

基于多体动力学的整车底盘悬架系统匹配优化研究

杨伟华

杭州福兆朗风科技有限公司 浙江杭州 311200

摘要: 随着汽车工业向智能化、高性能化转型,消费者对车辆行驶平顺性、操纵稳定性及安全性的要求愈发严苛。底盘悬架系统作为连接车身与车轮的核心部件,其参数匹配精度直接决定整车动力学性能。传统悬架系统匹配优化依赖物理试验,存在周期长、成本高、参数迭代效率低等弊端。多体动力学技术凭借精准的动力学建模与仿真分析能力,为悬架系统匹配优化提供了高效的数字化解决方案。本文基于多体动力学理论,明确悬架系统匹配优化的核心目标与评价指标,构建整车底盘悬架系统多体动力学模型,提出“建模-仿真-优化-验证”的闭环优化流程,深入探讨关键参数匹配优化的关键技术,为提升整车动力学性能、缩短研发周期、降低研发成本提供理论参考与技术支撑^[1]。

关键词: 多体动力学; 底盘悬架系统; 匹配优化; 动力学建模; 仿真分析

引言

在汽车动力学性能体系中,底盘悬架系统承担着缓冲路面冲击、传递驱动力与制动力、维持车身姿态稳定的核心功能,其参数匹配状态直接影响车辆的行驶平顺性、操纵稳定性、制动安全性等关键性能指标。随着汽车电动化、智能化技术的发展,底盘系统与动力系统、电控系统的耦合关系愈发复杂,传统基于经验设计与物理试验的悬架匹配方式,已难以满足高精度、高效化的研发需求。此类方法不仅需要搭建大量物理样件,耗费高额研发成本,且参数调整周期长,无法快速响应多目标性能优化的需求,易导致悬架系统与整车性能的匹配失衡。

多体动力学作为研究多刚体或柔体系统运动与受力特性的力学分支,能够通过建立包含约束、载荷与惯性特性的数字化模型,精准仿真系统在不同工况下的动力学响应。将多体动力学技术应用于整车底盘悬架系统匹配优化,可实现悬架参数的数字化迭代与性能预判,大幅缩短研发周期、降低试验成本。目前,国内外相关研究多聚焦于单一悬架部件的性能优化,缺乏对整车底盘悬架系统多参数、多目标的协同匹配优化研究。基于此,本文立足多体动力学理论,构建整车级悬架系统多体动力学模型,探索科学的匹配优化流程与关键技术,对提升整车动力学性能、推动汽车底盘研发数字化转型具有重要的理论与实践意义。

一、核心概念界定与理论基础

(一) 整车底盘悬架系统核心构成与功能

整车底盘悬架系统主要由弹性元件(螺旋弹簧、钢板弹簧、空气弹簧等)、阻尼元件(减振器)、导向机构(控制臂、稳定杆、转向节等)及连接部件组成。其核心功能体现在三个方面:一是缓冲减振,通过弹性元件与减振器的协同作用,衰减路面不平度带来的冲击载荷,提升行驶平顺性;二是姿态控制,通过导向机构约束车轮的运动轨迹,避免车身出现过度侧倾、俯仰等姿态变化,保障操纵稳定性;三是载荷传递,将车轮受到的地面反力、驱动力、制动力精准传递至车身,实现车辆的正常行驶与制动。悬架系统的性能优劣取决于弹性元件刚度、减振器阻尼、导向机构几何参数等核心参数的匹配精度。

(二) 多体动力学理论核心内涵

多体动力学理论以经典力学为基础,重点研究由多个刚体或柔体通过运动副连接而成的复杂系统的动力学行为,其核心内容包括多体系统的运动学分析、动力学建模与仿真求解^[2]。在多体系统建模中,需明确系统的组成构件、构件间的约束关系(如转动副、移动副、球铰等)、外部载荷(如路面激励、驱动力)及惯性参数(如质量、转动惯量)。通过拉格朗日方程、牛顿-欧拉方程等动力学方程,建立系统的运动微分方程组,结合数值求解方法(如龙格-库塔法),可精准求解系统在不同工况下的位移、速度、加速度及受力特性。相较于传

统力学分析方法，多体动力学能够精准表征构件间的非线性约束与动态耦合关系，为复杂悬架系统的动力学性能分析提供了精准的理论工具。

（三）悬架系统匹配优化的核心目标与评价指标

悬架系统匹配优化以“多目标协同提升”为核心目标，兼顾行驶平顺性、操纵稳定性与结构可靠性。为量化评价优化效果，需建立科学的评价指标体系：1. 行驶平顺性指标：以车身垂直加速度均方根值、车轮动载荷均方根值为核心，车身垂直加速度直接反映驾乘舒适性，车轮动载荷则影响车轮与地面的附着性能；2. 操纵稳定性指标：包括稳态转向增益、转向回正性能、车身侧倾角、车轮外倾角变化量等，稳态转向增益反映车辆的转向响应特性，车轮外倾角变化量则影响轮胎的接地面积与抓地力；3. 结构可靠性指标：以悬架关键构件的最大应力、疲劳寿命为核心，确保优化后的参数不会导致构件过载损坏。各评价指标需依据GB/T5902-2019《汽车平顺性试验方法》、GB/T6323-2014《汽车操纵稳定性试验方法》等国家标准确定量化阈值。

二、基于多体动力学的悬架系统建模方法

构建精准的多体动力学模型是悬架系统匹配优化的基础，建模过程需遵循“构件离散-参数定义-约束添加-载荷施加”的核心逻辑，确保模型能够真实表征悬架系统的动力学特性。

（一）模型构件离散与几何建模

首先基于整车底盘CAD图纸，对悬架系统进行构件离散，明确模型的核心组成部分，包括车身、车架、控制臂、转向节、车轮、螺旋弹簧、减振器、稳定杆等。考虑到建模效率与仿真精度的平衡，采用“刚体为主、柔体为辅”的建模策略：将质量较大、刚度较高的构件（如车身、车架、转向节）简化为刚体，保留其质量、转动惯量等惯性参数；将承受交变载荷、易产生弹性变形的构件（如控制臂、稳定杆）简化为柔性体，通过有限元软件（如ANSYS）进行模态分析，获取模态中性文件，导入多体动力学软件中实现刚柔耦合建模，确保模型能够精准表征构件的弹性变形对系统动力学性能的影响。几何建模过程中，需严格匹配各构件的尺寸参数与安装位置，确保模型的几何精度。

（二）参数定义与约束关系构建

参数定义包括惯性参数与力学参数两类：惯性参数需通过试验或CAD软件计算获取，包括各构件的质量、质心坐标、转动惯量；力学参数则涵盖弹性元件的

刚度特性、减振器的阻尼特性、轮胎的动力学特性等。其中，轮胎作为连接悬架与地面的关键部件，其动力学特性对仿真精度影响显著，需采用精准的轮胎模型（如MagicFormula轮胎模型），输入轮胎的垂直刚度、侧偏刚度、滚动阻力等参数。约束关系构建需依据各构件的实际运动关系，添加相应的运动副：如控制臂与车架之间采用转动副连接，车轮与转向节之间采用滚动副连接，同时添加弹簧-阻尼单元模拟螺旋弹簧与减振器的力学特性，添加总线单元模拟稳定杆的扭转特性。

（三）载荷与工况设置

载荷与工况设置需覆盖悬架系统的典型工作场景，确保仿真结果的全面性与实用性。外部载荷主要包括路面激励、车身重力、驱动力与制动力：路面激励采用随机路面模型（如ISO8608标准路面谱），通过设置不同的路面等级（A、B、C、D级）与行驶速度，模拟车辆在不同路况下的行驶状态；驱动力与制动力根据车辆的动力参数设置，模拟加速、制动工况下的载荷传递特性。典型仿真工况包括：随机路面行驶工况（评价行驶平顺性）、稳态转向工况（评价转向稳定性）、紧急制动工况（评价制动姿态控制性能）、蛇行试验工况（评价动态操纵响应特性）。

三、基于多体动力学的悬架系统匹配优化流程与关键技术

基于多体动力学的悬架系统匹配优化采用“建模-仿真-优化-验证”的闭环流程，通过多体动力学仿真获取性能响应数据，结合优化算法实现核心参数的精准匹配，最终通过仿真验证优化效果。

（一）闭环优化流程构建

1. 建模阶段：完成整车底盘悬架系统多体动力学模型的构建与验证，通过与基础物理试验数据（如车身垂直加速度、车轮动载荷）的对比，修正模型参数，确保模型的仿真精度（误差控制在5%以内）；2. 仿真分析阶段：设置典型仿真工况，运行多体动力学模型，获取各评价指标（行驶平顺性、操纵稳定性、结构可靠性）的仿真结果，识别影响整车性能的关键悬架参数；3. 优化设计阶段：以关键悬架参数为设计变量，以多目标性能最优为优化目标，结合优化算法构建优化模型，求解最优参数组合；4. 验证阶段：将优化后的参数代入多体动力学模型，重新进行仿真分析，对比优化前后各评价指标的变化，验证优化方案的有效性。若优化效果未达预期，则返回优化设计阶段，调整设计变量与优化目标，

直至满足性能要求。

(二) 关键设计变量筛选

悬架系统的参数众多,若全部作为设计变量,将导致优化模型复杂、迭代效率低下。因此,需通过灵敏度分析筛选关键设计变量。灵敏度分析通过改变单一参数的取值(如 $\pm 10\%$),观察各评价指标的变化幅度,筛选出对性能影响显著的参数。结合悬架系统的结构特性,关键设计变量主要包括:1.弹性元件参数:螺旋弹簧的垂直刚度、空气弹簧的充气压力;2.阻尼元件参数:减振器的压缩阻尼系数、复原阻尼系数;3.导向机构参数:控制臂的长度与安装角度、稳定杆的扭转刚度;4.轮胎参数:轮胎的垂直刚度、侧偏刚度。通过灵敏度分析,可明确各参数对行驶平顺性、操纵稳定性的影响权重,为优化设计提供针对性方向。

(三) 多目标优化模型构建与求解

悬架系统匹配优化属于多目标优化问题,各评价指标之间存在耦合与制约关系(如提升行驶平顺性可能导致操纵稳定性下降),需构建多目标优化模型实现协同优化。优化模型的构建包括三个核心要素:1.设计变量:即通过灵敏度分析筛选出的关键悬架参数,明确各参数的取值范围(基于工程实际与结构强度要求);2.优化目标:以行驶平顺性最优(车身垂直加速度均方根值最小)、操纵稳定性最优(车身侧倾角最小、稳态转向增益合理)、结构可靠性最优(关键构件最大应力小于材料许用应力)为多目标函数;3.约束条件:包括参数取值约束、性能指标约束(如车轮动载荷均方根值不超过静态载荷的1.2倍、车身侧倾角不超过 8°)。

优化算法选用NSGA-III多目标优化算法,该算法能够有效处理多目标优化问题,生成均匀分布的Pareto最优解集合。通过多体动力学仿真软件与优化算法的联合仿真(如ADAMS与Isight的联合),实现设计变量的自动迭代与性能响应的实时计算,最终从Pareto最优解集合中,结合工程实际需求选取最优参数组合。

(四) 优化结果的仿真实验

优化结果的验证需通过多工况仿真实验,对比优化前后各评价指标的变化趋势,验证优化方案的有效性

与稳定性。验证内容包括:1.单一工况性能验证:在随机路面行驶工况下,验证车身垂直加速度、车轮动载荷的降低幅度;在稳态转向工况下,验证车身侧倾角、车轮外倾角变化量的优化效果;2.多工况协同验证:确保优化后的参数在加速、制动、转向等多工况下均能满足性能要求,避免单一工况优化导致其他工况性能恶化;3.结构可靠性验证:通过仿真获取优化后关键构件(控制臂、稳定杆)的应力分布,验证其是否满足疲劳寿命要求。若验证结果表明部分工况性能未达预期,需重新调整优化目标与设计变量范围,再次进行迭代优化。

结论

本文基于多体动力学理论,探讨整车底盘悬架系统匹配优化的建模方法、闭环优化流程与关键技术。结论如下:多体动力学技术可精准表征悬架动力学特性,构建刚柔耦合模型能实现不同工况性能仿真分析,为匹配优化提供数据支撑;采用“建模-仿真-优化-验证”闭环流程,结合灵敏度分析与NSGA-III算法,可筛选关键设计变量,实现多参数、多目标协同匹配优化,兼顾行驶平顺性与操纵稳定性;精准筛选关键变量与科学构建多目标模型是提升匹配优化效率与精度的核心保障^[1]。未来,随着多体动力学与人工智能、数字孪生技术融合,悬架系统匹配优化有三方向发展:一是智能化优化,引入深度学习算法提升效率;二是全生命周期优化,结合数字孪生技术实现动态参数调整;三是多系统耦合优化,联合悬架与动力、电控系统建模优化实现整车动力学全局最优。未来研究可深化刚柔耦合建模精度,探索高效多目标优化算法,推动多体动力学在汽车底盘研发深度应用。

参考文献

- [1] 赵福全.基于NSGA-III算法的悬架系统多目标匹配优化[J].中国机械工程,2021,32(15):1857-1864.
- [2] 陈箐.刚柔耦合多体动力学在汽车稳定杆优化中的应用[J].机械设计与制造,2022(04):267-271.
- [3] 王建华.多体动力学与人工智能融合的悬架优化研究进展[J].汽车技术,2023(07):1-7.