文章编号:1001-3997(2012)09-0063-03

组合式半挂车液压悬架线性二次型最优控制器的设计及仿真

田晋跃 李 光 田 刚
(江苏大学 汽车与交通工程学院,镇江 212013)

Design and Simulation on the Optimal Control Model of Hydraulic Suspension System for Assembled Semi-Trailer

TIAN Jin-yue, LI Guang, TIAN Gang
(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

【摘 要】研究通过建立随机路面输入模型和组合式半挂车三轴的液压悬架动力学模型，运用最优控制原理研究设计出液压悬架的线性二次型最优控制器。在 Matlab/simulink 仿真环境中构建液压主动悬架的仿真模型。结果表明:在白噪声激励下,配有线性二次型最优控制器的液压悬架与被动悬架相比,在侧倾角加速度,轮胎动载荷变化和悬架动行程方面都有不同程度的优化,保证了半挂车载货平台的水平度和高度变化幅度,提高了组合式半挂车行驶的安全性和操纵的稳定性。

关键词:组合式半挂车;液压悬架;最优控制;仿真

【Abstract】*The research is based on a random road input model and a dynamic and mathematic model for hydraulic suspension of the front module of the semi-trailer, and by using the optimal theory, a* LQR *controller is researched and designed. By means of the software* Matlab/simulink, *the simulation model for the hydraulic active suspension is built. The result showes that compared with the passive suspension by white noise, the hydraulic suspension with* LQR *controller is superior both on the fields of acceleration of body's roll angle, the dynamic flexibility of suspension and the dynamic load of tires, ensuring the levelness of the platform and height change range of semi-trailer, enhancing the stability when the assembled semi-trailer travels.*

Key Words: Assembled Semi-Trailer; Hydraulic- Suspension; Optimal Control; Simulation

中图分类号:TH16 文献标识码:A

1 引言

悬架是汽车的重要组成部分,它不仅要承受车体质量,还要减少来自地面的振动。汽车悬架的控制策略,逐渐成为相关领域的专家学者研究重点[1-2]。常见的控制方式有被动控制、主动控制和半主动控制,最优控制理论和开关控制算法是应用广泛的控制算法[3-4]。由于线性二次型问题的最优解可以写成统一的解析表达式和实现求解过程的规范化,且可推导出一个简单的线性状态的反馈控制规律,易于构成闭环最优反馈控制,便于工程实现,因而在实际工程问题中得到了广泛应用[5-7]。通过对组合式半挂车三轴悬架模型进行仿真分析;针对传统被动悬架缺陷进行改进设计控制模型,在侧倾角加速度,轮胎动载荷和悬架动行程上都有不同程度的优化,提高了半挂车行驶的安全性和稳定性。

2 悬架动力模型的建立

通过对三轴模块受力简化和受力分析得到受力图，如图 1 所示。

根据模型可得系统的状态方程为:

$$\dot{X}=AS+BU+FW$$
$$Y=CX+DU \qquad (1)$$

式中:X—状态变量;U—控制向量,$U=[U_1,U_2,U_3,U_4,U_5,U_6]^T$;$W$—扰动向量,$W=[\omega_1,\omega_2,\omega_3,\omega_4,\omega_5,\omega_6,]^T$;$A$—系统矩阵;$B$—控制矩阵;$F$—扰动矩阵;$C$—输出矩阵;$D$—传递矩阵。根据系统的一阶微分方程组可求出矩阵 A,B,F,C,D。

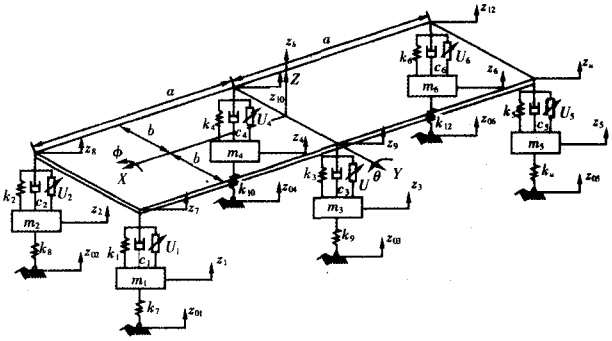


图 1 三轴模块的九自由度模型

3 线性二次型最优控制器设计

研究的组合式半挂车液压悬架的线性二次型最优控制的目标是车身的侧倾角加速度，轮胎的动载荷和液压悬架的动行程。故选取车身的侧倾角加速度,六个车轮的动载荷,六个液压悬架

★来稿日期:2011-11-10

的动行程作为该动力学模型最优控制器的控制指标。因此线性二次型最优控制器设计的性能指标 J 表达式为:

$$J=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T\begin{bmatrix} q_1\ddot{\phi}^2+q_2k_7^2(z_1-z_{01})^2+q_3k_8^2(z_2-z_{02})^2+ \\ q_4k_9^2(z_3-z_{03})^2+q_5k_{10}^2(z_4-z_{04})^2+ \\ q_6k_{11}^2(z_5-z_{05})^2+q_7k_{12}^2(z_6-z_{06})^2+ \\ q_8(z_7-z_1)^2+q_9(z_8-z_2)^2+q_{10}(z_9-z_3)^2+ \\ q_{11}(z_{10}-z_4)^2+q_{12}(z_{11}-z_5)^2+q_{13}(z_{12}-z_6)^2 \end{bmatrix}\mathrm{d}t \quad (2)$$

系统的输出状态方程 $Y=CX+DU$ 代入,就可以转化为状态调节器问题。转化后的优化指标为:

$$J=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T(X^TQX+2X^TNU+U^TRU)\mathrm{d}t \quad (3)$$

其中,$Q=C^T$;$qC\ N=C^TqD$;$R=D^TD$

4 仿真模型建立及结果分析

4.1 仿真模型建立

利用 MATLAB/Simulink 建立线性二次型最优控制的液压主动悬架系统和被动悬架模型仿真模型,如图 2 所示。仿真时间设为 10s,车速 18km/h,采样时间 0.005s。模型的参数说明,如表 1 所示。路面输入模型采用滤波白噪声,在 Matlab/Simulink 中实现仿真的框图,如图 3 所示。车辆在 B 级路面以速度 18km/h 行驶时,仿真得到路面垂直位移时域信号。且各轴车轮之间路面输入是有时间延迟的。中间轴的滞后时间为:$\Delta t=a/v_0$;第三轴的滞后时间为:$\Delta t=2a/v_0$

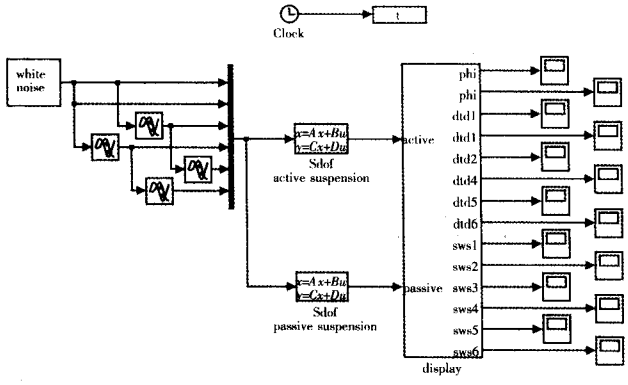


图2 仿真模型 Simulink 框图

表 1 九自由度模型结构参数

车辆模型参数	符号	数值	单位
车身质量	m_b	96000	kg
车轮质量	m_1,m_2,m_3,m_4,m_5,m_6	150	kg
质心距 1,3 轴的距离	a	1.5	m
质心距左右轮中心线的距离	b	1.0	m
悬架刚度	k_1,k_2,k_3,k_4,k_5,k_6	20000	N/m
轮胎刚度	$k_7,k_8,k_9,k_{10},k_{11},k_{12}$	192000	N/m
悬架阻尼	c_1,c_2,c_3,c_4,c_5,c_6	2100	N·S/m
车身绕 y 轴转动惯量	I_p	73500	kg·m²
车身绕 x 轴转动惯量	I_r	18000	kg·m²

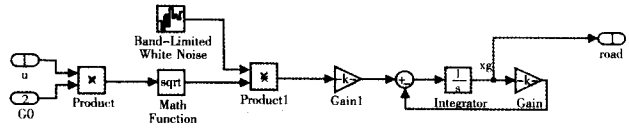


图 3 路面模型 Simulink 框图

4.2 仿真结果分析

仿真得到的各评价指标的对比结果,如图 3~图 6 所示。

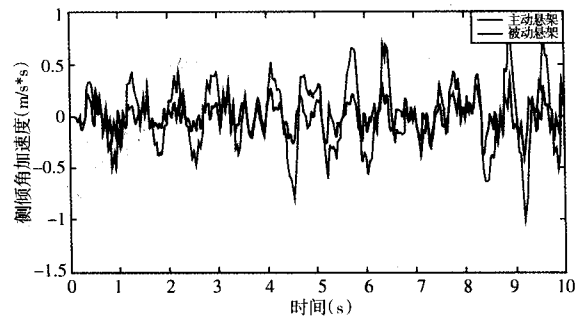
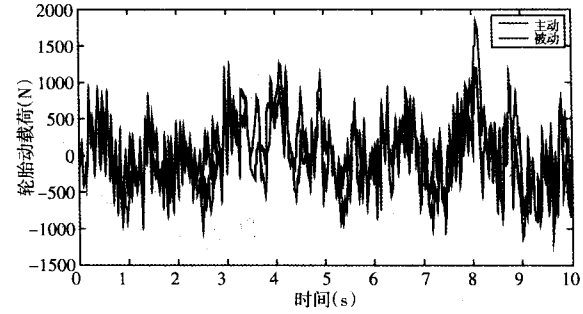
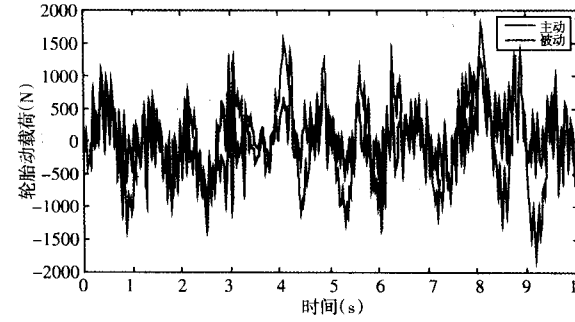


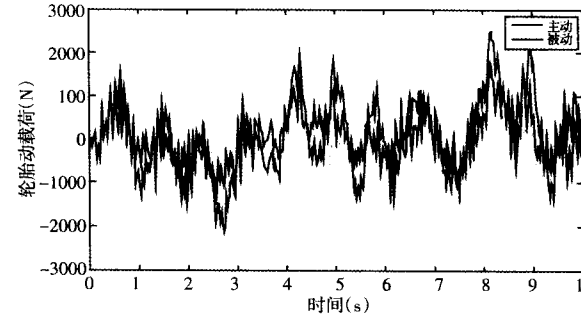
图 4 主(被)动悬架车身侧倾角加速度对比图



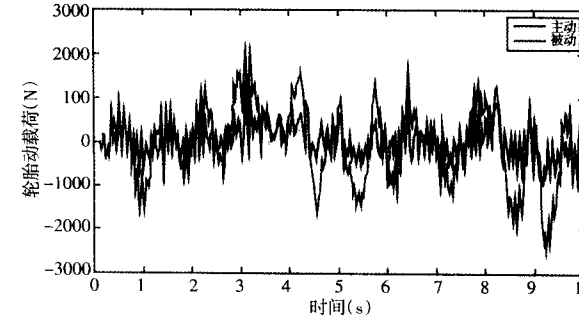
(a)左前轮胎动载荷对比结果



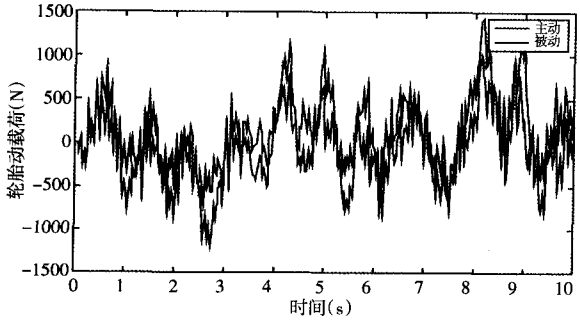
(b)右前轮胎动载荷对比结果



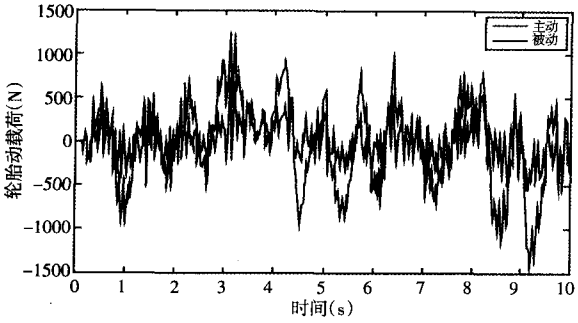
(c)左中轮胎动载荷对比结果



(d)右中轮胎动载荷对比结果

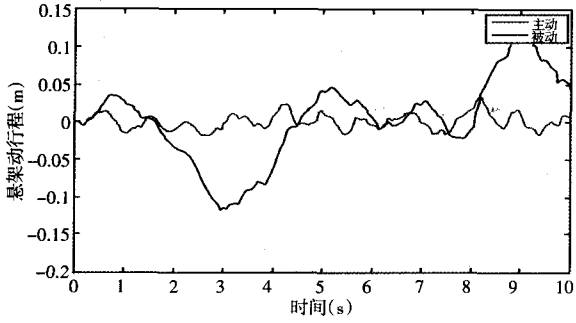


(e)左后轮胎动载荷对比结果

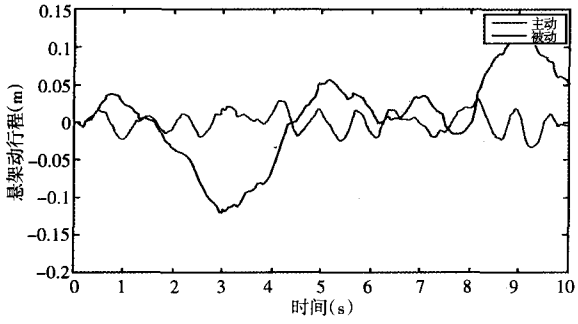


(f)右后轮胎动载荷对比结果

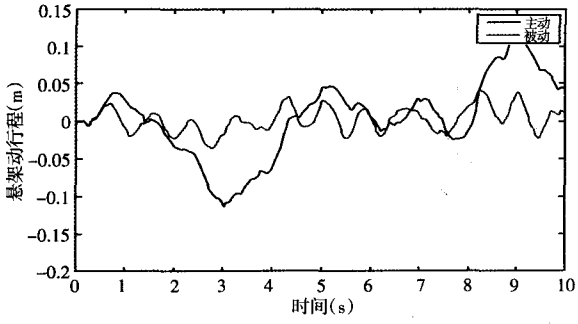
图 5 主(被)动悬架轮胎动载荷对比图



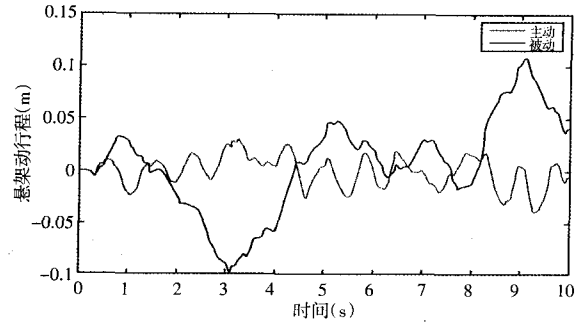
(a)左前悬架动行程对比结果



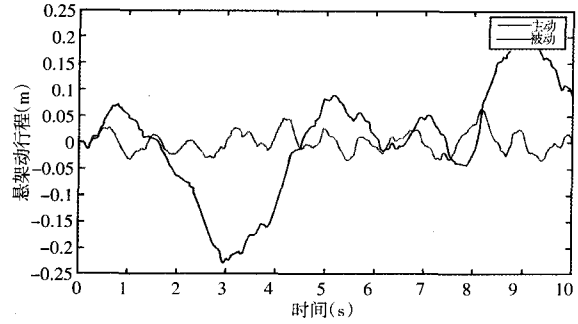
(b)右前悬架动行程对比结果



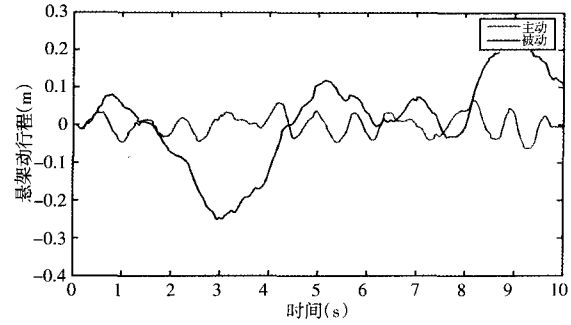
(c)左中悬架动行程对比结果



(d)右中悬架动行程对比结果



(e)左后悬架动行程对比结果



(f)右后悬架动行程对比结果

图 6 主(被)动悬架动行程对比图

5 结论

由图 4 可知,在白噪声激励下,与被动悬架相比,采用最优控制的液压悬架有效地减少了车身侧倾角加速度,车身减振效果明显,有利于半挂车行驶的平顺性。由图 5 可知,与被动悬架相比,采用最优控制的液压悬架有效地抑制了轮胎动载荷变化,装有主动控制的液压悬架的挂车的车轮动载荷比较稳定,有利于半挂车行驶的操作稳定性。由图 6 可知,与被动悬架相比,采用最优控制的液压悬架有效地减小了悬架的动行程,进而降低了挂车的载货平台的高度以及减小了撞击悬架限位的概率,进一步提高了半挂车行驶的平顺性。挂车行驶平顺性和操作稳定性的提高保证了载货平台的水平度和高度变化,提高了组合式半挂车行驶的安全性和稳定性。

参考文献

[1] Williams RA.Automotive Active Suspension Part1:Basic Princi-ples[J]. ASME Proc Instn Engrs,1997,211(PartD):415-446.
[2] Williams RA.Automotive Active Suspension Part2:Practical Considerations[J].ASME Proc Instn Engrs,1997, 211(PartD):427-444.
[3] 王昊,胡海岩.基于磁流变阻尼器整车半主动悬架的开关控制[J].振动与控制学报, 2004,2(4): 71-76.
[4] 管继富,顾豪,侯朝桢.车辆半主动悬架自适应 LQG 控制[J].系统仿真学报,2004,16(10):2340-2343.
[5] 于长官.现代理论及研究[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.
[6] 李国勇.最优控制理论及参数优化[M].北京:国防工业出版社,2006(1).
[7] 刘豹.现代控制理论[M].北京:机械工业出版社,2000(5).