重庆单轨交通车体接地故障研究及处置策略

唐 刚 刘川容

（重庆市轨道交通（集团）有限公司，400042，重庆//第一作者，高级工程师）

摘 要 目的：重庆单轨车辆设置有GR（车体接地继电器），供电系统设置有64D（接地漏电保护装置），当两者中任何一个发生接地漏电故障时，都将中断运营而造成较大影响。研究两者之间的相互作用机理，能快速查找接地漏电故障原因，并锁定故障发生点，帮助恢复运营。方法：对单轨车辆GR的动作机理及供电系统64D的动作机理进行分析，明确接地漏电故障时两者相互关系及影响；对重庆单轨2号线所发生的接地漏电的故障案例进行梳理。结果及结论：通过供电系统和车辆接地漏电故障时各自故障时间点、故障现象及故障先后发生的顺序，制定了故障车辆判定及处置一览表。经实践运用，证明该一览表能快速锁定故障点并解决问题。

关键词 单轨交通；接地漏电保护装置；故障判定方法

中图分类号 U279.3+23；U232

DOI：10.16037/j.1007-869x.2023.07.040

Chongqing Monorail Transit Carbody Grounding Fault and Treatment Strategies

TANG Gang, LIU Chuanrong

Abstract Objective: Chongqing monorail vehicles are equipped with GR (carbody grounding relay), power supply system is equipped with 64D (grounding leakage protection device). When the grounding leakage fault occurs in either of them, the operation will be interrupted, resulting in greater impact. Studying their interaction mechanism allows efficient identification of grounding leakage fault causes, locating the faulty points and assisting in resuming operation. Method: By analyzing the action mechanisms of both monorail vehicle GR and of power supply system 64D, their interactive relation and influence during grounding leakage are identified; the grounding leakage fault cases of Chongqing monorail Line 2 are reviewed. Result & Conclusion: According to the time, situation and sequential happenings during power supply system and vehicle grounding leakage faults are analyzed, a list for judgment and treatment of failure vehicles is formulated. Through practical application, it is proved that the faulty points can be quickly located to solve the problem.

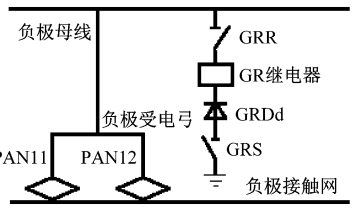
Key words monorail transit; grounding leakage protection device; fault judgment method

Author's address Chongqing Rail Transit (Group) Co., Ltd., 400042, Chongqing, China

1 车体接地继电器接地保护的基本原理

GR（车体接地继电器）接地保护是因列车发生接地故障，GR检测到车体带高电压（电压100 V及以上）时，该继电器动作，切断牵引主电路和辅助逆变器系统控制回路，使其停止工作；防止因列车车体带电或列车与站台之间形成跨步电压，对上下车的乘客造成触电伤害，以保障列车及乘客安全。GR接地保护原理示意图如图1所示。

根据GR接地保护的设计要求，GR的线圈阻值为750 Ω，保护电压整定值为100 V。



注：GRR—GR的辅助继电器；GRDd—接地二极管；GRS—接地开关；PAN—受电弓。

图1 GR接地保护原理示意图

Fig. 1 Diagram of GR grounding protection principle

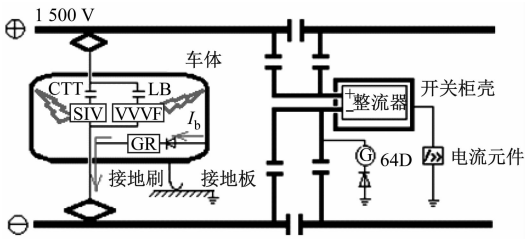
2 GR故障类型

按照故障产生的原因，车体接地故障可分为GR故障和GR感应故障两种类型。

2.1 GR故障

GR故障是指因车辆的高压元器件损坏，高压回路与车体搭接形成回路，电流经车体回流到负极接触网，从而形成的故障回路（见图2）。此类故障多由车辆设备故障所致。

1）工作原理：车体带电100 V及以上时，电流I_b流经GR使其闭合，此时列车断开单元LB和



注：CTT—磁性接触器；SIV—辅助逆变器；LB—电磁接触器；VVVF—交流调压变频；I_b—电流；64D—接地漏电保护装置。

图 2　GR 故障回路示意图

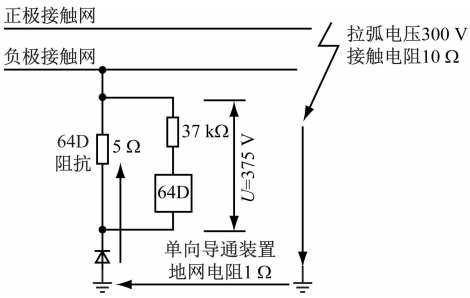
Fig. 2　Diagram of GR fault circuit

CTT。

2）电路分析：由整流器正极（1 500 V）→接触网→正极受电弓→车体接触高压（≥ 100 V）→GR（≥ 100 V）→负极受电弓（电压为 0）→负极接触网（电压为 0）→整流器负极（牵变所）形成回路，GR 继电器闭合，启动故障保护动作。

2.2　GR 感应故障

GR 感应故障是指供电系统或者其他原因造成供电系统发生接地故障，大地对负极接触网产生 100 V 以上的电压差，进入车站的车辆 GR 感应检测出电压差而启动保护动作（见图 3）。此类故障由供电系统故障所致。



注：U—电压。

图 3　GR 感应故障回路示意图

Fig. 3　Diagram of GR induction fault circuit

1）工作原理：根据经验，接触网对地发生短路故障时，故障点的拉弧电压最大为 300 V，拉弧电阻最大为 10 Ω，地网的接地电阻为 1 Ω（设计时要求小于 1 Ω），64D 阻抗为 5 Ω，则 I_{min} = 75 A，$U_{地-负极接触网}$ = 375 V。其中：I_{min} 为最小电流，$U_{地-负极接触网}$ 为地与负极接触网的电压差。

由上式可知，正极接触网（或整流器正极）接地故障时，综合接地网比负极接触网的电压高 375 V 及以上。不难理解，所有车辆一旦进入车站与接地板（与综合接地网连通）接触，接地板对负极接触网有 375 V 及以上的压降，所有与接地板接触的车辆 GR 继电器均感应到电压差而发出 GR 保护动作。

2）电路分析：由整流器正极或接触网接地（1 500 V）→拉弧点及接地网→接地板（375 V）→车体（375 V）→GR（≥100 V）→受电弓（0 V）→负极接触网（0 V）→整流器负极（0 V）构成回路，GR 继电器因得电而启动保护动作。

3　车辆 GR 故障与供电系统的关系

当列车发生 GR 故障时（持续时间超过 200 ms），供电系统 64D 必然检测到接地故障并启动保护动作。同理，当供电系统发生 64D 或者框架保护故障时，列车必然发生感应故障而启动保护动作。

3.1　64D 工作原理及电路分析

1）工作原理：接触网或者整流器正极接地，或者正极接触网以下所有正极接地，电流经过大地，或者通过综合接地网，回流到 64D，产生 200 V 及以上电压差，64D 闭合，并启动保护动作，150 ms 以内断开供电断路器，则接触网断电（见图 4）。

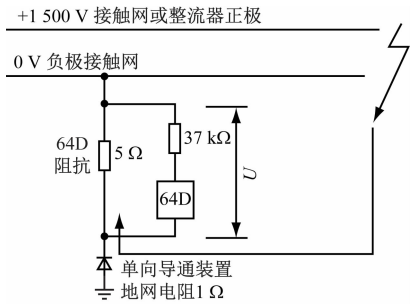


图 4　64D 的保护原理示意图

Fig. 4　Diagram of 64D protection principle

2）电路分析：整流器正极→综合接地网→64D（≥200 V）→牵变所整流器负极，形成回路。

3.2　框架保护工作原理及电路分析

1）工作原理：整流器正极触碰开关柜壳时，电流 I_b 流经框架保护电流元件，经过大地或者综合接地网，再回流到 64D。因电流元件与 64D 是串联关系，启动框架故障保护动作后，必然启动 64D 故障保护动作。框架保护原理示意图见图 5。

2）电路分析：整流器正极触碰开关柜壳体→框架保护电流元件→接地→…→综合接地网→64D（电压约 375 V，≥200 V）→牵变所整流器负极，形成故障回路。

3.3　车辆 GR 故障时对供电系统的影响

1）单个故障列车在区间发生GR故障，列车发

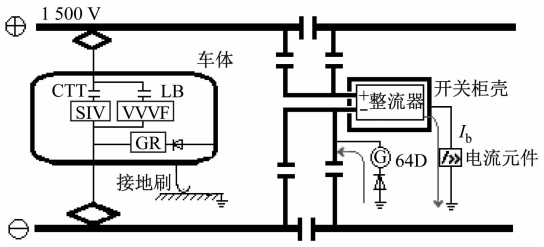


图 5　框架保护原理示意图

Fig. 5　Diagram of framework protection principle

出 GR 故障报警,随后进行牵引保护,列车失去牵引,停车。此时,供电系统无影响,其他运营列车无影响。

2）故障列车发生 GR 故障后,因惯性进入车站,列车接地刷与车站接地板相接触,继而引发全线其他列车发生 GR 感应故障报警,供电系统 64D 会启动保护动作(故障持续 0.3 s 以上时)。

3）故障列车在车站发生 GR 接地故障,全线列车会同时发出 GR 故障报警,供电系统 64D 启动保护动作。因全线同时爆发 GR 故障,无法即时分辨故障列车。

3.4　供电系统故障时对车辆的影响

1）整流器或者接触网(含避雷器等设施)的正极高压侧接地,64D 启动动作保护,同时全线同一送电分区的所有车站的车辆,全部先后报 GR 故障。

2）整流器正极碰开关柜壳时,框架装置启动保护,64D 启动动作保护,馈线断路器断开,接触网失电,部分车辆会检测到 LGD(接触网低电压故障)。

4　供电系统故障定位的改进策略

如图 6 所示:改造车站接地板,使站内接地板与大地之间相互绝缘后单点接地;利用单向导通装置的特性(对地正向导通,反向截止),实现故障列车在车站时对接地板放电,车站发出 GR 保护报警,从而锁定站内的列车故障。

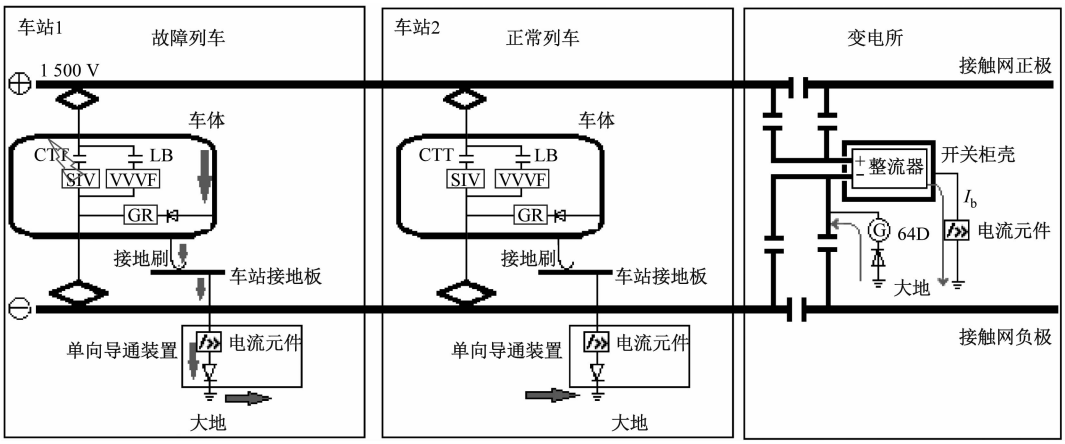


图 6　供电系统故障定位示意图

Fig. 6　Diagram of power supply system fault locationing

改造后的车站接地板,能很好地实现 GR 故障的定位,快速排除运营故障(已拟定在大修改造中投入使用)。

5　GR 故障综合判定及策略

在运营实践中,接地故障对运营造成影响非常大。根据重庆单轨运营十多年的数据统计分析,初期几乎每年都会发生几起 GR 接地故障,影响较大的有 30 余起。造成全线或部分区段中断运营时间都在 10 ~ 60 min 之间,部分中断 48 h 以上,带来了很大影响。

为了消除运营影响,提高应急处置能力,通过多年运营数据分析,总结汇编了 GR 故障列车判定一览表(见表 1)。

6　案例分析

6.1　列车在车站发生 GR 放炮故障

2009 年 8 月 10 日 11:56,重庆轨道交通 2 号线 218 次列车进入大坪车站停车对位过程中出现 GR 故障,并伴有放炮异响和少量烟雾。全线列车发生 GR 故障,变电所 64D 启动保护动作。

故障发生后,列车在距正常停车位 2 m 左右停车,该次列车司机立即操作“GR 复位”按钮但不能复位,便进行一次降弓、升弓作业后,GR故障消除,

表 1　GR 故障列车判定及处置一览表

Tab. 1　GR failure train judgment and disposal list

车辆位置	故障现象及特征				车辆保护			变电所保护		判定依据及方法	应急处置
	GR 列车数量	特征识别	放炮伴声光	GR 复位	GR 故障	LGD 故障等	64D	框架保护			
车站	多车	不确定	√	不确定	√	×	√	×		① 声光现象；② 唯一故障车不能复位	① 锁定故障车；② 所有 GR 故障车辆降弓，依次升弓
		一般车	×	√	√	不确定	√	×			
	多车	不确定	不确定	√	√	不确定	√	×		① 最先报 GR 故障的车取前 3 列判定；② 观察受电弓状态；③ LGD 故障；④ 推牵引或制动再次发生 GR 故障	① 取先报 GR 故障的车前 3 列降弓后依次升弓；② 依次判定 3 列车的受电弓状态进行排除
		一般车	×	√	√	√	√	×			
	多车	无故障车	×	√	√	×	√	√		① 全线 GR；② 框架保护	退出故障牵变所
	多车	无故障车	×	√	√	×	√	×		① 全线 GR；② 64D 启动保护动作；③ 区间回路电流判定	① 退出故障牵变所；② 线路接地应甩开接地区间
	单车	故障车	√	不确定	√	不确定	不确定	×		单一判定，锁定该故障车	① 清客下线；② 必要时救援
区间	单车	故障车	√	不确定	√	×	×	×		单一判定，锁定该故障车	① 清客下线；② 必要时救援
	多车	不确定	×	√	√	×	√	不确定		供电系统故障	退出故障牵变所
车站和区间	多车	不确定	不确定	不确定	√	不确定	√	不确定		① 锁定区间单一发生 GR 故障的车辆；② 锁定有"声光"现象的 GR 故障车辆；③ 排除进站发生 GR 故障的车辆；④ 两列以上区间车发生 GR 故障，应重点关注供电系统；⑤ 降弓后，重启升弓再次发生 GR 故障的车辆应重点关注；⑥ 无法复位的车辆应重点关注	① 故障车清客下线或退出故障牵变所；② 必要时救援
车站接地板串联单向导通装置	单车	故障车	不确定	不确定	√	不确定	√	×		单一判定，锁定该车站运营车辆	① 清客下线；② 必要时救援
	多车	不确定	不确定	不确定	√	不确定	√	不确定		① 车站发生 GR 报警，锁定该车站运营车辆；② 车站未发生 GR 报警，锁定供电系统故障	① 故障车清客下线或退出故障牵变所；② 必要时救援

注：√为发生；×为不发生；不确定为无法确定发生或不发生。

采用牵引 1 对位停车，并确认"GR 复位"按钮灯熄灭。司机办理完成乘客乘降作业后发现主电压表无电压，监控器电压正常。司机进行再次降弓、升弓操作，确认主电压表仍无电压后，及时把故障情况准确报告给行调，行调令该车进入故障车停留线。

218 次列车进站时发生 GR 故障，继而全线 GR 故障。经过快速判定 218 次列车进站"声光"现象，锁定该车接地故障（后查明是 2184 车的编号 601 母线破损与车体金属支架发生短路所致），快速退出运营，故未对正线构成严重运营影响。

6.2　在区间发生 GR 故障

2016 年 9 月 27 日 19:11，司机值乘 222 次列车在重庆轨道交通 2 号线佛图关站至李子坝站上行区间运行时，发生 GR 接地故障。司机立即报告行调，按压接地复位按钮，故障消除后接着监控显示器上出现第二单元 VVVF1、VVVF2、VVVF3 的无电源故障，列车利用惯性滑行至李子坝车站对位停车。行调令司机做制动试验，司机执行后报告行调无牵引电流，行调通知司机降弓、手动切除车门清客。此次列车故障导致后续多次列车发生晚点，列车最大晚点 13 min，对正线运营造成了较大影响。

222 次列车在区间发生 GR 故障，导致列车出现牵引系统等故障。经快速锁定 222 次列车高压回路故障后，快速清客退出运营。

6.3　全线多车多区间发生 GR 故障

2016 年 9 月 27 日 19:16，重庆轨道交通 2 号线正线多次列车出现 GR 接地故障，司机按压复位按钮后恢复正常，接触网供电未跳闸。

2016 年 9 月 27 日 20:00，全线列车再次发生 GR 故障，金家湾、白居寺供电所 64D 启动保护动作，动物园站至金家湾站区段上下行接触网失电，金家湾站至鱼洞站区段上下行接触网单边供电。经牵变所重合闸后，全线又恢复运营。

根据故障报修统计分析：当日，正线运营 23 列车，有 21 列车在车站内发生 GR 故障，有 2 列在区间发生 GR 故障。其中，210 次列车在上行金家湾站至建桥站区间，230 次列车上行新山村站至大渡口站区间，均未发生 GR 故障。

因列车无异常特征,根据多车区间发生 GR 故障,判定是供电系统出故障。后经查明是供电故障避雷器出现间歇式放电所致。

6.4　感应型 GR 故障

2016 年 7 月 1 日,重庆轨道交通 2 号线全线 17 列列车发生 GR 故障,变电所 64D 启动保护动作,列车降弓收车后故障消除。运营结束后,当夜排查全部运营列车以及供电系统,没有找到故障点。次日 06:54,全线 12 列车再次发生列车 GR 故障,继后间歇性引发全线 64D 启动保护动作,因一时无法迅速锁定故障,列车只能逐一复位断续维持运行。此故障造成多部门投入大量的人力物力进行全面排查,影响运营 48 h。

运用车站及区间多车发生 GR 故障的对应策略,基本锁定供电系统。后查明,此故障是供电系统的上网电缆受损造成高阻接地所致。

7　结语

通过多年的运营经验,对单轨车辆独有的 GR 保护机理与供电系统 64D 保护机理进行了深入分析,总结了两者之间相互影响、相互作用的关系,梳理了一套快速判定故障点的方法,以及处置的策略,并制定了故障车辆判定一览表,经实践运用,取得较好效果,为单轨交通的安全运营提供了有力保障。

参考文献

[1]　周才发. 跨座式单轨交通直流牵引系统接地保护设计[J]. 都市快轨交通, 2010, 23(1): 93.
ZHOU Caifa. Earthing protection design of DC traction system for straddle monorail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2010, 23(1): 93.

(收稿日期:2021 - 02 - 02)

(上接第 214 页)

错的选择方案。

1 号线的倒接方案是根据现场设备复杂、施工时间紧张等限制因素而独创的,通过现场测试和实践验证已获得良好的使用效果,也为每天的施工调试创造了条件,在大修施工期间未发生过重大施工影响,保证了 1 号线信号大修施工的平稳过渡。随着轨道交通运行年限的不断增加,各线路也将迎来大修,为了设备大修过程中不影响第二天的运营,新旧系统间的倒接方案需要作重点研究和分析,并应针对不同系统不同设备的倒接工作逐项做好充足的方案,1 号线的倒接方案可为今后同类施工提供参考。

参考文献

[1]　上海申通地铁集团有限公司轨道交通培训中心. 城市轨道交通信号技术[M]. 上海:中国铁道出版社,2012.
Rail Transit Training Center of Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd. Urban rail transit signaling technology[M]. Shanghai: China Railway Publishing House, 2012.

[2]　王振信. 上海第一条地铁建设历程[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(11): 彩 15.
WANG Zhenxin. Construction course of the first metro line in Shanghai[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(11): C15.

[3]　曾智超, 林逢春. 上海地铁 1 号线沿线城市发展的实证研究[J]. 现代城市研究, 2005, 20(12): 26.
ZENG Zhichao, LIN Fengchun. Study on the city development in the region around Shanghai Metro No. 1[J]. Urban Research, 2005, 20(12): 26.

[4]　张浩. 对上海轨交 1 号线信号设备改造方案的探讨与分析[J]. 地下工程与隧道, 2014(1): 37.
ZHANG Hao. Discussion and analysis on the reconstruction scheme of signal equipment of Shanghai Rail Transit Line 1[J]. Tunnel and Rail Transit, 2014(1): 37.

(收稿日期:2022 - 08 - 19)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》
投稿网址:tougao. umt1998. com