

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904904

# 树障清理空中机器人的姿态控制器设计\*

王少辉<sup>1</sup>, 杨忠<sup>1</sup>, 张秋雁<sup>2</sup>, 许昌亮<sup>1</sup>, 徐浩<sup>1</sup>, 徐向荣<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学自动化学院 南京 211106; 2. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院 贵阳 550000;  
3. 安徽工业大学机械工程学院 马鞍山 243032)

**摘要:**以一种用于对高压线路附近的树障进行清理的树障清理空中机器人为研究对象,分析其姿态控制问题。首先,建立了具有新型结构的树障清理空中机器人的姿态动力学模型和控制分配矩阵。然后,为了克服惯性矩阵的不确定性,采用滑模方法设计姿态控制器;同时,引入非线性函数来改进传统的边界层法以提高控制器性能;接着提出了一种切换控制分配矩阵的方法来解决空中机器人在切割作业过程中的动力学模型变化的问题。最后,在仿真平台上实现了上述控制器。实验结果表明,本滑模控制器具有良好的姿态控制性能,能有效克服机体惯量的不确定性;通过切换控制分配矩阵实现了空中机器人在切割作业过程中的姿态稳定。

**关键词:** 空中机器人;树障清理;姿态控制器;滑模;控制分配

**中图分类号:** TP242 TH861 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

## Design of attitude controller for the aerial tree-pruning robot

Wang Shaohui<sup>1</sup>, Yang Zhong<sup>1</sup>, Zhang Qiuyan<sup>2</sup>, Xu Changliang<sup>1</sup>, Xu Hao<sup>1</sup>, Xu Xiangrong<sup>3</sup>

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;  
2. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd, Guiyang 550000, China;  
3. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China)

**Abstract:** This paper takes the aerial tree-pruning robot that is used for clearing the tree barricades near high-voltage lines as study object, and the attitude control problem of the aerial robot is addressed. Firstly, the attitude dynamics model and control allocation matrix of the aerial tree-pruning robot with new structure are established. Then, in order to overcome the uncertainty of the inertia matrix, the sliding mode method is used to design the attitude controller. At the same time, a non-linear function is introduced to improve the traditional boundary layer method and enhance the controller performance. Then, a control allocation matrix switching strategy is proposed to solve the dynamics model change problem of the aerial robot in the cutting operation process. Finally, the controller was implemented on the simulation platform. The experiment results show that the sliding mode controller designed in this paper has good attitude control performance and can effectively overcome the inertia uncertainty of the robot body. Through switching the control allocation matrix, the attitude stabilization of the aerial robot in the cutting operation process is realized.

**Keywords:** aerial robot; tree pruning; attitude controller; sliding mode; control allocation

## 0 引言

树障是输电线路通道存在的一种安全隐患,表现为电力线附近的树木的不断生长进而逐渐威胁到输电线路

的运行安全。为此,电力部门每年都要投入大量的人力物力对辖区输电线路通道内的树障进行清理整治。目前,大部分输电线路附近的树障清理是由人工和一些简单工具完成的。然而,传统的依靠人工的树障清理方式,存在着效率不高、安全风险大的缺点,特别是在恶劣的环

收稿日期:2010-03-28 Received Date:2010-03-28

\* 基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(066600KK52170074)、国家重点研发计划项目(2017YFE0113200)、国家自然科学基金(61473144)资助项目

境和复杂的地形下执行树障清理任务,给负责树障清理的工作人员带来了巨大的挑战,这也是电力公司一直在努力解决的问题<sup>[1]</sup>。

针对上述问题,本文设计了一种树障清理空中机器人。该空中机器人装有刀具机械臂,能够沿输电线路切断电线附近的树枝,可以实现从树障外侧到内侧的“剃头”式快速切割。同时,树障清理空中机器人能胜任更加复杂多变的地形,且具有比人工更高的作业效率<sup>[2-3]</sup>。

为了完成树障清理这一预定任务,需要实现高精度的姿态控制。然而,树障清理空中机器人携带刀具机械臂,机体质量大,质量分布不均匀,执行不同的树障清理任务时需携带不同类型的负载,这些特点造成了机体的转动惯量矩阵具有不确定性,这增加了姿态控制器的设计难度。此外,在切割作业的过程中,空中机器人与树木发生接触,这使得其动力学模型也发生了变化,同时,控制分配矩阵也需做出相应调整。

近年来,随着传感技术和机电一体化技术的飞速发展,空中机器人的研究与开发工作取得了很大的进展。基于机器学习的控制算法<sup>[4-5]</sup>,由于依赖于重复训练,所以很难用于复杂的未知环境。线性二次型调节器<sup>[6-8]</sup>(linear quadratic regulator, LQR)的主要优点是通过求解黎卡提方程由系统的全状态反馈获得最优控制输入。然而,对于一般系统,求取黎卡提方程的解析解是比较困难的;同时,LQR方法对系统模型精度的要求较高,对参数不确定系统的控制性能较差,这也限制了LQR方法在树障清理空中机器人姿态控制器中的应用。因此,在实际工程应用中,经典PID控制器<sup>[9-10]</sup>、滑模<sup>[11-12]</sup>等控制算法仍发挥着重要作用。

使用诸如PID等经典方法设计得到的控制器,存在着鲁棒性较差的缺点;当系统模型偏离平衡点或存在较强的外界干扰时,控制性能将无法得到保障;同时模型参数的变化也会导致控制器性能变差,必须对控制器进行参数调整以满足不同模型参数下的控制器性能要求;考虑到本文研究的空中机器人自身存在惯性矩阵不确定性且接触作业也会给空中机器人带来外界扰动,因此上述方法较难满足树障清理空中机器人的控制需求。

考虑到滑模控制对模型参数不确定性、模型误差以及外部干扰具有较强的鲁棒性;本文基于滑模控制的方法设计了树障清理空中机器人的姿态控制器;同时通过引入非线性函数来改进传统的边界层法以提升滑模控制器性能;并在控制器设计过程中考虑模型参数的不确定性,使得最终得到的控制器具有较好的鲁棒性,以满足树障清理空中机器人的作业需求。本文分析了树障清理空中机器人的运动学和动力学特性,确定了涵道和主旋翼在位姿控制过程中的控制分配矩阵。针对切割作业过程中空中机器人动力学模型变化提出了切换控制分配矩阵

的策略。最后通过仿真和真机实验验证了所设计的姿态控制器与控制分配策略的有效性。

## 1 树障清理空中机器人的运动学和动力学模型

首先定义惯性坐标系  $I$  和机体坐标系  $B$ , 如图 1 所示。

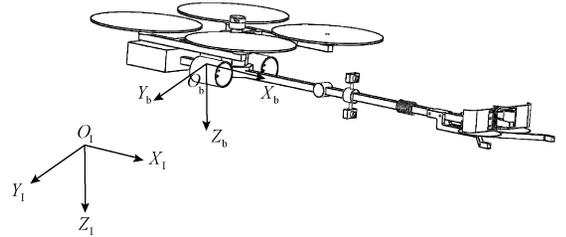


图1 惯性坐标系  $I$  和机体坐标系  $B$

Fig.1 Inertial coordinate system  $I$  and robot body coordinate system  $B$

由图 1 可知,树障清理空中机器人以四旋翼飞行器为主体结构,装配前置刀具机械臂,使用双锯片刀头进行树障清理;机身两侧对称安装涵道推进器用于提供使机身水平前进的推力。

根据牛顿第二定律,通过位置、速度微分方程描述的空中机器人运动学模型可表示为<sup>[13]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{P}} = \mathbf{v} \\ \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{g} + \mathbf{R}_b^w \frac{\mathbf{F} + \mathbf{F}_d}{m} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{P} = [x \ y \ z]^T$ ,  $\mathbf{v} = [v_x \ v_y \ v_z]^T$  和  $\mathbf{g} = [0 \ 0 \ g]^T$  分别表示惯性坐标系下的位置、速度和重力加速度矢量;  $m$  表示空中机器人的质量;  $\mathbf{R}_b^w$  表示机体坐标系到惯性坐标系的姿态转换矩阵。

$$\mathbf{R}_b^w = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi & c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi \\ c\theta s\psi & s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $c$  表示  $\cos$ ;  $s$  表示  $\sin$ ;  $\phi$  为空中机器人滚转角;  $\theta$  为俯仰角;  $\psi$  为偏航角。

$$\mathbf{F} \text{ 表示机体坐标系下 4 个旋翼产生的总升力矢量:} \\ \mathbf{F} = [0 \ 0 \ -f]^T, f > 0 \quad (3)$$

式中:  $f$  表示机体坐标系下 4 个旋翼产生的总升力大小。

$$\mathbf{F}_d \text{ 表示机体坐标系下 2 个涵道产生的推力矢量:} \\ \begin{cases} \mathbf{F}_d = [f_d \ 0 \ 0]^T \\ f_d = f_{dl} + f_{dr}, f_{dl} > 0, f_{dr} > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $f_{dl}$  和  $f_{dr}$  分别表示左侧和右侧涵道推进器提供的推力大小。

联立式(1)、(2)、(3)、(4)可得:

$$\begin{cases} \ddot{x} = (c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi) \frac{-f}{m} + c\theta c\psi (f_{dl} + f_{dr}) \\ \ddot{y} = (c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi) \frac{-f}{m} + c\theta s\psi (f_{dl} + f_{dr}) \\ \ddot{z} = g - (c\phi c\theta) \frac{f}{m} - s\theta (f_{dl} + f_{dr}) \end{cases} \quad (5)$$

根据文献[14],由牛顿欧拉方程可得空中机器人动力学模型为:

$$\begin{cases} \dot{\Theta} = R\Omega \\ J\dot{\Omega} = -\Omega \times J\Omega + U + Dd \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\Theta = [\phi \ \theta \ \psi]^T$  和  $\Omega = [p \ q \ r]^T$  分别代表了欧拉角和机体角速度矢量。 $J = \text{diag}(J_x, J_y, J_z)$  表示机体的转动惯量矩阵; $d$  表示模型中的不确定部分和飞行过程中的外部扰动; $D$  为其分配矩阵; $R$  表示由机体角速度到欧拉角速度的转换矩阵。考虑到本文主要研究空中机器人小角度低速飞行的状态, $R$  可以近似为单位矩阵,所以式(6)可以简化为:

$$\begin{cases} J\dot{\Theta} = -\Omega \times J\Theta + U + Dd \\ U = U_c + U_d \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $U_c = [U_{cx} \ U_{cy} \ U_{cz}]^T$  表示由主旋翼产生的 3 个姿态通道的控制力矩; $U_d = [U_{dx} \ U_{dy} \ U_{dz}]^T$  表示由于涵道推力产生的在姿态通道上的控制力矩; $U = [U_x \ U_y \ U_z]^T$  表示姿态通道上的总控制力矩。则空中机器人的动力学模型可以表示为:

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = \theta\psi \frac{J_y - J_z}{J_x} + \frac{U_{cx} + U_{dx}}{J_x} \\ \ddot{\theta} = \phi\psi \frac{J_z - J_x}{J_y} + \frac{U_{cy} + U_{dy}}{J_y} \\ \ddot{\psi} = \phi\theta \frac{J_x - J_y}{J_z} + \frac{U_{cz} + U_{dz}}{J_z} \end{cases} \quad (8)$$

令  $P_{dl} = [0 \ -y_l \ 0]^T$ 、 $P_{dr} = [0 \ y_r \ 0]^T$  分别表示空中机器人质心到左、右侧涵道安装中心的位置矢量,则:

$$\begin{cases} U_{dx} = 0 \\ U_{dy} = 0 \\ U_{dz} = y_l f_{dl} - y_r f_{dr} \end{cases} \quad (9)$$

联立式(4)、(9),可得:

$$\begin{bmatrix} f_{dl} \\ U_{dz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ y_l & -y_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{dl} \\ f_{dr} \end{bmatrix}, f_{dl} > 0, f_{dr} > 0 \quad (10)$$

式(10)即为涵道推进器的控制分配矩阵;由期望的前向推力  $f_d$  和期望的偏航通道控制力矩分量  $U_{dz}$  便可确定左右涵道的推力大小。

空中机器人的飞行由多个电机和旋翼驱动。旋翼转速决定空中机器人的总拉力和力矩。对于本文研究的“X型”构型的空中机器人,其动力布局如图 2 所示<sup>[15-16]</sup>。

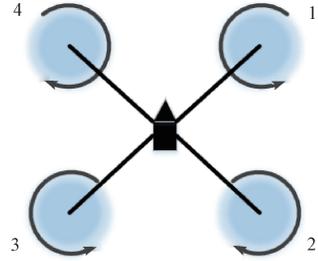


图 2 空中机器人动力布局

Fig.2 The dynamic layout of the aerial robot

旋翼 1、3 逆时针旋转,旋翼 2、4 顺时针旋转。通过增加/减小旋翼 1、2 的转速,同时减小/增加旋翼 3、4 的转速产生滚转运动;增加减小/旋翼 2、3 的转速,减小/增加旋翼 1、4 的转速产生俯仰运动。偏航运动则通过增加/减小逆时针旋翼转速,同时减小/增加顺时针旋翼的转速产生。

4 个旋翼产生的总升力为:

$$f = c_T(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \quad (11)$$

4 个旋翼产生的力矩为:

$$\begin{cases} U_x = dc_T \left( -\frac{\sqrt{2}}{2}\omega_1^2 - \frac{\sqrt{2}}{2}\omega_2^2 + \frac{\sqrt{2}}{2}\omega_3^2 + \frac{\sqrt{2}}{2}\omega_4^2 \right) \\ U_y = dc_T \left( \frac{\sqrt{2}}{2}\omega_1^2 - \frac{\sqrt{2}}{2}\omega_2^2 - \frac{\sqrt{2}}{2}\omega_3^2 + \frac{\sqrt{2}}{2}\omega_4^2 \right) \\ U_z = c_M(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $c_T$  表示升力系数; $\omega_i (i = 1, 2, 3, 4)$  表示 4 个旋翼的转速; $d$  表示电机中心到机体中心的距离; $c_M$  表示电机的反扭矩系数。

根据式(12),可得到如下矩阵表示的控制分配关系:

$$M = C_M W \quad (13)$$

式中:  $M = [f U_x U_y U_z]^T$  表示旋翼产生的驱动力和驱动力矩; $W = [\omega_1^2 \ \omega_2^2 \ \omega_3^2 \ \omega_4^2]^T$  表示各个旋翼的转速平方; $C_M$  为控制分配矩阵。

$$C_M = \begin{bmatrix} c_T & c_T & c_T & c_T \\ -dc_T \frac{\sqrt{2}}{2} & -dc_T \frac{\sqrt{2}}{2} & dc_T \frac{\sqrt{2}}{2} & dc_T \frac{\sqrt{2}}{2} \\ dc_T \frac{\sqrt{2}}{2} & -dc_T \frac{\sqrt{2}}{2} & -dc_T \frac{\sqrt{2}}{2} & dc_T \frac{\sqrt{2}}{2} \\ c_M & -c_M & c_M & -c_M \end{bmatrix} \quad (14)$$

根据式(7)可知,涵道推进器和主旋翼均参与了偏航通道的姿态控制;故偏航通道的姿态控制器产生的期望控制力矩要分配到这两个执行机构中去,本文采用以下方法来确定主旋翼产生的偏航控制力矩  $U_{cz}$  和涵道产生的偏航控制力矩  $U_{dz}$  之间的关系:

$$\begin{cases} U_{cz} = \gamma U_z / (1 + \gamma) \\ U_{dz} = U_z / (1 + \gamma) \\ \gamma = U_{zmax} / U_{dzmax}, \gamma \in (0, 1) \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $\gamma$  表示比例系数,由悬停状态下主旋翼能产生的最大偏航控制力矩  $U_{zmax}$  和涵道能产生的最大偏航控制力矩  $U_{dzmax}$  确定。根据式(10)、(13)~(15)可将姿态控制器产生的期望控制力矩和位置控制器产生的期望控制力矩转换为4个旋翼和2个涵道推进器的转速信号,从而控制空中机器人的姿态和位置。

## 2 滑模姿态控制器设计

### 2.1 基于滑模方法的姿态控制器设计

与一般无人机不同,树障清理空中机器人在执行不同任务时搭载的负载均不同,这将导致树障清理空中机器人的转动惯量矩阵的变化;因此,建立的动力学模型将存在建模误差,进而影响控制器的性能。考虑到滑模控制对参数不确定性、模型误差和外部干扰具有较强的鲁棒性;本文采用滑模控制方法设计姿态控制器以克服惯性矩阵的不确定性。将式(8)改写为如下形式<sup>[17-18]</sup>:

$$J\ddot{\Theta} = U - Q\dot{\Theta} + d \quad (16)$$

$Q$  如式(17)所示:

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\psi} & \dot{\theta} \\ \dot{\psi} & 0 & -\dot{\phi} \\ -\dot{\theta} & \dot{\phi} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix} \quad (17)$$

考虑到执行不同任务时树障清理空中机器人的转动惯量的变化,本文在转动惯量矩阵中引入变化量  $J_\Delta = \text{diag}(\Delta J_x, \Delta J_y, \Delta J_z)$ ;将由  $J_\Delta$  的引入所带来的系统模型的不确定项归入一个有界的系统总扰动项  $d_\Delta$ ,再通过适当的滑模控制器参数选取,使得最终得到的控制器对总扰动项  $d_\Delta$  有良好的抑制作用,从而可以有效的降低转动惯量矩阵的变化对控制器性能的影响。

滑模控制器的设计步骤如下:

$$(J + J_\Delta)\ddot{\Theta} = U - (Q + Q_\Delta)\dot{\Theta} + d \quad (18)$$

$$J\ddot{\Theta} = U - Q\dot{\Theta} + d - J_\Delta\ddot{\Theta} - Q_\Delta\dot{\Theta} \quad (19)$$

$$Q_\Delta = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\psi} & \dot{\theta} \\ \dot{\psi} & 0 & -\dot{\phi} \\ -\dot{\theta} & \dot{\phi} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta J_x & 0 & 0 \\ 0 & \Delta J_y & 0 \\ 0 & 0 & \Delta J_z \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$d_\Delta = d - J_\Delta\ddot{\Theta} - Q_\Delta\dot{\Theta} \quad (21)$$

$$J\ddot{\Theta} = U - Q\dot{\Theta} + d_\Delta \quad (22)$$

假设  $d_\Delta$  有界,且满足  $\|d_\Delta\| \leq D, D \in \mathbb{R}, D > 0$ 。

定义跟踪误差:

$$e_\Theta = \Theta - \Theta_d \quad (23)$$

定义滑模函数:

$$s = \alpha e_\Theta + \dot{e}_\Theta \quad (24)$$

其中,  $\alpha = \text{diag}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3), \alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0, \alpha_3 > 0$

联立式(22)~(24),则有:

$$Js = J(\alpha \dot{e}_\Theta + \ddot{e}_\Theta) = J\alpha \ddot{e}_\Theta + J\dot{\Theta} - J\ddot{\Theta}_d =$$

$$J\alpha \ddot{e}_\Theta + U - Q\dot{\Theta} + d_\Delta - J\ddot{\Theta}_d \quad (25)$$

设置如下形式的指数趋近律:

$$\dot{s} = -ks - \varepsilon \text{sign}(s) \quad (26)$$

其中:

$$\varepsilon = \text{diag}(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) \quad (27)$$

$\varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 > 0, \varepsilon_3 > 0$

则姿态控制律可以设置为如下形式:

$$U = J\ddot{\Theta}_d + Q\dot{\Theta} - J\alpha \dot{e}_\Theta - ks - (\eta + \varepsilon) \text{sign}(s) \quad (28)$$

其中:

$$\eta = \text{diag}(\eta_1, \eta_2, \eta_3) \quad (29)$$

$\eta_1 > 0, \eta_2 > 0, \eta_3 > 0, \|\eta\| \geq D$

$$k = \text{diag}(k_1, k_2, k_3) \quad (30)$$

$k_1 > 0, k_2 > 0, k_3 > 0$

构建如下形式的 Lyapunov 能量函数:

$$V = \frac{1}{2} s^T Js \quad (31)$$

由式(31)表示的系统的平衡状态为  $s = 0$ ;由于转动惯量矩阵  $J$  恒为正定矩阵,则该能量函数正定。将式(31)对时间求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s^T \dot{J}s = s^T (J\alpha \dot{e}_\Theta + U - Q\dot{\Theta} + d_\Delta - J\ddot{\Theta}_d) = \\ & s^T (-ks - (\eta + \varepsilon) \text{sign}(s) + d_\Delta) \leq \\ & -s^T ks - s^T \varepsilon \text{sign}(s) \leq 0 \end{aligned} \quad (32)$$

由式(32)可知  $\dot{V}(x, t)$  负半定,当且仅当  $s = 0$  时,  $\dot{V}(x, t) = 0$ ;根据 Lyapunov 稳定性理论,当控制输入满足式(28)时,系统在平衡点处渐近稳定,系统状态最终收敛到滑模面  $s = 0$  上。因此,该控制律可用于实现姿态的跟踪控制。

### 2.2 改进的边界层方法

由于滑模控制律中会出现不连续控制项  $\text{sign}(s)$ ,该不连续项会导致系统状态在滑模面  $s = 0$  附近出现抖振现象。为克服上述抖振现象,通常采用传统的边界层方法,即采用饱和函数来代替控制律中的符号函数,饱和函数的形式如下:

$$\text{sat}(s/\Delta) = \begin{cases} \text{sign}(s), & |s| \geq \Delta \\ s/\Delta, & |s| < \Delta \end{cases} \quad (33)$$

其中,  $\Delta > 0$  为边界层厚度。

由于在切换面附近是连续控制,所以消除了抖振现象。然而,饱和函数并不是符号函数的最优逼近,因此,使用饱和函数代替符号函数会直接影响系统的稳定性和控制性能。考虑到树障清理空中机器人对姿态控制精度和稳定性要求较高,因此有必要对传统边界层法做出改进。针对这一问题,本文提出如下形式的非线性函数来替代控制律中的饱和函数,定义非线性函数  $P(s, \Delta, \delta, \beta)$  如下:

$$P(s, \Delta, \delta, \beta) = \begin{cases} \text{sign}(s), & |s| > \Delta \\ (|s|/\Delta)^\beta \text{sign}(s), & \delta < |s| \leq \Delta \\ s\delta^{\beta-1}\Delta^{-\beta}, & |s| \leq \delta \end{cases} \quad (34)$$

其中,  $\Delta > 0$  为边界层厚度;  $0 < \delta < 1$  为线性区间的长度;  $0 < \beta < 1$  为指数项,使非线性函数  $P(s, \Delta, \delta, \beta)$  具有比饱和函数更优的逼近符号函数的性能;同时考虑到控制律要在嵌入式平台上进行离散化实现,在平衡点附近引入线性段  $s\delta^{\beta-1}\Delta^{-\beta}$ ,可以有效避免由于非线性函数  $(|s|/\Delta)^\beta \text{sign}(s)$  在平衡点处斜率过大导致离散积分过冲从而使系统状态在滑模面附近抖振的现象。

### 3 切割作业时的控制分配策略设计

如图3所示,在执行树障清理任务时,空中机器人携带刀具机械臂,飞至树木顶端,对上层树枝进行“剃头式”切割;切割过程中,刀具开启,对称装在机体两侧的涵道推进器提供刀具进给所需的推力,4个旋翼保持机体始终处于水平状态。

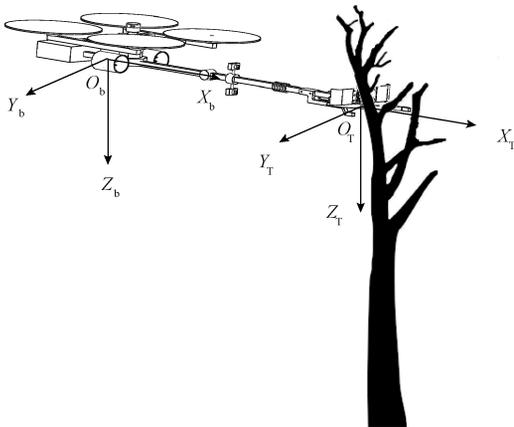


图3 空中机器人切割作业

Fig.3 The cutting operation of the aerial robot

在切割作业过程中,空中机器人与树木接触,这相当于对空中机器人施加了外界约束,此时原有的动力学模型和控制分配矩阵均发生了改变;若不对控制分配策略进行调整,将会造成空中机器人姿态控制性能变差甚至

失控。因此,本节将建立切割作业环境下的空中机器人动力学模型,并对控制分配策略做出相应的调整。在切割作业过程中作如下假设。

- 1) 忽略切割过程中树枝弯曲对机体造成的影响。
- 2) 切割过程中空中机器人姿态小角度范围内变化。

假设1)使得空中机器人与树木的接触近似为刚体接触,这将简化后续的分析;假设2)保证了空中机器人在切割过程中姿态处于小角度变化,这一点尤为重要,因为在实际测试中,切割过程中姿态角变化过大,会导致切割装置卡死,严重时甚至会导致空中机器人失控。因此,在切割过程中,机体和树木之间可以等效为万向节连接,而空中机器人姿态的旋转中心由机体重心转移到了锯片与树木的接触点  $O_T$ ;以该接触点为原点建立新的姿态参考坐标系  $O_T X_T Y_T Z_T$ ,则在切割过程中,空中机器人机体绕  $O_T X_T$  轴旋转的角度为滚转角,绕  $O_T Y_T$  轴旋转的角度为俯仰角,绕  $O_T Z_T$  轴旋转的角度为偏航角。空中机器人主旋翼的控制分配矩阵也产生了相应变化,如式(35)所示。

$$C_M = \begin{bmatrix} c_T & c_T & c_T & c_T \\ -dc_T \frac{\sqrt{2}}{2} & -dc_T \frac{\sqrt{2}}{2} & dc_T \frac{\sqrt{2}}{2} & dc_T \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -lc_T & -(l + \sqrt{2}d)c_T & -(l + \sqrt{2}d)c_T & -lc_T \\ c_M & -c_M & c_M & -c_M \end{bmatrix} \quad (35)$$

式中:  $l$  为1、4号旋翼中心之间的连线到接触点;  $O_T$  之间的距离。与式(14)相比,空中机器人机体旋转中心的变化改变了主旋翼到旋转轴的距离,从而改变了姿态通道的控制分配矩阵;同时,空中机器人机体相对于新的旋转轴的转动惯量发生了变化,故由式(8)表示的空中机器人动力学模型变为如下形式:

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = \theta\psi \frac{J'_y - J'_z}{J'_x} + \frac{U_{cx} + U_{dx}}{J'_x} \\ \ddot{\theta} = \phi\psi \frac{J'_z - J'_x}{J'_y} + \frac{U_{cy} + U_{dy}}{J'_y} \\ \ddot{\psi} = \phi\theta \frac{J'_x - J'_y}{J'_z} + \frac{U_{cz} + U_{dz}}{J'_z} \end{cases} \quad (36)$$

其中,  $J'_x, J'_y, J'_z$  为机体相对于新的旋转轴的转动惯量,而根据式(28)所设计的滑模姿态控制器可以克服这种转动惯量的变化对控制器性能影响;同时,通过空中机器人机载传感器实时检测刀锯状态,当锯片与树木接触后,及时切换控制分配矩阵以保证空中机器人在切割过程中的姿态稳定性。

### 4 仿真实验

为了验证本文使用的滑模姿态控制器的有效性,首先通过仿真比较了改进的边界层法与传统边界层法的性能差异;然后在姿态通道进行了滑模控制器与常规PID控制器的仿真比较实验。为了比较算法的鲁棒抗扰能力,在仿真实验中加入了幅值为0.3的高斯白噪声。

由于空中机器人的转动惯量等参数通过实验方法较难获取,故采用三维制图软件Solidworks对本文使用的树障清理空中机器人进行机械建模,建模过程完全按照实际使用的材质及尺寸进行,最后通过仿真分析得到空中机器人的转动惯量等参数;同时,涵道力矩与旋翼力矩的比例系数 $\gamma$ 通过实验的方法测得,最终确定的空中机器人的相关参数如表1所示。

表1 树障清理空中机器人的相关参数

Table 1 Related parameters of the aerial tree-pruning robot

符号	数值	单位
$l$	0.85	m
$d$	0.55	m
$m$	15	kg
$J_x$	0.46	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
$J_y$	7.35	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
$J_z$	7.08	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
$\gamma$	0.72	-

#### 4.1 改进的边界层法的性能验证

仿真实验以俯仰通道为例,设置饱和函数和非线性函数 $P(s, \Delta, \delta, \beta)$ 的边界层厚度均为 $\Delta = 0.5$ ,同时非线性函数的相关参数设置为 $\delta = 0.2, \beta = 0.1$ ;设置期望的俯仰角为 $1^\circ$ ,俯仰角初值为 $0^\circ$ 。仿真过程中,系统滑动模态的变化曲线如图4所示。

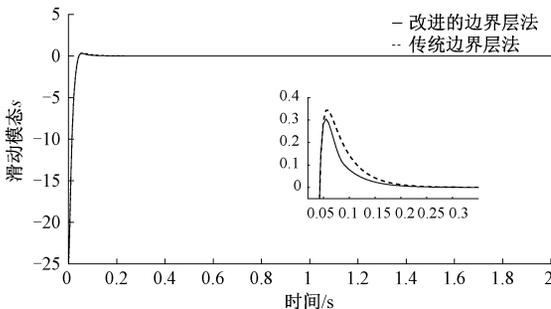


图4 改进边界层法与传统边界层法性能比较

Fig.4 Performance comparison between improved boundary layer method and traditional boundary layer method

由图4可知,使用改进后的边界层法之后,系统状态能更快地收敛至滑模面 $s=0$ 上,且由于控制作用是连续的,所以系统状态不会在滑模面附近出现抖振。

#### 4.2 基于改进边界层法的滑模控制器性能验证

仿真实验中,3个姿态通道的状态初值均设置为 $[\phi_0, \theta_0, \psi_0] = [5^\circ, 0^\circ, 0^\circ]$ ,期望姿态角设置为 $[\phi_d, \theta_d, \psi_d] = [0^\circ, 5^\circ, 5 * \cos(6 * t)^\circ]$ 。图5所示为比较了在初始转动惯量条件下PID和滑模控制器的姿态控制性能,可以看到,在跟踪常值信号和周期信号时,滑模控制器都具有更快的响应速度并且无超调,能快速收敛到期望值;而PID控制器有较大的超调量,收敛的速度更慢,动态性能较差。

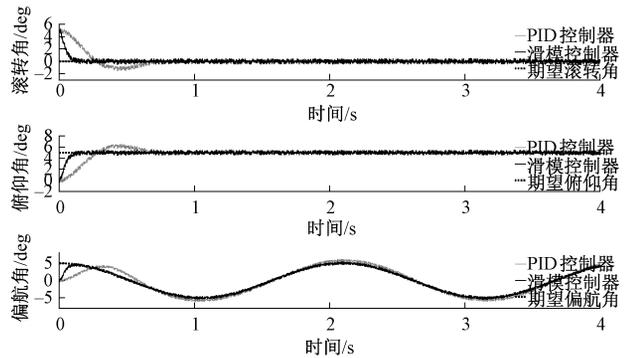


图5 滑模控制器与PID控制器控制性能比较

Fig.5 Control performance comparison between the sliding mode controller and PID controller

为了比较转动惯量具有不确定性的情况下的控制器性能,在图5实验的基础上将机体三轴的转动惯量增加为原来的1.35倍,得到的控制结果如图6、7所示。

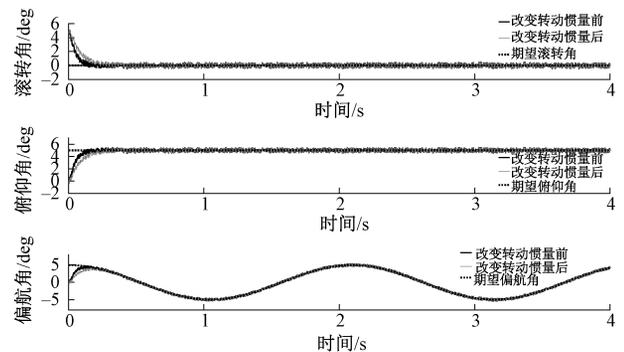


图6 滑模控制器在改变转动惯量前后的控制性能比较

Fig.6 Control performance comparison of the sliding mode controller before and after rotation inertia change

可以看出在加入35%的转动惯量变化之后,以滚转通道为例,滑模控制器的调节时间由原来的0.095s变为0.102s,增加了7.4%,无超调,动态性能并未受

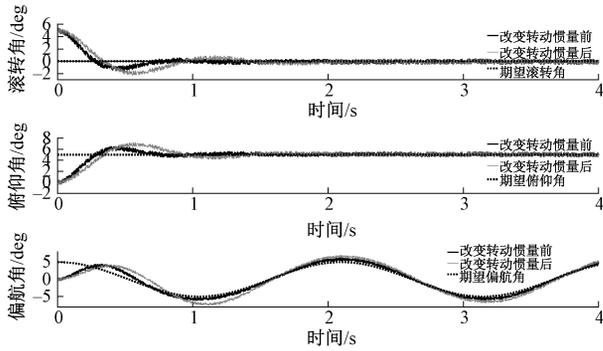


图 7 PID 控制器在改变转动惯量前后的控制性能比较  
Fig.7 Control performance comparison of the PID controller before and after rotation inertia change

到太大影响,仍能精确跟踪期望信号;而 PID 控制器的超调量变大,调节时间由原来的 0.94 s 变为 1.67 s,增加了 77.66%,且超调量也显著增加,控制器的动态性能变差。由此可见,PID 控制器对机体的转动惯量变化比较敏感,过大的转动惯量的变化会导致控制器性能变差,甚至导致控制系统发散;相比之下滑模控制器具有很好的鲁棒性,转动惯量矩阵的不确定性对控制器性能影响较小。

如图 8 所示,在 2 s 加入大小为 2° 的姿态角误差,并且改变了机体的转动惯量来模拟树障清理空中机器人从悬停到切割作业的变化过程,与此同时切换空中机器人的控制分配矩阵。可以看出,滑模控制器和 PID 控制器均能实现在切割作业过程中机体的姿态稳定,这说明了及时切换控制分配矩阵可以保持空中机器人在切割过程中的姿态稳定。PID 控制器经过较长时间的振荡最后趋于稳定,相比之下滑模控制器无超调,具有更快的响应速度,动态性能更好;并且在空中机器人的转动惯量发生变化时滑模控制器仍能维持良好的姿态控制性能,而 PID 控制器的控制性能则变差。

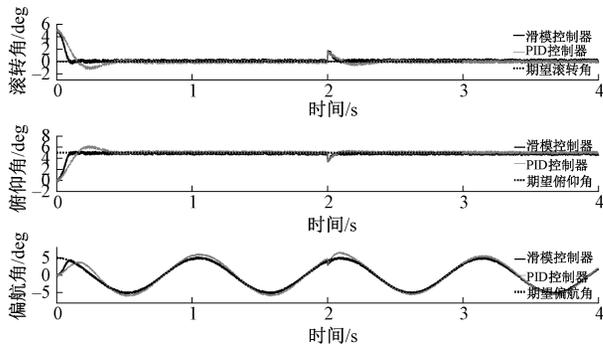


图 8 切割作业过程中的控制器性能比较  
Fig.8 Controller performance comparison in cutting operation process

## 5 飞行实验验证

### 5.1 实验平台

树障清理空中机器人主体配备了基于 STM32-F427 微处理器的飞行控制单元。机载传感器模块由 9 自由度 IMU 单元、超声波传感器、气压计和 GPS 模块组成。有一个与地面站和机载数据记录仪进行双向通信的无线模块。刀具机械臂直接安装在空中机器人前部,可以用来清除树木障碍物。飞行控制代码基于 ArduPilot 的开源工作使用 C/C++ 语言编写,通过修改相关代码可以使飞行控制器满足我们的应用需要。

### 5.2 悬停实验

使树障清理空中机器人处于悬停状态,同时使用机载记录仪记录的飞行数据,可以绘制出姿态控制器性能的曲线图。

如图 9 所示,3 个姿态通道的姿态控制效果。可以看出在悬停状态下,滑模控制器可以使姿态角的控制误差稳定在 1° 以内;而 PID 控制器的姿态控制误差则在 2° 左右。这表明相比 PID 控制器,滑模姿态控制器对惯性矩阵的不确定性和参数误差具有更好的鲁棒性和更优的控制性能。

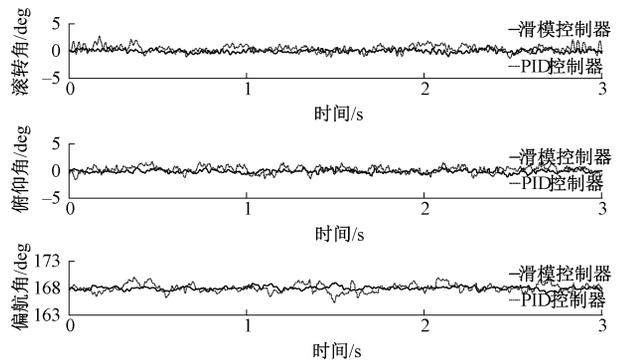


图 9 姿态控制器控制性能

Fig.9 The control performance of the attitude controller

### 5.3 切割实验

实验中,树障清理空中机器人成功地完成了对直径在 4 cm 左右树枝的切割。切割任务分为以下几个阶段:首先,飞手操纵空中机器人飞至待切割树枝附近;接着,涵道推进器和刀具开启,空中机器人水平前飞对目标树枝进行切割;最后,切割完成后空中机器人飞至下一任务目标处。值得注意的是,切割过程中的水平前飞速度不宜过快,否则可能导致刀具卡死;经过大量的实验,最后得出水平前飞的速度最好控制在 3 cm/s 以下,这既保证了飞行的安全性又保证了切割效率。

同时,对直径为4 cm的树枝进行切割只需1.5 s左右的时间,这说明树障清理空中机器人的切割效率是相当高的。图10所示为树障清理空中机器人在切割作业过程中的状态;图11所示为基于切换控制分配矩阵的滑模控制器的姿态控制效果;图12所示为PID控制器的姿态控制效果。



图10 切割状态下的树障清理空中机器人

Fig.10 The aerial tree-pruning robot in cutting state

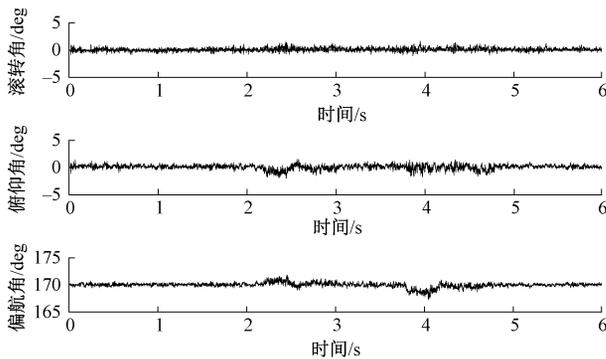


图11 滑模控制器的姿态控制效果

Fig.11 The attitude control performance of the sliding mode controller

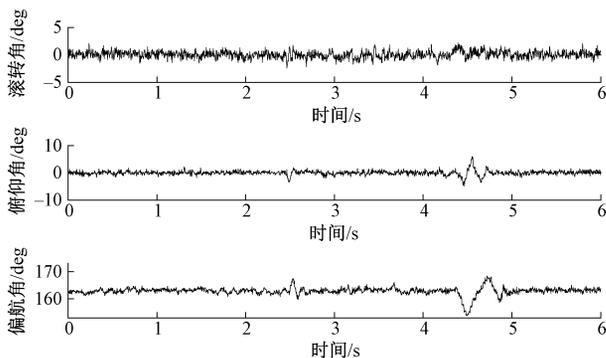


图12 PID控制器的姿态控制效果

Fig.12 The attitude control performance of the PID controller

如图11所示,从0~2.2 s空中机器人处于前飞状态,2.2 s时空机器人接触到树木并开始切割,3.8 s空中机器人切割完成;可以看到基于切换控制分配矩阵的

滑模控制器使得空中机器人在进入(2.2~3.1 s)和退出切割状态(3.8~4.8 s)时姿态在 $4.5^\circ$ 内小幅振荡,而在悬停状态(0~2.2、5~6 s)和切割作业过程中(3.1~3.8 s)姿态基本保持稳定且姿态角的控制误差在 $\pm 1^\circ$ 以内。图12显示,基于PID的姿态控制器使得空中机器人在进入(2.2~2.9 s)和退出切割状态(4.2~5.1 s)时姿态均有相当大幅度的变化,偏航通道的姿态变化甚至达到了 $9^\circ$ ;这在实际飞行中是十分危险的,因为过大的姿态调整幅度很可能使空中机器人碰到周围的树枝或者其他障碍物。综上,本文设计的基于切换控制分配矩阵的滑模姿态控制器能保持树障空中机器人在悬停和切割作业过程中的姿态稳定,能快速修正机体姿态角误差,且相比PID控制器具有更好的姿态控制性能。

## 6 结 论

本文设计了一种有效的树障清理空中机器人的姿态控制和控制分配方案。考虑到树障清理空中机器人作业的特殊性,为了克服惯性矩阵的不确定性,采用滑模法设计了姿态控制器,并引入非线性函数改进了传统的边界层法。针对在切割作业过程中空中机器人动力学模型和控制分配会发生变化的问题,提出了切换控制分配矩阵的策略。最后,在空中机器人平台上实现了上述姿态控制器和控制分配矩阵切换策略。最后实验结果表明,本文设计的滑模控制器和控制分配矩阵切换策略能够实现空中机器人在悬停和切割作业下的姿态稳定控制。

## 参考文献

- [1] 刘世林.浅谈防止高压输电线路树障事故的对策[J].中国高新技术企业,2015(36):135-136.  
LIU SH L. Talks about the countermeasures for preventing tree-breakage accidents of high-voltage transmission lines[J]. China High-Tech Enterprises, 2015 (36): 135-136.
- [2] 蒋昀宸,樊绍胜,陈骏星.带电作业智能新技术及其应用现状[J].湖南电力,2018,38(5):5-8.  
JIANG Y CH, FAN SH SH, CHEN J X X. Smart new technologies and applications for live work[J]. Hunan Electric Power, 2018, 38(5):5-8.
- [3] 范怡敏,罗云飞,沈克永,等.配备小型紫外光传感器的无人机电力巡视设计与测试[J].电子测量与仪器学报,2018,32(5):188-194.

- FAN Y M, LUO Y F, SHEN K Y, et al. Design and test of unmanned aerial vehicle power patrol with small ultraviolet sensor[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(5):188-194.
- [4] WASL S L, HOFFMANN G M. Multi-agent quadrotor testbed control design: integral sliding mode vs. reinforcement learning [C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems*. Edmonton, Canada: IEEE, 2005:3712-3717.
- [5] MUELLER F L, SCHOELLIG A P, D'ANDREA R. Iterative learning of feed-forward corrections for high-performance tracking [C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems*. Algarve, Portugal: IEEE, 2012:3276-3281.
- [6] 潘健, 刘昌龙. 基于ESO的LQR控制器在无人机姿态控制中的研究[J]. *系统仿真学报*, 2018, 30(2):410-416.
- PAN J, LIU CH L. UAV attitude control with LQR controller based on extended state observer[J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(2):410-416.
- [7] BOUABDALLAH S, NOTH A, SIEGWART R. PID vs LQ control techniques applied to an indoor micro quadrotor [C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems*. Sendai, Japan: IEEE, 2004:2451-2456.
- [8] NONAMI K, KENDOUL F, SUZUKI S, et al. Autonomous control of a mini quadrotor vehicle using LQG controllers [M]//*Autonomous Flying Robots*. Japan: Springer, 2010:61-76.
- [9] 杨明志, 王敏. 四旋翼微型飞行器控制系统设计[J]. *计算机测量与控制*, 2008, 16(4):485-488.
- YANG M ZH, WANG M. Design of flight control system for a four-rotor mini rotorcraft [J]. *Computer Measurement & control*, 2008, 16(4):485-488.
- [10] 马乐, 王东, 李元昕, 等. 全向旋翼机械臂设计、建模及动态补偿PID控制[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(3):89-99.
- MA L, WANG D, LI Y X, et al. Design, modeling and dynamic compensation control of fully-actuated aerial manipulator[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(3):89-99.
- [11] XIONG J J, ZHANG G. Sliding mode control for a quadrotor UAV with parameter uncertainties [C]. *International Conference on Control, Automation and Robotics*. Hong Kong, China: IEEE, 2016:207-212.
- [12] 翟丽相, 钱默抒, 刘剑魁. 无人机姿态控制系统滑模动态面容错控制方法[J]. *系统仿真技术*, 2017(3):65-70.
- ZHAI L X, QIAN M SH, LIU J W. Control scheme of sliding mode dynamic surface for UAV attitude control system[J]. *System Simulation Technology*, 2017(3):65-70.
- [13] 范云生, 曹亚博, 赵永生. 四旋翼飞行器轨迹跟踪控制器的设计与验证[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(3):741-749.
- FANG Y SH, CAO Y B, ZHAO Y SH. Design and validation of trajectory tracking controller for quadrotor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(3):741-749.
- [14] BARÁNEK R, ŠOLC F. Modeling and control of a hexacopter [C]. *Carpathian Control Conference*. IEEE, 2012:19-23.
- [15] 杨成顺. 多旋翼飞行器建模与飞行控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2013.
- YANG CH SH. Research on modeling and flight control technology of multi-rotor aircraft [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [16] 张翔. 多旋翼无人机姿态估计与控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2017.
- ZHANG X. A Research on pose estimation and control technology of multi-rotor UAVs [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [17] 杨翼. 四旋翼无人机鲁棒抗扰控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2017.
- YANG Y. Research on robust disturbance rejection control technology of quadrotor unmanned aircraft vehicle [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [18] 林旭梅, 王婵. 四旋翼飞行器的自适应鲁棒滑模控制器设计[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(7):1522-1528.

LIN X M, WANG CH. Design of adaptive robust sliding mode controller of quadrotor helicopter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36 (7): 1522-1528.

### 作者简介



王少辉, 2017 年于南京航空航天大学获得学士学位, 现为南京航空航天大学在读硕士研究生, 主要研究方向为无人飞行器建模与控制。

E-mail: chnwangsh@163.com

**Wang Shaohui** received his B. Sc. degree in 2017 from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics; now, he is a M. Sc. candidate in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interest includes modeling and

control of UAV.



杨忠 (通信作者), 分别在 1994 年和 1998 年于南京航空航天大学获得硕士学位和博士学位, 现为南京航空航天大学自动化学院教授, 主要研究方向为机器人和无人飞行器的设计与控制。

E-mail: YangZhong@nuaa.edu.cn

**Yang Zhong** (corresponding author) received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1994 and 1998, respectively; now, he is a professor in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interest includes the design and control of robots and UAV.