

基于整车室内道路模拟的零部件疲劳试验研究

□ 中国汽车技术研究中心有限公司/王灵龙 刘伟 李伟

随着我国汽车产业的发展，产品开发需求日益旺盛。如何缩短开发周期，降低成本成为十分必要的研究课题。采用室内的整车道路模拟试验有助于综合发现产品缺陷并针对缺陷快速进行优化设计，达到提升产品质量的目的。在整车试验过程中，由于汽车零部件类别多、数量大，所以提前预判具体的失效部件难度大，进行相关的疲劳测试周期长、成本高。因此，快速发现失效零部件并提升其质量成为影响整车产品的开发周期和成本投入的重要内容。从轴耦合型道路试验的研究出发，通过室内道路模拟复现实车载荷传递的做法得到零部件上的真实载荷，有针对性的对失效部件进行疲劳试验并验证零部件质量。与传统的验证过程相比，这样的改变减少了大量的前期准备工作，可以有效节约成本，缩短试验周期。

道路模拟是先进的整车及零部件系统疲劳试验方法，是将整车在试车场或用户道路条件下行驶采集的信号在室内试验台架上重现的策略，在全球范围内的对汽车整车及零部件测试都有着广泛的应用，具有接近真实复现车辆的工作状态来验证产品性能的明显优点。

在开发过程中，一方面整车耐久性试验测试周期长、成本高，失效的零部件存在不可预测的特点，另一方面国内新车开发周期短、产品迭代快，两者构成了显著的矛盾。在室内采用道路模拟的方法对

整车进行试验，能够提前发现整车耐久性问题，也可以验证整车及部件的缺陷以快速解决，缩短开发周期，节约成本。

在传统的室内整车道路试验中，预估失效部件时，为对所有可能出现失效的部件进行验证，试验前需要花费较长的时间准备，利用路试载荷谱在试验室内进行失效部件的验证；对未失效部件，这种前期准备是徒劳的，明显浪费了时间和成本。如果在部件出现失效之后有针对性地进行准备，便可减少大量无谓的准备工作。所以，基于整

车道路模拟信号输出进行零部件疲劳试验也许可以更大程度的解决上述矛盾，进一步提高试验效率，节约企业成本。

路谱信号的采集及试验应用的基本原理

在整车上采集受力部件的载荷（或形变等）信号的方法是通过在部件上粘贴应变片并标定后，将部件安装到路试车辆上，通过车内的数据采集仪对数据进行记录，图1所示的是对部件改制，本体经贴片并通过标定后成为能测量真实受力

的各类自制的“部件传感器”。将这些“传感器”安装到车辆上，通过图2所示的随车数据采集仪记录载荷。这些载荷信号可以用来参与整车迭代或单独用来进行部件试验，在试验室内复现车辆或部件的试验工况。

图3所示是以整车为例的直观的试验系统工作过程及工作原理。

根据相关公式可以对线性系统

进行求解，如果被试系统为线性不变系统，根据频响函数的关系及输入、输出可直接获得所需驱动信号。但是，测试系统的各个环节(试件、夹具、执行机构、测量系统等)基本会构成一个非线性系统，理论计算得到的反馈与期望响应存在较大偏离。

为了消除非线性的影响，反复重复并逐步修正驱动信号，使系统

的响应逼近于期望响应信号。过程如下：

1) 用白粉噪声作为输入信号，并采集系统的输出信号，求得传递函数。

2) 按给定的系统输入和传递函数得到系统输出并与目标信号进行比对，得到输出差值。

3) 用输出差值和传递函数求出系统输入差值；

4) 用输入差值修正前一次的系统输入作为本次输入和传递函数求输出。

经数次以上过程的重复(迭代)后，比对样件的信号输出和目标信号的差异在可接受(一般按均方根误差5%以内作为接受目标)的范围内后，设备的驱动信号就可以用来进行整车或对应型号零部件的测试验证工作。

室内整车迭代的控制方法分析与验证

轴耦合道路模拟试验台是运用以上基本原理的复杂系统，有多达24通道或以上的输入控制，用于室内试验的方法考核部件和整车的可靠性。经过长期的发展和大量的试验及系统结构设计改进，现有轴耦合道路模拟机技术能够可靠、准确地再现车辆的力和力矩。

对整车的迭代，通过4轮的六分力传感器作为反馈，理论上可以得到与道路行驶状态一样的结论。试验室的实际操作中，会选择性采用前文介绍的自制传感器信号作为试验件的响应与对应通道的目标信号进行比对，监控车辆上的部件信号以保证试验时车辆内的运动状态与实际道路一致。对于仅有车轮六



图1 传感器化的关键部件



图2 随车数据采集仪

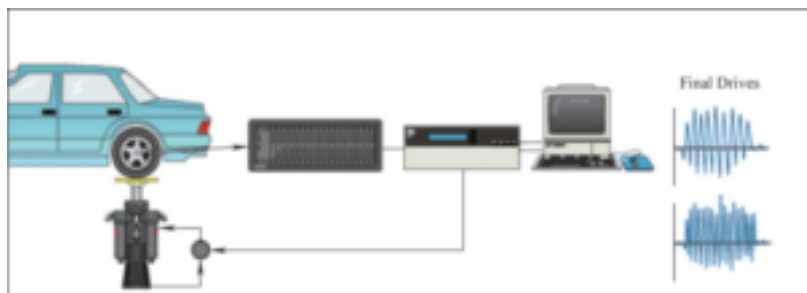


图3 道路谱测试系统工作原理示意

分力而缺少悬架或其他部件载荷的道路模拟试验，可以将轴头加速度信号参与迭代以提高试验结果的准确性，但要结合不同路况具体分析应用。这样，仅有六分力传感器或结合其他传感器成为两种控制策略。

为研究这两种采用室内的方式复现道路谱的程度，可以通过对比自制传感器是否参与迭代的结果的影响程度来确定。为比较出参与迭代通道的作用，文章按两种控制测量的方案进行比较得出。其中第一种控制策略是仅以六分力传感器作为控制通道，第二种控制策略将六分力传感器、加速度传感器、悬架位移和应变通道等传感器通同时作为控制通道。对两种控制策略分别记为控制策略A和控制策略B，然后对得到的具体比对结果进行分析。对低频路面，控制策略A和控制策略B的时域信号的统计特征值见表1。

表1 低频路段时域特征统计值 (单位: kN)

信号来源	信号名称	最大值	最小值	均方根值	R值
路试	目标信号	3.395	-2.962	0.774	—
控制策略A	响应信号	3.377	-2.914	0.765	6.45%
	响应误差	0.397	-0.237	0.050	
控制策略B	响应信号	3.357	-2.942	0.770	7.45%
	响应误差	0.344	-0.302	0.058	

因时域特征曲线图肉眼很难观察到差异，本文将频域曲线图进行对比，如图4所示。同样，对高频路面控制策略A和控制策略B的时域信号的统计特征值比对结果汇总到表2中，频域曲线图的比对结果见图5。

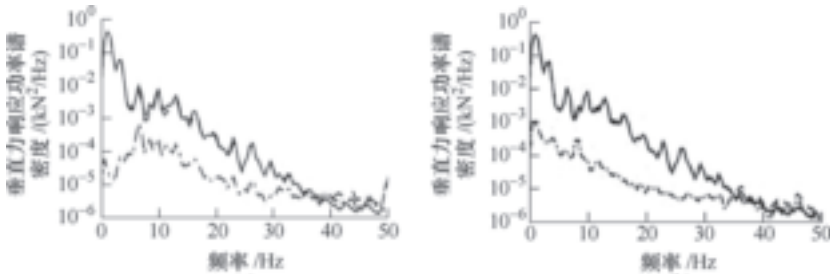


图4 低频路段频域特征比对

a) 控制策略A b) 控制策略B

表2 高频路段时域特征统计值 (单位: kN)

信号来源	信号名称	最大值	最小值	均方根值	R值
路试	目标信号	4.598	-2.675	1.217	—
控制策略A	响应信号	4.581	-2.767	1.199	10.42%
	响应误差	0.472	0.525	0.127	
控制策略B	响应信号	4.108	-2.303	1.078	14.02%
	响应误差	0.577	-0.467	0.171	

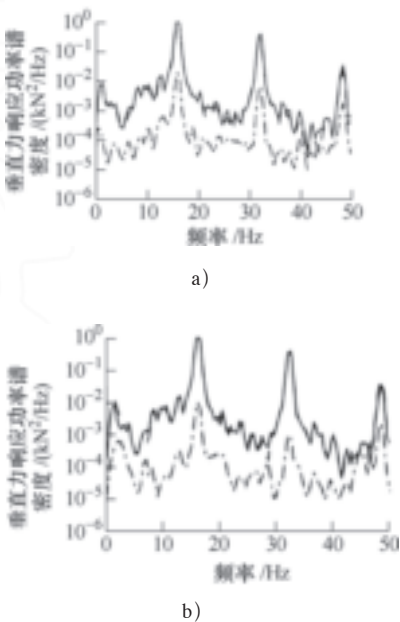


图5 高频路段频域特征比对

a) 控制策略A b) 控制策略B

可以看出两种控制策略中，台架试验均能较好地复现车辆在试车场中的受力状态，两种响应的均方根误差RMS非常接近，R值均小于20%且数值相当。台架试验能够较好地复现车辆在试车场中的受力状态，迭代精度较高。所以可以认为采用控制策略A的台架试验结果和实际道路耐久试验结果一致，各部件的受力状态也和道路试验的受力状态一致。

由以上可以推断，道路模拟机能真实再现道路工况，所以可在试验室内从道路模拟机上收集可信的响应信号。通过室内模拟道路试验，针对性获得的损坏部件或需要重点关注的部件及系统的路谱信号后，用于验证试验或批量对产品进行质量监控。前期的工作只需进行对车辆六分力传感器的准备，这样可以大量减少前期准备工作量。下文以控制臂作为研究对象，比对路试状态的原始信号及试验室内采集

的相同通道信号的试验结果差异，为类似部件的零部件试验思路提供参考。

室内整车道路谱信号对失效部件进行试验的应用

控制臂在车辆行驶过程中起到传递载荷和控制运动的双重作用，属于底盘系统有代表性的重要部件之一。将上文所述的室内采集的整车道路模拟信号的输出作为对控制臂耐久试验的信号输入，进行单通道的部件疲劳试验，用于验证该部件是否满足整车的使用要求。具体的试验安装如图6所示，经过数次迭代后，试验路况的迭代精度RMS低于5%后进行试验。这样的试验条件与该部件安装在整车上行驶在真实路面的受力工况是基本一致的。

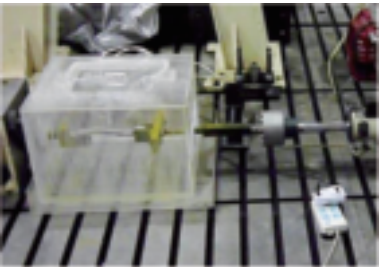


图6 单通道零部件耐久试验

图7是按采集信号进行试验的试件断口照片，从最后试件损坏的状态可以看出，利用该信号较好地



图7 失效断口照片（两端）

复现了部件在整车上的工况，与样品使用时的失效基本一致。试验数据经雨流计数处理后，按系数为5的标准SN线计算各路段损伤值结果见图8。由此可见，对室内道路试验输出的路谱信号，经过迭代后采用的试验信号与原路段信号通过同样处理后得到的信号相比，复现度高达98.3%，用来进行零部件试验的结果可信度极高。

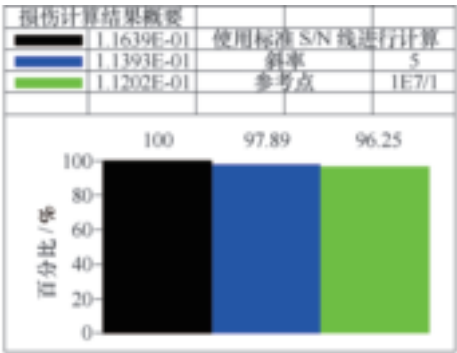


图8 不同信号对部件损伤分析

结语

本文从道路模拟的基本原理出发，通过轴耦合的方法采集到的室内整车道路模拟输出对控制臂进行耐久性测试。利用该思路进行零部件试验，可以大幅缩短对新车型验证的准备时间并以较高的精度对失效零部件进行测试验证，以满足整车开发需要。采用这样的方法对项目周期的缩短及成本的压缩具有绝对性优势。

1) 等部件失效以后有针对性地采集或验证，可以减少前期的无效工作。

2) 前期准备工作可以后移，所以采集路谱的准备时间，关键路径的变化会导致项目时间大幅压

缩，同时可以只准备六分力传感器即可得到高精度试验信号大幅减少准备时间。

3) 将准备及收集车辆响应信号的工作后移并转移到室内，能减少项目风险，同时增加了该环节的工作时长，将有限的工程师资源得以释放缓冲，有利于项目资源平衡。

文章以控制臂作为研究对象较有代表性，虽然整车迭代使用轴耦合的道路模拟试验机进行，但如果采用4立柱得到室内道路模拟输出的信号进行类似实验，在精度、成本及周期等相关要求不同的情况下采用，也能达到最大限度缩短项目周期，降低项目成本的效果。