

# 西安轨道交通运营线路振动源强度实测研究

马 茜

(西咸新区轨道交通投资建设有限公司, 710086, 西安//高级工程师)

**摘 要** 对西安轨道交通已运营的 4 条线路进行了振动源强度实测, 分析了钢轨至隧道壁振动的衰减特征以及列车振动的衰减规律, 并讨论了曲线半径及道床类型对减振效果的影响。结果表明, 从减振效果来看, 在同等条件下, 大曲线半径线路优于小曲线半径线路, 减振垫浮置板道床优于短轨枕式整体道床, 钢弹簧浮置板道床优于碎石道床。

**关键词** 城市轨道交通; 线路振动监测; 减振效果

**中图分类号** U211.3; U231.2

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.12.021

## Study on Vibration Source Intensity measurement of Xi'an Rail Transit Operation Line

MA Qian

**Abstract** Vibration source intensity of four operating lines in Xi'an rail transit is measured systematically. The attenuation characteristics of vibration from rail to tunnel wall and the attenuation pattern of train vibration are analyzed. The impact of line curve radius and track bed type on vibration reduction effect is discussed. Research results show that, in terms of damping effect, large curvature radius line is better than small curvature radius line, damping pad floating slab track bed better than short sleeper monolithic track bed, and steel spring floating slab track bed better than ballast bed under the same conditions.

**Key words** urban rail transit; line vibration monitoring; vibration reduction effect

**Author's address** Xixian New Area Rail Transit Investment and Construction Co., Ltd., 710086, Xi'an, China

随着轨道交通线网规模的增大和行车密度的不断增加, 既有线路上的环境振动影响问题日益凸显。一方面, 城市轨道交通环境振动会对存放文物及精密仪器等的敏感建构筑物造成影响, 为此, 北京及西安等地曾多次因文物受振问题而优化轨道交通线路方案。另一方面, 城市轨道交通环境振动会影响居民的生活环境, 降低生活质量。西安轨道交通沿线有较多敏感建筑物, 尤其是文物建筑, 且

越来越多的线路穿越居民小区, 故有必要对其环境振动情况进行深入研究。

城市轨道交通环境振动是较为复杂的系统问题, 其影响因素众多。主要影响因素有轨道结构、车辆特征、行车速度、行车密度与速度、车辆和轨道保养维修状态、地质条件、线路条件、地铁土建结构型式、房屋建筑特性以及受振体的远近等。从研究内容上看, 列车的振源特性、振动波的传播规律是研究的核心, 而对振动进行实测是研究的基础, 也是研究关键。深入认识运营线路的振动源强, 不仅对后期工程建设有重要的指导意义, 而且对改善和优化振动环境有直接的参考价值。

本文对西安轨道交通已运营 2 年以上的 4 条线路进行了全面、系统的振动源强监测, 根据监测数据初步分析其衰减规律, 并探讨曲线半径及道床形式对减振效果的影响。

## 1 振动监测方案

地铁线路振动源强度受沿线地质条件、地下隧道段和地上高架段及道床形式等多种因素的共同影响。西安轨道交通 1 号线—4 号线所处的地质环境变化较大, 主要包括渭河低阶地、高阶地、黄土梁洼、黄土塬等 4 类; 地铁结构形式涉及地下隧道段和地上高架段; 道床结构主要为整体道床, 在地裂缝区段采用框架板道床, 环境敏感点按要求采用减振道床。车辆均为 B 型车。

为尽可能全面了解线路振动现状, 本研究共布置了 31 个监测断面 (其中 1 号线 4 个、2 号线 10 个、3 号线 7 个、4 号线 10 个), 每个隧道断面均在钢轨 (左右股)、道床及隧道侧壁布置 5 个测点。根据 HJ 453—2018《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》, 在高架段布置振动源强监测点, 监测隧道内振动加速度。监测工作实施基本情况如表 1 所示。

本次振动监测使用了型号为 INV3060A 的动态信号采集分析仪, 拾振器参数如表 2 所示。

表 1 隧道内振动监测工作基本情况表

Tab. 1 Basic information of vibration monitoring work inside tunnel

| 拾振器  | 测点布置  | 检测工况 | 数据处理  | 备注  |
|--|---|------|---|---|
| 低频加速度拾振器, 具体型号及参数详见表 2; 频率范围为 0.2~2 500 Hz | 1) 钢轨(左、右股)、道床、隧道侧壁布置 5 个测点<br>2) 测点布置要求: ① 地下段时, 高于轨顶面 1.25 m±0.25 m 处; ② 地面段, 距线路中心线 7.5 m 地面处, 距建筑物水平距离 3 m 以上; ③ 高架段: 距桥梁中心线 7.5 m 地面处, 距建筑物水平距离 3 m 以上 | 全天   | 列车通过时段, 分频最大 Z 振级 $V_{LZ0\max}$ , 取运营高峰期不少于 5 次的算术平均值; 相同线路在钢轨、列车、隧道结构等其他参数基本保持不变的前提下, 评价不同曲线半径下不同道床形式的减振效果 | 地铁停运后工作组进监测断面安装好仪器设备, 采集全天振动监测数据, 待第二天地铁停运后取回设备 |

表 2 拾振器基本参数表

Tab. 2 Basic parameters of vibration pickup

| 监测对象   | 传感器类型  | 型号     | 量程/g  | 频率响应范围/Hz    |
|--------|--------|--------|-------|--------------|
| 隧道内钢轨  | 加速度    | 9824 型 | 1 000 | 1 000~15 000 |
| 隧道内道床  | 加速度    | 9821 型 | 200   | 500~5 000    |
| 隧道内隧道壁 | 水平加速度  | 9828 型 | 10    | 0.2~2 500.0  |
| 高架段    | 垂直向加速度 | 9828 型 | 10    | 0.2~2 500.0  |

注:  $g$  为重力加速度。

拾振器的布设不仅需满足监测断面里程的要求, 还需避开任何可见的有缺陷区域或特殊区域(有大裂缝的区域、渗水区、道岔和道口区域)。考虑到监测仪器及监测现场条件的具体情况, 每处监测断面布设 5 个振动测点, 具体布置点位如图 1 所示。① 位于列车行驶方向左、右侧钢轨, 垂直于轨面的钢轨底部(a、b 点); ② 位于列车行驶方向右侧道床, 垂直于道床(c 点); ③ 位于列车行驶方向右侧隧道壁, 测点距轨面竖向距离约 1.2 m(d、e 点), 分别监测水平向和垂直向振动加速度。

对于高架段, 当两侧有挡板结构的桥梁或有腹板结构的 U 形梁时, 拾振器应置于距邻近行车线路中心线水平距离 7.5 m、距轨顶面以上 5 m 处; 当两侧无挡板结构时, 拾振器应置于距邻近行车线路中心线水平距离 7.5 m、距轨顶面以上 3.5 m 处。具体如图 1 b) 所示。

钢轨底部测点的传感器安装实景图如图 2 a) 所示。先将钢轨底部用砂纸打磨、去杂质, 再安装传感器; 传感器采用绝缘磁座进行电绝缘, 并用绝缘胶带固定, 以防止接头松动脱落。

隧道壁测点的传感器安装实景图如图 2 b) 所示。需借助安装辅助设备将传感器牢固固定在道床、隧道壁上, 以防导线因接头松动脱落后被高速行驶的列车卷入车轮。高架段测点的传感器安装

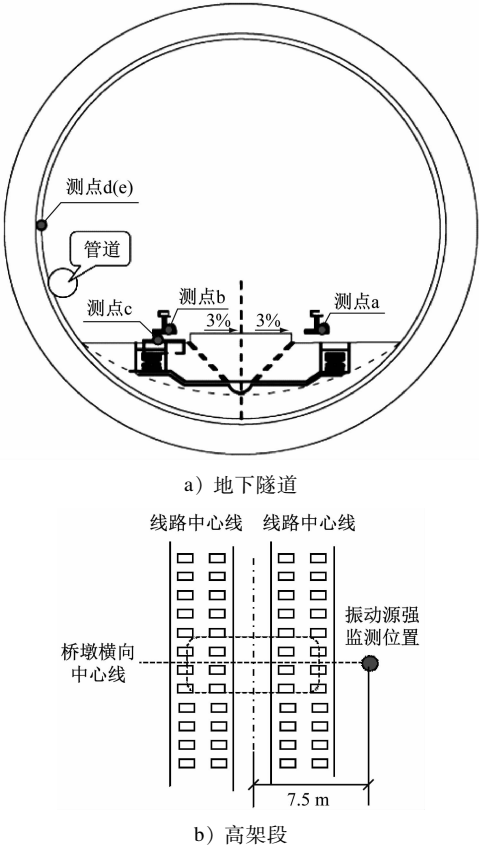


图 1 振动监测点布置示意图

Fig. 1 Layout diagram of vibration monitoring points

实景图如图 2 c) 所示。拾振器安装完成后, 对监测系统进行调试。监测采用定时启动方式, 且数据直接存储在笔记本电脑中。在隧道内, 将采集仪与可附着的固定物绑扎牢固; 在高架段, 将采集仪用橡皮泥固定于坚固地面上。

2 监测结果分析

分别于 2019 年 12 月 25 日—2020 年 1 月 22 日、2020 年 3 月 13 日—2020 年 4 月 15 日完成了对西安轨道交通 4 条线路、31 个监测断面的振动监测

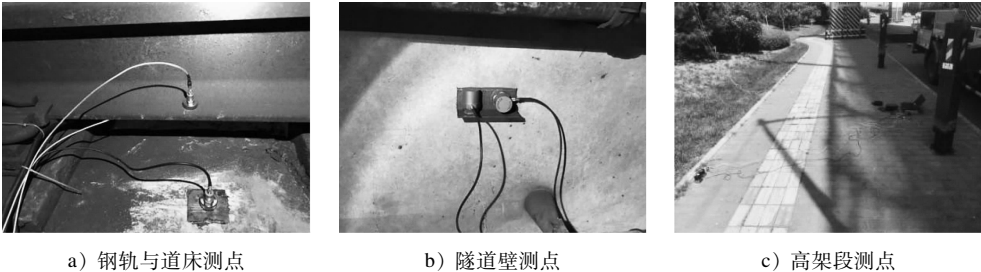
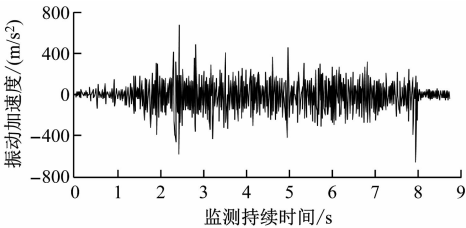


图2 测点传感器安装实景图

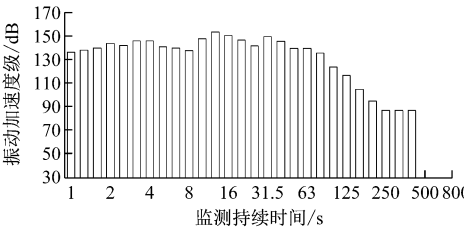
Fig. 2 Pictures of sensors installed at measuring points

工作。以1号线三桥站—后卫寨站区间上行方向里程K7+163处监测断面为典型断面进行详细分析。图3为监测时间段内典型断面的典型时程与1/3倍频程分析图。由图3可见,通过该断面的时间约为

6.5 s,结合列车长约120 m,计算得到当前列车运行速度约为66 km/h。而列车实际运行时由于经历了起动-加速-匀速-减速-停站的过程,故可推断地铁隧道区间内列车实际运行速度为40~78 km/h。



a) 全程波形图(右侧钢轨测点)



b) 1/3 倍频程分析图(右侧钢轨测点)

图3 监测时间段内典型断面的典型时程与1/3倍频程分析图

Fig. 3 Diagram of typical time-history and 1/3 octave analysis on typical monitoring sections during monitoring period

典型断面振动情况统计如表3所示。

表3 典型断面振动情况统计表

Tab.3 Statistics of vibration condition of typical sections

| 测点位置    | 振动加速度级/dB |        |        |        |        |        |
|---------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
|         | 列车1       | 列车2    | 列车3    | 列车4    | 列车5    | 平均值    |
| 左侧钢轨    | 135.56    | 134.36 | 128.74 | 142.33 | 144.11 | 137.02 |
| 右侧钢轨    | 127.15    | 127.01 | 132.36 | 131.08 | 126.91 | 128.90 |
| 道床      | 109.53    | 105.39 | 105.14 | 104.99 | 105.48 | 106.11 |
| 隧道壁(垂直) | 91.81     | 92.76  | 92.48  | 92.60  | 92.58  | 92.45  |
| 隧道壁(水平) | 82.64     | 82.57  | 84.79  | 88.78  | 82.51  | 84.26  |

由表3可见,断面位置处的振动加速度级沿钢轨-道床-隧道壁传播路径依次递减,符合振动能量传播规律。故此,选取振动加速度级最大值作为统计指标,对5组列车通过时间段内加速度级最大值求平均值,作为该断面处加速度级的评价指标。为确定振动能量衰减规律及程度,本文主要针对垂直向振动加速度级自钢轨至道床及隧道壁的衰减程度进行定量评价分析。具体衰减程度 $\delta$ 计算方法如下:

$$\delta_{\text{道床}} = \frac{V_{\text{LZO max(钢轨)}} - V_{\text{LZO max(道床)}}}{V_{\text{LZO max(钢轨)}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\delta_{\text{隧道壁}} = \frac{V_{\text{LZO max(钢轨)}} - V_{\text{LZO max(隧道壁)}}}{V_{\text{LZO max(钢轨)}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

- $\delta_{\text{道床}}$ ——钢轨至道床的衰减程度;
- $\delta_{\text{隧道壁}}$ ——钢轨至隧道壁的衰减程度;
- $V_{\text{LZO max(钢轨)}}$ ——钢轨处振动加速度级;
- $V_{\text{LZO max(道床)}}$ ——道床处振动加速度级;
- $V_{\text{LZO max(隧道壁)}}$ ——隧道壁垂直向振动加速度级。

### 2.1 各线路监测结果

1号线—4号线隧道内各断面的振动监测结果如表4所示。

通过比较各线路不同断面的钢轨、道床及隧道壁振动加速度级及 $\delta$ 可以看出:由于能量的扩散和结构阻尼的作用,振动衰减较明显;隧道壁水平向振动加速度级明显小于隧道壁垂直向振动加速度级,说明垂直向振动能量在地铁振动对周围结构的影响中占主导作用。

### 2.2 不同道床类型及曲线半径的减振效果比较

由于各线路钢轨类型、列车编组、运行速度基

表 4 1 号线—4 号线隧道内各断面监测结果

Tab.4 Monitoring results of all sections in Line 1—Line 4 tunnels

| 线路   | 断面 | 测点位置    | $V_{LZ0\ max}/dB$ | $\delta/\%$ | 线路   | 断面 | 测点位置    | $V_{LZ0\ max}/dB$ | $\delta/\%$ |
|------|----|---------|-------------------|-------------|------|----|---------|-------------------|-------------|
| 1 号线 | 1  | 钢轨      | 132.96            |             | 3 号线 | 2  | 钢轨      | 131.45            |             |
|      |    | 道床      | 106.11            | 20.19       |      |    | 道床      | 108.31            | 17.60       |
|      |    | 隧道壁(垂直) | 92.45             | 30.47       |      |    | 隧道壁(垂直) | 71.78             | 45.39       |
|      | 2  | 钢轨      | 141.17            |             |      | 3  | 钢轨      | 126.98            |             |
|      |    | 道床      | 113.53            | 19.58       |      |    | 道床      | 104.19            | 17.95       |
|      |    | 隧道壁(垂直) | 77.88             | 44.83       |      |    | 隧道壁(垂直) | 94.40             | 25.66       |
|      | 3  | 钢轨      | 139.84            |             |      | 4  | 钢轨      | 121.92            |             |
|      |    | 道床      | 100.76            | 27.95       |      |    | 道床      | 95.12             | 21.98       |
|      |    | 隧道壁(垂直) | 93.63             | 33.04       |      |    | 隧道壁(垂直) | 82.92             | 31.99       |
|      | 4  | 钢轨      | 132.97            |             |      | 5  | 钢轨      | 112.68            |             |
|      |    | 道床      | 104.73            | 21.24       |      |    | 道床      | 96.59             | 14.28       |
|      |    | 隧道壁(垂直) | 94.98             | 28.57       |      |    | 隧道壁(垂直) | 136.04            |             |
| 2 号线 | 1  | 钢轨      | 131.21            |             | 6 号线 | 6  | 钢轨      | 136.04            |             |
|      |    | 道床      | 104.46            | 20.39       |      |    | 道床      | 97.06             | 28.65       |
|      |    | 隧道壁(垂直) | 95.26             | 27.40       |      |    | 隧道壁(垂直) | 119.73            |             |
|      | 2  | 钢轨      | 128.28            |             |      | 7  | 钢轨      | 119.73            |             |
|      |    | 道床      | 104.83            | 18.28       |      |    | 道床      | 95.74             | 20.04       |
|      |    | 隧道壁(垂直) | 95.62             | 25.46       |      |    | 隧道壁(垂直) | 125.60            |             |
|      | 3  | 钢轨      | 108.30            |             |      | 1  | 钢轨      | 118.57            | 5.60        |
|      |    | 道床      | 84.92             | 21.59       |      |    | 道床      | 65.56             | 47.80       |
|      |    | 隧道壁(垂直) | 75.23             | 30.54       |      |    | 隧道壁(垂直) | 124.91            |             |
|      | 4  | 钢轨      | 125.77            |             |      | 2  | 钢轨      | 118.20            | 5.37        |
|      |    | 道床      | 122.67            | 2.46        |      |    | 道床      | 82.00             | 34.35       |
|      |    | 隧道壁(垂直) | 74.94             | 40.42       |      |    | 隧道壁(垂直) | 124.36            |             |
|      | 5  | 钢轨      | 128.55            |             | 3 号线 | 3  | 钢轨      | 115.18            | 7.38        |
|      |    | 道床      | 122.67            | 4.57        |      |    | 道床      | 67.70             | 45.56       |
|      |    | 隧道壁(垂直) | 74.94             | 41.70       |      |    | 隧道壁(垂直) | 125.81            |             |
|      | 6  | 钢轨      | 129.71            |             |      | 4  | 钢轨      | 119.07            | 5.36        |
|      |    | 道床      | 105.15            | 18.93       |      |    | 道床      | 102.69            | 18.38       |
|      |    | 隧道壁(垂直) | 95.31             | 26.52       |      |    | 隧道壁(垂直) | 122.93            |             |
|      | 7  | 钢轨      | 133.90            |             |      | 5  | 钢轨      | 118.26            | 3.80        |
|      |    | 道床      | 105.15            | 21.47       |      |    | 道床      | 78.75             | 35.94       |
|      |    | 隧道壁(垂直) | 95.31             | 28.82       |      |    | 隧道壁(垂直) | 117.99            |             |
|      | 8  | 钢轨      | 130.73            |             |      | 6  | 钢轨      | 118.87            | -0.75       |
|      |    | 道床      | 106.01            | 18.91       |      |    | 道床      | 92.34             | 21.74       |
|      |    | 隧道壁(垂直) | 88.73             | 32.13       |      |    | 隧道壁(垂直) | 130.63            |             |
|      | 9  | 钢轨      | 129.27            |             | 4 号线 | 7  | 钢轨      | 97.96             | 25.01       |
|      |    | 道床      | 106.01            | 17.99       |      |    | 道床      | 88.36             | 32.36       |
|      |    | 隧道壁(垂直) | 88.73             | 31.36       |      |    | 隧道壁(垂直) | 131.92            |             |
|      | 10 | 钢轨      | 129.62            |             |      | 8  | 钢轨      | 99.05             | 24.92       |
|      |    | 道床      | 106.01            | 18.21       |      |    | 道床      | 87.95             | 33.33       |
|      |    | 隧道壁(垂直) | 88.73             | 31.55       |      |    | 隧道壁(垂直) | 117.48            |             |
| 3 号线 | 1  | 钢轨      | 132.69            |             |      | 9  | 钢轨      | 118.99            | -1.29       |
|      |    | 道床      | 105.97            | 20.14       |      |    | 道床      | 72.66             | 38.15       |
|      |    | 隧道壁(垂直) | 69.13             | 47.90       |      |    | 隧道壁(垂直) | 123.12            |             |
| 4 号线 | 10 | 钢轨      | 101.21            | 17.80       |      | 10 | 钢轨      | 101.21            | 17.80       |
|      |    | 道床      | 92.59             | 24.80       |      |    | 道床      | 101.21            | 17.80       |
|      |    | 隧道壁(垂直) | 92.59             | 24.80       |      |    | 隧道壁(垂直) | 92.59             | 24.80       |

本相同,以道床类型和曲线半径分别评价减振效果,结果如表 5 所示。由表 5 可知:与小曲线半径线路相比,同等条件下大曲线半径线路的减振效果更优;与短轨枕式整体道床相比,减振垫浮置板道床的减振效果更优,钢弹簧浮置板道床的减振效果优

于碎石道床。

3 结语

1) 首次开展了西安轨道交通 31 个监测断面的运营轨道振动实测,全面系统地掌握了西安轨道交

表 5 不同道床类型及曲线半径的减振效果评价表

Tab.5 Evaluation of vibration reduction effect of different types of track bed and curvature radius

| 道床类型         | 曲率半径/m | 振动传递路径 | $\delta/\%$ |
|--------------|--------|--------|-------------|
| 短轨枕式<br>整体道床 | 400    | 钢轨→道床  | 20.19       |
|              |        | 钢轨→隧道壁 | 30.47       |
|              | 450    | 钢轨→道床  | 27.95       |
|              |        | 钢轨→隧道壁 | 33.04       |
| 减振垫<br>浮置板道床 | 400    | 钢轨→道床  | 19.58       |
|              |        | 钢轨→隧道壁 | 44.83       |
| 钢弹簧<br>浮置板道床 | 400    | 钢轨→道床  | 4.57        |
|              |        | 钢轨→隧道壁 | 41.70       |
| 碎石道床         | 400    | 钢轨→道床  | 18.21       |
|              |        | 钢轨→隧道壁 | 31.55       |

通运营振动源强,为后续工程设计、研究奠定了坚实的基础。

2) 对比分析了钢轨至隧道壁振动的衰减特征,研究表明,同等条件下大曲线半径的减振效果优于小曲线半径,减振垫浮置板道床的减振效果优于短轨枕式整体道床,钢弹簧浮置板道床的减振效果优于碎石道床。

参考文献

[1] 潘昌实,谢正光. 地铁区间隧道列车振动测试与分析[J]. 土

木工程学报,1990(2):8.

PAN Changshi, XIE Zhengguang. Measurement and analysis of vibrations caused by passing trains in subway running tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 1990(2):8.

[2] 夏禾. 交通环境振动工程[M]. 北京:科学出版社,2010.

XIA He. Traffic environmental vibration engineering[M]. Beijing: Science Press, 2010.

[3] 闫维明,张祎,任珉,等. 地铁运营诱发振动实测及传播规律[J]. 北京工业大学学报,2006(2):6.

YAN Weiming, ZHANG Yi, REN Min, et al. In situ experiment and analysis of environmental vibration induced by urban subway transit[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006(2):6.

[4] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 北京:科学出版社,2015.

ZHAI Wanming. Vehicle-track coupling dynamics[M]. Beijing: Science Press,2015.

[5] 马蒙,刘维宁,邓国华,等. 基于校准法的地铁振动对西安钟楼影响研究[J]. 工程力学,2013(12):7.

MA Meng, LIU Weining, DENG Guohua, et al. Study of subway vibration impact on Xi'an Bell Tower by calibration method[J]. Engineering Mechanics, 2013(12):7.

(收稿日期:2020-12-18)

杭州地铁四期建设项目即将获批

杭州有望上马新地铁项目。据《都市快报》11月12日报道,在11日的全市招商引资暨项目促进大会上,杭州市地铁集团董事长朱少杰透露,杭州地铁四期建设项目即将获批,预计批复规模152.9 km,总投资约1380亿元。杭州是继上海、北京、广州、成都之后全国第五个地铁运营里程超500 km的城市。2012年11月首条线路运营以来,至今年8月运送乘客超43.4亿人次,在城市公共交通出行中的占比突破68%。相较于超千万常住人口和万亿以上的GDP城市,杭州市的地铁发展相对较缓,2019年末运营里程为130 km,低于同期的南京、武汉、成都等城市。2020年底,杭州地铁多条线路集中开通试运营,运营里程增至306 km,实现十城区全覆盖。今年9月,随着19号线、3号线北延段、10号线后通段开通,运营里程达516 km。

《杭州市综合交通发展“十四五”规划》显示,“十三五”期间城市轨道交通初步成网,但相比国内同等规模城市,线网规模及主城区线网密度仍偏低。“十四五”期间,全市轨道交通运营总里程将达600 km,并全面启动轨道交通四期建设规划项目建设。《都市快报》前述报道提到,杭州地铁四期建设规划将重点支持城西科创大走廊、临平经济开发区等区域发展,改善塘栖、崇贤、闻堰、紫金港科技城等人口密集区的市民出行条件;提前研究地铁四期建设项目沿线用地,锁定开发地块。

(来源:2022年11月14日《澎湃新闻》)