

面向主动悬架车型的整车多轴道路模拟试验

韩文彬，范学，梁鹏，王香军，刘媛，杨协之，吴福团
比亚迪汽车工业有限公司

【摘要】 比亚迪新开发多款主动悬架车型，由于主动悬架的刚度/高度/阻尼多维度主动调节，在传统道路模拟台架上的姿态响应无法保证。为实现主动悬架车型的精确模拟，需激活实车 ECU 同步迭代及测试。通过采集试车场路面载荷与 ECU 所需数据，采用 ECU 快速原型，基于 Restbus 模拟，可完成最贴近实际载荷的整车级结构耐久验证，主动悬架车型整车道路模拟试验精度大大提升。

【关键词】 主动悬架，24 通道，Restbus 模拟，道路模拟

Vehicle Multi-axial Road Simulation Test for Vehicle with Active Suspension

Han Wenbin, Fan Xue, Liang Peng, Wang Xiangjun, Liu Yuan, Yang Xiezhi, Wu Futuan

BYD Auto Industry Company Limited

Abstract: BYD has developed several new active suspension. Due to the multi-dimensional active adjustment of the active suspension such as stiffness, height, and damping, the attitude response cannot be guaranteed on the traditional road simulation rig. In order to realize the accurate simulation of vehicle with active suspension, it is necessary to activate of real vehicle ECU during the iteration and test. By collecting the required data of road surface excitation and ECU in the proving ground, using ECU rapid prototype and based on Restbus Simulation, the structure endurance test closest to the actual load on the whole-vehicle level can be completed, and the accuracy is greatly improved for whole-vehicle level road simulation test with active suspension

Key words: 329DOF, Restbus simulation, active suspension, road simulation

引言

悬架在整车结构上处于车轮与车身之间，功能上承载着乘客、车身、发动机、变速器等质量，同时在道路行驶中直接承受着地面对车轮的作用力。依靠其液压部件和弹性元件等部件，悬架部件对于车辆的隔振起着至关重要的作用。随着技术的进步，很多高端车辆配备主动悬架，其通过悬架电子控制单元（Electronic Control Unit，简称 ECU）对车辆行驶过程中的 CAN 报文进行分析计算^[1]，根据不同行驶工况控制悬架的特性状态。因此从载荷层面上来说，主动悬架的主动控制使得车辆所受载荷随着道路激励和驾驶习惯具有时变性，即簧上、簧下系统的载荷不止受路面激励影响，还引入了第二个变量：悬架的实时控制。

传统道路模拟方式针对被动悬架，主要模拟的是路面激励对带来的载荷，而针对主动悬架车型，则需要在模拟道路激励的同时模拟悬架的控制状态，才能完整复现目标道路的车辆响应。

本文以配置液压主动悬架的某车型为研究对象，通过采集常规载荷路谱数据和主动悬架控制器即 ECU 所需 CAN 数据，通过主动悬架系统策略分析，结合实时控制机柜的 ECU 输入环境模拟，完成了主动悬架车型的 24 通道试验复现、验证。

1 常规道路模拟方式分析

1.1 被动悬架道路模拟方式

传统整车多通道道路模拟试验是一种在试验室内复现实

际道路行驶状况的测试手段。主要流程如图 1 所示。通过在试车场对实际车辆道路谱的采集，运用液压伺服多通道道路模拟台架和计算机远程参数控制系统进行迭代，得到用于驱动台架试验的道路载荷文件，在此结果上进行整车或者底盘系统的多通道道路模拟试验，最后与试车场耐久试验车辆进行比较得出零部件考核一致性结果，由此能大大缩短验证及开发时间。

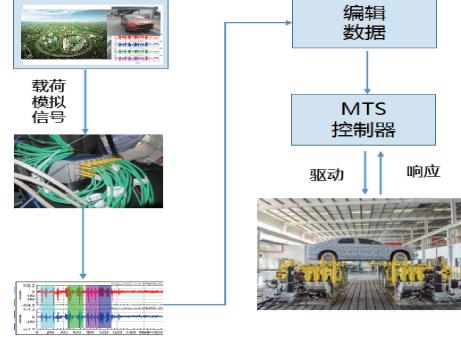


图 1 传统道路模拟方式

2 主动悬架开/闭状态路谱对比

为了更好地对比主动悬架在道路中对车辆载荷起到的作用，利用某款液压主动悬架车型进行路谱数据测试，对主动悬架控制器硬件分别进行上/下电状态测试，上电代表主动悬架开启，下电代表主动悬架功能失效，下电后机械调节阻尼器状态至中间档位。

通过数据分析，产生如图 2 所示的数据结果。主动悬架

开/关状态下载荷呈现明显的车身载荷减小、底盘载荷增大的现象。根据主动悬架控制逻辑，主动控制主要为了减小车内乘员在不平路面上的不舒适度，逻辑所需达到的结果为车身振动减小，与实测数据对应。而车身减小的这部分能量由底盘结构吸收，表现为底盘载荷增大。

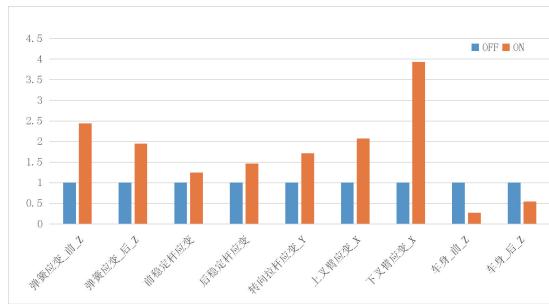


图 2 某款液压主动悬架开/闭状态载荷对比

3 研究方案

3.1 主动悬架整车模型

以分析车辆俯仰侧倾常用的七自由度整车模型，希望得到车辆在不同路面上，车身的俯仰与侧倾运动的动力学描述。

整车模型的结构示意图如图 3 所示，其组成部分为车身、四个悬架与四个车轮。整车模型能反映四个车轮受到路面激励时车身垂向、俯仰以及侧倾运动。半主动悬架系统的设计初衷便是改善车辆的垂向振动及侧倾、俯仰等运动，这些都关系到了车辆的乘坐舒适性及轮胎抓地 (Road-holding) 等性能^[2]。因此基于整车模型的主动悬架控制需要考虑悬架之间相互作用，其对车辆的舒适性控制也从单一的垂向运动抑制变为多个方向的联合抑制。

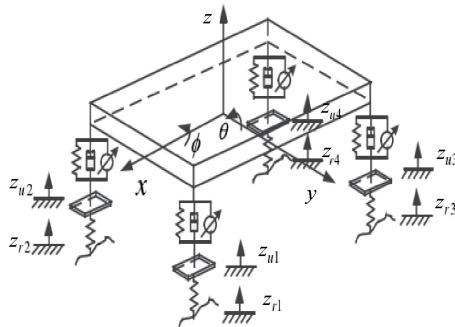


图 3 七自由度车辆模型

结合整车模型状态空间方程分析可得，主动悬架的侧倾与俯仰控制，与路面激励与悬架作动力有关^[3]。因此控制主动悬架的执行端从而控制主动悬架的作动力是一种较好的复现方式。电流回放方式就是行业内主流的主动悬架道路模拟方式。

3.2 电流回放模拟方式

架的变量。其主要针对 CDC 减振器，对于 CDC 减振器，减振器电流是执行机构发出的控制信号，也就是说该模拟方式直接通过复现悬架的执行结果来模拟悬架响应，如图 4 所示。在迭代或耐久试验过程中，道路采集到的实时电流信号需要跟随其他载荷信号一起给到车辆，已达到车辆响应与路试一致的效果。该方式只需要一个电流发生器和同步时钟，即可实现载荷与电流的实时同步播放，方案成本低，只需电流发生器不需其他任何硬件，且操作简单易于设置，可准确生成在试验场上采集的电流时间历程。

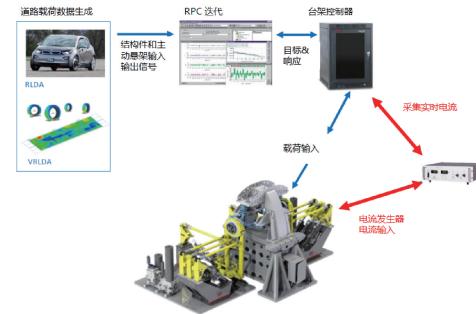


图 4 电流回放方式

不难发现，电流回放的方式仅针对于结构和策略较为简单的CDC 减振器，对于较为复杂的空簧和液压主动悬架，还需增加刚度阀开关、姿态控制阀开关、步进电机步数等信号波形的模拟，控制对象相应增加，需增加至少 12 通道的信号线束制作和信号发生模拟工作。另外，该方案通过控制主动悬架的末端执行机构实现响应模拟，绕过了 ECU 的程序和指令，不能随着悬架特性的变化而自动调整电流时间历程，即如果 ECU 程序调整，则执行机构的输出电流也将发生变化，需要重新采集道路数据。绕过 ECU 直接激励执行部件进行耐久试验的方式，无法考核 ECU 本体、中央缸这种前端控制和执行部件。

3.3 Restbus 模拟方式

为了更精确地复现目标信号，需要从悬架控制单元的前端获取输入信号，进行完整的主动悬架模拟。对于悬架控制单元即 ECU，可以选择建立快速原型，通过模型输出执行信号给到悬架执行机构，但此方案无法验证实车悬架控制单元。因此本文选用的是实车 ECU 模型进行验证。

Restbus 模拟方式是较为精确且验证全面的主动悬架模拟方式。图 5 是基于 Restbus 模拟方式进行迭代的示意图。

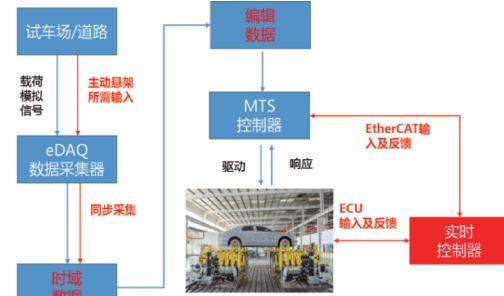


图 5 Restbus 模拟

电流回放，顾名思义主要是通过回放电流历程来模拟悬

在路谱采集时，我们将载荷信号连同主动悬架所需输入信号一同采集，经过一系列检查和编辑给到控制器，在迭代和耐久过程中，利用 EtherCAT 通信将主动悬架部分输入给到实时控制器，实时控制器结合 Matlab 和 Simulink 模型，并通过 CAN 总线通信与 ECU 进行交互。基于 EtherCAT 通信的高速通信方式，主动悬架的 CAN 信号与路面激励驱动实现了较好的同步。信号传输路径如图 6 所示。

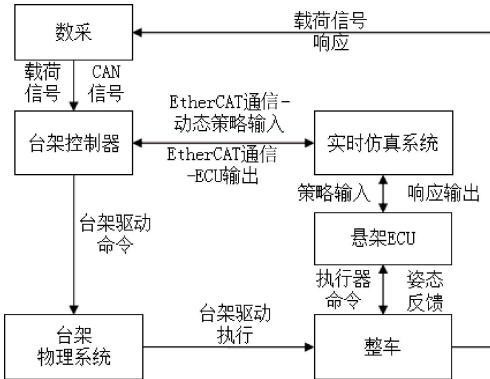


图 6 信号传递路径

接下来本文主要以我司某主动悬架车型为进行基于 Restbus 模拟方式的道路模拟试验。

3.4 研究过程

某车型主动悬架道路模拟试验方案流程见图 7，具体内容为：

- 1) 悬架策略分析：针对我司研发的液压主动悬架，分析悬架控制器的输入策略。
- 2) 路谱采集：制订路谱采集方案，包括工况和采集信号的确认，并实施采集。分析路谱数据，检查信号问题，确认采集目标中的参量默认值。
- 3) 模型搭建和试验迭代：使用 Simulink 工具建立主动悬架通信环境，利用 Restbus 通信完成主动悬架车型的迭代，获取液压缸的驱动文件。
- 4) 台架试验和结果对标：依据道路耐久循环定义和台架试验标准流程进行台架试验，并进行路试与台架的问题对标关联，输出考核结果。



图 7 主动悬架 24 通道道路模拟流程图

4 悬架策略分析

4.1 ECU 模型

在道路行驶过程中，控制器接收到来源于传感器的车身振动信息、来源于车辆通讯网络的车辆行驶状态等信号，即作为控制器的输入，根据预先设定的程序发出控制指令，控

制伺服电机操控各个阀执行工作，即输出。台架试验的终极目的是复现车辆响应，对主动悬架来说阀的最终执行状态，车辆悬架的姿态就是我们的复现目标。因此为了得到目标执行量，我们只需控制控制器的输入与道路一致即可。控制器简易模型如图 8 所示。

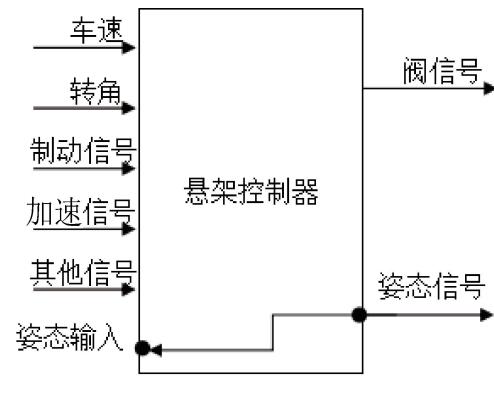


图 8 控制器简易模型

我司设计的液压主动悬架系统在兼顾整车舒适性的同时，又能实现车身高度调节等诸多功能。电控液压主动悬架主要由传感器、电子控制 ECU、悬架控制执行器组成，其结构简易图如图 9 所示。根据选择的模式和路况信息等，液压主动悬架系统可以主动控制系统实现阻尼调节、刚度调节、高度调节等功能^[4]。

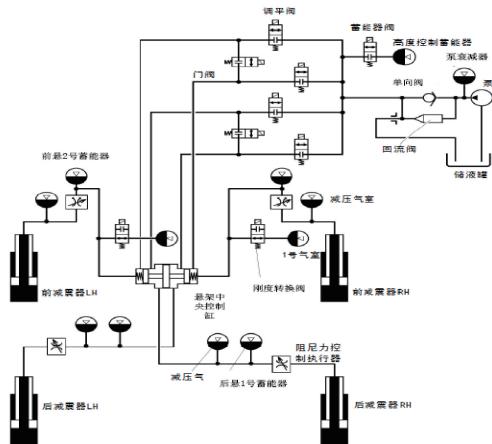


图 9 液压主动悬架系统功能原理图

4.2 ECU 输入分类

对于待测车型主动悬架来说，影响阻尼和刚度调节的信号主要为车辆的侧倾、俯仰、车辆车速、车身姿态等参量。简单来说即车速高低、大转角、大俯仰工况如加速、制动等工况对策略执行影响较大^[4]。

对于主动悬架的输入信号，我们可以按照其时域特性分为以下三类：

- 1) 动态影响策略执行的时变信号。
- 2) 单阈值影响策略执行的时变信号。
- 3) 影响策略执行的状态信号。

对于动态影响策略的时变信号，控制器需要经过复杂算法来计算输出的功能，此类信号需完整复现；单阈值影响策

略执行的时变信号如制动油缸压力等信号，只需给到不抑制悬架高度调节的阈值范围内任意定值即可；对可能抑制悬架工作的状态位信号，如门开关信号、制动踏板开关信号、迎宾灯开关、悬架故障位信号，只需给到不抑制功能的状态值，保证系统正常工作。

5 采集方案制定

常规 24 通道采集需求主要为载荷信号。对于主动悬架控制器，首先应按照文中 3.2 分析情况进行 ECU 输入信号的采集，对于 ECU 的输出信号，即悬架执行、状态信号，主要包括阻尼调节器、刚度模块、悬架控制泵等部件的状态、车辆姿态，其信号可以通过 CAN 采集。对于由主动悬架作用进而产生状态变化的位置，可加装传感器（见表 1）作为监控信号，如管路油压等信号。

表 1 常规传感器布置方式及意义

位置	通道	单位	意义
车轮	车轮六分力	kN/kN·m	
底盘	轴头加速度	g	路面激励
	左右双叉臂球头、前稳定杆应变	uE	车辆内部受力之后悬架
	左右双叉臂球头、后稳定杆应变	uE	车辆内部受力之前悬架
车身	减振器塔座加速度	g	
	弹簧应变	mm	车身运动姿态
整车	GPS	—	车速、经纬度等位置信息
整车	主动悬架必要的 CAN 信号	—	用于主动悬架策略输入和悬架复现精度评估、试验监控
主动悬架系统	管路油压	—	用于悬架工作状态复现精度评估和试验监控

6 模型搭建和试验迭代

6.1 模型搭建

dSPACE 是一套基于 Matlab/Simulink 的控制系统开发与测试平台，可实现与 HIL 实验平台的无缝连接，具有组合性强、快速性好、可靠性高、实时性好、灵活性高等优点^[5]。对于 Restbus 模拟需使用 dSPACE 控制机柜建立输入输出接口环境。如图 10 所示，dSPACE 实时仿真机柜与设备控制器需经历一系列配置和模型定义，确保通信正确、无延迟。

6.2 迭代思路

由于需要建立 ECU 与台架实时控制器的通信，需要针对悬架控制器建立模型。完成模型搭建后即可进行迭代。迭

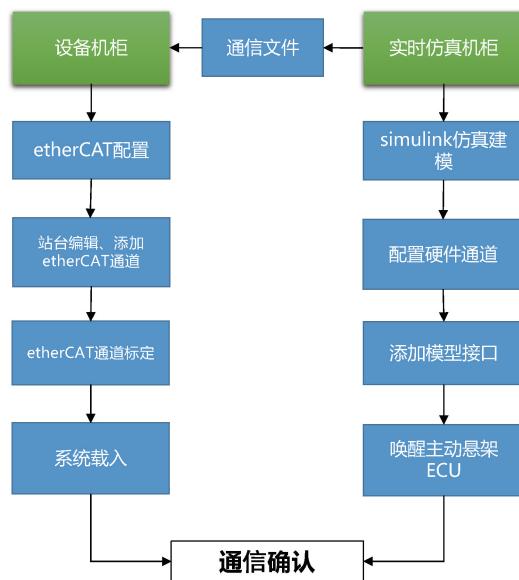


图 10 通信流程

代的驱动和响应关系如图 11 所示。按照 3.2 中策略分析，我们得出悬架控制器主要策略输入的时变信号为等 14 个信号。因此不同于常规迭代的 24 个作动缸驱动信号，主动悬架驱动信号共 38 个。其响应信号也由原来的 78 个增加到 82 个。主动悬架的高度值作为迭代主要目标信号。



图 11 驱动响应信号

6.3 迭代结果分析

表 2 为主要通道的迭代误差，不难发现 X、Y、Z 方向信号迭代误差大部分都在 15% ~ 25% 之间，迭代结果良好，主动悬架高度传感器通道迭代误差较大。

表 2 典型通道迭代误差

传感器位置	通道	RMS error (%)
六分力	1_LF_WFT_Fx	19
	2_LF_WFT_Fy	25
	3_LF_WFT_Fz	28
	4_LF_WFT_Mx	16
	6_LF_WFT_Mz	14
	7_RF_WFT_Fx	17
	8_RF_WFT_Fy	28

(续)

六分力	9_RF_WFT_Fz	27
	10_RF_WFT_Mx	16
	12_RF_WFT_Mz	14
	13_LR_WFT_Fx	23
	14_LR_WFT_Fy	21
	15_LR_WFT_Fz	35
	16_LR_WFT_Mx	11
	18_LR_WFT_Mz	16
	19_RR_WFT_Fx	26
	20_RR_WFT_Fy	22
	21_RR_WFT_Fz	33
	22_RR_WFT_Mx	13
	24_RR_WFT_Mz	17
弹簧	53_LF_Spr_Sz	13
	54_RF_Spr_Sz	14
	55_LR_Spr_Sz	18
	56_RR_Spr_Sz	18
悬架高度	DiSus_Height_FL	32
	DiSus_Height_FR	32
	DiSus_Height_RL	32
	DiSus_Height_RR	31

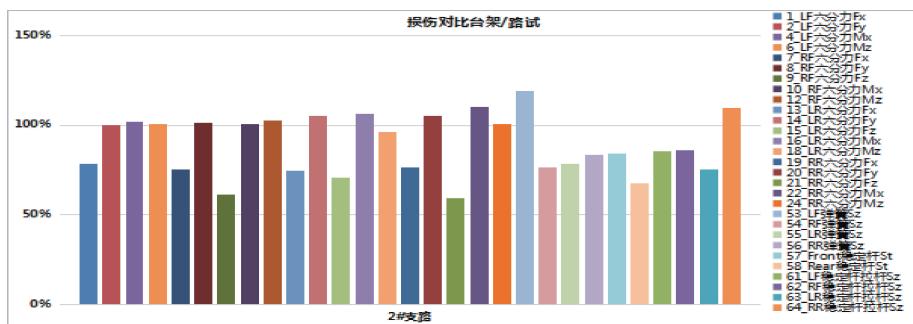


图 12 损伤对比

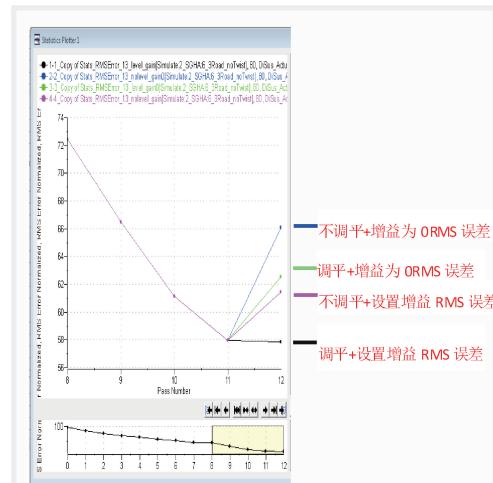


图 13 主动悬架系统对迭代误差影响

采用伪损伤概念，利用载荷历程以及合适的材料 S-N 或 e-N 曲线，按照 Miner 损伤累积法则即可计算疲劳损伤量^[7]，以伪损伤大小作为载荷信号对试件影响的量化依据。查看计算后台架损伤复现情况，发现 Z 向六分力损伤复现结果 60% ~ 80% 之间，弹簧损伤复现结果 80% 左右。即 Z 向复现结果一般，如图 12 所示。

针对垂向部分迭代误差问题进行分析，被测车辆高度状态存在不稳定问题。

分析其原因，高度可主动调节的车辆在迭代或耐久过程中势必存在液压或空气内窜问题，进而出现高度不稳定状态，为了分析倾斜本身和前后高度不一致问题对迭代误差的影响，我们进行了多组迭代测试。主要测试方式是在迭代的过程中，对主动悬架的姿态倾斜问题进行高度调平和不进行调平对迭代误差的影响，以及同组驱动文件播放两次对迭代误差的影响，两种条件共四个测试组合进行测试，得出了图 13。主要有以下结论：

- 1) 悬架倾斜问题对迭代误差有一定影响。
- 2) 悬架系统存在不稳定性且对迭代结果产生较大影响。
- 3) 悬架系统本身不稳定性带来的影响大于悬架倾斜问题造成的迭代误差。

也就是说，在迭代过程中进行调平是有一定作用的，而耐久试验过程中悬架的姿态不稳定是必然，对此造成的迭代误差可以忽略。但在迭代和耐久试验过程中，悬架系统的不稳定性对载荷产生了影响，由此带来的载荷随机性大大增加。

因此对于迭代误差原因锁定为悬架高度不稳定原因。后期悬架高度问题改进后可解决。

7 台架试验和结果对标

7.1 台架试验

针对主动悬架车型，由于悬架控制器信号传输方式主要是 CAN 信号传输，且信号处于同一网络，可以很方便地对信号进行实时监控。表 3 是 24 通道主动悬架车型试验可选择监控的主要通道。所有载荷和悬架 CAN 信号保证处于同步实时采集监控状态。

表 3 主要监控通道

通道序号	通道名称	监控用途
1	常规载荷信号	主动悬架数据分析和故障排查
2	悬架高度	
3	当前高度挡位	
4	故障码	
5	阀开关状态	
6	管路压力	
7	电池包温度、电压、绝缘电阻等	安全监控用

同时在耐久过程中可通过 DSPACE 控制器引入的 CAN 环境中手动高度调节报文控制悬架举升操作验证悬架手动功能是否正常工作，图 14 是主动悬架问题排查举例。在执行第二次“下降-调平-上升-调平”循环时，悬架在调平-上升过程中报故障码 4。仔细分析悬架在低状态到调平状态上升过程中，后轮距生速率明显低于前轮，在前轮到达调平位并关闭调平阀后，后轮仍处于上升且调平阀打开状态。在后轮持续上升过程中前轮被带动往上抬升 20mm。在后轮到达调平位置后执行上升操作，此时四轮调平阀打开，前轮继续抬升，但后轮高度未执行上升。持续几秒后悬架报故障码 4，悬架调节功能被抑制。通过监控数据分析可得出，此故障根本原因为悬架前后举升速率差异过大导致。

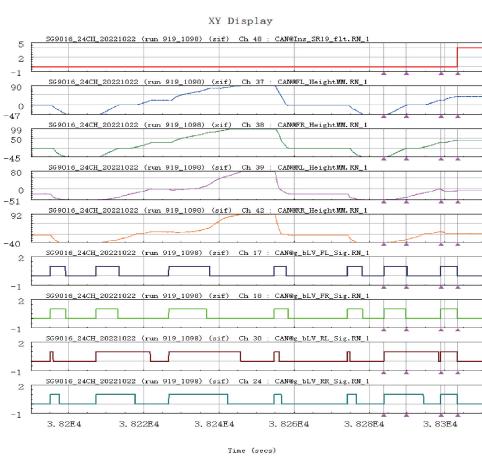


图 14 主动悬架问题排查举例

7.2 结果对标

为了更好地判断台架出现问题的发生频次，判断问题严

重性，分析问题原因及开裂类问题裂纹起始位置。试验前针对仿真风险位置和路试开裂问题进行了标记。试验完成后进行路试和台架问题对标，部分结果见表 4。

表 4 路试台架对标

序号	失效零部件	失效里程/km		问题一致性
		路试	台架	
1	大梁车架前下摆臂后安装支架加强板开裂	1214	2319	共有
2	大梁车架第二横梁左连接支架开裂	1214	1098	共有
3	左、右后减振器安装支架处车架本体开裂	3267	1098	共有
4	前减振器上支撑衬套变形、断裂	1379	959	共有
5	油箱安装（第五）横梁与车架纵梁连接处开裂	2864	1540	共有
6	右前刚度阀固定螺栓脱落，刚度阀线束断开	/	1657	台架
7	电池包防撞梁左侧安装点位置与车架焊接处开裂	2041	3541	共有
8	左后上叉臂前安装点处安装支架焊点开裂	/	3541	台架
9	左后减震器液压管路漏油	98	0	共有
10	后悬摆臂与车身发生干涉	1494	1706	共有
11	下摆臂与车架连接处衬套磨损	1247	1706	共有
12	油箱安装卡箍拐角裂纹	1805	—	路试
13	第五横梁横梁油箱安装点横梁开裂	2864	4000	共有
14	左右翼子板安装支架焊点开裂	4000	4000	共有

经对比评估，试验问题对应较好。由于实验室出于安全问题考虑油箱油量添加量较低，未复现油箱安装卡箍开裂问题。其他重点问题，台架与路试一致性较好，对于部分开裂问题，受限于骡子车试制阶段大部分为手板件，其工艺稳定性较差，循环数有所偏差。

8 结论

本研究基于液压主动悬架车型，建立了主动悬架整车级道路模拟试验能力，为主动悬架车型的结构耐久验证提供了能够较好地等效路试道路强化耐久试验的台架验证手段，相较路试试验时长压缩 300%，能够快速进行一轮用户全寿命耐久验证，辅助车型提前发现部分结构方面问题以获得充分

的整改验证时间，或在道路试验暴露问题后，基于优化方案进行一轮快速验证验证。基于 Restbus 模拟，在悬架控制器模型一致的情况下，可以快速进行验证，无需改制执行器线

束的情况下即可考核到整个悬架系统的功能和结构耐久性，更好地服务车型研发。

参 考 文 献

- [1] STAHL K, LEIMBACH K. Vehicle Dynamics Simulation by Using Hardware in the Loop Techniques [C]// 2014 IEEE 17th International on Intelligent Transportation Systems Conference, 2014: 473-477.
- [2] 王金珠. 基于 ECU 硬件在环的车辆半主动悬架系统应用研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [3] 陈相甫. 汽车主动悬架系统的俯仰与侧倾控制方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [4] 韩文彬, 范学, 陈松明, 黄恩荣, 梁鹏. 主动悬架系统功能耐久试验方法研究 [Z] 比亚迪汽车工业有限公司, 2023.
- [5] 马培蓓, 吴进华, 纪军, 等陈相甫. dSPACE 实时仿真平台软件环境及应用 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16 (4); 667-670.
- [6] 王国军. 疲劳分析实例指导教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.