基于红嘴蓝鹊线性二次型调节器的主动悬架控制策略研究

吕金运　秦玉英　杜俊风

（辽宁工业大学，锦州 121001）

【摘要】针对车辆主动悬架系统的线性二次型调节器（LQR）权重系数矩阵设定过程具有主观性、效率低的问题，提出一种基于红嘴蓝鹊优化算法的权重系数矩阵设定策略。建立了1/4车辆模型、随机路面和冲击路面模型，并完成线性二次型调节器设计和适应度函数构建，通过红嘴蓝鹊算法在搜索空间中求解最优权重系数矩阵和最小适应度函数值，最后利用MATLAB/Simulink，分别以C级路面、冲击路面为激励，与被动悬架和采用其他优化算法时主动悬架控制效果进行对比仿真分析。结果表明：与被动悬架、蛇算法优化主动悬架控制结果相比，所提出的控制策略在C级路面上对车身垂向加速度、车轮动载荷及悬架动行程的优化分别达到75.50%、48.23%、47.63%和62.07%、22.56%、21.16%，在冲击路面上使车身垂向加速度第一峰值分别降低76.80%、3.13%，提升了车辆的行驶平顺性和安全性。

关键词：红嘴蓝鹊算法　主动悬架　线性二次型最优控制　适应度函数　权重系数矩阵优化

中图分类号：U463.33；TP13　　**文献标志码：**A　　**DOI：** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20250002

LQR Control Strategy Research for Active Suspension Based on Red-Billed Blue Magpie

Lü Jinyun, Qin Yuying, Du Junfeng

(Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001)

【**Abstract**】The weighting coefficient matrix in the Linear Quadratic Regulator (LQR) of the active suspension system for vehicles has drawbacks of subjectivity and low efficiency. To address this issue, the paper proposes a weight coefficient matrix strategy based on the Red-billed Blue Magpie optimization algorithm. A 1/4 vehicle model, random road surface and impact road surface model are established. A linear quadratic regulator is designed, and a fitness function is constructed. The optimal weighting coefficient matrix and the minimum fitness function value are obtained through the Red-billed Blue Magpie algorithm in the search space. MATLAB/Simulink is used for simulation and a comparative analysis is conducted on passive suspension systems and active suspension systems under C-class road and impact road excitations, along with other optimization algorithms. The simulation results indicate that this proposed control strategy achieves optimizations of 75.50% for the vehicle body vertical acceleration, 48.23% for the wheel dynamic load and 47.63% for the suspension dynamic travel on Class-C road surface compared with the passive suspension and snake algorithm optimization active suspension control. The first peak value of vertical acceleration on the impact road surface is optimized by 76.80%, enhancing vehicle ride comfort and safety.

Key words: Red-billed blue magpie algorithm, Active suspension, Linear quadratic-type optimal control, Fitness function, Weight coefficient matrix optimization

【引用格式】吕金运, 秦玉英, 杜俊风. 基于红嘴蓝鹊线性二次型调节器的主动悬架控制策略研究[J]. 汽车工程师, 2026(3): 1-6.

LÜ J Y, QIN Y Y, DU J F. LQR Control Strategy Research for Active Suspension Based on Red-Billed Blue Magpie[J]. Automotive Engineer, 2026(3): 1-6.

1　前言

主动悬架可随车辆运动状态和外界激励的变化实时提供所需的理想控制力，保证行驶过程中车辆的平顺性和操纵稳定性。近年来，研究人员针对主动、半主动悬架系统的控制提出了多种控制方

法，其中以线性二次最优控制理论为基础的主动悬架控制技术发展最快[1]。屈亚洲等[2]采用单目标粒子群优化算法确定最优控制参数，控制效果略优于PID控制器，但优化结果受初始参数和算法参数设置影响较大。王雅璇等[3]提出一种改进人工蜂群算法并对控制器权重系数进行优化，通过引入3种新的解搜索策略和调整选择策略，有效提高了算法的全局搜索和局部搜索能力，但多种搜索策略和调整选择策略的引入增加了算法的复杂度，在某些复杂问题中，局部搜索能力仍然不足，导致算法难以找到全局最优解。耿玺钧等[4]提出基于线性递减权值的粒子群优化（Particle Swarm Optimization，PSO）算法，通过动态调整粒子在进化过程中的探索和开发能力，提高了算法局部搜索和全局搜索能力，但算法参数的选择对优化结果有较大影响。范秋霞等[5]提出了一种基于蛇算法的控制器权重系数矩阵优化策略。孙京哲等[6]提出了基于霜冰优化算法的自适应模糊PID和模糊PID并联复合控制策略，该策略增加了系统的复杂性，实际应用和维护可能存在一定难度。

上述研究均涉及控制策略的参数优化问题，为此，本文基于红嘴蓝鹊算法[7]对控制器的权重系数矩阵进行优化设计，并建立1/4车辆模型，在C级路面和冲击路面条件下与被动悬架和采用其他优化算法时的主动悬架控制效果进行仿真对比，验证其有效性。

2 车辆模型与状态空间方程的建立

2.1 1/4车辆模型的建立

采用二自由度1/4车辆模型，该模型只考虑车身和车轮的垂向运动，极大降低了计算的复杂性，能够反映整车的垂向动力学特征，如图1所示。其中，m_2为车身质量，m_1为车轮质量，k_2为悬架弹簧等效刚度，k_1为轮胎刚度，c_2为悬架减振器等效阻尼，z_2为车身的垂向位移，z_1为车轮的垂向位移，z_q为路面输入，f为作动器输出的主动控制力。

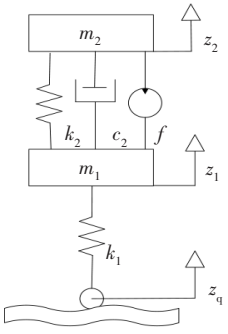


图1 1/4车辆模型

由牛顿第二定律，有：

$$\begin{cases} m_2\ddot{z}_2 = -c_2(\dot{z}_2-\dot{z}_1) - k_2(z_2-z_1) + f \\ m_1\ddot{z}_1 = k_2(z_2-z_1) + c_2(\dot{z}_2-\dot{z}_1) - k_1(z_1-z_q) - f \end{cases} \tag{1}$$

2.2 状态空间方程的建立

系统的状态向量为：

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} z_2 & z_1 & \dot{z}_2 & \dot{z}_1 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

系统输入为：

$$\boldsymbol{u} = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} f & z_q \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

系统输出为：

$$\boldsymbol{y} = \begin{bmatrix} \ddot{z}_2 & k_1(z_1-z_q) & z_2-z_1 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

式中：$\ddot{z}_2$为车身垂向加速度，$k_1(z_1-z_q)$为轮胎动载荷，(z_2-z_1)为悬架动行程。

由式(1)~式(4)可得系统的状态空间方程和输出方程：

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u} \\ \boldsymbol{y} = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{D}\boldsymbol{u} \end{cases} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\dfrac{k_2}{m_2} & \dfrac{k_2}{m_2} & -\dfrac{c_2}{m_2} & \dfrac{c_2}{m_2} \\ \dfrac{k_2}{m_1} & -\dfrac{(k_2+k_1)}{m_1} & \dfrac{c_2}{m_1} & -\dfrac{c_2}{m_1} \end{bmatrix}$，$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{B}_1 \\ \boldsymbol{B}_2 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dfrac{1}{m_2} & -\dfrac{1}{m_1} \\ 0 & 0 & 0 & \dfrac{k_1}{m_1} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} -\dfrac{k_2}{m_2} & \dfrac{k_2}{m_2} & -\dfrac{c_2}{m_2} & \dfrac{c_2}{m_2} \\ 0 & k_1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$，$\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{D}_1 & \boldsymbol{D}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dfrac{1}{m_2} & 0 \\ 0 & k_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$。

3 路面模型的建立

3.1 随机路面模型

采用路面功率谱密度描述路面不平度的统计特性[8]：

$$G_q(n) = G_q(n_0)\left(\frac{n}{n_0}\right)^{-w} \tag{6}$$

式中：$G_q(n)$为路面空间功率谱密度，$G_q(n_0)$为路面不平度系数，n_0=0.1 m^{-1}为参考空间频率，w=2为频率指数，n为空间频率。

由滤波白噪声模型搭建的随机路面输入数学表达式为[9]：

$$\dot{z}_q(t) + 2\pi v n_1 z_q(t) = 2\pi n_0\sqrt{G_q(n_0)v}\,w(t) \tag{7}$$

式中：v为车速，n_1=0.01 m^{-1}为空间截止频率下限，$w(t)$为均值为0、方差为1的标准高斯白噪声。

3.2 冲击路面模型

冲击路面的数学表达式为[10]：

$$z_q=\begin{cases}\dfrac{h_b}{2}\left[1-\cos\left(\dfrac{2\pi v}{w_b}(t-t_0)\right)\right], & t_0\leqslant t\leqslant t_0+\dfrac{w_b}{v}\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{8}$$

式中：t_0=0.5 s为轮胎进入冲击路面的时刻，w_b=0.3 m为减速带宽度，h_b=0.05 m为减速带高度。

4 主动悬架LQR控制器

选取LQR控制策略的性能指标函数，可定义为悬架系统的3个性能评价指标和主动控制力的权重平方和的积分：

$$J=\int_0^{\infty}\left[q_1\ddot{z}_2^2+q_2k_1^2\left(z_1-z_q\right)^2+q_3\left(z_2-z_1\right)^2+q_4f^2\right]\mathrm{d}t \tag{9}$$

式中：q_1、q_2、q_3、q_4分别为车身垂向加速度、轮胎动载荷、悬架动行程和主动控制力的权重系数。

根据最优控制理论，将式(5)代入式(9)并整理为标准二次型的形式，可得：

$$J=\int_0^{\infty}\left[\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{x}+u_1^{\mathrm{T}}Ru_1+2\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}u_1\right]\mathrm{d}t \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{Q}_0=\begin{bmatrix}q_1&0&0\\0&q_2&0\\0&0&q_3\end{bmatrix}$，$R=\boldsymbol{D}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_0\boldsymbol{D}_1+q_4=q_1/m_2^2+q_4$，$\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_0\boldsymbol{C}=$

$$\begin{bmatrix}\left(\dfrac{k_2}{m_2}\right)^2q_1+q_3 & -\left(\dfrac{k_2}{m_2}\right)^2q_1-q_3 & \dfrac{c_2k_2}{m_2^2}q_1 & -\dfrac{c_2k_2}{m_2^2}q_1\\ -\left(\dfrac{k_2}{m_2}\right)^2q_1-q_3 & \left(\dfrac{k_2}{m_2}\right)^2q_1+k_1^2q_2+q_3 & -\dfrac{c_2k_2}{m_2^2}q_1 & \dfrac{c_2k_2}{m_2^2}q_1\\ \dfrac{c_2k_2}{m_2^2}q_1 & -\dfrac{c_2k_2}{m_2^2}q_1 & \left(\dfrac{c_2}{m_2}\right)^2q_1 & -\left(\dfrac{c_2}{m_2}\right)^2q_1\\ -\dfrac{c_2k_2}{m_2^2}q_1 & \dfrac{c_2k_2}{m_2^2}q_1 & -\left(\dfrac{c_2}{m_2}\right)^2q_1 & \left(\dfrac{c_2}{m_2}\right)^2q_1\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{N}=\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_0\boldsymbol{D}_1=\begin{bmatrix}\dfrac{k_2}{m_2^2}q_1 & -\dfrac{k_2}{m_2^2}q_1 & \dfrac{k_2}{m_2^2}q_1 & -\dfrac{k_2}{m_2^2}q_1\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}。$$

车辆参数和性能指标的权重系数确定后，由黎卡提方程求解矩阵$\boldsymbol{P}$：

$$\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}+\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}-(\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}_1+\boldsymbol{N})R^{-1}(\boldsymbol{B}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}+\boldsymbol{N}^{\mathrm{T}})+\boldsymbol{Q}=0 \tag{11}$$

反馈增益矩阵为：

$$\boldsymbol{K}=R^{-1}\boldsymbol{B}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P} \tag{12}$$

系统输入为：

$$f=-\boldsymbol{K}\boldsymbol{x} \tag{13}$$

5 权重系数矩阵的优化

5.1 适应度函数的建立

优化问题的数学模型为寻找一组设计变量，在满足约束条件的前提下使适应度函数尽可能小。

设计变量为：

$$\boldsymbol{X}=[q_1\ \ q_2\ \ q_3\ \ q_4] \tag{14}$$

式中：变量取值范围为$10^{-3}<q_i<10^6$(i=1,2,3,4)。

悬架系统的3个性能指标具有不同的单位且数值量级存在较大差距，将适应度函数设为车身垂向加速度、轮胎动载荷与悬架动行程的归一化结果之和：

$$\min L(q)=\frac{RMS\left[\ddot{z}_2(q)\right]_A}{RMS\left[\ddot{z}_2(q)\right]_P}+\frac{RMS\left[k_1z_1(q)-k_1z_q(q)\right]_A}{RMS\left[k_1z_1(q)-k_1z_q(q)\right]_P}+\frac{RMS\left[z_2(q)-z_1(q)\right]_A}{RMS\left[z_2(q)-z_1(q)\right]_P} \tag{15}$$

式中：RMS为均方根函数，A、P分别表示主、被动悬架性能指标。

约束条件为：主动悬架的3种性能指标的均方根值分别小于被动悬架的对应指标均方根值。

5.2 基于红嘴蓝鹊算法的权重系数优化

红嘴蓝鹊算法的优化过程是搜索代理不断逼近最佳位置的更新过程，流程如图2所示。

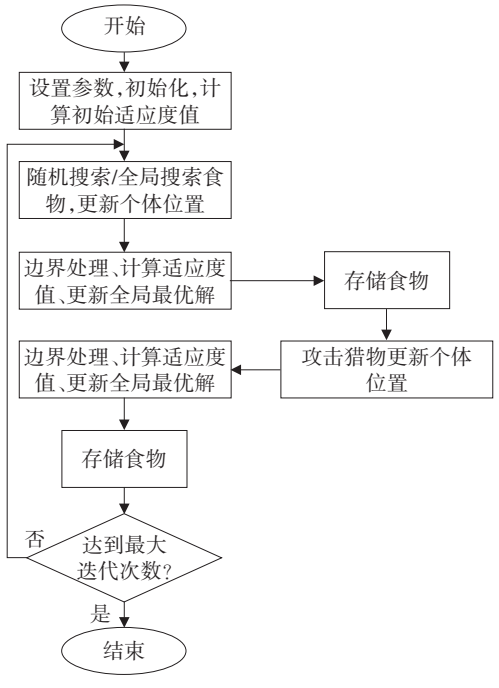


图2 红嘴蓝鹊算法优化LQR控制流程

具体步骤如下：

a. 参数设置。设置搜索代理规模 N=50个，终止迭代次数 T=60次。

b. 权重系数初始化。搜索代理位置表示为 $\boldsymbol{X}$=[q_1 q_2 q_3 q_4]，维度 d=4，生成候选解并计算其适应度值：

$$X_{i,j}=(b_u-b_l)\times R_{andi1}+b_l \tag{16}$$

式中：$X_{i,j}$为第 i 个搜索代理第 j 个变量的值，b_u、b_l分别为变量的上、下界，R_{andi}为[0,1]范围内的随机数。

c. 目标的寻找与存储。搜索代理分为小团体和集群，根据概率选择小团体或集群进行位置更新、边界处理（确保更新后的位置仍在上、下界的范围内）。计算新位置的适应度值，如果小于当前的全局最佳适应度值，则更新为新的全局最佳适应度值并进行食物存储（储存每个搜索代理最佳适应度值）。

小团体探索食物的过程可表示为：

$$\boldsymbol{X}^i(k+1)=\boldsymbol{X}^i(k)+\left(\frac{1}{p}\times\sum_{m=1}^{p}\boldsymbol{X}^m(k)-\boldsymbol{X}^{rs}(k)\right)\times R_{and2} \tag{17}$$

集群探索食物的过程可表示为：

$$\boldsymbol{X}^i(k+1)=\boldsymbol{X}^i(k)+\left(\frac{1}{q}\times\sum_{m=1}^{q}\boldsymbol{X}^m(k)-\boldsymbol{X}^{rs}(k)\right)\times R_{and3} \tag{18}$$

食物储存过程可表示为：

$$\boldsymbol{X}^i(k+1)=\begin{cases}\boldsymbol{X}^i(k), & F^i_{old}>F^i_{new}\\ \boldsymbol{X}^i(k+1), & \text{其他}\end{cases} \tag{19}$$

式中：k 为当前迭代次数；$\boldsymbol{X}^i(k+1)$为第 i 个新的搜索代理位置；p 为从所有搜索个体中随机选择的2~5个红嘴蓝鹊的数量；$\boldsymbol{X}^m(k)$为随机选择的第 m 个个体；$\boldsymbol{X}^{rs}(k)$为当前迭代中随机选择的搜索代理；q 为集群在探索食物时的搜索代理数量，范围为[10,N]；F^i_{old}、F^i_{new}分别为第 i 只红嘴蓝鹊位置更新前、后的适应度值。

d. 攻击猎物。每个搜索代理都会通过随机选择小团体和集群的方式朝着食物方向运动并更新位置，从而探索周围的搜索空间。随机系数的设置可避免搜索过于局限在某一特定方向，从而增加了搜索的多样性。其中 C_f影响个体在算法迭代过程中的更新，适当的 C_f取值可以帮助算法避免早熟收敛到局部最优解。更新每个搜索代理位置信息、适应度值并进行食物储存。

小团体攻击猎物与集群攻击猎物的过程可分别表示为：

$$\boldsymbol{X}^i(k+1)=\boldsymbol{X}^{food}(k)+C_f\times\left(\frac{1}{p}\times\sum_{m=1}^{p}\boldsymbol{X}^m(k)-\boldsymbol{X}^{rs}(k)\right)\times R_{andn1} \tag{20}$$

$$\boldsymbol{X}^i(k+1)=\boldsymbol{X}^{food}(k)+C_f\times\left(\frac{1}{q}\times\sum_{m=1}^{q}\boldsymbol{X}^m(k)-\boldsymbol{X}^{rs}(k)\right)\times R_{andn2} \tag{21}$$

式中：$\boldsymbol{X}^{food}(k)$为食物的位置，$C_f=(1-k/T)^{2t/T}$，R_{andni}为用于生成标准正态分布（平均值为0，标准差为1）的随机数。

e. 终止条件判断。判断当前迭代次数是否达到最大迭代次数，如果小于最大迭代次数，则重复步骤c、步骤d，直到满足停止迭代条件，如果达到最大迭代次数，则输出食物存储中的最优解 $\boldsymbol{X}_{best}$=[q_1 q_2 q_3 q_4]，运算结束。

6 仿真分析

取车身质量 m_2=3 500 kg、车轮质量 m_1=50 kg、悬架弹簧等效刚度 k_2=117 000 N/m、轮胎刚度 k_1=370 000 N/m、悬架减振器等效阻尼 c_2=2 600 N·s/m，仿真分析过程中，车速设置为60 km/h。

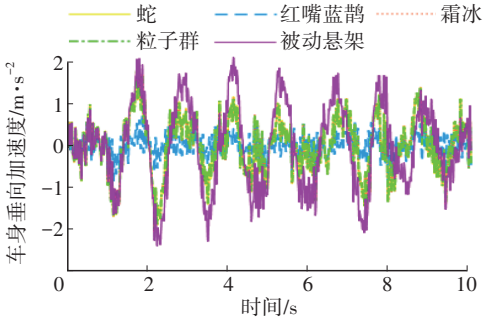
6.1 C级路面的仿真分析

在C级路面条件下进行仿真分析，其中 $G_q(n_0)=256\times10^{-6}$ m^3，使用4种优化算法求解，获得适应度值和权重系数 q_i 如表1所示，蛇算法、红嘴蓝鹊算法、霜冰算法、粒子群优化算法的反馈增益矩阵 $\boldsymbol{K}$ 分别为(−0.004, −34 091.688, 6 467.660, −489.731)、(−75 259.856, 74 565.766, 11 413.942, 871.372)、(−0.006, −37 643.445, 6 891.276, −538.379)、(−0.001, −37 726.561, 6 900.961, −539.509)。

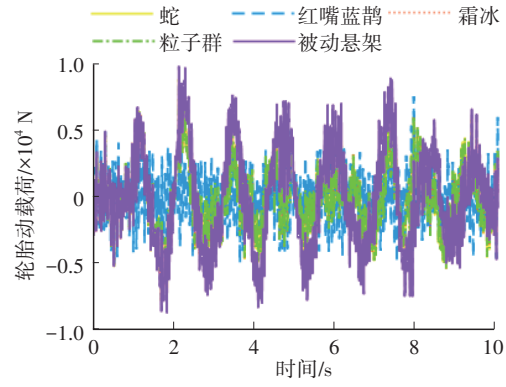
表1 C级路面的LQR权重系数优化结果

算法	适应度值	权重系数			
		q_1	q_2	q_3	q_4
蛇	1.684	1 000 000	238 372	410 980	986 279
红嘴蓝鹊	0.642	91 031	0.001	1 000 000	0.001
霜冰	1.684	1 000 000	179 050	1 000 000	740 829
粒子群	1.684	4 581 982	232 196	468 308	960 692

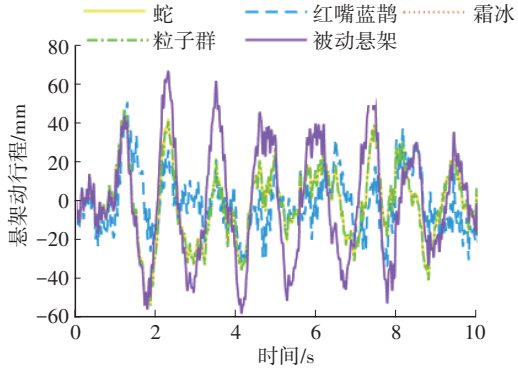
根据不同的反馈增益矩阵 $\boldsymbol{K}$，计算出最优输入 f，以实现对悬架系统输出的优化控制，3种性能指标仿真曲线如图3所示。



(a)车身加速度



(b)轮胎动载荷



(c)悬架动行程

图3　C级路面下性能指标仿真结果

由图3可以看出，红嘴蓝鹊算法优化的控制策略能够有效降低车身垂向加速度幅值，对轮胎动载荷和悬架动行程也起到了很好的控制作用，由悬架性能指标的仿真结果计算获得车辆悬架性能指标如表2所示。

表2　C级路面下悬架性能指标的均方根

算法	车身垂向加速度均方根/m·s^{-2}	车轮动载荷均方根/N	悬架动行程均方根/mm
蛇	0.644	2 455.233	19.198
红嘴蓝鹊	0.244 3	1 901.428	15.137
霜冰	0.642	2 442.870	19.310
粒子群	0.642	2 442.619	19.313
被动悬架	0.996	3 672.339	28.902

与被动悬架的性能指标相比较，蛇算法、红嘴蓝鹊算法、霜冰算法、粒子群算法优化LQR控制的主动悬架对车身垂向加速度均方根值分别降低了35.35%、75.50%、35.55%、35.55%，对轮胎动载荷的优化分别达到35.15%、48.23%、33.48%、35.49%，对悬架动行程的优化分别达到33.58%、47.63%、33.19%、33.19%。由此可知，红嘴蓝鹊算法控制策略能够提高车辆的乘坐舒适性和行驶平顺性。

6.2　冲击路面的仿真分析

冲击路面激励如图4所示，车身的垂向振动和俯仰现象会引起驾乘人员不适。所以在该工况下，评价乘坐舒适性的指标为车身加速度，仿真结果如图5所示。

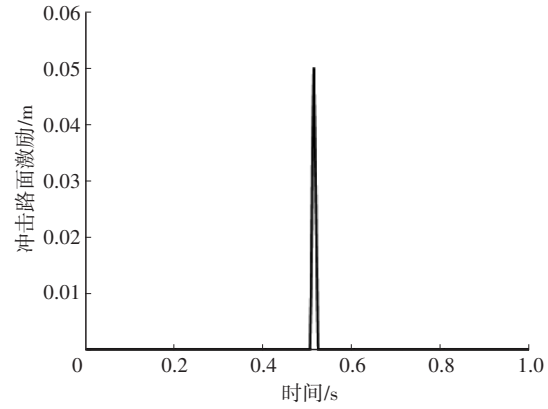


图4　冲击路面激励

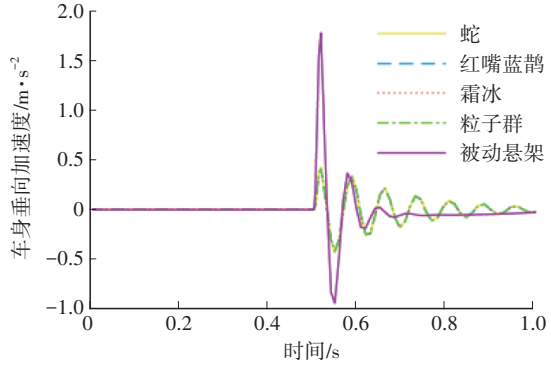


图5　冲击路面下的车身加速度

为了定量分析冲击路面的平顺性，采用车身垂向加速度第一个峰值进行评价，蛇算法、红嘴蓝鹊算法、霜冰算法、粒子群算法优化LQR控制的主动悬架和被动悬架的车身垂向加速度第一峰值分别为0.425 1 m/s^2、0.411 8 m/s^2、0.412 0 m/s^2、0.411 8 m/s^2、1.775 0 m/s^2。

红嘴蓝鹊算法对车身垂向加速度的第一峰值相比于被动悬架和蛇算法分别改善了76.80%、4.13%，可以较好地改善车辆在冲击路面下的行驶平顺性。

7　结束语

本文提出一种基于红嘴蓝鹊算法的线性二次型调节器权重系数矩阵优化策略，并建立了二自由度1/4车辆模型、C级路面以及冲击路面的仿真模型开展了验证，结果表明：在C级路面下，相对于被动悬架的性能指标，红嘴蓝鹊算法优化LQR控制的主

动悬架使车身垂向加速度均方根值降低了75.50%，对轮胎动载荷的优化达到48.23%，对悬架动行程的优化达到47.63%，相比于其他3种算法优化LQR控制的主动悬架也有不同程度提升，在冲击路面条件下，车身垂向加速度的第一峰值相比于被动悬架和蛇算法改善了76.80%、3.13%。

参 考 文 献

[1] 丁芳，王波，刘明岩．汽车主动悬架LQR控制研究[J]．机械设计与研究，2020，36(4)：52-56.
DING F，WANG B，LIU M Y．Study on LQR Control of Automotive Active Suspension[J]．Mechanical Design and Research，2020，36(4)：52-56.

[2] 屈亚洲，熊乐，吴云兵，等．基于PSO算法的LQR与PID控制主动悬架性能对比[J]．中国汽车，2020(4)：12-17.
QU Y Z，XIONG L，WU Y B，et al．Comparison of LQR and PID Control Active Suspension Performance Based on PSO Algorithm[J]．China Automobile，2020(4)：12-17.

[3] 王雅璇，罗建南，罗小桃，等．基于改进人工蜂群算法的主动悬架LQR控制器设计[J]．噪声与振动控制，2021，41(3)：61-66.
WANG Y X，LUO J N，LUO X T，et al．Design of the Active Suspension LQR Controller Based on an Improved Artificial Swarm Algorithm[J]．Noise and Vibration Control，2021，41(3)：61-66.

[4] 耿玺钧，崔立堃，冯绪永，等．基于线性递减权值PSO算法优化LQR控制的主动悬架性能研究[J]．现代制造工程，2023(1)：43-49.
GENG X J，CUI L K，FENG X Y，et al．Study on the Performance of Active Suspension Based on LQR Control PSO Algorithm[J]．Modern Manufacturing Engineering，2023(1)：43-49.

[5] 范秋霞，张珂，徐磊，等．基于蛇算法的主动悬架线性二次型调节器优化设计[J]．科学技术与工程，2024，24(9)：3852-3860.
FAN Q X，ZHANG K，XU L，et al．Optimized Design of Linear Secondary Regulator of Active Suspension Based on Snake Algorithm[J]．Science，Technology and Engineering，2024，24(9)：3852-3860.

[6] 孙京哲，魏文智，严天一．基于霜冰优化算法的半主动悬架控制策略研究[J]．青岛大学学报(工程技术版)，2024，39(3)：68-77.
SUN J Z，WEI W Z，YAN T Y．Research on Semi-Active Suspension Control Strategy Based on Frost Optimization Algorithm[J]．Journal of Qingdao University (Engineering Technology Edition)，2024，39(3)：68-77.

[7] 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).

[8] 余志生．汽车理论[M]．第6版．北京：机械工业出版社，2018.
YU Z S．Automobile Theory[M]．The 6th Edition．Beijing：Machinery Press，2018.

[9] 陈杰平，陈无畏，祝辉，等．基于Matlab/Simulink的随机路面建模与不平度仿真[J]．农业机械学报，2010，41(3)：11-15.
CHEN J P，CHEN W W，ZHU H，et al．Random Pavement Modeling and Unness Simulation Based on Matlab/Simulink [J]．Journal of Agricultural Machinery，2010，41(3)：11-15.

[10] 张翔宇．基于线性二次最优控制的悬架动力学研究与工程实现[D]．北京：北京交通学，2022.
ZHANG X Y．Research and Engineering Realization of Suspension Dynamics Based on Linear Quadratic Optimal Control[D]．Beijing：Beijing Traffic Science，2022.

（责任编辑　斛　畔）

修改稿收到日期为2025年1月6日。