

用于清洗绝缘子的四旋翼无人机抗回冲力控制

万 能^{1†}, 白若蓉², 汪 晓¹, 郭可贵¹, 季海波²

(1. 国网安徽省电力有限公司 检修分公司, 安徽 合肥 230601; 2. 中国科学技术大学 信息科学技术学院, 安徽 合肥 230027)

摘要: 本文主要针对利用四旋翼无人机清洗绝缘子时受到的回冲力干扰及姿态控制问题, 提出了一种用于清洗绝缘子的无人机抗回冲力控制方法. 对于无人机系统, 本文运用非线性控制方法中的反步法来设计姿态控制器, 使其达到输入状态稳定, 并对外部扰动具有鲁棒性. 本文首先根据无人机运动模型建立了其动力学方程. 之后, 运用动量定理和流体力学中的伯努利方程对所受的回冲力进行建模. 然后, 运用反步法设计姿态控制器并证明其稳定性. 最后, 运用MATLAB对无人机系统进行仿真实验, 其结果证明了文中所提出的控制方法的有效性和鲁棒性. 本文所提出的控制方案可以避免目前已有的一些技术存在的缺陷, 并且为无人机抗扰动控制和绝缘子冲洗都提供了发展空间.

关键词: 无人机; 姿态控制; 绝缘子清洗; 反步法

引用格式: 万能, 白若蓉, 汪晓, 等. 用于清洗绝缘子的四旋翼无人机抗回冲力控制. 控制理论与应用, 2021, 38(4): 496 – 502

DOI: 10.7641/CTA.2020.00309

Anti backlash force control of quadrotor unmanned aerial vehicles for insulator cleaning

WAN Neng^{1†}, BAI Ruo-rong², WANG Xiao¹, GUO Ke-gui¹, JI Hai-bo²

(1. Maintenance Company of State Grid Anhui Electric Power Co. Ltd., Hefei Anhui 230601, China;

2. School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui 230027, China)

Abstract: In this paper, aiming at the problem of backlash force interference and attitude control when using quadrotor unmanned aerial vehicles (UAV) to clean insulators, a method of anti backlash force control for cleaning insulator of quadrotor UAV is proposed. For the UAV system, this paper uses the backstepping method in the nonlinear control methods to design the attitude controller to make the system stable in input to state and robust to external disturbance. In this paper, the dynamic equations of the quadrotor UAV attitude system is first established. Then, the Bernoulli equation in fluid mechanics and momentum theorem are used to model the backlash force. After that, an attitude controller is designed by backstepping method and its stability is proved. Finally, simulation experiments of UAV systems are performed by MATLAB. The results prove the effectiveness and robustness of the proposed control method. The control method proposed in this paper can avoid the shortcomings of some existing technologies and provide development space for anti disturbance control of UAV and insulator cleaning.

Key words: unmanned aerial vehicles (UAV); attitude control; insulator cleaning; backstepping

Citation: WAN Neng, BAI Ruorong, WANG Xiao, et al. Anti backlash force control of quadrotor unmanned aerial vehicles for insulator cleaning. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(4): 496 – 502

1 引言

电力作为现代社会一种至关重要的能源, 与人民的生产生活和经济发展都密不可分. 输电线路作为电力系统中不可或缺的一环, 其稳定安全的运行对国民生活和经济都至关重要. 据不完全统计, 输电线路频发的污闪、冰闪等事故造成的大面积停电已经给国家

带来了巨大的损失, 对国民的生活造成巨大不便^[1].

绝缘子是输电线路中一种用来固定带电导体的特殊绝缘控件^[2]. 由于绝缘子在工作过程中长期处于暴露的环境中, 周围大气中的灰尘颗粒极易附着在其表面上, 形成污秽层^[3]. 若不及时清洗绝缘子, 电网极易发生污秽闪络现象, 并造成供电系统短路故障^[4]. 故

收稿日期: 2020-05-29; 录用日期: 2020-11-06.

[†]通信作者. E-mail: wanneng500@foxmail.com; Tel.: +86 15256587653.

本文责任编辑: 杨辰光.

国网安徽省电力有限公司重点科技项目(52120319000B)资助.

Supported by the Key Scientific and Technological Projects of State Grid Anhui Electric Power Co. Ltd. (52120319000B).

而, 对输电线路尤其是绝缘子进行定期的清洗和维护是保障电力系统稳定运行的重要环节。

目前较为常用的对绝缘子进行清洗维护的有以下几种方法^[5-7]: 通过人工擦洗绝缘子表面, 这种方法操作简单易行, 但需要停电作业, 成本较高且安全性不高. 考虑到停电清洗对经济生产和日常生活都有较大影响, 所以对输电线路设备进行带电水冲洗是防止电网发生污闪、冰闪事故的简便有效且经济效益较高的方法^[8]. 部分电力公司通过载人直升机进行手持高压水枪冲洗, 但是直升机具有成本较高, 空域申请困难和一次性投资较大等缺点, 难以进行大规模推广^[9]. 因此, 开发基于无人机平台的高压带电水冲洗作业系统很有必要。

近年来, 无人机在军事战争、民用生活和科技研究等多个领域得到了广泛应用^[10-12]. 其便携性、安全性、易操作性等优点可以充分满足探查、拍摄、投递物资等多方面的应用需求^[13]. 使用无人机携带水箱对绝缘子进行带电水冲洗具有灵活性强、安全性高、成本较低、不要求停电作业、对生产生活影响较小等多方面的优势。

从20世纪80年代以来, 如何稳定有效地控制无人机是全世界专家学者研究的重点, 各种各样的控制方法也被提出了很多^[14-17]. 文献^[18]和文献^[19]中根据四旋翼无人机的线性模型, 使用传统控制算法中的PID方法和线性二次型调节器(linear quadratic regulator, LQR)方法对其进行控制. 但由于无人机模型的复杂性和非线性, 这两种控制方法都不能保证系统在非平衡点的稳定, 对扰动的反应也不够敏感. 另外, 有许多学者通过反馈线性化的方法来处理非线性系统的控制问题. 通过坐标变换或者输出反馈等方法将无人机系统简化为闭环形式的线性系统, 从而使控制器的设计更为简便和易于计算^[20]. 但是这种处理方式始终会丢掉无人机系统的部分信息, 使得无法对其进行精确控制. 故而, 采用非线性控制算法更适合无人机这种多耦合、复杂性高、非线性的系统. Yoo等人采用模糊滑模控制(fuzzy sliding mode control, FSMC)方法来增强系统的自适应性^[21]. 使其在负载变化下更加稳定, 对外界干扰的响应时间也有缩短. 本文使用的反步法也是非线性控制算法中的一种, 设计过程清楚简便, 适合用于解决无人机抗干扰的控制问题。

目前使用无人机平台进行绝缘子带电水冲洗在国内的研究较少, 具有很好的研究价值和意义, 并且可以在将来广泛推广, 有望成为清洗输电线路设备污秽的便捷有效、经济实惠的方法. 在这方面的研究可以极大程度上改变输电线路清洗工作的现状, 为带电水冲洗工作提供一种低成本、高效率、高频次的解决方

案. 使输电线路带电水冲洗可以更加常态化和高效化, 并且可以拓宽利用无人机平台进行清障作业等广泛的发展空间。

本文主要围绕无人机姿态控制的问题, 根据非线性控制理论, 设计姿态控制器使其保持稳定. 其中, 需要注意的一点是在使用无人机清洗绝缘子时, 由于力的作用是相互的, 无人机会受到回冲力的影响, 干扰其正常的稳定飞行. 如何设计控制器使无人机的姿态不受干扰是本文考虑的重点. 本文的整个流程框架如图1所示。

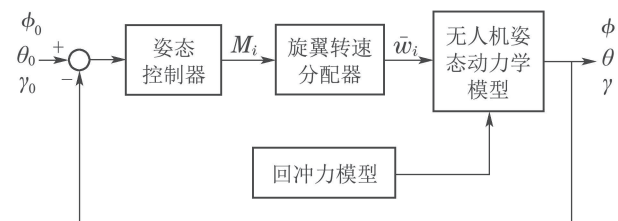


图1 无人机抗回冲力控制流程图

Fig. 1 Schematic diagram of anti backlash control of UAV

本文下面的结构是这样的: 在第2节给出无人机的姿态模型和回冲力模型; 第3节设计基于反步法的姿态控制器, 并证明其稳定性; 第4节使用MATLAB对无人机抗回冲力系统进行仿真实验; 最后, 第5节进行文章的总结。

2 动力学模型

本节分为两个部分: 第1小节中给出无人机姿态动力学模型; 第2小节里结合动量定理和伯努利方程, 建立无人机所受回冲力的模型。

2.1 无人机姿态动力学模型

本文使用惯性参考系与随体参考系之间的欧拉角来描述无人机在空间中的姿态. 假设无人机为刚体, 地面坐标系为惯性参考系, 固结于无人机上的坐标系(e_1, e_2, e_3)为动参考系. 坐标轴取在无人机的惯性主轴上, 组成右手正交坐标系. 坐标系的原点取在无人机的质心, 绕3个惯性主轴的转动惯量为(J_1, J_2, J_3). 无人机的3个姿态角为绕 e_1 的滚转角 γ , 绕 e_2 的偏航角 ϕ , 和绕 e_3 的俯仰角 θ 。

为了建立较为完备、准确的无人机动力学模型, 以及便于后续控制器的设计和推导, 本文做出如下几点假设:

假设1 无人机为刚体, 且其几何中心就是无人机的重心, 其转动惯量保持不变。

假设2 无人机的3个姿态角都是有界的: $-\frac{\pi}{2} < \gamma < \frac{\pi}{2}$, $-\pi < \phi < \pi$, $-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$ 。

忽略空气阻力, 建立无人机的姿态模型如图2所示。

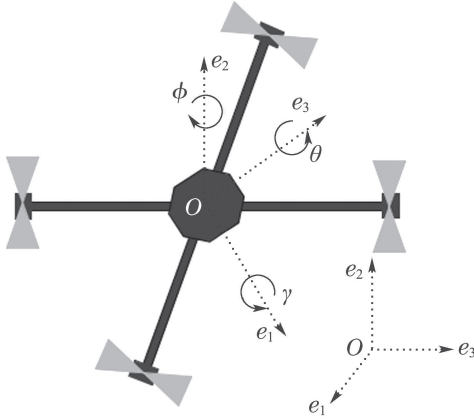


图2 无人机姿态模型图

Fig. 2 The attitude model of UAV

设无人机绕质心的角速度矢量在体坐标系下的3个分量为 $(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$, (M_1, M_2, M_3) 是作用在无人机上的控制力矩, F 为无人机受到的回冲力, l 为无人机水箱喷口到质心的距离. 假设无人机搭载水箱的喷口位于无人机的边缘中心点, 且与 e_1 轴重合. 喷水方向与前进方向重合, 喷口就正处于无人机的对称轴上, 故而无人机所受到的回冲力恰好是前进方向的反方向, 与 e_1 轴和对称轴都重合.

在实际工程作业时, 首先通过视觉系统定位到需要冲洗的绝缘子, 并控制无人机飞到指定位置, 当无人机保持稳定后正对绝缘子喷水. 喷水作业时无人机处于悬停状态, 故可看作回冲力 F 只对俯仰角 θ 有影响, 则建立无人机的数学模型表达式为

$$\begin{cases} \dot{\phi} = (\omega_2 \cos \gamma - \omega_3 \sin \gamma) / \cos \theta, \\ \dot{\theta} = \omega_2 \sin \gamma - \omega_3 \cos \gamma, \\ \dot{\gamma} = \omega_1 - (\omega_2 \cos \gamma - \omega_3 \sin \gamma) \tan \theta, \\ J_1 \dot{\omega}_1 = (J_2 - J_3) \omega_2 \omega_3 + M_1, \\ J_2 \dot{\omega}_2 = (J_3 - J_1) \omega_3 \omega_1 + M_2 + Fl, \\ J_3 \dot{\omega}_3 = (J_1 - J_2) \omega_1 \omega_2 + M_3. \end{cases} \quad (1)$$

2.2 回冲力模型

在本文中使用无人机搭载水箱清洗绝缘子. 因为力的作用是相互的, 无人机会受到回冲力的干扰. 在对回冲力进行建模的过程中, 假设喷水口是圆形横截面, 水的密度不因压力变化而变化, 喷水管口的示意图如图3所示.

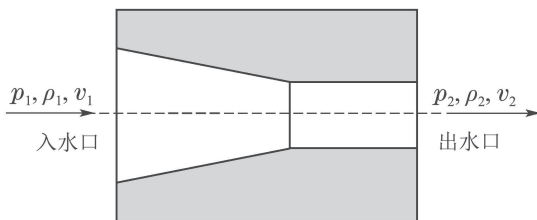


图3 喷水管口示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spray nozzle

在喷水出口截面内外两点应用动量定理有

$$F_0 \Delta t = mv_2 - mv_1, \quad (2)$$

其中: F_0 为无人机所受回冲力进入稳定状态后的值, Δt 为瞬时喷水时间, m 为喷出水的质量, v_2 为喷口外流体速度, v_1 为喷口内流体速度, 以及流量公式

$$m/\Delta t = \rho q, \quad (3)$$

其中: ρ 为流体的密度, q 为流体的流量. 联立这两个公式可得

$$F_0 = \rho q v, \quad (4)$$

其中 v 为喷出的流体速度, 也就是式(2)中的 v_2 , 为喷口外的流体速度.

式中喷水的流量和速度需要根据喷水口的压强和直径来计算. 根据流体力学中的伯努利方程, 选取喷口横截面内外两点有

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho_1 g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho_2 g} + \frac{v_2^2}{2g}, \quad (5)$$

其中: z_1, z_2 为喷口内外两点高度, p_1, p_2 为喷口内外的静压力, ρ_1, ρ_2 为喷口内外流体密度, v_1, v_2 为喷口内外流体速度, g 为重力加速度. 两截面之间的连续性方程为

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2, \quad (6)$$

其中 A_1, A_2 为两截面的面积.

假设喷嘴为圆形横截面, 即有 $A = \frac{\pi d^2}{4}$, 可得

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho_1 [1 - (\frac{d_2}{d_1})^4]}}, \quad (7)$$

其中: d_1 为喷嘴入口处直径, d_2 为喷嘴出口处直径. 对于工程应用连续水射流有 $(\frac{d_2}{d_1})^4 \ll 1$, 同时考虑到 $p_1 \gg p_2$, 得出圆锥形喷嘴出口射流流速的简化表达式($p_1 = p, \rho_1 = \rho$), 以及射流流量公式

$$v = \sqrt{\frac{2p}{\rho}}, \quad (8)$$

$$q = vA = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2p}{\rho}}. \quad (9)$$

将上述流体流速和流量的表达式代入式(4)可得稳定状态时的反冲力表达式为

$$F_0 = \rho q v = \frac{\pi}{2} d^2 p. \quad (10)$$

本文中将打开喷水开关到回冲力保持稳定的这一段时间的动态过程近似看作是一阶惯性环节, 经过一个过渡时间 T 达到稳定状态, 故回冲力的动态系统 F 的表达式为

$$T\dot{F} + F = F_0, \quad (11)$$

并可解出

$$F = -F_0 \cdot e^{-\frac{1}{T}t} + F_0. \quad (12)$$

3 控制器设计

在本节中, 给出无人机姿态控制器的设计, 使其在受到回冲力和其他未知外部扰动的时候可以保持稳定飞行, 完成冲洗绝缘子的任务. 为了使分析过程更加连续和完整, 首先分析更具一般性的系统

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + L(x)z + d_1(t), \\ \dot{z} = y(x, z) + N(x, z)u + d_2(t) + F, \\ F_0 = T\dot{F} + F, \end{cases} \quad (13)$$

式中: 向量函数 $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, $y: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$; 矩阵函数 $L: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$, $N: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$; 扰动向量函数 $d_1: [0, \infty] \rightarrow \mathbb{R}^n$, $d_2: [0, \infty] \rightarrow \mathbb{R}^n$. 设 f, y, L, N 在所讨论的定义域内是光滑函数, 且 $f(0) = 0$. 对于上述系统(13), 存在下面定理1成立.

定理 1 假设在系统(13)中, 矩阵 L 与 N 均存在逆矩阵, 则有控制律

$$\begin{aligned} u &= -N^{-1}[k(z - \varrho) + L^T x + y - \dot{\varrho} + F], \\ \varrho(x) &= L^{-1}(x)[-kx - f(x)], \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $k = c + \frac{1}{2\delta^2}$, $c > 0$, $\delta > 0$, 可以使系统在无扰动时是指数稳定的, 在有扰动时是输入状态稳定的, 并且对所有的 $t \geq 0$, 有下面的不等式(15)成立:

$$\begin{aligned} \left\| \begin{matrix} \xi(t) \\ \eta(t) \end{matrix} \right\| &\leq \delta \sqrt{\frac{1 - e^{-2ct}}{2c}} \left(\sup_{\tau \in [0, t]} \left\| \begin{matrix} d_1(\tau) \\ d_2(\tau) \end{matrix} \right\| \right) + \\ &e^{-ct} \left\| \begin{matrix} \xi(0) \\ \eta(0) \end{matrix} \right\|, \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $\xi = x$, $\eta = z - \varrho(x)$.

证 根据反步设计的思路, 对上述系统中的 x 子系统, 取虚拟控制

$$\varrho(x) = L^{-1}(x)[-k_1 x - f(x)], \quad (16)$$

其中: k_1 为设计参数, 坐标变换 $\xi = x$, $\eta = z - \varrho(x)$, 并选取李雅普诺夫函数

$$V(\xi, \eta) = \xi^T \xi / 2 + \eta^T \eta / 2,$$

沿上述系统的变化率为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \xi^T [f(x) + L(x)z + d_1(t)] + \eta^T [y(x, z) + \\ &N(x, z)u + d_2(t) + F - \dot{\varrho}(x)] = \\ &-k_1 \xi^T \xi + \xi^T d_1 + \eta^T d_2 + \\ &\eta^T [L^T \xi + y + Nu + F - \dot{\varrho}] \leq \\ &(-k_1 - \frac{1}{3\delta_1^2}) \|\xi\|^2 + \eta^T [L^T \xi + y + Nu + \end{aligned}$$

$$F - \dot{\varrho} + \frac{\eta}{2\delta_2^2}] + \frac{\delta_1^2}{2} \|d_1\|^2 + \frac{\delta_2^2}{2} \|d_2\|^2, \quad (17)$$

式中 δ_1, δ_2 为正数. 令

$$k_1 - \frac{1}{2\delta_1^2} = c_1 > 0, \quad k_2 - \frac{1}{2\delta_2^2} = c_2 > 0,$$

取控制率为

$$u = -N^{-1}[k_2 \eta + L^T \xi + y - \dot{\varrho} + F], \quad (18)$$

可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -c_1 \|\xi\|^2 - c_2 \|\eta\|^2 + \frac{\delta_1^2}{2} \|d_1\|^2 + \frac{\delta_2^2}{2} \|d_2\|^2 \leq \\ &-2cV + \frac{\delta^2}{2} \|d_1\|^2 + \|d_2\|^2, \end{aligned} \quad (19)$$

其中取 $c = \min\{c_1, c_2\}$, $\delta = \max\{\delta_1, \delta_2\}$.

对上式左右两边同时乘以 e^{2ct} , 并在区间 $[0, t]$ 上积分, 可得

$$\begin{aligned} V(t) &\leq e^{-2ct} V(0) + \\ &\frac{\delta^2}{2} \int_0^t e^{-2c(t-\tau)} [\|d_1(\tau)\|^2 + \|d_2(\tau)\|^2] d\tau \leq \\ &e^{-2ct} V(0) + \\ &\delta^2 \frac{1 - e^{-2ct}}{4c} \sup_{\tau \in [0, t]} [\|d_1(\tau)\|^2 + \|d_2(\tau)\|^2]. \end{aligned} \quad (20)$$

将上式两边开方即可得式(21):

$$\begin{aligned} \left\| \begin{matrix} \xi(t) \\ \eta(t) \end{matrix} \right\| &\leq \delta \sqrt{\frac{1 - e^{-2ct}}{2c}} \left(\sup_{\tau \in [0, t]} \left\| \begin{matrix} d_1(\tau) \\ d_2(\tau) \end{matrix} \right\| \right) + \\ &e^{-ct} \left\| \begin{matrix} \xi(0) \\ \eta(0) \end{matrix} \right\|. \end{aligned} \quad (21)$$

证毕.

由上式可知, 系统从扰动到状态是指数稳定的. 当扰动为零时, 有 $\xi(t) \rightarrow 0$, $\eta(t) \rightarrow 0$, 考虑到坐标变换及 $f(0) = 0$, 可得 $\varrho(0) = 0$, 从而 $x(t) \rightarrow 0$, $z(t) \rightarrow 0$ 均为指数收敛. 当扰动不为零时, 系统的状态响应也对扰动具有一定的抑制. 这说明本文选择的控制方法是具有鲁棒性的, 可使无人机在受到回冲力和其他外部扰动时也能保持稳定飞行.

在利用无人机搭载水箱清洗绝缘子的工作过程中, 姿态控制系统的目的是将3个姿态角 (ϕ, θ, γ) 控制在期望的姿态角 $(\phi_0, \theta_0, \gamma_0)$. 根据上述姿态控制器设计的过程和无人机动力学方程联立, 令

$$\begin{aligned} x &= (x_1 \ x_2 \ x_3)^T = (\phi - \phi_0 \ \theta - \theta_0 \ \gamma - \gamma_0)^T, \\ z &= (\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3)^T. \end{aligned}$$

对应系统可得

$$f(x) = 0, \quad (22)$$

$$L(x) = \begin{bmatrix} 0 & \cos \gamma / \cos \theta & -\sin \gamma / \cos \theta \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \\ 1 & -\cos \gamma \tan \theta & \sin \gamma \tan \theta \end{bmatrix}, \quad (23)$$

$$L^{-1} = \begin{bmatrix} \sin \theta & 0 & 1 \\ \cos \theta \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\cos \theta \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \end{bmatrix}, \quad (24)$$

$$\begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{pmatrix} = -J[k^2 L^{-1} + L^T + k\dot{L}^{-1}] \begin{pmatrix} \phi - \phi_0 \\ \theta - \theta_0 \\ \gamma - \gamma_0 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -2kJ_1 - J_2\omega_3 & J_3\omega_2 \\ J_1\omega_3 & -2kJ_2 - J_3\omega_1 \\ -J_1\omega_2 & J_2\omega_1 & -2kJ_3 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ Fl \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (25)$$

其中 $J = \text{diag}\{J_1, J_2, J_3\}$.

由上述各表达式可完成无人机抗回冲力的姿态控制,可以得到无人机在抵消回冲力干扰时需要的控制力矩,再根据多旋翼无人机的自身结构参数,可以反解出无人机各个旋翼的电机转速,使其在受到回冲力和其他未知干扰时也能保持在期望的位置,完成水冲洗绝缘子的任务。

在本文中,以X型的四旋翼无人机为例,根据已经求得的控制力矩和无人机所需要的总升力,可以求出无人机4个电机的转速如式(26)所示:

$$\begin{pmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{pmatrix} = B^{-1} \begin{pmatrix} F_h \\ M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{pmatrix}, \quad (26)$$

$$B = \begin{bmatrix} c_T & c_T & c_T & c_T \\ \frac{\sqrt{2}}{2}dc_T & -\frac{\sqrt{2}}{2}dc_T & -\frac{\sqrt{2}}{2}dc_T & \frac{\sqrt{2}}{2}dc_T \\ \frac{\sqrt{2}}{2}dc_T & \frac{\sqrt{2}}{2}dc_T & -\frac{\sqrt{2}}{2}dc_T & -\frac{\sqrt{2}}{2}dc_T \\ c_M & -c_M & c_M & -c_M \end{bmatrix}, \quad (27)$$

其中: c_T, dc_T, c_M 为与无人机结构相关的参数,可查阅其说明书获得; F_h 为无人机的总升力,用于抵消无人机整体的重力。

4 仿真实验

在本节中,将给出一个无人机姿态控制的仿真示例,运用MATLAB搭建无人机姿态控制系统的仿真模

型,并实现上述控制算法.其中,四旋翼无人机的各参数的设定值如表1所示.

表1 各参数取值

Table 1 Value of each parameter

符号	J_1	J_2	J_3	l	d	p
取值	0.5	13.5	13.5	0.35	6	0.6
单位	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	m	mm	Mpa

初始状态时,无人机已通过视觉定位系统飞到指定的位置,并悬停在指定位置处,初始时的姿态角设定为 $(\phi_0, \theta_0, \gamma_0) = [0 \ 0 \ 0]^T \text{ rad}$. 控制目标为使姿态角能够回归稳定,并保持在期望的姿态角. 每个姿态角通道所受的外部扰动为 $d = [0.2 \sin(0.1\pi t) \ 0.2 \cos(0.1\pi t) \ 0.2 \sin(0.1\pi t)]^T$.

仿真得到的结果如图4和图5所示. 图4为四旋翼无人机的3个姿态角: 滚转角、俯仰角和偏航角随时间的变化曲线. 图5为3个姿态角的角速度随时间的变化曲线.

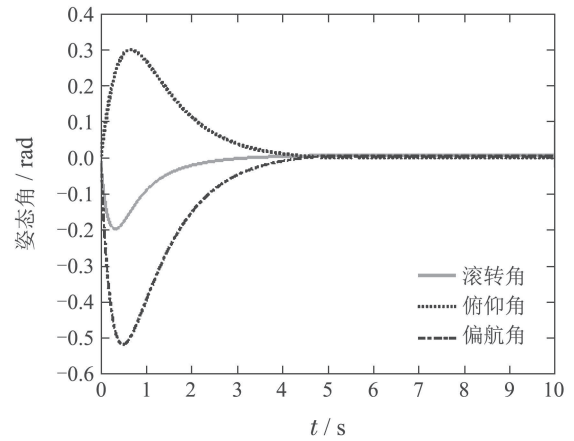


图4 无人机姿态角随时间变化曲线

Fig. 4 The attitude angles of UAV via time

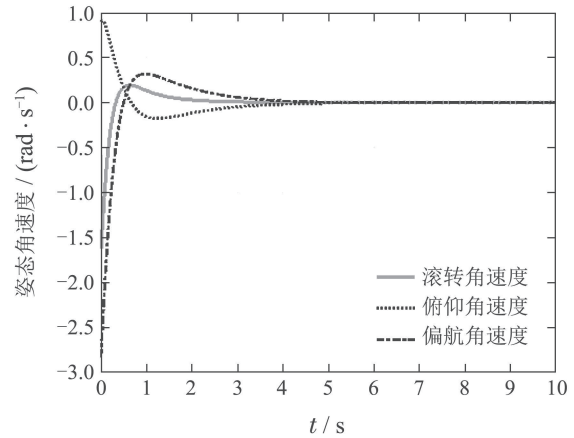


图5 无人机姿态角速度随时间变化曲线

Fig. 5 The attitude angular velocities of UAV via time

从上面两幅图中可以看出,在初始时刻无人机开始喷水清洗绝缘子,同时受到回冲力和外部扰动的干

扰, 其姿态角有了明显的变化. 但在设计的姿态控制器的作用下系统可以较快地恢复到平衡状态, 并稳定在期望的姿态角附近. 说明文中提出的控制方案对回冲力和外部扰动有较好的抑制作用, 仿真结果证明了所提出的控制器的有效性和鲁棒性.

为了证明抗回冲力控制方法设计的必要性, 本文设计了一组对比实验. 在对比实验中, 无人机系统各参数的选择仍与表1中的相同, 无人机初始状态和期望的姿态角相同, 所受的外部扰动和回冲力也相同, 但在控制算法中去掉了有关回冲力的部分, 借此观察当回冲力扰动存在, 却没有在控制方法中加以处理时的无人机各个姿态角的变化. 得到的仿真结果如图6和图7所示, 图6为四旋翼无人机的3个姿态角: 滚转角、俯仰角和偏航角随时间的变化曲线. 图7为3个姿态角的角速度随时间的变化曲线.

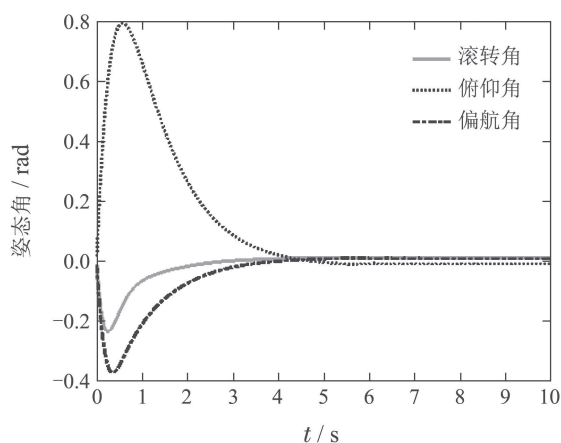


图6 无人机姿态角随时间变化曲线

Fig. 6 The attitude angles of UAV via time

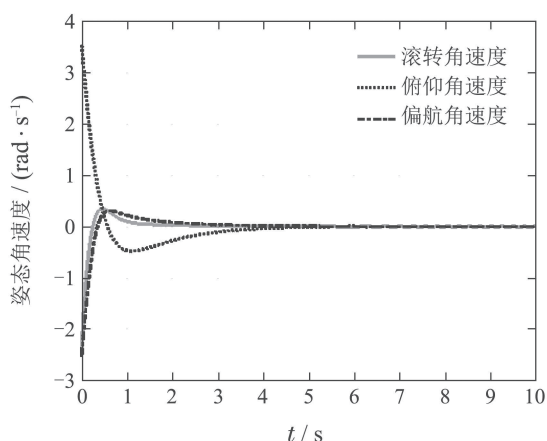


图7 无人机姿态角速度随时间变化曲线

Fig. 7 The attitude angular velocities of UAV via time

从图中可以看出, 虽然在受到回冲力和外部扰动时无人机的3个姿态角也能恢复稳定并保持在期望状态, 但对比实验组的3个姿态角(尤其是俯仰角)变化范围明显比图4中的姿态角变化范围要大. 说明对比组

的无人机在受到干扰时姿态角偏离期望位置的幅度更大, 抗干扰能力较弱, 控制方法的鲁棒性没有另外一组的好. 所以, 设计抗回冲力的控制方法是必要且有效的.

5 结论

本文提出了一种用于清洗绝缘子的无人机抗回冲力控制方法, 将现代非线性控制方法有效地应用于无人机姿态控制当中. 本文首先根据牛顿动力学及欧拉角坐标变换得到无人机的姿态动力学方程组. 然后, 运用动量定理和伯努利方程建立回冲力的模型. 之后, 根据反步法设计无人机姿态控制器, 使其可以在受到回冲力和其他未知外部扰动时仍能保持稳定飞行, 并完成冲洗绝缘子的任务. 最后, 运用MATLAB进行仿真实验, 其结果证明了所设计的控制方案的有效性和鲁棒性. 本文所提出的控制方法可以为无人机在受扰动状态下的控制问题提供一个解决思路. 同时, 本文的应用场景也可以避免目前清洗绝缘子方法的一些弊端, 为绝缘子带电水冲洗的发展提供了支持和拓宽了思路.

参考文献:

- [1] WEI Xiaoguang, YANG Bingjian, TANG Guangfu, et al. Technical development and engineering application of HVDC circuit breaker. *Power System Technology*, 2017, 41(10): 3180 – 3188.
(魏晓光, 杨兵建, 汤广福, 等. 高压直流断路器技术发展与实践. 电网技术, 2017, 41(10): 3180 – 3188.)
- [2] MENG Zhigao, JIANG Xingliang, DONG Bingbing, et al. AC pollution flashover characteristics of surged polluted glass and composite insulators under natural fog condition. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(12): 65 – 71.
(孟志高, 蒋兴良, 董冰冰, 等. 自然雾条件下严重染污玻璃、复合绝缘子交流污闪特性. 电工技术学报, 2016, 31(12): 65 – 71.)
- [3] SU Zhiyi, LI Qingfeng. Historical review and summary on measures against pollution flashover occurred in power grids in China. *Power System Technology*, 2010, 34(12): 124 – 130.
(宿志一, 李庆峰. 我国电网防污闪措施的总结和回顾. 电网技术, 2010, 34(12): 124 – 130.)
- [4] ZHANG Hui, TU Youping. Study on aging characteristics of silicone rubber sheds of composite insulators based on TSC test. *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, 2012, 32(19): 169 – 174.
(张辉, 屠幼萍. 基于TSC测试的硅橡胶复合绝缘子伞裙材料老化特性研究. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 169 – 174.)
- [5] SHEN Wenwei, SONG Wei, WANG Guoli, et al. Influence of corona discharge on aging characteristics of HTV silicone rubber material. *High Voltage Apparatus*, 2013, 49(2): 1 – 7.
(申文伟, 宋伟, 王国利, 等. 复合绝缘子HTV硅橡胶材料老化特性的研究. 高压电器, 2013, 49(2): 1 – 7.)
- [6] VENKATESULU B, THOMAS M J. Long-term accelerated weathering of outdoor silicone rubber insulators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, 18(2): 418 – 424.
- [7] WANG Bin, LIANG Xidong, ZHANG Yibo, et al. Natural pollution test of composite and porcelain insulators under AC and DC stress. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(9): 2322 – 2328.
(王彬, 梁曦东, 张轶博, 等. 交、直流电压下复合绝缘子和瓷绝缘子的自然积污试验. 高电压技术, 2009, 35(9): 2322 – 2328.)

- [8] EL-HAG A H, JAYARAM S H, CHEMEY E A. Effect of insulator profile on aging performance of silicone rubber insulators in salt-fog. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2007, 14(2): 352 – 359.
- [9] LUTZ B, CHENG L, GUAN Z, et al. Analysis of a fractured 500 kV composite insulator-identification of aging mechanisms and their causes. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012, 19(5): 1723 – 1731.
- [10] ZHANG Qirui, WEI Ruixuan, HE Renke, et al. Path planning for unmanned aerial vehicle in urban space crowded with irregular obstacles. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(10): 1407 – 1413. (张启瑞, 魏瑞轩, 何仁珂, 等. 城市密集不规则障碍空间无人机航路规划. 控制理论与应用, 2015, 32(10): 1407 – 1413.)
- [11] WANG Shaohua, YANG Ying. Quadrotor aircraft attitude estimation and control based on Kalman filter. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(9): 1109 – 1115. (汪绍华, 杨莹. 基于卡尔曼滤波的四旋翼飞行器姿态估计和控制算法研究(英文). 控制理论与应用, 2013, 30(9): 1109 – 1115.)
- [12] LIANG Xiao, FANG Yongchun, SUN Ning. Trajectory planning and tracking controller design for a planar quadrotor unmanned aerial vehicle transportation system. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(11): 1430 – 1438. (梁潇, 方勇纯, 孙宁. 平面四旋翼无人飞行器运送系统的轨迹规划与跟踪控制器设计. 控制理论与应用, 2015, 32(11): 1430 – 1438.)
- [13] CARDOSO D N, RAFFO G V, ESTEBAN S. A robust adaptive mixing control for improved forward flight of a tilt-rotor UAV. *Proceedings of the 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Rio de Janeiro: IEEE, 2016: 1432 – 1437.
- [14] ROSALES C, SORIA C, CARELLI R, et al. Adaptive dynamic control of a quadrotor for trajectory tracking. *Proceedings of the 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems*. Miami: IEEE, 2017: 547 – 553.
- [15] HE Bo, FANG Yongchun, LIU Hailiang, et al. Precise positioning online trajectory planner design and application for overhead cranes. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(10): 1352 – 1358. (何博, 方勇纯, 刘海亮, 等. 桥式起重机精准定位在线轨迹规划方法设计及应用. 控制理论与应用, 2016, 33(10): 1352 – 1358.)
- [16] WEI Ruixuan, ZHANG Qirui, XU Zhuofan, et al. A brain-like mechanism for developmental UAVs' collision avoidance. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(2): 175 – 182. (魏瑞轩, 张启瑞, 许卓凡, 等. 类脑发育无人机防碰撞控制. 控制理论与应用, 2019, 36(2): 175 – 182.)
- [17] WEI Ruixuan, HE Renke, ZHANG Qirui, et al. Skinner-based emergency collision avoidance mechanism for UAV. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2016, 36(6): 620 – 624. (魏瑞轩, 何仁珂, 张启瑞, 等. 基于Skinner理论的无人机应急威胁规避方法. 北京理工大学学报, 2016, 36(6): 620 – 624.)
- [18] ZHU J C, LIU E D, GUO S, et al. A gradient optimization based PID tuning approach on quadrotor. *Proceedings of the 27th Chinese Control and Decision Conference*. Qingdao: IEEE, 2015: 1588 – 1593.
- [19] BOUABDALLAH S, NOTH A, SIEGWART R. PID vs LQ control techniques applied to an indoor micro quadrotor. *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Sendai: IEEE, 2004: 2451 – 2456.
- [20] LEE D, KIM H J, SASTRY S. Feedback linearization vs adaptive sliding mode control for a quadrotor helicopter. *International Journal of Control Automation and Systems*, 2009, 7(3): 419 – 428.
- [21] YOO C S, RYU S D, PARK B J, et al. Actuator controller based on fuzzy sliding mode control of tilt rotor unmanned aerial vehicle. *International Journal of Control Automation and Systems*, 2014, 12(6): 1257 – 1265.

作者简介:

万 能 硕士, 工程师, 长期从事输电线路无人机巡检技术工作,

E-mail: wanneng500@foxmail.com;

白若蓉 硕士研究生, 主要研究无人机非线性控制, E-mail:

bairr@mail.ustc.edu.cn;

汪 晓 高级工程师, 从事输电线路运维管理工作, E-mail: wx_

ahepc@126.com;

郭可贵 工程师, 从事输电线路运维管理工作, E-mail: 469537704

@qq.com;

季海波 教授, 博士生导师, 主要研究方向为非线性系统的数值计

算方法、非线性控制及应用、导航与制导、随机与混合系统等, E-

mail: jihb@ustc.edu.cn.