

园艺林下作业电动多功能平台设计与试验

刘浩鲁^{1,2} 赵山虎^{1,3} 马文龙³ 陆凤祥³ 丁昌文³ 曹光乔^{1,4}

(1. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 2. 农业农村部现代农业装备重点实验室, 南京 210014;
3. 江苏悦达智能农业装备有限公司, 盐城 224002; 4. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081)

摘要: 针对适宜果园园艺林下作业的动力机械适应性差、功能单一、污染排放的问题, 本文设计了一台用于林下作业, 集割草、喷药和运输于一体的电动多功能作业平台。首先, 基于果园冠层低矮、地形崎岖环境的农艺要求与约束条件, 进行了平台总体布局与性能指标设计, 对电池、电机、底盘、作业部件和控制系统开展了参数化设计。然后, 以爬坡角度、续航时间和制造成本为核心目标, 考虑了滑转率、接地比压、质心纵坐标等多重约束, 建立了多目标优化数学模型, 并采用 NSGA-Ⅱ 优化算法进行求解, 确定了平台电池容量、电机功率关键参数的最优匹配方案。最后, 对样机进行直线行驶、最小转弯半径、割草性能等基本性能试验。试验结果表明, 所设计的多功能作业平台直线行驶 100 m 平均跑偏量为 1.453 m, 原地转弯半径为 656 mm, 能够通过 20% 坡 (约 11.3°) 和 30% 坡 (约 16.7°) 爬坡测试、驻坡制动和坡道转向试验, 满足设施园艺行间地头良好的通过性要求; 当割草机转速为 2 000 r/min 时, 留茬高度、漏割率等作业指标满足作业需求, 续航时间为 5.8 h。研究结果表明, 所设计的电动平台在满足林下复杂环境作业需求的同时, 实现了零排放、低噪声、多功能集成与性能优化, 为林下作业机械的绿色化、智能化发展提供了思路与技术参考。

关键词: 林下作业; 电动多功能作业平台; 分布式电驱动底盘; 割草; 爬坡; 多目标优化

中图分类号: S126

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)15-0180-09

OSID:



Design and Performance Test of Electric Multifunctional Platform for Horticultural Under-canopy Operations

Liu Haolu^{1,2} Zhao Shanhu^{1,3} Ma Wenlong³ Lu Fengxiang³ Ding Changwen³ Cao Guangqiao^{1,4}

(1. *Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China*
2. *Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China*
3. *Jiangsu Yueda Intelligent Agricultural Equipment Co., Ltd., Yancheng 224002, China*
4. *Graduate School, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*)

Abstract: Aiming to address the problems of poor adaptability, single functionality, and polluting emissions in power machinery suitable for orchard and horticultural understory operations, an electric multifunctional operation platform for under-canopy operations that integrated mowing, spraying, and transportation was designed. Firstly, based on the agronomic requirements and constraints of low-canopy orchards and rugged terrain environments, the overall layout and performance indicators of the platform were planned, and parametric designs were conducted for the battery, motor, chassis, operational components, and control system. Then, with climbing angle, endurance time, and cost as core objectives, and considering multiple constraints such as slip rate, ground pressure, and longitudinal coordinate of the center of mass, a multi-objective optimization mathematical model was established. The NSGA-Ⅱ optimization algorithm was employed to solve the model, determining the optimal matching scheme for key parameters, including platform battery capacity and motor power. Finally, basic performance tests were conducted on the prototype, including minimum turning radius, mowing performance, and spraying performance. The test results showed that the designed multifunctional operation platform had an average deviation of 1.453 m in a 100-meter straight-line driving test, an on-

收稿日期: 2026-01-21 修回日期: 2026-03-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2000303)和江苏省农机研发制造推广应用一体化试点项目(JSYTH05)

作者简介: 刘浩鲁(1993—),男,助理研究员,博士生,主要从事农机装备电动化与智能化研究,E-mail: liuhaolu@caas.cn

通信作者: 曹光乔(1978—),男,研究员,博士生导师,主要从事农机化管理工程研究,E-mail: caoguangqiao@126.com

site turning radius of 656 mm, and passed climbing tests on 20% (approximately 11.3°) and 30% (approximately 16.7°) slopes, as well as slope parking brake and slope steering tests, meeting the navigability requirements for facility horticulture inter-row and headland operations. When the mower operated at 2 000 r/min, performance indicators such as stubble height and missed cutting rate met operational requirements, with an endurance time of 5.8 h. The research results demonstrated that the designed electric platform not only met the operational demands of complex understory environments but also achieved zero emissions, low noise, multifunctional integration, and performance optimization. It can provide ideas and technical references for the green and intelligent development of understory operation machinery.

Key words: under-canopy operations; electric multifunctional operation platform; distributed electric drive chassis; mowing; climbing; multi-objective optimization

0 引言

园艺生产对保障果蔬供应具有重要意义^[1-2]。园艺场景存在作业环节地形地貌多样、作业空间狭小、环境遮挡严重、作业环节多等特点^[3],对动力平台提出了高灵活性、高通过性、高续航性、多功能性、高通用性的要求^[4]。以水果生产为例,我国是世界第一大水果生产和消费国,超六成果园分布在西南、东南和西北地区的丘陵山区^[5],其栽培模式普遍存在行架低、行距窄等问题^[6],迫切需要适应丘陵山区地形和郁闭环境特点的林下多功能作业平台^[7-8]。

西方发达国家较早开展多功能果园机械化装备研究,研发了升降采摘平台、果实运输等作业平台^[9],这些机型主要适用于平原或缓坡地区的标准化果园。为了适应我国果园栽培模式特点,张亚等^[10]设计了可以完成开沟、施肥、施药作业的果园多功能管理平台,该平台可以通过监控系统实现果园作业管理。近年来,随着电动技术的快速发展^[11],电动化技术逐渐应用于设施园艺^[12]和丘陵山区^[13]等小地块作业环境,电驱系统在低速时扭矩输出更平顺、响应更快^[14-16],配合分布式履带底盘架构和电子差速控制,底盘在爬坡、防滑、防溜和转向等方面更加可控^[17-19]。王宝超等^[20]设计了一种单电机驱动的小型增程式电动履带拖拉机,能实现旋耕和开沟等作业。郭惠萍等^[21]设计了一种双电机分布式驱动履带拖拉机,研究了底盘运动性能和犁耕作业性能。Zhang 等^[22]提出一种基于载荷转移的牵引与配重联合控制方法,通过协同调节电池位置与耕深,降低了电动拖拉机滑转率与能耗,提升了耕深均匀性。褚阳阳等^[23]设计了一款适用于果园作业的电动轮式多功能作业平台,具备割草、喷药和运输等多种功能。王林泽等^[24]提出了一种具有铰接式车架,独立四轮驱动与转向轮组的多模式驱动控制转向无人农用动力装备,可以用于设施园艺生

产中播种、中耕、植保、运输等作业环节。杨福增等^[25]设计了一种适用于郁闭果园环境、割茬高度可调且株间避障灵活便捷的小型图传遥控式割草机。针对电动农机驱动系统与能源系统协调性差、电机能耗高等问题,Xu 等^[26]提出了一种适用于运输工况的单电机电动拖拉机无人协同优化控制方法。Chen 等^[27]提出了一种新的电驱移动平台和旋耕机横向耦合动力学模型,通过数值模拟和转向稳定性测试验证了所提出模型的正确性。

综上所述,目前已有一些适用于园艺作业的电动多功能作业平台,但是存在机械结构复杂、生产成本高、利用率低等缺点。本文面向园艺生产管理需求,设计可以实现割草、运输和喷药的分布式电动履带式多功能作业平台;完成电池、电驱底盘、作业模块及控制系统等关键部件的设计,并针对平台在多种工况下的综合性能表现,构建多目标优化模型,寻求全局最优解,以提升平台的整体性能与实用性。对优化设计的电动多功能作业平台开展整机试验,以验证多功能作业平台直线行驶性能、转弯性能、爬坡性能、割草作业性能与续航性能。

1 总体方案

园艺多功能作业平台主要由分布式电驱底盘和作业部件构成,系统架构如图 1 所示。作业部件包括喷药机、运输箱、割草机、旋耕机。在多功能作业平台的上覆盖板上设有快速接口,喷药机或运输箱可以通过快速接口与平台连接,在前(后)侧设有快速接口与电动液压升降装置,割草机或旋耕机可以通过快速接口与平台挂接,并利用电动液压升降装置调整角度。

2 关键部件设计

多功能作业平台可以更换喷药、运输、割草和旋耕 4 个作业部件,分别计算 4 种部件的功率参数,进而开展平台电源、底盘和电驱部件的参数化设计。

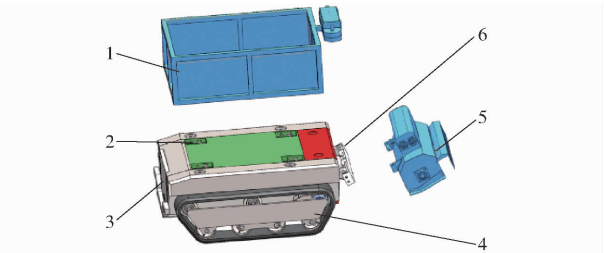


图1 电动园艺多功能作业平台系统架构示意图

Fig.1 Schematic of horticultural electric multifunctional operating platform

1. 上装运输箱 2. 上装快速接口 3. 电池部件 4. 分布式履带电驱底盘 5. 前装割草机 6. 前装快速接口

整机设计参数如表1所示。

表1 电动园艺多功能作业平台设计参数		
Tab.1 Electric horticultural multifunctional operation platform design parameters		
部件	参数	数值/型号
运输	运输载质量/kg	500
	药箱容量/L	500
	水平喷幅/m	12
喷药	垂直喷幅/m	6
	风送电机额定功率/kW	1.5
	喷药电机额定功率/kW	1.5
割草	割幅/mm	1 000
	割草电机额定功率/kW	3
电池系统	蓄电池类型	磷酸铁锂电池
	容量/(A·h)	202
	额定电压/V	64
	续航时间/h	≥4
底盘系统	离地间隙/mm	150
	设计爬坡角度/(°)	15
	作业速度/(km·h ⁻¹)	0~8
	底盘尺寸/(mm×mm×mm)	1 280×1 000×570
	轴距/mm	820
	驱动电机额定功率/kW	3
	驱动电机额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
	减速机减速比	30

2.1 作业装置模块化设计与功率计算

割草装置前装于平台,旋耕部件后装于平台,通过调整驱动电机的正反转调整平台行驶方向,两者通过快速挂接机构与平台连接,快速挂接机构与最大承载3 t的电动液压推杆连接,通过调控电动液压推杆实现作业部件的位置调节。喷药装置和运输部件通过快速接口与平台连接,运输部件设计装载量为500 kg。

2.1.1 割草装置

割草装置采取甩刀式割刀,通过快速挂接机构与平台前部连接,通过电动液压推杆实现升降,割刀由一个独立电机驱动,所需功率 P_m ^[28-29]为

$$P_m = \frac{v_m L_m M_q}{102} \tag{1}$$

式中 v_m ——切割机作业速度,取1 m/s
 L_m ——割草机割幅,取1 m
 M_q ——单位面积切割功率,取300 N·m/m²^[30]

代入数据得到割草装置所需功率为2.94 kW。

2.1.2 喷药装置

喷药装置包括药箱、药泵、风机等部件。药箱容量为500 L,药泵选用高压柱塞泵,药泵由独立电机驱动,所需功率 P_p 为

$$P_p = \frac{pQ}{600\eta_p} \tag{2}$$

式中 p ——工作压力,取5 MPa
 Q ——总流量,取16 L/min
 η_p ——药泵效率,取0.9

代入数据得到喷药泵驱动电机功率为1.48 kW。

选用后向高效离心风机作为喷药机风机,实现风送雾化,风送电机功率 P_f 为

$$P_f = \frac{Q_f p_o}{60\,000\eta_f} \tag{3}$$

式中 Q_f ——风量,取40 000 m³/h
 P_o ——全压,取1 500 Pa
 η_f ——风机效率,取0.75

代入数据得到风送电机功率为1.33 kW。

2.2 履带行走系统

底盘是平台通过性的决定因素。采用橡胶履带,接地长度0.93 m,履带宽度180 mm,以降低接地比压,减少对林地表土和根系的破坏。行走驱动采用分布式方案:左右两侧履带分别由一台电机通过减速器独立驱动。该方案省去了传统转向机构,通过控制两侧电机转速和转矩差实现灵活转向(包括原地转向),显著提升狭窄林间的机动性。驱动电机峰值功率选定为每侧4 kW,额定功率3 kW,以满足爬坡和复杂地况需求。

驱动方式采用两侧独立的电机带减速机,电机动力经过减速器传递至驱动轮,两侧独立驱动,可以实现任意速度差速,达到原地转向。直流无刷电机可靠性高、稳定性好、体积小、启动转矩大、可低速大功率运行,有利于提高履带底盘的空间利用率,符合果园内低速大扭矩运行作业要求。对平地直行、坡面直行、平地转向3种工况下的驱动力进行分析,有

$$F_{s1} = \frac{1}{2}mg(f_1 + f_2) \tag{4}$$
$$F_{s2} = \frac{1}{2}[mg(f_1 + f_2)\cos\theta + mg\sin\theta] \tag{5}$$

$$F_{s3} = \frac{1}{2}mg \left(f_1 + f_2 + \frac{1}{2}\mu_t\lambda \right) \tag{6}$$

式中 F_{s1} ——平地直行单侧履带所需驱动力,N
 F_{s2} ——坡面直行单侧履带所需驱动力,N
 F_{s3} ——平地转向单侧履带所需驱动力,N
 f_1 ——履带外摩擦因数,取 0.08
 f_2 ——履带内摩擦因数,取 0.06
 θ ——爬坡坡度,取 15°
 μ_t ——转向阻力系数,取 0.6
 λ ——接地轨距比,取 1.2
 m ——整机质量,取 750 kg
 g ——重力加速度, m/s^2

代入数据可求得机具所需最大驱动力,每个电机所需输出的功率 P 、扭矩 T 、转速 n 计算式为

$$P = \frac{1}{9\,550}Tn \tag{7}$$

其中
$$T = \frac{F_s R S_A}{N\eta i} \tag{8}$$

$$n = \frac{30v_{\max}i(1+\delta)}{\lambda\pi R} \tag{9}$$

式中 R ——驱动轮节圆半径,取 0.16 m
 S_A ——过载安全系数,取 1.2
 N ——单侧驱动轮个数,取 1
 η ——电机传动效率,取 0.95
 i ——减速器减速比,取 15
 δ ——履带滑转率,取 10%
 $v_{\max}$ ——最大行驶速度,取 2.5 m/s
 F_s ——驱动轮驱动力,N

代入数据计算可得所需电机驱动扭矩 T 约 $98\text{ N}\cdot\text{m}$,所需转速 n 约 1 050 r/min,所需最大功率 P 约 2.7 kW。综上,选择履带底盘驱动电机的额定功率为 3 kW,额定扭矩为 $38.2\text{ N}\cdot\text{m}$,额定转速为 3 000 r/min 的交流异步电机,通过减速比为 30 的轮边减速器,可输出约 $286.7\text{ N}\cdot\text{m}$ 的扭矩,满足要求。

2.3 电池系统

动力电池是电动平台的能量核心。综合比较能量密度、功率密度、循环寿命和成本,选用磷酸铁锂(LFP)电池体系,其热稳定性好,安全性高,适合园艺作业工况。通过计算平台在典型复合工况下的平均功率与续航要求,初步确定电池组额定电压为 60 V,容量不小于 200 A·h。采用成组技术,设计具备电压、电流、温度监测及均衡功能的电池管理系统(BMS),确保电池安全、高效、长寿命运行。

考虑田间复杂环境,为保障续航和安全性,选择磷酸铁锂电池作为动力电池。根据电机母线工作电压和作业最大功率,确定动力电池容量为

$$C_b = \frac{1\,000PT}{U_m h_k \eta_{mc}} \tag{10}$$

式中 C_b ——动力电池容量,A·h
 U_m ——电机母线电压,V
 h_k ——锂电池放电深度,取 0.8
 η_{mc} ——电机控制器和电动机效率乘积,取 0.8

经计算,电池选型为 64 V、202 A·h 的磷酸铁锂电池。

2.4 控制系统

控制系统采用上下两层架构。上层整车控制器 VCU 作为决策核心,选用 ARK-3520P-U8A1E 嵌入式工控机,负责接收操作人员指令、视觉信息、激光雷达和组合导航等信号,进行整车能量管理、作业模式判断和各子系统协调控制。下层控制器以 stm32f405 芯片为核心,包括电机控制器 MCU 控制两侧驱动电机、作业装置控制器管理各作业部件和电动液压推杆等。各控制器通过 CAN 总线与 VCU 通信,实现信息共享与指令同步。控制系统结构如图 2 所示。

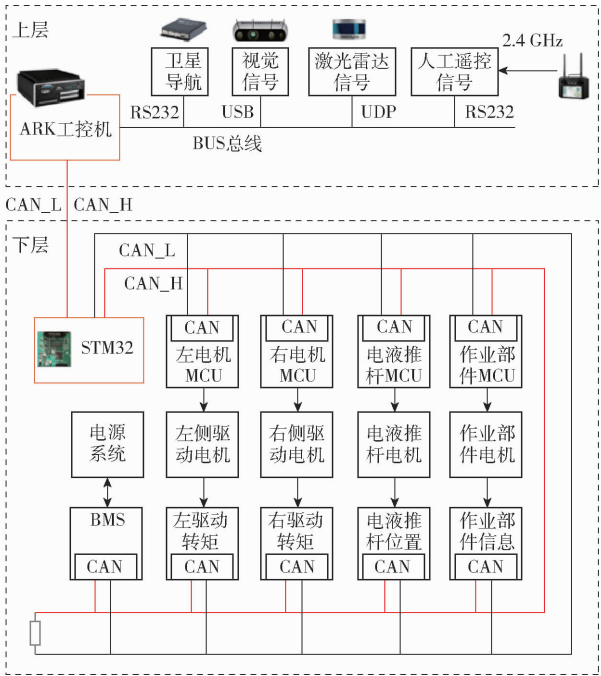


图 2 控制系统结构图

Fig. 2 Control system architecture diagram

控制策略上,重点开发基于模糊 PID 的驱动电机同步控制算法,以保障直线行驶稳定性,以及针对坡道、湿滑路面的自适应转矩分配策略,提升通过性。

3 多目标优化

本研究针对一款分布式电驱动履带式多功能作业平台,以爬坡能力、续航时间、制造成本为目标,开

展多目标优化设计。通过多目标优化算法,寻求平台各性能指标之间的最佳平衡,提高平台综合性能。

3.1 优化模型与方法

将上述问题表述为标准的数学优化模型。由于目标函数和约束条件可能为非线性且变量间存在耦合,选用适合多目标、非线性的优化算法,如带精英策略的快速非支配排序遗传算法(NSGA - II)。通过建立平台的动力学、能耗和成本分析模型,计算各目标函数值。

3.1.1 设计变量

选取 3 个关键设计变量进行优化,即

$$X = (P_m, E_b, i) \tag{11}$$

式中 E_b ——电池总容量, kW·h

3.1.2 目标函数数学模型

(1) 爬坡性能目标函数

爬坡受力分析如图 3 所示,为使爬坡角度最大化,平台爬坡时,需要克服滚动摩擦阻力和沿坡面向下的重力分力,总阻力 F_R 为

$$F_R = m_t g \sin \alpha_{\max} + f m_t g \cos \alpha_{\max} \tag{12}$$

式中 $\alpha_{\max}$ ——最大爬坡角度, (°)

m_t ——平台总质量, kg

f ——履带滚动阻力系数, 取 0.08

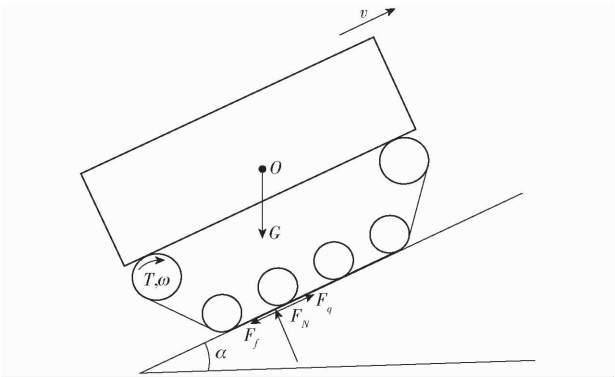


图 3 电动平台爬坡受力分析

Fig. 3 Force analysis of electric platform climbing slopes

平台驱动力 F_q 是土壤对履带的水平反作用力。驱动电机通过减速机传到驱动轮上的驱动扭矩 T 的大小,表明了平台能提供驱动能力的大小,同时驱动力 F_q 又受土壤条件的限制,不能无限增加,因为当土壤反作用力即驱动力 F_q 增加到一定程度时,土壤会被破坏,此时驱动轮将会严重打滑,驱动力 F_q 就不能再增加。当达到最大爬坡角度时,驱动力与阻力相等,即

$$F_{q\max} = \min \left\{ 9\,550 \frac{P_m i \eta_q}{n r_q}, \mu m_t g \cos \alpha_{\max} \right\} \tag{13}$$

式中 η_q ——驱动效率, 取 0.85

r_q ——驱动轮半径, m

$F_{q\max}$ ——平台最大驱动力, N

μ ——附着系数

(2) 续航性能目标函数

多功能作业平台耗能主要来自行驶和外接装置的动力输出,续航时间计算公式为

$$T_{\text{end}} = \frac{E_b \eta_b}{P_t} \tag{14}$$

式中 T_{end} ——续航时间, h

η_b ——电池放电效率, 取 0.95

P_t ——系统总功率需求, kW

当运载作业时,需要克服滚动阻力 P_r 、电驱系统损耗 P_a 和风阻 P_w ,总功率计算式 P_t 为

$$P_t = P_r + P_a + P_w \tag{15}$$

作业时,平台能耗除用于行驶还要用于作业部件功耗 P_{PTO} ,总功率 P_t 为

$$P_t = P_r + P_a + P_w + P_{PTO} \tag{16}$$

(3) 成本目标函数

制造的总成本计算公式为

$$C_t = C_f + C_b + C_m \tag{17}$$

式中 C_t ——总成本

C_f ——固定成本

C_b ——电池成本

C_m ——电机成本

3.1.3 约束条件

(1) 接地比压约束

履带对地面的平均比压 p_{avg} 不得超过土壤承载能力,数学表达式为

$$p_{\text{avg}} \leq 35\,000 \text{ Pa} \tag{18}$$

(2) 滑转率约束

滑转率计算式为

$$\delta = \delta^* \ln \left(\frac{\mu_{\max}}{\mu_{\max} - \mu} \right) \tag{19}$$

式中 δ^* ——特征滑转率, 取 0.1

$\mu_{\max}$ ——最大附着系数, 取 0.6

最大允许滑转率为 0.15, 约束函数为

$$\delta \leq 0.15 \tag{20}$$

(3) 功率匹配约束

系统最大功率需求不得超过电池 3C 放电能力, 约束函数为

$$P_t \leq 3 E_b \tag{21}$$

(4) 最小爬坡约束

平台必须满足最小爬坡角度要求

$$\alpha_{\max} \geq 15^\circ \tag{22}$$

(5) 质心纵向约束

质心与前后轴距离不得过小,防止前倾或后仰,质心坐标位置如图 4 所示。质心纵坐标 L_{cg} 满足

$$0.3 \text{ m} \leq L_{cg} \leq 1 \text{ m} \tag{23}$$

当多功能作业平台挂接割草机等作业部件时,

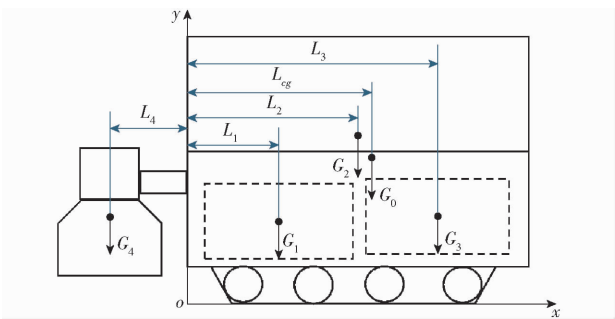


图 4 平台质心坐标

Fig. 4 Platform center longitudinal coordinate

质心纵坐标 L_{cg1} 为

$$L_{cg1} = \frac{m_mgL_1 + m_cgL_2 + m_bgL_3 + m_lgL_4}{m_c + m_m + m_b + m_l} \tag{24}$$

当多功能作业平台上安装运输机构等部件时，质心纵坐标 L_{cg2} 为

$$L_{cg2} = \frac{m_mgL_1 + (m_l + m_c)gL_2 + m_bgL_3}{m_c + m_m + m_b + m_l} \tag{25}$$

- 式中
- m_m ——电机质量, kg
 - m_c ——底盘质量, kg
 - m_l ——作业部件质量, kg
 - m_b ——电池质量, kg
 - L_1 ——电机质心纵向距离, 取 0.40 m
 - L_2 ——平台质心纵向距离, 取 0.65 m
 - L_3 ——电池质心纵向距离, 取 0.90 m
 - L_4 ——前置作业部件质心纵向距离, 取 -0.30 m

(6) 速度约束
速度条件为

$$v_{\max} = \frac{n_{\max} \times 2\pi r_q (1 - \delta) \times 60}{1\,000i} \geq 5 \text{ km/h} \tag{26}$$

式中 $n_{\max}$ ——电机最大转速, 取 4 000 r/min

3.1.4 优化方法

NSGA-II 通过快速非支配排序、精英保留策略和拥挤度比较算子三大核心组件，巧妙地平衡了多目标优化中的收敛性和多样性，提高了优化效率。NSGA-II 算法的应用可以通过 Matlab 的 gamultiobj 函数实现。算法采用 TOPSIS 方法选择折衷解，参数设置如表 2 所示。

表 2 算法参数设置

Tab. 2 Algorithm parameter settings

参数	设定值	说明
种群大小	200	平衡计算效率与多样性
最大迭代数	500	确保收敛性
交叉概率	0.9	保持优良基因
变异概率	0.1	引入多样性
Pareto 比例	0.35	精英保留比例

3.2 优化结果与分析

通过算法迭代求解，得到一组 Pareto 最优解集，如表 3 所示。每个解代表一个在多个目标间折衷的可行设计方案。优化过程证实，通过系统性的参数匹配，平台综合性能相比初始经验设计有显著提升。

表 3 Pareto 最优解集

Tab. 3 Pareto optimal solution set

项目	参数	最大爬坡解	最长续航解	最低成本解	折衷解	初始设计
设计变量	电机功率/kW	3.0	2.3	2.2	3.0	3.0
	电池能量/(kW·h ⁻¹)	9.7	16.0	8.0	11.8	12.9
	传动比	37	39	37	37	30
性能指标	最大爬坡度/(°)	21.2	15.2	15.2	21.0	15.9
	续航时间/h	5.2	9.0	4.6	6.3	6.8
	生产成本/元	22 175	26 630	20 196	23 839	24 720

三维 Pareto 前沿图如图 5 所示，基于 NSGA-II 算法优化后的电动多功能作业平台最大爬坡角度提升了 32.1%，续航时间降低了 7.4%，生产成本降低了 3.6%。

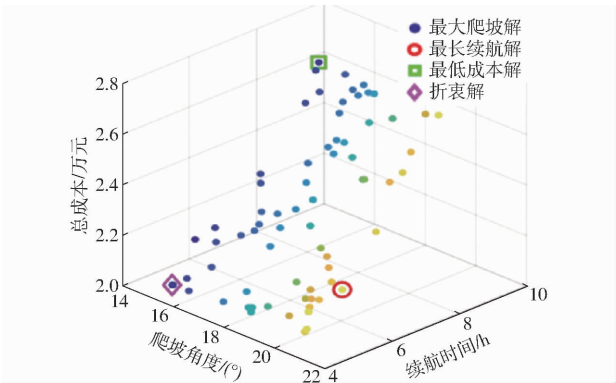


图 5 三维 Pareto 前沿图

Fig. 5 Three-dimensional Pareto front graph

从成本构成看，电池成本占比较大，后期可以考虑电池租赁等方法降低购置成本，因此在设计中预留了快换接口。

3.3 性能对比图

将目标函数归一化，生成性能对比图，如图 6 所示。从雷达图上看，采用 TOPSIS 方法取得的折衷解能够较好地平衡爬坡角度、续航时间和制造成本的关系。

4 性能试验

4.1 直线行驶性能试验

行驶直线性是指动力底盘保持直线行驶的性能，采用巡航模式进行行驶直线性能测试。在测试场地上设置一条醒目的长距离基准直线，农机沿该基准线行驶 100 m，测量并计算行驶轨迹的横向偏差，

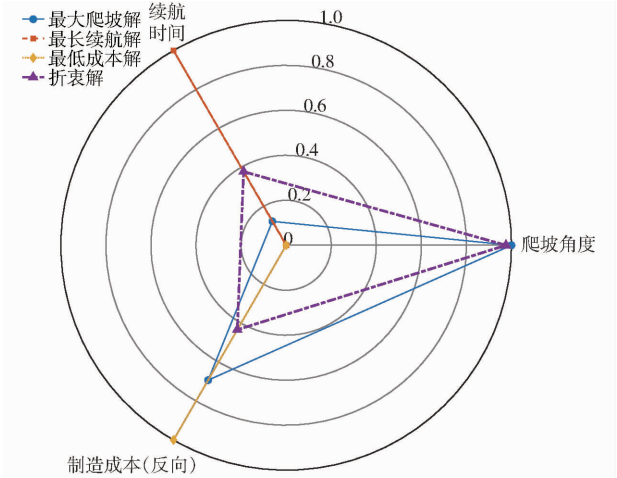


图 6 代表性解雷达图

Fig. 6 Representative solution radar chart

如图 7 所示。多功能作业平台行驶速度为 2 km/h, 电动多功能作业平台最大跑偏量为 1.821 m, 平均跑偏量为 1.453 m。



图 7 直线行驶试验

Fig. 7 Straight-line driving test

4.2 转向性能试验

电动多功能作业平台行驶速度为 2 km/h, 试验地面坡度小于 3°, 开展原地转向试验, 如图 8 所示。多功能作业平台原地转向平均转向圆半径为 656 mm 转向性能良好, 符合设施园艺作业空间狭小要求。



图 8 原地转向试验

Fig. 8 Steering test in place

4.3 爬坡性能试验

20% 坡和 30% 坡是测试农业机械爬坡性能、稳定性及牵引力的标准化坡道, 这里的 20% 与 30% 指的是垂直升高高度与水平前进距离的百分比。在江苏省盐城市的悦达智能农业装备有限公司拖拉机试验场开展爬坡性能试验, 如图 9 所示, 参照 GB/T

3871.1—2006《农业拖拉机 试验规程 第 1 部分: 通用要求》要求, 在 20% 坡(约 11.3°)和 30% 坡(约 16.7°)上开展爬坡测试、驻坡制动和坡道转向试验, 试验结果如下: 作业平台能顺利完成 30% 坡的爬坡测试; 驻坡制动 5 min 时, 没有出现移动迹象; 坡道转向试验时未出现侧向滑移或翘起, 转向性能良好。试验结果表明, 多功能作业平台爬坡性能良好。



图 9 爬坡试验

Fig. 9 Hill-climbing test

4.4 割草试验

在江苏省盐城市果园开展割草作业性能试验, 如图 10 所示, 作业速度为 1 m/s, 割茬高度为 50 mm, 设定 2 000 r/min 和 2 500 r/min 两种刀辊转速, 满电开始割草作业, 电量降至 20% 时停止作业, 测定作业效率、留茬高度、漏割率和续航时间。在试验区域按照五点采样法取样, 选取 1 m² 的空间测量割茬高度, 根据测定的数据计算平均割茬高度和漏割率。试验结果如表 4 所示。



图 10 割草试验

Fig. 10 Grass cutting experiment

表 4 割草试验结果

Tab. 4 Grass cutting test results

刀辊转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	作业效率/ ($\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	留茬高度/ mm	漏割率/ %	续航时间/ h
2 000	0.324	51	6.52	5.8
2 500	0.351	52	5.41	5.2

试验结果表明, 割草作业时续航时间大于 5 h, 作业效率、留茬高度和漏割率均满足预定目标。

5 结论

(1) 本文针对设施园艺狭小空间作业的特殊需求, 系统性地完成了一款电动多功能作业平台的创新设计。平台以分布式电驱履带底盘为基础, 集成

了割草、喷药、运输三大功能模块,并提出了整机控制架构。

(2)通过相关的运动学与动力学分析,建立了以最大爬坡角度、续航时间和制造成本为优化目标,以接地比压、滑转率、功率、最小爬坡角、质心纵向位置和行驶速度为约束条件的多目标优化模型,采用 NSGA-Ⅱ 优化算法对电池容量、电机功率和减速比进行了多目标优化,优化后电动多功能作业平台最大爬坡角度提升了 32.1%,续航时间降低了 7.4%,

生产成本降低了 3.6%。

(3)对样机进行直线行驶、最小转弯半径、割草性能等基本性能试验。试验结果表明,所设计的多功能作业平台百米直线行驶平均跑偏量为 1.453 m,原地转弯半径为 656 mm,能够通过 20% 坡(约 11.3°)和 30% 坡(约 16.7°)爬坡测试、驻坡制动和坡道转向试验,满足设施园艺行间地头良好的通过性要求;当割草机转速为 2 000 r/min 时,留茬高度、漏割率等作业指标满足作业需求,续航时间为 5.8 h。

参 考 文 献

[1] 苏晓杨,李银坤,张英男,等. 设施园艺生命周期碳足迹核算与减排技术研究进展[J]. 蔬菜, 2026(1): 1-10.
Su Xiaoyang, Li Yinkun, Zhang Yingnan, et al. Research progress on carbon footprint accounting and emission reduction technologies throughout the life cycle of protected horticulture[J]. Vegetables, 2026(1): 1-10. (in Chinese)

[2] Wu G, Yang Q, Zhang Y, et al. Energy and optical analysis of photovoltaic thermal integrated with rotary linear curved Fresnel lens inside a Chinese solar greenhouse[J]. Energy, 2020, 197: 117215.

[3] 孙景彬,刘志杰,杨福增,等. 丘陵山地农业装备与坡地作业关键技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 1-18.
Sun Jingbin, Liu Zhijie, Yang Fuzeng, et al. Research review of agricultural equipment and slope operation key technologies in hilly and mountains region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 1-18. (in Chinese)

[4] Bai Y, Zhang B, Xu N, et al. Vision-based navigation and guidance for agricultural autonomous vehicles and robots: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 205: 107584.

[5] 秦喜田,刘学峰,任冬梅,等. 我国果园生产机械化现状及其发展趋势[J]. 农业装备与车辆工程, 2019, 57(增刊 1): 35-38.
Qin Xitian, Liu Xuefeng, Ren Dongmei, et al. Current situation and development prospect of orchard mechanization in China[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2019, 57(S1): 35-38. (in Chinese)

[6] Wang Y, Zhou J, Zheng Y, et al. VR map construction for orchard robot teleoperation based on dual-source positioning and sparse point cloud segmentation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 224: 109187.

[7] Sun J, Meng C, Zhang Y, et al. Design and physical model experiment of an attitude adjustment device for a crawler tractor in hilly and mountainous regions[J]. Information Processing in Agriculture, 2020, 7(3): 466-478.

[8] 杨涛,吴柏强,李晓晓,等. 丘陵地形果园多功能电动作业平台设计与性能研究[J]. 湖北农业科学, 2023, 62(9): 158-164,169.
Yang Tao, Wu Baiqiang, Li Xiaoxiao, et al. Design and performance study of a multifunctional electric operation platform for orchards in hilly terrain[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2023, 62(9): 158-164,169. (in Chinese)

[9] 缪友谊,陈小兵,朱继平,等. 果园作业平台研究进展分析[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(6): 41-49.
Miao Youyi, Chen Xiaobing, Zhu Jiping, et al. Research progress of orchard work platform[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(6): 41-49. (in Chinese)

[10] 张亚,刘继展,詹国祥,等. 智能型果园多功能管理机的设计与田间试验[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(3): 434-438.
Zhang Ya, Liu Jizhan, Zhan Guoxiang, et al. Design and field test of intelligent orchard multi-functional management machine[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(3): 434-438. (in Chinese)

[11] 刘孟楠. 电动拖拉机设计理论及控制策略研究[D]. 西安:西安理工大学, 2020.
Liu Mengnan. Study on design theory and control strategy of electric tractor[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020. (in Chinese)

[12] Ren X, Huang B, Yin H. A review of the large-scale application of autonomous mobility of agricultural platform[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 206: 107628.

[13] 刘浩鲁,沈成,曹光乔,等. 轻简型稻麦收获机电动智能底盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(12): 78-86.
Liu Haolu, Shen Cheng, Cao Guangqiao, et al. Design and experiment of light and simple rice-wheat harvesters' electric intelligent chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 78-86. (in Chinese)

[14] 欧阳安,温昌凯,樊晨龙,等. 农业新能源动力装备研究现状与发展建议[J]. 农业机械学报, 2025, 56(12): 41-58.
Ouyang An, Wen Changkai, Fan Chenlong, et al. Research status and development suggestions of new energy power equipment for agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 41-58. (in Chinese)

- [15] 温昌凯, 赵子豪, 谢斌, 等. 混合动力拖拉机关键技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2025, 56(12): 1–23.
Wen Changkai, Zhao Zihao, Xie Bin, et al. Review of key technologies in hybrid tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 1–23. (in Chinese)
- [16] 赵思夏, 李贤哲, 闫祥海, 等. 拖拉机新型动力传动系统关键技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2025, 56(12): 24–40.
Zhao Sixia, Li Xianzhe, Yan Xianghai, et al. Review of research on key technologies for new power transmission systems in tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 24–40. (in Chinese)
- [17] 刘浩鲁, 沈成, 胡良龙, 等. 电动农业装备研究进展与发展趋势[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23): 39–51.
Liu Haolu, Shen Cheng, Hu Lianglong, et al. Research progress and development trend of electric agricultural equipments [J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(23): 39–51. (in Chinese)
- [18] 赵子豪, 谢斌, 温昌凯, 等. 基于牵引作业负载匹配的四电机双耦合电动拖拉机多驱动模式节能控制研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(12): 87–98.
Zhao Zihao, Xie Bin, Wen Changkai, et al. Adaptive energy-saving control for four-motor dual-coupled drive electric tractors in load traction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 87–98. (in Chinese)
- [19] 孙晨阳, 周俊, 赖国梁. 基于 ASTUKF 的分布式农业车辆路面参数辨识方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 401–414.
Sun Chenyang, Zhou Jun, Lai Guoliang. Road parameters identification method for distributed agricultural vehicle based on ASTUKF[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 401–414. (in Chinese)
- [20] 王宝超, 乔明睿, 初香港, 等. 增程式电动履带拖拉机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 431–439.
Wang Baochao, Qiao Mingrui, Chu Xianggang, et al. Design and experiment on extended-range electric caterpillar tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 431–439. (in Chinese)
- [21] 郭惠萍, 王霆伟, 谢广杰, 等. 温室双电机分布式驱动履带拖拉机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 780–788.
Guo Huiping, Wang Tingwei, Xie Guangjie, et al. Design and test of greenhouse dual-motor distributed drive crawler tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 780–788. (in Chinese)
- [22] Zhang S, Ren W, Xie B, et al. A combined control method of traction and ballast for an electric tractor in ploughing based on load transfer[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 207: 107750.
- [23] 褚阳阳, 汪冰清, 薛金林, 等. 轮式果园多功能自主导航作业平台设计[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(2): 180–186.
Chu Yangyang, Wang Bingqing, Xue Jinlin, et al. Design of a wheeled multi-function autonomous operation platform in orchard[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(2): 180–186. (in Chinese)
- [24] 王林泽, 李庆敏, 周坤雷, 等. 电驱无人农用动力装备设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(12): 110–120.
Wang Linze, Li Qingmin, Zhou Kunlei, et al. Design and experiment of electric unmanned agricultural power equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 110–120. (in Chinese)
- [25] 杨福增, 孙景彬, 李亚男, 等. 郁闭果园图传遥控式割草机的设计与性能试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(1): 281–293.
Yang Fuzeng, Sun Jingbin, Li Yanan, et al. Design and performance test of image transmission remote control mower in closed orchard[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(1): 281–293. (in Chinese)
- [26] Xu W, Zhu Y, Xiao M, et al. A multi-agent-based cooperative optimization control method for the motor energy consumption and tracking accuracy of an unmanned electric tractor[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025, 159: 111665.
- [27] Chen F, Ding J, Luo Z, et al. A novel robust model predictive controller for improving the steering stability of electric drive mobile platform considering the effect of both yaw motion and rototiller lifting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 230: 109846.
- [28] 李亚男. 小型遥控郁闭果园割草机的设计与试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
Li Yanan. Design and experimental of small remote control closed orchard mower[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022. (in Chinese)
- [29] 鲍秀兰, 严煜, 毛金城, 等. 果园割草机器人甩刀设计与分析[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(6): 136–143.
Bao Xiulan, Yan Yu, Mao Jincheng, et al. Design and analyses of swinging blade for orchard mowing robot[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(6): 136–143. (in Chinese)
- [30] 马攀宇. 山地果园仿形割草机的设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
Ma Panyu. Design and test of mountain orchard profile mower[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019. (in Chinese)