第38卷 第18期
Vol.38 No.18

计 算 机 工 程
Computer Engineering

2012年9月
September 2012

·开发研究与设计技术· 文章编号：1000—3428(2012)18—0273—04 文献标识码：A 中图分类号：N945

基于动力学模型的汽车制动稳定性虚拟展示

李红波，张寅奇，吴 渝，薛 亮

(重庆邮电大学网络智能研究所，重庆 400065)

摘 要：现有3D引擎的物理模型不能真实反映车辆制动时的运动状态。为此，提出一种汽车制动稳定性虚拟展示系统。建立汽车动力学模型，包括四轮车辆模型和车轮轮胎模型，利用上层仿真软件对动力学模型进行运算和虚拟场景渲染，给出车轮状态和虚拟仪表的展现方法，并基于3D引擎设计虚拟展现系统。实验结果表明，该系统能同时观测整车及车轮的运行状态，实时再现制动过程中车轮抱死、车身横摆侧滑的行为，其动力学模型能够满足虚拟展现对画面渲染的实时性、连续性要求。

关键词：汽车制动稳定性；虚拟现实；3D游戏引擎；动力学模型；渲染速率；虚拟仪表盘

Virtual Display of Vehicle Braking Stability Based on Dynamic Model

LI Hong-bo, ZHANG Yin-qi, WU Yu, XUE Liang

(Institute of Network Intelligence, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

【Abstract】Since the simple physical model of current 3D game engine cannot truly reflect the vehicle baking state of motion, a virtual display simulation system of vehicle braking stability is proposed. The vehicle dynamic model including four-wheel vehicle model and wheel tire model is established. The upper simulation software is used to compute the dynamic model and to render the virtual scenes. The display method of tire state and the virtual meters are given, and then the virtual display system is designed and developed by 3D game engine. Experimental results show that this system can observe simultaneously the running state of vehicle and wheels, and reproduce behaviors of the wheel lock, vehicle yaw and sideslip. The dynamic model can satisfy the real-time and continuous requirement of screen rendering for virtual display.

【Key words】vehicle braking stability; Virtual Reality(VR); 3D game engine; dynamic model; rendering rate; virtual instrument panel

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.18.074

1 概述

目前针对汽车制动稳定性的虚拟展现系统研发主要通过虚拟现实模型语言(Virtual Reality Modeling Language, VRML)编程实现，能够完成虚拟展现的功能，但其缺陷主要在于：

(1)VRML文件需要VRML浏览器解释执行，复杂的三维模型将降低浏览器速度，由于VRML浏览器非主流浏览器，因此系统可移植性弱。

(2)此类仿真系统功能单一，特别是没有反映车轮的运动状态。虽然运用3D游戏引擎制作仿真系统能够很好地解决以上问题，但引擎自身物理模型是否能够真实反映车辆制动时运动状态尚待证明。如果引擎物理模型不足以客观展现车辆运动状态，则需要建立汽车动力学模型，并加入系统控制制动的过程。

汽车动力学模型主要包括车辆模型和轮胎模型。汽车是一个多自由度系统，文献[1-2]建立能够描述车身横摆、平动和车轮滚动的七自由度模型对汽车制动稳定性进行研究，有效地提高了制动稳定性。文献[3]在制动稳定性研究中建立同样的模型，仿真数据同实车实验结果拟合度较高。轮胎模型主要分为理论理论模型和经验模型。其中，经验模型计算简单，对特定轮胎的计算精度高，但通用性差，仿真实验需要得到轮胎的特性参数[4]；理论模型对回正力矩的理论计算误差较大，但回正力矩值与横向力值的数量级相差较大，因此，对汽车制动性进行仿真实验时影响不大，而且理论模型通用性强。文献[5-7]在Bergman的三维弹簧模型和弦模型基础上，推出了完整的轮胎力学特性公式，成为理论模型的代表，被广泛采用。

本文利用七自由度车辆模型和G.Gim轮胎模型建立汽车动力学模型，设计开发一套效果逼真、功能相对丰富、可移植性强的3D汽车制动稳定性虚拟展示系统。

2 汽车动力学建模

2.1 四轮车辆模型

在对车辆动力学建模之前，假设如下：(1)忽略悬架的影响，忽略侧倾的影响。(2)忽略轮胎的滚动阻力、车辆风

基金项目：“核高基”重大专项“汽车电子控制器嵌入式软件平台”(2009ZX01038-002-002-2)；新世纪优秀人才支持计划基金资助项目(教技司[2008]274号)；科技部“原创动漫技术及软件(工具)技术研发团队”扶持基金资助项目(国科发高[2009]593号)

作者简介：李红波(1970－)，男，高级工程师，主研方向：机器视觉，虚拟现实；张寅奇，硕士研究生；吴 渝，教授、博士生导师；薛 亮，硕士研究生

收稿日期：2011-12-07 **修回日期：**2012-01-15 **E-mail：**lihongbo@cqupt.edu.cn

阻。(3)路面是完全水平的，不考虑车辆垂直运动。(4)汽车左右 2 边完全对称。

四轮车辆模型如图 1 所示。矢量 $\boldsymbol{v}_x$ 和矢量 $\boldsymbol{v}_y$ 为车辆纵向速度和横向速度；矢量 $\dot{\boldsymbol{\phi}}$ 为横摆角速度；矢量 $\boldsymbol{F}_{xfl}$、$\boldsymbol{F}_{xfr}$、$\boldsymbol{F}_{xrl}$、$\boldsymbol{F}_{xrr}$ 分别为 4 个车轮所受地面纵向制动力；矢量 $\boldsymbol{F}_{yfl}$、$\boldsymbol{F}_{yfr}$、$\boldsymbol{F}_{yrl}$、$\boldsymbol{F}_{yrr}$ 分别为 4 个轮胎所受地面横向制动力；α_f、α_r 分别为前轮侧偏角和后轮侧偏角；δ 为前轮转角，直线制动时为 0；c 为轮距；l_f 为前轴到车辆质心距离；l_r 为后轴到车辆质心距离。

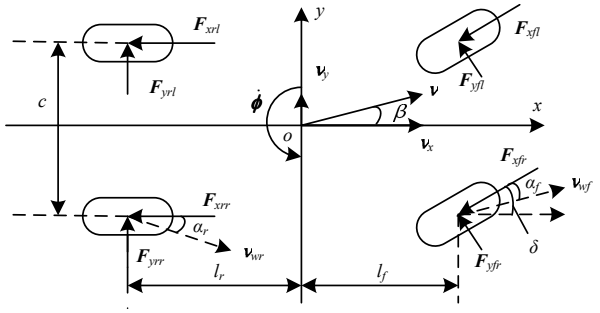


图 1 四轮车辆模型

车辆运动方程[5]如下：

$$\begin{aligned}
&m(\dot{\boldsymbol{v}}_x-\boldsymbol{v}_y\dot{\boldsymbol{\phi}})=(\boldsymbol{F}_{xfl}+\boldsymbol{F}_{xfr})\cos\delta+(\boldsymbol{F}_{yfl}+\boldsymbol{F}_{yfr})\sin\delta+\boldsymbol{F}_{xrl}+\boldsymbol{F}_{xrr}\\
&m(\dot{\boldsymbol{v}}_y+\boldsymbol{v}_x\dot{\boldsymbol{\phi}})=(\boldsymbol{F}_{xfl}+\boldsymbol{F}_{xfr})\sin\delta+(\boldsymbol{F}_{yfl}+\boldsymbol{F}_{yfr})\cos\delta+\boldsymbol{F}_{yrl}+\boldsymbol{F}_{yrr}\\
&I_z\ddot{\boldsymbol{\phi}}=\frac{c}{2}[(\boldsymbol{F}_{xfr}-\boldsymbol{F}_{xfl})\cos\delta+(\boldsymbol{F}_{yfl}-\boldsymbol{F}_{yfr})\sin\delta+(\boldsymbol{F}_{xrr}-\boldsymbol{F}_{xrl})]+\\
&\quad l_f[(\boldsymbol{F}_{yfl}+\boldsymbol{F}_{yfr})\cos\delta+(\boldsymbol{F}_{xfl}+\boldsymbol{F}_{xfr})\sin\delta]-l_r(\boldsymbol{F}_{yrl}+\boldsymbol{F}_{yrr})
\end{aligned}\tag{1}$$

其中，I_z 为车辆绕 z 轴的转动惯量；m 为整车质量；矢量 $\dot{\boldsymbol{v}}_x$ 为车辆纵向加速度；矢量 $\dot{\boldsymbol{v}}_y$ 为车辆横向加速度；矢量 $\ddot{\boldsymbol{\phi}}$ 为横摆角加速度。

车辆运行过程中各车轮的载荷转移[2]如下：

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{F}_{zfl}&=\frac{mgl_r}{2(l_f+l_r)}-\frac{m\dot{\boldsymbol{v}}_xh}{2(l_f+l_r)}-\frac{m\dot{\boldsymbol{v}}_yh}{2c}\\
\boldsymbol{F}_{zfr}&=\frac{mgl_r}{2(l_f+l_r)}-\frac{m\dot{\boldsymbol{v}}_xh}{2(l_f+l_r)}+\frac{m\dot{\boldsymbol{v}}_yh}{2c}\\
\boldsymbol{F}_{zrl}&=\frac{mgl_f}{2(l_f+l_r)}+\frac{m\dot{\boldsymbol{v}}_xh}{2(l_f+l_r)}-\frac{m\dot{\boldsymbol{v}}_yh}{2c}\\
\boldsymbol{F}_{zrr}&=\frac{mgl_f}{2(l_f+l_r)}+\frac{m\dot{\boldsymbol{v}}_xh}{2(l_f+l_r)}+\frac{m\dot{\boldsymbol{v}}_yh}{2c}
\end{aligned}\tag{2}$$

车轮运动方程[8]如下：

$$I_w\dot{\boldsymbol{\omega}}=\boldsymbol{F}_xR-\boldsymbol{M}_b\tag{3}$$

制动系统模型[8]如下：

$$\begin{aligned}
&\boldsymbol{M}_b=k\boldsymbol{P}(t)\\
&\boldsymbol{P}(t)=\boldsymbol{P}(t-1)k_1+k_2
\end{aligned}\tag{4}$$

其中，矢量 $\boldsymbol{M}_b$ 车轮所受制动力矩；矢量 $\boldsymbol{P}(\cdot)$ 为制动压力；k 为制动器制动因素；参数 k_1、k_2 可通过大量实验拟合得到；矢量 $\dot{\boldsymbol{\omega}}$ 是车轮角加速度；矢量 $\boldsymbol{F}_x$ 为车轮所受地面摩擦阻力；I_w 为车轮转动惯量。

2.2 车轮轮胎模型

本文采用 G.Gim 理论模型，并且在不考虑轮胎侧倾角的情况下建立轮胎模型。

轮胎所受纵向力[5]：

$$\begin{aligned}
&\boldsymbol{F}_x=C_sS_sl_n^2+u_x\boldsymbol{F}_z(1-3l_n^2+2l_n^3) && S_s<S_{sc}\\
&\boldsymbol{F}_x=u_x\boldsymbol{F}_z && S_s\geqslant S_{sc}
\end{aligned}\tag{5}$$

轮胎所受横向力[5]：

$$\begin{aligned}
&\boldsymbol{F}_y=C_aS_al_n^2+u_y\boldsymbol{F}_z(1-3l_n^2+2l_n^3) && S_a<S_{sc}\\
&\boldsymbol{F}_y=u_y\boldsymbol{F}_z && S_a\geqslant S_{sc}
\end{aligned}\tag{6}$$

其中，C_s、C_a 分别为轮胎纵向刚度和横向刚度；矢量 $\boldsymbol{F}_z$ 为车轮垂直载荷；u_x、u_y 为车轮纵向、横向附着系数；S_s、S_a 为制动时纵向、横向滑移率；S_{sc}、S_{ac} 分别为滑移临界点、侧偏临界点。各参数计算如下[5]：

$$\begin{aligned}
u&=\sqrt{u_x^2+u_y^2}\\
S_{sc}&=\frac{3u\boldsymbol{F}_z}{C_s}\\
S_{ac}&=\frac{C_s}{C_a}\sqrt{S_{sc}^2+S_s^2}\\
S_n&=\frac{1}{3u\boldsymbol{F}_z}\sqrt{(C_sS_s)^2+(C_aS_a)^2}
\end{aligned}\tag{7}$$

3 虚拟展现系统功能设计和实现

3.1 系统架构设计

用于汽车制动稳定性虚拟展现的虚拟现实系统的硬件组成方案如图 2 所示。系统总体上由上层仿真软件、输入设备、输出设备以及模型资源构成。输入设备包括方向盘、档位控制器和制动踏板(图 2 中实心箭头表示硬件连接线)，由输入设备将控制信息传入上层仿真软件，通过输出设备展示汽车整体运动状况(图 2 中空心箭头表示传输信息)。

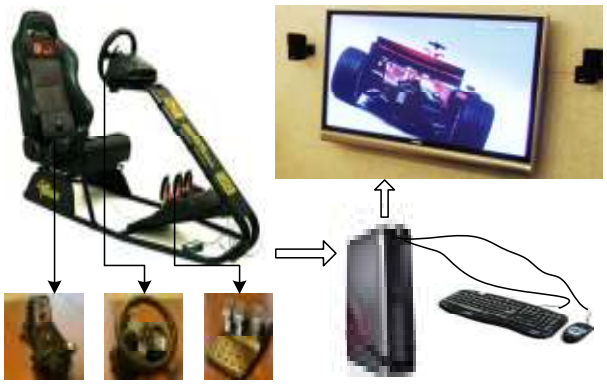


图 2 硬件组成方案

上层仿真软件加载模型资源搭建虚拟试验场景，输入设备上传汽车驾驶信号给上层仿真软件，以控制虚拟的汽车行为，上层软件通过输出设备将图像和声音信号输出。

上层仿真软件负责动力学模型的运算和虚拟场景的渲染，是系统的核心功能模块，采用面向对象的结构化设计，其类组成结构如图 3 所示，包括 FrameRender、Car、DynamicSimulation、Hud、InputMapper、ResourceManager 等 5 个功能类。FrameRender 又分别由一个 CarPanel、一个 HudPanel 和 4 个 WheelPanel 组成，所有类定义在 Car Braking Simulation 命名空间下。

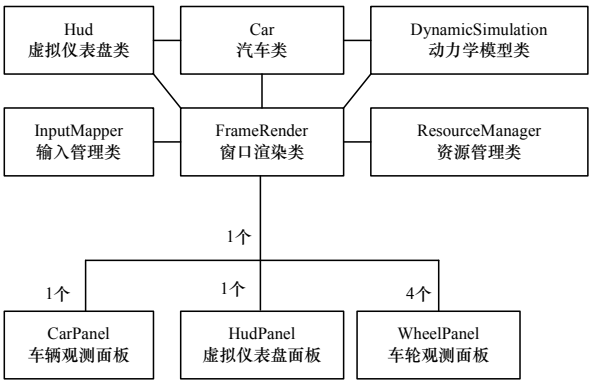


图 3　上层仿真软件类组成结构

在图 3 中，InputMapper 负责输入设备信号的接收管理；ResourceManager 负责模型资源的加载以及删除；DynamicSimulation 完成 2 节中动力学模型的仿真计算；Car 实现汽车的启动、加速、制动、转向等基本操作；Hud 通过 Car 获取车速计算表盘指针位置；FrameRender 利用 ResourceManager 加载的 3D 模型搭建虚拟试验环境，根据 InputMapper 接收到的信号通过 Car 对车进行控制。当接收到罗技方向盘刹车踏板传来的刹车信号后，触发 DynamicSimulation 开始仿真，将仿真得到的车速、轮速、侧向位移传递给 Car，使虚拟汽车按照仿真数据进行制动。FrameRender 将汽车的运行状态渲染到 CarPanel，将虚拟仪表盘绘制到 HudPanel，将车轮的运行状态渲染到 WheelPanel。

上述汽车行为控制、图形渲染、资源管理等功能是基于 3D 游戏引擎实现的，特别是引擎提供的汽车功能包，能够直接通过调用其汽车驾驶操纵函数操纵虚拟汽车。

系统总体构件的 UML 构件图如图 4 所示。

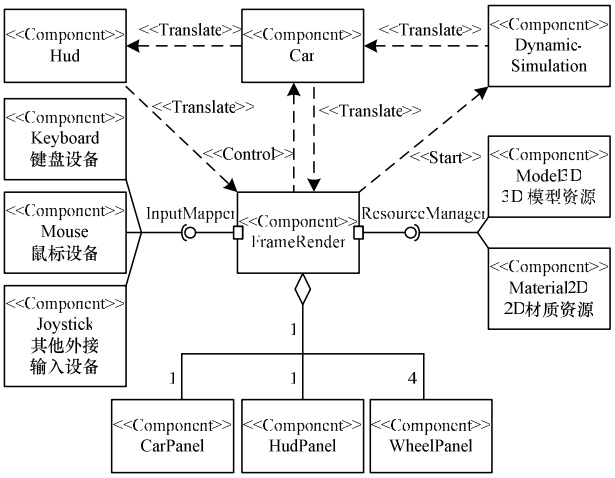


图 4　系统总体构件的 UML 构件图

3.2　动力学模型

汽车动力学模型是微分方程描述的连续系统形式，只有使用差分方法将连续方程变为时间离散的差分方程，才能通过计算机语言表示成程序。数值解微分方程的方法有很多，一般采用四阶龙格库塔方法和尤拉方法。本文采用尤拉方法编程实现动力学模型。系统在收到刹车信号后，开始对每帧图像运行一次算法，直到车速为 0，即制动完毕时结束算法。动力学模型算法步骤如下：

(1)设置初始车速、制动压力、载荷、车轮侧偏角。

(2)用制动系统模型(式(4))计算制动力矩 $\boldsymbol{M}_b$。

(3)用轮胎模型计算地面制动力 $\boldsymbol{F}_x$、$\boldsymbol{F}_y$。

(4)用车轮运动方程计算车轮角加速度进而计算车轮角速度。

(5)用车辆运动方程计算车辆纵向加速度、横向加速度、横摆角速度。

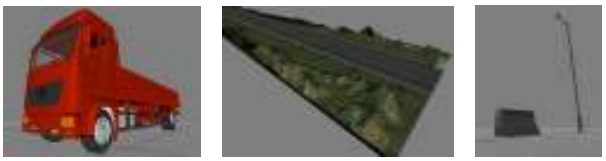
(6)计算车轮垂直载荷。

(7)计算车速、车辆纵向横向位移。

(8)判断车速是否为 0。若为 0，则算法结束，否则返回步骤(2)。

3.3　三维建模

采用 3D 建模软件制作的 3D 模型如图 5 所示，其中，车辆模型根据某重型卡车的实际参数按比例建模。

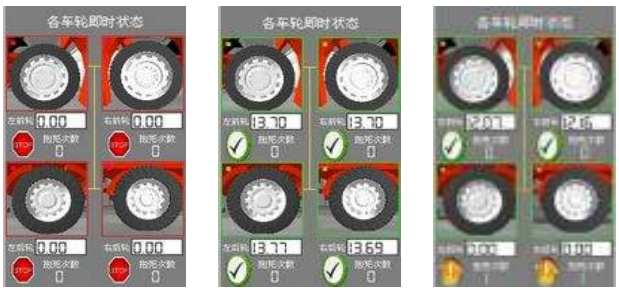


(a)车辆模型　(b)道路模型　(c)路障和路灯模型

图 5　3D 模型

3.4　车轮状态展现设计

车轮运动分别渲染在 4 个 WheelPanel 中。WheelPanel 中车轮观测视口的渲染，通过在车轮外侧正对车轮处设置一个跟随摄像机实现。车轮观测视口周围绘制 4 条边线，内部左上角绘制一个实心小正方形，当车辆行驶时，将边线和小正方形绘制为绿色，停止时绘制为红色。车轮视口下方添加一个显示轮速的 Textbox，轮速单位 m/s，并绘制文字“抱死次数”等。左下角绘制一幅 2D 纹理贴图表示车轮静止、正常转动、抱死 3 种状态。车轮状态示意图如图 6 所示。



(a)车辆静止　(b)车辆行驶　(c)车辆制动

图 6　车轮状态示意图

3.5　虚拟仪表盘的实现

车速仪表盘主要由表盘和指针构成。表盘上的刻度表示车速，单位为 km/h，车速指示范围为 0 km/h~220 km/h。表盘和指针通过加载 2 幅纹理贴图的方式实现，虚拟车速仪表盘如图 7 所示。指针旋转是利用旋转指针贴图的方式实现，旋转角度和车速之间的关系如下：

$$\alpha = \frac{\theta}{220} \times \boldsymbol{v}_x \times \frac{\pi}{180^\circ} \tag{8}$$

其中，θ 表示刻度 0 到刻度 220 之间的夹角。

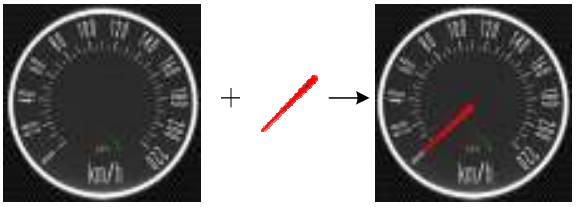


图 7 虚拟车速仪表盘

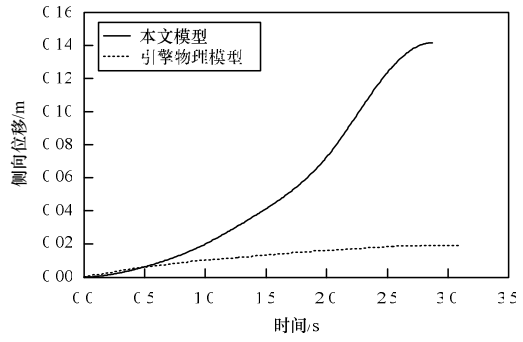
4 仿真实验与分析

本文实验采用某款重型卡车为研究对象，其主要参数如表 1 所示。

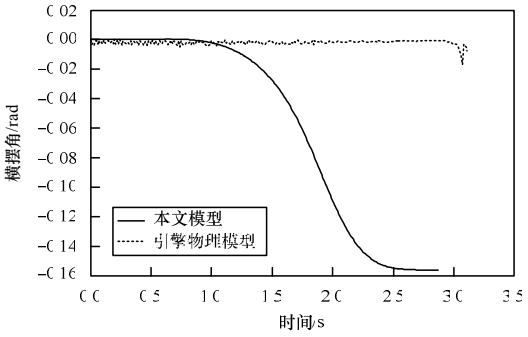
表 1 车辆参数

参数名称	数值	参数名称	数值
整车质量/kg	14 000	车轮半径/m	0.5
车辆前轴轴荷/kg	7 000	前轮制动器制动因素	2 100
车辆绕垂直轴的转动惯量/(kg·m^{-2})	20 000	后轮制动器制动因素	2 600
轮距/m	1.8	制动系统最大制动压力/Mpa	7
轴距/m	5.5	车辆质心高度/m	0.9

首先通过本文动力学模型对汽车制动过程进行数值仿真，仿真步长 0.01 s，得到制动时横摆角和侧向位移仿真曲线，然后利用虚拟展现系统对制动过程进行虚拟仿真实验。在虚拟仿真实验中，利用本文动力学模型进行制动时，记录画面渲染速率；利用引擎自带物理模型对汽车进行制动时，记录横摆角、侧向位移和画面渲染速率。然后，以 0.01 s 为步长绘制曲线。制动时仿真曲线如图 8、图 9 所示。



(a)2 种模型制动时的侧向位移



(b)2 种模型制动时的横摆角

图 8 2 种模型制动时的仿真曲线

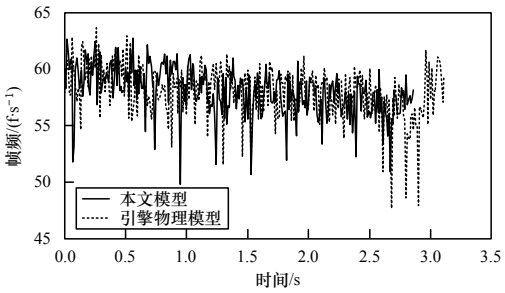


图 9 2 种模型制动时的帧频

由图 8、图 9 可知，本文动力学模型能够模拟出车辆制动时横摆侧滑的情况，而引擎的物理模型则近似线性模型，模拟的车辆基本没有发生侧滑和横摆。由图 9 可知，2 种模型计算运行时帧频基本一致，本文动力学模型并没有增加系统运行时间，完全能够满足高质量连续画面渲染的要求。

图 10 和图 11 分别为本文动力学模型制动时的系统运行界面和引擎物理模型制动时系统运行界面。图 10(a)的车轮状态显示制动过程中后轮已经发生抱死，图 10(b)显示车辆制动静止后车身发生偏转和测移，图 11 则显示引擎物理模型制动过程无车轮抱死现象，制动后车辆姿态没有发生变化。通过对比发现，相较于引擎物理模型，本文动力学模型可以更精确地反映车辆制动时车身状态和车轮状态。



(a)制动过程中



(b)制动结束

图 10 本文动力学模型制动画面



(a)制动过程中



(b)制动结束

图 11 引擎物理模型制动画面

(下转第 281 页)