

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.12.020

排流网情况下地铁杂散电流分布数值模拟研究

马德良,方江敏,钱瑶虹

(华南理工大学 机械与汽车工程学院,广东 广州 510640)

摘要:针对地铁杂散电流的腐蚀及预防问题,对排流网情况下地铁杂散电流及相关因素的影响分布进行了研究,在原有的走行轨—金属网模型基础上,提出并建立了走行轨—排流网—金属网系统的物理模型,基于基尔霍夫定律建立相应的数学模型,利用 MATLAB 对数学模型进行了程序编写,分别研究了排流网影响效果,以及排流网条件下变电所间距、过渡电阻和走行轨纵向电阻对走行轨电流、走行轨电压、杂散电流和排流网中电流的影响。结果表明:排流网可以排流大部分杂散电流,从而降低腐蚀危害;变电所的间距不宜大于 2 km,过渡电阻宜设定在 $15\ \Omega \cdot \text{km}$ 以上,尽可能降低走行轨纵向电阻。

关键词:杂散电流;地铁;排流网;走行轨;过渡电阻

中图分类号:TM152;TG172.84

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)12-1465-04

Numerical simulation of stray current distribution in metro network with drainage

MA De-liang, FANG Jiang-min, QIAN Yao-hong

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Aiming at the corrosion and prevention of stray current in the subway, the influence distribution of the stray current and related factors of the subway is studied. on the basis of the existing rail-metal mesh model, the physical model of the rail-drain network-metal mesh system was proposed and established. Based on Kirchhoff's Law, the corresponding mathematical model is established, Matlab was used for programming the mathematical model, the effect of the drainage network and the influence of the distance between the substation, the transition resistance and the longitudinal resistance of the running rail on the running rail current, the running rail voltage, the stray current and the current in the drain network are studied respectively. The results indicate that drainage network can drain most of the stray current, thereby reducing the corrosion hazard; substation spacing should not be greater than 2 km, the transition resistance should be set at $15\ \Omega \cdot \text{km}$ or more, the longitudinal resistance of the track should be reduced as much as possible.

Key words: stray current; metro; drainage net; rail; transition resistance

0 引言

我国的地铁牵引供电系统普遍采用双边供电的直流牵引制式。理想状态下,变电所为机车提供牵引电流,电流流经机车后通过走行轨返回变电所^[1]。但是实际情况下,走行轨与大地之间很难做到完全绝缘,在地铁运行中部分电流泄漏至金属网或埋地金属等,形成杂散电流^[2]。

泄漏的杂散电流会对埋地金属结构产生电化学腐蚀,破坏钢结构强度,影响使用寿命等^[3],且泄漏的杂散电流和金属腐蚀量之间符合法拉第定律。理论上 1 A 的杂散电流在一年内可以腐蚀溶解钢铁大约 9 kg^[4]。实际上土壤中的杂散电流往往远大于 1 A,其造成的腐蚀程度、腐蚀速率更快。

在走行轨下铺设排流网可以将泄漏出来的大部分杂散电流回流至变电所负极,从而减少流入埋地金属结构的杂散电流大小,进而降低腐蚀危害^[5]。目前国

内外对无排流网情况下的地铁杂散电流计算公式及模拟较多,但考虑排流网影响却很少。

本研究对排流网条件下变电所间距、过渡电阻和走行轨纵向电阻对走行轨电流、走行轨电压、杂散电流及排流网电流分布的影响进行研究。

1 地铁杂散电流分布模型建立

由于地质条件的不同及其他因素的不确定性,严格意义上杂散电流泄漏公式很难推导^[6],本研究采取理想的条件下建立走行轨—金属网,走行轨—排流网—金属网两个系统建立相应的数学模型。模型的建立基于以下几点假设^[7]:(1)杂散电流的分布按单个变电所提供考虑;(2)走行轨、金属网及排流网的纵向电阻均匀分布;(3)馈电线电阻忽略不计;(4)走行轨与金属网之间及金属网与排流网之间的过渡电阻一致。

1.1 无排流网情况下地铁杂散电流分布模型

电流电压分布图^[8]如图 1 所示。

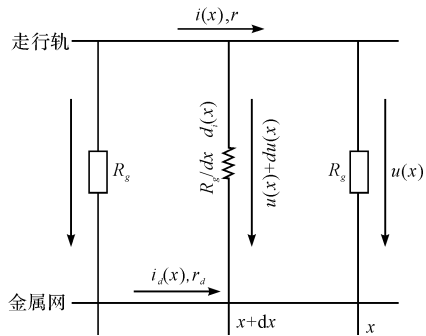


图 1 走行轨—金属网电流电压分布图

$i(x)$ —走行轨 x 处电流, A; r —走行轨纵向电阻, Ω/km ; $u(x)$ — x 处走行轨对金属网电压, V; $i_d(x)$ —金属网 x 处电流, A; r_d —金属网纵向电阻, Ω/km ; R_g —走行轨对金属网的过渡电阻, $\Omega \cdot \text{km}$

将走行轨及金属网中电流之和近似等于供电电流。根据基尔霍夫定律:

$$i(x) \cdot r \cdot dx + u(x) - [u(x) + du(x)] - i_d(x) \cdot r_d \cdot dx = 0 \tag{1}$$

由(1)可得:

$$\frac{du(x)}{dx} = i(x) \cdot r - i_d(x) \cdot r_d \tag{2}$$

$$I = i(x) + i_d(x) \tag{3}$$

$$u(x) = di(x) \cdot R_g/dx \tag{4}$$

联立方程(2~4),输入边界条件: $x=0, i(0)=I; x=L, i(L)=I$,求解得:

$$u(x) = -Ir \sqrt{\frac{R_g}{r+r_d}} \tanh\left(\frac{L}{2} \sqrt{\frac{r+r_d}{R_g}}\right) \cosh \sqrt{\frac{r+r_d}{R_g}} x +$$

$$\begin{aligned} & Ir \sqrt{\frac{R_g}{r+r_d}} \sinh \sqrt{\frac{r+r_d}{R_g}} x \\ & i(x) = \frac{-Ir \tanh\left(\frac{L}{2} \sqrt{\frac{r+r_d}{R_g}}\right) \sinh \sqrt{\frac{r+r_d}{R_g}} x + I \cosh \sqrt{\frac{r+r_d}{R_g}} x + Ir_d}{r+r_d} \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} & i_s = I - i(x) = \\ & \frac{Ir + I \tanh\left(\frac{L}{2} \sqrt{\frac{r+r_d}{R_g}}\right) \sinh \sqrt{\frac{r+r_d}{R_g}} x - I \cosh \sqrt{\frac{r+r_d}{R_g}} x}{r+r_d} \end{aligned} \tag{6}$$

1.2 有排流网情况下地铁杂散电流分布模型

同时将走行轨、排流网及金属网中电流之和近似等于供电电流。

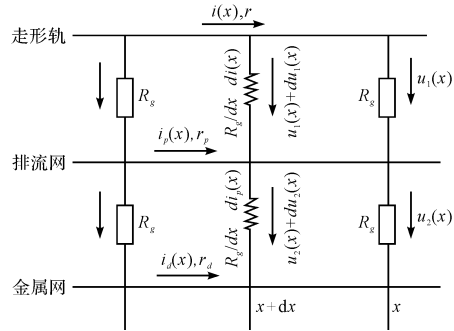


图 2 走行轨—排流网—金属网电流电压分布图

$i(x)$ —走行轨 x 处电流, A; r —走行轨纵向电阻, Ω/km ; $u_1(x)$ — x 处走行轨对排流网电压, V; $i_p(x)$ —排流网 x 处电流, A; r_p —排流网纵向电阻, Ω/km ; $u_2(x)$ — x 处排流网对金属网电压, V; $i_d(x)$ —金属网 x 处电流, A; r_d —金属网纵向电阻, Ω/km ; R_g —走行轨对排流网及排流网对金属网之间的过渡电阻,为简化计算视为相同。将走行轨、排流网及金属网中电流之和近似等于供电电流

根据基尔霍夫定律:

$$i(x) r dx + u_1(x) - i_p(x) r_p dx - (u_1(x) + du_1(x)) = 0 \tag{8}$$

$$i_p(x) r_p dx + u_2(x) - i_r(x) r_d dx - (u_2(x) + du_2(x)) = 0 \tag{9}$$

$$u_1(x) = di(x) R_g/dx \tag{10}$$

$$u_2(x) = di_p(x) R_g/dx \tag{11}$$

$$I = i(x) + i_p(x) + i_r(x) \tag{12}$$

联立(8~12)得,输入边界条件: $i(0)=I, i(L)=I, i_p(0)=0, i_p(L)=0$,令:

$$M = \frac{r - r_p - r_d}{2 \sqrt{(r - r_p - r_d)^2 - 4 r_p r_d}}$$

$$r_1 = \sqrt{\frac{r + r_p + r_d + \sqrt{(r - r_p - r_d)^2 - 4r_p r_d}}{2R_g}}$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{r + r_p + r_d - \sqrt{(r - r_p - r_d)^2 - 4r_p r_d}}{2R_g}}$$

求解得:

$$i(x) = \left(I - \left(\frac{1}{2} + M \right) I \cosh r_1 L - \left(M - \frac{1}{2} \right) I \tanh \frac{r_2 L}{2} \sinh r_2 L - \left(\frac{1}{2} - M \right) I \cosh r_2 L \right) \times \sinh r_1 x / \sinh r_1 L + \left(\frac{1}{2} + M \right) I \cosh r_1 x + \left(M - \frac{1}{2} \right) I \tanh \frac{r_2 L}{2} \sinh r_2 x + \left(\frac{1}{2} - M \right) I \cosh r_2 x \quad (13)$$

$$u_1(x) = \left(I - \left(\frac{1}{2} + M \right) I \cosh r_1 L - \left(M - \frac{1}{2} \right) I \tanh \frac{r_2 L}{2} \sinh r_2 L - \left(\frac{1}{2} - M \right) I \cosh r_2 L \right) R_g r_1 \cosh r_1 x / \sinh r_1 L + \left(\frac{1}{2} + M \right) I R_g r_1 \sinh r_1 x + \left(M - \frac{1}{2} \right) I \tanh \frac{r_2 L}{2} R_g r_2 \cosh r_2 x + \left(\frac{1}{2} - M \right) I R_g r_2 \sinh r_2 x \quad (14)$$

$$i_p(x) = \frac{i(x)r - u_1'}{r_p} = \frac{I - \left(\frac{1}{2} + M \right) I \cosh r_1 L - \left(M - \frac{1}{2} \right) I \tanh \frac{r_2 L}{2} \sinh r_2 L - \left(\frac{1}{2} - M \right) I \cosh r_2 L}{r_p \sinh(r_1 L)} + \frac{\left(\frac{1}{2} + M \right) (r - r_1^2 R_g) I}{r_p} \cosh r_1 x + \frac{\left(M - \frac{1}{2} \right) \tanh \frac{r_2 L}{2} (r - r_2^2 R_g) I}{r_p} \sinh r_2 x + \frac{\left(\frac{1}{2} - M \right) (r - r_2^2 R_g) I}{r_p} \cosh r_2 x \quad (15)$$

$$i_s = I - i(x) = I - \left(I - \left(\frac{1}{2} + M \right) I \cosh r_1 L - \left(M - \frac{1}{2} \right) I \tanh \frac{r_2 L}{2} \sinh r_2 L - \left(\frac{1}{2} - M \right) I \cosh r_2 L \right) \sinh r_1 x / \sinh r_1 L - \left(\frac{1}{2} + M \right) I \cosh r_1 x - \left(M - \frac{1}{2} \right) I \tanh \frac{r_2 L}{2} \sinh r_2 x - \left(\frac{1}{2} - M \right) I \cosh r_2 x \quad (16)$$

2 模拟结果与分析

本研究运用 Matlab 软件 M 语言进行程序编写。根

据工程实例中尽量不多层排流,避免隔层排流的排流原则^[9],本研究排流网铺设采用 6 根纵向排列,单根直径 12 mm 的钢筋,其纵向电阻 $r_p = 0.86 \Omega \cdot \text{km}^{[10]}$ 。已知两变电所间距 $L = 2 \text{ km}$,供电电流 $I = 2000 \text{ A}$,走行轨纵向电阻 $r = 0.04 \Omega/\text{km}$,金属网纵向电阻 $r_d = 0.01 \Omega/\text{km}$,过渡电阻 $R_g = 3 \Omega \cdot \text{km}$,排流网纵向电阻 $r_p = 0.86 \Omega \cdot \text{km}$ 。

2.1 排流网影响分析

通过模拟有、无排流网两种情况下走行轨电流、走行轨电压、杂散电流的分布。结果表明,铺设排流网对走行轨电流、走行轨电压及杂散电流基本无影响,但排流网可回流大部分杂散电流,相应的流入金属网等埋地金属的杂散电流降低,从而达到有效预防杂散电流腐蚀的目的。

2.2 变电所间距 L 影响分析

改变变电所间距 L ,分别取 1.5 km, 2 km, 2.5 km, 3 km,模拟变电站间距对走行轨电流、走行轨电压、杂散电流和排流网中电流的影响。模拟结果表明,随变电所间距增大,走行轨电流减小,对应产生的杂散电流增大,排流网中的电流也对应增大,走行轨电压对应降低。

变电所间距对杂散电流、排流网中电流影响对比分析如图 3 所示。

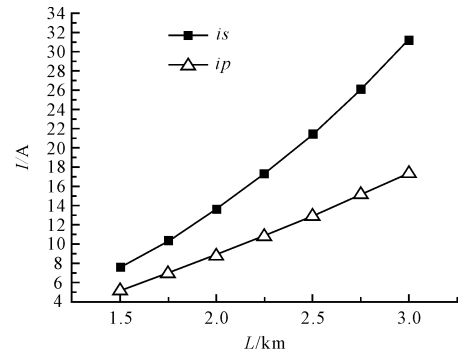


图 3 变电所间距对杂散电流、排流网中电流影响对比分析图

由图 3 可知,当两变电所间距超过 2 km 时,杂散电流和排流网中的电流增大速率加快,但排流网的排流速率明显低于杂散电流产生的速率。

2.3 过渡电阻 R_g 影响分析

改变过渡电阻 R_g ,分别取 $3 \Omega \cdot \text{km}$, $7 \Omega \cdot \text{km}$, $11 \Omega \cdot \text{km}$, $15 \Omega \cdot \text{km}$,模拟过渡电阻对走行轨电流、走行轨电压、杂散电流和排流网中电流的影响。模拟结果表明:增大过渡电阻,走行轨电流会相应增大,产生的杂散电流减少,排流网中电流也对应减少,走行轨电压保持不变。

过渡电阻对杂散电流和排流网中电流影响对比分析如图 4 所示。

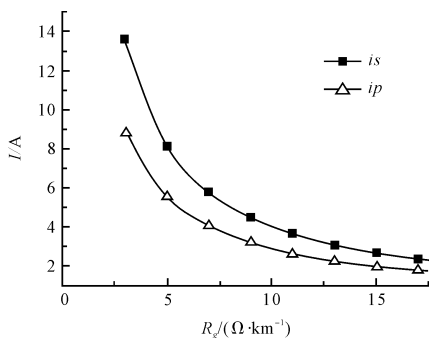


图4 过渡电阻对杂散电流和排流网中电流影响对比分析图

由图4可知,当过渡电阻小于 $8.5 \Omega \cdot \text{km}$ 时杂散电流和排流网中电流降低速率快,当过渡电阻大于 $8.5 \Omega \cdot \text{km}$ 时,杂散电流及排流网中电流明显较低,且两者差值仅在1 A左右。当过渡电阻大于 $15 \Omega \cdot \text{km}$ 时,杂散电流及排流网中的电流基本趋于稳定。

2.4 走行轨纵向电阻 r 影响分析

改变走行轨纵向电阻 r , 分别取 $0.02 \Omega/\text{km}$, $0.04 \Omega/\text{km}$, $0.06 \Omega/\text{km}$, $0.08 \Omega/\text{km}$, 模拟走行轨纵向电阻对走行轨电流、走行轨电压、杂散电流和排流网中电流的影响。模拟结果表明,增大走行轨纵向电阻,走行轨电压增大,且变化幅度较大,走行轨电流相应减少,产生的杂散电流增大,排流网中电流基本保持不变。走行轨纵向电阻对杂散电流和排流网中电流影响对比分析如图5所示。

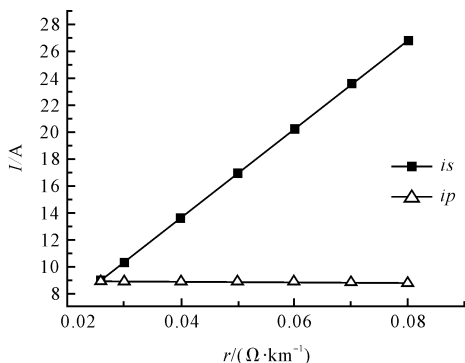


图5 走行轨纵向电阻对杂散电流和排流网中电流影响对比分析图

由图5可知,随走行轨纵向电阻的增大,杂散电流增大速率较快,但排流网中电流基本无变化,说明走行轨纵向电阻对排流网中电流无影响。

3 结束语

通过建立数学模型,本研究运用 Matlab 分析了排流网的影响效果,以及排流网条件下变电所间距、过渡电阻和走行轨纵向电阻对走行轨电流、走行轨电压、杂散电流和排流网电流的分布影响,结果表明:

(1)排流网对走行轨电流、走行轨电压及杂散电流分布影响甚微,但排流网会将产生的大部分杂散电流回流至变电所负极,从而降低腐蚀危害;

(2)变电所间距对走行轨电流、杂散电流、排流网中的电流及走行轨电压都会有影响。变电所间距越大产生的杂散电流越大,排流网中的电流也越大。

(3)过渡电阻也会对走行轨电流、杂散电流及排流网中电流产生影响,但是其影响作用小于变电所间距。过渡电阻越大产生的杂散电流越小,排流网中电流也越小。增大走行轨纵向电阻,走行轨电流会相应减少,产生的杂散电流增大,但是对排流网中电流无影响。

参考文献 (References):

- [1] 牟龙华,史万周,张明锐. 排流网情况下地铁杂流分布规律的研究[J]. 铁道学报,2007,29(3):42-47.
- [2] 邓 琴. 地铁排流网系统的设计研究[D]. 成都:西南交通大学电气工程学院,2012.
- [3] 曹阿林,朱庆军,侯保荣,等. 油气管道的杂散电流腐蚀与防护[J]. 煤气与热力,2009,29(3):6-9.
- [4] 宋吟蔚,王新华,何仁洋,等. 埋地钢质管道杂散电流腐蚀研究现状[J]. 腐蚀与防护,2009(8):4-5.
- [5] 张春苗,王昌吉. 排流网与地网排流时对杂散电流分布影响的探讨[J]. 西部探矿工程,2006,124(8):214.
- [6] 韩旭红. 城市地铁杂散电流及抑制措施深入研究[D]. 成都:西南交通大学电气工程学院,2014.
- [7] 李 威. 地铁杂散电流腐蚀监测及防护技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2004.
- [8] 赵宇辉,周晓军. 地铁杂散电流分布的数值分析[J]. 城市轨道交通研究,2009,12(12):42-47.
- [9] 杜贵府,张栋梁,吴培林. 城市轨道交通多层排流网投入运行研究[J]. 城市轨道交通研究,2015,18(11):80-82.
- [10] 蔡 力,王建国,樊亚东,等. 地铁走行轨对地过渡电阻杂散电流分布的影响[J]. 高压电技术,2015,41(11):3604-3606.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

马德良,方江敏,钱瑶虹. 排流网情况下地铁杂散电流分布数值模拟研究[J]. 机电工程,2017,34(12):1465-1468.

MA De-liang, FANG Jiang-min, QIAN Yao-hong. Numerical simulation of stray current distribution in metro network with drainage[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(12):1465-1468.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>