

# 基于 LS-OPT 的虚拟路谱整车系统仿真和底盘参数识别

袁志丹<sup>1</sup>，王强<sup>1</sup>，张永召<sup>1</sup>

(1. 上海仿坤软件科技有限公司，上海 201102)

**摘要：**在对汽车进行虚拟路谱的分析过程中，底盘子系统的参数差异可能会引起系统整体的显著差异。本文论述了一种对底盘子系统进行垂直方向轴头力标定的方法，并将标定后的底盘参数应用于虚拟路谱技术。

**关键词：**CAE；系统仿真；参数识别；LS-OPT；虚拟路谱

## 1 前言

在现代机械工业中，有 80% 以上的结构强度破坏是由疲劳破坏所造成的。随着机械产品运转速度的提高，疲劳破坏更加普遍。车身是汽车的主要承载部件，尤其轿车、客车等承载式车身，是悬架、发动机和车身附件的安装基础，承受来自路面、发动机等的各种交变载荷，其疲劳强度性能对保证汽车产品的安全性和可靠性至关重要。近年来，车身耐久性 CAE 分析研究已经取得了较大进展。但是，如何高效、准确地提取整车中各个连接点的载荷仍然是其中的一个关键问题。

传统的载荷提取方法首先需要通过实车的整车道路试验，提取轮胎中心的载荷，再利用多体动力学分析，将轮胎中心的载荷分解，从而获取各个连接安装点的载荷。这种载荷提取方法时间周期较长，而且价格昂贵，同时还必须具备与新设计车相同平台的实车模型。

鉴于理论分析法与试验法的局限性，随着计算机虚拟试验技术、系统动力学等理论的发展，虚拟仿真法逐渐成为提高汽车生产效率、节省开发与成本的重要途径。虚拟路谱技术，是通过构建统一平台，简化建模过程，引入虚拟试验场，从而只需建立一个整车模型，就能够在汽车真实试验条件下，通过在计算机上建立汽车的虚拟模型，并对其进行虚拟仿真，可以模拟各种响应特性。将仿真结果与实车试验数据相比较，调整模型设计参数，并提出优化与改进模型的合理建议。可实现在汽车设计前期即可得到样车道路试验结果的整车性能预测效果的仿真技术，包括：NVH、疲劳寿命、道路载荷预测、整车、子系统和部件的动力学和运动学分析。

虚拟仿真法能够全面、准确地预测汽车的性能，及时对设计缺陷进行修改，大大缩短产品开发周期、提高设计效率与产品质量。对于传统的汽车动力学软件，在建模过程中，一般将整车模型视为刚体，并基于多刚体系统动力学理论开发的求解器进行计算分析，所建立的模型精度不高，仿真结果不能很好地反映实车工况。虚拟路谱技术（虚拟试验场混合模型，Hybrid-Virtual Proving Ground）弥补了上述不足，考虑计算量的原因首先将整车模型考虑为梁结构，详细地描述汽车各部件及其连接关系；然后用梁结构的整车模型的仿真结果与实车试验数据进行对标，进行底盘调校当两者的结果匹配后，再把梁替换成体网格，这样就可以通过标定后的体网格的整车模型直接获得零件准确的应力结果，从而使仿真更为真实、全面与快捷。

## 2 传统的车身连接点载荷提取方法

试验研究方法是“设计-试制-测试-改进-再试制”的过程，通过进行实车试验与评定，及时发现设计中存在的问题，查找车的结构参数的影响等。具体试验方法可分为室外道路试验、试验场试验、室内模拟试验三

种。尽管通过试验法可直观获取试验数据，但受客观因素的影响，必须通过多次试验才能使产品达到预期的性能要求，且试验结果反馈速度慢、生产周期长、成本高。

## 2.1 道路载荷谱采集

道路载荷谱的采集一般在试车场典型/误用/耐久工况路段（例如：坑洼路、冲击路、振动路、鹅卵石路等）上进行，分别在车辆前轮和后轮轮心处安装六分力传感器和加速度传感器，测量车辆在各种路面行驶时轮心 3 个方向承受的力（ $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ ）、力矩（ $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ ）或转向节轴头的加速度（ $A_x$ 、 $A_y$ 、 $A_z$ ）数据等。

## 2.2 通过多体模型的模拟与试验测试数据对比

由于在实车的路面载荷谱采集的时候，无法同时获取各个车身连接点的载荷，因此需要通过其他方法来获取这些车身连接点的载荷谱。目前通用的方法是通过创建多体模型来提取。为了完成这项工作，首先需要验证所创建的多体模型的可靠性，即将模拟分析所获取的轮胎中心的六向载荷或者加速度与试验测试的结果数据进行对比，如果对比结果比较好，则认为该多体模型可以用于各个车身连接点的载荷提取。

## 2.3 车身各个连接点的载荷提取

经过试验验证以后，所创建的多体模型即可用于车身各个连接点的载荷提取。这些车身连接点位置包括减震器位置、副车架位置、稳定杆位置等。

# 3 虚拟路谱整车系统模型的建立

基于虚拟路谱技术建立虚拟仿真有限元动力学模型，建立了刚柔混合模型的悬架和车身。进行部件连接、约束时，考虑部件的刚体与柔体特性，合理完成整车装配。

## 3.1 轮胎的建模

根据实车的实际轮胎尺寸创建轮胎有限元网格模型。创建过程中，需输入轮胎的尺寸、胎压以及质量。图 1 为轮胎有限元模型。

轮胎在虚拟路谱技术中具有非常重要的作用，轮胎的精度高低，将直接影响连接点载荷的精度。所以，在将轮胎装配到整车模型之前，需要先标定轮胎的刚度且控制好精度。

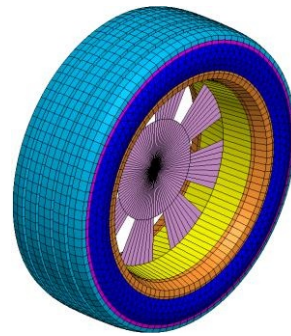
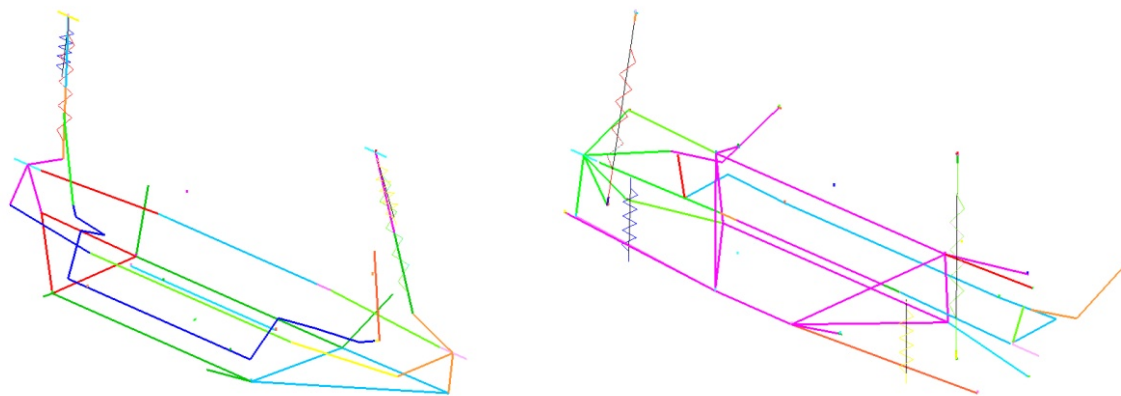


图 1 . 轮胎有限元模型及结构示意图

## 3.2 底盘的建模

考虑到后期对标工作的计算量以及对虚拟模型要求的精度，可以将底盘的结构件考虑为梁结构，对其赋予每个底盘结构件的实际质量和惯量。

底盘结构件用橡胶衬套进行连接，即 LSTC/LS-DYNA®中的\*ELEMENT\_BEAM (ELFORM=6) 来定义，前后底盘的有限元网格模型如图 2 所示。



(a) 前悬有限元模型(麦弗逊)

(b) 后悬有限元模型(多连杆)

图 2 前后悬挂的柔性梁有限元模型

### 3.3 整车虚拟路谱模型的搭建

车身创建完成后，将其与底盘和轮胎的有限元模型装配在一起，生成整车级别的虚拟路谱有限元模型如图 3 所示。其车身使用刚性单元模拟；底盘模型使用梁的方式进行建模。

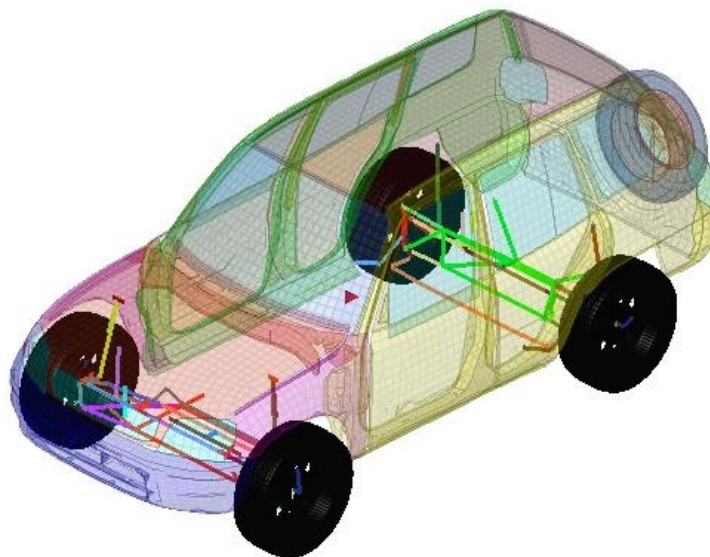


图 3 整车虚拟路谱有限元模型示意图

### 3.4 路面的建模

根据实车在路面路试的信息，通过建立节点和单元的形式来建立多种典型路面作为输入，在 LSTC/LS-DYNA® 的模拟分析中将其定义为刚性材料，并建立轮胎与路面间的接触关系。

## 4 系统参数优化及识别

随着近年来优化理论的逐渐成熟和计算机计算能力的快速发展，CAE 仿真分析越来越多的结合优化算法，来解决系统目标优化、参数识别、可靠性设计等问题。上述问题就可以利用参数识别技术来解决，通过把模型中用于定义底盘的材料进行变量参数化，借助优化算法来修正输入的初始值，使得整车系统仿真的结果更加与试验结果吻合。

参数识别问题通常是个非线性逆向求解问题，可通过数学优化来解决。通过探索系统参数空间，优化器可以找到一个可以最大化匹配度量的参数集，其中匹配度量用于量化目标和可变响应之间匹配程度，可变响应则取决于模型中的系统参数。

用于系统参数识别的技术主要由两个组成部分，一是优化方法，二是匹配度量。

#### 4.1 系统参数识别的优化方法

本论文中所使用优化软件是 LS-OPT，它推荐的用于解决参数识别问题的优化方法是基于元模型的优化。

所谓元模型，是在精度可接受的条件下，构造一个计算量小，但计算结果与 CAE 仿真结果相近的数学模型来代理相应的 CAE 模型<sup>[4]</sup>。元模型是对设计响应的一种近似，通常是设计变量的一个简单函数。典型的元建模技术主要有响应面法 (Response Surface)、前馈神经网络法 (Feedforward Neural Network) 和 Kriging 法。基于多项式基函数的响应面法是应用最广的元建模方法，应用 D-Optimal 法采集离散点，每次迭代需要  $1.5(n+1)$  个线性样点，计算时间快，准确性取决于多项式的阶次。本文以响应面法为元建模方法。

LS-OPT 软件提供的元模型有基于多项式的响应面模型、径向基网络模型、前馈神经网络模型、Kriging 模型等。元模型的构造通常按照以下步骤完成。

- 1) 选择一个合适的元模型；
- 2) 选择合适的 DOE 方法，用于在设计空间中确定构造元模型所需的样本点；
- 3) 利用 CAE 分析软件或者其它求解器计算并输出系统在样本点上的响应值；
- 4) 拟合样本点处的响应值，从而构造元模型。

基于元模型的优化策略主要有单级优化，连续优化和子区域减小的连续优化<sup>[5]</sup>。常见的优化算法主要有蛙跳算法、基因算法、混合基因算法和模拟退火算法。采用子区域减小的连续优化在缩小的子区域内增加采样点进行采样，每级都会在当前子区域内进行一次元模型的优化，直到找到收敛的解。本文以区域减小的连续优化为优化策略，终止计算的容差兼顾设计和目标，设计变化容差和目标函数容差均为 0.01。

由于原本的优化问题将在元模型上实现，从而让优化过程变得非常高效，因此在优化算法的选择时，可以不用过多考虑优化算法的计算成本，应优先选择优化结果精度高、具有全局性优化特点的算法。

#### 4.2 系统参数识别的匹配度量

如何度量目标和响应之间的匹配程度，LS-OPT 软件提供了两种主要形式，分别是数值匹配度量和曲线匹配度量。

要匹配数值，先从求解器的输出中提取相应的响应，然后把这些响应与相应目标值关联起来，通常使用 MSE (均方误差) 或 Sqrt MSE (均方根误差) 函数作为目标优化函数；对于曲线匹配度量，有均方误差法 (Mean Square Error) 和曲线映射法 (Curve Mapping)。均方误差法是基于坐标的曲线匹配度量。如果要匹配的曲线存在陡峭部分、或者纵坐标值不唯一的情形，则应选择曲线映射法作为匹配度量。因为曲线映射法使用曲线的长度来计算匹配程度，使用中建议过滤噪声明显的曲线<sup>[2]</sup>。

### 5 底盘参数优化及识别

虚拟路谱技术以多体系统动力学理论为基础，通过求解动力学方程来进行模型仿真分析。在建模时，要对悬架等部件进行柔化处理。在有限元分析中，分析对象划分的网格节点是相对于对象本身的某一惯性坐标。为了描述方便，一般将惯性坐标固定连在物体的一端，并将坐标的一个轴线与物体的轴线重合。将有限元分析的柔体加入多体系统中，需将柔体作相对的位移，即需将柔体分析的有限元方程乘以转换矩阵，从而实现由局部坐标向整个模型的惯性坐标的转换。

采用 Lagrange 方法建立的多体系统动力学，当代入其各项因子后，其简化形式的有限元方程如下式所示：



$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F_a\}$$

然而有限元模型的通用结构分析方程，一般是在有限元分析对象的局部坐标系下建立的，方程中的变量是相对于局部坐标的坐标元素。为了实现有限元分析方程与多体系统动力学分析方程的统一，可以通过多体理论中坐标转换矩阵  $B$ ，实现有限元分析方程向多体系统动力学的转换。

对于上式，其惯性坐标下的刚度、阻尼、质量矩阵是由局部坐标系的响应矩阵乘以局部坐标向惯性坐标的转换矩阵得到的，那么该方程可以表示为：

$$[Bm_e]\{B^T\ddot{x}\} + [Bc_e]\{B^T\dot{x}\} + [Bk_e]\{B^Tx\} = \{F_a\}$$

式中， $M = Bm_eB^T$ ， $m_e$  为静止状态下的单元质量矩阵；

$C = Bc_eB^T$ ， $c_e$  为静止状态下的单元阻尼矩阵；

$K = Bk_eB^T$ ， $k_e$  为静止状态下的单元刚度矩阵。

同时上式中等号右边也可以表示为位移、速度、加速度的函数：

$$\frac{\partial F}{\partial \dot{u}}\{\Delta \dot{u}\} + \frac{\partial F}{\partial \dot{q}}\{\Delta \dot{q}\} + \frac{\partial F}{\partial q}\{\Delta q\} = \{F_a\}$$

当单元的位移不大时，采用惯性坐标描述方程应是简单可行的方法，因为转换矩阵不需要更新。但当单元位移较大时，转换矩阵必须更新，从而使得局部坐标向惯性坐标系转换的相关矩阵也必须更新，如此系统的求解效率就明显降低。

在 LSTC/LS-DYNA® 软件中，所有的刚性体与柔性体都使用一个浮动局部坐标，当刚性体或柔性体运动时，对于系统求解的每一步，从局部坐标向惯性坐标系转换的相关矩阵都要更新，而惯性坐标系下的矩阵不需要更新，这样可提高系统的求解效率。此外，柔性体的变形应力在材料的线性变化范围内，其总位移可通过在局部坐标系中的相邻的单元变形叠加得到。而多体系统的求解是在多体模型的基础上，先求得柔性体与多体系统的作用点的力、速度、加速度等边界条件后，求出柔性体的变形、力与力矩，再与多刚体模型的结果对比，如果误差较大，以柔性体的变形、力或力矩为已知条件再做求解，直至误差满足要求。

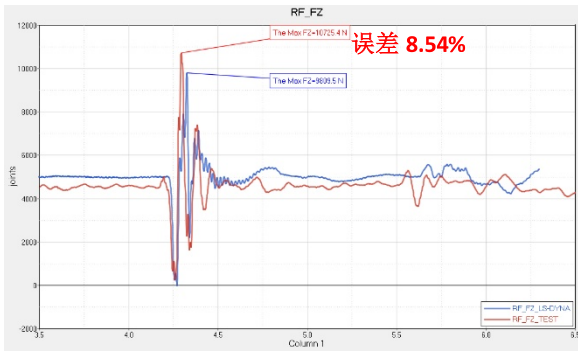
总之，有限元分析与多体动力学仿真拥有相同的系统动力学求解基础。有限元分析使用惯性坐标系下的惯性矩阵能更好地适应小位移分析的需要，而 LSTC/LS-DYNA® 软件使用局部坐标系下的局部单元矩阵，能及时有效地描述系统内不同构件的位置关系。

### 5.1 建立整车系统底盘参数识别模型

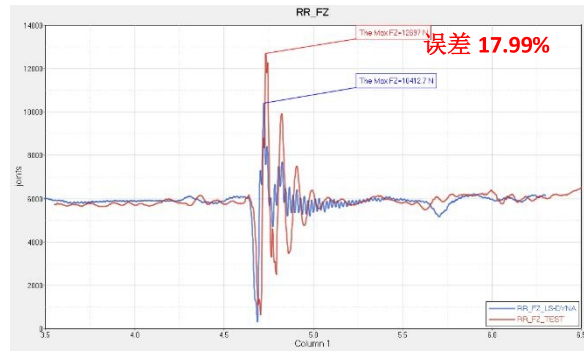
在初始试验条件下，采用梁网格模型进行仿真。根据上述计算方法，可以结合 LS-DYNA 求解器完成虚拟路谱计算。并在相同情况下，通过整车仿真模型与试验数据的对比，进一步验证整车仿真模型的可靠性。

但是，当计算结果与试验值存在较大差距时，需要对底盘的一些参数进行标定。然而，随着参数数据的增多，人为进行标定会非常困难。在 LS-OPT 软件中，可以将试验的轴头力作为优化目标，可实现对底盘参数进行自动标定。

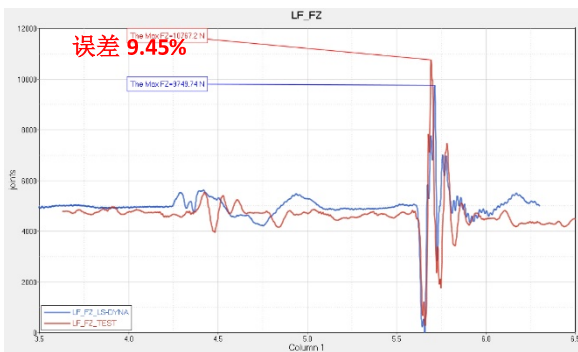
某典型 R2 路面，直接在时域内比较幅值与相位，进行整车仿真模型的时域对标。下图 4 为某 R2 路的第一次迭代计算时刻 FZ 轴头力对标结果。



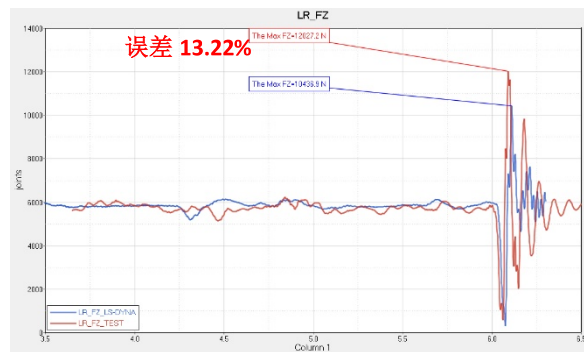
(a) 右前轮轴头力 FZ 对标



(a) 右后轮轴头力 FZ 对标



(a) 左前轮轴头力 FZ 对标



(a) 左后轮轴头力 FZ 对标

图 4 整车虚拟路谱结果与试验结果对标（底盘参数识别前）

参数识别模型定义如下：

变量：定义了 24 个变量来描述底盘参数；

响应：计算输出轮心处的轴头力 FZ；

优化目标：把试验中的轴头力 FZ 作为目标值，定义仿真响应与目标值之间的匹配度量，最后把定义的匹配度量作为优化约束目标（图 5）。

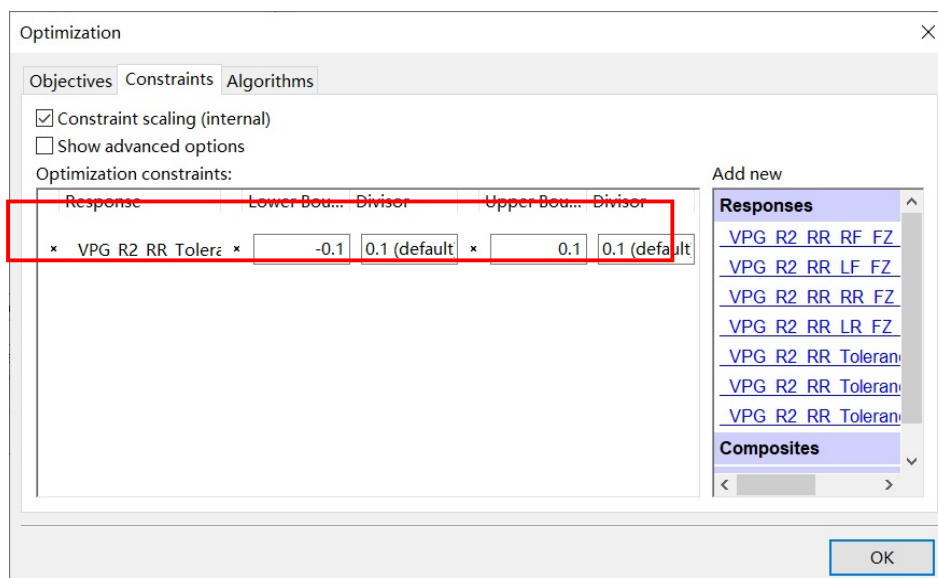


图 5 LS-OPT 软件中优化约束目标的设置

## 5.2 整车系统仿真模型底盘参数优化

本案例采用具有顺序优化策略（Sequential），设置最大 100 次迭代优化过程，每次迭代使用 38 个仿真样本（图 6）。

对于虚拟路谱分析，Z 方向的轴头力是工况的主要载荷方向对计算结果影响很大，因此对于虚拟路谱分析在此仅进行 Z 方向的轴头力标定。此外，在初始迭代前右后轮 FZ 的误差是最大的，故把该右后轮 FZ 作为研究对象来进行底盘参数识别，这样在提高计算精度的同时还能节省计算量。

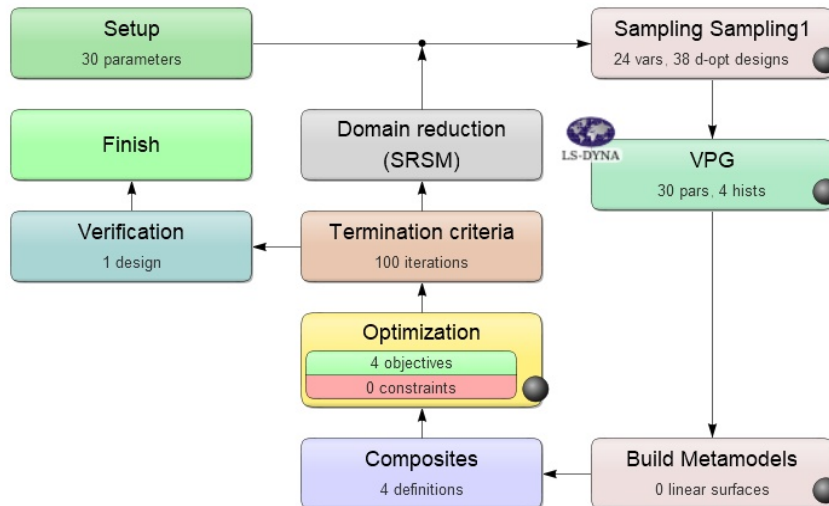


图 6 LS-OPT 软件中参数优化过程设置

因为优化过程需要较大的计算资源，标定值与试验数据误差与用户的计算时间和资源有关，一般控制在 10%即可。

查看 LS-OPT 的优化 History 结果可知，在第 1 次迭代后计算就接近了优化目标，后期再经过了 4 次迭代后就完全满足了优化目标，优化策略比较容易收敛。

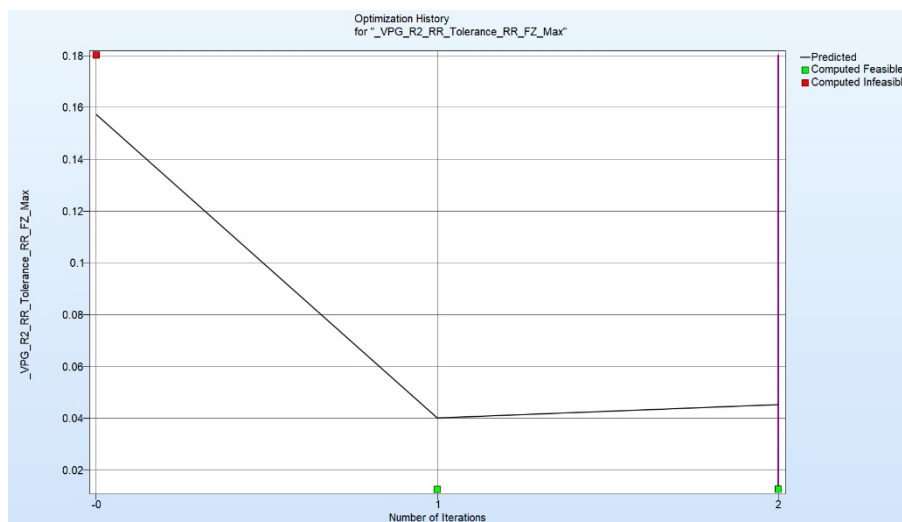
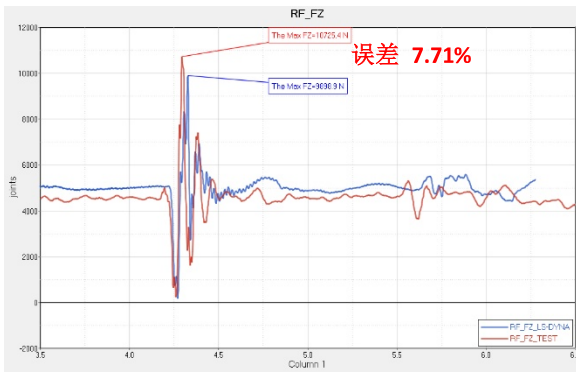
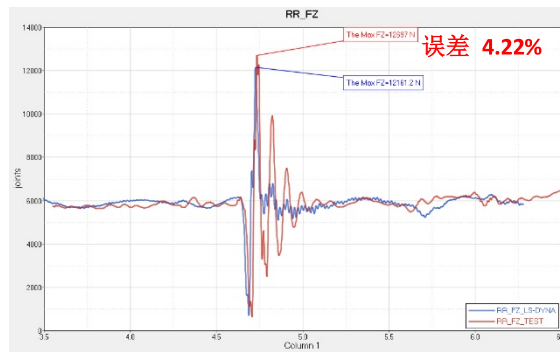


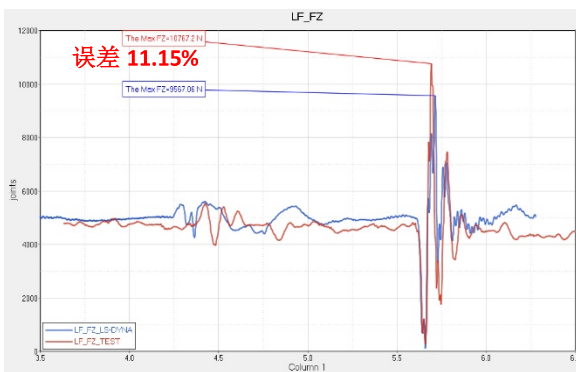
图 7 LS-OPT 软件中参数优化 History 结果（右后轮 FZ 的误差）



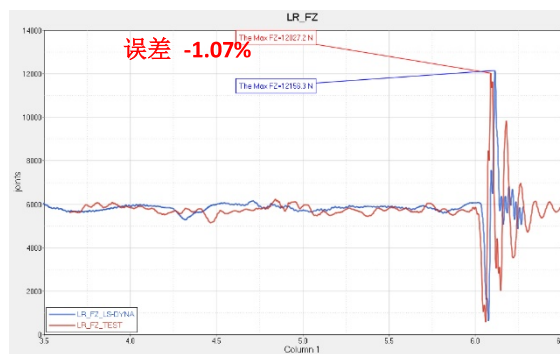
(a) 右前轮轴头力 FZ 对标



(a) 右后轮轴头力 FZ 对标



(a) 左前轮轴头力 FZ 对标



(a) 左后轮轴头力 FZ 对标

图 8 整车虚拟路谱结果与试验结果对标（底盘参数识别后）

基于相同的方法对其它轴头和比较重要的方向进行底盘参数的识别，当四个轴头的多个方向的力都满足我们所设定的误差要求时，该模型就是满足试验要求的底盘参数识别后的标定模型。

## 6 虚拟路谱混合模型

在上一步基于计算量的原因采用梁单元的虚拟路谱模型已经和试验进行了对标，验证了梁单元的虚拟路谱模型的准确性，然后通过零件替换的方式把虚拟路谱模型中关注零件的梁替换成柔性体，这样即可建立虚拟路谱的混合模型，从而可以获取真实路谱下的真实应力-应变响应，直接获得的动态应力值。可以考虑材料和几何非线性及阻尼的影响，在计算中包含了结构非线性、车身支撑发动机支撑等橡胶连接件的非线性因素、悬挂转向系统连接和缓冲件的非线性因素、车轮轮胎的非线性因素、轮胎和地面接触条件等等。

虚拟路谱的混合模型在进行柔性体的替换后，在定义的路面模型上运动中，可以计算出车身上或底盘上任何一个部位的应力随时间变化的响应以及在运动过程中力从路面传递到车身上的传递途径，可以判断最易发生破坏的位置以及诊断其原因。这就避免了传统 CAE 分析中，部件间受力关系难以确定的困难。由于边界条件是路面模型作为输入，分析中几乎排除了传统 CAE 分析常使用的人为假定。在系统运动学和动力学分析中，车身悬挂的弹性和变形影响可真实计入计算分析中，从而提高了分析精度。

进行转向节柔性体替换后的虚拟路谱混合模型在典型工况下的动应力云图如图 9 所示。



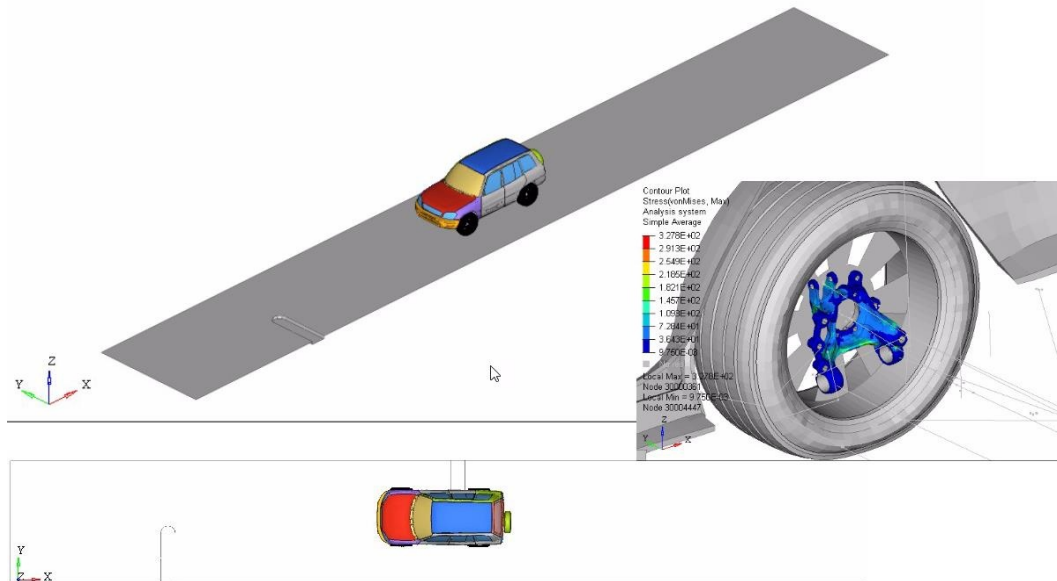


图 9 后悬转向节的动应力云图（Chuck Hole 右 2 坑）

## 7 总结

随着计算机硬件与软件的发展，仿真分析在整车研发中越来越重要。而且，随着仿真分析对精确性的要求，柔性和非线性建模逐渐成为整车或子系统仿真分析的发展趋势。本文通过在 LS-DYNA 中用虚拟样车在虚拟道路模型上进行虚拟路谱行驶试验，通过轴头力的仿真计算结果与实车试验的对比来验证模型的有效性，应用结果表明：

整车的有限元模型与实车的状况很接近，且通过模拟获取的结果与传统的方法获取的结果吻合较好，该方法可作为汽车设计和测试过程中的有效试验手段。

虚拟试验场混合模型技术在汽车设计的任何阶段都可发挥作用，尤其在概念设计阶段，因为没有真实的样机来获得应力应变响应和道路载荷值，虚拟试验场混合模型独特的整车分析方法可发挥强大的作用。

获得的应力是由实时的路面载荷产生的真实应力，而不是线性静态应力，施加到结构上的力是该设计车型结构所导致的力，而不是从以前相似设计中获得的力。

## 参考文献：

- [1]编辑委员会. 汽车工程手册 - 试验篇. 北京: 人民交通出版社
- [2]胡志刚, 面向虚拟试车场 (VPG) 技术的路面模拟系统研究, 《华中科技大学》.
- [3]LS-DYNA KEYWORD USER' S MANUAL. Version 971, LSTC
- [4]Zhang, Y., et al., "Validation of a FEA tire model for vehicle dynamic analysis and full vehicle real time proving ground simulations", SAE Technical Paper # 971100, 1997.
- [5]石琴, 陈无畏, 洪洋, 谷叶水, 张鹏, 基于有限元理论的轮胎刚度特性的仿真研究, 系统仿真学报, 2006, 18(6):1445-1449
- [6]GB/T. 23663-2009; 汽车轮胎纵向和横向刚性试验方法[s].
- [7]张允真, 曹富新, 弹性力学及其有限元法, 中国铁道出版社, 1983.
- [8]LS-OPT User' s Manual. LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION, Copyright. 2015.
- [9]C-NCAP 管理规则. 中国汽车研究中心, 2015 年版.