

城市轨道交通牵引计算仿真平台设计*

耿鹏 刘霞 袁重阳

(通号城市轨道交通技术有限公司, 100070, 北京)

摘要 [目的] 在城市轨道交通项目设计初期, 为了能够较准确的评估信号系统的运行指标, 满足工程需求, 有必要设计一套牵引计算仿真平台。[方法] 该平台依托实际 ATO (自动列车运行) 算法, 设计了一套牵引计算仿真平台, 可以对城市轨道交通信号系统的旅行速度、追踪间隔等指标进行评估。模拟了一套简化的 CBTC (基于通信的列车控制系统), 包括运行计划制定、移动授权计算、安全控制模型输出, 并最终自动生成牵引计算的 CAD (计算机辅助设计) 图纸, 内容涵盖速度曲线、线路坡道、线路平面、追踪间隔等。[结果及结论] 实现了仿真平台与控车算法库的集成。通过接口设计, 有效提取 ATO 算法的关键参数, 便于在不同项目应用中实施灵活调整。平台架构涵盖数据管理、逻辑运算、图表展示三大模块, 且平台配备直观易用的交互界面, 涵盖运营参数配置、列车参数设定、线路参数设定、追踪间隔计算、速度-距离曲线展示等功能, 便于用户直接操控各环节。尽管仿真运行周期可按需调整, 但动力学模型的计算周期仍维持与实际一致。

关键词 城市轨道交通; 信号系统; 牵引计算; ATO 算法
中图分类号 TP391.9; U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.03.049

Design of Traction Calculation and Simulation Platform for Urban Rail Transit

GENG Peng, LIU Xia, YUAN Chongyang

(CRSC Urban Rail Transit Technology Co., Ltd., 100070, Beijing, China)

Abstract [Objective] At the initial stage of urban rail transit projects, it is essential to design a traction calculation simulation platform to accurately evaluate the operational indicators of the signaling system and meet engineering requirements. [Method] Based on a practical ATO (automatic train operation) algorithm, a platform is designed to assess indicators such as operating speed and headway in urban rail transit signaling systems. A simplified CBTC (communication-based train control) system is simulated, incorporating operational planning formulation, movement authorization computation, safety control model outputs, and the automated generation of traction

calculation CAD (computer-aided design) drawings. These drawings include details on speed curves, track gradients, track layout, and headway intervals. [Result & Conclusion] The integration of simulation platform and train control algorithm library is successfully achieved. Key parameters of the ATO algorithm are effectively extracted through interface design, facilitating flexible adjustments for different project applications. The platform architecture comprises three main modules: data management, logic processing, and graphical display. It is equipped with an intuitive and user-friendly interface that supports operations such as configuring operational parameters, setting train and track parameters, calculating headways, and displaying speed-distance curves. This design enables users to directly control each stage of the process. Although the simulation running cycle can be adjusted as needed, the computation cycle of the dynamics model remains consistent with real-world operations.

Key words urban rail transit; signaling system; traction calculation; ATO algorithm

目前, 牵引计算研究的焦点主要集中在两大领域: 一是车辆系统的牵引与制动性能^[1-2]; 二是信号系统的控车算法^[3-4]。然而, 关于两者融合且符合实际产品性能的运算平台的研究却鲜有报道。这一现象主要归因于设计阶段与信号实现阶段的相对独立, 导致系统能力的评估往往只能停留在粗略层面^[5]。牵引计算作为确定牵引质量、运行速度、运行时分及能量消耗等运营指标的关键手段^[6], 在信号系统工程设计的初期阶段, 通过列车牵引计算仿真的方法来验证系统是否满足用户需求, 已成为一种有效的验证途径^[7]。

城市轨道交通信号系统能力分析, 旨在既定的线路条件、车辆类型等基础设施和行车组织方案下, 对信号系统所能提供的最大行车能力进行深入的分析与评估。其中, 追踪间隔和旅行速度是衡量信号系统能力的主要指标^[8]。旅行速度指的是列

*北京市科协金桥工程种子资金项目 (ZZ22010)

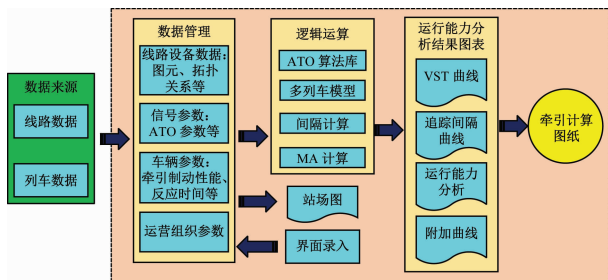
车在正常运营状态下的全线平均速度,而追踪间隔则是指列车运行过程中,在同一地点同向连续运行的列车间的时间间隔,这一间隔涵盖了每个轨道区段和折返区段。

能力分析评估流程主要包括 2 个步骤:首先,需整理线路、车辆、信号控制参数等输入数据;其次,利用牵引计算仿真平台,计算列车的运行状况,包括速度-距离曲线、时间-距离曲线以及时间-速度曲线,从而得出旅行速度。在此基础上,结合信号系统的安全控制模型,进一步计算出 CBTC(基于通信的列车控制)和 ITC(点式列车控制)的追踪间隔。

1 框架设计

在计算行车能力时,获取单车的速度运行曲线是基础中的基础。该曲线与真实信号系统运行曲线的吻合程度越高,所得结果的准确性也就越高。理论上,在完整的 CBTC 系统测试环境中,让列车沿线路运行一遍即可获取该曲线,但在实际操作中却面临诸多困难。一方面,在设计初期,各产品的详细数据往往难以获取,且数据配置工作繁琐,完成所有产品的数据制作与调试需要耗费大量时间,因此短期内给出评估结果并不现实;另一方面,由于各系统软件均按照预设时间运行,每次全线运行耗时较长,而在计算过程中可能需要频繁调整参数,这无疑增加了工作难度。

因此,仿真平台采用了实际运营线路的 ATO(自动列车运行)算法,且该算法库可根据不同线路实际 ATO 产品的算法变化进行更新,从而确保计算结果与实际运行曲线高度一致。此外,平台还采用了动态仿真的方式,并允许调整仿真周期,以缩短仿真时间,同时以直观界面的形式向用户展示列车运行状态。仿真平台的框架设计如图 1 所示。



注：VST 曲线为速度-距离-时间关系曲线。

图 1 框架设计

Fig. 1 Framework design

整个框架主要由数据管理、逻辑运算、运行能力分析 3 个部分组成。

1.1 数据管理

以线路数据和列车数据为基础数据源,分为 4 类:

线路设备数据:主要包含绘图图元、区段拓扑关系、道岔和信号机属性等。这些设备以站场图的方式进行绘制,易于观察。

信号参数:主要是 ATO 算法中的所需的参数设置,如 ATO 的运行等级、EB(紧急制动)计算模型参数及铁电参数等。

车辆参数:主要是仿真车辆模型所需的参数,如牵引制动性能(加速度)、反应时间等。

运营组织参数:主要设置列车运行场景,如运行路径、站停时间、跳停设置等。

以上参数除了通过数据库获取外,常用参数也可通过界面的方式进行录入。

1.2 逻辑运算

该部分包含 4 个方面:

1) ATO 算法部分封装了实际 ATO 产品的核心算法。ATO 控车算法的关键输入参数涵盖列车位置信息、MA(移动授权)信息、线路详情以及配置参数,而其输出则包括级位指令与命令速度等。其调用流程见图 2。

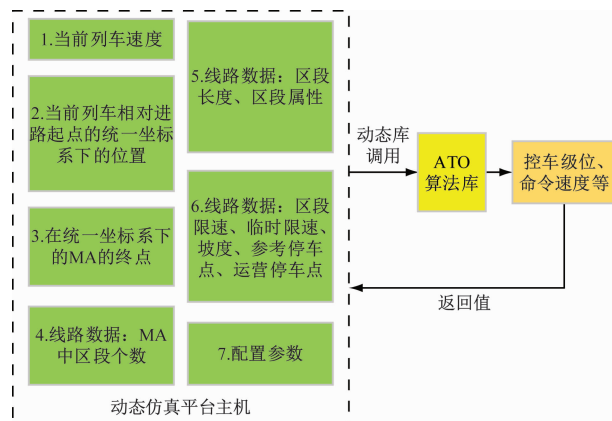


图 2 调用流程

Fig. 2 Calling process

2) 单/多车模型部分专注于车辆仿真,涵盖牵引力与制动力的计算、阻力评估、加速度与速度的计算、列车位置的动态推进、折返换端控制逻辑、站停时间的处理机制、列车运行数据的存储以及多车辆间的时钟同步校正。

3) 间隔计算模块依据单车运行曲线数据,对

CBTC 追踪间隔与点式追踪间隔进行精确计算。

4) MA 计算模块在列车运行期间,实时计算列车前方的 MA,并将该信息即时传递给 ATO 算法进行处理。

1.3 运行能力分析结果图表

根据上述计算的结果,进行图表化展示,包括 VST 曲线、追踪间隔曲线、运行能力分析(各区间运行时间、旅行速度、预告应答器位置计算、信号机位置计算等)。最后将主要指标导出到牵引计算图纸中。

2 软件实现

2.1 算法设计

2.1.1 CBTC 间隔计算

采用“反推法”策略,在给定路径与运行曲线条件一致的情况下(如图3所示),针对前车运行曲线上的任意点 P ,将该 P 点设定为前车当前位置参考点,并附加一定的可配置余量,以确定出最为严苛的危险点 P' 。随后,在 P' 点之前,寻找最接近的 Q 点,确保 Q 点能够通过 ATO 的常用制动减速策略安全抵达 P' 点。在此基础上,再次引入一定的可配置余量,以确定 Q' 点的位置。最终, P 点与 Q' 点在曲线上的时间距离,即构成了该点的追踪间隔时间。

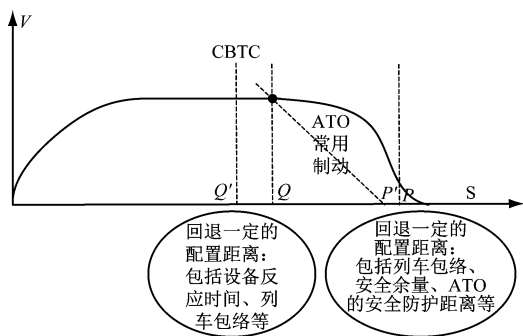


图3 CBTC 间隔计算示意图

Fig. 3 Diagram of CBTC interval calculation

在完成所有点的相应计算后,选取所得结果中的最大值作为整个过程的追踪间隔。以正线区间内任意地点 i 的设计追踪间隔计算为例(见图4),具体流程阐述如下:

1) 单车运行仿真结束后,可获取列车在任意地点的位置、速度及时间信息;

2) 将单车车头运行至地点 i 时的位置、速度及时间分别标记为 s_i, v_i, t_i ;

3) 依据空间间隔条件,确定后车可追踪的最近

位置 j ;

4) 记录单列车车头运行至位置 j 时的位置、速度及时间,分别标记为 s_j, v_j, t_j ;

5) 地点 i 的设计追踪间隔 H_i 由 t_i 与 t_j 的差值确定,即 $H_i = t_i - t_j$;

6) 若存在固定闭塞区域(该区域内仅允许一列车运行),则在计算安全余量回缩时需将该区域纳入考量。

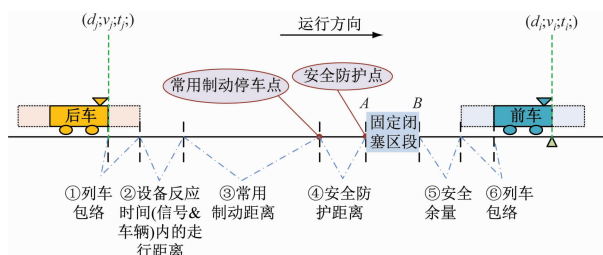


图4 追踪间隔组成

Fig. 4 Component of tracking interval

2.1.2 点式间隔计算

图5为 ITC 间隔计算示意图。

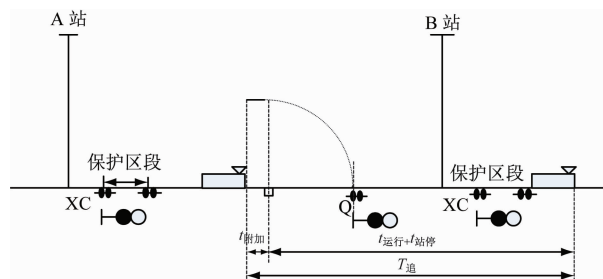


图5 ITC 间隔计算示意图

Fig. 5 Diagram of ITC interval calculation

点式追踪间隔的计算依据进路为单位展开,最终选取各计算结果中的最大值作为整个运行过程中的追踪间隔标准。以图5所示进路,即从信号机 Q 至 B 站出站信号机 XC 为例,列车追踪间隔时间 $t_{\text{追}}$ 的计算公式为: $t_{\text{追}} = t_{\text{运行}} + t_{\text{站停}} + t_{\text{附加}}$ 。其中, $t_{\text{运行}}$ 为列车头部自“进路的预告应答器”起始,至尾部完全离开“进路末端信号机保护区段”(若不存在保护区段,则以终端信号机位置为准)所需的时间; $t_{\text{站停}}$ 为列车在 B 站的停靠时间; $t_{\text{附加}}$ 为涵盖设备响应时间、信号开放时间及司机确认时间。

2.2 工作流程

依据设计框架,仿真平台的工作流程设计可遵循以下:

1) 从数据库中提取数据,构建包含计轴设备、

区段划分、道岔配置、车辆信息及 ATO 等关键要素的模型体系。

2) 制定运行方案,确定列车的起始站点及其运行路径。

3) 设定相关参数,包括 ATO 站台追踪功能的启用状态、固定闭塞区域的配置,以及线路和道岔的限速标准。

4) 创建仿真列车实例,并集成 ATO 算法。根据 ATO 算法输出的控制级别,结合预设的级别与加速度/减速度映射表,实现对列车运行的精确控制。

5) 在运行过程中记录速度-距离数据点,并将这些信息存储起来,以备后续分析使用。

6) 对所有记录的数据点进行追踪间隔的计算,并将计算结果以曲线图的形式呈现。

7) 将速度-距离曲线、追踪间隔曲线等关键信息,按照标准化的格式输出至 CAD 图纸上,便于进一步的审查和应用。

3 仿真验证

根据前文算法章节设计并实现了一套适用于牵引计算仿真平台软件,并采用某实际站场环境进行验证。

3.1 单车运行曲线

综上所述,平台基础功能是仿真单车运行曲线,追踪间隔计算的准确性依赖单车运行曲线。因此以该实际线路作为测试场景进行模拟。单车运行曲线软件截图如图 6 所示。在运行曲线部分,图例的排列顺序从上至下依次为:V-T 曲线(ATO 系统的时间-速度曲线)、ATOLevel 曲线(ATO 系统输出的级位变化曲线)、EB 曲线(紧急制动触发速度的曲线)、COMD 曲线(ATO 命令下的速度曲线)、MRSP 曲线(最高限制速度的曲线)及 WARN 曲线(ATO 系统发出的报警速度曲线)。

同时,为了验证仿真结果的准确性,采集了现场真实跑车的数据进行对比分析。以上行的 14 个站点为例,将仿真运行结果与现场数据进行了详细对比,具体对比结果如表 1 所示。

经对比分析,仿真结果与实际数据的偏差总体上较小,大部分偏差控制在 2~3 s 之间。偏差产生的主要原因包括:

1) 仿真模型中列车的反应时间难以与实际运营情况保持一致;

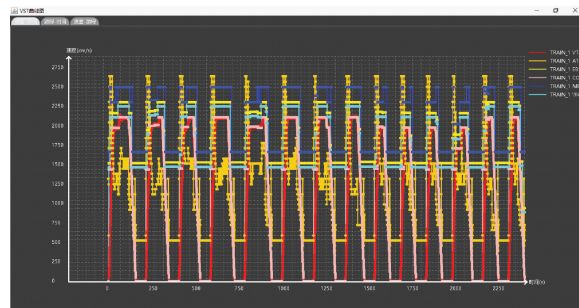


图 6 单车运行曲线软件截图

Fig. 6 Software screenshot of single vehicle operation curves

表 1 运行结果对比

Tab. 1 Comparison of operation results

| | 车站上行方向 | 仿真软件 区间运行 时间/s | 现场值 | 计算与 现场偏 差/s |
|----|---------------------|----------------------|-----|-------------------|
| 1 | 纺织城站—香王站 | 158.0 | 161 | -3.0 |
| 2 | 香王站—灞柳二路站 | 135.0 | 138 | -3.0 |
| 3 | 灞柳二路站—田王站 | 124.2 | 127 | -2.8 |
| 4 | 田王站—洪庆站 | 142.2 | 144 | -1.8 |
| 5 | 洪庆站—紫霞三路站 | 159.4 | 162 | -2.6 |
| 6 | 紫霞三路站—凤凰池站 | 126.0 | 128 | -2.0 |
| 7 | 凤凰池站—鹦鹉寺公园站 | 127.8 | 130 | -2.2 |
| 8 | 鹦鹉寺公园站—芷阳广场站 | 110.4 | 113 | -2.6 |
| 9 | 芷阳广场站—西工程大· 西科大站 | 92.4 | 96 | -2.6 |
| 10 | 西工程大·西科大站— 西花园站 | 90.4 | 94 | -3.2 |
| 11 | 西花园站—华清池站 | 94.0 | 97 | -3.0 |
| 12 | 华清池站—东三岔站 | 119.6 | 122 | -2.6 |
| 13 | 东三岔站—银桥大道站 | 92.8 | 97 | -4.2 |
| 14 | 银桥大道站—秦陵西站 | 93.8 | 96 | -2.2 |

2) 仿真中对于坡度、阻力等参数的计算,相较于实际现场环境,存在一定的不可避免的偏差;

3) 实际列车多次运行测试中,各区间的时间也可能存在一定的偏差。然而,所有区间的仿真运行时间均短于现场测试时间。基于此,后续研究可利用多条线路的测试结果,探寻其中的规律并进行相应的校正(例如,统一将仿真时间增加 2 s),以期使仿真结果更加贴近实际情况。

3.2 牵引计算图纸

基于间隔计算理论,所得结果被统一导出至 CAD 图纸中。该图纸主要由以下组成部分构成:运行曲线、坡度信息、途径信号机位置以及追踪间隔

曲线,具体图示见图7。在运行曲线部分,图例的排列顺序从上至下依次为:V-S曲线(ATO系统的速度-距离曲线)、Tsec-S曲线(时间与路程关系的曲线)、MRSP曲线(最高限制速度的曲线)、EB-S曲线(紧急制动触发速度的曲线)、COMD曲线及WARN曲线。

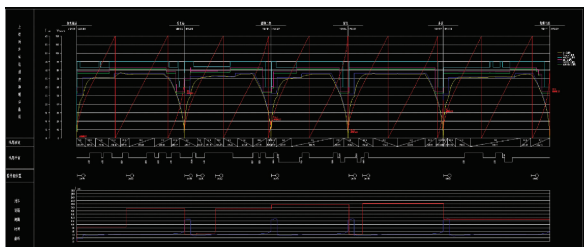


图7 图纸输出截图

Fig.7 Screenshot of drawing output

4 结语

本文阐述了一种牵引计算仿真平台的设计架构及其核心功能,并基于实现的主要算法进行了仿真验证。仿真结果表明,该设计平台通过采用信号系统实际的ATO控制算法,确保了仿真结果与实际运行之间的差异极小。平台以信号平面图作为核心输入,并辅以关键参数的设定,能够支持CBTC和ITC下的仿真运行及追踪间隔计算。这一平台为线路工程设计、在轨运营线路计划的调整及运营能力的评估提供了重要的参考依据。

参考文献

- [1] 张喜茂,孙丛君. 一种全局优化混合动力牵引计算仿真软件[J]. 城市轨道交通研究,2024,27(6):250.
ZHANG Ximao, SUN Congjun. A hybrid power traction calculation and simulation software with global optimization approach[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(6):250.
- [2] 杨欣,马忠.《列车牵引计算规程》粉末冶金闸瓦相关参数的研究[J]. 铁道机车车辆,2019,39(5):83.

- YANG Xin, MA Zhong. Research on parameters of powder metal-lurgy brake shoe in railway train traction calculation[J]. Railway Locomotive & Car, 2019, 39(5):83.
- [3] 谢树庆. 城市轨道交通CBTC系统运行能力优化研究[J]. 自动化仪表,2022,43(8):137.
- XIE Shuqing. Study on optimization of operation capacity of urban rail transit CBTC system[J]. Process Automation Instrumentation, 2022, 43(8):137.
- [4] 辛亚江. 高速铁路列车到达追踪间隔的优化研究[J]. 铁道运输与经济,2024,46(6):8.
- XIN Yajiang. Optimization research on train arrival tracking intervals of high speed railway[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(6):8.
- [5] 徐意. 基于CBTC的城市轨道交通运行仿真平台设计[J]. 铁道通信信号,2017,53(9):75.
- XU Yi. Operation simulation platform design for CBTC-based urban rail transit[J]. Railway Signalling & Communication, 2017, 53(9):75.
- [6] 何晔,胡彩凤,吴能峰,等. 地铁车辆牵引仿真计算[J]. 铁道机车车辆,2015,35(6):63.
- HE Ye, HU Caifeng, WU Nengfeng, et al. Simulation calculations of metro tractions[J]. Railway Locomotive & Car, 2015, 35(6):63.
- [7] 杨海鹏,薛巧丽. 牵引计算在轨道交通特定项目中的应用及研究[J]. 控制与信息技术,2021(1):46.
- YANG Haipeng, XUE Qiaoli. Application and research of traction calculation in specific project of rail transit[J]. Control and Information Technology, 2021(1):46.
- [8] 武云霞,李兆龄. 城市轨道交通信号系统能力分析及优化措施[J]. 铁路通信信号工程技术,2019,16(12):60.
- WU Yunxia, LI Zhaoling. Capacity analysis and optimization measures of signal system in urban rail transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2019, 16(12):60.

• 收稿日期:2022-11-24 修回日期:2023-05-11 出版日期:2025-03-10
Received:2022-11-24 Revised:2023-05-11 Published:2025-03-10
• 通信作者:耿鹏,高级工程师,genpeng@crcsu.com.cn
• ©《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

敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解读和评述,是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

