

# 地铁杂散电流干扰下管地电位 波动特征的傅里叶分析

董亮<sup>1</sup>, 姚知林<sup>1</sup>, 葛彩刚<sup>2</sup>, 石超杰<sup>1</sup>, 陈金泽<sup>1</sup>

(1.常州大学 江苏省油气储运技术重点实验室, 江苏 常州 213164;  
2.北京凯斯拓普科技有限公司, 北京 100028)

**摘要:** **目的** 辨识埋地管道受到地铁杂散电流干扰时管地电位的波动特征。**方法** 对上海、广州、深圳、武汉等 4 个城市中与地铁轨道邻近而受干扰的埋地管道进行 24 h 管地电位测试, 并利用 ORIGIN 软件对管地电位数据分别进行快速傅里叶变换处理, 统计分析不同城市埋地管道中地铁杂散电流干扰频率的分布特征。**结果** 管地通电电位对杂散电流干扰的响应快, 傅里叶变换后具有明显的幅值和频率分布特征, 统计发现同一测试点在干扰的不同时段内, 幅值较大即占主导的干扰频率范围接近, 最大幅值对应的干扰主频率一致。上海、广州、深圳、武汉等 4 个城市测试点地铁杂散电流干扰中占主导的干扰频率范围分别为 6~33、5~37、6~18、4~36 mHz, 干扰主频率分别为 9、7、7、5 mHz, 对应的地铁杂散电流干扰周期范围和主周期均与附近地铁线的站间行车间隔范围和主要站间行车间隔吻合, 这表明测试点附近地铁线的站间行车间隔决定了地铁杂散电流的干扰周期。**结论** 地铁杂散电流干扰下管地电位经傅里叶变换后能够得到其干扰频率范围及分布特征, 结合地铁线的站间行车间隔可以辨识出地铁杂散电流的具体干扰来源, 并为管道防腐或杂散电流腐蚀实验研究提供参考。

**关键词:** 埋地管道; 地铁; 杂散电流; 管地电位; 快速傅里叶变换; 干扰频率

**中图分类号:** TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)02-0294-10

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.02.031

## Fourier Analysis of the Fluctuation Characteristics of Pipe-to-Soil Potential under Metro Stray Current Interference

DONG Liang<sup>1</sup>, YAO Zhi-lin<sup>1</sup>, GE Cai-gang<sup>2</sup>, SHI Chao-jie<sup>1</sup>, CHEN Jin-ze<sup>1</sup>

(1.Jiangsu Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Technology, Changzhou University,  
Changzhou 213164, China; 2.Beijing Cathop Technology Co., Ltd, Beijing 100028, China)

**ABSTRACT:** In order to identify the fluctuation characteristics of pipe-to-soil potentials on buried pipelines with metro stray

收稿日期: 2020-07-05; 修订日期: 2020-09-14

Received: 2020-07-05; Revised: 2020-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51401017); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX19\_0671); 2018 年江苏省油气储运技术重点实验室开放课题

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51401017), Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (SJCX19\_0671), the Open Project of Jiangsu Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Technology in 2018

作者简介: 董亮(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为腐蚀与防护。邮箱: dongliang@cczu.edu.cn

**Biography:** DONG Liang (1983—), Male, Ph. D., Senior engineer, Research focus: corrosion and protection. E-mail: dongliang@cczu.edu.cn

引文格式: 董亮, 姚知林, 葛彩刚, 等. 地铁杂散电流干扰下管地电位波动特征的傅里叶分析[J]. 表面技术, 2021, 50(2): 294-303.

DONG Liang, YAO Zhi-lin, GE Cai-gang, et al. Fourier analysis of the fluctuation characteristics of pipe-to-soil potential under metro stray current interference[J]. Surface technology, 2021, 50(2): 294-303.

current interference, 24-hour pipe-to-soil potentials were tested on interfered buried pipelines which were close to the metro system in four cities including Shanghai, Guangzhou, Shenzhen and Wuhan. Then, fast Fourier transform (FFT) on those pipeline potential data was conducted by ORIGIN software, and the interference frequency was analyzed in different cities. The results showed that the pipe-to-soil potential responds quickly to stray current interference, and obvious amplitude and frequency distribution characteristics was found based on the on potential of buried pipeline after Fourier transform. The ranges of frequency with larger amplitude are close to each other, and the main interference frequencies with the largest amplitude are the same during different periods of interference. The ranges of dominant interference frequency of metro stray current in Shanghai, Guangzhou, Shenzhen and Wuhan test locations are 6~33 mHz, 5~37 mHz, 6~18 mHz and 4~36 mHz, respectively, and the main interference frequencies of metro stray current in four cities are 9 mHz, 7 mHz, 7 mHz, and 5 mHz, respectively, which are consistent with the main locomotive driving intervals between the stations of the nearby metro. Therefore, the interference cycles of metro stray current are determined by the locomotive driving intervals between metro stations. It can be concluded that the interference frequency range and distribution characteristics of the pipe-to-soil potential under the interference of metro stray current can be obtained after Fourier transform, and the interference source of metro stray current can be identified based on the correlation between the range of frequency characteristics obtained by FFT method and the locomotive driving intervals of metro system, which can provide reference for pipeline protection and experimental research on stray current corrosion.

**KEY WORDS:** buried pipeline, metro, stray current, pipe-to-soil potential, fast Fourier transform, interference frequency

截至 2019 年底, 全球有 167 个城市开通了地铁, 轨道里程达 15 622.61 km<sup>[1]</sup>。随着轨道交通的发展与地域条件的限制, 在开通地铁的城市中已经出现了较多埋地管道与地铁轨道线路并行或交叉等邻近的情况, 且这种案例的数量呈现增长的趋势<sup>[2-4]</sup>。在邻近地铁轨道的埋地管道上通常都会检测到杂散电流干扰, 致使管道存在杂散电流腐蚀的风险<sup>[5-11]</sup>。国内外均出现过地铁工程投运后, 其主体结构钢筋或附近钢质燃气管道发生多处腐蚀穿孔的情况<sup>[12-19]</sup>。

地铁杂散电流干扰下管地电位呈现不断变化的波动特征, 针对其干扰特征国内外开展了一些研究。刘瑶等<sup>[20]</sup>对北京 63 个不同程度与地铁交叉或平行的管道测试点进行管地电位测试, 根据管地电位呈现出的周期波动规律对管地电位图像进行局部放大分析, 统计出北京地铁杂散电流干扰引起的管地电位波动周期主要分布在 50~200 s。朱祥剑等<sup>[21]</sup>对北京、上海、深圳、无锡等 4 个城市地铁杂散电流干扰下的埋地管道的管地电位图像进行放大分析, 经统计后发现同一城市不同测试点管地通电电位波动周期分布范围接近, 不同城市的分布比例相差不大且均在 0~300 s。刘杰等<sup>[22]</sup>对某处与地铁线路交叉的管道进行管地电位测试, 同样对管地电位图像进行局部放大分析, 发现地铁杂散电流的干扰周期可能与地铁实际运行工况有关。上述 3 位研究者所采用的局部放大分析法由于需要人眼分辨并统计干扰波形的周期, 这使得研究的工作量变得较为繁重, 并可能会出现误差。王琼等<sup>[23]</sup>对距离铁轨 3.5 m 的管道进行管地电位高频测试, 对数据进行傅里叶变换后发现直流成分为 -0.38 V, 对

应的交流成分频率约为 50 Hz, 幅值为 2.68 V, 即管道受到了电气化铁路交流杂散电流干扰。尽管该结果验证了傅里叶变换在实际操作中对管道杂散电流数据处理的有效性, 但对于交流干扰而言同样可以测量交流管地电压进行判别。Chen 等<sup>[24]</sup>采用傅里叶变换对某测试点晚间时段 30 min 的管地电位数据进行分析, 同样采用观察的手段判断出测试点杂散电流的干扰频率范围为 0~0.1 Hz, 对管地电位中频率高于 0.1 Hz 的波动进行过滤后, 发现该段电位中有 20 个波峰, 同一时段内刚好有 20 辆机车通过测试点, 推测管地电位波峰的出现与机车通过测试点有关。而实际上, 由于地铁轨道交通采用的是连通的焊接轨, 即使没有机车通过测试点, 只要轨道中有车辆在运行, 管地电位就会出现干扰波动的情况。周宇等<sup>[25]</sup>以 100 Hz 的频率采集了受轨道交通动态杂散电流干扰下的管地电位数据, 并对 21:10—21:20、22:00—22:10、00:00—00:10 时段的数据进行傅里叶变换, 通过观察发现管道所受杂散电流干扰的频率主要集中在 0.5 Hz 以内, 并据此判断轨道交通运行行为为主要干扰源, 而对轨道交通运行与管地电位变化之间的规律未做深入研究。

针对地铁杂散电流干扰下管道的腐蚀, Qin 等<sup>[26]</sup>模拟了 X70 钢在动态杂散电流干扰条件下的腐蚀行为, 结果发现钢的腐蚀速率与干扰电流的周期有很强的相关性, 随着干扰周期的增加, 腐蚀速率逐渐增大直至稳定不变。为进一步研究地铁杂散电流干扰的频率范围和分布特征, 并明确管地电位变化与地铁运行工况的相关性, 本文采集了上海、广州、深圳、武汉等 4 个不同城市内多个测试点连续超过 24 h 的管地

电位数据,采用快速傅里叶变换对夜间、早间、午间、晚间等多个时段的数据进行处理和统计分析,并结合地铁的实际运行工况得出地铁杂散电流干扰的一般特征规律。

## 1 傅里叶变换方法

在处理数字信号时,通常可将信号分析分为时域分析与频域分析,而傅里叶变换就是一种将信号从时域转换到频域的变换形式。傅里叶变换的基本原理是,任何连续测量的时序或信号都可以表示为不同频率的正弦波或余弦波信号的无限叠加。利用这一原理,可以快速分析出平稳或非平稳信号的频率特征,而地铁杂散电流干扰下波动的管地电位就是一种典型的非平稳信号。离散傅里叶变换是傅里叶变换最基本的方法并有着重要的作用,信号的频谱分析、滤波处理等都可以通过离散傅里叶变换来完成。离散傅里叶的运算公式为:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk} \quad k=0 \sim (N-1) \quad (1)$$

设  $0 \leq i \leq N-1$ , 根据上式, 计算  $X(i)$  的展开式如下:

$$X(i) = x(0)W_N^{0i} + x(1)W_N^{1i} + x(2)W_N^{2i} + \dots + x(N-1)W_N^{(N-1)i} \quad (2)$$

式中:  $W_N$  是旋转因子,  $W_N = \exp\left(-j\frac{2\pi}{N}\right)$ , 当  $N$  很大时, 计算量非常大, 运行效率低。为了减少运算量 and 提高效率, 快速傅里叶变换利用  $W_N$  旋转因子具有的对称性和周期性, 把一个  $N$  项序列 (设  $N=2k$ ,  $k$  为正整数) 分成两个  $\frac{N}{2}$  项的子序列, 每个  $\frac{N}{2}$  点离散傅里叶变换需要  $\frac{N^2}{4}$  次运算, 再用  $N$  次运算把两个  $\frac{N}{2}$  点的离散傅里叶变换组合成一个  $N$  点的离散傅里叶变换, 这样变换以后, 使得  $N$  点的离散傅里叶变换乘法计算量由  $N^2$  降为  $N + \frac{N^2}{2}$ , 继续进行将子序列一分为二的操作, 直到将  $N$  项序列分为两两一组的离散傅里叶变换的计算单元, 计算量最终将由  $N^2$  降至  $N \log_2 N$ , 因此, 在现代信号分析中通常都是采用快速傅里叶变换替代离散傅里叶变换。

## 2 地铁杂散电流干扰下管地电位测试方法及数据基本特征

选取上海、广州、深圳、武汉等 4 个城市中与地铁邻近且受干扰严重的埋地管道作为测试对象, 采用

试片断电法测量管地电位, 包括管地通电电位和断电电位, 即在埋地管道阴极保护测试桩附近开挖测试坑, 将极化试片与铜/饱和硫酸铜参比电极 (CSE) 一同埋设, 将 uDL2 数据记录仪的 3 个接线端分别连接极化试片、参比电极和测试桩中埋地管道的引线。基于前文所述, 已有研究结果表明地铁杂散电流干扰的频率范围为 0~0.1 Hz 或处于 0.5 Hz 以内<sup>[24,25]</sup>, 而傅里叶变换可以处理得到采样频率一半以下的频率值, 因此, 设定采样频率为 1 Hz, 能够满足地铁杂散电流干扰频率分析要求。试片通断周期为通电 12 s/断电 3 s, 通电和断电电位采集均为延时 300 ms, 连续测试 24 h 以上。测试连线示意图见图 1。

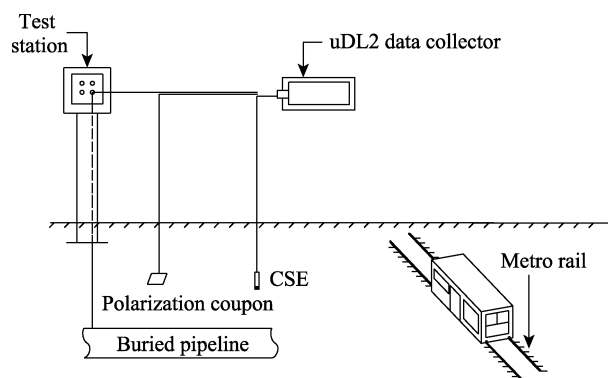


图 1 管地电位测试连接图

Fig.1 Schematic diagram of pipeline potential test

图 2 为上海、广州、深圳、武汉测试点埋地管道 24 h 电位图像, 4 个城市测试点埋地管道的通电电位和断电电位均呈现白天波动大、夜间相对平稳的特征。由于断电电位更接近试片的极化电位, 极化过程较慢且无 IR 降的影响, 各城市管地通电电位的波动均明显大于断电电位的波动。表 1 为 4 个城市管地电位数据及各测试点附近地铁运营时间的统计结果, 由于在地铁运营前后需要进行空运巡线和维修检查工作, 且地铁采用连通的焊接轨, 每当有车辆在铁轨上运行时, 就会出现杂散电流干扰, 因此, 各城市测试点的通电电位和断电电位出现明显波动的时间均早于附近地铁首班车发车时间, 明显波动终止的时间均晚于末班车到站时间。由于运营起始和即将停运阶段的发车数量较少, 首、末班车时段的管地电位波动小于白天其他时段的波动。

分别选取 4 个城市晚高峰时段的管地通电电位进行局部放大, 如图 3 所示, 可以发现管地通电电位上下波动具有一定的周期性, 且幅值和频率随时间不断变化, 显然是由多种不同的干扰波形叠加而成, 而具体的干扰频率和幅值无法直接从时域数据中获取, 后续利用快速傅里叶变换可对其进行变换分析。

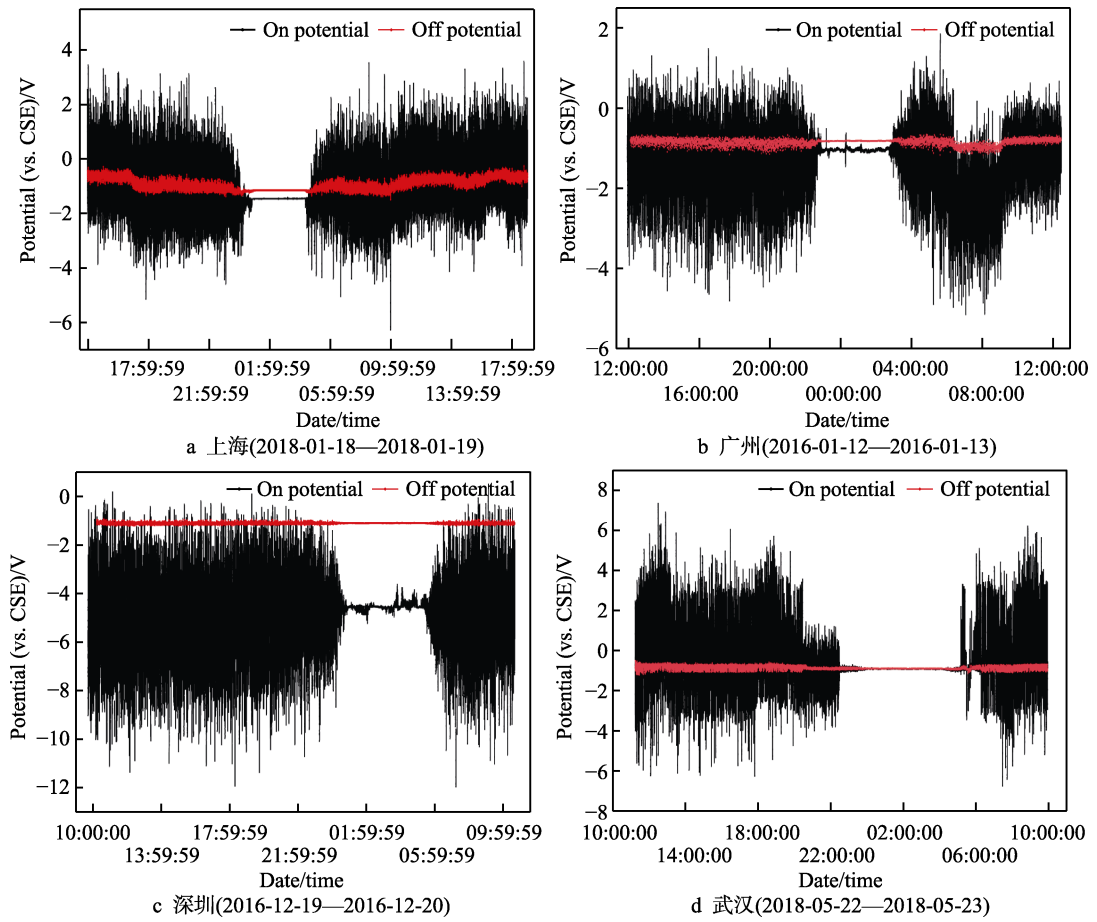


图 2 4 个城市测试点管地通电电位和断电电位图像  
Fig.2 On-off potential of the test points in four cities: a) Shanghai, b) Guangzhou, c) Shenzhen, d) Wuhan

表 1 4 个城市管地电位统计  
Tab.1 Statistics of pipeline potential in four cities

City	On potential (vs. CSE)/V		Off potential (vs. CSE)/V		Time	
	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Potential fluctuation time	Metro operating time
Shanghai	3.4	-6.3	-0.38	-1.43	4:30~1:00 (+1)	5:30~0:12 (+1)
Guangzhou	1.8	-5.2	-0.68	-1.2	3:20~1:00 (+1)	6:00~23:56
Shenzhen	0.25	-12.1	-1.05	-1.34	4:00~1:00 (+1)	6:30~0:09 (+1)
Wuhan	7.44	-6.65	-0.41	-1.11	5:20~0:00 (+1)	6:00~23:30

### 3 地铁杂散电流干扰下管地电位的傅里叶变换分析

#### 3.1 同一城市不同时段管地电位傅里叶变换分析

以上海 1#测试点采集的数据为例，选取 24 h、1:00—2:00、8:00—9:00、14:00—15:00 和 17:00—18:00 时段管地通电电位和断电电位数据，分别对应于全天、夜间停运及白天运行早、午、晚 3 个时间段，采用 ORIGIN 软件对数据分别进行快速傅里叶变换，变换结果如图 4、图 5 所示。

由图 4a 可见，对管地 24 h 通电电位进行快速傅

里叶变换后，在多个频率处出现峰值点，这些峰值点中的最大幅值为 9 mHz 处的 172 mV。图 4b 断电电位频谱图像中也在一些频率处出现峰值点，但由于断电电位波动并不大且采样的数据量较小，这些峰值点的幅值都相对较小且频率相对较大。由图 5 可见，不同时段的管地电位在经过快速傅里叶变换后，通电电位频谱图像的波动明显大于断电电位频谱图像的波动，且夜间时段的通、断电电位频谱图像均波动不大，这与夜间实际的管地电位平稳特征吻合。通电电位频谱在早、午、晚 3 个时段的最大幅值均出现在 9 mHz 位置，最大幅值分别为 322、354、353 mV，均大于 24 h 通电电位频谱中的最大幅值 172 mV，因为傅里叶变换在对杂散电流信号进行分析时，信号分析结

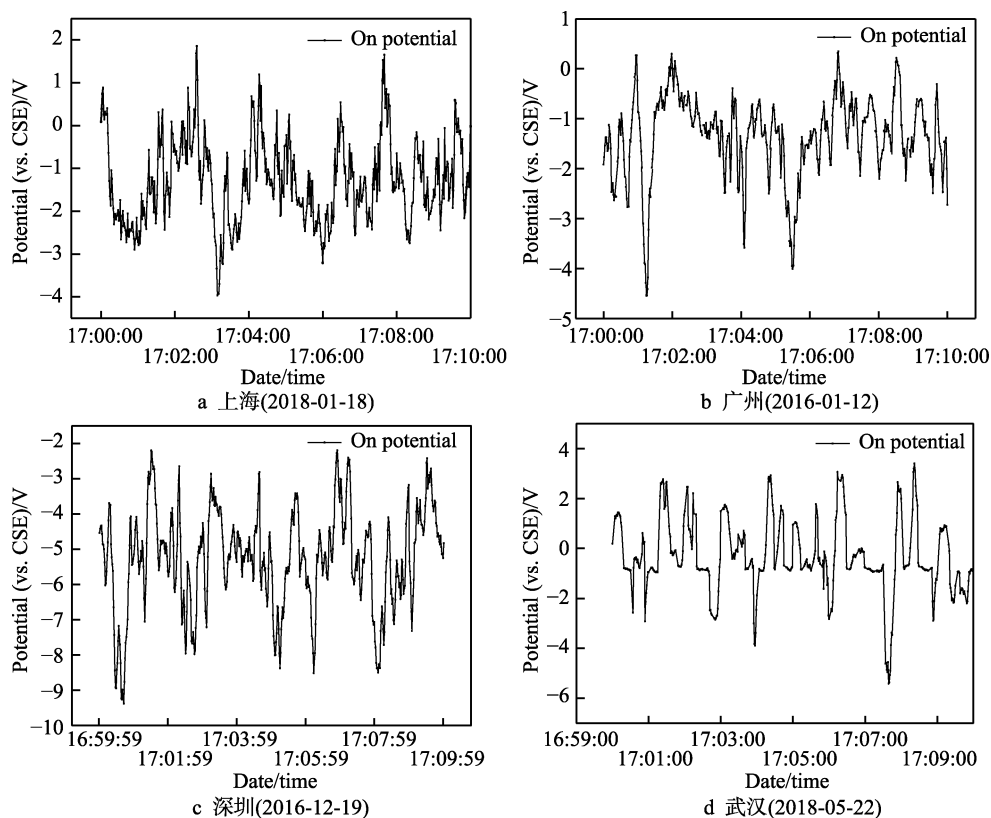


图3 4个城市测试点 17:00~17:10 管地通电电位图像

Fig.3 On potential from 17:00 to 17:10 of the test points in four cities: a) Shanghai, b) Guangzhou, c) Shenzhen, d) Wuhan

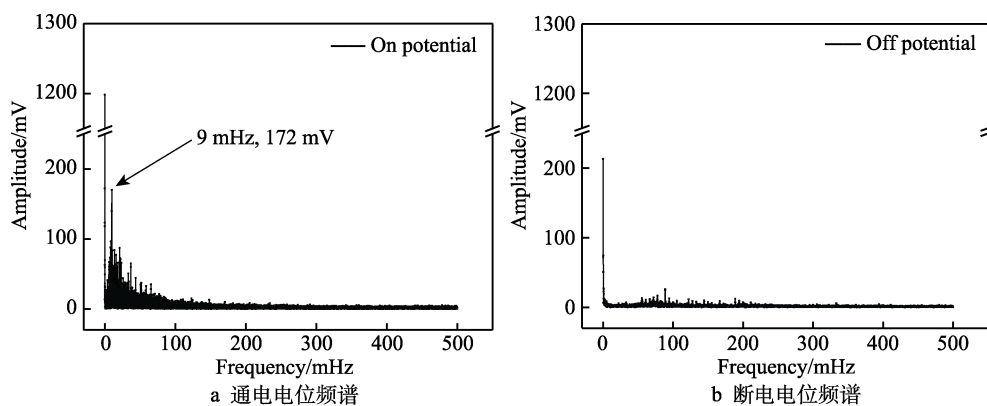


图4 上海1#测试点 24 h 管地电位频谱图像

Fig.4 FFT spectrum of pipeline potential at Shanghai test point 1# in 24 h

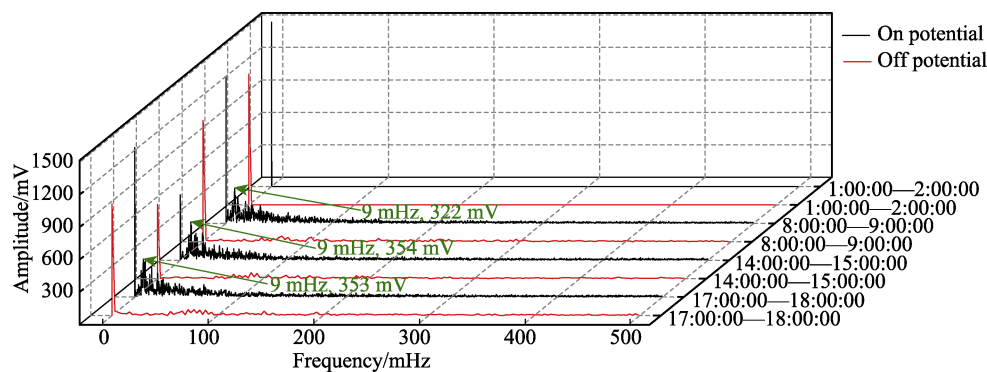


图5 上海1#测试点 1 h 管地电位频谱图像

Fig.5 FFT spectrum of pipeline potential at Shanghai test point 1# in 1 h

果的平均值受该段信号的持续时长影响,管地电位白天波动大,夜间波动小,因此,全天 24 h 管地电位频谱中的最大幅值要小于白天 1 h 管地电位频谱中的最大幅值。

在对管地电位数据 24 h 和每 1 h 进行快速傅里叶变换后,进一步选取上海 1#测试点 17:00—18:00 与首、末班车发车后各半小时内的通电电位数据,并对数据每 10 min 进行 1 次快速傅里叶变换,图 6、图 7 为

变换后的频谱图像。其中首、末班车发车后各半小时内的干扰最大幅值均小于 17:00—18:00 时段的干扰最大幅值,这与首、末班车时段和白天其他时段的管地电位波动特征吻合。图中各时段干扰最大幅值对应的频率均为 9 mHz,该结果与 24 h 和每 1 h 进行 1 次快速傅里叶变换的结果一致。在后文中,将各时段分析结果中干扰最大幅值对应的频率称为干扰主频率,对应的周期称为干扰主周期。

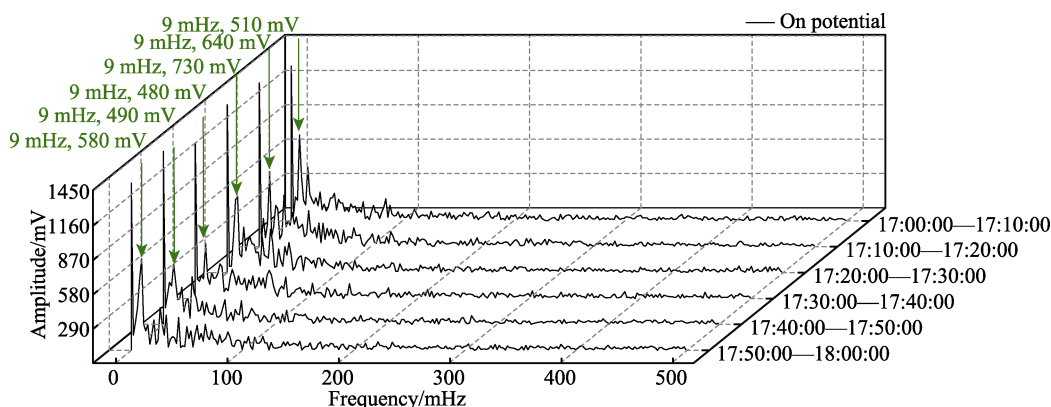


图 6 上海 1#测试点 17:00—18:00 每 10 min 管地通电电位频谱图像

Fig.6 FFT spectrum of on potential every 10 min from 17:00 to 18:00 at the Shanghai test point 1#

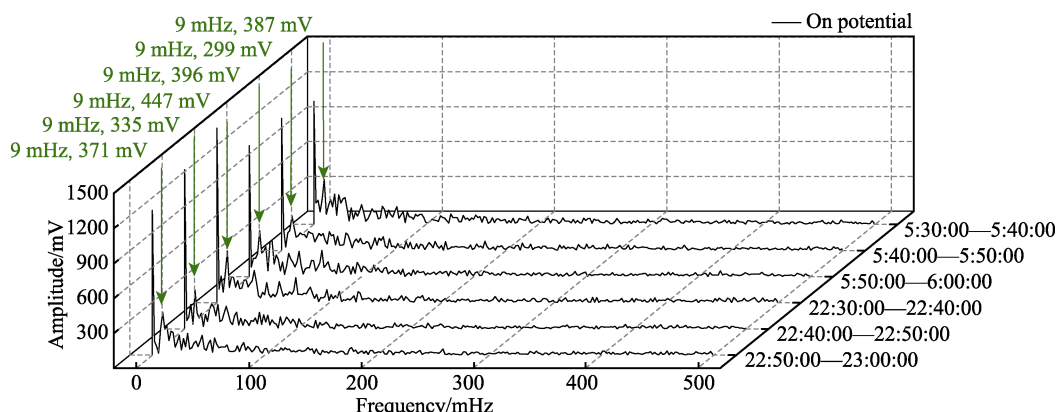


图 7 上海 1#测试点首、末班车发车后每 10 min 管地通电电位频谱图像

Fig.7 FFT spectrum of on potential every 10min from 5:30 to 6:00 and 22:30 to 23:00 at Shanghai test point 1#

为验证同一管道上受不同地铁线路影响的测试点管地电位波动是否具有相同的规律,选择该管线上受另一地铁线路影响的 2#测试点采集的数据,对 1:00—2:00、8:00—9:00、14:00—15:00、17:00—18:00 时段管地通电电位数据分别进行快速傅里叶变换,变换结果见图 8。该测试点的通电电位数据分析结果同 1#测试点的数据分析结果呈现相同的规律,除夜间没有明显波动外,其他时段均有明显的峰值点,其中幅值较大的峰值点集中在低频区域。各时段干扰的最大幅值分别为 315、339、337 mV,与 1#测试点各时段干扰的最大幅值接近,且这些幅值均出现在同一频率处,即各时段的干扰主频率相同。

为分析地铁杂散电流的频率范围及主要分布特征,选取上海 1#测试点早、午、晚 3 个时段频谱图

像中幅值前 10、前 11~20、前 21~50 以及幅值大于 20 mV 的点统计见图 9。图 9 中可见 3 个时段幅值前 10 点的周期集中在 30~143 s,对应干扰频率为 7~33 mHz;幅值前 11~20 点的周期集中在 23~163 s,对应干扰频率为 6~44 mHz;前 21~50 点的周期集中在 15~187 s,对应干扰频率为 5~67 mHz;幅值大于 20 mV 点的周期范围为 4~202 s,对应干扰频率为 5~250 mHz。在地铁官网中调研上海 1#测试点附近地铁线的站间等待时长,并除去地铁到站停留时间后统计出了地铁的站间行车间隔,发现该地铁线的站间行车间隔范围为 30~150 s,主要站间行车间隔为 120 s,这与 1#测试点 3 个时段幅值前 10 点的周期范围和干扰主周期相近。图 9 中幅值前 10 点的幅值范围明显大于另外 3 组的幅值范围,后文中将幅值前 10 点的周期范围称为



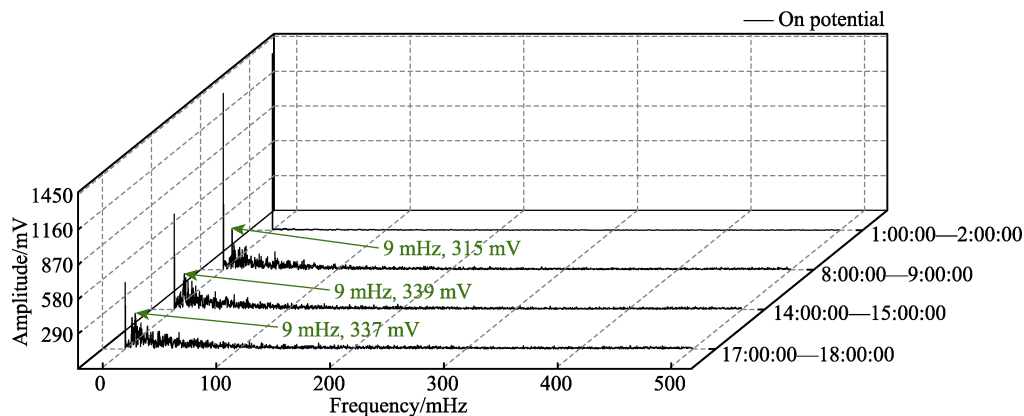


图8 上海2#测试点1 h 管地通电电位频谱图像

Fig.8 FFT spectrum of on pipeline potential at Shanghai test point 2# in 1 h

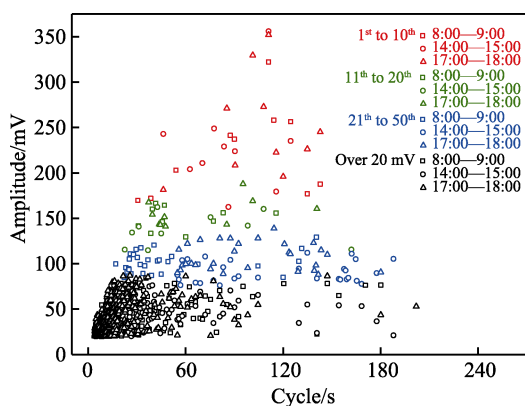


图9 上海1#测试点管地通电电位频谱统计图

Fig.9 Statistic of on potential spectrum at Shanghai test point 1#

该杂散电流干扰中占主导的干扰周期范围,对应的频率范围称为该杂散电流干扰中占主导的干扰频率范围。

### 3.2 不同城市管地电位傅里叶变换分析

从广州、深圳、武汉 3 个城市测试点的电位数据中同样选取 1:00—2:00、8:00—9:00、14:00—15:00、17:00—18:00 等 4 个时段数据,对这些数据分别进行快速傅里叶变换,图 10—12 为变换后的频谱图像。3 个城市的通电电位频谱图像的波动都明显大于断

电电位频谱图像的波动,夜间时段通、断电电位频谱图像均波动不大。3 个城市的通电电位频谱图像中幅值较大的峰值点均集中在低频区,且早、午、晚 3 个时段的干扰主频率均为固定值,广州 3 个时段的干扰主频率均为 7 mHz,对应幅值分别为 290、305、344 mV;深圳 3 个时段的干扰主频率均为 7 mHz,对应幅值分别为 531、561、580 mV;武汉 3 个时段的干扰主频率均为 5 mHz,对应幅值分别为 400、479、411 mV。

对上海及上述 3 个城市早、午、晚时段通电电位频谱中干扰幅值前 10 的峰值点进行特征统计,结果如表 2 所示。4 个城市测试点地铁杂散电流干扰中占主导的干扰周期范围为 27~250 s,对应的干扰频率为 4~37 mHz。各城市间的干扰最大幅值有较大差异,其中深圳的干扰最大幅值明显大于其他 3 个城市,可能有多种原因导致这一差异,包括供牵引变电站间距、牵引电流大小、轨道过渡电阻、土壤电阻率、管道和轨道相对位置等<sup>[27-28]</sup>。各城市间的干扰主频率也有所不同,广州和深圳的干扰主频率一致,上海测试点地铁杂散电流的干扰主频率要大于其他 3 个城市,这可能与上海地铁交通更发达、站间行车间隔更短的原因有关,在后文中将进一步讨论。

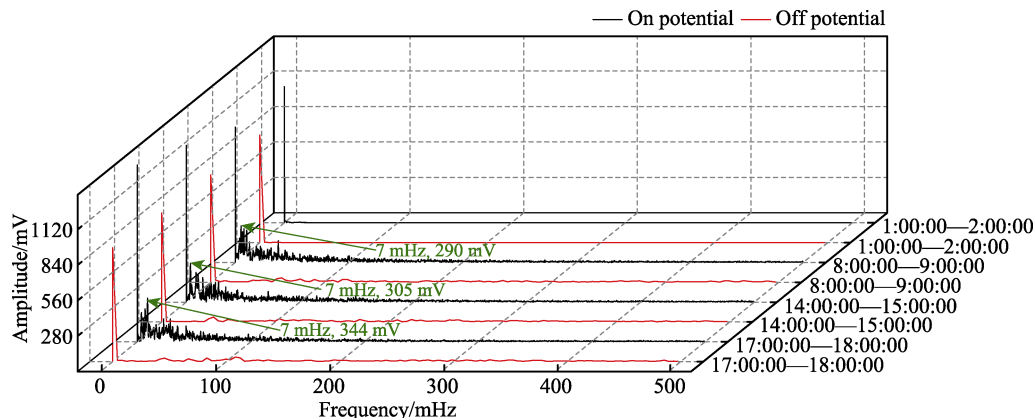


图10 广州测试点1 h 管地电位频谱图像

Fig.10 FFT spectrum of pipeline potential at Guangzhou test point in 1 h

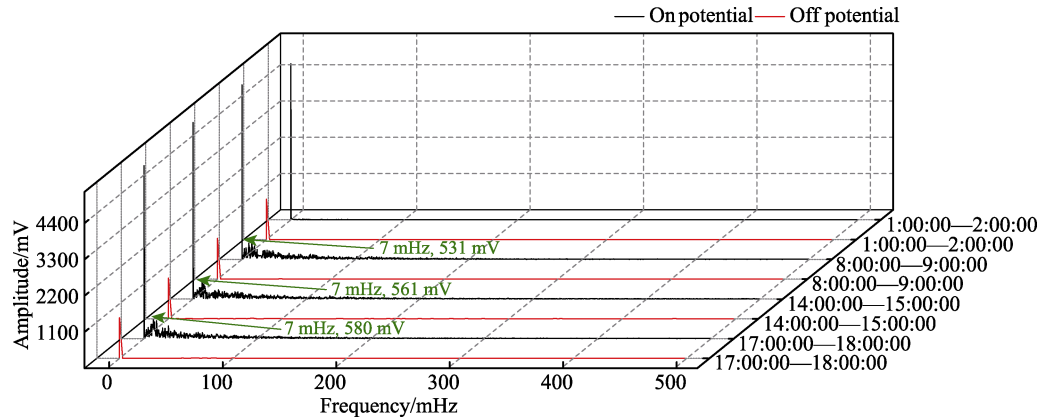


图 11 深圳测试点 1 h 管地电位频谱图像  
Fig.11 FFT spectrum of pipeline potential at Shenzhen test point in 1 h

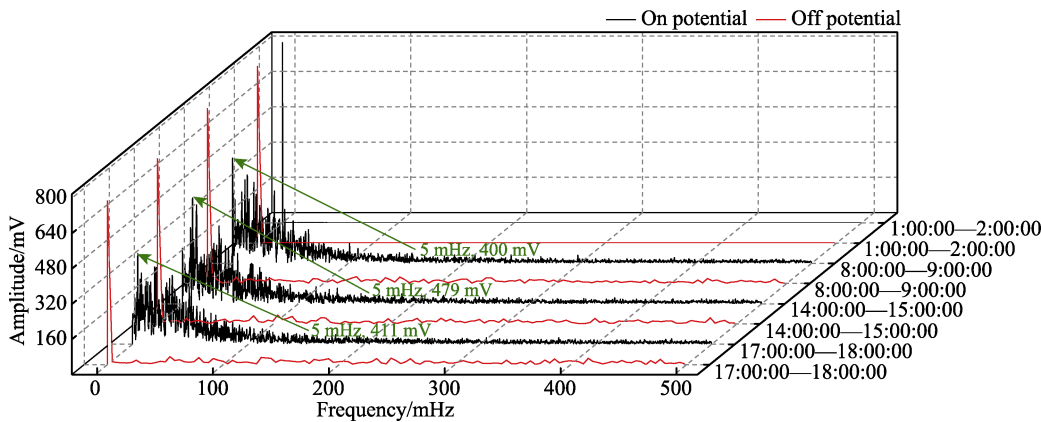


图 12 武汉测试点 1 h 管地电位频谱图像  
Fig.12 FFT spectrum of pipeline potential at Wuhan test point in 1 h

表 2 4 个城市测试点不同时段干扰特征数据  
Tab.2 Interference characteristics of four cities test points at different times

City	Dominant interference cycle range/s	Dominant interference frequency range/mHz	Maximum amplitude/mV	Main interference frequency/mHz	Main interference cycle/s
Shanghai 1#	30~143	7~33	354	9	111
Shanghai 2#	34~166	6~29	339	9	111
Guangzhou	27~200	5~37	344	7	142
Shenzhen	56~166	6~18	580	7	142
Wuhan	28~250	4~36	479	5	200

3.3 管地电位波动特征与地铁运行工况对比

在各城市地铁官网中调研 4 个城市测试点附近地铁的站间行车间隔，并对间隔时间进行占比统计，结果如图 13 所示，在调研过程中，由于地铁系统提供的到站时刻表只能精确到半分钟，因此，理论站间行车间隔与实际站间行车间隔可能存在 15 s 以内的误差。结合 4 个城市管地电位快速傅里叶变换的分析结果统计如表 3 所示。上海、广州、深圳、武汉地铁杂散电流干扰中占主导的干扰周期范围与地铁的站间行车间隔范围基本吻合。其中 4 个城市测试点附近地铁的站间行车间隔分别以 120、150、150、210 s 为主，该结果与地铁杂散电流的干扰主周期基本吻合。由于轨道采用连通的焊接轨道，列车从上一站加

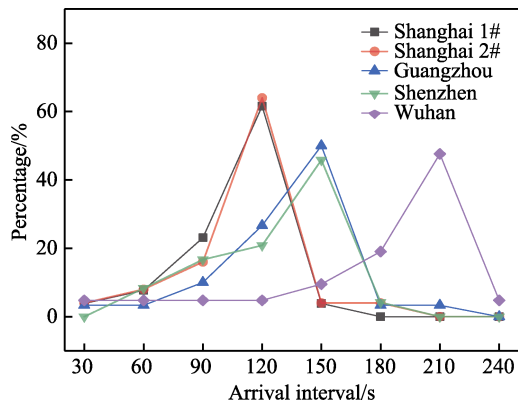


图 13 4 个城市测试点附近地铁各站间行车间隔占比统计图  
Fig.13 Statistics of driving interval between nearby metro stations in four cities



表 3 快速傅里叶变换结果与测试点附近地铁线的实际工况统计  
Tab.3 Results of fast Fourier transform and actual working condition of nearby metro

City	Dominant interference cycle range/s	Main interference cycle/s	Driving interval range/s	Main driving interval/s
Shanghai 1#	30~143	111	30~150	120
Shanghai 2#	34~166	111	30~180	120
Guangzhou	27~200	142	30~210	150
Shenzhen	55~166	142	60~180	150
Wuhan	28~250	200	30~240	210

速启动至下一站减速停车时,管道测试点会受到一次完整周期的地铁杂散电流干扰,管地电位都会出现一个周期的波动,当一条地铁线中有多个站间行车间隔相同且有多辆列车运行时,与之对应周期的杂散电流干扰幅值就会叠加增大。地铁线的站间行车间隔决定了地铁杂散电流的干扰周期。

## 4 结论

1) 由于断电电位极化过程较慢,使得响应速度较慢,而通电电位极化过程快,响应速度快且数据采集量大,因此,对通电电位进行傅里叶变换可以更好地体现出管道受地铁杂散电流干扰的特征。在对上海测试点管地电位进行快速傅里叶变换后,通电电位频谱图像除夜间外均有明显的波动,幅值大于 20 mV 的频率集中在 5~250 mHz。同一测试点在干扰的不同时段内占主导的干扰频率范围接近,最大幅值对应的干扰主频率一致。

2) 上海、广州、深圳、武汉测试点地铁杂散电流干扰中占主导的干扰频率范围分别为 6~33、5~37、6~18、4~36 mHz,对应的周期范围与测试点附近地铁线的站间行车间隔范围吻合。各城市测试点地铁杂散电流的干扰主频率分别为 9、7、7、5 mHz,对应的干扰主周期与测试点附近地铁线的主要站间行车间隔一致,地铁线的站间行车间隔决定了地铁杂散电流的干扰周期。

3) 快速傅里叶变换分析可以有效地分析出地铁杂散电流的干扰频率范围及分布特征,结合附近地铁的实际运行工况可以辨识地铁杂散电流干扰的具体来源,同时可为管道防腐和实验研究的参数设定提供参考。

### 参考文献:

- [1] 韩宝明, 陈佳豪, 杨运节, 等. 2019 年世界城市轨道交通运营统计与分析综述[J]. 都市快轨交通, 2020, 33(1): 4-8.  
HAN Bao-ming, CHEN Jia-hao, YANG Yun-jie, et al. Statistical analysis of urban rail transit operation in the world in 2019: A review[J]. Urban rapid rail transit, 2020, 33(1): 4-8.
- [2] ALLAHKARAM S R, ISAKHANI-ZALARIA M,

- DERAKHSHANI M, et al. Investigation on corrosion rate and a novel corrosion criterion for gas pipelines affected by dynamic stray current[J]. Journal of natural gas science and engineering, 2015, 26(9): 453-460.
- [3] 魏洲邦, 刘广桥, 曹刚. 地铁杂散电流对埋地管道的影响与防护[J]. 全面腐蚀控制, 2020, 34(3): 41-45.  
WEI Zhou-bang, LIU Guang-qiao, CAO Gang. Influence and protection of buried metal pipelines on stray current[J]. Total corrosion control, 2020, 34(3): 41-45.
- [4] ALAMUTI M M, NOURI H, JAMALI S. Effects of earthing systems on stray current for corrosion and safety behaviour in practical metro systems[J]. IET electrical systems in transportation, 2011, 1(2): 69-79.
- [5] 查鑫堂, 张建文, 陈胜利, 等. 杂散电流干扰和阴极保护作用下碳钢腐蚀规律研究[J]. 表面技术, 2015, 44(12): 12-18.  
ZHA Xin-tang, ZHANG Jian-wen, CHEN Sheng-li, et al. Corrosion behavior of carbon steel in interference of stray current and cathodic protection[J]. Surface technology, 2015, 44(12): 12-18.
- [6] 符耀庆, 王秀通, 陈胜利. 南朗段埋地天然气管道杂散电流检测与治理[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 22-27.  
FU Yao-qing, WANG Xiu-tong, CHEN Sheng-li. Stray current detection and treatment for buried natural gas pipeline of Nanlang segment[J]. Surface technology, 2016, 45(2): 22-27.
- [7] QIAN S, CHENG Y. Accelerated corrosion of pipeline steel and reduced cathodic protection effectiveness under direct current interference[J]. Construction & building materials, 2017, 148: 675-685.
- [8] XU S Y, LI W, WANG Y Q. Effects of vehicle running mode on rail potential and stray current in DC mass transit system[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2013, 62(8): 3569-3580.
- [9] ZAKOWSKI K, DAROWICKI K, ORLIKOWSKI J, et al. Electrolytic corrosion of water pipelines system in the remote distance from stray currents: Case study[J]. Case studies in construction materials, 2016, 4: 116-124.
- [10] CHEN Z G, QIN C K, TANG J X. Experiment research of dynamic stray current interference on buried gas pipeline from urban rail transit[J]. Journal of natural gas science

- and engineering, 2013(15): 76-81.
- [11] CHEN Z P, KOLEVA D, VAN B K. A review on stray current-induced steel corrosion in infrastructure[J]. Corrosion reviews, 2017, 35(6): 397-423.
- [12] THORSTEN E, BERND I. Stray current-induced corrosion in cathodic protection installations of steel-reinforced concrete structures: FEM study of the critical parameters[J]. Materials and corrosion, 2020, 71: 738-748.
- [13] TANG K K. Stray current induced corrosion of steel fibre reinforced concrete[J]. Cement and concrete research, 2017, 100: 445-456.
- [14] NI T W, BI T T, YANG Z G. Failure analysis on abnormal perforation of super large diameter buried gas pipeline nearby metro[J]. Engineering failure analysis, 2019, 103: 32-43.
- [15] 仇洪云, 张辉, 邢琳琳, 等. 杂散电流对埋地燃气管道腐蚀影响研究[J]. 全面腐蚀控制, 2017, 31(11): 75-77.  
ZHANG Hong-yun, ZHANG Hui, XING Lin-lin, et al. Study on effects of stray current on corrosion of buried gas pipeline[J]. Total corrosion control, 2017, 31(11): 75-77.
- [16] CHARALAMBOUS C A, AYLOTT P. Dynamic stray current evaluations on cut-and-cover sections of DC metro systems[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2014, 63(8): 3530.
- [17] OGUNSOL A A, MARISCOTTI A, SANDROLIN I L. Estimation of stray current from a DC-electrified railway and impressed potential on a buried pipe[J]. IEEE transactions on power delivery, 2012, 27(4): 2238-2246.
- [18] BERTOLINI L, CARSANA M, PEDEFERRI P. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current[J]. Corrosion science, 2007, 49(3): 1056-1068.
- [19] SOLGAARD A O S, CARSANA M, GEIKER M R, et al. Experimental observations of stray current effects on steel fibres embedded in mortar[J]. Corrosion science, 2013(74): 1-12.
- [20] 刘瑶, 谭松玲, 邢琳琳, 等. 北京埋地燃气管道地铁杂散电流干扰影响现场检测及规律分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019, 31(4): 429-435.  
LIU Yao, TAN Song-lin, XING Lin-lin, et al. Detection and analysis of interference with buried gas pipelines from subway stray current in Beijing area[J]. Corrosion science and protection technology, 2019, 31(4): 429-435.
- [21] 朱祥剑, 杜艳霞, 覃慧敏, 等. 地铁杂散电流干扰下埋地管道管地电位动态波动规律[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(12): 878-885.  
ZHU Xiang-jian, DU Yan-xia, QIN Hui-min, et al. Dynamic fluctuation characteristics of pipe-to-soil potential on buried pipelines under interference of stray current from subway[J]. Corrosion & protection, 2019, 40(12): 878-885.
- [22] 刘杰, 杜艳霞, 覃慧敏, 等. 地铁杂散电流对埋地管道的干扰规律[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(1): 43-47.  
LIU Jie, DU Yan-xia, QIN Hui-min, et al. Interference regularity of metro stray current on buried pipelines[J]. Corrosion & protection, 2019, 40(1): 43-47.
- [23] 王琼, 黄琦, 张昌华. 基于傅里叶变换的管道杂散电流分析及应用[J]. 管道技术与设备, 2011(5): 39-41.  
WANG Qiong, HUANG Qi, ZHANG Chang-hua. Analysis and application of stray current in pipeline based on Fourier transformation[J]. Pipeline technology and equipment, 2011(5): 39-41.
- [24] CHEN Z G, QIN C K, ZHANG Y J, et al. Research of impact of stray current from urban rail transit system on buried gas pipeline[J]. Advanced materials research, 2011, 239-242: 1219-1222.
- [25] 周宇, 秦朝葵, 陈志光. 轨道交通动态杂散电流干扰及傅里叶分析[J]. 煤气与热力, 2013, 33(2): 28-32.  
ZHOU Yu, QIN Chao-kui, CHEN Zhi-guang. Fourier analysis of dynamic stray current of rail transit[J]. Gas & heat, 2013, 33(2): 28-32.
- [26] QIN Hui-min, DU Yan-xia, LU Min-xu, et al. Effect of dynamic DC stray current on corrosion behavior of X70 steel[J]. Materials and corrosion, 2020, 71: 1-19.
- [27] 韩雪. 直流杂散电流下埋地金属管线的腐蚀与防护研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2015.  
HAN Xue. Corrosion and protection of buried metal pipelines under DC stray current situation[D]. Dongying: China University of Petroleum, 2015.
- [28] LINDEMUTH D, CRABTREE D. AC and DC stray current mitigation and corrosion control for a new urban pipeline[C]// Corrosion 2012. Atlanta: NACE, 2012.