

# 白车身一体化耐久仿真技术研究与应用

柳亮，郭静，王斌，王翠，张旎  
东风汽车公司技术中心

**【摘要】**本文提出了白车身耐久虚拟仿真替代实物验证的一体化技术路线，应用虚拟试验场与虚拟四通道台架仿真技术，实现“零样车、零测试”的白车身耐久仿真计算，采用伪损伤敏感度分析技术，优化分析工况，支撑白车身在设计阶段样车试制之前完成快速验证与改进。研究与应用结果表明，白车身虚拟仿真一体化技术应用能准确识别白车身疲劳耐久失效风险，显著缩短仿真验证周期达70%，具备较高的工程应用价值。

**【关键词】**虚拟试验场，虚拟四通道，损伤敏感度，疲劳耐久仿真

## Research and Application of Integrated Durability Simulation Technology for White Body

Liu Liang, Guo Jing, Wang Bin, Wang Cui, Zhang Ni  
Dongfeng Motor Company Technology Center

**Abstract:** This paper proposes an integrated technology route of virtual simulation replacing physical verification. By applying virtual testing ground and virtual wheel coupling bench simulation technology, the durability simulation calculation of the white body with “zero sample vehicle and zero test” is achieved. Pseudo damage sensitivity analysis technology is used to simplify the analysis of working conditions and support the rapid verification and improvement of the white body before prototype production in the design phase. The research and application results indicate that the integrated technology of virtual simulation for white body can accurately identify the risk of solder joint failure in white body, significantly shorten the verification cycle by 70%, and has high engineering application value.

**Key words:** virtual proving ground, virtual wheel coupling, pseudo damage sensitivity, fatigue durability simulation

## 引言

随着新能源乘用车市场竞争持续白热化，主机厂对车型研发周期提出更高的要求，尤其是白车身的耐久仿真分析与验证，传统耐久仿真分析需要进行路谱采集，搭建整车多体动力学模型进行载荷分解或迭代，输出到仿真专业开展耐久仿真分析，周期长且依赖物理样车及测试资源，成为制约项目研发周期压缩的重要“卡脖子点”之一。文献[1]应用试车场道路载荷测量、刚柔耦合多体系统动力学模型和道路模拟虚拟迭代等技术，在轿车开发的结构设计阶段实现白车身结构疲劳寿命的有效预估与改进设计；文献[2]介绍了虚拟试验台技术原理，建立试验台多体动力学模型，阐述道路模拟试验流程；文献[3]应用虚拟迭代技术进行虚拟载荷迭代，输出的载荷进行白车身疲劳耐久仿真分析并对比；文献[4]详细阐述了汽车开发过程白车身耐久性分析研究基本流程及难点；文献[5]中系统地阐述了整车四通道快速模拟试验加载谱编制方法。

综上所述，当前行业针对新能源纯电动汽车的白车身耐久一体化仿真技术研究，面临以下几个问题。

1) 虚拟试验场与虚拟四通道载荷迭代方法的技术研究相对较多，但两者的联合仿真目前尚未见到有研究案例，亦未有主机厂对外公开。

2) 如何制定一套行之有效的虚拟验证技术路线，实现“零样车、零测试”的白车身耐久仿真计算过程还存在问题。

3) 如何在虚拟载荷分解及迭代过程中保证精度的同时

压缩求解时间，并评估仿真验证的有效性仍存在问题。

本文以某新能源纯电动乘用车白车身开发为例，详细介绍一套完整的“零样车、零测试”的白车身耐久仿真计算流程和方法，以实现在物理样车试制之前，进行车身结构寿命的有效预估与优化设计，可将整个仿真工作前置的同时大幅减少后续开发中实车耐久性试验验证的次数。

## 1 总体技术路线

传统的白车身耐久仿真分析技术路线一般有两种，一种是通过前期试制样车在试验场进行载荷谱采集，获取轮心六分力或加速度信号，然后搭建整车多体动力学模型，进行虚拟迭代或载荷分解，最后以分解得到的载荷输入到白车身疲劳耐久分析模型中进行寿命计算；另一种是采用虚拟试验场（Virtual Proving Ground, VPG）技术<sup>[5]</sup>进行虚拟载荷提取，然后采用分解的载荷进行载荷分解或虚拟迭代，获取车身端载荷作为白车身疲劳耐久分析模型输入，进行寿命计算。

本文首先采用虚拟试验场技术进行载荷提取，进而搭建虚拟四通道台架进行特征工况车身端载荷虚拟迭代，将获取的车身激励载荷导入白车身疲劳耐久分析模型中进行联合仿真，计算白车身疲劳寿命，最后与实车四通道试验结果进行对标。总体技术路线如图1所示。

### 1.1 虚拟试验场技术

VPG载荷分解技术，是一种基于VPG技术的整车道路轮心六分力提取及零部件耐久载荷提取方法。它涉及试验场的3D数字化模型、车辆轮胎的Ftire动力学模型、车辆的动力学模型等技术手段和措施，通过精准的数字化模型来获取

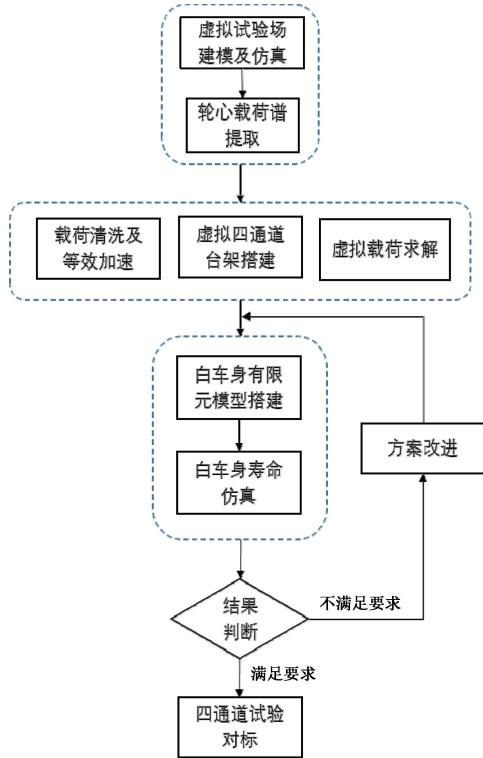


图 1 总体技术路线

耐久载荷，能显著降低研发成本，缩短研发工作周期。

VPG 载荷分解技术，能解决车型开发前期骡子车或正式状态样车不具备资源条件或开发周期不足情况下，需开展车辆耐久性能预测、耐久载荷分解时没有载荷来源的问题。目前，行业暂时还没有其他技术路径可实现该功能的等效耐久载荷分解技术和方法（即不采集实车路谱）<sup>[6]</sup>。

技术方法上，首先根据设计参数、硬点位置、零部件质量、弹簧刚度、减振器阻尼、连接衬套的刚度和配重信息，用多体动力学软件 Adams 来创建整车模型。在 VPG 模型创建方面，虚拟路面需要将轮胎模型创建出来，且多用 Ftire 轮胎模型参数建模。同时，需要提前将所有底盘零部件和车身件搭建柔性体 MNF 文件进行模拟。其技术流程如图 2 所示。

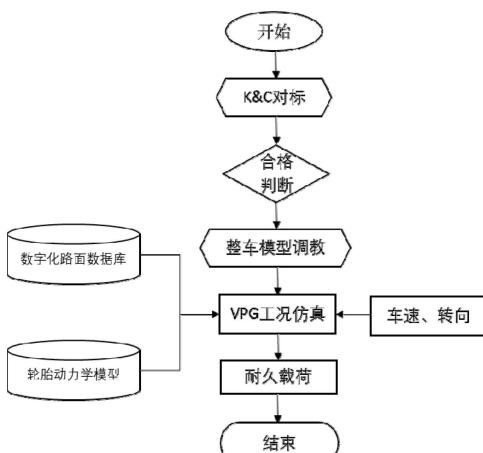


图 2 虚拟试验场技术流程

## 1.2 虚拟四通道技术

### 1.2.1 虚拟四通道技术原理

在车型开发中，四通道验证已成为行业主流，它具备周期短、精度高、问题复现快等明显优势，在主机厂的快速迭代车型，尤其是车身换代车型上应用广泛，已经可以替代针对车身的整车道路耐久验证。

MSC 公司的 Adams 软件中提供了虚拟四通道的模型，如图 3 所示。由于该四通道模型只能实现对车辆的垂向、俯仰、侧倾、扭曲等 4 种激励，无法施加随机路谱激励。ADAMS/Car 模块中提供了各种汽车子系统的模板，如前悬架系统、后悬架系统、转向系统、制动系统、车身等。因此，只需选择合适子系统模板，并且修改各个子系统的硬点坐标、模型参数等即可搭建一个完整的整车多体动力学仿真模型<sup>[7]</sup>。

本文建立了虚拟试验台模型，具体包括试验台机械系统、电-液伺服和传感器测量反馈系统等。之后调试整个虚拟试验台系统的动态响应特性，使其与真实的试验台保持高度一致，这是后续虚拟迭代工作的基础，也是确保虚拟计算获得的车身预估寿命值与后续实车台架试验具有可比性的关键所在。结合之前建立的整车多体模型，最终建立的刚柔耦合虚拟试验模型，如图 3 所示。

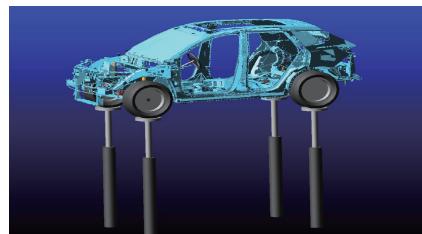


图 3 典型虚拟四通道模型

### 1.2.2 虚拟载荷迭代

利用参考车型道路试验数据，轮心加速度信息作为目标期望值，通过采用虚拟迭代工具 FEMFAT.lab VI，输入白或粉红噪声，通过多体动力学模型仿真，输出轮心加速度响应；通过反复迭代，逐渐逼近目标期望值，从而反推出虚拟路面输入。传递函数计算方式如下<sup>[8]</sup>。

计算多体动力学传递函数：

$$[H(\omega)] = \frac{F(\omega)}{U(\omega)} \quad (1)$$

式中， $F$  为输出信号（期望值）； $U$  为输入信号（白或粉红噪声）。

反推出输入信号为

$$U = [H]^{-1} \cdot F \quad (2)$$

式中， $[H]^{-1}$  为传递函数的逆。

计算第一个输入：

$$U_1 = [H]^{-1} \cdot F_{desired} \quad (3)$$

式中， $U_1$  为第一个输入信号； $F_{desired}$  为目标期望值。

经过反复迭代，计算第  $n$  个输入：

$$U_{n+1} = U_n + [H]^{-1} \cdot (F_{desired} - F_n) \quad (4)$$

反复迭代过程如图 4 所示。路谱迭代软件工具 FEMFAT. Lab，充分利用多体模型和参考车型的试验数据，与

Adams 集成，自动进行系统线性化识别和新的迭代 Drive 计算，迭代过程参数设置帮助系统迅速收敛。

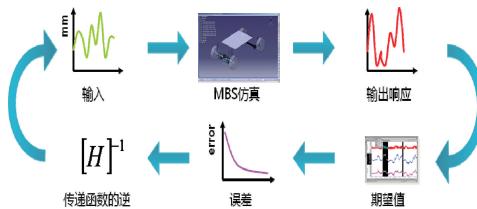


图 4 虚拟迭代流程图

### 1.3 Miner 线性损伤理论

累计损伤是有限寿命设计的核心问题，长期受到高度重视与广泛研究。最早进行累计损伤研究的是帕尔姆格伦，于 1924 年提出了疲劳损伤的线性假设。迈因纳于 1945 年将此理论公式化，形成著名的“帕尔姆格伦-迈因纳线性累计损伤法则”。线性累计损伤的基本假设<sup>[9]</sup>如下。

1) 损伤正比于循环比（损伤比）。

对单一循环，用  $D$  表示损伤，用  $\frac{n}{N}$  表示循环比，则  $D$

正比于  $\frac{n}{N}$ 。

2) 试件能够吸收的能量达到极限值，导致疲劳破坏。

试件破坏前能够吸收的能量为  $w$ ；总循环次数为  $n$ ；在某一循环数时，试件吸收的能量为  $W_1$ 。由于试件吸收的能量与其循环数  $N_1$  之间存在正比关系，因此存在：

$$\frac{W_1}{w} = \frac{n_1}{N} \quad (5)$$

3) 疲劳损伤可以分别计算，然后线性叠加。

由前面的定义，设构件的加载历史由  $S_1, S_2, \dots, S_r$  等  $r$  个不同的应力水平构成，各级应力对应的寿命为  $N_1, N_2, \dots, N_r$ ，各应力水平下的实际循环数为  $n_1, n_2, \dots, n_r$ ，则可得到构件总的损伤为：

$$D = \sum_{i=1}^r \frac{n_i}{N_i} \quad (6)$$

当损伤等于 1 时，零件发生破坏，即

$$\sum_{i=1}^r \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (7)$$

## 2 白车身耐久仿真一体化技术应用

本文以某新能源车型为全新平台开发，前期无基础样车，同时，白车身开发周期不足 60 天，同时要求进行 2~3 轮数据迭代，因此要求单轮次的分析周期必须小于 20 天（包含载荷提取与数据处理）。

基于以上开发背景，本文应用虚拟试验场与虚拟四通道技术联合仿真，在无样车、无测试条件的前提下开展载荷提取及仿真分析，评估白车身失效风险。

### 2.1 虚拟试验场仿真与载荷分解

本文采用 Adams 修正的 Craig-Bampton 模态综合方法 modal synthesis method，其特点是选取固定边界正则模态和约束模态来表示柔性体的变形<sup>[10]</sup>。其关键点有以下三个

方面。

- 1) 车身采用柔性体模型建模。
- 2) 车身结构阻尼比调节。
- 3) 加速度传感器测点的选择。

轮胎采用 Ftire 模型，最高有效频率 120~150Hz，适用于操纵稳定性仿真分析（低频）、行驶平顺性仿真分析（中频）、耐久性能仿真分析（中高频）（如图 5）。

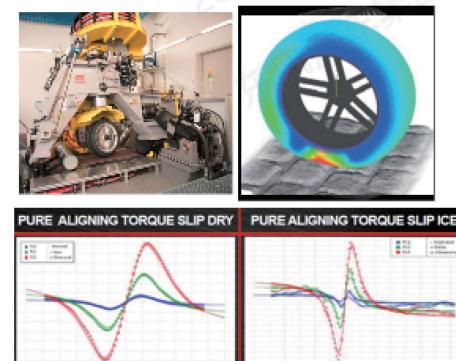


图 5 Ftire 模型测试与辨识

搭建了 VPG 模型后，还需要对多体模型进行基础 K&C 标定，保证模型的精度。

应用对某试验场的耐久典型特征工况进行 VPG 仿真，如图 6 所示，提取轮心载荷，其工况及试验条件见表 1。

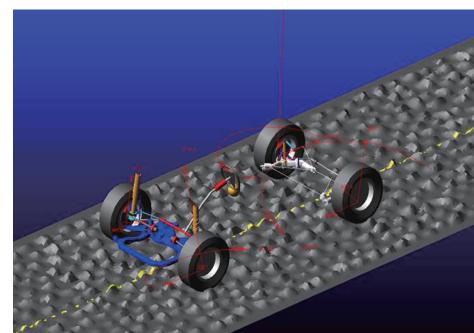


图 6 VPG 仿真模型

表 1 试验场道路工况明细

序号	3D 数字化路面库	长度/km
1	性能路	1.5
2	二环	2
3	比利时路	1
4	综合路 1	1.8
5	综合路 2	4.0
6	山区	0.5
7	合计	10.8

### 2.2 载荷提取

完成 VPG 仿真之后，提取轮心六分力及轴头加速度信号，对特征路面载荷进行数据清洗，含滤波、去毛刺等。

从图 7~图 8 中可以看到, 某特征工况下的加速度信号在 VPG 载荷分解后的轮心载荷数据存在明显毛刺, 峰值相差约 40%, 通过滤波、去毛刺等基础数据清洗, 数据质量明显提升, 经处理后的数据可用于虚拟迭代。

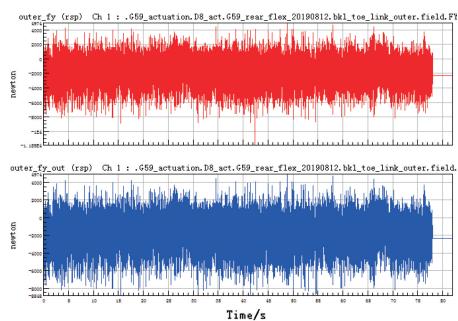


图 7 某特征路面分解的载荷

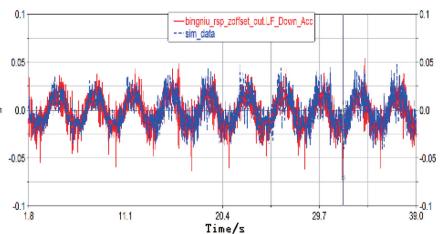


图 8 某特征路面载荷清洗

### 2.3 虚拟四通道模型搭建

根据某四通道台架的图纸数据, 进行参数提取及必要的外观简化。

四立柱试验台主要由 4 个垂向布置的液压缸及配套的伺服阀、油管、油源等部件组成。在不考虑液压系统特性的前提下, 虚拟四立柱试验台只需要建立 4 个垂向布置的液压缸即可, 液压缸的活塞和托盘作为一个运动部件, 与缸筒(或地面)通过移动副约束<sup>[11]</sup>。

模型搭建后需根据实物四通道台架进行基础标定与行程校核, 确保仿真模型的准确性, 本文所搭建的虚拟四通道基础台架模型如图 9 所示。

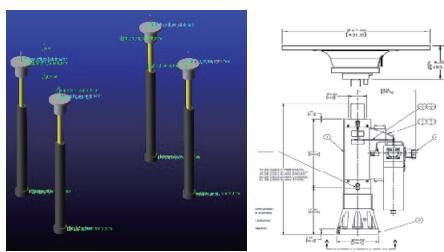


图 9 虚拟四通道台架搭建

### 2.4 虚拟载荷迭代与求解

仿真中要根据不同类型的路况和不同频率段综合考虑位移信号以及加速度信号在迭代中的权重比例, 同时将采集的位移信号和加速度信号作为目标跟踪信号。

依据本文 1.2 节的虚拟四通道技术, 在搭建的虚拟试验

台上进行车身端载荷迭代计算, 求解车身塔顶处的耐久载荷。

经过几次迭代后, 将 VPG 分解的加速度与位移信号和在虚拟台架上采集的目标点信号对比, 二者在时域、频域上接近, 在穿级统计结果中也很接近, 迭代结果的均方根误差与目标信号均方根的比值在 10% 以内, 反馈信号的均方根值与目标信号的均方根值之比接近 1 时, 可以认为此时的驱动信号可以很好地模拟虚拟台架的作动情况, 用此驱动信号可进行虚拟四通道台架仿真及作为实物四通道台架的驱动信号。

各通道信号的时域曲线的吻合程度非常高, 误差在 10% 以内, 迭代达到收敛条件后, 保存最后一次的 Drive 文件, 用于后续载荷预测和疲劳耐久仿真分析工作。虚拟四通道轮心多次迭代伪损伤如图 10 所示。

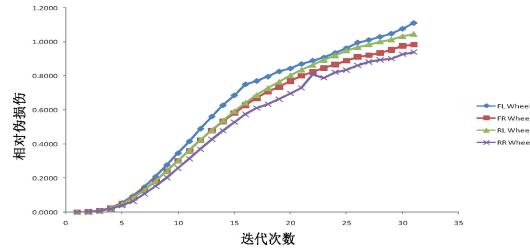


图 10 虚拟四通道轮心多次迭代伪损伤

### 2.5 车身塔座安装点载荷伪损伤等效分析

利用本文 1.3 节的 Miner 线性损伤理论算法, 对试验场全部工况的整车耐久试验进行载荷加速分析。以塔顶 Z 向力载荷作为等效加速的分析对象, 计算各工况半载、满载下的伪损伤。

1) 按各验证工况及循环次数, 计算车身连接点 4 个安装点载荷伪损伤, 得到车身系统的总和, 作为后续关联目标准值。

2) 根据各车型全部工况伪损伤值, 开展损伤贡献量分析和伪损伤对比分析。计算各典型特征工况的损伤贡献量, 计算结果表明, 比利时工况对车身产生的伪损伤占总损伤的 50% 左右, 占比最高。其他各种工况总损伤占比 40% 左右。伪损伤对比分析结果如图 11 所示。

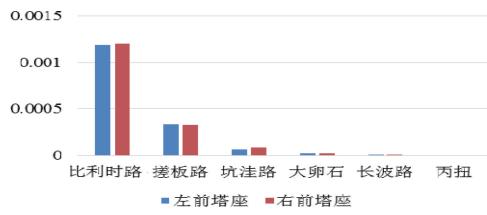


图 11 前塔座处各特征工况损伤当量关系

3) 根据车身载荷传递路径及过往车型开发经验, 以比利时路、搓板路工况作为初步加速方案, 基于伪损伤等效计算各工况伪损伤等效系数, 加速方案的等效加速比见表 2。这里以 4 个塔座的平均加速系数作为该车型初版加速方案循环次数, 则各车型各塔座伪损伤比在 0.86~1.12 之间, 结果收敛较好。

表 2 塔座处 Z 向伪损伤当量关系

项目	左前塔座 $F_z$ 载荷	右前塔座 $F_z$ 载荷	左后塔座 $F_z$ 载荷	右后塔座 $F_z$ 载荷	循环次数
损伤	$5.9 \times 10^{-1}$	$6.3 \times 10^{-1}$	$4.6 \times 10^{-1}$	$5.4 \times 10^{-1}$	672
比利时路损伤	$8.0 \times 10^{-4}$	$8.2 \times 10^{-4}$	$8.0 \times 10^{-4}$	$9.0 \times 10^{-4}$	
加速系数	742	772	575	600	
初版方案 伪损伤比	1.10	1.15	0.86	0.89	

本文计算输出的当量关系系数也可以作为后续试验场车身快速耐久专项试验大纲制定的依据，针对可能出现的专项问题进行解析或快速验证。

## 2.6 白车身耐久分析

本文采用名义应力法进行疲劳计算，应用雨流计数法对载荷时间历程进行统计，得到载荷循环的幅值和循环次数，并对平均应力进行修正，最后将输出的节点力导入疲劳分析软件 FEMFAT 中，采用基于 Rup 节点载荷法计算焊点疲劳寿命<sup>[12]</sup>。

白车身耐久仿真分析模型如图 13 所示，所搭建的白车身模型为充分考虑质心和惯量影响，在传统白车身模型基础上带了四门两盖及电池包，其余附件配重（ $\geq 10\text{kg}$ ）。

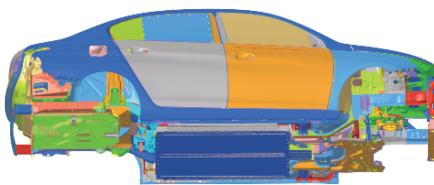


图 12 白车身耐久仿真分析模型

计算结果（图 13）显示，白车身后隔板焊缝处存在一处薄弱点，其分析损伤值达到 7.52，超过仿真目标值，其余钣金及焊缝满足分析要求。

该处焊缝主要受车身扭转载荷作用，在交变载荷反复作用下达到一定的循环次数出现疲劳寿命风险，仿真所识别的风险点及计算结果见表 3。

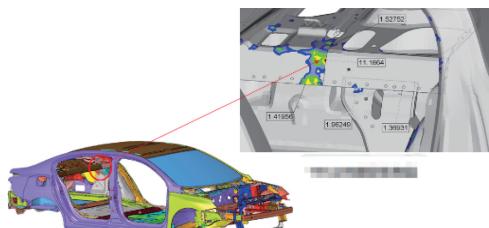


图 13 仿真薄弱点云图

表 3 耐久仿真分析结果

仿真薄弱点	开发车型（损伤值）	目标值
后隔板焊缝	7.52	3
后隔板钣金	$3.69 \times 10^{-2}$	1
减振器上安装点	$1.11 \times 10^{-2}$	

在项目开发中，该处风险出于改进成本与周期的考虑，选择预留改善方案，待四通道试验完成后，根据实车的风险情况，进一步评估是否导入改善措施。

根据仿真失效云图提出改善方案如图 14 所示。改善方案措施如下。

- 1) 增加焊缝长度，由两段改为三段。
- 2) 增长每一段焊缝长度，由 10mm 增长至 17mm。

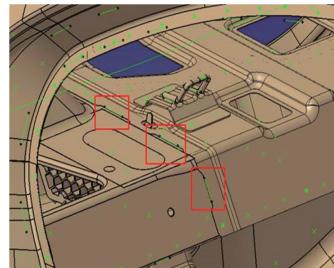


图 14 后隔板焊缝改善方案

针对图 15 所示改善方案进行仿真分析计算，计算结果显示，该处焊缝焊接数量与焊接长度改善后，仿真损伤值由 7.52 下降至 0.91，改善效果显著，满足目标值，项目决策将此改善方案作为后续工艺优化方案及风险对策方案进行预留。

## 3 仿真精度对标

### 3.1 虚拟试验场载荷分解精度对标

项目开发至工程样车试制阶段，用实车布置六分力及加速度传感器，采集轮心与车身端的加速度信号，将仿真信号与实测信号在幅值均方根（RMS）、伪损伤进行对标，4 条特征道路工况的对标结果显示，载荷幅值方面 Z 向精度达到 95.3%，伪损伤精度在 0.5~2 之间，如图 15、图 16 所示。

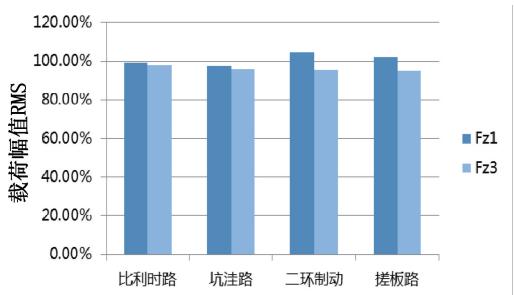


图 15 载荷幅值 RMS 对标

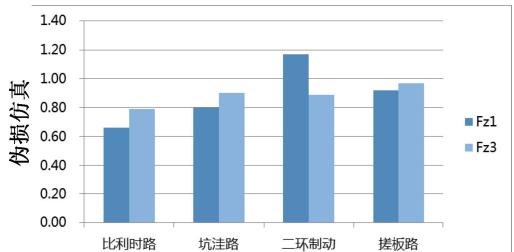


图 16 轮心处伪损伤对标

### 3.2 虚拟四通道载荷迭代精度对标

参考 VPG 对标，虚拟四通道仿真信号与实测信号在幅值 RMS、伪损伤值也进行强对标。6 种特征道路工况的对标结果显示，载荷幅值方面 Z 向精度达到 80%（图 17），伪损伤精度在 0.8~1.2 之间。

从表 4 中的数据可知，在车身端塔座处，虚拟迭代与实车数据采集的数据对比，等效加速后的两种特征路上，其仿真与试验伪损伤值在 0.7~2 之间（行业一般要求为 0.5~2）。

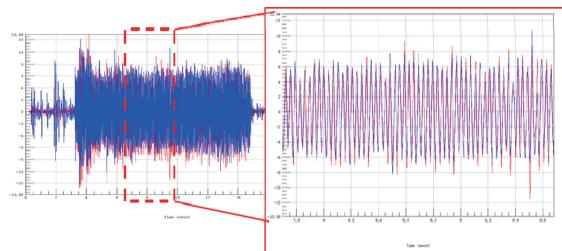


图 17 搓板路仿真与实测载荷对标

表 4 虚拟仿真与实测数据对标

工况	测点		仿真	试验	试验/仿真
比利时路	伪损伤	左前	$2.15 \times 10^{-7}$	$3.44 \times 10^{-7}$	1.6
		右前	$2.06 \times 10^{-7}$	$3.51 \times 10^{-7}$	1.7
		左后	$1.46 \times 10^{-7}$	$1.63 \times 10^{-7}$	1.1
		右后	$1.28 \times 10^{-7}$	$1.47 \times 10^{-7}$	1.1
搓板路	伪损伤	左前	$3.69 \times 10^{-8}$	$4.09 \times 10^{-8}$	1.1
		右前	$3.96 \times 10^{-8}$	$4.07 \times 10^{-8}$	1.02
		左后	$1.78 \times 10^{-8}$	$1.50 \times 10^{-8}$	0.84
		右后	$1.83 \times 10^{-8}$	$1.31 \times 10^{-8}$	0.71

### 3.3 白车身耐久仿真结果对标

设计阶段仿真验证完成后，项目开展实车四通道试验，试验完成后拆解，涂显影剂后，发现一处开裂，位置在后隔板右侧连接焊缝，开裂部位及里程与仿真预测结果一致，前期仿真预测的薄弱点出现开裂，开裂出现在试验进程进行到 75%~100% 的某时刻，裂纹长度约 30mm，如图 18 所示，其他部位均通过考核，很好地验证了本文论述的技术路线及分析方法。

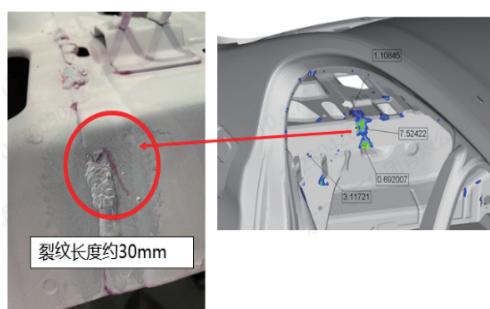


图 18 实车开裂处与仿真分析薄弱点对标

实车出现开裂后，针对前期仿真识别的薄弱点，导入改善方案，改善方案经过一体化仿真分析，接受后进行后续验证，顺利通过了第二轮试验考核。

### 4 仿真分析周期对比

对比本文提出的白车身一体化耐久仿真分析新方法的分析周期与传统方法进行对标，按载荷提取、虚拟迭代、仿真分析共三个阶段，其分析周期对标结果见表 5，从表中可知，新方法的优势如下。

1) 载荷提取。无须载荷谱采集样车，无须进行传感器布置与贴片，以及相应的标定与测试工作，因此，周期明显缩短。

2) 虚拟载荷迭代。因采用损伤敏感度分析技术获取试验场工况之间的当量关系，大幅简化虚拟迭代工况数量，由原来的 10 多条路简化成 2 条，时间显著节省。

3) 受第二步工况简化作用，因需要计算的工况减少，白车身耐久仿真计算时间进一步缩短。

4) 包括后续的改善方案迭代，经过工况等效之后也将持续缩短时长，改善方案基本可以做到 2 天一轮次。

表 5 新方法与传统方法仿真周期对标

分析方法	载荷谱提取/天	载荷迭代与简化/天	白车身耐久仿真/天	周期合计/天
传统方法	20 (含六分力测试)	5	10	35
新方法	3	3	2	8

### 5 结论

本文创新地提出了虚拟仿真替代实物验证的一体化仿真技术路线，应用虚拟试验场与虚拟轮耦合台架仿真技术，实现“零样车、零测试”的白车身耐久仿真计算，支撑白车身在设计阶段样车试制之前完成快速验证与改进，能够很好地指导产品在开发早期的白车身设计阶段进行疲劳耐久风险识别，采用虚拟测试与虚拟试验台的搭建与载荷提取，能够灵活地在设计阶段进行设计方案迭代与风险评估，周期短、效率高、工程应用一致性较好。

目前，该技术路线在行业里并不多见，通过全面地分析和对标，总结其主要创新点及结论如下。

1) 创新地使用虚拟试验场、虚拟四通道、白车身耐久仿真技术进行联合仿真，实现白车身耐久虚拟仿真一体化。

其中，虚拟试验场载荷分解典型特征工况垂向 RMS 精度达到 95%、伪损伤在 0.5~2 的区间内（比利时路为 0.8~1.1）；虚拟四通道仿真 RMS 精度达到 80%，伪损伤精度在 0.8~1.2 区间内。

2) 应用伪损伤敏感度分析技术进行耐久工况简化。通过与传统白车身仿真分析方法对比，其分析周期显著缩短，缩短了 70%，能实现设计阶段的快速迭代与响应。

3) 工程应用效果方面，通过在某新能源乘用车白车身耐久仿真分析项目中应用，白车身虚拟仿真一体化技术能准确预测白车身焊点失效风险。

同时，在本文的技术路线及项目对标过程中，也发现一

些局限性待进一步开展研究并改善，主要有以下三个方面。

- 1) 虚拟试验技术应用依赖轮胎 Ffire 模型，同时，在模型搭建过程中需要对弹性件进行标定，并做 K&C 验证，需要一定的轮胎基础数据库积累。
- 2) 该方法在应用过程中需要对道路试验场工况进行等效和简化，该过程需在基于同平台、同悬架形式的车型中应用<sup>[13]</sup>。

- 3) 仿真模型状态与测试车辆状态（轴荷等）的微小差异，对幅值影响较大，例如轮胎阻尼对相位对标影响较大、衬套阻尼对整体对标情况均有影响等。

## 参 考 文 献

- [1] SUI J HIRSHEY J. Evaluation on Analytical Tire Models for Vehicle Vertical Vibration Simulation Using Virtual Tire Testing Method [J] SAE transactions, 1999, 108 (6): 1521-1526.
- [2] HBM nCode. Glyph Reference user manuals [Z]. 2019.
- [3] KIM H S, YIM H J, KIM C B. Computational Durability Prediction of Body Structures in Prototype Vehicle [J]. International Journal of Automotive Technology. 2002, 3 (4): 129-135
- [4] 王秉刚. 汽车耐久性工程方法 [M]. 北京：机械工业出版社，1991.
- [5] 陈忠良，崔红伟，骆红云，等. 室内整车可靠性道路模拟试验方法 [J]. 北京汽车，2005，(2): 10-13.
- [6] 刘拥军，杨万安，姚烈，等. 道路模拟试验机在整车道路模拟试验中的应用. 上海汽车 [J]. 2001, (4): 26-29.
- [7] 张巍，魏朗，余强. 基于有效路形的车辆振动模型 [J]. 交通运输工程学报, 2008, 8 (4): 16-19.
- [8] 于海波. 汽车承载系试验场用户关联耐久性试验方法研究 [D]. 吉林：吉林大学，2008.
- [9] 王怀翊，尚候均. 论中国新能源汽车产业发展战略及相关路径研究 [J]. 时代汽车, 2019, (6): 89-90.
- [10] 董英雷. 纯电动汽车道路可靠性强化试验研究 [D]. 北京：北京理工大学，2016.
- [11] 刘再生，霍福祥，杨立峰，等. 基于路谱输入的汽车台架耐久性试验方法研究 [J]. 汽车技术, 2010, (9): 47-50.
- [12] 王霄峰. 汽车可靠性工程基础 [M]. 北京：清华大学出版社，2007.
- [13] 杨晓华，姚卫星，段成美. 确定性疲劳累积损伤理论研究进展 [J]. 中国工程科学, 2003, 5 (4): 81-87