

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.10.001

# 基于特性的商用车整体式车桥及耦合悬架 动力学模型研究\*

李力<sup>1</sup>, 黄伟<sup>2</sup>, 高越<sup>1</sup>, 孙磊<sup>2</sup>, 朱宝黎<sup>2</sup>, 管欣<sup>1</sup>, 詹军<sup>1</sup>, 姜乐<sup>1</sup>, 段春光<sup>1</sup>, 崔晨雪<sup>2</sup>, 王威<sup>2</sup>  
(1. 吉林大学, 汽车底盘集成与仿生全国重点实验室, 长春 130022; 2. 中国重型汽车集团有限公司, 济南 250000)

**[摘要]** 车桥及悬架是汽车的重要部件, 为了实时模拟商用车的整体式车桥及多种结构类型的悬架, 本文采用基于总成特性的建模技术路线, 将车桥的运动解耦为 Motion 运动学和 Ride 动力学, 将悬架特性划分为耦合承载特性、RC/PC 导向特性和耦合 K&C 运动学特性, 创新性地考虑了车桥的俯仰动态效应、桥间承载非线性动态耦合关系、桥间 K&C 运动学耦合关系, 建立了能够激发出商用车制动抖振负面现象的动力学模型, 并提出了针对耦合悬架的 K&C 试验方案和模型参数辨识方法。最后, 通过对比 K&C 试验数据, 并与 TruckSim 模型作对比, 系统层级上验证了本模型的精准性; 通过将车辆参数填入 UniTruck 软件, 对某款商用车进行了仿真, 并与 TruckSim 仿真结果作对比, 整车层级上验证了本模型的有效性。

**关键词:** 商用车; 整体式车桥; 耦合悬架; 平衡悬架; 多联悬架; K&C 试验

## Research on a Property-Based Dynamic Model of the Solid Axle and Coupled Suspension for Commercial Vehicles

Li Li<sup>1</sup>, Huang Wei<sup>2</sup>, Gao Yue<sup>1</sup>, Sun Lei<sup>2</sup>, Zhu Baoli<sup>2</sup>, Guan Xin<sup>1</sup>, Zhan Jun<sup>1</sup>, Jiang Le<sup>1</sup>,  
Duan Chunguang<sup>1</sup>, Cui Chenxue<sup>2</sup> & Wang Wei<sup>2</sup>

1. Jilin University, National Key Laboratory of Automotive Chassis Integration and Bionics, Changchun 130022;

2. China National Heavy Duty Truck Group Co., Ltd., Jinan 250000

**[Abstract]** The axle and suspension are critical components of vehicles. To achieve real-time simulation of the solid axle and various suspension structures of a commercial vehicle, the property-based modeling technical route is adopted in this paper. The axle's movement is decoupled into motion kinematics and ride dynamics, while the suspension characteristics are divided into coupled carrying characteristics, RC/PC guiding characteristics, and coupled K&C kinematic characteristics. Innovatively considering the pitch dynamic effect of the axle, the nonlinear dynamic coupling relationship of suspension between axles, and the K&C coupling relationship of suspension between axles, a dynamic model for commercial vehicles is developed to trigger the negative phenomenon of brake vibration. Additionally, a K&C testing method for the coupled suspension and a method for model parameter identification are proposed. Finally, the accuracy of the model is validated at the system level by comparing K&C test data with TruckSim model results. Inputting vehicle parameters into the UniTruck software for simulation and comparing the results with TruckSim simulation, the model's effectiveness is verified at the vehicle level.

**Keywords:** commercial vehicle; solid axle; coupled suspension; balanced suspension; tandem suspension; K&C test

\* 吉林省自然科学基金-国家重点实验室(学科类)重大专项(SKJ202302014)和吉林省长春市重大科技专项(20230301006ZD)资助。

原稿收到日期为 2024 年 06 月 12 日, 修改稿收到日期为 2024 年 08 月 10 日。

通信作者: 段春光, 工程师, 博士, E-mail: dsprings@163.com; 黄伟, 高级工程师, 博士, E-mail: huangwei@sinotruk.com。

## 前言

车桥及悬架是车辆的重要簧下部件,它们不仅影响乘坐舒适性,还会通过车轮定位影响汽车的操纵稳定性,并通过主销影响转向力感和触感,对整车的稳态性能、动态品质和驾驶感觉都有较大的影响<sup>[1]</sup>。

与乘用车普遍采用的断开式车桥和独立悬架不同,商用车常用整体式车桥和多种结构类型的悬架,由于商用车车桥和悬架的尺寸质量较大、加工工艺不高,导致了商用车系统间匹配的复杂度和整车集成的难度增加,使得商用车整车的负面现象(例如制动抖振等)急剧增多,严重制约了商用车的高质量发展<sup>[2]</sup>。

目前,商用车整车厂商多是通过产品开发流程后期的实车场地试验,对车桥和悬架进行调校从而改善负面现象,如何在汽车开发过程中提前获知品质问题,是商用车行业当前关注的重点之一。本文研究的商用车整体式车桥及耦合悬架动力学模型,能够帮助厂商提前获知由车桥和悬架而导致的制动抖振等品质问题,以便在设计之初加以避免,在设计之中加以管控,在设计之后加以优化,减少迭代成本和开发周期<sup>[3]</sup>。

当前,国内外对商用车整体式车桥及耦合悬架进行了大量研究,建模方法主要分为两类,一类是基于总成结构的建模,另一类是基于总成特性的建模<sup>[4]</sup>。基于总成结构的模型通常是通过多体动力学软件对车桥和悬架进行建模:葛方舟<sup>[5]</sup>基于 Adams 建立了重型载货汽车的双前轴平衡悬架和车桥模型, Philipson 等<sup>[6]</sup>基于多体动力学原理建立了 Modelon 的串联悬架和车桥模型, Hasagasioglu 等<sup>[7]</sup>基于 SuspensionSim 软件建立了 6×2 重型车辆的串联悬架模型,靳建龙等<sup>[8]</sup>基于 CATIA 建立了平衡悬架模型并进行了 K 特性分析, Evers 等<sup>[9]</sup>基于 Matlab/Simulink 中的多体工具箱 Multibody 建立了商用车车桥和悬架模型。基于总成特性的模型则通常是通过代数型方程求解车桥运动和悬架力, Abdelkareem 等<sup>[10]</sup>建立了牵引车-半挂车的耦合刚度悬架模型, Kamiński<sup>[11]</sup>针对多种结构类型的平衡悬架和多联悬架分别建立了模型, Ha 等<sup>[12]</sup>建立了 6×4 牵引车的平衡悬架和 3 轴半挂车的三联悬架模型, Rill 等<sup>[13]</sup>为 VTT 软件建立了商用车的悬架模型和车桥模型。

通过调研发现,基于总成结构的模型直观可视,但建模费事,求解费时,并且由于供应商的技术保密,整车厂商难以获悉详尽的结构参数,因此难以进行产品管控和优化。基于总成特性的模型,以 TruckSim<sup>[14]</sup>和 TruckMaker<sup>[15-16]</sup>为代表,只须考虑车桥及悬架的主要特性,实时性好、适用范围广,其总成特性本身也可以成为整车厂商管控和评判供应商的重要依据。然而,现有基于总成特性的模型,其俯仰运动多为通过 Dive 角(主销后倾反方向角)修正的稳态模型,少有考虑车桥的俯仰动态效应,难以模拟制动抖振的负面现象;现有的非独立悬架模型,其 C 特性大多沿用乘用车独立悬架模型,不能准确模拟整体式车桥的车轮受力顺从变位(力作用下的弹性运动学特性);现有的耦合悬架模型,多为仅考虑承载力定比例分配的等效稳态模型,少有考虑由平衡装置带来的桥间承载动态耦合非线性特性,少有考虑桥间 K&C 特性的耦合关系,因此难以准确仿真。

本文为满足模型仿真的实时性,采用基于总成特性的建模方法,将车桥模型划分为 Motion 运动学模块和 Ride 动力学模块,将悬架模型划分为耦合承载特性模块、RC/PC 导向特性(侧倾中心特性和纵倾中心特性)模块和耦合 K&C 运动学特性模块,建立了适用于整体式车桥及多种结构类型悬架(板簧式/空气弹簧式非独立悬架、板簧式/空气弹簧式平衡悬架、板簧式/空气弹簧式多联悬架)的悬架模型,并提供了配套的悬架 K&C 试验方案和模型参数辨识方法。最后,以 K&C 试验数据为基准,通过对比 TruckSim 模型仿真结果,系统层级上验证了本模型的精准性;将模型嵌入 UniTruck 整车模型并对某款商用车进行了仿真,通过与 TruckSim 仿真结果作对比,整车层级上验证了本模型的有效性。

## 1 整体式车桥及非独立悬架

车桥与车架二者在 Motion 运动平面(中间坐标系  $X-Y$  平面)方向上的刚度极大,在 Ride 运动方向(垂直于中间坐标系  $X-Y$  平面)的刚度较小<sup>[17]</sup>,因此可以将车桥模型划分为 Motion 运动学模块和 Ride 动力学模块,如图 1 所示。Motion 运动学模块表达的是车桥跟随整车 Motion 动力学的纵向、侧向、横摆运动;Ride 动力学模块表达的是车桥自身的垂向、侧倾、俯仰运动。



### 1.2 非独立悬架模型

如图3所示,非独立悬架模型的承载特性可简化为3个变刚度弹簧(和阻尼),分别是垂向弹簧 $K_{Frz}$ 、侧倾弹簧 $K_{FrRoll}$ 、俯仰弹簧 $K_{FrPitch}$ ,为了适配“考虑总成结构的柔性车架模型”,可将垂向弹簧 $K_{Frz}$ 分为左垂向弹簧 $K_{FL}$ 和右垂向弹簧 $K_{FR}$ 。

可以通过“平行轮跳”试验<sup>[18]</sup>中的“左轮轮心垂向力-左轮轮跳”曲线辨识得到左垂向弹簧刚度 $K_{FL}$ ;通过“平行轮跳”试验中的“右轮轮心垂向力-右轮轮跳”曲线辨识得到右垂向弹簧刚度 $K_{FR}$ ;通过“反向轮跳”试验中的“车桥侧倾力矩-车桥侧倾角度”曲线,并剔除掉由左垂向弹簧、右垂向弹簧产生的侧倾力矩,得到悬架连接杆系的侧倾弹簧刚度 $K_{FrRoll}$ ;通过“纵向力”试验中的“主销后倾角或车轮侧视角-接地点纵向力”曲线,并将接地点的力等效为桥心的俯仰力矩,得到俯仰弹簧刚度 $K_{FrPitch}$ 。

上述建模的假设是垂向、侧倾、俯仰相互解耦,然而实际中,车桥的俯仰运动对垂向力的影响较大,不能忽略<sup>[18]</sup>。TruckSim软件中由于缺少车桥俯仰自由度,因此可基于“纵向力”试验工况中的“轮心垂向力-接地点纵向力”曲线,辨识得到“Load transfer due to wheel torque”;本模型中,可基于“纵向力”试验工况中的“主销后倾角或车轮侧视角-轮心垂向力”曲线,辨识得到此项参数,记为 $K_{FrDiv2FrFz}$ 。至此,如图3所示的左前轮承载力 $F_{FL}$ 可表达为

$$F_{FL} = K_{FL} \Delta z_{FL} + K_{FrDiv2FrFz} \Delta \theta_{Fr} / 2 \quad (7)$$

式中: $\Delta z_{FL}$ 为左前轮的轮跳位移; $\Delta \theta_{Fr}$ 为前桥的俯仰角度。同理,可得右前轮承载力公式。

关于RC/PC导向特性,与乘用车类似,每1个车桥具有1个侧倾中心和1个纵倾中心,不同的是乘用车普遍为断开式车桥,即1个车轴具有2个车桥,因此乘用车的每个车轴具有2个RC和2个PC,商用车则一般是每1个整体式车桥具有1个RC和1个PC,如图4所示。可基于车桥通过悬架传递给车架的力,以及RC/PC的位置关系,求解车架所受的“抗侧

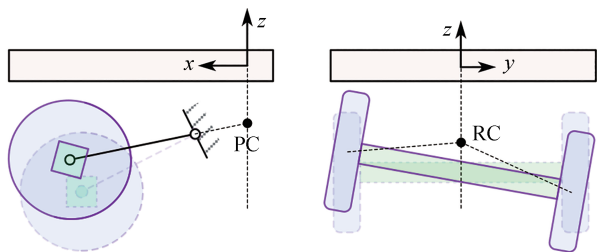


图4 整体式车桥RC/PC示意图

倾力矩、抗俯仰力矩、举升力”和车桥所受的“举升反力”,具体过程可参考相关文献<sup>[17]</sup>,本文不再赘述。

关于K&C运动学特性,与乘用车不同的是,乘用车车轮(即车桥)仅有1个垂向自由度,而整体式车桥须考虑垂向和侧倾2个自由度的影响,因此其K特性的精确求解需要查2-D表,如式(8)所示,式中, $z_{AxleTrvl}$ 代表车桥桥心的垂向跳动行程, $\phi_{Axle}$ 代表车桥的侧倾角变化量。

$$\text{左前轮K特性} = f(z_{AxleTrvl}, \phi_{Axle}) \quad (8)$$

式(8)的方法虽然精准,然而却需要繁琐复杂的K&C试验,难以操作。经探索, $z_{AxleTrvl}$ 和 $\phi_{Axle}$ 两个自变量相互之间耦合程度不大,如图5所示,因此可以忽略两自变量的耦合影响,采用叠加的方式近似求解K特性<sup>[14-16]</sup>,如式(9)所示。

$$\text{左前轮K特性} \approx f(z_{AxleTrvl}) + f(\phi_{Axle}) \quad (9)$$

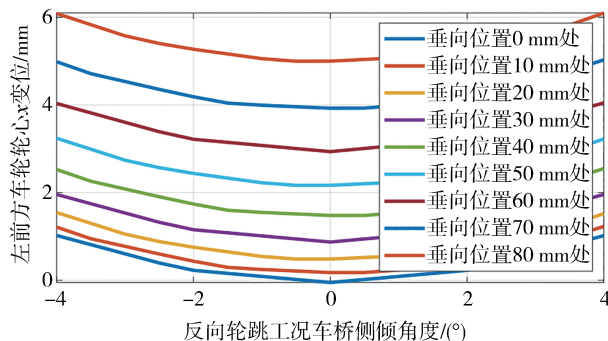


图5 车桥不同垂向位置处反向轮跳时左前轮纵向变位

如图6所示,在根据K&C运动学特性求解车轮定位时,本模型采用了与TruckSim不同的方法。TruckSim在处理K特性时,首先修正桥心的K变位,然后通过运动学求解固联在车桥上的车轮定位;在处理C特性时,除纵向柔度和侧向柔度是修正整体式车桥的桥心外,TruckSim直接沿用乘用车的断开式车桥和独立悬架模型,通过每一个车轮的受力计算车轮的C变位。在处理K特性时,考虑到一方面

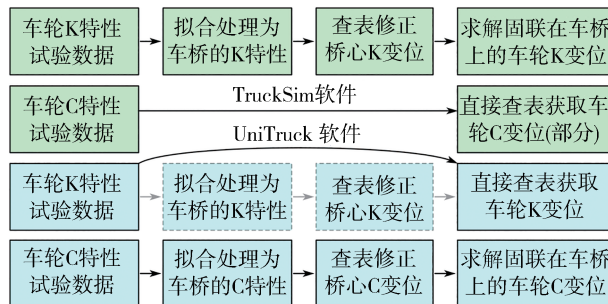


图6 基于悬架K&C特性求解车轮K&C特性流程图

K&C 试验数据本身就可以直接得到车轮定位,另一方面也是为了提高精度减少误差,因此本模型直接通过 K&C 试验数据曲线查表获取车轮 K 特性;本模型在处理 C 特性时,首先通过车轮的受力求解车桥所受的合力,然后修正桥心的 C 变位( $F_x$ 对  $x/y/psi$ ,  $F_y$ 对  $x/y/psi$ ,  $M_z$ 对  $x/y/psi$ ),最后线性叠加并通过运动学求解固联在车桥上的车轮 C 变位。

## 2 平衡悬架

平衡桥直接沿用 2 个独立的整体式车桥模型即可,本文重点对平衡悬架的耦合承载特性和耦合 K&C 运动学特性进行创新性建模,对 RC/PC 导向特性直接沿用非独立悬架模型。

### 2.1 平衡悬架承载特性模型

平衡悬架承载特性模型如图 7 所示,与非独立悬架模型不同的是,平衡模型须考虑弹簧的桥间耦合关系:考虑  $K_{ML}$  和  $K_{RL}$  的耦合关系,  $K_{MR}$  和  $K_{RR}$  的耦合关系,  $K_{MidRoll}$  和  $K_{RearRoll}$  的耦合关系,  $K_{MidPitch}$  和  $K_{RearPitch}$  的耦合关系,中桥俯仰对中桥、后桥垂向力的影响,后桥俯仰对中桥、后桥垂向力的影响。

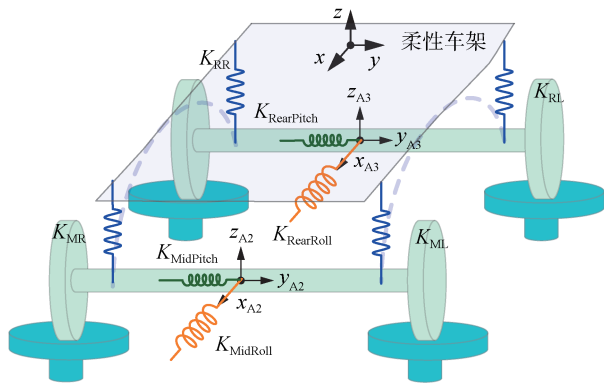


图7 某6x4牵引车中后桥平衡悬架模型示意图

以图7中平衡悬架的左中轮为例,其承载力  $F_{ML}$  求解如式(10)所示。

$$F_{ML} = K_{ML2ML} \Delta z_{ML} + K_{RL2ML} \Delta z_{RL} + K_{MidDive2MidFz} \Delta \theta_{Mid} / 2 + K_{RearDive2MidFz} \Delta \theta_{Rear} / 2 \quad (10)$$

式中:  $K_{ML2ML}$  为左中悬架对左中轮的承载刚度;  $K_{RL2ML}$  为左后悬架对左中轮的承载刚度;  $\Delta z_{ML}$  和  $\Delta z_{RL}$  分别代表左中轮轮跳和左后轮轮跳;  $K_{MidDive2MidFz}$  为中桥俯仰对中桥的承载影响;  $K_{RearDive2MidFz}$  为后桥俯仰对中桥的承载影响;  $\Delta \theta_{Mid}$  和  $\Delta \theta_{Rear}$  分别代表中桥和后桥的俯仰角度。

式(10)为稳态模型,实际上桥间耦合具有动态效应。为了模拟桥间耦合的动态效应,可以考虑增加平衡装置自由度(例如平衡梁“跷跷板”的俯仰动力学),然而这会带来严重的刚性方程问题。因此,本模型采用“2阶滞后”来近似模拟动态效应,如式(11)所示。

$$F_{ML} = K_{ML2ML} \Delta z_{ML} + Dly_{RL2ML} (K_{RL2ML} \Delta z_{RL}) + K_{ML2RL} \Delta z_{ML} - Dly_{ML2RL} (K_{ML2RL} \Delta z_{ML}) + K_{MidDive2MidFz} \Delta \theta_{Mid} / 2 + K_{RearDive2MidFz} \Delta \theta_{Rear} / 2 \quad (11)$$

式中:  $Dly_{RL2ML}$  为左后悬架对左中轮承载刚度的 2 阶滞后函数;  $Dly_{ML2RL}$  为左中悬架对左后轮承载刚度的 2 阶滞后函数;  $K_{ML2RL}$  为左中悬架对左后轮的承载刚度。

以图7中的中桥为例,悬架提供的侧倾力矩  $M_{Midx}$  和俯仰力矩  $M_{Midy}$  如式(12)和式(13)所示。

$$M_{Midx} = K_{MidRoll2MidRoll} \Delta \phi_{Mid} + K_{RearRoll2MidRoll} \Delta \phi_{Rear} + (F_{MR} - F_{ML}) k_{Mid} T_{Mid} / 2 \quad (12)$$

$$M_{Midy} = K_{MidPitch2MidPitch} \Delta \theta_{Mid} + K_{RearPitch2MidPitch} \Delta \theta_{Rear} \quad (13)$$

式中:  $K_{MidRoll2MidRoll}$  为中桥悬架杆系对中桥的侧倾刚度;  $K_{RearRoll2MidRoll}$  为后桥悬架杆系对中桥的侧倾刚度;  $\Delta \phi_{Mid}$  和  $\Delta \phi_{Rear}$  分别为中桥和后桥的侧倾角度;  $K_{MidPitch2MidPitch}$  为中桥悬架杆系对中桥的俯仰刚度;  $K_{RearPitch2MidPitch}$  为后桥悬架杆系对中桥的俯仰刚度;  $k_{Mid}$  为中桥悬架板簧的安装系数;  $T_{Mid}$  为中桥的轮距。

### 2.2 平衡悬架 K&C 运动学特性模型

对于平衡悬架的 K 特性而言,若按照式(8)的方法精确求解需要 4-D 特性表,如式(14)所示,显然不可取。因此本文拓展式(9)的思想,创新性地采用 4 个 1-D 表线性叠加来近似表达 K 特性,如式(15)所示。同理本文创新性地采用 6 个 1-D 表线性叠加来近似表达 C 特性,如式(16)所示。

$$\text{车轮K特性} = f(z_{MidAxleTrvl}, \phi_{MidAxle}, z_{RearAxleTrvl}, \phi_{RearAxle}) \quad (14)$$

$$\text{车轮K特性} \approx f(z_{MidAxleTrvl}) + f(\phi_{MidAxle}) + f(z_{RearAxleTrvl}) + f(\phi_{RearAxle}) \quad (15)$$

$$\text{车桥C特性} \approx f(Fx_{Mid}) + f(Fy_{Mid}) + f(Mz_{Mid}) + f(Fx_{Rear}) + f(Fy_{Rear}) + f(Mz_{Rear}) \quad (16)$$

式中:  $z_{MidAxleTrvl}$  和  $z_{RearAxleTrvl}$  分别代表中桥和后桥的平行轮跳量;  $\phi_{MidAxle}$  和  $\phi_{RearAxle}$  分别代表中桥和后桥的侧

倾量; $F_{x_{Mid}}$ 、 $F_{y_{Mid}}$ 、 $M_{z_{Mid}}$ 分别代表中桥所受的纵向力、侧向力、横摆力矩; $F_{x_{Rear}}$ 、 $F_{y_{Rear}}$ 、 $M_{z_{Rear}}$ 分别代表后桥所受的纵向力、侧向力、横摆力矩。

### 2.3 平衡悬架K&C试验方案及参数辨识方法

当前国内外对平衡悬架K&C试验方法的研究较少<sup>[19]</sup>,笔者提出了一种平衡悬架的K&C试验方案<sup>[20]</sup>,如表1所示。表1中:“中桥同向轮跳工况”具体是指后桥垂向位置约束不动且其他方向随动,中桥实施平行轮跳;“中桥纵向力工况”是指后桥垂向位置约束不动且其他方向随动,中桥车轮接地点施加纵向力;其余工况同理。

表1 平衡悬架K&C试验方案

试验工况名称	测量数据
中桥同向轮跳	分别记录中桥左/右车轮、后桥左/右车轮共4个车轮的以下数据:1. 纵向变位-轮跳;2. 侧向变位-轮跳;3. Camber角变位-轮跳;4. Caster/Dive角变位-轮跳;5. Toe角变位-轮跳;6. 轮心垂向力-轮跳。
中桥纵向力	分别记录中桥左/右车轮、后桥左/右车轮共4个车轮的以下数据:1. 纵向变位-纵向力/侧向力/回正力矩;2. 侧向变位-纵向力/侧向力/回正力矩;3. Camber角变位-纵向力/侧向力/回正力矩;4. Caster/Dive角变位-纵向力/侧向力/回正力矩;5. Toe角变位-纵向力/侧向力/回正力矩;6. 轮心垂向力-纵向力。
中桥侧向力	
中桥回正力矩	
后桥纵向力	
后桥侧向力	
后桥回正力矩	

通过表1的试验数据可以辨识出本平衡悬架承载特性模型需要的参数。可以通过“中桥同向轮跳”工况,获取“4个车轮轮心垂向力-中桥车轮轮跳”数据,得到左中悬架对左中车轮的承载刚度 $K_{ML2ML}$ 、左中悬架对左后车轮的承载刚度 $K_{ML2RL}$ 、右中悬架对右中车轮的承载刚度 $K_{MR2MR}$ 、右中悬架对右后车轮的承载刚度 $K_{MR2RR}$ ;同理可通过“后桥同向轮跳”工况,得到 $K_{RL2ML}$ 、 $K_{RL2RL}$ 、 $K_{RR2MR}$ 、 $K_{RR2RR}$ ;可以通过“中桥反向轮跳”工况,获取“4个车轮轮心垂向力-中桥反向轮跳”数据,并剔除掉垂向弹簧承载力的影响,得到中桥悬架对中桥的侧倾刚度 $K_{MidRoll2MidRoll}$ 、中桥悬架对后桥的侧倾刚度 $K_{MidRoll2RearRoll}$ ;同理可以通过“后桥反向轮跳”工况,得到 $K_{RearRoll2MidRoll}$ 、 $K_{RearRoll2RearRoll}$ ;可以通过“中桥纵向力”工况,获取“4个车轮Caster/Dive角度-中桥车轮纵向力”数据,得到中桥悬架对中桥的俯仰刚度 $K_{MidPitch2MidPitch}$ 、中桥悬架对后桥的俯仰刚度 $K_{MidPitch2RearPitch}$ ;同理可以通过“后桥纵向力”工况得到 $K_{RearPitch2MidPitch}$ 、 $K_{RearPitch2RearPitch}$ ;可以通过“中桥纵向力”工况,获取“4个车轮轮心垂向力-中桥车轮Caster/Dive角度”数据,得到中桥俯仰对中桥承载力的影响

$K_{MidDive2MidFz}$ 、中桥俯仰对后桥承载力的影响 $K_{MidDive2RearFz}$ ;同理可以通过“后桥纵向力”工况,得到 $K_{RearDive2MidFz}$ 、 $K_{RearDive2RearFz}$ 。

通过表1的试验结果还可以辨识出本模型K运动学特性需要的参数,以左中轮K特性中的X变位为例进行说明:通过“中桥同向轮跳”工况获取“左中轮纵向X变位”、通过“中桥反向轮跳”工况获取“左中轮纵向X变位”、通过“后桥同向轮跳”工况获取“左中轮纵向X变位”、通过“后桥反向轮跳”工况获取“左中轮纵向X变位”,最后将上述4个“左中轮纵向X变位”按照式(15)的思想进行线性叠加,即可得到当前左中轮的K特性纵向X变位。

通过表1的试验结果还可以辨识出本模型C运动学特性需要的参数。以左中轮C特性中的Y变位为例进行说明:通过“中桥纵向力”工况获取“中桥侧向Y变位”、通过“后桥纵向力”工况获取“中桥侧向Y变位”、通过“中桥侧向力”工况获取“中桥侧向Y变位”、通过“后桥侧向力”工况获取“中桥侧向Y变位”、通过“中桥回正力矩”工况获取“中桥侧向Y变位”、通过“后桥回正力矩”工况获取“中桥侧向Y变位”,最后将上述6个“中桥侧向Y变位”按照式(16)的思想进行线性叠加,即可得到当前中桥的侧向Y变位,再通过运动学求解,即可得到固联在车桥上的车轮的C特性侧向Y变位。

## 3 多联悬架

多联悬架常见于半挂车的三联桥(如图8所示),以及军用导弹车的N联桥等。可将平衡悬架的建模思想进行拓展类推即可得到适用于多联悬架的模型。

多联悬架承载特性模型如式(17)所示,多联悬架K运动学特性模型如式(18)所示,多联悬架C运动学特性模型如式(19)所示。

式(17)中: $F_{NL}$ 为N号桥左轮所受的承载力; $K_{1LtoNL}$ 为1号桥左侧悬架对N号桥左侧车轮的承载刚度; $\Delta z_{NL}$ 是N号桥左侧悬架变形; $K_{1DiveToVFz}$ 为1号桥俯仰变形对N号桥垂向力的影响; $\Delta\theta_{NL}$ 为N号桥的俯仰变形。如须考虑承载动态耦合关系,则按式(11)思想进行推导即可,本文不再赘述。式(18)中, $f_{nAtoi}$ 为n号桥(A代表Axle)的运动对i号车轮的K特性修正。式(19)中, $g_{nAtom}$ 为n号桥的受力对m号车桥桥心的C特性修正。

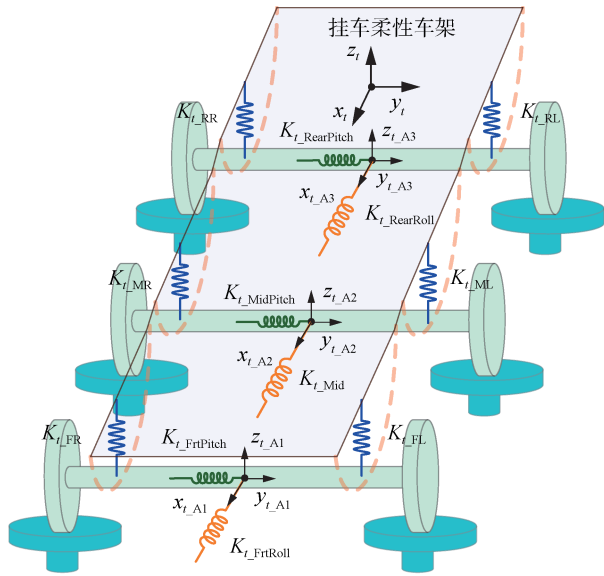


图8 某3轴半挂车三联悬架模型示意图

$$\begin{bmatrix} F_{1L} \\ F_{2L} \\ \dots \\ F_{NL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{1Lto1L} & K_{2Lto1L} & \dots & K_{NLto1L} \\ K_{1Lto2L} & K_{2Lto2L} & \dots & K_{NLto2L} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{1LtoNL} & K_{2LtoNL} & \dots & K_{NLtoNL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z_{1L} \\ \Delta z_{2L} \\ \dots \\ \Delta z_{NL} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{1Diveto1Fz} & K_{2Diveto1Fz} & \dots & K_{NDiveto1Fz} \\ K_{1Diveto2Fz} & K_{2Diveto2Fz} & \dots & K_{NDiveto2Fz} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{1DivetoNFz} & K_{2DivetoNFz} & \dots & K_{NDivetoNFz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_{1L} \\ \Delta \theta_{2L} \\ \dots \\ \Delta \theta_{NL} \end{bmatrix} / 2 \quad (17)$$

$$K_{\text{特性}}_{i\text{车轮}} = \sum_{n=1}^N f_{nAtoi}(n\text{桥平行轮跳}) + \sum_{n=1}^N f_{nAtoi}(n\text{桥反向轮跳}) \quad (18)$$

$$C_{\text{特性}}_{m\text{车桥}} = \sum_{n=1}^N g_{nAtom}(n\text{桥纵向力}) + \sum_{n=1}^N g_{nAtom}(n\text{桥侧向力}) + \sum_{n=1}^N g_{nAtom}(n\text{桥回正力矩}) \quad (19)$$

参考表1可以得出如表2所示的多联悬架 K&C 试验方案。表2中：“1桥同向轮跳”具体是指其他车桥垂向位置约束不动且其他方向随动，1号桥实施平行轮跳；“N桥纵向力”是指其他车桥垂向位置约束不动且其他方向随动，N号车轮接地点施加纵向力；其余工况同理。

通过表2的试验结果可以辨识出多联悬架的承载特性模型、K&C 运动学特性模型所需要的参数，进行同理推导即可<sup>[20]</sup>，本文不再赘述。

表2 多联悬架 K&C 试验方案

试验工况名称	测量数据
1桥同向轮跳	分别记录所有车桥左/右侧车轮的以下数据:1. 纵向变位-轮跳;2. 侧向变位-轮跳;3. Camber角变位-轮跳;4. Caster/Dive角变位-轮跳;5. Toe角变位-轮跳;6. 轮心垂向力-轮跳。
1桥反向轮跳	
.....	
N桥同向轮跳	
N桥反向轮跳	
.....	
1桥纵向力	分别记录所有车桥左/右侧车轮的以下数据:1. 纵向变位-纵向力/侧向力/回正力矩;2. 侧向变位-纵向力/侧向力/回正力矩;3. Camber角变位-纵向力/侧向力/回正力矩;4. Caster/Dive角变位-纵向力/侧向力/回正力矩;5. Toe角变位-纵向力/侧向力/回正力矩;6. 轮心垂向力-纵向力。
1桥侧向力	
1桥回正力矩	
.....	
N桥纵向力	
N桥侧向力	
N桥回正力矩	

## 4 模型验证

### 4.1 非独立悬架模型验证

本文以“孔辉汽车科技公司”的某牵引车前桥“实车 K&C 试验报告”的数据为基准，通过与 TruckSim 模型作对比，验证本模型中 K 特性的精准性；以“Adams 示例模型”整体式车桥的“虚拟 K&C 试验报告”的数据为基准，通过与 TruckSim 模型作对比，验证本模型中 C 特性的正确性。

图9表明，本模型的 K 特性求解省略了图6中“TruckSim 等效至桥心”的数据拟合步骤，直接基于试验数据描述车轮的 K 特性，更为精准。图10表明，本模型的 C 特性求解考虑了整体式车桥的独有特点，将悬架的 C 特性用于修正车桥桥心，然后求解固联在车桥上的车轮的 C 特性，因此相较于“TruckSim 部分沿用乘用车的断开式车桥和独立悬架模型”，更为正确。

### 4.2 平衡悬架和多联悬架模型验证

由于当前国内缺少“平衡悬架”和“多联悬架”的 K&C 试验台，因此本文基于 Adams 软件搭建“平衡

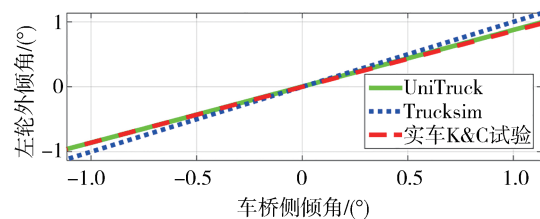


图9 整体式车桥反向轮跳工况左轮侧倾外倾

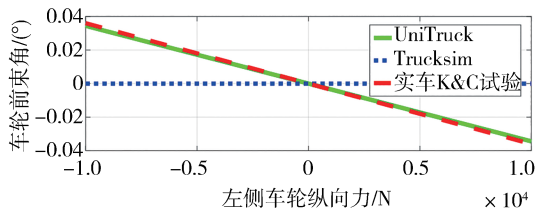


图10 整体式车桥反向纵向力工况左轮前束变位

悬架模型”和“虚拟K&C试验台”、“三联悬架模型”和“虚拟K&C试验台”,如图11和图12所示。本文以“基于Adams的虚拟K&C试验”数据为基准,通过对比TruckSim模型,在系统层级上验证本模型的准确性。

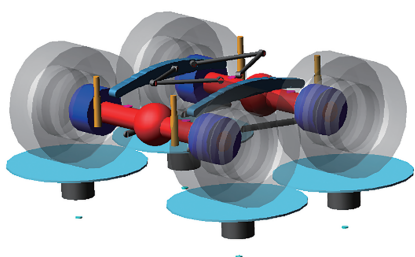


图11 基于Adams的平衡悬架及K&C试验台模型

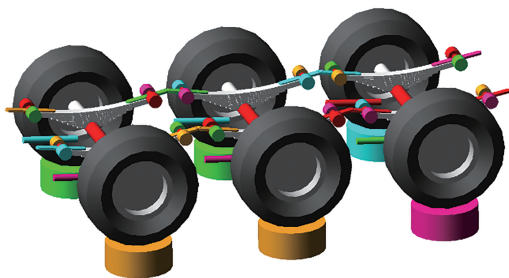


图12 基于Adams的三联悬架及K&C试验台模型

图13表明,相较于TruckSim的定比例分配模型,本悬架承载模型能够更准确地反映耦合悬架的桥间耦合非线性关系。图14表明,相较于TruckSim的稳态模型,本悬架承载模型可以更好地反映桥间耦合承载力的动态效应。

从图15和图16可以看出,本模型可以更高精度地仿真耦合悬架的K&C运动学特性,也侧面验证了本建模思路(通过多个1-D特性表线性叠加来近似代替N-D特性表)的可靠性。

### 4.3 整车层级验证

搭建157DOF牵引车-半挂车整车模型<sup>[17,21-22]</sup>,将本模型嵌入,并完成GUI图形用户界面的开发,形

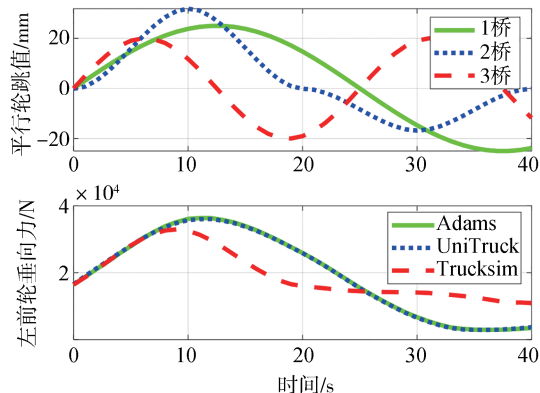


图13 三联悬架车桥随机平行轮跳工况左前轮垂向力

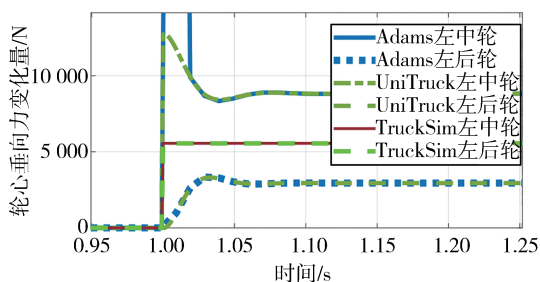


图14 平衡悬架中桥平行阶跃轮跳工况左侧轮垂向力

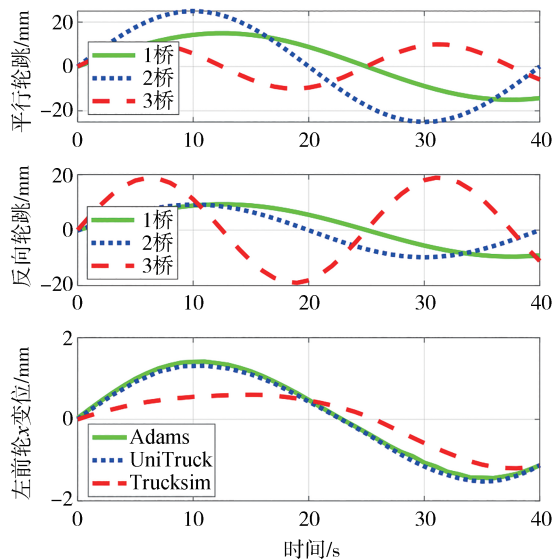


图15 三联桥轮跳随机工况左前轮纵向变位

成商用车仿真软件UniTruck 2024<sup>[23]</sup>,如图17所示。将某款拖挂车的车辆参数分别填入TruckSim软件和UniTruck软件,通过仿真车辆动态品质中制动抖振的负面现象,整车层级上验证本模型的有效性和创新性。

利用UniTruck 2024软件对某款拖挂车进行2 s

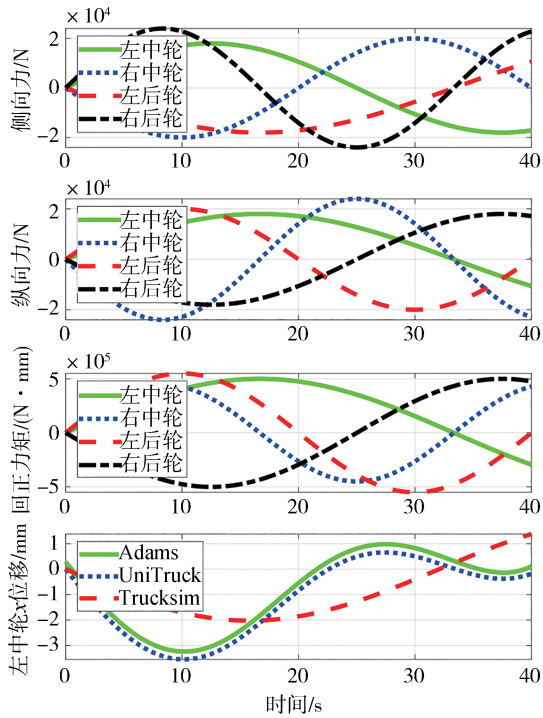


图 16 平衡桥车轮随机力工况左中轮纵向变位

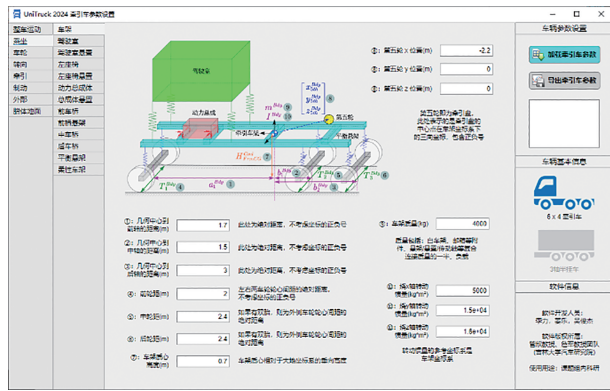


图 17 UniTruck 2024 软件 GUI 图形用户界面(部分)

时刻紧急制动工况的仿真<sup>[24]</sup>,仿真结果如图 18 和图 19 所示,可以看出,考虑车桥俯仰动态特性的 UniTruck 可以很好地仿真出商用车制动抖振的负面

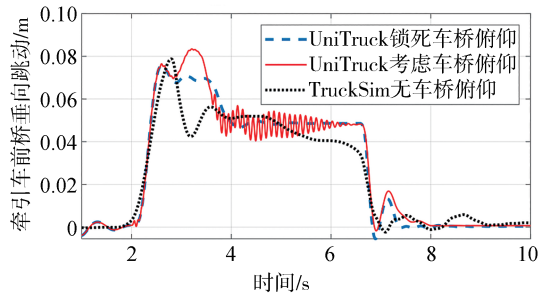


图 18 某拖挂车制动工况牵引车前桥垂向位置

现象,能够激发出 9.6 Hz 左右的簧下部件共振频率。图 20 表明,通过优化相关参数设置,可以有效降低或避免车辆在制动时产生的抖振负面现象,证明了 UniTruck 模型能够成为商用车产品高品质开发的重要仿真工具。

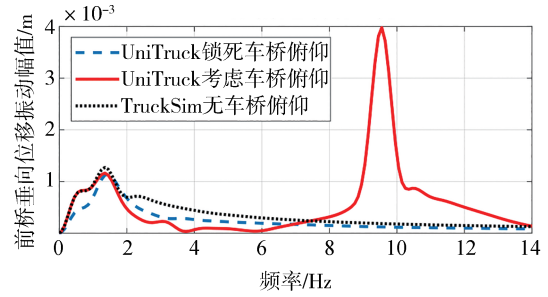


图 19 某拖挂车制动工况牵引车前桥垂向位置频率分析

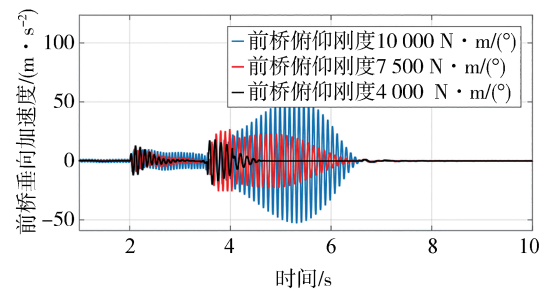


图 20 不同俯仰刚度下的车桥垂向振动响应

### 5 结论

为了实时准确仿真商用车的车桥和悬架,本文建立了基于总成特性的整体式车桥和耦合悬架模型,对车桥建立了 Motion 运动学模型和 Ride 动力学模型,对悬架建立了耦合承载特性模型、RC/PC 导向特性模型、耦合 K&C 运动学特性模型,并提供了一种针对耦合悬架的 K&C 试验方案和模型参数辨识方法,之后通过与 Adams 模型和 TruckSim 模型作对比,验证了本模型的准确性和有效性。验证结果表明,与 TruckSim 模型相比,本车桥模型可以激发出车辆制动抖振的负面现象,本悬架模型可以更为精准地表达耦合悬架的耦合承载非线性动态特性和耦合 K&C 运动学特性。

本次车桥建模的创新点是新增了车桥的俯仰自由度,通过对 C 特性的反用,将 C 特性中的纵倾柔度 (compliance) 转化为了纵倾刚度 (stiffness),把 Dive 角的附加变形修正稳态模型转化为了俯仰自由度动

态模型,可以突出反映当车轮制动到零时的抖振现象。本次悬架建模的创新点是建立了桥间耦合悬架模型,创新性地通过 $N$ 个1-D特性表线性叠加来近似代替 $N$ 联桥的 $N$ -D特性表,可以更为便捷快速地模拟耦合悬架的动态承载非线性特性和K&C运动学特性,并提供了一套可行的针对耦合悬架的K&C试验方案和模型参数辨识方法。

### 参考文献

- [1] 郭孔辉. 汽车操纵动力学原理[M]. 南京:江苏科学技术出版社,2011.  
GUO K H. Vehicle handling dynamics[M]. Nanjing: Jiangsu Science & Technology Press, 2011.
- [2] 中国汽车工业协会, 中国汽车工程研究院股份有限公司, 一汽解放集团股份有限公司. 汽车工业蓝皮书—中国商用汽车产业发展报告(2023)[M]. 北京:社会科学文献出版社, 2023.  
China Association of Automobile Manufacturers, China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., FAW Jiefang Group Co., Ltd. Blue book of China's auto-mobile industry: annual report on the development of China's commercial vehicle industry(2023)[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2023.
- [3] 齐海政. 高品质商用车动力学建模关键问题研究[D]. 长春:吉林大学, 2011.  
Qi H Z. Study on dynamical model of high quality commercial vehicles[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [4] 管欣, 逢淑一. 面向性能的汽车运动动力学模型回顾[J]. 汽车工程, 2011, 33(9): 739-744.  
GUAN X, PANG S Y. A review on performance-oriented vehicle motion dynamics models[J]. Automotive Engineering, 2011, 33(9): 739-744.
- [5] 葛方舟. 重型载货汽车双前轴平衡悬架建模、计算与优化研究[D]. 镇江:江苏大学, 2017.  
GE F Z. Research on modeling, calculation and optimization for dual-front-axle equalizing suspension of heavy truck[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.
- [6] PHILIPSON N, ANDREASSON J, GFVERT M, et al. Heavy vehicles modeling with the vehicle dynamics library[J]. The Modelica Association, 2008.
- [7] HASAGASIOGLU S, KILICASLAN K, ATABAY O, et al. Vehicle dynamics analysis of a heavy-duty commercial vehicle by using multibody simulation methods[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 60: 825-839.
- [8] 靳建龙, 孙桓五. 重型商用车平衡悬架系统运动学分析[J]. 汽车实用技术, 2020(13): 125-128.  
JIN J L, SUN H W. Kinematic research on tandem suspension system for heavy-duty commercial vehicle[J]. Automobile Applied Technology, 2020(13): 125-128.
- [9] EVERS W J, BESSELINK I, NIJMEIJER H, et al. Development and validation of a modular simulation model for commercial vehicles[J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2009, 16(1-2): 132-153.
- [10] ABDELKAREEM M A A, MAKRAHY M M, ABD-EL-TAW-WAB A M, et al. An analytical study of the performance indices of articulated truck semi-trailer during three different cases to improve the driver comfort[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, 2018, 232(1): 84-102.
- [11] KAMIŃSKI Z. Calculation of the optimal braking force distribution in three-axle trailers with tandem suspension[J]. Acta Mechanica et Automatica, 2022, 16(3): 189-199.
- [12] HA D V, TAN V V, NIEM V T, et al. Evaluation of dynamic load reduction for a tractor semi-trailer using the air suspension system at all axles of the semi-trailer[C]. Actuators. MDPI, 2022, 11(1): 12.
- [13] RILL G, BAUER F, KIRCHBECK M. VTT—a virtual test truck for modern simulation tasks[J]. Vehicle System Dynamics, 2021, 59(4): 635-656.
- [14] TruckSim. 2024.1 User help—suspension\_systems[R]. Ann Arbor MI, USA: Mechanical Simulation Corporation, 2024.
- [15] CarMaker. 13.0 User's guide—reference manual[R]. GER: IPG Automotive, 2023.
- [16] TruckMaker. 13.0 User's guide—reference manual truck[R]. GER: IPG Automotive, 2023.
- [17] 管欣, 李力, 段春光, 等. 基于特性的商用车全浮式驾驶室动力学模型[J]. 汽车工程, 2023, 45(12): 2272-2279.  
GUAN X, LI L, DUAN C G, et al. A characteristics-based dynamic model of the full floating cab for the commercial vehicle[J]. Automotive Engineering, 2013, 45(12): 2272-2279.
- [18] Heavy commercial vehicles and buses—definitions of properties for the determination of suspension kinematic and compliance characteristics: ISO 23365[S]. 2022.
- [19] 史世俊. ADAMS 钢板弹簧离散梁建模及重型载货汽车悬架K&C特性仿真[D]. 长春: 吉林大学, 2012.  
SHI S J. Discrete beam modeling of the leaf spring in ADAMS and simulation of suspension K&C characteristics for heavy-duty truck[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [20] 詹军, 姜乐, 李力, 等. 一种基于特性的耦合桥悬架模型及K&C特性测试方法: CN117892432A [P]. 2024.04.16.  
ZHAN J, JIANG L, LI L, et al. A characteristic-based coupled axle suspension model and K&C characteristic testing method: CN117892432A [P]. 2024.04.16.
- [21] 管欣, 李力, 孙磊, 等. 基于特性的牵引车-半挂车刚柔组合车架动力学模型研究[J]. 汽车工程, 2024, 46(3): 448-455.  
GUAN X, LI L, SUN L, et al. Research on a property-based dynamic model of the rigid-flexible combining frame for the tractor-semitrailer[J]. Automotive Engineering, 2024, 46(3): 448-455.
- [22] UniVehicle. UniTruck 模型的优势[EB/OL]. 上海: Bilibili, 2024-07-23 [2024-08-09]. <https://www.bilibili.com/video/BV1pM8ieUEGt>.  
UniVehicle. The advantages of the UniTruck model [EB/OL]. Shanghai: Bilibili, 2024-07-23 [2024-08-09]. <https://www.bilibili.com/video/BV1pM8ieUEGt>.

- 1470-1475.
- [10] XIAO F, HU J, JIA M, et al. A novel integrated control framework of AFS, ASS, and DYC based on ideal roll angle to improve vehicle stability [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2022, 54: 101764.
- [11] MURATA S. Innovation by in-wheel-motor drive unit [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2012, 50(6): 807-830.
- [12] KATSUYAMA E. Decoupled 3D moment control using in-wheel motors [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2013, 51(1): 18-31.
- [13] 张利鹏, 李亮, 祁炳楠. 轮毂电机驱动电动汽车侧倾稳定性解耦控制 [J]. *机械工程学报*, 2017, 53(16): 94-104.  
ZHANG L P, LI L, QI B N. Decoupled roll stability control of in-wheel motor drive electric vehicle [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(16): 94-104.
- [14] 张利鹏, 任晨辉, 李韶华. 轮毂电机驱动汽车侧向稳定性底盘协同控制 [J]. *机械工程学报*, 2019, 55(22): 153-164.  
ZHANG L P, REN C H, LI S H. Chassis cooperative control for improving lateral stability of in-wheel motors drive electric vehicle [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55 (22) : 153-164.
- [15] 邓斌, 李维汉, 吴迪, 等. 基于KFESO的四轮主动转向积分滑模控制 [J]. *汽车工程*, 2024, 46(1): 100-108.  
DENG B, LI W H, WU D, et al. Integral sliding mode control for four-wheel active steering based on Kalman filter extended state observer [J]. *Automotive Engineering*, 2024, 46(1): 100-108.
- [16] 石求军, 李静, 刘鹏. 基于非线性扰动观测的商用车ESC自适应滑模控制研究 [J]. *汽车工程*, 2020, 42(6): 801-807.  
SHI Q J, LI J, LIU P. Research on ESC adaptive sliding mode control for commercial vehicles based on nonlinear disturbance observation [J]. *Automotive Engineering*, 2020, 42 (6) : 801-807.
- [17] 李杰, 孔祥悦, 王晓燕, 等. 基于模型预测的主动转向智能无人车辆横向稳态控制 [J]. *北京理工大学学报*, 2023, 43(8): 812-819.  
LI J, KONG X Y, WANG X Y, et al. A lateral stability control strategy of active steering intelligent unmanned vehicle based on model predictive [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2023, 43(8): 812-819.
- [18] 韩陌, 何洪文, 石曼, 等. 基于学习的无人驾驶车辆模型预测路径跟踪控制研究 [J]. *汽车工程*, 2024, 46(7): 1197-1207.  
HAN M, HE H W, SHI M, et al. Research on learning-based model predictive path tracking control for autonomous vehicles [J]. *Automotive Engineering*, 2024, 46(7): 1197-1207.

~~~~~  
(上接第 1732 页)

- [23] UniVehicle. UniTruck 软件介绍 [EB/OL]. 上海: Bilibili, 2024-07-22 [2024-08-09]. <https://www.bilibili.com/video/BV1YD8teqE1g>.  
UniVehicle. Introduction to UniTruck software [EB/OL]. Shanghai: Bilibili, 2024-07-22 [2024-08-09]. <https://www.bilibili.com/video/BV1YD8teqE1g>.
- [24] UniVehicle. UniTruck 仿真制动抖振\_行车振动\_驾驶体感\_等动画演示视频 [EB/OL]. 上海: Bilibili, 2024-07-24 [2024-08-09]. <https://www.bilibili.com/video/BV1S9eDeBEKR>.  
UniVehicle. UniTruck simulation brake vibration, driving vibration, driving sensation, and other animated demonstration videos [EB/OL]. Shanghai: Bilibili, 2024-07-24 [2024-08-09]. <https://www.bilibili.com/video/BV1S9eDeBEKR>.