

DOI: 10.13382/j.jemi.B2206166

一种无绝缘轨道电路道砟电阻估算方法*

张永贤 黄盛科

(华东交通大学电气与自动化工程学院 南昌 330013)

摘要:针对无绝缘轨道电路中道砟电阻易受工作环境影响以及现场测量困难的问题,提出一种道砟电阻估算方法。首先根据二端口网络理论,构建调整状态下轨道电路传输模型,仿真分析道砟电阻和补偿电容对轨道电路各设备两端电压、电流的影响规律;其次基于现场微机监测数据,计算轨道电路各设备两端电压、电流仿真值与监测值之间的误差;最后利用粒子群优化算法,将轨道电路传输模型和误差值作为算法适应函数和适应值估算道砟电阻,并对结果进行性能验证。实验结果表明该方法的估算结果在验证中平均绝对百分比误差(MAPE)为14.31%,计算精度相比轨入电压法较优,从而验证所提道砟电阻估算方法的有效性和可行性。

关键词:无绝缘轨道电路;道砟电阻;微机监测;粒子群优化算法

中图分类号: U284.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.3

Method for ballast resistance estimation in jointless track circuit

Zhang Yongxian Huang Shengke

(College of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Aiming at the problems that the ballast resistance in the jointless track circuit is easily affected by the working environment and the implementation of field measurement is difficult, the ballast resistance estimation method is proposed. Firstly, according to the two-port network theory, the transmission model of the jointless track circuit under the adjustment state is constructed, and the influence law of ballast resistance and compensation capacitance on the voltage and current value at each end of the track circuit equipment is analyzed by simulation. Secondly, based on field microcomputer monitoring data, the error between the simulated value and the measured value of the voltage and current at each end of the track circuit equipment is calculated. Finally, the particle swarm optimization algorithm is used to estimate ballast resistance value by regarding the track circuit transmission model and the error value as the adaptation function and the algorithm adaptation value respectively. And the results are used for performance verification. The experimental results show that the estimated result of this method is verified and the mean absolute percentage error (MAPE) reaches 14.31%. Thus, the calculation accuracy of this method is better than that of the rail entry voltage method, which verifies the validity and feasibility of this method.

Keywords: jointless track circuit; ballast resistance; microcomputer monitoring; particle swarm optimization algorithm

0 引言

轨道电路作为保障我国铁路运输安全和运输效率的基础设备,具备列车占用情况检测、完整性检查、向列车传输行车信息等功能,为列车的安全、高速运行提供重要

保障。经过调研发现,道砟电阻是影响无绝缘轨道电路信号传输质量的重要因素^[1]。由于现场工作环境复杂,特别是在室外降雨量较大或道床潮湿时,会导致道砟电阻值下降、漏泄电流上升和轨道电路占用情况不能正常显示,出现“红光带”故障,严重影响铁路的运输效率^[2]。反之,道床环境的变化也会导致道砟电阻值上升,使轨道

电路分路残压衰减程度不足,出现“分路不良”情况。

目前,无绝缘轨道电路道砟电阻的测量方法主要有无补偿式和带补偿式。无补偿式方法主要有开路短路法、终端开路电压法和始端开路短路电压法、三阻抗法以及开路短路三电压表法^[3],但是这些方法不适用于带补偿电容的无绝缘轨道电路,且需要在铁路现场进行测量才能完成,工作量大,在繁忙线路上实施困难。带补偿式方法主要为轨入电压法^[4],该方法利用微机监测系统^[5],并根据轨道电路轨入电压和道岔电阻之间的关系来计算道砟电阻。由于除轨入电压外,道砟电阻变化还会影响轨道电路所有设备两端电压、电流值,因此可利用多个设备端电压、电流值进行道砟电阻计算,从而提高计算结果的准确性。

针对上述问题,本文以 ZPW 型无绝缘轨道电路为研究对象,通过分析道砟电阻和补偿电容对轨道电路各设备端电压、电流值的影响规律,比较模型仿真值和微机监测值并结合粒子群优化算法,从数据的角度来实现道砟电阻的估算。

1 无绝缘轨道电路室内外设备端电压电流计算模型

1.1 无绝缘轨道电路传输模型

ZPW 型无绝缘轨道电路由室内设备和室外设备组成。其中,室内设备主要包括模拟电缆、衰耗器、接收器和发送器等,室外设备主要包括数字电缆、调谐区设备、匹配变压器、补偿电容和钢轨等^[6]。此外,钢轨和补偿电容构成主轨道区段。因此,根据二端口网络理论^[7]和传输线理论^[8],可构建无绝缘轨道电路调整状态下的传输模型,如图 1 所示。

图 1 中,为下文叙述方便,将电压、电流统一为符号 P ,用序号区分不同信号。其中 P_1 为接收器接入电压, P_2 和 P_3 分别为接收防雷模拟网络盘电缆侧电压和电流, P_4 为受端 BP 电缆侧电流, P_5 和 P_6 分别为受端轨面电流和送端轨面电流, P_7 为送端 BP 电缆侧电流, P_8 和 P_9 分别为发送防雷模拟网络盘电缆侧电压和电流, P_{10} 和 P_{11} 分别为发送器功出电压和功出电流。根据二端口网络理论,可得无绝缘轨道电路传输矩阵,其表达式如式(1)所示。

$$N_{\text{total}} = N_{\text{sim}} N_{\text{fspt}} N_{\text{fbp}} N_{\text{ftx}} N_{\text{zgd}} N_{\text{jtx}} N_{\text{jbp}} N_{\text{jspt}} N_{\text{jsim}} \quad (1)$$

式中: N_{sim} 和 N_{jsim} 为模拟电缆网络的等效四端网络, N_{fspt} 和 N_{jspt} 为数字传输电缆的等效四端网络。根据均匀传输线理论,可利用传输电缆的一次参数 Z_{cab} 和 Y_{cab} ,计算得到传输电缆的传输矩阵^[9]。模拟电缆网络在轨道电路中的作用是补偿室外传输电缆,共同构成符合标准长度的传输线路。因此模拟电缆网络的传输矩阵可使用传输电

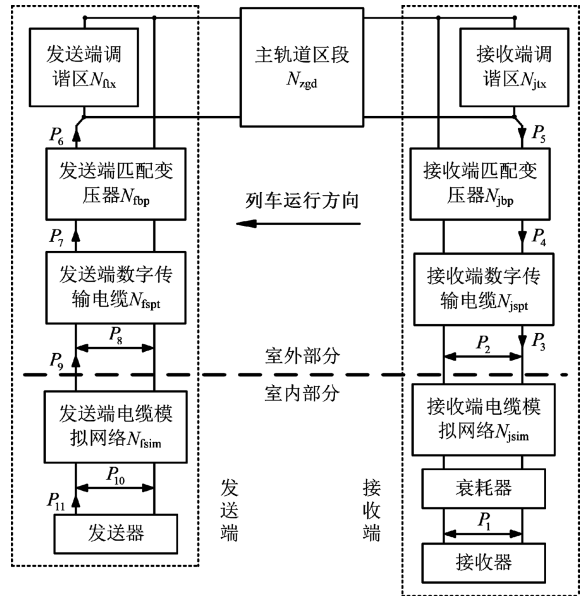


图 1 无绝缘轨道电路传输模型

Fig. 1 Jointless track circuit transmission model

缆的传输矩阵进行等效替代^[10]。

此外,式(1)中 N_{fbp} 和 N_{jbp} 为匹配变压器的等效四端网络,其表达式如式(2)所示。

$$N_{\text{fbp}} = \begin{bmatrix} K & j\omega L_{\text{bp}} \\ 0 & \frac{1}{K} \end{bmatrix}, N_{\text{jbp}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{K} & j\omega L_{\text{bp}} \\ 0 & K \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: K 为匹配变压器变压比, L_{bp} 为匹配变压器电感值^[11]。式(1)中, N_{ftx} 和 N_{jtx} 分别为发送端调谐区和接收端调谐区等效四端网络,可根据调谐区结构和二端口网络理论计算得到^[12]。

同时,式(1)中 N_{zgd} 为主轨道区段的等效四端网络,其等效模型如图 2 所示。

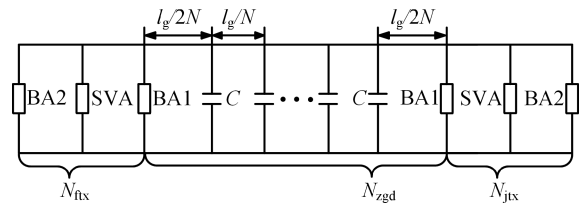


图 2 主轨道区段等效模型

Fig. 2 Main track section equivalent model

图 2 中, l_g 为轨道电路长度,也即钢轨长度, C 为补偿电容, N 为补偿电容个数,由此可知 N_{zgd} 的计算公式,如式(3)所示。

$$N_{\text{zgd}} = N_{\text{gg}} \left(\frac{l_g}{2N} \right) N_{\text{cb}} \left[N_{\text{gg}} \left(\frac{l_g}{N} \right) N_{\text{cb}} \right]^{N-1} N_{\text{gg}} \left(\frac{l_g}{2N} \right) \quad (3)$$

式中: N_{cb} 为单个补偿电容并接的等效四端网络, $N_{gg}(l)$ 为长度 l 的钢轨传输矩阵^[13]。根据均匀传输线理论,可根据钢轨一次参数钢轨电阻、钢轨电感、道砟电阻和钢轨漏泄电容,计算得到 $N_{gg}(l)$ 。

在构建各部分的二端口网络模型后,即可根据式(1)得到轨道电路传输模型,为后文室内外设备端电压、电流计算模型提供理论基础。

1.2 室内外设备端电压电流计算模型

在构建轨道电路传输模型的基础上,根据二端口网络理论,可计算得到室内外设备两端的电压、电流值,其计算模型如图3所示。

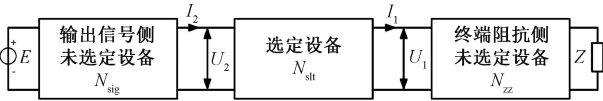


图3 室内外设备端电压电流计算模型

Fig. 3 Indoor and outdoor device port value calculation model

图3中, N_{sig} 为输出信号侧未选定设备的等效四端网络, N_{slr} 为选定设备的等效四端网络, N_{zz} 为终端阻抗侧未选定设备的等效四端网络, E 为发送器输出信号, Z 为终端阻抗。根据二端口网络理论,可计算得到终端阻抗侧选定设备端电压 U_1 和电流 I_1 ,如式(4)所示。

$$U_1 = \frac{Z_1}{N_{ss11}Z_1 + N_{ss12}}E, I_1 = \frac{1}{N_{ss11}Z_1 + N_{ss12}}E \quad (4)$$

式中: N_{ss} 为输出信号侧未选定设备传输矩阵 N_{sig} 与选定设备传输矩阵 N_{slr} 的级联, Z_1 为电压 U_1 两端的阻抗,其计算方法如式(5)所示^[14]。

$$\begin{cases} N_{ss} = \begin{bmatrix} N_{ss11} & N_{ss12} \\ N_{ss21} & N_{ss22} \end{bmatrix} = N_{sig}N_{slr} \\ Z_1 = \frac{N_{zz11}Z + N_{zz12}}{N_{zz21}Z + N_{zz22}} \end{cases} \quad (5)$$

同理,根据上述计算方法也可求得输出信号侧选定设备端电压 U_2 和电流 I_2 。因此,根据图1的无绝缘轨道电路传输模型,利用式(4)和(5)可依次分别求得轨道电路设备端电压、电流值 $P_1 \sim P_{11}$ 。

2 室内外设备端电压电流影响因素分析

2.1 道砟电阻对设备端电压电流值的影响规律

根据铁路的实际运营情况,取道砟电阻 R_d 的最小值为 $0.5 \Omega \cdot \text{km}$,且最小值只有在严重雨雪天气才会出现^[15]。此外,当 $R_d > 10 \Omega \cdot \text{km}$ 时,设备端电压、电流值变化幅度较小。因此,本文在仿真分析中 R_d 的取值范围为 $0.5 \sim 10 \Omega \cdot \text{km}$ 。

根据上述分析,在已知无绝缘轨道电路传输矩阵的

基础上,可利用二端口网络理论计算该轨道电路设备端电压、电流值。在本文中,根据轨道电路各部分电气参数,使用 Pycharm 软件和 Python 编程语言构建轨道电路的调整态四端网模型,可仿真计算室内外设备端电压、电流值。图4为道砟电阻 R_d 在取值范围内遍历时接收端各设备端电压、电流值 $P_1 \sim P_5$ 归一化的仿真结果,其他仿真条件为:轨道电路信号载频 $f_c = 2\ 300 \text{ Hz}$;轨道电路长度 $l_g = 773 \text{ m}$;补偿电容个数 $N = 12$;容值均为 $25 \mu\text{F}$ 。

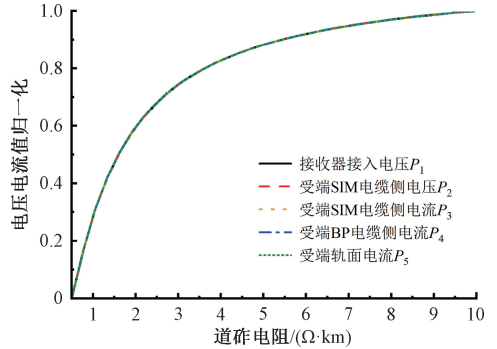


图4 道砟电阻对接收设备端电压电流值的影响

Fig. 4 Impact of ballast resistance on the terminal voltage and current value of receiving equipment

由图4可知, $P_1 \sim P_5$ 归一化的变化曲线完全重合,道砟电阻 R_d 对其影响规律基本相同。此外,随着 R_d 的增大,电压、电流值 $P_1 \sim P_5$ 整体呈上升趋势,其中 R_d 越小,其变化的趋势越明显, R_d 越大,其变化的趋势接近平稳。

基于图4的仿真条件,分析道砟电阻 R_d 与发送端各设备端电压、电流之间的影响规律,如图5所示。

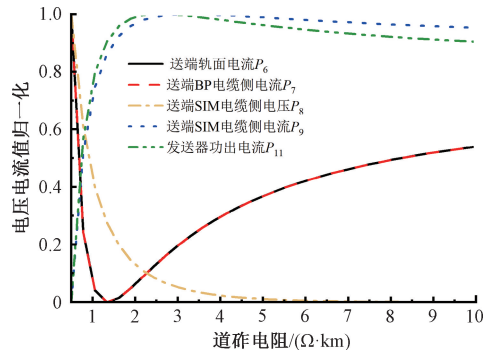


图5 道砟电阻对发送设备端电压电流值的影响

Fig. 5 Impact of ballast resistance on the terminal voltage and current value of sending equipment

由图5可知,电流值 P_6 和 P_7 归一化的变化曲线完全重合,电流值 P_8 和 P_{11} 归一化的变化曲线基本重合,道砟电阻 R_d 对 P_6 和 P_7 的影响规律基本相同,对 P_8 和 P_{11} 的影响规律相似度较高。随着 R_d 的增大,电流值 P_6 和 P_7

先减小后增大,且在 $R_d = 1.37 \Omega \cdot \text{km}$ 时达到最小值;电压值 P_8 呈指数趋势减小;电流值 P_9 和 P_{11} 先增大后减小,且在 $R_d \approx 3 \Omega \cdot \text{km}$ 时达到最大值。

2.2 补偿电容对设备端电压电流值的影响规律

根据图 4 和 5 的仿真结果,可知 R_d 对送端轨面电流 P_6 、受端轨面电流 P_5 、送端 SIM 电缆侧电压 P_8 和发送器功出电流 P_{11} 的影响规律四者之间相似度较低。因此选择上述 4 个设备端电压、电流值,仿真分析在补偿电容断线故障和容值正常状态下的规律变化。

基于图 4 的仿真条件,令式(3)中补偿电容的取值依次为 $0 \mu\text{F}$,仿真单个补偿电容 C_1 、 C_4 、 C_5 、 C_8 、 C_9 或 C_{12} 在断线故障状态下道砟电阻与 K_i 之间的影响规律,其中 K_i 表示送端轨面电流 P_6 与受端轨面电流 P_5 之间的比值,其仿真结果如图 6 所示。

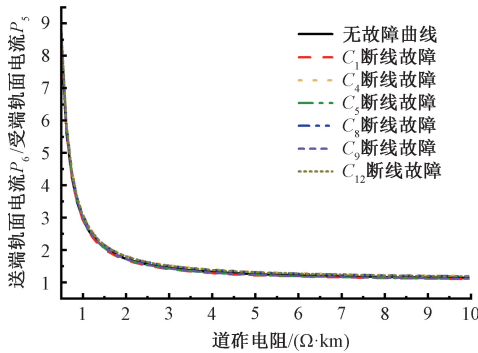


图 6 补偿电容断线故障和正常状态下道砟电阻对 K_1 的影响

Fig. 6 Impact of ballast resistance on K_1 under compensation of disconnection fault and normal capacity

由图 6 可知, K_1 随着道砟电阻 R_d 的增大呈下降趋势,且当 $R_d > 6 \Omega \cdot \text{km}$ 时基本趋于稳定。通过计算无故障仿真曲线和各故障仿真曲线间的平均绝对百分比误差 MAPE,可分析两曲线间的差异情况,其计算方法如式(6)所示^[16]。

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i - F_i}{A_i} \right| \quad (6)$$

式中: n 为曲线的离散点总数, A_i 和 F_i 分别为无故障仿真曲线和故障仿真曲线中各点所对应的电压、电流值。利用式(6),计算求得图 6 的仿真结果的 MAPE 最大值为 2.7%,可知补偿电容断线故障和正常状态下 R_d 对 K_1 的影响规律曲线基本重合。

基于图 4 和 6 的仿真条件,仿真分析单个补偿电容 C_2 、 C_6 或 C_{10} 断线故障状态下道砟电阻 R_d 对 P_8 的影响规律,其仿真结果如图 7 所示。

由图 7 可知,随着道砟电阻 R_d 的增大,电压值 P_8 呈下降趋势。此外,当单个补偿电容发生断线故障时, P_8

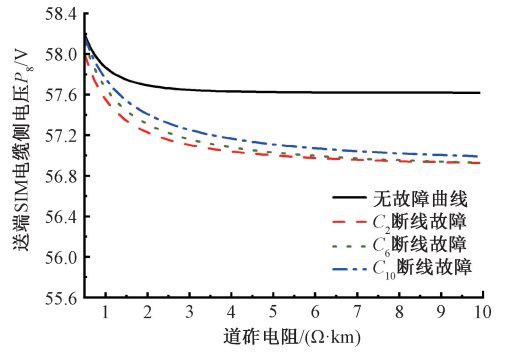


图 7 补偿电容断线故障和正常状态下道砟电阻对 P_8 的影响

Fig. 7 Impact of ballast resistance on P_8 under compensation of disconnection fault and normal capacity

的变化趋势整体下降,且与无故障数据相比最大误差约为 1.2%,MAPE 指标为 1.0%。

基于图 4 和 6 的仿真条件,仿真分析单个补偿电容 C_2 、 C_6 或 C_{10} 断线故障状态下道砟电阻 R_d 对 P_{11} 的影响规律,其仿真结果如图 8 所示。

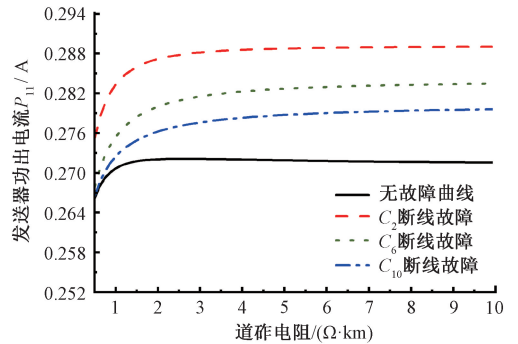


图 8 补偿电容断线故障和正常状态下道砟电阻对 P_{11} 的影响

Fig. 8 Impact of ballast resistance on P_{11} under compensation of disconnection fault and normal capacity

由图 8 可知,随着道砟电阻 R_d 的增大,电流值 P_{11} 整体呈上升趋势。此外,当单个补偿电容发生断线故障时, P_{11} 的变化趋势整体上升,且与无故障数据相比最大误差约为 6.4%,MAPE 指标为 5.9%。

3 基于粒子群优化算法的道砟电阻估算方法

3.1 设计思路

由以上分析可知,道砟电阻 R_d 对设备端值 $P_1 \sim P_{11}$ 的影响规律各有差异。其中,影响规律具有较高独立性且不易受补偿电容断线故障影响的电压、电流为送端轨

面电流 P_6 与受端轨面电流 P_5 的比值 K_i 以及发送端 SIM 电缆侧电压 P_8 。此外,在实际的铁路运营中,接收器端阻抗 Z_{rev} 需要根据线路情况进行人为调整。因此,基于室内外设备端电压、电流计算模型,可仿真计算比值 K_i 和电压 P_8 ,并利用微机监测设备测量 K_i 和 P_8 的现场实际值与仿真值进行对比分析,最终达到通过比值 K_i 和电压 P_8 估算道砟电阻的目的。

基于以上思路,结合某铁路信号公司开展的调研项目,本文使用粒子群优化算法,以 ZPW 型无绝缘轨道电路传输模型作为适应函数,并以仿真数据与实测数据之间的误差作为算法适应值,实现道砟电阻 R_d 的估算。

3.2 算法实现

粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 是一种对模拟鸟群的模型进行修正,以使粒子能够飞向解空间,并在最优解处降落的优化算法。PSO 初始化为随机解,通过迭代寻找最优解,并根据适应度评价解的品质^[17]。根据 PSO 的算法思路,把轨道电路传输模型 N_{total} 作为算法的适应函数,设置道砟电阻 R_d 和接收器端阻抗 Z_{rev} 为函数自变量,以 K_i 和 P_8 仿真数据与监测数据之间的误差 C 作为算法的适应值。令实测数据序列为 D_r , 仿真数据序列为 D_i , 具体如式 (7) 所示。

$$\begin{cases} D_r = (K_i, P_8) \\ D_i = (K'_i, P'_8) \end{cases} \quad (7)$$

已知两数据序列,可通过欧几里得度量公式计算仿真数据与实测数据之间误差大小,也即两数据序列的接近程度,如式 (8) 所示^[18]。

$$C = \sqrt{(K_i - K'_i)^2 + (P_8 - P'_8)^2} \quad (8)$$

此外,考虑到两变量的数量级不同,为避免某变量在误差计算中占据过大或过小的比重,在进行误差分析前需要对数据进行归一化预处理。

在 PSO 算法的实现过程中,首先设置自变量 R_d 和 Z_{rev} 的取值区间,使用随机函数在区间范围内的二维空间中生成 m 个粒子,其中粒子 i 的位置用 x_i 表示,其速度用 v_i 表示^[19]。其次对粒子进行迭代寻优,在每一次迭代中,粒子根据个体经过的历史最好位置和种群经过的历史最好位置来更新其位置和速度,如式 (9) 所示。

$$\begin{cases} v_{i+1} = \omega v_i + c_1 rand_1 (pbest_i - x_i) + c_2 rand_2 (gbest_i - x_i) \\ x_i = x_i + v_{i+1} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $pbest_i$ 为粒子经过的历史最好位置, $gbest_i$ 为种群经过的历史最好位置, ω 为惯性因子, c_1 和 c_2 为学习因子, $rand_1$ 和 $rand_2$ 为 $[0, 1]$ 的随机数^[20]。

最终,当粒子群的全局最优位置满足最小界限时结束算法迭代,根据粒子的分布情况,可估算出误差较小的

轨道电路传输模型所对应的道砟电阻 R_d 。

3.3 可行性分析

实测数据的获取是道砟电阻估算方法的重要环节。在铁路的实际运营中,可通过微机监测设备实时测量轨道电路室内外设备端电压、电流值。以某车站的 4 号区段为例,测量其送端轨面电流 P_6 和受端轨面电流 P_5 , 计算得到比值 K_i , 其变化趋势如图 9 所示。

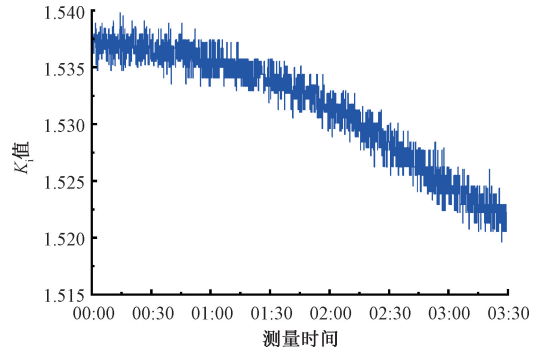


图9 现场实测值 K_i 趋势图

Fig. 9 Trend diagram of field measured value K_i

由图 9 可知,该区段轨道电路在凌晨 00:00~03:30 时段内,其 K_i 值呈下降趋势。根据图 6 的分析结果,可知此时段内轨道电路的道砟电阻值处于上升状态。

此外,通过适应函数自变量道砟电阻 R_d 和接收器端阻抗 Z_{rev} 在取值范围内的遍历,仿真计算对应的轨道电路模型误差,从而分析验证使用粒子群优化算法实现 R_d 估算的可行性,部分仿真结果如图 10 所示。

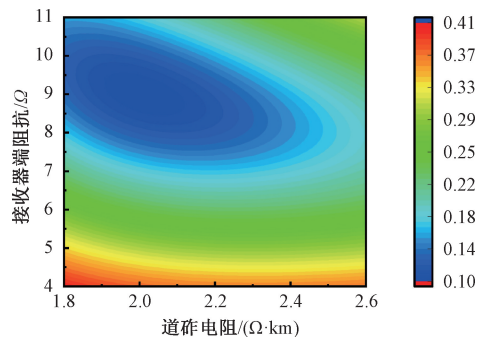


图10 模型误差分布图

Fig. 10 Model error distribution diagram

在图 10 中,横坐标表示 R_d , 纵坐标表示 Z_{rev} , 不同颜色的区域表示不同的轨道电路传输模型误差。其中,区域中的颜色越蓝,表示模型与实际轨道电路之间的误差越小,即构建的轨道电路传输模型越精准。经过模型误差分析,证明存在较优的道砟电阻使得构建的传输模型较精准,从而估算出 R_d 。

4 实验与结果分析

4.1 实验结果

通过在某车站实地考察轨道电路各设备电气参数并利用微机监测设备测量室内外设备端电压、电流值,建立粒子群算法 PSO 的适应函数。本文在二维空间中设置的粒子总数为 20,在粒子初始化过程中随机生成粒子的 x 和 y 坐标,分别对应道砟电阻 R_d 和接收器端阻抗 Z_{rev} ,其初始化分布情况如图 11 所示。在完成算法初始化后进行算法迭代,计算每个粒子的适应度,并以此更新粒子的速度和位置。其中,粒子群优化算法迭代过程中的学习因子 c_1 和 c_2 取值为 2,惯性因子 ω 取值为 1。最终,粒子群的全局最优位置满足最小界限,结束算法迭代,迭代后粒子分布情况如图 11 所示。

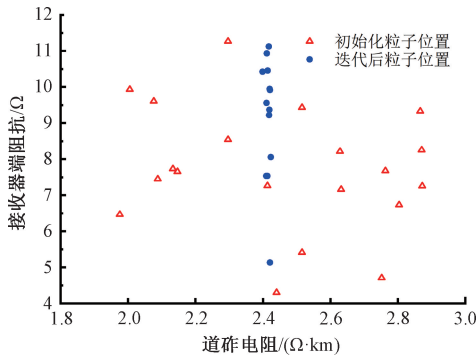


图 11 初始化和迭代后粒子分布图

Fig. 11 Particle distribution diagram after initialization and iteration

由图 11 可知,迭代后的粒子群相比初始化的粒子群更有规律。在迭代后的粒子分布图中,粒子在垂直方向上基本聚集于一条直线,在水平方向上分布较分散。

通过上述分析,可知粒子在垂直方向上聚集的拟合直线可用表达式表示,如式(10)所示。

$$x = 2.42 \quad (10)$$

由此可知,大部分粒子在迭代后的横坐标值约为 $2.42 \Omega \cdot \text{km}$,可得此估算方法得到的道砟电阻 R_d 值约为 $2.42 \Omega \cdot \text{km}$ 。

4.2 性能验证与分析

为验证本文提出的基于粒子群算法的道砟电阻 R_d 估算方法的准确性,将 R_d 的估算结果输入至轨道电路传输模型中,仿真计算室内外设备端电压、电流值,并将仿真数据与监测数据进行误差分析。此外,根据文献[4]中的轨入电压法,计算出道砟电阻值 R_d 并使用相同方法得到仿真数据与监测数据进行误差分析,其分析对照情况如表 1 所示。

表 1 仿真数据与监测数据对照表

Table 1 Comparison table between simulation data and measured data

变量名	监测值	PSO 仿真值	轨入法仿真值
P_1 / mV	483	513	521
P_2 / V	16.1	14.9	15.1
P_3 / mA	48.2	67.9	69.0
P_4 / mA	43.6	54.8	55.6
P_6 / A	3.66	3.75	3.76
P_7 / mA	299	375	375
P_8 / V	121	125	125
P_9 / mA	195	220	227
P_{11} / mA	284	271	271

由表 1 可知,基于本文提出的道砟电阻估算方法得到的电压、电流仿真值与微机监测值的平均绝对百分比误差为 14.31%,而基于轨入电压法得到的电压、电流仿真值与微机监测值的平均绝对百分比误差为 15.24%,表明本文设计的基于粒子群优化算法的道砟电阻估算方法具有相对较高的精准度。此外, P_7 仿真值与监测值偏差较大的主要原因可能是轨道电流传输模型中使用的钢轨一次参数不准确,导致信号在钢轨上传输的仿真情况与实际情况不符。

5 结论

本文提出了一种基于粒子群算法的道砟电阻估算方法,通过结合现场微机监测数据,可求得道砟电阻的最佳估值。首先基于均匀传输线、二端口网络理论和轨道电路工作原理,构建了无绝缘轨道电路传输模型和室内外设备端电压、电流计算模型;其次根据模型进行仿真,分析了道砟电阻对两变量的影响规律具有较高的独立性且其规律不易受补偿电容状态影响,分别为送端轨面电流与受端轨面电流的比值和发送防雷模拟网络盘电缆侧电压;最终实验结果表明,本文提出的估算方法具有相对较高的精准度,能基本反映现场实际道砟电阻,为进一步提高轨道电路传输模型精度和道砟电阻在线监测提供了新的实现方案。

参考文献

- [1] 李文涛. 高速铁路 ZPW-2000 轨道电路技术与成就[J]. 铁道通信信号, 2019, 55(S1): 49-54.
LI W T. Development and achievement of ZPW-2000 track circuit technology in high-speed railway [J]. Railway Signalling and Communication, 2019, 55(S1): 49-54.
- [2] 赵林海, 刘成波, 冉义奎. 无绝缘轨道电路道砟电阻在线监测方法[J]. 铁道学报, 2017, 39(8): 101-106.

- ZHAO L H, LIU CH B, RAN Y K. On-line monitoring of ballast resistance of jointless track circuits[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(8): 101-106.
- [3] 李炭. 基于轨道电路传输理论的道床电阻动态计算[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2020.
- LI T. Dynamic calculation of ballast resistance based on transmission theory of track circuit [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020.
- [4] 祁杰生. ZPW-2000A 无绝缘轨道电路调整与道床电阻分析[J]. 铁道通信信号, 2010(2): 30-32.
- QI J SH. Adjustment of ZPW-2000A jointless track circuit and analysis of ballast bed resistance [J]. Signalling and Communication, 2010(2): 30-32.
- [5] 梁晨, 倪克琦, 常素良, 等. 铁路轨道动态响应自动监测系统的研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(8): 6-9.
- LIANG CH, NI K Q, CHANG S L, et al. The research on automatic monitoring system of railway track dynamic response [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(8): 6-9.
- [6] 傅佳伟, 王小敏, 郭进. ZPW-2000 轨道电路的多轮对动态分路建模研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(9): 2374-2384.
- FU J W, WANG X M, GUO J. Research on dynamic multi-wheel sets shunted track circuit modeling [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(9): 2374-2384.
- [7] 谢志远, 王岩, 郭以贺, 等. 传输线电气参数测试方法研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 151-155.
- XIE ZH Y, WANG Y, GUO Y H, et al. Research and application of testing method for electrical parameters of transmission lines [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 151-155.
- [8] 李奕霖. ZPW-2000A 型无绝缘轨道电路的四端网等效模型仿真研究[J]. 电子设计工程, 2021, 29(9): 46-50.
- LI Y L. Simulation based on four-terminal network of equivalent model for ZPW-2000A uninsulated track circuit [J]. Electronic Design Engineering, 2021, 29(9): 46-50.
- [9] 刘一博, 赵林海. 基于 CSM 系统的 JTC 故障智能诊断方法[J]. 铁道学报, 2021, 43(11): 78-87.
- LIU Y B, ZHAO L H. Method of intelligent diagnosis of JTC faults based on CSM system [J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(11): 78-87.
- [10] 刘家良, 毕红军, 杨世武, 等. ZPW-2000 无绝缘轨道电路相邻区段干扰仿真研究[J]. 铁路计算机应用, 2014, 23(5): 45-48.
- LIU J L, BI H J, YANG SH W, et al. Simulation of adjacent segment interference in ZPW-2000 jointless track circuit [J]. Railway Computer Application, 2014, 23(5): 45-48.
- [11] 李汉青. ZPW-2000 无绝缘轨道电路数学建模[J]. 机电信息, 2019(21): 6-7.
- LI H Q. Mathematical modeling of ZPW-2000 jointless track circuit [J]. Mechanical and Electrical Information, 2019(21): 6-7.
- [12] ZHAO L H, ZHANG C L, QIU K M, et al. A fault diagnosis method for the tuning area of jointless track circuits based on a neural network [J]. Proceedings of Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail & Rapid Transit, 2013, 227(4): 333-343.
- [13] WANG Z, GUO J, ZHANG Y, et al. Fault diagnosis for jointless track circuit based on intrinsic mode function energy moment and optimized LS-SVM [J]. IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. IEEE, 2016: 1-4.
- [14] 王海波. ZPW-2000R 型无绝缘轨道电路建模与仿真研究[J]. 科学技术创新, 2019(23): 67-69.
- WANG H B. Research on modeling and simulation of ZPW-2000R jointless track circuit [J]. Scientific and Technological Innovation, 2019(23): 67-69.
- [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 L H, JIANG H, MENG J H, 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.
- [16] 李国全, 高建宇, 白天宇, 等. 基于 SVM 与改进型乌鸦搜索算法的风电功率预测方法[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(2): 40-45.
- LI G Q, GAO J Y, BAI T Y, et al. Wind power prediction based on improved crow search algorithm and support vector machine [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(2): 40-45.
- [17] 孙世政, 向洋, 党晓圆, 等. 基于粒子群解耦算法的 FBG 流量温度复合传感研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 2-10.
- SUN SH ZH, XIANG Y, DANG X Y, et al. Research on FBG flow and temperature composite sensor based on the PSO decoupling algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1): 2-10.
- [18] 张煌, 王国权, 孙鹏. 基于信息融合的目标检测系统研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(19): 28-35.

ZHANG H, WANG G Q, SUN P. Research on target detection system combining based on information fusion[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(19): 28-35.

[19] 蒋建峰, 孙金霞, 尤澜涛. 基于粒子群优化算法的无线传感网络安全分簇策略[J]. 计算机科学, 2021, 48(S2): 452-455, 470.

JIANG J F, SUN J X, YOU L T. Security clustering strategy based on particle swarm optimization algorithm in wireless sensor network [J]. Computer Science, 2021, 48(S2): 452-455, 470.

[20] 黄海宏, 汪宇航, 王海欣. 基于粒子群优化粒子滤波算法的 SOC 估算研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(2): 245-253.

HUANG H H, WANG Y H, WANG H X. Research on SOC estimation based on particle swarm algorithm and particle filter algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 (2): 245-253.

作者简介



张永贤 (通信作者), 2002 年于华东交通大学获得硕士学位, 现为华东交通大学副教授, 主要研究方向为信号设备故障检测与诊断技术。

E-mail: 30425289@qq.com

Zhang Yongxian (Corresponding author), received his M. Sc. degree from East China Jiaotong University in 2002. Now he is an associate professor at East China Jiaotong University. His main research interests include signal equipment fault detection and diagnosis technology.



黄盛科, 现为华东交通大学硕士研究生, 主要研究方向为信号设备故障检测与诊断技术。

E-mail: 1480485538@qq.com

Huang Shengke is a M. Sc. candidate at East China Jiaotong University. His main research interests include signal equipment fault detection and diagnosis technology.