

# 站台门与钢轨等电位连接方式下的 绝缘防护测试及保障措施

张明锐<sup>1</sup> 曹庭嵩<sup>1</sup> 刘金叶<sup>2</sup> 刘悦<sup>2</sup>

(1. 同济大学电子与信息工程学院, 201804, 上海; 2. 上海申通地铁集团有限公司, 201103, 上海)

**摘要** [目的] 站台门系统与钢轨等电位连接方式下, 当站台门系统的对地绝缘降低时, 容易产生放电现象。为确保乘客的乘坐安全, 应基于该方式, 建立有效的站台门绝缘保障措施。[方法] 从站台门电气绝缘机理和人体电气安全 2 个维度分析了站台门与钢轨等电位连接的优势。建立了轨电位计算模型, 对常规工况、极端工况 2 种工况下站台门处轨电位进行了仿真。采用多参数单一变化法, 分析了常规工况下各回流系统参数不同取值对站台门轨电位的影响, 计算了极端工况下的站台门轨电位分布曲线。提出了站台门绝缘的测试方法及站台门绝缘维护的相关措施。[结果及结论] 采用站台门系统与钢轨等电位连接方式时, 轨电位的最大值不应超过 60 V。极端工况下, 站台门处轨电位有可能高于该阈值, 此时乘客的人身安全可能会受到威胁, 须采取有效措施, 确保站台门的绝缘有效性。

**关键词** 地铁; 站台门; 绝缘维护

**中图分类号** U223.6<sup>+</sup>1:U231

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.09.009

## Insulation Protection Tests and Safeguard Measures under Equipotential Connection of Platform Door and Steel Rails

ZHANG Mingrui<sup>1</sup>, CAO Tingsong<sup>1</sup>, LIU Jinye<sup>2</sup>, LIU Yue<sup>2</sup>

(1. Electronic and Information Engineering School, Tongji University, 201804, Shanghai, China; 2. Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] Under the equipotential connection method between platform door system and steel rail, once the ground insulation of the platform door system weakens, the discharge is prone to occur. In order to ensure passengers' safety, effective insulation safeguard measures for the platform door should be taken based on this method. [Method] The advantages of equipotential connection of the platform door and the steel rail are analyzed from the two dimensions of the electrical insulation mechanism of the platform door and human electrical safety. A rail potential calculation model is established to simulate the rail potential at the platform door under normal

and extreme working conditions. The influence of the parameters of the return current system on the above mentioned rail potential under normal working conditions is analyzed by using the method of changing the value of one single parameter at a time, and the distribution curve of the above rail potential under extreme working conditions is calculated. The testing method and the relevant maintenance measures for the platform door insulation are put forward. [Result & Conclusion] When the equipotential connection method of the platform door system and the steel rail is used, the maximum value of the rail potential should not exceed 60 V. Under extreme working conditions, the rail potential at the platform door may exceed the above threshold, which may pose threat to the physical safety of the passengers. Therefore, it is necessary to take effective measures to ensure the effectiveness of the platform door insulation.

**Key words** metro; platform door; insulation maintenance

为了保障乘客登车时的电气安全, 许多地铁线路将站台门系统与钢轨等电位连接, 以消除站台门与列车间的电位差。但是, 当站台门系统的对地绝缘降低时, 站台门表面容易产生放电现象。针对该问题, 文献[1-3]分析了站台门放电现象的成因, 提出发生放电现象的薄弱环节是门体部件, 建议对站台门的门槛板、立柱装饰板等部件加装绝缘, 以避免放电现象的发生。文献[4]通过分析广州地铁线网的站台门绝缘问题, 设计了一种在线绝缘监测装置, 以有效预防站台门放电。然而, 现阶段的研究主要集中于加强站台门本体的绝缘有效性, 而在站台门的整体绝缘保证条件、列车运行工况、轨电位变化规律方面等仍缺乏深入的研究, 对站台门系统绝缘与接地给人体带来的安全风险仍缺乏整体、系统的认识。

本文基于站台门与钢轨直接相连的绝缘方式, 从理论和仿真计算两个层面, 得出站台门电位变化

的规律,以及影响轨电位变化的关键因素和主要条件,并从人体电气耐受机理上阐释了站台门绝缘安装标准的参数要求。

## 1 站台门电气绝缘与人体安全

### 1.1 站台门放电现象机理分析

站台门一般采用与钢轨等电位连接的方式。该方式的优势为站台门和钢轨等电位连接后,二者对地电压相同,即使乘客在上下车期间同时触碰站台门金属裸露部分和列车车体,也不会承受二者间的电位差。但该方式对站台门绝缘有效性提出了特殊要求,须用更高标准对站台门进行维护保养。

按照 CJJ 183—2012《城市轨道交通站台屏蔽门系统技术规范》,若站台门绝缘处在正常状态,则站台门与大地间的过渡电阻应大于  $0.5\text{ M}\Omega$ ,此时从站台门流向大地的电流很小,可忽略不计,站台门不会产生放电现象。一旦站台门门体受结构渗水、漏水、灰尘覆盖、保洁用水残留等因素影响时,站台门的绝缘性能会出现不同程度的下降。

根据 GB/T 18216.1—2021《交流 1 000 V 和直流 1 500 V 及以下低压配电系统电气安全防护措施的试验、测量或监控设备 第 1 部分:通用要求》,站台门对地绝缘完全失效时,其对地电阻为  $4\text{ }\Omega$ 。由于钢轨 OVPD(过压保护装置)的存在,在测得的轨电位值超过设定值时,可以将轨电位限制在  $90\text{ V}$  以下。此时从站台门流向大地的电流最大值为  $22.5\text{ A}$ ,电流通过站台门流向大地形成回路,回路中电阻较大的地方在短时间内会产生大量热量并加速氧化,导致电阻进一步增大并产生不均匀电场,进而在站台门周围间隙产生火花放电。

### 1.2 电气安全数值分析

GB/T 13870.1—2008《电流对人和家畜的效应 第 1 部分:通用部分》中,定义  $I_a$  为流过人体的电流,  $U_a$  为保障人体安全的情况下(此时  $I_a \leq 0.20\text{ A}$ )站台门对地电位最大值,  $U_b$  为确保人体不会发生电气生理效应的前提下( $I_a \leq 0.03\text{ A}$ )站台门对地电位最大值,  $U_c$  为确保人体不会感应到电流的前提下( $I_a \leq 2 \times 10^{-3}\text{ A}$ )站台门对地电位最大值。站台门对地绝缘损坏或失效时,站台门对地绝缘阻值  $R_o$  为  $4\text{ }\Omega$ ,人体电阻  $R_n$  为  $2\text{ k}\Omega$ 。由于  $R_o$  远小于  $R_n$ ,  $R_o$  可忽略不计,进而根据电压电流公式计算可得:  $U_a = 400\text{ V}$ ,  $U_b = 60\text{ V}$ ,  $U_c = 4\text{ V}$ 。由此可知,当站台门对地绝缘失效时,其电压安全阈值为  $60\text{ V}$ 。若站

台门电位大于  $60\text{ V}$ ,则乘客有可能产生触电感受,因此,采用站台门系统与钢轨等电位连接方式时,轨电位的最大值不应超过  $60\text{ V}$ ,以确保站台门绝缘失效时乘客的电气安全。

## 2 常规工况及极端工况下站台门处轨电位分布情况

本文基于常见的双边供电方式建立了“钢轨-排流网-大地”模型,并对模型的各参数进行定义:

1)  $I$  为总牵引电流;  $I_1$ 、 $I_2$  分别为牵引变电所 1、牵引变电所 2 提供的电流;  $I_{g1}(x)$  和  $I_{g2}(x)$  为牵引变电所 1、牵引变电所 2 在泄漏点  $x$  处的钢轨电流;  $I_{p1}(x)$  和  $I_{p2}(x)$  分别为牵引变电所 1、牵引变电所 2 在泄漏点  $x$  处流入排流网的杂散电流。

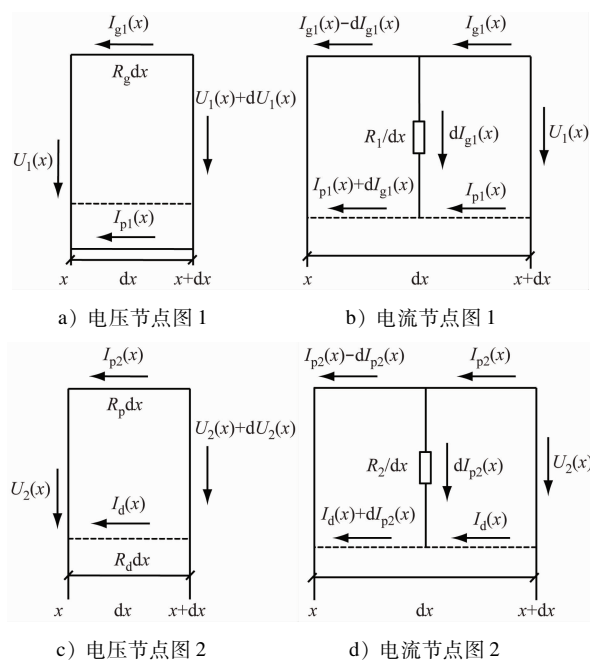
2)  $R_g$  为钢轨纵向电阻;  $R_1$  为钢轨到排流网的过渡电阻;  $R_p$  为排流网的纵向电阻;  $R_2$  为排流网到地的过渡电阻;  $R_d$  为大地纵向电阻。

3)  $U_1(x)$ 、 $U_2(x)$  分别为  $x$  处钢轨到排流网的电压、排流网对地电压。

4)  $L_1$ 、 $L_2$  分别为列车与牵引变电所 1、牵引变电所 2 的距离。

### 2.1 轨电位计算模型

图 1 为钢轨电压与电流电路模型图。



注:箭头表示电压、电流的方向。

图 1 钢轨电压与电流电路模型图

Fig. 1 Diagram of steel rail voltage and current circuit models

图1的电路模型按照列车所在位置可分为2个区段进行求解,即 $[0, L_1]$ 和 $[L_1, L]$ 两段, $L$ 为总的

供电区间长度, $L = L_1 + L_2$ 。在 $[0, L_1]$ 段,根据基尔霍夫第一定律,可得方程组如下:

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_{g1}(x)}{dx} \\ \frac{dI_{p1}(x)}{dx} \\ \frac{dU_1(x)}{dx} \\ \frac{dU_2(x)}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1/R_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/R_2 \\ R_g & -R_p & 0 & 0 \\ R_d & R_p + R_d & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{g1}(x) \\ I_{p1}(x) \\ U_1(x) \\ U_2(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -I_1 R_d \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)是一阶非齐次方程组,其通解形式为:

$$\begin{bmatrix} I_g(x) \\ I_p(x) \\ U_1(x) \\ U_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 e^{\lambda_1 x} \\ C_2 e^{\lambda_2 x} \\ C_3 e^{\lambda_3 x} \\ C_4 e^{\lambda_4 x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:

$f$ ——非齐次微分方程组的一个特解;

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ ——回流系统参数矩阵 $M$ 的特征值;

$[a_{1i} \ a_{2i} \ a_{3i} \ a_{4i}]^T$ ——回流系统参数矩阵 $M$ 的特

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{g2}(x) \\ \dot{I}_{p2}(x) \\ \dot{U}_1(x) \\ \dot{U}_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -R_g & R_p \\ -R_d & -(R_p + R_d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{g2}(x) \\ I_{p2}(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ I_2 R_d \end{bmatrix} \quad (6)$$

对式(5)求解后代入边界条件,通过式(6)即可求得 $[L_1, L]$ 区段内的轨电位。

## 2.2 轨电位仿真

轨电位往往受到牵引电流、供电区间长度、钢轨纵向电阻等参数的影响。

这些参数的典型变化范围如下<sup>[5]</sup>:① $I$ 为 $-4 \sim 3$  kA(列车采用1 500 V电压供电);② $L$ 为 $1 \sim 3$  km;③ $R_1, R_2$ 均为 $0 \sim 100 \ \Omega/\text{km}$ ;④ $R_p$ 为 $0.000 1 \sim 1.000 0 \ \Omega/\text{km}$ ;⑤ $R_g$ 为 $0 \sim 0.1 \ \Omega/\text{km}$ ;⑥ $R_d$ 为 $0.000 1 \sim 1.000 0 \ \Omega/\text{km}$ 。

### 2.2.1 常规工况下站台门处轨电位

由于线路区间距离远大于列车自身长度,因此将列车整体视为质点,设 $L_1, L_2$ 均为1.5 km。表1、表2为本文设定的列车基本参数及回流系统基本

征值 $\lambda_i (i=1, 2, 3, 4)$ 对应的特征向量;

$C_1, C_2, C_3, C_4$ ——根据边界条件确定的常数。

边界条件计算式为:

$$\begin{cases} I_{g1}(0) = I_{g1}(L_1) = I_1 \\ I_{p1}(0) = I_{p1}(L_1) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

对式(3)进行求解,可得到轨电位 $U(x)$ 的计算式为:

$$U(x) = U_1(x) + U_2(x) \quad (4)$$

区段 $[L_1, L]$ 内的轨电位求解方法与 $[0, L_1]$ 段内一致,其微分方程组形式及边界条件的计算式分别为:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{g2}(x) \\ \dot{I}_{p2}(x) \\ \dot{U}_1(x) \\ \dot{U}_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -R_g & R_p \\ -R_d & -(R_p + R_d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{g2}(x) \\ I_{p2}(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ I_2 R_d \end{bmatrix} \quad (5)$$

参数。

基于表1、表2的参数值,可计算得到常规运行工况下站台门处轨电位分布曲线,如图2所示。由图2可知:在常规工况下,由于回流系统的线路参数在某固定值附近波动,站台门处的轨电位约为 $-27.67$  V。

表1 列车基本参数

Tab.1 Basic parameters of the train

列车参数	参数值
供电电压/V	1 500
列车编组形式	A-B-C-B-C-A
列车平均加速度/( $\text{m/s}^2$ )	0.9
列车平均减速度/( $\text{m/s}^2$ )	-1.0
A车长度/m	23.69
B车长度/m	22.10
C车长度/m	22.10

注:A车一带司机室的拖车;B车一带受电弓的动车;C车一带空压机的动车。

表 2 回流系统基本参数

Tab. 2 Basic parameters of the return current system

回流系统参数	参数值
$R_g/(\Omega/\text{km})$	0.03
$R_p/(\Omega/\text{km})$	0.01
$R_d/(\Omega/\text{km})$	0.01
$R_1/(\Omega \cdot \text{km})$	15
$R_2/(\Omega \cdot \text{km})$	3
$L_1/\text{km}$	1.5
$L/\text{km}$	3
$I/\text{kA}$	3

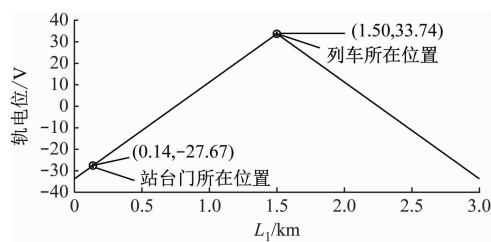


图 2 常规运行工况下站台门处轨电位分布曲线

Fig. 2 Distribution curve of the rail potential at the platform door under normal operating conditions

### 2.2.2 回流系统各参数对站台门处轨电位的影响

基于表 1、表 2 的参数,采用多参数单一变化法分析回流系统各参数对站台门处轨电位的影响,各参数不同取值对应的站台门处轨电位如表 3 所示。由表 3 可知:①  $R_g$  越大,站台门处轨电位越大;②  $R_1$  及  $R_2$  不会影响站台门处轨电位;③ 列车越靠近供电区间中点,站台门处轨电位越大;④  $I$  越大,站台门处轨电位越大;⑤  $L$  越长,站台门处轨电位越大。

### 2.2.3 极端工况下的站台门处轨电位

受使用时长、温度等因素影响,地铁回流系统钢轨纵向电阻、排流网纵向电阻增大后可能形成极端运行工况,此时轨电位将达到最大<sup>[6]</sup>。为了模拟该工况,将回流系统各基本参数按照极端情形取值,如表 4 所示。

由于列车存在牵引及制动 2 种工作状态,此时牵引电流存在正值和负值,且二者的绝对值不相等,本文对这 2 种情形分别进行了仿真:

1) 列车牵引加速时,其牵引电流为正,最大值可达到 3 kA。将表 4 的参数及牵引电流最大值的绝对值代入式(2)、式(5)进行仿真,可得到牵引电流为正时极端工况下的轨电位分布曲线,如图 3

表 3 各回流系统各参数不同取值对应的站台门处轨电位

Tab. 3 Rail potentials at the platform door corresponding to different values of the return current system parameters

影响因素	影响因素取值	站台门处轨电位/V
$R_g/(\Omega/\text{km})$	$R_g = 0.01$	-9.146
	$R_g = 0.05$	-45.700
	$R_g = 0.10$	-91.340
$R_p/(\Omega/\text{km})$	$R_p = 0.000\ 1$	-27.430
	$R_p = 0.500\ 0$	-27.430
	$R_p = 1.000\ 0$	-27.430
$R_d/(\Omega/\text{km})$	$R_d = 0.000\ 1$	-27.440
	$R_d = 0.500\ 0$	-27.240
	$R_d = 1.000\ 0$	-27.070
$R_1/(\Omega \cdot \text{km})$	$R_1 = 15$	-27.430
	$R_1 = 50$	-27.450
	$R_1 = 100$	-27.450
$R_2/(\Omega \cdot \text{km})$	$R_2 = 15$	-27.430
	$R_2 = 50$	-27.430
	$R_2 = 100$	-27.430
$L_1/\text{km}$	$L_1 = 0.5$	-8.249
	$L_1 = 1.0$	-21.590
	$L_1 = 1.5$	-27.430
$L/\text{km}$	$L = 1$	-4.950
	$L = 2$	-16.200
	$L = 3$	-27.670
$I/\text{kA}$	$I = -4$	36.580
	$I = 1$	-9.145
	$I = 3$	-27.430

表 4 极端工况下各回流系统基本参数取值

Tab. 4 Basic parameters of the return current system under extreme working conditions

影响因素	参数值	影响因素	参数值
$R_g/(\Omega/\text{km})$	0.1	$R_p/(\Omega/\text{km})$	1
$R_1/(\Omega \cdot \text{km})$	100	$R_2/(\Omega \cdot \text{km})$	100
$L/\text{km}$	3.0	$R_d/(\Omega/\text{m})$	1
$L_1/\text{km}$	1.5		

所示。此时站台门处轨电位为 -91.35 V,远大于站台门对地绝缘失效时使人产生电气生理效应的电压阈值(60 V)。因此,若回流系统的基本参数为表 4 的极端情形,当列车牵引电流  $I = 3\ \text{kA}$  时,有可能会引发安全事故。



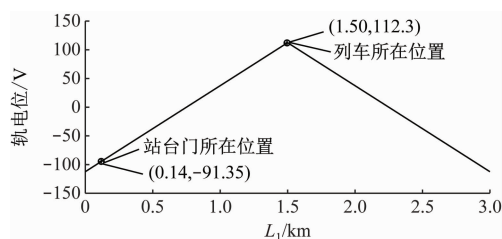


图3 牵引电流为正时极端工况下的轨电位分布曲线

Fig. 3 Rail potential distribution curve under extreme working conditions with positive traction current

2) 列车制动减速时,其牵引电流为负,最大值可达到4 kA。基于表4中的参数及牵引电流最大值的绝对值代入式(2)、式(5)进行仿真,可得到牵引电流为负时极端工况下的轨电位分布曲线,如图4所示。此时站台门处轨电位为121.80 V,远大于站台门对地绝缘失效时使人产生电气生理效应的电压阈值(60 V)。因此,若回流系统的基本参数为表4的极端情形,列车牵引电流 $I = -4$  kA时,也可能引发安全事故。

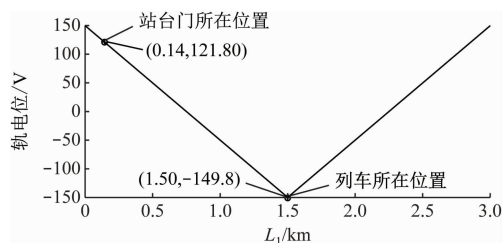


图4 牵引电流为负时极端工况下的轨电位分布曲线

Fig. 4 Rail potential distribution curve under extreme working conditions with negative traction current

### 3 站台门绝缘测试方法及保障措施

#### 3.1 站台门绝缘测试方法

一般使用500 V的兆欧表对站台门的绝缘情况进行测试。将其中一条测量导线与站台门门体的金属部件相连,另一条测量导线则与站台门附近站台土建结构的金属部件相连。从使用寿命和导电性两个方面考虑,测量导线应采用截面积大于35 mm<sup>2</sup>、长度为50~100 m的多股铜芯聚氯乙烯绝缘电缆,其直流电阻应小于0.5 Ω/km。

测量导线与金属部件的连接宜采用磁性接头或夹子,连接点必须除去锈迹,测量电压约为500 V。测试时,将兆欧表放置在水平位置,由慢渐快地摇动手柄,使兆欧表均匀加速至120 r/min并持续10 s,待指针稳定后进行读数。兆欧表稳定时指示

的电阻值即为站台门的绝缘电阻值。

#### 3.2 站台门绝缘保障措施

站台门绝缘失效的原因主要有:①绝缘材料质量不过关;②绝缘结构设计不合理;③绝缘部件的安装工序有误;④受周围环境影响,绝缘部件发生腐蚀;⑤没有采用正确的维护保养措施。其中,最后2个原因引起的绝缘失效可以在运营维护中得以部分消除。

针对灰尘污染站台门底座的问题,可在门体立柱绝缘套、绝缘垫片和金属构件表面喷涂复合绝缘树脂,以增强其抗污染能力。针对站台门绝缘材料质量不达标的问题,可以喷涂改性复合绝缘树脂,或采用Q235碳钢板支撑门槛板,以确保满足钢结构的整体强度要求<sup>[1]</sup>。针对车站漏水、渗水问题,则需要及时消除水患,并做干燥处理。

此外,须对站台门采取严格的绝缘维护措施和保养规程。一般情况下,每半年对站台门进行一次全面的清洁与检修,防止粉尘吸附和绝缘破损导致站台门绝缘性能下降。日常检修时,应及时更换损耗严重的门体立柱、门槛等关键部件,以确保乘客的乘车安全。

### 4 结语

站台门与钢轨直接相连,在避免乘客在上下车过程中产生电位差的同时,可能会导致放电。本文基于这种连接方式,阐述了站台门放电现象的原理,得到站台门对地绝缘失效时使人产生电气生理效应的对地电压阈值为60 V。进一步对极端工况下站台门处轨电位进行仿真,结果表明:极端工况下站台门处轨电位有可能高于该阈值,此时乘客的人身安全可能会受到威胁,为此,须确保站台门的绝缘有效性。

本文提出了站台门绝缘的测试办法,并针对常见的站台门绝缘失效原因提出了相应的保障措施,用以确保站台门绝缘性能。但是目前的措施还不能够完全杜绝该放电现象的发生,后续应对站台门在线绝缘监测装置进行深入的研究。

### 参考文献

- [1] 裴伟. 地铁站台门接地浅析[J]. 四川水泥, 2019(3): 313.  
PEI Wei. Analysis on grounding of subway screen door[J]. Sichuan Cement, 2019(3): 313.

(下转第64页)

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40 (S1): 2935.
- [2] 黄戡, 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.  
HUANG Kan, SUN Yiwei, YANG Weijun, et al. Influence of shield tunneling on pile foundation of adjacent bridge using fluid-soil coupling theory[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(3): 983.
- [3] 袁海平, 王斌, 朱大勇, 等. 盾构近距侧穿高架桥桩的施工力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1457.  
YUAN Haiping, WANG Bin, ZHU Dayong, et al. Mechanical behaviours of a shield tunnel adjacent to existing viaduct pile foundations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1457.
- [4] 程康, 俞帆, 梁荣柱, 等. 考虑桩基剪切效应的盾构开挖对邻近桩基水平向变形分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊2): 178.  
CHENG Kang, YU Fan, LIANG Rongzhu, et al. Analysis of horizontal deformation of adjacent pile foundation by shield excavation considering shear effect of pile foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2): 178.
- [5] 郭一斌, 张立明, 郑刚, 等. 盾构施工对大型立交桥超长桩工作性状的影响[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2941.  
GUO Yibin, ZHANG Liming, ZHENG Gang, et al. Influence of shield tunneling on working performance of large interchange's super-long piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2941.
- [6] 漆伟强, 匡亚洲, 杨志勇, 等. 砂卵石地层盾构近距离侧穿匝道桥桩变形研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增刊2): 679.  
QI Weiqiang, KUANG Yazhou, YANG Zhiyong, et al. Study on deformation of bridge pile in sandy pebble stratum with shield passing through ramp at close range[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S2): 679.
- [7] 郑宏利, 胡继波. 盾构隧道侧穿施工对既有立交桥结构体系的影响机制分析[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊1): 473.  
ZHENG Hongli, HU Jibo. Mechanism analysis of influence of shield tunnel side-crossing construction on existing overpass structure system[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 473.
- [8] 李明睿, 陈国平, 范秀江, 等. 盾构施工对临近桩基影响的数值模拟及参数分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(1): 45.  
LI Mingrui, CHEN Guoping, FAN Xiujiang, et al. Numerical study and parametric analysis of influence of tunnel excavation on adjacent pile foundation[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(1): 45.
- [9] 周鑫, 杨建辉, 刘涛. 盾构法施工对近距离侧穿桥梁桩基的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(2): 586.  
ZHOU Xin, YANG Jianhui, LIU Tao. Analysis on the influence of shield construction on lateral and closely cross bridge pile foundation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(2): 586.
- 收稿日期:2022-05-22 修回日期:2022-11-02 出版日期:2024-09-10  
Received:2022-05-22 Revised:2022-11-02 Published:2024-09-10  
• 第一作者:麻凤海,教授,xkb@vip.163.com  
通信作者:王其,助理工程师,120321382@qq.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## (上接第 57 页)

- [2] 赵鹏, 赵玉海. 浅论站台门绝缘及与钢轨等电位的安全措施[J]. 科技资讯, 2019, 17(33): 76.  
ZHAO Peng, ZHAO Yuhai. Discussion on safety measures of screen door insulation and equipotential with rail[J]. Science & Technology Information, 2019, 17(33): 76.
- [3] 吴卫海, 陈金伟. 地铁车站站台门放电现象分析和防护[J]. 机电工程技术, 2017, 46(7): 165.  
WU Weihai, CHEN Jinwei. Analysis and protection of spark discharge of platform screen door in metro station[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2017, 46(7): 165.
- [4] 梁绍昌. 地铁站台站台门在线绝缘监测装置的研制[J]. 科技风, 2018(18): 13.  
LIANG Shaochang. Development of on-line insulation monitoring device for subway platform screen door[J]. Technology Wind, 2018(18): 13.
- [5] 裴文龙. 城市轨道交通钢轨电位与杂散电流综合抑制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.  
PEI Wenlong. Research on rail potential and stray current comprehensive suppression for urban rail transit[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [6] 宋奇吼, 杨飏, 童岩峰, 等. 南京地铁 1 号线轨电位异常的抑制方法[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(4): 114.  
SONG Qihou, YANG Yang, TONG Yanfeng, et al. Research on the control of abnormal rail potential for Nanjing Metro Line 1[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(4): 114.
- 收稿日期:2023-03-08 修回日期:2023-04-10 出版日期:2024-09-10  
Received:2023-03-08 Revised:2023-04-10 Published:2024-09-10  
• 通信作者:张明锐,教授,zmr@tongji.edu.cn  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license