

多功能蔬菜筐装车装置设计与研究

刘雨涵 刘晓 张梦园 沈心蕊

山东石油化工学院 智能制造与控制工程学院, 山东东营, 257061;

摘要: 针对我国蔬菜物流末端装车环节人工劳动强度大、效率低、损耗率高的问题, 设计了一款适用于个体农户及小型物流场景的多功能蔬菜筐装车装置。该装置集成自动抓取、精准码垛、稳定举升与高效推送功能, 采用模块化设计理念, 核心机械结构包括自适应抓取机构、双剪叉举升机构、精准推送平台及可移动避震底座。通过 SolidWorks 完成三维建模与装配, 利用 SolidWorks Motion 进行运动学仿真, 并对底座支承底板、托举臂、举升机架等关键部件进行强度校核。结果表明, 装置可覆盖 280–450mm 规格蔬菜筐, 举升高度达 1.5m, 最大承载 100kg, 码垛精度 $\pm 2\text{mm}$, 满足田间复杂环境下的装车需求, 能有效提升蔬菜装车效率 30% 以上, 降低人工劳动强度, 减少蔬菜运输损耗。该研究为农产品物流自动化装备的小型化、低成本化发展提供实践参考。

关键词: 蔬菜物流; 自动装车; 机械结构设计; 运动仿真; 强度校核

DOI: 10.64216/3104-9702.25.03.038

引言

在我国农业生产体系中, 个体农户无疑是蔬菜种植的中坚力量, 他们承担着从播种到收获的各个环节。然而, 在蔬菜收获后的装车环节, 这一物流末端的关键工序, 却长期依赖于人工操作, 暴露出诸多显著的痛点。首先, 蔬菜的收获期往往较为集中, 且其保鲜期相对较短, 这就要求装车过程必须高效迅速。然而, 现实中人工装车的速度却远远不能满足这一需求, 人均日装车量不足 200 筐的低效率, 极易导致蔬菜错过最佳的销售窗口期, 进而造成不可挽回的经济损失。其次, 人工搬运满载蔬菜的筐子, 单筐重量高达 15–20 公斤, 劳动强度极大, 农户在长时间高强度作业下, 极易出现肌肉劳损等职业损伤, 严重影响其身体健康。此外, 由于手工码放缺乏统一的标准, 菜筐堆叠松散, 稳定性差, 在运输过程中极易发生倾倒、碰撞等现象, 导致蔬菜损耗率居高不下, 高达 8%–12%^[1-2]。这些问题不仅制约了蔬菜产业的健康发展, 也给农户带来了沉重的负担。

随着农业现代化进程推进, 自动化装备逐步向田间渗透, 但现有解决方案存在明显局限性: 欧美国家主流大型农业自动化装车设备体型庞大、成本高昂(单台造价超 50 万元), 无法适应个体农户分散种植、田间道路狭窄的场景^[3]; 国内部分企业推出的机械臂式装车装置, 虽实现部分自动化, 但灵活性差, 仅能适配单一规格菜筐, 且未考虑田间不平整地面对设备稳定性的影响^[4-5]。

基于此背景, 本研究精心设计了一款多功能蔬菜筐装车装置, 该装置的核心目标明确为“小型化、低成本、高适配性”。为了实现这一目标, 研究团队深入优化了机械结构及其传动方案, 旨在有效解决个体农户在装车

环节中面临的效率低下和劳动强度过大的问题。该装置采用了“电机+丝杠”的驱动方式, 不仅结构紧凑, 而且动力传输高效。此外, 装置还集成了多规格菜筐适配功能, 能够灵活应对不同尺寸的蔬菜筐; 同时具备复杂地形适应能力, 确保在各种环境下都能稳定运行; 并且设计了便捷的维护系统, 大大降低了后期维护的难度和成本。为了验证设计的可行性和可靠性, 研究团队利用三维建模技术进行了详细的虚拟构建, 并通过运动仿真和强度校核等多重手段进行了全面的性能评估。为农产品物流末端的自动化升级提供了坚实的技术支撑, 有望在农业生产与物流领域发挥重要作用。

1 装置总体设计

1.1 设计指标

结合个体农户田间作业场景需求与蔬菜筐常见规格, 确定装置核心设计指标如下:

适配性: 抓取范围覆盖 280–450mm, 兼容市场主流蔬菜筐(如 600×400mm、500×300mm 规格), 无需更换部件即可实现不同筐型切换;

承载与举升: 最大承载重量 100kg(等效 5 筐满载蔬菜), 举升高度调节范围 0.5–1.5m, 满足小型货车(车厢高度 0.8–1.2m) 装车需求;

精度与效率: 码垛定位精度 $\pm 2\text{mm}$, 举升速度 0.1–0.3m/s, 推送速度 0.4–0.6m/s, 单次装车循环时间 $\leq 30\text{s}$;

环境适应性: 底座采用避震设计, 可适应坡度 $\leq 5^\circ$ 、地面凹凸差 $\leq 30\text{mm}$ 的田间环境, 底座材质具备防腐蚀性能, 耐受潮湿泥土与农药残留;

安全性与维护性: 配备过流保护、极限位置限位开关, 关键部件(如电机、丝杠) 采用标准化接口, 拆装

时间 $\leq 15\text{min}$ 。

1.2 总体结构设计

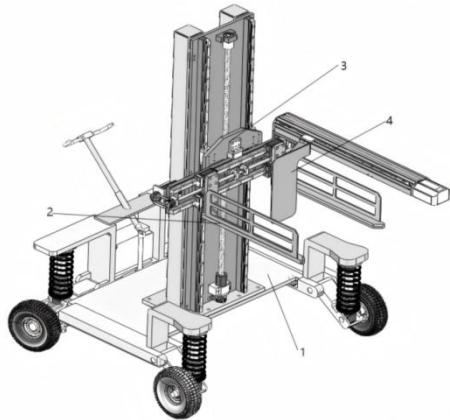
装置采用模块化设计，分为四大核心单元：可移动避震底座、自适应抓取机构、双剪叉举升机构、精准推送平台，总体结构如图 1 所示。各单元通过标准化连接件组装，既保证整体稳定性，又便于单独维护与更换。

可移动避震底座：作为装置支撑基础，采用四轮结构，后轮驱动并配备转向功能，底盘加装筒簧一体避震器，降低田间颠簸对作业精度的影响；

自适应抓取机构：安装于举升机构顶端，由双托举臂、同步传动组件与防滑橡胶垫组成，通过步进电机驱动丝杠实现托举臂同步开合，适配不同规格菜筐；

双剪叉举升机构：连接底座与抓取机构，采用电动推杆驱动剪叉臂伸缩，实现抓取机构的垂直升降，结构紧凑，收缩后整机高度 $\leq 0.6\text{m}$ ，便于运输；

精准推送平台：位于举升机构中部，由推送板、丝杠传动组件组成，将举升到位的菜筐水平推送至货车车厢，推送行程 800mm，覆盖车厢深度需求。



1. 底盘 2. 抓取机构 3. 举升机构 4. 推出机构

图 1 “菜小垛”多功能蔬菜筐装车装置总体结构图

2 核心机械结构设计

2.1 可移动避震底座设计

底座是装置稳定运行的基础，需同时满足承载、移动与避震需求。底座框架采用 Q235 钢材质，通过有限元分析优化结构布局，重点设计以下部分：

承载框架：采用矩形管焊接结构，横杆截面尺寸 $100\text{mm} \times 50\text{mm} \times 5\text{mm}$ ，纵杆尺寸 $80\text{mm} \times 40\text{mm} \times 4\text{mm}$ ，通过强度校核（见 3.1 节）确保承载 250kg（含装置自重与最大负载）时无变形；

移动系统：前轮选用直径 200mm、宽度 80mm 的橡胶轮胎，增大接地面积以避免陷土；后轮为驱动轮，配备功率 1.2kW 直流伺服电机，通过减速器实现 0.15–0.5m/s 的移动速度调节，最小转弯半径 1.5m，适应田间狭小空间；

避震机构：在车轮与框架连接处加装型号为 JB-100 的筒簧一体避震器，弹簧刚度系数 50N/mm ，阻尼系数 $10\text{N}\cdot\text{s}/\text{mm}$ ，可缓冲地面凹凸带来的冲击力，确保举升过程平稳性。

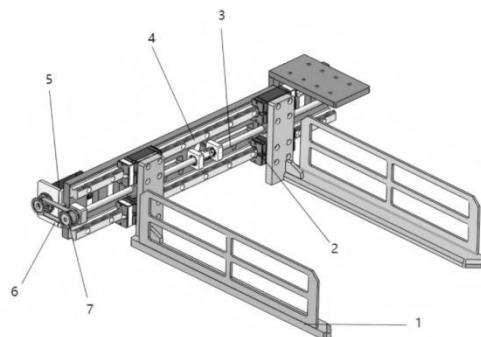
2.2 自适应抓取机构设计

抓取机构需实现“稳抓、适配、防损”功能，结构如图 2 所示，核心设计包括：

同步开合传动：采用 57 步进电机（额定扭矩 $0.8\text{N}\cdot\text{m}$ ）驱动滚珠丝杠，丝杠螺距 10mm，通过左右旋螺纹带动两侧托举臂同步靠近或远离，开合速度 0.05–0.1m/s，抓取范围 280–450mm；

托举臂优化：托举臂长度 600mm，截面尺寸 $50\text{mm} \times 30\text{mm} \times 5\text{mm}$ ，内侧根据菜筐加强筋分布开设 3mm 深的凹槽，增大接触面积；臂端覆盖邵氏硬度 60 的丁腈橡胶垫，摩擦系数 ≥ 0.4 ，防止菜筐滑动，同时避免刚性接触损伤菜筐；

限位保护：在托举臂最大开合位置安装光电传感器（型号 E3F-DS30C4），当检测到菜筐时自动停止开合，避免过度夹紧损坏蔬菜。



1. 托举臂 2. 滑块 3. 丝杆 4. 导轨 5. 驱动电机 6. 同步带 7. 同步轮

图 2 自适应抓取机构结构图

2.3 双剪叉举升机构设计

举升机构需平衡“承载能力”与“结构紧凑性”，采用双剪叉式结构，设计要点如下：

驱动方案：选用额定推力 5000N 的电动推杆（型号 DT300），推杆行程 1200mm，工作速度 0.1–0.3m/s，通过铰链连接剪叉臂中部，驱动剪叉臂伸缩实现升降；

剪叉臂优化：剪叉臂采用 Q235 钢材质，截面为 U 型（尺寸 $80\text{mm} \times 40\text{mm} \times 5\text{mm}$ ），铰接点采用自润滑轴承（型号 SI60ES-2RS），降低摩擦损耗，提升使用寿命；

稳定性设计：剪叉臂之间加装横向拉杆，防止升降过程中侧向偏移；在举升机构顶端与抓取机构连接处设置导向滑块，确保升降轨迹线性度误差 $\leq 0.5\text{mm/m}$ 。

2.4 精准推送平台设计

推送平台负责将举升到位的菜筐送入车厢，核心设计包括：

传动系统：采用42步进电机（额定扭矩0.4N·m）驱动滚珠丝杠，丝杠长度800mm，螺距8mm，推送板通过滑块与丝杠连接，推送速度0.4~0.6m/s，定位精度±0.5mm；

导向与限位：平台两侧设置高度50mm的导向条，确保菜筐推送过程中不偏移；在推送起点与终点安装行程开关（型号LX19-001），实现自动启停，避免超程损坏设备。

3 关键部件强度校核与运动仿真

3.1 关键部件强度校核

采用材料力学理论与有限元分析结合的方式，对底座支承底板、托举臂、举升机架进行强度校核，确保满足设计载荷要求。

底座支承底板校核：底座承载总重量250kg（装置自重150kg+最大负载100kg），重力 $F = m \times g = 250 \times 9.8 = 2450\text{N}$ ，简化为均布载荷作用于1.2m长的横杆上。横杆截面为矩形（100mm×10mm），惯性矩 $I = 8.33 \times 10^7 \text{mm}^4$ ，抗弯截面系数 $W = 1.66 \times 10^4 \text{mm}^3$ 。跨中最大弯矩 $M_{\max} = \frac{2ql}{8} = (2450/1.2) \times 1.2^2 / 8 = 367.5 \text{N}\cdot\text{m}$ ，

$$\text{弯曲正应力 } \sigma = \frac{M_{\max}}{W} = 367.5 \times 10^3 / 1.66 \times 10^4 \approx$$

22.1MPa，小于Q235钢许用应力 $[\sigma] = 130\text{MPa}$ ，满足强度要求。

托举臂校核：托举臂承载单筐重量65kg（含蔬菜），重力 $F = 65 \times 9.8 = 637\text{N}$ ，简化为悬臂梁（长度1m）末端集中载荷。托举臂截面为矩形（50mm×20mm），惯性矩 $I = 2.08 \times 10^5 \text{mm}^4$ ，抗弯截面系数 $W = 8.33 \times 10^3 \text{mm}^3$ 。固定端最大弯矩 $M_{\max} = 637 \times 1 = 637\text{N}\cdot\text{m}$ ，弯曲正应力 $\sigma = 637 \times 10^3 / 8.33 \times 10^3 \approx 76.5\text{MPa}$ ，考虑动态载荷系数1.2，实际应力 $\approx 91.8\text{MPa}$ ，小于Q235钢许用应力 $[\sigma] = 130\text{MPa}$ ，满足强度要求。

举升机架校核：举升机架承受总载荷650N（含抓取机构与菜筐），弯矩575N·m，机架截面为矩形管（外边长50mm，内边长40mm，壁厚5mm），抗弯截面模量 $W = 1.3 \times 10^{-5} \text{m}^3$ 。压应力 $\sigma_{\text{压}} = 650 / (0.9 \times 10^{-3}) \approx 0.722\text{MPa}$ ，弯曲应力 $\sigma_{\text{弯}} = 575 / (1.3 \times 10^{-5}) \approx 44.23\text{MPa}$ ，组合应力 $\sigma_{\text{组合}} = 0.722 + 44.23 \approx 44.95\text{MPa}$ ，小于Q235钢许用应力 $[\sigma] = 140\text{MPa}$ ，满足强度要求。

3.2 运动学仿真

利用SolidWorks Motion模块对装置核心动作（抓取、举升、推送）进行运动学仿真，验证运动轨迹合理性与平稳性：

抓取动作仿真：设定托举臂从最大开合状态（450mm）

闭合至最小状态（280mm），仿真结果显示，托举臂同步误差≤0.1mm，开合过程无卡顿，橡胶垫与菜筐接触压力均匀（最大接触压力0.8MPa），无蔬菜损伤风险。

举升动作仿真：模拟举升机构从0.5m升至1.5m，仿真结果显示，举升速度稳定在0.2m/s，升降轨迹线性度误差≤0.3mm，剪叉臂铰接点最大受力1200N，小于材料许用载荷。

推送动作仿真：模拟推送板从起点推送800mm至终点，仿真结果显示，推送速度稳定在0.5m/s，定位误差±0.4mm，满足±2mm的码垛精度要求。

4 结论

本研究设计的多功能蔬菜筐装车装置，通过模块化机械结构设计与多学科优化，实现了以下目标。适配性提升：抓取机构覆盖280~450mm规格菜筐，无需更换部件即可切换，适配个体农户多样化需求；性能达标：装置最大承载100kg，举升高度0.5~1.5m，码垛精度±2mm，单次循环时间≤30s，相比人工装车效率提升30%以上，劳动强度降低80%；环境适应：底座避震设计可应对田间不平整地面，关键部件强度校核合格，运行稳定可靠；成本可控：核心部件选用国产标准件，整机成本控制在2万元以内，符合个体农户经济承受能力。

参考文献

- [1] 赵冬梅, 隋静. 中国蔬菜物流体系的现状与发展[J]. 中国农学通报, 2007, 23(12): 411~414.
- [2] 谢鼎越, 邓援超, 宋志成, 等. 袋装饲料自动装车机码包装置的设计与优化[J]. 饲料工业, 2024, 45(22): 14~21.
- [3] 吴浩, 高久庆, 王延敏, 等. 千万吨级骨料矿山成品装车智能控制系统研究与应用[J]. 水泥, 2025, (01): 68~70.
- [4] 付明坤. 袋装物料自动码垛装车机结构设计及优化[D]. 山东农业大学, 2023.
- [5] 袁波. 袋装物料全自动装车机的设计及优化[D]. 湖北工业大学, 2019.
- [6] 张枫吟, 李永新. 基于双目视觉的水泥自动装车机车厢尺寸测量系统[J]. 传感器与微系统, 2025, 44(02): 160~162+168.
- [7] 黄伟, 李小江, 周海江, 等. 饮料自动装车系统的设计[J]. 装备机械, 2024, (02): 83~86.

作者简介：刘雨涵（2005-），女，本科在读。

基金项目：山东石油化工学院大学生创新创业训练计划项目（DC2025199“‘菜小垛’——多功能蔬菜筐装车装置”）