

文章编号: 1001-0920(2012)03-0403-05

基于自适应二阶终端滑模的飞行器再入姿态控制

范金锁¹, 张合新¹, 张明宽², 周鑫¹

(1. 第二炮兵工程学院 301 室, 西安 710025; 2. 96313 部队, 湖南 邵阳 422000)

摘要: 针对飞行器再入过程中存在着模型不确定性因素以及气动环境复杂等鲁棒控制问题, 提出一种基于自适应二阶非奇异终端滑模的控制方案. 设计的控制器保证姿态跟踪误差在有限的时间内收敛于零, 不需要内外扰的先验知识, 通过在线自适应辨识扰动上界以消除其影响. 最后以气动参数扰动 50% 作为扰动条件进行了飞行器再入姿态控制仿真, 结果表明了该方案的快速性和鲁棒性.

关键词: 再入姿态跟踪; 自适应辨识; 二阶非奇异终端滑模; 有限时间收敛

中图分类号: V412

文献标识码: A

Adaptive second-order terminal sliding mode control for aircraft re-entry attitude

FAN Jin-suo¹, ZHANG He-xin¹, ZHANG Ming-kuan², ZHOU Xin¹

(1. The 301 Section, The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China; 2. The 96313 Military Unit, Shaoyang 422000, China. Correspondent: FAN Jin-suo, E-mail: fanjinsuo1982@yahoo.com.cn)

Abstract: A robust adaptive flight control based on second-order nonsingular terminal sliding mode control is proposed for the problems existing in aircraft re-entry phase such as model uncertainty and complex aerodynamic conditions, which can guarantee the tracking error convergence to zero in finite time. The effects caused by inside and outside disturbances are cancelled by on-line upper bounds adaptive identification without any information in advance. Finally, simulation is made through the assumption that aerodynamic parameters perturb 50%. Simulation results show the speed ability and robustness of the proposed scheme.

Key words: re-entry attitude tracking; adaptive identification; second-order nonsingular terminal sliding mode; finite time convergence

1 引言

飞行器再入飞行过程中, 空气密度和飞行器速度变化较大, 动力学参数变化剧烈, 通道间的耦合作用非常严重, 表现出强烈的多变量耦合和非线性, 且伴随着其他未知干扰的不确定, 因此飞行器姿控系统应具有很强的鲁棒性. 近年来出现的基于时标分离的飞行器滑模控制系统通常要求已知内外扰的界或者界的导数大小^[1-4], 这对于飞行器再入机动过程显然是无法实现的; 而一些基于智能算法的干扰观测器如模糊干扰观测器^[5-6]又存在模糊规则难以获取等不足.

针对此类问题, 本文基于自适应控制和终端滑模控制设计再入姿控系统. 在慢回路控制系统设计中, 利用自适应控制在线估计扰动上界, 设计自适应终端滑模控制系统, 引入边界层技术以解决扰动界参数随时间的增加而过分增大的问题; 在快回路控制系统

中, 采用基于自适应方案的非奇异二阶终端滑模控制, 以减小系统抖振, 获得更高的控制精度, 达到跟踪误差快速收敛的效果.

2 数学模型

飞行器姿控模型可认为是一类不确定 MIMO 仿射非线性系统. 利用奇异摄动理论, 引入时间尺度分离的概念, 将姿态控制系统分为快、慢回路分别设计. 飞行器的动力学方程通常选择 3 个姿态角作为状态, 但这样的系统是非最小相位的, 不便于控制系统的设计. 因此, 为了得到最小相位, 令系统状态 $\Omega = [\alpha, \beta, \gamma]^T$, $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$, 控制量 $u = [\delta_x, \delta_y, \delta_z]^T$, 则飞行器姿控系统可描述为如下的仿射非线性系统:

$$\begin{aligned}\dot{\Omega} &= f_s(\Omega) + \Delta f_s(\Omega) + g_s(\Omega)\omega, \\ \dot{\omega} &= f(\Omega, \omega) + \Delta f(\Omega, \omega) + (g + \Delta g)u =\end{aligned}\quad (1)$$

收稿日期: 2010-10-07; 修回日期: 2011-01-04.

作者简介: 范金锁(1982-), 男, 博士生, 从事滑模控制系统的研究; 张合新(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 从事飞行器制导与控制等研究.

$$f(\Omega, \omega) + gu + d. \quad (2)$$

其中

$$f_s(\Omega) = [-qSC_y/(mv \cos \beta), qSC_z/(mv), 0]^T,$$

$$g_s(\Omega) = \begin{bmatrix} -\cos \alpha \tan \beta & \sin \alpha \tan \beta & 1 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 1 & -\tan \varphi \cos \gamma & \tan \varphi \sin \gamma \end{bmatrix},$$

$$f(\Omega, \omega) = \begin{bmatrix} [(I_y - I_z)\omega_z\omega_y + qSl^2m_x^{\omega_x}\omega_x/v]/I_x \\ [(I_z - I_x)\omega_z\omega_x + qSl^2m_y^{\omega_y}\omega_y/v + qSlm_y^\beta\beta]/I_y \\ [(I_x - I_y)\omega_x\omega_y + qSl^2m_z^{\omega_z}\omega_z/v + qSlm_z^\alpha\alpha]/I_z \end{bmatrix},$$

$$g = qSl \begin{bmatrix} m_x^{\delta_x}/I_x & m_x^{\delta_y}/I_x & m_x^{\delta_z}/I_x \\ 0 & m_y^{\delta_y}/I_y & 0 \\ 0 & 0 & m_z^{\delta_z}/I_z \end{bmatrix};$$

x, y, z 为飞行器的 3 个主轴方向; α, β, γ 为攻角、侧滑角和滚动角; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 为在弹体坐标系 3 轴上的角速度; I_x, I_y, I_z 为飞行器对于弹体各轴的转动惯量, 设飞行器是主轴对称的则其惯量积项可以忽略; $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ 为在弹体坐标系 3 轴上的控制量; $\Delta f_s(\Omega), \Delta f(\Omega, \omega), \Delta g$ 为不确定部分; d 为快回路内外扰组成的复合扰动; 其他符号含义参见文献 [7].

3 基于终端滑模的飞行器姿控系统

姿态控制模型中具有非匹配不确定性, 且系统中扰动项上界通常未知, 因此设计控制器时, 利用自适应估计扰动上界提高慢回路控制系统对于非匹配不确定性的鲁棒性, 减小跟踪误差. 快回路则采用自适应二阶终端滑模控制器设计, 在提高收敛速度的同时消除抖振效果. 为了方便设计, 首先作如下假设^[1]:

假设 1 慢回路中扰动项满足

$$\|\Delta f_s\| \leq r_1 + r_2 \|\Omega\|, \quad (3)$$

其中 r_1 和 r_2 为未知常数.

假设 2 快回路中各通道复合扰动项满足

$$|d_j| \leq \varphi_{2j}, |\dot{d}_j| \leq \varphi_{3j}. \quad (4)$$

3.1 自适应终端滑模慢回路控制系统设计

慢回路控制器使 Ω 在有限时间内跟踪指令信号 Ω_c , 并给出快回路的指令信号, 且闭环系统具有较强的鲁棒性. 设计终端滑模面^[8]

$$s = \Omega_e + \int_0^t (a\Omega_e + b\Omega_e^{q_1/p_1}) d\tau. \quad (5)$$

其中: $\Omega_e = \Omega - \Omega_c$ 为跟踪误差; $a > 0, b > 0; p_1 > q_1$, 且 p_1, q_1 为正奇数.

对式 (5) 两端求时间导数, 并代入式 (1) 得

$$\dot{s} = f_s + \Delta f_s + g_s\omega - \dot{\Omega}_c + a\Omega_e + b\Omega_e^{q_1/p_1}. \quad (6)$$

定理 1 令慢回路系统 (1) 满足假设 1, 控制律为

$$\omega_c = -g_s^{-1}[f_s + a\Omega_e + b\Omega_e^{q_1/p_1} - \dot{\Omega}_c +$$

$$(\rho + \hat{r}_1 + \hat{r}_2 \|\Omega\|)\text{sign}(s)], \quad (7)$$

其自适应调节律为

$$\dot{\hat{r}}_1 = m_1^{-1}\|s\|, \dot{\hat{r}}_2 = m_2^{-1}\|s\|\|\Omega\|. \quad (8)$$

如果采用控制律 (7), 且扰动上界参数由自适应律 (8) 进行调节, 则闭环系统稳定, 姿态跟踪误差在有限的时间内收敛到零. 其中: \hat{r}_1, \hat{r}_2 为 r_1, r_2 的估计; $m_i > 0$ 为设计参数.

证明 定义 Lyapunov 函数

$$V_1 = \frac{1}{2}s^T s + \frac{1}{2}m_1\hat{r}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\hat{r}_2^2. \quad (9)$$

将式 (9) 两端求导并将 (6) 代入, 考虑 $\tilde{r}_1 = \hat{r}_1 - r_1, \tilde{r}_2 = \hat{r}_2 - r_2$, 得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= s^T \dot{s} + m_1\tilde{r}_1\dot{\hat{r}}_1 + m_2\tilde{r}_2\dot{\hat{r}}_2 = \\ & s^T[\Delta f_s - (\rho + \hat{r}_1 + \hat{r}_2 \|\Omega\|)\text{sign}(s)] + \\ & \tilde{r}_1\|s\| + \tilde{r}_2\|s\|\|\Omega\| \leq \\ & \|s\|\|\Delta f_s\| - (\rho + \hat{r}_1 + \hat{r}_2 \|\Omega\|)\|s\| + \\ & \tilde{r}_1\|s\| + \tilde{r}_2\|s\|\|\Omega\| \leq \\ & \|s\|(r_1 + r_2 \|\Omega\|) - (\rho + \hat{r}_1 + \hat{r}_2 \|\Omega\|)\|s\| + \\ & \tilde{r}_1\|s\| + \tilde{r}_2\|s\|\|\Omega\| \leq -\rho\|s\| < 0. \end{aligned} \quad (10)$$

根据 Lyapunov 稳定性理论, 系统渐近稳定, s 渐近可达. 由式 (10) 得

$$s^T \dot{s} + m_1\tilde{r}_1\dot{\hat{r}}_1 + m_2\tilde{r}_2\dot{\hat{r}}_2 \leq -\rho\|s\|, \quad (11)$$

即

$$s^T \dot{s} + m_1\tilde{r}_1m_1^{-1}\|s\| + m_2\tilde{r}_2m_2^{-1}\|s\|\|\Omega\| \leq -\rho\|s\|. \quad (12)$$

经运算可得^[9]

$$\|\dot{s}\| \geq \rho + \tilde{r}_1 + \tilde{r}_2 \|\Omega\|. \quad (13)$$

由文献 [9] 所述, 通过适当选择参数初值, 有

$$\|\dot{s}\| \geq \rho. \quad (14)$$

这表明 s 将在有限时间内收敛到零, 当到达滑模面后, 经过有限时间, 跟踪误差也将在有限时间内收敛到零.

式 (7) 包含的符号函数使得慢回路无法进行指令跟踪, 通常的做法是引入边界层函数. 将符号函数平滑处理后系统轨迹运动在滑模面的一个邻域内, 系统将存在稳态误差, 同时削弱了系统的鲁棒性. 为此, 引入双曲正切函数替代符号函数, 有

$$\tanh(\mu s) = \frac{e^{\mu s} - e^{-\mu s}}{e^{\mu s} + e^{-\mu s}}.$$

该双曲正切函数对 s 是可微的, 并且当 $\mu \rightarrow \infty$ 时, $\tanh(\cdot) \rightarrow \text{sign}(\cdot)$. 于是有

$$\begin{aligned} \omega_c &= -g_s^{-1}[f_s + a\Omega_e + b\Omega_e^{q_1/p_1} - \dot{\Omega}_c + \\ & (\rho + \hat{r}_1 + \hat{r}_2 \|\Omega\|)\tanh(\mu s)]. \end{aligned} \quad (15)$$

考虑式 (8) 的参数自适应律, 在理论上系统轨迹将达到并保持在滑模面上, 这样即可保证扰动界参数

不会随时间的增加而过分增大. 事实上, 滑模面上一个很小的偏移就会导致 s 不为零, 从而 $\|s\| > 0$, 于是 $\dot{\hat{r}}_i$ 大于零, \hat{r}_i 将不断增大, 造成参数估计 \hat{r}_i 变化过大而使得控制作用不断增大. 为了有效稳定 \hat{r}_i 变化, 在自适应律中引入边界层, 得到改进的参数自适应律为

$$\dot{\hat{r}}_1 = \begin{cases} m_1^{-1}\|s\|, & \|s\| > s_0; \\ 0, & \|s\| \leq s_0. \end{cases} \quad (16)$$

$$\dot{\hat{r}}_2 = \begin{cases} m_2^{-1}\|s\|\|\Omega\|, & \|s\| > s_0; \\ 0, & \|s\| \leq s_0. \end{cases} \quad (17)$$

其中 $s_0 > 0$ 为一较小的设计参数.

3.2 基于自适应估计的快回路二阶终端滑模控制器设计

通常认为外扰作用在快回路上, 由于外界环境的未知性, 快回路的复合扰动不满足类似式(3)的假设. 快回路控制器使 ω 在有限的时间内跟踪指令信号 ω_c , 且闭环系统具有较强的鲁棒性. 传统滑模控制虽然可以完成控制任务, 但其固有的强抖振会造成舵机的损害^[10]. 高阶滑模能够有效地消除抖振, 获得更高的控制精度, 而非奇异终端滑模^[11-12]可以使跟踪误差有限时间内收敛, 保证系统的稳定性. 但是, 传统的利用二阶终端滑模设计的控制器中包含扰动的上界, 甚至必须用到扰动变化律的上界, 如文献[1]. 在实际应用中, 预先了解扰动项较为困难, 而明确其范围则具有极大难度. 因此, 这里设计自适应二阶终端滑模控制器, 在保证鲁棒性的同时有效削弱控制信号的抖振. 定义滑动模态为

$$\sigma = \omega_e = \omega - \omega_c. \quad (18)$$

定理 2 选择如下非奇异二阶终端滑模面:

$$s = \beta^{-1}\dot{\sigma}^{p/q} + \sigma. \quad (19)$$

其中: $\beta = \text{diag}[\beta_1, \beta_2, \beta_3]$, $\beta_i > 0$ 为设计参数; p 和 q 为奇数且 $1 < p/q < 2$; $\dot{\sigma}^{p/q} = [\dot{\sigma}_1^{p/q} \ \dot{\sigma}_2^{p/q} \ \dot{\sigma}_3^{p/q}]^T$. 若快回路系统采用控制律(20), 且未知扰动变化率上界由自适应律(21)进行调节, 则闭环系统稳定, 跟踪误差在有限的时间内收敛到零. 其中

$$u = -g^{-1} \left[f - \dot{\omega}_c + \int \rho \text{sign}(s) dt + \int \hat{\varphi}_3 dt + (q/p)\beta \int \dot{\sigma}^{2-(p/q)} dt \right], \quad (20)$$

$\rho = \text{diag}[\rho_1, \rho_2, \rho_3]$, $\rho_i > 0$ 为设计参数. 更新律选择为

$$\dot{\hat{\varphi}}_3 = W(p/q)\text{diag}(\dot{\sigma}^{(p/q)-1})\beta^{-1}s. \quad (21)$$

证明 选择 Lyapunov 函数

$$V_2 = \frac{1}{2}s^T s + \frac{1}{2}\tilde{\varphi}_3^T W^{-1}\tilde{\varphi}_3, \quad (22)$$

其中 $\tilde{\varphi}_3 = \varphi_3 - \hat{\varphi}_3$. 对式(22)两端求导, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= s^T \dot{s} - \tilde{\varphi}_3^T W^{-1}\dot{\hat{\varphi}}_3 = \\ & s^T [(p/q)\beta^{-1}\text{diag}(\dot{\sigma}^{(p/q)-1})\dot{\sigma} + \dot{\sigma}] - \tilde{\varphi}_3^T W^{-1}\dot{\hat{\varphi}}_3 = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & s^T [(p/q)\beta^{-1}\text{diag}(\dot{\sigma}^{(p/q)-1})(\dot{\omega} - \dot{\omega}_c) + \dot{\sigma}] - \\ & \tilde{\varphi}_3^T W^{-1}\dot{\hat{\varphi}}_3 = \\ & s^T [(p/q)\beta^{-1}\text{diag}(\dot{\sigma}^{(p/q)-1})(\dot{f} + g\dot{u} + \dot{d} - \\ & \dot{\omega}_c) + \dot{\sigma}] - \tilde{\varphi}_3^T W^{-1}\dot{\hat{\varphi}}_3 \leq \\ & s^T [(p/q)\beta^{-1}\text{diag}(\dot{\sigma}^{(p/q)-1})(\dot{f} + g\dot{u} + \varphi_3 - \\ & \dot{\omega}_c) + \dot{\sigma}] - \tilde{\varphi}_3^T W^{-1}\dot{\hat{\varphi}}_3 = \\ & s^T [(p/q)\beta^{-1}\text{diag}(\dot{\sigma}^{(p/q)-1})(\dot{f} + g\dot{u} + \\ & \tilde{\varphi}_3 + \hat{\varphi}_3 - \dot{\omega}_c) + \dot{\sigma}] - \tilde{\varphi}_3^T W^{-1}\dot{\hat{\varphi}}_3 = \\ & s^T [(p/q)\beta^{-1}\text{diag}(\dot{\sigma}^{(p/q)-1})(\dot{f} + g\dot{u} + \hat{\varphi}_3 - \dot{\omega}_c) + \\ & \dot{\sigma}] + s^T (p/q)\beta^{-1}\text{diag}(\dot{\sigma}^{(p/q)-1})\tilde{\varphi}_3 - \tilde{\varphi}_3^T W^{-1}\dot{\hat{\varphi}}_3. \quad (23) \end{aligned}$$

将式(20)和(21)代入(23)有

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq -s^T (p/q)\beta^{-1}\text{diag}(\dot{\sigma}^{(p/q)-1})\rho \text{sign}(s) \leq \\ & -(\rho p/q)\lambda_{\min}(\beta^{-1}\text{diag}(\dot{\sigma}^{(p/q)-1}))\|s\| < 0. \quad (24) \end{aligned}$$

根据 Lyapunov 稳定性理论和非奇异 Terminal 滑模有限时间收敛理论, σ 和 $\dot{\sigma}$ 在有限时间 t_r 内到达并稳定在辅助滑模面 $s = 0$ 上. 当系统到达辅助滑模面 $s = 0$ 后, 将在有限时间 t_s 内到达 $\sigma = \dot{\sigma} = 0$, 即

$$t_s = \frac{p}{(p-q)} \frac{1}{\min_{i=1,2,3} \sigma_i(t_r)^{\frac{p}{p-q}}}. \quad (25)$$

上述控制律的设计中要用到滑动量的导数 $\dot{\sigma}$ 和指令信号导数 $\dot{\Omega}_c, \dot{\omega}_c$, 对于非线性系统而言上述导数计算非常复杂, 而采用差分器又会受到噪声信号的污染, 因此采用一阶鲁棒精确微分器进行导数的光滑实时估计, 即

$$\begin{cases} \dot{z}_0 = -\lambda_1|z_0 - s|^{1/2}\text{sign}(z_0 - s) + z_1, \\ \dot{z}_1 = -\lambda_2\text{sign}(z_0 - s). \end{cases} \quad (26)$$

4 仿真研究

以某飞行器姿控模型为例进行仿真. 仿真中取速度 $V = 680 \text{ m/s}$; $I_x = 650 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $I_y = 750 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $I_z = 600 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$; 其他气动参量由气动参数表插值获得. 为了考察气动参数大范围摄动时控制器的性能, 仿真中气动参数摄动范围取 50%.

为了与本文算法相比较, 取慢、快回路传统终端滑模控制为

$$\begin{aligned} \omega_c &= -g_s^{-1}[f_s + a_1\Omega_e + b_1\Omega_e^{q_1/p_1} - \\ & \dot{\Omega}_c + \rho \tanh(\mu s)], \quad (27) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u &= -g^{-1}[f + a_2\omega_e + b_2\omega_e^{q/p} - \\ & \dot{\omega}_c + \rho \tanh(\mu s)]. \quad (28) \end{aligned}$$

仿真条件为: $a_1 = b_1 = 6$, $a_2 = b_2 = 11$, $q_1 = 3$, $p_1 = 5$, $q = 5$, $p = 7$, $\rho = \text{diag}(1, 1, 1)$, $\mu = 2$.

图1为气动参数摄动 50% 时采用传统终端滑模控制时姿态角度跟踪曲线, 图2为其相应的舵面偏转

情况. 从图 1 和图 2 可以看出, 由于没有采用有效消除参数摄动的措施, 姿态跟踪速度缓慢, 跟踪曲线存在较大波动, 舵面偏转抖振严重. 这说明传统终端滑模虽然具有一定的鲁棒性, 但是仅依靠其本身的鲁棒性不足以克服气动参数摄动带来的扰动影响, 因此控制效果较差.

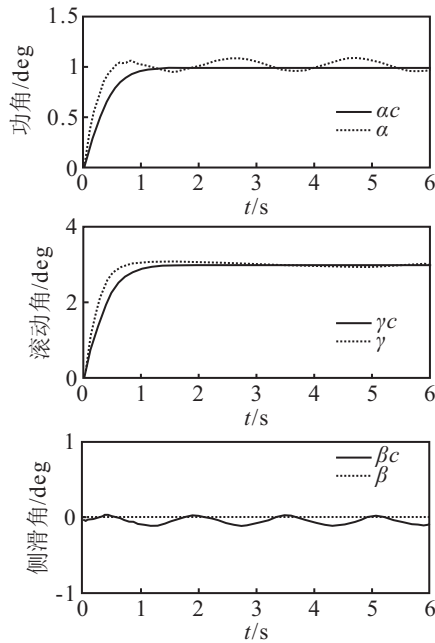


图 1 传统终端滑模控制姿态跟踪曲线

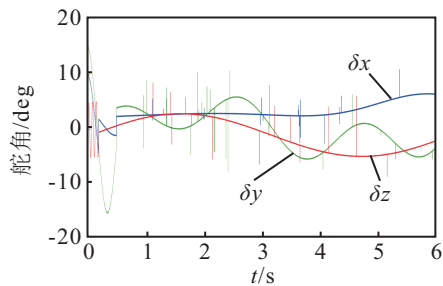


图 2 传统终端滑模控制时舵偏角偏转曲线

采用本文算法的仿真条件为: 定理 1 中, $m_1 = m_2 = 1.2$, $a = b = 6$, $q_1 = 3$, $p_1 = 5$, $\mu = 1/20$, $\rho = \text{diag}(1.5, 1.5, 1.5)$, $s_0 = 0.1$; 定理 2 中, $q = 5$, $p = 7$, $\beta = \text{diag}(1.1, 1.1, 1.1)$, $W = \text{diag}(1, 1, 1)$, $\eta = \text{diag}(0.8, 0.8, 0.8)$.

图 3 为采用本文算法后飞行器姿态角的跟踪曲线, 图 4 为其相应的舵面偏转情况. 从图 3 和图 4 可以看出, 由于在慢回路中利用自适应控制在线估计扰动上界, 在快回路采用自适应二阶终端滑模技术在线消除了扰动的影响, 姿态跟踪曲线平滑连续, 控制系统能够稳定跟踪系统的制导指令; 舵面偏转仅在开始阶段出现少许抖振, 其余几乎处处连续; 跟踪时间约为 1.5s, 提高了系统的收敛速率. 这些结论充分表明了本文算法对于气动参数大范围摄动具有强鲁棒性, 与传统终端滑模控制相比有一定的优越性.

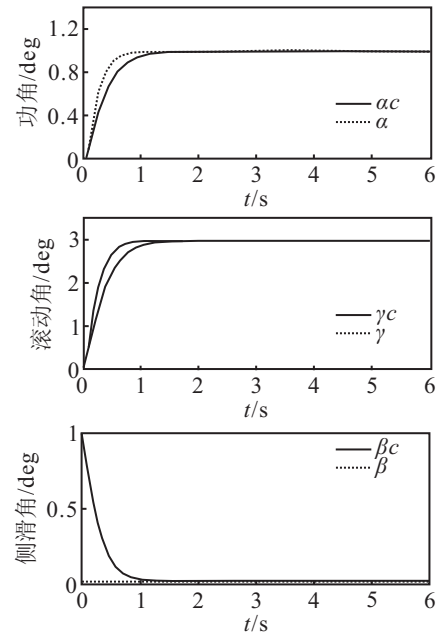


图 3 利用本文算法的姿态跟踪曲线

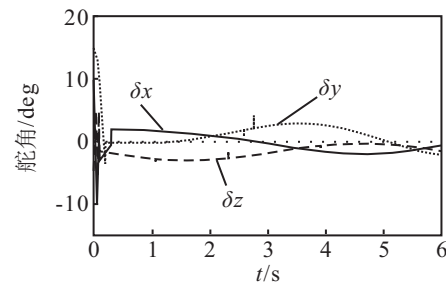


图 4 利用本文算法的舵面偏转曲线

5 结 论

针对飞行器再入段气动参数变化剧烈, 飞行环境恶劣等特点, 设计了基于自适应二阶终端滑模方案的姿控系统. 控制方案不需要内外扰的先验知识, 利用自适应在线估计并消除其影响. 基于 Lyapunov 稳定性定理的理论分析及仿真结果都验证了该方案的快速性和鲁棒性.

参考文献(References)

- [1] 朱凯, 齐乃明, 秦昌茂. 基于二阶滑模的 BTT 导弹反演滑模控制[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(4): 829-832.
(Zhu K, Qi N M, Qin C M. Backstepping sliding mode control for BTT missiles based on second-order sliding mode[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(4): 829-832.)
- [2] Hall C E, Shtessel Y B. Sliding mode disturbance observer-based control for a reusable launch vehicle[J]. J of Guidance, Control and Dynamics, 2006, 29(6): 1315-1328.
- [3] Shtessel Y B, Hall C E. Integrated higher-order sliding mode guidance and autopilot for dual-control missiles[J]. J of Guidance, Control and Dynamics, 2009, 32(1): 79-94.

- [4] Tournes C, Shtessel Y B, Shkolnikov I. Missile controlled by lift and divert thrusters using nonlinear dynamic sliding manifolds[J]. *J of Guidance, Control and Dynamics*, 2006, 29(3): 617-625.
- [5] 黄国勇, 姜长生, 王玉惠. 基于快速模糊干扰观测器的UASV再入Terminal滑模控制[J]. *宇航学报*, 2007, 28(2): 292-297.
(Huang G Y, Jiang C S, Wang Y H. Research of terminal sliding mode control based on fast fuzzy disturbance observer for UASV re-entry[J]. *J of Astronautics*, 2007, 28(2): 292-297.)
- [6] Woojong Y, Daehyun J, Sangchui W. Synchronization of two different non-autonomous chaotic systems using fuzzy disturbance observer[J]. *Physics Letters A*, 2010, 374(11-12): 1354-1361.
- [7] 钱杏芳, 林瑞雄, 赵亚男. 导弹飞行力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 68-85.
(Qian X F, Lin R X, Zhao Y N. *Missile flight dynamics*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006: 68-85.)
- [8] 黄国勇, 姜长生, 王玉惠. 基于自适应Terminal滑模的空天飞行器再入控制[J]. *宇航学报*, 2008, 30(2): 305-307.
(Huang G Y, Jiang C S, Wang Y H. Robust terminal sliding mode control for UASV re-entry[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(2): 305-307.)
- [9] Zhuang K Y. The study and application of VSC[D]. Hangzhou: College of Automation, Zhejiang University of China, 2002.
- [10] Godard, Kumar K D. Fault tolerant reconfigurable satellite formations using adaptive variable structure techniques[J]. *J of Guidance, Control and Dynamics*, 2010, 33(3): 969-984.
- [11] Feng Yong, Yu Xing-huo, Man Zhi-hong. Non-singular sliding mode control of rigid manipulators[J]. *Automatic*, 2002, 38(12): 2159-2167.
- [12] Jin Mao-lin, Lee Jinoh, Hun Pyung. Practical nonsingular terminal sliding-mode control of robot manipulators for high-accuracy tracking control[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2009, 56(9): 3593-3601.

(上接第402页)

- [2] Comaniciu D, Ramesh V, Meer P. Kernel-based object tracking[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(5): 564-577.
- [3] Collins R T. Mean-shift blob tracking through scale space[C]. *Proc of IEEE Computer Society Conf on Computer Vision and Pattern Recognition*. Madison: IEEE Press, 2003:234-240.
- [4] Qi S M, Huang X W. Hand tracking and gesture recognition by anisotropic kernel mean shift[C]. *Proc of Int Conf on Neural Networks and Signal Processing*. Zhenjiang: IEEE Press, 2008: 581-585.
- [5] 贾静平, 柴艳妹. 一种健壮的目标多自由度Mean Shift序列图像跟踪算法[J]. *中国图象图形学报*, 2006, 11(5): 707-713.
(Jia J P, Chai Y M. Robust tracking of objects in image sequences using multiple degrees of freedom Mean Shift algorithm[J]. *J of Image and Graphics*, 2006, 11(5): 707-713.)
- [6] 胡钊, 杨静宇. 基于分块颜色直方图的mean shift跟踪算法[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(10): 2936-2955.
(Hu Y, Yang J Y. Tracking algorithm based on block color histogram and mean shift[J]. *J of System Simulation*, 2009, 21(10): 2936-2955.)
- [7] 彭宁嵩, 杨杰. Mean-Shift跟踪算法中核函数窗宽的自动选取[J]. *软件学报*, 2005, 16(9): 1542-1550.
(Peng N S, Yang J. Automatic selection of kernel-bandwidth for mean-shift object tracking[J]. *J of Software*, 2005, 16(9): 1542-1550.)
- [8] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *Int J of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [9] Schwind P, Suri S, Reinartz P. Applicability of the SIFT operator to geometric SAR image registration[J]. *Int J of Remote Sensing*, 2010, 31(8): 1959-1980.
- [10] Mehrotra H, Majhi B, Gupta P. Robust iris indexing scheme using geometric hashing of SIFT keypoints[J]. *J of Network and Computer Applications*, 2010, 33(3): 300-313.
- [11] Kim Z. Real time object tracking based on dynamic feature grouping with background subtraction[C]. *Proc of IEEE Conf on Computer Vision and Pattern Recognition*. Anchorage: IEEE Press, 2008: 1-8.
- [12] 蔺海峰, 马宇峰, 宋涛. 基于SIFT特征目标跟踪算法研究[J]. *自动化学报*, 2010, 36(8): 1204-1208.
(Lin H F, Ma Y F, Song T. Research on object tracking algorithm based on SIFT[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 36(8): 1204-1208.)
- [13] Xu R, Wunsch D. Survey of clustering algorithms[J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 2005, 16(3): 645-678.