基于模糊天棚的垂向动力学自适应控制研究

吴圣　王一鸣　张小炼

（比亚迪汽车工业有限公司，深圳 518100）

【摘要】面向车辆动力学多工况控制优化需求，提出一种基于模糊推理规则与天棚阻尼控制的垂向动力学混合控制方法。通过构建参数动态调整机制与系统特性自适应匹配的闭环调节系统，建立模糊隶属度函数与天棚阻尼系数的非线性映射关系，实现了不同工况下的天棚阻尼系数动态调整。仿真结果表明，相较于传统天棚控制方法，该策略显著降低了车身垂向冲击载荷。

关键词：垂向动力学　参数自适应　模糊规则　天棚阻尼

中图分类号：U463.33　　**文献标志码：**A　　**DOI：** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20250084

Research on Vertical Dynamics Adaptive Control Based on Fuzzy Ceiling

Wu Sheng, Wang Yiming, Zhang Xiaolian

(BYD Auto Industry Co., Ltd., Shenzhen 518100)

【Abstract】 A vertical dynamic hybrid control method based on fuzzy inference rules and canopy damping control is proposed to meet the optimization requirements of multi condition control in vehicle dynamics. By constructing a closed-loop adjustment system with parameter dynamic adjustment mechanism and adaptive matching of system characteristics, a nonlinear mapping relationship between fuzzy membership function and canopy damping coefficient is established to achieve dynamic adjustment of canopy damping coefficient under different operating conditions. The simulation results show that compared with traditional ceiling control methods, this strategy significantly reduces the vehicle's heavy impact load.

Key words: Vertical dynamics, Parameter adaptation, Fuzzy rules, Skyhook

【引用格式】 吴圣, 王一鸣, 张小炼. 基于模糊天棚的垂向动力学自适应控制研究[J]. 汽车工程师, 2026(3): 7-12.

WU S, WANG Y M, ZHANG X L. Research on Vertical Dynamics Adaptive Control Based on Fuzzy Ceiling[J]. Automotive Engineer, 2026(3): 7-12.

1　前言

车辆行驶平顺性和驾乘舒适性已成为现代汽车设计的重要目标。作为车辆底盘核心子系统，悬架系统的动态特性直接影响整车的驾乘舒适性。传统被动悬架受限于固定阻尼参数，难以适应复杂多变的行驶工况；主动悬架虽能实现主动力的精准调节，但存在能耗和成本高、可靠性不足等缺陷。在此背景下，半主动悬架兼具性能与成本优势，逐渐成为研究热点[1]。

天棚控制作为经典的半主动悬架控制方法，通过构建虚拟阻尼系统有效抑制车身振动，但固定参数的设计暴露出其在实际应用中的局限性，无法适应车速、载荷及路谱的动态变化，导致瞬态振荡和性能下降。沈钰杰等[2]以提高乘坐舒适性为目标，搭建分数阶天棚阻尼模型，并利用粒子群优化算法进行了悬架参数的多目标优化；荣兵[3]通过构建优化变量与综合评价指标之间的二次响应面模型来优化天棚阻尼系数，显著提升了乘坐舒适性；王杰等[4]通过仿真比较了被动悬架、开关式天棚阻尼半主动悬架和最优控制半主动悬架在车身垂直加速度、悬架动挠度和轮胎动载荷三项关键

通信作者：吴圣（1982—），学士，高级工程师，研究方向为汽车底盘零部件，78141509@qq.com。

指标上的动态响应特性；李靖玮等[5]针对连续可变阻尼减振器系统时滞效应，构建非线性系统动力学模型，融合非支配排序遗传算法II（Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II，NSGA-Ⅱ）多目标优化机制，改进了天棚阻尼控制方法，提升了控制器的性能表现。

模糊控制理论凭借其不依赖精确数学模型、擅长处理非线性与不确定性问题的优势，为半主动悬架控制提供了新思路[6]。本文融合模糊推理规则和天棚阻尼控制方法，建立参数动态调整机制和系统特性自适应匹配的闭环调节系统，通过设计模糊隶属度函数与目标天棚阻尼系数的非线性映射关系，实现不同工况下天棚阻尼系数的动态调整，以期为半主动悬架控制提供新的解决方案。

2 天棚控制模型

在半主动悬架研究中，二自由度模型是理论分析的基础，其包含簧上质量和簧下质量，用于描述1/4车辆系统的动态特性。天棚控制作为一种经典方法，通过假设车身与天棚之间存在的阻尼力有效抑制车身振动，提升乘坐舒适性。本文基于二自由度模型推导天棚控制理论。

理想天棚阻尼控制模型如图1所示。

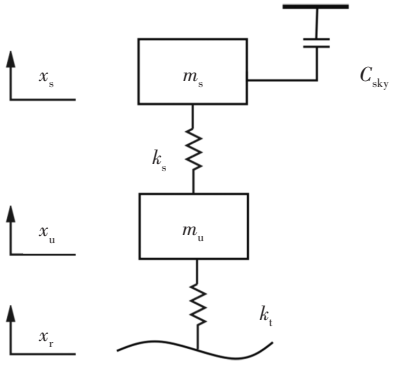


图1 理想天棚阻尼控制模型

由牛顿第二定律可得系统微分方程为：

$$\begin{cases} m_s\ddot{x}_s=-C_{sky}\dot{x}_s-k_s(x_s-x_u) \\ m_u\ddot{x}_u=k_s(x_s-x_u)-k_t(x_u-x_r) \end{cases} \tag{1}$$

式中：$\ddot{x}_s$、$\ddot{x}_u$分别为簧上、簧下质量的垂向加速度，m_s、m_u分别为簧上、簧下质量，k_s、k_t分别为悬架刚度、轮胎刚度，C_{sky}为天棚阻尼系数，$\dot{x}_s$为车身垂向速度，x_s、x_u、x_r分别为车身、轮胎、路面的垂向位移。

而实际的半主动悬架阻尼控制模型如图2所示。

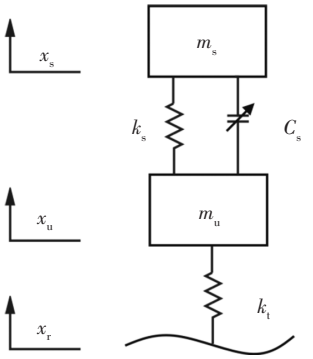


图2 实际半主动悬架阻尼控制模型

由牛顿第二定律可得系统微分方程为：

$$\begin{cases} m_s\ddot{x}_s=-C_s(\dot{x}_s-\dot{x}_u)-k_s(x_s-x_u) \\ m_u\ddot{x}_u=C_s(\dot{x}_s-\dot{x}_u)+k_s(x_s-x_u)-k_t(x_u-x_r) \end{cases} \tag{2}$$

式中：C_s为半主动悬架的可调阻尼系数，$\dot{x}_u$为轮胎垂向速度。

将理想化的天棚阻尼控制模型转化为实际工程应用中的半主动悬架控制系统，其核心在于建立理论天棚阻尼系数C_{sky}与物理可实现的可变阻尼系数C_s之间的映射关系。

通过对比分析半主动悬架系统与理想天棚模型的动力学方程可知，当悬架可调阻尼器的实际阻尼力与天棚理论阻尼力相等时，即等效天棚控制算法对车身垂向振动的理论抑制效果[7]为：

$$\begin{cases} m_s\ddot{x}_s=-C_{sky}\dot{x}_s-k_s(x_s-x_u) \\ m_s\ddot{x}_s=-C_s(\dot{x}_s-\dot{x}_u)-k_s(x_s-x_u) \end{cases} \tag{3}$$

$$C_{sky}\dot{x}_s=C_s(\dot{x}_s-\dot{x}_u) \tag{4}$$

$$C_s=\frac{C_{sky}\cdot\dot{x}_s}{\dot{x}_s-\dot{x}_u} \tag{5}$$

结合半主动悬架的实际情况，C_s不仅必须保持正值，还应被限制在减振器可实现的动态调节范围内，由此边界条件可得C_s需满足：

$$C_s=\begin{cases} \dfrac{C_{sky}\cdot\dot{x}_s}{\dot{x}_s-\dot{x}_u},\ C_s\in[C_{min},C_{max}],\ \dfrac{\dot{x}_s}{\dot{x}_s-\dot{x}_u}\geqslant 0 \\ C_{min},\qquad \dfrac{\dot{x}_s}{\dot{x}_s-\dot{x}_u}<0 \end{cases} \tag{6}$$

式中：C_{min}为执行器可实现的最小阻尼系数，C_{max}为执行器可承载的最大阻尼系数。

考虑到公式中的除号仅用于判断正负，因此对符号判断逻辑进行优化，将符号判断公式调整为乘法表达式$\dot{x}_s(\dot{x}_s-\dot{x}_u)$。

最终得到天棚控制算法为：

$$C_s=\begin{cases} \dfrac{C_{sky}\cdot\dot{x}_s}{\dot{x}_s-\dot{x}_u},\ C_s\in[C_{min},C_{max}],\ \dot{x}_s(\dot{x}_s-\dot{x}_u)\geqslant 0 \\ C_{min},\qquad \dot{x}_s(\dot{x}_s-\dot{x}_u)<0 \end{cases} \tag{7}$$

3 路面模型

为解析半主动悬架系统的动力学行为特性，需首先建立路面激励的数学模型。依据随机振动理论，典型道路路面不平度激励信号可表征为[8]：

$$\dot{q}(t)=-2\pi n_{00}vq(t)+2\pi n_0\sqrt{G_q(n_0)v}\,w(t) \tag{8}$$

式中：$\dot{q}(t)$为路面不平度输入；n_{00}=0.011 m^{-1}为路面空间截止频率；v为车速，本文后续仿真车速统一设定为v=30 m/s；n_0为参考空间频率，通常取n_0=0.1 m^{-1}；$G_q(n_0)$为路面不平度系数；$w(t)$为白噪声信号。

本文建立的路面激励模型如图3所示。

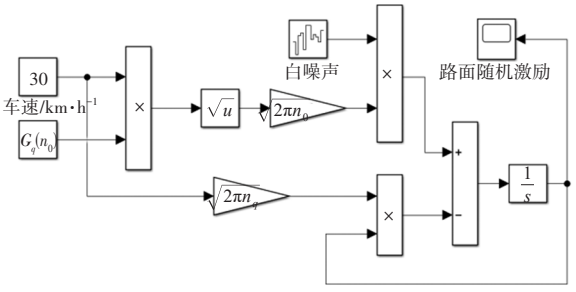


图3 路面模型

各级路面的$G_q(n_0)$几何平均值如表1所示。仿真工况设为C级路面，路面激励如图4所示。

表1 各级路面参数

路面等级	不平度标准差 σ_q/mm (0.011 m^{-1} < n < 2.83 m^{-1})	路面不平度系数 $G_q(n_0)/\times10^{-6}$ m^3 n_0=0.1 m^{-1}
A	3.81	16
B	7.61	64
C	15.23	256
D	30.45	1 024
E	60.90	4 096
F	121.80	16 384
G	243.61	65 536

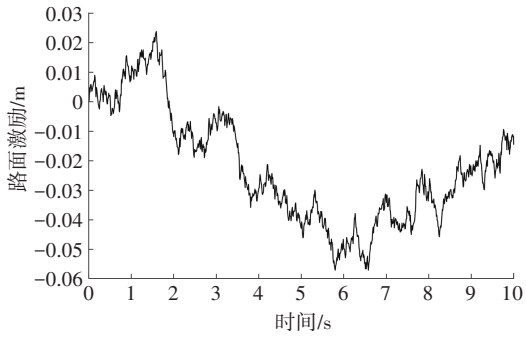


图4 随机路面激励

4 模糊天棚控制器设计

4.1 模糊控制

模糊控制基于模糊逻辑理论，运用语言化规则库将定性经验量转化为隶属度函数，通过模糊推理机制解析不确定信息，构建复杂系统的非线性调节策略，具备极强的鲁棒性[9]。

针对半主动悬架系统，本文定义悬架动速度$(\dot{x}_s-\dot{x}_u)$与车身垂向速度$\dot{x}_s$的双通道输入集，通过模糊映射关系计算减振器目标天棚阻尼系数C_{sky}，实现振动能量的精准控制。

在模糊控制器设计过程中，本文设置输入变量悬架动速度$(\dot{x}_s-\dot{x}_u)$的论域为[−1, 1] m/s、输入变量车身垂向速度$\dot{x}_s$的论域为[−0.2, 0.2] m/s、输出变量目标天棚阻尼系数C_{sky}的论域为[2 000, 10 000] N·s/m。

采用五级模糊划分策略，即负大[NB]、负小[NS]、零[Z]、正小[PS]、正大[PB]，在保证控制鲁棒性的前提下降低算法复杂度，构建具备最小完备性的模糊决策空间。本文建立的模糊规则如表2所示。

表2 模糊规则

输出变量		悬架动速度				
		NB	NS	Z	PS	PB
车身垂向速度	NB	PB	PB	Z	NB	NB
	NS	PB	PS	Z	NS	NB
	Z	Z	Z	Z	Z	Z
	PS	NB	NS	Z	PS	PB
	PB	NB	NB	Z	PB	PB

基于模糊集合论的可参数化配置原理，采用具有对称线性过渡特性的三角型隶属度函数对悬架动速度$(\dot{x}_s-\dot{x}_u)$、车身垂向速度$\dot{x}_s$及目标天棚阻尼系数C_{sky}进行隶属度建模，其分段线性化特征在保证语义解释精度的同时，显著降低了模糊推理过程的计算维度。

本文搭建的模糊控制器输入、输出变量间的模糊规则如图5所示。

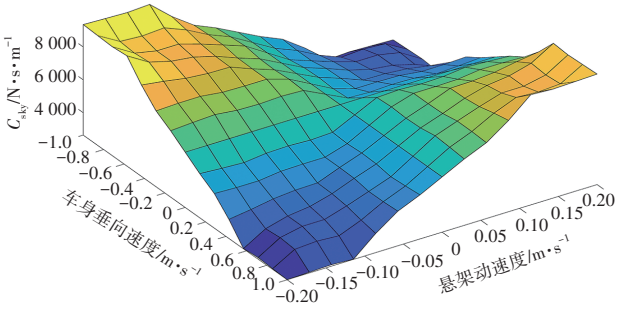


图5 模糊控制规则

4.2 基于模糊规则的天棚控制器设计

传统天棚阻尼控制方法一般通过车身垂向速度矢量与簧下速度矢量进行逻辑决策，其控制律设计未充分考虑天棚阻尼系数C_{sky}的动态参数耦合机制。

因此，本文提出基于模糊推理规则的天棚阻尼控制方法，建立悬架动速度$(\dot{x}_s-\dot{x}_u)$、车身垂向速度$\dot{x}_s$及目标天棚阻尼系数C_{sky}的非线性映射关系，实现C_{sky}的动态调节，可极大提高半主动悬架的性能表现。

模糊天棚控制器模型如图6所示。

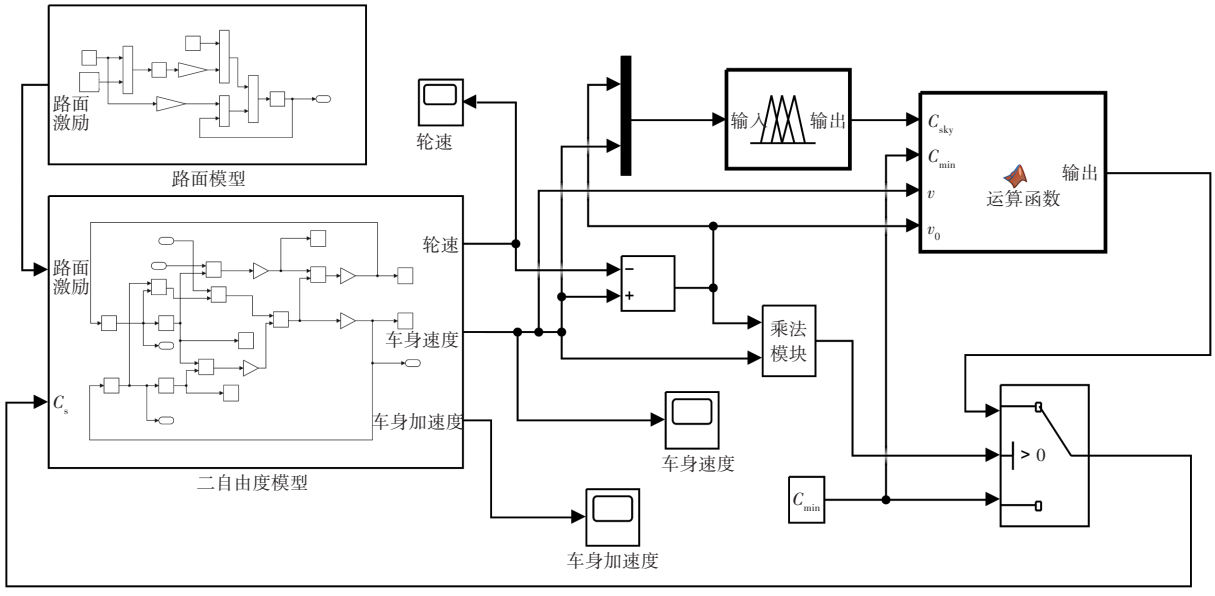


图6 模糊天棚控制器模型

5 仿真结果与分析

本文仿真模型的主要参数如表3所示。

表3 模型参数

参数	数值
簧上质量m_s/kg	1 010
簧下质量m_u/kg	175
悬架刚度k_s/kN·m^{-1}	100
轮胎刚度k_t/kN·m^{-1}	756
车速v/m·s^{-1}	30
被动悬架阻尼C_{spas}/N·s·m^{-1}	6 600

根据国际标准ISO 8608:2016《机械振动-道路表面轮廓-测量数据报告》对路面工况的分级体系，本文选取C级路面模拟典型城市道路工况，该等级能够较为准确地反映城市常规路面的振动激励特征。

为进一步验证控制器的动态响应性能，同时引入过减速带的瞬态冲击工况，本文通过典型稳态激励与极端瞬态激励相结合的方式，全面验证所搭建的控制系统在复杂路面条件下的鲁棒性与控制性能。

5.1 稳态激励工况

C级路面工况下的车身加速度如图7所示，由图7可知，天棚控制方法和基于模糊逻辑优化的天棚控制方法相较于传统被动悬架系统，在车身垂向加速度抑制方面表现出显著优势，其车身垂向加速度均方根值分别从被动悬架的0.98 m/s^{2}降低为0.83 m/s^{2}和0.76 m/s^2，降幅分别达到15.3%和22.4%。本文提出的模糊天棚控制方法相较于传统天棚控制方法，在车身垂向加速度抑制效果上实现了7.1百分点的额外提升，这验证了基于模糊逻辑优化的天棚控制方法在悬架控制领域的应用潜力。

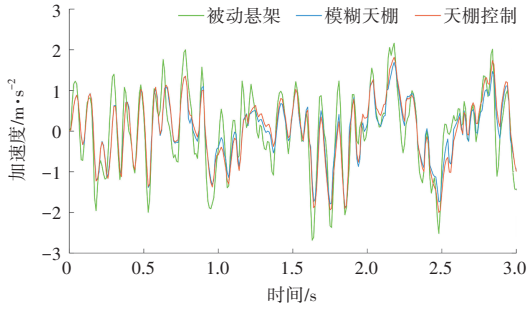


图7 C级路面工况下车身垂向加速度

人体对机械振动的耐受性评估常采用振动剂量指标（Vibration Dose Value, VDV）作为核心量化参数[10]。区别于传统均方根法，其计算模型考虑了振动持续时间的影响，突出反映了振动能量随作用时间的非线性累积特性，其表达式为：

$$V_{VDV}=\left(\int_0^T a^4(t)\mathrm{d}t\right)^{\frac{1}{4}} \tag{9}$$

式中：a为加速度，T为周期。

如图8所示为C级路面车身垂向振动剂量值，相对于被动悬架，采用模糊天棚控制方法时，3 s积分时间的振动剂量值由1.659 m/s$^{1.75}$下降至1.249 m/s$^{1.75}$，降幅达到24.7%，相比于传统天棚控制方法，其振动剂量值的相对优化幅度达8.3百分点，证实了模糊天棚控制算法在改善车辆行驶平顺性指标方面的有效性。

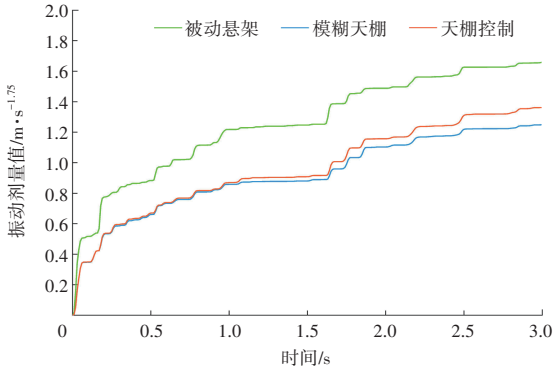


图8　C级路面工况下车身垂向振动剂量值

5.2　瞬态激励工况

本文设置减速带的详细参数为：纵向长度为0.25 m、高度为0.05 m。过减速带工况下的车身垂向加速度响应和车身垂向振动剂量值分别如图9、图10所示。

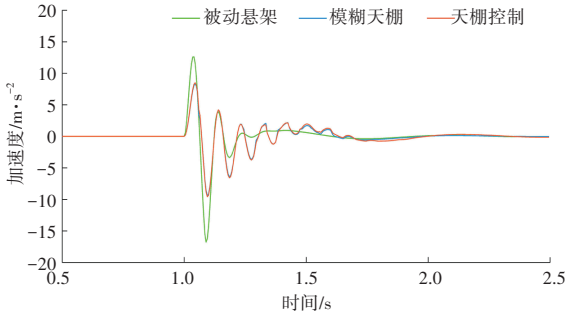


图9　减速带工况下车身垂向加速度

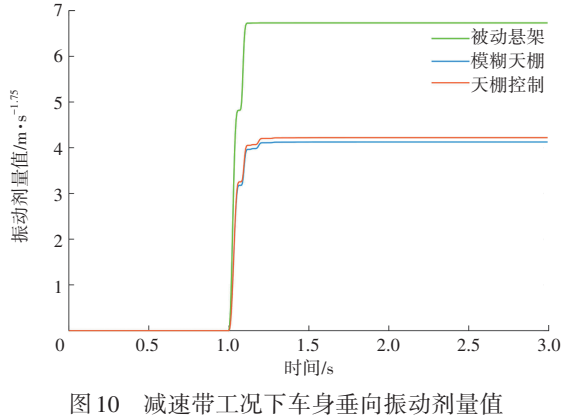


图10　减速带工况下车身垂向振动剂量值

由图9可知，采用模糊天棚控制方法后，车辆通过减速带工况下的垂向动力学响应显著改善，车身垂向加速度峰值由被动悬架的16.746 m/s^{2}衰减到9.564 m/s^2，衰减幅度达42.9%。进一步对比3 s积分时间的振动剂量值指标，模糊天棚控制方法相较于传统天棚控制方法实现了2.4%的优化率，表明该方法能有效抑制垂向冲击载荷并显著提升乘坐舒适性。

6　结束语

本文构建了基于模糊推理规则-天棚阻尼控制的半主动悬架控制架构，建立了参数动态调整机制与系统特性自适应匹配的闭环调节系统，通过设计模糊隶属度函数与目标天棚阻尼系数间的非线性映射关系，实现了不同工况下的天棚阻尼系数动态调整，仿真验证结果表明，所提出的混合控制方法相较于传统天棚控制方法，有效提升了车辆在复杂工况下的动态适应能力。

参　考　文　献

[1] 林鑫, 邹波, 杨波, 等. CDC半主动悬架整车平顺性测试研究[J]. 汽车测试报告, 2024(24): 143-145.
LIN X, ZOU B, YANG B, et al. Research on Vehicle Smoothness Testing of CDC Semi Active Suspension[J]. Automotive Test Report, 2024(24): 143-145.

[2] 沈钰杰, 季凯, 黄荣楠, 等. 基于分数阶天棚的车辆ISD悬架动态性能分析[J]. 汽车工程, 2025, 47(2): 332-341.
SHEN Y J, JI K, HUANG R N, et al. Dynamic Performance Analysis of Vehicle ISD Suspension Based on Fractional Order Skyline[J]. Automotive Engineering, 2025, 47(2): 332-341.

[3] 荣兵. 基于响应面法的半主动悬架天棚控制算法优化[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(11): 114-121.
RONG B. Optimization of Semi-Active Suspension Ceiling Control Algorithm Based on Response Surface Methodology [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2024, 43 (11): 114-121.

[4] 王杰, 乔慧, 王鑫, 等. 电控半主动悬架控制策略研究[J]. 汽车实用技术, 2024, 49(14): 40-45.
WANG J, QIAO H, WANG X, et al. Research on Control Strategy of Electronic Control Semi Active Suspension[J]. Automotive Practical Technology, 2024, 49 (14): 40-45.

[5] 李靖玮, 罗建南, 黄震. 考虑CDC系统时滞的半主动悬架控制器设计研究[J]. 汽车工程, 2024, 46(5): 913-922.
LI J W, LUO J N, HUANG Z. Research on the Design of Semi Active Suspension Controller Considering Time Delay

in CDC System[J]. Automotive Engineering, 2024, 46(5): 913-922.

[6] 刘忠海，王圣坤，贯怀光，等. 基于模糊逻辑与天棚控制的半主动悬架策略研究[J]. 汽车实用技术，2024，49(15)：26-29+58.
LIU Z H, WANG S K, GUAN H G, et al. Research on Semi Active Suspension Strategy Based on Fuzzy Logic and Ceiling Control[J]. Automotive Practical Technology, 2024, 49 (15): 26-29+58.

[7] 赵一夫. 基于改进天棚阻尼控制的悬架半主动控制仿真研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2023.
ZHAO Y F. Simulation Study on Semi-Active Suspension Control Based on Improved Ceiling Damping Control[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.

[8] 王平，王一鸣，吴圣，等. 基于粒子群算法的悬架PID控制器参数整定研究[J]. 农业装备与车辆工程，2024，62(11)：86-89+94.
WANG P, WANG Y M, WU S, et al. Research on Parameter tuning of Suspension PID Controller Based on Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2024, 62(11): 86-89+94.

[9] 曹菁，王心坚，倪淮生. 基于模糊解耦控制的质子交换膜燃料电池阴极控制方法研究[J]. 汽车工程师，2024(3)：15-20+27.
CAO J, WANG X J, NI H S. Research on Cathode Control Method of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Based on Fuzzy Decoupling Control[J]. Automotive Engineer, 2024, (3): 15-20+27.

[10] 陈长，梁远路，薛博阳，等. 车辆振动特征与人体乘坐舒适性的关系[J]. 同济大学学报（自然科学版），2020，48(7)：1007-1015.
CHEN C, LIANG Y L, XUE B Y, et al. The Relationship Between Vehicle Vibration Characteristics and Human Riding Comfort[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2020, 48 (7): 1007-1015.

（责任编辑　王　一）
修改稿收到日期为2025年4月1日。

《汽车工艺与材料》投稿须知

《汽车工艺与材料》于1986年创刊，是由中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车材料与制造技术类月刊，目前已入选《中文核心期刊要目总览》（第二版）、RCCSE中国准核心学术期刊（B+）、中国核心期刊（遴选）数据库、中国学术期刊综合评价数据库、欧洲学术出版中心数据库（EuroPub）、哥白尼精选期刊数据库（ICI Journals Master List）、EBSCO International数据库、J-Gate数据库。

《汽车工艺与材料》以“为中国报道汽车制造，为汽车引领工艺材料”为办刊宗旨，致力于报道以汽车轻量化技术和智能制造技术为核心的先进制造技术与材料应用技术，重点关注电动汽车蓄电池、电机、电控关键材料技术，燃料电池材料技术，高强度钢、铝镁合金、非金属材料及其成形技术，连接技术，智能装备与绿色制造等，以期通过高质量学术内容的出版和传播助推行业创新技术的交流与发展。

《汽车工艺与材料》杂志关注领先的整车及零部件企业和材料、装备等供应商，及时报道汽车行业最新的产品设计、制造、材料、加工技术、生产装备、检测技术等方面的成功案例。

主要栏目：

AT&M视界、生产现场、材料应用、生产装备、检测技术、数字化园地、行业动态等。

投稿要求：

（1）来稿须具有独创性并与实践相结合，文章字数最好控制在5 000～8 000字。

（2）来稿不能在国内、外公开杂志上发表过，请勿一稿多投。

（3）来稿的试验方法、试验数据、试验结论必须准确、可靠。

（4）来稿须包括以下项目：题名、作者姓名、作者单位、摘要（200字左右）、参考文献等。来稿采用word文档的格式。

（5）来稿文章格式应符合一般科技论文格式，或参考近期本刊所刊登文章格式。

（6）文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的参考文献，且在文中应标注文献引用处。

（7）本刊使用网站投稿，投稿网址：http://qcgyycl.cbpt.cnki.net，咨询电话：0431-82026054。

竭诚欢迎汽车行业及相关各界的专家学者积极向本刊投稿。