

1-2-2019

Design-Model-Oriented Simulation for High-Speed Railway Dynamics

Xie Xing

1. Institute of Advanced Design & Manufacturing, School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; ;

Tang Zhao

2. Traction Power State Key Lab, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

Jiang Jie

1. Institute of Advanced Design & Manufacturing, School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; ;

Yisheng Zou

1. Institute of Advanced Design & Manufacturing, School of Mechanical Engineering, 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.

Design-Model-Oriented Simulation for High-Speed Railway Dynamics

Abstract

Abstract: The traditional vehicle dynamics focuses more on numerical simulation, which separates from design model. LMS Virtual.Lab Motion - natively integrated in CATIA - is a multi-body dynamics package developed with CAA V5 for mechanical system, which is widely applied in engineering fields, such as aerospace, automotive, etc. But to expand to the dynamics of locomotive vehicle, the bottleneck problem of wheel/rail dynamic interaction should be solved. *This paper employs CAA V5 and Motion UDF/UDS functions to create some special force elements which distinguish locomotive vehicles from general multibody system applications, and to integrate wheel/rail interaction solver module which determines wheel/rail contact locations and forces through hybrid programming of Fortran and C++. A simulation model for high-speed railway based-on CAD design model is built.* Compared with Simpack, the analysis results of CRH2 reveal that the method is valid and available, and brings forward a new study way for CAD/CAE integration for high-speed railway.

Keywords

high-speed railway, vehicle dynamics, design model, motion, secondary development

Authors

Xie Xing, Tang Zhao, Jiang Jie, Yisheng Zou, and Guofu Ding

Recommended Citation

Xie Xing, Tang Zhao, Jiang Jie, Zou Yisheng, Ding Guofu. Design-Model-Oriented Simulation for High-Speed Railway Dynamics[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(2): 465-472.

面向设计模型的高速列车动力学仿真研究

谢星¹, 唐兆², 姜杰¹, 邹益胜¹, 丁国富¹

(1.西南交通大学机械工程学院先进设计与制造研究所, 成都 610031; 2.西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 成都 610031)

摘要: 传统的机车车辆动力学更多关注于数值仿真而与设计模型相脱离, LMS Virtual.Lab Motion 是由 CAA V5 开发集成在 CATIA 环境中的多体动力学软件, 在航空、汽车等工程领域得到广泛应用, 但要拓展到机车车辆动力学尚待解决轮轨动态作用等瓶颈问题。为此, 在集成于 CAD 的 Motion 环境中, 利用 CAA V5 和 Motion 的二次开发功能, 自定义多个机车车辆特有力元, 并结合 C++ 和 Fortran 混合编程技术集成轮轨关系求解模块, 构建了基于设计模型的高速列车动力学仿真分析模型。通过与 Simpack 中 CRH2 算例的定性分析对比, 验证了方法的可行性, 为其 CAD/CAE 集成提供了思路。

关键词: 高速列车; 车辆动力学; 设计模型; Motion; 二次开发

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 02-0465-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201802013

Design-Model-Oriented Simulation for High-Speed Railway Dynamics

Xie Xing¹, Tang Zhao², Jiang Jie¹, Zou Yisheng¹, Ding Guofu¹

(1. Institute of Advanced Design & Manufacturing, School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Traction Power State Key Lab, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The traditional vehicle dynamics focuses more on numerical simulation, which separates from design model. LMS Virtual.Lab Motion – natively integrated in CATIA – is a multi-body dynamics package developed with CAA V5 for mechanical system, which is widely applied in engineering fields, such as aerospace, automotive, etc. But to expand to the dynamics of locomotive vehicle, the bottleneck problem of wheel/rail dynamic interaction should be solved. *This paper employs CAA V5 and Motion UDF/UDS functions to create some special force elements which distinguish locomotive vehicles from general multibody system applications, and to integrate wheel/rail interaction solver module which determines wheel/rail contact locations and forces through hybrid programming of Fortran and C++.* A simulation model for high-speed railway based-on CAD design model is built. Compared with Simpack, the analysis results of CRH2 reveal that the method is valid and available, and brings forward a new study way for CAD/CAE integration for high-speed railway.

Keywords: high-speed railway; vehicle dynamics; design model; motion; secondary development

引言

随着列车运行速度的提高和动力作用的加剧,



收稿日期: 2016-01-04 修回日期: 2016-03-15;
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(5157546);
作者简介: 谢星(1988-), 男, 江西瑞金, 博士生, 研究方向为虚拟样机、CAD/CAE 集成; 唐兆(1979-), 男, 四川南充, 博士, 讲师, 研究方向为虚拟样机技术、疲劳强度仿真分析技术。

仅仅考虑孤立的车辆或列车动力学已经不能很好满足实际运行情况, 应考虑与车辆系统相互作用和相互影响的其它系统, 例如弓网系统、线桥隧系统和流体系统等, 同时在高速下部分运动部件应由刚体向柔性体转化, 这就是高速列车的耦合大系统动力学研究^[1-2]。在此大背景下, 高速列车的 CAD-CAE 集成及优化设计的虚拟样机技术研究也

成为一个热点问题^[2-4]。近年来,在高速列车的CAD/CAE集成研究上也涌现出一些成果^[5-7]。

在车辆动力学方面,传统的车辆动力学软件如Simpack等仅作为独立的仿真分析软件,更多地关注于数值分析,CAD设计模型导入到分析软件只是作为可视化手段而与设计的关联性不强,导致仿真与设计是两个分离的进程。为此,丁国富等^[8]提出了一种在设计和性能分析间建立属性提取层,通过预先在CAD设计中进行属性定义,从而实现直接从产品设计模型抽取分析模型的思路和方法,并以多体动力学为例进行了验证,使得设计与分析的关联性得到加强。但是仍需要通过中性文件与CAE进行数据信息传输。而Motion是LMS Virtual.Lab下的多体动力学的仿真分析功能包,其基于达索公司的PLM开放式软件平台CAA V5开发,由于与CAD(CATIA)的集成,Motion能够快速响应设计更改迭代及时地更新设计结果。并且能够与平台的结构分析、振动噪声、声学、系统疲劳及优化等无缝连接构成建模、仿真和优化的一体化集成环境。因此在基于设计模型的Motion中进行扩展是一种比较好的关联设计与分析的实现方式。从查阅的文献和资料来看,Motion在机车车辆动力学上的应用还较少。韩国机械和材料研究院(KIMM)在Motion中创建自定义的用户子程序,通过自定义300多个常微分方程(ODE)的悬浮算法计算电磁铁的抬升力和导向力,集成柔性接触力子程序到求解器,首次建立了磁悬浮列车的仿真模型^[9]。

与磁悬浮列车要解决无接触的悬浮算法问题类似,高速列车要解决的是车辆(轮对)与轨道复杂动态作用下的轮轨关系问题,轨道预处理以及机车车辆特有力元定制,这是机车车辆在LMS Virtual.Lab平台上应用所要解决的主要技术难点。

本文通过CAA V5在CAD设计模型中以信息分层描述方法提前进行属性定义,形成一个具有完整产品自身零件属性信息和性能属性数据的一体化模型,并借助Motion的二次开发功能自定义了

车辆系统特有力元并集成轮轨关系求解算法等,将通用多体动力学扩展到机车车辆动力学分析领域,构建了高速列车的动力学仿真分析模型。

1 高速列车的多体模型

高速列车是典型的机械多体系统,根据多体理论,车辆系统可分解为车体、构架、轮对等,悬挂系统等部件或装置,悬挂系统用于连接和约束车辆系统各物体的系列装置,起到导向牵引和传递系统的各种载荷的作用,以及支撑车辆行驶的轨道等。

1.1 多体方程

Motion求解器采用的是被验证的高效、精确和稳定的DADS求解器。它是基于以3个位置坐标和欧拉四元数方向坐标为变量的绝对坐标系下的笛卡尔方程式。多体系统一般由物体、连接物体的铰和力元以及外部激励等构成,物体之间的相对自由度受到一组铰和约束方程的约束。那么多体系统的组集方程可以表示成牛顿-欧拉运动方程和约束方程的微分代数方程形式:

$$\left. \begin{array}{l} \left[\begin{array}{cc} M & \Phi_q^T \\ \Phi_q & \mathbf{0} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \ddot{q} \\ \lambda \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} Q_a \\ \gamma \end{array} \right] \\ q = [x \ y \ z \ e_0 \ e_1 \ e_2 \ e_2]^T \end{array} \right\} \quad (1)$$

式中: M 是物体的质量矩阵; q 是欧拉四元数; Q_a 是作用于物体的广义力; λ 是拉格朗日乘子; Φ_q 是约束力的雅可比矩阵; γ 是约束方程的二阶导数。

1.2 面向设计的属性参数提取

以往的虚拟样机性能分析,CAD模型仅作为可视化的形状模型而通过分析工具添加属性在CAE软件中进行二次建模,这忽略了产品零件自身的属性定义。实际上,CAD模型已经直接或间接地提供了性能分析所需的数据^[8],有些可由零件自身的物理属性给出,如质量、几何形状、质心、转动惯量、密度、弹性模量、刚度、阻尼等;有些则需要通过产品装配关系和空间运动特性间接得到,如位置、方位、铰与多体的连接关系、位置坐

标等。因此在 CAD 中就对产品的物理属性进行建模, 将产品的属性定义提前放在 CAD 设计中, 通过在 CAD 和样机性能分析之间建立属性提取层, 为后续的性能分析提供一个满意的一体化模型。

Motion 基于 CAA V5 开发, 其模型继承自 CATIA。对于高速列车动力学而言, 针对其动力学信息模型的表达, 将产品的动力学信息进行了分层描述, 即部件层和特征层, 进而建立起基于 CATIA/CAA 的动力学信息模型。部件层主要是从宏观的角度表达装配体的部件构成, 其信息包括: 部件名称、装配层次、部件关系等部件信息。特征层主要是从微观的角度来描述零部件的具体几何对象, 主要包括: 名称、体积、重心、材料、功能、位置等属性信息以及约束类型、运动关系等关联信息。基于 CATIA/CAA 的动力学信息模型见图 1。该模型较好地表达了产品动力学模型属性信息以及关联信息, 基本满足后续动力学分析对信息量的要求, 而且模型相对简单。

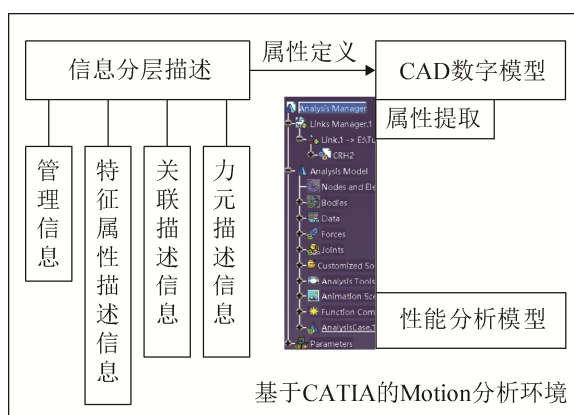


图 1 面向设计模型的动力学属性提取

Fig. 1 Design-model-oriented dynamics attributes extraction

1.3 动力学模型与拓扑结构图

Motion 中的高速列车的建模以基于骨架的自顶向下的子结构/装配体方法完成数字模型的创建, 骨架定义各部件之间的装配关系和控制关联关系(包括尺寸和约束等)以响应分析结果快速及时地更新模型。在建立数字化模型时, 分别建立机车车辆各子系统模型, 包括前、后转向架, 车体、牵

引制动装置等, 然后建立各子系统的零部件细节三维模型, 最后通过子结构装配形成整车三维模型。再根据车辆多体动力学理论, 将部件或子系统定义为构件, 添加铰链、约束、力或力元等连接或约束元素建立整车动力学模型, 在这过程中如何定义机车车辆各部件之间合适的约束连接是一个关键。

Motion 中只提供了常用的力元等约束元素以及航空、汽车等领域的专业模块, 并未提供机车车辆领域所需的专业模块, 但是可通过其 UDF/UDS 自定义功能开发相关的功能力元, 即机车车辆领域的特有力元, 包括串联弹簧-阻尼力元(Spring-Damper in Serial Point-to-Point, 简称 SDSP)、三向并联弹簧-阻尼力元(Spring-Damper in Parallel Component, 简称 SDPC)、剪切弹簧力元(Shearing Spring, 简称 SS)和轮轨力元(Wheel-Track Contact Force Element, 简称 WTCF)等, 用来模拟悬挂系统之间的连接约束关系和轮轨约束关系。由此建立 CAD/CAE 集成环境下的整车动力学模型及其拓扑关系, 见图 2。

2 基于 Motion 的定制开发

在计算多体动力学中, 通常地, 有两种处理工程实际的方法: 一是针对某一特定的工程应用开发专门的算法, 这种方法领域性较强, 不能很好地适应更多的一般性应用或者物理现象; 二是在已有的多体系统算法的基础上进行适当地扩展, 这种方法有好的兼容性、继承性和集成性, 并能适应特定领域的工程应用。

Motion 提供了成熟的多体系统算法(DADS 求解器), 其 UDF/UDS 定制开发具有一定的柔性, 用户可以根据需要自定义所需的力元, 主要包括两个方面: 一是对内置的力元进行适当的修改以适应不同的实际分析需要, 如对 TSDA 力元考虑弹簧的极限拉断的情况等; 二是用户自定义力或子程序, 用户可以通过开放的接口函数来定义所需的力元。对于机车车辆动力学而言, 本文考虑第二种情形。

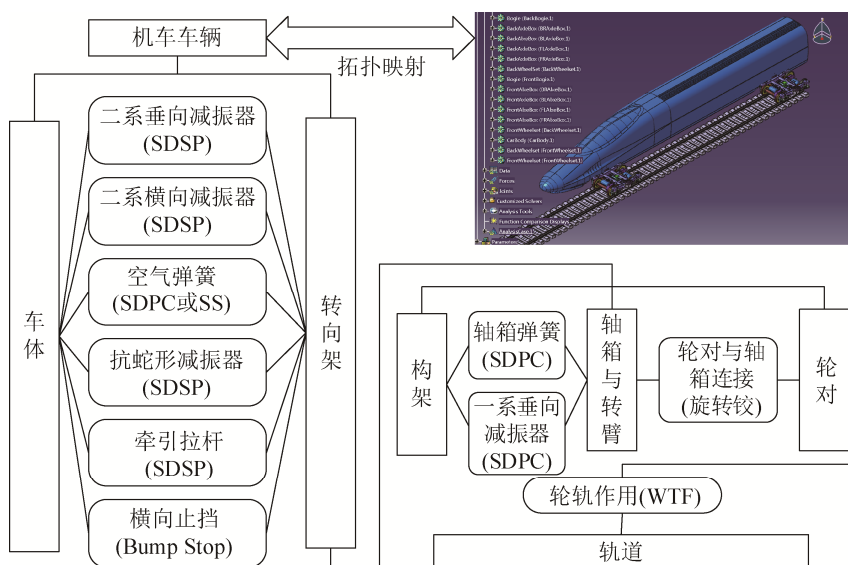


图2 机车车辆动力学模型及其拓扑关系

Fig. 2 Railway vehicle dynamics model and its topological map

2.1 机车车辆特有力元开发

对于机车车辆中的特有力元开发，以机车车辆上的减振器为例，包括一系横向减振器、二系横向减振器以及抗蛇形减振器等。铁道客车上的阻尼器两端存在具有一定刚度的橡胶节点，从实际情形考虑，有必要建立带有橡胶节点的高速列车模型^[10]。考虑两端的橡胶节点的等值性，可以将其简化为串联弹簧-阻尼力元(SDSP)，其一般的开发步骤如下：

(1)力元对话框界面描述。通过 Motion 中的对话框描述语言定制自定义力元的内容，对话框中的交互数据定义了力元的基本参数，将作为后续力元力学定律的计算输入参数，力元界面的定义见图 3。

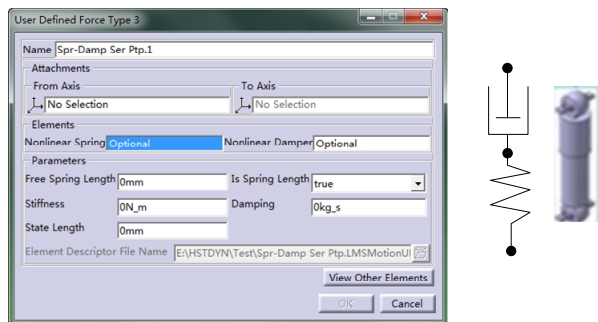


图3 串联弹簧-阻尼力元界面定义
Fig. 3 SDSP UI definition

(2)用户自定义力的力学定律计算。借助自定义模板，添加适当处理代码实现用户自定义力和状态方程。即依据所定义的力元的力学定律，求解作用在选择的点或者坐标系上的力(力/转矩)，这里需要注意的是，对话框坐标系所选择的作用点是由质心坐标定义还是局部坐标系定义，将作用力转化到作用在重心坐标上；再变换力和力矩到全局坐标系得到广义力和力矩；最后将变换后的力和力矩应用到系统中。力学定律的推导过程，可见文献[11-12]。

2.2 轨道预处理

2.2.1 轨道坐标系描述

在机车车辆动力学的轮轨关系计算中，为了方便地描述轨道几何，采用另一种坐标表示，即轨道坐标，是一种相对坐标系描述方式，定义见图 4。轨道中心线上的坐标系 $X^{ti}Y^{ti}Z^{ti}$ 称为体-轨道坐标系，其跟随体一同运动，也就是每个体都有各自的体-轨道坐标系。在世界(全局)坐标系下，体-轨道坐标系的位置和方向可以由空间的轨道中心线的弧长 s 描述。同笛卡尔坐标系一样，每个体都有体坐标系 $X^{ir}Y^{ir}Z^{ir}$ ，但轨道坐标中，体坐标相对于体-轨道坐标系描述。

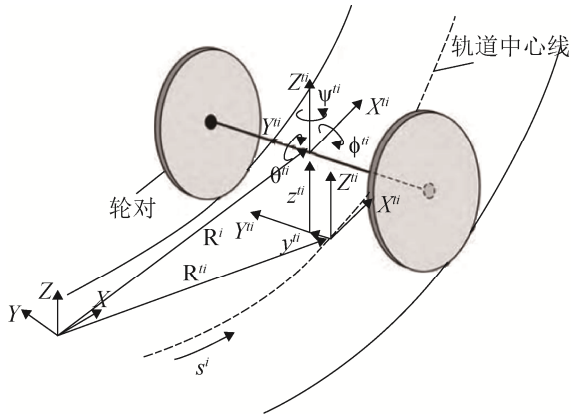
图4 机车车辆中的轨道坐标系^[12]

Fig. 4 Railroad vehicle trajectory coordinates

在轨道坐标系中, 体-轨道坐标系由与弧长 s 相关的三个位置和三个姿态(按一定序列的欧拉角, 常用 $Z \rightarrow Y \rightarrow X$, 即摇头-点头-侧滚)表示, 可以写成如下形式:

$$\begin{cases} \mathbf{R}^{ii} = \mathbf{R}^{ii}(s^i) = [x^{ii}(s^i) \ y^{ii}(s^i) \ z^{ii}(s^i)]^T \\ \boldsymbol{\theta}^{ii} = \boldsymbol{\theta}^{ii}(s^i) = [\psi^{ii}(s^i) \ \theta^{ii}(s^i) \ \phi^{ii}(s^i)]^T \end{cases} \quad (2)$$

在体-轨道坐标系中, 体坐标系同样可由与弧长 s 相关的三个位置和三个姿态角描述, 在机车车辆动力学中, 常选择序列 $\text{Yaw}(Z) \rightarrow \text{Roll}(X) \rightarrow \text{Pitch}(Y)$ 来描述任意体的姿态。则在轨道坐标系中, 任意体的运动都可以描述为两个移动位移量 y^{ir} 、 z^{ir} 及三个相对旋转方位角 ψ^{ir} 、 ϕ^{ir} 和 θ^{ir} 来描述。另一方面轨道坐标系的运动可由空间曲线的弧长参数 s 唯一确定。故而, 在全局坐标系下, 不同于式(1), 任意体的广义轨道坐标描述可以写成:

$$\mathbf{p}^i = [s^i \ y^{ir} \ z^{ir} \ \psi^{ir} \ \phi^{ir} \ \theta^{ir}]^T \quad (3)$$

2.2.2 轨道预处理流程

轨道的预处理有两个方面: 一是由轨道定义文件输出离散数据完成轨道几何建模; 二是由离散的数据处理后作为轮轨关系计算的输入, 对于轮轨关系计算, 采用的是广义轨道坐标的描述处理方式, 而 *Motion* 中采用的是广义笛卡尔坐标的方式来组集动力学方程, 这就需将轮对的广义笛卡尔坐标向广义轨道坐标进行变换, 变换的量有轮对位置、轮对速度、轮对姿态和轮对角速度等。

在任意仿真时刻 t , *Motion* 中轮对在全局坐标

系下的位置、速度、姿态和角速度都已知, 因此, 根据轨道坐标的描述, 可完成广义笛卡尔坐标到广义轨道坐标的变换^[12], 主要步骤如下:

(1) 读取轨道离散数据, 计算各离散节点的姿态角和坐标轴矢量;

(2) 计算轮对坐标系对应的轨道坐标系的全局坐标 $(x_{si} \ y_{si} \ z_{si})^T$ 、弧长 s_i 和三个姿态角 $(\Psi_{ii} \ \theta_{ii} \ \phi_{ii})^T$;

(3) 计算轨道坐标系的方向余弦阵 \mathbf{A}^{ii} , 三个坐标轴单位向量 $(\mathbf{i}^{ii} \ \mathbf{j}^{ii} \ \mathbf{k}^{ii})$;

(4) 求轮对坐标系的广义轨道坐标表示的位置 $(s_i \ y_{ir} \ z_{ir})^T$;

(5) 求轮对坐标系相对于轨道坐标系的姿态角 $(\Psi_{ir} \ \phi_{ir} \ \theta_{ir})^T$;

(6) 求轮对坐标系在广义轨道坐标描述下的速度 v_{pi} ;

(7) 求轮对坐标系在广义轨道坐标描述下的角速度。

通过以上的步骤, 可以一一求解轮轨关系计算中由广义轨道坐标描述的相关物理量, 用于后续的计算。

2.3 轮轨关系算法实现

机车车辆动力学区别于一般多系统动力学的两个问题: 一是几何问题, 即轮/轨几何和轨道几何, 根据轮轨型面和轮轨约束关系确定接触点位置; 二是接触问题, 即轮轨接触, 根据轮轨之间的接触力作用关系, 由蠕滑力理论计算接触点的蠕滑率、切向蠕滑力和自旋蠕滑等量^[12-14]。轮轨力起着车辆导向的作用, 是最重要和特殊的一种力元类型, 其动态作用的复杂作用及计算过程通过 *Motion* 中的接触力元是不能实现或符合工程物理现象。

为此本文将这一涉及到轮轨型面、轨道几何和外部激励等多个因素的复杂的计算过程分离, 采用 C++ 静态库封装。Motion 中利用 UDF/UDS 功能, 将动力学计算模型与轮轨力计算之间的数据交换以轮轨力元的方式封装, 用于定义轮轨关系计算的

基本参数和及时获取任意积分时刻的系统数据,如轮对位置、速度等,将这些必要的参数通过 Fortran 和 C++ 的联合调用的方式完成传递,这样即可实现以系统的积分步长来控制数据的更新与轮轨力的

计算,实现原理见图 5。至此,轮轨力计算与其他自定义力元计算一同编译生成自定义的求解器,与 Motion 的求解器一起完成机车车辆动力学的求解分析。

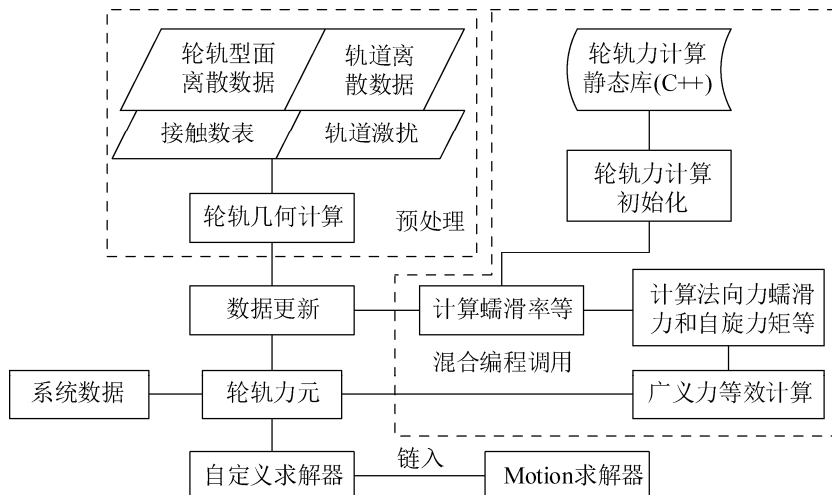
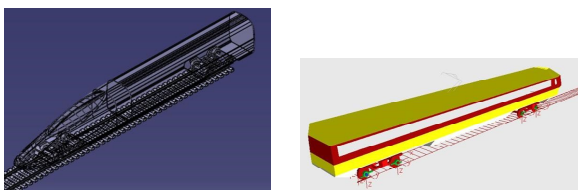


图 5 轮轨关系计算的实现原理

Fig. 5 Implementation for wheel-rail contact computing

3 可行性验证

为了验证本文提出的机车车辆动力学在通用多体动力学 Motion 中的扩展应用的方法和可行性,以 CRH2 模型为算例,与机车车辆领域广泛采用的商业软件 Simpack 在扰动作用下的直线轨道上的动力学分析结果做了定性的分析对比。Motion 与 Simpack 中的动力学计算模型见图 6。



(a) Motion 中的计算模型 (b) Simpack 中的计算模型

图 6 CRH2 动力学计算模型

Fig. 6 CRH2 dynamics computing model

考虑高速列车在常规速度下运行的情况,选择 200 km/h(实际为 191.74 km/h)进行计算,分析选取表征动力学性能的相关几个物理量^[13],见图 7。

通过曲线结果对比,在 Motion 计算稳定收敛后,两者的计算结果也是非常接近,曲线基本重合。稳定后, Motion 中轮轨横向力为 404.784 N, Simpack 中结果为 544.496 N,前者的数值要略小于后者,而对于整个轮对(轮轴横向力),结果是一致的。误差的原因主要有,首先在 Motion 不能实现自定义力元的预平衡分析,同时本文轮轨算法采用穿透法在初始时有一定的穿透压缩量,因此在计算开始后出现短时间震荡以达到平衡稳定状态,而运动稳定后,两者的结果趋于一致;此外,两者采用的积分求解算法不同, Simpack 采用优化的 DASSL 法(SODASRT),而 Motion 中采用的是通用的 Runge-Kutta 法,在收敛速度上要慢,文献[15]将 Simpack、Vampire、ADAMS/Rail 等与 Manchester BenchMark 进行比较也表明了不同软件和求解算法之间存在差异或误差。

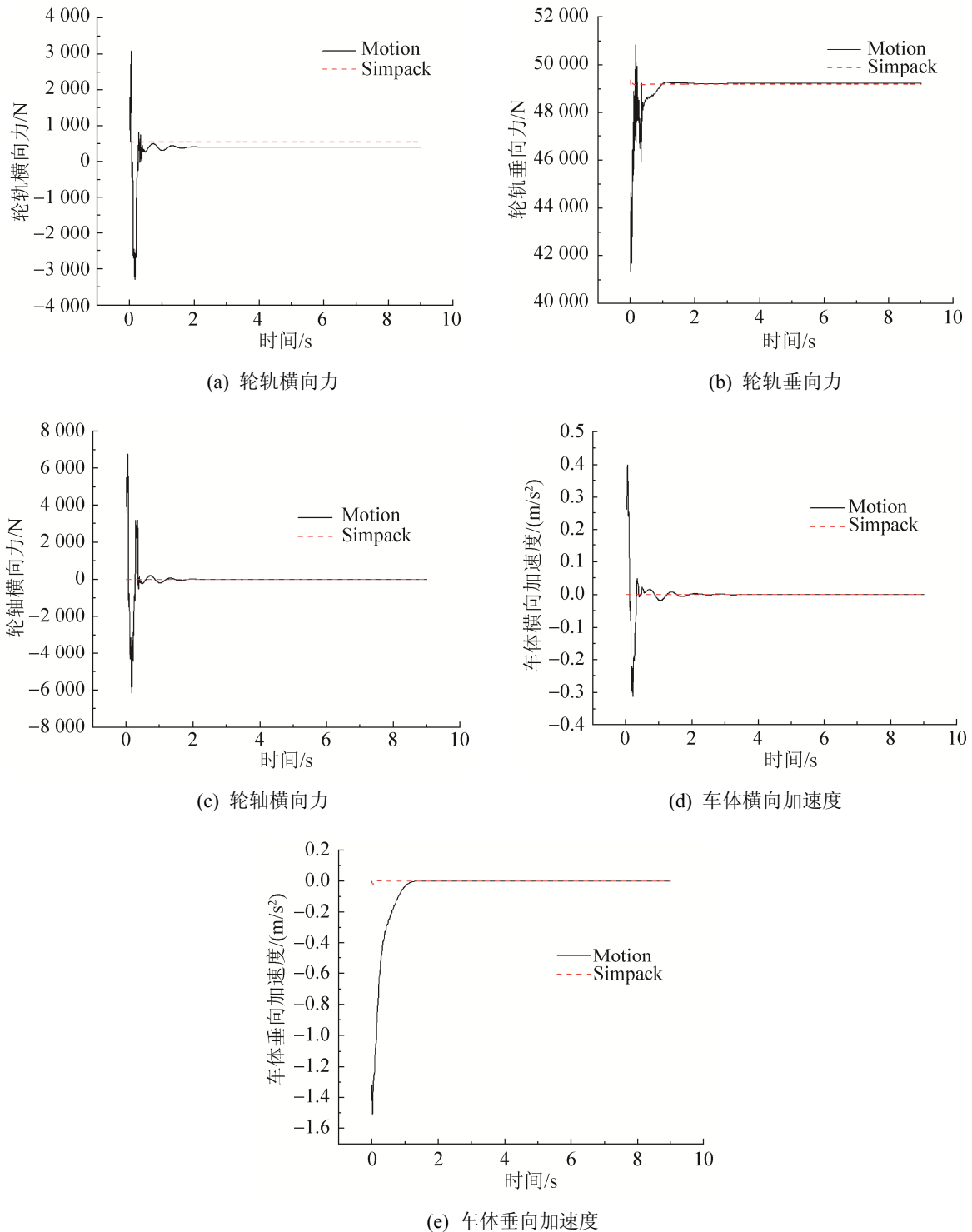


图 7 两种动力学计算结果比较

Fig. 7 Comparison of dynamics computing result between SIMPACK and Motion

4 结论

高速列车系统的研究已不局限于车辆动力学的数值算法分析, 正在向多学科耦合、CAD/CAE 集成

系统的方向发展, 由单纯的动力学仿真分析逐渐过渡到设计-分析-优化的整个反馈进程, 高速列车的虚拟样机技术研究将表现出更强大的生命力和作用。由于高速列车设计的学科领域和系统的复杂性, 借

鉴现有的先进的商业平台是一种很好的研究选择。

本文从设计的角度,将设计模型和分析模型结合起来研究,基于此重点研究了 Motion 扩展后能够成为解决车辆动力学系统的技术方法。在 LMS Virtual.Lab 的多学科仿真集成平台上,通过 CAA V5 在 CAD 设计模型中提前进行属性定义,并通过提取性能数据直接从产品设计模型中抽取动力学性能分析模型。借助 Motion 中提供的 UDF/UDS 定制开发功能,自定义拓展机车车辆所特有力元,通过 Fortran 与 C++ 的混合调用的方式集成轮轨关系计算算法,编译生成的自定义求解器与 Motion 求解器共同完成求解分析任务,以此建立了面向设计模型的机车车辆的动力学仿真分析模型,并进行了初步的定性分析验证,表明了所提出方法的可行性,为机车车辆系统动力学的 CAD/CAE 集成及后续的多学科耦合仿真、分析和优化研究提供了一种思路和方法。

参考文献:

- [1] 张卫华, 张曙光. 高速列车耦合大系统动力学及服役模拟[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(2): 147-152.
Zhang Weihua, Zhang Shuguang. Dynamics and service simulation for general coupling system of high-speed trains[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(2): 147-152.
- [2] 张曙光, 池茂儒, 刘丽. 机车车辆动力学研究及发展[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(1): 56-62.
Zhang Shuguang, Chi Maoru, Liu li. The dynamics study of railway vehicle and its development[J]. China Railway Science, 2007, 28(1): 56-62.
- [3] 赵洪伦, 徐祖茂. 铁道车辆CAD-CAE集成系统研制探讨[J]. 上海铁道大学学报, 1997, 18(3): 55-60.
Zhao Honglun, Xu Zumao. Approach to integrated CAD-CAE system of railway vehicles[J]. Journal of Shanghai Tiedao University, 1997, 18(3): 55-60.
- [4] 肖瑞泉. 铁道车辆车轮 CAD/CAE/CAM 一体化技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
Xiao Ruiquan. Research on CAD/CAE/CAM technology of railway vehicle[D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [5] 宋加佳. 列车制动盘 CAD/CAE 集成设计系统研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
Song Jiajia. Research on CAD/CAE integrated design system of train brake disc[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [6] 刘康. 接触网 CAD/CAE 集成系统研究与实现[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
Liu Kang. The research and implementing of overhead contact line CAD/CAE integrated system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [7] 李慧萍. 高速车体 CAD/CAE 关键技术研究与应用[D]. 大连: 大连交通大学, 2012.
Li Huiping. Research and application on CAD/CAE key technology of high-speed train body[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2012.
- [8] 丁国富, 闫开印, 张卫华, 等. 面向虚拟样机设计的产品属性提取研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(1): 14-20.
Ding Guofu, Yan Kaiyin, Zhang weihua, et al. Research on extraction of product properties based on virtual prototyping design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(1): 14-20.
- [9] Hyungsuk Han, Seokjoon Moon, Hanwook Cho. State-of-the-art Multibody Dynamic Simulations of EMS-type Maglev Vehicles at KIMM[C]// San Diego, USA: [s.n.], 2008.
- [10] 郝建华. 铁道客车系统隔振分析及悬挂参数优化[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
Hao Jianhua. Optimization of vibration isolation and suspension parameters of railway passenger car systems [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong university, 2006.
- [11] 洪嘉振. 计算多体系统动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
Hong Jiazhen. Computational dynamics of multi-body system[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [12] Shabana A A, Zaazaa K E, Sugiyama H. Railroad vehicle dynamics: a computational approach[M]. CRC press, 2007.
- [13] 翟宛明. 车辆-轨道耦合动力学 [M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2007.
Zhai Wanming. Vehicle-Track coupling dynamics (3rd Edition)[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [14] Pombo J, Ambrósio J, Silva M. A new wheel-rail contact model for railway dynamics[J]. Vehicle System Dynamics (S0042-3114), 2007, 45(2): 165-189.
- [15] Iwnicki S. The Manchester benchmarks for rail vehicle simulation[M]. Taylor & Francis, 1999.