

城市轨道交通接触网短路阻抗测试及整定 计算装置的研制

何柏杉¹ 何靖² 薛磊² 唐玫¹ 李攀飞² 杨鹏周² 汪琪¹

(1. 四川铁道职业学院铁道工电学院, 611732, 成都; 2. 中铁一局集团电务工程有限公司, 710025, 西安)

摘要 [目的]城市轨道交通接触网的线路阻抗受多种因素(如线索材料、线路长度、周边环境等)的显著影响,导致不同线路及不同时段阻抗差异显著。然而,在整定计算过程中,常依赖于经验公式进行估算,这往往导致整定值不够精确,进而影响了保护装置的选择性与灵敏性。当系统遭遇短路故障时,可能会出现误动或拒动的情况,带来较大的安全隐患。因此,研制一种能够准确测试接触网短路阻抗并进行整定计算的装置显得尤为重要。[方法]提出了一种低压短路试验方法。该方法在接触网末端设置短路点,通过在线路首端施加低压直流电的方式,实现对短路阻抗的测量。采用高精度的双通道同步采样技术获取电压与电流的精确采样值,并基于RL(强化学习)简化双边供电模型,结合牛顿迭代法,研究出了一种指数曲线拟合求解线路阻抗的新方法。此外,通过开发集参数配置、整定计算于一体的软件,成功集成了接触网阻抗测量及整定计算装置。[结果及结论]该装置不仅具备参数配置、线路阻抗求解等功能,还能对短路点的电流变化进行仿真分析;能够实现根据不同线路和环境条件的实时测量,显著提高了线路阻抗测量的准确性,为整定计算提供了坚实的数据支持和重要参考。通过实际算例验证了线路阻抗计算和短路电流结果的准确性,充分证明了该方法的可行性和有效性。

关键词 城市轨道交通; 接触网; 短路试验; 牛顿迭代法; 线路阻抗; 电流仿真

中图分类号 U225.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.10.030

Development of Short-Circuit Impedance Testing and Setting Calculation Device for Urban Rail Transit Catenary

HE Baishan¹, HE Jing², XUE Lei², TANG Mei¹, LI Panfei², YANG Pengzhou², WANG Qi¹

(1. School of Railway Engineering and Electricity, Sichuan Railway College, 611732, Chengdu, China; 2. China Railway First Bureau Group Electric Engineering Co., Ltd., 710025, Xi'an, China)

Abstract [Objective] The line impedance of urban rail transit catenary is significantly affected by many factors such as

wire material, line length, surrounding environment, etc., resulting in significant impedance differences between different lines and different time periods. However, in the setting calculation process, assessments often rely on empirical formulas, leading to inaccurate setting values and affecting the selectivity and sensitivity of the protection device. When the system encounters a short-circuit fault, false operation or refusal to operate may occur, posing a great safety hazard. Therefore, it is particularly important to develop a device that can accurately test the short-circuit impedance of the catenary and perform setting calculations. [Method] A low-voltage short-circuit test method is proposed. The method sets a short-circuit point at the end of the catenary and realizes the measurement of short-circuit impedance by applying low-voltage direct current at the head end of the line. A high-precision dual-channel synchronous sampling technology is used to obtain accurate sampling values of voltage and current, and a new method for solving line impedance by exponential curve fitting is developed based on RL (Reinforcement Learning) simplified bilateral power supply model and combined with Newton iteration method. In addition, by developing a software that integrates parameter configuration and setting calculation, the catenary impedance measurement and setting calculation device is successfully integrated. [Result & Conclusion] This device is not only capable of parameter configuration and line impedance solving, but also can simulate and analyze the current changes at the short-circuit point. It can realize real-time measurement according to different lines and environmental conditions, significantly improves the accuracy of line impedance measurement, providing solid data support and important reference for setting calculations. The accuracy of line impedance calculation and short-circuit current results is verified through actual examples, thus the feasibility and effectiveness of this method is fully proved.

Key words urban rail transit; catenary; short-circuit test; Newton iteration method; line impedance; current simulation

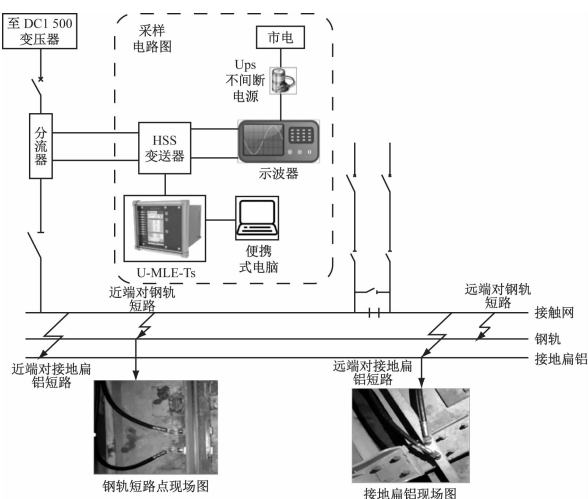
1 背景与意义

城市轨道交通(以下简称“城轨”)接触网是通

过摩擦取流方式为电力机车提供电能的输电线路,其具有电压高、电磁环境复杂、无备用等特征,一旦发生短路故障将直接影响行车与设备的安全。

目前,在新建的城轨接触网送电开通前,通常须先进行整定计算,再通过短路试验验证保护装置的有效性。整定计算^[1]一般先根据线索类型、安装形式等条件查表得到接触网与钢轨的单位阻抗,估算线路阻抗;再根据城轨接触网的结构,构建牵引供电系统数学模型^[2];在搭建的数学模型上设定合适的短路点,进行仿真计算短路电流^[3-4],校验保护装置的有效性。此过程主要存在 2 个问题:① 城轨接触网及钢轨的线路阻抗为估算值,仿真的短路电流数据也存在较大误差;② 新建线路的金属短路故障难以通过仿真发现。因此,通常在整定计算后进行城轨接触网短路试验。

短路试验^[5-6]一般在供电分区的近端或远端设置接触网与钢轨或接地扁铝的短路点^[7],形成闭合回路。城轨接触网短路试验接线方法如图 1 所示。



注:Ups 为不间断电源;HSS 为变压器;U-MLE-Ts 为直流综合继电保护装置。

图 1 城轨接触网短路试验接线方法

Fig. 1 Wiring method for short-circuit testing of urban rail catenary

由图 1 可知:城轨接触网将分流器串联入馈线回路引出至直流开关柜变压器,再引出到示波器展示测量波形。

此过程虽然能直接发现金属短路故障,校验继电保护的有效性,但是也存在以下问题:① 测试设备种类多、数量大、安设位置分散;② 直流屏柜短路放电会直接烧毁设备,威胁人员安全;③ 造成接触网、隔离开关、高压屏柜等主要设备老化,影响使用

寿命。针对问题①,可通过研发高度集成化、灵巧轻便的专用设备进行短路试验^[8]。针对问题②和问题③,可通过降低电压进行短路试验^[9]。

因此,本文在分析城轨接触网整定值计算与短路试验过程存在的主要问题,提出了低压短路模拟试验方法,并研制了一种短路试验及整定计算装置。其能够发现金属短路故障点,完成低压短路试验的参数测量与采集;采用牛顿迭代法准确地计算短路点两端线路阻抗,搭建城轨接触网双边供电模型,仿真短路点的电流等功能,具有一定的工程意义。

2 整体设计思路

2.1 测试装置的主要功能

为实现在低电压的城轨接触网的线路阻抗测试和短路电流仿真,测试装置需具有如表 1 所示的主要功能。

表 1 测试装置的主要功能

Tab. 1 Main functions of the test device

主要功能	详细说明
直流电源发生	需要设计 2 路直流电源,1 路作为测试回路电源,另 1 路 12 V 作为控制回路的电源
通电时间控制	能通过控制直流电源的通断控制闭合回路上的通电时间
采样参数配置	能配置采样模式、通道、点数、周期等参数
参数同步采样	能以较高的频率对闭合回路的测试回路电压电流进行同步采样
数据传输	能快速可靠地将同步采样电压、电流数据传输到逻辑数据模块
线路阻抗求解	能依据同步采样数据求解接触网线路阻抗
短路电流仿真	能根据线路阻抗,完成基于双边供电模型的短路电流仿真

2.2 装置的组成结构

图 2 为短路试验模拟测试系统的整体结构,分为硬件系统和软件系统。硬件系统由直流电源、脉冲信号控制、双通道同步采样和高速数字信号传输组成。软件系统可以完成短路试验的参数配置、线路阻抗的计算及短路电流的仿真等功能。

3 系统硬件的整体设计与实现

综合考虑设备的实用性、经济性和安全性等因素,设计了如图 3 所示的电路原理图。

3.1 直流电源电路的设计与实现

根据设计需求,直流电源需要控制回路和测试

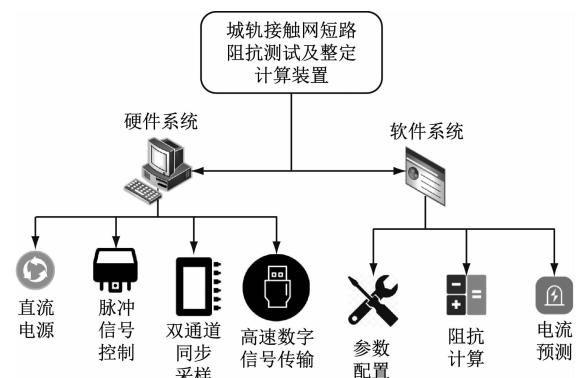


图 2 本装置的系统组成

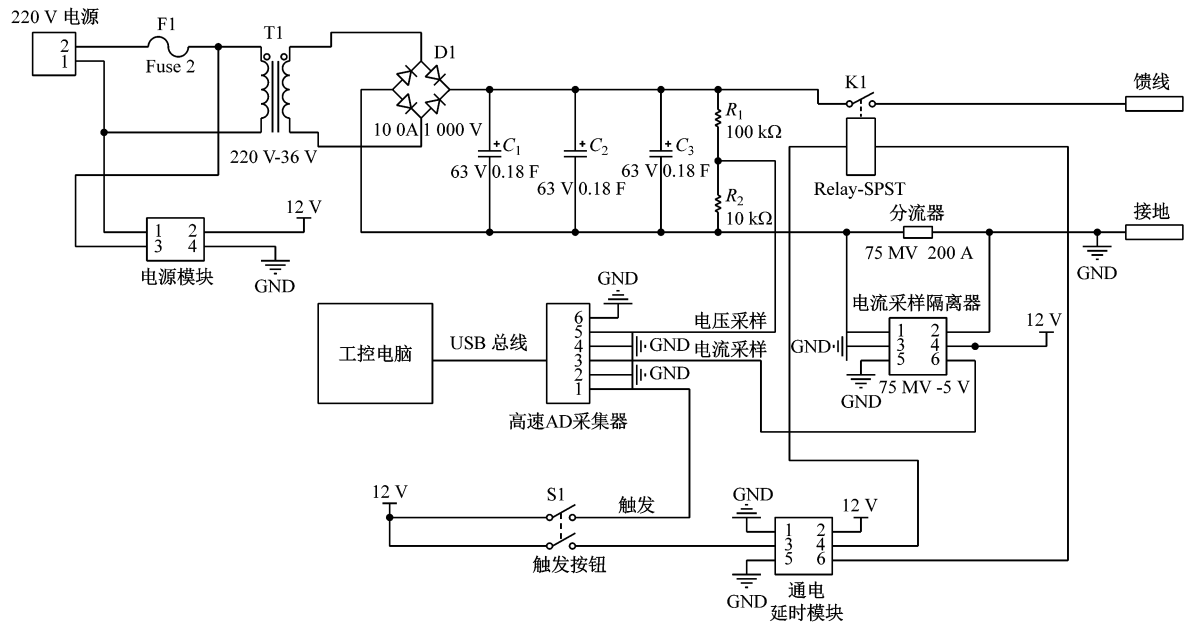
Fig. 2 System composition of the device

回路两路电源。控制回路电源直接由直流模块将 220 V 交流电变为 12 V 直流电。测试电源采用 50 V 直流电源,以提高短路试验的安全性。

由图 3 可知:测试电源直接取用 220 V 单相交流电经变压器变压为 36 V 交流电压,再经桥式整流电路将单相交流信号整流为脉动直流信号,最后选用 C_1 、 C_2 、 C_3 总电容为 0.54 F 将脉动波滤波为稳定的 50 V 直流信号。

3.2 通电时间控制电路

虽然大幅降低测试电源的电压,但是短路电流对接触网持续的进行冲击同样会造成较大的损害。



注:F1 为熔断器;T1 为隔离变压器;D1 为电力二极管; R_1 — R_2 为分压电阻; C_1 — C_3 为滤波电容;Fuse 为保险丝;Relay-SPST 为单刀单掷;GND 为接地。

图 3 硬件系统电路的整体设计

Fig. 3 Overall design of the hardware system circuit

因此,采用通电延时模块控制直流电源的短路试验的通电时间,有效地提高了测试安全性,同时能减少冗余数据的出现,方便了后续数据的传输和处理。

由图 3 可知:通电延时模块直接取用经双极触发按钮是 S1 同时控制高速 AD 采样器和通电延时模块。高速 AD 采样器立刻开始采样,通电延时模块由拨码开关控制发出 12 V 直流电的延迟时间,再经过 Relay-SPST 继电器线圈控制 K1 的导通,进而接通测试回路进行短路试验。

如表 2 所示,4 个拨码开关的位置(0 或 1)控制延时时间对照情况,如拨码开关选用的 0001 位置,

表示延时 0.6 s,即 600 ms。

表 2 拨码开关位置的时间对照表

Tab. 2 Time comparison table of DIP switch position

位置	延时时间/s	位置	延时时间/s
0000	0.3	1000	3
0001	0.6	1001	4
0010	0.8	1010	5
0011	1.0	1011	8
0100	1.3	1100	10
0101	1.6	1101	15
0110	2.0	1110	30
0111	2.5	1111	60

3.3 数字信号同步采样电路

由于高压短路试验持续时间短,电流变化大,为了更好地对数据进行分析 and 传输,因此选用某高速 AD 采集器以实现电流电压数字信号的双通道同步采样。

1) 电压采样。由于高速 AD 采样器最大仅能采样 12 V 电压信号,因此用 R_1 (电阻为 100 k Ω)、 R_2 (电阻为 10 k Ω) 两电阻串联分压通过导线接入高速 AD 采样器的端钮 5 实现电压采样。

2) 电流采样。选用 75 MV/200 A 分流器串入直流回路,再将分流两端分别接入电流采样隔离器,隔绝测试回路与控制回路。最后将电流采样隔离器接入高速 AD 采样器端钮 3 实现电流采样。

3.4 工控电脑与数据传输系统

选用的工控电脑具有体积小、质量轻、防尘防水防油,能耗低、噪声小等优点,配置酷睿 i3 处理器,8G 内存+256G 硬盘,8.4 寸(280 cm)平板液晶触摸屏显示器,带 2 路 USB,能够直接嵌入仪器安装箱中。

USB(通用串口总线)支持设备的即插即用和热插拔功能,其传输可靠性及传输效率高,与所选工控电脑具有较好的兼容性,被选用作为数据传输方式。

4 软件系统的设计与开发

4.1 软件系统的主要功能

图 4 为软件系统的主要功能模块,完成低压短路试验参数配置、短路试验数据线路阻抗计算,线路短路电流的仿真等功能。

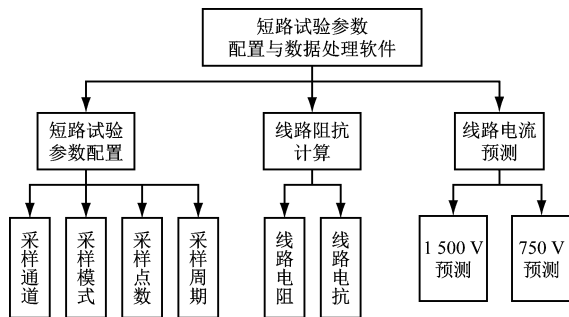


图 4 软件系统的主要功能模块

Fig. 4 Main functional modules of the software system

4.2 关键算法

4.2.1 基于牛顿迭代法的指数曲线拟合方法

图 5 为牛顿迭代法的指数曲线拟合方法。由图

5 可知:当测试电源导通时,线路上的电流将会由 0 逐渐增加到最大值后趋于稳态,电压则会由初始值逐渐降低至最小值后趋于稳态。

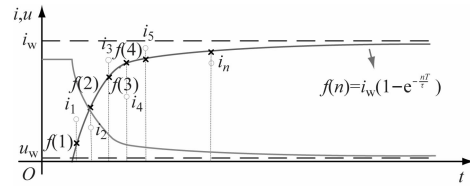


图 5 牛顿迭代法的指数曲线拟合方法

Fig. 5 Exponential curve fitting method based on Newton iteration method

当测试参数进入稳态时,将平均稳态电压 u_w 和平均稳态电流 i_w 相除,即得线路电阻:

$$R_d = \frac{u_w}{i_w} \quad (1)$$

测试电源导通瞬间为 t_0 时刻,同步数据采样中的电流分别为 $i_n(i_1, i_2, \dots, i_N)$, 电压值分别为 $u_n(u_1, u_2, \dots, u_N)$, τ 为时间常数, T 为采样周期,测试电流的指数函数拟合曲线为:

$$f(n) = i_w \left(1 - e^{-\frac{nT}{\tau}} \right), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

采用最小二乘法求解的目标方程为:

$$F(n) = \sum_{n=0}^N \left(i_n - i_w(1 - e^{-\frac{nT}{\tau}}) \right)^2 \quad (3)$$

令 $k = e^{-\frac{T}{\tau}}, k \in (0, 1)$, 那么:

$$F(k) = i_w^2 \sum_n k^{2n} + 2i_w \sum_n i_n k^n - 2i_w^2 \sum_n k^n + \sum_n i_n^2 + ni_w^2 - 2i_w \sum_n i_n \quad (4)$$

由于在实际测量时, n 为定值, i_n 也为定值,那么对 $F(k)$ 求得导数并令其等于 0, 则有:

$$F'(k) = 2i_w \sum_n n [i_w k^{2n-1} + (i_n - i_w) k^{n-1}] = 0 \quad (5)$$

式(5)为一元高次方程求实数解,可采用牛顿迭代法求解,所求的解即为目标函数的极值:

$$k_{a+1} = k_a - \frac{f(k_a)}{f'(k_a)}, \quad a = 1, 2, \dots, A \quad (6)$$

由于本装置是专用设备,可以通过查表法估算 $k_1 = e^{-\frac{T}{\tau_1}} \approx 1$, 那么可以取初始值 $k_1 = 1$, 经过式(6)多次迭代直至 $|k_{a+1} - k_a| \leq 0.0001$ 时收敛,时间常数 τ_{a+1} 为:

$$\tau_{a+1} = -\frac{T}{\ln k_{a+1}} \quad (7)$$

最后,可以求得线路电感:

$$L_s = R_d \tau_{a+1} \quad (8)$$

4.2.2 基于RL(强化学习)简化双边供电模型的短路电流仿真

图6为城轨接触网双边供电等效模型^[10],由于输电线路对地电容比较小,可忽略电容 C_1 、电容 C_2 ,可近似等效于电阻 R_{d1} 、电感 L_{s1} 与电阻 R_{d2} 、电感 L_{s2} 分别串联,再并联的电路的等效电路。

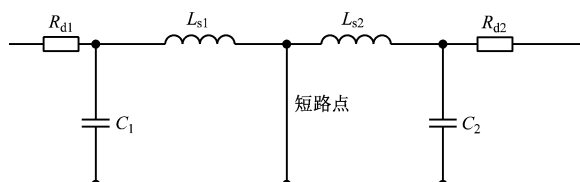


图6 城轨直流双边供电模型

Fig.6 Model of urban rail DC bilateral power supply

两侧各电流仿真计算公式分别为:

$$\begin{aligned} i_1(t) &= \frac{U}{R_{d1}}(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}})\varepsilon(t - t_0) \\ i_2(t) &= \frac{U}{R_{d2}}(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}})\varepsilon(t - t_0) \end{aligned} \quad (9)$$

式中:

t ——时间;

U ——单边供电的直流电压;

τ_1, τ_2 ——为两侧的时间常数;

$\varepsilon(t - t_0)$ ——阶跃函数。

用叠加定理可求得短路点电流仿真公式为:

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t) \quad (10)$$

4.3 软件的运行逻辑

图7为软件的运行逻辑框图。

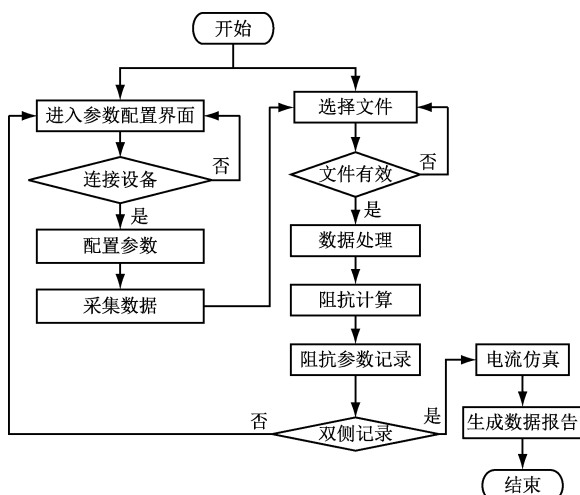


图7 软件的运行逻辑框图

Fig.7 Logical block diagram of software operation

其主要流程是:① 测试参数配置前需要连接设备,如果连接成功,则会显示版本信息,随后配置测试信息;如果不成功,则需要继续连接设备。② 短路测试,数据采集并保存文件。③ 判断文件是否有效,如果有效,则进行数据处理,随后进行阻抗计算,并记录阻抗参数;如果无效,则返回继续选择文件。④ 判断阻抗参数是否双侧记录,如果是则进行电流仿真,生成试验报告;如果否,则返回参数配置进行另一侧数据测量。

5 试验及结果验证

5.1 系统的工作原理及过程

选择某城轨接触网上进行了试验,其过程为:

① 某供电分区某处设置短路点,距离两侧整流变压器距离分别约为1.10 km、6.05 km。② 使用测试装置分别在两侧整流变压器附近进行试验,配置采样参数,测试采用AI0、AI2双通道同步采样,采样点数为10 000个,采样周期为5 μ s。③ 按动触发按钮,进行短路测试,分别记录数据。④ 将采集的数据导入软件,分别求得线路阻抗和短路电流的仿真值。

5.2 结果展示

5.2.1 阻抗测试计算结果

图8 a)、图8 b)分别为某城轨接触网近端侧(1.10 km)、远端侧(6.05 km)处的短路测试结果软件截图,近端线路电阻 R 为77.755 m Ω 展示、线路电感 L 为22.87 mH,远端线路电阻 R 为594.861 m Ω ,线路电感 L 为174.985 mH。

5.2.2 短路电流仿真结果

图9为基于1 500 V直流双边供电模型的电流变化趋势仿真,其结果显示,电流值从0开始,2~4 ms后达到最大值,其稳态值结果为21 812.869 A。

6 结语

本文针对城轨接触网线路阻抗估算误差大,造成继电保护整定值偏差,短路试验安全性差、缺乏专用测试设备等问题,研究了一种基于牛顿迭代法的指数曲线拟合求线路阻抗的方法;提出了一种基于RL简化双边供电模型的电流变化的数学模型;提出了一种城轨接触网低压模拟短路试验方法并集成了测试装置,其能够完成接触网线路阻抗测量与计算、高压短路电流变化趋势的仿真等功能。通过实际算例验证了此装置能够提升继电保护装置整定

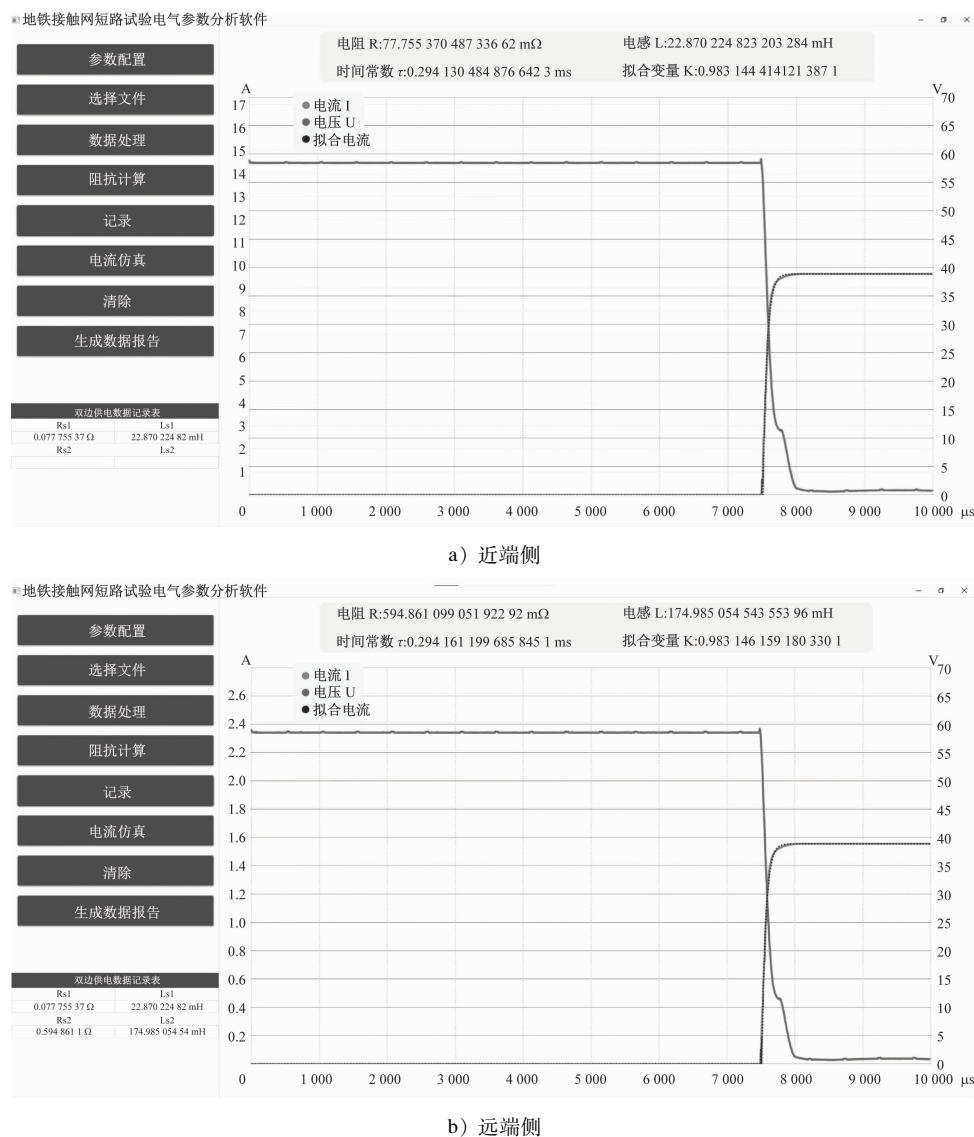


图8 某城轨接触网近端侧(1.10 km)、远端侧(6.05 km)处的短路测试结果软件截图

Fig.8 Short-circuit test results at the proximal side (1.10 km) and the distal side (6.05 km) of an urban rail catenary

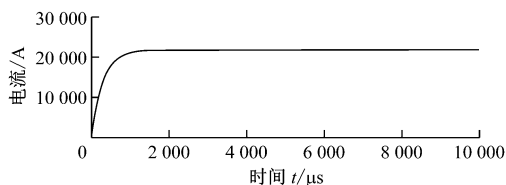


图9 仿真双边供电情况下的电流变化

Fig.9 Simulation of current variations under bilateral power supply conditions

计算的准确性,简化整定计算过程,提高工作效率。

参考文献

- [1] 李浩. 城轨供电系统继电保护配置与整定计算软件设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.

LI Hao. Design of relay protection configuration and setting calculation software for subway power supply system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.

- [2] 郝紫惠. 基于 MATLAB 仿真的直流牵引供电系统馈线保护整定软件开发[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.

HAO Zihui. Development of feeder protection setting software for DC traction power supply system based on MATLAB simulation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.

- [3] 李夏青, 顾群义, 曹岩. 城轨牵引网短路电流特征分析与仿真[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(2): 117.

LI Xiaqing, GU Qunyi, CAO Yan. Analysis and simulation of short-circuit current in subway traction power supply[J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(2): 117.

(下转第 187 页)

4 结语

结合轨道交通控制的特点,本文对云平台的安全需求进行了梳理,并详细介绍了云平台的虚拟化层、调度机制、资源共享协议等关键技术。针对云平台在处理安全任务时可能遇到的预算时间耗尽问题,现有的资源共享协议仍有较大改进空间,是未来研究的重要方向之一。

参考文献

- [1] 王振东,齐威,苗义峰,等.基于云计算技术的铁路调度集中系统架构设计研究[J].铁道运输与经济,2020,42(1):38.
WANG Zhengdong, QI Wei, MIAO Yifeng, et al. A study on the design of the architecture of railway CTC system based on cloud computing technology [J]. Railway Transport and Economy, 2020,42(1):38.
- [2] 赵宏涛,陈峰,许伟,等.基于云边协同的高速铁路智能行车调度系统研究[J].铁道运输与经济,2021,43(1):71.
ZHAO Hongtao, CHEN Feng, XU Wei, et al. High-speed railway intelligent traffic control system based on cloud edge collaboration [J]. Railway Transport and Economy, 2021,43(1):71.
- [3] 李杰,徐启禄.基于云平台的城市轨道交通智能运维系统设计与应用[J].城市轨道交通研究,2021,24(8):213.

(上接第182页)

- [4] 许成,王慧芳,王晓保.直流牵引供电系统短路计算模型分析[J].电力系统保护与控制,2013,41(22):84.
XU Cheng, WANG Huifang, WANG Xiaobao. Analysis of short-circuit model for DC traction supply system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22):84.
- [5] 张智杰.城市轨道交通DC1500V供电系统研究[D].兰州:兰州交通大学,2015.
ZHANG Zhijie. Research on DC1500V power supply system of urban rail transit [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2015.
- [6] 金雪丰,陈裕楠,童翔.直流牵引供电系统短路试验分析[J].都市快轨交通,2016,29(3):103.
JIN Xuefeng, CHEN Yu'nan, TONG Xiang. Analysis on short circuit test of DC traction power supply system[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2016, 29(3):103.
- [7] 韩志杰.城轨直流牵引供电系统短路试验[J].都市快轨交通,2013,26(1):113.
HAN Zhijie. Short-circuit test on DC traction power supply system of urban rail transit [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2013, 26(1):113.
- [8] 周邵钢,吴观华,李艳明,等.一种城市轨道交通接触网受

电检测装置及检测方法:CN 114 778973A[P]. 2022-07-22.
ZHOU Shaogang, WU Guanhua, LI Yanming, et al. An urban rail transit contact network electrified detection device and detection method: CN 114 778973A[P]. 2022-07-22.

- [4] 肖珊,吴华.基于云平台的城市轨道交通能源管理系统[J].城市轨道交通研究,2021,24(4):95.
XIAO Shan, WU Hua. Urban rail transit energy management system on cloud platform [J]. Urban Mass Transit, 2021,24(4):95.
- [5] 张彬,李继民,张寿华,等.基于动态信任评估的政务数据云服务平台设计[J].河北大学学报(自然科学版),2018,38(4):432.
ZHANG Bin, LI Jimin, ZHANG Shouhua, et al. A cloud service platform design based on dynamic trust evaluation [J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2018,38(4):432.
- [6] ZHANG Yuzhuo, HONG Chunhua, CAO Yuan, et al. Safety mechanism design and verification of safety computer parallel program [J]. Chinese Journal of Electronics, 2018, 27(6):1163.

· 收稿日期:2022-06-07 修回日期:2022-08-15 出版日期:2024-10-10
Received:2022-06-07 Revised:2022-08-15 Published:2024-10-10
· 第一作者:冯浩楠,副研究员,fln02212005@163.com
通信作者:姜庆阳,副研究员,tklsjqy@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

- [9] 郭泓宏.低压电器短路试验平台设计与运营[D].上海:东华大学,2022.
GUO Minghong. Design and operation of short circuit test platform for low voltage electrical apparatus [D]. Shanghai: Donghua University, 2022.
- [10] 肖涛古.城轨直流供电系统模型及直流短路分析[D].广州:华南理工大学,2012.
XIAO Taogu. DC power supply system model of subway and DC short circuit analysis [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.

· 收稿日期:2023-05-09 修回日期:2023-08-06 出版日期:2024-10-10
Received:2023-05-09 Revised:2023-08-06 Published:2024-10-10
· 第一作者:何柏杉,讲师,hebaishan318@163.com
通信作者:何靖,高级工程师,925905992@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license