汽车悬挂系统动态检测与自适应维修策略优化研究

唐中政[1] 赵光发（通讯作者）[2] 顾成琛[3]

1. 成都中达丰田汽车销售服务有限公司 四川省 成都市 610091

2. 拜城县精新汽车维修服务有限公司 新疆维吾尔自治区 阿克苏地区 842300

3. 安徽省 合肥市 230000

【摘　要】：针对汽车悬挂系统非线性与时变退化导致的操稳与舒适性渐进劣化问题，构建面向道路运行场景的动态检测与自适应维修一体化方法。研究以车身垂向加速度、悬架行程及关键参数退化表征为核心指标，结合去噪与归一化预处理，建立特征集并采用随机森林实现弹簧疲劳与减振器阻尼下降等故障类型识别与故障概率输出。在此基础上，引入行驶里程与路况等级变量，基于马尔可夫决策过程设计维修动作选择机制，并设置故障概率达到 30% 且处于颠簸路况时的优先干预规则，形成诊断到决策的闭环更新流程。以量产 SUV 为对象开展道路实验，覆盖正常与两类退化状态并形成 200 组样本。结果表明，自适应维修策略相较传统定期维修在年度维修成本上由 1200 元降至 900 元，下降 25%；故障复发率由 15.0% 降至 12.3%，下降 18%；关键部件平均使用寿命由 5.00 年提升至 5.25 年，提升 5%。研究验证了融合故障概率与路况暴露的动态决策可在成本约束与风险控制之间实现更优折中，为车队状态维修与预测性维修落地提供参考。

【关键词】：悬挂系统；动态检测；随机森林；马尔可夫决策过程；自适应维修

0 引言

汽车悬挂系统直接影响车辆舒适性、操稳稳定性与制动附着利用率，其在长期服役中会出现减振器衰退、弹性元件蠕变与间隙增长等复合退化，且退化速度受载荷与路况显著影响。传统依赖里程或周期的维护方式难以反映个体差异，易造成提前更换或风险滞后暴露。面向车队运营的安全合规与成本控制需求，有必要将道路实测信号与动力学机理相结合，通过数据驱动诊断获得可量化的故障概率，并进一步与工况变量耦合形成可执行的自适应维修决策框架，以提升维修资源配置效率与运行可靠性。

1 汽车悬挂系统动态检测与维修策略研究现状及理论基础

汽车悬挂系统作为车身与车轮之间的力学耦合单元，其核心功能在于把路面激励转化为可控的车身姿态响应，并把轮胎接地性与乘坐舒适性之间的矛盾约束在可接受范围内；在实际服役情境中，减振器衰退、弹性元件蠕变以及衬套间隙增长会叠加出现，使得操稳稳定性与制动附着利用率呈现渐进式劣化，这也把动态检测从静态外观排查推向对运行状态的连续刻画。现有研究围绕台架激振与道路实测两条技术路线展开，前者依靠可重复载荷谱来识别阻尼与刚度特性漂移，后者更侧重把加速度、悬架行程以及轮速等多源信号映射为健康状态指标；鉴于悬挂系统存在明显的非线性与时变性，单一阈值判别难以契合不同车型、载荷与工况差异，促使研究逐步转向数据驱动的故障诊断与剩余性能评估。维修策略层面，传统定期更换更强调里程规则而弱化状态差异，面向车队运营与安全合规的需求，状态维修与预测性维修被更频繁地当作研究对象来使用，其理论基础通常建立在车辆垂向动力学建模、可靠性退化机理以及维修决策优化三者的耦合框架之上，从而为后续自适应维修策略的指标体系、模型构建与算法设计提供可衔接的理论入口。

2 汽车悬挂系统动态检测模型构建与自适应维修策略设计

2.1 动态检测指标体系与数据采集方法

悬挂系统在车辆垂向动力学链路中承担把路面激励转化为车身姿态响应的关键作用，因此动态检测指标需要同时覆盖车身响应强度、悬架传力路径以及关键部件参数退化的可观测表征。本研究把车身垂直加速度作为舒适性与隔振能力的直接代理变量，并将悬挂弹簧刚度以及减震器阻尼系数纳入参数类指标，以刻画弹性元件蠕变与阻尼衰退对系统等效动力学特性的长期漂移；在此基础上，结合悬架行程变化对限位碰撞与衬套间隙增长的敏感性，形成面向运行状态的综合指标体系，从而为后续故障类型识别与维修决策提供可贯通的输入空间。为把多源信号与动力学机理建立对应关系，悬挂系统可简化为单自由度受迫振动形式来描述其在垂向方向的主导动态特性，进而把参数辨识与健康评估嵌入统一框架，振动方程表达为：

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx=F(t)$$

其中，m 表示等效簧载质量（单位：kg），x 为车身相对位移（单位：m），$\dot{x}$ 为相对速度（单位：m/s），$\ddot{x}$ 为相对加速度（单位：m/s²），c 表示等效阻尼系数（单位：N·s/m），

k 表示等效刚度（单位：N/m），$F(t)$ 为路面激励在垂向方向的等效外力（单位：N）。

数据采集方案围绕可复现布置与工况覆盖展开，考虑车辆横摆与俯仰耦合对局部测点的影响，加速度传感器选用底盘 4 角布置形式以获取车体各角点的垂向加速度序列，采样频率设定为 200 Hz 以兼顾悬挂主频段动态响应与车载采集算力约束；为把弹簧受力变化映射到刚度退化趋势，应变片贴附于弹簧受力点并与温度补偿通道同步采集，从而降低环境漂移对载荷估计的干扰。针对道路实测数据中常见的电磁干扰与高频随机噪声，预处理环节把去噪与归一化作为必须步骤来开展，一方面依靠带通滤波抑制非目标频段能量并削弱尖峰异常对特征计算的牵引效应，另一方面把不同测点与不同量纲的指标进行归一化处理，以避免模型训练阶段出现由量纲差异引发的权重偏置，同时为跨车型、跨载荷的对比分析提供更稳定的数据尺度基础。

2.2 基于机器学习的悬挂系统故障诊断模型

悬挂系统故障在信号层面通常体现为振动能量分布与冲击成分比例的改变，因而特征构建需要把时域统计量与频域能量结构同时纳入。面向底盘 4 角加速度序列与悬架行程信号，时域层面提取均方根以描述整体振动强度，并引入峰值因子以表征冲击性与非平稳成分对极值的放大效应；频域层面以功率谱密度刻画不同频带能量占比的迁移，从而使弹簧疲劳导致的固有频率下移以及减震器漏油引发的阻尼下降具备可分辨的特征投影。均方根的计算形式为：

$$RMS=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}x_i^2}$$

其中，RMS 表示均方根值（单位：与 x_i 一致），N 为采样点数（单位：无量纲），x_i 为第 i 个采样点的信号幅值（单位：m/s² 或 m，取决于输入信号类型）。

在模型层面，随机森林被选用为故障诊断器以适应悬挂系统非线性、工况扰动强且特征间相关性复杂的现实情境，其核心机制是借助多棵决策树的集成投票来降低单模型对噪声与局部样本偏差的敏感度。模型输入定义为由时域与频域特征拼接形成的特征向量，输出端给出故障类型标签，用于区分弹簧疲劳、减震器漏油等典型失效模式，并把正常状态作为基线类别以支撑维修门限的设定。参数寻优环节把交叉验证当作泛化能力评估手段来使用，并将决策树数量固定在 50 棵以平衡分类稳定性与计算开销，使得模型能够在车队批量车辆的周期性动态检测场景中维持可部署性，同时为后续与工况变量耦合的策略优化提供一致的故障概率输出口径。

2.3 自适应维修策略优化算法设计

维修决策若仅依赖里程阈值，容易把不同道路等级与载荷历史引起的退化差异压缩为同一规则，从而导致维修资源配置与风险暴露之间出现结构性错配；结合故障诊断模型输出的故障类型与故障概率，并引入行驶里程以及路况等级作为工况描述变量，可把维修问题转化为可计算的序贯决策过程。本研究把马尔可夫决策过程当作策略载体来构建自适应维修框架，其中状态集合由健康状态分级、故障概率区间以及路况等级共同刻画，动作集合对应继续运行、计划性检修与立即更换等维修动作，奖励函数以综合考虑安全风险代价、停运机会成本与维修费用的方式来定义，使得策略搜索能够在长期期望收益意义下选择更适宜的维修时机。决策触发规则在工程落地层面引入可操作门限，当故障概率达到或超过 30% 且车辆处于颠簸路况等级时，策略会把维修优先级上调以抑制退化在高激励环境中的加速扩散，并把诊断结果回写到状态转移估计中以形成闭环更新。该闭环流程在逻辑上表现为从数据采集进入诊断环节，再把诊断结论与工况评估共同送入维修决策模块，并将维修实施后的反馈信息用于修正状态表征与转移概率，流程结构见图 1。

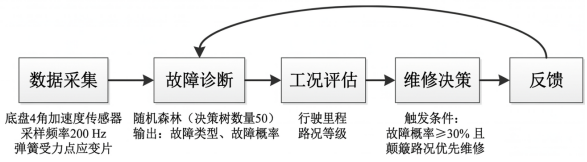

图1 自适应维修策略决策流程图

3 自适应维修策略的应用效果评估与验证

3.1 实验设计与数据来源

面向自适应维修策略在真实运行条件下的可执行性评估，本研究选用某品牌量产 SUV 作为实验对象，以保证悬挂结构形式、整车质量分布以及传感器布置方案具有工程代表性，并把动态检测与维修决策所需的多源信号采集嵌入统一的道路运行场景中。实验车辆分别设置为正常状态、弹簧疲劳达到 10% 状态以及减震器阻尼下降达到 20% 状态，其中弹簧疲劳以等效刚度衰减为主要表征，减震器阻尼下降以等效阻尼系数漂移为主要表征，使得数据样本能够覆盖悬挂系统典型退化路径下的动力学响应差异，并为故障诊断模型输出的故障类型与概率提供可对照的标定基础。道路工况设计围绕车队运营中更具普遍性的纵向激励谱来开展，实验场景囊括城市道路 50 km、高速道路 100 km 以及颠簸道路 20 km 的组合路线，以拉开不同路况等级下的激励强度差异，并把悬挂系统由舒适性主导向附着与冲击承载主导的工作区间完整覆盖，从而为自适应策略中路况等级参与状态刻画提供数据支撑。样本构建以单次完整路线作为 1 组样本来组织，并在 3 类车辆状态与 3 类路况组合的约束

下形成总计 200 组样本量，使得训练与评估阶段能够同时观察状态差异与工况差异对特征分布的耦合影响。数据来源方面，车身垂向加速度序列由底盘 4 角传感器同步采集以降低姿态耦合带来的测点偏差，悬架行程信号与轮速信号用于补充对限位冲击与动态载荷转移的可观测性，应变测量通道用于把弹簧受力变化映射到刚度退化趋势的判读依据；在数据进入诊断与决策模块前，将去噪、归一化以及异常片段剔除作为一致性处理流程来开展，以避免道路实测中电磁干扰与瞬态尖峰对健康指标计算产生非预期牵引，并把跨路况、跨状态样本的尺度差异压缩到可比范围内。

3.2 效果对比分析与结论

自适应维修策略的效果评估围绕经济性、安全性以及资产寿命延续性 3 个维度来构建对比框架，其中传统定期维修被定义为仅依赖年周期与里程规则的计划性维护方式，自适应策略则把故障诊断模型输出的故障概率与故障类型作为触发依据，并把路况等级与行驶里程纳入维修动作选择的状态变量，从而在同等车辆使用强度下形成可对照的策略差异。对比指标的统计口径保持与车队运维习惯一致，维修成本以年度维保支出作为归集口径，故障复发率以完成维修后同类故障在后续运行周期内再次出现的比例作为度量，使用寿命以悬挂关键部件达到更换阈值前的服役年限作为表征，从而把策略差异落实到可被运营决策直接引用的指标集合。基于该口径，自适应策略在年度维修成本上表现为 900 元 / 年，相较传统定期维修的 1200 元 / 年呈现 25% 的下降幅度，主要缘由在于策略把维修资源从低风险状态的提前更换中释放出来，并把干预窗口更多压缩到高故障概率且处于颠簸路况暴露的阶段。故障复发率在传统策略下为 15.0%，自适应策略下为 12.3%，对应 18% 的下降幅度，其差异与策略把诊断结论回写到状态更新并动态调整维修优先级的闭环机制存在一致性，使得退化尚未被充分消除的部件能够在高激励工况到来前获得更及时的处置。使用寿命维度的对比结果显示，传统策略下平均使用寿命为 5.00 年，自适应策略下延长至 5.25 年，体现为 5% 的寿命增益，该结果更接近于对部件剩余性能的渐进式释放而非一次性更换带来的跳变提升，因而与悬挂系统缓慢退化且工况敏感的工程特性相契合。综合上述指标对比可以认为，自适应维修策略在不改变车辆既定运行路线结构的前提下，能够把维修时机选择从单一里程规则推进到兼顾故障概率与路况暴露的动态调整模式，并在成本约束与风险控制之间形成更具可操作性的折中结果。

表1　自适应与传统维修策略效果对比表

对比维度	传统定期维修	自适应维修策略	相对变化幅度
维修成本（元/年）	1200	900	-25%
故障复发率（%）	15.0	12.3	-18%
使用寿命（年）	5.00	5.25	+5%

4 结语

本研究面向道路运行条件提出悬挂系统动态检测与自适应维修策略：以多源信号构建健康指标与特征体系，利用随机森林输出故障类型与概率，并以马尔可夫决策过程融合里程与路况完成维修动作优化与闭环更新。实车验证显示，该策略在降低年度维保成本、抑制故障复发与延长使用寿命方面均优于传统定期维修，体现了以状态与暴露共同驱动的维修时机选择优势。后续可进一步扩充车型与极端工况样本，并强化状态转移建模与在线更新能力，以提升跨场景泛化与工程部署稳定性。

参考文献

[1]马心坦,李朝阳,游海涛,王玉刚.汽车排气系统振动性能分析及优化设计[J].现代制造工程,2025,(09):73-79.

[2]吴斌,王桂龙.汽车座椅动态加载系统设计与试验研究[J].机械设计与制造,2026,(03):364-367.

[3]黄晶晶,熊永莲,李峰.汽车变刚度智能悬挂系统抑制共振H∞控制设计[J].机械设计与制造,2026,(03):12-16.

[4]舒斌.汽车测试设备管理系统的智能化升级与优化策略[J].中国战略新兴产业,2025,(15):107-109.

[5]胡超群.滚动轴承运行状态评估及维修策略研究[D].导师：李永华.大连交通大学,2024.

作者简介：唐中政（1987—），男，汉族，本科，研究方向为汽车工程