文章编号：1674-2974（2026）02-0200-09 DOI：10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026169

基于端口宏模型的轨道电路升弓过电压分析

赵斌[1†]，张晨晨[1]，李森森[1]，宋玉华[2]，张正义[2]，高丽霞[1]
（1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院，甘肃 兰州 730070；
2. 中铁二十一局集团有限公司，甘肃 兰州 730070）

摘 要：升弓瞬间产生的钢轨过电压会严重影响轨旁信号设备的安全运行.为了分析AT牵引供电方式下机车升弓电弧对轨道电路过电压的影响，基于Agrawal场线耦合模型建立轨道电路升弓过电压分析模型.首先推导了牵引供电与轨道电路组成的多导体传输线系统的Agrawal场线耦合模型的解，并建立了一个易于实现的宏模型.然后将提出的宏模型与电磁暂态仿真软件PSCAD中“频率相关（相位）模型”组件结合，建立用于分析轨道电路暂态响应的模型.在PSCAD软件中通过动态距离控制、击穿电压判定及电弧能量方程耦合建立升弓电弧模型，并且通过和实测数据对比验证该方法的准确性.最后，分析了道床电阻以及升弓时的接触网电压相位对钢轨升弓过电压的影响.研究结果表明：道床电阻越大，钢轨的升弓过电压峰值越大，其过电压危害越严重；升弓时电压相位角为90°时，钢轨升弓过电压峰值最大.研究结果为轨道电路抗干扰分析及过电压防护提供理论依据.

关键词：轨道电路；Agrawal场线耦合模型；升弓过电压；PSCAD；网压相位
中图分类号：U284.2 **文献标志码**：A

Rising pantograph overvoltage analysis of track circuits based on port macro-model

ZHAO Bin[1†], ZHANG Chenchen[1], LI Sensen[1], SONG Yuhua[2], ZHANG Zhengyi[2], GAO Lixia[1]
（1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. China Railway 21st Bureau Group, Lanzhou 730070, China）

Abstract: The overvoltage generated on rails during pantograph rising can severely affect the safe operation of trackside signaling equipment. To investigate the influence of pantograph arcing on the overvoltage of track circuits in AT traction power supply systems, an overvoltage analysis model for track circuits is established based on the Agrawal's field-to-line coupling model. Firstly, the solution of Agrawal's field-to-line coupling model for the multi-conductor transmission line system composed of traction power supply and track circuits is derived, and an easily implementable macro-model is developed. Secondly the proposed macro-model is integrated with the "Frequency Dependent (Phase)" component in the electromagnetic transient simulation software PSCAD to establish a model for analyzing the transient response of track circuits. A pantograph arcing model is constructed in

* **收稿日期**：2025-03-28
基金项目：国家自然科学基金资助项目（5196070019），National Natural Science Foundation of China（5196070019）
作者简介：赵斌（1982—），男，甘肃武威人，兰州交通大学教授，博士
† 通信联系人，E-mail：17339820521@163.com

PSCAD by incorporating dynamic distance control, breakdown voltage determination, and coupling of the arc energy equation. The accuracy of the method is verified through comparison with measured data. Finally, the influence of ballast resistance and the contact wire voltage phase angle during pantograph rising on rail overvoltage is analyzed. The results show that a higher ballast resistance leads to a greater peak rail overvoltage, increasing the risk of overvoltage damage. Additionally, the peak rail overvoltage reaches its maximum when the pantograph rises at a voltage phase angle of 90°. These findings provide a theoretical basis for interference immunity analysis and overvoltage protection in track circuits.

Key words: track circuit; Agrawal's field-to-line coupling model; rising pantograph overvoltage; PSCAD; voltage phase of contact line

轨道电路作为高速铁路信号控制系统的关键基础设施,其安全性与可靠性已成为影响列车运行效率与行车安全的核心要素.然而,电力机车升弓时在受电弓滑板和接触线触碰过程中可能产生电弧或电火花,并伴随着在接触网上产生暂态过电压[1-2].此类过电压通过机车传导至钢轨,可能导致轨道电路绝缘材料介质击穿和信号设备电子元件损伤等严重故障,严重威胁铁路信号系统的运行稳定性.因此开展轨道电路的升弓过电压分析研究十分必要.

轨道电路的升弓过电压分析,实际就是对轨道电路的暂态响应进行研究.Moraes等[3]将场耦合模型与传输线模型相结合,基于一阶时域差分法实现单导体架空线路的过电压计算,为传输线的暂态分析提供理论基础与模型参考.Štumpf等[4]利用Cooray-Rubinstein公式和Cagniard-de Hoop方法,提出了一种用于单导体传输线的时域场线耦合模型,但无法处理端接复杂网络和多导体传输线的情况,因此不适用于轨道电路的暂态分析.Zhao等[5]提出数值拉氏变换法,求解了不同条件下轨道电路的时域解.赵斌等[6]基于节点导纳法以及Q-D算法在复频域内考虑高频损耗对轨面电压的影响.目前对升降弓瞬间动车组车体过电压[7-8]及轨道电路雷击过电压[9-10]的研究较多,对于轨道电路的升弓过电压研究较少,因此本文提出了一种基于端口宏模型的轨道电路升弓过电压分析方法,在PSCAD中建立牵引网与轨道电路混合的多导体传输线模型以及升弓电弧模型,分析轨道电路的升弓过电压及其影响因素,为轨道电路的绝缘配合优化及过电压防护设计提供理论支持.

1　轨道电路升弓过电压仿真模型

1.1　多导体传输线端口宏模型

Agrawal的场线耦合模型可用于对轨道电路的暂态响应进行分析,相应的复频域电报方程为[11-12]

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{U}^{\mathrm{s}}(x,s)}{\mathrm{d}x}+\left[s\boldsymbol{L}_0+\boldsymbol{R}_0+\boldsymbol{Z}_{\mathrm{g}}(s)\right]\cdot\boldsymbol{I}(x,s)=\boldsymbol{E}_x(x,s)\\ \dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{I}(x,s)}{\mathrm{d}x}+\left(s\boldsymbol{C}_0+\boldsymbol{G}_0\right)\cdot\boldsymbol{U}^{\mathrm{s}}(x,s)=0\end{cases}\tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{R}_0$为线路单位长度电阻;$\boldsymbol{G}_0$为电导;$\boldsymbol{L}_0$为电感;$\boldsymbol{C}_0$为电容矩阵;$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{g}}$是与线路集肤效应和有损大地相关的频变阻抗;$\boldsymbol{U}^{\mathrm{s}}(x,s)$为散射电压;$\boldsymbol{I}(x,s)$为全电流;$\boldsymbol{E}_x(x,s)$为入射场的水平分量.在下文中,为了方便表示,省略了拉普拉斯变量"s".

边界条件为

$$\begin{cases}\boldsymbol{U}^{\mathrm{s}}\left(x_0\right)=-\boldsymbol{Z}_{\mathrm{A}}\boldsymbol{I}\left(x_0\right)+\displaystyle\int_0^h\boldsymbol{E}_z^{\mathrm{inc}}\left(x_0,z\right)\mathrm{d}z\\ \boldsymbol{U}^{\mathrm{s}}\left(x_l\right)=-\boldsymbol{Z}_{\mathrm{B}}\boldsymbol{I}\left(x_l\right)+\displaystyle\int_0^h\boldsymbol{E}_z^{\mathrm{inc}}\left(x_l,z\right)\mathrm{d}z\end{cases}\tag{2}$$

式中:x_0和x_l分别为线路的首端和末端;h为线路高度;$\boldsymbol{E}_z^{\mathrm{inc}}(x)$为垂直分量,体现在线路两端的集中电源.

为了求解式(1),将散射电压和全电流通过式(3)进行相模变换,得到其模量表达式[13]:

$$\begin{cases}\boldsymbol{U}^{\mathrm{s}}(x)=\boldsymbol{T}_v\boldsymbol{U}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{s}}(x)\\ \boldsymbol{I}(x)=\boldsymbol{T}_i\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}}(x)\end{cases}\tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{T}_v$为电压模变换矩阵;$\boldsymbol{T}_i$为电流模变换矩阵;$\boldsymbol{U}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{s}}(x)$和$\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}}(x)$分别为散射电压和全电流对应的模量形式,将式(3)代入式(1),可得

$$\begin{cases} \boldsymbol{T}_v \dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{U}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{s}}(x)}{\mathrm{d}x} + \boldsymbol{Z}_0 \cdot \left[\boldsymbol{T}_i \cdot \boldsymbol{I}_{\mathrm{m}}(x)\right] = \boldsymbol{E}_x(x) \\ \boldsymbol{T}_i \dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}}(x)}{\mathrm{d}x} + \boldsymbol{Y}_0 \cdot \left[\boldsymbol{T}_v \cdot \boldsymbol{U}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{s}}(x)\right] = 0 \end{cases} \tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{Z}_0 = s\boldsymbol{L}_0 + \boldsymbol{R}_0 + \boldsymbol{Z}_{\mathrm{g}}(x)$;$\boldsymbol{Y}_0 = s\boldsymbol{C}_0 + \boldsymbol{G}_0$.

以某一模量为例,可得散射电压和全电流如下:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{U}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{s}}(x) \\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{m}}(x) \end{bmatrix} = \int_{x_1}^{x} \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}_{\mathrm{m}}(x-x')} \begin{bmatrix} \boldsymbol{T}_v^{-1}(m,:) \cdot \boldsymbol{E}_x(x') \\ 0 \end{bmatrix} \mathrm{d}x' + \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}_{\mathrm{m}}(x-x_1)} \begin{bmatrix} \boldsymbol{U}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{s}}(x_1) \\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{m}}(x_1) \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中:

$$\mathrm{e}^{\boldsymbol{A}_{\mathrm{m}}(x-x_1)} = \begin{bmatrix} \phi_{11,\mathrm{m}}(x-x_1) & \phi_{12,\mathrm{m}}(x-x_1) \\ \phi_{21,\mathrm{m}}(x-x_1) & \phi_{22,\mathrm{m}}(x-x_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh\gamma_{\mathrm{m}}(x-x_1) & -\sinh\gamma_{\mathrm{m}}(x-x_1)\cdot Z_{\mathrm{C,m}} \\ -\sinh\gamma_{\mathrm{m}}(x-x_1)\cdot Z_{\mathrm{C,m}}^{-1} & \cosh\gamma_{\mathrm{m}}(x-x_1) \end{bmatrix} \tag{6}$$

式(5)可以改写为[14]

$$\begin{cases} \boldsymbol{I}_{\mathrm{m}}(x_1) = \boldsymbol{Y}_{\mathrm{C,m}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{s}}(x_1) - \mathrm{e}^{-\gamma_{\mathrm{m}}(x_2-x_1)}\left[\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}}(x_2) + \boldsymbol{Y}_{\mathrm{C,m}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{s}}(x_2)\right] \\ \qquad + \boldsymbol{Y}_{\mathrm{C,m}}\int_{x_1}^{x_2} \mathrm{e}^{-\gamma_{\mathrm{m}}(x'-x_1)}\cdot\left[\boldsymbol{T}_v^{-1}\cdot\boldsymbol{E}_x(x')\right]\mathrm{d}x' \\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{m}}(x_2) = \boldsymbol{Y}_{\mathrm{C,m}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{s}}(x_2) - \mathrm{e}^{-\gamma_{\mathrm{m}}(x_2-x_1)}\left[\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}}(x_1) + \boldsymbol{Y}_{\mathrm{C,m}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{s}}(x_1)\right] \\ \qquad - \boldsymbol{Y}_{\mathrm{C,m}}\int_{x_1}^{x_2} \mathrm{e}^{-\gamma_{\mathrm{m}}(x_2-x')}\cdot\left[\boldsymbol{T}_v^{-1}\cdot\boldsymbol{E}_x(x')\right]\mathrm{d}x' \end{cases} \tag{7}$$

式中:$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{C,m}}$和$\gamma_{\mathrm{m}}$分别为特征导纳和传播常数的模量.为了求解接有非线性元件或时变元件的线路,将式(7)转化为相域形式:

$$\begin{cases} \boldsymbol{I}(x_1) = \boldsymbol{Y}_{\mathrm{C}}\cdot\boldsymbol{U}^{\mathrm{s}}(x_1) + \boldsymbol{I}_{\mathrm{s}}(x_1) + \boldsymbol{I}_{\mathrm{E}}(x_1) \\ \boldsymbol{I}(x_2) = \boldsymbol{Y}_{\mathrm{C}}\cdot\boldsymbol{U}^{\mathrm{s}}(x_2) + \boldsymbol{I}_{\mathrm{s}}(x_2) + \boldsymbol{I}_{\mathrm{E}}(x_2) \end{cases} \tag{8}$$

其中,$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{C}} = \boldsymbol{T}_i\boldsymbol{Y}_{\mathrm{C,m}}\boldsymbol{T}_v^{-1}$为多导体传输线系统的特征导纳矩阵,受控电流源是

$$\begin{cases} \boldsymbol{I}_{\mathrm{s}}(x_1) = -\boldsymbol{H}(x_2-x_1)\cdot\left[\boldsymbol{I}(x_2) + \boldsymbol{Y}_{\mathrm{C}}\cdot\boldsymbol{U}^{\mathrm{s}}(x_2)\right] \\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{s}}(x_2) = -\boldsymbol{H}(x_2-x_1)\cdot\left[\boldsymbol{I}(x_1) + \boldsymbol{Y}_{\mathrm{C}}\cdot\boldsymbol{U}^{\mathrm{s}}(x_1)\right] \end{cases} \tag{9}$$

其中$\boldsymbol{H}(x) = \mathrm{e}^{-\gamma x}$,$\gamma = \sqrt{\boldsymbol{YZ}}$为传播常数.外界电磁场作用而产生的独立电流源为

$$\begin{cases} \boldsymbol{I}_{\mathrm{E}}(x_1) = \boldsymbol{Y}_{\mathrm{C}}\cdot\int_{x_1}^{x_2} \boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}(x'-x_1)\cdot\boldsymbol{E}_x(x')\mathrm{d}x' \\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{E}}(x_2) = -\boldsymbol{Y}_{\mathrm{C}}\cdot\int_{x_1}^{x_2} \boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}(x_2-x')\cdot\boldsymbol{E}_x(x')\mathrm{d}x' \end{cases} \tag{10}$$

式(8)可以改写为[15]

$$\begin{cases} \boldsymbol{I}(x_1) = \boldsymbol{Y}_{\mathrm{C}}\cdot\boldsymbol{U}^{\mathrm{s}}(x_1) + \hat{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{s}}(x_1) + \hat{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{E}}(x_1) \\ \boldsymbol{I}(x_2) = \boldsymbol{Y}_{\mathrm{C}}\cdot\boldsymbol{U}^{\mathrm{s}}(x_2) + \hat{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{s}}(x_2) + \hat{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{E}}(x_2) \end{cases} \tag{11}$$

其中:

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{s}}(x_1) = -\boldsymbol{H}\left[\boldsymbol{I}^*(x_2) + \boldsymbol{Y}_{\mathrm{C}}\boldsymbol{U}^{\mathrm{s}}(x_2)\right] \\ \hat{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{s}}(x_2) = -\boldsymbol{H}\left[\boldsymbol{I}^*(x_1) + \boldsymbol{Y}_{\mathrm{C}}\boldsymbol{U}^{\mathrm{s}}(x_1)\right] \end{cases} \tag{12}$$

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{E}}(x_1) = \left(\boldsymbol{1} - \boldsymbol{H}^2\right)^{-1}\left[\hat{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{sE}}(x_1) - \boldsymbol{H}\hat{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{sE}}(x_2)\right] \\ \hat{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{E}}(x_2) = \left(\boldsymbol{1} - \boldsymbol{H}^2\right)^{-1}\left[\hat{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{sE}}(x_2) - \boldsymbol{H}\hat{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{sE}}(x_1)\right] \end{cases} \tag{13}$$

根据式(11)~式(13),可以实现场线耦合模型的端口宏模型,如图1所示.该模型的最大优势在于可以直接使用PSCAD仿真元件库中的传输线内置元件(ULM),精确地处理频率相关的参数[16].

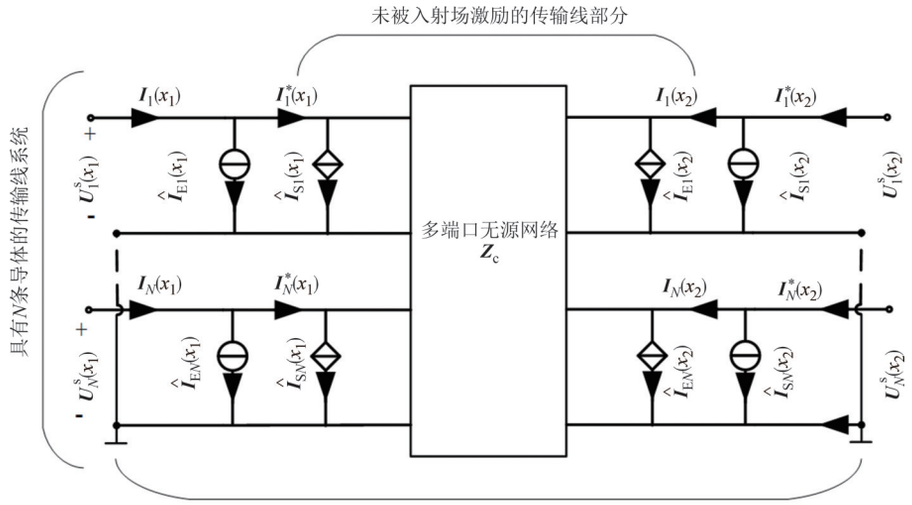


图1 多导体传输线端口宏模型

Fig.1 Macro modeling of multi-conductor transmission line ports

1.2 牵引网与轨道电路多导体传输线建模

高速铁路牵引供电系统广泛采用AT牵引供电方式,在我国高速铁路AT牵引供电系统中,牵引网结构复杂,所含的导线数目多,在典型的全并联高速铁路牵引网中,一般包含承力索、接触线、正馈线、钢轨、保护线等共计14条导线[17].为降低模型的复杂度,提高计算效率,根据牵引网空间导线分布情况,结合等值合并原则对导线实现等值合并[18].本文将接触线与承力索等值为一根导线,则单线AT牵引供电线可等值为5根导线.建立牵引网与轨道电路混合模型,如图2所示.其中,C_1为补偿电容;g_{11}、g_{22}为漏泄电导;g_{21}为道床电阻;$\boldsymbol{r}_{ii}$、$\boldsymbol{l}_{ij}$、$\boldsymbol{c}_{ij}$(i,j=1,2,…,5)分别为电阻、电感和电容矩阵.

由于PSCAD可以精确分析处理传输线暂态响应,因此本文研究选用PSCAD作为仿真软件.实际工程中,典型的AT牵引供电网有关导线的悬挂结构如图3所示,其导线的传输类型与参数如表1所示[19].

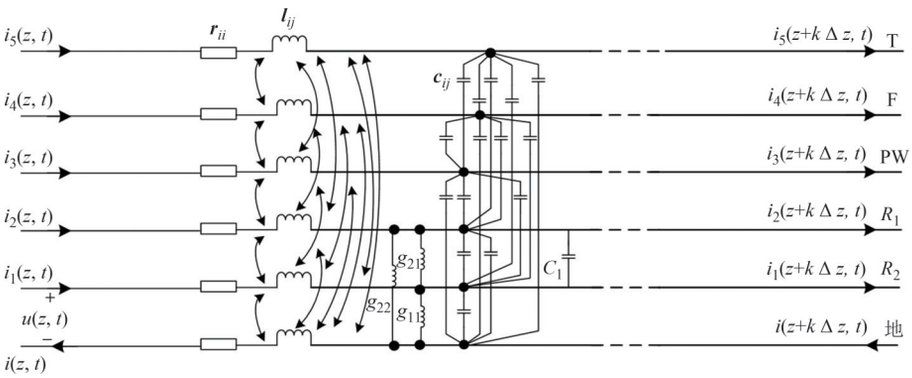


图2　牵引网与轨道电路多导体传输线系统等值电路

Fig.2　Traction network and track circuit multi-conductor transmission line system equivalent circuit

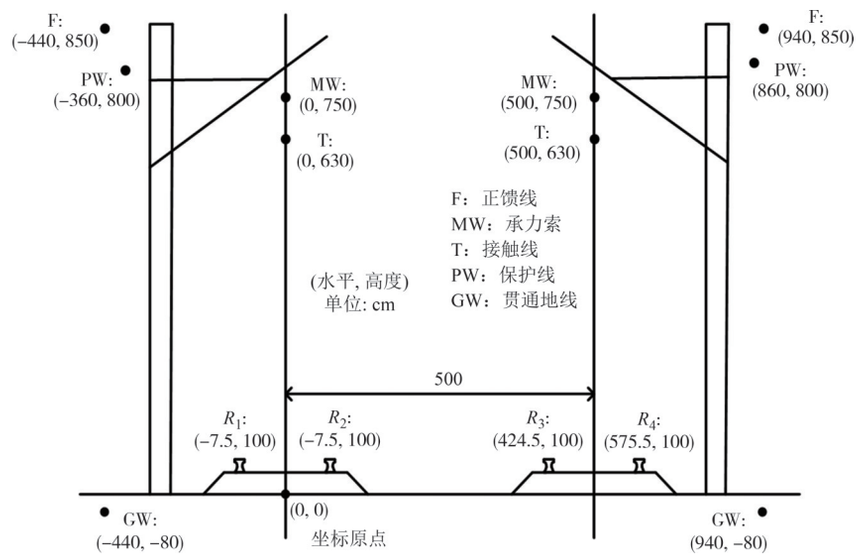


图3　AT牵引网导线位置关系图

Fig.3　AT traction network wire position relationship diagram

表1　AT牵引网导线类型与参数

Tab.1　AT traction network conductor types and parameters

传输线类型	型号	等效半径/mm	直流电阻/(Ω•km^{-1})
接触线T	CTM−150	7.078 6	0.132 4
钢轨R	P60	12.79	0.247
正馈线F	LBGJ−300/25	11.88	0.094 33
保护线PW	LBGJ−120/35	8.12	0.214 3

根据图3,在PSCAD软件中使用其“频率相关(相位)模型”建立牵引网输电线路模型如图4所示,其中C1为正馈线,C2为保护线,C3、C4为两条钢轨,C5为接触线.各个导线的参数分别按照表1所示数据进行设置.

1.3 升弓电弧模型

在受电弓运动过程中,升降弓动作会引发弓网

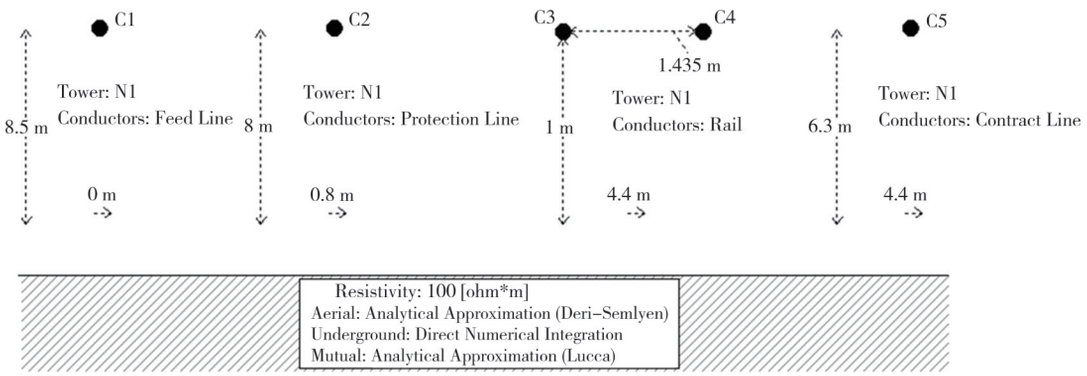


图 4 牵引网输电线路模型

Fig.4 Transmission line model of traction network

间隙的动态变化,当受电弓与接触线的间隙减小时,空气介质击穿将导致放电现象产生.本文基于PSCAD仿真软件搭建弓网距离模块,如图5所示.该模型包含两个关键输出量:l表示实时弓网间距,S1为接触状态的逻辑判断信号,当弓网间矩小于1 μm时,可以判定弓网可靠接触,此时S1输出为低电平,反之,若弓网间矩大于或等于该阈值,则判定弓网未可靠接触,S1输出高电平.

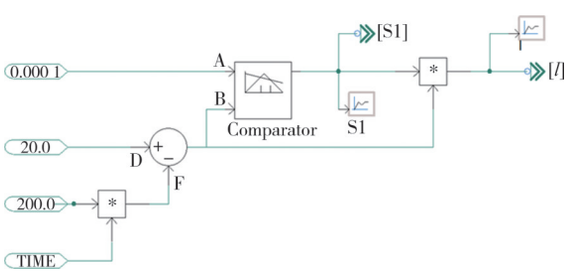


图 5 弓网距离模块

Fig.5 Pantograph-catenary distance module

在受电弓运动过程中,当接触间矩缩短至临界值时,周围气体介质将发生电离放电现象并形成电弧.在标准大气压下,空气介质击穿电压与距离的经验公式如下所示[20].

$$U = 24.55l + 6.66\sqrt{l} \tag{14}$$

式中:U为空气介质击穿电压,kV;l为弓网间距,cm.

根据式(14)搭建击穿电压模块,如图6所示,E_1为受电弓与接触线之间的电压值.该模块在空气介质未发生击穿时,S2端维持高电位状态,当空气介质击穿现象发生后,S2端电位转为低电平.

在受电弓和接触网之间的空气介质被击穿之后,会产生弓网电弧.实际工程中,接触线的上下振动可能导致弓网间出现多次接触与分离,从而导致

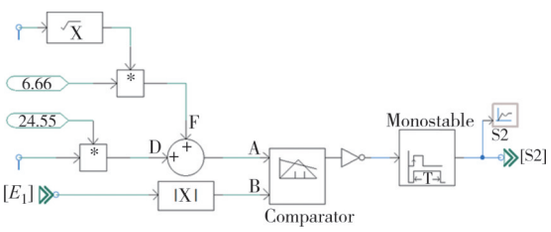


图 6 击穿电压模块

Fig.6 Breakdown voltage module

弓网电弧多次产生.本文只分析第一次升弓电弧.根据经验,假设该交流电弧半径为恒定值、温度沿径向均匀分布,弧驻不存在空间电荷,且辐射热源和电导率为温度的函数[21],那么电弧电导g为

$$g = F(Q) = F\left[\int (P - P_0)\,\mathrm{d}t\right] \tag{15}$$

$$\frac{\mathrm{d}g}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} \cdot \frac{\mathrm{d}g}{\mathrm{d}Q} = (P - P_0)\frac{\mathrm{d}g}{\mathrm{d}Q} \tag{16}$$

式中:P为电弧输入功率,$P = i^2/g$,i为电弧电流;P_0为电弧输出功率,$P_0 = k_1 g^{-\beta} L$,L为电弧弧长,k_1、β为常数.

由电弧理论可得,电弧电导g、电弧总能量Q可以表示为

$$g = \frac{\pi r^2 \sigma}{L} \tag{17}$$

$$Q = q\pi r^2 L \tag{18}$$

根据气体分子运动理论,单位体积电弧积累的能量q为

$$q = 0.354p\left(1 - \frac{T_1}{T_0}\right) \tag{19}$$

式中:p为大气压强;T_1为外界环境温度;T_0为所产生电弧的温度.

基于沙哈公式的电弧理论模型,在假设大气压强p恒定且比热容不变的条件下,可推导得到电弧的

电导率σ的表达式为

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{m}{T_0}} \tag{20}$$

式中:σ_0为电弧单位长度电导;m为系数.

将式(17)~式(20)代入式(16)可得

$$\frac{dg}{dt} = \frac{k_2}{L} i^2 - k_1 k_2 g^{1-\beta} \tag{21}$$

式(21)就是最终的电弧模型,k_1、k_2及β为电弧参数,与电弧电压幅值及持续时间有关.根据式(21)在PSCAD中搭建电弧模型如图7所示.

根据上述建立的弓网距离、击穿电压以及电弧三个模块,将其按照图8所示进行连接即可得到升弓电弧模型.并将其与前文所建牵引网与轨道电路多导体传输线模型结合,即可得到轨道电路升弓过电压仿真模型.

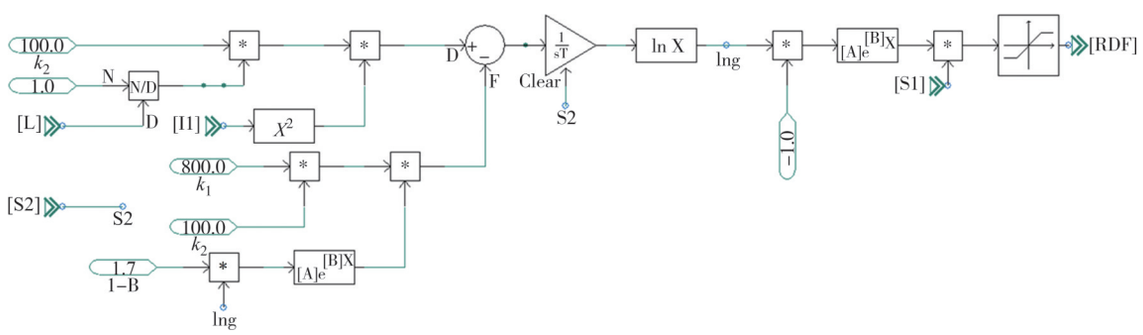


图7　电弧模块

Fig.7　Arc module

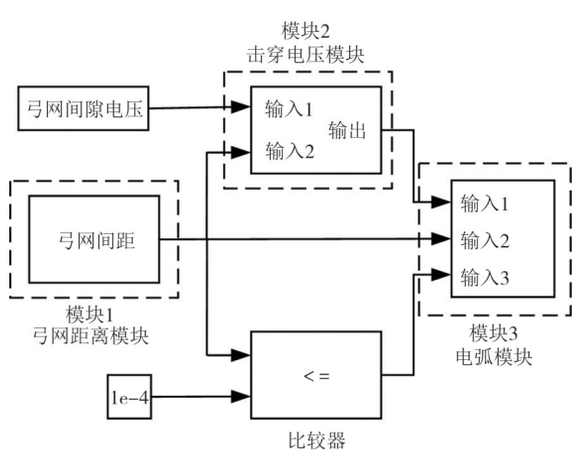


图8　升弓电弧模型

Fig.8　Pantograph-lifting arc model

2　仿真验证

为验证本文所建模型的准确性.设置受电弓以2 m/s匀速运动进行动态仿真,模拟其从初始间距0.2 m至与接触线触碰的全过程.图9为弓网间隙电压与弓网间距的时程变化曲线.仿真结果表明:当受电弓运动至99.7 ms时,弓网间隙发生击穿现象;电弧形成后,间隙电压迅速降至电弧电压水平.将接触线过电压仿真计算结果与文献[22]实测数据进行对比,结果如图10所示,发现其电压波形呈现工频基波叠加高频衰减振荡的复合特征.由图10可知,仿真过电压峰值为69.23 kV,与实测数据的67.8 kV接近,并且持续时间符合《轨道交通 绝缘配合 第2部分:过电压及相关防护》(GB/T 32350.2—2015)[23]中对于操作过电压的规定,验证了本文所建模型的准确性.

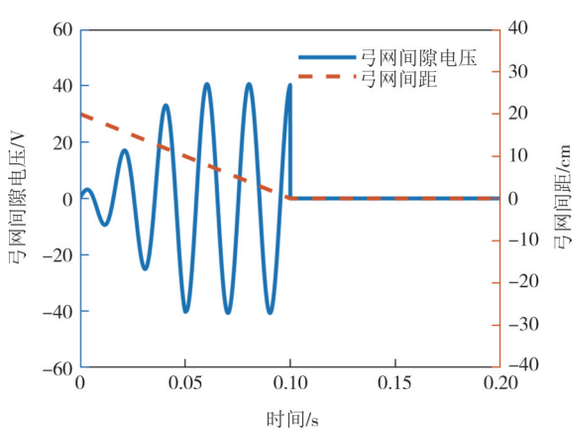


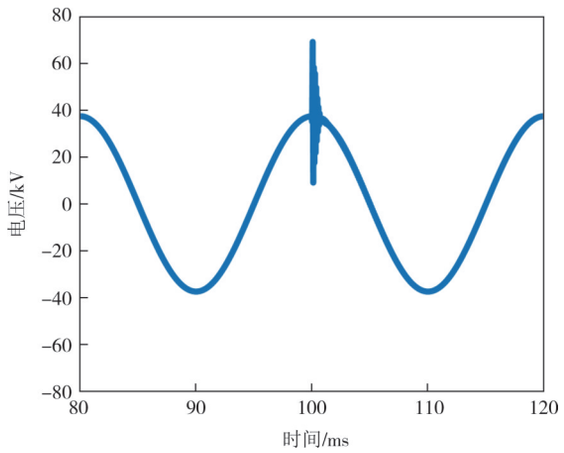
图9　弓网间距及弓网间隙电压的时程变化曲线

Fig.9　Time-history curves of pantograph-catenary distance and pantograph-catenary gap voltage

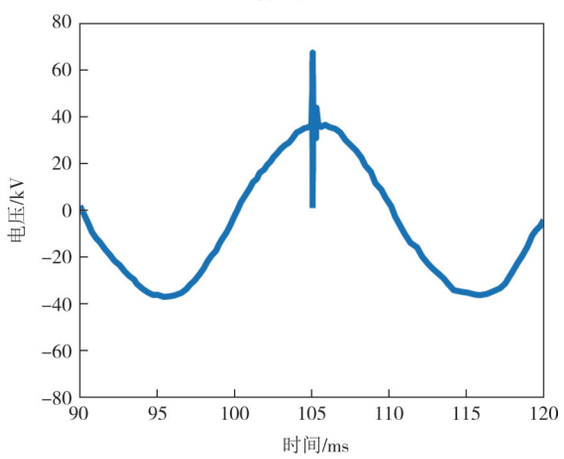
3　钢轨升弓过电压影响因素分析

3.1　钢轨漏泄电阻对钢轨升弓过电压的影响

高速铁路沿线的地质条件具有显著的复杂性,钢轨漏泄电阻作为关键电气参数,其数值受环境温度、湿度以及道床结构材料厚度等多重因素的共同影响.因此研究道床电阻对钢轨过电压的影响是必



(a)仿真波形



(b)实测波形

图 10 升弓时接触线过电压

Fig.10 Overvoltage on the contact wire during pantograph raising

要的.分别仿真钢轨漏泄电阻值为 1、5、10 Ω/km 三种情况下时,钢轨升弓过电压的波形,仿真结果如图 11 所示.

由图 11 可知,在其他参数相同的条件下,钢轨漏泄电阻越大,轨道电路接收端钢轨对地过电压的峰值也随之增大.这是因为随着钢轨漏泄电阻的增大,信号在钢轨上传输时的漏泄电流越小,因此钢轨过电压峰值越大.

3.2 接触网电压相位对钢轨升弓过电压的影响

合闸瞬间,牵引网系统中将出现瞬态高频振荡现象.理论分析表明,在升弓操作暂态过程持续阶段,接触网电源电压可近似视为恒定参数.该参数的值与升弓操作瞬间接触网的电压相位有关.研究表明,当合闸操作发生时接触网电压处于幅值最大点,系统呈现出最为严峻的工作状态.为分析升弓瞬间接触网电源电压相位角对钢轨升弓过电压峰值的影响,本文借鉴相关领域研究方法[1,22],将系统的电气特性等效为一个受直流激励的 RLC 二阶振荡电路.图 12 为不同相位角下钢轨升弓过电压幅值的仿真结果.

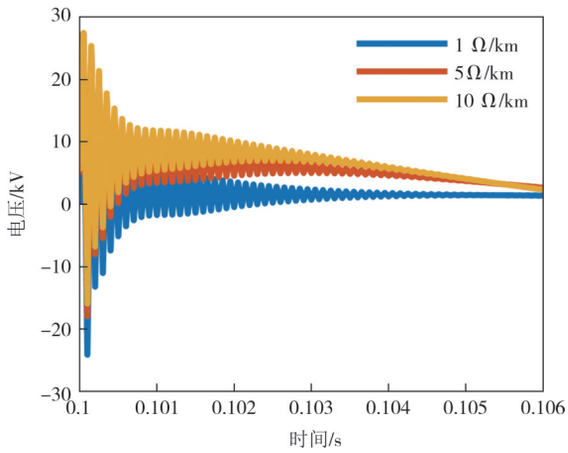


图 11 漏泄电阻对钢轨升弓过电压的影响

Fig.11 Influence of ballast resistance on rail-to-pantograph overvoltage

从图 12 可知,轨道电路接收端钢轨对地过电压在不同相位角条件下峰值差距较大.当电源电压处于零相位点时,钢轨产生的升弓过电压幅值相对较低,而在相位角处于 90° 和 270° 时,钢轨产生的升弓过电压幅值较大,其中当相位角为 90° 时,钢轨将产生最大过电压,其峰值可达 23.24 kV.理论分析结果表明,在适当的相位角下升弓可以降低钢轨过电压.

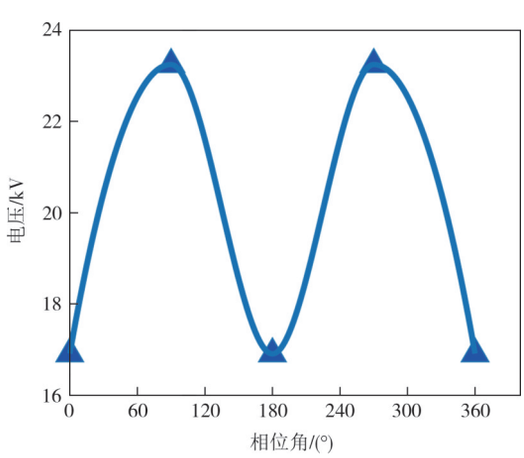


图 12 接触网电压相位角对钢轨过电压的影响

Fig. 12 Influence of catenary voltage phase angle on rail overvoltage

4 结 论

1) 基于 Agrawal 场线耦合模型提出了计算轨道

电路暂态响应的端口宏模型.该模型利用PSCAD中内置的“频率相关(相位)模型”,可以直接在PSCAD中对轨道电路暂态响应进行分析.建立升弓电弧模型,通过动态距离控制、击穿电压判定及电弧能量方程耦合,实现了电弧产生至熄灭的过程.并与实测数据对比验证了模型的准确性,为轨道电路升弓过电压的计算提供了一种简单高效的方法.

2) 利用本文模型对钢轨升弓过电压影响因素进行分析.结果表明,钢轨漏泄电阻越大,钢轨上的漏泄电流越小,钢轨升弓过电压的峰值越大;升弓时接触网电源相位角对钢轨升弓过电压有较大的影响,相位角为90°时,钢轨升弓过电压峰值最大为23.24 kV,严重影响轨旁信号设备的安全运行.

3) 本文计算结果为轨道电路抗干扰分析及过电压防护提供理论依据.

参考文献

[1] 曹保江,宋勇葆,谢文汉,等. 基于PSCAD的高速动车组升弓浪涌过电压仿真分析[J]. 高电压技术,2018,44(8):2746-2753.
CAO B J, SONG Y B, XIE W H, et al. Simulation analysis of surge voltage of rising pantograph for high-speed electric multiple unit based on PSCAD[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8):2746-2753.(in Chinese)

[2] 李玉诗.动车组高压系统过电压分布及防护研究[D].北京:北京交通大学,2022.
LI Y S. Research on overvoltage distribution and protection of high-voltage system of EMUs [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.(in Chinese)

[3] MORAES L B, PIANTINI A, SHIGIHARA M, et al. Analysis of lightning overvoltages on overhead hybrid lines [C]//2022 36th International Conference on Lightning Protection (ICLP), October 2-7, 2022, Cape Town, South Africa: IEEE, 2022: 529-534.

[4] ŠTUMPF M, ANTONINI G. Lightning-induced voltages on transmission lines over a lossy ground: an analytical coupling model based on the Cooray-Rubinstein formula [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(1): 155-162.

[5] ZHAO B, OU J N, WANG D, et al. Analysis of transient response of jointless track circuit based on multiconductor transmission lines theory[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2022, 17(11):1570-1579.

[6] 赵斌, 张友鹏. 基于傅里叶变换结合Q-D算法的轨道电路暂态分析[J]. 铁道学报, 2016, 38(3): 78-83.
ZHAO B, ZHANG Y P. Transient analysis of track circuits based on FFT & Q-D algorithm [J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(3): 78-83.(in Chinese)

[7] 律方成,韩芳,汪佛池,等. 动车组升降弓过电压及抑制措施仿真分析[J]. 高压电器, 2016, 52(2): 1-6, 12.
LV F C, HAN F, WANG F C, et al. Overvoltage in CRH reactor lifting process and simulation analysis of restraining measures[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2): 1-6, 12.(in Chinese)

[8] 苑丰彪,何朝保,李静源,等. 动车组高压系统过电压及其抑制技术研究[J]. 铁道机车与动车,2021(1): 8-11, 41,5.
YUAN F B, HE Z B, LI J Y, et al. Study on overvoltage and its suppression technology for the high-voltage system of MU [J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2021(1): 8-11, 41, 5.(in Chinese)

[9] 王州龙,徐金鹏,靳邵云, 等. 高速铁路信号设备通信接口雷击过电压损伤试验研究[J]. 工程科学与技术,2024,56(4): 287-296.
WANG Z L, XU J P, JIN S Y, et al. Experimental study on lightning transient overvoltage damage of interface devices of high-speed railway signal equipment [J]. Advanced Engineering Sciences, 2024, 56(4): 287-296.(in Chinese)

[10] 赵斌, 李森森, 宋玉华, 等.基于端口宏模型的移频轨道电路雷击响应分析[J].铁道科学与工程学报, 2025, 22(2): 852-862.
ZHAO B, LI S S, SONG Y H, et al. Analysis of lightning strike response in frequency-shifted track circuit based on port macro-model[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(2):852-862.(in Chinese)

[11] LIU X, CUI X, QI L. Time-domain finite-element method for the transient response of multiconductor transmission lines excited by an electromagnetic field [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2011, 53(2):462-474.

[12] 狄祎.场线耦合模型的端口宏模型研究及其PSCAD实现[D].保定:华北电力大学, 2022.
Di Y. Research on the port macro-model of field-to-line coupling mode and its interface with PSCAD [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2022.(in Chinese)

[13] LIU X, FAN Z W, LIANG G S, et al. Calculation of lightning induced overvoltages on overhead lines: model and interface with MATLAB/Simulink[J]. IEEE Access, 2018, 6:47308-47318.

[14] PAUL C R. Analysis of multi conductor transmission lines [M]. New York: Wiley, 2007.

[15] LIU X, DI Y. An easy-to-implement macro-model for evaluation of lightning induced voltages on overhead lines and its interface with PSCAD [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022, 64(2): 472-481.

[16] 王建. 基于PSCAD/EMTDC的特高压输电线路潜供电弧建模与仿真[J]. 电力与能源, 2023, 44(4): 335-339.
WANG J. Modeling and simulation of UHV transmission line

secondary arc based on PSCAD/EMTDC [J]. Power & Energy, 2023, 44(4): 335-339.(in Chinese)

[17] 张友鹏, 蔡红蕾, 赵斌.牵引电流对桥梁区段信号电缆的电磁串扰研究[J].铁道科学与工程学报, 2019, 16(4):1058-1066.
ZHANG Y P, CAI H L, ZHAO B. Study on electromagnetic interference of traction currents upon signal cables in the bridge section[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(4): 1058-1066.(in Chinese)

[18] 吴命利. 电气化铁道牵引网的统一链式电路模型[J]. 中国电机工程学报,2010,30(28): 52-58.
WU M L. Uniform chain circuit model for traction networks of electric railways[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 52-58.(in Chinese)

[19] 钟汉华,陈剑云,华敏,等. 全并联AT牵引供电系统雷击故障测距多路径行波算法研究[J]. 铁道学报,2024,46(1):60-71.
ZHONG H H, CHEN J Y, HUA M, et al. Research on multi-path traveling wave algorithm for lightning fault location of all-parallel AT traction power supply system [J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(1): 60-71.(in Chinese)

[20] LIANG J Y, FENG Q P, ZHANG Y T, et al. Study on transient overvoltage during pantograph lifting and lowering of intercity train [C]//2021 4th Asia Conference on Energy and Electrical Engineering (ACEEE), September 10-12, 2021, Bangkok, Thailand: IEEE, 2021:99-104.

[21] 李艳伟.智能控制技术在电弧炉电极调节中的应用[D].天津:天津理工大学, 2012.
LI Y W. Study of intelligent control technology of the electrode arc furnace electric regulator [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2012.(in Chinese)

[22] 吴命利, 史丹, 郭晨曦,等. 动车组升弓电磁暂态的仿真与测试[J].中国铁道科学, 2014, 35(6):91-98.
WU M L, SHI D, GUO C X, et al. Simulation and measurement of electromagnetic transients at pantograph lifting for electric multiple unit[J]. China Railway Science, 2014, 35(6): 91-98.(in Chinese)

[23] 中华人民共和国国家质量监督检验疫总局,中国国家标准化管理委员会.轨道交通 绝缘配合 第2部分:过电压及相关防护:GB/T 32350.2—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantina of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Repubilc of China. Railway applications—Insulation coordination—Part 2: Overvoltages and related protection: GB/T 32350.2—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.(in Chinese)