

基于帕累托最优解算法的水泥搅拌桩施工一次合格率优化研究

邹家华¹, 吴飞龙^{2*}, 刘智华², 岳未森², 杨青龙², 刘华森², 曹 盟², 张 欣², 康钦容³

¹广州市从化区公共建设项目代建中心, 广东 广州

²中铁隧道集团二处有限公司, 河北 廊坊

³武汉工程大学资源与安全工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年9月14日; 录用日期: 2026年10月5日; 发布日期: 2026年10月16日

摘 要

本文以广丰汽车城基础配套设施(一期)软基处理工程为例, 针对软土地基水泥搅拌桩施工一次合格率偏低问题, 采用随机抽样与要因分析, 识别出桩长不足、桩身水泥土强度不足、桩身完整性差三大核心质量问题, 确定水泥用量不足、机械设备性能差、作业面环境差为主要影响因素。为平衡质量、成本与工期之间的目标冲突, 引入帕累托最优解算法开展多目标决策优化, 构建“可行性-经济性-时间性”多目标优化模型, 得出控制提升速度、增设全自动记录仪的核心对策及软弱地基换填的辅助对策。优化后, 施工一次合格率从92%提升至97.5%, 巩固期合格率稳定在98%以上。

关键词

水泥搅拌桩, 施工质量, 一次合格率, 帕累托最优解, 多目标优化

Optimization Study on the One-Time Pass Rate of Cement Mixing Pile Construction Based on the Pareto Optimal Solution Algorithm

Jiahua Zou¹, Feilong Wu^{2*}, Zhihua Liu², Weisen Yue², Qinglong Yang², Huasen Liu², Meng Cao², Xin Zhang², Qinrong Kang³

¹Construction Project Management Center of Conghua District, Guangzhou City, Guangzhou Guangdong

²China Railway Tunnel Group No. 2 Co., Ltd., Langfang Hebei

³School of Resources & Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

*通讯作者。

文章引用: 邹家华, 吴飞龙, 刘智华, 岳未森, 杨青龙, 刘华森, 曹盟, 张欣, 康钦容. 基于帕累托最优解算法的水泥搅拌桩施工一次合格率优化研究[J]. 土木工程, 2026, 15(10): 28-37. DOI: 10.12677/hjce.2026.1510235

Received: September 14, 2026; accepted: October 5, 2026; published: October 16, 2026

Abstract

Taking the soft-soil foundation treatment project for the Phase-I infrastructure supporting facilities of Guangfeng Auto City as a case study, this paper addresses the low one-time acceptance rate of cement-soil mixing piles in soft-ground conditions. Random sampling and root-cause analysis are adopted to identify three core quality defects, namely insufficient pile length, inadequate strength of cement-soil pile body and poor pile integrity. Insufficient cement dosage, poor equipment performance and unfavorable working-surface conditions are confirmed as the principal influencing factors. To resolve the objective conflicts among quality, cost and construction duration, the Pareto optimal-solution algorithm is introduced for multi-objective decision-making optimization. A multi-objective optimization model framed by “feasibility-economy-timeliness” is established. Core countermeasures, including controlling pile-lifting speed and installing full-automatic recorders, together with the auxiliary measure of soft-ground replacement, are obtained. After optimization, the one-time acceptance rate of construction rises from 92% to 97.5%, and the pass rate remains stably above 98% during the consolidation period.

Keywords

Cement Mixing Pile, Construction Quality, One-Time Pass Rate, Pareto Optimal Solution, Multi-Objective Optimization

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国基础设施建设向软土地区延伸,水泥搅拌桩因具有造价低、施工便捷、环保性好等优势,被广泛应用于道路、桥梁、建筑地基处理工程中[1],水泥搅拌桩施工质量直接影响工程结构稳定性与使用寿命。然而,软土具有含水率高、压缩性大、承载力低的特性,加之水泥搅拌桩施工涉及“钻-搅-喷-提”多环节协同,易受施工参数、设备性能、环境条件等因素影响,导致水泥搅拌桩施工质量控制难度较大,常出现桩长不足、桩身强度不够、桩身完整性差等质量问题[2]。据统计,软土地区水泥搅拌桩施工一次合格率仅为85%~93%,返工率达10%~15%,不仅增加了工程成本,还严重影响施工进度[2][3]。

国内外学者围绕水泥搅拌桩施工质量影响因素开展了大量研究。叶亚平等[4]应用AHP-模糊综合评价法评价了水泥搅拌桩成桩质量。肖少文等[5]研究了水泥搅拌桩单桩承载力的影响。陈祎等[6]以苏台高速工程为背景,研究了水泥用量、钻进/提升速度和喷浆流量、桩长等施工、设计质量控制。尹忠辉[7]分析了提升速度、转速、翼片宽度等对水泥搅拌桩成桩质量的影响。现有研究多聚焦水泥搅拌桩多因素对成桩质量的影响,缺乏对多目标的系统性优化分析。

帕累托最优解算法作为多目标决策工具,能够在相互冲突的目标中找到综合效益最优的解决方案。在工程优化领域的应用日益广泛,徐玉萍、高小永、王人龙等[8]-[10]利用帕累托最优解分析了公交线路走向、列车编组计划、重载铁路运输效益等。现有研究未发现将帕累托最优解算法应用于水泥搅拌桩施工质量优化,尤其缺乏结合实际工程数据的实证分析。文章以广丰汽车城基础配套设施(一期)项目软基处理工程为例,通过数据统计分析水泥搅拌桩施工质量现状,定位核心质量问题;基于人机料法环五要素,

挖掘影响施工质量的末端因素，确定主要要因；构建多目标优化模型，运用帕累托最优解算法筛选最优施工对策；实施优化对策并进行效果验证，分析合格率提升成效。

2. 工程概况

广丰汽车城基础配套设施(一期)项目位于广州市南沙区，涉及4个子项，水泥搅拌桩施工总量达19.6万m。项目区域地质以淤泥质软土为主，含水率高、承载力低，需通过水泥搅拌桩进行软基处理，设计桩长8~12m，桩径500mm，水泥强度等级42.5MPa，桩身设计强度0.8MPa，水灰比0.55，其中水泥掺入量为65kg/m，粉煤灰掺入量20kg/m，水泥搅拌桩施工初期发现水泥土搅拌桩桩长(见图1)、桩身水泥土强度、桩身完整性不合格(见图2)等现象较为严重，直接影响了水泥土搅拌桩的施工质量，以至于造成搅拌桩检测不合格返工，费工费时，间接影响到项目整体施工进度。采用随机分段抽样方式，对现场20根水泥搅拌桩进行质量自检，统计结果见表1。



Figure 1. Insufficient pile length
图 1. 桩长不足



Figure 2. Unqualified strength and integrity of pile-body
图 2. 桩身强度、完整性不合格

Table 1. Self-inspection table for construction quality of cement mixing piles
表 1. 水泥搅拌桩施工质量自检表

调查项目	检测数量/根	不合格/根	累计不合格数/根	不合格率/%	累计不合格率/%
桩长度	20	4	4	20	20
桩身水泥土强度	20	5	9	25	45
桩身完整性	20	5	14	25	70
其他	20	1	15	5	75

由表 1 可知，累计不合格率达 75%，其中桩长不足、桩身水泥土强度不足、桩身完整性差三项累计不合格率达 70%，占总不合格项的 93.33%。

在实施项目中选取 6 组覆盖不同子项、地质条件及施工条件的代表性施工段，每组 50 根搅拌桩，统计的一次合格率结果见表 2。

Table 2. Table of field test results of one-time pass rate for cement mixing pile construction
表 2. 水泥搅拌桩施工一次合格率现场检测结果表

组数	搅拌桩/根	合格/根	不合格/根	合格率/%
第一组	50	47	3	94
第二组	50	46	5	92
第三组	50	47	3	94
第四组	50	46	5	92
第五组	50	44	7	88
第六组	50	46	7	92
平均合格率	-	-	-	92

由表 2 可知，施工一次合格率在 88%~94%区间波动，平均合格率仅 92%，且第五组合格率低至 88%，反映出施工质量稳定性不足。基于现状分析，若能解决三大核心质量问题的 80%，则一次合格率计算公式为：

$$92\% + (1 - 92\%) \times 93.33\% \times 80\% = 97.97\%$$

考虑不可预见因素影响，确定优化目标的一次验收合格率为 97%。

3. 基于帕累托最优解的质量优化

3.1. 帕累托最优解算法

帕累托最优解的核心思想是：在多目标决策中，若存在一个解决方案集合，集合内的方案无法在不降低其他目标性能的前提下，单独提升某一个目标的性能，则该集合为帕累托前沿，集合内的方案为帕累托最优解[11]。集合外的方案均为“劣解”，可被集合内的方案替代。帕累托最优解不追求“单目标极致”，而是找到“多目标平衡的最优解”。该算法避免了单一目标优化导致的局部最优，实现综合效益最大化。

设多目标优化问题的数学表达式为：

$$\min F(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)\} \tag{1}$$

$$g_i(x)g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m \tag{2}$$

$$h_i(x)=0, j=1,2,\cdots,p$$

(3)

式中， $F(x)$ 为目标函数向量， $g_i(x)$ 为不等式约束， $h_i(x)$ 为等式约束。若不存在 $x'\in X$ (X 为可行域)，使得对所有 $k=1,2,\cdots,n$ ，有 $f_k(x')\leq f_k(x^*)$ ，且至少存在一个 k 使得 $f_k(x')\leq f_k(x^*)$ ，则 x^* 为帕累托最优解[11] [12]。

3.2. 要因分析

(1) 末端因素识别

基于工人作业水平、机械设备、原材料、施工方法、施工场地等五要素(简称为人、机、料、法、环)，绘制原因分析关联图，见图 3，识别出 7 条末端因素：培训不到位、奖罚制度不健全、技术交底不齐全、水泥质量不合格、桩身水泥用量不足、机械设备性能差、作业面环境差。

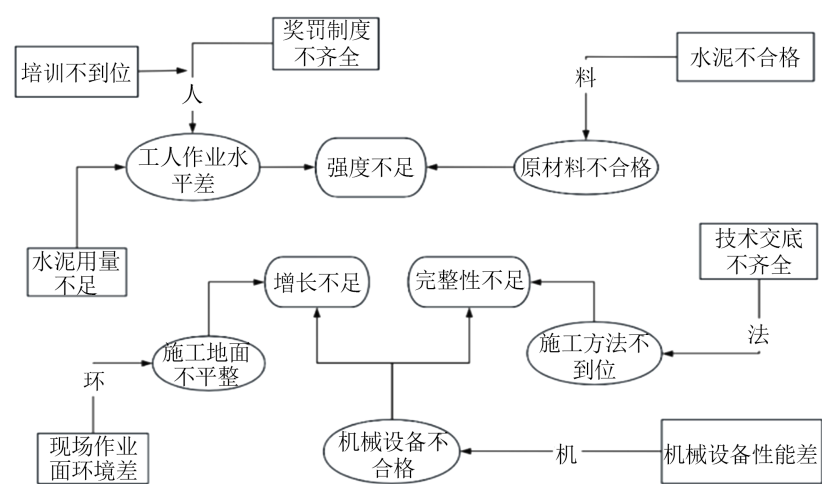


Figure 3. Correlation diagram for cause analysis
图 3. 原因分析关联图

(2) 因果关联要因验证

① 定性分析

制定水泥搅拌桩施工质量影响要因分析确认表，通过现场调查、测试、资料查阅等方式逐项验证，结果见表 3。

Table 3. Verification table for key-cause analysis
表 3. 要因分析验证表

末端因素	验证情况	确认主要原因
培训不到位	工人岗前培训率 90%，技能考核合格率 100%，培训记录齐全	非要因
奖罚制度不健全	已制定奖罚制度，但未及时考核	非要因
技术交底不齐全	技术交底资料完整，工人未严格按交底施工	非要因
水泥质量不合格	水泥进场检验报告均合格，强度等级符合设计要求	非要因
桩身水泥用量不足	现场抽查 5 处水灰比，实测输浆量均低于设计值(90 kg/m)，分别为 81.2、80.54、80.57、80.6、80.62 kg/m	要因
机械设备性能差	部分搅拌桩设备无自动记录仪，无法准确记录桩长、输浆量等参数	要因
作业面环境差	部分施工场地不平整，导致机身不正，影响施工精度	要因

由表 3 可知，桩身水泥用量不足、机械设备性能差、作业面环境差为影响水泥搅拌桩施工质量的三大主要要因。

② 量化分析

现有水泥搅拌桩施工质量影响因素分析关联图(图 3)仅体现影响因素间的定性关系，通过量化评分可以明确各因素对核心质量问题的影响权重，核心问题权重基于表 1 不合格率占比设定，设计的“因素 - 问题”关联强度矩阵见表 4。表 4 中关联强度是指末端因素对质量问题的影响程度，按“无关联(1 分)、弱关联(2 分)、中等关联(3 分)、强关联(4 分)、极强关联(5 分)”划分。

Table 4. Table of correlation strength between terminal factors and core quality problems
表 4. 末端因素与核心质量问题关联强度关系表

末端因素	桩长不足 (权重 30%)	桩身强度不足 (权重 40%)	桩身完整性差 (权重 30%)	综合关联度 (加权求和)	关联等级
操作人员培训不到位	2 分	2 分	3 分	2.3 分	中等关联
质量奖罚制度不健全	1 分	2 分	2 分	1.7 分	弱关联
施工技术交底不齐全	3 分	3 分	4 分	3.3 分	强关联
桩身水泥用量不足	4 分	5 分	4 分	4.4 分	极强关联
机械设备性能差	5 分	4 分	5 分	4.6 分	极强关联
作业面环境差	5 分	3 分	4 分	3.9 分	强关联
水泥原材料质量不合格	1 分	5 分	3 分	3.2 分	强关联

注：关联等级评分为：0~1 分 = 无关联，1~2 分 = 弱关联，2~3 分 = 中等关联，3~4 分 = 强关联，4~5 分 = 极强关联。

由表 4 可知，“机械设备性能差”“桩身水泥用量不足”“作业面环境差”的综合关联度较高，“机械设备性能差”“桩身水泥用量不足”达到了极强关联要因判定标准 > 4.0 分，且验证数据超标幅度 ≥ 10%，同时符合“无法通过简单整改消除”的特性。“作业面环境差”是强关联中评分最高项，达到了 3.9 分。表 4 关系表进一步验证了桩身水泥用量不足、机械设备性能差、作业面环境差为影响水泥搅拌桩施工质量的三大主要要因。

3.3. 多目标优化模型构建

针对水泥搅拌桩施工质量优化，以“提升质量、控制成本、保障工期”为核心，设定三大目标函数。即① 质量目标(f_1)：最大化一次合格率，目标值 ≥ 97%；② 经济目标(f_2)：最小化额外成本投入，成本增幅 ≤ 5%；③ 时间目标(f_3)：最小化对策实施周期，工期延误 ≤ 3 天。将桩身水泥用量、机械设备性能、作业面环境等三大要因的质量、经济、时间作为变量。

设定的约束条件有：① 对策需符合《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2012)[13]；② 施工设备、材料、人力等资源满足现场需求；③ 对策实施过程需保障施工安全，无安全隐患。

水泥搅拌桩施工质量优化问题各参数取值范围见表 5。

3.4. 帕累托最优解确定

针对三大要因，每项提出 2 种候选对策，共 6 种对策，从成本增幅、实施周期、质量提升预期三方面考虑，转化为经济性、时间性、可行性进行打分(1~5 分)评价，见表 6。经济性、时间性、可行性得分越高，表明该目标表现越优。

Table 5. Parameter setting for construction quality optimization of cement mixing piles
表 5. 水泥搅拌桩施工质量优化参数设置

项目		取值范围
约束	一次合格率/%	[97, 100]
	质量/%	[97, 100]
自变量	经济/%	[0, 5]
	时间/天	[0, 3]
目标	提升质量、控制成本、保障工期	

Table 6. Candidate countermeasures and evaluation indices
表 6. 候选对策及评价指标

要因	候选对策	成本增幅 /%	实施周期 /天	质量提升预期 /%	时间性	可行性
桩身水泥用量不足	1. 调整水灰比	8.5	2	4.0	5	3
	2. 控制提升速度	3.2	3	4.5	4	5
机械设备性能差	3. 更换设备	7.6	4	3.8	4	4
	4. 增加全自动记录仪	2.8	2	4.2	5	4
作业面环境差	5. 软弱地基换填	4.1	3	3.5	3	4
	6. 加铺土方	3.8	2	2.8	4	3

(1) 筛选规则制定

结合帕累托最优解理论，制定“劣解排除→非劣解识别→最优解确定”三步筛选规则。① 劣解排除规则。若对策 A 在可行性、经济性、时间性三项指标中，每一项得分均 $\leq$ 对策 B，且至少有一项得分 $<$ 对策 B，则 A 为劣解，予以排除。② 非劣解识别规则。剩余对策中，若不存在任何其他对策能在所有指标上优于该对策，则该对策为非劣解，构成帕累托前沿；③ 最优解确定规则。按照经济性 $>$ 时间性 $>$ 可行性，综合项目优先级，对非劣解进行加权评分，其中，经济性、时间性、可行性的权重分别为 0.4、0.3、0.3，得分最高者为最优解。

(2) 逐对对比排除劣解

基于表 6 数据，对 6 项候选对策进行逐对对比分析。① “桩身水泥用量不足”对策对比得到非劣解集合：{对策 1，对策 2}。② “机械设备性能差”对策对比得到非劣解集合：{对策 4}。③ “作业面环境差”对策对比得到非劣解集合：{对策 5，对策 6}。

(3) 确定最优解

① 帕累托前沿构成

经上述对比，剩余非劣解为对策 1、对策 2、对策 4、对策 5、对策 6；各项非劣解加权评分计算结果为：对策 1 为 3.6 分、对策 2 为 4.3 分、对策 4 为 4.7 分、对策 5 为 3.6 分、对策 6 为 3.3 分。

② 最优解确定

对策 4 加权得分最高(4.7 分)，对策 2 次之(4.3 分)，对策 5 最低(3.6 分)，结合水泥搅拌桩施工质量优化参数，最终确定控制提升速度、增加全自动记录仪为核心最优对策，同步保留软弱地基换填作为辅助对策，用于解决作业面环境问题。

3.5. 最优对策实施

(1) 控制提升速度

搅拌桩机原提升速度为 1.2~1.5 m/min，在搅拌桩机上加装速度传感器来实时监测提升速度，当速度

超出阈值时自动报警。经现场试验，加装速度传感器后最优提升速度应控制在 0.8~1.0 m/min，可确保水泥浆与软土充分搅拌，喷浆均匀。

(2) 增加全自动记录仪

每台搅拌桩机均安装全自动记录仪，与喷浆泵、深度传感器联动，确保数据同步采集，调试误差 $\leq \pm 2\%$ 。选用具备桩长、输浆量、提升速度、成桩时间四项参数记录功能的 JCD-2000 智能记录仪，数据存储容量 ≥ 16 GB，支持实时传输。

(3) 软弱地基换填

采用含泥量 $\leq 3\%$ 级配的砂石作为换填材料，压实系数 ≥ 0.95 ；分层换填时，每层厚度为 30 cm，采用振动压路机碾压，碾压次数达到 3~5 遍，压实度检测合格后方可进行下一层施工。

4. 优化效果验证

采用与施工前相同的随机分段抽样方法，选取 80 个检测点，其中水泥搅拌桩长度、桩身水泥土强度、桩身完整性、其他各 20 个检测点，通过钻芯取样、低应变检测等方式进行质量检测，统计不合格点数及合格率。检测结果见表 7，并与施工前数据(表 1)形成对比。

Table 7. Inspection table for cement mixing pile construction quality after adopting optimal countermeasures
表 7. 最优对策实施后水泥搅拌桩施工质量检测表

序号	检查项目	检查点数 /处	不合格点数 /处	不合格率 /%	施工前不合格率 /%	下降幅度 /%
1	水泥搅拌桩长度	20	0	0	20	100
2	桩身水泥土强度	20	1	5	25	80
3	桩身完整性	20	0	0	25	100
4	其他	20	1	5	5	0
合计	-	80	2	2.5	75	96.7

由表 7 可知，最优对策实施后施工质量累计不合格率从 75%降至 2.5%，下降幅度达 96.7%；一次合格率计算为 97.5%。

最优对策实施后的一次合格率超出目标值 0.5%，三个主要影响水泥搅拌桩施工质量的因素水泥搅拌桩长度不足、桩身水泥土强度不足和桩身不完整在质量问题中的比重明显下降，水泥搅拌桩的施工质量得到了极大的改善，实现了质量优化目标，实施效果见图 4。



Figure 4. Core-drilling photograph of cement mixing pile after implementation of optimal countermeasures
图 4. 最优对策实施后水泥搅拌桩取芯图

项目组分别于 2022 年 11 月 15 日、11 月 20 日、12 月 10 日对水泥搅拌桩施工质量进行复查，结果见表 8。

Table 8. Quality inspection table of cement mixing piles in consolidation period
表 8. 巩固期水泥搅拌桩质量检测表

检测时间	检查点数 /处	合格点数 /处	不合格点数 /处	合格率 /%	备注
11 月 15 日	80	79	1	99	无核心质量问题
11 月 20 日	80	78	2	98	1 处为桩位偏差，非核心问题
12 月 10 日	80	80	0	100	无任何质量问题

由表 8 可知，桩长不足问题完全解决，不合格率从 20%降至 0%；桩身完整性问题完全解决，不合格率从 25%降至 0%；桩身强度不足问题显著改善，不合格率从 25%降至 5%；三大核心问题累计不合格率从 70%降至 5%，改善效果显著。从复检结果来看，现场班组均能按照对策有效执行，巩固期水泥搅拌桩施工一次合格率均能达到 98%以上，最高达 100%，且未出现桩长不足、桩身强度不够等核心质量问题，验证了最优对策的长期有效性与稳定性。

5. 结论

(1) 结合现场统计开展帕累托分析，确定桩长不足、桩身强度不足、桩身完整性差为水泥搅拌桩核心质量问题，三者累计不合格权重达 93.33%。区别于经验层面主观罗列缺陷，本研究依据不合格占比完成问题定量排序，锁定质量管控重点，为对策制定提供数据支撑。

(2) 从人 - 机 - 料 - 法 - 环五个方面梳理末端影响因素，结合现场核查与关联强度量化评价，剔除 5 项非关键因素，明确桩身水泥用量不足、设备性能差、作业面环境差三大主要要因。相比传统经验化因果推断，采用现场验证与加权打分的组合方式，降低主观误判，客观甄别关键影响条件。

(3) 采用帕累托最优解算法针对可行性、经济性、时间性开展多目标寻优，经劣解剔除、非劣解识别及项目优先级加权，确定控制提升速度、增设全自动记录仪作为主要管控对策。常规现场整改常片面追求质量，易带来成本、工期失控；该算法可在多重约束下完成方案比选，兼顾综合效益。经工程应用，搅拌桩一次合格率由 92%提高至 97.5%，超出预设目标 0.5%，巩固期质量稳定，验证了该方法优于纯经验决策的实际工程价值。

(4) 本研究仅基于广州南沙淤泥质软土工程开展了工程验证，候选对策、成本、工期、质量提升预期等参数均来源于项目现场统计，尚未在泥炭土、冲填土、砂层夹层等复杂地质条件下校验。仅考虑水泥用量、设备性能、作业面环境三类主要因素，未纳入地层局部突变、人员操作波动、极端气象等随机扰动。后续可收集多区域、多地质工况的工程数据，完成模型校准与外部验证，并将该多目标优化思路推广至高压旋喷桩、CFG 桩等地基处理工艺的质量优化。

参考文献

[1] 裘友强, 张留俊, 刘洋, 等. “双碳”背景下公路软土地基处理技术研究进展[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(1): 113-131.

[2] 余盈. 水泥搅拌桩处理地基施工质量控制[J]. 建设机械技术与管理, 2025, 38(6): 153-155.

[3] 林文. 沿海软基水泥搅拌桩施工优化研究[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(21): 64-66.

[4] 叶亚平, 魏逸龙, 裘友强, 等. 基于 AHP-模糊综合评价法的水泥搅拌桩质量评价与应用[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S1): 329-336.

-
- [5] 肖少文, 王红军, 汤明生, 等. 软土地基中水泥土复合桩承载特性影响因素研究[J/OL]. 工业建筑: 1-13. <https://link.cnki.net/urlid/11.2068.TU.20251226.1602.008>, 2025-12-29.
- [6] 陈祎, 王骁帆. 水泥搅拌桩施工信息化管控技术研究[J]. 公路, 2024, 69(10): 37-44.
- [7] 尹忠辉. 水泥搅拌桩施工参数间相关关系研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(S2): 172-179.
- [8] 徐玉萍, 周金赛, 张津杭, 等. 基于帕累托最优效率模型的轨道交通沿线公交线路运行效率评价[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(22): 9569-9576.
- [9] 高小永, 周峻峰, 刘定智, 等. 基于权重估计与混合多标准决策的帕累托最优解筛选[J]. 化工自动化及仪表, 2024, 51(5): 854-863.
- [10] 王人龙, 申芮, 池宏, 等. 考虑帕累托最优识别的偏序优先多属性决策方法[J]. 中国管理科学, 2025, 33(12): 121-133.
- [11] 张波, 徐黎明, 黄志伟, 等. 梯度策略的多目标 GANs 帕累托最优解算法[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(9): 89-95.
- [12] 郑宝敏, 余涛, 瞿凯平, 等. 多区域并行协同的多目标分布式帕累托最优潮流算法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 93-101.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 79-2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.