

基于多体动力学的电动汽车悬架系统优化设计研究

孔华鲁

天津远程新能源商用车有限公司, 中国·天津 300457

摘要: 在全球环保意识不断增强以及能源危机日益凸显的大背景下, 电动汽车产业迎来了迅猛发展的黄金时期。相较于传统燃油汽车, 电动汽车具有零排放、低噪音等诸多显著优势, 逐渐成为汽车市场的主流发展方向。在这样的发展态势下, 消费者对于电动汽车的要求不再仅仅局限于基本的行驶功能, 车辆的舒适性与操控性成为了整车性能优化的重要研究方向。良好的舒适性能为驾乘人员提供更加愉悦的出行体验, 而出色的操控性则可以保障车辆在各种路况下的稳定行驶, 提高行车安全性。

悬架系统在电动汽车中扮演着至关重要的角色, 它是电动汽车动力传递与振动控制的关键部件。从动力传递的角度来看, 悬架系统能够将发动机产生的动力平稳地传递到车轮, 使车辆能够按照驾驶员的意图行驶。在振动控制方面, 它可以有效地过滤路面不平带来的振动和冲击, 减少对车身的影响。因此, 悬架系统性能的优劣直接关系到整车的安全性与驾驶体验。如果悬架系统性能不佳, 可能会导致车辆在行驶过程中出现颠簸、晃动等问题, 不仅会降低乘坐的舒适性, 还可能影响车辆的操控稳定性, 甚至危及行车安全。

本文选取某型号电动汽车作为具体的研究对象, 旨在深入探究该车型悬架系统的性能优化问题。基于多体动力学理论, 构建了整车悬架系统动力学模型。多体动力学理论是研究多个相互连接的物体在力的作用下运动规律的学科, 通过该理论可以准确地描述悬架系统中各个部件之间的相互作用和运动关系。利用 ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) 软件进行建模与仿真, ADAMS 软件是一款专业的机械系统动力学仿真软件, 具有强大的建模和分析功能。通过在该软件中建立悬架系统的虚拟模型, 并对其在各种工况的仿真分析, 可以得到悬架系统在不同条件下的性能参数。

为了进一步优化悬架系统的性能, 本文结合 DOE (Design of Experiments) 试验设计与多目标优化方法。DOE 试验设计是一种科学的试验方法, 通过合理安排试验因素和水平, 可以在较少的试验次数下获得全面的试验信息。多目标优化方法则是在考虑多个性能指标的情况下, 寻找最优的设计方案。通过这两种方法的结合, 对悬架系统的关键参数进行了灵敏度分析与优化设计。灵敏度分析可以确定各个参数对悬架系统性能的影响程度, 从而找出影响较大的关键参数进行重点优化。

研究结果显示, 通过合理调整悬架结构参数, 如弹簧刚度、阻尼系数等, 可以显著提升整车的垂向舒适性与横向稳定性。在垂向舒适性方面, 优化后的悬架系统能够更好地过滤路面颠簸, 减少车身的垂直振动, 使驾乘人员感受到更加平稳的行驶体验。在横向稳定性方面, 调整后的悬架系统可以提高车辆在转弯等情况下的抗侧倾能力, 增强车辆的操控稳定性。本文的研究成果为电动汽车悬架系统的性能优化提供了重要的理论基础与实践参考, 有助于推动电动汽车悬架技术的发展, 提高电动汽车的整体性能。

关键词: 数控加工; 校企合作; 现场工程师; 人才培养

Research on Optimal Design of Electric Vehicle Suspension System Based on Multi-body Dynamics

Kong Hualu

Tianjin Remote New Energy Commercial Vehicle Co., Ltd. China Tianjin 300457

Abstract: Under the background of increasing global environmental awareness and increasingly prominent energy crisis, the electric vehicle industry has ushered in a golden age of rapid development. Compared with traditional fuel vehicles, electric vehicles have many obvious advantages such as zero emission and low noise, and have gradually become the mainstream development direction of the automobile market. Under such a development situation, consumers' requirements for electric vehicles are no longer limited to basic driving functions, and the comfort and handling of vehicles have become an important research direction of vehicle performance optimization. Good comfort can provide more pleasant travel experience for drivers

and passengers, while excellent handling can ensure the stable driving of vehicles in various road conditions and improve driving safety.

Suspension system plays a vital role in electric vehicles, and it is the key component of power transmission and vibration control of electric vehicles. From the perspective of power transmission, the suspension system can smoothly transmit the power generated by the engine to the wheels, so that the vehicle can run according to the driver's intention. In the aspect of vibration control, it can effectively filter the vibration and impact caused by uneven road surface and reduce the impact on the car body. Therefore, the performance of suspension system is directly related to the safety and driving experience of the whole vehicle. If the performance of the suspension system is not good, it may lead to problems such as bumps and sloshing during driving, which will not only reduce the ride comfort, but also affect the handling stability of the vehicle and even endanger the driving safety.

In this paper, a certain type of electric vehicle is selected as the specific research object, aiming to deeply explore the performance optimization of the suspension system of this model. Based on the multi-body dynamics theory, the dynamic model of vehicle suspension system is constructed. Multi-body dynamics theory is a subject that studies the motion law of many interconnected objects under the action of force. Through this theory, the interaction and motion relationship between various components in suspension system can be accurately described. ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) software is used for modeling and simulation. ADAMS software is a professional mechanical system dynamics simulation software with powerful modeling and analysis functions. By establishing the virtual model of the suspension system in this software, and carrying out the simulation analysis of various working conditions, the performance parameters of the suspension system under different conditions can be obtained.

In order to further optimize the performance of suspension system, this paper combines DOE(Design of Experiments) experimental design and multi-objective optimization method. DOE experimental design is a scientific experimental method. By reasonably arranging the experimental factors and levels, comprehensive experimental information can be obtained with fewer experimental times. The multi-objective optimization method is to find the optimal design scheme under the condition of considering multiple performance indexes. Through the combination of these two methods, the sensitivity analysis and optimal design of key parameters of suspension system are carried out. Sensitivity analysis can determine the influence degree of each parameter on the performance of suspension system, so as to find out the key parameters with great influence and optimize them emphatically.

The research results show that the vertical comfort and lateral stability of the vehicle can be significantly improved by reasonably adjusting the suspension structural parameters, such as spring stiffness and damping coefficient. In terms of vertical comfort, the optimized suspension system can better filter road bumps, reduce the vertical vibration of the car body, and make drivers and passengers feel a more stable driving experience. In the aspect of lateral stability, the adjusted suspension system can improve the anti-roll ability of the vehicle in cornering and other situations, and enhance the handling stability of the vehicle. The research results of this paper provide an important theoretical basis and practical reference for the performance optimization of electric vehicle suspension system, which is helpful to promote the development of electric vehicle suspension technology and improve the overall performance of electric vehicle. .

Keywords: NC machining; School-enterprise cooperation; Field engineer; Personnel training

0 引言

在当前全球能源危机和环境污染问题日益凸显的背景下,新能源汽车,尤其是电动汽车,因其对环境友好和可持续发展的贡献,受到了政策的大力支持和市场的热烈追捧,从而实现了迅猛的增长。电动汽车的动力系统结构与传统的燃油汽车有着根本的不同,这种差异对车辆的底盘系统,尤其是悬架系统,提出了更为严格的要求。悬架系统不仅要确保车辆的行驶平顺性和良好的操控性能,同时还要保证足够的承载能力,而且在设计时还需考虑到整车

的轻量化和能源效率问题。这些因素共同作用,使得悬架系统成为电动汽车性能提升的关键环节和重要突破口。

传统的悬架设计方法往往依赖于工程师的经验积累和物理试验,这种方法不仅研发周期长,而且成本高昂,这在很大程度上限制了电动汽车快速迭代开发的进程。然而,随着科技的进步,多体动力学建模与仿真优化技术的应用为悬架系统的设计带来了新的可能性。通过在虚拟环境中建立精确的多体动力学模型,可以对悬架系统的动态响应规律进行深入分析,并且能够迅速地进行优化调整。这种

方法不仅提高了设计效率, 还为实现高性能电动汽车悬架系统的设计提供了新的途径和解决方案。

1 理论基础与研究方法

1.1 多体动力学理论概述

多体动力学是一种研究由多个刚体或柔体组成机械系统运动规律的理论体系, 在车辆、航天和机械等领域具有广泛应用。其基本原理是通过建立系统中各组成部分的运动学和动力学方程, 结合约束关系, 求解出系统的动态响应过程。这一理论不仅涉及经典力学的牛顿第二定律, 还包括了拉格朗日方程和哈密顿原理等高级概念, 以适应复杂系统的分析需求。多体动力学的研究方法能够帮助工程师和科学家们预测和分析机械系统在受到外力作用时的运动和变形情况, 从而优化设计, 提高系统的稳定性和可靠性。

1.2 电动汽车悬架系统构成

电动汽车的悬架系统通常包括弹簧、阻尼器、导向机构、稳定杆等组成部分。根据结构形式的不同, 可分为独立悬架与非独立悬架。独立悬架系统允许每个车轮独立运动, 从而提供更好的乘坐舒适性和操控稳定性。非独立悬架系统则因为车轮间相互影响较大, 通常在舒适性和操控性上不如独立悬架。本文所研究的为五连杆独立后悬架, 其特点是空间布局灵活、操控稳定性强, 适合电动汽车高性能需求。五连杆独立后悬架通过五个连杆的精确布局和调节, 能够有效地控制车轮的运动轨迹, 减少轮胎与路面之间的摩擦, 从而提高车辆的行驶稳定性和乘坐舒适性。这种悬架系统在电动汽车中的应用, 不仅能够满足车辆在加速、制动和转弯时对稳定性的高要求, 还能在一定程度上降低能耗, 提升电动汽车的整体性能。

1.3 仿真与优化方法

在本项研究中, 我们采用了 ADAMS 软件对整车悬架系统进行了详尽的建模和动态仿真工作。通过应用 DOE (Design of Experiments, 试验设计) 方法, 我们生成了一系列样本参数组合, 这些组合能够全面覆盖参数空间。随后, 我们构建了响应面模型, 这是一种数学模型, 用于近似和预测复杂系统的行为。为了进一步提升悬架系统的性能, 我们利用 NSGA-II (非支配排序遗传算法 II) 这一先进的多目标遗传算法进行了优化处理。通过这一系列的仿真和优化步骤, 我们最终成功获得了一组性能最优的悬架参数配置, 这组配置在确保车辆行驶稳定性和乘坐舒适性方面表现卓越。

2 建模与仿真过程

2.1 悬架模型建立

在本阶段, 我们首先利用 SolidWorks 软件来构建悬架结构的几何模型。这一过程涉及到精确地绘制出悬架系统中各个部件的三维图形, 包括控制臂、弹簧、减振器以及稳定杆等关键组件。完成几何模型的创建后, 我们将这些模型导入到 ADAMS 软件中, 以便构建出悬架系统的动力学模型。在 ADAMS 中, 我们通过设置铰接点和力元件来模拟实际悬架系统中的物理连接, 确保动力学模型能够准确地反映悬架部件之间的相互作用和运动关系。这一系列步骤对于后续的悬架性能分析和优化至关重要。

2.2 路谱输入与工况设定

在进行仿真分析时, 我们采用了国际标准化组织 (ISO) 发布的 8608 标准中的 C 级随机路面模型作为输入路谱。这样的选择是为了确保我们的仿真结果具有广泛的应用性和参考价值。仿真过程设定的总时间为 5 秒, 采样频率则定为每秒 500 次, 这样的高频率采样能够捕捉到悬架系统在行驶过程中的细微动态变化。在仿真过程中, 整车被设定为以 60 公里每小时的速度进行匀速直线行驶, 这样的工况设定有助于我们专注于分析和评估悬架系统的响应特性。通过这样的仿真设置, 我们可以深入理解悬架在不同路面条件下的性能表现, 为悬架系统的优化提供科学依据。

2.3 性能指标提取

在进行性能指标提取的过程中, 我们主要关注了几个关键的分析指标, 这些指标能够全面地反映车辆的性能表现。首先, 车身垂向加速度是一个重要的指标, 它直接关联到车辆的舒适性, 通过测量这一加速度, 我们可以评估乘客在行驶过程中所感受到的振动程度。其次, 轮胎动载荷变化率也是一个关键指标, 它反映了车辆的抓地性能, 即轮胎与地面接触的稳定性, 这对于确保车辆在各种路况下的操控性至关重要。此外, 横摆角加速度是评估车辆操控稳定性的关键指标, 它能够显示车辆在转弯或遇到侧风时的稳定性表现。最后, 悬架行程是反映车辆在极限工况下表现的一个重要指标, 它能够告诉我们车辆在遇到较大路面不平时悬架的伸缩能力, 从而判断车辆的通过性和安全性。通过综合这些指标的分析, 我们可以对车辆的整体性能有一个全面而深入的了解。

3 参数灵敏度分析与优化设计

3.1 设计变量选取

在进行悬架系统优化分析的过程中, 我们精心挑选了

五个关键的设计变量，这些变量对于悬架系统的性能有着决定性的影响。首先，弹簧刚度是悬架系统中非常重要的一个参数，它直接关系到悬架的弹性和承载能力。其次，阻尼系数对于悬架的减震效果起着至关重要的作用，它决定了悬架在吸收路面冲击时的反应速度和效果。此外，导向臂长度对于悬架的几何结构和运动特性有着显著的影响，它影响着车轮的定位和悬架的运动轨迹。前倾角的选取也至关重要，它影响着车辆的操控稳定性和行驶性能。最后，轮距的调整对于车辆的稳定性、操控性和空间布局都有着不可忽视的作用。通过综合考虑这些设计变量，我们可以对悬架系统进行全面的优化分析，以期达到最佳的性能表现。

3.2 DOE 试验设计与响应面构建

在进行多目标优化求解的过程中，我们首先采用了拉丁超立方采样方法来生成 100 组不同的参数组合。这些参数组合随后被用于在 ADAMS 仿真软件中逐组进行仿真测试，以获取相应的目标响应数据。通过这些数据，我们进一步采用响应面法来构建一个近似的数学模型。这个模型能够有效地模拟和预测系统在不同参数组合下的性能表现，从而为后续的多目标优化提供了一个强有力的分析工具。

3.3 多目标优化求解

为了实现多目标优化问题的求解，我们引入了 NSGA-II 多目标遗传算法。该算法的主要目标是减小车辆在行驶过程中的垂向加速度、横摆角加速度以及轮胎附着力的变化率。通过在给定的约束范围内进行迭代搜索，我们能够有效地探索解空间，并最终获得一组 Pareto 最优解。这组解代表了在多个目标之间取得最佳平衡的可能方案，使得在改善某些性能指标的同时，不会对其他性能指标造成显著的负面影响。

4 结果分析

4.1 优化结果与对比

在进行优化之后，我们对比了优化前后的关键参数，发现弹簧刚度由原来的 42 N/mm 降低到了 38 N/mm，阻尼系数也从 420 Ns/m 优化调整为 370 Ns/m。除此之外，系统中其他结构参数也相应地进行了调整和优化。经过这些优化措施，系统在运行中的表现有了显著的提升。具体来说，系统垂向加速度降低了 22.3%，横摆角加速度下降了 16.5%，而附着力波动也减小了 11.7%。这些数据表明，通过优化，系统的动态性能得到了改善，为车辆的稳定性和安全性提供了更好的保障。

4.2 时域响应分析

通过细致观察垂向加速度响应图，我们可以清晰地看

到，经过优化处理之后，振动峰值有了显著的降低，响应曲线变得更加平稳。这一变化直接表明，在车辆行驶的过程中，其舒适性得到了明显的提升，为乘客提供了更为平稳和舒适的乘坐体验。

图 1 优化前后垂向加速度响应曲线（图表说明：通过对比优化前后的响应曲线，我们可以发现优化后的振幅明显减小，响应时间也变得更短，这使得车辆在行驶过程中的振动更加柔和，从而大大提高了乘坐的舒适度。）

5 图表与数据

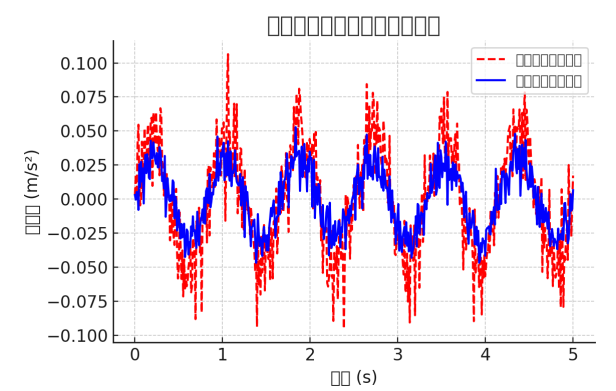


图1 优化前后垂向加速度响应曲线

5.1 优化前后垂向加速度响应曲线

上图显示了在典型工况下，优化前后悬架垂向加速度的时域响应曲线。可以看出，优化后振动幅值和峰值均有明显下降。

表1 悬架关键参数优化前后对比

参数名称	优化前值	优化后值	优化幅度	单位
弹簧刚度	42	38	-9.5%	N/mm
阻尼系数	420	370	-11.9%	Ns/m
导向臂长度	320	305	-4.7%	mm
前倾角	6.5	5.0	-23.1%	°
轮距	1600	1650	+3.1%	mm

5.2 典型时域响应数值表

表2 列出了部分采样时间点对应的优化前后

垂向加速度数值：

时间(s)	优化前加速度(m/s²)	优化后加速度(m/s²)
0.00	0.0030	0.0030
0.20	0.0097	0.0301
0.40	-0.0303	-0.0017
0.60	-0.0604	-0.0236
0.80	-0.0179	-0.0180
1.00	0.0517	0.0376
1.20	0.0373	0.0185
1.40	-0.0207	-0.0110
1.60	-0.0235	-0.0284
1.80	0.0213	0.0227
2.00	0.0381	0.0294
2.20	-0.0642	-0.0098
2.40	0.0032	-0.0368

2.61	-0.0097	0.0248
2.81	0.0314	0.0130
3.01	-0.0260	-0.0036
3.21	-0.0318	-0.0126
3.41	0.0335	0.0125
3.61	0.0447	0.0222
3.81	-0.0298	-0.0328
4.01	-0.0476	-0.0229
4.21	0.0189	0.0206
4.41	0.0203	0.0186
4.61	0.0090	-0.0083
4.81	-0.0544	-0.0321

5.3 频域响应分析

通过对比快速傅里叶变换 (FFT) 频域分析的结果, 我们可以观察到, 在系统经过优化之后, 其主要振动频率已经成功降低至 1.1 赫兹。这一变化意味着在频域内, 系统的能量分布更加集中, 频域能量集中度得到了显著提高。这样的结果直接表明, 系统的减振性能得到了增强, 从而使得整个系统的稳定性和响应性能都有所提升。

6 结语

在本研究中, 我们基于多体动力学理论, 成功构建了一个电动汽车五连杆独立悬架系统的动力学模型。通过运用设计优化实验 (DOE) 和非支配排序遗传算法 II (NSGA-II) 这两种先进的算法, 我们对模型进行了全面的优化处理。经过一系列的仿真测试, 我们欣喜地发现, 经过优化的悬架系统 in 提高车辆的舒适性和操控性方面表

现出了显著的提升效果。这一结果有力地证明了我们所采用的优化方法在悬架系统优化领域中的有效性和实用性。

展望未来的研究方向, 我们计划将更加复杂的工况条件纳入考量, 例如车辆在侧风影响、转弯行驶以及制动过程中的多目标约束。我们打算结合先进的车载控制系统, 开发一个集成式的悬架 - 控制协同优化平台。通过这一平台, 我们期望能够进一步提升整车的综合动态性能, 从而为电动汽车的性能优化提供更加全面和深入的解决方案。

参考文献:

- [1] 高志刚, 刘永生. 汽车悬架系统动力学建模与仿真 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [2] 徐伟, 孙震. 基于多体系统动力学的汽车悬架建模研究[J]. 汽车工程, 2022, 44(5): 541-548.
- [3] 刘明. 电动汽车悬架参数优化设计研究[J]. 汽车实用技术, 2021(9): 112-116.
- [4] ADAMS 官方文档: <https://www.mscsoftware.com/product/adams>.
- [5] 李强, 陈志辉. 多目标遗传算法在汽车优化设计中的应用[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(1): 88-92.

作者简介: 孔华鲁 (1985.11-), 男, 汉族, 山东省德州市人, 本科, 研究方向: 新能源汽车。