



遗传算法在高桩墩台桩位优化上的应用

陈章楷，戈浩波

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司，广东 广州 510230)

摘要：良好的高桩墩台桩位设计可使结构更加经济、合理，然而桩位的设计过程通常需要耗费较大的人力劳动。通过 Ansys 有限元计算软件的 APDL 命令流将优化算法整合到模型计算与后处理之中，实现程序化自动优化特定荷载条件下的桩位布置。以一个遗传算法优化桩位布置的算例，介绍了遗传算法的优化过程以及优化参数对优化过程的影响，实现在极少的用时里优化出内力值较小的桩位。

关键词：高桩墩台；优化算法；桩位设计

中图分类号：U 656.1⁺13

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)07-0205-06

Application of genetic algorithms in optimization of pile layout of high-pile pier

CHEN Zhang-kai, GE Hao-bo

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

Abstract: A good design of the pile layout of a high-piled pier can make the structure more economical and reasonable. However, the design process of pile layout usually needs a lot of manpower. In this paper, the optimization algorithm is integrated into the calculation and post-processing through the APDL command flow of Ansys software, to realize automatic optimization of pile layout under specific load conditions. The optimization process of genetic algorithm and the influence of optimization parameters on the optimization process are introduced by taking an example of optimization of pile layout, to get an optimized pile layout with small internal force value in very few time.

Keywords: high-pile pier; optimization algorithm; pile layout design

系靠船墩主要承受自重、波浪力、船舶力和地震力等荷载。在桩位设计过程中，斜桩的轴向力可以有效减少水平荷载产生的桩身弯矩，降低桩身强度要求。然而如果斜桩的桩位布置不当，将可能产生较大的压桩力或拔桩力，当地质条件较差时，桩周土将无法提供足够的桩侧摩擦力，导致结构失效。合理布置桩位可有效降低桩基内力，从而降低桩身强度要求和地基承载力要求。

桩位的布置主要包括桩的间距、倾度与每一根桩的扭角。桩的间距与倾度变数较少，一般来说桩位布置的难点在于每一根桩的扭角取值。粗略估算一个 12 根桩墩台，以 15°为最小扭动角度，每根桩有 24 个可能性，桩位布置有 12²⁴ 种可能。

以往的桩位设计是反复、重复调整的机械过程，对工程师来说是一项繁琐、耗时的工作。

本文主要讨论基于优化算法，以桩基内力为目标函数，通过计算机语言实现程序自动寻求桩位布置的次优解。为方便陈述，下文提到的“桩位”一词特指一个墩台上每根桩的扭角分布。

1 常用优化算法

常见的随机优化算法主要有爬山法、模拟退火算法、遗传算法、蚁群算法、粒子群算法、禁忌搜索等，各种算法各有其优缺点与适用范围^[1-4]。应用不同的优化方法，目标是一致的，即：使得拔桩力、压桩力和弯矩更小。由于拔桩

力、压桩力和弯矩的目标数值不一样，可设定目标函数如下：

$$\text{Cost} = W_p \cdot |F_p| + W_c \cdot |F_c| + W_m \cdot |F_m| \quad (1)$$

式中：Cost 为目标值（仅代表内力量值总和，不具备实际物理意义）； F_p 、 F_c 、 F_m 分别为各个荷载工况下得出的该高桩墩台桩基最大的拔桩力、压桩力和弯矩内力值； W_p 、 W_c 、 W_m 分别为对应最大拔桩力、压桩力和弯矩的权重。越小的目标值代表该桩位下桩基的整体内力水平越小，也是更优的桩位。本文中力、弯矩分别采用单位 kN 和 kN·m。目标函数可自由编写，可设置内力限值，亦可根据需要采用桩身应力进行目标值的计算。

目标函数是桩位的变量，设某一高桩墩台桩数为 x ， x_i 代表第 i 根桩的扭角，则目标函数是以桩位为变量的非线性函数：

$$\text{Cost} = \text{Cost}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

1.1 爬山法

某一系列确定的变量对应一个目标函数值，每一个变量的微小变化都会使得目标函数值增加或减小。爬山法每一步的思路是分别对每一变量进行微小调整，得到使目标函数获得最多增益的变量，作为当前步进行调整的变量，进而继续对每一变量进行考量。

爬山法的缺点是易于陷入局部最优解，不再探索定义域中其他范围内的最优解，图 1 简洁明了地阐释这一问题。



图 1 局部最优解示意

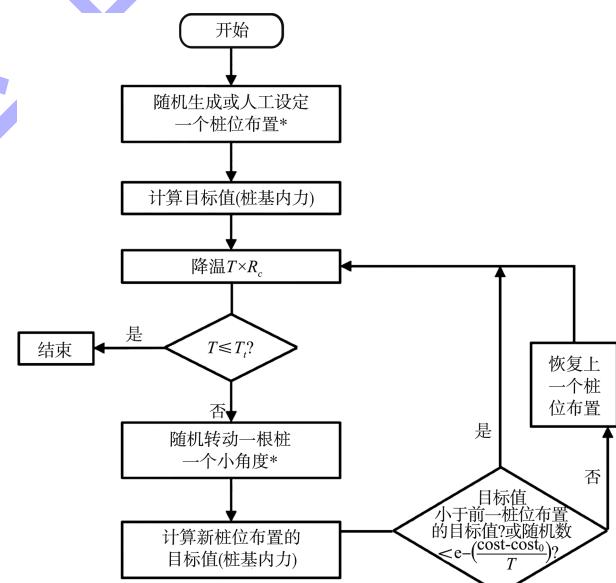
在将该方法应用到桩位优化时，常陷入局部最优解，即各桩的任何微小转动都不再降低桩基内力，然而此时，桩基内力目标函数依然是一个较大的量值。并且由于碰桩的限制，每一根桩的调整范围受限于相邻桩，这显然在整体上缩小了桩位探索的定义域。

1.2 模拟退火算法

模拟退火算法的基本思想是：对当前解的某一变量进行微小调整产生新解，新解的目标函数值更优，则接受新解并进行下一轮计算；新解的目标函数值若更劣，则以一定概率接受新解并进行下一轮计算。该概率如下：

$$\text{Possibility} = e^{-\left(\frac{\text{Cost}-\text{Cost}_0}{T}\right)} \quad (3)$$

式中：Possibility 为接受当前劣解的概率；Cost、 Cost_0 分别为当前目标函数值与上一次迭代计算的目标函数值； T 为当前温度。模拟退火算法应用在桩位优化的流程见图 2。由于退火作用，在迭代的初期接受劣解的概率较大，可在更大范围搜索最优解，当迭代进行到一定次数，接受劣解的概率将接近于 0，此时近似于爬山法，只寻求一定范围内的最优解^[5-6]。将退火算法应用到桩基优化时，不同的初始解将获得差别较大的优化结果，该法过分强调人为设定的初始解。



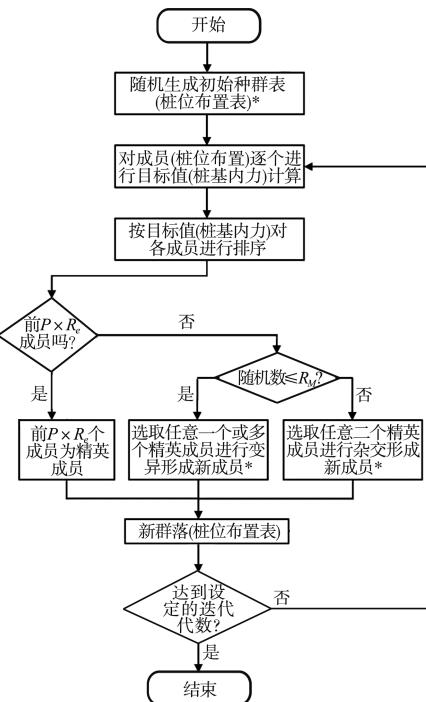
注：* 的含义是：如果随机生成布置或者随机转动之后碰桩，则放弃该桩位布置； R_c 为退火常数； T_i 为目标温度。

图 2 退火算法优化桩位流程

1.3 遗传算法

遗传算法模拟基因重组、变异及优胜劣汰的机制，将一个解视为一个成员，若干个解视为一个种群^[7]。初始随机生成一个种群，根据目标函数对其进行排序，名列前茅的成员视为精英，其余的成员则淘汰，再以某一精英通过变异（更改某

一变量)形成一个新的成员, 或者任选某两个精英进行杂交(各取两精英中的部分解变量组成一个新的解)形成一个新的成员, 直至补齐种群成员数量, 再对该新种群进行排序, 重复以上步骤^[8]。将遗传算法应用到桩位优化的流程见图3。



注: * 的含义是: 如果随机生成种群表成员或变异、杂交时, 该成员存在碰桩重新随机生成该成员, 直至不存在碰桩。 P 为种群规模(即种群成员数量); R_e 为精英比例; R_M 为杂交变异比例, 以及更迭代数、变异强度(每次变异的桩数)。

图3 遗传算法优化桩位流程

遗传算法的主要参数包括种群规模(即种群成员数量)、精英比例、杂交变异比例、更迭代数和变异强度(每次变异的桩数)。

与模拟退火算法从一个初始解开始迭代不同, 遗传算法拥有一个一定规模的种群表, 且尝试新解的试探幅度较大(变异和杂交), 所以遗传算法搜索全局最优解的能力较强, 陷入局部最优解的概率小。在运用遗传算法进行桩基优化的过程中, 通常能在较少的计算时间内获得较理想的桩基内力值。

2 遗传算法优化算例

2.1 模型介绍

将优化算法应用于一个高桩墩台, 3×3 根钢

管桩, 桩间距 3 m, 倾角 1:4, 承受自重和系统力, 其中系统力 4 500 kN, 与水平面的夹角范围为 0~45°, 与墩台前沿的夹角范围为 60°~120°。桩土相互作用采用嵌固点法, 计算软件为有限元软件 Ansys, 采用 APDL 命令流将优化算法整合到模型计算与后处理之中, 达到程序自动优化桩位的目的。Ansys 模型见图4。



图4 Ansys 有限元模型

2.2 碰桩检测

在优化桩位的过程中, 桩扭角的转动可能会使得桩与桩之间发生碰桩, 本文采用立体几何中计算空间两直线距离的方法计算桩与桩之间的距离, 判断桩两两之间是否碰桩。因为实际上桩为线段而非直线, 故再加以判断两桩之间各四分点之间的距离关系, 对两桩是否碰桩进行进一步判断。

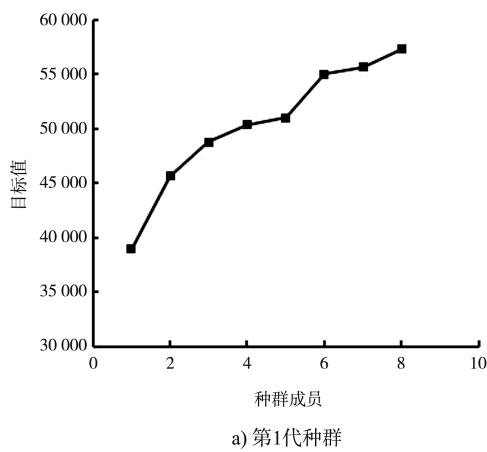
2.3 优化参数

在本次优化中采用以下优化参数: 精英比例(每一代种群中精英成员占所有成员的比例)为 0.4; 种群规模(种群成员总数)为 20; 变异比例(每一代种群中精英成员产生变异生成新成员的概率, 与杂交比例之和为 1)为 0.4; 杂交比例(每一代种群中精英成员杂交生成新成员的概率)为 0.6; 变异强度(发生变异的某一精英成员, 其发生变异的桩数)为 2; 更迭代数(种群发生迭代的总次数)为 20; 目标值拔桩力、压桩力和弯矩的权重分别为 4.0、1.7、6.0。

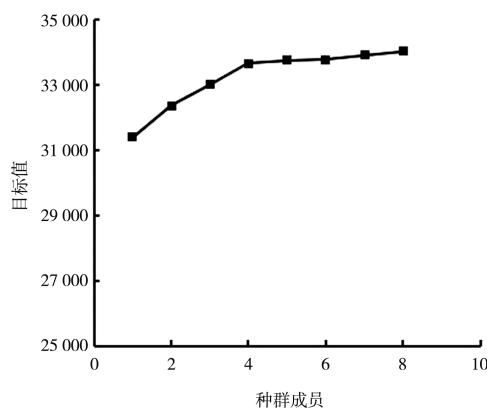
2.4 计算结果

第1代、第10代以及第19代的精英成员目

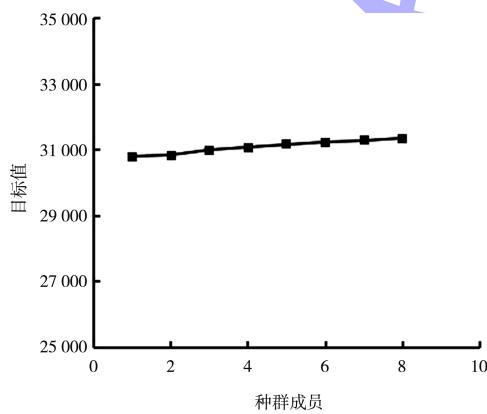
标值见图 5。



a) 第1代种群



b) 第10代种群



c) 第19代种群

图 5 种群精英成员目标值

从图 5 可知, 各代精英成员目标值随着代次更迭整体下降, 且各代精英成员趋于平均。即: 从内力值的加权目标值上来看, 各代桩基趋于优化。

从图 6 可以看出, 种群最优精英成员桩基目标值随着代次更迭递减, 随着代数的增加, 最优

精英成员桩基目标值的递减速度变慢, 最后趋近于一个较优的目标值。

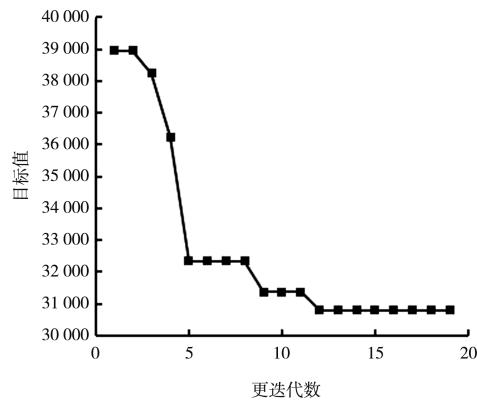


图 6 各代最优精英成员桩基目标值

表 1 最优精英成员桩基最大内力

| 代次 | 最大拔桩力/ kN | 最大压桩力/ kN | 最大弯矩/ (kN·m) | 目标值 |
|----|-----------|-----------|--------------|--------|
| 1 | 6 960 | 10 497 | 5 125 | 76 587 |
| 10 | 3 707 | 5 496 | 1 189 | 31 381 |
| 19 | 3 709 | 5 198 | 1 177 | 30 810 |

表 2 第 10 代种群精英成员桩基最大内力

| 精英成员序号 | 最大拔桩力/ kN | 最大压桩力/ kN | 最大弯矩/ (kN·m) | 目标值 |
|--------|-----------|-----------|--------------|--------|
| 1 | 3 707 | -5 496 | 1 189 | 31 381 |
| 2 | 4 145 | -5 235 | 1 131 | 32 342 |
| 3 | 4 163 | -5 178 | 1 244 | 32 994 |
| 4 | 4 011 | -5 805 | 1 274 | 33 639 |
| 5 | 3 814 | -5 474 | 1 516 | 33 733 |
| 6 | 4 449 | -5 474 | 1 096 | 33 755 |
| 7 | 4 441 | -5 509 | 1 114 | 33 892 |
| 8 | 4 348 | -5 536 | 1 190 | 34 021 |

从表 1、2 可看出, 以加权目标值来考量桩基内力具有一定的合理性, 由于压桩力的权重较小, 优化的过程中允许压桩力具有较大的量值。而精英成员(每一代次中的最优的前 8 个成员)中, 即使个别成员有相对较大的某个内力值(比如成员 5 的弯矩值), 由于其拥有较优的目标值, 将其保留在精英成员之中, 以期其在后续迭代中能通过变异和杂交产生更优的桩位。

2.5 优化参数对优化过程的影响

运用遗传算法进行桩位优化的过程中, 种群

规模越大, 则每一代进行变异杂交的成员数量越多, 对优解的探索范围也越大, 最终得出的优化桩位趋近于全局最优解的可能性也越大。对于桩数较多的墩台, 应适当增加种群规模, 以增加对桩位探索的广度。但是种群规模变大, 每一代的计算量随之而增加。对于工程问题, 笔者认为种群规模宜在2倍桩数左右。

更迭代数越多, 在反复的迭代中也可能得到更低的目标值, 但是种群每一代的进步速度越来越慢, 在一定的代数之后, 每一代的进步相当迟缓, 更多的代数使得计算量增大, 得到的优化却并不明显。

迭代代数越多、或种群规模越大, 对优化结果是有利的, 但也明显增加计算时间, 故迭代代数与种群规模应在目标的优化需求、计算用时之间权衡裨益。

精英比例越大, 每一代的精英得以保留, 从较少的代数来看这样的策略是较为保守的, 但是精英比例大也意味着变异杂交少, 对优解的探索范围小, 过大的精英比例容易使得迭代优化陷入局部最优解。而过小的精英比例, 则每一代变异杂交多, 精英保留少, 容易失去具有变异杂交形成优解的潜力成员。

由于桩位的杂交对于桩基的优化从直观上并没有促进作用, 杂交对于桩基优化只是另一种方式的变异, 所以杂交与变异之间的比例在桩基问题可能意义不大。而变异强度应对桩数进行考虑, 桩数较多时, 可适当提高变异强度。

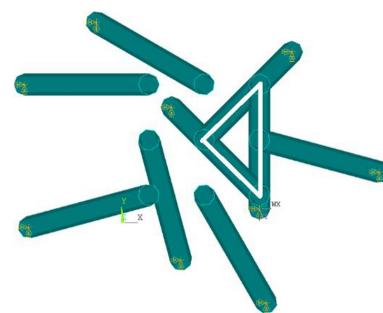
目标值权重体现各内力结果对目标值的影响程度。本文采用的拔桩力、压桩力和弯矩权重分别为4.0、1.7、6.0, 说明在本次桩位优化中允许压桩力在数值上比拔桩力和弯矩较大。本例中第19代种群第一个精英成员的拔桩力、压桩力和弯矩分别为3 709、5 198、1 177, 反映了权重值对优化目标的影响。当桩基为端承桩, 则允许较大的压桩力, 而限制拔桩力。当桩基为摩擦桩, 且拔桩力不控制时, 则应设置拔桩力与压桩力相当

的权重。若已取得地勘报告, 可评估出桩基承载力时, 可通过修改目标函数, 使得桩力限制在地基承载力允许值之内。当桩强度允许值较小时, 可根据材料力学强度理论公式确定轴力与弯矩的权重大小。

3 优化算法优缺点

本文中的简单算例用于测试桩数为9根, 最小转动扭角为 15° , 更迭代数为20, 种群规模20, 运算时间约为10 min, 便能得到较为理想的内力值。对比人工调试桩位, 从时间、人工成本上来说具有相当可观的优越性。实际应用中可根据打桩船的尺寸、周围已有结构物等, 预先限制桩基扭角的取值范围, 或考虑桩位的对称布置, 使得计算量明显下降, 进一步缩短计算时间。

诚然, 并非内力值小的桩位就是一个好的、符合施工实际的桩位, 本文所介绍的优化算法仅考虑了碰桩的避免, 并未考虑其他现实因素。如, 在优化过程中, 有时会出现一些不可施工的桩位, 如图7a)所示的3根桩“扭成一团”的桩位、图7b)所示的2根桩“夹”1根桩的桩位, 也有两根桩桩底相向的“内八字”桩位, 这些桩位并不符合设计常规, 需要进行剔除筛选。本文仅作遗传算法在高桩墩台桩位设计的初探, 对不可施工的桩位并没有进行研究。非常规桩位的问题可以从算法上进行检验, 通过程序自动剔除, 这是在算法上可以实现的, 也是将优化算法应用到桩位优化这一课题下一步该解决的重点问题。



a) 3根桩扭成一团

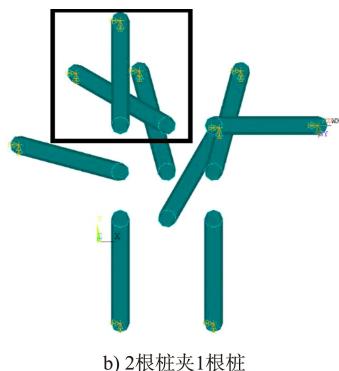


图 7 不可施工桩位

4 结语

1) 优化算法通过自动循环计算迭代，在花费少量人工的情况下得到桩基内力值较小的次优解，大大减少工程师的工作量。

2) 运用遗传算法进行计算机自动优化桩位，避免人为主观地判断桩位是否还有优化空间，进而实现桩截面、桩长等的优化，提高结构设计的竞争力。

3) 下一步的工作应从桩位的筛选上下功夫，以期实现在不需人为干预的情况下程序自动优化出可应用于实际施工的桩位，将进一步提高桩位设计效率。

(上接第 180 页)

3 结论

1) 本文利用 Revit 软件建立丰富的水运工程族库，并通过 Dynamo 可视化编程平台调用族，通过搭积木的方式构建了水富港三维模型，结果表明利用 Dynamo 调用 Revit API 进行设计建模是可行的。

2) Dynamo 利用与 Revit 良好的相关性，通过节点将建模过程流程化，解决了三维手动建模重复工作，模型精度不高的问题。同时通过构件相对位置参数化及族参数化的方式，也让模型的方案可扩展性更强。

3) Dynamo 自带的 Python Script 节点让其除建模以外，还能使用 Python 语言编程，打破了自身固有节点的局限性，为下一步模型的受力分析、结构计算提供了想象空间。

参考文献：

- [1] SIRAG D J, WEISSER P T. Toward a unified thermodynamic genetic operator[C] // International Conference on Genetic Algorithms on Genetic Algorithms & Their Application. New Jersey: L. Erlbaum Associates Inc.1987.
- [2] HOLLAND J H. Adaptation in Natural and Artificial System[M]. Boston: A Bradford Book, 1992: 1-19.
- [3] 文福拴, 韩祯祥. 基于遗传算法和模拟退火算法的电力系统的故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 1994(3): 29-35.
- [4] 李守巨, 刘迎曦, 何翔, 等. 基于模拟退火算法的边坡最小安全系数全局搜索方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 236-240.
- [5] 高尚. 模拟退火算法中的退火策略研究[J]. 航空计算技术, 2002, 32(4): 20-22, 26.
- [6] 冯玉蓉. 模拟退火算法的研究及其应用[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005.
- [7] 葛继科, 邱玉辉, 吴春明, 等. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(10): 2911-2916.
- [8] 耿新青. 遗传算法及其应用[J]. 小型微型计算机系统, 2000, 23(6): 9-10.

(本文编辑 武亚庆)

参考文献：

- [1] 何清华, 钱丽丽, 段运峰, 等. BIM 在国内外应用的现状及障碍研究[J]. 工程管理学报, 2012, 26(1): 12-16.
- [2] 交通运输部. 交通运输重大技术方向和技术政策[R]. 北京: 交通运输部, 2015.
- [3] 刘江林, 宋文涛, 徐军辉, 等. 广东北江蒙里枢纽二线船闸工程 BIM 解决方案[J]. 水运工程, 2018(8): 135-139, 149.
- [4] 代浩, 赫文. 基于 Revit 的水运工程项目参数化建模方法研究[J]. 港工技术, 2018, 55(1): 52-55.
- [5] 徐甜. BIM 技术在某山区内河散货码头工程中的应用[J]. 港工技术, 2018, 55(3): 97-101.
- [6] 倪寅. BIM 技术在水运工程中的应用[J]. 水运工程, 2018(4): 128-133, 166.
- [7] 吴生海, 刘陕南, 刘永晓, 等. 基于 Dynamo 可视化编程建模的 BIM 技术应用与分析[J]. 工业建筑, 2018, 48(2): 35-38, 15.

(本文编辑 王璁)