

9-23-2022

Architecture Design and Prototype Verification of Railway Vehicle Dynamics Cloud Platform

Junjie Sheng

State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
shengjj1997@163.com

Zhao Tang

State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
tangzhao@swjtu.edu.cn

Shaodi Dong

State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

Shuyang Wu

State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Architecture Design and Prototype Verification of Railway Vehicle Dynamics Cloud Platform

Abstract

Abstract: Since almost all the software in the railway vehicle field is controlled by foreign capital, it is difficult to catch up with the development of independent vehicle system software based on single machine deployment mode in a short time. In view of this, a set of autonomous and controllable vehicle system dynamics software architecture based on cloud platform is proposed. *Based on the railway vehicle system dynamics and cloud services, a cloud platform with automatic process modeling, cloud computing, post-processing analysis is built.* A simulation model of a trailer car is applied in the platform, and compared with the SIMPACK simulation results to verify the availability and reliability of the platform. The implementation of the platform could replace the commonly used software for railway vehicle dynamics to a certain extent, which can provide reference for the development of similar software.

Keywords

railway vehicle system, autonomous controllable, simulation contrast, dynamic performance, cloud platform

Authors

Junjie Sheng, Zhao Tang, Shaodi Dong, Shuyang Wu, and Hao Liang

Recommended Citation

Junjie Sheng, Zhao Tang, Shaodi Dong, Shuyang Wu, Hao Liang. Architecture Design and Prototype Verification of Railway Vehicle Dynamics Cloud Platform[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(09): 2056-2064.

铁道车辆动力学云平台架构设计及原型验证

盛俊杰, 唐兆*, 董少迪, 吴舒扬, 梁浩

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 现阶段铁道车辆动力学领域的基础仿真软件多为单机模式, 基于单机模式开发追赶国外先进仿真软件短时间难以达到, 鉴于此, 提出一套基于云平台的自主可控的车辆系统动力学软件架构。依据车辆系统动力学理论, 依托云服务, 搭建拥有自动化流程建模、云计算、后处理分析等功能的平台。在此基础上建立拖车仿真模型, 并与 SIMPACK 仿真计算结果进行对比研究车辆动力学性能, 验证平台的可用性和可靠性。平台的实现在一定程度上可以替代常用的铁道车辆动力学软件, 可为同类型软件的开发提供参考。

关键词: 车辆系统动力学; 自主可控; 仿真对比; 动力学性能; 云平台

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2022) 09-2056-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0379

Architecture Design and Prototype Verification of Railway Vehicle Dynamics Cloud Platform

Sheng Junjie, Tang Zhao*, Dong Shaodi, Wu Shuyang, Liang Hao

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Since almost all the software in the railway vehicle field is controlled by foreign capital, it is difficult to catch up with the development of independent vehicle system software based on single machine deployment mode in a short time. In view of this, a set of autonomous and controllable vehicle system dynamics software architecture based on cloud platform is proposed. Based on the railway vehicle system dynamics and cloud services, a cloud platform with automatic process modeling, cloud computing, post-processing analysis is built. A simulation model of a trailer car is applied in the platform, and compared with the SIMPACK simulation results to verify the availability and reliability of the platform. The implementation of the platform could replace the commonly used software for railway vehicle dynamics to a certain extent, which can provide reference for the development of similar software.

Keywords: railway vehicle system; autonomous controllable; simulation contrast; dynamic performance; cloud platform

引言

随着列车的不断提速, 轮轨之间的作用力会急剧增大, 这将加剧各运动件的磨耗和振动, 降低使用寿命。因此研究车辆系统动力学性能至关重要。当前国内在车辆系统动力学仿真领域所使用的商

业化动力学仿真软件主要包括德国的 SIMPACK^[1-2]、俄罗斯的 UM^[3-5]、美国的 ADAMS^[6-8] 与 NUCARS^[9]、英国的 VAMPIRE 等。由于这些动力学软件的开发基本上来自于国外, 在数据安全、软件供给等方面存在着忧患, 因此亟需面向轨道行业开发自主的动力学仿真软件。

收稿日期: 2021-04-29 修回日期: 2021-08-04

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1711402); 国家自然科学基金(52172407)

第一作者: 盛俊杰(1997-), 男, 硕士生, 研究方向为列车系统动力学仿真和可视化。E-mail: shengjj1997@163.com

通讯作者: 唐兆(1979-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为列车系统动力学仿真和可视化。E-mail: tangzhao@swjtu.edu.cn

国内铁路领域的研究人员和机构不断致力于研发自主可控的车辆系统动力学仿真软件。自 1992 年西南交通大学 VICT^[10]开始, 到 1997 年同济大学基于 MATLAB/SIMULINK 搭建的动力学仿真程序^[11], 2004 年以 VILT 为基础开发的 TTISIM^[12], 2012 年大连交通大学的列车空气制动与纵向动力学集成仿真^[13], 以及 2014 年西南交通大学的 TPLWRSim^[14]等动力学仿真软件相继得到开发, 但是这些仿真软件的开发基本上处于铁路行业的早期阶段, 应用模式为单机环境, 在数据仿真计算、迁移等方面存在缺乏并行计算、数据共享、多平台访问等功能模块的问题。随着互联网技术的不断发展与成熟, 逐渐形成了面向用户提供基础服务、中间件、数据服务等功能的平台服务, 改变了传统的单机构架环境部署模式, 为工业领域^[15-17]提供新的服务模式。本文依托车辆-轨道耦合动力学^[18], 交叉融合开源云计算技术^[19], 自主设计一套兼具高效、数据共享的车辆系统动力学仿真云平台。

对车辆系统动力学进行数值分析的高效的方法是计算机仿真, 本文设计了一个集成数值计算、数据管理和图形界面三大模块仿真平台, 通过利用 C++ 语言运行高效性的特点自主开发建立高效的数值分析算法, 解决数据读取, 存储, 快速求解算法等关键问题。通过利用云平台终端灵活的特点, 实现用户硬件共享、流程自动化建模、多平台数据访问, 最后以 Python 为基础进行数据管理, 展示后处理数据结果, 完成对平台的搭建, 有利于对本行业自主可控软件的支撑与借鉴。

1 系统架构设计

云平台系统基于“共用数据层, 解耦逻辑层”的设计思想, 采用层次化、模块化的设计模式, 开发用户图形界面模块、仿真计算模块和后处理计算模块。考虑动力学求解中包含了大量的积分求解、矩阵、向量等运算, 目前现有的开源函数库无法满足需求, 因此在数值计算层自主开发数值积分, 线性、非线性代数方程求解, 以及矩阵计算、基础函数运

算库, 通过建立惯性(Inertia)、标记点(Marker)等类构成车体模型, 与轨道类(Track)、轮轨类(WrContact)等类组合为大系统, 从而实现仿真计算模块的搭建; 在图形交互层借助 SpringBoot 与 VUE 开源框架高集成、多服务、快速构建项目的优势, 建立数据存储共享, 图形交互, 扩展算法功能模块; 在数据分析层, 自主开发 PostProcessingAcc 等数据分析算法, 并利用开源绘图工具类(Numpy、Pyplot)进行绘图以及结果显示等功能, 完成从仿真计算、后处理计算、图形界面的云平台搭建。系统框架如图 1 所示。

1.1 数值计算层

车辆系统的复杂结构、高自由度决定了底层对于数据处理高性能的需求。当前底层求解器借助 C++ 运行高效性的特点进行编写, 建立矩阵、向量、积分求解算法 RK4、Newmark 等通用功能类, 用于积分求解位移、速度、轮轴力等多体动力学参数。

设置底层算法框架时主要考虑以下 3 个方面: ①尽量解耦避免出现后续处理复杂模型时存在增加自由度困难的问题; ②便捷读取数据, 用于增加跨语言通用性; ③输出数据, 便于数据的后续处理分析。

仿真计算模块通过自主设计的函数建立数据模型读取接口, 采用哈希的存储管理子模块的数据; 通过 C++ 面向对象进行车辆部件的单元计算模块的开发, 为最终耦合整个车辆系统提供功能模块的支撑。

1.2 数据分析层

稳定性、安全性、平稳性作为评定机车车辆在线路上动力学性能的重要指标, 需要强大的图形处理模块功能, 进行数据处理。而 Python 作为一种语法简洁清晰、具有强大的数据库的语言, 能有效满足对动力学指标的数据处理。整个数据分析框架分为 3 层: 逻辑层、仿真数据处理层、单元模块计算层。数据分析框架的结构和作用是: 在系统完成

仿真计算后,进行数据分析时,通过预留的数据输出接口,获取动力学仿真数据,并结合车辆系统动力学性能指标的算法,进行自主数据开发处理。借助开源代码库(Pyplot)将每一个单元模块数据输出

为相应的时间-位移、时间-速度、时间-力等曲线,与铁道车辆动力学性能的国标进行对比,对动力学参数进行性能的评判与修正,以满足动力学性能的标准。

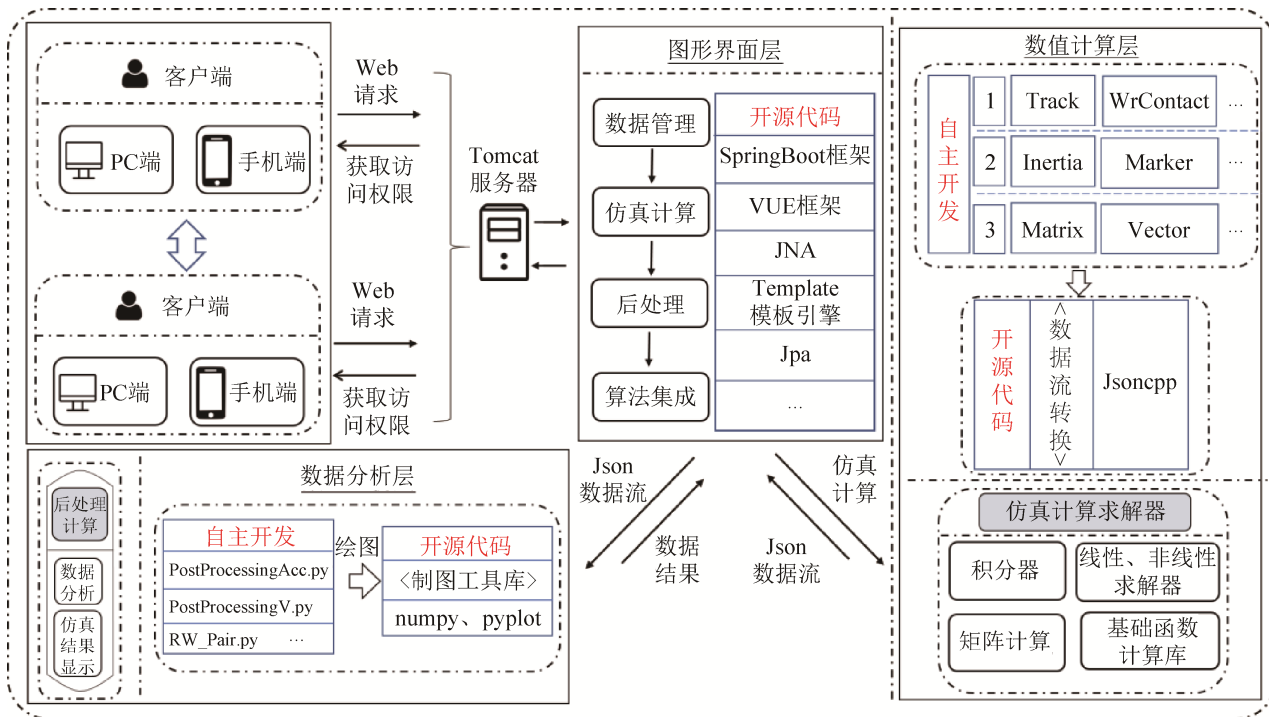


图 1 系统框架图

Fig. 1 System frame diagram

1.3 图形界面层

为满足用户群需求,随时随地进行数据访问计算,采用 SpringBoot+VUE 开源框架建立云仿真平台,实现数据共享、数据管理、数据迁移。项目开发基于 MVC(model view controller)模式,将视图从业务逻辑中进行分离,降低耦合,增加可重用性,使代码更具有结构性、可扩展性,减少后期维护、开发测试的成本。如图 2 所示,该云平台的主界面主要分为建模界面、后处理界面以及功能模块界面。

(1) 建模界面,依赖于数据管理模块,基于其“置换型”的模板引擎,将数值分析的各项前置参数与系统集成,形成流程自动化建模,简约传统动力学软件建模的繁琐流程,加快前处理进程,从而提高动力学仿真建模效率。

(2) 后处理界面,主要集成了后处理模块,用于研究仿真计算数据可视化问题,通过递归算法自主开发设计以“树状图”为模型结构的数据显示仿真结果界面,加快定位后处理数据结果。

(3) 功能模块界面,该模块界面主要包含仿真计算与算法集成模块,其中仿真计算模块利用分布式计算、并行计算技术,并借助 SpringBoot+VUE 框架将各种硬件资源虚拟化,按需使用,为用户提供高效的仿真计算功能,减少单机环境下对 IT 基础设施的高昂费用、安装单机环境带来的问题,满足用户多端访问的需求。而算法集成模块,依托策略模式和开源代码 JNA,实现对自主开发的动态链接库(Dll)算法的集成与封装,满足用户自主上传算法进行集成的功能需求,增加云平台的可扩展性。其整体接口设计如图 3 所示。

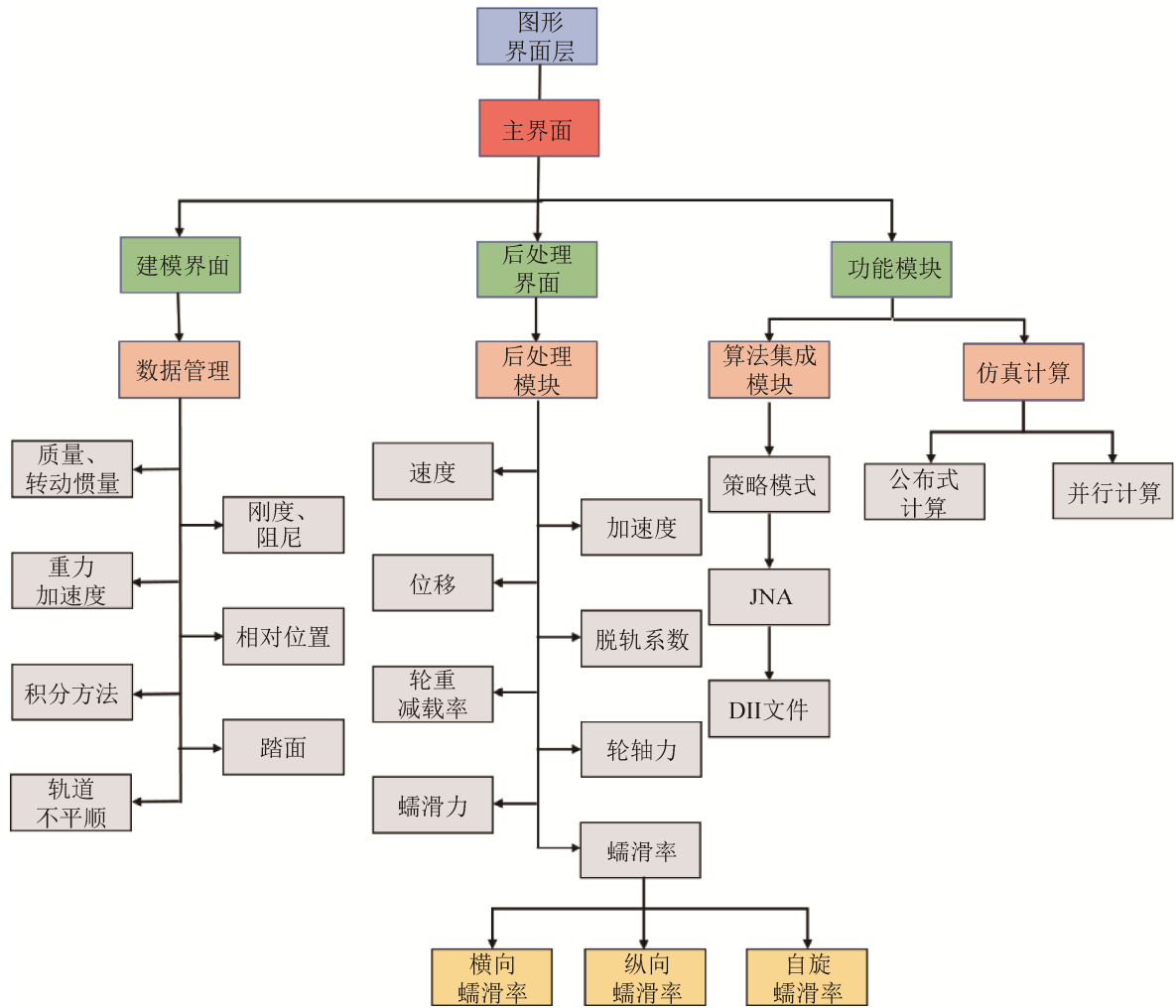


图 2 界面分析
Fig. 2 Interface analysis

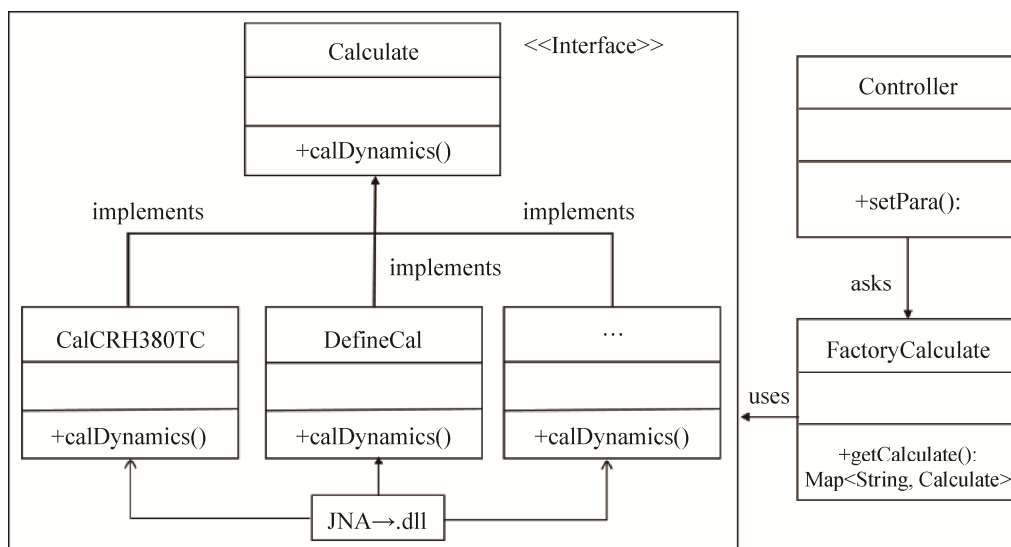


图 3 算法集成设计图
Fig. 3 Algorithm integration design diagram

2 原型系统实现

仿真云平台系统包括服务器端、客户端以及算法模块 3 个部分。客户端由登录系统，用户管理，仿真计算等三大模块组成，其中仿真计算又分为建模界面、后处理结果界面以及功能模块界面等。建模界面用于将建模参数、轨道不平顺等动力学参数上传至服务器端，后处理结果界面用于将计算结果以图像的形式可视化，其客户端的

图形界面展示如图 4、图 5 所示，功能模块界面用于发送仿真计算请求命令以及提供用户自主上传算法。

服务器端主要完成数据计算、数据处理、数据读写等，数据计算利用内嵌的计算模块进行仿真计算；数据处理主要完成对仿真数据的后处理，并以图像的形式传递给客户端；数据读写主要用于存储用户计算结果以及查询往期仿真结果。

铁道车辆动力学云平台

用户管理	编号	类型	里程	曲线半径	曲线长度	过滤曲线长度	超高
<ul style="list-style-type: none"> 员工管理 角色管理 权限管理 	1	直线	0	0	0	0	0
<ul style="list-style-type: none"> 建模界面 车型参数 线路区间 曲线参数 	2	曲线	30	800	300	80	0.07
<ul style="list-style-type: none"> 后处理界面 计算结果 	3	直线	330	0	0	0	0
<ul style="list-style-type: none"> 功能模块界面 计算 算法集成 	4	直线	1000	0	0	0	0

图 4 曲线参数输入界面

Fig. 4 Curve parameter input interface

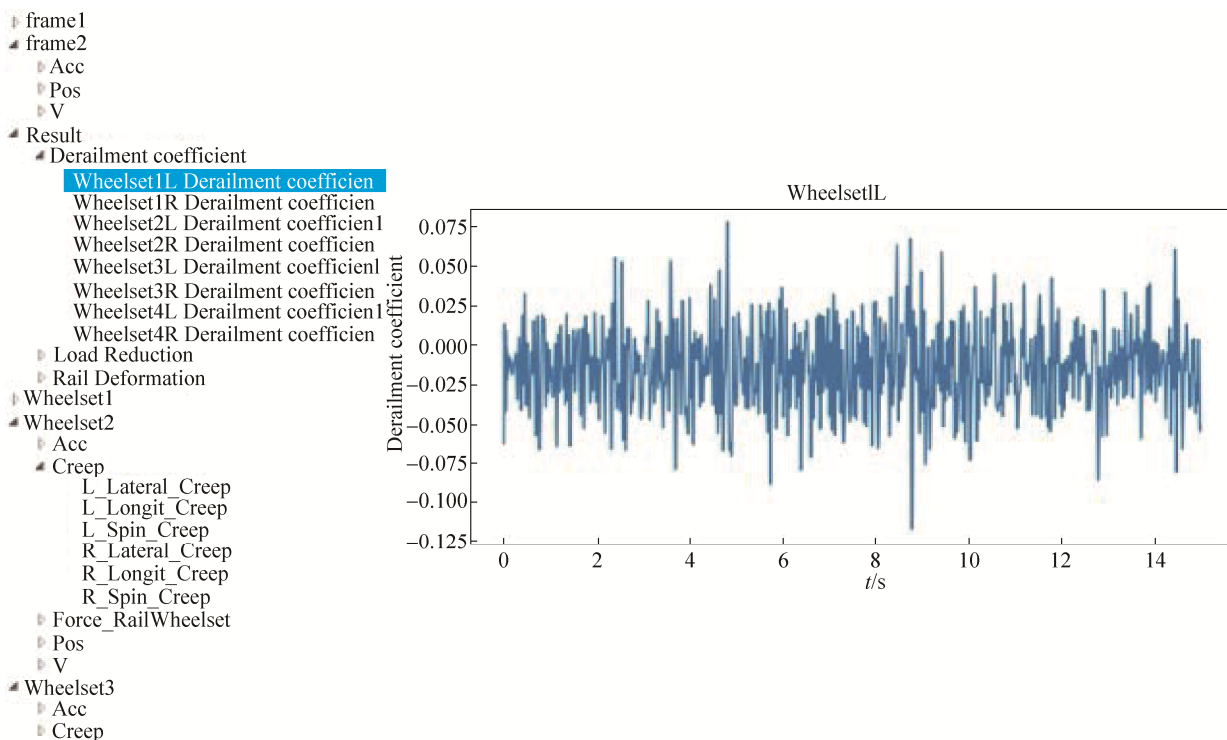


图 5 后处理图形界面

Fig. 5 Post-processing graphical interface

<http://www.china-simulation.com>

平台的仿真计算算法, 其系统模型主要由 1 个车体, 2 个构架和 4 个轮对和 8 个轴箱体组成, 共 15 个惯性体。与 SIMPACK 不同的是系统采用的绝对坐标系建模, 而 SIMPACK 属于相对坐标系建模, 这将导致两者的自由度存在差异。平台车辆模型中车体与构架各拥有 6 个自由度, 而轴箱只拥有点头的自由度, 其他方向的自由度不做设置属于无此自由度。轮对拥有纵向、横向、侧滚、摇头 4 个方向上的自由度, 在垂向与点头上其为非独立自由度, 整个模型共 50 个自由度, 其中 42 个独立自由度 ($1 \times 6 + 2 \times 6 + 8 \times 1 + 4 \times 4$), 8 个为非独立自由度 (4×2); 而 SIMPACK 模型其车体、构架、轮对都拥有全自由度, 轴箱体拥有点头的独立自由度, 其他方向为非独立自由度, 模型共计拥有共 90 个自由度, 其中 50 个独立自由度 ($1 \times 6 + 2 \times 6 + 4 \times 6 + 8 \times 1$), 40 个非独立自由度 (8×5)。在模型处理方面 SIMPACK 轮轨蠕滑力采用 FASTSIM 计算, 轮轨法向力采用的约束法计算, 而本算法的蠕滑力采用了沈氏理论, 轮轨法向力为非线性赫兹弹簧计算。这些差异将导致轮轨接触点选择、轮轨接触求解、空间建模等方法存在一定的差异。

3 算例验证

列车运行的稳定性与平稳性是轨道交通动力学性能最基本的要求之一。在城市轨道交通运行中, 采用脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力、横向加速度、垂向加速度等进行动力学性能指标评定, 其中脱轨系数用于评定车辆的车轮轮缘在横向力作用下是否会发生爬轨现象, 并通过轮重减载率补充脱轨的安全指标, 而轮轴横向力用于评定是否因为过大的横向力导致轨距扩宽或者线路产生严重变形, 横向加速度与垂向加速度通常作为车辆在运行过程中运行品质的衡量标准。

3.1 工况设计

本文对基于自主研发的车辆系统与 SIMPACK 商业软件, 设计 3 种工况进行数据分析对比:

工况 1: 仿真计算在直线线路段, 轨道随机不平顺激励下分别以 38.89、44.44、50、55.5、61.11、66.67 m/s 等^[12]6 个速度等级运营时轮轴横向力平均最大值的对比。

工况 2: 仿真计算时速 75 m/s 的某动车组拖车仿真模型, 选取脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力三项指标, 进行仿真结果分析对比。

工况 3: 仿真计算时速 69.44 m/s 下动车组的横向加速度与垂向加速度, 进行仿真结果分析对比。

3.2 结果分析

工况 1 计算结果见表 1, 主要考察车辆在直线工况运行时, 对比不同速度等级下轮轴横向力平均值。如图 6 所示, 从总体上分析, 不同速度等级范围内, 仿真计算所得数据结果与 SIMPACK 相比, 其轮轴横向力在波形上较为吻合, 但量值上仿真软件的横向力略大于 SIMPACK 的仿真计算值, 造成差别的原因主要在于轮轨接触点选择、轮轨接触求解、空间建模等方法存在一定的差异。

表 1 轮轴横向力平均计算数值

Table 1 Average calculation value of lateral axle force

速度/(m·s ⁻¹)	轮轴横向力/kN	
	SIMPACK	仿真软件
38.89	1.741	4.758
44.44	1.718	5.230
50.00	1.700	5.445
55.50	1.679	5.610
61.11	1.787	5.510
66.67	1.812	5.561

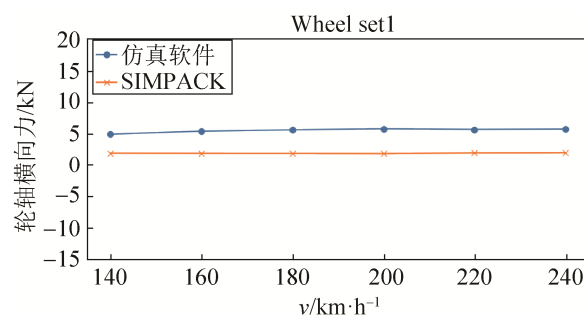


图 6 轮轴横向力平均值对比

Fig. 6 Comparison of average value of lateral axle force

工况2的仿真结果为图7所示,考察轮重减载率,发现其波形、峰值与SIMPACK仿真结果基本吻合,且其峰值小于规定值0.65^[20]。

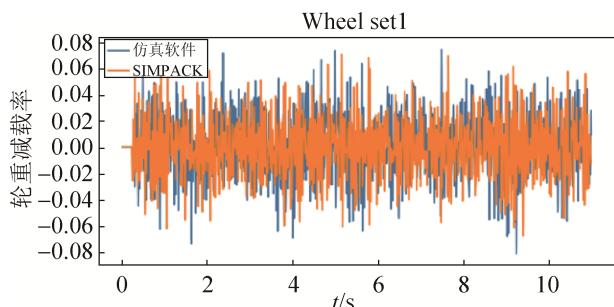


图7 轮重减载率
Fig. 7 Rate of wheel load reduction

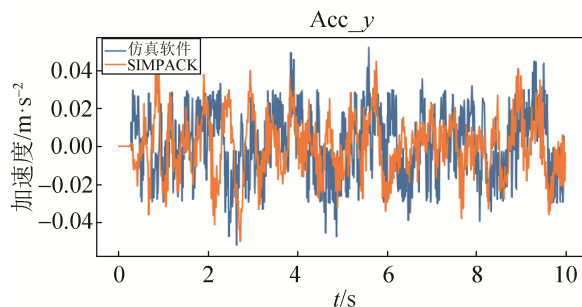
由表2可知,在当前速度等级下,考察脱轨系数可以发现自主研发的车辆系统动力学软件和商业软件SIMPACK其量值存在一定的差异,但差值微小,远小于规定值0.8^[20],对比轮轴横向力,发现其量值比SIMPACK略大,但满足规定的轮轴横向力的限值。因此,仅从车辆运行的稳定性的3个指标来说,其动力学性能满足了指标的需求,且有较大的安全冗余,满足车辆的行驶安全,得出了本软件在一定程度上可以替代SIMPACK部分计算的结论。

表2 直线工况仿真结果对比

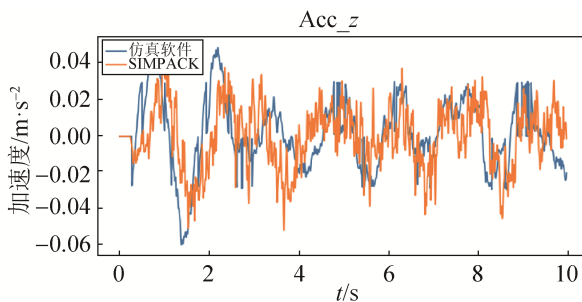
Table 2 Comparison of simulation results of linear working conditions

动力学性能指标	SIMPACK	仿真软件
脱轨系数	0.029	0.095
轮轴横向力/kN	1.87	5.96

工况3主要用于运行平稳性的评定,仿真计算结果如图8所示,其中图8(a)表示横向加速度对比,图8(b)表示垂向加速度对比。该工况主要考察了横向加速度与垂向加速度,对比分析发现其波形趋势以及数量级上基本吻合。此外横向加速度与垂向加速度的幅值均小于平稳性指标 W 的2.50^[20]限值,其最大幅值如表3所示,评定值为优,满足标准规范。因此从车辆运行的平稳性指标上进行分析,可以验证得到平稳性工况满足要求。



(a) 横向加速度



(b) 垂向加速度

图8 加速度对比

Fig. 8 Acceleration comparison

表3 最大幅值加速度比较

Table 3 Comparison of maximum acceleration $m \cdot s^{-2}$

动力学性能指标	SIMPACK	仿真软件
横向加速度	0.050	0.052
垂向加速度	0.052	0.060

4 结论

(1) 提出基于云平台架构的车辆动力学仿真平台,基于该平台实现了自主可控的车辆系统动力学仿真软件。平台的主要优势包括简化数据建模流程;提供并行计算和后处理功能模块;以及实现对数据的管理,满足用户查看仿真计算结果的需求。同时该平台支持算法(DLL)文件的读取,新增系统计算的可扩展功能,为国内其他同类型动力学系统开发提供借鉴。

(2) 通过实例对比,分析数据发现仿真软件计算得到轨道动力学性能指标,均能与SIMPACK仿真结果取得较好的一致性。该软件能够较为准确的模拟列车在直线工况运行下的动力学性能。

(3) 目前该系统支持动车组模型在直线线路上仿真云计算、流程自动化建模、后处理部分动力学

指标分析处理以及自主算法集成模块, 提高了用户求解分析动力学的效率。

(4) 当前原型系统在计算功能模块存在求解功能不完善的情况, 在后续开发中应增添列车曲线工况的仿真计算模块, 扩宽列车车型的求解范围等。此外, 在数据后处理也需添加数据分析绘图子模块, 增强后处理的功能。

参考文献:

- [1] Chang Chao, Ling Liang, Han Zhaoling, et al. High-Speed Train-Track-Bridge Dynamic Interaction considering Wheel-Rail Contact Nonlinearity due to Wheel Hollow Wear[J]. Shock and Vibration (S1070-9622), 2019, 2019: 1-18.
- [2] 李响, 任尊松, 徐宁, 等. 基于转向架悬挂参数与踏面锥度优化的高速车辆动力学性能分析[J]. 铁道学报, 2018, 40(3): 39-44.
Li Xiang, Ren Zunsong, Xu Ning, et al. Dynamic Performance Analysis of High-Speed Vehicle Based on Optimization of Bogie Suspension Parameters and Tread Conicity[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(3): 39-44.
- [3] 戚壮, 梁钰, 王晓雷, 等. 应用于高速轮轨滚动接触的蠕滑理论算法对比研究[J]. 摩擦学学报, 2019, 39(3): 319-329.
Qi Zhuang, Liang Yu, Wang Xiaolei, et al. Comparative Study on the Theory of Creeping Theory Applied to High Speed Wheel-Rail Rolling Contact[J]. Tribology, 2019, 39(3): 319-329.
- [4] 闫一凡, 齐洪峰, 罗林涛, 等. 基于 UM 的高速磁浮车辆刚柔耦合建模及振动传递规律研究[J]. 铁道机车车辆, 2019, 35(5): 59-64, 126.
Yan Yifan, Qi Hongfeng, Luo Lintao, et al. Rigid-flexible Coupled Modeling of High-speed Maglev Vehicle and Vibration Transmitting Research Base on UM[J]. Railways Locomotive & Car, 2019, 35(5): 59-64, 126.
- [5] Gao Mingyuan, Cong Jianli, Xiao Jieling, et al. Dynamic Modeling and Experimental Investigation of Self-Powered Sensor Nodes for Freight Rail Transport[J]. Applied Energy (S0306-2619), 2020, 257: 113969.
- [6] 陈春棉, 刘国伟. 密接式车钩冲击连挂过程仿真研究[J]. 计算机与数字工程, 2021, 49(2): 408-411.
Chen Chunmian, Liu Guowei. Simulation Analysis of the Impact Coupling Process of the Tight-Lock Coupler[J]. Computer & Digital Engineering, 2021, 49(2): 408-411.
- [7] Meng Jianjun, Xu Ruxun, Li Decang. Robust Nonfragile H_{∞} Control of Lateral Semiactive Suspension of Rail Vehicles[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society (S1026-0226), 2019(1): 1-12.
- [8] Wang Yixuan, Chen Enli, Liu Pengfei, et al. A Simplification of Railway Vehicle Lateral Vibration Model Based on LQG Control Strategy[J]. Australian Journal of Mechanical Engineering (S1448-4846), 2018, 16(2): 147-161.
- [9] Xu Jingmang, Gao Yuan, Wang Ping, et al. Numerical Analysis for Investigating Wheel-Rail Impact Contact in a Flange Bearing Frog Crossing[J]. Wear (S0043-1648), 2020, 450: 203253.
- [10] 翟婉明, 孙翔, 詹斐生. 机车车辆与轨道垂向相互作用的计算机仿真研究[J]. 中国铁道科学, 1993(1): 42-50.
Zhai Wanming, Sun Xiang, Zhan Feisheng. Computer Simulation of the Vertical Dynamic Interactions Between Track and Train[J]. China Railway Science, 1993(1): 42-50.
- [11] 沈钢, 曹志礼. 机车车辆动力学集成仿真系统的开发[J]. 铁道车辆, 1997(12): 3-7.
Shen Gang, Cao Zhili. Development of Integrated Simulation System for Rolling Stock Dynamic[J]. Rolling Stock, 1997(12): 3-7.
- [12] 王开云, 翟婉明. 车辆—轨道耦合动力学仿真软件 TTISIM 及其试验验证[J]. 中国铁道科学, 2004(6): 49-54.
Wang Kaiyun, Zhai Wanming. TTISIM Software for Vehicle-Track Coupling Dynamics Simulation and Its Verification[J]. China Railway Science, 2004(6): 49-54.
- [13] 魏伟, 赵旭宝, 姜岩, 等. 列车空气制动与纵向动力学集成仿真[J]. 铁道学报, 2012, 34(4): 39-46.
Wei Wei, Zhao Xubao, Jiang Yan, et al. The Integrated Model of Train Air Brake and Longitudinal Dynamics[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(4): 39-46.
- [14] 干锋, 戴焕云, 高浩. 磨损车轮踏面精确轮轨接触关系计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(3): 43-51.
Gan Feng, Dai Huanyun, Gao Hao. Calculation Method of Accurate Wheel-Rail Contact Relationship of Worn Wheel Tread[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(3): 43-51.
- [15] 汪松松, 彭来湖, 戴宁, 等. 基于工业互联网的针织机械互联互通结构研究[J]. 纺织学报, 2020, 41(1): 165-173.

- Wang Songsong, Peng Laihu, Dai Ning, et al. Research on Knitting Machine Interconnection and Interoperability Structure Based on Industrial Internet[J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(1): 165-173.
- [16] 窦林名, 王盛川, 巩思园, 等. 冲击矿压风险智能判别与监测预警云平台[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2248-2255.
- Dou Linming, Wang Shengchuan, Gong Siyuan, et al. Cloud Platform of Rock-Burst Intelligent Risk Assessment and Multi-Parameter Monitoring and Early Warning[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2248-2255.
- [17] 张志华, 王梦情, 毛文涛, 等. 基于时序相关性的云平台多负载序列联合预测[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(4): 68-75.
- Zhang Zhihua, Wang Mengqing, Mao Wentao, et al. Joint Prediction of Multi-Workload Sequences Based on Temporal Correlation in the Cloud[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 43(4): 68-75.
- [18] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 4版. 北京: 科学出版社, 2015.
- Zhai Wanming. Vehicle-Track Coupling Dynamics[M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2015.
- [19] 段文雪, 胡铭, 周琼, 等. 云计算系统可靠性研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2020, 57(1): 102-123.
- Duan Wenxue, Hu Ming, Zhou Qiong, et al. Reliability in Cloud Computing System: A Review[J]. Journal of Computer Research and Development, 2020, 57(1): 102-123.
- [20] GB/T 5599-2019. 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范[S].
- GB/T 5599-2019. Specification for Dynamic Performance Assessment and Testing Verification of Rolling Stock[S].