

# 重庆轨道交通 2 号线列车过压斩波 IGBT (绝缘栅双极型晶体管)故障分析及解决措施

谷翠军 吴晓东 李国银 杨 吉

(重庆中车四方所科技有限公司, 401133, 重庆)

**摘 要** [目的]重庆轨道交通 2 号线列车正线运营出现多起过压斩波 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)故障,影响了线路的正常运营,需分析故障原因,并提出解决措施。[方法]基于过压斩波原理,分析故障现象及故障机理,进而得到故障原因,建立了实物测试单元对故障原因进行试验验证,进而针对性提出解决措施。[结果及结论]由于驱动板、适配板和斩波器 IGBT 被击穿,故报出 OVT-IGBT 故障。此外,由于 IGBT 被击穿,过压斩波回路处于导通状态,故过压吸收电阻长时间工作致使其温度过高而损坏,触发 GR(接地)故障。试验结果进一步验证,斩波器关断瞬间产生的尖峰电压是 IGBT 发生故障的主要原因。改进措施为:优化过压吸收回路主动放电功能,降低过压吸收回路斩波器的工作频率;优化 VVVF(变压变频)控制程序,增加有斩无流故障逻辑、未斩有流故障逻辑和一旦故障便切除本故障单元的逻辑;优化驱动板的相关参数,降低 IGBT 的开关频率。实际结果表明,改进措施能有效解决 OVT-IGBT 故障问题,使牵引故障率明显下降,保证了重庆轨道交通 2 号线的正常运营。

**关键词** 城市轨道交通;列车;过压斩波;IGBT 故障

**中图分类号** U270.38<sup>+</sup>1

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.01.045

## Fault Analysis and Resolution Measures for Overvoltage Chopping IGBT of Chongqing Rail Transit Line 2 Trains

GU Cuijun, WU Xiaodong, LI Guoyin, YANG Ji  
(CRRC SRI Chongqing S & T Co., Ltd., 401133,  
Chongqing, China)

**Abstract** [Objective] Multiple incidents of overvoltage chopping IGBT (insulated gate bipolar transistor) faults are observed during train main line operation of Chongqing Rail Transit Line 2, significantly impacting the line normal operation. It is aimed to analyze the root causes of these faults and put forward resolution measures. [Method] Based on the overvoltage chopping principle, the fault phenomena and mechanisms are analyzed, fault causes are further obtained, and a physical test unit is built to validate the identified causes through tests, thus targeted resolution measures are proposed.

[Result & Conclusion] The reported OVT-IGBT faults are traced back to breakdowns in driver board, adapter board and chopper IGBT. Furthermore, the overvoltage chopping circuit remained in conducting state due to the IGBT breakdown, leading to prolonged service time and damage of overvoltage absorption resistor at elevated temperature, triggering GR (ground relay) faults. Test results further confirm that the peak voltage generated at the instance of chopper shutdown is the primary cause of IGBT faults. Improvement measures include optimizing the active discharge function of the overvoltage absorption circuit to reduce the working frequency of overvoltage absorption circuit chopper; enhancing VVVF (variable voltage variable frequency) control program by introducing the fault logic of chopping without current, the fault logic with current but no chopping, and immediate isolation of the faulty unit logic once a fault occurs; optimizing relevant parameters of driver board to reduce the switching frequency of IGBT. The practical results demonstrate that these improvement measures can effectively resolve the OVT-IGBT fault issues, leading to significant reduction in traction faults and ensuring the normal operation of Chongqing Rail Transit Line 2.

**Key words** urban rail transit; train; overvoltage chopping; IGBT fault

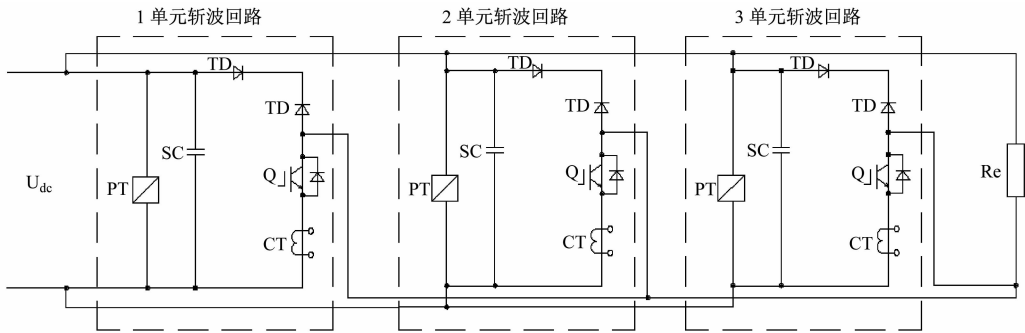
重庆轨道交通 2 号线(以下简称“2 号线”)是我国西部第一条城市轨道交通线路,也是我国第一条跨座式单轨线路,于 2004 年 11 月开通运营。2 号线列车在正线运营时,牵引逆变器 VVVF(变压变频)箱多次发生过压斩波 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)故障,并伴随 GR(接地)故障,导致列车下线,严重影响线路的正常运营。对此,本文基于过压斩波原理,结合故障现象、网络数据及有关试验验证,分析并确定故障原因,进而提出解决措施。

## 1 过压斩波原理

车辆制动时,牵引逆变器 VVVF 箱处于再生制动工况,牵引电机处于发电状态,将列车动能转化

为电能,并回馈至牵引逆变器 VVVF 箱直流侧,通过受电弓反馈给直流电网<sup>[1]</sup>。当电网无法完全吸收反馈能量时,电网电压将迅速升高,进而导致 VVVF 箱中的支撑电容电压上升。为了保证电网及列车行车安全,2 号线牵引系统采用了电阻消耗型再生能量回收技术。当支撑电容两端电压过高时,过压斩波器工作,通过过压吸收电阻消耗多余的电能并以热量的形式散发,从而降低母线电压<sup>[2]</sup>。

图 1 为 2 号线车辆单元组过压吸收回路拓扑图。由图 1 可知:过压吸收回路由过压斩波器 Q 和过压吸收电阻 Re 组成;PT 为电压传感器,用于实时检测支撑电容 SC 两端的电压;CT 为电流传感器,用于检测斩波回路电流,并根据检测的电流值对过压吸收回路进行相应的故障保护。受车辆结构限制,2 号线车辆每个单元组的三路过压斩波回路共用同一个 Re。



注:U<sub>dc</sub>—DC 1 500 V 电源;TD—二极管。

图 1 2 号线车辆单元组过压吸收回路拓扑图

Fig. 1 Topology diagram of Line 2 vehicle unit overvoltage absorption circuit

## 2 故障现象及分析

### 2.1 故障现象

在临江门站—较场口站区间运行中,多列列车的司机室 TCMS(列车控制管理系统)监视屏显报 OVT-IGBT(过压斩波 IGBT)故障和 GR 故障,导致列车下线。

故障列车回库后,对其高压回路的熔断器箱、隔离开关箱、高压接线箱、断路器箱、VVVF 箱等设备进行开箱检查发现,断路器箱内过压吸收电阻的电阻带脱落至箱体底部。用万用表二极管档对 VVVF 箱中的斩波器 Q 两端电缆测量发现,正反均导通,说明斩波器 Q 被击穿损坏。故障列车其余箱体设备均无异常。

VVVF 箱体返回工厂后,经拆解、试验和测量发现,斩波器 Q 及其驱动板、适配板和过压吸收电阻均出现损坏。

### 2.2 故障机理

图 2 为 OVT-IGBT 故障判定逻辑。由图 2 可知,当控制器检测到 OVT-IGBT 故障位置位、控制器及 RIOM(远程输入输出单元)电源正常,并持续 0.5 s 后,便向 TCMS 上报 OVT-IGBT 故障并切除

本单元牵引。若车体电位较接触网负线电位高 100 V,则触发 GR 故障。

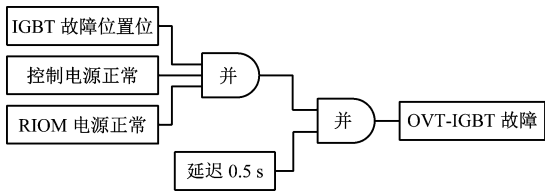


图 2 OVT-IGBT 故障判定逻辑图

Fig. 2 Diagram of OVT-IGBT fault determination logic

### 2.3 故障分析

IGBT 故障树如图 3 所示。由图 3 可知,OVT-IGBT 故障原因可能为 IGBT 本体失效、适配板故障、驱动板故障、供电故障或控制器故障。结合 VVVF 箱体中驱动板、适配板、斩波器 IGBT 都出现损坏现象,可初步推断导致 OVT-IGBT 故障的原因为:在斩波器 Q 工作时,过压吸收回路中存在瞬时电压尖峰,击穿了驱动板、适配板和斩波器 IGBT,于是报出 OVT-IGBT 故障。此外,由于 IGBT 被击穿,过压斩波回路处于导通状态,故过压吸收电阻长时间工作,最终温度过高而损坏。而损坏的电阻碎片接触车体,导致车体带电,进而触发 GR 故障。

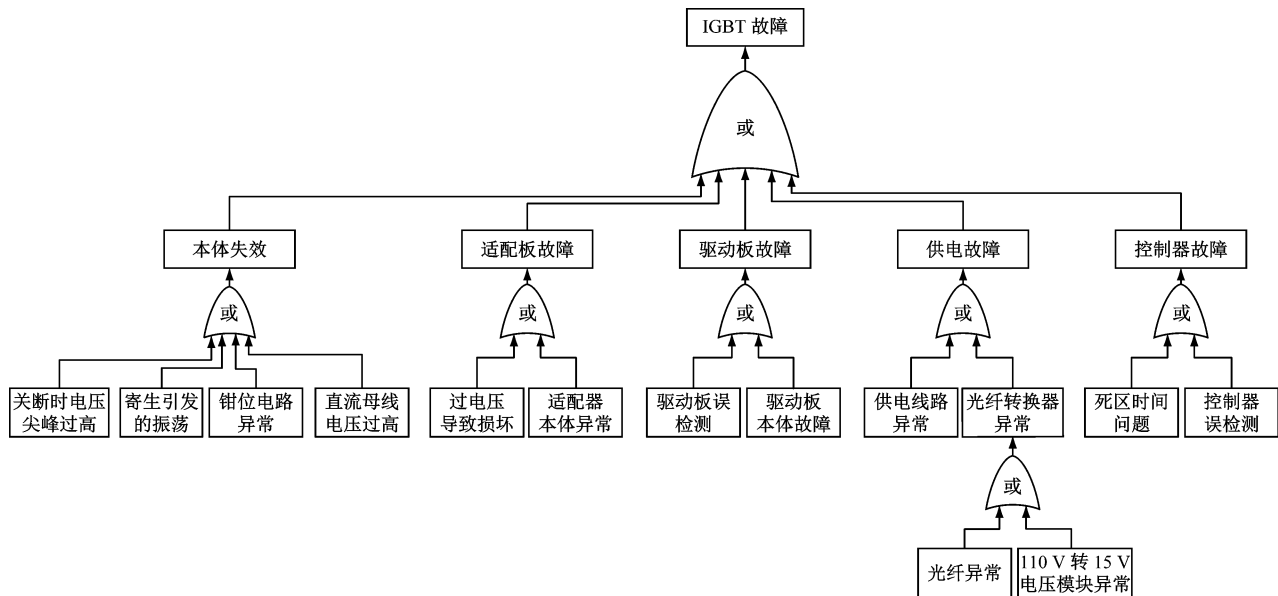


图3 IGBT故障树

Fig. 3 IGBT fault tree

### 3 试验验证及改进措施

#### 3.1 试验验证

为进一步确定 OVT-IGBT 故障原因,本研究根据车辆实际走线长度,搭建了 2 个实物测试单元 (PU1、PU2) 进行双脉冲试验。双脉冲试验接线如图 4 所示。PU1 到过压吸收电阻的距离约为 1.8

m, PU2 到过压吸收电阻的距离约为 16.6 m, 过压吸收电阻阻值  $R_e = 5.4 \Omega$ 。通道 1 测量 PU1 单元斩波器 Q 的集电极 C 和发射极 E 之间电压  $V_{CE1}$ , 通道 2 测量 PU2 单元斩波器 Q 的集电极 C 和发射极 E 之间电压  $V_{CE2}$ , 通道 3 测量 PU1 的斩波电流  $I_1$ , 通道 4 测量 PU2 斩波电流  $I_4$ 。

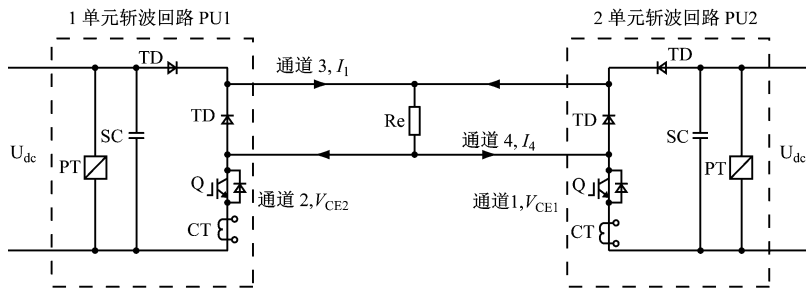


图4 双脉冲试验接线示意图

Fig. 4 Diagram of double pulse test wiring

图 5 为 PU1 中斩波器 Q 开通工作时的  $V_{CE1}$  波形图截图。从图 5 可以看出,在斩波器关断瞬间,  $V_{CE1}$  出现了尖峰电压。

由试验结果可确定,IGBT 故障发生的原因:斩波器关断瞬间,回路中产生了  $V_{CE1}$  尖峰电压;  $V_{CE1}$  尖峰电压击穿了斩波器的适配板、驱动板,从而导致了 OVT-IGBT 故障。进一步分析可知,由于 2 号线每个单元组的三路过压斩波回路共用 1 个过压吸收电阻,故而更易导致斩波器关断瞬间产生尖峰电压。

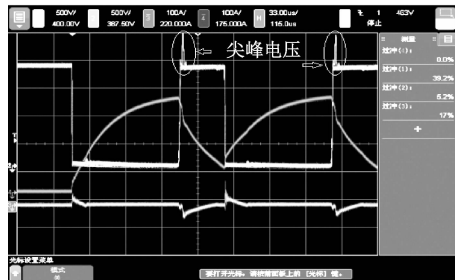


图5 PU1 中斩波器 Q 开通工作时的  $V_{CE1}$  波形图截图  
Fig. 5 Screenshot of  $V_{CE1}$  waveform when chopper Q of PU1 is switched on

### 3.2 改进措施

针对 OVT-IGBT 故障发生的原因,本文提出如下改进措施:

1) 优化过压吸收回路主动放电功能,将开通过压吸收回路对应的支撑电容电压阈值提高,降低过压吸收回路斩波器的工作频率,减少开关损耗。这可有效避免斩波器因过热而损坏;提高支撑电容电压阈值对电容本身的性能和寿命无影响。

2) 对过压吸收回路相关逻辑处理进行优化,增加有斩无流故障(斩波器工作,但回路中没检测到电流,说明回路有故障)和未斩有流故障(斩波器不工作,但回路中检测到电流,说明斩波器有故障),从而可实时监控该回路的工作状态。

3) 当斩波器 IGBT 发生故障后,易造成过压吸收电阻过热烧损,并导致 GR 故障。建议优化 VVVF 控制程序——一旦 OVT-IGBT 故障后,可通过控制高速断路器切除该故障单元,避免故障影响范围扩大。

4) 优化驱动板的相关参数,调节驱动电阻,降低 IGBT 的开关频率,从而减小 IGBT 在关断过程中产生的尖峰电压,进而减小尖峰电压对适配板的冲击。

经现车验证,最终解决了 OVT-IGBT 故障,保证了 2 号线正常运营。

### 4 结语

针对 2 号线多起过压斩波 IGBT 故障,结合故障现象、故障机理和试验验证,最终确定了故障原因。针对故障原因,提出了故障改进措施。在后续车辆设计时,可考虑每路过压斩波回路单独配置 1 套过压吸收电阻,从设计初期避免潜在的风险。

### 参考文献

- [1] 陈勇,刘承志,郑宁,等.基于逆变回馈的地铁再生制动能量吸收的研究[J].电气化铁道,2011,22(3):36.  
CHEN Yong, LIU Chengzhi, ZHENG Ning, et al. Research of inversion and feedback based energy absorption in metro regenerative braking[J]. Electric Railway, 2011, 22(3): 36.
- [2] 李友瑜,杨守焕,阳吉初,等.地铁列车制动电阻的种类及优化设计[J].城市轨道交通研究,2010,13(5):49.  
LI Youyu, YANG Shouhuan, YANG Jichu, et al. Types of metro braking resistor and optimal design[J]. Urban Mass Transit, 2010, 13(5): 49.

· 收稿日期:2021-09-07 修回日期:2021-11-19 出版日期:2024-01-10  
Received:2021-09-07 Revised:2021-11-19 Published:2024-01-10  
· 通信作者:谷翠军,高级工程师,014600005587@srsri.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

(上接第 243 页)

- ZHAO Chi. Application of remote monitoring system in urban rail transit construction project based on 5G technology[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(1): 169.
- [6] 徐曼洋. 基于 BIM + GIS 城市大数据平台的智慧临港应用示范[J]. 土木建筑工程信息技术, 2021, 13(2): 139.  
XU Minyang. BIM + GIS urban big data platform application demonstration of smart Lingang area[J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2021, 13(2): 139.
- [7] 张金月. BIM 应用于设施管理之路:物联网和人工智能的影响[J]. 土木建筑工程信息技术, 2018, 10(6): 10.  
ZHANG Jinyue. The future of BIM for facility management: the impact of IoT and AI[J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2018, 10(6): 10.
- [8] 邱洲. 公路工程智慧工地开发模块建设及具体应用[J]. 公路, 2021, 66(7): 214.  
QIU Zhou. Construction and application of intelligent construction site development module for highway engineering[J]. Highway,

2021, 66(7): 214.

- [9] 望远福,蒋永祥,李晓龙. BIM + 信息化技术在京雄高速项目的综合应用[J]. 公路, 2021, 66(4): 241.  
WANG Yuanfu, JIANG Yongxiang, LI Xiaolong. Comprehensive application of BIM + information technology in Jingxiong Expressway Project[J]. Highway, 2021, 66(4): 241.
- [10] 孙文侠,王志文. “智慧工地”在公路工程中的应用研究[J]. 公路, 2019, 64(8): 353.  
SUN Wenxia, WANG Zhiwen. Research on the application of 'smart construction site' in highway engineering[J]. Highway, 2019, 64(8): 353.

· 收稿日期:2022-08-09 修回日期:2022-11-23 出版日期:2024-01-10  
Received:2022-08-09 Revised:2022-11-23 Published:2024-01-10  
· 第一作者:黄恒儒,高级工程师,595807378@qq.com  
通信作者:徐彬彬,工程师,511206551@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