

# 城市轨道交通全自动运行系统中的列车车门控制技术

陈 宁

(上海富欣智能交通控制有限公司, 201203, 上海//工程师)

**摘 要** 城市轨道交通全自动运行 (FAO) 模式的普遍应用, 对列车运行的高可靠性及灵活控制提出了更多要求。在无人驾驶系统中, 车门状态的监督控制不再是司机的职责, 信号系统需要承担并提供给调度人员更多的门控方式。从运营需求的角度出发, 基于太原轨道交通 2 号线信号系统, 分析了 FAO 模式下列车自动开关门、车门抑制的施加及解除、远程开关门控制、车门和站台门故障隔离等车门控制关键功能的实现。

**关键词** 城市轨道交通; 全自动运行系统; 列车车门控制技术

**中图分类号** U270.38+6:U231.6

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2021.10.045

## Train Door Control Technology in Urban Rail Transit FAO System

CHEN Ning

**Abstract** With the extensive application of fully automatic operation (FAO) system in urban rail transit, higher requirements are raised for reliable and flexible train control functions. In FAO system, the responsibilities of train door control are transferred from train driver to train signaling system which provides more control modes for dispatchers. Based on the signal system of Taiyuan rail transit Line 2, the critical function performance of train door control are analyzed from the perspective of operational requirements, including automatic train door opening and closing, application and release of train door inhibition, train door remote control, train door and platform door fault isolation under FAO mode.

**Key words** urban rail transit; FAO; train door control technology

**Author's address** Shanghai Fuxin Intelligent Transportation Solution Co., Ltd., 201203, Shanghai, China

太原轨道交通 2 号线信号项目采用上海富欣智能交通控制有限公司自主研发的 JeRail®CBTC (基于通信的列车控制) 全自动运行 (FAO) 信号系统, 于 2020 年 12 月正式开通运行, 实现了 GoA4 (自动

控制等级 4) 的列车控制。与以往 GoA2、GoA3 的列车控制相比, JeRail® CBTC FAO 系统具备了列车自动唤醒检测、自动出库、FAM (全自动运行模式) 自动运行、全自动折返、自动化洗车、车辆自动回库休眠等一系列全自动运行功能。系统还提供了一整套远程控制命令, 实现故障设备的远程重启, 车辆关键故障的报警、复位及旁路设置, 全面提高了系统的故障处理和应急响应能力。太原轨道交通 2 号线信号项目首次应用了基于云平台的 ATS (列车自动监控) 与综合监控深度集成方案, 实现了分散系统资源的集中控制, 运营人员可在统一界面获取所有专业信息, 以满足全方位的自动化运营管理及维护需求。

FAO 模式的高度自动化和运营场景的复杂化, 给 ATP (列车自动防护) 系统、ATO (列车自动运行) 系统、车载设备与中央控制系统的联动配合, 以及车载与车辆的集成控制提出了更多挑战。本文基于太原轨道交通 2 号线信号系统的实现, 着重对列车在 FAO 模式下和车载控制器 (OBCU) 在正常情况下, 以及车门、站台门故障失效情况下的门控技术做完整介绍。

## 1 常用的列车车门控制策略

太原轨道交通 2 号线项目支持从受限制的人工驾驶模式 (RM) 到点式列车控制 (ITC)、FAO 的全等级列车运行模式。其主要分为 4 类 (见表 1), 根据不同的列车驾驶模式, 开、关门控制方式有不同的设置。

在人工开、关门控制方式下, 司机通过有效按压激活侧驾驶室的开、关门按钮来控制车门。而在自动开、关门控制方式下, OBCU 通过车门控制相关的列车线向车辆发送门控命令, 同时车辆通过车门状态列车线向 OBCU 实时上报车门关闭锁闭状态。由于 OBCU 采用 2 乘 2 取 2 的双端冗余配置, A 端车载设备作为主用时发出的左、右侧门控制命令与

表 1 不同驾驶模式下的开、关门控制方式

Tab.1 Door opening/closing control under different driving modes

驾驶模式	开、关门控制方式
RMF、RMR	人工开、关车门
ITC-CM、CBTC-CM	人工开、关车门
ITC-AM、CBTC-AM	根据开关门模式选择开关的位置,可设置为:人工开车门,人工关车门;自动开车门,人工关车门;自动开车门,自动关车门
FAM(自全自动运行模式)、CAM(蠕动模式)、ATB(无人驾驶折返)	自动开、关车门

注:RMF 为向前受限制的人工驾驶模式;RMR 为向后受限制的人工驾驶模式;CM 为 ATP 下的人工驾驶模式;AM 为 ATO 驾驶模式。

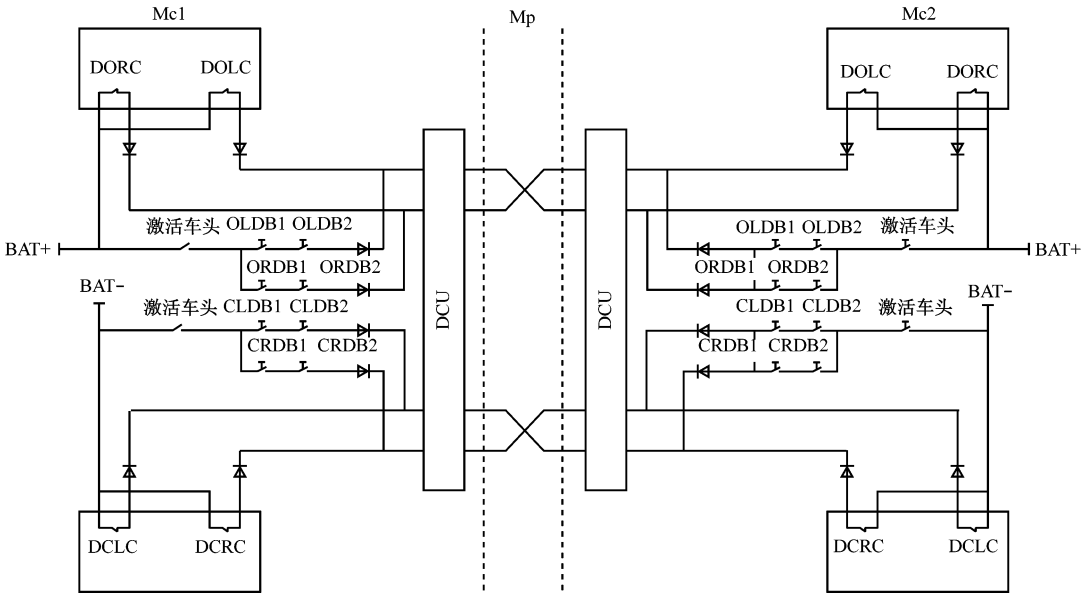
B 端车载设备的左、右侧控制命令相反;车辆向 OBCU 传输的车门状态对于 A、B 端车载设备的左、右侧也是相反的。如图 1 所示,MC1(A 端)输出的左门控制命令(DOLC(打开左侧车门命令)、DCLC(关闭左侧车门命令))与 MC2(B 端)输出的右门

控制命令(DORC(打开右侧车门命令)、DCRC(关闭右侧车门命令))的列车线交叉连接,MC1(A 端)输出的右门控制命令(DORC、DCRC)与 MC2(B 端)输出的左门控制命令(DOLC、DCLC)的列车线交叉连接,实现了双端车载设备的冗余控制。

2 FAO 场景中的车门控制流程

2.1 上电时的门控电路检查

在 FAO 模式下,无论车门模式选择开关处于什么位置,系统默认列车车门始终为“全自动开、关门”控制模式,车门的开、关完全由 OBCU 触发。因此,在列车收到唤醒命令后,OBCU 与车辆执行联合自检的过程中,需要进行列车关键功能的测试,通常包括:激活驾驶室测试,紧急制动测试,车门控制测试,机械自检,牵引制动动态测试等。在车门控制测试中,OBCU 依次发出左门使能、开和关左侧车门和右门使能、开和关右侧车门的命令,并校验车门状态是否依据发出的车门控制命令正确变化,以确保车辆投入运营前的良好状态。



注:OLDB 为打开左侧车门按钮;ORDB 为 打开右侧车门按钮;CLDB 为关闭左侧车门按钮;CRDB 为关闭右侧车门按钮;DCU 为车门控制单元;Mc1、Mc2 为带司机室的拖车;Mp 为带受电弓的动车;BAT 为供电电源。

图 1 车门控制电路原理图

Fig.1 Train door control circuit schematic diagram

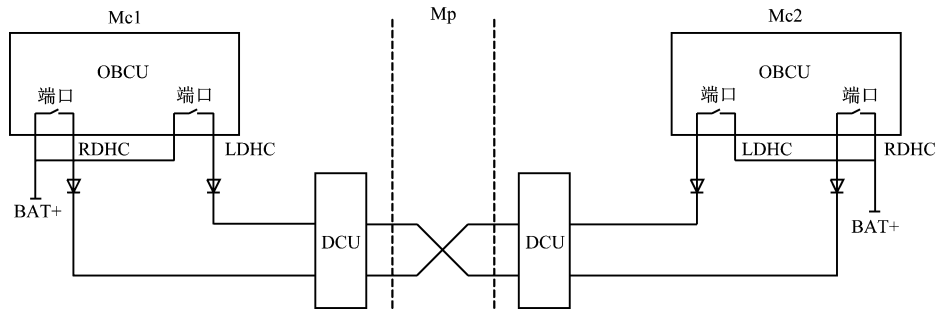
2.2 停站期间的开、关门控制

如图 2 所示,在 FAO 系统中,OBCU 除了具备通用的门使能及开、关门命令,还增加了门抑制安全列车线(LDHC(左侧车门抑制命令)、RDHC(右侧车门抑制命令)),对车门抑制状态进行控制。当

列车处于非 FAO 模式时,OBCU 始终输出门抑制释放;当列车处于 FAO 模式时,门抑制默认施加。FAO 模式下列车在站台对准且满足停站开门条件时,OBCU 将需要开门侧的“门使能”信号与“门抑制释放”信号同时给出并发送开门命令(开门命令

通常持续输出 1 s),车辆门控器响应开门命令打开车门并联动站台门打开。停站倒计时结束后,OB-  
CU 自动发出关门命令(关门命令通常持续输出 1  
s),车辆门控器响应关门命令关闭车门并联动站台

门关闭。OBCU 在获得所有车门关闭并处于锁闭状  
态的信息后,检查其他发车条件均满足时,撤销“门  
使能”的同时输出“门抑制施加”信号。车辆具备发  
车条件后车门抑制始终处于施加状态。



注:DCU 为车门控制单元。

图 2 车门抑制状态控制电路原理图

Fig.2 Train door inhibit status control circuit schematic diagram

### 3 故障场景下的门控操作

#### 3.1 车门紧急解锁逻辑

列车每扇车门上方设有 1 个紧急手柄,在系统故障、车辆火灾等紧急情况下,乘客能够通过旋转紧急手柄将车门打开,进行疏散逃生。

1) 区间非零速解锁。当列车处于 FAO、AM、CM 状态时,在区间运行且处于非零速时,若车门紧急手柄被旋转至“解锁位”,车辆断开车门锁闭回路,但车门关闭回路仍然保持;车辆门控器发送“紧急解锁请求信号”给 TCMS(列车监控管理系统),TCMS 转发给 OBCU(同时 TCMS 触发附近的车载 CCTV(闭路电视),激活车门附近的乘客紧急对讲,方便 OCC(运营控制中心)了解列车上的情况),OBCU 检测到车门锁闭状态丢失的情况下,列车将继续运行至下一站,打开车门不关闭,等待人员上车处理。

2) 站台区域非零速解锁。当列车处于 FAO、AM、CM 状态时,在站台区低速运行时,当车门紧急手柄被旋转至“解锁位”,车辆断开车门锁闭回路,但车门关闭回路仍然保持;车辆门控器发送“紧急解锁请求信号”给 TCMS,TCMS 转发给 OBCU,OBCU 检测到车门锁闭状态丢失的情况下,通过计算施加紧急制动后确保 1 个车门仍处在站台区域,则进行紧急制动,等待人员上车处理,否则将继续运行至下一站,打开车门不关闭,等待人员上车处理。

3) 区间零速解锁。区间零速解锁时的车门紧

急解锁流程见图 3。当列车处于 FAO 模式,并在区间停车处于零速时,车门紧急手柄旋转至“解锁位”,车辆断开车门锁闭回路,但车门关闭回路仍然保持;车辆门控器发送“紧急解锁请求信号”给 TC-MS,TCMS 转发给 OBCU(同时 TCMS 触发附近的车载 CCTV,激活车门附近的乘客紧急对讲,方便 OCC 了解列车上的情况),OBCU 将“紧急解锁请求信号”发送给中央 ATS,OCC 调度员判断是否可以

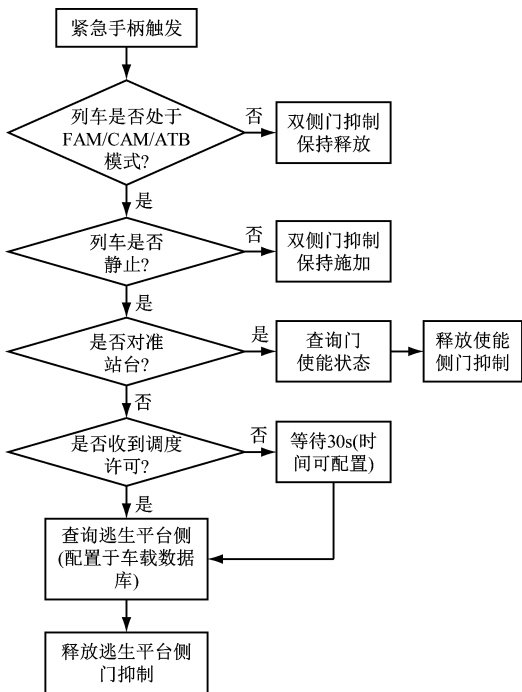


图 3 区间零速解锁时车门紧急解锁流程

Fig.3 Train door emergency release process in zero speed unlocking section

取消门抑制信号,并在规定时间内(目前设置为30s)发送允许取消门抑制信号命令,紧急解锁允许指示灯点亮,乘客再次将车门紧急手柄旋转至“解锁位”,此时车辆将同时断开车门锁闭回路和车门关闭回路,乘客可以从车厢内扒开车门,进行疏散;若OCC调度员没有在规定时间内给出取消门抑制信号,OBCU默认给出门抑制释放信号,乘客可以采用上述操作流程从车厢内扒开车门,进行疏散。

4) 特定站台自动解锁。根据运营上的特殊需求,在太原轨道交通2号线信号系统中,还对于停车列检库、牵出线及正线存车线的虚拟站台做了特殊处理。FAO模式列车在此类站台停车对准的情况下,OBCU将自动释放双侧车门的门抑制信号,以方便司机登乘。

### 3.2 车门与站台门故障对位隔离

1) 车门故障隔离。当列车上的1扇或多扇车门出现故障告警时,行车调度人员将派遣多职能队员登车进行车门故障隔离操作。车门的故障隔离状态将从车辆依次传输到OBCU、综合监控系统及即将停站站台的站台门控制系统;列车到站停准后,故障车门及对应位置的站台门不进行开启。设置了故障隔离车门上的隔离指示灯会自动亮起,以提醒乘客车门处于故障状态。

2) 站台门故障隔离。当某个车站的站台门出现故障无法正常关闭或开启时,站务人员将故障站台门设置为隔离状态,站台门故障信息(站台编号及故障站台门编号)通过综合监控系统发送到车载设备及车辆,在列车停站后,故障站台门及对应的车门不进行开启;如果故障站台门的隔离状态一直保持,后续停站列车对应位置的车门都不会进行自动开启。设置了车门或站台门故障对位隔离后,行调界面上将出现报警并显示车门、站台门故障隔离状态。

### 3.3 控制中心远程开、关门命令及站台开、关门按钮

1) 新增的开、关门控制方式。在FAO系统中,除了设置于司机室的人工开、关门控制按钮及OBCU自动发出的开、关门控制命令,系统还增加了两种开、关门控制方式:①ATS远程开、关门命令;②站台开、关门按钮。这两种开、关门控制方式仅在列车处于FAO级别下有效,通常应用于正常开、关门控制失效的情况。当列车停站期间车门关闭后遇到紧急情况需要再次打开,或车门、站台门遇到

障碍物无法正常关闭时,系统支持调度员通过ATS界面发送远程开关门命令,或通知站务人员通过按压站台开、关门按钮实现再次开、关门的操作。

2) 应用场景。列车停站后当车门或站台门未正常打开,列车发送报警信息到控制中心,由调度员确认车门状态;若车门处于“使能”状态时,调度员向该列车发送远程开门命令,或安排车站人员按压站台开门按钮,使车门、站台门同步打开。当车门或站台门未正常关闭,列车发送报警信息到控制中心,调度员确认车门状态;若车门处于“使能”状态时,调度员向该列车发送远程关门命令,或安排车站人员按压站台关门按钮,使车门、站台门同步关闭;如果开、关车门失效时车门处于“未使能”状态,则需派遣司机登乘列车后,切除ATC控制并激活“门使能旁路”开关,人工恢复车门故障。另外,在门控方式中,手动打开的车门,系统不支持自动关门控制。因此,当门模式开关设置为手动开、关门的AM列车停站后升级为FAM时,车门也不会自动关闭,需要通过远程关门命令或站台关门按钮控制关门。

### 3.4 特殊情况下的打开车门不关闭故障

故障情况下,当需要人工干预时,系统能够依据特殊场景条件,控制列车进站停准后打开车门不关闭,以方便站务人员上车处理故障或切换到降级模式运行。此种情况通常包括以下场景:

1) FAM模式下,发生以下情况,停站后打开车门不关闭:①站间运行过程中门锁闭丢失;②FAM授权丢失;③收到车辆发来保持车门打开的命令;④制动重故障激活。

2) CAM模式下,列车到达实体站台后,打开车门不关闭,等待站务人员上车处理故障。

3) 其他模式下,当收到ATS的清客指令和扣车指令时,列车到站后均打开车门不关闭。

4) 当列车发生某些需要人工干预的故障时,列车到站停准后打开车门不关闭。例如:①车辆辅助逆变器故障;②车辆蓄电池充电机故障;③车辆TCMS完全故障;④车辆空压机故障;⑤车辆空气制动无法缓解;⑥车辆停放制动无法缓解;⑦1扇或多扇门故障;⑧列车运行过程中车门锁闭状态丢失;⑨轴箱轴承故障;⑩车辆发生火灾报警。

对于打开车门不关闭的故障情况,必须在相关故障恢复后,系统才能恢复响应关门命令。

## 4 结语

列车车门控制是信号车载系统安全防护和自动控制中的重要功能。太原轨道交通 2 号线 FAO 系统中门控功能的实现,是基于对运营场景需求的充分分析和讨论。本文全面总结了常规运营和故障情况下的各种车门控制流程,需注意,在 FAO 系统中,由于运行控制场景的复杂化,除了从系统层面面对运营需求、行车效率和安全性的充分保障,对参与运营人员的培训必须全面,调度、维保人员需明确各种场景下的运营操作限制,严格遵守系统操作规范来执行操作控制。

## 参考文献

[1] 梁浩. 太原市轨道交通 2 号线信号系统 ATC 用户手册[Z].

(上接第 212 页)

关断路器跳闸。因整流机组容量有限,不可视其为理想电压源,存在等效电阻  $R_{eq}$ ,在短路大电流流过后,造成直流母排上电压  $U_d$  迅速降低至约 816 V。在电压  $U_d$  降低后,电客车上  $C_M$  的电压不能突变,则形成了由列车车载电容器流经 216 开关,回馈到直流母排上的反向电流  $i_{L2}$ ,其电流值达 4 495 A。

### 2.3.2 阶段 2

如图 6 b) 所示,因过流速断保护  $I_{max}^{++}$  触发 215 开关跳闸,短路电流被切除,进入阶段 2。在 215 开关跳闸后,短路线路切除,整流机组输出电压  $U_d$  迅速恢复。同时由上述分析可知,整流机组上存在等效电抗  $L_{eq}$ ,在 215 开关跳闸前流过断流大电流  $i_{L1}$ 。由于电感有反向电动势作用,电感的电流不能瞬时突变,在  $L_{eq}$  上形成续流电流  $i_{L1,f}$ ,与整个后端负载构成 Boost 升压电路,此时  $U_d$  迅速抬高且超过整流机组空载电压  $U_{d0}$ 。

在接触网短路过程中,列车上的  $C_M$  因释放能量而导致电压下降,且此时电压小于  $U_d$ ;同时 216 开关柜上的电流  $i_{L2}$  迅速改变为正电流,通过叠加  $i_{L1,f}$ ,构成电流  $i_{L2,0}$ 。随着  $i_{L2,0}$  迅速升高,其电流变化满足 DDL +  $\Delta I$  保护的定值要求,保护装置发出跳闸命令,电流变化率和  $\Delta I$  满足电流变化率保护,DDL +  $\Delta I$  保护发出跳闸动作命令,触发 216 开关跳闸。在母线电压被拉低后,入段线上电客车检测到电压降低,列车断路器因低压下限保护跳闸。

上海:上海富欣智能交通控制有限公司,2020。

LIANG Hao. Taiyuan rail transit Line 2 signaling project ATC user manual[Z]. Shanghai: Shanghai Fuxin Intelligent Transportation Solution Co., Ltd., 2020.

[2] 王华. 南京地铁客室车门系统故障分析及处理[J]. 数字技术与应用,2014(6): 143.

WANG Hua. Fault analysis and treatment of passenger door system in Nanjing metro [J]. Digital Technology and Application, 2014 (6):143.

[3] 闫学祥,刘海东,杨培盛. 城市轨道交通列车车门紧急解锁控制联动优化[J]. 城市轨道交通研究,2017(12): 38.

YAN Xuexiang, LIU Haidong, YANG Peisheng. Optimum control linkage of door emergency unlocking for urban rail transit vehicle [J]. Urban Mass Transit, 2017(12):38.

(收稿日期:2021-05-31)

## 3 结语

1) 考虑在直流开关柜的故障识别中,利用形态学、小波分析等手段对故障波形进行形态识别,在保护装置中将此类波形进行判别,避免不必要的跳闸。

2) 在正常运营过程中,某处接触网发生短路故障时,可能会引起相邻接触网发生同类型故障跳闸,造成电客车停运,导致故障范围扩大。在应急处置时,应当掌握此类故障特征,制定相应的故障响应措施,以实现接触网供电快速恢复。

## 参考文献

[1] 张宝奇,班瑞平. 电力机车车顶绝缘子闪络引发接触网故障的研究及对策[J]. 铁道机车车辆,2007(5): 63.

ZHANG Baoqi, BAN Ruiping. Research on electric locomotive car roof insulator contamination cause catenary fault[J]. Railway Locomotive & Car,2007(5): 63.

[2] 许嘉轩. 基于 Gauss-Seidel 法的城市轨道交通直流牵引供电系统稳态短路计算方法[J]. 城市轨道交通研究,2020(7):138.

XU Jiaxuan. Steady state short-circuit calculation of DC traction power supply system based on Gauss-Seidel iteration [J]. Urban Mass Transit, 2020(7):138.

[3] 黄德胜,张巍. 地下铁道供电[M]. 北京:中国电力出版社,2010:223-224.

HUANG Desheng, ZHANG Wei. Metro power supply [M]. Beijing:China Electric Power Press,2010:223-224.

(收稿日期:2019-11-21)