

基于 Kalman 滤波和 LQG 控制的 主动悬架系统容错控制研究

王玉蓉, 张海龙, 王恩荣

(南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 传感器掺杂噪声信号是主动悬架系统运行过程中常见的一种故障。针对二自由度车辆主动悬架系统加速度传感器发生故障的情况, 基于最优控制理论和卡尔曼滤波算法, 设计了线性高斯二次型(linear quadratic Gaussian, LQG)控制器, 分别在谐波激励、冲击性和实测路面谱激励下, 进行综合悬架性能仿真分析。结果表明, 与无容错情况相比, 故障状态下采用容错控制后的簧载与非簧载质量传输率、悬架动行程传输率均大幅减小, 有效提升了驾乘舒适性, 同时轮胎动载荷传输率显著增大, 确保了安全性, 整体可近似恢复到无故障时的主动悬架性能。

[关键词] 主动悬架, LQG 控制器, Kalman 滤波, 容错控制

[中图分类号] U463.33 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2020)04-0030-07

Research on Fault Tolerant Control of Active Suspension System Based on Kalman Filtering and LQG Control Algorithm

Wang Yurong, Zhang Hailong, Wang Enrong

(NARI School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Sensor-doped noise signal is a kind of fault that will occur during the operation of active suspension system. Aiming at the failure of the acceleration sensor of the two-degree-of-freedom vehicle active suspension system, this paper designs a linear quadratic Gaussian (LQG) controller based on the optimal control theory and Kalman filter algorithm. Under the excitation of impact and measured road surface spectrum, a comprehensive suspension performance simulation analysis is carried out. The results show that compared with the non-fault-tolerant situation, the sprung and unsprung mass transmission rate and the suspension dynamic stroke transmission rate after the fault-tolerant control are adopted in the fault state are greatly reduced, which effectively improves the driving comfort and the tire dynamics. The load transmission rate has been significantly increased to ensure safety, and the overall performance of the active suspension can be approximately restored to that in a failure-free condition.

Key words: active suspension, LQG controller, Kalman filter, fault-tolerant control

汽车作为现代出行必要的代步工具, 其内在性能受到了人们很高的关注, 尤其是舒适性和安全性两方面, 这主要由悬架系统性能来决定^[1]。因为被动悬架参数固定、运行时状态无法调节, 难以满足车辆综合悬架性能要求, 继而发展出新型可控悬架系统。根据行驶状态和路面状况自适应调节, 可最大限度地满足车辆运行中对舒适性和安全性的折中需求, 包括半主动和主动悬架两类^[2]。振动加速度传感器通过测量悬架的运行状态, 用于主动控制器的设计, 然而在行驶过程中主动悬架遇到元器件或环境电磁干扰的问题, 均会导致传感器输出故障, 甚至会造成控制器失效, 从而影响乘客的乘坐舒适性甚至危及乘客的安全。

目前众多学者对故障下的主动悬架容错控制方法开展了广泛的研究, 主要针对执行器和传感器发生故障的情况。杨柳青等^[3]在传感器故障下设计了自适应故障估计系统, 提出一种基于传感器信号重构的主动容错控制方法, 有效地估计传感器故障值, 提高了悬架性能和控制品质, 并具有良好的控制鲁棒性。陈双等^[4]设计了卡尔曼滤波器对悬架进行状态估计。在作动器发生故障的情况下, 基于故障增益对

收稿日期: 2020-07-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475246)、江苏省自然科学基金青年项目(BK20171039)。

通讯作者: 张海龙, 博士, 副教授, 研究方向: 磁流变智能减振及电磁馈能技术研究. E-mail: 61204@njnu.edu.cn

LQG 控制率进行实时补偿,提高了主动悬架的可靠性. 张袅娜等^[5]建立了悬架系统定性与定量结合的统一模型,针对未知输入设计了未知输入观测器并提出对故障和状态解耦的方法,仿真结果表明该方法能够有效观测悬架故障与状态. Zhang 等^[6]提出了一种可以反映自适应调节律的滑模观测器,能够对叉车系统传感器故障进行检测和信号重构,同时设计了滑模容错控制器,有效提高了故障发生时叉车系统运行安全性. Lin 等^[7]设计了比例差动滑模观测器来实现传感器和执行器的故障重构,提出了一种基于非线性控制理论的四轮车辆主动悬架系统的容错控制方法,提高了故障下车辆运行稳定性.

本文基于文献[8]提供的加权系数,结合 Kalman 滤波算法与最优控制理论设计了 LQG 控制器. 建立二自由度悬架状态空间模型以及故障模型,通过对比分析谐波激励、平滑脉冲和随机路面谱典型激励下主动悬架在传感器未发生故障、传感器发生故障下无容错控制以及传感器发生故障下有容错控制的综合悬架性能,仿真验证 LQG 控制器对综合悬架性能的效果.

1 悬架系统模型建立

1.1 悬架动力学模型

如图 1,为二自由度主动悬架模型^[4]. 设 x_s 为簧载位移; x_u 为非簧载位移; x_i 为路面激励位移; m_s 为簧载质量; m_u 为非簧载质量; k_t 为轮胎刚度系数; k_s 为弹簧刚度系数; c_s 为悬架阻尼系数; F_a 为悬架主动控制力.

上述二自由度的主动悬架运动微分方程为

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_s + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u) + k_s (x_s - x_u) = F_a, \\ m_u \ddot{x}_u - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u) - k_s (x_s - x_u) + k_t (x_u - x_i) = -F_a. \end{cases} \quad (1)$$

取状态变量 $\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$. 其中, $x_1 = x_s - x_u$, $x_2 = \dot{x}_s$, $x_3 = x_u - x_i$, $x_4 = \dot{x}_u$, 控制输入为 $\mathbf{U} = [F_a]$, 干扰输入为 $\mathbf{w} = [x_i]$.

其状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{G}\mathbf{w}(t), \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{D}\mathbf{U}. \end{cases} \quad (2)$$

式中,方程中的各系数矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ \frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & 0 & \frac{c_s}{m_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_s}{m_u} & \frac{c_s}{m_u} & \frac{k_t}{m_u} & -\frac{(c_s + k_t)}{m_u} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_s} \\ 0 \\ -\frac{1}{m_u} \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & 0 & \frac{c_s}{m_s} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{k_s}{m_u} & \frac{c_s}{m_u} & \frac{k_t}{m_u} & -\frac{(c_s + k_t)}{m_u} \end{bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_s} \\ 0 \\ -\frac{1}{m_u} \end{bmatrix}.$$

1.2 故障悬架模型

本文只考虑传感器故障的情况,其对应量测输出可表示为以下形式:

$$y_f = \alpha y + \varepsilon. \quad (3)$$

式中: y_f , y 分别为传感器故障输出值和实际输出值; α 为传感器故障增益的系数; ε 为传感器卡死或恒偏差的值.

当 $\alpha \in (0, 1)$, $\varepsilon = 0$ 时,传感器发生增益故障;当 $\alpha = 1$, $\varepsilon \neq 0$ 时,发生恒偏差为 ε 的故障;当 $\alpha = 0$, $y = \varepsilon$ 时发生卡死故障. 传感器在发生上述故障时悬架系统的输出为

$$\mathbf{Y}_f = \alpha \mathbf{Y} + \varepsilon = \mathbf{Y} + (\alpha - 1) \mathbf{Y} + \varepsilon = \mathbf{C}_f \mathbf{X} + \mathbf{F} \mathbf{f} + \mathbf{v}. \quad (4)$$

式中, \mathbf{C}_f 为输出矩阵, \mathbf{F} 为传感器故障矢量, \mathbf{f} 为传感器故障值向量,其值为 $(\alpha - 1) \mathbf{Y} + \varepsilon$, \mathbf{v} 为干扰向量.

故障悬架模型状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{G}\mathbf{w}, \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{D}\mathbf{U}, \\ \mathbf{Y}_f = \mathbf{C}_f \mathbf{X} + \mathbf{F} \mathbf{f} + \mathbf{v}. \end{cases} \quad (5)$$

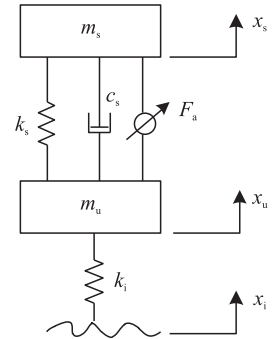


图 1 二自由度主动悬架模型
Fig. 1 2-DOF active suspension model

式中, A, B, C, D, G 为适维悬架系统参数矩阵.

2 车辆主动悬架容错控制器设计

2.1 LQG 控制器设计

LQG 主动悬架的评价指标泛函 J 定义为时域 T 内簧载质量加速度、悬架动行程、簧载质量速度、轮胎动位移、非簧载质量速度的加权平方和的积分值^[9-10]. 表达式如下:

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [\ddot{x}_s^2 + \rho_1(x_s - x_u)^2 + \rho_2 \dot{x}_s^2 + \rho_3(x_u - x_i)^2 + \rho_4 \dot{x}_u^2] dt. \quad (6)$$

式中, $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$ 分别为评价指标的权重系数.

二次函数积分型表达式如下:

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

式中,

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{k_s^2}{m_s^2} + \rho_1 & \frac{c_s k_s}{m_s^2} & 0 & -\frac{c_s k_s^2}{m_s^2} \\ \frac{c_s k_s^2}{m_s^2} & \frac{c_s^2}{m_s^2} + \rho_2 & 0 & \frac{c_s^2}{m_s^2} \\ 0 & 0 & \rho_3 & 0 \\ -\frac{c_s k_s^2}{m_s^2} & -\frac{c_s^2}{m_s^2} & 0 & \frac{c_s^2}{m_s^2} + \rho_4 \end{bmatrix}, N = \begin{bmatrix} -\frac{k_s}{m_s^2} \\ \frac{c_s}{m_s^2} \\ 0 \\ \frac{c_s}{m_s^2} \end{bmatrix}, R = \frac{1}{m_s^2}.$$

根据极值定理,在任意 t 时刻都能够求出悬架的最优控制力 $U(t)$:

$$U(t) = -R^{-1} B^T P X(t) = -K X(t). \quad (8)$$

式中, K 为增益矩阵; P 可由 Riccati 方程求得^[11-12], 方程式如下:

$$(A - B R^{-1} N)^T P + P(A - B R^{-1} N) + (Q - N^T R^{-1} N) - P B R^{-1} B^T P = 0. \quad (9)$$

2.2 基于 Kalman 滤波的故障状态观测器

卡尔曼滤波根据系统状态可分为预测部分和校正部分. 预测部分是依据前一时刻的状态值得到该时刻先验估计的部分, 校正部分是结合测量和预测得到后验估计的部分^[13].

主动悬架的状态方程和量测方程如下:

$$\begin{cases} x(k) = A x(k-1) + B u(k) + G w(t), \\ y(k) = C x(k) + D u(k). \end{cases} \quad (10)$$

式中, $x(k)$ 、 $x(k-1)$ 分别为 k 与 $k-1$ 时刻的状态矢量; $y(k)$ 为 k 时刻的测量值, $u(k)$ 为 k 时刻的测量噪声; $w(k)$ 为 k 时刻的过程噪声.

由于系统呈线性, 且系统噪声呈高斯分布, 容易得到此算法的预测和校正方程^[14].

(1) 预测部分

状态预测:

$$\hat{x}(k|k-1) = A \hat{x}(k-1|k-1) + B u(k), \quad (11)$$

误差预测:

$$P(k|k-1) = A P(k-1|k-1) A^T + Q(k). \quad (12)$$

(2) 校正部分

增益方程:

$$k_g(k) = \frac{P(k|k-1) \cdot C^T}{[C \cdot P(k|k-1) \cdot C^T + R]}. \quad (13)$$

滤波方程:

$$\mathbf{x}(k|k) = \mathbf{x}(k-1|k-1) + \mathbf{k}_g(k) [\mathbf{y}(k) - \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(k|k-1)]. \quad (14)$$

误差更新:

$$\mathbf{P}(k|k) = [\mathbf{I} - \mathbf{k}_g(k) \cdot \mathbf{C}] \mathbf{P}(k|k-1). \quad (15)$$

当传感器发生故障时,结合式(5)得到传感器故障下状态误差和输出残差方程为:

$$\mathbf{e} = \bar{\mathbf{x}} - \hat{\mathbf{x}}, \quad (16)$$

$$\mathbf{r} = \bar{\mathbf{y}} - \hat{\mathbf{y}}. \quad (17)$$

式中, $\bar{\mathbf{x}}$ 为状态变量的测量值, $\hat{\mathbf{x}}$ 为状态变量的估计值, $\bar{\mathbf{y}}$ 为输出变量的测量值, $\hat{\mathbf{y}}$ 为输出变量的估计值.

在加速度传感器发生故障时,能够对簧载质量加速度、非簧载质量加速度、悬架动挠度以及轮胎动载荷进行状态估计,并与实际输出比较获得残差,针对故障诊断的结果对悬架主动力进行故障补偿.

3 车辆主动悬架模型的仿真分析

主动悬架系统参数如表 1,当 F_a 为零时为被动悬架系统.

3.1 谐波激励响应

本文采用分段谐波激励信号,在高频时能够限制位移谐波信号幅值,如式(18)所示.

$$x_i = \begin{cases} a_m \sin(2\pi ft), & f \leq f_T, \\ a_m (f_T/f) \sin(2\pi ft), & f > f_T. \end{cases} \quad (18)$$

式中, a_m 表示谐波激励信号的幅值,选为 2.5 cm, f 为谐波激励信号的频率,选为 0~20 Hz, f_T 为谐波激励信号的转折频率,选为 2.1 Hz.

无故障主动控制(active control, Active)、故障下无容错控制(no fault-tolerant control, NFTC)以及故障下有容错控制(fault-tolerant control, FTC)的主动悬架在谐波激励下的频域响应如图 3 所示. 悬架系统的评

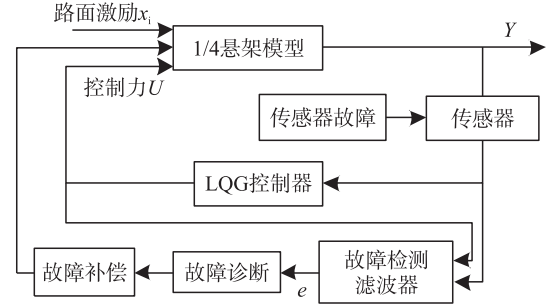


图 2 二自由度悬架系统 LQG 控制原理框图

Fig. 2 Schematic diagram of LQG control-based 2-DOF suspension system

表 1 二自由度车辆模型参数

Table 1 Parameters of 2-DOF vehicle model

车辆模型参数	数值
簧载质量 m_s/kg	189.25
非簧载质量 m_u/kg	15.95
悬架弹簧刚度 $k_s/(\text{N}\cdot\text{m})$	16 000
减振器阻尼系数 $c_s/((\text{N}\cdot\text{s})/\text{m})$	1 000
轮胎等效刚度 $k_t/(\text{N}\cdot\text{m})$	120 000

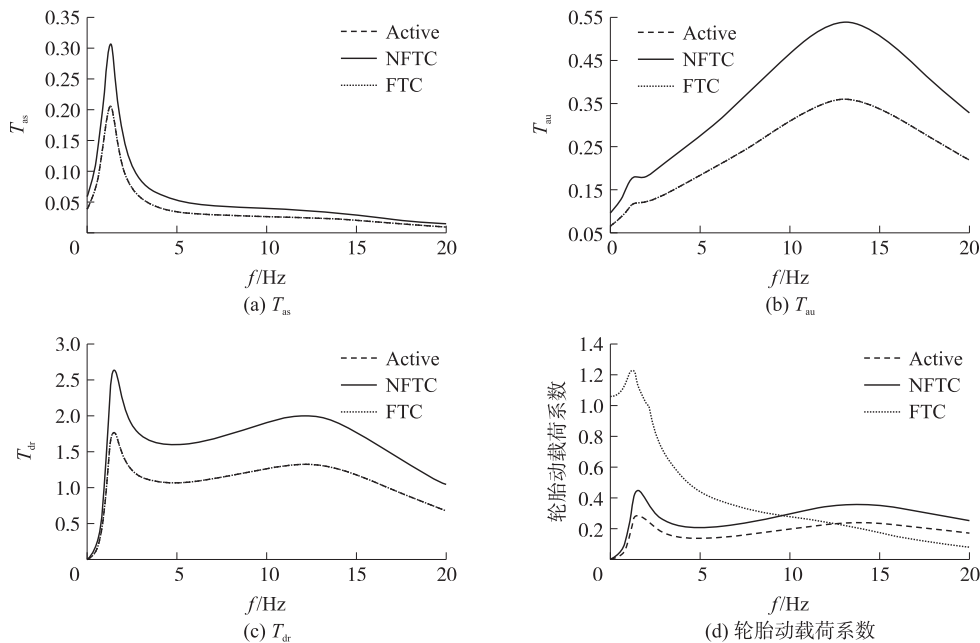


图 3 谐波激励下二自由度悬架的频域响应

Fig. 3 Frequency domain response of 2-DOF suspension under harmonic excitation

价指标主要有簧载质量加速度传输率 T_{as} , 非簧载质量加速度传输率 T_{au} , 悬架动行程传输率 T_{dr} 以及轮胎动载荷系数^[15]. 从图 3 中, 可以看出 FTC 的加速度传输率以及动行程传输率和 Active 几乎一致, NFTC 加速度传输率以及动行程传输率均明显增加, 并且 FTC 的动载荷较 Active 有所增加. 在低频时 FTC 的 T_{as} , T_{au} 和 T_{dr} 的峰值较 NFTC 分别减少了 32.3%, 33.3% 和 30.7%, 此时簧载质量共振频率大约为 1.5 Hz, 同时 DLC 的峰值明显增加, 因此可以看出明显改善了簧载质量共振抑制的悬架性能. 在 3~8 Hz 的中间频域内, Active 的 T_{as} 的大小明显降低, 而 DLC 的大小有所升高, 此时悬架的平顺性有所降低, 而安全性有所提高. 总之, 在频域范围 0~20 Hz 内, NFTC 安全性能降低, FTC 乘坐舒适性虽然有所降低, 但是安全性显著提高, 很好地改善了悬架的综合悬架性能.

图 4 给出了共振频率谐波激励下的 Active、NFTC 与 FTC 悬架性能时域比较, 可以看出在谐波激励下传感器故障时 NFTC 簧载质量加速度 a_s , 非簧载质量加速度 a_u , 悬架动行程 x_r 以及轮胎动态力 F_t 较 Active 明显增大, 对悬架性能影响很大, 尤其是安全性能无法保证. FTC 的 a_s , a_u , x_r 能几乎恢复到 Active 情况, 有效的提高了车辆行驶的乘坐舒适性以及限制了悬架动行程, 并且 F_t 较 Active 还是有所下降, 一定程度上延长了轮胎使用周期.

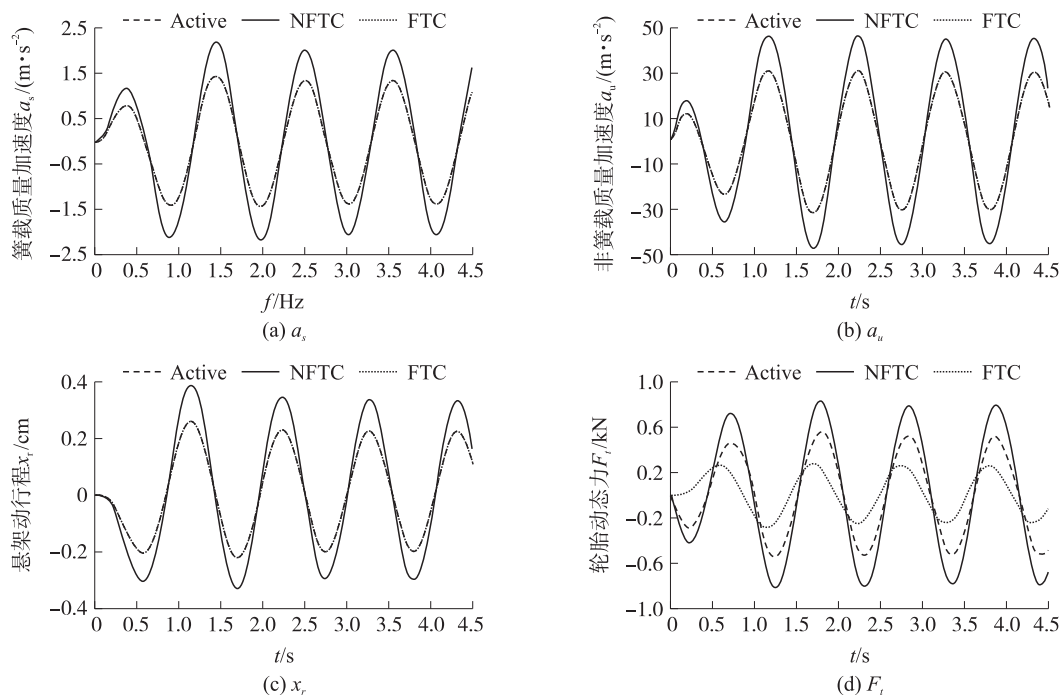


图 4 谐波激励下二自由度悬架的时域响应

Fig. 4 Time domain response of 2-DOF suspension under harmonic excitation

3.2 平滑脉冲响应

车辆运行中的路面冲击会产生强烈振动影响, 采用平滑脉冲信号作为激励, 该激励信号由式 (19) 给出

$$x_i = 0.25a_m e^{(\mu\omega_0 t)^2} e^{-\mu\omega_0 t} u(t). \quad (19)$$

式中, a_m 是该信号的幅值, ω_0 是基波频率, μ 是脉冲刚度^[16], 在本文中选择 $a_m = 2.0$ cm, $\omega_0 = 10.4$ rad/s, $\mu = 3$.

Active、NFTC 以及 FTC 在平滑脉冲激励下的时域暂态响应对比如图 5 所示, 选择簧载加速度 a_s , 非簧载加速度 a_u , 悬架动行程 x_r 以及轮胎动态力 F_t 作为评价悬架性能的指标, 可以看出 NFTC 的 a_s , a_u , x_r 的暂态调节时间较 Active 变化不大, 但峰值明显升高. 而 FTC 能快速恢复到无故障的情况, 同时 F_t 最大值也快速地增大, 有效地改善了系统的操控性.

3.3 实测路面谱响应

随机路面激励通常模拟真实的路面状况来评价车辆悬架性能. 在车速为 20 m/s, 路面等级为 C 级的实测路面谱激励下^[17], 对比分析 Active、NFTC 和 FTC 悬架响应的功率谱密度. 如图 6 所示, 可以看出在第一共振点附近, FTC 和 Active 的 a_s 功率谱密度较 NFTC 明显降低, 有效提升驾乘舒适性, 在第二共振点附近, FTC 的 a_u , x_r 的功率谱密度大小较 NFTC 有所增加, 增加了车辆抓地性能, 提升了悬架系统操控稳定性.

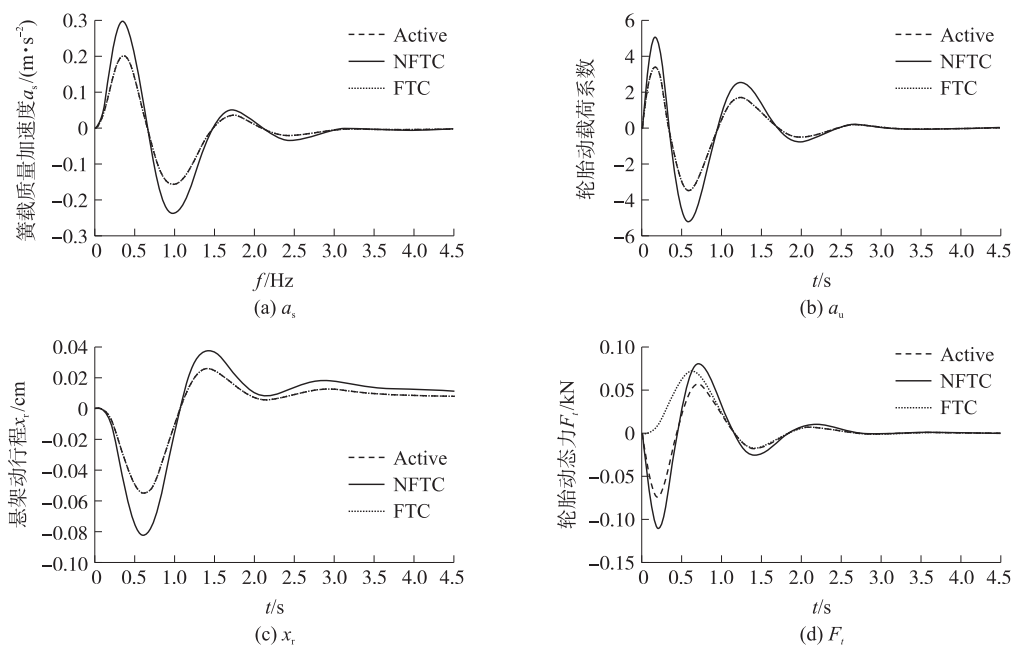


图 5 平滑脉冲激励下二自由度悬架的时域响应

Fig. 5 Time domain response of 2-DOF suspension under smooth pulse excitation

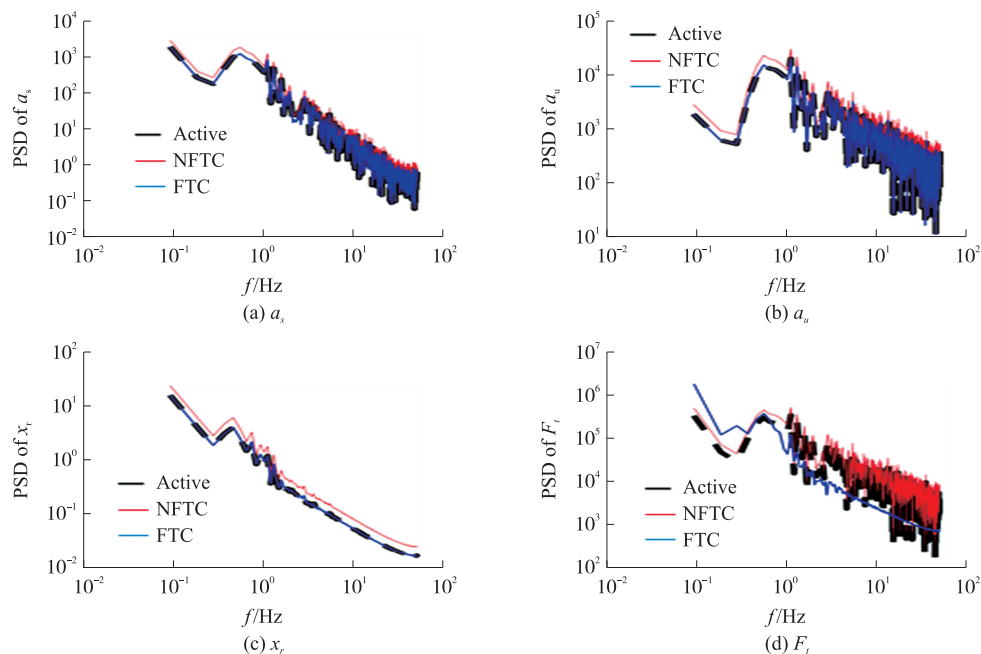


图 6 随机路面激励下二自由度悬架的时域响应

Fig. 6 Time domain response of 2-DOF suspension under random road excitation

4 结论

本文对传感器故障下的两自由度主动悬架进行研究,基于 Kalman 滤波和最优控制理论设计了一种 LQG 主动容错控制器,在谐波激励、冲击性路面输入和实测路面谱激励输入下对无故障、故障下无容错控制以及故障下有容错控制的主动悬架进行仿真分析.结果表明,加入容错控制的主动悬架能够确保加速度传感器故障下的平顺性以及安全性,该研究为接下来开展磁流变半主动悬架容错控制奠定基础.

[参考文献] (References)

- [1] 兰京. 基于 LQG 最优调节器理论的车辆悬架分析及仿真[J]. 科技创新与应用, 2019, 8(10): 19-21.

- [2] 来飞,胡博. 汽车主动悬架技术的研究现状[J]. 南京理工大学学报,2019,43(4):518-526.
- [3] 杨柳青,陈无畏. 基于传感器信号重构的汽车主动悬架主动容错控制[J]. 汽车工程,2013,35(12):1084-1091.
- [4] 陈双,钟孝伟. 汽车主动悬架作动器故障诊断与控制补偿方法[J]. 汽车技术,2018(2):40-44.
- [5] 张袅娜,付留杰,徐才茂,等. 基于未知输入观测器的悬架故障诊断[J]. 长春工业大学学报,2017:313-321.
- [6] ZHANG Z L, XIAO B X. Sensor fault diagnosis and fault tolerant control for forklift based on sliding mode theory[J/OL]. IEEE Access,2020:2991188[2020-12-10]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9081962>.
- [7] LIN B, SU X Y. Fault-tolerant controller design for active suspension system with proportional differential sliding mode observer[J]. International Journal of Control, Automation, and Systems,2019,17(7):1751-1761.
- [8] 周长城. 汽车平顺性与悬架系统设计[M]. 北京:机械工业出版社,2011:211-213.
- [9] 钟孝伟,陈双,张不扬. 基于卡尔曼滤波算法的车辆振动状态估计与最优控制研究[J]. 汽车技术,2017(5):14-18.
- [10] 刘剑. 车辆馈能悬架直线电机结构参数优化设计[D]. 南京:南京师范大学,2019.
- [11] ZHANG H L, WANG E R, ZHANG N. Semi-active sliding mode control of vehicle suspension with magneto-rheological damper[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2015,28(1):63-75.
- [12] 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.
- [13] 张志达. 1/4 车辆主动悬架 LQG 控制仿真分析[J]. 汽车实用技术,2017,23(21):171-174.
- [14] LI H, TANG C Y, ZHANG T X. Controller of vehicle active suspension systems using LQG method[C]//Automation and Logistics. Qingdao:IEEE ICAL,2008:401-404.
- [15] 钟孝伟. 汽车半主动悬架作动器故障诊断与容错控制方法研究[D]. 辽宁:辽宁工业大学,2018.
- [16] 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.
- [17] 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 庆]