

商用车制动系统台架试验与实车验证对比分析

马小军 李阿勇 任敏超 张瑞阳
陕西重型汽车有限公司 陕西 西安 710200

摘要:商用车制动系统台架试验可精准复现制动工况, 高效、精确且经济, 能快速完成核心参数优化与方案筛选, 但存在环境模拟缺失、动态响应差异等局限。实车验证能捕捉复杂环境影响, 实现系统级、用户场景贴合度高的验证, 但开发周期长、环境依赖性强、资源投入大。二者具有互补性, 前期开发依赖台架试验, 后期验证需实车测试。行业案例表明, 两者结合能有效优化制动性能, 提升制动系统稳定性和可靠性。

关键词:商用车制动系统; 台架试验; 实车验证; 对比

引言: 商用车制动系统的性能优劣直接关乎行车安全与运输效率, 其研发过程需严谨验证。台架试验与实车验证作为两大关键手段, 各有独特价值与适用场景。台架试验借助专业设备, 能精准控制变量、高效复现特定工况; 实车验证则在真实道路环境中, 考量多因素综合影响。深入对比分析二者, 明确其技术特点、优势局限及互补关系, 对优化制动系统设计、提升产品质量、保障商用车安全稳定运行意义重大。

1 商用车制动系统台架试验的技术特点与局限性

1.1 试验原理与边界条件复现

(1) 案例: 在卡车制动跑偏台架试验中, 借助液压伺服系统精准模拟车辆制动时的轴荷转移过程—通过向台架模拟车架施加垂直载荷, 模拟不同制动强度下前后轴荷的分配变化, 同时安装高精度力传感器与位移监测设备, 实时测量转向直拉杆在制动过程中的变形量, 以此判断转向系统与制动系统的干涉情况; 此外, 还可通过调整台架模拟的路面附着系数(如更换不同摩擦系数的试验台面), 复现湿滑、干燥等不同路面条件下的制动受力状态, 为制动跑偏优化提供数据支撑。(2) 关键参数: 试验需重点控制轮距、质心高度、制动减速度等核心参数, 分析其对板簧S变形的影响。例如, 当轮距从2.4m调整至2.6m时, 板簧横向受力分布发生变化, S变形量可减少12%; 质心高度每增加0.1m, 制动时板簧承受的纵向扭矩增大, S变形量提升8%-10%; 而制动减速度从0.3g提升至0.6g时, 板簧S变形量显著增加, 需通过台架试验确定不同参数组合下板簧的变形阈值, 避免因变形过大导致制动失效。

1.2 优势分析

(1) 高效性: 无需等待自然环境或实际路况, 可快速复现极端制动工况。例如, 在制动系统热衰退测试中, 台架能在2小时内完成0.6g制动减速度下的15次连续

制动循环, 模拟车辆长下坡频繁制动场景, 同步监测制动盘温度变化与制动力衰减趋势, 而相同工况的实车测试需依赖特定山区路段, 且单次测试周期长达1天以上。(2) 精确性: 采用专业测试设备保障数据精度, 如使用拉线位移传感器测量制动部件间的干涉量, 精度可达0.01mm, 能精准捕捉垂臂硬点位置调整对转向直拉杆变形的微小影响; 同时, 台架配备扭矩传感器、压力传感器等, 可实现制动管路压力、制动力矩等参数的实时采集, 数据误差控制在 $\pm 1\%$ 以内。(3) 经济性: 省去实车测试的燃油消耗、道路租赁、多人员协作等成本, 单次台架试验成本约为实车验证的1/5。尤其在零部件级验证阶段(如制动卡钳、制动盘性能测试), 无需搭建完整整车测试环境, 可大幅降低研发投入, 适合前期多方案快速迭代测试^[1]。

1.3 局限性

(1) 环境模拟缺失: 无法完全复现实车复杂环境变量, 如路面不平度导致的车辆颠簸—台架通常采用平整试验台面, 难以模拟坑洼路面对制动管路振动的影响, 可能遗漏因振动引发的管路泄漏隐患; 同时, 台架多采用固定胎压设置, 无法模拟实车行驶中胎压自然损耗(如胎压降低5%)对制动半径的影响, 导致部分实车场景下的故障无法在台架中暴露。(2) 动态响应差异: 台架难以模拟整车多系统协同的动态过程, 例如主挂车制动协调时间—半挂车因制动管路更长, 制动响应存在延迟, 行业要求该延迟需控制在0.3秒内, 但台架试验多单独测试主车或挂车制动系统, 无法还原主挂车制动信号传输的时间差, 可能导致台架测试合格的系统在实车匹配中出现制动不同步问题; 此外, 台架对驾驶员操作习惯的模拟不足(如制动踏板踩下速度的随机性), 也会导致测试结果与实车实际制动效果存在偏差。

2 商用车制动系统实车验证的技术特点与挑战

2.1 验证场景与数据采集

(1) 典型工况：除80km/h紧急制动、长下坡缓速器恒速制动外，还需覆盖城市拥堵路段的频繁启停制动（如每分钟3-5次制动操作）、高速公路的高速巡航制动（100km/h初速下的轻制动），以及非铺装路面的低附着系数制动（如泥泞路面、冰雪路面）；针对特种商用车（如冷藏车、油罐车），还需加入满载状态下的弯道制动工况，模拟实际运输中的复杂行驶场景。(2) 数据指标：除制动距离（如8.6吨货车40km/h初速下 ≤ 10.2 米）、减速度偏差（空载/满载 $\leq 20\%$ ）外，需同步采集制动鼓/盘温度（连续制动后不超过350℃）、制动踏板行程（空载时 ≤ 150 mm，满载时 ≤ 180 mm）、制动管路压力波动值（ ± 50 kPa以内），以及ABS防抱死系统的触发频率与轮速变化曲线，全面评估制动系统的综合性能^[2]。

2.2 优势分析

(1) 真实性：可精准捕捉复杂环境因素对制动系统的影响，例如西南地区山区道路长下坡场景中，制动鼓因持续摩擦生热易出现热裂纹，实车验证能通过温度传感器与应力监测设备，建立温度与裂纹产生的关联模型，为制动鼓材料优化提供真实数据支撑；同时可还原不同海拔（如高原地区气压变化）对制动效能的影响，弥补台架试验环境模拟的不足。(2) 系统级验证：能实现整车多系统协同验证，例如检测电控气压制动系统（EBS）的故障信号传输响应（ ≤ 0.2 秒），同时验证EBS与发动机缓速器、液力缓速器的联动控制逻辑，判断不同制动模式切换时的平顺性；还可评估制动系统与车身稳定系统（ESP）的协同工作效果，如紧急制动时ESP

对车轮制动力的动态调节能力，确保整车制动安全性。

(3) 用户场景贴合度：可模拟实际驾驶员的操作习惯，如不同踏板踩下速度（快速急踩、缓慢轻踩）对制动响应的影响，以及长时间驾驶后制动系统的疲劳性能变化，使验证结果更贴合商用车实际使用场景，为产品优化提供更具参考价值的依据^[3]。

2.3 挑战与成本

(1) 开发周期长：实车验证需覆盖平原、山区、高原、沿海等多种路况，且需完成空载、半载、满载等不同载荷状态的测试，单次完整验证周期可达3-6个月；若需针对极端气候（如-30℃低温、40℃高温）进行专项测试，还需等待特定季节或前往特定地域，进一步延长开发周期。(2) 环境依赖性：雨雪、大雾、高温等恶劣天气会直接影响测试安全性与数据准确性，可能导致测试中断，据统计，受环境因素影响，实车验证的成本会增加30%以上，包括车辆闲置费用、人员驻场费用、测试场地二次租赁费用等；此外，不同地区的道路法规差异（如部分路段限制重卡通行）也会增加测试规划难度。(3) 资源投入大：单次实车验证需投入多辆测试车辆（通常3-5辆，含备用车辆）、专业测试人员（驾驶员、数据分析师、机械工程师），以及高精度测试设备（如车载惯性测量单元、制动力分析仪），单批次测试成本可达数十万元；同时，测试过程中可能出现的车辆故障（如制动管路泄漏、制动盘磨损超标）会进一步增加维修成本与时间成本。

3 商用车制动系统台架试验与实车验证的对比分析

3.1 技术指标对比

指标	台架试验	实车验证
制动距离	可精确控制变量，误差 $\leq 2\%$	受路面附着系数影响，误差 $\geq 5\%$
热衰退率	可模拟连续20次制动，数据稳定	实际路况难以复现极端热负荷
制动协调时间	仅能模拟静态响应	可检测动态协调性（如EBS系统）
成本	单次试验约5万元	单次试验约25万元

3.2 互补性分析

(1) 前期开发：台架试验凭借高效、精准的优势，可快速完成制动系统核心参数的优化与设计方案筛选。例如在制动跑偏优化中，通过台架模拟不同垂臂硬点位置对转向直拉杆受力的影响，结合位移传感器采集的数据，在1-2周内即可对比5-8组设计方案，筛选出能将跑偏量控制在0.5°以内的最优硬点布局；同时可针对制动卡钳安装角度、制动间隙等关键参数进行迭代测试，避免将存在基础设计缺陷的方案带入实车阶段，大幅降低后期整改成本。(2) 后期验证：实车测试则聚焦台架难以覆盖的系统级鲁棒性验证，确保制动系统在复杂实际场景

中稳定工作。例如验证电控气压制动系统（EBS）的故障代码传输可靠性时，实车可还原车辆颠簸行驶、电磁干扰等真实工况，测试EBS在不同路况下故障信号的传输成功率（要求 $\geq 99.9\%$ ），以及故障报警的响应及时性；此外，还能验证台架无法模拟的“系统协同鲁棒性”，如ABS与ESP在冰雪路面紧急制动时的配合稳定性，确保整车制动性能符合实际使用需求^[4]。

4 商用车制动系统台架试验与实车验证对比行业案例与数据支撑

4.1 卡车制动跑偏优化

(1) 台架试验结果：某重型卡车在初期制动性能测

试中,出现明显跑偏问题,经台架拆解分析,确定垂臂硬点位置不合理导致制动时转向系统与制动系统存在干涉。通过台架试验搭建专项测试平台,模拟不同垂臂高度对干涉量的影响:当垂臂高度调整前,在0.6g制动减速度工况下,转向直拉杆与制动管路的干涉量达-2.422mm(负号表示过度挤压),易引发部件磨损与制动卡滞;通过逐步调整垂臂高度(每次调整10mm),最终将垂臂高度提升60mm后,再次测试显示干涉量降至-0.082mm,处于行业公认的安全干涉阈值($\pm 0.1\text{mm}$)以内,同时板簧S型变形量减少15%,制动时轴荷转移稳定性提升20%,为实车优化提供精准数据依据。(2)实车验证结果:基于台架优化方案,在某封闭测试场进行实车制动跑偏验证,测试条件为货车满载(总质量31吨)、初速度60km/h紧急制动。调整前,实车制动跑偏量达1.7m(超过GB7258-2017规定的 $\leq 1.5\text{m}$ 标准),存在安全隐患;采用台架优化的垂臂高度方案后,再次测试显示制动跑偏量降至0.2m,远优于国家标准要求;同时同步监测制动减速度偏差,空载与满载状态下减速度差值从22%降至18%,满足 $\leq 20\%$ 的行业规范,验证了台架优化方案的实际有效性。此外,在后续1000km实际道路测试中,该卡车未再出现制动跑偏相关故障,部件磨损率降低30%,进一步证明优化方案的可靠性。

4.2 新能源商用车制动能量回收

(1)台架测试:某新能源重卡企业针对电动液压复合制动系统(EHB)开展能量回收性能台架测试,搭建包含电机、电池、制动系统的模拟平台,模拟不同制动强度(0.2g-0.8g)与车速(20km/h-80km/h)工况。测试结果显示,在0.4g中等制动强度、60km/h车速下,EHB系统能量回收效率达68%,其中电机回馈扭矩响应时间 $\leq 0.15\text{s}$,制动管路压力与电机回馈力的协同误差 $\leq 5\%$;在连续10次制动循环测试中,能量回收效率波动幅度仅 $\pm 2\%$,表明系统稳定性良好。同时,台架还测试了低温环境(-20°C)对能量回收的影响,显示效率降至62%,

为后续低温适应性优化提供数据支撑。(2)实车测试:为验证台架数据的实际适用性,该企业在厦门某山区路段开展实车测试,该路段包含连续5km长下坡(坡度3%-5%),模拟新能源重卡实际运输场景(满载25吨)。测试结果显示,车辆在下坡过程中开启能量回收功能后,实际动能回收效率达82%,高于台架测试值,主要原因是实车下坡时重力势能辅助电机回馈,提升能量回收效果;同时,实车测试监测到电池SOC(剩余电量)从35%提升至58%,单次下坡回收的电能可支持车辆后续15km平路行驶,有效降低续航焦虑。此外,通过实车测试还验证了能量回收系统与机械制动的切换逻辑:当车速低于15km/h时,系统自动切换为机械制动,制动距离偏差 $\leq 0.5\text{m}$,确保制动安全性,进一步证明台架测试优化的能量回收算法在实际场景中的有效性。

结束语

商用车制动系统的台架试验与实车验证,犹如鸟之双翼,缺一不可。台架试验以高效精准见长,为前期开发提供坚实数据支撑;实车验证凭借真实全面的场景,确保系统在复杂路况下的可靠性。二者在技术指标、验证场景等方面各有优劣,却又紧密互补。未来,随着技术不断进步,应进一步强化两者协同,充分发挥各自优势,以更科学严谨的方式推动商用车制动技术发展,为行车安全保驾护航。

参考文献

- [1]王强,刘浩,张金斗.商用车气压制动系统性能台架试验与实车测试相关性研究[J].汽车工程,2022,(04):37-38.
- [2]李伟,陈涛.基于整车性能目标的商用车制动器台架试验方法探讨[J].重型汽车,2021,(10):102-103.
- [3]赵亮,高飞.商用车EBS台架测试与实车测试对比分析[J].汽车实用技术,2023,(08):80-81.
- [4]李志强.某型商用车制动性能开发中台架与道路试验的协同应用[J].时代汽车,2020,(13):126-127.