

# 基于故障观测器的无人机直接自修复控制

## Direct Self-repairing Control for UAV Based on Fault Observer

侯 睿 / Hou Rui

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

### 摘 要:

提出一种基于故障观测器的无人机直接自修复控制。首先,根据系统本身存在的故障,设计了一个非线性故障观测器对其进行观测。其次,设计了一个快速终端滑模面和直接自修复控制器,将指数函数和符号函数引入到新型滑模面里。同时引入了自适应技术,对不确定的故障估计其上界。最后,通过对无人机进行了相应的仿真数值验证得出所提方法的有效性。

**关键词:** 无人机;直接自修复控制器;快速终端滑模;非线性故障观测器

[**Abstract**] In this paper, a novel direct self-repairing controller via fault observer is designed, which addresses tracking control and convergence rate problem of UAV. Firstly, a nonlinear fault observer is designed to diagnose the UAV's fault. Secondly, a novel method based on the newly fast terminal sliding mode is designed. An adaptive approach is adopted to estimate upper bound of the fault. Finally, several numerical simulation results have shown the satisfactory control performance.

[**Key words**] UAV; Direct Self-repairing Control; Fast Terminal Sliding Mode; Nonlinear Fault Observer

## 0 引言

无人机飞行控制系统大多具有复杂的非线性因素,存在诸多不确定信息,且在高速飞行过程中飞行参数变化过快,使得常规控制对出现故障时的无人机在控制精度、稳定性与可靠性方面达不到期望性能。

针对无人机模型不确定性和干扰影响,滑模控制具有一定的鲁棒性能。所以,它可以被广泛地用于解决相关领域的问题,如机械臂和电机的控制<sup>[1]</sup>。一般传统的滑模控制采用线性滑模面,其系统状态收敛速度较慢,当系统状态远离平衡点时,基于线性滑模面的滑模控制方法并不能取得令人满意的控制效果。因此,本文采用终端滑模控制方法,它不仅可以使系统状态在平衡点附近有限时间内快速收敛,也可以解决系统远离平衡点的收敛速率问题<sup>[2]</sup>。

提出了基于故障观测器的无人机直接自修复控制。首先,根据系统本身存在的故障,设计了一个非线性故障观测器对其进行观测,通过选择相应的设计参数,可以使得观测误差处于指数收敛状态。其次,设计了一个快速终端滑模面和直接自修复控制器,将指数函数和符号函数引入到滑模面里,指数函数可以解决相应的收敛速率,而符号函数可以确保系统的稳定性。在设计直接自修复控制器的时候,引入自适应技术,对不确定的故障估计其上界。利用李雅普诺夫理论对所设计的直接自修复控制系统进行稳定性分析,证明该直接自修复控制系统可以在有限时间内处于全局稳定状态。最后,通过对无人机进行相应的数值仿真,验证了该方法的有效性。

## 1 系统描述

主要以无人直升机作为具体分析对象,无人直

升机存在俯仰、偏航和滚转三种运动。在此,以无人直升机的俯仰运动模态作为控制目标,它的模型可以表示为:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = g(X)u + f(X) \quad (2)$$

$$y = x_1 \quad (3)$$

式中,  $X = [x_1, x_2]^T \in R^2$  代表的系统状态向量,代表的是系统控制输入向量,  $y \in R$  代表的是系统输出向量。  $g(X)$  和  $f(X)$  是已知的非线性函数。

实际上,在无人直升机运作时常会有故障发生。因此,应该在故障发生的情况下建立一个故障模型。考虑故障发生时,该无人直升机的故障可以表示为:

$$\dot{x}_1 = \dot{x}_2 \quad (4)$$

$$\dot{x}_2 = g(X)u + f(X) + d(X) \quad (5)$$

$$y = x_1 \quad (6)$$

式(5)中,  $d(X)$  代表的是相关故障和外界干扰的总和。

假设 1: 在式(5)中,  $d(X)$  存在上界, 并且满足  $\|d(X)\| \leq \eta, \eta$  是正常数。

## 2 故障观测器设计

系统的控制原理如图 1 所示。

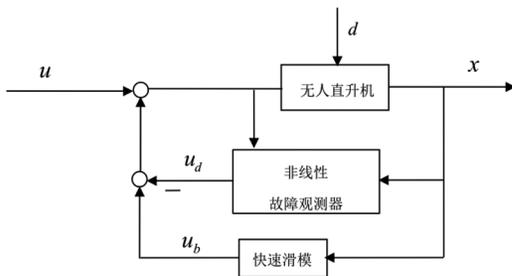


图 1 基于故障观测器的快速滑模控制原理图

故障观测器可以设计为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{d}} = z + p(X) \\ \dot{z} = -L(X)z + L(X)(-p(X) - f - gu) \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中,  $p(X)$  是一个可以被设计的非线性函数。  $L(X)$  是非线性故障观测器的增益, 并且需要满足以下公式:

$$L(X)\dot{x}_2 = dp(X)/dt \quad (8)$$

非线性故障观测器的观测误差可以定义为:

$$\hat{d} = d - \hat{d}$$

式(8)中, 参数  $\hat{d}$  指的是  $d$  的估计。

由于故障变化的速率远远小于观测器动态特

性变化的速率<sup>[3]</sup>, 因此可以得到:

$$\dot{\hat{d}} = 0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{d}} &= \dot{d} - \dot{\hat{d}} = -\dot{z} - \dot{p} = L(z+p) - L(\dot{x} - f - gu) \\ &= L\hat{d} - Ld = -L\hat{d} \end{aligned} \quad (10)$$

通过选择合适的参数  $L(X)$ , 观测器误差可以成指数形式收敛。在此, 选择  $L(X) = b, b > 0$ 。

此时,  $p(X)$  可以被表达为:

$$p(X) = bx_2 \quad (11)$$

故障观测器的输出将会被转至增益调整模块, 将相应观测到的故障转化成相应的输入。根据式(4)~式(6), 可以得到状态向量  $\dot{x}_2$  的表达式为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= f + g(u + \hat{d}/g) \\ u_d &= g^{-1}\hat{d} \end{aligned} \quad (12)$$

在添加非线性故障观测器以后, 系统可以被重新表示为:

$$\dot{x}_2 = gu + f + d = g(u_b - u_d) + f + d = gu_b + f + \tilde{d} \quad (13)$$

## 3 直接自修复控制器的设计

为了实现所预定的控制目标, 首先, 需要设计一个直接自修复控制器, 系统状态将会在有限时间内收敛到平衡点; 其次, 在满足快速终端滑模面  $s=0$  条件下, 输出误差将会在有限时间内消除。

定义  $x_2$  的跟踪误差为:  $e = [e_1 \quad e_2]^T$

式中:

$$e_1 = x_1 - y_m(t) \quad (14)$$

$$e_2 = \dot{e}_1 = x_2 - \dot{y}_m(t) \quad (15)$$

$y_m(t)$  代表参考跟踪指令。因此, 关于跟踪误差的方程组可以被表示为:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = f(X) + \tilde{d} + gu_b - \dot{y}_m(t) \end{cases} \quad (16)$$

假设 2: 在式(16)中, 参考跟踪指令  $y_m(t)$  以及二阶导数是存在并且有界的。

为了设计  $x_1$  的跟踪控制, 本文设计的快速终端滑模面为:

$$\delta = e_1 + k_1 |e_1|^{\gamma} \text{sgn}e_1 + k_2 |e_2|^{\lambda} \text{sgn}e_2 \quad (17)$$

在式(17)中, 比例参数  $k_1, k_2 > 0$ 。控制设计参数  $\gamma > 1, 1 < \lambda < 2$ 。

定理 1: 为了解决式(4)~式(6)所存在收敛速率和跟踪控制问题, 设计了直接自修复控制律, 如式(18)~式(20)所示。

如果在之前的假设条件满足的情况下, 那么上述控制律可以确保其系统保持稳定, 并且跟踪误差

$e_1$  会在有限时间内趋向于零。

$$u_b = u_{be} + u_{bd} \quad (18)$$

$$u_{be} = -g^{-1}(X)(f(X) - \dot{y}_m(t) + \frac{1}{k_2\lambda} |e_2|^{2-\lambda} \text{sgn}e_2 + \frac{k_1\gamma |e_1|^{\gamma-1}}{k_2\lambda} |e_2|^{2-\lambda} \text{sgn}e_2) \quad (19)$$

$$u_{bd} = -g^{-1}(X)(\eta + \xi) \text{sgn}\delta \quad (20)$$

注 1: 在定理 1 中, 参数  $\xi$  可以被定义为:

$$\xi = \hat{\eta} \frac{1}{k_2\lambda} |e_2|^{1-\lambda} \quad (21)$$

参数  $\hat{\eta}$  是关于  $\eta$  的估计值, 参数误差  $\tilde{\eta}$  可以被表示为:

$$\tilde{\eta} = \eta - \hat{\eta}$$

此时, 定义自适应参数律  $\dot{\hat{\eta}}$  为:

$$\dot{\hat{\eta}} = \beta |\delta| \quad (22)$$

其中, 设计参数  $\beta$  需要满足  $\beta > 0$ 。

证明: 根据闭环系统性能, 设计出如下的李雅普诺夫函数为:

$$V = \delta^2/2 + \tilde{\eta}^2/2\beta + \tilde{d}^2/2 \geq 0 \quad (23)$$

对应  $V$  的导数可以表示为:

$$\dot{V} = \delta \dot{\delta} + \tilde{\eta} \dot{\tilde{\eta}}/\beta + \tilde{d} \dot{\tilde{d}} = \delta(e_2 + k_1\gamma |e_1|^{\gamma-1} e_2 + k_2\lambda |e_2|^{\lambda-1} \dot{e}_2) + \tilde{\eta} \dot{\tilde{\eta}}/\beta + \tilde{d} \dot{\tilde{d}} \quad (24)$$

根据式 (10), 可以得到:

$$\tilde{d} \dot{\tilde{d}} - \tilde{d}(-L\tilde{d}) = -L\tilde{d}^2 \quad (25)$$

只要确保  $L(X)$  是正定的, 那么  $\tilde{d} \dot{\tilde{d}}$  便是负定的。

与此同时,  $\delta \dot{\delta} + \tilde{\eta} \dot{\tilde{\eta}}/\beta$  可以被表示为:

$$\delta \dot{\delta} + \tilde{\eta} \dot{\tilde{\eta}}/\beta = \delta [e_2 + k_1\gamma |e_1|^{\gamma-1} e_2 + k_2\lambda |e_2|^{\lambda-1} \cdot (f + \tilde{d} + g(u_{be} + u_{bd})) - \dot{y}_m(t)] + \tilde{\eta} \dot{\tilde{\eta}}/\beta = \delta k_2\lambda |e_2|^{\lambda-1} (\tilde{d} + gu_{bd}) - \tilde{\eta} \dot{\tilde{\eta}}/\beta \quad (26)$$

将式 (20) ~ (22) 代入到式 (26) 中可以得到:

$$\delta \dot{\delta} + \tilde{\eta} \dot{\tilde{\eta}}/\beta = \delta k_2\lambda |e_2|^{\lambda-1} [\tilde{d} - (\eta + \hat{\eta} \frac{1}{k_2\lambda} |e_2|^{1-\lambda}) \text{sgn}\delta] - \tilde{\eta} |\delta| \leq \delta k_2\lambda |e_2|^{\lambda-1} (\tilde{d} - \eta) - \tilde{\eta} |\delta| \leq \delta k_2\lambda |e_2|^{\lambda-1} (\tilde{d} - \eta) + \eta |\delta| - \tilde{\eta} |\delta| \leq \delta k_2\lambda |e_2|^{\lambda-1} (\tilde{d} - \eta) \leq 0$$

根据以上几个假设, 式 (24) 可以被表示为:

$$\dot{V} = \delta \dot{\delta} + \tilde{\eta} \dot{\tilde{\eta}}/\beta + \tilde{d} \dot{\tilde{d}} \leq \delta k_2\lambda |e_2|^{\lambda-1} (\tilde{d} - \eta) - L\tilde{d}^2 < 0 \quad (27)$$

从中可以看出系统的状态将在有限时间内收敛至平衡点。跟踪误差  $e_1$  会在有限时间内趋

向于零。这里自适应技术的加入是为了估计故障的上界。相比于传统的终端滑模控制, 所设计的伴有参数自适应律的快速终端滑模控制不仅可以适用于正常情况下的控制律, 更可以适用于出现故障和干扰情况, 并且具有良好的跟踪性能和鲁棒性。

## 4 仿真分析

无人直升机的飞控系统是非常复杂的, 因此为了简化, 在此次仿真中只考虑它处于垂直飞行状态的模型。根据文献, 无人直升机在垂直飞行时的故障模型如下:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= K_1 C_T(x_4) x_3^2 - g - K_2 x_2 - K_3 x_2^2 - K_4 \\ \dot{x}_3 &= -K_5 x_3 - K_6 x_3^2 - K_7 x_3^2 \sin x_4 + K_8 u_{th} + K_9 \\ \dot{x}_4 &= x_5 \\ \dot{x}_5 &= K_{10} (-0.0003175u_{\theta_c} + 0.5436 - x_4) \\ &\quad - K_{11} x_5 - K_{12} x_3^2 \sin x_4 + d(x_4, x_5, t) \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

式中,  $C_T(x_4) = (-K_{c1} + \sqrt{K_{c1}^2 + K_{c2} x_4})^2$ , 状态变量  $x_1 = h, x_2 = \dot{h}, x_3 = \omega, x_4 = \theta_c, h$  为高度,  $\omega$  为旋转角速率,  $\theta_c$  为叶片桨距角,  $g$  为重力加速度。  $u_{th}$  为油门的输入。系统的参数如表 1 所示。

表 1 无人直升机控制系统参数

参数	大小	参数	大小
$K_1$	0.25m	$K_2$	$0.1s^{-1}$
$K_3$	$0.1m^{-1}$	$K_4$	$7.86ms^{-2}$
$K_5$	$0.7s^{-1}$	$K_6$	0.0028
$K_7$	0.005	$K_8$	$0.1088s^{-2}$
$K_9$	$-13.92s^{-1}$	$K_{10}$	$800s^{-2}$
$K_{11}$	$65s^{-1}$	$K_{12}$	0.1
$K_{c1}$	0.032592	$K_{c2}$	0.06145

控制目标是实现直升机高度和角度跟踪指令期望值。在此设定期望值  $x_{1m} = 2(m), x_{4m} = 0.3(rad)$ 。为了体现所设计的控制器的效果, 将强干扰和故障添加到无人直升机系统中, 在此假设系统故障和干扰被选择为常值故障  $d = 5$ 。自适应故障估计的值设置为  $\hat{\eta} = 4$ 。高度和高度跟踪误差的曲线如图 2、图 3 所示。 (下转第 67 页)

缓慢。在 2008 年冰雪、地震灾害抢险救援中,凸现了我国通用航空发展滞后的现状。低空空域的逐步开放,必然会促进通用航空产业的全面发展,这样就可以在为社会创造价值的同时,又培养大量的飞行员和航空机械师,这将成为保卫国家安全的重要的“战略预备役部队”。

(5)通用航空产业链可以带来巨额社会财富。

与我国空域面积相当的美国,每年通用航空制造业营业额在 200 亿美元左右,而中国仅 2 亿,相差 100 倍。开放低空空域将促进通用航空产业链的成熟,包括通用飞机机场的建设、通用飞机的售后服务、人员培训、地面监控等等行业将会产生一系列就业机会,成为新兴市场体系。

低空空域开放后,现有的通用航空运营商将利

用现行的市场地位紧抓市场机遇,分享行业发展的蛋糕,同时也为市场需求的增长起到了先导作用。对比分析和市场调查研究,到 2015 年通用航空器租赁、售后服务、运营管理、专业服务等业务将迅猛发展,年均市场需求在 80 亿左右;到 2018 年我国民用直升机的需求量将达到 7 300 架左右,是我国现有直升机拥有量的约 58 倍。通用航空及其带动的产业将形成一万亿人民币以上的市场容量。

随着低空空域的开放及国家扶持通用航空发展政策的出台,未来 10 年,加大基础设施建设步伐,通用航空产业将成为扩大内需与就业、促进国民经济发展的重要产业,产生大量经济效益,将会是继续干线飞机、支线飞机之后另一个迅速崛起的朝阳产业。

(上接第 46 页)

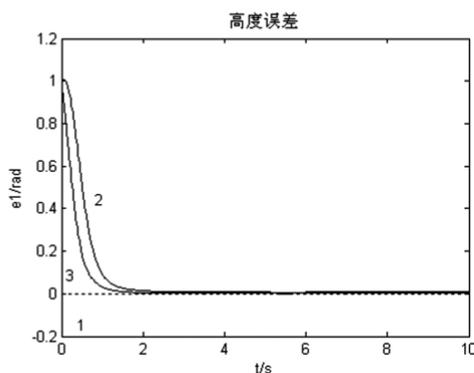


图 2 存在故障和干扰情况下的高度误差曲线

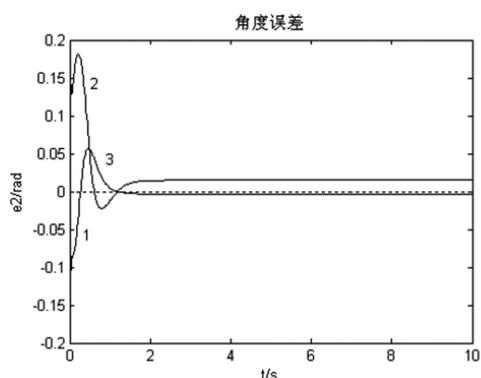


图 3 存在故障和干扰情况下的角度误差曲线

曲线 1 代表的是理想输出曲线。曲线 2 代表的是基于传统终端滑模控制的直接自修复控制输出曲线。曲线 3 代表的是基于非线性故障观测器的直接自修复控制输出曲线。所描述的方法主要通过两个方面来区别:(1)使用非线性故障观测器的直接自修

复控制器,它的收敛效果在高度和高度误差方面要比传统的终端滑模控制器要快得多;(2)在跟踪精度方面,使用本节所描述的方法要比传统的终端滑模控制器要精确得多。因此通过收敛速度和跟踪精度的对比,体现出了本节所描述的方法具有更好的收敛速度和跟踪精度。

## 5 结论

主要针对无人机采用基于故障观测器的直接自修复控制方法来解决收敛问题。引入非线性故障观测器去解决故障带来的影响。引入终端滑模控制,设计相应地滑模面和直接自修复控制器。同时利用李雅普诺夫理论对所设计的直接自修复系统进行相应的稳定性证明。最终仿真结果显示,本文所设计的基于非线性观测器的直接自修复控制系统具有较快的响应速度和跟踪精度。

## 参考文献:

- [1]J. Zhang, C. S. Jiang, J. Wen. Robust tracking control of near space vehicle based on dynamic saturation function fast terminal sliding mode[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(3):110-115.
- [2]N. B. Almutairi and M. ZRIBI. Sliding mode control of coupled tanks[J]. Mechatronics, 2006,16(3):427-441.
- [3]M. Liu, P. Shi, L. Zhang and X. Zhao. Fault tolerant control for nonlinear Markovian jump systems via proportional and Derivative sliding mode observer. IEEE Trans on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2011,58(11):2755-2764.