

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20242370

基于布谷鸟优化算法的城市供水优化调度

孟琦凯¹, 池勇志¹, 姜参参^{2,3}, 焦茹媛², 何 怡^{2,4}, 郑效旭^{2,4},
付晓青⁴, 庄绪亮^{2,3}, 徐圣君^{2,3,4}

(1. 天津城建大学环境与市政工程学院, 天津 300384; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085;
3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 4. 长三角(义乌)生态环境研究中心, 浙江 义乌 322000)

摘要: 如何利用数字化模拟技术对二供系统与城市主体供水系统进行协同优化, 以实现管网漏损控制和能耗减少, 并达成双碳目标, 已成为供水行业亟待解决的重要需求。为此, 引入水费与电费之和作为目标函数, 结合 EPANET 2.2、MATLAB 及 EPANET-MATLAB-Toolkit 进行联合编程, 提出了一种基于布谷鸟算法的水泵及二供系统进水量实时调度优化模型, 并将该优化模型在一个小型供水管网中进行验证。结果表明, 在 24 h 内的调度后, 优化后供水总费用减少了 3.5%, 其中水费降低了 0.63%, 电费降低了 9.9%。所构建的优化模型为未来供水管理的绿色、安全及智能化转型提供了参考与借鉴。

关键词: 供水系统优化; 泵站与水箱调度; 泄漏控制; 能源管理; 布谷鸟优化算法

中图分类号: TV674

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0152-05

Urban Water Supply Optimization Scheduling Based on Cuckoo Optimization Algorithm

MENG Qi-kai¹, CHI Yong-zhi¹, JIANG Can-can^{2,3}, JIAO Ru-yuan², HE Yi^{2,4},
ZHENG Xiao-xu^{2,4}, FU Xiao-qing⁴, ZHUANG Xu-liang^{2,3}, XU Sheng-jun^{2,3,4}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;
2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;
3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. Yangtze River Delta Research Center for Eco-Environmental Sciences, Yiwu 322000, China)

Abstract: The effective utilization of digital simulation technology for the synergistic optimization of secondary water supply systems and urban main water supply systems has emerged as a critical necessity in the water supply sector. This optimization aims to achieve leakage control in pipelines and reduce energy consumption while aligning with carbon neutrality objectives. This study presents a comprehensive approach that incorporates the sum of water charges and electricity costs as the objective function, leveraging a combination of EPANET 2.2, MATLAB, and the EPANET-MATLAB Toolkit. We propose an optimization model that employs the Cuckoo Search Algorithm to facilitate the real-time scheduling of pump operations and inflow rates within the secondary water supply system. The proposed optimization model was validated through application to a small-scale water supply network. The results show that the total costs reduce 3.5% over a 24-hour period, with water charges decreasing by 0.63% and electricity costs decreasing by 9.9%. The developed optimization model serves as a significant reference for the future advancement of green, safe, and intelligent water supply management practices.

Key words: water distribution system optimization; pump and tank scheduling; leakage control; energy management; Cuckoo optimization algorithm

收稿日期: 2024-12-19, 修回日期: 2025-03-27, 接受日期: 2025-04-18

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3203800); 浙江省“尖兵”“领燕”科技计划项目(2023C03131, 2023C03132)

作者简介: 孟琦凯(2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向为供水管网优化, E-mail: qikaimeng126@.com

通讯作者: 徐圣君(1985-), 男, 博士、副研究员, 研究方向为供水管网优化, E-mail: sjxu@rcees.ac.cn

1 引言

随着我国用水规模的扩大、高层建筑的增多,二次供水系统的应用逐渐广泛。通过二次供水系统与城市主体供水系统协同调度,实现漏损管控与能效优化以降低供水企业的运营成本,成为亟待解决的难题^[1]。为此,XU Q 等^[2-3]量化分析了二次供水系统的运行调度对城市供水系统在压力稳定性及漏损情况的影响,为二供系统调度改进提供了基础。刘雅亭等^[4-5]通过优化水箱进水调度策略,减少了供水能耗和漏损,体现了二供系统调度在减漏降耗方面的效能。然而,如何应用优化算法寻求二供系统与泵站之间的协同调度策略以及该策略在具体模型应用中的减漏降耗效果等问题,尚未形成系统性的理论框架和研究分析。基于布谷鸟优化算法求解配合峰谷电价的二供系统水量时空调度与水泵调速的协同优化策略可实现管网压力调控及减漏降耗目标。为此,本文首先设计了一个包含二供系统的水力模型,用以模拟和计算管网的水力运行状态、能耗及漏损情况;其次通过布谷鸟优化算法,寻求各时段二供系统中水箱的最优进水量及泵站中水泵的相对转速两项运行策略;最后分析了优化前后系统各阶段的能耗需求、漏损水量等变化情况,评估了泵站与二供系统联合优化所带来的经济效益。

2 模型与方法

2.1 决策变量与目标函数

本文提出一种基于峰谷电价机制的二次供水系统协同优化策略,旨在将供水与电价双高峰时段的流量转移至双低谷时段。通过这一时空水量调度,在缓解管网压力波动的同时,动态调节水泵转速以抑制漏损水量,并显著降低高电价时段的泵站能耗成本。因此,决策变量选定为二次供水系统中流量控制阀的通过流量及变速泵的相对转速。将目标函数确定为漏损水费和水泵电费之和,定义为供水总费用,用符号 f_{sum} 表示(单位为元),其计算公式为:

$$f_{\text{sum}} = S \sum_{i=1}^{24} Q_{it} + w_t \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{t=1}^{24} \frac{\rho g Q_{jt} h_{jt}}{3\,600 \times 1\,000 \eta_{jt} \eta_1 \eta_2} \quad (1)$$

式中, S 为单位制水成本,元/ m^3 ; Q_{it} 为节点 i 在时刻 t 的漏损水量, m^3/h (需二次供水的节点选取流量控制阀的流量); w_t 为 t 时刻的单位电度

电费,元/($\text{kW} \cdot \text{h}$); N_p 为水泵的总数; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; g 为当地重力加速度, m/s^2 ; Q_{jt} 、 h_{jt} 、 η_{jt} 分别为水泵 j 在时刻 t 的流量、扬程、效率,单位分别为 m^3/h 、 m 、 $\%$; η_1 为电动机传动效率; η_2 为电动机效率。

本文漏损水费的计算被表达为单位制水成本与 24 h 内总漏损水量的乘积。电费由泵站内的变速泵产生。

2.2 约束函数

为确保高层建筑的用水供应,同时避免二次供水系统出现负压状态。需对流量控制阀的流量(F)和水箱水位(L)进行约束, F 、 L 的取值范围分别为:

$$F_{\min} \leq F \leq F_{\max} \quad (2)$$

$$L_{\min} \leq L \leq L_{\max} \quad (3)$$

式中, $F_{\min}$ 、 $F_{\max}$ 分别为流量控制阀的最小流量、最大流量, m^3/h ; $L_{\min}$ 、 $L_{\max}$ 分别为水箱最低水位、最高水位, m 。

为保证水泵处于高效运行区间,需对水泵转速(R)进行约束, R 的取值范围为:

$$R_{\min} \leq R \leq R_{\max} \quad (4)$$

式中, $R_{\min}$ 、 $R_{\max}$ 分别为水泵最小相对转速、最大相对转速。

为保障管网供水压力满足用户需求且不造成浪费,需对各节点的压力(H_i)进行约束, H_i 的约束范围为:

$$H_{\min,i} \leq H_i \leq H_{\max,i} \quad (5)$$

式中, $H_{\min,i}$ 、 $H_{\max,i}$ 分别为节点 i 的最小压力、最大压力, m 。

2.3 指标与构建模拟

采用 EPANET 2.2 水力软件构建二次供水系统与城市主体供水系统的水力模型。

(1)漏损计算。EPANET 2.2 水力软件通过设置节点漏损指数系数的方式来模拟管网的漏损情况。漏损水量 Q_L 的计算公式为:

$$Q_L = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_s} C_L p_{i,t}^{\gamma} \quad (6)$$

式中, N_s 为节点总数; C_L 为漏损常数; $p_{i,t}$ 为节点 i 在时段 t 的压力; γ 为漏损指数系数。

(2)变速泵的模拟。变速泵的转速(r)、流量(Q)、扬程(H)与电机轴功率(P)存在如下关系:

$$r_1/r_2 = Q_1/Q_2 = \sqrt[3]{H_1/H_2} = \sqrt[3]{P_1/P_2} \quad (7)$$

模拟时通过赋给目标水泵一个相对转速设置的时间模式,来改变水泵在各个时刻的转速,从而保证变速泵在不同工况下均处于高效运行区间。

(3)二次供水系统中流量控制阀的模拟。在

EPANET 2.2 中,流量控制阀具有一个可设置的参数,该参数可与控制语句结合使用,以便在模拟过程中动态调整流量控制阀的状态。控制语句见图 1。

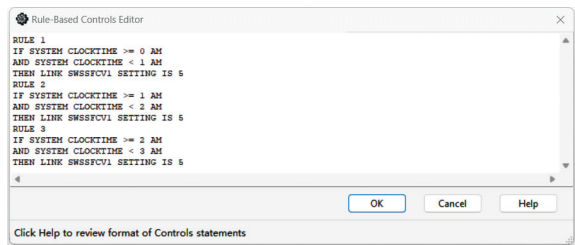


图 1 EPANET 2.2 流量控制阀控制语句
Fig. 1 EPANET 2.2 flow control valve control statement

2.4 布谷鸟算法

由于布谷鸟算法(CS)采用 LEVY 飞行机制向最优解移动,并通过概率筛选减少陷入局部最优的可能性,能够有效应对供水系统优化调度中的混合变量处理、复杂约束满足和全局最优搜索等核心挑战^[6]。因此,本文选用布谷鸟算法,并结合 MATLAB 及 EPANET-MATLAB-Toolkit 进行联合编程,以实现流量控制阀流量和水泵相对转速的优化调度。

3 结果与讨论

3.1 管网概况

本文设计了一个包含建筑二次供水系统的虚拟供水系统,水力模型见图 2。其中,将需要二次供水系统的高层建筑设置为两个需水节点,分别代表高层建筑中的低楼层用户和高楼层用户,低楼层用户直接接入城市供水系统,而高楼层用户前端设置流量控制阀、水箱及水泵等。

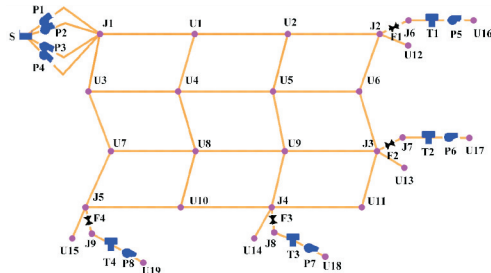


图 2 虚拟供水系统水力模型
Fig. 2 Hydraulic model of virtual water supply system

该管网系统包括 1 个水源(S)、4 个水箱(T1~T4)、4 个流量控制阀(F1~F4)、9 个中间节点(J1~J9)、19 个用户节点(U1~U19)及 8 台变速泵(P1~P8)。在用户节点中,U1~U11 为市政管网的直供用户,U12~U15 为高层建筑中的低楼层用户,而 U16~U19 则为高层建筑中的

高楼层用户。水泵应用方面,P1~P4 为泵站中的变速泵,其性能曲线为 $H = 64.00 - 0.013\ 06Q^2$ (H 为扬程,m; Q 为流量, m^3/h);P5~P8 为各个二次供水系统中的水泵,其性能曲线为 $H = 66.67 - 0.041\ 67Q^2$ 。各管段的长度、直径、漏损指数系数及海曾—威廉系数(H-W 系数)见表 1。

表 1 虚拟管网中各管段相关参数
Tab. 1 Related parameters of each pipe segment in the virtual pipe network

管段	长度 /km	直径 /mm	漏损指 数系数	H-W 系数
J1~U1;U1~U2;U2~J2;U3~U4;U5~U6;U7~U8; U8~U9;U9~J3;J5~U10;U10~J4;J4~U11;	5	200	0.08	140
J1~U3;U1~U4;U2~U5;J2~U6;U3~U7;U4~U8; U5~U9;U6~J3;U7~J5;U8~U10;U9~J4;J3~U11;	2	150	0.09	140
J2~U12;J3~U13;J4~U14;J5~U15;	0.5	120	0.08	140

用水时变化系数的设置是在实践经验基础上给出的粗略值,见图 3(a)。用户节点(U1~U19)的日平均用水量见图 3(b)。另外,依据《建筑给水排水设计标准》(GB 50015-2019)^[7],将二次供水系统中水箱的容积设置为用户日用水量的 20%。参照国网浙江省电力有限公司工商业用户购电价格,将高、中、低峰供电成本分别设置为 1.12、0.86、0.29 元/(kW·h),供水成本设置为 3.19 元/ m^3 。

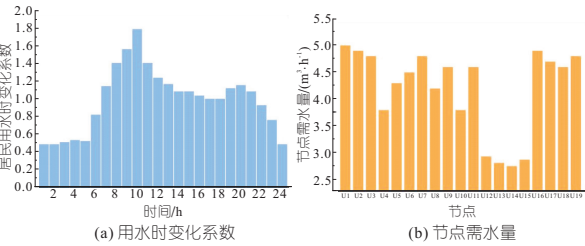


图 3 虚拟供水系统基础信息
Fig. 3 Basic information of virtual water supply system

3.2 优化求解

利用 EPANET-MATLAB-Toolkit 工具包提供的接口函数,将设计完成的配水系统水力模型导入 MATLAB 2022 进行模型数据的加载与解析。此时,水箱采用即用即进式进水,即流量控制阀的流量与水箱的出水量相等,水箱水位恒定。依据费用计算公式(1)求出初始每日供水总费用为 795.82 元,其中水费为 547.91 元,电费为 247.91 元。随后按照图 4 流程进行优化求解。首先输入目标函数及相关变量,设定种群规模(鸟巢数量)为 20、布谷鸟蛋被发现的概率(p_a)为 0.25。依据式(1)~(5)撰写解空间上下界。接着,将流量控制阀和水泵的工况参数定义为鸟巢位置并初始化随机生成。再将生成的鸟巢位置代入水力模型中求得适应度值(适应度值为目标函

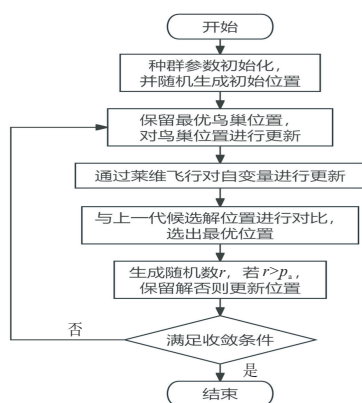


图 4 布谷鸟算法流程图

Fig. 4 Flowchart of Cuckoo algorithm

数的值)。随后,通过莱维飞行机制生成新的鸟巢位置并再次计算其适应度,比较新鸟巢位置的适应度值与当前最优鸟巢位置,若新解更优,则更新当前最优值。接着,产生一个 $[0,1]$ 之间的随机数 r ,若 r 大于 p_a ,则随机改变鸟巢位置,获得一组新的鸟巢。最后,当算法在 1 000 次迭代中未找到更优解时,结束计算。最终,通过该优化模型得出,该供水系统在当前约束条件下能够实现的每日供水总费用约为 767.74 元,其中水费 544.47 元,电费 223.27 元。

3.3 结果分析

通过优化模拟,获得了 4 个流量控制阀在各个时段的通过流量优化结果,如图 5(a)所示。以 T1 水箱为例,绘制了优化后水箱水位的变化情况,如图 5(b)所示。由图 5 可知,在用水低谷时段(0:00~6:00、22:00~0:00),流量控制阀通过流量大于节点需水量,水箱在该期间进行蓄水作业,水箱水位呈上升趋势。在 6:00~22:00 的用水高峰时段,流量控制阀流量小于节点需水量,水箱水位呈下降趋势,反映出系统优先调度水箱内储存的水资源以满足用户需求。这一现象表明,经过二次供水系统调度有效实现了供水负荷的时空转移,形成了“低谷蓄水、高峰释水”的良性循环。

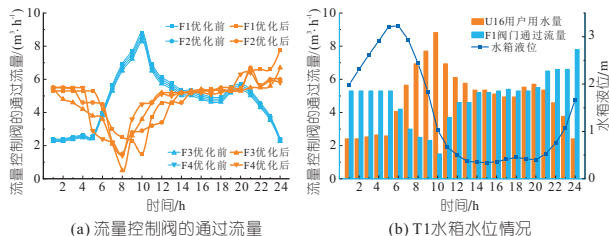
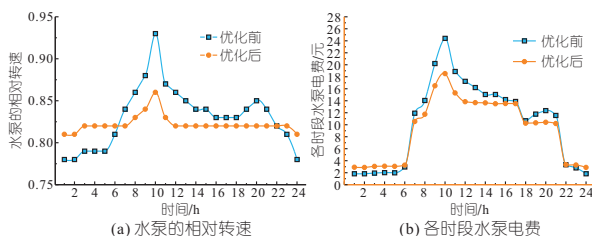
图 5 流量控制阀的通过流量和 T1 水箱水位情况
优化前后的结果对比Fig. 5 Comparison of results before and after optimization
with flow through flow control valve and water
level of T1 tank

图 6(a)为水泵优化调度结果。由图 6(a)可知,日间(6:00~22:00)水泵的相对转速较优化前明显降低,尤其在尖峰时段,从原本的 0.93 降至 0.86。而在夜间及凌晨时段(0:00~6:00、22:00~0:00),水泵的相对转速则明显上升,特别是在低谷时段,从 0.78 提升至 0.81。这一变化归因于水箱的蓄水作业增加了夜间的系统需水量,要求水泵维持较高的转速以满足蓄水需求。图 6(b)展示了优化前后各时段水泵的电费情况。由图 6(b)可知,由于优化后水泵相对转速的变化与优化前相比,在电价高峰时段(9:00~17:00)减少 23.05 元,在电价中峰时段(7:00~8:00、18:00~21:00)电费支出减少 8.86 元,电价低谷时段(0:00~6:00、22:00~24:00)电费支出增加 7.27 元,合计每日电费节支 24.64 元。

图 6 水泵的相对转速及各时段水泵电费
优化前后的结果对比Fig. 6 Comparison of results before and after optimization
with the relative speed of the pump and the electricity
charge of the pump in each period

通过优化前后水费数据发现,水费降幅仅为 0.63%,漏损水量未呈现显著下降趋势。这一现象可归因于漏损水量与节点压力之间呈现正比关联特性^[8]。本文构建的协同优化策略通过水泵调速与二次供水时空调度的联合作用,虽有效实现了管网总供水量的时序均衡化调控,让日用水量波动系数由 0.29 降至 0.14(各节点于 24 h 内总用水量的标准差除以平均值),但管网平均压力(各节点压力的平均值)由优化前的 298.90 kPa 仅下降至 294.98 kPa,优化前后管网平均压力下降不显著。由于漏损水量与节点压力呈正比,在总水量不变情况下,漏损总量未发生显著变化,导致漏损水费节支很少。但综合来看,基于布谷鸟算法的水泵与二供系统优化模型,可实现节约 3.5% 的日运营成本,体现了精准调控水箱蓄放功能与水泵联合调控可带来的经济效益,其科学合理地运用是推动供水系统向智能化、绿色化转型的关键驱动力之一。

4 结论

a. 本文提出了一种基于布谷鸟算法的实时

调度优化模型,并设计了一个结合二次供水系统与城市主体管网的供水系统进行验证。结果表明,该模型通过精确调控流量控制阀的流量,并结合峰谷电价对水泵相对转速进行调节,成功实现了减漏降耗的目标,使供水总费用减少了 3.5%。

b. 本文在联合二次供水系统与城市主体管网的运行调度方面进行了优化,弥补了现有模型在成本效益分析中的不足,为以绿色和安全为目标的系统优化调度模式提供了理论参考。

参考文献:

- [1] NEGM A, MA X D, AGGIDIS G. Deep reinforcement learning challenges and opportunities for urban water systems[J]. Water research, 2024, 253: 121145.
- [2] XU Q, CHEN Q W, QI S L, et al. Improving water and energy metabolism efficiency in urban water supply system through pressure stabilization by optimal operation on water tanks[J]. Ecological informatics, 2015, 26: 111-116.
- [3] 王晴怡,王彤,康炳卿,等. 基于聚类分析法的二次供水错峰调蓄研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(6): 94-97. (WANG Q Y, WANG T, KANG B Q, et al. Study on peak staggered storage of secondary water supply based on cluster analysis[J]. Water resources and power, 2023, 41(6): 94-97. (in Chinese))
- [4] 刘雅亭. 基于水力模型和遗传算法的二次供水优化

(上接第 98 页)

- [2] GUO J C, LU Q L, LIU Z, et al. Concept and key technology of “multi-scale high-density” fracturing technology: A case study of tight sandstone gas reservoirs in the western Sichuan Basin[J]. Natural gas industry B, 2023, 10(3): 283-292.
- [3] 崔少英,包腾飞,崔健健. 水工隧洞中水力劈裂临界孔隙水压计算方法[J]. 水电能源科学, 2012, 30(5): 62-64, 170. (CUI S Y, BAO T F, CUI J J. Computing method study of critical pore water pressure of hydraulic splitting in hydraulic tunnel[J]. Water resources and power, 2012, 30(5): 62-64, 170. (in Chinese))
- [4] 苏海健,靖洪文,赵洪辉,等. 平行裂隙群岩体强度与破裂特征的试验研究[J]. 工程力学, 2015, 32(5): 192-197, 207. (SU H J, JING H W, ZHAO H H, et al. Strength and fracture characteristic of rock mass containing parallel fissures[J]. Engineering mechanics, 2015, 32(5): 192-197, 207. (in Chinese))
- [5] 赵洪宝,胡桂林,李伟,等. 预制裂隙岩石裂纹扩展规律的研究进展与思考[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(增刊 2): 899-906. (ZHAO H B, HU G L, LI W, et al. Research progress and thinking on the crack propagation law of pre-fractured rock[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2016, 12(S2): 899-906. (in Chinese))
- [6] 申林方,华涛,王志良,等. 参数空间变异性对岩石水力压裂裂隙扩展形态的影响[J]. 岩土力学, 2025, 46(4): 1294-1302. (SHEN L F, HUA T, WANG Z L, et al. Effect of parameter spatial varia-

调度研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2023. (LIU Y T. Study on optimal operation of secondary water supply based on hydraulic model and genetic algorithm[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2023. (in Chinese))

- [5] 曹金宇,信昆仑,周立典,等. 基于低位水箱调度的二级泵站供水能耗优化[J]. 环境工程, 2023, 41(6): 174-180. (CAO J Y, XIN K L, ZHOU L D, et al. Energy consumption optimization of secondary pumping station based on low-level water tank scheduling[J]. Environmental engineering, 2023, 41(6): 174-180. (in Chinese))
- [6] RAJWAR K, DEEP K, DAS S. An exhaustive review of the metaheuristic algorithms for search and optimization: Taxonomy, applications, and open challenges[J]. Artificial intelligence review, 2023, 56(11): 13187-13257.
- [7] 徐凤. 与时俱进 促进发展——国家标准《建筑给水排水设计标准》(GB 50015-2019)修订介绍[J]. 给水排水, 2020, 56(7): 1-3, 26. (XU F. Introduction on revision of Standard for design of building water supply and drainage (GB 50015-2019) [J]. Water & wastewater engineering, 2020, 56(7): 1-3, 26. (in Chinese))
- [8] 王彤,杨军. M市供水泵站优化调度模型及应用[J]. 水电能源科学, 2019, 37(7): 141-145. (WANG T, YANG J. Study on optimal dispatching of water supply pumping stations in M city[J]. Water resources and power, 2019, 37(7): 141-145. (in Chinese))
- [9] 唐巨鹏,路江伟,许鹏,等. 预制裂缝对煤系页岩水力压裂效果影响的试验研究[J]. 实验力学, 2018, 33(1): 150-158. (TANG J P, LU J W, XU P, et al. Experimental investigation on the effect of prefabricated cracks on hydrofracture of coal measure shale[J]. Journal of experimental mechanics, 2018, 33(1): 150-158. (in Chinese))
- [8] LÜ M L, ZHU Z D, ZHOU L M, et al. Numerical simulation of hydraulic fracture propagation in rock masses with pre-existing double fractures using the phase field method[J]. Rock and soil mechanics, 2024, 45(6): 1850-1862.
- [9] 蒋长宝,付银兰,王光淇. 水力压裂煤裂隙网络表征与造缝性能评估试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6): 62-71. (JIANG C B, FU Y L, WANG G Q. Experimental study on characterization hydraulic fracturing coal fracture network and evolution of fracture forming performance[J]. Coal science and technology, 2023, 51(6): 62-71. (in Chinese))
- [10] 牛双建,靖洪文,杨大方,等. 单轴压缩下破裂岩样强度及变形特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(1): 112-118, 125. (NIU S J, JING H W, YANG D F, et al. Experimental study on strength characteristics and deformation behavior of the cracked rock samples under uniaxial compression [J]. Journal of mining and safety engineering, 2015, 32(1): 112-118, 125. (in Chinese))