

直流牵引回流系统杂散电流泄漏量的计算

刘颖熙¹ 张栋梁² 方学礼¹ 龙祖良¹ 杨佳能¹

(1. 中国电建集团贵州电力设计研究院有限公司, 550002, 贵阳;

2. 中国矿业大学电气与动力工程学院, 221008, 徐州//第一作者, 助理工程师)

摘要 针对大范围内地铁直流牵引回流系统泄漏电流(即杂散电流)难以计算与检测的现状,提出了一种杂散电流泄漏量计算方法,为杂散电流腐蚀危险性的评价提供了基础数据支撑。阐述了基于现有工程技术的杂散电流泄漏量检测方法,并利用 MATLAB 软件,对计算方法进行了仿真分析。

关键词 地铁; 杂散电流; 泄漏量; 仿真分析

中图分类号 U223.6+2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.05.033

Calculation of Stray Current Leakage in DC Traction Reflux System

LIU Yingxi, ZHANG Dongliang, FANG Xueli, LONG Zuliang, YANG Jianeng

Abstract Aiming at the present situation of large-scale stray current leakage in DC traction reflux system that is difficult to calculate and measure, a method of calculating the stray current leakage is presented, which provides a basic data support for the evaluation of stray current corrosion risk. Then, with a description of the stray current leakage measurement based on the existing engineering technologies, the calculation method is simulated and analyzed by using MATLAB software.

Key words metro; stray current; leakage current; simulated analysis

First-Author's address Guizhou Provincial Electric Power Design & Research Institute, 550002, Guiyang, China

由于钢轨存在电阻且钢轨与道床(大地)之间无法完全绝缘,因此经钢轨回流的电流会有一部分从钢轨中泄漏而形成杂散电流。杂散电流会对地铁隧道的结构钢筋以及地铁附近埋地金属管线等造成电化学腐蚀。这不仅会降低钢筋混凝土主体结构的强度和耐久性,缩短金属管线的使用寿命,甚至会造成重大灾难^[1]。

由于直接测量杂散电流十分困难,因此在现有技术条件下,一般采用由杂散电流引起的埋地金属

极化电位偏移值来作为杂散电流腐蚀危险性的间接评价指标。但是,埋地金属电位极化偏移值只能反映出被测点附近的杂散电流泄漏情况^[2-6]。

针对大范围内杂散电流泄漏量难以测量的现状,本文提出了一种新的杂散电流泄漏量计算方法。该方法避开对复杂回流系统电压电流参数的求解,计算范围从传统的局部区域扩大到列车整个运行区间。另外,在实际工程实现上,该方法无需增加额外传感器等设备,在现有地铁系统配置的条件下就可完成列车运行过程中区间内杂散电流泄漏量的检测。

1 地铁杂散电流分布模型

地铁回流系统中杂散电流的分布问题是复杂的空间电流场问题。为便于分析,现将地铁回流系统简化为平面分布参数电阻网络,并假设:

- (1) 分布参数电阻网络为 n 层结构;
- (2) 各层纵向电阻均匀分布;
- (3) 相邻两层之间过渡电导均匀分布。

回流系统模型如图 1 所示。列车供电方式为双边供电,运行区间位于两个变电所之间。图 1 中: $I_{s,1}$ 为变电所 1 的电流; $I_{s,2}$ 为变电所 2 的电流; I_t 为列车电流; R_k 为第 k 层($k=1,2,\dots,n$) 纵向电阻; G_k 为第 k 层对下一层的过渡电导。

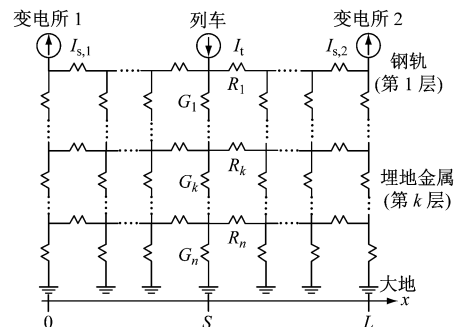


图 1 回流系统模型图

沿列车运行方向(x 的正方向),在 Δx 微元上构建等效电阻网络,如图2所示。图2中 $i_k(x)$ 为 x 处第 k 层金属中的电流,并且取 x 的负方向为电流正方向; $u_k(x)$ 为 x 处第 k 层金属对下一层的电压。

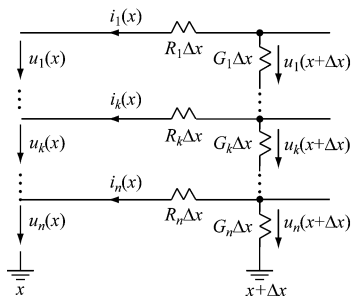


图2 微元等效电阻网络

根据图1和图2,分析各电压、电流之间的关系,可建立如下杂散电流分布模型:

$$\begin{cases} \frac{du_1(x)}{dx} = R_1 i_1(x) - R_2 i_2(x) \\ \vdots \\ \frac{du_k(x)}{dx} = R_k i_k(x) - R_{k+1} i_{k+1}(x) \\ \vdots \\ \frac{du_n(x)}{dx} = R_n i_n(x) \\ \frac{di_1(x)}{dx} = G_1 u_1(x) \\ \vdots \\ \frac{di_k(x)}{dx} = -G_{k-1} u_{k-1}(x) + G_k u_k(x) \\ \vdots \\ \frac{di_n(x)}{dx} = -G_{n-1} u_{n-1}(x) + G_n u_n(x) \end{cases} \quad (1)$$

假设区间内到变电所1距离为 x 处的钢轨电位(钢轨对地电压)为 $u_g(x)$,则

$$u_g(x) = \sum_{k=1}^n u_k(x) \quad (2)$$

将式(2)与式(1)联立,得:

$$\frac{du_g(x)}{dx} = R_1 i_1(x) \quad (3)$$

式中:

R_1 ——钢轨纵向电阻;

$i_1(x)$ —— x 处的钢轨电流。

式(3)对于任意层数的回流系统结构均成立。

2 杂散电流泄漏量 I_s 计算方法

根据杂散电流腐蚀的累积效应,提出一种杂散电流泄漏量的计算方法。该方法的计算目标是列车从区间始点($x=0$)运行到区间终点($x=L$)过程中区间内每千米距离上的平均杂散电流泄漏量 I_s 。

2.1 算法分析

2.1.1 运行时间和运行距离的杂散电流泄漏总量

以列车位置 $x=S$ 处作为分界点,将运行区间划分为两个分析域 $X_1(x \in [0, S])$ 和 $X_2(x \in [S, L])$;列车从变电所1运行到变电所2的过程中,在分析域 X_1 上有:

假设列车距变电所1的距离为 x 处的杂散电流为 $i_s(x)$,则由杂散电流定义:

$$i_s(x) = I_{s,1} - i_1(x) \quad (4)$$

令

$$I_{St1} = \iint i_s(x) dx dt = \iint (I_{s,1} - i_1(x)) dx dt \quad (5)$$

则,将式(3)代入式(5)可得

$$I_{St1} = \iint \left(\int_0^S \left(I_{s,1} - \frac{1}{R_1} \frac{du_g(x)}{dx} \right) dx \right) dt = \int \left(I_{s,1} S - \frac{1}{R_1} (u_g(S) - u_g(0)) \right) dt \quad (6)$$

式中:

I_{St1} ——列车运行过程中在分析域 X_1 上关于运行时间和运行距离的杂散电流泄漏总量。

同理,在分析域 X_2 上有:

$$I_{St2} = \iint (I_{s,2} - i_1(x)) dx dt = \int \left(I_{s,2} (L - S) - \frac{1}{R_1} (u_g(S) - u_g(L)) \right) dt \quad (7)$$

令整个区间上关于运行时间和运行距离的杂散电流泄漏总量为 I_{St} ,则

$$I_{St} = I_{St1} + I_{St2} = \int \left(I_{s,1} S + I_{s,2} (L - S) - \frac{1}{R_1} (2u_g(S) - u_g(0) - u_g(L)) \right) dt \quad (8)$$

考虑到在实际运行中,列车位置处的钢轨电位 $u_g(S)$ 难以测量,因此需对式(8)作进一步变换,以避免钢轨电位,使其更容易实现泄漏量计算。

2.1.2 变换计算表达式

将牵引变电所等效为理想电压源 U_s 和内阻 R_e 串联的形式,将列车等效为理想电流源 I_t ,则列车牵引供电模型如图3所示。图3中: R_0 为接触线(网)

电阻; U_t 为列车电压; $U_{s,1}$ 、 $U_{s,2}$ 分别为变电所 1 和变电所 2 输出电压。

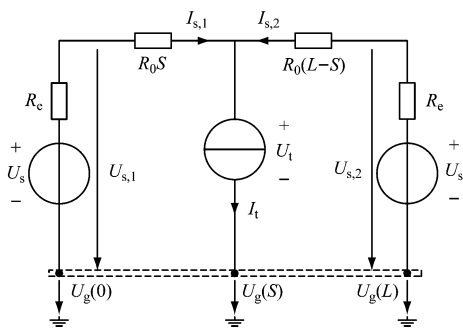


图3 牵引供电模型

由图3,根据基尔霍夫定律得:

$$\begin{cases} u_g(S) - u_g(0) = U_{s,1} - U_t - R_0 S I_{s,1} \\ u_g(S) - u_g(L) = U_{s,2} - U_t - R_0(L-S) I_{s,2} \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8),得:

$$I_{st} = \frac{1}{R_1} \int ((R_0 + R_1)(S I_{s,1} + (L-S) I_{s,2}) - (U_{s,1} + U_{s,2} - 2U_t)) dt \quad (10)$$

为使列车采用再生制动方式运行时表达式也能成立,对式(10)作如下改进:

$$I_{st} = \frac{1}{R_1} \int ((R_0 + R_1) |S I_{s,1} + (L-S) I_{s,2}| - |U_{s,1} + U_{s,2} - 2U_t|) dt \quad (11)$$

考虑到在工程实际中信号采集具有一定的时间间隔(采样周期 Δt),无法获得时间上连续的电压和电流信号,因此,根据定积分的性质,杂散电流泄漏量 I_s 最终表达式为:

$$I_s = \frac{1}{L} \left(\frac{1}{tL} I_{st} \right) \approx \frac{1}{tL^2 R_1} \sum_{i=1}^N ((R_0 + R_1) |S_i I_{s,1,i} + (L-S_i) I_{s,2,i}| - |U_{s,1,i} + U_{s,2,i} - 2U_{t,i}|) \Delta t = \frac{1}{NL^2 R_1} \sum_{i=1}^N ((R_0 + R_1) |S_i I_{s,1,i} + (L-S_i) I_{s,2,i}| - |U_{s,1,i} + U_{s,2,i} - 2U_{t,i}|) \quad (12)$$

式中:

i ——第 i 次采样;

N ——信号采样总次数;

t ——运行时间。

由于 $N = t/\Delta t$ (取整),因此, I_s 的计算精度受采样周期 Δt 影响。

2.2 算法的工程实现途径

由式(12)可以看出:计算 I_s 需要实时采集的信息只包括两端变电所的输出电压、输出电流,以及列车电压和列车位置,避免了对复杂轨道回流系统实时参数的求解和检测,容易实现泄漏量计算。

在工程实际中,实时获取两端变电所输出电压 ($U_{s,1,i}$, $U_{s,2,i}$)、输出电流 ($I_{s,1,i}$, $I_{s,2,i}$)、列车电压 $U_{t,i}$ 和列车位置 S_i 信号的途径如图4所示。两端变电所实时输出电压和输出电流信息可从所内的电力 SCADA(监控和数据采集)系统获取;列车实时电压信息可从车载电力监控系统获取;列车实时位置信息可从列车自动监控(ATC)系统获取。并且,列车电压和列车位置信息可通过地铁信号系统实时无线传输到地面指挥调度中心。该途径无需额外的检测传输等设备,仅根据从各个系统中获取的各项实时信息即可计算出列车运行过程中整个区间内的杂散电流泄漏量。

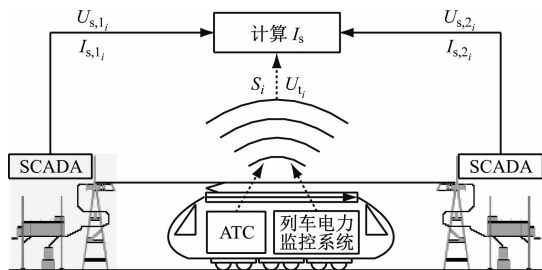


图4 电压、电流和列车位置信号获取途径

3 仿真分析

根据 I_s 的表达式,利用 MATLAB 软件进行仿真分析。为了得到 I_s 表达式中的电压、电流以及列车位置等信息,需要进行列车牵引计算和牵引供电计算,最后由二者计算结果得出杂散电流泄漏量。

3.1 列车牵引仿真计算

假设列车采用最快速牵引策略运行,制动方式为再生制动,轨道无坡度和弯道,列车所受阻力只考虑列车的基本阻力。最快速牵引策略要求列车牵引运行时采用最大牵引力,制动运行时采用最大制动力,列车速度达到线路限速值时保持限速值匀速行驶。列车的牵引力和制动力根据列车的牵引特性曲线获得^[7]。在该牵引策略下,列车位置和功率曲线如图5所示。计算中,区间长度 L 取 2 km,限速值取 80 km/h。

3.2 牵引供电仿真计算

为了能顺利进行牵引供电仿真计算,根据图3

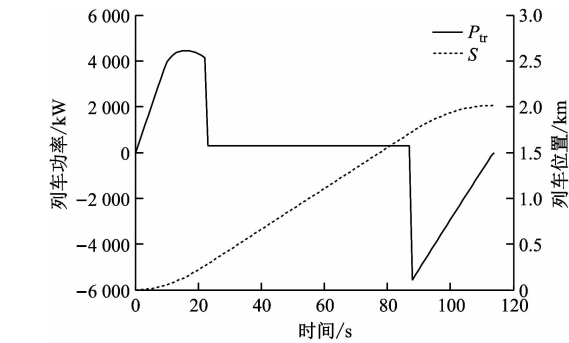


图5 列车位置和功率曲线

的牵引供电模型,假设列车和变电所之间钢轨及道床的整体等效电阻为 R_G ,在分析域 X_1 上(分析域 X_2 上类似),由于杂散电流的存在,使得 $i_1(x) < I_{s,1}$,因此有:

$$u_g(S) - u_g(0) = \int_0^{S_i} i_{1_i}(x) R_1 dx = \int_0^{S_i} I_{s,1_i} R_G dx < \int_0^{S_i} I_{s,1_i} R_1 dx \quad (13)$$

故而可得

$$R_G < R_1 \quad (14)$$

假设 $R_G = 0.9 R_1$,在图3基础上,列车到两端变电所之间分别用电阻 $0.9 R_1 S$ 和 $0.9 R_1 (L - S)$ 等效,根据列车牵引计算结果,计算得到变电所输出电压和列车电压曲线如图6所示,变电所输出电流如图7所示。计算中,取 $U_s = 1\,500\text{ V}$; $R_e = 0.032\, \Omega$; $R_0 = 0.150\, \Omega/\text{km}$; $R_1 = 0.030\, \Omega/\text{km}$ 。

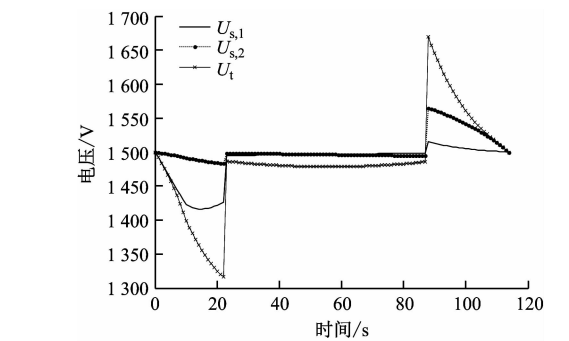


图6 变电所输出电压和列车电压曲线

3.3 计算 I_s

根据以上仿真计算结果,利用式(12)计算列车运行过程中区间内每 km 距离上平均杂散电流泄漏量。在不同的采样周期 Δt (计算步长)下,得到不同的 I_s 值,如表1所示。根据表1作 I_s 与 Δt 的关系曲线,如图8所示。

由图8可以看出,当采样周期在 0.5 s 以内时,

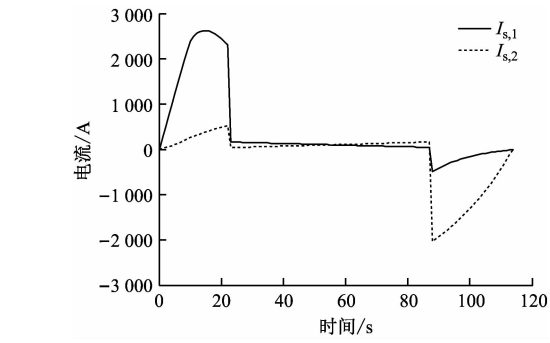


图7 变电所输出电流曲线

表1 不同 Δt 下的 I_s 值

$\Delta t/\text{s}$	$I_s/(\text{A}/\text{km})$	$\Delta t/\text{s}$	$I_s/(\text{A}/\text{km})$
0.001	9.290	0.5	9.317
0.002	9.285	1.0	8.981
0.050	9.298	2.0	9.256
0.100	9.276	5.0	10.155
0.200	9.280	10.0	7.245

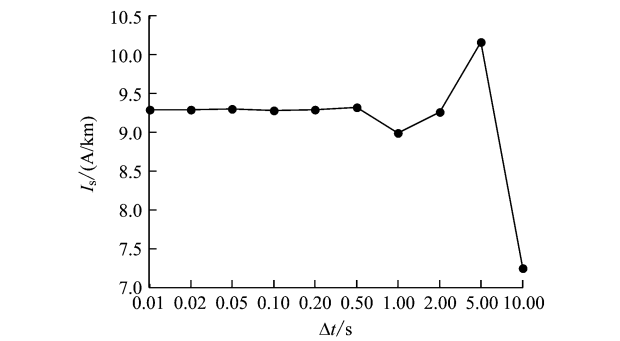


图8 I_s 与 Δt 的关系曲线

I_s 计算结果很平稳;而采样周期大于 0.5 s 以后, I_s 计算结果波动性很大,不能准确反映实际的杂散电流泄漏量大小。因此,为了使计算结果保持较高的准确度,采样周期宜小于 0.5 s 。

4 结语

通过建立多层杂散电流模型,得到不同层数回流系统的钢轨电位统一表达式。根据该表达式由杂散电流定义计算出某运行时间和运行距离的杂散电流泄漏总量 I_{st} 。在此基础上,通过牵引供电计算,对 I_{st} 的表达式予以改进,推导出在列车运行区间内每 km 距离上的平均杂散电流泄漏量 I_s 的表达式。根据 I_s 的表达式,阐述了在现有技术条件下实现测量 I_s 的途径,并利用 MATLAB 软件对 I_s 计算方法进行了仿真分析。所得结论如下:

(1) 提出的杂散电流泄漏量计算方法将杂散电

流泄漏量计算范围从传统的局部区域扩大到列车整个运行区间,为评价列车运行区间内总体的杂散电流腐蚀危险性提供了一种参考。

(2) 该计算方法不依赖于回流系统复杂的实时电压、电流参数,容易实现杂散电流泄漏量的计算。并且,在地铁系统现有配置的条件下,无需额外的检测传输等设备就可实现对列车运行区间内杂散电流泄漏量的检测。

(3) 仿真结果表明,当采样周期小于 0.5 s 时, I_s 的计算结果稳定,能够较好地反映出运行区间内杂散电流泄漏情况。

参考文献

- [1] BERTOLININ L, CARSANA M, PEDEFERRI P. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current [J]. Corrosion Science. 2007, 49:1056.
- [2] Railway applications-fixed installations - electrical safety, earthing and the return circuit - Part 2: provisions against the effects of stray currents caused by d. c. traction systems BS EN 50122-2:2010[S].

- [3] 李威. 应用于地铁杂散电流腐蚀测量的硫酸铜电极实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(1):61.
- [4] KEITH Griffiths. Stray Current Control-An Application of Ohm's Law[J]. EMC in Railways, 2006:83.
- [5] 李威,王爱兵,王禹桥. 地铁杂散电流腐蚀的模糊综合评价方法研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 03:221.
- [6] DAROWICKI K, ZAKOWSKI K. A New Time-Frequency Detection Method of Stray Current Field Interference on Metal Structures[J]. Corrosion Science, 2004, 46:1061.
- [7] 石红国,彭其渊,郭寒英. 城市轨道交通牵引计算模型[J]. 交通运输工程学报, 2005, 04:20.
- [8] CUI G, LI Z L, YANG C, et al. The influence of DC stray current on pipeline corrosion[J]. Petroleum Science, 2015, 13(1):1.
- [9] 韦莉,张逸成,达世鹏,等. 城市轨道交通牵引系统仿真技术研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, v. 3908:1161.
- [10] XU S Y, LI W, XING F F, et al. Novel predictive model for metallic structure corrosion status in presence of stray current in DC mass transit systems[J]. Journal of Central South University, 2014(3).

(收稿日期:2017-10-27)

(上接第 149 页)

明显。从变化率的角度来看,本试验列车阻力值的变化更为平缓,对列车牵引系统的冲击更小。综合以上两点,本试验列车表现出良好的运行特性。

4 结论

(1) 通过误差分析与能耗计算,验证了 GPS 测速方法用于列车运行阻力测定的有效性。利用成熟的统计学方法,更为精确地得出了列车的单位基本运行阻力公式;同时,利用多个测速装置同时测速、取均值的做法,有效减小了列车运行时纵向振动所带来的测量误差。但该误差并未完全消除。如何方便有效地消除该误差仍然需要作进一步探索。总体上,利用 GPS 测速方法使得测算准确,同时也减小了试验的工作量。

(2) 通过对比分析某城市轨道交通列车与同类型其他列车的运行阻力特性,发现被测列车的单位基本运行阻力较同类列车小,运行阻力随速度的变化也较为平缓,故该列车表现出良好的运行特性,能够有效降低能耗,便于牵引动力基本参数的选择

与配置。

参考文献

- [1] 袁修法,林建辉. 直线电机驱动地铁车辆运行阻力试验研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2014(3):387.
- [2] 国际电气协会. 车辆组装和运行前的整车试验: IEC 61133-2006[S]. 北京:中国标准出版社, 2006:46.
- [3] 中国国家标准化管理委员会. 城市轨道交通车辆组装后的检查与试验规则: GB/T 14894—2005[S]. 北京:建设部标准定额研究所, 2005.
- [4] 中华人民共和国铁道部. 列车牵引计算规程: TB/T 1407—1998[S]. 北京:中国标准出版社, 1998.
- [5] 李济棋. 上海地铁 11 号线列车牵引能耗分析[J]. 机电一体化, 2013(6): 32.
- [6] 杨龙. GPS 测速研究及应用[D]. 青岛:国家海洋局第一海洋研究所, 2007.
- [7] SAMPRIT S A S H, BERTRAM P. 例解回归分析[M]. 郑明等,译. 北京:中国统计出版社, 2004.
- [8] 谢振国. 杭州地铁 1 号线车辆编组的探讨[J]. 机车电传动, 2004(3):13.

(收稿日期:2017-09-01)