

# ZPW-2000A型无绝缘轨道电路建模与仿真研究

张永贤<sup>1</sup>,徐雪松<sup>1</sup>,余江松<sup>2</sup>

(1.华东交通大学电气与电子工程学院,江西南昌330013;2.南昌铁路局电务处,江西南昌330002)

**摘要:**分析了ZPW-2000A型无绝缘轨道电路系统的工作原理,运用传输线和电路网络理论,建立了ZPW-2000A各单元的数学模型,利用MATLAB软件实现了轨道电路分路状态仿真。通过对比仿真结果与现场实测数据,说明了仿真模型及算法的正确性及其工程应用价值。

**关键词:**无绝缘轨道电路;数学模型;分路电流;仿真

**中图分类号:**U284.26

**文献标识码:**A

轨道电路以铁路线路的两根钢轨作为信号传输介质,具有轨道占用检查、传递行车信息及行车安全检查等功能。无绝缘轨道电路去掉了故障率高的机械绝缘接头,提高了轨道电路的可靠性,在长轨区段安装不用锯轨,在电化区段降低了轨道电路的不平衡系数,改善了钢轨线路的运营质量。我国无绝缘轨道电路技术的发展历经UM71型引进、WG-21A型国产化、ZPW-2000A型性能提高发展三个阶段。ZPW-2000A在轨道电路传输安全性、传输长度、系统可靠性、可维修性以及结合国情提高技术性能价格比、降低工程造价上都有了显著提高,为实现机车信号主体化创造了必备条件。

由于轨道电路工作于室外,受外部环境因素影响较大,轨道电路参数偏移将影响信号设备的正常工作,因此,轨道电路的故障监测及故障诊断非常重要。在轨道电路研究中,计算机仿真系统由于修改参数方便、计算精度高、重复性好等优点,已经开始逐渐取代传统的物理仿真系统。应用计算机仿真技术,研究不同参数条件,如钢轨阻抗、道床漏泄导纳和补偿电容配置方式、轨道电路长度等,及各种工作状态,如调整状态、分路状态、某些部件失效状态等情况下轨道电路传输特性,可以有效地促进轨道电路的优化设计和故障诊断。

## 1 ZPW-2000A无绝缘轨道电路工作原理

ZPW-2000A分为主轨道电路和调谐区小轨道电路两个部分,并将短小轨道电路视为列车运行前方主轨道电路的所属“延续段”。发送器产生中心频分别为1700 Hz,2000 Hz,2300 Hz,2600 Hz的移频信号。电缆模拟网络可视为室外电缆的一个延续,通过调整电缆模拟网络,使室外SPT型铁路信号数字电缆与电缆模拟网络相当于10 km电缆长度。匹配变压器实现了轨道电路与SPT传输电缆的匹配连接。

ZPW-2000A的电气绝缘节由调谐单元、空芯线圈SVA及29 m钢轨组成,用于实现两相邻轨道电路间的电气隔离。对于较低频率轨道电路(1700,2000 Hz)端,设置 $L_1, C_1$ 两元件的 $F_1$ 型调谐单元,对于较高频率轨道电路(2300,2600 Hz)端,设置 $L_2, C_2, C_3$ 三元件的 $F_2$ 型调谐单元。发送A发出信号的载频为 $f_1$ ,发送A和接收A处的调谐单元对频率 $f_1$ 呈现电容性,并与调谐区钢轨、SVA的电感构成并联谐振,呈现较高阻抗,相当于开路,减少了对本区段信号的衰耗。接收C和发送B处的调谐单元对频率 $f_1$ 为串联谐振,呈现较低阻抗,相当于短路,阻止了本区段轨道电路信号进入相邻区段。

对于频率为1700~2300 Hz的移频信号,钢轨呈现较高的感抗值,使轨道电路的传输衰耗较大。为此采取分段加补偿电容的方法减弱电感的影响,加补偿电容后,轨道电路趋于阻性,增加了轨道电路的传

收稿日期:2008-03-14

基金项目:江西省自然科学基金(2007GZS0883);江西省教育厅科技项目(GJJ08239)

作者简介:张永贤(1975-),男,山西临汾人,硕士,副教授,研究方向为轨道交通信号与控制。

输距离,改善了轨道电路信号传输,加大了轨道入口端短路电流,减小了送受端钢轨电流比,从而保证了轨道电路入口端信号干扰比,改善了接收器和机车信号的工作。补偿电容设置密度加大,有利于改善列车分路,减少轨道电路中列车分路电流的波动范围,有利于延长轨道电路传输长度。过密设置又增加了成本,带来维修的不便,要适当考虑。补偿电容的设置方式在区间采用“等间距法”,即将主轨道电路的长度  $L$  按补偿电容总量  $N$  等分,其步长  $\Delta = L/N$ ,轨道电路两端按半步长  $\Delta/2$ ,中间按全步长  $\Delta$  设置电容,以获得最佳传输效果<sup>[1]</sup>。

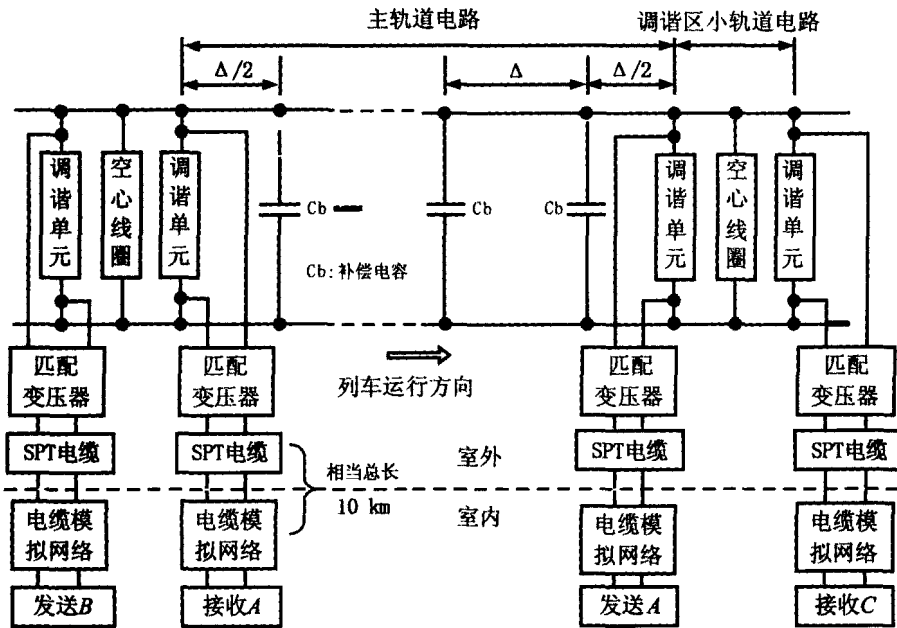


图 1 ZPW-2000A 无绝缘轨道电路系统原理框图

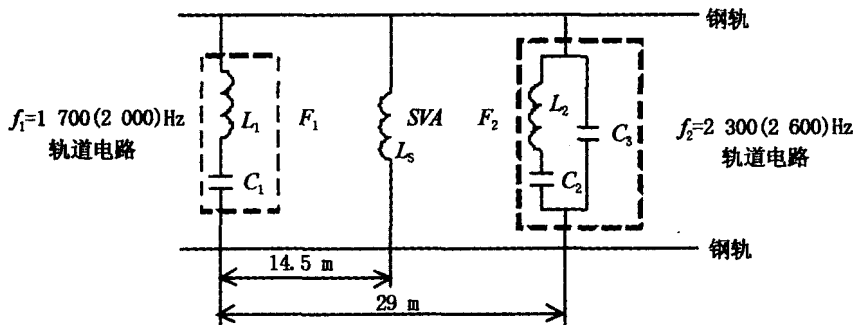


图 2 ZPW-2000A 无绝缘轨道电路电气绝缘节

## 2 ZPW-2000A 无绝缘轨道电路建模

### 2.1 主轨道电路

将钢轨的电阻  $R$ 、电感  $L$ 、轨间泄漏电容  $C$ 、泄漏电导  $G$  看成是沿线均匀分布的,可利用均匀传输线理论来分析研究轨道电路中电压电流的传输过程<sup>[2]</sup>。但是 ZPW-2000A 无绝缘轨道电路每隔一定的距离安装有补偿电容,致使轨道电路参数在补偿电容处发生突变,整个轨道电路成为一个非均匀分布参数电路,无法用传统的轨道电路分析方法来分析整个轨道电路。 $N$  个补偿电容将轨道电路分成  $N + 1$  段,每段轨道电路看作一个参数均匀分布的轨道四端网,将补偿电容也作为一个四端网,则整个轨道电路可看作一系列四端网的级联,如图 3 所示。

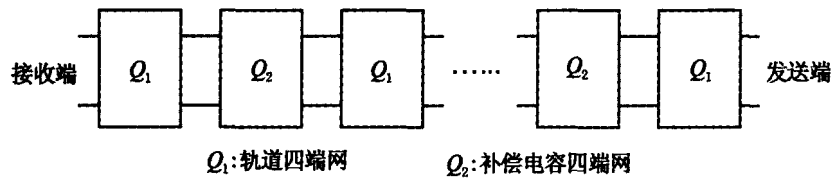


图3 主轨道电路等效网络图

图3中轨道四端网  $Q_1$  和补偿电容四端网  $Q_2$  的传输矩阵如式(1)和式(2)。

$$Q_1 = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & -Z_C \sinh(\gamma x) \\ -1/Z_C \sinh(\gamma x) & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -j\omega C_b & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(1)中  $\gamma$  为轨道电路的传播常数,  $Z_C$  为轨道电路的特性阻抗,  $x$  为轨道四端网轨道长度, ZPW-2000A 轨道电路两端的四端网轨道长度为  $\Delta/2$ , 其它为  $\Delta$ 。式(2)中  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为钢轨上传输信号的频率,  $C_b$  为补偿电容。

## 2.2 调谐区小轨道电路

将图2所示调谐区小轨道电路的调谐单元  $F_1$ 、 $F_2$ 、空芯线圈 SVA 分别等效为三个四端网, 与其间的两段 14.5 m 长的轨道四端网  $Q_{gd}$  级联, 如图4所示。调谐单元  $F_1$ 、 $F_2$ 、空芯线圈 SVA 的传输矩阵如式(3)、式(4)和式(5)。

$$Q_{F1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{j\omega C_1}{(\omega^2 L_1 C_1 - 1)} & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Q_{F2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -j\left(\omega C_3 - \frac{\omega C_2}{(\omega^2 L_2 C_2 - 1)}\right) & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Q_{SVA} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{j}{(\omega L_s)} & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

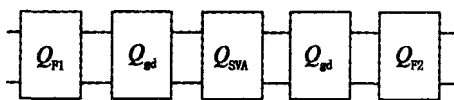


图4 调谐区小轨道电路等效网络图

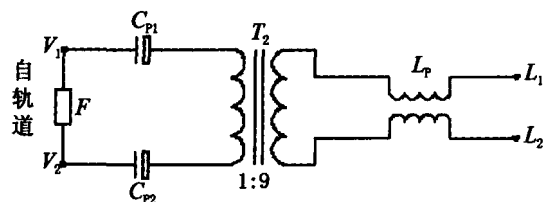


图5 匹配变压器

## 2.3 传输电缆及匹配变压器

电缆模拟网络补偿实际 SPT 数字信号电缆, 使补偿电缆和实际电缆总距离为 10 km, 以便于轨道电路的调整和构成改变列车运行方向电路。传输电缆可等效为长度为 10 km 的均匀传输线, 其传输矩阵  $Q_{DL}$  与式(1)形式相同。

匹配变压器用于轨道电路与 SPT 数字信号电缆的匹配连接, 电路如图5所示,  $V_1 V_2$  经调谐单元端子接至轨道,  $L_1 L_2$  经 SPT 电缆接至室内。匹配变压器变比为 9:1, 钢轨侧电路中, 串联接入两个 16 V, 4 700  $\mu\text{F}$  电解电容  $C_{P1}$ 、 $C_{P2}$ , 二电容按相反极性串接, 构成无极性联结, 起到隔直及交连作用。10 mH 的电感  $L_p$  用作 SPT 电缆表现出容性的补偿, 与匹配变压器相对应处轨道被列车分路时, 它可作为一个阻抗。建立匹配

变压器电路模型时,忽略两隔直电容,变压器看作理想变压器,得出匹配变压器传输矩阵如式(6)所示。

$$Q_P = \begin{bmatrix} 1/9 & -j\omega L_P/9 \\ 0 & 9 \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 3 ZPW-2000A 无绝缘轨道电路分路状态仿真

列车在轨道电路上运行时,将两钢轨短接,轨道电路处于分路状态。分路电阻  $R_f$  由列车车轴、车轮电阻及车轮与钢轨的接触电阻共同构成,阻值一般在  $0.04 \sim 0.15 \Omega$  范围内变化。接收端因列车分路作用,接收电压降低,轨道继电器落下,表示轨道电路区段有车占用。同时,安装于列车头部的机车信号接收线圈感应到分路电流,然后分析出轨道电路中传输的机车信号信息,完成地-车之间的信息传递。

分路点至发送端之间由若干个轨道四端网和补偿电容、调谐单元、匹配变压器、电缆传输网络级联而成,可等效为图6所示的电路,图中的  $Q$  为分路点至发送端各单元级联的等效传输矩阵。

发送端电压  $U_s$ , 电流  $I_s$  与分路电流  $I_f$  关系如式(7)。

$$\begin{bmatrix} I_f R_f \\ I_f \end{bmatrix} = Q \begin{bmatrix} U_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_s \\ I_s \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)中  $Q_{11}$ 、 $Q_{12}$ 、 $Q_{21}$ 、 $Q_{22}$  为传输矩阵  $Q$  的四个元素。消去  $I_s$  得分路电流

$$I_f = \frac{Q_{11} Q_{21} - Q_{21} Q_{12}}{Q_{22} R_f - Q_{12}} U_s \quad (8)$$

随着列车运行,分路点不断接近发送端,分路点每移动  $\Delta x$ ,就要重新计算传输矩阵  $Q$ ,为计算每个点的分路电流  $I_f$ ,需要大量的矩阵运算。MATLAB 是用于科学工程计算的高级语言,具有强大的矩阵运算和数值计算能力,本文利用 MATLAB 建立了轨道电路分路电流仿真环境,只需设置相关的参数,即可完成各种情况下的仿真。

以载频为 2 300 Hz,长度为 1 278 m 的轨道电路为例,需要安装 18 个  $46 \mu\text{F}$  的补偿电容,间隔  $\Delta$  为 71 m,仿真轨道电路在分路状态下分路电流的分布情况如图7,所示曲线为列车运行过程中分路电流信号的包络线。图7中分路电流曲线共 22 个突变点,自左至右分别对应图1中发送 B 处的调谐单元、空芯线圈、接收 A 处的调谐单元、18 个补偿电容、发送 A 处的调谐单元。从图中可以看出补偿电容的作用非常明显,补偿电容改变了分路电流距离发送端越远而逐渐衰减的趋势,由于其与钢轨阻抗产生的谐振,在有些位置分路电流反而有增加趋势,从而使轨道电路传输距离增加,地车信息得到有效可靠地传输。

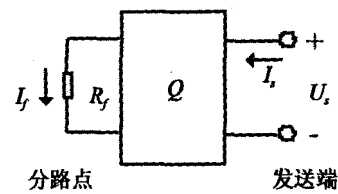


图6 分路点至发送端之间等效网络图

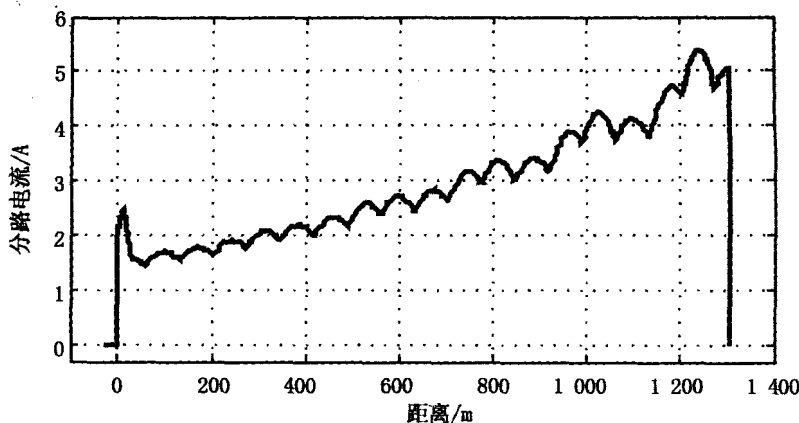


图7 轨道电路分路状态下分路电流分布曲线

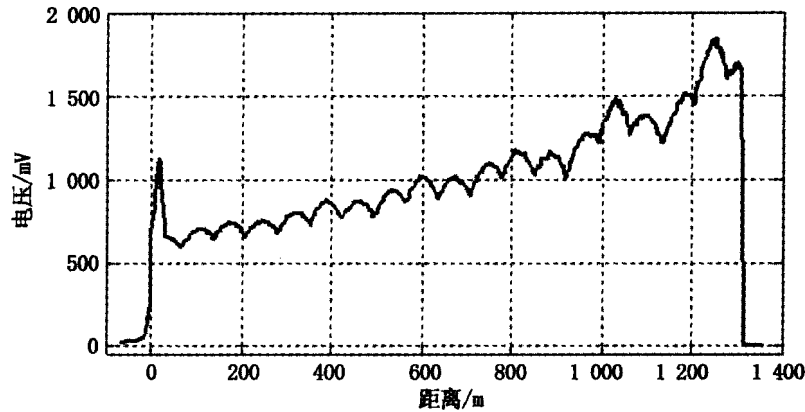


图8 机车信号接收线圈感应电压实测曲线

#### 4 结束语

图8中的曲线为电务测试车在载频为2300 Hz的某轨道区段采集记录的机车信号接收线圈感应电压信号的包络线。接收线圈感应电压反映了分路电流的变化情况<sup>[3]</sup>,比较仿真结果与实测数据,可以看出仿真结果基本反映了轨道电路实际工作情况。计算机仿真的精度主要取决于数学模型的精度,而数学模型是实际系统经过简化、线性化等处理后得出的理想模型,需要将仿真结果与实测数据比较后不断地修正、完善数学模型,使其更逼近实际系统。本文建立的ZPW-2000A型无绝缘轨道电路的仿真系统,为轨道电路研究提供了一个实验平台,还可进一步仿真各种故障状态下的分路电流的变化情况,为轨道电路监测与故障诊断提供依据。而分路电流可通过机车信号接收线圈采集到,通过波形分析,找出分路电流异常点,可有效地定位轨道电路故障点、判别故障原因。

#### 参考文献:

- [1] 赵怀东,王玫素. ZPW-2000A型自动闭塞设备安装与维护[M].北京:中国铁道出版社,2005.
- [2] 费锡康. 无绝缘轨道电路原理及分析[M].北京:中国铁道出版社,1993.
- [3] 苏娟,姜道勇,杜普选. 动态测量轨道电路参数的方法研究[J]. 电子技术应用,2006,(11):7-9.

## Modeling and Simulation of ZPW-2000A Jointless Track Circuit

ZHANG Yong-xian<sup>1</sup>, XU Xue-song<sup>1</sup>, YU Jiang-song<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Electricity Department of Nanchang Railway Administration, Nanchang 330002, China)

**Abstract:** Based on the theory of uniform transmission line and four-terminal net circuit, this paper presents a simulating model of ZPW-2000A jointless track circuit. A kind of numerical algorithm of shunt current is established with MATLAB. The Simulating result is compared with the measured data, which proves that the simulating model and algorithm is correct and practical.

**Key words:** jointless track circuit; mathematical model; shunt current; simulation

(责任编辑:王建华)