DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2026.02.011

面向农情监测的轮—翼复合沿缆式巡检机器人设计与分析

娄登云，雷金*，秦新燕，李春昊，李文睿，吴长欢

（石河子大学机械电气工程学院，新疆石河子，832003）

摘要：现有农情监测平台在开放农田环境下普遍存在无人机续航有限、低空重复观测视角一致性不足，以及地面机器人易受地表状况和作物冠层遮挡影响等问题，难以同时兼顾快速部署能力与高重复性观测需求。为实现农田场景下同地点、同视角、不同时间农情信息的连续获取与对比分析，本研究设计一种面向农情监测的轮—翼复合沿缆式巡检机器人。本研究以农田上方架空缆线为固定巡检路径，提出飞行上下线与沿缆巡检相结合的双模态巡检方案，以满足同地点、同视角重复观测需求；在此基础上，设计由被动触发式夹爪、可变形机臂及轮—翼复合末端执行机构组成的一体化构型，实现飞行执行单元与沿缆执行单元的结构复用；建立飞行悬停、挂线防滑、沿缆驱动转矩以及机臂驱动与过中心自锁等关键约束模型，并运用SolidWorks和ADAMS开展模态切换与沿缆行走工况仿真分析。仿真结果表明，机器人双侧机臂能够实现同步折叠，模态切换过程连续稳定，整机可在约5 s内完成由飞行展开模态向沿缆工作模态的转换；在沿缆行走模态下，平台连续前进，轮组与缆线接触稳定，前后轮俯仰角变化范围约为－0.2～0.2 rad，表现出较好的路径约束性和观测姿态稳定性。所提出机器人能够兼顾农田监测区域快速进入与固定路径稳定巡检需求，可为农情时序监测、重复观测数据采集及低成本农业巡检装备研发提供参考。

关键词：农情监测；沿缆式巡检机器人；轮—翼复合结构；模态切换

中图分类号：S220.2 **文献标识码**：A **文章编号**：2096-7217（2026）02-0124-09

娄登云，雷金，秦新燕，李春昊，李文睿，吴长欢. 面向农情监测的轮—翼复合沿缆式巡检机器人设计与分析[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2026，7(2)：124－132

Lou Dengyun, Lei Jin, Qin Xinyan, Li Chunhao, Li Wenrui, Wu Changhuan. Design and analysis of a wheel-wing hybrid cable-travelling inspection robot for agricultural monitoring [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2026, 7(2): 124－132

0 引言

农情巡检是智慧农业获取作物长势、病虫害、墒情和灾后受损信息的重要手段，也是水肥调控、长势评估和田间管理决策的基础[1-4]。随着农业生产向数字化、精细化发展，农情信息获取正由人工观察转向自动化、连续化和高时空分辨率监测[5-6]。对于作物长势演变、病害扩展和灾后恢复等问题，仅依赖一次性观测难以满足分析需求，平台能否在不同时间对同一区域进行稳定复查，直接影响后续时序对比和变化识别结果的可靠性[7-8]。

现有农情巡检方式主要包括无人机[9]、地面机器人[10-12]和固定轨道平台[13-17]。无人机覆盖范围大、部署速度快，适合大范围普查和快速制图，但续航受限，低空作业时视角易波动；地面机器人近距离分辨率高、载荷能力较强，适合行间巡检和近地观测，但受泥泞地表、作物冠层和复杂田间环境约束明显；固定轨道平台位姿稳定、重复观测能力强，适合长期固定样区监测，但依赖专用基础设施，灵活性不足。因此，开放农田中的重复观测平台需要在进入能力、路径稳定性和观测视角一致性之间取得平衡[18]。

针对上述问题，本文设计一种面向农情监测的轮—翼复合沿缆式巡检机器人。该平台利用农田上方架空缆线构建固定巡检路径，采用飞行接近与沿缆行走相结合的双模态巡检方案：飞行模态用于完成跨越沟坎、积水等复杂地表环境的快速进入，沿缆模态则用于

收稿日期：2026-03-18 修回日期：2026-04-25

基金项目：国家地区科学基金项目(62563034)

第一作者：娄登云，男，2001年生，河南驻马店人，硕士研究生；研究方向为巡检机器人技术。E-mail：loudengyun@stu.shzu.edu.cn

*通信作者：雷金，男，1976年生，河南南阳人，博士，副教授；研究方向为农业机械装备与智能机器人。E-mail：jinlei@shzu.edu.cn

在固定空间路径上进行低速、稳定的农情信息采集。与常规无人机随机航线巡检相比，沿缆巡检能够将机器人运动轨迹约束在同一架空缆线路径上，从而降低不同时间重复观测时的位置偏差和视角变化；与地面机器人相比，该方式可减少泥泞地表和作物遮挡对观测过程的影响。因此，本研究所提出平台的农情监测目标并非一次性大范围覆盖，而是面向重点地块的多时相重复观测。

本研究进行机器人总体结构、关键部件和约束模型设计，并通过 ADAMS 分析模态切换和沿缆行走过程，重点考察机臂折叠连续性、轮缆接触状态和行走姿态变化。通过沿缆行走过程中的接触状态和角度响应分析，说明该平台能够为后续农情图像的连续采集和时序对比提供相对稳定的运动基础。

1　机器人总体方案

1.1　整机结构

为满足农情监测任务对快速部署、固定路径巡检和重复观测一致性的要求，本研究设计一种轮—翼复合沿缆式巡检机器人，其总体结构如图 1 所示。该机器人以农田上方架空缆线为固定巡检路径，采用飞行接近与沿缆行走相结合的双模态作业方式，在保持区域快速进入能力的同时，提高多时相观测的位置与视角一致性[19-20]。整机主要由被动触发式夹爪、左右对称可变形机臂、轮—翼复合末端执行机构、上线引导感知模块以及农情检测载荷模块组成。

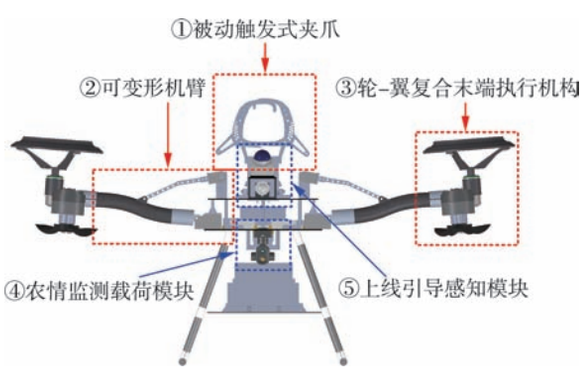


图 1　机器人整机结构

Figure 1　Overall structure of the robot

从总体布置上看，机器人采用左右对称构型，以提高飞行模态下的配重均衡性和沿缆模态下的支撑稳定性。机身上部布置被动触发式夹爪，用于挂载导线并建立模态切换所需的几何约束；两侧通过可变形机臂连接轮—翼复合末端，可变形机臂用于完成飞行构型与沿缆构型之间的连续切换，轮—翼复合末端执行机构同时承担飞行模态下的升力产生和沿缆模态下的接触支撑与驱动功能，实现旋翼系统与沿缆行走系统在同一平台内实现功能统一；机身中部作为承载主体，用于布置主控、飞控、通信和供电单元[21]；机身下部则布置面向农业任务的多源感知载荷。飞行阶段由旋翼末端提供升力和姿态调节输入；挂线后，机臂收拢使行走轮与缆线接触，机器人运动轨迹由缆线几何约束。该布置可减少自由飞行重复观测时的横向路径偏差。

考虑到机器人需要同时完成线缆识别、近缆对位、引导上线和农情信息采集等任务，本研究将感知系统分为上线引导感知模块和农情检测载荷模块两类，整机与感知载荷主要参数如表 1 所示。

表 1　轮—翼复合沿缆式巡检机器人主要参数

Table 1　Main parameters of the wheel-wing hybrid cable-travelling inspection robot

参数类别	参数名称	参数值
整机参数	整机长度/mm	1 840
	整机宽度/mm	1 400
	整机高度/mm	800
	空载质量/kg	20
	最大起飞质量/kg	30
	轮组直径/mm	190
	前后轮间距/mm	690
	旋翼直径/mm	816
	适用缆线直径/mm	20～30
	沿缆行走速度/(m·s^{-1})	1.4
	飞行速度/(m·s^{-1})	2.4
	模态切换时间/s	5
	飞行续航时间/min	20
上线引导感知模块	激光雷达型号	Livox MID-360s
	工业相机型号	MV-CU013-A0UC
农情检测载荷模块	云台相机型号	SIYI ZT6
	可见光分辨率/pixel	3 840×2 160
	热红外分辨率/pixel	640×512

上线引导感知模块由 Livox MID-360s 激光雷达和 MV-CU013-A0UC 工业相机构成，主要用于导线识别、空间定位和近缆对位，为机器人完成抓持挂载提供感知支持[22]；农情检测载荷模块采用 SIYI ZT6 云台相机，兼具可见光与热红外成像能力，可用于作物长势、热异常及局部受灾区域检测[23-24]。在沿缆巡检过程中，云台相机随机器人沿固定缆线路径移动，可在相同巡检路径和相近拍摄高度下对作物冠层进行重复成像。沿缆巡检时，云台相机随机器人沿同一缆线路径移动，拍摄高度主要由缆线布置和云台安装位置决定。

与自由飞行低空复查相比,该方式可减少平台横向漂移对图像对比的影响。通过将“上线引导感知”与“农情监测载荷”分层布置,平台实现了作业安全性与农业监测功能的兼顾,也增强了系统在不同任务阶段的适应性。

在原理样机实现方面,本研究进一步完成了样机集成与系统控制方案设计。系统控制关系如图2所示,机器人采用“机载电脑+飞控单元+执行器驱动模块”的总体架构。其中,机载电脑负责任务逻辑管理、监测数据处理与路径规划;飞控单元负责飞行阶段的姿态控制以及图像信号的接收与传输;执行器驱动模块负责模态切换舵机、沿缆行走电机和夹持驱动执行器的协调控制。通过整机结构与控制系统的一体化设计,平台能够完成飞行接近、抓持挂载、模态切换和沿缆巡检等连续作业过程,为后续约束建模、仿真分析和农业应用验证提供了结构基础。

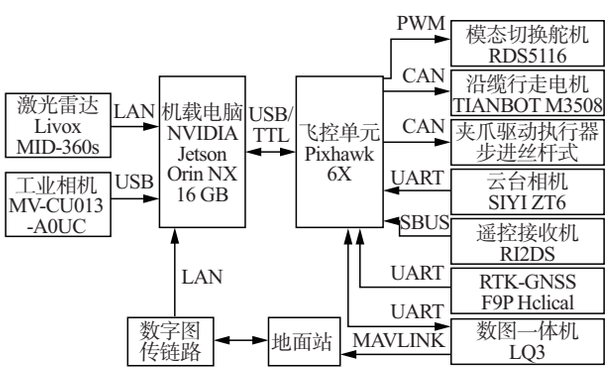


图2 系统控制框图

Figure 2 System control block diagram

1.2 作业流程

机器人作业流程如图3所示,整体形成飞行上下线和沿缆巡检的双模态作业链条。与常规自由飞行巡检方式不同,该平台不是依靠单一飞行系统完成一次性区域覆盖,而是通过轮—翼复合末端中的旋翼单元实现快速接近与跨障,再通过被动触发式夹爪建立与缆线之间的初始约束,随后通过可变形机臂完成构型重构,最终依靠轮—翼复合末端中的行走轮单元实现沿缆行走,并由机身下部农情监测载荷完成图像采集。该流程的核心在于将“快速进入能力”和“固定路径重复观测能力”分配到不同作业阶段:飞行阶段解决农田环境下的部署问题,沿缆阶段解决多时相农情图像采集中的位置和视角一致性问题。

1)在飞行上线阶段,主要工作的部件是轮—翼复合末端中的旋翼单元和飞控单元。此时可变形机臂保持展开状态,为旋翼提供稳定布局;旋翼负责提供升力和姿态控制输入,带动整机完成起飞和近缆接近,此时行走轮处于非承载状态。该阶段主要依靠飞行执行部件完成区域快速进入,使平台能够跨越沟坎、积水和高秆作物冠层,减少地表条件对部署效率的影响。

2)在抓持挂载阶段,主要工作的部件是上线引导感知模块和被动触发式夹爪。机器人通过感知模块中的激光雷达和工业相机共同作用,实现对电力线上目标抓线点的定位,在旋翼提供的姿态调节作用下由缆线下方缓慢靠近,通过机身位置微调使夹爪与缆线对准;随后缆线触发夹爪开启并在弹性元件作用下完成回弹闭锁,从而建立机器人与缆线之间的初始约束。该阶段的核心是由夹持机构完成挂载和定位,为后续机臂折叠和轮组挂线提供几何基准与安全支撑。

3)在模态切换阶段,主要工作的部件是可变形机臂及其驱动机构。机臂在舵机和连杆机构驱动下向内折叠,带动轮—翼复合末端逐步向缆线收拢;随着机臂持续运动,末端中的行走轮逐渐与缆线形成包络接触,平台承载方式由旋翼悬停主导过渡为轮线接触支撑主导,最终双行走轮合并形成稳定的沿缆工作构型。该阶段本质上是由机臂重构机构完成飞行模态向沿缆模态的连续转换[25]。

4)在沿缆巡检阶段,主要工作的部件转变为轮—翼复合末端中的行走轮单元及机身下部农情监测载荷。此时旋翼转入待机状态,行走轮与缆线接触并承担平台重量与驱动任务,带动机器人沿固定架空缆线路径低速前进;机身下方安装的ZT6云台相机同步完成作物冠层图像、热红外图像及局部异常区域信息采集。由于机器人运动轨迹受缆线几何形态约束,其横向自由度和路径随机性明显小于自由飞行平台,机身姿态变化也更容易控制在较小范围内。因此,在不同时间重复巡检同一地块时,平台能够获得相近空间位置、相近拍摄高度和相近观测角度下的农情图像,为作物长势变化、病虫害扩展和灾后恢复过程的时序对比提供较稳定的数据采集条件。

5)在飞行越障阶段,主要工作的部件重新转变为轮—翼复合末端中的旋翼单元、可变形机臂及飞控单元。当机器人沿缆巡检至杆塔或其他线路障碍物附近时,行走轮停止沿缆前进,可变形机臂在驱动作用下重新展开,使平台由沿缆工作构型逐步恢复为飞行构型;随后旋翼恢复主要升力与姿态控制功能,带动整机脱离缆线约束并跨越障碍区域。该阶段的关键在于通过飞行模态实现对线路障碍物的有效跨越,从而保证巡检任务的连续性和环境适应性。

6)在飞行下线阶段,主要工作的部件是旋翼单元、飞控单元和机体起落支撑结构。当机器人完成目标线路巡检任务后,旋翼提供升力并控制整机脱离缆线运行区域,平台由沿缆或越障后的飞行状态逐步下降至

安全高度并完成稳定着陆。

结合图 4 所示可知，该平台的巡检方式并非随机路径覆盖，而是依托农田上方架空缆线形成固定巡检带。机器人通过飞行方式进入目标区域后，沿同一缆线路径对重点地块和异常区域进行重复回访，并在不同时间节点获取相近空间位置和相近视角下的图像与环境信息。对于作物长势时序监测、病虫害复查和灾后恢复评估等任务而言，图像之间的可比性不仅取决于相机性能，也与平台运动路径、拍摄高度和姿态稳定性密切相关。沿缆式巡检方式能够通过固定几何路径降低平台重复观测误差，使机器人由单纯的快速进入工具转变为面向农情时序监测的固定路径重复观测平台。

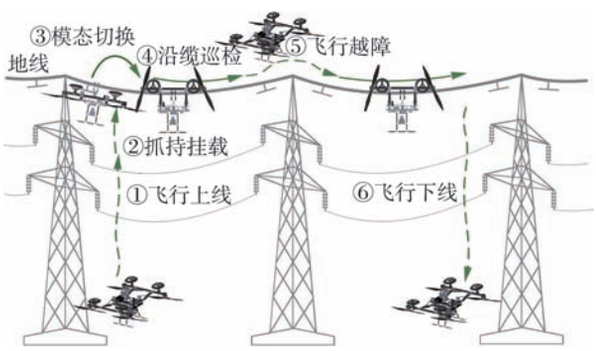


图 3　机器人工作流程图

Figure 3　Workflow of the robot

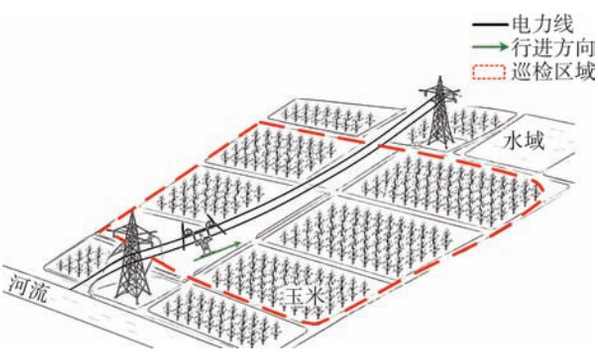


图 4　机器人巡逻区域示意图

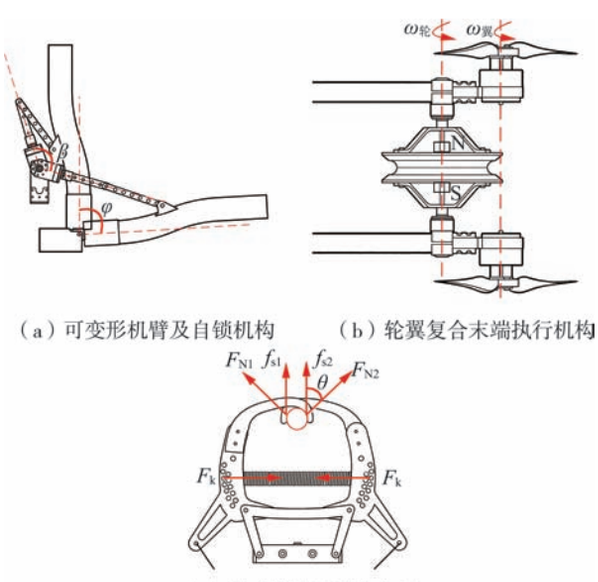
Figure 4　Schematic diagram of the robot patrol area

1.3　关键部件设计

机器人关键部件如图 5 所示，其设计重点在于实现飞行模态与沿缆行走模态之间的连续转换，并保证挂载后的稳定支撑与重复观测能力。

如图 5(a)所示，可变形机臂及其自锁机构是实现双模态切换的关键部件。飞行模态下，机臂保持展开状态，以满足旋翼布置和飞行稳定性要求；沿缆模态下，机臂在驱动作用下向内折叠，带动末端轮组逐步靠近缆线并形成挂载构型。考虑到沿缆行走过程中机臂需长期承受末端载荷及外界扰动，在机臂中引入具有过中心特性的连杆自锁机构。随着机臂转角 φ 的变化，连杆机构在展开终点附近逐步进入过中心位置，使外载荷难以直接反驱驱动单元，从而形成稳定的构型保持能力。过中心位置形成后，外载荷难以直接反驱舵机，展开构型主要由连杆几何关系和机械限位保持。该设计可减少舵机在保持阶段的持续输出转矩。

如图 5(b)所示，轮—翼复合末端执行机构采用旋翼、行走轮与吸附单元一体化布置形式，是平台实现飞行作业与沿缆作业功能统一的核心部件。飞行模态下，旋翼作为主要执行单元提供升力和姿态控制输入；沿缆模态下，行走轮与缆线接触并承担支撑与驱动功能，从而实现同一末端机构在两种作业模式下的功能复用。为提高沿缆构型的稳定性，在末端机构中引入双电磁铁吸附设计，通过电磁吸附力增强关键构件之间的贴合与约束，减小机臂展开状态下因振动或扰动引起的相对位移，提高构型锁定后的整体稳定性。由此，轮—翼复合末端不仅实现了旋翼与轮组的空间集成，也通过吸附约束增强了结构可靠性和作业安全性。



(a) 可变形机臂及自锁机构　　(b) 轮翼复合末端执行机构

(c) 被动触发欠驱动夹爪

图 5　关键部件结构示意图

Figure 5　Schematic diagrams of key components

注：φ 为可变形机臂转角；β 分别为舵机转角；$\omega_{轮}$、$\omega_{翼}$ 分别为行走轮角速度和旋翼角速度；F_{N1}、F_{N2} 分别为夹爪两侧接触点法向力；f_{s1}、f_{s2} 分别为夹爪两侧接触点摩擦力；F_k 为弹性元件夹紧力；θ 为夹爪接触包络角。

如图 5(c)所示，夹爪机构是机器人与缆线建立初始接触约束的首个执行部件，其设计重点在于被动触发、欠驱动包络与线控驱动相结合。上线过程中，夹爪无需依赖高精度主动对位驱动，而是在缆线接触作用下被动触发开启，并在弹性元件与机构几何约束共同作用下完成闭合，从而实现对缆线的快速接触与抓持。为提高夹持过程对位置误差和缆径变化的适应能力，夹爪左右两侧抓持单元采用欠驱动设计，以较少驱动输入实现多关节协同运动，使夹爪在接触位置存在偏

差或导线尺寸变化时仍能形成自适应包络,提高抓持稳定性与挂载容错性。与此同时,夹爪驱动采用线控传动方式,可将驱动单元后置,减小末端质量和局部转动惯量,降低对机臂折叠与飞行姿态稳定性的影响,并有利于夹爪紧凑化布置。被动触发用于降低上线时的主动对位要求,欠驱动结构用于适应缆径和接触位置偏差,线控传动则将驱动单元后置,以减小夹爪端部质量。夹爪主要承担初始挂载和定位作用,不作为沿缆行走阶段的主要承载部件。

2 约束模型与仿真分析

2.1 关键约束模型建立

为验证所提出轮—翼复合沿缆式机器人构型的合理性,并为参数选取和仿真分析提供依据,本研究从飞行悬停能力、挂线防滑能力、沿缆驱动能力以及机臂驱动与自锁能力4个方面建立简化约束模型。

2.1.1 飞行悬停约束

机器人在飞行上线阶段需具备稳定悬停和姿态调节能力。考虑基本悬停需求及导线附近飞行时的抗扰裕度,旋翼系统最大升力应满足:

$$T_{\max} \geqslant \lambda mg \tag{1}$$

式中:$T_{\max}$——旋翼系统最大升力,N;

λ——推力裕度系数;

m——机器人总质量,kg;

g——重力加速度,m/s²。

式(1)用于约束旋翼选型,使机器人在飞行上线阶段具有足够的悬停和姿态调节能力。

2.1.2 挂线防滑约束

机器人进入沿缆模态后,行走轮与缆线之间需提供足够附着力,以避免坡段导线或外界扰动作用下发生滑移。为评价轮缆接触状态下的附着裕度,定义防滑安全系数为:

$$S_s = \frac{\mu_1 N_1 + \mu_2 N_2}{mg\sin\alpha + f_r(N_1 + N_2)} \tag{2}$$

式中:S_s——防滑安全系数;

μ_1、μ_2——前、后行走轮与缆线之间的等效摩擦系数;

N_1、N_2——前、后行走轮法向接触力,N;

α——导线局部坡角,rad;

f_r——滚动阻力系数。

实际设计中应满足$S_s > 1$,并根据风扰、姿态波动和轮缆接触状态变化预留一定安全裕度。防滑安全系数越大,表示平台在坡段导线上的附着裕量越高,抗扰能力越强。该组约束主要用于指导轮组包覆材料、轮径及缆径适配范围的确定,同时为沿缆行走稳定性分析提供基础。

2.1.3 沿缆驱动转矩约束

沿缆运行时,双轮驱动系统既要克服坡度阻力和滚动阻力,又要避免超过轮缆附着极限。机器人沿导线方向的总驱动转矩需求可表示为:

$$\tau_1 + \tau_2 = r[mg\sin\alpha + f_r(N_1 + N_2) + ma] \tag{3}$$

同时,前、后行走轮驱动转矩应受到轮缆附着能力限制:

$$\tau_1 \leqslant r\mu_1 N_1,\ \tau_2 \leqslant r\mu_2 N_2 \tag{4}$$

式中:τ_1、τ_2——前、后行走轮驱动转矩,N·m;

r——行走轮半径,m;

a——机器人沿导线方向的加速度,m/s²。

式(3)用于估算沿缆行走所需的总驱动转矩,式(4)用于约束单轮驱动转矩不超过附着极限。该约束主要用于指导行走电机选型,并为后续沿缆作业性能分析提供依据。

2.1.4 舵机驱动与过中心自锁机理

可变形机臂是实现飞行模态与沿缆模态切换的关键机构,其驱动过程需克服机臂自重及末端机构载荷引起的阻力矩,并在展开到位后保持构型稳定。本研究采用舵机通过上、下连杆驱动可变形机臂完成折叠与展开,舵机摇臂输出转矩经双连杆机构传递至机臂中部连接点,从而形成机臂绕根部转轴的驱动力矩。考虑连杆机构传动后,舵机输出转矩应满足:

$$T_s \geqslant \frac{(m_a g l_a + F_e l_e) l_s \sin\varepsilon}{l_b \sin\gamma} \tag{5}$$

式中:T_s——舵机输出转矩,N·m;

m_a——可变形机臂质量,kg;

l_a——机臂质心到根部转轴的距离,m;

F_e——末端轮—翼复合机构等效载荷,N;

l_e——末端载荷作用点到根部转轴的距离,m;

ε——等效载荷力臂方向与重力方向之间的夹角,rad;

l_s——舵机摇臂对连杆作用力的有效力臂,m;

l_b——连杆连接点到机臂根部转轴的距离,m;

γ——连杆作用线与机臂之间的夹角,rad。

由式(5)可知,舵机输出转矩与机臂载荷、末端载荷及连杆机构有效力臂有关。当l_s过小时,机构有效传力能力下降,舵机所需输出转矩增大。因此,在机构设计中应避免连杆机构长时间处于小力臂区域。机臂展开到位后,连杆机构接近死点,此时$l_s \to 0$,外载荷难以直接反驱舵机,从而形成过中心自锁效果,提高飞行模态下的构型保持能力。该特性有助于减小舵机持续保持转矩,提高飞行模态下的构型稳定性。

2.2 模态切换仿真分析

为验证所提出轮—翼复合沿缆式巡检机器人在模

态切换过程中的运动学可行性，在 SolidWorks 中完成整机三维建模，并将其导入 ADAMS 建立简化多体动力学模型，如图 6 所示。模型主要包含机身主体、被动夹爪、可变形机臂、轮—翼复合末端执行机构及起落架等关键部件。建模过程中对传感器、紧固件、线缆和局部辅助结构进行了适当简化，仅保留与模态切换和沿缆作业密切相关的主体构件，以提高仿真效率并突出关键运动特征。在 ADAMS 模型中，机身与机臂、机臂与末端机构之间采用转动副建模，刚性连接部件设置固定副，并通过舵机驱动函数模拟双侧机臂同步折叠过程。该模型主要用于描述机臂折叠过程中的空间干涉关系、轮组向缆线靠近时的几何匹配关系，以及系统支撑状态由“飞行悬停主导”向“轮线接触支撑主导”的变化过程。

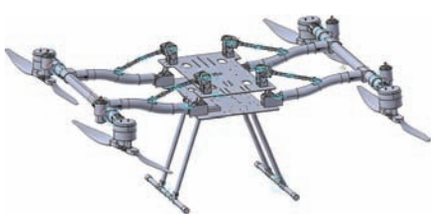


图 6　ADAMS 简化模型

Figure 6　Simplified ADAMS model

基于所建立的 ADAMS 模型，对机器人由飞行展开构型向沿缆工作构型的模态切换过程进行仿真分析，结果如图 7 所示。

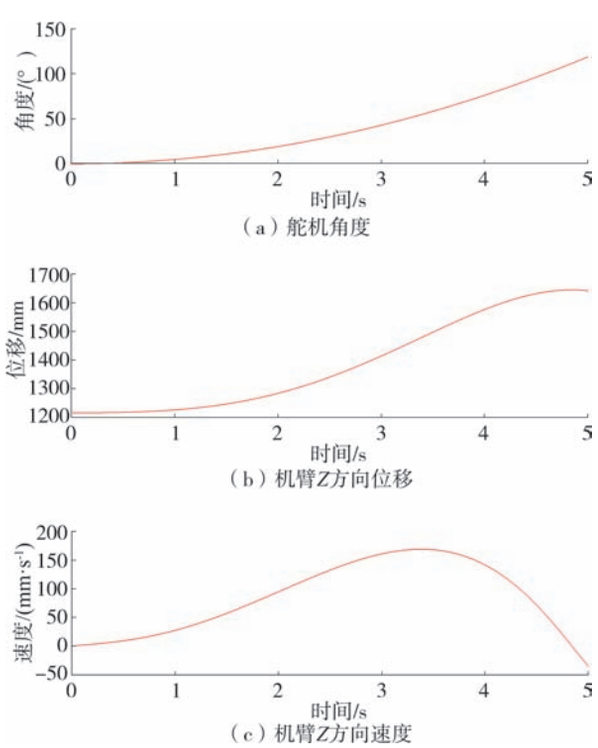


图 7　模态切换响应曲线

Figure 7　Response curves of mode switching

在机器模态切换过程中，舵机转角由 0°增加至约 118°；机臂末端 Z 向位移约 430 mm，速度曲线在约 3.4 s 达到峰值后逐渐下降。上述结果说明，机臂折叠过程未出现明显运动突变，末端机构能够在约 5 s 内收拢至沿缆工作位置，验证了总体方案和关键机构设计在运动学层面的可行性。

2.3　沿缆行走仿真分析

完成模态切换后，机器人进入沿缆行走状态，其 ADAMS 简化模型如图 8 所示。该工况下，平台主要受重力、轮线接触力、驱动力及摩擦力作用，机器人自重通过轮组与缆线接触传递，驱动电机输出牵引力沿缆线切向作用于系统，实现沿缆稳定前进。与自由飞行状态相比，沿缆作业模式受到缆线约束，横向自由度明显减小，因而更有利于保持运动轨迹和观测姿态的一致性。

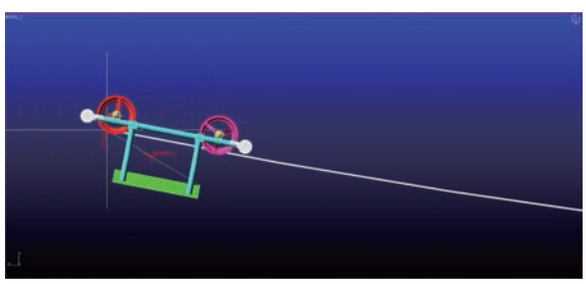


图 8　行走状态简化模型

Figure 8　Simplified model of the travelling state

为比较不同行走速度下的轮缆接触和姿态变化，设置两种恒速驱动工况，行走轮驱动角速度分别为 6 rad/s 和 12 rad/s（对应沿缆行走线速度约为 0.57 m/s 和 1.14 m/s），分别模拟精细巡检和快速巡检两种典型作业场景。沿缆行走状态下的关键响应结果如图 9 和图 10 所示，图中分别展示了两种工况下前后轮的法向接触力与速度方向角变化曲线。

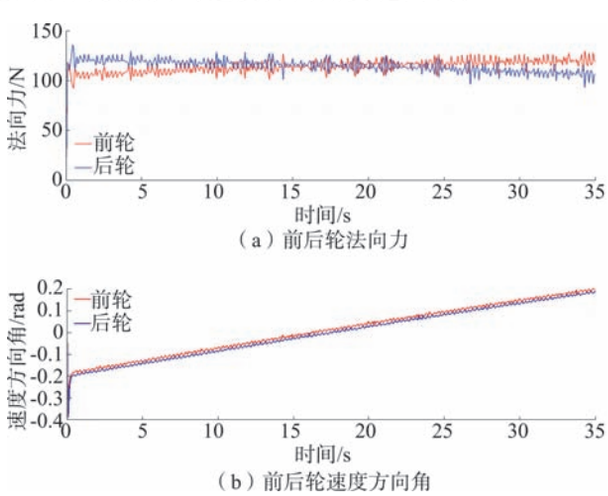


图 9　精细巡检沿缆行走响应曲线

Figure 9　Cable-travelling response curves for detailed inspection

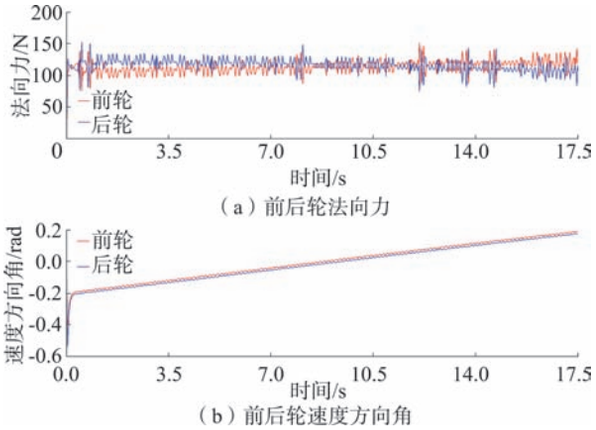


图 10 快速巡检沿缆行走响应曲线

Figure 10 Cable-travelling response curves for rapid inspection

仿真结果显示,在 6 rad/s 和 12 rad/s 驱动条件下,机器人均能沿缆线连续前进,前后轮法向力未出现持续失载。忽略仿真开始时的角度突变,速度变化角变化范围约为−0.2～0.2 rad,整体变化平滑,未发生失稳打滑,说明在所设定的速度范围内,平台姿态变化未出现明显放大。

从农情图像采集角度看,沿缆行走过程中轮缆接触稳定和俯仰角波动较小,意味着相机载荷在巡检过程中能够保持较连续的拍摄姿态,有利于减少图像序列中的视角突变和画面抖动,为后续开展作物冠层图像拼接、长势变化对比和异常区域复查提供运动稳定性基础。

3 结论

1)针对现有农情监测平台在开放农田环境下快速部署能力、环境适应性与重复观测一致性难以兼顾的问题,提出了一种面向农情监测的轮—翼复合沿缆式巡检机器人。该平台以架空缆线为固定巡检路径,构建了飞行上线和沿缆行走相结合的双模态作业方式。

2)完成了机器人总体结构、关键部件与感知载荷配置的设计,建立了飞行悬停、挂线防滑、沿缆驱动及机臂驱动等关键约束模型。仿真结果表明,机器人可在约 5 s 内完成由飞行展开模态向沿缆行走模态的转换;沿缆行走过程中轮组与缆线接触稳定,前后轮俯仰角变化范围约为−0.2～0.2 rad,验证了所提方案在运动学层面的可行性和观测姿态稳定性。

参 考 文 献

[1] 罗锡文. 人工智能与植保机械化[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2020, 1(1): 1−6.
Luo Xiwen. Artificial intelligence and plant protection mechanization [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization (in Chinese and English), 2020, 1(1): 1−6.

[2] 赵峻, 聂志刚, 李广, 等. 基于无人机低空近景图像的玉米螟虫害检测方法[J]. 智慧农业(中英文), 2025, 7(6): 111−123.
Zhao Jun, Nie Zhigang, Li Guang, et al. Corn borer pests infestations detection method using low-altitude close-range UAV imagery [J]. Smart Agriculture, 2025, 7(6): 111−123.

[3] 郑恒彪, 吉文翰, 郭彩丽, 等. 无人机遥感作物估产研究进展[J]. 南京农业大学学报, 2025, 48(1): 1−13.
Zheng Hengbiao, Ji Wenhan, Guo Caili, et al. Research progress in crop yield estimation using unmanned aerial vehicle-based remote sensing [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2025, 48(1): 1−13.

[4] 许晓斌, 朱红春, 李峰, 等. 高时空分辨率遥感支撑的农业精准灾害预警:进展、瓶颈与融合路径[J]. 智慧农业(中英文), 2026, 8(2): 18−34.
Xu Xiaobin, Zhu Hongchun, Li Feng, et al. High spatiotemporal resolution remotesensing for precision agricultural disaster early warning: Progress, bottlenecks, and integrative pathways [J]. Smart Agriculture, 2026, 8(2): 18−34 .

[5] 吉文翰, 郑恒彪, 王迪, 等. 基于无人机影像和卷积神经网络的水稻育种材料产量预测研究[J]. 南京农业大学学报, 2025, 48(5): 1001−1012.
Ji Wenhan, Zheng Hengbiao, Wang Di, et al. Yield prediction in rice breeding materials using UAV-based images and convolutional neural network [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2025, 48(5): 1001−1012.

[6] 聂鹏程, 钱程, 覃锐苗, 等. 天空地一体化信息感知与融合技术发展现状与趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2023, 4(2): 1−11.
Nie Pengcheng, Qian Cheng, Qin Ruimiao, et al. Development status and trends of space-air-ground integrated information sensing and fusion technology [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2023, 4(2): 1−11.

[7] 赵春江. 智慧农业的发展现状与未来展望[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 1−7.
Zhao Chunjiang. Current situations and prospects of smart agriculture [J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 1−7.

[8] 岳学军, 蔡雨霖, 王林惠, 等. 农情信息智能感知及解析的研究进展[J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(6): 14−28.
Yue Xuejun, Cai Yulin, Wang Linhui, et al. Research progress of intelligent perception and analytics of agricultural information [J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(6): 14−28.

[9] Ayankojo I T, Thorp K R, Thompson A L. Advances in the application of small unoccupied aircraft systems (sUAS) for high-throughput plant phenotyping [J]. Remote

Sensing, 2023, 15(10): 2623.

[10] Young S N, Kayacan E, Peschel J M. Design and field evaluation of a ground robot for high-throughput phenotyping of energy sorghum [J]. Precision Agriculture, 2019, 20(4): 697－722.

[11] Xu R, Li C. A review of high-throughput field phenotyping systems: Focusing on ground robots [J]. Plant Phenomics, 2022, 2022: 9760269.

[12] 王琳, 陈强, 施印炎, 等. 农业机器人底盘关键技术研究现状分析[J]. 拖拉机与农用运输车, 2023, 50(5): 1－9.
Wang Lin, Chen Qiang, Shi Yinyan, et al. Progress and development on key technology of robot chassis in agricultural production [J]. Tractor & Farm Transporter, 2023, 50(5): 1－9.

[13] 何勇, 李禧尧, 杨国峰, 等. 室内高通量种质资源表型平台研究进展与展望[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 127－141.
He Yong, Li Xiyao, Yang Guofeng, et al. Research progress and prospect of indoor high-throughput germplasm phenotyping platforms [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38 (17): 127－141.

[14] 陈龙跃, 段丹丹, 徐卫兵, 等. 地、空尺度的农作物高通量表型分析的应用与挑战[J]. 广东农业科学, 2024, 51(11): 149－162.
Chen Longyue, Duan Dandan, Xu Weibing, et al. Applications and challenges of high-throughput phenotypic analysis of crops at ground and aerial scale [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2024, 51(11): 149－162.

[15] Ninomiya S. High-throughput field crop phenotyping: Current status and challenges [J]. Breeding Science, 2022, 72(1): 3－18.

[16] Roth L, Marzougui A, Walter A. A review of the journey of field crop phenotyping: From trait stamp collections and fancy robots to phenomics-informed crop performance predictions [J]. Journal of Plant Physiology, 2025, 311: 154542.

[17] Yuan H, Song M, Liu Y, et al. Field phenotyping monitoring systems for high-throughput: A survey of enabling technologies, equipment, and research challenges [J]. Agronomy, 2023, 13(11): 2832.

[18] Shamshiri R R, Weltzien C, Hameed I A, et al. Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(4): 1－14.

[19] Alhassan A B, Zhang X, Shen H, et al. Power transmission line inspection robots: A review, trends and challenges for future research [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 118: 105862.

[20] Qin X, Jia B, Lei J, 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: 257－273.

[21] Jiang W, Ye G C, Zou D H, et al. Mechanism configuration and innovation control system design for power cable line mobile maintenance robot [J]. Robotica, 2021, 39(7): 1251－1263.

[22] Zeng Y, Qin X, Li B, et al. A novel autonomous landing method for flying-walking power line inspection robots based on prior structure data [J]. Applied Sciences, 2023, 13(17): 9544.

[23] 罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 我国智能农机的研究进展与无人农场的实践[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 8－17.
Luo Xiwen, Liao Juan, Hu Lian, et al. Research progress of intelligent agricultural machinery and practice of unmanned farm in China [J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 8－17.

[24] Fountas S, Mylonas N, Malounas I, et al. Agricultural robotics for field operations [J]. Sensors, 2020, 20(9): 2672.

[25] Jia W, Lei J, Qin X, et al. Dynamic modeling and analysis of a flying-walking power transmission line inspection robot landing on power transmission line using the ANCF method [J]. Applied Sciences, 2025, 15(4): 1863.

Design and analysis of a wheel-wing hybrid cable-travelling inspection robot for agricultural monitoring

Lou Dengyun, Lei Jin*, Qin Xinyan, Li Chunhao, Li Wenrui, Wu Changhuan

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

Abstract: Existing agricultural monitoring platforms in open-field environments generally suffer from limited endurance of unmanned aerial vehicles, insufficient viewpoint consistency during low-altitude repeated observations, and high susceptibility

of ground robots to surface conditions and crop canopy occlusion, making it difficult to concurrently meet the demands of rapid deployment and highly repeatable observation. To achieve continuous acquisition and comparative analysis of agricultural information at the same location and from the same viewpoint over different periods, a wheel-wing hybrid cable-travelling inspection robot for agricultural monitoring was designed. Using overhead cables above farmland as fixed inspection paths, a dual-mode inspection scheme combining aerial cable docking and cable-travelling locomotion was proposed to meet the demand for repeated observation at fixed locations and viewpoints. On this basis, an integrated configuration composed of a passive trigger gripper, deformable arms, and wheel-wing hybrid end-effectors was developed to realize structural reuse of the aerial execution unit and the cable-travelling execution unit. In addition, key constraint models, including flight hovering, anti-slip on the cable, cable-travelling driving torque, and arm driving with over-center self-locking, were established, and SolidWorks and ADAMS were used to simulate mode switching and cable-travelling operation. The simulation results showed that the two arms of the robot could fold synchronously and the mode-switching process was continuous and stable. The robot could complete the transition from the flight-deployed mode to the cable-travelling working mode within approximately 5 seconds. In the cable-travelling mode, the platform moved continuously with stable wheel-cable contact, and the pitch angle variation of the front and rear wheels ranged from about −0.2 to 0.2 rad, indicating favorable path constraint and observation posture stability. The proposed robot can satisfy both rapid access to field monitoring areas and stable fixed-path inspection requirements, providing a reference for temporal agricultural monitoring, repeated observation data acquisition, and the development of low-cost agricultural inspection equipment.

Keywords: agricultural monitoring; cable-travelling inspection robot; wheel-wing hybrid structure; mode switching

Foundation items: National Regional Science Foundation of China (62563034)

First Author: Lou Dengyun, E-mail: loudengyun@stu.shzu.edu.cn

* **Corresponding Author:** Lei Jin, E-mail: jinlei@shzu.edu.cn