

车辆滚翻事故再现轨迹模型及仿真的研究

陈琳¹, 李三红¹, 许洪国², 杨健²

¹国家汽车质量监督检验中心, 襄樊

²吉林大学交通学院

摘要: 论文分析了汽车滚翻再现理论模型和方法, 制定了应用于汽车翻滚事故的算法和流程, 建立了滚翻轨迹模型, 并利用该模型获得完整的汽车滚翻运动过程中任意时刻的车辆空间位置和形态, 实现了二维再现演示。利用 OpenGL 图形处理技术, 实现从三维空间到二维平面的投影变换, 利用 VC、OpenGL、3Dsmax 图形处理技术, 开发了汽车翻滚事故三维再现的模块。通过模型试验验证了仿真系统的正确性和精度, 并对实际案例进行了再现分析。

关键词: 滚翻事故, 事故再现, 滚翻轨迹模型, OpenGL

Study on Trajectory Model and Simulation of Vehicle Rollover Accident Reconstruction

CHEN Lin¹, LI Sanhong¹, XU Hongguo², YANG Jan²

¹National Automobile Quality Supervision and Test Center, Xiangfan, China

²Jilin University, China

Abstract: The general theory and method on reconstruction analysis of rollover accident are analyzed. The vehicle rollover trajectory model is built, and the vehicle position and status in every moment of the complete vehicle during rollover process are obtained. 2D reconstruction of vehicle rollover accident is developed. The algorithm on OpenGL are used to transform a 3D space to a 2D picture based on the theory of projection and buffer, and the module of 3D reconstruction is programmed utilizing VC++, OpenGL, 3Dmax. The model was validated by experimentation. The reconstruction analysis of actual case was carried out.

Keywords: Vehicle Rollover Accident, Accident Reconstruction, Rollover Trajectory Model, OpenGL

1 引言

翻车事故是一种恶性交通事故, 汽车滚翻事故是道路交通事故的一种重要形式。虽然翻车事故在全部交通事故中所占的比例不大, 但往往都会造成严重的人员伤亡和大的财产损失。由于汽车滚翻事故的复杂性以及它与其它事故类型(如碰撞事故)的差异性, 目前无法在一般的事故处理实践中对汽车滚翻事故做出详细、客观、准确的事故再现分析。论文在国内外现有研究成果的基础上, 对汽车滚翻事故再现分析的一般理论、模型、算法和参数选取, 建立了车辆滚翻轨迹模型, 并利用该模型获得完整的汽车滚翻运动过程中(三个阶段, 即: 侧滑阶段、侧翻阶段和翻滚阶段)任意时刻的车辆空间位置和形态, 实现了二维再现演示, 利用 VC、OpenGL、3Dsmax 图形处理技术, 实现从三维空间到二维平面的投影变换, 开发了汽车翻滚事故三维再现的模块。通过模型试验验证了仿真系统的正确性和精度, 并对实际案例进行了再现分析。

2 滚翻轨迹模型建立

如图 1 所示, XOY 坐标系为地面坐标系, 与车身固结的坐标系 X'_gC_gY' 为车辆坐标系。车辆坐标系原点 $C_g(X_c, Y_c)$ 为质心位置; L_{xw1} 、 L_{xw2} 、 L_{xw3} 、 L_{xw4} 分别为车辆质心 C_g 沿 X' 方向到四轮轮中心的距离; L_{yw1} 、 L_{yw2} 、 L_{yw3} 、 L_{yw4} 分别为质心 C_g 沿 Y' 方向到四轮轮中心的距离; W_{Bf} 、 W_{Br} 、 W_{wf} 、 W_{wr} 分别为前、后轴轮距和轴距; D_{w1} 、 D_{w2} 、 D_{w3} 、 D_{w4} 分别为质心 C_g 到四轮轮中心的距离; ψ 为车头方向在地面坐标系中的角度。

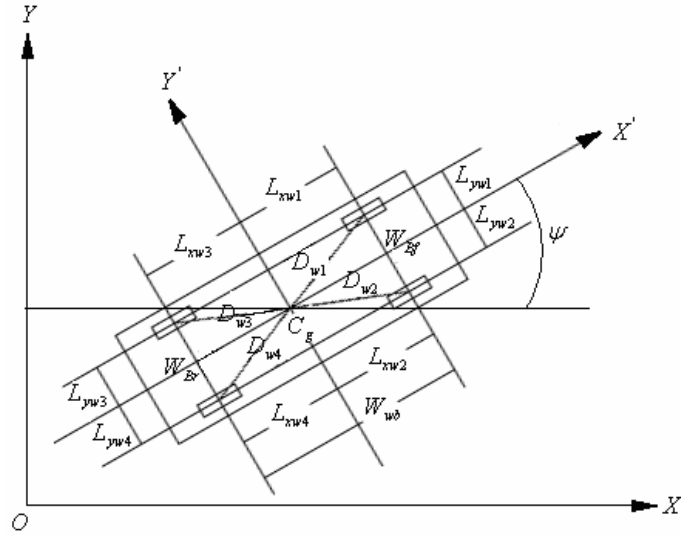


图 1 四轮车辆坐标系

由图 1 可以计算出每个车轮的位置为

$$\begin{cases} X_{wi} = X_c + D_{wi} \cos \psi_i \\ Y_{wi} = Y_c + D_{wi} \sin \psi_i \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

式中： i 分别代表左前轮、右前轮、左后轮和右后轮； ψ_i 为各轮和质心 C_g 的连线与 X 轴方向的夹角。

当车辆发生侧翻，即侧翻转角 $\theta \neq 0$ 时， L_{yw1} 、 L_{yw2} 、 L_{yw3} 、 L_{yw4} 在 XOY 平面内的投影长度分别为 L'_{yw1} 、 L'_{yw2} 、 L'_{yw3} 、 L'_{yw4} ，则

$$\begin{cases} L'_{ywi} = L_{ywi} |\cos \theta| \\ D'_{wi} = \sqrt{L_{xwi}^2 + L_{ywi}^2} \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

$$\begin{cases} X_{wi} = X_c + D'_{wi} \cos \psi_i \\ Y_{wi} = Y_c + D'_{wi} \sin \psi_i \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

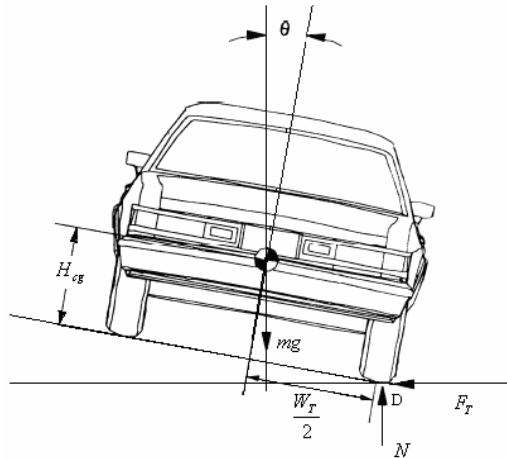


图 2 车辆滚翻过程受力/运动状态图

在汽车坐标系的 Y' - Z' 平面内，如图 2 所示，运动微分方程为：

$$\begin{cases} m\ddot{y} = -F_T \\ m\ddot{z} = -N + mg \\ I_{xx}\ddot{\theta} = -N\left(\frac{W_T}{2}\cos\theta - H_{cg}\sin\theta\right) + F_T\left(H_{cg}\cos\theta + \frac{W_T\sin\theta}{2}\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $0 \leq \theta \leq \pi/2$; H_{cg} —质心高度(m); W_T —轮距(m); I_{xx} —绕过质心的 x 轴的转动惯量($\text{kg} \cdot \text{m}^2$); N —地面支持力(N); F_T —汽车车身与路面接触部位受到的侧向作用力。

由几何关系知, 汽车质心坐标与广义坐标 θ 之间的关系为

$$\begin{cases} y = \frac{W_T}{2}(1 - \cos\theta) + H_{cg}\sin\theta \\ z = H_{cg}\cos\theta + \frac{W_T\sin\theta}{2} \end{cases} \quad (5)$$

联立求解, 得运动微分方程为

$$\left[I_{xx} - mL^2(\cos 2\alpha)\right]\ddot{\alpha} = -mgL\cos\alpha - mL^2(\sin 2\alpha)\dot{\alpha}^2 \quad (6)$$

$$\text{其中: } \alpha = \theta + \arctan\left(\frac{2H_{cg}}{W_T}\right), \quad L = \sqrt{\frac{W_T^2}{4} + H_{cg}^2}。$$

给定初始条件, 通过解方程(6)求得该阶段任意时刻的翻转角速度和翻转角度, 将各时刻的翻转角度代入式(5)求得各点的质心广义坐标值。建立滚翻运动轨迹方程为

$$\begin{cases} Y_c = y(\ddot{\alpha}) \\ Z_c = z(\ddot{\alpha}) \\ \theta = \theta(\ddot{\alpha}) \\ \begin{cases} X_{wi} = X_c + D'_{wi}\cos\psi_i \\ Y_{wi} = Y_c + D'_{wi}\sin\psi_i \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (7)$$

通过解方程组(7)求出任意时刻车辆位置参数和翻转状态参数, 进而通过二维演示、三维动画的方式显示车辆各时刻的位置及形态。

2 动画仿真模块

2.1 动画仿真程序

轨迹模型分析事故车辆运动是分析—模拟—修正—模拟的过程。由轨迹模型的分析方法提供初始值, 进行模拟计算、动画显示; 用户根据实际现场的情况进行参数修正, 再次进行动画演示, 直至模拟的车辆运动过程与实际现场所描述的相一致。

二维动画演示采用 VC 中的 GDI 绘图, 在整个视图类的生命周期始终保持同一个 DC(设备环境对象), 在视图类的任意位置调用访问此 DC, 从而简化了 DC 的操作。为保证动画模拟的精度, 在视图类采用定时器, 每隔指定时间间隔执行回调函数, 首先擦除前一位置车辆的位置(反色重绘), 并绘制该时刻的位置, 然后绘制两位置之间的轨迹曲线。

OpenGL 中的函数可以进行图形的绘制或改变图形的绘制形态, 可以对这些图形进行着色、移动、变换等操作, 还可以改变视点与视角, 3DMAX 是基于 OpenGL 标准的关键帧动画制作软件。三维动画仿真模块采用 OpenGL、3DMAX、VC 三者混合编程, 利用 3DMAX 制作三维仿真模型, 利用 OpenGL 对其进行编程控制, 利用 VC 制作主控界面。

主程序模块的计算流程大致可以分为数据准备阶段、数据模拟分析阶段和结果显示阶段，其流程图如图 3 所示。

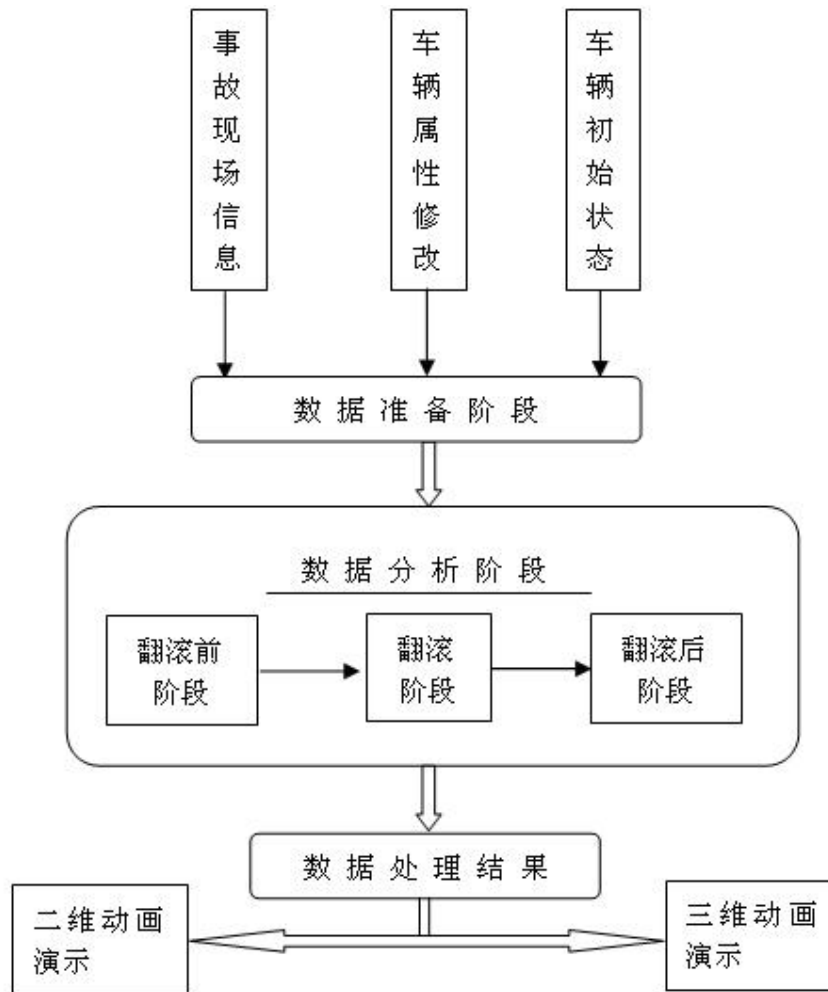


图 3 主程序流程示意图

2.2 仿真程序流程

如图 4 所示，进入主程序进行二维滚翻模拟计算，完成如图 5 所示的车辆参数设置及事故现场初始化设置，车辆的参数设置和事故现场设置在模拟的过程中至关重要，将决定最终模拟结果的精度。

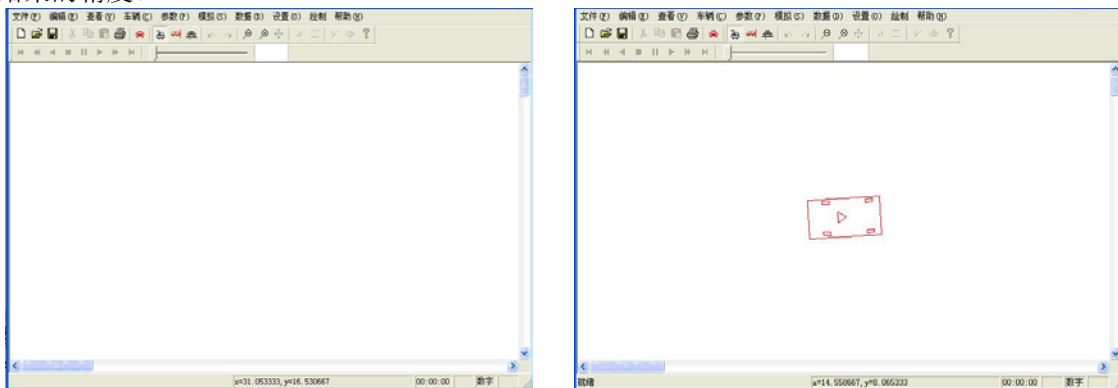


图 4 软件主界面

图5 车辆参数及事故现场初始化设置

初始化程序后，可以根据事故发生时刻的各种数据将事故过程的运动情况以二维动画的形式显示出来。并时时进行参数修正，经过分析—模拟—修正—模拟的过程再次进行动画演示，直至模拟的车辆运动过程与实际现场所描述的相一致。同时，在二维模拟过程中系统将自动生成车辆运动过程中的数据，包括车辆行驶位置、速度、加速度、横摆角度、侧倾角度、质心位置、轮胎接地点位置。

随后进入三维动画演示阶段，三维动画仿真主要是针对二维模拟再现的补充演示，使事故再现更直观，更真实，有利于用户了解事故发生的全过程。程序读取二维分析生成的车辆和现场数据，将可以进行动画演示，如图6所示。

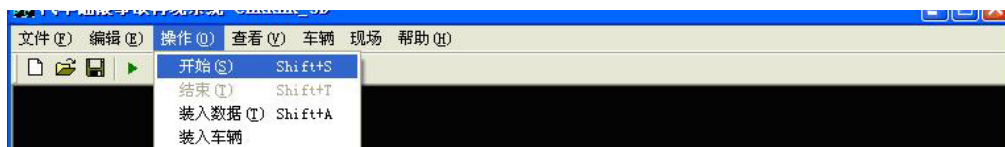


图6 三维仿真程序启动

该仿真程序为模拟的事故现场设置了全视角查看功能，可以点击左键的同时拖动鼠标，对现场和模拟车辆进行全视角查看。转动鼠标滚轮可以对场景和车辆进行放大和缩小。程序主界面如图7所示。

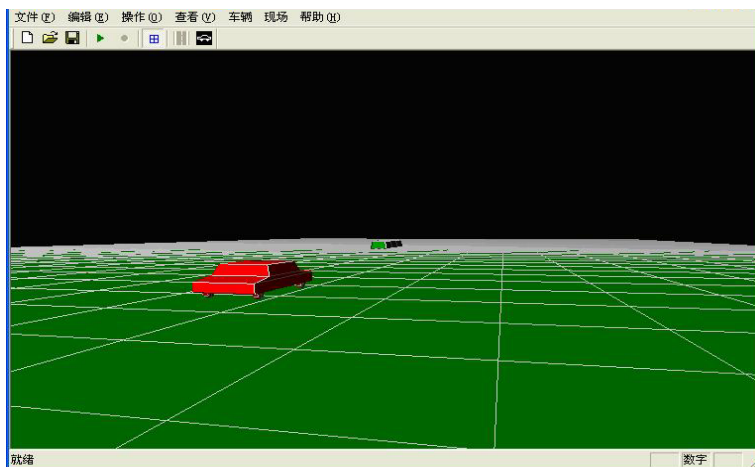
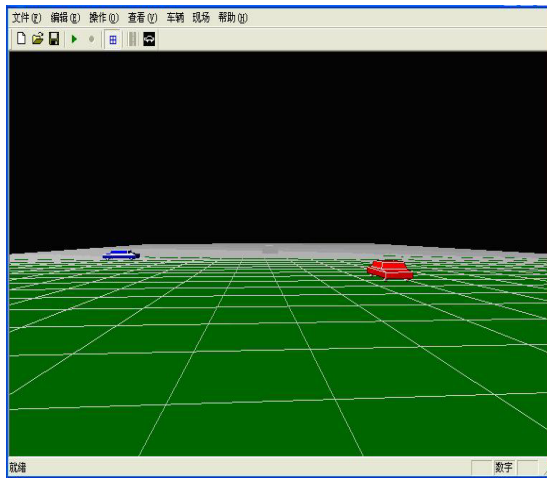
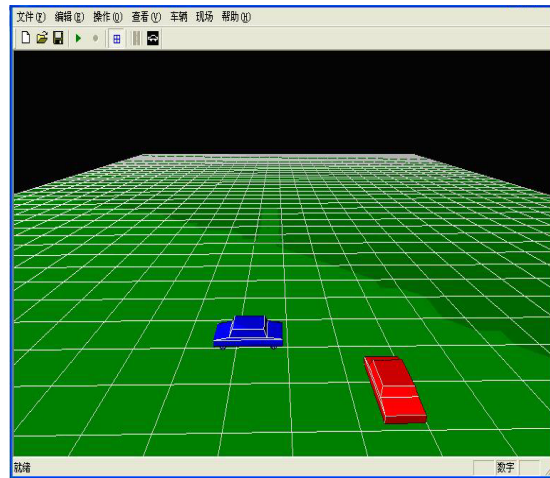


图7 三维仿真主界面

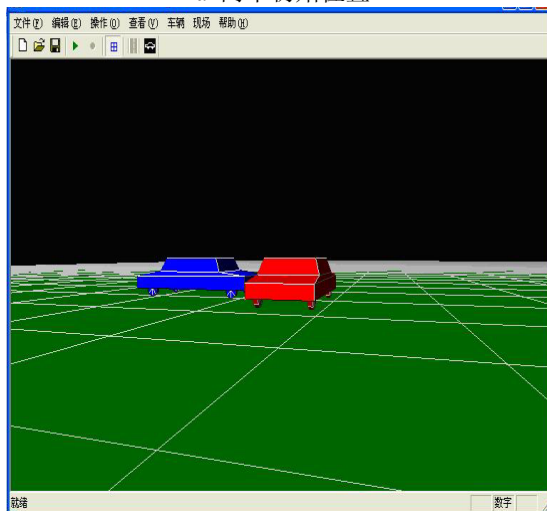
该仿真程序除可以进行单车翻滚事故仿真外，还可以根据临界侧翻碰撞力模型进行两车碰撞翻滚再现演示，仿真过程如图8所示。



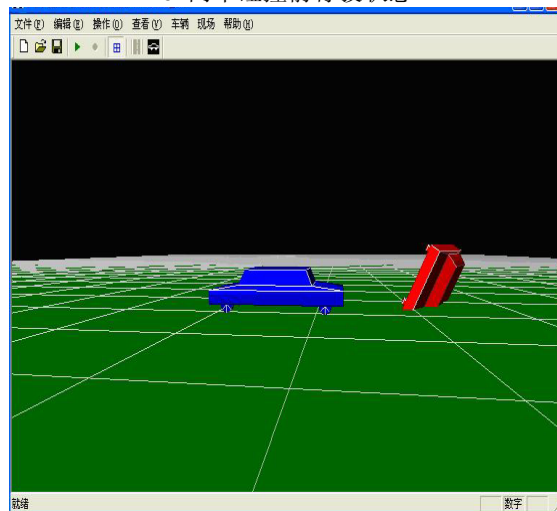
a 两车初始位置



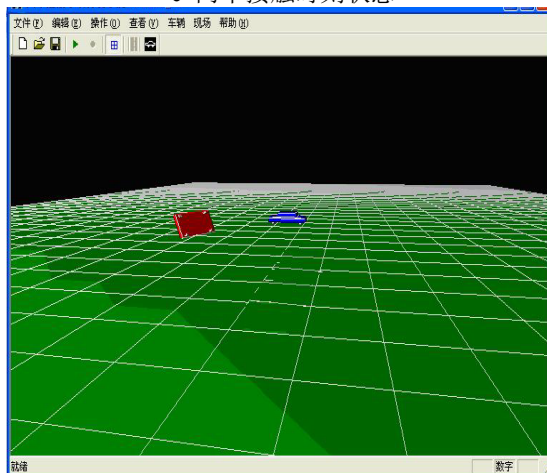
b 两车碰撞前行驶状态



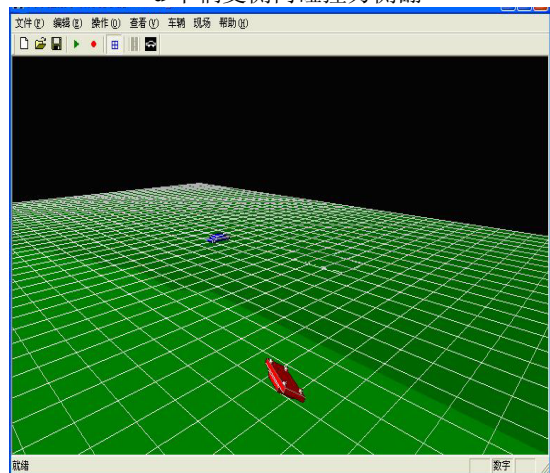
c 两车接触时刻状态



d 车辆受侧向碰撞力侧翻



e 车辆侧翻后滑行状态



f 车辆停定状态

图 8 碰撞力导致车辆侧翻仿真过程

3 模型验证及实例验证

3.1 PC-CRASH 螺旋滚翻再现验证

利用 PC-CRASH 模型库中对螺旋滚翻再现的一个例子来验证滚翻再现子模块对螺旋滚翻事故的再现。

图 9 所示, 为 PC-CRASH 对一起螺旋滚翻事故再现运动过程剪图, 即车辆行驶过程中右侧轮胎与道路路面上突起的障碍物发生碰撞作用, 产生螺旋式滚翻运动。如图 10 所示, 滚翻再现模块在相同的初始条件下对该起事故的再现过程。

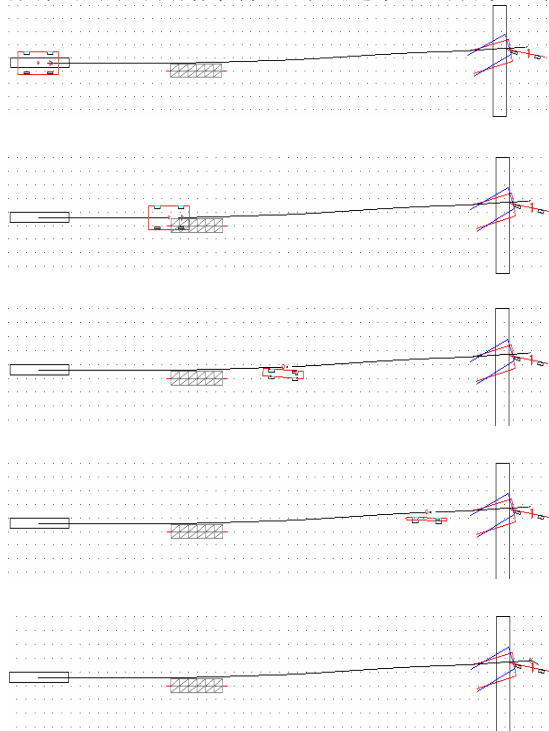


图 9 PC-CRASH 螺旋滚翻再现



图 10 CAR-RAR 螺旋滚翻再现

从图 9 和图 10 对比验证看出, 模拟结果与计算分析与 PC-CRASH 再现结果较为接近, 实现了对整个汽车滚翻过程的二维再现, 直观的表现出了车辆的运动情况。

3.2 实例验证

2004 年 X 月 X 日, XX 时 X 分, 在某公路上某驾驶员驾驶轿车行驶到某道路入口, 由于夜间行车, 光线较差, 没有及时发现入口设置的一个消能沙桶, 在车辆即将接触沙桶的时刻采取了过度转向, 车辆失控后偏离行驶方向, 发生了侧翻事故。

3.2.1 计算分析

根据路面遗留痕迹及车辆变形情况计算得到轿车事故前车速约为: $v \approx 90\text{km/h}$

3.2.2 仿真再现分析

初始化事故现场, 参照事故现场图, 将事故现场记录的汽车侧滑印记起始点、路面痕迹、翻滚位置、碰撞后汽车最终停定位置、车辆技术参数等数据输入系统。反复设定车辆初始速度、初始方向角度等参数, 通过轨迹模型对事故车辆运动情况进行分析-模拟-修正-模拟, 将模拟的车辆运动轨迹状态和结果, 与现场情况进行比较, 直至模拟现场的轨迹与实际的现场轨迹较为一致, 最终得到车辆事故前的行驶速度约为 88km/h , 二维模拟状况如图 11 所示。

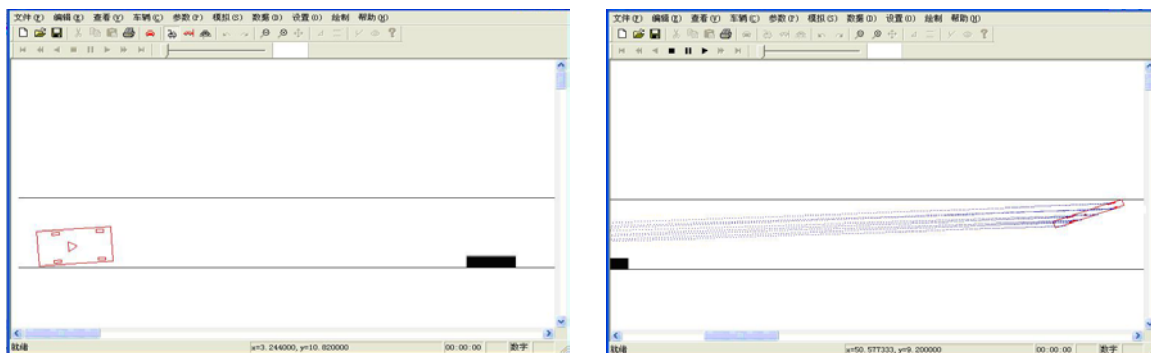
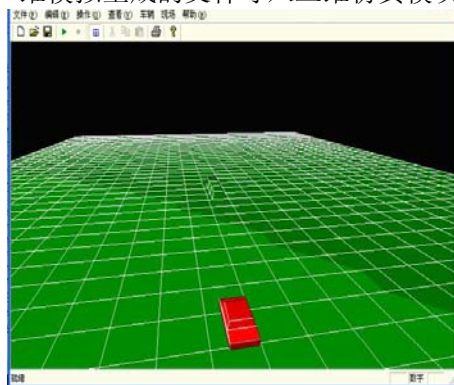
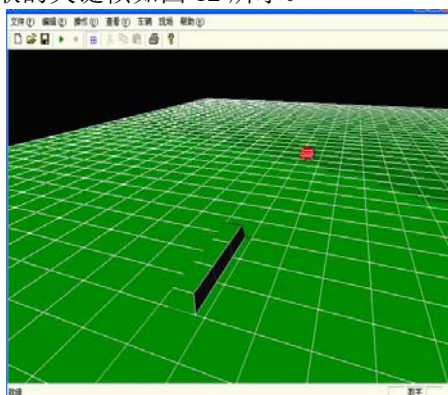


图 11 二维模拟过程中车辆侧翻状态

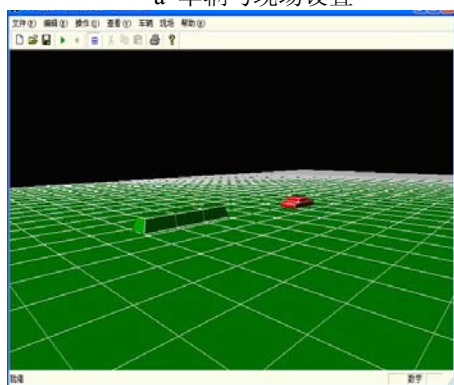
二维模拟生成的文件导入三维仿真模块，截取的关键帧如图 12 所示。



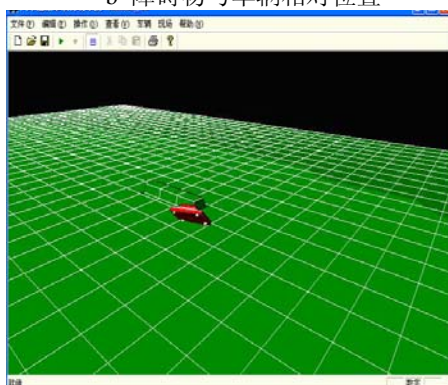
a 车辆与现场设置



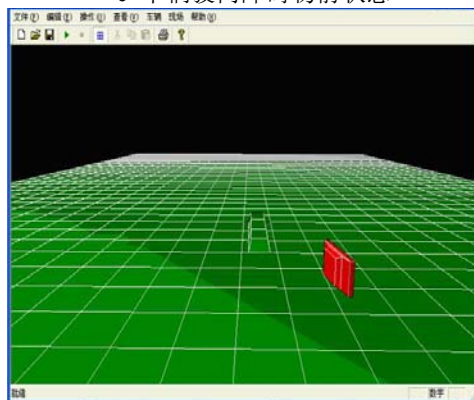
b 障碍物与车辆相对位置



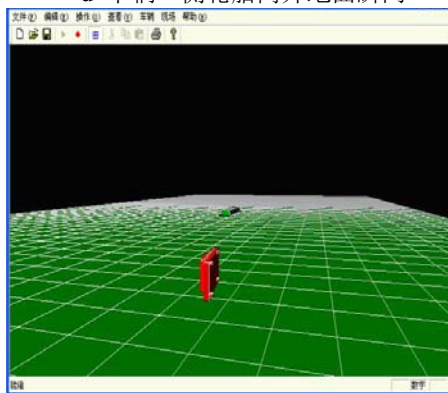
c 车辆驶向障碍物前状态



d 车辆一侧轮胎离开地面瞬间



e 车辆侧翻后运动状态



f 车辆最终停定状态

图 12 三维模拟车辆运动状态的关键帧

4 结论

建立了翻滚轨迹模型，开发了二维、三维仿真模块，并通过 PC-CRASH 模型及实例验证证明该轨迹模型及仿真程序具有一定的实用价值。由于建模初期做了一些基本假设，同时由于道路交通事故的复杂性和各种类型的车辆的结构不同，翻滚事故再现模块还需不断地加以完善。

参考文献

- [1] Steffan, H., Moser, A.. The Collision and Trajectory Models of PC-CRASH. SAE 960886, 1996.
- [2] M. Kröninger, R. Lahmann, T. Lich, M. Schmid, H. Güttler and T. Huber, K. Williams, A New Sensing Concept for Tripped Rollovers. SAE 2004-01-0340, 2004.
- [3] Hermann Steffan, Andreas Moser. How to Use PC-Crash to Simulate Rollover Crashes. SAE 2004-01-0341, 2004.
- [4] 魏朗, 陈涛, 周维新. 道路交通事故计算机辅助分析系统 TACAR V1.
- [5] 余志声. 汽车理论. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [6] 杜吉祥. 汽车碰撞事故的计算机模拟再现技术的研究 [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2002.
- [7] 胡远志, 李一兵, 张伟. 交通事故再现中汽车轨迹的建模验模. 计算机仿真, 2003, 20 (10).
- [8] 祝军. 汽车翻滚事故再现分析的方法研究和系统开发 [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2005.