

基于改进人工蜂群算法的锚杆格构梁 加固边坡优化研究

吝哲峰¹ 何锦涛² 刘洋^{2,*}

(1. 陕西核工业工程勘察院有限公司, 西安 710054; 2. 西安工程大学城市规划与市政工程学院, 西安 710600)

摘要 锚杆格构梁支护结构是边坡加固和滑坡防治中的一种常用结构,在边坡支护、滑坡治理方面有很好的防治效果。现有支护结构系统以及加固机理研究主要针对边坡本身参数,而在支护结构优化以及综合考虑边坡稳定性方面的研究相对较少。本文以典型圆弧滑裂面边坡作为研究对象,通过建立该边坡的边界方程,采用改进人工蜂群优化算法对边坡工程中的锚杆格构梁参数进行了优化研究,使用解析法对锚杆格构梁建立优化设计数学模型,编制了基于人工蜂群算法的锚杆格构梁优化设计程序。通过实例分析,验证了改进人工蜂群算法在锚杆格构梁支护结构优化设计方面的有效性,可为今后同类型项目的设计提供参考。

关键词 锚杆格构梁, 支护结构, 改进人工蜂群算法

中图分类号: TU476 文献标志码: A DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.202601.0008

Research on Strengthening Optimization of Anchor Lattice Beam Based on Improved Artificial Bee Colony Optimization Algorithm

LIN Zhefeng¹ HE Jintao² LIU Yang^{2,*}

(1. Shaanxi Nuclear Industry Engineering Survey Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2. School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710600, China)

Abstract The anchor lattice beam supporting structure is commonly used in slope reinforcement and landslide prevention and control, demonstrating effective performance in slope support and landslide management. Existing research on the supporting structural system and reinforcement mechanisms has primarily focused on slope parameters, whereas studies on the optimization of the supporting structure and the comprehensive assessment of slope stability remain relatively limited. This paper takes a typical slope with a circular slip surface as the research subject. By establishing the boundary equations of the slope, an improved artificial bee colony optimization algorithm is applied to optimize the parameters of the anchor lattice beam in slope engineering. An analytical method is employed to develop a mathematical model for the optimal design of the anchor lattice beam, and a corresponding optimization design program based on the artificial bee colony algorithm is compiled. Through case analysis, the effectiveness of the improved artificial bee colony algorithm in the optimization design of the anchor lattice beam supporting structure is verified, which can provide a reference for the design of similar projects in the future.

Keywords anchor lattice beam, supporting structure, improved artificial bee colony optimization algorithm

收稿日期: 2024-11-11

基金项目: 陕西省油气井及储层渗流与岩石力学重点实验室开放基金(WSEFRM20200102001)

作者简介: 吝哲峰(1978-),男,高级工程师,主要从事灾害防治与预警研究。E-mail:564075961@qq.com

* 联系作者: 刘洋(1980-),男,副教授,主要从事建筑结构抗震及控制和岩土工程及防灾减灾研究。E-mail:yangliu@xpu.edu.cn

0 引言

滑坡作为一种常见的地质灾害,对周边的基础设施、居民财产乃至居民生命安全构成了严重威胁。因此,对滑坡进行有效治理和开展边坡防护显得尤为重要,这需要开发出既便捷又经济的支护结构。锚杆格构梁支护结构因其在边坡加固中的显著效果而得到了广泛应用,吸引了众多研究者的关注和深入研究。韩冬冬等^[1]开展了不同间距预应力锚杆格构梁与黄土滑坡相互作用的模型试验,发现格构梁间距越大,锚杆力差距大。Zeng等^[2]基于极限平衡理论,建立了考虑锚杆预应力的框架锚杆加筋边坡地震稳定性分析模型。Qiu等^[3]基于框架预应力锚杆边坡支护结构的作用机理,对框架锚杆支护结构在谐波地震作用下的土压力变化与工程实例进行了比较。Li等^[4]为了揭示土锚滑坡的动力行为以及不同频率下锚体的力学特征,对1:7比例的土锚滑坡进行了振动台试验。

在边坡稳定性和支护结构优化设计方面,以优化算法为基础的工程设计优化方法是求解各种工程问题最优解的新方法和研究趋势。张研等^[5]提出了基于天牛须算法的相关向量机边坡稳定性分析优化模型,并将该模型应用于高速公路的边坡稳定性分析。Pu等^[6]提出了一种优化算法——混合粒子群算法来解决相应的算法缺陷问题。曹昊等^[7]提出基于黏菌智能优化算法和蒙特卡洛模拟的可靠度分析方法,对爆区附近古滑坡体进行稳定性分析。李垚熠等^[8]提出了基于列文伯格-马夸尔特算法和光谱优化算法的边坡形态智能优化方法,综合考虑了边坡优化的经济性和稳定性,提高了边坡稳定性。不少学者采用智能优化算法对工程问题进行优化。Zhao等^[9]提出了一种新的生物启发优化算法(称为人工蜂鸟算法)来解决优化问题。林中湘等^[10]通过机器学习的方法,进行了巷道响应参数敏感性分析,解决了强开采扰动作用下深部沿空巷道围岩稳定性控制问题。综上所述,现有支护结构系统以及加固机理研究主要针对边坡本身参数,而在支护结构优化以及综合考虑边坡稳定性方面的研究相对较少。

本文以典型圆弧滑裂面边坡作为研究对象,通过建立该边坡的边界方程,给出了锚杆格构梁

结构支护系统优化模型,提出了改进人工蜂群算法,并用改进人工蜂群算法解决边坡工程中锚杆格构梁支护结构的参数优化问题。通过引入线性衰减指数作为领域半径参数改进了传统人工蜂群算法,以增强算法的寻优效率。通过使用基于改进人工蜂群算法的锚杆格构梁优化模型,探索边坡支护结构的最佳加固参数组合,提高边坡工程的设计质量和安全性。

1 格构锚固参数优化模型建立

1.1 格构锚固边坡安全系数的计算

本文综合实际典型边坡特性,以典型圆弧滑裂面边坡作为研究对象,建立圆弧滑裂面边坡的几何边界数学模型。几何模型的原点设置在坡脚处,建立 xoy 坐标系,如图1所示。边坡边界方程第1段坡面 L_1 的方程为式(1),第2段坡顶 L_2 的方程为式(2),假定潜在滑裂面为圆弧面,其圆心为 $O(x_0, y_0)$,滑面 C 的方程为式(3)。边坡的几何边界方程如下:

$$L_1(x) = x \tan \beta \quad 0 < x \leq H / \tan \beta \quad (1)$$

$$L_2(x) = H \quad x > H / \tan \beta \quad (2)$$

$$C(x) = y_0 - \sqrt{R^2 - (x - x_0)^2} \quad x \geq 0, y \geq 0 \quad (3)$$

式中: β 为边坡坡角; H 为边坡高度; R 为潜在滑裂面圆弧半径。

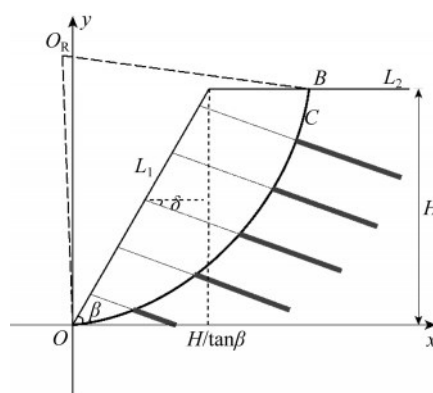


图1 锚杆格构梁加固边坡简化模型示意图

Fig.1 Simplified model diagram of slope reinforced by anchor lattice beam

1.2 格构锚固的参数优化模型

根据预应力锚杆作用在条分块位置的不同,将条分块分为两类,条分块示意图如图2所示^[11]。

0#条分块为预应力锚杆从条分块中间贯穿,1#条分块为预应力锚杆从条分块底部贯穿。通过对条分块的分类,由力的平衡分别可得0#条分块和1#条分块的物理方程,其公式如下:

$$N_0 = \sum_{i=1}^{n_0} cl + \{w_{0,i} \sin \theta_{0,i} + q_j \cos \delta [\sqrt{x_1^2 - (x_{0,i} - x_0)^2}] \sin \theta_{0,i}\} \tan \varphi \theta_{0,i} \quad (4)$$

$$N_1 = \sum_{i=1}^{n_1} cl + (w_{1,i} + q_j \sin \delta d) \cos \theta_{1,i} + F_i \quad (5a)$$

$$F_i = q_j \cos \delta [\sqrt{x_1^2 - (x_{1,i+1} - x_0)^2} - \sqrt{x_1^2 - (x_{1,i} - x_0)^2}] \sin \theta_{1,i} \tan \varphi_{1,i} \quad (5b)$$

式中: c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; w 为土体重力; l 为条分块长度; q_j 为第 j 排锚杆预应力; $\theta_j = 90^\circ - \alpha_i - \delta$, δ 为锚杆的倾角, α 为条分块底部水平夹角。

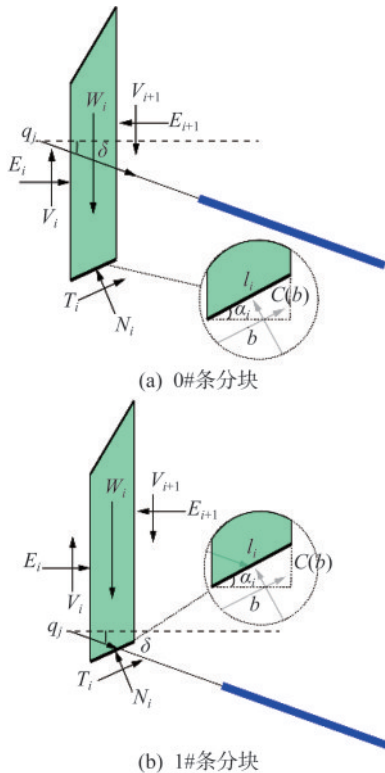


图2 条分块示意图

Fig.2 Slice block diagram

由法向反力 N_i 和切向反力 T_i 求得 a 、 b 滑裂面上总的滑动力 N 与抗滑力 T :

$$N = \sum_{i=0}^n N_i \quad (6)$$

$$T = \sum_{i=1}^{n_0} w_{0,i} \sin \theta_{0,i} + \sum_{i=1}^{n_1} w_{1,i} \sin \theta_{1,i} \quad (7)$$

2 基于改进人工蜂群算法的格构锚固优化

为解决锚杆格构梁的结构设计优化问题,本文以最大安全系数为目标进行锚杆格构梁参数的优化设计。设定目标函数 F_s ,其计算公式由式(6)和式(7)确定:

$$\max F_s = \frac{N}{T} \quad (8)$$

2.1 改进人工蜂群算法

人工蜂群算法是一种模拟蜂群采蜜行为的仿生智能算法。传统人工蜂群算法蜜源更新机制如下:

$$v_{ij} = x_{ij} + \text{rand}(-1, 1)(x_{ij} - x_{kj}) \quad (9)$$

式中: x_{ij} 为锚杆格构梁支护边坡安全系数方程的向量; v_{ij} 为在蜜源 x_{ij} 附近产生的新蜜源的位置; k 为随机产生的数。

传统人工蜂群算法常因收敛速度缓慢、易早熟收敛以及倾向于陷入局部最优解而应用受到局限。针对这些问题,本研究提出了一种改良版的人工蜂群算法。该改进算法对蜜源更新机制进行了优化:

$$v_{ij} = x_{ij} + RC_i \text{rand}(-1, 1)(x_{ij} - x_{kj}) \quad (10)$$

$$RC_i = A(1 - i/T) \quad (11)$$

式中: RC_i 为迭代 i 次的领域半径参数; i 为迭代次数; T 为迭代总数。

2.2 算法参数的选取

算法的性能在很大程度上取决于其参数设置的合理性。其中,蜜源规模作为一个关键参数,对算法的收敛性和寻优能力影响很大。本文对比了蜜源规模分别为20、30、50、100、200、300和500的适应度曲线。不同蜜源规模下的改进人工蜂群收敛过程曲线如图3所示。由图3可知,随着蜜源规模增大,蜜源可获得更好的初始最佳适应度值,且能以更少的移动次数收敛至最优解。当蜜源规模为20时,迭代次数大于100后适应度曲线出现一些不收敛点;当蜜源规模为30时,不收敛点减少;当蜜源规模达到50时,不再出现这种现象。由于蜜源规模为200时收敛速度和收敛性均有所保证,本文建议用改进人工蜂群算法求解优化设计问题时,蜜源规模可取200,最大移动次数可取100。

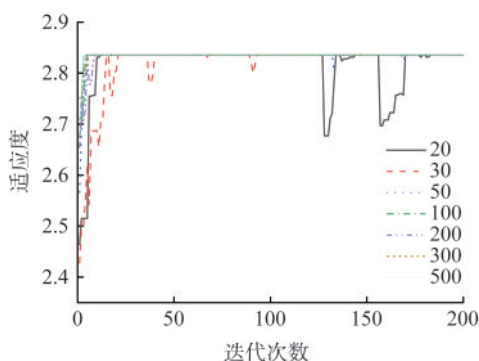


图3 不同蜜源规模下的改进人工蜂群收敛过程曲线
Fig.3 Improved artificial bee colony convergence process curves under different nectar source scales

3 算例分析

3.1 算例求解过程

模型土体初始计算参数见表1。以实际典型边坡为研究对象,参考已有文献选用表1的参数。模型尺寸及监测点图如图4所示。依照图4所示的模型尺寸^[1,11-12],得到该模型的边界方程,通过给定的首行锚杆的坐标和锚杆行数及间距,计算该模型在给定的圆弧面的安全系数解析解,未加锚杆格构梁时安全系数为1.65,加入锚杆格构梁后为2.22。

表1 模型土体初始计算参数

Table 1 Initial calculation parameters of model soil

材料参数	重度/ (kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角	滑面半径/m
土体	20.7	29.6	21.4°	6.855
首行锚杆x	锚固力/kN	锚杆行数	锚固角	锚杆间距/m
0.384	100	5	20°	1.5

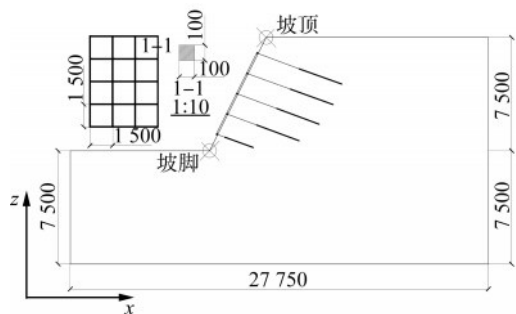


图4 模型尺寸及监测点图(单位: mm)

Fig.4 Model size and monitoring point diagram (Unit: mm)

锚杆格构梁设计工况见表2。鉴于首行锚杆的坐标存在差异,综合考量了首行锚杆的具体位置与锚杆间距,精确计算出坡面上所需锚杆的数

量,并据此设定了表2中的五种设计工况。基于改进人工蜂群算法的锚杆格构梁参数优化结果见表3。采用改进人工蜂群算法求解锚杆格构梁系统中锚杆的关键参数预应力值 q_j 、锚固角 δ 和锚固间距 S_x 的优化设计值,同时给出各工况优化设计参数对应的安全系数。

表2 锚杆格构梁设计工况

Table 2 Design conditions of anchor lattice beam

工况	首根锚杆的横坐标
1	0.184
2	0.284
3	0.384
4	0.484
5	0.584

表3 基于改进人工蜂群算法的锚杆格构梁参数优化结果

Table 3 Optimization results of anchor lattice beam parameters based on improved artificial bee colony algorithm

工况	锚杆格构梁优化设计参数			优化后安全系数
	锚固力/kN	锚固角/(°)	锚杆间距/m	
1	144.54	30.88	0.50	2.023
2	81.65	60.95	1.70	2.155
3	124.17	64.30	0.94	2.291
4	136.09	77.97	1.60	2.289
5	143.18	59.87	1.09	2.292

3.2 数值模拟验证

3.2.1 模型建立

研究中,利用有限元软件FLAC 3D建立了锚杆格构梁加固边坡数值模型,并对数值模拟结果进行验证。综合考虑实际滑坡治理案例,确定研究模型尺寸为27.75 m×6.50 m×15.00 m。模型的上部约束是完全自由的,下部是完全约束的,外围约束是固定其法线方向的。土体模型选用摩尔库仑本构模型。建立格构梁实体模型,选用弹性本构模型,Cable单元模拟锚杆,锚杆的节点与格构梁纵横梁交叉点进行节点耦合,其本构模型为线弹性模型。模型土为均质黄土,表1为土体参数,根据图4的尺寸建立的模型数值模型如图5所示。具体加载方案与已有文献[12]相同。

3.2.2 优化结果分析

有限元数值模拟分析、参考的模型试验^[12]和优化后的坡顶处和坡脚处位移结果如图6所示。

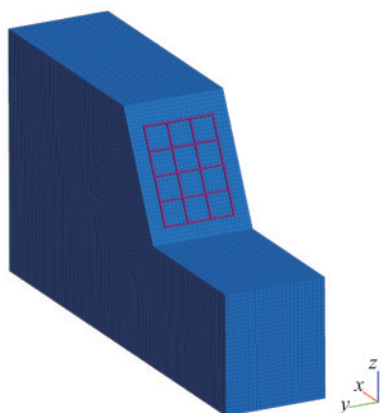


图5 数值模型图

Fig.5 Numerical model diagram

图中横坐标为荷载值,单位为 kPa;纵坐标为位移值,单位为 mm。纵坐标中位移正值包括坡顶处的模拟计算值、模型试验值和优化后计算出的工况 3 的优化结果。纵坐标中位移负值是坡脚处的模拟计算值、模型试验值和优化后计算出的工况 3 的优化结果。通过对比模型试验和未优化的有限元数值计算结果,在均布荷载的作用下,当荷载从 6 kPa 增加到 48 kPa 时,坡顶位移的两组数据最大差值为 8.56 mm,最小差值为 0.39 mm;坡脚处位移的两组数据最大差值为 13.57 mm,最小差值为 2.28 mm。与坡高相比,最大值变化小于 0.2%,可见,二者分析结果基本一致,说明了本文使用的有限元模型的正确性,可在此基础上分析使用改进人工蜂群算法优化后的锚杆格构梁设计结果,更好地说明优化的效果。在对比优化前后的有限元数值计算结果后,随着均布荷载的逐渐增加,改进人工蜂群算法后的预应力锚杆格构梁的支护效果越来越明显。在 6 kPa、24 kPa、42 kPa 时,坡顶处位移差值分别为 0.24 mm、2.44 mm、9.16 mm,坡脚处位移差值分别为 0.87 mm、2.38 mm、6.97 mm,分析计算得到总体优化效果最高可达 12%,平均可达 10%。

4 结论

本文基于预应力锚杆格构梁系统改进了人工蜂群算法,并利用改进的人工蜂群算法优化了预应力锚杆格构梁支护系统设计结果,获得的主要结论如下:

(1) 基于传统的条分法,给出了在预应力锚杆格构梁系统支护下的边坡安全系数的计算方

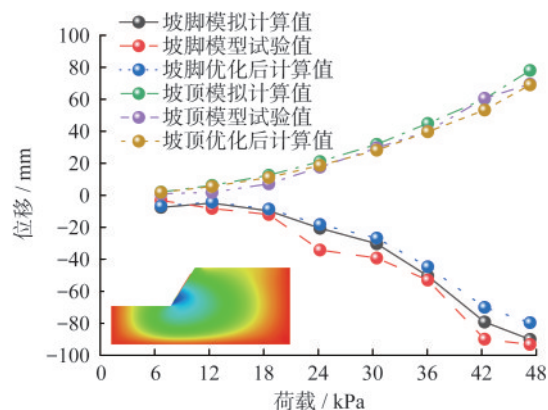


图6 监测点位移值

Fig.6 Displacement value of monitoring point

法,建立了锚杆格构梁支护结构的优化模型。

(2) 通过引入线性衰减领域半径对蜜源更新机制进行改进,得到了改进的人工蜂群算法,并求解锚杆格构梁系统优化模型,得到了边坡支护结构的最佳加固参数组合,分析得到该方法平均优化效果可达 10%。

(3) 通过对坡度为 60° 的锚杆格构梁支护结构加固的边坡的研究,初步确定了边界方程和优化目标函数等因素。

研究结果可用于其他类型的预应力锚杆格构梁加固边坡优化模型等相关问题。后续的研究中将进一步研究适用于不同坡角和复杂地质条件的优化模型。

参 考 文 献

- [1] 韩冬冬, 门玉明, 王鹏. 格构梁刚度及间距对锚杆格构梁受力影响的模型试验[J]. 工业建筑, 2021, 51(3): 136-141.
HAN Dongdong, MEN Yuming, WANG Peng. Model tests on influences of stiffness and spacing for beams on lattice beams by prestressed anchorage [J]. Industrial Construction, 2021, 51 (3) : 136-141. (in Chinese)
- [2] ZENG H, YE S, ZHANG J. Seismic stability analysis of slope reinforced by frame anchors considering prestress[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2024, 28(4): 1238-1252.
- [3] QIU M, YE S, ZHANG W, et al. Seismic dynamic earth pressure analysis of frame-anchor slope supporting structure considering prestress [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2024, 28(6) : 2231-2244.
- [4] LI N, WANG B, MEN Y, et al. Dynamic behavior of soil anchorage landslide at different frequencies [J].

- Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019, 10(1): 271-286.
- [5] 张研,唐北昌,孟庆鹏.基于天牛须优化算法的相关向量机边坡稳定性分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2024,43(11):11-17,36.
- ZHANG Yan, TANG Beichang, MENG Qingpeng. Slope stability analysis on relevance vector machine based on beetle antennae search optimization algorithm [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2024, 43(11): 11-17, 36. (in Chinese)
- [6] PU Q M, GAN J K, QIU L R, et al. An efficient hybrid approach based on PSO, ABC and k-means for cluster analysis [J]. Multimedia Tools and Applications, 2022, 81(14): 19321-19339.
- [7] 曹昊,钟冬望,冯庆蔚,等.基于黏菌优化算法与蒙特卡罗模拟的古滑坡体稳定性分析[J/OL].武汉科技大学学报, 2026: 1-8. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=dKcr_PZ1zcsiWTbLJSf-Xaj27UGrNaN1FBtJHmuXxFOy9I4HAbFbf2IvE9MaPL4MnTPygn8SoP0x3TCpYpYKZvmCgs4eHEBHALLSs3h4vU9c-bBF0dPVNfIMznt66Ot6gySsURt7yfN-58WW10BCDGP SOuRNLAfNm8HPf03APcgrikdDGWVrdQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS
- CAO Hao, ZHONG Dongwang, FENG Qingwei, et al. Stability analysis of ancient landslide based on slime mould algorithm and Monte Carlo simulation [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2026: 1-8. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=dKcr_PZ1zcsiWTbLJSf-Xaj27UGrNaN1FBtJHmuXxFOy9I4HAbFbf2IvE9MaPL4MnTPygn8SoP0x3TCpYpYKZvmCgs4eHEBHALLSs3h4vU9c-bBF0dPVNfIMznt66Ot6gySsURt7yfN-58WW10BCDGP SOuRNLAfNm8HPf03APcgrikdDGWVrdQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS
- [8] 李垚熠,陈国庆,石明汉,等.基于LM-LSO算法的磷石膏堆场边坡形态与稳定性智能优化方法[J].黄金科学技术,2024,32(5):882-893.
- LI Yaoyi, CHEN Guoqing, SHI Minghan, et al. Intelligent optimization method for slope morphology and stability of phosphogypsum stack based on LM-LSO algorithm [J]. Gold Science and Technology, 2024, 32(5): 882-893. (in Chinese)
- [9] ZHAO W G, WANG L Y, MIRJALILI S. Artificial hummingbird algorithm: A new bio-inspired optimizer with its engineering applications [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2022, 388: 114194.
- [10] 林中湘,张彪,柴君锋,等.基于SOA-RF智能算法的深部巷道支护参数优化研究[J].煤炭工程,2024,56(9):41-48.
- LIN Zhongxiang, ZHANG Biao, CHAI Junfeng, et al. Optimization of support parameters for deep roadway based on SOA-RF intelligent algorithm [J]. Coal Engineering, 2024, 56(9): 41-48. (in Chinese)
- [11] LIU Y, HE J, LIANG J, et al. A new improved particle swarm algorithm for optimization of anchor lattice beam support structures [J]. Natural Hazards, 2024, 121: 225-243.
- [12] LIU Y, HAN D, LIU N, et al. Reinforcement mechanism analysis of lattice beam and prestressed anchor rod system for loess slope [J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: 1121172.