

# 轨道交通供电系统电缆故障在线定位技术研究

马一博<sup>1</sup>, 石勇<sup>2</sup>

(1. 西安市轨道交通集团有限公司, 西安 710016;

2. 国电南瑞科技股份有限公司, 南京 211106)

**摘要:** 传统的电力系统中, 电缆故障定位技术主要是通过离线定位实现, 导致电缆故障定位误报率较高, 基于此, 设计出新型电缆故障在线定位技术; 利用傅里叶变换公式, 采集供电系统电压脉冲, 并对异常脉冲进行记录; 通过异常脉冲分析结果与供电系统导体数据变化, 完成电缆故障类别判定; 根据电缆故障类别判定结果, 采用行波算法对故障点到电缆端点的距离展开计算, 完成电缆故障定位; 实验表明, 该故障定位技术误报率较低, 使用效果好。

**关键词:** 轨道交通; 供电系统; 电缆故障定位; 电压脉冲

## Research on On-line Cable Fault Location Technology of Rail Transit Power Supply System

Ma Yibo<sup>1</sup>, Shi Yong<sup>2</sup>

(1. Xian Rail Transit Group Company Limited, Xi'an 710016, China;

2. Nari Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** In the traditional power system, the cable fault location technology is mainly realized through offline positioning, which leads to a high false alarm rate of cable fault location. Based on this, a new online cable fault location technology is designed. Use the Fourier transform formula to collect the voltage pulses of the power supply system and record the abnormal pulses. Through abnormal pulse analysis results and power system conductor data changes, complete the cable fault category judgment. According to the judgment result of the cable fault category, the distance between the fault point and the end point of the cable is calculated using the traveling wave calculation method to complete the cable fault location. Experiments show that the fault location technology has a low false alarm rate and good use effect.

**Keywords:** rail transit; power supply system; cable fault location; voltage pulse

### 0 引言

轨道交通是指在轨道上行驶的、服务于人们日常生活、工作的交通<sup>[1-2]</sup>。对于轨道交通而言, 其最重要的就是车辆的供电系统, 它是整个车辆的动力源泉。一旦出现供电系统问题, 将会直接导致车辆停滞, 严重的可能会发展为车辆故障, 威胁人员安全以及财产安全。通过多次研究可知, 轨道交通供电系统故障主要起因为电缆的故障<sup>[3]</sup>。因此, 大部分的专家学者针对此现象提出了轨道交通供电系统电缆故障在线定位技术。但在长期的使用中可以发现, 传统的轨道交通供电系统电缆故障在线定位技术时常会出现误报的问题<sup>[4]</sup>, 因而, 在此次研究中, 将就此问题设计新型的轨道交通供电系统电缆故障在线定位技术。

采用行波计算技术, 对传统的轨道交通供电系统电缆故障在线定位技术展开优化。在设计后, 将设计技术应用测试环节, 采用文中设计技术、原有技术以及文献 [5] 中提出的采用基于时域反射法的航空电缆故障定位技术进行

对比。基于时域反射法的航空电缆故障定位技术根据空运电缆装机后故障定位困难的特点, 研究了基于 TDR 技术的电缆故障定位方法, 分析了典型故障波形, 搭建了测试平台, 进行了电缆短路、断路故障测试。以此证实文化总设计技术的可行性与科学性。

### 1 轨道交通供电系统电缆故障在线定位技术设计

针对原有轨道交通供电系统电缆故障在线定位技术在使用中出现的问题, 在此设计中将针对误报率过高的问题, 进行针对性优化设计。此次研究中设计的技术, 将以原有定位技术作为设计基础, 沿用原有技术中的部分设计, 构建新的故障定位技术。为保证此次定位技术设计中的有序性, 将轨道交通供电系统电缆故障在线定位技术分为四部分, 完成供电系统电缆故障的高精度定位。在此次设计中, 涉及部分故障定位设备的使用。技术实现平台设计过程中, 将对设备的型号进行设定。

收稿日期: 2020-05-15; 修回日期: 2020-06-16。

作者简介: 马一博(1981-), 男, 陕西西安人, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统自动化, 轨道交通供电系统、设备监控系统等方向的研究。

引用格式: 马一博, 石勇. 轨道交通供电系统电缆故障在线定位技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(1): 20-23.

### 1.1 供电系统电压脉冲采集

在此次设计中, 首先对供电系统中的电压脉冲进行获取。通过对电压脉冲的研究, 可实现对供电系统电缆故障的判定, 并采用适用于此故障的定位方式, 实现对故障的定位。

在脉冲采集的过程中, 主要考虑脉冲的形状、脉冲的宽度以及脉冲的幅度<sup>[6]</sup>。电压脉冲采样的过程中, 采样频率直接影响了电压脉冲的采集结果。由于轨道交通的距离较大, 在对其进行电压脉冲采用时, 选用高频率的采集间隔, 将电压脉冲宽度变窄, 提升对电缆分辨的精度。设定电缆中的连续脉冲为  $f(a)$ , 抽样序列为  $g(a)$ , 对该脉冲进行采样, 设定抽样信号为  $f_i(a)$ 。则有:

$$f_i(a) = f(a)g(a) \quad (1)$$

假设脉冲序列  $g(a)$  的脉冲获取时间间隔为  $t$ , 则  $\alpha_i = 2\pi/t_g$ , 其中,  $\alpha_i$  为脉冲序列获取周期。将此公式展开傅里叶变换, 则有:

$$Y(\alpha) = 2\pi \sum Y_n \beta(\alpha - n\alpha_i) \quad (2)$$

公式 (2) 中,  $Y_n$  为  $g(a)$  的傅里叶系数<sup>[7-8]</sup>, 根据傅里叶变换公式可知:

$$Y_n = \frac{1}{t_g} \int_{-t_g/2}^{t_g/2} g(a) e^{-jn\alpha_i a} dt \quad (3)$$

公式 (3) 中,  $e^{-jn\alpha_i a}$  为变换周期,  $d$  为电缆间隔距离。将  $f_i(a)$  的傅里叶变换设定为  $F(a)$ , 根据频域卷积公式<sup>[9]</sup>得出变换后的公式为:

$$F_i(a) = F(a)G(a) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} G(a)F(\alpha - n\alpha_i) \quad (4)$$

公式 (4) 中,  $f_i(a)$  为  $F_i(a)$  中的一个周期性函数, 通过上述公式, 得出供电系统电压脉冲的数据变化图像, 对图像的波动与宽度进行分析, 获取供电系统电缆运行状态图像与数据。通过对供电系统中的电缆电压脉冲进行采集, 获取供电系统中的初始电缆状态数据, 提出脉冲波动较大的部分, 做出特殊标记加以记录, 作为接下来分析与定位中的数据来源。

### 1.2 电缆故障类别判定

采用采集到的电压脉冲结果, 确定供电系统中的电压异常部分, 对于线缆端子和中间端子进行详细检查, 如线缆端子和中间端子有烧伤变色痕迹, 可判断为线缆故障异常部分。并通过此数据作为电缆故障类别判定的基础。供电系统电缆故障从形式上来看, 大致可以分为两部分, 首先是并联故障, 其次是串联故障<sup>[10-11]</sup>。并联故障是由导体绝缘下降造成的故障; 串联故障是由于一个或是多个导体故障导致的电缆故障。通过图像可将供电系统电缆故障显示如图 1 所示。

如图 1 所示,  $H$  为供电系统中的局部电容,  $p$  为电压中间的缝隙,  $R$  为绝缘电阻。通过电压脉冲采集结果可知, 当故障不同时,  $H$ 、 $p$ 、 $R$  的设计变化也不相同。为对电缆故障进行合理的分类, 通过电压脉冲采集结果以及  $R$  的数值变

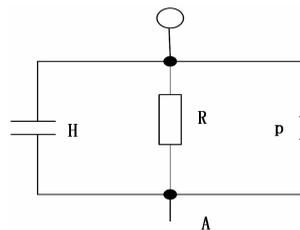


图 1 供电系统电缆故障简图

化, 将供电系统电缆故障种类划分如表 1 所示。

表 1 供电系统电缆故障种类划分结果

故障特殊	R	电压脉冲变化
低阻	小于额定	高压脉冲较大
闪络	无穷大	高压脉冲较大
高阻	大于额定	高压脉冲较小
开路	无穷大	高压脉冲较小

通过上述表 1 中的内容对供电系统中的电缆故障进行分类, 并采用行波计算对故障位置进行监测, 实现供电系统电缆故障的精准定位。

### 1.3 行波计算

采用上述设计内容, 完成对供电系统电缆故障的基础研究。在此部分中, 将采用行波计算的方式, 对故障的位置进行确定<sup>[12-13]</sup>。设定在供电电源的作用下, 电流行波与电压行波在电缆的两端移动, 当出现故障时, 行波发生反射, 在行波传输至故障点, 发生二次反射。这种行波状态呈周期状, 在电缆进入故障后稳态<sup>[14-15]</sup>。设定供电系统电缆两端为  $C$ 、 $D$ , 故障行波达到端点的时间分别为  $T_C$ 、 $T_D$ , 故障点到达  $C$  端点的距离为  $X_C$ , 到达  $D$  端点的距离为  $X_D$ , 电磁波在电缆中的传播速度为  $x$ , 供电电缆的总长度为  $K$ , 则有:

$$X_C = \frac{(T_C - T_D)x + K}{2} \quad (6)$$

$$X_D = \frac{(T_D - T_C)x + K}{2} \quad (7)$$

通过上述公式实现对故障位置的精准定位, 由于电缆的材料较多, 为保证行波计算的精准度, 对电缆材料进行研究<sup>[16-17]</sup>, 并设定相应的计算值如表 2 所示。

表 2 电缆材料行波速度取值范围

电缆材料		波速	
介电系数	相对电磁系数	计算值	使用值
1	4.1~4.5	135~145	145
1	2.5	195	170
1	2.4~2.5	185~190	185
1	2.6	185	190
1	4.5~5.5	135~145	150
1	2.1~2.7	180~210	195
1	2.3	200	195
1	3.1~3.5	155~170	170
1	2.5	200	195

通过上述电缆材料行波速度取值范围结合行波计算公式，完成对供电系统电缆的故障在线定位。

### 1.4 实现电缆故障在线定位

采用行波计算方式，完成了电缆故障的在线定位。为保证定位的精准度，在此部分中，将对定位结果进行判定，并对定位技术的使用环境与平台展开设定。

设定由于时间带来的定位误差为  $\chi_1$ ，由于脉冲采集带来的误差为  $\chi_2$ ，定位允许的最大定位误差为  $\chi_{max}$ ，则有：

$$\chi_1 = xt_1/2 \tag{8}$$

$$\chi_2 = xt_2/2 \tag{9}$$

$$\chi_{max} = \chi_1 + \chi_2 = (\epsilon_1 + \epsilon_2)x/2 \tag{10}$$

式中， $x$  为电磁波的传输数据<sup>[18-19]</sup>， $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  分别为时间误差与周期误差，通过计算可知，在供电系统电缆故障中，允许的最大定位误差为 4.5。为保证计算部分可正常使用，设定电缆故障在线定位技术实现平台如图 2 所示。

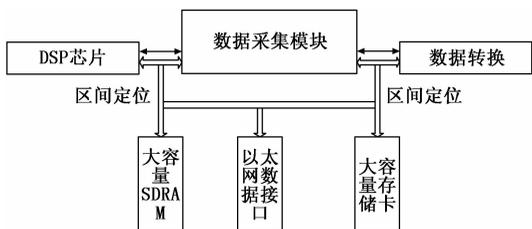


图 2 电缆故障在线定位技术实现平台

采用图 2 平台设计构架图，选取相应的设备与芯片，作为文中设计定位技术的实现平台。在此部分中，主要以采集部分使用的设备作为主要平台设备选取对象，此设备选取的结果直接影响着故障定位的精度。因而，采用 DPS 芯片对其进行控制，通过此设定提升采集设备在数据获取中的有效性<sup>[20-21]</sup>。

将上述计算部分与技术实现平台相结合，并将其安装至轨道交通供电系统中，通过此平台，实现对电缆故障的定位与处理<sup>[22-23]</sup>。至此，轨道交通供电系统电缆故障在线定位技术设计完成。

## 2 实验结果与讨论

为了检测本文中设计的轨道交通供电系统电缆故障在线定位技术的可行性与有效性，分别的仿真实验室内与现场对此方法展开相应的测试。

### 2.1 测试环境

在实验内采用下图中的测试电路对文中设计技术、原有技术以及引用其他方式设计的定位技术展开测试。在此次测试中，将测试环境设定为三种不同的供电系统电缆运行状态，首先是具有绝缘故障，其次是电压波动故障，最后是局部放电故障，如图 3 所示。

在测试中，首先选取一根完整的电缆，而后使用壁纸刀沿电缆的水平方向切割，破坏电缆绝缘层，并漏出电缆导体芯。将采用绝缘破损的电缆引入到上述测试电路中，施加 DC 1000 V，以此完成对绝缘破损的电缆故障的仿真。

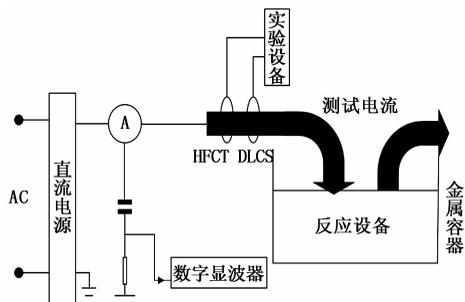


图 3 测试电路

电压波动故障仿真中，采用变压器控制供电系统两端的电压，造成供电系统的电压变化。局部放电仿真中，通过控制供电系统的放电位置，造成电缆间歇性故障。通过上述设定，检测文中方法与其他两种方法的定位误报率。

### 2.2 测试指标

此次测试中，设定测试指标为在线定位技术的定位误报率，误报率的计算公式如下所示：

$$F = \frac{|A \times B|}{C} \times 100\% \tag{11}$$

式中， $C$  表示测试指标总集； $A$  表示正常电缆电压波动故障集合； $B$  为误认为是异常项目电缆电压波动故障集合。

通过此指标可直观地展示文中设计技术、原有技术以及采用其他方式设计技术的使用效果。且采用数值对比的方式，降低了此次技术应用测试的难度。

由于此次测试对象为供电系统电缆，因而，在指标设计的过程中，对传统的误报率进行部分改进。传统的误报率是指上报错误信息在上报全部信息中的比重。在此次测试中，设定误报率为故障点定位与预定故障点之间的误差距离。通过此设定，提升测试结果的有效性。

### 2.3 测试平台

为保证此次测试的可控性，对实验室中使用的部分设备仪器进行设定，具体设定结果如图 4 所示。

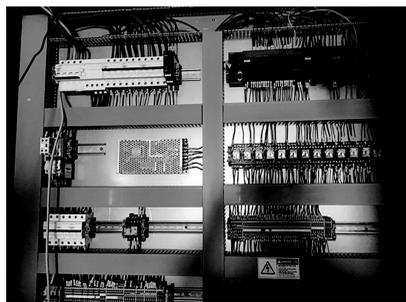


图 4 使用的部分测试设备图

采用图 4 中设备与电缆，实现对电缆故障定位技术的测试。在此次测试中，共设定 30 个故障点，采用文中设计技术与其他两种技术对供电系统中的故障点进行定位，并及时记录每种方法的定位数据，将其与预设位置数据进行对比，并得出相应的误报率。通过对误报率数据变化的分析，完成对文中设计定位技术以及其他两种定位技术使用

差别的研究。

### 2.4 测试结果

通过表 3 实验结果可知, 当供电系统电缆故障为绝缘故障时, 文中设计技术的定位误报率较低, 原有定位技术的误报率最高。随着测试点距离的不断增加, 原有定位技术的误报率波动逐步加大, 文中设计技术的误报率较为稳定, 并没有因为电缆距离的变化而发生变化。采用其他方式设计的定位技术, 相较于文中设计技术误报率较大, 但明显优于原有定位技术。

表 3 电缆绝缘故障定位测试结果

电缆故障测试点	文中设计技术误报率 / %	原有定位技术误报率 / %	采用其他方式设计技术误报率 / %	电缆故障测试点	文中设计技术误报率 / %	原有定位技术误报率 / %	采用其他方式设计技术误报率 / %
1	1.32	2.46	1.87	16	1.15	2.55	1.61
2	1.42	2.27	1.71	17	1.00	2.42	1.79
3	1.11	2.95	1.88	18	1.08	2.55	1.67
4	1.37	2.59	1.76	19	1.21	2.74	1.77
5	1.08	2.47	1.52	20	1.14	2.32	1.81
6	1.30	2.58	1.76	21	1.21	2.28	1.52
7	1.33	2.93	1.51	22	1.27	2.31	1.74
8	1.45	2.92	1.68	23	1.43	2.21	1.67
9	1.42	2.45	1.53	24	1.15	2.78	1.79
10	1.11	2.30	1.64	25	1.40	2.28	1.70
11	1.06	2.73	1.60	26	1.46	3.00	1.82
12	1.29	2.47	1.75	27	1.39	2.76	1.66
13	1.48	2.70	1.74	28	1.29	2.26	1.76
14	1.11	2.65	1.56	29	1.42	2.62	1.65
15	1.14	2.92	1.76	30	1.49	2.37	1.90

通过表 4 实验结果可知, 当供电系统电缆故障为电压波动故障时, 三种故障定位技术的误报率明显上升。但文中设计技术的误报率较为稳定, 没有出现大部分的激增, 在日常使用中, 不会造成定位异常。原有定位技术与采用其他方式设计的技术误报率上升幅度较高, 综上可知, 当电缆故障为电压波动故障时, 文中设计技术使用效果最佳。

在表 5 实验结果中, 电缆出现局部放电时, 原有定位技术对于此故障的定位效果最差, 文中设计技术对于此故障的定位效果最佳。综合电缆电压波动故障定位测试结果以及电缆绝缘故障定位测试结果可知, 文中设计故障定位技术, 在常见的供电系统电缆故障定位使用中, 效果最佳。

### 3 结束语

轨道交通是目前人们出行的重要交通工具之一, 其故障定位效果直接影响到人们的正常出行与人身安全。一般来说, 常见的轨道交通包括轻型轨道、高架铁路以及地下铁路等方式。在此次研究中, 对轨道交通供电系统电缆故障定位技术展开优化设计, 通过测试结果证明此次研究中设计的技术使用效果优于原有的定位技术。由此可知, 采用行波计算可有效改善离线故障定位技术误差高的问题。采

表 4 电缆电压波动故障定位测试结果

电缆故障测试点	文中设计技术误报率 / %	原有定位技术误报率 / %	采用其他方式设计技术误报率 / %	电缆故障测试点	文中设计技术误报率 / %	原有定位技术误报率 / %	采用其他方式设计技术误报率 / %
1	1.52	2.78	2.04	16	1.63	2.87	1.84
2	1.53	2.59	2.09	17	1.64	2.96	2.13
3	1.58	2.84	2.20	18	1.58	2.83	1.91
4	1.51	2.50	2.16	19	1.68	3.00	2.01
5	1.56	2.63	1.97	20	1.69	2.88	2.05
6	1.59	2.58	2.16	21	1.53	2.99	1.83
7	1.55	2.75	1.82	22	1.61	2.90	2.14
8	1.63	2.85	1.83	23	1.58	2.70	2.00
9	1.65	2.88	1.87	24	1.67	2.81	1.85
10	1.68	2.59	1.98	25	1.52	2.65	1.81
11	1.54	2.68	2.19	26	1.54	2.67	1.86
12	1.6	2.70	1.89	27	1.56	2.77	2.01
13	1.61	2.55	1.84	28	1.65	2.83	1.81
14	1.62	2.86	1.88	29	1.52	2.73	2.09
15	1.70	2.75	1.95	30	1.56	2.54	1.93

表 5 电缆局部放电故障定位测试结果

电缆故障测试点	文中设计技术误报率 / %	原有定位技术误报率 / %	采用其他方式设计技术误报率 / %	电缆故障测试点	文中设计技术误报率 / %	原有定位技术误报率 / %	采用其他方式设计技术误报率 / %
1	2.09	3.17	2.61	16	2.17	3.11	2.7
2	2.15	3.03	2.57	17	2.00	3.00	2.68
3	2.11	3.08	2.60	18	2.01	3.01	2.57
4	2.10	3.20	2.62	19	2.13	3.17	2.66
5	2.16	3.19	2.56	20	2.15	3.16	2.56
6	2.09	3.12	2.69	21	2.20	3.2	2.68
7	2.04	3.06	2.67	22	2.14	3.12	2.65
8	2.01	3.05	2.56	23	2.01	3.02	2.51
9	2.04	3.09	2.69	24	2.16	3.11	2.66
10	2.13	3.19	2.58	25	2.11	3.06	2.60
11	2.15	3.12	2.56	26	2.19	3.13	2.69
12	2.05	3.01	2.58	27	2.08	3.13	2.52
13	2.02	3.20	2.53	28	2.15	3.00	2.69
14	2.13	3.18	2.51	29	2.07	3.20	2.68
15	2.19	3.12	2.62	30	2.11	3.09	2.53

用在定位技术不但可以提升故障的定位精度, 还可以降低由于离线定位造成的车辆供电系统损伤问题的发生。在日后的轨道交通故障定位过程中, 可增加文中设计定位技术的使用范围, 以此保证故障定位的有效性。

#### 参考文献:

[1] 戴丽君. 城市轨道交通供电系统电缆故障在线定位技术研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22 (12): 35-38.

(下转第 28 页)