

城市轨道交通全自动运行列车跳跃模式研究

杨利强¹ 张爱平²

(1. 徐州地铁集团有限公司, 221018, 徐州; 2. 中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京)

摘要 [目的]FAO(全自动运行)系统需通过跳跃模式实现未精确停车时的位置修正,因该模式下信号系统接口与列车牵引制动系统接口设置不同存在跳跃失败风险,需对此模式进行研究。[方法]从列车跳跃模式的定义出发,分析其功能需求。结合我国某FAO项目实例,介绍现有跳跃模式方案并提出优化建议。对既有方案与优化方案的安全性和可用性进行对比分析。[结果及结论]优化方案将轻制动力平均分配至每节车辆的第二个转向架上,减少了第一个转向架静摩擦力的影响,从而减少了静摩擦力对整车制动力的影响;同时该方案加大了列车启动牵引级位,从理论计算和实车验证方面充分保证了列车能够在各种条件下跳跃启动,极大增加了FAO系统的可用性。

关键词 城市轨道交通;全自动运行;列车;跳跃模式

中图分类号 U284.48

DOI:10.16037/j.1007-869x.20241559

Research on Skip Mode of Trains in Urban Rail Transit FAO System

YANG Liqiang¹, ZHANG Aiping²

(1. Xuzhou Metro Group Co., Ltd., 221018, Xuzhou, China;
2. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China)

Abstract [Objective] The FAO (fully automated operation) system must utilize a skip mode to correct train position deviations when precise stopping is not achieved. Due to differences in interface configurations between the signaling system and the train traction/braking system under this mode, there is a risk of skip failure, necessitating dedicated in-depth research. [Method] Starting from the definition of train skip mode, the study analyzes its functional requirements. Using a FAO project in China as a case study, a comparative analysis is conducted between the existing and optimized schemes in terms of safety and availability. [Result & Conclusion] The optimized scheme distributes light braking force evenly to the second bogie of each car, thereby reducing the influence of static friction from the first bogie and mitigating its impact on the overall train braking force. Meanwhile, the scheme increases the traction level for train startup, ensuring—both through theoretical calculation and real-vehicle validation—that the train can successfully initiate movement under various conditions. This

significantly enhances FAO system availability.

Key words urban rail transit; FAO (fully automated operation); train; skip mode

近年来,FAO(全自动运行)系统已成为城市轨道交通新建线路的主流选择^[1]。该系统的高度智能化和自动化,代表了行业技术发展趋势,能有效提高运营安全水平,优化运行组织效率,并改善乘客服务体验。因此,如何提高FAO系统的安全性和可用性,是城市轨道交通行业需要进一步思考的课题^[2]。

FAO列车的跳跃模式作为FAO系统中一项提高停站效率及改善乘客体验的备用功能,可在列车进站无法精准停车,即过标或欠标的情况下,确保列车再次自动进行精准可靠的对标。文献[3]指出,当列车未进入停车点区域时,将启动缓慢跳跃模式进行调整直至精确对准停车点。随着城市轨道交通FAO系统的推广应用,列车跳跃模式亦出现了一些故障,因此有必要对该模式进行深入研究。

1 FAO列车跳跃模式概述

1.1 列车跳跃模式的定义

按照T/CAMET 04017.1—2019《城市轨道交通全自动运行系统规范第1部分:需求》,跳跃为FAO系统控制列车低速小距离运行的模式。该模式适用于列车未精确停车情况下再次精确对标,以及唤醒场景下的动态测试等情况。

1.2 列车唤醒时跳跃模式的功能需求

FAO列车在自动唤醒或远程唤醒后进行一系列自检测试,以确保各系统功能正常,其中动态测试一般通过列车的跳跃功能验证其基本的牵引和制动功能及其协同控制逻辑。

1.3 列车对标不准时跳跃模式的功能需求

FAO列车在进站对标停车时,通常情况下要求列车客室车门中心线与站台门中心线的距离在300 mm以内^[11]。由于系统的响应、误差、配合、故障等

各种原因,均有可能导致列车出现欠标或过标的情况。当出现上述情况,为了提高运行效率,要求 FAO 列车具备站台跳跃对标功能。

2 列车跳跃模式的实现方案

中央信号系统、车载信号主机、列车控制电路、牵引系统、制动系统等是实现上述跳跃功能的基础,其具体原理在此不做赘述。列车跳跃模式下如何设计车载信号主机与列车控制电路、牵引系统、制动系统之间的配合,是实现上述跳跃功能的关键。

2.1 列车跳跃模式的既有方案

本文以我国某 6 节编组(4 节动车+2 节拖车) B 型 FAO 列车为例,对该列列车跳跃模式的既有实现方案进行介绍。FAO 系统由车辆、通信、信号、供电、火灾、综合监控等组成^[12],其中车辆与其他地面 FAO 系统的接口均来自车载信号系统^[13],列车的运行由信号系统控制完成^[14-15],无须人工干预。该列列车的车载信号系统主机与列车控制电路、牵引系统、制动系统间的接口示意图如图 1 所示。

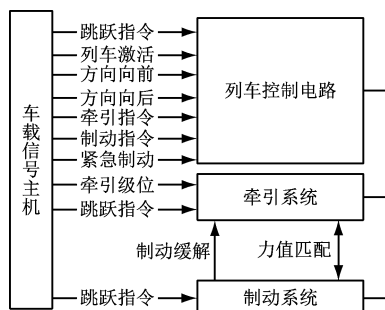


图 1 车载信号主机与列车控制电路、牵引系统、制动系统间的接口示意图(既有方案)

Fig. 1 Interface diagram between on-board signal host and train control circuit, traction system and braking system (existing scheme)

图 1 中,各信号接口的定义及功能如下:

1) 跳跃指令通过发送跳跃模式触发信号,使列车、牵引和制动系统能够识别该模式。

2) 列车激活、方向向前、方向向后等信号用于跳跃模式,列车根据司机室激活端的状态识别跳跃方向。

3) 牵引指令、制动指令和紧急制动信号用于车载信号主机,以控制列车的运行、常规制动及紧急停车。

4) 在跳跃模式下,牵引级位通过信号系统控制牵引力输出,使列车能够克服制动力等阻力实现

运行。

5) 在跳跃模式下,制动系统需保持部分制动力,因此牵引系统需忽略制动缓解信号以实现跳跃动车。

6) 力值匹配是在跳跃模式下,牵引力需与轻制动力形成一定的平衡关系,保证列车可以平稳启动。

2.2 列车跳跃模式既有方案的实现及存在问题

通过调试与多车次测试,本项目确定跳跃模式的最佳参数为:牵引级位 40%,保持制动级位 15%。该设定可稳定实现跳跃启动与精准对位。

在后续运营中发现,列车会偶发无法跳跃动车的情况,经调查分析发现现有方案采用的固定 15% 轻制动级位,除理论上制动闸瓦施加的力之外,还会受闸瓦与轮对之间的静摩擦力影响。该静摩擦力在不同环境、不同温湿度等条件下表现出的力值不同。制动系统静摩擦因数 μ 的台架试验结果显示,测量值为 0.27~0.43。

μ 为 0.27~0.43 对应的 15% 轻制动级位时的静摩擦力为 25.3~82.7 kN。为便于分析,分别取最小静摩擦因数和最大静摩擦因数两个边界值进行分析。定义 μ_1 为最小静摩擦因数, a_1 为该工况对应的列车启动加速度;定义 μ_2 为最大静摩擦因数, a_2 为该工况对应的列车启动加速度。

根据现有信号设定的列车启动时牵引级位为 40%,对应的牵引力为 99.18 kN。经计算,不同 μ 下的启动加速度为: $\mu_1=0.27$ 时, $a_1=0.310 \text{ m/s}^2 > 0.083 \text{ m/s}^2$,列车可以启动; $\mu_2=0.43$ 时, $a_2=0.030 \text{ m/s}^2 < 0.083 \text{ m/s}^2$,列车无法启动。

该测试验证了不同静摩擦力对跳跃模式下列车是否能够动车有明确的影响,可能会导致在一定环境条件下列车无法跳跃动车。

2.3 列车跳跃模式既有方案优化及验证

不同静摩擦力对列车跳跃启动的影响,原则上可以通过调整牵引力与制动力的关系来优化解决。

2.3.1 制动力方案优化

由于目前设定的轻制动级位为 15%,已处于制动系统判断制动施加与缓解的边界值,很难再调小,因此考虑将轻制动力集中在部分转向架(仅在每节车的第 2 个转向架)上施加。不同 μ 下的轻制动力如表 1 所示。其中: F_1 为对每个转向架施加的轻制动力, F_2 为对每节车辆第 2 个转向架施加的轻制动力。

表1 不同 μ 下的轻制动力Tab.1 Different light braking force under different μ values

μ	转向架	F_1/kN	F_2/kN
0.27	转向架1	2.108	0
	转向架2	2.108	5.18
	转向架3	2.108	0
	转向架4	2.108	5.18
	转向架5	2.108	0
	转向架6	2.108	5.18
	转向架7	2.108	5.18
	转向架8	2.108	0
	转向架9	2.108	5.18
	转向架10	2.108	0
	转向架11	2.108	5.18
	转向架12	2.108	0
0.43	转向架1	6.89	0
	转向架2	6.89	11.58
	转向架3	6.89	0
	转向架4	6.89	11.58
	转向架5	6.89	0
	转向架6	6.89	11.58
	转向架7	6.89	11.58
	转向架8	6.89	0
	转向架9	6.89	11.58
	转向架10	6.89	0
	转向架11	6.89	11.58
	转向架12	6.89	0

由表1可见: μ 为0.27时,整车制动力由25.3 kN变为31.08 kN; μ 为0.43时,整车制动力由82.7 kN变为69.5 kN。由此可计算出列车的启动加速度 a : μ 为0.27时, a 为 0.282 m/s^2 ($>0.083 \text{ m/s}^2$),列车可以启动; μ 为0.43时, a 为 0.096 m/s^2 ($>0.083 \text{ m/s}^2$),列车可以启动。

通过实车方案调整,并经多车次测试后列车均可跳跃启动。

2.3.2 牵引力方案优化

牵引力优化方案如下:

1) 动态牵引级位方案。由于既有列车在设定的固定牵引级位40%下会偶发无法动车的情况,考虑在跳跃动车时,将牵引级位设定为40%~50%,即信号系统控制列车进入跳跃模式后先施加40%

牵引级位,在一定时间范围(如5 s)内逐步增加至50%牵引级位,对应的牵引力为99.18~124.00 kN,对应不同 μ 下的 a 分别为: μ 为0.27时, a 为 $0.31 \sim 0.43 \text{ m/s}^2$; μ 为0.43时, a 为 $0.03 \sim 0.15 \text{ m/s}^2$ 。该方案要求不同的牵引级位对应的 a 不同,停车位置也会实时变化,控制难度较高。且该方案非本项目信号系统厂家的成熟方案,实施困难,经多车次测试难以保证精准停车,因此需继续调试研究。

2) 固定大牵引级位方案。将现车设定的固定40%牵引级位调整为固定50%牵引级位,对应不同 μ 下的 a 分别为: $\mu=0.27$ 时, a 为 0.430 m/s^2 ($>0.083 \text{ m/s}^2$),列车可以启动; $\mu=0.43$ 时, a 为 0.150 m/s^2 ($>0.083 \text{ m/s}^2$),列车可以启动。经多车次测试后,列车均可在跳跃模式下启动并实现精准停车。

3 列车跳跃模式安全性和可用性分析

基于本文所述的跳跃模式方案,对既有方案和优化方案的安全性和可用性进行分析。

3.1 既有方案与优化方案的相似之处

FAO列车跳跃功能的实现,都需要发送进入跳跃模式的触发信号,以便列车各系统识别并按照约定的方案进行控制执行和响应。为了提高列车的安全性,信号系统在控制列车进行跳跃时,需保障列车速度不能过高,跳跃距离不能太大。因此信号系统通过施加紧急制动使得列车在特殊情况下超出预定速度或距离后能紧急停止,确保了列车的安全性。

为了确保每列列车出库前牵引、制动及跳跃功能正常,以便列车在正线运营时能正常运行,以及在出现进站对标不准时及时自动调整,因此在每次列车唤醒时需进行动态测试,以验证列车的跳跃功能。在此方面,既有方案与优化方案是一致的,是保证列车安全可靠运营不可或缺的。

3.2 既有方案与优化方案的差异

3.2.1 轻制动力分配方案

轻制动力的施加是为了保障列车能够以较小的速度运行较短的距离。既有方案将轻制动力平均分配至每个转向架上,该方案中制动的静摩擦力对整车制动力的影响较大,间接增加了整车制动力。而优化方案将轻制动力平均分配至每节车辆的第2个转向架上,减少了第1个转向架静摩擦力

的影响,从而减少了静摩擦力对整车制动力的影响。两种方案在安全性上无区别,但相比既有方案,优化方案降低了列车启动时的静摩擦力,同时也增加了系统可用性。

3.2.2 信号与牵引系统接口

既有方案设定固定牵引级位为 40%,但列车静摩擦力受环境、温湿度等条件影响,在联调测试时未保障足够的裕量,因此在静摩擦力较大时列车无法跳跃启动。优化方案加大了列车启动牵引级位,从理论计算和实车验证方面充分保证了列车能够在各种条件下跳跃启动,极大增加了系统可用性。

3.2.3 牵引系统与制动系统力值匹配

列车跳跃模式下,牵引系统与制动系统间的力值需要匹配。优化方案保证了在各种静摩擦力的情况下,列车均可具备最小的启动加速度,从而解决了现车偶发的无法动车的问题,提高了列车的运行效率及可用性。

4 结语

列车跳跃模式是 FAO 列车不可或缺的一项基本功能,既有方案虽然实现了跳跃功能,但忽略了在特殊情况下静摩擦力的影响。优化方案在既有方案的基础上直接增加了固定牵引级位,可用性明显提升,是目前信号系统较易实现的方案,保证了跳跃模式的可用性,也是该项目采用的最终方案。跳跃模式作为 FAO 列车的关键功能,其深入研究对提升 FAO 系统的可用性以及列车运营效率具有积极意义。

参考文献

- [1] 郎永强. 城市轨道交通全自动运行系统列车蠕动模式设计与实现[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(11): 85.
LANG Yongqiang. Train creeping mode design and implementation for urban rail transit FAO system[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(11): 85.
- [2] 刘洋. 城市轨道交通全自动运行列车蠕动模式研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(增刊2): 88.
LIU Yang. Research on train creep mode in urban rail transit FAO system[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(S2): 88.
- [3] 张海涛, 梁汝军. 地铁列车全自动无人驾驶系统方案[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(5): 33.
ZHANG Haitao, LIANG Rujun. Introduction to the unattended train operation system on metro train[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(5): 33.
- [4] 张敏. 全自动驾驶方案应用分析[J]. 电子世界, 2017(4): 200.
- ZHANG Min. Application analysis of fully automatic driving solutions[J]. Electronics World, 2017(4): 200.
- [5] 廖绍辉, 姚风龙, 杨东, 等. 空气制动预压力对全自动驾驶地铁列车精准停车影响的分析[J]. 机械工程师, 2021(5): 129.
LIAO Shaohui, YAO Fenglong, YANG Dong, et al. Impact analysis of pneumatic brake pre-pressure on the accurate stop of fully automatically driving metro trains[J]. Mechanical Engineer, 2021(5): 129.
- [6] 禹宏鹏, 徐伟. 城市轨道交通车辆与信号系统接口分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2010, 33(4): 43.
YU Hongpeng, XU Wei. Analysis of the interface of RS-SIG system in urban mass transit[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2010, 33(4): 43.
- [7] 黄良骥, 唐涛. 地铁列车自动驾驶系统分析与设计[J]. 北方交通大学学报, 2002, 26(3): 36.
HUANG Liangji, TANG Tao. System analysis and design of automatic train operation on metro[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2002, 26(3): 36.
- [8] 王昊, 刘妃. 全自动驾驶信号系统的关键功能研究[J]. 江苏科技信息, 2019, 36(23): 46.
WANG Hao, LIU Fei. Study of the key functions of signaling system in full automation operation[J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2019, 36(23): 46.
- [9] 陈威. 全自动驾驶地铁车辆功能与优势研究[J]. 智能城市, 2019, 5(5): 86.
CHEN Wei. Research on functions and advantages of fully automatic driving metro vehicles[J]. Intelligent City, 2019, 5(5): 86.
- [10] 施挺. 上海城市轨道交通全自动运行系统运营场景研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(增刊2): 160.
SHI Ting. Research on the operation scenario of Shanghai Metro fully automatic operation system[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(S2): 160.
- [11] 宋丽梅, 周琪. 城市轨道交通全自动无人驾驶安全性分析[J]. 信息通信, 2020, 33(3): 148.
SONG Limei, ZHOU Qi. Safety analysis of automatic unmanned driving in urban rail transit[J]. Information & Communications, 2020, 33(3): 148.
- [12] 洪伟权, 谭华, 张海涛. 国内外自动驾驶发展态势[J]. 通信企业管理, 2021(3): 54.
HONG Weiquan, TAN Hua, ZHANG Haitao. The development trend of autonomous driving at home and abroad[J]. C-Enterprise Management, 2021(3): 54-57.
- [13] 肖衍, 苏立勇. 轨道交通全自动驾驶系统集成技术研究[J]. 中国铁路, 2015(5): 109.
XIAO Yan, SU Liyong. Research on integrated technology of automatic driving system for rail transit[J]. China Railway, 2015(5): 109.

(下转第 202 页)

- [16] 张伟. FAO 试验线系统设计及关键场景实施[J]. 铁道通信信号, 2023, 59(4): 73.
ZHANG Wei. System design and implementation of key operation scene of the FAO test line[J]. Railway Signalling & Communication, 2023, 59(4): 73.
- [17] 邸鑫鹏, 钱枫. 轨道交通全自动运行系统探究[J]. 智能建筑电气技术, 2019, 13(4): 55.
DI Xinpeng, QIAN Feng. Research on automatic operation system of rail transit[J]. Electrical Technology of Intelligent Buildings, 2019, 13(4): 55.
- [18] 谭文举, 杨卫峰, 廖云, 等. 城市轨道交通全自动运行系统设计及场景分析[J]. 机车电传动, 2019(4): 112.
TAN Wenju, YANG Weifeng, LIAO Yun, et al. Overview of urban rail transport fully automatic operation system and typical scenario[J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(4): 112.
- [19] 刘晨阳. 城市轨道交通全自动运行系统信号功能设计及实际应用[J]. 科技创新与应用, 2018, 8(19): 92.
LIU Chenyang. Signaling function design and practical application of urban rail transit fully automated operation system[J]. Technology Innovation and Application, 2018, 8(19): 92.
- [20] 闫宏伟, 燕飞. 城市轨道交通全自动运行系统及安全需求[J]. 都市快轨交通, 2017, 30(3): 50.
YAN Hongwei, YAN Fei. Fully automatic operation system and its safety requirement of urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2017, 30(3): 50.
- [21] 蒋勇. 城市轨道交通全自动运行系统综合联调方案[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(2): 125.
JIANG Yong. Integrated joint commissioning scheme of urban rail transit FAO system [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(2): 125.
- [22] 颜纯. 南宁轨道交通 5 号线行车综合自动化系统新增功能联调方案与验证[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(2): 128.
YAN Chun. Joint commissioning scheme and verification of Nan-ning rail transit line 5 train integration automatic system newly added functions[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(2): 128.
- 收稿日期:2023-05-10 修回日期:2023-06-02 出版日期:2025-06-10
Received:2023-05-10 Revised:2023-06-02 Published:2025-06-10
• 通信作者:马迪迪,工程师,252736890@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
- ~~~~~
- (上接第 196 页)
- [14] 张艳兵,王道敏,肖衍. 城市轨道交通全自动驾驶的发展与思考[J]. 铁道运输与经济,2015,37(9):70.
ZHANG Yanbing, WANG Daomin, XIAO Yan. Development and thoughts on full-automatic operation of urban rail transit [J]. Railway Transport and Economy, 2015, 37(9):70.
- [15] 韩延光, 饶东, 闫磊. 全自动驾驶车辆网络系统的应用分析[J]. 铁道车辆, 2017, 55(10): 27.
HAN Yanguang, RAO Dong, YAN Lei. Application analysis of the network system for vehicles with fully automatic driving[J]. Rolling Stock, 2017, 55(10): 27.
- [16] 谢正媛, 李月. 城市轨道交通全自动运行系统应用研究[J]. 数字技术与应用, 2018, 36(2): 53.
XIE Zhengyuan, LI Yue. Study on the application of automatic operation system for urban rail transit[J]. Digital Technology and Application, 2018, 36(2): 53.
- [17] 刘磊, 胡荣华, 薛强. 基于虚拟分区的城市轨道交通全自动运行控制系统动态测试安全防护方法[J]. 城市轨道交通研
究, 2023, 26(8): 210.
LIU Lei, HU Ronghua, XUE Qiang. Safety protection method for dynamic testing of urban rail transit FAO control system based on virtual partitioning [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(8): 210.
- [18] 张九高. 城市轨道交通全自动运行列车唤醒场景动态测试需求探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(2): 42.
ZHANG Jiugao. Dynamic test requirements in urban rail transit FAO train wake-up scenario[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(2): 42.
- 收稿日期:2024-12-31 修回日期:2025-03-11 出版日期:2025-06-10
Received:2024-12-31 Revised:2025-03-11 Published:2025-06-10
• 第一作者:杨利强,正高级工程师,wangdawei335@126.com
通信作者:张爱平,高级工程师,zhangaipeng7105@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