https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.204

土钉加固边坡智能优化设计方法

罗 琛[1],甘太平[2],张 洁[1*],陶媛媛[3]

1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室,上海 200092
2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司,广东广州 510663
3. 浙江省衢州机场管理有限公司,浙江衢州 324000

摘 要: 为了提升土钉加固边坡优化设计的智能化与自动化水平,并提高优化设计效率,提出了一种以安全系数自动化计算方法为核心的土钉加固边坡智能优化设计方法.以土钉参数作为设计变量,在满足边坡安全性的条件下建立了以土钉材料的最小费用为目标函数的优化模型,采用该方法求解了优化模型.通过一个土钉加固边坡优化设计算例应用了该方法,并提供了优化设计参数的取值建议.结果表明,提出的优化设计方法在确保安全性的同时可使土钉加固费用降低48.6%,并实现了优化结果中土钉布置及最危险滑动面的可视化.为了兼顾收敛性能与计算效率,推荐设置初始种群个体数量200个及进化代数400代.研究成果可为土钉加固边坡以降低成本为目标的优化设计提供有效手段.

关键词: 土钉加固边坡;优化设计;自动化;智能化;遗传算法;工程地质.

中图分类号: P642.22 **文章编号:** 1000-2383(2026)10-3953-13 **收稿日期:** 2025-07-19

Intelligent Optimization Method for Design of Soil Nailed Slope

Luo Chen[1], Gan Taiping[2], Zhang Jie[1*], Tao Yuanyuan[3]

1. *Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai* 200092, *China*
2. *China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou* 510663, *China*
3. *Zhejiang Quzhou Airport Management Co., Ltd., Quzhou* 324000, *China*

Abstract: To improve the level of intelligence and automation in the optimization design of soil nailed slopes and to increase the efficiency of optimization design, an intelligent optimization design method for nailed slopes has been proposed, with an automatic safety factor calculation approach at its core. In this method, soil nail parameters are adopted as design variables, and an optimization model is formulated with the objective of minimizing the material cost of soil nails under the constraint of slope stability. The proposed method is then employed to solve the model. A case study is presented to demonstrate the application of the method in the optimization design of a nailed slope, along with recommendations for the selection of design parameters. The results indicate that the proposed optimization method is capable of reducing the soil nailing cost by 48.6% while ensuring safety. Furthermore, visualizations of the optimized soil nail arrangement and the critical slip surface are achieved. To balance convergence performance and computational efficiency, it is recommended that the initial population size be set to 200 individuals

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(Nos. 42072302, 52025094);上海市教委极端环境建造未来学科资助项目.

作者简介: 罗琛(1997-),女,博士研究生,主要从事岩土工程可靠度与风险分析研究. ORCID: 0000-0002-6965-549X. E-mail: luochen@tongji.edu.cn

* **通讯作者:** 张洁(1980-),男,教授,博士生导师,主要从事岩土工程可靠度与风险分析等方面研究. ORCID: 0000-0001-7528-4077. E-mail: cezhangjie@tongji.edu.cn

引用格式: 罗琛,甘太平,张洁,陶媛媛,2026.土钉加固边坡智能优化设计方法.地球科学,51(10):3953-3965.

Citation: Luo Chen, Gan Taiping, Zhang Jie, Tao Yuanyuan, 2026. Intelligent Optimization Method for Design of Soil Nailed Slope. *Earth Science*, 51(10): 3953-3965.

and the number of generations to 400. The findings of this study provide an effective approach for cost-oriented optimization design of nailed slopes.

Key words: soil nailed slope; optimization design; automation; intelligence; genetic algorithm; engineering geology.

0 引言

随着工程建设的快速发展,以提高安全性和降低成本为目标的优化设计方法在不同的边坡工程中得到了持续的发展与应用.安彩龙等(2020)提出了一种最优锚固方向角计算的新方法,可进一步提高锚索的锚固效益.刘兴雷等(2024)结合了数值模拟与灰色关联分析、正交试验设计方法,对高速公路边坡预应力锚索桩板墙中桩体的嵌固长度、桩间距和桩宽进行了优化.南宁等(2022)探讨了不同数量、位置和宽度的宽平台对高边坡抗冲刷性和整体稳定性的影响,以选取满足稳定性要求且开挖量最少的最优坡形.Fang *et al.* (2019)采用一种新的基于极限曲线法的边坡优化设计方法,对露天矿边坡的坡角和坡高进行优化设计,节省了剥离废矿岩体体积可达9.15%.张禹等(2023)基于边坡断面形态效应理论及三维支挡作用影响,通过比选法进行了露天矿到界边坡形态优化.近年来,智能方法的快速发展促进了边坡工程智能优化设计方法的应用,进一步提升了优化效率与优化效果.李垚熠等(2024)采用边坡形态智能优化方法,得到了堆场边坡最小挖方量的优化设计方案.尹志凯等(2020)基于改进差分进化算法对三维边坡锚固位置进行了优化,可节约20%~25%的锚固点数量.

土钉加固作为一种高效经济的边坡支护技术,因其施工简便、适应性强等优点,在边坡工程中得到了广泛应用(陈昌富等, 2022; 张锐等, 2024; 余家骥等, 2025).在保证安全性的前提下如何有效降低土钉加固边坡的成本,成为研究者和设计者所追求和关注的问题.在优化设计方法方面,比选法是一种常用的优化方法,即对多个设计方案进行对比分析,选择其中的最优方案(樊成等, 2025).然而,该方法的可选方案数量有限,分析效率较低,且易受人为主观因素影响.相比之下,正交试验设计法依赖于数学统计方法,能够在有限的试验次数下找到较优设计方案,从而提高了比选的效率及科学性(张钦喜等, 2003).然而,其可选方案范围仍具有一定的局限性,导致优化能力有限.

数值模拟技术与智能算法的发展为土钉加固边坡的优化设计提供了更加高效和系统的方法.一些研究以土钉支护结构的安全系数(FOS)最大化作为优化目标,取得了一定成果(Benayoun *et al.*, 2020; Sharma and Ramkrishnan, 2020; Arvin *et al.*, 2022; Goyal *et al.*, 2023),但往往忽略了对成本因素的综合考虑.也有学者尝试以土钉支护结构的费用最小化为目标开展优化设计(Seo *et al.*, 2014; Benayoun *et al.*, 2021),但对设计变量的考虑相对有限,导致应对实际工程时存在一定的局限性.基于智能优化算法(如遗传算法、粒子群优化算法等)的优化设计方法不断地受到关注(丁敏和张永兴, 2011; 周勇等, 2017; Shirgir *et al.*, 2023; Gao *et al.*, 2024; 彭宗桓等, 2024).该类方法具备较强的全局搜索能力,能同时处理更多的设计变量,在优化效率和优化结果的质量方面均优于传统方法.然而,现有研究多集中于对土钉长度、间距、倾角等参数的优化,较少涉及土钉整体布置位置的优化考虑,使得优化结果在实际施工布置中难以直接参考.此外,优化设计结果中土钉位置与最危险滑动面的可视化表示较为欠缺,影响了土钉加固效果的直观呈现与设计人员的判断效率.值得注意的是,目前相关优化设计方法在土钉加固边坡的稳定性分析与安全系数评估过程中自动化程度仍有待提高,这在一定程度上限制了优化设计的自动化程度及整体效率.

为了提升土钉加固边坡以成本为目标进行优化设计的智能化和自动化程度,以及提升优化设计的效率和优化结果的可视性,提出了一种基于安全系数自动化的土钉加固边坡智能优化设计方法.论文结构安排如下:首先,介绍了土钉加固边坡安全系数计算方法.其次,建立了包含设计变量、目标函数和约束条件在内的土钉加固边坡优化设计数学模型.此外,提出了基于安全系数自动化计算方法的智能优化设计方法对优化模型进行求解,并给出了土钉加固边坡安全系数自动化计算方法.随后,以一个土钉加固边坡为例进行了优化设计,并对优化前后的设计方案进行对比.最后,探讨了包含初始种群个体数量和进化代数在内的优化参数对优化设计结果的影响.研究可为土钉加固边坡优化设计提供较为实用的智能化方法.

1　土钉加固边坡安全系数计算方法

土钉加固边坡设计方案的合理性和可行性需通过边坡稳定性分析后确定.为了对土钉加固边坡稳定性进行分析,以图1所示的多排土钉加固边坡为例,给出了土钉加固边坡沿某一潜在滑动面的安全系数计算模型.假设r表示该滑动面半径,α_s表示该边坡坡度,m表示土钉加固排数,s表示最下排土钉钉头至坡脚的水平距离,L表示土钉长度,L_e表示滑动面下方土钉锚固长度,D表示土钉钢筋直径,D_1表示相邻排土钉竖向间距,D_2表示同排相邻土钉水平间距,d_{hole}表示钻孔直径,α_j ($j=1, 2, \cdots, m$)表示土钉倾角.由于土钉加固边坡的潜在滑动面形状可以假设为圆弧形,当土钉的作用线与滑面相交时,将每排土钉提供的加固力视为一个作用在交点上的集中力,且该集中力施加到某一特定土条.此外,考虑到各排土钉提供的加固力 T_j ($j=1, 2, \cdots, m$)对边坡抗剪力的提升作用,土钉加固边坡沿图1所示滑动面的安全系数可采用Bishop简化法计算(Bishop, 1955; 孙铁成等, 2005):

$$F_{s,i}=\frac{\sum M_r+\sum T_j y_j}{\sum M_d}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\dfrac{G_i\tan\varphi+cb}{\dfrac{\tan\varphi\sin\alpha_i}{F_{s,i}}+\cos\alpha_i}+\sum_{j=1}^{m}T_j\left(\dfrac{\sin\alpha_j\tan\varphi}{F_{s,i}}+\dfrac{y_j}{r}\right)}{\sum_{i=1}^{n}G_i\sin\alpha_i}, \tag{1}$$

式中:$F_{s,i}$ ($i=1, 2, \cdots, J$)表示所考虑的 J 个潜在滑动面中第 i 个滑动面的安全系数;$\sum M_r$表示由土体提供的抗滑力矩之和;$\sum M_d$表示由滑动体提供的滑动力矩之和;y_j表示滑动面圆心至第 j ($j=1, 2, \cdots, m$)排土钉轴线的距离;c表示土体黏聚力;φ表示土体内摩擦角;G_i ($i=1, 2, \cdots, n$)表示第 i 个土条的重量;α_i ($i=1, 2, \cdots, n$)表示第 i 个土条底部的倾角;b表示土条按等宽度划分后的宽度;T_j ($j=1, 2, \cdots, m$)表示由第 j 排土钉提供的加固力,取土钉极限抗拔力 T_{uj}与土钉极限抗拉力 T_{yj}二者中的较小值(British Standards Institution, 2017; 余家骥等, 2025),可表示为:

$$T_j=\min\left\{T_{uj}, T_{yj}\right\}, \tag{2}$$

$$T_u=\tau_b\pi d_{\text{hole}}L_e/D_2, \tag{3}$$

$$T_y=f_y A_s/D_2, \tag{4}$$

式中:τ_b表示注浆体与土体之间的粘结强度;A_s表示土钉的钢筋截面积;f_y表示土钉的钢筋屈服强度.

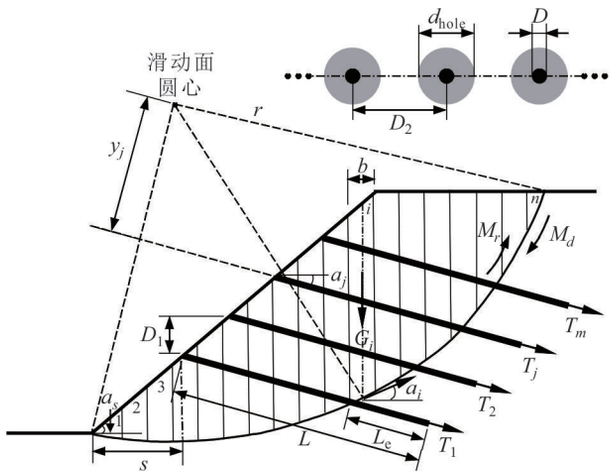

图1　土钉加固边坡示意图

Fig.1　Schematic diagram of soil-nailed slope

需要注意的是,公式(1)仅表示图1所示土钉加固边坡沿某个潜在滑动面的安全系数 $F_{s,i}$.当考虑 J 个潜在滑动面时,土钉加固边坡的安全系数则为边坡沿所考虑的 J 个潜在滑动面的安全系数最小值,可表示为:

$$F_s=\min_{i=\{1,2,\ldots,J\}}F_{s,i}. \tag{5}$$

在本文中,采用GeoStudio中Slope/W模块(Krahn, 2004)的"进入和退出"法生成滑动面,并采用"Bishop简化法"(刘磊磊等, 2023; 蒋水华等, 2025)建立土钉加固边坡的稳定性分析模型,由此计算得到不同的土钉加固边坡设计方案的安全系数.

2　土钉加固边坡优化设计数学模型

进行土钉加固边坡的优化设计前需要建立数学模型.本文将土钉加固边坡优化设计考虑为有约束的单目标优化问题,建立了包含设计变量、目标函数和约束条件的数学模型.

2.1　设计变量

本文考虑了8个与土钉相关的变量作为优化设计变量:土钉排数 m、土钉钢筋直径 D、钻孔直径 d_{hole}、土钉水平间距 D_2、土钉竖向间距 D_1、土钉长度 L、土钉倾角 α_j及最下排土钉钉头至坡脚的水平距离 s(丁敏和张永兴, 2011; 周勇等, 2017).进行优化设计时,为了便于优化结果的实际工程施工,将采用的所有排土钉的长度 L、钢筋直径 D、钻孔直径 d_{hole}、水平间距 D_2、竖向间距 D_1和土钉倾角 α_j分别设置为相同值.

2.2 目标函数

土钉加固边坡设计方案的成本主要与土钉钢筋用量(包括 m, D, d_{hole}, D_2, D_1, L)及土钉注浆层的水泥砂浆用量有关.土钉加固边坡优化设计的目标是寻找使得土钉加固边坡总费用最小的设计方案,因此目标函数可表示为(肖专文等, 1999; Shirgir *et al.*, 2023):

Find: $X=[m, D, d_{\text{hole}}, D_2, D_1, L, \alpha_j, s]$

Minimize:

$$C=C_{\text{g}}\frac{\sum_{i=1}^{m}\frac{\pi}{4}(d_{\text{hole}}^2-D^2)L+a\sum_{i=1}^{m}\frac{\pi}{4}D^2L}{D_2}, \quad (6)$$

式中:C表示单位长度土钉加固边坡的土钉材料总费用,元/m;a表示土钉钢筋与水泥砂浆费用比.为简化计算,设水泥砂浆价格为 $C_{\text{g}}=1/\text{m}^3$.因此,当采用公式(6)计算得到费用$C$后,与水泥砂浆的真实费用(元/$\text{m}^3$)的乘积即为单位长度土钉加固边坡中土钉材料的真实费用.

2.3 约束条件

土钉加固边坡优化设计需要在满足一定的约束条件下进行,即需要在设计变量的合理范围内寻找土钉加固边坡的费用最小的设计方案,且需要满足土钉加固边坡的安全性.因此,对土钉加固边坡设计变量和边坡整体稳定性的约束条件如下:

Subject to: $m_{\min}<m<m_{\max}$;

$D_{\min}<D<D_{\max}$;

$d_{\text{hole},\min}<d_{\text{hole}}<d_{\text{hole},\max}$;

$D_{2,\min}<D_2<D_{2,\max}$;

$D_{1,\min}<D_1<D_{1,\max}$;

$L_{\min}<L<L_{\max}$;

$\alpha_{j,\min}<\alpha_j<\alpha_{j,\max}$;

$s_{\min}<s<s_{\max}$;

$$F_s\geqslant F_{st}, \quad (7)$$

式中:$X_{i,\min}$和$X_{i,\max}$分别表示设计变量的上限和下限取值;F_{st}表示边坡稳定安全系数的最小阈值.

3 土钉加固边坡优化模型求解方法

为了求解上述土钉加固边坡优化设计数学模型,提出了一种基于安全系数自动化计算的土钉加固边坡智能优化设计方法,主体框架采用遗传算法(GA).GA是一种基于自然选择和遗传机制的智能优化算法,常用于求解复杂非线性的工程优化问题(Holland, 1975; 刘界鹏等, 2021; 吴波等, 2024; 樊成等, 2025).本文采用GA模拟生物进化过程中的"选择-交叉-变异"机制,将所考虑的8个设计变量(包括m,D,d_{hole},D_2,D_1,L,α_j和s)中某个设计变量的一个可能取值视为一个基因,以 x_{ji} ($j=1, 2, \cdots, 8$; $i=1, 2, \cdots, N$)表示,其中N表示染色体(个体)数量.将不同设计变量的一种取值组合视为一条染色体(个体),即优化问题的一个可能解,以 $X_i=[x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, x_{4i}, x_{5i}, x_{6i}, x_{7i}, x_{8i}]=[m_i, D_i, d_{\text{hole},i}, D_{2,i}, D_{1,i}, L_i, \alpha_{j,i}, s_i]$ ($i=1, 2, \cdots, N$)表示.将N条不同染色体即设计变量的N种不同组合的整体视为一个种群,以 $\boldsymbol{X}=[X_1; X_2; \cdots; X_N]$表示.此外,设$K$表示进化代数,则 $\boldsymbol{X}_j$ ($j=0, 1, 2, \cdots, K$)表示进化至第j代种群,其中 $\boldsymbol{X}_0$表示初始种群.

为了增强优化设计流程的自动化及智能化,以及实现土钉布置及土钉加固边坡临界滑动面的可视化,提出的优化设计方法将土钉加固边坡安全系数自动化计算方法嵌入GA框架中,用以寻找在公式(7)的约束条件下费用最低的土钉加固边坡设计方案.土钉加固边坡安全系数自动化计算方法将在下一小节中进行介绍,基于该方法的智能优化设计流程图如图2所示.

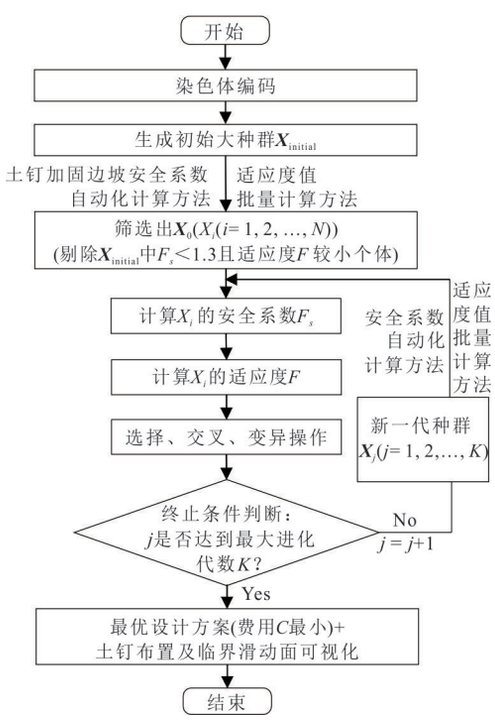

图2 土钉加固边坡智能优化设计流程

Fig.2 Flowchart of intelligent optimization design for soil nailed slope

3.1　染色体编码

对于土钉加固边坡包含较多设计变量的高维且连续优化设计问题,采用基于实数编码的浮点向量法编码避免了二进制向量法的较长向量长度及转换问题,使得求解效率和精度更高且结果更为直观(包子阳等, 2018; Renkavieski and Parpinelli, 2021; 惠迎新和陈嘉伟, 2023; 吴波等, 2024; 邢国华等, 2025).因此,本文中染色体X_i的表示方法采用浮点向量法编码,即染色体(设计向量)中各基因(设计变量)直接以各设计变量的实数值表示.

3.2　初始种群

3.2.1　初始种群安全系数自动化计算　初始种群过少会造成种群多样性不足,容易陷入局部最优,而过多则会造成计算资源消耗大,算法收敛速度变慢(张岩和吴水根, 2017).因此,初始种群的选择较为关键.初始种群的选择可根据先验信息,将其转化为一组可能满足要求的解,再从这些解中抽取个体,以便采用GA更快地找到最优解(刘界鹏等, 2021).在本研究中,需要获取的先验信息主要包括:初始种群中各个体的F_s及其适应度值.由于约束条件(公式(7))中包含对个体F_s的约束$F_s \geqslant F_{st}$,若计算得到$F_s < F_{st}$的个体可直接排除;若计算得到个体的适应度值Φ较小,可直接排除.由此,将$F_s \geqslant F_{st}$且适应度Φ更高的优秀个体作为初始种群,以便生成优秀个体的概率更大,并且更快地找到最优解.

为了找到$F_s \geqslant F_{st}$且适应度较高的优秀个体作为初始种群$\boldsymbol{X}_0$(包含N个个体),首先生成一个初始大种群,再在其中选择较优个体,而后进行优化流程.为了避免随机抽样的较强随机性,并增强优化过程的可控性,初始大种群的生成方法是先根据公式(7)中各设计变量约束的上下限,按一定的间隔分别生成各设计变量对应的值;再将各设计变量的各取值分别组合成为各个体$X_i = [m_i, D_i, d_{\text{hole},i}, D_{2,i}, D_{1,i}, L_i, \alpha_{j,i}, s_i]$ $(i = 1, 2, \cdots, N_{\text{initial}})$;最后,全部个体组合而成初始大种群$\boldsymbol{X}_{\text{initial}}$.为了从中选出初始种群$\boldsymbol{X}_0$,分别采用土钉加固边坡安全系数自动化计算方法和适应度值批量计算方法计算$\boldsymbol{X}_{\text{initial}}$中各个体的$F_s$和适应度值$\Phi$.

为了判断初始大种群$\boldsymbol{X}_{\text{initial}}$中各个体对应的安全系数是否满足约束条件$F_s \geqslant F_{st}$,采用土钉加固边坡安全系数自动化计算方法对各设计方案对应的边坡采用公式(5)进行稳定性分析,以求取相应的安全系数F_s.

3.2.2　适应度值批量计算　在采用安全系数自动化计算方法计算初始大种群$\boldsymbol{X}_{\text{initial}}$中各条染色体$X_i$对应的安全系数$F_s$后,采用公式(6)分别计算$\boldsymbol{X}_{\text{initial}}$中各条染色体$X_i$的目标函数值即总费用$C$.$C$越小,说明染色体$X_i$的性能越好,采用GA希望寻找到的土钉加固边坡最优设计方案即为C最小的方案.然而,从自然选择法则来看,染色体的适应度越小,说明其性能越好.为了与自然选择法则保持一致,将费用C(公式(6))的倒数作为适应度函数,可表示为:

$$\Phi = \frac{D_2}{\sum\limits_{i=1}^{m} \frac{\pi}{4}(d_{\text{hole}}^2 - D^2)L + a\sum\limits_{i=1}^{m} \frac{\pi}{4} D^2 L}, \quad (8)$$

式中:Φ表示适应度值.适应度Φ越大,费用C越小,则染色体的性能越好,对应的可行解越优,因此需要选择适应度Φ更大的染色体.

由于初始种群中的各个个体及对应的适应度值相互独立,因此仍可采用并行计算方式动态分配适应度值的计算任务,从而提升计算效率,由此计算得到$\boldsymbol{X}_{\text{initial}}$中各个体的适应度值.为了剔除不满足安全系数约束条件$F_s < F_{st}$(公式(7))的个体,对适应度值Φ采用惩罚函数:若安全系数$F_s < F_{st}$,则将适应度值Φ赋值为0,具体可表示为:

$$\Phi = \begin{cases} \Phi, \text{if } F_s \geqslant F_{st} \text{ (方案可行)} \\ 0, \text{if } F_s < F_{st} \text{ (方案不可行)} \end{cases}. \quad (9)$$

在初始大种群$\boldsymbol{X}_{\text{initial}}$中,除需采用公式(9)剔除$\Phi = 0$即不满足安全系数约束条件$F_s < F_{st}$的个体外,还需进一步剔除适应度值$\Phi$较低的个体.这是由于过多适应度值较低(即费用较高)的个体可能会干扰优质个体的基因传递,降低算法的优化效率.因此,在初始阶段保留更多适应度较高的个体,有助于优质基因的遗传,提升获得更优解的可能性.相关内容将在后文进一步讨论.

根据上述方法,从初始大种群$\boldsymbol{X}_{\text{initial}}$中筛选出了包含$N$个$F_s \geqslant F_{st}$且适应度更高的个体$X_i = [m_i, D_i, d_{\text{hole},i}, D_{2,i}, D_{1,i}, L_i, \alpha_{j,i}, s_i]$ $(i = 1, 2, \cdots, N)$作为初始种群$\boldsymbol{X}_0$.

3.3　进化终止条件

确定初始种群$\boldsymbol{X}_0$后,分别采用算术交叉算子及非均匀变异算子进行交叉和变异操作.由于染色体采用实数编码,适合使用基于线性插值的算术交叉算子进行交叉操作,该方法可在父代个体之间生成连续可行解,有效避免子代落入不可行区域.非均

匀变异算子是一种随进化过程动态调整搜索策略的机制，能够在早期强化全局搜索、后期优化局部细节，从而提高遗传算法在解决复杂优化问题时的搜索效率和解的质量，降低陷入局部最优的风险.

在对初始种群$\boldsymbol{X}_0$进行选择、交叉和变异操作后，得到新一代种群$\boldsymbol{X}_j$($j=1, 2, \cdots, K$).判断是否达到最大进化代数K，即判断是否满足进化终止条件.当达到最大进化代数K时，GA进化终止，得到的解即为土钉加固边坡最优的设计方案.此外，对应方案的安全系数以及包含最危险滑动面在内的土钉设置也可直接呈现.

4 土钉加固边坡安全系数自动化计算方法

当采用土钉加固边坡安全系数计算方法计算一组土钉加固边坡设计方案下的安全系数时，需要人工输入较多的参数，包括：土体强度参数，包括土体重度为γ、黏聚力c和内摩擦角φ；土钉强度参数，包括各排土钉的注浆体与土体之间粘结强度τ_b，以及由钢筋屈服强度f_y和钢筋直径D计算得到的抗拉强度T_y；土钉几何参数，包括各排土钉的钻孔直径d_{hole}、长度L、倾角α_j和水平间距D_2；土钉位置参数，包括根据土钉排数m、竖向间距D_1和最下排土钉钉头至坡脚的水平距离s计算得到的土钉在边坡内外端点的坐标；决定边坡形状的边坡顶点坐标；滑动面参数，包括进入和退出的位置坐标及数量；等等.因此，对多组设计方案下的土钉加固边坡安全系数进行计算时，若采用人工操作则工作量较大且效率较低.为了提高土钉加固边坡安全系数的计算效率，通过输入参数的自动更新，实现土钉加固边坡安全系数自动化批量计算，同时实现土钉布置及临界滑动面的可视化.土钉加固边坡安全系数自动化计算方法的流程如图3所示，具体操作步骤如下：

(1) 设置任意一组土体参数(包括c，φ和γ等)和土钉参数(包括τ_b，T_y，d_{hole}，L，α_j，D_2和土钉内外端点坐标等)，将模型参数配置以XML格式文件导出；

(2) 准备需要进行安全系数计算的N组土钉加固边坡设计方案对应的N组输入参数；

(3) 对于第i($i=1, 2, \cdots, N$)组参数，寻找各类参数在XML文件中所在的行，并替换为第i组参数的对应值，由此生成N组XML文件；

(4) 调用计算执行文件，进行土钉加固边坡安全系数计算.由于各设计方案及其安全系数计算相互独立，采用并行计算方式动态分配计算任务，提升安全系数计算效率.

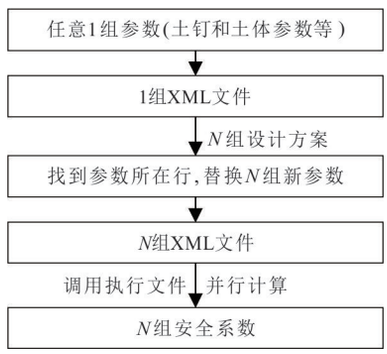

图3 土钉加固边坡安全系数自动化计算方法流程

Fig.3 Flowchart of automated calculation method for FOS of soil-nailed slope

采用上述土钉加固边坡安全系数自动化计算方法自动替换包括土体参数、土钉参数、边坡形状和滑动面等在内的多类输入参数，能够高效地进行各设计方案的安全系数自动化计算，从而较大程度地提升土钉加固边坡优化设计的效率和智能化水平.

5 算例分析

本节采用提出的基于安全系数自动化计算方法的智能优化设计方法对图4所示的边坡进行土钉加固后的优化设计.该边坡坡高为$H=13$ m，坡角为$\alpha_s=40^\circ$，坡率为1∶1.2.边坡土体重度为$\gamma=19$ kN/m^3，黏聚力为$c=10$ kPa，内摩擦角为$\varphi=24^\circ$.注浆体与土体之间的粘结强度取$\tau_b=80$ kPa，土钉的钢筋屈服强度取$f_y=400$ MPa.将土钉排数m、土钉钢筋直径D、钻孔直径d_{hole}、土钉水平间距D_2、土钉竖向间距D_1、土钉长度L、土钉倾角α_j及最下排土钉钉头至坡脚的水平距离s作为优化设计变量.其中，为了便于实际工程施工，各排土钉的L、D、d_{hole}、D_2、D_1和α_j均取相同值.

图4a展示了土钉加固边坡优化前的设计方案，其中各设计变量的值为$X_0=[m, D, d_{\text{hole}}, D_2, D_1, L, \alpha_j, s]=$[3排，0.020 m，0.135 m，2.5 m，1.8 m，12 m，15°，4 m].取土钉钢筋与水泥砂浆费用比$a=6$，采用公式(6)计算得到优化前设计方案(图4a)的总费用为$C_0=0.229$.下面采用基于安全系数自动化计算方法的智能优化设计方法对土钉加固边坡进行优化.

5.1　优化设计模型

优化设计目标是寻找使得土钉加固边坡总费用C(公式(6))最小的设计方案,同时需满足公式(7)的约束条件.由于土钉加固边坡的相关设计规范较少,参考土钉支护基坑的相关规范《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120-2012),以及 Lin *et al.*(2017)对土钉墙设计参数的总结,设定各设计变量的约束条件如下:

Subject to: 3排 $<m<$ 6排;

0.016 m $<D<$ 0.032 m;

0.075 m $<d_{\text{hole}}<$ 0.150 m;

1 m $<D_2<$ 3 m;

1 m $<D_1<$ 3 m;

6.5 m $<L<$ 15.6 m;

$5^\circ<\alpha_j<20^\circ$;

3 m $<s<$ 5 m;

$F_s\geqslant 1.3$;

需要说明的是,对于L的约束条件为6.5 m $<L<$ 15.6 m,是由于《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120-2012)中规定$0.5H<L<1.2H$.此外,$F_s\geqslant 1.3$是由于参考《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330-2013)取边坡稳定安全系数最小阈值$F_{st}=1.3$,意为将$F_s\geqslant$1.3的土钉加固边坡视为安全边坡.由于考虑4 096个不同的滑动面足以分析边坡的安全性(Zhang *et al.*, 2011),在本算例中,对于每种设计方案下的土钉加固边坡均考虑$J=4\,096$个不同的滑动面.随后,根据公式(5)计算各设计方案下土钉加固边坡安全系数F_s.

5.2　优化设计流程

基于安全系数自动化计算方法的智能优化设计方法中,染色体X_i的表示方法采用浮点向量法编码.为了生成初始大种群$\boldsymbol{X}_{\text{initial}}$,将各设计变量按一定的间隔分别取值为:

$m=$[3排, 4排, 5排, 6排];

$D=$[0.01 m, 0.02 m, 0.03 m];

$d_{\text{hole}}=$[0.08 m, 0.11 m, 0.14 m];

$D_2=$[1 m, 2 m, 3 m];

$D_1=$[1 m, 2 m, 3 m];

$L=$[7 m, 10 m, 13 m, 16 m];

$\alpha_j=$[15°];

$s=$[3 m, 4 m, 5 m];

根据丁敏等(2011)和 Benayoun *et al.*(2021)对土钉倾角的敏感性分析,发现土钉倾角α_j的大小对安全系数并无明显影响,因此对各排土钉采用相同的倾角$\alpha_j=15^\circ$.将以上设计变量的取值分别组合后共得到个体$N_{\text{initial}}=3\,888$个,将个体组合后即为初始大种群$\boldsymbol{X}_{\text{initial}}$.为了找到$F_s\geqslant$1.3且适应度更高的优秀个体作为初始种群$\boldsymbol{X}_0$,采用土钉加固边坡安全系数自动化计算方法计算各个体的F_s,并采用适应度值批量计算方法计算各个体的适应度值.随后剔除$\Phi=0$即不满足安全系数约束条件$F_s<1.3$的个体,将剩余的个体按Φ的大小从高到低排序.由于遗传算法的初始种群规模不宜小于设计变量的10倍(邢国华等, 2025),取Φ值较高的500个个体,即初始种群$\boldsymbol{X}_0$的个体数量取$N=500$个.$\boldsymbol{X}_0$中个体的安全系数F_s最小值为1.300,最大值为1.472;适应度值Φ最小值为2.201,最大值为6.890.根据图2所示的土钉加固边坡智能优化设计流程,基于$\boldsymbol{X}_0$继续进行GA的选择、交叉和变异操作.当达到设定的最大进化代数$K=400$代时,进化终止.

5.3　优化设计结果

采用智能优化设计方法对上述优化设计模型进行求解,得到土钉加固边坡从优化前设计方案进化到K=400代的最优设计方案费用C的进化曲线,如图5所示.在K=200代后进化后费用C趋于收敛,表示最优设计方案趋于稳定.得到的土钉加固边坡最优方案如图4b所示,即$X_1=[m,\ D,\ d_{\text{hole}},\ D_2,\ D_1,\ L,\ \alpha_j,\ s]=$[3排, 0.018 m, 0.078 m, 1.66 m, 1.8 m, 10.59 m, 15°, 3.8 m],费用为$C_1=$0.118.

土钉加固边坡优化前后设计方案参数对比如表1所示.与优化前设计方案(图4a)相比,在保证$F_s>$1.3的条件下,优化后设计方案(图4b)中土钉用量明显减少.具体地,D由0.020 m减少至0.018 m;d_{hole}由0.135 m减少至0.078 m;D_2由2.5 m减少至1.66 m;L由12 m减少至10.59 m.因此,优化后土钉加固边坡的总费用C由0.229减少至0.118,省去了48.6%的土钉材料成本费用.此外,代表土钉整体位置的参数s由4.0 m减少至3.8 m,D_1没有发生变化,即优化前后的土钉位置变化不明显.这是由于土钉位置的相关参数主要决定了土钉加固边坡的安全系数,而对费用的影响较小.因此,在以费用最小化为目标的优化设计中,优化对象以土钉材料的相关参数为主.

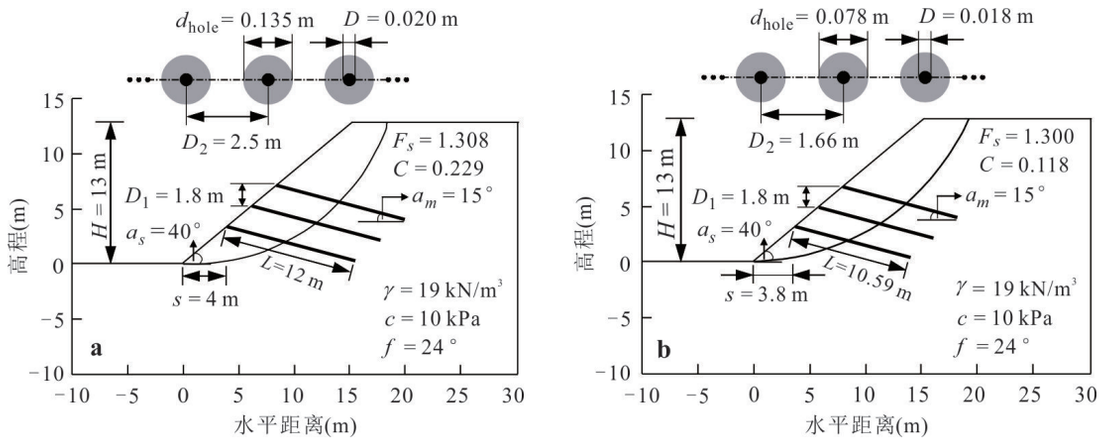

图 4 土钉加固边坡优化前后设计方案对比

Fig.4 Comparison of design schemes before and after optimizations for soil nailed slope

a.优化前设计方案:C_0 = 0.229;b.优化后最优设计方案:C_1 = 0.118

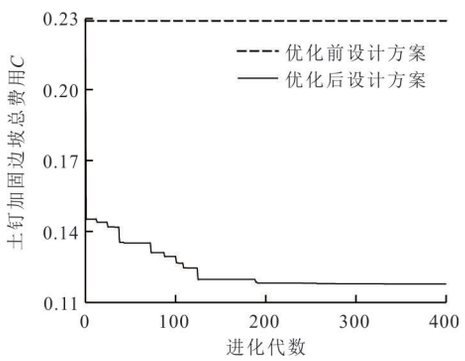

图 5 土钉加固边坡费用 C 的进化曲线

Fig.5 Evolution curve of cost C for soil nailed slope

6 优化设计结果敏感性分析

在上述算例中,仅给出了当初始种群个体数量 N=500 个且进化代数 K=400 代时,采用基于安全系数自动化计算方法的智能优化设计方法的优化设计结果.为了深入理解初始种群个体数量 N 和迭代次数 K 对优化结果的影响并给出优化参数的取值建议,本节将分析 N 和 K 对优化设计结果的影响.

6.1 初始种群个体数量的影响

当初始种群个体数量 N 分别取 100 个、200 个、300 个、400 个和 500 个,采用智能优化设计方法分别进行优化,得到不同进化代数下土钉加固边坡费用 C 的进化曲线如图 6 所示.可以发现,更多的初始种群个体数量 N 并不一定带来更好的优化效果.这是由于初始种群虽然多,但如果包含的费用高(适应度小)的个体较多,会干扰优质个体的遗传过程,降低进化效率.根据遗传算法原理,初始种群中若优质个体(适应度高、费用低)占比较大,则优秀基因在后代中被保留和传播的概率更高,从而更容易在较少的进化代数中获得更优解.

不同 N 下的最优设计方案如表 2 所示.可以看出,与图 4a 的优化前设计方案相比,在表 2 的优化后设计方案主要体现在设计变量 D,d_{hole},D_2 和 L 的差异.这是由于在遗传算法的进化过程中,这些参数对土钉加固边坡费用 C(公式(6))的影响权重较大,其取值变化能更直接地改变适应度函数 Φ(公式(8))的值,因此在种群进化中表现出更显著的差异性.邢国华等(2025)建议遗传算法的初始种群规模不宜小于设计变量的 10 倍,对应本文问题即为初始种群个体数量不小于 N=100.此外,刘界鹏等(2021)、张岩和吴水根(2017)建议初始种群个体数量为 0~100 个.由于本文优化问题中涉及的设计变量较多,建议采用 N=200.

6.2 进化代数的影响

当进化代数 K 分别取 100 代、200 代、300 代和 400 代时,不同进化代数 K 下土钉加固边坡费用 C 的进化曲线如图 7 所示.结果表明,与 K = 300 代或 400 代相比,当 K = 100 代及 K = 200 代时,均未达到最优的设计结果,仍存在较大的费用优化空间.只有设置足够的进化代数,才能确保遗传算法在解空间中完成充分搜索,从而获得满足约束条件下的最优或近似最优解.这一现象与遗传算法的基本原理密切相关:算法的收敛效果受种群规模与进化代数的协同作用影响.若进化代数过少,即使初始种群质量较高,也可能因搜索深度不足而陷入局部最优.

不同 K 对应的土钉加固边坡优化设计结果如

表 1　土钉加固边坡优化前后设计方案参数对比

Table 1　Comparison of design parameters before and after optimizations for soil nailed slope

设计变量	优化前	优化后	变化率(%)
土钉排数 m (排)	3	3	—
土钉钢筋直径 D (m)	0.020	0.018	−10.0
钻孔直径 d_{hole} (m)	0.135	0.078	−42.2
土钉水平间距 D_2 (m)	2.500	1.660	−33.6
土钉竖向间距 D_1 (m)	1.800	1.800	0.0
土钉长度 L (m)	12.000	10.590	−11.8
土钉倾角 α_j (°)	15	15	0.0
最下排钉头至坡脚距离 s (m)	4.000	3.800	−5.0
费用 C (元/m)	0.229	0.118	−48.6
安全系数 F_s	1.308	1.300	—

表 2　不同初始种群个体 N 下土钉加固边坡优化设计结果

Table 2　Optimization design results of soil nailed slope under different initial population sizes N

设计变量	N=100	N=200	N=300	N=400	N=500
m (排)	3	3	3	3	3
D (m)	0.019	0.017	0.020	0.019	0.018
d_{hole} (m)	0.070	0.080	0.075	0.076	0.078
D_2 (m)	1.890	1.870	1.710	1.730	1.620
D_1 (m)	1.800	1.800	1.800	1.800	1.800
L (m)	11.000	10.920	10.810	10.880	10.590
α_j (°)	15	15	15	15	15
s (m)	3.800	3.800	3.800	3.800	3.800
C (元/m)	0.110	0.108	0.113	0.111	0.118
F_s	1.300	1.300	1.300	1.300	1.300

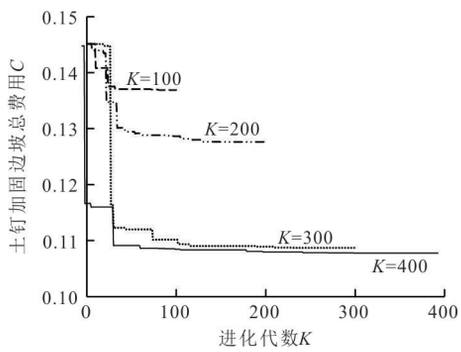

图 6　不同初始种群个体 N 下土钉加固边坡费用 C 进化曲线

Fig.6　Evolution curves of cost C for soil nailed slope under different initial population sizes N

表 3 所示. 当 K = 100 代和 K = 200 代时,土钉加固边坡的安全系数 F_s>1.3. 说明当进化代数相对较少时,尚未充分降低费用以达到最优的设计方案,此时在保证边坡安全的前提下尚有继续优化的空间,比如可继续减少土钉长度 L,土钉钢筋直径 D,以及钻孔直径 d_{hole} 等的用量. 当 K 增加至 300 代或 400 代时,土钉加固边坡的安全系数 F_s = 1.3,说明算法逐步逼近最优解,在保证安全的前提下有效降低了加固费用. 尽管从结果来看,K = 300 代已经能够获得较为理想的优化结果,但为提升优化精度和结果稳定性,建议设置 K = 400 代. 此外,张岩和吴水根(2017)建议进化代数 K 取 100～500. 若代数设置过小,种群尚未充分进化,难以收敛至最优解;反之,若进化代数过大,可能导致种群陷入早熟状态,进一步演化难以取得实质改进,不仅增加计算成本,也造成资源浪费.

通过对不同的初始种群和进化代数对土钉加固边坡优化设计结果的影响进行分析,发现对于本文算例的优化问题,当初始种群取个体数量为 N=200 且进化代数为 K=400 时,足以得到土钉加固边坡的最优方案. 结果可为类似边坡加固问题中遗传算法参数设置的推荐参考.

需要指出的是,尽管本文在算例与敏感性分析

表 3 不同进化代数 K 下土钉加固边坡优化设计结果

Table 3 Optimization design results of soil nailed slope under different generations K

设计变量	K=100	K=200	K=300	K=400
m (排)	3	3	3	3
D (m)	0.020	0.017	0.019	0.017
d_{hole} (m)	0.079	0.078	0.078	0.080
D_2 (m)	1.550	1.530	1.870	1.870
D_1 (m)	1.600	1.800	1.800	1.800
L (m)	10.960	10.890	10.940	10.920
α_j (°)	15	15	15	15
s (m)	3.600	3.800	3.700	3.800
C (元/m)	0.137	0.128	0.109	0.108
F_s	1.308	1.325	1.300	1.300

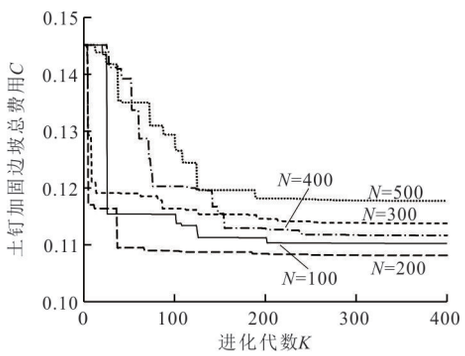

图 7 不同进化代数 K 下土钉加固边坡费用 C 进化曲线

Fig.7 Evolution curves of cost C for soil nailed slope under different evolution generations K

中仅针对单一坡高与坡形条件下的土钉加固边坡进行了优化设计，但所提出的方法同样适用于不同土钉加固边坡坡高和坡形条件下的优化问题．未来研究将进一步考虑将坡高作为设计变量纳入优化设计模型，并在目标函数中引入钻孔费用，以实现更系统和精细的优化设计．

7 结论

(1)将土钉的排数、钢筋直径、钻孔直径、水平间距、竖向间距、长度、倾角和最下排土钉钉头至坡脚水平距离作为设计变量，在一定的设计变量范围内且安全系数不小于一定阈值的约束条件下，建立了以土钉材料总费用最小的设计方案为目标函数的优化设计数学模型．

(2)提出了土钉加固边坡智能优化设计方法．该方法将安全系数自动化计算方法内嵌入遗传算法框架，有效提升了土钉加固边坡优化模型求解效率．当达到最大进化代数时，由该方法给出了最优方案的设计变量取值、安全系数、土钉布置及最危险滑动面可视化结果．采用安全系数自动化计算方法自动更新参数配置，并采用并行计进行高效的安全系数计算．

(3)提出的智能优化设计方法在满足边坡安全性约束的前提下，能够显著降低土钉加固费用，最大降幅达 48.6%．与优化前设计方案相比，优化后方案在土钉长度、钢筋直径及钻孔直径等多个关键设计变量上实现了有效优化．

(4)优化效果对初始种群规模与进化代数较为敏感．为维持解空间多样性并提升进化效率，宜设定适度规模的初始种群，且设置足够的进化代数防止算法早熟收敛．建议初始种群规模为 200 个及进化代数为 400 代，以保证全局搜索能力且具有良好的收敛性能，可为同类边坡优化设计问题中优化参数设置提供参考．

References

An, C. L., Liang, Y., Wang, L. Q., et al., 2020. Three-Dimensional Optimization Design for the Direction Angle of Anchor Cable Reinforcement in Wedge Rock Slope. *Rock and Soil Mechanics*, 41(8): 2765－2772 (in Chinese with English abstract).

Arvin, M. R., Ghavami, E., Motamedi Azari, M., 2022. Optimization of Nail Inclination Angle in Soil Nail Walls Based on a Prevalent Limit Equilibrium Method. *Indian Geotechnical Journal*, 52(2): 352－371. https://doi.org/10.1007/s40098-021-00574-z

Bao, Z. Y., Yu, J. Z., Yang, S., 2018. Intelligent Optimization Algorithm and Its MATLAB Example (2nd ed.). Publishing House of Electronics Industry, Beijing (in Chinese).

Benayoun, F., Boumezerane, D., Bekkouche, S. R., et al., 2021. Optimization of Geometric Parameters of Soil Nailing Using Response Surface Methodology. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(19): 1965. https://doi.org/10.1007/s12517-021-08280-z

Benayoun, F., Boumezerane, D., Rehab Bekkouche, S., et al., 2020. Application of Genetic Algorithm Method for Soil Nailing Parameters Optimization. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 800: 012009. https://doi.org/10.1088/1757-899x/800/1/012009

Bishop, A. W., 1955. The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. *Géotechnique*, 5(1): 7－17. https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.1.7

British Standards Institution, 2017. Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soils—Part 2: Soil Nail Design (BS 8006-2: 2011＋A1:2017). BSI Standards Limited, London.

Chen, C. F., Li, W., Zhang, J. R., et al., 2022. State-of-the-Art of Intelligent Analysis and Design in Slope Engineering of Highways in Mountainous Areas. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 49(7): 15－31 (in Chinese with English abstract).

Ding, M., Zhang, Y. X., 2011. Optimization of Soil Nailing Struture Based on Improved Genetic Algorithm. *China Civil Engineering Journal*, 44(S1): 171－176 (in Chinese).

Fan, C., Wang, Z. Y., Qi, P. F., et al., 2025. Analysis and Optimization of Soil Nail Parameters in a Deep Foundation Pit of Silty Clay Based on Response Surface Methodology. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 42(4): 142－148, 158 (in Chinese with English abstract).

Fang, H. W., Chen, Y., Deng, X. W., 2019. A New Slope Optimization Design Based on Limit Curve Method. *Journal of Central South University*, 26(7): 1856－1862. https://doi.org/10.1007/s11771-019-4139-y

Gao, D. X., Li, K., Cai, Y. C., et al., 2024. Landslide Displacement Prediction Based on Time Series and PSO-BP Model in Three Georges Reservoir, China. *Journal of Earth Science*, 35(3): 1079－1082. https://doi.org/10.1007/s12583-021-1575-z

Goyal, A., Shrivastava, A. K., 2023. Optimization of Helical Soil Nailing Behaviors by Response Surface Methodology and Hybrid Coot Optimization. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 47(9): 1658－1680. https://doi.org/10.1002/nag.3533

Holland, J.H., 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press, Ann Arbor.

Hui, Y. X., Chen, J. W., 2023. Squeezed Branch Pile Groups Optimization Method Based on Improved Genetic Algorithm. *Journal of Jilin University* (*Engineering and Technology Edition*), 53(7): 2089－2098 (in Chinese with English abstract).

Jiang, S. H., Zhong, Y., Huang, Y. Z., et al., 2025. Expected Effectiveness Evaluation and Optimization Methods of Slope Site Investigation Program. *Earth Science*, 50(6): 2255－2269 (in Chinese with English abstract).

Krahn, J., 2004. Stability Modeling with SLOPE/W: An Engineering Methodology. GEO-SLOPE/W International Ltd., Calgary.

Li, Y. Y., Chen, G. Q., Shi, M. H., et al., 2024. Intelligent Optimization Method for Slope Morphology and Stability of Phosphogypsum Stack Based on LM-LSO Algorithm. *Gold Science and Technology*, 32(5): 882－893 (in Chinese with English abstract).

Lin, P. Y., Bathurst, R. J., Liu, J. Y., 2017. Statistical Evaluation of the FHWA Simplified Method and Modifications for Predicting Soil Nail Loads. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(3): 04016107. https://doi. org/10.1061/(asce)gt. 1943-5606.0001614

Liu, J. P., 2021. Intelligent Building Basic Algorithm Course. China Architecture & Building Press, Beijing (in Chinese).

Liu, L. L., Liang, C. Q., Xu, M., et al., 2023. Probabilistic Analysis of Large Slope Deformation Considering Soil Spatial Variability with Rotated Anisotropy. *Earth Science*, 48(5): 1836－1852 (in Chinese with English abstract).

Liu, X. L., Wu, S. C., Han, L. Q., et al., 2024. Structural Parameter Optimization and Stress Characteristic Analysis of Prestressed Anchor Cable Pile Sheet Wall in Expressway Slope. *Science Technology and Engineering*, 24(15): 6439－6447 (in Chinese with English abstract).

Nan, N., Li, P., Su, S. R., et al., 2022. Optimization Design of High Loess Slope Based on Combination of Wide and Narrow Platform: A Case Study of an Industrial Square in Zichang City. *Coal Geology & Exploration*, 50(6): 155－164 (in Chinese with English abstract).

Peng, Z. H., Sheng, J. L., Ye, Z. Y., et al., 2024. Reliability Analysis of Three-Dimensional Slope Based on Improved PSO-RBF Neural Network. *Earth Science*, 49(5): 1706－1721(in Chinese with English abstract).

Renkavieski, C., Parpinelli, R. S., 2021. Meta-Heuristic Algorithms to Truss Optimization: Literature Mapping and

Application. *Expert Systems with Applications*, 182: 115197. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115197

Seo, H. J., Lee, I. M., Lee, S. W., 2014. Optimization of Soil Nailing Design Considering Three Failure Modes. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(2): 488－496. https://doi.org/10.1007/s12205-014-0552-9

Sharma, A., Ramkrishnan, R., 2020. Parametric Optimization and Multi-Regression Analysis for Soil Nailing Using Numerical Approaches. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(4): 3505－3523. https://doi.org/10.1007/s10706-020-01230-8

Shirgir, S., Shamsaddinlou, A., Zare, R. N., et al., 2023. An Efficient Double-Loop Reliability-Based Optimization with Metaheuristic Algorithms to Design Soil Nail Walls under Uncertain Condition. *Reliability Engineering & System Safety*, 232: 109077. https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.109077

Sun, T. C., Zhang, M. J., Yang, Q., 2005. A Stability Analysis Method and Its Application for Composite Soil Nailing in Deep Excavation. *Engineering Mechanics*, 22(3): 126－133 (in Chinese with English abstract).

Wu, B., Qiu, W. X., Xu, S. X., et al., 2024. A Method for Assessing Probability of Tunnel Collapse Based on Artificial Intelligence Deformation Prediction. *Earth Science*, 49(11): 4204－4215 (in Chinese with English abstract).

Xiao, Z. W., Gong, X. N., Tan, C. M., 1999. Genetic Algorithm for Optimal Design of Soil Nailing in Foundation Pit. *China Civil Engineering Journal*, 32(3): 73－80 (in Chinese).

Xing, G. H., Lu, Y. J., Miao, P. Y., et al., 2025. Structural Optimization Design Method of Temporary Relay Tower Based on Improved Genetic Algorithm. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 59(3): 469－479 (in Chinese with English abstract).

Yin, Z. K., Lu, K. L., Shi, F., et al., 2020. Optimization of Anchorage Location of Three Dimensional Slopes Based on Improved Differential Evolution Algorithm. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 42(7): 1322－1330 (in Chinese with English abstract).

Yu, J. J., Huang, X. D., Chen, Z. Y., et al., 2025. Three-Dimensional Upper-Bound Analysis of Seismic-Induced Displacements of Soil Nailed Slopes. *Journal of Railway Science and Engineering*, 22(1): 161－171 (in Chinese with English abstract).

Zhang, J., Zhang, L. M., Tang, W. H., 2011. New Methods for System Reliability Analysis of Soil Slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(7): 1138－1148. https://doi.org/10.1139/t11-009

Zhang, Q. X., He, J. Y., Huo, D., et al., 2003. Numerical Analysis for Deformation of Nailed Soil Wall and Optimization of Design Parameters. *China Civil Engineering Journal*, 36(11): 24－28 (in Chinese with English abstract).

Zhang, R., Ling, S. G., Zheng, J. L., et al., 2024. Flexible Reinforcement Method and Field Monitoring of Expansive Soil Cutting Slope. *China Journal of Highway and Transport*, 37(6): 87－97 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Y., Liu, Y., Yang, Y., et al., 2023. Open-Pit Mine Slope Optimization with the Morphology and Spatial Support Effect. *Coal Science and Technology*, 51(4): 66－71 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Y., Wu, S.G., 2017. MATLAB Optimization Algorithms. Tsinghua University Press, Beijing (in Chinese).

Zhou, Y., Xu, F., Yang, X. H., 2017. Optimization Design of Deep Foundation Pit Supporting with Composite Soil Nail Based on Genetic Algorithm. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 43(5): 115－121 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

安彩龙，梁烨，王亮清，等，2020. 岩质边坡楔形体锚索加固方向角三维优化设计. 岩土力学，41(8): 2765－2772.

包子阳，余继周，杨杉，2018. 智能优化算法及其MATLAB实例. 2版. 北京：电子工业出版社.

陈昌富，李伟，张嘉睿，等，2022. 山区公路边坡工程智能分析与设计研究进展. 湖南大学学报(自然科学版)，49(7): 15－31.

丁敏，张永兴，2011. 基于改进遗传算法的土钉支护结构优化设计. 土木工程学报，44(增刊1): 171－176.

樊成，王子源，祁鹏飞，等，2025. 基于响应面法的某粉质黏土深基坑土钉参数分析与优化. 长江科学院院报，42(4): 142－148，158.

惠迎新，陈嘉伟，2023. 基于改进遗传算法的挤扩支盘群桩优化方法. 吉林大学学报(工学版)，53(7): 2089－2098.

蒋水华，钟越，黄奕哲，等，2025. 边坡场地勘探方案预期效果评价及优化方法. 地球科学，50(6): 2255－2269.

李垚熠，陈国庆，石明汉，等，2024. 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. 黄金科学技术，32(5): 882－893.

刘界鹏，2021. 智能建造基础算法教程. 北京：中国建筑工业出版社.

刘磊磊，梁昌奇，徐蒙，等，2023. 考虑参数旋转各向异性空间变异性的边坡大变形概率分析. 地球科学，48(5): 1836－1852.

刘兴雷, 吴顺川, 韩龙强, 等, 2024. 高速公路边坡预应力锚索桩板墙结构参数优化与受力特征分析. 科学技术与工程, 24(15): 6439－6447.

南宁, 李鹏, 苏生瑞, 等, 2022. 基于宽窄平台相结合的黄土高边坡优化设计: 以陕西省子长市某工业广场高边坡为例. 煤田地质与勘探, 50(6): 155－164.

彭宗桓, 盛建龙, 叶祖洋, 等, 2024. 基于改进PSO-RBF神经网络的三维边坡可靠度分析. 地球科学, 49(5): 1706－1721.

孙铁成, 张明聚, 杨茜, 2005. 深基坑复合土钉支护稳定性分析方法及其应用. 工程力学, 22(3): 126－133.

吴波, 丘伟兴, 徐世祥, 等, 2024. 基于人工智能变形预测隧道坍塌失效概率评估方法. 地球科学, 49(11): 4204－4215.

肖专文, 龚晓南, 谭昌明, 1999. 基坑土钉支护优化设计的遗传算法. 土木工程学报, 32(3): 73－80.

邢国华, 陆勇健, 苗鹏勇, 等, 2025. 基于改进遗传算法的临时转播塔结构优化设计方法. 浙江大学学报(工学版), 59(3): 469－479.

尹志凯, 卢坤林, 石峰, 等, 2020. 基于改进差分进化算法的三维边坡锚固位置优化. 岩土工程学报, 42(7): 1322－1330.

余家骥, 黄旭东, 陈志宇, 等, 2025. 基于Newmark法的土钉支护边坡震后位移三维上限分析. 铁道科学与工程学报, 22(1): 161－171.

张钦喜, 何建勇, 霍达, 等, 2003. 土钉墙变形破坏的数值模拟及设计参数优化. 土木工程学报, 36(11): 24－28.

张锐, 凌时光, 郑健龙, 等, 2024. 膨胀土路堑边坡柔性加固方法及现场监测. 中国公路学报, 37(6): 87－97.

张岩, 吴水根, 2017. MATLAB优化算法. 北京: 清华大学出版社.

张禹, 刘宇, 杨洋, 等, 2023. 基于形态与支挡效应的露天矿到界边坡形态优化. 煤炭科学技术, 51(4): 66－71.

周勇, 徐峰, 杨校辉, 2017. 基于遗传算法的深基坑复合土钉支护优化设计. 兰州理工大学学报, 43(5): 115－121.