

# 多体动力学仿真数据驱动的列车运行可视化

郁家福,马宗,刘丰嘉,唐兆

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

**摘要:**针对传统多体动力学软件无法直观体现出列车真实运行环境,而目前主流的列车虚拟运行仿真系统又无法实现对列车运行平稳性评估的现状,提出了一种多体动力学仿真数据驱动的列车运行可视化方法。采用三维 GIS 技术,实现了不同线路环境下列车运行三维场景高精度模型的构建。使用多体动力学软件 SIMPACK 对列车在不同速度和不同轨道谱下的运行进行动力学仿真,并基于仿真后处理数据建立了最小二乘线性回归模型,预测出列车在不同运行状态下的垂向平稳性指标值。借助三维可视化引擎 UNIGINE,实现了以列车运行的多体动力学仿真数据来驱动列车模型运动的三维可视化。

**关键词:**多体动力学;仿真;列车运行;三维可视化

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)04-0084-05

## Train Running Visualization Based on Multibody Dynamic Simulation Data

YU Jiafu, MA Zong, LIU Fengjia, TANG Zhao

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

**Abstract:** As the traditional multibody dynamics software can not be used to directly reflect the real running environment of the train, and the mainstream virtual simulation system of the train can not be used to assess the running stability of the train, a visualization method for the train running based on multibody dynamic simulation data is proposed. The 3D GIS technology is used to construct the high-precision model for the train running in different line environments. Then, multibody dynamics software SIMPACK is used to do the dynamic simulation of the train running at different speeds and different orbital spectrum. Based on the post-simulation data, a least-squares linear regression model is established, which is used to predict the vertical stability of the train running under different conditions. With the help of the three-dimensional visual engine UNIGINE, the multibody dynamics simulation data of the train running is used to drive the motion of the train model.

**Keywords:** multibody dynamics; simulation; train running; three-dimensional visualization

## 0 引言

随着我国高速铁路工程的迅速发展,我国高速列车的设计制造以及集成技术已达到世界先进水平,而对高速列车在各种运行状态下安全性能的监测与评估目前还存在一些不完善的地方。国内外对列车安全性能评估研究的方式主要采用线路实验以及振动台实验等方法,通过处理大规模的实验数据加以分析得出列车的动力学性能指标,即运动稳定性、运行平稳性和曲线通过能力<sup>[1]</sup>。伴随着计算机技术的迅速发展,对列车在各种运行状态下的仿真已成为一种有效的代替试验来分析评估列车安全性能的方法<sup>[2]</sup>。上述方法不但节约相应的实验成本,而且可以模拟产生足够的仿真数据来分析研究列车在各种条件下的运行时状态,这对列车安全性的评估有非常重要的辅助作用。

目前国内外许多学者主要使用多体动力学<sup>[3]</sup>理论对高速列车在各种环境下的运行状态进行仿真分析,进而得

出列车运行过程中的平稳性及安全性能状况。但是目前借助成熟的多体动力学仿真软件来分析列车的运行性能往往无法快速并且直观形象反应出列车在各种运行环境下的真实状态。近年来,随着虚拟现实(VR)技术的快速发展,结合仿真结果对列车真实运行状况进行可视化再现成为研究热点。针对列车运行可视化仿真研究,国外发展比国内早,技术也比较成熟全面。例如西班牙 CITEF 公司为欧洲高速列车开发的列车运行仿真平台以及驾驶培训平台<sup>[4]</sup>,日本三菱精密株式会社为新干线高速铁路研发了一套虚拟仿真系统<sup>[5]</sup>,美国 Dovetail Games 公司的 Train Simulator 等列车运行仿真模拟软件对各种类型的列车在不同路线以及运行环境下的运行状态可以进行非常逼真的模拟。我国对列车在运行状态的三维可视化仿真工作虽然起步较晚,但是随着我国铁路建设事业的快速发展,针对列车运行状态的三维可视化研究工作也取得了不错的成绩,例如上海同济大学开发的北京地铁二号线司机培训半实物仿真平台<sup>[6]</sup>,西南交通大学的轨道交通模拟驾驶仿真培训系统<sup>[7]</sup>等。上述系统主要是对列车运行过

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51405402;51475396)

**作者简介:**郁家福(1992—),男,江西吉安人,硕士研究生,研究方向为列车运行可视化。

程中周围的三维环境进行可视化简单模拟再现,但是并没有综合考虑对列车本身的动力学仿真结果分析,可视化结果无法满足对列车安全性与平稳性的评估。

本文结合三维 GIS 数据对真实列车运行环境进行三维建模,构建出列车运行高精度三维场景模型。进一步使用动力学仿真软件对列车在不同轨道谱下的运行状态进行仿真,在分析处理仿真数据基础上,采用最小二乘法对列车运行平稳性指标进行预测计算,最终借助三维可视化引擎对仿真结果进行三维呈现。本文的工作满足了列车在相应真实环境下各种运行状态的模拟需求,并有助于快速评估列车在运行过程中的垂向平稳性指标。

### 1 列车运行三维环境建模

我国高速铁路呈长距离带状分布,列车运行线路周围地形地势环境复杂,对列车运行三维环境建模是模拟列车真实运行环境的关键技术之一。目前随着三维 GIS 技术的发展,利用 GIS 数据对列车运行线路沿线周围大规模真实三维地形环境快速建模成为研究热点之一,另一方面,虚拟高速铁路场景还涉及诸多铁路基础模型构建,如钢轨、轨枕、轨道板、路基、路堑、车站、站台、道岔、接触网、接触网支柱、桥梁、桥墩、扣件、隧道等。本节具体介绍对列车运行环境三维建模涉及到的一些关键技术,包括基于 DEM 数据构建列车运行真实三维地形建模方法,铁路线路的三维场景建模基本流程,直线线路模型空间位置和姿态的计算方法等。列车运行环境整体三维建模流程如图 1 所示。

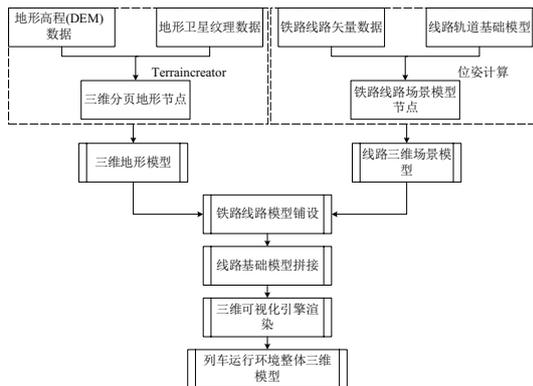


图 1 列车运行环境三维建模流程图

#### 1.1 基于 DEM 数据的三维地形构建

铁路线路的复杂多变,为呈现列车在运行过程中周围真实三维地形,可以采用三维 GIS 技术构建列车运行过程中的三维数字地形高程模型(digital elevation model, DEM)。DEM 通过对高程数据的内插计算,能够很好地拟合连续地形,是三维地形属性特征的一种数字化表达方式<sup>[8]</sup>,其表达方式主要包括等高线模型、规则网格模型、不规则三角网格(TIN)模型。本文使用.tif 格式的三角网格地形高程数据以及卫星拍摄的三维纹理数据作为输入数据,借助三维可视化引擎 UNIGINE<sup>[9]</sup>,使用 C++ 语言开发了基于 DEM 数据生成三维地形模型的插件 Terraincreator,图 2 为使用该插件构建三维地形环境的流程图。

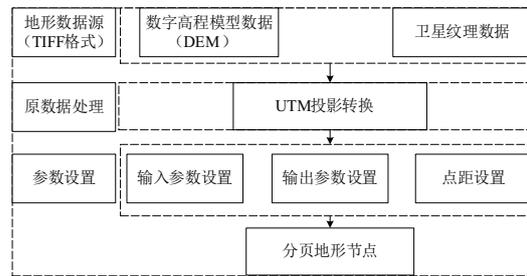


图 2 三维地形建模流程图

Terraincreator 插件软件界面以及输入 DEM 数据并设置输出参数后所构建的三维地形模型如图 3 所示。



图 3 Terraincreator 软件界面及三维地形模型

#### 1.2 铁路线路三维场景建模

三维铁路线路的空间位置由它的线路平面和纵断面所决定,二者分别表示列车线路在平面上的弯曲状况以及线路起伏状态。其中,线路平面主要包含 3 种类型的线路线形:直线、圆曲线、缓和曲线<sup>[10-11]</sup>。图 4 为铁路线路线形分类示意图。

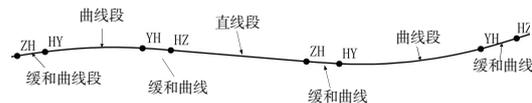


图 4 铁路线路线形分类示意图

铁路轨道直线线路平面位置计算方法<sup>[12]</sup>如下:

$$\begin{aligned} x &= x' + l \sin A \\ y &= y' + l \cos A \end{aligned} \tag{1}$$

其中:  $x'$  和  $y'$  为缓直点的坐标,  $A$  为缓直点的方位角。根据轨道模型坡度角、侧方位角、方位角进行计算调整后得到铁路轨道线路模型三维整体位姿坐标。图 5 为在三维可视化引擎中将 3DMax 软件构建的 FBX 格式铁路高架桥模型按其三维位姿坐标铺设于地形模型中。

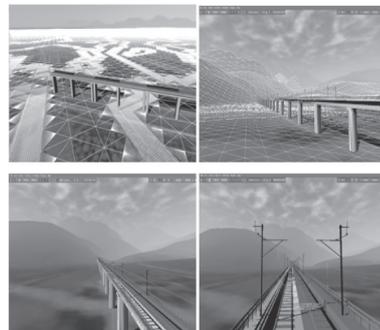


图 5 直线线路高架桥模型铺设图

## 2 列车动力学模型仿真计算

针对车辆在运行过程中的动力学仿真计算与分析主要借助于成熟的商业多体动力学软件,例如:SIMPACK<sup>[12]</sup>、ADAMS<sup>[13]</sup>、NUCARS<sup>[14]</sup>等。目前应用于轨道交通领域最广泛的车辆动力学仿真软件主要是SIMPACK<sup>[15]</sup>。本节基于SIMPACK软件对某型列车在多种轨道谱下的直线段运行进行了垂向动力学仿真计算,并进一步对仿真结果数据进行处理。

### 2.1 列车运行仿真

在SIMPACK软件中,列车动力学模型按弹簧悬挂系统主要分为:车体、轮对和构架。以单节车模型为讨论对象,本文建立了单节列车整车模型,该模型在SIMPACK软件中仿真示意图如图6所示。

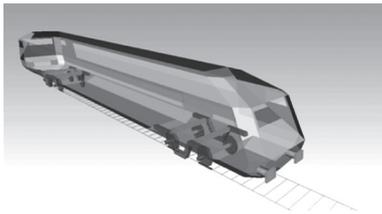


图6 单节列车 SIMPACK 运行仿真示意图

在建模过程中,车体、构架、轮对等列车子部件结构质量与转动惯量等属性主要通过SIMPACK软件中的Body Properties定义,空气弹簧等部件通过软件中的力元Force定义,车辆模型各个子部件运动连接主要采用铰(joint)以及约束(Constrain)来定义。在单节列车模型构建完成后,在车体端枕梁上方距车体中心1000mm车体地板面位置添加2个Sensor用于对列车运行过程中实时垂向振动加速度监测。

如图6所示,本文所构建的单节列车模型主要由1个车体、前后2个转向架构成,转向架一共包括4个轮对以及2个构架。车体、构架、轮对均包含有横向、纵向、垂向、侧滚、点头、摇头6个自由度。本文仿真采用的单节客车模型部分主要参数如表1所示。

表1 列车模型主要参数

物理意义	数值
车体质量/kg	32 500
转向架质量/kg	2 560
轮对质量/kg	2 080
车体侧滚运动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	9.05e4
车体点头运动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	1.5e6
转向架构架侧滚惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	2084
转向架构架点头惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	1405
轮对侧滚惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	749
二系轴箱悬挂垂向刚度/(N/m)	0.154e6
一系轴箱悬挂垂向刚度/(N/m)	1.20e6
二系轴箱垂向阻尼/(N·s/m)	4.0e4
一系轴箱垂向阻尼/(N·s/m)	2.5e4

在单节列车模型在运行仿真过程中,车辆系统各部件之间的相互作用力主要包括一系悬挂与二系悬挂的弹簧力、阻尼力、轮轨之间的法向接触力以及切向蠕滑力等,通过对整个车辆系统各部件的受力分析,可以建立列车在运行过程中的运动方程。借助多体系统动力学的理论分析,车辆系统动力学方程表示如下:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{y}} + \mathbf{K}\mathbf{y} = \mathbf{F}(\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}, t)$$

式中: $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 分别表示系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵, $\mathbf{y}$ 为系统状态变量, $t$ 为时间, $\mathbf{F}(\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}, t)$ 为车辆系统的非线性力。

列车运行的实际线路存在着轨道随机不平顺的现象,这一方面会影响旅客乘坐的舒适度,另一方面会影响到机车车辆结构部件的疲劳损伤,从而影响列车运行过程的平稳性与安全性。轨道随机不平顺的特征统计主要由轨道功率谱密度描述<sup>[16]</sup>。目前较为典型的轨道谱包括:美国谱(AAR)、德国高速轨道谱等,而我国至今没有轨道谱标准<sup>[17]</sup>。美国谱按轨道不平顺度将轨道等级分为6级,其高低、方向、水平及轨距不平顺表达式<sup>[18]</sup>如下:

1) 轨道高低不平顺

$$S_v(\Omega) = \frac{kA_v\Omega_c^2}{\Omega^2(\Omega^2 + \Omega_c^2)} \quad (2)$$

2) 轨道方向不平顺

$$S_a(\Omega) = \frac{kA_a\Omega_c^2}{\Omega^2(\Omega^2 + \Omega_c^2)} \quad (3)$$

3) 轨道水平及轨距不平顺

$$S_c(\Omega) = \frac{4kA_c\Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_c^2)(\Omega^2 + \Omega_s^2)} \quad (4)$$

其中: $S(\Omega)$ 为轨道不平顺功率谱密度, $\Omega$ 为轨道不平顺空间频率(rad/m); $A_v$ 、 $A_a$ 是粗糙度常数( $\text{cm}^2 \cdot \text{rad/m}$ ); $\Omega_c$ 、 $\Omega_s$ 是截断频率(rad/m); $k$ 是安全系数,一般取0.25,详细美国谱特征参数见文献[19]。图7为美国6级线路轨道(AAR6)随机不平顺度MATLAB模拟结果。

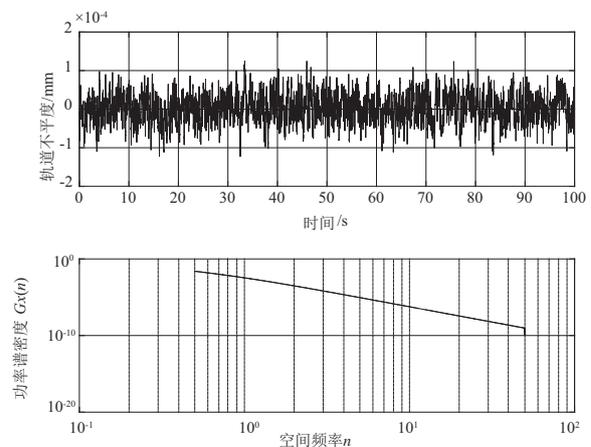


图7 6级轨道谱(AAR6)随机不平顺模拟图

本文将美国各级轨道谱垂向特征参数作为列车模型在SIMPACK软件中运行仿真的轨道随机不平顺激励输入参数,进行了列车在运行过程中垂向动力学模型的仿真计算,并进一步运用最小二乘法曲线拟合的方式对列车在不

同轨道谱下同一速度及同一轨道谱不同速度运行时车体的垂向平稳性指标进行预测。列车模型以各级美国谱对应的最高速率运行时车体垂向振动加速度仿真结果曲线如图 8 所示。

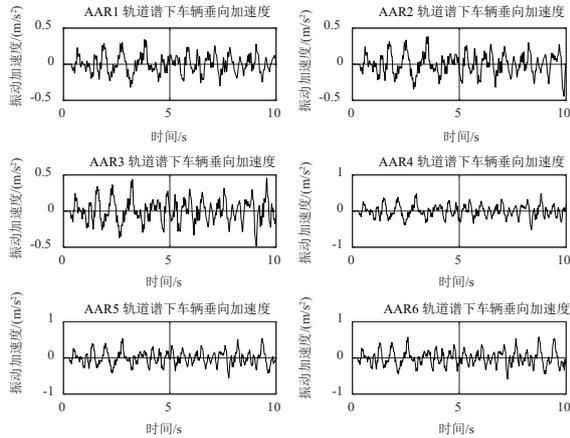


图 8 各级谱最高速度下车体垂向加速度曲线

## 2.2 列车垂向平稳性指标预测

列车运行过程中的平稳性与舒适性评价标准<sup>[19]</sup>目前有许多,如:Spierling 指标<sup>[20]</sup>、ISO2631-1997 标准、UIC513-1994 标准以及 GB5599-85 标准等,而上述所有评价标准都主要是通过对列车运行过程中车体各向加速度进行变换处理计算得出。本文采用 Spierling 指标作为列车平稳性评价参考指标。针对同一速度在不同等级轨道谱下列车运行状态,采用最小二乘多项式拟合的方式实现对列车在不同轨道谱下车体垂向加速度均方差  $\sigma$  以及 Spierling 值  $W$  的平稳性预测。根据列车以 20 km/h 在 1~6 级美国谱下运行的 SIMPACK 仿真结果数据,统计车体垂向振动加速度均方差  $\sigma$  值及 Spierling 值如表 2。

表 2 车体垂向振动加速度均方差与 Spierling 值

轨道谱类型	$\sigma$	$W$
AAR1	0.065 4	1.404 8
AAR2	0.076 3	1.446 4
AAR3	0.069 2	1.386 6
AAR4	0.061 1	1.324 8
AAR5	0.038 1	1.148 4
AAR6	0.015 3	0.886 0

本文将表 2 中 1~6 级美国轨道谱参数下列车垂向振动加速度均方差值  $\sigma$  以及 Spierling 值  $W$  作为原始输入数据,对上述数据进行归一化处理,采用最小二乘多项式拟合的方法,以轨道谱等级  $L$  作为自变量,分别对  $\sigma$  以及 Spierling 值  $W$  进行二次与三次多项式拟合,拟合结果如图 9 所示。图中 a 线为曲线拟合预测结果,b 线为表 2 中的仿真结果统计数据。

由上述二次与三次多项式曲线拟合结果,本文计算了拟合结果曲线上相应 6 级轨道谱下列车车体垂向振动加速度均方差  $\sigma$  值及 Spierling 值。进一步通过计算对比拟合曲线上 6 级轨道谱  $\sigma$ 、 $W$  值(预测计算结果)与表 2 中由

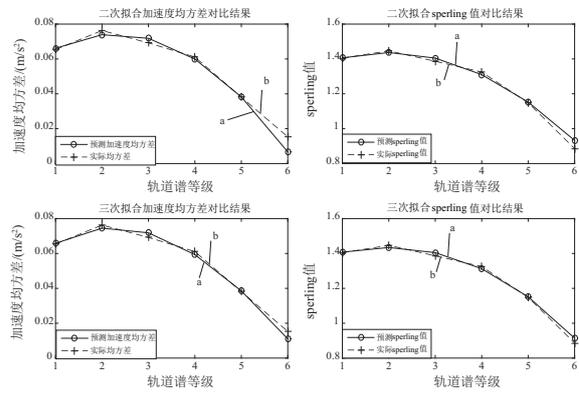


图 9 列车平稳性多项式拟合预测结果

6 级轨道谱的仿真结果数据统计计算得到的  $\sigma$ 、 $W$  值(真实数据)的残差平方和  $Q_\sigma$ 、 $Q_W$ ,可以得出采用多项式拟合预测效果,具体对比结果如表 3 所示。

表 3 6 级谱下多项式拟合预测结果

统计量	二次多项式	三次多项式
$\sigma$	0.006 7	0.011 0
$W$	0.932 9	0.914 4
$Q_\sigma$	8.89e-5	3.20e-5
$Q_W$	2.9e-3	1.4e-3

从表 3 结果可知采用最小二乘法多项式拟合的预测效果较好。

针对同一轨道谱不同速度下列车运行过程垂向平稳性预测,本文选用 6 级美国谱作为列车运行线路环境。图 10 是列车以不同速度在美国 6 级谱下运行仿真的 Spierling 值结果统计。

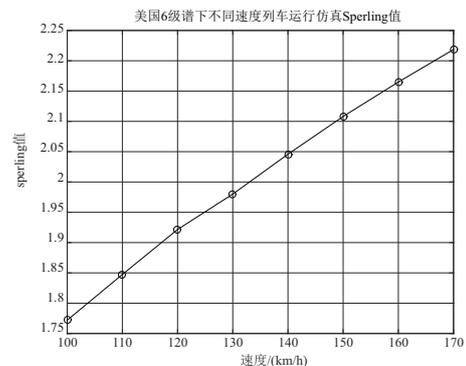


图 10 美国 6 级谱下不同速度列车运行仿真 Spierling 值

由仿真数据计算可知,6 级轨道谱下列车垂向平稳性 Spierling 指标值与列车运行速度的相关系数  $r$  为 0.998 6,二者存在很强的线性关系。因此,可直接采用最小二乘法对列车运行速度与 Spierling 值进行线性回归,从而实现对列车运行过程中垂向平稳性的预测。

## 3 仿真数据驱动的列车运行可视化

基于 SIMPACK 对列车在不同等级美国轨道谱环境下

运行的仿真数据,分析可知列车在不同速度同一轨道谱以及不同轨道谱同一速度下运行平稳性均可通过采用最小二乘法进行曲线拟合的方式获得较好的预测结果。本文采用固定轨道谱等级下列车不同速度运行的仿真结果作为原始数据,用最小二乘法进行线性回归的方式实现列车平稳性 Sperling 值预测计算。借助三维可视化引擎 UNIGINE,将列车在直线线路上的 SIMPACK 运行仿真数据(模型垂向运动加速度以及三维位姿坐标时域数据等)作为原始数据,驱动引擎中相应列车模型进行运动,从而实现列车仿真运行状态的三维渲染呈现。通过上述预测模型,列车在不同运行状态下的垂向平稳性 Sperling 值实时计算显示如图 11 所示。



图 11 列车运行过程三维可视化效果图

## 4 结语

传统多体动力学软件无法快速并且直观形象反映出列车的真实运行环境(如地形、天气、光照、路况信息等),目前主流的列车虚拟运行仿真系统又无法实现对列车安全性与平稳性的评估分析。针对上述现状,本文提出了一种基于多体动力学仿真数据驱动的列车运行可视化方法。本文主要工作如下:

1) 基于真实三维地形数字高程数据以及卫星纹理贴图数据,开发了构建列车运行地形环境三维模型的插件。根据不同铁路线路类型,将列车运行涉及的线路场景基础模型布置于构建好的三维地形模型之中,从而构件列车运行整体三维场景模型。

2) 基于多体动力学软件 SIMPACK,对列车在不同等级美国轨道谱下的运行进行仿真,并对仿真结果数据进行分析处理,建立了最小二乘法线性回归模型,预测出列车在不同速度以及不同轨道类型下运行的垂向平稳性指标。

3) 基于仿真结果数据以及列车垂向平稳性预测模型,借助三维可视化引擎,对列车在直线段上运行过程中的运行仿真状态进行三维渲染呈现。

## 参考文献:

- [1] 张卫华,李艳,宋冬利. 高速列车运动稳定性设计方法研究[J]. 西南交通大学学报,2013,48(1):19-23.
- [2] 杜延鹏. 高速列车安全性态评估仿真平台设计与实现[D]. 成都:西南交通大学,2014.
- [3] 缪炳荣. 基于多体动力学和有限元法的机车车体结构疲劳仿真研究[D]. 成都:西南交通大学,2007.
- [4] 宋晓伟. 地铁列车运行控制视景仿真系统中三维建模技术的研究与实现[D]. 北京:北京交通大学,2006.
- [5] 苏虎,周美玉. 列车驾驶仿真系统中分布式视景仿真[J]. 铁道学报,2002,24(5):37-41.
- [6] 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.
- [7] 王小亮. 高速列车驾驶仿真器动感模拟系统研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.
- [8] Bi H, Li X, Guo M, et al. Digital Terrain Analysis Based on DEM[J]. Frontiers of Forestry in China, 2006, 1(1):54-58.
- [9] 王远明,卢宽,贾倩,等. 基于 Unigine 的舰载航空视景仿真技术研究[J]. 系统仿真学报,2017(9):2087-2092.
- [10] 李向国. 高速铁路线路参数分析及其行车动力特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2011.
- [11] Wang J, Zhu J, Liu Z, et al. A Virtual High-Speed Railway Scene Modeling Method Based on Basic-ElementModel Combination[C]// Seventh International Conference on Image and Graphics. IEEE, 2013:711-715.
- [12] Rulka W. SIMPACK—A Computer Program for Simulation of Large-motion Multibody Systems[M]. Multibody Systems Handbook Springer Berlin Heidelberg, 1990:265-284.
- [13] Li Z, Kota S. Virtual Prototyping and Motion Simulation with ADAMS[J]. Journal of Computing & Information Science in Engineering, 2001, 1(3):276-279.
- [14] Blader, F.B., Elkins, J.A., Wilson, N.G., et al. Development and validation of a general vehicle dynamics simulation (NUCARs)[P]. Railroad Conference, 1989. Proceedings., Technical Papers Presented at the 1989 IEEE/ASME Joint, 1989.
- [15] Schupp G, Netter H, Mauer L, et al. Multibody system simulation of railway vehicles with Simpack[J]. Vehicle System Dynamics, 1999, 31:101-118.
- [16] 罗林. 轨道随机干扰函数[J]. 中国铁道科学, 1982(1):79-117.
- [17] CHEN Guo, 翟婉明, ZUO Hong-fu. 仿真计算比较我国干线谱与国外典型轨道谱[J]. 铁道学报, 2001(3):82-87.
- [18] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 北京:科学出版社, 2015.
- [19] 万里翔, 许明恒. 铁道车辆运行平稳性评价方法的研究[J]. 铁道机车车辆, 2001(1):8-11.
- [20] 严隽鸞, 傅茂海. 车辆工程[M]. 第3版. 北京:中国铁道出版社, 2008.

收稿日期:2018-03-21