

# 城市轨道交通列车再生制动能量穿越时 钢轨电位分布规律仿真分析

林彦凯<sup>1</sup> 刘天晗<sup>2</sup> 高 瑞<sup>2</sup> 杜贵府<sup>2</sup>

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 610031, 成都; 2. 苏州大学轨道交通学院, 215131, 苏州//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 当前,城市轨道交通钢轨电位过高引起的钢轨电位限制装置频繁动作、轨旁设备打火、杂散电流泄漏量增大等现象严重,对乘客人身安全及线路杂散电流水平有较大影响,而针对多列车动态运行过程汇总再生制动能量穿越时钢轨电位分布规律尚待进一步研究。对城市轨道交通供电系统动态运行过程中钢轨电位分布规律进行研究,建立系统供电-回流-列车全模型下钢轨电位动态分布模型。分析了多区间多列车并列动态运行情况下再生制动列车回馈至牵引网功率被其他供电区间列车利用情况下钢轨电位的变化情况。研究分析表明,系统多列车动态运行时,再生制动能量穿越情况对钢轨电位影响较大。

**关键词** 城市轨道交通; 钢轨电位; 再生制动能量穿越

**中图分类号** U260.359; U284.26<sup>+</sup>1

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2021.12.023

## Simulation Analysis of Rail Potential Distribution Pattern with Crossing of Urban Rail Transit Train Regenerative Braking Energy

LIN Yankai, LIU Tianhan, GAO Rui, DU Guifu

**Abstract** Currently, situations caused by urban rail transit high rail potential such as frequent action of OVPD (over-voltage protection device), fire of rail side equipment and increased amount of stray current leakage are serious, having concerning influence on passenger safety and stray current level of the line. The rail potential distribution pattern during the crossing of collective regenerative braking energy of multiple trains operating in dynamic traction network requires further research. The rail potential distribution pattern under urban rail transit power supply system dynamic operation is studied, and rail potential dynamic distribution model under the overall model of system power supply-reflux-train is established. The variation of rail potential under the conditions of multiple trains running at multiple intervals and the regenerative braking energy fed back to the traction network being reused by trains at other intervals is analyzed. Results show that when multiple trains are operating in the system, the impact of train regenera-

tive braking energy crossing on rail potential is distinct.

**Key words** urban rail transit; rail potential; regenerative braking energy crossing

**First-author's address** China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 610031, Chengdu, China

城市轨道交通普遍采用直流牵引供电方式。由于走行轨存在纵向电阻,故当牵引电流回流时,走行轨上会存在一定压降。此时,若采用悬浮接地方式,则钢轨与大地之间会形成电位差,即钢轨电位。我国城市轨道交通直流牵引供电系统在运行过程中的钢轨电位及杂散电流问题尤为突出<sup>[1-2]</sup>,已经影响到城市轨道交通系统自身及周边城市地下工程(埋地金属管线及埋地主体结构)的安全运行。

过高的钢轨电位会危害上下列车的乘客安全,甚至会引起触电事故。此外,过高的钢轨电位还会对连接到钢轨的相关设备(转辙机及屏蔽门等轨旁设备)造成损害。国内已经有钢轨电位过高引发的屏蔽门局部打火冒烟及转辙机外壳接地电缆烧熔等事故。为了防止上述问题的出现,在轨道与大地之间通常设置 OVPD(钢轨电位限制装置)<sup>[3]</sup>。在列车运行时,一旦 OVPD 处的电位超过安全限值(按标准规定,安全限值为 90 V),OVPD 就会立即动作,将该位置的钢轨直接与地网相连。此时,该位置的钢轨电位就会受到限制,从而避免了过高钢轨电位对人身及轨旁设备的影响。OVPD 的设置虽然可以保护人身及轨旁设备,但其带来的副作用也不可避免。当 OVPD 动作时,会有大量的回流电流通过 OVPD 泄漏到大地,根据实际现场测试的结果,该泄漏电流可达上千安培,不可避免地会对周边结构钢筋及埋地管线产生腐蚀。由此可见,钢轨电位已经成为线路运行过程中的重要安全问题。

钢轨电位问题已对城市轨道交通系统安全运行造成较大影响,然而针对钢轨电位动态分布的研究仍然缺乏。既有相关文献对钢轨电位建模一般仅局限于回流系统模型建立,而忽略了供电部分及多列车动态运行时能量穿越情况对回流系统钢轨电位的影响<sup>[4-5]</sup>。本文针对城市轨道交通系统供电-回流-列车全模型下钢轨电位动态分布规律进行研究,分析多列车动态运行过程中再生制动能量穿越对钢轨电位的影响。

## 1 城市轨道交通供电系统仿真模型

### 1.1 基本模型

多列车动态运行时列车之间能量穿越现象明显。列车再生制动回馈至接触网的能量越区为牵引加速列车供电。为研究回流系统钢轨电位的动态分布规律,需建立城市轨道交通供电-列车-回流全系统的仿真模型,其主要包括牵引变电所、列车、接触网、回流系统(走行轨、排流网、地网)等。

假设在供电系统中,变电所数与列车数共有  $N$  个,其位置依次为  $x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}, \dots, x_N$ 。以变电所及列车位置为切面,将供电系统分为  $N-1$  个区段。每个区段中对供电系统各部分进行模型等效。供电系统仿真模型如图 1 所示。在第  $n$  个切面位置  $x=x_n (1 \leq n \leq N-1)$  处:  $U_{un}$  为上行接触网对地电位,  $U_{dn}$  为下行接触网对地电位,  $U_{rn}$  为走行轨对地电位,  $U_{sn}$  为排流网对地电位;  $y_{wn}$  为上下行接触网之间等效电导;在  $x_n$  至  $x_{(n+1)}$  区段中,  $z_{un}$  及  $z_{dn}$  分别为上行接触网与下行接触网的等效纵向电阻;走行轨-排流网-地网因其分布参数特性明显,等效为双  $\pi$  型电路,  $z_{rn}$  为走行轨等效纵向电阻,  $z_{sn}$  为排流网等效纵向电阻,  $y_{rn}$  为走行轨对排流网等效电导,  $y_{sn}$  为排流网对地等效电导,由  $x_n$  至  $x_{(n+1)}$  区段长度及

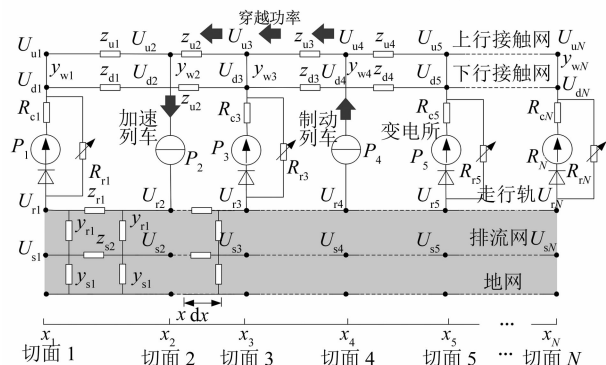


图1 城市轨道交通供电系统仿真模型

Fig. 1 Simulation model of power system in urban rail transit

回流系统参数进行折算。

### 1.2 节点方程建立

在  $x=x_n$  处,不控整流机组等效为单向理想电压源串内阻模型  $R_{cn}$ ,再生制动电能吸收装置等效为可变电阻模型  $R_{rn}$ 。令不控整流机组空载电压为  $U_{d0}$ ,再生制动能量吸收装置启动阈值为  $U_{s-limit}$ ,则整流机组及再生能量吸收装置的等效输出特性见图 2。

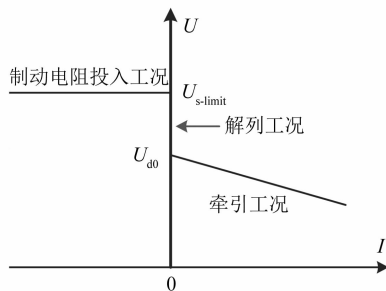
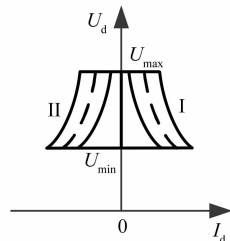


图2 整流机组与再生能量吸收装置等效输出特性

Fig. 2 Equivalent output characteristics of rectifier unit and regenerative energy absorption device

在动态建模过程中,列车等效为时变功率源,其功率及位置不断随时间改变,功率-时间曲线及位置-时间曲线根据列车牵引计算结果获取。在每一时刻进行潮流计算迭代求解时,列车位置及功率恒定。列车外特性曲线如图 3 所示。受牵引网压限制,列车位置网压为  $U_{max} \sim U_{min}$ 。



注：第一象限曲线表示列车处于牵引工况；  
第二象限曲线表示列车处于再生制动工况。

图3 列车外特性曲线

Fig. 3 External characteristics curve of train

根据图 1 所示城市轨道交通供电系统模型及等效电路,针对  $x_n$  位置,可以建立如下节点电压方程:

$$I_{un} = -y_{wn} U_{dn} + \left( \frac{1}{z_{u(n-1)}} + \frac{1}{z_{un}} + y_{wn} \right) U_{un} - \frac{U_{u(n-1)}}{z_{u(n-1)}} - \frac{U_{u(n+1)}}{z_{un}} \quad (1)$$

$$I_{dn} = \left( \frac{1}{z_{d(n-1)}} + \frac{1}{z_{dn}} + y_{wn} + \frac{1}{R_{cn}} \right) U_{dn} - y_{wn} U_{un} -$$

$$\frac{1}{R_{cn}} U_m - \frac{U_{d(n-1)}}{z_{d(n-1)}} - \frac{U_{d(n+1)}}{z_{dn}} \quad (2)$$

$$I_m = -\frac{1}{R_{cn}} U_{dn} + \left( \frac{1}{z_{r(n-1)}} + \frac{1}{z_m} + \frac{1}{R_{cn}} + y_{r(n-1)} + y_m \right) U_m - (y_{r(n-1)} + y_m) U_{sn} - \frac{U_{r(n-1)}}{z_{r(n-1)}} - \frac{U_{r(n+1)}}{z_m} \quad (3)$$

$$I_{sn} = \left( \frac{1}{z_{s(n-1)}} + \frac{1}{z_{sn}} + y_{r(n-1)} + y_m + y_{s(n-1)} + y_{sn} \right) U_{sn} - (y_{r(n-1)} + y_m) U_m - \frac{U_{s(n-1)}}{z_{s(n-1)}} - \frac{U_{s(n+1)}}{z_{sn}} \quad (4)$$

根据各切面位置所建立的节点方程组进行潮流迭代计算,获得各时刻下供电系统各节点电压电流分布。

### 1.3 回流系统钢轨电位分布

由于回流系统自身具备分布参数特性,即使能获得节点电压及电流,也不能获得全线各位置的钢轨电位动态分布,因此,还需建立回流系统钢轨电位分布模型。

取全模型回流系统位置  $x$  的 1 个微元  $dx$ , 建立三层结构回流系统微元模型(如图 4 所示),分析电压与电流关系。由此,钢轨电位与杂散电流关系为:

$$\begin{cases} \frac{du_r(x)}{dx} = -R_r i_r(x) \\ \frac{du_s(x)}{dx} = -R_s i_s(x) \\ \frac{di_r(x)}{dx} = G_r(u_s(x) - u_r(x)) \\ \frac{di_s(x)}{dx} = G_r u_r(x) - (G_r + G_s) u_s(x) \end{cases} \quad (5)$$

令  $a=R_r G_r, b=R_s G_s, k=R_s(G_r+G_s)$ , 设计算参数

$$\alpha = \sqrt{\frac{a+b}{2} + \sqrt{\frac{(a-b)^2}{4} + ak}}, \beta = \sqrt{\frac{a+b}{2} - \sqrt{\frac{(a-b)^2}{4} + ak}},$$

则由式(5)可得,  $0 \sim l_1$  段钢轨电位与杂散电流为:

$$u_r(x) = C_1 e^{-\alpha x} + C_2 e^{\alpha x} + C_3 e^{-\beta x} + C_4 e^{\beta x} \quad (6)$$

$$i_r(x) = \frac{\alpha C_1 e^{-\alpha x} - \alpha C_2 e^{\alpha x} + \beta C_3 e^{-\beta x} - \beta C_4 e^{\beta x}}{R_r} \quad (7)$$

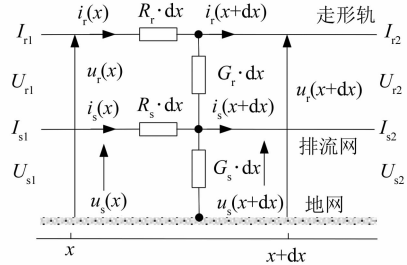
$$u_s(x) =$$

$$u_r(x) - \frac{\alpha^2 C_1 e^{-\alpha x} + \alpha^2 C_2 e^{\alpha x} + \beta^2 C_3 e^{-\beta x} + \beta^2 C_4 e^{\beta x}}{G_r R_r} \quad (8)$$

$$i_s(x) = \left( \frac{G_s}{\alpha} - \frac{\alpha}{R_r} - \frac{G_s \alpha}{G_r R_r} \right) (C_1 e^{-\alpha x} - C_2 e^{\alpha x}) +$$

$$\left( \frac{G_s}{\beta} - \frac{\beta}{R_r} - \frac{G_s \beta}{G_r R_r} \right) (C_3 e^{-\beta x} - C_4 e^{\beta x}) \quad (9)$$

在式(6)~式(9)中,  $C_1, C_2, C_3, C_4$  是通解的待定系数。



注:  $u_r(x)$  为  $x$  处走行轨对地电位;  $u_s(x)$  为  $x$  处排流网对地电位;  $i_r(x)$  为  $x$  处走行轨电流;  $i_s(x)$  为  $x$  处排流网电流;  $R_r$  为单位长度走行轨纵向电阻;  $R_s$  为单位长度排流网纵向电阻;  $G_r$  为单位长度走行轨对排流网过渡电导;  $G_s$  为单位长度排流网对地过渡电导。

图 4 三层结构回流系统微元模型示意图

Fig. 4 Micro element model diagram of three-layer structure reflux system

根据潮流计算结果及钢轨电位计算结果可以得到列车动态运行过程中钢轨电位的分布。

## 2 再生制动能量穿越下钢轨电位分布

为分析再生制动能量穿越下钢轨电位的分布规律,本文基于国内某线路的实际数据开展仿真分析。该线路共设置 8 座车站,且各车站间隔 1 km。  $x=0, x=2\ 000\text{ m}, x=4\ 000\text{ m}, x=6\ 000\text{ m}$  及  $x=8\ 000\text{ m}$  处设有牵引变电所。仿真计算中,牵引变电所空载电压为 1 593 V,等效内阻为 0.016  $\Omega$ ,再生能量吸收装置启动阈值为 1 800 V,接触网及走行轨的单位长度纵向电阻为 0.02  $\Omega/\text{km}$ ,排流网的单位长度纵向电阻为 0.02  $\Omega/\text{km}$ ,走行轨及排流网的单位过渡电阻为 15  $\Omega/\text{km}$ 。列车功率及位置曲线由列车牵引计算获得。

假设:在  $x=6\ 800\text{ m}$  处,有 1 列列车向接触网回馈再生制动电能(电流幅值为 2 500 A);由 1 列牵引加速列车全部吸收该电能,且线路中无其他列车或牵引变电所运行。当加速列车分别位于  $x=2\ 000\text{ m}, x=3\ 500\text{ m}, x=5\ 000\text{ m}$  处时,线路中由再生制动电能产生的钢轨电位幅值对比如图 5 所示。

由图 5 可知,当加速列车位置不同时,其再生制动电能产生的钢轨电位幅值差别较大。当由  $x=2\ 000\text{ m}$  处的加速列车全部吸收再生制动电能时,线路正向钢轨电位幅值可达 107.1 V,负向钢轨电位幅值可达 -130.9 V。相比之下,当加速列车位于

5 000 m 时,正负向钢轨电位幅值分别为 23.7 V 及 -66.0 V。

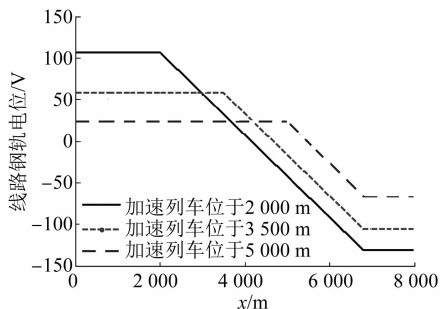


图 5 不同越区长度对钢轨电位影响

Fig. 5 Effect of different crossing length on rail potential

进一步分析多个列车动态运行过程中的线路钢轨电位分布情况。在仿真软件中设置上行线和下行线各有 2 列列车对开运行,0~200 s 时间段内,列车的位置-时间曲线及功率-时间曲线如图 6 所示。

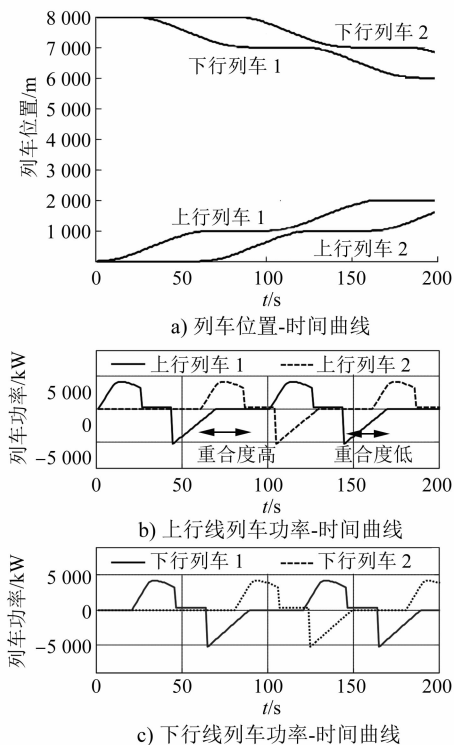


图 6 列车运行示意图

Fig. 6 Schematic diagram of train operation

根据图 6 建立仿真模型进行分析,得到该过程中再生制动电能利用情况如图 7 所示。

对比图 6 中的 2 组列车运行功率图可知:当加速列车牵引电能功率与制动列车再生回馈电能的功率重合度较高时,被牵引加速列车吸收的再生制

动能能量较多,当列车再生制动馈电但线路中无牵引加速列车时,再生制动电能会被其他能耗装置吸收。在该情况下,钢轨电位动态分布如图 8 所示。由图 8 可见,随时间变化,全线钢轨电位幅值变化明显。

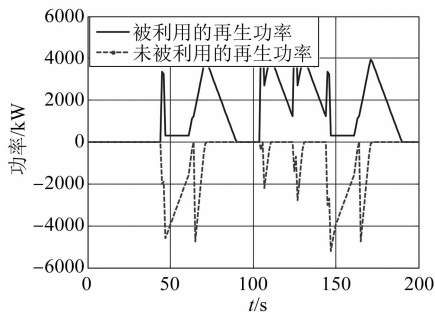


图 7 再生制动电能利用情况

Fig. 7 Utilization of regenerative braking power

对比图 7 与图 8 可知:当再生制动电能被牵引加速列车吸收得较多且穿越距离较远情况下钢轨电位上升明显。例如 67 s 到 81 s 时间段下行列车 1 再生制动列车位于 7 100 m 位置附近,回馈至牵引网的能量穿越为上行列车 2 供电,此时上行列车 2 位于 200 m 位置附近,该时间段钢轨电位最大幅值可达 90.5 V,相比其他时间段钢轨电位升高明显。

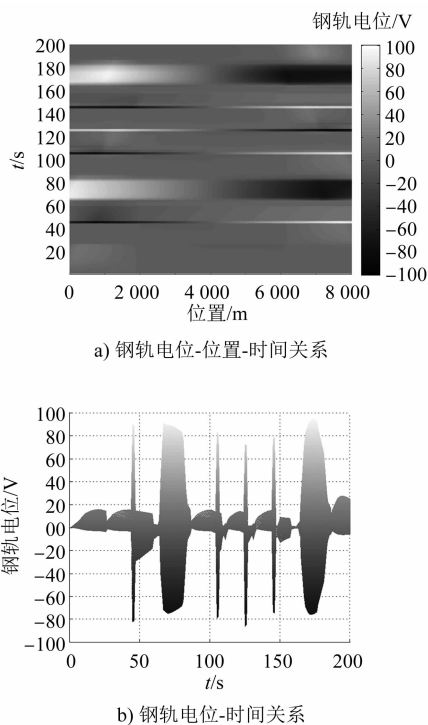


图 8 钢轨电位分布

Fig. 8 Distribution of rail potential

(下转第 124 页)