

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2023.05.017

动态杂散电流的时频特征 及腐蚀行为研究

夏 雪, 杨晓峰, 陈茂鲁, 郑琼林

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘 要: 城市轨道交通直流牵引供电系统中, 部分走行轨回流电流泄漏至大地形成杂散电流, 易导致埋地金属的电化学腐蚀问题。实际系统中多列车频繁启停使得杂散电流表现为典型的动态信号, 时频特征的提取有助于研究其腐蚀行为。在建立杂散电流数学模型的基础上, 通过 S 变换提取杂散电流的典型时频分布特征, 并基于失重测试及电化学测试研究典型频率下杂散电流的腐蚀行为。实验结果表明, 动态杂散电流的直流及低频交流分量均会影响金属的电化学腐蚀过程, 且腐蚀速率随电流密度的增大及交流频率的降低而增加。

关键词: 城市轨道交通; 杂散电流; 电化学腐蚀; S 变换; 电化学测试

中图分类号: TM 922; TM 46

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2023)05-0117-08

Time-frequency Characteristics and Corrosion Behavior of Dynamic Stray Current

XIA Xue, YANG Xiaofeng, CHEN Maolu, ZHENG Trillion Q

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: In the DC traction power supply system of an urban rail transit system, the partial return current from running rails may leak to the earth and form a stray current, which can easily cause the electrochemical corrosion of buried metals. A stray current would appear as a nonstationary signal owing to the frequent start and stop of multiple trains in an actual system. Its time-frequency characteristic is conducive to the study of its corrosion behavior. Based on the mathematical model of the traction power system, a time-frequency analysis of the stray current signal was conducted using the S-transform. Furthermore, the corrosion behavior of stray currents at typical frequencies was studied based on weight-loss and electrochemical tests. The experimental results show that both the DC and low-frequency AC components of the dynamic stray current affect the electrochemical corrosion process of metals and that the corrosion rate increases with increasing current density and decreasing AC current frequency.

Keywords: urban rail transit; stray current; electrochemical corrosion; S-transform; electrochemical tests

近年来, 城市轨道交通凭借其速度快、运量大、安全便捷等优势, 呈现高速发展趋势^[1-2]。直流牵引供电系统通常采用走行轨兼作列车电流的回流路径^[3], 钢轨

纵向电阻使得走行轨存在对地压降, 即轨道电位^[4-6]。此外, 走行轨对大地之间并非完全绝缘, 这将导致部分回流电流泄漏至周边大地形成杂散电流^[7-9]。杂散电

收稿日期: 2022-11-21 修回日期: 2023-03-14

第一作者: 夏雪, 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在轨道交通中的应用, 20121509@bjtu.edu.cn

通信作者: 杨晓峰, 男, 副教授, 博士生导师, 从事轨道交通杂散电流治理应用研究, xfyang@bjtu.edu.cn

基金项目: 北京市自然科学基金项目(3222054), 国家自然科学基金重点项目(51737001)

引用格式: 夏雪, 杨晓峰, 陈茂鲁, 等. 动态杂散电流的时频特征及腐蚀行为研究[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(5): 117-124.

XIA Xue, YANG Xiaofeng, CHEN Maolu, et al. Time-frequency characteristics and corrosion behavior of dynamic stray current[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(5): 117-124.

流会进一步对沿线埋地金属构件等产生电化学腐蚀现象^[10-11], 严重时甚至引起管道泄漏、火灾等事故^[12-13]。

在实际运行线路中, 由于列车运行图复杂且列车频繁启停, 杂散电流呈动态分布, 含有丰富的直流分量和低频交流分量。文献[14, 15]分析了直流杂散电流作用下金属的腐蚀行为; 文献[16, 17]研究了工频 50 Hz 的交流杂散电流对金属腐蚀的影响。鉴于实际牵引供电系统站间距小, 列车运行周期通常为几十至数百秒, 杂散电流呈典型低频交流分布, 但现有研究多聚焦于杂散电流的直流分量或工频及以上的交流分量, 对其中的低频交流分量引起的腐蚀研究则非常有限。直流杂散电流腐蚀遵循法拉第电解定律, 金属的腐蚀量与电流密度、通电时间成正比^[18]; 而交流杂散电流腐蚀的复杂性使其无法使用法拉第定律预估腐蚀量^[19], 因此有必要分析其时频特征对电化学腐蚀行为的影响规律。鉴于传统傅里叶变换在处理非平稳信号时, 存在频谱泄漏等问题, 文献[20, 21]分别引入短时傅里叶变换与连续小波变换的时频联合分析方法研究轨道电位与埋地管道极化电位的时频特征。然而短时傅里叶变换下窗函数固定, 无法兼顾时间和频率分辨率; 而连续小波变换一旦选定小波基, 其时频窗无法根据动态信号自动调整, 导致难以完整提取信号的时频特征。而 S 变换的高斯窗宽度可随频率改变, 能够更好地分析动态信号的时频特征, 故本文基于 S 变换提取杂散电流的时频谱, 以进一步评估其腐蚀行为。

本文首先引入基于可变高斯窗的 S 变换对杂散电流开展时频分析, 提取其时频谱特征。在此基础上, 针对杂散电流的直流及典型低频交流分量, 以城市轨道交通中常用的 Q235 钢作为研究对象, 搭建了腐蚀测试验证平台进一步研究动态杂散电流的腐蚀行为。最后通过失重测试与电化学测试开展了杂散电流直流及交流分量的腐蚀行为研究。

1 杂散电流的时频分析算法

1.1 轨道电位与杂散电流产生

在直流牵引供电系统中, 列车自接触网(或第三轨)取流, 经走行轨回流至牵引所负极, 形成闭合的电气回路。但走行轨对地之间并非完全绝缘, 因此部分列车电流经周边土壤或埋地金属管道返回牵引所负极, 即为杂散电流, 如图 1 所示。杂散电流会在流出金属部件处产生电化学腐蚀现象, 缩短金属结构的使用寿命, 带来潜在的安全隐患。

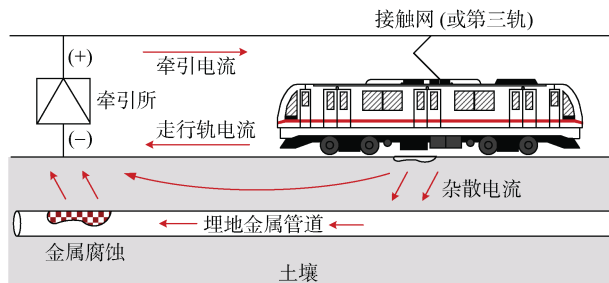


图 1 轨道电位与杂散电流的产生

Figure 1 Generation of rail potential and stray current

1.2 杂散电流的 S 变换算法

城市轨道交通中普遍存在站间距小、列车运行工况复杂且启停频繁的特点, 这使得杂散电流信号呈低频交流非平稳特征。考虑到传统傅里叶变换在处理非平稳信号时存在频谱泄漏等问题, 难以准确提取其时频谱, 故本文引入 S 变换的时频分析方法处理杂散电流信号。

S 变换是 R.G.Stockwell 于 1996 年提出的一种时频分析方法^[22], 是傅里叶变换在非平稳信号场景中的推广。其基本思想为在一个时间跨度可变的窗函数内假设信号平稳, 通过傅里叶变换提取局部频谱, 进而在时间轴移动窗函数以得到信号的时频特征。时变信号 $x(t)$ 的一维连续 S 变换定义为:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \omega(\tau - t, f) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

窗函数为:

$$\omega(\tau - t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-f^2(\tau - t)^2}{2} \right)} \quad (2)$$

其中, τ 决定窗函数在时间轴的位置, 频率 f 决定窗函数的宽度。窗函数以频率 f 为自变量, 随频率 f 变化主动调整时间分辨率, 使 S 变换呈现渐进式分辨率的特点^[23], 即对于时变信号 $x(t)$ 中的低频成分, S 变换能获得良好的频率分辨率; 而对于其中的高频成分, 则能获得良好的时间分辨率, 故可完整描述信号的时频特征。此外, S 变换无损可逆的特点使其能完整重构时变信号 $x(t)$, 表示为:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} S[\tau, f] d\tau \right] e^{j2\pi ft} df \quad (3)$$

S 变换不仅克服了短时傅里叶变换窗口高度与宽度固定的缺陷, 同时也克服了小波变换效果受限于特定基波的不足, 能完整提取信号中的时频统计特征, 且具有较好的抗噪声能力和无损可逆的特点, 更适用

于非平稳动态杂散电流信号的时频分析。

鉴于杂散电流方向及幅值的不确定性,实际杂散电流难以直接测量,通常以埋地测量电极与参考电极的极化电位作为间接指标评估杂散电流的泄漏水平。考虑到极化电位与轨道电位直接相关,且牵引所负极为杂散电流的最终回流点,其轨道电位可通过牵引所的电位监测系统自动测量,故本文以牵引所轨道电位间接表征杂散电流,进而采用S变换提取其时频特征。

2 动态杂散电流的时频分析

2.1 杂散电流分布

为简化分析,本文选取典型双边直流牵引供电系统模型,在两牵引所之间设置一车站,相邻两站间的距离均为2.5 km,即牵引所区间总长为5 km。牵引供电系统的仿真参数如表1所示。

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值
接触网电阻 $R_c/(m\Omega/km)$	75
走行轨电阻 $R_r/(m\Omega/km)$	18
轨-地过渡电阻 $R_g/(\Omega\cdot km)$	15
区间长度 L/km	5
牵引所电压 U_{TS}/V	1 500

以图2所示典型列车运行图开展仿真分析。列车1、2与列车3在两牵引所间分别完成一次、两次“牵引-匀速-制动”过程,总运行时间 $T=315$ s。基于此得到图3所示牵引所处的轨道电位,可知其局部频率随时间改变,为非平稳信号。

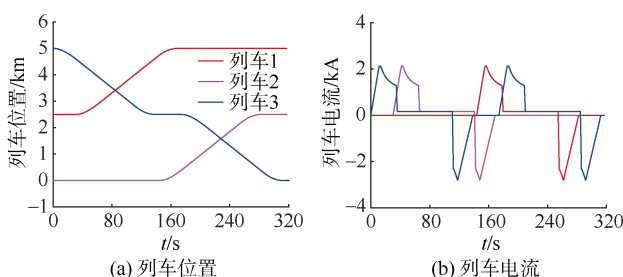


图2 列车运行图

Figure 2 Train operation

2.2 时频分析结果

将总运行时间 T 内的牵引所轨道电位 u_r 代入式(1)得到轨道电位的S变换结果。

$$S(u_r(t)) = \int_0^T u_r(t) \omega(\tau - t, f) e^{-j2\pi f t} dt \quad (4)$$

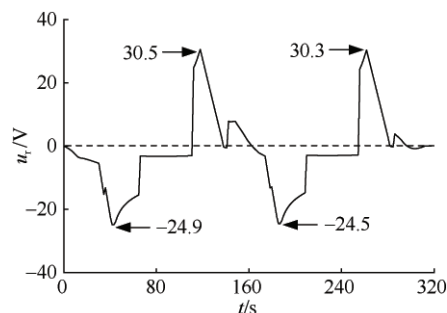


图3 牵引所轨道电位

Figure 3 Rail potential of traction substation

根据式(4)可得到图4所示的轨道电位时频谱图,可见轨道电位为典型的低频信号。时频谱图中信号的主要频率分布范围为 $0 \sim 1$ Hz, 低频段内信号幅值处于较高水平,而随着频率的增大,信号幅值逐渐趋近于0,且轨迹逐渐模糊。总体而言,时频谱图中的时间轴与轨道电位信号的时间分布一一对应,在轨道电位幅值发生突变时,时频谱图中对应时刻下的频率范围更广,低频下的信号幅值也更大。

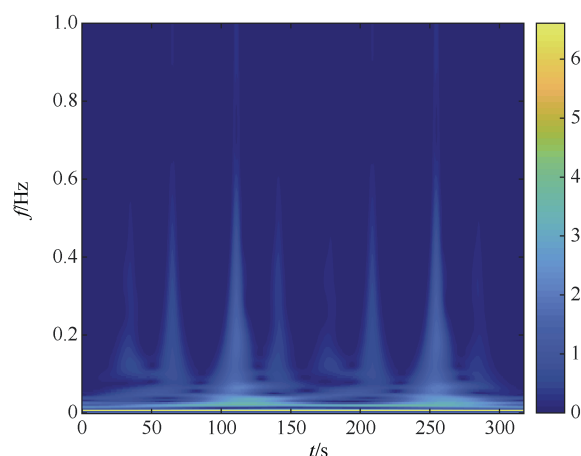


图4 轨道电位的时频谱图

Figure 4 Time-frequency spectrum of rail potential

为了进一步分析轨道电位信号的时频分布特征,定义信号能量 W 为信号幅值平方的积分。

$$W = \int_0^T |S(u_r(t))|^2 dt \quad (5)$$

其中, T 为所分析信号的时间,即列车总运行时间。依据各频率下的S变换幅值 $|S(u_r(t))|$ 可得图5所示轨道电位信号在 $0 \sim 5$ Hz 频段内的能量分布情况。

可知轨道电位的直流分量,即0 Hz的信号能量占比为2.43%; $0 \sim 1$ Hz 内的信号能量基本占据了整个扇形图,而大于1 Hz 内的信号能量仅占0.17%; $>0 \sim 0.03$ Hz 频段内,信号能量占比高达63.84%; $>0.03 \sim$

1 Hz 频段内信号能量占比达到 33.55%, 但频率范围较广, 信号能量分布较为分散。考虑到本文采用牵引所处轨道电位间接表征杂散电流, 故所分析的杂散电流信号较集中分布在低频段 0~0.03 Hz 内。

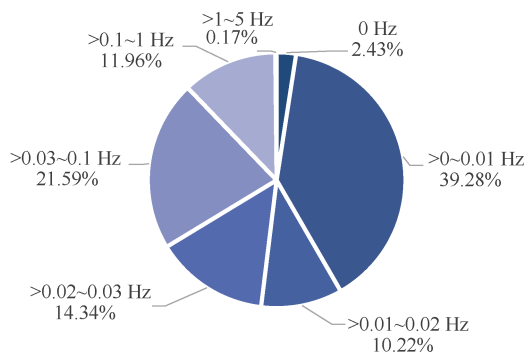


图5 典型低频能量分布

Figure 5 Typical low-frequency energy distribution

鉴于低频交流杂散电流分量对金属电化学腐蚀的影响存在差异, 本文在提取出杂散电流时频谱图的基础上, 进一步开展电化学腐蚀强度测试, 以研究典型低频交流杂散电流作用下的金属腐蚀规律。

3 腐蚀强度测试方法

3.1 失重测试方法

失重测试方法是一种通过对比金属腐蚀前后的重量变化来测定腐蚀速率的有效方法。实验试样选取规格为 10 mm×10 mm×5 mm 的 Q235 钢, 其主要化学成分为铁。钢片采用砂纸打磨后, 留出约 1 cm² 的工作面, 并用环氧树脂密封制成图 6 所示的工作电极。

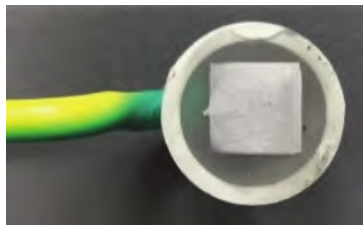


图6 工作电极

Figure 6 Working electrode

图 7 为失重测试装置示意, 包括工作电极(working electrode, WE)、对电极(counter electrode, CE)、激励电源和限流电阻 R 。其中, 电解液一般采用 5% 的氯化钠溶液, 对电极 CE 通常采用石墨材料, 激励电源用于模拟杂散电流。实验在室温下进行, 周期为 2 h, 分别对工作试样进行电流密度为 100、300、500 A/m² 的动态杂散电流腐蚀实验, 其中低频交流分量依据上文

时频分析的结果选取典型频率 0.007、0.01、0.02 Hz。

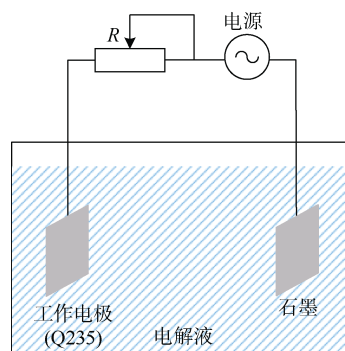


图7 失重测试示意

Figure 7 Illustration of weight-loss test

实验前后采用高精度电子天平对工作试样进行称重, 并依据式(6)计算腐蚀速率 v_{corr} 。

$$v_{\text{corr}} = \frac{W_0 - W_1}{St} \quad (6)$$

其中, W_0 、 W_1 分别为工作试样腐蚀前、腐蚀并去除腐蚀产物后的质量, g; S 为试样暴露在电解液中的面积, cm²; t 为腐蚀时间, h; v_{corr} 为腐蚀速率, g/(cm²·h)。

3.2 电化学测试方法

电化学测试方法根据施加扰动信号后电极系统的响应变化分析金属腐蚀行为。本文采用的电化学测试方法包括极化曲线测试与电化学阻抗谱测试。极化曲线表征电极电位与电极电流之间的关系, 如图 8 所示, 能展现阳极与阴极反应信息, 且借助极化曲线测定的腐蚀电位 E_{corr} 与腐蚀电流密度 i_{corr} 可以分析金属腐蚀速率的变化趋势; 而阳、阴极极化曲线的斜率大小反映了电极耐腐蚀性的强弱, 因此可以通过极化曲线斜率比值 k_a/k_c 得到腐蚀过程中阳极电极与阴极电极中起主要作用的电极。电化学阻抗谱测试则是将电极系统等效为电阻与电容的串并联电路, 根据阻抗值的大小分析电极的腐蚀程度。本文借助电化学工作站, 采用

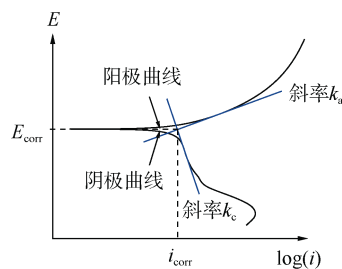


图8 极化曲线

Figure 8 Polarization curve

图9所示三电极系统,并以饱和甘汞电极作为参比电极(reference electrode, RE),对不同腐蚀条件下的工作试样进行分析。其中,电化学阻抗谱测试频率范围选为0.01~10 kHz。

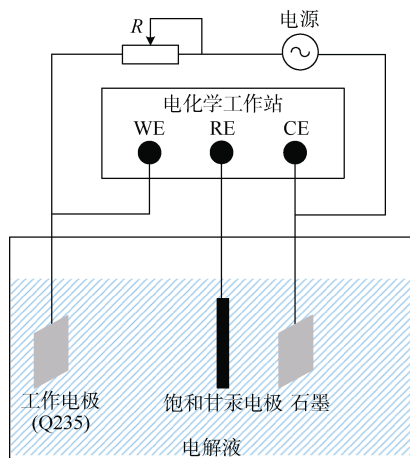


图9 电化学测试示意

Figure 9 Illustration of electrochemical test

4 测试结果分析

4.1 失重测试分析

根据失重测试的数据绘制得到腐蚀速率与直、交流电流密度的关系曲线如图10所示。施加直流(0 Hz)杂散电流时,腐蚀速率增大为浸泡腐蚀下的17~54倍;施加(0.007~0.02 Hz)交流杂散电流时,腐蚀速率增大为浸泡腐蚀下的4~24倍,可知动态杂散电流的直、交流分量均能加速金属的腐蚀,且随着施加杂散电流密度的增大,金属腐蚀速率也逐渐加快。

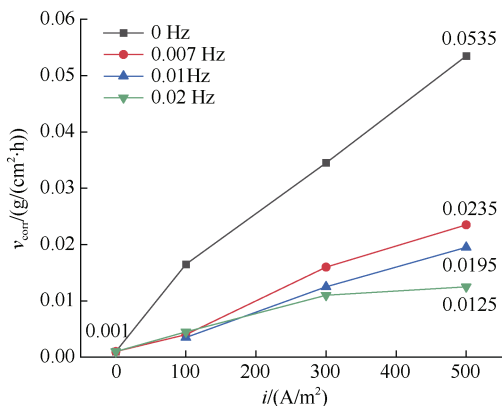


图10 腐蚀速率与电流密度的关系

Figure 10 Relationship between corrosion rate and current density

同一杂散电流密度下,直流腐蚀速率约为低频交流流下的2~4倍,这意味着相同的电流密度下,直流杂

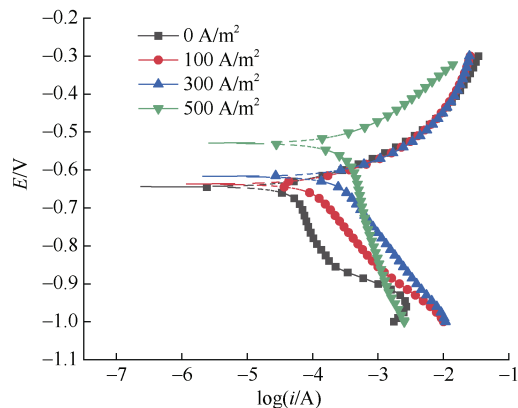
散电流造成的金属腐蚀比低频交流杂散电流严重,但在大电流密度时,低频交流杂散电流下的金属腐蚀速率也几乎达到直流腐蚀下的一半。在杂散电流密度较小时(100 A/m^2),不同频率的交流腐蚀速率数值基本一致,而在电流密度较大时($>100 \text{ A/m}^2$),随着交流电流频率增大,腐蚀速率则逐渐减小。

4.2 电化学测试结果分析

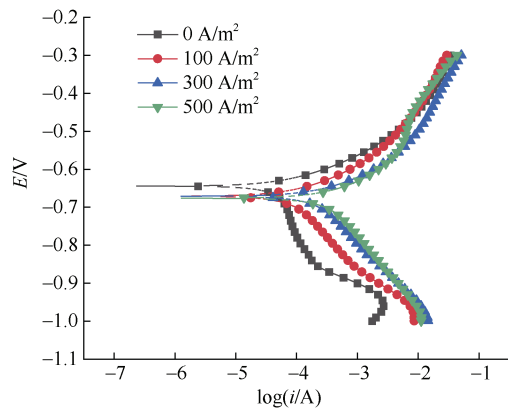
4.2.1 极化曲线分析

不同电流密度($0 \sim 500 \text{ A/m}^2$)的动态杂散电流下,金属在电解液中浸泡2 h后的极化曲线如图11所示。施加干扰信号前后,极化曲线的变化趋势大体相同,阳极曲线均呈现随着电位升高,电流逐渐增大的趋势。施加直、交流电流对极化曲线的阳极区及阴极区均有影响。直流杂散电流腐蚀时,随着杂散电流密度增大,腐蚀电位逐渐升高,阳极曲线左移,腐蚀速率明显加快,说明直流干扰加速了金属腐蚀过程。而随着交流杂散电流密度的增大,阳极区极化曲线呈右移的趋势,腐蚀电位逐渐降低,表明腐蚀电流密度逐渐增大,金属的阳极溶解速率逐渐加快。

通过图11的极化曲线拟合得到表2的相关参数。其中,阳极极化曲线斜率与阴极极化曲线斜率之比



(a) 直流



(b) 交流0.007 Hz

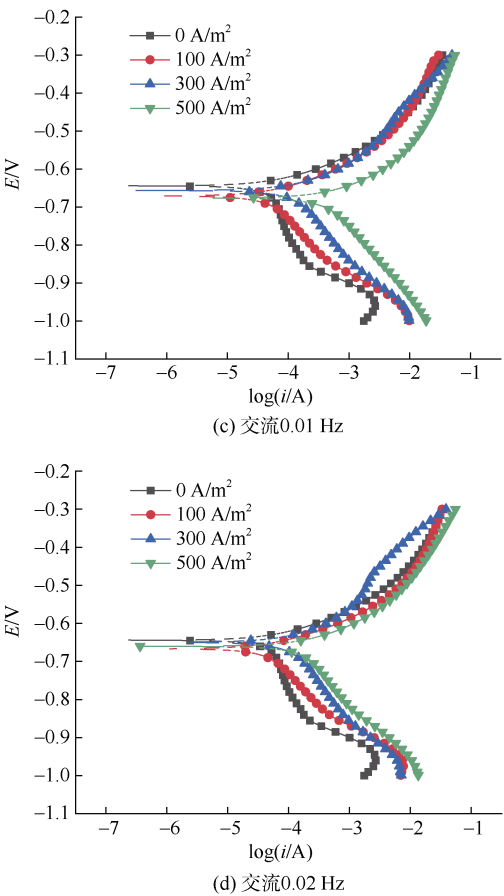


图 11 极化曲线
Figure 11 Polarization curves

表 2 极化曲线拟合参数
Table 2 Polarization curve data

实验条件	$i/(\text{A/m}^2)$	E_{corr}/V	$i_{\text{corr}}/(\mu\text{A/cm}^2)$	$k_a/(\text{mV/dec})$	$k_c/(\text{mV/dec})$	k_a/k_c
浸泡	0	-0.644	87.3	83.89	502.51	0.17
	100	-0.637	155	96.96	215.56	0.45
直流	300	-0.617	414	113.96	234.8	0.49
	500	-0.529	436	118.19	283.93	0.42
0.007 Hz	100	-0.671	116	98.74	182.38	0.54
	300	-0.671	299	105.34	176.37	0.60
0.01 Hz	500	-0.676	498	133.08	187.55	0.71
	100	-0.671	67.3	85.08	188.18	0.45
0.01 Hz	300	-0.656	187	110.67	345.42	0.32
	500	-0.654	636	117.55	180.44	0.65
0.02 Hz	100	-0.667	61.5	78.36	176.43	0.44
	300	-0.650	174	110.75	224.92	0.49
0.02 Hz	500	-0.660	212	98.93	224.9	0.44

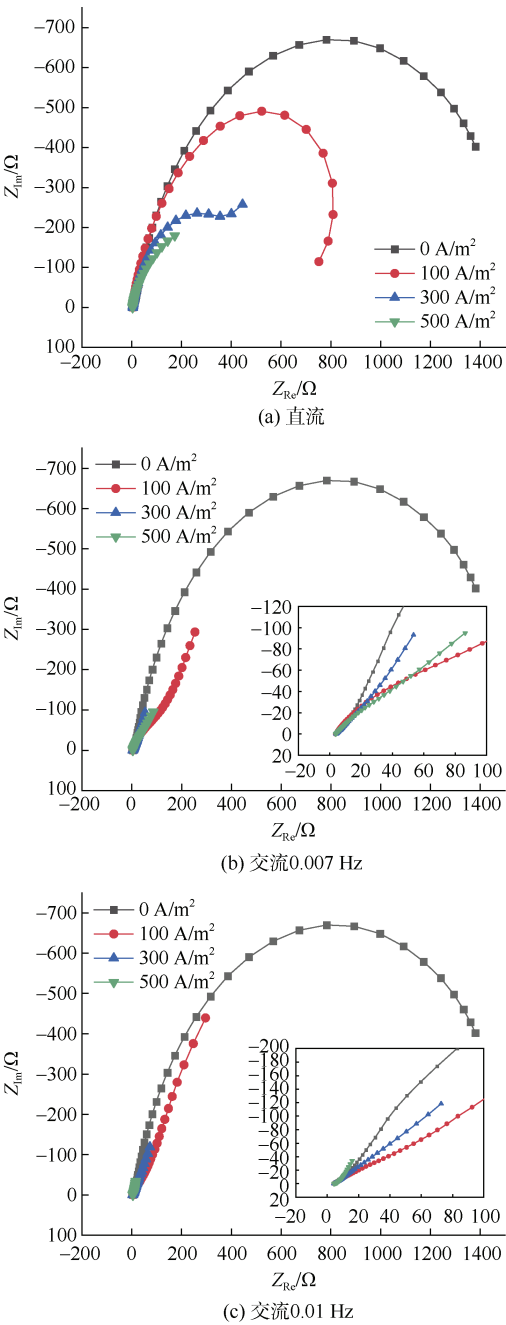
k_a/k_c 均小于 1，表明在动态杂散电流腐蚀过程中，阳极腐蚀程度更大，因此电极系统的腐蚀行为以阳极金

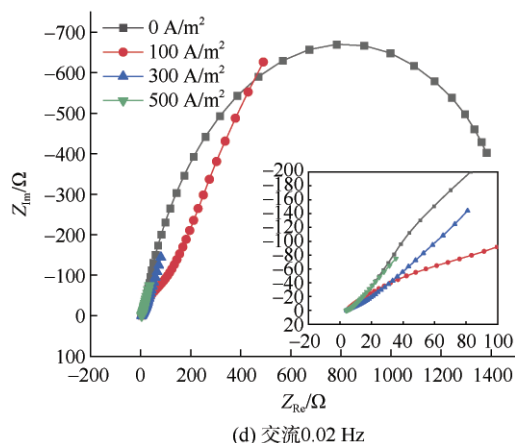
属溶解反应为主。此外，由于腐蚀电流密度与腐蚀速率成正比，随着杂散电流密度的增大，腐蚀电流密度逐渐增大，因此腐蚀速率不断加快。

4.2.2 电化学阻抗谱分析

金属在不同腐蚀条件下的 Nyquist 图如图 12 所示，电化学阻抗谱测试时自高频区向低频区扫描，对应至 Nyquist 图中自左至右为高频区至低频区。图中横纵坐标分别表示电极系统等效阻抗的实部 Z_{Re} 与虚部 Z_{Im} ，则阻抗值定义为曲线某一点的模值 $|Z|$ ：

$$|Z| = \sqrt{Z_{\text{Re}}^2 + Z_{\text{Im}}^2} \tag{7}$$





(d) 交流 0.02 Hz

图 12 Nyquist 图

Figure 12 Nyquist plots

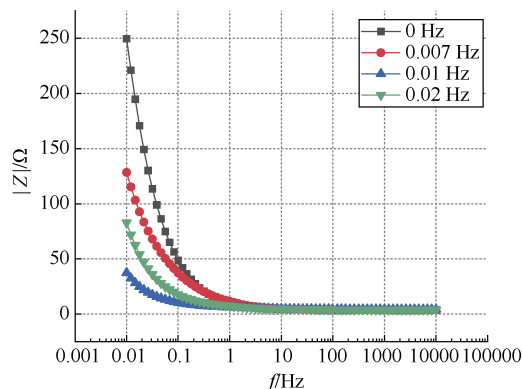
阻抗值反映了金属腐蚀程度,即 $|Z|$ 越大,腐蚀程度越弱。未施加激励电流时,阻抗图低频区呈现单容抗弧,且半径较大,表明腐蚀过程阻抗较大,腐蚀速率较慢;而施加激励电流后,整体阻抗值则明显减小。频率为 0.007 Hz 时,当杂散电流密度由 0 A/m^2 逐渐增大至 500 A/m^2 ,低频区阻抗值由 1438Ω 先减小至 388Ω 、 107Ω ,后又增大至 128Ω ,这是因为电流密度的增大使得腐蚀反应加剧,同时也使腐蚀产物的生成速率加快,因此金属试样在发生电化学腐蚀的同时生成的不溶性产物又在一定程度上阻碍了腐蚀反应的发生。

施加频率为 0.01 Hz、电流密度为 100 A/m^2 的交流杂散电流后,低频区阻抗值由 1438Ω 减小到 530Ω ;电流密度增大为 300 A/m^2 时,阻抗值减小至 139Ω ,腐蚀反应加剧;电流密度进一步增大为 500 A/m^2 时,阻抗值减小至 27.5Ω ,说明随着电流密度的增大,金属的腐蚀速率逐渐加快。频率为 0.02 Hz 时 Nyquist 图的变化趋势与频率 0.01 Hz 时类似。

对于不同频率的交流杂散电流对金属腐蚀的影响,当电流密度为 100 A/m^2 或 300 A/m^2 时,随着电流频率的增大,阻抗值逐渐增大,金属腐蚀速率则减小。而当电流密度为 500 A/m^2 时,如图 13 所示,低频区阻抗值随交流频率的增大呈现出先迅速减小后略微增大的趋势,这是由于在大电流密度时电解池中不溶性腐蚀产物的快速增加导致。但总体上,金属的腐蚀速率仍与交流杂散电流的频率呈反比关系。

综上所述,失重测试定量地分析了典型杂散电流频率及密度对于金属腐蚀速率的影响;电化学测试借助极化曲线与电化学阻抗谱从电极系统内部反应的角度

分析了金属的腐蚀行为,并从电化学角度验证了失重测试结果的准确性。

图 13 电流密度为 500 A/m^2 时的 Bode 图Figure 13 Bode plots at 500 A/m^2

5 结论

本文基于 S 变换的时频算法分析了动态杂散电流的时频特征,在此基础上借助失重测试与电化学测试方法研究了典型频率下的动态杂散电流对金属腐蚀行为的影响,得到以下结论:

1) 城市轨道交通中的杂散电流通常表现为低频交流信号,结合典型列车运行图分析得到其主要频率范围集中于 $0 \sim 0.03 \text{ Hz}$;

2) 失重测试与电化学测试的结果表明,动态杂散电流的直流与交流分量均能加速金属的电化学腐蚀,且随着杂散电流密度的增大,腐蚀电流密度增大,腐蚀速率逐渐加快;随着低频交流杂散电流频率增大,金属腐蚀速率逐渐减小。

杂散电流的低频交流分量造成的腐蚀行为复杂,本文通过对杂散电流的时频分析提取其典型低频分量并进行腐蚀行为研究,为不同频段的杂散电流治理提供了理论基础。

参考文献

- [1] 韩宝明,李亚为,鲁放,等. 2021 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, 2022, 35(1): 5-11. HAN Baoming, LI Yawei, LU Fang, et al. Statistical analysis of urban rail transit operations in the world in 2021: a review[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(1): 5-11.
- [2] ZABOLI A, VAHIDI B, YOUSEFI S, et al. Evaluation and control of stray current in DC-electrified railway systems[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2017, 66(2): 974-980.
- [3] 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.
- [4] 杨晓峰, 薛皓, 郑琼林. 基于双向可变电阻模块的杂散电流与轨道电位动态模拟系统[J]. 电工技术学报, 2019, 34(13): 2793-2805.
- YANG Xiaofeng, XUE Hao, Zheng Trillion Q. Stray current and rail potential dynamic simulation system based on bidirectional variable resistance module[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2019, 34(13): 2793-2805.
- [5] 王慧康, 杨晓峰, 倪梦涵, 等. 轨道电位与杂散电流动态模拟实验平台[J]. 电工技术学报, 2020, 35(17): 3609-3618.
- WANG Huikang, YANG Xiaofeng, NI Menghan, et al. Rail potential and stray current dynamic emulator[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2020, 35(17): 3609-3618.
- [6] Bhagat S, Yang X, Wang M, et al. Review and evaluation of stray current mitigation for urban rail transit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(23): 4851-4863.
- [7] 杨晓峰, 王慧康, 郑琼林. 直流牵引供电系统中有限边界边缘效应对轨道电位的影响[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(3): 1-11.
- YANG Xiaofeng, WANG Huikang, ZHENG Trillion Q. Influence of finite boundary fringe effect on the rail potential in DC traction power supply system[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(3): 1-11.
- [8] AATIF S, HU Haitao, RAFIQ F, et al. Analysis of rail potential and stray current in MVDC railway electrification system[J]. Railway engineering science, 2021, 29(4): 394-407.
- [9] GU Jingda, YANG Xiaofeng, ZHENG T Q, et al. Rail potential and stray current mitigation for urban rail transit with multiple trains under multiple conditions[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2022, 8(2): 1684-1694.
- [10] CHEN Zhipai, GAO Liang, KOLEVA D A. Evaluating the stray current corrosion of steel rebar in different layouts[J]. Measurement, 2022, 196: 111217.
- [11] TANG Kangkang. Stray alternating current (AC) induced corrosion of steel fibre reinforced concrete[J]. Corrosion science, 2019, 152: 153-171.
- [12] DU Guifu, WANG Jun, JIANG Xingxing, et al. Evaluation of rail potential and stray current with dynamic traction networks in multitrain subway systems[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2020, 6(2): 784-796.
- [13] 杨晓峰, 郑琼林. 城市轨道交通牵引供电系统接触网和回流安全综述[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(2): 1-9.
- YANG Xiaofeng, ZHENG Trillion Q. A review of studies on traction power supply catenary and reflux safety in urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(2): 1-9.
- [14] QIAN Shan, CHENG Y F. Accelerated corrosion of pipeline steel and reduced cathodic protection effectiveness under direct current interference[J]. Construction and building materials, 2017, 148: 675-685.
- [15] SHI Jinjie, ZOU Yiqing, MING Jing, et al. Effect of DC stray current on electrochemical behavior of low-carbon steel and 10%Cr steel in saturated $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solution[J]. Corrosion science, 2020, 169: 108610.
- [16] WANG Xinhua, SONG Xuting, CHEN Yingchun, et al. Effect of alternating stray current and stress on the corrosion behavior of X80 pipeline steel in soil simulated solution[J]. International journal of electrochemical science, 2018, 13(6): 5654-5666.
- [17] LI Yingchao, XU Cheng, ZHANG Ronghua, et al. Effects of stray AC interference on corrosion behavior of X70 pipeline steel in a simulated marine soil solution[J]. International journal of electrochemical science, 2017, 12(3): 1829-1845.
- [18] WANG Xinhua, WANG Zuquan, CHEN Yingchun, et al. Effect of a DC stray current on the corrosion of X80 pipeline steel and the cathodic disbandment behavior of the protective 3PE coating in 3.5% NaCl solution[J]. Coatings, 2019, 9(1): 29.
- [19] QIN Huimin, DU Yanxia, LU Minxu, et al. Effect of dynamic DC stray current on corrosion behavior of X70 steel[J]. Materials and corrosion, 2020, 71(1): 35-53.
- [20] ZAKOWSKI K. Detection and time/frequency analysis of electric fields in the ground[J]. Anti-corrosion methods and materials, 2007, 54(5): 294-300.
- [21] MUJEZINOVIC A, MARTINEZ S. Application of the continuous wavelet cross-correlation between pipe-to-soil potential and pipe-to-rail voltage influenced by dynamic stray current from DC train traction[J]. IEEE transactions on power delivery, 2021, 36(2): 1015-1023.
- [22] STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWE R P. Localization of the complex spectrum: the S transform[J]. IEEE transactions on signal processing, 1996, 44(4): 998-1001.
- [23] STOCKWELL R G. A basis for efficient representation of the S-transform[J]. Digital signal processing, 2007, 17(1): 371-393.

(编辑: 王艳菊)