

面向列车群的运行仿真平台关键技术研究

武建平, 傅寿华, 李 宪

中国铁路设计集团有限公司交通运输规划研究院, 天津
Email: 15114205@bitu.edu.cn

收稿日期: 2021年7月3日; 录用日期: 2021年7月20日; 发布日期: 2021年7月26日

摘 要

重点研究了面向列车群的运行仿真平台搭建技术。基于面向列车群的运行仿真平台需求分析, 将整个系统划分为数据结构化存储与维护模块、仿真基础建模、列车运行仿真(列车牵引计算模块、车站作业仿真模块、区间运行仿真模块)、运行计划生成与优化模块、指标统计分析模块和仿真过程可视化展示模块等主要功能模块; 然后搭建了面向列车群的运行仿真平台架构及数据流程; 最后针对车站到发线运用核心问题构建了数学优化模型。通过上述工作, 仿真平台可真实有效地实现列车群的追踪运行。该平台可进行单列车牵引计算、多列车追踪运行、列车延误及其传播特点分析、影响追踪间隔因素分析等相关技术领域。

关键词

高速铁路, 列车群, 运行仿真, 到发线运用, 通过能力

Research on Key Technologies of Train Group-Oriented Operation Simulation Platform

Jianping Wu, Shouhua Fu, Xian Li

Institute of Transport Planning, China Railway Design Corporation, Tianjin
Email: 15114205@bitu.edu.cn

Received: Jul. 3rd, 2021; accepted: Jul. 20th, 2021; published: Jul. 26th, 2021

Abstract

The focus is on the construction technology of the train group-oriented operation simulation plat-

form in this paper. Based on the demand analysis of the train group-oriented operation simulation platform, the whole system is divided into data structured storage and maintenance module, simulation basic modeling, train operation simulation (train traction calculation module, station operation simulation module, section operation simulation module), operation plan generation and optimization module, index statistical analysis module and simulation process visualization display module and other main functional modules; then build the train group-oriented operation simulation platform architecture and data flow; finally build mathematics for the core problems of the station arrival and departure line optimize the model. Through the above work, the simulation platform can truly and effectively realize the tracking operation of the train group. The platform can carry out single-train traction calculations, multi-train tracking operations, analysis of train delays and their propagation characteristics, analysis of factors affecting tracking intervals, and other related technical fields.

Keywords

High-Speed Railway, Train Group, Operation Simulation, Arrival and Departure Line Utilization, Passing Capacity

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

截止到 2020 年底, 全国高速铁路运营里程达 3.8 万公里, 基本形成了“八纵八横”高速铁路网; 全路配备复兴号动车组 1036 列, 基本覆盖各条繁忙干线, 中国高速铁路发展取得举世瞩目的成就。其中, 在新建线路设计、既有线改造、新车型性能测试、列车运行控制新方法评估等工作的开展过程中, 均离不开海量实验数据的获取和分析, 然而直接开展大规模现场实验是不可能实现的, 因此需要通过计算机搭建仿真平台来代替。基于此, 国内外诸多专家学者进行了大量的研究[1] [2] [3] [4], 也取得了较多的研究成果。国外主要关注于铁路路网能力仿真、客运线网优化仿真、列车运行节能节时策略、车辆结构仿真、轮轨关系仿真等专题仿真研究方面。例如 Kyriakos Tsiflakos 等人开发一个可以将铁路网地理布局图数据转化为仿真数据进行建模的铁路仿真系统。C. J. Goodman 等人给出了列车运行、电力供应系统和牵引驱动模型, 并成功地应用在列车速度控制、能耗计算、运行时分计算等方面。M. Abirl 等人研究了在速度、停站、列车种类、停站间距等参数的影响下, 铁路信号机和运行图鲁棒性对通过能力的影响。国内的研究重点包括列车运行仿真、仿真建模方法、编组站运营系统仿真等多个方面[5]。例如鲁工圆等人基于运输组织理论、系统工程理论开发高速铁路车站仿真软件, 用于车站设计、运行管理以及员工培训等[6] [7] [8]。贾利民等人使用专家系统技术方法建立了复杂混合系统的智能仿真模型, 并基于广深铁路进行了分析, 利用惰行工况控制列车在满足站间运行时分的情况下精准停车的可行方法, 运用遗传算法对列车惰行点进行求解, 并通过单车模拟仿真来验证求解过程的可行性和求解效果苗建瑞研究了车站到发及调车作业模拟模型, 并结合列车运行系统和信号系统连接, 形成了列车接发与调度模拟实验系统[9] [10]。目前主要形成以 OpenTrack、RailSim、TrainStart 等为代表的铁路仿真软件应用实践。综合分析既有成果, 主要存在以下的不足: 1) 现有研究更多的集中于列车运行控制策略, 而对线路基础模型研究较少, 提高线路模型精度, 可提升仿真结果的准确度; 2) 大多研究集中于既有普速铁路, 而对高速轮轨铁路、高速磁浮等研究缺乏; 3) 主要是数据计算为目的, 较少考虑实景效果和实时性; 4) 面向列车群的

运行控制研究较少。鉴于此，本文将从上述薄弱环节入手，对面向列车群的运行仿真平台的关键技术进行深入研究，以期对我国高速铁路列车运行仿真领域的发展起到促进作用。

2. 仿真平台需求分析及功能划分

通过分析仿真平台的需求，对仿真平台的功能模块进行优化分割。

1) 面向列车群的运行仿真平台搭建会涉及海量数据，对仿真输入数据、仿真过程数据以及仿真结果数据的储存与维护会占用大量空间，实现数据结构化储存与维护功能是仿真平台需要具备的首要功能。

2) 为了提升仿真平台的精度，仿真平台应在线路基础建模、列车模型编组等基础模型的建立上下功夫，提高线路数据的数学抽象表达精度，完善机车车辆的性能数据。

3) 仿真平台应可实现单列车牵引计算，也可实现多列车的追踪运行；应可模拟车站技术作业，也可实现线网列车运行模拟。

4) 仿真平台虽以运行图为输入进行仿真模拟，但实际仿真过程通过列车运行环境可以反映出既定运行图的不合理之处，实现运行计划的优化。

5) 通过仿真平台的搭建，能够实现从多个维度多个角度对线路区间通过能力进行分析，以及寻找压缩列车群最小追踪间隔的有效途径等功能，因此，仿真结果的输出与图形化展示是仿真平台搭建的目的之一。

6) 为直观表现列车群的仿真过程，仿真平台需要具有可视化展示功能。

根据上述需求分析，面向列车群的运行仿真平台的系统功能划分如下图 1 所示。



Figure 1. Schematic diagram of the functional structure of the simulation platform for train groups

图 1. 面向列车群的仿真平台功能结构示意图

本文中的仿真平台软件采用了模块化的设计，每个模块都可以独立的实现整个仿真平台中的一项功能，而在仿真过程中所生成和用到的数据都储存到了数据库之中，程序的模块之间通过设计好的接口函数进行数据的交互。铁路车站计算机联锁仿真系统的接口有外部接口和内部接口。内部接口主要是仿真

系统自身三大功能模块之间的信息交互,本仿真系统由人机界面处理模块、联锁逻辑关系运算模块、站场设备状态设置模块组成,各功能模块之间设有数据传递接口。外部接口主要是本仿真系统与本站列控中心(TCC)、与邻站联锁仿真系统 CBI 之间的信息交互。通过功能模块和接口合理设计,使得仿真平台简洁高效。

3. 仿真平台数据流程及架构设计

面向列车群的运行仿真平台应以线路基础模型、列车模型、运行计划及策略为输入,在数据中心集中控制下,根据仿真时钟,每列动车组作为智能体实时从数据中心获取外部环境数据,然后调用列车动力学模型进行计算,并更新列车数据返回数据中心,同时实时地将仿真过程通过显示模块进行显示,仿真过程结束后将输出仿真结果,应包括 VS 曲线、实际运行图、各车站股道占用情况、运营统计数据等。列车群与数据中心的数据交换应采用 TCP/IP 连接实现,如图 2 所示。

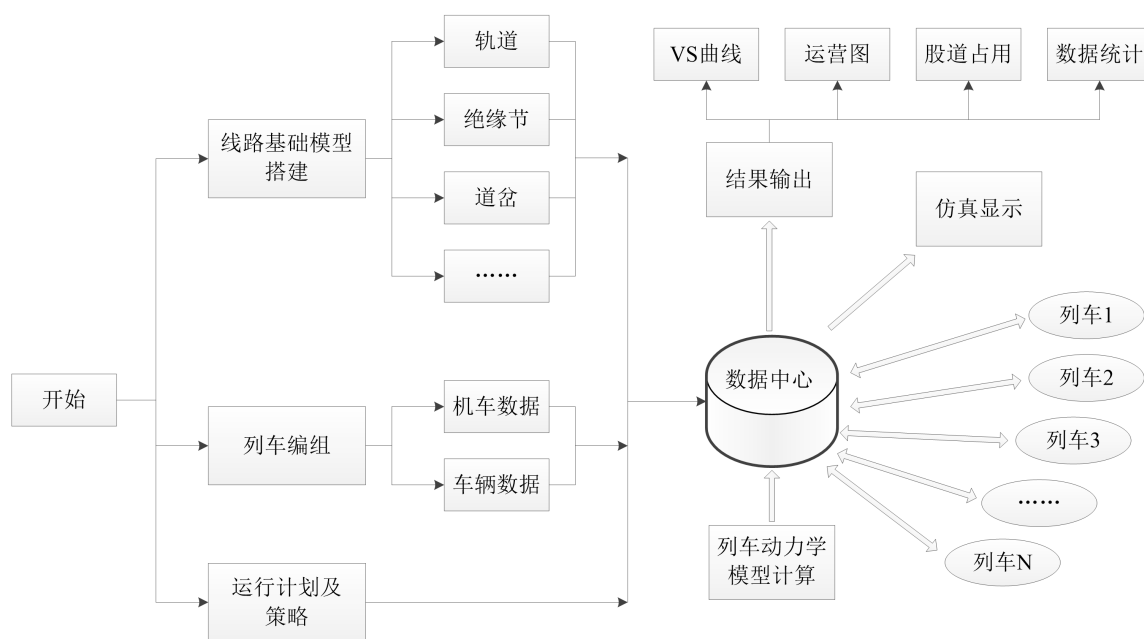


Figure 2. Schematic diagram of the data flow and architecture of the simulation platform for train groups
图 2. 面向列车群的仿真平台数据流程及架构示意图

在该架构中,列车群追踪运行仿真模型主要分为线路基础模型搭建和列车智能体模型。通过两类模型的分别搭建和有效耦合,使得仿真平台能够真实反映出列车群追踪运行过程。

此外,为了使车站计算机联锁仿真系统更好地实现联锁功能,将仿真系统分为三层结构,人机交互层、逻辑层、设备模拟层。人机交互层实现铁路车站站场图的绘制、信号设备实时状态显示、命令操作,逻辑层根据操作命令、信号设备实时状态,进行逻辑运算,设备模拟层实现信号设备驱动命令仿真执行、信号设备故障模拟等功能。因此仿真平台由人机界面处理、联锁逻辑关系运算、站场设备状态设置三大功能模块组成。本文主要针对联锁逻辑关系运算功能模块进行设计。

4. 关键技术探讨

车站到发线的合理使用是提高车站通过能力和车站作业效率的重要途径,是仿真平台搭建中非常关键的核心模块。为了确保行车安全,一般到发线都是按固定使用原则确定,暂不考虑不固定使用条件下

的到发线运用。对于新建车站，在给定的到发线数量条件下，要尽量减少到发线使用条数。此外，到发线的使用要尽量满足均衡使用的目标。

首先需要定义决策变量：

x_m^t ，双态决策变量，当第 m 车次在 t 时刻开始占用第 n 条到发线时取 1，否则取 0；

s_m^t ，双态决策变量，当第 m 车次在 t 时刻占用着第 n 条到发线时取 1，否则取 0。

对于尽量减少到发线使用条数，可用下式表示：

$$\min Z_1 = \sum_{n=1}^{|N|} \min \left\{ \sum_{m=1}^{|M|} \sum_{t=1}^{|T|} x_m^t, 1 \right\} \quad n, m \in N^+ \quad (1)$$

对于到发线的均衡使用目标，可用各条到发线占用时间方差最小表示：

$$\min Z_2 = \sum_{n=1}^{|N|} \left(\sum_{m=1}^{|M|} \sum_{t=1}^{|T|} \Delta_m x_m^t - \frac{1}{Z_1} \sum_{m=1}^M \Delta_m \right)^2 \quad n, m \in N^+ \quad (2)$$

其中， N 表示到发线集合， $|N|$ 表示到发线数量； M 表示车站一昼夜接发的车次集合， $|M|$ 表示车次数量； T 表示仿真时间戳集合， $|T|$ 表示除综合维修天窗外的时间长度； Δ_m 表示第 m 车次占用到发线的时间。

此外，在车站接车进路分段解锁条件下，为了提高车站接车的效率，相邻两车次应尽量停靠不同线束的到发线。

如下图 3 树状图所示，车站上行方向有编号为 1、2、3、4 共四条到发线，其中到发线 1 和 2 隶属于线束 a，到发线 3 和 4 隶属于线束 b，则到发线 1 和 2 的距离可记为 1，到发线 1 和 3 的距离可记为 2，以此类推。

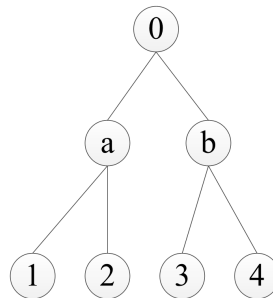


Figure 3. Schematic diagram of the arrival and departure wire harness

图 3. 到发线束示意图

则可通过相邻两车次选择的到发线距离最大实现，即：

$$\max Z_3 = \sum_{m \in M} \zeta_m^{n_1 n_2} \quad \forall x_m^{n_1, t_1} = 1, x_{m+1}^{n_2, t_2} = 1, m \in M, n_1, n_2 \in N, t_1, t_2 \in T \quad (3)$$

其中， $\zeta_m^{n_1 n_2}$ 为到发线 n_1 与 n_2 的距离。

根据实际需求，车站到发线运用还应满足以下约束条件。

在考虑车站接发列车时，一个车次同一时刻只能占用一条到发线：

$$\sum_{n=1}^{|N|} x_m^t = 1 \quad \forall m = \{1, 2, 3, \dots, M\}, t = \{1, 2, 3, \dots, T\} \quad (4)$$

相应的，一条到发线同一时刻至多只能被一列动车组占用：

$$\sum_{m=1}^{|M|} x_m^{nt} \leq 1 \quad \forall n = \{1, 2, 3, \dots, N\}, t = \{1, 2, 3, \dots, T\} \quad (5)$$

到发线一旦被占用,就需要列车完成相应的技术作业或客运作业才能离开,则相应的逻辑约束如下:

$$s_m^{nt} \geq x_m^{nt} + (x_m^{n\tau} - 1)Q \quad \forall t \in [\tau, \tau + \Delta_m^n - 1], m \in M, n \in N, \tau \in T \quad (6)$$

前后两列列车占用到发线需满足最小时间间隔:

$$t_2 x_m^{nt_2} - t_1 x_m^{nt_1} \geq \gamma \quad \forall m \in M, n \in N, t_1, t_2 \in T, t_1 < t_2 \quad (7)$$

其中, γ 表示最小间隔时间。

有上水作业的车次需要占用有上水设备的到发线,数学表达式如下:

$$\sum_{t=1}^{|\Gamma|} \sum_{n \in N_s} x_m^{nt} = 1 \quad \forall m \in M_s \quad (8)$$

其中, N_s 表示具有上水设备的到发线集合, $N_s \subseteq N$; M_s 表示需要上水作业车次集合, $M_s \subseteq M$ 。

通过车站的车次只能占用正线,而有停站作业的车次不能停靠正线:

$$\sum_{t=1}^{|\Gamma|} x_m^{1,t} = 1 \quad \forall m \in M_r \quad (9)$$

$$\sum_{t=1}^{|\Gamma|} x_m^{1,t} = 0 \quad \forall m \notin M_r \quad (10)$$

其中, M_r 表示在车站不停车通过的车次集合, $M_r \subseteq M$ 。

以上式(1)~式(10)构成了车站到发线使用数学优化模型。

通过到发线运用数学优化模型的构建,使得仿真平台更加符合实际需求。

5. 结束语

本文以列车群为对象,分析了仿真平台的需求及其功能结构划分,然后根据列车群运行业务逻辑,构建了平台架构及数据流程,最后针对仿真平台中的到发线运用核心问题构建了数学优化模型,使得仿真平台整体简洁高效,真实有效。该平台可进行单列车牵引计算、多列车追踪运行、列车延误及其传播特点分析、影响追踪间隔因素分析等相关技术领域。

基金项目

中国铁路设计集团有限公司科技开发课题(2019KF220918)。

参考文献

- [1] 唐金金. 基于运行图的高速列车群运行过程全息优化仿真方法与系统研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [2] 潘金山. 基于 GIS 的列车运行仿真系统研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [3] 武建平, 何君礼, 林柏梁, 等. 动车组高级修计划优化模型及算法研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(7): 1-9.
- [4] Wu, J.P., Lin, B.L., Wang, J.X., et al. (2018) A Network-Based Method for the EMU Train High-Level Maintenance Planning Problem. *Applied Sciences*, 8, 2. <https://doi.org/10.3390/app8010002>
- [5] Lin, B.L., Wu, J.P., Lin, R.X., et al. (2019) Optimization of High-Level Preventive Maintenance Scheduling for High-Speed Trains. *Reliability Engineering & System Safety*, 183, 261-275. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.11.028>
- [6] 鲁工圆. 客运专线车站作业仿真系统的研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2007.

-
- [7] 鲁工圆, 彭其渊, 贺东. 基于离散事件系统的客运专线车站作业仿真系统研究[J]. 铁路计算机应用, 2009, 18(1): 5-8.
 - [8] 鲁工圆, 闫海峰, 校磊, 等. 高速铁路车站作业建模及仿真系统研究[J]. 铁道运输与经济, 2013, 35(5): 37-42.
 - [9] 周成晨, 杜文, 王媛媛. 客运专线车站列车接发仿真进路排列算法研究[J]. 铁道运输与经济, 2009, 31(6): 9-13.
 - [10] 刘嫣, 杨浩. 客运专线车站作业计划编制模型与算法研究[J]. 铁道运输与经济, 2008, 30(7): 17-20.