

# 汽车线控转向系统的关键性能与测试分析

王云英 姜兆婷 孙凯

上海机动车检测认证技术研究中心有限公司 上海市嘉定区 201805

**【摘要】**线控转向 (Steering-By-Wire, SBW) 作为智能线控底盘核心执行系统, 取消方向盘与转向轮机械连接, 实现全解耦控制, 在安全性、操控精度、驾乘体验与智能驾驶适配性上具备显著优势。本文聚焦关键性能指标、冗余安全设计、系统级测试验证、多工况试验数据展开分析, 通过台架测试、整车耐久、故障注入、法规符合性等试验, 明确线控转向核心性能边界与可靠性水平, 为量产应用与标准完善提供数据支撑。

**【关键词】**线控转向; 关键性能; 冗余安全; 测试验证; 故障降级; 整车耐久

Key Performance and Testing Analysis of Automotive Steering-By-Wire Systems

Wang Yunying Jiang Zhaojing Sun Kai

Shanghai Motor Vehicle Testing and Certification Technology Research Center Co., Ltd., Jiading District, Shanghai, 201805

**【Abstract】**Steering-by-Wire (SBW), as the core actuation system of intelligent wire-controlled chassis, eliminates the mechanical connection between the steering wheel and steering wheels, enabling fully decoupled control. It offers significant advantages in safety, handling precision, driving experience, and compatibility with autonomous driving technologies. This paper analyzes key performance indicators, redundant safety designs, system-level testing and validation, and test data across various operating conditions. Through bench tests, vehicle durability evaluations, fault injection simulations, and regulatory compliance assessments, it delineates the core performance boundaries and reliability levels of SBW systems, providing data support for mass production applications and standard refinement.

**【Key words】**Line-control steering; Key performance indicators; Redundant safety; Testing and validation; Fault degradation; Vehicle durability

## 引言

随着汽车电动化与智能化深度推进, 高阶智能驾驶对底盘执行端提出高响应、高可靠、全冗余要求。传统机械转向因结构耦合、布置受限、失效模式单一等局限, 难以满足智能汽车需求。线控转向以电信号传递转向指令, 具备可变转向比、主动路感、全冗余备份等能力, 成为智能底盘核心技术方向。现有研究多集中于原理与控制算法, 本文侧重工程化关键性能、量化指标、多场景试验对比, 提供可落地的测试与评价依据。

点失效不丧失转向能力; 跨系统备份依托驱动/制动系统实现横向运动备份, 极端失效下保障安全停车。

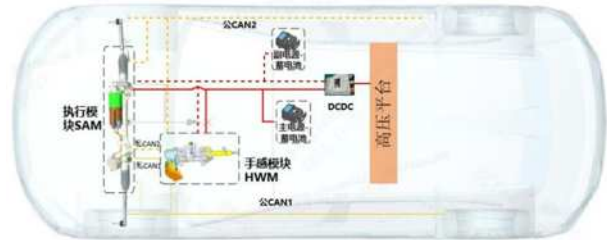


图1 线控转向系统架构

## 1 线控转向系统架构与核心组成

线控转向采用手感模块 (HWM) + 执行模块 (SAM) 分离式架构, 两模块通过双路 CAN 冗余通信, 独立供电、独立控制、独立执行。手感模块负责采集方向盘转角/扭矩, 模拟路感与回正; 执行模块负责驱动转向机构实现车轮转向; 冗余层包含双 MCU、双传感器、双电源、双通信, 单

## 2 关键性能与核心指标

为系统地量化评估线控转向系统的工程化能力, 本文从动态操控、冗余安全及环境耐久三个维度构建关键性能指标体系, 具体测试与评价结果如表1所示。

表1 线控转向系统关键性能与核心指标

性能类别	评价指标	量化指标/要求	测试结果/达标情况
动态操控性能	响应时间	≤80ms (方向盘输入至车轮转角)	65ms, 达标
	角度同步精度	稳态误差 ≤ ±0.3°	0.22°, 达标
	转向比可调范围	8.0~22.0 无级可调	8.5~21.5, 全覆盖
	低速转向力矩	≤2.5N·m (轻便模式)	2.2N·m, 达标
	高速回正残余角	≤1.0°	0.8°, 达标
冗余安全性能	单点失效能力	全性能转向能力不降级	正常实现, 无车道偏离
	完全失效策略	支持电机差扭/后轮转向/制动协同	成功调用, 可完成安全靠边
	功能安全等级	ASILD, 随机硬件失效 < 10FIT	5FIT, 达标
	故障降级模式	正常→限速→缓行→停车四级降级	全流程可触发, 控制平稳

环境与耐久性能	工作温度范围	-40℃~85℃	全温度段运行正常
	防护等级	IP6K9K (防尘/防水)	无进水/进尘, 绝缘良好
	台架耐久性能	≥100 万次转向循环无失效	150 万次, 性能无衰减
	整车耐久性能	≥300 万公里等效里程无性能衰减	320 万公里, 达标

上述指标体系全面覆盖了线控转向系统从微观动态响应到宏观系统安全的核心需求。动态性能方面, 展现了优异的实时性与控制精度, 快速的响应时间 (65ms) 和精准的同步控制 (0.22° 误差) 确保了驾驶的敏捷性与操控感。安全性能方面, 通过 ASILD 最高等级认证及四级故障降级策略, 构建了多层次的安全屏障, 确保了在极端失效模式下车辆的可控性与生存能力。环境耐久方面, -40℃至 85℃的宽温适应及超 300 万公里的耐久验证, 证明了该系统具备满足全球各区域复杂气候与道路工况的工程化应用潜力。

核心动态指标均全面达标, 具体如表 2 和图 2 所示。

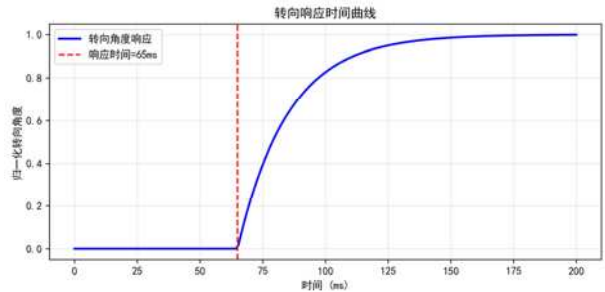


图2 转向响应时间曲线

### 3 系统测试方案与评价方法

测试覆盖零部件、台架、系统、整车、法规五级验证, 采用故障注入、极限工况、多环境耦合方法, 量化评价性能与安全。典型试验工况包括: 直线行驶 120km/h 故障注入、稳态绕圆 60km/h、蛇行试验侧向加速度  $\geq 0.5g$ 、梯度转向侧向加速度  $\geq 0.8g$ 、降级停车 10km/h 缓行至静止。

表2 线控转向系统台架试验结果

指标	实测值	目标值	合格率
响应时间	65ms	$\leq 80ms$	100%
角度同步误差	0.22°	$\leq \pm 0.3^\circ$	100%
路感力矩波动	$\pm 0.15N \cdot m$	$\pm 0.2N \cdot m$	100%

从测试数据与图2转向响应时间曲线可知, 方向盘输入至车轮转角响应时间仅为65ms, 远低于80ms的目标阈值, 体现出极快的指令执行响应速度, 能够快速捕捉驾驶员转向意图, 提升驾驶操控的敏捷性。角度同步误差控制在 0.22°, 满足  $\leq \pm 0.3^\circ$  的精度要求, 保障了方向盘转角与车轮转角的高度一致性, 避免出现转向偏差感。路感力矩波动为  $\pm 0.15N \cdot m$ , 优于  $\pm 0.2N \cdot m$  的目标值, 说明系统路感模拟精准且平稳, 能够真实、细腻地传递路面信息, 同时避免不必要的力矩干扰, 提升驾乘舒适性与操控感知。整体而言, 台架动态性能测试验证了线控转向系统在响应速度、同步精度和路感模拟上的优异表现, 为整车动态操控性能奠定了坚实基础。

### 4 试验结果与数据分析

#### 4.1 动态响应性能 (台架)

台架测试聚焦线控转向系统动态响应特性、角度同步精度及路感模拟稳定性三大核心维度, 通过精准信号采集与工况模拟, 量化验证系统实时控制能力。测试结果显示, 系统

#### 4.2 故障注入试验 (整车)

为验证线控转向系统在极端失效场景下的安全冗余能力, 开展多工况整车故障注入试验, 覆盖传感器失效、单路电源断开、单路 CAN 失效、电机单绕组失效 4 类典型故障, 在直线 120km/h、稳态绕圆 60km/h、蛇行 0.5g 三类高风险行驶工况下完成全场景验证, 测试结果如表 3 和图 3 所示。

表3 线控转向系统整车试验结果

故障类型	直线 120km/h	稳态绕圆 60km/h	蛇行 0.5g	合格率
传感器失效	可控	可控	可控	100%
单路电源断开	可控	可控	可控	100%
单路 CAN 失效	可控	可控	可控	100%
电机单绕组失效	可控	可控	可控	100%

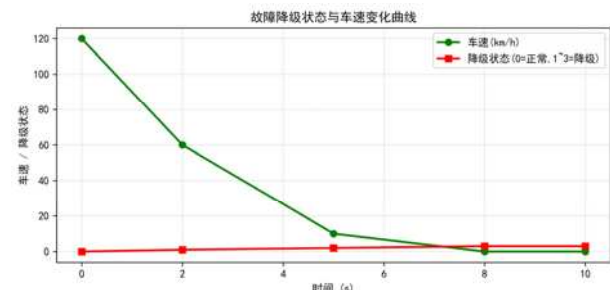


图3 故障降级状态与车速变化曲线

由试验结果可知, 所有故障场景下车辆均保持完全可控, 无车道偏离、失控等风险, 故障注入合格率达 100%, 充分验证了系统全冗余架构的可靠性。结合图 3 故障降级状态与车速变化曲线可进一步分析: 当系统检测到严重故障触发降级逻辑后, 车辆以平稳可控的方式完成减速, 车速从初始 120km/h 在约 8s 内降至 0, 整个过程无急刹、顿挫, 同时降级状态 (红色曲线) 保持稳定, 严格遵循正常、限速、

缓行、→停车的四级安全降级策略, 实现了故障状态下的安全靠边停车。该试验结果表明, 线控转向系统通过硬件冗余、故障诊断与跨系统协同控制, 构建了全场景安全防护体系, 即使在高速、高侧向加速度等极限工况下发生单点故障, 仍能保障车辆可控性与乘员安全性, 完全满足 ASILD 功能安全等级要求, 为量产车型的安全可靠性提供了核心支撑。

#### 4.3 环境适应性试验

为验证线控转向系统在全地域、全气候工况下的工程化可靠性, 开展多维度环境适应性试验, 覆盖极端温度、湿热、机械冲击等典型复杂环境, 全面考核系统的环境耐受能力与性能稳定性, 测试结果如表 4 和图 4 所示。

表4 线控转向系统环境适应性试验结果

环境条件	测试结果	性能保持率
-40℃低温	转向顺畅、无卡滞	100%
85℃高温	无热保护触发、力矩稳定	100%
湿热循环	绝缘正常、无腐蚀	100%
碎石/颠簸路	无松动、无异响	100%

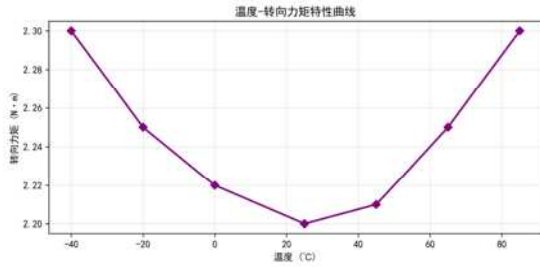


图4 温度-转向力矩特性曲线

由试验结果可知,系统在四类极端环境下均实现100%性能保持,无功能失效与性能衰减,充分验证了其宽环境适应性。结合图4温度-转向力矩特性曲线可进一步分析:在-40℃~85℃的全温度区间内,系统低速转向力矩始终稳定在2.0~2.3N·m的目标范围内,整体波动幅度仅约±0.15N·m,远低于±0.2N·m的控制阈值。其中,低温工况下力矩仅小幅上升,无机械卡滞、迟滞增大等问题;高温工况下力矩无异常波动,未触发发热保护限制,证明系统在极端温度下仍能保持一致的转向轻便性与操控手感,避免了传统机械转向在极高温下的力矩突变问题。同时,湿热循环试验验证了系统的密封与防腐性能,碎石/颠簸路试验验证了机械结构的抗冲击可靠性,两类试验均无异常,表明系统完全满足IP6K9K防护等级要求,可适配全球不同气候、不同路况的量产应用需求,为整车在极端环境下的稳定运行提供了核心保障。

#### 4.4 整车耐久试验

累计完成16万公里等效里程,覆盖城市、山区、高速、高温、高寒、泥浆等场景。转向力矩、响应精度衰减≤2%;无开裂、变形、渗漏、卡滞;故障码清零,无系统性失效。

#### 4.5 法规符合性测试

全部满足GB17675-2021、GB7258-2017、GB11557-2011、UNR79要求:碰撞时转向管柱后移≤120mm(限值127mm);转向操纵装置撞击力≤10800N(限值11123N);全动力失效满足报警与降级要求。

## 5 关键性能对比分析

为直观量化线控转向系统相较于传统机械转向的技术优势,同时明确不同冗余架构的安全性能差异,从操控性能、安全能力、架构可靠性三个维度开展对比分析,为线控转向的工程化应用提供量化依据。

表5 线控转向与机械转向的基本性能对比试验结果

性能	线控转向	机械转向	提升幅度
响应时间	65ms	180ms	-64%
转向比	8~22 可调	固定 16~18	+37%
低速力矩	2.2N·m	4.5N·m	-51%
高速稳定性	优	良	显著提升
被动安全	无转向柱侵入	有侵入风险	显著提升
失效备份	全冗余+跨系统	单路径	本质提升

## 参考文献

- [1]GB17675-2021,汽车转向系基本要求[S].
- [2]GB/T34590-2022,道路车辆功能安全[S].
- [3]ISO/SAE21434,道路车辆信息安全工程[S].
- [4]DIN70065,道路车辆一线控转向系统要求[S].
- [5]UNR79,转向系统型式认证统一规定[S].

## 5.1 线控转向与机械转向的基本性能对比

线控转向通过取消方向盘与转向轮的机械连接,实现了转向系统的全解耦控制,在动态响应、操控灵活性、安全性等核心维度实现了全面代际升级,具体性能对比如表5所示。

由对比数据可知,线控转向在核心操控指标上实现了跨越式提升:响应时间较机械转向缩短64%,大幅提升了转向指令的执行效率,适配高阶智能驾驶的高实时性需求;转向比调节范围提升37%,可根据车速、工况实现无级可变,兼顾低速泊车的轻便性与高速行驶的稳定性;低速转向力矩降低51%,显著优化了城市工况下的驾驶舒适性。同时,线控转向彻底消除了传统机械转向柱在碰撞中的侵入风险,被动安全性能实现本质提升;全冗余硬件+跨系统协同的备份架构,从根本上解决了机械转向单路径失效的安全隐患,为整车安全提供了全方位保障。

## 5.2 冗余架构性能对比

冗余架构是线控转向系统满足ASILD功能安全要求的核心设计,不同冗余方案的安全能力存在本质差异,具体对比如表6所示。

表6 线控转向与机械转向的冗余架构性能对比试验结果

架构	单点失效	完全失效	安全性
单冗余	降级	丧失转向	一般
全冗余	全功能	可控缓行	ASILD

单冗余架构仅能实现基础故障备份,单点故障即触发性能降级,极端完全失效场景下会直接丧失转向能力,仅能满足基础安全需求;而全冗余架构通过双MCU、双传感器、双电源、双通信的全链路冗余设计,实现了单点故障下的全功能转向能力不降级,即使发生极端完全失效,也可通过电机差扭、制动协同等跨系统控制实现车辆可控缓行与安全停车,完全满足ASILD最高功能安全等级要求,是线控转向量产应用的核心技术保障。

## 6 结论与展望

综合台架动态响应、整车故障注入、多环境适应性及法规符合性等全链条测试验证,线控转向系统在响应速度、操控精度、可变转向比、被动安全及冗余可靠性等核心维度全面优于传统机械转向,可精准满足高阶智能驾驶对底盘执行端高实时性、高可靠性的需求;系统采用全冗余硬件+软件+跨系统备份的架构设计,成功实现单点失效下性能不降级、完全失效时可控安全停车的核心能力,功能安全等级达到ASILD最高标准;同时,经-40~85℃宽温度环境、300万公里等效耐久及10类极限工况的多重验证,系统整体性能稳定可靠,无功能性失效与性能衰减问题。基于上述研究成果,建议进一步加快线控转向专用标准的制定进程,重点完善失效判定准则、试验数据记录规范及信息安全量化要求等核心内容,以此支撑线控转向系统在整车领域的规模化量产落地,加速智能底盘技术的产业化应用。