

考虑输入约束的半主动悬架非线性自适应控制

孙丽颖[†], 王 新, 白 锐

(辽宁工业大学 电气工程学院, 辽宁 锦州 121001)

摘 要: 针对具有输入约束及参数不确定性问题的汽车半主动悬架系统, 提出一种考虑输入饱和的非线性自适应 Backstepping 控制器. 该方法引入一个辅助系统, 通过设计新的误差变量, 实现对控制饱和的补偿, 解决控制输入的幅值约束问题. 同时, 考虑到悬架系统的参数不确定性问题, 采用映射自适应算法设计自适应律, 通过构造适当的 Lyapunov 函数, 保证悬架系统的稳定性. 仿真结果表明, 所设计的控制器具有良好的隔振性能, 而且能够有效降低输入约束和不确定参数对系统性能的影响.

关键词: 输入约束; 半主动悬架; 饱和补偿; Backstepping; 自适应控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Nonlinear adaptive control for semi-active suspension with input constraints

SUN Li-ying[†], WANG Xin, BAI Rui

(College of Electrical Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: A controller design method based on nonlinear adaptive Backstepping is proposed for the vehicle semi-active suspension system containing parameter uncertainties and input saturation problem. This method realizes the compensation of the control saturation by introducing an auxiliary system and designing a new error variable, which solves the problem of amplitude constraint of the control input. Considering the parameter uncertainty of the suspension system, a control law is designed using a projection adaptive algorithm, and the stability of the suspension system is ensured by constructing the appropriate Lyapunov function. The simulation results show that the controller has good vibration isolation performance and can effectively reduce the influence of input constraint and uncertain parameters.

Keywords: input saturation; semi-active suspension; saturation compensation; Backstepping; adaptive control

0 引 言

汽车悬架系统是车辆的重要组成部分, 而悬架系统的控制策略研究一直受到国内外专家学者的关注. 针对抑制车身垂直加速度, 同时考虑悬架动行程、轮胎接地性等问题, 已有大量文献研究了悬架系统的自适应控制、鲁棒控制、智能控制等控制策略, 并取得了满意的效果^[1-5].

然而, 在工程实际中, 物理系统的控制输入幅值约束是普遍存在的. 考虑悬架系统的控制输入饱和问题具有实际意义, 但研究此方面问题的文献相对较少. 文献[6]针对执行机构饱和问题, 构建了抗饱和补偿器, 提出了抗饱和自适应鲁棒控制器设计方法, 在保证闭环系统稳定的同时降低了抗饱和的保

守性. 文献[7]针对电液伺服位置系统的输入饱和问题, 采用动态面方法设计抗饱和控制器, 并引入 Nussbaum 函数补偿输入饱和引起的非线性项, 有效削弱了输入约束对系统性能的影响. 文献[8]针对发电机汽门的非线性控制问题, 引入了切换机制, 通过构造共同的 Lyapunov 函数和参数替换律解决了发电机汽门输入控制量幅值的约束问题. 文献[9]针对飞行器姿态控制中存在的输入饱和问题, 基于齐次性理论和饱和控制器设计方法, 充分利用系统的模型结构特征, 提出了一种有限时间姿态镇定方案, 设计了一类饱和的有限时间姿态控制器, 使飞行器姿态可以在有限时间内稳定在平衡点.

本文针对汽车半主动悬架系统控制输入中存在

收稿日期: 2017-06-20; 修回日期: 2017-11-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61773189); 辽宁省教育厅重大科技平台项目(JP2016012).

责任编委: 张庆灵.

作者简介: 孙丽颖(1972—), 女, 教授, 博士, 从事电力系统非线性控制、鲁棒控制等研究; 王新(1991—), 男, 硕士生, 从事非线性及复杂系统控制的研究.

[†]通讯作者. E-mail: lgsunliying@163.com

的幅值约束问题,考虑到系统的非线性和参数不确定等因素,通过引入辅助系统,采用自适应Backstepping方法镇定增广的误差系统. 仿真结果表明,应用该控制算法,在满足输入约束的条件下,半主动悬架系统的乘坐舒适性和安全性得到有效改善.

1 问题描述

为便于研究,以1/4车二自由度半主动悬架系统作为研究对象,其简化模型如图1所示.

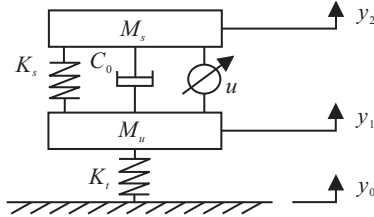


图1 半主动悬架模型

系统运动学方程^[10]可描述为

$$\begin{cases} M_s \ddot{y}_2 = K_s(y_1 - y_2) + \varepsilon K_s(y_1 - y_2)^3 + \\ \quad C_0(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + u, \\ M_u \ddot{y}_1 = -K_s(y_1 - y_2) - \varepsilon K_s(y_1 - y_2)^3 - \\ \quad C_0(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + K_t(y_0 - y_1) - u. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\varepsilon > 0$ 为一小参数,用来描述悬架系统刚度的非线性程度; M_s 和 M_u 分别为车身质量和轮胎质量; y_2 和 y_1 分别为车身垂向位移和轮胎垂向位移; y_0 为路面激励; K_s 和 C_0 分别为悬架系统刚度和阻尼系数的不可调部分; K_t 为轮胎刚度系数; u 为半主动悬架的控制力,由空气弹簧或可调阻尼器提供.

选取状态变量 $x_1 = y_2, x_2 = \dot{y}_2, x_3 = y_1, x_4 = \dot{y}_1$. 为避免零动态振荡问题^[11],引入线性滤波器 $\bar{x}_3 = \frac{\xi}{s + \xi} x_3$,其中 ξ 为常数,建立状态空间方程

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{M_s} [-K_s(x_1 - x_3) - \varepsilon K_s(x_1 - x_3)^3 - \\ \quad C_0(x_2 - x_4) + u], \\ \dot{\bar{x}}_3 = \xi(x_3 - \bar{x}_3), \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{M_u} [K_s(x_1 - x_3) + \varepsilon K_s(x_1 - x_3)^3 + \\ \quad C_0(x_2 - x_4) - K_t(x_3 - y_0) - u]. \end{cases} \quad (2)$$

在实际系统中,执行机构存在幅值约束,只能提供有限的控制力. 取最大控制输入为 $u_{\max} > 0, u = \text{sat}(v)$,令 $\delta = u - v$,则控制输入饱和函数可表示为

$$u = \text{sat}(v) = \begin{cases} \text{sgn}(v)u_{\max}, & |v| \geq u_{\max}; \\ v, & |v| < u_{\max}. \end{cases} \quad (3)$$

考虑半主动悬架系统模型中,刚度系数 K_s 和阻尼系数 C_0 会随车辆运行状态和工作环境变化而变化,定义不确定参数 $\theta_1 = K_s, \theta_2 = C_0$,则式(2)可改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{M_s} [-\theta_1(x_1 - x_3) - \varepsilon\theta_1(x_1 - x_3)^3 - \\ \quad \theta_2(x_2 - x_4) + u], \\ \dot{\bar{x}}_3 = \xi(x_3 - \bar{x}_3), \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{M_u} [\theta_1(x_1 - x_3) + \varepsilon\theta_1(x_1 - x_3)^3 + \\ \quad \theta_2(x_2 - x_4) - K_t(x_3 - y_0) - u]. \end{cases} \quad (4)$$

假设1 不确定参数 θ_i 是有界的,其上下界定义为 $\theta_i \in \Omega = \{\theta_i : 0 < \theta_{i\min} \leq \theta_i \leq \theta_{i\max}\}$,其中 $i = 1, 2$.

2 控制器设计

针对控制输入存在饱和的情况,引入一个稳定的辅助系统,采用输入饱和误差放大的方法,可以实现控制饱和的补偿^[12]. 设计辅助系统为

$$\begin{cases} \dot{\lambda}_1 = -a_1\lambda_1 + \lambda_2, \\ \dot{\lambda}_2 = -a_2\lambda_2 + b\delta. \end{cases} \quad (5)$$

式(5)可写为

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda}_1 \\ \dot{\lambda}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 & 1 \\ 0 & -a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} \delta. \quad (6)$$

其中: $a_1 > 0, a_2 > 0$. 此 2×2 矩阵为Hurwitz的,当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\lambda_i \rightarrow 0$. 为保证辅助系统(6)稳定,要求 a_1 和 a_2 足够大.

首先,定义新的误差变量

$$z_1 = x_1 - \bar{x}_3 - \lambda_1, \quad (7)$$

对式(7)求导,可得

$$\dot{z}_1 = x_2 - \xi(x_3 - \bar{x}_3) - (\lambda_2 - a_1\lambda_1). \quad (8)$$

选取第1个Lyapunov函数

$$V_1 = \frac{1}{2}z_1^2, \quad (9)$$

$$\dot{V}_1 = z_1[x_2 - \xi(x_3 - \bar{x}_3) - (\lambda_2 - a_1\lambda_1)]. \quad (10)$$

定义第2个误差变量为

$$z_2 = x_2 - x_{2d}. \quad (11)$$

取 $x_{2d} = \xi(x_3 - \bar{x}_3) + (\lambda_2 - a_1\lambda_1) - c_1z_1$,其中 $c_1 > 0$

为常数,则有

$$\dot{V}_1 = -c_1 z_1^2 + z_1 z_2. \quad (12)$$

如果 $z_2 \rightarrow 0$, 则 $\dot{V}_1 \leq 0$. 对式(11)求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{z}_2 = & \frac{1}{M_s} [-\theta_1(x_1 - x_3) - \varepsilon\theta_1(x_1 - x_3)^3 - \\ & \theta_2(x_2 - x_4)] - \xi(x_4 - \dot{x}_3) + [a_2\lambda_2 + \\ & a_1(\lambda_2 - a_1\lambda_1)] + c_1\dot{z}_1 + \frac{1}{M_s}v, \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $b = 1/M_s$, 定义第 2 个 Lyapunov 函数为 $V_2 = V_1 + \frac{1}{2}z_2^2$, 对其求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 + z_2 \dot{z}_2 = -c_1 z_1^2 - \\ & c_2 z_2^2 + \left(\frac{1}{M_s} - b\right)\delta z_2. \end{aligned} \quad (14)$$

取控制律为

$$\begin{aligned} v = & -M_s[a_2\lambda_2 + a_1(\lambda_2 - a_1\lambda_1)] - M_s[c_1\dot{z}_1 - \\ & \xi(x_4 - \dot{x}_3)] + [\hat{\theta}_1(x_1 - x_3) + \varepsilon\hat{\theta}_1(x_1 - x_3)^3 + \\ & \hat{\theta}_2(x_2 - x_4)] - M_s z_1 - M_s c_2 z_2. \end{aligned} \quad (15)$$

其中: $\hat{\theta}_i$ 为 θ_i 的估计值, $c_2 > 0$ 为常数.

定义系统 Lyapunov 函数为

$$V = V_2 + \frac{1}{2\gamma_1}\tilde{\theta}_1^2 + \frac{1}{2\gamma_2}\tilde{\theta}_2^2. \quad (16)$$

其中: $\tilde{\theta}_i = \hat{\theta}_i - \theta_i, \gamma_i > 0, i = 1, 2$.

对该函数求导数, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 + z_2 \dot{z}_2 + \frac{1}{\gamma_1}\tilde{\theta}_1\dot{\tilde{\theta}}_1 + \frac{1}{\gamma_2}\tilde{\theta}_2\dot{\tilde{\theta}}_2 = \\ & -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + \tilde{\theta}_1\left[\frac{1}{M_s}(x_1 - x_3)z_2 + \right. \\ & \left. \varepsilon\frac{1}{M_s}(x_1 - x_3)^3 z_2 + \frac{1}{\gamma_1}\dot{\tilde{\theta}}_1\right] + \\ & \tilde{\theta}_2\left[\frac{1}{M_s}(x_2 - x_4)z_2 + \frac{1}{\gamma_2}\dot{\tilde{\theta}}_2\right]. \end{aligned} \quad (17)$$

采用一种映射自适应算法^[13], 使 $\hat{\theta}$ 的变化范围在 $[\theta_{\min} \ \theta_{\max}]$ 内. 取自适应律为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\theta}}_1 = \text{Proj}_{\hat{\theta}}\left(-\gamma_1\frac{1}{M_s}[(x_1 - x_3) + \varepsilon(x_1 - x_3)^3]z_2\right), \\ \dot{\hat{\theta}}_2 = \text{Proj}_{\hat{\theta}}\left(-\gamma_2\frac{1}{M_s}(x_2 - x_4)z_2\right). \end{cases} \quad (18)$$

其中

$$\text{Proj}_{\hat{\theta}}(\cdot) = \begin{cases} 0, & \hat{\theta} \geq \theta_{\max}, \cdot > 0; \\ 0, & \hat{\theta} \leq \theta_{\min}, \cdot < 0; \\ \cdot, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (19)$$

则有

$$\dot{V} = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 \leq 0. \quad (20)$$

当且仅当 $z_1 = z_2 = 0$ 时, $\dot{V} = 0$. 根据 LaSalle 不变性原理^[14], 闭环系统渐近稳定.

为了保证 $x_1 - \bar{x}_3 \rightarrow 0, \dot{x}_1 - \dot{\bar{x}}_3 \rightarrow 0$, 需要 $\lambda_1 \rightarrow 0, \lambda_2 \rightarrow 0$, 即需要 δ 有界. 在初始条件下, V 有界, 从而 δ 有界. 通过设置 a_i 的值可以保证 $\lambda_i \rightarrow 0$. 令输出 y 恒等于 0, 得到系统的零动态

$$\begin{cases} y = x_1 - \bar{x}_3 \equiv 0, \\ \dot{y} = x_2 + \xi(\bar{x}_3 - x_3) = 0, \\ \ddot{y} = \frac{1}{M_s}[-K_s(x_1 - x_3) - \varepsilon K_s(x_1 - x_3)^3 - \\ C_0(x_2 - x_4) + u] + \xi[\xi(x_3 - \bar{x}_3) - x_4] = 0. \end{cases} \quad (21)$$

代入原系统可得

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_3 = \xi(x_3 - \bar{x}_3), \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{M_u}\{M_s\xi[\xi(x_3 - \bar{x}_3) - x_4] - K_t(x_3 - y_0)\}. \end{cases} \quad (22)$$

改写为矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_3 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\xi & \xi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ A_1 & A_2 & A_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_3 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A_4 \end{bmatrix} y_0. \quad (23)$$

其中

$$\begin{aligned} A_1 = & -\frac{M_s}{M_u}\xi^2, \quad A_2 = \frac{M_s}{M_u}\xi^2 - \frac{K_t}{M_u}, \\ A_3 = & -\frac{M_s}{M_u}\xi, \quad A_4 = \frac{K_t}{M_u}. \end{aligned}$$

当且仅当 $\xi > 0$ 时, 此 3 阶矩阵是 Hurwitz 的, 零动态渐近稳定.

3 仿真研究

根据第 2 节的设计结果, 对半主动悬架系统进行仿真研究, 并与被动悬架效果进行比较. 半主动悬架系统参数为: $M_s = 145 \text{ kg}, M_u = 36 \text{ kg}, K_s = 1.372 \times 10^4 \text{ N/m}, K_t = 1.76 \times 10^5 \text{ N/m}, C_0 = 282 \text{ Ns/m}, \varepsilon = 0.4, \xi = 1$.

仿真时控制器及自适应律各参数为: $a_1 = a_2 = 2, c_1 = c_2 = 1, \gamma_1 = 6.86 \times 10^8, \gamma_2 = 1.41 \times 10^7, \theta_{1\min} = 1.3 \times 10^4, \theta_{1\max} = 1.4 \times 10^4, \theta_{2\min} = 260, \theta_{2\max} = 300$.

分别以凸块路面和正弦路面作为路面输入信号, 验证存在输入约束时控制系统的路面适应性, 两种路面的函数表达式如下所示:

凸块路面函数: $y_0 = 0.04(1 - \cos 8\pi t), 0.5 \leq$

$t \leq 0.75$.

正弦路面函数: $y_0 = 0.06 \sin 6\pi t$.

图2(a)和图2(b)分别为凸块路面输入下悬架系统的车身垂直加速度曲线和悬架动行程曲线,其中实线为本文设计的控制算法的响应曲线,虚线为被动悬架系统的响应曲线.图3为凸块路面下控制输入和自适应参数曲线.图3(a)为控制输入曲线,其中实线为考虑输入约束时的实际控制输入,虚线为理想状态下的控制输入.图3(b)和图3(c)分别为两个自适应参数的变化曲线,其中实线为自适应参数的估计值,虚线为不确定参数的实际值.

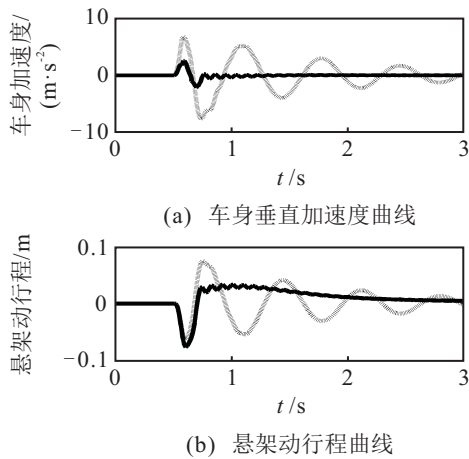


图2 凸块路面下车身加速度及悬架动行程曲线

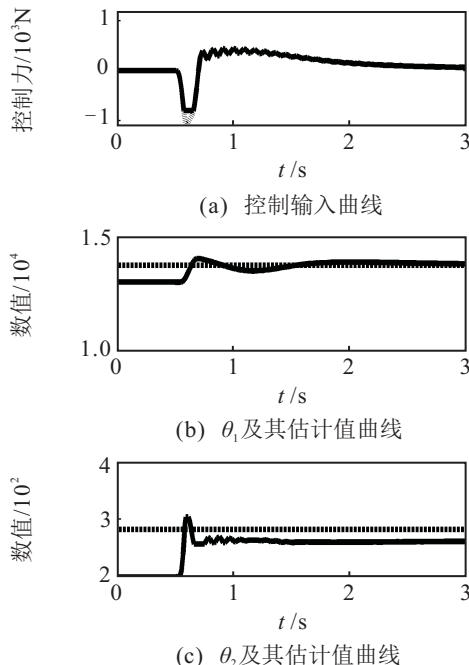


图3 凸块路面下控制输入及自适应参数曲线

由图2和图3可见,控制输入幅值限制在800N时,相比于被动悬架,设计的半主动悬架控制器可以明显减小汽车悬架的车身垂直加速度,悬架动行程小于8cm,满足要求.同时,自适应参数的估计值快速趋近于实际值.

图4(a)和图4(b)分别为正弦路面输入下的车身垂直加速度曲线和悬架动行程曲线,其中实线为本文设计的控制算法在正弦输入下的响应曲线,虚线为被动悬架系统的响应曲线.图5(a)为控制输入曲线,其中实线为考虑输入约束时的实际控制输入,虚线为理想状况下的输入.图5(b)和图5(c)分别为两个自适应参数的变化曲线,其中实线为自适应参数的估计值,虚线为不确定参数的实际值.

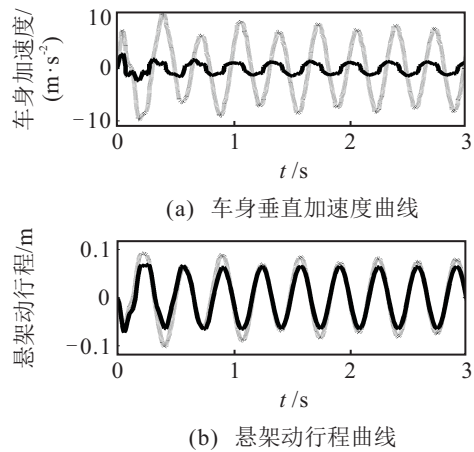


图4 正弦路面下车身加速度及悬架动行程曲线

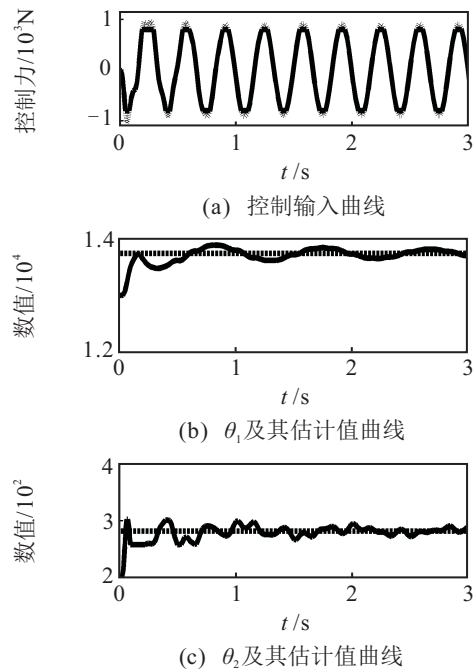


图5 正弦路面下控制输入及自适应参数曲线

通过比较可以看出,在正弦激励信号下,设计的半主动悬架垂直加速度在 2.5 m/s^2 以内,悬架动行程也控制在8cm以内,自适应参数趋近于实际值,而被动悬架的车身垂直加速度接近 10 m/s^2 .由此可见,在正弦路面信号下本文所设计的控制器依然保持良好的性能.

在实际情况中, M_s 为车身质量,其值可通过测量得到.当考虑到测量误差或其他扰动影响使参数 b 取

值偏离 $1/M_s$ 时,经过仿真研究和实验,系统仍能保持稳定,且对车身垂直加速度、悬架动行程等性能影响很小。

4 结 论

本文通过定义辅助系统,采用输入饱和误差放大的方法,设计了考虑执行机构输入约束的半主动悬架控制系统,同时考虑到悬架系统中刚度系数和阻尼系数受汽车运动状态及环境变化的影响,采用自适应Backstepping方法设计控制器,在参数不确定的情况下,系统性能依然得到保证。最后通过仿真对比,表明该控制方法克服了输入约束和参数不确定性对系统的影响,同时很好地改善了汽车悬架系统的乘坐舒适性和安全性。

参考文献(References)

- [1] 周辰雨,张硕,武丽颖. 基于Backstepping和LQG算法的车辆主动悬架控制研究[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2015, 37(4): 138-146.
(Zhou C Y, Zhang S, Wu L Y. Study on control system of active suspension based on Backstepping and LQG[J]. J of Southwest University: Natural Science Edition, 2015, 37(4): 138-146.)
- [2] Sunwoo M, Cheok K A C, Huang N T. Model reference adaptive control for vehicle active suspension systems[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1991, 38(3): 217-222.
- [3] 管成,朱善安. 液压主动悬架的非线性自适应控制[J]. 汽车工程, 2004, 26(6): 691-695.
(Guan C, Zhu S A. Nonlinear adaptive control of hydraulic active suspension[J]. Automotive Engineering, 2004, 26(6): 691-695.)
- [4] 王靖岳,王浩天,张勇. 基于模糊PID控制的汽车主动悬架研究[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(8): 1047-1051.
(Wang J Y, Wang H T, Zhang Y. A study of automobile active suspension based on fuzzy PID control[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2009, 28(8): 1047-1051.)
- [5] 朱思洪,吕宝占,王辉,等. 汽车半主动空气悬架的神经网络控制方法[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(4): 66-70.
(Zhu S H, Lv B Z, Wang H, et al. Neural network control method of automotive semi-active air suspension[J]. J of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(4): 66-70.)
- [6] 孙维超. 汽车悬架系统的主动振动控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学航天学院, 2013.
(Sun W C. Active vibration control for vehicle suspension systems[D]. Harbin: School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, 2013.)
- [7] 方一鸣,许衍泽,李建雄. 具有输入饱和的电液伺服位置系统自适应动态面控制[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(4): 511-518.
(Fang Y M, Xu Y Z, Li J X. Adaptive dynamic surface control for electro-hydraulic servo position system with input saturation[J]. Control Theory & Applications, 2014, 31(4): 511-518.)
- [8] 孙丽颖,赵军. 考虑输入约束的发电机汽门非线性自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(6): 601-606.
(Sun L Y, Zhao J. Nonlinear adaptive control for the turbine steam valve with input constraints[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(6): 601-606.)
- [9] 程盈盈,都海波,何怡刚. 输入饱和受限下的刚体飞行器姿态系统的有限时间镇定[J]. 控制与决策, 2015, 30(8): 1386-1392.
(Cheng Y Y, Du H B, He Y G. Finite-time attitude stabilization of rigid spacecraft under input saturation[J]. Control and Decision, 2015, 30(8): 1386-1392.)
- [10] 赵和平,黄宏成,习纲,等. 非线性弹簧汽车悬架动态特性研究[J]. 机械强度, 2001, 23(2): 165-167.
(Zhao H P, Huang H C, Xi G, et al. Dynamic characteristics of vehicle suspension with non-linear springs[J]. J of Mechanical Strength, 2001, 23(2): 165-167.)
- [11] Jung-Shan Lin, Ioannis Kanellakopoulos. Nonlinear design of active suspensions[J]. IEEE Control Systems, 1997, 17(3): 45-59.
- [12] Bechlioulis C P, Rovithakis G A. Robust adaptive control of feedback linearizable MIMO nonlinear systems with prescribed performance[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2008, 53(9): 2090-2099.
- [13] Xu L, Yao B. Adaptive robust control of mechanical systems with non-linear dynamic friction compensation[J]. Int J of Control, 2008, 81(2): 167-176.
- [14] Jean-Jacques E Slotine, Weiping Li. 应用非线性控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
(Jean-Jacques E Slotine, Weiping Li. Applied nonlinear control[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.)

(责任编辑: 郑晓蕾)