

整车测试可靠性提升策略研究

韩飞

一汽奔腾汽车股份有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i2.19989

[摘要] 整车可靠性试验是汽车研发体系中验证产品耐久品质的核心环节。随着汽车技术加速迭代，整车结构复杂度与用户对耐用性的期待同步攀升，传统试验方法在周期、成本与精度之间面临突出矛盾。本文围绕整车测试可靠性提升这一命题展开系统研究，从多个方面论述关键技术路径，并提出一系列针对性的管理机制，旨在为汽车行业在研发过程中搭建更可靠的验证流程提供可行的解决思路。

[关键词] 整车可靠性；试验技术；用户关联；虚拟验证；数字化管理

中图分类号：V448.15+2 **文献标识码：**A

Research on Strategies for Improving Vehicle Testing Reliability

Fei Han

FAW Bestune Car Co., Ltd.

[Abstract] Vehicle reliability testing is a core component in the automotive R&D system for verifying product durability. With the accelerating iteration of automotive technology, the complexity of vehicle structures and customer expectations for durability are both rising. Traditional testing methods face prominent contradictions among cycle time, cost, and accuracy. This paper conducts a systematic study on the proposition of improving vehicle testing reliability, discusses key technical pathways from multiple aspects, and proposes a series of targeted management mechanisms. The aim is to provide feasible solutions for the automotive industry to establish more reliable verification processes during R&D.

[Key words] Vehicle Reliability; Testing Technology; User Correlation; Virtual Verification; Digital Management

引言

汽车可靠性直接关乎用户安全与品牌信誉，是产品工程成熟度的核心标尺。整车可靠性试验通过在受控条件下复现车辆行驶过程中的各种负荷与环境，暴露设计缺陷、验证系统耐久品质。中国汽车市场竞争已从单纯价格比拼转向品质与口碑的较量，消费者对车辆长期无故障运行能力的要求逐年提高。这一背景下，可靠性试验在汽车开发流程中的战略地位愈加凸显。现代汽车融合了机械传动、电控单元、传感器网络与复杂软件算法，系统集成度达到前所未有的高度。传统可靠性试验往往聚焦单一零部件或总成，面对多维度交互作用的整车级系统，其验证充分性面临挑战。怎样在有限时间和预算内，准确评估整车在真实使用环境下的可靠性表现，成为行业亟须破解的共性难题。

1 试验设计的源头优化

1.1 基于用户真实场景的试验设计

整车可靠性试验的根本目标在于确保产品在真实用户手中能够承受长期使用的考验。试验规范若脱离实际使用条件，验证结果便失去工程意义。建立精准的用户模型是试验设计的首要

环节，其核心任务是通过广泛采集车辆实际运行数据，描绘目标用户群体的典型使用特征。

车联网技术与远程信息处理平台的普及，为获取海量真实工况数据提供了便利条件。研发团队选取载荷、车速、转速、道路坡度、环境温度等特征参数，对采集数据进行归纳处理。数据分析流程主要包括数据清洗、特征提取与工况聚类三个阶段。经过处理的用户模型能够清晰呈现车辆在不同行驶场景下的负荷分布。针对商用车，载荷变化对底盘部件损伤影响显著，必须区分满载、半载与空驶的比例关系；对于乘用车，则需重点关注城市拥堵、高速巡航与山区道路的里程分配。只有将用户使用轮廓刻画精确，试验场道路规范才能与用户实际损伤建立可靠关联。

由此引出的核心问题在于，如何在试验场有限里程内复现用户全寿命周期的累积损伤。用户关联技术正是解决这一问题的系统工程，其操作流程涵盖四个关键步骤：首先，通过用户模型明确目标用户的典型使用场景与载荷谱特征；其次，在公共道路与试验场道路同步开展载荷测量，获取轴头力、应变、加速度等关键信号；再次，以疲劳损伤理论为基础，运用频域损伤谱方

法分析不同路面对车辆各部件的损伤贡献;最后,根据关联结果调整试验场道路的循环次数与行驶方式,确保各测点损伤比控制在合理区间。

执行过程中必须认识到,整车作为非线性复杂系统,不同部位的强化系数存在显著差异。底盘悬架、车架与车身对路面输入的响应特性各不相同,当量计算时必须分别处理,不能简单套用统一系数。工程实践中通常采用百分位取值方法,综合各通道损伤比分布来确定最终的试验场强化系数。由此确定的试验规范,既能避免考核不足导致的市场风险,又可防止过度考核造成的设计冗余。

1.2 中国工况数据的本土化应用

我国幅员辽阔,道路环境与驾驶习惯具有鲜明的地域特征,这为建立基于本土用户场景的可靠性验证体系提供了独特的数据基础。依托国内复杂的交通路况与多样化的使用条件,自主品牌汽车在积累真实工况数据方面具备天然优势,也为摆脱对国外标准的被动跟随创造了条件。

基于这一现实,国内研究机构近年来持续开展大规模实车载荷数据采集,累计测试里程相当可观,涵盖城市拥堵、高速巡航、山区坡道、乡村颠簸等多种典型场景。通过对采集数据的深度挖掘,形成了能够精准提取不同区域、不同用途车辆使用特征的用户工况识别算法,推动可靠性验证从经验驱动向数据驱动转变。

2 虚拟仿真与物理试验的协同验证

2.1 虚拟试验场技术

物理样车试制之前开展充分的虚拟验证,能够在设计阶段提前识别潜在失效风险,大幅压缩后期整改成本。虚拟试验场技术集成数字路面模型、轮胎模型与整车多体动力学模型,构建起完整的仿真验证平台。

虚拟试验场技术的工程价值体现在三个模型的协同作用上。数字路面模型通过激光扫描技术获取试验场实际路面的高精度几何数据,将凹凸不平的强化路面转化为计算机可识别的数学描述。轮胎模型基于台架实测数据进行参数辨识,确保仿真中轮胎与路面相互作用的行为与实物一致。整车多体动力学模型则集成悬架、车架、动力总成等子系统的特性参数,形成完整的虚拟样车。三者的整合使得在无实物样件的条件下,提前预测整车在典型路面上的动态响应与疲劳损伤成为可能。设计人员据此优化结构细节,降低应力集中,消除早期失效风险。物理样车试制完成后,还可将实测载荷谱与仿真结果进行对标,持续修正模型参数,提升后续车型的仿真精度。

2.2 HIL与SIL测试的深度融入

电控系统在现代汽车中的普及,使软件可靠性成为整车耐久性的重要组成部分。传统可靠性试验侧重机械结构,对软件逻辑错误与硬件集成问题的暴露能力有限。硬件在环与软件在环测试技术的引入,填补了这一空白。硬件在环测试将真实的电子控制单元接入实时仿真系统,模拟车辆在各种工况下的运行状态,工程师可注入故障信号、复现极限边界条件,验证控制器在

异常情况下的响应策略与安全保护机制。软件在环测试则在虚拟平台上运行控制算法代码,其价值在于不依赖硬件即可提前发现逻辑缺陷与代码稳定性问题。动力总成与高级驾驶辅助系统等关键领域,软硬件交互的复杂性对整车可靠性构成严峻挑战,而硬件在环与软件在环测试能够在不搭建完整整车的条件下,完成对控制系统的充分验证,将集成风险消除在早期阶段。

2.3 仿真与试验迭代闭环

虚拟仿真与物理试验并非相互替代的关系,而是需要形成紧密耦合的迭代闭环。仿真为试验提供预测与指导,试验则为仿真提供校准与验证的依据。数字样车阶段,仿真结果的有效性主要依赖经验评估与对标数据库的支持;物理样车阶段,则需通过对比虚拟预测与实测数据,识别建模偏差并修正模型参数。以参数修正为例,零部件特性参数的实测值往往与设计值存在差异,采用实测数据进行建模能够显著提升仿真精度。整车KC试验数据同样可用于校准悬架模型,使虚拟样车更接近实物状态。仿真与试验的闭环贯穿整车开发全过程,每一次实物试验的数据回流,都在为下一轮虚拟验证积累更准确的模型基础,使研发团队逐步摆脱对大量物理样车的依赖,实现更快速度、更低成本的可靠性验证。

3 环境应力的精确复现

3.1 多轴多负荷综合模拟

车辆行驶过程中承受的载荷具有明显的多向性与耦合特征。垂向振动来自路面不平度激励,纵向载荷对应加速与制动工况,横向载荷源自转向离心力。上述多维载荷的复合作用,对试验设备提出了更高的要求。传统单轴激励台架无法完全复现这种复杂的应力状态,容易导致失效模式失真。多轴振动台架技术的成熟,使整车级多负荷模拟成为可能。该类设备能够在垂向、纵向、横向三个方向独立施加激励,精确复现实际道路的载荷谱特征。与单轴试验相比,多轴加载下部件之间的相互运动关系更接近真实行驶状态,激发的失效模式也更具代表性。部分领先企业已开发出能够将道路模拟与电池测试结合的集成化台架系统,可在可控温度范围内同步对车身、底盘与电池包施加振动载荷,实现整车级别的综合可靠性验证。

3.2 温度湿度振动三综合试验

环境应力对整车可靠性的影响具有显著的协同效应。高温加速材料老化,低温引发脆性断裂,湿度促进电化学腐蚀,振动导致机械疲劳。单一应力作用下的试验往往无法暴露多因素耦合引发的失效模式。温度湿度振动三综合试验正是针对这一问题开发的验证手段。试验过程中,待测样品同时承受交变温度、循环湿度与宽带随机振动三种应力。连接器在温变与振动共同作用下的接触不良、密封件在湿热循环后的防护性能下降、电子元件在热振耦合下的焊点开裂,这些单一应力试验难以捕捉的缺陷,在三综合试验中能够得到有效激发。三综合试验的应用贯穿零部件与系统层级验证。根据产品安装位置与使用条件差异,试验方案设计应选择合适的温度剖面、湿度范围与振动谱

型。发动机舱内零部件要承受更高温等级，底盘部件则需重点关注盐雾与石击的复合作用。

3.3 加速试验方法的科学应用

产品开发周期持续压缩的背景下，完全按照实时光阴进行可靠性验证已不现实。加速寿命试验通过在较短时间内施加高于正常水平的应力，使产品快速经历相当于实际使用年限的老化过程，已成为缩短验证周期的关键技术。实施加速试验的关键前提是保证故障机理不发生改变，应力水平的提高必须控制在合理范围内，避免引入实际使用中不会出现的失效模式。威布尔分布模型常用于加速试验的数据分析与寿命预测，其尺度参数反映系统平均寿命，形状参数表征寿命分布特征。通过调整试验应力水平并拟合模型参数，可推算出产品在正常使用条件下的可靠性指标。基于用户关联的损伤当量计算，为加速系数的科学设定提供了数据支持，如此确定的加速系数能够兼顾验证充分性与周期压缩需求。

4 全流程数据驱动的管理机制

4.1 试验过程实时监控与异常响应

传统可靠性试验管理模式，过程数据分散记录，异常情况依赖人工发现，问题响应存在明显滞后。试验完成后的数据分析结果，通常只用于下一轮产品改进，对当前验证的指导意义有限。数字化试验管理平台的引入改变了这一局面。平台通过为台架部署边缘计算终端，实现试验数据的实时采集与云端传输。管理人员可在远程查看各台架运行状态、试验进度与关键曲线，进度延迟、设备停机、数据异常等信息通过告警策略自动推送至相关人员，试验员与设计工程师可第一时间分析原因、采取措施，从而避免无效试验的持续进行。

4.2 载荷谱与耐久谱的数字化建模

台架试验工况设定的合理性，直接决定验证结果对市场表现的预测能力。传统方法依赖工程师经验编制载荷谱，与用户真实工况存在一定的偏差。数字化建模技术使工况设定从经验驱动转向数据驱动，研发团队基于海量真实运行数据，结合损伤模

型对各零部件载荷、温度、转速信号进行统计分析，生成对应的载荷谱与耐久谱，用于台架工况设定，使试验条件与用户实际使用情境高度吻合。台架运行过程中实时采集数据输入云端损伤模型，构建零件寿命分布曲线，实现批次耐久差异量化评估与可疑批次预警干预，将试验结果利用从周期结束后提前至过程进行中。

4.3 从试验验证到市场反馈的闭环

可靠性验证的最终目标是确保产品在市场端表现稳定，建立试验场数据与售后反馈的有效关联是验证体系优化的基础。完整的数据闭环应当包含从真实驾驶环境采集、经过大数据建模生成载荷谱、转化为台架工况设定、实时进行损耗计算与一致性评估、售后数据回流修正模型五个环节。售后维修记录中的实际失效模式与失效里程，是验证试验规范准确性的最真实依据。

5 结语

试验规范的精准定义、虚拟与物理验证的深度融合、环境应力的高保真复现，以及贯穿全流程的数据闭环，共同构成了整车可靠性验证体系的优化路径。未来，试验技术须持续追踪用户真实场景，以数字化手段驱动精度与效率的平衡，使验证结果真正经得起市场端长期使用的检验。

[参考文献]

- [1]程小强,许文婷.基于深度学习的整车可靠性规范开发模型优化探析[J].中国机械,2024,(26):84-87.
- [2]徐俊杰.整车测试与验证概述[J].汽车电器,2020(9):65-67.
- [3]廖丽芳,韦增汉,黄兰富.针对整车开发项目的样品试制管理研究[J].汽车维修技师,2023,(12):81.
- [4]魏冰,陈添,刘震辉,等.整车控制软件平台化设计及仿真[J].汽车制造业,2025,(05):49-54.

作者简介:

韩飞(1986-),男,汉族,吉林长春人,本科,中级工程师,主要从事汽车整车测试方面的研究工作。