

车辆半主动悬架粒子群模糊混合控制策略*

严天一 闫海敬 侯兆萌 王玉林 张鲁邹 陈焕明

(青岛大学机电工程学院, 青岛 266071)

摘要: 在 Matlab 中建立 4 自由度 1/2 半主动悬架车辆模型后, 构建模糊混合控制器, 利用粒子群优化算法对模糊混合控制器的隶属度函数和模糊控制规则同时进行优化, 开发了粒子群模糊混合控制策略。为了有效验证所提出的控制策略, 在搭建的车辆半主动悬架系统控制策略硬件在环仿真试验平台上进行了粒子群模糊混合控制策略的半实物仿真试验。硬件在环仿真试验结果表明, 粒子群模糊混合控制策略明显优于传统模糊控制策略, 能有效地提高半主动悬架系统的综合性能, 并且在不同路面输入激励下均能取得较好的控制效果。

关键词: 车辆 半主动悬架 粒子群优化 模糊混合控制 硬件在环

中图分类号: U463.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)08-0001-07

PSO-fuzzy-hybrid Control Strategy of Semi-active Suspensions

Yan Tianyi Yan Haijing Hou Zhaomeng Wang Yulin Zhang Luzou Chen Huanming

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: A half-car model of semi-active suspension systems with 4-DOF was designed in Matlab, and a fuzzy hybrid controller was built. Then, the membership functions and rule of fuzzy hybrid control strategy were optimized by particle swarm optimization (PSO). In order to verify the proposed control strategy, a series of experiments of PSO-fuzzy-hybrid control strategy on the platform of hardware-in-the-loop were carried out. It showed that compared with traditional fuzzy control strategy, PSO-fuzzy-hybrid control strategy enhanced the overall performance of the semi-active suspension system effectively, and obtained better control performance in all different road input excitations.

Key words: Vehicle Semi-active suspension Particle swarm optimization Fuzzy hybrid control strategy Hardware-in-the-loop

引言

悬架系统是车辆的重要总成之一, 它可以隔离地面传给车身的冲击与振动。传统被动悬架系统因其悬架刚度和阻尼系数无法适时自动调整, 其平顺性和道路友好性很难满足不同路况和工况下行驶的要求; 而主动悬架虽然能取得优良的性能, 但由于其结构复杂、能量消耗大、成本高, 严重限制其实车应用。半主动悬架系统克服了被动悬架系统的技术缺陷, 又具有实现成本低的优势, 近年来已成为本领域的研究热点^[1]。对于半主动悬架系统控制策略研究方面, 由于模糊控制具有不依赖精确的数学模型, 具有处理模糊性和不确定性的特点, 已成为开发控

制策略的主要方法^[2]。

由于模糊控制器需要确定的参数很多, 依据专家经验很难准确地定出各项参数和控制规则。因此, 许多学者致力于模糊控制器自动设计的研究, 现已开发出基于神经网络、遗传算法 (Genetic algorithms) 的各型自适应模糊控制器^[3~5]。在上述一些文献给出的优化过程中, 模糊控制器实际的规则产生和参数整定是分步进行的, 实现起来较为复杂, 而且一旦控制器设计完成, 其模糊规则也不再变化。由于隶属函数和模糊控制规则不是相对独立而是相互联系的, 故欲获得高性能模糊控制器应同时对上述两种要素实施优化。

粒子群优化算法^[6] (Particle swarm optimization,

收稿日期: 2012-06-13 修回日期: 2012-08-04

* 国家自然科学基金资助项目 (50905090) 和山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目 (BS2010ZZ002)

作者简介: 严天一, 副教授, 博士, 主要从事车辆系统动力学及其控制策略研究, E-mail: yan_7012@126.com

PSO) 是一种源于对鸟群捕食行为的研究而发明的一种新型优化计算技术,属于随机全局优化技术范畴,具有快速性、有效性和鲁棒性技术特点。本文采用粒子群算法来优化整定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策略,并自行构建硬件在环仿真平台,开展粒子群模糊混合控制策略半实物仿真试验,以验证控制策略的实车应用可行性。

1 建立悬架系统模型

建立如图 1 所示的某款轿车 4 自由度车辆半主动悬架系统的动力学模型,为简化动力学建模过程^[7],遵循以下合理假设:

(1) 除轮胎、悬架弹簧和减振器之外,其余构件均简化为刚体,不会发生结构变形。

(2) 悬架系统由线性弹簧和粘性阻尼器组成,车轮简化为线性弹簧,并保证始终与地面接触。

(3) 车身俯仰角较小,簧载质量质心相对路面激励作垂直方向运动。

(4) 忽略车辆前、后轴的耦合效应,即悬挂质量分配系数为 1。

(5) 忽略轮胎垂直刚度及悬架刚度等非线性因素影响。

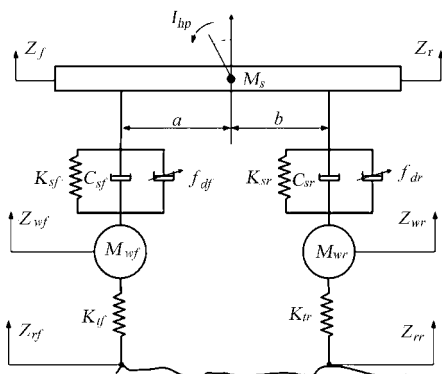


图 1 半主动悬架系统 1/2 模型

Fig. 1 1/2 model of semi-active suspension system

根据牛顿第二定律,4 自由度 1/2 车辆半主动悬架系统的运动微分方程可表示为

$$\begin{cases} \ddot{Z}_{wf} M_{wf} = K_{tf} (Z_{rf} - Z_{wf}) + F_{sf} - f_{df} \\ \ddot{Z}_{wr} M_{wr} = K_{tr} (Z_{rr} - Z_{wr}) + F_{sr} - f_{dr} \\ \ddot{Z}_f = \left(\frac{1}{M_s} + \frac{a^2}{I_{hp}} \right) (f_{df} - F_{sf}) + \left(\frac{1}{M_s} + \frac{ab}{I_{hp}} \right) (f_{dr} - F_{sr}) \\ \ddot{Z}_r = \left(\frac{1}{M_s} + \frac{ab}{I_{hp}} \right) (f_{df} - F_{sf}) + \left(\frac{1}{M_s} + \frac{b^2}{I_{hp}} \right) (f_{dr} - F_{sr}) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $F_{sf} = K_{sf} (Z_{uf} - Z_{wf}) + C_{sf} (\dot{Z}_{uf} - \dot{Z}_{wf})$

$F_{sr} = K_{sr} (Z_{ur} - Z_{wr}) + C_{sr} (\dot{Z}_{ur} - \dot{Z}_{wr})$

式中 M_s ——簧载质量, kg

M_{wf} ——前悬架非簧载质量, kg

M_{wr} ——后悬架非簧载质量, kg

I_{hp} ——车身俯仰运动转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

K_{tf} ——前轮轮胎垂直刚度, kN/m

K_{tr} ——后轮轮胎垂直刚度, kN/m

K_{sf} ——前悬架弹簧刚度, kN/m

K_{sr} ——后悬架弹簧刚度, kN/m

C_{sf} ——前悬架阻尼器阻尼系数, $\text{kN} \cdot \text{m/s}$

C_{sr} ——后悬架阻尼器阻尼系数, $\text{kN} \cdot \text{m/s}$

f_{df} ——前轮悬架控制力, N

f_{dr} ——后轮悬架控制力, N

Z_{wf} ——前轮非簧载质量垂直位移, m

Z_{wr} ——后轮非簧载质量垂直位移, m

Z_{tf} ——前轮路面垂直扰动输入位移, m

Z_{tr} ——后轮路面垂直扰动输入位移, m

Z_f ——前轮簧载质量垂直方向位移, m

Z_r ——后轮簧载质量垂直方向位移, m

2 粒子群模糊控制器

2.1 模糊控制器的设计

半主动悬架的控制策略有多种,其中天棚控制和地棚控制占有非常重要的位置,是半主动悬架的经典控制策略。天棚控制策略能够控制悬挂质量的振动,而地棚控制策略则可有效控制非悬挂质量的振动。本文所提出的控制策略以 Goncalves 所提出的混合控制策略为框架^[8],同时对悬挂质量和非悬挂质量进行有效振动控制。

混合控制策略可表示为

$$F = G [\alpha \delta_{sky} + (1 - \alpha) \delta_{gnd}] \quad (2)$$

其中天棚控制和地棚控制分别为

$$\delta_{sky} = \begin{cases} v_1 & (v_1 v_{12} \geq 0) \\ 0 & (v_1 v_{12} < 0) \end{cases} \quad (3)$$

$$\delta_{gnd} = \begin{cases} v_2 & (v_1 v_{12} \geq 0) \\ 0 & (v_1 v_{12} < 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中 G ——增益系数 α ——阻尼力分配系数

δ_{sky} ——基于天棚开关变量

δ_{gnd} ——基于地棚开关变量

v_1 ——簧载质量振动速度, m/s

v_2 ——非簧载质量振动速度, m/s

v_{12} ——簧载质量和非簧载质量相对速度, m/s

自动地调整控制器参数 α , 可使悬架处于良好的振动状态,故本文采用模糊控制器,遵循“在簧载质量和非簧载质量两者之中,振动得剧烈便被遏制;如果两者均剧烈振动,则同时以同等程度对它们的

振动加以遏制”的控制原则,实现对 α 的在线调节^[9]。其中,模糊控制器采用双输入、单输出系统,以簧载质量绝对振动速度 v_1 、非簧载质量绝对振动速度 v_2 为模糊混合控制器输入,以阻尼力分配系数 α 为模糊混合控制器输出。模糊控制器的输入、输出隶属度函数和控制规则用粒子群算法进行优化整定。基于粒子群算法的模糊混合控制系统的程序框图如图2所示。

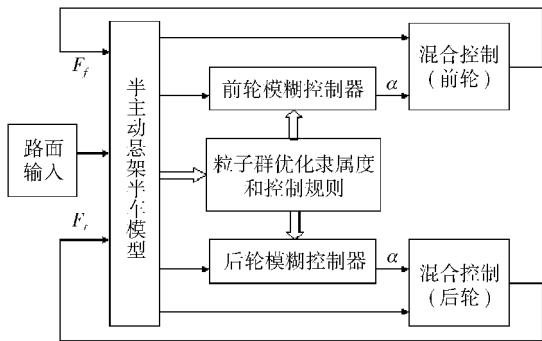


图2 粒子群模糊混合控制系统框图

Fig.2 System block of PSO-fuzzy hybrid control

2.2 粒子群优化算法

粒子群优化算法 (PSO) 最先由 Eberhart 和 Kennedy 于 1995 年提出^[10]。它是一种基于迭代的优化工具,系统初始化一组随机解,通过迭代搜寻最优值。在 PSO 中,每个粒子的位置 X_i 代表优化问题的候选解,粒子在搜索空间中以一定的速度飞行,这个速度根据它本身飞行的经验和同伴的飞行经验来动态调整其飞行方向和速率。所有的粒子都有一个被适用度函数决定的适应度,并且知道自己当前的位置(当前的位置 X_i)和目前为止发现的最好位置(个体极值 P_i),以及整个群体中所有粒子发现的最好位置(全局极值 P_g),粒子们追随当前最优的粒子在解空间中进行搜索。给定一个 D 维搜索空间且有 m 个粒子,第 i 个粒子的位置和速度分别为 $X_i = (X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,d})$ 和 $V_i = (V_{i,1}, V_{i,2}, \dots, V_{i,d})$,在每一次迭代中,粒子根据个体极值 $P_i = (P_{i,1}, P_{i,2}, \dots, P_{i,d})$ 和全局极值 $P_g = (P_{g,1}, P_{g,2}, \dots, P_{g,d})$ 来动态调整自己的速度向量以调整自身位置,粒子 i 的速度进化方程为

$$V_{i,j}(t+1) = \omega V_{i,j}(t) + c_1 r_1 (P_{i,j} - X_{i,j}(t)) + c_2 r_2 (P_{g,j} - V_{i,j}(t)) \quad (5)$$

式中 ω ——惯性权重 c_1, c_2 ——加速因子

r_1, r_2 ——0~1 之间均匀分布的随机数

为了保证算法的稳定性,算法定义了一个最大速度上限 $V_{\max}$,用以限制粒子移动速度的大小,即

$$V_{i,j}(t+1) \leq V_{\max} \quad (6)$$

相应的粒子 i 的位置进化方程为

$$X_{i,j}(t+1) = X_{i,j}(t) + V_{i,j}(t+1) \quad (j=1, 2, \dots, d) \quad (7)$$

其中速度更新公式中的惯性权重 ω 采用 Shi 建议的线性递减权重策略^[11],由最大加权因子线性减小到最小加权因子,在每次迭代中,惯性权重为

$$\omega(j) = \omega_{\min} + \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{n} (n - j) \quad (8)$$

式中 j ——当前迭代次数

$\omega_{\max}$ ——最大惯性因子

n ——最大进化数

$\omega_{\min}$ ——最小惯性因子

为了更好地平衡粒子在搜索空间的探测和开发能力,加速因子随迭代的进行动态变化, c_1 线性减小, c_2 线性增加,保证了粒子的全局寻优能力^[12]在每次迭代中,加速因子 c_1 和 c_2 为

$$c_1(j) = (c_{1e} - c_{1j}) \frac{j}{n} + c_{1j} \quad (9)$$

$$c_2(j) = (c_{2e} - c_{2j}) \frac{j}{n} + c_{2j} \quad (10)$$

式中 c_{1j} —— c_1 的初始值 c_{2j} —— c_2 的初始值

c_{1e} —— c_1 的终值 c_{2e} —— c_2 的终值

2.3 粒子群模糊控制器

根据悬架平顺性的评价指标,本文采用的适用度函数为

$$f = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^T [q (x_w(t) - x_g(t))^2 + \dot{x}_b^2(t)] dt \quad (11)$$

式中 q ——轮胎动位移的加权系数

模糊控制器输入 v_1, v_2 和输出 α 均采用 7 个语言变量 {O, S, M, N, L, V, P}, 对应隶属度函数采用高斯型。高斯曲线的形状由 β 和 δ 两个变量决定,即

$$\mu(x) = \exp \left(- \left(\frac{x - \beta}{\delta} \right)^2 \right) \quad (12)$$

式中 β ——高斯曲线中心位置值

δ ——高斯曲线宽度

半车模型的前后两个车轮,每个轮对应的模糊控制器有 21 条高斯曲线共有 42 个变量,加上 49 条模糊规则共有 91 个变量。用 PSO 算法对前后轮模糊控制器的参数同时优化整定,首先将需要优化的模糊控制参数编码,前轮模糊控制器的编码串为 $pc1[X_1, X_2, \dots, X_{91}]'$,后轮模糊控制器的编码串为 $pc2[X_1, X_2, \dots, X_{91}]'$ 。其中一个模糊控制器编码如下:

模糊控制器隶属度编码

$a = \text{addvar}(a, 'input', 'v1', [-35 \ 35]);$

$a = \text{addmf}(a, 'input', 1, 'ES', 'gaussmf', [pc1(1) \ pc1(2)])$

```

:
a = addmf( a,'input',1,'EL','gaussmf',[ pc1 ( 13 )
pc1 (14) ])
a = addvar(a,'input','v2',[- 5 5]);
a = addmf( a,'input',2,'ES','gaussmf',[ pc1 ( 15 )
pc1 (16) ])
:
a = addmf( a,'input',2,'EL','gaussmf',[ pc1 ( 27 )
pc1 (28) ])
a = addvar(a,'output','alpha',[0 1]);
a = addmf( a,'output',1,'Z1','gaussmf',[ pc1 ( 29 )
pc1 (30) ])
:
a = addmf( a,'output',1,'Z9','gaussmf',[ pc1 ( 45 )
pc1 (42) ]

```

```

模糊控制规则编码
ruleList =
[1 1 pc1(43) 1 1
:
7 7 pc1(91) 1 1 ];
a = addrule( a,ruleList );

```

粒子中每个变量均用实数表示,应用 PSO 寻优的算法流程为:①对粒子群中粒子的位置进行初始化,设定群体规模 $m=50$,维数 $d=91$,取 $\omega_{\min}=0.4$, $\omega_{\max}=0.9$,最大迭代次数 $n=50$, $V_{\max}=0.5$, $X_{\max}=0.5$,随机初始化各粒子的位置和速度。②根据粒子的当前位置调用适应度函数,并运行车辆 Simulink 模型,其中模型中的模糊控制器自动读取当前粒子的位置,模型运行后的车身加速度、悬架动挠度、轮胎变形量输出给适应度函数。③根据式(11)评价各个粒子适应度,将当前粒子的位置和适应度储存在各粒子的 P_i 中,对每个粒子将其适应度 P_i 与群体中所经历最好位置 P_g 的适应度进行比较,如果优于 P_g ,则将其位置代替 P_g 。④粒子速度更新,各参量计算如下:由式(7)得出速度权重系数,由式(8)和(9)得出加速因子 c_1 、 c_2 ,将各参量代入式(4)得出新的速度 $V_{i,j}$,根据式(5)判断新的速度是否在区间范围内,如果 $V_{i,j}$ 大于 $V_{\max}$,则用 $V_{\max}$ 代替 $V_{i,j}$ 。⑤位置更新。将更新后的速度代入式(6),得出新的粒子位置值 $X_{i,j}$ 。⑥判断是否满足达到最大迭代次数 50,若满足,则转向步骤⑦,否则转向步骤②。⑦输出 P_g ,结束寻优操作。

根据上述算法流程,利用 Simulink 开发如图 3 所示的 1/2 车辆半主动悬架仿真模型。其中,表 1 为该半主动悬架系统模型的主要参数。

经过系统优化的模糊控制器相关参数如下:前

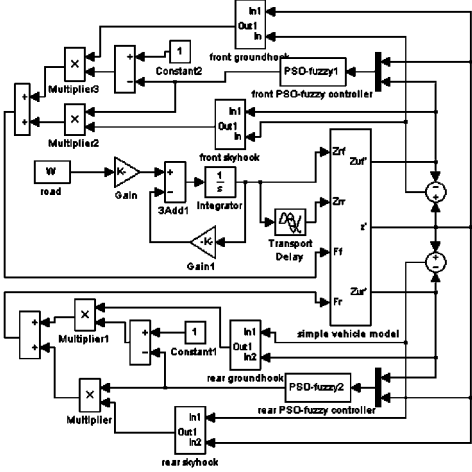


图 3 基于粒子群算法的模糊混合控制策略的半主动悬架仿真模型

Fig. 3 Simulation model of PSO-based fuzzy hybrid control strategy of semi-active suspensions

表 1 车辆半主动悬架系统模型参数

Tab. 1 Parameters of semi-active suspension system model

参数	数值
簧载质量 M_s/kg	690
前悬架非簧载质量 M_{wf}/kg	40.5
后悬架非簧载质量 M_{wr}/kg	40.5
车身俯仰运动转动惯量 $I_{hp}/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	1 222
前轮胎垂直刚度 $K_{tf}/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	192
后轮胎垂直刚度 $K_{tr}/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	192
前悬架弹簧刚度 $K_{sf}/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	17
后悬架弹簧刚度 $K_{sr}/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	22
前悬架阻尼器阻尼系数 $C_{sf}/\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.89
后悬架阻尼器阻尼系数 $C_{sr}/\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.76
前轮轴心到质心尺寸 a/m	1.25
后轮轴心到质心尺寸 b/m	1.51

悬架模糊控制器隶属度和模糊规则参数 $\text{pc1} = [5.5, -22, 0.89, -15, 18, -8.3, 0.10, -15, 0.10, 1.2, 0.10, 12.2, 0.10, 22.2, 4.9, -3.2, 1.72, -1.85, 0.063, 0.75, 5.7, 0.38, 1.5, 0.62, 2.8, 0.23, 0.10, 2.44, 0.62, 0, 0.76, 0.35, 0.13, 0.56, 0.86, 0.47, 0.42, 0.72, 0.20, 0.68, 0.58, 0.88, 0.36, 0.86, 0.49, 1.0, 7.2, 5.8, 4.3, 2.9, 4.8, 3.7, 9.6, 6.5, 1.8, 8.8, 3.4, 3.7, 7.6, 1.3, 6.4, 9.8, 7.5, 1.5, 5.6, 6.5, 5.2, 1.6, 4.4, 6.5, 6]'$;后悬架模糊控制器隶属度和模糊规则参数 $\text{pc2} = [14, -23, 34, -26, 14, -24, 42, -27, 0.10, -6.9, 8.5, 35, 4.3, 10, 2.0, -4.3, 0.10, -1.3, 3.5, -2.9, 3.1, -0.37, 0.11, 0.18, 1.1, 1.0, 1.8, 4.7, 0.68, 0.07, 0.85, 0.26, 0.68, 0.20, 0.14, 0.54, 0.30, 0.87, 0.15, 0.69, 0.16, 0.85, 0.33, 0.92, 0.59, 1.0, 7.5, 5.5, 1.2, 1.5, 5.5, 3.2, 9.7, 6.3, 6.4, 7.8, 2.6, 4.6, 5.3, 4.7, 6.3, 5.3, 4.6, 7.5, 6.1, 6.5, 2.5, 5.7, 6, 5.4, 6, 6]'$ 。

3 硬件在环仿真及结果分析

在自主开发的以 Freescale MC9S12 XDP512 芯片为核心,加外围芯片以及以 AD7801 模/数转换芯片为核心的模/数转换电路组成的电控单元如图 4 所示的基础上,利用研华 PCI-1711 数据采集卡与 Matlab 内置的 Real-time Windows Target 模块自行构建硬件在环仿真试验平台^[13],该平台结构如图 5 所示。在半主动悬架硬件在环仿真平台中,数据采集卡的作用是将前、后两轮的簧载质量垂向振动速度与非簧载质量垂向振动速度传递给电控单元,同时将电控单元输出的控制力传递给悬架模型,搭建的硬件在环仿真平台实物如图 6 所示。利用 Freescale CodeWarrior 软件开发粒子群模糊混合控制策略,通过 BDM 模块将所开发的控制策略程序移植到硬件在环仿真平台上,并开展相关硬件在环仿真试验。

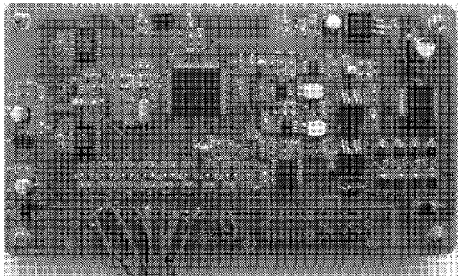


图 4 基于 Freescale XDP512 核心芯片的电子控制单元
Fig. 4 Electronic control unit based on Freescale XDP512 core chip

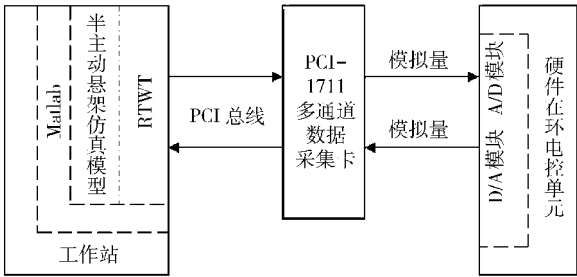


图 5 硬件在环仿真平台结构图

Fig. 5 Structure of hardware-in-the-loop platform

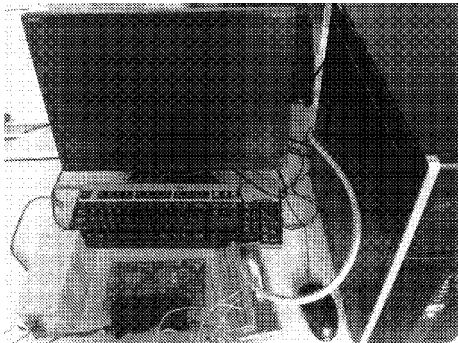


图 6 车辆半主动悬架系统硬件在环试验平台
Fig. 6 Hardware-in-the-loop platform of semi-active suspension systems

3.1 凸块脉冲输入仿真

根据国标 GB/T 4970—2009《汽车平顺性试验方法》规定的三角形凸块模型来模拟脉冲输入。设置凸块幅值为 0.06 m,路面水平位移 2 m。生成的路面输入前后轮相同,后轮输入比前轮输入在时间上延迟 0.012 3 s,仿真车速为 60 km/h,仿真工作步长 0.005 s,仿真时间为 3 s,在自行开发的电控单元中分别移植模糊混合控制算法和粒子群模糊混合控制算法,与已建立的 4 自由度 1/2 车辆半主动悬架模型进行硬件在环仿真,基于硬件在环的被动悬架以及半主动悬架不同控制策略的对比仿真结果如图 7~11 所示。

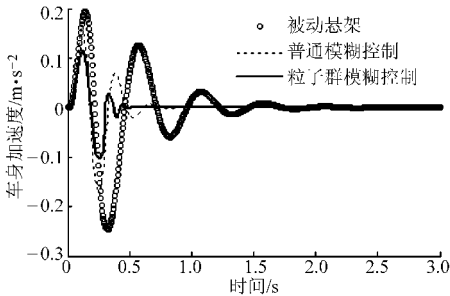


图 7 车身加速度脉冲响应

Fig. 7 Pulse response of sprung mass acceleration

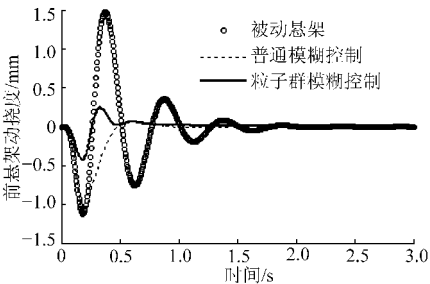


图 8 前悬架动挠度脉冲响应

Fig. 8 Pulse response of front suspension deflection

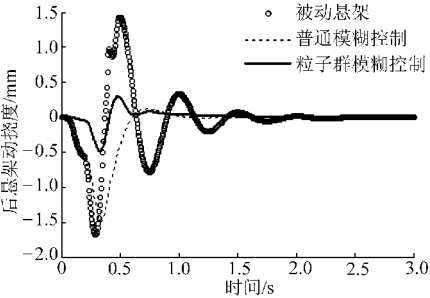


图 9 后悬架动挠度脉冲响应

Fig. 9 Pulse response of rear suspension deflection

图 7 中,与被动悬架系统和普通模糊控制相比,粒子群模糊混合控制策略控制方案得到的车身质心加速度的超调量有较大幅度的降低,调整时间短,减振效果较好,在图 8 和图 9 中普通模糊控制得到的前、后悬架动挠度超调量都很大,在图 10 和图 11 中

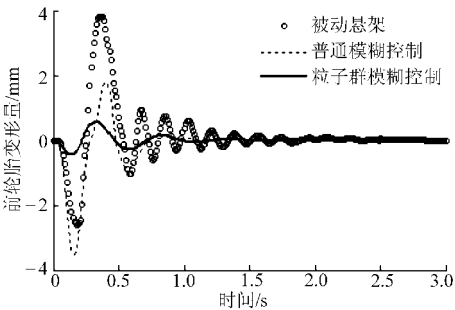


图 10 前轮胎变形量脉冲响应

Fig. 10 Pulse response of front tire deformation

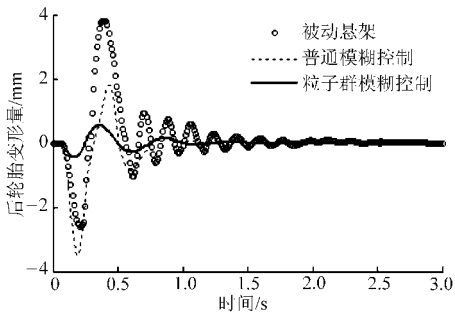


图 11 后轮胎变形量脉冲响应

Fig. 11 Pulse response of rear tire deformation

普通模糊控制得到的前、后轮胎变形量不仅超调量大,而且调整时间长。由此可见与普通模糊混合控制策略相比,粒子群模糊混合控制策略可以有效降低车辆前、后轮轮胎变形量的超调量,显著缩短调整时间。

3.2 随机路面输入模型

本文路面模型采用滤波白噪声法^[14],即

$$\dot{x}_r(t) = -2\pi f_0 x_r(t) + 2\pi \sqrt{G_0 v_0} w(t) \quad (14)$$

式中 x_r ——路面位移 G_0 ——路面不平度系数
 f_0 ——下截止频率 v_0 ——车辆行驶速度
 $w(t)$ ——均值为零的高斯白噪声

试验车辆以 60 km/h 车速匀速驶过 A 级、C 级路面^[15],路面不平度系数 G_0 分别为 2.6×10^{-8} 、 4.5×10^{-6} m³/cycle,下截止频率为 0.01 Hz,白噪声功率为 20 dB,求解器为定步长 ode4 (Runge-Kutta) 定步长求解器。表 2 给出了不同等级路面下车身加速度、悬架动挠度和轮胎动载荷的均方根值比较。

从表 2 可以看出,在不同等级的路面上基于粒子群模糊混合控制的半主动悬架均能有效减低车身的垂向振动加速度、悬架动挠度和轮胎动载荷。

为进一步评价所提出的模糊混合控制策略,本文分析了在各种控制策略控制下的车身垂向加速度、前、后悬架动挠度和前、后轮轮胎动载荷的频谱特性,如图 12~16 所示。

由图 12 可得,除车轮共振频率点外,粒子群模糊混合控制策略可以有效降低车身垂直加速度;

表 2 不同控制策略的硬件在环仿真结果

Tab.2 Simulation results of different control strategies based on hardware-in-the-loop

路面等级	评价指标 (均方根值)	被动悬架	普通模糊 控制器	粒子群模 糊控制器
A	车身垂向加速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	0.171 0	0.132 0	0.059 3
	前悬架动挠度/mm	3.12	1.98	1.59
	后悬架动挠度/mm	4.93	2.57	2.13
	前轮轮胎动载荷/N	882	984	586
	后轮轮胎动载荷/N	1 176	1 282	1 080
C	车身垂向加速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	2.310	1.820	0.749
	前悬架动挠度/mm	41.5	14.7	18.0
	后悬架动挠度/mm	52.1	28.9	23.6
	前轮轮胎动载荷/N	1 224	1 336	974
	后轮轮胎动载荷/N	1 632	1 748	1 532

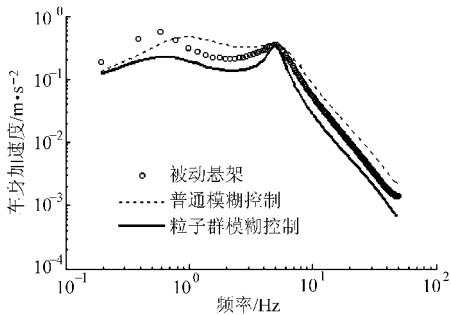


图 12 车身垂向加速度幅频特性

Fig. 12 Amplitude frequency characteristics of centric acceleration

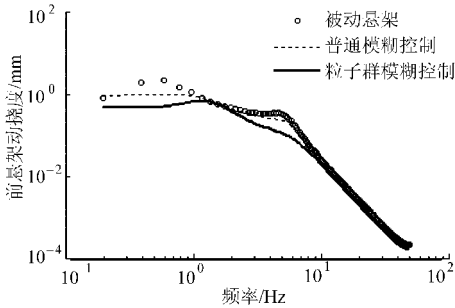


图 13 前悬架动挠度幅频特性

Fig. 13 Amplitude frequency characteristics of front suspension deflection

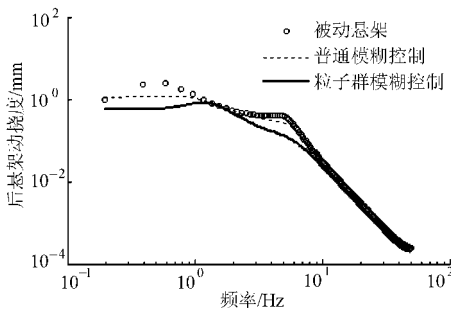


图 14 后悬架动挠度幅频特性

Fig. 14 Amplitude frequency characteristics of front suspension deflection

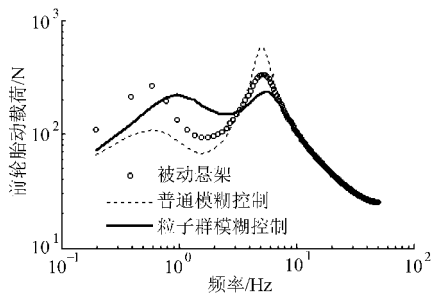


图 15 前轮轮胎动载荷幅频特性

Fig. 15 Amplitude frequency characteristics of front tire dynamic load

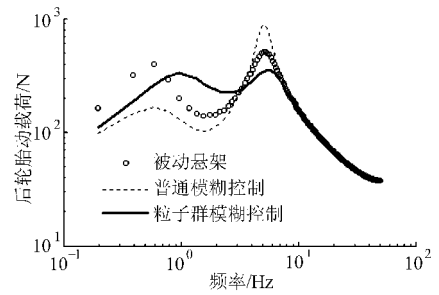


图 16 后轮轮胎动载荷幅频特性

Fig. 16 Amplitude frequency characteristics of rear tire dynamic load

图 13 ~ 14 分别为前悬架动挠度、后悬架动挠度的幅频特性图,与传统模糊控制策略相比,粒子群模糊混合控制在两个共振频率点附近可减小前、后悬架动挠度。分析图 15 ~ 16 可知,除在车身共振频率点外,粒子群模糊控制策略可有效降低前轮轮胎动载荷及后轮轮胎动载荷。

4 结束语

粒子群模糊混合控制策略的凸块脉冲和随机路面硬件在环仿真试验表明,与被动悬架系统和传统模糊控制策略相比,可自动调整隶属度函数及模糊控制规则的粒子群模糊混合控制策略不仅有效提高了车辆平顺性,同时有效兼顾了道路友好性。

参 考 文 献

- 1 陈龙,周孔亢,李德超. 车辆半主动悬架控制技术的研究[J]. 农业机械学报,2002,33(1):25~28.
Chen Long,Zhou Kongkang,Li Dechao. Study on control technology of semi-active suspension on a vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2002,33(1):25~28. (in Chinese)
- 2 乐巍,张孝祖,陈士安,等. 汽车四自由度半主动悬架阻尼模糊控制的方法[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2003,24(1):55~59.
Le Wei,Zhang Xiaozu,Chen Shian, et al. The way of fuzzy control of damping coefficient on automobile semi-active suspension with four degrees of freedom[J]. Journal of Jiangsu University:Natural Science Edition, 2003, 24(1):55~59. (in Chinese)
- 3 贝绍轶,陈龙. 基于遗传算法的汽车半主动悬架模糊控制器设计[J]. 农业机械学报,2006,37(9):9~12.
Bei Shaoyi,Chen Long. Design of semi-active automobile suspension fuzzy controller based on genetic algorithms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2006,37(9):9~12. (in Chinese)
- 4 王辉,朱思洪. 半主动空气悬架神经网络的自适应控制[J]. 农业机械学报,2006,37(1):28~31.
Wang Hui,Zhu Sihong. Neural network adaptive control for semi-active air suspension [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2006,37(1):28~31. (in Chinese)
- 5 殷智宏,郭孔辉,宋晓琳. 基于辨识模型的半主动悬架控制策略研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2010,37(12):24~30.
Yin Zhihong,Guo Konghui,Song Xiaolin. Study of semi-active suspension control strategy based on an identification model[J]. Journal of Hunan University:Natural Sciences, 2010, 37(12):24~30. (in Chinese)
- 6 Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [C] // Proceedings IEEE International Conference on Neural Networks, 1995,4:1 942~1 948.
- 7 Agrawal O P, Shabana A A. Application of deformable-body mean axis to flexible multi-body system dynamics [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,1986,56(2):217~245.
- 8 Goncalves F D. Dynamic analysis of semi-active control techniques for vehicle applications [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University,2001.
- 9 陈杰平,冯武堂,郭万山,等. 整车磁流变减振器半主动悬架变论域模糊控制策略[J]. 农业机械学报,2011,42(5):7~13,19.
Chen Jieping,Feng Wutang,Guo Wanshan, et al. Whole vehicle magnetorheological fluid damper semi-active suspension variable universe fuzzy control simulation and test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(5):7~13,19. (in Chinese)
- 10 Eberhart R C,Kennedy J. A new optimizer using particle swarm[C]//Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science,1995:39~43.
- 11 Eberhart R C,Shi Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization [C] // Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation,2000,1:84~88.
- 12 刘丽琴,张学良,谢黎明,等. 基于动态聚集距离的多目标粒子群优化算法及其应用[J]. 农业机械学报,2010,41(3):189~194.
Liu Liqin,Zhang Xueliang,Xie Liming, et al. Multi-objective particle swarm optimization algorithm based on dynamic crowding distance and its application [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(3):189~194. (in Chinese)

中。试验过程中,从推秧杆开始推秧到完成推秧,持续的时间分别为 0.036、0.024 和 0.016 s,行星架实际转角与设计转角误差为 $\pm 3^\circ$,在 $62^\circ \sim 88^\circ$ 范围内波动。误差主要来源于加工精度不足导致装配存在间隙。图 9 中秧针末端静轨迹,与图 6 中理论静轨迹相比基本吻合,不吻合的原因有:①加工误差。②试验误差(即拍摄时摄像头位置不准)。③描点误差(视频处理时某些位置标志点无法看清导致拾取误差)。

由此可知,该推秧装置的实际静轨迹与理论静轨迹基本一致,验证了理论建模以及反求结果的正

确性。

6 结论

(1) 步行式插秧机等径凸轮推秧装置在传统推秧装置的基础上,取消推秧弹簧,使插秧机能够在不同速度下正常作业,并且解决了推秧提前或滞后的问题,同时较好地满足了插秧农艺要求和推秧农艺要求。

(2) 等径凸轮推秧装置具有比共轭凸轮推秧装置更小的外形尺寸和压力角,结构更加小巧紧凑,有更好的动力学特性。

参 考 文 献

- 1 Vareed Thomas Edathiparambil. Development of a mechanism for transplanting rice seedling[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002,37(9):395~410.
- 2 陈建能,王英,张翔,等. 基于共轭凸轮的强制推秧机构反求设计[J]. 农业工程学报,2011,27(3):98~102.
Chen Jianneng, Wang Ying, Zhang Xiang, et al. Reverse design of compulsory seedling-pushing mechanism based on conjugate cam[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 98~102. (in Chinese)
- 3 陈建能,王英,赵雄,等. 步行式插秧机共轭凸轮推秧装置的反求设计及仿真[J]. 农业机械学报,2011,42(12):78~82,37.
Chen Jianneng, Wang Ying, Zhao Xiong, et al. Reverse design and simulation of walking-type rice based on conjugate cam transplanter's seedling-pushing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 78~82, 37. (in Chinese)
- 4 王英,陈建能,周丽莎,等. 步行式插秧机共轭凸轮推秧装置动力学分析及试验[J]. 农业机械学报,2012,43(10):51~57.
Wang Ying, Chen Jianneng, Zhou Lisha, et al. Dynamic analysis and experiment of the conjugate cam seedling-pushing device applied on walking-type rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 51~57. (in Chinese)
- 5 谢仁华,管嫦娥. 椭圆齿轮传动后插式分插机构动力学分析与试验[J]. 机械传动,2009,33(6):78~81.
- 6 俞高红,谢仁华,赵匀. 椭圆齿轮传动后插旋转式分插机构运动分析与试验[J]. 农业机械学报,2008,39(5):45~48.
Yu Gaohong, Xie Renhua, Zhao Yun. Kinematic analysis and experiment of backward rotary transplanting mechanism with elliptical gears transmission [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 45~48. (in Chinese)
- 7 陈建能, Zhao Yun, Yu Gaohong, et al. Establishment and verification of dynamics model of seedling-pushing device in transplanting mechanism with planetary elliptic gears[J]. Transactions of CSAE, 2003, 19(5): 71~76.
- 8 陈建能,赵匀. 高速插秧机椭圆齿轮行星系分插机构的参数优化[J]. 农业机械学报,2003,34(5):46~49.
Chen Jianneng, Zhao Yun. Parameters optimization of transplanting mechanism with planetary elliptic gears for high-speed transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(5): 46~49. (in Chinese)
- 9 孙恒,陈作模,葛文杰. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社,2006:160~162.
- 10 赵匀. 机构数值分析与综合[M]. 北京:机械工业出版社,2005:55~60.
- 11 彭波,孙一林. Visual Basic 编程技术全接触[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- 12 陈锦昌,陈亮. 计算机图形学基础[M]. 广州:华南理工大学出版社,2010.
- 13 赵匀. 农业机械计算机辅助分析和设计[M]. 北京:清华大学出版社,1998:163~188.

(上接第 7 页)

- 13 严天一,任坤儒,王玉林,等. 车辆半主动悬架系统模糊混合控制策略[J]. 农业机械学报,2012,43(12):11~15,27.
Yan Tianyi, Ren Kunru, Wang Yulin, et al. Fuzzy hybrid control strategy of semi-active suspensions for vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 11~15, 27. (in Chinese)
- 14 喻凡. 车辆动力学及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- 15 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 Ping, Chen Wuwei, Zhu Hui, et al. Modeling and simulation on stochastic road surface irregularity based on Matlab/Simulink [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 11~15. (in Chinese)