



考虑约束及初始方案的高桩墩台桩位 遗传进化^{*}

郭隆洽^{1,2,3}, 郭汝庆⁴

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230; 2. 广州大学工程抗震研究中心, 广东 广州 510006;
3. 广东省地震工程与应用技术重点实验室, 工程抗震减震与结构安全教育部重点实验室, 广东 广州 510006;
4. 香港教育大学 数学与资讯科技学系, 香港 999077)

摘要: 高桩墩台在港口工程中常用于承受船舶撞击力和系缆力等各方向作用力, 合理的桩位布置是设计的重难点, 通常需要兼顾拔桩力、压桩力、桩身强度、变形、现场可实施性等各方面的要求。在上述限制下, 传统的设计手段通常需要多次迭代, 耗时长且不一定得到满意的优化效果。针对桩位优化问题, 将有限元建模计算融入到遗传算法中, 以每根桩的扭角、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, 实现高桩墩台桩位布置的遗传进化, 并据此编制计算软件, 通过实际案例计算展示桩位优化过程。

关键词: 遗传算法; 高桩墩台; 桩位优化

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)11-0067-07

Geneticalgorithm to optimization of pile layout of suspended structure with constraints and prior options

GUO Long-qia^{1,2,3}, GUO Ru-qing⁴

(1.CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2.Earthquake Engineering Research& Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

3.Guangdong Provincial Key Laboratory of Earthquake Engineering and Applied Technology, Key Laboratory of Earthquake Resistance, Earthquake Mitigationand Structural Safety, Ministry of Education, Guangzhou 510006, China;

4. Department of Mathematicsand informationTechnology, The Education Universityof Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: Pile layout is the most critical design issue for the suspended structure subjected to forces of various directions(berthing force & mooring force, etc.), for which trade-off should be made among several aspects including the axial compressive and pullout force, pile strength, structural deflection and the constructability on site. Given such constraints and forces, traditional design procedure requires plenty of time-consuming iterations while the most optimized scheme is not always accessible. Therefore, to optimize the pile layout, GA(genetic algorithm) is employed with the calculation procedure of FEM embedded. Taking the horizontal & vertical angles and location of the pile top of each pile as the decision variables, utilizing several initial pile layout patterns from engineer's judgement as the prior knowledge, and exerting the constraint condition including the limitation of internal force and no geometric interference, the evolution of pile layout is implemented, based on which a dedicated program is developed and calculating demo of a practical case is presented.

Keywords: genetic algorithm; suspended structure; optimization of pile layout

收稿日期: 2022-03-13

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFE0112500); 国家自然科学基金项目(51878196, 52078150)

作者简介: 郭隆洽(1992—), 男, 博士研究生, 工程师, 从事港工结构设计及港工结构抗震研究。

高桩墩台结构具有对不同水深及地质条件适应性强、离岸深水区施工方便等优点，在港口工程尤其是油泊位和液化天然气泊位中，常作为靠船墩、系缆墩，以承受船舶撞击力和系缆力。由于其承受的水平荷载较大，且在不同船型和工况下朝向多个方向，设计中通常需要设置若干斜桩，以提高结构的侧向刚度和承载力。斜桩方案设计需要兼顾各设计指标及现场条件，包括：1) 最大拔桩力和最大压桩力是否满足地基承载力；2) 钢管桩强度是否满足要求；3) 顶部变形是否满足位移限制要求；4) 最终桩位布置能否有施工空间，设备能否施打。为了满足上述诸多要求和限制，桩位布置的传统设计方式通常需要进行多次迭代，不断调整每根桩的桩顶位置、扭角、仰角，效率较低下，且不一定获得满意的优化效果。

为此，基于遗传算法，本文提出了高桩墩台桩位遗传进化算法，可以实现：1) 施加内力限值、几何不干涉、结构对称等实际约束条件，保证方案有效性；2) 输入初始方案，从而提高算法优化效果及效率。

1 桩位遗传进化算法

1.1 遗传算法简介

遗传算法 (genetic algorithm, GA) 是一类通过模拟自然界生物自然选择和自然进化的自适应全局优化概率搜索算法，最早由 Holland^[1] 于 1992 年提出。与传统搜索算法如二分法、牛顿法、抛物线法等相比，遗传算法具有不易陷于局部最优解，适合求解高度复杂的非线性问题，支持离散变量优化，以及支持并行计算等优点^[2-3]。本文将基于遗传算法，说明实现高桩墩台桩位布置遗传进化的具体流程。

1.2 高桩墩台桩位优化问题描述

假设某一高桩墩台的布置见图 1，其结构共有 n_p 根桩，建立如下坐标系：每根桩的桩顶坐标为 (x_i, y_i) ，平面扭角为 θ_i ，竖直斜率为 ψ_i 。一般可以根据优化要求选取其中若干个参数作为决策变量，其余参数作为常量或者通过与决策变量的几何等式约束条件得到。

高桩墩台桩位优化问题，即针对实际工程关注的指标，构建合适的目标函数 f ，在给定的结构受力约束条件及几何约束条件下，于合适的决策变量取值范围中，找到目标函数 f 尽量小的结构方案。可以描述为下述数学优化模型：式(3)~(5) 代表几何不等式约束条件；式(6)~(10) 代表结构受力、变形不等式约束条件，分别表示桩基最大拔桩承载力、桩基最大抗压承载力、结构变形限制要求，以及压弯及拉弯组合下钢管桩的强度限制。

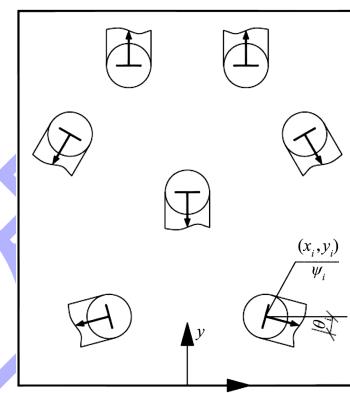


图 1 桩位布置

$$X = \{\chi_i\}_{(i=1,2,\dots,n_p)} \subseteq (x_i, y_i, \theta_i, \psi_i)_{(i=1,2,\dots,n_p)} \quad (1)$$

$$\text{obj.} \quad \min f(\text{FEM}(X)) \quad (2)$$

$$\text{s. t.} \quad \text{mindist}(X) < \varepsilon \quad (3)$$

$$\text{s. t.} \quad \text{miny}(X) > y_{\min} \quad (4)$$

$$\text{s. t.} \quad g_k(X) < 0 \quad (k=1,2,\dots,p) \quad (5)$$

$$\text{s. t.} \quad \max(P_{\text{mx},i,j}) < P_{\text{mx},\max} \quad (6)$$

$$\text{s. t.} \quad \min(P_{\text{mn},i,j}) > P_{\text{mn},\min} \quad (7)$$

$$\text{s. t.} \quad u_h < u_{\max} \quad (8)$$

$$\text{s. t.} \quad \max\left(-\frac{\gamma_F P_{\text{mn},i,j}}{A_p} + \frac{\gamma_F M_{\text{mx},i,j}}{W_p}\right) < \frac{f_y}{\gamma_M} \quad (9)$$

$$\text{s. t.} \quad \max\left(\frac{\gamma_F P_{\text{mx},i,j}}{A_p} + \frac{\gamma_F M_{\text{mx},i,j}}{W_p}\right) < \frac{f_y}{\gamma_M} \quad (10)$$

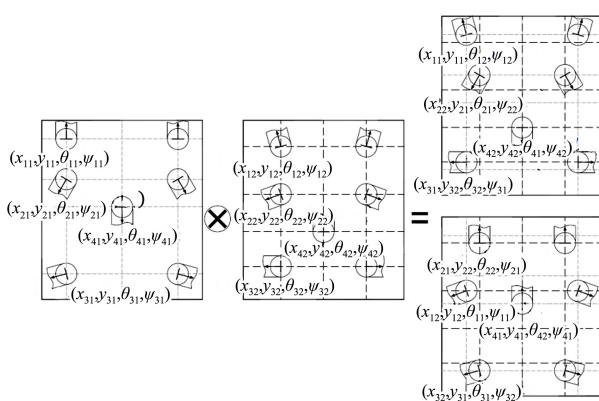
$$(i=1,2,\dots,n_p; j=1,2,\dots,m)$$

式中： X 为桩位方案； χ 为决策变量； n_p 为决策变量个数； n_p 为桩数； $\text{FEM}(X)$ 为有限元建模计算求得内力及位移等，用以计算目标函数值； $\text{mindist}(X)$ 为求解各桩的最小净距； $\text{miny}(X)$ 为求解桩与泥面交点 y 坐标的最小值； $g_k(X)$ 为第 k 个几何约束条件，可根据实际要求进行设置； $P_{\text{mx},i,j}$ 为第 i 根桩第 j 个荷载工况的拔桩力； $P_{\text{mn},i,j}$ 为第 i 根桩第

j 个荷载工况的压桩力(负为压桩); $M_{\text{max},j}$ 为第 i 根桩第 j 个荷载工况的桩头弯矩; u_h 为结构在所有荷载工况下发生最大水平位移; ϵ 为允许的最小桩净距, 用于避免碰桩; y_{\min} 为允许的桩与泥面交点 y 坐标最小值, 用于限制桩侵入泊位前沿线; u_{\max} 为结构允许的最大变形; $P_{\text{max},\max}$ 为桩基最大抗拔承载力; $P_{\text{min},\min}$ 为桩基最大抗压承载力; A_p 为钢管桩的截面积; W_p 为钢管桩的抗弯模量; f_y 为钢管桩钢材的屈服强度; γ_F 为荷载分项系数; γ_M 为材料分项系数。

1.3 算法流程及概念对照说明

选择、交叉、变异是遗传算法的核心, 其过程与传统设计方法中方案调整和优化的过程有相似之处。遗传算法采用均匀交叉算子^[4-5], 将种群的前一半个体和后一半个体进行有序配对, 2 个配对父代个体的每一位基因都以交叉概率 $p_c=0.8$ ^[6] 进行交换从而形成 2 个新的子代个体, 这种方法可以保证个体的基因(决策变量)充分交叉。如图 2, 2 个父代中的决策变量进行随机交换, 第 2 根桩($x_{21}, y_{21}, \theta_{21}, \psi_{21}$)的 y 坐标和扭角 θ 来自第 1 个父代, x 坐标和斜率 ψ 来自第 2 个父代, 这样通过交叉运算, 2 个父代方案就可以随机地交换形成 2 个子代新方案。这个过程与传统设计迭代过程的思维有相似之处, 即期望通过结合既有方案, 使新方案兼具两者桩位布置的优势。



注: x_{ij} 表示第 j 个父代的第 i 根桩的 x 坐标, 其他同理。

图 2 桩位交叉

本算法的变异算子采用 Breeder 变异算子^[7], 对于方案的每一决策变量都以变异概率 p_m 随机突变为取值范围中的其他取值。如图 3, 方案第 2 根

桩的扭角 θ 发生了变异。这个过程与传统设计的决策亦有相似之处, 即通过调整某根桩的设计参数, 研究其对方案受力的影响趋势及其敏感性。

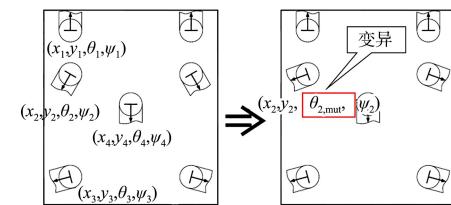


图 3 桩位变异

高桩墩台桩位优化问题是一个约束较多、较强的问题, 其目标函数和约束条件涉及内力、位移、几何等多种量纲、多个量级的指标, 使用罚函数法难以确定合适的罚因子^[8], 故本算法采用 Deb 可行性法则^[9], 配合锦标赛选择算子^[10]来处理约束, 同时采用精英保留重插入策略, 以加强算法的收敛性。

算法开始时需要构建初始方案, 除了随机产生, 还可以人为部分或全部指定, 有 2 个主要来源: 1) 根据工程经验定义若干个合理的方案, 属于一种先验知识, 适用于对已有方案继续优化; 2) 先进行一轮遗传进化, 在若干代方案中, 选择合适的个体构建新一轮进化的初始方案。

2 算例

2.1 工程概况

某 LNG 码头靠船墩靠泊 Q-Flex 型 LNG 船(等效为 10 万 DWT), 泊位布置见图 4, 对右侧靠船墩进行分析。墩台顶高程 6.8 m, 尺寸 12 m×10.8 m×2 m, 桩基采用 7 根 $\phi 142@25.4$ mm 钢管桩(S355 JOH)。原泥面高程-14.0 m, 上覆层为 25 m 厚软黏土($C_u=50\sim70$ kPa), 持力层为密实砂, 桩基初步按照入土 35 m 设计。结构考虑承受自重及各方向撞击力和系缆力, 荷载及荷载组合见表 1、2。



图 4 码头泊位布置

表 1 荷载数值

项目	坐标 x/m	坐标 y/m	坐标 z/m	F_x/kN	F_y/kN	F_z/kN
DL	-	-	-	-	-	-
ML1	0	3	5.8	-2 880.0	0	0
ML2	0	3	5.8	-2 610.2	0	1 217
ML3	0	3	5.8	-2 781.9	-745	0
ML4	0	3	5.8	-2 521.2	-676	1 217
BL1	0	0	5.8	-600.0	3 000	0
BL2	0	0	5.8	600.0	3 000	0

注: DL 表示自重, ML 表示系缆力, BL 表示船舶撞击力。

表 2 荷载组合

编号	组合
1	DL+ML1
2	DL+ML2
3	DL+ML3
4	DL+ML4
5	DL+BL1
6	DL+BL2

有限元模型中采用梁单元模拟钢管桩, 壳单元模拟墩台, m 法弹簧模拟桩土相互作用。

2.2 算法参数设置

各桩编号及桩位布置见图 5, 结合工程经验以

表 3 决策变量及几何等式约束关系

编号	x/m	y/m	$\theta/^\circ$	ψ
1 [#]	(1.5~4, 0.5)	(1.5~3, 0.5)	(0~30, 5) (330~355, 5)	[0.250, 0.167]
2 [#]	(1.5~4, 0.5)	(3~10, 0.5)	(0~90, 5) (270~355, 5)	[0.250, 0.167]
3 [#]	(1.5~4, 0.5)	(10~11, 0.5)	(45~90, 5)	[0.250, 0.167]
4 [#]	0.0	(1.5~10.5, 0.5)	(75~105, 5) (255~285, 5)	[0.250, 0.167]
5 [#]	$=-x_1$	$=y_1$	$=180-\theta_1$	$=\psi_1$
6 [#]	$=-x_2$	$=y_2$	$=180-\theta_2$	$=\psi_2$
7 [#]	$=-x_3$	$=y_3$	$=180-\theta_3$	$=\psi_3$

注: 1) $(a~b, c)$ 表示取值范围从 a 到 b , 取值间距为 c ; 2) $[a, b\dots]$ 表示取值的枚举, 可取 $a, b\dots$ 中的任一值; 3) $=$ 表示等式约束关系; 下划线表示决策变量。

2) 几何不等式约束条件: 式(3)~(5)。控制桩净距大于 0.5 m, 钢管桩入土位置不超过 $y=-0.5$ m, 同时控制第 1、2 排桩及第 2、3 排桩之间保持 1 m 的间距, 即: $\text{mindist}(X) < 0.5$; $\text{miny}(X) > -0.5$; $y_1 - y_2 + 1 < 0$; $y_2 - y_3 + 1 < 0$ 。

3) 内力、位移不等式约束条件: 式(6)~(10) 及式(2)目标函数。如上文所述, 由于目标函数、内力和位移约束条件涉及的指标通常相互关联,

及可施工性, 高桩墩台遗传进化算法设置如下:

1) 决策变量取值范围及几何等式约束定义为式(1)。如表 3 所示, 以 1[#]~4[#] 桩的桩顶位置、扭角和斜率作为决策变量, 并通过几何等式约束关系, 使桩位关于 y 轴大体呈对称布置, 共有 15 个决策变量。考虑到其左侧工作平台和靠船墩桩基需先施打(图 4), 为减少打桩船移船作业, 结合桩位布置经验, 决策变量的取值范围如表 3 设置。其中, 4[#] 桩限制左右扭转范围是为了减轻地震工况下结构的扭转效应。

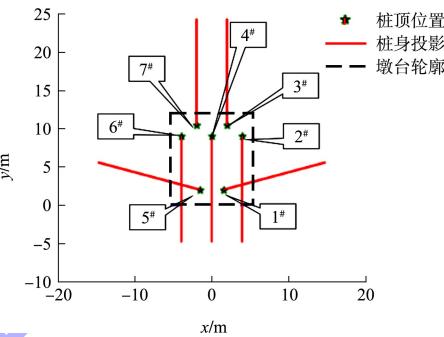


图 5 桩位布置

需要进行合理设置, 采取表 4 中几种不同的建模方式, 目标函数采用目标权重法构建, 以不同的权重来反映对各指标的重视程度, 其余指标显示在约束条件中表示。考虑项目的地质条件及钢管桩受力、使用要求, 以期通过优化可以实现: $\max(P_{\text{maxi},j}) \leq 2000 \text{ kN}$; $\min(P_{\text{mini},j}) \geq -5500 \text{ kN}$; $u_h \leq 80 \text{ mm}$; $\max(-P_{\text{mini},j}/84.6 + M_{\text{maxi},j}/29.2) < 215$; $\max(P_{\text{maxi},j}/84.6 + M_{\text{maxi},j}/29.2) < 240$ 。

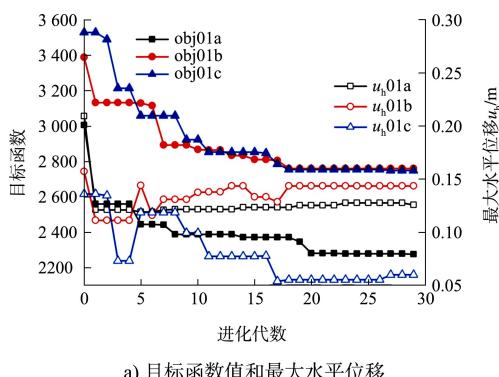
表 4 各最优化模型目标函数及内力、位移约束条件

模型编号	目标函数(obj.)及约束条件(s. t.)	种群规模/遗传代数
01a	obj. 0. 6max($P_{\text{mxi},j}$) - 0. 2min($P_{\text{mni},j}$) + 0. 2max($M_{\text{mxi},j}$) s. t. NA	50/30
01b	obj. 0. 5max($P_{\text{mxi},j}$) - 0. 2min($P_{\text{mni},j}$) + 0. 3max($M_{\text{mxi},j}$) s. t. NA	50/30
01c	obj. 0. 4max($P_{\text{mxi},j}$) - 0. 2min($P_{\text{mni},j}$) + 0. 4max($M_{\text{mxi},j}$) s. t. NA	50/30
02	obj. 0. 8max($P_{\text{mxi},j}$) - 0. 2min($P_{\text{mni},j}$) s. t. $\begin{cases} u_h < 0.08 \\ \max(-P_{\text{mni},j}/84.6 + M_{\text{mxi},j}/29.2) < 215 \\ \max(P_{\text{mxi},j}/84.6 + M_{\text{mxi},j}/29.2) < 240 \end{cases}$	50/30
03	obj. 0. 2max($-P_{\text{mni},j}/84.6 + M_{\text{mxi},j}/29.2$) + 0. 2max($P_{\text{mxi},j}/84.6 + M_{\text{mxi},j}/29.2$) + 0. 6 $u_h \cdot 1000$ s. t. NA	400/3

2.3 计算结果及分析

为了说明约束条件对高桩墩台桩位遗传进化方向和效果的影响, 分别建立 01a、01b、01c 模型(表 4), 先对无约束条件下的模型进行分析以作对照。构建目标函数时最大拔桩力的权重依次递减, 最大弯矩的权重依次递增。

图 6 为每代最优方案的关键指标在各代中的演化情况, 可见目标函数值虽然得到了较好的优化, 但是各个指标并不完全按期望的方向演化, 比如: 01c 模型拔桩力权重较低, 甚至逐代增大, 相反, 01a 和 01b 模型的最大弯矩则始终未能得到有效优化, 而且 01a 和 01b 模型的最大水平位移超出了允许的阈值。可见缺乏必要的约束条件时, 仅靠目标函数使方案完全向期待的方向进化存在一定困难。



a) 目标函数值和最大水平位移

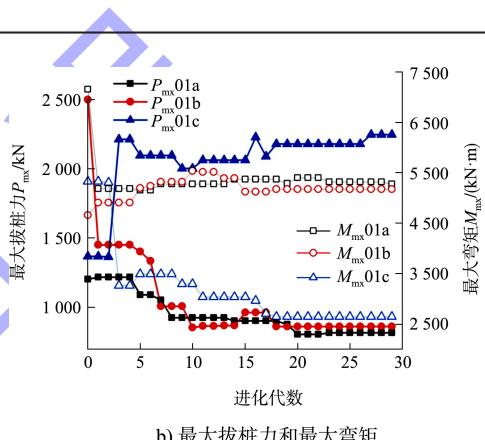
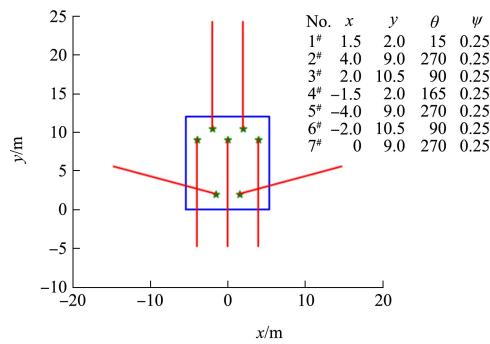


图 6 无约束条件下关键指标的演化

引入钢管桩强度和最大水平位移约束条件, 建立 02 模型(表 4), 根据工程经验, 输入图 7 所示 2 个初始方案构建先知种群, 每代中最优方案关键指标的演化情况如图 8 所示, 方案的最大拔桩力和最大压桩力经过遗传进化不断得到优化, 最终代最优个体最大拔桩力为 1 705 kN, 最大压桩力为 2 778 kN, 同时各桩桩力标准差逐代减小, 表明各桩受力越来越均匀。如图 9 所示, 由于设置了约束条件, 历代钢管桩压弯、拉弯作用下的应力以及结构发生的大水平位移都在允许的阈值内。最终得到的方案见图 10, 其受力较 2 个初始方案有了较大改观。如初始方案 1 各参数为: 最大拔桩力 3 075 kN; 最大压桩力 6 276 kN; 最大弯矩 3 206 kN·m, 桩力标准差 2 204。



a) 初始方案1

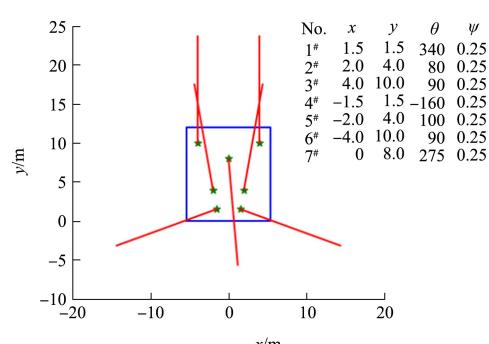
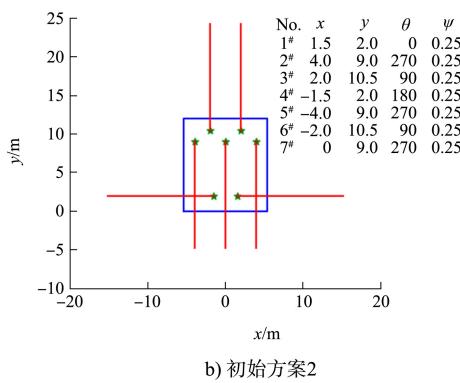


图 10 02 模型经过优化的桩位布置



b) 初始方案2

图 7 02 模型先知种群桩位布置

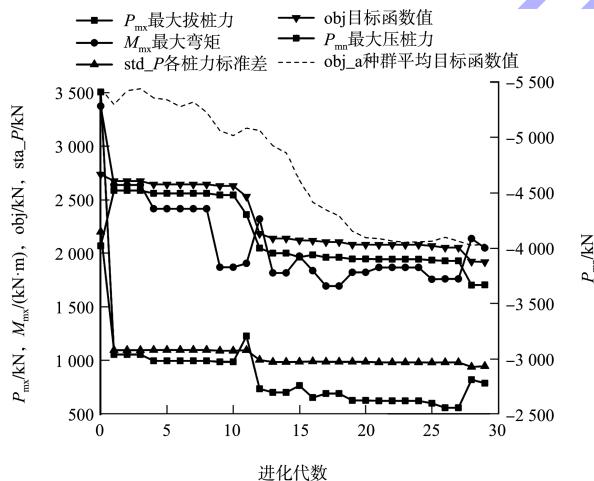


图 8 02 模型约束条件下关键指标演化

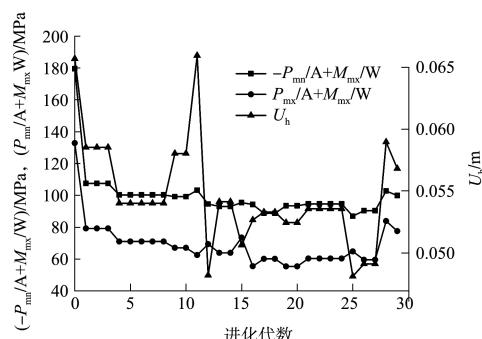
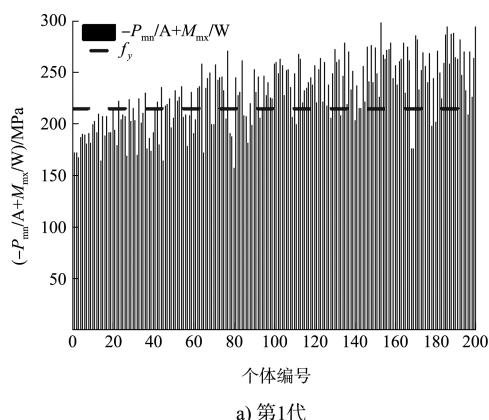
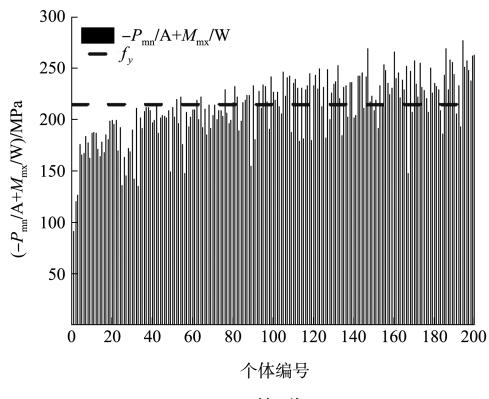


图 9 02 模型考虑约束条件下约束指标评估

虽然 02 模型取得了较好的优化效果,但由于约束条件过强,除了 2 个输入的初始方案,依靠随机产生的方式总共进行了 1 373 次方案评估才补全了有效初始种群。为了更高效地补全初始种群,建立 03 模型,将 02 模型的约束指标构建成目标函数(表 4)。以钢管桩压弯组合应力为例,通过 3 代进化,满足 02 模型约束的个体数目逐代增多(图 11),在其中找到足够数量的有效个体,构建 02 模型的初始种群,最终也可以实现较好的优化效果,且提高了计算效率。



a) 第1代



b) 第3代

图 11 03 模型种群个体钢管桩压弯组合应力

3 结论

1) 考虑实际约束条件的高桩墩台桩位遗传进化算法可以在保证方案有效性的同时, 实现较好的优化效果。

2) 通过引入初始方案构建有效的先知种群, 可以提高进化算法的计算效率。

3) 本文构建目标函数时采用的目标权重法本质上仍是一种单目标优化算法, 而高桩墩台桩位优化问题是一个多目标优化问题, 当前已有小生境 Pareto 遗传算法、非劣解排序遗传算法、Pareto 浓度进化算法^[11]等多目标优化算法, 预期可以令此工程问题实现更好的优化效果。

参考文献:

- [1] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence[M]. Cambridge: MIT Press, 1992.
- [2] KATOCH S, CHAUHAN S S, KUMAR V. A review on genetic algorithm: past, present, and future [J]. Multimedia tools and applications, 2021, 80(5): 8091-8126.
- [3] 周明. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [4] SYSWERDA G. Uniform crossover in genetic algorithms.[C]// Proc. 3rd Intl Conference on Genetic Algorithms: 卷 3. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1989: 2-9.
- [5] UMBARKAR A J, SHETH P D. Crossover operators in genetic algorithms: a review[J]. IJCTACT Journal on soft computing, 2015, 6(1): 1083-1092.
- [6] SHOPOVA E G, VAKLIEVA-BANCHEVA N G. Basic—A genetic algorithm for engineering problems solution [J]. Computers & chemical engineering, 2006, 30(8): 1293-1309.
- [7] MÜHLENBEIN H, SCHLIERKAMP-VOOSEN D. Predictive models for the breeder genetic algorithm I. continuous parameter optimization[J]. Evolutionary computation, 1993, 1(1): 25-49.
- [8] DEB K. Optimization for engineering design: algorithms and examples[M]. 2nd ed. New Delhi: PHI, 2013.
- [9] DEB K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2000, 186(2): 311-338.
- [10] BLICME T, THIELE L. A comparison of selection schemes used in evolutionary algorithms[J]. Evolutionary computation, 1996, 4(4): 361-394.
- [11] 唐云岚, 赵青松, 高妍方, 等. Pareto 最优概念的多目标进化算法综述[J]. 计算机科学, 2008(10): 25-27, 57.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 66 页)

6 结论

1) 港口总体规划编制同步考虑生态环境影响是落实绿色发展理念、加强环境影响源头管控的重要途径之一。

2) 本次规划在编制之初即分析了规划区域周边环境敏感区分布、用地规划以及岸线利用效率, 提出了避让环境敏感目标、港城协调、高效集约等规划空间布局导向建议。

3) 在规划方案初步制定后, 结合作业区主要运输货种和大气环境质量本底, 选定大气环境影响作为规划编制重点考虑的环境影响因素。

4) 针对规划水平年吞吐量预测, 拟定了 2 个发展情景, 并分别开展了大气环境影响预测分析。基于预测结果, 从降低大气环境影响角度, 提出了规划水平年干散货吞吐量规模控制建议。

- 5) 规划编制阶段同步落实绿色发展理念, 采纳建议, 为后续规划环境影响评价工作奠定了较好的基础。

参考文献:

- [1] 吴小芳. 绿色港口规划的理论和方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [2] 左天立, 查雅平, 聂向军, 等. 生态型港口规划理念研究 [J]. 水运工程, 2017(5): 56-61.
- [3] 陈旭, 刘智慧, 曹莹, 等. 基于集约绿色发展的襄阳港总体规划[J]. 水运工程, 2021(11): 32-37.
- [4] 徐武周. 流场与泥沙对生态型港口平面布置优化的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [5] 交通运输部规划研究院. 镇江港总体规划(2035 年) 修订[R]. 北京: 交通运输部规划研究院, 2021.

(本文编辑 王传瑜)