

# 中汽中心科研课题研究报告

## 基于 FTire 轮胎模型和 RTS 的汽车耐久仿真测试技术研究

Vehicle Durability Simulation Test Technology Research  
Based on the FTire Model and RTS Integration Test

课 题 编 号 : 17180113

承 担 部 门 : 汽车工程研究院

课 题 负 责 人 : 杨建森

完 成 日 期 : 2019 年 03 月



中国汽车技术研究中心  
China Automotive Technology & Research Center







## 摘要

汽车的耐久性能是评价汽车质量的重要性能参数之一，其技术验证手段往往是通过实车道路试验、室内台架试验和 CAE 分析三种方法进行。随着汽车行业的发展与进步，耐久开发周期越来越短，传统的实车道路试验与 CAE 分析方法很难保证整车开发进度，这就要求汽车开发人员采用新兴技术，提高汽车耐久性能开发效率。混合系统响应收敛（Hybrid System Response Convergence，简称 HSRC）迭代技术是一种跳过了复杂数学建模过程转而利用实车真实物理模型的混合仿真迭代技术，利用力和位移等物理量的逐步迭代过程复现试验样车在试验场测试路面中的运动姿态与载荷，为快速开发台架耐久试验驱动信号提供了一种行之有效的方法。

首先，概述了课题的主要研究方向。阐述了在当前汽车开发背景下发展 HSRC 技术的意义与必要性，以及该技术的发展历程与市场前景，并介绍了本课题的主要研究内容。

其次，本文对 HSRC 技术原理进行了详细叙述。HSRC 的核心技术在于获取混合仿真传递函数，在道路模拟试验机中力作为收敛信号，位移作为耦合信号，随后通过推导 FTire 轮胎模型传递函数、耦合信号传递函数和收敛信号传递函数推导出 HSRC 混合仿真传递函数。通过反函数原理，混合仿真迭代收敛算法可以通过计算物理与虚拟系统间的误差生成台架的驱动信号，随后不断地迭代生成唯一符合两者环境的驱动信号。

再次，本文对 HSRC 技术必要的虚拟路面与 Ftire 轮胎模型进行了介绍。介绍了针对路面结构分别使用了不同的建模方法，从而得到中汽中心盐城试验场强化耐久路面的虚拟路面数据；Ftire 模型与轮胎侧偏、纵滑、cleat 凸块等试验输入息息相关，通过对该车对应型号的轮胎开展试验及数据辨识处理，不断提高轮胎模型的仿真精度，该车型轮胎模型的最终辨识精度达到了 86.43%。

最后，本文记叙了实车路谱采集过程以及对 HSRC 载荷精度的验证过程。实车路谱采集试验是将轮心六分力、加速度、位移等传感器安装至车辆指定位置，并使车辆按照规定的轨迹与车速行驶从而获取各传感器反馈信号的过程。HSRC 技术验证过程中，通过虚拟路面与轮胎模型的仿真、台架与车辆耦合迭代运算，同样能够得到实车轮心位置的受力反馈信号，再通过与实车采集信号的对比，验证 HSRC 技术的精度与有效性。最终通过比利时路与颠簸路轮心力信号的对比，HSRC 技术的综合精度分别达到了 93.66% 和 87.26%，完成了课题预期目标。

关键词：耐久性能，混合系统响应收敛，路面，轮胎模型，路谱采集

# 目录

<b>第1章 绪论</b> .....	- 1 -
1.1. 引言 .....	- 1 -
1.2. 课题研究背景及意义 .....	- 1 -
1.3. 课题相关研究现状 .....	- 2 -
1.4. 课题主要研究内容 .....	- 3 -
<b>第2章 混合系统响应收敛仿真理论基础</b> .....	- 5 -
2.1. 混合系统响应收敛仿真理论 .....	- 5 -
2.1.1. 概述 .....	- 5 -
2.1.2. 混合仿真传递函数 .....	- 7 -
2.1.3. 混合仿真迭代收敛算法 .....	- 8 -
2.2. 混合仿真交互平面 .....	- 8 -
2.2.1. 混合仿真交互平面 .....	- 8 -
2.2.2. 三轴加速度传感器布置 .....	- 9 -
2.2.2.1. 低频运动 .....	- 9 -
2.2.2.2. 高频运动 .....	- 10 -
2.3. 本章小结 .....	- 11 -
<b>第3章 路面模型</b> .....	- 12 -
3.1. 盐城试验场简介 .....	- 12 -
3.2. T8 强化耐久路段 .....	- 14 -
3.3. 路面建模 .....	- 15 -
3.3.1. 规则路面建模 .....	- 15 -
3.3.2. 随机路面建模 .....	- 18 -
3.3.3. 路面建模成果 .....	- 19 -
3.4. HSRC 项目道路数据选取 .....	- 25 -
3.5. 本章小结 .....	- 32 -
<b>第4章 Ftire 轮胎模型</b> .....	- 33 -
4.1. 轮胎模型简介 .....	- 33 -
4.2. Ftire 轮胎模型理论基础 .....	- 34 -

4.3. Ftire 模型轮胎试验 .....	- 35 -
4.4. Ftire 轮胎参数辨识 .....	- 37 -
4.5. 本章小结 .....	- 44 -
<b>第 5 章 实车路谱采集 .....</b>	<b>- 45 -</b>
5.1. 确定车型及配置 .....	- 45 -
5.2. 载荷通道确认 .....	- 46 -
5.3. 零部件贴片与标定 .....	- 48 -
5.4. 整车传感器布置与通道测试 .....	- 52 -
5.4.1. 传感器布置 .....	- 52 -
5.4.2. 整车通道测试 .....	- 54 -
5.5. 试验场道路载荷谱采集 .....	- 54 -
5.6. 本章小结 .....	- 58 -
<b>第 6 章 混合系统响应收敛仿真技术及应用 .....</b>	<b>- 59 -</b>
6.1. 混合仿真坐标系系统 .....	- 59 -
6.1.1. 数字化路面的极性 .....	- 59 -
6.1.2. 车辆的极性 .....	- 59 -
6.1.3. HSRC 虚拟测试环境下的极性 .....	- 60 -
6.2. 混合仿真收敛传递函数的获取 (HSRC FRF) .....	- 61 -
6.2.1. 软件设置 .....	- 61 -
6.2.2. Ftire 轮胎传递函数的系统识别 .....	- 63 -
6.3.1. 耦合信号与收敛信号传递函数的系统识别 .....	- 65 -
6.3. 迭代与收敛 .....	- 68 -
6.4. 迭代结果评价 .....	- 72 -
6.4.1. 时域曲线对比 .....	- 72 -
6.4.2. 频域对比 .....	- 73 -
6.4.3. 损伤对比 .....	- 74 -
6.5. 本章小结 .....	- 77 -
<b>第 7 章 全文总结 .....</b>	<b>- 78 -</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>- 79 -</b>



# 第 1 章 绪论

## 1.1. 引言

汽车的耐久性能是评价汽车质量优异的重要标准，其含义是指在规定的使用和维修条件下，当汽车达到某项技术或经济指标极限时，能够完成特定功能的能力。汽车疲劳耐久性开发过程中通常采用实车道路试验、室内台架试验和 CAE 分析三种技术验证手段。其中实车道路试验最接近真实疲劳结果，但周期长，成本高；CAE 分析技术由于受到理论的制约及输入条件的误差影响，其预测精度有限；基于种种限制因素，现阶段的疲劳耐久性能验证已逐渐演变为前期 CAE 分析，后期台架与道路试验共同验证的方法来进行。

当前我国汽车工业面临着快速开发产品的压力，研发进度须紧跟潮流变化还须适应全球不同市场地区路况与驾驶习惯。因而，整车厂与研发机构纷纷试图采用计算机虚拟仿真技术来应对工程难题，但大部分非线性弹性部件难以准确创建模型。本项目所采用的即一种跳过了复杂数学建模过程转而利用远程参数迭代的混合仿真技术，它将 FTire 轮胎模型、整车道路模拟机实车模型与虚拟路面结合起来，为台架耐久试验提供驱动信号并验证轮胎模型精度。

## 1.2. 课题研究背景及意义

当前我国汽车工业面临着快速开发产品的压力，研发进度须紧跟潮流变化还须适应全球不同市场地区路况与驾驶习惯。整车厂与研发机构纷纷试图采用计算机虚拟仿真技术来应对工程难题，但大部分非线性弹性零部件难以准确创建数学模型。本项目所采用的混合系统响应收敛 (Hybrid System Response Convergence, HSRC, 以下简称 HSRC) 迭代技术则是一种跳过了复杂数学建模过程转而利用实车真实物理模型的混合仿真迭代技术，它将整车道路模拟机(Road Test Simulation, RTS)实车模型、FTire 轮胎模型与虚拟路面相结合构建了一个真实-虚拟的混合模型，利用力和位移等物理量作为信号通讯接口可以通过逐步迭代复现试验样车在试验场测试路面中的运动姿态与载荷，为快速开发台架耐久试验驱动信号提供了一种行之有效的技术手段。因此应对客户所急需的，研究建立 FTire 轮胎模型与虚拟试验场技术结合 24 通道道路模拟机建立真实-虚拟的混合模型生成准确的耐久性试验台架驱动信号，可以提升中心在汽车耐久性仿真测试方向的创收能力和行业影响力。

目前 HSRC 技术主要由美国、英国等汽车开发技术手段发达国家所使用，国内尚未有引进该技术之案例。HSRC 技术由 MTS 公司于 2010 年 Vehicle Dynamic Expo 首次提出，经过 Fricke 团队改进的混合仿真技术手段 HSRC 可以摒弃传统混合仿真技术依赖于实时仿真的高硬件需求从而更有效地更快执行耐久测试，并且测试结果与完全虚拟的计算机仿真相比在仿真精度结果上有极大地提高。

目前国内的轴耦合整车道路模拟测试在结构耐久测试领域仍属于新兴时期，众多主机厂纷纷建设自有的轴耦合整车道路模拟试验机，随着客户对设备的使用与技术理解不断加深其对整车道路模拟技术的信赖和获益会逐步提高，势必增加主机厂研发资金对于该领域的投资。但另一方面，随着我国每年诸多新车型与改款开发需求的不断增长，从开发流程的角度来说对每一款车型都进行载荷谱采集这是极为不现实不实际的，因此亟需一款可以对开发中的产品进行快速评估的测试方法，HSRC 会带给客户最重要的两大收益——宝贵的开发时间与早期测试结果。掌握 HSRC 及 FTire 轮胎建模、虚拟试验场等技术无疑将进一步提高我公司在结构耐久性测试领域的技术领先性。

HSRC 技术是一项结合了 FTire 轮胎模型与虚拟试验场数字路面的新兴技术，其技术本质自然地将试验与仿真两大领域的技术特点与优势结合起来。一旦 HSRC 技术得到了普遍范围的认可与应用，必然会提高客户对 FTire 轮胎建模应用的需求，同时该技术也会带动针对盐城试验场已建成虚拟试验场的真实与虚拟路面客户依赖度；道路模拟方面则可为客户提供更多的结构耐久测试方案选项，除已有基于载荷谱采集的传统道路模拟方案以外还可针对设计变更、配置改款等因素导致较难在短时间内完成载荷谱采集的试验车提供基于 HSRC 的道路模拟测试的选项。

### 1.3. 课题相关研究现状

2012 年 MTS 公司首次将 HSRC 技术应用于奥迪 A5 整车产品开发过程中。其研究结论证明 HSRC 是一种精确仿真手段，一旦获取了数字路面与相应的 FTire 轮胎模型其可应用于改款车型开发、无实际道路载荷数据采集、提高虚拟仿真结果精度等全新产品开发技术当中。

自 HSRC 技术诞生以来，国外各大车企均与 MTS 公司展开技术合作。2013 年，捷豹路虎公司开始使用 HSRC 技术，证实该技术可以有效地为其省略耗费大量人力财力的载荷谱采集道路试验过程（通常每台车需耗费 1-2 个月）并且在主动减震器开发调校阶段即可对车身及底盘件展开结构耐久测试，而传统方法需等待减震器调校结束后才能开展数据采集台架驱动文件开发等工作。另外克莱斯勒北美研发中心也致力于结合 3D 拓扑扫描技术为其道路模拟试验室开发完整试验场道路的 HSRC 技术道路模拟测试程序。00

根据 MTS 公司近年的工程经验，HSRC 技术执行的效果主要取决于所建立轮胎模型的精度，因此为测试轮胎建立真实的非线性物理模型也是本项研究当中极为重要的一环。FTire 轮胎模型是目前国际上公认的高精度耐久性仿真轮胎模型，其仿真有效频率可高达 200Hz。作为 HSRC 混合仿真动态收敛试验技术的必要输入条件，FTire 轮胎模型的精度显得尤为重要。目前国内对 FTire 轮胎模型建模研究较少，但国内整车厂对 FTire 轮胎模型应用需求日益增多，有多个企业将耐久性仿真纳入到整车开发体系中，特别是浙江吉利汽车试验部提出希望在 HSRC 技术领域与我中心展开合作，希望中心率先开展此项技术之研究。

## 1.4. 课题主要研究内容

本课题主要研究的是基于 FTire 和 RTS 道路模拟技术的混合仿真迭代收敛技术开发。为了能够在汽车开发早期即开展耐久测试，通过建立实车试验场真实路面的数字模型，结合高精度轮胎模型，通过混合仿真技术为测试样车和道路模拟试验台架生成驱动信号。

### 1) 试验对象车辆 FTire 模型测试和建模技术研究

通过与国内外专家、技术人员交流合作，引入 FTire 轮胎模型识别工具并建立相关轮胎参数化建模的试验能力。通过对国内外 FTire 建模报告考核相应试验能力与建模能力，为 HSRC 确立合适的高精度的轮胎模型。

### 2) 盐城试验场虚拟数字路面的研究

对目标试验场——盐城试验场的 T8 耐久综合路进行 3D 拓扑数字化扫描虚拟试验场的前期科研项目成果进行评估性研究，研究其与 HSRC 技术相关的各项技术性应用接口。

### 3) 试验场道路载荷谱采集

对目标试验样车在盐城试验场目标测试道路上进行载荷谱采集，采集期间除记录目标载荷数据外应准确记录车辆行驶路线与车速以保证其在 HSRC 混合仿真中所应用一致。

### 4) 引入混合仿真动态收敛工具与技术

通过与国内外专家、HSRC 开发人员合作，引入 HSRC 混合仿真工具并且将 HSRC 测试环境下的整车道路模拟试验机、FTire 轮胎模型与虚拟路面三者结合起来，测试

系统有效性为后续仿真做好技术准备。

### 5) 为 24 通道整车道路模拟测试构建混合仿真动态收敛输入信号

在整车道路模拟试验机上对试验样车进行 HSRC 混合仿真动态收敛驱动文件开发，通过对试验样车轮胎进行驾驶方式与路线的控制以及同步激励台架试验样车建立台架与虚拟模型间的传递函数，从而逐步完成试验样车在虚拟路面之中的驱动文件开发过程。

### 6) 比对混合仿真动态收敛试验技术的试验精度

在保证载荷精度的前提下，通过伪损伤、穿级计数、雨流计数等技术方法评估驱动文件开发结果与质量，对比相同路面下载荷谱采集与应用混合仿真动态收敛技术所获取的车辆载荷在时域与频域上的一致性。

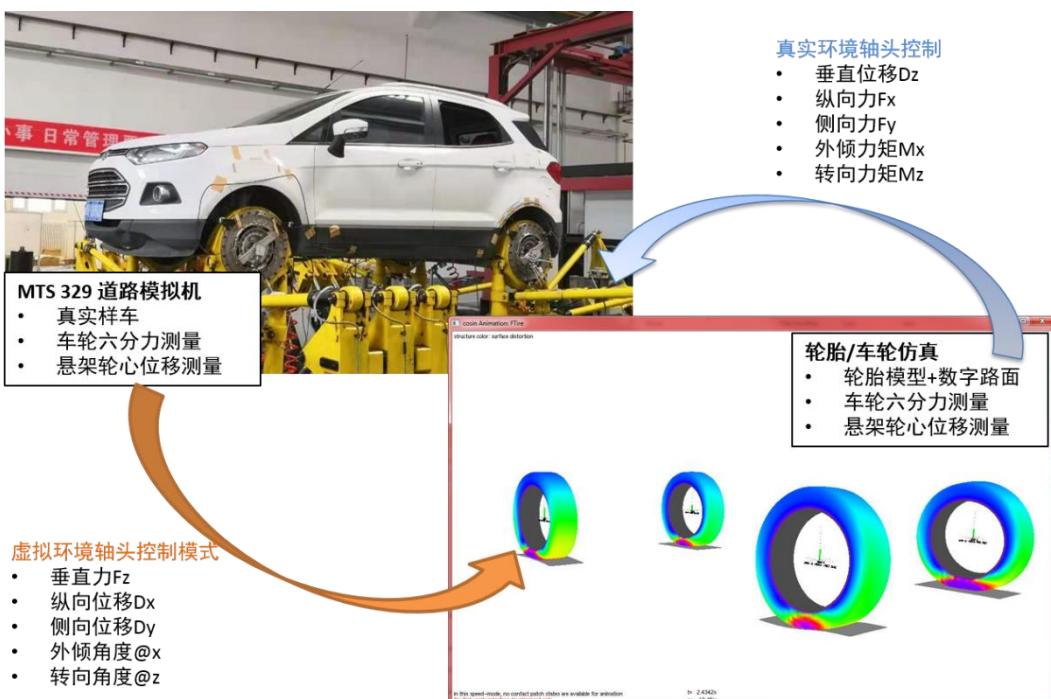


图 1.1 混合系统响应收敛仿真原理图

## 第2章 混合系统响应收敛仿真理论基础

2010年，美国美特斯工业系统有限公司开发了一种用于耐久性测试应用的混合仿真方法——混合系统响应收敛（Hybrid System Response Convergence, HSRC）仿真技术。它可以实现多自由系统物理和虚拟系统相互耦合的运动模拟。该技术需要系统的各物理和虚拟部件按顺序执行而非同时执行，从根本上避免了对实时仿真的硬件要求。

### 2.1. 混合系统响应收敛仿真理论

#### 2.1.1. 概述

HSRC 算法是一种利用混合传递函数将系统的物理和虚拟模型的 20 个控制通道均收敛到合理区间的兼容性解决方案。在 HSRC 中轮胎与路试车辆所经历的工况和车速相一致的情况下行驶在相应的虚拟数字路面上。对于本次科研项目，我们最终将使用 HSRC 得到的解与使用相同车辆测量的道路数据进行了数据分析和对比。

如图 2.1 所示，在典型的混合系统响应收敛仿真中，一个完整的混合动力仿真系统包括一台完整的车辆与一套虚拟轮胎。其中整车和悬架安装在 MTS 329 道路模拟机上从而组成真实物理系统，而虚拟车轮部件则使用了四个相同的 FTire 轮胎模型。

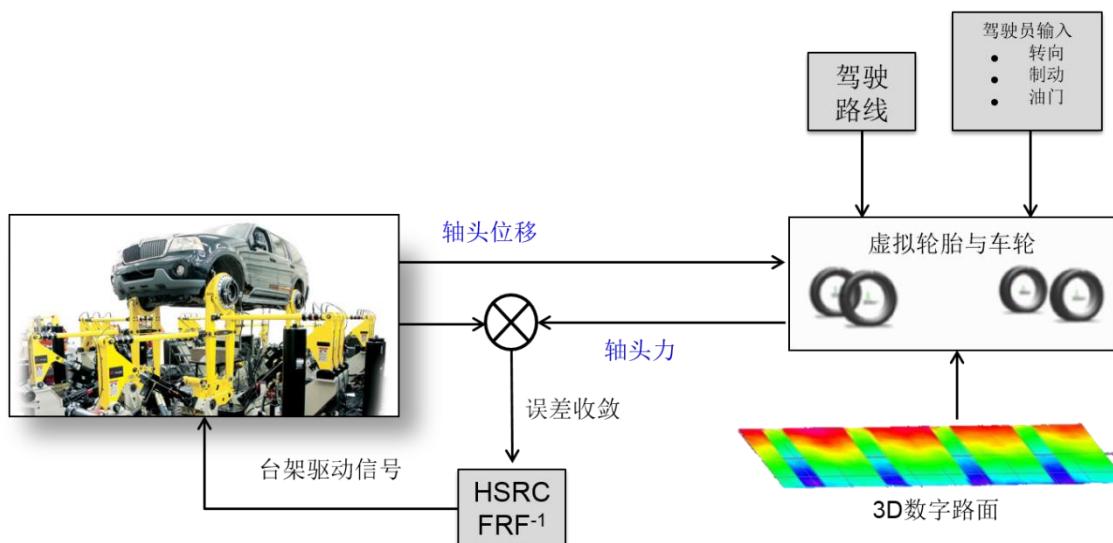


图 2.1 混合系统响应收敛仿真理论框图

混合仿真需要物理系统和虚拟系统之间的力和运动姿态最终相匹配。HSRC 通过保持其中一个物理量（力或运动）相同并求解使另一个物理量也相同的驱动文件来解

决非实时混合仿真问题。这意味着有三个关键信号：

- **耦合信号**: 对于每次迭代, 此信号都从物理模型的真实响应所获取得到, 并作为约束条件直接作用于虚拟环境之中。它可以是力或运动姿态, 但无论选择何种耦合信号, 都应选择余下的那个信号作为收敛信号, 本项目中采用加速度传感器所计算得到的车轮轴头运动姿态信号作为耦合信号;
- **物理收敛信号**: 从 MTS 329 道路模拟机(分别来自车轮力传感器或 LVDT 位移/加速度传感器)采集的真实力或运动, 本项目中采用车轮六分力传感器的信号作为收敛信号。
- **虚拟收敛信号**: 虚拟轮胎与数字道路仿真中记录的运动或力。

如表 1 所示, 每个 HSRC 的混合仿真交互平面均被定义了不同的控制模式和不同的耦合与收敛物理量:

表 2.1 HSRC 浮动车身式仿真的控制模式

编 号	控制通道	虚拟环境控制模式 (耦合信号)	真实物理台架控制模 式(物理收敛信号)
1	左前轴头纵向(x)	位移	力
2	左前轴头侧向(y)	位移	力
3	左前轴头垂向(z)	力	位移
4	左前轴头外倾(@x)	角度	力矩
5	左前轴头转向(@z)	角度	力矩
6	右前轴头纵向(x)	位移	力
7	右前轴头侧向(y)	位移	力
8	右前轴头垂向(z)	力	位移
9	右前轴头外倾(@x)	角度	力矩
10	右前轴头转向(@z)	角度	力矩
11	左后轴头纵向(x)	位移	力
12	左后轴头侧向(y)	位移	力
13	左后轴头垂向(z)	力	位移
14	左后轴头外倾(@x)	角度	力矩
15	左后轴头转向(@z)	角度	力矩
16	右后轴头纵向(x)	位移	力
17	右后轴头侧向(y)	位移	力
18	右后轴头垂向(z)	力	位移
19	右后轴头外倾(@x)	角度	力矩
20	右后轴头转向(@z)	角度	力矩

## 2.1.2. 混合仿真传递函数

HSRC 算法的核心即获取混合仿真传递函数 (HSRC FRF)。HSRC 传递函数描述了物理系统和虚拟系统之间的数学模型关系，因此它包含了轮胎模型传递函数、耦合信号传递函数和收敛信号传递函数。如图 2.2 所示，以左前轮纵向力  $F_x$  为例，HSRC 传递函数的获取过程首先需要获得描述轮胎模型数学关系的轮胎模型传递函数 (DWT FRF, Disembodied Wheels and Tires, 脱离车身的车轮和轮胎模型传递函数)。根据定义好的耦合信号控制模式生成白噪声驱动文件，将驱动文件导入虚拟环境中利用 Adams 和 FTire 软件的求解器获取单轮轮胎模型的响应信号，并通过后处理生成单轮胎模型传递函数。由于本项目中四个车轮采用相同的轮胎型号，因此完整的轮胎模型包含四个相同的单轮胎模型传递函数。

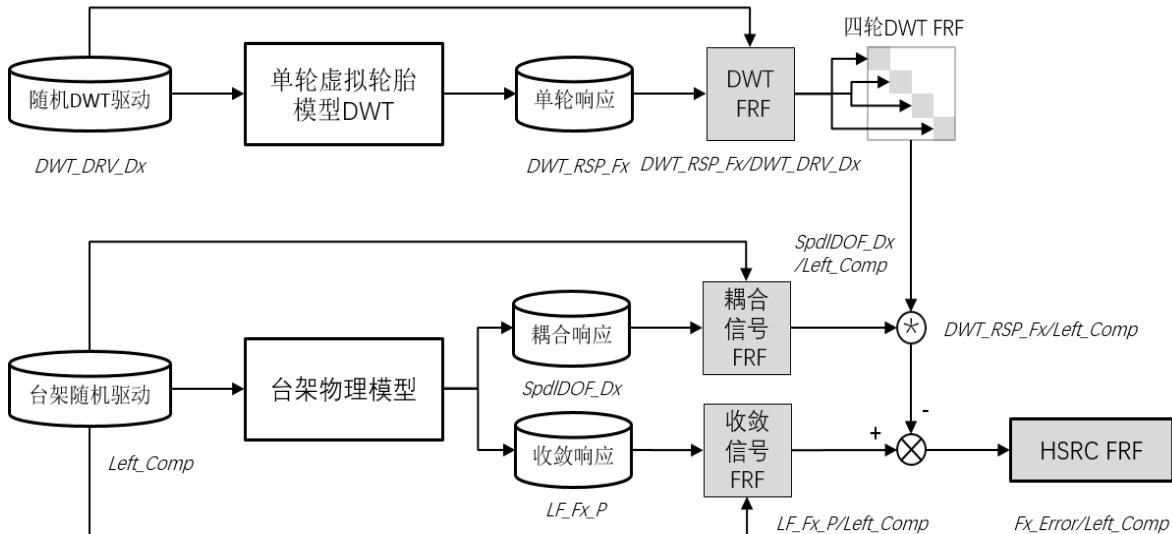


图 2.2 混合系统响应收敛传递函数的获取流程图

随后与传统的道路模拟台架迭代方法相同，为台架物理模型生成随机驱动信号并加载至物理样车获取轮心的车轮力信号作为收敛相应信号，并将车轮轮心采集得到的加速度矩阵信号和作动器位移信号转换成运动姿态位移信号作为耦合响应信号。对耦合响应和收敛响应分别求取传递函数得到耦合信号传递函数和收敛信号传递函数。在耦合交互平面上，由于后期运算会将台架的真实耦合响应运动直接加载到轮胎当中，因此将物理系统的耦合信号传递函数与车轮的轮胎模型传递函数进行矩阵乘法运算时车轮运动姿态可以与台架响应运动相抵消，从而得到台架驱动信号与虚拟轮胎力之间的传递函数。进而再与之前得到的物理载荷收敛信号传递函数相比较得到车轮力的载荷误差，从而得到整个系统的驱动信号与两个系统间车轮力误差之间的传递函数作为混合仿真传递函数。

### 2.1.3. 混合仿真迭代收敛算法

当获得混合仿真传递函数后即可开始对特定虚拟数字路面下道路模拟机的驱动文件开发。首先为了生成驱动文件，需要计算混合仿真传递函数的反函数(HSRC  $H^{-1}$ )。如图 2.3 所示，以下以左前轮纵向为例说明混合仿真迭代收敛算法的处理流程。在首次生成驱动文件时，应选择所需的数字路面文件、车辆参数和 FTire 轮胎模型。随后由于耦合信号台架混合仿真交互平面位移为零，故轮胎模型按照车辆的垂直静载和纵向侧向以无位移的约束下在虚拟环境中运行并求取第一次的虚拟环境收敛信号 LF\_Fx\_V。同时由于台架此时并运行获得真实的收敛信号，故此时的 LF\_Fx\_P 信号为零，从而两个环境间的误差即可与混合仿真传递函数反函数相乘获得第一次的台架驱动 Left\_Comp\_DRV\_0。

此后的运算过程与传统迭代过程非常相似。真实物理环境中的台架与样车运行第一次的驱动文件后即可得到相应的耦合位移信号 LF\_SpdDOF\_Dx 与收敛力信号 LF\_Fx\_P。将耦合位移信号加载至虚拟环境中，等待 2-3 分钟后即可再次获得轮胎力的收敛信号 LF\_Fx\_V，随即真实与虚拟环境间有了第一次的载荷误差。如同首次的计算，使用混合仿真传递函数反函数即生成新一次的台架驱动 Left\_Comp\_DRV\_1。如此反复迭代，HSRC 迭代算法通过混合仿真传递函数反函数生成“妥协”的驱动文件以不断地控制与缩小真实与虚拟环境间的误差，最终将生成一个在给定限定条件下即符合真实物理环境又符合虚拟环境的唯一台架驱动文件。

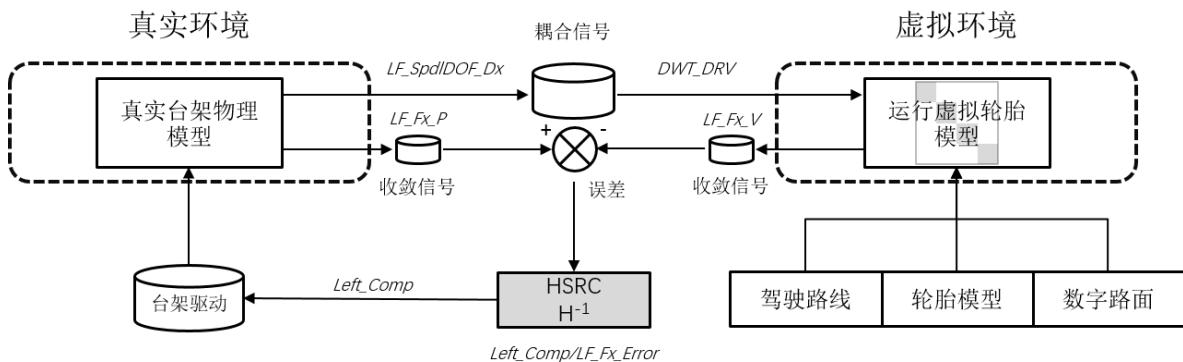


图 2.3 混合系统响应收敛仿真理论框图

## 2.2. 混合仿真交互平面

### 2.2.1. 混合仿真交互平面

混合仿真交互平面指的是混合仿真系统中的一个耦合交互点，HSRC 算法在这个

点上使虚拟仿真系统与真实世界中的台架和样车物理系统中的运动和力相匹配。对于 MTS 329 型道路模拟机，通常选择车轮六分力力传感器（Wheel Force Transducer）的几何中心平面作为混合仿真交互平面。

混合仿真交互平面的偏置是指道路模拟机参考平面到混合仿真交互平面的横向距离。在 MTS 329 型道路模拟机上，测量中心是轴头支座的中心。如果选择了车轮六分力力传感器的几何中心平面作为混合仿真交互平面，则混合仿真交互平面偏置即为从轴头支座的中心到车轮六分力力传感器中心的横向距离。如图 2.4 所示，一般来说偏置值是轴头支座厚度的一半、轮毂适配器厚度和车轮六分力力传感器厚度一半相加的和。

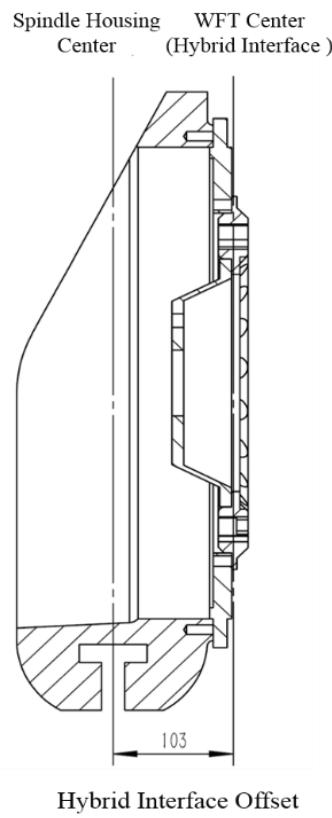


图 2.4 轮毂安装点轴头支座剖面图即混合仿真交互平面与其偏置

### 2.2.2. 三轴加速度传感器布置

HSRC 混合仿真中的一个关键即解算混合仿真交互平面的运动姿态。在真实的台架物理模型系统中，仿真交互平面的运动姿态是通过线性可变差动变压位移传感器（Linear Variable Differential Transformer, LVDT）和加速度传感器一并测量并解算的。

#### 2.2.2.1. 低频运动

混合仿真交互平面在 0-3Hz 的低频运动中，其运动姿态通过作动器中的 LVDT 位

移传感器测量得出。对于 MTS 329 六自由度道路模拟机来说其配备的作动器 LVDT 位移传感器即可满足测量混合仿真交互平面上所有六个自由度的运动。混合仿真交互平面的六自由度运动姿态是通过对 MTS 329 多体模型中作动器的线性位移建立多项式拟合解算得到的。在测试前，需要将该多项式输入 MTS 控制软件中，以有效地计算混合仿真交互平面的运动姿态。

### 2.2.2.2. 高频运动

混合仿真交互平面在 3Hz 以上的高频运动中，其运动姿态通过加速度传感器阵列获得。加速度传感器安装在轴头支座的外侧，以相等的间隔排列以测量所有六个自由度。在 RPC 软件中每个加速度传感器信号都参与计算以转换为六自由度运动。要测量所有六个自由度，每个车轮至少需要六个单轴加速度传感器，或者使用九个单轴加速度传感器以提高加速度信号的保真度。因此，如图 2.5 和图 2.6 所示，对于浮动人车身式的整车 HSRC 试验，总共需要 24 个单轴加速度传感器或 12 个三轴加速度传感器。

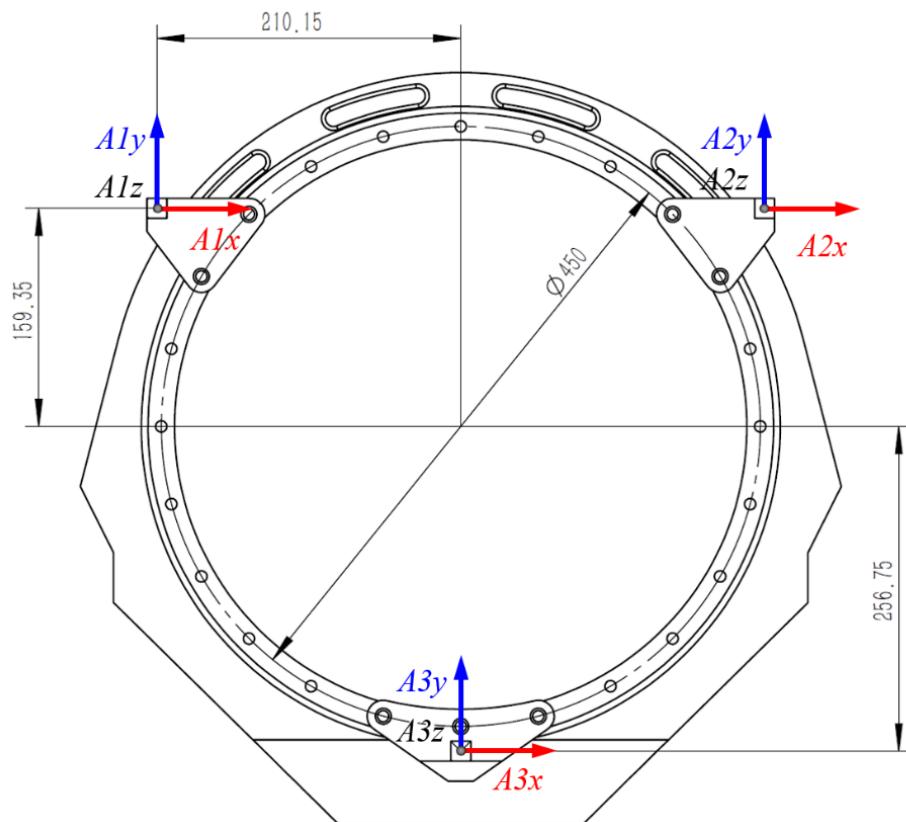


图 2.5 安装在轴头支座三个位置的 9 通道三向加速度传感器

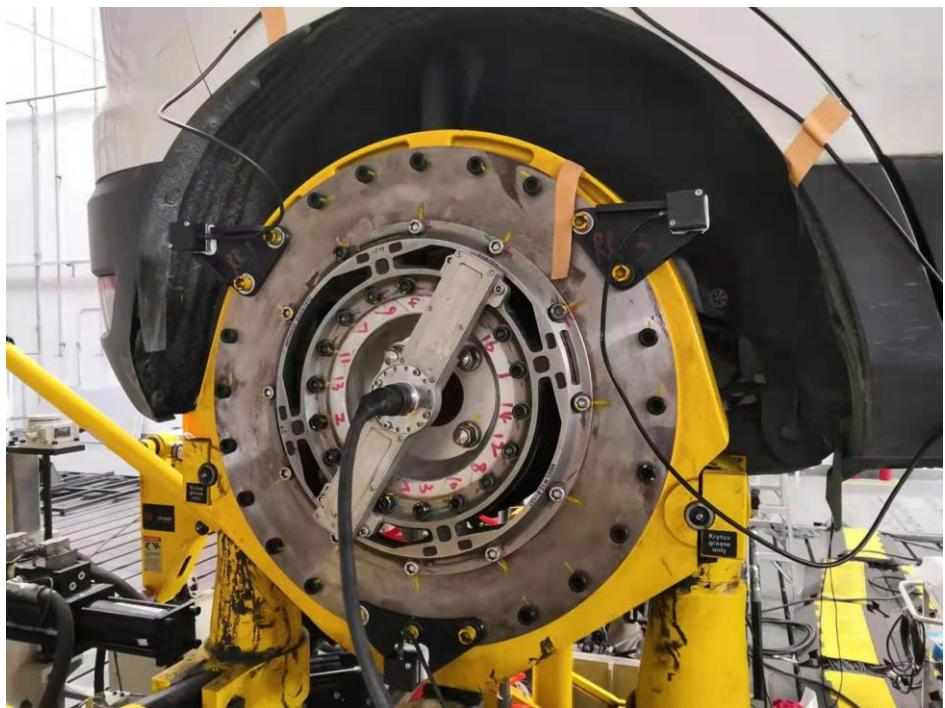


图 2.6 安装在台架轴头支座上的三个三向加速度传感器组成的阵列

### 2.3. 本章小结

本章内容首先介绍了混合系统响应收敛仿真理论的基本框图，随后介绍了物理系统中混合仿真交互平面的概念，引出了在道路模拟试验机中力作为收敛信号位移作为耦合信号的重要概念。随后通过推导 FTire 轮胎模型传递函数、耦合信号传递函数和收敛信号传递函数介绍了 HSRC 算法中最重要的混合仿真传递函数的定义。通过混合仿真传递函数的反函数，混合仿真迭代收敛算法可以通过计算物理与虚拟系统间的误差生成台架的驱动信号，随后不断地迭代生成唯一符合两者环境的驱动信号。

## 第3章 路面模型

试验场试验是汽车性能验收的最终阶段，其中，疲劳耐久性能的验证是让试验车辆按照指定车速与行驶路线在耐久工况路面中行驶，并以车辆的损坏情况来判断。疲劳是由振动产生的交变应力产生的，而汽车振动的根本来源于路面，因此，路面激励的输入是开展 HSRC 技术研究的重要一环。

### 3.1. 盐城试验场简介

本项目中所运用的虚拟数字路面原型来源于中汽中心盐城汽车试验场有限公司，如图 3.1 所示。盐城试验场于 2011 年 12 月 31 日开始动工建设，至 2015 年末部分建成并投入运行，项目总投资超过 10 亿元。盐城试验场由国际知名设计公司整体规划设计，试验道路总长超过 60 公里，主要道路设施的设计充分考虑了乘用车和商用车兼顾的使用需求，能够满足所有类型车辆的法规试验测试，场地和技术指标均处于国内领先、国际一流水平。



图 3.1 盐城试验场总体布局

盐城试验场致力于成为国内汽车工程技术开发、产品优化升级和创新的基地，是国内路况种类最为齐全的汽车试验场。此外，试验场除了具备完善的道路设施外，还设置了的相关配套设施，比如：集办公会议和客户接待于一体的办公楼、可容纳 500 人住宿的宾馆、大型加油站、大型快速充电站、大型加载车间和称重台、全自动洗车机、监控塔以及场地内客户休息区、公共检修车间、客户保密停车库、VIP 客户试验准备车间以及各类试验室等，能够为客户提供全方位的服务。

为满足车辆不同的性能验证需求，试验场工况按区域进行划分。盐城试验场道路工况除连接路外共分为 12 种，包括：直线性能路、外部噪声路、直线制动路、动态广场、舒适性路、高速环道、强化耐久、坡道路、干操控路、湿圆环、湿操控路、耐久路，如图 3.2 所示。

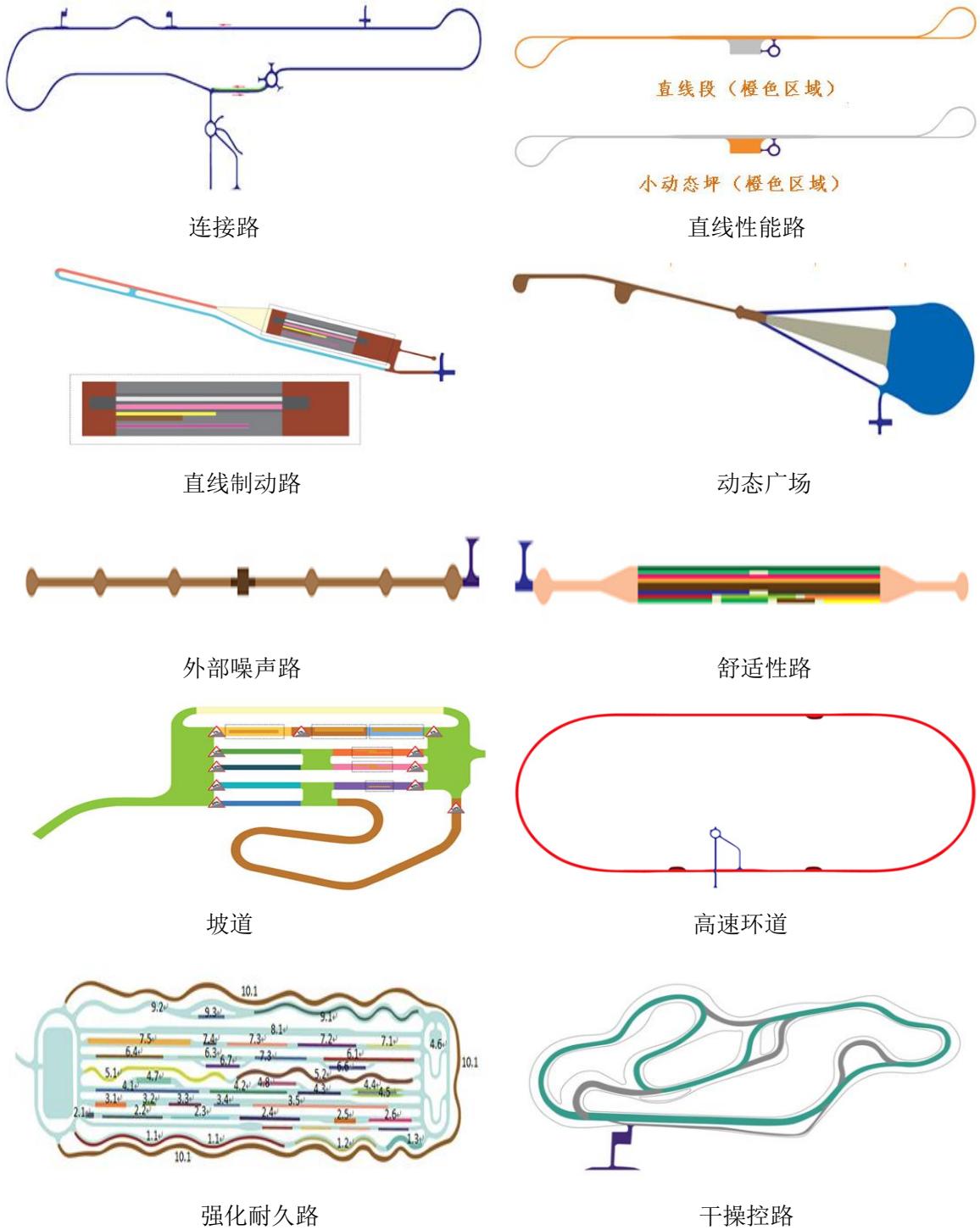


图 3.2 盐城试验场部分道路设施路线简图

### 3.2. T8 强化耐久路段

T8 强化耐久道路是本次项目中主要考查与应用的工况，路面布局如图 3.2 所示。其中，T8 道路共分为 10 条车道，1 至 4 号车道由北向南行驶，6 至 9 号车道由南向北行驶，5 号车道双向行驶，10 号车道逆时针行驶。全部道路共分为 42 种工况，如比利时路、卵石路、搓板路、振动路、波形路、井盖路等，符合汽车耐久开发过程中的高、低频和大、小幅值的使用需求，T8 路面详细清单参见表 3.1。

表 3.1 盐城试验场 T8 强化耐久路面清单

序号	车道	名称	长度 (m)	备注
1	第一车道	比利时路	500	
2		沥青补丁路	200	
3		拱形车道	90	
4	第二车道	铁道路口	20	
5		振动路III	140	
6		圆形坑洼路	135	
7		短波形路	140	
8		路缘冲击路	50	
9		30°角障碍路	100	
10		气囊试验车道	800	二号支路-多条组合
11		扭曲路	72	
12	第三车道	颠簸路	30	
13		沟渠路	75	
14		特殊坑洼路-26 寸坑洞	60	
15		均匀变化波浪路	315	
16		振动路 I	240	
17	第四车道	混凝土板块冲击路	180	
18		鱼鳞路	100	
19		倾斜车道	130	
20		损坏的混凝土路	90	
21		支路：住宅入口路	20	四号支路
22		支路：盐水池路段	150	
23		支路：盐雾路段	150	
24		支路：泥浆池路段	150	
25	第五车道	砾石路	340	
26		沙石路	420	
27	第六车道	比利时路段	220	
28		溅水路段	120	
29		振动路（类型 2）	150	
30		长波路段	156	

31		涉水池 (0.5)	150	六号支路
32		涉水池 (1.0)	150	
33	第七车道	绳索路段	100	
34		井盖路段	135	
35		锯齿路	140	
36		坡道与正弦“波浪障碍物”组合	30	
37		鹅软石路	240	S 弯
38		中性道路	800	
39	第九车道	不规则的混凝土路	400	
40		中性道路	400	九号支路
41		溅水路段 2	80	
42	第十车道	沙尘路	2080	森林路

### 3.3. 路面建模

盐城试验场 T8 路面种类繁多，功能齐全，但并不是所有路面均能够有效构建虚拟路面。当汽车在砂石路或森林路上行驶后，由于路面沙石的松动会造成路面构型的变动，因此无法用一种虚拟路面描述路面特征；此外，诸如盐雾池、泥浆池、涉水路面等主要用于耐腐蚀性考查与减震器降温，对于疲劳耐久仿真并无实际意义。因此，在实际项目开展过程中，我们仅关注可有效用于仿真分析的耐久路面特征，并运用不同的技术手段创建虚拟数字路面。

#### 3.3.1. 规则路面建模

规则路面在此处定义为 T8 强化耐久路中路面各个特征形状比较规则，在道路建设过程中针对各个路面特征均具有准确的尺寸约束，道路建成后仍可以准确测量各个特征参数的路面。如振动路、坑洼路、鱼鳞坑路、波形路等。规则路面建模充分参考道路设计图纸，由道路图纸创建路面三维数模，再将数模导入有限元软件中进行三角网格划分并导出节点与三角单元信息，最后将节点与三角单元信息进行提取并增加路面摩擦系数从而生成 RDF 文件。

RDF 文件是基于 ADAMS 软件的三维等效容积路面。三维等效容积路面是由多个空间三角平面相互连接组成的，其主要参数包括路面节点编号及数量，节点坐标，构成每个三角平面的节点序号及点集，路面的动、静摩擦系数，如图 3.3 所示。

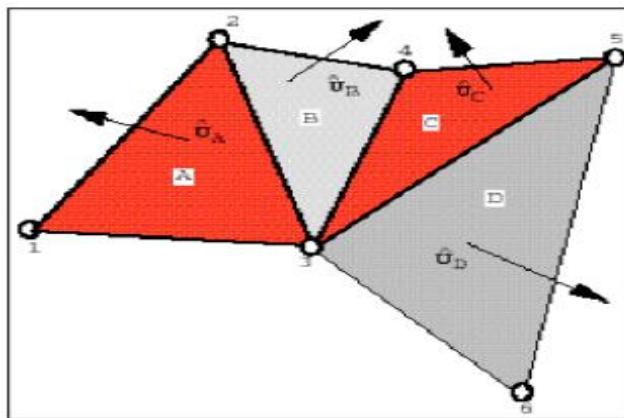


图 3.3 三维等效容积路面

以圆形坑洼路为例，如图 3.4 所示，以下将详细介绍规则路面建模过程。



图 3.4 T8 圆形坑洼路段

路面设计图纸详细规定了路面中每一个圆形坑的位置与尺寸，因此仅需借助三维绘图软件进行绘制即可得到该路面的三维数模，如图 3.5 所示。

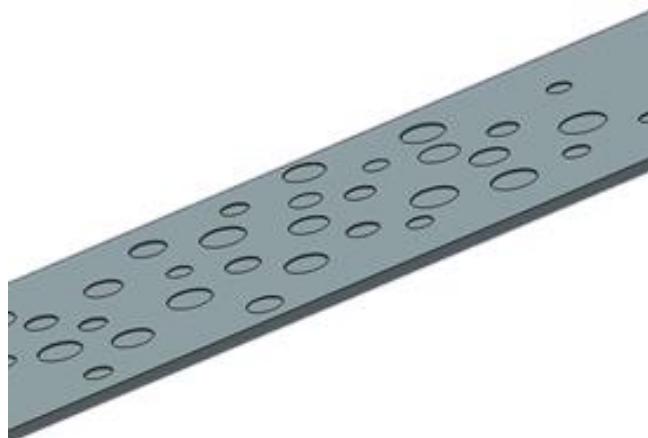


图 3.5 圆形坑洼路段数模

将数模导入有限元软件中，如 Hypermesh、ANSY 等，对数模进行抽壳与三角网格划分，正确定义坐标起始点并重新编排节点号，导出 inp 节点信息文件，如图 3.6 所示。

```
**
**ANSA_VERSION:16.1.0;
**
**
** file created by A N S A Mon Jul 18 08:50:56 2016
**
** output from :
**
** D:/Ge_xukun/PG in Yancheng/5.1.12_PG_road2_yuanxingkengwalu/5.1.12_yuanxingkengwalu_assemble2.CATProduct
** gwalu_assemble2.CATProduct
**
*HEADING
**
**
**
*NODE
    1,           0.,      -1851.8518518518517,          0.
    2,           0.,      -2000.,                  0.
    3,          150.,      -2000.,                  0.
    4,     97.54460334456039, -1897.7833924230513,          0.
    5, 299.9999999999994,      -2000.,                  0.
    6, 110.21520262769485, -1777.037186910613,          0.
    7,           0.,      -1703.7037037037037,          0.
    8, 227.5078140951075, -1860.027923352793,          0.
    9,           0.,      -1555.555555555555,          0.
   10, 115.00796652412171, -1637.4674848076702,          0.
   11, 449.9999999999983,      -2000.,                  0.
   12, 381.1374363173597, -1875.5807871802963,          0.
   13, 221.19042481124367, -1711.5235977406312,          0.
```

图 3.6 导出路面节点信息

提取节点坐标与三角单元信息，可直接在 inp 文件中通过去除逗号并添加行的方式生成 RDF 路面文件，如图 3.7 所示。

```
$-----[MDI_HEADER]-----$-----[MDI_HEADER]
FILE_TYPE = 'rdf'
FILE_VERSION = 5.00
FILE_FORMAT = 'ASCII'
(COMMENTS)
(comment_string)
'flat 3d contact road for testing purposes'
$-----[UNITS]-----$-----[units]
[UNITS]
LENGTH      = 'mm'
FORCE        = 'newton'
ANGLE        = 'radians'
MASS         = 'kg'
TIME         = 'sec'
$-----[MODEL]-----$-----[definition]
[MODEL]
METHOD      = '3D'
FUNCTION_NAME = 'ARC904'
$-----[OFFSET]-----$-----[offset]
[OFFSET]
X           = 0.0
Y           = 0.0
Z           = 0.0
$-----[NODES]-----$-----[nodes]
[NODES]
NUMBER_OF_NODES = 98025
{ node  x_value  y_value  z_value }
  1 -1000.0    1851.8518518518  0.0
  2 -1000.0    2000.0        0.0
```

图 3.7 生成 RDF 文件

最后，将路面导入 ADAMS 软件中，加载整车道路仿真，仿真结束后查看是否能够正常输出数据，并检查路面在软件中的显示效果。

### 3.3.2. 随机路面建模

相对规则路面而言，随机路面是指 T8 强化耐久路中路面中的每一个特征无法准确测量，且道路在施工过程中只给出特征的尺寸与高程范围，无详细的形状与尺寸说明，如比利时路、卵石路、不规则混凝土路。随机路面建模无法参考现有图纸对路面进行绘制，现阶段的技术手段是采用激光扫描的方式对路面各点的高程信息进行扫描，从而得到路面表层的点云数据，通过对点云数据的特殊处理得到可用于多体动力学软件仿真的数字化路面，格式为 CRG。

以比利时路为例，如图 3.8 所示，以下将详细介绍随机路面建模过程。



图 3.8 比利时路段

扫描设备属于车载三维激光扫描仪，是由激光传感器、数码相机、GPS 天线等部分组成，如图 3.9 所示。在路面扫描过程中，驾驶员以 5km/h 的车速低速行驶，不间断的获取车辆经过的每一段路面的点云数据。



图 3.9 车载激光扫描仪

在本项目中使用的激光扫描仪包含左右两个激光传感器。两个传感器共用同一组 GPS 信号，从而使各自扫描的信号可以用相同的坐标系叠加在一起，从而提高路面特征的参数获取精度，如图 3.10 所示。



图 3.10 激光扫描点云数据

经过对点云数据的插值、提取与网格划分，最终输出 CRG (Curved Regular Grid) 格式文件。CRG 格式通过指定一条路面的中心线和由离散矩形节点组成的栅格的高程信息来定义路面，如图 3.11 所示，各矩形的节点在路面横向方向的间距值可以任意定义，从而能够灵活的描述各种路面，生成原理如图 3.12 所示。

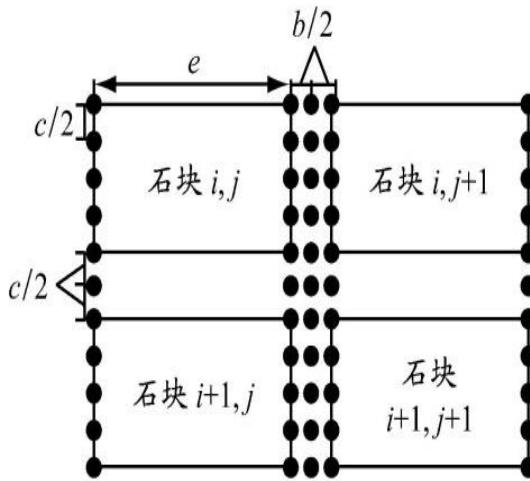


图 3.11 CRG 路面节点分布简图

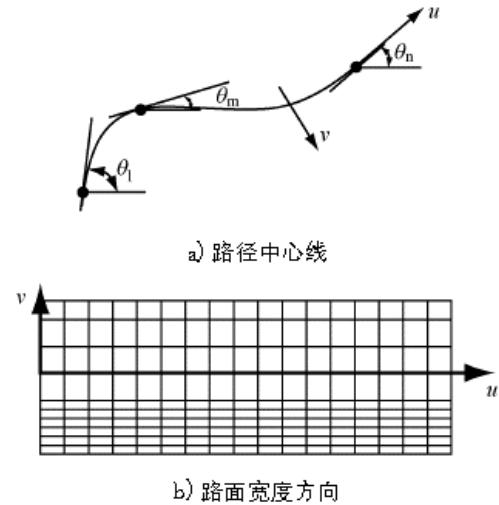


图 3.12 CRG 路面原理简图

CRG 文件非常利于激光数据的保存，其二进制保存数据的方式能够有效降低数据量，便于在实际仿真过程中随取随用，大大提高了仿真效率。

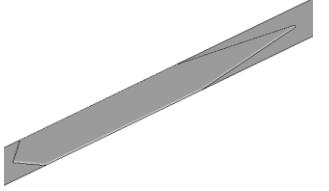
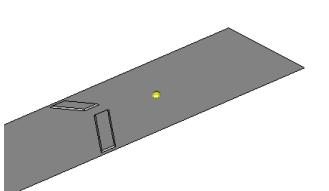
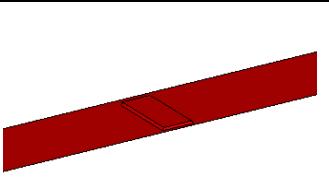
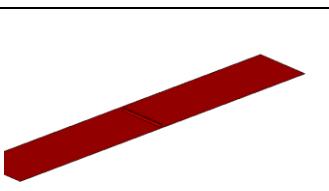
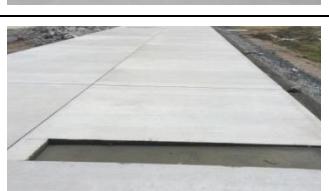
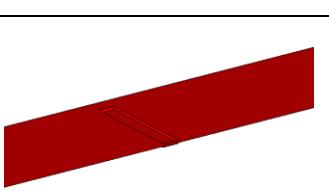
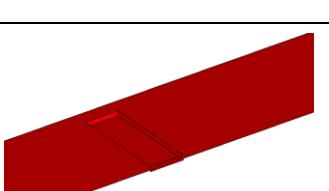
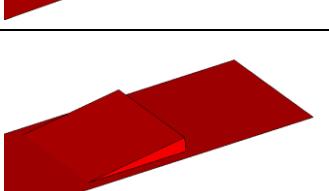
### 3.3.3. 路面建模成果

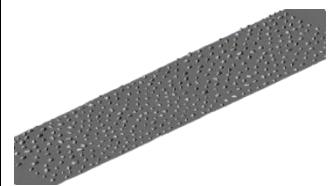
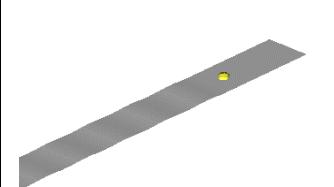
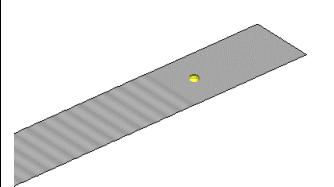
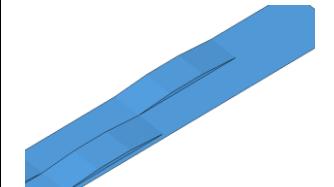
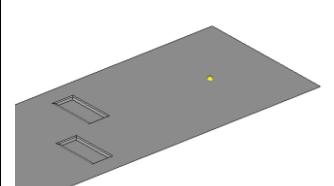
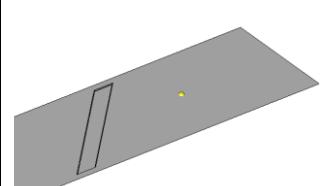
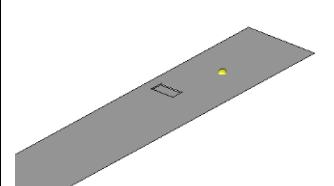
经过对盐城试验场 T8 强化耐久路面的调研与分类，运用两种技术手段对构建虚拟试验场所需路面分别进行了创建。路面建模过程中剔除了砂石路、森林路无法用一

种状态描述的变化路段，以及涉水池、盐雾池、中性路等非疲劳耐久仿真考察路段，最终得到的路面工况共 39 种，如表 3.2 所示。

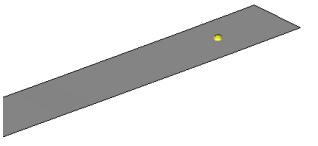
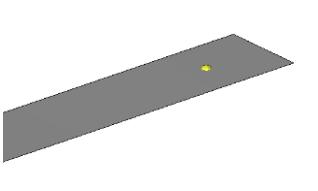
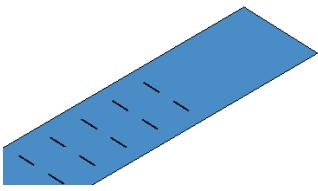
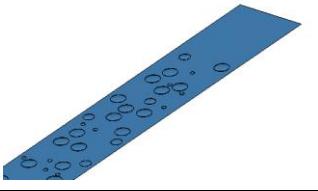
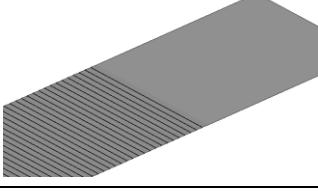
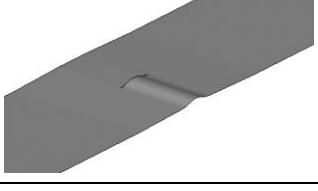
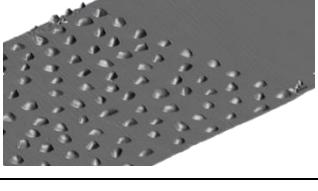
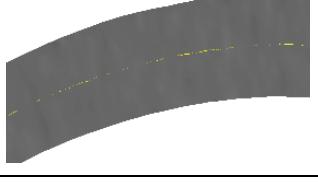
表 3.2 盐城虚拟路面建模清单

序号	所属车道	路段名称	路段长度	实地显示效果	虚拟路面效果
1	第一车道	比利时路 1	500		
2		混凝土补丁路	200		
3		拱形车道	90		
4	第二车道	铁道交叉路段	20		
5		振动路 3	140		
6		圆形坑洼路	135		
7		短波路	140		

8	第二车道 支路	路缘冲击路	50		
9		30°角障碍路	97		
10		路缘石路	17		
11		木制横梁路	16		
12		沟槽路 1	16		
13		沟槽路 2	14		
14		边坡路	10		
15		比利时路 3	70		

16	第三车道	卵石路 2	70		
17		正弦波路	70		
18		搓衣板路	70		
19		大扭曲路	72		
20		小扭曲路	72		
21		颠簸路	35		
22		沟渠路	76.5		
23		26寸坑洼路	70		

24		均匀/变化 波浪路	252.5		
25	第四车道	振动路 1	240		
26		混凝土板 块冲击路	180		
27		鱼鳞坑路	100		
28		破损混凝 土路段	90		
29		比利时路 2	220		
30	第六车道	溅水路	120		
31		振动路 2	150		

32		长波路	156		
33		溅水池路	80		
34		绳索路	100		
35	第七车道	井盖路	135		
36		锯齿路	140		
37		正弦坡路	30		
38		卵石路 1	240		
39		不规则混凝土路	400		

### 3.4. HSRC 项目道路数据选取

HSRC 项目中需要调用虚拟路面数据仿真作为轮心力输入。为保证混合仿真技术的充分验证，同时，考虑试验室台架资源的合理利用，所选择的路面数据需实现由低频至高频，低幅值至高幅值的全面覆盖。此外，由于整车道路模拟试验台不能有效模拟转向道路工况，因此，强化耐久路段中的弯路不在本次研究范围之内。

本项目以选定试验车的盐城路谱采集数据为基础，对比轮心通道在不同道路工况的力值反馈，初步选定的六条具有代表性的路面分别为：搓板路、锯齿路、颠簸路、比利时路、卵石路、波形路，如图 3.13 所示。



(1) 搓板路



(2) 锯齿路



(3) 比利时路



(4) 颠簸路



(5) 卵石路



(6) 波形路

图 3.13 选定的六种路面结构特征

分别对以上四种路面的路谱采集信号进行轮心力时域与频域分析，包括时域内四轮轮心Z向力（4个通道）的幅值分析与频域内所有四轮所有轮心力（12通道）的响应范围分析，如下：

### （1）搓板路

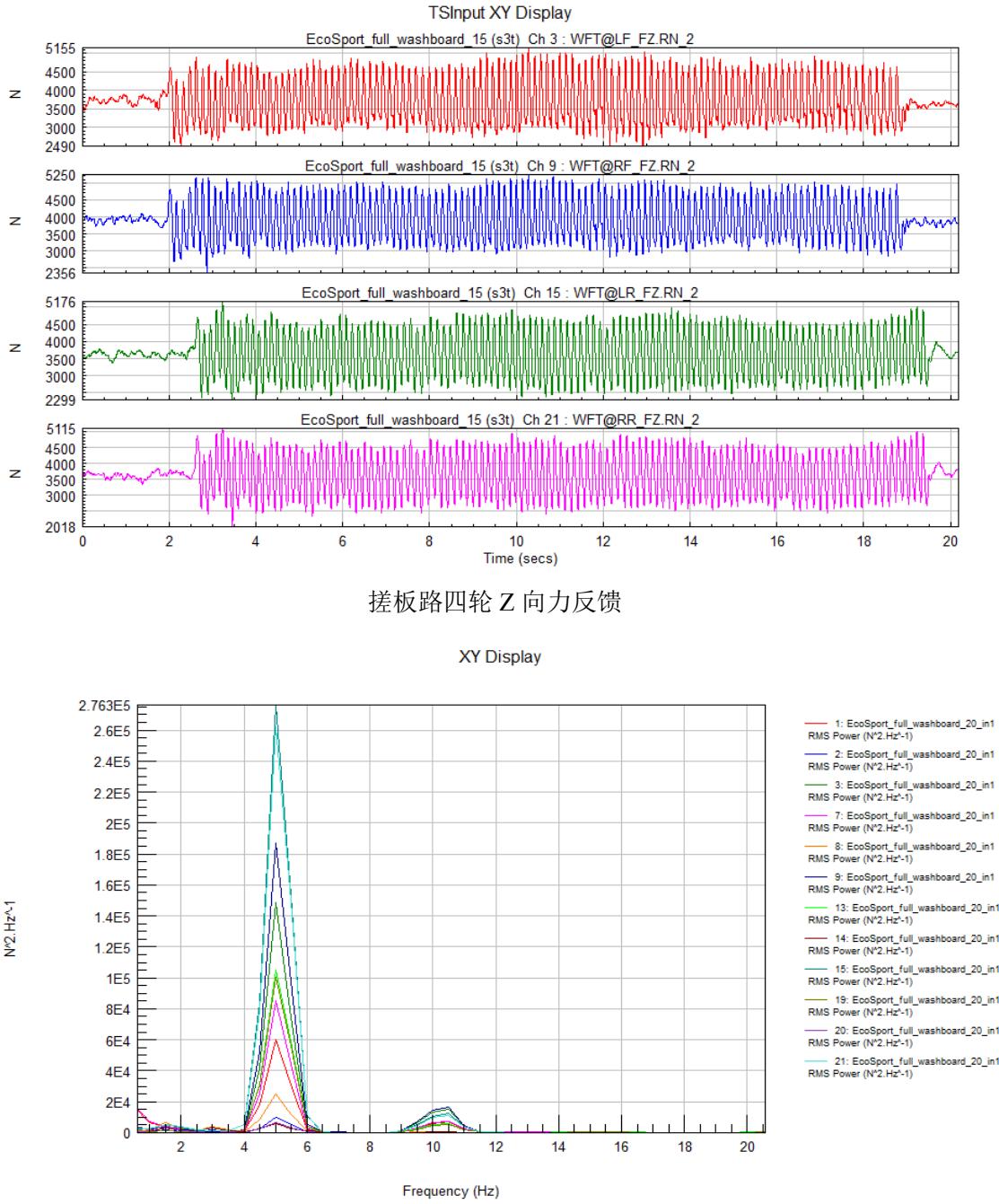


图 3.14 搓板路路谱采集信号分析结果

该车型在搓板路按规定车速行驶时，轮心垂向力的响应最大为 5250N，最低为 2018N，单轮幅值最高分别为 2665N、2894N、2877N、3097N，平均值 2883.25N；轮

心力的频域响应范围较窄，主要集中在 20Hz 内，共振频率分别为 5Hz 与 10.5Hz。以上结果表明，搓板路的结构属于低幅值低频响应类型的路面。

## (2) 锯齿路

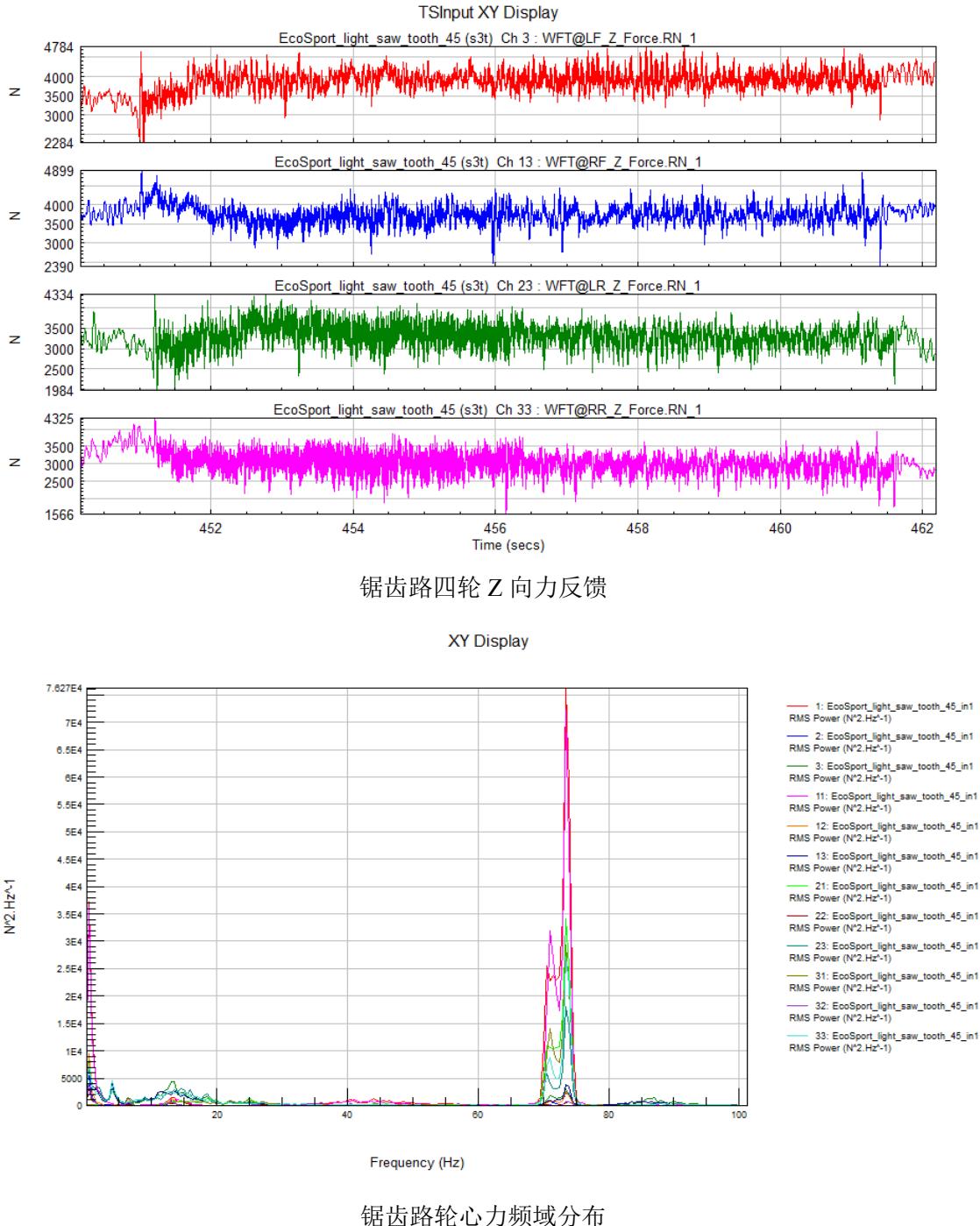


图 3.15 锯齿路路谱采集信号分析结果

该车型在锯齿路按规定车速行驶时，轮心垂向力的响应最大为 4899N，最低为 1566N，单轮幅值最高分别为 2500N、2509N、2350N、2759N，平均值 2529.5N；轮心力的频域响应范围主要集中在 100Hz 内，共振频率分别为 0.5Hz 与 73.5Hz（能量集

中)。以上结果表明，锯齿路的结构属于低幅值高响应类型的路面。

### (3) 比利时路

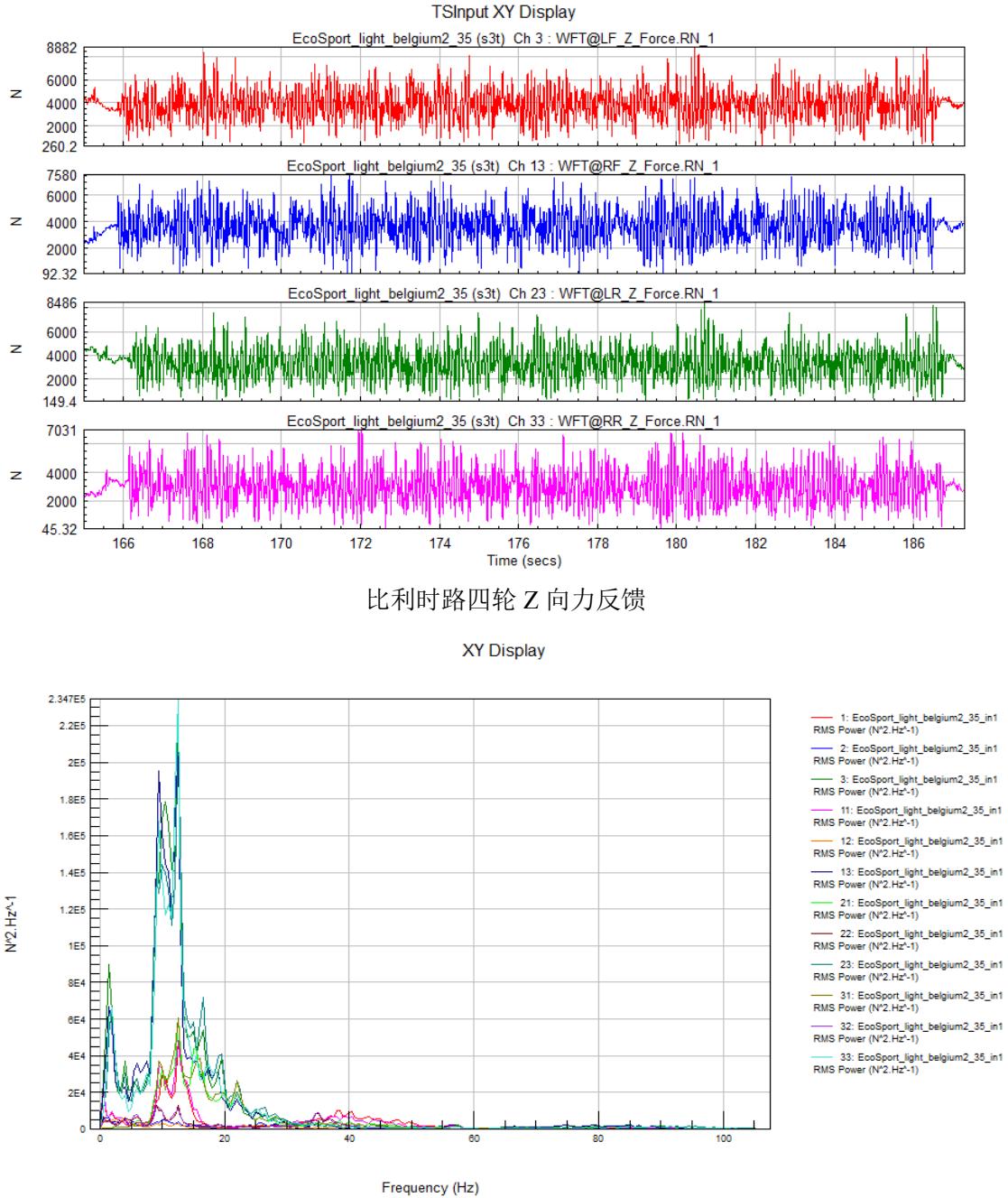
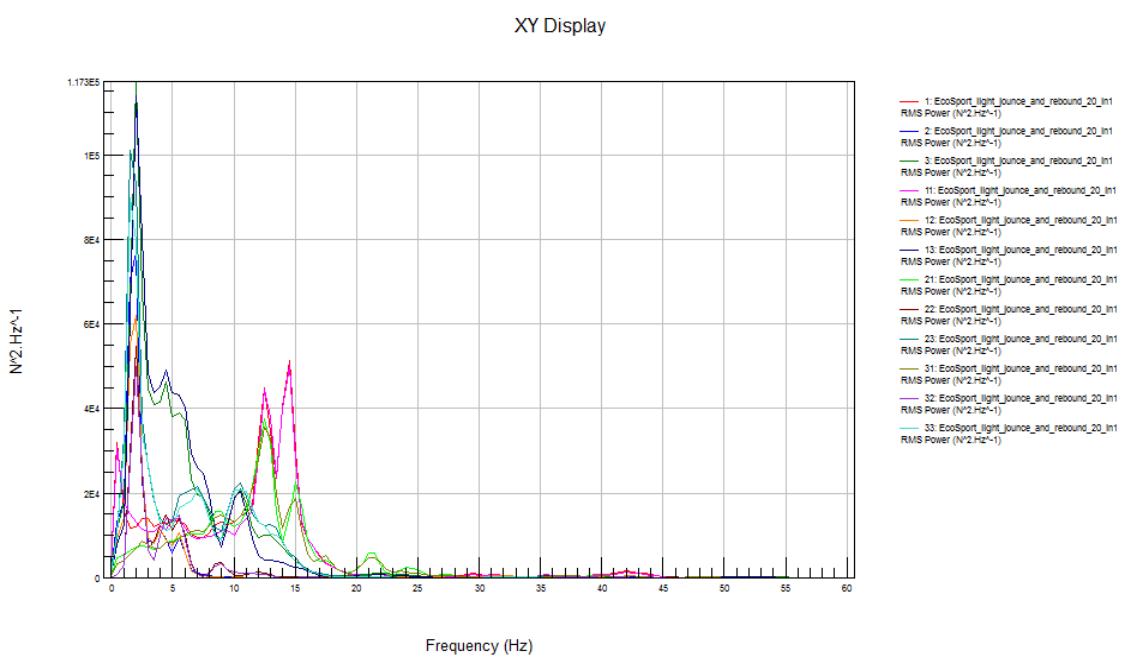
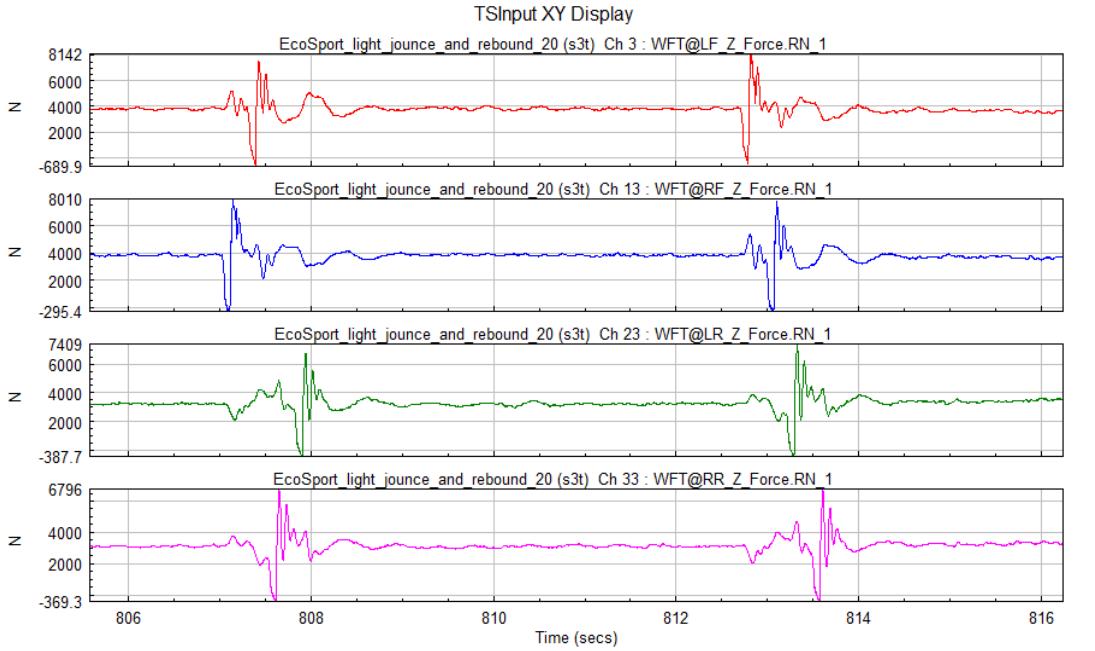


图 3.16 比利时路路谱采集信号分析结果

该车型在比利时路按规定车速行驶时，轮心垂向力的响应最大为 8882N，最低为 92.32N，单轮幅值最高分别为 8621.8N、7487.68N、8336.6N、6985.68N，平均值 7857.94N；轮心力的频域响应范围分布较广，主要集中在 100Hz 内，共振频率为 12Hz。以上结果表明，比利时路的结构属于高幅值宽频响应类型的路面。

#### (4) 颠簸路

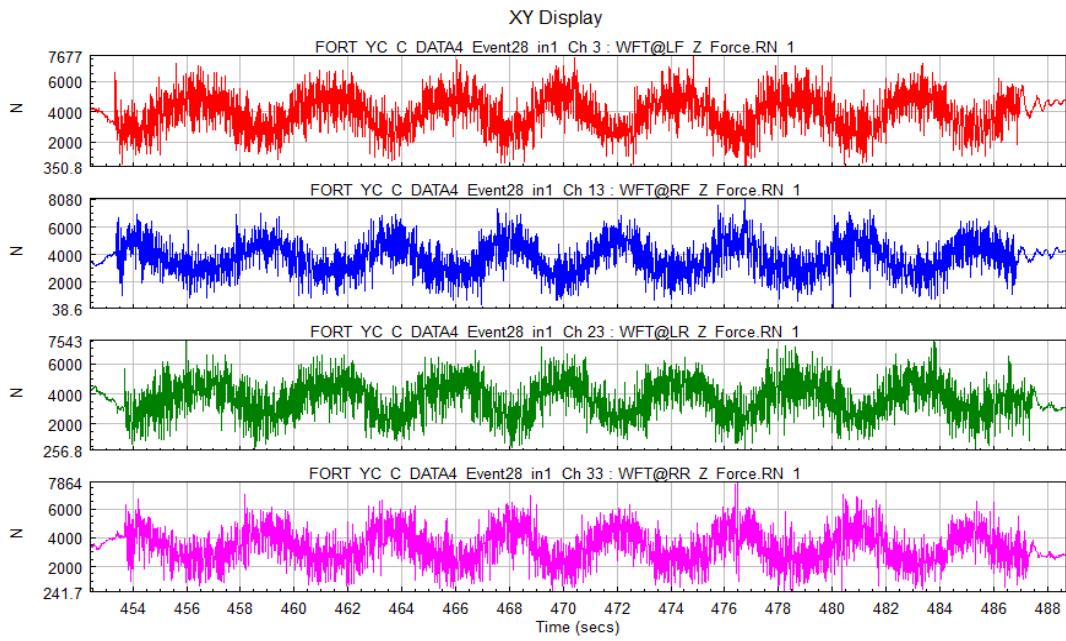


颠簸路轮心力频域分布

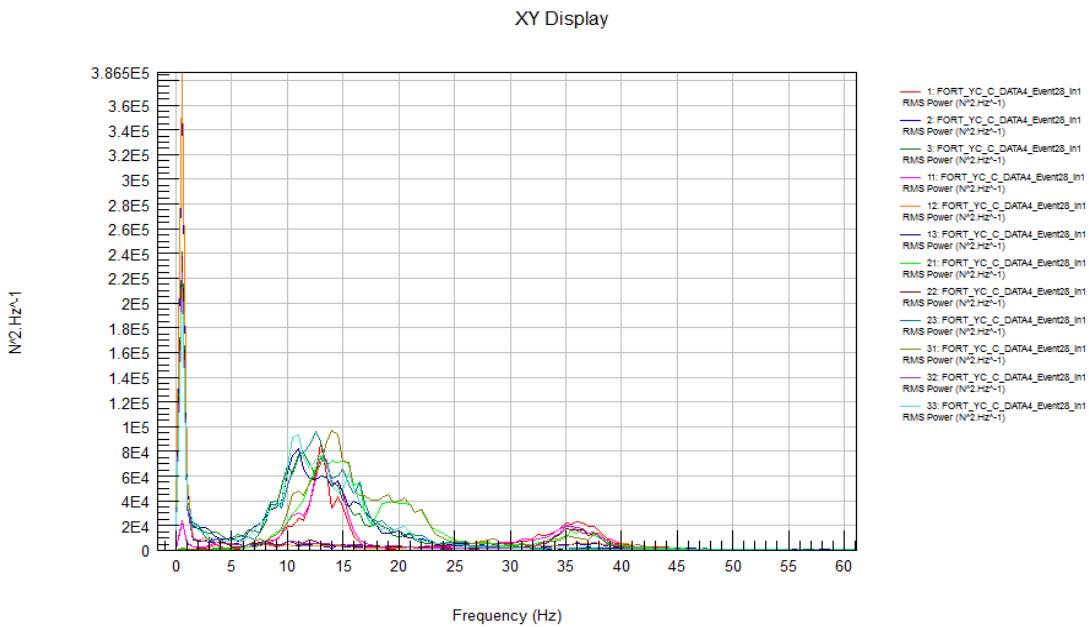
图 3.17 颠簸路路谱采集信号分析结果

该车型在颠簸路按规定车速行驶时，轮心垂向力的响应最大为 8142N，最低为 -689.9N，单轮幅值最高分别为 8831.9N、8305.4N、7796.7N、7165.3N，平均值 8024.83N；轮心力的频域响应范围主要集中在 55Hz 内，共振频率为 2Hz（能量集中）与 12Hz。以上结果表明，颠簸路的结构属于高幅值低频响应类型的路面。

## (5) 卵石路



卵石路四轮 Z 向力反馈

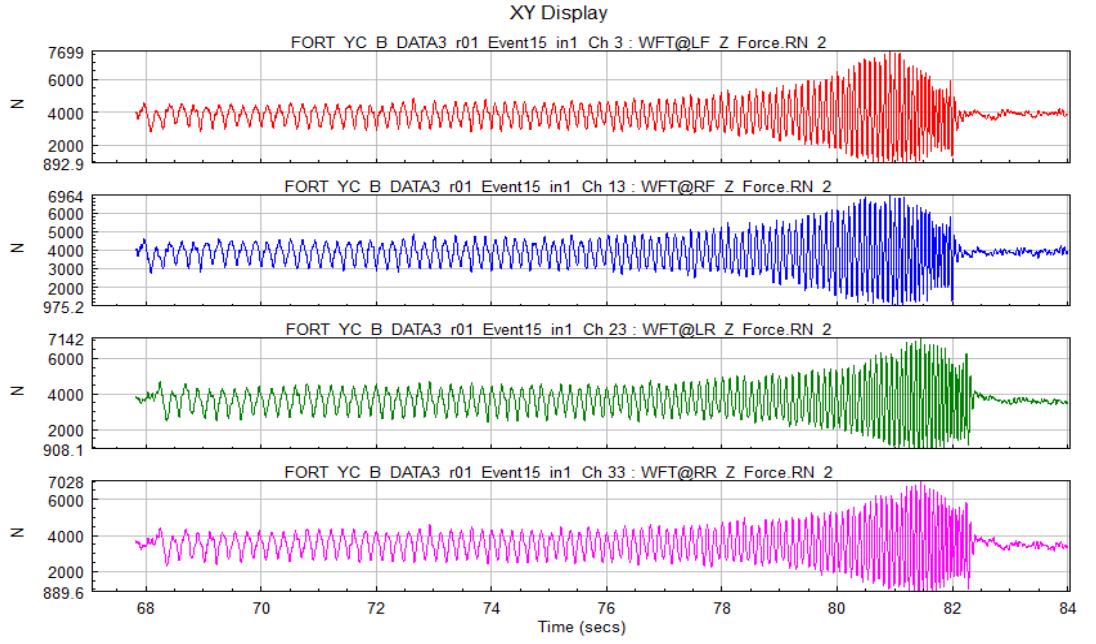


卵石路轮心力频域分布

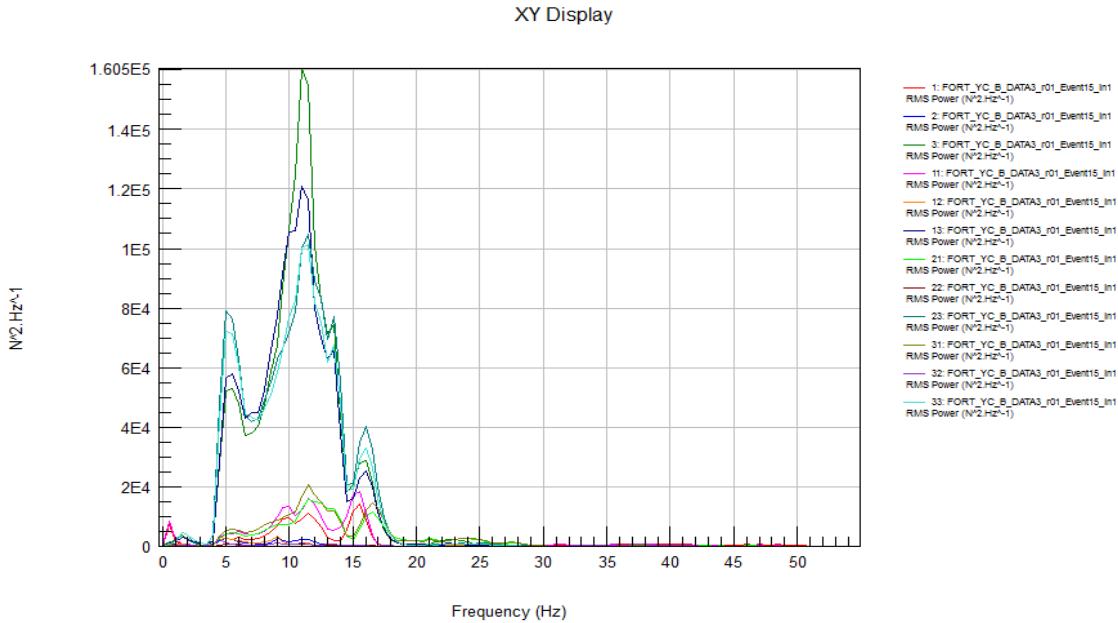
图 3.18 卵石路路谱采集信号分析结果

该车型在卵石路按规定车速行驶时，轮心垂向力的响应最大为 8080N，最低为 38.6N，单轮幅值最高分别为 7326.2N、8041.4N、7286.2N、7622.3N，平均值 7569.03N；轮心力的频域响应范围主要集中在 60Hz 内，共振频率为 1Hz（能量集中）与 12Hz。以上结果表明，卵石路的结构与比利时路类似，属于高幅值低频响应类型的路面，但轮心垂向力幅值略低于颠簸路。

## (6) 波形路



波形路四轮 Z 向力反馈



波形路轮心力频域分布

图 3.19 波形路路谱采集信号分析结果

该车型在波形路按规定车速行驶时，轮心垂向力的响应最大为 7699N，最低为 889.6N，单轮幅值最高分别为 6806.1N、5988.8N、6233.9N、6138.4N，平均值 6291.8N；轮心力的频域响应范围分布较广，主要集中在 50Hz 内，共振频率为 11.5Hz。以上结果表明，波形路的结构属于高幅值宽频响应类型的路面，但相对比利时路而言，幅值略低，频域略窄。

由以上分析结果表明：六种路面分别涵盖了低幅低频、低幅高频、高幅宽频、高幅低频的激励类型，而卵石路和波形路近似于颠簸路和比利时路，但幅值或频域略小，因此，在 HSRC 验证时，选用搓板路、锯齿路、比利时路和颠簸路四种路面即可。此外，由于高频高幅值的行驶工况对车辆的损伤程度较大，在规划耐久程序与行驶路线时，一般会避免出现此类工况，或降低车速使激励幅值与频域降低。综合以上结论，选定的四条路面符合 HSRC 项目使用需求，能够合理、全面的验证该技术的有效性。

### 3.5. 本章小结

本章主要介绍了盐城试验场试验道路情况与虚拟路面的建模与选用过程。项目基于盐城试验场的强化耐久路面，前期使用不同建模方法建立虚拟路面数据，再利用实车路谱采集数据，分析轮心力响应的范围与特点，选择具有不同幅值与频率分布的、具有代表性的路面数据，从而为 HSRC 技术的全面验证提供基础。

## 第4章 Ftire 轮胎模型

轮胎是连接车辆与路面的唯一部件，其主要作用是支撑全车重量，缓和冲击，保证车辆正常行驶性能。轮胎的力学特性与汽车的动力学特性密切相关，除空气作用力外，汽车运动所需的所有外力都是由轮胎和路面之间的相互作用产生的。HSRC 技术研究中，所有台架驱动的力值信号输入都是由轮胎模型仿真得到的，因而，轮胎模型的准确性将直接影响混合仿真技术的有效性。

### 4.1. 轮胎模型简介

轮胎技术发展至今，轮胎的内部结构日趋复杂，这就给准确建立能够用于软件仿真的精确模型带来巨大困难。常见的充气汽车轮胎一般是由钢丝层、帘布层、尼龙层等多种材料叠加成型的，如图 4.1 所示，其多层结构既要充分考虑轮胎的载重系数，又要保持轮胎的强度、耐磨、降噪等多项指标。

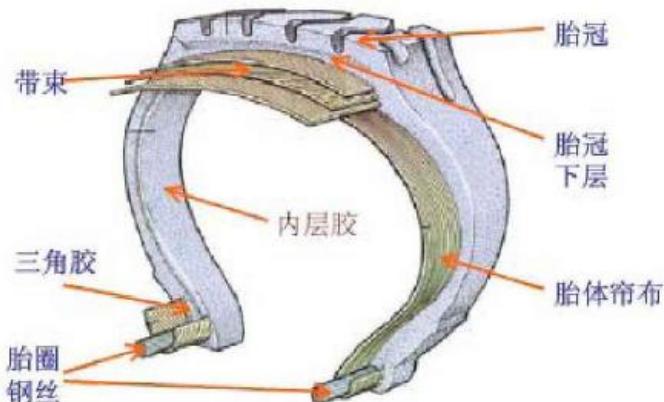


图 4.1 子午线轮胎结构图

现代轮胎模型的研究主要为了更准确的表征轮胎力学特性，包括动态特性与静态特性，如图 4.2 所示。在轮胎模型的研究中，起初是采用定性分析的方法，如早期建立的弦模型、梁模型和刷子模型，能够帮助人们定性的分析轮胎六分力的产生机理，但由于模型缺少定量的精度描述，因而不能用于汽车的动力学分析。随着理论的逐渐深入以及试验技术的进步，基于试验的经验模型逐渐发展起来，即以适当的数学公式来拟合轮胎的侧偏、回正、制动或侧翻工况的受力变化，但经验模型的弊端在于无法有效处理轮胎的动态特性，因为不能用于舒适性与耐久性的仿真分析。为进一步解决经验模型的高频分析精度问题，又诞生了基于结构的轮胎模型，把轮胎简化为弹性圆环，用于表征轮胎的胎侧刚度及带束特性，适用于高频动态激励工况，比较代表性的

如 SWIFT 模型、Ftire 模型、Rmod-K 模型、模态模型等。

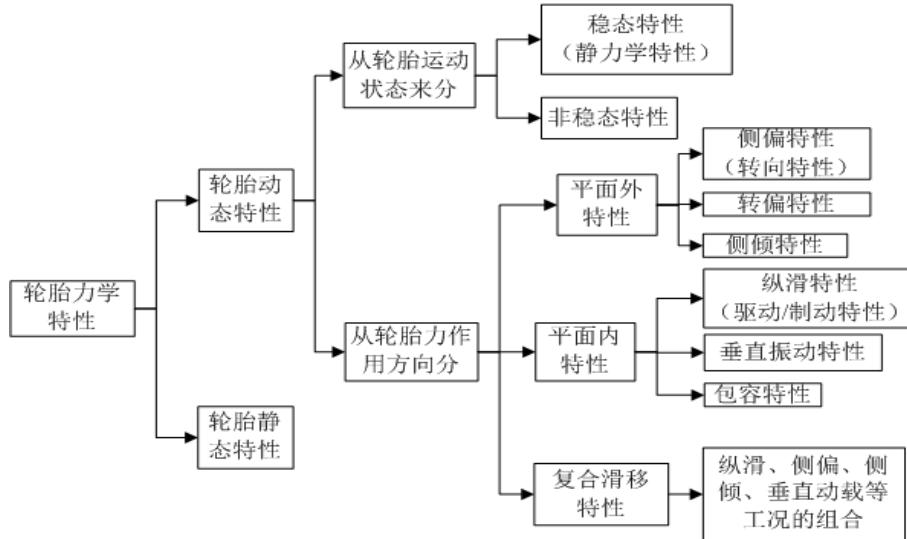


图 4.2 轮胎力学特性分类

## 4.2. Ftire 轮胎模型理论基础

Ftire(Flexible Ring Tire Model)轮胎模型是由德国 Esslingen 大学的 Michael Gipser 教授于 1999 年提出的一种柔性环轮胎模型。起先，Gipser 教授在多年的研究中建立了三种轮胎振动载荷模型：刚性环刷子模型 (BRIT)、柔性环模型 (CTire)、基于板壳的有限元模型 (DTire)，前两个模型的胎冠部分利用刷子模型进行描述，但任何一种模型均无法全面描述轮胎的力学特性。在综合三个模型的优点后，Michael Gipser 提出了 FTire 模型。

Ftire 模型同样将胎体与胎面分开建模，从而能够对轮胎的结构以及接触问题进行单独描述。其建模核心是用 80~200 个集中质量的结点来替换轮胎结构中帘布、钢丝、橡胶等带束层，并把这些节点统称为带束结点。结点之间增加了弹簧与阻尼特性描述，通过节点、弹簧、阻尼来共同描述轮胎的各项特性，不仅能够描述轮胎面内的振动，而且对于轮胎的侧偏特性也能够准确响应，如图 4.3 所示。

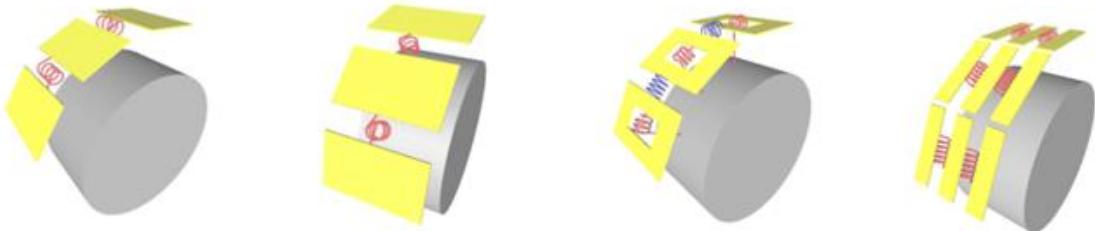


图 4.3 Ftire 轮胎模型建模理论示意

Ftire 模型本身具备完全的非线性及高精度的轮胎稳态特性，可以对大小为轮胎接

地印迹一半的障碍物进行仿真，对于汽车操稳及平顺性能仿真具有较好的适用性。由于 Ftire 的仿真频率可达到 200Hz, 对于汽车平顺性及耐久性能的仿真既可以满足其高频要求，又能够具备较高的精度。在本课题开展的虚拟试验场仿真过程中，主要采用的就是 Ftire 模型。通过学习 Ftire 模型理论及辨识方法，生成对应车型轮胎的 Ftire 模型，从而提高虚拟试验场疲劳载荷提取精度。

### 4.3. Ftire 模型轮胎试验

Ftire 模型在仿真轮胎平面内特性方面说具有较高的精度。但是该模型的生成需要较多的参数，为获取这些参数需要进行轮胎的刚度试验、稳态力及力矩等试验。中汽中心已逐步建成自身轮胎测试及建模能力，在本项目的开展过程中，首先对 Ftire 建模所需试验工况进行梳理，将各工况与台架测试能力相结合，再根据轮胎性能和试验室台架能力确定轮胎加载范围，尽可能接近轮胎的极限工况，最大范围覆盖轮胎在试验场中使用过程中的受力过程，Ftire 模型所需试验项目如表 4.1 所示。

表 4.1 Ftire 模型试验方案

序号	试验项目	载荷 N	速度 km/h	侧偏角 deg	侧倾角 deg	滑移率	凸块放置 方式
1	侧偏试验	0.4*LI	60	$\pm 15$	-5	0	无
		0.8*LI			0		
		1.2*LI			5		
2	纵滑试验	0.4*LI	60	0	0	-30%至 30%	无
		0.8*LI					
		1.2*LI					
3	径向刚度试验	0 至 1.5*LI	0	0	0	0	无
					6		
4	侧向刚度试验	0.4*LI	0	0	0	0	无
		0.8*LI					
		1.2*LI					
5	纵向刚度试验	0.4*LI	0	0	0	0	无
		0.8*LI					
		1.2*LI					
6	扭转刚度试验	0.4*LI	0	$\pm 15$	0	0	无
		0.8*LI					
		1.2*LI					

7	动态过凸块试验	0.5*LI	5	0	0	0	横置		
			30				45°斜置		
		1.0*LI	60						
		1.5*LI	90						
8	动刚度试验	0.4*LI	0	0	0	0	无		
		0.8*LI	30						
		1.2*LI	60						
			90						
9	横置凸块径向刚度试验	0 至 1.5*LI	0	0	0	0	横置		
					6				
10	纵置凸块径向刚度试验	0 至 1.5*LI	0	0	0	0	纵置		
11	横置凸块上的侧向刚度试验	0.4*LI	0	0	0	0	横置		
		0.8*LI							
		1.2*LI							
12	接地印迹形状测量试验	0.4*LI	0	0	0	0	无		
		0.8*LI			6				
		1.2*LI							
13	斜置凸块径向刚度试验	0 至 1.5*LI	0	0	0	0	45°斜置		
14	有效滚动半径	0.4*LI	20	0	0	0	无		
		0.8*LI	40						
			60						
		1.2*LI	100						
			140						

轮胎试验是以中汽中心试验台为主，如图 4.4 所示。履带式轮胎六分力系统主要由 A 型加持框架、垂直液压伺服作动器、力和力矩传感器转轴电驱动总成、不锈钢带、液压动态水力轴承支撑、驱动系统、轮胎胎压充气系统等部分组成，能够有效完成纵滑试验、侧偏试验、有效滚动半径试验、垂向刚度试验、力和力矩试验等多项试验内容。对于 Ftire 试验工况中的过凸块试验，则使用高速均匀性测试系统完成，该系统转鼓直径为 2 米，能够以最大 320km/h 的速度进行加载。



(a) 轮胎六分力测试

(b) 轮胎静态刚度测试



(c) 轮胎动态 cleat 测试

图 4.4 Ftire 轮胎试验

#### 4.4. Ftire 轮胎参数辨识

Ftire 模型是利用多项试验结果对特性型号的轮胎不断进行模型修正，最终将模型调整至能够满足该款轮胎的力学特性输出，并形成属性文件用于 ADAMS 软件仿真。辨识流程如图 4.5 所示。

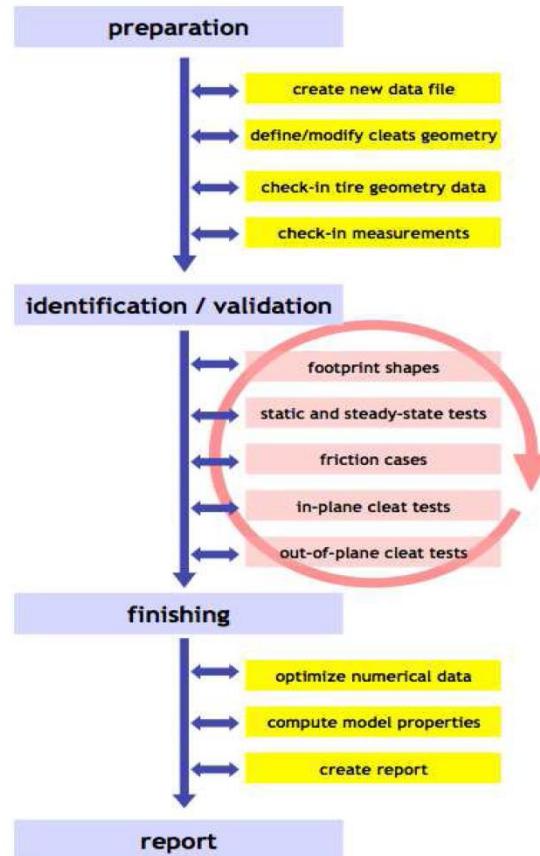


图 4.5 Ffire 模型生成流程

为便于用户应用 Ffire 技术, Cosin Scientific software 已将 Ffire 属性文件的生成方法集成为软件, 并在全球范围内开展服务。该软件以各工况下的试验参数为目标, 结合试验中测得的轮胎接地印迹, 最终生成 Ffire 属性文件, 软件界面如图 4.6 所示。

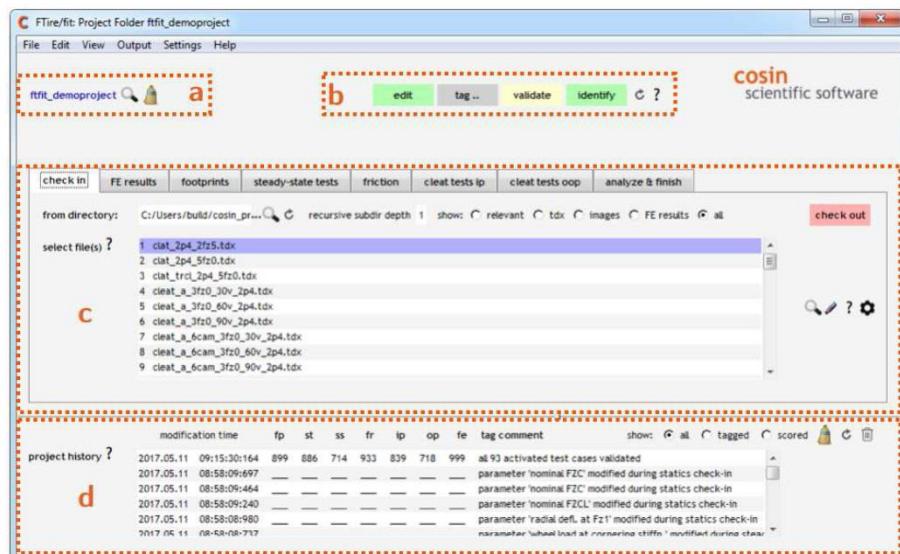


图 4.6 cosin Ffire/fit 软件用户界面

为便于用户及时了解当前辨识模型精度，软件会自动统计每个工况的结果精度，并将辨识工况分为六类，实时显示各类工况的精度指标，包括：

- (1) ‘fp’: footprints, 接地印迹;
- (2) ‘st’: static tests, 静态测试结果，包括径向、侧向、纵向、扭转及包容刚度;
- (3) ‘ss’: steady-state tests, 稳态测试结果，包括纵滑、侧偏、动刚度;
- (4) ‘fr’: friction, 摩擦系数;
- (5) ‘ip’: dynamic in-plane cleat tests, 平面内过凸块;
- (6) ‘op’: dynamic out-of-plane cleat tests, 平面外过凸块。

Ftire 模型辨识开始后，首先新建配置文件，输入测试轮胎对应的各项轮胎信息，如品牌、胎压、质量、尺寸参数等，如图 4.7 所示。其次，定义不同凸块尺寸与布置形式，并对每种凸块按顺序以 A、B、C、D 等命名，凸块的定义包括以下六点（长度单位为毫米）：

- (1) cleat height: 凸块高度;
- (2) cleat length: 凸块长度;
- (3) cleat bevel edge length: 凸块斜边长度;
- (4) cleat direction: 凸块方向（相对转鼓轴线的安装角度）;
- (5) drum diameter: 转鼓直径;
- (6) type of drum: 转鼓类型（轮胎在转鼓内或转鼓外）。

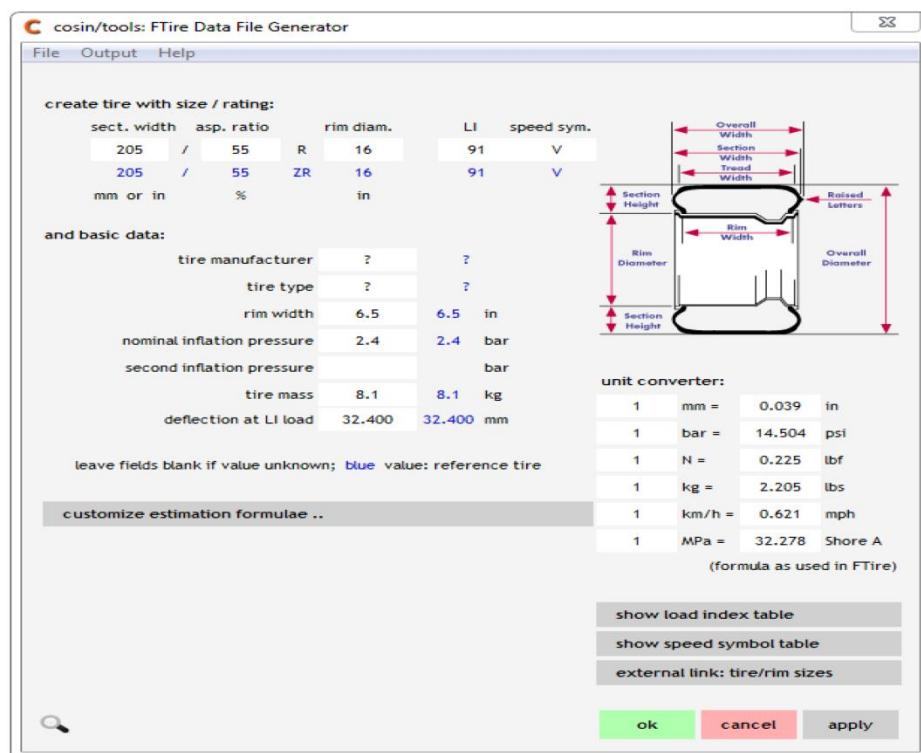


图 4.7 新建 Ftire 配置文件

开始辨识后，技术人员需要按照接地印迹、静态特性、稳态、摩擦、面内、面外六类工况分别进行模型与试验数据的对比与调整，软件能够显示不同窗口界面以供检验，如图 4.8 所示。

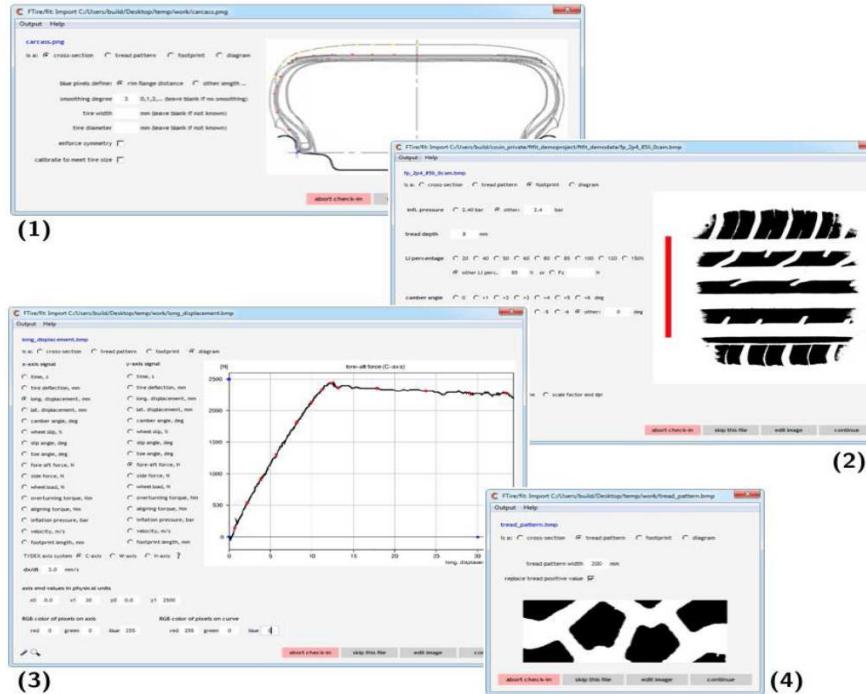
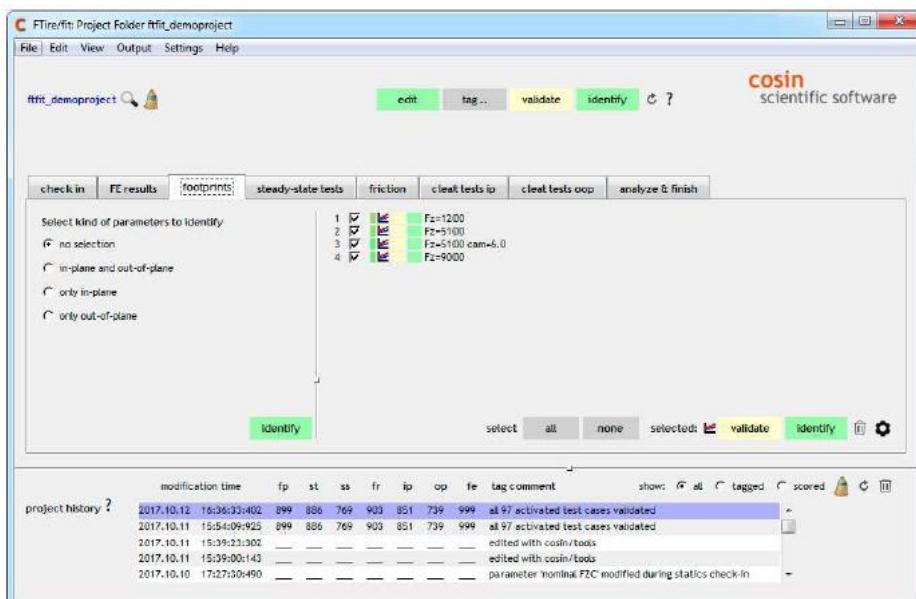
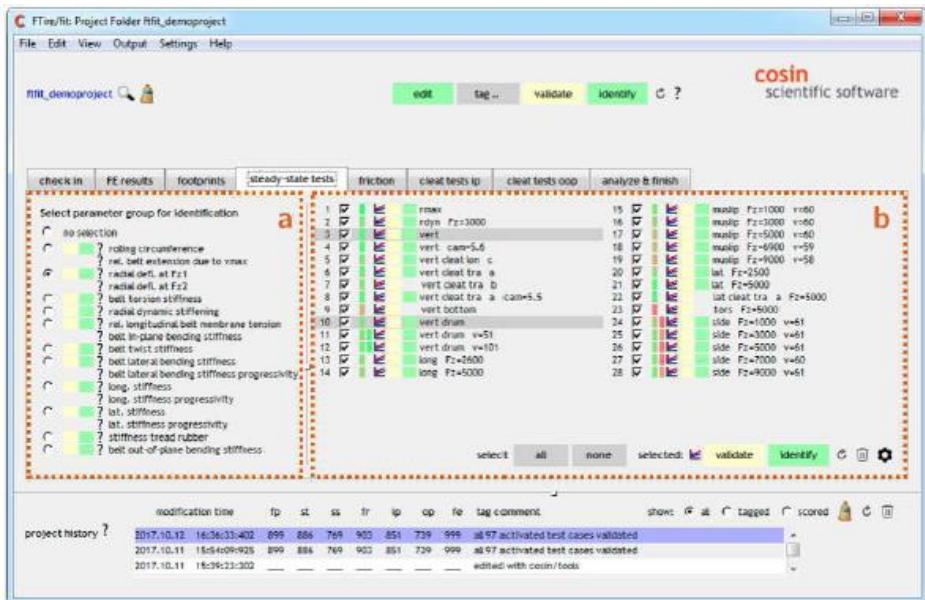


图 4.8 辨识结果检验界面

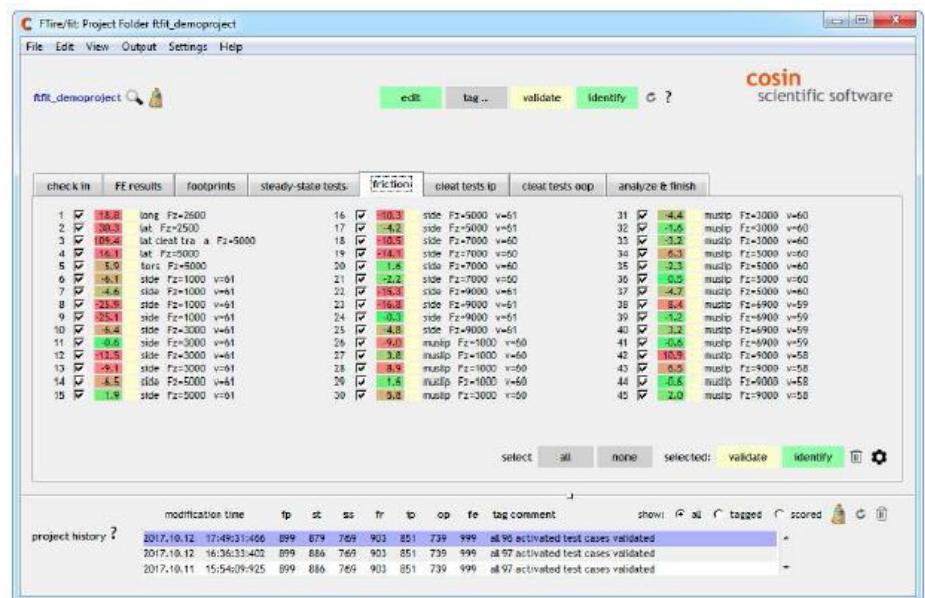
对于每一类工况，cosin 软件都能会依据试验数据进行模型的修正和拟合，如图 4.9 所示。



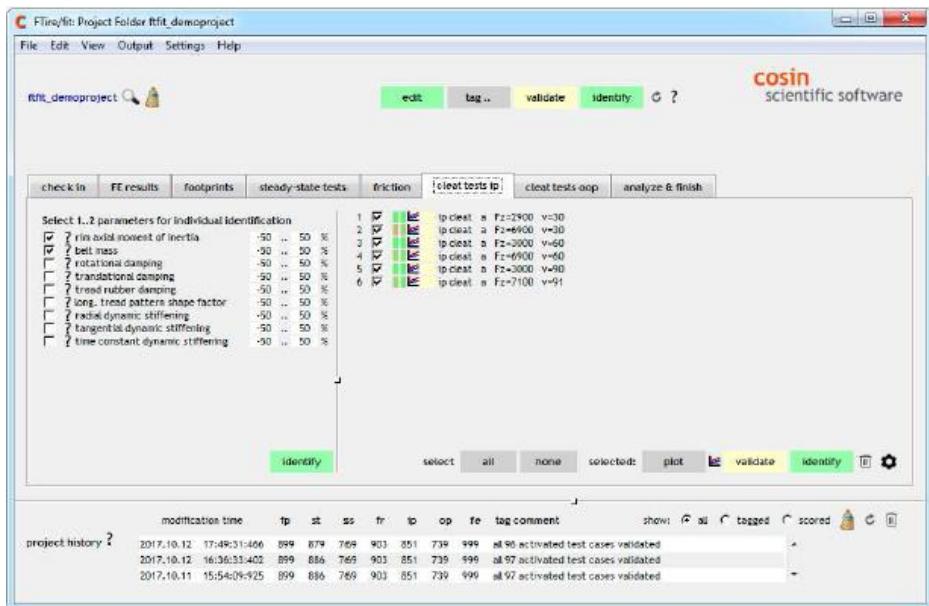
(a) 接地印迹测量结果辨识



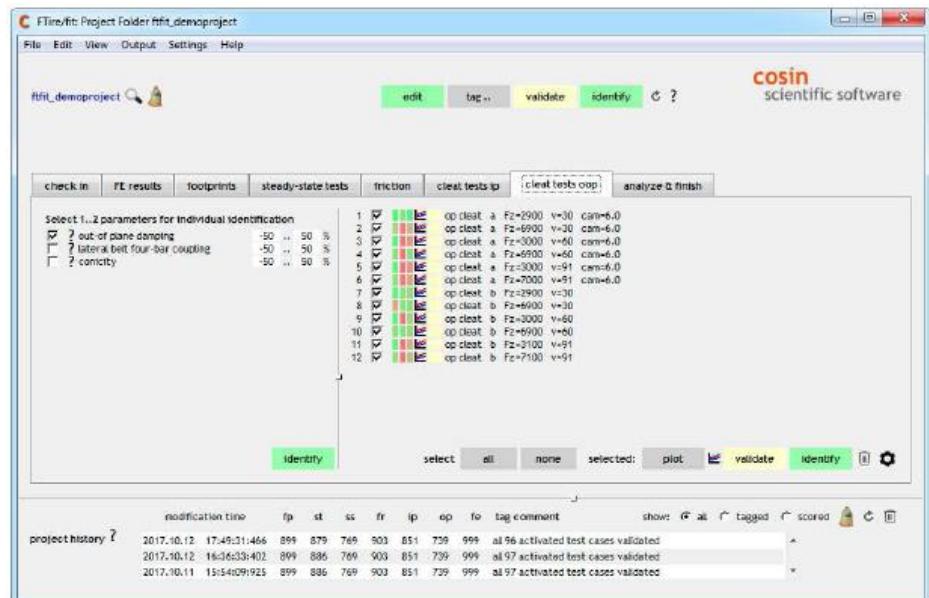
(b) 稳态测量结果辨识（含静态特性）



(c) 摩擦系数测量结果辨识



(d) 面内特性测量结果辨识



(e) 面外特性测量结果辨识

图 4.9 Ffire 模型辨识调整过程

为验证 Ffire 模型精度，cosin 软件能够自动形成辨识结果报告，便于用户对与模型使用精度的理解。报告中对比了各工况下轮胎模型仿真和试验数据的差异，以轮胎接地印迹、静态特性、面内特性和面外特性四部分的对比结果作为模型精度的评判指标，如图 4.10 所示。

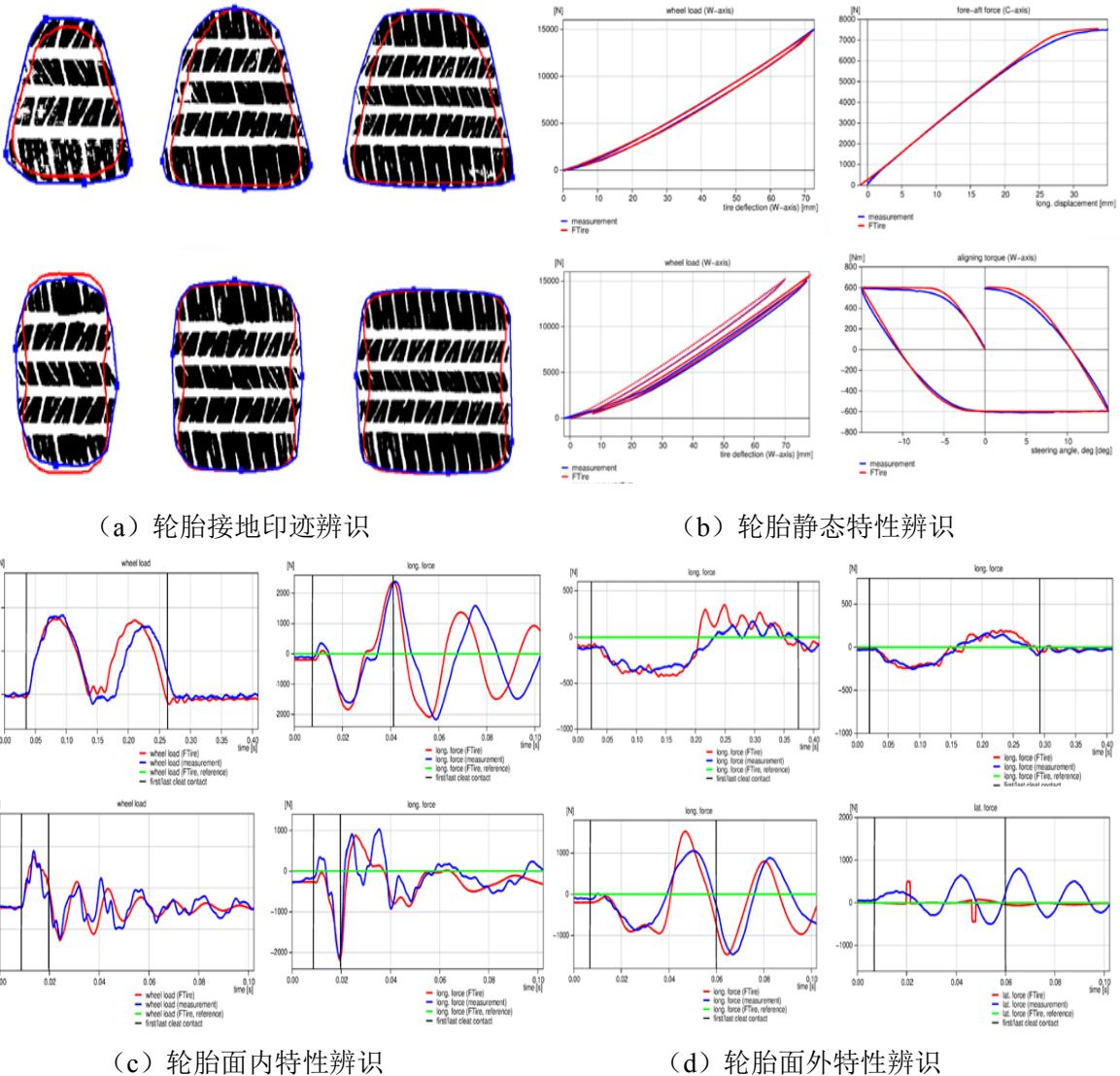


图 4.10 Ftire 轮胎辨识结果 (部分)

为了保证后期 HSRC 技术验证精度, Ftire 模型辨识经过多次尝试与总结, 辨识精度逐渐提高, 第一版达到预期指标的 Ftire 模型精度达 83.18%, 精度计算方式采用软件的自动统计值, 如表 4.2 所示。

表 4.2 Ftire 模型精度统计表 (NO.1)

分类	fp	st	ss	fr	ip	op	平均值
统计值	92.2%	87.2%	76.5%	88.0%	83.5%	71.7%	83.18%

由以上 Ftire 模型的统计表可知, 该模型的面外特性精度略差。通过对面外特性辨识过程的进一步优化, 提高面外特性工况的辨识权重, 从而使得模型的精度进一步得到提高, 精度达 86.43%, 达到课题预期指标, 如表 4.3 所示。

表 4.3 Ftire 模型精度统计表 (NO.2)

分类	fp	st	ss	fr	ip	op	平均值
统计值	92.9%	91.4%	78.8%	92.5%	82.6%	80.4%	86.43%

## 4.5. 本章小结

本章主要总结了轮胎模型的研究现状及 Ftire 轮胎模型的试验及辨识过程。路面是 HSRC 技术中的主要激励来源，而轮胎又是传递路面激励的唯一路径，本章工作内容的开展，是混合仿真技术开展的前提条件，高精度轮胎模型的运用也是保证混合仿真技术有效性的重要条件。通过对轮胎模型的简述，指出 Ftire 轮胎模型在耐久开发中的重要性。同时，本章介绍了 Ftire 轮胎模型的辨识过程，通过对试验参数的调试与优化，使得最终模型精度达到 86.43%，符合课题预期指标。

# 第 5 章 实车路谱采集

实车路谱采集是指将试验车辆安装轮心六分力传感器、轴头及车身加速度传感器、位移传感器、应变片等，使车辆在试验场道路中按一定速度与轨迹进行行驶，从而获取不同试验场道路工况下的车辆部件的受力大小、变形程度、相对位移和冲击加速度等时域信号。在现代汽车的可靠耐久开发过程中，实车路谱采集数据应用广泛，无论是开发前期的零部件疲劳 CAE 分析与校核，还是产品验证阶段的整车耐久性能验证，都需要应用路谱采集数据。

## 5.1. 确定车型及配置

开展路谱采集试验首先需要明确试验目的，用于 CAE 疲劳校核与台架试验的路谱采集数据在信号通道方面侧重不同。在车辆选择过程中，首先本次项目最终是要用于 HSRC 技术验证，所选车型不能超过整车道路模拟机最大加载能力，即整车配载后的总质量不能超过 4 吨；其次，所选车辆需状态良好，未经过疲劳试验或长期恶劣工况行驶；此外，所选车辆应当是国内市场常见车型，具有较为广泛的使用范围和一定的用户认可度。

经过对内部资源的调查与车辆选择，本次项目最终选用的车型为福特翼博，属于紧凑级 SUV，该车具体参数如表 5.1 所示。

表 5.1 福特翼博车型参数

参数分类	详细描述	
基本参数	车辆型号	EcoSport 手动尊贵型
	级别	小型 SUV
	VIN 号	LVSHKAMN9DF56077
	整备质量 (KG)	1290
	座位数	5
	轮胎型号	MAXXIS 205/60 R16
	轮胎气压	前 2.2bar, 后 2.5bar
悬架参数	驱动方式	前置前驱
	前悬架类型	麦弗逊独立悬架
	后悬架类型	扭转梁非独立悬架
	车体结构	承载式车身
	助力类型	电动助力
尺寸参数	长度 (mm)	4280
	宽度 (mm)	1785
	高度 (mm)	1658
	轴距 (mm)	2530
	前轮距 (mm)	1527

	后轮距 (mm)	1533
发动机参数	发动机型号	GTDIQ3
	变速箱	5 挡手动
	能源类型	汽油
	排量	1.0T
	最大功率 (KW)	92
	最大扭矩 (NM)	170

## 5.2. 载荷通道确认

试验车辆选定后，则可以根据车辆悬架类型确定最终的路谱采集载荷通道。一般乘用车辆前悬架类型多为麦弗逊悬架，而后悬架则是扭力梁或多连杆式悬架居多，而多连杆悬架需要测量每个连杆上受力，扭力梁则需会根据实际需求测量扭力梁上的局部应变。HSRC 项目在路谱采集数据的应用中，主要以轮心力和加速度数据为主，因而在制定本项目的载荷通道时，去掉了扭力梁应变测量，仅保留路谱采集试验的常规测量项目。测试通道明细表如表 5.2 所示。

表 5.2 路谱采集通道明细表

编号	分类	通道描述与命名		单位	采样频率
1	六分力	LtFr Spindle Load (X)	WFT@LF_X_Force	N	512
2		LtFr Spindle Load (Y)	WFT@LF_Y_Force	N	512
3		LtFr Spindle Load (Z)	WFT@LF_Z_Force	N	512
4		LtFr Spindle Moment (X)	WFT@LF_MX_Moment	N-m	512
5		LtFr Spindle Moment (Y)	WFT@LF_MY_Moment	N-m	512
6		LtFr Spindle Moment (Z)	WFT@LF_MZ_Moment	N-m	512
7		LtFr Spindle Angular Speed	WFT@LF_Velocity	rpm	512
8		LtFr Spindle Angle	WFT@LF_Position	Deg	512
9		LtFr Spindle Acceleration(X)	WFT@LF_X_Acceler	g	512
10		LtFr Spindle Acceleration(Z)	WFT@LF_Z_Acceler	g	512
11		RtFr Spindle Load (X)	WFT@RF_X_Force	N	512
12		RtFr Spindle Load (Y)	WFT@RF_Y_Force	N	512
13		RtFr Spindle Load (Z)	WFT@RF_Z_Force	N	512
14		RtFr Spindle Moment (X)	WFT@RF_MX_Moment	N-m	512
15		RtFr Spindle Moment (Y)	WFT@RF_MY_Moment	N-m	512
16		RtFr Spindle Moment (Z)	WFT@RF_MZ_Moment	N-m	512
17		RtFr Spindle Angular Speed	WFT@RF_Velocity	rpm	512
18		RtFr Spindle Angle	WFT@RF_Position	Deg	512

19		RtFr Spindle Acceleration(X)	WFT@RF_X_Acceler	g	512
20		RtFr Spindle Acceleration(X)	WFT@RF_Z_Acceler	g	512
21		LtRr Spindle Load (X)	WFT@LR_X_Force	N	512
22		LtRr Spindle Load (Y)	WFT@LR_Y_Force	N	512
23		LtRr Spindle Load (Z)	WFT@LR_Z_Force	N	512
24		LtRr Spindle Moment (X)	WFT@LR_MX_Moment	N-m	512
25		LtRr Spindle Moment (Y)	WFT@LR_MY_Moment	N-m	512
26		LtRr Spindle Moment (Z)	WFT@LR_MZ_Moment	N-m	512
27		LtRr Spindle Angular Speed	WFT@LR_Velocity	rpm	512
28		LtRr Spindle Angle	WFT@LR_Position	Deg	512
29		LtRr Spindle Acceleration(X)	WFT@LR_X_Acceler	g	512
30		LtRr Spindle Acceleration(X)	WFT@LR_Z_Acceler	g	512
31		RtRr Spindle Load (X)	WFT@RR_X_Force	N	512
32		RtRr Spindle Load (Y)	WFT@RR_Y_Force	N	512
33		RtRr Spindle Load (Z)	WFT@RR_Z_Force	N	512
34		RtRr Spindle Moment (X)	WFT@RR_MX_Moment	N-m	512
35		RtRr Spindle Moment (Y)	WFT@RR_MY_Moment	N-m	512
36		RtRr Spindle Moment (Z)	WFT@RR_MZ_Moment	N-m	512
37		RtRr Spindle Angular Speed	WFT@RR_Velocity	rpm	512
38		RtRr Spindle Angle	WFT@RR_Position	Deg	512
39		RtRr Spindle Acceleration(X)	WFT@RR_X_Acceler	g	512
40		RtRr Spindle Acceleration(X)	WFT@RR_Z_Acceler	g	512
41	轮心加速度	LtFr Spindle Acceleration (X)	WheelAcc@LF_X_ACC	g	512
42		LtFr Spindle Acceleration (Y)	WheelAcc@LF_Y_ACC	g	512
43		LtFr Spindle Acceleration (Z)	WheelAcc@LF_Z_ACC	g	512
44		RtFr Spindle Acceleration (X)	WheelAcc@RF_X_ACC	g	512
45		RtFr Spindle Acceleration (Y)	WheelAcc@RF_Y_ACC	g	512
46		RtFr Spindle Acceleration (Z)	WheelAcc@RF_Z_ACC	g	512
47		LtRr Spindle Acceleration (X)	WheelAcc@LR_X_ACC	g	512
48		LtRr Spindle Acceleration (Y)	WheelAcc@LR_Y_ACC	g	512
49		LtRr Spindle Acceleration (Z)	WheelAcc@LR_Z_ACC	g	512
50		RtRr Spindle Acceleration (X)	WheelAcc@RR_X_ACC	g	512
51		RtRr Spindle Acceleration (Y)	WheelAcc@RR_Y_ACC	g	512
52		RtRr Spindle Acceleration (Z)	WheelAcc@RR_Z_ACC	g	512
53	车身加速度	LtFr Body Acceleration (X)	BodyAcc@LFDP_X_ACC	g	512
54		LtFr Body Acceleration (Y)	BodyAcc@LFDP_Y_ACC	g	512
55		LtFr Body Acceleration (Z)	BodyAcc@LFDP_Z_ACC	g	512
56		RtFr Body Acceleration (X)	BodyAcc@RFDP_X_ACC	g	512

57	部件力	RtFr Body Acceleration (Y)	BodyAcc@RFDP_Y_ACC	g	512
58		RtFr Body Acceleration (Z)	BodyAcc@RFDP_Z_ACC	g	512
59		LtRr Body Acceleration (X)	BodyAcc@LRDP_X_ACC	g	512
60		LtRr Body Acceleration (Y)	BodyAcc@LRDP_Y_ACC	g	512
61		LtRr Body Acceleration (Z)	BodyAcc@LRDP_Z_ACC	g	512
62		RtRr Body Acceleration (X)	BodyAcc@RRDP_X_ACC	g	512
63		RtRr Body Acceleration (Y)	BodyAcc@RRDP_Y_ACC	g	512
64		RtRr Body Acceleration (Z)	BodyAcc@RRDP_Z_ACC	g	512
65	弹簧位移	LtFr Spring displacement	SG@LF_TRAVL	g	512
66		RtFr Spring displacement	SG@RF_TRAVL	g	512
67		LtRr Spring displacement	SG@LR_TRAVL	g	512
68		RtRr Spring displacement	SG@RR_TRAVL	g	512
69	部件力	LtFr Tierod Load (Axial)	SG@LF_TIEROD	g	512
70		RtFr Tierod Load (Axial)	SG@RF_TIEROD	N	512
71		LtFr LCA Balljoint Load (X)	SG@LF_BJ_X	N	512
72		LtFr LCA Balljoint Load (Y)	SG@LF_BJ_Y	N	512
73		RtFr LCA Balljoint Load (X)	SG@RF_BJ_X	N	512
74		RtFr LCA Balljoint Load (Y)	SG@RF_BJ_Y	N	512
75		LtFr Shock Rod Load (Axial)	SG@LF_DAMP	N	512
76		RtFr Shock Rod Load (Axial)	SG@RF_DAMP	N	512
77		LtRr Shock Rod Load (Axial)	SG@LR_DAMP	N	512
78		RtRr Shock Rod Load (Axial)	SG@RR_DAMP	N	512
79		LtFr Sta-bar Link Load (Axial)	SG@LF_STBLINK	N	512
80		RtFr Sta-bar Link Load (Axial)	SG@RF_STBLINK	N	512
81	标记点	MARK	FORT1@MARK	N	512
82	GPS	Latitude	GPS@lat	N	512
83		Longitude	GPS@lon	deg	512
84		Altitude	GPS@altitude	deg	512
85		Speed km/h	GPS@speed_kmh	deg	512

### 5.3. 零部件贴片与标定

在实际路谱采集过程中，轮心六分力与可通过工装安装在车轮中心，位移和加速度传感器也是可以直接布置在响应测点的，但零部件的内力则需要用应变片进行测量。在将零部件受力集中部分布置应变片，部件变形引起应变片的电阻变化，利用外接的力传感器和电压表可以将应变片的电阻变化与力值对应起来，这一过程称为零部件传感器化。例如，在弹簧中间部位布置应变片，当弹簧压缩时，根据应变片的电阻变化

和前期得到的电阻-力函数关系，即可直接由数据采集设备读出弹簧的受力，此弹簧也就变成了一个力传感器。

在进行 HSRC 项目中，需要将进行贴片标定的零部件包括弹簧、转向拉杆、减震器、前下摆臂球铰、稳定杆连杆 5 个部位。详细的贴片与标定情况如下图所示。

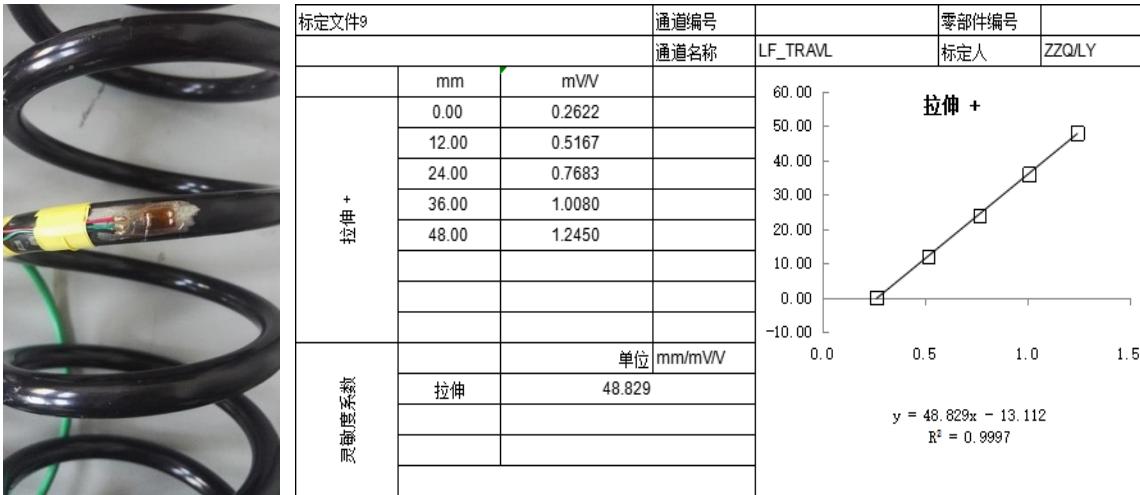


图 5.1 左前弹簧贴片示例与传感器标定结果

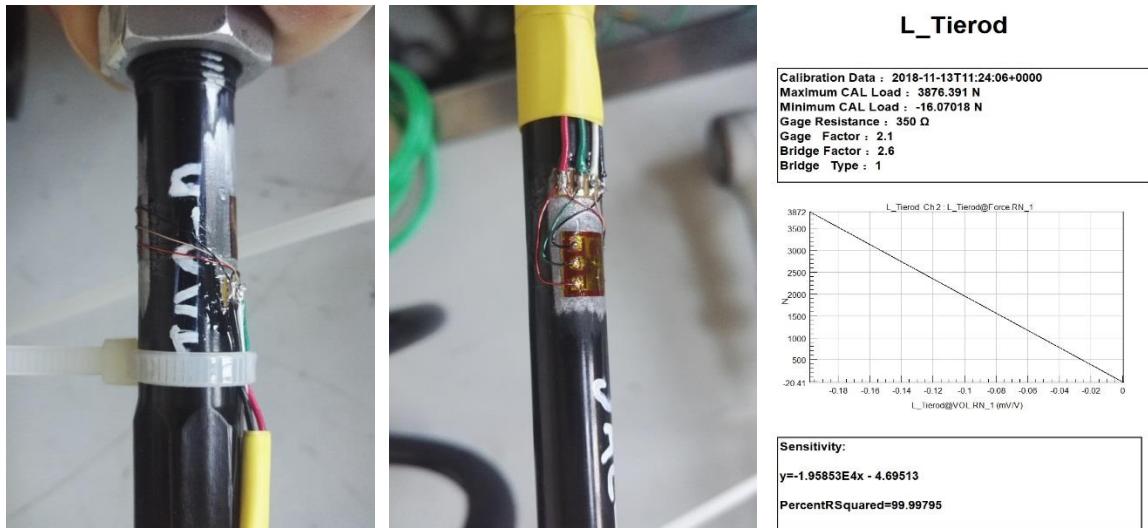


图 5.2 左侧转向拉杆贴片示例与传感器标定结果



标定文件5			通道编号		零部件编号	
			通道名称	LF_BJ_X	标定人	ZZQ/LY
	N	mV/V				
拉伸+	1226.00	-0.1488		4500.00	拉伸+	
	2261.00	-0.2648		4000.00		
	2617.00	-0.3131		3500.00		
	3014.00	-0.3625		3000.00		
	3431.00	-0.4215		2500.00		
	3362.00	-0.4078		2000.00		
	3887.00	-0.4837		1500.00		
				1000.00		
灵敏度系数	单位 N/mV/V			500.00		
	拉伸	-7923.4		0.00	$y = -7923.4x + 109.19$	
	压缩				$R^2 = 0.9974$	
标定文件6			通道编号		零部件编号	
			通道名称	LF_BJ_Y	标定人	ZZQ/LY
	N	mV/V				
拉伸+	1096.00	-0.1411		6000.00	拉伸+	
	1903.00	-0.2381		5000.00		
	2527.00	-0.3119		4000.00		
	3682.00	-0.4631		3000.00		
	4133.00	-0.5199		2000.00		
	4365.00	-0.5586		1000.00		
	4865.00	-0.6222		0.00		
灵敏度系数	单位 N/mV/V					
	拉伸	-7803.7			$y = -7803.7x + 41.749$	
	压缩				$R^2 = 0.9992$	

图 5.3 左前下摆臂球铰 X、Y 向力贴片示例与传感器标定结果



图 5.4 左前减震器阻尼杆轴向力贴片示例与传感器标定结果

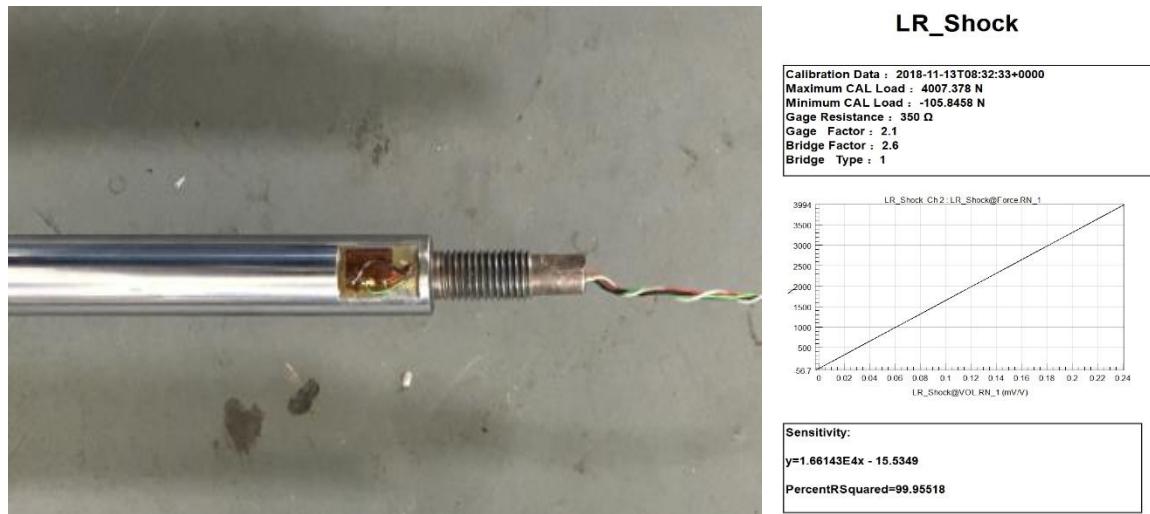


图 5.5 左后减震器阻尼杆轴向力贴片示例与传感器标定结果



图 5.6 左侧稳定杆连杆贴片示例与传感器标定结果

## 5.4. 整车传感器布置与通道测试

在零部件贴片标定的过程中，一般是将零部件进行拆解后进行操作的，各传感器经过状态确认后即将安装到试验车辆上。待全部传感器安装完成后，还要进行整车采集通道的测试验证，保证安装后的各信号通道能够正常工作。

### 5.4.1. 传感器布置

在布置传感器时，一方面要将加速度、位移等传感器紧固的安装在待测部位，另一方面各传感器都有响应的信号传输线路，要避免车辆或车辆内部零部件在运动过程中发生信号线的挤压或拉断的情况。此外，对于加速度与六分力按照的特殊要求如下：

- (1) 合理选择加速度传感器类型，压阻式加速度成本低廉，但测量频率范围有限，适用于耐久路面的多个加速度通道信号采集情况；压电式加速度适用于高频激励工况，多用于 NVH 振动测量试验；电容式加速度传感器受温度影响较小，适用于高温高频工况，如发动机悬置点加速度测量；
- (2) 在安装加速度传感器时，需要进行  $1g/2g$  反转工况测试；
- (3) 加速度传感器用塑钢土紧固的粘接在待测部位，保证所有传感器正极方向垂直向上，且要保证能够方便的观察对应标识；
- (4) 六分力传感器安装前，需要定制与试验车辆配套的适配器，并保证适配器强度满足试验场工况；
- (5) 六分力传感器安装后，一般要制作前轮保证支撑架，保证滑环在测量过程中始终保持竖直向上。

整车传感器的安装与布置情况如下图所示。



图 5.7 车轮六分力传感器安装

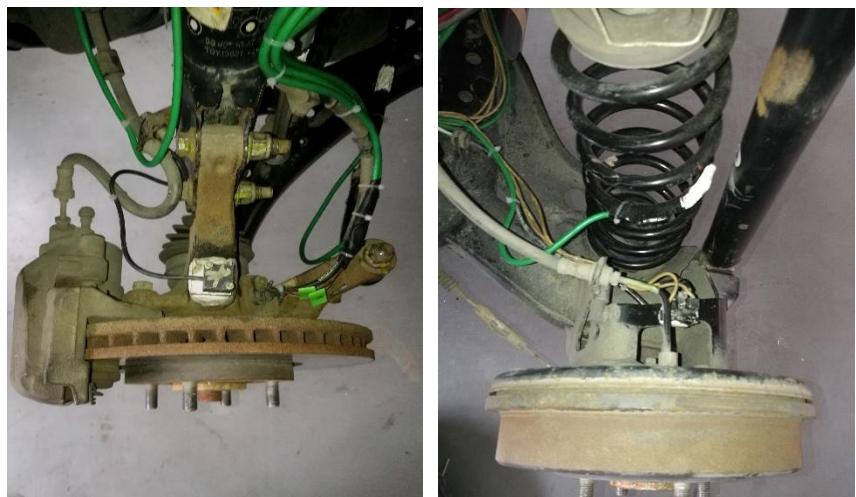


图 5.8 左前与左后轴头加速度传感器布置



图 5.9 左前与左后车身加速度传感器布置

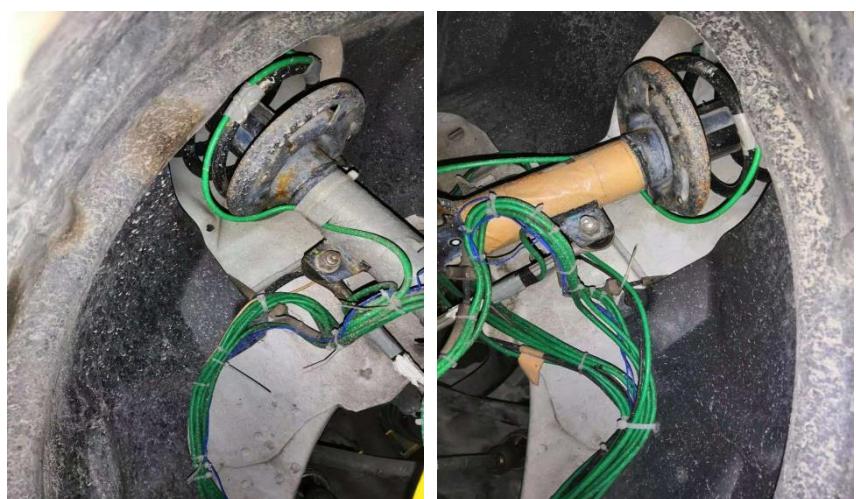


图 5.10 左前与右前贴片连杆传感器布置



图 5.11 车底线束走向布置

#### 5.4.2. 整车通道测试

全部传感器安装完成后，需要对各传感器状态进行测试与信号检验，确保通道能够正常工作。在进行整车通道测试中，对于各个通道的检验通常分为以下三个步骤：

- (1) 将试验车辆利用举升机举起至所有轮胎脱离地面，将六分力传感器归零，按顺序转动车轮并采集数据，检查六分力传感器是否正常；
- (2) 选择一段平直路面，进行全挡位加速和带档减速至车辆停止，使车辆能够产生明显的加速与制动效果，同时采集数据，检查各通道信号是否正常；
- (3) 选择一个圆形广场，进行车辆稳态回转操作，使车辆能够产生明显的车身侧倾效果，同时采集数据，检查各通道信号是否正常。

整车通道检查完毕后，需再次确认各传感器信号线是否存在干涉现象，将布置应变片的零部件位置用防水胶带密封，防止应变片松动与受到外界环境温度的影响。至此，路谱采集车辆准备工作全部完成，待车辆运输至指定试验场后即可按照特定的试验场行驶程序进行路谱采集试验。

### 5.5. 试验场道路载荷谱采集

本项目是基于盐城试验场强化耐久道路开展的技术研究，因此，在制定路谱采集行驶程序时，基本涵盖了试验场所有耐久路面，以便于 HSRC 技术在不同道路特征、或同种道路不同行驶车速下的信号对比验证。

本项目中制定的盐城试验场行驶程序是按照 T8 路段的车辆行驶要求，分别对每种道路工况规划了三种行驶车速，车速数据来源于部分外部企业在试验场中的真实行

驶车速，具体工况如表 5.3 所示。

表 5.3 路谱采集车辆行驶程序

编号	道路名称	车速(KPH)	采集数据记录名称
		A	
1	比利时路	30	Event1
2	混凝土补丁路	35	Event2
3	拱形车道	40	Event3
4	铁道路口	30	Event4
5	振动路III	35	Event5
6	圆形坑洼路	20	Event6
7	短波路	40	Event7
8	路缘冲击（左）	10	Event8
9	路缘冲击（右）	10	Event9
10	30°角路障路	35	Event10
11	扭曲路	8	Event11
12	颠簸路	20	Event12
13	沟渠路	30	Event13
14	26 寸坑洼路	50	Event14
15	波形路	30	Event15
16	振动路 I	35	Event16
17	混凝土板块冲击路	40	Event17
18	鱼鳞路	40	Event18
19	破损混凝土路	40	Event19
20	比利时路	40	Event20
21	溅水路	30	Event21
22	振动路 II	35	Event22
23	长波路	35	Event23
24	绳索路	30	Event24
25	井盖路	35	Event25
26	锯齿路	40	Event26
27	正弦坡道	35	Event27
28	卵石路-10S 蛇形驾驶	20	Event28
34	不规则的混凝土路	30	Event29

在车辆开展路谱采集试验前再次确认各通道状态，严格按照制定的道路行驶车速进行试验场采集，记录数据。此外，试验开展过程中对每条道路进行了三次重复采集，

以保证结果数据的一致性。路谱采集信号结果如下图所示。

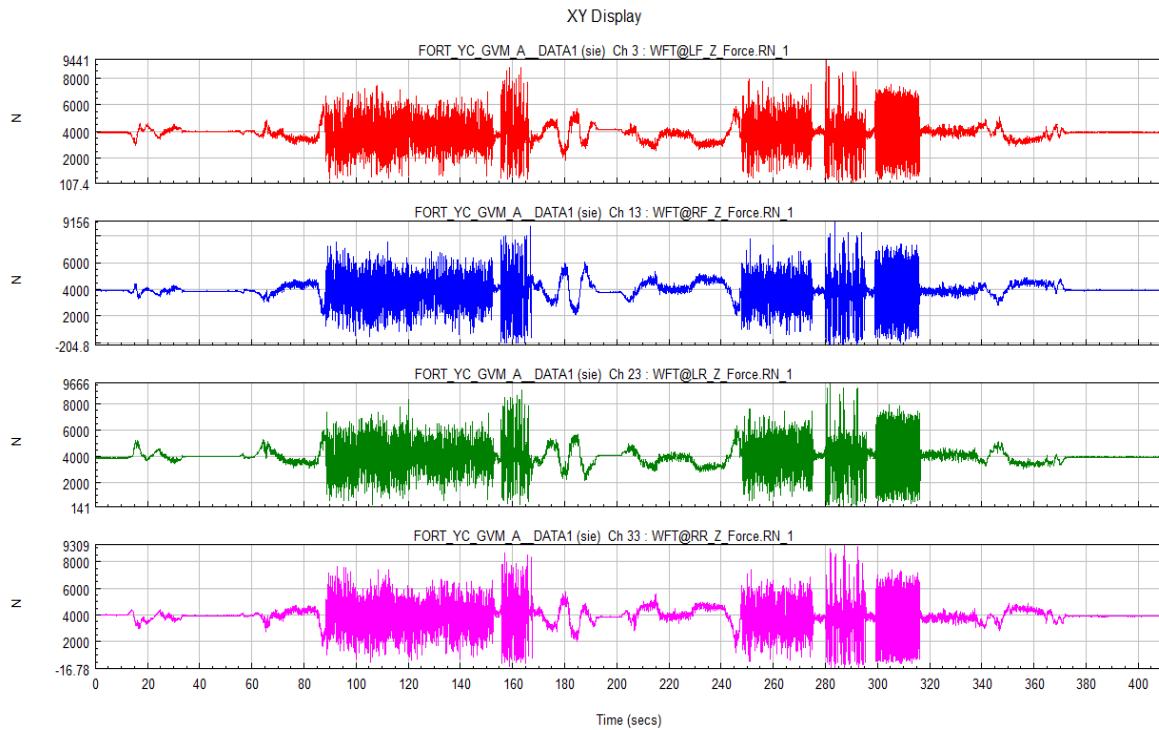


图 5.12 轮心 Z 向力采集结果示意

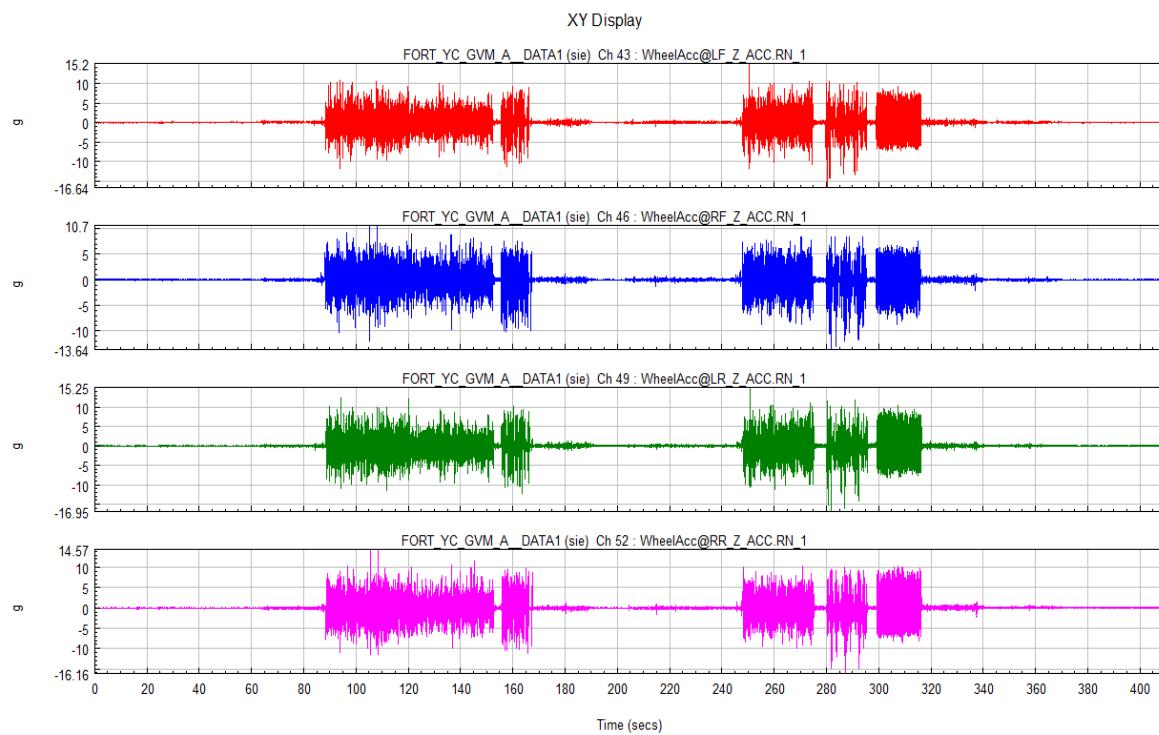


图 5.13 轴头 Z 向加速度采集结果示意

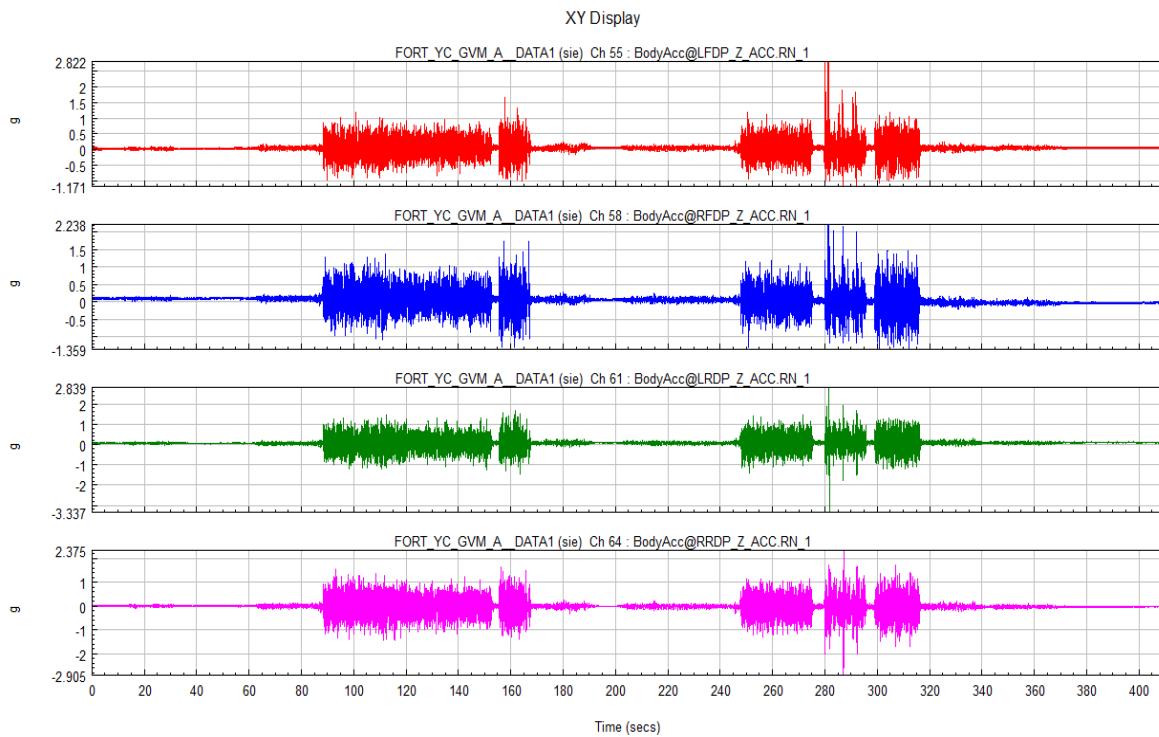


图 5.14 车身 Z 向加速度采集结果示意

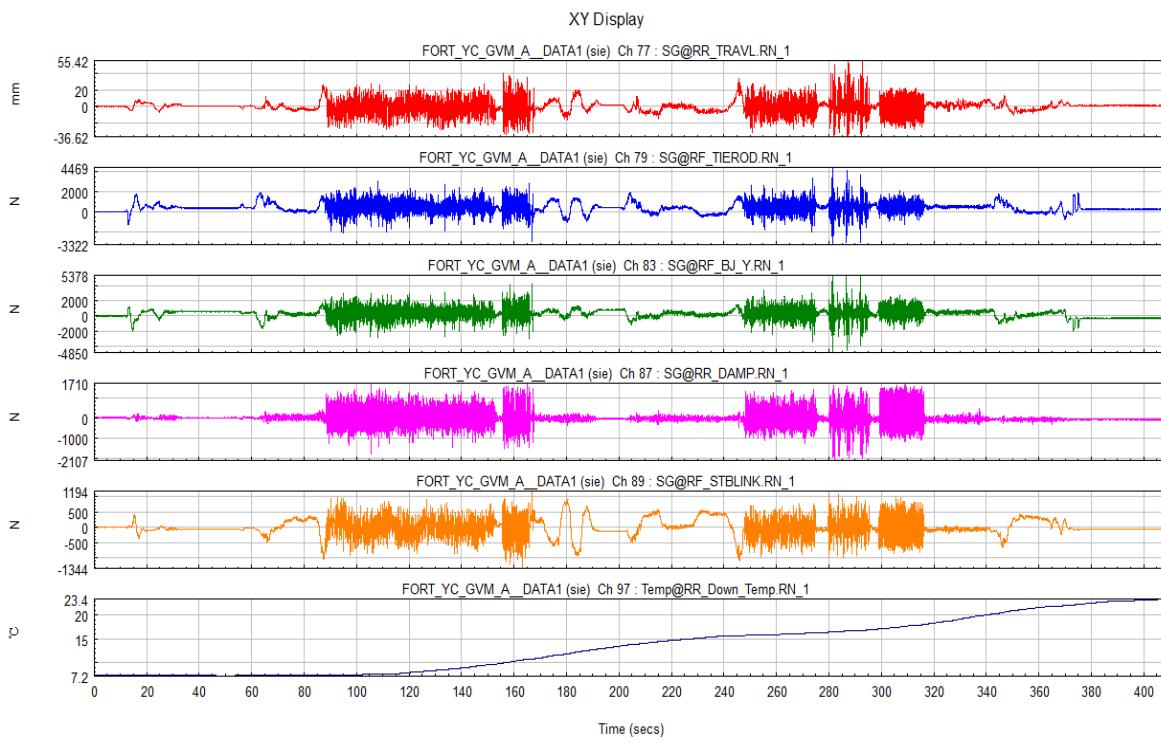


图 5.15 零部件受力采集结果示意

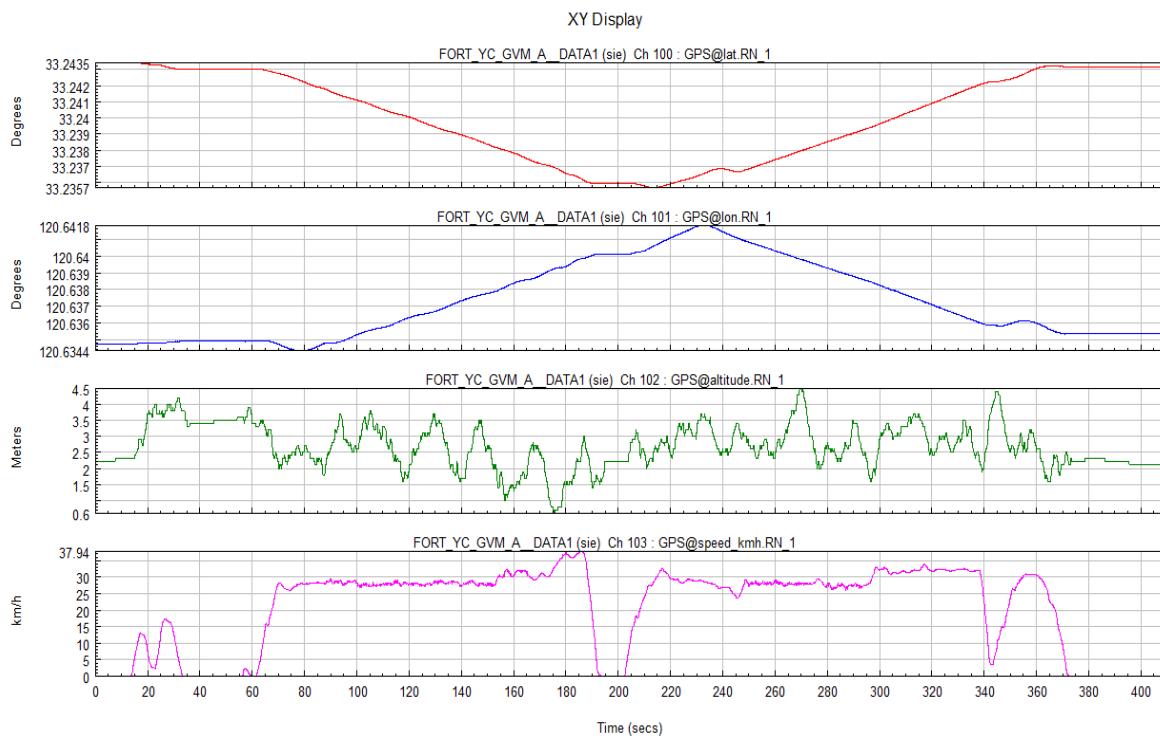


图 5.16 GPS 信号采集结果示意

## 5.6. 本章小结

本章内容主要描述了路谱采集试验的全部过程。从采集通道的确认、传感器的布置安装、通道检验至最终路谱采集试验，每一环节的工作都是保证试验有效进行的必要条件。最终采集信号的检验结果显示，本次路谱采集试验数据有效，能够用于后期 HSRC 技术的对比验证。

# 第6章 混合系统响应收敛仿真技术及应用

根据前文所述，当获得了必要的虚拟试验场数字路面、FTire 轮胎模型以及理解了混合仿真理论之后即可执行一个真实的混合系统响应收敛仿真项目。本章对一台福特翼博样车进行了全流程的混合仿真，并对生成的驱动文件采集车辆的响应信号与实际道路载荷谱数据进行了分析与对比。

## 6.1. 混合仿真坐标系系统

### 6.1.1. 数字化路面的极性

数字化路面的极性定义如下，如图 6.1 所示，以路面的起点看向终点，根据右手定则纵向  $x$  指向路面中央，侧向  $y$  指向左，垂向  $z$  指向路面上方。

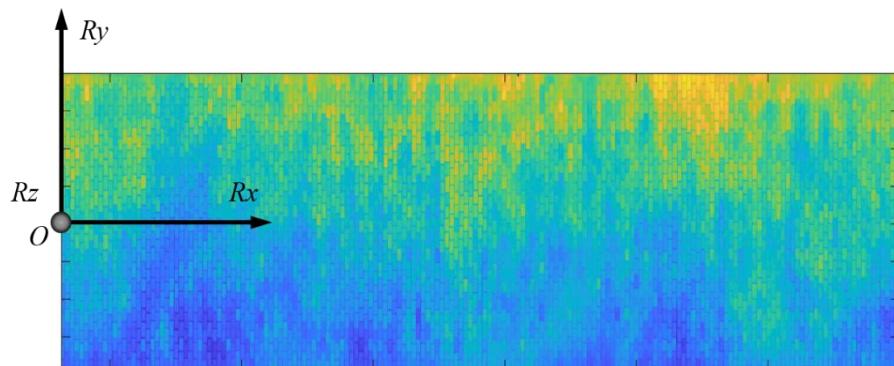


图 6.1 数字路面坐标系

### 6.1.2. 车辆的极性

如图 6.2 所示，车轮心位置的收敛响应信号按照整车坐标系右手定则定义：坐标系原点选在汽车前轴中心位置，坐标系的 X 轴与地面平行并以车辆后方为正方向，Y 轴以指向副驾驶员的方向为正方向，Z 向则以垂直向上为正方向。

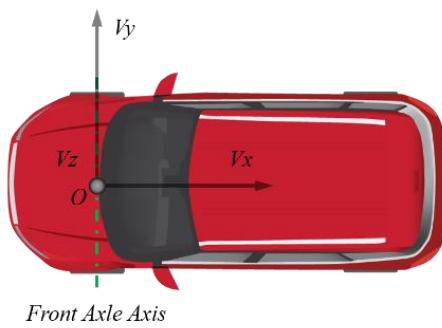


图 6.2 整车坐标系右手定则

### 6.1.3. HSRC 虚拟测试环境下的极性

将虚拟数字路面导入 RPC HSRC 软件后得到路面与整车相结合的模型。车辆的行驶方向被定义为远离 x 正极的负方向，因此如果按照数字路面默认的极性行驶，车辆会按照与实际行驶方向相反的方向行驶远离道路。如图 6.3-6.4 所示，因此需要在软件当中定义路面旋转 180 度。另一个参数是可以调节车辆在纵向的偏置（Road Shift），可以使用该参数来调整车辆行驶的起始位置。调节后车辆在数字路面上行驶所获得的车速和距离数据一定是负值，但与真实行驶方向一致且车轮受力方向也与载荷谱采集中所定义的方向一致。

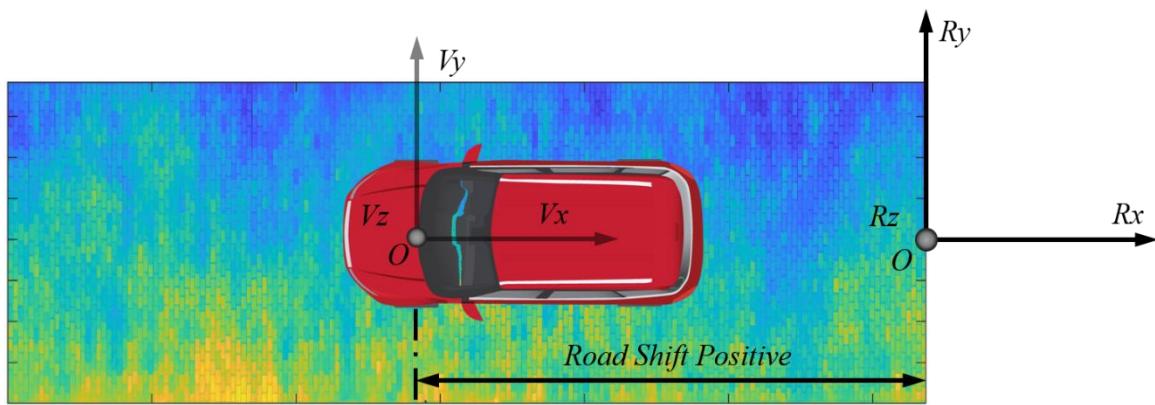


图 6.3 道路旋转 180 度后的整车坐标系与数字路面坐标系

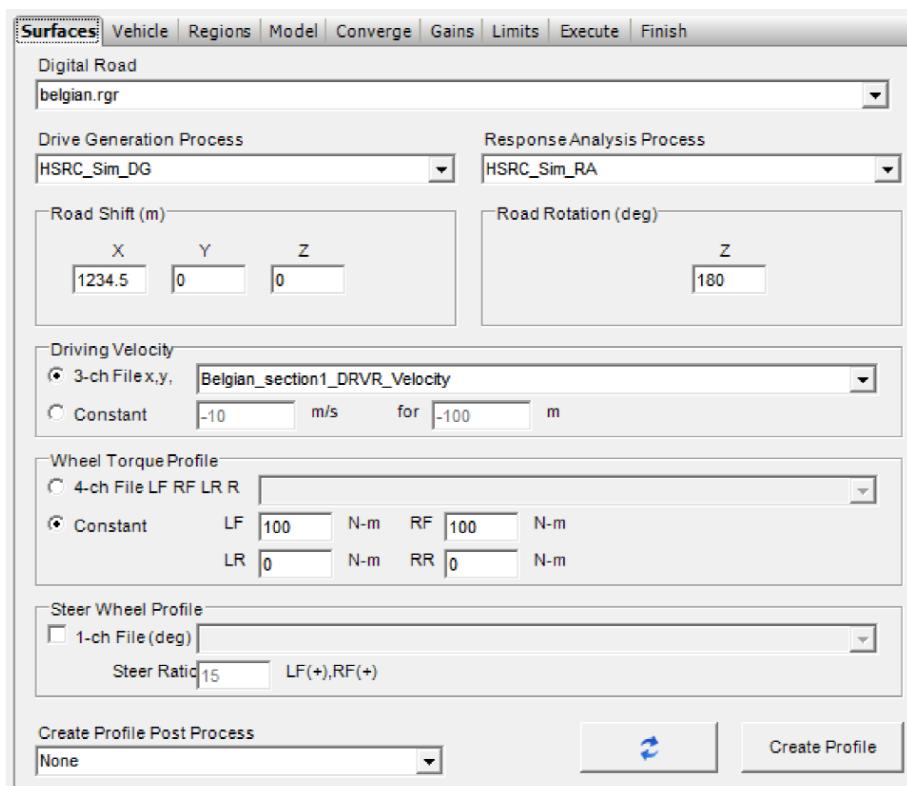


图 6.4 路面参数设置界面

## 6.2. 混合仿真收敛传递函数的获取（HSRC FRF）

一个有效的混合系统响应收敛仿真算法必须同时对轮胎传递函数和台架传递函数建模，下文分别介绍轮胎传递函数和耦合/收敛传递函数的获取方法。

### 6.2.1. 软件设置

在获取真实物理系统的耦合信号传递函数与收敛信号传递函数时，需要首先对样车进行激励。在软件当中设置台架的驱动通道与传统的道路模拟试验相同，如图 6.5 所示，即传统的二十四个控制通道。

Station Drive												
	Station Channel	Control Mode	Channel Descriptor	Full Scale	Units	Upper Limit % FS	Upper Limit	On	Lower Limit % FS	Lower Limit	On	File Link
1	Left Long Comp	Force	Left Long Comp	50.00	kN	1001.00	500.50	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-500.50	<input type="checkbox"/>	
2	Front Lat Comp	Force	Front Lat Comp	100.00	kN	1001.00	1001.00	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-1001.00	<input type="checkbox"/>	
3	LF Vert	Disp	LF Vert	225.00	mm	1001.00	2252.25	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-2252.25	<input type="checkbox"/>	
4	Front Camber	Moment	Front Camber	25.00	kN-m	1001.00	250.25	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-250.25	<input type="checkbox"/>	
5	LF Brake	Moment	LF Brake	12.00	kN-m	1001.00	120.12	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-120.12	<input type="checkbox"/>	
6	Front Steer	Moment	Front Steer	50.00	kN-m	1001.00	500.50	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-500.50	<input type="checkbox"/>	
7	Right Long Comp	Force	Right Long Comp	50.00	kN	1001.00	500.50	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-500.50	<input type="checkbox"/>	
8	Lat Trans	Disp	Lat Trans	220.00	mm	1001.00	2202.20	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-2202.20	<input type="checkbox"/>	
9	RF Vert	Disp	RF Vert	225.00	mm	1001.00	2252.25	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-2252.25	<input type="checkbox"/>	
10	Front Rack	Moment	Front Rack	50.00	kN-m	1001.00	500.50	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-500.50	<input type="checkbox"/>	
11	RF Brake	Moment	RF Brake	12.00	kN-m	1001.00	120.12	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-120.12	<input type="checkbox"/>	
12	Front Toe	Moment	Front Toe	24.00	kN-m	1001.00	240.24	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-240.24	<input type="checkbox"/>	
13	Long Trans	Disp	Long Trans	250.00	mm	1001.00	2502.50	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-2502.50	<input type="checkbox"/>	
14	Rear Lat Comp	Force	Rear Lat Comp	100.00	kN	1001.00	1001.00	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-1001.00	<input type="checkbox"/>	
15	LR Vert	Disp	LR Vert	225.00	mm	1001.00	2252.25	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-2252.25	<input type="checkbox"/>	
16	Rear Camber	Moment	Rear Camber	25.00	kN-m	1001.00	250.25	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-250.25	<input type="checkbox"/>	
17	LR Brake	Moment	LR Brake	12.00	kN-m	1001.00	120.12	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-120.12	<input type="checkbox"/>	
18	Rear Steer	Moment	Rear Steer	35.00	kN-m	1001.00	350.35	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-350.35	<input type="checkbox"/>	
19	Shear	Force	Shear	300.00	kN	1001.00	3003.00	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-3003.00	<input type="checkbox"/>	
20	Yaw	Angle	Yaw	20.00	deg	1001.00	200.20	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-200.20	<input type="checkbox"/>	
21	RR Vert	Disp	RR Vert	225.00	mm	1001.00	2252.25	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-2252.25	<input type="checkbox"/>	
22	Rear Rack	Moment	Rear Rack	50.00	kN-m	1001.00	500.50	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-500.50	<input type="checkbox"/>	
23	RR Brake	Moment	RR Brake	12.00	kN-m	1001.00	120.12	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-120.12	<input type="checkbox"/>	
24	Rear Toe	Moment	Rear Toe	24.00	kN-m	1001.00	240.24	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-240.24	<input type="checkbox"/>	

图 6.5 MTS RPCPro 软件中控制通道的设置

另一方面台架的响应通道应包含力和运动姿态信号，如图 6.6 所示即六分力传感器信号、加速度传感器信号、和轴头位移的计算通道：

Station Drive	Station Response	Computed Response	Hybrid Interface	Event Action	Extra Header Data						
	Station Channel	Channel Descriptor	Full Scale	Units	Upper Limit % FS	Upper Limit	On	Lower Limit % FS	Lower Limit	On	File Link
1	WFT LF FX	WFT LF FX	44.48	kN	1001.00	445.24	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-445.24	<input type="checkbox"/>	
2	WFT LF FY	WFT LF FY	44.48	kN	1001.00	445.24	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-445.24	<input type="checkbox"/>	
3	WFT LF FZ	WFT LF FZ	44.48	kN	1001.00	445.24	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-445.24	<input type="checkbox"/>	
4	WFT LF MX	WFT LF MX	13.56	kN-m	1001.00	135.74	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-135.74	<input type="checkbox"/>	
5	WFT LF MY	WFT LF MY	13.56	kN-m	1001.00	135.74	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-135.74	<input type="checkbox"/>	
6	WFT LF MZ	WFT LF MZ	13.56	kN-m	1001.00	135.74	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-135.74	<input type="checkbox"/>	
7	WFT RF FX	WFT RF FX	44.48	kN	1001.00	445.24	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-445.24	<input type="checkbox"/>	
8	WFT RF FY	WFT RF FY	44.48	kN	1001.00	445.24	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-445.24	<input type="checkbox"/>	
9	WFT RF FZ	WFT RF FZ	44.48	kN	1001.00	445.24	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-445.24	<input type="checkbox"/>	
10	WFT RF MX	WFT RF MX	13.56	kN-m	1001.00	135.74	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-135.74	<input type="checkbox"/>	
11	WFT RF MY	WFT RF MY	13.56	kN-m	1001.00	135.74	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-135.74	<input type="checkbox"/>	
12	WFT RF MZ	WFT RF MZ	13.56	kN-m	1001.00	135.74	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-135.74	<input type="checkbox"/>	
13	WFT LR FX	WFT LR FX	44.48	kN	1001.00	445.24	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-445.24	<input type="checkbox"/>	
14	WFT LR FY	WFT LR FY	44.48	kN	1001.00	445.24	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-445.24	<input type="checkbox"/>	
15	WFT LR FZ	WFT LR FZ	44.48	kN	1001.00	445.24	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-445.24	<input type="checkbox"/>	
16	WFT LR MX	WFT LR MX	13.56	kN-m	1001.00	135.74	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-135.74	<input type="checkbox"/>	
17	WFT LR MY	WFT LR MY	13.56	kN-m	1001.00	135.74	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-135.74	<input type="checkbox"/>	
18	WFT LR MZ	WFT LR MZ	13.56	kN-m	1001.00	135.74	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-135.74	<input type="checkbox"/>	
19	WFT RR FX	WFT RR FX	44.48	kN	1001.00	445.24	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-445.24	<input type="checkbox"/>	
20	WFT RR FY	WFT RR FY	44.48	kN	1001.00	445.24	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-445.24	<input type="checkbox"/>	
21	WFT RR FZ	WFT RR FZ	44.48	kN	1001.00	445.24	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-445.24	<input type="checkbox"/>	
22	WFT RR MX	WFT RR MX	13.56	kN-m	1001.00	135.74	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-135.74	<input type="checkbox"/>	
23	WFT RR MY	WFT RR MY	13.56	kN-m	1001.00	135.74	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-135.74	<input type="checkbox"/>	
24	WFT RR MZ	WFT RR MZ	13.56	kN-m	1001.00	135.74	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-135.74	<input type="checkbox"/>	
25	LF A1y	LF A1y	122.68	g	1001.00	1228.03	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-1228.03	<input type="checkbox"/>	
26	LF A1z	LF A1z	98.78	g	1001.00	988.79	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-988.79	<input type="checkbox"/>	
27	LF A2x	LF A2x	99.04	g	1001.00	991.39	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-991.39	<input type="checkbox"/>	
28	LF A2y	LF A2y	98.94	g	1001.00	990.43	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-990.43	<input type="checkbox"/>	
29	LF A3y	LF A3y	123.52	g	1001.00	1236.44	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-1236.44	<input type="checkbox"/>	
30	LF A3z	LF A3z	99.24	g	1001.00	993.39	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-993.39	<input type="checkbox"/>	
31	RF A1y	RF A1y	122.87	g	1001.00	1229.93	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-1229.93	<input type="checkbox"/>	
32	RF A1z	RF A1z	99.53	g	1001.00	996.30	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-996.30	<input type="checkbox"/>	
33	RF A2x	RF A2x	122.52	g	1001.00	1226.43	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-1226.43	<input type="checkbox"/>	
34	RF A2y	RF A2y	123.30	g	1001.00	1234.23	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-1234.23	<input type="checkbox"/>	
35	RF A3y	RF A3y	98.88	g	1001.00	989.79	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-989.79	<input type="checkbox"/>	
36	RF A3z	RF A3z	123.21	g	1001.00	1233.33	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-1233.33	<input type="checkbox"/>	
37	LR A1y	LR A1y	123.08	g	1001.00	1232.03	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-1232.03	<input type="checkbox"/>	
38	LR A1z	LR A1z	122.89	g	1001.00	1230.13	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-1230.13	<input type="checkbox"/>	
39	LR A2x	LR A2x	122.91	g	1001.00	1230.33	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-1230.33	<input type="checkbox"/>	
40	LR A2y	LR A2y	99.65	g	1001.00	997.50	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-997.50	<input type="checkbox"/>	
41	LR A3y	LR A3y	122.75	g	1001.00	1228.73	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-1228.73	<input type="checkbox"/>	
42	LR A3z	LR A3z	123.23	g	1001.00	1233.53	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-1233.53	<input type="checkbox"/>	
43	RR A1y	RR A1y	121.93	g	1001.00	1220.52	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-1220.52	<input type="checkbox"/>	
44	RR A1z	RR A1z	121.59	g	1001.00	1217.12	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-1217.12	<input type="checkbox"/>	
45	RR A2x	RR A2x	123.36	g	1001.00	1234.83	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-1234.83	<input type="checkbox"/>	
46	RR A2y	RR A2y	123.35	g	1001.00	1234.73	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-1234.73	<input type="checkbox"/>	
47	RR A3y	RR A3y	122.74	g	1001.00	1228.63	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-1228.63	<input type="checkbox"/>	
48	RR A3z	RR A3z	122.96	g	1001.00	1230.83	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-1230.83	<input type="checkbox"/>	
49	LF_SpdIDOF_Dx	LF_SpdIDOF_Dx	250.00	mm	1001.00	2502.50	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-2502.50	<input type="checkbox"/>	
50	LF_SpdIDOF_Dy	LF_SpdIDOF_Dy	220.00	mm	1001.00	2202.20	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-2202.20	<input type="checkbox"/>	
51	LF_SpdIDOF_Dz	LF_SpdIDOF_Dz	225.00	mm	1001.00	2252.25	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-2252.25	<input type="checkbox"/>	
52	LF_SpdIDOF_@x	LF_SpdIDOF_@x	18.00	deg	1001.00	180.18	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-180.18	<input type="checkbox"/>	
53	LF_SpdIDOF_@y	LF_SpdIDOF_@y	20.00	deg	1001.00	200.20	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-200.20	<input type="checkbox"/>	
54	LF_SpdIDOF_@z	LF_SpdIDOF_@z	12.00	deg	1001.00	120.12	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-120.12	<input type="checkbox"/>	
55	RF_SpdIDOF_Dx	RF_SpdIDOF_Dx	250.00	mm	1001.00	2502.50	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-2502.50	<input type="checkbox"/>	
56	RF_SpdIDOF_Dy	RF_SpdIDOF_Dy	220.00	mm	1001.00	2202.20	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-2202.20	<input type="checkbox"/>	
57	RF_SpdIDOF_Dz	RF_SpdIDOF_Dz	225.00	mm	1001.00	2252.25	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-2252.25	<input type="checkbox"/>	
58	RF_SpdIDOF_@x	RF_SpdIDOF_@x	18.00	deg	1001.00	180.18	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-180.18	<input type="checkbox"/>	
59	RF_SpdIDOF_@y	RF_SpdIDOF_@y	20.00	deg	1001.00	200.20	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-200.20	<input type="checkbox"/>	
60	RF_SpdIDOF_@z	RF_SpdIDOF_@z	12.00	deg	1001.00	120.12	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-120.12	<input type="checkbox"/>	
61	LR_SpdIDOF_Dx	LR_SpdIDOF_Dx	250.00	mm	1001.00	2502.50	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-2502.50	<input type="checkbox"/>	
62	LR_SpdIDOF_Dy	LR_SpdIDOF_Dy	220.00	mm	1001.00	2202.20	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-2202.20	<input type="checkbox"/>	
63	LR_SpdIDOF_Dz	LR_SpdIDOF_Dz	225.00	mm	1001.00	2252.25	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-2252.25	<input type="checkbox"/>	
64	LR_SpdIDOF_@x	LR_SpdIDOF_@x	18.00	deg	1001.00	180.18	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-180.18	<input type="checkbox"/>	
65	LR_SpdIDOF_@y	LR_SpdIDOF_@y	20.00	deg	1001.00	200.20	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-200.20	<input type="checkbox"/>	
66	LR_SpdIDOF_@z	LR_SpdIDOF_@z	12.00	deg	1001.00	120.12	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-120.12	<input type="checkbox"/>	
67	RR_SpdIDOF_Dx	RR_SpdIDOF_Dx	250.00	mm	1001.00	2502.50	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-2502.50	<input type="checkbox"/>	
68	RR_SpdIDOF_Dy	RR_SpdIDOF_Dy	220.00	mm	1001.00	2202.20	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-2202.20	<input type="checkbox"/>	
69	RR_SpdIDOF_Dz	RR_SpdIDOF_Dz	225.00	mm	1001.00	2252.25	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-2252.25	<input type="checkbox"/>	
70	RR_SpdIDOF_@x	RR_SpdIDOF_@x	18.00	deg	1001.00	180.18	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-180.18	<input type="checkbox"/>	
71	RR_SpdIDOF_@y	RR_SpdIDOF_@y	20.00	deg	1001.00	200.20	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-200.20	<input type="checkbox"/>	
72	RR_SpdIDOF_@z	RR_SpdIDOF_@z	12.00	deg	1001.00	120.12	<input type="checkbox"/>	-1001.00	-120.12	<input type="checkbox"/>	

图 6.6 MTS RPCPro 软件中响应通道的设置

正如在第二章中所讨论到的，根据混合仿真算法的原理必须为每个自由度分配一个耦合和一个收敛信号。对于 MTS 329 道路模拟试验机，在垂直方向的自由度上选择将垂直自由度与力耦合，这样使得虚拟轮胎可以有效地跟随路面高程的起伏而如果以位移作为约束则会受到过高的冲击载荷，这样所获得的垂直自由度的收敛将更加稳定。而其他方向的自由度则与运动相耦合（位移或旋转），以使它们更接近几何体在真实空间中彼此的相对位置。如图 6.7 所示，以左前轮单轮为例，除了垂直方向为力耦合位移收敛其他四个方向均为位移耦合力收敛（制动力矩方向不控制）。

	Station Channel	Channel Descriptor	Units	HSRC Type
1	LF Dx	LF Dx	mm	Coupling
2	LF Fx	LF Fx	kN	Convergence
3	LF Dy	LF Dy	mm	Coupling
4	LF Fy	LF Fy	kN	Convergence
5	LF Dz	LF Dz	mm	Convergence
6	LF Fz	LF Fz	kN	Coupling
7	LF @x	LF @x	deg	Coupling
8	LF Mx	LF Mx	N-m	Convergence
9	LF @y	LF @y	deg	Convergence
10	LF My	LF My	N-m	Coupling
11	LF @z	LF @z	deg	Coupling
12	LF Mz	LF Mz	N-m	Convergence

图 6.7 MTS RPCPro 软件中耦合与收敛信号的分配

### 6.2.2. Ftire 轮胎传递函数的系统识别

首先导入已获取的 Ftire 轮胎模型文件，导入后可以在 MTS RPC HSRC 软件界面下定义传递函数系统识别所需的激励信号震形和幅值。相关参数定义如图 6.8-6.9 所示：

Channel Description	Units	Lower Cut-Off Freq. (Hz)	Break Freq. (Hz)	Exponent	Upper Cut-Off Freq. (Hz)
LF Dx	mm	0.00	1.00	2.00	102.40
LF Dy	mm	0.00	1.00	2.00	102.40
LF Fz	kN	0.00	1.00	1.00	102.40
LF @x	deg	0.00	1.00	2.00	102.40
LF My	N-m	0.00	1.00	1.00	102.40
LF @z	deg	0.00	1.00	2.00	102.40

图 6.8 驱动信号频谱震形

Channel Description	Units	3 Sigma (EU)	DC Offset
LF Dx	mm	5.00	0.00
LF Dy	mm	5.00	0.00
LF Fz	kN	1.00	0.00
LF @x	deg	0.50	0.00
LF My	N-m	0.00	0.00
LF @z	deg	0.50	0.00

图 6.9 驱动信号频谱幅值

在定义好模型的相关参数后即可对轮胎模型进行激励，如图 6.10 所示。轮胎模型相关参数定义如下：

- Rolling Speed (滚动速度)：轮胎会在匀速滚动下被激励，由于轮胎刚度和阻尼随速度变化，因此需要选择一种试验场下驾驶的典型速度；
- Drive Torque (驱动力矩)：轮胎的预加载驱动扭矩会影响轮胎的响应。对于前驱乘用车一般选取 100 N.m 每轮的经验值；
- Hybrid Interface Offset (混合仿真交互面偏置)：台架的混合仿真交互面偏置值，这个参数根据每个台架的配置尺寸而改变；
- Virtual Wheel Mass (虚拟轮胎质量)：车轮及轮胎的总重；
- Wheel MOI\_Ixx\_Izz (虚拟车轮 Ixx/Izz 转动惯量)：车轮及轮胎绕非旋转轴的转动惯量；
- Wheel MOI\_Iyy (虚拟车轮 Iyy 转动惯量)：车轮及轮胎绕旋转轴的转动惯量。

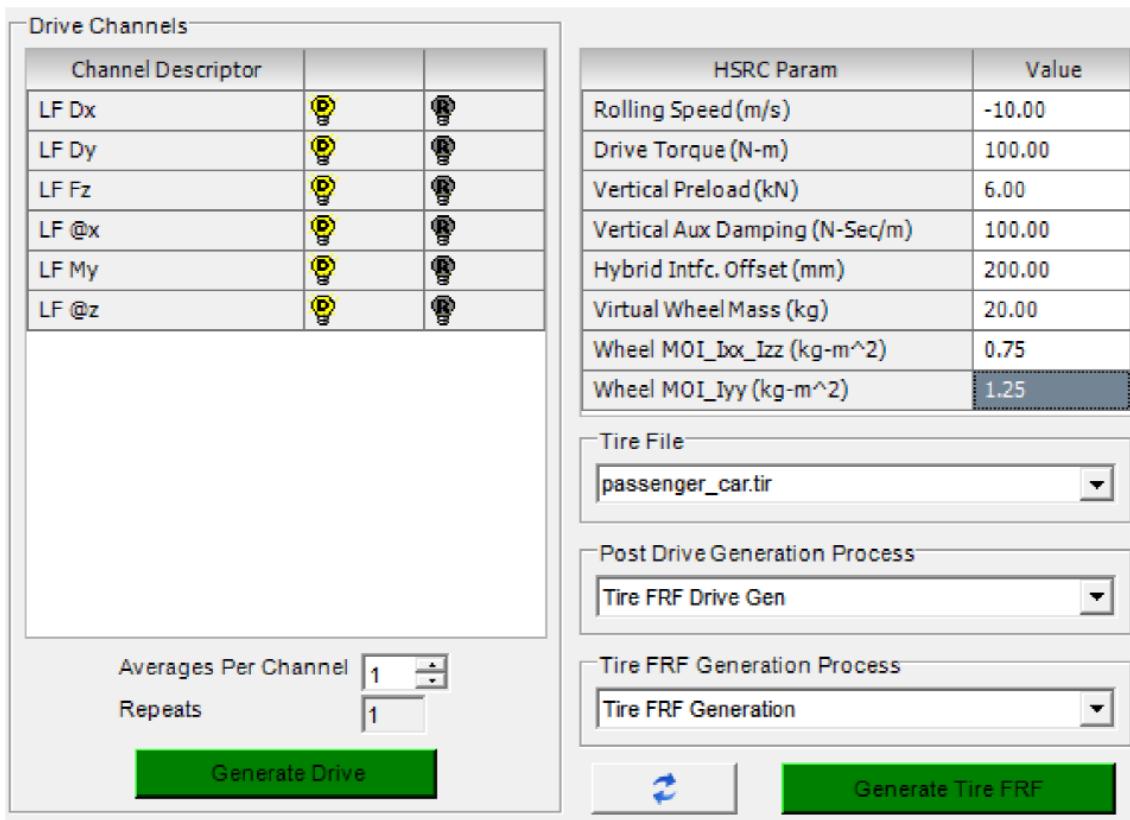


图 6.10 轮胎传递函数系统识别参数

如图 6.11 所示为轮胎 Ftire 模型的轮胎模型参数辨识结果，图中只展示了对角线的传递函数，值得注意的是第五个传递函数为零代表制动通道 My 的力矩与旋转角度之间的关系不参与整体计算。

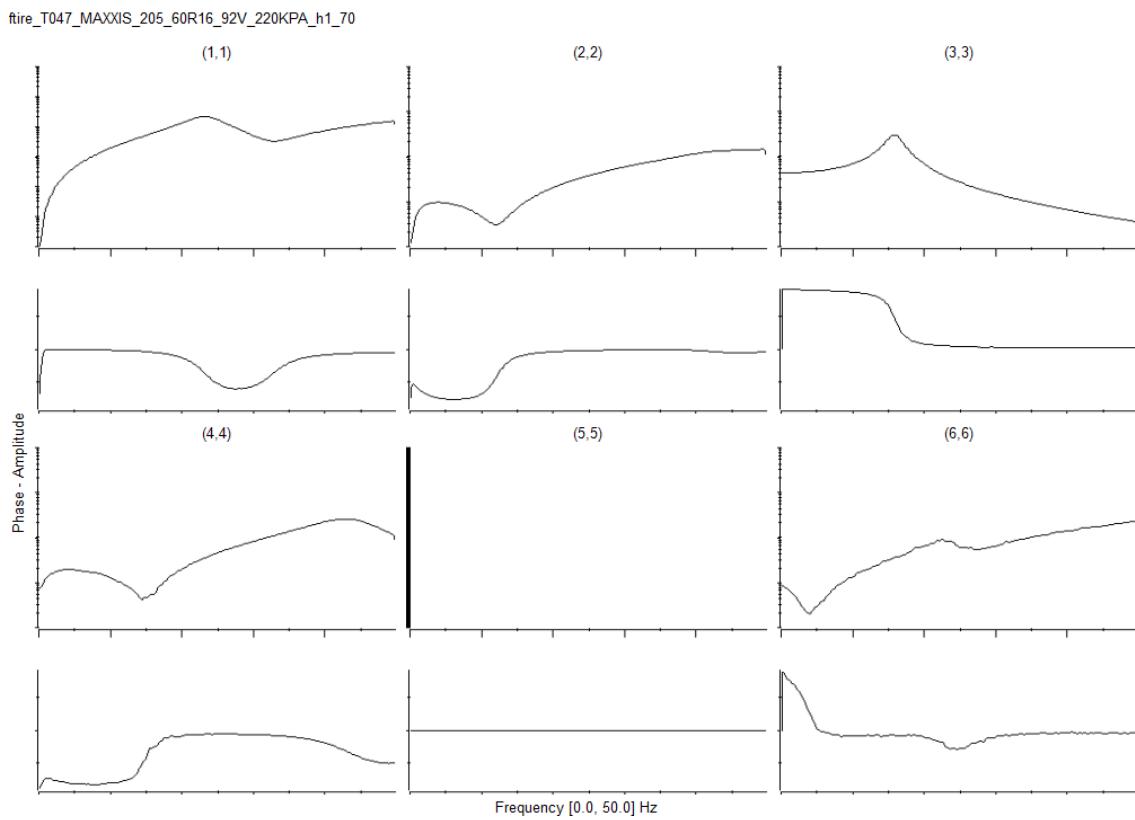


图 6.11 轮胎传递函数(DWT\_FRF)

### 6.3.1. 耦合信号与收敛信号传递函数的系统识别

耦合信号与收敛信号传递函数的系统识别与传统道路模拟的系统识别获取方法相同，如第二章所述，唯一的区别是需要根据耦合信号组与收敛信号组将响应信号分类并且分别求取耦合信号传递函数 (HIX\_FRF) 与收敛信号传递函数 (HIC\_FRF)。通过对耦合信号传递函数与轮胎模型传递函数矩阵求乘积再与收敛信号传递函数求和即可获得混合仿真传递函数，见公式 6.1。如图 6.12-6.14 所示，分别为真实的耦合信号传递函数、收敛信号传递函数和混合仿真传递函数。

对新获得的混合仿真传递函数矩阵求逆，即可得到混合仿真传递函数反函数，见公式 6.2。如图 6.15 所示，蓝色的矩阵曲线为得到的混合仿真传递函数反函数。

$$HSRC_{FRF} = HIX_{FRF} * DWT_{FRF} + HIC_{FRF} \quad \dots \dots \dots \quad (6.1)$$

$$HSRC_{FRF}^{-1} = \frac{1}{HSRC_{FRF}} \quad \dots \dots \dots \quad (6.2)$$

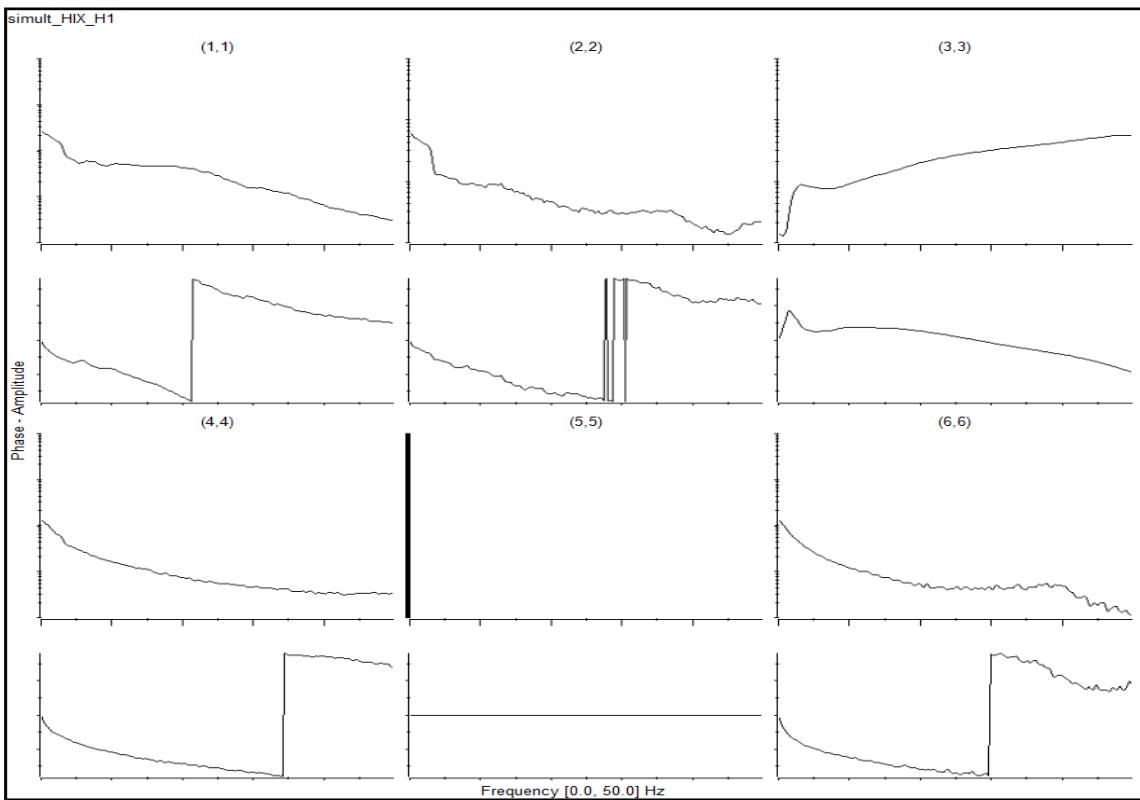


图 6.12 耦合信号传递函数(HIX\_FRF)

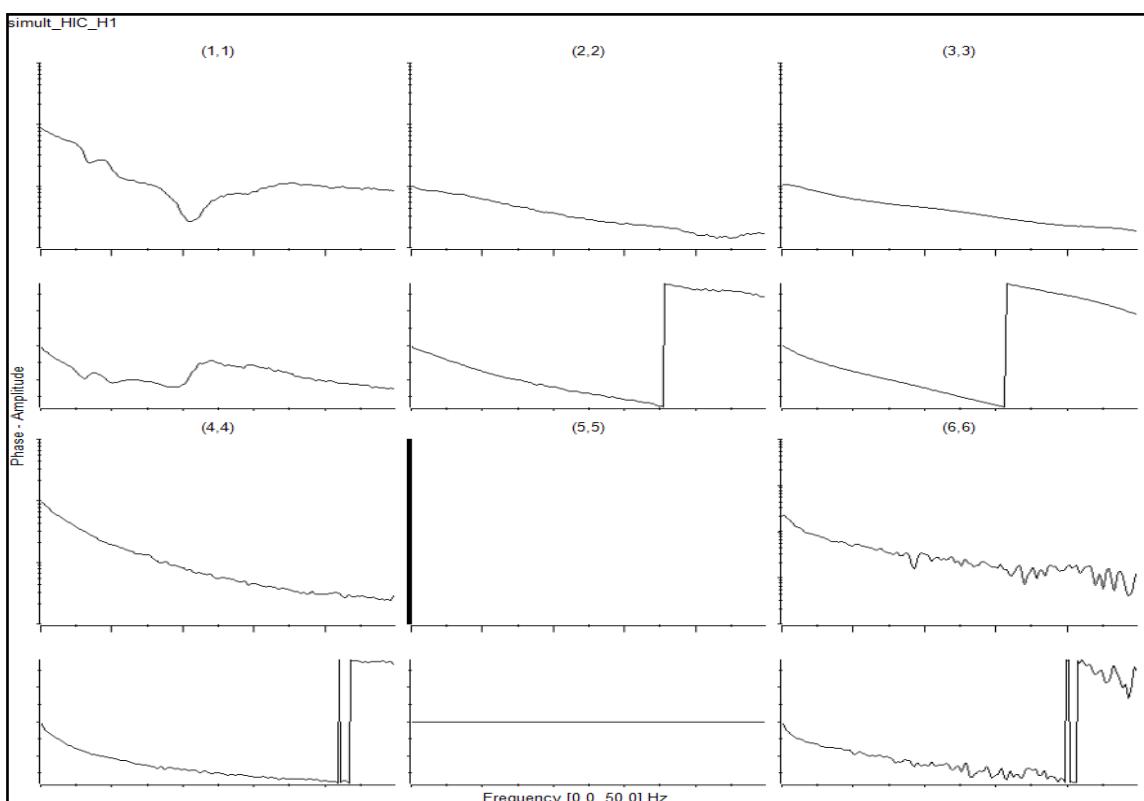


图 6.13 收敛信号传递函数(HIC\_FRF)

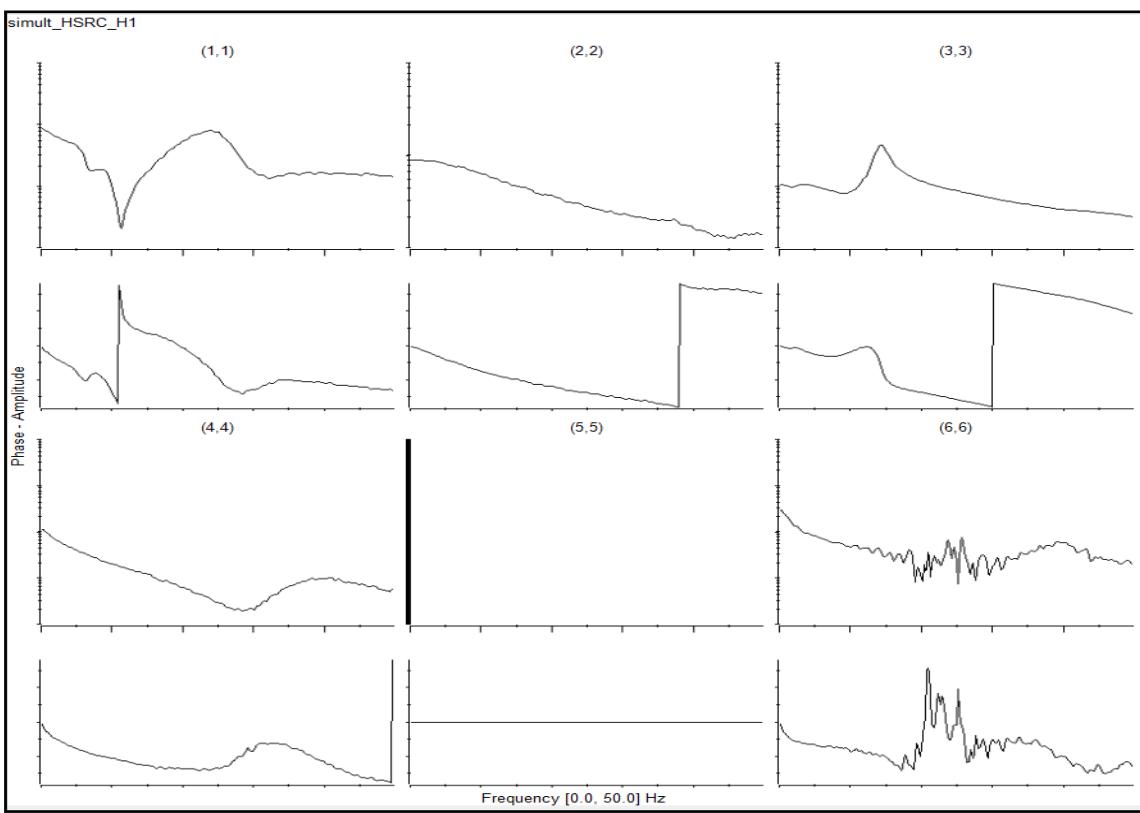


图 6.14 混合仿真传递函数 (HSRC FRF)

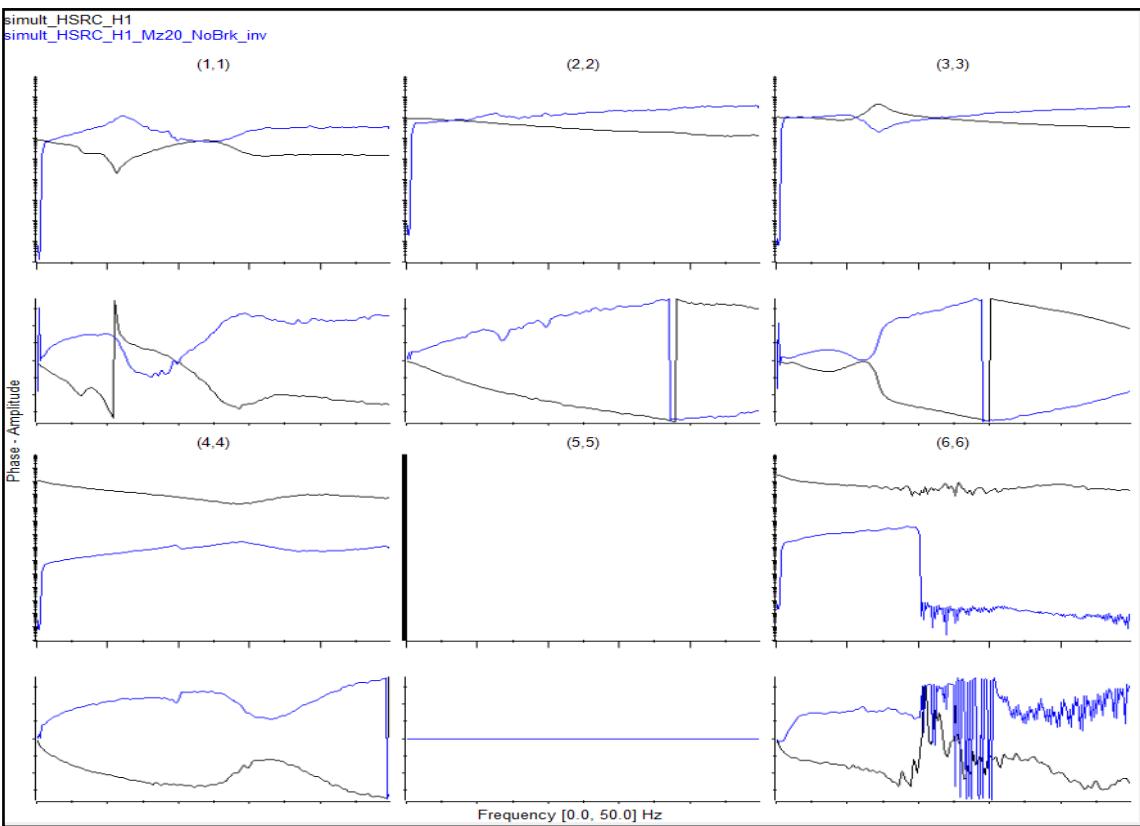
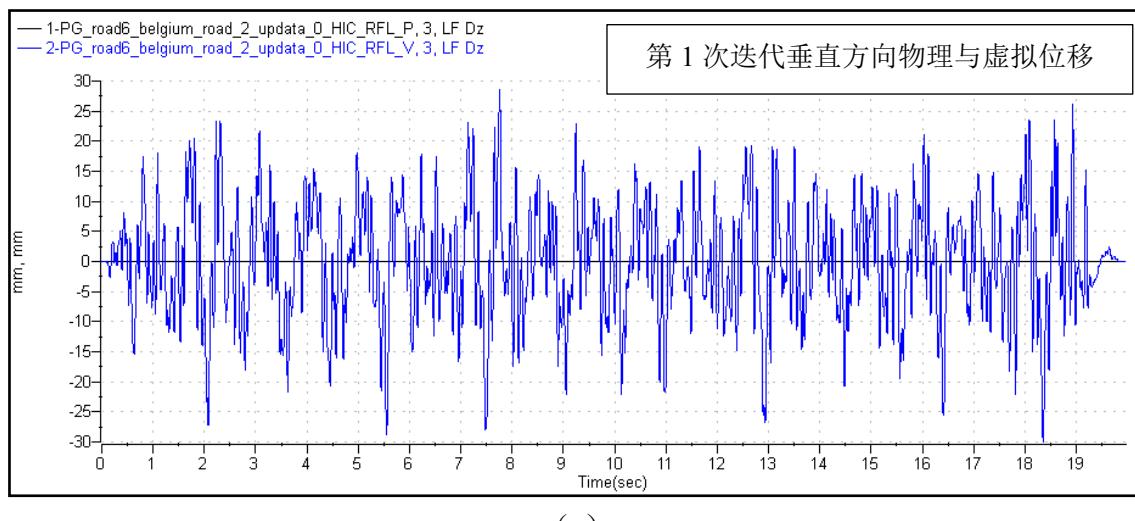


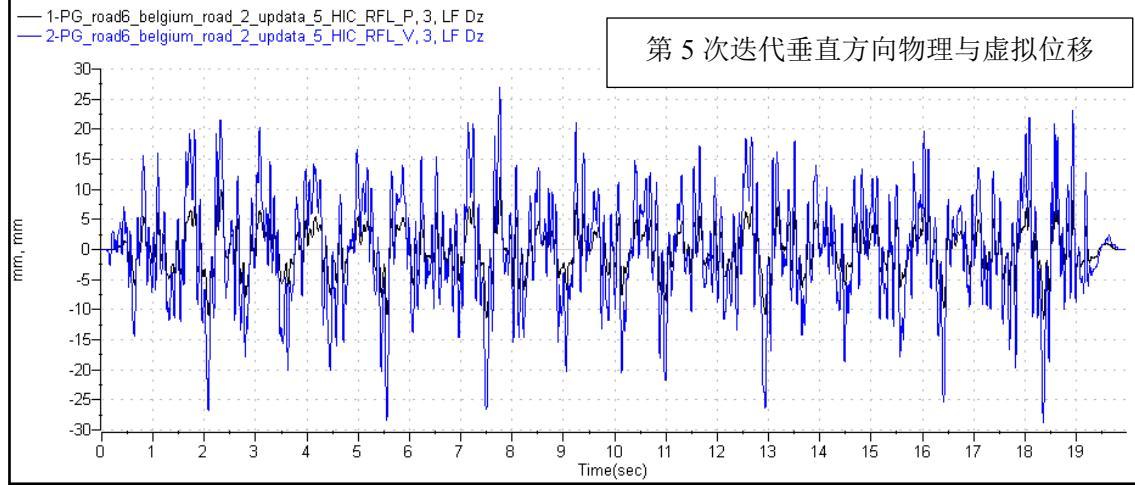
图 6.15 混合仿真传递函数反函数 (HSRC FRF<sup>-1</sup> 蓝色曲线)

### 6.3. 迭代与收敛

获得了混合仿真传递函数反函数即可根据混合仿真迭代算法进行台架驱动文件的开发。以 Event20 比利时路的左前轮垂向位移为例，如图 6.16 所示，在第一次的迭代当中，由于真实物理系统的样车并没有被激励，因此得到了一条垂向位移为零的黑色曲线；而在虚拟环境中轮胎模型会在无位移但有车辆静态垂向预载的耦合信号加载下通过指定的数字路面，从而获得左前轮垂向位移的蓝色收敛曲线。对物理和虚拟系统第一次的垂向位移求差值得到左前轮在混合仿真交互平面垂向位移的误差曲线，并与混合仿真传递函数反函数卷积得到第二次的物理系统台架驱动信号。对样车使用新的驱动信号进行激励采集得到新的耦合信号，驱动虚拟轮胎后得到新的物理与虚拟环境的收敛信号误差，如图 6.16 所示如此反复迭代黑色的真实物理系统响应不断“增长”，最终真实的物理系统和虚拟系统中的轮心垂向位移最终会收敛至彼此相协调的状态。



(a)



(b)

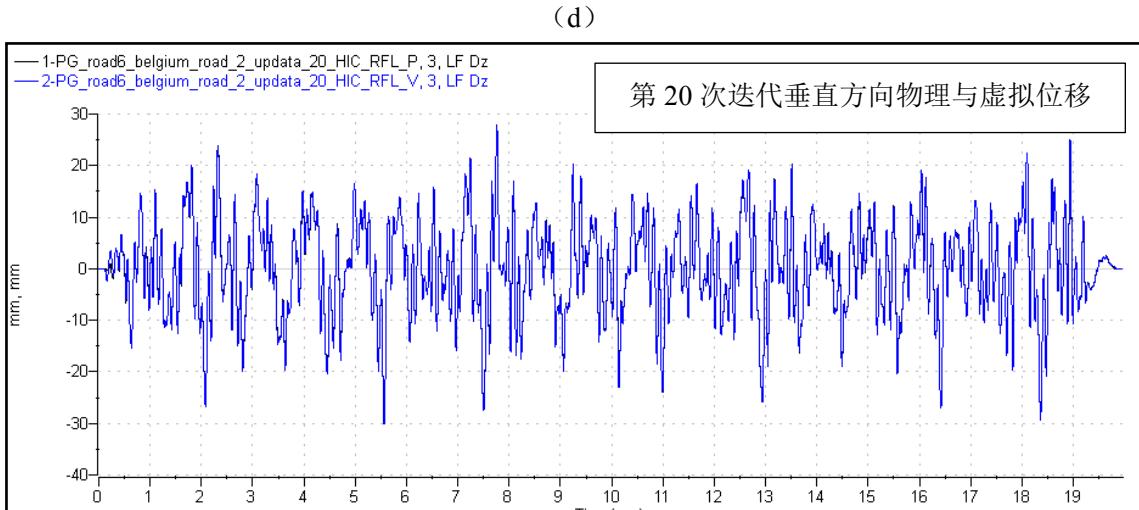
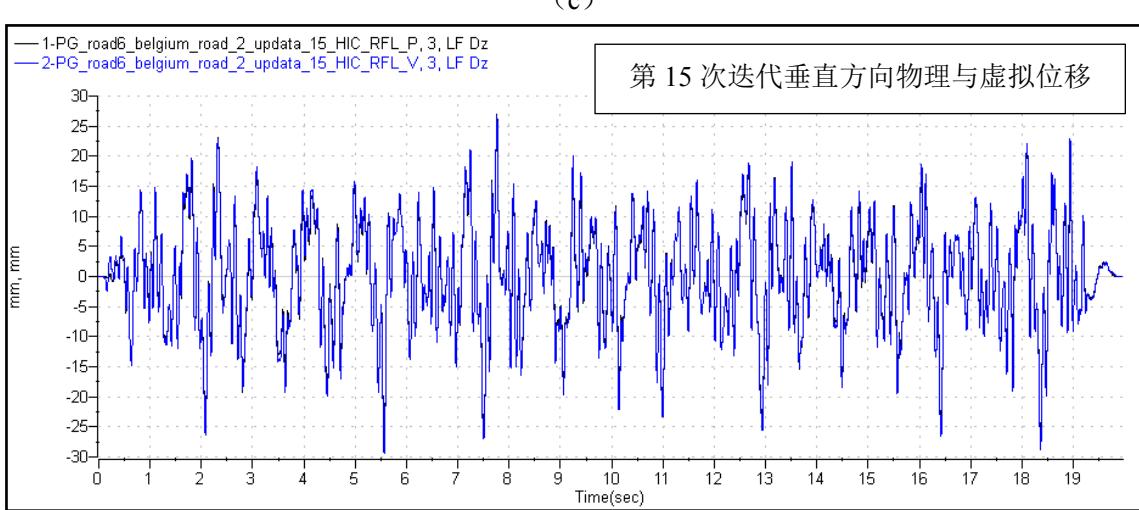
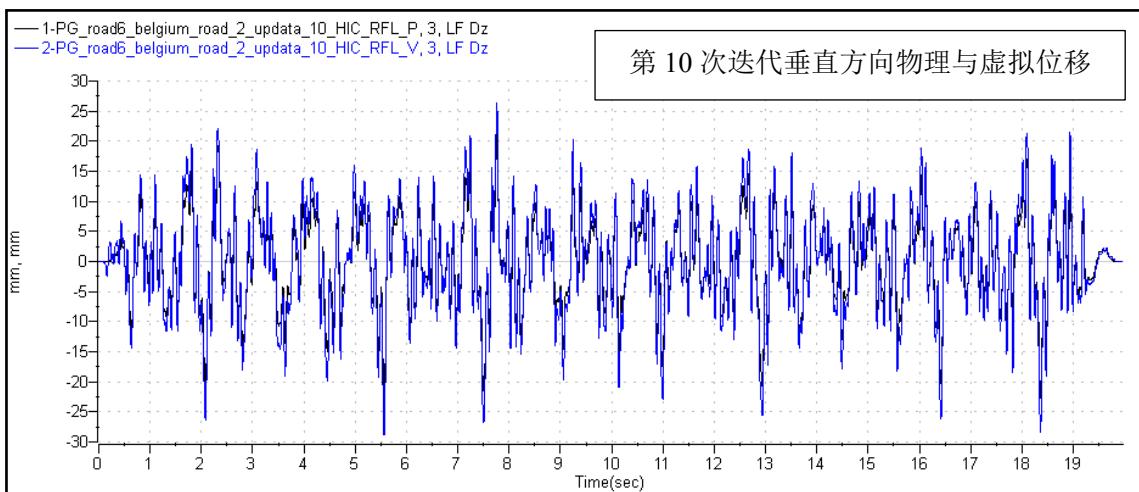


图 6.16 在混合仿真迭代过程中，物理系统中的黑色垂向位移信号与虚拟系统中的蓝色垂向位移信号不断收敛至重合的程度

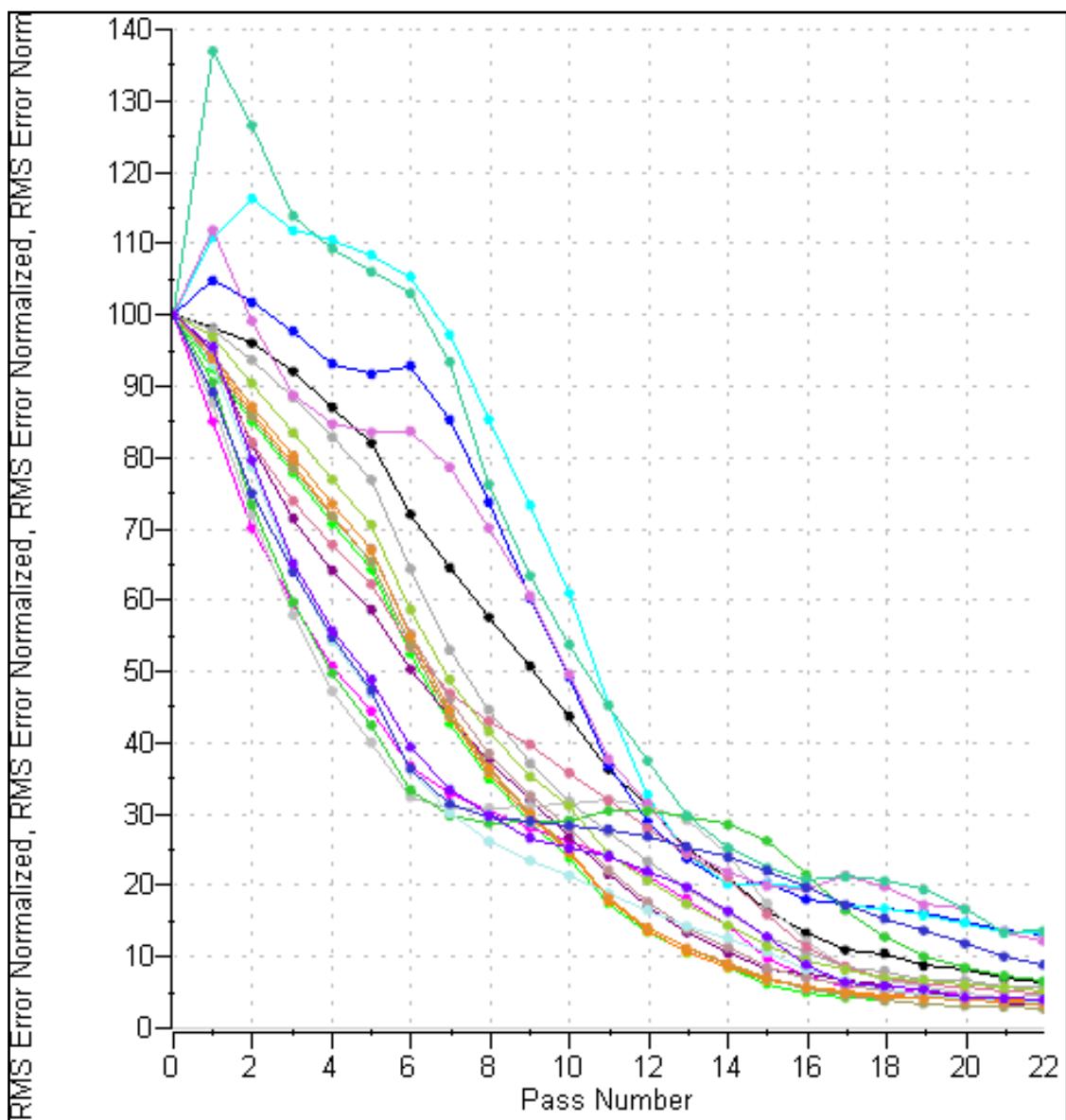


图 6.17 比利时路混合仿真迭代误差收敛曲线

表 6.1 比利时路混合仿真各通道迭代误差统计

通道名称	LF					RF				
	Fx	Fy	Mx	Mz	Dz	Fx	Fy	Mx	Mz	Dz
误差值	6.50	13.14	3.29	4.41	2.99	5.68	13.48	4.52	4.95	3.95
通道名称	LR					RR				
	Fx	Fy	Mx	Mz	Dz	Fx	Fy	Mx	Mz	Dz
误差值	3.81	12.23	6.57	3.68	2.72	5.0	13.60	8.85	4.04	3.40

如图 6.17 比利时路混合仿真迭代误差收敛曲线所示，通过二十二次迭代，物理系

统与虚拟系统相协调一致，混合系统响应收敛仿真中作为收敛信号的二十个通道，其物理系统与虚拟系统间误差的均方根误差均下降到 20%以下，二十个迭代通道的误差平均值为 6.34%，即比利时路的混合仿真精度为 93.66%。与此同时，混合系统响应收敛得到了唯一同时满足两个系统约束条件的驱动文件，该驱动文件即可用于该仿真工况下的整车道路模拟试验。

本文同样展示了颠簸路的混合仿真迭代误差结果，如图 6.18 所示。

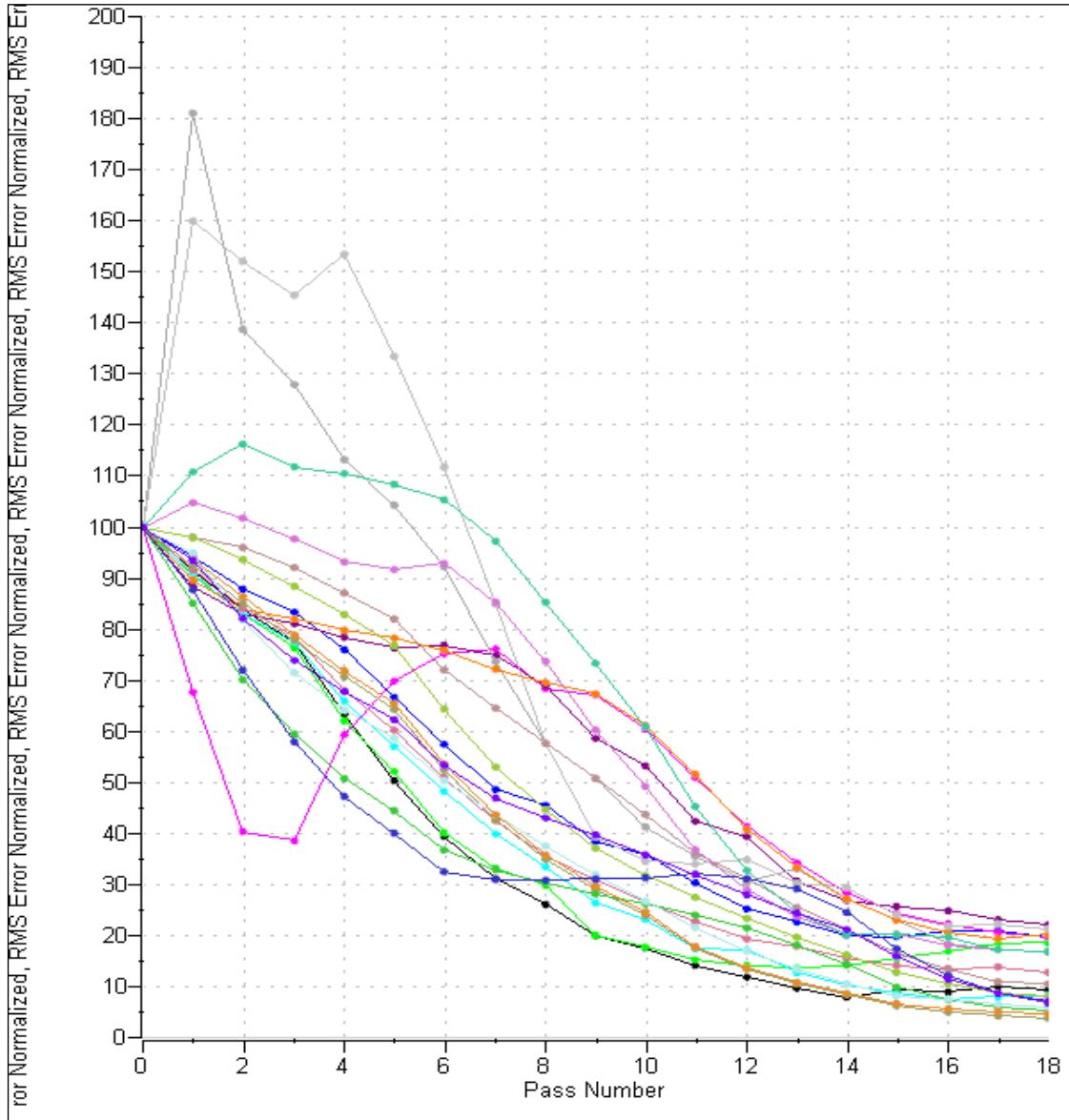


图 6.18 颠簸路路混合仿真迭代误差收敛曲线

在进行颠簸路混合仿真迭代过程中，通过十八次迭代，物理系统与虚拟系统相协调一致，作为收敛信号的二十个通道中有 3 个通道的系统均方根误差位于 20%-23%之间，其余通道均方根误差均低于 20%，二十个迭代通道的误差平均值为 12.74%，即

颠簸路的混合仿真精度为 87.26%，符合项目预期精度指标。

表 6.2 颠簸路混合仿真各通道迭代误差统计

通道名称	LF					RF				
	Fx	Fy	Mx	Mz	Dz	Fx	Fy	Mx	Mz	Dz
误差值	10.62	16.74	5.32	19.44	9.32	7.94	16.82	19.91	7.15	18.59
通道名称	LR					RR				
	Fx	Fy	Mx	Mz	Dz	Fx	Fy	Mx	Mz	Dz
误差值	22.06	16.97	6.82	6.00	8.21	20.21	21.32	3.82	4.74	12.79

在搓板路与锯齿路的混合仿真迭代过程中，物理系统与虚拟系统间的误差均方根误差均能降低至 20%以下，同样符合项目预期的 80%精度指标。由于篇幅原因，此处不再列举其他两种路面的精度结果。根据以往传统的路谱采集信号迭代经验，HSRC 技术的迭代与收敛速度要显得更加优越。同种耐久程序下的台架迭代过程，运用 HSRC 技术可将传统的路谱采集迭代周期 5-10 个工作日降低至 2-5 个工作日，这也是该项技术的先进性所在。

## 6.4. 迭代结果评价

在 6.3 节中证明了混合系统响应收敛仿真算法可获得高于 80%的仿真精度，但这是在给定条件下得到的唯一解，即整个混合仿真系统包含了真实的试验样车与台架、轮胎模型及虚拟数字路面等给定信息。尽管获得的台架驱动是可信的，但由于现有技术水平的限制，诸如轮胎模型建模精度误差等因素会导致混合仿真的结果与真实道路载荷谱采集所得到的载荷响应有偏差。因此在下文中将从时域曲线、频域曲线、损伤分析等三个角度对比混合系统响应收敛仿真技术与真实载荷谱采集获得的数据之间的差别。以下图中，红色曲线均为载荷谱采集目标真实信号，蓝色曲线均为混合系统响应收敛仿真技术所获得的车辆载荷信号。由于篇幅所限无法展示全部通道的结果对比，因此本文仅以左前轮垂向力为目标展示各个方面的仿真效果。完整的对比结果参见附件。

### 6.4.1. 时域曲线对比

如图 6.19 以及 6.20 所示，可以发现在颠簸路当中混合仿真得到的垂向力蓝色信号与真实的载荷谱采集信号相比在第一个坑洞位置复现得很完美但在第二个坑洞处产生了 0.5 秒的延迟，但载荷很相似。由于实际采集当中车速的不稳定会导致虚拟仿真与真实之间会有延迟，这是在意料之中的。

在比利时路中同样由于虚拟仿真与真实采集的车速不完全相同，再加上由于采集的路面是随机型高频输入，因此单纯从时域曲线上无法判断复现的重合程度，但也能看出大约有四个峰值处的载荷形状是很相近的。另外一点我们发现，虚拟仿真的载荷普遍相比真实道路采集偏小，这会造成在后期的耐久测试中载荷输入偏弱，这需要通过提高通过重复次数等方法来补偿。

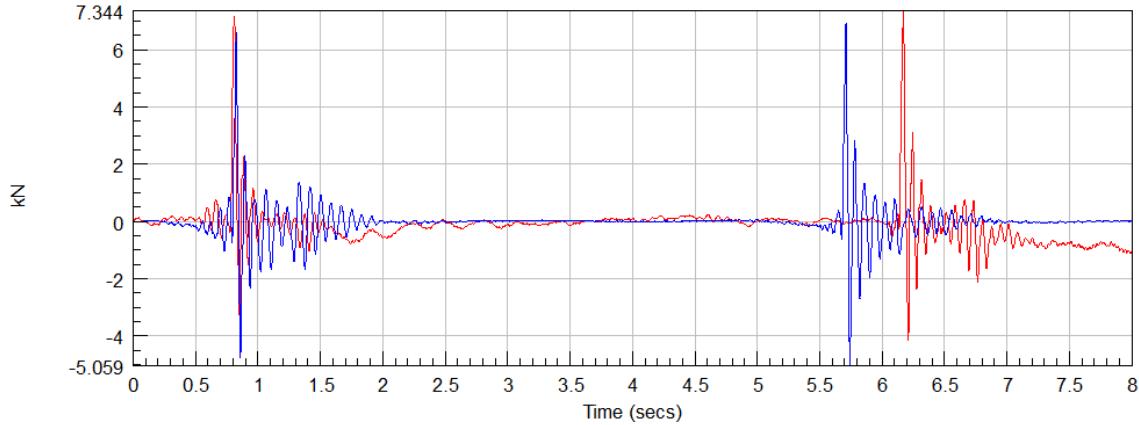


图 6.19 Event12 颠簸路时域曲线对比

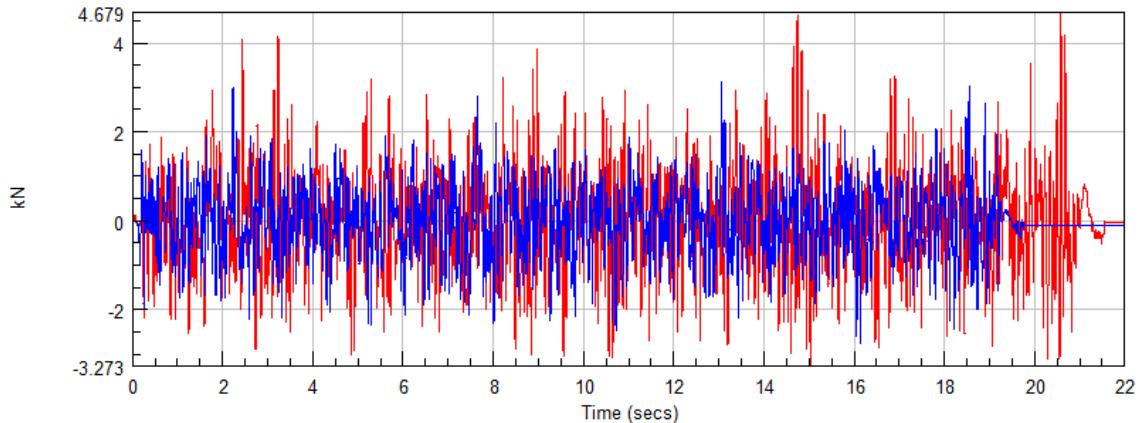


图 6.20 Event20 比利时路时域曲线对比

#### 6.4.2. 频域对比

如图 6.21 以及 6.22 所示，通过频谱分析可以发现总体来说混合仿真得到的垂向力蓝色功率谱密度与真实的载荷谱采集获得的红色功率谱密度是非常相近的，这意味着无论从频率上或是能量分布上混合仿真的结果都与真实情况非常相近。根据我们的项目经验，这样的能量与频率分布与纯虚拟仿真生成的载荷谱相比具有更接近真实的优势，而纯虚拟仿真的载荷谱中往往会发生 20-50Hz 区域高频能量过高导致载荷输入过大的弊端。

仔细观察可发现，在颠簸路中垂向的仿真结果在 0-5Hz 的低频区域有所欠缺。而

比利时路中 10-30Hz 的中高频能量有所欠缺，这与时域曲线中幅值的缺乏现象是一致的。

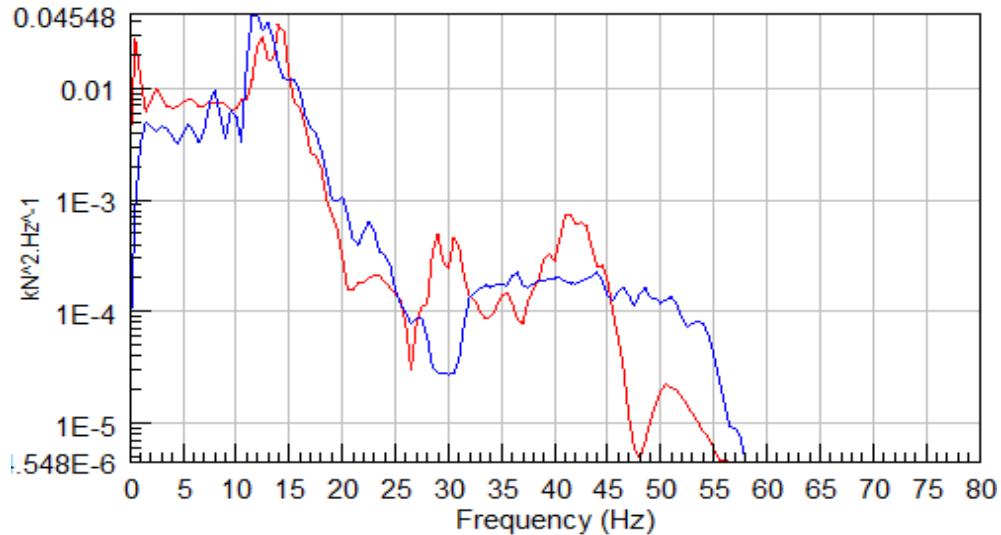


图 6.21 Event12 颠簸路频域对比

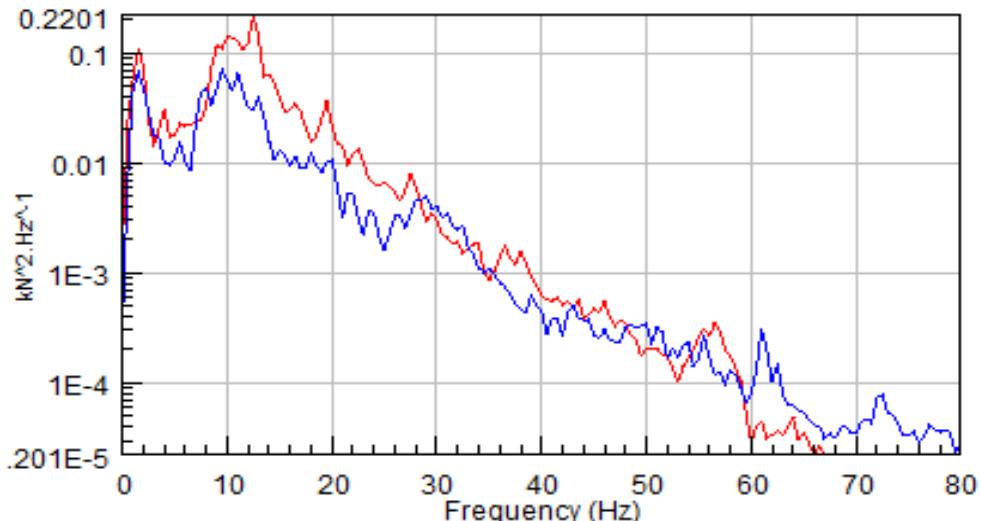


图 6.22 Event20 比利时路频域对比

### 6.4.3. 损伤对比

由于疲劳耐久加速测试主要考核的是路面对车辆悬架及车身的载荷输入循环次数，因此在此研究领域有三种方法来判断输入载荷的幅值与循环次数是否和目标相吻合，即穿级计数、雨流技术、以及频域伪损伤谱。

通过观察图 6.23-6.26 的穿级计数与雨流技术结果我们发现，在颠簸路中仿真的结果无论从计数次数与载荷幅值范围基本符合道路载荷谱采集的目标信号。而比利时路则体现蓝色信号无法覆盖红色信号的现象，即仿真结果损伤偏小。

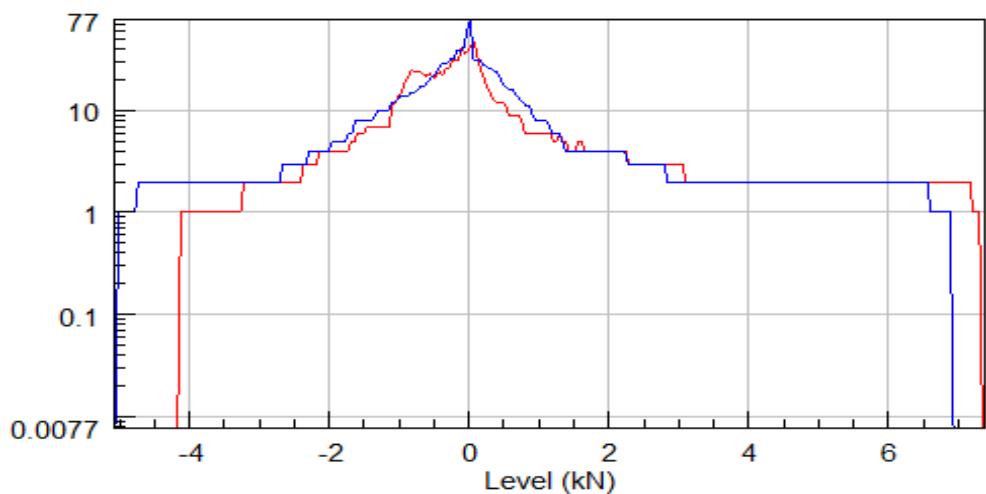


图 6.23 Event12 颠簸路穿级计数对比

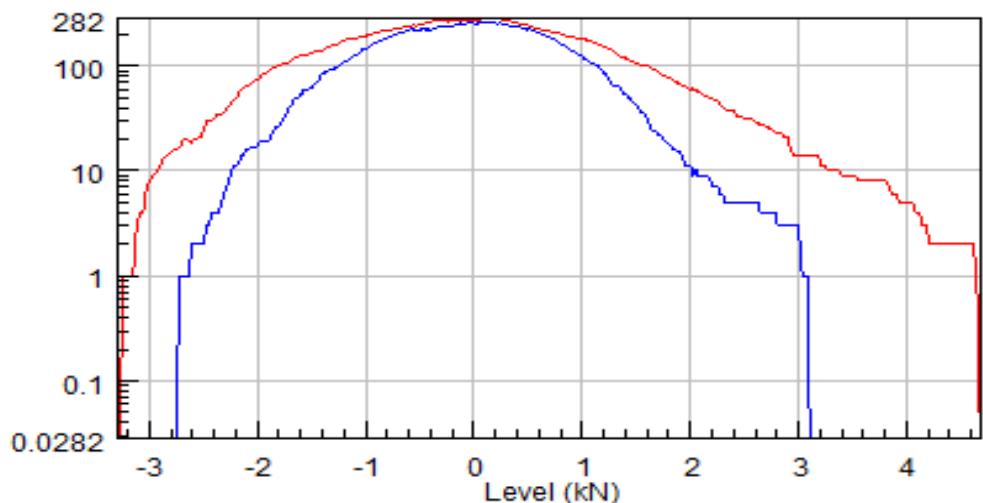


图 6.24 Event20 比利时路穿级计数对比

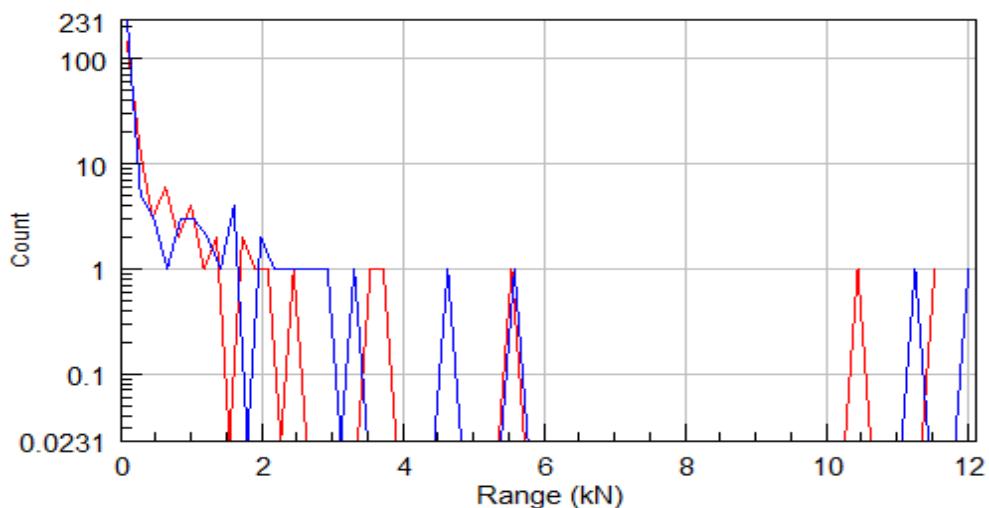


图 6.25 Event12 颠簸路雨流计数对比

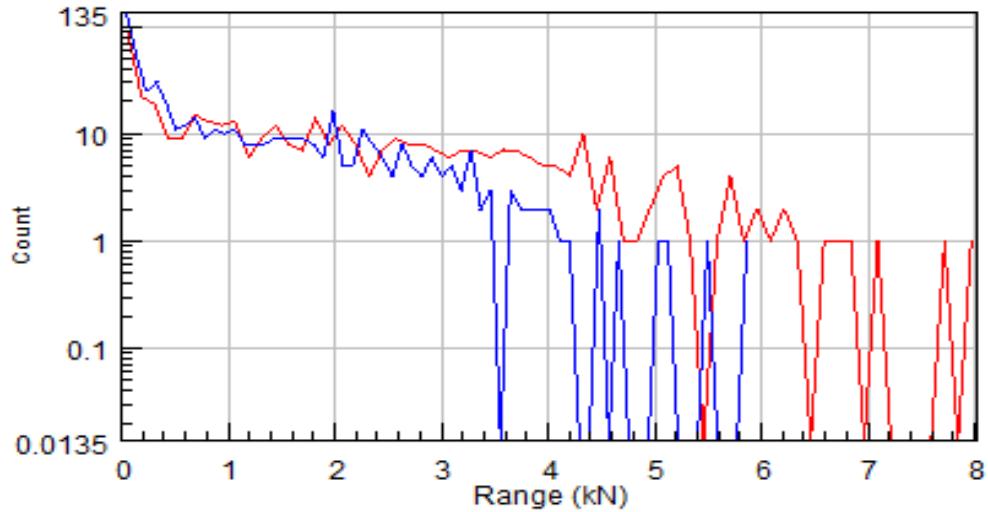


图 6.26 Event20 比利时路雨流计数对比

频域伪损伤谱（Related Damage Spectrum）即将曲线根据不同的频段分别计算损伤，相比传统单一损伤值结果这样计算的优势是可以发现损伤与频率分布之间的关联现象。

如图 6.27-6.28，仿真结果显示颠簸路低频损伤略小而比利时路第三、四、五频段的损伤较小，由于损伤是与时域当中的载荷幅值相关的，因此与第 6.4.1 节中的现象一致，我们发现混合仿真结果的损伤相比真实道路采集相对较小。

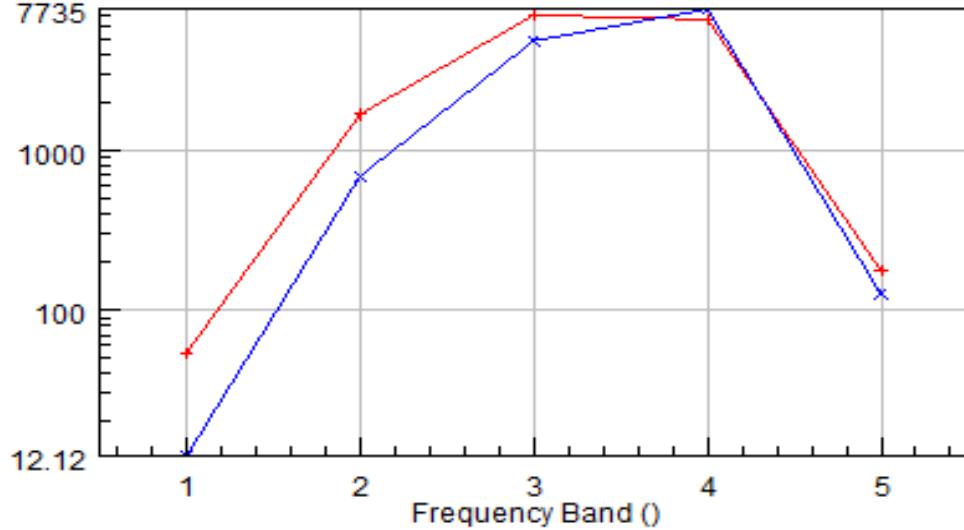


图 6.27 Event12 颠簸路频域伪损伤对比

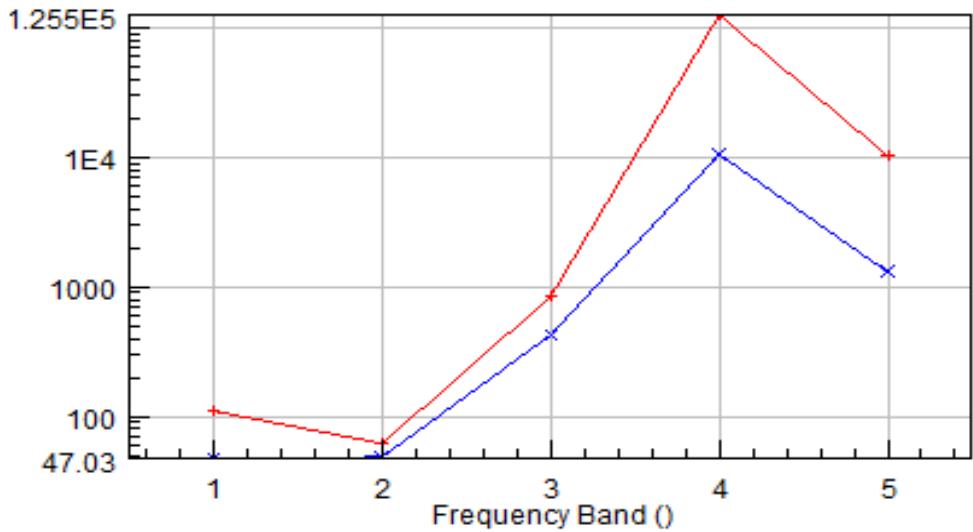


图 6.28 Event20 比利时路频域伪损伤对比

## 6.5. 本章小结

本章结合第二章阐述的混合系统响应收敛仿真技术理论，将该算法付诸于实践。介绍了数字路面的导入与系统极性定义，混合仿真收敛传递函数的获取以及迭代与收敛的各个步骤。通过对选定四种路面的混合仿真迭代研究，使得比利时路与颠簸路的混合系统响应收敛仿真精度分别达到 93.66% 与 87.26%，搓板路与锯齿路的混合仿真精度同样能够达到 80% 的精度预期指标。本章最后还结合实际应用对混合系统响应收敛仿真所生成的载荷进行了时域、频域以及损伤等各个方面的评估，得到了有助于投入实际项目开发的重要信息，虽然本技术相对传统方法不尽完美，但如果将本技术推广至行业内部，将为客户节省至少一个月的开发成本，这对于客户来说是无价的。

## 第7章 全文总结

HSRC 技术能够在四个车轮处的混合仿真交互平面上同时实现响应收敛。与其他仿真方法相比，HSRC 的一个显著优势是它能够不依靠高超的实时仿真技术就能执行标准的道路模拟耐久测试。由于整车企业在缩短开发周期方面压力越来越大，以及严格的成本控制，因此将物理和虚拟测试相结合，可以加快设计开发过程，特别是对于新能源车辆，有利于实现开发车型的快速、准确的耐久性能验证。

本文延续了“虚拟试验场建立”课题的研究成果，采用了盐城试验场强化耐久虚拟路面作为输入条件。在对实车试验场采集轮心力信号的时域和频域分析中，确定了本次课题中选定的路面数据，包括搓板路、锯齿路、颠簸路和比利时路。四种路面能够实现不同幅值与频域下对 HSRC 技术的综合验证。

在 Ftire 轮胎模型方面，课题组人员对 Ftire 模型的试验与辨识过程重新进行了梳理与研究，通过对模型辨识过程的反复学习与调整，使得轮胎模型的最终精度达到了 86.43%。Ftire 轮胎模型的辨识过程需要较强的轮胎动力学理论基础以及软件辨识经验，因此在本次研究过程中，最终模型的生成仍存在时间周期过长的弊端，需要继续加深对理论的研究和模型辨识水平的提升。

HSRC 技术的提出解决了实时技术的局限性，其使用迭代方法来开发满足混合系统运动方程的解，迭代方法允许物理和虚拟系统作为开环系统而不是同时运行，可以使用更详细的模型和复杂的测试系统。由于台架试验周期的限制，在本课题的研究过程中，HSRC 技术的验证运用了部分工况进行，选定的四种路面混合仿真迭代精度均达到了 80% 以上，完成了课题预期指标。后续将继续研究 HSRC 技术在多种工况下的验证，以便于更加权威的掌握该技术的理论与应用水平，能够为客户提供高质量的技术服务。

多年来，很多汽车公司一直采用实验室模拟试验来提高汽车零部件的质量、耐久性和可靠性。实验室模拟测试提供了准确的耐久性和性能信息，并能有效缩短产品开发周期。随着虚拟测试和混合仿真技术的发展，汽车测试不再局限于车辆设计验证的作用，而是越来越多的用来验证车辆模型。在 HSRC 技术中，某个试件可以成为整车模型的一个单元，或者与虚拟单元相互补充，从而提高测试质量。

## 参考文献

- [1] Fricke,D., Hybrid System Response Convergence (HSRC) An Alternative Method for Durability Hybrid Simulation.Vehicle Dynamic Expo 2010, 2010.
- [2] Fricke, D. and Frost, M., Development of a Full-Vehicle Hybrid-Simulation Test using Hybrid System Response Convergence (HSRC).SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst. 5(2):2012-01-0763, 2012, doi:10.4271/2012-01-0763.
- [3] MTS Systems Corporation, Optimizing Durability Test Efficiency, Cust. Case Study 2, 2014.
- [4] William F Miliken, Douglas L Miliken. Race car vehicle dynamics. Society ofAutomotive Engineers, Inc. 400 Commonwealth Drive, PA 15096, USA, 1995.
- [5]Rustighi E, Elliott S J, Finnveden S,et al.Linear stochastic evaluation of tyre vibration due to tyre/ road excitation[J]. Journal of Sound and Vibration,2008, 310(4-5): 1112-1127.
- [6] Schudt J., Kodali R., Shah M.. Virtual Road Load Data Acquisition in Practice at General Motors. SAE Technical Paper 2011-01-0025, 2011.
- [7] Tasci M., Tebbe J., Davis J.. Development of 3-D Digital Proving Ground Profiles for Use in Virtual Prediction of Vehicle System/Sub-System Loads. SAE Technical Paper 2011-01-0189, 2011.
- [8] Zhang B., Cai Q., Lu Y.. Component Tests Based on Vehicle Modeling and Virtual Testing. SAE Technical Paper2017-01-0384, 2017.
- [9] Gipser M.. RGR Road Models for FTire. SAE Technical Paper 2008-01-1410, 2008.
- [10] Gipser M.. FTire – the tire simulation model for all applications related to vehicle dynamics [J]. Vehicle System Dynamics, 2007, Vol.45, pp.139-151.
- [11] You S., Fricke D.. Advances of Virtual Testing and Hybrid Simulation in Automotive Performance and Durability Evaluation. Technical Paper, 11M-2097, 2011.
- [12] Roy N., Scheiblegger C., Darling, J.. Durability Loads Prediction of Body-on-Frame Vehicles using Full Vehicle Simulation. SAE Int. J. Passeng. Cars-Mech. Syst. 2017-01-9675, 2017.
- [13]Au FTK,Cheng Y.S.,Cheng Y.K.,Effects of random road surface roughness and long-termdefection of prestressed concrete girder and cable-stayed bridges on impact due to movingvehicles. Computers and Structures. 2001 (79): 853-872
- [14] ZHANG Yong-lin, ZHANG Jia-fan. Numerical simula-tion of stochastic road process using white noise filtra-tion[ J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2006, 20(2):

363-372.

- [15]B.Chadha . O.P.Agrawal. Dynamic Analysis of Flexible MultibodySystems Using Mixed Model and Tangent Corrdinates. Computers & Structures.1989.volumn31
- [16]喻凡,林逸.汽车系统动力学[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [17]陈作模.机械原理.第七版[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [18]刘军.车辆悬架系统试验评价技术[J].农业机械学报. 2000, 31(5):62-66.
- [19]姜学智,李忠华.国内外虚拟现实技术的研究现状[J].辽宁工程技术大学报.2004 年 4 月(第 23 卷第 2 期):238-240.
- [20]陈立平,张云清,任卫群,覃刚等.机械系统动力学分析及 ADAMS 应用教程[M].清华大学出版社,2005,1.
- [21]石锋,王红钢,刘再生,等.路谱台架试验研究[J].振动与冲击,2012,31(19):10-14.
- [22]汪斌,周鎧,陈栋华,等.路面时域波形室内再现方法研究[J].中国机械工程,2010, 21(3):364-367.
- [22]钱立军,吴道俊,杨年炯,等.基于室内道路模拟技术的整车加速耐久性试的研究[J].汽车工程,2011,33(2):91-96.
- [23] Xu Peijun,Wong D,Leblanc P. Road Test Simulation Technology in Light Vehicle Development and Durability Evaluation[C].SAE Technical Papers,2005-01-0854,2005.
- [24] Gao Yunkai,Wang Genhai,Han Jingpeng.The Study on Fatigue Test of Cab Assembly Based on 4-Channel Road Simulation Bench[C].SAE Technical Papers,2017-0-0328,2017.
- [25] Li An,Leblanc P, Wong Dan.6DOF RTS Drive File Development Technique for Solid-axle-type Rear Suspensions Instrumented for 4DOF Applications[C].SAE Technical Papers,2005-01-0855,2005.
- [26] Xu Peijun,Leblanc P, Peticca G. Steering Measurement Analysis and Simulation on 6DOF Road Test Simulator[C].SAE Technical Papers,2006-01-0733,2006.
- [27] De Almeidayh Y H,Chaces R R,Rezende F C.Comparison Between Durability Tests Performed in Field and in Lab for Powertrain Suspension System[C].SAE Technical Papers, 2014-36-0174,2014.
- [28]吴参,王维锐,陈颖,潘双夏.三维路面谱的仿真建模与验证[J].浙江大学学报(工学版),2009(43),10:1935-1938.
- [29]赵治.ADAMS/Car 软件中随机路面建立方法[J].客车技术与研究,2012(1):11-13.
- [30]李玉龙,彭剑,李新田.整车道路耐久试验的研究[J].设计与研究,2013(3):14-19.
- [31]韩愈,孟广伟,门玉琢.车辆用户载荷谱试验场关联强化试验方法[J].振动、测与诊断, 2014.12:1088-1093.

- [32]李浩磊.基于道路试验法的车身零部件疲劳寿命研究[D].湖南大学,2012.
- [33]刘拥军,杨万安,姚烈,等.MTS329 道路模拟试验机在整车道路模拟试验中的应用[J].上海汽车,2001.4:26-29.
- [34]李飞,郭孔辉,丁海涛.汽车耐久性分析底盘载荷预测方法研究综述[J].科学技术与工程,2010.8:5960-5962.
- [35]王秋景,管迪华.汽车零部件加速疲劳试验方法[J].汽车技术,1997.11:14-17.
- [36]成永刚,郑松林,冯金芝.轿车悬架耐久性试验载荷谱的优化研究[J].汽车工程,2009(5):467-470.
- [37]卿宏军,韩旭,陈志夫.某轿车结构载荷谱采集与分析[J].湖南大学学报,2012.12:32-35
- [38]程永全.道路模拟试验系统的关键技术—远程参数控制技术[J].工程与试验,2001,41(z2):32-33.
- [39]胡毓冬,周鎔,徐刚.整车道路模拟试验台的控制算法[J].同济大学学报(自然科学版),2012, 40(8):1244-1248
- [40]陈剑,马文明,文智明.基于模糊聚类算法的道路模拟试验控制方法研究[J].中国机械工程, 2010(18):2260-2263.
- [41]别辉,杨波,过学迅,等.汽车道路模拟系统的模糊自适应控制及仿真[J].现代制造工程, 2007(4):6-8.
- [42]尹立一,郑书涛,沈刚,等.基于改进 MCS 算法的道路模拟机试验系统[J].农业机械学报, 2011,42(12):55-61.
- [43]周泽.基于真实路谱重现的虚拟台架及汽车疲劳寿命预测研究[D].湖南大学,2013.
- [44]玉明.车辆轴耦合道路模拟试验台运动学分析[D].哈尔滨工业大学,2012.
- [45]范锐.轮耦合道路模拟台波形再现控制算法的研究[D].哈尔滨工业大学,2013.
- [46]邹喜红,熊锋,袁冬梅,等.基于多轴道路模拟激励谱的摩托车车架虚拟试验方法[J].农业工程学报,2014,30(15):39-45.