

基于模糊PID控制的输电线路巡检机器人 自平衡机理分析

李小彭^{1,2}, 李雪东¹, 樊星¹, 石冰²

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 宁夏理工学院 机械工程学院, 宁夏 石嘴山 753000)

摘要: 巡检机器人在风载荷作用下会发生一定的摆动,从而导致巡检结果准确性和可靠性降低,参考旋翼类飞行器设计了巡检机器人在风载荷下的平衡机构. 首先,利用电机的动力学方程推导电机电压和转速之间的传递函数,使用叶素法建立旋翼产生的升力与旋翼转速之间的关系,从而建立平衡机构的输入电压和输出升力之间的联系. 其次,分析不同方向的风载荷对巡检机器人工作状态的影响,建立了巡检机器人在横向风载荷下的摆动数学模型. 最后,将模糊PID(proportional integral derivative)应用于平衡机构的控制中,开展了巡检机器人的数值仿真和样机实验. 结果表明:所设计的平衡机构可以有效抑制巡检机器人在风载荷中的摆动.

关键词: 巡检机器人; 风载荷; 摆动模型; 平衡机构; 模糊PID

中图分类号: TH 133.3 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)02-0076-10

Analysis of Self-Balancing Mechanism of Transmission Line Inspection Robot Based on Fuzzy PID Control

LI Xiao-peng^{1,2}, LI Xue-dong¹, FAN Xing¹, SHI Bing²

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Mechanical Engineering, Ningxia Institute of Technology, Shizuishan 753000, China. Corresponding author: LI Xiao-peng, E-mail: xpli@me.neu.edu.cn)

Abstract: An inspection robot tends to swing under wind load, which may reduce the accuracy and reliability of inspection results. The balancing mechanism of the inspection robot under wind load was designed with reference to the rotor aircraft. Firstly, the transfer function between the voltage and speed of the motor was derived by using the dynamic equation of the motor, and the relationship between the lift generated by the rotor and the rotor speed was established by using the blade element method, so as to establish the relationship between the input voltage and the output lift of the balancing mechanism. Secondly, the influence of wind load in different directions on the working state of the inspection robot was analyzed, and the swing mathematical model of the inspection robot under transverse wind load was established. Finally, the fuzzy PID (proportional integral derivative) was applied to the control of the balancing mechanism, and the numerical simulation and prototype experiment of the inspection robot were carried out. The results showed that the designed balancing mechanism can effectively restrain the swing of the inspection robot under wind load.

Key words: inspection robot; wind load; swing model; balancing mechanism; fuzzy PID

输电主要依靠高压输电线路和超高压输电线路. 目前输电线路的主要巡检方式有3种,包括人工巡检法、直升机巡检法和无人机巡检法^[1]. 机

器人巡检被认为是未来电力线路巡检的主要方式,也是实现智能巡检的重要手段^[2]. 巡检机器人需要在复杂的环境中执行任务,其中包括在架空

线路上工作.而在这种情况下,风载荷是主要的影响因素之一.不少学者深入研究了风载荷对巡检机器人的影响.

洪展等^[3]研究了风载荷下巡检机器人的姿态控制,并对其操作进行了优化.孙翠莲等^[4]对风载荷作用下障碍物检测机器人的结构参数进行了优化.Guo等^[5]分析了巡检机器人在风载荷作用下的稳定抓取情况.Qin等^[6]利用拉格朗日方程建立输电线路巡检机器人的动力学模型,分析了巡检机器人在遇到横风工况时在线路上的行走稳定性.Jiang等^[7]基于随机风载荷对巡检机器人的运动影响,提出一种风载荷下巡检机器人鲁棒稳定控制方法,对巡检机器人的结构进行研究.Dian等^[8]提出一种基于自平衡双臂机构的输电线路巡检机器人.Wang等^[9]提出一种重心调节机构来克服巡检机器人的越障摆动.Wang等^[10]采用一种三臂悬挂结构来保持巡检机器人跨越障碍物时的柔性稳定性.关于巡检机器人运动平衡的控制策略研究,Zhao等^[11]提出一种通用Ⅱ型模糊增益调度PID控制器,用于实现输电线路巡检机器人的自平衡调节.Pussente等^[12]针对输电线路跟随器问题,提出一种通过区间Ⅱ型模糊逻辑调节的PID控制器.Raafi'u等^[13]对控制系统进行比较,证明模糊PID控制器是控制直流电机转速的较好控制方法.Wang等^[14]提出一种模糊自适应PID控制器,可以很好地控制无刷直流电机的速度输出.Bhimte等^[15]通过比较实验得出分数阶模糊PID控制器可以更精确控制伺服电机的转速输出.

本文考虑风载荷对输电线路巡检机器人的影响,参考旋翼类飞行器设计巡检机器人在风载荷下的平衡机构,并且设计模糊PID控制器控制平衡机构的输出.最后通过仿真和实验验证平衡机构在模糊PID控制器下可以有效减弱巡检机器人在风载荷下的晃动.本文的主要贡献是考虑随机风载荷的影响,提出一种平衡机构,并设计模糊PID控制器进行控制,从而保障巡检机器人在风载荷下的正常工作.

1 平衡机构

巡检机器人工作时受到风载荷的影响会发生摆动,根据旋翼类飞行器的飞行原理,将旋翼产生的升力用于巡检机器人的平衡上.图1为设计的平衡机构,即旋翼系统.

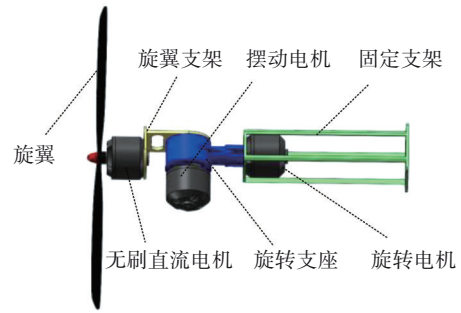


图1 旋翼系统模型

Fig. 1 Rotor system model

旋翼系统通过无刷直流电机驱动旋翼输出升力.旋转电机被固定在支架上,采用直联方式驱动旋转支座在 180° 范围内旋转.摆动电机被固定在旋转支座上,通过齿轮啮合带动旋翼支架在 90° 范围内摆动.这种结构使得旋翼能够调整姿态,以应对不同工况下的工作.

巡检机器人在输电线路独立工作时,行走和越障功能必不可少.当前轮臂式巡检机器人一般由行走机构、机械臂升降机构、旋转机构和电气箱等组成.为了加强巡检机器人抵抗风载荷的能力,在机器人上布置了旋翼.考虑到巡检机器人的整体结构,将旋翼布置在电气箱的两侧.巡检机器人简化模型如图2所示.

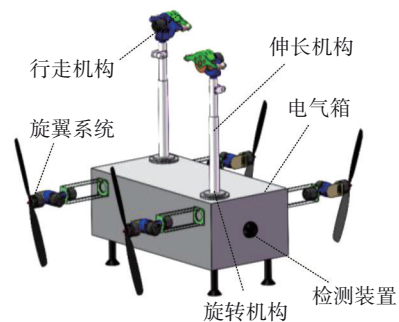


图2 巡检机器人简化模型

Fig. 2 Simplified model of the inspection robot

考虑巡检机器人复杂的工作环境,本文设计的旋翼系统对巡检工作起到了一定的辅助作用.下文主要研究旋翼系统在巡检机器人风载荷抵御中的关键作用.

2 传动模型

旋翼系统产生的升力由电机输出电压控制,下面对旋翼和电机建立传动模型.

2.1 旋翼的平衡升力

本文采用叶素法^[16]来推导旋翼输出的升力.

叶素法将旋翼叶片看作由无限多微小叶素组成,通过计算每个叶素的拉力,并沿着翼展方向积分,最终得到整个叶片的升力.叶素法计算的结果与实际情况比较符合,具有较高的精度,示意图如图 3 所示.

单位展长叶素输出升力如式(1)所示:

$$f = \frac{1}{2} B \rho n v_1^2. \quad (1)$$

式中: f 为单位展长叶素输出的升力; B 为升力系数; ρ 为空气密度; n 为翼弦长度; v_1 为任一叶素所在位置的线速度.

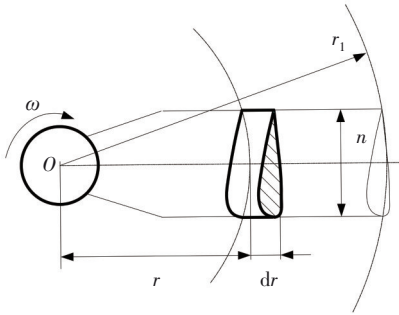


图 3 旋翼上的叶素

Fig. 3 Blade element on the rotor

通过对单位展长叶素沿翼展方向进行积分,得到整个旋翼叶片输出的升力如下:

$$F_s = \int_0^{r_1} \frac{1}{2} B \rho n (\omega r)^2 dr = \frac{1}{6} A_1 B \rho (\omega r_1)^2. \quad (2)$$

式中: F_s 为单个旋翼输出的总升力; r 为任一叶素所在位置的半径; A_1 为叶片面积; ω 为旋翼角速度; r_1 为旋翼半径.

根据式(2)可知,单个旋翼产生的总升力与旋翼角速度平方成正比,取比例系数为 K_1 ,单位是 $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{rad}^2$,则式(2)简化为式(3):

$$F_s = K_1 \omega^2. \quad (3)$$

结合现存旋翼的相关参数,本文取 $K_1 = 3 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{rad}^2$ 进行后续研究.

2.2 电机的传动模型

基于电机电压平衡和力矩平衡可知:

$$u = iR + L \frac{di}{dt} + K_f \omega; \quad (4)$$

$$J_d \frac{d\omega}{dt} = T_n - T_l. \quad (5)$$

式中: u 为电机电压; i 为电流; R 为电机等效电阻; L 为电机电感; K_f 为电机反电势系数; J_d 为电机轴上等效转动惯量; T_n 为电机力矩, $T_n = K_n i$, K_n 为电机转矩常数; T_l 为电机负载力矩.

驱动旋翼无刷直流电机为小功率电机,电机感应系数很小,可忽略电感 L .

$$i = \frac{u - K_f \omega}{R}. \quad (6)$$

通过化简可以得到式(7)所示的电机近似动力学模型:

$$J_d \frac{d\omega}{dt} = \frac{K_n u}{R} - \frac{K_f K_n \omega}{R} - T_l. \quad (7)$$

由于 T_l 与 ω 有关,所以该电机动力学模型属于非线性,采用泰勒展开法将模型线性化, T_l 在基准点 ω_0 附近展开成泰勒级数,忽略高阶小量后如式(8)所示,最后化简得到的线性动力学模型如式(9)所示:

$$T_l = T_l(\omega_0) + \dot{T}_l(\omega - \omega_0); \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{\omega} &= -\varepsilon \omega + \eta u - \mu, \\ \varepsilon &= \frac{K_f K_n}{J_d R}, \\ \eta &= \frac{K_n}{J_d R}, \\ \mu &= \frac{T_l}{J_d}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: ε, η, μ 皆为常数.因为 μ 相对于 η 太小,故忽略不计.旋翼电机的动力学模型可以近似为惯性环节,进行拉氏变换后,传递函数如下:

$$\frac{\omega(s)}{u(s)} = \frac{\eta}{s + \varepsilon}. \quad (10)$$

式中: s 为拉普拉斯算子,取 $\varepsilon = 10, \eta = 10$ 对电机进行仿真,具体传递函数如下:

$$\frac{\omega(s)}{u(s)} = \frac{1}{0.1s + 1}. \quad (11)$$

3 风载荷影响分析

3.1 风载荷模型

针对风力较大的待巡检地区,需要建立1个合理的风速模型.研究表明,对于短时间内稳定风速的模拟和预测,双参数威布尔分布函数拟合较为准确^[17].

双参数威布尔分布函数的表达式如式(12)所示:

$$P(v) = \frac{k}{c_1} \left(\frac{v}{c_1} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c_1} \right)^k \right]. \quad (12)$$

式中: $P(v)$ 为风速概率; k 为形状参数; c_1 为尺度参数; v 为风速.

一般情况下, k 和 c_1 由观测平均风速 \bar{v} 和时间 t 内最大风速 v_{\max} 求解,具体表达式如式(13)和式(14)所示:

$$k = \frac{\ln(\ln t)}{\ln \frac{0.9v_{\max}}{\bar{v}}}; \quad (13)$$

$$c_1 = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1 + \frac{1}{k})}. \quad (14)$$

通过观测某待检区域风况数据,计算得出 $k=5, c_1=14$. 将参数代入式(12)中得到该地区的风速概率分布,如图4所示,并拟合得到该地区的风速时程曲线,如图5所示.该地区平均风速期望值 $\bar{v}=12.85 \text{ m/s}$,属于阵风7级的强度,从而模拟巡检机器人在强风下的工作环境.

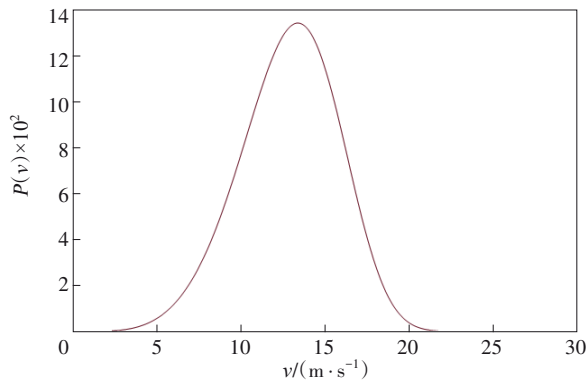


图4 风速概率分布

Fig. 4 Probability distribution of wind speed

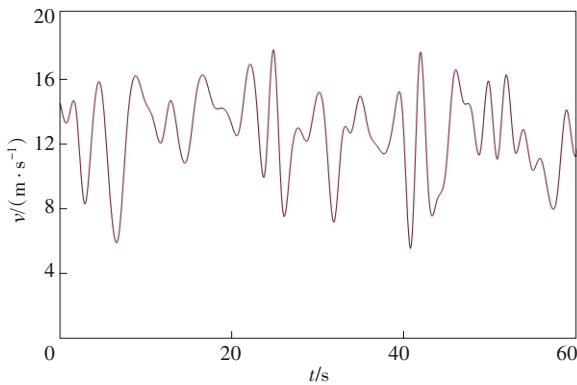


图5 风速时程

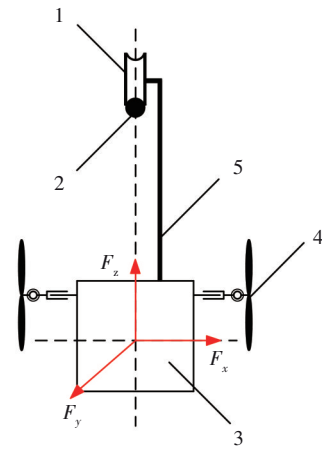
Fig. 5 Time schedule of wind speed

高空随机风载荷对巡检机器人的总风力 F_p 可以分解为垂直于行进方向的横向风力 F_x , 平行于行进方向的风力 F_y 和沿竖直方向的风力 F_z . 风力分解如图6所示. F_y 主要对巡检机器人的行进速度和加速度造成一定影响, F_z 主要作用于竖直方向上, 所以 F_y 和 F_z 对巡检机器人摆动的影响较小, 本文只研究 F_x 对摆动的影响. 横向风力 F_x 会使巡检机器人在高空线路上产生晃动, 特别是在恶劣环境下, 巡检机器人可能会面临掉落的风险.

横向风力 F_x 可根据式(15)计算:

$$F_x = \frac{1}{2} \rho \alpha K K_h A v_s^2. \quad (15)$$

式中: α 为风速不均匀系数; K 为空气动力学系数; K_h 为高空风速增大系数; A 为受风投影面积; v_s 为风速.



1—行走轮;2—输电线;3—电气箱;
4—旋翼系统;5—机械臂.

图6 风载荷图解

Fig. 6 Wind load diagram

在距离地面 60 m 的空中, 取风速增大系数 $K_h=1.71$, 空气动力学系数 $K=1.5$, 风速不均匀系数 $\alpha=0.85$, 将式(15)化简为式(16):

$$F_x = 1.336 A v_s^2. \quad (16)$$

巡检机器人的受风投影面积 $A=0.2 \text{ m}^2$, 基于现实考虑, 将拟合得到的风载荷完全等同于横向风力 F_x , 将图5风速曲线代入式(16)计算得到如图7所示的横向风载荷时变曲线图.

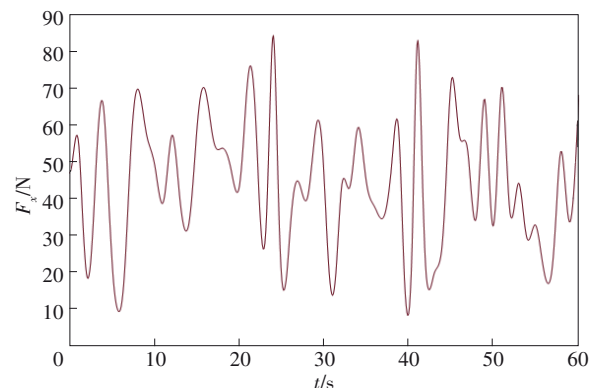


图7 巡检机器人所受的横向风载荷

Fig. 7 Transverse wind load on the inspection robot

3.2 巡检机器人摆动模型

随机风载荷作用于执行巡检工作的机器人上时, 机器人将产生摆角, 由于风载荷和重力分

力的影响,机器人将会往复摆动.一般在行走机构与输电线接触处会设置机构来抑制这种摆动,即产生与摆动速度成正比的阻尼,但是这种抑制作用十分有限.本文利用旋翼系统输出的升力来平衡巡检机器人在风载荷下的摆动,其中同侧的2个旋翼采用并联的方式进行连接.摆动模型如图8所示.为了使摆动模型易于求解,进行以下设定:

1)旋翼系统安装中心与输电线中心的距离为 h_1 ;

2)巡检机器人重心位于电气箱中心,与输电线中心距离为 h_2 ;

3)横向风载荷作用位置与旋翼系统输出升力作用位置相同,均与输电线中心的距离为 h_1 ;

4)同侧2个旋翼输出平衡力大小相等,输出总升力为 F_T ,即 $F_T=2F_S$.

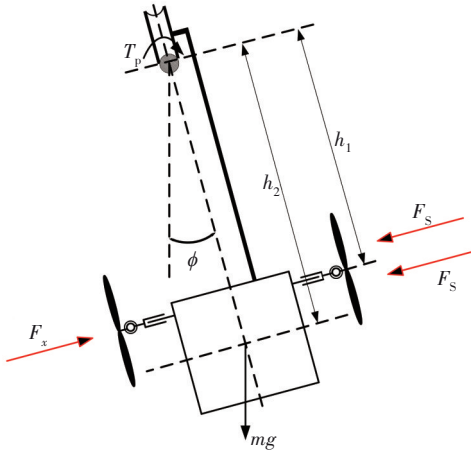


图8 巡检机器人的摆动模型

Fig. 8 Swing model of the inspection robot

根据以上设定,可得到如式(17)所示的巡检机器人动力学模型:

$$\left. \begin{aligned} F_T h_1 + F_x h_1 + T_p &= J \ddot{\phi} + mgh_2 \sin \phi, \\ T_p &= -c_0 \dot{\phi}, \\ J &= mh_2^2. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中: F_T 为同侧2个旋翼输出的总升力; T_p 为行走机构处的阻力矩; J 为机器人的转动惯量; m 为机器人质量; ϕ 为摆角; c_0 为行走阻尼.

巡检机器人的摆角一般很小, $\sin \phi \approx \phi$, 式(17)可化简如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{mh_2^2}{h_1} \ddot{\phi} + \frac{c_0}{h_1} \dot{\phi} + \frac{mgh_2}{h_1} \phi &= F_T + F_x, \\ F &= F_T + F_x. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中, F 为同侧2个旋翼输出总升力 F_T 与横向风

载荷 F_x 的合力.

对式(18)进行拉氏变换,得到如式(19)所示的摆动系统传递函数:

$$H(s) = \frac{\phi(s)}{F(s)} = \frac{1}{\frac{mh_2^2}{h_1} s^2 + \frac{c_0}{h_1} s + \frac{mgh_2}{h_1}}. \quad (19)$$

设计巡检机器人的相关参数值如表1所示.

表1 巡检机器人参数

Table 1 Parameters of the inspection robot

参数	取值
m/kg	30
h_1/m	0.5
h_2/m	0.6
$c_0/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	10
$g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	9.8

将表1中参数代入式(19)中,得到式(20)所示的摆动系统的具体传递函数:

$$H(s) = \frac{\phi(s)}{F(s)} = \frac{1}{21.6s^2 + 20s + 352.8}. \quad (20)$$

4 控制仿真

4.1 模糊PID控制器设计

模糊PID控制器基于PID算法,以误差 e 和误差变化率 e_c 作为输入,利用模糊规则进行推理,实时对PID的3个参数进行整定,来满足不同时刻的 e 和 e_c 对PID参数的要求,使得被控对象具有更好的动、静态性能.对于具有随机时变特性的风载荷,模糊PID控制器更为合适.模糊PID控制器的原理如图9所示.

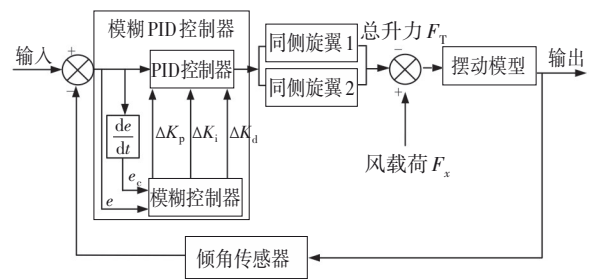


图9 模糊PID控制器用于摆动系统控制的原理图

Fig. 9 Schematic diagram of fuzzy PID controller for the swing system

控制框图中,倾角传感器实时检测巡检机器人摆角大小,与输入的理想角度进行比较得到角度误差 e 和误差变化率 e_c ,将 e 和 e_c 输入到模糊PID控制器中,经过模糊化、模糊推理和清晰化等过程后输出PID 3个参数的变化量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$

(p 表示比例, i 表示积分, d 表示微分), 从而调整此刻 PID 控制器的参数, 并将误差 e 输入给 PID 控制器, 通过式 (21) 所示的模糊 PID 控制器的表达式进行计算, 控制同侧 2 个旋翼共同实时输出升力, 从而抑制巡检机器人在风载荷下的摆动.

$$u(t) = (K_p + \Delta K_p)e(t) + (K_i + \Delta K_i) \int_0^t e(t)dt + (K_d + \Delta K_d) \frac{de(t)}{dt}. \quad (21)$$

模糊 PID 控制器的组成包括 1 个二输入三输出模糊控制器和 1 个常规 PID 控制器. 模糊 PID 控制器的设计过程如下. 首先设定 PID 控制器初始参数, 调整参数使控制效果良好. 经过多次测试, 选取初始值为 $K_p=4\ 000, K_i=2\ 000, K_d=1\ 000$. 然后设定输入、输出变量的模糊集和论域范围. 模糊规则可以实时调整 PID 控制器的参数. 误差 e 以及误差变化率 e_c 是模糊控制器的输入, $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 是模糊控制器的输出. 此外, 输入变量的论域被设定为 $[-1.0, 1.0]$, 输出变量的论域被设定为 $[-100, 100]$, 输入和输出模糊集的设置如式 (22) 所示:

$$e, e_c, \Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}. \quad (22)$$

式中: N 为负; P 为正; B 为大; M 为中; S 为小; ZE 为 0. 它们分别代表的是 {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}.

设置输入和输出变量隶属度曲线和模糊规则表, 本文使用三角形隶属度函数作为输入和输出的隶属度函数. 三角形隶属度函数的表达如式 (23) 所示:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c; \\ 0, & x \geq c. \end{cases} \quad (23)$$

式中 a, b 和 c 表示参数.

模糊 PID 控制器的输入变量采用如图 10 所示的三角形隶属度曲线.

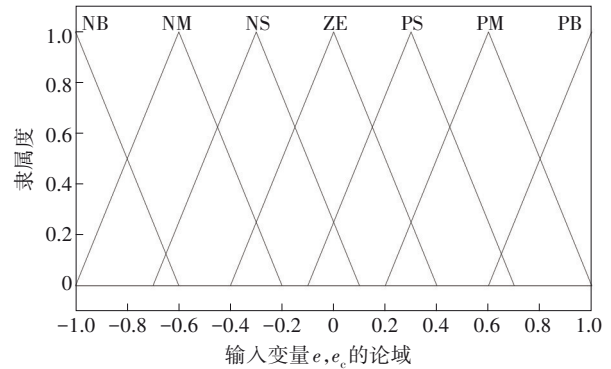


图 10 输入变量的隶属度曲线

Fig. 10 Membership curves of the input variables

模糊 PID 控制器的输出变量采用如图 11 所示的三角形隶属度曲线.

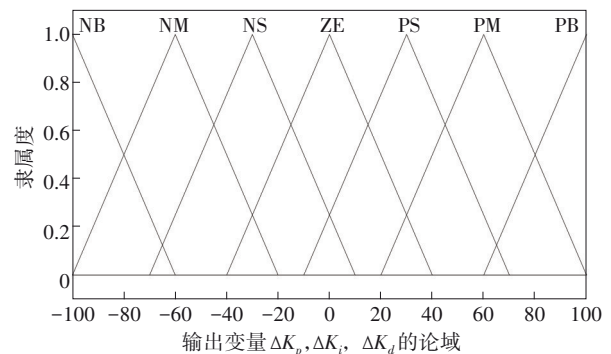


图 11 输出变量的隶属度曲线

Fig. 11 Membership curves of the output variable

模糊控制规则是采用模糊控制语句来表述模糊输入变量 (e 和 e_c) 和模糊输出变量 ($\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$) 之间关系的一种准则. 根据旋翼系统抑制摆动的原理和 PID 控制器 3 个参数间的关系建立了如表 2~4 所示的规则. 本文模糊控制器的模糊推理决策选取 Mamdani 推理法, 反模糊化过程选择面积重心法.

表 2 ΔK_p 的模糊控制规则
Table 2 Fuzzy control rule of ΔK_p

角度误差变化率 e_c	角度误差 e						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZE
NM	PB	PM	PS	PS	NS	NS	ZE
NS	PM	PM	PS	PS	NS	NS	ZE
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PS	NS	NS	NS	PS	NS	NM	NB
PM	NS	NS	NS	PS	PS	PM	PB
PB	PS	PS	NS	PB	PM	PB	PB

表 3 ΔK_i 的模糊控制规则
Table 3 Fuzzy control rule of ΔK_i

角度误差变化率 e_c	角度误差 e						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NM	ZE	ZE
NM	NB	NM	NS	ZE	PS	PS	PS
NS	PS	PS	PS	ZE	ZE	ZE	ZE
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PS	PS	PS	PS	ZE	PS	PS	PM
PM	NB	NB	ZE	ZE	NS	NS	NS
PB	NB	NB	ZE	ZE	NS	NS	NS

表 4 ΔK_d 的模糊控制规则
Table 4 Fuzzy control rule of ΔK_d

角度误差变化率 e_c	角度误差 e						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PS	PS	ZE	ZE	ZE	PB	PB
NM	NS	NS	NS	ZE	PS	PM	PM
NS	PS	PS	PS	ZE	PS	PS	PS
ZE	PS	PS	PS	ZE	PS	PS	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	PS	PS	PS
PM	PM	PM	PS	ZE	PS	PM	PM
PB	PB	PM	PS	ZE	PS	PM	PB

4.2 仿真分析

为了说明使用模糊 PID 控制策略的优势,本节比较了在不同控制策略下巡检机器人的摆动角度、摆动速度. 仿真模拟使用的巡检机器人的参数如表 5 所示. 在此工况下通过不同的控制策略可以获得巡检机器人的输出特性.

表 5 仿真中巡检机器人参数
Table 5 Parameters of the inspection robot in simulation

参数	取值
旋翼直径 D/mm	200
旋翼旋转关节长度 L_1/mm	150
旋翼摆动关节长度 L_2/mm	60
行走轮半径 r_1/mm	30
行走阻尼 $c_\theta/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	10
升降臂原始长度 L_3/mm	600
同侧旋翼安装距离 L_4/mm	1 000
电气箱尺寸/ $(\text{mm}\times\text{mm}\times\text{mm})$	1 100×300×200
巡检机器人质量 m/kg	30

本文在 Simulink 模块中搭建了巡检机器人在风载荷下摆动的控制模型, 并进行仿真实验. 将第 4.1 节设计的控制器用于仿真, 仿真模型分为 3 种. 初始输入角度始终设定为 0° , 同时采用图 7 的风载荷模型作为输入, 在无控制自然状态、

PID 控制和模糊 PID 控制作用下对摆动系统进行仿真, 仿真时间设定为 60 s. 3 种仿真模型的结果如图 12 和图 13 所示.

根据图 12 和图 13, 在时变风载荷作用下, 自然状态下机器人的摆角最大达到 18.35° , 质心摆动速度最大达到 25.13 cm/s . 而模糊 PID 控制策略相较 PID 控制策略对机器人摆动有更好的抑制, 使得机器人最大摆角降至 2.14° , 质心的最大摆动速度降到 6.16 cm/s , 降幅约为 75%. 这表明模糊 PID 控制策略不仅抑制了机器人的大幅摆动, 还有效减缓了其质心的摆动速度.

为了进一步对比模糊 PID 控制和传统 PID 控制的效果, 输入其他典型风载荷模型. 仿真开

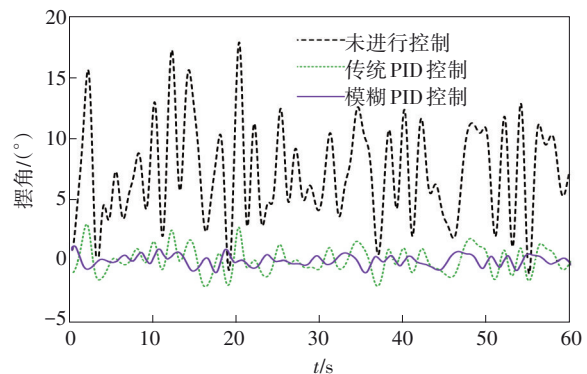


图 12 巡检机器人摆角

Fig. 12 Swing angle of the inspection robot

始 10 s 时,施加 1 个矩形脉冲信号作为干扰,大小为 50 N,风速约为 14 m/s,干扰持续时间为 0.5 s,模拟阵风对机器人的影响.2 种控制效果如图 14 所示.

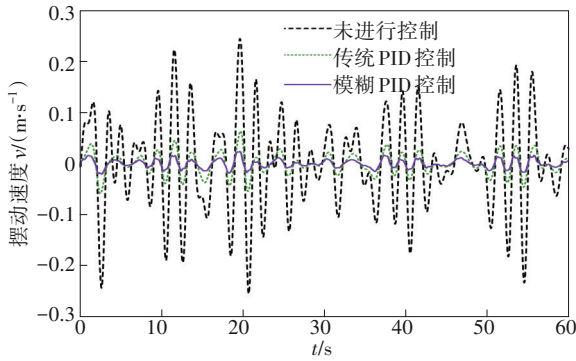


图 13 巡检机器人摆动速度

Fig. 13 Swing speed of the inspection robot

如图 14 所示,第 10 s 干扰产生时,模糊 PID 控制和传统 PID 控制都能迅速抑制机器人的摆动,在最短时间内降低机器人的最大摆角.显然,模糊 PID 控制在抑制最大摆角方面性能更好,所以在巡检工作中面对突发风载荷时,模糊 PID 控制的效果更为理想.

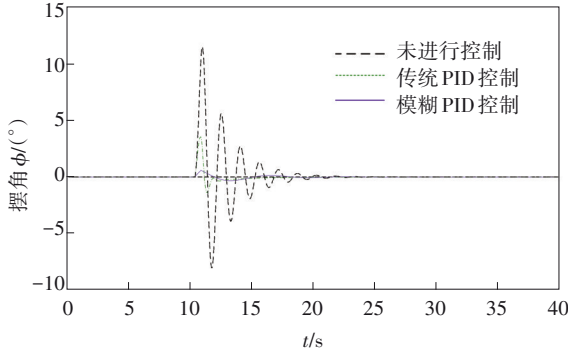


图 14 施加干扰信号时机器人的摆角变化

Fig. 14 Swing angle change of the robot under interference

5 样机实验

5.1 样机研制

参考文献[18],设计了本文的巡检机器人实验样机.由于实验条件有限,该实验样机对原模型进行了尺寸缩减,并进行了一定的简化.样机参数如表 6 所示,样机实物如图 15 所示.

表 6 样机参数
Table 6 Prototype parameters

样机参数	数值
行走电机额定电压/V	12
额定转速/(r·min ⁻¹)	15
额定转矩/(N·mm)	20
样机滑动速度/(mm·s ⁻¹)	16
旋翼直径/mm	205
升降机构原始长度/mm	150
最大伸长长度/mm	300
旋翼电机额定电压/V	12
空载转速/(r·min ⁻¹)	33 600
电气箱尺寸/(mm×mm×mm)	300×150×120
样机高度/mm	380
3D 打印材料	未来 8200 树脂

本文设计的旋翼系统具有旋翼转向功能,可以根据不同工况调整旋翼的位姿,以提供不同状态下的辅助功能.样机的旋翼系统能够实现相应的位姿调整.本文实验样机通过手动操作来完成上述姿态构型之间的变换,以便进行多种工况的实验研究.图 16 展示了样机在不同位姿下的状态.

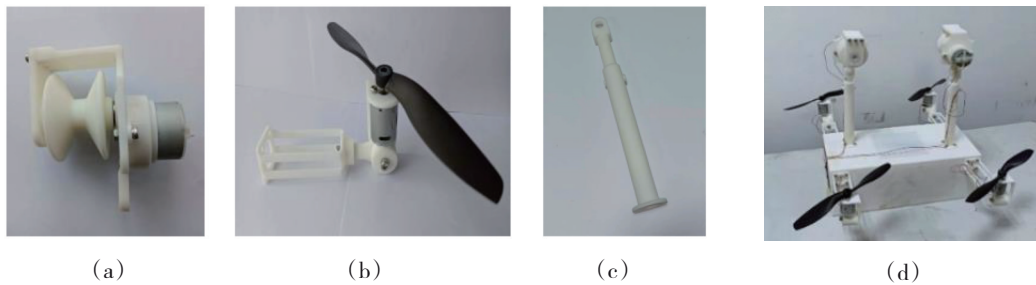


图 15 旋翼巡检机器人样机

Fig. 15 Prototype of the inspection robot with rotors

(a)—行走机构;(b)—旋翼系统;(c)—升降机构;(d)—巡检机器人样机.

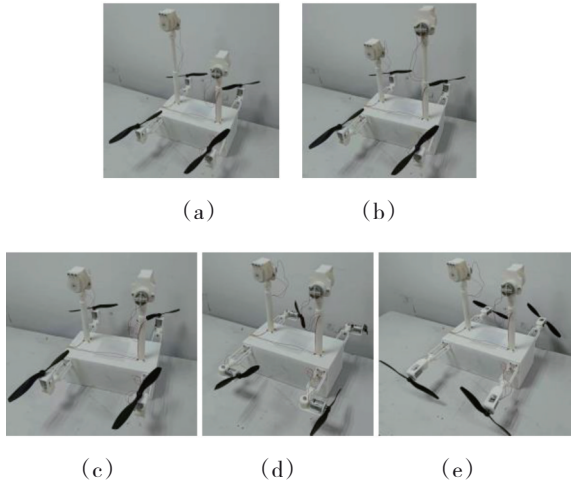


图 16 机器人样机的位姿

Fig. 16 Pose of the robot prototype

(a)一前臂伸长;(b)一后臂伸长;(c)一旋翼向上;
(d)一旋翼向侧;(e)一旋翼向前.

5.2 风载荷稳定性测试

由于3D打印的样机零部件质量较小,所以实验利用电风扇输出风力来模拟外部风载荷的作用.图17a表示的是样机在风载荷作用下的自然摆动,旋翼系统没有参与工作.图17b表示的是旋翼系统输出平衡力抑制样机的摆动,具体工作过程如下:调整旋翼方向,使同侧2个旋翼的输出力正对风载荷方向;当风扇启动时,样机会产生摆动,通过电位器控制电机输入电压,从而驱动旋翼输出合适的平衡力,旋翼系统输出的平衡力会迅速降低样机的摆角;当风载荷停止时,旋翼系统可以使机器人快速停止摆动.样机抑制摆动实验如图17所示,摆动实验结果如图18所示.

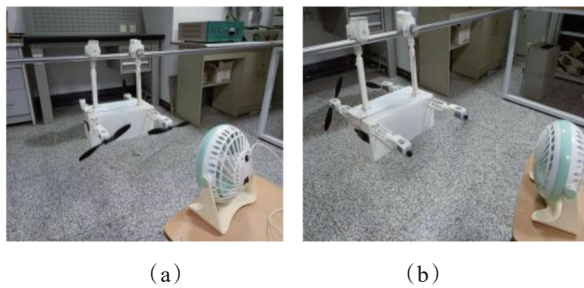


图 17 抑制摆动实验

Fig. 17 Swing suppression experiment

(a)一风载荷作用下的自然摆动;
(b)一旋翼系统工作抑制摆动.

旋翼系统不工作时,样机单侧的最大摆角约为13°.但是当旋翼系统开始工作时,样机摆动被抑制,其单侧最大摆角被控制在5°范围内.通过2个实验摆角的对比,证明旋翼系统能够有效抑制

样机在风载荷中的摆动,从而提高机器人在风载荷下的工作稳定性.

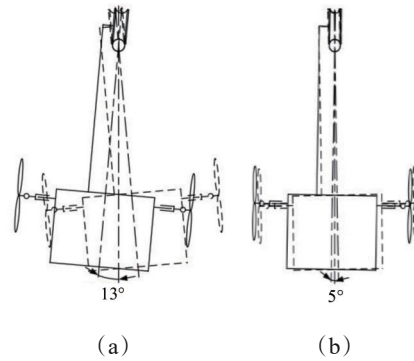


图 18 摆动实验结果

Fig. 18 Swing experiment results

(a)一无旋翼系统;(b)一有旋翼系统.

6 结 论

1)不同方向的风载荷对巡检机器人的摆动影响程度不一致.对于本文所建立的机器人摆动模型,横向风载荷对巡检工作造成的阻碍最为严重.

2)在面对时变风载荷作用时,控制策略的应用可以更好地抑制巡检机器人的摆动.仿真结果表明:模糊PID控制策略相较于PID控制策略抑制摆动的效果更加突出.

3)引入旋翼系统的巡检机器人可以减弱由于外界干扰引起的横向摆动.实验结果表明采用旋翼系统的样机在风载荷中的摆角大幅减小.

参考文献:

[1] Yang L, Fan J F, Liu Y H, et al. A review on state-of-the-art power line inspection techniques [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(12): 9350-9365.

[2] Montambault S, Pouliot N. About the future of power line robotics [C]// International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. Montreal: IEEE, 2010: 1-6.

[3] 洪展, 吴功平, 王伟, 等. 风载荷下巡检机器人姿态检测与作业优化 [J]. *机械设计与制造*, 2016(12): 197-200. (Hong Zhan, Wu Gong-ping, Wang Wei, et al. Attitude detection and operation optimization of inspection robot under wind load [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2016(12): 197-200.)

[4] 孙翠莲, 赵明扬, 王洪光. 风荷载下越障巡检机器人结构参数优化 [J]. *机械工程学报*, 2010, 46(7): 16-21. (Sun Cui-lian, Zhao Ming-yang, Wang Hong-guang. Structural parameters optimization of a navigating inspection robot under the wind load [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(7): 16-21.)

(下转第 95 页)