

考虑列车运行工况的钢轨电位 硬件动态模拟平台

王双慧, 杨晓峰, 王慧康, 郑琼林

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘 要:为解决钢轨电位和杂散电流治理措施开展但现场验证难度大的问题, 钢轨电位硬件动态模拟平台近年来获得广泛关注。但现有硬件动态模拟平台通常仅考虑走行轨纵向电阻变化, 而忽略列车运行工况和走行轨-大地过渡电阻的影响, 无法准确再现钢轨电位随列车运行工况的动态规律。为此, 提出一种考虑列车运行工况的钢轨电位硬件动态模拟平台。首先通过直流牵引供电系统模型, 分析列车运行工况对钢轨电位的影响, 根据接触网、走行轨及走行轨-大地过渡电阻的变化特性, 研究包括低阻模块(LRM)与高阻模块(HRM)的钢轨电位硬件动态模拟平台工作原理和数学模型, 并提出考虑列车运行工况的硬件动态模拟平台控制策略。最后通过仿真和实验结果, 验证相关理论和控制策略的正确性。

关键词: 直流牵引供电系统; 钢轨电位; 杂散电流; 硬件动态模拟平台; 可变电阻模块; 低阻模块; 高阻模块
中图分类号: TM 922.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6073(2022)03-0008-09

Rail Potential Hardware Dynamic Emulator Considering the Train Operating Condition

WANG Shuanghui, YANG Xiaofeng, WANG Huikang, ZHENG Trillion Q

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

Abstract: The rail potential hardware dynamic emulator (RPHDE) has received considerable research attention in recent years in view of the field verification challenges of rail potential and stray current mitigation measures. However, existing RPHDEs generally do not consider the influence of train operation conditions and rail-to-earth resistance on rail longitudinal resistance; therefore, they cannot accurately reproduce the dynamic rail potential distribution along the line. A novel RPHDE that considers train operating conditions is proposed. This study first analyzes the influence of train operating conditions on rail potential using a DC traction power supply system model. Subsequently, based on the analysis of the dynamic characteristics of the catenary, running rails, and rail-to-earth resistance, the operational principles and mathematical model of the proposed RPHDE are investigated. Moreover, the corresponding control strategies of the RPHDE considering the train operating conditions are also proposed. The simulation and experimental results verified the validity of the aforementioned theoretical analysis and control strategies.

Keywords: DC traction power supply system; rail potential; stray current; hardware dynamic emulator; variable resistance module; low resistance module; high resistance module

收稿日期: 2021-10-20 修回日期: 2021-11-08

第一作者: 王双慧, 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术 in 轨道交通中的应用, 20121492@bjtu.edu.cn

导师简介: 杨晓峰, 男, 副教授, 博士生导师, xfyang@bjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51737001)

引用格式: 王双慧, 杨晓峰, 王慧康, 等. 考虑列车运行工况的钢轨电位硬件动态模拟平台[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(3): 8-16.
WANG Shuanghui, YANG Xiaofeng, WANG Huikang, et al. Rail potential hardware dynamic emulator considering the train operating condition[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(3): 8-16.

1 研究背景

城市轨道交通具有运力大、速度快、节能环保、不受气候影响等优点,近年来获得快速发展。截至2020年,我国城市轨道交通运营线路总里程达7 978 km^[1]。城市轨道交通广泛采用直流牵引供电系统,牵引所通过接触网(或第三轨)向列车供电,并通过走行轨回流^[2]。数千安培的列车电流流经每千米数十毫欧的走行轨会产生钢轨电位问题,过高的钢轨电位会危及人员及设备安全^[3]。走行轨与大地之间并非完全绝缘,部分电流会泄漏至周边介质或大地中,形成杂散电流^[4-5]。杂散电流容易导致钢筋混凝土结构及其他埋地金属结构的腐蚀,极端情况下会严重损坏其结构,减少使用寿命^[6-8]。

常见的钢轨电位与杂散电流治理措施包括:降低走行轨电阻、增强走行轨-大地间绝缘、提高供电系统电压等级、缩短牵引所间距、采用杂散电流收集网等^[9-13]。但受环境因素的影响,上述措施随着时间推移逐渐恶化,依然存在杂散电流泄漏现象^[14]。一些研究者提出利用电力电子技术实现对杂散电流的治理^[15-18],为杂散电流的治理提供了新思路。然而,上述治理措施直接用在现场,开展实验的协调难度大。钢轨电位硬件动态模拟平台(rail potential hardware dynamic emulator, RPHDE),能突破时空约束,再现钢轨电位的动态分布规律,为硬件治理措施的采用提供物理验证平

台。王慧康等提出了一种电力电子的硬件动模方法^[19],但其可变电阻模块仅能模拟列车单一运行工况下的钢轨电位。为此,杨晓峰等研究了一种改进的可变电阻模块^[2],以适应不同列车运行工况,但拓扑相对复杂。而徐杰等提出了一种简化拓扑^[11],采用固定电阻模拟走行轨-大地的过渡电阻,但未考虑列车运行工况影响。

为此,本研究提出考虑列车运行工况的钢轨电位硬件动态模拟平台(简称“硬件动模平台”)。首先,分析直流牵引供电系统模型和钢轨电位模型,将分布参数的回流系统简化为集中参数电阻网络,提出低阻模块(low resistance module, LRM)模拟接触网与走行轨纵向动态电阻、高阻模块(high resistance module, HRM)模拟走行轨-大地动态过渡电阻的方法;然后,在分析LRM与HRM工作原理的基础上,提出考虑列车运行工况的硬件动态模拟平台及其控制策略;最后,通过仿真和实验,对上述理论和控制进行验证。

2 牵引供电系统建模

直流牵引供电系统基本结构如图1所示,由牵引所、上/下行接触网(或第三轨)、回流系统、列车构成。为方便分析,假定直流牵引供电系统中全线路上下行轨道、接触网分别贯通。当列车牵引出站时,沿线路所有牵引所为列车提供电流,各牵引所与列车构成供电回路。

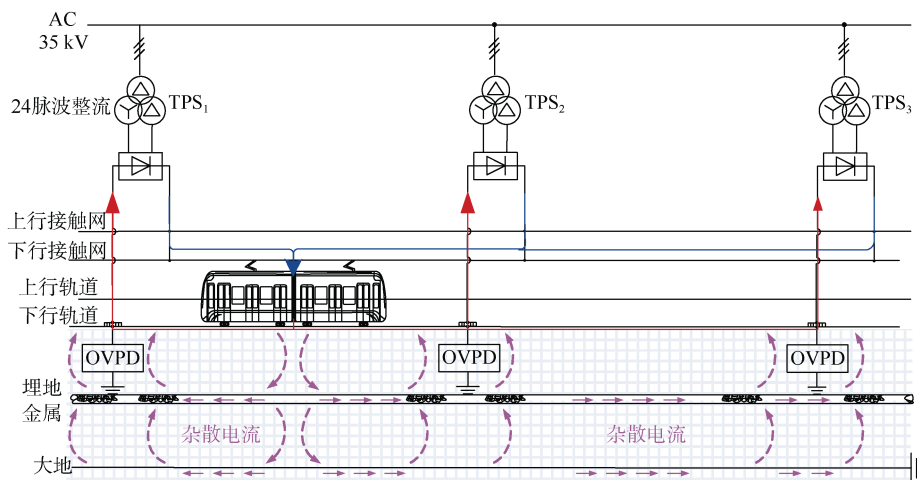


图1 直流牵引供电系统基本组成

Figure 1 Configuration of a DC traction power supply system

2.1 列车与牵引所模型

作为直流牵引供电系统的主要负载,列车通常被等效为一个电流源^[20],牵引电流随列车运行工况变化。

牵引所TPS的整流机组采用24脉波不控整流。整流机组外特性与交流侧电感、移相变压器的漏感、变压器耦合系数以及整流器接线方式等多种因素有关,外特性为多段曲线^[21]。为简化分析,本研究将整

流机组等效为电压源串联内阻的形式。

2.2 供电回流系统建模

回流系统为无数微元段构成的电阻网络, 具有分布参数特征。仅考虑走行轨-大地两层模型的数学模型如图 2 所示, 其中 R_r 表示单位长度走行轨纵向电阻(Ω/km),

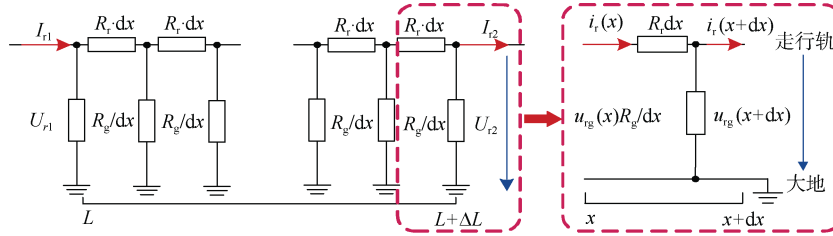


图 2 回流系统两层分布模型与微元段

Figure 2 Two-layer distribution model and micro-element segment model of a recirculation system

根据图 2 微元段, 得到任意位置 x 处钢轨电位 $U_{rg}(x)$ 与轨道电流 $I_r(x)$ 表达式

$$\begin{bmatrix} U_{rg}(x) \\ I_r(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{R_r R_g}} & \frac{-1}{\sqrt{R_r R_g}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C_1 e^{\sqrt{\alpha} x} \\ C_2 e^{-\sqrt{\alpha} x} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $\alpha = R_r/R_g$ 为波阻抗传播系数。

由式(1)可知, 当供电回路内电阻参数及区间长度确定时, 钢轨电位与轨道电流表达式中的系数 C_1 、 C_2 由边界条件确定。

设单列车单牵引所的区间长度为 L_s , 边界处的钢轨电位为 U_{r1} 、 U_{r2} , 区间内的边界条件为

$$U_{rg}(0) = U_{r1} \quad U_{rg}(L_s) = U_{r2} \quad (2)$$

由式(1)解得, 待定系数 C_1 、 C_2 为

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{U_{r1} e^{-\sqrt{\alpha} L_s} - U_{r2}}{e^{-\sqrt{\alpha} L_s} - e^{\sqrt{\alpha} L_s}} \\ C_2 &= \frac{U_{r2} - U_{r1} e^{\sqrt{\alpha} L_s}}{e^{-\sqrt{\alpha} L_s} - e^{\sqrt{\alpha} L_s}} \end{aligned} \quad (3)$$

3 钢轨电位理论计算

基于列车与牵引所的等效电路, 笔者以两列车 3

R_g 表示单位长度走行轨-大地过渡电阻(Ω/km)。供电区间的起点坐标为 $L(\text{km})$, 终点坐标为 $L+\Delta L(\text{km})$, 区间长度为 ΔL , 流入起点处的电流为 I_{r1} , 流出终点的电流为 I_{r2} 。在微元段 dx 中, $i_r(x)$ 表示 x 处轨道电流, $u_{rg}(x)$ 表示 x 处钢轨电位。

个牵引所为例, 建立了图 3 所示的直流牵引供电系统模型。以列车和牵引所位置作为截面, 将线路划分为 4 个区段。其中, 牵引所空载电压和支路电流分别为 U_{di} 、 I_{di} , 牵引所内阻 R_{ini} , 列车电流为 I_{ti} 。截面 i 处走行轨电位为 U_{ri} , 接触网电压为 U_{ci} , 截面 i 与 $i+1$ 之间走行轨电阻为 R_{ri} , 接触网电阻为 R_{ci} 。

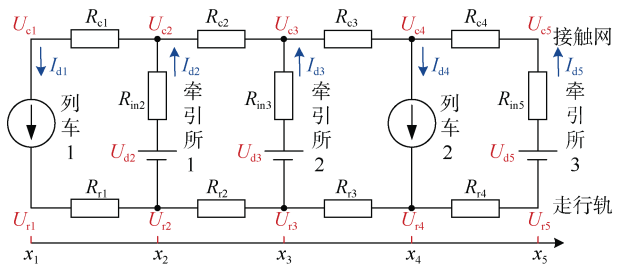


图 3 直流牵引供电系统模型

Figure 3 DC traction power supply system model

在截面 $x_1 \sim x_5$ 中, 建立截面导纳子矩阵 Y_i 。截面 i 与截面 $i+1$ 之间的阻抗子矩阵可建立为 Z_i , Y_i 与 Z_i^{-1} 共同构成导纳矩阵。在截面 x_i 处, 节点电压矩阵与注入截面电流矩阵定义为 U_i 与 I_i 。对上述模型列写节点电压方程, 得到

$$\begin{bmatrix} Y_1 + Z_1^{-1} & -Z_1^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ -Z_1^{-1} & Z_1^{-1} + Y_2 + Z_2^{-1} & -Z_2^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & -Z_2^{-1} & Z_2^{-1} + Y_3 + Z_3^{-1} & -Z_3^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & -Z_3^{-1} & Z_3^{-1} + Y_4 + Z_4^{-1} & -Z_4^{-1} \\ 0 & 0 & 0 & -Z_4^{-1} & Y_5 + Z_4^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} \quad (4)$$

在式(4)的矩阵中, 各元素表示如下:

$$Z_i^{-1} = \begin{bmatrix} 1/R_{ci} & 0 \\ 0 & 1/R_{ri} \end{bmatrix} \quad U_i = \begin{bmatrix} U_{ci} \\ U_{ri} \end{bmatrix} \quad I_i = \begin{bmatrix} I_{ci} \\ I_{ri} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$Y_i = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1/R_{ini} & -1/R_{ini} \\ -1/R_{ini} & 1/R_{ini} \end{bmatrix} & (i=2,3,5) \\ \text{zeros}(2) & (i=1,4) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} R_{ci}=R_c \times (x_{i+1}-x_i) \\ R_{ri}=R_r \times (x_{i+1}-x_i) \end{cases} \quad R_{ini} = \frac{U_{d0}-U_{dN}}{I_{dN}} \quad (7)$$

当线路参数与列车牵引特性确定时, 流入截面的电流 $[I_1; I_2; I_3; I_4; I_5]$ 、导纳矩阵 Y_i 与 Z_i^{-1} 均为已知。由式(4)即可求得系统分析模型中的各点电位, 由此求

得牵引所的支路电流 I_{di} 如下:

$$I_{di} = \frac{U_{ci} - U_{ri} - U_{di}}{R_{ini}} \quad (8)$$

考虑列车之间不同工况下的电流耦合, 牵引所电流与列车电流满足

$$\begin{cases} I_{t1} = \lambda_1 I_{d2} + \lambda_2 I_{d3} + \lambda_3 I_{t4} + \lambda_4 I_{d5} \\ I_{t4} = (1-\lambda_1) I_{d2} + (1-\lambda_2) I_{d3} + \lambda_5 I_{t1} + (1-\lambda_4) I_{d5} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\lambda_1 \sim \lambda_5$ 定义为分流系数。

当列车工况不同时, 其分流系数如表 1 所示。

表 1 分流系数与列车工况关系

Table 1 Relationship between λ and train operating condition

工况组合	工况	功率关系	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	列车电流与各支路电流关系
列车 1 列车 2 同时牵引	工况 1	$P_1 > P_2$	1	λ_2	0	0	0	$I_{t1} = I_{d2} + \lambda_2 I_{d3}$ $I_{t4} = (1-\lambda_2) I_{d3} + I_{d5}$
	工况 2	$P_1 < P_2$	λ_1	1	0	0	0	$I_{t1} = I_{d2} + \lambda_2 I_{d3}$ $I_{t4} = (1-\lambda_1) I_{d2} + I_{d3} + I_{d5}$
列车 1 牵引 列车 2 制动	工况 3	$P_1 > P_2$	1	1	1	1	—	$I_{t1} = I_{d2} + I_{d3} + I_{t4} + I_{d5}$
	工况 4	$P_1 < P_2$	0	0	λ_3	0	—	$I_{t1} = \lambda_3 I_{t4}$
列车 1 制动 列车 2 牵引	工况 5	$P_1 > P_2$	0	0	—	0	1	$I_{t4} = I_{d2} + I_{d3} + I_{t1} + I_{d5}$
	工况 6	$P_1 < P_2$	1	1	—	1	λ_5	$I_{t4} = \lambda_5 I_{t1}$

列车 1 和列车 2 的功率分别为 P_1 、 P_2 。当两列车同为牵引工况时, λ_3 、 λ_4 、 $\lambda_5=0$, $P_1 > P_2$, $\lambda_1=1$; $P_1 < P_2$, $\lambda_2=1$ 。当列车 1 牵引、列车 2 制动时, $P_1 > P_2$, $\lambda_1 \sim \lambda_4=1$; $P_1 < P_2$, λ_1 、 λ_2 、 $\lambda_4=0$ 。当列车 2 牵引、列车 1 制动时, $P_1 > P_2$, λ_1 、 λ_2 、 $\lambda_4=1$; $P_1 < P_2$, λ_1 、 λ_2 、 $\lambda_4=0$ 。由上述分析可知:

- 1) 两列车在不同工况下, 线路存在多个供电回路;
- 2) 列车不同工况与功率, 会影响系统潮流分布;
- 3) 当列车不同工况时, 列车电流存在跨区间传输, 其传输距离跨越多个供电区间。

接下来以表 1 的工况 3 为例, 分析回路电流对钢轨电位的影响。线路中存在 4 个供电回路, 各供电回路电流与钢轨电位微元模型如图 4 所示。供电回路

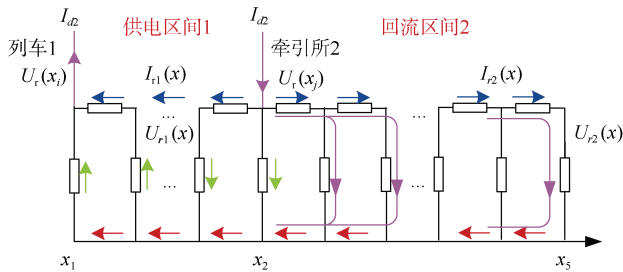


图 4 列车 1 与牵引所 2 之间的供电回路

Figure 4 Power supply circuit between train1 and TPS2

电流 I_{d2} 将线路划分为供电区间 1 和回流区间 2, 其中: 供电区间 1 的钢轨电位为 $U_{r1}(x)$, 轨道电流为 $I_{r1}(x)$; 回流区间 2 的钢轨电位为 $U_{r2}(x)$, 轨道电流为 $I_{r2}(x)$ 。

沿线路分布的钢轨电位与轨道电流公式如下:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} U_{r1}(x) \\ I_{r1}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{R_r R_g}} & \frac{-1}{\sqrt{R_r R_g}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C_1 e^{\sqrt{ax}} \\ C_2 e^{-\sqrt{ax}} \end{bmatrix} & (x_1 \leq x \leq x_2) \\ \begin{bmatrix} U_{r2}(x) \\ I_{r2}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{R_r R_g}} & \frac{-1}{\sqrt{R_r R_g}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C_3 e^{\sqrt{ax}} \\ C_4 e^{-\sqrt{ax}} \end{bmatrix} & (x_2 \leq x \leq x_5) \end{cases} \quad (10)$$

其边界条件为

$$\begin{cases} I_{r1}(x_1) = I_{d2}, I_{r1}(x_2) + I_{r2}(x_2) = I_{d2} \\ U_{r1}(x_2) = U_{r2}(x_2), I_{r2}(x_5) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

通过上述边界条件, 得出回路电流 I_{d2} 对全线路钢轨电位与轨道电流的表达式。以此类推, 可以求解出回路电流 I_{d3} 、 I_{d4} 、 I_{d5} 对全线路的钢轨电位与轨道电流, 最后进行叠加, 得到沿线钢轨电位的分布情况。

在牵引所或列车数量发生变化时, 采用同样的方法建立节点电压方程, 并改变导纳矩阵, 求得支路节点电位与支路电流。首先根据列车工况及电流确定系统中存在的回路电流, 其次计算不同供电回路电流对

全线路钢轨电位与轨道电流的影响,最后进行叠加得到全线路钢轨电位。

由上述分析可知,在直流牵引供电系统中,电流的回流路径受到列车运行工况与瞬时功率的影响。

4 可变电阻模块模拟

前述回流系统建模均基于分布参数的电阻网络,无法直接用于硬件动模实现,为此有必要将分布参数

的电阻网络转换为集中参数模型。本研究采用集中参数电阻等效模拟 ΔL 段内的微元电阻,并采用可变电阻模块模拟其外特性。

4.1 集中参数模型特性

如图 5 所示, π 型集中参数模型中走行轨电阻为 Z_r ,走行轨对地过渡电阻为 R_{yg1} 、 R_{yg2} ,流入起点电流为 I_{r1} ,流出电流为 I_{r2} ,起点处钢轨电位为 U_{r1} ,终点处钢轨电位为 U_{r2} ,流过 Z_r 的电阻为 I_x 。

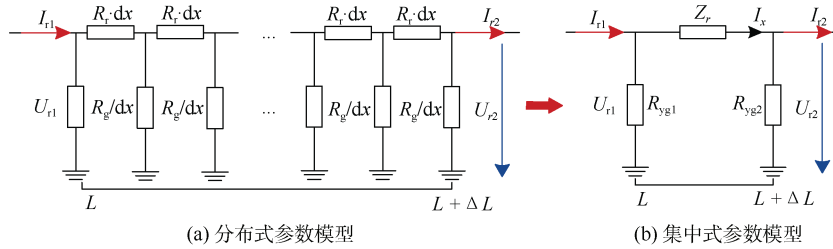


图 5 回流系统集中参数等效

Figure 5 Lumped parameter equivalence of the returned system

根据图 5 的集中参数模型,区间 $L \sim (L+\Delta L)$ 内回流系统的等值参数满足下述关系,即

$$\begin{cases} I_x = I_{r1} - U_{r1} / R_{yg1} \\ U_{r2} = U_{r1} - I_x \cdot Z_r \\ I_{r2} = I_x - U_{r2} / R_{yg2} \end{cases} \quad (12)$$

整理式(12),可得到集中参数模型中钢轨电位与轨道电流的关系如下:

$$\begin{bmatrix} U_{r2} \\ I_{r2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + Z_r / R_{yg1} & -Z_r \\ -(1/R_{yg1} + 1/R_{yg2} + Z_r / (R_{yg1} \cdot R_{yg2})) & 1 + Z_r / R_{yg2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{r1} \\ I_{r1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

设

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 1 + Z_r / R_{yg1} & -Z_r \\ -(1/R_{yg1} + 1/R_{yg2} + Z_r / (R_{yg1} \cdot R_{yg2})) & 1 + Z_r / R_{yg2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, \mathbf{H}_1 表示由起点处电流与钢轨电位到终点处电流与钢轨电位的转换矩阵。

在分布参数模型下,各起点与终点处钢轨电位与轨道电流的关系如下:

$$\begin{bmatrix} U_{r2} \\ I_{r2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{e^{\sqrt{\alpha}\Delta L} + e^{-\sqrt{\alpha}\Delta L}}{2} & \frac{e^{-\sqrt{\alpha}\Delta L} - e^{\sqrt{\alpha}\Delta L}}{2/\sqrt{R_r R_g}} \\ \frac{e^{-\sqrt{\alpha}\Delta L} - e^{\sqrt{\alpha}\Delta L}}{2\sqrt{R_r R_g}} & \frac{e^{\sqrt{\alpha}\Delta L} + e^{-\sqrt{\alpha}\Delta L}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{r1} \\ I_{r1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} \frac{e^{\sqrt{\alpha}\Delta L} + e^{-\sqrt{\alpha}\Delta L}}{2} & \frac{e^{-\sqrt{\alpha}\Delta L} - e^{\sqrt{\alpha}\Delta L}}{2/\sqrt{R_r R_g}} \\ \frac{e^{-\sqrt{\alpha}\Delta L} - e^{\sqrt{\alpha}\Delta L}}{2\sqrt{R_r R_g}} & \frac{e^{\sqrt{\alpha}\Delta L} + e^{-\sqrt{\alpha}\Delta L}}{2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中, \mathbf{H}_2 表示由起点处电流与钢轨电位到终点处电流与钢轨电位的转换矩阵。

根据边界位置处轨道电流与钢轨电位的关系,令 $\mathbf{H}_1 = \mathbf{H}_2$,得到

$$\begin{cases} 1 + Z_r / R_{yg1} = (e^{\sqrt{\alpha}\Delta L} + e^{-\sqrt{\alpha}\Delta L})/2 \\ -Z_r = R_r (e^{-\sqrt{\alpha}\Delta L} - e^{\sqrt{\alpha}\Delta L})/2\sqrt{\alpha} \\ -(1/R_{yg1} + 1/R_{yg2} + Z_r / (R_{yg1} \cdot R_{yg2})) = \sqrt{\alpha} (e^{-\sqrt{\alpha}\Delta L} - e^{\sqrt{\alpha}\Delta L})/2R_r \\ 1 + Z_r / R_{yg2} = (e^{\sqrt{\alpha}\Delta L} + e^{-\sqrt{\alpha}\Delta L})/2 \end{cases} \quad (17)$$

由式(17),得到集中参数模型下走行轨纵向电阻 Z_r 以及走行轨-大地过渡电阻,即

$$\begin{cases} Z_r = \sqrt{R_r R_g} \sinh(\sqrt{\alpha}\Delta L) \\ R_{yg1} = R_{yg2} = \frac{\sqrt{R_r R_g}}{\tanh \frac{\sqrt{\alpha}\Delta L}{2}} \end{cases} \quad (18)$$

由以上分析可知,长度为 ΔL 的回流系统采用集中参数模型替代,替换前后的钢轨电位和电流保持不变,

且集中参数模型中的阻抗仅与区间内回流系统自身参数与区间长度 ΔL 有关。

4.2 可变电阻模块特性

列车两侧接触网电阻、走行轨纵向电阻与走行轨-大地过渡电阻的特性随列车位置变化,图6为单供电区间系统模型。

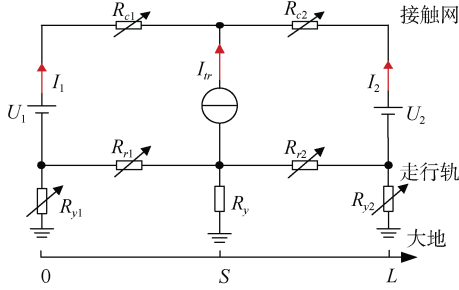


图6 单供电区间系统模型

Figure 6 Single power supply interval system model

当列车在长度为 L 的供电区间运行时,左右侧牵引所位置分别为0和 L ,列车位置为 S 。由式(18),列车左右两侧接触网电阻 R_c ,走行轨电阻 R_r ,走行轨-大地电阻 R_y 与列车位置 S 满足如下关系,即

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{c1} = R_c S \\ R_{c2} = R_c (L - S) \\ R_{r1} = \sqrt{R_r R_g} \sinh(\sqrt{\alpha} S) \\ R_{r2} = \sqrt{R_r R_g} \sinh(\sqrt{\alpha} (L - S)) \\ R_{y1} = \frac{\sqrt{R_r R_g}}{\tanh \frac{\sqrt{\alpha} S}{2}} \\ R_{y2} = \frac{\sqrt{R_r R_g}}{\tanh \frac{\sqrt{\alpha} (L - S)}{2}} \end{array} \right. \quad (19)$$

列车位置对地过渡电阻 R_y 为固定值,即

$$R_y = \frac{\sqrt{R_r R_g}}{2 \tanh \frac{\sqrt{\alpha} L}{4}} \quad (20)$$

接触网电阻 R_{c1} 、 R_{c2} 的等效阻值范围为 $[0, R_c L]$,走行轨电阻与 R_{r1} 、 R_{r2} 的等效阻值变化范围为 $[0, R_r L]$,与列车位置呈线性关系。走行轨对地过渡电阻 R_{y1} 、 R_{y2} 的等效阻值变化范围为 $[2R_g/L, +\infty)$,与列车位置 S 为反比关系。

4.3 LRM 拓扑工作原理

图7所示的低阻模块LRM用来模拟走行轨纵向

动态电阻,LRM由电阻 R_{ol} 、开关管 S_1 与 S_2 、 R_{cl} - C_l 支路以及电感 L_l 构成。两个开关管反向串联,使LRM能够在双向电流下工作。

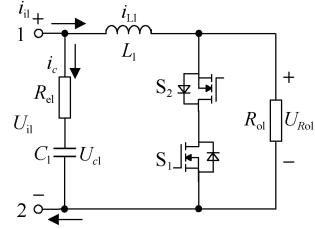


图7 LRM 拓扑

Figure 7 Topology of LRM

根据电流的流动方向,LRM具有两种典型的工作模式。在两种工作模式下,LRM具有相同的等效电路,以端口1流入为例分析其工作原理。

根据电感电流伏秒平衡,LRM等效输出阻值为

$$R_{LRM} = (1 - D_1) R_{ol} \quad (21)$$

可见,通过控制 D_1 ,即可控制LRM输出阻值,进而模拟随列车移动的接触网电阻 R_c 与走行轨电阻 R_r 。

4.4 HRM 拓扑工作原理

如图8所示,高阻模块HRM用来模拟随列车移动的走行轨-大地动态过渡电阻,它由输入电阻 R_{ih} 、输入电容 C_{ih} 、反向串联开关管 S_1 与 S_2 及 S_3 与 S_4 、输出电阻 R_{oh} 、输出电容 C_{oh} 以及储能电感 L_h 构成。通过控制开关管开通或关断,使得HRM能够在双向输入电压下工作。

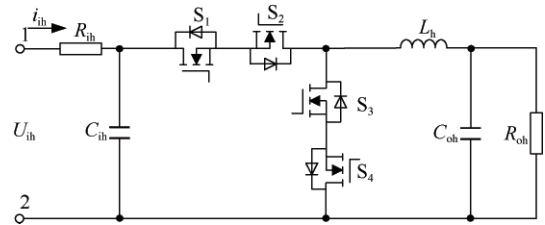


图8 HRM 拓扑

Figure 8 Topology of HRM

HRM在输入电压极性不同时有两种工作模式。在输入电压 $U_{ih} > 0$ 时, S_2 、 S_4 常闭、 S_1 、 S_3 互补导通;在 $U_{ih} < 0$ 时, S_1 、 S_3 常闭、 S_2 、 S_4 互补导通。在两种工作模式下,HRM具有相同的等效电路,故以 $U_{ih} > 0$ 为例分析工作原理,可分为两个典型工作阶段。

阶段1:开关管 S_1 导通, S_3 关断,时间为 $D_h T_{sh}$,电感 L_h 被充电。根据小纹波近似法,此阶段电感电流满足

$$L_h \frac{di_{Lh}}{dt} = U_i - U_{oh} \quad (22)$$

阶段 2: 开关管 S_3 导通, S_1 关断, 关断时间为 $(1-D_h)T_{sh}$ 。电感电流通过 S_3 、 S_4 续流。此阶段电感电流满足

$$L_h \frac{di_{Lh}}{dt} = -U_{oh} \quad (23)$$

根据电感电流伏秒平衡, 联立式(22)、(23), 可得

$$U_{oh} = D_h U_i \quad (24)$$

由小纹波近似法, 假设输入电流为恒定值, 可得

$$i_{ih} = \frac{U_{ih} - U_i}{R_{ih}} \quad (25)$$

由能量守恒原则, 输入功率与输出功率相等, 得到

$$i_{ih} U_{ih} = i_{ih}^2 R_{ih} + i_{oh} U_{oh} \quad (26)$$

联立式(24)~(26), 可得 HRM 等效输出阻值为

$$R_{HRM} = R_{ih} + \frac{R_{oh}}{D_h^2} \quad (27)$$

控制开关管占空比 D_h 即可控制 HRM 阻值, 进而模拟随列车移动的走行轨-大地过渡电阻 R_y 。

5 钢轨电位模拟平台

5.1 单供电区的钢轨电位模拟系统

列车由电流源 I_{tr} 模拟, 牵引所由电压源 U_1 、 U_2 模拟。LRM-1 与 LRM-2 用于模拟接触网电阻与走行轨电阻 R_{c1} 、 R_{c2} 、 R_{r1} 与 R_{r2} ; HRM-1 与 HRM-2 用于模拟走行轨对地过渡电阻 R_{y1} 、 R_{y2} , 其阻值满足式(19)。列车位置与大地间的过渡电阻为固定阻值, 其数值满足式(20)。

5.2 考虑列车工况的控制策略

为实现 RPHDE 在不同列车运行工况下对钢轨电位和杂散电流分配规律的模拟, 本研究采用了图 9 所示的控制策略。

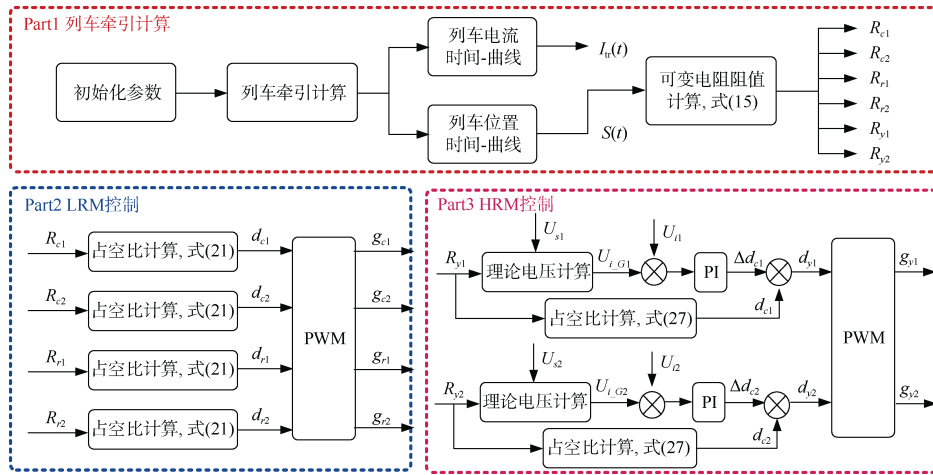


图 9 考虑列车运行工况的钢轨电位模拟系统控制框图

Figure 9 RPHDE control strategy by considering operating conditions

Part 1 为列车的牵引计算及可变电阻值的计算。首先选定模拟目标线路及线路参数, 如供电区间的长度、回流系统参数等。其次, 根据列车的牵引计算曲线, 得到列车电流随时间变化的曲线 $I_{tr}(t)$ 、列车位置随时间变化的曲线 $S(t)$, $I_{tr}(t)$ 用于设置电流源参数, 根据 $S(t)$ 及式(19)可计算出可变电阻控制的目标阻值。

Part 2 为 LRM 的控制。LRM 采用开环控制, 利用 Part 1 计算的走行轨电阻 R_{r1} 、 R_{r2} 及接触网电阻 R_{c1} 、 R_{c2} 的目标阻值作为 R_{LRM} , 通过式(21)、 R_{LRM} 与占空比 D_L 的关系, 得到 LRM 的控制信号 g_{r1} 、 g_{r2} 、 g_{c1} 、 g_{c2} 。

Part 3 为 HRM 的控制。HRM 采用闭环控制, 利

用 Part 1 计算的走行轨-大地过渡电阻 R_{y1} 、 R_{y2} 的目标阻值作为 R_{HRM} , 通过式(27)、 R_{HRM} 与占空比 D_H 的关系, 得到 HRM 的控制信号 g_{y1} 、 g_{y2} , 结合输入电压的极性, 给出对应开关管的驱动信号。

6 仿真与实验验证

结合数学模型计算结果以及模拟系统实验结果进行对比, 验证所提系统拓扑、控制的正确性。由于实际列车运行过程中电流峰值可达数千安培, 而单位长度的走行轨纵向电阻通常小于 $10 \text{ m}\Omega/\text{km}$, 在不改变钢轨电位幅值和分布规律的基础上, 将列车电流和走行轨纵向电阻、走行轨-大地过渡电阻进行缩放, 得到硬件动模平台参数, 分别如表 2~4 所示。

表 2 动模系统实验参数

Table 2 Experimental parameters of a dynamic emulator

	参数	数值
线路参数	单位长度轨道纵向电阻 $R_r/(\Omega/\text{km})$	1
	单位长度轨道过渡电阻 $R_g/(\Omega/\text{km})$	312.5
	单位长度接触网电阻 $R_c/(\Omega/\text{km})$	1
列车	供电区间长度 L/km	2.5
	最大牵引电流/A	14.5
	最大制动电流/A	-15
牵引所	空载电压 U_{d0}/V	100
	等效内阻 R_m/Ω	1
可变电阻	走行轨电阻/ Ω	0~2.5
	接触网电阻/ Ω	0~2.5
	走行轨-大地过渡电阻/ Ω	250~5 000

表 3 LRM 仿真参数

Table 3 LRM simulation parameters

参数	数值	参数	数值
$C_f/\mu\text{F}$	650	R_{of}/Ω	2.5
$L_f/\mu\text{F}$	500	R_{ef}/Ω	0.5

表 4 HRM 仿真参数

Table 4 HRM simulation parameters

参数	数值	参数	数值
$C_{ib}/\mu\text{F}$	4.7	R_{ib}/Ω	50
$L_b/\mu\text{F}$	500	R_{ob}/Ω	180
$C_{ob}/\mu\text{F}$	4.7		

采用上述电路参数，搭建如图 6 所示考虑列车运行工况的钢轨电位硬件动态模拟平台，得到牵引所 1 处、列车处的钢轨电位动态分布结果，如图 10 所示。

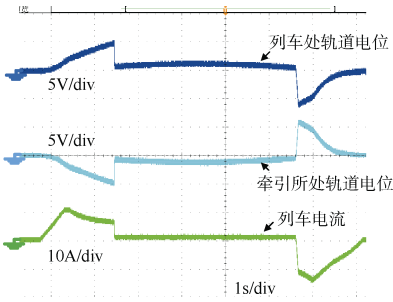


图 10 考虑列车运行工况的钢轨电位实验波形

Figure 10 Experimental waveforms of the rail potential considering

由实验结果可知，牵引所与列车处钢轨电位大小相等，方向相反，满足钢轨电位分布特征。随着列车运行工况改变，列车处钢轨电位最大值为 4.8 V，由前述的钢轨电位理论计算，结合线路参数，计算出实际线路列车处的钢轨电位为 4.84 V，偏差为 0.7%。

7 结论

笔者研究了考虑列车运行工况的钢轨电位硬件动

态模拟平台的拓扑及其控制策略，通过理论计算、仿真结果与实验验证，得到了以下结论：

- 1) 直流牵引供电系统中电流的回流路径受列车运行工况与瞬时功率的影响。
- 2) LRM 能模拟走行轨纵向电阻与接触网电阻的动态变化，HRM 能模拟走行轨-大地过渡电阻的动态变化，二者在双向电压输入时阻值可调，具有较好的稳态精度和动态特性。

参考文献

[1] 侯秀芳, 梅建萍, 左超. 2020 年中国内地城轨交通线路概况[J]. 都市轨道交通, 2021, 34(1): 12-17.
HOU Xiufang, MEI Jianping, ZUO Chao. Overview of urban rail transit lines in Chinese mainland in 2020[J]. Urban rapid rail transit. 2021, 34(1): 12-17.

[2] 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.

[3] 周军峰, 谭海川, 张鑫, 等. 直流杂散电流对天然气管道干扰影响案例分析[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(9): 713-718.
ZHOU Junfeng, TAN Haichuan, ZHANG Xin, et al. Case study on interference effect of DC stray current on natural gas pipelines[J]. Corrosion and protection. 2018, 39(9): 713-718.

[4] XU S, LI W, WANG Y. Effects of vehicle running mode on rail potential and stray current in DC mass transit systems[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 62(8): 3569-3580.

[5] 申宁, 李群湛, 刘炜. 不均匀过渡电阻下地铁杂散电流分析[J]. 都市轨道交通, 2010, 23(6): 98-100.
SHEN Ning, LI Qunzhan, LIU Wei. Analysis of metro stray current under non-uniform transition resistance[J]. Urban rapid rail transit. 2010, 23(6): 98-100.

[6] 蔡力, 王建国, 樊亚东, 等. 地铁走行轨对地过渡电阻杂散电流分布的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3604-3610.
CAI Li, WANG Jianguo, FAN Yadong, et al. Influence of the track-to-earth resistance of subway on stray current distribution[J]. High voltage technology, 2015, 41(11): 3604-3610.

[7] 张栋梁, 刘颖熙, 吴晗. 不同牵引策略下地铁杂散电流动态分布研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(9): 37-42.
ZHANG Dongliang, LIU Yingxi, WU Han. Dynamic distribution of metro stray current under different traction strategies[J]. Urban mass transit, 2017, 20(9): 37-42.

[8] 刘颖熙, 张栋梁, 方学礼, 等. 直流牵引回流系统杂散电流泄漏量的计算[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(5): 150-154.
LIU Yingxi, ZHANG Dongliang, FANG Xueli, et al. Calculation of stray current leakage in DC traction reflux system[J]. Urban mass transit, 2019, 22(5): 150-154.

[9] MEMON S A, FROMME P. Stray current corrosion and mitigation: a synopsis of the technical methods used in DC

- transit systems[J]. IEEE electrification magazine, 2014, 2(3): 22-31.
- [10] 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.
- [11] 徐杰, 杨晓峰, 王慧康, 等. 一种多区段地铁轨道电位动态模拟系统[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(3): 57-65.
XU Jie, YANG Xiaofeng, WANG Huikang, et al. A multi-section metro rail potential dynamic emulator system[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(3): 57-65.
- [12] 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.
- [13] COTTON I, CHARALAMBOUS C, AYLOTT P, et al. Stray current control in DC mass transit systems[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2005, 54(2): 722-730.
- [14] DU G, ZHANG D, LI G, et al. Maximum safety regenerative power tracking for DC traction power systems[J]. Multi-disciplinary digital publishing institute, 2017, 10(2).
- [15] WANG M, YANG X, WANG L, et al. Resonant switched capacitor converter based DC auto-transformer for urban rail transit[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Texas: IEEE, 2018: 1441-1446.
- [16] 郑琼林, 杨晓峰, 游小杰. 城市轨道交通直流自耦变压器牵引供电系统[J]. 都市轨道交通, 2016, 29(3): 91-97.
ZHENG Trillion Q, YANG Xiaofeng, YOU Xiaojie. DC auto-transformer based traction power supply system for urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2016, 29(3): 91-97.
- [17] FOTOUHI R, FARSHAD S, FAZEL S S. A new novel DC booster circuit to reduce stray current and rail potential in DC railways[C]// Compatibility and Power Electronics (CPE). Badajoz: IEEE, 2009: 457-462.
- [18] FABRE J, LADOUX P, SOLANO E, et al. MVDC three-wire supply systems for electric railways: design and test of a full sic multilevel chopper[J]. IEEE transactions on industry applications, 2017, 53(6): 5820-5830.
- [19] 王慧康, 杨晓峰, 倪梦涵, 等. 轨道电位与杂散电流动态实验平台[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.
- [20] GU J, YANG X, ZHENG T Q. Influence factors analysis of rail potential in urban rail transit[J]. Microelectronics reliability, 2018, 88-90.
- [21] 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轨道电位影响[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.

(编辑: 王艳菊)

(上接第7页)

- [14] 裴潇湘. 加设排流网情况下杂散电流场仿真分析[J]. 电气化铁道, 2017, 28(4): 71-74.
PEI Xiaoxiang. Simulation and analysis of stray current adding with stray current drainage network[J]. Electric railway, 2017, 28(4): 71-74.
- [15] CHARALAMBOUS C A, COTTON I, AYLOTT P. Modeling for preliminary stray current design assessments: the effect of crosstrack regeneration supply[J]. IEEE transactions on power delivery, 2013, 28(3): 1899-1908.
- [16] 顾靖达, 杨晓峰, 郑琼林, 等. 基于不同接地方式与列车工况的负阻变换器牵引供电系统轨道电位与杂散电流[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1703-1717.
GU Jingda, YANG Xiaofeng, ZHENG Trillion Q, et al. Rail potential and stray current on negative resistance converter traction power system under different grounding schemes and train conditions[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2021, 36(8): 1703-1717.
- [17] RAHMAN F A A, KADIR M Z A A, OSMAN M, et al. Review of the AC overhead wires, the DC third rail and the DC fourth rail transit lines: issues and challenges[J]. IEEE access, 2020, 8: 213277-213295.
- [18] FOTOUHI R, FARSHAD S. A new novel power electronic circuit to reduce stray current and rail potential in DC railway[C]//IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference. Poznan, 2008: 1575-1580.
- [19] WANG M, YANG X, ZHENG T Q, et al. DC autotransformer-based traction power supply for urban transit rail potential and stray current mitigation[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2020, 6(2): 762-773.
- [20] 郑琼林, 杨晓峰, 游小杰. 城市轨道交通直流自耦变压器牵引供电系统[J]. 都市轨道交通, 2016, 29(3): 91-97.
ZHENG Trillion Q, YANG Xiaofeng, YOU Xiaojie. DC auto-transformer based traction power supply system for urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2016, 29(3): 91-97.
- [21] GU J, YANG X, ZHENG T Q, et al. Negative resistance converter traction power system for reducing rail potential and stray current in the urban rail transit[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2021, 7(1): 225-239.
- [22] YANG X F, GU J D, ZHENG T Q. Faults and reliability analysis of negative resistance converter traction power system[J]. Microelectronics reliability, 2020, 114.
- [23] GU J D, YANG X F, ZHENG T Q, et al. Rail potential and stray current mitigation for the urban rail transit with multiple trains under multiple conditions[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2022, 8(2): 1684-1694.

(编辑: 王艳菊)