

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202010021



采用 AHP-KCA 的主动悬架  
LQG 控制器设计

赵健, 柳江, 李明星, 袁策

(青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520)

**摘要:** 为提高汽车用户的乘坐舒适性,进行基于层次分析法(AHP)和 K 均值聚类算法(KCA)的主动悬架控制研究.首先建立 2 自由度主动悬架模型,设计以悬架性能指标为目标函数的线性二次高斯(LQG)控制器;然后,利用 AHP 求得一组性能指标权值,并根据这组权值在 MATLAB 软件中得到 225 组新的权值;最后,在 MATLAB/Simulink 软件中进行主、被动悬架性能的仿真,通过 KCA 对权值分类分级.仿真结果表明:与被动悬架相比,采用 AHP-KCA 结合算法得到的主动悬架性能有所提高,尤其是车辆乘坐舒适性;与仅利用 AHP 相比,AHP-KCA 结合算法进一步提升车辆悬架的性能,证明了其优越性.

**关键词:** 主动悬架;线性二次高斯(LQG)控制器;加权系数;层次分析法(AHP);K 均值聚类算法(KCA)

**中图分类号:** U 463      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2021)06-0732-08

Design of LQG Controller for Active Suspension  
Using AHP-KCA

ZHAO Jian, LIU Jiang, LI Mingxing, YUAN Ce

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

**Abstract:** In order to improve the riding comfort of automobile users, the active suspension control based on analytic hierarchy process (AHP) and K-means clustering algorithm (KCA) were studied. A two-degree-of-freedom active suspension model was established, and a linear-quadratic-Gaussian (LQG) controller with suspension performance indexes as objective function was designed. By using AHP, a group of performance indexes weights were obtained, according to which 225 groups of new weights were obtained in MATLAB software. The performance simulation of active and passive suspension was carried out in MATLAB/Simulink software respectively. The weights were classified and graded by KCA. The simulation results show that, compared with passive suspension, the performance of active suspension obtained by the combination of the two algorithms is improved, especially the riding comfort of the vehicle; compared with only using AHP, the combination of the two algorithms further improves the performance of vehicle suspension, which proves its superiority.

**Keywords:** active suspension; linear-quadratic-Gaussian (LQG) controller; weighting coefficient; analytic hierarchy process (AHP); K-means clustering algorithm (KCA)

汽车被动悬架存在构型相同则性能特征必然相同的桎梏,不能适应多变的路况,因而主动悬架成为研究的重点.控制策略是主动悬架研究的核心,不同的控制算法应用在悬架上取得的效果有所不同<sup>[1-4]</sup>.

**收稿日期:** 2020-10-15  
**通信作者:** 柳江(1976-),男,副教授,博士,博士生导师,主要从事车辆系统动力学研究. E-mail: zeh@163.com.  
**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51575288)

线性二次高斯(linear-quadratic-Gaussian,LQG)算法作为一种较完善的控制算法,在悬架减振方面应用广泛,主动悬架控制器常采用该算法提升车辆性能.LQG 控制器设计的关键在于各性能指标加权系数的选取,文献[5-7]采用试凑法确定加权系数,原理简单,但调试加权系数耗费时间较长且适应性较差.文献[8-9]利用层次分析法(analytic hierarchy process,AHP)求出 2 自由度和 4 自由度主动悬架各性能指标的加权系数.文献[10-11]利用遗传算法(genetic algorithm,GA)求出 2 自由度和 7 自由度主动悬架性能指标的加权系数.李鑫军等<sup>[12]</sup>将 AHP 和 GA 相结合,求得加权系数.但上述文献中,AHP 存在主观片面性较多、稳定性较差的缺点;而 GA 的问题则是初始搜索范围较差,未能考虑各性能指标数量级的差异.因此,本文提出一种新的权值优化方案,将 K 均值聚类算法(K-means clustering algorithm,KCA)引入到加权系数的优化中,得出更合适的加权系数,从而提升车辆悬架的性能.

## 1 2 自由度车辆模型

### 1.1 路面模型的建立

滤波白噪声生成随机路面输入模型为

$$\dot{z}_q = -2\pi f_0 z_q + 2\pi \sqrt{G_0 u_0} \omega. \tag{1}$$

式(1)中: $z_q$  为路面位移; $m$ ;  $f_0$  为下截止的频率,Hz; $G_0$  为路面的不平度系数, $\text{m}^3 \cdot \text{r}^{-1}$ ; $u_0$  为车辆的前进速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; $\omega$  为数学期望为 0 的高斯白噪声.

### 1.2 2 自由度 1/4 车辆悬架模型的建立

建立 2 自由度 1/4 车辆模型,如图 1 所示.图 1 中: $m_b$  为车身质量; $m_w$  为车轮质量; $k_s$  为悬架刚度; $k_t$  为轮胎刚度; $f$  为悬架主动控制力; $c_s$  为悬架阻尼系数; $z_b$  为车身位移; $z_w$  为车轮位移; $z_q$  为路面位移.

车辆模型的动力学方程为

$$m_b \ddot{z}_b = k_s(z_w - z_b) + c_s(\dot{z}_w - \dot{z}_b) + f. \tag{2}$$

$$m_w \ddot{z}_w = k_t(z_q - z_w) - k_s(z_w - z_b) - c_s(\dot{z}_w - \dot{z}_b) - f. \tag{3}$$

### 1.3 系统状态方程

1/4 车辆模型的车身加速度、轮胎动位移和悬架动行程是主要的悬架性能指标,因此系统的状态变量  $\mathbf{X}$  和输出变量  $\mathbf{Y}$  选取为

$$\mathbf{X} = \mathbf{Y} = [z_b \quad z_w \quad \dot{z}_b \quad \dot{z}_w \quad z_q]^T, \tag{4}$$

则系统的状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{E}\mathbf{W}, \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{D}\mathbf{U}. \end{cases} \tag{5}$$

式(4),(5)中: $\mathbf{A}$  为系统状态矩阵,  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{-c_s}{m_b} & \frac{c_s}{m_b} & \frac{-k_s}{m_b} & \frac{k_s}{m_b} & 0 \\ \frac{c_s}{m_w} & \frac{-c_s}{m_w} & \frac{k_s}{m_w} & \frac{-k_t - k_s}{m_w} & \frac{k_s}{m_w} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2\pi f_0 \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{B}$  为控制输入矩阵,  $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_b} & \frac{-1}{m_w} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$ ;  $\mathbf{E}$  为路面输入矩阵,  $\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2\pi n_0 \sqrt{G_0 u_0} \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{C}$  为输出矩阵,  $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{D}$

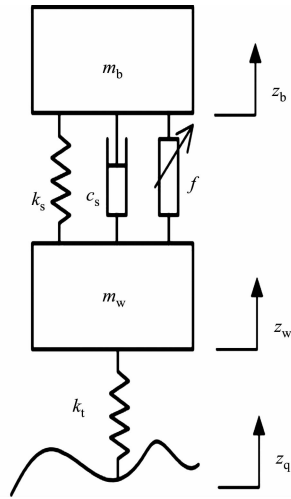


图 1 2 自由度 1/4 车辆模型  
Fig. 1 Two-degree-of-freedom 1/4 vehicle model

为传递矩阵,  $D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$ ; 控制力向量  $U = F$ ; 高斯白噪声输入向量  $W = w$ .

2 主动悬架 LQG 控制器的设计

在汽车行驶过程中,既要考虑车辆平顺性,又要保证行车安全性,同时还要避免悬架动挠度过大.因此,性能指标函数  $J$  表达式为

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \{q_1 \dot{z}_b^2 + q_2 (z_b - z_w)^2 + q_3 (z_w - z_q)^2\} dt. \tag{6}$$

式(6)中:  $q_1, q_2$  和  $q_3$  分别是各性能指标的加权系数.

根据最优控制理论,式(6)为

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (X^T Q X + U^T R U + 2 X^T N U) dt. \tag{7}$$

式(7)中:  $Q, R$  分别是状态变量及控制变量的加权矩阵;  $N$  是交叉项的权重.

由 MATLAB 软件中的 lqr 函数求出最优增益反馈矩阵  $K$ , 即

$$[K, S', E] = \text{lqr}(A, B, Q, R, N). \tag{8}$$

式(8)中:  $S'$  为 Riccati 方程解;  $E$  为系统特征值.

根据状态变量  $X$  在时刻  $t$  的瞬时值  $X(t)$ , 可求出作动器在时刻  $t$  的控制力  $U(t)$  为

$$U(t) = -KX(t). \tag{9}$$

3 基于 AHP 的控制器的仿真分析

3.1 基于 AHP 的确定加权系数

3.1.1 同尺度量化比例系数 主动悬架的性能指标间存在较大的数量级差距,为了能同一化比较,令车身加速度同尺度量化比例系数  $\beta_1 = 1$ , 求出被动悬架仿真后的各性能指标统计数据  $\sigma_i^2$ , 则悬架动行程和轮胎动位移的同尺度量化比例系数  $\beta_i$  为

$$\sigma_1^2 \times \beta_1 = \sigma_i^2 \times \beta_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \tag{10}$$

3.1.2 主观加权比例系数 1) 构造性能指标间的判断矩阵  $H$ , 设  $h_{i,j}$  为指标  $i$  对指标  $j$  的重要性比值,  $h_{i,j}$  性能指标间重要性比值如下: 同等重要为 1; 略重要为 3; 比较重要为 5; 重要为 7; 很重要为 9. 若指标间重要性比值介于 2 个比值之间, 则可依次取 2, 4, 6, 8.

构造性能指标间的判断矩阵  $H = (h_{i,j})_{n \times n} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,n} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{n,1} & h_{n,2} & \cdots & h_{n,n} \end{bmatrix}.$

2) 求解各性能指标的权重排序向量  $W$ , 根据判断矩阵  $H$ , 可知  $H$  中各行元素的乘向量  $M$  为

$$\left. \begin{aligned} M &= [M_1, M_2, \dots, M_n]^T, \\ M_i &= \prod_{j=1}^n h_{i,j}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

$M$  的  $n$  次方根向量  $\overline{W}$  为

$$\left. \begin{aligned} \overline{W} &= [\overline{W}_1, \overline{W}_2, \dots, \overline{W}_n]^T \\ \overline{W}_i &= \sqrt[n]{M_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

$\overline{W}$  的正则向量  $W$  为

$$W = \overline{W} / \sum_{i=1}^n \overline{W}_i, \quad i = 1, 2, 3. \tag{13}$$

3)  $H$  的最大特征值  $\lambda_{\max}$  及一致性检验 CR 分别为

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{\max} &= \sum_{i=1}^n \frac{(\boldsymbol{H}\boldsymbol{W})_i}{nW_i}, \quad i=1,2,\cdots,n, \\ \text{CR} &= \frac{\lambda_{\max} - n}{\text{RI}(n-1)}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式(14)中:RI 是  $\boldsymbol{H}$  的随机一致性指标.

当  $n=3$  时,  $\text{RI}=0.52$ , 将此值代入式(14), 求解 CR. 若  $\text{CR}<0.1$ , 则通过一致性检验, 否则, 需要对矩阵  $\boldsymbol{H}$  进行一致性校正<sup>[13]</sup>.

4) 求解主观加权比例系数, 以车身加速度为主要优化目标, 令其主观加权系数  $\gamma_1$  为 1, 则其他性能指标的主观加权系数为

$$W_1/\gamma_1=W_i/\gamma_i, \quad i=1,2,\cdots,n. \quad (15)$$

3.1.3 最终加权系数 由式(10)得出的同尺度量化比例系数  $\beta_i$  及由式(15)得到的主观加权比例系数  $\gamma_i$  求得悬架各性能指标的最终加权系数  $q_i$ , 即

$$q_i=\beta_i\times\gamma_i, \quad i=1,2,\cdots,n. \quad (16)$$

3.2 车辆模型的仿真输入参数

以某轿车为研究对象, 车辆模型有关参数<sup>[14]</sup>如表 1 所示.

表 1 车辆模型仿真输入参数

Tab. 1 Input parameters of vehicle model simulation

参数	数值	参数	数值
$m_b/\text{kg}$	320	$c_s/\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	1 000
$m_w/\text{kg}$	40	$u_0/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	20
$k_s/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	2 000	$f_0/\text{Hz}$	0.1
$k_t/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	20 000	$G_0/\text{m}^3\cdot\text{r}^{-1}$	$256\times10^6$

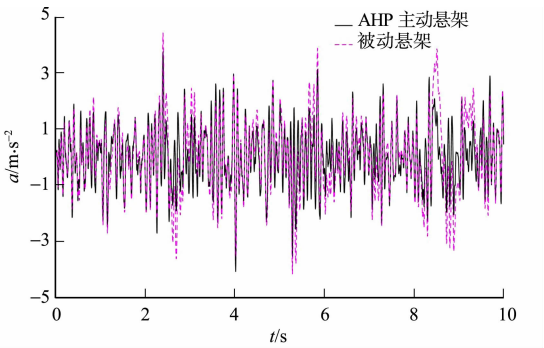
3.3 基于 AHP 的 LQG 控制器的仿真与分析

在 MATLAB/Simulink 软件中建立悬架仿真模型, 选择 C 级路面作为道路输入, 仿真时间( $t$ )为 10 s,  $\boldsymbol{H}=$

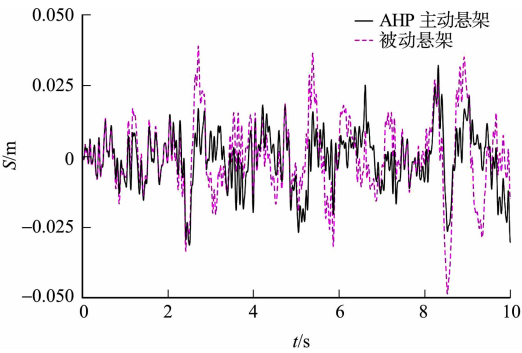
$$\begin{bmatrix} 1 & 9 & 1 \\ \frac{1}{9} & 1 & \frac{1}{7} \\ 1 & 7 & 1 \end{bmatrix}.$$
由上述工况, 结合以车身加速度为主要

优化对象的原则, 将 3 个性能指标车身加速度( $a$ )、悬架动行程( $S$ )、轮胎动位移( $s$ )按照重要性排序, 构造基于 AHP 的主观加权判断矩阵  $\boldsymbol{H}$ .

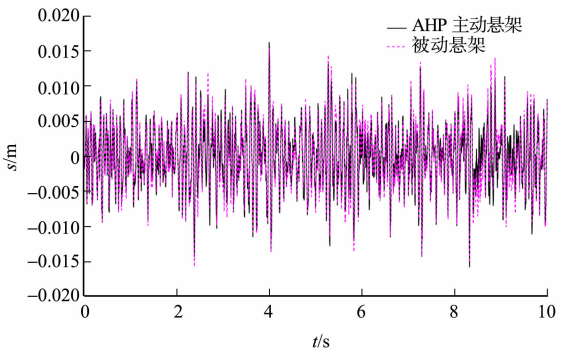
基于 AHP 优化的悬架性能仿真图, 如图 2 所示. 由



(a) 车身加速度



(b) 悬架动行程



(c) 轮胎动位移

图 2 基于 AHP 优化的悬架性能仿真图

Fig. 2 Simulation chart of suspension performance based on AHP optimization

判断矩阵  $\boldsymbol{H}$ , 再根据式(10)~(15)可得到 3 个性能指标的加权系数分别为  $q_1=1, q_2=1\ 130, q_3=$

73 445. 根据表 1 车辆模型输入仿真参数和 3 个加权系数,运行 MATLAB/Simulink 软件中的仿真模型. 被动悬架的车身加速度、悬架动行程、轮胎动位移均方根值分别为 1.266 9,0.012 4,0.004 5;采用 AHP 优化后的主动悬架的车身加速度、悬架动行程、轮胎动位移均方根值分别为 1.096 4, 0.010 2, 0.004 7.

由图 2 可知:相较于被动悬架,采用 AHP 主动悬架车身加速度的均方根值有明显的降低,减小了 13.46%,有效地改善了汽车平顺性;悬架动行程减小 17.74%,且完美符合设计的要求范围(±100 mm),降低了撞击悬架限位的概率;但是主、被动悬架的轮胎动位移的均方根值相差不大,说明主动悬架对轮胎动位移没有明显的控制效果. 因此,LQG 控制器的设计符合要求.

## 4 基于 KCA 的控制器的仿真分析

### 4.1 KCA 样本的确定

为保证车身加速度的优化效果,令车身加速度的加权系数为  $q_1=1$ ,  $q_2, q_3$  为自变量. 在 MATLAB 中,根据 AHP 提供的加权系数,采用 Random 随机函数进行仿真实验. 设  $q_2$  范围为[1 000,2 000],  $q_3$  范围为[50 000,100 000],在此范围内各随机取 15 个数值.

加权系数  $q_2, q_3$  的随机取值在 MATLAB 软件表示为

$$\left. \begin{aligned} q_{2i} &= \text{round}(1\ 000 + 1\ 000 \times \text{rand}(3,5)), & i &= 1,2,3,\cdots,15, \\ q_{3i} &= \text{round}(50\ 000 + 50\ 000 \times \text{rand}(3,5)), & i &= 1,2,3,\cdots,15. \end{aligned} \right\}$$

(17)

运行函数后,得到

$$\left. \begin{aligned} q_{2,i} &= (1\ 505, 1\ 067, 1\ 616, 1\ 715, 1\ 853, 1\ 949, 1\ 179, 1\ 846, 1\ 026, \\ &\quad 1\ 258, 1\ 415, 1\ 607, 1\ 595, 1\ 373, 1\ 449), & i &= 1,2,3,\cdots,15, \\ q_{3,i} &= (68\ 096, 66\ 331, 74\ 462, 93\ 415, 58\ 975, 65\ 776, 52\ 401, 74\ 037, \\ &\quad 88\ 563, 73\ 858, 99\ 474, 71\ 790, 98\ 255, 55\ 691, 97\ 335), & i &= 1,2,3,\cdots,15. \end{aligned} \right\}$$

(18)

将  $q_{2,i}, q_{3,i}$  正交组合,  $q_1=1$ ,得到 225 组加权系数,代入到 LQG 控制器中进行仿真实验,得到主动悬架 3 个性能指标的均方根值  $\text{RMS}(a), \text{RMS}(S), \text{RMS}(s)$ . 记录仿真结果并按序编号,将其作为 KCA 聚类分析的样本,得到样本数据.

### 4.2 基于 KCA 的样本数据仿真与分析

4.2.1 KCA 的设计与编程 KCA 的输入包含  $N$  个数据集  $x$  和类簇的数目  $k$ ;输出为  $k$  个类簇及每个类簇包含的样本个数及编号<sup>[15]</sup>.

算法流程,如图 3 所示,具体有如下 5 个步骤.

- 1) 初始化.  $X$  为给定包含  $N$  个数据的集合; $K$  为聚类的类数;初始聚类中心为在  $X$  中随机选取  $k$  个对象.
- 2) 设定迭代终止条件. 通常设置最大循环次数作为终止条件.
- 3) 更新样本对象所属类. 根据距离准则将数据对象分配到距离最接近的类.
- 4) 更新类的中心位置. 将每一类的平均向量作为下次迭代的聚类中心.
- 5) 重复步骤 3)~4),当满足步骤 2)中的迭代终止条件时,完成聚类.

4.2.2 KCA 的聚类结果分析 在 MATLAB 软件中编写并运行 KCA 程序,根据悬架性能指标相似度的不同,样本划分为 9 类,得到聚类结果如图 4 所示.

由于主动悬架 3 个性能指标数量级和单位的差异性,无法直接叠加,为了获得 LQG 的综合控制效果,将悬架的 3 项指标归一化处理,得到综合控制指标  $L$ ,即

$$L = \sum_{i=1}^3 \frac{\text{RMS}[\Delta_i(X)]}{\text{RMS}[\Delta_{i,p}(X)]}.$$

(19)

式(19)中: $\Delta_i$  是主动悬架的性能指标;下标  $p$  是指被动悬架.

KCA 聚类结果均值,如表 2 所示. 表 2 中: $M(i) (i=1,2,3,\cdots,9)$  为  $i$  类均值; $n$  为样本数.

由表 2 可知如下 5 点. 1) 对象最多的一类有 32 个样本,最少的一类包含 12 个样本. 2) 第 2,9 类的  $L$  最小,数值分别为 2.616 5,2.632 0,综合控制效果最好. 这两类的特征是  $\text{RMS}(a)$  较低,车辆乘坐舒

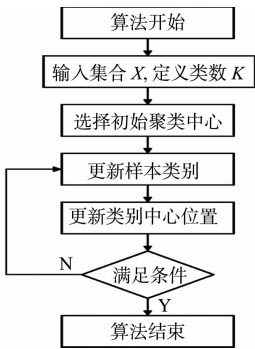


图 3 KCA 聚类流程

Fig. 3 Clustering process of KCA

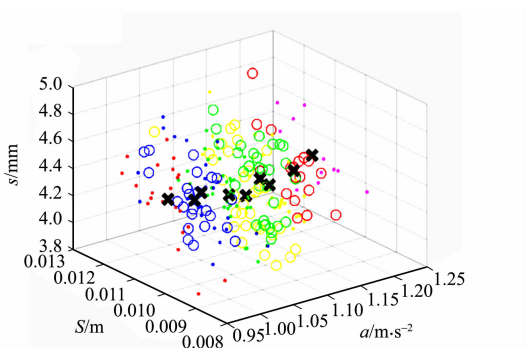


图 4 聚类结果图

Fig. 4 Clustering result graphs

表 2 KCA 聚类结果均值

Tab. 2 KCA clustering mean result

参数	M(1)	M(2)	M(3)	M(4)	M(5)	M(6)	M(7)	M(8)	M(9)
$n$	27	21	37	24	12	31	18	32	23
$a/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	1.127 2	0.975 2	1.052 1	1.027 7	1.193 9	1.077 6	1.157 5	1.114 1	1.005 0
S/m	0.010 5	0.010 5	0.010 2	0.010 5	0.010 5	0.010 2	0.010 3	0.010 2	0.010 4
s/m	0.004 3	0.004 4	0.004 4	0.004 4	0.004 4	0.004 3	0.004 4	0.004 4	0.004 4
$L$	2.713 8	2.616 5	2.653 0	2.658 0	2.789 2	2.650 4	2.744 3	2.702 0	2.632 0

适性相较于被动悬架改善较为明显. 这两类权值系数取值分别为  $q_{2,2}=1\ 435, q_{3,2}=58\ 353; q_{2,9}=1\ 373, q_{3,9}=59\ 605$ , 所选轿车模型悬架动行程的加权系数取值范围为  $1\ 350\sim1\ 450$ , 轮胎动位移的加权系数取值范围为  $58\ 300\sim59\ 700$  时, 车辆悬架获得最优性能. 3) 第 3, 4, 6 类的  $L$  居中, 悬架性能表现较好; 第 1, 5, 7, 8 类的  $L$  值最大, 数值均超过  $2.700\ 0$ , 第 5 类  $L$  值接近  $2.800\ 0$ , 悬架控制效果最差. 此时, 权值系数  $q_2$  为  $1\ 550\sim1\ 750, q_3$  为  $79\ 000\sim93\ 000$ , 表明悬架动行程、轮胎动位移在加权系数都取较大值时, 改善较大, 但综合控制效果反而有所降低. 4)  $a$  和  $L$  的改善效果具有一致性, 两者成正相关.

车身加速度直观地体现汽车平顺性, 根据 RMS( $a$ ) 的均值, 再结合  $L$ , 对 9 类数据进行分级处理, 作出 AHP-KCA 分级表, 如表 3 所示.

表 3 是以机器学习替代专家主观选择的结果, 对于不同车型都可以用 AHP-KCA 算法分析处理, 为 LQG 控制器设计时权值的选择提供数据

表 3 AHP-KCA 主动悬架分级表

Tab. 3 AHP-KCA active suspension classification table

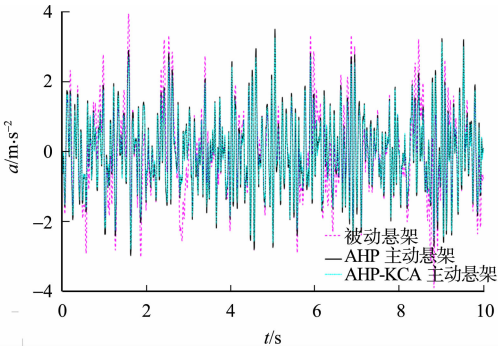
等级	类别	$q_2$	$q_3$
A	2, 9	1 350~1 450	58 300~59 700
B	3, 4, 6	1 450~1 550	60 000~79 000
C	1, 5, 7, 8	1 550~1 750	79 000~93 000

框架. 从 A 级加权系数中选出控制效果最好的一组数据,  $q_2=1\ 415, q_3=59\ 300$ . 由表 3 可知: 9 类样本数据分为 3 级, 其中, 第 2, 9 类为 A 级, 控制效果最佳; 第 3, 4, 6 类为 B 级, 控制效果较好; 第 1, 5, 7, 8 类为 C 级, 控制效果差, 但相较于被动悬架, 这 3 级悬架性能都有所提升.

5 基于 AHP-KCA 主动悬架控制器的仿真分析

节 3 通过 AHP 求出了一组加权系数, 在此基础上, 节 4 利用 KCA 确定了另一组最优加权系数. 结合这 2 组加权系数, 运行 Matlab/Simulink 软件中的仿真模型, 便可得到被动悬架与基于 2 种算法的主动悬架各性能仿真图, 如图 5 所示.

由图 5(a)可知: 相较于被动悬架, 主动悬架显著降低了  $a$  的幅值, 改善汽车的乘坐舒适性. 由图 5(b)可知:  $S$  明显的减小有效降低悬架击穿概率, 使悬架工作空间得到更充分的利用. 由图 5(c)可知: 采用 AHP 的主动



(a) 车身加速度



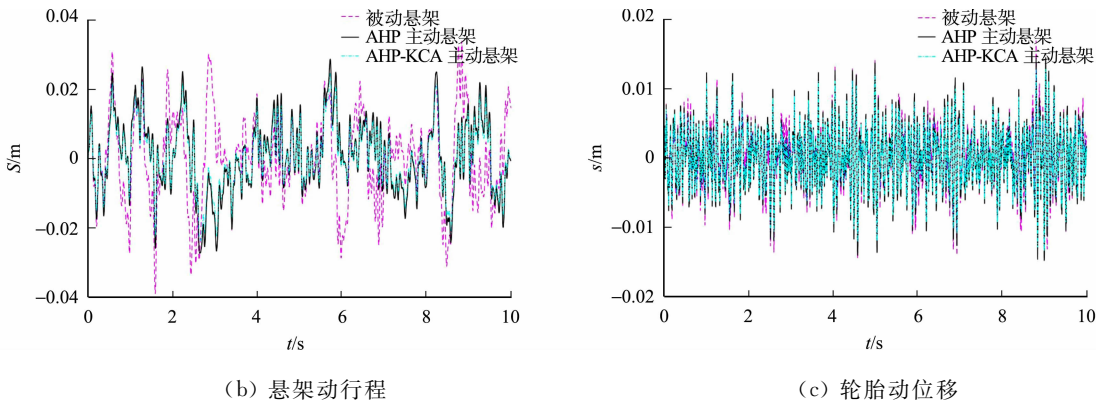


图 5 基于 AHP-KCA 算法优化的悬架性能仿真图

Fig. 5 Simulation chart of optimization suspension performance based on AHP-KCA algorithm

悬架对  $s$  的控制效果不佳,但采用 AHP-KCA 的主动悬架降低  $s$ ,改善行车安全性.

为了量化分析,各性能指标均方根值,如表 4 所示.表 4 中: $\eta_1$  为 AHP 主动悬架性能指标变化率; $\eta_2$  为 AHP-KCA 主动悬架性能指标变化率.

表 4 各性能指标均方根值  
Tab. 4 RMS of each performance index

性能指标	$M(\text{被动悬架})$	$M(\text{AHP 主动悬架})$	$M(\text{AHP-KCA 主动悬架})$	$\eta_1 / \%$	$\eta_2 / \%$
$a / \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	1.266 9	1.096 4	1.013 1	-13.46	-20.03
$S / \text{m}$	0.012 4	0.010 2	0.009 3	-17.74	-25.00
$s / \text{m}$	0.004 5	0.004 7	0.004 1	4.40	-8.90

由表 4 可知:相较于被动悬架,2 种算法设计的主动悬架均有效降低  $a, S$  的均方根值,且减小幅度都超过 10.00%,验证了 AHP 比较矩阵中比值选择的合理性;AHP-KCA 主动悬架比单一 AHP 主动悬架改善幅度更大,幅值减少超过 20.00%,虽然 AHP 主动悬架对  $s$  没有起到积极效果,但 AHP-KCA 主动悬架降低  $s$ ,减少幅度为 8.90%,证明 AHP-KCA 结合算法的优越性.

为了验证 AHP-KCA 算法的可靠性,将 AHP-KCA 的仿真结果与已有文献作对比,对比结果如表 5 所示.表 5 中: $\eta_3$  为  $a$  的相对误差率; $\eta_4$  为  $S$  的相对误差率; $\eta_5$  为  $s$  的相对误差率.

表 5 仿真结果对比  
Tab. 5 Comparison of simulation results

对比文献	$a / \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	$\eta_3 / \%$	对比文献	$S / \text{m}$	$\eta_4 / \%$	对比文献	$s / \text{m}$	$\eta_5 / \%$
文中	1.013 1	—	文中	0.009 3	—	文中	0.004 1	—
文献[16]	1.210 0	16.27	文献[18]	0.009 1	2.20	文献[19]	0.004 0	2.50
文献[17]	1.065 3	4.90	文献[16]	0.090 0	3.33	文献[20]	0.003 8	7.89

由表 5 可知:文中实验数据与已有文献实验数据的相对误差均较小,其中, $a$  与文献[16]的实验数据误差为 16.27%, $S$  与文献[18]的实验数据相对误差为 2.20%;与其他文献的仿真结果相比,文中相对误差也较小,3 个性能指标的相对误差均在 8%以下.因此,采用 AHP-KCA 算法的主动悬架起到不错的控制效果.

6 结论

- 1) 在传统 LQG 算法基础上,增加 AHP 算法改善悬架的控制效果,并进一步引入 KCA 聚类,仿真结果证明:机器学习替代专家系统的方法是可行的,同时,其对于其他的基于经验的悬架控制算法也有一定的参考价值.
- 2) 与被动悬架相比,采用 AHP-KCA 算法设计的 LQG 控制器,能显著提升汽车悬架性能(3 个指标分别降低了 20.03%,25.00%,8.90%).同时,将文中的仿真结果与其他文献的仿真或实验结果进行对比,相对误差均较小,证明了仿真结果的准确度,证明了 AHP-KCA 算法的可行性.
- 3) AHP-KCA 算法给出了包含 225 组加权系数及悬架响应特性的数据集,并利用 KCA 分类分级,

为 LQG 控制器设计中加权系数的确定提供了选择框架和理论指导.

### 参考文献:

- [1] 龙金莲,张玉分,卢家喧,等. 汽车主动悬架 LQR 控制器平顺性控制仿真[J]. 计算机仿真,2018,35(4):102-106. DOI:10.3969/j.issn.1006-9348.2018.04.021.
- [2] CHEN Shian,WANG Juncheng,YAO Ming,*et al.* Improved optimal sliding mode control for a non-linear vehicle active suspension systems[J]. Journal of Sound and Vibration,2017,395:1-25. DOI:10.1016/j.jsv.2017.02.017.
- [3] NING Donghong,SUN Shuaishuai,ZHANG Fei,*et al.* Disturbance observer based Takagi-Sugeno fuzzy control for an active seat suspension[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2017,93:515-530. DOI:10.1016/j.ymssp.2017.02.029.
- [4] 王青云,王芃,袁姝,等. 基于磁流变材料的汽车悬架半主动控制[J]. 科学技术与工程,2018,18(1):133-138. DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2018.01.023.
- [5] 刘兴亚,韩振南. 关于车辆主动悬架稳定性控制系统研究[J]. 计算机仿真,2016,33(11):148-151. DOI:10.3969/j.issn.1006-9348.2016.11.031.
- [6] 兰波,喻凡,刘娇蛟. 主动悬架 LQG 控制器设计[J]. 系统仿真学报,2003,15(1):138-140,153. DOI:10.3969/j.issn.1004-731X.2003.01.039.
- [7] 汤靖,高翔. 基于最优控制的四自由度汽车主动悬架控制器[J]. 农业机械学报,2005,36(4):9-12. DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2005.04.003.
- [8] 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. DOI:10.3969/j.issn.1000-3835.2013.02.020.
- [9] CHAI Lingjiang,SUN Tao,FENG Jinzhi,*et al.* Design of the LQG controller for active suspension system based on analytic hierarchy process[J]. Automotive Engineering,2010(10):5445-5460. DOI:10.1021/pr100678k.
- [10] 孟杰,张凯,焦洪宇. 基于遗传算法优化的汽车主动悬架 LQG 控制器的设计[J]. 机械科学与技术,2013,32(6):914-918.
- [11] 谢伟,赵波,蒋培露. 基于遗传算法的主动悬架最优控制研究[J]. 农业装备与车辆工程,2019,57(8):78-81. DOI:10.3969/j.issn.1673-3142.2019.08.019.
- [12] 李鑫军,柳江,付延轩,等. 基于 AHP-GA 的主动悬架 LQG 控制器设计[J]. 现代制造工程,2019(10):34,70-79.
- [13] 喻凡,林逸. 汽车系统动力学[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2017.
- [14] 杨绪兵,陈松灿,杨益民. 层次分析法中整体一致性判别及校正[J]. 武汉大学学报(理学版),2004,50(3):306-310. DOI:10.3321/j.issn:1671-8836.2004.03.011.
- [15] 冯晓蒲,张铁峰. 四种聚类方法之比较[J]. 微型机与应用,2010,29(16):1-3. DOI:10.3969/j.issn.1674-7720.2010.16.001.
- [16] 柴陵江,孙涛,冯金芝,等. 基于层次分析法的主动悬架 LQG 控制器设计[J]. 汽车工程,2010,32(8):712-718.
- [17] 杨水永,杜燕,秦洪懋. 主动悬架控制策略研究与试验验证[J]. 现代制造工程,2017(3):1-6. DOI:10.16731/j.cnki.1671-3133.2017.03.001.
- [18] 刘林涛. 基于半主动悬架的电动轮车辆振动控制研究[D]. 南昌:南昌大学,2019.
- [19] 陈双,宗长富. 车辆主动悬架的遗传粒子群 LQG 控制方法[J]. 汽车工程,2015,37(2):189-193.
- [20] 陈英. 车辆悬架系统的 LQG 控制器设计[D]. 西安:西安理工大学,2017.

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 崔长彩)