doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.05.012

盾构隧道下穿风井同步近接施工对比研究

何永辉[1]，王春森[1]，申玉生[2]
（1. 广州地铁设计研究院股份有限公司，广东东莞 523123；2. 西南交通大学土木工程学院，成都 610031）

摘 要： 为解决轨道交通盾构隧道下穿中间风井工程的同步近接施工技术难点，以东莞市 1 号线为例，分析盾构隧道和中间风井对施工时序的影响，提出造成影响小和经济效益高的施工方案。结合现场实际情况，提出 3 种施工方案，分别为盾构通过后再施工风井、风井底板施工完成后盾构再通过及风井主体施工完成后盾构再通过。通过数值模拟，分析不同施工方案对地表竖向位移、墙顶水平位移、墙顶竖向位移和支撑轴力等的影响，从造成影响和经济效益的角度确定最佳施工方案。最后，通过现场监测数据验证所选方案影响小和数值模拟可靠性。研究结果表明：风井主体施工完成后盾构再通过的地表沉降和结构变形最小，但工期较长；风井底板施工完成后盾构再通过和盾构通过后再施工风井的工期接近，但风井底板施工后盾构再通过的地表沉降和结构变形较小，经济效益高，是优选的施工方案。现场监测结果显示，监测数据均在控制范围内，所选施工方案安全可行，施工影响较小。现场实测数据与数值模拟结果吻合良好，理论研究结论可靠。研究结果对类似工程具有一定的参考价值。

关键词： 城市轨道交通；盾构隧道；风井；近接施工；数值模拟；现场监测
中图分类号： U231　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1672-6073(2025)05-0093-10

Comparative Study on Synchronous Close-Proximity Construction of a Shield Tunnel Underpassing a Ventilation Shaft

HE Yonghui[1], WANG Chunsen[1], SHEN Yusheng[2]
(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Dongguan, Guangdong 523123;
2. School of civil engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: To address the technical challenges of the synchronous close-proximity construction during the shield tunneling of Line 1 of the Dongguan Rail Transit in Guangdong Province, an analysis was conducted on the impact of the construction sequence of the shield tunnel and the intermediate ventilation shaft. A construction plan was proposed that would minimize impact and maximize economic benefits. Based on the actual site conditions, three construction plans were put forward: (1) involves constructing the ventilation shaft after the shield has passed through, (2) involves the shield passing through after the construction of the shaft's base slab is completed, (3) involves the shield passing through after the main construction of the shaft is completed. Through numerical simulation, the impact of different construction schemes on surface vertical displacement, wall-top horizontal displacement, wall-top vertical displacement, and support axial force was analyzed. From the perspective of impact and economic benefits, the optimal construction plan has been determined. Finally, the impact of the selected scheme

收稿日期：2025-01-02　修回日期：2025-04-17
第一作者：何永辉，男，硕士，工程师，从事轨道交通结构设计工作，1042740818@qq.com
通信作者：王春森，男，本科，正高级工程师，从事轨道交通线路规划、线路设计工作，wangchunsenmr@qq.com
基金项目：国家自然科学基金项目(52278414)
引用格式：何永辉，王春森，申玉生. 盾构隧道下穿风井同步近接施工对比研究[J]. 都市快轨交通，2025，38(5)：93-102.
HE Yonghui, WANG Chunsen, SHEN Yusheng. Comparative study on synchronous close-proximity construction of a shield tunnel underpassing a ventilation shaft[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(5): 93-102.

and the reliability of numerical simulation were verified through field monitoring data. The research results indicate that the surface settlement and structural deformation are minimal after the main construction of the air shaft is completed and the shield machine passes through, although the construction period is longer. After the completion of the air shaft base slab construction, the construction period for the shield machine to pass through again and for the air shaft construction to be carried out after the shield machine passes through are similar, but the surface settlement and structural deformation are smaller after the shield machine passes through again following the completion of the air shaft base slab construction. This option also has higher economic benefits and is the preferred construction plan. The results of on-site monitoring indicate that all monitoring data are within the controlled range, the selected construction plan is safe and feasible, and the impact of construction is minimal. The measured data were in good agreement with the numerical results, validating the reliability of the theoretical conclusions. The findings provide valuable reference for similar engineering projects.

Keywords: urban rail transit; shield tunnel; ventilation shaft; proximity construction; numerical simulation; field monitoring

随着城市地铁建设的快速发展，盾构隧道建设密度不断增加，各类盾构隧道施工中的近接影响问题日益凸显。研究盾构隧道施工对建筑物产生的变形及地面沉降影响，对于保障建筑物安全和制定科学、合理的施工方案具有重要意义[1-5]。

近年来，盾构施工的近接影响问题受到了大量学者的关注。范文昊等[6]研究了新建双线盾构隧道下穿既有隧道近接影响分区，并对近接影响范围进行量化，对不同影响分区提出针对性控制措施；宋锋[7]利用数值模拟的方法，以某地铁盾构隧道为依托工程，研究了隧道下穿不同施工顺序对托换结构的影响；黄懿等[8]利用有限元模型进行数值模拟，分析了砂卵石地层条件下基坑开挖、支护、盾构下穿风井不同施工阶段对地表沉降和邻近建筑物的内力变形影响，并提出了相应的地表沉降预测模型；刘勇等[9]采用相似几何模型，研究了不同埋深下盾构隧道下穿对高铁路基的沉降变形影响；魏义山等[10]采用数值模拟与施工监测相结合的方法，研究了盾构近距离下穿时对既有隧道预加固措施的加固效果进行了研究。可以看出，现有研究主要是针对既有已完工的隧道、路基、桥梁桩基等结构，研究其隧道下穿所造成的沉降变形影响并提出相应的控制措施。

与现有研究不同，本文依托工程(广东东莞市轨道交通 1 号线盾构隧道工程)涉及的盾构施工近接影响问题具有特殊性。该工程原设计 1 个中间风井，后续新增 1 座车站，作为 1 号线和 3 号线换乘站。确定加站前，原区间盾构隧道已经始发，且该区间风井已经开始施工。为避免该风井成为废弃工程，将其改造给同位置上部 3 号线使用，且 1 号线盾构隧道通过该风井时，距离风井结构底部仅 2.6 m。由于中间风井进度延后于隧道盾构掘进时间，导致施工进度不匹配，最终造成盾构隧道下穿风井时间节点与风井围护结构和主体施工时间节点基本上同期，当盾构隧道下穿风井位置时，风井围护结构连续墙已经施工完成，围护结构内支撑及主体结构仍在施工。其中盾构切削连续墙位置预留了玻璃纤维筋。因此，该工程建设必须解决盾构隧道和风井围护结构的同步近接施工问题。考虑到现有研究中对下穿临时改造且二者同步施工的中间风井的相关研究还相对欠缺，有必要进一步对此类问题开展针对性研究。

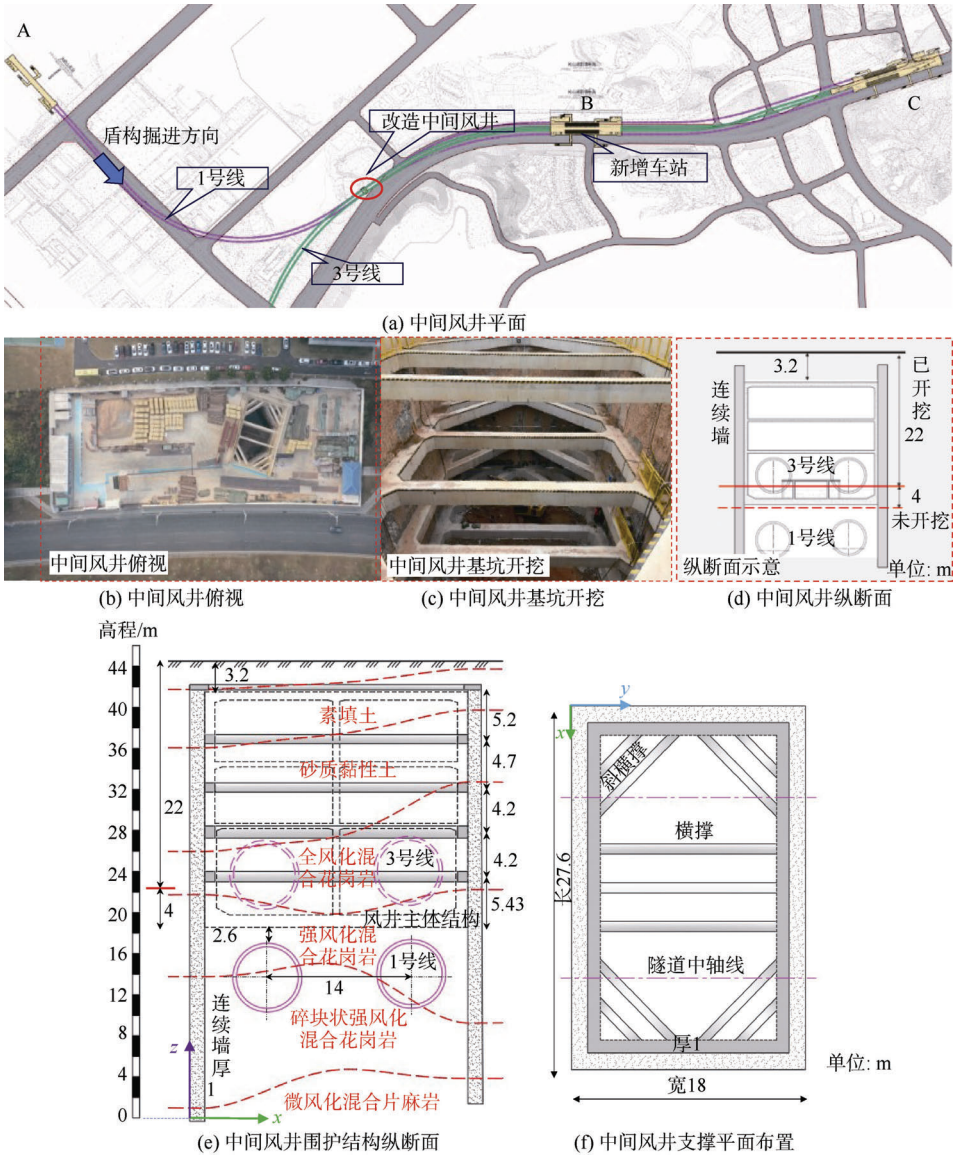
因此，本文采用数值模拟方法，分析风井和盾构隧道的不同施工时序对结构内力、结构变形、地表沉降等力学指标的影响，并考虑经济效益提出优选的施工方案，同时通过数值模拟对监测参数进行施工前的预测，确保所选方案安全可靠，施工影响小。最后，结合现场监测数据，将模拟结果与现场监测结果进行对比，对所选方案造成的影响和数值模拟研究的可靠性进行验证，证明数值模拟的预测结果较合理。所得结论能为类似工程建设提供参考。

1 工程概况

1.1 线路和中间风井概况

如图 1(a)所示，依托广东东莞市轨道交通 1 号线盾构隧道工程，该 1 号线在原线路 A、C 车站间新增 1 座车站 B，作为 1 号线和 3 号线的换乘车站。原设计 1 号线使用的中间风井位于 A、B 车站之间，改造给同位置 3 号线使用。

该中间风井设计原基坑深度 33 m，连续墙的嵌固深度约 5 m。改造后基坑深度调整为 26 m，使得 1 号线隧道顶部与基坑底部的垂直距离仅为 2.6 m，如图 1(b)所示。当 1 号线左线盾构隧道与中间风井的距离约为 66 m 时(左线盾构隧道先行，右线盾构隧道延后约 230 m)，基坑开挖至第 5 道支撑下方 0.5 m 处，开挖深度约为 22 m，并完成第 5 道支撑。根据改造方案，基坑应继续挖深 4 m，并完成风井主体结构。



(a) 中间风井平面　(b) 中间风井俯视　(c) 中间风井基坑开挖　(d) 中间风井纵断面

(e) 中间风井围护结构纵断面　(f) 中间风井支撑平面布置

图 1　线路和中间风井概况

Figure 1　Overview of the alignment and ventilation shaft

1.2　盾构下穿风井施工方案

考虑到 1 号线盾构下穿风井过程中，盾构顶部距离基坑底部的距离较小(仅 2.6 m)，制定施工方案时需要考虑 2 方面因素的影响：①安全性方面，下穿过程中的结构变形、地表沉降大小和基坑底部的稳定性等是否满足要求；②经济性方面，施工方案是否具备良好的时间效益。

为此，根据工程实际情况提出 3 种盾构下穿施工方案：①风井施工暂停，左、右线盾构先行下穿中间风井(工期约 30 d)，再完成风井主体结构施工；②左线盾构暂停，先施作完风井主体结构底板并封闭基坑，减小基坑暴露时间，然后左、右线盾构通过(工期约 36 d)，最后再施作风井主体结构；③左线盾构暂停，先施作完风井主体结构，左、右线盾构再通过(工期约 90 d)，如图 2 所示。

基于此，首先采用数值模拟方法对 3 种施工方案进行比选，分析并给出优选施工方案。然后，采用优选方案进行施工，结合现场监测数据对施工方案造成影响和数值模拟结果可靠性进行验证。

2　盾构下穿风井模型

2.1　数值模型

数值模拟软件采用了 FLAC3D。如图 3 所示，根据依托工程设计资料建立数值模型，模型的整体尺寸

长、宽和高分别为 150、100 和 64.5 m，模型宽度和长度大于基坑开挖宽度和长度的 5 倍，可消除边界效应的影响。在边界条件的设置上，模型底面约束 x、y、z 3 个方向的位移，模型顶面无约束，模型四周均约束法向位移。如图 3 所示。

模型的支撑、冠梁和腰梁等支护结构采用了 Beam 单元模拟。其余材料，如土体、地下连续墙、风井主体结构等结构采用 Brick 单元模拟。

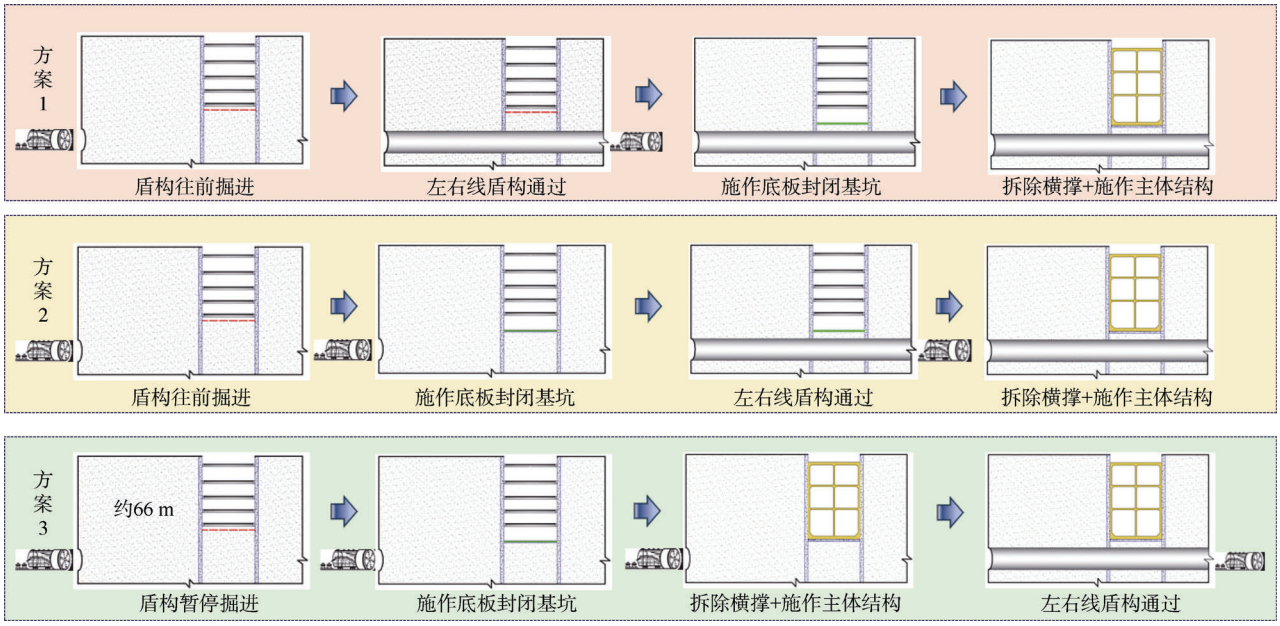


图 2　不同盾构下穿施工方案示意

Figure 2　Schematic of construction schemes for the shield tunnel underpassing the ventilation shaft

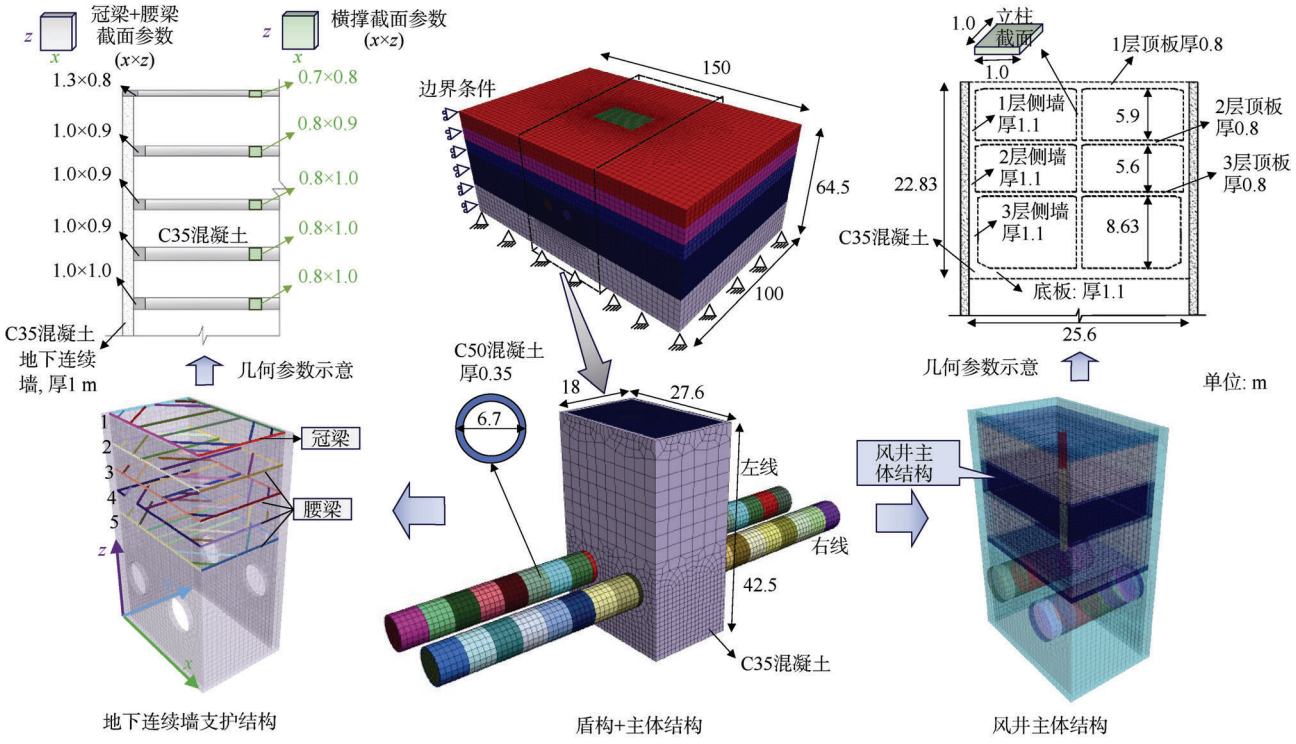


图 3　数值模型

Figure 3　The numerical model

2.2 材料物理力学参数

在数值模型中，为便于网格划分，对实际土层分布进行了适当简化：土层类型从上到下依次为素填土、砂质黏性土、全风化混合花岗岩、强风化混合花岗岩和微风化混合片麻岩。上述岩土物理力学参数依托工程地质勘察资料进行取值，如表 1 所示。在数值模型中，岩土体的本构模型均采用服从 Mohr-Coulomb 强度准则的理想弹塑性材料进行模拟。

表 1 土体力学参数

Table 1 Soil mechanical parameters

地层名称	重度/(kN/m³)	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
素填土	17.56	20	0.30	12	10
砂质黏性土	17.56	25	0.35	20	18
全风化混合花岗岩	17.66	30	0.25	21	19
强风化混合花岗岩	21.88	100	0.30	43	32
微风化混合片麻岩	26.29	15 000	0.18	40	800

地下连续墙、混凝土支撑、冠梁和腰梁及风井主体结构均采用 C35 钢筋混凝土；盾构管片采用 C50 钢筋混凝土，盾构切削地下墙位置按照原围护结构设计，预留了玻璃纤维筋。上述结构的本构模型均采用了弹性本构，结构材料的详细力学参数如表 2 所示。

表 2 结构材料力学参数

Table 2 Mechanical parameters of structural materials

结构名称	材料类型	重度/(kN/m³)	弹性模量/GPa	泊松比
地下连续墙	C35 钢筋混凝土	24	33.0	0.2
混凝土支撑	C35 钢筋混凝土	24	33.0	0.2
冠梁和腰梁	C35 钢筋混凝土	24	33.0	0.2
风井主体结构	C35 钢筋混凝土	24	33.0	0.2
盾构管片	C50 钢筋混凝土	24	35.5	0.2
盾构切削面	玻璃纤维筋	20	25.0	0.25

在接触面设置上，结构构件之间由于刚度接近，变形连续传递，所以对模拟支撑和冠梁及腰梁的 Beam 单元和连续墙是在单元节点处施加 Link 连接，实现节点力和位移的传递，模拟材料与材料之间的固结。而土—结构之间由于刚度变化大，变形不连续，故在二者间设置接触面模拟土与结构之间的错动和滑移。静水面则设置在地面以下 4 m 处。

2.3 分析步骤

分析步骤主要分为 4 步：①设置材料参数、边界状态、重力等初始条件；②求解初始地应力场，并进行位移清零；③模拟盾构下穿前的初始基坑开挖状态：首先施作地下连续墙，开挖土体至设计深度并施作第 1 道腰梁及支撑；继续分层开挖及施作每层腰梁及支撑至坑底设计标高；④按照不同的施工方案，盾构掘进通过基坑并完成风井主体结构：风井主体结构的施作时机根据不同盾构下穿方案分别实施。风井主体结构按照以下步骤逐层完成施工：施作第 5 道支撑以下侧墙及底板后，拆除第 5 道支撑；施作第 5 道支撑以上第 4 道支撑以下侧墙后，拆除第 4 道支撑；依次模拟风井主体结构施工完成。

在上述施工过程模拟中，除初始地应力会进行位移清零外，其他施工步序的内力和变形结果会基于上一步施工步序结束时的内力状态继续演化。

3 施工前预测计算结果及分析

为便于与现场实测数据进行对比，施工前预测监测点(数值模拟监测点)与后期现场监测点位保持一致。如图 4 所示。

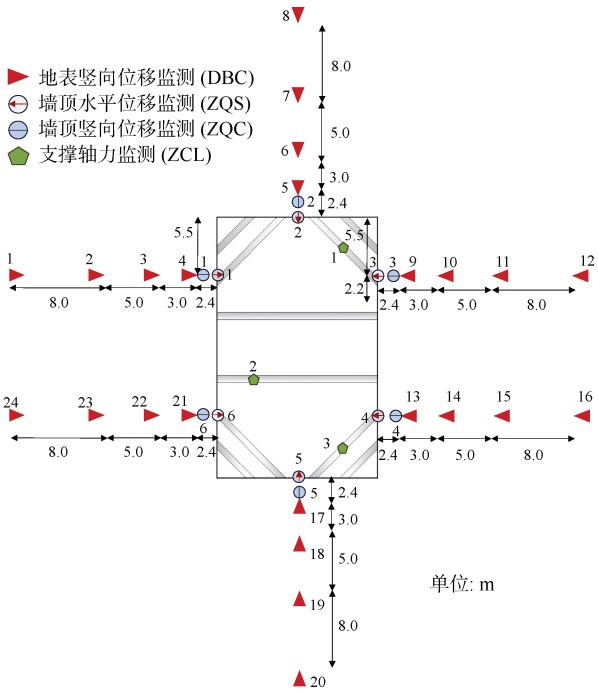


图 4 监测点布置

Figure 4 Layout of monitoring points

施工前预测的监测内容包括地表竖向位移、墙顶位移和支撑轴力。其中，支撑轴力值涵盖了第 1 道横支撑到第 5 道横支撑。盾构掘进完成后，对各个监测指标进行对比分析，得到不同方案下盾构施工对风井结构及地面的影响程度。

3.1 施工前预测-地表竖向位移

考虑到风井结构在几何上具有对称性，选取 DBC-1～8 共 8 个测点分析 3 种方案对地表沉降的影响及作用

规律。各个测点的地表竖向位移最大值如图 5 所示。可以看到，盾构下穿施工产生的地表沉降最大竖向位移值出现在监测点 4，分别为：方案一为 21.35 mm；方案二为 19.31 mm；方案三为 14.65 mm，均小于施工安全控制要求(阈值 30 mm)。可以发现，越接近基坑，其竖向位移值越大。并且从这 8 个测点的不同方案对比可以看出，方案 1 最大，方案 2 次之，方案 3 最小。

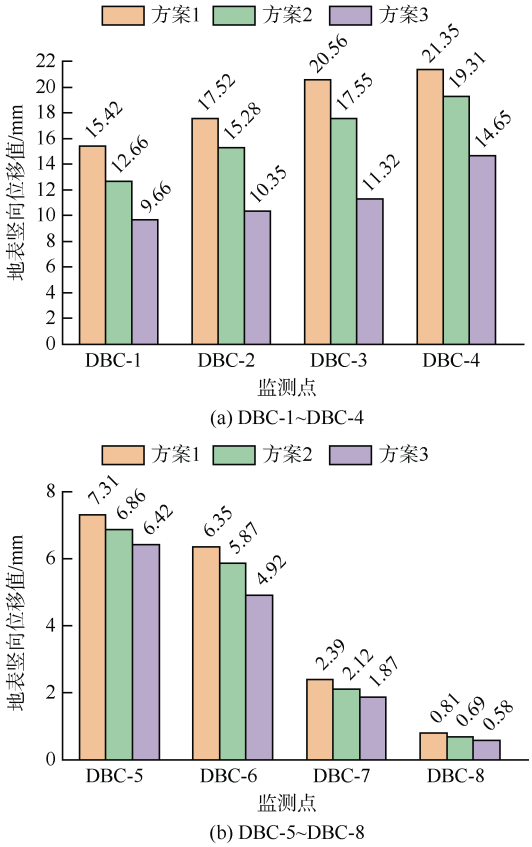


图 5　地表竖向位移最大值

Figure 5　Maximum vertical surface displacement

3.2　施工前预测-墙顶位移

盾构下穿施工完成后，各测点墙顶水平位移累计值和墙顶竖向位移累计值分别如图 6 和图 7 所示。

从图 6 中水平位移最值的变化可知：盾构隧道先于风井施工直接通过和待风井底板施工完后通过二者的位移值极为接近，方案 2 相比方案 1 平均降幅约为 9.22%；若采用方案 2，当风井结构全部施工完毕后再通过，其 6 个监测点的水平位移有大幅度的减小，相比方案 1 平均降幅约为 46.18%；3 种方案的水平位移最值均满足规范要求。

通过图 6 分析可知，计算结果显示风井基坑开挖后，墙顶变形最大值出现在墙顶监测点 5 位置，方案 1

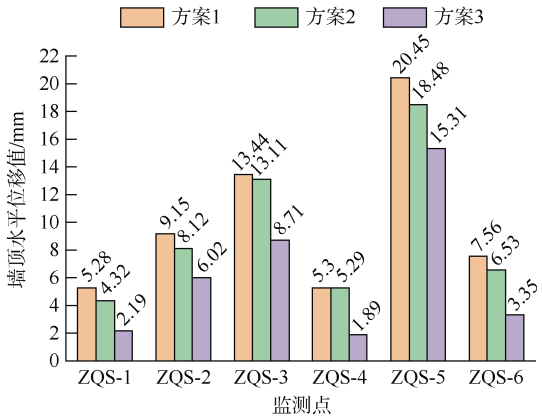


图 6　墙顶水平位移最大值

Figure 6　Maximum horizontal wall-top displacement

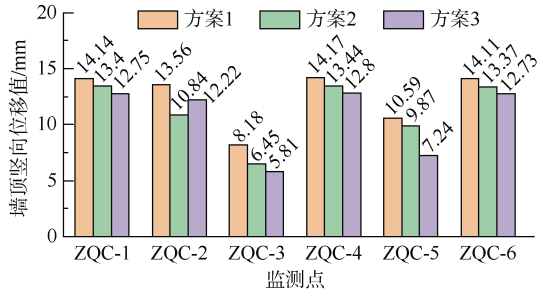


图 7　墙顶竖向位移最大值

Figure 7　Maximum vertical wall-top displacement

结构变形最大，方案 2 次之，方案 3 最小。这表明基坑开挖后先施工风井主体结构可以对基坑变形起到较好的约束作用。越早施作风井主体结构，盾构通过对地表水平方向变形影响越小。但从图 7 中竖向位移最值的变化可以看出，这种作用对于竖向位移的作用效果不明显。但 3 种方案中的地表竖向位移最值也均小于 25 mm 阈值。

3.3　施工前预测：支撑轴力

由于在施作风井主体结构前，方案 2 和方案 3 在

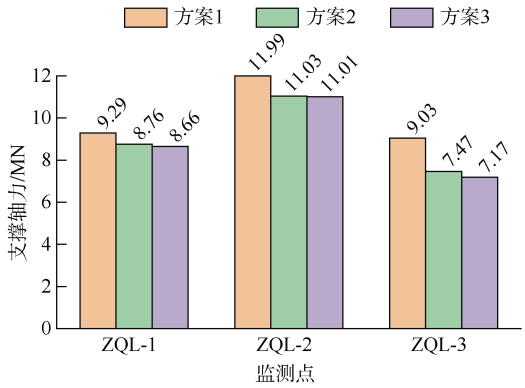


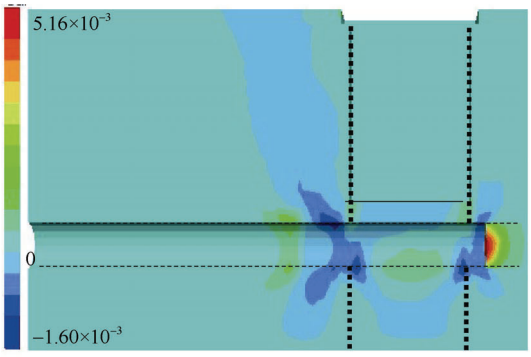
图 8　支撑轴力最值(第 4 道)

Figure 8　Maximum axial force in the support (support No.4)

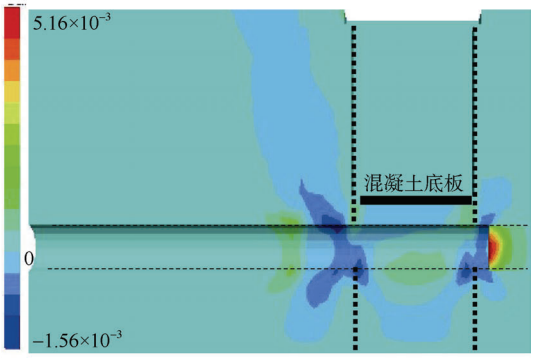
底板浇筑后，拆除第 5 道撑时，第 4 道撑受力最大，因此选择了第 4 道横撑在整个施工过程中的轴力最值对比 3 种方案的影响。

从影响围护结构稳定性的支撑受力情况看，无论是先施作风井结构的底板盾构再通过，还是施作完全部风井主体结构盾构再通过，第 4 道支撑的轴力最值较为接近，而方案 1 由于在盾构过程中没有底板或者风井主体结构的辅助支撑作用，在盾构掘进过程中使其支撑受到了较大轴力。从数值分析得到的 4 种因素综合分析结果来看，在盾构掘进前封闭基坑，对坑底下土层形成良好约束，可有效约束土层变形，因为土的剪应变增量是表征土稳定性的重要参数[11-14]，该参数指在土的受力变形过程中，某一微小时间间隔或微小变形阶段内，土所产生的剪应变的变化量。它反映土在该微小剪切变形的瞬时变化情况，用于描述土的变形发展过程和速率。图 9 给出了不同方案下盾构的剪应变增量云图。从图 9 可知，盾构开挖对土体稳定性的影响部位集中在基坑开挖底部的外侧和盾构开挖面侧。其中，基坑外侧呈现“X”型分布，在墙外侧靠近基坑底部位置应变增量最大，说明此处是土体扰动较大，容易失稳的位置。

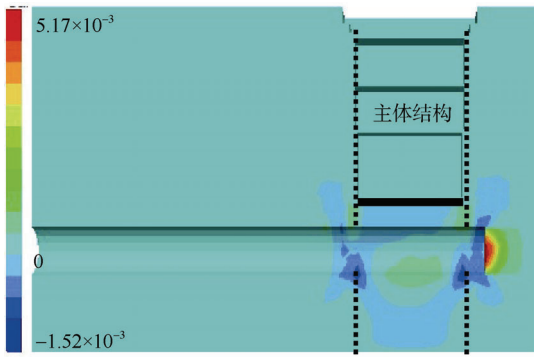
从数值模拟的结果来看，基坑封闭越早，剪应变增量越小，说明在盾构前越早封闭基坑，对坑底土层形成约束效果越强，能有效约束土层变形。



(a) 方案1: 盾构直接通过



(b) 方案2: 施作底板后盾构通过



(c) 方案3: 施作主体结构后盾构通过

图 9　不同方案盾构通过时岩土体剪应变增量

Figure 9　Shear strain increments of the rock and soil mass during the passage of the shield under different schemes

从计算结果内容可分析知：采用方案 2 和方案 3 对地表沉降和风井结构变形控制优于方案 1。但是方案 3 所需的时间较长，约 90 d，是方案 1 所需 30 d 的 3 倍，方案 2 所需 36 d 的 2.5 倍。而方案 2 施工工期仅较方案 1 多 6 d。根据现场施工实际情况，盾构机每耽误掘进 1 d，约产生 10 万元误工费，从经济效益看，方案 2 较方案 3 节省约 540 万元。结合现场盾构机掘进进度和施工造成影响考虑，采用方案 2 是综合更优的方案。

4　现场监测

4.1　现场监测数据分析

为确保所选方案在实施过程中的安全性与可靠性，如图 10 所示，从左线盾构隧道准备下穿(此时距离风井 66 m 左右)到右线盾构穿越风井过一定距离(约 70 m，大于数值模型边界范围)，对图 4 所示的监测内容开展了现场数据监测工作。

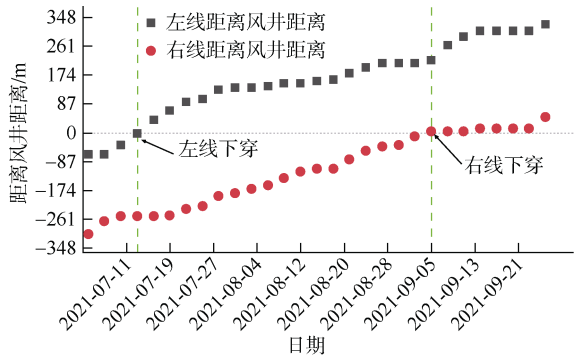


图 10　盾构施工时序

Figure 10　Shield tunneling construction schedule

根据监测方案，地表竖向位移、墙顶竖向位移以周为监测时间单位，墙顶水平位移和支持轴力以天为时间单位。为了更直观描述盾构掘进过程中各个监测

数据的变化情况，将图 10 纵轴(左右线盾构距离风井距离)作为横轴，各个监测数据作为纵轴，绘制二者的相关曲线如图 11 所示。

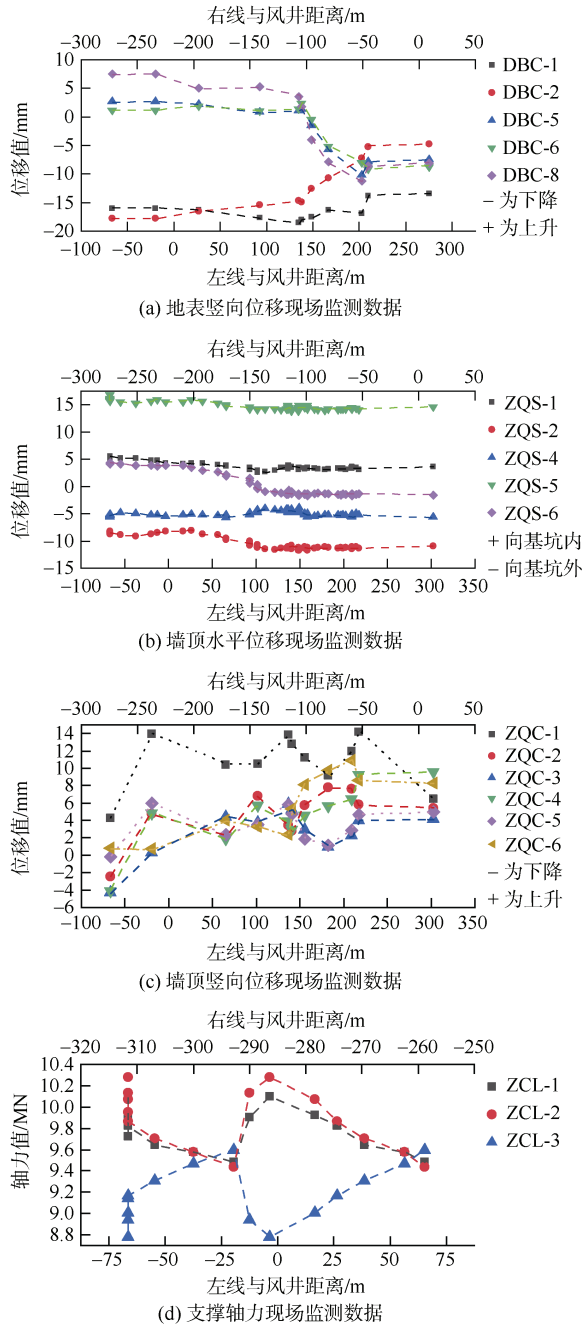


图 11　现场监测数据

Figure 11　Field monitoring data

地表竖向位移现场监测数据如图 11(a)所示(其中 3、4、7 号测点在实施过程中由于施工干扰因素缺失，故图中并未给出)；墙顶水平位移现场监测数据如图 11(b)所示(其中 3 号测点在实施过程中由于施工干扰因素缺失，故图中并未给出)；墙顶竖向位移如图 11(c)所示；支撑轴力监测值如图 11(d)所示。

从图 11(a)和图 11(b)所示的地表竖向位移和墙顶的水平位移监测数据可以分析出，当左线和右线盾构接近风井至完全下穿风井的过程中，各项监测数据没有较大的变化。图 11(c)所示墙顶的竖向位移虽然监测频率较低，但可以看出墙顶竖向位移在左线盾构机下穿过程中有一定幅度的增长，完全下穿后，随着土体变形趋于稳定，大部分监测数据逐渐趋于稳定。

图 11(d)给出了支撑轴力在左线盾构机下穿过程中的监测数据变化(4 号支撑在施作完底板后且左线下穿后不久就拆除，预留出空间搭设中板支架搭设，故右线下穿无监测数据)。根据图 11(d)分析可知，由于施作底板分担了下部支撑的作用力，中间和左侧的支撑轴力逐渐减小，但在左线盾构下穿过程中由于基坑底部土体受到较大扰动使其又增大，在盾构正好通过时达到了最大值，盾构通过后随着土体变形稳定后逐渐减小；右侧的斜支撑则呈现了相反的趋势。说明风井在盾构通过时需重点对接近底部的支护结构进行加强。

4.2　实测数据和数值模拟对比

现场监测的数据表明，采用方案 2 施工，现场的地表竖向位移、墙顶水平位移、墙竖向位移和支撑轴力均处于阈值和承载能力值内，说明所选方案的安全性。同时为了验证数值模型的合理性，将实测数据和数值模拟对应的各个监测数据(绝对值)最值进行对比。如表 3 所示，数值模拟相比实测数据较为接近，说明了数值模拟的合理性。

表 3　监测数据实测值和模拟值对比

Table 3　Comparison of measured and simulated values

监测项目	测点编号	实测最值	模拟最值	位移阈值/承载能力值
地表竖向位移监测/mm	DBC-1	14.87	12.66	30
	DBC-2	17.76	15.28	
	DBC-3	/	17.55	
	DBC-4	/	19.31	
	DBC-5	10.15	6.86	
	DBC-6	9.14	5.87	
	DBC-7	/	2.12	
	DBC-8	11.18	0.69	
墙顶水平位移监测/mm	ZQS-1	5.65	4.32	30
	ZQS-2	11.18	8.12	
	ZQS-3	/	13.11	
	ZQS-4	5.80	5.29	
	ZQS-5	16.90	18.48	
	ZQS-6	4.28	6.53	

续表

监测项目	测点编号	实测最值	模拟最值	位移阈值/承载能力值
墙顶竖向位移监测/mm	ZQC-1	14.17	13.40	25
	ZQC-2	7.79	10.84	
	ZQC-3	5.89	6.45	
	ZQC-4	9.61	13.44	
	ZQC-5	5.97	9.87	
	ZQC-6	10.93	13.37	
支撑轴力监测/MN	ZCL-1	10.097	8.762	12
	ZCL-2	10.280	1.1026	
	ZCL-3	9.597	7.169	

5 结论

本文以广东东莞市轨道交通1号线区间盾构下穿临时改造中间风井工程为依托，对盾构隧道下穿中间风井同步近接施工方案进行对比研究。主要结论如下：

1) 尽早封闭风井基坑能对坑底土层形成有效约束减小土层变形，并显著降低盾构下穿施工对风井结构的影响。盾构隧道与风井结构在不同施工时序下的影响规律为：风井主体施工完成后盾构再通过，风井结构变形和地表沉降最小；风井底板施工完成后盾构再通过，风井结构变形和地表沉降次之；盾构通过后再施工风井，风井结构变形和地表沉降最大。3种方案下风井结构均处于安全状态，整体安全可控。

2) 风井底板施工完成后盾构再通过的方案具有较高的经济效益。该方案中，盾构通过前仅需完成施作风井底板施工，不仅能有效减小盾构下穿风井施工引起的结构变形和地表沉降，还可缩短盾构通过前的停留时间，避免对总工期产生影响。

3) 现场监测数据表明，风井底板施工完成后盾构再通过的施工方案安全可靠，施工影响较小，各项监测数据均在控制范围内。同时，实测数据与施工预测结果规律一致，理论研究结果对实际工程具有参考价值。

参考文献

[1] 张庆, 甄文战, 封坤. 大直径盾构隧道下穿既有高速公路桥涵影响分析[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(1): 137-145.
ZHANG Qing, ZHEN Wenzhan, FENG Kun. Analysis of the impact of large diameter shield tunnel crossing existing expressway bridge and culvert[J]. Modern tunnelling technology, 2024, 61(1): 137-145.

[2] 焦饮玥, 董秀竹, 林森斌. 软土地区双线盾构下穿机场跑道沉降规律研究[J]. 铁道工程学报, 2024, 41(2): 68-73.
JIAO Xianyue, DONG Xiuzhu, LIN Senbin. Research on the settlement regularity of double-line shield tunnels underneath passing through airport runways[J]. Journal of railway engineering society, 2024, 41(2): 68-73.

[3] 叶宇航, 罗旭, 刘健美, 等. 岩溶区大直径盾构隧道下穿机场飞行区不停航施工建设方案[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(1): 269-275.
YE Yuhang, LUO Xu, LIU Jianmei, et al. Construction scheme with non-stop aviation for large-diameter shield tunnel crossing airport flight zone in Karst area[J]. Urban mass transit, 2024, 27(1): 269-275.

[4] 桂跃, 吕祎晔, 裴利华, 等. 盾构隧道群近接下穿施工顺序对既有隧道影响模型试验研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2023, 40(6): 1-12.
GUI Yue, LV Yiye, PEI Lihua, et al. Model testing on the influence of multi-line overlapping overlapping shield tunnels construction sequence on existing tunnels[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2023, 40(6): 1-12.

[5] 何况. 盾构隧道下穿复杂建筑物变形分析及控制措施[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(9): 62-68.
HE Kuang. Deformation analysis and control measures for shield tunnel under-passing complex buildings[J]. Urban mass transit, 2023, 26(9): 62-68.

[6] 范文昊, 谢盛昊, 周飞聪, 等. 新建双线盾构隧道下穿既有隧道近接影响分区及控制措施案例研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(4): 43-57.
FAN Wenhao, XIE Shenghao, ZHOU Feicong, et al. A case study on adjacent impact zoning and control measures for new double-line shield tunnel undercrossing existing tunnel[J]. Modern tunnelling technology, 2023, 60(4): 43-57.

[7] 宋锋. 双线盾构隧道下穿桥梁桩基托换施作时机的影响研究[J]. 国防交通工程与技术, 2024, 22(4): 80-84.
SONG Feng. Influence of pile foundations underpinning timing during the construction of double-line shield tunnel undercrossing bridge[J]. Traffic engineering and technology for national defence, 2024, 22(4): 80-84.

[8] 黄懿, 严如, 张文瀚, 等. 风井开挖与盾构下穿对周边环境影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(增刊2): 943-951.
HUANG Yi, YAN Ru, ZHANG Wenhan, et al. Study on the influence of air shaft excavation and shield tunneling on the surrounding environment[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2022, 18(S2): 943-951.

[9] 刘勇, 周怡晟, 索晓明, 等. 盾构下穿高铁路基变形规律模型试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(4): 941-951.

LIU Yong, ZHOU Yisheng, SUO Xiaoming, et al. Model test on the deformation law of shield tunnel underpassing high speed railway roadbed[J]. Rock and soil mechanics, 2023, 44(4): 941-951.

[10] 魏义山, 钟小春, 刘浩源, 等. 盾构近距离下穿工况下既有隧道钢环预加固弯曲刚度研究[J]. 土木工程学报, 2024, 57(S2): 120-126.
WEI Yishan, ZHONG Xiaochun, LIU Haoyuan, et al. Study on bending stiffness of pre-reinforcement of steel ring in existing tunnel under the condition of shield tunneling at close distance[J]. China civil engineering journal, 2024, 57(S2): 120-126.

[11] 张霄. 高速铁路隧道大断面法施工掌子面稳定性分析及超前支护设计方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
ZHANG Xiao. Stability analysis of working face in large section construction of high-speed railway tunnel and research on design method of advanced support[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.

[12] 姚任行, 邱豪磊, 安然, 等. 宁波地铁窄基坑抗隆起稳定性及变形特性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(4): 209-216.
YAO Renxing, QIU Haolei, AN Ran, et al. Study on anti-heave stability and deformation characteristics of narrow foundation pits in Ningbo metro[J]. Urban mass transit, 2025, 28(4): 209-216.

[13] 王明年, 杨恒洪, 王旭, 等. 砂土地层隧道掌子面稳定性的物质点法分析[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(S2): 74-84.
WANG Mingnian, YANG Henghong, WANG Xu, et al. Analysis of tunnel face stability in sandy soil by material point method[J]. Tunnel construction, 2024, 44(S2): 74-84.

[14] 王林枫. 土岩地层无岩肩吊脚墙基坑变形破坏特征及稳定性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2023.
WANG Linfeng. Study on deformation and failure characteristics and stability of foundation pit without rock shoulder hanging wall in soil and rock stratum[D]. Chongqing: Chongqing University, 2023.

（编辑：傅依萱）

（上接第 63 页）

[8] 强添纲, 刘涛, 裴玉龙. 地铁进站客流量 SARIMA 与 GA-BP 神经网络组合预测模型[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(12): 134-142.
QIANG Tiangang, LIU Tao, PEI Yulong. Combined prediction model of SARIMA and GA-BP neural network for subway passenger flow[J]. Railway transport and economy, 2021, 43(12): 134-142.

[9] 许文星, 章玉. 基于随机森林算法的轨道站点短期客流预测[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2022, 46(3): 406-410.
XU Wening, ZHANG Yu. Short-term passenger flow forecast of rail station based on random forest algorithm[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Enginerring), 2022, 46(3): 406-410.

[10] 姚明辉, 王威超, 吴启亮, 等. 基于实时数据特征和 XGBoost 算法的城市公共交通枢纽客流量预测[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(11): 3302-3308.
YAO Minghui, WANG Weichao, WU Qiliang, et al. Passenger flow prediction of urban public transportation hubs based on real-time data features and XGBoost algorithm[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(11): 3302-3308.

[11] 张开雯, 何勇, 余家香, 等. 基于麻雀搜索算法和长短期记忆神经网络的轨道交通站点客流预测[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2025, 48(01): 105-113.
ZHANG Kaiwen, HE Yong, YU Jiaxiang, et al. Passenger flow prediction of urban rail transit stations based on ISSA-LSTM model[J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 2025, 48(01): 105-113.

[12] 禹倩, 张亚东, 郭进, 等. 基于深度集成神经网络的城市轨道交通短时进站客流预测[J]. 铁道学报, 2023, 45(12): 37-46.
YU Qian, ZHANG Yadong, GUO Jin, et al. Short-term inbound passenger flow forecasting for urban rail transit based on deep ensemble neural network[J]. Journal of the China railway society, 2023, 45(12): 37-46.

[13] Trojovská E, Dehghani M, Trojovský P. Zebra optimization algorithm: A new bio-inspired optimization algorithm for solving optimization algorithm[J]. Ieee access, 2022, 10: 49445-49473.

（编辑：傅依萱）