

# CAE Simulation and Optimization of Vehicle Acceleration in Front Impact Based on Energy Management

Hongmiao Wang, Liwei Xu, Shenrong Wu, Danfeng Zhou

(AERI, Chery Automobile Co., Ltd. Wuhu, 241009, wanghongmiao@mychery.com)

**Abstract:** A kind of concept design approach is introduced in the process of new car development. Based on the principle of energy conservation and the two-step representation of target acceleration, the crash pulse is optimized by CAE simulation to reduce occupants' injury indices as much as possible. Provided that the design space is assigned, the ideal crash pulse is achieved through optimizing the material strength and thickness of the front rail to control the energy absorption and deformation of the front rail. It is shown that this concept analysis methodology is feasible and practical. It provides valuable guideline for safety design of body structure and reduces risks of preprogram development.

**Keywords:** Energy Management, Target Pulse, Front Rail, Front Impact

## 基于能量管理的汽车正碰加速度计算机仿真优化

王洪苗, 徐立伟, 吴沈荣, 周丹凤

(汽车工程研究院, 奇瑞汽车股份有限公司, 芜湖, 241009, wanghongmiao@mychery.com)

**摘要:** 本文介绍了某新车型在开发阶段的概念分析过程中, 基于碰撞能量守恒原理和双阶梯加速度的目标波形, 应用计算机仿真方法优化碰撞加速度, 来达到减小乘员伤害值的目的。在设计空间一定的情况下, 通过优化前纵梁的材料强度、厚度来控制前纵梁的能量吸收和变形模式, 从而获得理想的碰撞加速度波形。实践证明, 这种概念分析方法是有效可行的, 它可以为车身安全性结构设计提供有益的参考, 降低前期开发风险。

**关键字:** 能量管理, 目标波形, 前纵梁, 正面碰撞

## 1 引言

进入 21 世纪以后, 人们对汽车安全性的要求越来越高, 近几年来, 安全性是购车族考虑得最重要因素之一。EuroNCAP 第二阶段提出更加苛刻的要求, C-NCAP 也将增加新的测试项目, 这都对自主品牌汽车的安全性能提出更大的挑战。面对目前的形势, 国内民族汽车在安全性方面亟待改进, 这就要求概念分析阶段就提出安全性的基本要求, 在整车研发前期就把安全性考虑进来, 而不是在后期才去查缺补漏。

前部碰撞是汽车事故中发生频率最高的一种碰撞形式, 研究正面碰撞中乘员的安全性有着十分重要的意义。对于车辆正面刚性壁障碰撞, 设计准则有两个方面。一是使车辆前部尽可能多的吸收碰撞的能量, 车辆以一定的速度撞击刚性壁障时, 系统产生的总能量是一定的, 车辆前部吸收的能量越多, 乘客舱的完整性保存的越完好, 乘员的伤害值就会越小。二是车体加速度应控制在一定的指标之内<sup>[1]</sup>。前纵梁是前舱中主要的吸能元件, 同时也是影响车体加速度波形的重要因素之一。根据以上准则, 本文通过改变前纵梁元件的强度和厚度特性, 利用计算机模拟整车模型下研究前纵梁的变形模式, 加强前纵梁的吸能效果, 达到降低乘员伤害值的目的。

## 2 双阶加速度目标波形

在正面刚性碰撞中, 车辆碰撞的加速度-时间历程与乘员伤害程度之间有着密切的关系。因此, 加速度波形是评价车辆在正碰中的安全性的一个必不可少的评价指标。

1967 年, Egli<sup>[2]</sup>提出加速度历程对乘员伤害有直接影响。1988 年 Ishii 和 Yamanaka<sup>[3]</sup>发现加速度波形简化为双台阶形式, 较高的第一台阶和较低的第二台阶峰值有利于降低乘员的伤害值。1990 年 Matsumoto<sup>[4]</sup>对简化的双阶加速度波形进行了对比

得出了“抬高第一阶峰值，有利于减小胸部加速度和头部损伤”的结论。2001年Wu等人<sup>[5]</sup>论证了双台阶波形描述方法的机理，并在此基础上研究了假人伤害值的参数模型和优化方法。2002年Wu等人<sup>[6]</sup>对波形优化原理给出较为系统地解释，他们对规定碰撞速度和规定乘员胸部加速度限制下如何确定所需最短压缩空间进行了理论推导。邱少波等<sup>[7]</sup>认为较理想的波形是前端高抬，中间回落，尾端有限制的升高并呈平坦特性。综上所述，本文将以双台阶波形为目标，优化现有加速度。

图1是理想的加速度波形曲线，图中的a-b-c-d-e-f折线是简化的加速度波形，即“双阶加速度”或者“G1-G2加速度”，第一个峰值出现在10ms左右，大小为15~20g，，这便于安全气囊的触发，在30~50ms内逐渐升高，峰值不宜过大，减缓乘员和气囊的接触<sup>[1]</sup>。

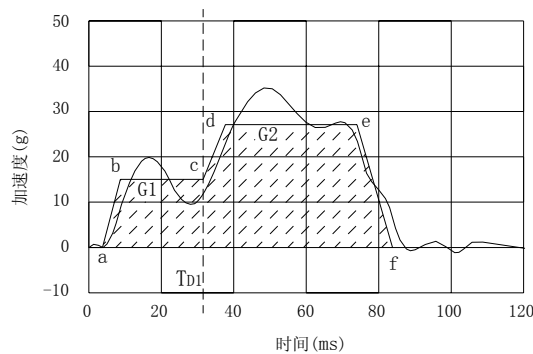


图1 双阶加速度波形

### 3 能量守恒原理

在前部正面刚性壁障碰撞过程中，假设刚性壁障是不吸收能量的，则大部分碰撞过程中产生的能量都被车辆吸收。根据能量守恒原理，碰撞过程系统的总能量为

$$E = \frac{1}{2} m_0 v_0^2 \quad (1)$$

式中E为车辆与刚性壁障碰撞过程中系统的总能量， $m_0$ 为车辆包括车内随车工具、假人和配重等所有随车一起运动的总质量， $v_0$ 为车辆与刚性壁障发生碰撞前的瞬间速度。

由公式(1)可知，当车子的质量一定时，碰撞的总能量和车辆运行速度的平方成正比。当车辆的质量和速度一定时，碰撞系统的总能量是一定的。在本文研究中，速度 $v_0$ 一定。更改设计带来的质量变化比率很小，因此可认为对于各种设计方案整个系统的总能量是一定的。

### 4 碰撞空间和纵梁的初步估算

在前部正碰中，主要有50km/h和56km/h两个速度的工况。根据经验，当车辆以50km/h速度与刚性壁障发生碰撞时，所产生的平均加速度应为20g左右，一般不超过25g，这样才可以使乘员不至于产生过大的加速度，从而避免乘员大的伤害。为了在车辆碰撞过程中获得理想加速度，就要合理安排车辆前部的碰撞空间。

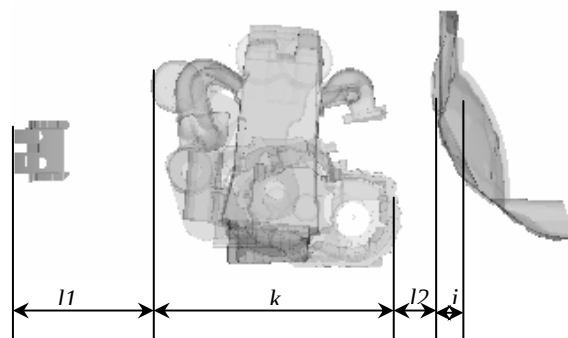


图2 碰撞空间

如图 2，前部空间布置分成三部分：一是前保险杠横梁到动力总成的距离 $l_1$ ；二是动力总成的宽度 $k$ ；三是动力总成到防火墙的距离 $l_2$ ；而允许前围板向后侵入为 $i$ 。

根据公式

$$l = \frac{1}{2} \bar{a} t^2 \quad (2)$$

$$v_0 = \bar{a} t \quad (3)$$

$$l = f(l_1 + l_2) + i \quad (4)$$

由公式 (2)、(3) 和 (4) 可推出

$$\bar{a} = \frac{v_0^2}{2 f (l_1 + l_2) + 2i} \quad (5)$$

式中  $f$  为影响碰撞空间的系数，通常取 0.9， $\bar{a}$  为车辆与刚性壁障碰撞过程中的平均加速度，由公式 (5) 即可推导出车辆在前部碰撞过程中的平均加速度。

在总布置的尺寸、动力总成空间位置已经确定的情况下，前纵梁的空间也被限制在一定的范围内。鉴于总布置空间等诸多因素的影响，前纵梁的截面采用目前较为普遍的矩形。

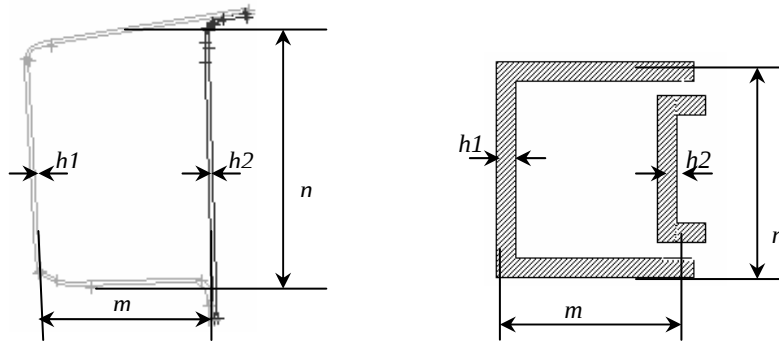


图 3 前纵梁截面示意图

如图 3 所示。前纵梁的截面长设为  $m$ ，宽设为  $n$ ，同时为了方便计算，假设前纵梁的截面厚度为  $h_1 = h_2 = h$ ，因此，前纵梁的截面面积  $\bar{A}$  近似为

$$\bar{A} = (m \times n) - (m - h) \times (n - h) \quad (6)$$

同时，又有

$$\bar{F} = m_0 \bar{a} \quad (7)$$

$$\bar{F} = 2 \bar{A} \sigma \quad (8)$$

式 (7) 和 (8) 中  $\bar{F}$  为车辆与刚性墙碰撞过程的平均接触力； $\bar{a}$  为碰撞的平均加速度； $m_0$  为车辆包括车内假人和配重的总质量； $\sigma$  为前纵梁材料的屈服强度。

根据以上公式可得到前纵梁的屈服强度  $\sigma$  和厚度  $h$  之间的关系为

$$\sigma = \frac{m_0 \bar{a}}{2[(m \times n) - (m - h)(n - h)]} \quad (9)$$

公式 (9) 即为材料的屈服强度和厚度之间的关系式，由此公式可以初步计算出前纵梁的初始厚度。

## 5 加速度的优化仿真

本文在前纵梁结构等其它条件都不发生变化的情况下，对前纵梁材料强度、厚度和整车加速度的关系进行了研究。模拟的工况为整车模型在碰撞速度为 50km/h，C-NCAP 前部正面 100% 刚性墙碰撞。前处理软件采用 Hypermesh8.0，同时使用大型动态非线性有限元软件 LS-DYNA 求解。如图 4 所示为计算仿真碰撞示意图。



图 4 碰撞模拟示意图

### 5.1 优化方案

前纵梁的结构如下图所示，

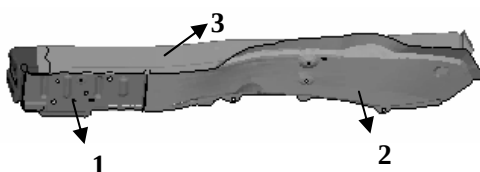


图 5 前纵梁结构示意图

1 为前纵梁外板前段，2 为前纵梁外板后段，3 为前纵梁内板

为了方便表述，以下用件 1、2 和 3 表示前纵梁的外板前段、后段和内板。为了得到最优的加速度波形，根据公式 (9)，本文在估算得到的前纵梁厚度范围内选择五组方案，如表 1 所示。纵梁厚度的变化会使得纵梁的重量有所变化，但相对整车而言这个变化可以忽略不计。因而在做初步估计时只考虑同样的总能量。

表 1 五种方案的材料厚度

| 方案    | 零件代号 | 材料         | 厚度 (mm) |
|-------|------|------------|---------|
| Case1 | 1    | B250P1     | 1.4     |
|       | 2    | B340LA     | 1.8     |
|       | 3    | B340LA     | 1.8     |
| Case2 | 1    | B250P1     | 1.4     |
|       | 2    | B250P1     | 1.8     |
|       | 3    | B340LA     | 1.8     |
| Case3 | 1    | B250P1     | 1.8     |
|       | 2    | B250P1     | 1.8     |
|       | 3    | B340LA     | 2.0     |
| Case4 | 1    | B340LA     | 2.0     |
|       | 2    | B340LA     | 2.0     |
|       | 3    | B340-590DP | 2.2     |
| Case5 | 1    | B340-590DP | 1.8     |
|       | 2    | B340-590DP | 1.8     |
|       | 3    | B340-590DP | 2.0     |

### 5.2 纵梁变形的对比

图 6~10 为五种方案前纵梁碰撞后变形情况和前端的压溃情况示意图。从图中可以看出，五种方案的前纵梁前端都发生不同程度的压溃。其中 Case1 后端两处发生弯折变形，变形模式不稳定；Case2 和 Case3 后部变形相对 Case1 较好；Case4 前端压溃充分，悬置安装点前侧发生折弯变形，变形模式比较稳定；Case5 左侧前纵梁前端变形不稳定，发生失稳现象。

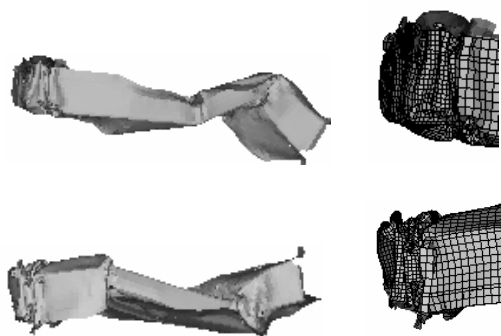


图6 Case1 前纵梁变形图

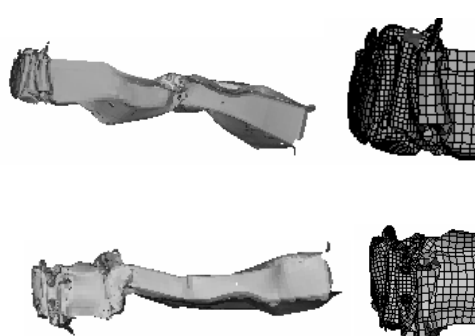


图7 Case2 前纵梁变形图

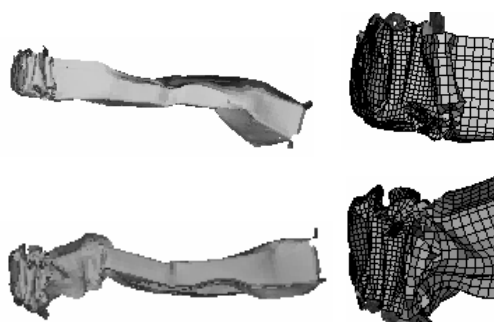


图8 Case3 前纵梁变形图

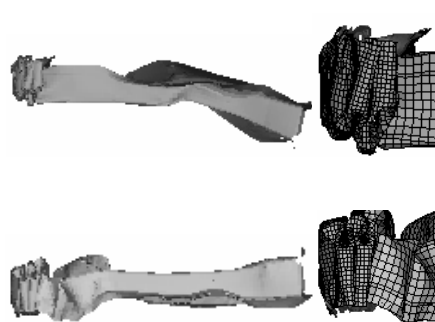


图9 Case4 前纵梁变形图



图10 Case5 前纵梁变形图

### 5.3 能量吸收的对比

表2列出五种方案整车碰撞产生的总能量和前纵梁在碰撞发生后30ms和90ms时的吸能情况，五种方案中整车能量相差314.8J，相对整车碰撞能量，这个值可以忽略不计。

从表2中可以看出Case4吸收能量绝对值最多，所占比率最大。

表2 前纵梁能量吸收

|       | Total<br>energy (J) | T=30ms              |       | T=90ms              |       |
|-------|---------------------|---------------------|-------|---------------------|-------|
|       |                     | Absorbed energy (J) | ratio | Absorbed energy (J) | ratio |
| Case1 | 199937.4            | 31439               | 15.7  | 46889               | 23.5  |
| Case2 | 199937.4            | 29230               | 14.6  | 42617               | 21.3  |
| Case3 | 200106.9            | 33761               | 16.8  | 46658               | 23.3  |
| Case4 | 200252.2            | 43534               | 21.7  | 57369               | 28.6  |
| Case5 | 200106.9            | 39600               | 19.8  | 51924               | 25.9  |

### 5.4 加速度波形对比

图11~15分别为五种方案中车辆在左侧B柱下方的加速度曲线和简化的等效双阶加速度波形。图中曲线为测得的加速

度曲线；折线为由加速度曲线利用最小二乘法计算得到的等效二阶加速度波形。从图中可以看出，case4 中的加速度曲线最符合理想状态。

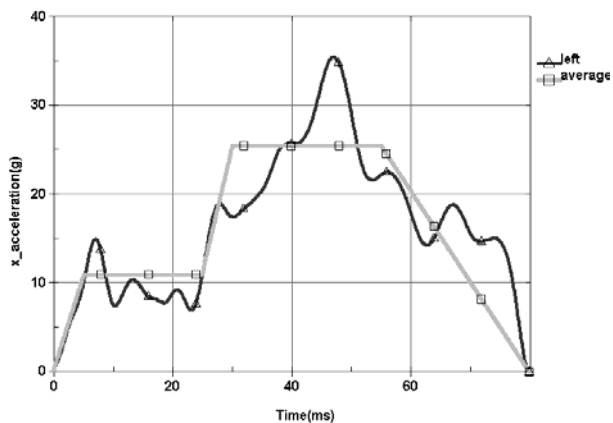


图 11 Case1 B 柱下方加速度曲线

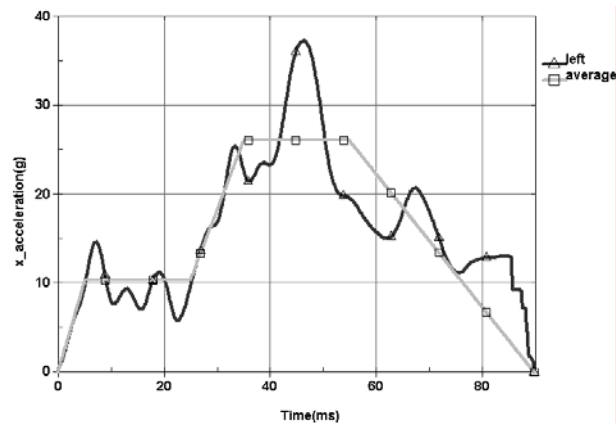


图 12 Case2 B 柱下方加速度曲线

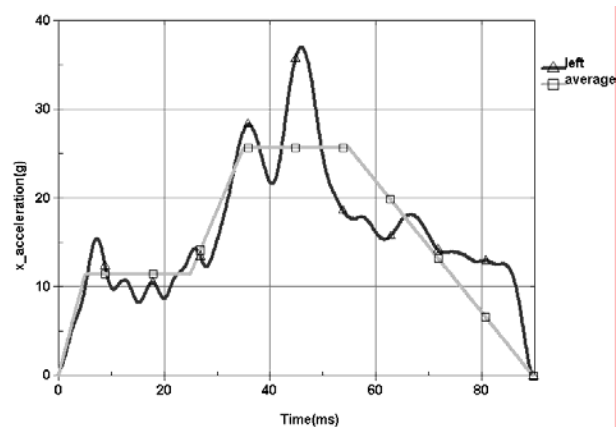


图 13 Case3 B 柱下方加速度曲线

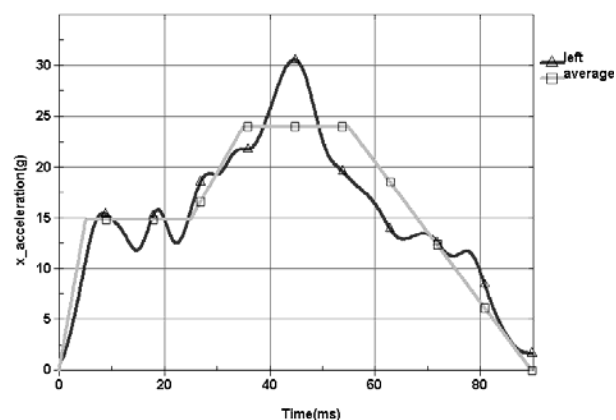


图 14 Case4 B 柱下方加速度曲线

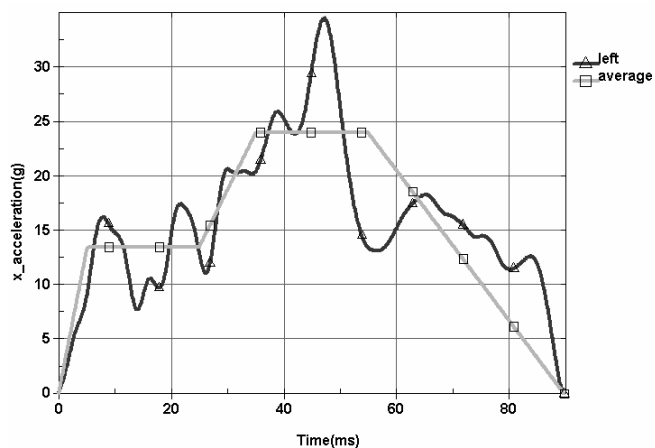


图 15 Case5 B 柱下方加速度曲线

表 3 为图 11~15 中五种方案加速度曲线的峰值、等效双阶加速度波形的第一阶和第二阶值。结合表 2 和表 3 可以看出，前 30ms 吸收能量较多的方案，第一阶值相应较大，整个碰撞过程吸收的能量也较多，相应的第二阶值就会有所降低。

表3 五种方案加速度的峰值和等效波形的第一、二阶值

|       | MAX. value (g) | First step (g) | Second step (g) |
|-------|----------------|----------------|-----------------|
| Case1 | 35.50          | 11.02          | 25.51           |
| Case2 | 37.40          | 10.38          | 26.13           |
| Case3 | 37.10          | 11.48          | 25.75           |
| Case4 | 30.40          | 14.89          | 24.07           |
| Case5 | 34.60          | 13.50          | 24.09           |

## 6 结论

本文主要利用有限元方法,在整车总布置一定的情况下,假设前纵梁的结构不变,研究了前纵梁材料的强度和厚度在前部正面碰撞过程中对整车碰撞性能的影响。通过对五种方案的研究分析得出:一、前纵梁的厚度和材料强度对加速度波形有很大的影响,可以通过计算机模拟优化前纵梁的材料强度和厚度;二、前纵梁吸收能量越多、变形模式越稳定,则车体加速度波形越好,与理想的双阶加速度波形越吻合,同时乘员的伤害值会相应降低。

因总布置空间的限制,本文只考虑了前纵梁结构不变时材料的强度和厚度对整车性能的影响。在车辆碰撞过程中影响整车安全性能的因素还很多,例如前纵梁前端诱导槽的位置,前纵梁的截面大小等,这都需要进一步的研究分析。

## 参考文献

- [1] 顾镭, 徐立伟等.汽车碰撞安全设计与仿真[M]. 芜湖:奇瑞汽车有限公司, 2006.12.65~84.
- [2] A. Egli, Stopping the occupant of a crashing Vehicle[C], SAE paper, 1967, 670038.
- [3] K. Ishii and I. Yamanaka. Influence of Vehicle Deceleration Curve on Dummy Injury criteria[C]. SAE Paper 1988, 880612.
- [4] H. Matsumoto, M. Sakakida, and K. Kurimoto. A Parametric Evaluation of Vehicle Crash Performance[C], SAE Paper, 1990, 900465.
- [5] S.R. Wu, X. Zhang, and P. Lenk. Step function – a measure for frontal crash pulse and its applications, Int. J. Vehicle Design, 26 (2001) 385-394.
- [6] J. Wu, S. Bilkhu, and G.S. Nusholtz. An Impact Pulse-Restraint Energy Relationship and its Application[C], SAE Paper, 2003, 200310505.
- [7] 邱少波, 潘作峰, 李红建, 张君媛.车体耐撞性概念优化方法[C]. 汽车安全技术, 北京:中国汽车工程协会, 2006.8.140~147.