面向车辆垂向动力学LQR控制器的遗传算法优化

王平　王一鸣

（比亚迪汽车工业有限公司，深圳 518100）

【摘要】为改善整车平顺性和乘坐舒适性，针对车辆垂向动力学系统中线性二次型调节器（LQR）存在的性能优化主观性和局限性问题，提出了一种遗传算法（GA）优化方法。首先建立汽车垂向动力学模型，设计了LQR控制器，然后，引入遗传算法实现了参数优化。仿真结果显示，相较于被动悬架，经遗传算法优化的LQR控制器在车身加速度、悬架动行程以及轮胎动位移方面展现了更优的控制效果。

关键词：垂向动力学　LQR控制　遗传算法　参数优化

中图分类号：U463.33　　**文献标志码：**A　　**DOI：** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20240418

Genetic Algorithm Optimization of LQR Controller for Vehicle Vertical Dynamics

Wang Ping, Wang Yiming

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

【**Abstract**】In order to improve smoothness and ride comfort of the vehicle, this paper proposes a Genetic Algorithm (GA) optimization method to address the subjectivity and limitations of performance optimization of Linear Quadratic Regulators (LQR) in the vertical dynamic system of vehicles. Firstly, a vertical dynamic model of the vehicle is established, an LQR controller is designed, and genetic algorithm is introduced for parameter optimization. The simulation results show that compared with passive suspension, the controller optimized by genetic algorithm demonstrates better control effect in performance index including body acceleration, suspension dynamic travel and tire dynamic displacement.

Key words: Vertical dynamics, LQR control, Genetic algorithm, Parameter optimization

【引用格式】王平，王一鸣．面向车辆垂向动力学LQR控制器的遗传算法优化[J]. 汽车工程师, 2026(6): 31-36.

WANG P, WANG Y M. Genetic Algorithm Optimization of LQR Controller for Vehicle Vertical Dynamics[J]. Automotive Engineer, 2026(6): 31-36.

1　前言

悬架系统的性能表现对整车的动力学响应具有显著影响。主动悬架系统基于多目标优化控制架构实时调整悬架参数[1]，能够在复杂非线性工况下提供卓越的动态响应性能。

线性二次型调节器（Linear Quadratic Regulator，LQR）是一种广泛应用于控制系统设计的优化方法，它通过最小化一个包含状态变量和控制输入的二次型性能指标来确定最优控制律。然而，在LQR控制器设计中，权重矩阵的选择往往依赖于工程师的经验[2]，可能导致性能优化的主观性和局限性。针对该问题，国内外学者提出了许多优化方法：王兴国[3]和詹长书[4]等采用粒子群算法优化LQR参数；王明祥[5]采用长短期记忆（Long Short-Term Memory，LSTM）网络实现控制策略优化，提高整车平顺性；孙凤等[6]将能耗作为约束条件，提出了一种改进的LQR控制策略；李登科和冯晶晶等[7]采用改进的鲸鱼优化算法，综合性能评价指标对比例-积分-微分（Proportional-Integral-Derivative，PID）控制器参数进行了优化；张昕[8]等基于改进的粒子群算法，显著提高了PID控制器目标函数的收敛速度；李长艺[9]等

通信作者：王平（1974—），大学本科，中级工程师，主要研究方向为汽车底盘及电子，wang.ping@byd.com。

基于改进的自适应惯性权重粒子群算法，优化了刚柔耦合车辆的振动控制问题；韩乐[10]采用改进的遗传算法（Genetic Algorithm，GA）优化悬架控制策略，显著降低了俯仰角加速度和倾侧角加速度，提升了平顺性和稳定性；顾黄一等[11]采用灰狼算法优化模糊PID控制器的量化因子和比例因子，大幅改善了车辆的悬架性能；夏长高等[12]利用增强遗传算法（Enhanced Genetic Algorithm，EGA）全局搜索最优的LQR权重矩阵，输出悬架系统最优控制阻尼力。

本文提出一种面向线性二次型调节器的遗传算法优化方法，旨在自动寻找最佳的权重矩阵参数，从而提高车辆的行驶平顺性和乘坐舒适性。首先建立垂向动力学模型，设计线性二次型调节器，选取车身加速度、悬架动行程以及轮胎动位移作为关键评价指标，并引入遗传算法实现权重矩阵的自动优化。

2 车辆二自由度动力学模型

在车辆悬架系统研究中，考虑到实际悬架系统的复杂性和参数的多样性，采用简化的车辆二自由度（Two Degree of Freedom，2-DOF）模型，该模型适用于分析和优化车辆的平顺性和舒适性，是研究主动悬架系统的基础工具，能够有效捕捉车辆垂向动力学的主要特征，同时保证计算求解过程的简明高效。该模型通常包含簧上质量和簧下质量两个主要部分，并考虑二者的相互作用关系。模型涉及的参数主要包含悬架刚度、轮胎刚度、减振器阻尼等，可以描述车身和簧下质量的垂向运动特性。

本文构建的面向主动悬架系统的二自由度动力学模型如图1所示。

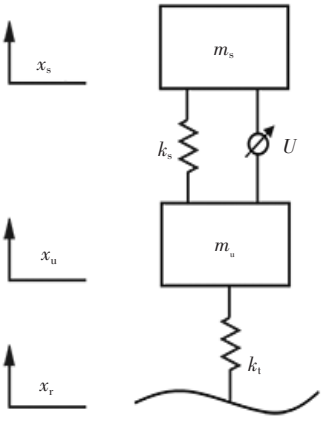


图1 二自由度模型

由牛顿第二定律，系统运动微分方程为：

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

式中：$\ddot{x}_s$、$\ddot{x}_u$分别为簧上、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，U为悬架主动力，x_s、x_u、x_r分别为车身、轮胎、路面的垂向位移。

路面激励位移输入为滤波白噪声，时域表达式为：

$$\dot{x}_r(t) = -2\pi f_0 x_r(t) + 2\pi\sqrt{G_0 v}\,w(t) \tag{2}$$

式中：t为时间；v为汽车行驶速度；f_0为下截止频率，通常取0.1 Hz；G_0为路面不平度系数；$w(t)$为随机白噪声信号。

3 悬架LQR控制器设计及遗传算法优化

3.1 悬架系统状态方程构建

为便于数值计算与仿真，全面描述系统内部状态，简化处理多输入多输出系统，将式（1）转化为系统状态方程：

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{X} + \boldsymbol{B}U + \boldsymbol{G}\boldsymbol{W} \\ \boldsymbol{Y} = \boldsymbol{C}\boldsymbol{X} + \boldsymbol{D}U \end{cases} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{D}$、$\boldsymbol{G}$均为系数矩阵，$\boldsymbol{W}$为路面白噪声输入矩阵。

其中，状态变量矩阵为：

$$\boldsymbol{X} = (\dot{x}_s, \dot{x}_u, x_s, x_u, x_r)^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

考虑到车辆悬架系统评价的复杂性，本文选取车身垂向加速度$\ddot{x}_s$、悬架动行程$(x_s - x_u)$及轮胎动位移$(x_u - x_r)$作为关键输出指标，构建输出变量矩阵，旨在全面精准地反映悬架系统的动态响应与性能表现：

$$\boldsymbol{Y} = (\ddot{x}_s, x_s - x_u, x_u - x_r)^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

系数矩阵的表达式为：

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\dfrac{k_s}{m_s} & \dfrac{k_s}{m_s} & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{k_s}{m_u} & -\dfrac{k_t + k_s}{m_u} & \dfrac{k_t}{m_u} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2\pi f_0 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{m_s} \\ -\dfrac{1}{m_u} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}0 & 0 & -\dfrac{k_s}{m_s} & \dfrac{k_s}{m_s} & 0\\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1\end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}\dfrac{1}{m_s}\\ 0\\ 0\end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{G}=\begin{bmatrix}0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 2\pi\sqrt{G_0 v}\end{bmatrix} \tag{10}$$

3.2 LQR最优控制器设计

基于前文的分析，并为了全面评估车辆的动态响应与乘坐舒适性，以车身垂向加速度、悬架动行程及轮胎动位移作为LQR控制器性能目标函数的关键变量。

本文构建的LQR控制器性能评价指标函数如下：

$$J=\int_0^{\infty}\left[q_1\left(x_u-x_r\right)^2+q_2\left(x_s-x_u\right)^2+q_3\ddot{x}_s^2\right]\mathrm{d}t \tag{11}$$

式中：q_1、q_2、q_3为加权系数。

将式(3)代入式(11)可得：

$$J=\int_0^{\infty}\left(\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{X}+U^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}U+2\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}U\right)\mathrm{d}t \tag{12}$$

式中：$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$、$\boldsymbol{N}$均为系数矩阵。

其中：

$$\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & \dfrac{k_s^2}{m_s^2}+q_2 & -\dfrac{k_s^2}{m_s^2}-q_2 & 0\\ 0 & 0 & -\dfrac{k_s^2}{m_s^2}-q_2 & \dfrac{k_s^2}{m_s^2}+q_1+q_2 & -q_1\\ 0 & 0 & 0 & -q_1 & q_1\end{bmatrix} \tag{13}$$

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}\dfrac{1}{m_s^2}\end{bmatrix} \tag{14}$$

$$\boldsymbol{N}=\begin{bmatrix}0\\ 0\\ -\dfrac{k_s}{m_s^2}\\ \dfrac{k_s}{m_s^2}\\ 0\end{bmatrix} \tag{15}$$

主动悬架的最优输出力为：

$$U_{\mathrm{best}}=-\boldsymbol{K}x(t) \tag{16}$$

式中：$x(t)$为t时刻的反馈状态变量；$\boldsymbol{K}$为反馈增益矩阵，可通过求解代数里卡蒂(Riccati)方程获得[13]，用于实现系统的最优控制。

本文通过应用MATLAB中的LQR控制器计算函数，求解反馈增益矩阵$\boldsymbol{K}$：

$$\left[\boldsymbol{K},\boldsymbol{S},\boldsymbol{e}\right]=LQR(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B},\boldsymbol{Q},\boldsymbol{R},\boldsymbol{N}) \tag{17}$$

式中：$\boldsymbol{S}$为Riccati方程的解，$\boldsymbol{e}$为特征向量。

3.3 基于遗传算法的参数优化

根据LQR控制器的设计公式，其控制效果的优劣取决于加权系数q_1、q_2、q_3，这些系数直接影响到系统的动态响应和整体性能。本文引入遗传算法对q_1、q_2、q_3进行系统性优化[14]。

考虑到LQR控制器的优化问题涉及多个性能指标，具有不同的量纲和数值范围，本文采用归一化方法消除不同量纲的影响。

适应度函数为：

$$L_{\min}=\frac{A_{\mathrm{acc}}(q_i)}{A_{\mathrm{accpas}}}+\frac{X_{\mathrm{sws}}(q_i)}{X_{\mathrm{swspas}}}+\frac{X_{\mathrm{tdd}}(q_i)}{X_{\mathrm{tddpas}}} \tag{18}$$

其中：

$$0.1<q_i<10^6,\ \ i=1,2,3 \tag{19}$$

边界条件为：

$$\begin{cases}A_{\mathrm{acc}}<A_{\mathrm{accpas}}\\ X_{\mathrm{sws}}<X_{\mathrm{swspas}}\\ X_{\mathrm{tdd}}<X_{\mathrm{tddpas}}\end{cases} \tag{20}$$

式中：A_{acc}、X_{sws}、X_{tdd}分别为车身垂向加速度、悬架动行程和轮胎动位移的均方根值；A_{accpas}、X_{swspas}、X_{tddpas}分别为被动悬架的垂向加速度、悬架动行程和轮胎动位移。

本文构建的面向悬架LQR控制器的遗传算法优化流程如图2所示。

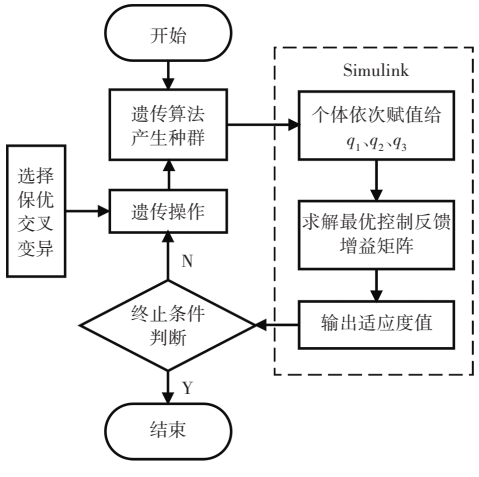


图2 遗传算法优化流程

详细操作步骤为：

a.初始化：算法产生种群。

b.赋值：依次赋值给加权系数q_1、q_2、q_3，根据式(17)求解反馈增益矩阵，并根据式(16)求解悬架最优主动力输入到二自由度动力学模型，输出悬架系统性能指标。

c.判断：根据式(18)求解适应度值，判断是否满足结束条件，若是，则结束并得到最优解，否则继续执行。

d.迭代：算法选择适应度值较高的个体，保留部分最优解，进行交叉组合以产生新的后代，并引入变异操作以增加种群多样性，并转至步骤b。

4 仿真结果与分析

悬架系统仿真模型主要参数如表1所示。

表1 模型主要参数

参数	数值
簧上质量m_s/kg	345
簧下质量m_u/kg	45
悬架刚度k_s/N·m^{-1}	22 000
轮胎刚度k_t/N·m^{-1}	192 000
车速v/m·s^{-1}	20
被动悬架刚度k_{spas}/N·m^{-1}	22 000
被动悬架阻尼C_{spas}/N·s·m^{-1}	1 000

最终建立的面向悬架系统LQR控制器的遗传算法优化模型，即GA-LQR控制器模型如图3所示。

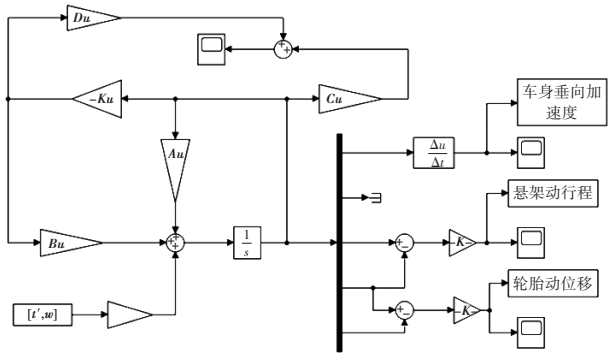


图3 控制器优化模型

根据ISO 8608:2016《机械振动-道路表面轮廓-测量数据报告》标准对路面工况的分级体系(A~H级)，本文选取C级路面作为典型城市道路工况的模拟，该等级能够准确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，通过典型稳态激励与极端瞬态激励相结合的方式，全面考核控制系统在复杂路面条件下的鲁棒性与适应性。

4.1 C级路面工况

针对悬架系统目标函数进行迭代求解，最终得到适应度值的收敛曲线如图4所示。

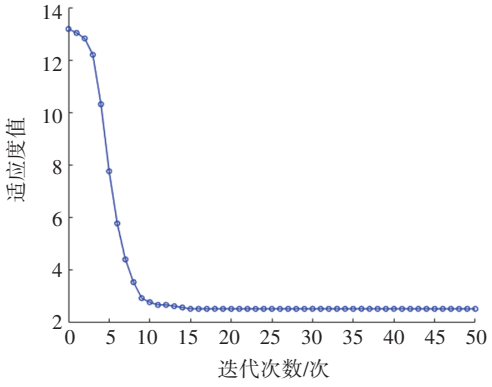


图4 适应度值收敛曲线

从图4中可以看出，在求解最优加权系数时，个体的适应度值不断减小，在迭代至第11次时，曲线基本收敛，最终适应度值收敛至2.52，获得最优解。

不同控制策略下悬架系统的车身加速度、悬架动行程、轮胎动位移性能对比如图5~图7所示。

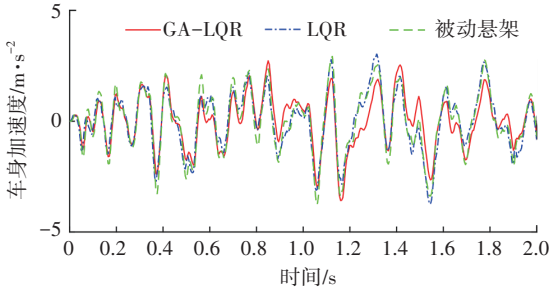


图5 车身加速度对比

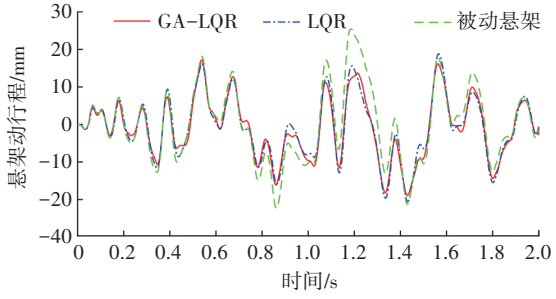


图6 悬架动行程对比

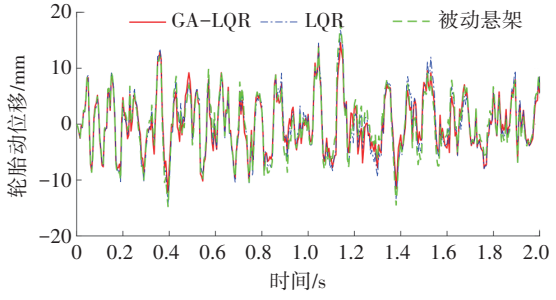


图7 轮胎动位移对比

由图5~图7可知，相较于被动悬架系统，LQR控制器和GA-LQR控制器均能有效提升车身响应性能，如表2所示，LQR控制器在车身加速度、悬架动位移、轮胎动位移方面分别降低了0.6%、24.6%、8.4%，而GA-LQR控制器则分别降低了1.2%、32.5%、13.4%。

表2　C级路面工况不同性能指标均方根值

类型	车身加速度/m·s^{-2}	悬架动行程/mm	轮胎动位移/mm
被动悬架	1.652 1	17.644 3	6.567 5
LQR	1.642 5	13.295 4	6.017 3
GA-LQR	1.631 9	11.902 6	5.687 5

4.2　过减速带工况

本文设定车辆以20 m/s的速度过减速带，其中减速带详细参数为：纵向长度0.25 m、高度0.05 m。不同控制策略下悬架性能对比如图8~图10所示。

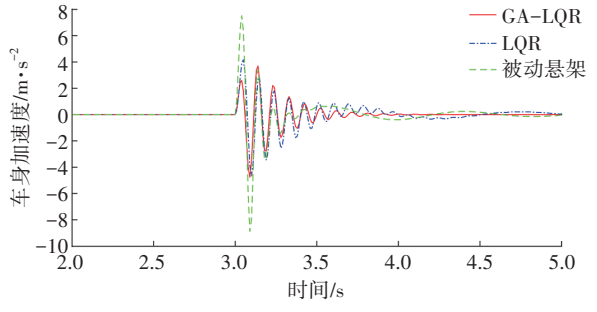


图8　车身加速度对比

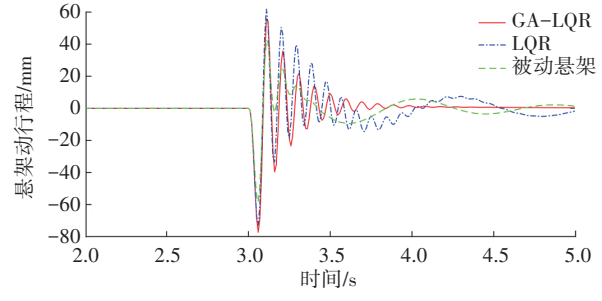


图9　悬架动行程对比

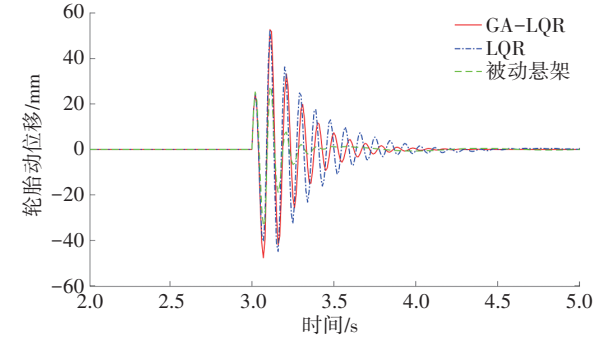


图10　轮胎动位移对比

表3所示为不同性能指标均方根值，相较于被动悬架系统，LQR控制器在车身加速度、悬架动位移、轮胎动位移方面分别降低了31.3%、-18.2%、-10.1%，而GA-LQR控制器则分别降低了39.7%、7.8%、-5.1%，展现了GA-LQR控制器在提升悬架性能和乘坐舒适性方面的显著优势。

表3　过减速带工况不同性能指标均方根值

类型	车身加速度/m·s^{-2}	悬架动行程/mm	轮胎动位移/mm
被动悬架	0.941 7	8.901 0	5.871 1
LQR	0.646 9	10.528 2	6.469 1
GA-LQR	0.567 5	8.203 7	6.168 1

5　结束语

本文面向车辆悬架系统，通过构建二自由度主动悬架动力学模型，设计LQR控制器，并引入遗传算法求解最优权重矩阵。结果表明：GA-LQR控制器显著提升了车辆行驶平顺性和乘坐舒适性，为未来车辆悬架系统的优化设计提供了新的思路和方法。

参　考　文　献

[1] 陈潇凯, 雷浩, 刘佳辉, 等. 控制学科在环的主动悬架多学科设计优化[J]. 北京理工大学学报, 2018, 39(7): 683-687.
CHEN X K, LEI H, LIU J H, et al. Multidisciplinary Design Optimization of Active Suspension in Environmental Control Discipline[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2018, 39(7): 683-687.

[2] 张进秋, 彭虎, 张建, 等. 车辆悬挂LQR主动控制权矩阵权重参数优化[J]. 振动与冲击, 2018, 37(22): 214-219.
ZHANG J Q, PENG H, ZHANG J, et al. Optimization of Weight Parameters for Vehicle Suspension LQR Active Control Matrix[J]. Vibration and Shock, 2018, 37(22): 214-219.

[3] 王兴国, 吴伟林, 何伟. 基于PSO的LQR车辆横纵向跟踪控制研究[J]. 自动化与仪表, 2024, 39(10): 136-142.
WANG X G, WU W L, HE W. Research on Longitudinal and Lateral Tracking Control of LQR Vehicles Based on PSO[J]. Automation and Instrumentation, 2024, 39(10): 136-142.

[4] 詹长书, 陈小文. 全参数自适应粒子群LQR主动悬架控制策略[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(12): 9-17.
ZHAN C S, CHEN X W. Full Parameter Adaptive Particle Swarm LQR Active Suspension Control Strategy[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(12): 9-17.

[5] 王明祥. 基于长短期记忆神经网络的汽车主动悬架优化控制研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
WANG M X. Research on Optimization Control of Automotive Active Suspension Based on Long ShortTerm Memory Neural Networks[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.

[6] 孙凤, 邢大壮, 周冉, 等. 考虑能耗的电磁主动悬架LQR控制策略[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(4): 754-760+798.
SUN F, XING D Z, ZHOU R, et al. LQR Control Strategy for Electromagnetic Active Suspension Considering Energy Consumption[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(4): 754-760+798.

[7] 李登科, 冯晶晶, 王忠玉, 等. 基于改进鲸鱼优化算法的主动悬架控制策略[J]. 动力学与控制学报, 2024, 22(11): 20-27.
LI D K, FENG J J, WANG Z Y, et al. Active Suspension Control Strategy Based on Improved Whale Optimization Algorithm[J]. Journal of Dynamics and Control, 2024, 22 (11): 20-27.

[8] 张昕, 彭瑞祥, 张宏远. 基于改进粒子群算法优化PID控制的主动悬架性能研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2024, 43 (6): 13-19.
ZHANG X, PENG R X, ZHANG H Y. Research on Active Suspension Performance Optimization of PID Control Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2024, 43(6): 13-19.

[9] 李长艺, 刘壮壮, 李亚洁, 等. 基于改进粒子群算法的刚柔耦合模型车辆平顺性研究[J]. 齐鲁工业大学学报, 2024, 38(3): 74-80.
LI C Y, LIU Z Z, LI Y J, et al. Research on Vehicle Smoothness of Rigid Flexible Coupling Model Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm [J]. Journal of Qilu University of Technology, 2024, 38(3): 74-80.

[10] 韩乐. 基于动力学模型与改进GA算法的车辆主动悬架控制方法研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2024(5): 110-114.
HAN L. Research on Active Suspension Control Method for Vehicles Based on Dynamic Model and Improved GA Algorithm[J]. Automation and Instrumentation, 2024(5): 110-114.

[11] 顾黄一, 汪石农, 陈德政. 基于灰狼算法的半主动悬架模糊PID控制研究[J]. 安徽工程大学学报, 2024, 39(2): 24-31.
GU H Y, WANG S N, CHEN D Z. Research on Fuzzy PID Control of Semi Active Suspension Based on Grey Wolf Algorithm[J]. Journal of Anhui Engineering University, 2024, 39(2): 24-31.

[12] 夏长高, 张凡, 韩江义. 基于EGA优化的农用UTV半主动悬架最优控制[J]. 机械设计与制造, 2024(6): 91-95+101.
XIA C G, ZHANG F, HAN J Y. Optimal Control of Agricultural UTV Semi Active Suspension Based on EGA Optimization[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2024 (6): 91-95+101.

[13] 伊丽娜, 扎其劳, 套格图桑. 分数阶Riccati方程的Bäcklund变换及其应用[J]. 应用数学, 2024, 37(4): 1121-1132.
IRINA, ZA Q L, TOGTUSAN. The Bäcklund Transform of Fractional Order Riccati Equations and Its Applications[J]. Applied Mathematics, 2024, 37(4): 1121-1132.

[14] 付林凯, 金智林. 自适应多种群遗传优化的SUV防侧翻控制方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(6): 39-47.
FU L K, JIN Z L. Adaptive Multi Population Genetic Optimization for SUV Anti Rollover Control Method[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(6): 39-47.

（责任编辑　王　一）
修改稿收到日期为2025年2月18日。

（上接第30页）

[9] FU S W, LI K, HUANG H S, et al. Red-Billed Blue Magpie Optimizer: A Novel Metaheuristic Algorithm for 2D/3D UAV Path Planning and Engineering Design Problems[J]. Artificial Intelligence Review, 2024, 57(6).

[10] 陈齐平, 魏佳成, 罗玉峰, 等. 轮边驱动电动汽车主动悬架LQG控制仿真研究[J]. 现代制造工程, 2020(3): 7-13+92.
CHEN Q P, WEI J C, LUO Y F, et al. Simulation Study on LQG Control of Active Suspension for Wheel-Side Driven Electric Vehicles[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(3): 7-13+92.

[11] TAN B, WU Y, ZHANG N, et al. Improvement of Ride Quality for Patient Lying in Ambulance with a New Hydro-Pneumatic Suspension[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11(4).

[12] 卢凡, 陈思忠. 汽车路面激励的时域建模与仿真[J]. 汽车工程, 2015, 37(5): 549-553.
LU F, CHEN S Z. Modeling and Simulation of Road Surface Excitation on Vehicle in Time Domain[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(5): 549-553.

（责任编辑　斛　畔）
修改稿收到日期为2025年12月18日。