

# 城市轨道交通列车自动灵活编组技术应用研究

胡荣华<sup>1,2</sup>

(1. 上海轨道交通无人驾驶列控系统工程技术研究中心, 200070, 上海;

2. 卡斯柯信号有限公司, 200070, 上海//高级工程师)

**摘 要** FAO(全自动运行)模式下,列车的灵活编组能快速地适应线路不同时段、不同区段的运力差异需求,减少运力浪费,提高运输经济性。分析了列车自动编组联挂和解编的过程,研究了列车编组识别、列车联挂状态检测、联挂列车编组防护包络管理和控制等设计方案,提出了联挂列车编组的多防护包络管理方式,以实现列车自动灵活编组运行。

**关键词** 城市轨道交通;列车自动灵活编组;列车单元;多防护包络管理

**中图分类号** U292.3<sup>+</sup>1; U29-39

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.11.032

## Application of Flexible Urban Rail Transit Train Formation Technology

HU Ronghua

**Abstract** In fully automatic operation (FAO) mode, the flexible train formation can quickly adapt to the transport capacity demands of different periods and line sections, reduce the transport capacity waste, and improve the operation economy. By analyzing the process of automatic train coupling and uncoupling, the design schemes of train formation identification, coupling status detection, protection envelop management and control of coupled train are studied, multi envelope protections for coupled train are proposed to realize the automatic flexible train formation operation.

**Key words** urban rail transit; automatic flexible train formation; train unit; multi protection envelope management

**Author's address** Technology Research Center of Shanghai Rail Transit Unmanned Train Control System Engineering, 200070, Shanghai, China

## 1 列车灵活编组的必要性分析

城市轨道交通线路客流随时空变化是不平衡的,最为突出的特点是由于上下班出行带来的潮汐客流现象,这在连接市区与郊区的通勤线路上尤为明显。目前解决潮汐客流最直接的措施是在客流

高峰时段投入更多的运营列车,以缩短行车间隔、提高运力。而在客流非高峰时段,为了提高运营列车的利用率,一般通过增加行车间隔来减少运营列车数,这在一定程度上降低了服务质量。另一个有效的举措是实行列车灵活编组运营,针对全天不同时段或不同区段的客流差异,在保证各时段/区段均能提供较优服务质量的前提下,通过改变运营列车的编组数,在运输组织上实现运量与运力的最佳协同。这样,可以合理优化各时段的列车满载率,解决因客流在时段分布不均衡造成的运力浪费问题,提高城市轨道交通的运输经济性。

在传统的列车灵活编组运营中,一般是由检修人员或司机在车辆段特定的联挂/解编区域内人工实施列车联挂/解编作业。通过人工重启配置新编组列车的车载数据和车辆数据,在确认新编组列车电气连接和性能正常后重启列车,让新编组列车驶入正线投入运营。目前国内大部分城市轨道交通线路(如广州地铁3号线、深圳地铁9号线等)的灵活编组运营主要采用上述方式,其作业的自动化程度不高、作业时间较长、灵活度较低。

列车自动灵活编组是指在正线/车辆段的特殊区域,信号系统根据运营计划自动控制运营列车改变其编组数,以适应不同运营时段/区段的运力差异需求。随着FAO(全自动运行)技术的持续发展,基于FAO的CBTC(基于通信的列车控制)系统已广泛应用于城市轨道交通的新建项目,在FAO的基础上实现列车自动灵活编组(即在运营期间可自动管理列车的联挂和解编)已成为当前轨道交通业内的研究热点。信号系统应确保列车自动联挂/解编作业全过程快捷、安全,并对联挂/解编后的列车进行安全、可靠的识别和控制,以适应城市轨道交通线路的高密度运营需求。此项技术在国外已有成功的应用经验,如在沙特阿拉伯首都利雅得的地铁4号线、5号线及6号线上,信号系统已支持列车自

动联挂/解编和列车自动救援。

## 2 列车编组的定义

在列车灵活编组中,信号系统将列车分为列车编组和列车单元,其定义如下:

1) 列车单元:列车灵活编组中的最小列车组成,列车单元不能再进行解编。

2) 列车编组:由 1 个或多个列车单元组成列车编组;由 1 个列车单元组成的列车称为小编组列车;由多个列车单元组成的列车称为大编组列车或联挂列车,本文称之为联挂列车。

3) 激活列车单元:指被激活端驾驶室的列车单元,由 ATU(激活列车单元)负责控制联挂列车的运行。

4) 非激活列车单元:指未被激活端驾驶室的列车单元,不参与列车运行控制,其输出被车辆旁路。

小编组列车和联挂列车示意如图 1 所示。

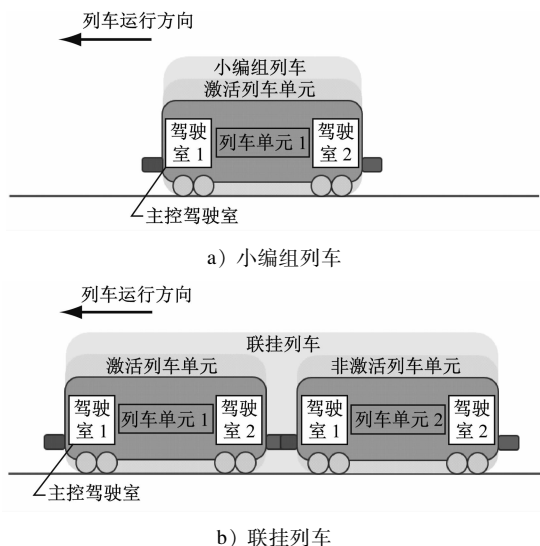


图 1 小编组列车和联挂列车示意图

Fig. 1 Diagram of single train formation and coupled train formation

## 3 列车自动灵活编组技术方案

列车自动灵活编组运营下,信号系统需具备在线调整列车编组数及满足不同编组列车在线混跑要求的功能。信号系统根据当天运营计划自动控制列车在车辆段或正线的特定位置改变其编组数,自动控制 2 列  $n$  节小编组列车联挂,形成 1 列  $n+n$  节的联挂列车,以替代 2 列  $n$  节小编组列车在线路上运行。反之,也可将 1 列  $n+n$  节编组的联挂列车

解编为 2 列  $n$  节小编组列车。解编后的 2 列小编组列车分开运营,以实现运量和运力的最佳协同。

### 3.1 列车自动联挂的作业步骤

ATS(列车自动监控)系统将联挂任务(包括被联挂、去联挂)编入当天运营计划,信号系统自动控制列车运行至正线特定区域(如折返轨、存车线)执行联挂作业。联挂作业完成后,联挂列车将作为 1 列新的列车,自动投入正线运营。图 2 为列车自动联挂作业流程。

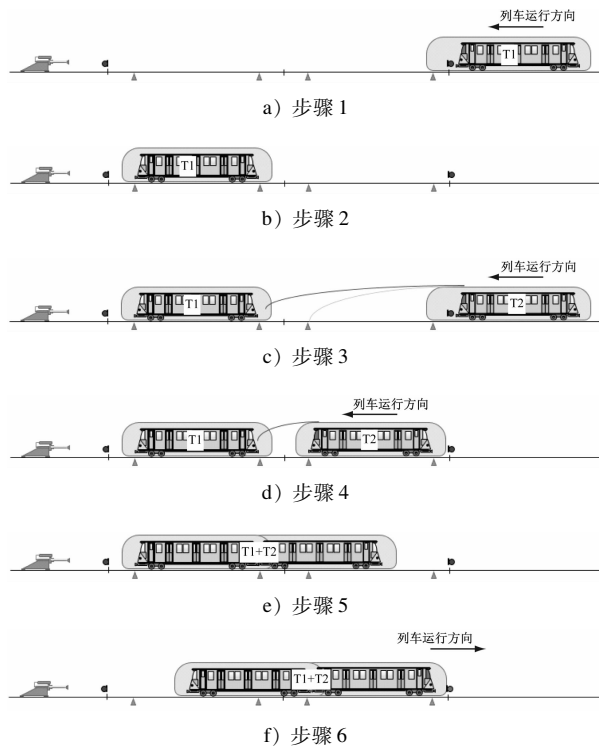


图 2 列车自动联挂作业步骤分解

Fig. 2 Decomposition of operation steps for train automatic coupling

如图 2 所示,列车自动联挂作业分为 6 个步骤:

1) 步骤 1:ATS 为被联挂列车 T1 办理运行至联挂区域的进路;

2) 步骤 2:T1 自动运行至联挂区域末端后停车;ATS 根据当天运营计划自动下发被联挂指令,待 T1 被联挂准备就绪后,VOBC(车载控制器)通知轨旁系统;

3) 步骤 3:根据当天运营计划,ATS 自动为去联挂列车 T2 办理去联挂进路,并下发去联挂指令;

4) 步骤 4:轨旁 ZC(区域控制器)根据 T1 的被联挂状态,自动控制 T2 接近 T1;

5) 步骤 5:T2 在停车或不停车情况下与 T1 碰撞联挂后形成联挂列车( $T1+T2$ ),车辆系统和信号

系统自动配置联挂列车的编组数据,形成联挂列车的数据信息;

6) 步骤 6:ATS 根据当天运营计划自动控制联挂列车投入正线运营。

### 3.2 列车自动解编的作业步骤

ATS 将解编任务编入当天运营计划,联挂列车 ( $T_3 + T_4$ ) 运行至正线特定区域后自动解编为 2 列小编组列车。解编后的 2 列小编组列车按当日运营计划,分别投入正线运营。图 3 为列车自动解编作业流程。

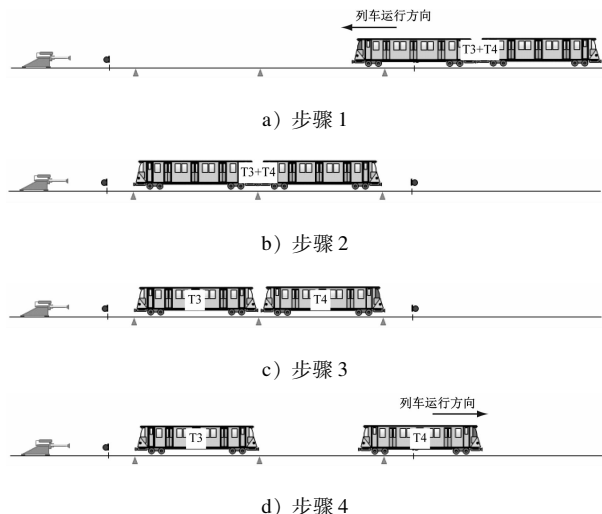


图 3 列车自动解编作业步骤分解

Fig. 3 Decomposition of operation steps for train automatic uncoupling

如图 3 所示,列车自动解编分为 4 个步骤:

1) 步骤 1:联挂列车 ( $T_3 + T_4$ ) 自动运行至解编区域停车;

2) 步骤 2:ATS 根据当天运营计划下发解编指令;

3) 步骤 3:车辆系统和信号系统自动配置新列车编组数据,联挂列车解编为 2 列小编组列车  $T_3$ 、 $T_4$ ;

4) 步骤 4:ATS 根据当天运营计划自动控制列车  $T_3$ 、 $T_4$  分别投入正线运营。

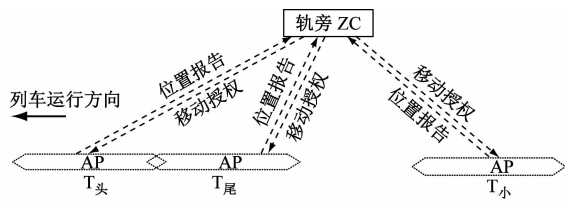
### 3.3 联挂列车的网络架构

为实现联挂列车的安全可靠控制,VOBC 通过贯通网络实时交互各列车单元中的车载设备识别号、端部联挂状态、列车运行信息、运营任务信息及控制指令(如车载设备状态、驾驶模式、开关门指令等),以识别列车编组信息,监督编组状态,控制列车安全运行。

## 4 列车编组管理功能

### 4.1 联挂列车的多 AP(防护包络)管理

联挂列车各列车单元的 VOBC 同时工作,并和轨旁系统保持通信。其对应的 AP 相互独立,即联挂前后各列车单元的 VOBC 与轨旁系统的通信方式没有发生变化,且在联挂/解编过程及后续投入正线运营过程中,各列车单元 VOBC 识别号均保持不变。通过该方式,可确保 ZC 和 VOBC 能快速适应列车编组数目的变化,减少列车联挂/解编的作业时间,如图 4 所示。



注:  $T_{\text{头}}$ ——联挂列车的头车;  $T_{\text{尾}}$ ——联挂列车的尾车;  $T_{\text{小}}$ ——小编组列车。

图 4 联挂列车编组多 AP 管理示意图

Fig. 4 Multi AP (automatic protection) management of coupled train formation

轨旁子系统与联挂列车 VOBC 的通信方式为:

1) ZC:将联挂列车视为多个独立的列车单元;各列车单元的 VOBC 同时和 ZC 保持通信,VOBC 给 ZC 提供位置报文、速度及状态信息;ZC 为各列车单元分别建立 AP,并反馈移动授权;联挂列车的头车为激活列车单元,可响应轨旁信息并控制列车运行;联挂列车的尾车为非激活列车单元,也接收轨旁信息,但不控制联挂列车运行。

2) ATS:将联挂列车视为 1 列车,联挂列车各列车单元的 VOBC 同时和 ATS 保持通信,分别给 ATS 提供列车识别号、驾驶模式、列车联挂状态及任务执行状态等信息;ATS 将多个列车单元合并为 1 个新的联挂列车(如列车 201、列车 202 合并为联挂列车 201202)进行管理,同时给各列车单元反馈运行任务;作为激活列车单元的头车的 VOBC 根据 ATS 任务控制联挂列车运行。

3) CI(计算机联锁):将联挂列车视为 1 列车;列车进站时,仅激活列车单元的头车的 VOBC 向 CI 请求建立通信;VOBC 根据列车编组类别给 CI 匹配发送不同的开门指令,控制站台门开启/闭合;非激活列车单元的尾车与 CI 间不通信。

### 4.2 联挂状态检测

为安全实施列车联挂/解编作业,确保列车联挂后的运行安全,VOBC 需对联挂列车进行安全、可

靠识别和实时监督。信号-车辆接口信息中,在每个列车单元的两端均增加了安全信息,用以采集每个驾驶端的联挂状态,如图 5 所示。

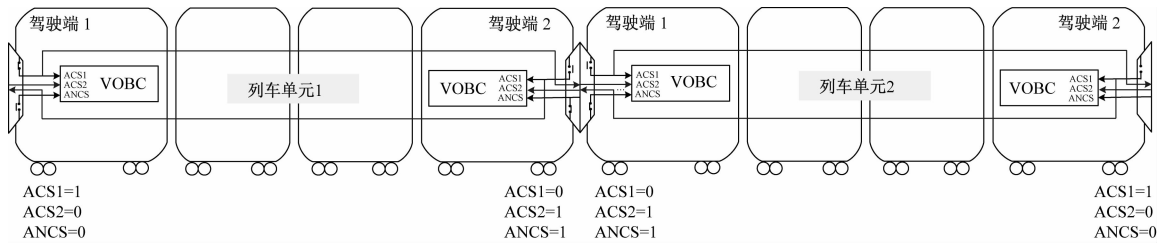


图 5 列车联挂状态采集示意图

Fig. 5 Diagram of train coupling status acquisition

如图 5 所示,ACS1 表示本端单侧是否为联挂状态,其值取“0”时表示本端联挂,取“1”时表示本端非联挂;ANCS 表示本端单侧是否为非联挂状态,取“0”时表示本端非联挂,取“1”时表示本端联挂;ACS2 表示与本端联挂的另一个列车单元的远端是否为联挂状态,其值取“0”时表示另一个列车单元的远端已联挂,取“1”时表示另一个列车单元的远端未联挂。VOBC 根据每个驾驶端的 ACS1、ANCS 及 ACS2 取值,来识别列车为小编组列车或联挂列车:

1) ACS1/ANCS 信号来源于本驾驶端车钩的内部接点,通过识别 ACS1/ANCS 的状态来判断本驾驶端是否联挂。这两个信号互斥,当本驾驶端若处于联挂状态时,ACS1 = 0,ANCS = 1;当本驾驶端处于非联挂状态时,ACS1 = 1,ANCS = 0。

2) 通过识别 ACS2 的状态来判断本列车单元另一个驾驶端是否联挂。此 ACS2 信号来源于与本端联挂的另一个列车单元远端的 ACS1 状态,可用于检查本端的电气连接状态,以判断另一个列车单元的远端是否还联挂其它列车单元。

### 4.3 联挂列车的编组信息识别

VOBC 和 ZC 共同协作,以安全、可靠地识别列车的编组数,这是授权联挂列车运行的关键。VOBC 和 ZC 都需要对联挂列车的编组状态和编组信息进行计算:VOBC 根据各列车单元对应的 VOBC 识别号及 Cab(列车的驾驶端)的联挂状态,计算联挂列车的联挂编组状态;ZC 根据各列车单元 Cab 的联挂状态和 AP 位置,计算联挂列车的联挂编组信息。

1) 正常情况下,头车的 VOBC 采用其计算得到的联挂编组状态来识别联挂列车。若头车的

VOBC 对列车联挂编组状态的识别不成功,则采用 ZC 计算得到的联挂编组信息识别来联挂列车。

2) 正常情况下,ZC 根据头车的 VOBC 计算得到的联挂编组状态来识别联挂列车,并计算移动授权。若 ZC 收到头车的 VOBC 计算得到的联挂编组状态无效(如列车编组数为 0),ZC 则根据自己计算得到的联挂编组信息来计算移动授权。

3) 若 VOBC、ZC 的计算结果都不可用时(如列车编组数为 0),VOBC 将仅授权列车 RM(限制人工驾驶模式)可用。

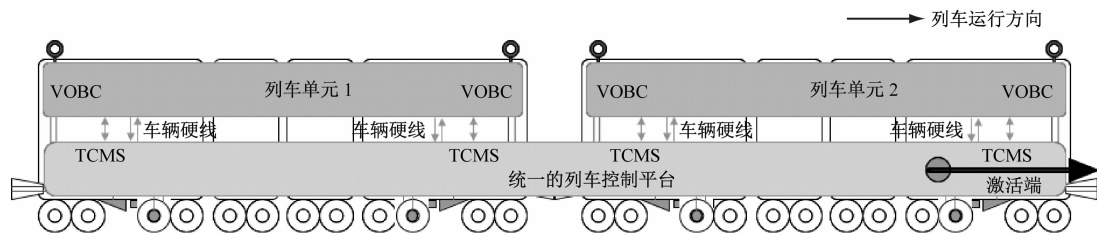
通过以上设计,当联挂编组状态和联挂编组信息中任一信息有效时,联挂列车都可以保持 CBTC 运行。

### 4.4 联挂列车编组的控制

列车正常运行时,所有 VOBC 均保持工作状态。由激活列车单元的头车控制联挂列车运行,并向列车发送控制指令。尾车的控制指令被列车旁路。如图 6 所示,列车通过全自动车钩贯通 VOBC 和列车的输出/输入信息(如牵引/制动、门状态等),将联挂列车整合为一个统一的列车控制平台进行管理。

## 5 结语

列车自动灵活编组技术对潮汐客流特征明显的城市轨道交通线路具有重要意义,既可以很好地保障城市轨道交通线路的服务质量,又可节省运营成本,提高运营效率和运输经济性,具有较高的推广价值。本文从列车自动灵活编组的功能需求入手,将列车灵活编组技术和 FAO 相结合,分析了列车自动联挂/解编过程的关键技术及相关功能的实现方式。在未来,该技术有望在互联互通轨道交通



注：↕ 为网络接口信息与 TCMS 指令的交互；↕ 为硬线采集信息与输入/输出信息的交互。

图 6 联挂列车系统架构示意图

Fig. 6 Diagram of coupled train system architecture

线路间的跨线灵活编组、列车联挂救援等运营场景中得到更为广泛的应用。

## 参考文献

- [1] 范海宁, 何勇浩. 城市轨道交通列车灵活编组方案及功能实现[J]. 城市轨道交通研究, 2021(9): 43.  
FAN Haining, HE Yonghao. Flexible marshalling scheme and function realization of urban rail transit train[J]. Urban Mass Transit, 2021(9): 43.
- [2] 王冬海, 黄柒光. 列车灵活编组在城市轨道交通全自动运行线路中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2019 年(增刊 2): 28.  
WANG Donghai, HUANG Qiguang. Application of flexible train formation on rail transit FAO lines[J]. Urban Mass Transit, 2019

(S2): 28.

- [3] 王翔, 吴士林. 基于以太网的灵活编组列车的网络控制系统研究[J]. 电脑知识与技术, 2019(3): 59.  
WANG Xiang, WU Shilin. Research on network control system of flexible marshalling train based on Ethernet[J]. Computer Knowledge and Technology, 2019(3): 59.
- [4] 唐玉川, 马宝仁. 城市轨道交通灵活编组运营组织研究[J]. 铁道工程学报, 2014(8): 96.  
TANG Yuchuan, MA Baoren. Research on the flexible car-set operation organization of urban rail[J]. Transit Journal of Railway Engineering Society, 2014(8): 96.

(收稿日期: 2022-03-14)

(上接第 142 页)

统计分析数据进行综合研判, 进而为维护人员提供全面的分析结果。

## 4 结语

本文提出了跨专业智能运维系统逻辑架构及物理架构设计方案, 重点介绍了跨专业结合部的设备故障诊断分析技术。后续可进一步从以下两方面拓展研究: 一方面进一步研究实现跨专业应急场景下的指挥及组织, 以提升复合化、多职能运维模式下的协同效率; 另一方面可基于海量的多专业运维数据, 利用大数据及人工智能技术对数据特征进行深度挖掘, 研究跨专业设备运维的规律, 为城市轨道交通运维智能化提供更科学的可量化的决策依据。

## 参考文献

- [1] 张俊. 轨道交通智能运维系统应用探讨[J]. 智能建筑与智慧

城市, 2020(5): 70.

- ZHANG Jun. Discussion on the application of intelligent operation and maintenance system in rail transit[J]. Intelligent Building & Smart City, 2020(5): 70.
- [2] 吕平. 城市轨道交通智能运维的研究与应用[J]. 工程建设与设计, 2020(12): 251.  
LYU Ping. Research and application of intelligent operation and maintenance of urban rail transit[J]. Construction & Design for Project, 2020(12): 251.
- [3] 郑敬醒. 城市轨道交通信号专业智能运维的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2021(15): 175.  
ZHENG Jingxing. Application of intelligent operation and maintenance of urban rail transit signal discipline[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2021(15): 175.

(收稿日期: 2022-05-20)