

喷水施药一体化农用智能小车的设计

王宇轩, 南欣然, 占向辉*

珠海科技学院智能制造与航空学院, 广东 珠海

收稿日期: 2025年7月21日; 录用日期: 2025年8月13日; 发布日期: 2025年8月22日

摘要

随着农业装备现代化的发展, 效率较低的人工作业方式已不适用于大规模生产的需要。针对上述现象, 设计了一款喷水施药一体化农用智能小车。首先设计了智能农用小车的整体结构, 采用减震弹簧和直流电机结合实现在崎岖土地的正常行走。同时, 基于离心泵抽水技术设计了涡轮增压喷枪, 可以自动调节喷洒范围, 实现远距离喷射。其次, 基于连杆结构和丝杆传动与升降机结合设计了可自主折叠、抬升的农药喷洒机构, 可增大农药喷洒范围, 提高施药效率。最后通过传感器等传感元件收集数据, 结合PID控制算法和32 ARM单片机技术, 实现小车自动驾驶, 提高了农作物浇灌与施药的灵活性和便利性。喷水施药一体化农用智能小车作为一种实现自主规划路线、完成喷水、施药工作的农用小车, 具有良好的应用前景和广泛的市场需求。

关键词

喷水施药一体化, 农用小车, 机械结构

Design of an Integrated Spraying and Medication Agricultural Smart Cart

Yuxuan Wang, Xinran Nan, Xianghui Zhan*

School of Intelligent Manufacturing and Aviation, Zhuhai College of Science and Technology, Zhuhai Guangdong

Received: Jul. 21st, 2025; accepted: Aug. 13th, 2025; published: Aug. 22nd, 2025

Abstract

With the development of agricultural equipment modernization, less efficient human work methods are no longer suitable for the needs of mass production. In response to the above phenomenon,

*通讯作者。

文章引用: 王宇轩, 南欣然, 占向辉. 喷水施药一体化农用智能小车的设计[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(4): 465-475.
DOI: 10.12677/met.2025.144046

an integrated agricultural intelligent trolley with water spray and pesticide application is designed. Firstly, the overall structure of the intelligent agricultural trolley is designed, and the shock absorption spring and DC motor are used to achieve normal walking on rough land. At the same time, a turbocharged spray gun is designed based on centrifugal pumping technology, which can automatically adjust the spraying range to achieve long-distance spraying. Secondly, based on the connecting rod structure and the screw drive combined with the lift, the pesticide spraying mechanism that can be folded and lifted autonomously is designed, which can increase the range of pesticide spraying and improve the efficiency of pesticide application. Finally, the data is collected through sensors and other sensing components, combined with PID control algorithm and 32 ARM microcontroller technology, to realize the autonomous driving of the trolley, which improves the flexibility and convenience of crop watering and pesticide application. As an agricultural trolley that realizes independent planning of routes, completes water spraying and pesticide application, it has good application prospects and wide market demand.

Keywords

Integration of Water Spray and Pesticide Application, Agricultural Trolley, Mechanical Structure

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着科学技术的飞速发展,农业生产逐渐趋向机械化、智能化,越来越多的智能农业设备走进人们的生活,减轻人工负担的同时,提高了劳动效率[1]。多功能农业小车控制系统的研制与开发已具备了坚实的基础和良好的发展前景,因此智能农业小车具有很高的可行性[2]。目前国内的农业小车许多方面有待完善,例如灌溉时喷枪无法自主转向需要人工调节以及无人机施药使用成本高和其操作复杂等问题,非常有研制的必要性。该研究利用三维数字化模型的建造,结合控制编程,重点研究了农用智能小车整体结构、尺寸分析、控制逻辑流程等问题,形成了可行性方案。

2. 农用智能小车方案设计

喷水施药一体化农用智能小车基本功能要求:灌溉作业要求喷枪的喷射距离可调节,以适应不同大小的田地,同时人力调整喷枪角度和高度耗时费力,要求喷枪可自主调整旋转角度和喷射高度。在不同尺寸的田中进行农药喷洒作业时,需要一种可改变喷洒范围的施药机构,同时为了防止农药飘移,在为不同高度植物进行施药时,需要让喷药口尽量贴合植物,这要求农药喷洒机构可以自主升降调节高度。由于田间环境复杂多变,需要实时监测当前环境,因此在小车上加装了微型监测站,用于对当前环境信息进行收集,同时根据收集的信息及时改变喷枪系统和施药机构正在进行的工作。

在进行农用智能小车的设计时,充分考虑农户需求,简化操作步骤,多数操作由小车自主分析完成,降低其使用门槛。通过交互式 CAD/CAM 系统(SolidWorks)建立了三维模型,如图 1。

小车搭载喷枪进行浇水灌溉作业,升降支架可调节喷枪高度,旋转塔台可以调整喷洒角度,实现自主转向,提高了喷枪作业的灵活性。农药喷洒机构具有升降折叠功能,根据农作物不同调节高度,防止农药飘移,同时可进行大范围打药。微型监测站可实时收集工作环境信息,经由中心处理器计算后对正在作业的喷枪和打药机进行调整,以更好地适应环境,提高工作效率。



Figure 1. Overall structure diagram of integrated spraying and medication agricultural smart vehicle
图 1. 喷水施药一体化农用智能小车总体结构图

3. 农用智能小车机构设计

3.1. 喷枪系统设计

喷枪系统，可根据用户需求在面对不同高度作物、不同范围耕地，控制喷枪喷射高度和喷射距离。如图 2、图 3 所示，通过行星减速电机驱动皮带传动实现喷枪可绕轴 360° 旋转和上下 $-40^\circ \sim 40^\circ$ 的旋转。配合动态密封技术，在水管接头与连接法兰之间加入 O 型圈密封环实现动态密封，实现在进行旋转喷射时不会出现水管缠绕、打结等问题。

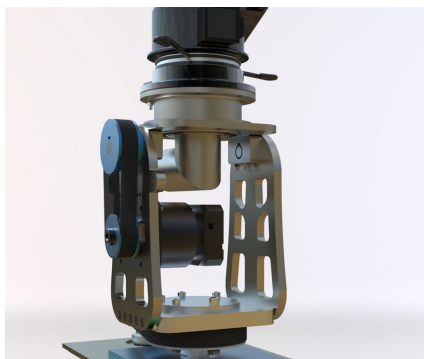


Figure 2. Control of the upper and lower belt transmission mechanism
图 2. 控制上下的皮带传动机构

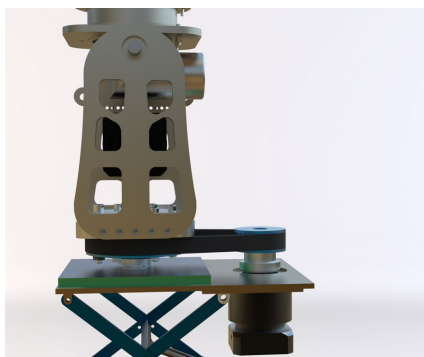


Figure 3. The belt drive mechanism that controls the shaft winding
图 3. 控制绕轴的皮带传动机构

升降支架可将喷枪送至不同高度，通过调节电机供电频率调节电机转速，同时在旋转轴上安装滑电环，避免电机在喷枪旋转过程中出现电线缠绕或断裂问题，以此控制涡轮离心泵从蓄水箱的抽水速度，改变喷枪内部水压达到调整喷射距离的目的，同时喷管下方配有万向节分压管，若喷管内压力过高可通过分压管紧急分走一部分水流，降低喷管内压强防止管内压力过大造成管壁破裂，万向节可使分压管全方位移动，保证水流喷到旋转涡轮叶片上，通过涡轮叶片将水散射至小范围内的作物上。喷枪内部结构如图4所示。

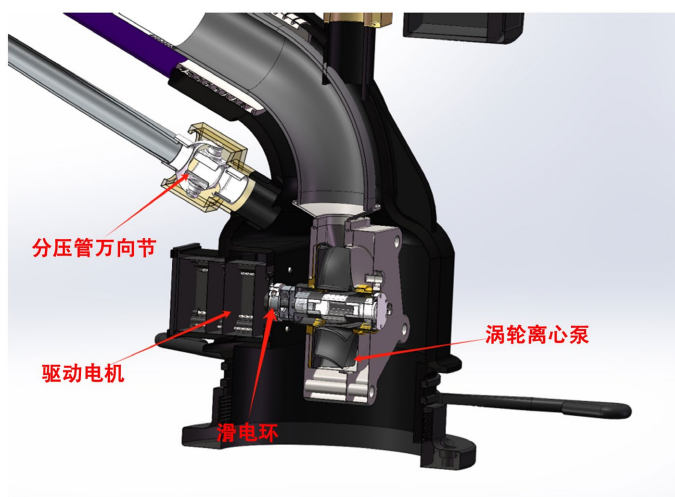


Figure 4. Schematic diagram of the internal structure of the turbocharged spray gun

图4. 涡轮增压喷枪内部结构示意图

3.2. 农药喷洒机构设计

农药喷洒机构可自主升降、折叠喷洒装置，根据工作环境风速调节喷洒机高度防止农药漂移[3]。如图5，丝杆螺母与内连杆通过螺栓与螺母连接，电机带动丝杆旋转，丝杆螺母沿蓝色箭头方向向前运动的同时将内连杆推起，内连杆沿橙色箭头方向施力撑起外连杆；同理，当丝杆螺母沿蓝色箭头的反方向运动时，内连杆沿橙色箭头的反方向施力将外连杆收回。活塞在外连杆撑开或收回时起缓冲作用。如图6，伸展连杆内部的输药管将农药输送至高速离心雾化喷头[4]，实施农药喷洒工作。

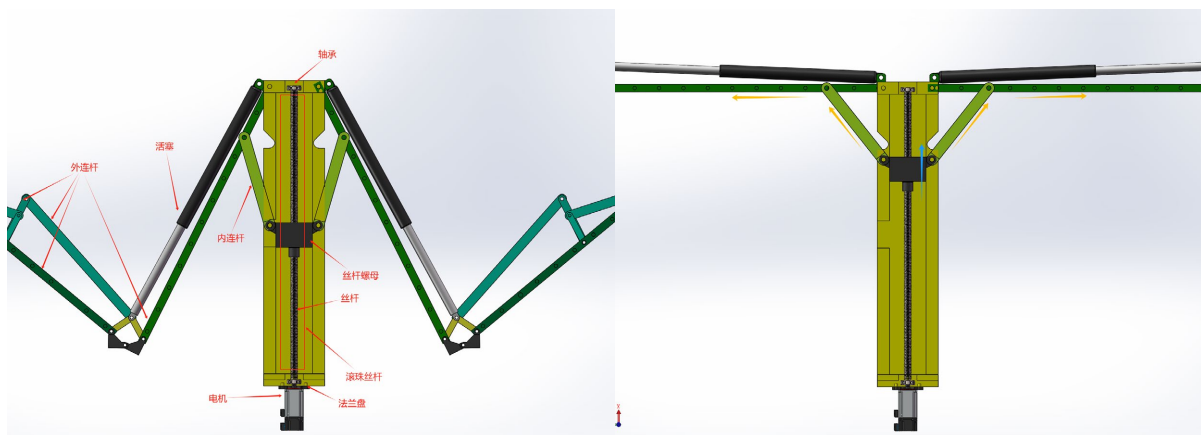


Figure 5. Schematic diagram of the folding device

图5. 折叠装置展开示意图

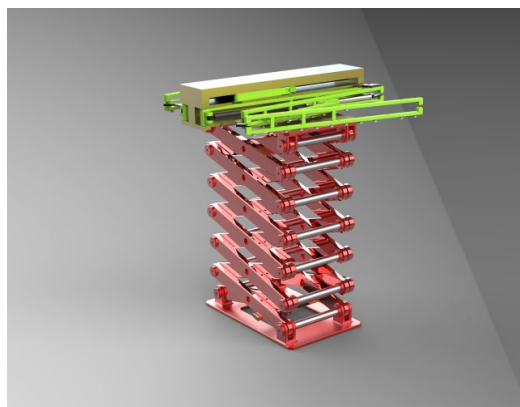


Figure 6. Model of pesticide spraying mechanism
图 6. 农药喷洒机构模型

施药时喷洒机构若距离作物太高会导致多余农药外泄造成环境污染，因此，通过给小车加装风速传感器和超声波传感器来控制小车施药机构的高低，在风速大时升降机下降，使施药机构贴近作物，起到防止农药飘移的作用。

微型监测站配备超声波风速仪收集当前工作的实时风速，在喷杆下方安装的超声波传感器，通过垂直朝向作物，起到实时测量喷头与作物冠层的距离的作用，自动适应地形起伏和作物高低的变化。通过 PLC(可编程逻辑控制器)控制液压泵，将液压油压入液压缸，推动活塞运动，从而控制喷洒机上升或下降 [5]。表 1 为风险等级参考表，在使用时，操作员根据当前作物手动设定一个无风状态下的最佳喷洒高度，例如“高于作物顶部 50 厘米”，所有自动调整都将以此为基准。

Table 1. Risk level and height adjustment table

表 1. 风险等级与高度调整表

风险等级	风速范围(m/s)	高度调整策略	执行方式
理想窗口	0~2.5 m/s	无需调整	基准高度(高于作物 50 cm)
轻度	2.5~4.5 m/s	向下调整 20 cm	基准高度-20 cm
中度	4.5~6.0 m/s	向下调整 40 cm	基准高度-40 cm
高度	>6.0 m/s	发出警报	提示操作员停止作业

式(1)中，定义 H_{base} 为操作员设定的基准高度、 V_{current} 为当前平均风速、 $H_{\text{adj_range}}$ 为总可调高度，通过超声波风速仪收集起始风速 V_{min} 和最大调整量风速 V_{max} ，可求解目标高度 H_{target} ，目标高度为施药喷头相对于作物冠层的距离。

$$H_{\text{target}} = H_{\text{base}} - \left(\frac{V_{\text{current}} - V_{\text{min}}}{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}} \right) \times H_{\text{adj_range}} \quad (1)$$

超声波风速仪将过去 5~10 秒收集的平均风速发送给控制器作为决策依据，例如：当平均风速上升超过 4.5 m/s 时，执行下降指令。但只有当风速下降并持续低于 4.0 m/s 后，才执行回升指令，中间的 0.5 m/s 就是稳定“死区”。使用该决策这可以有效过滤掉阵风的干扰，从而提高决策的准确性。

3.3. 驱动装置设计

农用机车行驶的道路环境大多十分恶劣，这不仅对机车的使用寿命具有极大影响，而且对使用机车

的人员安全也存在很大威胁[6]。驱动装置如图7所示,将直流电机安装在轴承座上,通过联轴器和法兰与轮胎相连,组成驱动为小车提供动力。连接板将驱动和减震弹簧安装在了一起,通过合页与小车相连,形成了驱动与减震相结合的驱动装置。

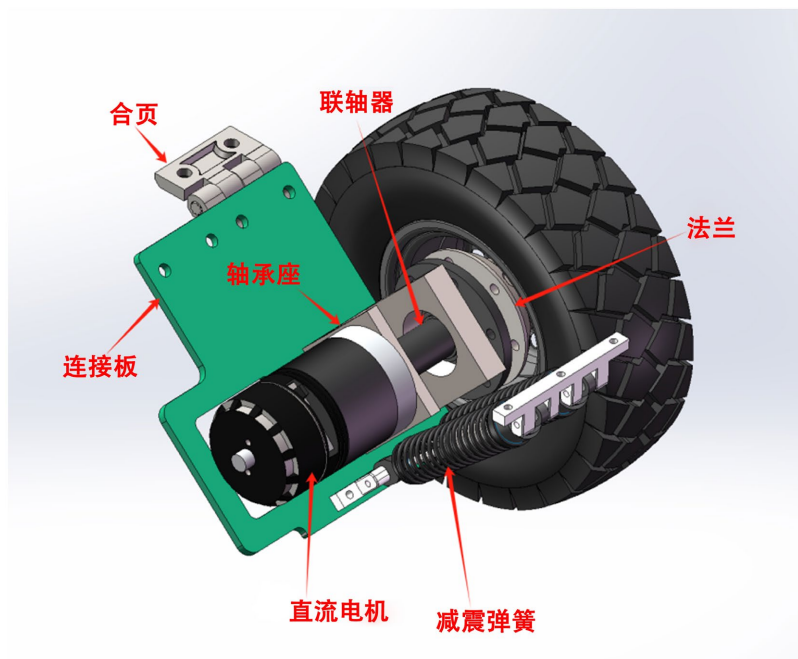


Figure 7. Drive device
图7. 驱动装置

由于小车需搭载灌溉用水及自身器械,因此对于驱动电机的选型有一定的要求。为了确保电机能够胜任田间作业的复杂工况,对车辆的性能参数进行了如下设定:车辆总质量 $m = 1$ 吨 $= 1000$ kg; 车轮半径 $r = 735$ mm $= 0.735$ m; 同时,考虑到田间作业速度不宜过快,在最高设计速度取值时,取 $v = 15$ km/h ≈ 4.17 m/s¹; 期望加速时间 t 选用软启动以适应不平整路面,从0到最高速度用时15秒;最大爬坡度 $\theta = 15\%$ (约8.5度,应对田埂或缓坡);考虑到泥土、草地等软质路面,滚动阻力会显著大于硬化路面,在此取一个较高的滚动阻力系数² $\mu = 0.05$;将田间可能存在的泥沙作为影响因素,把效率设定稍低,取传动系统效率³ $\eta = 85\%$ 。

驱动车辆所需克服的力主要包括滚动阻力、坡度阻力和加速阻力。将计算在最苛刻工况下(满载、在泥地上加速爬坡)的总需求。式(1)中, F_{roll} 为滚动阻力,其中 $g = 9.8$ m/s², $\cos(8.5^\circ) \approx 0.989$ 。式(2)中, F_{grade} 为坡度阻力, $\sin(8.5^\circ) \approx 0.148$ 。式(3)中, F_{accel} 为加速阻力,加速度 $a = \frac{v}{t} = \frac{4.17 \text{ m/s}}{15 \text{ s}} \approx 0.278$ m/s²。式(4)中, F_{total} 为总驱动力。

$$F_{\text{roll}} = m \cdot g \cdot \mu \cdot \cos(\theta) = 1000 \text{ kg} \cdot 9.8 \text{ m/s}^2 \cdot 0.05 \cdot 0.989 \approx 484.6 \text{ N} \quad (2)$$

$$F_{\text{grade}} = m \cdot g \cdot \sin(\theta) = 1000 \text{ kg} \cdot 9.8 \text{ m/s}^2 \cdot 0.148 = 1450.4 \text{ N} \quad (3)$$

¹根据美国农业与生物工程师学会(ASABE)的相关标准和众多农用无人车(AGV)的设计实践,小型农用平台的最高速度通常设定在10~20 km/h的区间内。

²参考车辆动力学手册,选择0.05是基于对“田间软质路面”的保守判断。

³来源:工程设计经验与安全系数考量,机械传动永远存在能量损失。85%的效率是一个综合了多级传动和恶劣工况的保守估计。

$$F_{\text{accel}} = m \cdot a = 1000 \text{ kg} \cdot 0.278 \text{ m/s}^2 = 278 \text{ N} \quad (4)$$

$$F_{\text{total}} = F_{\text{roll}} + F_{\text{grade}} + F_{\text{accel}} = 484.6 + 1450.4 + 278 = 2213 \text{ N} \quad (5)$$

由(2)~(5)式求出总驱动力 $F_{\text{total}} = 2213 \text{ N}$ ，通过(6)、(7)式分别计算车轮所需扭矩和车轮转速。

$$T_{\text{wheel}} = F_{\text{total}} \cdot r = 2213 \text{ N} \cdot 0.735 \text{ m} \approx 1626.5 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6)$$

$$\text{RPM}_{\text{wheel}} = \frac{v \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{4.17 \text{ m/s} \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 0.735 \text{ m}} = 54.3 \text{ RPM} \quad (7)$$

根据式(6)、(7)求得的 T_{wheel} 和 $\text{RPM}_{\text{wheel}}$ ，计算电机所需峰值扭矩 $T_{\text{motor_peak}}$ 和电机所需转速 $\text{RPM}_{\text{motor}}$ 。田间作业车的大扭矩需求决定了必须使用大减速比的减速器，故在式(8)中使用一个 30:1 的减速比。式(9)中 $T_{\text{flat_wheel}}$ 为平地车轮扭矩，其中 $F_{\text{flat_roll}}$ 为平地行驶阻力 ($F_{\text{flat_roll}} = m \cdot g \cdot \mu = 1000 \cdot 9.8 \cdot 0.05 = 490 \text{ N}$)。式(10)中 $T_{\text{motor_rated}}$ 为电机额定扭矩。式(11)中 $\text{RPM}_{\text{motor}}$ 为电机所需转速，式(12)中 P_{rated} 为电机额定功率。

$$T_{\text{motor_peak}} = \frac{T_{\text{wheel}}}{\text{减速比} \cdot \eta} = \frac{1626.5 \text{ N} \cdot \text{m}}{30 \cdot 0.85} \approx 63.8 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (8)$$

$$T_{\text{flat_wheel}} = F_{\text{flat_roll}} \cdot r = 490 \cdot 0.735 = 360.15 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (9)$$

$$T_{\text{motor_rated}} = \frac{T_{\text{flat_wheel}}}{\text{减速比} \cdot \eta} = \frac{360.15}{30 \cdot 0.85} \approx 14.1 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (10)$$

$$\text{RPM}_{\text{motor}} = \text{RPM}_{\text{wheel}} \cdot \text{减速比} = 54.3 \text{ RPM} \cdot 30 = 1629 \text{ RPM} \quad (11)$$

$$P_{\text{rated}} = \frac{T_{\text{motor_rated}} \cdot \text{RPM}_{\text{motor}}}{9550} = \frac{14.1 (\text{N} \cdot \text{m}) \cdot 1629 \text{ RPM}}{9550} = 2.4 \text{ kW} \quad (12)$$

由(8)式、(11)式与(12)式结果可得：应选额定功率在 3 kW 左右，额定转速在 1500~2000 RPM 之间，且峰值扭矩能够达到 65 N·m 以上的直流电机系统。

Table 2. Comparison table of different types of motor scheme selection

表 2. 不同型号电机方案选型对比表

方案	额定功率	额定电压	额定转速	峰值扭矩
大扭矩有刷电机	3 kW	48V/72V DC	1500 RPM	约 70 N·m
密封式永磁同步电机	3.5 kW	72V DC	2000 RPM	约 80 N·m
低速大扭矩轮毂电机	4 kW	72V/96V DC	100~200 RPM	>200 N·m

由表 2 可知，通过列出不同型号的电机与上述数据进行对比选型，大扭矩有刷电机输出扭矩满足使用要求、额定功率在 3 kW 左右且额定转速在 1500 RPM 之间，因此最终选择大扭矩有刷电机作为小车的驱动电机。

4. 智能农用小车仿真实验

整框架作为整车的支撑部分，需要一定的承受能力和稳定性，为了保证安全系数满足使用要求，选择对整框架进行仿真。在分析整框架之前，对整框架结构进行简化，去除其他部分复杂的细节，避免分析过程中软件停止运行。

首先给整框架添加材料，整框架材料设置为合金钢，然后对整框架进行固定，整框架的固定如图 8 所示。整框架进行固定完成后在受压力面添加一个力，整框架在极限情况下受到的压力设置为 20,000 N，添加完压力对整框架进行网格化后进行分析。整框架附加压力如图 9 所示[7]。

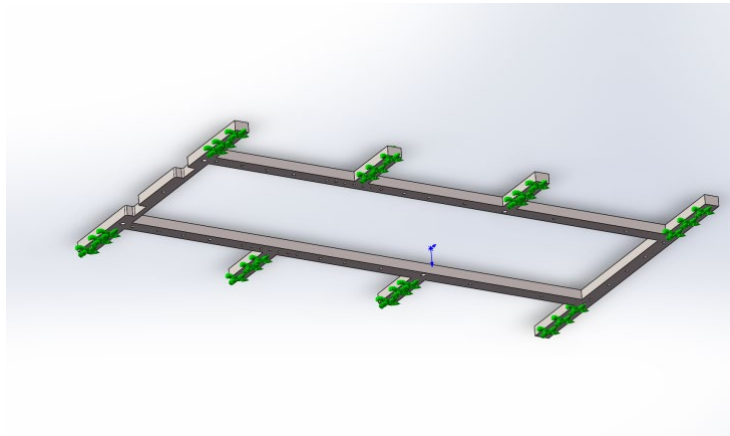


Figure 8. Fixation of the entire frame
图 8. 整框架的固定

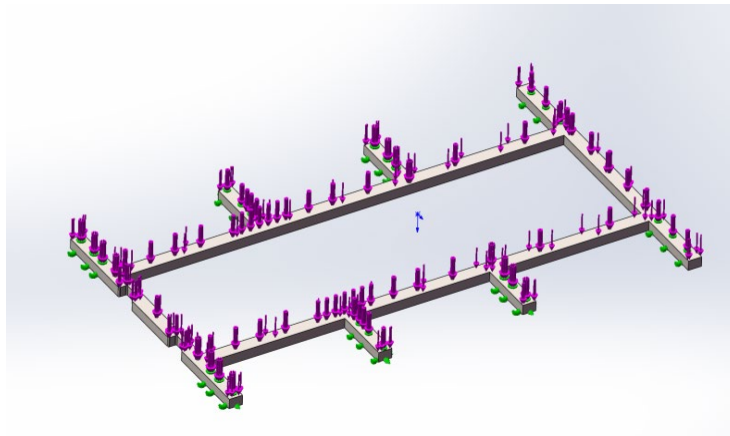


Figure 9. Apply pressure to the entire frame
图 9. 在整框架上施加压力

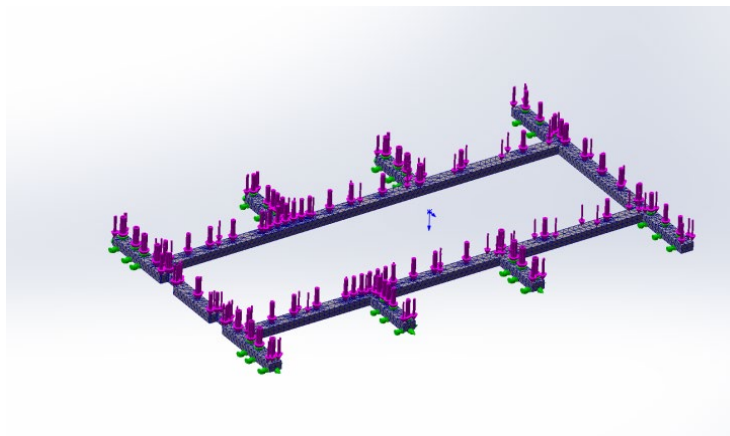


Figure 10. Whole-frame meshing
图 10. 整框架网格化

将整框架网格化如图 10 所示，网格大小 32.38 mm，对应力集中且重要的部分添加网格控制，控制网格大小为 1.6 mm。最后进行运算求解获得应力图、位移图、应变图如图 11~13 所示。

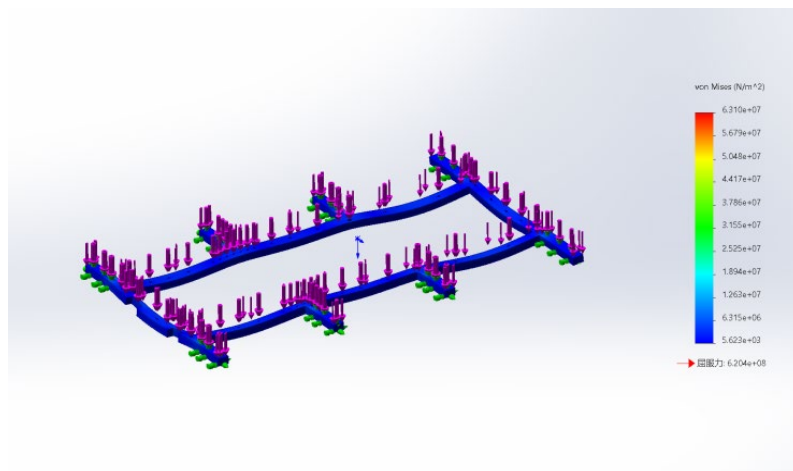


Figure 11. Stress diagram
图 11. 应力图

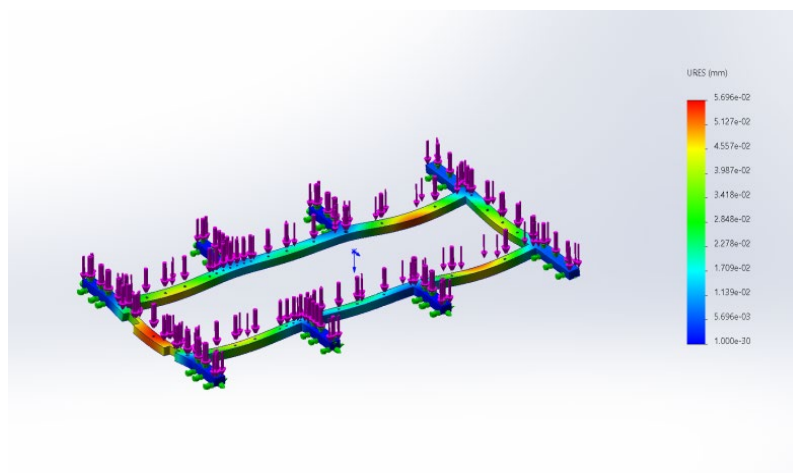


Figure 12. Displacement diagram
图 12. 位移图

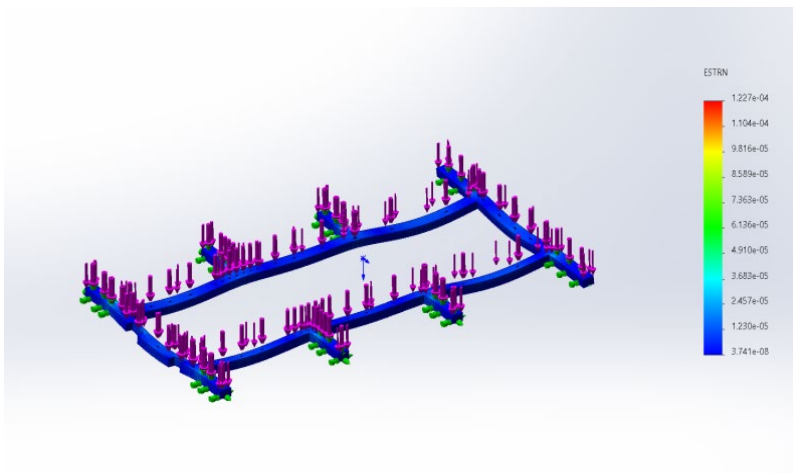


Figure 13. Strain diagram
图 13. 应变图

根据 SolidWorks 提供的材料参数可得合金钢材料的张力强度 $7.238256 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ ，抗剪模量 $7.9 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ，弹性模量 $2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$

本次分析结果如图 10，整框架最大应力为 $6.204 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ ，此应力远小于材料的抗剪模量和张力强度，屈服强度 $2.757 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 大于最大应力为 $6.31 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ 强度符合使用要求。由图 12 可得最大位移为 0.05696 mm 。

在整框架两边中间处。对安全系数进行校核如图 14 所示，通过对整框架的结构强度进行了校核，从图 14 可知，有限元分析结果得安全系数为 9.8 的时候满足要求，因此采用了合金钢材料以及参数，作为进料架的材料，同时对结构不合理的地方进行了针对性优化，最终完成零件的设计。

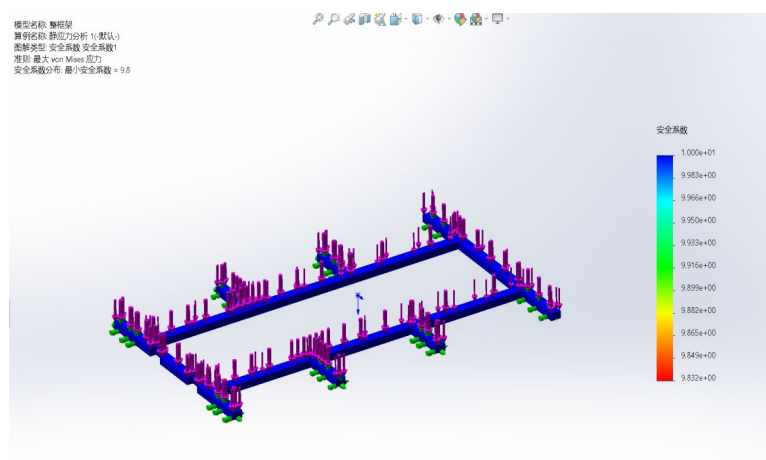


Figure 14. Safety factor diagram

图 14. 安全系数图

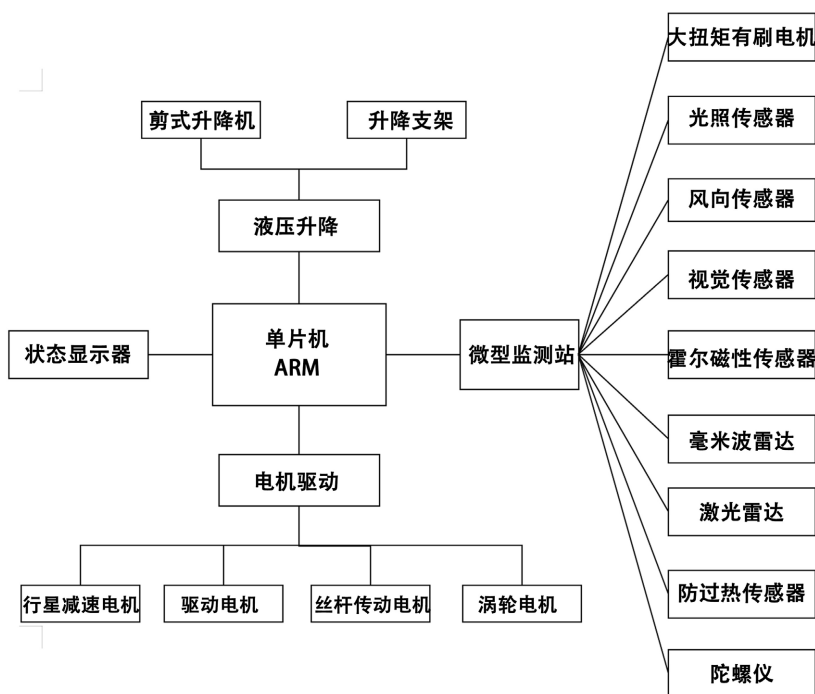


Figure 15. The drive process of the intelligent agricultural trolley

图 15. 智能农用小车驱动流程

5. 农用智能小车驱动过程

农用智能小车控制系统采用 32 ARM 单片机,以单片机为核心集成电机驱动模块、光照传感器模块、风向传感器模块以及视觉传感器模块等硬件。在各模块相应软件程序控制下,实时采集农田环境信息,驱动有关的电机动作,实现喷枪灌溉作业和农药喷洒作业。农用智能小车的驱动过程如图 15 所示。

基于该控制系统的综合功能与实现,农用智能小车不但可以识别当地的光照强度,自动调整灌溉量,而且可以 0.5 m/s 的速度行走,同时完成路径规划、避障等智能功能。

以视觉传感器、毫米波雷达、激光雷达为环境感知系统,通过智能移动整车控制单元对车辆运行状态进行信息融合、决策规划控制执行机构运转,从而实现智能移动[8]。无人驾驶系统架构如图 16 所示。

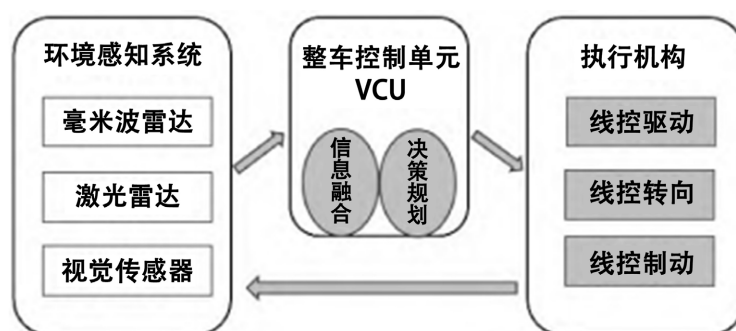


Figure 16. Driverless system architecture

图 16. 无人驾驶系统构架

6. 结论

当前越来越多的智能化农业产品进入千家万户的生活,但是农业小车领域一直缺少一款智能化的产品及应用。基于此,本文设计了喷水施药一体化农用智能小车,利用皮带传动结构解决了喷枪浇水灵活转向问题,利用折叠升降农药机搭配剪式升降机模拟无人机低空喷洒。解决了无人机使用成本高、喷药过程中农药飘移问题,高强度整框架和驱动装置提高了小车的质量和行驶能力,为多功能一体化农用智能小车市场提供了可行性方案。喷水施药一体化农用智能小车,是一个集运动控制、方向辨别、规划执行等功能的智能系统,解决了以往市面上普通的农用小车只能人工控制的问题,目前已实现各模块反馈信号的自检,并通过检测结果对小车所处工作状态进行剖析与干预,确保小车稳定运行。

参考文献

- [1] 沈露萍. 基于电子技术的智能农业机械控制系统设计[J]. 南方农机, 2024, 55(22): 59-61.
- [2] 张铁民, 李辉辉, 陈大为, 黄鹏焕, 庄晓霖. 多源传感器信息融合的农用小车路径跟踪导航系统[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 37-42.
- [3] 陈咸林, 肖洋洋, 周强, 舒俊, 熊丹, 邵添. 基于丝杆传动的高精度机械矩阵设计[J]. 机械工程师, 2022(1): 71-73.
- [4] 李彪恒, 杨莹, 陈威, 段智华, 唐云飞. 基于丝杆伸缩机构的树形晾衣架设计[J]. 机械研究与应用, 2020, 33(5): 131-132+135.
- [5] 高希功. 剪叉式液压升降机的结构设计与优化[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2014.
- [6] 樊爱琼. 基于空气弹簧的农用机车物理减震仿真研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(15): 8175-8177.
- [7] 孙蓓, 王鑫. 基于 SolidWorks 的掩护式液压支架有限元分析[J]. 现代制造技术与装备, 2025, 61(1): 31-33.
- [8] 彭丽红, 卢海鑫, 罗柱, 等. 基于物联网的小型智能移动灌溉系统研究[J]. 无线互联科技, 2023, 20(15): 19-22+26.