

DOI:10.13196/j.cims.2022.08.004

# 基于数字孪生的地铁列车性能评估系统

樊孟杰, 江海凡, 丁国富, 王 兵, 邹益胜<sup>+</sup>

(西南交通大学 先进设计与制造技术研究所, 四川 成都 610031)

**摘 要:**针对当前地铁列车性能评估中存在的评估不全面、数字化程度不足, 评估缺乏时效性和准确性, 评估模式单一导致的评估效率不高等问题, 提出基于数字孪生的地铁列车性能评估系统参考架构, 并从虚实映射的角度, 通过模型映射、行为映射和状态映射 3 个递进层次构建性能评估系统, 全面表达列车性能。进一步, 基于时空环比实现从列车级到部件级的异常精确定位, 设计云边协同的评估模式解决评估效率不高的问题。最后, 对系统进行实现, 验证了所提方法和理论的有效性, 以期对数字孪生在地铁中的应用与推广提供一定的借鉴。

**关键词:**数字孪生; 地铁列车; 性能评估; 虚实映射; 时空环比; 云边协同

**中图分类号:**TP399;U298.1

**文献标识码:**A

## Digital twin-based performance evaluation system for subway train

FAN Mengjie, JIANG Haifan, DING Guofu, WANG Bing, ZOU Yisheng<sup>+</sup>

(Institute of Advanced Design and Manufacturing, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Aiming at the problems such as low evaluation efficiency caused by incompleteness, insufficient digitization, lack of timeliness and accuracy and single evaluation mode in performance evaluation of subway train, a reference architecture for subway train performance evaluation system based on digital twin was proposed. From the perspective of virtual-reality mapping, the system was constructed from three progressive levels that were model mapping, behavior mapping and state mapping, which comprehensively expressed the train performance. Based on the time-space comparison, the abnormality was precisely positioning from the train level to the component level. A cloud-edge collaborative model was designed to solve the problem of low efficiency of train performance evaluation. The system was implemented to verify the effectiveness of the proposed method and theory and to provide a reference for the application and promotion of digital twin in subway.

**Keywords:** digital twin; subway train; performance evaluation; virtual-reality mapping; time-space comparison; cloud-edge collaboration

## 0 引言

地铁是大中城市重要的出行交通工具, 对其进行性能评估、把握实时运行状态、保障其安全运行具有重要意义。近年来, 随着物联网、大数据、人工智能等技术的发展, 智慧地铁<sup>[1]</sup>建设蓝图被推上前沿, 对其中的智能运维模式<sup>[2]</sup>也进行了需求分析和规划。基于该模式, 不少学者设计了地铁列车监测评估体系架构, 阐述了从底层数据采集到顶层列车评估的相关使能技术, 能有效地推进地铁运行从传统的被动安全向主动安全转型<sup>[3-5]</sup>。然而, 随着地铁列

车设备越来越多样化、复杂化、个性化, 对其进行性能评估时将会面临一些问题与挑战, 主要集中于以下 3 方面:

(1) 评估缺乏全面性、数字化程度不足 传统的性能评估多基于数据, 对某一部件进行单方面的状态分析, 以图表形式展示结果, 缺乏对列车及其部件在结构、属性、运行过程等多方面的数字化刻画, 难以全面反映列车性能, 使评估内容不够丰富、评估结果可视化程度也不足。地铁列车结构复杂, 从全路网的角度, 需要明确列车各层级模型之间的关系, 并逐一建立数字化模型, 形成对模型、数据的有效管

收稿日期: 2020-08-11; 修订日期: 2021-03-29. Received 11 Aug. 2020; accepted 29 Mar. 2021.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB1201201)。Foundation item: Project supported by the National Key Research and Development Program, China(No. 2017YFB1201201).

理,以实现数据共享和业务共融。

(2)评估缺乏时效性和准确性 列车性能评估的时效性和准确性是评估结果好坏的重要评判指标。一方面,当前列车性能评估数据源大多以离线数据集或模拟数据为主,时效性不足;另一方面,评估模型缺乏对可变参数的集成,不能自感知动态数据来调整模型参数,模型无法实现迭代优化,从而导致评估结果精度不高。

(3)评估模式单一导致评估效率不高,难以满足多样化、个性化的评估需求 当前列车性能评估模式以“数据采集-车地数据传输-地面数据挖掘与分析”为主。随着车载智能设备多样化、复杂化,各类数据将呈海量增长,该模式下车地协作不充分、评估时效不协调、通讯信道资源和存储资源浪费或不足等造成的系统运行效率低的缺点会逐渐暴露,需要新的车地协作评估模式以适应多样化、个性化的评估需求。

数字孪生(Digital Twin, DT)作为实现虚实之间双向映射、动态交互、实时连接的关键途径,能形成对物理世界高保真的动态多维/多尺度/多物理量观察、认知、控制及改造<sup>[6]</sup>。近年来,数字孪生处于不断的探索阶段。在生产制造领域,数字孪生用于构建工业互联网架构<sup>[7]</sup>以及信息物理系统<sup>[8]</sup>,同时

提出了数字孪生车间<sup>[9]</sup>的概念,并阐述了其演化机理<sup>[10]</sup>;在产品设备运维方面,数字孪生用于设备的在线监测、寿命预测以及维护优化<sup>[11-14]</sup>;在医疗领域,数字孪生用于搭建虚拟药品质量控制实验室,以优化设备、人员效益,降低成本<sup>[15]</sup>。

上述研究表明,数字孪生在数字化领域中解决问题更加全面、逼真、系统、实时、高效。因此,本文结合性能评估中存在的问题与挑战,将数字孪生应用于列车性能评估系统中,提出列车虚实映射构建方案,通过数字孪生下的虚实映射数字化手段全面表达列车性能,并在此基础上建立列车异常定位方法和性能评估模式,为解决性能评估中存在的问题提供一定借鉴。

## 1 系统参考架构

数字孪生在面向不同的应用对象时,具体的系统构建方式不同,结合地铁列车性能评估需求和陶飞教授等<sup>[16]</sup>提出的数字孪生五维模型,构建如图 1 所示的基于数字孪生的地铁列车性能评估系统参考架构,该架构总体分为 5 部分:

(1)物理空间 从全路网的角度,为使评估具有全面性,系统应当能实现对任意线路上任意列车的

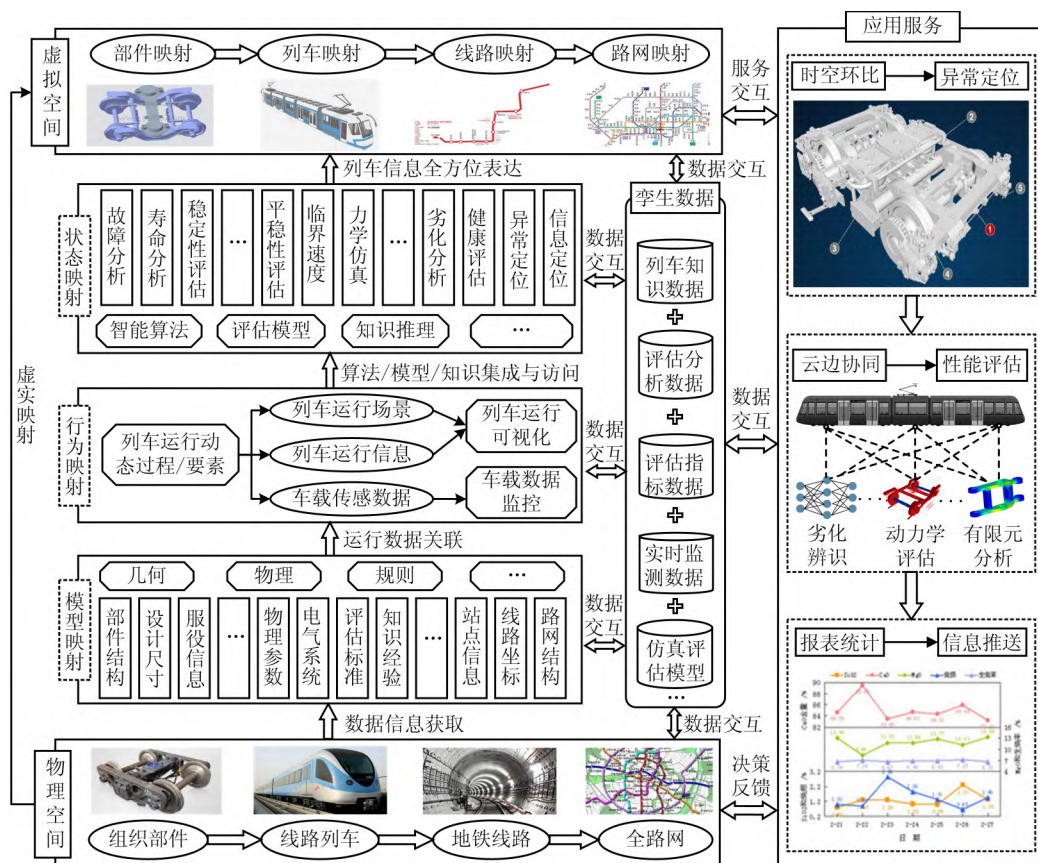


图1 系统参考架构

评估,物理空间则要包括从列车单元级部件到系统级列车,再到复杂系统级线路或路网的各层级物理实体及其属性信息。在列车运行过程中,物理空间产生运行数据、工作环境参数等,是整个系统的数据信息来源,具备底层数据采集、传输功能。

(2)虚拟空间 通过对列车及其部件、线路及全路网在几何、物理、行为、规则等方面的描述,建立全方位的数字化模型,一方面在虚拟世界全方位表达列车信息并真实反映列车的动态运行过程;另一方面将建立的模型用于列车性能评估分析,如部件劣化分析、有限元分析、多体动力学仿真等。数字化模型可以表达为三维模型、标记文本、工程算法等形式。

(3)服务应用 通过对虚拟空间建立的各类模型、算法等进行服务化封装,在物理空间实时数据驱动下完成服务。在列车性能评估中,主要应用服务包括列车运行异常定位(状态辨识)、对列车及其部件的性能评估以及评估结果的可视化推送。

(4)孪生数据 融合了物理空间、虚拟空间以及服务应用中产生及衍生的所有数据,主要包括各类模型、列车知识数据、评估分析数据、监测数据等。各类数据通过标识、分类、管理为其余部分提供数据支撑,可通过搭建统一的数据管理平台,建立交互接口,实现数据共享和服务协同。

(5)各部分之间的连接 物理空间通过各类协议、总线(如 MVB)将车载数据、信息传输至虚拟空间和孪生数据中,前者用于更新列车模型,实现以虚写实,后者形成数据管理,并通过 Java 数据库(JDBC)、开放数据库连接(ODBC)建立数据库接口,供其余部分调用;虚拟空间从孪生数据中获取历史数据用于模型训练,并在实时数据驱动下进行评估分析,分析结果一方面返回至孪生数据,另一方面在服务应用中,形成报表统计,并转换为控制决策;服务应用可通过交互界面请求虚拟空间中的分析服务,并通过短信或 APP 形式将控制决策发送给司机室或维护管理人员,实现对物理列车的控制或维修。同时,本次运维信息将返回至孪生数据进行存储,形成列车履历数据。

上述 5 部分描述了基于数字孪生的地铁列车性能评估系统架构组成。而数字孪生的应用服务建立于虚实映射之上,其本质是以数字化的形式对物理对象的行为、状态或流程进行实时的动态呈现<sup>[17]</sup>。数字化的基础是在虚拟空间中建立物理对象的各类模型;行为或流程表达为对列车运行过程中动态要素的呈现;状态是反映列车某时刻下的性能,通过评

估手段来实现。因此,本文进一步从虚实映射的角度构建性能评估系统,将架构中列车的虚实映射过程分为模型映射、行为映射和状态映射 3 个递进层次。三者虚拟空间中先通过全方位建模反映列车静态属性信息,再将实时数据与模型关联,反映列车动态运行过程/要素(如列车运行场景/传感数据),最后在数据驱动下,调用系统封装的各项功能,完成评估分析服务,使评估具有层次性、全面性,进而使列车信息得到全方位的表达。

## 2 基于数字孪生的地铁列车虚实映射

### 2.1 模型映射

模型映射旨在构建与列车虚实一致的静态数字模型,全方位地表达并管理列车及其部件的属性信息,是性能评估服务的基础。为使评估面向全路网并能形成有效管理,首先需要划分地铁网络层次结构,然后确立各层级模型的信息组成和关联关系,最后采用建模手段实现模型信息的数字化表达。

(1)多层级地铁网络划分 地铁列车自身是集机电一体化、自动化于一身的复杂高科技产品<sup>[18]</sup>,从全路网的角度,应当要实现任意线路列车及其部件的信息定位。在实际情况中,线网中有若干条运行线路,线路上管理着若干辆列车的运行;列车由多节车辆“串联”而成,而车辆则通过各组分的诸多部件装配而成。由于性能评估多是面向关键系统部件,本文不考虑系统部件以下的零部件级别采取由面到线、由线到点的层级划分方式。如图 2 所示,划分出的层次结构至上而下为“线网-线路-列车-车辆-组份-部件”。进一步,根据划分的层级,建立各级模

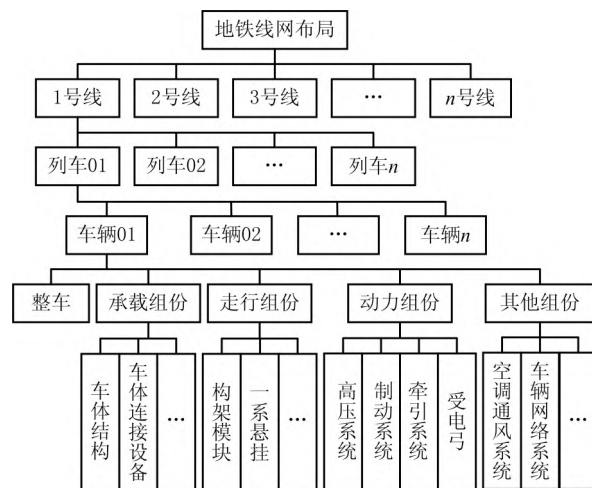


图2 地铁网络层级划分

型名称字典,利用元模型<sup>[19]</sup>思想建立车辆、列车、线路、路网的产品元模型结构树,并对各级模型设定编号规则,形成逐层统一标识,以实现全网下信息的快速定位与管理。

(2)模型信息组成及关联关系 上述划分的各层模型可以单独抽象为一类实体对象,考虑到模型间的关联关系,各级模型对象需包含约束信息、共享信息和自身信息,如图 3 所示。

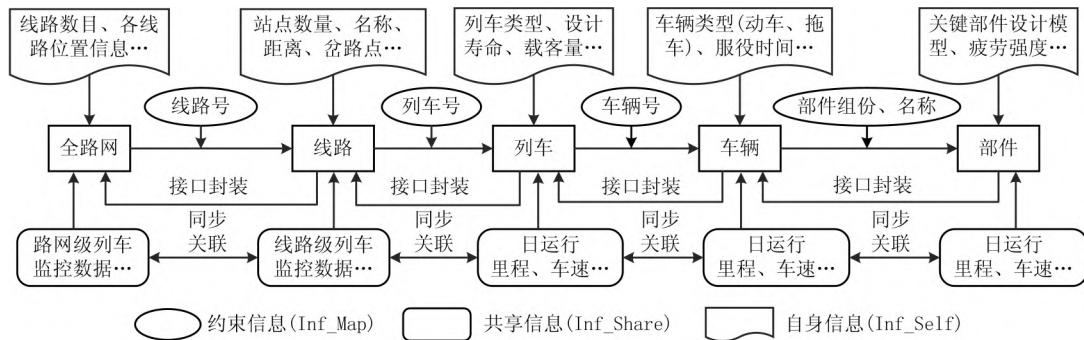


图3 模型信息组成及关联关系

约束信息指从上一层能够唯一确定下一层模型的独有信息,如在某条线路上可以通过列车编号来确定某一列车,从而获取列车相关信息,用  $Inf\_Map$  表示。将该信息以接口的形式来建立层级间的关联,对模型进行逐级封装,能有效减少建模时的信息冗余。共享信息指各层模型共同拥有、同步更新的信息,该信息可以在某一层获取后,通过信息共享机制传递给其它层,如从车载日志上获取的列车日运行里程,可传递到同列车其余各层模型,作为日运行里程参数,用  $Inf\_Share$  表示。自身的属性信息则指除约束和共享信息外,要构建模型的一切信息,包括在全生命周期内的设计参数、装配参数等,用  $Inf\_Self$  表示。用  $Modle$  表示某一层实体模型,则其信息组成为:

$$Modle = \langle Inf\_Map, Inf\_Share, Inf\_Self \rangle.$$

(3)模型信息表达 以上三类信息抽象地描述了各级模型应当包含的信息类型,以明确模型信息间的关联关系,而对 3 类信息进行实体化时,又可以从几何、物理、规则等方面进行描述,如图 4 所示。几何描述包括列车基本结构尺寸信息、部件间的装配关系等;物理描述包括重要物理特征项及其演变规律,如弹性刚度、载荷工况等;规则描述则是对有关联的属性间的关系进行描述,以形成内部数据关联逻辑。

模型信息的表达则以某种规范的数据结构形式对描述信息进行数据建模,并采用适当的工具或手段对其实现数字化。如利用 CAD、CAE 等软件对列车形状、尺寸、纹理、材质、物理特性等方面属性进

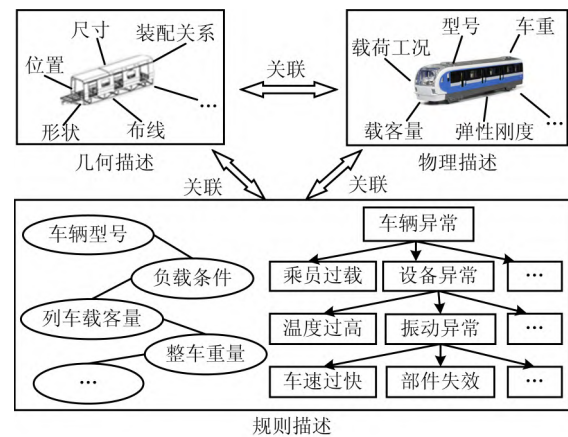


图4 模型信息描述

行刻画;基于拓扑建立车辆内部装配运动模型,并赋予相应规则;利用文本、表格、标记语言等管理模型信息的读写属性。

## 2.2 行为映射

行为映射旨在反映列车在途过程中的动态运行过程/要素,进一步促进虚实空间的关联,该过程获取实时运行数据,是性能评估服务的驱动。考虑到物理对象行为粒度的不同,将列车行为分为宏观上的行为和微观上的行为。

(1)宏观行为 指通过一定的设备或手段可直接观测、感知、描述的物理对象行为,落实到在地地铁列车,这一类行为可表达为运行过程中产生的动作流、数据流和信息流,如图 5 所示。

动作流是列车最直观的行为,可直接观测,它将列车的运行过程看作一系列动作的衔接,如从开门



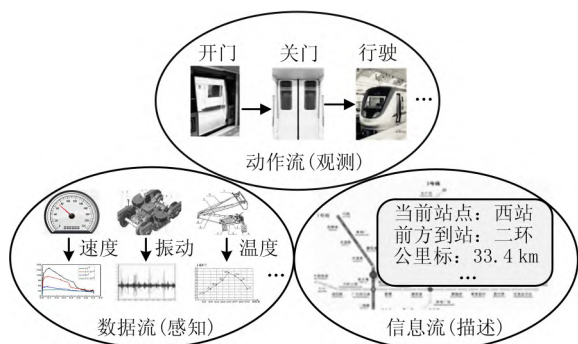


图5 列车宏观行为

到关门,再到启动行驶,这一动作衔接过程即可形成列车在站台“停车-候客-出发”的场景行为。通过在虚拟空间中对动作流进行实时映射,可直观展现列车外观形态,提升可视化效果,该过程可采用虚拟运行、视景仿真<sup>[20]</sup>的形式实现;数据流通过感知各类实时数据来量化列车的行为,可由车载设备记录或加装传感装置来获取数据,如列车行驶速度、悬挂部件振动信号、受电弓温升变化等。由于这些数据都是随着运行过程而不断变化,对数据动态过程的表达即是对列车行为的表达,该映射过程可通过实时数据监控来实现;信息流是对列车运行过程中位置、站点、运行时间等信息进行描述,可用于列车实时位置定位,如列车当前站点、即将到站站点、公里标等,这一流程可直接描述,因此可以通过二维坐标定位或可视化看板的形式来实现。

(2)微观行为 指在环境干扰与内部运行机制下,无法直接观察、感知的列车及其部件内部响应行为,该行为在长期、慢性的内部演化过程中形成了一定的规律,并能建立模型来对其进行映射与描述,如通过建立部件劣化辨识模型来描述其性能退化行为、利用决策树模型来描述其基本演化行为。通过这些模型描述,能使列车的行为从微观上更加精确地表达,将其运用到列车的性能评估中,能在一定程度上提升评估结果的准确性。

### 2.3 状态映射

状态映射旨在通过评估分析手段,挖掘并反映列车某时刻下的性能,是性能评估服务的实现。与传统离线或基于模型的仿真相比,数字孪生更注重实时数据与仿真模型的结合,即模型映射与行为映射共同驱动的仿真评估,使列车的性能分析能从原来的被动变为主动,离线变为在线。在评估过程中,首先应根据列车结构、技术参数、历史数据、工程理

论等建立如有限元、动力学、劣化分析等全方位的仿真评估模型以及各自的评价指标体系,并进行服务化封装。然后,在实时数据的驱动下,调用模型、算法接口或第三方工程软件进行评估分析。最后,得出分析结果并输出。

为提升评估结果的准确性,仿真评估模型应考虑环境变量、动态参数的集成。为此,设计了如图6所示的仿真评估模型接口格式。接口主要由3部分组成:

(1)自定义参数接口 该接口代表需要根据知识或经验在一定的范围内进行主观赋值的参数,如多版本仿真模型共存时的模型选择、算法中的初始权重赋值、在不同应用场景下的评估指标和阈值的确定等,通常以人机交互的形式来主观确定。

(2)自适应参数接口 列车在运行过程中或维护优化后,微观行为的演化会使某些物理属性和结构参数发生变化,该接口自感知这种变化并将其反馈至仿真评估模型中,通过调整相应的参数来提升模型精度,它不依赖于主观因素,而是依靠内部自感知、分析来实现调整。常见的自适应参数包括传感数据、基于算法的辨识数据、以及模型迭代后的优化数据,而在一些情况下,三者也会形成循环。以车辆动力学仿真评估为例,将悬挂部件实时振动数据作为输入参数,悬挂部件的劣化辨识模型(预先训练好)接收该参数并进行性能退化辨识,而辨识后的结构参数再自动输入到动力学仿真模型中,优化其对应的参数。最后,以优化后的模型进行动力学仿真评估,能有效提升仿真评估准确性。

(3)结果输出接口 该接口在仿真评估结束后,将仿真数据进行整理和归纳,以文件报告、图表分析、数据存储记录等形式输出,是性能评估中可视化的体现。

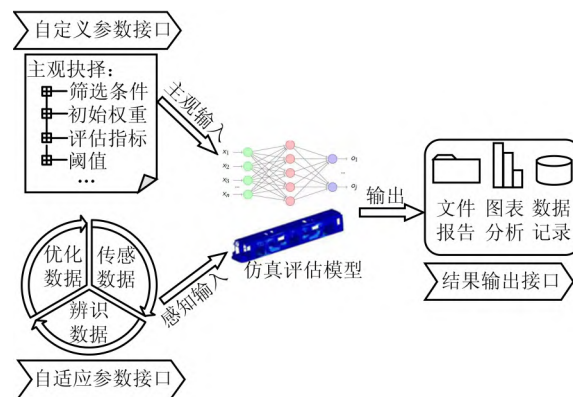


图6 仿真评估模型接口格式

上述3个接口能实现数字孪生下仿真评估模型的输入与输出,使其具备自感知、自优化能力,并在实时数据驱动下进一步实现状态映射,有效提高评估时效性和准确性。

### 3 基于虚实映射的列车性能评估关键技术

地铁列车性能评估中的应用服务主要体现为对列车及其部件进行异常识别、定位,并在此基础上施以相应的评估方案。针对列车性能评估模式单一导致的评估效率不高的问题,基于模型、行为及状态3个层次的映射,进一步从异常定位与评估模式两方面来探讨列车性能评估关键技术。

#### 3.1 基于时空环比的异常定位

列车的性能评估包括正常情况下的预测性评估以及异常状态下的诊断性评估。在正常情况下,利用实时数据驱动评估模型实现预测性评估,该过程以关键部件为首要评估对象(如转向架、受电弓);在异常状态下,则应当以异常源为首要评估对象。因此,首先需要对异常信息进行定位。考虑到列车运行环境的封闭性、相似性,以及列车相同部件数量众多,本文利用时空环比的方式进行异常定位。时空

环比从维度上可以分为时间域和空间域,从层级上则可分为列车级和部件级。

(1)列车级时空环比 用于判定是线路异常还是列车异常,如图7所示。在时间维度下,同一列车运行于不同的线路段之间,分别记录各路段下列车行为映射中的实时信息流、数据流,并提取特征,输入到决策模型(如聚类算法)中进行各路段下的状态特征比对,输出评判结果。时间维度下的比对情况可归纳为两类:一类是列车在某路段内出现数据异常、特征不一致,在其余路段内行驶均为正常,此时可判定为线路段存在异常;另一类是列车在所有时间节点内都为数据异常,此时可能是列车异常,也可能是整条线路异常,需要进一步在空间维度内进行判定。

在空间维度下,通过对比多列车经过同一路段时产生的信息流与数据流,输入到决策模型中,输出异常定位结果。该模式下的对比情况也可归纳为两类,一类是所有列车在该路段内均出现数据异常,此时可判定为线路异常;另一类是只有当前列车在该路段上出现数据异常或存在正常运行的列车,则可判定为列车异常。

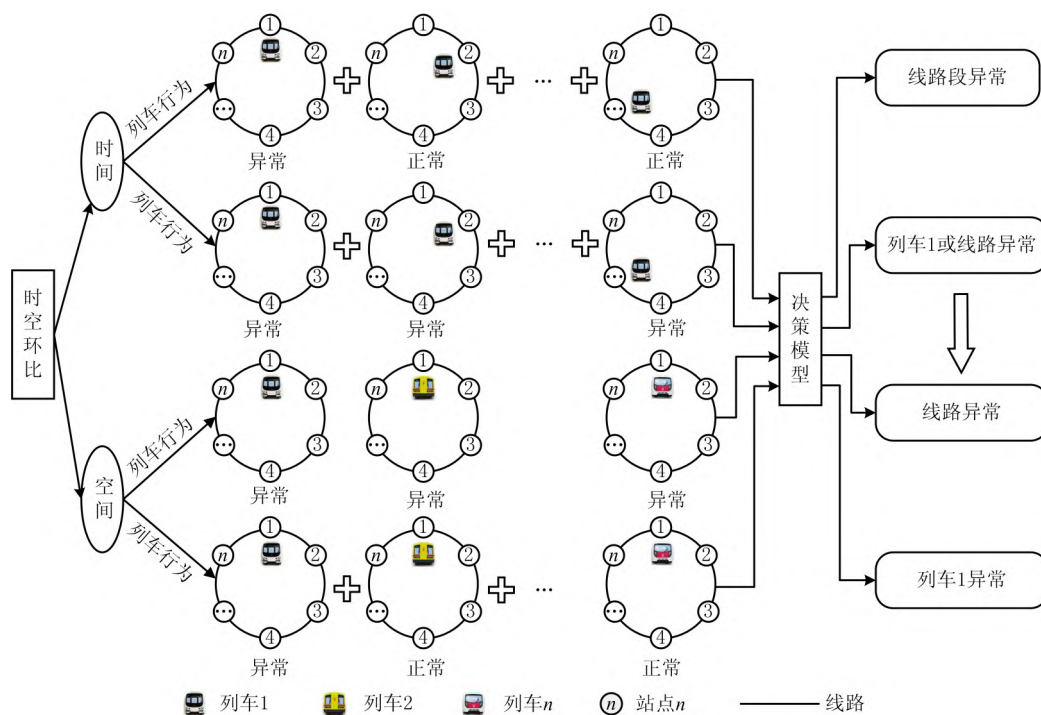


图7 列车级时空环比

(2)部件级时空环比 在确定异常来自于列车的情况下,需要进一步定位异常的部件。在时

间维度下,将部件的数据流进行特征提取,并形成历史数据,通过建立决策模型来评估部件当前

数据特征与历史数据特征的一致性,若决策结果存在不一致性,则该部件可判定为异常,反之则为正常。

在空间维度下,列车相同部件数量众多、且正常情况下同类部件运作机理、数据流表征状态几乎一致,利用这一特点,建立聚类决策模型,在模型基础上评估同时段下,同类部件的监测数据表征的状态是否一致,若某一部件的特征与其余部件出现了聚类偏离,则可判定其为异常部件。

### 3.2 云边协同的列车性能评估模式

与传统列车状态监控或故障诊断不同,数字孪生驱动下的性能评估需要评估列车全方位、多角度的性能。一方面,由于各类评估模型或算法复杂度不同,会存在长周期与短周期的评估、长时耗与短时

耗的计算以及正常情况与异常情况下的不同评估需求,它们对数据完整性、评估时效性均有不同要求;另一方面,列车车载智能设备向多样化、复杂化、个性化发展,从底层感知的数据多源异构,呈海量增长,对数据的处理逻辑包含流式数据计算、离线模型训练、实时数据监控等多种方式,需要建立高效、可靠、稳定的数据通信与存储机制。但传统列车评估多以车地数据传输、地面中心进行多车数据挖掘与分析为主。在两方面的背景下,会出现车地存储与通信信道资源浪费或不足、评估时效不协调、地面中心数据吞吐量压力大等情况,从而造成评估效率不高,难以满足多样化、个性化的评估需求。为此,引入云边协同<sup>[21-22]</sup>的性能评估模式来解决这一类问题,其架构如图 8 所示。

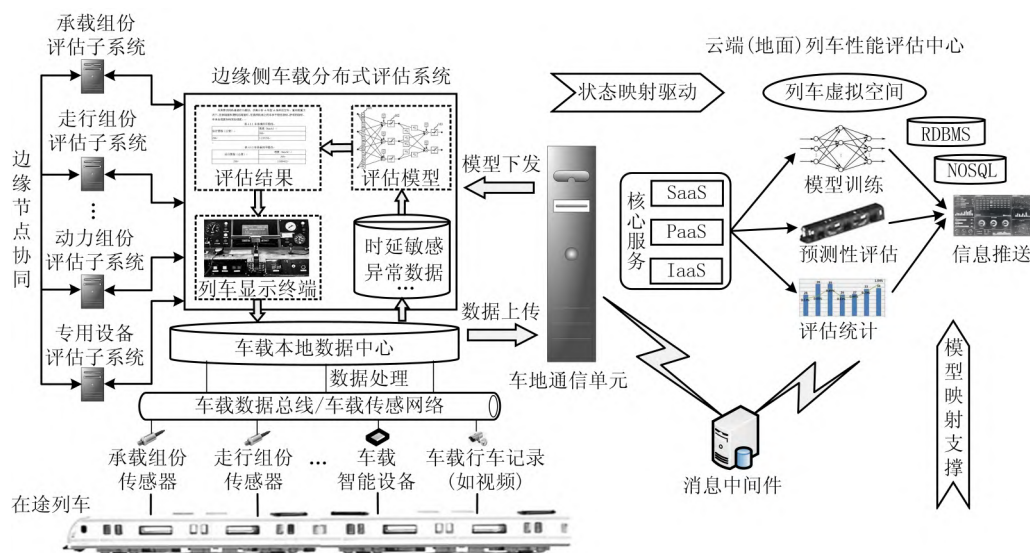


图8 云边协同性能评估模式

边缘计算在网络的边缘节点处以分布式存储与计算模式提供基于数据的服务,是对云计算的一种补充与扩展<sup>[23]</sup>。引入边缘计算,能有效减少设备端与云端吞吐压力,缓解云中心负载压力,提高数据分析响应效率<sup>[24]</sup>。

落实到地铁列车性能评估中,边缘侧用于处理时延敏感、短周期、短时耗、异常情况下的评估需求。其具体实施为:在车载端建立边缘侧分布式评估系统,将评估所需数据或信息直接由车载数据中心发送至各评估子系统进行评估计算,并将评估结果返回至数据中心及列车司机室显示终端,直接形成车载终端评估可视化。同时,由

于数字孪生下的评估面向列车全方位的性能,部分评估的实现需要融合多个边缘部件的数据信息,为避免形成信息孤岛,可在边缘节点间建立通信机制,形成边边协同<sup>[23]</sup>,实现节点间数据共享,提升各部件的评估质量。

与边缘侧相反,云端列车性能评估中心则面向路网,建立在地面一端:借大数据平台,根据模型映射中建立的全方位数字化模型和状态映射中建立的型接口格式来负责长周期的模型训练、正常情况下的预测性评估、离线数据挖掘等。二者在地铁列车性能评估中的部分应用项设计如表 1 所示。



表 2 性能评估云端与边缘侧应用项设计

地面云端	车载边缘侧
列车动力学仿真	关键部件劣化辨识
剩余寿命预测	部件故障诊断
评估(决策)模型训练	系统可靠性分析
电气系统仿真	电气设备检修
历史数据存储	实时数据采集
维修信息推送	车载数据监控

云端与边缘侧通过车地通信单元实现交互。云端将训练好的评估模型下发至车载系统,再由车载系统分发至各评估子系统,后者在评估时能有效避

免模型训练带来的耗时,而边缘侧则将正常数据、评估结果等上传至云端,为其提供离线模型训练、地面安全中心监控等的基本数据支撑。地面(云)与车载(边)相互协同,能有效提升列车性能评估系统的运行效率。

4 应用实例

4.1 系统实现

基于上文提出的系统架构及虚实映射方法,结合某地铁,对基于数字孪生的地铁列车性能评估系统进行实现。如图 9 所示为 3 个映射方法及部分应用服务的实现,主要包括:

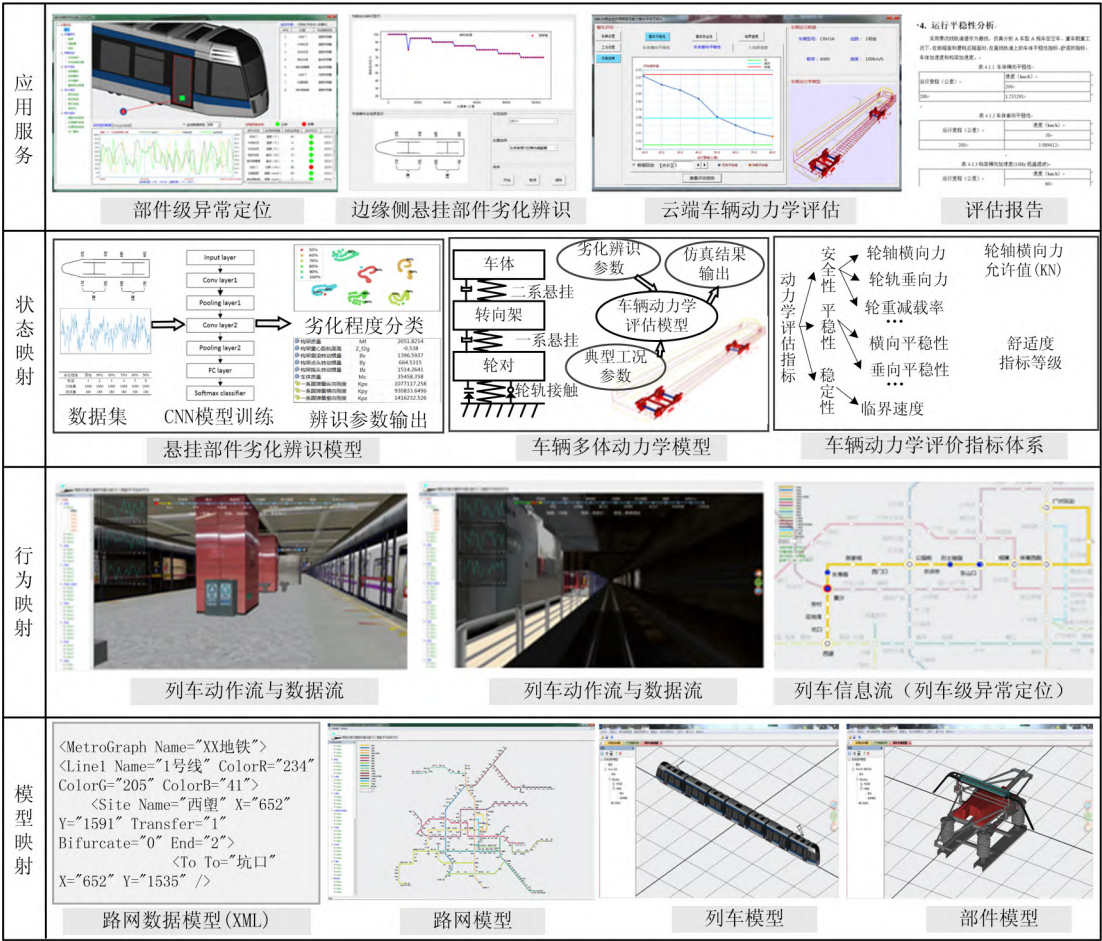


图9 系统实现

(1)面向全路网的列车模型映射 利用可扩展标记语言(eXtensible Markup Language,XML)建立了路网数据模型,用于管理路网级和线路级基本信息,并以二维路网的形式实现可视化。基于开源图形场景(Open Scene Graph,OSG)建立了列车及其部件可视化建模模块,支持 3DMAX、CATIA、

SOLIDWORKS 等主流三维建模软件的模型导入,并通过关系型数据库、文档形式管理列车及其部件的全方位信息,形成模型知识库。此外,建立了模型结构树用于管理各级模型及其关联关系,通过界面中树节点实现对相关知识信息的增删改查操作,为行为映射和状态映射提供了基本数据支持。



(2)数据驱动的列车行为映射 从模型映射建立的模型树或二维路网可进入到具体列车的行为映射模块中。该模块在运行数据驱动下,利用 OSG 技术实现列车虚拟运行,模拟列车开门、关门、隧道行驶等动作流,展现运行速度、部件温度等信息流,能达到数据驱动下的列车同步到站、停车、开关门、启动等效果,较为逼真地还原了列车动态运行过程。同时,结合二维路网,同步展现列车当前站点、到站时间等信息流,当列车出现异常时,可通过异常标识在路网中进行定位。

### (3)基于车辆动力学评估的状态映射与应用服务

本文以车辆动力学为例,对状态映射部分所提理论进行实现。一方面利用 SIMPACK 动力学仿真软件建立某线路上 A 型车的多体动力学仿真模型及评价指标体系。另一方面,由于悬挂部件故障引起的列车事故占比很高<sup>[25]</sup>,考虑到其对车辆动力学性能的影响以及评估模型对动态参数的集成需求,基于卷积神经网络(Convolutional Neural Network,CNN)训练了振动信号下的悬挂部件劣化辨识模型,模型在行为映射实时数据驱动下,可对悬挂参数进行辨识分析。辨识后的参数,自适应更新至动力学仿真模型中,替换原有参数,并联合定义的轨道参数、速度值等进行评估分析,输出结果。由于该过程考虑了悬挂部件的退化情况,满足状态映射中所提的仿真模型接口格式,在一定程度上能提升评估准确性。

此外,由于车辆动力学评估对时效性要求较低,一般在较长周期内进行定期评估并更新其动力学模型即可,因此将其部署至云端一侧(地面);而悬挂部件的劣化辨识模型则由云端训练,并定期下发至车载边缘侧部署,进行低时延的辨识,当辨识结果出现异常偏离时,即可上传云端进行动力学评估。

## 4.2 车辆动力学仿真评估结果

悬挂系统结构复杂,建模参数众多,本文主要以一系、二系悬挂部件的刚度和阻尼为辨识对象,参数类型包括一系弹簧横向、垂向刚度、二系横向、垂向减震器阻尼、二系空簧横向、垂向刚度等。首先为定量验证这些参数变化对动力学性能的影响,通过动力学模型在 SIMPACK 中获取不同劣化等级下的悬挂系统模拟振动数据(如劣化等级从 100%到 50%),然后将数据输入 CNN 模型中,输出辨识后的悬挂参数,再联合动力学仿真模型进行计算。

如图 10 所示为设定的两个速度等级下,该车辆轮轴横向力(动力学安全性指标)的仿真评估结果。在 5 个劣化等级下,轮轴横向力上升的平均幅度达到 10.22%,结合动力学评估指标,该结果表明随着悬挂部件劣化程度增加,车辆动力学性能下降明显。将二者结合,能定量地计算悬挂部件劣化后的动力学评估值,对于提升动力学仿真模型的准确性以及数字孪生下多学科、多物理量融合具有重要意义。

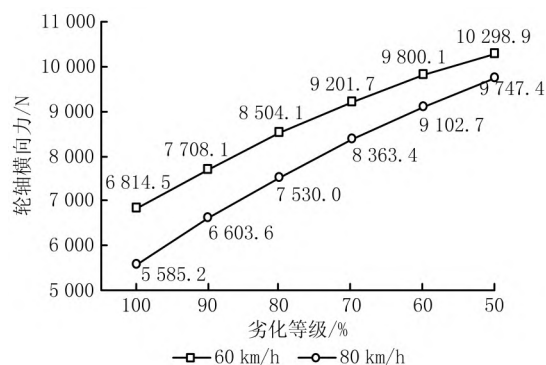


图10 轮轴横向力仿真结果

进一步,为验证融合了悬挂部件劣化辨识的车辆动力学仿真评估模型更加准确,以横向平稳性为例(动力学平稳性指标),将考虑和未考虑悬挂部件劣化的动力学仿真评估与一段车辆实测情况下的动力学评估结果进行比较。其中考虑了劣化情况的悬挂参数劣化程度调至与实测情况的劣化程度相同,而未考虑的则以正常情况进行计算。如图 11 所示为 3 种情况下的评估情况对比,其结果表明考虑了劣化情况的评估趋势与实测情况基本一致,且相对于未考虑的情况,在其基础上将评估结果平均提升了约 21%,使仿真评估更接近于实测值,即证明了融合了悬挂部件劣化辨识的动力学仿真评估模型更加准确。

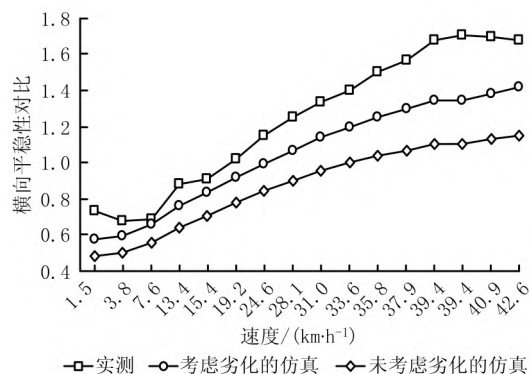


图11 动力学仿真评估与实测对比

## 5 结束语

本文提出了基于数字孪生的地铁列车性能评估系统参考架构。在系统中通过模型映射建立面向全路网的多层级数字化模型,解决评估不全面、数字化程度不足的问题;通过行为映射表达列车运行过程中的动态要素,并结合状态映射来实现评估模型的构建与执行,解决评估缺乏时效性和准确性的问题。在3个映射基础上,基于时空环比方法和云边协同模式实现性能评估中的应用服务,解决评估模式单一导致的效率不高的问题。进一步,通过系统实现和具体评估结果验证了所提方法及理论的有效性,为数字孪生在地铁中的应用提供了一定的参考。

本文重点在于提出数字孪生在地铁列车性能评估系统中的应用架构及虚实映射方案,但没有对方案中的具体使能技术进行详细探讨。后续将结合实际开展更加深入的各环节技术理论研究以及与实际的协调配合,从而进一步推进数字孪生的落地应用,更加有效地保障地铁安全运行。

## 参考文献:

- [1] CAMET. China urban rail transit smart urban rail development outline[R/OL]. (2020-03-12) [2020-07-26]. <https://wenku.baidu.com/view/27f16cee8aeb172ded630b1c59eef8c75ebf9554.html>(in Chinese). [中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要[R/OL]. (2020-03-12) [2020-07-26]. <https://wenku.baidu.com/view/27f16cee8aeb172ded630b1c59eef8c75ebf9554.html>.]
- [2] WEI Yun, BAI Wenfei, LI Yujie. Demand analysis and functional planning research of smart subway[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(1):40-48(in Chinese). [魏运, 白文飞, 李宇杰. 智慧地铁需求分析及功能规划研究[J]. 都市快轨交通, 2020, 33(1):40-48. ]
- [3] TAN Hongyuan. Health evaluation and maintenance decision of metro vehicle equipment units[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016(in Chinese). [谭鸿愿. 地铁车辆设备单元健康状态评估与维修决策[D]. 成都:西南交通大学, 2016. ]
- [4] WANG Shuaigang. Research on intelligent processing algorithm of urban rail train monitoring data based on ART-2[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010(in Chinese). [王帅刚. 基于ART-2的城轨列车监控数据智能处理算法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2010. ]
- [5] YONG L D, LIANG L S, JIAN L Z, et al. Evaluation and reduction of vulnerability of subway equipment: An integrated framework[J]. Safety Science, 2018, 103:172-182.
- [6] TAO Fei, ZHANG He, QI Qinglin, et al. Ten questions about digital twins: analysis and thinking[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(1):1-17(in Chinese). [陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生十问:分析与思考[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1):1-17. ]
- [7] CHENG J F, ZHANG H, TAO F. DT-II: Digital twin enhanced industrial internet reference framework towards smart manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 62: 101881. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101881.
- [8] ELISA N, LUCA F, MARCO M. A review of the roles of digital twin in cps-based production systems[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 11: 939-948.
- [9] TAO Fei, CHENG Ying, CHENG Jiangfeng, et al. Theory and technology of digital physics workshop information physics fusion[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(8):1603-1611(in Chinese). [陶飞, 程颖, 程江峰, 等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(8):1603-1611. ]
- [10] JIANG Haifan, DING Guofu, ZHANG Jian. Evolution mechanism and operation mechanism of digital twin workshop[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(7): 824-824(in Chinese). [江海凡, 丁国富, 张剑. 数字孪生车间演化机理及运行机制[J]. 中国机械工程, 2020, 31(7): 824-824. ]
- [11] LIU Kui, WANG Pan, LIU Ting. The application of digital twins in the operation and maintenance of aeroengines[J]. Journal of Aerospace Power, 2019(4): 70-74(in Chinese). [刘魁, 王潘, 刘婷. 数字孪生在航空发动机运行维护中的应用[J]. 航空动力, 2019(4): 70-74. ]
- [12] GUO Jutao, HONG Haibo, ZHONG Keke, et al. Digital twin-based production management and control method for aerospace manufacturing workshop[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(7): 808-814(in Chinese). [郭具涛, 洪海波, 钟珂珂, 等. 基于数字孪生的航天制造车间生产管控方法[J]. 中国机械工程, 2020, 31(7): 808-814. ]
- [13] AIVALIOTIS P, GEORGOULIAS K, CHRYSSOLOURIS G. The use of digital twin for predictive maintenance in manufacturing[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2019, 32(11): 1067-1080.
- [14] SHEVLYUGIN M V, KOROLEV A A, GOLITSYNA A E, et al. Electric stock digital twin in a subway traction power system[J]. Russian Electrical Engineering, 2019, 90(9): 647-652.
- [15] LOPES M R, COSTIGLIOLA A, PINTO R, et al. Pharmaceutical quality control laboratory digital twin—A novel governance model for resource planning and scheduling[J]. International Journal of Production Research, 2020, 58(21): 6553-6567.
- [16] TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng. Digital twin five-dimensional model and its application in ten fields[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18(in

- Chinese). [陶 飞, 刘蔚然, 张 萌. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18. ]
- [17] TANG Jing. Research on the application of digital twins in the assembly process of aviation electromechanical products [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(15): 22-30(in Chinese). [唐 竞. 数字孪生在航空机电产品装配工艺中的应用研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(15): 22-30. ]
- [18] QIAO Hui. Principle of structure and construction of metro trains [J]. Science and Technology Information, 2012(4): 337-338(in Chinese). [乔 辉. 地铁列车的结构及构造原理[J]. 科技信息, 2012(4): 337-338. ]
- [19] XU Jing, JI Yangjian, QI Guoning, et al. Mechanical components classification coding method supporting large-volume custom design[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(11): 149-155(in Chinese). [许 静, 纪杨建, 祁国宁, 等. 支持大批量定制设计的机械零部件分类编码方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(11): 149-155. ]
- [20] YANG Lin. Research and implementation of 3D modeling of subway train operation simulation system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015(in Chinese). [杨 林. 地铁列车运行仿真系统三维建模的研究与实现[D]. 成都: 西南交通大学, 2015. ]
- [21] CHEN Yuping, LIU Bo, LIN Weiwei, et al. Summary of clouds in the cloud [J]. Computer Science, 2021, 48(3): 259-268(in Chinese). [陈玉平, 刘 波, 林伟伟, 等. 云边协同综述[J]. 计算机科学, 2021, 48(3): 259-268. ]
- [22] MA J, ZHOU H, LIU C C, et al. Study on edge-cloud collaborative production scheduling based on enterprises with multi-factory [J]. IEEE Access, 2020, 8(1): 30069-30080.
- [23] BAI Yuyang, HUANG Yanhao, CHEN Siyuan, et al. Cloud edge intelligence: Edge computing method for power system operation control and its application status and prospects[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(3): 397-410(in Chinese). [白昱阳, 黄彦浩, 陈思远, 等. 云边智能: 电力系统运行控制的边缘计算方法及其应用现状与展望[J]. 自动化学报, 2020, 46(3): 397-410. ]
- [24] DING Hua, YANG Liangliang, YANG Zhaojian, et al. Prediction of the health status of coal shearers driven by the fusion of digital twin and deep learning[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(7): 815-823(in Chinese). [丁 华, 杨亮亮, 杨兆建, 等. 数字孪生与深度学习融合驱动的采煤机健康状态预测[J]. 中国机械工程, 2020, 31(7): 815-823. ]
- [25] JIN Zibo, FANG Yu, LU Yuanhang, et al. Analysis of fault characteristics of secondary suspension of urban rail transit vehicles based on multi-body dynamics simulation [J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(7): 97-101(in Chinese). [金子博, 方 宇, 陆远航, 等. 基于多体动力学仿真的城市轨道交通车辆二系悬挂故障特征分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(7): 97-101. ]

## 作者简介:

樊孟杰(1996—),男,四川成都人,硕士研究生,研究方向:数字孪生、数字化建模与仿真,E-mail:1529181373@qq.com;

江海凡(1992—),男,湖南醴陵人,博士研究生,研究方向:数字孪生、数字化建模与仿真,E-mail:JiangHaifan@my.swjtu.edu.cn;

丁国富(1972—),男,四川乐至人,教授,博士生导师,研究方向:复杂机电设备数字化设计与制造、数字孪生等,E-mail:dingguofu@163.com;

王 兵(1997—),男,河南南阳人,硕士研究生,研究方向:数字孪生、虚拟调试,E-mail:1220929776@qq.com

邹益胜(1980—),男,浙江温州人,副研究员,博士生导师,研究方向:多学科协同仿真、服役环境下的设备故障诊断与寿命预测等,通讯作者,E-mail: zysapple@sina.com。