doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.06.011

有源轨道电位硬件动态模拟系统

王振帅，杨晓峰，孙向轩
（北京交通大学电气工程学院，北京 100044）

摘 要：为解决城市轨道交通轨道电位与杂散电流防治措施开展现场试验验证难度大的问题，轨道电位硬件动态模拟系统受到广泛关注。现有无源硬件动模方案一般通过调控定值功率电阻的平均投入时间实现等效输出阻值的动态调节，由于定值功率电阻发热与功率限制，功率等级提升困难，为此本文提出一种有源轨道电位硬件动态模拟(active rail potential hardware dynamic emulator，ARPHDE)系统。在分析 ARPHDE 系统工作模态的基础上，提出虚拟电阻变换单元(virtual resistance converter unit，VRCU)、大电阻变换单元(large resistance converter unit，LRCU)和区段切换开关的协调控制策略，以实现等效虚拟阻值的准确调控。仿真结果表明：ARPHDE 能够准确再现轨道电位动态时空分布规律，相比传统无源硬件动模方案，ARPHDE 系统将传统定值电阻调控方式转换为虚拟电阻调控方式，避免了定值功率电阻发热问题，具有良好的应用前景。

关键词：城市轨道交通；轨道电位；有源轨道电位硬件动态模拟；虚拟电阻变换单元
中图分类号：U231　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2025)06-0083-09

Active Rail Potential Hardware Dynamic Emulator System

WANG Zhenshuai, YANG Xiaofeng, SUN Xiangxuan
(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: To address the difficulty of on-site verification for urban rail transit rail potential and stray current prevention measures, the rail potential hardware dynamic emulator system of rail potential has attracted widespread attention. Existing passive hardware emulator schemes usually achieve dynamic adjustment of the equivalent output resistance by modulating the average insertion time of a fixed power resistor. However, due to the heating and power limitations of fixed power resistors, it is difficult to increase the power rating. Therefore, this paper proposes an active rail potential hardware dynamic emulator (ARPHDE) system. Based on the analysis of the operating principle of the ARPHDE, a coordinated control strategy for the virtual resistance converter unit (VRCU), large resistance converter unit (LRCU), and section switching switches is developed, enabling precise regulation of the equivalent virtual resistance value. Simulation results demonstrate that the ARPHDE can accurately reproduce the spatiotemporal dynamic distribution patterns of rail potential. Compared to traditional passive hardware emulator schemes, the ARPHDE system replaces fixed power resistor regulation with virtual resistance regulation, avoiding issues of the fixed power resistor heating and showing promising application prospects.

Keywords: urban rail transit; rail potential; active rail potential hardware dynamic emulator; virtual resistance converter unit

城市轨道交通(简称“城轨交通”)凭借其准时、快捷、高运力、低污染等优势发展迅速。截至 2024 年底，我国内地已有 28 个省份、58 座城市开通了 362 条运营线路，总运营里程达 12 168 km[1-2]。城轨交通广泛

收稿日期：2025-06-09　修回日期：2025-08-08
第一作者：王振帅，男，硕士研究生，研究方向为电力电子技术在城市轨道交通中的应用，23126369@bjtu.edu.cn
导师简介：杨晓峰，男，博士，副教授，博士生导师，研究方向为电力电子技术在城市轨道交通中的应用，xfyang@bjtu.edu.cn
基金项目：国家自然科学基金(51737001)；北京市自然科学基金(3222054)
引用格式：王振帅，杨晓峰，孙向轩. 有源轨道电位硬件动态模拟系统[J]. 都市快轨交通，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.

采用直流牵引供电系统，即列车从接触网或第三轨取电后通过走行轨回流，但由于走行轨自身内阻的存在，回流电流会产生轨道电位(也称“钢轨电位”)，过高的轨道电位会危及乘客与设备安全[3]。鉴于走行轨与大地之间并非完全绝缘，部分列车电流会泄漏至大地，形成杂散电流(也称“迷流”)，这会对沿线埋地金属管线产生电化学腐蚀危害，影响其使用寿命[4-5]。此外，当杂散电流侵入中性点接地的变压器时，可能使其出现直流偏磁现象，导致变压器异常振动噪声、电网谐波含量增加甚至继电保护误动作等后果，严重影响电网的正常运行[6-11]。

从国内外研究成果来看，传统轨道电位与杂散电流问题的防治措施包括：优化牵引变电所布局、加强钢轨对地绝缘水平、设置排流网和排流柜、阴极保护、专用轨(也称“第四轨”)回流等[3, 12-16]。上述措施通常适于城轨交通建设阶段实施，对于既有城轨线路改造难度较大，且随着时间推移其治理性能亦逐渐下降[16]。由于走行轨回流是导致轨道电位与杂散电流问题的源头，将回流电流转移至其他专用线路是解决此类问题的有效方法，为此一些学者提出了基于电力电子技术的治理措施[14-18]。然而此类措施直接在现场开展试验验证存在协调困难、测试成本高等挑战，亟需开发现场试验验证前的地面硬件动模方案，轨道电位硬件动态模拟(rail potential hardware dynamic emulator，RPHDE)方案应运而生。文献[19]提出了基于纵向可变电阻模块的 RPHDE 模拟轨道纵向电阻与轨地过渡电阻，但仅适用于单个区段运行情况。文献[20]提出了一种基于双向可变电阻模块的硬件动模系统拓扑，根据接地方式衍生出 3 类不同的 RPHDE；文献[21]则引入双向电流轨道电阻模块和轨地过渡电阻模块构造 RPHDE，结合系统不同接地方式特征，实现了列车运动过程中对列车与牵引所处轨道电位、杂散电流的动态模拟。文献[22]研究了基于简化轨道纵向电阻模块的多区段 RPHDE；文献[23]则进一步简化了双向电流轨地过渡电阻模块，并在 RPHDE 中考虑了列车运行工况。然而，既有 RPHDE 均通过调控定值功率电阻在各周期内的平均投入时间实现等效输出阻值的动态调节。一方面定值功率电阻的阻值相对误差会影响无源动模系统的模拟精度，另一方面由于定值功率电阻发热与功率限制，RPHDE 功率等级提升困难。

为此，本文提出一种无需功率电阻的有源轨道电位硬件动态模拟(active rail potential hardware dynamic emulator，ARPHDE)系统。分析直流牵引供电系统的电路模型，研究基于虚拟电阻变换单元的 ARPHDE 工作原理，提出虚拟电阻变换单元、大电阻变换单元和区段切换开关的协调控制策略，最后通过仿真对 ARPHDE 的可行性进行验证。

1 直流牵引供电系统电路模型

1.1 直流牵引供电系统建模

直流牵引供电系统基本组成如图 1 所示，由列车、牵引所、接触网(第三轨)与回流系统组成，列车电流 $i_t(t)$ 随时间变化，列车在牵引、匀速、制动工况下单向运行。

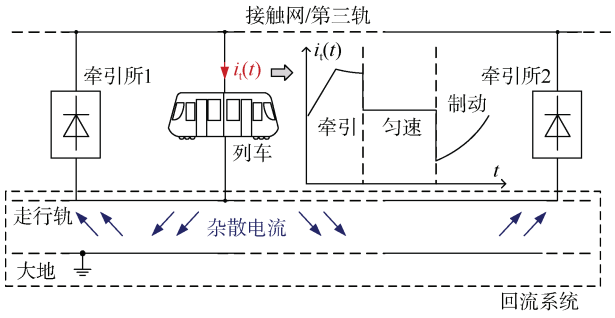


图 1 直流牵引供电系统基本组成

Figure 1 Configuration of DC traction power supply system

直流牵引供电系统的电路模型如图 2 所示，沿线位置 x 处的轨道电位 $u_r(x)$、钢轨回流电流 $i_r(x)$、杂散电流 $i_s(x)$与轨道纵向电阻 R_r、轨地过渡电阻 R_g、供电区间长度 L、列车位置 $S(t)$、列车电流 $i_t(t)$有关，为方便讨论，假设轨道纵向电阻、轨地过渡电阻沿轨道均匀分布，牵引所电压恒定。

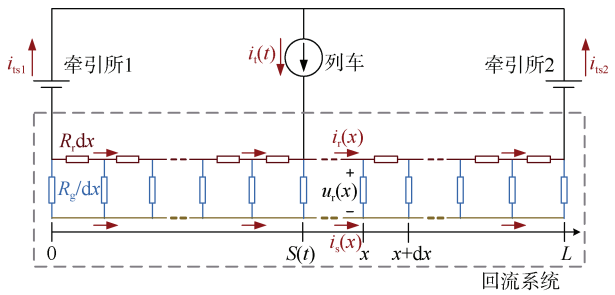


图 2 直流牵引供电系统的电路模型

Figure 2 Circuit model of DC traction power supply system

1.2 回流系统建模分析

回流系统呈现典型分布参数电路特征，可等效为微元电阻网络，沿线位置 x_1 至 x_2 处的回流系统等效电路如图 3(a)所示，沿线位置 x 至 x+dx 处的回流系统等效电路如图 3(b)所示。

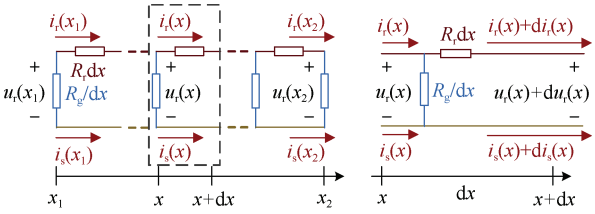


图 3　电阻网络的微元法建模

Figure 3　Resistance network modeling by infinitesimal method

根据图 3(b)列写基尔霍夫电压与电流方程为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}u_{\mathrm{r}}(x)}{\mathrm{d}x}=-R_{\mathrm{r}}i_{\mathrm{r}}(x)\\ \dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{r}}(x)}{\mathrm{d}x}=-\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{s}}(x)}{\mathrm{d}x}=-\dfrac{u_{\mathrm{r}}(x)}{R_{\mathrm{g}}}\end{cases}\tag{1}$$

得到轨道电位、钢轨回流电流与杂散电流的通解为

$$\begin{cases}u_{\mathrm{r}}(x)=-\sqrt{R_{\mathrm{r}}R_{\mathrm{g}}}\left(C_1\mathrm{e}^{\sqrt{\alpha}x}-C_2\mathrm{e}^{-\sqrt{\alpha}x}\right)\\ i_{\mathrm{r}}(x)=C_1\mathrm{e}^{\sqrt{\alpha}x}+C_2\mathrm{e}^{-\sqrt{\alpha}x}\\ i_{\mathrm{r}}(x)+i_{\mathrm{s}}(x)=C_3\end{cases}\tag{2}$$

式中，波阻抗传播系数 $\alpha=R_{\mathrm{r}}/R_{\mathrm{g}}$；$C_1$、$C_2$、$C_3$ 为待定系数。

取 $x=x_1$ 解出待定系数 C_1、C_2、C_3

$$\begin{cases}C_1=\left(-\dfrac{1}{2\sqrt{R_{\mathrm{r}}R_{\mathrm{g}}}}u_{\mathrm{r}}(x_1)+\dfrac{1}{2}i_{\mathrm{r}}(x_1)\right)\mathrm{e}^{-\sqrt{\alpha}x_1}\\ C_2=\left(\dfrac{1}{2\sqrt{R_{\mathrm{r}}R_{\mathrm{g}}}}u_{\mathrm{r}}(x_1)+\dfrac{1}{2}i_{\mathrm{r}}(x_1)\right)\mathrm{e}^{\sqrt{\alpha}x_1}\\ C_3=i_{\mathrm{r}}(x_1)+i_{\mathrm{s}}(x_1)\end{cases}\tag{3}$$

将式(3)代入(2)得

$$\left[u_{\mathrm{r}}(x)\quad i_{\mathrm{r}}(x)\right]^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{T}(x-x_1)\cdot\left[u_{\mathrm{r}}(x_1)\quad i_{\mathrm{r}}(x_1)\right]^{\mathrm{T}}\tag{4}$$

$$i_{\mathrm{s}}(x)=i_{\mathrm{r}}(x_1)+i_{\mathrm{s}}(x_1)-i_{\mathrm{r}}(x)\tag{5}$$

令 $\Delta x=x-x_1$，则传播矩阵 $\boldsymbol{T}(\Delta x)$表示为

$$\boldsymbol{T}(\Delta x)=\begin{pmatrix}\cosh\left(\sqrt{\alpha}\Delta x\right) & -\dfrac{R_{\mathrm{r}}}{\sqrt{\alpha}}\sinh\left(\sqrt{\alpha}\Delta x\right)\\ -\dfrac{\sqrt{\alpha}}{R_{\mathrm{r}}}\sinh\left(\sqrt{\alpha}\Delta x\right) & \cosh\left(\sqrt{\alpha}\Delta x\right)\end{pmatrix}\tag{6}$$

1.3　回流系统模型简化

图 3(a)所示微元电阻网络的简化等效电路如图 4 所示。

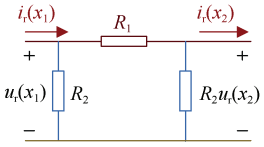


图 4　微元电阻网络的等效电路

Figure 4　Equivalent circuit of infinitesimal resistance network

电压和电流满足以下方程：

$$\begin{pmatrix}u_{\mathrm{r}}(x_2)\\ i_{\mathrm{r}}(x_2)\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1+\dfrac{R_1}{R_2} & -R_1\\ -\dfrac{2R_2+R_1}{R_2^2} & 1+\dfrac{R_1}{R_2}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}u_{\mathrm{r}}(x_1)\\ i_{\mathrm{r}}(x_1)\end{pmatrix}\tag{7}$$

取 $x=x_2$，联立式(4)与式(7)解得

$$\begin{cases}R_1=\dfrac{R_{\mathrm{r}}}{\sqrt{\alpha}}\sinh\left(\sqrt{\alpha}\Delta x\right)\\ R_2=\dfrac{R_{\mathrm{r}}}{\sqrt{\alpha}}\coth\left(\dfrac{\sqrt{\alpha}\Delta x}{2}\right)\end{cases}\tag{8}$$

考虑 α 极小，上式化简为

$$\begin{cases}R_1=R_{\mathrm{r}}\Delta x\\ R_2=\dfrac{2R_{\mathrm{g}}}{\Delta x}\end{cases}\tag{9}$$

上式计算的等效电阻 R_1 与 R_2 存在误差，相对误差大小与波阻抗传播系数 α、微元电阻网络长度 x_2–x_1 正相关，对于长度为 3 km 的微元电阻网络，取不同波阻抗传播系数的等效电阻相对误差见表 1，采用简化式(9)计算的等效电阻误差可近似忽略，因此本文采用式(9)计算等效电阻。

表 1　等效电阻相对误差

Table 1　Relative error of equivalent resistance

电阻种类	相对误差%			
	α=1/500	α=1/750	α=1/1 000	α=1/1 500
R_1	0.300	0.200	0.150	0.100
R_2	0.150	0.100	0.075	0.050

2　轨道电位与杂散电流的理论计算

直流牵引供电系统的集总参数模型如图 5 所示。

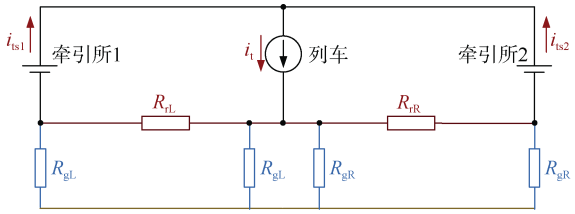


图 5　直流牵引供电系统的集总参数模型

Figure 5　Lumped parameter model of DC traction system

对满足 0<S<L 的任意列车位置，电阻参数为

$$\begin{cases} R_{\mathrm{rL}} = R_{\mathrm{r}} S \\ R_{\mathrm{gL}} = \dfrac{2R_{\mathrm{g}}}{S} \\ R_{\mathrm{rR}} = R_{\mathrm{r}}\left(L-S\right) \\ R_{\mathrm{gR}} = \dfrac{2R_{\mathrm{g}}}{\left(L-S\right)} \end{cases} \tag{10}$$

列车处轨道电位满足

$$u_{\mathrm{r}}(S) = i_{\mathrm{t}} \frac{R_{\mathrm{rL}} R_{\mathrm{rR}}}{2\left(R_{\mathrm{rL}} + R_{\mathrm{rR}}\right)} \tag{11}$$

牵引所 1 电流 i_{ts1} 与牵引所 2 电流 i_{ts2} 满足

$$\begin{cases} i_{\mathrm{ts1}} = \dfrac{L-S}{L} i_{\mathrm{t}} \\ i_{\mathrm{ts2}} = \dfrac{S}{L} i_{\mathrm{t}} \end{cases} \tag{12}$$

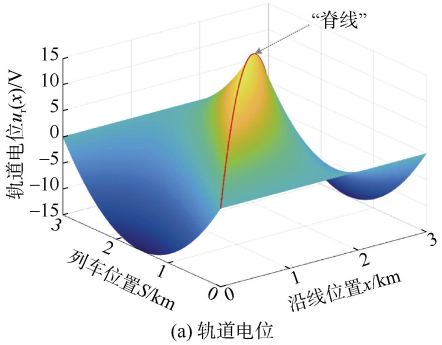
沿线非列车处轨道电位、钢轨回流电流满足

$$\left[u_{\mathrm{r}}(x) \quad i_{\mathrm{r}}(x)\right]^{\mathrm{T}} = \begin{cases} \boldsymbol{T}(x-S)\cdot\left[u_{\mathrm{r}}(S) \quad -i_{\mathrm{ts1}}\right]^{\mathrm{T}} & x < S \\ \boldsymbol{T}(x-S)\cdot\left[u_{\mathrm{r}}(S) \quad i_{\mathrm{ts2}}\right]^{\mathrm{T}} & x \geqslant S \end{cases} \tag{13}$$

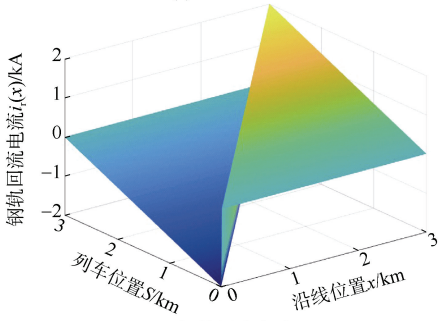
杂散电流满足

$$i_{\mathrm{s}}(x) = \begin{cases} -i_{\mathrm{ts1}} - i_{\mathrm{r}}(x) & x < S \\ i_{\mathrm{ts2}} - i_{\mathrm{r}}(x) & x \geqslant S \end{cases} \tag{14}$$

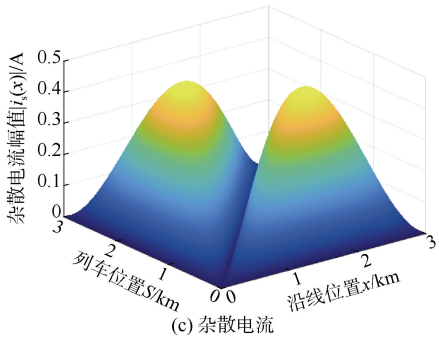
为方便讨论，取供电区间长度 L=3 km，列车电流 i_{t}=2 kA，轨道纵向电阻 R_{r}=0.02 Ω/km、轨地过渡电阻 R_{g}=15 Ω·km，得到轨道电位 $u_{\mathrm{r}}(x)$、钢轨回流电流 $i_{\mathrm{r}}(x)$、杂散电流 $i_{\mathrm{s}}(x)$与列车位置 S、沿线位置 x 的关系如图 6 所示。



(a) 轨道电位



(b) 钢轨回流电流



(c) 杂散电流

图 6 轨道电位与杂散电流的计算结果

Figure 6 Calculation result of rail potential and stray current

3 有源轨道电位硬件动模系统

3.1 工作原理

ARPHDE 拓扑如图 7 所示，其中 U_{TS1}、U_{TS2} 表示牵引所电压源，$i_{\mathrm{t}}(t)$表示列车电流源，i_{r1}～i_{r5} 表示钢轨回流电流，i_{ts1}、i_{ts2} 表示牵引所电流，R_{r1}～R_{r5} 表示轨道纵向电阻，R_{g1}～R_{g5}、R_{rg} 表示轨地过渡电阻，区段切换开关 $\mathrm{K_{r1}}$～$\mathrm{K_{r4}}$ 与 $\mathrm{K_{g1}}$～$\mathrm{K_{g6}}$ 为双向开关。$\mathrm{a_t}$ 为列车处(沿线位置 x=S 处)测试点，$\mathrm{a_1}$～$\mathrm{a_5}$ 为沿线位置 x=0、L/4、L/2、3L/4、L 处测试点，同时兼作不同区段的物理接口，用于相关轨道电位硬件防治措施的试验验证。

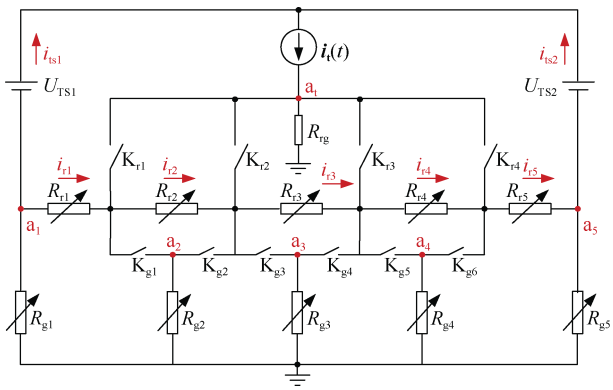


图 7 ARPHDE 拓扑

Figure 7 ARPHDE topology

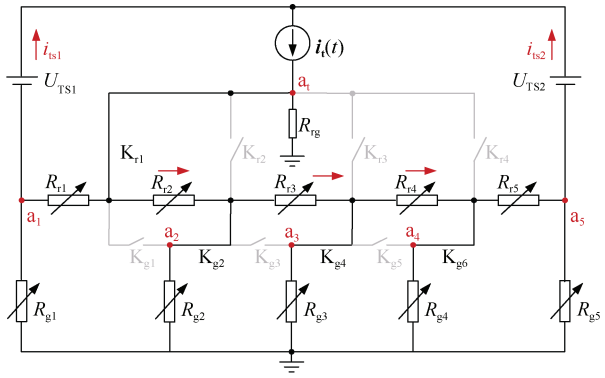
ARPHDE 的工作模态与列车位置 S 有关，如图 8 所示，各模态的工作情况如下。

模态 1：R_{r1} 阻值增大，R_{r2} 阻值减小，$\mathrm{K_{r1}}$ 与 $\mathrm{K_{g2}}$ 闭合，$\mathrm{K_{g1}}$ 断开，i_{r1}=−i_{ts1}，i_{r2}=i_{ts2}。

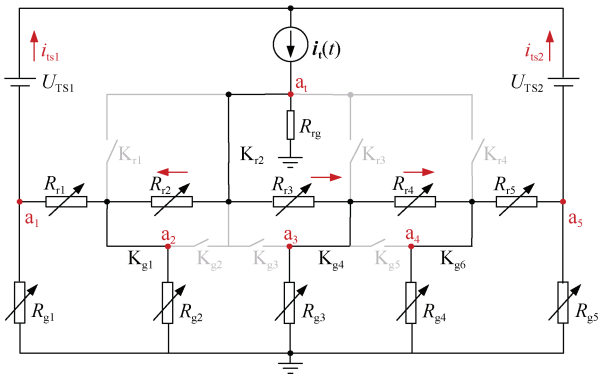
模态 2：R_{r2} 阻值增大，R_{r3} 阻值减小，$\mathrm{K_{r2}}$ 与 $\mathrm{K_{g1}}$ 闭合，$\mathrm{K_{g2}}$ 断开，i_{r2}=−i_{ts1}，i_{r3}=i_{ts2}。

模态 3：R_{r3} 阻值增大，R_{r4} 阻值减小，$\mathrm{K_{r3}}$ 与 $\mathrm{K_{g3}}$ 闭合，$\mathrm{K_{g4}}$ 断开，i_{r3}=−i_{ts1}，i_{r4}=i_{ts2}。

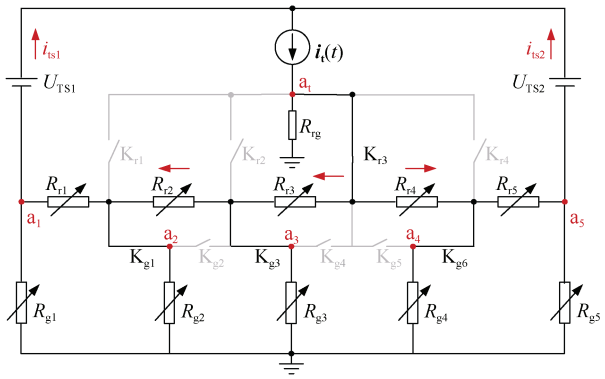
模态 4：R_{r4} 阻值增大，R_{r5} 阻值减小，$\mathrm{K_{r4}}$ 与 $\mathrm{K_{g5}}$ 闭合，$\mathrm{K_{g6}}$ 断开，i_{r4}=−i_{ts1}，i_{r5}=i_{ts2}。



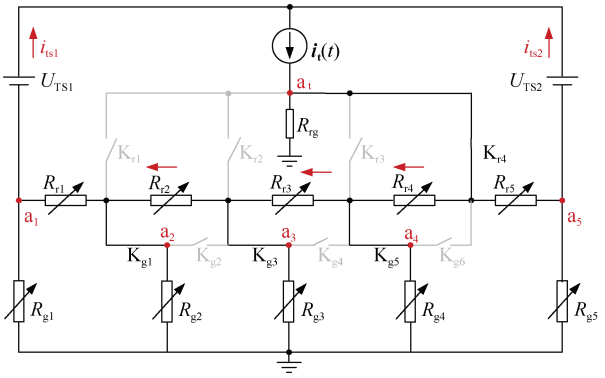
(a) 模态1 ($0<S(t)\leqslant L/4$)



(b) 模态2 ($L/4<S(t)\leqslant L/2$)



(c) 模态3 ($L/2<S(t)\leqslant 3L/4$)



(d) 模态4 ($3L/4<S(t)<L$)

图 8　ARPHDE 的工作模态

Figure 8　Operating modes of ARPHDE

当列车位置为 $S(t)=(j-1)L/4$ 时(j=2、3、4)，ARPHDE 由模态 j–1 切换至模态 j，i_{rj} 会突变 $i_t(t)$，因此 R_{r2}～R_{r4} 需要有在电流突变时保持电压稳定的能力。由于轨地过渡电阻远大于轨道纵向电阻，钢轨回流电流远大于杂散电流，轨道纵向电阻、轨地过渡电阻需采用不同变换单元进行模拟。因此，本文提出虚拟电阻变换单元(virtual resistance converter unit，VRCU)与大电阻变换单元(large resistance converter unit，LRCU)，VRCU 用于模拟 R_{r1}～R_{r5}，LRCU 用于模拟 R_{g1}～R_{g5}。

3.2　虚拟电阻变换单元

本文提出的 VRCU 拓扑如图 9 所示，由全桥电路、电压源 U_{DC}、输入电容 C_{in}、输出电感 L_o、输出电容 C_o 和旁路开关 S_D 组成，开关管 Q_1～Q_4 构成全桥电路。

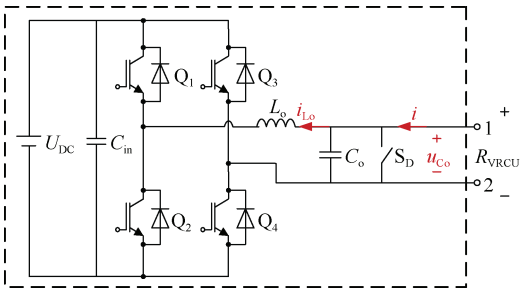


图 9　VRCU 拓扑

Figure 9　Topology of VRCU

Q_1 与 Q_2、Q_3 与 Q_4 互补导通，当 Q_1 与 Q_4 的控制信号占空比为 D_1 时，VRCU 的等效输出电阻为

$$R_{VRCU}=\frac{(2D_1-1)U_{DC}}{i} \tag{15}$$

当 ARPHDE 模态切换时，VRCU 端口电流 i 会发生突变，为保持端口电压 u_{Co} 稳定，闭合旁路开关 S_D 使 VRCU 被旁路，通过控制开关管 Q_1～Q_4 保证电感电流 i_{Lo} 跟踪端口电流的变化，使流过 S_D 电流为零即可实现 S_D 的零电流关断，定义从端口电流突变到电感电流与端口电流相等所用时间为换向时间 Δt_h，换向时间满足

$$\Delta t_h=\frac{L_o i_t(t)}{U_{DC}} \tag{16}$$

3.3　大电阻变换单元

本文提出的 LRCU 拓扑如图 10 所示，由双向开关 S_1 与 S_2、输入电容 C_{in}、输入电阻 R_{in}、输出电感 L_o、输出电容 C_o 与输出电阻 R_o 组成。

开关 S_1 与 S_2 互补导通，当 S_1 的控制信号占空比为 D_2 时，LRCU 的等效输出电阻为

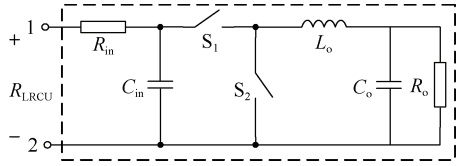


图 10　LRCU 拓扑

Figure 10　Topology of LRCU

$$R_{LRCU}=R_{in}+\frac{R_o}{D_2^{\,2}} \tag{17}$$

4　控制策略

为实现等效虚拟阻值的准确调控，本文提出虚拟电阻变换单元、大电阻变换单元和区段切换开关的协调控制策略，如图 11 所示，由 3 部分组成：区段切换开关控制，VRCU 控制和 LRCU 控制。

区段切换开关控制：通过列车牵引计算得到列车电流 $i_t(t)$与列车位置 $S(t)$，根据 $i_t(t)$设置电流源参数，根据不同$S(t)$对应的 ARPHDE 工作模态与图 8 中 K_{r1}～K_{r4}、K_{g1}～K_{g6} 给出控制信号 g_{kr1}～g_{kr4} 与 g_{kg1}～g_{kg6}，VRCU 与 LRCU 等效输出电阻的控制目标阻值计算式如式(18)、式(19)，下面根据是否考虑列车运行工况，分析列车位置 S(t)的计算过程。

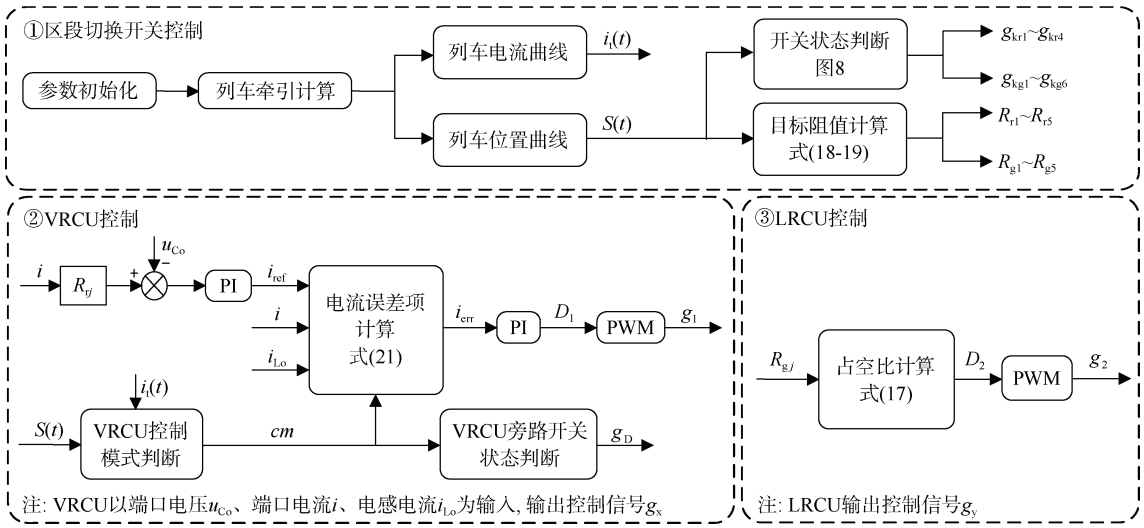


图 11　ARPHDE 协调控制策略

Figure 11　Block diagram of ARPHDE coordinate control

当考虑列车运行工况时，取列车电流 $i_t(t)$如图 12(a)中所示，列车处网压 u_{tr}=750 V、列车阻力 w 与列车质量 M 已知，根据式(20)计算列车加速度 $a(t)$、速度 $v(t)$、位置 $S(t)$。取 Δt=0.001 s，列车初始速度与初始位置为零，假设每个时间间隔 Δt 内列车加速度不变，依次取 t=0、Δt、2Δt、…，得到列车位置如图 12(a)中所示。列车加速度与速度如图 12(b)所示。

$$R_{tj}=\frac{R_t}{4}\min\left\{\left|4S-(j-1)L\right|,L\right\}\quad j=1,\cdots,5 \tag{18}$$

$$R_{gj}=\begin{cases}8R_g/\min\left\{\left|4S-(j-1)L\right|,L\right\} & j=1,5\\ 8R_g/\left(\min\left\{\left|4S-(j-1)L\right|,L\right\}+L\right) & j=2,3,4\end{cases} \tag{19}$$

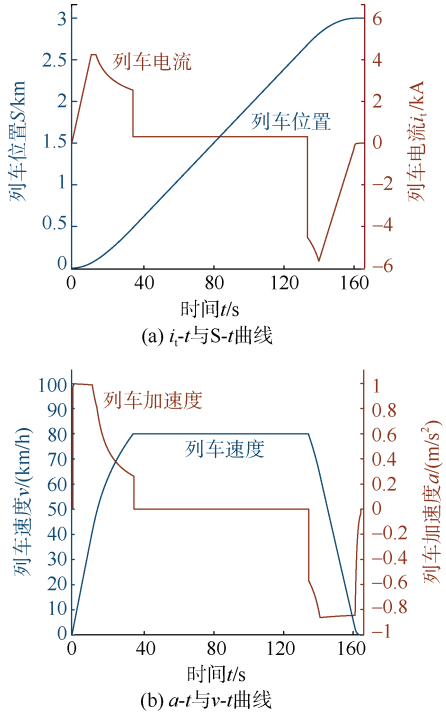
$$\begin{cases}a(t)=\dfrac{u_{tr}i_t(t)}{Mv(t)}-\dfrac{w}{M}\\ v(t+\Delta t)=v(t)+3.6a(t)\Delta t\\ S(t+\Delta t)=S(t)+\dfrac{v(t)}{3.6}\Delta t+\dfrac{a(t)}{2}(\Delta t)^2\end{cases} \tag{20}$$

当不考虑列车运行工况时，取列车电流 $i_t(t)$=2 kA，速度 $v(t)$=72 km/h，列车初始位置为零，列车位置达到 3 km 后速度为零，列车位置与列车电流如图 13 所示。

VRCU 控制：用于模拟 R_{tj} 的 VRCU 以式(18)的计算结果作为等效输出电阻 R_{VRCU} 的控制目标阻值，采用电压电流双闭环控制，当列车位置为 $S(t)$=(j–1)L/4 时采用电流闭环控制，持续时间 Δt_h 后恢复为电压电流双闭环控制，为方便讨论定义 VRCU 的控制模式标识位 cm，当 VRCU 采用电压电流双闭环控制时 cm=1，当 VRCU 采用电流闭环控制时 cm=0，结合 2 种控制模式得到 VRCU 的控制信号 g_1，VRCU 的电流误差项为

$$i_{err}=cm\left(i_{ref}+i\right)+\left(i_{Lo}-i\right) \tag{21}$$

当 cm=1 时，VRCU 的旁路开关 S_D 关断，当 cm=0 时，VRCU 的旁路开关 S_D 导通，结合 S_D 的开关状态给出控制信号 g_D。



(a) i_t-t与S-t曲线

(b) a-t与v-t曲线

图 12　考虑列车运行工况的牵引计算结果

Figure 12　Traction calculation results by considering operating conditions

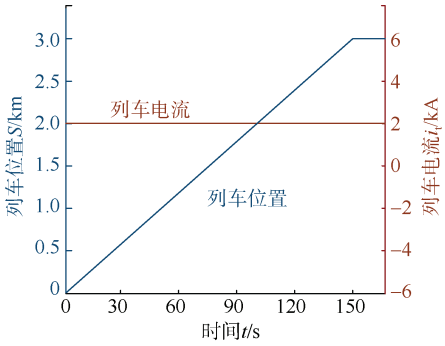


图 13　不考虑列车运行工况的牵引计算结果

Figure 13　Traction calculation results without considering operating conditions

LRCU 控制：用于模拟 R_{gj} 的 LRCU 以式(19)的计算结果作为等效输出电阻 R_{LRCU} 的控制目标阻值，结合式(17)得到 LRCU 的控制信号 g_2。

5　仿真验证

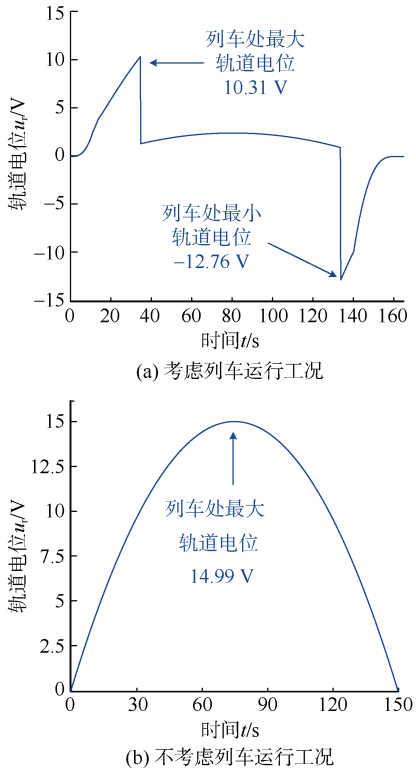
由于实际列车电流达数千安培，每千米走行轨纵向电阻仅数十毫欧，在不影响轨道电位幅值与分布规律的基础上，列车电流缩小 40 倍、轨道纵向电阻与轨地过渡电阻放大 40 倍，得到直流牵引供电系统参数见表 2。

表 2　直流牵引供电系统的参数

Table 2　Parameters of the DC traction system

项目	参数	数值
线路	供电区间长度 L/km	3
牵引所	牵引所电压 U_{TS1} 与 U_{TS2}/V	10
电阻	轨道纵向电阻 R_{t}/(Ω/km)	0.8
	轨地过渡电阻 R_{g}/(Ω·km)	600

根据式(10)与式(11)计算列车处轨道电位：当考虑列车运行工况时，根据图 12(a)计算得到列车处轨道电位如图 14(a)所示；当不考虑列车运行工况时，根据图 13 计算得到列车处轨道电位如图 14(b)所示。



(a) 考虑列车运行工况

(b) 不考虑列车运行工况

图 14　轨道电位计算结果

Figure 14　Calculation results of rail potential

为验证 ARPHDE 可行性与控制策略有效性，本文基于 Easygo 系列 PXIbox 半实物仿真平台搭建了图 7 所示的 ARPHDE 仿真模型。列车在 t=0 时刻开始单向运行，仿真结果如图 15～16 所示。

考虑列车运行工况的轨道电位试验结果如图 15 所示，列车处最大轨道电位为 10.59 V，计算结果为 10.31 V，偏差为 2.7%；列车处最小轨道电位为–13.14 V，计算结果为–12.76 V，偏差为 3.0%。

不考虑列车运行工况的轨道电位实验结果如图 16 所示，列车处最大轨道电位为 15.05 V，计算结果为

14.99 V，偏差为 0.4%。

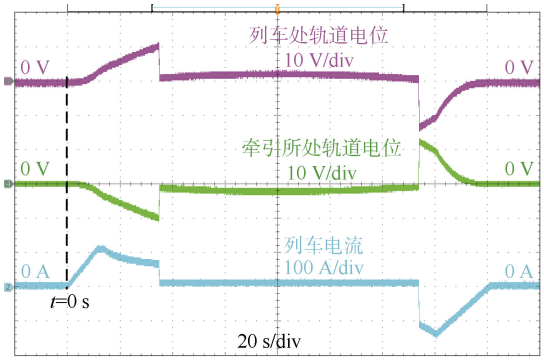


图 15　考虑列车运行工况的轨道电位实验结果

Figure 15　Experimental results of rail potential by considering operating conditions

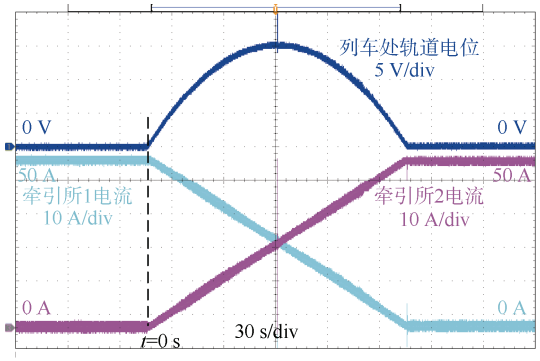


图 16　不考虑列车运行工况的轨道电位实验结果

Figure 16　Experimental results of rail potential without considering operating conditions

6　结论

本文研究了有源轨道电位硬件动态模拟系统的拓扑与工作原理，提出了 VRCU、LRCU 与区段切换开关的协调控制策略并进行了半实物仿真验证，得到以下结论：

1) 在协调控制策略下，ARPHDE 通过动态调节 VRCU 虚拟阻值和区段切换实现了列车的时空运行特征的动态模拟，能够准确复现轨道电位变化规律。

2) 相比传统无源硬件动模方案，由于无需功率电阻，ARPHDE 避免了定值功率电阻发热问题，有助于提升系统功率等级。

3) VRCU 能够在端口电流突变时保持端口电压稳定，具有良好的动态特性。

参考文献

[1] 侯秀芳, 冯晨, 燕汉民, 等. 2024 年中国内地城市轨道交通运营线路概况[J]. 都市快轨交通, 2025, 38(1): 13-19.
HOU Xiufang, FENG Chen, YAN Hanmin, et al. Overview of urban rail transit operations in China's mainland in 2024[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(1): 13-19.

[2] YANG Xiaofeng, WANG Miao, ZHENG T Q, et al. Modelling and simulation of stray current in urban rail transit: a review[J]. Urban rail transit, 2024, 10(3): 189-199.

[3] ZHU Chengqian, DU Guifu, DING Yawen, et al. Rail potential control with train diagram optimization in multitrain DC traction power system[J]. International journal of rail transportation, 2022, 10(4): 476-496.

[4] SZYMENDERSKI J, MACHCZYŃSKI W, BUDNIK K. Modeling effects of stochastic stray currents from D.C. traction on corrosion hazard of buried pipelines[J]. Energies, 2019, 12(23): 4570.

[5] 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]. 都市快轨交通, 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.

[6] 宁晓雁, 高国强, 尹彩琴, 等. 地铁引起的变压器偏磁电流特征分析[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(5): 125-131.
NING Xiaoyan, GAO Guoqiang, YIN Caiqin, et al. Characteristics of transformer bias current caused by metro[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(5): 125-131.

[7] 王文博, 李文恒. 电网拓扑结构对地铁杂散电流分布特性研究[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(5): 110-116.
WANG Wenbo, LI Wenheng. Topology of power grid and characteristics of stray current distribution in metro systems[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(5): 110-116.

[8] WANG Aimin, LIN Sheng, HU Ziheng, et al. Evaluation model of DC current distribution in AC power systems caused by stray current of DC metro systems[J]. IEEE transactions on power delivery, 2021, 36(1): 114-123.

[9] 罗远国, 刘君, 毛钧毅, 等. 轨地过渡电阻对电网地铁杂散电流分布影响分析[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(4): 32-40.
LUO Yuanguo, LIU Jun, MAO Junyi, et al. Analysis of the influence of rail-to-ground resistance on the stray current distribution in a power grid[J]. Power system and clean energy, 2021, 37(4): 32-40.

[10] 彭平, 曾祥君, 倪砚茹, 等. 考虑地铁杂散电流影响的变压器直流偏磁电流建模方法[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(1): 192-198.
PENG Ping, ZENG Xiangjun, NI Yanru, et al. Modeling

for the DC bias current of transformer caused by the metro stray current[J]. Journal of electric power science and technology, 2021, 36(1): 192-198.

[11] 史云涛, 赵丽平, 林圣, 等. 城市电网中地铁杂散电流分布规律及影响因素分析[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1951-1957.
SHI Yuntao, ZHAO Liping, LIN Sheng, et al. Analysis of distribution of metro stray current in urban power grid and its influencing factors[J]. Power system technology, 2021, 45(5): 1951-1957.

[12] 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]. 都市快轨交通, 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.

[13] 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.

[14] 夏雪, 杨晓峰, 陈茂鲁, 等. 零阻变换器系统中开关单元的优化分布方法[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(3): 1-7.
XIA Xue, YANG Xiaofeng, CHEN Maolu, et al. Optimal distribution of a switch unit in a zero-resistance converter system[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(3): 1-7.

[15] WANG Miao, YANG Xiaofeng, NI Menghan, et al. Dynamic performance analysis, optimization, and verification of DC auto-transformer system with rail potential and stray current emulator[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2021, 8(1): 480-491.

[16] BHAGAT S, 杨晓峰, 王淼, 等. 城市轨道交通杂散电流治理的综述与评估(英文)[J]. 电工技术学报, 2021, 36(23): 4851-4863.
BHAGAT S, YANG Xiaofeng, WANG Miao, et al. Review and evaluation of stray current mitigation for urban rail transit[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2021, 36(23): 4851-4863.

[17] 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, Trillion Q. Zheng, 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.

[18] 陈茂鲁, 杨晓峰, 郑琼林, 等. 零阻变换器系统中晶闸管开关单元的关断策略[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(2): 25-33.
CHEN Maolu, YANG Xiaofeng, ZHENG Trillion Q, et al. Turn-off strategy of SCR based switch unit in zero-resistance converter system[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(2): 25-33.

[19] IBRAHEM A, ELRAYYAH A, SOZER Y, et al. DC railway system emulator for stray current and touch voltage prediction[J]. IEEE transactions on industry applications, 2017, 53(1): 439-446.

[20] 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.

[21] 王慧康, 杨晓峰, 倪梦涵, 等. 轨道电位与杂散电流动模实验平台[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.

[22] 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.

[23] 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]. 都市快轨交通, 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.

（编辑：傅依萱）