

# 基于ADAMS的复杂路面下车辆行驶振动响应数值模拟

金瑞琪, 王艳

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2023年2月14日; 录用日期: 2023年3月14日; 发布日期: 2023年3月21日

## 摘要

随着我国社会经济的快速发展以及人们的生活水平的不断提升, 人们对汽车的持有量也在不断增加。脉冲路面如减速带、减速桩等作为车辆在驾驶过程中十分常见的路面, 对其进行动力学仿真十分必要。本文通过对简单四轮汽车模型在不同减速带地面模型下的振动进行分析得到了路面模型、车速以及车辆自身阻尼对车辆振动幅度的影响, 并得到了其通过崎岖路面的振动幅度对比。

## 关键词

动力学, 冲击振动, ADAMS, 模态分析

# Numerical Simulation of Vehicle Vibration Response on Complex Road Surface Based on ADAMS

Ruiqi Jin, Yan Wang

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 14<sup>th</sup>, 2023; accepted: Mar. 14<sup>th</sup>, 2023; published: Mar. 21<sup>st</sup>, 2023

## Abstract

With the rapid development of China's social economy and the improvement of people's living standard, people's ownership of cars is also increasing. Impulsive road surfaces such as speed bumps and speed piles are very common as vehicles in the driving process, and it is necessary to simulate their dynamics. In this paper, the vibration of a simple four-wheeled vehicle model under

different speed bump ground models is analyzed to get the effect of road model, vehicle speed and vehicle's own damping on the vibration amplitude of the vehicle, and the comparison of its vibration amplitude through the rugged road surface is obtained.

## Keywords

Dynamics, Impactvibration, ADAMS, Modal Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着人们汽车保有量的日渐提升,人们越发关注车辆的乘坐舒适性和安全性。日常生活中,脉冲路面随处可见,有些路面由于年久失修形成的凹凸不平或是铺上的减速带、减速桩等减速装置。当车辆以一定车速经过这些复杂路面时,路面激励通过路面传向车轮,通过悬架、车体、车座到达人体,严重影响了人们的乘坐舒适性[1]。而在设计减速带时,对不同形式减速带的减速效果,减速带的设置方法以及设置所需考虑的因素会有不同的要求[2]。因此,研究复杂路面对车辆行驶过它时产生的冲击振动的响应特性,能够对车辆行驶稳定性的研究起到更好的实验指导意义。当车辆行驶通过复杂路面时,车辆中部分强度不大的零件会受到较大瞬时应力,对这些零件的要求也会有所提升,因而研究复杂路面对车辆行驶产生的冲击振动的响应特性也会对部分汽车零件的结构安全性研究起到重要意义。

杨英武通过对简化的跳车模型施加冲击力来模拟车辆跳车时车轮对地面作用力的实际影响作用,进而计算出此时该作用力表面的振动情况,然后通过实际对比分析该力对道路表面的振动情况以便推测振动引发的地面效应[3]。邱望标视轮胎为刚体建立车辆与减速带碰撞数学模型,对车辆通过减速带产生的振动进行分析,从而提出最佳减速带形状模型[4]。陈波佑为降低车辆行驶通过减速带的冲击,研究了一种非牛顿流体减速带的受压分析,通过建模分析,得出非牛顿流体减速带在5 s内的受压情况及内部流体的流动情况[5]。马骁以车身垂向加速度以及车轮动载荷作为评价指标,通过Adams/Car软件进行建模仿真,针对路面减速带的高度和宽度进行汽车平顺性虚拟仿真试验,最后总结出外形尺寸的结构对行车舒适度的影响[6]。

本文利用有限元分析软件Adams基于某汽车实际参数建立简化车辆模型,对其在减速带或崎岖路面下的振动情况进行仿真分析,并分析了不同减速带尺寸给车辆模型带来的颠簸程度,为后期汽车振动的测试提供保障。

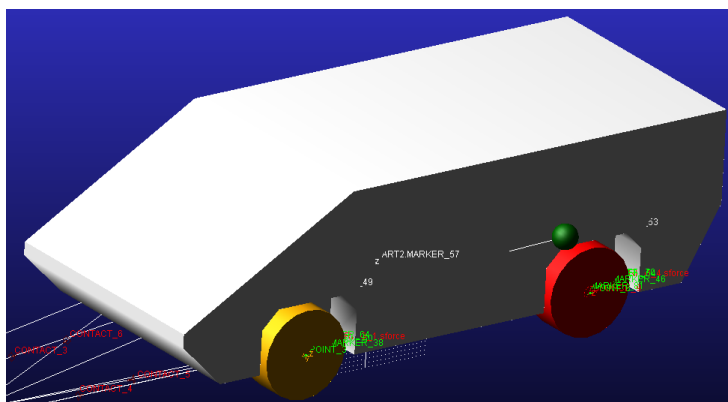
## 2. 车辆与路面模型建立

### 2.1. 简化车辆模型建立

根据某车型车辆的实际参数,本文为反映实际情况,在简化模型时按照真实外形建立车辆模型并为其设置相关结构参数,该车型具体结构参数和悬架参数如下表1所示。由于计算机计算能力受限,为减少计算量需求,本文将车身设置为一个刚体进行仿真运算。本文使用SolidWorks软件绘制车体的三维模型导入ADAMS中。而后根据车辆实际质量结合绘制的简化车辆模型定义车体的密度,本文设置车体密度为 $800 \text{ kg/m}^3$ ,车轮则使用ADAMS软件建模,定义密度为 $100 \text{ kg/m}^3$ 。简化车辆模型如图1所示。

**Table 1.** Vehicle structure parameters**表 1.** 车辆结构参数

参数	数值
车身质量	1500 kg
轮距	1500 mm
轴距	2600 mm
车身长	4800 mm
车身宽	1860 mm
车身高	1650 mm

**Figure 1.** Simplified vehicle model**图 1.** 简化车辆模型

约束定义: 本文首先将作为地面的长方体固定, 将 4 个车轮与长方体地面施加接触约束, 设定其动/静摩擦系数皆为 1。在定义悬架与车体、车轮约束时, 利用转动副对车轮进行约束。通过弹簧 - 阻尼元件对车辆车体以及车辆悬架进行约束, 在设置参数时, 取  $k = 3 \times 10^5 \text{ N/m}$ ,  $c = 100 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ 。而后对车轮建立转动弹簧, 添加车轮转动的阻尼, 这是为了模拟车轮刹车后刹车片的摩擦力。新建转动弹簧 - 阻尼元件时选择  $k = 0$ ,  $c = 20 \text{ N}\cdot\text{s/m}$  即可。最终完成了对于整个车辆的建模。

## 2.2. 减速带地面模型建立

在经过减速带路面等路面不平输入作用时, 车辆汽车结构的可靠性会受到挑战, 且脉冲输入属于大振动范畴, 此时的车辆所受到的车身垂向加速度很大[7]。本文假定所有减速带路面中, 减速带是以圆弧形的形式存在的, 且其高与底边宽度是路面的相关参数。

在研究车辆振动时, 车辆行驶的平顺性和行驶安全性是需要考量的因素。因此本文在研究减速带的结构尺寸时也将其纳入考量。如果减速带路面的圆弧形凸块的斜率太大, 车辆通过时, 车辆所受到的瞬时冲击力会很大, 严重则可能造成车辆失控, 从而导致交通事故的发生; 而减速带路面输入的圆弧形凸块的斜率太小的话, 减速带无法对车辆起到减速效果, 形同虚设。因此, 为了能够使论文更为贴合实际行驶情况, 本文经过综合考虑: 主要选取长度作为主要的研究对象, 设置圆弧形减速带的宽度为 300 mm~800 mm, 如表 2 所示。将减速带的高度设置为相同高度 30 mm。通过对减速带的设置, 得到了 6 种不同的减速带路面模型。

具体减速带的结构尺寸如下表 2 所示。

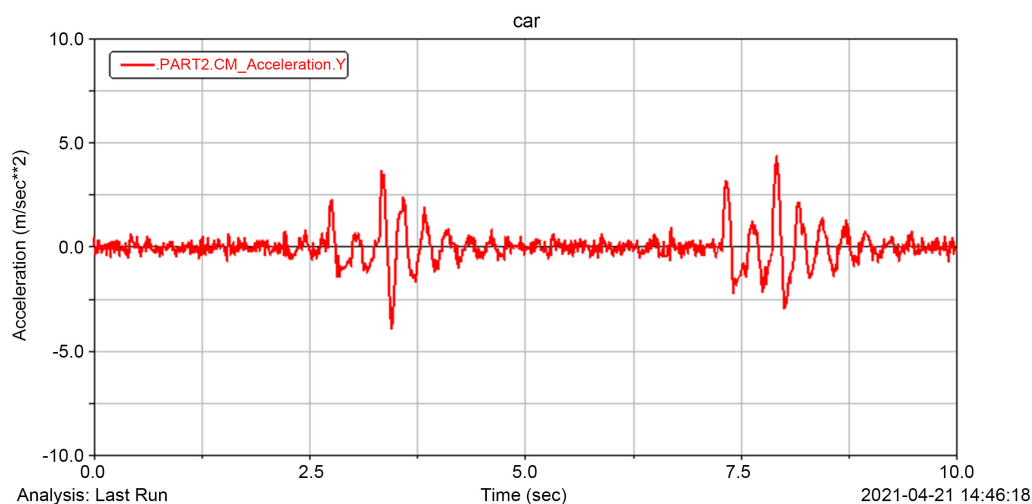


Figure 2. Acceleration curve generated by the body along the vertical direction at 20 km/h

图 2. 20 km/h 时车身沿竖直方向产生的加速度曲线

Table 2. Structural dimensions of reduction belts

表 2. 减速带的结构尺寸

减速带路面模型	减速带宽度
A	300 mm
B	400 mm
C	500 mm
D	600 mm
E	700 mm
F	800 mm

而对于圆弧形减速带, 车辆在经过圆弧形减速带时的车辆的运动轨迹近似于半正弦波。杨智勇通过理论推导求出了周期半正弦激励模型, 他在文章中计算了车辆前轮与车辆后轮的动态激励  $x_{fd}$  及  $x_{rd}$ , 如下式(1)、(2)所示[8]:

$$x_{fd} = \frac{A \sin\left(\frac{2\pi v}{x} t\right) + \left| A \sin\left(\frac{2\pi v}{x} t\right) \right|}{2} \quad (1)$$

$$x_{rd} = \frac{A \sin\left(\frac{2\pi v}{x} (t + \Delta t)\right) + \left| A \sin\left(\frac{2\pi v}{x} (t + \Delta t)\right) \right|}{2} \quad (2)$$

式中,  $A$  为连续减速带正弦激励的幅值;  $f$  为连续减速带正弦激励的频率;  $v$  为车辆行驶的速度;  $x$  为圆弧形减速带底边宽度。

### 3. 结果分析

#### 3.1. 车辆行驶通过减速带振动仿真

为了研究车速以及减速带尺寸对车辆平顺性的影响, 分别以 20 km/h~70 km/h 匀速驶过减速带路面模

型, 以车身的垂向加速度作为车辆受到的冲击振动强度的评价指标。然后通过数据处理得到各个速度和各种尺寸减速带路面的综合作用下的车身沿竖直方向产生的加速度曲线。

在车辆通过减速带时, 车辆会产生振动, 而振动则会影响车辆行驶的平顺性, 为了减少减速带对车辆内部乘客体验的影响, 需要保证车辆的受迫振动频率不会达到车辆自身的固有频率, 不会产生共振现象。在本文的设计中, 考虑到了共振相关的影响。此处以车辆仿真模型在 20 km/h 驶过 300 mm 的 A 型减速带路面时的仿真过程为例, 进行仿真结果的展示, 最终通过仿真得到的车辆沿竖直方向产生的加速度曲线如下图 2 所示。

由图 2 可知, 车辆在行驶通过减速带时车身会沿竖直方向产生加速度的突变, 其分别为前轮通过减速带以及后轮通过减速带时对车辆产生的冲击效应。通过对车身沿竖直方向产生的加速度进行分析, 可以分析减速带的尺寸对汽车乘客舒适性的影响。

通过后处理的数据分析得到当一辆车以一系列车速通过 A 脉冲路面时, 车身沿竖直方向产生的最大加速度分别如下表 3 所示。

**Table 3.** Maximum vertical acceleration of the A-road at different vehicle speeds

**表 3.** A 型路面车身沿竖直方向产生的最大加速度

车速 (km/h)	车身沿竖直方向产生的最大加速度(mm/s <sup>2</sup> )
20	4452.7863
30	7867.138
40	9199.3941
50	10177.7302
60	9478.8919
70	7971.245

使用同样的方法进行了 36 次仿真后, 最终得到的关于车身沿竖直方向产生的最大加速度的所有数据如下表 4 所示:

**Table 4.** The maximum acceleration of the body along the vertical direction under different road surfaces

**表 4.** 不同路面下车身沿竖直方向产生的最大加速度

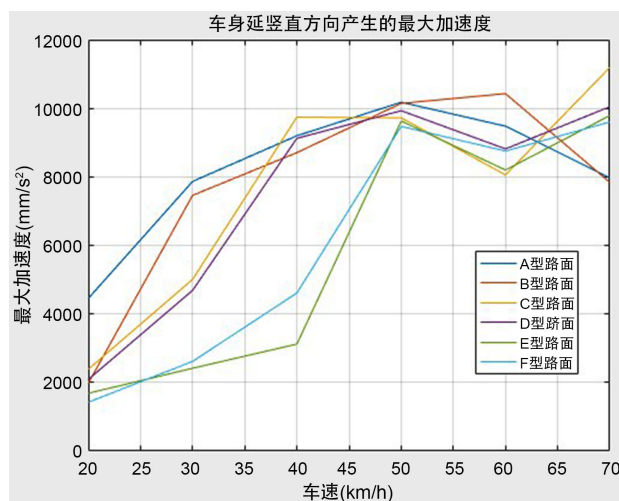
路面	车速					
	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h	70 km/h
A	4452.7863	7867.138	9199.3941	10177.7302	9478.8919	7971.245
B	1976.4485	7460.2634	8707.3102	10144.0727	10428.0003	7840.1868
C	2386.9411	5007.2582	9742.3309	9721.765	8056.1019	11191.2708
D	2088.3266	4688.3404	9124.4133	9929.6656	8816.1756	10045.2973
E	1685.8409	2415.7344	3121.4052	9627.8951	8200.018	9788.013
F	1424.2915	2615.4233	4612.018	9471.9145	8752.8033	9601.255

### 3.2. 车辆行驶通过减速带振动仿真结果分析

由上节中的表 4 可以画出如图 3 所示的车身沿竖直方向产生的最大加速度的线形图。

由图 3 对所得到的不同路面下车身沿竖直方向产生的最大加速度的观察可以明显发现: 路面情况相同的情况下, 车身的垂向加速度会随着车速的增加呈现先增大后减小的变化趋势。以 A 型减速带路面而

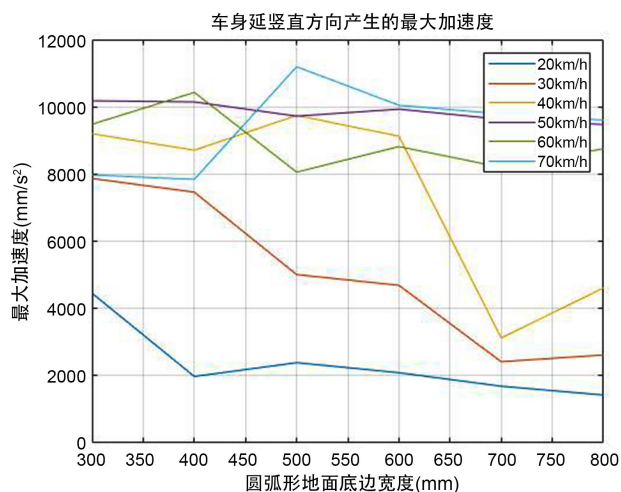
言, 当车辆分别以 20 km/h 到 70 km/h 的车速经过此种脉冲输入时, 车身沿竖直方向产生的最大加速度分别为  $4452.7863 \text{ mm/s}^2$ 、 $7867.138 \text{ mm/s}^2$ 、 $9199.3941 \text{ mm/s}^2$ 、 $10177.7302 \text{ mm/s}^2$ 、 $9478.8919 \text{ mm/s}^2$ 、 $7971.245 \text{ mm/s}^2$ 。通过对仿真结果的对比能够发现, 当车速为 70 km/h 时, 车辆中心点的垂向加速度最大; 而车速在 20 km/h 时, 车辆中心点的垂向加速度最小。



**Figure 3.** Maximum vertical acceleration under different road surfaces

**图 3.** 不同路面下竖直方向产生的最大加速度

由图 4 对所得到的不同车速下车身沿竖直方向产生的最大加速度的观察可以明显发现: 对于车速相同的情况下, 车身的垂向加速度会随着圆弧形减速带底边宽度的增加呈现减小的变化趋势, 即对 F 型减速带路面而言, 车辆中心点的垂向加速度相较 A 型路面更小。



**Figure 4.** Maximum vertical acceleration at different vehicle speeds

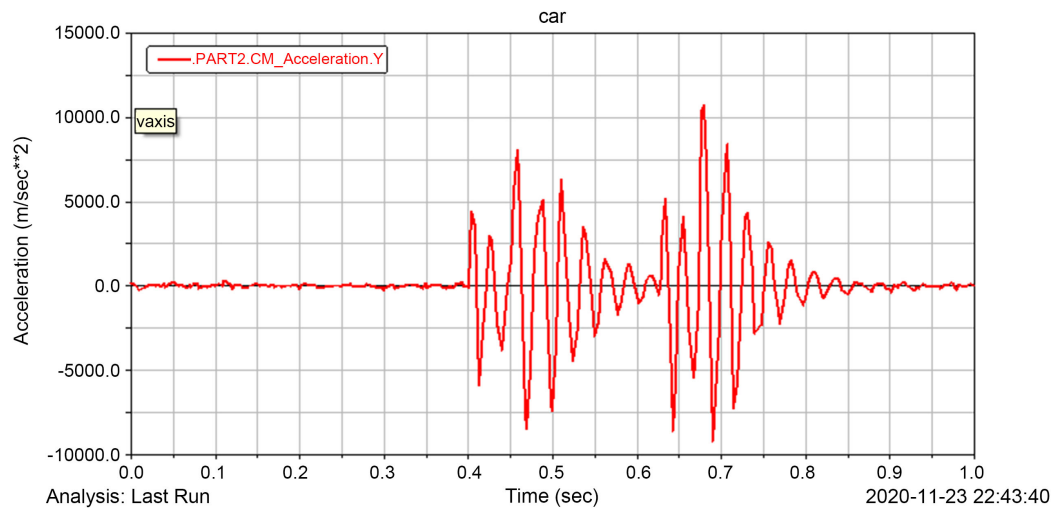
**图 4.** 不同车速下车身沿竖直方向产生的最大加速度

因此, 在进行减速带的设计时, 应当考虑到车辆在对应路况行驶速度, 在能够实现减速的同时让车辆中的乘客感受不到过大的振感。

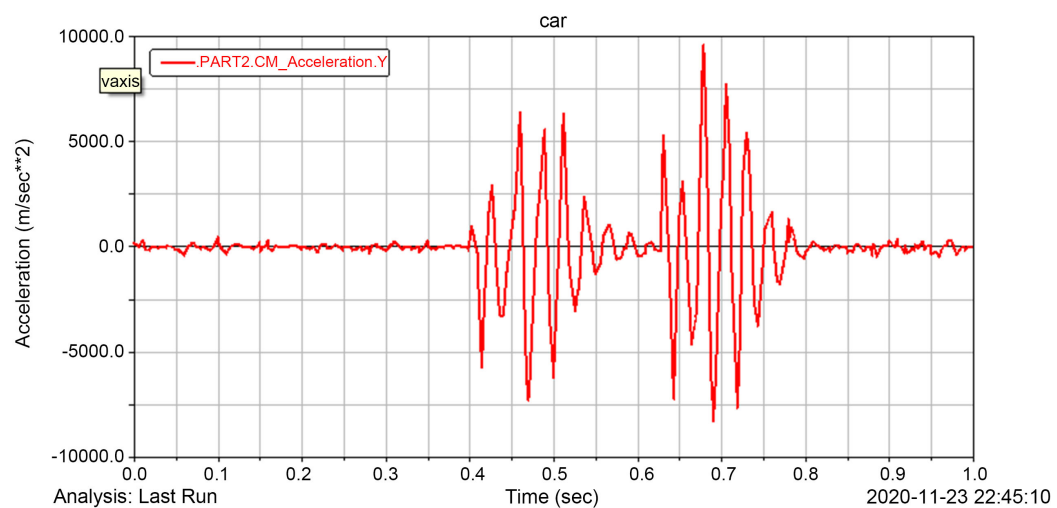
### 3.3. 车辆减震阻尼系数对振动的影响

本节研究的是车辆在行驶通过减速带时减震阻尼系统参数对冲击振动的影响。从 4.2 中表格可以得知：对 A 型路面，当车辆以 40 km/h~60 km/h 的速度行驶通过减速带时车身沿竖直方向的最大加速度已经接近甚至超过重力加速度  $g$  了。因此本节为了较小振动持续时间，可以提高悬架的阻尼，研究阻尼系数对车辆振动的影响，本文同样以车身的垂向加速度作为车辆受到的冲击振动强度的评价指标。

此处选取车辆在 40 km/h 下驶过 A 型减速带路面模型为例，通过仿真得到的车辆在阻尼系数  $c$  为 1000.0 N·s/m 及 2000.0 N·s/m 下沿竖直方向产生的加速度曲线进行仿真结果的展示，最终如下图 5 所示：



(a)  $c$  为 1000.0 N·s/m



(b)  $c$  为 2000.0 N·s/m

**Figure 5.** Vertical acceleration curves for vehicles with different damping

**图 5.** 车辆在不同阻尼下沿竖直方向产生的加速度曲线

由图 5 可知，左图为阻尼系数  $c$  为 1000.0 N·s/M 时的振动曲线，右图为阻尼系数  $c$  为 2000.0 N·s/M 时的振动曲线。从图中可以得出：车身的振动幅度有一定程度上的减小，从 9612.9492 到 10729.7709，其振幅减少了约 10.40%，其效果十分明显。

## 4. 结论

本文以车辆在复杂路面下的振动相应为研究对象, 分析了不同参数对车辆在行驶过程中最大纵向加速度的影响。通过 36 个地面模型分析了一般四轮车辆在行驶通过减速带时的振动响应, 得到其车辆的振动情况, 并分析得到了对相同的路面, 车速与振幅之间的关系以及对相同的车速, 路面参数与振幅之间的关系。通过对比简化车辆模型驾驶位处振幅及车轮振幅得到了增大阻尼系数对减少驾驶位振动产生的影响。分析结果可以正确地指导减速带的设计, 对减速带给与汽车乘客的舒适性影响方面的研究带来指导意义。

## 参考文献

- [1] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [2] 官阳. 关于不同形式减速带降速效果的研究[J]. 汽车与安全, 2020(11): 52-58.
- [3] 杨英武, 韩舟轮, 王柏生, 刘承斌. 车辆通过减速带引起的振动分析[J]. 振动工程学报, 2007(5): 502-506.
- [4] 邱望标, 黄克, 黎熊, 蒋辉海, 李莉娅. 减速带形状对汽车振动的影响分析[J]. 橡胶工业, 2008(11): 657-659.
- [5] 陈波佑, 朱雄飞, 尚召伟. 基于 ANSYS 的非牛顿流体减速带有限元分析[J]. 科技创新导报, 2019, 16(34): 87-88.
- [6] 马骁. 基于 ADAMS/CAR 的公路减速设施对车辆平顺性影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2013.
- [7] 翟萍依. 汽车平顺性脉冲输入行驶试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2015.
- [8] 杨智勇. 连续减速带激励下多自由度车辆悬架系统的混沌振动与控制[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2015.