http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0438

输入输出受限的无人机防滑刹车系统容错控制

孙辉, 闫建国*, 屈耀红

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710072)

摘 要: 针对无人机防滑刹车系统工作过程中同时出现系统输出滑移率稳定区域受限、控制输入饱和与刹车执行机构故障的多重约束问题,提出了一种基于障碍 Lyapunov 形式的自适应神经网络反演容错控制器的设计方法。当刹车执行机构发生故障时,通过自适应神经网络补偿刹车系统中的非线性及不确定项,根据反演设计原理,应用神经网络输出设计相应的容错控制律,同时,在控制器的设计中引入鲁棒切换控制项,优化系统快速容错的暂态性能。首先本文设计的容错控制器无需精确获取执行机构在线故障的重构信息,也能使刹车闭环系统能够快速稳定,然后基于 Lyapunov 方法分析了系统的稳定性,最后通过数值仿真结果表明,所提出的容错控制算法能够有效地保证刹车执行机构故障时控制系统的稳定性和有效性。

关 键 词: 防滑刹车; Lyapunov; 容错控制; 执行机构故障; 输入输出受限
中图分类号: TP237; V227
文献标识码: A **文章编号**: 1001-5965(2017)06-1132-09

近 20 年来,无人机容错技术得到了长足的发展,特别针对大中型轮式起降无人机的机电系统容错理论也进行了深入的研究。刹车系统作为无人机的起飞着陆子系统的组成部分,对于保障无人机安全起飞、着陆及纠偏起到重要的作用。防滑刹车系统的可靠与否,直接关系到无人机载具的起降安全和任务完成程度。执行机构部分失效型故障普遍存在于各类非线性控制系统中,无人机刹车系统也不例外,对于无人机刹车系统的执行机构故障的自主解析冗余技术的研究有着重要的理论和应用价值。然而,此类研究文献却鲜有。

近些年来,反演算法被广泛应用于非线性系统的容错控制中[1-3]。Chen 等[4]将反演迭代控制算法应用至飞机防滑刹车系统的滑移率跟踪控制,取得了较好的控制效果。文献[5]采用滑模迭代学习律进行故障估计,用以补偿执行机构故障和外部干扰的影响,但文献中的故障估计却依赖于现有故障估计误差的获取。文献[6-8]假设执行器的失效型故障量和卡死型故障量已知的前提下,针对纯反馈的非线性冗余执行器容错控制,提出自适应模糊反演控制策略,设置自适应模糊机构补偿系统非线性项,实际中真实故障值是无法取得的。

与此同时,随着自适应反演神经网络控制的发展,大量的先进控制方法被提出,例如 Polycarpou[9] 首次提出将自适应边界技术应用于估计神经网络逼近误差的未知上界。这种策略已经广泛应用于自适应神经网络的设计。Bechlioulis 和 Rovithakis[10] 针对标准 SISO 不确定非线性系统提出了一种基于自适应神经网络的控制器,能够保证跟踪误差在一个时变的界内。然而只有当神经网络的估计性能受限在一定紧集内时,大多数自适应神经网络控制算法仅能够确保闭环控制系统的半全局一致稳定。Wang 等[11] 将水下无人机推

收稿日期: 2016-05-23; **录用日期**: 2016-07-01; **网络出版时间**: 2016-09-12 10:39
网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20160912.1039.005.html
基金项目: 国家自然科学基金 (60974146,61473229)
* **通讯作者**: E-mail: yjg0311@nwpu.edu.cn

引用格式: *孙辉, 闫建国, 屈耀红. 输入输出受限的无人机防滑刹车系统容错控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(6): 1132-1140. SUN H, YAN J G, QU Y H. Fault-tolerant control of UAV anti-skid braking system with input and output constraints[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(6): 1132-1140 (in Chinese).*

http://bhxb.buaa.edu.cn

进器故障量和外界扰动看作是系统的不确定项,构造径向基函数神经网络(Radial Basis Function Neural Network, RBFNN)用于估计不确定项,同时将滑模算法同反演控制相结合,对执行器故障进行容错控制。然而,其并未考虑系统跟踪状态量的受限与执行器饱和这一因素。

现有的文献研究[12-14]均是针对滑移率的调节使其对设定最优值进行跟踪,而对刹车系统稳定性问题却少有探讨。滑移率控制中刹车工作点常处于稳定或不稳定区域[15]。滑移率处于不稳定区域则会导致防滑效果不理想甚至使飞机主轮趋于抱死,导致不期望的侧向滑移,从而造成安全事故。为了保证跟踪误差在提前设定的界内,基于障碍 Lyapunov 函数的反演控制算法得到了广泛的研究[16-18],然而该方法的使用前提是系统所有可测状态量必须全程限定在已知的常数范围内,而且并未讨论故障状态下的系统稳定性能。

在不确定参数与各种外部扰动作用下执行机构受限将会对防滑性能产生很大的影响。特别地,当执行机构发生故障时,重构控制器与控制输入饱和之间的关系很难确定,因此控制输入受限这一问题亟待解决。文献[19-20]分别针对SISO、MIMO 非线性系统的输出受限和输入控制饱和问题进行研究,利用了对称的障碍 Lyapunov 函数结合反演算法设计控制律,并分别利用神经网络和模糊项来逼近未知模型参数和干扰项。文献[21]应用 RBFNN 控制器补偿系统非线性和执行器缓变型故障,设定初始状态即为故障状态下进行的仿真分析,通过选择合适的控制器参数,使得全程 RBFNN 误差总保持在一定的紧集内,然而文献并未考虑系统工作过程中突发型未知故障对神经网络控制器稳定性的冲击影响。为了克服经典自适应神经网络控制器这一缺点,文献[22]引入鲁棒切换项,当神经网络的输入量超出逼近范围时,切换项起作用,将传统自适应神经网络控制项切除掉,随之而来的鲁棒项开始起作用,将用于补偿超出神经网络输入范围对系统的影响。基于预定义跟踪有限精度范围而设计一种自适应神经网络容错控制算法具有重大的理论和实际意义。但直至现在为止,并没有一种有效的自适应神经网络容错控制方法,用于解决非线性系统输入输出受限、机构故障的多重约束问题。

因此,本文在以上文献的研究基础上,探索了无人机防滑刹车系统在存在建模不确定性和执行机构未知失效故障,同时存在控制输入饱和情况下的滑移率受限问题。本文的主要工作如下:针对无人机防滑刹车系统故障模型中的非线性不确定项,使用自适应神经网络进行逼近,发生执行器失效故障时,若系统的约束量超出神经网络输入设定值,则通过切换鲁棒项,来补偿神经网络超出逼近设定值对系统稳定性的冲击影响,以达到快速容错的目的;针对控制输入饱和,设置了饱和补偿项,用于补偿超出饱和的部分;对于输出滑移率受限问题,使用了障碍 Lyapunov 函数设计容错控制器,确保了滑移率始终维持在受限条件之内。系统能够在故障未知,无需精确故障重构的情况下,以较少的可调参数,使整个系统实现快速稳定容错控制。

1　问题描述与预备知识

考虑包含执行机构故障的刹车系统数学模型为不确定非线性系统。建立刹车系统模型时不考虑飞机的横侧向运动,假设所有主机轮的作动机构均具有一致性和同步性,因此刹车控制系统可以简化为仅对单个机轮的控制[4],而本文主要应用于基于滑移率设计的防滑刹车控制系统,则滑移率可以被定义为

$$\delta = \frac{V_x - R_{\mathrm{vb}}\omega_{\mathrm{w}}}{V_x} \tag{1}$$

对式(1)两边求导可得

$$\dot{\delta} = f(\delta) + \frac{R_{\mathrm{vb}}}{V_x J} T_{\mathrm{b}} \tag{2}$$

式中:

$$f(\delta) = -\frac{\dot{\delta}}{V_x} F_1 + \frac{F_1}{V_x} - \frac{R_{\mathrm{vb}}}{V_x} F_2 \tag{3}$$

其中:

$$\begin{aligned} F_1 = {} & \frac{T_0 + k_v V_x}{m} - \frac{\rho C_d S_{\mathrm{w}} V_x^2}{2m} - \frac{\rho C_{\mathrm{p}} S_{\mathrm{p}} V_x^2}{2m} - \\ & \mu \frac{(a - \mu_{\mathrm{f}} h)\left(g - \dfrac{\rho C_L S_{\mathrm{w}} V_x^2}{2m}\right) + h_{\mathrm{t}} \dfrac{T_0 + k_v V_x}{m}}{a + b + (\mu - \mu_{\mathrm{f}}) h} - \\ & \mu \frac{h_{\mathrm{p}} \dfrac{\rho C_{\mathrm{p}} S_{\mathrm{p}} V_x^2}{2m}}{a + b + (\mu - \mu_{\mathrm{f}}) h} - \\ & \mu_{\mathrm{f}} \frac{(b + \mu h)\left(g - \dfrac{\rho C_L S_{\mathrm{w}} V_x^2}{2m}\right)}{a + b + (\mu - \mu_{\mathrm{f}}) h} - \\ & \mu_{\mathrm{f}} \frac{-h_{\mathrm{t}} \dfrac{T_0 + k_v V_x}{m} - h_{\mathrm{p}} \dfrac{\rho C_{\mathrm{p}} S_{\mathrm{p}} V_x^2}{2m}}{a + b + (\mu - \mu_{\mathrm{f}}) h} \end{aligned} \tag{4}$$

$$F_2 = \mu R_{\mathrm{vb}} \frac{(a - \mu_{\mathrm{f}} h)\left(mg - \dfrac{\rho C_L S_{\mathrm{w}} V_x^2}{2}\right)}{nJ[a + b + (\mu - \mu_{\mathrm{f}}) h]} +$$

http://bhxb.buaa.edu.cn

$$\mu R_{\mathrm{vb}}\frac{h_{\mathrm{t}}(T_0+k_vV_x)+h_{\mathrm{p}}\dfrac{\rho C_{\mathrm{p}}S_{\mathrm{p}}V_x^2}{2}}{nJ[a+b+(\mu-\mu_{\mathrm{f}})h]} \tag{5}$$

式中：V_x 为飞机速度；ω_{w} 为机轮转速；T_{b} 为刹车力矩；δ 为滑移率；R_{vb} 为刹车半径；J 为机轮转动惯量；其他飞机机轮建模相关参数的定义详见文献[23]。结合系数 μ 同 δ 之间具备非线性关系，即

$$\mu(\delta)=D\sin(C\arctan(B\delta)) \tag{6}$$

表 1 展示出 μ-δ 相关参数的数值。

表 1 μ-δ 关系参数示意

Table 1 Relationship of μ-δ parametric representation

飞机跑道状态	D	C	B
干柏油跑道	0.8	1.5344	14.0326
湿柏油跑道	0.4	2.0192	8.2098
结冰跑道	0.2	2.0875	7.2018

由式(4)~式(6)，可以看出滑移率同飞机速度和机轮转速，滑移率与结合系数都存在有非线性关系，从而使得无人机防滑刹车系统具有较强的非线性，将系统重新写成非线性状态方程：

$$\begin{cases}\dot{x}(t)=f(x)+g(x)u\\ y=x\end{cases} \tag{7}$$

式中：状态变量 $x=\delta$；控制输入 $u=T_{\mathrm{b}}$；$f(x)=f(\delta)$；$g(x)=R_{\mathrm{vb}}/(V_xJ)$。本文仅考虑执行机构发生部分失效故障，且将此故障建模为乘性因子形式，则执行机构故障下实际作用于刹车控制力矩为

$$u=\rho(t)u_{\mathrm{c}} \tag{8}$$

式中：$\rho(t)$ 为执行器的故障程度，$\rho(t)\in(0,1]$。当 $\rho(t)=1$ 时，则 $u=u_{\mathrm{c}}$（u_{c} 为控制力矩），表示执行机构正常工作，指令控制刹车力矩与实际力矩一致；当 $\rho(t)\in(0,1)$ 时，表示执行机构产生部分失效故障。同时考虑刹车力矩作为控制输入的饱和受限问题，即 $0\leqslant u\leqslant u_{\max}$（$u_{\max}$ 为最大刹车力矩），设计指令相应的 u_{c} 以实现防滑刹车系统稳定容错控制。

$$\mathrm{sat}(v)=\begin{cases}u_{\max} & v\geqslant u_{\max}\\ v & u_{\min}<v<u_{\max}\\ u_{\min} & v\leqslant u_{\min}\end{cases} \tag{9}$$

式中：v 为控制器的输入指令；$u_{\min}$ 为最小刹车力矩（本文为 0）。至此，无人机防滑刹车系统方程在执行器部分失效故障发生时可以改写为

$$\begin{cases}\dot{x}(t)=f(x)+g(x)\rho(t)u_{\mathrm{c}}\\ y=x\end{cases} \tag{10}$$

由式(6)可知，滑移率与结合系数之间关系具有较强的非线性和不确定性，往往系统建模时不能够较为准确的获取，而且本文中的执行机构失效型故障程度未知，因此设置 RBFNN 直接用于逼近系统未知非线性项和故障项，从而将 RBFNN 引入容错控制器设计中具有重要的意义。

本文控制目标：针对式(10)所描述的无人机防滑刹车系统，考虑执行机构部分失效故障与控制输入受限问题，设计容错控制器使得刹车过程中，实现对期望滑移率的跟踪，即使发生执行器故障也仍能满足刹车工作点快速调节并稳定在限定有界范围之内。

为了后续方便容错控制器设计及其稳定性分析，现将本文的数学符号做统一定义。令 $\mathbf{R}$ 表示实数域，$\mathbf{R}_+$ 表示全体实数构成的空间，$\mathbf{R}^n$ 表示 n 维实数向量空间。

引理 1 在一紧集域内 $\Omega_Z\in\mathbf{R}^m$，使用 RBFNN，逼近未知连续非线性函数 $\phi(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}}):\mathbf{R}^m\rightarrow\mathbf{R}$，形式如下：

$$f(\boldsymbol{Z})=\boldsymbol{W}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{H}(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}})+\varepsilon(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}}) \tag{11}$$

式中：$\varepsilon(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}})$ 为神经网络固有估计误差，且有界，满足 $|\varepsilon(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}})|\leqslant\varepsilon^*$，$\varepsilon^*\in\mathbf{R}_+$ 为未知常数；输入向量 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}}\in\Omega_Z$，$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}})=[h_1(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}}),h_2(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}}),\cdots,h_l(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}})]^{\mathrm{T}}:\Omega_Z\rightarrow\mathbf{R}^l$，且神经网络节点数 $l>1$，$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}})$ 为已知光滑向量值函数，选择 RBFNN 函数 $h_i(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}})(1\leqslant i\leqslant l)$ 为高斯基函数，形式如下：

$$h_i(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}})=\exp\left[-\frac{(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}}-\boldsymbol{a}_i)^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}}-\boldsymbol{a}_i)}{b_i^2}\right] \tag{12}$$

其中：$\boldsymbol{a}_i\in\Omega_Z$ 和 $b_i\in\mathbf{R}_+$ 分别为高斯基函数的中心和宽度。定义最优权值向量 $\boldsymbol{W}^*=[w_1^*,w_2^*,\cdots,w_l^*]^{\mathrm{T}}$ 为

$$\boldsymbol{W}^*:=\arg\min_{\hat{\boldsymbol{W}}\in\mathbf{R}^l}\left\{\sup_{z\in\Omega_Z}|f(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}})-\hat{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}})|\right\} \tag{13}$$

式中：$\hat{\boldsymbol{W}}$ 为 $\boldsymbol{W}^*$ 的估计值。

引理 2[24] 针对所有 $\boldsymbol{s}\in\mathbf{R}^p$，同时给定常数 $0<r_1<r_2$，且 n 阶光滑函数 $F(\boldsymbol{s})$ 满足以下条件：

1) 当 $\|\boldsymbol{s}\|\leqslant r_1$，$F(\boldsymbol{s})=0$。

2) 当 $\|\boldsymbol{s}\|\geqslant r_2>r_1$，$F(\boldsymbol{s})=1$。

3) $F(\boldsymbol{s})\geqslant n$ 阶连续可导。

针对所有 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}}\in\mathbf{R}^p$，本文选取切换函数为

$$M(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}})=\begin{cases}0 & \|\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}}\|\leqslant r_1\\ 1-\cos^n\left[\dfrac{\pi}{2}\sin^n\left(\dfrac{\pi}{2}\cdot\dfrac{\|\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}}\|^2-r_1^2}{r_2^2-r_1^2}\right)\right] & \text{其他}\\ 1 & \|\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}}\|\geqslant r_2\end{cases} \tag{14}$$

式中：$0<r_1<r_2$，则 $M(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{in}})$ 为 n 阶光滑连续可导

http://zhzb.buaa.edu.cn

函数。

引理 3[25]　对于所有满足 $|\cdot|<k_b$,则不等式 $\ln[k_b^2/(k_b^2-(\cdot)^2)]\leqslant S^2/(k_b^2-(\cdot)^2)$ 恒成立。其中:S 为跟踪误差;k_b 为跟踪误差的受限最大值。

假设 1　存在已知光滑函数 $\psi(\cdot)$,且存在未知常数 $\lambda\in\mathbf{R}_+$ 保证不等式 $|f(\cdot)|\leqslant\lambda\psi(\cdot)$ 恒成立。

假设 2　在执行机构容错控制器设计中,$g(\cdot)$ 为已知函数,$\dot{g}(\cdot)$ 有界,在 $|\cdot|<k_b$ 条件下,存在 $0<\underline{g}_0\leqslant g(\cdot)\leqslant\bar{g}_0$ 恒成立,且 $\underline{g}_0,\bar{g}_0\in\mathbf{R}_+$,又故障程度 $\rho(t)$ 满足 $\rho(t)\in(0,1]$,且 $\rho(t)$ 微分有界,$\dot{\rho}(t)\leqslant v_0,v_0\in\mathbf{R}_+$,令 $\sigma(t)=g(\cdot)\rho$,则 $0<\underline{\sigma}<\sigma(t)<\bar{\sigma}$,$|\dot{\sigma}(t)|\leqslant v,\underline{\sigma},\bar{\sigma},v\in\mathbf{R}_+$。

假设 3　由于 $\forall t\in[0,+\infty)$

$$q(\cdot)=\begin{cases}1 & 0<\cdot<k_b\\ 0 & -k_a<\cdot\leqslant 0\end{cases}\tag{15}$$

式中:$-k_a$ 为跟踪误差的受限最小值。

故而定存在一个正常数 θ 满足 $|(1-q)/(k_a^2-(\cdot)^2)+q/(k_b^2-(\cdot)^2)|\leqslant\theta$。

2　自适应鲁棒容错控制器设计

本文提出的容错控制器思想是将滑移率控制视为含有系统输出约束条件的控制问题,通过约束条件的限定,使得滑移率始终在受限区域之内,即使发生执行器故障也仍能满足刹车工作点快速调节并稳定在限定有界范围之内。针对执行器故障下的无人机防滑刹车非线性系统式(10),基于假设 1和假设 2,定义 $S=y-y_r$,y 为测量信号,y_r 为参考信号,$\sigma(t)=\rho(t)g(x)$,对 S 求导可得

$$\dot{S}=\dot{y}-\dot{y}_r=\sigma(t)[\sigma^{-1}(t)(f(x)-\dot{y}_r)+u_c]\tag{16}$$

选取障碍 Lyapunov 候选函数:

$$V=\frac{1}{2\sigma(t)}\left[(1-q)\ln\frac{k_a^2}{k_a^2-S^2}+q\ln\frac{k_b^2}{k_b^2-S^2}\right]+\frac{1}{2}\tilde{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\gamma}^{-1}\tilde{\boldsymbol{W}}+\frac{1}{2\tau}\tilde{\lambda}^2+\frac{1}{2\vartheta}\tilde{\varepsilon}^2+\frac{1}{2}P_a^2\tag{17}$$

式中:

$$q(S)=\begin{cases}1 & 0<S<k_b\\ 0 & -k_a<S\leqslant 0\end{cases}$$

$\boldsymbol{\gamma}^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{\gamma}$ 为设定的正定对角阵,选取参数 $\tau,\vartheta\in\mathbf{R}_+$,并且 RBFNN 权值的估计误差定义为 $\tilde{\boldsymbol{W}}=\hat{\boldsymbol{W}}-\boldsymbol{W}^*$,RBFNN 上界的估计误差值为 $\tilde{\lambda}=\hat{\lambda}-\hat{\lambda}^*$,$\lambda$ 为 RBFNN 上界估计值,λ^* 为 RBFNN 上界真实值,RBFNN 固有逼近误差的估计误差值为 $\tilde{\varepsilon}=\hat{\varepsilon}-\varepsilon^*$,$\hat{\varepsilon}$ 为估计值,ε^* 为实际值,控制器饱和补偿量为 P_a。考虑式(16),并对式(17)两端求微分,可得

$$\dot{V}=\frac{1}{\sigma(t)}\left(\frac{1-q}{k_a^2-S^2}+\frac{q}{k_b^2-S^2}\right)S\dot{S}-\frac{\dot{\sigma}(t)}{2\sigma^2(t)}\left[(1-q)\ln\frac{k_a^2}{k_a^2-S^2}+q\ln\frac{k_b^2}{k_b^2-S^2}\right]+\tilde{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\gamma}^{-1}\dot{\hat{\boldsymbol{W}}}+\tau^{-1}\tilde{\lambda}\dot{\hat{\lambda}}+\vartheta^{-1}\tilde{\varepsilon}\dot{\hat{\varepsilon}}+P_a\dot{P}_a\tag{18}$$

代入引理 3,则式(18)可以进一步放缩为

$$\begin{aligned}\dot{V}&\leqslant\frac{1}{\sigma(t)}\left(\frac{1-q}{k_a^2-S^2}+\frac{q}{k_b^2-S^2}\right)S\dot{S}+\frac{\dot{\sigma}(t)}{2\sigma^2(t)}\left(\frac{1-q}{k_a^2-S^2}+\frac{q}{k_b^2-S^2}\right)S^2+\tilde{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\gamma}^{-1}\dot{\hat{\boldsymbol{W}}}+\tau^{-1}\tilde{\lambda}\dot{\hat{\lambda}}+\vartheta^{-1}\tilde{\varepsilon}\dot{\hat{\varepsilon}}+P_a\dot{P}_a=\\&\frac{S}{\sigma(t)}\left\{\sigma(t)\left(\frac{1-q}{k_a^2-S^2}+\frac{q}{k_b^2-S^2}\right)\cdot\left[\sigma^{-1}(t)(f(x)-\dot{y}_r)+u_c+\frac{\dot{\sigma}(t)}{2\sigma^2(t)}S\right]\right\}+\tilde{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\gamma}^{-1}\dot{\hat{\boldsymbol{W}}}+\tau^{-1}\tilde{\lambda}\dot{\hat{\lambda}}+\vartheta^{-1}\tilde{\varepsilon}\dot{\hat{\varepsilon}}+P_a\dot{P}_a=\\&S\left(\frac{1-q}{k_a^2-S^2}+\frac{q}{k_b^2-S^2}\right)(u_c+\phi(\boldsymbol{Z}))+\tilde{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\gamma}^{-1}\dot{\hat{\boldsymbol{W}}}+\tau^{-1}\tilde{\lambda}\dot{\hat{\lambda}}+\vartheta^{-1}\tilde{\varepsilon}\dot{\hat{\varepsilon}}+P_a\dot{P}_a\end{aligned}\tag{19}$$

定义 $\boldsymbol{Z}=[x,\dot{y}_r]^{\mathrm{T}}\in\mathbf{R}^3$,则未知非线性项为

$$\phi(\boldsymbol{Z}):=\sigma^{-1}(t)(f(x)-\dot{y}_r)+\frac{\dot{\sigma}(t)}{2\sigma^2(t)}S\tag{20}$$

从式(3)和式(6)可知,$f(x)$ 具有较强的非线性,往往系统建模时不能够较为准确的获取,由于本文中的故障程度未知,因此设置 RBFNN 用于逼近未知非线性项 $\phi(\boldsymbol{Z})$,同时根据引理 2,同时考虑执行器饱和,则设计容错控制律为

$$u_c=\mathrm{sat}(v,u_{\max})\tag{21}$$

式中:设计控制器 u_c 的输入为

$$v=-[(1-q)(k_a^2-S^2)+q(k_b^2-S^2)]K_1S+(1-M(\boldsymbol{Z}))\alpha^{\mathrm{n}}+M(\boldsymbol{Z})\alpha^{\mathrm{r}}-K_2P_a\tag{22}$$

其中:K_1 和 K_2 为待设计的控制参数;α^{n} 为传统自适应神经网络控制项;α^{r} 为鲁棒切换控制项,两者定义分别为

$$\alpha^{\mathrm{n}}=-\hat{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}(\boldsymbol{Z})-\hat{\varepsilon}\tanh(S/\xi)\tag{23}$$

$$\alpha^{\mathrm{r}}=-\hat{\lambda}\psi(\boldsymbol{Z})\tanh(S\psi(\boldsymbol{Z})/\xi)\tag{24}$$

自适应律设计为

$$\dot{\hat{\boldsymbol{W}}}=\boldsymbol{\gamma}\left[(1-M(\boldsymbol{Z}))\left(\frac{1-q}{k_a^2-S^2}+\frac{q}{k_b^2-S^2}\right)\cdot\right.$$

http://bhxb.buaa.edu.cn

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{Z})S-\varpi\hat{\boldsymbol{W}}\Big] \tag{25}$$

$$\dot{\hat{\lambda}}=\tau\Big[M(\boldsymbol{Z})S\Big(\frac{1-q}{k_{\mathrm{a}}^2-S^2}+\frac{q}{k_{\mathrm{b}}^2-S^2}\Big)\cdot \psi(\boldsymbol{Z})\tanh(S\psi(\boldsymbol{Z})/\xi)-\kappa\hat{\lambda}\Big] \tag{26}$$

$$\dot{\hat{\varepsilon}}=\vartheta\Big[(1-M(\boldsymbol{Z}))S\Big(\frac{1-q}{k_{\mathrm{a}}^2-S^2}+\frac{q}{k_{\mathrm{b}}^2-S^2}\Big)\cdot \tanh(S/\xi)-\zeta\hat{\varepsilon}\Big] \tag{27}$$

设计饱和辅助机构为

$$\dot{P}_{\mathrm{a}}=-K_3P_{\mathrm{a}}-\Delta u^2/P_{\mathrm{a}}-\Delta u \tag{28}$$

式中：K_3 为待设计的参数；$\Delta u=u_{\mathrm{c}}-v$；待设计参数 $\xi,\varpi,\kappa,\zeta\in\mathbf{R}_+$。当系统发生执行器故障时，RBFNN 的输入将会出现较大的波动，甚至超出 RBFNN 逼近范围，从而使得控制系统暂态性能变差，容错时间变长。当系统发生故障时，鲁棒项 α^{r} 会随 $M(\boldsymbol{Z})$ 而变化，起到对于超出逼近范围的补偿作用。

定理 1 针对式(10)所示故障无人机防滑刹车系统，应用自适应律式(23)～式(27)，辅助机构式(28)，设计控制器式(21)，其中控制器 u_{c} 的输入量 v 设计为式(22)，若满足假设 1～假设 3，选取合适的控制参数，则可以保证滑移率始终维持在给定界内，闭环控制系统半全局一致稳定，所有信号有界。

证明 根据引理 1 可令：

$$\phi(\boldsymbol{Z})=\boldsymbol{W}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{H}(\boldsymbol{Z})+\varepsilon(\boldsymbol{Z}) \tag{29}$$

考虑将式(29)代入不等式(19)，可得

$$\dot{V}\leqslant S\Big(\frac{1-q}{k_{\mathrm{a}}^2-S^2}+\frac{q}{k_{\mathrm{b}}^2-S^2}\Big)(\Delta u+v+\boldsymbol{W}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{H}(\boldsymbol{Z})+\varepsilon(\boldsymbol{Z}))+\tilde{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\gamma}^{-1}\dot{\hat{\boldsymbol{W}}}+\tau^{-1}\tilde{\lambda}\dot{\hat{\lambda}}+\vartheta^{-1}\tilde{\varepsilon}\dot{\hat{\varepsilon}}+P_{\mathrm{a}}\dot{P}_{\mathrm{a}} \tag{30}$$

根据式(28)，则有

$$P_{\mathrm{a}}\dot{P}_{\mathrm{a}}=-K_3P_{\mathrm{a}}-\Delta u^2-\Delta uP_{\mathrm{a}} \tag{31}$$

将控制器输入，式(22)和式(31)代入不等式(30)：

$$\dot{V}\leqslant-K_1S^2+S\Big(\frac{1-q}{k_{\mathrm{a}}^2-S^2}+\frac{q}{k_{\mathrm{b}}^2-S^2}\Big)[\Delta u+(1-M(\boldsymbol{Z}))\alpha^{\mathrm{n}}+M(\boldsymbol{Z})\alpha^{\mathrm{r}}-K_2P_{\mathrm{a}}+\boldsymbol{W}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{H}(\boldsymbol{Z})+\varepsilon(\boldsymbol{Z})]+\tilde{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\gamma}^{-1}\dot{\hat{\boldsymbol{W}}}+\tau^{-1}\tilde{\lambda}\dot{\hat{\lambda}}+\vartheta^{-1}\tilde{\varepsilon}\dot{\hat{\varepsilon}}-K_3P_{\mathrm{a}}-\Delta u^2-\Delta uP_{\mathrm{a}} \tag{32}$$

考虑假设 1～假设 3，并根据 Young 不等式，可得

$$-S\Big(\frac{1-q}{k_{\mathrm{a}}^2-S^2}+\frac{q}{k_{\mathrm{b}}^2-S^2}\Big)K_1P_{\mathrm{a}}\leqslant\frac{K_1^2}{2}P_{\mathrm{a}}^2+\frac{S^2}{2}\theta^2 \tag{33}$$

$$S\Big(\frac{1-q}{k_{\mathrm{a}}^2-S^2}+\frac{q}{k_{\mathrm{b}}^2-S^2}\Big)\Delta u\leqslant\frac{1}{2}\Delta u^2+\frac{S^2}{2}\theta^2 \tag{34}$$

同时将自适应律式(23)～式(28)，代入不等式(32)，可得

$$\dot{V}\leqslant-(K_1-\theta^2)S^2-\frac{\varpi}{2}\|\tilde{\boldsymbol{W}}\|^2-\frac{\kappa}{2}|\tilde{\lambda}|^2-\frac{\zeta}{2}|\tilde{\varepsilon}|^2+\frac{\varpi}{2}\|\boldsymbol{W}^*\|^2+\frac{\kappa}{2}|\lambda^*|^2+\frac{\zeta}{2}|\varepsilon^*|^2+\theta(1-M(\boldsymbol{Z}))\varepsilon^*(|S|-S\tanh(S/\xi))+\theta M(\boldsymbol{Z})\lambda^*(\psi(\boldsymbol{Z})S|-\psi(\boldsymbol{Z})S\tanh(\psi(\boldsymbol{Z})S/\xi))-\Big(K_3-\frac{K_2^2}{2}-\frac{1}{2}\Big)P_{\mathrm{a}}^2-\frac{1}{2}\Delta u^2\leqslant-(K_1-\theta^2)S^2-\Big(K_3-\frac{K_2^2}{2}-\frac{1}{2}\Big)P_{\mathrm{a}}^2-\frac{\varpi}{2}\|\tilde{\boldsymbol{W}}\|^2-\frac{\kappa}{2}|\tilde{\lambda}|^2-\frac{\zeta}{2}|\tilde{\varepsilon}|^2+\Lambda \tag{35}$$

式中：$\Lambda=\frac{\varpi}{2}\|\boldsymbol{W}^*\|^2+\frac{\kappa}{2}|\lambda^*|^2+\frac{\zeta}{2}|\varepsilon^*|^2+0.2785\xi\theta[M(\boldsymbol{Z})(\lambda^*-\varepsilon^*)+\varepsilon^*]$。则根据 Lyapunov 候选函数式(17)可得

$$\dot{V}\leqslant-\frac{1}{2\sigma(t)}(K_1-\theta^2)[(1-q)(k_{\mathrm{a}}^2-S^2)+q(k_{\mathrm{b}}^2-S^2)]\Big(\frac{1-q}{k_{\mathrm{a}}^2-S^2}+\frac{q}{k_{\mathrm{b}}^2-S^2}\Big)S^2-\frac{\lambda_{\min}(\boldsymbol{\gamma})}{2}\varpi\tilde{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\gamma}^{-1}\tilde{\boldsymbol{W}}-\frac{\kappa}{2\tau}\tilde{\lambda}^2-\frac{\xi}{2\vartheta}\tilde{\varepsilon}^2-\frac{1}{2}\Big(K_3-\frac{K_2^2}{2}-\frac{1}{2}\Big)P_{\mathrm{a}}^2+\Lambda \tag{36}$$

式中：$\lambda_{\min}(\boldsymbol{\gamma})$ 为求取矩阵 $\boldsymbol{\gamma}$ 的最小特征值。

式(36)根据引理 3，可以得到

$$\dot{V}\leqslant-\frac{1}{2\sigma(t)}(K_1-\theta^2)[(1-q)(k_{\mathrm{a}}^2-S^2)+q(k_{\mathrm{b}}^2-S^2)]\Big[(1-q)\ln\frac{k_{\mathrm{a}}^2}{k_{\mathrm{a}}^2-S^2}+q\ln\frac{k_{\mathrm{b}}^2}{k_{\mathrm{b}}^2-S^2}\Big]S^2-\frac{\lambda_{\min}(\boldsymbol{\gamma})}{2}\varpi\tilde{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\gamma}^{-1}\tilde{\boldsymbol{W}}-\frac{\kappa}{2\tau}\tilde{\lambda}^2-\frac{\xi}{2\vartheta}\tilde{\varepsilon}^2-\frac{1}{2}\Big(K_3-\frac{K_2^2}{2}-\frac{1}{2}\Big)P_{\mathrm{a}}^2+\Lambda \tag{37}$$

这里令 $\Theta=\min\{(K_1-\theta^2)[(1-q)(k_{\mathrm{a}}^2-S^2)+q(k_{\mathrm{b}}^2-S^2)],\lambda_{\min}(\boldsymbol{\gamma})\varpi,\kappa,\xi,K_3-0.5K_2^2-0.5\}$，则式(37)可以被改写为

$$\dot{V}\leqslant-\Theta V+\Lambda \tag{38}$$

为了确保整个闭环容错系统的稳定性，控制器的参数满足

$$\begin{cases}K_1-\theta^2>0\\ K_3-\dfrac{K_2^2}{2}-\dfrac{1}{2}>0\end{cases} \tag{39}$$

http://bhxb.buaa.edu.cn

求解式(38),可得 $V(t)$ 的值域范围为

$$0 \leqslant V(t) \leqslant V(0)\mathrm{e}^{-\Theta t} + \frac{\Lambda}{\Theta}(1-\mathrm{e}^{-\Theta t}) \leqslant V(0) + \frac{\Lambda}{\Theta} \tag{40}$$

根据假设 2,并对式(40)两边求取反对数可得

$$\left[(1-q)\ln\frac{k_{\mathrm{a}}^2}{k_{\mathrm{a}}^2-S^2} + q\ln\frac{k_{\mathrm{b}}^2}{k_{\mathrm{b}}^2-S^2}\right] \leqslant \exp\left\{2\underline{\sigma}\left[(V(0)-\frac{\Lambda}{\Theta})\mathrm{e}^{-\Theta t} + \frac{\Lambda}{\Theta}\right]\right\} \tag{41}$$

式(41)经变换,可得 $|S(t)| = |x(t) - y_{\mathrm{r}}(t)| \leqslant [(1-q)k_{\mathrm{a}} + qk_{\mathrm{b}}]\sqrt{1-\mathrm{e}^{-2\underline{\sigma}\Lambda/\Theta}}$。

综上所述,即使在执行机构故障下,也能够通过选择合适的控制参数,使得滑移率跟踪误差 S 以任意精度趋近于 0,并且系统输出滑移率全程稳定在受限稳定范围内。

3　仿真分析

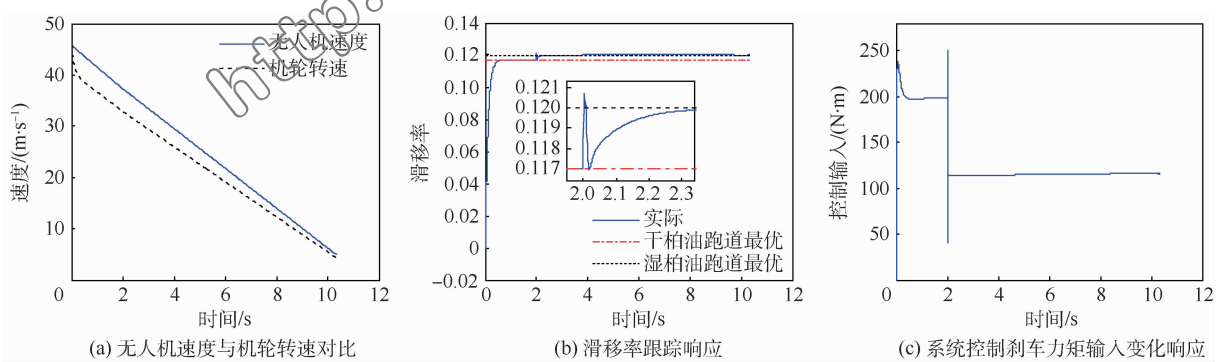
为了验证所提出的控制方法用于无人机防滑刹车执行器故障容错控制的有效性,在 MATLAB 环境下对所提的方法进行了仿真研究。为了验证所提容错算法的可靠性,无人机在干柏油跑道着陆时可分 2 种情况进行仿真:①在正常工况,切换不同跑道作用下系统响应;②执行器故障,本文设计的容错控制器起作用下的系统响应。

刹车系统模型部分参数分别为:飞机质量 $m = 3\,000$ kg;前轮至重心距离 $a = 3.883$ m;主轮至重心距离 $b = 1.076$ m,刹车半径 $R_{\mathrm{vb}} = 0.165$ m;飞机重心高度 $h = 1.32$ m;最大刹车力矩 $u_{\max} = 250$ N·m。防滑控制的目标是刹车滑移率实时跟踪最优滑移率,且滑移率受限始终在稳定范围内。本文选取跑道参数详见表 1,其中对应的最优滑移率分别为:干柏油跑道最优滑移率选取0.117;湿柏油跑道最优滑移率选取0.12;结冰跑道最优滑移率选取 0.13。在这里选取最佳滑移率跟踪误差 $S(t) = \delta(t) - \delta_{\mathrm{r}}(t)$ 受限的上下界分别为 $k_{\mathrm{b}} = k_{\mathrm{c}} - \delta_{\mathrm{r}}(t)$,$k_{\mathrm{a}} = k_{\mathrm{c}} - \delta(0)$。其中,$\delta(t)$ 和 $\delta_{\mathrm{r}}(t)$ 分别为滑移率、给定最优滑移率,选取参数 $k_{\mathrm{c}} = 0.25$。无人机的着陆刹车初始速度为 $V_x(0) = 45.8$ m/s,$\omega(0) = 277.5$ rad/s。RBFNN 参数选取为:神经元个数为 680;RBFNN 中心 a_i 平均分布于 $[-0.000\,15, 0.14] \times [0, 0.13] \times [0, 1.3]$;宽度 $b_i = 0.5$ $(i = 1, 2, \cdots, 80)$。为了实现故障状态下稳定控制,控制器和自适应律参数分别选择为:$K_1 = 30$;$K_2 = 0.57$;$\psi(\boldsymbol{Z}) = 240$;$r_1 = 1.18$;$r_2 = 1.25$;$K_3 = 4.5$;$|\boldsymbol{\gamma}| = \tau = 1$;$\vartheta = 0.25$;$\varpi = 0.02$;$\kappa = 0.001$;$\zeta = 0.12$。为了较为真实的模拟目标滑移率的设定,针对目标最佳滑移率的输出,设定传递函数 $\delta_{\mathrm{d}} = \delta_{\mathrm{c}}/(0.1s + 1)$,$s$ 为传递函数,当飞机速度低于 5 m/s,可视为防滑系统不再工作,仿真结束。

情况 1　无故障仿真

$$\delta_{\mathrm{c}} = \begin{cases} 0.117 & 0 < t \leqslant 2\ \mathrm{s} \\ 0.120 & t > 2\ \mathrm{s} \end{cases} \tag{42}$$

本次仿真,在 2 s 时发生跑道切换,故而给定最优滑移率也发生变化,如式(42)所示,由于跑道状态发生变化,跑道模型式(6)中的参数也随之发生变化,系统参数出现摄动。通过仿真,当系统参数发生变化时,可以验证容错控制算法对不同给定最优滑移率的追踪能力。仿真结果如图 1 所示。图 1(a)表示执行机构无故障时,无人机速度与机轮转速对比图,机轮并未出现滑移现象。图 1(b)表示滑移率的跟踪响应曲线,2 s 时跑道发生切换,从干柏油跑道切至湿柏油跑道,0.3 s 就可以完成切换,并未出现较大的超调。图 1(c)表示刹车力矩的系统响应控制输入,在跑道发生切换时,为了快速跟踪上变化的期望滑移率,刹车力矩进行了迅速响应,导致刹车力矩出现饱和,这



(a) 无人机速度与机轮转速对比　(b) 滑移率跟踪响应　(c) 系统控制刹车力矩输入变化响应

图 1　切换跑道下执行器无故障时的刹车仿真结果

Fig. 1　Results of simulation for braking under switch runway with no fault of actuator

http://bhxb.buaa.edu.cn

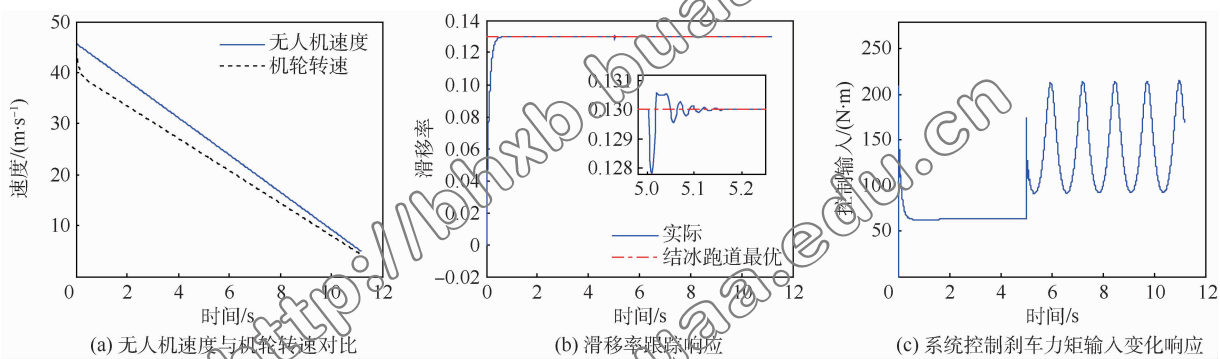
时控制律中的辅助机构开始起作用进行补偿,将刹车力矩迅速拉回受限区域,使得刹车得以稳定控制,并未使机轮出现明显的抱死。

情况 2 时变型故障仿真

结冰跑道着陆是无人机的一种极限着陆状况,对执行机构性能和控制律设计提出了更为严格的要求[26],情况 2 以结冰跑道工况为例,同时在执行器发生时变故障的条件下,来验证容错算法的有效性,故障注入方式为

$$\rho(t)=\begin{cases}1 & t<5\ \mathrm{s}\\ 0.5+0.2\sin(5t) & t\geqslant 5\ \mathrm{s}\end{cases} \tag{43}$$

仿真结果如图 2 所示,从图 2(a)可以看出,当发生故障时,机轮转速并未出现明显波动。从图 2(b)可以看出,滑移率发生波动,由于容错算法中的鲁棒项的作用,使得滑移率从临界稳定区域快速调节至期望最优化率值,从而确保系统输出在稳定区域内的前提下,仍能够实现快速容错,从图中可以看出容错时间为 0.2 s。图 2(c)表示为了减少故障对于系统稳定性的影响,在 5 s 时,根据本文算法设置,刹车力矩针对时变型故障进行了补偿容错控制,随着故障的不断变化,实时调节控制律输出。



(a) 无人机速度与机轮转速对比 (b) 滑移率跟踪响应 (c) 系统控制刹车力矩输入变化响应

图 2 结冰跑道下执行器时变故障时的刹车仿真结果

Fig. 2 Results of simulation for braking under ice runway with time-varying fault of actuator

4 结 论

本文在构建无人机刹车数学模型基础上,考虑系统输出滑移率受限、控制输入饱和及未知故障信息的情况下,设计一种基于障碍 Lyapunov 函数方法的自适应鲁棒 RBFNN 容错控制器,通过稳定性分析和仿真实验得到:

1)针对无人机防滑刹车系统具有较强非线性参数时变等特点,提出执行器未知故障状态下的容错控制器算法,无需故障诊断,构建神经网络逼近系统的非线性不确定项,神经网络的应用有效避免了控制器设计中的奇点问题,切换项的引入,即可对系统进行快速容错控制,简化了容错控制器设计流程。

2)采用障碍 Lyapunov 函数方法来设计容错控制器,可实现系统输出滑移率的实时约束,确保滑移率始终保持在稳定区域内,防止刹车打滑现象出现,改善了防滑刹车系统性能。

3)不同类型跑道所对应的结合系数变化较大,在给定不同目标滑移率设定下,无需改变原有系统已有控制器参数设计,即可对系统稳定控制,针对刹车力矩控制输入饱和,设定的辅助饱和机构对执行器的饱和现象的快速抑制起到一定作用。

参考文献(References)

[1] 胡庆雷,肖冰,马广富.输入受限的航天器姿态调节小波滑模反步控制[J].哈尔滨工业大学学报,2010,42(5):678-682.
HU Q L,XIAO B,MA G F. Wavelet based backstepping sliding mode control for spacecraft attitude requlation under control input contraint[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2010,42(5):678-682(in Chinese).

[2] HU Q L,HUO X,XIAO B. Reaction wheel fault tolerant control for spacecraft attitude stabilization with finite-time convergence[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control,2013,23(15):1737-1752.

[3] HU Q L,FRISWELL M I,WAGG D J,et al. Adaptive backstepping fault-tolerant control for flexible spacecraft with bounded unknown disturbances[C]// Proceedings of the IEEE on the 28th Chinese Control Conference. Piscataway,NJ:IEEE Press,2009:788-793.

[4] CHEN X,DAI Z,LIN H,et al. Asymmetric barrier Lyapunov function-based wheel slip control for antilock braking system[J]. International Journal of Aerospace Engineering,2015,2015:1-10.

[5] 李建成,席涛.基于滑模迭代学习律的航天器姿态控制[J].系统工程与电子技术,2012,34(9):1895-1899.
LI J C,XI T. Spacecraft attitude control scheme based on sliding mode controller with iterative learning law[J]. System Engineering and Electronics,2012,34(9):1895-1899(in Chinese).

http://bhxb.buaa.edu.cn

[6] YANG H, WANG H. Robust adaptive fault-tolerant control for uncertain nonlinear system with unmodeled dynamics based on fuzzy approximation [J]. Neurocomputing, 2016, 173 (3): 1660-1670.

[7] WANG H, LIU X, LIU P X, et al. Robust adaptive fuzzy fault-tolerant control for a class of non-lower-triangular nonlinear systems with actuator failures [J]. Information Sciences, 2016, 336: 60-74.

[8] HUO B, TONG S, LI Y. Observer-based adaptive fuzzy fault-tolerant output feedback control of uncertain nonlinear systems with actuator faults[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2012, 10(6): 1119-1128.

[9] POLYCARPOU M M. Stable adaptive neural control scheme for nonlinear systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1996, 41(3): 447-451.

[10] BECHLIOULIS C P, ROVITHAKIS G A. Adaptive control with guaranteed transient and steady state tracking error bounds for strict feedback systems [J]. Automatica, 2009, 45(2): 532-538.

[11] WANG Y, ZHANG M, WILSON P A, et al. Adaptive neural network-based backstepping fault tolerant control for underwater vehicles with thruster fault[J]. Ocean Engineering, 2015, 110: 15-24.

[12] POURSAMAD A. Adaptive feedback linearization control of antilock braking systems using neural networks[J]. Mechatronics, 2009, 19(5): 767-773.

[13] TANG Y, ZHANG X, ZHANG D, et al. Fractional order sliding mode controller design for antilock braking systems[J]. Neurocomputing, 2013, 111: 122-130.

[14] TAEHYUN S, SEHYUN C, SEOK I. Investigation of sliding-surface design on the performance of sliding mode controller in antilock braking systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(2): 747-759.

[15] TANELLI M, ASTOLFI A, SAVARESI S M. Robust nonlinear output feedback control for brake by wire control systems[J]. Automatica, 2008, 44(4): 1078-1087.

[16] TEE K P, REN B, GE S S. Control of nonlinear systems with time-varying output constraints [J]. Automatica, 2011, 47 (11): 2511-2516.

[17] TEE K P, GE S S, TAY E H. Barrier Lyapunov functions for the control of output-constrained nonlinear systems[J]. Automatica, 2009, 45(4): 918-927.

[18] QIU Y, LIANG X, DAI Z. Backstepping dynamic surface control for an anti-skid braking system[J]. Control Engineering Practice, 2015, 42: 140-152.

[19] ZHAO Z, HE W, GE S S. Adaptive neural network control of a fully actuated marine surface vessel with multiple output constraints[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(4): 1536-1543.

[20] LI Y, TONG S, LI T. Adaptive fuzzy output-feedback control for output constrained nonlinear systems in the presence of input saturation[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2014, 248: 138-155.

[21] CHEN M, MEI R. Actuator fault tolerant control for a class of nonlinear systems using neural networks[C] // Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA). Piscataway, NJ: IEEE Press, 2014: 101-106.

[22] HUANG J T. Global tracking control of strict-feedback systems using neural networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2012, 23(11): 1714-1725.

[23] 李玉忍,张智慧,徐健龙. 飞机防滑刹车模糊滑模变结构控制研究[J]. 西北工业大学学报, 2015, 33 (1): 45-49.
LI Y R, ZHANG Z H, XU J L. Study on fuzzy sliding-mode variable structure control for aircraft anti-skid braking[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2015, 33 (1): 45-49 (in Chinese).

[24] CHEN W, GE S S, WU J, et al. Globally stable adaptive backstepping neural network control for uncertain strict-feedback systems with tracking accuracy known a priori[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2015, 26 (9): 1842-1854.

[25] REN B, GE S S, TEE K P, et al. Adaptive neural control for output feedback nonlinear systems using a barrier Lyapunov function[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2010, 21 (8): 1339-1345.

[26] 李兵强,陈晓雷,林辉,等. 飞机全电防滑刹车系统稳定动态面控制[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(5): 1139-1145.
LI B Q, CHEN X L, LI H, et al. Enhanced stability dynamic surface control for aircraft antiskid braking system using electro-mechanical atuator[J]. System Engineering and Electronics, 2016, 38(5): 1139-1145 (in Chinese).

作者简介:

孙辉　男,博士研究生。主要研究方向:无人机机电系统容错控制。

闫建国　男,博士,教授。主要研究方向:导航制导与飞行控制、计算机控制。

屈耀红　男,博士,副教授。主要研究方向:组合导航及在线风场估计、容错定位。

http://bhxb.buaa.edu.cn

Fault-tolerant control of UAV anti-skid braking system with input and output constraints

SUN Hui, YAN Jianguo*, QU Yaohong

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In this paper, a method of adaptive neural network backstepping fault-tolerant control, based on barrier Lyapunov function, is proposed for anti-skid braking system in the presence of slip-ratio constraint, control input saturation and partial loss of actuator effectiveness. The neural network can more accurately approximate the unknown nonlinearity in order to compensate the effect of actuator fault, and the great robustness to actuator fault is guaranteed. In this approach, the output of neural network is used to design the backstepping controller to achieve fault-tolerant control and uncertainty compensation, and a robust term is employed to optimize the transient performance of braking system. Firstly, the closed-loop fault-tolerant control system could be stable without the reconfiguration value of actuator fault in real time. Then, the stability of the system is analyzed based on the Lyapunov method. Finally, the numerical simulation results show that the proposed fault-tolerant control scheme can effectively guarantee the stability and effectiveness of the control system when the actuator happens faulty.

Keywords: anti-skid braking; Lyapunov; fault-tolerant control; actuator fault; input and output constraints

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2016-05-23; **Accepted**: 2016-07-01; **Published online**: 2016-09-12 10:39

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20160912.1039.005.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (60974146, 61473229)

* **Corresponding author**. E-mail: yjg0311@nwpu.edu.cn