

基于无人机的竹产品与疫木下山吊运系统设计与试验*

陈洪立¹ 王冠凯¹ 黄宏亮² 马锒宏¹ 赵胤¹ 杜小强¹

(1.浙江理工大学 机械工程学院 浙江杭州 310018; 2. 浙江省湖州市安吉县林业局 湖州市 313300)

摘 要:【目的】针对目前竹产品伐后下山主要依靠人工搬运、拖车,存在劳动强度大、运送效率低、人力成本高以及易发生安全事故等问题,设计一种基于无人机的竹产品与疫木下山吊运系统,能够实现利用无人机在竹林或树林间的自主吊运和危险情况下紧急脱困保护无人机安全的功能,减少人工参与、保障作业人员安全并克服山地垂直落差大的问题。【方法】基于测定的竹梢、竹段形态特征参数研究设计吊挂自动脱钩装置和无人机紧急脱困装置,并通过 SOLIDWORKS 软件建立装置的三维模型,同时开发了驱动设备的软硬件系统。基于 ANSYS Workbench 软件的静态结构分析(static structural)、静磁分析(magnetostatic)对吊运装置的关键结构进行仿真和理论计算,确定结构参数和电磁铁型号。进行室内试验分析打包方式的效率、两种脱钩方式的稳定性和脱困机构的可行性。并进行林间试验,测试整套调运系统在实际工作场景下的效率和稳定性。【结果】室内试验表明,魔术贴打包方式平均用时 21s、凹扣组平均用时 22.2s、绳结组平均用时 25.8s,选用魔术贴进行打包。重力钩脱钩成功率为 80%、电磁主动脱钩成功率为 90%,选用电磁主动脱钩方式。林间试验结果显示,脱钩成功率为 90%,其中挂钩的平均耗时为 14.69 秒,脱钩的平均耗时为 1.19 秒。在上升、下降和前进状态下,脱困成功率分别为 80%、90%和 90%。【结论】该吊运系统能够减少人工参与、提高运送效率、减小人力成本和降低发生安全事故的概率,试验表明该吊运系统满足现场应用需求。

关键词:无人机、竹林吊运、紧急脱困、自动脱钩、仿真优化、林业应用。

中图分类号 S776.2

文献标识码: A

文章编号: XXXX-XXXX () -XXXX

Design and Testing of a Bamboo Product and Epidemic Tree Downhill Lifting System Based on UAV

Chen Hongli¹ Wang Guankai¹ Huang Hongliang² Ma Zenghong¹ Zhao Yin¹ Du Xiaoqiang¹

(1. Zhejiang Sci-Tech University School of Mechanical Engineering Hangzhou 310018; 2. Anji County Forestry Bureau 313300)

Abstract:【Objective】In response to the current problems of high labor intensity, low transportation efficiency, high labor costs, and easy occurrence of safety accidents caused by manual handling and towing of bamboo products after logging, a drone based bamboo product and epidemic wood downhill lifting system is designed to achieve the function of using drones for autonomous lifting in bamboo forests or forests and emergency rescue in dangerous situations to protect the safety of drones, reduce manual participation, ensure the safety of operators, and overcome the problem of large vertical drops in mountainous areas.【Method】Based on the measured morphological characteristic parameters of bamboo shoots and bamboo segments, a hanging automatic decoupling device and an emergency rescue device for unmanned aerial vehicles were studied and designed. A three-dimensional model of the device was established using SOLIDWORKS software, and the software and hardware systems for driving the equipment were developed. Based on ANSYS Workbench software, static structural analysis and magnetostatic analysis are used to simulate and theoretically calculate the key structures of the lifting device, determine the structural parameters and electromagnetic coil models. Conduct indoor experiments to analyze the efficiency of the packaging method, the stability of the two decoupling methods, and the feasibility of the escape mechanism. And conduct forest experiments to test the efficiency and

stability of the entire transportation system in actual working scenarios. 【Result】 Indoor tests showed that the average time for the Velcro packing method was 21s, for the concave hook group it was 22.2s, and for the knot group it was 25.8s, with Velcro selected for packing. The gravity hook disengagement success rate was 80%, while the electromagnetic active disengagement success rate was 90%, with the electromagnetic active disengagement method selected. The field test results showed a disengagement success rate of 90%, with the average hook hanging time being 14.69 seconds and the average disengagement time being 1.19 seconds. The success rates for disengagement in ascending, descending, and forward states were 80%, 90%, and 90%, respectively. 【Conclusion】 The lifting system can reduce manual involvement, improve transportation efficiency, lower labor costs, and reduce the probability of safety accidents. Experiments have shown that the lifting system meets the requirements of on-site applications.

Key words: drone, bamboo forest lifting, emergency rescue, automatic decoupling, simulation analysis, forestry applications.

0 引言

我国是世界上竹资源最丰富的国家，共有竹类植物 39 属 530 余种。竹种资源、竹林面积、竹材蓄积和产量均居世界首位，素有“竹子王国”的美誉（蒋鹏飞等，2022；李玉敏等，2019）。毛竹林是中国南方的重要森林类型，特点为生长快、周期短、产量高和用途广泛。浙江省是中国主要的毛竹产区，其地形以“七山一水二分田”著称，74.63%的地区为山地和丘陵，适合毛竹生长。毛竹主要分布在海拔 400 至 800 米的丘陵和低山山麓地区（叶鹏等，2020）。根据国家林业和草原局发布的《2021 中国林草生态综合监测评价报告》，2021 年我国竹林面积达 756.27 万 hm^2 ，占全国竹林总面积的 69.78%，成为林业经济的重要组成部分。毛竹竹梢因其观赏和经济价值受到消费者青睐，市场需求不断扩大。然而，安吉地区的毛竹采运和加工仍以人工操作为主，机械化程度相对较低（徐薇等，2024）。

随着竹产业的蓬勃发展，竹产品运输的机械设备越来越受到关注。目前，毛竹伐后下山的转运工作仍主要依赖传统的人工搬运和拖车等方法。在国内，竹产品采后下山的运输装备包括：一种三线双轨式动力架空索道（贵州林业厅，1966）；一种山地竹林轻简型运输装置及其布置方法（俞国红等，2024）；湖州市林业局设计的一种无动力管道（陆美珍等，2018）；浙江农林大学研发的挂式运输导轮组（吴纯彪等，2023）；以及竹材索道集材跑车运输系统（雷永杰等，2023）。此外，还包括针对高低落差较大的山地设计的轨道运输方式（张火亮等，2024）和一些非竹产品运输的案例，如利用环形单轨运输（杨方等，2023）和双轨运输油茶果（陈吉朋等，2024）。

传统运输方式，如人工搬运、拖车、索道和管道，存在诸多缺点。人工搬运和拖车在大规模或长距离运输中效率较低，且在恶劣天气条件下存在较高的安全隐患。此外，这些方法劳动强度大，需耗费大量人力。索道和管道的建设与维护成本也较高，尤其是在山地环境中，拆装困难，且适应性差，难以应对复杂地形，特别是垂直落差大的区域。此外，这些方式对环境的影响较大，可能破坏生态。

为此，我们提出了一种利用无人机运输竹产品下山的新方式。这种方法具有更高的运输效率，更安全的作业条件，降低的劳动强度，较低的维护成本，以及更强的环境适应性。

根据农业农村部办公厅和财政部办公厅印发的《2024—2026 年农机购置与应用补贴实施意见》，计划全面开展农用无人驾驶航空器购置补贴工作。针对当前竹产品运输中存在的问题，研发一套无人机运输设备具有重要的政策、理论和实践意义。引入该设备将显著提高竹产品下山的效率，减少人力需求，降

低用人成本，并推动毛竹产业向智能化和高效化发展。

本文针对无人机在竹产品下山过程中面临的绳子与石块卡住、树枝缠绕或钩子挂住树枝等问题，研究并设计了一套无人机紧急脱困装置及吊挂自动脱钩装置。通过 SOLIDWORKS 软件建立了装置的三维模型，并基于 ANSYS Workbench 软件对吊运系统的关键零部件进行了仿真和理论计算。此研究旨在解决可能导致无人机无法继续飞行的困境，为竹产品下山装置的设计提供参考，促进竹产业的进一步发展。

1 毛竹竹梢、竹材、竹笋、疫木物理特征

通过对浙江省湖州市安吉县毛竹林的实际调研，发现竹子通常在清明节前后种植，5 月时可进行第一次修剪，随后逐渐木质化，4 至 5 年后可砍伐。每亩地约有 30 至 80 根竹子，平均为 60 根。人工搬运时，单人一天可处理约 4000 斤竹子。而实验平台的无人机可挂载约 50kg 的货物。因此，将人工搬运的 100kg 左右一捆竹梢拆分为 50kg 一捆，以便无人机进行吊运。

并利用卷尺测量出调研时 10 捆竹子的一些数据。数据结果如表 1 所示，调研图片如图 1 所示。

表 1 竹产品形态特征参数

Tab. 1 The morphological characteristic parameters of bamboo products		
参数	值	平均值
竹子长度 Bamboo length/m	18-25	20
竹梢长度 Bamboo tip length/m	2.8-5	3
竹梢最粗处直径 Diameter at the thickest part of the bamboo tip/cm	6-10	7.5
竹梢保留节数 Number of nodes retained on the bamboo tip/个	9-16	13
竹梢竹节间距 Internode spacing of bamboo tip/cm	17-39	23
一捆竹梢重量 Weight of a bundle of bamboo tips/kg	80-120	100
竹段长度 Length of bamboo segment/m	1.1-1.5	1.3
竹段重量 Weight of bamboo segment/kg	0.3-0.6	0.5

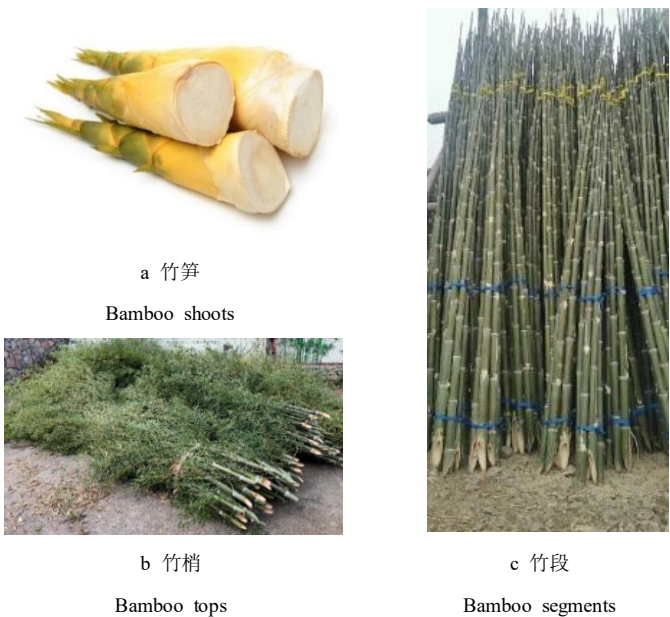
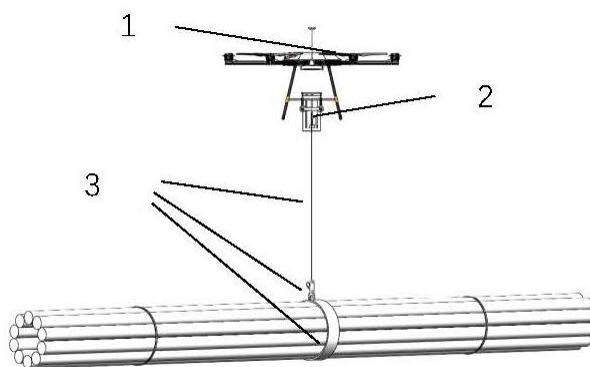


图 1 竹产品实物图

Fig. 1 Physical image of bamboo products

2 吊运系统整体结构

吊运系统包括吊挂自动脱钩装置和无人机紧急脱困装置。整体结构如图 2 所示。其中，吊挂自动脱钩装置由打包绳、自动脱钩装置和吊挂绳组成。无人机紧急脱困装置安装在无人机载货架上，并将吊挂自动脱钩装置挂载于其上。无人机紧急脱困装置主要由型材机架、顶升机构、夹紧机构、载货框架和控制系统组成。



1. 无人机; 2. 无人机紧急脱困装置; 3. 吊挂自动脱钩装置

1.UAV; 2. Emergency unblocking device for drones; 3. Automatic unhooking device for suspension

图 2 吊运系统整体结构

Fig. 2 Overall structure of the lifting system

2.1 吊挂自动脱钩装置整体结构与吊挂绳选型

在调研中发现，现场工人常用竹条进行打包，虽然方法简单，但可靠性不足。因此，决定采用打包绳作为主要的打包方式，并结合竹条进行固定，这样既方便又能提高可靠性，同时控制成本。

对于打包绳的选择，考虑了三种方式：魔术贴、凹扣和绳结。魔术贴使用方便快捷，凹扣则提供最安全稳定的固定方式，而绳结在缺乏其他工具时仍能确保较高的安全性。

在具体材料选择上，凹扣和魔术贴均采用扁平的尼龙绳。一般来说，尼龙绳的拉力标准为其破断拉力的一半到三分之一。根据资料，宽度为 5cm 的人字形尼龙绳可承载 300 斤。具体选择应根据实际需求，详见图 3 所示。

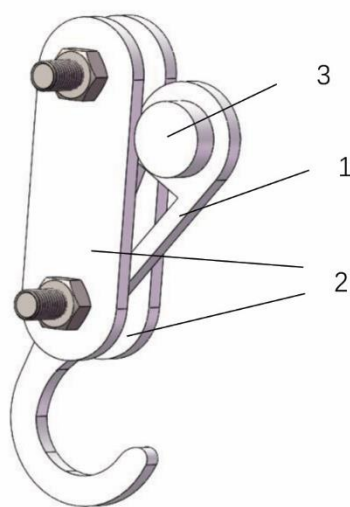


图 3 魔术贴、凹扣和绳结打包方式

Fig. 3 Packing methods using Velcro, buckles, and knots

为了提高无人机运输竹梢下山的效率并减少用工人数量，本文参考现有的重力钩进行优化设计。该装置

包括一个钩体、两个侧板和两个双头螺柱。装置与吊挂绳固定，下方挂钩与打包绳相连。装置结构如图 4 所示。



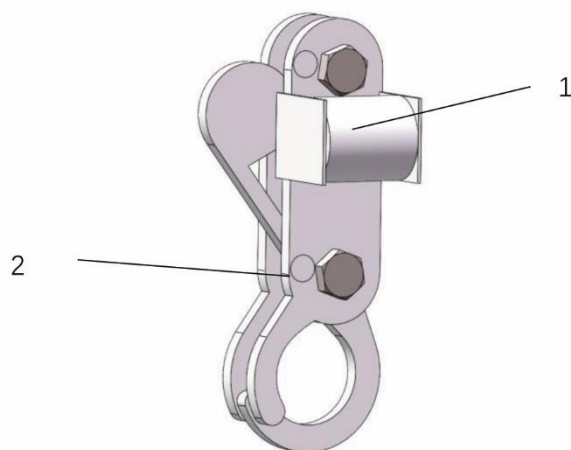
1. 钩体; 2. 侧板; 3. 配重块

1. Hook body; 2. Side plate; 3. Counterweight

图 4 重力钩装置结构

Fig. 4 Structure of the gravity hook device

考虑到实际作业时重力钩需要人工扶持等待无人机起飞，安全性欠缺，因此在此基础上进行改进，利用电磁铁和扭簧将普通重力勾改造成主动脱钩，完善作业流程和提高安全性。装置结构如图 5 所示。



1. 电磁铁; 2. 扭簧

1. Electromagnet; 2. Torsion spring

图 5 电磁铁主动脱钩结构

Fig. 5 Structure of the active unhooking mechanism with electromagnet

吊挂绳选型部分，查阅资料可知，钢丝绳的破断拉力计算公式为：

$$F_0 = K \times D^2 \times R_0 \div 1000 \quad (1)$$

其中：

F0: 钢丝绳最小破断拉力, 单位为 kN;

D: 钢丝绳公称直径, 单位为 mm;

R0: 钢丝绳公称抗拉强度, 单位为 MPa;

K: 钢丝绳的最小破断拉力系数。

其近似破断拉力公式为:

$$F_1 = 50 \times D^2 \times g \quad (2)$$

其中:

F1: 钢丝绳最小破断拉力, 单位为 N;

D: 钢丝绳公称直径, 单位为 mm;

g: 重力加速度, 取 9.8

因此计算可得直径 3mm 的钢丝绳破断拉力为 4410N, 安全系数取 6, 可知 3mm 钢丝绳的安全负荷为 735N, 可知最大承载能力为 75kg。为了确保无人机在卸货时能够保持在毛竹上方而不进入毛竹林, 最终选择直径 3mm, 长度 17m 的钢绳。具体方案图见图 6 所示。

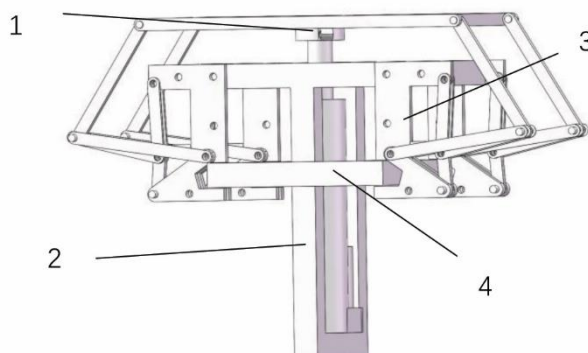


图 6 吊挂绳

Fig. 6 Suspension rope

2.2 无人机紧急脱困装置整体结构

无人机竹梢、竹段下山中面临绳子与石块卡住、树枝打结, 或者钩子挂住树枝等问题, 危及无人机安全。因此在危险状态将货物抛弃保护无人机安全十分有必要。本文设计了一个基于双死点结构锁紧的脱困结构, 可以在紧急状态接受信号, 将载货框架抛弃, 从而保证无人机的安全。装置由型材机架、顶升机构、夹紧机构、载货框架、控制系统组成。其示意图如图 7 所示。



1. 顶升机构; 2. 型材机架; 3. 夹紧机构; 4. 载货框架

1. Lifting mechanism; 2. Profile frame; 3. Clamping mechanism; 4. Cargo frame

图 7 无人机紧急脱困装置示意图

Fig. 7 Schematic of the emergency unblocking device for drones

其中型材机架固定在无人机载货架上，其作用是用来固定顶升机构、夹紧机构、载货框架。顶升机构由一个行程 100mm 的电推杆，钢材框架及四根传递拉力的外连杆组成。夹紧机构是该设备的核心组件，是一种六杆机构，由两个死点组成，包括机架、夹具块、销轴、压力传感器、外侧杆、内测杆、连杆上半和连杆下半。它利用一个死点卡住载货框架，并稍过死点将力传递到机架部分，外侧再通过外侧杆和内侧杆长度差将电推杆的上下传动转化为左右的传动，并且在非脱困时组成一个死点，整个结构通过两个死点保证稳定，最后通过破坏死点完成释放。载货框架由 2020 铝型材搭建，用来悬挂重物或者搭载其他设备，承担被抛弃的作用。控制系统主要包括主机无人机遥控，负责发送脱困脱钩信号以及从机 STM32F103 单片机，负责收发处理传感器信息和控制脱困装置。控制系统结构示意图如图 8 所示。

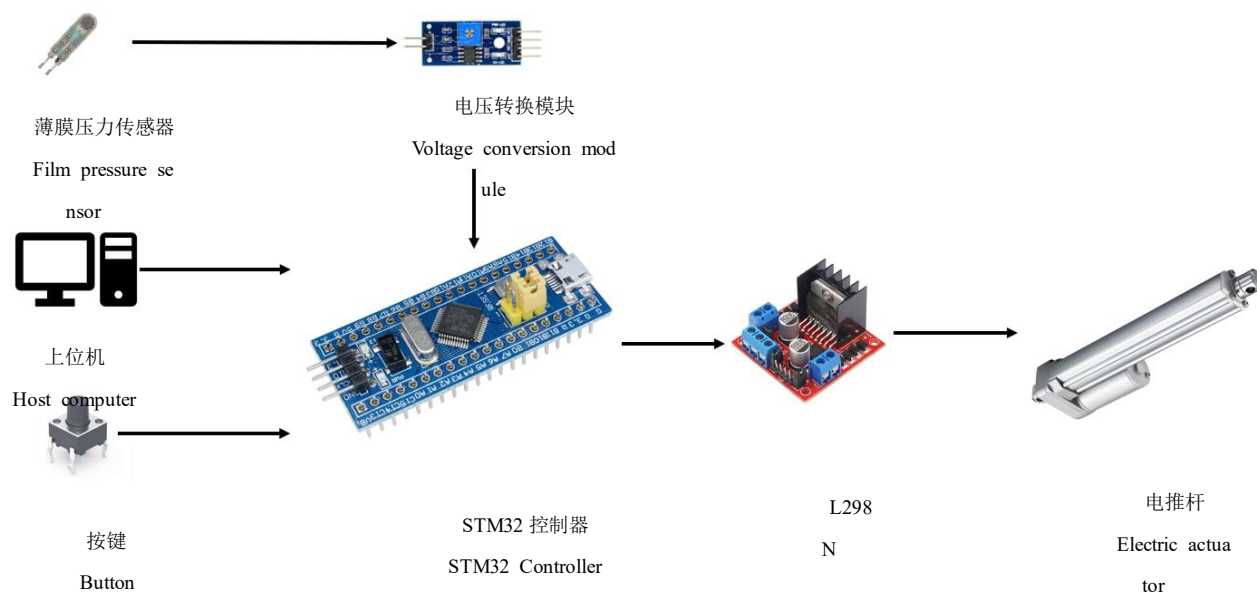


图 8 控制系统结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the control system structure

3 关键部件设计

3.1 吊挂自动脱钩装置研究与开发

由于毛竹竹梢质量较大且无人机的载重有限，因此吊钩主要称重部件钩体要进行强度校核，保证在安全吊运的同时也尽量满足轻量化的要求。因此运用有限元对其力学特性进行了计算模拟。

吊挂自动脱钩装置由 45 钢制成，经查阅相关文献后得知，45 号钢的物质密度为： $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$ ， $E=210 \text{ GPa}$ ，泊松比 $\mu=0.31$ 。在进行静力学分析前，为了构建钩体的有限元模型，需要对其进行网格划分，划分表见图 9。得到的单元数为 16807 个，节点数为 30662 个。

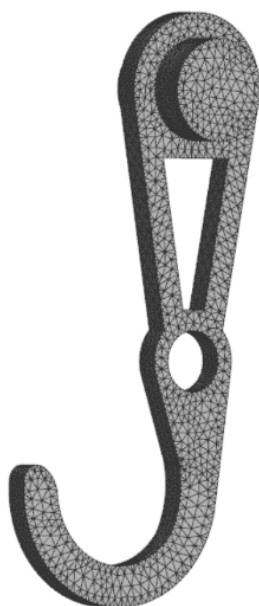


图 9 吊挂自动脱钩装置钩体有限元网格划分

Fig. 9 Finite element mesh division of the hook body for the automatic unhooking device

接下对钩体进行约束和载荷的作用，主要在钩体弯钩处施加一个小面积的与受力面正相关的均布载荷，在孔处施加一个固定约束。先计算该载荷的值，查阅数据得到实验平台的无人机提供 1000N 左右升力，机身总重 40kg，载重 50kg。

先计算无人机的最大加速度：

$$m_{total} = m_{aircraft} + m_{payload} \quad (3)$$

其中：

$$m_{aircraft} = 40kg \text{ (机身重量)}$$

$$m_{payload} = 50kg \text{ (载重)}$$

所以：

$$m_{total} = 40kg + 50kg = 90kg \quad (4)$$

$$\begin{aligned} F_{gravity} &= m_{total} \times g = 90kg \times 9.8m/s^2 \\ &= 882.9N \end{aligned} \quad (5)$$

$$F_{net \text{ lift}} = F_{lift} - F_{gravity} \quad (6)$$

其中 $F_{lift} = 1000N$ (升力)

$$F_{net\ lift} = 1000N - 882.9 = 117.1N \quad (7)$$

加速度 (a) 由额外升力产生的力除以总质量:

$$a_{acc} = \frac{F_{net\ lift}}{m_{total}} = \frac{117.1N}{90kg} \approx 1.3m/s^2 \quad (8)$$

再引入一个偏摆加速度:

$$a_{vib} = 0.5m/s^2$$

则总的外力为:

$$\begin{aligned} F_{extra} &= F_{acc} + F_{vib} \\ &= m_{payload} \times a_{acc} + m_{payload} \times a_{vib} \\ &= 50kg \times \frac{1.3m}{s^2} + 50kg \times \frac{0.5m}{s^2} \\ &= 90N \end{aligned} \quad (9)$$

$$F_{total} = m_{payload} \times g + F_{extra} = 580N \quad (10)$$

因此为了安全起见, 给钩体弯钩处施加一个 580N 的小面积载荷。

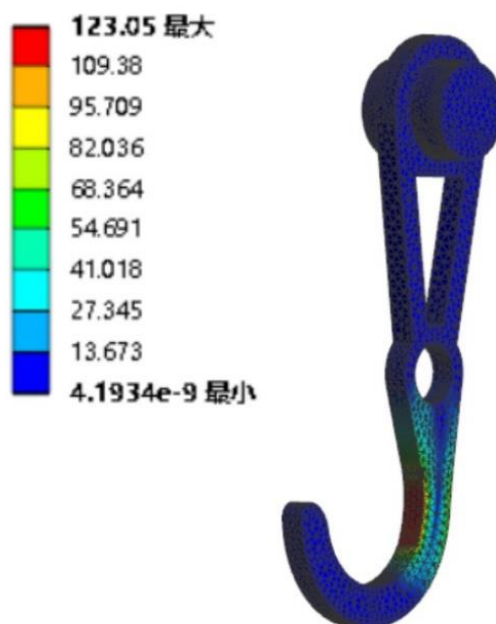


图 10 吊挂自动脱钩装置钩体静力学分析应力分布

Fig. 10 Stress distribution of the hook body in the static analysis of the automatic unhooking device

钩体的应力分析结果如图 10 中所示, 通过分析得出钩体在吊挂过程中的最大受力处为钩体和孔的连接处附近。整个钩体材料为 45 号钢, 屈服强度为 351Mpa, 按照零件手册中的安全系数 $n=2$, 那么理论上的许用应力为

$$[\sigma] = 167.5Mpa$$

由仿真数据得出最大应力为：

$$\sigma_{hook} = 123.05 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{hook} < [\sigma]$$

因此强度合格。

继续分析电磁铁主动脱钩结构的电磁铁部分,主动脱钩结构中扭簧为采购的线径为 1mm、外径 1.5cm、圈数 3、角度为 60 度的扭簧,其扭矩为 0.15NM。电磁铁选用通电消磁的 LSD-FP25/29S 型号电磁铁,其中永磁铁吸力为 8KG,根据型号的相关参数在 SOLIDWORKS 软件中建立电磁铁内部紫铜线圈的三维模型,其中线圈外径为 23mm,内径 11mm。厚度为 27mm。将三维模型导入 ANSYS Workbench 软件,选择静磁分析 (magnetostatic),用于分析线圈产生的磁场能否抵消永磁铁的磁场,并且分析是否能产生一个 8 kg 左右的力抵消永磁铁的吸力。设定线圈匝数为 800 匝,导电面积 0.2mm²,工作电流 1.5A,环境温度 25℃。参数设置完成后分别对磁场强度和磁场合力进行求解,得到的仿真结果如图 11 所示。由仿真结果可知电磁铁吸力为最大 87N,平均为 78N,可克服永磁的力达到消磁的效果。因此 LSD-FP25/29S 型号电磁铁满足要求。

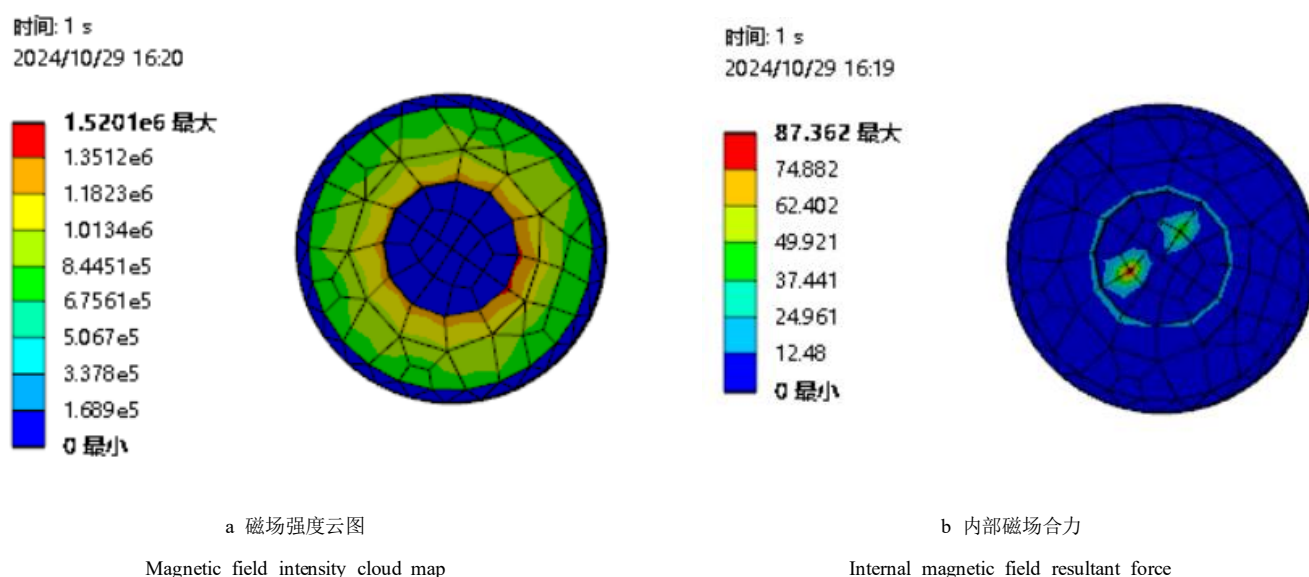


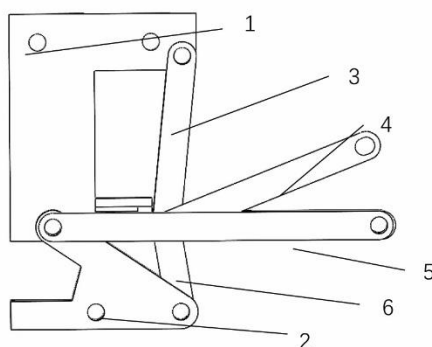
图 11 电磁铁静磁仿真结果

Fig. 11 Static magnetic simulation results of the electromagnet

3.2 无人机紧急脱困装置研究与开发

紧急脱困装置关键在于整个夹具部分的设计,包括两个死点的设计、过死点的设计和压力传感器位置的设计。

本文参考夹具结构设计了一种夹紧装置,如图 12 所示,其中利用夹具块和机架卡住载货框架,四个角各四个限制 z 轴、x 轴的移动, y 轴的移动由载货框架和型材机架限制。



1. 机架; 2. 夹具块; 3. 连杆上侧; 4. 内侧杆; 5. 外侧杆; 6. 连杆下侧

1. Frame; 2. Clamp block; 3. Upper side of the connecting rod; 4. Inner rod; 5. Outer rod; 6. Lower side of the connecting rod

图 12 无人机紧急脱困装置夹紧装置

Fig. 12 Clamping device of the emergency unblocking device for drones

该夹紧装置的连杆上侧和连杆下侧向机架处靠拢，其角度为 170 度，保证夹具块在卡住载货框架时力线向机架收拢，提高装置的稳定性。

与此同时，设计内侧杆上的孔为两圆心间距为 1mm 的直槽口，使得夹具具有一定的横向活动灵活度。

下面分析其传递到压力传感器上的力大小。

如图 13、图 14 所示，图 13 以 BE 转动副做 x 轴，AC 转动副做 y 轴，图 14 以 D 点为原点做坐标系。其中 F_1 为连杆上侧给到节点的力， F_1' 为连杆下侧给到节点的力， γ 、 β 分别是 F_1' 、 F_1 与 y 轴的夹角。

$$F_{\text{sensor}} = F_1' \times \sin \gamma + F_1 \times \sin \beta \quad (11)$$

$$\gamma + \beta = 10^\circ \quad (12)$$

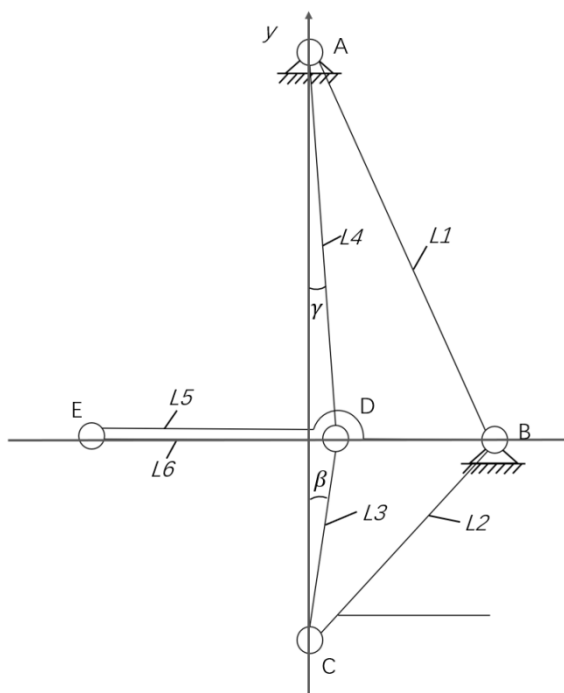


图 13 无人机紧急脱困装置夹紧装置原理图

Fig. 13 Schematic diagram of the clamping device for the emergency unblocking device of the drone

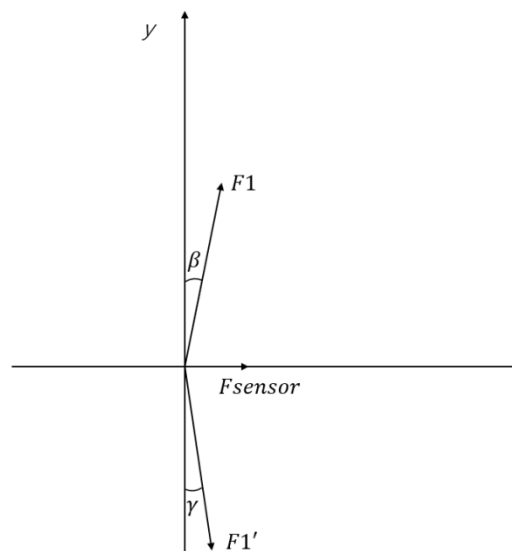


图 14 无人机紧急脱困装置夹紧装置受力分析图

Fig. 14 Force analysis diagram of the clamping device for the emergency unblocking device of the drone

因此从连杆上下侧传递到机架的力很小。因此选择了最大承受 100N 的压力传感器。

紧急脱困装置由 45 钢、铝型材制成，其中夹紧装置受力的零件为机架、夹具块、连杆上侧、连杆下侧，因此对主要受力的部分进行强度校核。夹紧装置由 45 钢制成，经查阅相关文献后得出，45 号钢的物质密度为： $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$ ， $E=210 \text{ GPa}$ ，泊松比 $\mu=0.31$ 。在进行静力学分析前，为了构建钩体的有限元模型，需要对其进行网格划分，划分表见图 15。得到的单元数为 58210 个，节点数为 247926 个。

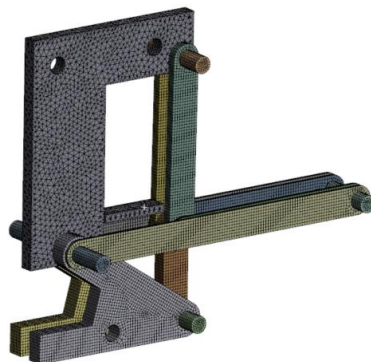


图 15 无人机紧急脱困装置夹紧装置有限元网格划分

Fig. 15 Finite element mesh division of the clamping device for the emergency unblocking device of the drone

接下对夹紧装置进行约束和载荷的作用，主要在两个固定孔处施加固定约束，在夹具块上方面施加一个均布载荷，载荷的大小参考钩体部分的计算，再考虑到该紧急脱困装置有四个夹紧装置，那么每个面受到的力应为：

$$F_{t1} = F_{t2} = F_{t3} = F_{t4} = \frac{F_{total}}{4} = 580/4 = 145N \quad (13)$$

因此给每个面施加 145N 的均布载荷。

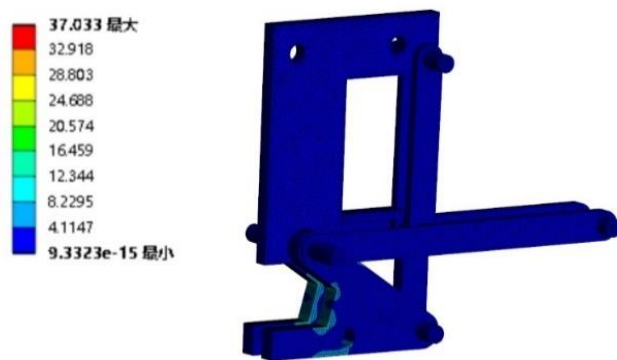


图 16 无人机紧急脱困装置夹紧装置静力学分析应力

Fig. 16 Static analysis stress of the clamping device for the emergency unblocking device of the drone

夹紧机构的应力分析结果如图 16 中所示，通过分析得出夹紧机构在夹紧过程中的最大受力处为夹块和机架连接处附近。整个夹紧机构材料为 45 号钢，屈服强度为 351Mpa，按照零件手册中的安全系数 $n=2$ ，那么理论上的许用应力为

$$[\sigma] = 167.5 \text{ Mpa}$$

由仿真数据得出最大应力为：

$$\sigma_{hook} = 37.033 \text{ Mpa}$$

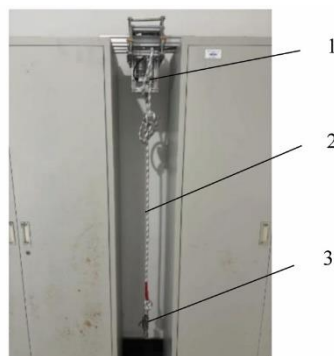
$$\sigma_{hook} < [\sigma]$$

因此强度合格。

4 性能试验和数据分析

4.1 室内试验

为验证吊挂自动脱钩装置与无人机紧急脱困装置能否完成预定功能，文章设置了三个室内试验，第一个试验是试验三个打包方式的效率，第二个试验是利用第一个试验测试出效率较好的打包方式测试两种钩子的成功率，第三个试验是测试脱困机构的时间和成功率。室内试验与 2024 年在浙江理工大学 23 号楼 219 实验室进行，用 2040 铝型材搭载离地面 2m 的实验平台。



1. 无人机紧急脱困装置; 2. 吊挂绳; 3. 吊挂自动脱钩装置

1. Emergency unblocking device for drones; 2. Suspension rope; 3. Automatic unhooking device for suspension

图 17 吊运装置室内试验

Fig. 17 Indoor test of the lifting device

吊运试验整体效果如图 17 所示，试验平台可模拟无人机挂载紧急脱困装置及吊挂自动脱钩装置后在正常情况下挂载货物卸货过程及遇到紧急情况进行脱困的过程。试验选取安吉县砍伐竹子，竹子参数如表 2 所示，室内试验用竹如图 18 所示。

表 2 室内试验用竹参数

Tab. 2 Parameters of bamboo for indoor experiments

参数 Parameter	平均值 Average
竹段长度 Length of bamboo segment/m	1.3
竹段最粗处直径 Diameter at the thickest part of the bamboo segment/cm	9
竹段个数 Number of bamboo segments	2
一捆梢头重量 Weight of a bundle of bamboo tips/kg	1



图 18 室内试验用竹

Fig. 18 Bamboo for indoor experiments

4.1.1 打包试验

该试验用来测试不同的打包方式的时间，因此本试验用来测试不同打包方式打包竹段的时间。

根据前文提到的三种打包方式，在以竹条捆扎的基础上，分成魔术贴组、凹扣组、绳结组三个试验组，每组设置 5 次重复试验，共进行 15 组试验，并将每组试验进行编号。试验打包如图所示，室内试验结果如表 3 所示。

表 3 打包试验结果
Tab. 3 Packing test results

编号 No.	魔术贴 Velcro	凹扣 Snap Button	绳结 knot
1	22s	21s	26s
2	21s	22s	25s
3	19s	21s	27s
4	23s	24s	27s
5	20s	23s	24s

注：试验中用时四舍五入小数并保留整数。
打包时间魔术贴组平均用时 21s，凹扣组平均用时 22.2s,绳结组平均用时 25.8s。因此选择魔术贴进行脱钩试验。



图 19 吊运装置室内试验过程
Fig. 19 Indoor test process of the lifting device

4.1.2 脱钩试验

该试验用来测试两种钩子在使用魔术贴打包的情况下对脱钩成功率的影响，因此本试验以打包竹子、吊挂离地、自动脱钩为一个完整的作业过程。验证其成功率。

根据前文提到的打包方式和两种脱钩方式，在以竹条捆扎的基础上，分成重力钩和电磁主动钩两个试验组，每组设置 10 次重复试验，共进行 20 组试验，并将每组试验进行编号。室内试验过程如图 19 所示，试验结果如表 4 所示。

表 4 竹段脱钩试验数据

Tab. 4 Data of bamboo segment unhooking tests

编号 No.	重力钩 Gravity Hook	电磁主动钩 Electromagnetic Active Hook	编号 No.	重力钩 Gravity Hook	电磁主动钩 Electromagnetic Active Hook
1	√	√	6	√	√
2	√	√	7	√	×
3	√	√	8	×	√
4	√	√	9	√	√
5	×	√	10	√	√

注：“√”表示相应动作成功，即吊挂离地后，放下接触地面或触发脱钩后能够自动脱钩。“×”表示相应动作失败，即吊挂离地后，放下接触地面未能够成功脱钩。

脱钩成功率 S_p 为：

$$S_p = \frac{N_p}{N} \times 100\%$$

(14)

式中 N_p 和 N 分别为脱钩成功次数和总试验次数。

4.1.3 脱困试验

该试验用来测试无人机紧急脱困装置的可行性，试验过程为在搭建好的试验平台上模拟无人机吊挂货物遇到危险情况尝试脱困。共进行 10 组重复试验，并将每组试验进行编号。室内试验过程如图 20 所示，试验结果如表 5 所示。



图 20 脱困装置室内试验过程

Fig. 20 Indoor test process of the unblocking device

表 5 脱困装置试验数据

Tab. 5 Data of unblocking device tests

编号 No.	脱困试验 Escape Test	脱困耗时 Escape Duration
1	√	5.5s
2	√	5.3s
3	√	5.6s
4	√	5.5s

5	×	×
6	√	5.4s
7	√	5.3s
8	√	5.6s
9	√	5.5s
10	√	5.5s

注：“√”表示相应动作成功，即吊挂离地后，启动脱困程序能够完成脱困。“×”表示相应动作失败，即吊挂离地后，启动脱困程序未完成脱困。

脱困成功率 S_c 为：

$$S_c = \frac{N_c}{N} \times 100\%$$

(15)

式中 N_c 和 N 分别为脱困成功次数和总试验次数。

4.2 林间试验

为验证吊挂自动脱钩装置与无人机紧急脱困装置能否在无人机实验平台上完成预定功能,, 于 2024 年在浙江省湖州市安吉县双一村进行林间试验, 无人机型号为优佳无人机公司自研的农用无人机, 试验条件和试验过程分别如表 6 和图 21 所示。



图 21 无人机林间吊运试验试验

Fig. 21 UAV Aerial Lifting Trials in Forest

表 6 林间试验条件

Tab. 6 Forest trial conditions

项目	参数
Items	Parameter
品种 Variety	竹段
竹段长度 Length of bamboo segment/m	1.3
竹段最粗处直径 Diameter at the thickest part of the bamboo segment/cm	9
竹段个数 Number of bamboo segments	5
一捆竹段重量 Weight of a bundle of bamboo segments/kg	3

选择室内试验中效率最高的魔术贴方式打包捆扎，试验目标一是测试在无人机条件下脱钩的成功率，二是测试在不同的无人机运动状态下的脱困成功率，为此设计了一下试验过程。

试验 1：首先无人机停在载货区，将打包好的毛竹竹梢放置在钩子上，无人机起飞运送到距离载货区d=20m 远的卸货区，通过自动脱钩装置将毛竹竹放置在卸货区，为此记录挂钩耗时和脱钩耗时，共进行 10 组试验。

试验 2：无人机载货，分别在上升、下降和前进三种状态进行脱困试验，每组设置 10 次重复试验，共进行 30 次试验。

试验条件和试验结果如图和表 7、表 8 所示。



图 22 无人机林间调运试验过程

Fig. 22 Process of UAV Transport Trials in Forest

表 7 林间试验脱钩结果

Results of Unhooking in Forest Trials							
编号	脱钩	挂钩耗时	脱钩耗时	编号	脱钩	挂钩耗时	脱钩耗时
No.	Unhooking	Hooking Duration	Unhooking Duration	No.	Unhooking	Hooking Duration	Unhooking Duration
1	√	15.4s	0.8s	6	√	15.6s	0.8s
2	√	13.2s	1.2s	7	√	14.8s	1.3s
3	√	14.1s	0.9s	8	√	12.7s	1.4s
4	×			9	√	14.2s	1.0s
5	√	15.0s	1.1s	10	√	17.2s	1.2s

注：“√”表示相应动作成功，即挂载好货物后，按预计轨迹飞行至卸货地点，启动脱钩程序，货物成功脱离。“×”表示相应动作失败，即挂载好货物后，启动脱钩程序，货物未脱离。

Results of Escape in Forest Trials			
编号	上升	下降	前进
No.	Ascend	Descend	Move Forward
1	√	√	√
2	×	√	√
3	√	√	√
4	√	√	√
5	×	√	×

6	√	×	√
7	√	√	√
8	√	√	√
9	√	√	√
10	√	√	√

注：“√”表示相应动作成功，即吊挂离地后，在上升、下降或前进状态时启动脱困程序能够完成脱困。“×”表示相应动作失败，即吊挂离地后，在上升、下降或前进状态时启动脱困程序未完成脱困。

脱钩成功为：

$$S_g = \frac{N_g}{N} \times 100\% \quad (16)$$

式中 N_g 、 N 分别为脱钩成功次数和总试验次数。

脱困成功率为：

$$S_n = \frac{N_n}{N} \times 100\% \quad (17)$$

式中 N_n 、 N 分别为脱困成功次数和总试验次数。

4.3 试验结果分析

室内试验结果表明，在三种打包方式中，魔术贴方式最为高效。重力钩的脱钩成功率为 80%，电磁主动钩的脱钩成功率为 90%，无人机紧急脱困装置的脱困成功率为 80%，平均脱困耗时为 5.475 秒。

林间试验结果显示，脱钩成功率为 90%，其中挂钩的平均耗时为 14.69 秒，脱钩的平均耗时为 1.19 秒。在上升、下降和前进状态下，脱困成功率分别为 80%、90%和 90%，达到了初步的预期效果。试验中观察到，脱钩失败与钩体摩擦力大有关，而脱困失败则与型材机架装配间隙大有关。后续可通过轻量化结构、精准装配和增加卷扬机结构等方式进一步改善无人机运送竹梢下山的灵活性和稳定性。目前，人工运送竹梢下山通常需要 3 至 4 人，而无人机自主调运的效率是人工搬运的 3 倍以上。

5 结论

1) 本研究分析了挂载用钢丝绳的破断拉力，确定直径为 3mm 的钢丝绳可安全承载 75kg 货物。研究了基于重力的脱钩方案和基于电磁铁的磁力脱钩方案，并探索了多级脱困原理。通过双死点锁紧机构及夹紧机构的相关力学性能，利用小于 10° 的角度将力传递给压力传感器，最终设计了无人机紧急脱困装置方案。

2) 通过室内试验和林间试验验证了设计方案。室内试验结果表明，魔术贴打包时间为 21 秒，凹扣打包时间为 22.2 秒。使用魔术贴打包的重力钩脱钩成功率为 80%，电磁铁主动钩脱钩成功率为 90%，脱困成功率为 80%。林间试验结果表明，基于魔术贴和电磁铁主动脱钩的脱钩成功率为 90%，挂钩和脱钩的平均耗时分别为 14.69 秒和 1.19 秒。在上升、下降和前进状态下，脱困成功率分别为 80%、90%和 90%。在山地环境下，无人机自主调运的效率是人工搬运的 3 倍以上。

参 考 文 献

- 蒋鹏飞, 张彬, 周建波, et al. 竹片粗铣连续化定向进料系统设计与试验[J]. 林业科学, 2022(006): 058.
(Ding Y C, Chen H. 2022. Design and experiment of a continuous directional feeding system for rough milling bamboo slices. Scientia Silvae Sinicae, 2022(006): 058. [in Chinese])
- 冯鹏飞, 李玉敏. 2021 年中国竹资源报告[J]. 世界竹藤通讯, 2023, 21(02): 100-103.
(Feng P F, Li Y M. 2023. 2021 China bamboo resource report. World Bamboo and Rattan, 21(02): 100-103. [in Chinese])
- 叶鹏, 叶昌民, 周彤悦, 等. 浙江省近自然毛竹林空间结构特征[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(02): 228-234.
(Ye P, Ye C M, Zhou T Y, et al. 2020. Spatial structure characteristics of near-natural moso bamboo forests in Zhejiang Province. Journal of Zhejiang A&F University, 37(02): 228-234. [in Chinese])
- 徐薇, 唐辉, 柳丽娜, 等. 基于竹资源高效利用的浙江安吉竹产业发展建议[J]. 世界竹藤通讯, 2024, 22(03): 124-127.
(Xu W, Tang H, Liu L N, et al. 2024. Development suggestions for the bamboo industry in Anji, Zhejiang, based on efficient utilization of bamboo resources. World Bamboo and Rattan, 22(03): 124-127. [in Chinese])
- 宋月鹏, 张红梅, 高东升, 等. 国内丘陵山地果园运输机械发展现状与趋势[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(01): 50-55+67. DOI:10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2019.01.10.
(Song Y P, Zhang H M, Gao D S, et al. 2019. Current status and trends of transportation machinery in hilly and mountainous orchards in China. Journal of Agricultural Machinery, 40(01): 50-55+67. DOI:10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2019.01.10. [in Chinese])
- 赤水楠竹场动力架空索道简介[J]. 林业机械, 1966, (04): 26-27.
(Chishui Moso Bamboo Plantation. 1966. Introduction of the power overhead cableway in Chishui moso bamboo plantation. Forestry Machinery, (04): 26-27. [in Chinese])
- 杨方, 周敏, 江溢华, 等. 丘陵山地环形单轨运输系统静态调度优化方法[J]. 农业工程学报, 2023, 39(04): 37-46.
(Yang F, Zhou M, Jiang Y H, et al. 2023. Static scheduling optimization method for ring monorail transport system in hilly and mountainous areas. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 39(04): 37-46. [in Chinese])
- 陈吉朋, 王凯, 陈佳佳, 等. 双轨式油茶果采摘机器人的动力轨道平台设计[J/OL]. 林业工程学报, 1-9[2024-11-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1862.S.20241028.1051.003.html>.
- (Chen J P, Wang K, Chen J J, et al. 2024. Design of the power track platform for double-track oil tea fruit picking robot. Journal of Forestry Engineering, 1-9. [in Chinese])
- 张火亮, 翁祖强, 魏恒. 一种适应丘陵山地的竹材运输装置[P]. 福建省: CN202411062725.3, 2024-10-01.
(Zhang H L, Weng Z Q, Wei H. 2024. A bamboo transport device suitable for hilly and mountainous areas. Fujian Province: CN202411062725.3. [in Chinese])
- 俞国红, 郑航, 符康强. 一种山地竹林轻筒型运输装置及其布置方法[P]. 浙江省: CN202410003047.7, 2024-03-08.
(Yu G H, Zheng H, Fu K Q. 2024. A lightweight transport device and its arrangement method for mountainous bamboo forests. Zhejiang Province: CN202410003047.7. [in Chinese])
- 陆美珍, 杨倩倩, 陈碧芽, 等. 竹材无动力管道运送下山新技术[J]. 世界竹藤通讯, 2018, 16(05): 39-41. DOI:10.13640/j.cnki.wbr.2018.05.009.
(Lu M Z, Yang Q Q, Chen B Y, et al. 2018. New technology for the transportation of bamboo through non-powered pipelines downhill. World Bamboo and Rattan, 16(05): 39-41. DOI:10.13640/j.cnki.wbr.2018.05.009. [in Chinese])
- 吴纯彪. 竹子绳索挂式运输导轮组设计与制作[D]. 浙江农林大学, 2023. DOI:10.27756/d.cnki.gzjlx.2023.000012.
(Wu C B. 2023. Design and production of a rope-hung transport pulley set for bamboo. Zhejiang A&F University. DOI:10.27756/d.cnki.gzjlx.2023.000012. [in Chinese])
- 雷永杰, 周建波, 傅万四, 等. 竹材索道集材运输装备跑车及悬索的设计与分析[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(06): 1348-1356.
(Lei Y J, Zhou J B, Fu W S, et al. 2023. Design and analysis of the running car and suspension cable of bamboo cableway transport equipment. Journal of Zhejiang A&F University, 40(06): 1348-1356. [in Chinese])
- 2024—2026 年农机购置与应用补贴实施操作要求[J]. 农业机械, 2024, (07): 25-29. DOI:10.16167/j.cnki.1000-

9868.2024.07.004.

(2024—2026 Operational requirements for agricultural machinery purchase and application subsidy implementation. *Agricultural Machinery*, 2024, (07): 25-29. DOI:10.16167/j.cnki.1000-9868.2024.07.004. [in Chinese])

2024—2026 年农机购置与应用补贴实施意见[J]. *农业机械*, 2024, (07): 22-24. DOI:10.16167/j.cnki.1000-9868.2024.07.003. (2024—2026 Implementation opinions on agricultural machinery purchase and application subsidy. *Agricultural Machinery*, 2024, (07): 22-24. DOI:10.16167/j.cnki.1000-9868.2024.07.003. [in Chinese])

李佳颐, 胡立夫, 李芋均. 一种基于无人机的小件物品运输系统[J]. *中国科技信息*, 2022, (08): 83-85. (Li J Y, Hu L F, Li Q J. 2022. A drone-based small item transportation system. *China Science and Technology Information*, (08): 83-85. [in Chinese])

Design of Fruit-Carrying Monitoring System for Monorail Transporter in Mountain Orchard[J]. Li Zhen; Zhou Yuehuai; Lyu Shilei; Huang Ying; Yi Yuanfei; Zhao Chonghai. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2023. (Li Zhen, Zhou Yuehuai, Lyu Shilei, Huang Ying, Yi Yuanfei, Zhao Chonghai. 2023. Design of Fruit-Carrying Monitoring System for Monorail Transporter in Mountain Orchard. *Journal of Circuits, Systems and Computers*.)

Drone-mounted remote-controlled arm for monitoring and precision spraying coconut rhinoceros beetle infestations[J]. Griengai Samseemoung, Peeyush Soni, Manusak Janthong, Weerayuth Promjan. *Smart Agricultural Technology*. (Griengai Samseemoung, Peeyush Soni, Manusak Janthong, Weerayuth Promjan. Drone-mounted remote-controlled arm for monitoring and precision spraying coconut rhinoceros beetle infestations. *Smart Agricultural Technology*.)

Guerra S P S, Oguri G, Junior H J E, et al. Mechanized harvesting of bamboo plantations for energy production: Preliminary tests with a cut-and-shred harvester[J]. *Energy for Sustainable Development*, 2016, 34: 62-66. (Guerra S P S, Oguri G, Junior H J E, et al. 2016. Mechanized harvesting of bamboo plantations for energy production: Preliminary tests with a cut-and-shred harvester. *Energy for Sustainable Development*, 34: 62-66.)

El Adawy M, Abdelhalim E H, Mahmoud M, et al. Design and fabrication of a fixed-wing Unmanned Aerial Vehicle (UAV)[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2023, 14(9): 102094. (El Adawy M, Abdelhalim E H, Mahmoud M, et al. 2023. Design and fabrication of a fixed-wing Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Ain Shams Engineering Journal*, 14(9): 102094.)

Lobovikov M, Schoene D, Yping L. Bamboo in climate change and rural livelihoods[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2012, 17: 261-276. (Lobovikov M, Schoene D, Yping L. 2012. Bamboo in climate change and rural livelihoods. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 17: 261-276.)