

1-8-2019

Effect of Rail Fracture on Train Shunt-Circuit Current Envelope

Youpeng Zhang

School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

Zhao Jian

School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

Bin Zhao

School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Effect of Rail Fracture on Train Shunt-Circuit Current Envelope

Abstract

Abstract: To analyze change rules of train shunt-circuit current amplitude envelope under the track circuit crack state, *a distributed parameter equivalent mathematic model of ZPW-2000A track circuit crack state was constructed based on the transmission theory; and the effect of ballast resistances, the crack points and the crack equivalent impedances on train shunt-circuit currents amplitude envelope were studied using MATLAB.* Experiment results show that the ballast resistance, the crack point and the crack equivalent impedance have great influence on train shunt-circuit current amplitude envelope before crack point; and the train shunt-circuit current amplitude envelope occurs discontinuity at the crack point regardless of any case. This mathematic model provides a new thought and theoretical basis for testing crack of rail line.

Keywords

ZPW-2000A track circuit, crack state, shunt-circuit current amplitude envelope, distributed parameter model

Recommended Citation

Zhang Youpeng, Zhao Jian, Zhao Bin. Effect of Rail Fracture on Train Shunt-Circuit Current Envelope[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 3198-3205.

钢轨断裂对分路电流影响的研究

张友鹏, 赵建, 赵斌

(兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为了分析轨道电路断裂态下机车分路电流幅值的变化规律, 通过分布参数模型法建立了 ZPW-2000A 轨道电路断裂态等效数学模型, 利用 MATLAB 软件仿真分析了不同道砟电阻、断裂点位置及断裂点等效阻抗变化对机车分路电流幅值包络的影响。仿真结果表明道砟电阻、断裂点位置和断裂点等效阻抗主要对断裂点之前的分路电流幅值包络影响较大, 且分路电流幅值包络曲线在断裂点处总存在突变点, 该模型可区分补偿电容断线和补偿电容处钢轨断裂。该数学模型可以为钢轨断裂的检测提供新的思路 and 理论依据。

关键词: ZPW-2000A 轨道电路; 断裂态; 分路电流幅值包络; 分布参数模型

中图分类号: U284.23

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 08-3198-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201808046

Effect of Rail Fracture on Train Shunt-Circuit Current Envelope

Zhang Youpeng, Zhao Jian, Zhao Bin

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To analyze change rules of train shunt-circuit current amplitude envelope under the track circuit crack state, a distributed parameter equivalent mathematic model of ZPW-2000A track circuit crack state was constructed based on the transmission theory; and the effect of ballast resistances, the crack points and the crack equivalent impedances on train shunt-circuit currents amplitude envelope were studied using MATLAB. Experiment results show that the ballast resistance, the crack point and the crack equivalent impedance have great influence on train shunt-circuit current amplitude envelope before crack point; and the train shunt-circuit current amplitude envelope occurs discontinuity at the crack point regardless of any case. This mathematic model provides a new thought and theoretical basis for testing crack of rail line.

Keywords: ZPW-2000A track circuit; crack state; shunt-circuit current amplitude envelope; distributed parameter model

引言

裂是铁路线路的常见故障之一, 严重威胁行车安全, 若因断轨而引发行车事故后果非常严重^[1]。



收稿日期: 2016-11-02

修回日期: 2017-04-17;

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划 (2015X007-H), 兰州交通大学青年基金(2015039);

作者简介: 张友鹏(1965-), 男, 甘肃庆阳, 硕士, 教授, 研究方向为无绝缘轨道电路故障诊断与检测。

目前, 我国多采用基于超声波检测原理的手推式探伤车人工巡轨和大型钢轨检测车定期巡检, 或采用各种类型的轨道电路实时监测钢轨线路等方法进行断轨检测。在我国普遍应用的 ZPW-2000A 轨道电路虽然能实现全局的断轨检测, 但受本身道床参数情况影响大, 误报率高^[2], 为铁路运营安全埋下了重大隐患。

目前, 国内外文献主要针对于轨道电路在钢轨

<http://www.china-simulation.com>

• 3198 •

完全折断时的断轨状态进行了研究: 阿·米·布列也夫^[3]利用传输线模型建立了轨道电路的断轨态模型; 张友鹏等^[4]将 ZPW-2000A 轨道电路的补偿电容等效为阻抗并平均分布在两根钢轨上, 再利用文献[3]断轨态模型建立了 ZPW-2000A 轨道电路的断轨态模型, 并提出影响接收端电流变化的几个重要因素; 毕延帅^[1]以断轨态模型为基础, 建立了 ZPW-2000A 轨道电路各组成部分钢轨折断时的模型, 分析了不同组成部分断轨对机车分路电流的影响。国外方面主要是对钢轨裂纹的影响进行了分析: A·G·Kostyrychev 等^[5]利用声学仪器分析了钢轨裂纹对于声波传输特性的影响分析; Laura 等^[6]仿真分析了钢轨裂纹对电流频率的影响。最近, 文献[7]中作者提出研究钢轨并未完全折断、尚存在电气连接的轨道电路断裂态的必要性和应用价值, 并建立了断裂态的复频域模型, 分析了断裂态电流行波的暂态变化过程, 但未将其应用到现有的 ZPW-2000A 轨道电路中。因此, 本文依据轨道电路断裂态的特性, 结合 ZPW-2000A 无绝缘轨道电路的结构特点, 首先建立了基于均匀传输线理论的列车分路条件下轨道电路断裂态的四端口网络模型, 并通过该模型求得分路电流幅值函数。然后对该模型进行

MATLAB 仿真分析, 进而确定了影响机车短路电流幅值包络曲线变化的几个重要因素和变化规律。

1 列车分路条件下断裂态建模

1.1 建模思路分析

轨道电路可等效成均匀传输线, 其信号的传输特性可以用四端网络来描述, 在理想情况下可将其看作是均匀分布参数电路^[8-9]。根据 ZPW-2000A 轨道电路的结构特点, 可以得到如图 1 所示的钢轨断裂时轨道电路分路状态结构示意图。由图 1 可知, 两个调谐区之间的主轨道部分由 n 个等值的补偿电容将其分为 $n+1$ 段, 其中两补偿电容间的距离为 Δ , 轨道电路两端与补偿电容的距离为 $\Delta/2$ ^[10]。若将各轨道电路单元按工作状态进行分类, 可将其分成调整状态单元 $N_{Ti}(i=1,2,\dots,n+1)$ 、分路状态单元 N_F 和断裂状态单元 N_B , 且当分路点与断裂点在一个单元内时用四端网 N_{BF} 描述其传输特性。补偿电容的传输特性用四端网 N_C 表示, 调谐区的传输特性用四端网 N_b 表示, 匹配变压器的传输特性用四端网 N_p 表示, 传输电缆的传输特性用四端网 N_L 表示, 衰耗器的传输特性用四端网 N_S 表示。

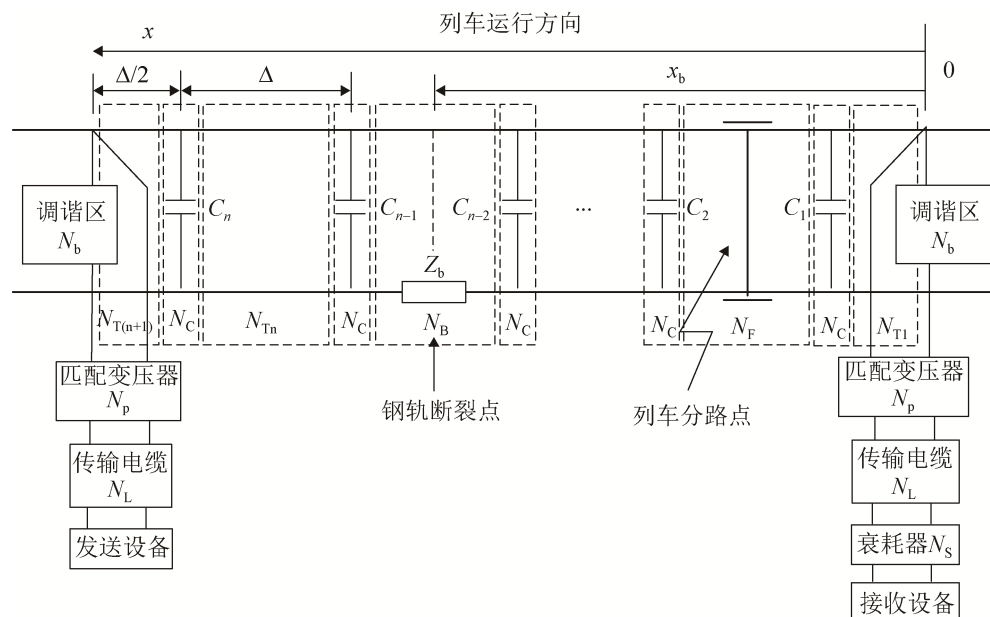


图 1 钢轨断裂时列车分路结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of shunting-state at rail steel fracture

钢轨断裂状态下,因轨条未完全断裂仍存在电气连接,可将钢轨断裂点视为等效阻抗 Z_b , 其值大小与钢轨特性阻抗 Z_B 相关^[3], 本文模型中设 Z_b 与 Z_B 间为线性映射。当 $Z_b=0$ 时, 轨道电路处于调整态; 当 $Z_b=\infty$ 时, 轨道电路处于断轨态。当 $Z_b \in (0, \infty)$ 时, 轨道电路工作在断裂态, 即钢轨在距离接收端 x_b 处出现折断。

列车迎着发送端驶入轨道电路, 列车轮对使轨道电路分路并可等效为在钢轨上并接一个分路电阻 $R_f^{[10]}$, 则由文献[11]可知 $I_f(t, x)$ 的模, 即分路电流幅值函数表达式如式(1)所示:

$$|I_f(t, x)| = \frac{|U_s(t)|}{|F_{11}(x) \times R_f + F_{12}(x)|} \quad (1)$$

其中: $U_s(t)$ 为发送端的输出电压, $F_{11}(x)$ 和 $F_{12}(x)$ 是发送设备与分路电阻间的传输四端网 F 的两个参数, 由图 1 并根据均匀传输线理论, 四端网 F 的表达式如式(2)所示:

$$F = \begin{bmatrix} F_{11}(x) & F_{12}(x) \\ F_{21}(x) & F_{22}(x) \end{bmatrix} = N_L \times N_P \times N_b \times N_T(x) \quad (2)$$

式中: $N_T(x)$ 表示列车分路点 x 到发送端之间的轨道四端网。 $N_T(x)$ 如式(3)所示, 式中 $N_F(x)$ 表示分路点 x 至临近分路点靠近发送端一侧的补偿电容 $C_k (k=1, 2, \dots, n)$ 间的轨道四端网。

$$N_T(x) = N_{T/2} \times N_C \times N_T \times N_C \times N_B \times N_C \times \dots \times N_C \times N_F(x) \quad (3)$$

另外, 当列车进入断裂点单元时分路点 x 至分路点补偿电容 C_k 间的轨道四端网用 $N_{BF}(x)$ 表示, 此时 $N_T(x)$ 如式(4)所示。

$$N_T(x) = N_{T/2} \times N_C \times N_T \times N_C \times \dots \times N_C \times N_{BF}(x) \quad (4)$$

因此, 本文需先求出各状态单元 N_{Ti} 、 N_B 、 $N_F(x)$ 和 $N_{BF}(x)$ 的四端网系数表达式, 以此求解出上述两种状态下轨道四端网 $N_T(x)$ 的系数表达式, 然后代入式(2)求出发送设备与分路电阻间的传输四端网 F , 再代入式(1)中, 求得最终的分路电流幅值函数的表达式。

1.2 轨道四端网求解

如图 1 所示, 本文中将主轨道区段以补偿电容

为界分成不同的轨道电路状态单元, 因此各轨道电路状态单元可用基本轨道电路模型求得其四端网系数表达式。文献[3]中提供了基本轨道电路在调整态和分路态的四端网系数表达式, 可将其引用为本文调整状态单元和分路状态单元, 在此不再赘述。因此, 本文主要求解断裂态轨道电路单元 N_B 和同时断裂并分路部分 $N_{BF}(x)$ 单元的四端网系数表达式。

当钢轨出现断裂时, 断裂点所在轨道电路单元 N_B 工作在断裂态。如图 2 所示是断裂态单元的等效电路图。

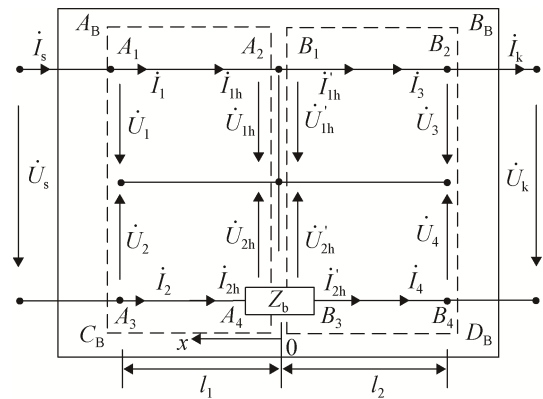


图 2 断裂态单元等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of fracture-state unit

图 2 中, $\dot{U}_s$ 和 $\dot{I}_s$ 表示该单元的送端电压(V)、电流(A); $\dot{U}_k$ 和 $\dot{I}_k$ 表示其受端电压(V)和电流(A); $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_2$ 和 $\dot{U}_3$ 、 $\dot{U}_4$ 表示各单元送、受端 2 根钢轨的对地电压(V); $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$ 和 $\dot{I}_3$ 、 $\dot{I}_4$ 表示送、受端 2 根钢轨上流过的电流(A); 此时, 需将模型以断裂点为界分为两部分, $\dot{U}_{1h}$ 、 $\dot{U}_{2h}$ 、 $\dot{U}'_{1h}$ 和 $\dot{U}'_{2h}$ 表示断裂点前后的钢轨对地电压(V), $\dot{I}_{1h}$ 、 $\dot{I}_{2h}$ 、 $\dot{I}'_{1h}$ 和 $\dot{I}'_{2h}$ 表示断裂点前后 2 根钢轨上的电流(A)。 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 为断裂点与始端之间的轨道电路积分常数; B_1 、 B_2 、 B_3 和 B_4 表示断裂点与终端之间的积分常数。 A_B 、 B_B 、 C_B 和 D_B 为轨道电路单元的四端口网络系数。设以钢轨断裂点为坐标原点, 断裂点到始端距离为 $l_1(m)$, 断裂点到终端距离为 $l_2(m)$, 整个断裂单元的长度为 $l(m)$, 即 $l = l_1 + l_2$ 。若钢轨线路在距离接收端 x_b 处的第 m 个单元内断裂, 则 m 可

表示为:

$$m = \left\lfloor \frac{x_b + 3\Delta/2}{\Delta} \right\rfloor \quad (5)$$

式中: $[x]$ 为取整函数, 则 $l_1 = \Delta \cdot m - \Delta/2 - x_b$,

$$l_2 = x_b - \Delta \cdot m + 3\Delta/2。$$

由传输线理论可知 $\dot{U}_s$ 、 $\dot{I}_s$ 、 $\dot{U}_k$ 和 $\dot{I}_k$ 之间满足传输方程, 见式(6):

$$\begin{cases} \dot{U}_s = A \cdot \dot{U}_k + B \cdot \dot{I}_k \\ \dot{I}_s = C \cdot \dot{U}_k + D \cdot \dot{I}_k \end{cases} \quad (6)$$

根据文献[4], 基本轨道电路的钢轨四端网系数的基本方程式如式(7)所示。式中 $\dot{U}_{1x}$ 、 $\dot{U}_{2x}$ 表示钢轨线路上任意点的对地电压(V)、 $\dot{I}_{1x}$ 、 $\dot{I}_{2x}$ 表示两根钢轨上流过的电流(A); A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 为四个积分常数, 其值为待定参数, 由轨道电路的边界条件来确定。

$$\begin{cases} \dot{U}_{1x} = A_1 \text{ch} \gamma_1 x + A_2 \text{sh} \gamma_1 x + A_3 \text{ch} \gamma_2 x + A_4 \text{sh} \gamma_2 x \\ \dot{U}_{2x} = A_1 \text{ch} \gamma_1 x + A_2 \text{sh} \gamma_1 x - A_3 \text{ch} \gamma_2 x - A_4 \text{sh} \gamma_2 x \\ \dot{I}_{1x} = (1/Z_{B1}) \cdot (A_1 \text{sh} \gamma_1 x + A_2 \text{ch} \gamma_1 x) + (1/Z_{B2}) \cdot (A_3 \text{sh} \gamma_2 x + A_4 \text{ch} \gamma_2 x) \\ \dot{I}_{2x} = (1/Z_{B1}) \cdot (A_1 \text{sh} \gamma_1 x + A_2 \text{ch} \gamma_1 x) - (1/Z_{B2}) \cdot (A_3 \text{sh} \gamma_2 x + A_4 \text{ch} \gamma_2 x) \end{cases} \quad (7)$$

式中: Z_{B1} 为对称钢轨线路的钢轨与大地间的特性阻抗, $Z_{B1} = EZ_B \sqrt{1+2P}/2$, E 为大地电阻常数, P 为钢轨的表面电导系数; Z_{B2} 为对称钢轨的相线电路的特性阻抗, $Z_{B2} = Z_B/2$; Z_B 为对称钢轨线路的特性阻抗; γ_1 为钢轨线路的地线传播常数, $\gamma_1 = E\gamma \sqrt{1+2P}$; γ_2 为钢轨线路的相线传播常数, $\gamma_2 = \gamma$; γ 为钢轨线路传播常数; Z_B 与 γ 称为轨道电路的二次参数: $Z_B = \sqrt{Z_g \cdot R_d}$, $\gamma = \sqrt{Z_g/R_d}$, Z_g 为钢轨阻抗, R_d 为道砟电阻, Z_g 和 R_d 为轨道电路的一次参数^[3-4]。

本文模型将轨道电路以断裂点为界分为两段, 因此一共有八个积分常数, 且积分常数 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 B_1 、 B_2 、 B_3 和 B_4 由如下边界条件确定:

条件 1: 当 $x=0$ 时, 有:

$$\dot{U}_{1h} = \dot{U}'_{1h}, \quad \dot{U}_{2h} = \dot{U}'_{2h},$$

$$\dot{I}_{2h} = \dot{I}'_{2h} = (1/Z_b) \cdot (\dot{U}_{2h} - \dot{U}'_{2h})。$$

条件 2: 当 $x=l_1$ 时, 有: $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2$

条件 3: 当 $x=-l_2$ 时, 有:

$$\dot{I}_3 = -\dot{I}_4, \quad \dot{U}_k = \dot{U}_3 - \dot{U}_4, \quad 2\dot{I}_k = \dot{I}_3 - \dot{I}_4。$$

将式(7)代入这三个边界条件中, 经计算化简得到方程, 见式(8):

$$\begin{cases} A_2/Z_{B1} - A_4/Z_{B2} = (1/Z_b) \cdot (A_1 - A_3 - B_1 + B_3) \\ A_2/Z_{B1} - A_4/Z_{B2} = B_2/Z_{B1} - B_4/Z_{B2} \\ A_2/Z_{B1} + A_4/Z_{B2} = B_2/Z_{B1} + B_4/Z_{B2} \\ A_1 + A_3 = B_1 + B_3 \\ A_1 \text{sh} \gamma_1 l_1 + A_2 \text{ch} \gamma_1 l_1 = 0 \\ B_2 \text{sh} \gamma_1 l_2 - B_1 \text{ch} \gamma_1 l_2 = 0 \\ \dot{U}_k = 2B_3 \text{ch} \gamma_2 l_2 - 2B_4 \text{sh} \gamma_2 l_2 \\ \dot{I}_k = (1/Z_{B2}) \cdot (B_4 \text{ch} \gamma_2 l_2 - B_3 \text{sh} \gamma_2 l_2) \end{cases} \quad (8)$$

根据式(8)可求得积分常数 $A_1 \sim A_4$ 和 $B_1 \sim B_4$, 即:

$$\begin{cases} A_1 = \frac{-Z_{B1} Z_b \cdot \text{cth} \gamma_1 l_1 \cdot (\frac{1}{2} U_k \cdot \text{sh} \gamma_2 l_2 + Z_{B2} \cdot \text{ch} \gamma_2 l_2 \cdot I_k)}{2Z_{B1} Z_{B2} \cdot p + Z_{B2} Z_b} \\ A_2 = \frac{Z_{B1} Z_b \cdot (\frac{1}{2} U_k \cdot \text{sh} \gamma_2 l_2 + Z_{B2} \cdot \text{ch} \gamma_2 l_2 \cdot I_k)}{2Z_{B1} Z_{B2} \cdot p + Z_{B2} Z_b} \\ A_3 = (\frac{Z_{B1} Z_b \cdot \text{sh} \gamma_2 l_2}{4Z_{B1} Z_{B2} + 2Z_{B2} Z_b / p} + \frac{1}{2} \text{ch} \gamma_2 l_2) U_k + (\frac{Z_{B1} Z_b \cdot \text{ch} \gamma_2 l_2}{2Z_{B1} + Z_b / p} + Z_{B2} \cdot \text{sh} \gamma_2 l_2) I_k \\ A_4 = \frac{1}{2} U_k \cdot \text{sh} \gamma_2 l_2 + Z_{B2} \cdot \text{ch} \gamma_2 l_2 \cdot I_k \\ B_1 = \frac{Z_{B1} Z_b \cdot \text{cth} \gamma_1 l_2 \cdot (\frac{1}{2} U_k \cdot \text{sh} \gamma_2 l_2 + Z_{B2} \cdot \text{ch} \gamma_2 l_2 \cdot I_k)}{2Z_{B1} Z_{B2} \cdot p + Z_{B2} Z_b} \\ B_2 = A_2 = \frac{Z_{B1} Z_b \cdot (\frac{1}{2} U_k \cdot \text{sh} \gamma_2 l_2 + Z_{B2} \cdot \text{ch} \gamma_2 l_2 \cdot I_k)}{2Z_{B1} Z_{B2} \cdot p + Z_{B2} Z_b} \\ B_3 = \frac{1}{2} U_k \cdot \text{ch} \gamma_2 l_2 + Z_{B2} \cdot \text{sh} \gamma_2 l_2 \cdot I_k \\ B_4 = A_4 = \frac{1}{2} U_k \cdot \text{sh} \gamma_2 l_2 + Z_{B2} \cdot \text{ch} \gamma_2 l_2 \cdot I_k \end{cases} \quad (9)$$

式中: $p = \text{cth} \gamma_1 l_2 + \text{cth} \gamma_1 l_1$ 。

且此时有式(10)成立:

$$\begin{cases} U_s = 2A_3 \text{ch} \gamma_2 l_1 + 2A_4 \text{sh} \gamma_2 l_1 \\ I_s = 1/(2Z_{B2}) \cdot (A_3 \text{sh} \gamma_2 l_1 + A_4 \text{ch} \gamma_2 l_1) \end{cases} \quad (10)$$

将 A_3 和 A_4 代入式(10)化简可求得此轨道电路单元的轨道四端网系数 $A_B \sim D_B$, 即:

$$\begin{cases} A_B = \frac{Z_{B1} \cdot Z_b \cdot \text{sh}\gamma_2 l_2 \cdot \text{ch}\gamma_2 l_1}{2Z_{B1}Z_{B2} + Z_{B2}Z_b / p} + \text{ch}\gamma_2 l \\ B_B = \frac{2Z_{B1} \cdot Z_b \cdot \text{ch}\gamma_2 l_2 \cdot \text{ch}\gamma_2 l_1}{2Z_{B1} + Z_b / p} + 2Z_{B2} \cdot \text{sh}\gamma_2 l \\ C_B = \frac{1}{2Z_{B2}} \cdot \left(\frac{Z_{B1} \cdot Z_b \cdot \text{sh}\gamma_2 l_2 \cdot \text{sh}\gamma_2 l_1}{2Z_{B1}Z_{B2} + Z_{B2}Z_b / p} + \text{sh}\gamma_2 l \right) \\ D_B = \frac{Z_{B1} \cdot Z_b \cdot \text{ch}\gamma_2 l_2 \cdot \text{sh}\gamma_2 l_1}{2Z_{B1}Z_{B2} + Z_b Z_{B2} / p} + \text{ch}\gamma_2 l \end{cases} \quad (11)$$

当列车分路点在钢轨断裂点所在单元,且未越过断裂点时的轨道电路等效电路图见图3。图3中以断裂点和分路点为界将整个轨道电路单元分为三个部分, $\dot{U}_f$ 和 $\dot{I}_f$ 表示分路点前的电压(V)和电流(A), Z_f 表示分路点的等效阻抗, $\dot{U}_{1f}$ 和 $\dot{U}_{2f}$ 为分路点前的对地电压, $\dot{I}_{1f}$ 和 $\dot{I}_{2f}$ 为分路点前两条钢轨上流过的电流, A_{BF} 、 B_{BF} 、 C_{BF} 和 D_{BF} 为此状态单元的轨道四端网系数。由于本文只需求分路点前电流与送端电压的关系,所以只需计算分路点之前的轨道四端网系数,因此仍按断裂态单元的分割方法设置八个积分常数即可求解出分路点之前的轨道四端网系数 $A_{BF} \sim D_{BF}$ 。 l_1 为该轨道电路单元始端到断裂点的距离(m), l_2 表示断裂点到分路点的距离(m), l 表示分路点到该单元始端的距离(m)。此时可以计算得出 $l_1 = \Delta \cdot m - \Delta / 2 - x_b$, $l_2 = x_b - x$, $l = l_1 + l_2$ 。

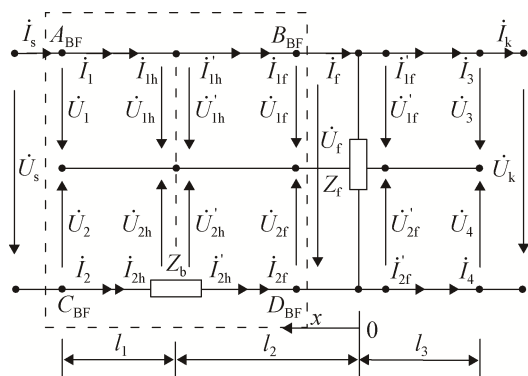


图3 分路且断裂状态单元等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of fracture and shunting state unit

由文献[3]可知:轨道电路在调整态轨道四端网系数表达式和分路态时分路点至送端的轨道四端网系数表达式除长度变量不同外,其余系数与函数都相同,同理可知在断裂点与分路点在同一轨道

电路单元的条件下轨道四端网 $N_{BF}(x)$ 的系数表达式与断裂单元 N_B 的轨道四端网系数表达式也是相同的,均为 l_1 、 l_2 和 l 的函数。将此状态下的三个变量代入 N_B 的四端网系数表达式中即可求得 $N_{BF}(x)$ 的四端网系数。

当列车越过断裂点以后,此时接收到的分路电流和电压不再受断裂点等效阻抗的影响,此时,轨道电路进入正常分路状态。由此,整个轨道电路在列车分路条件下的断裂态四端网系数表达式已全部求出,列车分路点到发送端的轨道四端网 $N_T(x)$ 就是各状态四端网单元与补偿电容单元按空间顺序进行级联。因此根据 1.1 节的建模思路便可建立列车分路条件下的 ZPW-2000A 轨道电路断裂态四端网模型,以此可求出在此状态下的分路电流幅值函数。

2 仿真分析

根据 ZPW-2000A 无绝缘轨道电路的基本电气参数^[4], 本文将仿真条件设置为:轨道电路长度 1 600 m; 补偿间距 Δ 为 100 m; 信号载频 2 000 Hz; $|U_s(t)| = 159$ V; 分路电阻 $R_f = 0.15$ Ω ; 补偿电容 16 个, 容值均为 50 μ F; 与轨道电路有关的参数取值^[3-4]: $Z_g = 14.75 \angle 82.3^\circ$ Ω / km , $R_d = 1.0$ $\Omega \cdot \text{km}$, $E = 1$, $P = 9$ 。若无特殊说明本文一般取断裂点等效阻抗为 $Z_b = 0.5Z_B$, 断裂点位置为 775 m。

图4为钢轨在不同位置断裂时,机车分路电流幅值包络曲线的仿真结果,断裂点位置选取 375 m、775 m 和 1 200 m。

由图4可知,在正常情况下,分路电流幅值包络在补偿电容的补偿作用下从接收端到发送端呈现“波浪”式递增,每个极小值点都和补偿电容的位置相对应,且在两补偿电容间的曲线并无突变点;两补偿电容间钢轨出现断裂后,对断裂点前的分路电流幅值包络曲线影响较大,主要表现为幅值下降且“波峰”和“波谷”变化不明显,这主要是因为钢轨的断裂影响了补偿电容的补偿效果;对断裂点之后的曲线影响较小,曲线的轮廓和正常状态

相同但幅值略有增大, 这是由断裂点后的电压突变引起的; 不论在何处断裂曲线一定存在突变点; 同时断裂点的位置离发送端越近断裂点前后的分路电流幅值包络曲线的变化越明显, 这是由于越靠近发送端, 接收到的电压越大。

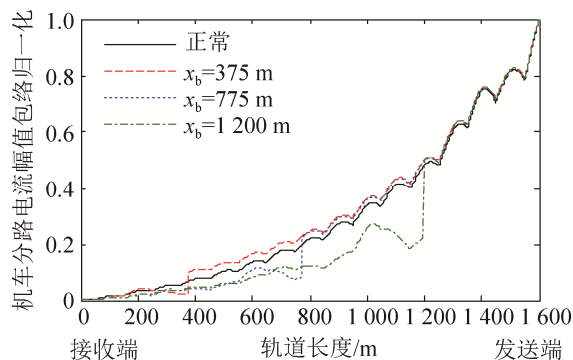
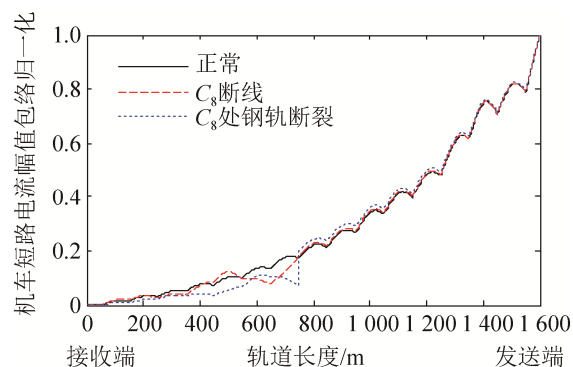


图4 不同断裂点位置下的仿真结果

Fig. 4 Simulation results figure under different fracture fault point locations

同时, 补偿电容断线也是轨道电路常见的故障之一, 为区分补偿电容断线和补偿电容位置处钢轨断裂的不同, 选取补偿电容 C_8 断线和在 C_8 处(750 m)钢轨断裂进行仿真实验, 仿真结果如图5所示。

图5 C_8 断线和 C_8 处钢轨断裂下的仿真结果Fig. 5 Simulation results figure under C_8 disconnection and fracture fault point on C_8

从图5中可以看出, 补偿电容 C_8 断线和在 C_8 处钢轨断裂的情况都对故障点前的分路电流幅值包络曲线的影响较大, 对故障点后的曲线影响较小; 同时 C_8 断线与在 C_8 处钢轨断裂的幅值包络曲线变化明显不同, C_8 断线会造成短路电流幅值包络在该处原有的“波谷”消失, 这是因为补偿电容

的补偿作用失效了, 而 C_8 处钢轨断裂一定存在突变点。因此, 本文模型可以很好地区分这两种类型的故障。

道砟电阻是轨道电路的一次参数, 其值波动也会对分路电流幅值包络产生明显影响^[12]。图6为其他参数确定的情况下, 分路电流幅值包络曲线随道砟电阻变化时的仿真结果。从图6中可看出断裂点前的分路电流幅值包络曲线随道砟电阻增大而衰减, 断裂点之后的曲线随道砟电阻值的增大而增大。因此道砟电阻值越大使得断裂点前后的幅值包络曲线的变化越明显。

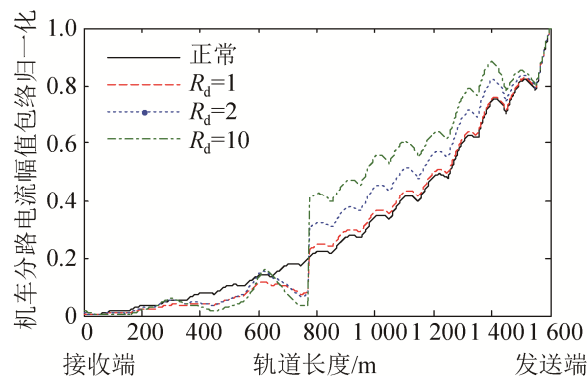


图6 不同道砟电阻值下仿真结果

Fig. 6 Simulation results figure under different ballast resistances

本文模型中将钢轨断裂点等效成阻抗 Z_b , Z_b 的大小将会影响分路电流幅值包络曲线的变化情况。如图7所示是其他参数确定时, 不同 Z_b 取值下分路电流幅值包络曲线的仿真结果。

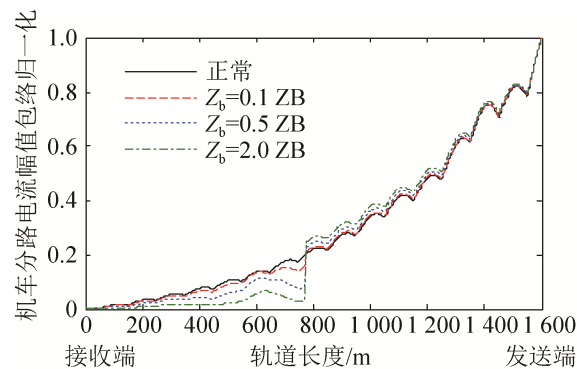


图7 不同断裂点等效阻抗值下仿真结果

Fig. 7 Simulation results figure under different equivalent impedances of fracture

由图7可知,等效阻抗 Z_b 越大,断裂点前的分路电流幅值包络曲线衰减越大,而断裂点后的曲线会略有增大。因此 Z_b 越大,断裂点前后的幅值包络曲线的变化越明显。

从图4~7可以看出,钢轨断裂对短路电流幅值包络曲线的影响主要在断裂点之前,且主要的影响因素包括道砟电阻、断裂点位置和断裂点等效阻抗的大小。同时,无论影响因素如何变化,在钢轨断裂点处短路电流幅值包络曲线均会发生不同程度的突变。

3 模型验证

由于现存的实验条件所限,对符合本文模型的实际数据难以获得,使得本文暂不能通过实际数据验证本文模型的正确性,因此只能以现有文献研究中已经被验证的模型间接验证本文模型的合理性。而由上文的分析可知,目前的对轨道电路断裂态的较少,也无法直接证明本文模型正确。但通过分析可知:当 $Z_b=0$ 时,轨道电路正常分路;而当 $Z_b=\infty$ 时,即钢轨完全折断,轨道电路处于断轨态。而目前对于轨道电路分路态和断轨态的研究已经很成熟,文献[3]给出了基本轨道电路在分路态和断轨态的四端网模型的系数表达式,根据本文思路可以建立ZPW-2000A轨道电路正常分路和断轨态模型,以此可以间接验证本文模型的正确性。

依据以上思路,将本文模型的分路状态单元 $N_F(x)$ 和断裂状态单元 N_B 替换成文献[3]中给出的基本轨道电路的分路态和断轨态四端网系数,进行仿真实验,同本文模型的 $Z_b=0$ 、 $Z_b=\infty$ 进行仿真对比,仿真结果如图8所示。由图8可知,本文建立的模型在 $Z_b=0$ 和文献[3]正常状态的仿真结果完全重合, $Z_b=\infty$ 与文献[3]断轨状态的仿真结果完全重合。由理论分析可知, $Z_b=0$ (轨道电路在分路状态),分路电流幅值包络将不受影响; $Z_b=\infty$ (轨道电路在断轨态)时,电流通过地与两条钢轨构成回路,此时仍可以接收到微弱的电流信号。因此,从仿真结果和理论分析可以间接验证本文模型的

正确性。

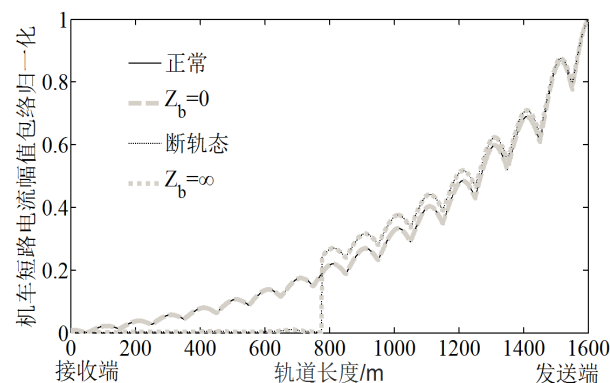


图8 $Z_b=0$ 和 $Z_b=\infty$ 时的仿真结果

Fig. 8 Simulation results figure at $Z_b=0$ and $Z_b=\infty$

4 结论

本文利用分布参数模型法,建立了在列车分路条件下ZPW-2000A轨道电路断裂态等效数学模型,以此求得机车分路电流幅值函数。并仿真分析了道砟电阻、断裂点位置及断裂点等效阻抗对分路电流幅值包络曲线的影响。道砟电阻、断裂点位置和断裂点等效阻抗是影响钢轨断裂后机车分路电流幅值包络曲线的重要因素,这些因素使断裂点之前的曲线发生了不同程度的变形,但对于断裂点之后的曲线影响较小,这证明钢轨的断裂降低了断裂点之前电容的补偿效果。且在不同道砟电阻、不同断裂点位置或不同断裂点等效阻抗条件下,分路电流幅值包络曲线在断裂点位置定会出现突变,该结果为钢轨断裂的检测提供了新的思路和理论依据。同时有别于补偿电容的断线故障,钢轨断裂时曲线会在断裂点出现间断,证明本文模型可以区分补偿电容断线和在补偿电容处钢轨断裂这两类容易混淆的故障。在未来的工作中,可以通过某种检测方法获得突变点的坐标,进而确定钢轨断裂的准确位置,从而为铁路运营和线路维护提供方便。

参考文献:

- [1] 毕延帅. 高速铁路轨道电路断轨状态研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015: 25-28.
Bi Yanshuai. Study of high-speed railway track circuit in the broken rail state[D]. Beijing: Beijing Jiaotong

- University, 2015: 25-28.
- [2] 史宏章, 任远, 张友鹏, 等. 国内外断轨检测技术发展的现状与研究[J]. 铁道运营技术, 2010, 16(4): 1-3.
Shi Hongzhang, Ren Yuan, Zhang Youpeng, et al. Domestic and foreign research status of rail breaking detection technology[J]. Railway Operation Technology, 2010, 16(4): 1-3.
- [3] 阿·米·布列也夫. 轨道电路分析与综合[M]. 孙名甫, 译. 北京: 中国铁道出版社, 1981: 90-100.
A M B. Track circuit analysis and synthesis[M]. SUN Mingfu, trans. Beijing: China Railway Publishing House, 1981: 90-100.
- [4] 张友鹏, 刘鹏鹏, 赵斌, 等. ZPW-2000A 轨道电路断轨态分析[J]. 控制工程, 2014, 21(5): 695-699.
Zhang Youpeng, Liu Kunpeng, Zhao Bin, et al. Study on broken rail operation of ZPW-2000A track circuit[J]. Control Engineering of China, 2014, 21(5): 695-699.
- [5] A G Kostyrychev, C L Davis, C Roberts. Detection of crack growth in rail steel using acoustic emission[J]. Iron making and Steelmaking (S0301-9233), 2013, 40(2): 98-102.
- [6] Laura Montalban Domingo, Beatriz Baydal Giner, Clara Zamorano Martin, et al. Experimental modal analysis of transverse-cracked rails-influence of the cracks on the real track behavior[J]. Structural Engineering and Mechanics (S1225-4568), 2014, 52(5): 1019-1032.
- [7] 赵斌. 基于轨道电路行波的钢轨断裂检测理论与仿真[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016: 15-16.
Zhao Bin. Theory and Simulation of Fracture Rail Detection Based on Track circuit Traveling Waves[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016: 15-16.
- [8] 赵会兵, 章宇舟, 汪希时. 电容补偿式轨道电路若干问题的研究[J]. 铁道学报, 1998, 20(4): 1-5.
Zhao Huibing, Zhang Yuzhou, Wang Xishi. Study on some problems of track circuit with compensation capacitors[J]. Journal of the China Railway Society, 1998, 20(4): 1-5.
- [9] 魏蕾. 轨道电路调整态暂态分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015: 1-5.
Wei Lei. Transient Analysis of Track Circuit in the Adjusting State[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015: 1-5.
- [10] 董昱. 区间信号与列车运行控制系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008: 90-125.
Dong Yu. Interval signal and train operation control system[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2008: 90-125.
- [11] 赵林海, 蔡伯根, 邱宽民, 等. 基于 HHT-DBWT 的无绝缘轨道电路补偿电容故障诊断[J]. 铁道学报, 2011, 33(3): 49-54.
Zhao Linhai, Cai Bogen, Qiu Kuanmin, et al. The method of diagnosis of compensation capacitor failures with jointless track circuits based on HHT and DBWT [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(3): 49-54.
- [12] 赵林海, 冉义奎, 穆建成. 基于遗传算法的无绝缘轨道电路故障综合诊断方法[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(3): 107-114.
Zhao Linhai, Ran Yikui, Mu Jiancheng. A comprehensive fault Diagnosis method for jointless track circuit based on genetic algorithm[J]. China Railway Science, 2010, 31(3): 107-114.