

DOI: 10.7652/xjtuxb201902005

采用路面识别方法的重型救援车辆 主动悬架控制策略

巩明德¹, 颜鑫²

(1. 燕山大学机械工程学院, 066004, 河北秦皇岛; 2. 吉林大学机械科学与工程学院, 130025, 长春)

摘要: 针对重型救援车辆在复杂路况行驶时存在的行驶平顺性差及操纵不稳定等问题,提出了采用路面识别方法的重型救援车辆主动悬架控制策略。识别方法以不同等级路面激励引起的相对路面粗糙度为依据,通过建立 T-S 型模糊控制规则实现路面等级识别;控制策略根据识别的路面等级、非簧载质量、簧载质量、悬架刚度、悬架阻尼和轮胎刚度,设计最优 H_{∞} 控制器参数矩阵,计算主动悬架作动力,实现主动悬架在不同等级路面行驶时的自适应控制。试验结果表明:采用路面识别方法的主动悬架控制系统能够通过调节鲁棒控制器参数矩阵,自适应地控制悬架刚度和阻尼,提高了不同路面行驶条件下的平顺性与操纵稳定性;在不同等级路面情况下与被动悬架相比,簧载质量加速度均方根值减小了 20% 以上,且在 4~8 Hz 频段内,簧载质量加速度幅值均小于被动悬架。

关键词: 重型救援车辆;主动悬架;路面等级;识别;鲁棒控制

中图分类号: TH113 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)02-0032-08

A Control Strategy for Active Suspension of Heavy Rescue Vehicles Based on Road Level Estimation

GONG Mingde¹, YAN Xin²

(1. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

2. School of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: A new adaptive robust control strategy for heavy rescue vehicles is proposed based on road level estimation to solve the problem that heavy vehicles have poor ride comfort and unstable handling when they are derived on complex road conditions. The road estimation method takes the relative roughness indicator (RRI), which is caused by different road level, as the basis of estimation, and T-S fuzzy control rules are then designed to estimate the final road level. Then the control strategy gives a parameter matrix for an adaptive optimal H_{∞} controller from the estimated road level, unsprung mass, sprung mass, suspension stiffness, suspension damping and tire stiffness. The control force of active suspension is calculated to realize the adaptive control of active suspension when derived on different road levels. Experimental results show that active suspension control systems based on the road level estimation adaptively control suspension stiffness and damping by adjusting the parameter matrix of the robust controller. The proposed control strategy improves both ride comfort and handling stability in different road levels. A comparison with the passive suspension in different road leveles show that the active suspension

收稿日期: 2018-05-18。 作者简介: 巩明德(1971—),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0802900)。

网络出版时间: 2018-12-03

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20181203.0954.010.html>

reduces the RMS of the sprung mass acceleration more than 20%, and the amplitude of the sprung mass acceleration of the active suspension is smaller than that of the passive suspension in the 4-8 Hz band.

Keywords: heavy rescue vehicle; active suspension; load level; estimation; robust control

车辆悬架系统具有缓冲行驶过程中由道路不平引起并传递给车身的冲击力、衰减由此引起的振动并保持与路面接触的作用^[1-2]。道路表面粗糙度是车辆行驶运动的主要激励,对乘坐舒适性、乘坐安全性、车辆操纵性和车辆动态载荷都有重要影响^[3-5]。1995年,国际标准 ISO 8608 提出道路粗糙度的概念,并给出了路面粗糙度的功率谱密度函数(PSD)的拟合表达式^[6]。Sayers 等人使用固定参数的标准 1/4 车模型来计算悬架行程,累积的计算结果除以行驶的距离称为国际粗糙度指数(I_{IRI})^[7]。Sun 等人研究了评估路面质量的两个主要指标国际粗糙度指数和功率谱密度之间存在的数学关系^[8]。

近些年来发展的一些智能控制方法,将路面信息添加到主动悬架控制策略的制定中。典型的预瞄控制假设前方路面不平度已知,在悬架控制力的计算中考虑了前方路面情况和车辆行驶速度^[9],但路面信息的获取和控制时滞等问题都限制了预瞄控制的发展。Wang 等人通过对路面特征值的提取建立了路面状况识别的方法为预测控制提供了理论基础^[10]。Balazs 等人提出了一种基于预测路面情况的车辆鲁棒控制方法,建立车辆行驶速度与预测路面倾斜度间联系,进而设计鲁棒控制器^[11]。以上主动悬架的控制方法较传统方法在控制效果上有显著提高,并且具有深远的发展前景。因此,将车辆可控悬架系统与路面识别进行结合成为了车辆可控悬架系统的研究重点与热点问题^[12-18]。但是,已有的研究成果中较多假设路面条件已知或可准确感知,而对于如何针对利用可控悬架系统获取路面信息的研究相对较少。

本文所述策略以悬架系统为纽带,将难以获取的路面不平度信息与能实测的悬架动行程进行联系,充分利用路面信息制定主动悬架的控制策略,将路面识别方法与悬架控制算法结合,根据实际路面情况合理地选取主动悬架控制算法参数,增强了主动悬架控制的参数自适应调节能力,提高了重型救援车辆行驶的平顺性与操纵稳定性。

1 车辆模型

重型救援车辆因车载精密仪器和高机动行驶的

需要,对车辆行驶平顺性和操纵稳定性有较高要求。重型救援车辆需行驶经过路面等级不同的复杂路段到达救援现场,因此救援车辆采用主动悬架技术及设计自适应不同路面等级的控制策略具有重要意义。

1/6 车辆模型是研究重型救援车辆可控悬架控制方法的最基本模型。设 m_s 为簧载质量, m_u 为非簧载质量, k_s 为悬架刚度, c_s 为悬架阻尼, k_t 为轮胎刚度, f 为主动悬架作动力且其存在最大值 f_{max} 。根据牛顿第二定律,1/6 车辆二自由度模型有如下运动微分方程

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_s &= \frac{k_s}{m_s}(x_u - x_s) + \frac{c_s}{m_s}(\dot{x}_u - \dot{x}_s) + \frac{f}{m_s} \\ \ddot{x}_u &= \frac{-k_s}{m_u}(x_u - x_s) - \frac{c_s}{m_u}(\dot{x}_u - \dot{x}_s) - \frac{f}{m_u} + \frac{k_t}{m_u}(x_r - x_u) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

二自由度(2DOF)1/6 车辆主动悬架的结构如图 1 所示。

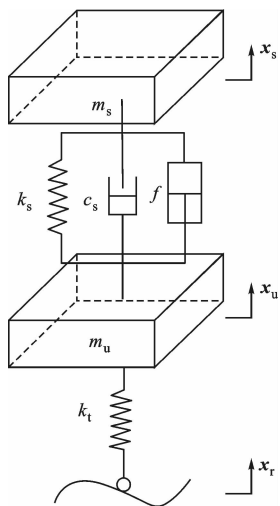


图 1 二自由度 1/6 车辆主动悬架结构

2 路面模型

2.1 路面功率谱密度

路面不平度用于描述路面起伏的程度,是车辆行驶过程中的主要激励。路面功率谱密度常用于描述路面不平度的统计特性,国际标准 ISO 8608 建议用下式作为空间功率谱密度的拟合表达式

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-W} \quad (2)$$

式中: n_0 为参考空间频率; $G_q(n_0)$ 为路面不平度系数, 是参考空间频率下的路面功率谱密度值; W 为频率指数。

2.2 相对粗糙度指数

在对路面不平程度进行描述时, 国际粗糙度指数 I_{IRI} 可作为评价路面平整度的重要指标。世界银行定义的国际平整度指数为

$$I_{\text{IRI}} = \frac{1}{L} \int_0^L |z_2 - z_1| \, dl \quad (3)$$

式中: L 为测量距离; z_1 为非簧载质量位移; z_2 为簧载质量位移。

对于评价路面质量的两大指标: 路面功率谱密度和国际粗糙度指数, Sun 等人通过理论分析, 得到了国际粗糙度指数与路面功率谱间关系为^[8]

$$I_{\text{IRI}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi \sqrt{v^3}} \left[\int_0^\infty \omega^2 |H_s(\omega)|^2 G_q(n) d\omega \right]^{1/2} \quad (4)$$

式中: n 为空间频率; ω 为时间角频率; v 为车速; $G_q(n)$ 为路面空间功率谱密度; $H_s(\omega)$ 为簧载质量位移对路面激励的传递函数。

由于重型救援车辆所行驶路面较为复杂恶劣, 通过单一的悬架竖向累积量计算 I_{IRI} 难以保证获取准确的路面粗糙度指数, 且本文并非定量评价路面质量而是识别路面等级, 故不同地形之间的相对粗糙度识别方法是本文研究的关键。本文在国际粗糙度指数 I_{IRI} 的基础上提出了路面相对粗糙度指数 I_{RRI} 的表达式为

$$I_{\text{RRI}} = \frac{(1/L) \int_0^L \left| \sum_{i=1}^6 (z_{i2} - z_{i1})^2 / 6 \right| dl}{L} \quad (5)$$

式中: L 为测量距离; z_1 为非簧载质量位移; z_2 为簧载质量位移。

实际行驶过程中, 主动悬架各作动器液压缸伸缩量互有差异, 若仅考虑单一悬架液压缸的垂直方向位移累积量, 会遗漏路面真实起伏情况, 且易受路面凹凸处突变影响, 由此 I_{IRI} 难以满足路面识别要求。本文提出的 I_{RRI} 对 6 个悬架液压缸的垂直方向位移累积量求取平均值, 能最大程度地反映路面真实起伏情况, 更能反映不同等级路面之间的差异。

3 路面等级识别方法

3.1 T-S 型模糊控制器

本文设计的 T-S 型模糊控制器, 根据输入-输出

数据进行参数辨识, 建立路面相对粗糙度值与路面等级间的模糊规则。T-S 型模糊控制器的输入数据为预处理后的特征信号集合, 包括 I_{RRI} 时域信号、近似信号和细节信号, 输出数据为路面等级。参数辨识就是通过对大量输入数据的分析、处理, 确定出表示系统输出变量表达式中的系数。对每级路面建立相应的模糊规则, 通过特征信号集合的数据分析确定模糊规则中输入信号的系数。模糊规则的选取依据 I_{RRI} 时域信号的数值, 模糊规则描述如下

R_i : If S_{i1} is A_i , then U_m is

$$k_{i1} S_{i1} + k_{i2} S_{i2} + k_{i3} S_{i3} + k_{i4} S_{i4} + k_{i5} S_{i5}$$

其中 S_{i1} 为路面相对粗糙度的时域信号, S_{i2} 、 S_{i3} 、 S_{i4} 分别为第 1、2、3 层近似信号, S_{i5} 为第一细节信号, A_i 为设置的模糊集合, U_m 为输出的路面等级, K_i 为输入信号的最佳系数, i 为建立的模糊规则个数。

本文中设置的模糊集合及路面等级对应的数值区间如表 1 和表 2 所示。

表 1 模糊集合的数值区间

模糊集合 A_i	数值区间
1	0.005 4~0.006 6
2	0.010 4~0.011 8
3	0.019 6~0.021 2
4	0.039 4~0.042 4
5	0.084 4~0.090 0

表 2 路面等级的数值区间

路面等级	数值区间
A	0.167~0.180
B	0.341~0.355
C	0.502~0.536
D	0.676~0.714
E	0.795~0.885

3.2 路面等级识别

本文提出的路面等级识别方法的流程如图 2 所示, 描述如下。①获取悬架动行程信号: 通过双加速度传感器采集加速度信号, 基于车辆动力学方程解算悬架动行程。②计算路面相对粗糙度: 根据公式(5)计算得到路面相对粗糙度, 并作为路面分级识别的依据。③小波信号分析: 对算得的路面相对粗糙度信号进行 3 层小波变换, 选取得到的第 1、2、3 层近似信号和第 1 层细节信号作为包含时域信号不同频段信息的特征信号集合。④信号预处理: 截取特征信号和路面相对粗糙度信号中的有效部分。

⑤ T-S模糊分类:将预处理后的信号集合输入 T-S 型模糊控制器,建立模糊规则并实现路面等级识别,输出最终的路面等级。

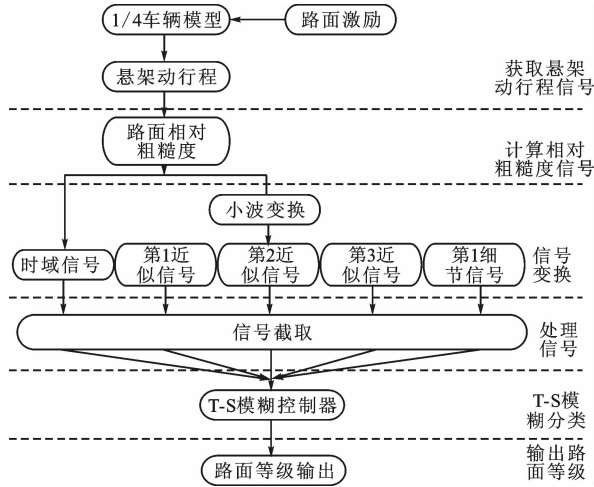


图2 路面等级识别流程图

采用双加速度传感器测量的加速度信号,经低频衰减积分变换得簧载质量位移和非簧载质量位移,进而作差得到悬架动行程,减弱了积分过程中的趋势项干扰及加速度信号处理过程中的噪声误差,同时减小了车辆自身运动对传感器测试带来的干扰。

采用设计的 T-S 型模糊控制器对不同等级路面进行等级识别,每段路面车辆行驶 40 s,以 1 s 作为识别间隔,结果如图 3 所示。可以看出,输出的路面等级识别点全部集中于对应路面等级上下,说明本文所提方法可有效实现不同路面等级识别。

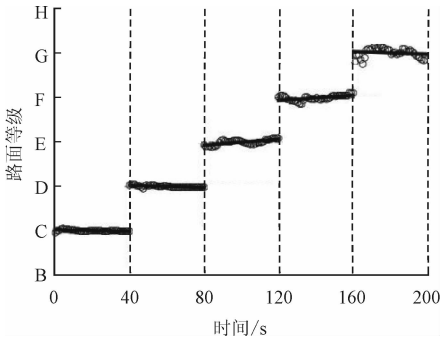


图3 不同路面等级的识别结果

4 鲁棒控制算法

4.1 主动悬架多目标控制问题描述

本文选择车辆行驶平顺性和操纵稳定性作为控制目标,对主动悬架的多目标控制策略进行研究,以车身加速度的 H_∞ 范数作为约束输出的优化指标,将悬架动行程、轮胎动静载荷比以及作动器主动力作为控制约束限制在各自允许的范围内。选取状态

变量为

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}_u - \mathbf{x}_s, \dot{\mathbf{x}}_s, \mathbf{x}_r - \mathbf{x}_u, \dot{\mathbf{x}}_u]^T \quad (6)$$

式中: $\mathbf{x}_r$ 为路面不平度,采用路面的垂直速度输入,可近似为 $\dot{\mathbf{x}}_r = 2\pi \sqrt{G_q(n_0)} v \mathbf{w}(t)$, $\mathbf{w}(t)$ 是均值为 0、强度为 1 的高斯分布白噪声。

系统的状态空间描述为

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 1 \\ \frac{k_s}{m_s} & \frac{-c_s}{m_s} & 0 & \frac{c_s}{m_s} \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ \frac{-k_u}{m_u} & \frac{c_u}{m_u} & \frac{k_t}{m_u} & \frac{-c_t}{m_u} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ G \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{w} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_s} \\ 0 \\ \frac{-1}{m_u} \end{bmatrix} \mathbf{f} \quad (7)$$

式中: $G = 2\pi \sqrt{G_q(n_0)} v$ 。

主动悬架系统的控制目标是尽可能减少簧载质量加速度,同时操纵稳定性要求:车辆行驶运动中,任意时刻的轮胎与地面间动载荷必须小于静载荷,可表示为

$$k_t(\mathbf{x}_u - \mathbf{x}_r) < (m_s + m_u)g \quad (8)$$

由于悬架机械结构限制,悬架的动行程应限定在一定范围内,即

$$\mathbf{x}_s - \mathbf{x}_u \leq \mathbf{x}_{\max} \quad (9)$$

另外,作动器存在输出饱和,因而作动器只能产生有限的作动力

$$\mathbf{f} \leq \mathbf{f}_{\max} \quad (10)$$

综上,定义输出信号为

$$\mathbf{z} = [\ddot{\mathbf{x}}_s, \mathbf{x}_u - \mathbf{x}_s, \frac{k_u(\mathbf{x}_r - \mathbf{x}_u)}{(m_s + m_u)g}, \mathbf{f}]^T \quad (11)$$

则系统的输出方程为

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \frac{k_s}{m_s} & \frac{-c_s}{m_s} & 0 & \frac{c_s}{m_s} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_u}{(m_s + m_u)g} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \frac{1}{m_s} \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{f} \quad (12)$$

定义测量反馈信号由悬架动行程信号 $\mathbf{x}_u - \mathbf{x}_s$ 和簧载质量速度信号 $\dot{\mathbf{x}}_s$ 组成,即

$$\mathbf{y} = [\mathbf{x}_u - \mathbf{x}_s, \dot{\mathbf{x}}_s]^T \quad (13)$$

式中,悬架动行程信号和簧载质量速度信号通过双加速度传感器采集的加速度信号经低频衰减积分变换得到。选取重型救援车辆进入试验路段时,加速度传感器示数为积分初值。低频衰减积分算法综合考虑了积分规则和趋势项误差,通过抑制低频信号有效地减小了积分运算带来的误差累积。系统测量

方程为

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} x \tag{14}$$

1/6 车辆悬架系统 H_∞ 输出反馈控制框图如图 4 所示,其广义控制对象 G 的状态空间为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1 w + B_2 f \\ z &= C_1 x + Df \\ y &= C_2 x \end{aligned} \right\} \tag{15}$$

其中,系统参数矩阵对应于前面的描述。

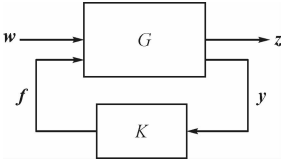


图 4 1/6 车辆悬架系统 H_∞ 输出反馈控制框图

4.2 最优 H_∞ 控制器设计

本节的目的是设计一个具有以下状态空间实现的输出反馈 H_∞ 控制器

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_k &= A_k x_k + B_k y \\ f &= C_k x_k + D_k y \end{aligned} \right\} \tag{16}$$

$$\left[\begin{array}{cc|cc} AX + XA^T + B_2 \hat{C} + (B_2 \hat{C})^T & \hat{A}^T + A + B_2 \hat{D} C_2 & B_1 & (C_1 X + D \hat{C}) \\ \hat{A}^T + A + B_2 \hat{D} C_2 & A^T Y + YA + \hat{B} C_2 + (\hat{B} C_2)^T & Y B_1 & (C_1 + D \hat{D} C_2) \\ \hline B_1 & Y B_1 & -\gamma I & 0 \\ (C_1 X + D \hat{C}) & (C_1 + D \hat{D} C_2) & 0 & -\gamma I \end{array} \right] < 0 \tag{19}$$

则 1/6 车辆主动悬架系统的输出反馈最优 H_∞ 控制器可以通过求解如下优化问题得到

$$\left. \begin{aligned} \min \quad & \gamma \\ \text{s. t.} \quad & \text{式(19)} \end{aligned} \right\} \tag{20}$$

问题(20)是一个具有线性矩阵不等式约束和线性目标函数的凸优化问题,可以在 Matlab 中应用 LMI 工具箱中的求解器 mincx 函数来求解。

控制器参数矩阵通过以下公式得到

式中: x_k 是控制器的状态向量; A_k 、 B_k 、 C_k 、 D_k 是待确定的控制器参数矩阵。

将式(16)代入式(15),得到闭环系统为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\xi} &= A_{cl} \xi + B_{cl} w \\ z &= C_{cl} \xi + D_{cl} w \end{aligned} \right\} \tag{17}$$

式中: $\xi = \begin{bmatrix} x \\ x_k \end{bmatrix}$; $A_{cl} = \begin{bmatrix} A + B_2 D_k C_2 & B_2 C_k \\ B_k C_2 & A_k \end{bmatrix}$; $B_{cl} = \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix}$; $D_{cl} = 0$; $C_{cl} = [C_1 + D D_k C_2 \quad D C_k]$ 。控制器式(16)是系统式(17)的一个 H_∞ 控制器。从 w 到 z 的传递函数的 H_∞ 范数小于 1 的充分必要条件是存在一个对称正定矩阵 X_{cl} ,使得

$$\left[\begin{array}{ccc} A_{cl}^T X_{cl} + X_{cl} A_{cl} & X_{cl} B_{cl} & C_{cl}^T \\ B_{cl}^T C_{cl} & -I & D_{cl}^T \\ C_{cl} & D_{cl} & -I \end{array} \right] < 0 \tag{18}$$

式中: $X_{cl} = \begin{bmatrix} Y & N \\ N^T & W \end{bmatrix}$; $X_{cl}^{-1} = \begin{bmatrix} X & M \\ M^T & Z \end{bmatrix}$ 。可以看出,矩阵变量 X_{cl} 和控制器参数矩阵 A_k 、 B_k 、 C_k 、 D_k 以非线性形式出现,采用变量替换法将非线性不等式(18)转换为如下的线性不等式

$$\left. \begin{aligned} A_k &= N^{-1} [\hat{A} - Y(A + B_2 D_k C_2) X] (M^T)^{-1} - \\ &\quad B_k C_2 X (M^T)^{-1} - N^{-1} Y B_2 C_k \\ B_k &= N^{-1} (\hat{B} - Y B_2 D_k) \\ C_k &= (\hat{C} - D_k C_2 X) (M^T)^{-1} \\ D_k &= \hat{D} \end{aligned} \right\} \tag{21}$$

综合以上分析,离线求解得到不同等级下的输出反馈 H_∞ 控制器参数矩阵,如表 3 所示。根据识别

表 3 不同等级路面对应的部分参数矩阵 A_k

路面等级	最优 H_∞ 性能值	部分 A_k 参数矩阵
C	5.629	$[-75.43, -61.68, -59.69, 1.67, 196.00, -3.42]$
D	6.900	$[163.95, 84.31, -32.65, 4.97, 214.92, 199.83]$
E	11.182	$[260.39, 77.36, 10.72, 9.34, 318.83, -216.35]$
F	20.046	$[-323.08, -10.27, -40.35, -2.28, -536.76, 378.26]$
G	37.971	$[-112.62, 0.42, -19.33, -0.67, 928.12, -647.69]$

的路面等级自适应选取相应的控制器参数矩阵,计算得到主动悬架作动力,实现本文提出的采用路面识别方法的主动悬架鲁棒控制。

5 试 验

本文应用的重型救援车辆如图 5 所示,图 6 为

主动悬架作动器单元,其中左侧为伺服控制作动器液压缸。液压缸上下方分别焊接了传感器安装座,通过双加速度传感器测量车辆行驶过程中的加速度信号,采样频率为 1 kHz。主要参数如表 4 所示。



图 5 重型救援车辆



图 6 主动悬架作动器单元

表 4 重型车辆及作动器液压缸主要参数

参数	数值
整车长度/mm	9 900
整车宽度/mm	3 050
整车高度/mm	3 300
整车质量/kg	36 000
质心到第 1 轴线距离/mm	1 570
质心到第 2 轴线距离/mm	2 210
质心到第 3 轴线距离/mm	3 860

为验证本文提出的路面等级识别方法,重型救援车辆在如图 7 所示的试验场地上行驶,测量其主动悬架簧载质量加速度及非簧载质量加速度,然后根据提出的路面识别方法,在 Matlab/Simulink 中对行驶路面进行不平等度模拟。图 8 为识别的路面不平等度时域信号。



图 7 试验场地

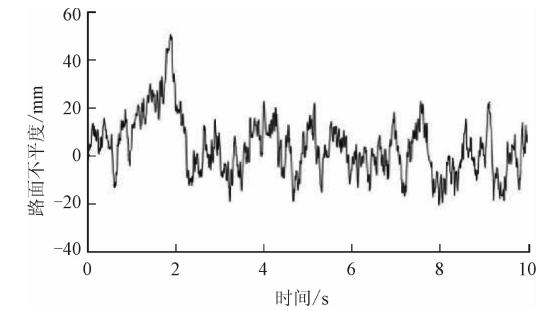


图 8 模拟路面不平度时域信号

采用本文提出的路面识别方法,识别出试验场地近似为 C 级路面。对本文提出的主动悬架鲁棒控制方法与被动悬架和天棚悬架进行时域分析,重型救援车辆在试验场地的行驶速度为 $v=80\text{ km/h}$ 。

由图 9~图 11 可知,所设计的主动悬架鲁棒控制器与被动悬架相比,在平顺性、乘坐舒适性和操纵稳定性上都有显著提高。与常用经典的天棚控制器相比,本文所设计的控制器在车身垂向加速度上有进一步改善,并在悬架行程和轮胎位移上也有显著改善,这符合鲁棒控制器设计时的硬约束性能要求。可以看出,所设计的最优 H_{∞} 控制器在提高行驶平顺性的同时,满足了操纵稳定性的要求,保证了主动悬架控制的稳定性和安全性,这对重型救援车辆在复杂高等级路面行驶时的安全性是十分关键的。

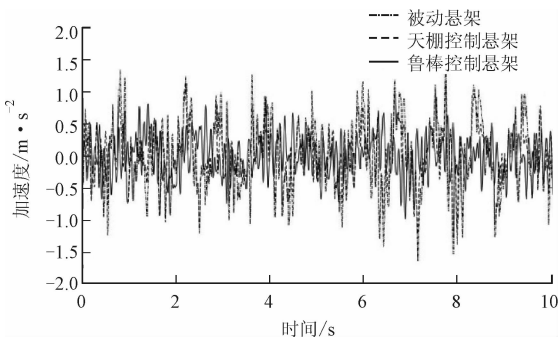


图 9 簧载质量加速度

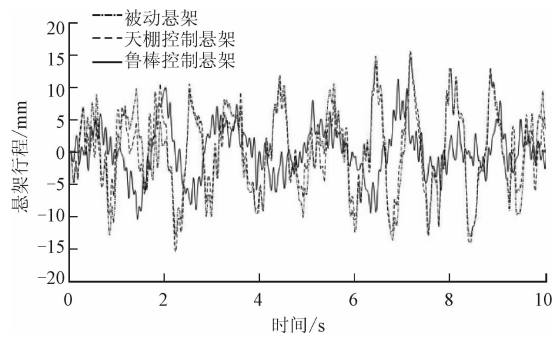


图 10 悬架行程

将设计的主动悬架鲁棒控制器应用于 C 级至

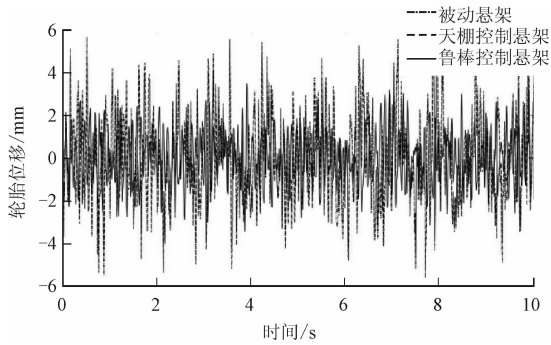


图 11 轮胎位移

G 级路面。表 5 给出了被动悬架及最优 H_{∞} 控制主动悬架簧载质量加速度的均方根值,可以看出:①与被动悬架相比,最优 H_{∞} 控制主动悬架输出明显减小,因而车辆的行驶平顺性得到了提高,并具有一定的鲁棒性;②不同等级路面间的簧载质量加速度的均方根值都有不同程度减小,尤其在高等级路面内,所设计的最优 H_{∞} 控制器也可以产生理想效果,这是因为计算控制器参数矩阵时采用了不同等级的路面系数。体现了本文所设计控制器的优越性。

表 5 不同等级路面内的加速度均方根值

路面等级	簧载质量加速度均方根/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$		改善程度/%
	被动	鲁棒	
C	0.569 8	0.368 3	35.36
D	1.139 1	0.756 6	31.58
E	2.279 4	1.622 3	28.83
F	4.556 3	3.514 7	22.86
G	9.112 5	7.056 9	22.56

为进一步说明本文所提出的采用路面识别方法的主动悬架鲁棒控制方法适用于不同等级路面,对其在频域内进行分析比较。根据国际标准 ISO 2361,人体对 4~8 Hz 的垂直振动十分敏感,因此要求簧载质量加速度的幅值在 4~8 Hz 频段内越小越好。图 12 为主动悬架鲁棒控制器与被动悬架在不

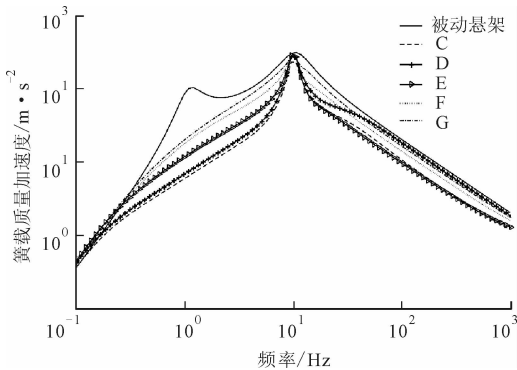


图 12 不同等级路面内的频率响应曲线

同等级路面内的频率响应曲线,可以看出:①与被动悬架相比,最优 H_{∞} 控制主动悬架的加速度频率响应在所关心的频段内优于被动悬架;②不同等级路面间的簧载质量加速度的幅值都有不同程度减小,尤其在高等级路面内,对簧载质量垂直振动也有一定抑制,提高了车辆行驶平顺性和操纵稳定性。

6 小 结

(1)为建立适用于重型救援车辆在行驶时的路面等级识别依据,在国际路面粗糙度 I_{IRI} 的基础上提出了相对路面粗糙度 I_{RRI} 。

(2)提出了一种新的路面等级识别方法,以相对路面粗糙度 I_{RRI} 为识别依据,通过 T-S 型模糊控制器实现了路面等级识别。

(3)设计了最优 H_{∞} 鲁棒控制器,并根据路面等级选取相应的最优 H_{∞} 控制器参数矩阵,实现了主动悬架在不同等级路面行驶时的自适应控制。试验结果表明,本文提出的控制策略在各等级路面均可产生良好的控制效果。

参考文献:

- [1] GOBB M, MASTINNU G. Analytical description and optimization of the dynamic behavior of passively suspended road vehicles [J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 245(3): 457-481.
- [2] 张振华,董明明. 2 自由度车辆悬架线性模型最佳阻尼比的解析分析 [J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(12): 1057-1059.
- ZHANG Zhenhua, DONG Mingming. Analysis on the optimal ratio on a 2 DOF linear model of vehicle suspension [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(12): 1057-1059.
- [3] 陈洪兴,何兆益. 基于国际平整度指数 RRI 的路面不平度研究 [J]. 公路, 2008(11): 155-160.
- CHENG Hongxing, HE Zhaoyi. A study on simulation of road roughness based on international roughness index [J]. Highway, 2008(11): 155-160.
- [4] ZHANG Yonglin, ZHAO Jiafan. Numerical simulation of stochastic road process using white noise filtration [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(2): 363-372.
- [5] AHLIN K, GRANLUND J, LINDSTROM F. Comparing road profiles with vehicle perceived roughness [J]. International Journal of Vehicle Design, 2004, 26(3): 270-286.
- [6] International Organization for Standardization. Me-

- chanical vibration: road surface profiles reporting of measured data [S]. London, UK: International Organization for Standardization, 1995.
- [7] SAYERS M W, GILLESPIE T D, PATERSON W D. Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements [R]. Washington, USA: World Bank, 1986: 26-32.
- [8] SUN Lu, RUTH J. Modeling indirect statistics of surface roughness [J]. Journal of Transportation Engineering, 2001, 127(2): 27-30.
- [9] 宋刚, 徐长成. 考虑控制时滞的车辆主动悬架随机预瞄控制 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 1-7.
- SONG Gang, XU Changcheng. Stochastic optimal preview control of active vehicle suspension with time-delay consideration [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 1-7.
- [10] WANG B, GUAN H. Road surface condition identification approach based on road characteristic value [J]. Journal of Terramechanics, 2014, 56: 103-117.
- [11] BALAZS N, PETER G. Considering predicted road conditions in vehicle control design H_{∞} method [C]// 6th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control. Schlossplatz, Austria: IFAC Secretariat, 2010: 396-401.
- [12] 么鸣涛, 管继富, 顾亮. 基于车辆振动加速度响应的路面识别 [J]. 拖拉机与农用运输车, 2011, 38(1): 28-31.
- YAO Mingtao, GUAN Jifu, GU Liang. Research on road identification based on vehicle vibration acceleration response [J]. Tractor & Farm Transporter, 2011, 38(1): 28-31.
- [13] QIN Yechen, DONG Mingming, ZHAO Feng, et al. Road profile classification for vehicle semi-active suspension system based on adaptive neuro fuzzy inference system [C]// Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 1533-1538.
- [14] BAR H A, LERNER R, LEVI D, et al. Recent progress in road and lane detection: a survey [J]. Machine Vision and Applications, 2014, 25(3): 727-745.
- [15] LEVULYTE L, URAULIS V, SOKOLOVSKIJ E. The research of dynamic characteristics of a vehicle driving over road roughness [J]. Eksploatacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability, 2014, 16(4): 518-525.
- [16] WARDC C, IAGEMMA K. Speed-independent vibration-based terrain classification for passenger vehicles [J]. Vehicle System Dynamics, 2009, 47(9): 1095-1113.
- [17] 李忠国. 基于垂直动载的路面不平度识别研究 [D]. 南京: 东南大学, 2007: 59-62.
- [18] FENG Jun, ZHANG Xinjie, GUO Konghui, et al. A frequency compensation algorithm of four-wheel coherence random road [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013: 986584.

[本刊相关文献链接]

- 卓明, 杨利花, 夏凯, 等. 考虑热场的重型燃气轮机组转子盘间接触应力分析. 2018, 52(11): 58-64. [doi: 10.7652/xjtuxb201811009]
- 陈保家, 邱光银, 肖文荣, 等. 航空发动机转子轴承运行可靠性评估方法. 2018, 52(10): 41-48. [doi: 10.7652/xjtuxb201810006]
- 田红亮, 余媛, 杜义贤. 重载下滚动直线导轨副的接触特性. 2018, 52(9): 1-9. [doi: 10.7652/xjtuxb201809001]
- 张磊, 徐华, 裴世源. 滑动轴承椭圆度对转子加速过程振动响应的影响. 2018, 52(9): 19-27. [doi: 10.7652/xjtuxb201809003]
- 夏凯, 孙岩桦, 卓明, 等. 带传扭销的环形平面接触轴段扭转特性研究. 2018, 52(9): 82-88. [doi: 10.7652/xjtuxb201809011]
- 刘石, 杨毅, 田丰, 等. 变压器绕组振动传递特性仿真研究. 2018, 52(6): 69-75. [doi: 10.7652/xjtuxb201806011]
- 田红亮, 何孔德, 陈从平, 等. 采用俞茂宏统一强度理论求解套管的极限外压强. 2018, 52(5): 1-11. [doi: 10.7652/xjtuxb201805001]
- 陈保家, 汪新波, 严文超, 等. 采用品质因子优化和子带重构的共振稀疏分解滚动轴承故障诊断方法. 2018, 52(4): 70-76. [doi: 10.7652/xjtuxb201804010]
- 田红亮, 彭文昱, 何孔德, 等. 采用俞茂宏统一强度理论求解圆筒和球壳的极限值. 2018, 52(3): 1-10. [doi: 10.7652/xjtuxb201803001]
- 杨毅, 刘石, 田丰, 等. 突发短路条件下变压器绕组振动特性的仿真研究. 2017, 51(10): 19-26. [doi: 10.7652/xjtuxb201710004]
- 妥吉英, 邓兆祥, 张河山, 等. 新型扭转准零刚度的振动角度传感系统. 2017, 51(8): 90-95. [doi: 10.7652/xjtuxb201708015]
- 温淑花, 张学良, 陈永会, 等. 结合面切向接触等效黏性阻尼分形模型. 2017, 51(1): 1-8. [doi: 10.7652/xjtuxb201701001]

(编辑 刘杨)