

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2024.06.011

# 跨座式单轨交通直流牵引系统 故障列车识别方法

张向亮<sup>1,2</sup>, 刘永生<sup>3</sup>, 蔡志端<sup>1,2</sup>, 王孝顺<sup>1</sup>, 罗四倍<sup>1</sup>, 单丰<sup>1</sup>, 祝艳华<sup>4</sup>

(1. 湖州学院智能制造学院, 浙江湖州 313000; 2. 湖州市绿色能源材料与电池梯次利用重点实验室, 浙江湖州 313000;  
3. 南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211102; 4. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 南京 211102)

**摘要:** 针对跨座式单轨交通直流牵引系统正极回路与列车车身发生短路故障危及城市轨道交通的安全运营问题, 基于跨座式单轨交通直流牵引系统双边供电等值模型, 分析正极回路与车体发生短路时故障列车和正常列车接地电流和负极受电电流幅值的特征差异, 提出一种基于接地电流和负极受电电流幅值比较的故障列车识别方法, 并通过 MATLAB 仿真和现场试验对所提方法进行测试。研究表明: 即使正常列车的车体接地继电器 GR 等值电阻由 750  $\Omega$  大幅降至 0.75  $\Omega$  时, 故障列车的接地电流幅值始终大于整定值和负极受电电流幅值, 本文所提方法能够准确地识别出故障列车, 验证了方法的有效性。

**关键词:** 城市轨道交通; 直流牵引系统; 故障识别; 接地电流; 负极受电电流; 跨座式单轨

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)06-0078-07

## An Identification Method of Faulty Train for a Straddle-Seat Monorail DC Traction System

ZHANG Xiangliang<sup>1,2</sup>, LIU Yongsheng<sup>3</sup>, CAI Zhidian<sup>1,2</sup>, WANG Xiaoshun<sup>1</sup>,  
LUO Sibe<sup>1</sup>, SHAN Feng<sup>1</sup>, ZHU Yanhua<sup>4</sup>

(1. School of Intelligent Manufacturing, Huzhou College, Huzhou Zhejiang 313000; 2. Huzhou Key Laboratory of Green Energy Materials and Battery Cascade Utilization, School of Intelligent Manufacturing, Huzhou College, Huzhou, Zhejiang 313000; 3. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102; 4. Nanjing Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211102)

**Abstract:** When a short-circuit fault occurs between the positive pole of a high-voltage DC circuit for a train and its carbody inside the station in a straddle seat monorail DC traction system, this causes the carbody grounding relay (GR) of all trains inside the station to actuate and the circuit breakers of the train to trip. Meanwhile, this also triggers multiple 64D grounding protection actions and trips the circuit breaker of the DC feeder. The fault results in a loss of power to the DC traction system. It is necessary to identify the faulty train and restore the normal power supply of the DC traction system as soon as possible to reduce the impact of the accident. First, the study analyzed characteristic differences in the amplitude of the grounding current and negative receiving electricity current for a faulty train compared to a normal train when a short-circuit occurred between the positive circuit and the carbody based on the equivalence model of the DC traction bipolar power supply system for straddle monorail transportation. Second, an identification method for a faulty train is proposed based on a comparison of the grounding current and negative current amplitude. The identification procedure is activated when the grounding current exceeds a predetermined threshold. If the grounding current amplitude is greater than the negative current, the train is identified as faulty;

收稿日期: 2024-03-29 修回日期: 2024-06-03

第一作者: 张向亮, 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为城市轨道交通交直流保护, 649981528@qq.com

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LY19F030002)

引用格式: 张向亮, 刘永生, 蔡志端, 等. 跨座式单轨交通直流牵引系统故障列车识别方法[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(6): 78-84.

ZHANG Xiangliang, LIU Yongsheng, CAI Zhidian, et al. An identification method of faulty train for a straddle-seat monorail DC traction system[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(6): 78-84.

otherwise, it is considered to be in a normal state. The accuracy and effectiveness of this method were validated through MATLAB simulations and field tests. The proposed approach is simple, practical, and highly reliable, providing a strong safeguard for the safe operation of straddle-seat monorail systems.

**Keywords:** urban rail transit; DC traction system; fault identification; grounding current; negative electric current; straddle-seat monorail

随着我国城市化进程的稳步推进,城市轨道交通在公共交通系统中的地位与作用越来越重要,逐渐成为城市公共交通的骨干<sup>[1]</sup>,保障城市轨道交通安全是保护人民生命财产和维护社会稳定的重要举措。城市轨道交通供电系统是城市轨道交通的能量总供给,而直流牵引系统是供电系统的重要组成部分,确保直流牵引系统的安全至关重要。直流牵引系统有走行轨回流和专用轨回流两种方式<sup>[2]</sup>。采用走行轨回流方式的直流牵引系统易形成杂散电流腐蚀附近的金属结构,对轨道交通中的电气设备和设施的正常运行造成一定危害<sup>[3]</sup>。为避免杂散电流的影响,跨座式单轨交通直流牵引系统采用专用轨回流方式<sup>[2-4]</sup>。列车正极回路与车身短路也是直流牵引系统中一种严重故障<sup>[5]</sup>,在走行轨回流系统中会产生很大短路电流,直流馈线保护能够快速正确地动作切除故障。但是在专用轨回流系统中车身与专用回流轨保持绝缘,上述故障不会产生大电流,直流馈线保护不起作用,致使车身产生高电压,严重影响到乘客的安全和电气设备的绝缘。针对专用轨回流系统中列车车身产生高电压的问题,文献[6]提出在跨座式单轨交通直流牵引系统的列车车身与负极轨之间安装车体接地继电器 GR,当列车正极回路与车身短路时,GR 动作使列车断路器跳闸,能够有效地隔离高电压,因此跨座式单轨交通直流牵引系统列车上全部安装了 GR。文献[7]指出,当列车正极回路与车身短路点位于列车断路器前端时,GR 虽然会动作跳开列车断路器,但是正极短路故障仍然存在,此时为了保证列车到站后乘客的安全以及有效地切除故障,列车上设置接地碳刷,车站设置接地带,直流负极柜负极母线与大地之间设置 64D 接地保护。站内所有列车车身通过接地碳刷与大地接通,若此时某列车正极回路与车身短路后就会导致站内所有列车 GR 动作跳开列车断路器,引起全线多处 64D 动作并跳开直流馈线断路器,导致直流牵引系统失去电源,扩大了事故范围。为了降低事故影响,需要尽快排除故障恢复直流牵引系统正常供电。在上述情况下无法快速准确地找出故障列车,现有做法是轮流试车,即告警列车全部降弓然后逐一升弓确定故障列车,该方法虽然能定位出故障列车,但是处理时间长、过程繁琐<sup>[8]</sup>。

文献[9]提出了本体差流法,即取消 GR 并增加车载差分电流检测装置,该方法能准确定位出差流区间内正极回路与车身发生短路的列车,但是无法定位故障点位于车身差流区间外的列车,而且取消 GR 会导致行驶途中的列车发生上述故障时列车断路器不能跳闸隔离高压。文献[10]提出了单向导通法,即在车站接地板与大地之间串接了单向导通装置,利用其对地正向导通、反向截止的特性锁定站内故障列车,具有一定的实用性,但是串接的单向导通装置是较易损坏的电子器件,如果被烧断会导致车站接地板与大地之间失去可靠连接,从而对乘客的人身安全造成严重威胁。由此可见,本体差流法和单向导通法均存在一定的局限性和不足,因此有必要进行更深入地研究,提出更可靠的故障列车识别方法。

本文将本体差流法中靠近正极受电靴处的电流互感器挪至列车接地碳刷处,保留列车 GR,以跨座式单轨交通直流牵引双边供电系统为基础,首先给出列车正极回路与车身短路的直流牵引系统等值模型,并分析故障列车和正常列车的接地电流和负极受电电流幅值特征,然后提出了一种基于接地电流和负极受电电流幅值比较的故障列车识别方法,最后通过 MATLAB 仿真及现场测试验证了所提方法的正确性和有效性。

## 1 等值模型与特征分析

### 1.1 正极与车身短路的直流牵引系统等值模型

跨座式单轨交通直流牵引双边供电系统如图 1 所示,列车 1、列车 2 分别位于车站甲和车站乙内,列车车体与接地碳刷组成一个整体;TA11 和 TA21 分别是列车 1 和列车 2 的接地电流互感器,而 TA12 和 TA22 分别是列车 1 和列车 2 的负极受电电流互感器; $i_{d1}$  和  $i_{d2}$  分别是列车 1 和列车 2 的接地电流; $I_{GR1}$  和  $I_{GR2}$  分别是流过列车 1 和列车 2 车体接地继电器的电流; $i_{n1}$  和  $i_{n2}$  分别是列车 1 和列车 2 负极受电电流。QF1 和 QF2 分别是列车 1 和列车 2 的断路器;64D1 和 64D2 分别是牵引变电所 A 和牵引变电所 B 的接地保护装置。当列车 1 在高压直流回路 f 点与车身发生正极短路故障时,会导致全线正极接触轨电位同时下降,接近大地电位,其对应的直流牵引系统等值模型如图 2 所示。

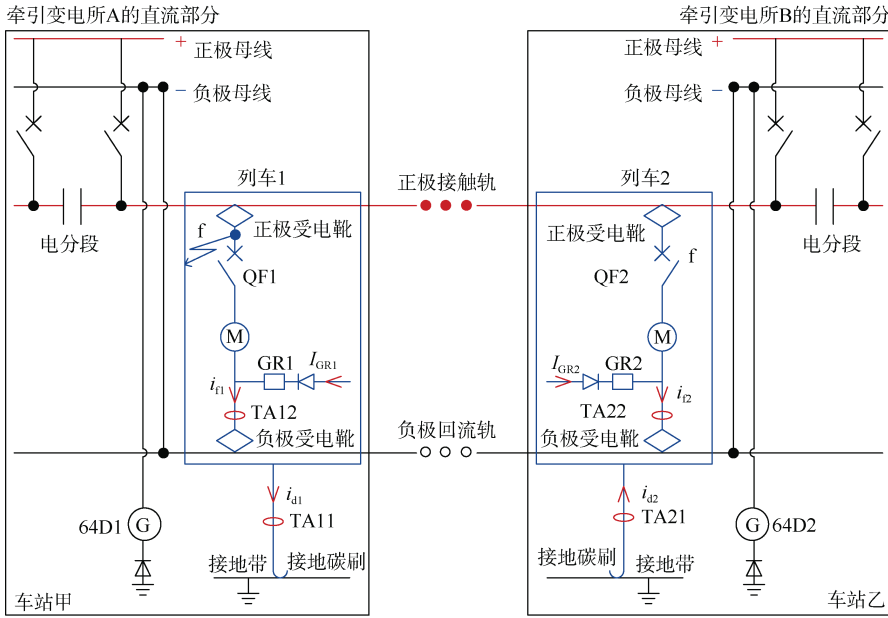


图1 跨座式单轨交通直流牵引双边供电系统

Figure 1 Diagram of DC traction bipolar power supply system for straddle monorail transportation

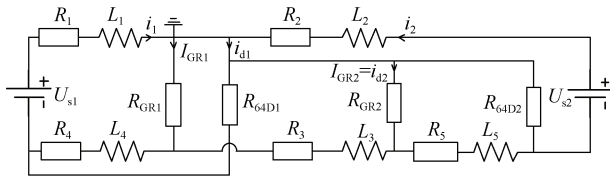


图2 列车1正极与车身短路的直流牵引系统等值模型

Figure 2 Equivalent model of DC traction power supply system with the short circuit between the positive pole of train 1 and the carbody

图2中,  $R_1$ 、 $L_1$  分别是列车1的正极短路点至牵引变电所A的正极接触轨等值电阻以及等值电感;  $R_2$ 、 $L_2$  分别是列车1的正极短路点至牵引变电所B的正极接触轨等值电阻以及等值电感;  $R_3$ 、 $L_3$  分别是列车1负极受电靴至列车2负极受电靴的负极回流轨等值电阻、等值电感;  $R_4$ 、 $L_4$  分别是列车1负极受电靴至牵引变电所A的负极回流轨等值电阻、等值电感;  $R_5$ 、 $L_5$  分别是列车2负极受电靴至牵引变电所B的负极回流轨等值电阻、等值电感;  $R_{GR1}$ 、 $R_{GR2}$  分别是列车1和列车2车体接地继电器GR的等值电阻, 正常取  $750 \Omega^{[4]}$ ;  $R_{64D1}$ 、 $R_{64D2}$  分别是牵引变电所A和牵引变电所B接地保护装置64D的等值电阻, 一般取  $5 \Omega^{[4]}$ ;  $i_1$ 、 $i_2$  分别是牵引变电所A和牵引变电所B的电源回路电流;  $U_{s1}$ 、 $U_{s2}$  分别是牵引变电所A和牵引变电所B的直流等值电源, 一般取  $1500 \text{ V}^{[11]}$ 。

文献[12]指出轨道交通负极回流轨单位长度等值电

阻为  $0.0128 \Omega/\text{km}$ ,  $R_3$ 、 $R_4$ 、 $R_5$  均不足  $0.0384 \Omega$ 。  $R_{64D1}$ 、 $R_{64D2}$  分别是  $R_4$ 、 $R_5$  的130倍,  $R_4$  所在支路、 $R_5$  所在支路可按短路处理, 即  $R_4 + j\omega L_4 \approx 0$ 、 $R_5 + j\omega L_5 \approx 0$ 。  $R_{GR1}$  是  $R_3$  的一万倍左右,  $R_3$  所在支路也可按短路处理,  $R_3 + j\omega L_3 \approx 0$ 。  $\omega$  为角频率,  $j$  为复数符号。  $R_{64D1}$  与  $R_{64D2}$  并联取等值电阻  $2.5 \Omega$ , 即  $R_{64D1} // R_{64D2} = 2.5$ 。 为简便分析计算, 将  $R_{GR1}$ 、 $R_{GR2}$  和  $2.5 \Omega$  等值为  $R_{eq}$ , 即  $R_{eq} = R_{GR1} // R_{GR2} // 2.5$ , 最后得到列车1正极与车身短路的直流牵引系统简化等值模型, 如图3所示。

### 1.2 接地电流、负极受电流特征分析

在图3中, 根据基尔霍夫电压定律列出计算式为

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + R_{eq} (i_1 + i_2) = 1500 \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 + R_{eq} (i_1 + i_2) = 1500 \\ R_{GR1} I_{GR1} = R_{GR2} i_{d2} = \frac{2.5 R_{GR2}}{2.5 + R_{GR2}} i_{d1} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $L_2 = \beta L_1$ ,  $R_2 = \beta R_1$ ,  $\beta$  为牵引变电所B、牵引变电所A至正极短路点的距离之比, 一般取值范围在  $9 \sim 29$ 。

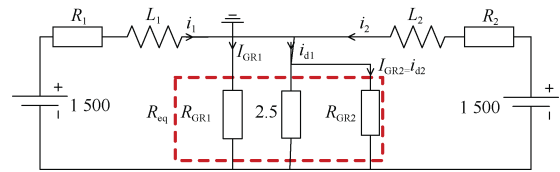


图3 列车1正极与车身短路的直流牵引系统简化等值模型  
Figure 3 Simplified equivalent model of DC traction power supply system with a short circuit between the positive pole of train 1 and the carbody

假设列车1正极回路与车身短路瞬间不计负荷电流, 有  $i_{1(0-)} = i_{2(0-)}$ ,  $i_1$ 、 $i_2$  的计算式为

$$\begin{cases} i_1 = \frac{1500}{R_1 + \frac{n}{n-1} \times R_{eq}} \left( 1 - e^{-\frac{R_1 + \frac{n}{n-1} \times R_{eq}}{L_1} t} \right) \\ i_2 = \frac{1500}{R_2 + n \times R_{eq}} \left( 1 - e^{-\frac{R_2 + n \times R_{eq}}{L_2} t} \right) \end{cases} \quad (2)$$

根据式(1)和式(2), 可得  $i_{d1}$ 、 $i_{d2}$ 、 $I_{GR1}$ 、 $I_{GR2}$ , 对应的计算式为

$$\begin{cases} i_{d1} = \frac{1}{1 + \frac{2.5}{2.5 + R_{GR2}} \times \frac{R_{GR2}}{R_{GR1}}} \times (i_1 + i_2) \\ i_{d2} = I_{GR2} = \frac{2.5}{2.5 + R_{GR2}} \times i_{d1} \\ I_{GR1} = \frac{2.5}{1 + \frac{2.5}{R_{GR2}}} \times \frac{1}{R_{GR1}} \times i_{d1} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,  $i_{d1}$  约在 400~600 A 之间<sup>[9]</sup>;  $i_{d2}=I_{GR2}=0.003i_{d1}$ ,  $i_{d2}$  幅值远小于  $i_{d1}$  幅值;  $I_{GR1}=0.003i_{d1}$ 、 $I_{GR2}=i_{d2}$ , 如果再考虑列车 1 和列车 2 的负荷电流  $I_{load1}$  和  $I_{load2}$  (较小), 则  $i_{f1}=0.003i_{d1}+I_{load1}$ ,  $i_{f2}=i_{d2}+I_{load1}$ , 可得列车 1 的  $i_{f1}$  幅值小于  $i_{d1}$  幅值, 而列车 2 的  $i_{f2}$  幅值大于等于  $i_{d2}$  幅值。

基于上述分析, 可得列车 1、列车 2 的接地电流和负极受电电流幅值特征: ①列车 1(故障列车)的接地电流幅值远大于列车 2(正常列车)的接地电流幅值; ②列车 1(故障列车)的接地电流幅值大于自身负极受电电流幅值, 而列车 2(正常列车)的接地电流幅值小于等于自身负极受电电流幅值。

## 2 故障列车识别

### 2.1 识别原理

由 1.2 节可知, 列车 1(故障列车)的接地电流幅值远大于列车 2(正常列车)的接地电流幅值。但是列车 2 车体接地继电器经长时间运行, 其等值电阻  $R_{GR2}$  可能大幅降低, 此时两列车接地电流幅值变大且接近, 仅用接地电流幅值进行判断可靠性不高。应对上述情况时, 列车 1(故障列车)的接地电流幅值始终大于其负极受电电流幅值, 而列车 2(正常列车)的接地电流幅值始终小于等于其负极受电电流幅值。基于此, 本文结合两种判据提出一种合理的故障列车识别方法。

首先以列车接地电流幅值  $|I_d|$  作为启动条件, 当采集到接地电流  $I_d$  后, 比较  $|I_d|$  和启动整定值  $I_{qdzd}$ , 若  $|I_d| < I_{qdzd}$ , 则判断列车正常, 不启动故障列车识别程序; 若  $|I_d| \geq I_{qdzd}$ , 则启动故障列车识别程序, 此时比较  $|I_d|$  和本列车负极受电电流幅值  $|I_f|$ , 当  $|I_d| > |I_f|$ , 则判断列车处于故障状态, 当  $|I_d| \leq |I_f|$ , 则判断其为正常状态。因此, 故障列车识别原理分两步, 一是启动识别程序, 二是进行识别判断, 判断式为

$$\begin{cases} |I_d| \geq I_{qdzd} \\ |I_d| > |I_f| \end{cases} \quad (4)$$

### 2.2 原理实现

由式(4)可知, 只有明确  $I_d$ 、 $I_f$ 、 $I_{qdzd}$  的具体值才能进行比较判断, 其中  $I_d$  和  $I_f$  可从列车接地碳刷 TA1 处和负极受电靴 TA2 处分别采集, 而启动整定值  $I_{qdzd}$  大小需要详细分析确定。

$I_{qdzd}$  的选择要保证识别程序不误启动、不拒启动, 故考虑两点, 一是  $I_{qdzd}$  要小于故障列车接地电流最小值  $I_{d1.min}$ , 确保识别程序不拒启动; 二是  $I_{qdzd}$  不小于正常列车接地电流最大值  $I_{d2.max}$ , 确保识别程序不误启动, 因此  $I_{qdzd}$  的取值为

$$I_{d2.max} \leq I_{qdzd} < I_{d1.min} \quad (5)$$

在车站只有一列车并且列车正极回路与车身发生短路, 此时接地电流幅值最小, 等于流过接地保护装置 64D1 和 64D2 的电流之和。64D 承受的最小电压为 375 V<sup>[9]</sup>, 故  $I_{d1.min}=2 \times 375/5=150$  A。由 1.2 节可知,  $I_{d2.max}=I_{GR2.max} \approx 2$  A。为了保证  $R_{GR2}$  可能降低使  $I_{d2}$  增大, 致使列车 2(正常车)识别程序不能误启动,  $I_{qdzd}$  应基于  $I_{d1.min}$  进行取值。由于  $I_{qdzd}$  的取值范围偏大, 启动灵敏系数可取 1.5, 则  $I_{qdzd}=150/1.5=100$  A。

### 2.3 识别流程

故障列车识别原理的具体流程可分 4 步:

- 1) 故障列车识别装置从列车接地碳刷处和负极受电靴处的电流互感器中分别采集接地电流和负极受电电流, 计算两者幅值  $|I_d|$  和  $|I_f|$ 。
- 2) 故障列车识别装置实时比较列车接地电流幅值  $|I_d|$  与启动整定值  $I_{qdzd}$ , 若  $|I_d| < I_{qdzd}$ , 则识别算法不启动, 列车被判断为正常状态。
- 3) 若  $|I_d| \geq I_{qdzd}$ , 则启动识别算法并进入识别判断环节, 此时若接地电流幅值大于负极受电电流幅值则列车被判断为故障状态, 若前者小于等于后者, 则列车被判断为正常状态。

4) 仅让锁定故障的识别装置将判断结果上传到该列车控制与诊断系统(train control and management system, TCMS), 并基于列车无线通信设备由 TCMS 系统转送至城市轨道交通调度指挥系统, 由轨道交通列车调度员下令检修人员快速完成故障列车维修并恢复运营。

## 3 仿真与测试

### 3.1 仿真模型

根据图 1 所示的跨座式单轨交通直流牵引双边供

电系统，在 MATLAB/Simulink 平台搭建对应的仿真模型，直流供电电压为 1 500 V，牵引变电所 A 与牵引变电所 B 之间距离设为 3 km，列车 2 位于车站乙并且状态正常，列车 1 位于车站甲并且高压直流回路正极与车身发生短路故障。仿真参数参考文献[6, 12]，如表 1 所示。

表 1 MATLAB/Simulink 仿真模型参数

Table 1 Simulation model parameters in MATLAB/Simulink

序号	参数	数值
1	正极接触轨电阻 $r_1/(\Omega/\text{km})$	0.012 8 <sup>[12]</sup>
	负极回流轨电阻 $r_2/(\Omega/\text{km})$	
2	正极接触轨电感 $l_1/(\text{mH}/\text{km})$	0.25 <sup>[12]</sup>
	负极回流轨电感 $l_2/(\text{mH}/\text{km})$	
3	车体接地继电器 GR 等值电阻 $R_{GR}/\Omega$	750(正常时)
		0.75(故障时)
4	接地继电器 64D 等值电阻 $R_{64D}/\Omega$	5.0 <sup>[6]</sup>
5	整流变压器容量 $S/\text{kVA}$	3 000
6	整流变压器原次边额定电压 $U_1、U_2/\text{kV}$	35、1.180
7	整流变压器短路阻抗百分比 $U_k/\%$	8

为了验证第 1 节所提故障列车识别方法的正确性和有效性，本文假设在列车 1 高压直流回路正极与车身发生短路故障情况下，当列车 2 车体接地继电器 GR 等值电阻  $R_{GR2}=750 \Omega、0.75 \Omega$  时，各进行一次仿真，比较列车 1 和列车 2 的接地电流幅值以及两列车的接地电流和负极受电电流幅值。仿真时刻设为 0.02 s，仿真时长设为 0.08 s。

### 3.2 仿真 1

当列车 2 的车体接地继电器 GR2 等值电阻  $R_{GR2}=750 \Omega$  时，仿真得到列车 1 和列车 2 的接地电流幅值波形，如图 4(a)所示；列车 1 的接地电流幅值和负极受电电流幅值波形如图 4(b)所示；列车 2 的接地电流幅值和负极受电电流幅值波形如图 4(c)所示。图 4 中， $I$  表示电流， $t$  表示时间。

由图 4(a)可知，故障前两列车的接地电流幅值约为 0 A，小于 100 A，识别程序不启动，直接判断两列车为正常状态；在 0.02 s 故障发生后，列车 1 的接地电流幅值增大，大于 100 A，识别程序启动并进入识别判断环节。

由图 4(b)可知，列车 1 的接地电流幅值远大于负极受电电流幅值，识别算法判断列车 1 为故障列车；列车 2 的接地电流幅值约为 0 A，小于 100 A，识别程序不启动，直接判断列车 2 为正常车辆，而且由图 4(c)可知，列车 2 的接地电流幅值小于负极受电电流幅值。

基于此，文中所提方法能精准判断出故障列车。

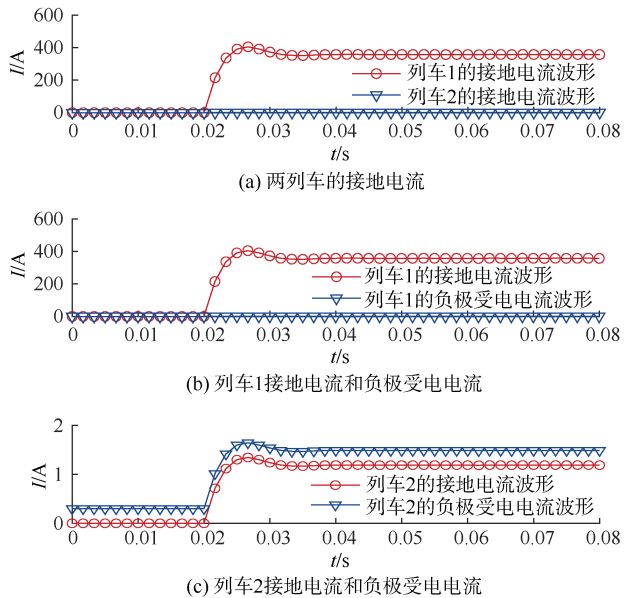


图 4  $R_{GR2}=750 \Omega$  时两列车的接地电流和负极受电电流波形  
Figure 4 The waveform of grounding current and negative receiving electricity current for the second train when  $R_{GR2}=750 \Omega$

### 3.3 仿真 2

当列车 2 车体接地继电器 GR2 等值电阻  $R_{GR2}=0.75 \Omega$  时，仿真得到列车 1 和列车 2 的接地电流幅值波形如图 5(a)所示，列车 1 的接地电流幅值和负极受电电流幅值如图 5(b)所示，列车 2 的接地电流幅值和负极受电电流幅值如图 5(c)所示。

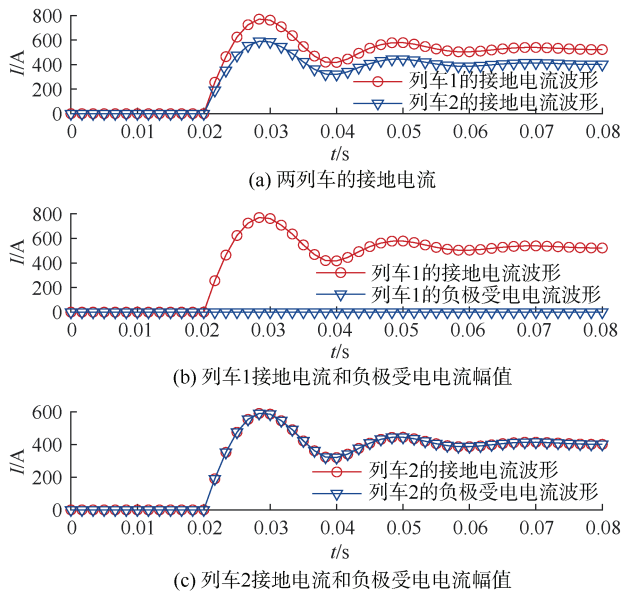


图 5  $R_{GR2}=0.75 \Omega$  时两列车的接地电流和负极受电电流波形  
Figure 5 The waveform of grounding current and negative receiving electricity current for the second train when  $R_{GR2}=0.75 \Omega$

由图 5(a)可知,故障前两列车接地电流幅值约为 0 A, 小于 100 A, 识别程序不启动, 直接判断两列车均是正常车; 在 0.02 s 故障发生后, 列车 1 和列车 2 的接地电流幅值均增大, 大于 100 A, 两列车的识别程序均启动并进入判断环节。由图 5(b)可知, 列车 1 的接地电流幅值远大于负极受电电流幅值, 识别算法判断列车 1 为故障列车。由图 5(c)可知, 列车 2 的接地电流幅值不大于负极受电电流幅值, 识别算法判断列车 2 为正常列车。

基于此, 文中所提方法在列车 2 车体接地继电器 GR 等值电阻大幅降低的情况下也能精准判断出故障列车。

### 3.4 现场测试

为了进一步证明所提方法的正确性和有效性, 本文在某公司车辆基地进行了列车高压直流回路正极与车身短路的现场实验。该公司提供了两辆车, 即车辆甲和车辆乙, 两辆车在负极受电靴处和接地碳刷处均安装 1 台霍尔电流传感器(一次额定电流为 350 A、二次额定电流为 175 mA, 额定转换比为 1:1200)。4 台霍尔电流传感器的二次电流通过控制电缆配线至故障录波装置(放置在车辆乙内, 采样频率为 10 kHz)。正极回路与车身短路故障设置在车辆甲内 f 点, 车辆乙保持正常状态。短路试验电源选择 1 500 V 电压源装置, 64D 接地保护装置整定时间取 0.3 s<sup>[9]</sup>, 现场测试接线如图 6 所示。

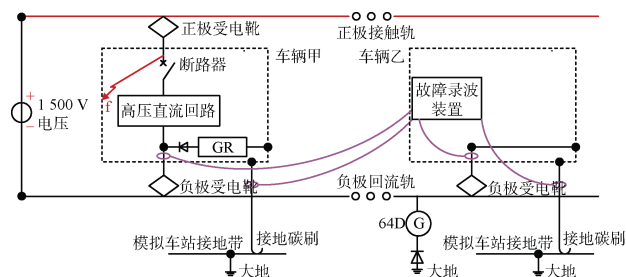


图 6 现场验证测试

Figure 6 Diagram of testing on the field

现场测试可得车辆甲和车辆乙的接地电流幅值(一次值)波形如图 7 所示, 两者均大于 100 A。

车辆甲的接地电流幅值和负极受电电流幅值(一次值)如图 8 所示, 前者大于后者。车辆乙的接地电流幅值和负极受电电流幅值(一次值)如图 9 所示, 前者等于后者。根据第 1 节所提识别原理可准确地判断出高压直流回路正极与列车短路故障发生在车辆甲内, 车辆乙正常。

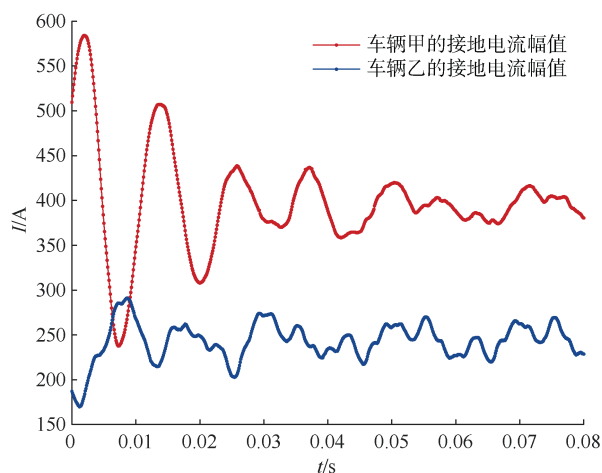


图 7 两车辆的接地电流幅值波形

Figure 7 The amplitude waveform of grounding current for two compartments

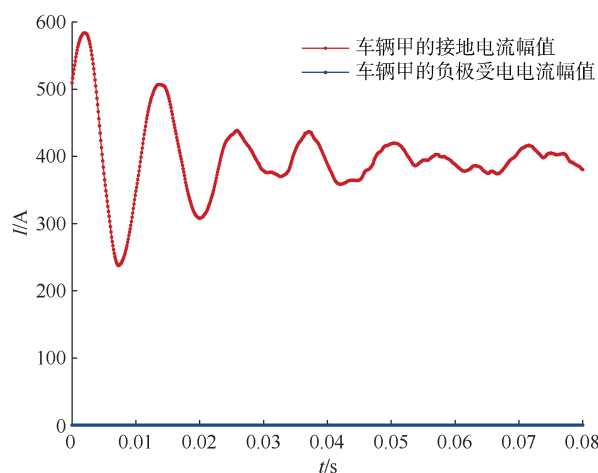


图 8 车辆甲接地电流和负极受电电流幅值波形

Figure 8 The amplitude waveform of grounding current and negative receiving electricity current for the first compartment

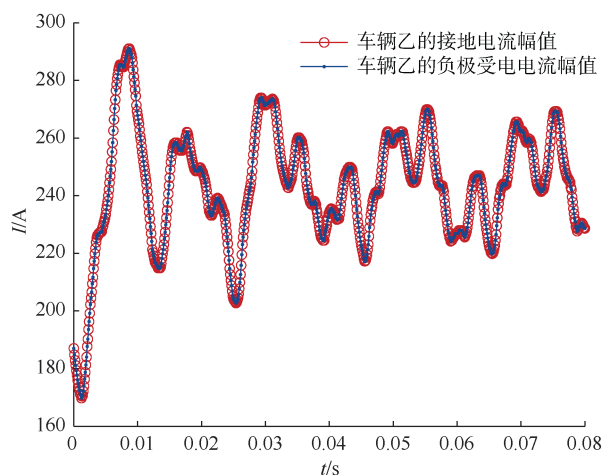


图 9 车辆乙接地电流和负极受电电流幅值波形

Figure 9 The amplitude waveform of grounding current and negative receiving electricity current for the second compartment

## 4 结论

针对跨座式单轨交通直流牵引系统正极回路与列车车身发生短路故障时如何快速准确地识别故障列车的问题,本文提出一种基于电流幅值比较的故障列车识别方法,得到以下结论。

1) 设计了跨座式单轨交通直流牵引双边供电系统模型,能较好地反映列车的接地电流和负极受电电流实际情况。

2) 针对正常列车的车体接地继电器GR等值电阻大幅下降的问题,提出了接地电流和负极受电电流幅值两种判据,提高算法的可靠性。

3) 即使正常列车的车体接地继电器GR等值电阻由750 Ω大幅降至0.75 Ω时,仿真和现场测试结果表明所提方法能够准确地识别出故障列车。

### 参考文献

- [1] 韩宝明, 余怡然, 习喆, 等. 2023年世界城市轨道交通运营统计与分析综述[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(1): 1-9.  
HAN Baoming, YU Yiran, XI Zhe, et al. Statistical analysis of urban rail transit operations worldwide in 2023: a review[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(1): 1-9.
- [2] 黄辉. 城市轨道交通专用轨回流系统直流接地保护方案[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(12): 203-206.  
HUANG Hui. DC ground protection scheme of urban rail transit special return rail system[J]. Urban mass transit, 2022, 25(12): 203-206.
- [3] SAHIL Bhagat, 杨晓峰, 王森, 等. 城市轨道交通杂散电流治理的综述与评估[J]. 电工技术学报, 2021, 36(23): 4851-4863.  
SAHIL Bhagat, YANG Xiaofeng, WANG Miao, et al. Review and evaluation of stray current mitigation for urban rail transit[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2021, 36(23): 4851-4863.
- [4] 张宾, 张丽, 刘俊明, 等. 国内外跨座式单轨车应用概况及其电气牵引系统技术方案分析[J]. 机车电传动, 2021(2): 31-36.  
ZHANG Bin, ZHANG Li, LIU Junming, et al. Application of straddle-type monorail vehicle in China and abroad and technical scheme analysis of its electric traction system[J]. Electric drive for locomotives, 2021(2): 31-36.
- [5] 闫宁宁, 王健, 孙继星, 等. 中低速磁浮交通接地系统研究综述[J]. 电气工程学报, 2023, 18(3): 35-45.

YAN Ningning, WANG Jian, SUN Jixing, et al. Review of research on medium and low speed maglev transportation grounding systems[J]. Journal of electrical engineering, 2023, 18(3): 35-45.

- [6] 周才发. 跨座式单轨交通直流牵引系统接地保护设计[J]. 都市轨道交通, 2010, 23(1): 93-96.  
ZHOU Caifa. Earthing protection design of DC traction system for straddle monorail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2010, 23(1): 93-96.
- [7] 王龙, 陈金龙, 张宾, 等. 跨座式单轨车接地保护设计[J]. 机车电传动, 2018(6): 111-114.  
WANG Long, CHEN Jinlong, ZHANG Bin, et al. Design of grounding protection for straddle type monorail car[J]. Electric drive for locomotives, 2018(6): 111-114.
- [8] 喻奇. 地铁专用回流轨牵引供电系统应用方案[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(1): 37-41.  
YU Qi. Research on application scheme of traction power supply system with special return conductor rail for metro[J]. Urban mass transit, 2021, 24(1): 37-41.
- [9] 张坤, 袁文辉, 刘翔, 等. 悬挂式单轨牵引回流接地故障检测保护机制研究[J]. 机车电传动, 2018(6): 84-88.  
ZHANG Kun, YUAN Wenye, LIU Xiang, et al. Research on suspended monorail traction power return grounding fault detection protection mechanism[J]. Electric drive for locomotives, 2018(6): 84-88.
- [10] 唐刚, 刘川容. 重庆单轨交通车体接地故障研究及处置策略[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(7): 215-219.  
TANG Gang, LIU Chuanrong. Chongqing monorail transit carbody ground-ing fault and treatment strategies[J]. Urban mass transit, 2023, 26(7): 215-219.
- [11] 孙磊. 地铁直流牵引供电系统车网保护配合研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.  
SUN Lei. Research on protection coordination of metro DC traction power supply system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [12] 张峻领. 地铁供电系统直流侧短路故障研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.  
ZHANG Junling. Study on DC side short circuit fault of subway power supply system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.

(编辑: 王艳菊)