algorithm [J]. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 24(2):198-212.
- [8] DEB K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, 186(2/4):311-338.
- [9] 侯文彬,夏登友. ISO 城市区域消防流量方法适用性[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(6):727-730.
HOU Wenbin, XIA Dengyou. Discussion on applicability of ISO's methods of calculating city fire suppression flow [J]. Fire Science and Technology, 2015, 34(6):727-730 (in Chinese).
- [10] 王训斌,杜坤,宋志刚,等. 基于水力模型的市政管网消防供水能力评估方法研究[J]. 给水排水, 2018, 44(11):113-116.
WANG Xunbin, DU Kun, SONG Zhigang, et al. Research on water supply capability evaluation method of municipal pipe network based on hydraulic model [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(11):113-116 (in Chinese).

作者简介:杨佳莉(1995-),女,云南南涧人,硕士研究生,主要研究方向为供水管网优化。

E-mail:956985585@qq.com

收稿日期:2020-07-10

修回日期:2020-08-27

(编辑:任莹莹)