

控制与决策

Control and Decision

考虑输入和输出约束的主动悬架系统自适应容错控制

胡银龙, 彭佳薇

引用本文:

胡银龙, 彭佳薇. 考虑输入和输出约束的主动悬架系统自适应容错控制[J]. *控制与决策*, 2025, 40(2): 693–698.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1794>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

航天器输入受限的鲁棒自适应姿态跟踪控制

Robust adaptive attitude tracking control of spacecraft with constrained inputs

控制与决策. 2021, 36(9): 2297–2304 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0013>

线控转向系统的自适应高阶滑模控制

Adaptive higher-order sliding mode control for SbW system

控制与决策. 2021, 36(6): 1529–1536 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1526>

带有输出约束的柔性关节机械臂预设性能自适应控制

Prescribed performance adaptive control of flexible-joint manipulators with output constraints

控制与决策. 2021, 36(2): 387–394 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0974>

带输入饱和的不确定非线性系统自适应模糊触发式补偿控制

Adaptive fuzzy trigger compensation control for uncertain nonlinear system with input saturation

控制与决策. 2021, 36(12): 3007–3014 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0907>

具有未建模动态和输出约束的耦合系统的分散自适应控制

Decentralized adaptive control for interconnected systems with unmodeled dynamics and output constraints

控制与决策. 2018, 33(12): 2113–2121 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0933>

考虑输入和输出约束的主动悬架系统自适应容错控制

胡银龙[†], 彭佳薇

(河海大学 人工智能与自动化学院, 江苏 常州 213200)

摘要: 针对具有约束的不确定主动悬架系统 (active suspension system, ASS), 提出一种考虑输入和输出约束的自适应容错控制方案. 首先, 设计一个有界约束函数来同时约束车身和轮胎的垂向位移, 以实现驾驶舒适度与轮胎抓地力之间的平衡. 其次, 为了进一步提高驾驶舒适度, 针对不确定车身子系统, 提出一种考虑输入约束的自适应容错控制律, 并与设计的有界约束函数进行叠加, 得到最终的控制律. 其中, 考虑到执行器故障及 ASS 不确定性带来的未知项, 采用自适应控制来逼近未知项的上界, 同时引入辅助系统对输入饱和进行补偿. 最终, 分析 ASS 的稳定性, 并通过仿真对比验证所提出方案的有效性.

关键词: 主动悬架; 输出约束; 输入饱和; 自适应控制; 执行器故障; 不确定系统

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1794

引用格式: 胡银龙, 彭佳薇. 考虑输入和输出约束的主动悬架系统自适应容错控制 [J]. 控制与决策, 2025, 40(2): 693-698.

Adaptive fault-tolerant control of active suspension systems with input and output constraints

HU Yin-long[†], PENG Jia-wei

(College of Artificial Intelligence and Automation, Hohai University, Changzhou 213200, China)

Abstract: An adaptive fault-tolerant control scheme considering input and output constraints for uncertain active suspension system (ASS) with constraints is proposed. Firstly, a bounded constraint function is designed to constrain both the vertical displacement of the car-body and the tire in order to achieve a balance between ride comfort and tire grip. Then, to further improve the ride comfort, an adaptive fault-tolerant control law considering input constraint is proposed for the uncertain car-body subsystem, and the final control law is obtained by adding the bounded constraint function. Considering the unknown term caused by actuator fault and ASS uncertainties, the adaptive control is adopted to approach its upper bound. Meanwhile, the auxiliary system is introduced to compensate for input saturation. Finally, the stability of the ASS is analysed and the effectiveness of the proposed scheme is verified by simulation.

Keywords: active suspension; output constraint; input saturation; adaptive control; actuator fault; uncertain system

0 引言

主动悬架系统 (active suspension system, ASS)^[1] 利用执行机构, 能够主动缓和颠簸路面对车身的冲击. 但是, 由于 ASS 的欠驱动特性, 许多研究^[2-4] 致力于提升驾驶舒适度, 而忽略了对 ASS 轮胎抓地力的控制.

ASS 控制是一个多目标控制问题, 但其性能指标之间往往相互矛盾^[5], 这给 ASS 控制带来了极大的挑战. 文献 [5] 针对一类非线性 ASS, 提出了一种自适应最优控制方法; 文献 [6-8] 通过最小化系统的

H_2/H_∞ 范数, 提升了 ASS 的多项性能; 文献 [9] 研究了时滞反馈非线性 ASS 的多目标优化方法; 此外, 文献 [10] 通过引入加权设计因子来反映驾驶舒适度与安全性之间的权衡, 提出了一种基于自适应扰动观测器的终端滑模控制算法 (ADO-TSMC).

上述方法主要通过设计权重和优化参数来兼顾多项性能, 而本文考虑将 ASS 多目标控制问题转化为多运动约束处理问题. 尽管文献 [7, 11] 在优化过程中考虑了 ASS 结构或控制输入的约束, 但这可能会导致解空间缩小、求解复杂度增加等问题. 目前,

收稿日期: 2023-12-28; 录用日期: 2024-06-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62173125).

[†]通讯作者. E-mail: yinlonghu@outlook.com.

障碍 Lyapunov 函数 (BLF) 已被广泛应用于处理 ASS 车身的运动约束问题^[12-14]. 然而, 这些研究忽略了轮胎运动对 ASS 性能的影响. 文献 [15-17] 针对电磁 ASS, 提出了全状态约束方案. 虽然合理设置约束值能够实现多个控制目标的折衷, 但是要用一个输入实现全状态的约束, 对参数整定具有极高的要求.

执行器的饱和及故障是 ASS 控制中需要考虑的重要因素. 针对输入饱和问题, 现有研究通常引入辅助系统^[18] 来实现输入补偿, 或用光滑函数^[19] 对实际输入进行近似, 以设计控制器. 文献 [20] 引入辅助系统, 解决了 ASS 的输入饱和问题; 文献 [21] 提出了一种 ASS 鲁棒饱和容错控制方案, 其中观测器用于估计包括执行器故障在内的集中扰动. 以上研究尚未考虑到 ASS 的运动约束问题.

本文考虑 ASS 不确定性、执行器饱和及故障问题, 提出一种考虑输入和输出约束的自适应容错控制方案. 其中, 设计了一种有界约束函数 (BCF), 其借助自身有界性以及 ASS 的输入耦合特性, 通过单个输入就能实现对车身和轮胎位移的同时约束, 解决了 ASS 驾驶舒适度与轮胎抓地力之间的矛盾.

1 问题描述

图 1 为本文考虑的 1/4 ASS 模型, 对应的非线性 ASS 运动学方程可以描述为

$$\begin{cases} m_b \ddot{z}_c = -F_s - F_c + v(u) + \Delta F_b; \\ m_{us} \ddot{z}_w = F_s + F_c - F_t - F_d - v(u) + \Delta F_{us}. \end{cases} \quad (1)$$

其中: m_b 和 m_{us} 分别表示车身质量 (未知) 和轮胎质量 (已知), z_c 和 z_w 分别表示车身和轮胎位移, z_r 表示路面扰动, $v(u)$ 表示系统的实际输入, ΔF_b 和 ΔF_{us} 表示系统的有界集总不确定性, F_s 和 F_c 分别表示悬架的弹簧力和阻尼力, F_t 和 F_d 分别表示轮胎的弹簧力和阻尼力, 它们的非线性表达式详见文献 [1] 中的式 (3).

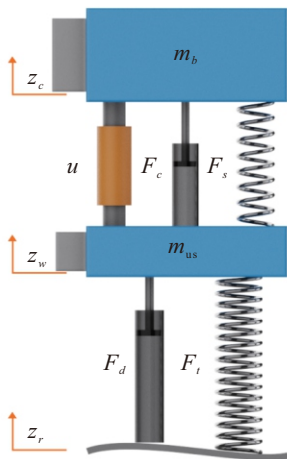


图1 1/4 主动悬架系统模型

本文考虑的系统实际输入可描述为

$$v(u) = \rho \text{sat}(u) + \Delta v, \quad (2)$$

$$\text{sat}(u) = \begin{cases} \text{sign}(u)u_m, & |u| \geq u_m; \\ u, & |u| < u_m. \end{cases}$$

其中: u 为理想输入, u_m 为执行器的边界值, Δv 为未知的执行器偏置值, $0 < \rho \leq 1$ 为未知的执行器增益故障程度. 式 (2) 可以进一步写为

$$v(u) = \text{sat}(u) + Q_u, \quad (3)$$

其中 $Q_u = (\rho - 1)\text{sat}(u) + \Delta v$ 为执行器故障导致的系统不确定性, 显然 Q_u 是有界的.

假设 1 m_b 可表示为已知标称值 m_{b0} 与未知项 m_Δ 的叠加, 即 $m_b = m_{b0} + m_\Delta$, 且 m_Δ 是有界的.

假设 2 ASS 是输入-状态稳定 (ISS) 的.

定义状态变量 $\mathbf{x} = [z_c, \dot{z}_c, z_w, \dot{z}_w]^T$, 取 $\Delta u = u - \text{sat}(u)$, 则系统 (1) 的状态空间模型可以写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{m_{b0}}(-F_s - F_c + u - \Delta u + F_1); \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{m_{us}}(F_s + F_c - F_t - F_d - u + F_2). \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{m_{us}}(F_s + F_c - F_t - F_d - u + F_2). \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} F_1 &= \Delta F_b + Q_u - m_\Delta \dot{x}_2, \\ F_2 &= \Delta u - Q_u + \Delta F_{us}. \end{aligned}$$

式 (4) 和 (5) 分别对应车身子系统和轮胎子系统. 定义系统输出 $\mathbf{y} = [y_1, y_2]^T = [x_1, x_3]^T$, 且其满足

$$k_{c1} \leq y_1 \leq k_{c2}, \quad k_{w1} \leq y_2 \leq k_{w2}. \quad (6)$$

其中: k_{c1} 和 k_{w1} 为负常数, k_{c2} 和 k_{w2} 为正常数.

本文的主要控制目标: 在执行器存在故障及饱和的情况下, 针对 ASS (1) 设计一个考虑输入和输出约束的自适应容错控制器, 使得输出 \mathbf{y} 具有维持在限制范围 (6) 内的能力, 且 y_1 收敛到零的小邻域内.

2 约束函数

例 1 为了阐述提出的约束处理方法, 本文以如下自由度系统为例进行说明:

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_1 = \varepsilon_2, \\ \dot{\varepsilon}_2 = f(\varepsilon_1, \varepsilon_2) + u. \end{cases} \quad (7)$$

针对系统 (7), 如文献 [22] 所述, 基于 BLF 的约束处理方法, 在控制律中派生了 BLF 的偏导数项 $-\tau_\varepsilon = -\frac{\partial V_{\text{BLF}}(\varepsilon_1)}{\partial \varepsilon_1}$, 以实现对其的约束. 图 2 给出了对数型 BLF 的 τ_ε 曲线. 可见, 当 ε_1 接近约束 k_ε 时, τ_ε 的幅值将无限增大, 这会增强饱和效应甚至引发奇异问题. 此外, BLF 不能保证系统在约束空间外的

稳定性,所以它要求被约束状态的初值满足约束条件.针对上述问题,文献[22]提出了一种有界BLF(BBLF),其偏导数曲线如图2所示.

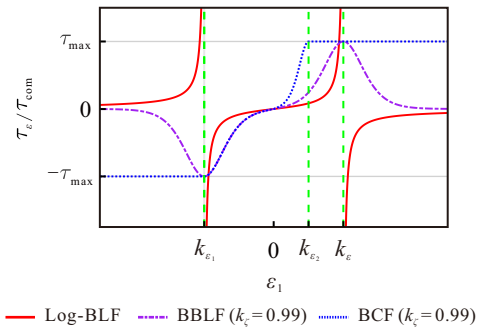


图2 不同BLF的偏导数及BCF曲线

本文受BBLF的启发,提出了一种分段非对称BCF,表达式如下:

$$\tau_{con} = \begin{cases} \tau_{max}, & \varepsilon_1 > k_{\varepsilon_2}; \\ \tau_b, & k_{\varepsilon_1} \leq \varepsilon_1 \leq k_{\varepsilon_2}; \\ -\tau_{max}, & \varepsilon_1 < k_{\varepsilon_1}. \end{cases} \quad (8)$$

其中: $k_{\varepsilon_1} < 0, k_{\varepsilon_2} > 0, \tau_{max} > 0$.

设计式(8)中的连续函数 $\tau_b = U \frac{h(\zeta)\zeta}{1 - k_{\zeta}^2 \zeta^2}$, 它需要满足以下两个条件:

- 1) 当 $\varepsilon_1 \rightarrow k_{\varepsilon_1}$ 时, $\tau_b = -\tau_{max}$, 当 $\varepsilon_1 \rightarrow k_{\varepsilon_2}$ 时, $\tau_b = \tau_{max}$.
- 2) 当 $\varepsilon_1 \rightarrow k_{\varepsilon_1}$ 或 $\varepsilon_1 \rightarrow k_{\varepsilon_2}$ 时, $\frac{\partial \tau_b}{\partial \varepsilon_1} = 0$.

具体设计如下:

$$\zeta = \tanh\left(\kappa \frac{\varepsilon_1}{-q(\varepsilon_1)k_{\varepsilon_1} + (1 - q(\varepsilon_1))k_{\varepsilon_2}}\right), \quad (9)$$

$$U = \tau_{max} \left(\frac{h(\gamma)\gamma}{1 - k_{\zeta}^2 \gamma^2}\right)^{-1}, \quad h(\zeta) = \kappa k_{\zeta}^2 \frac{1 - \zeta^2}{1 - k_{\zeta}^2 \zeta^2}. \quad (10)$$

为满足条件1),设计 $q(\varepsilon_1)$ 和 κ 如下:

$$q(\varepsilon_1) = \begin{cases} 0, & \varepsilon_1 \geq 0; \\ 1, & \varepsilon_1 < 0. \end{cases} \quad (11)$$

$$\kappa = \ln\left(\sqrt{\frac{1 + \gamma}{1 - \gamma}}\right). \quad (12)$$

对 τ_b 求偏导 $\frac{\partial \tau_b}{\partial \varepsilon_1}$, 不难发现条件2)等价于

$$-k_{\zeta}^2 \gamma^4 + (3k_{\zeta}^2 - 3)\gamma^2 + 1 = 0. \quad (13)$$

求解式(13)并取 $\gamma > 0$, 可得

$$\gamma = \frac{\sqrt{3k_{\zeta}^2 - 3 + \sqrt{9k_{\zeta}^4 - 14k_{\zeta}^2 + 9}}}{\sqrt{2}k_{\zeta}},$$

其中 $0 < k_{\zeta} < 1$ 为用户自定义的灵敏度系数.由图2可知,BCF的控制方向在区间 $k_{\varepsilon_1} \leq \varepsilon_1 \leq k_{\varepsilon_2}$ 内有

与BLF和BBLF相同的变化趋势,说明其能够维持约束.此外,BCF采用分段函数形式,一旦被约束状态超出约束,则约束函数幅值取最大值,相较于BBLF,能够更快地将状态控制到约束内.

3 控制器设计

3.1 有界约束函数设计

结合式(8)~(13),可以设计车身子系统(4)的位移约束函数如下:

$$\tau_c = \begin{cases} \tau_{c\max}, & y_1 > k_{c_2}; \\ U_c \frac{h(\zeta_c)\zeta_c}{1 - k_{\zeta_c}^2 \zeta_c^2}, & k_{c_1} \leq y_1 \leq k_{c_2}; \\ -\tau_{c\max}, & y_1 < k_{c_1}. \end{cases} \quad (14)$$

其中: ζ_c 和 U_c 分别对应式(9)和(10), $\tau_{c\max}$ 为车身位移约束函数的最大值, k_{ζ_c} 为对应的灵敏度系数.

相似地,轮胎子系统(5)的位移约束函数为

$$\tau_w = \begin{cases} \tau_{w\max}, & y_2 > k_{w_2}; \\ U_w \frac{h(\zeta_w)\zeta_w}{1 - k_{\zeta_w}^2 \zeta_w^2}, & k_{w_1} \leq y_2 \leq k_{w_2}; \\ -\tau_{w\max}, & y_2 < k_{w_1}. \end{cases} \quad (15)$$

其中: ζ_w 和 U_w 分别对应式(9)和(10), $\tau_{w\max}$ 为轮胎位移约束函数的最大值, k_{ζ_w} 为对应的灵敏度系数.

受例1的启发,为同时约束车身和轮胎位移,结合式(4)和(5),设置总的约束函数及理想控制律如下:

$$\tau = -m_{b0}\tau_c + m_{us}\tau_w, \quad u = \omega + \tau, \quad (16)$$

其中 ω 为待设计的自适应容错控制律.

注1 本文借助函数有界的优势,可以直接将BCF引入控制律,这不仅简化了控制器设计,且能够同时实现对多个受控自由度的约束.

3.2 自适应容错控制器设计

为了进一步提升驾驶舒适度,本小节针对车身子系统(4),提出了一种自适应容错控制方案.

step 1: 设计辅助系统如下:

$$\dot{\xi} = -k_1 \xi - \frac{\Delta u}{m_{b0}}, \quad (17)$$

其中 $k_1 > 0$. 为了将 ξ 引入系统以实现输入补偿,定义误差变量 $z_1 = x_2 - \alpha_1 - \xi$.

step 2: 定义Lyapunov函数 $V_1 = \frac{1}{2}x_1^2$, 并设计虚拟控制律 $\alpha_1 = -c_1 x_1$, 其中 $c_1 > 1/2$. 对 V_1 求导有

$$\dot{V}_1 = -c_1 x_1^2 + x_1(z_1 + \xi). \quad (18)$$

step 3: 第2个Lyapunov函数定义如下:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}z_1^2 + \frac{1}{2}\tilde{\beta}^2, \quad (19)$$

其中 $\tilde{\beta}$ 是估计误差,将在后续定义.

结合式(4)和(17),对式(19)进行求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & \dot{V}_1 + z_1 \left(\frac{-F_s - F_c + u + F_1}{m_{b0}} + c_1 x_2 + k_1 \xi \right) + \tilde{\beta} \dot{\beta}. \end{aligned} \quad (20)$$

结合假设1和假设2可知, F_1 是有界的.不妨设 $|F_1|$ 的上界为 β ,并采用如下自适应律对 β 进行逼近:

$$\dot{\hat{\beta}} = -k_2 \hat{\beta} + \frac{z_1^2}{m_{b0}} q_1. \quad (21)$$

其中: k_2 和 q_1 为正常数; $\hat{\beta}$ 为 β 的估计值,且有 $\tilde{\beta} = \beta - \hat{\beta}$.基于杨氏不等式,式(20)可进一步表示为

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 \leq & \dot{V}_1 + \frac{\beta}{4q_1 m_{b0}} + \frac{q_1 \hat{\beta} z_1^2}{m_{b0}} + \\ & z_1 \left(\frac{-F_s - F_c + u}{m_{b0}} + c_1 x_2 + k_1 \xi \right) + k_2 \tilde{\beta} \hat{\beta}. \end{aligned} \quad (22)$$

结合式(16),设计自适应容错控制律为

$$\begin{aligned} \omega = & m_{b0}(-c_2 z_1 - x_1 - c_1 x_2 - k_1 \xi) + F_s + F_c - q_1 \hat{\beta} z_1, \end{aligned} \quad (23)$$

其中 $c_2 > 1/2$.将式(16)和(23)代入(22)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 \leq & - \left(c_1 - \frac{1}{2} \right) x_1^2 - \left(c_2 - \frac{1}{2} \right) z_1^2 - \frac{k_2}{2} \tilde{\beta}^2 + \\ & \frac{1}{2} \xi^2 + \frac{\beta}{4q_1 m_{b0}} + \frac{k_2 \beta^2}{2} + \left(\frac{\tau}{m_{b0}} \right)^2. \end{aligned} \quad (24)$$

3.3 稳定性分析

定理1 针对满足假设1和假设2的车身子系统(4),考虑约束函数(16)、辅助系统(17)、自适应律(21)和自适应容错控制律(23),通过合理设计参数,输出 y_1 能够满足约束条件(6),且收敛到零的小邻域内.

证明 对于辅助系统(17),结合 $k_1 > 0$ 及假设2可知,辅助系统是稳定的,可设 $|\xi| \leq \bar{\xi}$.

求解式(24),并将 $\frac{1}{2}y_1^2 \leq V_2$ 代入,可得

$$|y_1| \leq \sqrt{2 \left(e^{-ct} V_2(0) + \frac{\Delta}{c} (1 - e^{-ct}) \right)}. \quad (25)$$

其中

$$\begin{aligned} c = & \min \left\{ c_1 - \frac{1}{2}, c_2 - \frac{1}{2}, \frac{k_2}{2} \right\}, \\ \Delta = & \frac{1}{2} \bar{\xi}^2 + \frac{\beta}{4q_1 m_{b0}} + \frac{k_2 \beta^2}{2} + \left(\frac{\tau}{m_{b0}} \right)^2. \end{aligned}$$

显然,增大 c 或减小 Δ 可使 y_1 收敛到零的小邻域内.

结合3.1节可知,系统输出 y_1 能够满足约束(6). □

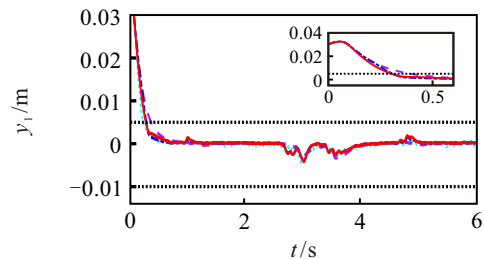
此外,对轮胎子系统(5)进行零动态分析(参照文献[13])可知,系统(5)是稳定的.结合3.1节可知,系统具有维持输出 y_2 不超出约束的能力.

4 仿真结果及分析

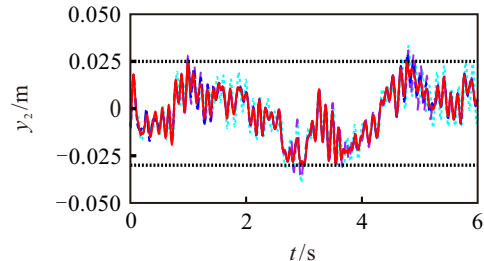
本节运用 Matlab/Simulink,在符合 ISO 8608 标准的 C 级路面下进行仿真.同时,考虑以下控制方法的对比:1)文献[10]中的 ADO-TSMC;2)基于3.2节的无约束自适应容错控制(AFC);3)考虑对称输出约束^[22]的自适应容错控制(OC-AFC).4)本文提出的考虑非对称输出约束的自适应容错控制(AOC-AFC).

本文的控制器沿用了文献[1]中的 ASS 参数,但对于建立的 ASS 模型,考虑悬架刚度系数存在10%的衰减, $m_b = 500 \text{ kg}$, $u_m = 1000 \text{ N}$, $\rho = 0.9$,且 $\Delta v = 20 \text{ N}$.控制器参数: $c_1 = 30$, $c_2 = 20$, $k_1 = 6$, $k_2 = 0.8$, $q_1 = 80$.约束函数设置: $\tau_{c \max} = 5 \text{ N}$, $\tau_{w \max} = 40 \text{ N}$, $k_{c1} = -0.01$, $k_{c2} = 0.005$, $k_{w1} = -0.03$, $k_{w2} = 0.025$.

图3展示了车身及轮胎位移的约束情况,显然,AOC-AFC能够同时约束车身和轮胎的位移,而基于其他控制方法的 ASS 更容易超出约束.此外,不同于 BLF,本文不要求初始状态满足约束条件,当输出 y_1 超出约束时,AOC-AFC中的 τ_c 能够维持最大幅值,使得 y_1 更快地回到允许范围内.



(a) 车身垂直位移



(b) 轮胎垂直位移

图3 车身及轮胎位移曲线

图4给出了悬架空间和轮胎动态载荷曲线,可

见,本文提出的方案在减小悬架空间和轮胎动态载荷方面更具优势.

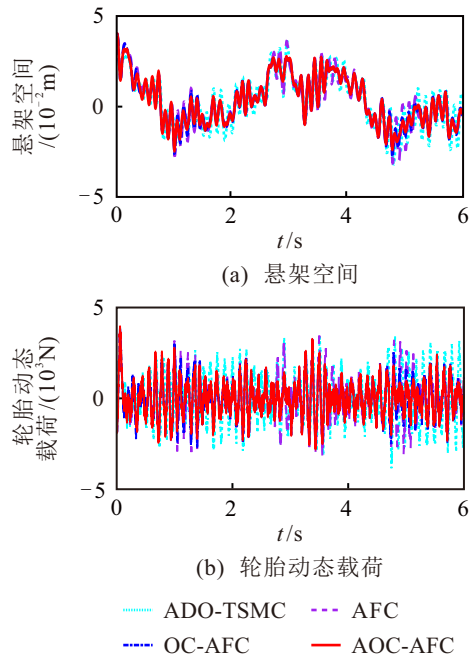


图4 悬架空间和轮胎动态载荷曲线

表1给出了4种控制器下,车身位移 y_1 、轮胎位移 y_2 和实际输入 $v(u)$ 的均方根(RMS)值.虽然,ADO-TSMC的RMS(y_1)最小,但是其RMS(y_2)最大,这侧面说明了驾驶舒适度与轮胎抓地力之间的矛盾. AOC-AFC通过对车身和轮胎位移同时施加约束来解决这一矛盾,它在有效降低RMS(y_2)的同时,能够约束 y_1 ,防止其RMS值过度增大.此外,系统输入的RMS值说明了AOD-AFC在减小能耗方面的有效性.

表1 各项性能指标的RMS值

控制器	RMS(y_1)	RMS(y_2)	RMS($v(u)$)
ADO-TSMC	0.0050	0.0138	598.3290
AFC	0.0055	0.0134	485.4704
OC-AFC	0.0053	0.0130	434.0220
AOC-AFC	0.0052	0.0129	418.6014

5 总结

本文针对具有约束的不确定ASS,提出了一种考虑输入和输出约束的自适应容错控制器.为了兼顾驾驶舒适度和轮胎抓地力,设计了一种可以同时约束车身和轮胎位移的有界约束函数.此外,考虑到ASS不确定性和执行器饱和以及故障问题,提出了一种考虑输入约束的自适应容错控制律,以进一步提高驾驶舒适度.其中,自适应技术用于处理未知项,辅助系统用于对输入饱和进行补偿.最终,仿真对比

表明,本文提出的方案能够同时约束车身和轮胎的位移,保证了驾驶舒适度及安全性.

参考文献 (References)

[1] Gao H F, Liu L, Liu Y J. Adaptive tracking event-triggered control of quarter-car bioinspiration active suspension systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(1): 475-484.

[2] Zhang J H, Sun W C, Jing H H. Nonlinear robust control of antilock braking systems assisted by active suspensions for automobile[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 27(3): 1352-1359.

[3] 秦武, 上官文斌, 吕辉. 非线性二自由度主动悬架滑模控制方法的研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(1): 58-68. (Qin W, Shangguan W B, Lv H. Research on sliding mode control for nonlinear active suspension system with two degrees of freedom[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(1): 58-68.)

[4] Wang T C, Li Y M. Neural-network adaptive output-feedback saturation control for uncertain active suspension systems[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2022, 52(3): 1881-1890.

[5] 黄英博, 吕永峰, 赵刚, 等. 非线性主动悬架系统自适应最优控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(12): 3197-3206. (Huang Y B, lv Y F, Zhao G, et al. Adaptive optimal control for nonlinear active suspension systems[J]. Control and Decision, 2022, 37(12): 3197-3206.)

[6] 庞辉, 王延, 刘凡. 考虑参数不确定性的主动悬架 H_2/H_∞ 保性能控制[J]. 控制与决策, 2019, 34(3): 470-478. (Pang H, Wang Y, Liu F. H_2/H_∞ guaranteed cost control for active suspensions considering parameter uncertainty[J]. Control and Decision, 2019, 34(3): 470-478.)

[7] Wen S P, Chen M Z Q, Zeng Z G, et al. Fuzzy control for uncertain vehicle active suspension systems via dynamic sliding-mode approach[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 47(1): 24-32.

[8] Gao H J, Sun W C, Shi P. Robust sampled-data H_∞ control for vehicle active suspension systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(1): 238-245.

[9] Shao S J, Jing D, Ren C B. Multiobjective optimization of nonlinear active suspension system with time-delayed feedback[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 9526359.

[10] Wang G, Chadli M, Basin M V. Practical terminal sliding mode control of nonlinear uncertain active suspension systems with adaptive disturbance observer[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 26(2): 789-797.

[11] 高坤明. 基于多目标优化的车辆主动悬架滑模控制研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2020. (Gao K M. Research on sliding mode control of vehicle

- active suspension based on multi-objective optimization[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2020.)
- [12] Sun W C, Pan H H, Zhang Y F, et al. Multi-objective control for uncertain nonlinear active suspension systems[J]. *Mechatronics*, 2014, 24(4): 318-327.
- [13] Liu Y J, Zeng Q, Tong S C, et al. Adaptive neural network control for active suspension systems with time-varying vertical displacement and speed constraints[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(12): 9458-9466.
- [14] Peng J W, Hu Y L, Zhang Q Y, et al. Adaptive neural network control for active suspension systems with asymmetric time-varying output constraints[C]. *The 37th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation*. Beijing, 2022: 628-633.
- [15] Min X, Li Y M, Tong S C. Adaptive fuzzy optimal control for a class of active suspension systems with full-state constraints[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2020, 14(5): 371-381.
- [16] Shao X F, Ye D. Neuroadaptive deferred full-state constraints control without feasibility conditions for uncertain nonlinear EASSs[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2022, 359(7): 2810-2832.
- [17] Ma S, Li Y M. Adaptive fuzzy fault-tolerant control for active seat suspension systems with full-state constraints[J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2023, 11(1): 2153391.
- [18] Du J L, Hu X, Sun Y Q. Adaptive robust nonlinear control design for course tracking of ships subject to external disturbances and input saturation[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, 50(1): 193-202.
- [19] 李元新, 魏淑仪. 具有输入饱和的不确定非线性系统自适应渐近跟踪控制[J]. *控制与决策*, 2023, 38(8): 2326-2334.
(Li Y X, Wei S Y. Adaptive asymptotic tracking of uncertain nonlinear systems with input saturation[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(8): 2326-2334.)
- [20] 孙丽颖, 王新, 白锐. 考虑输入约束的半主动悬架非线性自适应控制[J]. *控制与决策*, 2018, 33(11): 2099-2103.
(Sun L Y, Wang X, Bai R. Nonlinear adaptive control for semi-active suspension with input constraints[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(11): 2099-2103.)
- [21] Guo X J, Zhang J H, Sun W C. Robust saturated fault-tolerant control for active suspension system via partial measurement information[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 191: 110116.
- [22] Yang C G, Huang D Y, He W, et al. Neural control of robot manipulators with trajectory tracking constraints and input saturation[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2021, 32(9): 4231-4242.

作者简介

胡银龙 (1987-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为振动控制、非线性控制理论与应用研究, E-mail: yinlonghu@outlook.com;

彭佳薇 (2000-), 女, 硕士生, 主要研究方向为振动控制研究, E-mail: jiawei_peng2022@163.com.