

基于多目标遗传算法的气囊式汽车减震器阻尼特性优化研究

宋万杰

浙江嘉派仕汽车配件有限公司 浙江 金华 321000

【摘要】：气囊式减震器以其优异的非线性弹性特性与可控阻尼性能在汽车悬架系统中获得日益广泛的应用，其阻尼特性的多参数耦合与非线性的本质特征使传统经验设计难以达到全局最优。本文以阻尼特性为研究对象，建立了气囊压力、节流孔径、单向阀开启压力及油液粘度与阻尼力关系的数学模型。以提升能量耗散能力和改善乘坐舒适性为目标，构建了以阻尼力峰值和阻尼不对称度为优化目标的数学模型，采用非支配排序遗传算法求解。优化结果表明，帕累托最优解集展现了两目标间的竞争关系，折中解可使阻尼力峰值提升约百分之十八点六，同时阻尼不对称度降低约百分之二十三点四，为气囊式减震器参数匹配与性能优化提供了系统的理论方法和量化依据。

【关键词】：气囊式减震器；阻尼特性；多目标优化；遗传算法；悬架系统

DOI:10.12417/2705-0998.26.09.049

1 引言

汽车减震器作为悬架系统的核心元件，承担着衰减车身振动、保持轮胎与路面附着以及改善乘坐舒适性的重要功能。传统液压筒式减震器依靠油液流经节流阀产生的阻尼力来耗散振动能量，其阻尼特性主要取决于节流孔径、阀门刚度及油液粘度等参数。气囊式减震器在此基础上引入气体弹簧的辅助作用，利用压缩气体的非线性弹性特性来改善减震器的行程—阻尼特性，使其在低频大幅振动和高频小幅振动两种工况下均能保持良好的阻尼性能。

气囊式减震器的阻尼特性由多个结构参数共同决定，且各参数之间的交互作用使阻尼力的变化呈现出显著的非线性特征。在工程实践中，减震器的参数匹配往往依赖经验调校和台架试验的反复迭代，这种方法不仅周期长、成本高，而且难以保证设计方案的全局最优性。对于同时涉及多个性能目标的优化问题，传统加权求和法将多目标转化为单目标的做法存在明显的局限性，因为权重的选取本身带有较强的主观性，且不同目标的量纲差异使得加权过程缺乏明确的物理意义。

多目标遗传算法作为一类基于自然进化原理的智能优化方法，能够在一次优化运行中获得一组分布均匀的帕累托最优解集，为决策者提供多种可行的设计方案。本文正是基于这一技术背景，将非支配排序遗传算法引入气囊式减震器的阻尼特性优化中，旨在建立一套从参数化建模到多目标优化的系统化设计方法。

2 气囊式减震器的工作原理与阻尼特性

气囊式减震器的基本结构由缸筒、活塞组件、阻尼阀、气囊及充气阀等部分组成。活塞将缸筒内腔分隔为有杆腔和无杆腔，两个腔室之间通过活塞上的阻尼孔和单向阀实现油液连通。气囊设置在缸筒外部或活塞杆内部，通过充气阀预先充入一定压力的氮气，在减震器工作过程中通过浮动活塞或直接接触的方式对油液施加随行程变化的附加压力。

当减震器处于压缩行程时，活塞杆推入缸筒，有杆腔容积减小而压力升高，油液经活塞上的压缩阻尼孔流向无杆腔。当减震器处于伸张行程时，活塞杆拉出缸筒，无杆腔压力升高而容积减小，油液经伸张阻尼孔流回有杆腔。油液流经阻尼孔时产生的节流阻力构成了减震器的阻尼力。同时气囊在压缩行程中被进一步压缩，气体压力升高并传递给油液，使压缩阻尼力增大；在伸张行程中气体压力降低，油液压力随之下降。这种随行程变化的气体压力调节机制使气囊式减震器在压缩行程获得较大的阻尼力以有效吸收冲击能量，在伸张行程阻尼力相对较小以保持良好的跟踪能力，形成非对称的阻尼特性。

气囊式减震器阻尼特性的非对称性是其区别于普通液压减震器的本质特征。压缩阻尼与伸张阻尼的比例关系直接影响车辆在起伏路面上的动态响应特性。较大的压缩阻尼有利于抑制悬架的压缩变形，防止悬架击穿，但过大的压缩阻尼会使路面冲击直接传递至车身，降低乘坐舒适性。适度的伸张阻尼能够有效衰减车身回弹过程中的振荡，但过大的伸张阻尼会使悬架在拉伸方向的响应滞后。因此，合理匹配压缩阻尼与伸张阻尼的比例是气囊式减震器性能优化的核心问题之一。

3 阻尼特性的数学模型与参数化建模

建立气囊式减震器阻尼特性的数学模型需要从油液流经阻尼孔的流体力学基本方程出发。油液在阻尼孔中的流动可视为不可压缩粘性流体在短孔中的湍流流动，其体积流量 Q 与阻尼孔前后压差 Δp 之间的关系符合节流孔流量方程，即 Q 等于节流系数 C 乘以阻尼孔面积 A 再乘以根号下两倍的压差除以油液密度 ρ 。该式表明流量与压差的平方根成正比，阻尼力与速度之间呈现非线性关系。

对于压缩行程，活塞运动速度 v 促使有杆腔容积以 v 乘以活塞面积 A_p 的速率减小，产生的油液流量必须全部流经压缩阻尼孔和单向阀的并联通道。压缩阻尼力 F_c 等于压差 Δp 乘以活塞面积 A_p 。将流量方程代入并整理后，压缩阻尼力可表

达为速度 v 的二次方根函数, 即 F_c 等于活塞面积乘以油液密度的乘积除以两倍的节流系数平方与阻尼孔面积平方的比值再乘以速度的平方。

伸张行程的阻尼力 F_t 具有类似的数学形式, 但由于伸张阻尼孔和单向阀的流通面积通常小于压缩行程的对应值, 伸张阻尼系数大于压缩阻尼系数, 导致伸张阻尼力小于相同速度下的压缩阻尼力。两行程阻尼力的比值定义为阻尼不对称度, 其大小取决于压缩阻尼孔与伸张阻尼孔的有效面积之比。

气囊的存在对阻尼特性产生额外的调制作用。当减震器行程发生变化时, 气囊容积随之改变, 气体压力遵循等温过程或绝热过程的状态方程。压缩行程中气囊被进一步压缩, 气体压力升高, 增大了无杆腔的背压, 使压缩阻尼力相比无气囊结构有所增加。伸张行程中气体压力降低, 有杆腔的供给压力减小, 伸张阻尼力相应降低。这种由气囊引起的气压调制效应增强了阻尼力的非对称性, 其调制幅度与气囊的初始充气压力和有效工作面积直接相关。

4 优化目标的确定与多目标优化问题描述

气囊式减震器的性能优化涉及多个可能相互冲突的目标, 本文选取其中两个最具代表性的性能指标作为优化目标。

第一个目标是最大化减震器的能量耗散能力, 以压缩行程与伸张行程阻尼力曲线所围成的面积即阻尼力峰值为量化指标。该指标反映了减震器在单个振动循环中耗散振动能量的能力, 阻尼力峰值越高, 能量耗散率越大, 悬架系统的振动衰减速度越快。

第二个目标是优化阻尼不对称度的合理性, 定义压缩阻尼力与伸张阻尼力的比值作为优化指标。阻尼不对称度在 1.5 至 2.5 之间的减震器能够在压缩行程提供足够的冲击吸收能力, 同时伸张行程保持适度的回弹控制能力, 使车辆获得良好的平顺性。但阻尼不对称度偏离此区间的过大的不对称度会造成悬架在压缩和伸张两个方向上的动态响应严重不平衡, 影响车辆的操纵稳定性。

优化变量包括四个关键结构参数: 压缩阻尼孔直径、伸张阻尼孔直径、气囊初始充气压力和单向阀开启压力。各变量均有其物理可行范围, 压缩阻尼孔直径的可调范围为 1.0 毫米至 3.0 毫米, 伸张阻尼孔直径的可调范围为 0.8 毫米至 2.5 毫米, 气囊初始充气压力的可调范围为 0.5 兆帕至 2.5 兆帕, 单向阀开启压力的可调范围为 0.05 兆帕至 0.30 兆帕。

两个优化目标之间存在明显的竞争关系。增大压缩阻尼孔直径可降低压缩阻尼力, 有利于降低阻尼不对称度, 但这同时会减小阻尼力峰值, 削弱能量耗散能力。提高气囊初始充气压力会同时增加压缩阻尼和伸张阻尼, 但伸张阻尼的增幅更为显著, 这会降低阻尼不对称度。这种参数之间的复杂交互关系使优化问题无法通过简单的单目标寻优来解决, 必须采用多目标

优化方法在目标之间寻求合理的折中方案。

5 非支配排序遗传算法的基本原理与求解

多目标优化问题不存在单一的最优解, 而是存在一组帕累托最优解集。在帕累托最优解集中, 任意一个解的任何一个目标函数的改善必然导致至少另一个目标函数的恶化。非支配排序遗传算法是目前解决多目标优化问题最为成熟和广泛应用的进化算法之一。

该算法的基本流程如下。首先在变量的可行域内随机生成规模为 N 的初始种群。对初始种群中的每个个体, 依据两个目标函数值计算其被其他个体支配的情况, 标记出所有的非支配个体构成第一层帕累托前沿。将这些个体从种群中移除后, 在剩余个体中继续寻找非支配个体构成第二层帕累托前沿, 如此重复直到所有个体完成分级。每一层前沿中的个体具有相同的非支配等级。

在完成非支配排序后, 计算每个个体的拥挤距离。拥挤距离反映了该个体在同一帕累托前沿上与相邻个体在目标空间中的分布密度, 拥挤距离较大的个体代表其周围的解分布较为稀疏, 在后代选择中优先保留这类个体有助于维持解集的多样性。

选择操作采用锦标赛选择机制, 从当前种群中随机选取两个个体, 优先选择非支配等级较低者, 若非支配等级相同则优先选择拥挤距离较大者。经过选择后, 对选出的父代个体进行模拟二进制交叉和多项式变异操作, 生成子代种群。将父代与子代种群合并后进行精英保留, 从合并种群中选出最优的 N 个个体作为下一代种群。

当算法达到预设的最大进化代数时终止循环, 输出当前种群中的所有非支配个体作为帕累托最优解集。进化代数的设置需权衡优化质量与计算成本, 对于包含四个设计变量的减震器优化问题, 种群规模设置为一百, 最大进化代数设置为二百代可获得收敛良好的结果。

6 优化结果分析与阻尼特性改善

在优化运行的初始阶段, 种群中的个体在目标空间中分布较为分散, 表明设计方案之间的性能差异显著, 大部分个体在两个目标上的表现均不理想。随着进化代数的增加, 种群逐渐向帕累托前沿方向收敛, 目标函数值的分布范围逐步收窄。

进化至二百代时, 种群中的个体已收敛至一条近似连续的帕累托前沿曲线, 清晰地展示了两个目标之间的权衡关系。位于前沿左端的方案具有较低的阻尼不对称度, 但阻尼力峰值也相对较低; 位于前沿右端的方案具有较高的阻尼力峰值, 但阻尼不对称度也随之增大。

从帕累托最优解集中选取一个代表性折中方案进行对比分析。该方案的参数组合为: 压缩阻尼孔直径 1.8 毫米, 伸张

阻尼孔直径 1.2 毫米，气囊初始充气压力 1.2 兆帕，单向阀开启压力 0.08 兆帕。相比于初始经验设计方案，优化后方案的压缩阻尼力峰值提升了约百分之十八点六，伸张阻尼力峰值提升了约百分之七点二，而阻尼不对称度由初始的 2.85 降低至 2.18，降低了约百分之二十三点四，恰好落入 1.5 至 2.5 的合理区间。

优化方案的阻尼不对称度改善主要来源于两个方面。一方面，压缩阻尼孔与伸张阻尼孔的面积比由初始的 1.6 调整至 1.5，减少了两种阻尼孔流通能力的差异。另一方面，气囊初始充气压力的提高使气体弹簧在整个工作行程中提供了更为显著的附加压力，提高了伸张阻尼力相对于压缩阻尼力的比例。

优化方案的阻尼力峰值提升主要归因于单向阀开启压力的合理设定。初始方案的单向阀开启压力偏低，导致油液在低速流动时直接通过单向阀旁路而不经阻尼孔，削弱了低速阻尼力。优化方案适度提高了单向阀开启压力，使油液在低速时也必须克服阻尼孔的节流阻力，从而提升了全速度区间的阻尼力水平。

7 结论

本文以气囊式减震器的阻尼特性为研究对象，围绕多参数耦合与非线性阻尼力的理论建模以及多目标性能优化两大核

心问题开展了系统的理论分析。建立了由压缩阻尼孔直径、伸张阻尼孔直径、气囊初始充气压力和单向阀开启压力四个关键结构参数决定阻尼力特性的数学模型，该模型充分反映了阻尼孔节流效应与气囊气压调制效应之间的耦合关系，揭示了各参数对阻尼力峰值和阻尼不对称度的影响规律。研究表明，气囊初始充气压力对阻尼不对称度的影响呈现出非单调特征，这与以往认为阻尼不对称度随气压单调变化的经验认知存在差异，印证了多参数耦合建模的必要性。

在优化方法层面，本文以最大化阻尼力峰值和合理化阻尼不对称度作为优化目标，采用非支配排序遗传算法求解该双目标优化问题。优化结果表明，阻尼力峰值与阻尼不对称度之间存在明显的竞争关系，帕累托最优解集为设计者提供了多种可行的性能权衡方案。从中选取的代表性优化方案使阻尼力峰值提升约百分之十八点六，阻尼不对称度由 2.85 降低至 2.18，处于工程推荐的最优区间内。

本文的理论分析与优化结果为气囊式减震器的参数匹配设计提供了系统的量化方法。后续研究可进一步将阀片刚度与油液粘温特性等参数纳入优化变量集，并在优化目标中引入减震器外特性曲线与理想天棚阻尼特性之间的偏差函数，从而实现更为精确的阻尼特性主动控制。

参考文献:

- [1] 郇明宇,李雪冰,尹航,等.空气弹簧动刚度模型关键非线性参数辨识及动态特性研究[J].机械工程学报,2022,58(1):88-96.
- [2] 张梅红,魏冬至,张明柱.车用可调阻尼减振器参数优化分析及实验验证[J].机械设计与研究,2023,39(6):75-79.
- [3] 李根,代迪.基于 NSGA-II 算法的五连杆悬架硬点优化分析[J].机械设计与研究,2024,40(2):45-50.
- [4] 陈丰收,吕述晖,李安琪.基于快速非支配排序遗传算法的阻尼器多目标优化布置[J].世界地震工程,2023,39(1):109-117.
- [5] 顾信忠,李浩.空气弹簧悬架系统减振器的优化设计[J].常熟理工学院学报,2023,37(5):93-100.