

基于 AT(自耦变压器)吸上电流比的牵引网 多分段线性化故障测距方法研究

侯峰¹ 王帅² 孙忠锐²

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州; 2. 西南交通大学电气工程学院, 611756, 成都//第一作者, 高级工程师)

摘要 目的:针对现有 AT(自耦变压器)吸上电流比故障测距方法修正系数通过短路试验获取困难,提出新型修正系数获取方案,以有效提升故障定位精度,加快故障牵引网维修速度,减少供电系统停电时间。**方法:**通过接触网检测车以及定位设备,获得首末端 AT 吸上电流比与接触网检测车位置,基于接触网检测车的位置分布,求解 AT 吸上电流比分段修正系数。进一步提出 AT 吸上电流比故障测距的多分段线性化方法,通过细分故障测距分段整定范围,提升故障定位精度。依据 AT 牵引网工程参数,在 MATLAB/Simulink 软件上搭建双边供电 50 km AT 牵引网仿真模型,分别计算基于短路试验的传统 AT 吸上电流比故障测距方法和基于检测车位置的 AT 吸上电流比多分段线性化测距方法的测距误差与修正精度,并进行对比分析。**结果及结论:**仿真试验结果验证了基于 AT 吸上电流比的多分段线性化故障测距方法的正确性与精确性,故障定位误差由传统方法 ± 300 m 范围缩小至 ± 100 m,有效提升了故障定位精度。该方法无需短路试验,减少了传统短路试验测定修正系数方法对牵引网导线与断路器带来的寿命损耗,可应用于牵引网故障分析与故障定位研究。

关键词 电气化铁路; 吸上电流比; 故障测距; 修正系数

中图分类号 U223.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.12.032

Research on Multi-Segment Linearization Ranging Measurement Method Based on AT Suction Current Ratio in Traction Power Supply System

HOU Feng, WANG Shuai, SUN Zhongrui

Abstract Objective: In response to the difficulty of obtaining the correction coefficients for existing AT (auto-transformer) suction current ratio ranging method through short-circuit tests, a new correction coefficient acquisition scheme is proposed to effectively enhance the accuracy of fault location and expedite repair of the fault traction network, resulting in reduction of power supply system outage time. Method: Utilizing a catenary detection vehicle and locating equipment, the AT suction current ratio at the beginning and end, along with the position of catenary detection vehicle is obtained. Based on the position distribution of catenary detection vehicles, the segmented correction coefficients for AT suction current ratio are determined. Furthermore, a multi-segment linearization method for ranging based on the AT suction current ratio is proposed. This method subdivides the ranging range to enhance the fault location accuracy. Using the parameters of AT traction power supply system, a 50 km AT traction network simulation model is constructed in MATLAB/Simulink software. The ranging errors and correction accuracy of the conventional AT suction current ratio ranging method based on short-circuit tests and the AT suction current ratio multi-segment linearization ranging method based on the position of the inspection vehicle are calculated and compared. Result & Conclusion: The simulation test results validate the correctness and precision of the multi-segment linearization ranging method based on the AT suction current ratio. The ranging error is reduced from ± 300 m in the conventional method to ± 100 m, effectively improving fault location accuracy. This method eliminates the need for short-circuit tests, reducing the lifespan loss on traction network conductors and circuit breakers caused by conventional methods. It is applicable for fault analysis and fault location research in traction network.

zing a catenary detection vehicle and locating equipment, the AT suction current ratio at the beginning and end, along with the position of catenary detection vehicle is obtained. Based on the position distribution of catenary detection vehicles, the segmented correction coefficients for AT suction current ratio are determined. Furthermore, a multi-segment linearization method for ranging based on the AT suction current ratio is proposed. This method subdivides the ranging range to enhance the fault location accuracy. Using the parameters of AT traction power supply system, a 50 km AT traction network simulation model is constructed in MATLAB/Simulink software. The ranging errors and correction accuracy of the conventional AT suction current ratio ranging method based on short-circuit tests and the AT suction current ratio multi-segment linearization ranging method based on the position of the inspection vehicle are calculated and compared. Result & Conclusion: The simulation test results validate the correctness and precision of the multi-segment linearization ranging method based on the AT suction current ratio. The ranging error is reduced from ± 300 m in the conventional method to ± 100 m, effectively improving fault location accuracy. This method eliminates the need for short-circuit tests, reducing the lifespan loss on traction network conductors and circuit breakers caused by conventional methods. It is applicable for fault analysis and fault location research in traction network.

Key words electrified railway; suction current ratio; ranging; correction coefficient

First-author's address Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China

0 引言

AT(自耦变压器)牵引网结构庞大且无备用,电力机车受电弓通过与牵引网高速摩擦取电,极易导致牵引网导线损坏^[1]。频繁发生的牵引网故障

是牵引供电系统中中断的主要原因,每公里的偏差可能会导致额外的 40 ~ 50 min 的交通中断^[2]。AT 牵引网结构复杂,故障定位困难,如果不能及时准确发现和排除故障,将延长停电时间,干扰正常运输^[3]。因此,精确定位 AT 牵引网故障对于铁路的高效、安全运行意义重大,并能够带来显著的经济和社会效益。

目前,牵引变电所和相应的 AT 所、分区所内设置了同步采集 AT 吸上电流的专用故障测距装置,通过计算故障段首末端 AT 吸上电流比例,实现对 AT 牵引网的故障定位。由于牵引网导体阻抗、AT 漏抗等因素会影响该故障定位方法的稳定性和精度,一般需要在线路投运前进行短路试验,利用试验获取的短路数据,计算修正系数达到提升 AT 吸上电流比精度的目的^[4]。受接触网导体寿命限制,可进行的短路试验次数极少,实际工程中 AT 吸上电流比测距结果仍可能会出现较大误差。

由于 AT 吸上电流比测距公式修正系数依靠极少的短路试验,因此很难获取,本文设计了一种新型修正系数获取方案,通过细分测距单元,实现了基于 AT 吸上电流比的牵引网分段线性化故障测距方法。

1 AT 吸上电流比测距方法

文献[5]提出了 AT 吸上电流比测距原理,文献[6]提出了基于修正系数的吸上电流比测距精度提升方法,给出的 AT 吸上电流比测距公式为:

$$l = l_n + \frac{r - Q_1}{1 - (Q_1 + Q_2)} D \quad (1)$$

式中:

l ——牵引变电所到故障点的距离;

l_n ——牵引变电所至第 n 个 AT 的距离;

Q_1 、 Q_2 ——修正系数;

D ——故障 AT 段长度;

r ——AT 中性点吸上电流比。

r 的计算公式为:

$$r = \frac{I_{n+1}}{I_n + I_{n+1}} \quad (2)$$

式中:

I_n 、 I_{n+1} ——分别为故障点所在的第 n 个和第 $n+1$ 个(即第 n 个 AT 段首末端)AT 的中性点吸上电流。

修正系数 Q_1 、 Q_2 的选取受 AT 漏抗的大小及容

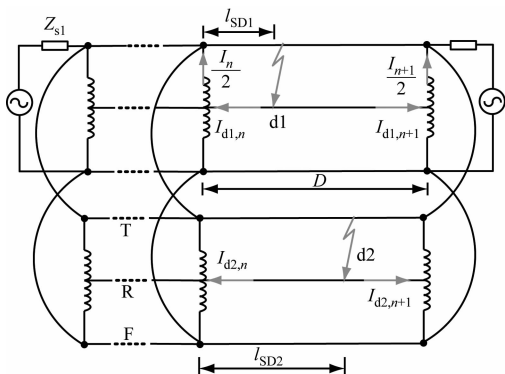
量、AT 段长度、线路阻抗与钢轨泄漏电流等因素影响。

2 基于短路试验的既有故障测距

为便于计算修正系数 Q_1 、 Q_2 ,只考虑故障 AT 段内故障点到故障 AT 段首端的距离 x_f , 计算公式为:

$$x_f = \frac{r - Q_1}{1 - (Q_1 + Q_2)} D \quad (3)$$

为确定修正系数 Q_1 、 Q_2 ,工程中至少需要进行 2 次短路校验。短路试验示意图如图 1 所示。



注: I_{SD1} 、 I_{SD2} 分别为两次故障中 AT 段内故障点到故障 AT 段首端的距离; T 为接触线; R 为钢轨; F 为负馈线。

图 1 牵引网 d1、d2 处短路试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of short-circuit test at d1 and d2 of traction network

在牵引网与第 n 个 AT 距离 $d1$ 与 $d2$ 处设置短路点,将两次短路校验所得电流比与故障位置代入式(3)中可得修正系数 Q_1 、 Q_2 的计算公式:

$$Q_1 = \frac{l_{SD2} H_1 - l_{SD1} H_2}{l_{SD2} - l_{SD1}} \quad (4)$$

$$Q_2 = 1 - \frac{l_{SD2} H_1 - l_{SD1} H_2}{l_{SD2} - l_{SD1}} - \frac{H_2 - H_1}{l_{SD2} - l_{SD1}} D \quad (5)$$

式中:

H_1 、 H_2 ——两次故障的 AT 中性点吸上电流比。

虽然,每个 AT 段的修正系数能通过两次短路校验计算得到,但在实际工程中,短路试验不便实施,且会对牵引网导线与断路器寿命造成一定损耗。因此,修正系数一般设置为经验值,并依靠极少的短路试验和运营故障数据进行修正,易受到偶然因素和其他外界因素的制约。在实际工程中,AT 吸上电流比测距方法时常不能准确定位故障点位置。

3 基于检测车位置的分段化故障测距

线路投运前会有接触网检测车对线路进行测试,投运会定期开行接触网检测车。考虑 T-R(接触线-钢轨)故障潮流与机车运行潮流类似,可利用接触网检测车的行车位置信息与机车负荷电流引起的吸上电流分布进行修正系数计算,减少短路试验对牵引网线路与断路器寿命的损耗。

接触网检测车位置布置如图 2 所示。机车自身定位装置与 AT 吸上电流测距装置同步定时,且同步记录机车到达位置与时间。测试结束后,对 AT 吸上电流比数据以及机车定位数据离线定时,即可获得机车位置与 AT 吸上电流比映射关系,进一步可得精确的分段修正系数。

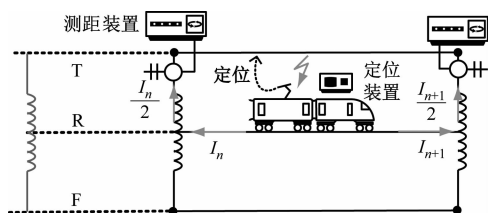
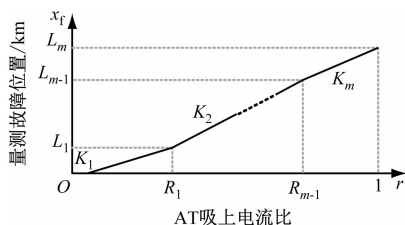


图2 接触网检测车位置布置示意图

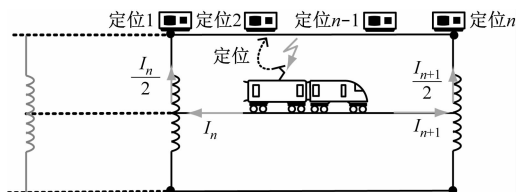
Fig.2 Schematic diagram of the location layout of catenary inspection vehicle

机车位置分布与分段线性化测距示意图如图 3 所示。



注: L —电流较大时刻的机车位置; K —变比调整系数; R —末端故障时的吸上电流比; m —线路分为 m 段。

a) 分段线性化测距



b) 检测车位置

图3 检测车位置分布与分段线性化测距示意图

Fig.3 Inspection vehicle position distribution and segmented linearization distance measurement

接触网检测车沿线路行驶,选取机车牵引电流

较大时刻,即可生成多组“机车位置-吸上电流”数据,可实现 AT 段内修正系数分段计算与设置。因此,为便于分段线性化,可将式(3)变换为:

$$x_f = \frac{D}{1 - (Q_1 + Q_2)} r + \frac{-Q_1 D}{1 - (Q_1 + Q_2)} \quad (6)$$

设变比调整系数 $K = \frac{D}{1 - (Q_1 + Q_2)}$ 、位移调整

系数 $B = \frac{-Q_1 D}{1 - (Q_1 + Q_2)}$, 则可将式(6)改写为:

$$x_f = Kr + B \quad (7)$$

将线路分为 m 段 ($m = 1, 2, 3, \dots, N$), 根据式(6)和式(7), 可将分段线性化的 AT 吸上电流比故障测距公式写为:

$$\begin{cases} x_f = K_1 r + B_1 & 0 \leq r < R_1 \\ x_f = K_2 r + B_2 & R_1 \leq r < R_2 \\ \vdots \\ x_f = K_m r + B_m & R_{N-1} \leq r \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中:

K_m ——第 m 段变比调整系数;

B_m ——第 m 段位移调整系数;

R_m ——第 m 段末端故障时的吸上电流比。根据式(7)得 K_m 和 B_m 计算公式:

$$K_m = \frac{L_m - L_{m-1}}{r_m - r_{m-1}} \quad (9)$$

$$B_m = L_m - K_m r_m \quad (10)$$

式中:

L_m ——第 m 段处机车电流较大时刻的机车位置;

r_m ——第 q 次定位时测距装置获得的 AT 吸上电流比。

4 仿真验证

为验证多分段线性化故障测距精度,依据 AT 牵引网工程参数,在 MATLAB/Simulink 软件上搭建了双边供电 50 km AT 牵引网仿真模型,其中 AT 短路电压百分比为 0.5%,钢轨泄露电导率为 0.2 S/km。AT 牵引网导线参数如表 1 所示。仿真拓扑如图 1 所示。

4.1 基于短路试验的故障测距仿真

图 1 中第 2 个 AT 段长度为 15 km,取测试点 d1 到牵引变电所的距离 $l_{d1} = 4$ km,测试点 d2 到牵引变电所的距离 $l_{d2} = 7$ km,在 d1、d2 点设置 T-R 短路故障,两端 AT 吸上电流测试数据如图 4 所示。

结合 d1、d2 短路位置,由式(2)可得 $r_1 = 0.275\ 3$ 、 $r_2 = 0.419\ 5$,再由式(4)与式(5)可得到 $Q_1 = 0.08\ 3$ 、 $Q_2 = 0.196$ 。

表 1 AT 牵引网导线参数

参数类型	参数值/(Ω/km)
钢轨阻抗 Z_R	$0.083\ 1 + j\ 0.444\ 8$
正馈线阻抗 Z_F	$0.170\ 2 + j\ 0.716\ 3$
接触线钢轨互阻抗 Z_{TR}	$0.049\ 3 + j\ 0.304\ 0$
接触线正馈线互阻抗 Z_{TF}	$0.049\ 3 + j\ 0.343\ 0$
正馈线钢轨互阻抗 Z_{FR}	$0.049\ 3 + j\ 0.292\ 0$

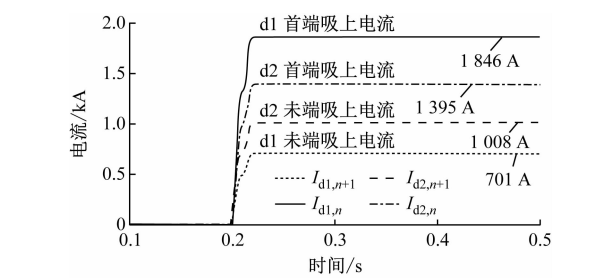


图 4 牵引网 d1、d2 处短路吸上电流

Fig. 4 Short circuit suction current at d1 and d2 of traction network

将 Q_1 和 Q_2 代入式(3),得到基于短路试验的 AT 吸上电流比故障测距结果,如表 2 所示。由表 2 可见,经牵引网每公里故障仿真验证,故障测距结果误差绝对值均小于 300 m,满足铁路技术规范要求^[7]。

4.2 基于检测车位置的分段化故障测距仿真

机车电流较大时刻故障定位点分别设置在 AT 段 0.5 km、4.0 km、9.0 km 和 14.5 km 处。机车为恒功率源,当机车在定位点时,AT 段两端吸上电流值分别如图 5 和图 6 所示。当接触网检测车行驶到与故障点相同位置 4.0 km 时,AT 段首末端吸上电流不同,但吸上电流比例相近。依据式(1)、式(9)与式(10),易得 AT 吸上电流比分段设置参数,如表 3 所示。

本文设置了 4 个故障定位点,将 AT 段分为 3 段整定,并将相应的修正系数代入式(8),对 AT 牵引网开展每公里故障测距仿真,仿真结果如表 4 所示。由表 4 可见,基于检测车位置的分段化测距公式的输出误差均小于 100 m。

传统方法与分段 AT 吸上电流比方法测距误差如图 7 所示。由图 7 可见,除 5.0 km、6.0 km 个别

表 2 基于短路试验的 AT 吸上电流比故障测距结果
Tab. 2 Raging results of AT suction current ratio based on the short-circuit tests

故障位置/km	首端吸上电流/A	末端吸上电流/A	吸上比例	测距结果/km	误差/m
0.5	2 514.0	328	0.116	0.677	177
1.0	2 403.0	387	0.139	1.156	156
2.0	2 197.0	501	0.186	2.134	134
3.0	2 019.0	600	0.229	3.041	41
4.0	1 846.0	701	0.275	4.002	2
5.0	1 676.0	815	0.327	5.080	80
6.0	1 526.0	914	0.375	6.066	66
7.0	1 395.0	1 008	0.419	7.000	0
8.0	1 273.0	1 095	0.462	7.894	-106
9.0	1 139.0	1 203	0.514	8.960	-40
10.0	1 029.0	1 292	0.557	9.854	-146
11.0	915.9.0	1 391	0.603	10.818	-182
12.0	804.5	1 490	0.649	11.783	-217
13.0	691.8	1 605	0.699	12.811	-189
14.0	583.5	1 716	0.746	13.799	-201
14.5	530.3	1 772	0.770	14.286	-214

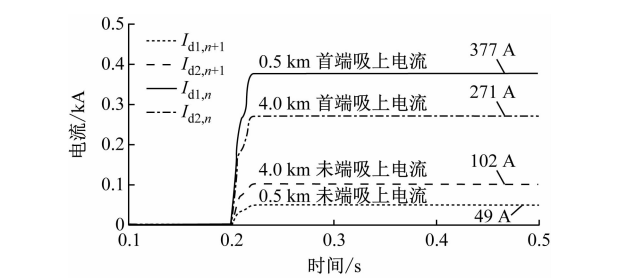


图 5 接触网检测车位于 0.5 km 与 4.0 km 处 AT 吸上电流值
Fig. 5 The current value absorbed by the AT on 0.5 km and 4.0 km of the catenary detection vehicle

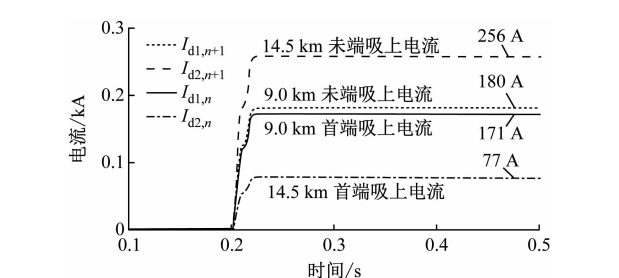


图 6 接触网检测车位于 9.0 km 与 14.5 km 处 AT 吸上电流值
Fig. 6 The current value absorbed by the AT on 9.0 km and 14.5 km of the catenary detection vehicle

故障位置外,分段 AT 吸上电流比测距精度较既有方法的高。

表 3 AT 吸上电流比分段设置参数

Tab.3 Setting parameters of segmented AT suction current ratio				
机车位置/ km	吸上电 流比	分段范围/ km	变比调整 系数	位移调整 系数
0.5	0.115	0~0.5	22.124	-2.067
4.0	0.275	>0.5~4.0	20.920	-1.753
9.0	0.516	>4.0~9.0	21.127	-1.768
14.5	0.771	>9.0~15.0	21.127	-1.767

表 4 分段 AT 吸上电流比方法故障测距结果

Tab.4 Ranging results of segmented AT suction current ratio					
current ratio					
故障位置/km	首端吸上 电流/A	末端吸上 电流/A	吸上电 流比	测距结 果/km	测距误 差/m
0.5	2 514	328	0.116	0.500	0
1.0	2 403	386	0.139	1.009	9
2.0	2 197	500	0.186	2.049	49
3.0	2 019	600	0.229	3.000	0
4.0	1 846	701	0.275	4.018	18
5.0	1 676	815	0.327	5.088	88
6.0	1 526	914	0.375	6.092	92
7.0	1 395	1 008	0.419	7.013	13
8.0	1 273	1 095	0.462	7.912	-88
9.0	1 139	1 203	0.514	9.000	0
10.0	1 029	1292	0.557	10.000	0
11.0	916	1 391	0.603	10.972	-28
12.0	805	1 490	0.649	11.944	-56
13.0	692	1 605	0.699	13.000	0
14.0	583	1 716	0.746	13.993	-7
14.5	530	1 772	0.770	14.500	0

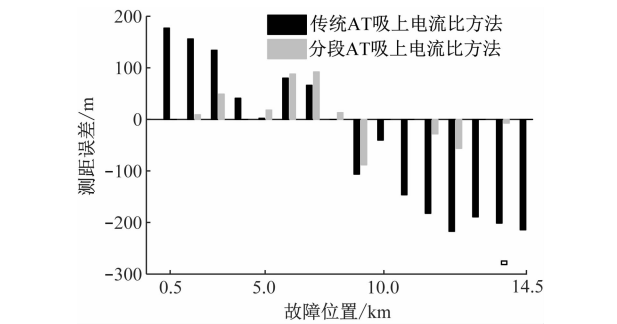


图 7 传统方法与分段 AT 吸上电流比方法测距误差
Fig.7 Ranging error between traditional method and segmented AT suction current ratio method

量纲一化误差百分比 p 计算公式为:

$$p = 100 \frac{x_f - z_f}{z_f} \tag{11}$$

式中:

z_f ——故障位置真值。

传统方法与分段 AT 吸上电流比方法故障测距误差百分比如图 8 所示。从图 8 可以明显看出,分段化的 AT 吸上电流比方法在故障 AT 段首端和末端的测距精度要远高于基于短路试验的 AT 吸上电流比方法。通过更细的分段划分,可进一步提升测距精度。同时,接触网检测车运行电流是正常牵引网负荷电流,远远小于短路电流,可以有效消除短路试验对牵引网带来的寿命损耗。

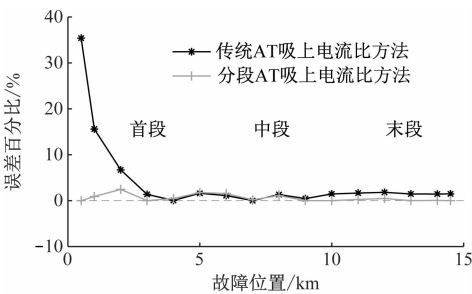


图 8 传统方法与分段 AT 吸上电流比方法测距误差百分比
Fig.8 The percentage of ranging error between conventional method and segmented AT suction current ratio method

4.3 机车定位与噪声误差影响

为充分验证具有不同噪声水平的电信号以及机车所处不同位置对误差的影响,在仿真数据中加入 20~100 dB 噪声,设置故障点在 10 km 处,考虑机车定位存在 100 m 定位误差,测距误差结果如图 9 所示。

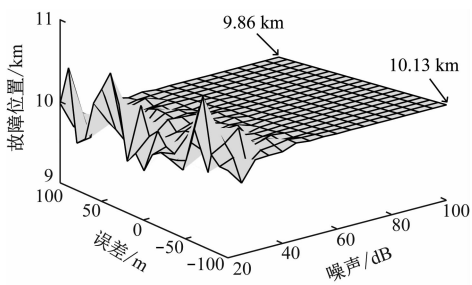


图 9 考虑机车定位和噪声影响的分段 AT 吸上电流比方法测距误差
Fig.9 Ranging error of segmented AT suction current ratio method considering locomotive positioning and noise impact

由图 9 可见:当噪声在 30~100 dB,本文算法

依旧可以得到准确的测距结果,当噪声达到 20 dB 时,测距结果开始剧烈波动,测距结果出现较大偏差;当机车定位存在 100 m 以内误差时,故障定位结果在 9.86 ~ 10.13 km 内浮动,依旧可以得到较高精度的测距结果。目前基于北斗卫星定位系统,机车可以实现 97% 置信区间 < 3 m 误差定位^[8],因此,本文方法在检测机车存在定位误差情况下仍具有较高的故障定位精度。

5 结语

本文针对基于短路试验的 AT 吸上电流比故障测距公式修正系数获取困难,且计算不方便的问题,设计了一种新型修正系数获取方案。该方案通过选取机车牵引电流较大时刻接触网检测车位置,生成多组“机车位置-吸上电流”数据,求解不同分段 AT 吸上电流比修正系数,并进一步提出了分段线性化 AT 吸上电流故障测距公式,实现了 AT 段 T-R 故障精确测距。与既有传统方法相比,分段线性化 AT 吸上电流故障测距方法极大提升了故障测距精度,消除了传统的基于短路试验测定修正系数方法对牵引网导线与断路器带来的寿命损耗。

参考文献

[1] WANG S, CHEN M W, LI Q Z, et al. A new hybrid fault identification method based on multi-terminals synchronous measure information for all parallel at traction power supply system[J]. Ener-

gies, 2018, 10(11): 2698.

[2] SAINI D K, NAIR R, YADAV M, et al. Modified algorithm for fault detection on AC electrical traction line: an Indian climate case study[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(4): 936.

[3] 哈特穆特·比泽内克. 电气化铁路牵引供电系统[M]. 戚广枫,译. 北京: 中国铁道出版社, 2019.

HARTMUT Bizernek. Electrified railroad traction power supply system[M]. G. F. Qi, Trans. Beijing: China Railway Publishing house, 2019.

[4] 高仕斌, 陈维荣, 陈小川. 客运专线牵引供电自动化[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010.

GAO Shibin, CHEN Weirong, CHEN Xiaochuan. Automation of traction power supply for passenger dedicated lines[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2010.

[5] FUJI H, Miura A. Fault location system in autotransformer feeding circuit of AC electric railways[J]. Electrical Engineering of Japan, 1976, 96(5): 96.

[6] WANG C, YIN X. Comprehensive revisions on fault-location algorithm suitable for dedicated passenger line of high-speed electrified railway[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2415.

[7] 中国铁路总公司. 电气化铁路 AT 供电方式故障测距装置: QCR 686—2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2019: 1.

China Railway Corporation. Fault ranging device for AT power supply mode of electrified railroad: QCR 686—2018[S]. Beijing: China Railway Press, 2019: 1.

[8] LAUER M, STEIN D. A train localization algorithm for train protection systems of the future[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(2): 970.

(收稿日期: 2022-10-10)

2023 年 10 月城市轨道交通运营数据

2023 年 10 月, 31 个省(自治区、直辖市)和新疆生产建设兵团共有 55 个城市开通运营城市轨道交通线路 299 条,运营里程为 9 862 km,实际开行列车 344 万列次,完成客运量 26.6 亿人次、进站量 15.9 亿人次。客运量环比增加 1.7 亿人次、增长 6.9%,同比增加 9.5 亿人次、增长 55.8%。平均客运强度为 0.869 万人次/(km·d)。新增运营里程 2.5km,新增运营区段 1 个,为青岛地铁 13 号线二期北段。

《2023 中国城市轨道交通市场发展报告》将于 2024 年 1 月正式发布,报告分为总述篇(所有制式)、地铁篇、市域(郊)铁路篇、中低运量篇、智慧城轨篇和规划篇六大篇章,共 27 章,涉及范围包括地铁、轻轨、市域铁路、有轨电车、单轨交通、中低速磁悬浮、智轨等;涉及领域包括投融资模式、设计咨询、施工安装、工程监理、机电设备(车辆装备、供电系统、通信系统、信号系统、综合监控系统、自动售检票系统、车站辅助设备、环控系统、车辆段/停车场设备、综合安防)等。

(来源:交通运输部)