



基于经典遗传算法的系缆墩桩位布置优化

廖振华, 施挺, 冯浩

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 系缆墩作为港口码头常见的高桩墩台结构形式, 其桩位布置优化是一个复杂的非线性问题, 传统基于经验的试算和调整方法在解决该问题时面临困难。本文基于经典遗传算法, 建立了桩位布置优化问题的数学模型。通过对各桩基参数进行二进制编码, 结合碰桩约束条件的后置处理策略, 应用计算机编程语言实现了系缆墩桩位布置的遗传迭代进化。模型优化结果表明, 应用经典遗传算法能够使桩位优化问题得到较好的收敛性能和优化效果, 且满足工程设计可行性和实用性要求, 为系缆墩桩位布置优化问题提供可靠的解决方案。

关键词: 系缆墩; 遗传算法; 桩位优化

中图分类号: U655.55

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)01-0044-07

Optimization of pile arrangement for mooring dolphin based on classic genetic algorithm

LIAO Zhenhua, SHI Ting, FENG Hao

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: As a common type of high-piled pier structure in harbors, the optimization of pile arrangement for mooring dolphin is a complex nonlinear problem. Traditional methods based on experience and adjustment encounter difficulties in handling this issue. This paper establishes a mathematical model for optimizing pile arrangement based on the classic genetic algorithm. By binary encoding various pile foundation parameters and combining with the post-processing strategy for pile collision constraints, and using computer programming languages, the genetic iterative evolution of pile arrangement for mooring dolphin is implemented. The optimization results of the model demonstrate that the application of the classic genetic algorithm can achieve good convergence performance and optimization effects for pile arrangement problems, and meet the feasibility and practicality requirements of engineering design, providing a reliable solution for the optimization of pile arrangement for mooring dolphin.

Keywords: mooring dolphin; genetic algorithm; pile arrangement optimization

港口码头高桩墩台结构形式中, 系缆墩是常见的一种结构单元, 其特点表现为: 除了承受结构自重外, 还须承受波浪力、水流力和系缆力等水平荷载。因此, 在设计系缆墩时, 需要设置不同方向的斜桩, 以提高结构的水平刚度和承载能力。在确定系缆墩桩位布置方案时, 根据工作经

验提出初步方案, 并在不同荷载工况组合下进行受力分析计算, 对桩基的各项内力(如桩力、弯矩、桩身应力)和位移等条件进行校核。桩位布置涉及多个参数, 如桩基的桩顶位置、斜度和扭角等, 这些参数与桩力之间存在复杂的相互关联性, 调整其中一个参数通常会导致计算结果大幅变化。

收稿日期: 2024-03-22

作者简介: 廖振华(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港航工程设计。

因此, 系缆墩桩位布置优化是一个复杂的非线性问题, 传统基于经验的试算和调整过程耗时且繁琐, 难以保证获得最优效果。

在 20 世纪 70 年代提出了遗传算法 (Genetic algorithm, GA), 该算法根据自然中生物体进化规律而设计, 基本思路是将问题建模为一个种群遗传进化的过程, 在每一代中, 通过选择、交叉和变异等遗传操作, 模拟自然界的遗传过程, 使种群中的个体不断进化, 从而找到问题的最优解^[1]。近年来随着计算机性能的提高和人工智能的兴起, 遗传算法作为一种启发式优化算法, 在复杂的非线性、多模态问题的优化中展现出较强的适应性和鲁棒性, 因此被广泛应用于各领域, 如无人驾驶路径规划、人工神经网络参数优化、机械结构优化设计、零件锻造工艺参数选取等^[2-5]。

近年来, 针对高桩墩台的桩位布置的优化算法, 陈章楷等^[6]通过 Ansys 有限元计算软件的 APDL 命令流, 将遗传算法整合到模型计算与后处理中, 实现了程序自动优化特定荷载条件下的桩位布置, 讨论优化参数对优化过程的具体影响, 提出了适当弱化交叉概率并提高变异强度等观点; 郭隆洽等^[7]将有限元计算与遗传算法结合, 以桩的扭角、仰角、桩顶坐标为决策变量, 以经验得出的若干布置形式为初始方案, 并设置内力限值、几何不干涉等约束条件, 采用均匀交叉算子, 将父代的决策变量进行随机交换, 实现高桩墩台桩位布置的遗传进化。

然而, 在遗传算法的交叉步骤中, 个体参数的直接交换可能导致随机性不足, 影响算法的多样性和搜索能力。此外, 将碰桩约束直接加入优化算法中, 将导致生成的个体不够理想或算法效率较低。这些问题具有进一步改进和优化的空间。

以某工程特殊地质下的系缆墩作为研究对象, 基于经典遗传算法建立系缆墩桩位布置优化的非线性问题数学模型。利用计算机编程语言, 对各桩基的参数进行二进制编码, 并在遗传操作中采用二进制位运算, 以提高迭代进化过程中的随机性。通过采用碰桩约束条件后置处理的策略, 在保留良好遗传信息的同时, 有利于提高优化结果

的实用性。上述桩位布置的优化方法可为类似工程提供借鉴。

1 工程概况

某 30 万吨级油品泊位, 长 450 m, 采用蝶形布置, 建设有 1 座工作平台、2 座主靠船墩、2 座副靠船墩、6 座系缆墩。其中, 系缆墩上部墩台直径 15 m, 采用高桩墩台结构, 桩基采用 9 根 $\phi 1\ 500$ mm 钢管桩, 上部为现浇墩台, 墩台厚 3.0 m。设计荷载条件为: 波高 $H_{1\%} = 3.53$ m, 水流流速 2.2 m/s, 系缆力 4 000 kN (作用方向 30° 、 45°)。

此外根据地质资料显示, 该区域存在一层较厚的圆砾层 (图 1), 从土层指标判断该层沉桩较困难, 预计桩尖可进入该层 6~7 m, 经计算单桩抗拔承载力约为 5 100 kN。因此, 在桩位布置设计时, 确定了评估标准: 1) 各桩之间压桩力均匀, 即压桩力标准差 σ 尽量减小, 使每根桩尽可能发挥其承载力作用, 从而达到优化桩长的目的; 2) 由于地质土层限制了最大单桩抗拔承载力, 需要各桩拉桩力 N_i 尽可能小。通过多次调整, 在前期设计中确定了桩位的初始布局 (定义编号 0), 其桩位布置见图 2。结构分析计算结果为压桩力标准差 $\sigma = 1\ 424$ kN, 最大拉桩力 $N_i = 4\ 535$ kN (N_i 为正时, 表示存在拉桩)。

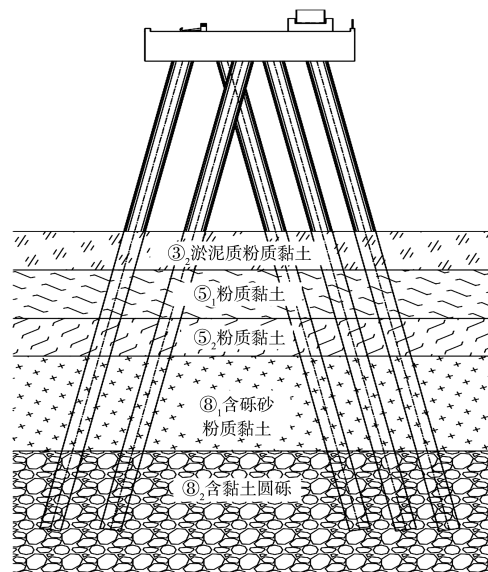
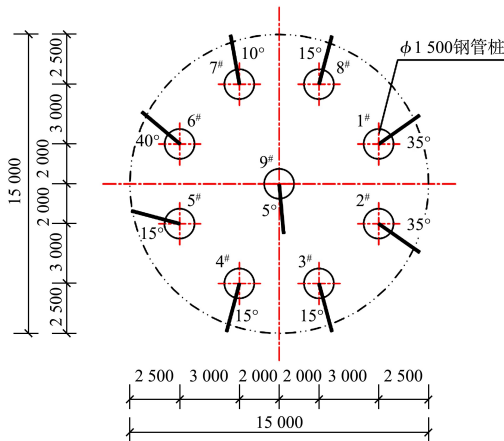


图 1 系缆墩断面

Fig. 1 Mooring dolphin section



注：图中桩斜度均为 4:1。

图 2 系缆墩桩位 (单位: mm)

Fig. 2 Pile position of mooring dolphin (unit: mm)

2 桩位布置优化数学模型

桩位布置参数一般包括桩基的桩顶位置 (x, y, z) 、斜度 (ρ) 和扭角 (θ) 等, 给定这些参数即可通过结构分析, 计算出各桩基的内力, 因此将上述变量作为模型的设计变量。结合工程桩位布置设计的评估标准, 采用的桩位布置优化数学模型为:

$$x = [X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n] \quad (1)$$

$$x_i = (x_i, y_i, z_i, \rho_i, \theta_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$\text{obj. } f(X) = C_a \sigma + C_b N_1 \rightarrow \min \quad (3)$$

$$\text{s. t. } g(X) > d \quad (4)$$

式中: X 为系缆墩桩基布置方案, 以 n 根桩的空间位置集合作为个体, 此模型中 $n = 9$; X_i 为单根桩的空间位置; $x_i, y_i, z_i, \rho_i, \theta_i$ 为桩顶位置、斜度和扭角; $f(X)$ 为模型优化的目标函数; σ 为 n 根桩的压桩力标准差; N_1 为 n 根桩中拉桩力的最大值, 拉桩力取正值; C_a, C_b 为权重系数, 此模型中均取 1; $g(X)$ 为约束条件, 此模型中指桩间距; d 为判断碰桩的常数, 当 $g(X) > d$ 时, 该桩位布置不存在碰桩。

3 基于经典遗传算法的模型优化

遗传算法作为一种模仿自然选择和遗传机制的搜索算法, 通过模拟自然进化过程解决优化问题。基于经典遗传算法优化桩位布置的流程见图 3。利用遗传算法的特性, 提出模型遗传进化流程,

包括 5 个基本步骤^[8]: 1) 染色体编码: 定义问题的解决方案表示方法, 本文模型中为对桩基空间位置进行编码; 2) 初始化种群: 随机生成已设定种群规模数量的一组桩位布置方案; 3) 适应度函数: 根据优化目标设计适应度函数, 评估种群中每个个体的适应度; 4) 遗传操作: 通过选择、交叉和变异操作生成新一代种群。适应度高的个体被选中参与与下一代的遗传的概率高, 然后用父代的染色体按照一定的概率进行交叉生成子代, 且子代染色体有一定概率进行变异; 5) 新一代种群: 由交叉和变异产生新一代种群, 返回步骤 3, 直到迭代达到设定次数。

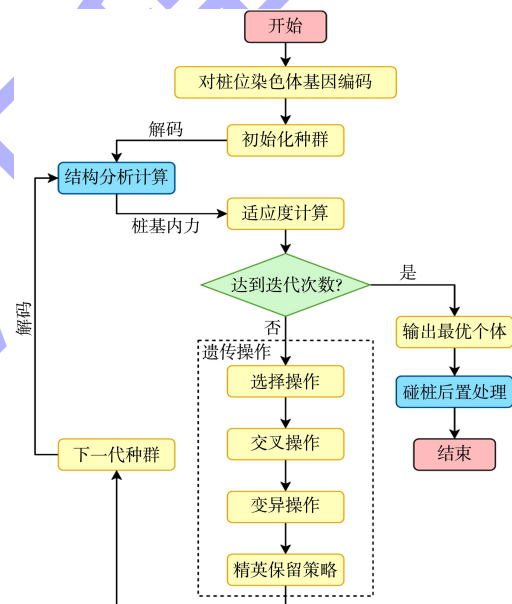


图 3 遗传算法优化桩位流程

Fig. 3 Flow of optimizing pile position by genetic algorithm

3.1 桩位染色体编码

在本模型中, 染色体编码是实现遗传算法的关键步骤。对于染色体编码, 一般可采取 3 种类型: 二进制编码、浮点数编码和符号编码。选择合适的编码方式可以提高算法的准确性。本模型使用二进制(计算机软、硬件交互操作的最基本单元)对染色体进行编码, 以达到在初始化种群和交叉、变异等遗传操作中采用二进制位运算, 保持了进化过程的高度随机性, 从而丰富了整个种群中遗传信息的多样性。这种多样性有助于遗传算

法更好地进行全局搜索, 避免过早收敛到局部最优解, 以提高寻找全局最优解的可能性。

系缆墩的桩基通常在设计中采用对称且均匀布置, 平面布置位置相对固定, 针对本模型, 各桩基的桩顶位置 (x_i, y_i, z_i) 考虑固定, 仅对桩基的斜度 (ρ) 和扭角 (θ) 进行编码, 具体为: 结合实际工程施工精度, 桩基的斜度 (ρ) 考虑(直桩 4, 5, ..., 10)共 2^3 种变化情况, 对应采用 3 位二进制按顺序编码, 如直桩编码为 000, 桩基斜度为 10 编码为 111。桩基的扭角 (θ) 的精度按 5° 考虑, 共 72 种变化情况, 由于 $2^6 < 72 < 2^7$, 因此采用 7 位二进制进行编码。

图 4 为进行 7 位二进制编码的桩基扭角, 在进化过程中进行单点交叉和变异的操作。

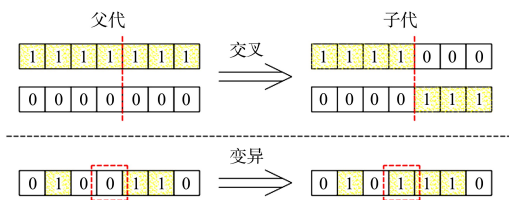


图 4 基于二进制编码的交叉、变异操作示意

Fig. 4 Schematic of crossover and mutation operations based on binary encoding

3.2 碰桩约束条件处理

在使用遗传算法求解问题时, 必须有效处理约束条件, 以确保搜索空间在合理范围内。在遗传算法处理约束条件时, 常采用罚函数法, 通过引入惩罚因子来构建约束函数, 并将其与目标函数相结合形成惩罚函数^[9]。然而, 郭隆洽等认为对于墩台桩位的优化问题, 使用罚函数法很难确定合适的惩罚因子, 提出采用 Deb 可行性法则配合锦标赛选择算子来处理约束。尽管如此, 在模型计算中为补全有效初始种群, 仍进行了庞大数量的方案评估。针对此问题, 本文在模型的优化过程中, 采用了一种不同的碰桩约束条件处理策略。

在初始化种群和种群迭代过程中, 由于个体的生成完全随机, 所以存在碰桩个体的概率远远

大于不存在碰桩个体的概率。然而, 即使存在碰桩的个体也可能携带良好的基因片段, 如果淘汰所有存在碰桩的个体, 可能会损失大量有价值的遗传信息。

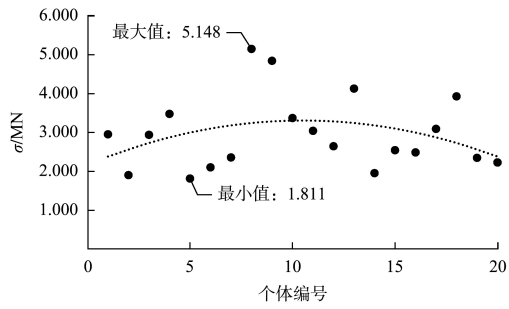
综上, 为了让可能携带良好基因片段的个体仍有机会参与下一代的遗传进化, 本文未将碰桩作为约束条件加入模型的初始化种群、交叉和变异等遗传操作中, 而是采用一种更为灵活的后置处理策略。具体来说, 是在优化过程结束后挑选优秀的个体, 通过交换碰桩之间的位置解决碰桩问题。通过此策略, 既保留了含有良好遗传信息的个体, 又确保了最终解不会碰桩。

3.3 初始化种群与种群迭代

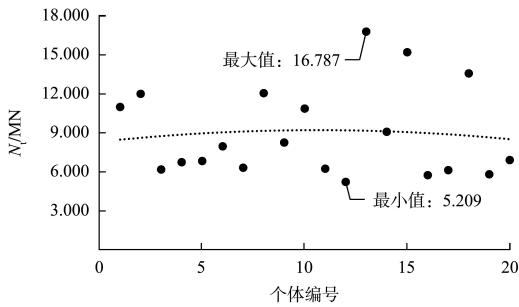
模型遗传算法采用的参数设定包括: 种群规模设定为 20 个个体; 交叉概率设定为 0.8; 变异概率设定为 0.1; 迭代次数设定为 30 轮; 选择算子采用轮盘赌选择法, 交叉算子为随机位置单点交叉操作, 变异算子为随机位置进行取反操作。

在种群迭代计算中, 模型优化加入了精英保留策略。具体操作为: 将当前世代种群中的最佳个体信息作为精英个体保留下来, 然后通过选择、交叉和变异等遗传操作生成下一代种群。在生成的下一代种群中, 将适应度最低的个体替换为当前种群中的最佳个体, 以确保遗传算法能够保持对当前种群最佳个体的持续关注, 从而避免因进化过程中的随机性而丢失相对良好的基因片段, 这有助于提高算法的收敛性, 在优化过程中更快地收敛到最优解。

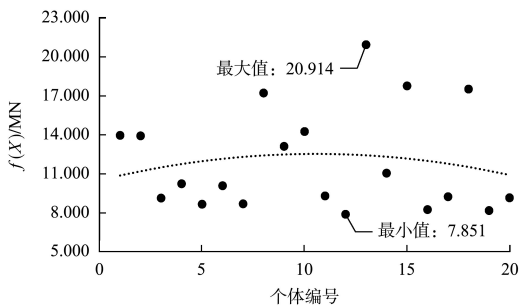
初始化种群后, 随机生成了 20 个个体的桩位布置, 经结构计算获得所有个体的压桩力标准差 σ 和拉桩力 N_i (图 5), 由于桩位是随机生成的, 个体的表现相当离散, 其中压桩力标准差 σ 最小值为 1.811 MN, 拉桩力 N_i 的最小值为 5.209 MN, 最优个体(定义编号 01)目标函数 $f(X)$ 最小值为 7.851 MN, 对应 $\sigma = 2.642$ MN, $N_i = 5.209$ MN, 初始种群中, 所有个体的最大拉桩力均不满足单桩抗拔承载力的限制条件。



a) 压桩力



b) 拉桩力



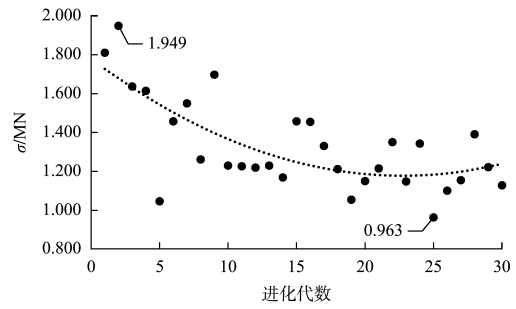
c) f(X)

图 5 初始化种群后模型结果

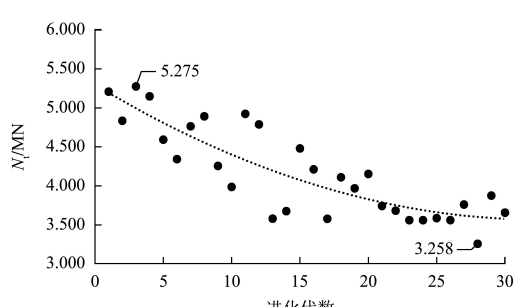
Fig. 5 Model results after initializing population

4 模型优化结果

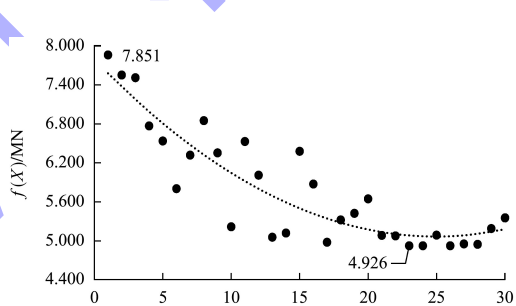
通过采用经典遗传算法在优化模型中迭代进化，每代种群中最优个体的压桩力标准差 σ 、拉桩力 N_i 以及目标函数 $f(X)$ ，均呈现明显的收敛情况(图 6)。进化迭代至第 20 代以后， σ 、 N_i 以 $f(X)$ 变化幅度均保持在较低水平，说明优化算法已经收敛到一个相对稳定解空间。基于经典遗传算法的桩位布置优化方法具备良好的收敛性能和优化效果。



a) 压桩力



b) 拉桩力



c) f(X)

图 6 模型的遗传进化结果

Fig. 6 Genetic evolution results of model

通过分析模型的遗传进化结果，从种群中筛选出表现优异的个体，并对这些个体实施碰桩约束条件的后处理。本文挑选了第 23 代中 $f(X)$ 最优个体(定义编号 02)，与 28 代中 N_i 最小的个体(定义编号 03)。个体 02 通过 $7^{\#} \leftarrow 8^{\#}$ ， $1^{\#} \rightarrow 4^{\#} \rightarrow 9^{\#} \rightarrow 6^{\#} \rightarrow 1^{\#}$ 的桩位调整方式，获得了不存在碰桩的个体 02a，同理个体 03 通过 $1^{\#} \leftarrow 4^{\#}$ 的调整方式得到了个体 03a，见图 7 和表 1。

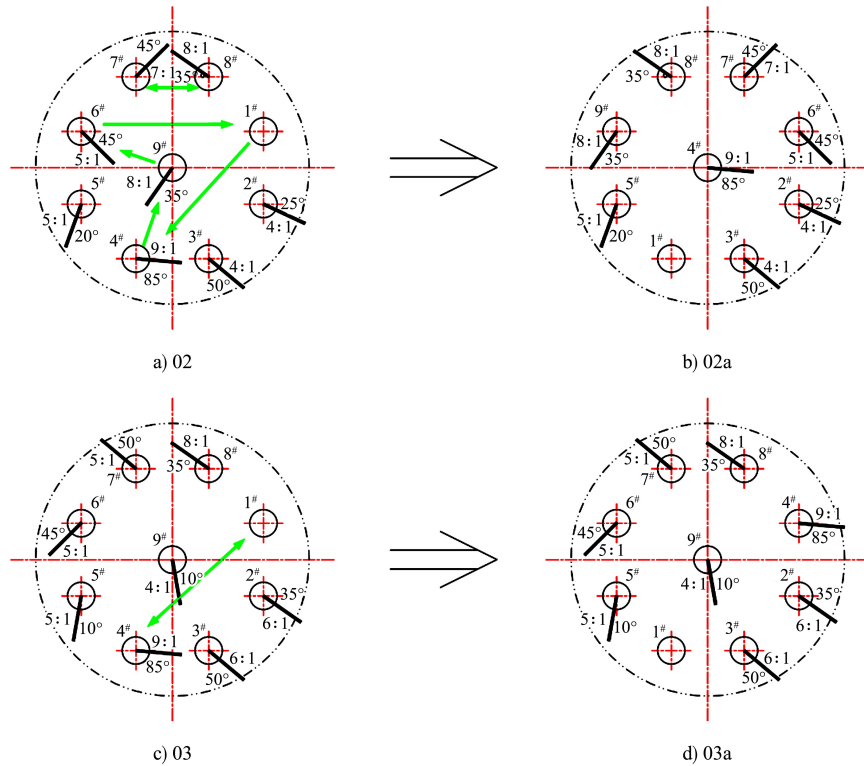


图 7 碰桩约束条件后置处理

Fig. 7 Post processing of collision pile constraint conditions

表 1 桩位布置参数

Tab. 1 Pile layout parameters

个体	桩编号	斜度 $l(^{\circ})$	扭角 $t(^{\circ})$
02	1 [#]	0	-110
	2 [#]	4	-25
	3 [#]	4	-40
	4 [#]	9	-5
	5 [#]	5	-110
	6 [#]	5	-45
	7 [#]	7	45
	8 [#]	8	145
	9 [#]	8	-125
03	1 [#]	0	70
	2 [#]	6	-35
	3 [#]	6	-40
	4 [#]	9	-5
	5 [#]	5	-100
	6 [#]	5	-135
	7 [#]	5	140
	8 [#]	8	145
	9 [#]	4	-80

遗传进化后个体表现对比见表 2。由表 2 可知, 在性能指标上, 经过碰桩后处理的个体 02a、03a 与原始状态(个体 02 和 03)相比变化不大, 目

标函数 $f(X)$ 指标分别增加了 0.57% 与 4.08%, 但相较于初始种群中的最优个体 01 具有显著提升, $f(X)$ 指标分别降低 36.90% 与 33.65%。这表明采用碰桩约束条件后置处理的策略, 在优化过程中有效地保留了有价值的遗传信息, 使得新生成的个体在性能表现上有所提升。此外, 与传统经验优化方法得到的个体 0 相比, 采用经典遗传算法和碰桩约束条件后置处理, 其模型结果在各项评估指标上也取得了一定程度的优化, $f(X)$ 指标分别降低了 16.87% 与 12.59%。意味着这种策略可以满足工程设计的精度要求, 并在优化过程中实现更好的性能。

表 2 遗传进化后个体表现对比

Tab. 2 Comparison of individual performance after genetic evolution

个体编号	σ/MN	N_t/MN	$f(X)/MN$
0	1.424	4.535	5.959
01	2.642	5.209	7.851
02	1.365	3.561	4.926
02a	0.955	3.999	4.954
03	1.747	3.258	5.005
03a	1.642	3.567	5.209

5 结论

1) 通过对各桩基的参数采用二进制编码,能够在进化过程中维持较高水平的随机性,从而使整个种群中的遗传信息更加丰富多样,有助于遗传算法更有效地进行全局搜索。

2) 结合引入碰桩约束条件的后置处理策略,能够更好地平衡个体的遗传信息和约束条件的处理,满足工程设计的精度要求,并在优化过程中实现更好的性能。

3) 经典遗传算法能够解决系缆墩桩位布置优化的非线性问题,在收敛性能、优化效果以及实际应用中均表现出显著优势,为系缆墩桩位布置问题提供了一种高效可靠的优化方案,且能满足工程设计的可行性和实用性要求。

4) 基于对问题平衡性以及算法性能进行初步评估的考虑,模型中优化目标的权重系数 C_a 和 C_b 均设为 1,然而,在不同的实际应用场景和优化目标下,权重系数的配置可能对算法的性能产生显著影响。在实际工程设计中,需深入探讨不同权重系数配置对遗传算法性能的具体影响,以实现更优的搜索效率和解的质量。

参考文献:

[1] FANG X P. Engineering design using genetic algorithms [D].

(本文编辑 赵娟)

(上接第 22 页)

参考文献:

[1] 杨进先,周益人,王震. 波浪作用下系泊船舶的撞击能量研究综述[J]. 水运工程, 2006(12): 27-32.

[2] 刘宇,唐国磊. 波浪周期对开敞式码头系泊安全影响研究[J]. 中国水运(下半月), 2010, 10(8): 30-31.

[3] 孟祥玮,高学平,张文忠,等. 波浪作用下船舶系缆力的计算方法[J]. 天津大学学报, 2011, 44(7): 593-596.

[4] 刘必劲. 开敞式码头系泊船舶运动量、系缆力和撞击能量研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.

[5] 张志明,周丰,杨国平,等. 离岸深水港码头系泊船舶运动量研究[J]. 中国港湾建设, 2010(S1): 49-52.

[6] BOWERS E C. Harbor resonance due to set-down beneath wave groups[J]. Journal of fluid mechanics, 1977, 79(1): 71-92.

[7] SMALLMAN J V, COOPER A J. A mathematical model for set down in harbors [J]. Coastal engineering, 1989, 13(3): 247-261.

[8] MEI C C, AGNON Y. Long-period oscillations in a harbor induced by incident short waves [J]. Journal of fluid mechanics, 1989, 208: 595-608.

Ames: Iowa State University, 2007. [2] 冯舒,刘明. 基于遗传算法改进的 AGV 路径规划研究[J]. 现代电子技术, 2024, 47(4): 123-127.

[3] 丁军,古榆川,黄霞,等. 基于改进遗传算法优化人工神经网络的 304 不锈钢流变应力预测准确性研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(10): 78-86.

[4] 谢海波,洪昊岑,王柏村,等. 基于多目标遗传算法的轴向柱塞泵低脉动结构优化设计[J/OL]. 工程设计学报. [2024-02-22] [2024-02-26]. <https://link.cnki.net/urlid/33.1288.th.20240219.1647.006>.

[5] 刘寿军,肖开永,牛腾,等. 基于神经网络-遗传算法的泵体零件热锻模具磨损与应力分析[J]. 锻压技术, 2024, 49(2): 208-214.

[6] 陈章楷,戈浩波. 遗传算法在高桩墩台桩位优化上的应用[J]. 水运工程, 2021(7): 205-210.

[7] 郭隆洽,郭汝庆. 考虑约束及初始方案的高桩墩台桩位遗传进化[J]. 水运工程, 2022(11): 67-73.

[8] SUMAN S K, GIRI V K. Genetic algorithms: basic concepts and real world applications [J]. International journal of electrical, electronics and computer systems, 2015, 12(3): 116-123.

[9] 王吉权,宋丽,宋豪豪,等. 基于改进实数遗传算法的桑叶采摘机结构参数优化[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(1): 14-20, 53.

[9] VAN DER MOLEN W, LIGTERINGEN H, VAN DER LEM J C, et al. Behavior of a moored LNG ship in swell waves [J]. Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering (ASCE). 2003, 129(1): 15-21.

[10] LIGTERINGEN H, MOES J. Motions of moored ships in long waves [C]//Maritime and Port Authority Centre. International conference on port and maritime R&D and technology, Singapore: [s. n.], 2001: 313-319.

[11] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室. 较长周期波浪作用下系泊船舶运动模型试验研究[R]. 武汉: 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 2022.

[12] 中交水运规划设计院有限公司, 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港总体设计规范: JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.

[13] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 液化天然气码头设计规范: JTS 165-5—2016[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.

(本文编辑 赵娟)