

风机叶片在线修复机器人姿态控制系统设计

傅 坚¹, 任浩瀚¹, 周 彬¹, 周卫国¹, 张海峰², 方临朝²

(1. 上海电力实业有限公司, 上海 200001; 2. 上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:针对风机叶片在线修复机器人在升降及贴近叶片过程中易出现偏摆、晃动及贴近困难等问题,提出了一种基于四旋翼平台的风机叶片在线修复机器人姿态控制系统。首先,结合风机叶片在线修复作业特点,分析了机器人在升降与贴近叶片阶段的姿态调整过程及受力情况,在此基础上完成了姿态控制系统的总体设计。其次,基于牛顿-欧拉方程建立了四旋翼修复机器人的动力学模型,系统描述了机器人姿态与位置变化之间的耦合关系,为控制算法设计和仿真分析提供了理论依据。随后,利用 Simulink 平台搭建了基于 PID 控制策略的姿态与位置控制模型,分别对横滚角、俯仰角及空间位置响应特性进行了仿真验证。仿真结果表明,当横滚角和俯仰角初始偏离角度为 10° 时,所设计的姿态控制系统能够在 2 s 内恢复至稳定状态;在目标贴近距离设定为 30 cm 的情况下,机器人约在 4 s 内即可达到预期位置,系统响应速度快、稳定性良好。所提出的姿态控制系统能够有效抑制升降过程中的姿态扰动,提高机器人贴近风机叶片时的控制精度与稳定性,可为风机叶片在线修复作业提供可靠的技术支撑。

关键词:叶片修复;四旋翼;PID 控制;牛顿-欧拉方程;Simulink 仿真;动力学模型

中图分类号: TP242;TP273

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)02-0012-06

Design of attitude control system for online repair robot of wind turbine blades

FU Jian¹, REN Haohan¹, ZHOU Bin¹, ZHOU Weiguo¹, ZHANG Haifeng², FANG Linchao²

(1. Shanghai Electric Power Industry Co., Ltd., Shanghai 200001, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: A wind turbine blade online repair robot attitude control system based on a quadcopter platform is proposed to address issues such as misalignment, shaking, and difficulty in approaching the blades during lifting and approaching. Firstly, based on the characteristics of online repair of wind turbine blades, the attitude adjustment process and force situation of the robot during the lifting and approaching stages of the blades were analyzed. Based on this, the overall design of the attitude control system is completed. Secondly, a dynamic model of a quadcopter repair robot is established based on the Newton Euler equation, which systematically described the coupling relationship between the robot's attitude and position changes, providing a theoretical basis for control algorithm design and simulation analysis. Subsequently, a posture and position control model based on PID control strategy is built using the Simulink platform, and the response characteristics of roll angle, pitch angle, and spatial position are simulated and verified. The simulation results show that when the initial deviation angle of roll angle and pitch angle is 10°, the designed attitude control system can recover to a stable state within 2 seconds. When the target proximity distance is set to 30 cm, the robot can reach the expected position within about 4 seconds, and the system has fast response speed and good stability. The attitude control system proposed in this article can effectively suppress attitude disturbances during the lifting process, improve the control accuracy and stability of robots when approaching wind turbine blades, and provide reliable technical support for online repair operations of wind turbine blades.

Keywords: blade repair; quadcopter; PID control; Newton-Euler equations; Simulink simulation; dynamic model

大力发展新能源是我国实现“双碳”目标的有效途径。2022 年我国风电、光伏发电累计装机容量超过 7.5 亿 kW,其中风电机组总装机量累计达到 3.65 亿 kW。自 2011 年起,我国风电累计装机规模持续 11 年稳居全球第一^[1]。

随着风机服役年数的增加,叶片受高温日照、沙尘、冻

雨、盐腐蚀等影响,不可避免地出现涂层裂纹、沙眼、坑洞等损伤缺陷。若不及时进行修复,会影响风机寿命,甚至导致叶片断裂造成不可逆转的财产损失^[2]。风机叶片缺陷传统上主要依靠人工修复,由于高空作业环境恶劣,存在着较大安全风险;此外,对叶片进行大规模修复时,甚至需将叶片整个拆卸返厂维修,存在修复周期长,操作难度

收稿日期:2023-12-05;录用日期:2024-05-24

基金项目:国家自然科学基金项目资助(51905331)

作者简介:傅 坚(1965—),男,硕士,正高级工程师,研究方向:风电运维。

通信作者:张海峰(1982—),男,博士,副教授,研究方向:特种机器人。

引用本文:傅坚,任浩瀚,周彬,等. 风机叶片在线修复机器人姿态控制系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2026,45(2):12-16,68. (FU Jian, REN Haohan, ZHOU Bin, et al. Design of attitude control system for online repair robot of wind turbine blades[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(2):12-16,68.)

大等诸多痛点^[3-5]。

近几年人工智能技术得到迅速发展,自动化、高效的在线修复方式正在逐渐取代传统修复。2020年,丹麦Rope Robotics公司发布了一款叶片在线修复机器人^[6],该机器人装配有机械臂,可携带工具对叶片进行巡检和打磨修复,采用人工牵绳的方式进行提升过程中的姿态调整和贴近叶片,智能化程度较低,调整速度慢;2022年,上海扩博智能技术有限公司研究了一款可对叶片前缘腐蚀进行修复的机器人^[7],利用无人机将机器人携带至叶片边缘安装夹紧吸附后方可展开作业,携带重物对无人机本就要要求较高,同时还需对其精准控制,作业难度大。

上述风机叶片在线修复机器人姿态控制的不便以及贴近叶片困难等问题,对机器人的姿态调整和平稳控制提出了巨大挑战。哈尔滨工业大学的ZHAO Q等^[8]提出了一种四旋翼玻璃幕墙清洗机器人,在作业过程中通过改变四旋翼的转速来调整机器人的姿态,防止碰撞损坏玻璃和抵抗横向风干扰;北京航空航天大学丁希仑等^[9]设计了一种多旋翼多功能的空中机器人,利用非线性轨迹线性化控制法对机器人空中姿态进行控制,实现壁面运动时步态稳定;南昌大学的何子翔等人设计了一款四旋翼的壁面清洗机器人^[10],利用可倾转的旋翼保持机器人动态风载下的稳定,并配合舵轮进行无偏移地移动。

本文提出一种基于四旋翼的风机叶片在线修复机器人姿态控制系统设计,对机器人进行动力学建模,并在Simulink环境下进行姿态角和位置的仿真实验,解决了风机叶片在线修复机器人在空中姿态调整和平衡控制困难问题。

1 机器人姿态调整及受力分析

1.1 基于四旋翼的姿态调整分析

图1为叶片迎风面修复作业示意图,机器人依靠风机顶端提前安装好的升降装置向上运动,受横向风及提升速度变化的影响,机器人易产生左右晃动及前后摇摆,若不及时处理会有撞击叶片或绳索缠绕的风险。到达预设提升高度后,还需将机器人整体贴近叶片完成吸附从而开始修复工作。

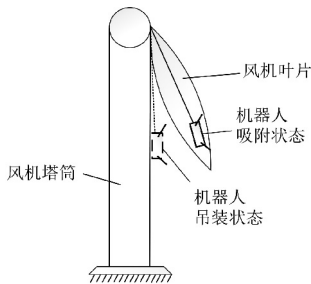


图1 修复机器人作业示意图

Fig. 1 Schematic diagram of repairing robot operation

针对提升过程中的偏摆、晃动及贴近叶片困难等问题,采用四旋翼结构实现修复机器人的姿态控制,结构如图2所示。机器人由本体结构与4个旋翼构成的。旋翼

布置采用“X”型对称分布,为了降低修复机器人的控制难度,采用正反桨叶安装的方式来抵消旋翼工作时自身所产生的扭矩。其中,1号和3号旋翼逆时针旋转,搭载反转桨叶;2号和4号旋翼顺时针旋转,同时搭载正转桨叶^[11]。

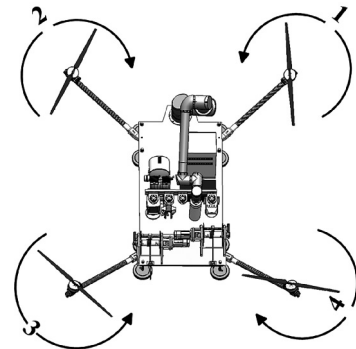


图2 在线修复机器人四旋翼结构

Fig. 2 Online repair robot quadcopter structure

修复面为叶片迎风面时,为防止旋翼碰撞损坏叶片,应将机器人底盘面向塔筒一侧安装,提供正向拉力使机器人贴近叶片;修复面为叶片背风面时,机器人底盘应远离塔筒一侧,提供反向推力。机器人出现左右摇摆时,适当增加或减少左右两侧桨叶的转速;同理,机器人出现上下摇摆时,增加或减少上下两侧桨叶的转速即可。

1.2 机器人受力分析

叶片与塔筒之间存在一定倾角 θ ,为满足机器人的姿态控制系统拉力及推力要求,须对机器人在空中的受力情况进行分析,从而选取合适的旋翼并设计硬件系统。机器人修复背风面叶片时贴附瞬间的受力简图如图3(a)所示,在此临界状态下机器人受重力 G 、绳索拉力 F_t 以及旋翼产生的合力 T ,修复迎风面时贴附瞬间的受力简图如图3(b)所示。

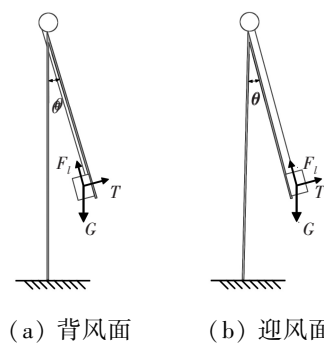


图3 机器人受力简图

Fig. 3 Schematic diagram of robot force

由于螺旋桨产生的拉力总是与桨平面垂直,设四个旋翼的拉力分别为 F_1, F_2, F_3, F_4 ,则其产生的合力 T 为

$$T = \sum_{i=1}^4 F_i = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = k(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \quad (1)$$

其中, k 为影响旋翼拉力的综合影响因数, ω 为旋翼的转速。

以修复面为叶片迎风面为例,为完成机器人吸附则螺旋桨需产生正向的拉力,在图3(b)所示吸附临界情况下,

此时修复机器人在叶片上受绳索的拉力 F_l 、重力 G 、以及旋翼的拉力 T ，将所有的力在正交坐标系下分解，得到 x 方向的分力为

$$T \cdot \sin \theta + F_l \cdot \cos \theta = G \quad (2)$$

y 方向的分力为

$$F_l \cdot \sin \theta = T \cdot \cos \theta \quad (3)$$

可得，旋翼拉力

$$T = \frac{G}{\cot \theta \cos \theta + \sin \theta} \quad (4)$$

同理，当修复面为叶片的背风面时，如图 3(b) 所示，机器人需旋翼提供推力靠近叶片，直至吸盘与叶片表面接触并贴附，此时旋翼产生的推力与前一种情况的拉力对于机体来说应是一对大小相同方向相反的力。

2 姿态调整控制系统设计

2.1 系统硬件设计

姿态控制系统的目的是实现机器人提升过程中保持动态稳定，到达预设高度后贴近叶片。姿态控制系统上电后，首先应完成自检，自检的内容包括旋翼是否通电正常以及模块初始化。根据迎风面和背风面两种不同修复情况设置旋翼旋向，传感器检测提升过程中机器人姿态动态变化，通过主控调节输入信号。提升至预设高度后，依据距离传感器获取机器人与叶片间的位置信息，逐渐增大旋翼拉力直至贴近叶片完成吸附，系统控制流程图如图 4 所示。

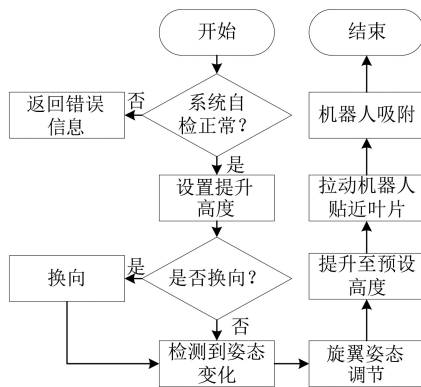


图 4 系统流程图

Fig. 4 System flowchart

对风机叶片在线修复机器人姿态控制系统进行硬件设计，根据受力分析选取合适拉力的旋翼，由于旋翼是无刷电机只能进行单向旋转，不能通过改变脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 的占空比实现反向，且拉力始终垂直于桨平面向上，无法提供反向推力^[12]。故设计如图 5 所示的换向方案，通过继电器来改变三相电流任意两根线路连接来实现换向。

此修复机器人的姿态调整系统主要依靠直流电源供电，电源通过分电板分别与四个电调相连，电调采集到 PWM 信号来将输入电源转换成不同的电压，输出到电机从而控制转速。同时，电源经过降压模块后为主控供电，

主控连接陀螺仪采集机器人本体姿态信息，底部激光测距器获取修复机器人底板与风机叶片之间的距离。总体硬件结构如图 6 所示。

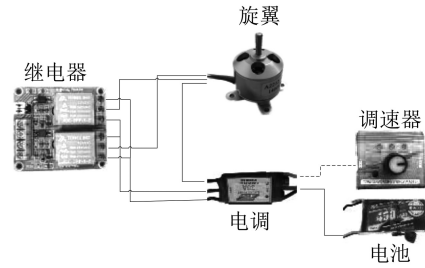


图 5 换向方案

Fig. 5 Reversing scheme

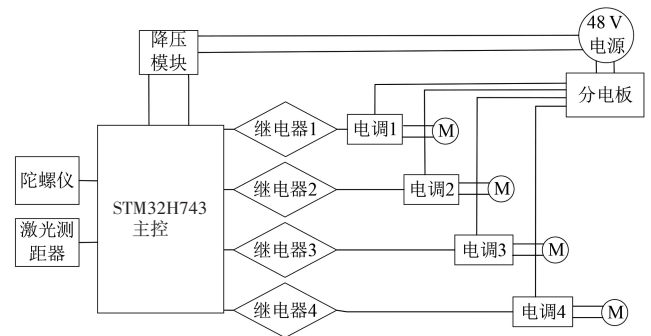


图 6 硬件架构

Fig. 6 Hardware architecture

主板选用 STM32H743 芯片，它采用 ARM Cortex-M7 内核，支持多种通讯接口，同时还具备低功耗和强大处理能力的优点。利用 Altium Designer 设计了 PCB 板，对硬件资源进行了整合，方便电机信号线的连接与调试。

2.2 姿态控制设计

姿态控制与位置控制均采用 PID 进行控制，PID 控制是自动控制中常用的方法，具有结构简单、效果较好等优势^[13-14]。离散后的 PID 公式为

$$u_n = k_p e_n + k_i \sum_{j=0}^n e_n \Delta t + \frac{k_d(e_n - e_{n-1})}{\Delta t} \quad (5)$$

姿态控制中，系统所输入的控制信号即为期望的姿态角，即平行于风机叶片表面。利用 MPU9250 得出当前姿态，姿态解算得出欧拉角作为被控制量与输入的期望值作差得出误差值，然后不断通过比例^[15]-积分-微分控制消除误差得到校正量，并转换为电调所能接收的 PWM 信号进行调速，姿态控制框图如图 7 所示。

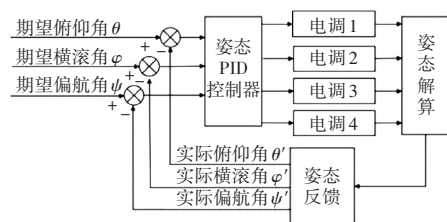


图 7 姿态控制框图

Fig. 7 Attitude control block diagram

位置控制与姿态控制类似,利用机器人底座的激光测距器获取叶片与底座之间的实际距离,与期望距离作比较,通过PID控制器来消除期望距离与实际距离的差值,从而达到目标距离的控制。

3 动力学建模与仿真

3.1 机器人动力学建模

四旋翼系统有4个可控变量,但却有6个自由度,是欠驱动系统^[16]。为了建立机器人的仿真模型,需对其动力学模型进行研究。这里提出3点假设来对机器人的模型进行简化。

- 1) 风机叶片在线修复机器人的结构对称。
- 2) 修复机器人的几何中心与重心重合。
- 3) 旋翼产生的力全部作用在机器人上,损耗可忽略不计。

建立基于大地的世界坐标系 E 和与修复机器人固连的本地坐标系 B ,如下图8所示。定义机器人在地面坐标系中的线性位置向量为 $T^E = [x, y, z]$,角度向量为 $\theta^E = [\phi, \theta, \psi]$,其中 ϕ 为偏航角, θ 为俯仰角, ψ 为横滚角。

地面坐标系与本地坐标系的转换矩阵 R 表述为

$$R = \begin{pmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta & c\psi s\theta & s\psi s\theta & c\psi \theta c\phi & -s\psi \theta c\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta & s\psi s\theta & -c\psi s\theta & s\psi \theta c\phi & c\psi \theta c\phi \\ -s\theta & c\theta & 0 & 0 & c\theta c\phi & s\theta c\phi \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中, c 表示余弦函数 \cos , s 表示正弦函数 \sin 。

$$F_E = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\cos\psi \sin\theta \sin\phi - \sin\psi \cos\theta) \times F_l + (\cos\psi \sin\theta \cos\phi + \sin\psi \sin\phi) \times T \\ (\sin\psi \sin\theta \sin\phi + \cos\psi \cos\theta) \times F_l + (\sin\psi \sin\theta \cos\phi - \cos\psi \sin\phi) \times T \\ \cos\theta \sin\phi F_l + \cos\theta \cos\phi T \end{bmatrix} \quad (9)$$

这里,设机器人在 X_E, Y_E, Z_E 三轴方向上所受到的阻力系数分别为 K_x, K_y, K_z ,那么根据牛顿第二定律,机器人在地面坐标系上的受力为

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x - K_x \times \dot{x} \\ F_y - K_y \times \dot{y} - mg + F_l \\ F_z - K_z \times \dot{z} \end{bmatrix} \quad (10)$$

四旋翼在工作时,旋翼由于受到空气阻力作用,会产生使机器人姿态改变的偏航力矩。由于机器人本体自重较大,工作基本不会沿着 Y_B 轴转动,偏航力矩可以忽略不计。设俯仰力矩为 Q_2 ,横滚力矩 Q_1 ,旋翼中心距机器人几何中心之间的距离中心是 l ,得

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} = l \begin{bmatrix} F_4 + F_3 - F_2 - F_1 \\ F_3 + F_2 - F_1 - F_4 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

机器人的姿态控制中,通常基于角动量守恒定律对其姿态进行建模,设机器人本地坐标系 X_B, Y_B, Z_B 轴的力矩和转动阻力系数分别为 $M_\phi, M_\theta, M_\psi, K_\phi, K_\theta, K_\psi$,由于机器人结构对称,质量均匀,则转动惯量矩阵可以认作是对角

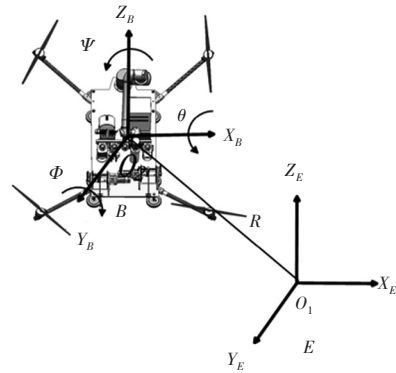


图8 机器人的本体坐标系与世界坐标系

Fig. 8 Robot's body coordinate system and world coordinate system

依据牛顿-欧拉方程,从位置和角度两方面入手来分析建立修复机器人的动力学模型,公式为

$$\begin{cases} F = m\dot{v} \\ M = \dot{H} \end{cases} \quad (7)$$

其中, F 为机器人所受合外力, v 为机器人的速度, M 为力矩之和, H 为机器人对地面的相对动量矩。

机器人基于本地坐标系 B 下的合外力矩阵可表示为

$$F_B = [0 \quad F_l \quad T] \quad (8)$$

其中, F_l 为绳子的牵引力

通过旋转矩阵 R 求得在世界坐标系 E 下的合外力表示为

阵,表示为

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_\phi/I_x \\ M_\theta/I_y \\ M_\psi/I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Q_1 - K_\phi \times \dot{\phi})/I_x \\ (Q_2 - K_\theta \times \dot{\theta})/I_y \\ (Q_3 - K_\psi \times \dot{\psi})/I_z \end{bmatrix} \quad (12)$$

综上,得修复机器人的动力学模型如下。

$$\begin{cases} \ddot{x} = (F_x - K_x \times \dot{x})/m \\ \ddot{y} = (F_y - K_y \times \dot{y} + F_l)/m - g \\ \ddot{z} = (F_z - K_z \times \dot{z})/m \\ \ddot{\phi} = (Q_1 - K_\phi \times \dot{\phi})/I_x \\ \ddot{\theta} = (Q_2 - K_\theta \times \dot{\theta})/I_y \\ \ddot{\psi} = (Q_3 - K_\psi \times \dot{\psi})/I_z \end{cases} \quad (13)$$

3.2 仿真分析

根据上述动力学模型,在MATLAB中使用Simulink建立四旋翼的PID仿真控制模型,如图9所示。

依据机器人的设计数据,经过推导计算得到机器人模型的各项参数如表1所示,并代入到PID仿真模型中。

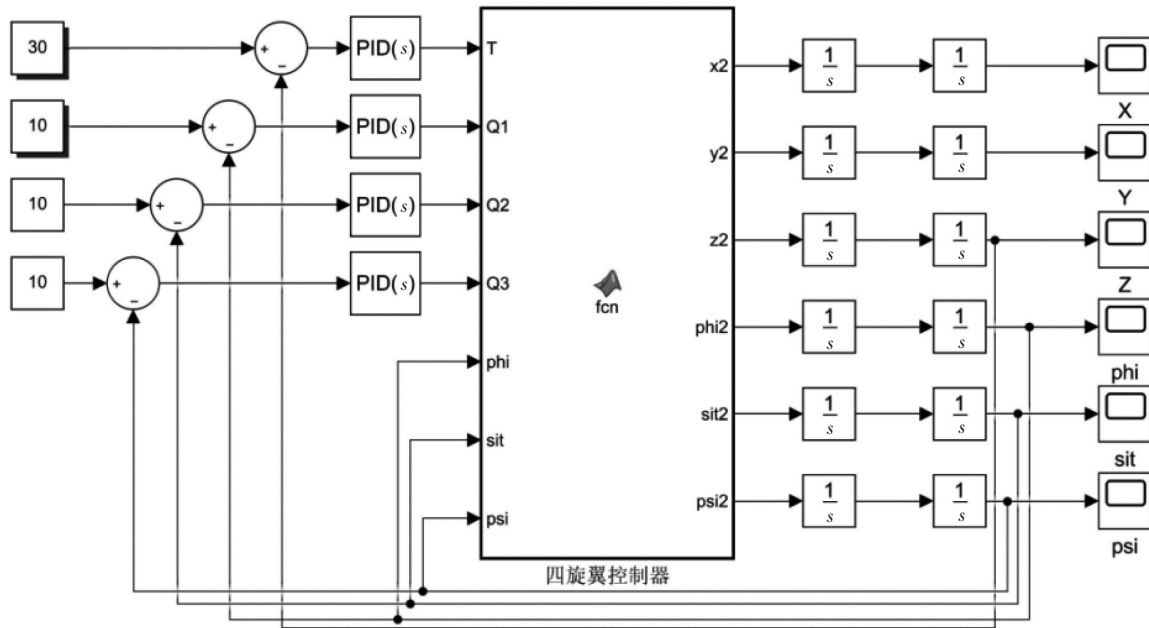


图9 四旋翼PID控制仿真模型

Fig. 9 Simulation model of four rotor PID control

表1 四旋翼模型参数

Tab. 1 Parameters of quadcopter model

参数类别	参数取值
整机重量 m	120 kg
重力加速度 g	9.8 m/s^2
旋翼距几何中心 l	1 382 mm
绕 X 轴转动惯量 I_x	17.85 kg/m^2
绕 Y 轴转动惯量 I_y	10.82 kg/m^2
绕 Z 轴转动惯量 I_z	22.82 kg/m^2

由于机器人自重较大,很难产生偏航角方向的偏移,故偏航角可忽略不计。模拟小扰动范围内机器人本体出现偏摆和晃动的姿态变化,给定横滚角、俯仰角的偏离角度各为 10° ,得到姿态角控制的响应曲线如图 10 所示,从图中可以看出横滚角与俯仰角在 2 s 左右能够达到稳定状态,而且各通道控制效果较好。

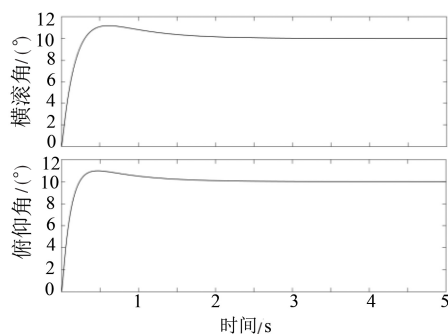


图10 PID仿真

Fig. 10 PID simulation

模拟机器人贴近叶片的过程,用PID来消除实际位置与期望位置的差值,给定机器人底座与风机叶片的目标距离值为 30 cm。经过示波器观察系统的响应曲线,仿真

结果表明系统能够在 4 s 左右快速响应,经过短暂的超调之后可迅速达到目标距离值并趋于稳定,仿真曲线如图 11 所示。

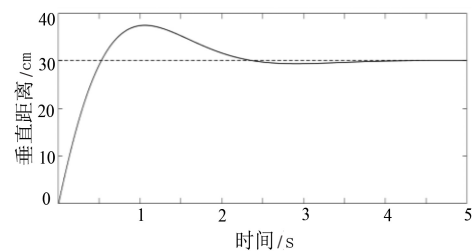


图11 机器人底座与叶片垂直距离仿真

Fig. 11 Simulation of vertical distance between robot bottom and blade

4 结论

本文基于风机叶片在线修复机器人的结构分析,提出了一种四旋翼的姿态控制系统,采用牛顿-欧拉方程建立了机器人动力学模型,通过仿真实验验证了姿态控制系统的有效性。主要结论如下。

1) 基于四旋翼的姿态控制系统能够实现机器人升降过程中横滚角和俯仰角的动态调整,且在 2 s 内达到稳定状态,提高了机器人提升过程中的稳定性。

2) 所提出的姿态控制系统在给定目标距离 30 cm 的情况下,机器人可在 4 s 左右达到预期位置,有效实现了机器人与叶片的贴合。

参考文献

[1] 武艺, 李然, 张晓明. 新型能源体系目标下中国气电发展趋势及应对策略[J]. 油气储运, 2025, 44(2): 135-144.

(下转第 68 页)