

The Explanation of the Cause of the Lateral Rotation Phenomenon after the Collision between the Car and the Guardrail and the Suggestions for the Optimization of the Guardrail

Kuan Liu

Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400000, China

Abstract: For highways at all levels under different terrain, environment, investment and other specific conditions, roadside safety design is very important. To ensure the safety of vehicles, we need to conduct structural safety analysis and evaluation on roadside guardrails. As a very important traffic safety facility, highway guardrail can effectively play its blocking role to prevent vehicles from directly rushing out of the road or turning out of the road. Through analysis, it is found that small cars are generally equipped with airbags and seat belt devices. The direct collision between the vehicle and the guardrail resulted in fewer casualties. However, after the car collided with the wave guardrail, it turned and turned at a high speed, causing the driver in the car to throw out of the car, or lose control, causing injury to nearby people. It has become an important cause of casualties in car accidents. In order to explain the cause of the lateral rotation phenomenon, through collision simulation and theoretical analysis, based on the characteristics of the direction of the moment of the vehicle subjected to the vehicle, the different motion patterns after the vehicle collides with the guardrail are obtained. Based on the single-degree-of-freedom model of, using the deflection curve equation of the simply supported beam, the mathematical model of the passenger car when the lateral motion occurs is derived. The mathematical model shows that the factors that cause the lateral rotation of the small passenger car are not only related to the vehicle type, but also related to factors such as the speed of the vehicle before the collision, the angle of collision and the bending stiffness of the guardrail beam. The results show that by improving the bending rigidity of the highway guardrail, it is possible to prevent the small passenger vehicle from colliding with the guardrail and to effectively improve the safety factor of the drivers and passengers.

Keywords: Collision simulation; lateral movement; arresting effect; bending stiffness; safety factor

汽车与护栏碰撞后横转现象成因解释及护栏优化建议

刘宽

重庆交通大学, 重庆, 中国, 400000

摘要: 对于不同地形、环境以及投资等具体条件影响下的各级公路, 路侧安全设计十分重要, 为保证车辆的行驶安全, 需要我们对路侧护栏需进行结构安全分析与评价。公路护栏作为一种十分重要的交通安全设施, 它能够有效的发挥其拦阻作用, 防止车辆直接冲到路外或翻出路外, 通过分析发现小型汽车普遍配备了安全气囊及安全装置, 从而车辆与护栏直接碰撞而导致的人员伤亡较少, 而小汽车在与波形护栏碰撞后因发生高速横转, 掉头现象, 使车内驾驶员甩出车外, 或失去控制而对附近人员造成伤害成为小汽车事故人员伤亡的重要原因, 为了对横转现象的成因进行解释, 通过碰撞仿真模拟及理论分析, 基于车辆所受到力偶矩方向特性, 得到车辆碰撞护栏后的不同运动形态, 以车辆碰撞护栏的单自由度模型为基础, 运用简支梁的挠曲线方程, 推导出了小客车发生横转运动时的数学模型。数学模型表明, 导致小型客车发生横转的因素除与车型相关, 还与车辆碰撞前的行驶速度、碰撞驶入角度及护栏梁体抗弯刚度等因素有关。结果表明: 通过提高公路护栏的抗弯刚度, 可以预防小型客车碰撞护栏横转运动, 有效提高驾乘人员的安全系数。

关键词: 碰撞仿真; 横转运动; 拦阻作用; 抗弯刚度; 安全系数

1 引言

近十几年来，公路的发展迅速，促进了我国经济，提高了人民的生活水平，并为我国与世界贸易合作和交流做出了巨大贡献，汽车也成为主要的交通工具，然而当汽车工业发展给我们出行带来便捷的同时，随之而来的也有大量的交通事故和人员伤亡，给社会造成了较为严重的影响。据统计，普通干线公路发生的所有事故中，大约有 45% 与车辆碰撞路侧护栏有关，而在高速公路约有 30% 是其造成的[1]，并且由此造成的特大恶性交通事故比例占该类事故总数的 62% 以上，汽车与路侧护栏碰撞后造成的人员死亡率极高，而车辆碰撞后不利的运动形态是罪魁祸首。2009 年 8 月，一辆小型客车在杭徽高速某路段因轮胎爆胎后碰撞高速公路中央隔离护栏，车辆发生高速横转，随后又撞上路侧护栏，造成车内 2 名乘客直接甩出车外致死、4 名乘客受伤的交通事故。2019 年 9 月，一辆小车由于导向轮爆胎后失控撞击护栏，而后高速旋转，与一辆小型客车相撞，造成 36 人死亡的重大交通事故。通过分析发现小型汽车普遍配备了安全气囊及安全装置，从而车辆与护栏直接碰撞而导致的人员伤亡较少，而小汽车在与波形护栏碰撞后，因发生高速横转，掉头现象，使车内驾驶人员甩出车外，或失去控制而对附近人员造成伤害成为小车事故人员伤亡的重要原因。

汽车与护栏碰撞后导致的二次事故危害远大于单纯碰撞，车辆碰撞后失控的运动形态是导致二次事故的主要原因，因此有必要在现有关公路护栏安全性能研究的基础上开展汽车碰撞护栏后运动形态的研究、提出车辆碰撞护栏后发生横向打转，掉头，侧翻，冲出等现象的成因及预防措施，对提高道路交通安全具有重要的意义。

2 小型汽车碰撞后运动形态

我国使用的护栏按照其受力后变形的特点可以分为三大类，分别为刚性，半刚性和柔性护栏。其代表分别为水泥混凝土护栏，其刚度较大，吸能性能较差，波形护栏，我国最常见的半刚性护栏，具有一定的防护能力和吸能能力，并且有着成本低廉，外形优美等特点，是我国使用范围最广的护栏类型，对于缆索护栏，其应用较为特殊，加之其维

护成本高，安装复杂，横向变形过大等特点，运用较前两种少。

2.1 小型汽车碰撞时的受力分析

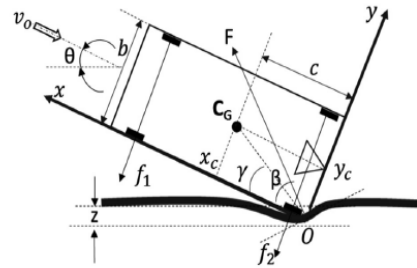


图 1. 汽车与护栏碰撞受力分析图

在此次分析中，我们将车辆受力过程分为两个阶段，第一个阶段为 t_1 ，代表的是从车辆碰撞护栏到车辆发生反弹旋转前，为护栏的压缩变形阶段，第二个阶段 t_2 代表的是汽车从旋转到停止的整个过程，为护栏的回复阶段。

2.1.1 t_1 阶段的受力分析

建立如图 1 所示的直角坐标系，画出受力示意图。在 t_1 时刻内，设车辆碰撞护栏后的作用力为 F_1 ，护栏对其反作用力为 F 。对力学系统进行简化，不计汽车与路面之间的摩擦力，忽略护栏的阻力，则根据动力学方程

$$I_x = \int_0^{t_1} F_x \times dt \quad (1)$$

$$I_y = \int_0^{t_1} F_y \times dt \quad (2)$$

$$L = \int_{t_1}^{t_2} (M_x - M_y) dt \quad (3)$$

式中：

F_x ——力 F 在 x 方向上的分力

F_y ——力 F 在 y 方向上的分力

M_x 、 M_y ——力 F 在 x, y 方向上的力矩 (kg·m)

I_x 、 I_y ——汽车在 x, y 方向上的冲量

L ——角冲量

2.1.2 t_2 阶段的运动状态

t_2 阶段简化后的力学模型如图 2 所示，力偶矩 M 的方向决定了车辆横转的方向，车辆碰撞的驶入角 α 和车辆的重心 C ，还有波形梁的挠曲线转角共同决定 M 的方向，重心 C 位置可采用角度 β (下称

重心夹角)来描述。

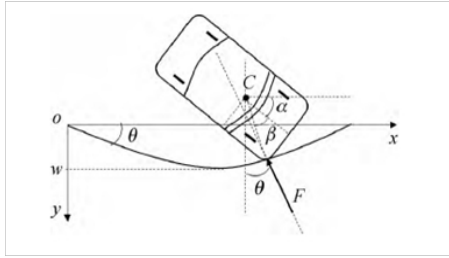


图 2. 简化受力分析图

(1) 当 $M_x < M_y$ 时, $\theta + \alpha + \beta < 90^\circ$, 力偶矩 M 为逆时针方向, 此时车辆有发生逆时针方向旋转的趋势。由于车身受到护栏的约束, 所以在车辆发生逆时针旋转过程中, 车辆可以驶回原方向, 此时护栏的导向功能得到发挥。

(2) 当力 F 的作用线恰好经过重心 C 处时, 力偶矩 $M=0$, 在此时, M_x 、 M_y 相等, 即当 $\theta + \alpha + \beta = 90^\circ$ 时, 此时车辆不发生回转而直接被反弹。

(3) 当 $M_x > M_y$ 时当 $\theta + \alpha + \beta > 90^\circ$ 时, 力偶矩 M 为顺时针方向, 此时车辆反弹过程中发生顺时针方向的旋转, 车辆方向失去控制, 护栏导向功能消失。正是由于小车有顺时针旋转的趋势, 所以才会有二次事故的发生, 若碰撞后的角加速度过大, 就会使成员甩出车外, 造成严重交通事故, 根据有关人士调查发现, 超过 3/4 的路侧护栏碰撞事故有发生旋转的趋势[2], 这也是二次交通事故发生的一个重要原因, 因此在护栏设计时, 要尽可能避免这种情形的发生。

3 小型汽车横转动力学分析

车辆的类型, 护栏的类型, 碰撞角度, 速度共同影响着车辆的运动状态, 碰撞的作用力在碰撞过程中不断改变, 并且有很多因素的干扰, 是一个非常复杂的过程。

3.1 确定驶入角和重心夹角的范围

我国与许多欧洲国家在进行实车碰撞时, 将角度统一在 20° , 但近年来我国学者经过统计发现, 大部分事故发生时车辆的撞角大于 20° 大约 90% 的事故撞角均在 30° 以上, 因此可以确定我国所采用的 20° 撞击标准不能满足护栏安全防护性能。

目前车辆种类繁多, 各种小汽车轮廓尺寸均有出现, 国家也没有出台统一标准, 统计发现, 常见

的几十款小汽车的车身长度和宽度比在 2.63-2.77 之间, 由此我们可以大致的读出小汽车的重心位置, 并推算出重心夹角大概为 20° 左右, 我国小汽车发动机大部分为前置, 故重心靠前, 由此可分析得出, 实际的重心夹角要比均值 20° 要大。

3.2 波形护栏挠曲线转角 θ 的计算

由于我国双波圆弧护栏最为普遍, 我们就对双波圆弧标准板进行分析, 其护栏栏板的截面形状, 如图 3 所示[3]。

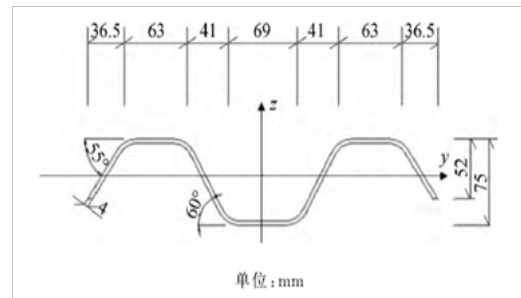


图 3. 双波圆弧标准板截面图

在对护栏栏板的外形及其尺寸进行计算时, 对于圆弧处, 我们采用割补法可以求出通过栏板形心的截面惯性矩:

$$I_z = \int_A y^2 dA \approx 1.93 \times 10^{-5} \quad (4)$$

我国公路波形护栏栏板的材料为优质碳素钢, 由其合成的钢栏板的弹性模量 E 在 200GPa 至 210GPa 之间, 在我们进行分析时, 可将护栏栏板与护栏立柱组成的结构简化为一种简支梁结构, 护栏碰撞力简为集中力作用, 此时, 其受力结构图可简化为图

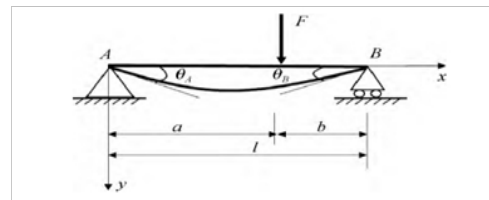


图 4. 简化简支梁结构

当碰撞力的大小一样时, 由受力特点我们可以得到在撞击力 F 作用在栏板中部时, 波形梁的挠度和转角会达到最大值, 根据挠曲线方程, 我们定义转角最大时为最不利情况进行研究, 当栏板处于最

不利状态时，挠度满足：

$$W_{\max} = \frac{Fl^3}{48EI_z} \quad (5)$$

此时梁端面转角满足：

$$\theta = \frac{Fl^2}{16EI_z} \quad (6)$$

在车辆与护栏碰撞的 t_1 时刻内，即车辆碰撞护栏到车辆发生反弹旋转前，碰撞力随着不断增大，护栏在 y 方向上的动态变形量逐渐达到最大值，在作用反力作用下，车辆与 y 轴方向上的分速度逐渐减小为 0，对于此类碰撞，可将其简化为一种单自由度模型，护栏的弹力与横向变形量满足线性关系，由此，我们可得出最大碰撞力与上述挠度 w 与质量 m 的关系：

$$F_{\max} = \frac{m(v_0 \sin \alpha)^2}{W_{\max}} \quad (7)$$

在我国进行的小车实车碰撞中，对小车的质量和速度规定为 1.5t 和 100km/h。而我国高速公路的限速普遍为 120km/h，高速公路上的汽车速度基本上都在 100km/h 以上，所以在实车碰撞时设置的速度明显不足[4]，这也是碰撞过程中小车会发生不利运动的原因。

3.3 碰撞驶入角与转角的关系

由上述式 (1) (2) (3) (4) 可得到驶入角 α 和转角 β 的关系：

$$\theta = (v_0 \sin \alpha)^2 \sqrt{\frac{3Ml}{16EI_z}} \quad (8)$$

4 仿真模拟

通过理论分析我们可以得到上述数学模型，为验证其可靠性，利用 LS-DYNA 动力学分析软件进行分析[5]

4.1 有限元模拟流程

利用前处理软件 HyperMesh 建立车辆与护栏模型，得到 K 文件，将其导入求解器 LS-DYNA 中进行计算，后期数据提取利用后处理软件 LS-PERPOST。流程如图 4 所示

4.2 车辆与护栏模型

模拟分析中采用的是已开发的汽车模型，该轿车的整体共有 339 个部件，整车质量为 1333kg，前后轴距分别为 1046mm 和 1042mm，尺寸为

4356×1678×1370，节点为 23789 个，完整模型见图 5 所示

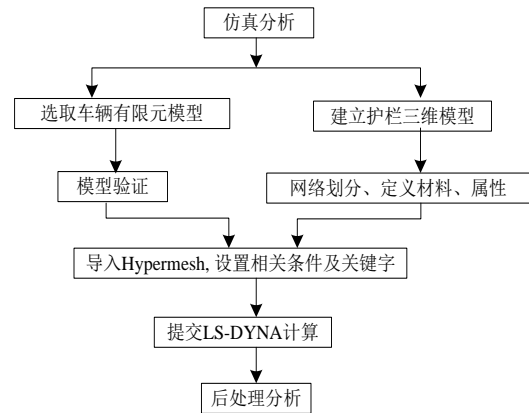


图 4. 模拟流程图

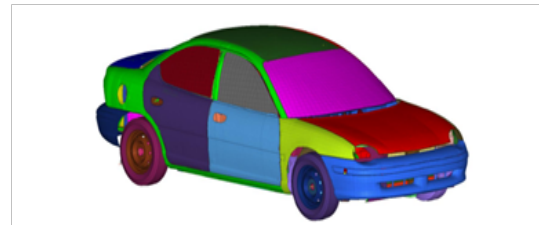


图 5. 汽车有限元模型

护栏模型采用 Gr-A-4E 类型进行建模，立柱间距设为 4m，护栏栏板材料采用 LS-DYNA 软件中的 24 号材料，既分段塑性材料，护栏的各个材料均为碳素钢结构，即屈服强度为 Q235 材料，完整模型见图 6 所示

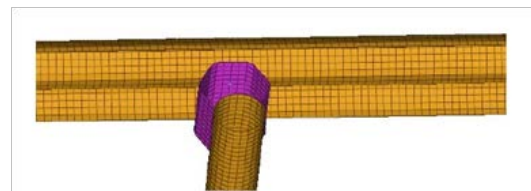


图 6. 护栏有限元模型

4.3 实验过程及结果

通过后修改关键字等信息，再导入求解器，得到不同的重心夹角，车辆碰撞驶入角度，车辆纵向轴夹角等，设置车辆撞击速度为 100km/h，在碰撞过程中，图 7 所示的是整个碰撞过程中 0ms、100ms、200ms、300ms 时刻所对应的汽车与护栏的状态。

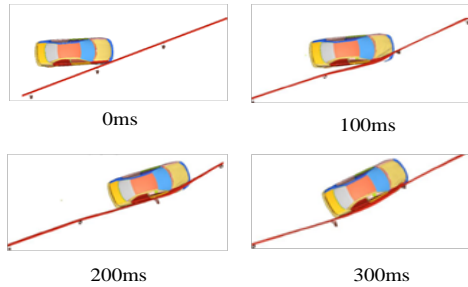


图 7. 轿车与护栏碰撞过程

由 LS-PREPOST 导出重心夹角和车辆纵向轴的夹角, 得到模拟推导角度和理论推导角度之间的关系如表 1 所示。

表 1. 模拟仿真实验数据及误差分析

汽车质量/t	重心距离前轴/m	β	$\alpha+\theta$	相对误差/%
1.5	1	17.8°	76°	4.2
1.5	1.3	20.8°	72°	3.1
1.5	1.6	22.8°	69°	2.5

为了减少偶然性, 防止护栏连接处阻绊影响模拟结果, 提高模拟精度, 可通过调整车辆初始位置, 初始速度等方法多次模拟分析。

通过仿真模拟与理论推导的对比, 发现结果基本吻合, 这也说明理论模型的可行性。

4.4 小客车碰撞护栏横转的预防

小客车碰撞护栏后发生横转的后果严重, 为尽量避免这种情况的发生, 我们需要根据驾驶员的驾驶行为, 并优化车辆结构和高速公路护栏。可以采取以下措施来设计公路栏杆:

(1) 减少公路护栏的长度和跨度。目前, 我国道路护栏使用的波纹钢护栏板的标准长度 4320mm, 不算两端的安装位置, 两柱之间的实际有效长度为 4000mm。在设计护栏时, 可以使用更多的规格的护栏板, 并且可以根据道路交通环境有选择地安装护栏。安装护栏时, 也可以通过减小护栏立柱之间的距离来减少护栏板的实际有效长度。

(2) 有选择的安装不同类型的护栏

高速公路是事故发生的主要场所之一, 通过分析发现单车碰撞事故, 发现波形护栏的单车碰撞事故的死亡率要远高于混凝土护栏, 混凝土护栏为刚性护栏, 相比于波形护栏具有更高的刚度, 其碰撞后变形较小, 车辆碰撞后基本上不发生横转现象, 因此建议在事故多发地段采用刚度更高的水泥混凝土护栏。

(3) 提高波形梁护栏板的抗弯刚度

由理论推导公式 (8) 可知, 当波束钢板弯曲和变形时, 截面角 θ 与梁板材料的杨氏模量 E 和截面惯性矩 I_z 有关。对于不同材料的钢材, 杨氏模量值比较接近, 因此选择优质钢作为栏板对提高波纹梁的抗弯刚度没有多大意义。目前, 护栏表面主要采用双波或三波截面, 并且截面面积的整体分布相对靠近中心轴线, 导致截面惯性矩 I_z 较小。因此, 在考虑到美观和安全性上都可以采用增加围栏的横截面面积和厚度的方法。截面积恒定时, 通过设计合理的截面形状, 并使截面积远离中心轴。

5 结语

车辆与公路护栏碰撞后的运动状态受车辆类型, 碰撞速度, 碰撞角度, 护栏类型的影响, 本文主要通过建立汽车碰撞力学模型, 从力学的角度探讨小型客车与护栏碰撞后发生横转现象的原因, 并提出护栏的优化设计结构, 从而减小横转现象发生。

参考文献

- [1] 谢玉洪, 雷正保, 李海侠, 宁英. 高速公路防撞护栏的研究现状与发展趋势. 工程建设与设计. 2003, (12), P40~43
- [2] M.H. Ray, J.D. Michie. Occupant Injury Producing Events in Longitudinal Barrier Axxidents. In Transportation Research Record 1065, TRB, National Research Council. Washington, D.C, 1986.
- [3] JT/T 281-2007 公路波形梁钢护栏.
- [4] 何烈云, 沈艾中, 周鹏, 无回弹运动汽车与公路护栏碰撞力学模型研究. 科技通报. 2017, 3.3(11), 251-255.
- [5] 雷正保, 杨应龙, 钟志华. 结构碰撞分析中的动态显式有限元方法及应用. 振动与冲击. 1999, 18(3), 73-78, 86.