

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第5期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.05.018

论文标题： 竹材索道集材运输装备设计与试验分析

作　　者： 雷永杰，冯海韵，王天宇，等

收稿日期： 2025-05-18

引文格式： 雷永杰,冯海韵,王天宇,等.竹材索道集材运输装备设计与试验分析[J].中南林业科技大学学报,2026,46(5):177-189.

LEI Y J, FENG H Y, WANG T Y, et al. Design and experimental analysis of bamboo cableway skidding transportation equipment[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):177-189.

相关论文推荐

Recommended articles

“以竹代塑”科技创新与基础科学问题

Technological innovation and fundamental science for bamboo as a substitute for plastic

“双碳”战略目标下木竹基先进功能材料研究进展

Advanced functional materials derived from natural wood and bamboo resources under the double carbon strategy in China

基于机器视觉的智能破竹分片系统设计与验证

Design and verification of intelligent bamboo fragmentation system based on machine vision

竹集成材激光雕刻模拟仿真与参数优化

Simulation and parameter optimization of laser engraving of laminated bamboo lumber

竹集成材-H型钢-竹集成材组合梁受弯性能

Bending performance of bamboo laminated veneer lumber- H-shaped steel-bamboo laminated veneer lumber composite beams

竹集成材-竹胶板钉节点力学性能

Mechanical performance of laminated bamboo lumber-bamboo plywood nailed connections loaded monotonically

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.05.018
http: //qks.csuft.edu.cn

竹材索道集材运输装备设计与试验分析

雷永杰[1, 2]，冯海韵[2]，王天宇[2]，周建波[2]，傅万四[3]，张雨晴[4]，张　彬[3]，李晓敏[5]

（1. 东北林业大学 机电工程学院，黑龙江 哈尔滨 150040；2. 国家林业和草原局哈尔滨林业机械研究所，黑龙江 哈尔滨 150086；3. 中国林业科学研究院木材工业研究所，北京 100091；4. 长沙正忠科技发展有限公司，湖南 长沙 410116；5. 中国林产工业有限公司，北京 100029）

摘　要：【目的】当前丘陵山地竹材集材运输下山面临装备匮乏、运输难度大的行业问题，现有运输设备尤其索道式运输设备多由木材索道简单改造而来，存在运输效果不稳定、架设周期长、安全保障不足等问题，设计了一种专用于山地竹林的移动式竹材索道集材运输装备。【方法】采用模块化设计方式，完成移动主机、运输跑车及各工作索等核心部件建模与控制系统设计，结合关键机械结构有限元分析及运输过程的运动学和动力学仿真，完成整套装备的研制与优化。选取运输速度、跑车与竹材总质量、索道倾斜角为考察因素，通过二次回归正交旋转组合试验开展验证分析。【结果】三因素对竹材运输安全性的影响程度由大到小依次为：索道倾斜角、跑车与竹材总质量、运输速度。当索道倾斜角低于 25.7°、跑车与竹材总质量小于 600 kg、运输速度低于 4.0 m/s 时，设备能够将竹材安全运输至路边转运点。【结论】当索道倾斜角为 16.3° ～ 21.0°、跑车与竹材总质量为 400 ～ 550 kg、跑车速度为 2.6 ～ 3.2 m/s 时，运输过程安全系数较高，可实现山地竹材高效运输，满足现场应用需求。同时，该装备具备移动便捷、拆装轻便的突出优势，运输跑车可实现边工作边充电，续航能力强，大幅提升山地作业连续性。研究可为丘陵山地竹材运输下山提供一种新的思路和技术装备。

关键词：山地竹林；索道集材；竹材运输；结构设计；试验验证

中图分类号：S776.32　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)05-0177-13

Design and experimental analysis of bamboo cableway skidding transportation equipment

LEI Yongjie[1,2], FENG Haiyun[2], WANG Tianyu[2], ZHOU Jianbo[2], FU Wansi[3], ZHANG Yuqing[4], ZHANG Bin[3], LI Xiaomin[5]

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;
2. Harbin Research Institute of Forestry Machinery, National Forestry and Grassland Administration, Harbin 150086, Heilongjiang, China;
3. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
4. Changsha Zhengzhong Science and Technology Development Co. Ltd., Changsha 410116, Hunan China;
5. China National Forest Product Industry Corporation, Beijing 100029, China)

Abstract:【Objective】In response to the current shortage of equipment and difficulties in transporting bamboo from hilly and mountainous areas, as well as the fact that existing transportation equipment, especially cableways, are mostly simply modified from wood cable equipment, resulting in unstable effects, long installation cycles, and lack of safety guarantees, a mobile bamboo cableway skidding transportation equipment specifically designed for mountain bamboo forests has been designed.【Method】A modular design approach was adopted, integrating mechanical modeling of the mobile host unit, transport car and cable components with control system development. Key structural components were optimized through finite element analysis, while kinematics and dynamics simulations validated the transport process. A quadratic regression orthogonal rotation combination experiment was conducted to evaluate the effects of transport speed, the total mass of cable car and bamboo, and cableway inclination angle on operational safety.【Result】The results indicate that cableway inclination angle exerts the most significant influence on transportation safety, followed by the total mass and transport speed. Safe transportation to roadside transfer points was achieved under the following thresholds: inclination angles ≤ 25.7°, total mass ≤ 600 kg, and speed ≤ 4.0 m/s.【Conclusion】When the inclination angle of the cableway is 16.3°-21.0°, the total mass of

收稿日期（Received）：2025-05-18　　**修订日期**（Revised）：2025-08-24

基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFD2200700）；中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目（CAFYBB2020ZB006）。

第一作者：雷永杰（leiyongjie1997@163.com），博士研究生。

通信作者：周建波（zhoujianbol@126.com），研究员，博士，博士研究生导师。

引文格式：雷永杰 , 冯海韵 , 王天宇 , 等 . 竹材索道集材运输装备设计与试验分析 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(5):177-189.

LEI Y J, FENG H Y, WANG T Y, et al. Design and experimental analysis of bamboo cableway skidding transportation equipment[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):177-189.

the cable car and bamboo is 400-550 kg, and the speed of the cable car is 2.6-3.2 m/s, the safety rate of descent is relatively high, which can achieve efficient transportation of mountain bamboo and meet the needs of on-site applications. Notably, its lightweight modular design enables rapid assembly and disassembly, while the self-charging cable car ensures prolonged operational endurance. This work provides a novel technical solution for mountainous bamboo transportation, addressing critical gaps in current forestry equipment.

Keywords: mountainous bamboo forest; cableway transportation; bamboo transport; structural design; experimental verification

中国作为全球最大竹产区“亚太竹区”的主产国之一，拥有丰富的竹材资源[1-2]。据统计，2024 年中国竹林面积超 756.27 万 hm^2，占世界总竹林面积的 30% 以上[3]，已经成为世界最大竹产品生产和出口国[4-5]。随着竹产业的快速发展，我国竹业机械研发日益受到重视，越来越多的研发人员参与到竹材采运及竹产品加工装备研究中，但由于我国竹林大部分位于丘陵山区[6]，加大了竹材采伐集材运输装备的研发难度，导致我国竹业机械的发展主要集中在产品成型和后期加工环节，前端采伐集材运输装备的相关研究较少[7-9]。

欧美发达国家木材集材运输技术成熟，装备性能先进[10]。其中，美国 MORBARK 公司研发的 Mor-Bell logger 采集机可实现 360° 全方位旋转，通过重心优化设计大幅提升了集材设备的林地通过性、转向性和稳定性[11]。瑞典开发的沃尔沃 860TC 集材车辆，集采集与运输功能于一体，具有卓越的采集效率及越野通行性[12]。

目前，我国竹材下山运输主要包括人工背负、溜坡下山、管道输送、轨道运输和索道运输五大类，各种运输方式在实际应用中存在不同程度的局限性。人工背负和溜坡下山属于传统运输方式，劳动强度大、效率低，且溜坡下山对林地和竹材伤害大，竹材在顺坡下滑过程中容易碰到坚硬的阻挡物而发生破裂，直接影响后期加工利用价值。在管道输送方面，杨健等[13]提出了从下到上铺设山体管道，形成可供竹材通过的输送通道，从而实现无动力的竹材运输，但此方法管道需临时铺设，施工费时、费力且效率较低。陆美珍等[14]提出通过预埋管道来实现竹材运输下山，但该方法的管道布置于地下，对竹林的破坏大，适用性受限。在轨道集材方面，姚文斌等[15]开发了一种竹材智能运输车，该车拥有 PLC 控制模块、无线通信发送模组，配备了搜索、避障、车辆速度传感器，能够自动完成运输任务，实现无人运输。但受竹林地形影响，智能小车尺寸较小，每次能运输的竹材数量有限，对于需要大规模集材运输的竹林运输效率低，且前期轨道、引导线等铺设成本高，推广难度较大。在索道运输方面，谭桂生等[16]开发了一种新型竹材运输方式，利用钢丝绳、收放线以及滑轮机构的协同作用，可实现竹材的迅捷、准确、可靠运输。但竹林内枝叶繁茂、干扰物较多，导致设备前期布局较为复杂，而且对钢丝绳、滑轮机构的耐受性和安全性要求高，难以实现大范围推广与应用。伍希志等[17]研发了一种用于竹林间伐的移动式索道集材运输设备，由与绞盘机连接的牵引索牵引缆车在承载索上往复运动，具有工作效率高、运输成本低的优势，但设备架设周期较长，工作稳定性有待进一步提高。

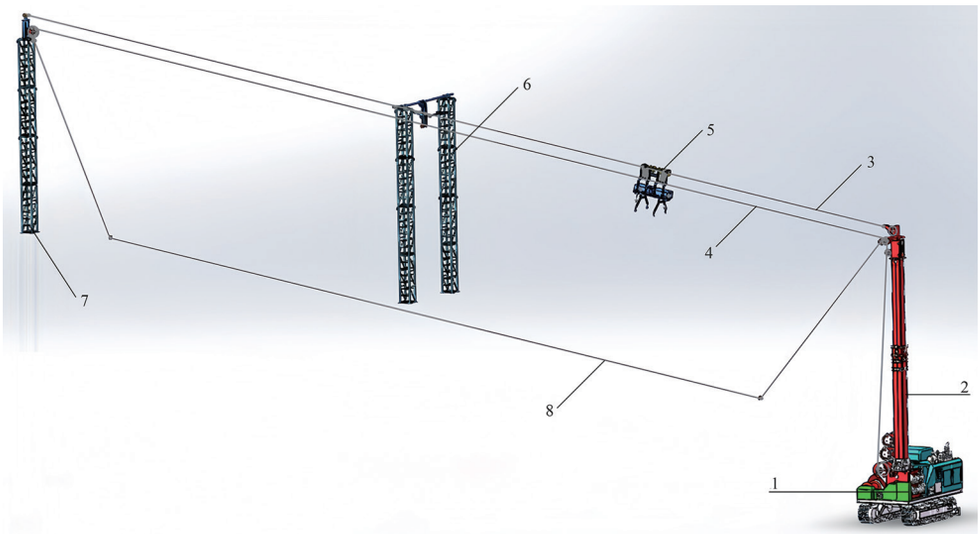
综上，受竹子本身特性和竹林地理环境的限制，国内外关于竹材集材运输装备的研究较少。尽管近些年国内有部分产品陆续推出，但普遍存在普适性差、适配性不足等问题，实际市场上投产使用少。目前，国内外尚未研究出稳定性强、安全性好、效率高的竹材集材运输系统。鉴于索道集材能适应复杂地形、克服地面障碍且对竹林环境破坏小、运输效率高等特点，本研究开发了一种轻简、移动拆装方便的专用于竹材的集材运输装备，采用模块化设计方式，对装备各关键部件进行结构设计，结合前期发表论文中的仿真分析，开展实物装备研制工作，并对装备进行了试验验证与分析，验证装备运行的安全可靠性，为山地竹材高效运输提供技术支撑。

1 竹材索道集材运输装备结构设计

1.1 整机设计与工作原理

我国竹林多集中分布在丘陵山区，受地形限制，大型设备难以进场作业。因此，采伐的竹子需先从山上运输至山外路边转运点，再经运输车运走。本研究先后赴湖南、四川、福建等典型竹产区开展实地调研，精准测算了区域内竹林垂直高度、坡度、竹子生长密度、竹子质量等关键参数，并综合分析了竹材自身结构特性。基于调研数据，初步确定竹材索道集材运输装备基本设计参数：竹林垂直高度≤ 200 m，索道倾斜角≤ 35°，索道跨距≤ 500 m，承载索速度≤ 1.0 $m\cdot s^{-1}$（可调），牵引索与回空索速度≤ 4.0 $m\cdot s^{-1}$（可调），跑车质量 200 kg，跑车单次载质量≤ 400 kg。

装备结构主要包括移动主机、牵引索、回空索、



1. 移动主机；2. 自动升降塔架；3. 承载索；4. 牵引索；5. 移动跑车；6. 中间支撑架；7. 山顶塔架；8. 回空索。
1. Mobile host; 2. Automatic lifting tower; 3. Load-bearing cable; 4. Hauling cable; 5. Cable car; 6. Intermediate support tower; 7. Peak tower; 8. Return cable.

图 1　索道集材运输装备整机结构
Fig. 1　Modeling diagram of cableway skidding transportation equipment

承载索、用于集材运输的自动充电跑车、各支撑塔架等（图 1）。

设备运行时，卷扬机控制各绳索工作，跑车在牵引索与回空索的配合牵引下，在承载索上移动，到达竹林集材点后，控制跑车制动机构对承载索锁紧，实现跑车定位；随后控制跑车上的升降卷扬机放索，绳索可将半径 60 m 内采伐的竹材拖拽至林间集材点，对竹材去枝打捆并与绳索固定后，控制升降卷扬机收索，提升打捆竹材至跑车下方限位高度；最后，解除跑车制动，牵引跑车至路边转运点，实现竹林机械化集材运输。设备支撑塔架的数量根据跨距和地形确定，跨距较大时可合理设置多个支撑塔架，跨距较小时，可不设置中间支撑塔架。

1.2　移动主机设计

移动主机主要包括底盘、配电箱、各工作索动力卷扬机、自动升降的支撑塔架等，根据移动主机主要部件，初步确定主机的主要尺寸参数为长 4 000 mm、宽 2 200 mm。

户外林业机械的行走方式主要有轮式和履带式两类 [18]。轮式行走机构具备结构紧凑、转向灵活的优势，且运行速度快，对林间地表植被的破坏较小，一般在较为平坦的地面作业 [19]。而履带式行走机构凭借其适应性强、转弯半径小及优秀的越障和爬坡能力，被广泛应用于丘陵山地等复杂地形 [20]。履带式底盘分为平行型、倒梯型、三角型和联合型等多种结构形式。其中，平行履带底盘因接地面积最大、工作最为稳定，且具有较强的通过性，因此，本设计选择平行型履带底盘为行走机构。

履带主要参数可通过履带宽度（b）、履带接地长度（L）来确定，履带宽度（b）的计算公式 [21] 为：

$$b = k \times 209 \times \sqrt[3]{M \times 10^{-3}} \text{。} \quad (1)$$

式中：b 为单个履带的宽度（mm）；k 为经验系数，一般取 1；M 为履带设备整机质量（kg）。根据初步设计，整机质量约为 10 t，经计算，履带宽度为 450.28 mm，取整为 450 mm。

履带接地长度（L）的计算公式 [22] 为：

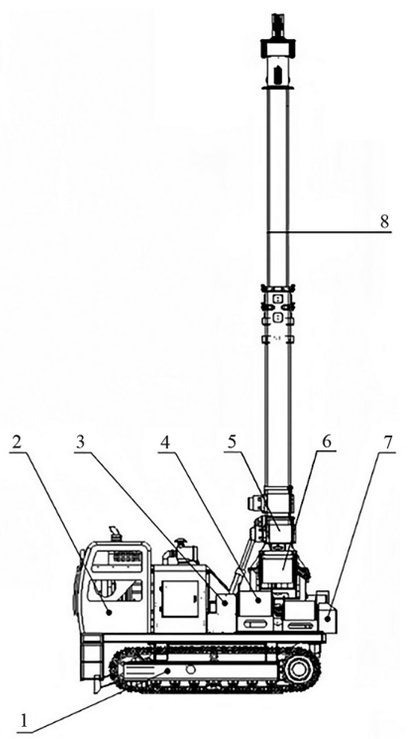
$$L = \frac{Mg}{2Pb} \text{。} \quad (2)$$

式中：L 为履带接地长度（mm）；P 为接地比压（MPa）。工程机械平均接地比压一般为 30 ～ 70 kPa，根据初步设计的移动主机尺寸，取 P 为 33 kPa；g 为重力加速度，取 9.8 m/s²。

将各参数代入式（2），可得履带接地长度为 3 300 mm。

根据计算的履带底盘参数，考虑到装备作业时主要在山地等复杂地形中，受地形起伏影响履带产生动态形变，实际接地长度较水平地形缩短，引入地形修正系数 k_1，根据设计经验，k_1 取 1.06，计算可得 L=3 498 mm，为便于加工，取 L=3 500 mm。底盘由中国山东凯信重工机械有限公司定制，底盘型号为 KX-DP2，底盘的具体性能参数如下：履带长度 3 500 mm，履带宽度 450 mm，履带节距 170 mm，最大爬坡度 25°，发动机额定功率 70 kW，额定载重量 15 t，运行速度 2 ～ 5 km/h。

移动主机上配置有自动升降塔架，主要用于索道架设与支撑作业。自动升降塔架包括伸缩臂、伸缩油缸、插销油缸，以及固联在伸缩臂端部的各工作索变向滑轮。在竹材索道集材运输装备安装过程中，通过液压系统驱动实现移动主机塔架上升，塔架上升至指定高度（最高可达 10 m），插销油缸启动，自动插销锁紧。当主机需要转场移动时，塔架回缩至最小外形尺寸，并放倒至水平状态，以适应山地移动作业。移动主机整体结构如图 2 所示。



1. 履带底盘总成；2. 驾驶室；3. 稳绳机构总成；4. 承载索卷筒；5. 牵引索卷筒；6. 回空索卷筒；7. 车尾覆盖件；8. 自动升降塔架。
1. Crawler undercarriage assembly; 2. Operator cab; 3. Stabilizing cable mechanism assembly; 4. Load-bearing cable drum; 5. Hauling cable drum; 6. Return cable drum; 7. Rear cover; 8. Automatically elevatable support tower.

图 2 移动主机整体结构示意

Fig. 2 Schematic diagram of the overall structure of the mobile host

1.3 卷扬动力机构设计

在设计各绳索卷扬动力机构主要性能参数时，需先确定各钢丝绳的类型。结合现代林业索道运输对工作索的实际使用要求，工作索应具备可靠的静态抗拉力、交变的动态承载力、良好的耐磨性等性能，确定工作索类型为 6×19 股纤维芯钢丝绳。然后根据跑车和吊运质量、倾斜角等主要设计参数计算各工作索直径，初步确定工作索规格。根据团队前期论文 [23] 中的计算结果，最终选用的工作索规格如表 1 所示。

根据工作索性能参数和装备主要设计参数，确定承载卷扬、牵引卷扬和回空卷扬的额定牵引力。依据团队前期研究成果 [24]，牵引卷扬和回空卷扬选用型号为 YE2-160M1-2 的三相交流电机，额定功率为 11 kW，额定转速为 2 930 r/min；承载卷扬选择型号为 YE2-200L-4 的三相交流电机，额定功率为 30 kW，额定转速为 1 470 r/min。各卷扬机构均采用液压马达驱动并内置专用减速机。其中，牵引卷扬、回空卷扬的额定牵引拉力为 10 kN，承载卷扬的额定牵引拉力为 50 kN。

1.4 跑车的设计

跑车主要由车架、行走机构、升降卷扬机构、自动充电机构组成。自动充电机构主要由链传动装置、发电机和蓄电池组成。当跑车在承载索上移动时，通过发电机将前后 2 个行走轮的机械能转换为电能，实现跑车边工作边充电，提高跑车的续航能力。跑车车架底板上设置有 2 台对称布置的升降卷扬机。通过控制卷扬机索升降，实现林间集材和集材点打捆竹材的提升运输。根据索道集材跑车运输系统设计要求，跑车升降卷扬机选用坤航起重机械有限公司生产的迈士顿小型升降卷扬机。卷扬机参数如表 2 所示，跑车整体结构如图 3 所示。

表 1 钢丝绳索类型参数

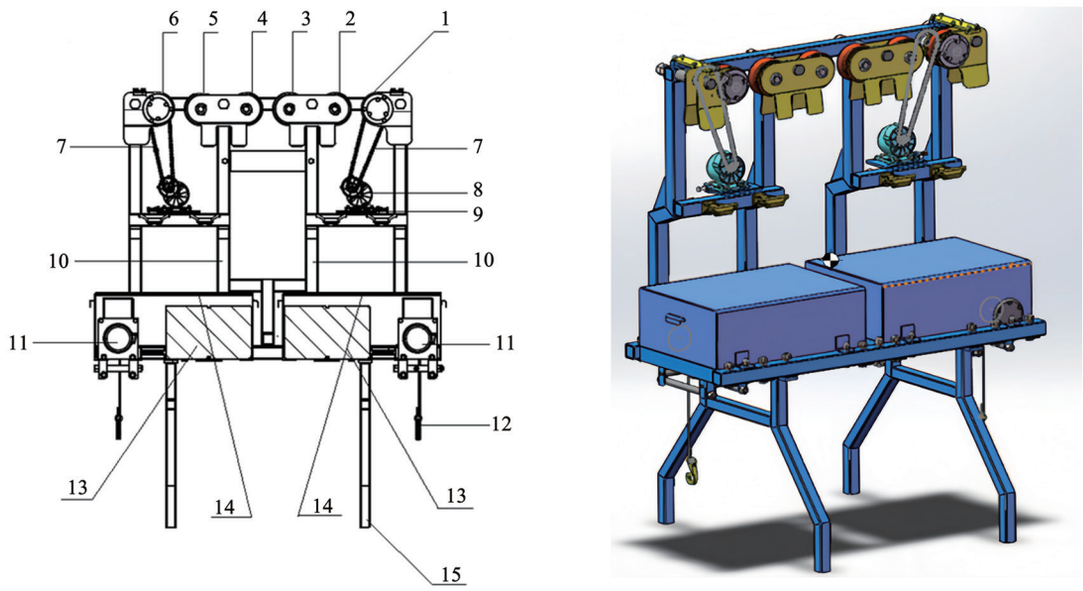
Table 1 Parameters of cable type

索名称 Name of cable	型号 Type	单位长度重力 Gravity per unit length /(N·m^{-1})	钢索许可破断拉力 Allowable breaking tension of steel cable /N	横截面面积 Cross sectional area /mm^2	钢索弹性模量 Elastic modulus of steel cable /MPa
牵引索 Pulling cable	6.2 6×19 NFC 1550 B ZS	1.35	22 100	14.32	
回空索 Return cable	6.2 6×19 NFC 1550 B ZS	1.35	22 100	14.32	E=1×10^5
承载索 Load-bearing cable	14.0 6×19 NFC 1550 B ZZ	6.85	112 000	72.49	

表 2 升降卷扬机参数

Table 2 Lifting winch parameters

额定起重 Rated lifting /kg	电机功率 Motor power /W	额定电压 Rated voltage /V	起升速度 Lifting speed /(m·min^{-1})	卷起长度 Roll length /m	挂钩质量 Hook quality /kg	整机质量 Overall quality /kg
200 ～ 400	1 600	220	13 ～ 20	1 ～ 50	16.7	29



1 ～ 6. 行走滑轮；7. 链传动装置；8. 发电机；9. 发电机支撑底座；10. 传输缆线通过的车架竖直支撑杆；11. 升降卷扬机；12. 防脱挂钩；13. 蓄电池；14. 底板罩盖；15. 限位支撑架。
1-6. Walking pulley; 7. Chain transmission device; 8. Generator; 9. Generator support base; 10. Vertical support rods through which transmission cables pass; 11. Lift winch; 12. Anti-drop hook; 13. Battery; 14. Floor cover; 15. Positioning restraint frame.

图 3　跑车整体结构示意与建模

Fig. 3　Schematic diagram and modeling diagram of the overall structure of the cable car

2　竹材索道集材运输装备控制系统的设计

竹材索道集材运输装备控制核心采用西门子 PLC，兼具手动、自动模式，可自由切换紧急制动，防止意外状况下出现安全事故。控制系统主要包括控制面板、移动主机自动升降塔架控制系统、牵引索与回空索配合牵引控制系统、跑车控制系统、实时状态监控系统。

2.1　移动主机自动升降塔架控制系统

塔架安装作业时，操作人员通过操控臂架变幅油缸、伸缩油缸工作，将第一节臂由水平状态逐渐提升至竖直状态（此时第二节臂位于第一节臂内）。待第一节臂达到竖直状态后，第二节臂在油缸的作用下升高，当提升至限位处时，位置传感器将信号传递给 PLC 控制器。PLC 发出控制信号，控制插销机构启动，插销固定，完成塔架架设。塔架回缩作业时，插销机构首先解锁，伸缩油缸控制第二节臂下降回缩，收缩至极限位置后，第一节臂放倒至水平状态，便于主机移动。塔架控制主程序流程如图 4 所示。

2.2　牵引索与回空索配合牵引控制系统

牵引索与回空索配合牵引系统主要通过卷扬机上的压力传感器、编码器来进行数据采集。系统利用压力传感器将所受压力换算为钢丝绳拉力，可实时观测索道安装时预拉力和工作时牵引索与回空索拉力。当拉力超过设定的预警值时，PLC 控制器输出控制指令，实时调整液压驱动压力和卷筒转速，降低跑车运行速度，从而避免工作索超负荷工作。牵引索与回空索主程序流程如图 5 所示，工作索系统界面如图 6 所示。

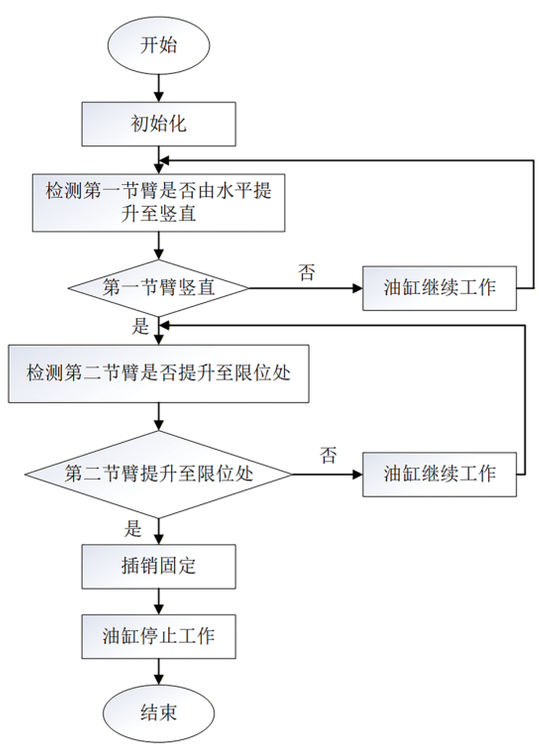


图 4　移动主机自动升降塔架控制系统流程

Fig. 4　Flow chart of automatic lifting tower control system for mobile host

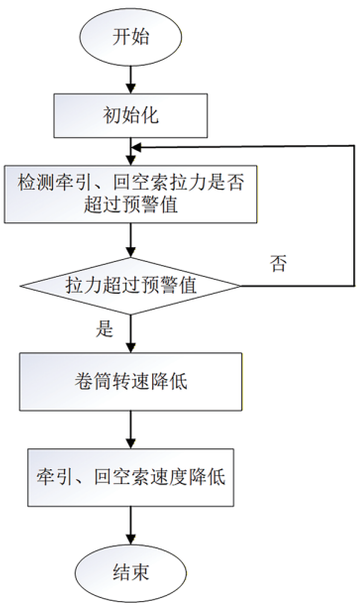


图 5 牵引索与回空索配合牵引控制系统流程

Fig. 5 Flow chart of traction control system with hauling and return cables

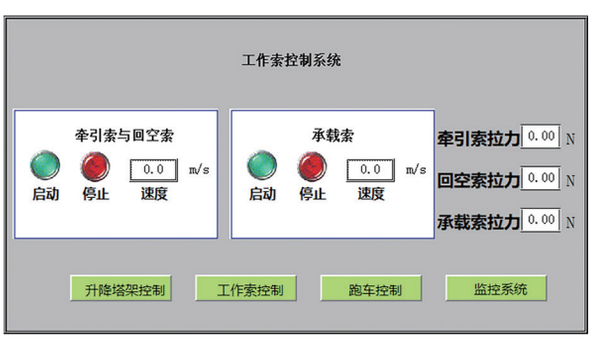


图 6 工作索控制系统界面

Fig. 6 Interface of working cable control system

2.3 跑车控制系统

跑车上设有升降卷扬机，卷扬机上安装压力传感器和编码器。压力传感器可实时监测升降卷扬机在林间牵引集材和提升打捆竹材时的工作索拉力；编码器可将监测的卷扬圈数换算成工作索长度。跑车限位支撑架上安装有光电传感器。当打捆竹材提升至跑车下方的限位支撑架内时，光电传感器将竹材遮挡产生的光强变化转换为电信号传递给 PLC，PLC 发出控制信号，控制升降卷扬机停止收索动作。跑车蓄电池安装有监测传感器，可以在线监测电池组的电池电压、单体内阻及单体极柱温度等状态参数，实时反馈蓄电池的运行状况，当电池电量过低时系统会自动发出警报提示。该监测系统界面如图 7 所示。

2.4 实时状态监控系统

实时监控系统主要通过温度传感器、压力传感器、位置传感器以及蓄电池监测传感器等，对各驱动电机、液压油缸、跑车等关键机构的工作状态和工作参数进行采集与监控。当传感器采集信息异常时，系统立即发出警报，操作人员可及时停止设备运行，并进行维护处理，避免造成设备损坏及安全事故发生。系统监控界面如图 8 所示。

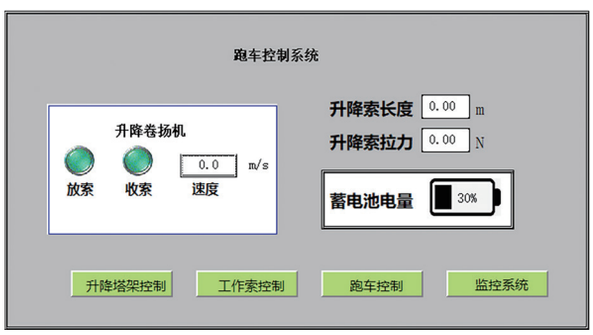


图 7 跑车控制系统界面

Fig. 7 Interface of cable car control system

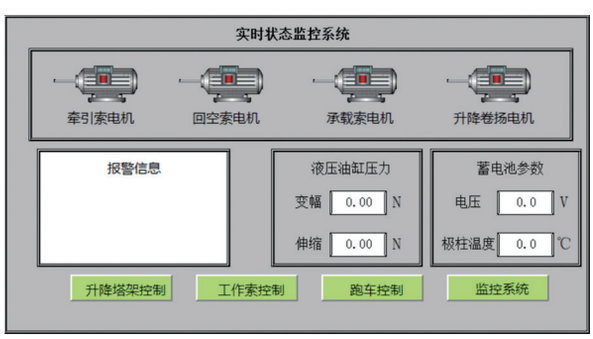


图 8 实时状态监控系统界面

Fig. 8 Interface of real-time condition monitoring system

3 试验与分析

3.1 试验条件

结合前期航拍调研的竹林地理环境数据，并根据项目合作企业经营地域，选择湖南省益阳市天池山东南坡竹林、四川省泸州市叙永县向林镇竹林、湖南省益阳市天池山东北坡竹林 3 个试验地点，其中湖南省益阳市天池山东南坡竹林坡度约 25.7°，四川省泸州市叙永县向林镇竹林坡度约 19.8°，湖南省益阳市天池山东北坡竹林坡度约 16.3°。竹林地理环境及索道集材运输系统搭建情况如图 9 和图 10 所示。试验运输竹材取自 3 个试验竹林中直径不定、3 ～ 5 年生的毛竹；经择伐后剔除枝干，通过跑车升降卷扬机放索和收索牵引至林间集材点打捆，再升空运输。

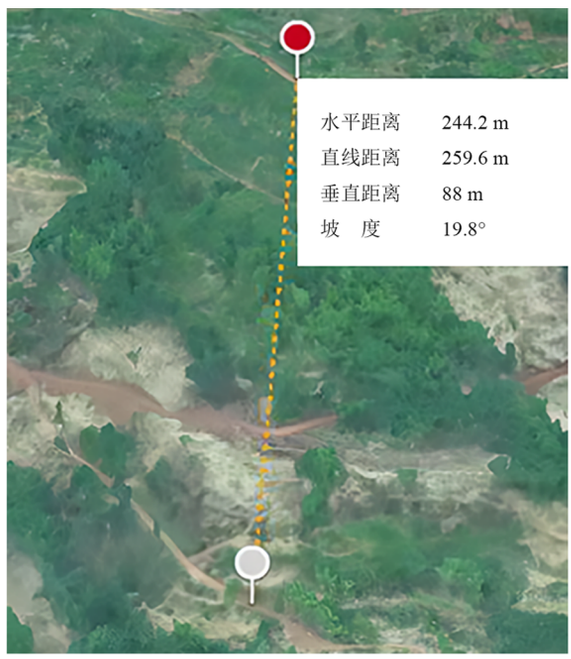
3.2 试验方案与指标

试验以竹材索道集材运输装备运输竹材的安

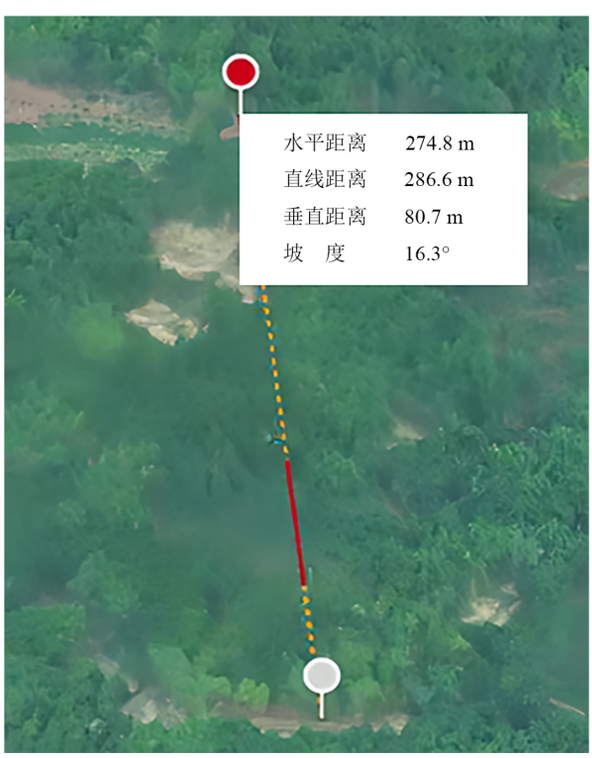
全性为指标，即跑车在运输过程中，竹材不发生掉落，能将打捆竹材成功运至路边转运点便满足安全性要求。为更加精准反映试验指标结果，将安全性指标进行量化，以跑车运输竹材过程中，跑车升降卷扬机钢丝绳下降的长度作为指标来衡量运输安全性。在运输过程中，跑车下方设置有对打捆竹材进行限位的支撑架，可有效减小跑车运输时打捆竹材的摆动幅度，避免因摆动过大导致跑车与竹材整体运动惯量增大，进而引发安全事故。



（a）湖南省益阳市天池山东南坡竹林
Bamboo forest on the southeast slope of Tianchi mountain, Yiyang City, Hunan Province



（b）四川省泸州市叙永县向林镇竹林
Bamboo forest in Xianglin Town in Xuyong County in Luzhou City, Sichuan Province



（c）湖南省益阳市天池山东北坡竹林
Bamboo forest on the northeast slope of Tianchi mountain, Yiyang City, Hunan Province

图 9　试验地竹林地理环境
Fig. 9　Geographical environment of bamboo forest in experimental site



（a）移动主机与塔架安装 Mobile host and tower installation



（b）山上塔架安装 Top tower installation



（c）跑车运输竹材下山 The cable car transports bamboo down the mountain

图 10　竹材索道集材运输装备搭建情况与运输现状

Fig. 10　Construction and transportation status of bamboo cableway skidding transportation equipment

跑车限位架高度为 0.8 m。升降卷扬机将竹材提升至最高限位点时，竹材底部距跑车底板下底面 0.15 m。当跑车升降卷扬机制动力不足时，致使钢丝绳下降到竹材超出限位架最低点，竹材将失去约束而发生大幅转动，运输安全性降到最低。以此时升降卷扬机钢丝绳下降高度为最低标准，用下降安全率（η）为指标来评价运输安全性，其计算公式为：

$$\eta = \frac{2\eta_2 - \eta_1}{2\eta_2} \times 100\% 。 \tag{3}$$

式中：η 为设备运输竹材的下降安全率（%）；η_1 为升降卷扬机钢丝绳下降长度（m）；η_2 为打捆竹材最高点低于限位支撑架最低点时的钢丝绳下降高度，η_2=0.65 m。

当下降安全率低于 50% 时，竹材运输安全性难以得到保障。此时跑车升降卷扬机制动器失效程度较严重，卷扬机钢丝绳下降长度超出限位支撑架，竹材摆动幅度急剧增加，无法满足竹材运输要求。当运输速度较大时，竹材可能出现掉落的风险。

3.3　单因素试验与分析

3.3.1　索道倾斜角对竹材运输安全性的影响

在跑车运输速度和跑车与竹材总质量一定的情况下，索道倾斜角对竹材运输安全性有较大影响。为探究倾斜角对运输安全性的影响规律，试验设定跑车运输速度为 3 m/s，跑车与竹材总质量为（500±10）kg（因打捆运输的竹材以根为单位，每次总质量可在 490 ～ 510 kg 之间浮动）。试验在 3 个不同坡度的竹林地开展，试验竹林搭建的设备索道倾斜角分别为 25.7°、19.8° 和 16.3°，每组试验重复 5 次，排除干扰较大的数据后取平均值。由式（3）计算不同索道倾斜角下的下降安全率，试验结果如表 3 所示。

表 3　索道倾斜角对竹材运输安全性的影响
Table 3　Influence of cableway inclination angle on bamboo transportation safety

序号 No.	索道倾斜角 Cableway inclination angle /(°)	升降卷扬机钢丝绳平均最大降落长度 Average maximum falling length of the cable of lifting winch /m	下降安全率 The descent safety rate /%
1	16.3	0.22	83.1
2	19.8	0.27	79.2
3	25.7	0.42	67.7

由表 3 可知，下降安全率与索道倾斜角呈负相关关系，随着索道倾斜角的增大，下降安全率逐渐减小。索道倾斜角越大，工作索附加在跑车上的自重分力越大。同时，运输过程中索道的挠度也随之增大，导致跑车和索道振动位移的幅值增大，降低竹材运输安全性。但在本次试验所设置的运输工况下，各倾斜角对应的下降安全率整体较高，未出现低于 50% 的情况，竹材均可安全运输下山。综合分析可得：竹材运输安全性随索道倾斜角的增大而减小，在实际作业过程中应尽量避免在 30° 以上坡度的竹林地进行竹材集材运输作业，以保障竹材运输安全性。

3.3.2　跑车速度对竹材运输安全性的影响

在索道倾斜角和跑车与竹材总质量一定的情况下，跑车运输速度对竹材运输安全性影响较大。为探究跑车速度对运输安全性的影响规律，试验中保持索道倾斜角和跑车与竹材总质量不变，设定索道倾斜角为 19.8°，跑车与竹材总质量为（500±10）kg。跑车速度通过牵引索与回空索运行速度来改变，试验时设置跑车速度分别为 2.0、2.5、3.0、3.5 和 4.0 m/s，每组试验重复 5 次，排除干扰较大的数据后取平均值。由式（3）计算不同跑车运输速度下的下降安全率，试验结果如表 4 所示。

表 4　跑车运输速度对竹材运输安全性的影响
Table 4　Influence of the cable car speed on bamboo transportation safety

序号 Serial No.	跑车运输速度 Transport speed of cable car /($m \cdot s^{-1}$)	升降卷扬机钢丝绳平均最大降落长度 Average maximum falling length of the cable of lifting winch /m	下降安全率 The descent safety rate /%
1	2.0	0.33	74.6
2	2.5	0.31	76.2
3	3.0	0.27	79.2
4	3.5	0.35	73.1
5	4.0	0.40	69.2

由表 4 可知，当跑车运输速度自 2.0 m/s 上升至 4.0 m/s 时，下降安全率呈先上升后下降的趋势。结合前期研究 [23] 中索道与跑车耦合振动仿真分析可知：当跑车速度较低（约 2 m/s）时，跑车在承载索上运行对承载索施加的载荷频率变化较快，此时跑车上升降卷扬机制动器在竹材高频位移作用下致使制动器热失效，丧失部分制动能力，导致钢丝绳降落长度增加，下降安全率降低。当跑车运输速度较高时，虽然承载索与跑车发生位移变化的频率降低，但此时承载索、跑车及吊运竹材产生位移变化的幅值增大，运动惯性大，升降卷扬机制动器制动能力不足，导致钢丝绳降落长度增加，下降安全率同样降低。此外，在本次跑车速度对竹材运输安全性试验中，在所设置的运输条件下，无下降安全率低于 50% 的情况，竹材均可安全运输下山。综合分析可得：竹材运输安全性随跑车运输速度的增大呈先增大后减小的趋势。在实际作业过程中，可选择适中的运行速度，使下降安全率达到最优水平。

3.3.3　跑车与竹材总质量对竹材运输安全性的影响

为探究跑车与竹材总质量对运输安全性的影响规律，试验时保持索道倾斜角和跑车运输速度

恒定，设定索道倾斜角为 19.8°，跑车运输速度为 3 m/s。跑车与竹材总质量通过控制打捆竹材质量来改变，结合实际运输情况，设置跑车与竹材运输总质量分别为 300、400、500 和 600 kg。每组试验重复 5 次，排除干扰较大的数据后取平均值。由式（3）计算不同跑车与竹材总质量下的下降安全率，试验结果如表 5 所示。

表 5 跑车与竹材总质量对竹材运输安全性的影响
Table 5 Influence of the total mass of cable car and bamboo on bamboo transportation safety

序号 Serial No.	跑车与竹材总质量 The total mass of cable car and bamboo /kg	升降卷扬机钢丝绳平均最大降落长度 Average maximum falling length of the cable of lifting winch /m	下降安全率 The descent safety rate /%
1	300	0.19	85.4
2	400	0.24	81.5
3	500	0.27	79.2
4	600	0.35	73.1

由表 5 可知，下降安全率与跑车与竹材总质量呈负相关，总质量越大，其下降安全率越低。在跑车运输速度和索道倾斜角不变的条件下，跑车与竹材总质量增大会使承载索挠度增大，运动惯性增加，跑车升降卷扬机的制动器所需制动力相应提高，从而导致钢丝绳降落长度增加，下降安全率降低。此次跑车与竹材总质量对竹材运输安全性试验中，在所设置的运输条件下，无下降安全率低于 50% 的情况，竹材均可安全运输下山。综合分析可得：竹材运输安全性随跑车与竹材总质量的增大逐渐减小，但仍在保障竹材安全运输范围内。在实际作业过程中，为同时兼顾运输安全性和运输效率，可在下降安全率不低于 50% 的条件下，适当增大吊运竹材的质量，提高运输效率。

3.4 二次回归正交旋转组合试验与分析

3.4.1 试验设计

对跑车运输速度、跑车与竹材总质量、索道倾斜角进行单因素试验分析，得出 3 个参数对竹材运输安全性的影响规律。但因运输时各运输条件并非恒定不变，需要随着实际作业情况实时调整，因此，为探明 3 个运输条件相互作用对竹材运输安全性的影响，进行了二次正交旋转组合试验 [25]。试验以跑车运输速度、跑车与竹材总质量、索道倾斜角为试验因素，设置 3 个水平，各因素的取值范围为：跑车运输速度 2 ～ 4 m/s、跑车与竹材总质量 400 ～ 600 kg、索道倾斜角 16.3° ～ 25.7°。根据二次正交旋转组合试验设计，分析跑车运输速度、跑车与竹材总质量、索道倾斜角对下降安全率的影响，并通过 F 检验得出 3 组因素对竹材运输安全性影响的显著性水平。试验因素及水平如表 6 所示，A_1、A_2、A_3 分别表示跑车运输速度、跑车与竹材总质量、索道倾斜角 3 个因素。试验方案及结果如表 7 所示，每组试验重复 3 次，结果取平均值。

表 6 试验影响因素及水平
Table 6 Test influencing factors and levels

编码 Encode	试验因素 Test factors		
	跑车运输速度 A_1 /(m·s^{-1})	跑车与竹材总质量 A_2 /kg	索道倾斜角 A_3 /(°)
−1	2	400	16.3
0	3	500	19.8
1	4	600	25.7

表 7 二次正交旋转组合试验结果
Table 7 Results of the quadratic orthogonal rotatable composite design experiments

序号 Order No.	试验因素 Test factors			下降安全率 η /%
	A_1 /(m·s^{-1})	A_2 /kg	A_3 /(°)	
1	3	600	25.7	65.2
2	3	500	19.8	78.7
3	2	400	19.8	75.3
4	3	500	19.8	79.2
5	2	600	19.8	67.8
6	3	500	19.8	79.6
7	3	600	16.3	82.6
8	3	500	19.8	79.2
9	4	600	19.8	68.7
10	3	400	25.7	69.5
11	4	500	16.3	76.7
12	4	500	25.7	62.1
13	2	500	25.7	63.4
14	2	500	16.3	80.6
15	4	400	19.8	71.3
16	3	400	16.3	83.1
17	3	500	19.8	78.1

3.4.2 试验结果分析

采用 Design-Expert 13 软件对表 7 中各因素进行回归分析，以下降安全率作为跑车运输安全性评价指标，建立跑车运输速度、跑车与竹材总质量和索道倾斜角二次回归模型，公式为：

$$\eta = 76.950\,0 - 0.965\,4A_1 - 1.960\,0A_2 - 7.850\,0A_3 + 1.230\,0A_1A_2 + 0.564\,6A_1A_3 - 0.756\,2A_2A_3 - 6.290\,0A_1^2 - 1.890\,0A_2^2 + 0.039\,3A_3^2 \quad (4)$$

回归方程的方差分析结果如表 8 所示。回归方程模型显著性检验 F_1=82.37，P ＜ 0.000 1，表明回归方程极为显著，与试验值拟合程度好，模型合理。模型的失拟性检验 F_2=5.77，P=0.061 8 ＞ 0.05，说明回归方程与实际误差所占比例很小，即试验误差小。

表 8　下降安全率指标方差分析 †

Table 8　The descent safety rate indicators η variance analysis

试验因素 Test factor	平方和 Sum of square	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	F	P	显著性 Significance
模型 Model	751.47	9	83.50	82.37	＜ 0.000 1	***
A_1	7.23	1	7.23	7.13	0.032 0	**
A_2	29.76	1	29.76	29.36	0.001 0	***
A_3	92.98	1	92.98	86.31	＜ 0.000 1	***
A_1A_2	6.00	1	6.00	5.92	0.045 2	**
A_1A_3	1.32	1	1.32	1.30	0.2919	
A_2A_3	2.36	1	2.36	2.33	0.170 7	
A_1^2	166.72	1	166.72	164.46	＜ 0.000 1	***
A_2^2	15.08	1	15.08	14.88	0.006 2	***
A_3^2	0.01	1	0.01	0.01	0.943 3	
残差 Residual	7.10	7	1.01			
失拟 Lack of fit	5.76	3	1.92	5.77	0.0618	
误差 Error	1.33	4	0.3330			
总和 Total	758.56	16				

† ***, P ＜ 0.01; **, 0.01 ≤ P ＜ 0.05.

试验因素对试验指标的影响程度可由 F 值显示，F 值越大，对试验指标的影响越大。由方差分析结果可看出，各因素对竹材运输安全性的影响由大到小依次为索道倾斜角、跑车与竹材总质量、跑车运输速度。

3.4.3　试验结果的响应面分析

通过 Design-Expert 13 软件对数据进行处理，得到跑车运输速度（A_1）、跑车与竹材总质量（A_2）、索道倾斜角（A_3）之间的交互作用以及对试验指标下降安全率（η）的影响，响应曲面如图 11 ～ 13 所示。

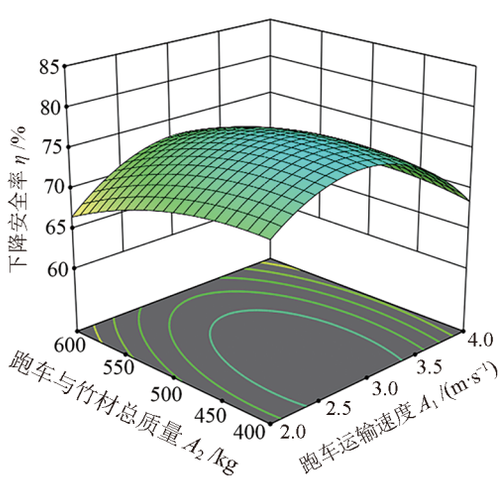


图 11　跑车运输速度和跑车与竹材总质量的响应曲面

Fig. 11　Response surface of cable car speed and the total mass of cable car and bamboo

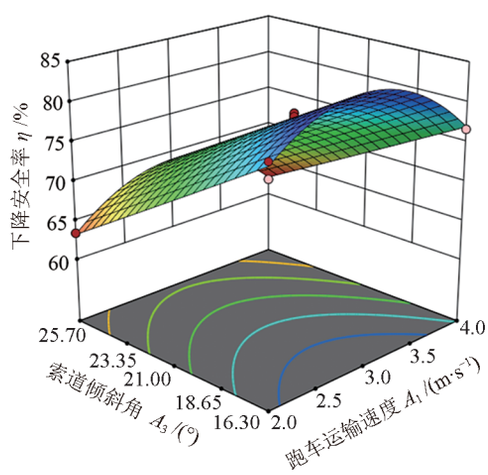


图 12　跑车运输速度和索道倾斜角的响应曲面

Fig. 12　Response surface of cable car speed and cableway inclination angle

由图 11 可知，当跑车与竹材总质量一定时，下降安全率随跑车运输速度的增加呈先增大后减小的变化趋势；当跑车运输速度一定时，下降安全率和跑车与竹材总质量呈负相关，随着跑车与竹材总质量的增加，下降安全率逐渐减小；跑车运输速度和跑车与竹材总质量的交互作用显著。

由图 12 可知，当索道倾斜角一定时，下降安全率随跑车运输速度的增大呈先升高后降低的变化趋势；当跑车运输速度一定时，下降安全率和索道倾斜角呈负相关，随着索道倾斜角的增大，下降安全率迅速减小，跑车运输速度和索道倾斜角的交互作用显著。

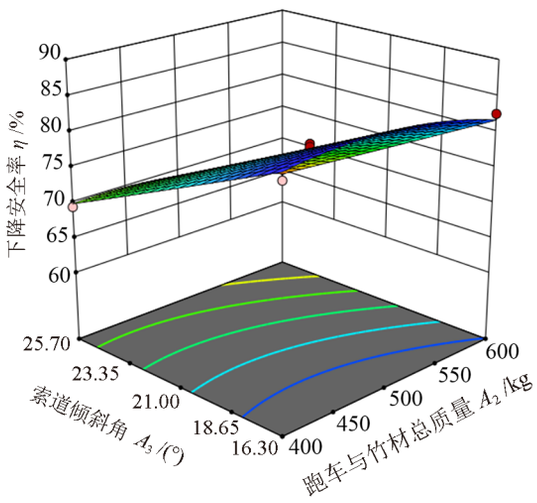


图 13 跑车与竹材总质量和索道倾斜角的响应曲面
Fig. 13 Response surface of the total mass of cable car and bamboo and cableway inclination angle

由图 13 可知，当跑车与竹材总质量一定时，下降安全率与索道倾斜角呈负相关，随着索道倾斜角的增大，下降安全率逐渐减小；当索道倾斜角一定时，下降安全率和跑车与竹材总质量也呈负相关，随着跑车与竹材总质量的增大，下降安全率逐渐减小。索道倾斜角和跑车与竹材总质量的交互作用不显著，因索道倾斜角增大时，重力沿索道方向分力与质量呈线性正相关，而惯性力由加速度决定，二者作用路径独立，故交互效应不明显。综合各因素响应曲面交互分析可得：当索道倾斜角为 16.3° ～ 21.0°、跑车与竹材总质量为 400 ～ 550 kg、跑车速度为 2.6 ～ 3.2 m/s 时，下降安全率较大，可达 75% 以上，可参考此工作条件进行实际作业。

4 结 论

针对丘陵山地竹子采伐后运输困难，现有人工背负、溜坡下山、索道、管道或轨道等输送方式普遍存在劳动强度大、作业效率低、安全保障差等问题，设计了一种专用于竹材索道集材运输装备，并进行装备试验验证与分析，实现了林间择伐竹材的牵引集材、打捆竹材迅速升空、运输跑车自动充电蓄能、竹材安全高效运输等功能。主要结论如下：

1）通过调研竹材资源丰富的湖南、福建等省份竹林情况，结合索道运输实际功能需求，采用模块化设计方式，确定了竹材索道集材运输装备主要设计参数和总体方案。完成了承载索、牵引索和回空索及其所对应的动力卷扬机构的设计与选型；设计了移动主机自动升降塔架装置、林间固定支撑塔架、移动跑车的结构，介绍了各机械结构的工作原理；开发了与装备配套的控制系统，最终完成了整套竹材索道集材运输装备的研制。

2）竹材运输安全性随着跑车运输速度、跑车与竹材总质量及索道倾斜角的增大有所降低，但整体仍处于安全保障范围内，试验过程中并未出现竹材掉落的情况。因此，当跑车运输速度低于 4 m/s、跑车与竹材总质量小于 600 kg、索道倾斜角低于 25.7° 时，该设备能够将竹材安全运输至路边转运点，满足现场应用需求。此外，通过二次回归正交旋转组合试验得出，当索道倾斜角为 16.3° ～ 21.0°、跑车与竹材总质量为 400 ～ 550 kg、跑车速度为 2.6 ～ 3.2 m/s 时，下降安全率可达 75% 以上，竹材运输安全性高，实际工作时优先选择在此条件下进行。

本研究研制的竹材索道集材运输装备可在一定条件下实现山地竹材高效、安全运输，但装备的稳定性有待进一步提升，因试验经费和条件限制，未能进行 30° 甚至 35° 以上坡度的试验，后期将进一步研究装备在大风等恶劣条件下的稳定性，索道超过 500 m 大跨度的适用性，通过增加跑车自动称重、跑车运输过程中周围环境可视化等进一步提高装备的智能化程度。

参考文献：

[1] BYSTRIAKOVA N, KAPOS V, LYSENKO I, et al. Distribution and conservation status of forest bamboo biodiversity in the Asia-Pacific region[J]. Biodiversity and Conservation,2003,12: 1833-1841.

[2] DLAMINI L C, FAKUDZE S, MAKOMBE G G, et al. Bamboo as a valuable resource and its utilization in historical and modern-day China[J]. Bioresources,2022,17(1):1926-1938.

[3] 冯鹏飞 , 李玉敏 .2021 年中国竹资源报告 [J]. 世界竹藤通讯 , 2023,21(2):100-103.
FENG P F, LI Y M. China's bamboo resources in 2021[J]. World Bamboo and Rattan,2023,21(2):100-103.

[4] HUANG L, CHEN K, ZHOU M, et al. Gravity models of China’s bamboo and rattan products exports: applications to trade potential analysis[J]. Forest Products Journal,2019,69(4): 337-344.

[5] HUANG Y, HOU Y L, REN J, et al. How to promote sustainable bamboo forest management: an empirical study from small-scale farmers in China[J]. Forests,2023,15:12.

[6] QI S H, SONG B, LIU C, et al. Bamboo forest mapping in China using the dense Landsat 8 image archive and Google Earth Engine[J]. Remote Sensing,2022,14:762.

[7] 刘延鹤 , 周建波 , 傅万四 , 等 . 中国现代竹林场全程机械化经营模式探析 [J]. 林业机械与木工设备 ,2020,48(11):13-17.
LIU Y H, ZHOU J B, FU W S, et al. Analysis on the whole-process mechanized management mode of modern bamboo forest farms in China[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment,2020,48(11):13-17.

[8] 费叶琦 , 刘英 , 陈甲伟 , 等 . 竹材采运机械发展探究 [J]. 世界林业研究 ,2021,34(1):31-36.
FEI Y Q, LIU Y, CHEN J W, et al. Development of bamboo cutting and transporting machinery[J]. World Forestry Research, 2021,34(1):31-36.

[9] 沈冯峥 , 徐康 , 李琴 , 等 . 竹材初加工机械研究现状及发展趋势 [J]. 浙江林业科技 ,2019,39(6):105-110.
SHEN F Z, XU K, LI Q, et al. History and development of primary processing machinery for bamboo[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology,2019,39(6):105-110.

[10] LIPMAN J K. Chinese in the woods: logging and lumbering in the American west by Sue Fawn Chung[J]. Labor: Studies in Working-Class History of the Americas,2017,14(1):95-96.

[11] SPINELLI R, MAGAGNOTTI N, LOMBARDINI C. Performance, capability and costs of small-scale cable yarding technology[J]. Small-Scale Forestry,2010,9:123-135.

[12] JONSSON M J, FOETZKI A, KALBERER M, et al. Natural frequencies and damping ratios of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) growing on subalpine forested slopes[J]. Trees, 2007,21:541-548.

[13] 杨健 , 梁一品 , 杨倩倩 , 等 . 管道无动力运送竹材下山的方法 : 201810972908.7[P]. 2019-02-15.
YANG J, LIANG Y P, YANG Q Q, et al. Method of transporting bamboo down the mountain without power through pipelines: 201810972908.7[P]. 2019-02-15.

[14] 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(5):39-41.
LU M Z, YANG Q Q, CHEN B Y, et al. A new technology to transport bamboo downhill via non-powered pipeline[J]. World Bamboo and Rattan,2018,16(5):39-41.

[15] 姚文斌 , 周超 . 一种竹材运输用智能运输车 : 201610350085.5[P]. 2016-12-07.
YAO W B, ZHOU C. An intelligent transport vehicle for bamboo transportation: 201610350085.5[P]. 2016-12-07.

[16] 谭桂生 , 夏胜平 , 欧阳亮 . 竹林开采用运竹装置 : 201820468103.4[P]. 2019-01-18.
TAN G S, XIA S P, OUYANG L. Bamboo Forest opening adopts bamboo transportation device: 201820468103.4[P]. 2019-01-18.

[17] 伍希志 , 李贤军 , 刘曼 , 等 . 一种适于竹林间伐的移动式索道集材设备及集材方法 : 202110490397.7[P]. 2022-10-04.
WU X Z, LI X J, LIU M, et al. A mobile cableway logging equipment and method suitable for bamboo forest thinning: 202110490397.7[P]. 2022-10-04.

[18] DOBRETSOV R Y, IVANOV A A, NURETDINOV D I, et al. Transmission and slewing mechanism for highly manoeuvrable small machine transmissions[J]. Journal of Physics: Conference Series,2022,2373:052002.

[19] ZANG L G, YANG S Q, WU C Y, et al. Design and kinematics analysis of coordinated variable wheel-track walking mechanism[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020,17(4):172988142093057.

[20] ZEMANEK T, NERUDA J. Impact on the operation of a forwarder with the wheeled, tracked-wheel or tracked chassis on the soil surface[J]. Forests,2021,12:336.

[21] 刘海燕 . 履带行走机构的计算与选型设计 [J]. 采矿技术 , 2013,13(4):90-93.
LIU H Y. Calculation and type selection design of crawler travel mechanism[J]. Mining Technology,2013,13(4):90-93.

[22] 赵立军 , 李金广 , 杨斌 , 等 . 山地电动履带底盘设计与仿真分析 [J]. 拖拉机与农用运输车 ,2024,51(1):30-37.
ZHAO L J, LI J G, YANG B, et al. Design and simulation analysis of mountain electric track chassis[J]. Tractor & Farm Transporter,2024,51(1):30-37.

[23] 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(6): 1348-1356.
LEI Y J, ZHOU J B, FU W S, et al. Design and analysis of bamboo cableway skidding transportation equipment sports car and suspension cable[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2023,40(6):1348-1356.

[24] 雷永杰 , 周建波 , 傅万四 , 等 . 竹材索道集材运输装备动力机构设计与分析 [J]. 林业机械与木工设备 ,2023,51(11):53-58.
LEI Y J, ZHOU J B, FU W S, et al. Design and analysis of power mechanism of bamboo cableway skidding transportation equipment[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2023,51(11):53-58.

[25] WANG Q, HUANG P, YIN Y H. Design and optimization of rolling mills pass based on parameterization and orthogonal test[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2021,112:803-818.

[本文编校：谢荣秀]