

文章编号: 1001-4632 (2026) 02-0198-12

引用格式: 范景腾, 郭进, 鲍才让太, 等. 基于多导体传输线的 25 Hz 相敏轨道电路迂回回路研究[J]. 中国铁道科学, 2026, 47 (2): 198-209.

Citation: FAN Jingteng, GUO Jin, BAO Cairangtai, et al. Study on the Bypass Path of 25 Hz Phase-Sensitive Track Circuit Based on the Multi-Conductor Transmission Line [J]. China Railway Science, 2026, 47 (2): 198-209.

基于多导体传输线的 25 Hz 相敏轨道电路 迂回回路研究

范景腾¹, 郭进¹, 鲍才让太², 张屹¹, 杨武东¹

(1. 西南交通大学 信息科学与技术学院, 四川 成都 611756;

2. 中国铁路青藏集团有限公司, 青海 西宁 810007)

摘要: 25 Hz 相敏轨道电路存在迂回回路不能用于检查断轨的问题, 受此影响现场运营长期未能明确断轨状态下受端电压的变化规律。为排除安全隐患提供理论基础, 基于多导体传输线 (MTL) 建模方法, 将 25 Hz 相敏轨道电路迂回回路上的多个区段等效为 1 个迂回区段, 采用六端网络分析断轨区段和迂回区段的电压和电流关系, 通过扼流变压器 (IB) 和大地形成断轨区段和迂回区段的耦合电路, 建立 25 Hz 相敏轨道电路迂回回路模型, 得到 MTL 方程; 基于变压器互感电路原理, 分析断轨区段送端和受端 IB 的电压和电流关系, 推导 IB 边界条件参数矩阵, 求解得到 25 Hz 相敏轨道电路断轨状态下沿线电压和电流, 提出基于 IB 边界条件的解耦算法; 在通过实验室和现场验证迂回回路模型和解耦算法正确性的基础上, 满足断轨状态下迂回回路受端电压不为 0 V 的前提, 分析 IB 连接方式、断轨位置、道床漏泄和横向连接距离等不同参数对受端电压的影响。结果表明: 在 IB 全连接区段, 断轨位置越靠近区段中部, 道床电阻越大, 受端电压越高; 在送端或受端 IB 连接断开的区段, 断轨位置越靠近 IB 连接的一端, 受端电压越高; 道床电阻增大, 受端电压先升高后降低; 横向连接距离超过 2 km 后, 受端电压几乎不会变化, 可将该值设为横向连接距离参考值; 断轨状态下受端电压越高越不利于断轨检查, 应对 IB 全连接的区段采用受端电压降为 40%、送端或受端 IB 连接断开的区段采用断开 IB 连接端单侧钢轨连接线等方式测试断轨检查。

关键词: 轨道电路; 多导体传输线; 扼流变压器; 钢轨断轨; 道床电阻; 横向连接距离; 连接方式

中图分类号: U284.2 **文献标识码:** A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2026.02.17

在我国, 25 Hz 相敏轨道电路是普速电气化铁路车站轨道电路的主要制式。该电路通过短接相邻区段扼流变压器 (Impedance Bond, IB) 牵引线圈的中心点贯通牵引回流; 同时, 在进站口的轨道区段通过短接上下行 IB 牵引线圈的中心点设置横向连接, 形成轨道电路迂回回路。自 1997 年重新定型以来, 因断轨后经过迂回回路产生一定的受端电压, 该电压过高将导致轨道电路不能输出故障占用的表示信息, 25 Hz 相敏轨道电路一直存在迂回回路不能用于检查断轨的问题, 存在一定的安全隐

患。现场运营长期受到该问题困扰, 且未明确断轨状态下受端电压的变化规律。

以往研究中, 轨道电路存在的故障和问题主要为: 线缆故障^[1-2]、低道床漏泄电阻^[3-5]、雷电侵害^[6]、不平衡牵引回流干扰^[7-9]、变压器磁化饱和^[10]、绝缘节两侧电位差^[11]、回流高次谐波干扰^[12-13]。以往研究中主要关注某 1 段轨道电路内部的故障, 因此只需建立故障场景下的单区段模型。然而, 25 Hz 相敏轨道电路的迂回回路问题涉及多区段间的耦合关系, 目前缺少合适的模型用于

收稿日期: 2025-10-28; 修订日期: 2026-01-12

基金项目: 国家能源集团重点研发项目 (CEZB220207860)

第一作者: 范景腾 (1997—), 男, 湖北孝感人, 博士研究生。E-mail: samuelfankington@foxmail.com

通讯作者: 杨武东 (1983—), 男, 四川成都人, 工程师。E-mail: wdyang@swjtu.edu.cn

研究。

轨道电路的建模常用四端网络方法,适用于对不同传输距离^[14]、不同道床电阻^[15]条件下轨道电路电压和电流的工程简化计算^[16-17]。相比区间轨道电路,站内轨道电路的排列及与牵引供电系统的关系更为复杂,而四端网络作为一种参数理想化模型,在25 Hz相敏轨道电路这种区段间耦合场景建模中存在一定的局限性。近年来,多导体传输线(Multi-conductor Transmission Line, MTL)建模方法被大量用于轨道电路复杂问题的建模。文献[18]建立基于MTL的轨道电路不平衡传输模型,提出轨道电路与牵引供电耦合场景的分析方法。文献[19]研究ZPW-2000轨道电路的邻线干扰问题,通过MTL模型计算得到仿真干扰电流,提出基于多参数协同优化策略的邻线干扰防护对策。文献[20]基于ZPW-2000轨道电路的MTL建模方法,提出信号暂态响应的求解方法,分析高频损耗、频率、分路电阻、调谐区状态和道床电阻等因素对轨道电路暂态响应的影响。

本文基于MTL建模方法,结合站内25 Hz相敏轨道电路的实际工况,建立用于求解25 Hz相敏轨道电路电压和电流的迂回回路模型并提出基于IB边界条件的模型解耦算法,通过试验验证模型和求解算法的正确性。利用仿真计算分析不同轨道电路参数条件下受端电压变化规律,为排除安全隐患提供理论基础。

1 基于MTL的迂回回路模型和解耦算法

1.1 四端网络的局限性

相比MTL建模方法,基于四端网络建模得到的是轨道电路简化模型。苏联学者БРЫЛЕЕВ等明确指出,为得到四端网络化简不平衡条件时需要满足以下2个假设^[21]。

(1) 轨道区段左右2根钢轨的自阻抗 z_1 和 z_2 均匀且相等,2根钢轨对地的漏泄电导 g_1 和 g_2 均匀且相等。

(2) 轨道区段送端和受端IB的等效接地电阻满足

$$Z_{DS} = Z_{DK} = 0.5\sqrt{(z_1 + z_m)g_1^{-1}} = 0.5Z_{CM} \quad (1)$$

式中: Z_{DS} 和 Z_{DK} 分别为送端和受端IB的等效接地电阻; z_m 为2根钢轨间的互阻抗; Z_{CM} 为单根钢轨

对地阻抗。

从假设条件看,文献[22]基于四端网络对ZPW-2000移频轨道电路迂回回路建模,此时信号的频率高、传输阻抗高,上述2个假设基本满足。但由于25 Hz相敏轨道电路的信号频率较低,阻抗较小,式(1)给出的假设通常不满足。特别是在25 Hz相敏轨道电路的区段状态设置为“接断发连”时,接车进路一侧IB牵引线圈中心点连接断开,发车进路一侧IB牵引线圈中心点短接,则阻抗 $Z_{DS} \neq Z_{DK}$;即便两端IB全连接,阻抗 $Z_{DS} = Z_{DK}$,但两者若均等于 $0.5Z_{CM}$ 还需满足“两侧相邻区段轨道无限长”的理想条件,然而站内的25 Hz相敏轨道电路区段长度一般较短,相邻区段不能视为无限长,因此在站场内部该假设难以成立。

从模型端口看,四端网络中1段轨道区段中2根钢轨的电流在送端和受端均相等,这与25 Hz相敏轨道电路断轨后2根钢轨电流不相等的实际情况相违背。

以上问题充分说明:四端网络不适用于25 Hz相敏轨道电路迂回回路的区段间耦合场景建模。

1.2 基于MTL的区段间耦合场景建模

典型车站的25 Hz相敏轨道电路的区段排列如图1所示。图中:I G和II G为正线股道;1DG, 3DG, 5-13DG, 11DG和II AG为下行咽喉区段;I BG和2DG, 4DG, 6-10DG, 8DG, 12DG为上行咽喉区段;侧线股道的IB按“接断发连”规则设置;除图中各绿色椭圆框内的IB断开外,其余IB均相互短接;上下行正线间的横向连接设在车站两侧,间隔约1 730 m;各股道区段长度为800 m左右。由图1可知:由于上述所有区段通过短接IB形成闭环环路,当股道I G发生断轨时,图中黄色区域内的各区段共同连接构成I G信号的迂回回路。

图1所示迂回回路上的多个区段可等效为1个迂回区段,并通过IB与断轨区段以及大地耦合,且站内25 Hz相敏轨道电路在断轨状态下主要通过区段间IB与大地连接形成迂回回路,因此可忽略横向连接的吸上线等附加连接。这是由于:带有吸上线的完全横向连接仅设在靠近牵引变电所的进站口^[23],且回流线网感抗相对钢轨更高^[24]。等效后区段间耦合场景下断轨区段与迂回区段的简化结构如图2所示。图中: U_T 和 Z_T 分别为送端IB信号线圈的等效电压和阻抗; I_{1a} 和 I_{2a} 分别为断轨区段2根钢轨的送端电流; I_{1b} 和 I_{2b} 分别为断轨区段2根钢轨的受端电流; I_r 为钢轨间漏泄电流; I_{Ya} 和 I_{Yb} 分别

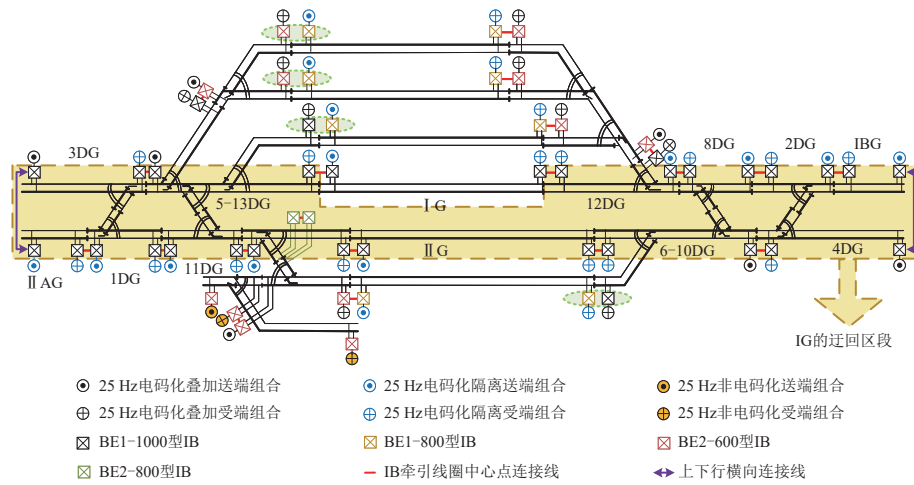


图 1 25 Hz 相敏轨道电路区段排列

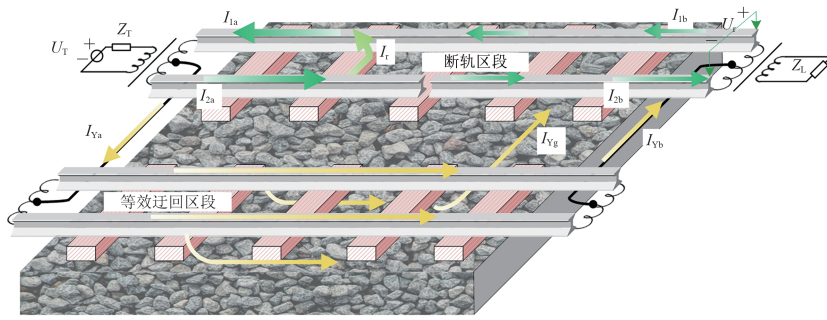


图 2 25 Hz 相敏轨道电路断轨区段与迂回区段简化结构

为等效迂回区段上通过 IB 汇入和汇出的迂回电流； I_{Yg} 为通过大地迂回至断轨区段的杂散电流； Z_L 为受端 IB 信号线圈的等效阻抗； U_r 为受端轨间电压（简称受端电压）。

理想条件下，轨道电路在断轨状态下的电流 I_{1b} 和 I_{2b} 均为 0，输出故障占用信息。但由图 2 可知：断轨状态下由于存在迂回回路，实际上电流 I_{1b} 和 I_{2b} 均不为 0，且产生受端电压 U_r 。该电压将导致继电器接点保持闭合，轨道电路不能输出故障占用信息，存在危及行车安全的隐患。因此，需要建立模型，求解轨道电路断轨状态下的电压和电流，进而通过计算明确不同条件下断轨状态受端电压的变化规律，为解决该问题提供理论支撑。

基于 MTL 建模方法，迂回回路模型中的某 1 段轨道可被视为六端网络。以区段送端为原点，在沿线 x 里程处，基于六端网络的 25 Hz 相敏轨道微分电路如图 3 所示。图中： U_{1x} 和 U_{2x} 为沿线 x 里程处 2 根钢轨的对地电压； I_{1x} 和 I_{2x} 为沿线 x 里程处 2 根钢轨的电流； g_{12} 为轨间通过道床表面漏泄的电导。

六端网络中，道床漏泄通路的构成如图 4 所示。

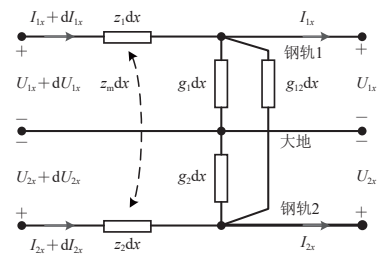


图 3 基于六端网络的 25 Hz 相敏轨道微分电路

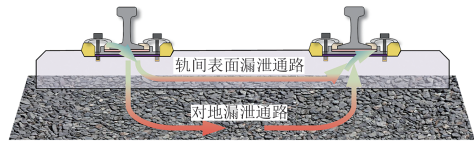


图 4 道床漏泄通路构成

由图 4 可知：在 2 根钢轨与大地构成的轨道横截面上，道床漏泄存在表面漏泄和对地漏泄 2 条通路，可采用表面漏泄系数 p_d 衡量这 2 个部分漏泄电阻之比，此外，在工程应用中往往采用道床电阻 R_d 衡量道床漏泄。

p_d 、 R_d 与 g_1 和 g_{12} 的关系为

$$p_d = g_{12} g_1^{-1} \tag{2}$$

$$R_d = (g_{12} + 0.5g_1)^{-1} \tag{3}$$

将图 3 中的电路应用在图 2 中, 得到对应的 25 Hz 相敏轨道电路迂回回路模型如图 5 所示。图中: U_{1a} 和 U_{2a} 为断轨区段送端 2 根钢轨的对地电压; U_{1b} 和 U_{2b} 为受端 2 根钢轨的对地电压; U_{Ya} 和 U_{Yb} 为迂回区段的送端和受端电压; l_M 为断轨区段的长度; l_A 为送端至断轨点的长度; l_B 为断轨点至受端

的长度; l_Y 为迂回区段长度; l_H 为横向连接距离, 故有 $l_Y = 2l_H - l_M$ 。

由图 5 可知: 由于单根钢轨断裂, 电压 $U_{1a} \neq U_{2a}$, $U_{1b} \neq U_{2b}$, 电流 $I_{1a} \neq I_{2a}$, $I_{1a} \neq I_{2a}$; 而迂回区段钢轨完好, 信号在迂回区段 2 根钢轨上共模传输, 同一截面处 2 根钢轨的对地电压相等、电流相等。

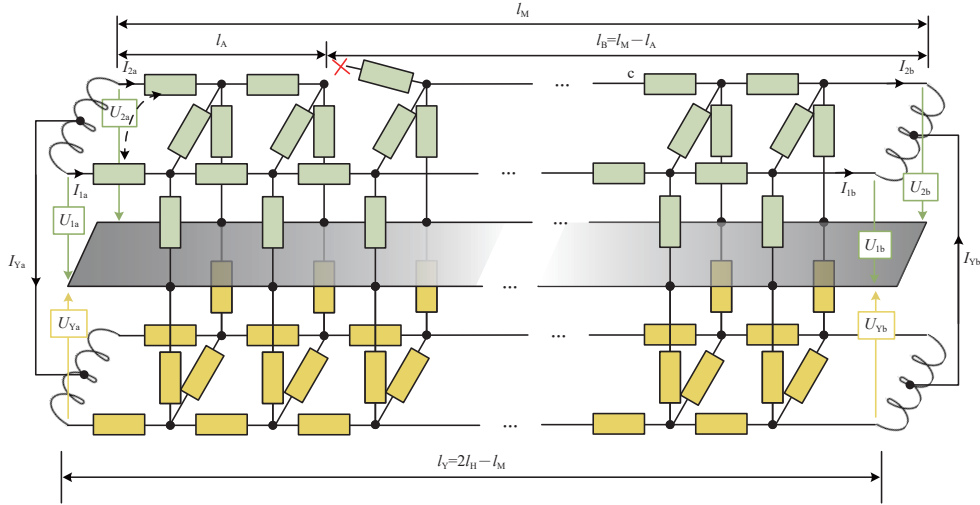


图 5 25 Hz 相敏轨道电路迂回回路模型

断轨区段两端电压和电流的关系为

$$\begin{pmatrix} U_{1a} & U_{2a} & I_{1a} & I_{2a} \end{pmatrix}^T = \mathbf{A} \begin{pmatrix} U_{1b} & U_{2b} & I_{1b} & I_{2b} \end{pmatrix}^T \quad (4)$$

其中,

$$\mathbf{A} = \mathbf{N}_R(l_A) \mathbf{N}_{BR} \mathbf{N}_R(l_B)$$

$$\mathbf{N}_{BR} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & Z_{br} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

式中: \mathbf{A} 为 25 Hz 相敏轨道电路断轨区段的传输矩阵; $\mathbf{N}_R(l_A)$ 和 $\mathbf{N}_R(l_B)$ 分别为送端至断轨点、断轨点至受端的传输矩阵, 可采用文献 [18, 21] 中的方法计算; \mathbf{N}_{BR} 为断轨点的传输矩阵; Z_{br} 为断轨等效阻抗。

迂回区段上, 设钢轨自阻抗 $z_1 = z_2$ 、对地漏泄电导 $g_1 = g_2$, 迂回区段电压和电流的关系为

$$\begin{pmatrix} U_{Ya} & I_{Ya} \end{pmatrix}^T = \mathbf{Y} \begin{pmatrix} U_{Yb} & I_{Yb} \end{pmatrix}^T \quad (5)$$

其中,

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{pmatrix}$$

$$y_{11} = \cosh(\gamma_Y l_Y) + R_A Z_Y^{-1} \sinh(\gamma_Y l_Y)$$

$$y_{12} = (R_A + R_B) \cosh(\gamma_Y l_Y) +$$

$$(Z_Y + R_A R_B Z_Y^{-1}) \sinh(\gamma_Y l_Y)$$

$$y_{21} = Z_Y^{-1} \sinh(\gamma_Y l_Y)$$

$$y_{22} = \cosh(\gamma_Y l_Y) + R_B Z_Y^{-1} \sinh(\gamma_Y l_Y)$$

式中: \mathbf{Y} 为 25 Hz 相敏轨道电路迂回区段的传输矩阵; y_{11} , y_{12} , y_{21} 和 y_{22} 为该矩阵的元素; R_A 和 R_B 分别为断轨区段送端和受端 IB 与迂回区段 IB 间的连接电阻; γ_Y 为传输常数; Z_Y 为特性阻抗。

R_A 和 R_B 按 IB “接断发连” 状态下的实际情况取值: 当送端 IB 断开时, R_A 为无穷大, R_B 为 0; 反之, 受端 IB 断开时, R_A 为 0, R_B 为无穷大; 当区段间送端 IB 和受端 IB 均连接时, R_A 和 R_B 均为 0。25 Hz 相敏轨道电路的阻抗仅为数百 mΩ, 此时无穷大的电阻可按 10 kΩ 取值。

根据迂回区段的电路结构, γ_Y 和 Z_Y 可分别表示为

$$\gamma_Y = \sqrt{z_y g_y} \quad (6)$$

$$Z_Y = \sqrt{z_y g_y^{-1}} \quad (7)$$

其中,

$$z_y = 0.5(z_1 + z_m)$$

$$g_y = \frac{4g_1^{-1} + 2g_{12}^{-1}}{g_1^{-1} g_{12}^{-1} + 2g_1^{-2}}$$

式中: z_y 为钢轨对地共模阻抗; g_y 为钢轨对地漏泄电导。

式 (4) 和式 (5) 即为 25 Hz 相敏轨道电路迂

回回路模型对应的MTL方程, 由于区段间存在IB与大地的耦合关系, 无法应用现有的单区段模型求解算法。

1.3 基于IB边界条件的模型解耦算法

上述模型中, 轨道电路送端和受端IB具有多个端子。为解耦该模型, 需采用变压器互感电路原理, 建立IB边界条件, 从而得到区段间电压和电流的关系。

首先, 由断轨区段和迂回区段2个区段间电流的关系, 可得

$$I_{Ya} = -(I_{1a} + I_{2a}) \quad (8)$$

$$I_{Yb} = -(I_{1b} + I_{2b}) \quad (9)$$

其次, 断轨区段送端和受端IB的电路图如图6所示。图中: L_{ES} 为IB信号线圈的电感; L_{EQ} 为单个牵引线圈的电感; M_{QS} 为信号线圈与单个牵引线圈的互感; M_{EQ} 为2个牵引线圈间的互感; 其中 $L_{ES} : L_{EQ}$ 为6:1。

$$\begin{pmatrix} U_{1a} & U_{2a} \end{pmatrix}^T = \Phi_M \begin{pmatrix} I_{1a} & I_{2a} \end{pmatrix}^T + j\omega M_{QS} U_T Z_{ET}^{-1} (1 \quad -1)^T + \begin{pmatrix} U_{Ya} & U_{Yb} \end{pmatrix}^T \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} U_{1b} & U_{2b} \end{pmatrix}^T = \Theta_M \begin{pmatrix} I_{1b} & I_{2b} \end{pmatrix}^T + \begin{pmatrix} U_{Yb} & U_{Yb} \end{pmatrix}^T \quad (11)$$

其中,

$$\Phi_M = \begin{pmatrix} -\omega^2 M_{QS}^2 Z_{ET}^{-1} - Z_{QT} - Z_{PT} & \omega^2 M_{QS}^2 Z_{ET}^{-1} - Z_{QT} \\ \omega^2 M_{QS}^2 Z_{ET}^{-1} - Z_{QT} & -\omega^2 M_{QS}^2 Z_{ET}^{-1} - Z_{QT} - Z_{PT} \end{pmatrix}$$

$$\Theta_M = \begin{pmatrix} \omega^2 M_{QS}^2 Z_{EL}^{-1} + Z_{QL} + Z_{PL} & -\omega^2 M_{QS}^2 Z_{EL}^{-1} + Z_{QL} \\ -\omega^2 M_{QS}^2 Z_{EL}^{-1} + Z_{QL} & \omega^2 M_{QS}^2 Z_{EL}^{-1} + Z_{QL} + Z_{PL} \end{pmatrix}$$

$$Z_{ET} = Z_T + j\omega L_{ES}$$

$$Z_{QT} = -j\omega M_{EQ}$$

$$Z_{PT} = j\omega(L_{EQ} + M_{EQ})$$

$$Z_{EL} = Z_L + j\omega L_{ES}$$

$$Z_{QL} = -j\omega M_{EQ}$$

$$Z_{PL} = j\omega(L_{EQ} + M_{EQ})$$

式中: ω 为25 Hz相敏轨道电路信号的角频率; Φ_M 和 Θ_M 为两端边界条件的参数矩阵; j 为虚数单位。

然后, 联立式(4)一式(11), 可得断轨区段受端电流 I_{1b} 和 I_{2b} 组成的矩阵为

$$\begin{pmatrix} I_{1b} & I_{2b} \end{pmatrix}^T = j\omega M_{QS} U_T Z_{ET}^{-1} \mathbf{K}^{-1} (1 \quad -1)^T \quad (12)$$

其中,

$$\mathbf{K} = (\mathbf{A}_{UU} \Theta + \mathbf{A}_{IU}) - [(\Phi_M + Y_A)(\mathbf{A}_{UI} \Theta + \mathbf{A}_{II}) + Y_B]$$

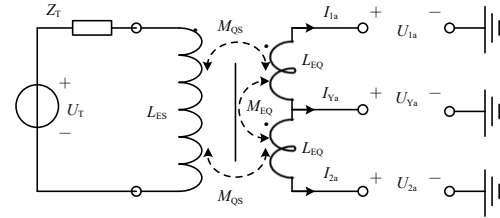
$$\Theta = (E - Y_C \mathbf{A}_{UI})^{-1} (\Theta_M + Y_D + Y_C \mathbf{A}_{II})$$

$$Y_A = -y_{11} y_{21}^{-1} \Psi$$

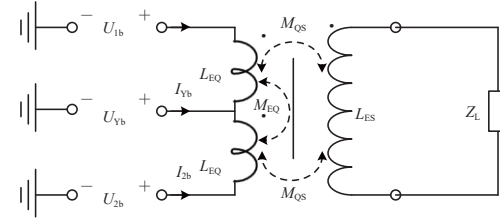
$$Y_B = (y_{11} y_{22} y_{21}^{-1} - y_{12}) \Psi$$

$$Y_C = -y_{21}^{-1} \Psi$$

$$Y_D = y_{22} y_{21}^{-1} \Psi$$



(a) 送端



(b) 受端

图6 断轨区段IB电路

由图6可知:

式中: \mathbf{K} , Θ , Y_A , Y_B , Y_C 和 Y_D 均为参数矩阵; Ψ 为元素全为1的2阶矩阵; E 为2阶单位矩阵; \mathbf{A}_{UU} , \mathbf{A}_{IU} , \mathbf{A}_{UI} 和 \mathbf{A}_{II} 均为2阶矩阵。

2阶矩阵 \mathbf{A}_{UU} , \mathbf{A}_{IU} , \mathbf{A}_{UI} 和 \mathbf{A}_{II} 由断轨区段的 4×4 维传输矩阵裂项导出, 为

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{UU} & \mathbf{A}_{IU} \\ \mathbf{A}_{UI} & \mathbf{A}_{II} \end{pmatrix} \quad (13)$$

最后, 在给定的轨道电路参数条件下, 由式(4)和式(12)可求解断轨区段沿线 x 里程处2根钢轨的电压 U_{1x} 和 U_{2x} 及电流 I_{1x} 和 I_{2x} , 它们组成的矩阵为

$$\begin{pmatrix} U_{1x} & U_{2x} & I_{1x} & I_{2x} \end{pmatrix}^T = \begin{cases} N_R(l_A - x) N_{BR} N_R(l_B) (U_{1b} \ U_{2b} \ I_{1b} \ I_{2b})^T & 0 \leq x < l_A \\ N_{BR} N_R(l_B) (U_{1b} \ U_{2b} \ I_{1b} \ I_{2b})^T & x = l_A \\ N_R(l_M - x) (U_{1b} \ U_{2b} \ I_{1b} \ I_{2b})^T & l_A < x \leq l_M \end{cases} \quad (14)$$

其中,

$$\begin{pmatrix} U_{1b} & U_{2b} & I_{1b} & I_{2b} \end{pmatrix}^T = j\omega M_{QS} U_T Z_{ET}^{-1} (\mathbf{\Theta} \quad \mathbf{E})^T \mathbf{K}^{-1} (1 \quad -1)^T$$

式 (14) 即为采用 IB 边界条件解耦得到的迂回回路模型电压和电流的通解, 由该通解可得断轨区段沿线 x 里程处的轨间电压 U_{12x} 和迂回电流 I_{Yx} 分别为

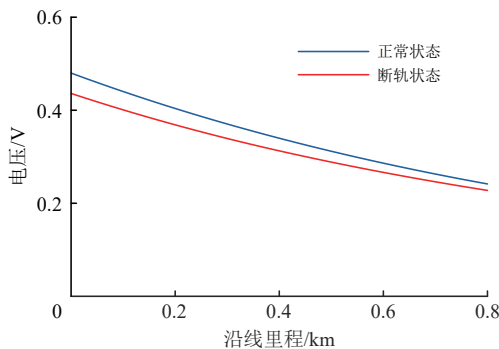
$$U_{12x} = U_{1x} - U_{2x} \tag{15}$$

$$I_{Yx} = -(I_{1x} + I_{2x}) \tag{16}$$

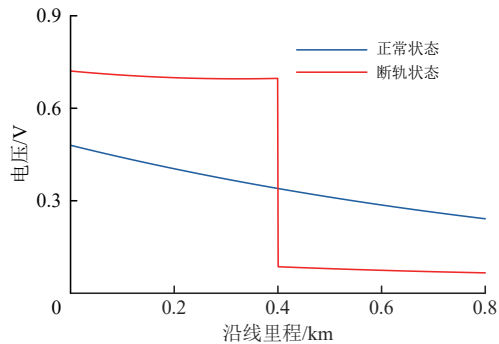
2 试验验证

2.1 基于迂回回路模型和解耦算法的沿线电压和电流求解结果

根据上述迂回回路模型和基于 IB 边界条件的解耦算法, 仿真试验在 0.8 km 长区段且区段两端 (送端和受端) IB 全连接的条件下进行, 分别按区段内钢轨无断轨 (正常状态) 和区段中部钢轨 2 断轨 (断轨状态) 计算断轨区段沿线 x 里程处的电压 U_{1x} , U_{2x} 和电流 I_{1x} , I_{2x} , 结果分别如图 7 和图 8 所示。



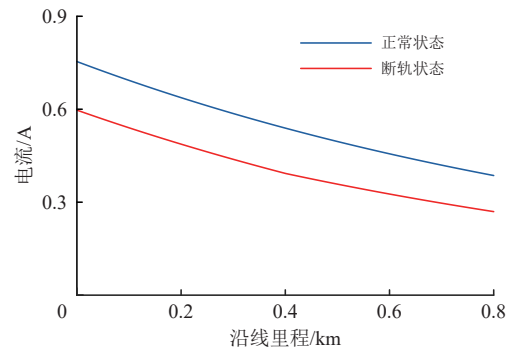
(a) 钢轨 1



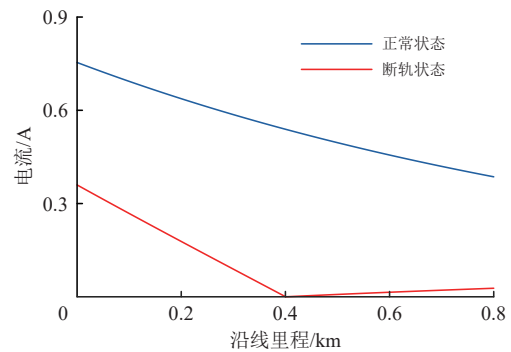
(b) 钢轨 2

图 7 2 种状态下钢轨电压

由图 7 可知: 2 种状态下钢轨 1 (未断钢轨) 的电压均随沿线里程的增加逐渐降低, 但断轨状态下任意位置钢轨 1 的电压均低于正常状态; 正常状



(a) 钢轨 1



(b) 钢轨 2

图 8 2 种状态下钢轨电流

态下钢轨 2 的电压与钢轨 1 相等, 但断轨状态下钢轨 2 (断裂钢轨) 的电压在断轨点附近剧烈变化, 且断轨状态下钢轨 2 近送端侧的电压高于正常状态、而近接收侧的电压低于正常状态。

由图 8 可知: 2 种状态下钢轨 1 的电流均随沿线里程的增加逐渐降低, 但断轨状态下的电流均低于正常状态; 正常状态下钢轨 2 的电流与钢轨 1 相等, 但断轨状态下钢轨 2 的电流沿送端至断轨点快速衰减, 并在断轨点处降为 0 A, 之后沿断轨点至受端略微增大。

采用式 (15) 和式 (16) 求解得到断轨区段沿线的轨间电压 U_{12x} 和迂回电流 I_{Yx} 如图 9 所示。由图 9 可知: 断轨状态下, 轨间电压沿送端至受端逐渐

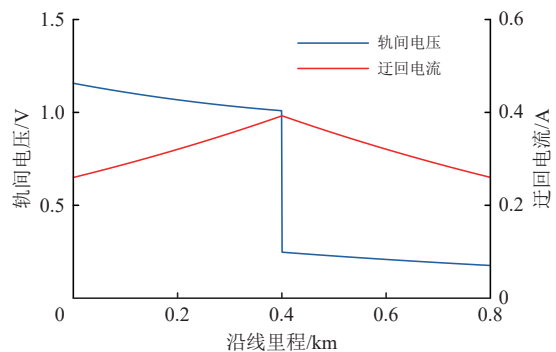


图 9 断轨状态下轨间电压和迂回电流

降低，并在断轨点（0.4 km）处产生跳变；迂回电流则沿送端至受端先增大后减小，并在断轨点处达到最大值。

2.2 基于六端网络模拟钢轨装置的实验室验证

实验室验证时，采用 25 Hz 相敏轨道电路全套

实物设备和六端网络模拟轨道装置，其中模拟轨道装置采用长度等效 0.2 km 的模拟单元级联而成，测试按 0.8 km 区段长度布置，将 0.4 km 设为断轨位置，可按 0.2 km 为间隔测量电压。实验室模拟时试验环境如图 10 所示。

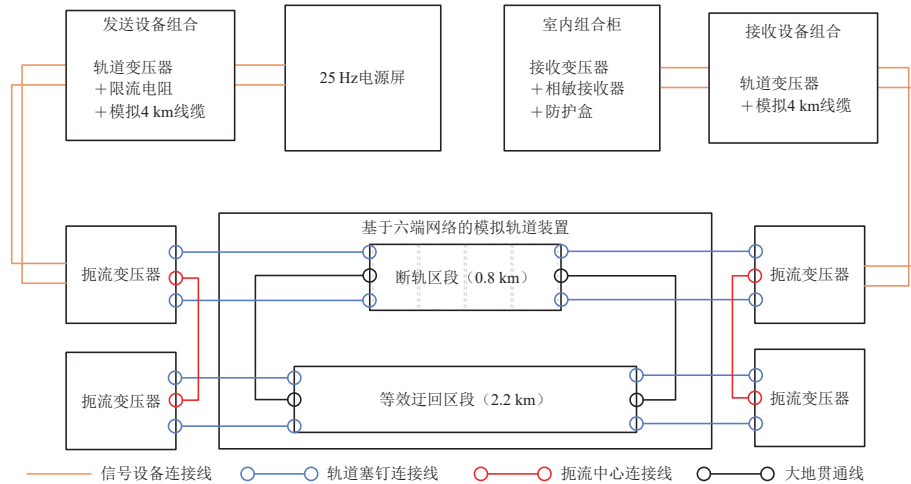


图 10 实验室模拟时试验环境

以 $l_M=0.8 \text{ km}$, $l_A=0.4 \text{ km}$, $l_H=1.5 \text{ km}$, $R_d=1.5 \Omega \cdot \text{km}$, $p_d=0.01$ ，送端和受端 IB 均设置为全连接方式的测试条件为例，得到 0.2 km 间隔时正常状态与断轨状态下轨间电压和 2 根钢轨对地电压的试验测量结果，并与模型计算结果对比见表 1。表中：由于沿线里程 0.4 km 为钢轨 2 的断轨点，

对应数据按“断点前”和“断点后”给出。

由表 1 可知：基于上述模型和解耦算法的计算数据与实测数据的平均绝对误差（MAE）为 0.016 9 V，均方根误差（RMSE）为 0.019 4 V，表明电压变化规律的实验室试验结果与上述模型及算法求解基本一致。

表 1 实验室试验和模型计算数据

沿线里程/km	轨间电压/V				对地电压/V			
	正常状态下		断轨状态下		钢轨 1		钢轨 2	
	试验	计算	试验	计算	试验	计算	试验	计算
0	0.978	0.960	1.157	1.153	0.405	0.438	0.711	0.715
0.2	0.791	0.808	1.091	1.063	0.359	0.371	0.710	0.692
断点前	0.652	0.680	1.024	1.002	0.300	0.314	0.680	0.689
断点后	0.652	0.680	0.254	0.256	0.300	0.314	0.101	0.077
0.6	0.559	0.573	0.224	0.216	0.269	0.266	0.091	0.066
0.8	0.455	0.483	0.212	0.182	0.219	0.227	0.081	0.058

2.3 现场验证

在某站调研中，利用改造施工天窗断开某正线区段受端 IB 牵引线圈一侧钢轨的连接线，从而模拟受端断轨条件，现场试验情况如图 11 所示，获取断轨前后现场实测数据见表 2。

由表 2 可知：断轨前送端和受端的 2 根钢轨的电流相等，而在断轨后 2 根钢轨的电流不相等，其中断轨点（受端）钢轨 2 的电流为 0，轨道电路在断轨状态时仍会通过迂回回路产生受端电压。通过

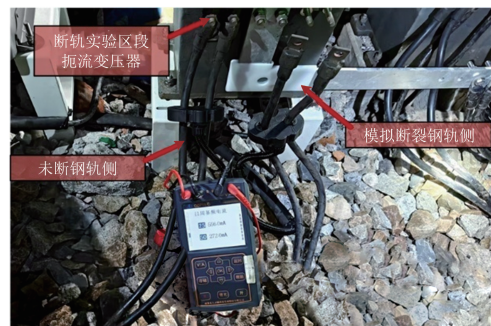


图 11 现场试况

表2 现场实测数据

数据位置	IB信号线圈电压/V	IB信号线圈电流/A	钢轨1电流/A	钢轨2电流/A	轨间电压/V
断轨前送端	1.983	0.338	0.831	0.843	0.649
断轨后送端	3.186	0.188	0.622	0.008	1.870
断轨前受端	1.770	0.240	0.800	0.810	0.634
断轨后受端	0.540	0.086	0.560	0.000	0.194

对比表2和图8的电流以及图9的轨间电压的变化特征可知,试验现象与理论分析基本一致。

3 不同影响因素对受端电压的影响

由式(15)可知,受端电压 $U_r=U_{1b}-U_{2b}$,由于IB与大地形成轨道电路迂回回路, $U_r \neq 0$ 。断轨状态下,如果受端电压过高,那么继电器接点保持闭合,此时轨道电路输出区段空闲信息,危及行车安全。基于MTL的25 Hz相敏轨道电路迂回回路模型可突破现有轨道电路建模方法的局限性,利用基于IB边界条件的解耦方法,可准确求解不同参数条件下轨道电路断轨状态的电压和电流,因此可通过仿真进一步分析电压和电流的变化规律。根据上述迂回回路模型的理论分析可知,当区段长度、钢轨几何参数确定时,轨道电路断轨状态下受端电压与IB连接方式、断轨位置、道床漏泄、横向连接距离有关。

3.1 不同IB连接方式下断轨位置的影响

在0.8 km区段内,以正常状态下的受端电压作为基准电压,分别仿真IB全连接、送端IB断开、受端IB断开3种不同IB连接方式下断轨位置对受端电压的影响,结果如图12所示。

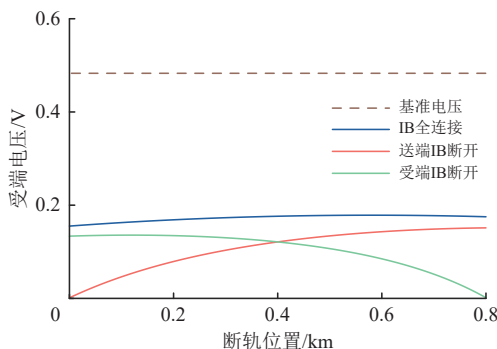


图12 不同IB连接方式下断轨位置对受端电压影响

由图12可知:区段两侧IB连接方式不同,断轨状态下受端电压随断轨位置的变化规律不同;IB全连接时,断轨点靠近两端的受端电压略低、断轨点靠近区段中部的受端电压略高,受端电压随

断轨位置变化整体幅度较小;送端IB断开时,断轨点位于送端时的受端电压为0 V,但断轨点越靠近受端,受端电压越高;相反地,受端IB断开时,断轨点位于受端时的受端电压为0 V,但断轨点越靠近送端,受端电压越高;3组连接方式下,断轨状态受端电压最大值约为正常状态的30%~40%。因此,在受端电压降为正常状态下的30%~40%时,需确保该电压使受端继电器接点断开,从而实现断轨状态下轨道电路输出正确。

3.2 不同IB连接方式下道床漏泄的影响

在不同IB连接方式下进行道床电阻的仿真,得到0.8 km区段中部断轨且表面漏泄系数 $p_d=1$,道床电阻 R_d 由 $0.4 \Omega \cdot \text{km}$ 增至 $40.0 \Omega \cdot \text{km}$ 时道床电阻对受端电压的影响,结果如图13所示。

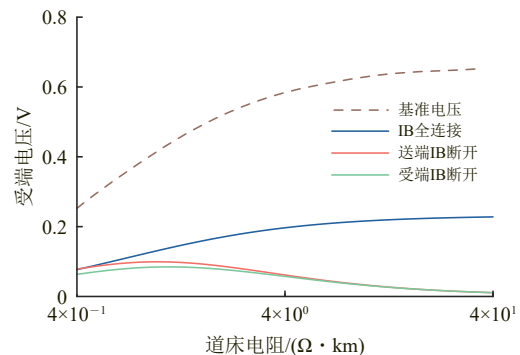


图13 不同IB连接方式下道床电阻对受端电压影响

由图13可知:未断轨前,受端电压随道床电阻的增大而增大,但增幅逐渐平缓;在设置IB全连接的区段,断轨后受端电压随道床电阻的增大而增大;在送端IB断开和受端IB断开的区段,断轨后受端电压均随道床电阻的增大呈先增大后减小的变化趋势。这一现象在ZPW-2000轨道电路迂回问题研究^[22]中也能得到印证。

IB连接方式不变且0.8 km区段中部断轨,仿真得到道床电阻分别为 1.5 和 $0.6 \Omega \cdot \text{km}$ 、表面漏泄系数由 10^{-2} 增至 10^2 时表面漏泄系数对受端电压的影响,结果如图14所示。由图14可知:不同道床电阻和IB连接方式下,断轨状态下受端电压随表面漏泄系数的变化规律基本相同,受端电压随表

面漏泄系数的增大反而降低,但相比IB全连接方式,送端IB断开和受端IB断开方式下受端电压更低,有利于检查轨道电路断轨。研究表明,通过提高轨道电路上钢轨扣件绝缘等措施可提高表面漏泄系数,从而有效降低受端电压,确保断轨检查输出正确^[25]。由此可见,不可忽视表面漏泄系数对轨道电路迂回回路的影响,通过工务作业及时排查钢轨扣件绝缘的老化情况有利于检查轨道电路断轨。

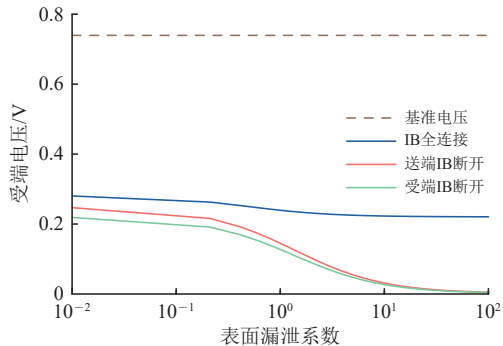
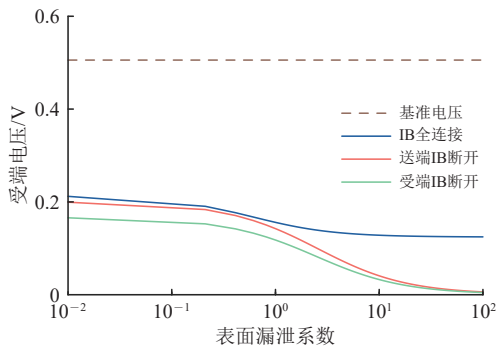
(a) 道床电阻 $1.5 \Omega \cdot \text{km}$ (b) 道床电阻 $0.6 \Omega \cdot \text{km}$

图14 不同IB连接方式下表面漏泄系数对受端电压影响

3.3 不同IB连接方式下横向连接距离的影响

仿真分析不同IB连接方式条件下,0.8 km区段中部断轨时不同横向连接距离对受端电压的影响,结果如图15所示。该仿真中,IB连接方式与前述仿真不同,分别为IB全连接、一端IB断开、两端IB断开,其中一端IB断开为送端或受端的IB

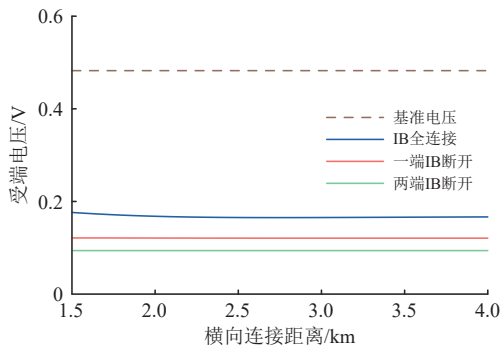


图15 不同横向连接距离时的受端电压仿真

仅断开其中1处,两端IB断开为送端和受端的IB同时断开。由图15可知:同一横向连接距离下,IB全连接方式下区段的受端电压高于一端IB断开方式,而在区段两端IB断开方式下的受端电压最低,但该方式完全阻隔了牵引回流,并不适用于电气化区段。

在现阶段站内25 Hz相敏轨道电路工程设计中,曾采用苏联给出的分析图表^[26]作为最小横向连接距离取值参考。因此根据图15还可知:当横向连接距离大于2.0 km后,受端电压不再随横向连接距离的增大发生明显改变。因此,建议将2.0 km作为25 Hz相敏轨道电路全连接区段横向连接距离设计时的参考值。

4 25 Hz相敏轨道电路迂回回路排查建议

基于不同条件下断轨状态受端电压的变化规律,建议在25 Hz相敏轨道电路的维护工作中按如下方法排查迂回回路的安全隐患:

(1) 核实是否存在迂回回路长度过短的区段,尽量按照2.0 km的标准调整横向连接距离;

(2) 对于迂回回路较短且送端和受端IB全连接的区段,可将受端电压调整至正常状态的40%,从而模拟断轨测试条件,再确认继电器接点闭合状态,即可测试轨道电路能否实现断轨检查;

(3) 对于迂回回路较短且送端或受端IB连接断开的区段,可断开IB连接一端的单组钢轨连接线,从而模拟断轨测试条件,再确认继电器接点闭合状态,即可测试轨道电路能否实现断轨检查;

(4) 根据模拟断轨的测试结果,在避免出现雨季红光带的前提下适当调低轨道电路的电压,防止断轨状态下受端电压过高无法进行断轨检查;

(5) 采用上文的断轨检查迂回回路建模方法,按最不利参数条件计算不同区段的受端电压理论值,设为集中监测系统电压报警值。

5 结论

(1) 建立25 Hz相敏轨道电路迂回回路模型,基于MTL建模方法,首先将25 Hz相敏轨道电路的迂回回路上多个区段等效为1个迂回区段,之后采用2段六端网络分析断轨区段和迂回区段的电压

和电流关系,再通过IB与大地连接2个区段形成耦合电路,最终得到该模型及对应的MTL方程,实现区段间耦合场景建模,突破轨道电路单区段建模和四端网络的局限性。

(2) 提出基于IB边界条件的模型解耦算法,基于变压器互感电路原理,建立断轨区段送端和受端IB端子上的电压和电流关系,得到IB边界条件的参数矩阵,再联立MTL方程,进而得到断轨区段受端电流,最终得到迂回回路模型电压和电流的通解,解决区段间耦合场景下轨道电路电压和电流的求解问题。

(3) 通过仿真计算和试验验证,研究25 Hz相敏轨道电路断轨状态下受端电压通过迂回回路的产生机制,得到不同IB连接方式、不同断轨位置、不同道床漏泄条件和不同横向连接距离下的受端电压的变化规律。①IB采用全连接方式时,断轨位置越靠近区段中部,断轨状态受端电压越高;IB

采用接断发连方式时,断轨位置越靠近IB连接的一端,断轨状态受端电压越高。②IB采用全连接方式时,道床电阻越大,断轨状态受端电压越高;IB采用“接断发连”方式时,道床电阻增大,断轨状态受端电压先升高后降低;表面漏泄系数增大时,断轨状态受端电压降低。③横向连接距离超过2 km后,继续增大横向连接距离,断轨状态受端电压几乎不会变化。

(4) 基于受端电压变化规律,建议在工程应用中可将2.0 km作为横向连接距离参考值,IB全连接区段可按正常电压40%测试断轨检查,送端或受端IB连接断开的区段可断开IB连接一端的钢轨连接线测试断轨检查。

(5) 25 Hz相敏轨道电路迂回回路模型和基于IB边界条件的解耦算法为排除安全隐患提供理论支撑,对保障运输安全有重要意义。此外,该模型在基于轨道电路的断轨故障诊断方面具有应用前景。

参 考 文 献

- [1] 常媛媛,张晨,范季陶,等. 电气化铁路电力电缆故障电流对信号电缆的电磁影响[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(4): 85-91. (CHANG Yuanyuan, ZHANG Chen, FAN Jitao, et al. The Electromagnetic Effect on the Signal Cable by the Fault Current of the Power Cable on Electrified Railway [J]. China Railway Science, 2010, 31 (4): 85-91. in Chinese)
- [2] 曹晓斌,何方方,韩虎,等. 铁路站场中间接触网短路对附近信号电缆的影响[J]. 铁道学报, 2017, 39(8): 45-51. (CAO Xiaobin, HE Fangfang, HAN Hu, et al. Effect of Short Circuit of OCS in the Middle of Station Yard on Adjacent Signal Cable [J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39 (8): 45-51. in Chinese)
- [3] 王保松. 低道床电阻轨道电路传输分析及解决方案[J]. 铁道通信信号, 2021, 57(6): 58-61. (WANG Baosong. Study on Transmission Properties and Solution of Low Ballast Resistance Track Circuit [J]. Railway Signalling & Communication, 2021, 57 (6): 58-61. in Chinese)
- [4] 杨轶轩. ZPW-2000A轨道电路道床漏泄区段改进措施研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2019, 16(增1): 69-73, 93. (YANG Yixuan. Research on Improvement Measures of Ballast Leakage Section of ZPW-2000A Track Circuit [J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2019, 16 (Supplement 1): 69-73, 93. in Chinese)
- [5] 王文彬,张奎刚. ZPW-2000轨道电路轨出电压季节性波动的分析与研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18(增1): 135-138. (WANG Wenbin, ZHANG Kuigang. Analysis and Research on Seasonal Fluctuation of Rail out Voltage of ZPW-2000 Track Circuit [J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18 (Supplement 1): 135-138. in Chinese)
- [6] 乔志超,向念文,阳晋,等. 高速铁路信号系统的雷电暂态模型研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(9): 90-96. (QIAO Zhichao, XIANG Nianwen, YANG Jin, et al. Research of Lightning Transient Model for High-Speed Railway Signal System [J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40 (9): 90-96. in Chinese)
- [7] 杨轶轩,徐宗奇. ZPW-2000A型轨道电路故障分析与处理[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2019: 115-125. (YANG Yixuan, XU Zongqi. Fault Analysis and Solution of ZPW-2000A Track Circuit [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019: 115-125. in Chinese)
- [8] 李明光. 电气牵引电流对信号设备干扰原因分析及处置方案[J]. 铁路通信信号工程技术, 2020, 17(7): 69-75. (LI Mingguang. Analysis and Disposal Scheme of Interference Causes of Electrified Traction Current on Signaling Equipment [J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2020, 17 (7): 69-75. in Chinese)
- [9] 蒋涛,陈治朋,王良. 直供方式下牵引回流对轨道电路的影响及对策[J]. 国防交通工程与技术, 2019, 17(1): 40-43, 65. (JIANG Tao, CHEN Zhipeng, WANG Liang. On the Effect of the Traction Returning Current on the Track Circuit in the Direct Power Supply System and Our Counter Measures [J]. Traffic Engineering and Technology for National Defense, 2019, 17 (1): 40-43, 65. in Chinese)

- [10] 费锡康,潘行谦,赵昌桂,等.加气隙的扼流变压器和25 Hz适配器[J].铁道学报,1994,16(1):37-42.
(FEI Xikang, PAN Xingqian, ZHAO Changgui, et al. Choke Transformer with Added Gap and 25 Hz Adapter [J]. Journal of the China Railway Society, 1994, 16 (1): 37-42. in Chinese)
- [11] 杨世武,李奕霖,陈海康,等.基于高速铁路典型车站牵引供电系统仿真模型的降低绝缘节两端电位差方案[J].中国铁道科学,2016,37(2):70-77.
(YANG Shiwu, LI Yilin, CHEN Haikang, et al. Solution to Reduction of Potential Difference on Both Ends of Insulation Joint Based on Simulation Model of Traction Power Supply System in Typical Station of High Speed Railway [J]. China Railway Science, 2016, 37 (2): 70-77. in Chinese)
- [12] 乔志超,魏子钧,杨轶轩,等.牵引电流谐波对轨道电路接收电压影响分析[J].中国铁路,2023(1):103-109.
(QIAO Zhichao, WEI Zijun, YANG Yixuan, et al. Influence Analysis of Traction Current Harmonic on Receiving Voltage of Track Circuit [J]. China Railway, 2023 (1): 103-109. in Chinese)
- [13] 李海燕,张晨旭,田帅.HXD电力机车牵引电流高次谐波对25 Hz轨道电路干扰问题的解决[J].铁道通信信号,2020,56(1):42-44.
(LI Haiyan, ZHANG Chenxu, TIAN Shuai. The Solution for High Harmonic Interference on 25 Hz Phase Sensitive Track Circuit Caused by HXD Series Electric Locomotive [J]. Railway Signalling & Communication, 2020, 56 (1): 42-44. in Chinese)
- [14] FAN J T, YANG W D. Impedance Analysis of Track Circuit with Power Eye Graph [C]// 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems. Rhodes, Greece: IEEE, 2020: 1-5.
- [15] 赵林海,江浩,孟景辉,等.考虑轨面设备的无绝缘轨道电路道砟电阻回归测量方法[J].中国铁道科学,2021,42(2):154-163.
(ZHAO Linhai, JIANG Hao, MENG Jinghui, et al. Regression Measurement Method of Ballast Resistance in Jointless Track Circuit Considering Track Surface Equipment [J]. China Railway Science, 2021, 42 (2): 154-163. in Chinese)
- [16] 崔勇,唐乾坤,杨世武.基于调整表优化的轨道电路牵引电流干扰防护研究[J].铁道学报,2018,40(12):71-80.
(CUI Yong, TANG Qiankun, YANG Shiwu. Research on Anti-Interference of Track Circuit Against Traction Current Based on Adjustment Table Optimization [J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40 (12): 71-80. in Chinese)
- [17] 刘倡,杨世武,崔勇,等.配置BES型扼流适配变压器的道岔区段轨道电路调整表仿真计算[J].中国铁道科学,2020,41(3):154-162.
(LIU Chang, YANG Shiwu, CUI Yong, et al. Simulation and Calculation of Track Circuit Adjustment Table in Turnout Section Configured with BES Impedance Match Bond [J]. China Railway Science, 2020, 41 (3): 154-162. in Chinese)
- [18] 范景腾,杨武东,郭进,等.检修接地不平衡传输条件对轨道电路的影响研究[J].铁道学报,2024,46(5):76-84.
(FAN Jingteng, YANG Wudong, GUO Jin, et al. Study on Effects on Track Circuit Caused by Unbalanced Transmission Conditions of Maintenance Grounding [J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46 (5): 76-84. in Chinese)
- [19] 代萌.基于协同优化策略和人工蜂群算法的轨道电路邻线干扰防护研究[J].中国铁道科学,2024,45(1):178-189.
(DAI Meng. Interference Protection Research of Adjacent Lines Based on Collaborative Optimization Strategy and Artificial Bee Colony Algorithm [J]. China Railway Science, 2024, 45 (1): 178-189. in Chinese)
- [20] 赵斌,陈磊,欧静宁,等.考虑高频损耗的ZPW-2000A轨道电路暂态响应分析[J].中国铁道科学,2023,44(1):186-193.
(ZHAO Bin, CHEN Lei, OU Jingning, et al. Transient Response Analysis Considering ZPW-2000A Track Circuit with High Frequency Loss [J]. China Railway Science, 2023, 44 (1): 186-193. in Chinese)
- [21] БРЫЛЕЕВ А М, КРАВЦОВ Ю А, ШИШЛЯКОВ А В.轨道电路的分析与综合[M].孙铭甫,译.北京:中国铁道出版社,1981:90-110.
(БРЫЛЕЕВ А М, КРАВЦОВ Ю А, ШИШЛЯКОВ А В. Analysis and Synthesis of Track Circuit [M]. Translated by SUN Mingfu. Beijing: China Railway Publishing House, 1981: 90-110. in Chinese)
- [22] 杨世武,刘家良,李文涛,等.站内轨道电路迂回电路模型分析及案例[J].铁道学报,2015,37(11):76-81.
(YANG Shiwu, LIU Jialiang, LI Wentao, et al. Model Analysis and Case Study on the Bypass Route in Station Track Circuit [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37 (11): 76-81. in Chinese)
- [23] 陈建译,陈习莲.25 Hz相敏轨道电路技术与应用[M].北京:中国铁道出版社,2019:347-352.
(CHEN Jianyi, CHEN Xilian. Technology and Application of the 25 Hz Phase Sensitive Track Circuits [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019: 347-352. in Chinese)
- [24] 曹晓斌,唐逢光,何祥照,等.不同类型机械绝缘节快速暂态过电压产生机理[J].中国铁道科学,2020,41(1):85-91.
(CAO Xiaobin, TANG Fengguang, HE Xiangzhao, et al. Generation Mechanism of Fast Transient Overvoltage in Different Types of Mechanical Insulation Joints [J]. China Railway Science, 2020, 41 (1): 85-91. in Chinese)
- [25] 日本铁道电气技术协会.铁道信号の技術はこうして生まれた[M].東京:日本铁道电气技术协会,2009:16-28.
(Japan Railway Electrical Engineering Association. Railway Signalling Technology: How It was Born [M]. Tokyo: Japan Railway Electrical Engineering Association, 2009: 16-28.)

Railway Electrical Engineering Association, 2009: 16-28. in Japanese)

[26] 董玉玺. 电化区段如何避免牵引回流对轨道电路的影响[J]. 铁道通信信号, 2008, 44(6): 15-17.

(DONG Yuxi. How to Eliminate the Influence of Traction Return Current on Track Circuit [J]. Railway Signalling & Communication, 2008, 44 (6): 15-17. in Chinese)

Study on the Bypass Path of 25 Hz Phase-Sensitive Track Circuit Based on the Multi-Conductor Transmission Line

FAN Jingteng¹, GUO Jin¹, BAO Cairangtai², ZHANG Yi¹, YANG Wudong¹

(1. School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 611756, China;

2. China Railway Qinghai-Tibet Group Co., Ltd., Xining Qinghai 810007, China)

Abstract: The 25 Hz phase-sensitive track circuit faces a broken rail detection problem due to the presence of a bypass path. As a result, the variation law of the receiving end voltage under broken rail conditions has not been clarified in the field operation for a long time. To provide a theoretical basis for eliminating potential safety hazards, based on the multi-conductor transmission line (MTL) modeling method, multiple sections along the bypass path of a 25 Hz phase-sensitive track circuit are equivalently represented as a single bypass section. A six-port network is adopted to analyze the voltage and current relationships between the broken rail section and the bypass section. These sections are linked through the impedance bond (IB) and the earth to form a coupling circuit, which is then used to establish a bypass-path model of the 25 Hz phase-sensitive track circuit and derive the corresponding MTL equations. Based on the principle of transformer mutual-inductance circuits, the voltage and current relationships of IBs at the sending and receiving ends of the broken rail section are analyzed. The boundary-condition parameter matrix of IB is derived, and the longitudinal distribution of voltage and current under broken rail conditions of the 25 Hz phase-sensitive track circuit is obtained. A decoupling algorithm based on the IB boundary-condition is proposed. The bypass-path model and the decoupling algorithm are validated through laboratory and field tests. Considering that the receiving voltage in the bypass path is non-zero under broken rail conditions, the effects of the IB connection scheme, break location, ballast leakage, and cross-bond distance on the receiving voltage are investigated. The results show that, for sections with IBs fully connected, the receiving voltage increases as the break location approaches the mid-section and as the ballast resistance increases. For sections with the sending-end or receiving-end IB disconnected, the receiving voltage increases as the break location approaches the end where the IB remains connected, and it first rises and then falls as the ballast resistance increases. When the cross-bond distance exceeds 2 km, the receiving voltage becomes nearly invariant, and 2 km can be used as a reference value. A higher receiving voltage under broken rail conditions makes broken rail detection more difficult. Therefore, it is recommended that, for sections with fully connected IBs, broken rail detection be tested using a criterion of a 40% drop in receiving voltage, whereas for sections with the sending-end or receiving-end IB connection disconnected, broken rail detection be tested by removing the single-rail connecting wire at the IB-connected end.

Key words: Track circuit; Multi-conductor transmission line; Impedance bond; Broken rail; Ballast resistance; Cross-bond distance; Connection scheme

(责任编辑 金 燕)