

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201704002



采用人群搜索算法的汽车 半主动悬架 LQG 控制

李 军, 方 春 杰

(重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074)

摘要: 针对某款乘用车的悬架系统,建立 1/4 车辆 2 自由度半主动悬架动力学模型,并对模型的输出指标进行加权处理,得到性能指标函数.鉴于性能指标函数中各权重不易确定的特点,运用人群搜索算法对函数各权重进行寻优,并采用线性二次高斯(LQG)最优控制算法对悬架的阻尼力进行控制.最后,在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型,对悬架的性能进行仿真分析.结果表明:采用基于人群搜索算法的 LQG 控制能够较好地减小车身加速度(BA)、悬架动挠度(SWS)及轮胎动变形(DTD),有效地改善车辆的平顺性和乘坐舒适性.

关键词: 半主动悬架; 人群搜索算法; 线性二次高斯控制; 平顺性; 动力学模型

中图分类号: U 463 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2017)04-0446-06

LQG Control of Vehicle Semi-Active Suspension Using Seeker Optimization Algorithm

LI Jun, FANG Chunjie

(School of Mechantronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Aiming at the suspension system of a passenger car, the dynamics model with 2 degrees of freedom of a 1/4 vehicle semi-active suspension is established. Output indexes of the semi-active suspension dynamics model are weighted to obtain the performance index function. Seeing that it is difficult to determine each weight in the performance index function, the seeker optimization algorithm is utilized to search and optimize the weights, and the linear quadratic Gauss (LQG) optimal control algorithm is applied to control the damping force of suspension. The simulation model is established to conduct simulation analysis of suspension performance in MATLAB/Simulink. Simulation results demonstrate that the linear quadratic optimal control can reduce body acceleration (BA), suspension working space (SWS) and dynamic tyre displacement (DTD) better, which can effectively improve the vehicle ride comfort.

Keywords: semi-active suspension; seeker optimization algorithm; linear quadratic Gauss control; ride comfort; dynamics model

传统被动悬架的刚度和阻尼在车辆运行过程中均不可调,难以适应路面的复杂性及多样性,进而限制了车辆平顺性及乘坐舒适性的提升.主动悬架虽可以根据路面激励大小和车辆运行状态,适时调整作动力的大小,但产生主动作动力需要安装独立的动力装置,因而提高了成本^[1];而半主动悬架以控制减

收稿日期: 2017-01-07

通信作者: 李军(1964-),男,教授,博士,主要从事汽车发动机排放与控制、节能与新能源汽车的研究. E-mail: cqleejun@163.com.

基金项目: 重庆市自然科学基金重点资助项目(CSTC2013yykfB0184);重庆市重点实验室科研基金资助项目(csct2015yfpt_zdsys30001)

振器阻尼力为目标,具有减振效果良好、成本相对低廉等优点.针对半主动悬架的控制问题,研究人员陆续提出了诸多控制方法.严天一等^[2]采用粒子群算法优化模糊控制器的隶属度函数和模糊控制规则,提出一种不依赖专家控制经验的粒子群模糊控制方法.么鸣涛等^[3]采用基于微分几何法的线性二次型调节器(LQR)控制方法,对某工程车辆半主动油气悬架进行控制.赵亮等^[4]提出了基于磁流变阻尼器和小种群遗传算法的半主动悬架最优控制方法.孟杰等^[5]提出一种基于模拟退火算法的半主动悬架最优控制方法.罗鑫源等^[6]利用层次分析法(AHP)设计了减小半主动悬架系统输出指标车身加速度(BA)、悬架动挠度(SWS)及轮胎动变形(DTD)的线性二次高斯(LQG)控制器.本文以某款乘用车的悬架系统为研究对象,建立 1/4 车辆 2 自由度半主动悬架动力学模型,并采用 LQG 最优控制算法对半主动悬架的阻尼力进行控制;然后,在 MATLAB/Simulink 中搭建模型并进行仿真分析,以验证控制的有效性.

1 半主动悬架动力学建模

为了反映车辆半主动悬架的动力学特性,建立 1/4 车辆 2 自由度半主动悬架动力学模型^[7],如图 1 所示.

图 1 中: m_s 、 m_u 分别为簧载质量和非簧载质量; $U(t)$ 为可控阻尼力; k_s 、 k_t 分别为被动悬架刚度和轮胎等效刚度; Z_s 、 Z_u 、 Z_q 分别为车身相对平衡位置的位移、车轮相对平衡位置的位移、路面不平度的位移输入.根据图 1,可以建立被动悬架动力学方程,即

$$\left. \begin{aligned} m_s \ddot{Z}_s + k_s(Z_s - Z_u) - U(t) &= 0, \\ m_u \ddot{Z}_u + k_t(Z_u - Z_q) + k_s(Z_s - Z_u) + U(t) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

采用滤波白噪声的时域表达式模拟该模型的路面不平度输入,可得路面输入表达式^[8]为

$$\dot{Z}_q = -2\pi f_0 Z_q + 2\pi \sqrt{G_0} u \omega(t). \quad (2)$$

式(2)中: f_0 为下截止频率; G_0 为路面不平度系数; u 为车速; $\omega(t)$ 为均值等于零的高斯白噪声.

设定悬架系统的 3 个输出指标分别为车身加速度、悬架动挠度和轮胎动变形,则模型的输出变量为 $Y(t) = (\ddot{Z}_s \quad Z_s - Z_u \quad Z_u - Z_q)^T$. 选取状态变量为 $X(t) = (\dot{Z}_s \quad \dot{Z}_u \quad Z_s \quad Z_u - Z_q)^T$, 将该运动学方程转化为状态空间方程形式为

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}(t) &= AX(t) + BU(t) + E\omega(t), \\ Y(t) &= CX(t) + DU(t). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)中:各系数矩阵分别为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{k_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_s}{m_s} & \frac{k_s + k_t}{m_u} & \frac{k_t}{m_u} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2\pi f_0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} \frac{1}{m_s} & -\frac{1}{m_u} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T,$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{k_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} \frac{1}{m_s} & 0 & 0 \end{pmatrix}^T, \quad E = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 2\pi \sqrt{G_0} u)^T.$$

2 半主动悬架系统控制

2.1 半主动悬架系统 LQG 控制器的设计

采用 LQG 最优控制算法对半主动悬架施加控制,旨在降低车身加速度,减小轮胎动变形及限制悬

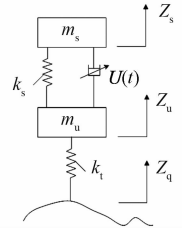


图 1 半被动悬架动力学模型

Fig. 1 Semi-active suspension dynamics model

架的动挠度. 对上述 3 个指标进行加权处理, 得到悬架性能指标函数^[9]为

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [q_1 \ddot{Z}_s^2 + q_2 (Z_s - Z_u)^2 + q_3 (Z_u - Z_q)^2] dt. \tag{4}$$

式(4)中: q_1, q_2, q_3 分别为车身加速度、悬架动挠度和轮胎动变形的权重.

将式(4)转化成二次型形式^[6], 则有

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + \mathbf{U}^T \mathbf{R} \mathbf{U} + 2 \mathbf{X}^T \mathbf{N} \mathbf{U}) dt. \tag{5}$$

式(5)中: $\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_2 + \frac{q_1 k_s^2}{m_s^2} & -q_2 - \frac{q_1 k_s^2}{m_s^2} & 0 \\ 0 & 0 & -q_2 - \frac{q_1 k_s^2}{m_s^2} & q_2 + q_3 + \frac{q_1 k_s^2}{m_s^2} & -q_3 \\ 0 & 0 & 0 & -q_3 & q_3 \end{pmatrix}; \mathbf{R} = \frac{q_1}{m_s^2}; \mathbf{N} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{q_1 k_s}{m_s^2} & \frac{q_1 k_s}{m_s^2} & 0 \end{pmatrix}^T.$

当车辆悬架结构参数和各指标权重确定后, 可由 Riccati 方程求得最优控制反馈增益矩阵 \mathbf{K} , 即

$$\mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} - (\mathbf{P} \mathbf{B} + \mathbf{N}) \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{N}^T) + \mathbf{Q} = 0. \tag{6}$$

由式(6)可求出 $\mathbf{K} = \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{N}^T$.

根据半主动悬架系统的状态变量 $\mathbf{X}(t)$, 可得最优的阻尼控制力为

$$\mathbf{U}(t) = -\mathbf{K} \mathbf{X}(t). \tag{7}$$

利用 MATLAB 中的线性二次高斯最优控制器设计函数 $[\mathbf{K}, \mathbf{S}, \mathbf{E}] = \text{LQR}(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{Q}, \mathbf{R}, \mathbf{N})$ ^[10], 求解出矩阵 \mathbf{K} . 根据式(3), (7), 将半主动悬架系统的状态空间方程转化为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}(t) &= (\mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{K}) \mathbf{X}(t) + \mathbf{E} \omega(t), \\ \mathbf{Y}(t) &= (\mathbf{C} - \mathbf{D} \mathbf{K}) \mathbf{X}(t). \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

2.2 LQG 控制器的 SOA 优化设计

为了解决半主动悬架系统性能指标函数中各权重不易确定的问题, 采用相应的群智能算法对 LQG 控制器进行优化. 人群搜索算法(SOA)是一种新型的群智能算法^[11], 它通过对人的不确定性推理行为和搜寻经验梯度行为的模拟, 求解得到问题的最优解. LQG 控制器的 SOA 算法优化有以下 5 个方面.

2.2.1 参数编码 设种群 S 中搜索者个体数为 n , 每个搜索者个体位置向量由 LQG 控制器的 3 个权重 q_1, q_2, q_3 构成, 即个体位置向量的维度 $d=3$. 令 $\mathbf{X} = (q_1, q_2, q_3)$, 则可将种群表示为

$$\mathbf{S}_{n \times d} = \begin{pmatrix} q_1^1 & q_2^1 & q_3^1 \\ q_1^2 & q_2^2 & q_3^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ q_1^n & q_2^n & q_3^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}^1 \\ \mathbf{X}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{X}^n \end{pmatrix}. \tag{9}$$

2.2.2 适应度函数的确定 考虑到半主动悬架系统的输出指标车身加速度(BA)、悬架动挠度(SWS)及轮胎动变形(DTD)的综合最优, 需要统一这三者的量纲. 因此, 将 SOA 算法的适应度函数设定为

$$\begin{aligned} \min f &= \text{RMS}[\ddot{Z}_s(\mathbf{X})]_{\text{Semi-Active}} / \text{RMS}[\ddot{Z}_s(\mathbf{X})]_{\text{Passive}} + \\ &\quad \text{RMS}[(Z_s - Z_u)(\mathbf{X})]_{\text{Semi-Active}} / \text{RMS}[(Z_s - Z_u)(\mathbf{X})]_{\text{Passive}} + \\ &\quad \text{RMS}[(Z_u - Z_q)(\mathbf{X})]_{\text{Semi-Active}} / \text{RMS}[(Z_u - Z_q)(\mathbf{X})]_{\text{Passive}}. \end{aligned} \tag{10}$$

式(10)中: $\mathbf{X} = (q_1, q_2, q_3); X_i \in [1, 10^6], i=1, 2, 3$; RMS 为相应指标数据的均方根值.

该 SOA 算法的适应度函数还需满足 3 个条件^[12], 即

$$\left. \begin{aligned} \text{RMS}[\ddot{Z}_s(\mathbf{X})]_{\text{Semi-Active}} / \text{RMS}[\ddot{Z}_s(\mathbf{X})]_{\text{Passive}} &\leq 1, \\ \text{RMS}[(Z_s - Z_u)(\mathbf{X})]_{\text{Semi-Active}} / \text{RMS}[(Z_s - Z_u)(\mathbf{X})]_{\text{Passive}} &\leq 1, \\ \text{RMS}[(Z_u - Z_q)(\mathbf{X})]_{\text{Semi-Active}} / \text{RMS}[(Z_u - Z_q)(\mathbf{X})]_{\text{Passive}} &\leq 1. \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

2.2.3 搜索步长的确定 人群搜索算法的不确定性推理行为是利用模糊系统的逼近能力模拟人的智能搜索行为, 以建立目标函数值和步长之间的联系^[13]. 因此, 将人群搜索算法的搜索步长模糊变量表示

为高斯隶属度函数的形式, 即

$$U(x) = \exp\left(\frac{-(x-u)^2}{2\delta^2}\right). \quad (12)$$

式(12)中: U 为高斯隶属度; δ, u 均为隶属度函数参数; x 为输入变量, 若 x 的取值超出 $[u-3\delta, u+2\delta]$, 且满足条件 $U(u+3\delta) < 0.011$, 则可忽略此时的隶属度, 故设定 $U_{\min} = 0.011$.

目标函数的模糊变量采用线性递减的隶属度函数, 使隶属度与函数值的排列成正比, 可将其表示为

$$U_i = U_{\max} - \frac{s - I_i}{s - 1}(U_{\max} - U_{\min}), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (13)$$

式(14)中: U_i 为目标函数值 i 的隶属度; n 为种群大小; I_i 为种群目标函数值按降序排列后 $x_i(t)$ 的序号; U_{\max} 为最大隶属度值, 取 $U_{\max} = 1$.

为了模拟搜索行为的随机性, 可以得到 j 维搜索空间目标函数值 i 的隶属度 $U_{i,j}$ 为

$$U_{i,j} = \text{rand}(U_i, 1), \quad j = 1, 2, \dots, d. \quad (14)$$

由式(14)可得搜索步长的表达式为

$$\alpha_{i,j} = \delta_{i,j} \sqrt{-\ln(U_{i,j})}. \quad (15)$$

式(15)中: $\alpha_{i,j}$ 为 j 维搜索空间的搜索步长; $\delta_{i,j}$ 为高斯隶属度函数参数, $\bar{\delta}_{i,j} = \omega \cdot |\mathbf{x}_{\min} - \mathbf{x}_{\max}|$, 其中, \mathbf{x}_{\max} , \mathbf{x}_{\min} 分别为同一种群的最大和最小目标函数值的位置; ω 为惯性权重.

惯性权重 ω 随着进化代数的增加, 从 0.9 线性递减至 0.1, 即 $\omega_{\max} = 0.9$, $\omega_{\min} = 0.1$, 则有

$$\omega = \frac{\text{iter}_{\max} - \text{iter}}{\text{iter}_{\max}}. \quad (16)$$

式(16)中: iter_{\max} 为最大迭代次数; iter 为当前迭代次数.

2.2.4 搜索方向的确定 分析人的利己行为、利他行为及预动行为, 并进行建模, 可得任意第 i 个搜寻者个体的利己方向 $\mathbf{d}_{i,\text{ego}}$, 利他方向 $\mathbf{d}_{i,\text{alt}}$ 和预动行为 $\mathbf{d}_{i,\text{pro}}$ [14] 为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{d}_{i,\text{ego}}(t) &= \mathbf{p}_{i,\text{best}} - \mathbf{x}_i(t), \\ \mathbf{d}_{i,\text{alt}}(t) &= \mathbf{g}_{i,\text{best}} - \mathbf{x}_i(t), \\ \mathbf{d}_{i,\text{pro}}(t) &= \mathbf{x}_i(t_1) - \mathbf{x}_i(t_2). \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

综合考虑利己方向、利他方向和预动方向, 由这 3 个方向随机加权几何平均产生搜索方向 [11], 即

$$\mathbf{d}_{i,j}(t) = \text{sign}(\omega \mathbf{d}_{i,j,\text{pro}} + \varphi_1 \mathbf{d}_{i,j,\text{ego}} + \varphi_2 \mathbf{d}_{i,j,\text{alt}}). \quad (18)$$

式(17), (18)中: $\mathbf{x}_i(t_1), \mathbf{x}_i(t_2)$ 分别为 $\{\mathbf{x}_i(t-2), \mathbf{x}_i(t-1), \mathbf{x}_i(t)\}$ 中的最佳位置; $\mathbf{p}_{i,\text{best}}$ 为第 i 个搜寻者个体到目前为止经历过的最佳位置; $\mathbf{g}_{i,\text{best}}$ 为第 i 个搜寻者个体所在邻域的集体历史最佳位置; $\varphi_1, \varphi_2 \in [0, 1]$.

2.2.5 搜寻者个体位置的更新 在搜寻步长、搜寻方向确定之后, 对搜寻者个体的位置进行更新, 操作 [13] 为

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{i,j}(t+1) &= \alpha_{i,j}(t) \mathbf{d}_{i,j}(t), \\ x_{i,j}(t+1) &= x_{i,j}(t) + \Delta x_{i,j}(t+1). \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

采用人群搜索算法优化 LQG 控制器设计过程, 如图 2 所示.

3 车辆悬架系统仿真分析

3.1 悬架系统仿真条件的设定

采用 MATLAB/Simulink 建立车辆半主动悬架系统的仿真模型, 如图 3 所示. 选取某款乘用车的悬架系统, 其中, 簧载质量 $m_s = 340 \text{ kg}$; 非簧载质量 $m_u = 40 \text{ kg}$; 悬架刚度 $k_s = 20 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$; 轮胎等效刚度 $k_t = 220 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$; 路面输入采用 B 级路面均值为零的白噪声输入, 其路面不平度系数为 $G_0 = 64 \times 10^{-6} \text{ m}^3$; 行驶车速 $u = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 下截止频率 $f_0 = 0.1 \text{ Hz}$; 仿真时间 $t = 100 \text{ s}$.

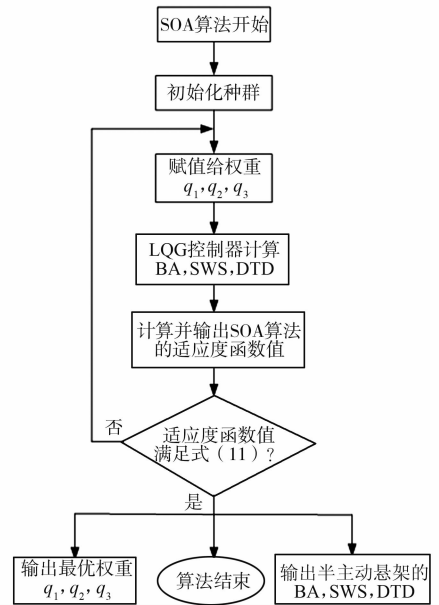


图 2 人群搜索算法优化 LQG 控制流程图

Fig. 2 Flow chart of LQG controller based on SOA optimization

3.2 悬架系统仿真结果及分析

设 SOA 算法的搜索者个体数 $n=1\ 000$, 最大迭代次数 $iter_{max}=1\ 000$, q_1, q_2, q_3 的搜索范围均为 $[1, 10^6]$. 为了验证半主动悬架性能的控制效果, 将其与被动悬架系统进行对比仿真, 仿真结果如图 4~7 所示.

通过人群搜索算法优化 LQG 控制器, 可得到 $q_1=214.988\ 4, q_2=5.003\ 8\times 10^5, q_3=8.101\ 9\times 10^5$. 与传统的悬架系统 LQG 控制方法相比, 该控制方法能够有效地解决控制过程中性能指标函数各权重不易确定的问题.

由图 4,5 可知: 与被动悬架相比, 半主动悬架车身加速度(\ddot{Z}_s)减幅明显, 且在低频范围内, 半主动悬架车身加速度功率谱密度(PSD)降幅较大. 由图 6,7 可知: 半主动悬架动挠度(Z_s-Z_u)变化曲线、轮胎动变形(Z_u-Z_q)变化曲线均为被动悬架相应曲线所包络, 因而其动挠度和轮胎动变形均有所减小.

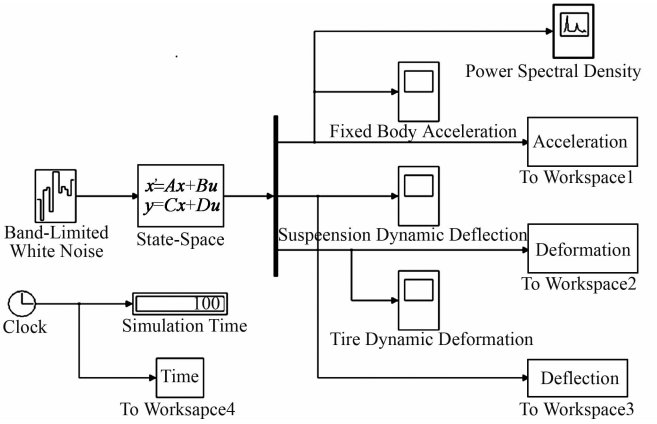


图 3 车辆半主动悬架系统仿真

Fig. 3 Vehicle semi-active suspension system simulation model

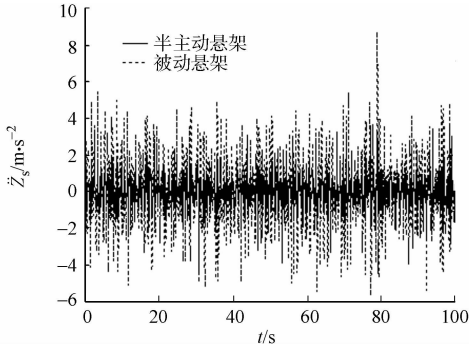


图 4 被动和半主动悬架的车身加速度变化曲线

Fig. 4 Curves of passive and semi-active suspension body acceleration

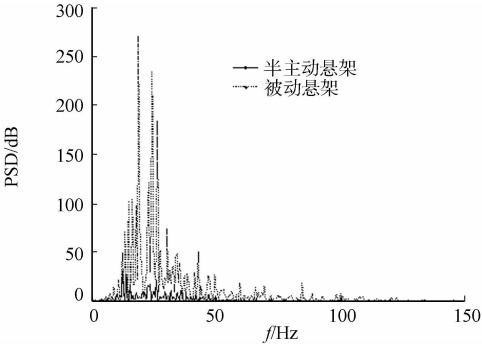


图 5 被动和半主动悬架的车身加速度功率谱密度曲线

Fig. 5 Curves of passive and semi-active suspension body acceleration power spectral density

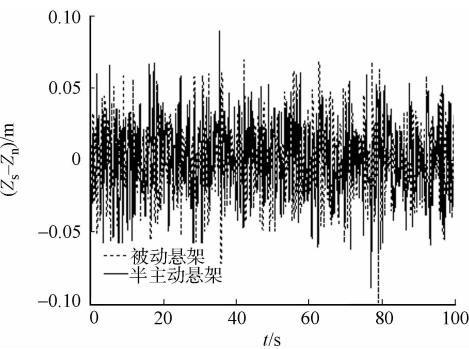


图 6 被动和半主动悬架的动挠度变化曲线

Fig. 6 Curves of passive and semi-active suspension working space

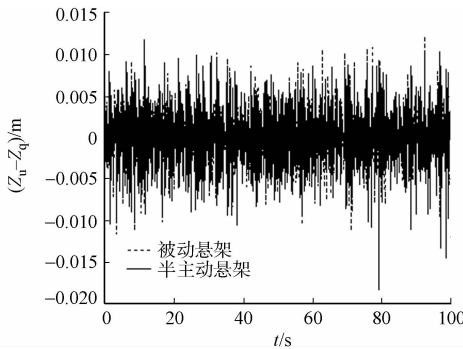


图 7 被动和半主动悬架的轮胎动变形变化曲线

Fig. 7 Curves of passive and semi-active suspension dynamic tire displacement

被动和半主动悬架性能指标数据对比, 如表 1 所示. 表 1 中: $RMS(BA)$ 为车身加速度均方根值; $RMS(SWS)$ 为悬架动挠度均方根值; $RMS(DTD)$ 为轮胎动变形均方根值; $abs(BA)_{max}$ 为车身加速度最大绝对值; $abs(SWS)_{max}$ 为悬架动挠度最大绝对值; $abs(DTD)_{max}$ 为轮胎动变形最大绝对值. 由表 1 可知: 半主动悬架性能指标相对于被动悬架的减幅依次为 $RMS(BA)$ 和 $abs(BA)_{max}$ 分别下降了 61.68%, 61.50%; $RMS(SWS)$ 和 $abs(SWS)_{max}$ 分别减小了 4.17%, 13.07%; $RMS(DTD)$, $abs(DTD)_{max}$ 则分别下降了 9.38% 和 31.46%.

表 1 被动与半主动悬架性能指标数据对比
Tab. 1 Comparison of passive and semi-active suspension performance index data

性能指标	$\text{RMS(BA)}/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	$\text{RMS(SWS)}/\text{m}$	$\text{RMS(DTD)}/\text{m}$	$\text{abs(BA)}_{\text{max}}/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	$\text{abs(SWS)}_{\text{max}}/\text{m}$	$\text{abs(DTD)}_{\text{max}}/\text{m}$
被动悬架	1.841 3	0.024 0	0.003 2	8.541 3	0.103 3	0.021 3
半主动悬架	0.705 5	0.023 0	0.002 9	3.288 1	0.089 8	0.014 6

综上所述,与未施加任何控制的被动悬架系统相比,采用基于 SOA 算法优化 LQG 控制的半主动悬架系统,有效地降低了车身的垂直振动,减少了限位块冲击车身、轮胎跳离地面的可能性,从而改善了车辆的平顺性和乘坐舒适性。

4 结束语

针对某款乘用车悬架系统,建立 1/4 车辆 2 自由度半主动悬架动力学模型.采用人群搜索算法优化半主动悬架系统性能指标函数的权重,解决了函数中各权重不易确定的问题,并利用 LQG 最优控制算法对半主动悬架系统的阻尼力进行控制,结合 B 级路面工况进行对比仿真分析.结果表明,与被动悬架系统相比,采用该控制方法可以减小车身加速度、悬架动挠度及轮胎动变形,有效地降低了车身的垂向振动,减少了限位块冲击车身、轮胎跳离地面的可能性,对于提高汽车的平顺性和乘坐舒适性具有一定的作用。

参考文献:

[1] 赵树恩,李玉玲. 汽车整车半主动悬架模块化并联模糊控制[J]. 计算机仿真,2013,30(5):143-145.

[2] 严天一,闫海敬,侯兆萌,等. 车辆半主动悬架粒子群模糊混合控制策略[J]. 农业机械学报,2013,44(8):1-8.

[3] 么鸣涛,李钊,顾亮. 基于微分几何法的半主动油气悬架 LQR 控制[J]. 北京理工大学学报,2011,31(5):519-523.

[4] 赵亮,文桂林,韩旭,等. 基于磁流变阻尼器的车辆半主动悬架最优控制的研究[J]. 汽车工程,2008,30(4):340-344.

[5] 孟杰,陈庆樟,张凯. 基于模拟退火算法的汽车悬架最优控制研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2013,32(3):497-501.

[6] 罗鑫源,杨世文. 基于 AHP 的车辆主动悬架 LQG 控制器设计[J]. 振动与冲击,2013,32(2):102-106.

[7] 喻凡,林逸. 车辆系统动力学[M]. 北京:机械工业出版社,2008:183-187.

[8] 闫光辉,关志伟,杜峰,等. 车辆主动悬架自适应 LQG 控制策略研究[J]. 机械科学与技术,2014,33(3):432-433.

[9] 兰波,喻凡. 车辆主动悬架 LQG 控制器的设计与仿真分析[J]. 农业机械学报,2004,35(1):14-16.

[10] 桑楠,白玉,李玉芳. 基于遗传算法的汽车主动悬架控制器优化设计[J]. 机械科学与技术,2013,32(9):1401-1403.

[11] 余胜威,曹中清. 基于人群搜索算法的 PID 控制器参数优化[J]. 计算机仿真,2014,31(9):347-351.

[12] 史辉,王峰,郁磊,等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011:50-56.

[13] 李献,骆志伟. 精通 MATLAB/Simulink 系统仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2015:524-526.

[14] DAI Chaohua, ZHU Yunfang, CHEN Weirong. Seeker optimization algorithm[C]//Proc 2006 Inter Conf Computational Intelligence and Security. Guangzhou:IEEE Press,2006:225-229.

(责任编辑:钱筠 英文审校:崔长彩)