

汽车—护栏碰撞的仿真模型

刘志斌^① 周一鸣 冯联杰 熊卫民
(车辆工程学院) (湖北工学院)

摘要 运用计算机仿真技术,对汽车同护栏等路边设施的碰撞过程进行了仿真分析,用欧拉法和拉格朗日法建立了汽车三维运动分析模型,确定了汽车—护栏的弹性碰撞模型并描述了逻辑判断,提出了汽车与护栏碰撞后汽车的接触面积、碰撞力和碰撞力矩的算法,给出的应用实例的仿真结果表明,研制的仿真软件可用于路边设计和预测汽车的性能。

关键词 汽车;路边护栏;碰撞模型;模拟

中图分类号 U461.6; TP391.9

Study on Modelling Related to Collision Between Vehicle and Barrier

Liu Zhibin Zhou Yiming Feng Lianjie Xiong Weimin
(College of Vehicle Engineering, CAU) (Hubei Polytechnic University)

Abstract The digital simulation with a personal computer-based software is applied for the simulation and analysis of the impact procedure between a vehicle and a spring barrier. The Euler and Lagrangian principles are used to establish the mathematical model of the vehicle with three-dimensional motion. The model of collision between vehicle and roadside spring barrier is developed. The logical judgment of impact procedure are discussed. The algorithm for the contact area, impact force and impact torque, as well as the applied point of the force on the vehicle is presented. Finally, the application examples are given.

Key words vehicle; barrier; collision-model; simulation

由于计算机技术的发展,用计算机仿真技术对交通事故进行研究已显示出巨大的优越性。对汽车—护栏碰撞过程的仿真研究,既有助于进行汽车的动态设计和分析,预测汽车的安全性,也有助于进行护栏的合理设计,使护栏能有效地吸收碰撞能量,并借助本身的弹性,将汽车导入车道边。计算机仿真的基础是数学模型^[1]。数学模型考虑的因素越全面,计算机仿真的结果越逼真、越精确,但解决问题的难度也越大,所以笔者在建立数学模型时,对各种模型进行了一些简化。

收稿日期:1996-01-04

①刘志斌,北京清华东路17号中国农业大学(东校区)43信箱,100083

1 汽车模型

模型假设如下:1)汽车模型限于具有独立悬架或非独立悬架的四轮汽车,悬架的柔度对转向和车轮外倾角的影响忽略不计;2)转向系统本身没有模型,转向输入和转向自由度直接与前轮的平均转向角相关;3)轮胎被处理成薄的圆盘,因而在陡坡突变且车轮近似平行于间断处的情况下,不考虑轮胎的横向包容性所导致的响应偏差;减振器特性曲线在压缩阶段和伸展阶段是对称的。

在对汽车模型的分析中,采用2套基本的坐标系:第1套为固结于空间的右手坐标系,即空间坐标系;第2套为固定于车身的动坐标系,又称汽车坐标系。空间坐标系遵循右手法则,其 z' 轴指向下,而 x' 轴和 y' 轴方向任选;类似地,汽车坐标系的 z 轴向下,即指向汽车底部, x 轴则指向车辆前方, y 轴指向汽车右侧,汽车坐标系原点在汽车簧上质量的质心。

汽车分析模型是一个由3,4或5个刚体组成的多刚体系统,这些刚体实际上是由簧上质量(底盘和车身)和簧下质量(车轮或车轴)组成的,这里用了11个自由度^[2]。

2 路边护栏模型

路边护栏是公路安全设施中最重要的一种,其基本形式有刚性护栏、弹性护栏(又称半刚性护栏)和柔性护栏3种。护栏的作用是在汽车与护栏碰撞时,在不被破坏的情况下吸收部分碰撞能量,并将汽车导入行车道,保证汽车不越过护栏冲进相对车道,或翻滚下护坡,因此对护栏的要求,首先是具有足够的强度和适当的刚度,其次是具有较强的吸能特性和一定的导向能力。这里主要讨论弹性护栏,分析汽车与护栏碰撞时护栏的受力和变形情况。

弹性护栏主要由横梁、立柱和地基组成,当汽车与护栏碰撞时,这3个部分共同参与作用。笔者建立护栏模型时作了以下假设:1)整个护栏系统为弹性支座连续梁,连续梁等截面,具有一致的弯曲刚度(EJ);2)护栏足够长或无限长;3)护栏的立柱间距 l 为常数,即护栏跨度相同;4)护栏的立柱与其地基为一整体,共同作用效果近似一弹簧,弹性系数 K 主要与地基的性质、立柱材料、立柱截面形状和尺寸以及埋深有关,由试验确定。

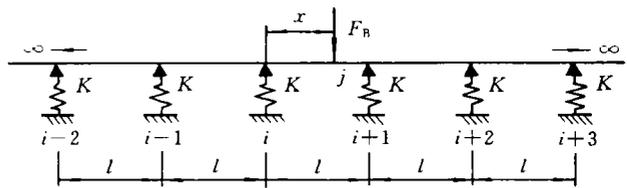


图1 护栏模型

根据以上假设,得到如图1所示的护栏模型。对于超静定梁的求解,计算方法很多,这里采用内力和移位的转换矩阵法求解弹性支座连续梁。

3 汽车—护栏的碰撞过程

3.1 汽车—护栏的碰撞模型

汽车与护栏碰撞一般是指簧上质量(车身)与护栏相碰。这里所讨论的碰撞仅限于簧上质

量与护栏之间,而假定簧下质量与护栏之间、簧上质量与地面之间并无接触(图2)。簧上质量简化成周围均质、具有相同各向刚度的正六面体,护栏平行于空间坐标轴 x' ,它可以是刚性的或变形的,具有无限宽或有限宽的垂直面。对于簧上质量与变形护栏碰撞的仿真,不考虑护栏的惯性影响,某一时刻的护栏挠度是在汽车与护栏接触之前,通过对护栏

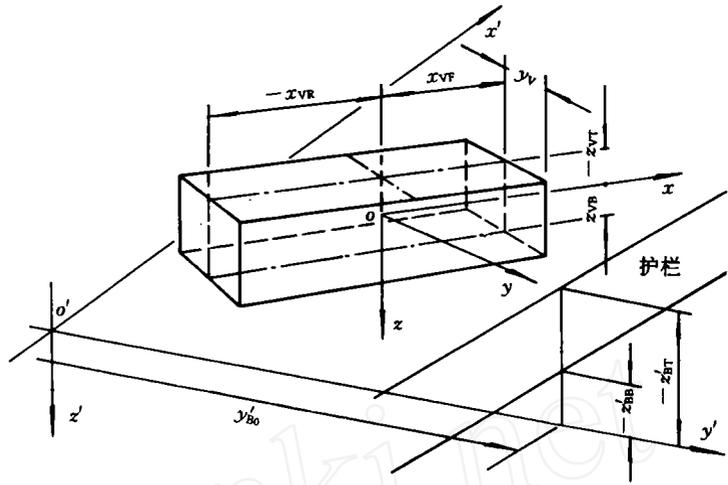


图2 汽车—护栏碰撞模型

逐渐增加某一小挠度($\Delta y'_B$)来确定的,当护栏挠度出现时,所需要的力一定与汽车结构受挤压的力平衡。碰撞力的算法是基于汽车挤压和结构“硬点”的变形,首先输入3个具有相同刚度的“硬点”之未变形位置;碰撞力就是以其变形量作为计算基础的。

3.2 汽车与护栏碰撞的判断

对于簧上质量与护栏的接触情况,通过一系列的判断来确定接触面的几何形状,最后计算出其面积及“等效”作用点。

规定在汽车与护栏碰撞时汽车的左后棱角不参与碰撞,所以首先对汽车过多的偏摆进行判断,对于 $\Psi > 135^\circ$ 的情况,则不进行仿真。现用下式对汽车棱角靠近护栏的情况作检验:

$$(x'_{cpn}, y'_{cpn}, z'_{cpn})^T = (x_c, y_c, z_c)^T + A(x_{cpn}, y_{cpn}, z_{cpn})^T$$

式中: $(x'_{cpn}, y'_{cpn}, z'_{cpn})$, $(x_{cpn}, y_{cpn}, z_{cpn})$ 分别是汽车棱角在空间坐标系和汽车坐标系中的坐标; (x_c, y_c, z_c) 是汽车坐标系原点在空间坐标系中的坐标; A 是从汽车坐标系到空间坐标系的转换矩阵。取 y'_{cpn} 最大的棱角点,则该棱角上端点和下端点的坐标为

$$(x'_{cpt}, y'_{cpt}, z'_{cpt})^T = (x_c, y_c, z_c)^T + A(x_{cpn}, y_{cpn}, z_{cpn})^T$$

$$(x'_{cpb}, y'_{cpb}, z'_{cpb})^T = (x_c, y_c, z_c)^T + A(x_{cpn}, y_{cpn}, z_{cpn})^T$$

设 $y'_{cpm} = \max[y'_{cpt}, y'_{cpb}]$, y'_B 为护栏在空间坐标系的横坐标, $\Delta y'_B$ 为挠度增量。若 $2\Delta y'_B > y'_{cpm} - (y'_B)_{i-1}$, 则汽车棱角与护栏无接触;若 $2\Delta y'_B < y'_{cpm} - (y'_B)_{i-1}$, 则汽车棱角与护栏接触。

要得到接触面的几何形状,必须对汽车与护栏的接触点进行判断,下面将详细讨论。

护栏垂直面法线相对于汽车坐标系的方向余弦为 $(\cos\alpha_B, \cos\beta_B, \cos\gamma_B)$, y' 轴与护栏垂直面交点相对于汽车坐标系的坐标为 $(x_{B_i}, y_{B_i}, z_{B_i})$, 有

$$(\cos\alpha_B, \cos\beta_B, \cos\gamma_B)^T = A^T(0, 1, 0)^T$$

$$(x_{B_i}, y_{B_i}, z_{B_i})^T = A^T[(-x'_c, (y'_B)_i - y'_c, -z'_c)]^T$$

这里 $(y'_B)_i = (y'_B)_{i-1} + n'(\Delta y'_B) - (i-1)(\Delta y'_B)$ ($i=1, 2, \dots, n', n'+1$)

为护栏垂直面的切平面,而

$$n' = \text{INT} \left(\frac{y'_{cpm} - (y'_B)_{i-1}}{\Delta y'_B} + 1 \right) \tag{1}$$

汽车与护栏发生碰撞时汽车有一定程度的旋转,其旋转的近似轴线为前一时刻护栏汽车平衡平面与具有变形 $(\delta_B)_{t-1}$ 的当前护栏平面的交线,设旋转轴线在平面 $Z=(Z_R)_{t-1}$ 上的点的坐标为 (x_{Bt}, y_{Bt}, z_{Bt}) ,则

$$\begin{bmatrix} (\cos\alpha_B)_t & (\cos\beta_B)_t & (\cos\gamma_B)_t \\ (\cos\alpha_B)_{t-1} & (\cos\beta_B)_{t-1} & (\cos\gamma_B)_{t-1} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{Bt} \\ y_{Bt} \\ z_{Bt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R'_B \\ (R_B)_{t-1} \\ (Z_R)_{t-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

这里

$$R'_B = x'_B(\cos\alpha_B)_t + y'_B(\cos\beta_B)_t + z'_B(\cos\gamma_B)_t \quad (3)$$

由式(2)和(3)可得护栏垂直面的方程

$$x_{Bt}\cos\alpha_B + y_{Bt}\cos\beta_B + z_{Bt}\cos\gamma_B - R_{Bt} = 0$$

垂直于当前护栏平面且包有旋转轴的平面常数为

$$R_{Bt} = x_{Bt}\cos\alpha_{Bt} + y_{Bt}\cos\beta_{Bt} + z_{Bt}\cos\gamma_{Bt}$$

为了便于讨论,将汽车的周边定义为 17 个“点”,如图 3 所示。

汽车与护栏的接触点,同时在护栏切平面、汽车周边切平面和汽车旋转轴平面内,设接触点为 (x_n, y_n, z_n) ,其相对于空间坐标系的速度分量为 (u'_n, v'_n, w'_n) ,则有

$$\begin{bmatrix} \cos\alpha_B & \cos\beta_B & \cos\gamma_B \\ A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{Bt} \\ R_1 \\ R_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} u'_n \\ v'_n \\ w'_n \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} u - y_n R + z_n Q \\ v + x_n R - z_n P \\ w + y_n P - x_n Q \end{bmatrix} \quad (5)$$

这里 $n=1, 2, \dots, 17$,即汽车的周边“点”; $A_1, B_1, C_1, R_1, A_2, B_2, C_2, R_2$ 是 n 的表列函数。式(4)便是接触点的基本判断方程,式(5)是每个接触点相对于空间坐标系的速度分量。

汽车与护栏某切平面 i 的接触面积由 4 个或 3 个点决定,如图 4 所示。设其坐标为 (x''_j, y''_j, z''_j) , $j=1, 2, 3, 4$,图中的 L_1 或 L_2 的方向分量(在下面的推算中省略下标 i)则为

$$a' = \begin{vmatrix} (y''_1 - y''_2) & (z''_1 - z''_2) \\ \cos\beta_B & \cos\gamma_B \end{vmatrix}$$

$$b' = \begin{vmatrix} (z''_1 - z''_2) & (x''_1 - x''_2) \\ \cos\gamma_B & \cos\alpha_B \end{vmatrix}$$

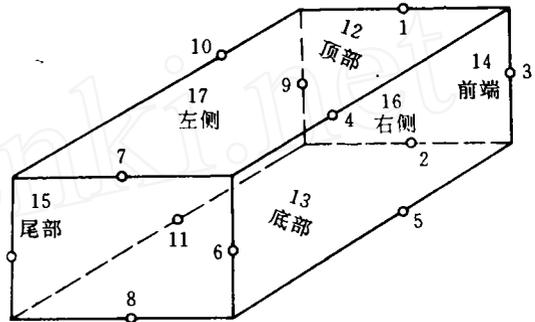


图 3 汽车周边“点”的定义

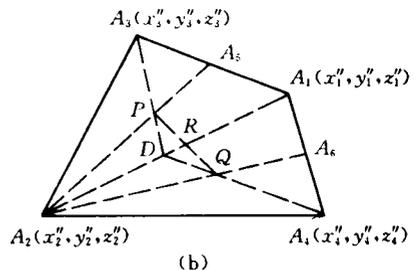
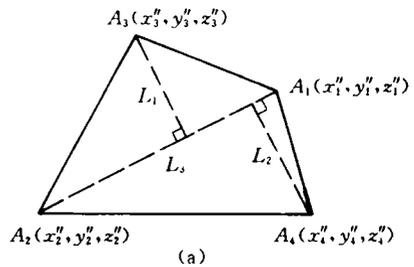


图 4 接触面积(a)和接触面积的形心(b)

$$c' = \begin{vmatrix} (x_1'' - x_2'') & (y_1'' - y_2'') \\ \cos\alpha_B & \cos\beta_B \end{vmatrix}$$

若只存在 3 个点, 则 $L_2 = 0$ 。 L_1, L_2 和 L_3 的长度分别由下式确定:

$$L_1 = (|a'(x_3'' - x_2'') + b'(y_3'' - y_2'') + c'(z_3'' - z_2'')|)(a'^2 + b'^2 + c'^2)^{-1/2}$$

$$L_2 = (|a'(x_4'' - x_2'') + b'(y_4'' - y_2'') + c'(z_4'' - z_2'')|)(a'^2 + b'^2 + c'^2)^{-1/2}$$

$$L_3 = [(x_1'' - x_2'')^2 + (y_1'' - y_2'')^2 + (z_1'' - z_2'')^2]^{1/2}$$

总的接触面积为

$$A_{INT} = [(L_1 + L_2) / 2] L_3$$

如图 4 所示, 点 D, A_5 和 A_6 分别为直线 A_1A_2, A_1A_3 和 A_1A_4 的中点, 则整个接触面的形心 $R(x_R, y_R, z_R)$ 如表 1 所示。

可以认为在汽车与护栏的碰撞中, 汽车挤压变形引起的碰撞力垂直于护栏, 并作用于“等效”作用点。等效作用点可用下式计算:

$$(\sum x_R)_i = \frac{1}{M_{ANT}} \sum_{i=1}^{n'+1} \frac{1}{2} [(A_{INT})_i + (A_{INT})_{i-1}] \cdot \frac{1}{2} (x_{Ri} + x_{Ri-1})$$

$$(\sum y_R)_i = \frac{1}{M_{ANT}} \sum_{i=1}^{n'+1} \frac{1}{2} [(A_{INT})_i + (A_{INT})_{i-1}] \cdot \frac{1}{2} (y_{Ri} + y_{Ri-1})$$

$$(\sum z_R)_i = \frac{1}{M_{ANT}} \sum_{i=1}^{n'+1} \frac{1}{2} [(A_{INT})_i + (A_{INT})_{i-1}] \cdot \frac{1}{2} (z_{Ri} + z_{Ri-1})$$

式中

$$M_{ANT} = \sum_{i=1}^{n'+1} \frac{1}{2} [(A_{INT})_i + (A_{INT})_{i-1}]$$

n' 由式(1)求得。

3.3 碰撞力和力矩

这里将采用一种新的算法来计算碰撞力。碰撞力由 2 部分组成: 一部分是由汽车结构受挤压引起的; 另一部分是由汽车结构“硬点”变形引起的。在计算碰撞力之前, 先讨论变形护栏的载荷特征。

护栏变形包括弹性和塑性变形, 其载荷特性曲线是非线性的, 如图 5 所示; 随着载荷增加, 载荷与变形的关系表现为变形和变形速度的多项式函数; 随着载荷减小, 载荷与变形的关系表现为变形的抛物线函数。

加载时的关系式为

$$F_B = \delta_1 + \sum_{i=2}^6 \delta_i (\delta_B)_n^{i-1} + \sum_{i=7}^{11} \delta_i (\dot{\delta}_B)_n^{i-6} \quad (6)$$

式中: n 为加载次数; $(\delta_B)_n$ 为护栏变形; $(\dot{\delta}_B)_n$ 为护栏变形的速度。

卸载时的关系式为

表 1 接触面的确定点与形心坐标

确定点	3 个点	4 个点
x_R	x_P	$x_P + L_2(x_Q - x_P) / (L_1 + L_2)$
y_R	y_P	$y_P + L_2(y_Q - y_P) / (L_1 + L_2)$
z_R	z_P	$z_P + L_2(z_Q - z_P) / (L_1 + L_2)$

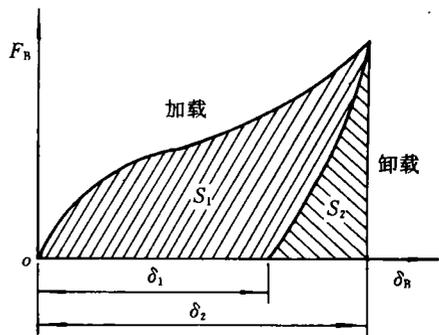


图 5 护栏的载荷特性曲线

$$F_B = \xi_0 n + \xi_1 n (\delta_B)_n + \xi_2 n (\delta_B)_n^2$$

式中 ξ_0, ξ_1, ξ_2 是与 λ 和 η 有关的因数; λ 为永久变形与最大变形之比, 即 $\lambda = \delta_1 / \delta_2$; η 为护栏残留能量与总的吸收能量之比, 即 $\eta = S_1 / (S_1 + S_2)$ 。

汽车挤压引起的变形力为

$$(F_N)_i = k_v \Delta y'_B \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} [(A_{INT})_i + (A_{INT})_{i-1}] \tag{7}$$

式中: k_v 为汽车结构载荷特征值; $\Delta y'_B$ 为护栏的变形增量。

设对于汽车坐标系汽车未变形的结构硬点为 $(x_{STi0}, y_{STi0}, z_{STi0})$, $i=1, 2, 3$, 则相对于空间坐标系的坐标为 $(x'_{STi0}, y'_{STi0}, z'_{STi0})^T = (x_c, y_c, z_c)^T + A(x_{STi0}, y_{STi0}, z_{STi0})^T$ 。如果未变形的“硬点”的横向坐标小于护栏垂直面的横向坐标, 或者“硬点”的横向速度为零, 则可认为由“硬点”变形产生的对护栏的力是零^[3], 即当 $y'_{STi0} < y'_B$ 或 $v'_{STi0} < 0$ 时, $F_{STi0} = 0$ 。这里

$$(u'_{STi0}, v'_{STi0}, w'_{STi0})^T = A(u - Ry_{STi0} + Qz_{STi0}, v + Rx_{STi0} - Pz_{STi0}, w + Py_{STi0} - Qx_{STi0})^T$$

而当 $v'_{STi0} \geq 0$ 且 $y'_{STi0} > y'_B$ 时, $F_{STi0} = K_{STi}(y'_{STi0} - y'_B)$, 其中 K_{STi} 为结构 i “硬点”的刚度系数, 而此时变形“硬点”在汽车坐标系中的位置为 $(x_{STi0}, y_{STi0}, z_{STi0})^T = A^T(x'_{STi0} - x'_c, y'_{STi0} - y'_c, z'_{STi0} - z'_c)^T$, 因此, 总的碰撞力为

$$F_N = (F_N)_i + \sum_{i=1}^3 F_{NSTi}$$

护栏的变形为 $\delta_B = (y'_B) - (y'_B)_0 - E_N$, 由式(6)和(7)计算出 F_B , 如果 $F_B - F_N > e_B$, 则重新运算。这里: E_N 为护栏的塑性变形(初始值为零); e_B 为允许误差。

汽车上“等效”作用点和结构“硬点”的速度分量为 $(u'_R, v'_R, w'_R)^T = A(u - Ry_i + Qz_i, v + Rx_i - Pz_i, w - Py_i - Qx_i)^T$, 这里 $x_i = (\sum x_R)_i, y_i = (\sum y_R)_i, z_i = (\sum z_R)_i, \{x_i, y_i, z_i\}^T = \{x_{STi0}, y_{STi0}, z_{STi0}\}^T, i=2, 3, 4$ 。

汽车对护栏的切向速度为

$$v_{tan} = \text{sgn}(u'_R) [(u'_R)^2 + (w'_R)^2]^{1/2}$$

汽车与护栏的摩擦力为

$$F_{fi} = \begin{cases} 0 & v_{tan} \leq \epsilon_v \\ \mu_B F_{SNi} \text{sgn} v_{tan} & v_{tan} > \epsilon_v \end{cases}$$

式中: F_{SNi} 为碰撞力; μ_B 为汽车与护栏的摩擦因数; ϵ_v 为摩擦滞后。有 $F_{SNi} = (F_N)_i, F_{SNi} = F_{SNTi}, i=2, 3, 4$ 。

碰撞力沿汽车坐标系各轴的分量为 $(F_{xsi}, F_{ysi}, F_{zsi})^T = A^T(-\mu_B F_{SNi} \cos \theta_{Bi}, -F_{SNi}, -\mu_B F_{SNi} \sin \theta_{Bi})^T$, 式中 $\theta_{Bi} = \arctan(w'_R / u'_R)$, 因此, 作用在汽车簧上质量的碰撞力矩为

$$\begin{cases} \sum M_{\varphi_i} = \sum_{i=1}^4 (y_i F_{zsi} - z_i F_{ysi}) \\ \sum M_{\theta_i} = \sum_{i=1}^4 (z_i F_{xsi} - x_i F_{zsi}) \\ \sum M_{\psi_i} = \sum_{i=1}^4 (x_i F_{ysi} - y_i F_{xsi}) \end{cases}$$

4 汽车与路边护栏碰撞的实例

汽车与路边护栏碰撞运行的设置,是在汽车直线行驶时某一时刻给一个转向输入,直到汽车与护栏碰撞,汽车回复到直线行驶。例中:汽车为独立式前悬架、非独立式后悬架式,汽车与护栏的摩擦系数为 0.3,护栏横梁的刚度系数为 0.258 MNm^4 ,支座的弹性系数为 $400 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,仿真时间从 0 至 5 s,汽车初始前进速度为 55 kmh^{-1} 。图 6 给出了仿真过程中汽车的运动图像。

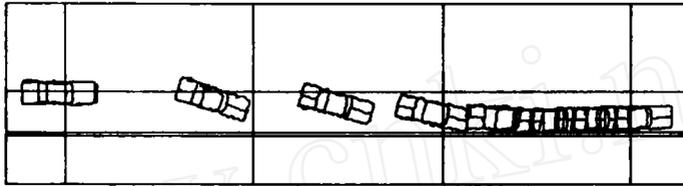


图 6 汽车与护栏碰撞运动图像(俯视)

5 结束语

通过汽车—护栏碰撞的仿真研究,可以认为,通过合理地选择护栏的材料和截面几何形状,当以某一车速行驶的汽车偏离公路撞击护栏时,护栏能有效地吸收碰撞能量,并借助本身的弹性将汽车导入车道边。本文作者研究的仿真软件,可用于路边设计,如护栏、边坡等,也可用于汽车的动态辅助设计和分析,以预测汽车的特性。

参 考 文 献

- 1 Ishikawa H. Computer simulation of automobile collision reconstruction of accidents. SAE,1985,851729
- 2 Woolley R L. The IMPAC computer program for accident reconstruction. SAE,1983,850256
- 3 刘志斌. 汽车—护栏碰撞仿真系统的研究与应用:[学位论文]. 北京:北京农业工程大学,1994