

考虑轨道交通下穿施工影响的桩板结构施工参数优化算法

Optimization Algorithm for Construction Parameters of Pile Slab Structure Considering the Influence of Rail Transit Underpass Construction

胡增辉¹, 韩三琪¹, 龚贤江²

- 宁波市轨道交通集团有限公司建设分公司, 浙江 宁波 315101;
- 宁波国际投资咨询有限公司, 浙江 宁波 315040)

摘要: 桩板结构施工受到轨道交通下穿施工扰动影响, 出现桩身变形、盖板竖向变形问题, 导致算法泛化能力差的问题。充分考虑轨道交通下穿施工影响, 通过多目标优化桩板结构施工参数使其符合实际施工需求。以某地铁1号线实际工程为依托, 利用有限元法建立施工模型, 模拟动态开挖过程。建立GA-LSSVM与NSGA-II算法相结合的多目标优化函数, 以桩板结构施工参数为研究对象, 对轨道交通下穿施工造成的桩身变形、盖板竖向变形为控制目标, 进行施工参数优化分析。通过获取非支配Pareto前沿解集, 得到桩板结构施工参数控制范围值。由模型验证结果可知, 该算法最大桩身变形为0.8 mm、最大盖板竖向变形为2.1 mm能够使变形量得到有效降低, 保证结构变形趋于稳定。

关键词: 轨道交通; 下穿施工; 桩板结构; 施工参数优化

中图分类号: U459.3 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2023) 05-0126-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.05.020

HU Zenghui¹, HAN Sanqi¹, Gong Xianjiang²

- Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Construction Branch, Ningbo 315101, China;
- Ningbo International Investment Consulting Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

Abstract: The construction of pile plate structure is disturbed by the underpass construction of rail transit, which leads to the problems of pile body deformation and vertical deformation of cover plate, resulting in poor generalization ability of the algorithm. Fully considering the impact of rail transit underpass construction, the construction parameters of pile slab structure are optimized through multi-objective to meet the actual construction requirements. Based on the actual project of a metro line 1, the construction model is established by using the finite element method to simulate the dynamic excavation process. A multi-objective optimization function combining GA-LSSVM and NSGA II algorithm is established. Taking the construction parameters of pile slab structure as the research object, the construction parameters are optimized and analyzed for the control objectives of the pile body deformation and the vertical deformation of cover plate caused by the underpass construction of rail transit. By obtaining the non dominated Pareto frontier solution set, the control range values of the construction parameters of the pile plate structure are obtained. From the model verification results, it can be seen that the maximum pile shaft deformation of the algorithm is 0.8mm, and the maximum vertical deformation of the cover plate is 2.1mm, which can effectively reduce the deformation and ensure that the structural deformation tends to be stable.

Keywords: rail transit; undercrossing construction; pile plate structure; optimization of construction parameters

0 引言

在桩板结构施工过程中，特别是在软黏土层进行浅埋深的情况下，桩板式结构具有较好的保护效果，并能承担较大的上部载荷，因此在地铁工程中得到了广泛的使用。如果设计中的参数不合适，则会导致大量的物料损耗，增加工程难度；如果体积太大，则无法有效地抑制轨道交通下穿施工的干扰，也无法承载顶部的荷载。研究轨道交通下穿施工对上部承台的干扰机理，并在此基础上进行了桩板结构施工优化设计，从而使其在实际应用中得到充分的应用。针对单桩的施工干扰问题，文献 [1] 通过 FLAC 软件建立数值模型，分析了侧向支护结构对桩身的承载量和位移的影响。该方法受到风险结构影响，致使施工参数不具有合理性；文献 [2] 采用有限元方法，采用三维数值模拟方法，比较了在不同桩长情况下，对桩基变形和桩体变形的作用进行了研究。该方法缺少对整个施工过程的模拟，导致施工参数控制范围不合理。国内外已有相关的研究成果，但尚无关于轨道交通下穿施工对整个结构的影响。目前对浅埋区软粘土地基上的动力作用下的桩板的受力和位移进行了研究，但对各种大小的桩板在轨道交通下穿施工的干扰作用下的反应仍有待深入研究。结合具体项目，运用有限元软件对实际工程中轨道交通下穿施工情况进行了细致地研究，并对其进行了实地分析，以供类似项目借鉴。为此，提出了考虑轨道交通下穿施工影响的桩板结构施工参数优化算法，结合 GA-LSSVM 与 NSGA-II 算法，构建多目标优化函数，优化施工参数。

1 桩板结构施工工程概况

以某地铁 1 号线实际工程为依托，该线路是外环快线，车站与车站之间的距离大约为 100 m，地面的覆盖层只有 6 m，而地面则有一个水塘。为了确保轨道交通下穿施工的安全，又能隔绝地下

工程的后期地面蓄水位对工程的不利影响，必须在此地段预先设置桩式。在此部分，其上覆有粉质泥和中厚砂粒，而在下层则是一种强的风化花岗岩^[3]。桩板结构为现浇形式，在基坑顶部分别进行了桩体和顶盖的灌浆，其构造见图 1。

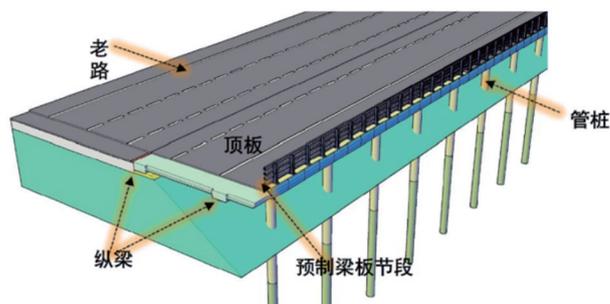


图 1 桩板结构

Fig. 1 Pile Sheet Structure

由图 1 可知，桩身的长度为 8 m，桩径为 1 m，横隔 16 m，纵隔 5 m。箱体厚度 0.6 m，灌注桩为一体，在桩基础上设置了 1.1 m 的覆盖层，并进行了夯实^[4]。

2 有限元模型构建

为了明确轨道交通下穿左、右线施工过程中各个阶段对桩板结构的干扰，采用 Plaxis 3D 构建有限元模型，并对施工过程中桩板结构变形进行了数值模拟分析。

2.1 模型建立

考虑模型边界尺度效应作用下，x 轴沿着正轨，y 轴沿着联络线方向，z 轴为轨道交通的垂直方向，在此基础上构建一个有限元模型，如图 2 所示。

在该模式基础上，采用了一个全静力的限制条件，并在横向上加了一个垂直滑移限制^[5]。在已有管线和路基下方 CFG（水泥、粉煤灰）桩的基础上，用固体单元进行数值仿真，并以坚硬土壤为材料；以物理单元为仿真对象，以线性弹塑性建模为主；轨道结构是以梁元为基础，以钢丝弹性为主要原材料的^[6-8]。

施工技术

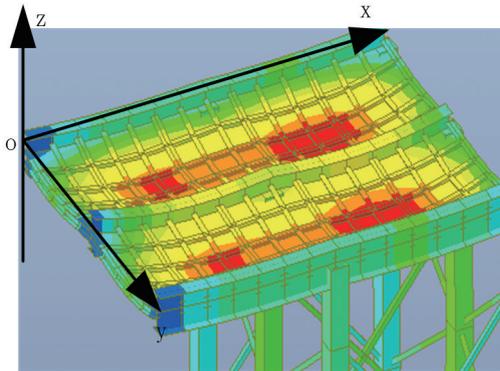


图2 有限元模型
Fig.2 Finite element model

2.2 动态开挖过程模拟

利用 Plaxis 3D 有限元软件, 可以根据工程的实际情况启动和冻结有关的单位进行逐级运算, 从而达到对整个工程仿真^[9]。在该模型中, 模拟了全施工动态开挖过程, 如下所示:

(1) 通过构建 3D 岩土模型, 利用 Pile、Liner 元素对桩板构造进行仿真, 并激活对应的材料特性, 使其得到的模型体系位移场为 0。

(2) 沿着工程建设方位挖掘空间赋予 shell 单元, 用于仿真, 并对挖掘表面施以刀盘顶部的推动力^[10]。

(3) 本项目在施工中, 采取一次以管片振幅为一次进尺, 沿该项目的轴线进行掘进。每次开挖时, 对新开挖的顶部进行推进器和拆除上一次的掘进, 将新开挖空间中布置 Shell 仿真单元, 以仿真盾体推进, 去掉相应长度盾壳体, 并根据该段厚度确定相应注浆和分层赋值^[11-12]。

(4) 分段开挖直至工程完工。

3 基于 GA-LSSVM 与 NSGA-II 算法的参数多目标优化

构造了基于 GA-LSSVM 和 NSGA-II 的多目标优化函数, 利用 G 改进 LSSVM 模型实现参数的优化。设置不同工况, 对轨道交通下穿施工造成的桩身变形、盖板竖向变形为控制目标。在 NSGA-II 中, 利用 NSGA-II 方法, 利用无优势 Pareto 前沿解集合来实现对两个控制对象的最小化, 并根据不同的数据区间进行多个目标的优选。

3.1 多目标函数建立

采用基于 NSGA-II 的无优势排序的精英策略, 对已建桩的施工工艺进行了多目标优化。以桩身变形和盖板竖向变形为目标, 通过以下公式求出相应的最优模型。桩板结构桩身变形目标函数, 可表示为:

$$f(x) = \min \lambda_1 (ga - lssvm(a_1, a_2, a_3)) \quad (1)$$

公式 (1) 中, a_1, a_2, a_3 分别表示土舱压力、泡沫量、注浆量; λ_1 表示桩身变形回归函数; ga 、 $lssvm$ 表示利用 ga 算法对 $lssvm$ 参数进行优化^[13]。

桩板结构盖板竖向变形目标函数, 可表示为:

$$f(x) = \min \lambda_2 (ga - lssvm(a_4, a_5, a_6)) \quad (2)$$

公式 (2) 中, a_4, a_5, a_6 分别表示掘进速度、刀盘扭矩及顶推力; λ_2 表示盖板竖向变形回归函数。鉴于轨道交通下穿施工的特殊性, 以及各施工单位的特殊性, 使得各影响因素的范围难以通过有关的工程技术标准来决定, 所以将采集到的数据进行整理, 并以每个参量的极大和极小值作为其上、下界限^[14]。

3.2 工况设置

由于轨道交通下穿施工造成的桩身结构的变形影响较大, 因此, 正确选择合适的施工参数是确保基坑施工安全的关键。结合工程现场的桩板结构参数, 安排了三种结构施工工况, 如表 1 所示。

表 1 结构施工工况安排
Table 1 Structure construction condition arrangement /m

工况	1	2	3
桩长	10.0	15.0	20.0
桩径	0.8	1.0	1.2
桩间距	4.0	6.0	8.0
板厚	0.6	0.8	1.0

将表 1 工况作为参数, 分析桩身变形、盖板竖向变形。

3.3 对比分析

3.3.1 桩身变形

在这三种结构施工参数下, 分析桩身变形情况, 如图 3 所示。

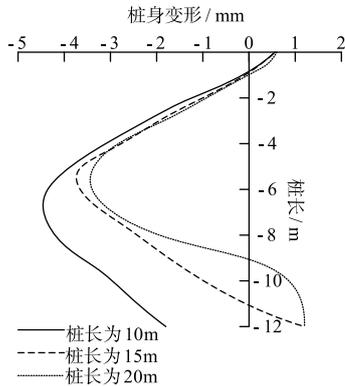


图3 桩身变形分析

Fig. 3 Deformation analysis of pile body

由图3可知,当桩长为10 m时,虽然桩距有所增加,但随着桩身长度的增加,桩身刚度增加,而在拱腰部位发生位移降低。在不影响桩长度、增加桩直径的前提下,可以提高桩的抗弹塑性,使其产生一定程度的变形,并能最大程度地沿桩侧移动。在桩长度为15 m的情况下,增大桩径和增大桩间距对桩体的抗拉强度影响不明显,而增大桩径和减小桩间距后桩体的抗拉强度则增大。在桩长20 m时,桩长、桩径和桩间距变化与桩长15 m的影响基本相同^[15]。通过以上分析发现,在保证桩板埋设深度基本相同情况下,相应的最大水平位移都发生在隧道拱腰位置,并且随桩长度的增加,其变形程度相应地减少。

3.3.2 盖板竖向变形

在这三种结构施工参数下,分析盖板竖向变形情况,如图4所示。

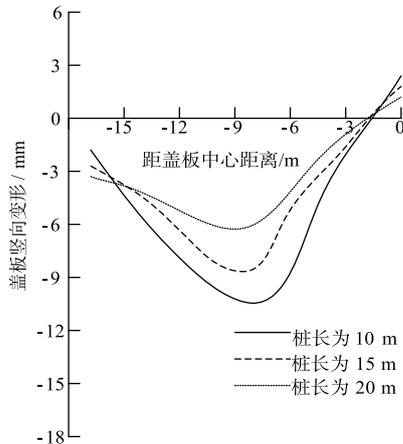


图4 盖板竖向变形分析

Fig. 4 Vertical deformation analysis of cover plate

由图4可知,当桩长为10 m时,盖板竖向降值最大值在11.0 mm~11.5 mm之间;当桩长为15 m时,盖板竖向降值最大值在8.5 mm~9.0 mm之间;当桩长为20 m时,盖板竖向降值最大值在6.0 mm~6.5 mm之间。由此可知,采用长桩可以最大限度地利用桩体的底部侧摩擦系数,降低桩顶的沉陷,从而使承台的承载力得到提高,降低了承台的垂直变形。根据轨道交通下穿施工已有隧洞工程的具体情况,根据工程监理资料从技术上及可操作性等方面,选取了工程实例中的最优设计参数区间,得到了相应的范围控制建议值。

3.4 桩板结构施工参数多目标优化

在得到最优设计指标后,利用NSGA-II算法进行多个目标的优选,得到无优势Pareto边界点。通过寻找最优LSSVM回归模型参数,能够获取全局最优解。采用最小二乘SVM作为求解方法,计算函数损耗程度,可表示为:

$$y_i [\omega^T \varepsilon(x) + b] = 1 - e_i \quad (3)$$

公式(3)中, ω 表示损耗权重; e_i 表示*i*个损耗变量; $\varepsilon(x)$ 表示经过非线性映射构建的函数; b 表示常数; y 表示样本种类。将不等式转化成方程式限制,LSSVM的最优问题可以按照最小化原理来表达:

$$\min R(\omega, e) = \frac{1}{2} \omega^T \omega + \frac{1}{2} \varphi \sum_{i=1}^N e_i \quad (4)$$

公式(4)中, φ 表示惩罚系数; N 表示样本总数。在LSSVM最优问题上,Lagrange的功能可以如下:

$$L(\omega, b, e, a) = \frac{1}{2} \omega^T \omega + \frac{1}{2} \varphi \sum_{i=1}^N e_i - \sum_{i=1}^N a_i \{ y_i [\omega^T \varepsilon(x) + b] - 1 + e_i \} \quad (5)$$

公式(5)中, a 表示Lagrange乘子。利用Mercer条件,可得到最优回归函数,可表示为:

$$h(x) = \sum_{i=1}^N a_i y_i \mu(x_i) + b \quad (6)$$

公式(6)中, $\mu(x_i)$ 表示经过Mercer条件得到的非线性映射结果。采用遗传算法进行LSSVM的参数优选,具体过程如下:设计适当的初始化

施工技术

运算步骤,也就是初始化群体中 N 个个体。通过对最优指标进行求解,得到了各个体适应度。根据该条件,设定了群体最大迭代次数 200 次,经过个体的筛选,使杂交几率为 0.9,突变几率为 0.1。在达到最大迭代数之前,将循环流程进行一个周期直至达到最大迭代次数。

利用 NSGA-II 算法所得的最优解并非单一,若要实现两种最优的组合,则需要进行更多的决策。在 Pareto 边界的求解中,一般采用最优的方法,并根据拥挤度对群体进行升序排列,将第一个和最后一个拥挤间距设定为无限大,第 i 个解的拥挤距离计算公式为:

$$\eta = \sum_{i=1}^M \frac{d_i(i+1) - d_i(i-1)}{d_i^{\max} - d_i^{\min}} \quad (7)$$

公式 (7) 中, M 表示目标个数; d_i^{\max} 、 d_i^{\min} 分别表示函数最大和最小值。

在两个目标都是最小值的情况下,得到了一个理想点 $E(1.02, 5.75)$, 并求出 Pareto 最佳解距与理想的距离,也就是求出该最佳点的表达式,从而得到两个目标的最佳数值。

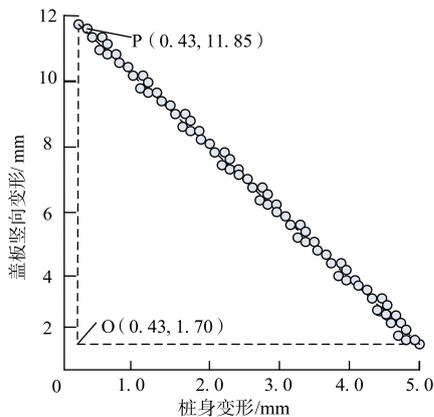


图 5 理想点及最优解结果
Fig. 5 Ideal point and optimal solution result

由图 5 可知,从最优点法求取最短 P 点的坐标值是 (0.43, 11.85),表示此时轨道交通下穿施工影响的桩板结构桩身变形为 0.43 mm,盖板竖向变形为 11.85 mm,相较于原始数据样本桩身变形、盖板竖向变形都有了明显的改善。

针对考虑轨道交通下穿施工影响实际情况,

结合监测信息反馈结果,以 Pareto 前沿优化所得的参数范围为参考,设计桩板结构施工参数控制范围值,如表 2 所示。

表 2 桩板结构施工参数控制范围值
Table 2 Control range of construction parameters of pile and sheet structure

参数	数值范围
刀盘扭矩	1150~1450kN·m
泡沫量	13~15m ³
土仓压力	230~250kPa
总推力	3100~3750kN
掘进速度	7~14mm/min

利用 NSGA-II 算法对参数优化后,可实现桩板结构桩身变形、盖板竖向变形最小化。从而可根据工程实际情况,确定合理的参数控制区间,控制既有桩板结构桩身变形、盖板竖向变形。

4 模型验证

为了验证数值模型的正确性,在某地铁 1 号线站一站区间采集现场施工参数,根据相应采集结果,选择相应的目标和盖板沉陷试验段设置测点,以测斜法测定桩身受力变形和盖板竖向变形。桩板结构现场施工,如图 6 所示。



图 6 桩板结构施工现场
Fig. 6 Piled slab structure construction site

在桩板结构现场,分别使用通过 FLAC 软件建立数值模型、通过有限元分析优化参数和基于 GA-LSSVM 与 NSGA-II 优化算法优化参数后,对比分析桩身变形、盖板竖向变形,对比结果如图 7 所示。

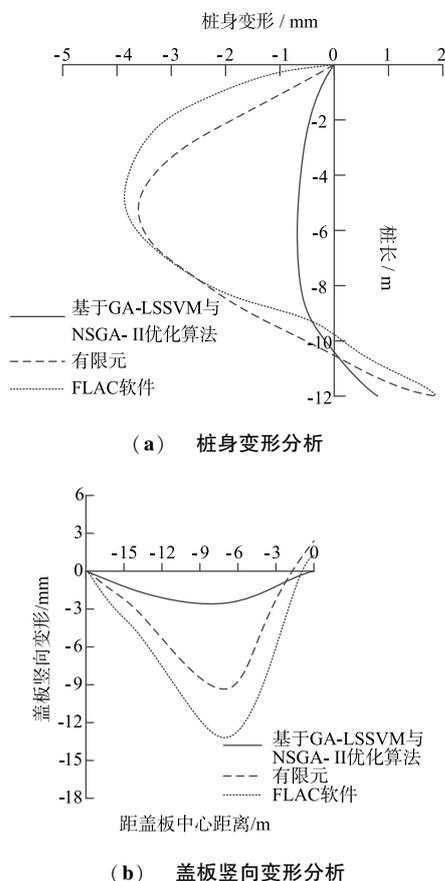


图7 不同方法变形结果分析

Fig. 7 Analysis of deformation results of different methods

由图7(a)可知,使用通过FLAC软件建立数值模型、通过有限元分析优化参数最大桩身变形分别为3.9 mm、3.6 mm,使用基于GA-LSSVM与NSGA-II优化算法最大桩身变形为0.8 mm。

由图7(b)可知,使用通过FLAC软件建立数值模型、通过有限元分析优化参数最大盖板竖向变形分别为13.5 mm、9.2 mm,使用基于GA-LSSVM与NSGA-II优化算法最大盖板竖向变形为2.1 mm。

通过上述验证结果可知,使用基于GA-LSSVM与NSGA-II优化算法桩身变形、盖板竖向变形程度较小,说明使用该优化算法能够使变形量得到有效降低,保证结构变形趋于稳定。

5 结束语

提出了一种考虑轨道交通下穿施工影响的桩板结构施工参数优化算法,结合GA-LSSVM与

NSGA-II算法,不仅实现了桩身变形、盖板竖向变形高效控制,而且通过引入多个优化目标,结合数据范围可获取施工参数组合,并得到如下结论:

(1) 通过构建有限元模型,模拟动态开挖过程,可保证各个施工步骤按照既有结构变形控制符合规范要求;

(2) 将GA-LSSVM和NSGA-II方法结合起来,构造了一个多目标最优解的方法,以桩身变形、盖板竖向变形为控制目标,结合工程项目实际情况,得到施工参数最优值;

(3) 利用NSGA-II算法确定施工参数合理控制范围,方便随时调整参数组合,控制既有桩身变形、盖板竖向变形,证明了该算法在参数优化过程的实用性和可靠性。

参考文献

- [1] 陆锦涛,褚洪涛,林卫星,等.基于FLAC 3D数值模拟的底部结构稳定性研究[J].矿业研究与开发,2020,40(4):19-23.
- [2] 黄戩,孙逸玮,杨伟军,等.基于渗流应力耦合的盾构隧道开挖对邻近桥梁桩基的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(3):983-993.
- [3] 王海峰.轨道交通桩板结构施工对临近既有有线影响的数值模拟[J].城市轨道交通研究,2022,25(3):36-41.
- [4] 刘晶磊,赵倩,梅名彰,等.轨道交通荷载下桩板结构主动隔振效果研究[J].地震工程学报,2020,42(1):7-14.
- [5] 李明.岩溶地区地铁盾构隧道下穿既有建筑物施工控制技术[J].城市轨道交通研究,2021,24(6):104-108.
- [6] 翟莹莹,左丽,张恩德.基于参数优化的RBF神经网络结构设计算法[J].东北大学学报(自然科学版),2020,41(2):176-181+187.
- [7] 杨磊,朱富丽,张浩.地铁隧道侧穿桥梁桩基工程注浆加固控制及监测管理研究[J].城市轨道交通研究,2022,25(10):165-170.
- [8] 高太平,闫建龙,申健昊,等.四线隧道密贴下穿既有车站施工参数优化分析[J].铁道标准设计,2020,64(9):95-102.
- [9] 曾铁梅,王金峰,吴贤国,等.盾构下穿既有隧道位移控制施工参数多目标优化[J].铁道标准设计,2022,66(2):98-104.
- [10] 李明.岩溶地区地铁盾构隧道下穿既有建筑物施工控制技

施工技术

- 术 [J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24 (6): 104-108.
- [11] 廖凌军, 宁毅, 杨帅, 等. 软弱地层地铁盾构下穿既有高铁线路施工技术 [J]. 施工技术, 2020, 49 (19): 118-120.
- [12] 孙捷城, 周国锋, 路林海, 等. 济南地铁盾构隧道小曲线叠落下穿京沪高铁桥施工控制技术 [J]. 施工技术, 2020, 49 (1): 61-66.
- [13] 钟正强, 刘卓泽, 彭建新, 等. 基于粒子群算法的单壁钢围堰加固施工优化 [J]. 公路交通科技, 2022, 39 (7): 90-97.
- [14] 熊斌, 虞志钢, 马明, 等. 下穿上跨既有交通线路钢箱梁桥顶推施工 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (S1): 3138-3141.
- [15] 舒波, 饶仁强, 任建. 富水砂卵石地层盾构近距离下穿既有线施工技术 [J]. 施工技术 (中英文), 2022, 51 (7): 39-43.

欢迎订阅 2024 年《混凝土与水泥制品》杂志

(国内外公开发行 邮发代号: 28-80)

《混凝土与水泥制品》杂志是由苏州混凝土水泥制品研究院与中国混凝土与水泥制品协会 (CCPA) 共同主办的全国建筑科学类期刊、RCCSE 中国核心学术期刊。自1974 年创刊以来, 深受广大读者的欢迎。

《混凝土与水泥制品》杂志专业报道国内外混凝土与水泥制品行业的生产 (施工)、应用、科研、设计、教学及企业管理等方面的新成果、新技术、新产品和最新发展动态。辟有“专家论坛”“混凝土研究”“水泥混凝土制品”“纤维水泥及制品”“房建材料及制品”“节能降碳”“检测及试验方法研究”“施工技术研究”“标准解读”“技术装备”等栏目。

《混凝土与水泥制品》杂志为月刊。国内统一连续出版物号: CN32-1173/TU; 国际标准连续出版物号 ISSN 1000-4637。标准大 16 开, 每月 20 日出版, 全年 12 期, 每期定价 15 元, 全年定价 180 元 (含平邮邮费)。欢迎广大读者向各地邮局订阅, 也可扫码订购。另, 本刊承接各类广告业务, 线上、线下皆可, 欢迎来电。

地址: 江苏省苏州市三香路 718 号

电话: 0512-68285716 网址: www.sccpi.cn

E-mail: sccpitg@126.com 邮编: 215004



微信公众号



扫码订购杂志