

悬挂伸缩刀具的树障清理空中机器人飞行控制方法

廖禄伟¹, 杨忠^{1†}, 王灿¹, 许昌亮¹, 徐浩¹, 王志永¹, 张秋雁²

(1. 南京航空航天大学大学自动化学院, 江苏南京 211106; 2. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州贵阳 550002)

摘要: 针对输电线路附近的树障进行清理问题, 本文提出了一种新型的悬挂伸缩刀具的树障清理空中机器人并进行了仿真和实物验证。首先, 对悬挂伸缩刀具的空中机器人进行了伸缩刀具重心变化下的动力学、运动学建模及接触建模。其次, 为避免空中机器人接触作业时机器人倾翻的问题, 设计了力估计器用于力感知和导纳控制器用于力控制。针对空中机器人非线性强耦合、伸缩刀具时参数扰动及作业时扰动的问题, 设计了线性自抗扰控制(LADRC)的机器人位姿控制器。再次, 数值仿真验证了导纳控制能有效避免空中机器人接触作业时产生倾翻的问题, 以及基于LADRC控制器的位姿控制具有良好的稳定性和抗扰性。最后, 通过实物飞行和接触作业测试, 进一步验证了本文悬挂伸缩刀具的树障清理空中机器人及其控制方法的有效性。

关键词: 树障清理; 空中机器人; 接触作业; 动力学建模; 线性自抗扰控制; 力控制

引用格式: 廖禄伟, 杨忠, 王灿, 等. 悬挂伸缩刀具的树障清理空中机器人飞行控制方法. 控制理论与应用, 2023, 40(2): 343–352

DOI: 10.7641/CTA.2022.11093

Flight control method of aerial robot for tree obstacle clearing with hanging telescopic cutter

LIAO Lu-wei¹, YANG Zhong^{1†}, WANG Can¹, XU Chang-liang¹, XU Hao¹,
WANG Zhi-yong¹, ZHANG Qiu-yan²

(1. College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 211106, China;
2. Electric Power Research Institute, Guizhou Power Grid Co., Ltd, Guiyang, Guizhou 550002, China)

Abstract: Aiming at the problem of clearing tree obstacle near power transmission lines, this paper proposes a new hanging telescopic cutter for tree obstacle clearing aerial robot contact and carries out simulation and physical verification. Firstly, the dynamics, kinematics and contact modeling of the aerial robot with telescopic tool hanging are carried out under the change of the tool center of gravity. Force estimator and admittance controller are designed for force sensing and force control in order to avoid the problem of robot tipping during contact operation. A linear active disturbance rejection (LADRC) robot pose controller is designed to solve the problems of nonlinear strong coupling, parameter perturbation and operation disturbance of aerial robots. The simulation results show that the admittance control can effectively avoid the tipping problem of aerial robots during contact operation, and the LADRC controller based pose control has good stability and disturbance resistance. Finally, physical flight and contact operation tests further verify the effectiveness of the proposed aerial robot and its control method.

Key words: trees pruning; aerial robot; contact operation; dynamics model; linear active disturbance rejection control; force control

Citation: LIAO Luwei, YANG Zhong, WANG Can, et al. Flight control method of aerial robot for tree obstacle clearing with hanging telescopic cutter. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(2): 343–352

收稿日期: 2021–11–10; 录用日期: 2022–03–15.

†通信作者. E-mail: YangZhong@nuaa.edu.cn; Tel.: +86 25-84892301-8013.

本文责任编辑: 龙离军.

贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2020]2Y044号), 中国南方电网有限责任公司科技项目(066600KK52170074), 航空科学基金(重点实验室类)项目(201928052006)资助, 南航研究生科研与实践创新计划项目(XCXJH20210316).

Supported by the Guizhou Provincial Science and Technology Projects (Guizhou-Sci-Co-Supp[2020]2Y044), the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd (066600KK52170074), the Aviation Science Foundation (Key Laboratory) Project (201928052006) and the Graduate Research and Practice Innovation Program of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (XCXJH20210316).

1 引言

输电线路是电力网络的重要组成部分,常常受到天气、植物、动物和人为等因素影响.其中,树木一旦与输电线路距离过近或发生接触,将带来放电短路的风险,因此树障已成为威胁电力线路安全与运行的“头号杀手”,针对这些树木进行清理,称之为树障清理.全国各地因树障而发生的停电事故和电网安全事故众多,各级供电部门每年投入巨大的人力、物力对树障进行清理,但效率低下,存在很大人身安全风险.因此,亟需研究树障清理的新型作业方式,安全可靠地实现高效、自动化的树障清理^[1].

树障清理空中机器人的出现,带来了一种全新的工作方式,改变了长期以来完全依靠人工清障的作业模式,可以做到精准切割树障,提高了作业安全性和作业效率,避免了人工作业带来的人身伤亡事故风险,同时也带来对物种及植物的保护.早在1989年, Cox等人^[2]提出了一种可伸缩的吊杆连接在直升机上用来修剪树枝. Molina等人^[3]基于多旋翼无人机开发了一款对脚斜钳子树障清理机器人,该机器人在作业前先要用钳子把机体悬挂在要切割的树干上,然后再进行切割作业,该机器人无人机机体上安装的作业装置与机体没有拉开足够的空间距离,因此机器人在作业时须飞入树内,导致螺旋桨极易受到枝叶的干扰而产生坠机风险. Azami等人^[4]针对高压电线附近的树障威胁开发了一款基于八旋翼无人机的悬挂链锯机器人.在国内,文献[5-7]中设计了一种新型的前推式的树障清理空中机器人,并通过线性自抗扰控制算法(active disturbance rejection controller, ADRC)^[8]实现了稳定的姿态控制,但是由于刀具超出了旋翼的投影面,其控制难度较大.因此,本文针对上述空中机器人的问题,提出了一种新型的悬挂伸缩刀具的树障清理空中机器人构型,该无人机能够从树障上方“剃头式”的切割树枝,具有更高的工作效率.同时,由于刀具和无人机设有可调节间距的伸缩结构,能有效保证无人机旋翼与树障的安全距离.

传统的飞行器大多数用于摄影、测绘、侦察等非接触作业环境,而本文提出的空中机器人用于接触作业,属于一种新型的作业方式.相比于传统的飞行器,无人机接触作业与外部环境发生交互作用,并能进行一些主动作业任务^[9-10].在接触控制上,由于闭环无人机平动动力学特性表现为弹簧-质量-阻尼的阻抗特性^[11],而导纳控制针对于表现为阻抗特性的系统具有较好的控制作用^[12],为了解决接触作业时出现倾翻的问题,本文提出并设计了导纳控制的方法.在力感知上,由于树障清理机器人与树木接触点不固定,无人机平台振动较大,通过力传感器直接感知接触力效果较差,因此本文根据空中机器人的运动模型

设计了力估计器的方法进行力感知.

此外,为了解决悬挂伸缩刀具空中机器人刀具伸缩带来参数变动和外部的扰动问题,本文采用线性自抗扰控制算法(linear active disturbance rejection control, LADRC)来实现清障空中机器人的位姿控制.在位姿控制上,悬挂刀具由于刀具伸缩长度会带来参数摄动和外部扰动,对无人机的控制要求更加困难.传统PID结构简单,但是PID参数的调整需要依赖经验并且对扰动抑制能力有限,很难到达较好的效果. H_∞ 、线性二次型调节器(linear quadratic regulator, LQR)、滑模控制都需要依赖数学模型,在实际系统中实现较为困难. ADRC是韩京清先生^[13]提出的新型抗扰控制算法,并且已经有较多成功应用于动力学参数摄动的多旋翼飞行器的例子^[14-15],结果表明ADRC具有良好抗扰能力和解耦性.但是非线性的ADRC参数多、没有明确的物理意义、不利于实际应用等缺陷,文献[16]提出的LADRC极大的简化了调参过程.

本文的研究思路如下: 1) 提出一种新型的悬挂伸缩刀具的树障清理空中机器人构型,通过非质心的刚体动力学和欧拉动力学对伸缩刀具重心变化下的空中机器人进行了动力学和运动学建模; 2) 考虑接触对机体的影响,进行接触建模并设计基于导纳控制的接触控制方法和基于姿态和加速度的力估计器; 3) 基于LADRC设计位姿控制器并分析稳定性; 4) 采用MATLAB进行仿真分析并通过实物飞行验证本文方法的有效性.本文的创新性如下: 1) 针对具体的输电线路应用需求,提出了一种新型的悬挂伸缩刀具的树障清理空中机器人构型,并且进行了运动建模; 2) 针对空中机器人接触作业容易倾翻的问题,对其进行了接触建模分析和力估计器设计,并将导纳控制器应用于本文的空中机器人,针对伸缩刀具及其飞行时会受到内外扰动的情况,设计了LADRC控制器; 3) 对本文提出的树障清理空中机器人进行了实物飞行验证,验证了本文提出的空中机器人构型和方法的有效性.

2 构型设计

悬挂伸缩刀具的树障清理空中机器人的构型如图1所示.该机器人系统由3部分组成: 1) 无人机平台; 2) 由多个锯盘组成的刀具系统; 3) 用于控制刀具伸缩长度的伸缩杆机构.

本文采用“北东地”坐标系为地理坐标系,记为 $\{O_E, X_E, Y_E, Z_E\}$,“前右下”坐标系为机体坐标系,记为 $\{O_B, X_B, Y_B, Z_B\}$,原点 O_B 与机身质心重合.定义伸缩的长度范围为 $l \in [0.5 \text{ m}, 1.5 \text{ m}]$.其中伸缩机构带动刀具伸缩,收缩长度 $l = 0.5 \text{ m}$,拉伸长度 $l = 1.5 \text{ m}$,后文分别采用收缩和伸长代表这两种状态.本文假设伸缩杆质量很小忽略不计,机器人系统为刚体.

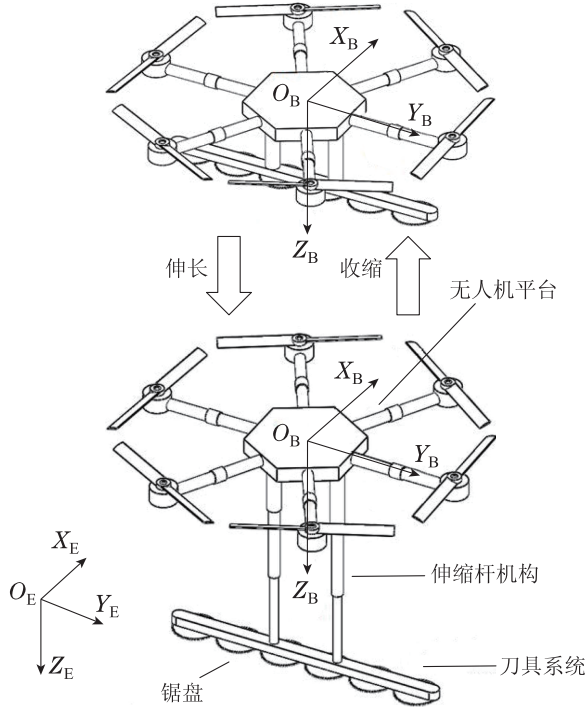


图1 悬挂伸缩刀具的树障清理空中机器人

Fig. 1 Aerial obstacle clearing robot suspended with telescopic cutters

3 数学建模

3.1 动力学建模

设 m_b 为飞行器机体质量, m_s 为悬挂刀具质量, 总质量为 $m = m_s + m_b$. $\mathbf{R}_G^B = [x_G \ y_G \ z_G]^T$ 为机体坐标系中系统整体质心相对坐标原点的位置, $\mathbf{R}_S^B = [x_S \ y_S \ z_S]^T$ 为机体坐标系中悬挂刀具质心相对坐标原点的位置. 根据原点非质心的刚体运动学和欧拉动力学得到如下平动和转动动力学方程^[17]:

$$\mathbf{I}_O \dot{\boldsymbol{\Omega}}^B + m \mathbf{R}_G^B \times (\dot{\mathbf{V}}^B + \boldsymbol{\Omega}^B \times \mathbf{V}^B) = \mathbf{M}^B, \quad (1)$$

$$m(\dot{\mathbf{V}}^B + \boldsymbol{\Omega}^B \times \mathbf{V}^B + \dot{\boldsymbol{\Omega}}^B \times \mathbf{R}_G^B + \boldsymbol{\Omega}^B \times (\boldsymbol{\Omega}^B \times \mathbf{R}_G^B)) = \mathbf{F}^B. \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\Omega}^B = [p, q, r]$ 为机体系中的角速度, $\mathbf{V}^B = [u, v, w]$ 是机体系中的线速度, \mathbf{F}^B 为系统在机体系所受合外力, \mathbf{M}^B 为系统在机体系所受的合外力矩, \mathbf{I}_O 为系统在机体坐标系的惯性张量. 根据惯性张量的平行轴定理, 并且过质心的惯性积为零, 表示如下:

$$\begin{cases} I_{O,xx} = I_{B,xx} + I_{S,xx} + m_S(y_S^2 + z_S^2), \\ I_{O,yy} = I_{B,yy} + I_{S,yy} + m_S(z_S^2 + x_S^2), \\ I_{O,zz} = I_{B,zz} + I_{S,zz} + m_S(x_S^2 + y_S^2), \\ I_{O,xy} = I_{O,yx} = m_S x_S^2 y_S^2, \\ I_{O,yz} = I_{O,zy} = m_S y_S^2 z_S^2, \\ I_{O,zx} = I_{O,xz} = m_S z_S^2 x_S^2, \end{cases} \quad (3)$$

式中: \mathbf{I}_B 为机身相对其质心的惯性张量, \mathbf{I}_S 为刀具相对其质心的惯性张量. 质心位置 \mathbf{R}_G^B 表示如下:

$$\mathbf{R}_G^B = \frac{m_B}{m_B + m_S} \mathbf{R}_S^B. \quad (4)$$

定义系统的控制量输入为 \mathbf{U} ^[18], 即

$$\mathbf{U} = [U_\phi, U_\theta, U_\psi, U_z]. \quad (5)$$

式中: U_ϕ, U_θ, U_ψ 分别为实际的滚转、俯仰、偏航、高度通道控制量输入.

合外力 \mathbf{F}^B 表示为

$$\mathbf{F}^B = \mathbf{C}_E^B \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U_z \end{bmatrix} + \Delta \mathbf{F}^B, \quad (6)$$

合外力矩 \mathbf{M}^B 表示为

$$\mathbf{M}^B = \mathbf{C}_E^B \begin{bmatrix} U_\phi \\ U_\theta \\ U_\psi \end{bmatrix} + \mathbf{R}_G^B \times \mathbf{C}_E^B \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} + \Delta \mathbf{M}^B, \quad (7)$$

式中: g 为重力加速度, \mathbf{C}_E^B 定义为地理坐标系到机体坐标系的旋转矩阵, $\Delta \mathbf{F}^B = [\Delta F_x \ \Delta F_y \ \Delta F_z]^T$, $\Delta \mathbf{M}^B = [\Delta M_x \ \Delta M_y \ \Delta M_z]^T$ 为系统未建模部分和内外干扰带来的扰动力和力矩. 整理式(1)–(2)得到

$$\mathbf{M} \dot{\mathbf{Q}} + \mathbf{C}(\mathbf{Q}) \mathbf{Q} = \mathbf{L}, \quad (8)$$

式中: \mathbf{M} 为系统涉及质量和惯量的广义惯性矩, 表示为

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & -mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & -I_{yy} & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{pmatrix}; \quad (9)$$

$\mathbf{Q} = [\mathbf{V}^B \ \boldsymbol{\Omega}^B]^T$ 为系统机体系的线速度和角速度; $\mathbf{L} = [\mathbf{F}^B \ \mathbf{M}^B]^T$ 为所受合外力和合外力矩; $\mathbf{C}(\mathbf{Q})$ 为涉及科里奥利力和向心力的矩阵. 将式(6)–(8)结合并展开得到动力学方程为

$$\dot{u} = -s_\theta g + ur - wq + x_G(q^2 + r^2) - y_G(pq - \dot{r}) - z_G(pq + \dot{q}) + \Delta F_x^B/m, \quad (10a)$$

$$\dot{v} = c_\theta s_\phi g + wp - ur + y_G(r^2 + p^2) - z_G(qr - \dot{p}) - x_G(qr + \dot{r}) + \Delta F_y^B/m, \quad (10b)$$

$$\dot{w} = U_z/m + c_\theta c_\phi g + uq - vp + z_G(p^2 + q^2) - x_G(qr - \dot{q}) - y_G(rq + \dot{p}) + \Delta F_z^B/m, \quad (10c)$$

$$\dot{p} = (U_\phi + (y_G c_\theta c_\phi - z_G c_\theta s_\phi)mg + (\dot{r} + pq)I_{xz} -$$

$$(r^2 - q^2)I_{yz} - (I_{xx} - I_{yy})qr - (pr - \dot{q})I_{xy} - m[y_G(\dot{w} - wq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] + \Delta M_x^B / I_{xx}, \quad (10d)$$

$$\dot{q} = (U_\theta - (z_G s_\theta + x_G c_\theta c_\phi)mg + (\dot{p} + qr)I_{xy} - (p^2 - r^2)I_{zx} - (I_{xx} - I_{zz})rp - (qp - \dot{r})I_{yz} - m[z_G(\dot{u} - ur + wq) - x_G(\dot{v} - uq + vp)] + \Delta M_y^B / I_{yy}, \quad (10e)$$

$$\dot{r} = (U_\psi + (x_G c_\theta s_\phi + y_G s_\theta)mg + (\dot{q} + rp)I_{yz} - (q^2 - p^2)I_{xy} - (I_{yy} - I_{xx})pq - (rq - \dot{p})I_{zx} - m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] + \Delta M_z^B / I_{zz}. \quad (10f)$$

3.2 运动学建模

运动学中不包含力和力矩的关系, 动力学模型主要描述位置与速度, 姿态角与角速率之间的关系. 系统的运动学方程如下:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\theta}}^E = \mathbf{W}_{BE}^T \boldsymbol{\Omega}^B, \\ \dot{\mathbf{P}}^E = \mathbf{C}_B^E \mathbf{V}^B, \end{cases} \quad (11)$$

式中: \mathbf{W}_{BE} 是从地理坐标系到机体坐标系的角速率变化矩阵, $\boldsymbol{\theta}^E$ 为地理坐标系下的欧拉角速度, \mathbf{P}^E 是系统在地理坐标系的位置.

3.3 接触建模

对于悬挂伸缩刀具空中机器人闭环系统以一定速度接触切割树木时, 如图2所示, 树木会施加给无人机 $\mathbf{F}_{\text{ext}}^E$ 的外力和刀具切割产生的外力矩 $\mathbf{M}_{\text{ext}}^B$. 无人机系统所受合外力和合外力矩写为

$$\begin{aligned} \mathbf{F}^B &= \mathbf{C}_E^B \left(\mathbf{F}_{\text{ext}}^E + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U_z \end{bmatrix} + \Delta \mathbf{F}^B, \quad (12) \\ \mathbf{M}^B &= \mathbf{C}_E^B \begin{bmatrix} U_\phi \\ U_\theta \\ U_\psi \end{bmatrix} + \mathbf{R}_G^B \times \mathbf{C}_E^B \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} + \\ &\quad \mathbf{R}_S^B \times \mathbf{C}_E^B \mathbf{F}_{\text{ext}}^E + \mathbf{M}_{\text{ext}}^B + \Delta \mathbf{M}^B. \quad (13) \end{aligned}$$

此时, 闭环无人机在外力作用下的位置响应类似于弹簧-质量-阻尼系统的动力学特性^[11]. 系统简化闭环平动动力学表示如下:

$$\mathbf{F}_{\text{ext}}^E(s) = (s^2 k_d + s k_s + k_m) \mathbf{X}(s), \quad (14)$$

式中: k_m 可以等效为位置的刚度, k_s 可以等效为位置的弹性, k_d 可以等效为位置的阻尼. 因此, 位置表现为阻抗的性质: 当有外力作用于弹簧阻尼系统上时系统会偏离平衡位置.

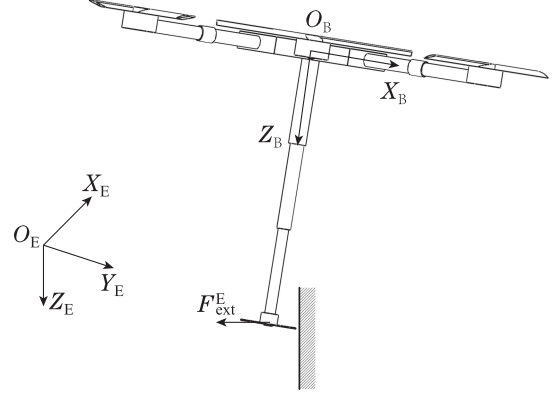


图2 接触作业接触力关系

Fig. 2 Contact operation contact force relationship

3.4 力估计器

接触作业时, 需要感知外界接触力, 而对于悬挂伸缩刀具空中机器人来说, 刀具和树木的接触位置不确定, 同时旋翼和刀具具有较大振动, 直接采用力传感器效果较差. 因此, 本文采用力估计器的方法对悬挂伸缩刀具空中机器人的接触力进行估计. 当悬挂伸缩刀具空中机器人在接触树木施加外力时, 树木也同样会施加反作用力, 如图2所示. 设机器人接触树木后保持恒定角度, 接触力在刀具进给的方向. 根据式(2)和式(6), 同时接触时角速度 $\boldsymbol{\Omega}^B = 0$, 得到力学关系为

$$m \dot{\mathbf{V}}^B = \mathbf{C}_E^B \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U_z \end{bmatrix} + \mathbf{C}_E^B \begin{bmatrix} F_{\text{ext}}^E \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

整理得到

$$\begin{cases} m\dot{u} = F_{\text{ext}}^E c_\theta c_\psi + mg(s_\phi s_\psi + c_\phi s_\theta c_\psi), \\ m\dot{v} = F_{\text{ext}}^E c_\theta s_\psi - mg(s_\phi c_\psi - c_\phi s_\theta s_\psi), \\ m\dot{w} = U_z - F_{\text{ext}}^E s_\theta + mg c_\theta c_\phi. \end{cases} \quad (16)$$

设航向角为固定值即 $\psi = 0$, 同时滚转通道保持稳定即 $\phi = 0$, 本机器人是低速低空空机器人, 风扰不构成剧烈的扰动, 忽略外部风扰带来的影响, 推导出简化的 F_{ext}^E 表达式为

$$F_{\text{ext}}^E = -(mg \tan \theta - m\dot{u}). \quad (17)$$

由上式可知, F_{ext}^E 由加速度、姿态角和无人机质量共同确定. 此时, 悬挂伸缩刀具空中机器人通过上式即可完成力估计.

4 控制方法研究

当空中机器人接触切割树木时, 传统的做法是以期望位置为控制输入, 然而这种做法存在极大的弊端, 当空中机器人接触切割树木而尚未割掉树木时, 空中机器人由于仍以期望位置为目标, 由上式(12)可知, 空中机器人将产生较大的接触力, 而接触力越大, 期望的 \mathbf{F}_d 越大, 导致期望姿态角 $\boldsymbol{\theta}_d$ 越大, 同时无人机控制器中一般存在积分环节会进一步增大姿态角, 通过

这一系列连锁反应从而导致姿态角超出正常可控范围引起空中机器人倾覆, 使用这种控制策略极易引起空中机器人倾覆导致重大的飞行事故. 传统位置控制已不适用于空中机器人接触作业, 因此, 需提出一套适用于接触作业的控制方法.

4.1 导纳控制

导纳控制是一种柔顺控制, 适用于表现为阻抗特性的系统. 导纳控制的基本思想是: 控制系统采用基于位置控制的内环和力控制的外环策略, 检测系统与外界的接触力, 通过导纳模型, 生成一个附加的位置, 此附加位置再去修正预先设定的位置轨迹, 最终送入位置控制内环, 完成最终的位置控制. 由上式(14)可知, 空中机器人接触作业时, 闭环系统表现为阻抗特性, 表现为输入为期望位置, 输出为期望力; 而导纳特性为输入期望力, 输出期望位置. 因此, 在接触作业时采用导纳控制能够有效的解决传统位置控制的弊端. 根据闭环系统的位置模型式(14)可以得到导纳控制位置误差 ΔX 和接触力误差 ΔF_{ext}^E 之间的关系为

$$\Delta X(s) = \frac{1}{s^2 k_d + s k_s + k_m} \Delta F_{\text{ext}}^E(s), \quad (18)$$

式中: $\Delta F_{\text{ext}}^E = F_d^E - F_{\text{ext}}^E$, $\Delta X = X_d^E - X^E$. 期望的接触力为 F_d^E , 实际的接触力为 F_{ext}^E , 期望的位置为 X_d^E , 实际的位置为 X^E . 根据式(14)(18), 最终期望接触力和外力的关系为

$$F_{\text{ext}}^E(s) = \frac{s^2 \hat{k}_d + s \hat{k}_s + \hat{k}_m}{s^2 k_d + s k_s + k_m} F_d^E(s), \quad (19)$$

式中: $\hat{k}_s, \hat{k}_m, \hat{k}_d$ 是导纳控制的可调参数, 从上式分析可知, 导纳控制作用下控制了输出力而不再直接控制期望位置, 实质上是利用了导纳和阻抗的对称性.

4.2 LADRC位姿控制器

自抗扰控制技术将作用于被控对象的所有不确定

因素归结为“未知扰动”, 并通过状态观测器进行估计补偿. 将悬挂伸缩刀具空中机器人位姿动力学模型解耦成为6个通道分别进行控制, 其结果将提高控制性能^[19]. 空中机器人总体控制系统结构如图3. 对其动力学方程式进一步的推导, 可得到解耦后的空中机器人六自由度模型

$$\begin{cases} \ddot{x} = f_x(x, \dot{x}, \omega_o x(t), \omega_i x(t)), \\ \ddot{y} = f_y(y, \dot{y}, \omega_o y(t), \omega_i y(t)), \\ \ddot{z} = f_z(z, \dot{z}, \omega_o z(t), \omega_i z(t)), \\ \ddot{\phi} = f_\phi(\phi, \dot{\phi}, \omega_o \phi(t), \omega_i \phi(t)), \\ \ddot{\theta} = f_\theta(\theta, \dot{\theta}, \omega_o \theta(t), \omega_i \theta(t)), \\ \ddot{\psi} = f_\psi(\psi, \dot{\psi}, \omega_o \psi(t), \omega_i \psi(t)). \end{cases} \quad (20)$$

式中: $f_i(\cdot)$ 为不确定项, $\omega_o i(t)$ 和 $\omega_i i(t)$ 为系统所受的外部扰动和刀具伸缩产生的扰动. (b_x, b_y, b_z) 是在 $1/m$ 附近的可调参数, $(b_\phi, b_\theta, b_\psi)$ 是在 $(1/I_{xx}, 1/I_{yy}, 1/I_{zz})$ 附近的可调参数, $(u_x, u_y, u_z, u_\phi, u_\theta, u_\psi)$ 是引入的中间控制量. 因此, 位姿控制器采用3个位置控制LADRC和3个姿态控制LADRC的内外环控制策略. 中间控制量 $(u_x, u_y, u_z, u_\phi, u_\theta, u_\psi)$ 与 $(U_\phi, U_\theta, U_\psi)$ 和 (U_z, ϕ_d, θ_d) 的关系为

$$\begin{cases} U_z = \sqrt{(mu_x)^2 + (mu_y)^2 + (mu_z - mg)^2}, \\ \phi_d = -\arcsin\left(\frac{mu_x s_\psi - mu_y c_\psi}{U_\phi}\right), \\ \theta_d = -\arcsin\left(\frac{mu_x c_\psi + mu_y s_\psi}{U_\theta}\right), \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} U_\phi \\ U_\theta \\ U_\psi \end{bmatrix} = W_{BE}^{-1} \begin{bmatrix} u_\phi \\ u_\theta \\ u_\psi \end{bmatrix}. \quad (22)$$

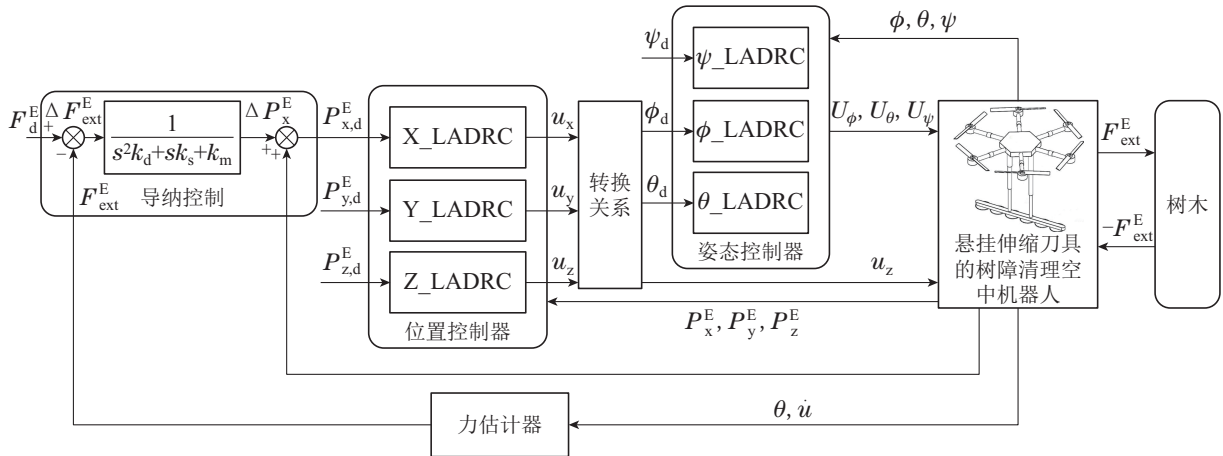


图 3 悬挂伸缩刀具空中机器人系统控制结构

Fig. 3 Control structure of hanging telescopic cutting tool aerial robot system

以俯仰通道 θ 为例进行设计:

假设总扰动为 $\varepsilon_\theta(t) = f_\theta(\cdot)$, 令 $x_3 = \varepsilon_\theta$ 为 θ 俯仰通道的总扰动, ε_θ 可导, $\dot{x}_3 = h$, 则俯仰通道的模型可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \theta, \\ \dot{x}_2 = x_1, \\ \dot{x}_3 = x_2 + u_\theta/I_{yy}, \\ \dot{x}_4 = h, \end{cases} \quad (23)$$

式中: x_1, x_2, x_3 分别为俯仰角、俯仰角速度和俯仰通道的扩张状态观测量. 设计如下的线性扩张状态观测器 (linear extended state observer, LESO) 可将俯仰通道中的总扰动估计出来:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1(z_1 - x_1), \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2(z_1 - x_1) + b_0 U_\theta, \\ \dot{z}_3 = -\beta_3(z_1 - x_1), \end{cases} \quad (24)$$

式中: $z_i, i = 1, 2, 3$ 为 x_i 的观测值; β_i 为观测值增益, $\beta_1 = 3\omega_o, \beta_2 = 3\omega_o^2, \beta_3 = \omega_o^3$, 其中 ω_o 为观测器的带宽; $b_0 = 1/I_{yy}$. 因此, LESO可以估计得到扰动值, 在俯仰通道中引入相应的补偿, 可实现对扰动的抑制.

令控制律为 $u_\theta = (u_1 - z_3)/b_0$, 设计基于PD控制律的反馈控制量, 可得最终的线性反馈控制 (linear state error feedback, LSEF) 律为

$$\begin{cases} U_\theta = (u_1 - z_3)/b_0, \\ u_1 = k_p(\theta_d - z_1) + k_d z_2, \end{cases} \quad (25)$$

式中: θ_d 为期望俯仰角, k_p 为比例增益, k_d 为微分增益. 设 $k_p = \omega_c^2, k_d = 2\omega_c$, 其中 ω_c 为控制器带宽.

4.3 稳定性分析

对上节建立的俯仰通道闭环控制回路进行稳定性分析. 对式(24)–(25)进行拉普拉斯变换可得

$$\begin{cases} z_1(s) = \frac{3\omega_o s^2 + 3\omega_o^2 s + \omega_o^3}{(s + \omega_o)^3} \theta(s) + \frac{bs}{(s + \omega_o^3)} U_\theta(s), \\ z_2(s) = \frac{3\omega_o s^2 + 3\omega_o^2 s + \omega_o^3}{(s + \omega_o)^3} \theta(s) + \frac{(s + \omega_o)bs}{(s + \omega_o^3)} U_\theta(s), \\ z_3(s) = \frac{\omega_o^3}{(\omega_o)^3 s^2} \theta(s) + \frac{b\omega_o^3 s}{(s + \omega_o^3)} U_\theta(s), \end{cases} \quad (26)$$

$$U_\theta(s) = \frac{\omega_c[\theta(s) - z_1(s)] - 2\omega_c z_2(s) - z_3(s)}{b_0}. \quad (27)$$

将式(26)带入式(27)整理可得 U_θ 与 θ 之间的关系

$$U_\theta(s) = \frac{(s + \omega_c)^3}{(s + \omega_o)^3 + 2\omega_c s + (\omega_c^2 + 6\omega_c \omega_o)s - \omega_o^3} \times \frac{1}{b_0} [\omega_c^2 \theta_d(s) - \frac{K_1 s^2 + K_2 s + K_3}{(s + \omega_o)^3}] \theta(s),$$

其中

$$\begin{cases} K_1 = 3\omega_c^2 \omega_o + 6\omega_c \omega_o^2 + \omega_o^2, \\ K_2 = 2\omega_c^2 \omega_o^2 + 2\omega_c \omega_o^3, \\ K_3 = \omega_c^2 \omega_o^3. \end{cases} \quad (28)$$

假设LESO可对扰动进行较好的估计, 忽略LESO对总扰动估计 z_3 和实际总扰动 ε_θ 之间的误差, 将式(23)进行拉普拉斯变换, 可得

$$\theta(s) = \frac{b}{s^2} U_\theta + \frac{1}{s^2} z_3(s). \quad (29)$$

联立式(26)–(28)(30), 得俯仰通道的闭环传递函数为

$$G(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_c^2}. \quad (30)$$

根据Routh判据, 当满足 $2\omega_c > 0$ 并且 $\omega_c^2 > 0$ 时, 俯仰通道闭环传递函数的全部极点都在左半平面, 系统在输入、输出均有界的条件下稳定. 由于 ω_c 为控制器的带宽, 其恒大于零, 因此, LADRC解耦控制器稳定性得以证明^[20].

5 实验验证

5.1 仿真参数

基于MATLAB/Simulink环境下搭建悬挂刀具无人机的仿真模型, 无人机系统的参数见表1.

表1 系统参数

Table 1 System parameter		
参数	符号	值
飞行器机身重量	m_b	24 kg
刀具系统重量	m_s	6 kg
重力加速度	g	$9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
机身 x 轴转动惯量	$I_{b,xx}$	$8.66 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
机身 y 轴转动惯量	$I_{b,yy}$	$8.45 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
机身 z 轴转动惯量	$I_{b,zz}$	$16.26 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
刀具 x 轴转动惯量	$I_{s,xx}$	$0.35 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
刀具 y 轴转动惯量	$I_{s,yy}$	$1.05 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
刀具 z 轴转动惯量	$I_{s,zz}$	$1.26 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
旋翼升力系数	k_f	$8.65 \times 10^{-4} \text{ N}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})^2$
旋翼反扭矩系数	k_m	$3.36 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{m}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})^2$
电机最大转速	n_i	5500 rpm
刀具相对机身质心距离	d	1.5 m

以俯仰通道为例, 经过反复实验, 在收缩时得到系统最佳的控制参数 $b_0 = 0.15$, 选取观测器的带宽 $\omega_o = 50$, 控制器带宽 $\omega_c = 5$. PID参数经过多次尝试, 选择性能较好的参数为 $k_p = 1.5, k_i = 0.05, k_d = 0.5$, LQR经过多次尝试, 选择较好性能的参数为 $Q = \text{diag}[3.7, 0.2], R = 0.35$.

5.2 非割树仿真验证

1) 姿态控制仿真.

用PID, LQR和LADRC对机器人进行控制, 在第 1 s 设期望姿态为 $[5, 5, 5]^{\circ}$. 第 3 s 拉伸刀具, 第 5 s 期望姿态为 $[10, 10, 10]^{\circ}$. 收缩和拉伸时姿态响应曲线如图 4. 可以看出LADRC控制下的收缩和拉伸姿态响应都没有明显的超调和振荡, LQR控制下的收缩和拉伸姿态响应有较小的超调, 而PID控制下的收缩姿态响应有较小的超调, 控制伸长后超调和振荡周期变大. 因此相比之下, LADRC控制效果最好, LQR效果较好, 而PID效果较差.

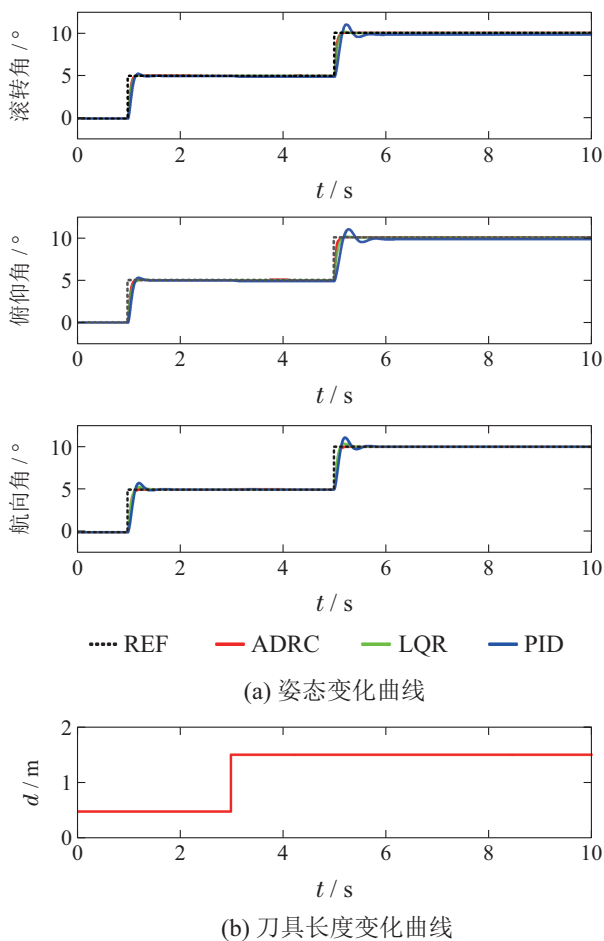


图 4 姿态仿真曲线
Fig. 4 Attitude simulation curve

2) 位置控制仿真

使用PID, LQR和LADRC对机器人进行控制, 初始时设置期望位置为 $[0, 0, -1]$ m, 第 1 s 时设置期望位置为 $[1, 1, -1]$ m. 第 3 s 拉伸刀具, 第 5 s 时设置期望位置为 $[1, 1, -2]$ m, 第 7 s 时设置期望位置为 $[2, 2, -2]$ m.

收缩和拉伸时位置响应曲线如图 5, 可以看出伸缩长度对高度的影响较小, 而主要影响水平位置. LADRC, LQR控制下的收缩和拉伸水平位置响应没有明显的超调和振荡, 而PID控制刀具拉伸后水平位置出现超调和振荡, 因此, LADRC和LQR控制效果比PID更好.

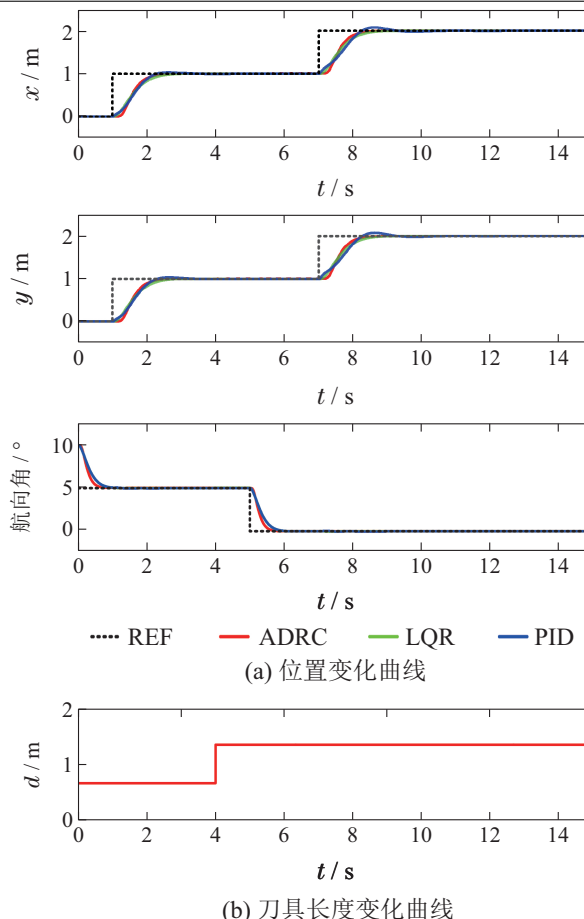


图 5 位置仿真曲线

Fig. 5 Position simulation curve

3) 干扰下的位姿控制仿真.

为了验证LADRC控制器在外部扰动下的性能, 考虑了以下空气动力学力和力矩扰动^[21]:

$$F_{\delta} = \begin{bmatrix} (\sin t + 1)m \\ (\cos t + 1)m \\ (\sin(0.5t) + 1)m \end{bmatrix}, \quad (31)$$

$$M_{\delta} = \begin{bmatrix} 0.3(\sin(0.5t) + 0.6)I_{xx} \\ 0.3(\cos(0.5t) + 0.6)I_{yy} \\ 0.3(\sin t + 0.6)I_{zz} \end{bmatrix}. \quad (32)$$

刀具在拉伸时使用LADRC, PID和LQR对无人机进行控制, 在第 1 s 设期望姿态为 $[10, 10, 10]^{\circ}$, 第 1 s 时设置期望位置为 $[1, 1, -1]$ m.

从图 6-7 可以看出, LADRC 控制器在干扰下位置姿态仍然可以保持稳定, 而PID, LQR控制下的位置姿态出现了振荡. 可以看出, LQR的抗扰能力最弱, PID其次, LADRC抗扰能力最强.

5.3 割树仿真验证

1) 位置控制下割树仿真.

刀具拉伸时从X轴方向进行割树, 为了模拟真实割树场景使用斜率为0.4 m/s的斜坡信号. 设期望位置

为 $[1, 0, -1]$ m, 在 $[0.5, 0, -1]$ m位置处有树木阻挡, 并区分树木较细和较粗两种情况, 假设细树于第5 s完成割树, 而粗树一直未割断.

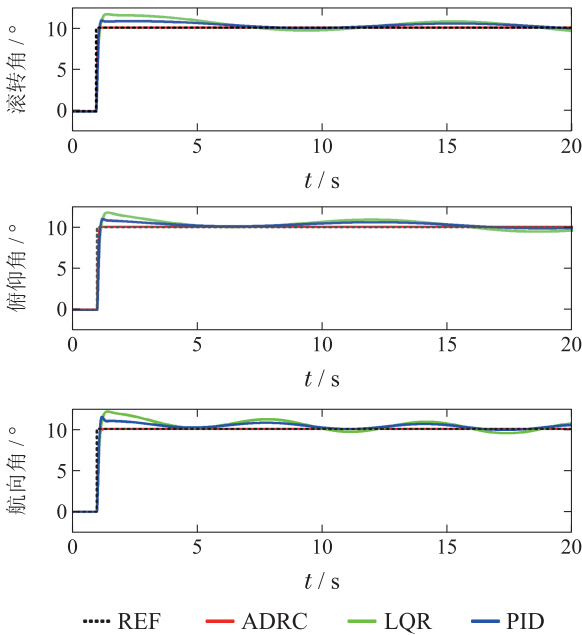


图6 扰动下的姿态仿真曲线

Fig. 6 Attitude simulation curve under disturbance

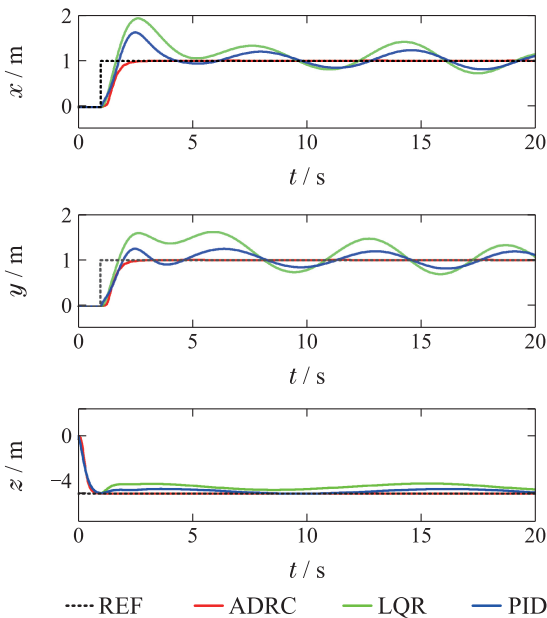
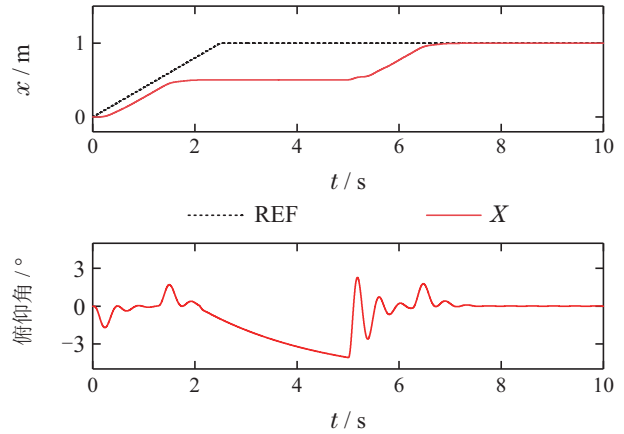


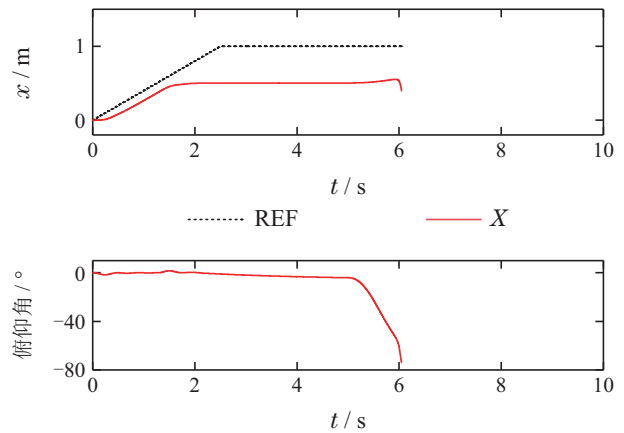
图7 扰动下的位置仿真曲线

Fig. 7 Position simulation curve under disturbance

从图8可以看出, 割树的时候由于树木的阻挡不能前进导致俯仰角不断变大. 割细树时由于能够快速割断, 从第5 s俯仰角能够回复到零. 割粗树时由于一直未割断, 俯仰角一直增大导致飞机倾翻仿真崩溃. 由此可以验证, 位置控制下割树具有极大的操作风险.



(a) 割细树仿真



(b) 割粗树仿真

图8 位置控制割树仿真

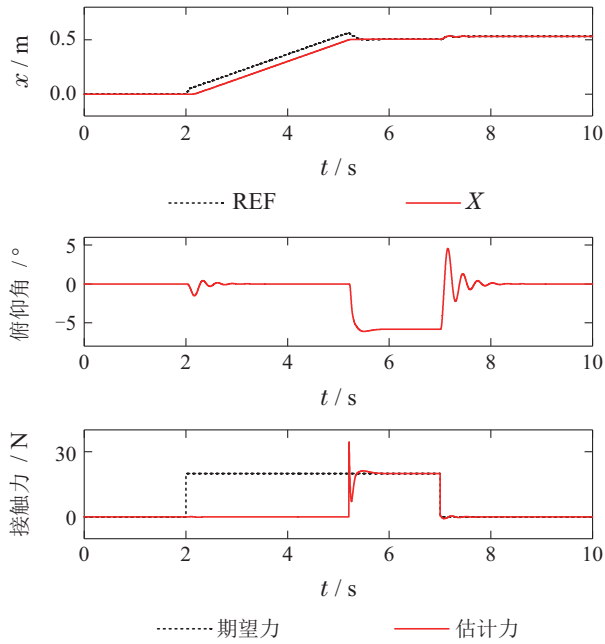
Fig. 8 X axis and pitch angle curve

2) 导纳控制下割树仿真.

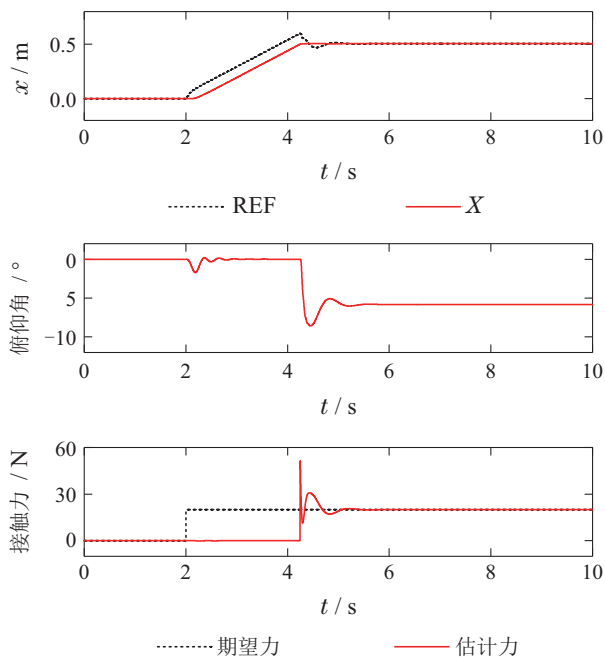
导纳控制参数经过多次调整, 选取 $\hat{k}_d = 100$, $\hat{k}_s = 1$, $\hat{k}_m = 1500$. 同样区分树木较细和较粗两种情况, 设第2 s期望接触力为20 N. 细树于第7 s完全割断, 而粗树一直未割断. 由图9可以看出, 加入导纳控制后, 开始由于没有接触力, 导纳控制类似于正常的位置控制. 初次在0.5 m接触树木时, 无人机会有较大的碰撞. 之后接触力减小直至期望力. 经过几次碰撞之后, 接触力稳定在20 N, 俯仰角也维持在 -5° 左右. 无人机在细树完全割断后能够快速回复到水平姿态, 在割粗树时也能保持角度稳定, 从而避免了无人机角度过大倾翻的风险. 因此, 导纳控制在本文空中机器人上有较好的应用效果.

5.4 实物验证

图10为本文设计的空中机器人系统实物, 其中包括了六旋翼无人机平台、伸缩机构和刀具系统, 机体和刀具采用碳纤维和铝合金结构, 飞行控制系统硬件采用开源Pixhawk飞控, 飞行数据可通过机载SD卡进行读取, GPS采用ZED-F9P模块, 动力系统采用好盈X8动力系统, 6个旋翼最大升力80 kg, 伸缩机构最大伸长1.5 m.



(a) 割细树仿真



(b) 割粗树仿真

图9 导纳控制割树仿真

Fig. 9 Admittance control cutting tree simulation



图10 空中机器人系统实物

Fig. 10 Physical aerial robot system

在室外进行实际割树如图11. 在靠近树木时切换至导纳控制模式, 设置期望力为20 N, 获取飞行的数据, 得到的曲线如图12所示, 可以看到在28 s附近开始割树, 俯仰角开始增大至6°左右. 同时有较大的接触力, 之后接触估计力接近期望力, 在35 s左右, 完成割树, 力和姿态都逐渐回到零附近.



图11 开始割树与完成割树

Fig. 11 Start and finish tree cutting

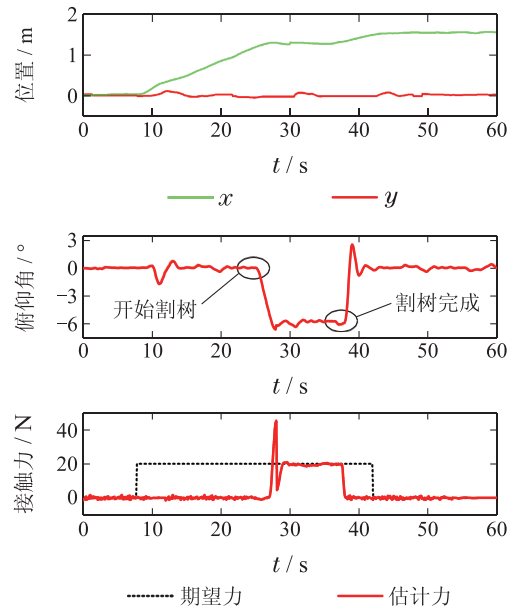


图12 实物飞行器割树曲线

Fig. 12 aircraft cut tree curve

6 结论

本文设计了一种用于树障清理的悬挂伸缩刀具空中机器人. 为了解决传统控制模型下接触作业出现翻机的风险, 对空中机器人接触作业时进行了力学分析, 得到机器人表现出阻抗的特性, 进而提出了导纳控制和力估计器的方法. 同时, 研究了基于LADRC的位姿控制方法, 设计了LADRC内外环控制器的结构. 最后, 通过MATLAB仿真和实物飞行, 验证了本文控制方法的有效性.

参考文献:

[1] FAN Ying, HUANG Yingnian, Gao Ju, et al. Problems and countermeasures of tree barriers in transmission line corridors. *Science and Technology Innovation and Application*, 2020, 294(2): 129 – 130.

- (樊莹, 黄应年, 高举, 等. 输电线路走廊树障存在问题及对策. 科技创新与应用, 2020, 294(2): 129 – 130.)
- [2] COX WC, HARTUNG J. *Airborne tree trimming apparatus*. US: US4815263A, 1989.
- [3] Molina J, Hirai S. Aerial pruning mechanism, initial real environment test. *Robotics and Biomimetics*, 2017, 4(1): 1 – 11.
- [4] AZAMI N, ZARAFSHAN P, KERMANI A M, et al. Design and analysis of an armed-ocrotor to prune trees near the power lines. *Proceedings of the International Conference of Iranian Aerospace Society*. Tehran, 2016: 1 – 6.
- [5] XU C, YANG Z, XU H, et al. Model predictive control for an aerial tree-pruning robot based on alternating direction method of multipliers. *Complexity*, 2021, 2021(4): 9981123.
- [6] WANG Shaohui, YANG Zhong, ZHANG Qiuyan, et al. Design of attitude controller for the aerial tree-pruning robot. *Journal of Instrumentation*, 2019, 40(6): 247 – 256.
(王少辉, 杨忠, 张秋雁, 等. 树障清理空中机器人的姿态控制器设计. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 247 – 256.)
- [7] XU C, YANG Z, JIANG Y, et al. The design and control of a double-saw cutter on the aerial trees-pruning robot. *The IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Kuala Lumpur: IEEE, 2018, 2095 – 2100.
- [8] LI Jiewen, YANG Zhong, ZHANG Qiuyan, et al. Design of auto disturbance rejection controller for cutting tool system of tree obstacle cleaning robot. *Applied Science and Technology*, 2020, 47(1): 68 – 73.
(李捷文, 杨忠, 张秋雁, 等. 树障清理机器人刀具系统自抗扰控制器设计. 应用科技, 2020, 47(1): 68 – 73.)
- [9] MENG X, HE Y, GU F, et al. Design and implementation of rotor aerial manipulator system. *2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Qingdao: IEEE, 2016, 673 – 678.
- [10] HAMAHA S, GEORGILAS I, RICHARDSON T. An adaptive-compliance manipulator for contact-based aerial applications. *The IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Auckland: IEEE, 2018, 730 – 735.
- [11] MENG Xiangdong, HE Yuqing, ZHANG Hongda, et al. Contact force control of aerial manipulator systems. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(1): 59 – 68.
(孟祥冬, 何玉庆, 张宏达, 等. 飞行机械臂系统的接触力控制. 控制理论与应用, 2020, 37(1): 59 – 68.)
- [12] OTT C, MUKHERJEE R, NAKAMURA Y. Unified impedance and admittance control. *2010 IEEE international Conference on Robotics and Automation*. Anchorage, AK: IEEE, 2010, 554 – 561.
- [13] HAN Jingqing. Auto disturbances rejection control technique. *Frontier Science*, 2007, 1(1): 25 – 32.
(韩京清. 自抗扰控制技术. 前沿科学, 2007, 1(1): 25 – 32.)
- [14] LU Kaiwen, YANG Zhong, ZHANG Qiuyan, et al. An active disturbance rejection flight control method for thrust-vectoring quadrotor with tiltable rotor. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(6): 1377 – 1387.
(卢凯文, 杨忠, 张秋雁, 等. 推力矢量可倾转四旋翼自抗扰飞行控制方法. 控制理论与应用, 2020, 37(6): 1377 – 1387.)
- [15] CHEN Zengqiang, LI Yi, YUAN Zhuzhi, et al. Attitude control of tandem rotor helicopter based on cascade active disturbance rejection control. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(9): 1219 – 1225.
(陈增强, 李毅, 袁著祉, 等. 串级自抗扰控制器在纵列式双旋翼直升机飞行姿态控制中的应用. 控制理论与应用, 2015, 32(9): 1219 – 1225.)
- [16] OTT C, MUKHERJEE R, NAKAMURA Y. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning. *Proceedings of the 2003 American Control Conference*. Denver, CO: IEEE, 2003, 4989 – 4996.
- [17] FAN Xiaoping, LI Bin. Modeling and active disturbance rejection control of quadrotor with variations of center of gravity. *Proceedings of the 36th Chinese Control Conference*. Dalian: Control Theory Committee of the Chinese Association of Automation, 2017, 973 – 978.
(樊晓平, 李斌. 重心变化四旋翼的建模与自抗扰控制, 第36届中国控制会议, 大连: 中国自动化学会控制理论专业委员会, 2017, 974 – 979.)
- [18] MATOUK D, GHEROUAT O, ABDESSEMED F, et al. Quadrotor position and attitude control via backstepping approach. *The 8th International Conference on Modelling, Identification and Control*. Algiers: IEEE, 2016, 73 – 79.
- [19] QI Haoran, QI Xiaohui. Research on quadrotor UAV based on linear active disturbance rejection control technique under wind-disturbance. *Flight Dynamics*, 2018, 36(2): 21 – 25.
(齐浩然, 齐晓慧. 风扰下的四旋翼无人机LADRC控制律设计. 飞行力学, 2018, 36(2): 21 – 25.)
- [20] YUAN Dong, MA Xiaojun, ZENG Qinghan, et al. Research on frequency-band characteristics and parameters configuration of linear active disturbance rejection control for second-order systems. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(12): 1630 – 1640.
(袁东, 马晓军, 曾庆含, 等. 二阶系统线性自抗扰控制器频带特性与参数配置研究. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1630 – 1640.)
- [21] RIDA MOKHTARI M, CHOUKCHOU BRAHAM A, CHERKI B. Extended state observer based control for coaxial-rotor UAV. *ISA Transactions*, 2016, 61: 1 – 14.

作者简介:

廖禄伟 博士研究生, 目前研究方向为无人机系统控制与管理, E-mail: llw@nuaa.edu.cn;

杨忠 教授 博士生导师, 目前研究方向为无人系统控制与管理、机器人仿生、机器视觉及应用, E-mail: YangZhong@nuaa.edu.cn;

王灿 硕士研究生, 目前研究方向为飞行器建模与控制技术, E-mail: wangcan@nuaa.edu.cn;

许昌亮 博士研究生, 目前研究方向为机器人建模与控制技术, E-mail: xuchangliang@nuaa.edu.cn;

徐浩 博士研究生, 目前研究方向为非线性控制技术, E-mail: ahaxuo@ahut.edu.cn;

王志永 硕士研究生, 目前研究方向为飞行器建模与控制技术, E-mail: wangzhiyong@nuaa.edu.cn;

张秋雁 工学学士 教授级高级工程师, 目前研究方向为测控技术, E-mail: 1072710113@qq.com.