

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.04.018

走行轨区段绝缘劣化时杂散电流动态分布及防护方法研究

郑艳¹, 郑子璇², 杜贵府², 丁传仓², 江星星², 李舜酩¹

(1. 南通理工学院汽车工程学院, 江苏南通 226002; 2. 苏州大学轨道交通学院, 江苏苏州 215031)

摘要: 针对城市轨道交通走行轨区段绝缘劣化导致的杂散电流升高, 且严重影响系统供电安全及周边地下金属工程安全的问题, 开展走行轨区段绝缘劣化时杂散电流动态分布规律及防护方法研究。首先, 对城轨线路区段高绝缘防护系统进行方案设计, 提出线路高绝缘区段的杂散电流防护方法, 设置单向导通装置及高绝缘区段; 然后, 建立城轨供电系统区段绝缘劣化情况下多列车动态运行仿真模型, 并考虑回流系统分区段防护控制特性, 进行系统统一链式建模及潮流求解; 最后, 基于国内实际城市轨道交通线路参数, 仿真分析区段绝缘劣化时全线杂散电流及钢轨电位的动态分布, 并研究分区段防护对线路杂散电流及钢轨电位的控制效果。研究结果表明, 区段绝缘劣化会导致该区段钢轨电位钳位、杂散电流增加; 采用分区段防护, 隔离区段外的回流电流并在区段内采用高绝缘, 能够大大限制区段内杂散电流幅值, 同时有效解决区段绝缘劣化导致的钢轨电位钳位问题。相关方法可用于城轨线路关键区段的杂散电流防护。

关键词: 城市轨道交通; 杂散电流; 区段绝缘劣化; 分区段防护

中图分类号: TM922.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)04-0153-08

Dynamic Distribution and Protection Methods of Stray Current Under Sectional Insulation Deterioration in Running Rails

Zheng Yan¹, Zheng Zixuan², Du Guifu², Ding Chuancang², Jiang Xingxing², Li Shunming¹

(1. School of Automotive Engineering, Nantong Institute of Technology, Nantong Jiangsu 226002;

2. School of Rail Transportation, Soochow University, Suzhou Jiangsu 215131)

Abstract: To address the problem of elevated stray current caused by insulation deterioration in running rail sections of urban rail transit, which seriously endangers the safety of the traction power supply system and surrounding underground metallic structures, this paper investigates the dynamic distribution patterns of stray current and corresponding protection methods under such insulation deterioration. First, a high-insulation protection scheme for urban rail line sections is designed, and a stray current mitigation strategy for high-insulation sections is proposed, which includes the installation of unidirectional conducting devices and the definition of high-insulation zones. Then, a multi-train dynamic operation simulation model of the urban rail power supply system is established under section insulation deterioration, taking into account the sectional protection control characteristics of the return system. A unified chain-type system model and a power flow solution are developed accordingly. Finally, based on the parameters of an actual domestic urban rail transit line, simulations are performed to analyze the dynamic distribution of stray current and rail potential along the entire line under section insulation deterioration, and the control effectiveness of sectional protection for both stray current and rail potential is evaluated. The results show that insulation deterioration in a section leads to rail potential clamping and an increase in stray current in that section. By adopting sectional protection, which isolates the return current from outside the section while maintaining high insulation within the section, the stray current amplitude in the section can be significantly suppressed, and the rail potential clamping problem induced by insulation deterioration is effectively

收稿日期: 2025-09-07 修回日期: 2026-01-05

第一作者: 郑艳, 女, 硕士, 讲师, 主要从事交通装备状态监测及控制方向研究, zyteamo@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(52477114); 南通理工学院科技创新团队基金项目(KCTD010); 江苏省基础研究计划(BK20251838)

引用格式: 郑艳, 郑子璇, 杜贵府, 等. 走行轨区段绝缘劣化时杂散电流动态分布及防护方法研究[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(4): 153-160.

resolved. The proposed methods can be applied to stray current protection for critical sections of urban rail lines.

Keywords: urban rail transit; stray current; sectional insulation deterioration; sectional protection

当前,在城市轨道交通直流牵引供电系统中,牵引电流普遍经由走行轨回流至牵引所负极。由于走行轨对地绝缘不理想,部分回流电流从走行轨泄漏,形成了杂散电流。此外,为控制过高的钢轨电位,线路普遍安装了钢轨电位保护装置。该装置动作时将走行轨直接接地,导致杂散电流泄漏量激增。区域内大量的杂散电流不仅会造成周围的结构钢筋以及埋地管道产生严重的化学腐蚀,还会影响附近的交流系统,如造成直流偏置、通信干扰,影响交流供电系统的供电质量等^[1-2]。城轨线路回流系统分布区域广,难以保证各位位置轨地绝缘均处于良好状态,易发生局部绝缘薄弱或者破损。尤其是随着运行年限不断增加,走行轨不可避免地产生区段绝缘劣化现象,大大增加线路杂散电流水平,使其动态分布情况复杂,对城轨线路自身及周边地下金属结构工程寿命产生影响。因此,如何通过对重点区段采取针对性的杂散电流防护措施,从而降低地铁杂散电流对周边关键设备及工程的干扰,成为城轨供电安全的研究重点之一。

为实现杂散电流防护,相关学者提出防护杂散电流的相关方法,主要分为以下3类:提升走行轨绝缘性能,如加强走行轨的绝缘涂层,用绝缘性能更高的混凝土混合物浇筑走行轨下方等^[3-4];改变牵引电流的回流路径,如设置专用的回流轨道,在走行轨旁并联回流导体,段场隔离,杂散排流等^[5-6];优化供电区间,如缩短牵引所间距,提高系统供电电压,改善系统功率分配等^[7-9]。相关学者基于改变供电区间的思想,提出通过在现有供电系统内增设负阻抗变流器装置,将原有的供电区间划分为多个区段,使得无列车运行的区段牵引电流为零^[10]。然而,从源头控制杂散电流泄漏的方法往往成本较高^[11-12]。与此同时,埋地金属管线与轨道交通线路通常存在局部交叉,若相应区段的走行轨绝缘状态良好,则杂散电流影响不大,可有效避免轨道交通杂散电流对附近关键地下金属工程的干扰。针对轨道交通杂散电流影响的关键区段,采取区段杂散电流综合防护的形式,即可保证经济性,又可实现关键区段的杂散电流防护,是一种较好的兼顾方式。

本文针对城轨区段绝缘劣化时杂散电流动态分布及分区段防护方法进行研究,建立考虑城轨供电系统区段绝缘劣化情况及分区段防护控制特性的动态运行仿真模型,仿真分析区段绝缘劣化时全线杂散电流的

动态分布,并研究分区段防护对线路杂散电流的控制效果,以丰富城轨线路杂散电流防护方法和途径。

1 城轨区段高绝缘防护系统简介

城市轨道交通供电系统包括牵引供电所、上下行接触网、列车、走行轨、回流线、排流网(stray current collection mat, SCCM)、地网等结构,如图1(a)所示。牵引变电所中包含不控整流机组、再生制动能量吸收装置(regenerative braking energy absorption device, READ);回流系统中还包含过电压保护装置(over voltage protection device, OVPD)、排流装置(drainage device, DD)等保护装置。实际现场城市轨道交通运行时,运营年限增加、环境变化(如大雪、冰冻等恶劣天气、过江过河)、温度变化(如高温、严寒)等情况都会导致钢轨对地绝缘性能的下降,进而导致钢轨电位、杂散电流的加剧,影响城轨系统的安全、稳定运行。

本文针对城轨线路绝缘薄弱或重要设备附近的区段,提出了如图1(b)所示高绝缘区段的杂散电流防护方法。高绝缘防护区段内的走行轨,通过表面绝缘涂覆、嵌入式轨道、高绝缘混凝土浇筑等方法^[13-14],加强区段内的走行轨绝缘,其中,高绝缘的走行轨能够有效减少区段内杂散电流的泄漏量,而单向导通装置(Unilateral Connecting Device, UCD)的设置能够在保障

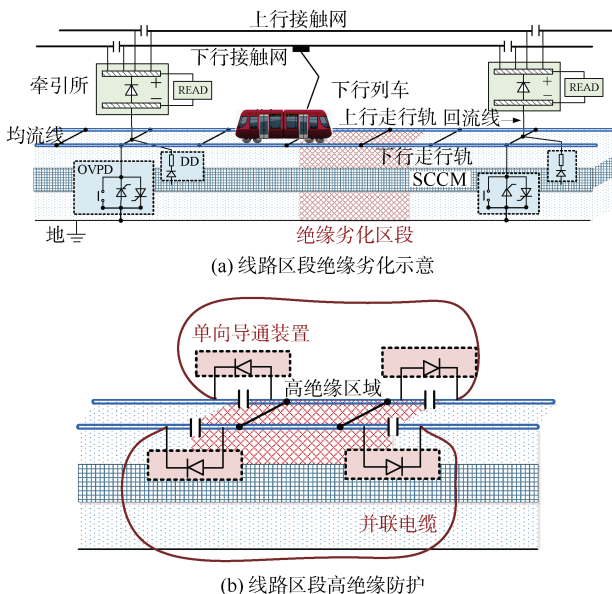


图1 城轨区段绝缘劣化及区段高绝缘防护示意
Figure 1 Schematic diagram of sectional insulation deterioration and high-insulation protection

列车正常行驶的同时,减少其他区段列车运行所导致的防护区段的杂散电流。例如,当防护区段内有列车行驶时,单向导通装置导通,牵引电流可自单向导通装置及走行轨回流至单侧或两侧的牵引所负极;当防护区段内没有列车运行时,区段两侧的单向导通装置关断,其他区段列车的回流电流无法从防护区段流通,从而大大减少了防护区段的杂散电流。

2 考虑区段绝缘劣化及分区段高绝缘防护的杂散电流动态分布计算方法

为分析区段绝缘劣化及分区段高绝缘防护时,全线多列车动态运行过程中杂散电流分布规律,本文建立了考虑区段绝缘劣化及分区段高绝缘防护的杂散电流动态分布计算方法,系统模型如图2所示。

在某一时刻,整个供电系统等效电阻模型以牵引变电所及列车所处位置为切面, N 个切面将全线划分为 $N-1$ 个区段。在牵引变电所或列车切面 $x_n(1 \leq n \leq N)$ 处,牵引变电所等效为由牵引电流 I_{cn} 控制的,带内阻的电压源 $U_{cn}=f(I_{cn})$, y_{cn} 为其等效电导。列车等效为时变功率源 P_n 。 y_{wn} 为上行接触网和下行接触网之间的导纳,在牵引变电所切面上下行接触网连接, $y_{wn}=1 \times 10^8 \text{ S}$;在列车及区段绝缘两端切面上下行接触网断开, $y_{wn}=0 \text{ S}$ 。

R_{gn} 、 R_{pn} 分别为走行轨对排流网电阻和排流网对地电阻。 R_{tn} 为走行轨对地过渡电阻。接触网的等效电阻 z_{wn} 由接触网单位长度纵向电阻及区段距离计算。 z_{tn} 及 z_{sn} 分别为走行轨等效电阻及排流网等效电阻。 U_n 、 I_n 、 Z_n 、 Y_n 分别为节点 n 处电压、电流、阻抗、导纳矩阵。 U_{dn} 、 U_{un} 、 U_{tn} 、 U_{sn} 分别为第 n 个切面位置下行接触网对地电压、上行接触网对地电压、走行轨对地电压、排流网对地电压。 R_{un} 为

钢轨分段装置的等效电阻。

由于实际线路分布参数明显,需要将区段分布参数模型等效为双 π 型集中参数模型。根据基尔霍夫基本定律,切面 n 及 $n+1$ 之间的区段中,任意位置 x 处的钢轨电位 $u_{tn}(x)$ 、SCCM 电位 $u_{sn}(x)$ 、走行轨电流 $i_{tn}(x)$ 、SCCM 电流 $i_{sn}(x)$ 满足:

$$\begin{bmatrix} u_{tn}(x) & u_{sn}(x) & i_{tn}(x) & i_{sn}(x) \end{bmatrix}^T = H \times \begin{bmatrix} C_{n1}e^{-\alpha x} & C_{n2}e^{\alpha x} & C_{n3}e^{-\beta x} & C_{n4}e^{\beta x} \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{m+n}{2} + \sqrt{\frac{(m-n)^2}{4} + mk}} \quad (2)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{m+n}{2} - \sqrt{\frac{(m-n)^2}{4} + mk}} \quad (3)$$

$$m = R_t G_s \quad (4)$$

$$n = R_s (G_s + G_p) \quad (5)$$

$$k = R_s G_s \quad (6)$$

式中, R_t 、 R_s 分别为单位长度走行轨、SCCM 纵向电阻, Ω/km ; G_s 、 G_p 分别为单位长度走行轨对 SCCM 过渡电导、SCCM 对地过渡电导, S/km ; $C_{n1} \sim C_{n4}$ 是由切面 x_n 处的边界条件确定的待定参数。 H 矩阵为 4×4 矩阵,具体为

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ \frac{\alpha}{R_t} & -\frac{\alpha}{R_t} & \frac{\beta}{R_t} & -\frac{\beta}{R_t} \\ 1 - \frac{\alpha^2}{G_s R_t} & 1 - \frac{\alpha^2}{G_s R_t} & 1 - \frac{\beta^2}{G_s R_t} & 1 - \frac{\beta^2}{G_s R_t} \\ \frac{G_p}{\alpha} - \frac{\alpha}{R_t} - \frac{G_p \alpha}{G_s R_t} & \frac{\alpha}{R_t} - \frac{G_p}{\alpha} + \frac{G_p \alpha}{G_s R_t} & \frac{G_p}{\beta} - \frac{\beta}{R_t} - \frac{G_p \beta}{G_s R_t} & \frac{\beta}{R_t} - \frac{G_p}{\beta} + \frac{G_p \beta}{G_s R_t} \end{bmatrix}$$

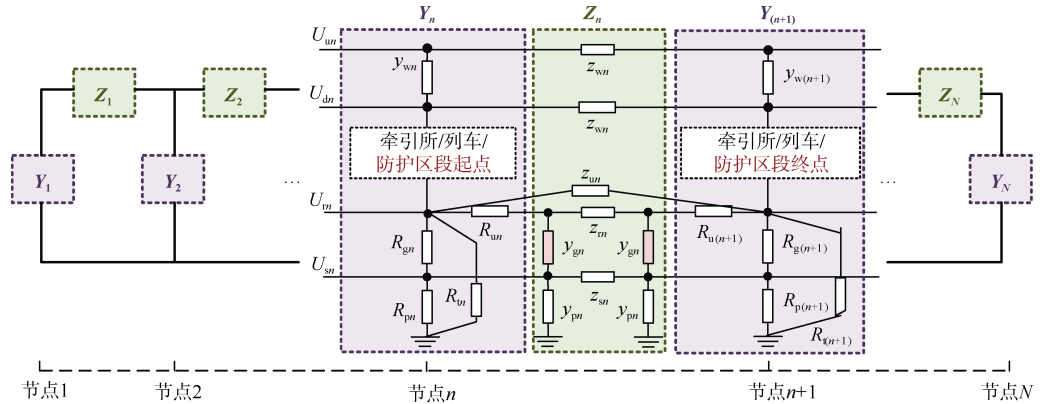


图2 考虑区段绝缘劣化及分区段高绝缘的系统统一链式模型

Figure 2 Unified chain model considering sectional insulation deterioration and high insulation sections

假设集中参数模型切面 x_n 在线路 $x=L$ 处, L 处回流安全参数应满足

$$\begin{bmatrix} U_{rn} & U_{sn} & I_{rn} & I_{sn} \end{bmatrix}^T = \mathbf{H} \times \begin{bmatrix} C_{n1}e^{-\alpha L} & C_{n2}e^{\alpha L} & C_{n3}e^{-\beta L} & C_{n4}e^{\beta L} \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

切面 x_{n+1} 在线路 $x=L+\Delta L$ 处, 则 $L+\Delta L$ 处走行轨电流 $I_{r(n+1)}$ 应满足

$$\begin{aligned} I_{r(n+1)} &= \left(1 - \frac{\alpha^2}{G_s R_r}\right) C_{n1} e^{-\alpha(L+\Delta L)} + \left(1 - \frac{\alpha^2}{G_s R_r}\right) C_{n2} e^{\alpha(L+\Delta L)} \\ &+ \left(1 - \frac{\beta^2}{G_s R_r}\right) C_{n3} e^{-\beta(L+\Delta L)} + \left(1 - \frac{\beta^2}{G_s R_r}\right) C_{n4} e^{\beta(L+\Delta L)} \\ &= k_1 U_{rn} + k_2 U_{sn} + k_3 I_{rn} + k_4 I_{sn} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $k_1 \sim k_4$ 应满足

$$\begin{aligned} [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4] &= \\ &\left[\left(1 - \frac{\alpha^2}{G_s R_r}\right) t_1 \quad \left(1 - \frac{\alpha^2}{G_s R_r}\right) t_2 \quad \left(1 - \frac{\beta^2}{G_s R_r}\right) t_1 \quad \left(1 - \frac{\beta^2}{G_s R_r}\right) t_2 \right] \cdot \\ &\mathbf{H}^{-1} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\mathbf{Y}_n =$$

$$\begin{bmatrix} y_{wn} + y_{cn} & -y_{wn} & -y_{cn} & 0 & 0 & s_{bn} \\ -y_{wn} & y_{wn} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -y_{cn} & 0 & y_{cn} + y_{g(n-1)} + y_{gn} + R_{dn}^{-1} + R_{ovn}^{-1} & -y_{g(n-1)} - y_{gn} - R_{dn}^{-1} & 0 & -s_{bn} \\ 0 & 0 & -y_{g(n-1)} - y_{gn} - R_{dn}^{-1} & y_{g(n-1)} + y_{gn} + y_{p(n-1)} + y_{pn} + R_{dn}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_n & 0 & -b_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

当设置区段高绝缘防护时, 防护区段两端的钢轨分段装置可由等效电阻 R_{wn} 来表示, 其动态特性为

$$R_{wn} = \begin{cases} 1 \times 10^{-3} \Omega, & \text{分断装置导通} \\ 1 \times 10^5 \Omega, & \text{分断装置关断} \end{cases} \quad (16)$$

由于新增钢轨分段装置的等效电阻 R_{wn} , 多状态统一电压方程中 $\mathbf{Z}_n$ 应表示为

$$\mathbf{Z}_n^{-1} = \text{diag}(1/z_{wn}, 1/z_{wn}, 1/(z_{rn} + R_{wn}), 1/z_{sn}, 0) \quad (17)$$

本文将所有节点处的多状态统一电压方程组简写为 $\mathbf{I} = \mathbf{G}\mathbf{U}$, 其中 $\mathbf{G}$ 为系统节点电压方程的系数矩阵, 由 $\mathbf{Z}_n$ 、 $\mathbf{Y}_n$ 构成。基于图 3 所示的迭代求解方法, 可得到系统多列车动态运行时, 各节点位置的参数动态变化情况。图 3 中, ε_1 为迭代过程节点电压收敛精度; ε_2 为系统功率平衡收敛精度; $\Delta P^{(i)}$ 系统不平衡功率; K 为潮

式中, $t_1 = e^{-\alpha \Delta L}$, $t_2 = e^{\alpha \Delta L}$ 。

根据双 π 型电路等效关系, 可得

$$\begin{cases} y_{gn} = \frac{k_1}{1 + k_3 + k_4} \\ z_{rn} = \frac{(k_3 - 1)(k_4 + k_3 + 1)}{k_1} \\ y_{pn} = \frac{k_2 - k_1}{k_4} \\ z_{sn} = \frac{k_4(1 + k_3 + k_4)}{k_1} \end{cases} \quad (10)$$

因此, 本文所建立的回流系统等效模型内, 区段等效参数取值仅取决于节点间距 ΔL 以及单位长度等效电阻 R_r 、 R_s 、 G_s 、 G_p 。

针对第 n 个切面位置, 可建立多状态统一方程

$$\mathbf{I}_n = -\mathbf{Z}_{n-1}^{-1} \mathbf{U}_{n-1} + (\mathbf{Z}_{n-1}^{-1} + \mathbf{Y}_n + \mathbf{Z}_n^{-1}) \mathbf{U}_n - \mathbf{Z}_n^{-1} \mathbf{U}_{n+1} \quad (11)$$

$$\mathbf{U}_n = [U_{dn}; U_{wn}; U_{rn}; U_{sn}; y_{bn}] \quad (12)$$

$$\mathbf{I}_n = [I_{dn}; I_{wn}; I_{rn}; I_{sn}; s_{bn}] \quad (13)$$

$$\mathbf{Z}_n^{-1} = \text{diag}(1/z_{wn}, 1/z_{wn}, 1/z_{rn}, 1/z_{sn}, 0) \quad (14)$$

流计算迭代次数。

3 杂散电流分布规律及防护效果分析

3.1 仿真参数设置

为分析城轨区段绝缘劣化时杂散电流动态分布及分区段高绝缘防护方法效果, 本文以国内某地铁 2 号线系统参数为例, 开展仿真分析。该线路供电区间长 13.697 km, 设置有 13 个车站(各车站标号分别以 S1~S13 表示)及 5 个牵引所(各牵引所标号分别以 T1~T5 表示)。

全线设置多列车动态运行, 上下行列车发车间隔 3 min, 上行方向列车在 S1 至 S13 停站时间分别为 38、29、24、38、40、29、22、25、28、32、25、32、34 s; 下行方向列车在 S1 至 S13 停站时间分别为 32、32、

24、26、29、25、37、24、25、23、25、29、26 s。全线列车运行图如图 4 所示。

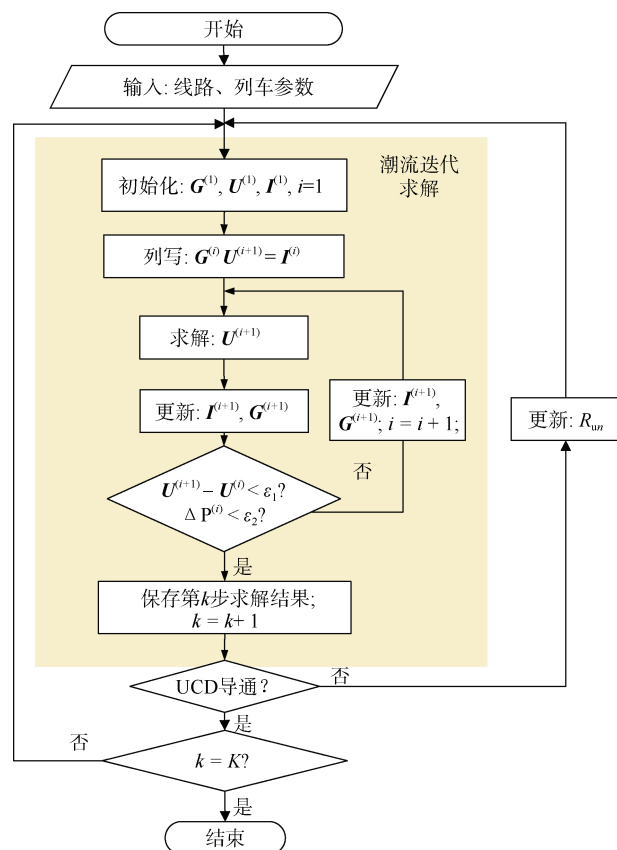


图 3 考虑区段高绝缘防护的系统潮流求解方法

Figure 3 Power flow calculation considering high-insulation section protection

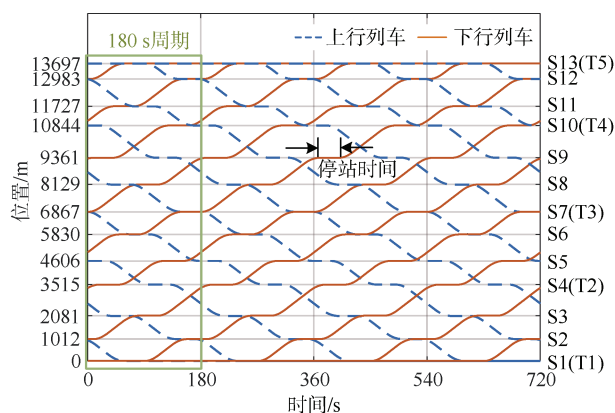


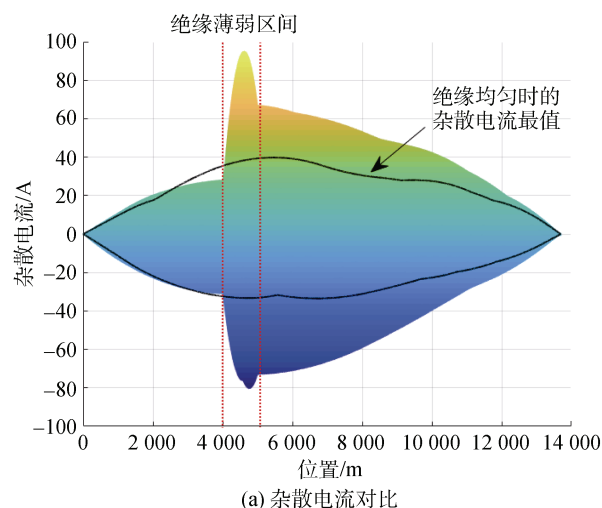
图 4 全线列车运行图设置

Figure 4 Train operation diagram for the entire line

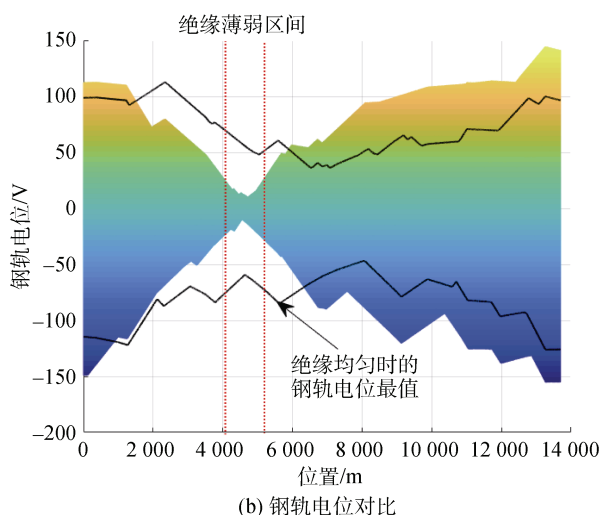
供电系统其他参数设置包括: 牵引变电所等效内阻 0.016Ω , 直流侧空载网压 1593 V , 直流侧最大网压 1800 V ; 走行轨、排流网、接触网纵向电阻分别设置为 15 、 18 、 $20 \text{ m}\Omega/\text{km}$ 。

3.2 区段绝缘劣化时杂散电流动态分布

为分析线路区段绝缘劣化时杂散电流等回流参数的动态分布, 将线路中 4 km 至 5 km 区段走行轨过渡电阻设置为 $0.1 \Omega \cdot \text{km}$, 其他位置走行轨过渡电阻设置为 $10 \Omega \cdot \text{km}$ 。对比仿真全线走行轨过渡电阻均为 $10 \Omega \cdot \text{km}$ 时的杂散电流动态分布, 结果如图 5 所示。



(a) 杂散电流对比



(b) 钢轨电位对比

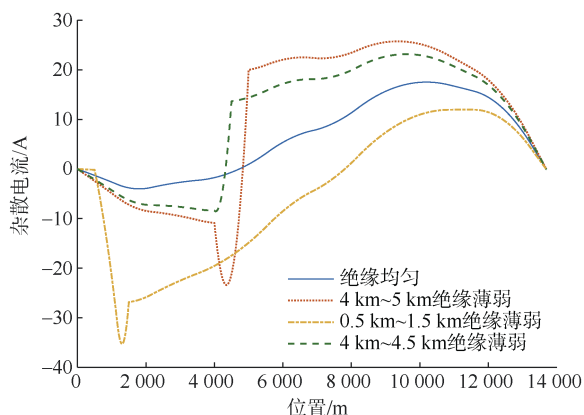
图 5 区段绝缘劣化时回流参数分布

Figure 5 Distribution of return-current parameters under sectional insulation deterioration

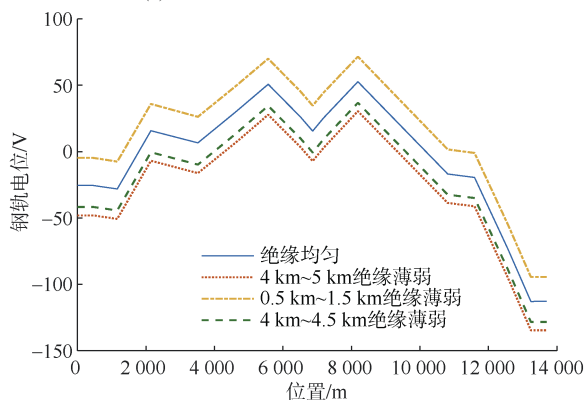
由图 5(a)可知, 相比于线路正常绝缘时, 4 km 至 5 km 发生区段绝缘劣化时, 该区段的杂散电流幅值会明显升高, 最大幅值可达到 95.0 A , 相比正常绝缘情况下杂散电流幅值升高 55.7 A 。该情况下, 线路钢轨电位的动态分布如图 5(b)所示, 绝缘劣化区段的钢轨电位被低绝缘电阻钳位, 幅值有所降低, 但其他区段的钢轨电位产生一定程度的抬升, 线路中最大钢轨电位可达到 -155.2 V , 相比正常绝缘情况下钢轨电位幅

值抬升了 29.2 V。

进一步对比分析线路中不同区段发生绝缘劣化时, 线路回流参数的分布情况。线路中 0.5 km 至 1.5 km、4 km 至 4.5 km、4 km 至 5 km 分别设置绝缘劣化, 走行轨过渡电阻设置为 $10\ \Omega\cdot\text{km}$, 线路回流参数对比如图 6 所示。由图 6 可知: 线路的不同区段发生绝缘劣化时, 将导致全线杂散电流出现不同水平的增加, 钢轨电位会产生不同程度的钳位, 进而全线钢轨电位的分布产生抬升。



(a) 不同区段发生绝缘劣化时杂散电流



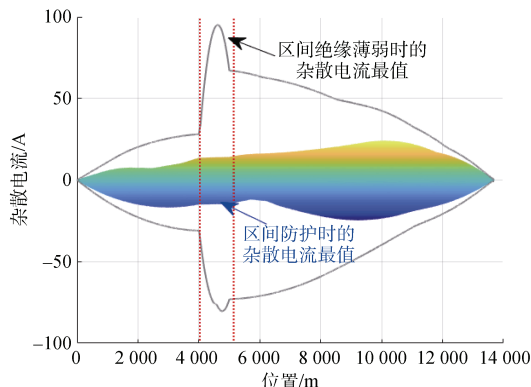
(b) 不同区段发生绝缘劣化时钢轨电位

图 6 线路不同区段发生绝缘劣化时回流参数分布对比

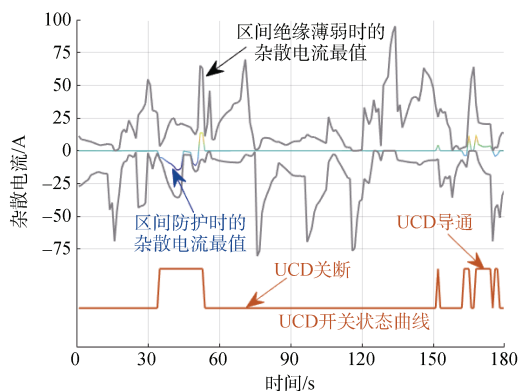
Figure 6 Comparison of return-current parameters when insulation degradation occurs in different sections

3.3 分区段防护效果分析

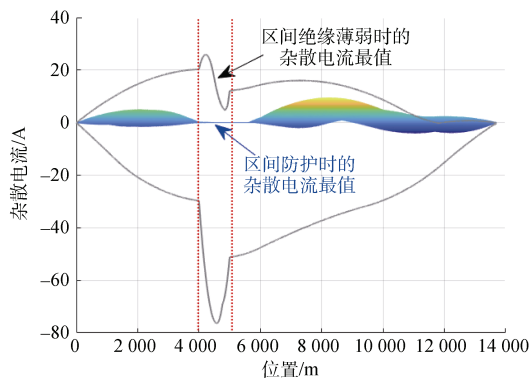
对本文所提出的分区段防护方法进行仿真分析, 验证分区段防护方法对杂散电流的防护效果。按照《地铁杂散电流腐蚀防护技术标准》(CJJ/T 49—2020)中对加强绝缘型防护方案的走行轨过渡电阻要求, 区段高绝缘走行轨对地过渡电阻设置为 $150\ \Omega\cdot\text{km}$ ^[15]。将 4 km 至 5 km 设置为高绝缘防护区段, 其他区段走行轨过渡电阻设置为 $10\ \Omega\cdot\text{km}$ 。仿真结果如图 7 所示。



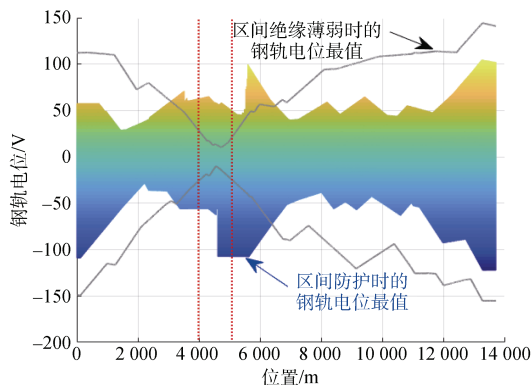
(a) 区段高绝缘防护时杂散电流对比



(b) 被保护区段杂散电流



(c) 80 s 至 120 s 时全线杂散电流对比



(d) 钢轨电位对比

图 7 分区段高绝缘防护效果

Figure 7 Effect of high-insulation sectional protection

列车运行周期内, 全线各位置杂散电流最大值如图 7(a)所示, 相比于区段绝缘薄弱情况下全线杂散电流的分布, 采用分区段防护时杂散电流幅值大大降低, 最大幅值降低了 70.5 A, 尤其是采用分区段防护的区段, 杂散电流降低明显。图 7(a)结果中包含了运行列车在被防护区段时杂散电流的最大幅值, 由于所采用的分区段防护方法, 列车不在被防护区段时, 被防护区段被隔离, 减少了回流电流通过被防护区段的时间。

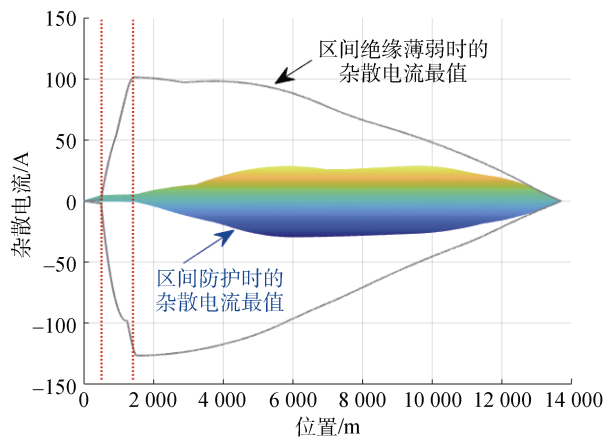
进一步分析被防护区段内杂散电流的变化情况, 结果如图 7(b)所示。在被防护区段内, 杂散电流的幅值大大降低, 由防护前的 95.0 A 降低至防护后的 14.6 A, 出现最大值的时刻是列车运行在被防护区段的时刻。但由于采用的电流隔离措施, 在 180 s 列车运行周期内, 仅有 32.5 s 时长当中有列车运行在被防护区段, 大大降低了被防护区段的杂散电流泄漏几率。

图 7(c)是 80 s 至 120 s 时间段内全线杂散电流分布, 该时间段内无列车在被防护区段运行, UCD 关断。此时, 分区段防护方法将被防护区段的杂散电流最大值降低了 98.7%以上, 全线杂散电流最大值也由 78.2 A 降低至为 9.4 A。

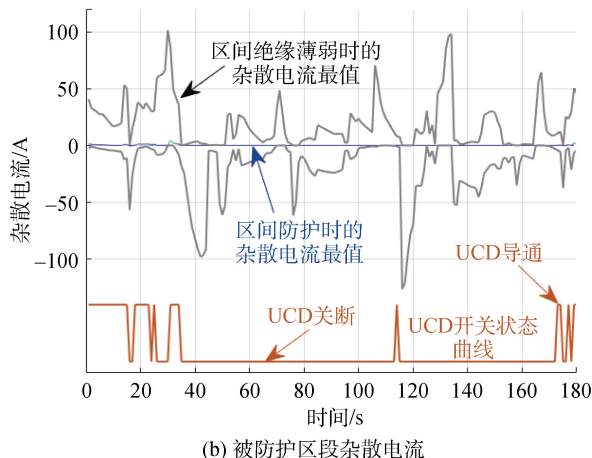
在分区段防护方法下, 全线各位置钢轨电位最大幅值如图 7(d)所示。分区段防护时采用走行轨高绝缘, 钢轨电位被钳位问题得到有效解决, 降低了线路其他位置钢轨电位被抬升的问题, 钢轨电位最大幅值由 155.2 V 降低至 104.6 V。

为进一步仿真分析分区段防护的效果, 设置 0.5 km 至 1.5 km 区段采用分区段高绝缘防护方法, 全线杂散电流及被防护区段的杂散电流如图 8 所示。

由图 8(a)可知, 采用分区段防护时, 全线杂散电流幅值由防护前的 95.0 A 降低至防护后的 29.2 A, 杂散电流幅值显著降低。由图 8(b)所示被防护区段的杂



(a) 区段高绝缘防护时杂散电流对比



(b) 被防护区段杂散电流

图 8 0.5 km 至 1.5 km 区段采用防护时参数对比

Figure 8 Comparison of parameters with high-insulation protection in the 0.5–1.5 km section

散电流动态分布图可知, 防护区段内杂散电流最大值为 5.2 A, 仅为分区段防护前的 4.1%。在列车不在被防护区段时间段, 杂散电流幅值进一步降低。同时 UCD 的导通时间段, 即列车运行在被防护区段的时间段, 仅占列车运行周期的 18.6%。

综上, 采用分区段防护方法可有效抑制被防护区段内杂散电流的幅值, 可应用于受杂散电流影响敏感的关键区段进行分区段重点防护。

4 结论

针对城轨区段绝缘劣化导致杂散电流泄漏量增大的问题, 本文建立了计及走行轨区段绝缘劣化情况的城轨杂散电流动态计算模型, 并提出分区段防护方法。结论如下:

1) 线路的不同区段发生绝缘劣化时, 将导致全线杂散电流出现不同水平的增加, 钢轨电位会产生钳位效应, 进而导致全线其他位置钢轨电位幅值抬升现象明显。

2) 相比于区段绝缘薄弱情况下全线杂散电流的分布, 采用分区段防护时全线杂散电流幅值大大降低, 尤其是被防护的区段, 杂散电流降低明显, 同时降低了被防护区段的杂散电流泄漏时间段。

3) 分区段防护时采用走行轨高绝缘, 钢轨电位被钳位问题得到有效解决, 避免了线路其他位置钢轨电位被抬升的现象。

本文所提方法作为线路的一种区段防护方法, 可以使杂散电流防护更有针对性, 同时降低杂散电流防护成本, 后续可针对分区段防护方法应用效果进行相

关研究及测试。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 郑琼林, 杨晓峰, 吴命利, 等. 轨道交通牵引供电系统技术进展与思考[J]. 电气工程学报, 2025, 20(4): 399-428.
Zheng Trillion Q, Yang Xiaofeng, Wu Mingli, et al. Advances and reflections on rail transit traction power supply system technology[J]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 20(4): 399-428.
- [3] 何广飞, 罗旭光, 卢玉龙, 等. 地铁防杂散电流的钢轨绝缘涂层研究[J]. 现代城市轨道交通, 2020(10): 107-109.
He Guangfei, Luo Xuguang, Lu Yulong, et al. Study on rail insulation coating to prevent stray current in metro[J]. Modern Urban Transit, 2020(10): 107-109.
- [4] 史海欧, 田骥, 刘小清, 等. 嵌入式连续支承轨道系统应用研究[J]. 现代城市轨道交通, 2021(12): 19-24.
Shi Haiou, Tian Ji, Liu Xiaoqing, et al. Application of embedded continuous support track system[J]. Modern Urban Transit, 2021(12): 19-24.
- [5] 周奇, 林圣, 邹全德, 等. 土壤结构对城轨中杂散电流分布的影响分析[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(2): 10-16.
Zhou Qi, Lin Sheng, Zou Quande, et al. Influence of soil structure on stray current distribution in urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(2): 10-16.
- [6] 刘炜, 郑杰, 李田, 等. 排流装置对直流牵引供电系统杂散电流分布的影响[J]. 电工技术学报, 2022, 37(18): 4565-4574.
Liu Wei, Zheng Jie, Li Tian, et al. The influence of drainage device on stray current distribution in DC traction power supply system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(18): 4565-4574.
- [7] 杜贵府, 张栋梁, 王崇林, 等. 直流牵引供电系统电流跨区间传输对钢轨电位影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 129-139.
Du Guifu, Zhang Dongliang, Wang Chonglin, et al. Effect of traction current transmission among power sections on rail potential in DC mass transit system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 129-139.
- [8] 孙建军, 邢春阳, 兰慧峰, 等. 接触轨供电制式下专用轨回流方案研究[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(1): 142-148.
Sun Jianjun, Xing Chunyang, Lan Huifeng, et al. Research on dedicated rail return current schemes based on contact rail power supply traction systems[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2025, 38(1): 142-148.
- [9] 邓霄, 贾猛, 林飞, 等. 全功率双向变电站与地铁杂散电流问题[J]. 都市轨道交通, 2020, 33(5): 142-147.
Deng Xiao, Jia Meng, Lin Fei, et al. Full-power bidirectional substation and the problem of subway stray current[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(5): 142-147.
- [10] 王振帅, 杨晓峰, 孙向轩. 有源轨道电位硬件动态模拟系统[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(6): 83-91.
Wang Zhenshuai, Yang Xiaofeng, Sun Xiangxuan. Active rail potential hardware dynamic emulator system[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2025, 38(6): 83-91.
- [11] 张开波. 城市轨道交通杂散电流防护失效原因及新型防护方案研究[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(2): 34-41.
Zhang Kaibo. An invalidation analysis and new protection schemes of stray current to urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(2): 34-41.
- [12] 黄江伟, 李守杰, 王龙. 城市轨道交通专用轨回流供电系统设计与应用[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(1): 193-196.
Huang Jiangwei, Li Shoujie, Wang Long. Design and application of special rail return current power supply system in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(1): 193-196.
- [13] 陈鹏, 刘薇, 杨刚. 现代有轨电车嵌入式轨道板的研究与设计[J]. 都市轨道交通, 2018, 31(1): 154-159.
Chen Peng, Liu Wei, Yang Gang. Research and design of embedded track structure of modern trams[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2018, 31(1): 154-159.
- [14] 靳守杰, 马坚生, 欧阳开, 等. 轨道交通杂散电流防护关键技术工程验证[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(5): 238-243.
Jin Shoujie, Ma Jiansheng, Ouyang Kai, et al. Engineering verification of key technologies for rail transit stray current protection[J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(5): 238-243.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁杂散电流腐蚀防护技术标准: CJJ/T 49—2020[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for stray current corrosion protection of subway: CJJ/T 49—2020[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.

(编辑: 王艳菊)