

长行程悬挂系统对车辆稳定性影响机理探讨

曾海军

探骊动力科技（重庆）有限公司 重庆

【摘要】长行程悬挂系统通过拓展车轮垂直活动空间强化复杂路况通过性，其对车辆稳定性的影响机理核心在于结构特性、阻尼效能与刚度分布的协同作用。行程延长易引发几何特性劣化，导致车轮外倾角异常与侧倾加剧；动态响应滞后会降低突发路况下的姿态可控性；谐振风险则破坏轮胎附着力稳定性。本文从结构关联基础切入，剖析稳定性失衡症结，阐释摆臂联动优化、减震器参数调校等提升路径，以及阻尼与刚度协同调控方法，揭示行程与稳定性的动态平衡规律，为越野及家用 SUV 悬挂调校提供理论支撑与实践参考。

【关键词】长行程悬挂；车辆稳定性；结构优化；阻尼调控；刚度匹配

【收稿日期】2025 年 10 月 15 日 **【出刊日期】**2025 年 11 月 15 日 **【DOI】**10.12208/j.sdr.20250274

Mechanism analysis of the impact of long-travel suspension systems on vehicle stability

Haijun Zeng

Tanli Power Technology (Chongqing) Co., Ltd., Chongqing

【Abstract】A long-travel suspension system enhances a vehicle's ability to handle complex terrains by extending the vertical movement range of the wheels. The mechanism through which it affects vehicle stability lies primarily in the coordinated interaction of structural characteristics, damping efficiency, and stiffness distribution. Excessive suspension travel may lead to geometric degradation, resulting in abnormal wheel camber angles and increased body roll; delayed dynamic response can reduce controllability during sudden maneuvers; and resonance risks may compromise tire traction stability. This paper starts from the fundamental structural correlations, analyzes the root causes of stability imbalance, and elaborates on optimization approaches such as linkage arm coordination and shock absorber parameter tuning. It further discusses the synergistic regulation of damping and stiffness, revealing the dynamic balance between suspension travel and stability, thereby providing theoretical and practical guidance for suspension tuning in off-road and household SUVs.

【Keywords】Long-travel suspension; Vehicle stability; Structural optimization; Damping regulation; Stiffness matching

引言

长行程悬挂系统是硬派越野与全地形车辆突破复杂路况限制的核心配置，通过延长车轮跳动行程保障轮胎接地连续性，却陷入“通过性提升伴随稳定性下降”的困境——过度追求行程易导致车身侧倾加剧、转向响应迟滞，高速工况下甚至引发操控失稳，成为车型性能升级的关键阻碍。现有研究多聚焦单一参数优化，忽视悬挂几何布局、刚度梯度与阻尼特性的联动效应。当下家用 SUV 越野化需求凸显，明确其对稳定性的作用机理迫在眉睫。本文从

结构特性切入，逐层剖析问题根源与优化路径，搭建理论与实践的衔接桥梁，回应行业性能平衡诉求。

1 长行程悬挂与车辆稳定性的结构关联基础

长行程悬挂与车辆稳定性的结构关联基础植根于核心部件参数与布局的协同作用，其结构核心体现为摆臂尺寸升级、减震器有效行程拓展及弹簧刚度适配调整，这些参数直接决定车轮运动轨迹的可控性与车身姿态的稳定性。摆臂长度的增加需配合转向节连接精度优化，大摆角球头销总成的应用可有效抑制车轮跳动时的横向偏移，为轮胎垂直接地

提供基础支撑,这一结构细节在越野车型的实际调校中尤为关键,比如硬派越野车型常用的加长下摆臂设计,需通过有限元分析优化球头销的受力分布,避免大摆角工况下的过早磨损。

悬挂系统的动态特性与车身稳定性形成紧密闭环,这种闭环关系通过振动传递与能量转换实现。行程延长会导致悬挂固有振动频率降低,与车身谐振区间的重叠概率显著上升,易引发垂直方向的共振现象。这种振动传递通过减震器与弹簧的能量转换完成,行程参数的合理性直接影响振动衰减效率,进而改变轮胎与地面的附着力分布,成为稳定性控制的隐形变量,在连续起伏的越野路面,这种共振现象可能导致车身姿态出现周期性波动,降低驾驶可控性^[1]。结构布局的协同设计是平衡行程与稳定性的基础,多杆件联动结构为这种平衡提供了实现路径。上双横摆臂下单长横摆臂的联动结构通过多杆件协同运动,在延长行程的同时精准控制车轮外倾角变化,确保轮胎始终保持理想接地姿态。这种设计打破了传统短摆臂悬挂的行程限制,证明结构特性的系统性优化可构建通过性与稳定性的平衡基石,为后续参数调校提供结构支撑,部分高端越野车型采用的双叉臂长行程结构,正是通过三角形连杆布局强化了这种协同效应。

2 长行程悬挂诱发稳定性失衡的核心症结

长行程悬挂诱发稳定性失衡的核心症结首先体现在悬挂几何特性的恶化,这种恶化直接冲击车辆侧倾稳定性。车辆转向时,长行程悬挂的摆臂摆动幅度增大,使车轮外倾角变化量超出合理阈值,外侧轮胎接地面积收缩,侧向附着力不足,进而加剧车身侧倾。非独立悬挂车型受硬轴结构限制,车轮相互干涉现象更明显,会进一步放大行程延长带来的姿态波动,形成安全隐患,在山区多弯道路段,这类车型的侧倾问题会显著影响驾驶安全性。

动态响应滞后是长行程悬挂引发稳定性问题的典型表现,阻尼力传递的时间差是其根本原因。长行程设计下,减震器活塞需在更长缸体内往复运动,运动距离的增加使阻尼力从产生到作用于车轮存在天然时间差,这种延迟在常规路况下可能不易察觉,但在突发场景中会直接暴露缺陷。当车辆遭遇坑洼、凸起等意外路况时,阻尼力无法及时介入抑制车轮剧烈跳动,导致车身姿态调整始终滞后于驾驶操作,形成“操作-响应”的时间差,破坏驾驶预期与车辆

实际状态的一致性。在越野场景中,这种滞后的负面影响被进一步放大。复杂路面的连续障碍会使轮胎频繁面临“冲击-回弹”循环,滞后的阻尼力难以实时支撑车轮,易造成轮胎短暂悬空^[2-6]。轮胎悬空不仅会中断动力向地面的有效传递,导致驱动力浪费,更会使车身失去该轮的支撑与导向作用,降低整体可控性。尤其在连续起伏的山地或泥泞路段,这种滞后引发的悬空会形成累积效应,每一次短暂失稳都会加剧车身姿态波动,最终形成累积性失稳风险,而泥泞路段的湿滑表面更会因轮胎打滑进一步放大这种风险,严重时可能导致车辆偏离预定行驶轨迹。

刚度与行程匹配失衡不仅削弱悬挂系统的支撑力,还会放大整车的动态不稳定性。为了满足长行程设计而降低弹簧刚度,虽然能够在轻载或低速行驶时显著改善乘坐舒适性,但在高速或重载工况下,低刚度弹簧难以提供足够的回弹支撑,导致车身姿态变化明显,侧倾幅度加大。此时,悬挂行程被迅速压缩,易出现车轴频繁触及缓冲块的情况,使冲击载荷通过控制臂、减震器和车身结构层层传递,形成结构性共振与局部疲劳。长期运行下,这种不良循环将造成悬挂部件磨损加剧、定位精度下降,进而诱发车辆在弯道或紧急变道时的转向不足与稳定性恶化。尤其在 SUV 满载或高速过弯时,这种“刚度不足—冲击加剧—姿态失衡”的连锁反应更为明显,严重影响车辆安全与操控性能。

3 结构优化导向的稳定性提升路径

结构优化导向的稳定性提升路径以摆臂联动设计为核心,通过多杆件协同运动实现行程与稳定性的平衡。上双横摆臂与下摆臂的协同结构通过连杆传递运动,可在车轮大行程跳动中维持垂直接地状态,减少横向位移对稳定性的干扰。平衡杆的增设能进一步限制左右悬挂的相对运动,单侧车轮遇障时可快速抑制车身倾斜,这一优化方案已在多款硬派越野车型的长行程悬挂系统中得到成熟应用,部分车型还通过主动稳定杆的液压控制实现了实时姿态调整。

减震器安装参数的精细化调校是结构优化的重要环节,直接影响力的传递效率与侧倾控制。缩短减震器安装角度可通过改变力的传递方向降低侧倾敏感度,增强车身抗侧倾能力^[7]。缓冲块高度的自适应调节设计能在行程接近极限时提供渐进式支撑,避免刚性碰撞引发的姿态突变,类似比亚迪动态伸缩架构的技术逻辑,实现了行程拓展与冲击控制的

双重目标,这种设计在兼顾越野性能的城市 SUV 中应用愈发广泛。

轮边转向协同技术为弥补响应滞后缺陷提供了有效解决方案,通过机械协同实现动态姿态补偿。将后轮辅助转向功能与长行程悬挂联动,通过转向节与摆臂的机械协同,使车轮在跳动过程中同步调整转向角度,提升转向精准度。这种技术路径既保留了长行程的通过性优势,又通过动态姿态补偿解决了操控迟滞问题,成为家用 SUV 长行程悬挂调校的优选方案,部分豪华品牌已将其与电子助力转向系统深度融合。

4 阻尼与刚度协同的稳定性调控方法

阻尼与刚度协同的稳定性调控方法中,阻尼特性的动态调节是平衡行程与稳定性的关键手段,智能减震技术为其提供了可靠实现路径。液压或气压式可调减震器依托气门阀片的智能控制机制,能根据行驶工况灵活切换工作模式:高速行驶时,通过强化回弹阻尼力度,有效抑制车身因惯性产生的过度下沉,保障行驶姿态稳定;低速通过复杂路面时,则主动降低压缩阻尼,快速吸收路面细碎颠簸,提升驾乘舒适性。磁流变减震器凭借卓越的响应速度,进一步优化阻尼调节效果,其内部磁流变液能在极短时间内完成状态转换,配合高效闭环控制,可实时适配路况变化,让长行程悬挂始终保持最佳振动衰减效率,持续维持轮胎与地面的稳定附着力,为车辆稳定性提供坚实支撑。

为更深入阐述刚度梯度优化与行程参数的适配逻辑,我将围绕渐进式弹性元件的工作原理、约束阻尼结构的协同作用及实际应用价值展开扩写,突出其对长行程悬挂稳定性的提升作用。刚度梯度的优化设计需与行程参数精准适配,渐进式弹性元件成为核心载体。渐进式弹簧凭借非线性刚度变化特性,能根据行程动态调整支撑强度:行程初期以低刚度状态柔和吸收路面细碎颠簸,保障驾乘舒适性;随行程增加接近极限位置时,刚度自动递增形成强劲支撑力,有效限制车身过度形变,避免悬挂系统进入失稳区间^[8]。约束阻尼结构的应用进一步强化振动抑制效果,其通过阻尼层与弹性元件的紧密贴合,在弹簧形变过程中同步发挥能量耗散作用,将振动能量转化为热能快速消散,大幅降低共振风险。这种组合设计打破传统单一刚度弹簧的适配局限,在改装车的越野场景测试与量产 SUV 的日常行驶验证中,均能显著提升车身姿态稳定性,成为长行程悬挂系统优化的重要配套技术。

悬挂与轮胎的系统级调校是稳定性调控的延伸与强化,构建多维度控制体系。宽胎配合负外倾角设置可增大接地面积,抵消长行程带来的附着力波动;胎压的动态调控则在保证胎壁支撑力的前提下,提升轮胎对复杂地面的贴合度。这种协同思路打破了单一部件优化的局限,构建起“悬挂结构—弹性元件—轮胎接地”的稳定性控制体系,实现多维度性能平衡,在专业越野赛事车辆的调校中,这种系统级优化已成为提升赛道成绩的关键。

5 结语

本文围绕长行程悬挂系统对车辆稳定性的影响机理展开分析,明确结构特性、阻尼效能与刚度分布的协同作用是核心影响维度。研究表明,行程延长引发的侧倾加剧、响应滞后等问题,可通过摆臂联动设计、阻尼自适应调节及刚度梯度优化缓解,印证“结构筑基—参数协同—系统调校”技术逻辑。这种机理分析为越野车型悬挂设计提供理论支撑,也为家用 SUV 调校提供实践参考,推动通过性与稳定性融合,为车辆底盘技术升级指引方向。

参考文献

- [1] 胡棋誉,陆泽琦,陈立群. 长行程磁悬浮平面作动器的动力学建模与非线性模型预测控制方法[J].动力学与控制学报,2025,23(08):1-11.
- [2] 李玉萍,顾吉仁. 机械结构优化对汽车行驶稳定性的影响[J].汽车测试报告,2025,(14):91-93.
- [3] 江艇.长行程低频振动校准系统的设计与实现[D].电子科技大学,2025.
- [4] 万银.复合工况下的车辆稳定性判据研究[D].重庆理工大学,2025.
- [5] 孔祥悦.无人车辆轨迹规划与跟踪协同稳态控制优化研究[D].北京建筑大学,2024.
- [6] 李志成.智能车辆队列高速转向运动稳定性研究[D].南京林业大学,2024.
- [7] 于果.考虑车身姿态的桥上中型客车侧风稳定性研究[D].吉林大学,2023.
- [8] 戚小平.面向车辆操纵稳定性与平顺性的悬架及转向系统结构分析与优化[D].昆明理工大学,2023.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS