

基于车辆深度融合的列车自动运行系统

王玉冰 高 天

(中车青岛四方车辆研究所有限公司, 266000, 青岛)

摘 要 **[目的]** 传统 ATO (列车自动运行) 系统与车辆牵引系统/制动系统之间并没有建立直接、实时、双向的数据交互, 在控车过程中无法获取车辆的牵引/制动状态和能力信息, 进而导致 ATO 系统发出的控制指令可能与车辆实际能力不匹配、控制周期长、停车精度低等问题, 需要将 ATO 系统和车辆系统进行深度融合。**[方法]** 阐述了传统 ATO 系统的工作原理及存在不足。提出了基于车辆深度融合的列车自动运行系统 (以下简称“融合 ATO 系统”), 论述了融合 ATO 系统在系统架构、信息传输、车辆接口及系统功能等方面的融合优化措施。将传统 ATO 系统和融合 ATO 系统进行对比, 对融合 ATO 系统的优势进行了分析。**[结果及结论]** 融合 ATO 系统取消了 ATO 系统与车辆牵引系统/制动系统之间的中转环节, 减少了通信链路, 使得二者之间的信息传输更加丰富和透明。融合 ATO 系统可充分发挥车辆系统和信号系统各自的特性和优势, 增强 ATO 系统与牵引系统/制动系统间的配合度, 提高整体控车效果。

关键词 城市轨道交通; 列车自动运行系统; 车辆系统; 融合设计

中图分类号 U284.48

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.04.044

Automatic Train Operation System Based on Vehicle Deep Integration

WANG Yubing, GAO Tian

(CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., 266000, Qingdao, China)

Abstract **[Objective]** Conventional ATO (automatic train operation) systems lack a direct, real-time, and bidirectional data exchange with the vehicle traction/braking systems. In the vehicle control process, information on the vehicle traction/braking status and capabilities is not available, which can lead to issues such as control commands from the ATO system not aligning with actual vehicle capabilities, long control cycles, and low parking precision, calling for a need to achieve deep integration between ATO and vehicle systems. **[Method]** The working principle and limitations of conventional ATO systems are discussed. The ATO system based on deep vehicle integration (hereinafter referred to as Integrated ATO) is introduced. The integration optimization measures of the Integrated ATO

system in terms of system architecture, information transfer, vehicle interfaces, and system functionality are elucidated. A comparative analysis is conducted between conventional and Integrated ATO systems to highlight the advantages of the latter. **[Result & Conclusion]** The Integrated ATO system cancels the interlink between ATO and vehicle traction/braking systems, reduces communication links to enhance richness and transparency of information transfer between them. The Integrated ATO system leverages the characteristics and advantages of both the vehicle and signaling systems, enhancing the coordination between ATO system and traction/braking systems, thereby improving overall control effectiveness.

Key words urban rail transit; ATO system; vehicle system; integration design

1 概述

1.1 研究背景

ATO (列车自动运行) 系统是城市轨道交通列车运行控制系统的重要组成部分。在 ATP (列车自动防护) 系统的安全防护及 ATS (列车自动监控) 系统的指挥监督下, ATO 计算列车控制指令, 并将指令发送给车辆系统, 车辆系统按照控制指令完成对列车的自动运行控制。随着计算机技术、控制技术及通信技术的不断发展, 城市轨道交通列车运行控制系统也随之不断更新迭代, 其对 ATO 系统的功能和性能提出了更高的要求^[1-4]。

传统的 ATO 系统通常集成在信号系统的车载列车运行控制单元中, ATO 系统与车辆牵引系统、车辆制动系统之间没有建立直接的实时数据交互, ATO 系统计算的车辆牵引/制动指令需通过 ATP 系统转发给车辆的 CCU (中央控制单元), 再由 CCU 二次转发给车辆牵引/制动系统。此外, ATO 系统也无法实时获取车辆牵引/制动系统的状态和能力信息, 而是间接地通过测速定位设备获取列车的速度、位置及加速度等信息, 并基于这些信息对列车运行速度进行控制和调整。此方案虽然能够实现

ATO 系统的基本功能,但存在以下不足:

1) ATO 系统生成的牵引/制动控制指令通过 ATP 系统先发送给 CCU;CCU 统一接收并进行判断后,将指令转发给牵引/制动系统予以执行,控制周期较长。

2) ATO 系统无法获取牵引/制动系统的实时状态和能力,这可能会导致控制指令与车辆实际控制能力不匹配,进而产生过牵引(或欠牵引)、过制动(或欠制动)及停车精度低等问题。

3) 部分车载非安全输入/输出硬线电路在信号系统和车辆系统中重复设置,导致整车电路较为冗杂,不利于提升列车电路的可靠性。

4) 没有充分发挥信号系统和车辆系统各自的优势和性能,不利于实现 ATO 系统与牵引系统、制动系统之间的协同配合。

1.2 融合设计目标

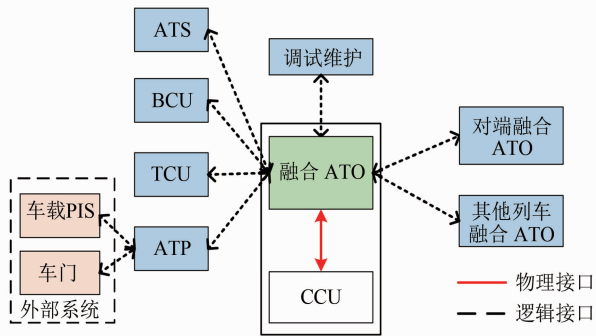
为解决上述问题,本文提出了基于车辆深度融合的列车自动运行系统(以下简称“融合 ATO 系统”),对传统 ATO 系统作进一步的优化与改进。融合 ATO 系统充分考虑了冲击率、牵引/制动转换次数、停车精度等指标,采集车辆的牵引/制动系统实时反馈的列车载重信息、牵引/制动能力与状态信息、指令反馈信息等。基于这些信息,融合 ATO 系统可在线实时生成最优 ATO 目标速度曲线并优化该目标速度曲线的跟踪策略,进而提高 ATO 系统的性能(主要包括 ATO 下的列车运行速度、冲击抑制水平及定点停车控制等)。

2 融合设计方案

2.1 架构融合

在传统的 ATO 系统架构中,ATO 系统通常集成在信号系统的车载控制单元中。与车辆深度融合后,ATO 系统不再集成于信号系统的车载控制单元中,而是作为独立模块集成在车辆的 CCU 中。融合后的 CCU 机箱内各板卡间直接采用安全通信协议的内部高速总线实现互联,CCU 和外部设备间则通过采用安全通信协议的外部总线实现互联。融合 ATO 系统的系统结构如图 1 所示,硬件结构如图 2 所示。

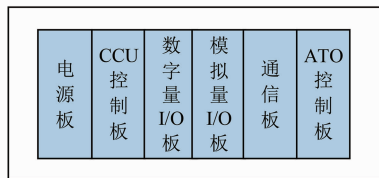
1) 融合 ATO 系统作为独立模块,集成在头车和尾车的 CCU 中,整车构成了双机热备冗余结构。CCU 通过背板为融合 ATO 系统提供通信接口及电源。



注:TCU—牵引控制单元;BCU—制动控制单元;PIS—乘客信息系统。

图 1 融合 ATO 系统的系统结构

Fig. 1 Diagram of Integrated ATO system architecture



注:I/O—输入/输出。

图 2 融合 ATO 系统的硬件结构示意图

Fig. 2 Diagram of Integrated ATO system hardware structure

2) 融合 ATO 系统不再设置对外硬线或网络接口,ATO 系统与其他系统(ATP、TCU、BCU 等)间的通信由 CCU 统一负责。

融合 ATO 系统生成的控制指令可以直接发送给车辆的牵引系统和制动系统,不再需要经由 ATP 系统转发,进而避免了 ATP 系统与 CCU 系统间因通信信息传输延时导致的牵引/制动控制指令滞后下发、滞后执行等问题,缩短了闭环控制周期,提高了系统的控制精度。

2.2 信息融合

与车辆深度融合后,融合 ATO 系统可以充分发挥架构融合的优势。利用 CCU 对外通信通道,基于以太网总线实时通信的特点,融合 ATO 系统实现了与 ATP 系统、车辆牵引系统、车辆制动系统间的信息透明传输。在既有传输数据基础上,融合 ATO 系统新增的数据有两部分:①车辆系统向融合 ATO 系统传输的信息,主要包括牵引/制动状态、牵引/制动可用率、牵引/制动实际作用力、滑行信息、空转信息及控制指令反馈等;②融合 ATO 系统向车辆系统传输的信息,主要包括牵引/制动指令、牵引/制动级位、运行工况、巡航指令、巡航速度、精确停车目标距离及目标速度、精确停车区间线路条件等。

与车辆深度融合后,可以使各系统间互相提供更为丰富的状态、控制信息,因此,融合 ATO 系统能最大程度地发挥车辆系统和信号系统的特性和优势,充分利用车辆牵引系统和车辆制动系统实时反馈的状态信息、能力信息、控制指令反馈信息、实际牵引力/制动力等信息,在线实时生成最优 ATO 目标运行曲线并优化目标速度跟踪控制策略,进而提高 ATO 系统控车的相关性能,提升列车运行速度,减少牵引/制动切换次数。

2.3 车辆接口融合

传统的列车电路中涉及了大量与车载列车运行控制单元相关的输入/输出继电器接口硬线信号。这些信号中,有很多是与车辆系统的硬线电路重复设置的,这导致列车电路复杂度增加。

融合 ATO 系统取消了与传统 ATO 系统相关的非安全输入信号、非安全输出信号的采集电路和传输电路,改由 CCU 系统通过 RIOM(远程输入输出模块)进行统一采集,再通过网络传输至融合 ATO 系统中。融合 ATO 系统与车辆接口示意图如图 3 所示。

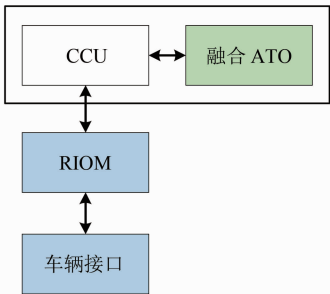


图 3 融合 ATO 系统与车辆接口示意图

Fig. 3 Diagram of interface between Integrated ATO system and vehicle

与 ATO 系统功能相关的输入信号和输出信号均为非安全关键信号。与车辆深度融合后,按照下述原则对这些信号进行整合设计:①安全关键信号(主要是 ATP 安全输入信号和 ATP 安全输出信号)保留传统的继电器接口,仍由车载信号系统负责采集;②与 ATO 功能相关的非安全关键信号不再采用继电器接口和电流环,而改为网络接口。与车辆系统融合后,与 ATO 功能相关的接口信息由 CCU 通过 RIOM 采集并传输至融合 ATO 系统中,此类信息主要包括列车车门控制模式选择信号、ATO 牵引/制动指令、ATO 牵引/制动级位、开门指令、关门指令等。

采用车辆接口融合的方式,可以在保证安全和基本功能的前提下,减少列车硬线电路,简化列车硬线

信号需求,降低列车电路的复杂度,提高列车电路的可用性和可靠性。

2.4 功能融合

在传统 ATO 系统中,ATO 系统负责在 ATP 系统的安全防护和 ATS 系统监督指挥下计算列车控制指令,车辆的牵引系统和制动系统负责按照 ATO 系统发送的控制指令完成对列车的控制(包括启动、加速、巡航、惰行、减速及制动停车的全过程)。在列车运行控制过程中,ATO 系统并没有考虑牵引系统和制动系统的实时状态和控制能力。

融合 ATO 系统充分发挥了各系统间信息融合的优势,对传统 ATO 系统的功能进行了优化,并重新分配 ATO 系统与牵引系统/制动系统的功能界限。

2.4.1 控制策略优化

融合 ATO 系统不仅可以从 ATP 模块获取 EB(紧急制动)限制速度、MA(移动授权)等信息,还可以从牵引系统和制动系统实时获取状态信息、能力信息、控制指令反馈信息、实际牵引/制动力大小等信息,进而利用这些输入信息在线实时生成最优的 ATO 目标速度曲线,并且根据状态实时调整牵引/制动控制指令,优化控制精度。

2.4.2 定点停车控制

在定点精确停车过程的低速阶段,融合 ATO 系统负责计算目标停车曲线及目标停车点距离等信息,并将这些信息发送给牵引/制动系统。牵引/制动系统收到停车控制权接管指令后,结合电制动和空气制动的状态及转换信息,完成定点停车控制。

2.4.3 巡航控制

融合 ATO 系统可以在列车大幅欠标情况下,或者列车在检修库/站间平直区间内运行时,控制列车进入低速/高速巡航控车阶段。融合 ATO 系统判断是否需要进入低速/高速巡航控制阶段,并向牵引系统发送巡航指令及巡航速度。牵引系统选择最有节能效果的牵引控制量,控制列车满足巡航速度控制要求,以减少不必要的过牵引。

2.4.4 滑行检测及控制

融合 ATO 系统可以实时获取牵引/制动系统发送的车轮滑行信息和空转信息。当列车在区间运行时,融合 ATO 系统周期性检测到车轮滑行/空转信息超过一定数量时,若此时已经施加了牵引/制动控制指令,则融合 ATO 系统将控制牵引/制动系统,使其不再增大牵引/制动级位,以减轻列车的滑行/空

转程度,并使列车尽快恢复至正常运行状态。

3 融合 ATO 系统的优势分析

1) 融合 ATO 系统计算的控制指令可直接发送给牵引系统和制动系统执行,不再需要其他系统进行转发,从而减少了通信链路,缩短了控制周期,提高了控制精度。

2) 融合 ATO 系统可实时获取牵引系统和制动系统反馈的状态和能力等信息,并用于优化 ATO 目标速度曲线和跟踪控制策略,使得计算的控制指令与车辆实际控制能力更为匹配,提升了 ATO 系统的控车能力和乘客的乘坐舒适性。

3) 融合 ATO 系统取消了与传统 ATO 系统相关的非安全输入信号、非安全输出信号的采集电路和传输电路,减少了与车辆系统重复设置的硬线电路,降低了列车电路的复杂度,进一步提升了列车电路的可靠性。

4) 融合 ATO 系统优化了既有 ATO 系统功能,重新分配了 ATO 系统与牵引系统/制动系统的功能界限,能够最大程度发挥车辆系统和信号系统的特性和优势。此外,融合 ATO 系统增强了 ATO 系统与牵引/制动系统间的配合度,优化了定点停车效果,降低了列车能耗,提升了整体控车效果。

4 结语

ATO 系统最本质的功能是代替司机的大部分操作,使列车行驶实现自动化,而实现列车自动运行控制的核心在于能够实时计算列车目标速度,跟踪目标速度所需的牵引/制动指令及级位大小,并将控制指令输出给车辆。车辆执行机构响应控制指令并做出相应的控制动作。ATO 系统相当于列车走行控制的“大脑”,而车辆的牵引和制动系统负责执行命令,即相当于“四肢”,二者之间的协同、紧密配合是实现列车自动运行的关键。

基于此,本文提出了基于车辆融合的 ATO 系统的新架构,该新架构主要在系统架构、信息传输、车

辆接口、系统功能等方面进行了融合与优化。与传统的 ATO 系统架构相比,融合 ATO 系统最大优势在于不再需要 ATP 进行中转,可以减少“大脑”与“四肢”之间通信链路,缩短通信延时。融合 ATO 系统的第二个优势是使得 ATO 系统与车辆牵引/制动系统之间的传输数据更加丰富、透明,增强了 ATO 系统与牵引系统和制动系统之间的配合度。此外,融合 ATO 系统使得信号系统和车辆系统之间的分工更加清晰,信号系统负责实现与行车安全相关的防护功能,车辆系统负责实现控车功能,这可以充分整合信号系统和车辆系统资源,发挥各自的特性和优势,提高整体控车效果。

参考文献

- [1] 夏庭锴,崔科. 城市轨道交通下一代 CBTC 系统发展展望[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(5): 43.
XIA Tingkai, CUI Ke. Prospect for the development of CBTC system in the next generation[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(5): 43.
- [2] 徐启禄. 基于车车通信的 CBTC 系统关键技术研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(5): 110.
XU Qilu. Key technology research on CBTC system based on vehicle-vehicle communication[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(5): 110.
- [3] 汪小勇. 城市轨道交通基于车车通信的列车自主运行系统探讨[J]. 中国铁路, 2020(9): 77.
WANG Xiaoyong. Discussion on train autonomous circumambulate system based on vehicle-to-vehicle communication in urban rail transit[J]. China Railway, 2020(9): 77.
- [4] 姜坚华,崔科. 城市轨道交通列车运行控制系统的发展方向[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(11): 6.
JIANG Jianhua, CUI Ke. Development trend of urban rail transit train control system[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(11): 6.

· 收稿日期:2021-11-02 修回日期:2021-12-21 出版日期:2024-04-10
Received:2021-11-02 Revised:2021-12-21 Published:2024-04-10
· 通信作者:王玉冰,工程师,wangyubing.ss@errgc.cc
· ©《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 228 页)

- [4] 李海新,胡禹峰,屈海洋,等. 深圳地铁 11 号线车辆辅助交流供电系统控制研究与设计[J]. 电力机车与城轨车辆, 2015, 38(5): 20.

LI Haixin, HU Yufeng, QU Haiyang, et al. Auxiliary AC power supply control design of Shenzhen Metro Line 11 vehicle[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2015, 38(5): 20.

· 收稿日期:2022-09-29 修回日期:2022-12-30 出版日期:2024-04-10
Received:2022-09-29 Revised:2022-12-30 Published:2024-04-10
· 通信作者:杨博,高级工程师,lyyangbo@outlook.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