

基于 AHP-NSGA-III 的车辆悬架预瞄最优控制研究

陈晓育,华春蓉,易科虹,付裕,董大伟

(西南交通大学 先进驱动节能技术教育部工程研究中心,四川 成都 610031)

摘要:针对车辆主动悬架线性二次最优控制存在的权值系数确定问题,提出了一种结合主客观性能评价的权值系数选择方法——层次分析-三代遗传算法。利用层次分析法确定变量范围,以6个主动控制悬架性能指标为目标函数,利用三代遗传算法进行多目标优化并以控制力作为限制条件筛选出最优解。以半车模型为例,结合前轮预瞄信息与卡尔曼估计器估计的状态变量,设计预瞄最优控制器,并采用虚拟激励法直接在频域范围内进行求解。仿真结果表明,所提出的控制策略可改善车辆的乘坐舒适性。

关键词:车辆;预瞄最优控制;虚拟激励法;层次分析法;NSGA-III

中图分类号:U463.33 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)01-0146-04

Research on Preview Optimal Control of Suspension Based on AHP-NSGA-III

CHEN Xiaoyu, HUA Chunrong, YI Kehong, FU Yu, DONG Dawei

(Engineering research center of advanced driving energy-saving technology, Ministry of education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Aiming at the problem existing in determining the weight matrix of linear quadratic optimal control, a coefficient selection method combined with subjective and objective evaluation based on analytic hierarchy process-three generation genetic algorithm (AHP-NSGA-III) is proposed. The analytic hierarchy process is used to determine the range of the variable. The performance indexes of the active suspensions are used as the objective functions. The NSGA-III is used for multi-objective optimization and the optimal solution is selected according to the condition of the control force limit. Taking the half-car model as an example, the front wheel preview information and the state variables estimated by the Kalman filter estimator are used to design the controller, and it is solved in the frequency domain by the pseudo excitation method. The simulation results show that the proposed control strategy can be used to improve ride comfort of the vehicle.

Keywords: vehicle; preview optimal control; pseudo excitation method; AHP; NSGA-III

0 引言

车辆主动悬架的控制算法是其核心技术之一^[1]。国内外学者相继提出包括天棚控制、最优控制、模糊控制、自适应控制、滑膜控制等主动悬架控制技术^[2-4]。

最优控制可以借助加权系数,对悬架各种性能指标进行综合考虑,因而在主动悬架中得到了广泛的应用^[5]。文献[6]、文献[7]分别在主观、客观上提出一种分工况权值确定方法。而在主动悬架的设计中,对于不同设计目的的车辆性能响应要求不同,因此主观因素与客观因素对于权重系数的设计都是至关重要的。

本文针对主动悬架线性二次最优控制中存在的权值系数确定问题,提出了一种结合主客观性能评价的权值系数选择方法(AHP-NSGA-III)。通过AHP方法赋予初始权重转化成变量区间,结合NSGA-III对主动悬架6个响应参数进行优化,并将此方法运用于带有卡尔曼估计器的预瞄最优主动控制悬架的设计中,利用虚拟激励法在频域范围内进行求解。仿真结果表明本文所提出的方法有效

改善了车辆的平顺性。

1 主动悬架动力学模型

建立1/2车辆行驶动力学模型,如图1所示。其中: M 为车身质量; I_c 为车身俯仰转动惯量; m_f 为前轮非簧载质量; k_c 为前悬架刚度; c_c 为前悬架阻尼; k_{rf} 为前轮胎刚度; m_r 为后轮非簧载质量; k_{rf} 为后悬架刚度; c_r 为后悬架阻尼; k_{ry} 为后轮胎刚度。 a 和 b 分别表示前后轴到车体质心的水平距离; x_{of} 、 x_{or} 为前后轮处路面不平度; u_f 、 u_r 为悬架作动器的控制力。

假定车辆的俯仰振动很小,则可建立车辆的动力学方程

$$M \ddot{x}_c = F_f + F_r \tag{1}$$

$$I_c \ddot{\theta} = F_f a - F_r b \tag{2}$$

$$m_f \ddot{x}_{1f} = k_{yf}(x_{of} - x_{1f}) - F_f \tag{3}$$

$$m_r \ddot{x}_{1r} = k_{yr}(x_{or} - x_{1r}) - F_r \tag{4}$$

其中:

基金项目:国家自然科学基金项目(51875482)

第一作者简介:陈晓育(1993—),男,福建漳州人,硕士研究生,研究方向为汽车噪声振动控制。

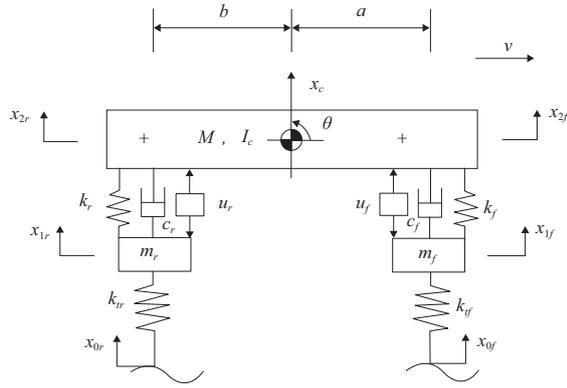


图 1 1/2 车辆主动悬架模型

$$F_f = c_f(\dot{x}_{1f} - \dot{x}_c - a\dot{\theta}) + k_f(x_{1f} - x_c - a\theta) + u_f \quad (5)$$

$$F_r = c_r(\dot{x}_{1r} - \dot{x}_c + b\dot{\theta}) + k_r(x_{1r} - x_c + b\theta) + u_r \quad (6)$$

其中: x_c 为车辆质心位移; θ 为车辆的俯仰角; x_{2f} 、 x_{2r} 为前、后簧载质量的位移; x_{1f} 、 x_{1r} 为前、后非簧载质量的位移。

考虑路面不平度和车辆行驶速度的影响,路面激励采用文献[8]所介绍的单边道路谱:

$$S_w(\omega) = \frac{1}{2\pi v} S_w(v) = \frac{R_r}{\omega^2}, R_r = 2\pi G_r v \quad (7)$$

其中: G_r 为路面不平度系数, v 为车辆的行驶速度, ω 表示圆频率。

假定前后轮运动轨迹完全相同,即它们所受路面激励仅相差一个固定时间 τ ,则:

$$x_{0r}(t) = x_{0f}(t - \tau), \tau = (a+b)/v \quad (8)$$

根据动力学方程响应指标可建立车辆运动的状态空间方程为

$$\dot{X} = AX + BU + DW \quad (9)$$

2 基于 AHP-NSGA-III 方法的主动悬架设计

2.1 基于卡尔曼估计的预瞄最优控制器设计

针对本文建立的 1/2 车辆悬架系统,取性能指标:

$$J = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{2T} \int_0^T E[\rho_1 \dot{x}_{2f}^2 + \rho_2 \dot{x}_{2r}^2 + \rho_3 (x_f - x_{2f})^2 + \rho_4 (x_r - x_{2r})^2 + \rho_5 (x_f - x_{0f})^2 + \rho_6 (x_r - x_{0r})^2] dt \quad (10)$$

其中 $\rho_1 - \rho_6$ 表示 6 个响应指标的加权系数。

将式(10)写成矩阵形式:

$$J = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{2T} \int_0^T E(X^T Q X + U^T R U + 2 X^T N U) dt \quad (11)$$

其中 Q 和 R 为时不变对称加权矩阵, N 为时不变加权矩阵。

为将前轮预瞄信息加入控制器中^[9],对式(8)进行拉普拉斯变换,并利用二阶 Pade 近似将其转换成状态空间方程,并将其扩展成含路面信息的系统状态空间方程为:

$$\frac{x_{0r}(s)}{x_{0f}(s)} = e^{-\tau s} \approx \frac{a_0 - a_1 s + a_2 s^2}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2}$$

写成矩阵后与式(9)组合扩阶得

$$\dot{\eta}_x = A_\eta \eta_x + B_\eta x_{0r}$$

$$\dot{X}_1 = A_1 X_1 + B_1 U + D_1 x_{0f} \quad (12)$$

$$J = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{2T} \int_0^T E(X_1^T Q_1 X_1 + U^T R U + 2 X_1^T N_1 U) dt \quad (13)$$

至此,通过对状态向量进行增维,预瞄控制问题转化为经典的 LQG 控制问题。由 LQG 控制理论可得最优控制力方程为

$$U = -K X_1 \quad (14)$$

其中

$$K = R^{-1} [B_1^T S + N_1^T] \quad (15)$$

S 为 Riccati 方程的解。

根据卡尔曼估计理论,考虑车辆传感器的布置情况,将车辆系统的量测值假定为前后悬架处车身加速度即 \dot{z}_4 、 \dot{z}_8 ,并考虑量测噪声 ψ_f 、 ψ_r 干扰,给出输出并将其写成状态空间方程可表示为:

$$y_f = \dot{z}_c + a \dot{\theta} + \psi_f, \quad y_r = \dot{z}_c - b \dot{\theta} + \psi_r \quad (16)$$

$$Y = C_1 X_1 + E_y U + W_1 \quad (17)$$

结合卡尔曼滤波器可表示成:

$$\hat{X}_1 = A_1 \hat{X}_1 + B_1 U + K_k (Y - C_1 \hat{X}_1 - E_y U) \quad (18)$$

$$K_k = P C_1^T V^{-1} \quad (19)$$

$$A_1 P + P A_1^T + W - P C_1^T V^{-1} C_1 P + F W F^T = 0 \quad (20)$$

2.2 AHP-NSGA-III 最优控制系数选择方法

a) 层次分析法确定权重范围

首先根据被动悬架在某一工况下的性能响应对 6 个设计参数 $\rho_1 - \rho_6$ 采取同尺度量化。以前悬架车身加速度为基准,按式(21)确定同尺度量化比例系数。

$$\beta_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_1} (i = 1, \dots, 6) \quad (21)$$

其中 σ_i 为 6 个被动悬架响应的均方根值。

根据车辆设计目标,运用 AHP 方法对指标之间的重要性做出最初的评判,假设前、后悬架的控制目标权重一样,初步选定参数的范围为:

$$\rho_{i\max} = \max(W(h_{ij})), \quad \rho_{i\min} = \min(W(h_{ij})) \quad (22)$$

其中: $W(h_{ij})$ 表示由层次分析法得到的权重; h_{ij} 的取值范围为 1, 2, ..., 9。

b) 基于 NSGA-III 算法的权值系数优化

以主动悬架 6 个响应均方根值与被动悬架的响应均方根值的比值作为目标函数,采用基于参考点的 NSGA-III 算法进行多目标优化^[10]。算法主要步骤如下:

1) 通过车辆预瞄最优控制求解得到的主/被动悬架 6 个响应均方根值构造 6 个目标函数

$$Z = \text{MOP} \left(\frac{\text{RMS}(x_{ia})}{\text{RMS}(x_{ip})} \right) (i = 1, \dots, 6) \quad (23)$$

其中 x_{ia} 、 x_{ip} 分别为主动、被动悬架的性能指标响应。

2) 在 AHP 挑选过后的权值系数范围内随机生成 N 个初始种群,通过随机选择,模拟二元交叉算子和多项式

变异,对种群进行迭代直到寻找到最优解。由当前亲本 P_t 通过交叉、遗传、变异生成新的种群 Q_t , 混合后得到规模为 $2N$ 的种群 $R_t = P_t \cup Q_t$ 。

3) 对种群 R_t 进行非支配选择得到相应的非支配层级,对于需要挑选的最后一个层级即 F_{k+1} 采用基于参考算子的方法对种群进行选择,将参考点与种群相关联,均匀地分布在标准超平面上。

4) 找出满足目标函数 Z 的最小值 z_i^{\min} 作为理想点集合,利用以下函数作用于目标函数寻找极值点:

$$f_i^*(x) = f_i(x) - z_i^{\min} \quad (24)$$

$$ASF(X, W) = \text{MAX}_{i=1, m} \frac{f_i^*(x)}{w^i} \quad (25)$$

利用极值点算出轴距,并进行归一化处理:

$$fn_i(x) = \frac{f_i^*(x)}{a_i} \quad (26)$$

5) 由此进行迭代,如果达到迭代条件,输出最后一代所有目标函数值以及权值系数。

3 控制器仿真

3.1 控制器仿真

本文采用虚拟激励法将固定随机振动分析转化成确定性谐波分析^[11],仿真车辆在随机路面激励下的系统响应,构造虚拟激励:

$$\tilde{f}(t) = \varphi \sqrt{S_r(\omega)} \exp(i\omega t) \quad (27)$$

其中 $i = \sqrt{-1}$ 。

$$\tilde{\dot{x}} = A \tilde{x} + D \tilde{f}(t) \quad (28)$$

得车辆在谐波激励下的稳定解为:

$$\tilde{x} = (i\omega I - A)^{-1} D \varphi \sqrt{S_r(\omega)} \exp(i\omega t) \quad (29)$$

3.2 仿真分析

取车辆参数为: $M = 730 \text{ kg}$, $I_c = 1230 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $m_f = 40 \text{ kg}$, $m_r = 35.5 \text{ kg}$, $c_f = 1290 \text{ (N} \cdot \text{s)/m}$, $c_r = 1620 \text{ (N} \cdot \text{s)/m}$, $k_f = 19960 \text{ N/m}$, $k_r = 17500 \text{ N/m}$, $k_{ff} = k_{rr} = 175500 \text{ N/m}$, $a = 1.011 \text{ m}$, $b = 1.803 \text{ m}$ 。行驶速度 $v = 20 \text{ m/s}$;路面取 C 级路面即 $G_r = 5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{cycle}$;取测量噪声强度 $R_v = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^4$ 。分别仿真分析了 AHP、NSGA-III、AHP-NSGA-III 3 种预瞄最优控制方法下的主动悬架响应功率谱,如图 2 所示。

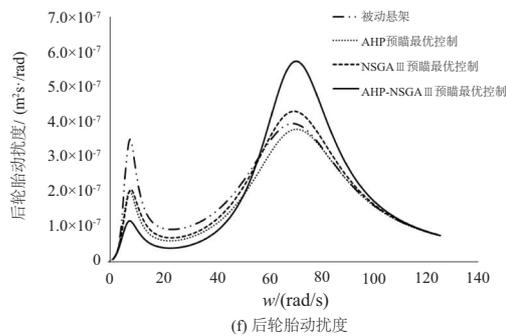
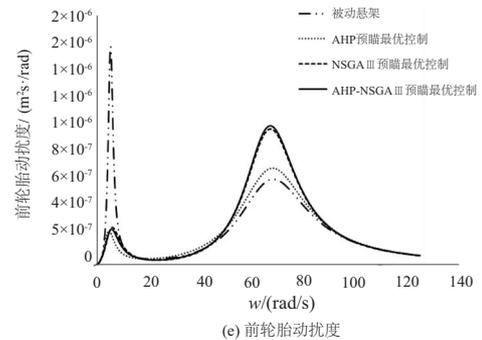
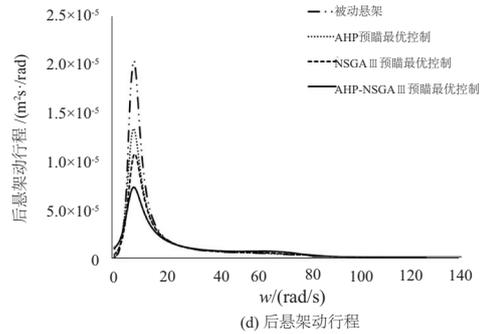
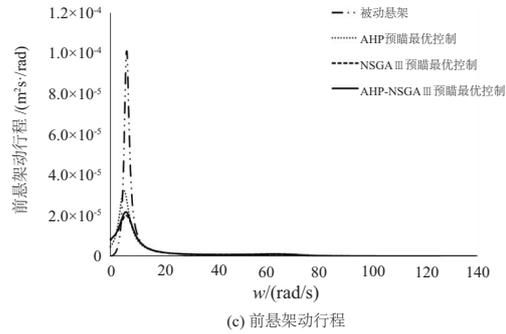
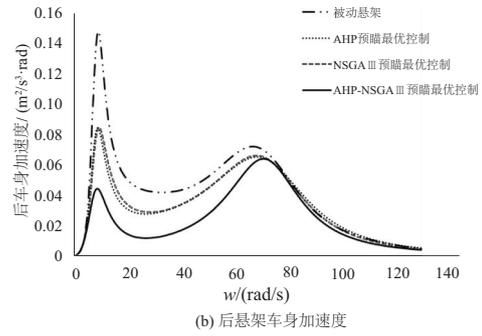
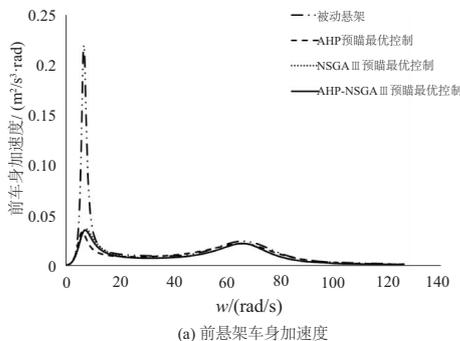


图 2 车辆响应功率谱密度

由图 2(a)-图 2(d)可知,基于 AHP、NSGA-III、AHP-NSGA-III 3 种预瞄最优控制方法的主动悬架对于车身加速度以及悬架动行程在车身固有频率附近有较大幅度的改善;且基于 AHP-NSGA-III 的预瞄最优主动悬架改善效果最好。由图 2(e)-图 2(f)可知,3 种方法的预瞄最优主动控制悬架均对于车身固有频率附近的轮胎动扰度有较大幅度的减少,但在车轮的固有频率附近前、后轮胎动扰度略有增加。

表 1 给出了车身加权加速度、悬架动行程、轮胎动扰

度的均方根值,从表中可以得出,AHP-NSGA-III 的预瞄最优控制方法对于前后悬架处的垂向加速度加权均方根值分别降低了 22.8%与 28.87%,比其他 2 种方法得出的响应值低。而 3 种方法对于 6 个响应目标有不同程度的影响。从所有目标相对于被动悬架目标的减少量总和来看,AHP-NSGA-III 方法得出的总减少量为 75.48%,比其他 2 种方法的总减少量要大。可以看出基于 AHP-NSGA-III 的预瞄最优控制方法在全局上有更好的控制效果。

表 1 悬架响应均方根值

项目	车身加速度/(m/s ²)		悬架动行程/m		轮胎动扰度/N		总减少量/(%)
	前悬架	后悬架	前悬架	后悬架	前悬架	后悬架	
被动悬架	1.204 8	2.011 7	19.449	13.653	980.38	873.34	—
AHP 预瞄最优控制	0.970 8	1.760 7	16.140	12.291	966.65	818.83	61.36
NSGA-III 预瞄最优控制	0.948 2	1.775 3	15.278	11.729	1 033.30	855.30	61.32
AHP-NSGA-III 预瞄最优控制	0.930 1	1.435 1	15.548	11.186	1 038.20	878.66	75.48

4 结语

针对线性二次最优控制存在的权重矩阵确定的问题,本文提出了一种基于 AHP-NSGA-III 方法的主客观评价结合的权值系数选择方法,并将其应用于具有卡尔曼滤波估计器的预瞄最优控制器的设计中,结合虚拟激励法给出了一种新的数值仿真方法。数值结果表明,基于 AHP-NSGA-III 的预瞄最优控制方法对于乘坐舒适性的改善效果最为明显。

参考文献:

- [1] 张丽萍,弓栋梁. 基于 H₂/H_∞ 控制的汽车主动悬架被动容错控制[J]. 汽车技术, 2017(11):48-53.
- [2] 李彤,姚嘉凌,王明海,等. 基于观测器的半主动悬架天棚控制设计与实现[J]. 机械制造与自动化, 2013,42(3):166-168.
- [3] 金耀,于德介,陈中祥,等. 内分泌 LQR 控制策略及其主动悬架减振研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(10):49-54.
- [4] 王威,薛彦冰,宋玉玲,等. 基于 GA 优化控制规则的汽车主动悬架模糊 PID 控制[J]. 振动与冲击, 2012, 31(22):157-162.

- [5] LIN J, LIAN R J. Intelligent control of active suspension systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(2):618-628.
- [6] 王其东,梅雪晴,王金波. 基于最优控制的半主动悬架下摆臂疲劳寿命预测[J]. 汽车技术, 2014(5):15-19.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] SONG G, LIN J H, ZHANG Y H, et al. An efficient stochastic optimal control algorithm for vehicle suspensions[C] // IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering, IEEE, 2012:614-620.
- [10] DEB, K, H. Jain. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach[J]. Problems With Box Constraints, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18(4): 577-601.
- [11] 林家浩,张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京:科学出版社, 2004.

收稿日期:2019-03-18