

基于 GOOSE 通信的城市轨道交通直流牵引供电系统 双边联跳与自愈方案

张海申

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉)

摘 要 [目的]城市轨道交通直流牵引供电系统的结构复杂且无备用,一旦故障将直接引发停车事故。针对传统牵引供电系统双边联跳方案在实际工程中暴露出的不足,以及直流牵引供电系统智能化程度较低的现状,需研究出利用智能化手段提高直流牵引供电系统双边联跳可靠性的方案。[方法]提出了一种基于 GOOSE(面向通用对象的变电站事件)通信的直流牵引供电系统双边联跳与自愈方案。该方案在直流牵引供电系统内构建了 GOOSE 过程层通信网络,通过牵引变电所内及牵引变电所间各类信息的快速实时交换实现了直流牵引供电系统的双边联跳与自愈重构。对所提出的方案进行了实验室模拟与现场验证。[结果及结论]基于 GOOSE 通信的城市轨道交通直流牵引供电系统双边联跳与自愈方案具有更高的可靠性与实时性,且方案智能化程度较高,可进行推广应用。

关键词 城市轨道交通;直流牵引供电系统;双边联跳;自愈;GOOSE 通信

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.011

Bilateral Tripping and Self-healing Scheme for Urban Rail Transit DC Traction Power Supply System Based on GOOSE Communication

ZHANG Haishen

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China)

Abstract [Objective] The structure of DC (direct current) traction power supply system for urban rail transit is complex and without any backup power supply. Once a malfunction occurs, it may directly lead to a train-stopping accident. In view of the shortcomings of the traditional traction power supply system bilateral tripping scheme exposed in actual projects, as well as the current low intelligence level in DC traction power supply system, it is necessary to study and propose a scheme to improve the reliability of bilateral tripping in DC traction power supply system intelligencization means. [Method] A bilateral tripping and self-healing scheme for DC traction power supply

system based on GOOSE (generic object oriented substation event) communication is proposed. The scheme constructs GOOSE process layer communication network within the DC traction power supply system, achieving bilateral tripping and self-healing reconstruction of DC traction power supply system via the rapid real-time exchange of various information within and between traction substations. Laboratory simulation and field verification are carried out regarding the proposed scheme. [Result & Conclusion] The bilateral tripping and self-healing scheme for DC traction power supply system based on GOOSE communication has higher reliability, better real-time performance and higher intelligence level for wide application.

Key words urban rail transit; DC traction power supply system; bilateral tripping; self-healing; GOOSE communication

城市轨道交通供电系统中各牵引变电所之间的牵引网采用双边供电模式,整个直流侧母线为一个整体,通过设置双边联跳保护实现对牵引网等的保护。长期以来,直流牵引供电系统的智能化程度较低,需要依靠保护装置、大量二次控制电缆及继电器等来实现对直流牵引网的保护。

直流牵引供电系统一旦断电,列车将失去动力,造成局部或全线运营中断,容易造成乘客恐慌、踩踏等恶劣事件。当断电故障发生时,各类信息在短时间内密集上传至控制中心调度人员处,仅依靠调度人员的经验,快速恢复供电是相当困难的。因此,如能自动隔离故障区域,自动恢复对非故障区段的供电,实现直流牵引供电系统的自愈重构,将极大减轻运营人员的压力,提升城市轨道交通的服务水平。

1 GOOSE 通信技术的应用现状

随着通信技术的更迭以及智能电网的普及,GOOSE(面向通用对象的变电站事件)通信技术在

城市轨道交通中的应用方兴未艾。文献[1-2]将 GOOSE 通信技术应用用于城市轨道交通中压环网中,实现了中压环网数字电流选跳保护。文献[3]将 GOOSE 通信技术延伸至直流牵引供电系统隔离开关,提出了基于 GOOSE 通信技术的隔离开关联锁方案。上述研究过程中构建的 GOOSE 网络局限于同电压等级的保护装置之间,未能实现中压环网与直流牵引供电系统保护装置间的无缝通信。文献[4]对交、直流牵引供电系统保护装置的无缝通信进行了初步探索。综上,目前对 GOOSE 通信技术的应用研究未涉及直流牵引供电系统的双边联跳,对基于 GOOSE 通信技术实现直流牵引供电系统的自愈更未涉及。

2 传统直流牵引供电系统双边联跳方案

目前,双边联跳保护普遍采用联跳继电器+联

跳电缆的方式实现^[1]。图 1 为典型双边联跳回路构成示意图。每座牵引变电所内均设置有保护装置、联跳继电器,相邻牵引变电所通过联跳电缆互联。牵引变电所间联跳及闭锁信号通过联跳电缆传递。例如,牵引变电所 A 断路器 213 在大电流脱扣、电流上升率(di/dr)、过电流或过负荷保护动作后,断路器 213 跳闸,同时发送跳闸信号至牵引变电所 B,牵引变电所 B 在接收到信号后,触发断路器 211 跳闸并自动启动线路测试及重合闸程序。牵引变电所 A 发生框架电流泄漏故障或手动紧急分闸时,同样发送联跳信号至牵引变电所 B,触发相应断路器的分闸程序。通过人工对框架电流泄漏故障复位后,可启动重合闸。

为了切除故障或切换运行方式,相邻牵引变电所间在保护动作、闭锁及联动等方面需进行大量的信息交换,目前其实现方式存在如下问题:

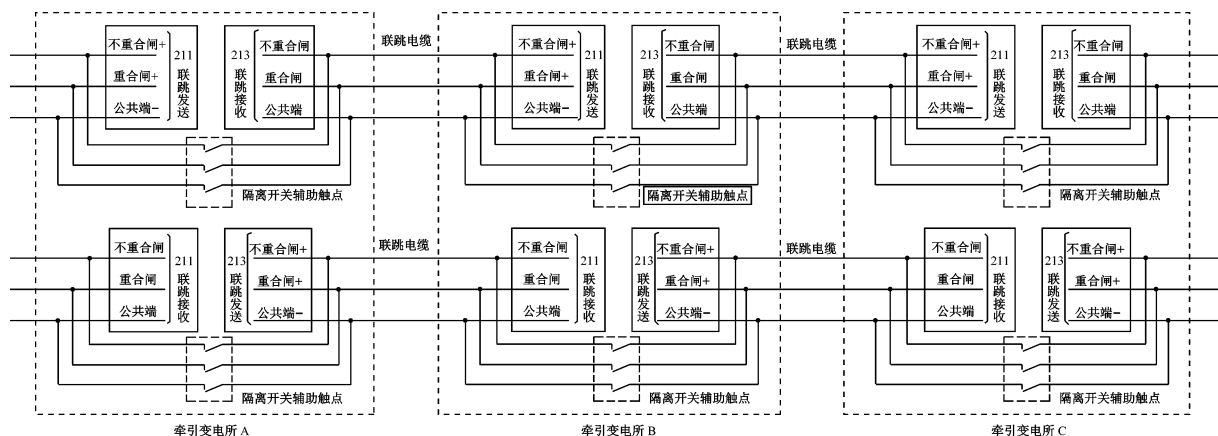


图 1 典型双边联跳回路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a typical bilateral tripping circuit

- 1) 硬接线传递信息的距离有限,城市轨道交通长大区间信号衰减严重,且电缆的工程投资较高。
- 2) 无法对联跳回路的状态进行实时监控,亦无法预知硬接线松动等故障隐患。
- 3) 由于牵引变电所间的信息交互能力较差,当站间交互信息量增加时,需相应增加联跳电缆芯数。
- 4) 直流牵引供电系统智能化程度低,且其运行方式的切换依赖人工,故障排除和系统恢复时间较长。

3 基于 GOOSE 通信的直流牵引供电系统双边联跳方案

3.1 系统结构

基于 GOOSE 通信的直流牵引供电系统双边联

跳组网示意图见图 2。图 2 中,每座牵引变电所内配置双网,牵引变电所间设置双通道,借助 GOOSE 通信本身的双网机制,双网数据无缝切换,避免信息重复或丢失。每台保护装置将保护信号、断路器、隔离开关位置等状态信号按照 GOOSE 规约的报文,上传至 GOOSE 交换机,GOOSE 交换机将收到的报文转发至过程层网络中的其他保护装置,该保护装置通过预设的收发规则,接收适用于自身的 GOOSE 报文并解码。

直流牵引供电系统配置的保护装置通过过程层网络采集实现联跳所需要的各类信息,从而进行逻辑判断与处理。

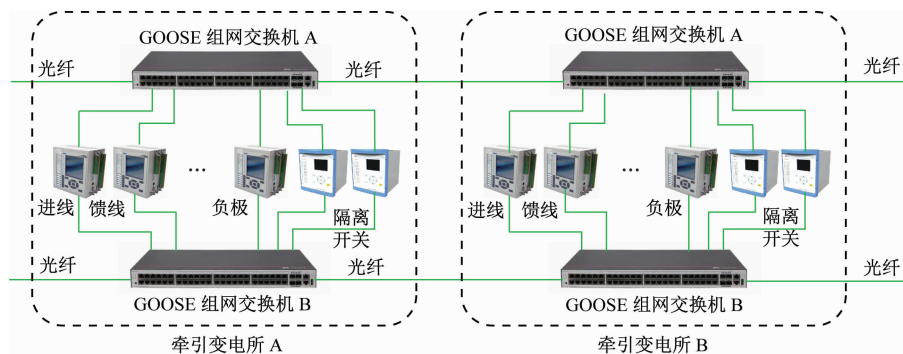


图 2 基于 GOOSE 通信的直流牵引供电系统双边联跳组网示意图

Fig. 2 Schematic diagram of bilateral tripping circuit network in DC traction power supply system based on GOOSE communication

3.2 网络化闭锁

图 3 为闭锁信号的演化示意图。在传统牵引供电系统双边联跳方案中,通过继电器辅助触点的串、并联实现对断路器、隔离开关等的闭锁。在基于 GOOSE 通信的牵引供电系统双边联跳方案中,各牵引变电所的保护装置通过 GOOSE 网络收集相邻牵引变电所的信息,结合本牵引变电所自身的信息,通过提前嵌入的逻辑判断,输出断路器、隔离开关等操作的闭锁接点,从而实现网络化闭锁。此种

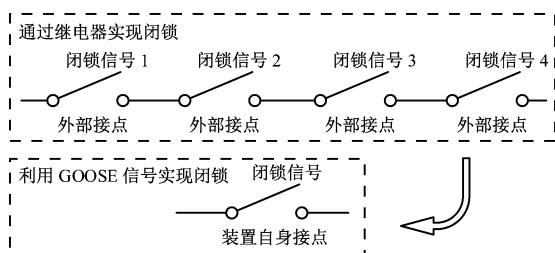


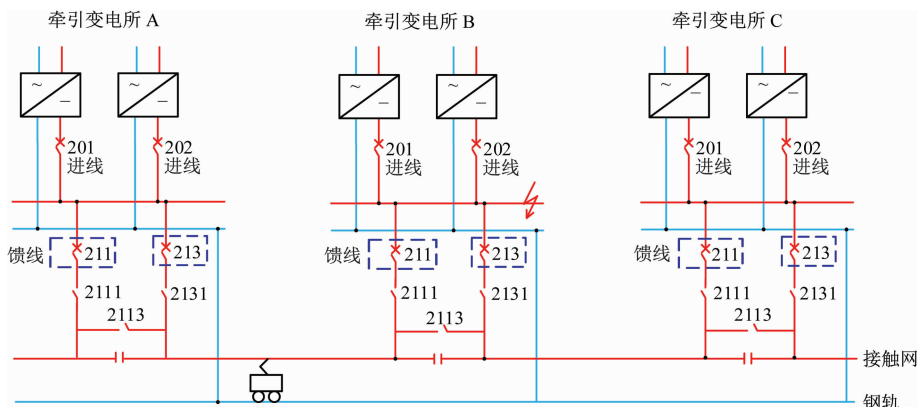
图 3 闭锁信号演化示意图

Fig. 3 Evolution diagram of locking signals

闭锁方式简化了二次操作回路设计的复杂性,同时灵活实现了设备间的相互闭锁。

3.3 GOOSE 信号收发配置

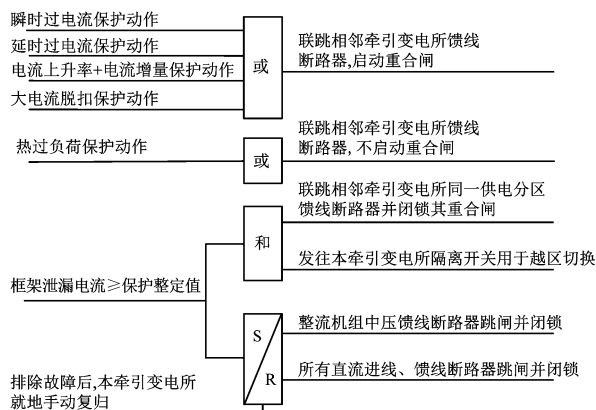
图 4 为直流牵引供电系统简化模型。该简化模型下 GOOSE 联跳信号的产生与联跳逻辑见图 5 与图 6。当牵引变电所 A 的瞬时过电流保护和延时过电流保护,电流上升率、电流增量保护或大电流脱扣保护动作后,向过程层网络发布“联跳相邻牵引变电所的馈线断路器,启动重合闸”的 GOOSE 信号;当牵引变电所 A 过负荷保护动作后,向过程层网络发布“联跳相邻牵引变电所馈线断路器,不启动重合闸”的 GOOSE 信号;当框架泄漏电流大于其保护整定值后,发布“联跳相邻牵引变电所同一供电分区馈线断路器并闭锁其重合闸”“发往本所隔离开关用于越区切换”“整流机组中压馈线断路器跳闸并闭锁”“所有直流进线、馈线断路器跳闸并闭锁”共 4 种 GOOSE 信号。



注:2111、2131、2113 为隔离开关。

图 4 直流牵引供电系统简化模型

Fig. 4 Simplified model of DC traction power supply system



注:S为置位信号;R为复位信号。

图5 GOOSE联跳信号的产生

Fig. 5 Generation of GOOSE bilateral tripping signals

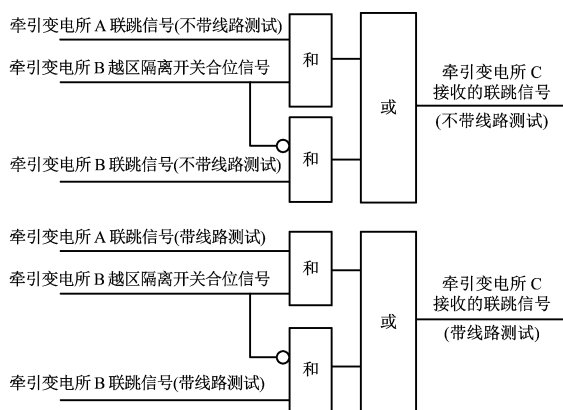


图6 GOOSE联跳信号的联跳逻辑

Fig. 6 Bilateral tripping logic of GOOSE bilateral tripping signals

牵引变电所 C 保护装置在 GOOSE 网络中检测到牵引变电所 B 越区隔离开关在合位,牵引变电所 A 发布了联跳(不对线路进行测试)信号后,将触发本牵引变电所相应断路器跳闸。在检测到牵引变电所 B 越区隔离开关在分位,且发布了不要求对线路进行测试的联跳信号后,也将触发本牵引变电所相应断路器跳闸。若联跳信号为要求对线路进行测试的信号,则牵引变电所 C 相应断路器跳闸后,将启动线路测试,线路测试成功后,断路器合闸。

3.4 对时网络

为确保保护装置间的时钟同步,采用国际通用的 IRIG-B 格式对间隔层保护装置进行时钟同步对时,在牵引变电所间构建统一的时钟网络。时钟网络采用双网模式,每座牵引变电所分别设置 2 台时钟同步装置。将时钟同步装置接入车站二级母钟,或在地面接收 GPS(全球定位系统)和北斗卫星信号作为时钟源。各牵引变电所间的时钟同步装置

通过站间光缆相互连接形成线路级的时钟网络。每座牵引变电所内的对时装置从对时网络中获取时钟信号,保护装置通过与对时装置对时,确保了时钟的同一性。各牵引变电所设备之间的时钟误差绝对值不大于 $10\ \mu\text{s}$ 。牵引变电所间及牵引变电所内时钟网络架构见图 7。

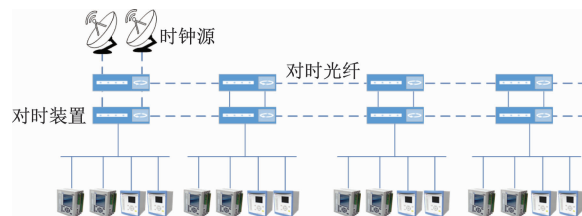


图7 牵引变电所间及牵引变电所内时钟网络架构

Fig. 7 Clock network architecture within and between traction substations

3.5 网络状态监视

为监视网络状态,提升维护便利性,按供电分区配置网络分析仪。将网络分析仪接入 GOOSE 网络节点,实时监控间隔层、过程层中设备的链路状态并显示未知链路,以监控 GOOSE 网络连接的完整性。同时,监视和获取各设备节点中的 GOOSE 数据,用于运维人员查看不同类型数据的状态信息及信号质量等。

4 直流牵引供电系统自愈功能的实现

4.1 自愈功能启动前提

对直流牵引供电系统自愈的前置条件进行梳理。以图 4 为例,如果直流柜侧框架泄漏保护或直流母线故障导致牵引变电所 B 故障退出运行,借助过程层网络,系统自动操作牵引变电所 A、B、C 的隔离开关,进而与断路器构成大双边供电,以此实现直流牵引供电系统的自愈重构。

4.2 越区切换流程

以图 4 中牵引变电所 B 直流柜框架保护动作为例,框架保护动作后,保护装置利用 GOOSE 网络传递信息,分别触发整流机组中压馈线断路器、牵引变电所 B 直流进线与馈线断路器跳闸,联跳牵引变电所 A 馈线断路器 213 与 214,联跳牵引变电所 C 馈线断路器 211 与 212。启动牵引变电所 B 上、下行的越区自动切换,以下行隔离开关 2113 自动切换为例,其切换流程见图 8。

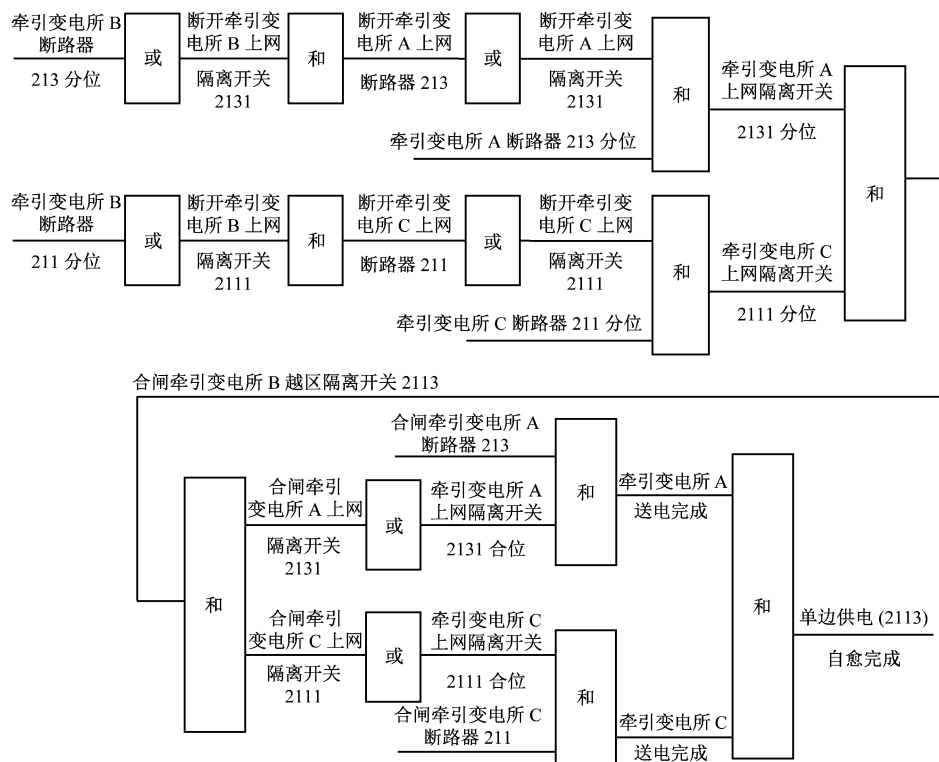


图 8 下行隔离开关 2113 切换流程

Fig. 8 Descending isolation switch 2113 switching process

5 工程造价对比

以 1 条长度为 25 km, 设置有 12 座混合所、12 座降压所、5 个供电分区的线路为例, 基于 GOOSE 通信的直流牵引供电系统联跳方案与传统方案相比, 工程造价见表 1。

表 1 基于 GOOSE 通信的直流牵引供电系统联跳方案工程造价较传统方案变化

Tab. 1 Changes in bilateral tripping scheme engineering investment of DC traction power supply system based on GOOSE communication to conventional schemes

项目	数量	总价/万元
新增时钟同步装置/个	24	43.2
新增过程层交换机/个	24	48.0
新增隔开控制器/个	12	24.0
新增网络分析仪/个	5	25.0
新增光缆长度/km	40	20.0
新增系统软件/个	1	50.0
减少混合所所间电缆/km	40	-200.0
减少混合所所内电缆/km	12	-36.0
合计		-25.8

由表 1 可见: 基于 GOOSE 通信的直流牵引供电系统联跳方案的工程投资略低。

6 方案实验室模拟与现场验证

6.1 实验室模拟验证

2021 年 5 月, 基于智能电网实时数据仿真装置在 Matlab 环境下使用 Simulink 搭建了包含 3 座牵引变电所的供电系统模型, 模拟了各工况下不同位置发生故障时基于 GOOSE 通信的直流牵引供电系统的响应情况, 通过实时仿真系统的测试验证了方案的可行性。除了验证 GOOSE 数据的共享路径与方法、直流牵引供电系统的网络化保护功能、基于 GOOSE 网络的直流牵引供电系统的双边联跳和自愈功能及多设备授时方法外, 还进行了交换机和保护装置的 EMC(电磁兼容)性能和机械性能试验, 结果表明方案的可靠性与完整性满足工程需求。

6.2 现场验证

2022 年, 在某城市轨道交通线路 35 kV 中压环网保护装置之间构建了基于 GOOSE 的过程层通信网络, 在混合所 A、混合所 B 及混合所 C 之间构建了直流牵引供电系统间的 GOOSE 过程层通信网络, 且 3 座混合所间的过程层通信借助牵引变电所

间的差动保护光缆实现。每座混合所分别设置 4 台站级 GOOSE 信号交换机,站内 35 kV 开关柜、DC 1 500 V 开关柜、负极柜、隔离开关的保护装置采用双通信口接入交换机。交换机不仅与站内设备相连接,而且通过站间差动保护光缆与全线各站互联。在每座混合所内分别设置 2 台时钟同步装置,在混合所 A 的时钟同步装置中接入该牵引变电所通信系统二级母钟,形成时钟网络的主时钟。时钟同步装置通过站间的光缆相互连接形成线路级的时钟网络。3 座混合所内对时从机从对时专网获取时钟信号,牵引变电所内保护装置直接与对时从机或智能通信网关机对时。施工完成后,对直流牵引供电系统双边联跳与自愈等进行了调试、试验与验证。

7 结语

2022 年,我国某城市轨道交通线路首次成功实现了基于 GOOSE 通信的直流牵引供电系统双边联跳与自愈。基于 GOOSE 通信的直流牵引供电系统双边联跳与自愈方案利用光缆替代了联跳电缆,节约了工程投资,实现了对联跳回路状态的实时监控,同时通过该方案可及时发现通道故障。自愈方案可减少人工干预,迅速恢复供电,实现了牵引变电所直流牵引供电系统的智能化。该方案具有很好的推广应用价值,后续可在本方案的基础上对自愈重构技术深入研究,进一步完善直流牵引供电系统的自愈方案。

参考文献

[1] 赵勤,王军平,曹捷. GOOSE 全面智能电流选跳在城轨供电

(上接第 60 页)

条的振动频率一致。轨道波磨激发了钢轨和弹条的高频异常振动,弹条的一阶固有频率为 768 Hz 且趋近于其一阶固有频率,加速了弹条的疲劳,引起弹条的疲劳断裂,这与弹条的疲劳断裂相符。

2) 对比了钢轨打磨前后的弹条断裂数量,钢轨打磨后弹条断裂数量得到有效控制,验证了轨道波磨是引起弹条疲劳断裂的主要因素。

参考文献

- [1] 罗晓勇. III 型弹条扣压力的研究及应用[J]. 铁道标准设计, 2002, 46(6): 15.
LUO Xiaoyong. A study on fastening pressure of type III elastic rail fastening and its application[J]. Railway Standard Design, 2002, 46(6): 15.
- [2] 杨程亮. DT-III 型扣件弹条断裂原因分析[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2019.

系统中的应用[J]. 都市快轨交通, 2016, 29(3): 98.

- ZHAO Qin, WANG Junping, CAO Jie. Application of GOOSE comprehensive intelligent current selective tripping solution in urban rail transit power supply system[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2016, 29(3): 98.
- [2] 李宇琦,何治新,张晔,等. 基于 GOOSE 通信的 PSCADA 数字选跳保护方案[J]. 电气化铁道, 2021, 32(1): 44.
LI Yuqi, HE Zhixin, ZHANG Ye, et al. Scheme for GOOSE communication-based PSCADA digital selective tripping protection[J]. Electric Railway, 2021, 32(1): 44.
- [3] 何治新,冯志翔,高宇膺,等. 基于 GOOSE 通信技术的地铁隔离开关数字联锁方案[J]. 电气化铁道, 2021, 32(2): 81.
HE Zhixin, FENG Zhixiang, GAO Yuying, et al. GOOSE communication technology-based digital interlocking scheme for subway disconnectors[J]. Electric Railway, 2021, 32(2): 81.
- [4] 张晓巍,余龙,廖权保,等. 基于 IEC 61850 实现地铁交直流供电保护装置的无缝通信[J]. 电气化铁道, 2019, 30(5): 79.
ZHANG Xiaoyi, YU Long, LIAO Quanbao, et al. IEC 61850 based realization of seamless communication of subway DC power supply protection device[J]. Electric Railway, 2019, 30(5): 79.
- [5] 辛长琴,范巧莲. 地铁直流牵引供电系统双边联跳回路探讨[J]. 电气化铁道, 2013, 24(3): 41.
XIN Changqin, FAN Qiaolian. Subway DC traction power supply system discussed bilateral inter-tripping loop[J]. Electric Railway, 2013, 24(3): 41.

· 收稿日期:2022-12-07 修回日期:2023-02-12 出版日期:2024-08-10
Received:2022-12-07 Revised:2023-02-12 Published:2024-08-10
· 作者:张海中,高级工程师,zhanghaishen@crfsdi.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

YANG Chengliang. Analysis of fracture reason of DT-III type fastener clip[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2019.

- [3] 胡晓辉. 60Si2 Mn 弹条断裂失效分析[J]. 理化检验(物理分册), 2001, 37(11): 498.
HU Xiaohui. Fracture failure analysis of 60Si2 Mn spring rod[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2001, 37(11): 498.
- [4] 杜茂金. 南京地铁 DT VI2 型扣件弹条折断原因分析[J]. 城市轨道交通研究, 2009, 12(7): 40.
DU Maojin. Analysis of DT VI2 type fastener broken shells in Nanjing Metro[J]. Urban Mass Transit, 2009, 12(7): 40.

· 收稿日期:2022-03-30 修回日期:2022-08-09 出版日期:2024-08-10
Received:2022-03-30 Revised:2022-08-09 Published:2024-08-10
· 通信作者:段勇奇,高级工程师,appleigigi111@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