

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.094



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



考虑土体参数不确定性的基桩多目标优化算法

吴兴征, 刘伟超

(河北大学 建筑工程学院, 河北 保定 071002)

摘要:为得到满足可靠性要求的基桩最佳设计方案,在有效控制基桩沉降量的情况下,尽可能降低基桩造价。以中国尊大厦基桩为例,考虑土体极限阻力不确定性,采用非支配排序遗传算法-II(NSGA-II),针对种群中的个体进行非支配解选择排序和拥挤距离比较。将桩径和桩长视为优化设计变量,以基桩承载力的目标可靠指标作为约束条件,工程造价和单桩沉降量的最小值为目标函数,得到 Pareto 最优解集。该算法解决了传统多目标优化方法在缺乏经验的情况下优化效果不佳与速度慢的问题。采用基于熵权理论的 TOPSIS 法对 Pareto 最优解集中的每一个解进行赋权后,筛选出相对贴适度最大的方案。结果表明:最优方案在造价和单桩沉降量上均优于原设计方案,证明基桩优化设计方法具有可行性。

关键词:基桩;不确定性;遗传算法;优化设计;最优解集

中图分类号:TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2024)06-0116-10

Multi-objective optimization algorithm of a foundation pile considering the uncertainty of soil parameters

WU Xingzheng, LIU Weichao

(College of Civil Engineering and Architecture, Hebei University, Baoding 071002, Hebei, P. R. China)

Abstract: In order to obtain the optimal design scheme of a foundation pile that meets the reliability requirements, the construction cost of foundation piles should be reduced as much as possible under the condition of effectively controlling the settlement of foundation piles. In this paper, the foundation pile of the China Zun Mansion is taken as an example, and the inherent uncertainty in the ultimate resistance of soils is considered. The non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II) is used, which includes the non-dominated solution selection sorting and crowding distance comparison for individuals in a population. In this algorithm, the pile diameter and pile length are regarded as optimal design variables, the targeted reliability index of the bearing capacity for foundation pile is taken as constraint condition, and the minimum engineering cost and the lowest settlement is taken as an objective function. The Pareto optimal solution set is obtained, and a few shortcomings are resolved, such as the poor optimization performance and slow speed of traditional multi-

收稿日期:2022-06-03

基金项目:河北省自然科学基金(E2019201296);河北省建筑业科技计划(KJJH2022004);河北大学研究生创新资助项目(HBU2022ss019)

作者简介:吴兴征(1971-),男,博士,副教授,主要从事岩土、防洪与海岸工程中不确定性模型研究,E-mail:xingzhengwu@163.com。

Received: 2022-06-03

Foundation items: Hebei Natural Science Foundation (No. E2019201296); Hebei Province Construction Industry Science and Technology Project (No. KJJH2022004); Post-graduated's Innovation Fund Project of Hebei University (No. HBU2022ss019)

Author brief: WU Xingzheng (1971-), PhD, associate professor, main research interests: uncertainty models in geotechnical, flood defence and coastal engineering, E-mail: xingzhengwu@163.com.

objective optimization methods in the absence of experience. Moreover, each solution in the Pareto optimal solution set is weighted by using the TOPSIS method based on the entropy weight theory, the best scheme is chosen with the largest relative closeness. The results show that the chosen scheme is slightly better than the original design scheme in terms of construction cost and pile settlement, which demonstrates that the proposed optimal design method for foundation piles is feasible.

Keywords: foundation pile; uncertainty; genetic algorithm; optimization design; optimal solution set

桩基础因具有承载能力高、地基条件适用性好的特点被广泛应用于地基处理。随着桩基础向大型与超深方向发展,对基桩的优化设计变得尤为重要。因此,在满足现有工程安全性的要求下,通过优化设计,得到经济与可靠的桩基设计方案,一直是工程师们重点关注的问题。

目前,已有一些学者将不同的优化方法应用到桩的设计模型中。简文星等^[1]以锚拉桩的造价最低作为目标函数,利用粒子群优化(P SO)算法对桩身参数进行优化设计,并编写了计算程序。张晓曦等^[2]采用极限上限定理,对典型的抗滑桩加固边坡的力学机制进行研究,在确保边坡稳定性的前提下,求得最低工程造价,为沉入式抗滑桩的优化设计构建一种理论方法。陈昌富等^[3]以工程造价最低为目标函数,以地基承载力与沉降等为约束条件,建立了优化数学模型,并基于加权扰动共生生物搜索(PWSOS)算法对桩基础进行优化设计。惠迎新等^[4]基于改进的遗传算法,对挤扩支盘桩的承力盘数量进行优化,将桩的承载力与最大沉降值等作为约束条件,以承力盘数量最少为目标函数,建立了挤扩支盘群桩优化模型,并用ABAQUS进行数值模拟得到了群桩的最优布置方式。王成华等^[5]将一种混沌粒子群优化(CPSO)算法引入桩基础优化设计中,建立了以造价最低为目标函数的优化设计模型,探究了桩基础的主要参数对其造价的影响规律。Nakanishi等^[6]通过扩展序列的线性规划技术结合自适应步长,提出了桩筏基础确定桩长的优化设计方法,考虑以桩筏基础的沉降作为约束条件,以最短桩长为目标得到了最优解。Bekdas等^[7]基于和谐搜索算法(HSA),以悬臂排桩的埋设深度和直径为设计变量,以悬臂排桩支护结构总造价最低为目标函数构建优化数学模型,并对优化后的方案进行有限元分析。

现有研究仅针对单目标进行优化设计,并未对多目标进行协同考虑,也未对土体阻力客观存在的不确定性进行探讨^[8],优化过程中存在结构失效的可能。有效考虑由土体参数不确定性引致的基桩承载性能的离散性,进而将描述其承载能力极限状态的可靠指标作为约束条件,旨在避免潜在的基桩

失效。此外,桩基础自身尺寸参数的选择将直接影响施工的成本以及建成后建筑物的安全性能,如基桩沉降量。鉴于此,笔者以中国尊大厦的基桩为例,以桩径、桩长为优化设计变量,以基桩承载性能的可靠指标为约束条件,以桩沉降量和造价作为目标函数构建基桩多目标协同优化求解模型。利用非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行优化,得到 Pareto 最优解集,利用熵权理论赋权的 TOPSIS 法对最优解集进行评价并排序,从而得到满足多目标的最优方案。

1 多目标优化算法

1.1 Pareto 前沿

在求解多目标优化问题时,改进任意一个目标函数的同时,必然会削弱至少一个其他目标函数的解被称为非支配解或 Pareto 解,目标函数最优解的集合称为 Pareto 最优解集^[9]。对于双目标优化问题,如图 1 所示,实线表示的是 Pareto 最优解集连线而成的 Pareto 前沿曲线。

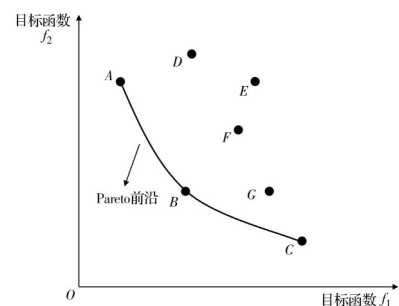


图1 Pareto 前沿

Fig. 1 Pareto front

从图 1 可得,目标函数 f_1 和 f_2 相互限制, f_1 或 f_2 越大时, f_2 或 f_1 越小。方案 A 和 D 相比, A 的目标函数 f_1 和 f_2 均比 D 的小,所以方案 A 比方案 D 有绝对优势,称方案 A 是方案 D 的支配解。方案 A 和 E 相比,两种方案的目标函数 f_2 相等, A 的目标函数 f_1 比 E 的小,所以方案 A 同样支配方案 E。方案 A 和 B 相比, A 的目标函数 f_1 比 B 的小,但是目标函数 f_2 比 B 的大,所以无法判断两种方案的优劣,故称方案 A 和方案 B 互为非支配解。从 A 到 G 的 7 个方案中,方案 A、B、C 互为非支配解,这 3 个方案组成的集合

为 Pareto 最优解集,其连线为 Pareto 前沿曲线。对于多目标优化问题,与此类似。

1.2 NSGA-II 遗传算法

NSGA-II 全称为非支配排序遗传算法-II,是由 Deb 等^[10]提出的一种后验式的多目标进化算法(MOEA),可有效解决非线性多目标优化问题并被广泛应用,其基本思想是在遗传算法的基础上,增加一个非支配解选择排序和拥挤距离计算的环节,解决了传统多目标优化方法在缺乏经验的情况下优化效果不佳、速度慢等问题。

NSGA-II 对随机产生的初始种群 P 中的个体(群体数量为 n)进行 Pareto 解集排序,具体方法如下。

1)对初始种群 P 的个体进行编码时,需要处理个体的数值精度较高的情况,若采用二进制编码存在位串长度过长,且经过解码后对应的数值可能在定义域外,出现无效编码并影响算法效率。而实数编码无需解码,从而提高算法效率^[11],故被选用。

2)采用拥挤比较算子和二元锦标赛选择方法^[12]对初始种群 P 进行选择,保留初始种群 P 中级别最低的个体进入下一代,级别相同的进行拥挤距离 d_i 的计算,个体 i 的拥挤距离即为个体 $i-1$ 与个体 $i+1$ 两个目标函数之差的和,即图 2 所示的矩形长宽相加。为保持种群的多样性,保留拥挤距离大的个体进入下一代筛选。

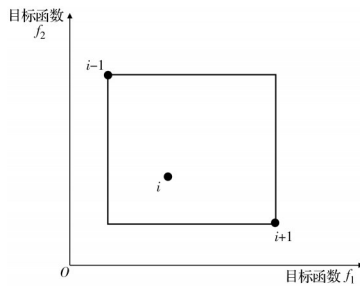


图 2 拥挤距离的计算

Fig. 2 Calculation of crowding distance

3)选择完个体后,对个体进行交叉和变异的遗传操作。交叉操作采用模拟二进制交叉(simulated binary crossover)方式,即任意两个个体进行实数编码后,随机选定编码中的点位进行交换,其参数为交叉分布系数,系数越大,表明产生的子代接近父代的概率越大,推荐值为 20。变异是指编码后个体中某点位代码改变,采用多项式变异(polynomial mutation)方式,其参数为变异分布系数,推荐值为 20^[13]。

交叉概率 P_c 指的是编码交换发生的概率,交叉概率越大,产生新个体的速度就越快,若交叉概率过小,则搜索过程会变得缓慢甚至停滞。变异概率

P_m 指的是编码发生突变的概率,变异概率越大,越不利于保留父代种群的优良基因,故变异概率 P_m 通常比交叉概率 P_c 要小,为使基因操作种群覆盖率为 100%,优化更加有效,故^[14]

$$P_m < P_c, \text{ 且 } P_c + P_m = 1. \quad (1)$$

4)经交叉、变异后的种群为子代种群 P' ,与之前的初始种群 P 合并为 $2P$,合并后的种群通过 Pareto 解集排序和拥挤距离计算筛选出下一代,直到满足迭代次数的要求后输出新种群 P'' 。

2 多目标决策

考虑若干个相互矛盾或制约的评价指标,由多个解甄选出最优方案,这是多目标决策的目的之一^[15]。Pareto 前沿上的每一个解对应着一种方案,若存在多个解(即 Pareto 最优解集),决策者无法直接比较这些非支配解之间的优劣性。基于熵权理论的 TOPSIS 法(technique for order preference by similarity to an ideal solution,逼近理想解排序法)^[16]对 Pareto 最优解集进行评估,可得到相对最优方案。

2.1 评价指标的权重计算

熵权理论利用信息熵^[16]计算出各指标权重,为多指标综合评价提供依据,它能最大限度降低主观因素的干扰。评价指标是指目标函数的值,评价对象是指 Pareto 最优解集中的单个解。设共有 n 个评价对象(其值可由 Pareto 最优解集中的单个解定义), m 个评价指标(其值可由目标函数定义),构建评价对象的原始矩阵 X 。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{im} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nj} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

对评价对象 x_{ij} 进行标准化,则有标准化后的评价对象 y_{ij} 。

$$y_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)}, & \text{极大型指标} \\ \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)}, & \text{极小型指标} \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_{ij} 为第 j 个评价指标的第 i 个评价对象; $\min(x_j)$ 和 $\max(x_j)$ 分别为第 j 个评价指标里所有评价对象中的最小值和最大值。对于极大型指标的情况, y_{ij} 越大越好,极小型指标的情况与此相反。

计算第 j 个评价指标的信息熵 H_j

$$H_j = -(\ln n)^{-1} \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (4)$$

式中: $f_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^n y_{ij}}$, 且当 $f_{ij} = 0$ 时, $\lim_{f_{ij} \rightarrow 0} f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。

第 j 个评价指标的权重 ω_j

$$\omega_j = \frac{1 - H_j}{j - \sum_{j=1}^m H_j} \quad (5)$$

2.2 标准化处理

为消除评价指标之间不同量纲的影响,对矩阵 X 中各列的每个元素进行标准化处理

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\max(x_j)} \quad (6)$$

式中: x_{ij}^* 为标准化处理后第 j 个评价指标的第 i 个评价对象。

对每个元素赋予权重后,得到赋权矩阵 Z 。

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1j} & \cdots & z_{1m} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ z_{i1} & \cdots & z_{ij} & \cdots & z_{im} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ z_{n1} & \cdots & z_{nj} & \cdots & z_{nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $z_{ij} = \omega_j x_{ij}^*$ 。

2.3 正理想点和负理想点

对于极大型或极小型指标,正理想点 z_j^+ 是赋权矩阵 Z 中各列的最大或最小值,而负理想点 z_j^- 是赋权矩阵 Z 中各列的最小或最大值^[17]。

对赋权矩阵 Z 的各列而言,各元素与正理想点的距离 d_i^+ 和与负理想点的距离 d_i^- 可表示为

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_j^+ - z_{ij})^2} \quad (8)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_j^- - z_{ij})^2} \quad (9)$$

式中: z_{ij} 为赋权矩阵 Z 中第 j 列的第 i 行元素。

2.4 相对贴近度

为评价赋权矩阵 Z 中的第 i 行元素,需计算相对贴近度 S_i ^[17]。

$$S_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (10)$$

式中: d_i^+ 、 d_i^- 为第 i 行元素与正理想点和负理想点距离。

整理式(8)、式(9)和式(10)得

$$S_i = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^m (z_j^- - z_{ij})^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (z_j^+ - z_{ij})^2} + \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_j^- - z_{ij})^2}} \quad (11)$$

根据相对贴近度 S_i 由大到小进行优劣排序,据此选择最优方案。

3 基桩优化模型

在给定基桩多个设计方案的基础上,控制成本与承载安全性,求出基桩的多目标优化解。

3.1 土体参数的不确定性

由于土体具有空间变异性,桩土间的极限阻力参数,即侧摩阻力与端阻力具有离散性。为简化,将每层土体的摩阻力和桩持力层的端阻力参数视作随机变量,并假定服从正态分布^[18-19]。

3.2 设计变量的选取

基桩的几何尺寸参数,即桩径 B 和桩长 D ,设定为不同的取值范围并处理为设计变量。对于桩长,《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)规定^[20],桩端以下硬持力层厚度不宜小于 $3B$,且根据持力层土体不同,桩端进入持力层的深度不同,对于黏性土、粉土不宜小于 $2B$,砂土不宜小于 $1.5B$,碎石类土不宜小于 $1B$ 。优化求解中不改变桩端持力层,即与原设计^[21]保持一致,则桩长

$$D_{\min} < D < D_{\max} \quad (12)$$

式中: D_{\min} 为持力层顶部深度加桩端进入持力层的最小深度值; D_{\max} 为持力层底部深度减去 $3B$ 。

对于桩径

$$B_{\min} < B < B_{\max} \quad (13)$$

式中: B_{\min} 和 B_{\max} 分别为桩径最小值和最大值,可取 1.0 m 和 2.0 m 。

3.3 目标函数的选取

3.3.1 沉降计算

基桩为上部结构提供足够承载力的同时,其产生的沉降要低于特定限值,故将基桩沉降量 S 最小作为目标函数之一。

1) 分项简化计算方法

张乾青等^[22]基于 Boussinesq 公式和 Vesic^[23]的桩侧阻力计算沉降的原理整理了 n 层土的单桩沉降计算方法,即

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{P_{bi}(1 - \nu_{bi})}{4G_{bi}r_0} + \sum_{i=1}^n \frac{(P_{ti} + P_{bi})l_i}{2AE_p} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_{si}}{\pi d_i l_i} \right) \frac{d_i}{E_i} (1 - \nu_{bi}^2) \cdot \left(2 + 0.35 \sqrt{\frac{l_i}{d_i}} \right) \quad (14)$$

式中: P_{bi} 和 P_{ti} 分别为第 i 段桩的桩端轴力和桩顶荷载; ν_{bi} 和 G_{bi} 分别为第 i 层桩端土的泊松比和剪切模量; r_0 为桩的半径; l_i 为第 i 段桩桩长; d_i 为第 i 段桩桩径; A 为桩的截面积; E_p 为桩体弹性模量; E_i 为土的变形模量, $E_i = 2(1 + \nu_{si})G_{bi}$; P_{si} 为第 i 段桩身侧阻力,且有 $P_{si} + P_{bi} = P_{ti}$ 。

Randolph^[24]提出了一种桩端轴力的计算方法,根据土层分布情况将桩由上而下分为 n 段,将第 i 段

桩的桩端轴力 P_{bi} 当作第 $i+1$ 段桩的桩顶荷载 $P_{1,i+1}$, 即

$$\frac{P_{bi}}{P_{1i}} = \frac{\frac{4\eta}{(1-\nu_{si})\xi} \frac{1}{\cosh(\mu l_i)}}{\frac{4\eta}{(1-\nu_{si})\xi} + \rho \frac{2\pi \tanh(\mu l_i) l_i}{\zeta \mu l_i r_0}} \quad (15a)$$

$$\rho = \frac{1}{G_m L} \sum_{i=1}^n G_{si} l_i \sqrt{\frac{G_m}{G_b}} [1 - e^{(1-h/L)}] \quad (15b)$$

$$G_s = \rho_s v_s^2 \quad (15c)$$

式中: ρ 为桩周土的不均匀系数; η 为系数, $\eta = r_0/r_b$; $\xi = G_l/G_b$, G_l 和 G_b 分别为深度 L 处和桩端的剪切模量, 对于成层土, $\xi = 1$; $\zeta = \ln(r_m/r_0)$, 其中 $r_m = 2.5L\rho(1-\nu_s)$; $\mu = \sqrt{2G_l/\zeta E_p r_0^2}$; G_m 为成层土中最大剪切模量; G_{si} 为第 i 层土的剪切模量; h 为桩端到刚性层距离; ρ_s 为土体密度; v_s 为剪切波速。

2) 基于荷载传递的剪切位移法

有些学者^[25-27]基于荷载传递的剪切位移法和 Boussinesq 公式原理, 给出了 n 层土体中单桩桩顶沉降量的表达式, 即

$$\frac{w_1}{P_1} = T_1 \cdots T_i \cdots T_n \left\{ \frac{w_b}{P_b} \right\} \quad (16a)$$

$$T_i = \begin{bmatrix} \text{ch}(\alpha_i l_i) & (AE_p \alpha_i)^{-1} \text{sh}(\alpha_i l_i) \\ AE_p \alpha_i \text{sh}(\alpha_i l_i) & \text{ch}(\alpha_i l_i) \end{bmatrix} \quad (16b)$$

$$w_b = \frac{P_b(1-\nu_b)}{4G_b r_0} \quad (16c)$$

$$\alpha_i = \sqrt{\frac{2\pi G_{si}}{AE_p \ln(r_m/r_0)}} \quad (16d)$$

式中: w_1 为桩顶沉降; w_b 为桩端沉降; ch 和 sh 分别为双曲余弦和双曲正弦函数。

3.3.2 造价分析

考虑桩基施工各种费用, 将工程造价 C 最小作为第 2 个目标函数。根据市场定价, 各环节成本如表 1 所列^[28]。

工程总造价主要有材料成本 C_1 、挖出土方成本 C_2 、泥浆运输成本 C_3 , 则

$$C = (C_{1,c} + C_2 + C_3)V + C_{1,s} n_s l_s + C_{1,l} n_l l_l \quad (17)$$

式中: $C_{1,c}$ 、 $C_{1,s}$ 、 $C_{1,l}$ 、 C_2 和 C_3 分别为表 1 中混凝土、箍筋、纵筋、挖出土方和运输泥浆的单价; V 为桩基体积, $V = \pi/4 \cdot B^2 D$; n_s 为箍筋数目, 由桩长 D 决定; l_s 为箍筋长度, 由桩径 B 决定; n_l 为纵筋数目, 由桩径 B 决定; l_l 为纵筋长度, 由桩长 D 决定。

3.4 约束条件

根据《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)^[29], 对于桩基的承载能力极限状态, 设定其目标可靠指标不小于 2.7。

表 1 材料价格与施工成本

Table 1 Material price and construction cost

成本	材料	型号/项目	单价/ (元/m ³)	密度/ (kg/m ³)
材料成本 C_1	混凝土	C30	380	2 360
		C35	430	2 395
		C40	480	2 430
		C45	530	2 465
		C50	580	2 500
	箍筋	Φ4	25 117.74	784.82
Φ6		25 902.67	785.16	
Φ8		26 687.6	785.83	
Φ28		33 751.96	784.41	
Φ30		34 536.89	785.02	
纵筋	Φ32	35 321.82	785.58	
	挖出土方成本 C_2	钻挖土孔	177.38	
泥浆运输成本 C_3	运输泥浆	76.45		

3.5 优化模型

对桩基的承载能力极限状态进行分析, 考虑桩土间极限阻力参数(包括侧摩阻力与端阻力)的不确定性, 建立基于可靠性算法的多目标优化模型。

$$\begin{aligned} & \text{search } \{B, D\} \\ & \min \{C(B, D), S(B, D)\} \\ & \quad \beta \geq \beta^T \\ & \text{s.t. } B_{\min} \leq B \leq B_{\max} \\ & \quad D_{\min} \leq D \leq D_{\max} \end{aligned} \quad (18)$$

式中: $S(B, D)$ 、 $C(B, D)$ 为沉降与造价的目标函数; β 为桩基承载能力极限状态下计算得到的可靠指标; β^T 为目标可靠指标。

基于 R 语言平台, 该模型具体求解流程如图 3 所示。主要分为 3 个步骤。

1) 给定设计变量, 将各土层极限侧摩阻力和持力层极限端阻力假定为正态随机变量, 构建桩基承载能力极限状态方程, 求解桩基承载性能的可靠指标, 具体计算过程包括: 桩基的极限承载力可由各层土体的极限侧摩阻力和持力层的极限端阻力给定, 可写为

$$Q_u = \pi B \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + q_b A_b \quad (19)$$

式中: Q_u 为桩基竖向极限承载力; B 为桩径; n 为土层数; q_{si} 为第 i 层土的极限侧摩阻力; l_i 为第 i 层土的土层厚度; q_b 为第 i 层土的极限端阻力; A_b 为桩端截面积。

若给定实际施加荷载 $Q_{L, \text{load}}$, 根据可靠性理论^[29], 则桩基承载性能的功能函数为

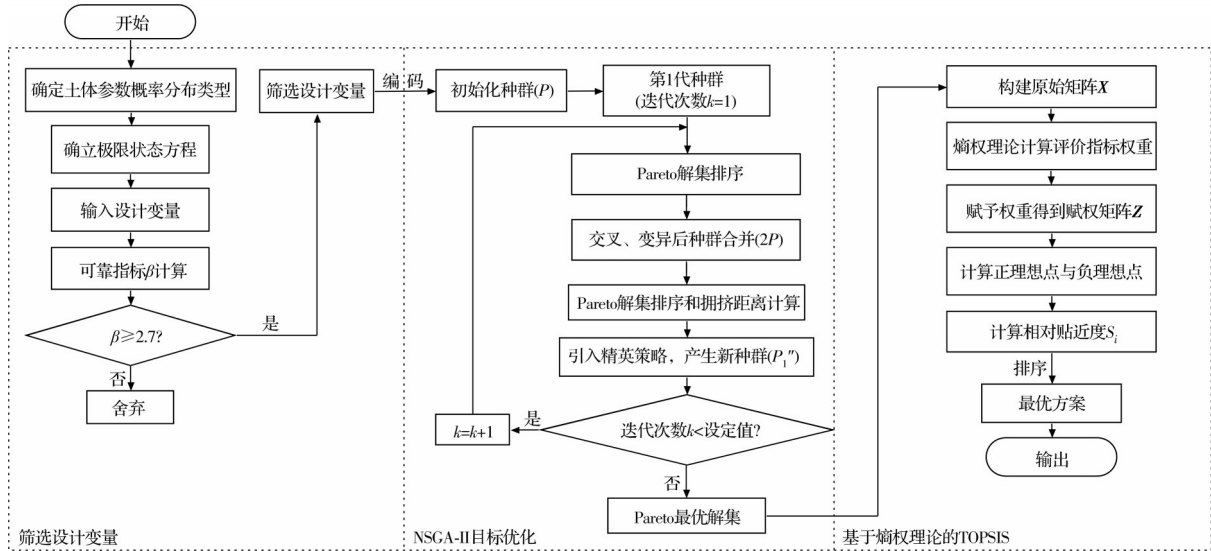


图 3 考虑土体参数不确定性的多目标优化求解流程

Fig. 3 Multi-objective optimization solution process when considering the uncertainty of soil parameters

$$Z(x) = Q_u - Q_{Load} = \pi D \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + q_b A_b - Q_{Load} \quad (20)$$

考虑土体参数的不确定性,假定各土层极限侧摩阻力 q_s 和极限端阻力 q_b 均服从特定统计分布。进而通过常规的一阶可靠性算法^[30](FORM)求解可靠指标 β 。

2)得到满足可靠指标要求的设计变量后,采用 NSGA-II 算法进行求解。

首先,对设计变量的初始种群进行实数编码^[11]。

$$\hat{\kappa}_i = \frac{\kappa_i - \kappa_{\min}}{\kappa_{\max} - \kappa_{\min}}, \quad i = 1, 2 \quad (21)$$

式中: κ_i 为第 i 个设计变量的值; κ_{\min} 与 κ_{\max} 为设计变量的最小与最大取值界限; $\hat{\kappa}_i$ 为编码后的取值。将桩径 B 和桩长 D 代入式(21)分别得到实数编码,图 4 示意出 n 个潜在个体。应指出,考虑到施工设备及钻头型号等因素,桩径变化以 0.1 m 为增量。

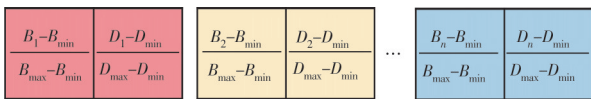


图 4 实数编码

Fig. 4 Real-number encoding

然后,通过交叉、变异操作保留较优个体进入下一代,引入精英保留策略^[10],到第 k 代时,设群体 P_k 中 p_k^1 为最优个体, P_{k+1} 为 P_k 的下一代群体,若 P_{k+1} 中不存在比 p_k^1 优的个体,则保留 p_k^1 并加入 P_{k+1} 中,作为 P_{k+1} 的第 $n+1$ 个个体。通过第 k 次迭代得到的最优种群 P_k^n 则为所求。

3)采用熵权理论赋权的 TOPSIS 法^[16],将优化后得到的 Pareto 解集进行赋权,计算相对贴近度并进行排序,评价现有方案的相对优劣。

4 算例分析

4.1 工程概况

中国尊大厦是超过 500 m 高的摩天大楼,其基础形式为桩筏基础。位于核心筒区的工程桩主要为 P1 型桩(桩径 1 200 mm、桩长 44.6 m)^[21]。选取 P1 型桩的单根基桩进行优化设计,模型示意如图 5 所示,P1 型桩为钻孔灌注桩,采用 C50 混凝土,采用 HRB500 的纵筋和 HPB235 箍筋^[31]。

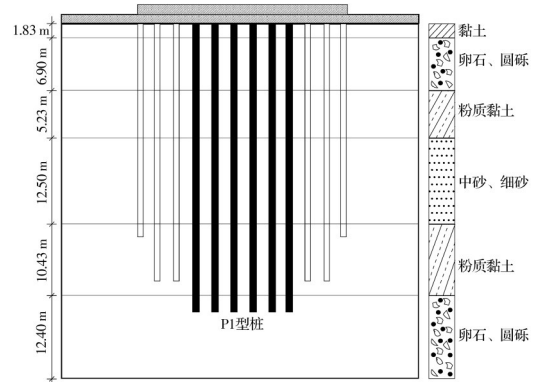


图 5 中国尊大厦核心筒区地层及布桩示意图

Fig. 5 Stratum and pile layout diagram of China Zun Mansion core tube zone

根据 P1 型桩的实际情况,沉降计算时土体参数(包括剪切波速、泊松比、密度、压缩模量等)如表 2 所列^[21,32],不考虑这些参数的不确定性。由两种沉降计算方法得到的单桩荷载-位移曲线^[21]如图 6 所示,由检测部门给出的根据 P1 型桩的静载试验结果也在图中示意。由图 6 可见,分项简化法计算得到的结果与实际检测结果差异较大,基于荷载传递的剪切位移法计算得到的结果与检测成果更为接近,其最大沉降量为 12.29 mm。

表 2 各层土体参数
Table 2 Parameters of each layer of soils

地层	土层名称	层厚/m	剪切波速 $v_s/(m/s)$	泊松比 ν	密度 $\rho/(g/cm^3)$	压缩模量 E_s/MPa	极限侧摩阻力 q_s/kPa	极限端阻力 q_b/kPa
7	黏土	1.83	321	0.35	1.90	70	70	
8	卵石、圆砾	6.90	498	0.20	2.10	140	140	
9	粉质黏土	5.23	351	0.30	1.95	75	75	
10	中砂、细砂	12.50	458	0.25	2.05	80	80	
11	粉质黏土	10.43	427	0.30	1.85	75	75	
12	卵石、圆砾	12.40	595	0.20	2.25	160	160	3 000

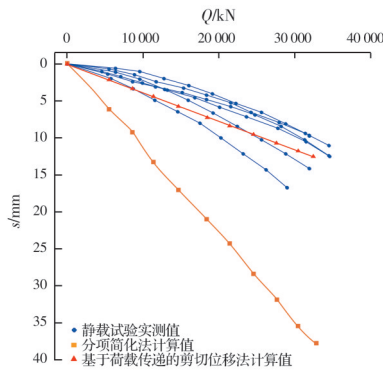


图 6 中国尊大厦 P1 型桩的荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves for the P1 type pile of China Zun Mansion

由中国尊大厦 P1 型桩的静载检测曲线^[21]可知, 基桩实际施加荷载 Q_{Load} 可取 6 根基桩最大检测加载值 Q_{max} 算术平均数的一半。考虑作用在结构上的恒载与活载, 该最大值 Q_{max} 通常由上部结构的设计人员给出, 即

$$Q_{Load} = \frac{\overline{Q_{max}}}{F_s} = \frac{32\,744\text{ kN}}{2} = 16\,372\text{ kN} \quad (22)$$

各层土体的极限阻力参数如表 2 所列。为考虑土体参数的不确定性, 假定各土层极限侧摩阻 q_s 和极限端阻力 q_b 均服从正态分布, 其变异系数均取 0.15^[18-19]。

4.2 多目标优化分析与决策

在 NSGA-II 遗传算法中, 设定交叉概率 $P_c = 0.9$, 变异概率 $P_m = 0.1$, 种群数量为 60, 迭代次数 $k = 100$ ^[10,13], 考虑造价 C 和沉降量 S 两个目标函数, 经过多次计算后得到如图 7 所示的 Pareto 最优解集。由图 7 可见, 计算结果全部为潜在最优解。在 Pareto 解集中选取可靠指标 $\beta \geq 2.7$ 的结果, 如表 3 所列。

由式(5)可得, 造价 C 和沉降量 S 两个评价指标的权重分别为 0.55 和 0.45。

两个评价指标均为极小型, 将表 3 中给出的满足可靠指标要求的 Pareto 解集, 进行标准化处理并考虑权重后的赋权矩阵为

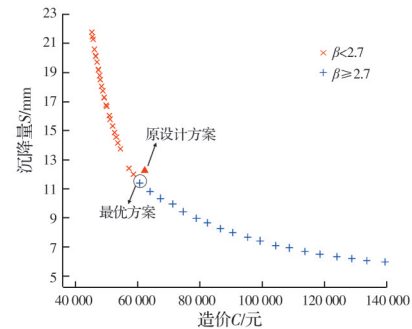


图 7 Pareto 最优解集

Fig. 7 Pareto optimal solution set

表 3 满足可靠指标要求的 Pareto 解集

Table 3 Pareto solution set that meets the reliability

index requirements					
序号	桩径 B/m	桩长 D/m	序号	桩径 B/m	桩长 D/m
1	1.1	45.99	11	1.6	42.60
2	1.2	45.69	12	1.7	44.19
3	1.2	43.42	13	1.7	42.37
4	1.3	45.39	14	1.8	43.89
5	1.3	43.30	15	1.8	42.08
6	1.4	45.09	16	1.9	43.59
7	1.4	43.18	17	1.9	41.85
8	1.5	44.79	18	2.0	43.29
9	1.5	42.73	19	2.0	41.40
10	1.6	44.49			

$$\begin{bmatrix} 0.24 & 0.45 \\ 0.27 & 0.41 \\ \vdots & \vdots \\ 0.55 & 0.23 \end{bmatrix} \quad (23)$$

由式(23)可得, 正理想点为 (0.24, 0.23), 负理想点为 (0.55, 0.45), 根据相对贴近度将满足可靠指标要求的 Pareto 解集进行排序, 如表 4 所示。

由表 4 可知, 相对贴近度最大的解为最优方案。该最优方案的造价最低, 沉降量最大。表 5 给出最优方案与原设计方案^[21]的目标函数值, 其在 Pareto 最优解集中的位置如图 7 所示。由表 5 可得, 在设计变量方面, 最优方案的桩径 B 比原设计方案减小 8.33%, 桩长 D 比原设计方案增长 3.12%。在目标函数造价 C 和沉降量 S 方面, 最优方案比原设计方

表4 根据相对贴近度的大小排序后的解集

Table 4 Sorted solutions set based on the relative closeness

次序	桩径 B/m	桩长 D/m	造价 $C/元$	沉降量 S/mm	离正理想点距离 d_i^+	离负理想点距离 d_i^-	相对贴近度 S_i
1	1.1	45.99	60 639.49	11.39	0.143	0.257	0.643
2	1.2	45.69	67 336.27	10.33	0.140	0.250	0.641
3	1.2	43.42	64 073.38	10.82	0.152	0.268	0.638
4	1.4	43.18	78 957.41	8.96	0.140	0.243	0.635
5	1.3	43.30	71 234.58	9.96	0.168	0.275	0.620
6	1.5	42.73	86 589.78	8.26	0.145	0.235	0.618
7	1.3	45.39	74 582.4	9.41	0.180	0.288	0.615
8	1.4	45.09	82 355.99	8.65	0.198	0.298	0.601
9	1.6	42.60	95 340.95	7.67	0.154	0.228	0.597
10	1.5	44.79	90 647.97	7.99	0.220	0.311	0.586
11	1.6	44.49	99 449.29	7.42	0.165	0.223	0.575
12	1.7	42.37	104 400.1	7.09	0.179	0.219	0.551
13	1.7	44.19	108 750.9	6.93	0.194	0.214	0.525
14	1.8	42.08	113 800.7	6.68	0.211	0.212	0.501
15	1.8	43.89	118 543.7	6.49	0.229	0.211	0.479
16	1.9	41.85	124 122.6	6.32	0.250	0.209	0.456
17	1.9	43.59	128 818.7	6.11	0.268	0.213	0.443
18	2.0	41.40	133 670.8	6.07	0.287	0.211	0.424
19	2.0	43.29	139 566.9	5.77	0.310	0.222	0.417

案分别减少 7.80% 和 7.32%, 从侧面说明本优化方法基本可行。优化后的最优方案考虑土体极限阻力参数的不确定性, 更贴近土体的实际情况。应指出, 造价分析中仅考虑初始建造成本, 未计及养护与人力等因素。

表5 原设计方案与最优方案对比

Table 5 Comparison between the original design scheme and the optimal scheme

方案	设计变量		目标函数	
	桩径 B/m	桩长 D/m	造价 $C/元$	沉降量 S/mm
原设计方案	1.2	44.6	65 769.51	12.29
最优方案	1.1	45.99	60 639.49	11.39
与原设计比较	-8.33%	+3.12%	-7.80%	-7.32%

5 结论

提出多目标优化与可靠性分析相结合的基桩优化设计方法。考虑土体极限阻力参数的不确定性, 采用一阶可靠性算法计算承载能力极限状态下的可靠指标, 以满足目标可靠指标作为约束条件, 利用 NSGA-II 遗传算法进行多目标(包括沉降与造价)优化得到 Pareto 最优解集。采用基于熵权理论的 TOPSIS 法对 Pareto 最优解集进行赋权排序后得到最优方案, 可以克服选择方案时主观性过强的缺点。建议的方法可求得满足钻孔灌注桩可靠性前提下经济性和安全性之间的平衡点。

将提出的方法用于中国尊大厦的基桩优化设

计, 原方案被优化后的最优方案支配。筛选后的最优方案造价为 60 639.49 元, 沉降量为 11.39 mm, 比原设计方案的造价减少 7.80%, 桩沉降量减少 7.32%, 且满足安全性的要求, 在一定程度上说明此优化设计方法的可行性。

本文的研究重点在于单根基桩的多目标优化算法, 未考虑群桩效应以及筏板作用等问题, 这或与工程实际存在差异, 尤其是沉降分析方面。考虑群桩沉降与承载力的优化分析较为繁杂, 值得深入研究。

参考文献

- [1] 简文星, 邓先华, 熊亚萍. 粒子群算法在锚拉桩桩身参数优化设计中的应用[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(2): 117-124.
JIAN W X, DENG X H, XIONG Y P. Application of particle swarm in pile parameter optimization design of anchor piles [J]. Safety and Environmental Engineering, 2016, 23(2): 117-124. (in Chinese)
- [2] 张晓曦, 何思明, 尹平保. 沉入式抗滑桩优化设计研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(12): 143-149.
ZHANG X X, HE S M, YIN P B. Optimum design of deeply embedded anti-slide pile [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(12): 143-149. (in Chinese)
- [3] 陈昌富, 邱琳淇, 毛凤山, 等. 基于加权扰动共生生物搜索算法桩网复合地基优化设计[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4477-4485, 4514.

- CHEN C F, QIU L Q, MAO F S, et al. Design optimization of pile-net composite foundation based on perturbation-weighted symbiotic organisms search (PWSOS) algorithm [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(11): 4477-4485, 4514. (in Chinese)
- [4] 惠迎新, 陈嘉伟. 基于改进遗传算法下的挤扩支盘群桩优化方法[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2023, 53(7): 2089-2098.
- HUI Y X, CHEN J W. Squeezed branch pile groups optimization method based on improved genetic algorithm [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*. 2023, 53(7): 2089-2098. (in Chinese)
- [5] 王成华, 曾超峰, 刘伟鹏. 基于混沌粒子群算法的桩基础优化设计方法[J]. *建筑结构*, 2016, 46(2): 76-81.
- WANG C H, ZENG C F, LIU W P. Optimal design method for pile foundation based on chaotic particle swarm algorithm [J]. *Building Structure*, 2016, 46(2): 76-81. (in Chinese)
- [6] NAKANISHI K, TAKEWAKI I. Optimum pile arrangement in piled raft foundation by using simplified settlement analysis and adaptive step-length algorithm [J]. *Geomechanics and Engineering*, 2013, 5(6): 519-540.
- [7] BEKDAŞ G, ARAMA Z A, KAYABEKIR A E, et al. Optimal design of cantilever soldier pile retaining walls embedded in frictional soils with harmony search algorithm [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(9): 3232.
- [8] 王忠福, 刘汉东, 贾金禄, 等. 大直径深长钻孔灌注桩竖向承载力特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(9): 2663-2670.
- WANG Z F, LIU H D, JIA J L, et al. Experimental study of vertical bearing capacity behavior of large-diameter bored cast-in-situ long pile [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(9): 2663-2670. (in Chinese)
- [9] CAO Z G, WANG Z C, ZHAO L, et al. Multi-constraint and multi-objective optimization of free-form reticulated shells using improved optimization algorithm [J]. *Engineering Structures*, 2022, 250: 113442.
- [10] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [11] SASAKI D, OBAYASHI S. Efficient search for trade-offs by adaptive range multi-objective genetic algorithms [J]. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, 2005, 2(1): 44-64.
- [12] TAVAKOLI-SOMEH S, REZVANI M H. Multi-objective virtual network function placement using NSGA-II meta-heuristic approach [J]. *The Journal of Supercomputing*, 2019, 75(10): 6451-6487.
- [13] WANG R H. An improved nondominated sorting genetic algorithm for multiobjective problem [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 2016: 1519542.
- [14] ZHANG Y J, LIU M D. Adaptive directed evolved NSGA2 based node placement optimization for wireless sensor networks [J]. *Wireless Networks*, 2020, 26(5): 3539-3552.
- [15] 何保荣. 基于多目标决策的时间序列数据挖掘算法仿真[J]. *计算机仿真*, 2019, 36(11): 243-246.
- HE B R. Simulation of time series data mining algorithm based on multi-objective decision [J]. *Computer Simulation*, 2019, 36(11): 243-246. (in Chinese)
- [16] GU X B, MA Y, WU Q H, et al. The risk assessment of landslide hazards in Shiwangmiao based on intuitionistic fuzzy sets-Topsis model [J]. *Natural Hazards*, 2022, 111(1): 283-303.
- [17] GUO Z W. Evaluation of financial ability of port listed companies based on entropy weight TOPSIS model [J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 103(sp1): 182-185.
- [18] GURBUZ A, PAIKOWSKY S G. New simple approach to prediction of axial settlement of single piles under design load [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(10): 04016067.
- [19] MIAO Y H, ZUO P P, YIN J, et al. An improved CPTu-based method to estimate jacked pile bearing capacity and its reliability assessment [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23(9): 3864-3874.
- [20] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [21] 孙宏伟, 常为华, 宫贞超, 等. 中国尊大厦桩筏协同作用计算与设计分析[J]. *建筑结构*, 2014, 44(20): 109-114.
- SUN H W, CHANG W H, GONG Z C, et al. Calculation and analysis of piled raft foundation interaction of China ZUN Tower [J]. *Building Structure*, 2014, 44(20): 109-114. (in Chinese)
- [22] 张乾青, 张忠苗. 群桩沉降简化计算方法[J]. *岩土力学*, 2012, 33(2): 382-388, 432.
- ZHANG Q Q, ZHANG Z M. A simplified calculation approach for settlement of pile groups [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(2): 382-388, 432. (in Chinese)
- [23] VESIC A S. Design of pile foundations [R]. NCHRP Synthesis of Highway Practice, 1977.
- [24] RANDOLPH M F. Design methods for pile groups and piled rafts [J]. *Proceedings of 13th ICSMFE*, 1994, 5: 61-82.
- [25] 高盟, 高广运, 杨成斌, 等. 层状地基群桩沉降计算的剪切位移解析算法[J]. *岩土力学*, 2010, 31(4): 1072-1077.
- GAO M, GAO G Y, YANG C B, et al. Analytical

- solution for settlement of group piles in layered ground based on shear displacement method [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(4): 1072-1077. (in Chinese)
- [26] 李镜培, 姚明博, 姚建平. 群桩等沉降临界桩长关系解析[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(6): 162-168.
LI J P, YAO M B, YAO J P. Analysis of relationship on critical-pile lengths of pile groups with similar settlement [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(6): 162-168. (in Chinese)
- [27] 王立兴, 吴文兵, 杨晓燕, 等. 层状地基中考虑桩端应力泡形扩散的单桩沉降计算方法[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(6): 65-73.
WANG L X, WU W B, YANG X Y, et al. A calculation method for settlement of single pile considering stress bulb dispersion of pile end soil [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(6): 65-73. (in Chinese)
- [28] 建设工程劳动定额市政工程-桩基础工程: LD/T 99.4—2008[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2008.
Construction engineering labor quota: Municipal engineering-pile foundation engineering: LD/T 99.4—2008 [S]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2008. (in Chinese)
- [29] 建筑结构可靠性设计统一标准: GB 50068—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
Unified standard for reliability design of building structures: GB 50068—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)
- [30] LOW B K, TANG W H. Efficient spreadsheet algorithm for first-order reliability method [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2007, 133(12): 1378-1387.
- [31] 蒋凯, 张轩奎, 薛磊, 等. 中国尊大厦底板高性能钢筋综合施工技术[J]. *施工技术*, 2019, 48(4): 17-19.
JIANG K, ZHANG X K, XUE L, et al. Foundation slab high performance reinforcement comprehensive construction of CITIC tower [J]. *Construction Technology*, 2019, 48(4): 17-19. (in Chinese)
- [32] 化建新, 郑建国. 工程地质手册[M]. 5版, 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
HUA J X, ZHENG J G. *Engineering geology manual* [M]. 5th Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)