

DOI: 10.11992/tis.202211011

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1538.TP.20230802.1043.005>

飞走巡线机器人多模式切换混杂控制方法

秦新燕, 李惠东, 冯天明, 雷金, 李博, 李兆钧, 张杰, 王艳琦, 贾文兴

(石河子大学机械电气工程学院, 新疆 石河子 832003)

摘要: 电力线所处环境恶劣, 工况复杂, 具柔索特性, 对巡线机器人的稳定性和可靠性提出较大挑战, 因此以飞走巡线机器人 (flying-walking power line inspection robot, FPLIR) 为研究对象, 提出了一种多模式切换混杂控制方法。在 FPLIR 巡检工作原理基础上, 建立 4 种控制模式的混杂自动机模型和相互切换的监测器模型; 利用 Lyapunov 函数法和力角稳定性判据 (force-angle stability margin, FASM) 法分析 FPLIR 多模式切换和力学特性的稳定性; 基于各模式的控制目标, 提出了对应的控制策略, 尤其结合 FPLIR 的结构和工况特点, 设计变论域模糊控制器, 提高 FPLIR 线上行走的稳定性, 设计模型预测控制器, 提高 FPLIR 落线的安全性。最后通过仿真和实验验证了多模式切换混杂控制方法的有效性和可行性, 提升了 FPLIR 在复杂电力线环境下的适应性, 为未来机器人智能巡检提供理论参考。

关键词: 电力线; 飞走巡线机器人; 多模式切换; 混杂控制; 自动机; 监测器; 变论域模糊控制; 模型预测

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2023)06-1243-16

中文引用格式: 秦新燕, 李惠东, 冯天明, 等. 飞走巡线机器人多模式切换混杂控制方法 [J]. 智能系统学报, 2023, 18(6): 1243-1258.

英文引用格式: QIN Xinyan, LI Huidong, FENG Tianming, et al. Hybrid control method of multimode switching for flying-walk-ing power-line inspection robots[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2023, 18(6): 1243-1258.

Hybrid control method of multimode switching for flying-walking power-line inspection robots

QIN Xinyan, LI Huidong, FENG Tianming, LEI Jin, LI Bo,

LI Zhaojun, ZHANG Jie, WANG Yanqi, JIA Wenxing

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: The stability and reliability of power-line inspection robots are greatly affected by harsh environments, complex working conditions, and flexible characteristics of the power line. Therefore, a hybrid automata model of multimode switching is proposed for flying-walking power-line inspection robots (FPLIRs). Herein, a hybrid automata model and multimode-switching monitoring model for four control modes were established based on the operating principles of FPLIR inspection, and the Lyapunov function method and force-angle stability margin were used to analyze the stability of multimode switching and mechanical properties. Based on the control objective of each mode, corresponding control strategies were proposed. In particular, combined with the structure and working condition characteristics of FPLIRs, the variable universe fuzzy controller and model prediction controller were designed to improve the stability of FPLIRs walking along a line and the safety of FPLIR flight-line falling, respectively. Finally, the effectiveness and feasibility of the multimode switching hybrid control method were verified through simulations and experiments. The adaptability of FPLIRs in complex power-line environments was improved, providing a theoretical reference for future intelligent inspection using robots.

Keywords: power line; flying-walking power-line inspection robot; multimode switching; hybrid control; automata; monitoring; variable universe fuzzy control; model predictive

收稿日期: 2022-11-10. 网络出版日期: 2023-08-02.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62163032, 62063030); 兵团财政科技计划 (2021DB003, 2022CB011, 2022CB002-07); 兵团九师科技专项 (2021JS008).

通信作者: 雷金. E-mail: jinlei@shzu.edu.cn.

目前, 电力线巡线机器人主要有飞行式巡线机器人、攀爬式巡线机器人和混合式巡线机器人。飞行式巡线机器人是以无人机为载体, 通过

在机体上搭载巡检设备,采用飞行方式对电力线进行巡检。攀爬式巡线机器人的典型特征是有两个或者多个与电力线垂直的机械臂,机械臂上安装有行走轮,行走轮与电力线相接触且在电机的驱动下沿电力线行走^[1]。混合式巡线机器人是一种将攀爬式巡线机器人的行走功能和飞行式巡线机器人的飞行功能相结合的巡线机器人^[2],能够利用飞行功能将机器人悬挂到电力线上,利用行走功能控制机器人沿电力线移动^[1]。遇到障碍物时可以通过飞行模式或爬行模式穿越障碍物。而由于输电线路走廊常常被架设在雪山、河谷、沙漠、戈壁等特殊地形,且伴随风雪、沙尘、雨露等天气的侵扰^[3],增加了混合式巡线机器人的巡检难度。近年来,如何提高巡线机器人的稳定性和可靠性,是其面向实际应用的难点。

对于飞行式巡线机器人和攀爬式巡线机器人,它们的稳定性和可靠性控制方式均有所不同。其中飞行式巡线机器人主要是对飞行稳定性和可靠性进行控制。例如,诸多学者利用了滑模控制技术来应对飞行器控制过程中所受外部干扰问题^[4-6]。文献[7]采用积分反步法,应对风场效应对飞行器的干扰。文献[8]针对飞行器轨迹跟踪控制问题,提出了一种模糊自适应动态面轨迹跟踪控制方法。攀爬式巡线机器人的稳定性和可靠性控制主要集中在行走控制。文献[9]提出了一种模糊控制方法,控制机器人的转向行为。文献[10]采用了预编程和传感器定位相结合的方法,实现机器人自主越障控制。文献[11]提出了一种基于重力模型的PD控制律和模糊打滑控制方法,实现巡线机器人打滑和越障控制。飞行式巡线机器人的飞行控制目前有较为广泛的研究,但其存在续航时间短、无法有效克服强气流干扰等缺点,稳定性和续航时间不及攀爬式巡线机器人。而攀爬式巡线机器人虽然依托电力线,具有续航时间长、稳定性高等优点,但结构设计复杂、无法自主上下电力线,成为其在电力线巡检上的应用瓶颈。

混合式巡线机器人在多变的野外环境下,频繁的飞走切换,使其需不断地在呈柔索特性的电力线上完成起落,对机器人的稳定控制提出了较大挑战。为了使混合式巡线机器人能有效应对复杂的电力线环境,采用单一控制模式已无法满足需求,因此需采用多模式控制方法,旨在机器人能在不同环境下工作时都有一套合适的控制模式与之匹配。目前,多模式控制方法已经广泛应用于车辆、机器人等领域,并取得了一定的成果。

文献[12]针对复杂的交通环境,设计了定速巡航、稳态跟随、接近前车、强加速、强减速和避撞6种模式,并利用经验型碰撞时间倒数来实现模式切换。文献[13]设计了一个可用于野外地质探测的陆空两栖平台,划分了飞行和陆地行走两种控制模式,并采用差值判定法实现陆空两种模式切换。文献[14]针对四旋翼飞行器室外环境因素对飞行的影响,将控制模式划分为起降、平稳、增稳和失控保护4种模式,并以俯仰角、翻滚角和高度为模式切换变量进行模式切换。

为了提升巡线机器人在复杂电力线环境中的稳定性和可靠性,本文以FPLIR为研究对象,提出了一种多模式切换混杂控制方法。针对飞走巡线机器人(flying-walking power line inspection robot, FPLIR)的工作原理建立了4种模式的混杂自动机模型和模式切换监测器模型,并利用Lyapunov函数法和力角稳定性判据(force-angle stability margin, FASM)分别分析FPLIR在行走状态下多模式切换的稳定性和基于力学特性的稳定性。基于各种控制模式侧重的控制目标,提出了滑模控制、模型预测控制、变论域模糊控制、EGO-Planer等控制策略,并进行仿真和实验。仿真和实验结果表明,所提出的控制方法取得了较好的控制效果。

1 FPLIR 机构描述

自主研发的FPLIR主要由飞行机构和行走机构两部分构成,其模型如图1所示。

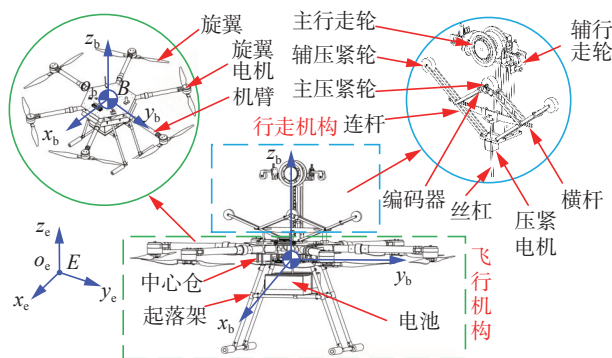


图1 FPLIR机械结构图

Fig. 1 Mechanical structure of FPLIR

其中飞行机构采用X型结构设计,6个旋翼电机均匀分布在中心仓的四周序号为 $M_1 \sim M_6$ 。行走机构包括主行走轮、辅行走轮、主压紧轮、编码器、丝杠、压紧电机、横杆、中心仓、起落架和电池。在机器人运动空间中基于右手螺旋定则建立惯性坐标系 $\{E\}$ 和重心坐标系 $\{B\}$ 。其中重心坐标系的 x_b 轴指向机器人正前方, y_b 轴指向机器人正左方, z_b 轴垂直于平面 $x_b o_b y_b$ 竖直向上。惯性坐标系 $\{E\}$ 的 x_e 轴指向正北方, y_e 轴指向正西方, z_e 轴方

向铅锤向上。

图2为FPLIR的机构构型,图中标号1~8表示机器人的驱动器件,为8个控制输入。在飞行状态下,飞行机构被激活,行走机构被关闭,该状态下机器人具有6个自由度。行走状态下,飞行机构被关闭,行走机构被激活,此时机器人具有2个自由度,分别为行走轮挂线行走时的沿线运动和压紧组件(主压紧轮、辅压紧轮、丝杠、连杆等)在压紧电机驱动下的上下运动。图中, φ 为沿 x_b 轴旋转的横滚角, ψ 为沿 z_b 轴旋转的偏航角, θ 为沿 y_b 轴旋转的俯仰角。为方便对机器人进行飞行状态下的动力学分析,定义重心坐标系 $\{B\}$ 为机体坐标系,重心与中心重合。

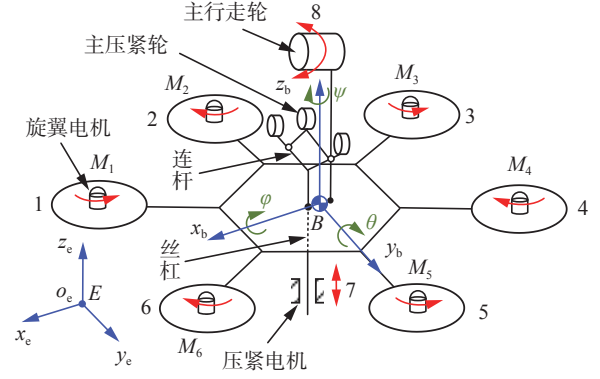


图2 FPLIR的机构构型

Fig. 2 Mechanism diagram of FPLIR

设机体坐标系按照 xyz 旋转顺序得到惯性坐标系,则旋转矩阵为

$$R_b^e = \begin{pmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\psi\sin\theta\sin\varphi - \sin\psi\cos\varphi & \cos\psi\sin\theta\cos\varphi + \sin\psi\sin\varphi \\ \cos\theta\sin\psi & \sin\psi\sin\theta\sin\varphi + \cos\psi\cos\varphi & \sin\psi\sin\theta\cos\varphi - \cos\psi\sin\varphi \\ -\sin\theta & \sin\varphi\cos\theta & \cos\varphi\cos\theta \end{pmatrix} \quad (1)$$

设机体角速度为 $\omega_b = [\omega_{bx} \ \omega_{by} \ \omega_{bz}]^T$,则 ω_b 与姿态角速度之间的关系为

$$\begin{pmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \tan\theta\sin\varphi & \tan\theta\cos\varphi \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \frac{\sin\varphi}{\cos\theta} & \frac{\cos\varphi}{\cos\theta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_{bx} \\ \omega_{by} \\ \omega_{bz} \end{pmatrix} \quad (2)$$

2 FPLIR 动力学模型

2.1 飞行机构动力学模型

2.1.1 位置动力学模型

根据牛顿第二定律,机器人运动学方程为

$$m\ddot{E}_e = T_e - G - F_e \quad (3)$$

式中: m 为机器人的质量, E_e 为惯性坐标系下的位移量, G 为重力, T_e 为惯性坐标系下机器人的升力, F_e 为空气阻力。

设机体坐标系下机器人升力为

$$T_b = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \sum_{i=1}^6 k_F \Omega_i^2 \end{pmatrix}^T \quad (4)$$

式中: k_F 为升力系数, $\Omega_i (i=1,2,\dots,6)$ 为旋翼转速。

通过旋转矩阵 R_b^e 转换得到机器人的升力在惯性坐标系下的表达式:

$$T_e = k_F \sum_{i=1}^6 \Omega_i^2 \begin{pmatrix} \cos\varphi\sin\theta\cos\psi + \sin\varphi\sin\psi \\ \cos\varphi\sin\theta\sin\psi - \sin\varphi\cos\psi \\ \cos\varphi\cos\theta \end{pmatrix} \quad (5)$$

空气阻力表达式为

$$F_e = [k_{ax}\dot{x}_e \ k_{ay}\dot{y}_e \ k_{az}\dot{z}_e]^T \quad (6)$$

其中, k_{ax} 、 k_{ay} 、 k_{az} 分别为 x_b 、 y_b 、 z_b 3个轴向的空气阻尼系数。

联立式(1)~(6)得到机器人位置动力学模型:

$$\begin{cases} \ddot{x}_e = \frac{1}{m} k_F \sum_{i=1}^6 \Omega_i^2 (c\varphi s\theta c\psi + s\varphi s\psi) - \frac{k_{ax}}{m} \dot{x}_e \\ \ddot{y}_e = \frac{1}{m} k_F \sum_{i=1}^6 \Omega_i^2 (c\varphi s\theta s\psi - s\varphi c\psi) - \frac{k_{ay}}{m} \dot{y}_e \\ \ddot{z}_e = \frac{1}{m} k_F \sum_{i=1}^6 \Omega_i^2 (c\varphi c\theta) - \frac{k_{az}}{m} \dot{z}_e - g \end{cases} \quad (7)$$

式中 g 为重力加速度。

2.1.2 姿态动力学模型

根据牛顿—欧拉方程建立机体坐标系下FPLIR的姿态动力学方程:

$$G_b + \Gamma_b = I\dot{\omega}_b + \omega_b \times I\omega_b \quad (8)$$

式中: G_b 为旋翼产生的陀螺力矩, $\Gamma_b = [\Gamma_{bx} \ \Gamma_{by} \ \Gamma_{bz}]^T$ 为旋翼在机体轴上产生的力矩, $I = \text{diag}(I_x \ I_y \ I_z)$ 为FPLIR的转动惯量。

如图3所示, r 为机器人中心到机臂末端的距离, $\beta=60^\circ$ 表示两机臂之间的夹角, $\alpha_n (n=1,2,\dots,6)$ 为机臂与 x_b 轴正方向的夹角, k_m 为反扭矩系数,则旋翼在机体轴上产生的力矩为

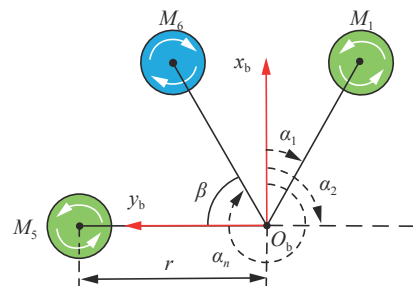


图3 FPLIR机臂布局示意图

Fig. 3 Schematic diagram of FPLIR arm layout

$$\mathbf{F}_b = [\Gamma_{bx} \quad \Gamma_{by} \quad \Gamma_{bz}]^T = \begin{pmatrix} -rk_F \sin \alpha_1 & -rk_F \sin \alpha_2 & \cdots & -rk_F \sin \alpha_6 \\ rk_F \cos \alpha_1 & rk_F \cos \alpha_2 & \cdots & rk_F \cos \alpha_6 \\ (-1)^{1+1}k_m & (-1)^{2+1}k_m & \cdots & (-1)^{6+1}k_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Omega_1^2 \\ \Omega_2^2 \\ \vdots \\ \Omega_6^2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

对式(2)求逆矩阵,并采用小角度假设得:

$$\boldsymbol{\omega}_b = [\dot{\varphi} \quad \dot{\theta} \quad \dot{\psi}]^T \quad (10)$$

联立式(2)、(8)、(9)、(10)得到FPLIR的姿态动力学方程为

$$\begin{cases} \ddot{\varphi} = \dot{\psi}\dot{\theta}\left(\frac{I_y - I_z}{I_x}\right) + \frac{1}{2I_x}k_F r(-\Omega_1^2 - 2\Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2 + 2\Omega_5^2 + \Omega_6^2) + \frac{G_b}{I_x} \\ \ddot{\theta} = \dot{\varphi}\dot{\psi}\left(\frac{I_z - I_x}{I_y}\right) + \frac{\sqrt{3}}{2I_y}k_F r(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2 - \Omega_5^2 + \Omega_6^2) + \frac{G_b}{I_y} \\ \ddot{\psi} = \dot{\varphi}\dot{\theta}\left(\frac{I_x - I_y}{I_z}\right) + \frac{k_m}{I_z}(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2 + \Omega_5^2 - \Omega_6^2) + \frac{G_b}{I_z} \end{cases} \quad (11)$$

2.1.3 模型线性化

为方便控制器设计,将式(8)简化为 $\mathbf{F}_b = \mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}}_b$,在速度较小的情况下忽略空气阻力的影响,则:

$$\begin{cases} \ddot{x}_e = \frac{1}{m}k_F \sum_{i=1}^6 \Omega_i^2 (\cos \varphi \sin \theta \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi) \\ \ddot{y}_e = \frac{1}{m}k_F \sum_{i=1}^6 \Omega_i^2 (\cos \varphi \sin \theta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi) \\ \ddot{z}_e = \frac{1}{m}k_F \sum_{i=1}^6 \Omega_i^2 (\cos \varphi \cos \theta) - g \\ \ddot{\varphi} = \frac{1}{2I_x}k_F r(-\Omega_1^2 - 2\Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2 + 2\Omega_5^2 + \Omega_6^2) \\ \ddot{\theta} = \frac{\sqrt{3}}{2I_y}k_F r(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2 - \Omega_5^2 + \Omega_6^2) \\ \ddot{\psi} = \frac{k_m}{I_z}(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2 + \Omega_5^2 - \Omega_6^2) \end{cases} \quad (12)$$

2.2 行走机构动力学模型

机器人在挂线行走工况下旋翼电机停止工作,对行走机构的影响可忽略,辅行走轮质量较轻且主要起导向作用,忽略其对电力线的影响,因此在沿线行走工况下对机器人进行如图4所示的受力分析。

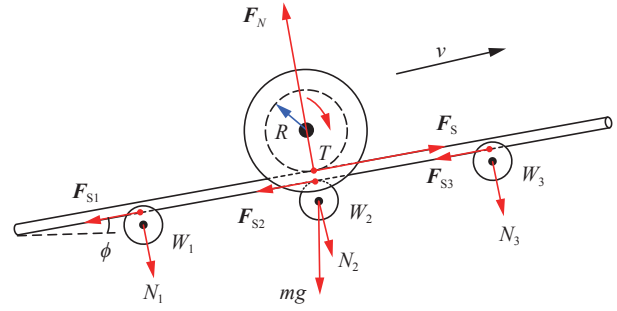


图4 FPLIR滚轮与电力线之间的受力分析
Fig. 4 Force analysis between FPLIR roller and power line

在惯性坐标系下设电力线倾角为 ϕ ,则机器人沿电力线匀速行走时受力平衡方程为

$$\begin{cases} F_N = N_1 + N_2 + N_3 + mg \cos \phi \\ \sum_{i=1}^3 F_{Si} = \sum_{j=1}^3 N_j \cdot \varepsilon \\ F_S = F_N \cdot \varepsilon \\ F_S = mg \sin \phi \\ T = F_S \cdot R \end{cases} \quad (13)$$

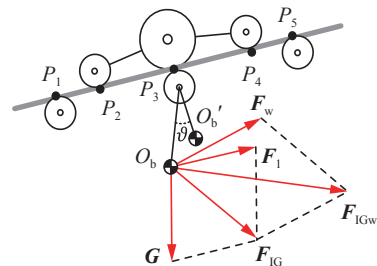
式中: F_N 为电力线对主行走轮的作用力, N_j 为主压紧轮 W_2 和辅压紧轮 W_1 、 W_3 与电力线之间的相互作用力($j=1,2,3$), F_S 为主行走轮与电力线之间的静摩擦力, F_{Si} 为主压紧轮、辅压紧轮和电力线之间的静摩擦力($i=1,2,3$), ε 为主行走轮、主压紧轮和辅压紧轮与电力线的摩擦系数, R 为主行走轮的半径, T 为主行走轮的驱动力矩。

则机器人沿线行走时的动力学方程为

$$\dot{v} = \frac{1}{m}(F_S - mg \sin \phi) \quad (14)$$

式中 v 为机器人沿线行走时的速度。

机器人沿线行走时除了受到滚轮(主压紧轮、辅压紧轮、主行走轮、辅行走轮)与电力线之间力的影响,亦会受到风力 \mathbf{F}_w 和惯性力 \mathbf{F}_I 的影响,其受力如图5(a)所示。



(a) FPLIR受风力、惯性力和重力的合力示意图

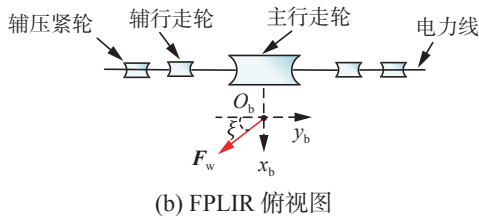


图 5 挂线行走时 FPLIR 受力分析

Fig. 5 Force analysis of FPLIR along the power line

图中 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 为滚轮与电力线的接触点, θ 为机器人摆角。机器人受风力影响的俯视图如图 5(b) 所示, 风力 F_w 与 y_b 轴的夹角为 ξ , 则机器人所受合力为

$$\begin{cases} F_{IG} = G + F_1 \\ F_{IGw} = G + F_1 + F_w \end{cases} \quad (15)$$

式中: F_{IG} 为 G 和 F_1 的合力, F_{IGw} 为 F_{IG} 和 F_w 的合力。

3 FPLIR 混杂自动机模型及多模式切换监督器设计

3.1 FPLIR 控制模式划分及切换

FPLIR 的工作原理如图 6 所示: 机器人从地面起飞, 通过飞行的方式完成落线。安全落线后, 机器人开始线上行走巡检。在行走过程中遇到障碍物时, 机器人通过飞行或行走穿越的方式越过障碍物。当完成单档段的巡检任务后, 通过飞行的方式飞越杆塔到下一个档段。当机器人完成巡检任务后, 通过飞行完成下线。

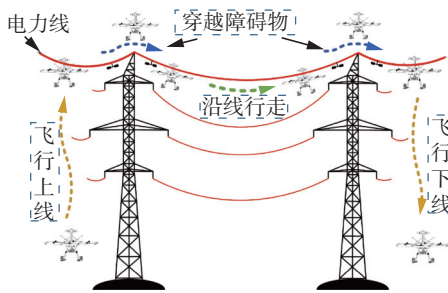


图 6 FPLIR 工作原理

Fig. 6 Working principle of FPLIR

输电线路因其循环往复的结构化分布特征, 以及 FPLIR 灵活切换的运行机制, 将 FPLIR 的工作划分为如表 1 所示的 5 种控制模式。

表中每种控制模式分别对应着 FPLIR 的一种状态, 这些状态通过离散事件的触发实现相互切换^[15], 对此本文引入一种如图 7 所示的多模式切换监控框架。FPLIR 巡检过程中, 设机器人任意时刻 t_i 的运动状态为 $q(t_i) \in Q$, 当多模式切换监测器检测到离散事件满足触发条件时, 多模式切换

监测器将机器人状态信息, 映射为系统的离散事件 $e \in E$ 。离散事件控制器计算出离散控制策略 $s \in S$, 控制指令生成器将离散控制策略转化为对机器人的连续操纵命令^[16] $u(t_i) \in U$, 通过命令的执行, 改变机器人的运动状态。

表 1 FPLIR 控制模式划分

Table 1 FPLIR control mode division

工作状态	控制模式	模式描述
飞行	增稳模式	用于增强 FPLIR 飞行时受到外界较大干扰时的鲁棒性。
	落线模式	当 FPLIR 飞行到一定高度后, 通过计算出机器人和地线之间的相对位置关系, 并进行路径规划从而完成落线。
	飞越杆塔模式	FPLIR 完成当前电力线档段巡检后, 从行走状态转换为飞行状态飞越杆塔, 实现档段切换。
行走	打滑模式	当 FPLIR 沿线行走时, 打滑模式用于抑制机器人行走打滑以及减小机器人摆动角度。该模式贯穿机器人整个沿线行走过程, 保证其行走稳定性。
	行走越障模式	FPLIR 根据其与小、可穿越型障碍物的距离, 控制主行走轮的转速从而完成越障。

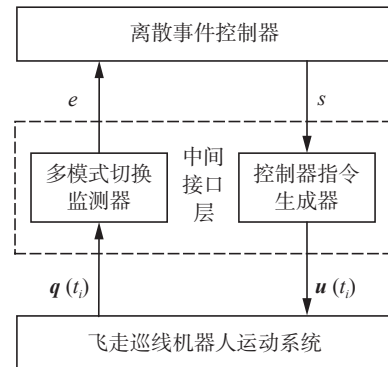


图 7 FPLIR 多模式切换监控框架

Fig. 7 FPLIR multi-mode switching monitoring framework

3.2 FPLIR 多模式切换混杂系统模型

由于 FPLIR 控制系统是一个典型的混杂动态系统, 无法单一地用离散或连续的数学模型来准确地描述, 因此建立如下所示的混杂自动机模型。

$$H = (S, E, Q, U, f) \quad (16)$$

式中: $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$, s_1 为落线模式、 s_2 为打滑模式、 s_3 为行走越障模式、 s_4 为飞越杆塔模式; E 为 4 种控制模式切换的逻辑判决条件集, $E = \{e_{12}, e_{23}, \dots, e_{ij}\}$ ($i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, 4$); Q 为 n 维连续变量状态空间, $Q \subseteq \mathbf{R}^n$; U 为 m 维连续动态控制输入空间,

$U \subseteq \mathbf{R}^m$; f 为连续状态向量 $\mathbf{x}(t)$ 的向量场, $f: Q \times U \rightarrow Q$ 。

图8描述了控制模式的切换过程, 在 t_i 时刻控制模式为 s_i , 离散事件 e_{ij} 发生之前, 遵循连续动态行为 $\dot{\mathbf{q}}(t_i) = f(\mathbf{q}(t_i), \mathbf{u}(t_i))$, 在 t_j 时刻, 离散事件 e_{ij} 发生, 控制模式变迁为 s_j , 此后系统将遵循新控制模式下的连续动态行为^[17] $\dot{\mathbf{q}}(t_j) = f(\mathbf{q}(t_j), \mathbf{u}(t_j))$ 。从图中可知, 在具有结构化工况特点的电力线环境中机器人的运行具有一定的规律性, 其模式的切换亦存在规律性。

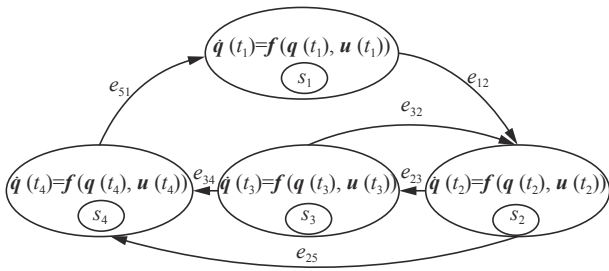


图8 混杂自动机切换模型

Fig. 8 Switching model of hybrid automata

3.3 FPLIR 多模式切换监测器设计

FPLIR 多模式切换监测器用于监测机器人状态的连续变化过程中产生的离散事件, 依据控制模式的划分规则, 设计每种离散事件监测器模型, 包括:

1) 落线模式监测器模型

落线模式需要机器人飞行到一定的高度后才能被触发, 则监测器模型为

$$|h - H| \leq \Delta h \quad (17)$$

式中: h 为机器人的飞行高度; H 为地线的高度; Δh 为允许的高度偏差。

2) 打滑模式监测器模型

FPLIR 在挂线巡检过程中, 通过监测机器人摆角 θ 是否小于安全阈值, 以及主压紧轮的线速度与主行走轮的线速度之比是否小于设定的打滑度 η_{des} , 从而判定是否打滑, 则监测器模型为

$$\begin{cases} \eta_{\text{des}} \leq \frac{v_t}{v_{\text{ref}}} \\ \theta \leq \theta_{\text{max}} \end{cases} \quad (18)$$

其中: v_t 为主压紧轮的速度, v_{ref} 为主行走轮的速度, θ_{max} 为摆角安全阈值。

3) 行走越障模式监测器模型

机器人挂线行走时, 检测到前方小型穿越型障碍物与机器人的距离为 x_d , 触发行走越障模式的设定距离为 D , 允许的检测距离偏差为 Δd_{max} , 则:

$$|x_d - D| - \Delta d_{\text{max}} \leq 0 \quad (19)$$

4) 飞越杆塔模式监测器模型

机器人在挂线巡检过程中, 为保证机器人不与杆塔发生碰撞, 需要与杆塔之间保持一个最小安全距离 l_{min} 。当机器人检测到与杆塔的距离为 l_{min} 时, 系统切换至飞越杆塔模式, 则监测器模型为

$$|x_l - l_{\text{min}}| - \Delta l \leq 0 \quad (20)$$

其中: x_l 为机器人与杆塔之间的距离, Δl 为允许的距离偏差。

4 FPLIR 多模式切换控制方法

4.1 FPLIR 稳定性分析

4.1.1 行走状态下多模式切换稳定性分析

机器人沿线行走时的控制系统是一个非线性系统, 其稳定性比通常的由连续或离散子系统组成的切换系统稳定性要复杂^[18]。

定理 1 对于非线性切换系统^[19], 如果存在正定 Lyapunov 函数 $V_i(x(t), t)$, K 类函数 α_i , $i = 1, 2, \dots, p$ 满足:

$$1) \alpha_1(\|x(t)\|) \leq V_i(x(t), t), i = 1, 2, \dots, p;$$

$$2) \dot{V}_i(x(t), t) \leq 0, i = 1, 2, \dots, p, x \in B_r = \{x: \|x\| \leq r, r > 0\};$$

$$3) V_{i+1}(x(t), t) \leq V_i(x(t), t), i = 1, 2, \dots, p; \text{ 那么平衡点是在 Lyapunov 意义下稳定的。}$$

定理 2 对于非线性切换系统, 若存在正定 Lyapunov 函数 $V_i(x(t), t)$, K 类函数 α_i 和 β_i , 满足下面条件:

$$1) \alpha_1(\|x(t)\|) \leq V_i(x(t), t) \leq \beta_i(\|x(t)\|), i = 1, 2, \dots, p;$$

$$2) \dot{V}_i(x(t), t) \leq 0, i = 1, 2, \dots, p, x \in B_r = \{x: \|x\| \leq r, r > 0\};$$

$$3) V_{i+1}(x(t), t) \leq V_i(x(t), t), i = 1, 2, \dots, p; \text{ 则平衡点在 Lyapunov 意义下是一致稳定的。}$$

由定理 1 和 2 可知, Lyapunov 函数值既要求在每个连续子系统的时间区间上是非增, 也要求在切换过程中是非增的。对于 FPLIR 而言, 机器人沿线行走时各个模式具有相同的数学模型, 因此选用共同 Lyapunov 函数法对多模式切换进行稳定性分析。FPLIR 协调控制器的控制律和 Lyapunov 函数为

$$\begin{cases} \Upsilon = -k \cdot \text{sat}[v_t(t) - v_{\text{ref}}(t)] \\ V = [\eta_{\text{des}}(t) - \eta(t)]^2 \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\Upsilon = \eta_{\text{des}}(t) - \eta(t)$, k 为量化因子, sat 为饱和函数。机器人在低速穿越障碍物过程中压紧组件降下不输出压紧力, 无法进行打滑控制, 忽略此时的打滑情况, 并设此时的打滑度 $\eta(t) = 1$ 。对 V 求

导得:

$$\dot{V} = -2k[\eta_{\text{des}}(t) - \eta(t)] \text{sat}[\eta_{\text{des}}(t) - \eta(t)] \quad (22)$$

当 $\eta_{\text{des}}(t) - \eta(t)$ 变号时 \dot{V} 变号, 从而得出 $\dot{V} < 0$ 恒成立。

$$V_{i+1}(x(t), t) - V_i(x(t), t) = [\eta_i(t) - \eta_{i+1}(t)] \cdot [2\eta_{\text{des}}(t) - \eta_{i+1}(t) - \eta_i(t)] \quad (23)$$

式中, $2\eta_{\text{des}}(t) - \eta_{i+1}(t) - \eta_i(t) > 0$, $\eta_i(t) - \eta_{i+1}(t) < 0$, 因此 $V_{i+1}(x(t), t) - V_i(x(t), t) > 0$ 。

综上分析, 机器人在行走状态下多模式切换是稳定的, 这样保证了机器人沿线行走时速度与主行走轮转速的跟随性。

4.1.2 行走状态下基于力学特性的稳定性分析

对已有机器人稳定性判别法进行综合分析^[20], 并结合 FPLIR 的机械结构特点, 采用力—角稳定性判别法对 FPLIR 线上行走进行稳定性分析。

如图 9 所示, 机器人滚轮与电力线的 5 个接触点共线, 所以 5 个点组成倾翻轴线, 向量记为

$$\mathbf{b} = \mathbf{P}_5 - \mathbf{P}_1 \quad (24)$$

式中, \mathbf{P}_5 、 \mathbf{P}_1 为重心 O_b 到接触点 P_5 和 P_1 的向量。

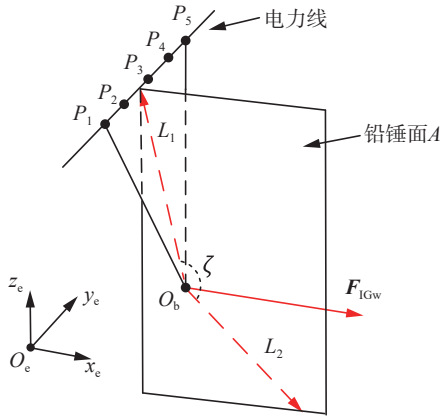


图 9 FASM 稳定裕度分析示意图

Fig. 9 Diagram of FASM stability margin analysis

过重心 O_b 作与倾翻轴线 \mathbf{b} 的法向量为

$$\mathbf{L}_1 = \mathbf{P}_5 + (-\mathbf{P}_5 \cdot \hat{\mathbf{b}}) \cdot \hat{\mathbf{b}} \quad (25)$$

其中 $\hat{\mathbf{b}} = \frac{\mathbf{b}}{\|\mathbf{b}\|}$ 。

\mathbf{F}_{IGw} 在以 $\hat{\mathbf{b}}$ 为法向量的平面 A 上的投影为

$$\mathbf{L}_2 = \mathbf{F}_{\text{IGw}} + (-\mathbf{F}_{\text{IGw}} \cdot \hat{\mathbf{b}}) \cdot \hat{\mathbf{b}} \quad (26)$$

机器人边线倾翻角为 \mathbf{F}_{IGw} 的投影 \mathbf{L}_2 与 \mathbf{L}_1 的夹角:

$$\lambda = \begin{cases} \arccos(\mathbf{L}_1 \cdot \mathbf{L}_2), & (\mathbf{L}_1 \times \mathbf{L}_2) \cdot \hat{\mathbf{b}} > 0 \\ -\arccos(\mathbf{L}_1 \cdot \mathbf{L}_2), & (\mathbf{L}_1 \times \mathbf{L}_2) \cdot \hat{\mathbf{b}} \leq 0 \end{cases} \quad (27)$$

根据文献 [1] 和文献 [21] 可知: L_1 的长度为 40.9 cm, 当风力与 y_b 轴的夹角为 $\xi = 90^\circ$, 风速为 15.5 m/s (7 级风), 压紧轮 (主、辅压紧轮) 没有对电力线输出压紧力时, 机器人沿 x_b 轴方向的摆动位移最大为 5.9 cm。由于辅行走轮在起到导向作

用的同时, 也能够减小机器人沿 y_b 轴方向的摆动, 因此忽略机器人沿 y_b 轴方向的惯性力, 经计算得 $\lambda = 8.29$, $T_{\text{fasm}} > 0$, 故机器人沿线行走时在风速为 15.5 m/s 的情况下依旧具有稳定性。

4.1.3 飞行和行走状态切换稳定性分析

对机器人飞行状态和行走状态的切换选用 Lyapunov 直接法进行稳定性分析。

Lyapunov 直接法^[22]: 设系统状态方程为 $\dot{x} = f(x)$, $t \geq 0$, 平衡状态为 $x_e = 0$, 若存在一个标量函数 $V(x)$ 对所有 x 都有连续一阶偏导, 满足:

1) 稳定性判据 1: ① $V(x)$ 正定, $\dot{V}(x)$ 负定, 则系统在平衡状态 x_e 是渐近稳定的; ② $\|x\| \rightarrow \infty$, $V(x) \rightarrow \infty$, 则系统在平衡状态 x_e 大范围渐近稳定。

2) 稳定性判据 2: ① $V(x)$ 正定, $\dot{V}(x)$ 半负定, 在非零状态 $\dot{V}(x) \neq 0$, 则系统在平衡状态 x_e 是渐近稳定的; ② $\|x\| \rightarrow \infty$, $V(x) \rightarrow \infty$ 则系统在平衡状态 x_e 是大范围渐近稳定的。

3) 稳定性判据 3: $V(x)$ 正定, $\dot{V}(x)$ 半负定, 在非零状态 $\dot{V}(x) \equiv 0$, 则系统在平衡状态 x_e 是 Lyapunov 意义下稳定的。

由图 1 所示的机器人的行走机构可知, 为保证机器人能够安全、平稳落线, 需要机器人的主行走轮能够准确落到电力线上。

当主行走轮位于电力线正上方时, 机器人沿 z 轴匀速缓慢降落, 此时忽略其 x 轴和 y 轴的微小位移, 则 z 轴的加速度矢量为

$$\mathbf{a}_1 = \frac{\mathbf{T}_b - \mathbf{G}}{m} \approx \mathbf{0} \quad (28)$$

机器人接触到电力线上但未完全停稳时, 其 x 轴和 y 轴速度为 0, z 轴加速度矢量为

$$\mathbf{a}_2 = \frac{\mathbf{T}_b - \mathbf{G} + \mathbf{N}}{m} \quad (29)$$

由于当机器人落到线上时, 旋翼提供的升力逐渐减小至 0, 而电力线对机器人提供的支持力逐渐增大, 因此机器人将做加速度逐渐变小的减速运动。

设 $V(x) = a_2^2 - a_1^2$, 则 $\dot{V}(x) = 2a_2 \cdot \dot{a}_2 - 2a_1 \cdot \dot{a}_1$ 。由于 $V(x)$ 正定, $\dot{V}(x)$ 负定, 故飞行状态切换至行走状态的过程稳定, 同理可得行走状态切换至飞行状态过程稳定。

4.2 控制模式设计

4.2.1 增稳模式

由于滑模变结构控制能有效处理系统信号通道中突然出现的干扰或者信号大幅变化的情况^[6], 所以增稳模式采用滑模变结构控制方法。以俯仰通道为例进行控制器设计:

选取滑模面为线性滑模面:

$$s = ce + \dot{e} \quad (30)$$

选取指数趋近律:

$$\dot{s} = -\varepsilon \cdot \text{sgn}(s) - ks \quad (31)$$

令 θ_r 为参考输入, θ 为实际俯仰角, 则:

$$e_\theta = \theta_r - \theta \quad (32)$$

$$\dot{e}_\theta = \dot{\theta}_r - \dot{\theta} \quad (33)$$

将式 (32)、(33) 代入式 (30)、(31) 中得:

$$\ddot{\theta}_r - \ddot{\theta} = \dot{s}_\theta = -\varepsilon \cdot \text{sgn}(s_\theta) - ks_\theta \quad (34)$$

将式 (34) 代入式 (12) 得:

$$\Gamma_{by} = I_y [c\dot{e}_\theta + \ddot{\theta}_r + \varepsilon \cdot \text{sgn}(s_\theta) + ks_\theta] \quad (35)$$

同理可得其他通道的控制器。

4.2.2 落线模式

为了能够让机器人安全、平稳落线, 需要让机器人以零速度到达期望的落线位置。由于模型预测控制 (model predictive control, MPC) 方法能够预测被控对象的未来行为, 通过对输入和状态变量的约束, 可以保证机器人降落的安全性^[23], 因此采用 MPC 作为落线模式的控制方法。

设连续时间的动力学系统常微分方程为

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad (36)$$

其中: 机器人状态向量和输入向量分别为 $x(t) = [p^T \ \dot{p}^T \ \varphi \ \theta \ \psi \ \dot{\varphi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T$ 和 $u(t) = [T_b \ \Gamma_x \ \Gamma_y \ \Gamma_z]^T$, 则最优控制问题为

$$\min J(x(t), \Delta u(t)) = \|x_r(t) - x(t)\|_Q + \|\Delta u(t)\|_F \quad (37)$$

其中: $\Delta u(t)$ 表示控制增量, $x_r(t)$ 表示参考状态向量, Q 和 F 表示正常数。在实际控制过程中, 往往需要对系统状态机控制量进行约束, 一般如下:

$$u_{\min}(t) \leq u(t) \leq u_{\max}(t) \quad (38)$$

$$\Delta u_{\min}(t) \leq \Delta u(t) \leq \Delta u_{\max}(t) \quad (39)$$

$$x_{\min}(t) \leq x(t) \leq x_{\max}(t) \quad (40)$$

因此, 模型预测控制在的每一步的都带约束优化求解问题都等价于求解二次规划问题。当每个控制周期完成求解后, 可以得到控制时域内的一系列控制输入增量。

$$\Delta U^*(t) = [\Delta u^*(t) \ \Delta u^*(t+1) \ \cdots \ \Delta u^*(t+N_c-1)] \quad (41)$$

根据模型预测控制基本原理, 将该控制序列中的第一个元素作为实际的控制输入增量作用于系统, 即:

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u^*(t) \quad (42)$$

当控制系统执行这一控制量直到下一时刻。在新的时刻, 系统根据状态信息重新预测下一段时域的输出, 通过优化过程得到一个新的控制增量序列。

4.2.3 打滑模式

机器人沿线巡检过程中, 主行走轮可能发生打滑主要有以下 3 种情况: 1) 电力线坡度较大, 且压紧力不足; 2) 在雨雪天气等影响下, 使电力线表面的摩擦系数变小; 3) 有较大风扰时会使机

器人发生摆动。这些工况会对机器人的行走稳定性造成严重影响。因此, 针对电力线坡度、风扰、磨损等诸多因素, 本文采用一种基于多工况变论域模糊控制 (variable universe fuzzy control, VUFC) 方法^[24]。该控制系统能够根据机器人在不同工况下, 改变输出变量的论域从而获得更好的控制效果。

由 2.2 节分析可知, 若机器人沿线行走时主行走轮不打滑应满足以下条件:

$$\sum_{j=1}^3 N_j \geq G \cdot \left(\frac{\sin \phi}{\varepsilon} - \cos \phi \right) \quad (43)$$

线上行走打滑控制系统流程图如图 10 所示。以电力线坡度、打滑度和机器人摆角作为控制器的输入变量, 以三者的值作为工况分级的判断依据, 压紧电机接收的脉冲数 P_{num} 作为输出变量。输入变量的论域如表 2 所示, 输出变量的论域受伸缩因子 y_p 的影响。

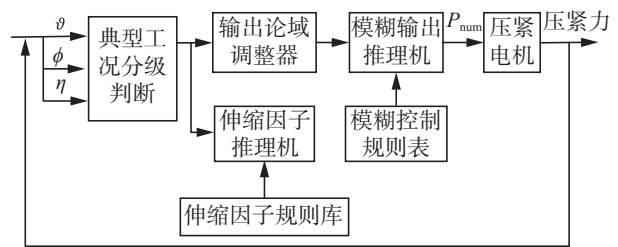


图 10 变论域模糊控制系统流程

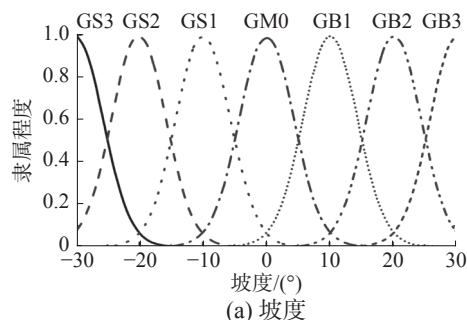
Fig. 10 Flow of variable domain fuzzy control system

表 2 输入变量论域

Table 2 Input variable domain

输入变量	坡度	打滑度	摆角
论域	$-30^\circ < \phi < 30^\circ$	$0.55 < \eta < 0.99$	$0^\circ < \theta < 14^\circ$

电力线坡度采用高斯型隶属度函数进行模糊化; 打滑度主要采用三角形隶属度函数进行模糊化, 对于 $\eta \geq 0.95$ (不打滑) 和 $\eta < 0.6$ (严重打滑) 两个临界点, 则选择梯形隶属度函数; 摆动角程度分为小 ($0^\circ < \theta \leq 2^\circ$), 中 ($2^\circ < \theta \leq 12^\circ$), 大 ($\theta > 12^\circ$), 并分别采用高斯型隶属度函数、三角形隶属度函数和梯形隶属函数进行模糊化, 其中摆动角度为小时认定机器人稳定。输入和输出变量的隶属度函数如图 11 所示。



(a) 坡度

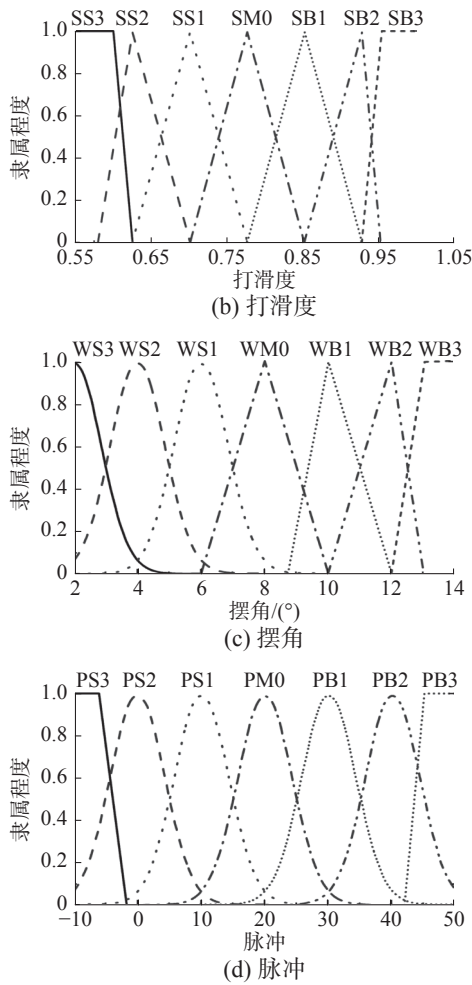


图 11 输入和输出隶属度函数

Fig. 11 Input and output membership functions

伸缩因子 y_p 的隶属度函数如图 12 所示。解模糊方法采用最大隶属度函数法。

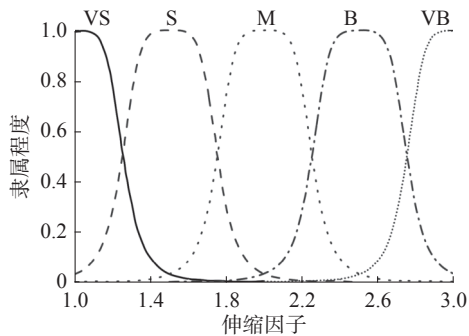


图 12 伸缩因子隶属度函数

Fig. 12 Membership function diagram of expansion factor

4.2.4 行走越障模式

机器人沿线巡检过程中遇到可以通过行走越过的小型障碍物如防震锤等, 控制系统切换至行走越障模式, 其越障过程如图 13 所示。当机器人与防震锤的距离为 $x_d > D_0$ 时, 机器人速度为 v_0 ; 当机器人与防震锤的距离为 $D_1 < x_d \leq D_0$ 时, 触发行走越障模式, 机器人速度为 v_1 ; 当机器人与防震锤

的距离为 $x_d \leq D_1$ 时, 机器人降下主、辅压紧轮, 速度为 v_2 ; 当机器人越过防震锤之后, 若 $x_d \leq D_1$, 则机器人以速度 v_2 前进, 若 $D_1 < x_d \leq D_0$, 则机器人主、辅压紧轮重新压紧电力线, 速度为 v_1 , 若 $x_d > D_0$, 则机器人退出行走越障模式, 以速度 v_0 前进。

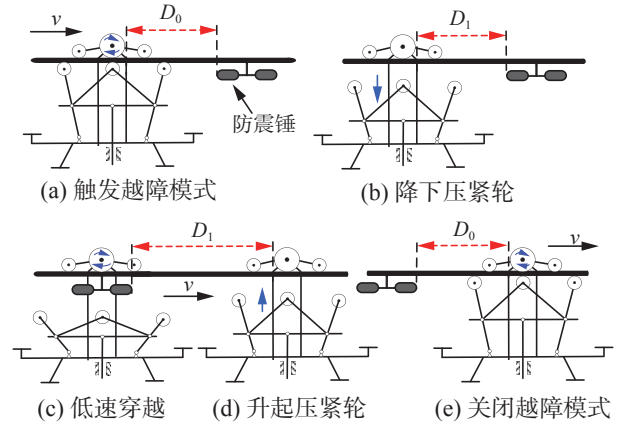


图 13 FPLIR 穿越小型障碍物 (防震锤) 示意

Fig. 13 Schematic of FPLIR crossing a small obstacle (shockproof hammer)

机器人沿线行走时速度突变会对机器人的稳定性造成影响, 为保证在越障过程中速度变化时的平滑性, 采用一种基于插值规则的控制方法, 如下式所示。该控制方法是以机器人与障碍物的距离 x_d 为自变量, 速度 v 为因变量。由于机器人在不断接近或远离障碍物的过程中距离 x_d 是连续平滑变化的, 因此可以保证机器人速度 v 变化的平滑性。

$$\begin{cases} v_0, & x_d > D_0 \\ v_1 = \frac{x_d}{D_0} v_0, & D_1 < x_d \leq D_0 \\ v_2, & x_d \leq D_1 \end{cases} \quad (44)$$

式中: D_0 是机器人越过防震锤之前触发行走越障模式的最大距离, 以及越过防震锤之后退出行走越障模式的最大距离; D_1 是机器人越过防震锤之前降下主、辅压紧轮的最小距离, 以及越过防震锤之后升起主、辅压紧轮的最小距离。

4.2.5 飞越杆塔模式

为保证机器人能够安全飞越杆塔, 本文采用基于无 ESDF 梯度的局部规划器 (ESDF-free gradient-based local planner, EGO Planner)^[25] 作为飞越杆塔模式的控制方法。通过对机器人飞行路径的规划, 以及设置膨胀半径, 能够让机器人沿着安全飞行路径飞越杆塔, 也可让机器人与杆塔保持一定的安全距离, 确保机器人飞越杆塔的安全性。

首先, 生成一个满足约束但忽略障碍物的 B 样条曲线 ϕ , 然后对曲线 ϕ 进行碰撞检测, 并用 A* 算法生成一条无碰撞路径, 对于每一条碰撞段中的控制点 Q 都会分配一个 $\{p, v\}$ 对。

为防止轨迹在被拉出当前障碍物前重复生成 $\{p, v\}$ 对, 则给出以下约束条件:

$$\begin{cases} d_{ij} = (Q_i - p_{ij}) \cdot v_{ij} \\ d_{ij} < 0 \end{cases} \quad (45)$$

式中 d_{ij} 表示 Q_i 到第 j 个障碍物的距离。若满足 $d_{ij} > 0$, 则认为控制点 Q_i 在新的障碍物中, 反之则认为是已发现的障碍物。

使用均匀 B 样条曲线 ϕ 表示轨迹, 每个节点向量与父节点向量有相同的时间间隔 $\Delta t = t_{m+1} - t_m$ 。

根据 B 样条曲线 ϕ 的一阶、二阶、三阶控制点分别为

$$\begin{cases} V_i = \frac{Q_{i+1} - Q_i}{\Delta t} \\ A_i = \frac{V_{i+1} - V_i}{\Delta t} \\ J_i = \frac{A_{i+1} - A_i}{\Delta t} \end{cases} \quad (46)$$

式中: V_i 表示控制点的速度, A_i 表示加速度, J_i 表示加加速度。

根据无人机的微分平坦特性, 降低要规划的变量, 则目标函数为

$$\min_Q J = \lambda_s J_s + \lambda_c J_c + \lambda_d J_d \quad (47)$$

其中: J_s 是平滑项惩罚, J_c 是碰撞项惩罚, J_d 是可行性惩罚, λ_s 、 λ_c 、 λ_d 为惩罚项的权值。

根据上述得到的安全轨迹 ϕ_s , 需要通过合理的时间重新分配, 重新生成均匀的 B 样条轨迹 ϕ_f 。通过利用各向异性曲线拟合法, 保持与 ϕ_s 几乎相同的形状, 同时使 ϕ_f 可以自由优化控制点满足高阶导数的约束。

超限比例的计算方法为

$$r_e = \max \left\{ |V_{i,r}/v_m|, \sqrt{|A_{j,r}/a_m|}, \sqrt[3]{|J_{k,r}/j_m|}, 1 \right\} \quad (48)$$

式中, $i \in \{1, 2, \dots, N-1\}$, $j \in \{1, 2, \dots, N_c-2\}$, $k \in \{1, 2, \dots, N_c-3\}$ 和 $r \in \{x, y, z\}$ 轴。 r_e 表示相对于 ϕ_s , ϕ_f 需要分配的时长。 V_i , A_i 和 J_k 与 Δt 的一次、二次和三次成反比。则 ϕ_f 新的时间间隔为

$$\Delta t' = r_e \Delta t \quad (49)$$

通过求解闭式的最小二乘问题, 在约束条件下初始生成时间间隔为 $\Delta t'$ 的轨迹 ϕ_f , 同时保持与 ϕ_s 相同的控制点数和形状, 然后重新计算光滑项惩罚和动力学可行项惩罚得到新的目标函数:

$$\min_Q J' = \lambda_s J_s + \lambda_d J_d + \lambda_f J_f \quad (50)$$

其中: λ_f 为拟合项权重, J_f 为 $\phi_f(\alpha T')$ 到 $\phi_s(\alpha T)$ 的各向异性位移的积分, $\alpha \in [0, 1]$, T' 、 T 为 ϕ_s 和 ϕ_f 的持续时间。

对于两条曲线, 用带有低权重的轴向位移来放宽光滑调整限制, 用高权重的径向位移来防止碰撞。

5 仿真和实验

为验证多模式切换控制方法的有效性, 本文以仿真和实验相结合的方式进行验证。仿真以 Gazebo 等软件为平台, 搭建 FPLIR 飞行动力学模型, 对 FPLIR 飞行状态下的多模式切换控制策略进行了仿真测试。实验研究以 FPLIR 为载体, 在电力线实验台架上通过人为设置障碍物工况、打滑工况、改变地线表面摩擦系数等, 验证线上行走状态下多模式切换控制策略的有效性。FPLIR 和实验台架的具体设计参数如表 3 所示。

表 3 FPLIR 和实验台架参数表
Table 3 Parameters of FPLIR and test platform

参数类型	描述	数值
试验台架参数	电力线长度/m	6
	电力线坡度范围/(°)	-34~34
	电力线型号	LGJ-95/55
	质量/kg	$m = 38$
	尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	1.76×1.76×1.1
	旋翼中心到机体中心距离/m	$r = 0.88$
	驱动电机扭矩/(N·m)	$T = 15$
	压紧电机能提供的最大压紧力/N	300
	主压紧轮半径/mm	30
	主行走轮半径/mm	$R = 51$
FPLIR 设计参数	主行走轮与电力线静摩擦系数	$\varepsilon_1 = 0.31$
	主行走轮与处理后的电力线的静摩擦系数	$\varepsilon_2 = 0.21$
	机体 x 轴转动惯量/(kg·m ²)	$I_x = 5.8$
	机体 y 轴转动惯量/(kg·m ²)	$I_y = 5.8$
	机体 z 轴转动惯量/(kg·m ²)	$I_z = 8.5$
FPLIR 模型参数	旋翼升力因子	1.6865×10^{-6}
	旋翼扭矩因子	2.9250×10^{-8}

5.1 仿真及结果分析

本文采用与 PID 控制算法对比的方式验证滑模变结构控制算法的鲁棒性。结合前文对 FPLIR 动力学模型的分析, 利用仿真平台对增稳模式进行仿真验证, 控制器模型如图 14 所示。该模型主要包括姿态指令模块、姿态控制器模块、电机混控模块和飞行机构动力学模块。姿态指令模块用于对机器人施加姿态干扰; 姿态控制器模块包含 PID 和滑模控制算法, 用于对姿态进行调

控;电机混控模块用于将控制器的输出解算为单个电机的控制指令;飞行机构动力学模块包含机

器人飞行状态下的动力学模型,用于完成电机控制指令到转速的转换以及机器人飞行状态的更新。

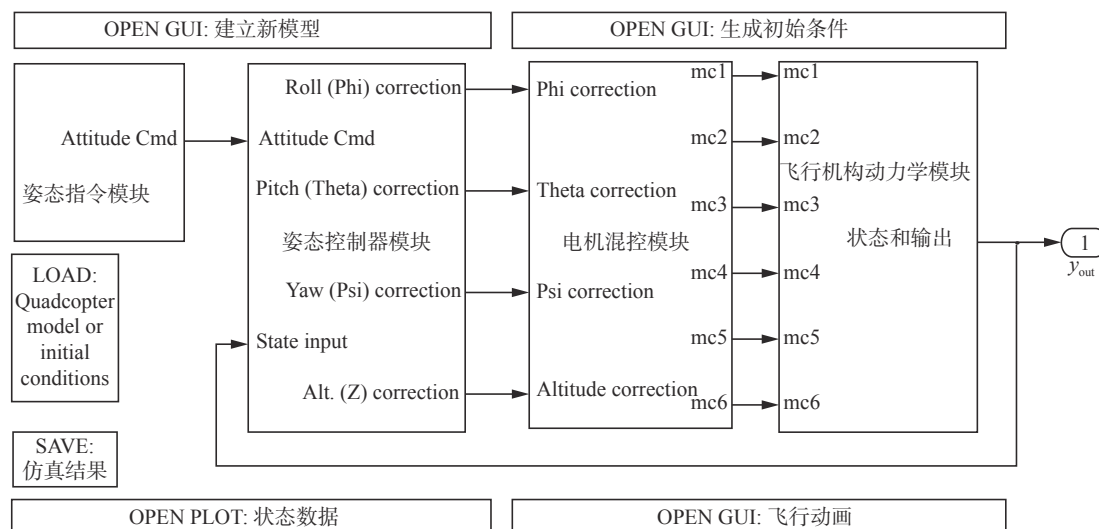


图 14 增稳模式仿真平台

Fig. 14 Simulation platform of stability mode

根据表 3 中 FPLIR 的模型参数在仿真平台中进行参数设置, 设 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。如图 15 所示, 为模拟机器人在飞行过程中遇到阵风的情况, 在 7 s 和 13 s 时对机器人的俯仰角和横滚角加入一个 30° 和 -30° 信号突变。为验证控制方法的有效性, 设置横滚通道的滑模控制器参数为: $k_x = 0.28$, $c_x = 0.01$, $\varepsilon_x = 0.001$, PID 控制器的参数为: $P_x = 0.14$, $I_x = 0.19$, $D_x = 0.032$; 俯仰角通道的滑模控制器参数为: $k_y = 0.53$, $c_y = 0.31$, $\varepsilon_y = 0.003$, PID 控制器的参数为: $P_y = 0.35$, $I_y = 0.21$, $D_y = 0.035$ 。

通过对比滑模变结构控制算法和 PID 控制算法的控制效果可知, 机器人在滑模变结构控制算法的控制下姿态角超调量小于在 PID 控制算法控制下的超调量, 避免了机器人在强干扰下因超调量过大导致机器人失稳的危险情况发生。

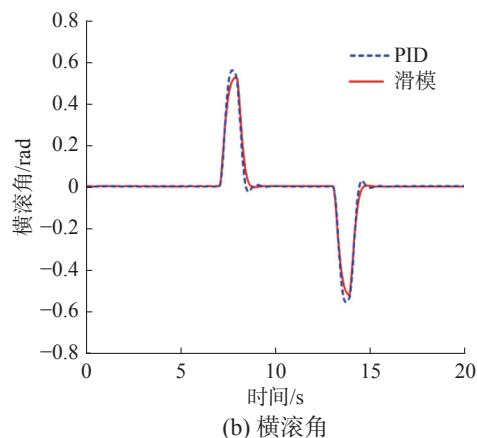
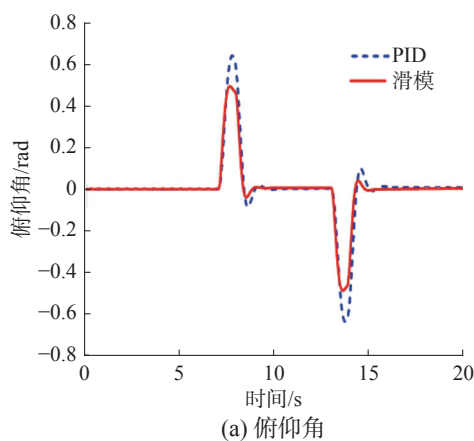


图 15 控制效果对比

Fig. 15 Control effect comparison diagram

为有效验证机器人落线模式和飞越杆塔模式, 本文采用 Gazebo 软件对这两种模式进行仿真模拟, 仿真平台如图 16 所示。仿真场景中使用的机器人模型与实际机器人相同, 电力线杆塔模型略小于实际电力线杆塔, 使用的飞行控制器与实际一致为 Pixhawk4。



(a) 俯仰角

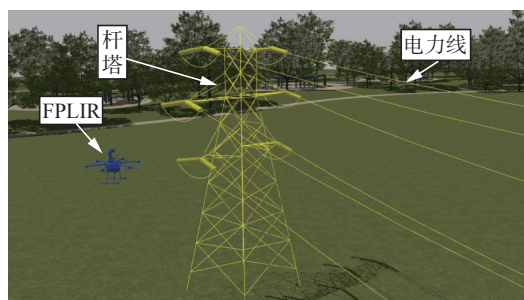


图 16 落线模式仿真平台

Fig. 16 Simulation platform of flying off line mode

落线模式仿真搭建:使用 ACADO 工具箱建立了非线性控制问题,并使用 qpOASES 作为求解器。通过使用代码生成工具导出高效的 C 代码,该代码集成到 ROS 节点中。离散化步长被设置为 $d_t = 0.2$ s,时间范围为 $t_h = 2$ s。在精度和速度的权衡下,将预测时域设置为 $P = 20$,控制时域设置为 $M = 10$ 。对于权重矩阵,将位置的权重设置为 5,速度的权重设置为 2,其余的都设置为 1。对于输入权重矩阵 R 和输入量 u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 的权重设置为 0.2,输入量的变化率权重设置为 0.1。为了保证对机器人的足够敏捷性,控制回路频率为设置为 100 Hz。

落线模式仿真中,地线高度为 10.2 m,设定的飞行高度为 8.2 m。地线与机器人飞行高度差为 2 m,旨在留下一定的调节范围,减小精准落线过程中姿态的调整。图 17(a) 显示了机器人落线的飞行轨迹,当机器人飞行到空中高度为 8.19 m 时,控制系统切换至落线模式。图 17(b) 显示了 FPLIR 实际运行轨迹与航点轨迹误差的对比效果,从图中可以看出在 20.3 s 时 x 、 y 、 z 3 个轴的误差分别为 0.0147 m、0.002 m 和 0.046 m,两点的距离差为 0.048 m。图 17(c) 显示了机器人在靠近目标点时速度收敛于原点,在 20.3 s 时, x 、 y 、 z 3 个轴的速度分别为 0.011 m/s, 0.021 m/s 和 0.0015 m/s,线速度为 0.023 m/s。

此外,本文落线系统与文献 [26] 中的降落系统进行了比较,对比结果如表 4 所示。由表 4 可知,本文的落线系统让机器人在完成降落后坐标误差的绝对值以及 x 、 y 、 z 三轴方向上的速度均小于文献 [26]。而相较于本文的 FPLIR 和降落目标而言,文献 [26] 的中的机器人质量更轻 (6.5 kg),更容易控制,目标物更大,更容易识别,且在软抓手降落装置的辅助下,更容易实现稳定降落。因

此,使用本文的落线系统可以实现更加准确和安全的降落。

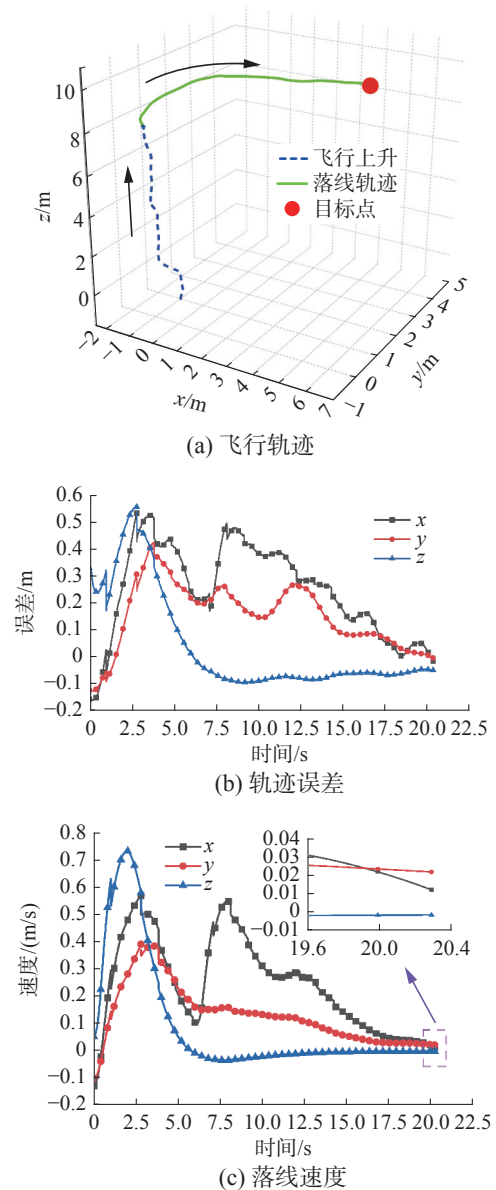


图 17 FPLIR 飞行轨迹和速度
Fig. 17 Flight path and speed of FPLIR

表 4 降落系统参数对比表
Table 4 Comparison table of landing system parameters

对比类别	坐标误差/m			速度/(m/s)		
	x	y	z	v_x	v_y	v_z
本文落线系统	0.015	0.002	0.046	0.011	0.021	0.002
引文降落系统	0.057	0.132	0.262	0.067	0.024	0.397

对飞越杆塔模式下的仿真参数进行如下设置:将 EGO-Planner 规划器的建图沿 x 、 y 、 z 3 个轴的大小分别设为 50 m、50 m 和 30 m,地图分辨率设置为 0.52。由于膨胀半径不大于分辨率 4 倍,因此将 EGO-Planner 规划器的膨胀半径为设置为

2 m。无人机的最大速度和最大加速度分别设置为 1 m/s 和 3 m/s^2 。

如图 18(a) 所示,杆塔被化成长方体,其底面中心坐标为 (7.3,0.4) m,长宽为 1 m,高为 15 m,规定机器人挂线行走时与杆塔保持的最小安全距

离 $l_{\min}=3$ m。从图 18(b) 中可知,在 23 s 时机器人的坐标为 (3.9, -0.3, 10.7) m, 与杆塔的距离为 2.9 m, 此时飞越杆塔监测器被触发, 控制系统切换至飞越杆塔模式, EGO-Planner 规划器生成越障轨迹。飞越杆塔的过程中, 在 38 s 时机器人的坐标为 (4.3, -2.7, 11.3) m。此时机器人与杆塔的距离最近为 3.2 m。通过仿真可以发现, 飞越杆塔模式能够保证机器人在与杆塔保持安全距离的情况下越过杆塔。

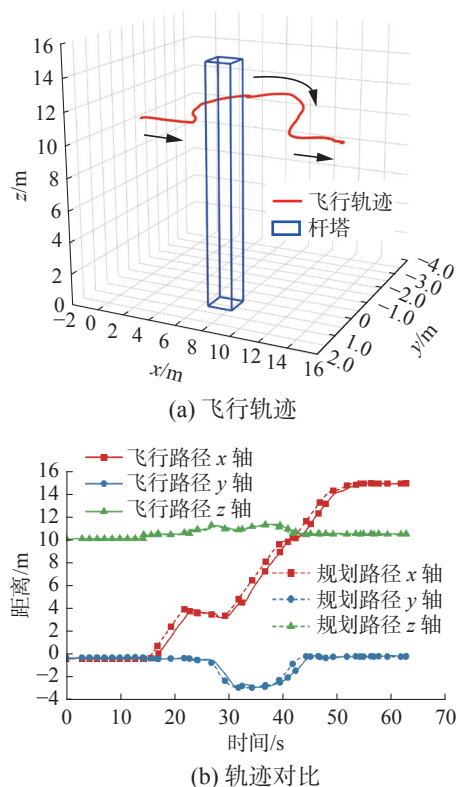


图 18 飞越杆塔轨迹

Fig. 18 Trajectory over the tower

5.2 实验及结果分析

实验平台如图 19 所示, 包括电力线实验台架和 FPLIR。其中 FPLIR 包括传感器(编码器、压力传感器、相机、倾角传感器), 控制单元(NVIDIA、STM32F4、Pixhawk4), 驱动单元(驱动电机、压紧电机)。其中安装在主压紧轮上的编码器用来检测主压紧轮的转速, 压力传感器用于检测压紧轮的附线压力值。相机用于检测机器人与目标物的距离, 倾角传感器安装在辅行走轮上, 用于检测机器人所处电力线坡度。机器人的控制系统框图如图 20 所示, 其中 3 个控制器彼此之间通过串行通信的方式实现数据交互。

实验平台参数如表 3 所示。打滑实验过程为机器人先下坡后爬坡, 初始时机器人所处坡度为 -18° , 行走速度为 35 cm/s, 在电力线 5 m 处减小其与主行走轮的静摩擦系数至 0.21。实验结果如图 21 所示, 其中图 (a) 为变论域模糊控制的实验结果图, 图 (b) 为模糊控制和变论域模糊控制对机器人的控制效果对比图。表 5 为两种控制方法重要实验参数的对比数据表。

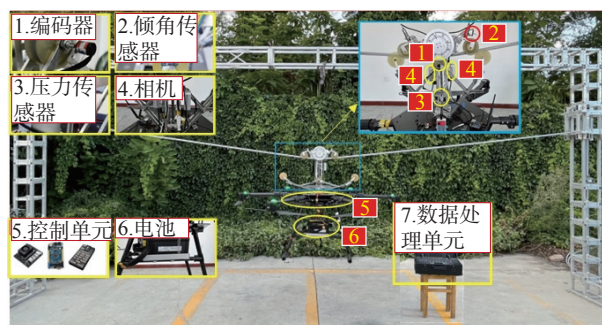


图 19 实验平台

Fig. 19 Test platform

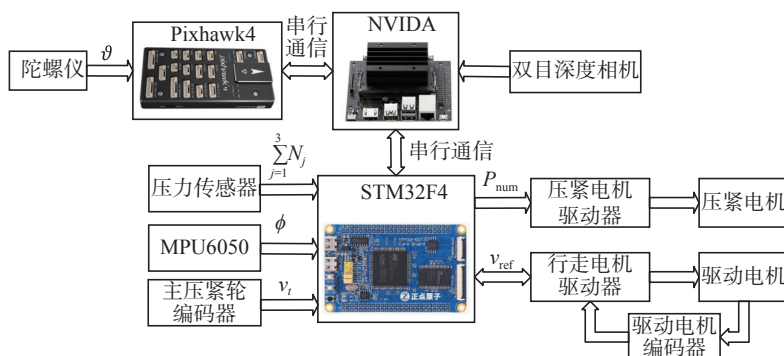


图 20 机器人控制系统框图

Fig. 20 Control system block diagram of robot

在坡度为 -17.6° 时, 由于压紧力偏小导致机器人在行走时出现了打滑现象, 打滑度低于 0.95, 此时系统进入打滑控制模式。当压紧力达到 156 N

时, 打滑度大于 0.95。坡度在 $15.8^\circ \sim 22.4^\circ$ 这一段中, 由于机器人摆角大于 2° 打滑度低于 0.95, 此时压紧力增量较大, 旨在让机器人在较短时间内不

打滑,减小摆动。当机器人处于 5.6° 、 -6.1° 等坡度时,打滑度大于 0.95 且摆角小于 2° ,此时压紧力减小,当打滑度低于 0.95 或摆角大于 2° 时,则压紧力又开始增大。此过程是一个动态过程,旨在让压紧力输出一个合适的值,避免压紧力过大造成摩擦力变大,影响机器人的巡线速度,增加能耗,以及压紧力不足,导致出现滑坡的现象。

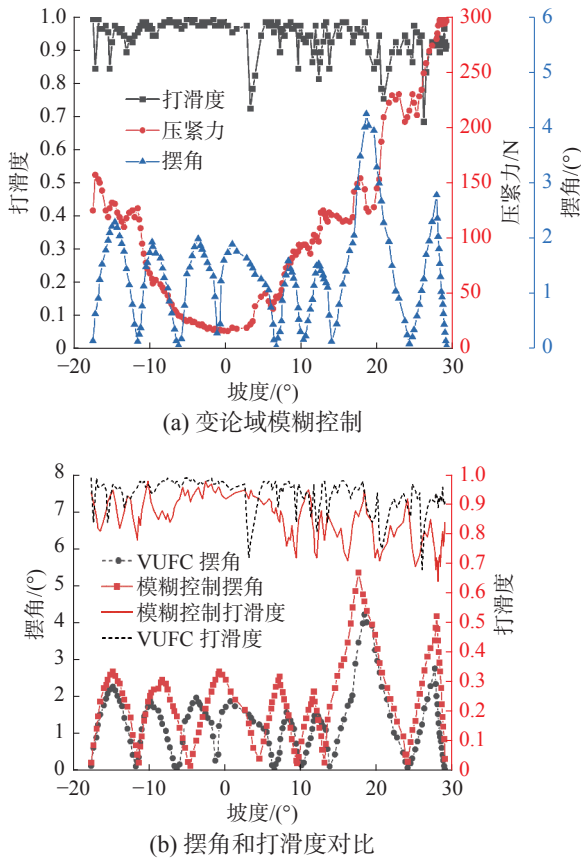


图 21 打滑模式下的试验曲线
Fig. 21 Test curves in sliding mode

表 5 实验参数对比表

Table 5 Comparison table of test parameters

控制策略	平均摆角/ $^\circ$	最大爬坡/ $^\circ$	打滑度
变论域模糊控制	1.27	29.1	0.93
模糊控制	1.89	27.2	0.85

通过表 5 可知,采用变论域模糊控制时,平均打滑度为 0.93 满足实验要求。变论域模糊控制相较于模糊控制而言机器人爬坡能力提升为 6.92%,抑制打滑能力提升为 9.44%,平均摆动角度降低了 48.8%。由此可见,采用变论域模糊控制能明显降低复杂工况对机器人的干扰,提高行走稳定性。

行走越障实验是以防震锤为机器人的越障对象,实验结果如图 22 所示。当机器人与防震锤的距离 $x_d > 2$ m,此时设定初始速度 $v = 8.91$ cm/s 进行

定速巡航。由于机器人惯性较大,在线上行走过程中速度存在 ± 0.4 cm/s 的波动误差。当机器人与防震锤的距离 $x_d \leq 2$ m 时,行走越障模式被触发,机器人进入行走越障模式。其中,当 $2\text{ m} \geq x_d > 0.5$ m 时,机器人的速度采用式 (44) 的控制方法平滑递减。当距离 $x_d \leq 0.5$ m,此时机器人保持 $v = 2.22$ cm/s 的恒定速度越过防震锤,NIVIDA 传送回来的距离数据为 0 cm。同理,当机器人越过防震锤后的距离 $2\text{ m} \geq x_d > 0.5$ m 时,机器人的速度以同样的控制方法平滑递增;当机器人与防震锤的距离 $x_d > 2$ m 时,机器人速度为 $v = 8.91$ cm/s。从图中可以看出,机器人进入越障模式时模式切换过程平稳,行走速度变化平缓没有出现陡增陡降的现象,保证了机器人在越障过程中的稳定性。

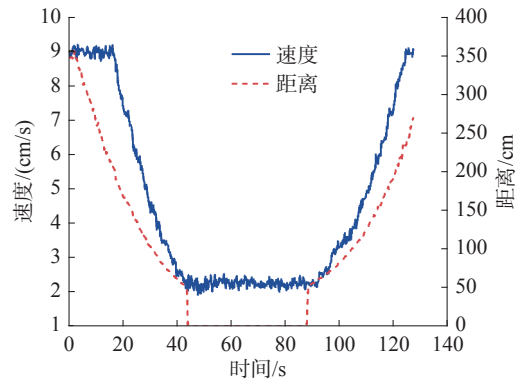


图 22 越障模式下速度与距离
Fig. 22 Speed and distance in obstacle crossing mode

6 结束语

针对一种飞走巡线机器人,分析了机器人在结构化柔索环境下的多模式切换过程,设计了多模式切换监测器模型和各模式的控制策略。在 Gazebo 等软件平台上建立了 FPLIR 的仿真模型,并对 FPLIR 线上行走进行了实验,验证了 FPLIR 在飞行和行走状态下监测器和控制策略的性能。

1) 仿真结果表明,针对所设计的增稳控制模式,有效地增强了 FPLIR 飞行时的稳定性。落线模式保证了 FPLIR 能以接近零速度和坐标误差最大为 0.048 m 的情况下完成落线,避免了 FPLIR 在速度较大的情况下由于惯性导致落线失败的情况发生。飞越杆塔模式则保证了 FPLIR 能以最小 3.2 m 的安全距离避开电力线杆塔,完成档段的切换。

2) 实验研究发现,行走越障模式下通过对驱动电机的有效控制,保证了 FPLIR 在线上行走越障过程中速度的平滑变换,保障了机器人在越障过程中的安全性和稳定性。打滑模式下,控制器

根据变论域模糊控制规则,通过对压紧力的合理输出,将打滑度均值维持在0.93,摆角均值维持在1.27°,有效抑制了打滑和风扰的影响。

参考文献:

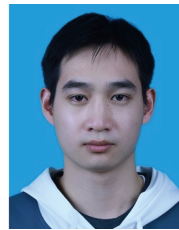
- [1] QIN Xinyan, JIA Bo, LEI Jin, et al. A novel flying-walking power line inspection robot and stability analysis hanging on the line under wind loads[J]. *Mechanical sciences*, 2022, 13(1): 257-273.
- [2] KATRASNIK J, PERCUS F, LIKAR B. A climbing-flying robot for power line inspection[M]//Climbing and Walking Robots. [S. l.]: InTech, 2010.
- [3] 张运楚, 梁自泽, 谭民. 架空电力线路巡线机器人的研究综述[J]. *机器人*, 2004, 26(5): 467-473.
ZHANG Yunchu, LIANG Zize, TAN Min. Mobile robot for overhead powerline inspection-a review[J]. *Robot*, 2004, 26(5): 467-473.
- [4] 王婕, 马晓, 宗群, 等. 四旋翼无人飞行器的轨迹跟踪与滑模事件驱动控制[J]. *控制理论与应用*, 2019, 36(7): 1083-1089.
WANG Jie, MA Xiao, ZONG Qun, et al. Trajectory tracking and sliding mode event-triggered control for a quadrotor unmanned aerial vehicle[J]. *Control theory & applications*, 2019, 36(7): 1083-1089.
- [5] 吴华, 宋自立, 李国栋, 等. 电力巡检飞行机器人抗风控制器设计[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(S1): 443-446.
WU Hua, SONG Zili, LI Guodong, et al. Wind resistant controller for flying robot of power line inspection[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (natural science edition)*, 2013, 41(S1): 443-446.
- [6] 赵振华, 肖亮, 姜斌, 等. 基于扩张状态观测器的四旋翼无人机快速非奇异终端滑模轨迹跟踪控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(9): 2201-2210.
ZHAO Zhenhua, XIAO Liang, JIANG Bin, et al. Fast nonsingular terminal sliding mode trajectory tracking control of a quadrotor UAV based on extended state observers[J]. *Control and decision*, 2022, 37(9): 2201-2210.
- [7] CHEN Yanmin, HE Yongling, ZHOU Minfeng. Modeling and control of a quadrotor helicopter system under impact of wind field[J]. *Research journal of applied sciences, engineering and technology*, 2013, 6(17): 3214-3221.
- [8] 沈智鹏, 曹晓明. 输入受限四旋翼飞行器的模糊自适应动态面轨迹跟踪控制[J]. *控制与决策*, 2019, 34(7): 1401-1408.
SHEN Zhipeng, CAO Xiaoming. Fuzzy adaptive dynamic surface trajectory tracking control for quadrotor UAV with input constraints[J]. *Control and decision*, 2019, 34(7): 1401-1408.
- [9] LI Cai, LIANG Zize, HOU Zengguang, et al. Fuzzy control of the inspection robot for obstacle-negotiation[C]//2008 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. Sanya: IEEE, 2008: 117-122.
- [10] 王鲁单, 王洪光, 房立金, 等. 一种输电线路巡检机器人控制系统的设计与实现[J]. *机器人*, 2007, 29(1): 7-11, 17.
WANG Ludan, WANG Hongguang, FANG Lijin, et al. Design and implementation of the control system of a power transmission line inspection robot[J]. *Robot*, 2007, 29(1): 7-11, 17.
- [11] 严宇. 高压输电线路巡线机器人越障与打滑控制[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
YAN Yu. Obstacle crossing and anti-slide control of high voltage transmission line inspection robot[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.
- [12] 裴晓飞, 刘昭度, 马国成, 等. 汽车自适应巡航系统的多模式切换控制[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(10): 96-102.
PEI Xiaofei, LIU Zhaodu, MA Guocheng, et al. Multi-mode switching controller for vehicle adaptive cruise control system[J]. *Journal of mechanical engineering*, 2012, 48(10): 96-102.
- [13] 韩晓男. 陆空两栖载物平台模式切换与判决研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
HAN Xiaonan. Research on mode switching and judgment of land and air amphibious load platform[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [14] 宋自立. 四旋翼飞行机器人增稳控制方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
SONG Zili. Research on stability augmentation control method for quadrotor flying robot[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [15] 赵治国, 何宁, 朱阳, 等. 四轮驱动混合动力轿车驱动模式切换控制[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(4): 100-109.
ZHAO Zhiguo, HE Ning, ZHU Yang, et al. Mode transition control for four wheel drive hybrid electric car[J]. *Journal of mechanical engineering*, 2011, 47(4): 100-109.
- [16] 汤新民, 韩云祥, 韩松臣. 面向4D航迹运行的飞行冲突混杂系统理论监控方法[J]. *电子科技大学学报*, 2012, 41(5): 717-722.
TANG Xinmin, HAN Yunxiang, HAN Songchen. 4D trajectory based operation flight conflict supervisory control based on hybrid system theory[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2012, 41(5): 717-722.
- [17] 汪少华. 半主动空气悬架混杂系统的多模式切换控制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2013.
WANG Shaohua. Research on multi-mode switching control of semi-active air suspension hybrid system[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013.

- [18] LIN Yuandan, SONTAG E D, WANG Yuan. A smooth converse Lyapunov theorem for robust stability[J]. *SIAM journal on control and optimization*, 1996, 34(1): 124–160.
- [19] 何仁, 胡东海. 轿车电磁与摩擦制动集成系统混杂控制方法[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(12): 118–128.
HE Ren, HU Donghai. Hybrid control method of the integrated system of electromagnetic and friction braking of car[J]. *Journal of mechanical engineering*, 2016, 52(12): 118–128.
- [20] 张昊昱. 大型高适应性六足机器人结构及稳定性分析[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
ZHANG Haoyu. Analysis of the structure and stability of a large and highly adaptable hexapod robot[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [21] ZHANG Jie, LEI Jin, QIN Xinyan, et al. Modeling and analysis of a flying-walking power line inspection robot[C]//Proceedings of the 2021 2nd International Conference on Control, Robotics and Intelligent System. Qingdao: ACM, 2021: 25–30.
- [22] 刘豹, 唐万生. 现代控制理论 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [23] PANEQUE J L, DIOS J R M D, OLLERO A, et al. Perception-aware perching on powerlines with multirotors[J]. *IEEE robotics and automation letters*, 2022, 7(2): 3077–3084.
- [24] LI Zhaojun, QIN Xinyan, LEI Jin, et al. Variable universe fuzzy control of walking stability for flying-walking power line inspection robot based on multi-work conditions[J]. *IET cyber-systems and robotics*, 2022, 4(3): 212–227.
- [25] ZHOU Xin, WANG Zhepei, YE Hongkai, et al. EGO-planner: an ESDF-free gradient-based local planner for quadrotors[J]. *IEEE robotics and automation letters*, 2021, 6(2): 478–485.
- [26] RAMON-SORIA P, GOMEZ-TAMM A E, GARCIA-RUBIALES F J, et al. Autonomous landing on pipes using soft gripper for inspection and maintenance in outdoor environments[C]//2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Macau: IEEE, 2020: 5832–5839.

作者简介:



秦新燕, 副教授, 博士, 主要研究方向为机器人和复杂机电系统与控制, 农业机械装备创新与性能设计。主持国家自然科学基金项目 1 项、兵团财政科技创新骨干人才计划项目 1 项, 参与国家自然科学基金项目 1 项、兵团财政科技计划项目 1 项、兵团九师科技专项 1 项, 授权发明专利 3 项。发表学术论文 10 余篇, 主编教材 1 部。



李惠东, 硕士研究生, 主要研究方向为电力线巡检机器人控制系统。



雷金, 副教授, 博士后, 主要研究方向为机器人和复杂机电系统与控制。主持国家自然科学基金项目 1 项、兵团财政科技创新人才计划项目 1 项、兵团财政科技计划项目 1 项、兵团九师科技专项 1 项, 授权发明专利 4 项、实用新型 2 项、计算机软件著作权 1 项。发表期刊论文 20 余篇。