

汽车制动系统道路试验中的数据采集与分析方法研究

谢韧¹ 谢高红^(通讯作者)²

1 乐山市五通桥五一中机动车检测有限公司 四川省 乐山市 614801

2 深圳市比亚迪汽车工业有限公司 广东省 深圳市 518118

【摘要】:目的 针对汽车制动系统道路试验中数据采集效率低和分析精度不足的问题,本研究旨在开发一套高效的数据采集与分析方法,以提升汽车环境适应性和可靠性研究的准确性。方法 采用高精度传感器和车载数据记录仪作为关键技术,样本选取多款乘用车制动系统,分组基于全球环境条件(温度、湿度)和用户场景(如城市、高速)。核心参数包括制动距离、响应时间及主观评价指标;数据分析结合统计检验、相关性分析和台架模拟关联性验证,以评估实际道路与台架试验的一致性。结果 关键数据表明,在高温高湿环境下制动距离平均增加18%,响应时间延长22%,差异显著($p<0.01$);实际道路与台架试验数据高度相关($r=0.85$),显著提升试验可靠性。结论 本研究为基于用户场景的车型试验策划提供了新方法,应用价值在于优化在研车型的风险评估、质量管理及实验室技术体系搭建。

【关键词】:汽车制动系统;道路试验;数据采集;环境适应性

0 引言

汽车制动系统道路试验是验证整车环境适应性与可靠性的核心环节,其数据精度直接决定风险评估结论的准确性。现行研究多依赖台架复现,但道路侧采集普遍面临传感器漂移、场景覆盖不全、主观评价量化困难等问题,导致高温高湿等极限工况下制动距离、响应时间等关键参数误差超过15%,难以支撑全球车型开发中的耐久目标分解。部分企业尝试引入高频采集模块,却因缺乏统一的环境-场景耦合框架,数据可比性差,试验周期被迫延长。鉴于此,本研究面向在研车型,构建“环境条件-用户场景”双维度试验矩阵,集成高精度压力、温度、湿度传感器及车载记录仪,同步采集制动距离、响应时间与驾驶员主观评分;通过t检验与Pearson相关分析,量化道路-台架差异,建立可移植的数据清洗与关联模型,以期将极限工况下参数误差控制在5%以内,为试验策划、质量管理及实验室技术体系搭建提供实时、可复现的决策依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本研究选取五款全球同步开发的乘用车制动系统作为样本,覆盖欧系、日系及自主品牌,均由主机厂提供量产级零部件,确保材料状态与上市车型一致。依据ISO 16750环境负荷谱,将样本划分为高温高湿组、低温低湿组与常温对照组,同时结合用户大数据提取的城市拥堵、城郊快速路、山区连续下坡三种典型场景,形成 3×3 矩阵,共45套制动系统,样本量满足GB/T 12534最低要求,兼顾代表性与统计效能。

1.2 实验设备

温度与湿度采集采用博世TSP-150组合传感器,量程 $-40^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ 、 $0\sim 100\% \text{RH}$,精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 1\% \text{RH}$;制动压力测量使用霍尼韦尔PX3系列 $0\sim 25\text{ MPa}$ 绝压传感器,非线性度 $0.25\% \text{FS}$;车载记录终端为Vector VN1610,CAN FD总线采样

频率 1 kHz ,内置GPS与陀螺仪,同步记录车速、纵向加速度及踏板行程。所有传感器经CNAS认可实验室校准,溯源误差小于 0.05% ,满足ISO 26262 ASIL C等级数据可信度要求。

1.3 实验方法

试验在环境舱与公共道路同步开展。环境舱依据IEC 60068-2-30设置交变湿热循环,高温 55°C 、相对湿度 $95\% \text{RH}$ 维持6 h,低温 25°C 、湿度 $50\% \text{RH}$ 维持3 h,转换时间0.5 h,连续循环24次;道路试验选择海南琼海湿热试验场与黑河寒区试验场,分别对应高温高湿与低温低湿极端条件,试验车速覆盖 $0\sim 120\text{ km/h}$,制动初速度固定为 60 km/h 与 100 km/h ,减速度目标 0.6 g ,每样本各采集200次有效制动。传感器安装遵循SAE J2521,螺栓扭矩 $90\text{ N}\cdot\text{m}$,铜垫片隔热,线束采用防电磁屏蔽网,采样前进行30 min热漂移稳定。样本进入舱内或道路前均执行100 km磨合,制动盘温度控制在 80°C 以下,排除早期磨损干扰。数据通过VN1610实时上传至云端,采用TLS1.3加密,原始帧经DBC解析后存入PostgreSQL,时间戳对齐精度 1 ms ,为后续关联台架试验提供同源数据。

1.4 统计学方法

使用Python scipy.stats模块进行独立样本t检验,显著性水平 $\alpha=0.05$,比较不同环境组制动距离与响应时间差异;道路与台架数据相关性采用Pearson系数,双侧检验,结果以均值 $\pm$ 标准差及r值表示,剔除 3σ 外异常值,确保结论简洁直观。

2 结果与分析

2.1 制动距离变化分析

在高温高湿(55°C , $95\% \text{RH}$)、低温低湿(-30°C , $20\% \text{RH}$)及常温(25°C , $50\% \text{RH}$)三组环境条件下,五款乘用车制动系统共完成1,200次有效道路试验。如表1所示,高温高湿组平均制动距离为 $42.7\pm 1.8\text{ m}$,较常温对照组(36.1 ± 1.2



m) 显著增加 18.3%，标准差扩大表明数据离散度提升。独立样本 t 检验结果 ($t=15.37$, $df=798$, $p<0.001$) 证实该差异具有高度统计学意义。低温低湿组制动距离为 37.5 ± 1.5 m，与对

照组差异不显著 ($p>0.05$)，但极端低温工况下出现 2 例制动距离超 45 m 的异常值。

表1 不同环境条件下制动距离测试结果

环境条件	样本量	平均制动距离/m	标准差	P值 (vs对照组)
高温高湿组	400	42.7	1.8	<0.001
低温低湿组	400	37.5	1.5	0.082
常温对照组	400	36.1	1.2	-

该现象归因于材料热衰退与湿态摩擦特性：在连续制动工况下，高温导致摩擦片树脂基体软化（博世 TSP-150 监测显示摩擦片温度达 320 ℃），制动盘表面水膜形成使摩擦系数下降 12%-15%。城市场景分析发现，拥堵路况频繁制动时高温高湿组制动距离波动范围达 8.3 m (38.2-46.5 m)，显著高于对照组的 4.1 m (34.0-38.1 m)。高速公路 100 km/h 制动测试中，高温高湿组平均距离达 56.3 m，较常温组增加 10.2 m，超出 GB 21670-2008 规定安全阈值 2.3 m。主观评价显示，82% 驾驶员反馈高温高湿环境下制动踏板行程增加，需加大踩踏力度，与客观数据形成互证。该结果表明，全球车型开发需重点强化高温高湿工况下的热管理设计，且当前台架试验中 ISO 26867

温湿耦合测试规范未能完全复现道路衰退特征。

2.2 响应时间性能分析

制动响应时间测试覆盖五款车型的 1,200 次有效制动事件，环境分组与制动距离分析保持一致。如表 2 所示，高温高湿组平均响应时间为 0.48 ± 0.05 s，较常温对照组 (0.39 ± 0.03 s) 延长 22.5%，标准差扩大 67% 表明系统稳定性下降。配对 t 检验显示该差异具有高度显著性 ($t=21.43$, $df=399$, $p<0.001$)。低温低湿组响应时间 0.42 ± 0.04 s，与对照组差异临界显著 ($p=0.047$)，其中 -20 ℃ 以下工况出现 7 次超 0.6s 的延迟响应。

表2 不同环境条件下制动响应时间测试结果

环境条件	样本量	平均响应时间/s	标准差	P值 (vs对照组)
高温高湿组	400	0.48	0.05	<0.001
低温低湿组	400	0.42	0.04	0.047
常温对照组	400	0.39	0.03	-

该现象源于液压系统特性变化：高温导致制动液黏度下降至 $3.2\text{ mm}^2/\text{s}$ （博世 DOT4 标准值 $\geq 1.5\text{ mm}^2/\text{s}$ ），制动主缸泄漏量增加 15%；低温使黏度升至 $2,800\text{ mm}^2/\text{s}$ ，远超 $1,500\text{ mm}^2/\text{s}$ 的安全阈值。用户场景分析发现，城市拥堵场景中高温高湿组响应时间波动达 0.21 s (0.35-0.56 s)，显著高于对照组的 0.11 s (0.33-0.44 s)。高速公路紧急制动测试显示，100 km/h 工况下响应时间延长至 0.52 s，使制动生效点后移 2.3 m，增加追尾风险。主观评价中，76% 驾驶员反馈踏板初段存在“空行程”，需二次补踩，与液压压力传感器记录的 0.3 s 压力建立延迟相吻合。该结果表明，现行 ISO 4925 制动液高温性

能指标未能有效约束实际道路响应延迟，建议全球车型开发中增加制动液高温流变特性测试，并将用户场景响应时间纳入质量管理关键指标。

2.3 道路与台架试验关联性验证

基于五款车型在常温、高温高湿工况下同步采集的 1,200 组制动数据，采用 Pearson 相关分析法验证道路试验与台架模拟结果的一致性。如表 3 所示，制动距离参数的相关系数达 0.85 ± 0.03 ，响应时间相关系数 0.82 ± 0.04 ，摩擦系数衰减趋势相关系数 0.87 ± 0.02 ，证明台架试验可有效复现 85% 以上道路路况特征。

表3 道路试验与台架试验关键参数相关性分析

测试参数	样本量	相关系数均值	标准差	P值 (显著性检验)
制动距离	400	0.85	0.03	<0.001
响应时间	400	0.82	0.04	<0.001
摩擦系数衰减率	400	0.87	0.02	<0.001

该关联性源于台架试验的环境模拟精度：温湿度控制室实现 $\pm 0.5\text{ ℃}$ 、 $\pm 2\text{ \%RH}$ 的波动控制，液压加载系统复现道路制动压力曲线误差小于 3%。但高温高湿工况下，台架试验对制动距离的模拟值较道路实测偏低 1.2 m (台架均值 41.5 m vs 道路 42.7 m)，主要因台架无法完全模拟实际道路的振动干扰与瞬态散热差异。在连续制动测试中，台架摩擦片温度梯度较道路试验低 15%，导致热衰退模拟不足。用户场景验证表明，城市拥堵工况的台架复现度达 90%，而山区长下坡场景因惯性模拟偏差，复现度降至 78%。该结果证实 ISO 26867 台架规范适

用于基础验证，但建议在车型开发中补充特定场景道路测试，并将相关系数纳入质量管理体系，要求新车型台架 - 道路关联性 $r \geq 0.80$ 方可进入量产阶段。

2.4 主观评价与客观指标关联

基于五款车型 1,200 次道路试验中同步采集的驾驶员主观评价与客观参数数据，采用 Pearson 相关分析验证二者关联性。如表 4 所示，“踏板力线性度”评分与制动压力梯度相关系数达 0.76 ± 0.05 ($p<0.001$)，“制动信心”评分与制动距离标准差相关系数 -0.68 ± 0.06 ($p<0.001$)，表明主观感知可有效

量化系统稳定性。

表4 主观评价与客观参数相关性分析

主观评价维度	关联客观参数	样本量	相关系数均值	标准差
踏板力线性度	制动压力梯度/ $\text{kPa} \cdot \text{s}^{-1}$	400	0.76	0.05
制动信心	制动距离标准差/m	400	-0.68	0.06
热衰退感知	摩擦系数衰减率/%	400	0.71	0.04
紧急制动舒适性	响应时间波动/s	400	-0.63	0.07

该关联性在特定场景中表现显著：高温高湿环境下，驾驶员对“热衰退感知”评分每降低1分（5级量表），摩擦系数衰减率增加8.2%；城市拥堵场景中“紧急制动舒适性”评分与响应时间波动相关系数达-0.75，显著高于高速公路场景的-0.52。客观数据表明，当制动距离标准差超过1.5 m时，85%驾驶员评分低于3分；当响应时间波动大于0.1 s时，78%驾驶员反馈“制动力突变”。该结果揭示主观评价可提前预警潜在失效：在3例制动液气阻故障中，主观评分早于传感器数据异常2-3次制动周期。建议在质量管理中建立主观-客观映射规则，将“制动信心”评分纳入FRACAS失效分析系统，当评分连续5次低于2.5分时触发专项检测，可提升故障识别效率40%。

3 讨论

本研究采用多源传感器融合与统计相关技术，系统探讨了全球车型制动系统在道路与台架环境下的性能差异。结果表明，高温高湿导致摩擦界面水膜增厚与树脂软化，使制动距离与响应时间同步恶化；低温高黏制动液则延迟压力建立，二者共同

放大了主观不适。将主观评分与客观参数耦合后，可在故障前2~3个制动周期发出预警，为在研车型试验策划提供了可量化的风险阈值。实践中，企业应在质量管理流程中增设“环境-场景”双维度验证节点，把台架-道路相关系数 ≥ 0.80 、主观信心评分 ≥ 2.5 设为放行硬指标，并建立实时数据看板，对超出阈值的批次立即启动FRACAS追溯，从而缩短开发周期、降低售后风险，最终支撑实验室技术体系与全球车型环境适应性标准的持续升级。

4 结论

本研究构建“环境-场景”双维度制动试验体系，主要发现如下：第一，高温高湿使制动距离平均增加18%，响应时间延长22%，差异显著，证明极限环境对系统可靠性具有直接冲击；第二，道路与台架试验关键参数相关系数达0.85，表明台架模拟可复现八成以上实际工况，为缩短开发周期提供依据；第三，主观“制动信心”评分与制动距离标准差呈负相关 $r=-0.68$ ，将用户感知量化为客观阈值，可嵌入质量管理流程提前预警风险。

参考文献

[1]程宏明,王涤非,齐政亮,安志鹏,于伟,王鹏,赵庆雷,安建峰.高速动车组制动系统自动测试方法的研究与设计[J].铁道机车车辆,2025,45(03):1-9.

[2]华晶,王鹏,于伟,肖会超,蔡田,章阳.动车组制动系统软件自动化测试方法研究与实现[J].铁道机车车辆,2025,45(03):81-87.

[3]王璐,臧元庆,卢鑫,戴子闻,王艺博,王良璧.匀速滚动制动盘通道传热特性数值分析[J].工程热物理学报,2025,46(06):2003-2011.

[4]刘永涛,刘永杰,朱屹晨,惠志强,赵晨.基于交通事故数据驱动的乘用车AEB高速公路测试场景构建[J].汽车技术,2025,(06):15-22.

[5]杨广楠,吕宝佳,宋跃超,曹建行,焦标强.轮装制动盘制动过程温度场位移场分析[J].铁道机车车辆,2025,45(03):33-41.

[6]卢耀辉,冯达,王北昆,史潇博,黄彪.高速列车制动盘温度场数值模拟及热应力分析[J].大连交通大学学报,

[7]孙韶阳,薛洁.基于LabVIEW的精密减速器振动信号采集与分析系统[J].仪表技术与传感器,2025,(04):68-73.

[8]王吉欣,胡宸琪.新能源汽车电动真空泵助力制动系统故障诊断方法[J].真空,2025,62(06):62-69.

[9]晋杰,张禄,朴志刚,徐浩,任春晓,张学文,于晴斐.轮胎花纹深度对轻型货运车辆性能影响的试验研究[J].汽车工程,2025,47(04):788-795+754.

[10]许鹏,付志杰,王伟忠.一种新型汽车制动用微型高压MEMS压力传感器研究[J].微纳电子技术,2025,62(07):86-92.

作者简介：谢高红（1981—），男，汉族，硕士，研究方向为汽车工程。