

# 基于参数反求法的目标假车底盘碾压模型修正\*

刘志恩<sup>1,2</sup>, 袁金呈<sup>1</sup>, 陈 弯<sup>1</sup>, 卢焯华<sup>1,2</sup>

(1. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室 武汉, 430070)

(2. 汽车零部件技术湖北省协同创新中心 武汉, 430070)

**摘要** 针对某目标假车底盘结构设计开发中的碾压性能仿真分析问题进行研究,首先,通过非线性动力学有限元方法进行底盘碾压性能仿真,并与实验结果进行对比,分析指出误差较大的原因;其次,应用参数反求法对底盘碾压模型中的实验车车轮模型参数进行修正,基于遗传算法得到车轮模型参数的最优解;最后,依据车轮模型参数的最优解进行参数修正,修正车轮参数后的目标假车底盘碾压仿真模型仿真结果与实验值的拟合程度大幅提高。研究结果表明:测量点最大位移值误差由原来的 16.7% 下降到 2.6%,评估点均方根误差下降了 91.9%,可为后续结构损伤诊断及结构优化等仿真研究提供基准模型。

**关键词** 智能汽车测试平台;参数反求法;目标假车底盘;碾压仿真;模型修正

**中图分类号** TH113;O322

## 引 言

随着智能驾驶技术在汽车产业中的进一步应用,智能汽车的开发成为了当前的研究热点,智能汽车的性能测试需求逐渐显现。在实验测试中,往往需要设置道路车辆模拟物,从而实现对智能驾驶汽车实时监控、自动避让及自动刹车等能力的测试<sup>[1]</sup>。

目标假车实验平台可以实现智能驾驶汽车测试实验的安全和实验效率的提高。目标假车底盘是目标假车实验平台的核心部件,其结构性能不仅影响实验安全和使用寿命,而且决定了目标假车实验平台的测试效果和极限测试性能,影响目标假车实验平台的市场竞争力。目标假车底盘是能源、动力、控制、转向及驱动等底盘子系统的载体,同时也需要在实验车车轮碾压下完成对内部各个子系统的保护。因此,在对目标假车底盘进行结构设计特别是轻量化设计时,需要重点考虑底盘的碾压刚度性能。目前,国内外对于金属结构受轮胎柔性体碾压冲击下的力学性能研究较少,如何获取底盘各板块精准的位移变形响应是对底盘进行碾压性能仿真和结构优化设计的关键问题。

针对碰撞冲击工况有限元模型中的参数反求对响应曲线进行拟合以提高仿真结果的准确性,国内

外研究人员进行了大量工作。Backus 等<sup>[2]</sup>最早提出现代反演方法的数学模型并介绍了反问题中的概念和理论。谭飞<sup>[3]</sup>在功能梯度梁波动特性分析的基础上,应用遗传算法建立功能梯度梁特性参数的反问题,提出一种基于瞬态响应的功能梯度梁材料特性参数的反求方法。Petr 等<sup>[4]</sup>提出通过优化方法测算材料参数,即不断调整参数数值,最终使得有限元计算结果与实验结果相逼近。针对碰撞冲击等复杂问题,常采用遗传算法进行响应函数的拟合<sup>[5-6]</sup>。研究证明,通过车轮参数的反求修正,能够有效提高碰撞冲击仿真精度<sup>[7-8]</sup>,但国内外研究中对于碰撞冲击仿真参数修正问题多关注于汽车结构,而非受碾压物体的响应函数。因此,笔者基于参数反求方法,采用遗传算法将受碾压结构在冲击碾压载荷下的有限元仿真响应函数与实验结果曲线进行拟合,从而提高目标假车底盘碰撞碾压有限元仿真精度,以便能更准确地预测碰撞响应。

## 1 底盘碾压仿真与实验

### 1.1 底盘碾压有限元模型的构建

底盘主体结构主要由盖板、底板、框架、裙边以及各连接件等部分组成,目标假车底盘结构如图 1 所示。

\* 国家重点研发计划资助项目(2016YFD0700704B);国家自然科学基金资助项目(51575410)

收稿日期:2020-10-09;修回日期:2021-04-30

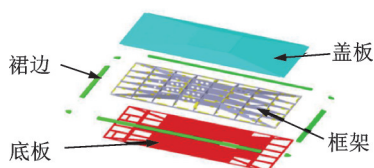


图 1 目标假车底盘结构

Fig.1 Target dummy vehicle chassis structure

针对目标假车底盘结构,建立目标假车底盘壳体结构在碾压工况下的有限元模型。根据底盘完整的 3 维模型,省略密封条、螺栓等对底盘抗碾压过程几乎没有影响的结构,将底盘中的主要功能部件简化为质量块,目标假车底盘壳体结构有限元模型如图 2 所示。为了在提高分析速度的同时保证计算结果精度,底盘采用 4~10 mm 的单元尺寸进行网格划分。底盘壳体材料如表 1 所示。

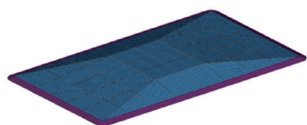


图 2 底盘壳体结构有限元模型

Fig.2 Chassis shell structure finite element method model

表 1 底盘壳体材料

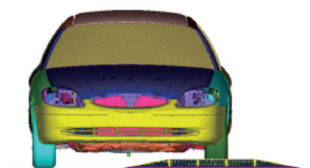
Tab.1 Material of chassis shell

材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比
镁合金	1.81×10 <sup>3</sup>	45	0.35
铝合金	2.67×10 <sup>3</sup>	70	0.30
低碳钢	7.85×10 <sup>3</sup>	210	0.30

针对底盘碰撞过程基于显式非线性动力学有限元方法,利用底盘有限元模型和实验车有限元模型,进行实验车底盘正面 50% 偏置碾压工况分析,正面 50% 偏置碾压模型如图 3 所示。



(a) 侧视图  
(a) Side view



(a) 正视图  
(a) Front view

图 3 正面 50% 偏置碾压模型

Fig.3 Model of 50% positive bias rolling

### 1.2 底盘初始碾压性能仿真分析

基于碾压工况有限元模型,利用 RADIOSS 求解器进行了底盘壳体位移变形的求解,求得提前设定的测量点在该工况下的最大位移,正面 50% 偏置碾压工况测量点最大位移及测量点位移-时间曲线分别如图 4,5 所示。

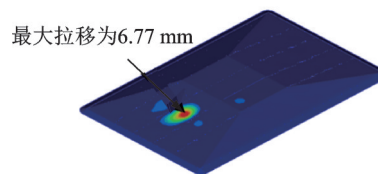


图 4 正面 50% 偏置碾压工况测量点最大位移

Fig.4 50% positive bias condition measure point max displacement

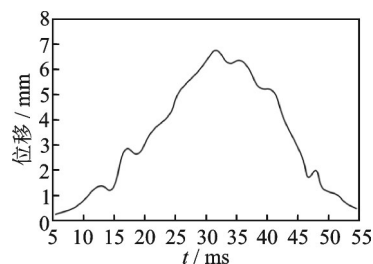


图 5 测量点位移-时间曲线

Fig.5 Measure point displacement-time curve

由图 4,5 可以看出,底盘测量点在实验车 80 km/h 车速 50% 偏置碾压工况下最大位移的仿真结果为 6.77 mm。

### 1.3 底盘碾压实验及结果对比

为验证 1.2 节中底盘碾压有限元仿真分析结果的准确性,进行实验车 80 km/h 车速下的目标假车底盘正面 50% 偏置碾压实验,正面 50% 偏置碾压实验图如图 6 所示。



图 6 正面 50% 偏置碾压实验图

Fig.6 50% positive bias rolling experiment

笔者在碾压实验中采用 GLS-B60 激光位移传感器,获取底盘测量点的实验真实位移-时间结果,并与仿真结果进行对比,碾压实验与仿真测量点位移-时间曲线对比如图 7 所示。

由图 7 可见,实验中底盘测量点处的最大位移

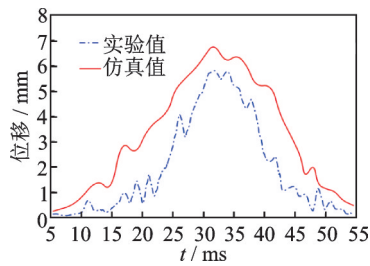


图7 碾压实验与仿真测量点位移-时间曲线对比

Fig.7 Comparison of displacement-time curve between rolling test and simulation measurement point

值为 5.80 mm, 而仿真结果中对应的最大位移值为 6.77 mm, 仿真结果相比于实验结果存在约 16.7% 的误差, 同时, 在整个 55 ms 时间内仿真曲线对实验曲线的拟合程度也较差。因此, 可以判断仿真结果准确性不足, 所建立的底盘碾压有限元模型存在一定的优化空间。

碾压与碰撞均涉及冲击力下的变形分析问题, 包含接触非线性过程。接触仿真有限元分析结果的校准, 主要可以通过连接方式、材料属性及单元属性的修正得以实现<sup>[9]</sup>。

文献[10-11]指出, 不同轮胎的建模方式得到的仿真结果准确性各不相同。一般来说, 模型越复杂, 网格尺寸越小, 细节的展现越充分, 得到的仿真结果准确性越高。本研究中, 实验车轮胎是实验车与底盘之间传递接触力的关键结构。为提高有限元分析和优化计算效率, 实验车模型采用单层轮胎建模方式进行模拟, 这种模拟方式在提高效率的同时也容易造成一定程度的误差。

## 2 车轮模型参数反求

### 2.1 实验车车轮有限元模型

本研究的实验车车轮总成采用单层轮胎建模方式进行模拟, 实验车车轮总成模型如图8所示, 主要包括胎面、胎侧、轮辋和轮辐4个部分。

车轮模型初始参数如表2所示。轮胎内部空气

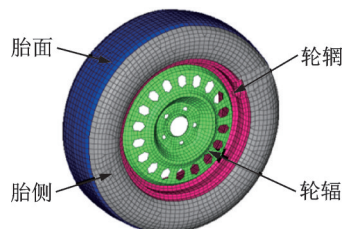


图8 实验车车轮总成模型

Fig.8 Model of experimental vehicle wheel assembly

表2 车轮模型初始参数

Tab.2 Initial parameters of wheel model

车轮部件	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比	初始厚度/mm
胎面	1.88×10 <sup>-6</sup>	2 450	0.33	24.00
胎侧	6.88×10 <sup>-6</sup>	2 450	0.33	10.00
轮辋	7.85×10 <sup>-3</sup>	210 000	0.29	4.15
轮盘	7.85×10 <sup>-3</sup>	210 000	0.29	12.70

使用理想空气模型进行模拟, 外部压力设定为大气压力 0.101 5 MPa, 初始内部压力设定为 0.25 MPa。

### 2.2 基于遗传算法的底盘碰撞碾压模型车轮参数反求

实践证明, 基于参数反求法, 对轮胎模型参数修正, 可以有效改善碰撞仿真结果的精确性。因此, 笔者参考碰撞仿真结果拟合问题中的方法, 利用参数反求法对碾压模型进行参数修正, 以获得精确的底盘碾压位移变形响应。

由于碰撞冲击问题中的响应函数往往呈现出高度非线性的特征, 利用遗传算法进行响应函数的拟合具有较高的适应性特点, 笔者采用遗传算法进行有限元模型参数的反求。

#### 2.2.1 优化变量定义

轮胎的泊松比对碰撞仿真过程中底盘位移的贡献量较小, 胎压、胎侧和胎面厚度、胎侧和胎面材料弹性模量对底盘位移的贡献量较大<sup>[12]</sup>。因此, 笔者将胎面的厚度和材料弹性模量设定为变量  $t_1, e_1$ ; 将胎侧的厚度和弹性模量设定为变量  $t_2, e_2$ ; 将胎压设定为变量  $p_1$ 。共有 5 个需要修正的建模参数变量, 且均为连续型变量, 优化变量设定如表3所示。

表3 优化变量设定

Tab.3 Optimization variables settings

参数	变量名	初始值	上限	下限
胎面厚度/mm	$t_1$	24	50	10
胎侧厚度/mm	$t_2$	10	40	6
胎面弹性模量/GPa	$e_1$	2.45	20.00	1.00
胎侧弹性模量/GPa	$e_2$	2.45	20.00	1.00
胎压/MPa	$p_1$	0.25	0.40	0.10

#### 2.2.2 拉丁超立方实验设计

拉丁超立方实验设计法适用于设计变量均为连续变量的情况, 其实验样本点具有较好的均衡性和空间填充性<sup>[13]</sup>, 笔者选择使用拉丁超立方方法作为实验设计方法。采用 HyperStudy 集成 RADIOSS 求

解器对模型进行计算,获取5个参数100种不同组合在同一测量点处的位移-时间数据,将位移-时间曲线上的20个评估点仿真值与实验值的差值均方根作为响应值,建立响应样本。

### 2.2.3 响应面近似模型的建立

由于遗传优化中需要大量的迭代运算,直接基于求解器仿真求解响应需要的时间过长,因此建立数学近似模型对真实物理模型进行代替是一种较为经济的选择。响应面法<sup>[14]</sup>是一种采用多项式函数来拟合设计空间的近似方法,得到的函数为简单的多项式函数表达式,其计算简单,给设计优化带来便利性,对于非线性问题还有利于求出全局最优解。笔者基于拉丁超立方实验设计建立的响应样本,在HyperStudy中建立4阶响应面近似模型。

### 2.2.4 遗传优化算法求解

经过上述分析,轮胎参数反求问题转化为基于简化的数学模型求其全局最优解,即

$$\begin{cases} \min L \\ 10 < t_1 < 50 \\ 6 < t_2 < 40 \\ 1 < e_1 < 20 \\ 1 < e_2 < 20 \\ 0.1 < p_1 < 0.4 \end{cases} \quad (1)$$

其中: $L$ 为位移-时间曲线上20个评估点仿真值与实验值的差值均方根。

基于建立的近似模型,采用HyperStudy中的遗传算法进行求解。初始种群数设定为164,经过237次迭代计算后,遗传算法得到收敛,获得了1组最优解,即各项轮胎参数最优修正值。

将最优解代入近似模型,求得 $L$ 的近似响应值,初始值与修正值的对比如表4所示。

表4 初始值与修正值的对比

Tab.4 Comparison between initial and revised value

参数	变量名	初始值	修正值
胎面厚度/mm	$t_1$	24.000	22.650
胎侧厚度/mm	$t_2$	10.000	17.800
胎面弹性模量/GPa	$e_1$	2.450	7.610
胎侧弹性模量/GPa	$e_2$	2.450	4.920
胎压/MPa	$p_1$	0.250	0.280
误差均方根	$L$	1.717	0.125

由表4可知,在近似模型中,误差均方根 $L$ 大幅降低,参数修正效果良好。

## 3 参数反求修正效果验证

基于修正后的轮胎模型参数,对轮胎有限元模型参数进行修改。将修改后的目标假车底盘碾压模型带入求解器进行计算,求得80 km/h车速下的测量点位移-时间曲线图,与实验获得的曲线进行对比,位移-时间曲线修正结果验证如图9所示。

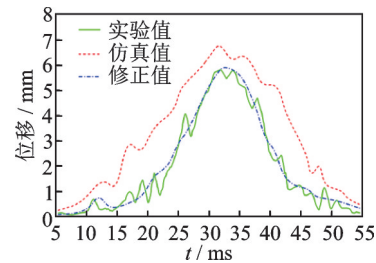


图9 位移-时间曲线修正结果验证

Fig.9 Verification of modification result of displacement-time curve

由图9可知,修正后的仿真结果中,测量点最大位移值为5.95 mm,同时求得位移-时间曲线20个评估点均方根误差值为0.139。

修正车轮参数后的仿真模型仿真结果与实验值拟合程度大幅提高,测量点最大位移值误差由原来的16.7%下降到了2.6%,评估点均方根误差下降了91.9%,这说明仿真结果精度大大提高,修正后的仿真模型可以更好地预测目标假车底盘的碾压性能。因此,可以基于修正后的有限元模型进行后续的目标假车底盘结构设计及优化。

## 4 结论

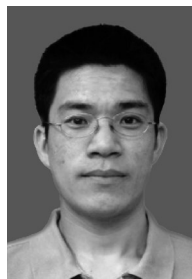
1) 对于目标假车底盘这类需要考虑碾压性能的特殊结构,在进行结构设计和优化时需要获得精确的碾压刚度响应,而碾压仿真结果由于模型的简化设置可能存在一定误差,需要参考实验结果进行修正。

2) 经过实践验证,应用基于遗传算法的参数反求法可以对目标假车底盘碾压模型中实验车车轮参数进行有效的修正,修正后的碾压模型仿真结果精度大大提高,与实验结果拟合程度较好,有效地解决了对于目标假车底盘这类需要考虑碾压性能的特殊结构有限元模型的精度问题。

3) 修正后的有限元模型可以作为目标假车底盘损伤诊断及结构优化等仿真研究的基准有限元模型,可用于检验应用模型的准确性及模型修正。

## 参 考 文 献

- [1] 和福建,张晋崇,石娟.智能网联汽车测试技术研究[J].汽车电器,2019(3):19-21,24.  
HE Fujian, ZHANG Jinchong, SHI Juan. Research of intelligent and connected vehicle testing technology[J]. Auto Electric Parts, 2019(3):19-21, 24.(in Chinese)
- [2] BACKUS G E, GILBERT J F. Uniqueness in the inversion of inaccurate gross earth data[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A, 1970(266):123-192.
- [3] 谭飞.基于瞬态响应的一种功能梯度梁的材料参数反求方法[D].长沙:湖南大学,2008.
- [4] PETR K, MARTIN H, PETR H, et al. Optimization of the material parameters of the continuous surface cap model for concrete[C]//2017 International Conference on Military Technologies (ICMT). Brno:IEEE, 2017.
- [5] JEON B, KIM J, MOON M, et al. Parametric optimization for energy calibration and gamma response function of plastic scintillation detectors using a genetic algorithm[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 930:8-14.
- [6] WANG W J, YUAN S Q, PEI J, et al. Optimization of the diffuser in a centrifugal pump by combining response surface method with multi-island genetic algorithm[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2017, 231(2):191-201.
- [7] 肖辉鹏,陈涛,段利斌,等.基于计算机参数反求的汽车轮胎有限元建模与仿真[J].汽车安全与节能学报,2018,9(3):258-264.  
XIAO Huipeng, CHEN Tao, DUAN Libin, et al. Vehicle tire finite-element modeling and simulation based on parameter reverse by computer[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2018, 9(3):258-264. (in Chinese)
- [8] 周亚妮.基于传力路径刚度的汽车正碰安全性正向设计方法研究[D].长沙:湖南大学,2016.
- [9] 魏太琛.材料对汽车碰撞仿真精度的影响分析[J].机电技术,2012,35(1):94-97.  
WEI Taichen. Analysis of the influence of materials on the accuracy of vehicle collision simulation[J]. Mechanical & Electrical Technology, 2012, 35(1):94-97. (in Chinese)
- [10] 曹立波,张滕滕,邵飞达,等.轮胎模型逼真度对偏置碰撞仿真的影响分析[J].汽车工程学报,2011,1(2):48-52.  
CAO Libo, ZHANG Tengting, SHAO Feida, et al. Analysis on the influence of tire model precision to the offset impact simulation[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2011, 1(2):48-52. (in Chinese)
- [11] 洪振宇,田炜,邹丽琼.子午线轮胎的滚动瞬态碰撞有限元分析[J].机械设计与制造,2018(6):147-150.  
HONG Zhenyu, TIAN Wei, ZHOU Liqiong. Rolling transient collision analysis of radial tire based on FEM[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(6):147-150. (in Chinese)
- [12] DUAN W T, ANKENMAN B E, SANCHEZ S M, et al. Sliced full factorial-based latin hypercube designs as a framework for a batch sequential design algorithm[J]. Technometrics, 2017, 59(1):11-22.
- [13] HE B, SI Y, YING L, et al. Research on optimization design of conformal cooling channels in hot stamping tool based on response surface methodology and multi-objective optimization[J]. Matec Web of Conferences, 2016, 80:10001.
- [14] 陶征,刘旭,郭勤涛.响应面法用于磨机传动系统扭转振动模型修正[J].振动、测试与诊断,2016,36(6):1222-1226.  
TAO Zheng, LIU Xu, GUO Qintao. Torsional vibration model updating for the mill transmission system based on response surface method[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(6):1222-1226. (in Chinese)



**第一作者简介:**刘志恩,男,1977年10月生,博士、副教授。主要研究方向为汽车噪声与振动(NVH)控制。曾发表《Structural modal analysis and optimization of SUV door based on response surface method》(《Shock and Vibration》2020, Vol.2020, No.1)等论文。  
E-mail:Liuzhien12345@168.com