

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.020



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



多目标优化基坑双边耦合变形控制设计建模及求解方法

丁小文¹, 龙思桦², 叶快¹, 万琪伟², 丁海滨², 徐长节²

(1. 江西省交通科学研究院有限公司, 南昌 330200; 2. 华东交通大学 江西省土木基础设施智慧建
维工程研究中心; 江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 南昌 330013)

摘要:在城市建设中, 基坑工程的安全性和经济性至关重要。由于传统的基坑围护结构设计方法通常依赖保守策略并主要关注强度控制, 导致其在精确控制变形方面效率低下, 无法满足现代城市建设的复杂需求。为解决这些问题, 提出一种新的逆向设计多目标优化模型, 该模型融合了变形控制与经济性, 旨在提高基坑围护结构设计的效率和经济效益。该模型包含一个双边耦合的基坑围护变形计算模型、一个整合变形控制和成本优化的多目标框架、一个基于元启发式算法的求解策略。与四种元启发式算法的比较和结合实际工程案例的深入分析表明, 该方法不仅能实现基坑围护结构的精确变形控制, 同时优化了成本效益, 特别是半经验半随机的启发式算法在处理复杂优化问题时表现出的更高效率和广泛适用性。

关键词:多目标优化模型; 逆向设计; 结构优化; 元启发式算法; 基坑; 围护结构

中图分类号: TU433 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2025)02-0126-08

Multi-objective optimization modeling and solution methods for deformation control design of pit support structures

DING Xiaowen¹, LONG Sihua², YE Kuai¹, WAN Qiwei², DING Haibin²,
XU Changjie²

(1. Jiangxi Transportation Research Institute Co., LTD., Nanchang 330200, P. R. China; 2. Jiangxi Engineering
Research Center for Intelligent Construction and Maintenance of Civil Infrastructure; Jiangxi Key Laboratory of
Geotechnical Infrastructure Safety and Control, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China)

Abstract: In urban construction, the safety and economic efficiency of pit excavation projects are crucial. Traditional pit support structure design methods typically rely on conservative strategies and focus primarily on strength control, which leads to inefficiencies in precise deformation control and fails to meet the complex

收稿日期: 2024-01-12

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3009400); 国家自然科学基金(52238009); 国家自然科学基金-高铁联合基金
(U1934208); 江西省自然科学基金(20223BBG71018)

作者简介: 丁小文(1973-), 男, 高级工程师, 主要从事基坑和隧道开挖技术研究, E-mail: dundun@eatrice.cn。
万琪伟(通信作者), 男, 博士生, E-mail: i@eatrice.cn。

Received: 2024-01-12

Foundation items: National Key R & D Program of China (No. 2023YFC3009400); National Natural Science Foundation of
China (No. 52238009); National Natural Science Foundation-High-speed Rail Joint Fund (No. U1934208); Natural
Science Fundation of Jiangxi Province (No. 20223BBG71018)

Author brief: DING Xiaowen (1973-), senior engineer, main research interests: foundation pit and tunnel excavation technology,
E-mail: dundun@eatrice.cn.
WAN Qiwei (corresponding author), PhD candidate, E-mail: i@eatrice.cn.

demands of modern urban construction. To address these issues, this paper introduces a new reverse-design multi-objective optimization model that integrates deformation control with economic efficiency, aimed at enhancing the effectiveness and cost-effectiveness of pit support structure designs. The model includes a bilaterally coupled deformation calculation model for pit supports, a multi-objective framework that integrates deformation control and cost optimization, and a solution strategy based on metaheuristic algorithms. Comparative analysis with four types of metaheuristic algorithms, along with in-depth case studies of actual engineering projects, demonstrates that this method not only effectively achieves precise deformation control but also optimizes cost efficiency. Notably, the semi-empirical and semi-random heuristic algorithms demonstrate superior efficiency and versatility in addressing complex optimization challenges.

Keywords: multi-objective optimization model; reverse design; structure optimization; meta-heuristic algorithm; foundation pit; retaining structure

作为高层建筑和地下空间开发的先导工程,基坑工程在城市建设中的安全性十分重要,地铁车站开挖围护结构的造价占总造价的40%以上,因此,基坑工程的安全性和经济性受到了广泛关注。作为基坑工程的核心内容,基坑围护结构的优化设计方法研究受到高度关注。传统的基坑围护结构设计往往依赖经验和简化的计算模型,设计原则往往仅考虑强度控制,当前,城市基坑对工程的变形控制提出了更高的设计要求^[1-2]。土木工程领域的变形控制设计相关研究成果不断涌现,且随着计算机技术和优化算法的快速发展,基于元启发式算法的逆向优化设计方法应运而生,并展现出强大的优化能力^[3-5]。

当前,基坑围护结构设计仍以强度控制为主,通过保守设计粗略控制变形。若在设计阶段降低保守设计的程度,在无具体理论和指导方法的情况下,容易造成施工期间变形超限,反而需要在施工过程中进行加固。根据现场监测数据,Xu等^[6]提出了控制变形的施工方法改进措施,通过分析施工情况,Xu等^[7]提出了通过增加施工围护结构形式和调整开挖顺序的方法控制变形,Cui等^[8]通过工后加固的形式对基坑围护结构进行变形控制加固设计。这种在施工过程中加固的方法既费时费力,又在经济上造成浪费,急需建立基坑围护结构优化设计理论模型,在设计阶段一定程度上实现基坑围护结构的变形精确控制。

大部分基坑工程的围护结构都处于非对称受荷状态,大量研究表明,非对称受荷情况下基坑围护结构会相互作用,发生推回变形^[9-11]。需要对基坑围护结构两侧变形建立变形耦合模型,并进一步建立同时考虑变形控制和经济性的多目标优化模型设计理论,在设计阶段实现精确变形控制和经济优化。目前,双边耦合的变形计算方法有理论法^[11-12]、有限元法、边界元法、离散元法等,这使得优化模型

的目标函数和优化条件的表达更加复杂,超出了传统优化模型的求解能力。

运筹优化领域常采用元启发式算法求解复杂岩土优化问题^[13-14]。元启发式算法是一种快速搜索算法,其基本原理往往来自大自然的物理或生物规律。常用的元启发式算法包括遗传算法^[15]、模拟退火算法^[16]、蚁群算法^[17]、最近邻算法^[18]、粒子群算法^[19]和布谷鸟算法^[20]等,但哪种算法适用于此类问题,仍需进一步研究。

笔者提出一种基坑双边耦合变形控制和经济性优化的基坑围护结构逆向设计多目标优化模型,模型总结分析了基坑围护结构的变形控制准则,引入基坑围护结构受力变形计算理论,采用元启发式算法求解该优化模型。分析所提出算法模型的有效性,对比不同算法的适用性,并依托具体工程案例进行具体分析。

1 逆向设计方法

逆向设计方法的核心包括3点:基坑围护双边耦合变形计算模型、同时考虑变形控制和经济性的多目标优化模型、元启发式优化模型搜索和求解算法。算法从预期的工程效果出发,反向推导出最优设计参数,以满足工程稳定性和安全性等多方面要求。

1.1 双边耦合变形计算模型及计算参数

双边耦合变形计算模型主要是将影响基坑工程安全性和经济性的设计参数转化为围护结构的受力变形规律。目前,基坑围护结构受力变形预测主要采用理论计算、经验类比和有限元法等方法。然而,规范中的理论预测方法通常只能实现单边变形预测,而准确的结果需要耦合两侧变形。

考虑到实际工程施工中关注最不利条件的受力变形情况,选用2D截面受力变形计算方法,基于能量原理和非线性土压力模型,通过弹性力学的最

小势能原理分析计算出基坑围护结构的受力变形特性^[11-12]。该模型忽略了边角效应,模拟了最不利条件,且能够提高计算效率,适合工程应用。此外,有限元和离散元等计算软件也可用于替换当前的计算模型。基坑围护结构的计算简图如图 1 所示,主要由挡土墙和水平支撑组成。建模前需要进行

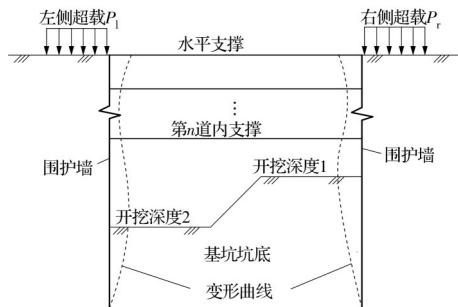


图 1 基坑围护结构 2D 计算截面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 2D calculation section of foundation pit retaining structure

数据收集,包括:1)对基坑支护结构的力学特性进行初步分析;2)确定反映典型或特别不利条件的横截面;3)调查选定剖面的地质属性;4)评估周围环境的潜在外部影响;5)根据工程规范设计围护结构的初步布置图,确定参数范围。

在基坑工程中,基坑围护结构的变形受到工程环境固定参数和设计可变参数的共同影响。工程环境参数包括地层物理力学特性、地下水状况、基坑两侧超载差异、坑底荷载差异及附近交通动载等,这些参数在设计施工过程中通常不变,需通过前期调研准确确定,而设计可变参数如挡土墙的尺寸、支撑数量及间距、支撑截面参数等,由设计者根据工程需要在合理范围内确定。在可变参数合理范围内,笔者旨在探索通过优化模型和求解算法平衡变形控制与经济优化的设计方案。整理 2D 计算模型所需参数,并给出相应的取值范围,如表 1 所示。

表 1 2D 计算模型计算参数表

Table 1 2D calculation model calculation parameter table

参数类型	参数名称	参数符号	单位	取值范围
环境参数	地层数量	m_s	/	/
	土层的重度	$[\lambda_{(d)}]$	[kN/m ³]	/
	土层的饱和重度	$[\lambda_{s_i}]$	[kN/m ³]	/
	土层的内摩擦角	$[\Phi_i]$	[°]	/
	土层的黏聚力	$[c_i]$	[kPa]	/
	土层的厚度	$[T_i]$	[dm]	/
	左侧围护桩的超载	overload _l	kPa	/
	右侧围护桩的超载	overload _r	kPa	/
	左侧开挖底部超载	reinforcement _l	kPa	/
	右侧开挖底部超载	reinforcement _r	kPa	/
设计参数	左侧开挖深度	H_l	dm	/
	右侧开挖深度	H_r	dm	/
	基坑宽度	B	dm	/
	计算截面的计算厚度	D	dm	/
	左侧围护墙的弹性模量	E_l	GPa	30
	右侧围护墙的弹性模量	E_r	GPa	30
	左侧围护墙设计长度	L_l	dm	$2H_l \geq L_l > H_l$
	右侧围护墙设计长度	L_r	dm	$2H_r \geq L_r > H_r$
	左侧围护墙设计厚度	h_l	dm	8~20
	右侧围护墙设计厚度	h_r	dm	8~20
	水平支撑垂直间距	S_v	dm	35
	水平支撑数量	n	/	$\left\{ n n \in \left[\frac{1, \max(H_l, H_r)}{S_v} \right], n \in N^+ \right\}$
	水平支撑的轴向刚度	$[EA_i]$	[GN]	[3, 60]

为在后续搜索过程中便于整数化处理,表 1 中部分变量的单位进行了调整,例如围护墙的设计长度和厚度采用 dm 作为单位。对于无量纲参数,其单位用“/”表示,而由环境决定的参数取值范围也

用“/”表示。为降低后续计算量,可以根据相关规范预先确定部分设计参数的取值。例如《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中提供了地连墙的强度等级与弹性模量的对应关系,指出混凝土的强

度等级越高,其弹性模量越大。一般情况下,地连墙的混凝土强度等级为C30~C40,为了保守计算,地连墙的弹性模量固定为C30对应的30 GPa。通常地连墙的设计厚度范围为8~20 dm,水平支撑的垂直间距为35 dm,最大设计数量为最大开挖深度除以35后取整。

双边耦合计算模型采用高阶多项式拟合围护墙的挠度函数,如式(1)所示。

$$w(z|a_0, a_1, a_2 \dots a_n) = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_n z^n \quad (1)$$

式中: w 为围护墙的挠度函数; z 为距离围护墙顶的深度; a_i 为多项式中的待定系数。

1.2 变形控制准则

国际上对于基坑工程设计往往考虑结构的服务极限状态(Service Limit Status, SLS),很少对变形和位移做显式限制。中国也有很多研究通过统计学方法制定了变形控制标准^[21-22],但存在较大的地域性。工程上一般采用《建筑基坑工程监测技术规范》的推荐值和指定工程的安全系数确定变形控制的大小,如式(2)和式(3)所示。

$$I_{\max} = \frac{40 \text{ mm}}{n_{\text{safety}}} \quad (2)$$

$$I_{\text{top}} = \frac{30 \text{ mm}}{n_{\text{safety}}} \quad (3)$$

式中: I_{\max} 为最大变形限制值; I_{top} 为桩顶变形限制值; n_{safety} 为变形控制的安全系数。

1.3 多目标优化模型

基于变形控制准则,建立围护结构的变形控制方程,优化模型的目标函数和约束条件如式(4)~式(6)所示,其中式(4)为目标函数,其余为约束条件,优化模型的目标函数取最小值。

$$F_1(w) = \min(I_{\max} - \max(w), I_{\text{top}} - w(z=0)) \quad (4)$$

$$\sqrt{F_1(w)} \leq 0.5 \text{ mm} \quad (5)$$

$$0 \leq (I_{\max} - \max(w)) \leq 0.5 \text{ mm} \quad (6)$$

$$0 \leq (I_{\text{top}} - \max(w(z=0))) \leq 0.5 \text{ mm} \quad (6)$$

式中: w 在二维模型中为墙体的挠度函数,在有限元模型中为挡土墙上的节点挠度数组; z 为基坑围护结构距离桩顶的深度。

对于经济优化模型而言,选取一类考虑材料造价的经济鲁棒性计算模型^[23],结构材料建造成本计算如表2所示。其中, P_w 和 P_s 分别为围护墙和水平支撑的单位造价,表中的计算参数对应表1。在2D计算模型中, n_h 的值取通常为1,在其他的3D模型中, $n_h = D/S_h$ 。当前造价模型计算主要描述了结构本身的材料造价。基于表2,以总造价 C 最小为目

标,造价模型如式(7)所示。

表2 结构材料建造成本计算表

Table 2 Calculation of construction costs of structural materials

项目	方程	花费/(USD/m ³)
围护墙	$Q_w = 2(B+D)L_i h_i P_w$	330
水平支撑	$Q_s = \frac{nD^2 B P_s}{S_h}$	33
总价	$Q_w + Q_s$	

$$C = \sum_i^{\{\text{left}, \text{right}\}} 2DL_i h_i P_w + \sum_i^{m_h} \frac{m_h E A_i B P_s}{E_i} \quad (7)$$

2 元启发式算法的引入与求解

由于基坑围护结构变形计算模型的非线性,涉及到的变形计算优化模型为非线性模型,传统求解器难以计算精确解,实际应用中一般采用元启发式算法搜索可行解。根据算法特点,可大致分为以下几类:纯随机搜索算法(暴力搜索、遗传算法等)、梯度搜索算法(粒子群算法、可变邻域搜索等)、半经验半随机算法(模拟退火算法、布谷鸟算法等)。在前期测试多种算法的基础上,为描述研究规律,引入遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法和布谷鸟算法,并分析各类算法的适用性。

2.1 遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是一种模拟生物进化自然选择机制的优化算法,可用于求解无约束和有约束的非线性优化问题。该算法能够在设计参数的可行取值范围内进行搜索,并根据预定目标函数的适应度进行迭代,以实现变形计算控制的快速收敛。设计参数通过编码确定各个模式的阶数,采用二进制编码方式构建设计参数组合的个体。遗传算法全面考虑设计参数的所有取值范围,并设置目标适应度函数,使之与围护桩变形与变形控制值的接近程度成正比,适应度函数如式(8)所示。算法通过应用精英选择和基因变异策略实现针对性的参数组合搜索。

$$F_f = \begin{cases} 0, & \max(w) > I_{\max}, \quad w(0) > I_{\text{top}} \\ \max(w), & \text{others} \end{cases} \quad (8)$$

式中: F_f 为适应度函数; $\max(w)$ 为两侧围护桩的最大水平变形。

2.2 粒子群算法

粒子群优化算法(PSO)是一种仿生算法,灵感来源于鸟群的觅食行为,其核心思想是将解空间中的每个个体视为鸟群中的一只鸟,每只鸟的位置代表一个可能的解。通过设定合理的目标函数来评估每个个体的性能,以指导粒子群向目标函数值最

优的方向进化。在此过程中,粒子的位置和速度不断更新,模拟鸟群觅食的动态过程,从而在解空间中搜索到满足条件的最优解。适应度函数的设定可以参考遗传算法中的做法。PSO 算法通过均匀初始化种群来实现全局搜索,其搜索过程主要通过粒子坐标的更新机制来控制,更新公式可表示为式(9)。

$$x_{\text{id}}^{k+1} = x_{\text{id}}^k + v_{\text{id}}^{k+1} \quad (9)$$

$$v_{\text{id}}^{k+1} = w v_{\text{id}}^k + c_1 r_1 (p_{\text{id},\text{pbest}}^k - x_{\text{id}}^k) + c_2 r_2 (p_{\text{d},\text{gbest}}^k - x_{\text{id}}^k) \quad (10)$$

式中: x_{id}^{k+1} 为编号为 id 的粒子在 $k+1$ 步时的坐标; v_{id}^{k+1} 为编号为 id 的粒子在 $k+1$ 步时的速度; w 为粒子自身惯性的权重; $p_{\text{id},\text{pbest}}^k$ 为在 k 步时对应的本身历史最优位置的坐标; $c_1 r_1$ 为粒子最优位置的考虑权重; $p_{\text{d},\text{gbest}}^k$ 为在 k 步时粒子种群全局历史最优位置的坐标; $c_2 r_2$ 为全局粒子最优位置的考虑权重。

2.3 模拟退火算法

模拟退火算法(SA)受金属加热冷却过程的启发,通过模拟粒子在加热时变为无序状态、冷却时逐渐有序化的物理现象,以实现优化搜索。算法从初始种子出发,在参数的可选取值范围内进行搜索,每次迭代对参数施加随机扰动,并根据适应度函数和温度下降模型决定是否接受新解。初始温度的选取影响迭代次数和解的质量,而温度变化曲线则决定算法是否易陷入局部最优。温度变化方程如式(11)所示,用于控制算法的收敛过程。

$$T(t) = \frac{T_0}{\lg(1+t)} \quad (11)$$

2.4 布谷鸟算法

布谷鸟搜索算法(CSA)是一种受布谷鸟寄生繁殖行为启发的优化算法。该算法通过模拟布谷鸟在不同鸟巢中产卵的过程,采用 Lévy 飞行模式进行半随机的位置更新,以寻找最佳解。在算法中,每只布谷鸟代表一个候选解,而鸟巢的质量由目标函数确定。布谷鸟算法的核心在于 Lévy 飞行模型的实现和鸟巢适应度的评估,其飞行模型可以表示为式(12),适应度函数的定义与遗传算法相似。该算法通过模拟布谷鸟的寄生繁殖行为,结合 Lévy 飞行模型,在参数可取值范围内高效搜索满足变形控制要求的参数组合。

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha L(s, \lambda) \quad (12)$$

式中: x_i^t 为第 i 个布谷鸟在 t 时刻所在的巢穴位置; α 为步长缩放因子,一般取 $\alpha = L/10$; L 是搜索过程的特征尺度,决定了搜索的步长,是一个概率模型,由

式(13)控制。

$$L(s, \lambda) = \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \sin(\pi \lambda / 2)}{\pi} \frac{1}{s^{1+\lambda}}, s \gg s_0 > 0 \quad (13)$$

2.5 逆向设计求解过程

逆向设计求解过程是以变形控制为起点,在设计参数中搜索满足基坑围护结构受力和变形要求的合适参数组合,并代入变形计算理论或有限元软件中验证。变形控制优化模型通常会生成多个可行解,应结合经济模型综合评价,以筛选出符合设计要求且具有最高经济效益的方案。具体搜索步骤包括:1)确定计算模型及相关参数;2)确定设计参数的取值范围并初始化搜索种群;3)选择适合的元启发式算法进行搜索;4)将得到的可行解代入经济优化模型,以评估不同方案的经济性。流程框架如图 2 所示。

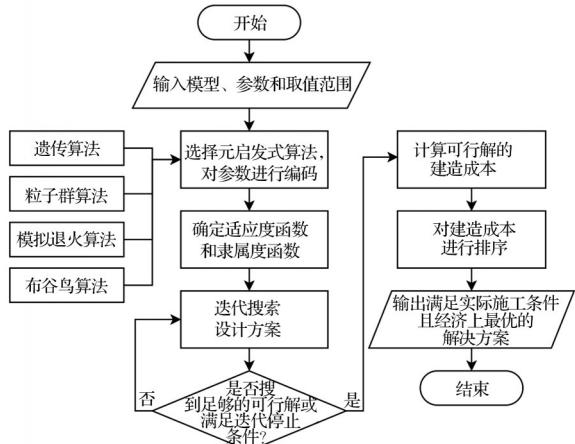


图 2 基坑围护结构逆向设计流程图

Fig. 2 Flow chart of reverse design of foundation pit retaining structure

3 案例分析

3.1 逆向设计

广州白云区综合交通枢纽项目包括一个火车站地下广场和地下广场下的地铁隧道,火车站广场基坑以及地铁基坑一起构成了坑中坑的工程结构,由于外坑的宽度远大于内坑,坑中坑的有限土压力传递效应不明显,对其进行单独分析。基坑宽度为 47.9 m,两侧基坑对称开挖至 12.39 m,基坑一侧设置土方车辆运输道路,估计坑外超载 50 kPa,另一侧无道路或设计超载。地铁基坑两侧 10 m 外设置有自然放坡,可认为存在一定的自然超载。实际工程设计中,基坑超载一侧围护桩设计长度为 16.39 m,另一侧为 14.39 m,挡墙厚度为 1 m,基坑围护结构设计截面图如图 3 所示。

工程地质参数及支撑围护结构的设计参数分

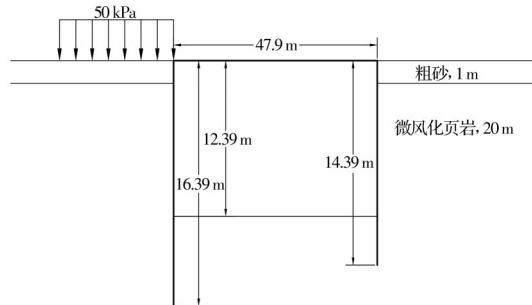


图3 基坑围护结构模型计算示意图

Fig. 3 Foundation pit envelope structure model calculation schematic

别列于表3和表4。基坑开挖区域主要穿越粗砂和微风化页岩两个地层,具有良好的地质条件。基坑变形控制要求在15 mm以内。考虑到一侧存在较大超载作用,设计时一侧长度为16.39 m,另一侧减小2.0~14.39 m。模型中考虑一侧坑外超载为50 kPa,另一侧不计超载。根据现场环境和设计情况,确定参数取值及搜索范围,如表5和表6所示。为验证理论的可靠性,将实际应用的计算参数代入理论中,计算得到的变形曲线与现场实测数据进行对比(如图4所示),结果表明,计算理论可用于后续的变形控制设计优化。

表3 地质土层参数表

Table 3 Geological soil layer parameter table

序号	土层名	$\gamma/(kN/m^3)$	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
(2)6-1	粗砂	19.0	0	30
(10)5-3	微风化页岩	25.9	300	30

表4 基坑围护结构材料参数表

Table 4 Material parameter table of foundation pit enclosure structure

结构	$EI/(10^7 N\cdot m^2)$	EA/N
围护墙	3.00	3.60×10^7
水平支撑		3.60×10^6

表5 基坑工程的环境参数取值表

Table 5 Environment parameter value table of foundation pit engineering

参数名称	符号	单位	取值
地层数	m_s		1
各土层的单位土重	$[\lambda_{di}]$	$[kN/m^3]$	[26]
各土层的饱和重度	$[\lambda_{si}]$	$[kN/m^3]$	[27]
各土层的内摩擦角	$[\varphi_i]$	$[(^\circ)]$	[30]
各土层的黏聚力	$[c_i]$	$[kPa]$	[300]
各土层的厚度	$[T_i]$	$[dm]$	[300]
基坑左侧挖深	H_l	dm	125
基坑右侧挖深	H_r	dm	125
基坑宽度	B	dm	479
计算截面厚度	D	dm	90

表6 基坑围护结构设计参数取值范围

Table 6 Value model of design parameters of foundation pit retaining structure

参数名称	符号	单位	取值
左侧围护桩的弹性模量	E_l	GPa	30
右侧围护桩的弹性模量	E_r	GPa	30
左侧围护桩的长度	L_l	dm	[140, 250]
右侧围护桩的长度	L_r	dm	[140, 250]
左侧围护桩的厚度	h_l	dm	[6, 12]
右侧围护桩的厚度	h_r	dm	$h_r = h_l$
水平支撑的垂直间距	S_v	dm	35
水平支撑的数量	n		[1, 2, 3]
水平支撑的轴向刚度	$[EA_i]$	[GN]	[10, 20, 30, 40, 50]

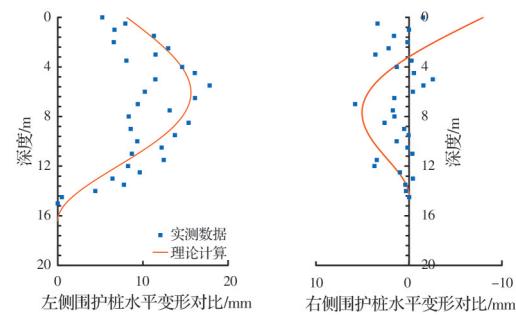


图4 基坑围护结构现场实测数据与理论算法结果对比图

Fig. 4 Comparison diagram between field measurement data and theoretical algorithm verification

3.2 启发式算法计算效能分析

在优化模型中代入相关参数进行设计优化。不论是计算理论还是有限元软件,完成一个计算案例所需时间基本固定,因此,元启发式算法性能差异的关键在于,能否减少搜索次数,以找到满足条件的解。在4种算法中,给定相同的初始状态和初始化种群。种群初始化方法为:左侧围护桩长度按5 dm步长把140~180 dm分为9组;右侧围护桩长度以22 dm步长划分为6组;围护桩厚度以3 dm步长划分为3组;水平支撑数量分别为1、2、3。假设水平支撑的轴向刚度为35,则初始化种群数量为486组。

在启发式算法迭代过程中,需要设置一个目标函数和迭代停止条件。目标函数(式(14))旨在搜索设计参数组合,使基坑围护结构的最大变形尽可能大,但不超过变形控制值。迭代停止条件(式(15))设置的目的是,当基坑围护结构的最大变形达到收敛时,停止计算并输出结果。

$$f_i = \begin{cases} \max(w), & \max(w) \leqslant I_{\max} \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (14)$$

$$f_i - f_{i-5} \leqslant 0.1, \quad i \geqslant 5 \quad (15)$$

式中: f_i 为第*i*次迭代的适应度,迭代终止条件可以

描述为:在连续5次迭代后,最大适应度函数的变化率小于0.1时停止迭代。将初始化后的种群代入元启发式算法进行迭代,在Windows 10操作系统的软件平台,CPU I7 12700、32 G内存的硬件平台上进

行搜索。分析粒子群算法(PSO)、遗传算法(GA)、模拟退火算法(SA)和布谷鸟算法(Cuckoo)的搜索结果,如表7所示,各类算法在单次试验条件下的最大适应度函数收敛曲线如图5所示。

表7 不同启发式算法的计算性能对比

Table 7 Comparison of computational performance of different heuristic algorithms

序号	算法	收敛迭代次数	适应度函数的最大值	计算次数	收敛总时间/s	平均单次计算时间/s
1	PSO	18	14.996 465	720	19 670.3	27.32
2	GA	9	14.958 992 36	450	12 245.2	27.21
3	SA	7	14.997 746 37	350	9 420.5	26.92
4	Cuckoo	6	14.985 229 17	240	6 485.9	27.02

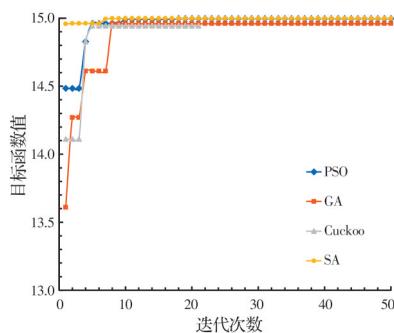


图5 不同启发式算法计算适应度结果对比曲线

Fig. 5 Comparison curves of fitness results calculated by different heuristic algorithms

由表7可见,理论算法的单次时长稳定在27 s左右,因此,影响计算效率的主要元启发式算法在搜索过程中的试错次数。根据表7中的数据可以看出,半经验算法的搜索效率优于其他两类算法。然而,从工程应用角度来看,不同算法的最优适应度差异并不显著,对实际设计的影响可以忽略。由于基坑围护结构的变形大小与单个设计参数的取值呈显著单调关系,而半经验搜索能够更好地拟合这类关系,且包含随机性能够避免陷入局部最优。在半经验算法中,Cuckoo算法的适应度函数值略劣于SA,原因主要为不同布谷鸟个体飞行路线重合度较高,易陷入局部最优,收敛更快,而SA算法在迭代过程中随机性会逐渐减弱,因此,能更稳定地模拟模型的内在联系并获得更高适应度的结果。考虑到当前的模型结构和实际应用的计算精度要求,Cuckoo算法更适用于当前问题。

分别整理不同水平支撑道数下的最优设计方案,并基于经济学模型计算不同设计方案的经济效益,如表8所示,表中符号与单位的含义同表1。由表8可知,当前的设计方案还能进一步优化。

表8 基坑围护结构设计方案经济性对比

Table 8 Economic comparison of design scheme of foundation pit retaining structure

L_1	L_r	h_1	n	$[EA_i]$	花费/USD
165	143	10	1	[10, 10]	11 744.7
165	152	7	2	[35, 35]	10 484.1
180	150	9	3	[10, 10, 10]	14 543.1

4 结论

提出多目标优化基坑双边耦合变形控制设计建模及求解方法,并分析不同的元启发式算法的适用性,得到以下主要结论:

- 1)现有经济模型较为简化,未来需要深入研究设计方案与工期、人工成本及机械费用之间的关联,进一步提高模型的精确度和实用性。
- 2)逆向设计方法框架中的力学计算模型可以替换为有限元、离散元等其他常用的计算模型,增强设计过程算法选择的多样性和鲁棒性。
- 3)半经验半随机搜索算法能够较好地模拟优化模型中内部的数据关联性,提高搜索效率。其中随机性更强的布谷鸟算法收敛更快,但适应度函数略低于SA,更适合用于解决当前问题。

参考文献

- [1] CUI Z, LI Q M, WANG J. Mechanical performance of composite retaining and protection structure for super large and deep foundation excavations [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2019, 25(5): 431-440.
- [2] TAN Y, WANG D L. Characteristics of a large-scale deep foundation pit excavated by the central-island technique in Shanghai soft clay. II: Top-down construction of the peripheral rectangular pit [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(11): 1894-1910.
- [3] LIU L L, WU R G, CONGRESS S S C, et al. Design

- optimization of the soil nail wall-retaining pile-anchor cable supporting system in a large-scale deep foundation pit [J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(7): 2251-2274.
- [4] YOU Y, YAN C H, XU B T, et al. Optimization of dewatering schemes for a deep foundation pit near the Yangtze River, China [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, 10(3): 555-566.
- [5] PRAGER W. Optimization of structural design [J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1970, 6(1): 1-21.
- [6] XU C J, CHEN Q Z, WANG Y L, et al. Dynamic deformation control of retaining structures of a deep excavation [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2016, 30(4): 04015071.
- [7] XU R Q, ZHU Y H, DING P. Performance of a large-scale excavation by bottom-up technique in Hangzhou soft clay [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 6061849.
- [8] CUI K, FENG J, ZHU C Y. A study on the mechanisms of interaction between deep foundation pits and the pile foundations of adjacent skewed arches as well as methods for deformation control [J]. *Complexity*, 2018, 2018: 6535123.
- [9] LIU S H, YANG J S, FU J Y, et al. Performance of a deep excavation irregular supporting structure subjected to asymmetric loading [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2019, 19(7): 05019007.
- [10] XU C J, LIN Z R, JIANG Y L, et al. Research on the spatial effect of foundation pit under asymmetric loads [J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 9: 976696.
- [11] DING H B, WAN Q W, XU C J, et al. Semianalytical method for controlling the deformation of retaining structures subjected to asymmetrical loads [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2024, 24(4): 04024031.
- [12] 万琪伟, 丁海滨, 万强, 等. 基于变形控制的基坑支护桩设计方法研究[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(4): 24-32.
- WAN Q W, DING H B, WAN Q, et al. Study on the design method of foundation pit retaining pile based on deformation control [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2023, 40(4): 24-32. (in Chinese)
- [13] 胡松奇. 基于天牛群算法优化支持向量回归机的岩土工程位移反分析方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- XU S Q. Study on displacement back analysis method of geotechnical engineering using support vector regression optimized by beetle swarm optimization algorithm [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [14] 崔春雨. 桩-撑支护型式下基于启发式算法的深基坑变形动态预测方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- CUI C Y. Research on dynamic prediction method of deep foundation pit deformation based on heuristic algorithm under pile-brace supporting system [D]. Jinan: Shandong University, 2022. (in Chinese)
- [15] 常祎妹, 汪洋, 朱晓宁. 基于运载能力的铁路集装箱中心站轨道吊与集卡协同优化[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2024, 24(1): 188-198.
- CHANG Y M, WANG Y, ZHU X N. Collaborative optimization of rail mounted gantry crane and container truck based on actual transportation capacity in railway container terminals [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2024, 24(1): 188-198. (in Chinese)
- [16] LI Z C, HU X M, CHEN C, et al. Multi-factor settlement prediction around foundation pit based on SSA-gradient descent model [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 19778.
- [17] GAO W. Forecasting of rockbursts in deep underground engineering based on abstraction ant colony clustering algorithm [J]. *Natural Hazards*, 2015, 76(3): 1625-1649.
- [18] HUANG S, HUANG M M, LYU Y J. A novel approach for sand liquefaction prediction via local mean-based pseudo nearest neighbor algorithm and its engineering application [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2019, 41: 100918.
- [19] 石一凡, 刘立龙, 兰胜伟, 等. 基于PSO-BP神经网络的中国区域大气加权平均温度模型[J]. *大地测量与地球动力学*, 2023, 43(12): 1300-1306.
- SHI Y F, LIU L L, LAN S W, et al. An atmospheric weighted mean temperature model for China region based on PSO-BP neural network [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2023, 43(12): 1300-1306. (in Chinese)
- [20] 韩鞠, 詹必雄, 刘宜成, 等. 基于布谷鸟算法优化BP神经网络的塔吊安全研究[J]. *工业建筑*, 2023, 53(Sup2): 790-793.
- HAN J, ZHAN B X, LIU Y C, et al. Optimization of BP neural network based on cuckoo algorithm for tower crane safety[J]. *Industrial Building*, 2023, 53(Sup2): 790-793. (in Chinese)
- [21] LIU L L, CAI G J, LIU S Y, et al. Deformation characteristics and control for foundation pits in floodplain areas of Nanjing, China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(7): 5527-5538.
- [22] LIU B, XU W, ZHANG D W, et al. Deformation behaviors and control indexes of metro-station deep excavations based on case histories [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 122: 104400.
- [23] JUANG C H, WANG L, HSIEH H S, et al. Robust geotechnical design of braced excavations in clays [J]. *Structural Safety*, 2014, 49: 37-44.