

基于人工智能算法的汽车NVH性能优化方法综述

高莹

(中国第一汽车股份有限公司研发总院, 长春 130013)

【欢迎引用】高莹. 基于人工智能算法的汽车NVH性能优化方法综述[J]. 汽车文摘, 2025(6): 30-34.

【Cite this paper】GAO Y. A Review of AI-Based Optimization Methods for Automotive NVH Performance[J]. Automotive Digest (Chinese), 2025(6): 30-34.

【摘要】汽车噪声、振动和声振粗糙度(NVH)特性是整车性能的重要指标之一。为了提升汽车驾乘舒适性并满足日益严格的NVH性能要求,综述了国内外将人工智能算法应用于NVH性能优化的研究,分析了该类方法对NVH问题优化的可行路线,指出人工智能算法在汽车NVH性能优化方面的发展趋势和挑战,为智能算法解决汽车性能优化问题提供了参考。

关键词:人工智能;NVH;优化算法

中图分类号:U461.1 文献标志码:A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20240330

A Comprehensive Review of Automotive NVH Performance Optimization Methods Based on Artificial Intelligence Algorithms

Gao Ying

(Global R&D Center, China FAW Corporation Limited, Changchun 130013)

【Abstract】The Noise Vibration Harshness (NVH) performance of vehicles is one of the key indicators of overall vehicle qualities. To enhance ride comfort and meet increasingly stringent NVH requirements, this paper reviews the application of Artificial Intelligence (AI) algorithms in NVH optimization, both domestically and internationally. It analyzes feasible approaches for improving NVH performance using AI-based methods and discusses future trends and challenges in AI-driven NVH optimization. The study aims to provide valuable insights for leveraging intelligent algorithms to address automotive performance enhancement.

Key words: Artificial Intelligence, NVH, Optimization Algorithms

0 引言

汽车噪声、振动和声振粗糙度(Noise Vibration Harshness, NVH)特性对驾乘舒适性及整车品质的提升具有重要作用^[1]。传统NVH性能研究主要采用有限元分析、声学仿真以及振动模态分析的方法,上述方法已形成一套成熟的研究体系。近年来,随着优化算法、机器学习、深度学习和聚类算法等人工智能技术的快速发展,在对问题进行求解时,通过问题解析、参数调整等步骤,显著提升了各类问题的求解速度。

尽管传统NVH特性的研究方法已经相对成熟,但其存在过度依赖工程师的设计经验、建模复杂性较高、仿真时间漫长以及多目标平衡困难的问题,影响

性能设计质量及研发效率。而人工智能算法具有高效率、高精度及高适应性的特点。因此,将人工智能算法应用于NVH特性研究,能够有效平衡多个性能指标之间的冲突,显著缩短研发周期。

本文综述了国内外研究人员在NVH特性研究中应用人工智能算法的场景及技术路线,对优化算法、机器学习等智能方法在NVH特性研究的发展现状进行归纳分析,在此基础上展望利用人工智能算法解决NVH性能优化问题的发展方向,旨在为相关性能研究人员提供一定参考。

1 基于人工智能的NVH性能优化研究现状

目前已有多家研究机构开展了基于人工智能算

法的 NVH 性能优化研究,主要集中于对汽车声学性能的评价及优化方向,其普遍应用了优化算法、机器学习的方法,同时基于采集及处理后的大量数据样本进行了结合数据驱动的研究。

1.1 基于优化算法的 NVH 性能优化方法

优化算法是一种寻找最佳解决方案的数学方法,其可将多个与 NVH 相关的性能冲突转化为优化问题进行处理。从初始解出发,通过迭代过程不断探索解空间,评估每个解的性能,并根据评估结果调整搜索方向,逐步逼近最优解,可以有效地平衡 NVH 相关性冲突。

Huang 等^[2]提出了一种改进区间分析方法以解决道路噪声不确定性的问题,将乘坐舒适性作为约束条件,通过客观和主观评估研究了道路噪声的声音质量,并提出了群体成对比较法以评估大量噪声样本集。分析了声音质量指标与道路噪声主观不适感之间的相关性,并量化了底盘动态参数对混合动力汽车道路噪声的贡献。He 等^[3]提出了一种多目标区间分析方法。该方法首先进行车辆道路测试,记录车辆内部噪声和振动,计算内部声压级和总加权加速度均方根值并作为目标。然后,计算不确定度下目标函数的中点和半径。通过调整加权系数调整车辆振动声学舒适性的首选平均性能和鲁棒性,并使用一个神经网络模型作为近似模型,以构建动态参数和振动声学指标之间的数值关系及加快计算速度。Lan 等^[4]提出了一种自适应并行滤波方法,分为调谐阶段和控制阶段。在调谐阶段,采用一组潜在噪声来训练相应的最优固定滤波器。在控制阶段,首先根据选择机制为每帧选择最合适的并行控制滤波器,以最小化估计误差信号的能量。然后,采用无延迟可变步长归一化频域块自适应滤波算法对选定的控制滤波器进行更新。此外,还分析了所提出方法计算复杂度。该方法可快速响应和抑制不同的车辆内部道路噪声。刘文强等^[5]提出了改进 A*算法和 Sigmoid 函数进行噪声寻优分析的方法。该方法考虑了汽车动力负荷特性图和声学特性图的优化,通过该算法寻找最佳噪声性能工况点,实现全局最优噪声路径规划。同时研究了混合动力关键工况的控制策略,提出了关键工况降噪控制方法,获得了明显的噪声优化效果。

上述研究提出的优化算法方法为解决车辆噪声和振动声学舒适性方面的问题提供了有效参考。未来优化算法有望更深入地在智能感知、动态决策和人机协同维度持续优化,为车辆设计和噪声控制提供有

效解决方案。

1.2 基于数据驱动的 NVH 性能优化方法

数据驱动是指通过收集、分析和解释大量数据来指导决策和行动的过程,其基于数据的客观性,摒弃主观偏见,利用统计分析方法从数据中提取有价值的信息。

Lim 等^[6]提出了一种知识驱动和数据驱动的方法以及一种基于自适应平衡学习机制的残差网络多目标预测方法。该双驱动方法建立了一套客观评价体系,可以应用于预测和优化车辆声学包的性能,并进一步提高轮胎或道路噪声的多个声音质量指标。Huang 等^[7]提出了一种融合知识和数据驱动的方法,用于优化声学包系统的吸声和隔音性能。其采用多层次、多目标方法作为知识模型,建立了包含系统、子系统和组件层的声学包系统的多层结构。同时,构建了基于自适应学习率森林的改进型长短期记忆模型作为数据驱动模型,该模型可以自适应地调整学习率。通过结合知识和数据驱动的方法,实现对声学包系统的有效优化。Song 等^[8]提出了一种基于大数据识别车辆系统与 NVH 因素之间精确连接和关系的技术,反映了动态特性的非线性,通过相关性分析和变量重要性分析快速找到需要改进之处,通过灵敏度分析了解系统 NVH 水平变化时房间噪声增加的程度。该方法可用于开发过程以及进一步验证其他深度学习和机器学习模型,显著缩短开发周期。该团队近期再次提出了一个全面的数据驱动框架^[9],用于汽车制造中噪 NVH 的声学分析和控制。通过将传输路径分析和作传输路径分析等先进技术与大数据分析相结合,该框架系统地识别和缓解关键频率范围内的关键噪声和振动源,减少了资源消耗并支持制造过程中的数据驱动决策,提高了车辆内部声学性能。王大—^[10]以某“前麦弗逊+后多连杆”悬架轿车为对象,提出一种融合知识图谱与数据驱动的路噪优化方法。首先,基于传递路径分析筛选关键参数,构建汽车路噪知识图谱网络,整合试验数据与供应商参数,通过高斯白噪声增强和 1/3 倍频程处理形成结构化数据集。其次,对比循环神经网络 (Recurrent Neural Network, RNN)、长短期记忆网络 (Long Short-Term Memory, LSTM) 以及结合 Transformer 框架和局部敏感哈希 (Locality Sensitive Hashing, LSH) 模型的预测模型 Transformer-LSH,优选 Transformer-LSH 嵌入知识图谱进行路噪推理。最后,结合区间可能度理论和遗传算法,以驾驶员右耳噪声为目标,优化悬架参数,实车

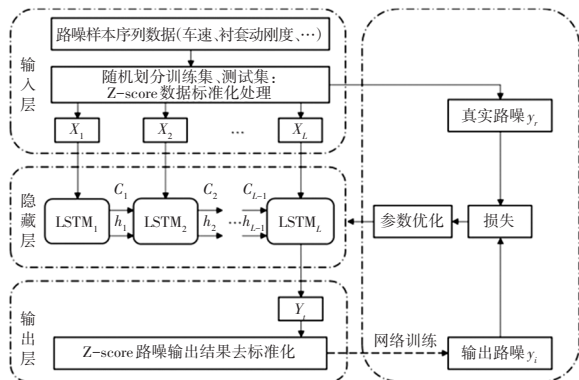
验证显示车内噪声降低了1.7 dB(A)。

基于大量数据的分析可以将NVH特性研究的主观评价量化为客观指标,从而制定更精准的问题解决策略。上述研究采用的数据驱动方法有效提高了优化过程的效率和准确性,同时缩短了开发周期,对车辆设计及其性能优化具有重要意义。

1.3 基于机器学习的NVH性能优化方法

机器学习是一种利用数据不断改进算法性能的技术,无需明确编程即可识别模式和作出决策。相关算法通过大量吸收数据,在数据积累过程中迭代优化,识别其中的规律和结构,并将这些知识应用于新的数据以预测结果或执行任务。

刘伟等^[11]提出了一种基于LSTM的汽车路噪预测方法,如图1所示。该方法建立了悬架系统相关参数与路噪之间的映射关系,同时构建了路噪预测模型。在模型训练过程中,通过路噪试验采集样本数据,并利用数据增强算法适当扩充样本数量,有效降低了模型训练对真实样本数量的需求。



注: X 为经过标准化处理后路噪影响因素的值, C 和 h 为 LSTM 单元长期记忆状态和输出, Y 为 LSTM 模型求解的路噪值。

图1 基于LSTM的路噪预测模型^[11]

Wang等^[12]基于机器学习和压缩感知方法,针对车辆内部噪声,引入了基于信号分解优化的反向传播神经网络和基于多变量的时域信号重建。研究表明,上述2种方法能够有效地重建非线性和非平稳的车辆内部噪声信号,可以为车辆主动噪声控制提供高精度的参考信号。Jia等^[13]提出了一种多层次的目标分析方法,基于车辆沿底盘部件的道路噪声的分层分解,根据振动传递路径逐层划定。随后,提出了基于多级目标框架的CNN-SVR混合模型,将该方法和模型用于底盘参数与道路噪声相关的灵敏度分析,以及车辆结构噪声的预测和优化分析,达到了显著的效果。Peng等^[14]开发了一种用于预测地板声学包隔音性能的分层多目标分解系统。该方法涉及引入一维卷积神经网络模型来预测地板声学套件的隔音性能,

从而避免了仅依赖数据驱动的传统计算机辅助工程(Computer-Aided Engineering, CAE)方法的局限性。Zhang等^[15]提出了一种基于离散循环神经网络和生成对抗网络的汽车NVH分析方法,替代了短快速傅里叶变换以及整个转速计数据组装系统,使神经网络能够从振动信号中获取转速。该方法继承了数字重采样和时变离散傅里叶变换的主导思想,根据转速变化和插值调整采样率,在相同角度的间隔序列中得到相等的时间间隔序列,提升了NVH设计分析阶次跟踪的质量。Noh等^[16]开发了一种基于CatBoost的回归模型,可以根据电机设计参数估计电机性能,包括NVH数值和扭矩。研究人员通过沙普利可加性特征解释(SHapley Additive exPlanations, SHAP)方法分析了进一步的关键设计预测因子,同时研究了各种优化算法,包括粒子群优化、遗传算法和强化学习,以确定电机设计参数的最佳调整。在整个过程中,NVH性能得到了改善,同时应用了约束条件以保持扭矩水平和电机成本。最后,AI模型和优化算法被集成至用户界面的仪表板中,电机设计工程师可以通过选择输入参数、应用属性平衡约束和执行优化来有效预测电机NVH性能。Rao等^[17]使用人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)方法开发了一个机器学习模型,可以准确表征铜绕组、清漆和正交各向异性定子层压结构的材料特性。在评估替代代理模型后,采用了基于拉丁超立方体参数采样的实验设计方法。使用标称定子设计参数构建有限元模型,并以此为数据集训练ANN模型。然后验证通过机器学习训练的ANN模型,以合理的精度预测驱动点频率响应函数(Frequency Response Function, FRF)频谱。随后,对电动定子进行模态测试,并利用获取的驱动点FRF数据训练ANN模型。在评估合适的优化技术后,使用机器学习算法确定最佳定子设计参数。在临界电机阶次处观察到良好的相关性,验证了所提出的NVH分析方法的准确性。Wysocki等^[18]提出了一种基于人工神经网络的元件设计参数寻优的方法,可以满足FRF目标曲线。通过变形初始组件有限元模型,为ANN生成训练数据,该网络根据几何参数输入预测FRF。然后,ANN作为进化算法优化器的元模型,识别满足FRF目标曲线的几何参数集。通过多个仿真测试中,验证了该方法在识别修改FRF的特定特征频率或幅度特征方面的有效性,从而实现了组件设计的优化。

基于机器学习方法,能够简化NVH特性研究中复杂的建模及仿真流程,从而在保证精度的同时提升

计算效率。上述研究共同推动了NVH性能研究向智能化、高效化和精准化方向发展,为汽车NVH性能的提升提供了新的思路和方法。

1.4 基于其他智能方法的NVH性能优化方法

除了人工智能算法外,虚拟现实(Virtual Reality, VR)和数字孪生等新技术也可以与NVH特性研究结合,为领域提供新的研究视角和方法。

Huo等^[19]提出了一种基于VR技术的车辆振动虚拟测试系统。该系统由VR子系统、模型子系统和虚拟仪表子系统组成。研究表明,虚拟测试技术理论模型适用于基于VR的汽车振动虚拟测试系统的创建。用户可以通过该系统在3种不同的观察模式,监测车辆振动及其时域和频域信号,从而提升研发效能。Mehrgou等^[20]使用数字孪生对电驱动单元进行高效NVH优化,通过与CAE优化技术和前装载相结合,提升了电力驱动单元音质和车内声音体验。同时,研究人员提出了一种方法论,该方法侧重于音调评估、目标设定和人工智能的集成以实现多维优化。万超等^[21]提出了一种基于路面图像分类识别的路噪主动控制方法,该方法通过多种传感器应用,基于卷积神经网络实现图像识别,对车辆前方路面进行感知和识别。识别获得的路面信息将被输入至基于自适应滤波算法的路噪主动控制算法中,从而间接通过人工智能算法实现路噪主动控制。

2 讨论及展望

人工智能算法可以简化复杂问题的求解过程,在NVH性能设计及特性研究中展现出显著优势。本节将对现阶段应用人工智能技术进行NVH特性研究的不足之处及发展趋势进行归纳。

(1)多种智能方法协同使用。在NVH特性研究中,针对不同问题采用多种智能算法协同工作,可以有效克服单一方法的局限性。例如,可以采用数据驱动方法构建声学评价模型,结合优化算法及机器学习方法进行性能优化,并运用VR技术进行效果测试,能够显著提升研发效率。

(2)多种算法融合使用。融合使用多种算法可以有效提升整体运算精度。例如,在智能声学模型建立的过程中,为了解决深度强化学习中神经网络随层数提升性能下降的问题,可以采用基于残差网络的多目标平衡优化方法。而为了消除传统残差网络在训练过程中损失函数梯度小的目标受损失梯度大的目标影响,可以加入自适应平衡学习机制。采用多种算法

进行融合计算,有利于实现NVH特性设计的最优化。

(3)工程化应用尚不成熟。目前研究大多以仿真验证为主,缺乏实车试验环节,无法清晰表现智能算法NVH特性优化的实际应用效果,导致工程化应用缺乏足够支撑。

(4)计算能力及成本门槛较高。NVH特性研究目前的流程相对成熟,而高精度的智能算法模型训练需要图形处理单元集群支持,且模型部署及工作所需要的硬件计算能力配置要求较高。如何在未来研究中平衡开发成本与预期收益,仍需进一步论证。

3 结束语

本文主要阐述了国内外结合机器学习、数据驱动等智能方法对NVH性能进行优化的技术路线,对上述方法在NVH特性研究中的应用优势进行了分析,探讨并提出了人工智能算法解决NVH特性研究存在的问题的方案,为人工智能赋能汽车NVH特性研究提供了一定参考。

汽车NVH特性对车辆操纵稳定性、经济性、驾乘舒适性及安全性等方面有重要影响。现有研究及试验可证明人工智能算法能够应用于NVH特性优化设计,并可以达到显著的性能提升。目前,在NVH特性分析中使用人工智能算法的方向主要集中于诸如路噪、风噪等外部声源以及CAE仿真的研究。后续研究可基于上述方法,对总成噪声、异响等结构噪声的声学特性及结构振动进行分析。通过数据驱动将主观声学评价转变为客观指标,应用优化算法及机器学习等方法简化分析流程,提升研发效率。此外,开展多专业、多学科合作,与其他汽车性能指标进行多性能协同优化的研究也是一条具有研究前景的技术发展路线。

参 考 文 献

- [1] 黄思怡,康健强.电动汽车振动特性及NVH性能控制研究进展[J].汽车实用技术,2023,48(17):200-205.
- [2] HUANG H B, HUANG X R, DING W P, et al. Uncertainty Optimization of Pure Electric Vehicle Interior Tire/Road Noise Comfort Based on Data-driven[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022(165): 108300.
- [3] HE L G, LI P P, ZHUANG Y, et al. Control Strategy Analysis of Multistage Speed Compressor for Vehicle Air Conditioning Based on Particle Swarm Optimization[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 47(6): 103033.
- [4] YIN L, ZHANG Z Q, WU M, et al. Adaptive Parallel Filter Method for Active Cancellation of Road Noise Inside

- Vehicles[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 193(6): 110274.
- [5] 刘文强, 费龙盼, 胡军峰, 等. 改进 A* 算法及关键工况的混动噪声控制[J/OL]. 机械科学与技术, (2025-01-03) [2025-05-16]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20240132>.
- [6] HUANG H B, LIM T C, WU J H, et al. Multitarget Prediction and Optimization of Pure Electric Vehicle Tire/Road Airborne Noise Sound Quality Based on A Knowledge and Data-Driven Method[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023(197): 110361.
- [7] HUANG H B, HUANG X R, DING W P, et al. Optimization of Electric Vehicle Sound Package Based on LSTM with An Adaptive Learning Rate Forest and Multiple-Level Multiple-Object Method[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023(187): 109932.
- [8] SONG D H, HONG S G, SEO J J, et al. Correlation Analysis of Noise, Vibration, and Harshness in a Vehicle Using Driving Data Based on Big Data Analysis Technique[J]. Sensors, 2022, 22(6): 2226.
- [9] SONG D H, HONG S G, HA C Y, et al. Acoustic Analysis and Data-Driven Control of Vehicle NVH: A Framework for Manufacturing Process Optimization[J]. Applied Acoustics, 2025(2): 110618.
- [10] 王大一. 知识与数据结合的汽车路噪预测分析方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- [11] 刘伟, 黄海波, 范大力, 等. 一种基于 LSTM 的汽车路噪预测方法[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(3): 145-152.
- [12] WANG Y S, GUO H, YANG C. (2023). Vehicle Interior Noise Mechanism and Prediction[J]. Vehicle Interior Sound Quality, 2022(9): 5-62.
- [13] JIA X L, ZHOU L, HUANG HAI B, et al. Improving Electric Vehicle Structural-Borne Noise Based on Convolutional Neural Network-Support Vector Regression[J]. Electronics, 2024, 13(1): 13010113.
- [14] PENG CHAO, CHENG S W, SUN M, et al. Prediction of Sound Transmission Loss of Vehicle Floor System Based on 1D-Convolutional Neural Networks[J]. Tech Science Press, 2024, 58(3): 25-46.
- [15] ZHANG Y, SHAO T, ZHU L C, et al. A Non-Tachometer Method for Order Tracking Technique in NVH Analysis Based on Deep Learning and RPM Estimation[C]// 2019 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics. Irkutsk: IEEE, 2019.
- [16] NOH K, LEE D, JUNG I, et al. AI-Based Optimization Method of Motor Design Parameters for Enhanced NVH Performance in Electric Vehicles[J]. SAE Technical Paper, 2024: 2024-01-2927.
- [17] RAO B, GSJ G, HE S, High-Fidelity NVH Model Development for Electric Motors Using Deep Learning and Machine Learning Algorithms[J]. SAE Technical Paper, 2025: 2025-01-0123.
- [18] WYSOCKI T V, RIEGER F, TSOKAKTSIDIS D E, et al. Generating Component Designs for an Improved NVH Performance by Using an Artificial Neural Network as an Optimization Metamodel[J]. Designs, 2021, 5(2): 5030036.
- [19] HUO Z Y, WANG Q, JAGOTA V, et al. Design and Simulation of Vehicle Vibration Test Based on Virtual Reality Technology[J]. Nonlinear Engineering, 2022, 11(1): 500-506.
- [20] MEHRGOU M, GRAF B, ZIEHER F, et al. Efficient NVH Optimization of Electric Drive Units Using Digital Twins[J]. MTZ Worldwide, 2024(85): 42-47.
- [21] 万超, 李华清. 基于路面图像分类识别的路噪主动控制方法研究[J]. 时代汽车, 2024(9): 193-195.

(责任编辑 梵玲)