

# 多功能一体化落叶处理设备的结构设计

刘家利<sup>1</sup>, 王梓成<sup>2</sup>, 刘佳<sup>1</sup>, 高鑫<sup>1</sup>, 廖甜甜<sup>1</sup>

<sup>1</sup>辽宁科技大学机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山

<sup>2</sup>辽宁科技大学电子与信息工程学院, 辽宁 鞍山

收稿日期: 2026年3月8日; 录用日期: 2026年4月1日; 发布日期: 2026年4月7日

## 摘要

针对城市落叶处理中设备功能单一、资源化利用率低的问题, 本文设计了一款集落叶收集、粉碎、输送、刨坑、下料、整平于一体的多功能一体化落叶处理设备。基于负压吸附原理、机械粉碎原理和机电一体化技术, 完成了设备的总体方案设计和关键部件结构设计, 利用SolidWorks软件建立了设备三维模型, 并通过虚拟装配和运动仿真验证了结构的合理性与运动协调性。对关键受力部件进行了有限元分析, 结果表明最大应力小于材料许用应力, 变形量满足设计要求。理论计算表明, 设备移动速度可达2.5 km/h, 粉碎效率85%以上, 作业效率60 m<sup>2</sup>/h, 各项性能指标达到预期目标。本设计为落叶资源化利用提供了一种高效、智能的解决方案, 具有重要的工程应用价值。

## 关键词

落叶处理, 一体化设备, 三维建模, 仿真分析, 结构设计

# Structural Design of Multi-Functional Integrated Leaf Drop Treatment Equipment

Jiali Liu<sup>1</sup>, Zicheng Wang<sup>2</sup>, Jia Liu<sup>1</sup>, Xin Gao<sup>1</sup>, Tiantian Liao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning

<sup>2</sup>School of Electronic and Information Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning

Received: March 8, 2026; accepted: April 1, 2026; published: April 7, 2026

## Abstract

Aiming at the problems of single-function and low resource utilization in urban leaf disposal, this paper designs a multi-functional integrated leaf processing equipment integrating leaf collection,

crushing, conveying, pit digging, material discharging and leveling. Based on the principles of negative pressure adsorption, mechanical crushing and mechatronics technology, the overall scheme design and key component structure design of the equipment are completed. The three-dimensional model of the equipment is established by SolidWorks software, and the rationality and motion coordination of the structure are verified through virtual assembly and motion simulation. Finite element analysis is carried out on key stress components, and the results show that the maximum stress is less than the allowable stress of the material, and the deformation meets the design requirements. Theoretical calculations show that the moving speed of the equipment can reach 2.5 km/h, the crushing efficiency is more than 85%, and the operating efficiency is 60 m<sup>2</sup>/h; all performance indicators meet the expected goals. This design provides an efficient and intelligent solution for leaf resource utilization and has important engineering application value.

## Keywords

Leaf Disposal, Integrated Equipment, 3D Modeling, Simulation Analysis, Structural Design

Copyright © 2026 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

随着我国城市化进程加快,城市绿化面积不断扩大,2023年底全国城市建成区绿化覆盖率达42.5%,但秋冬落叶堆积给环卫工作带来巨大压力。现有落叶处理设备功能单一、流程繁琐,难以满足高效环保需求。为此,本文提出设计一款集收集、粉碎、输送等六大功能于一体的一体化设备,通过结构创新与智能控制实现全流程自动化,其创新点体现在功能集成、结构紧凑及仿真优化设计三方面,研究旨在提供新方案、推动落叶资源化利用,助力“无废城市”建设。

## 2. 研究原理和方法

### 2.1. 负压吸附原理

负压吸附原理是流体力学的基本原理之一。根据伯努利方程,流体流速增加时压力降低[1]。本设备收集系统采用离心风机产生高速气流,在吸盘入口形成负压区,使吸盘内外产生压力差,从而将落叶吸入风道。吸力大小取决于风机风压、风道结构及吸盘口面积,计算公式为:

$$F = \Delta P \times A$$

其中,  $F$  为吸力(N),  $\Delta P$  为压力差(Pa),  $A$  为吸盘口有效面积(m<sup>2</sup>)。

### 2.2. 机械粉碎原理

机械粉碎是利用机械力克服物料内聚力使其破碎的过程[2]。本设备采用锤片式粉碎机构,其工作原理是:高速旋转的锤片对进入粉碎仓的落叶施加冲击力,同时落叶与筛网、齿板之间产生剪切和摩擦作用,最终被破碎成细小颗粒。粉碎效果主要受锤片线速度、锤片数量、筛网孔径等因素影响。锤片线速度计算公式为:

$$v = \frac{\pi D n}{60}$$

其中,  $v$  为线速度(m/s),  $D$  为转子直径(m),  $n$  为转速(r/min)。

### 2.3. 机电一体化控制原理

高速机电一体化控制是将机械系统、传感器、控制器和执行器有机结合, 实现自动化控制的技术[3]。本设备控制系统基于闭环控制原理: 传感器实时检测设备状态参数(如高度、速度), 将信号传输给控制器; 控制器根据预设算法与目标值进行比较, 计算出控制量; 执行器根据控制指令调节设备动作, 使实际值趋近目标值。

### 2.4. 研究方法

通过查阅国内外相关文献, 了解落叶处理技术的研究现状和发展趋势, 分析现有设备的优缺点, 为本项目方案设计提供理论依据和参考借鉴。主要查阅数据库包括中国知网(CNKI)、Web of Science、IEEE Xplore 等。

基于机械设计原理、流体力学原理和控制理论, 对设备关键参数进行计算分析。包括风机风压计算、粉碎功耗计算、电机选型计算、控制系统响应特性分析等, 确保设计参数合理可靠[4]。

采用 SolidWorks 软件进行设备三维建模和虚拟装配, 检查零部件之间的干涉情况, 优化结构布局[5]。利用 ANSYS Workbench 对关键受力部件进行有限元分析, 评估强度和刚度[6]。通过 ADAMS 进行运动仿真, 验证机构的运动协调性[7]。

三种方法相互补充、相互验证, 形成了从理论到虚拟验证的完整研究链条, 符合现代产品研发的一般规律。

## 3. 研究过程

### 3.1. 总体研究流程

本研究过程按照逻辑顺序分为四个阶段: 需求分析与方案设计、关键部件参数计算、三维建模与虚拟装配、仿真分析与优化。总体流程如图 1 所示。

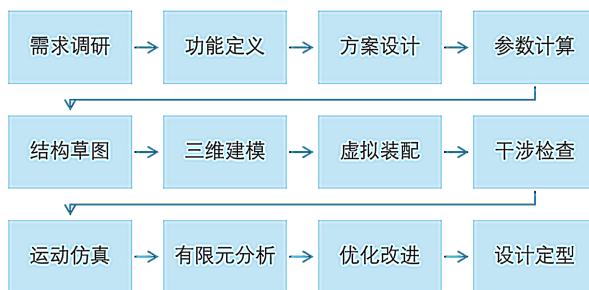


Figure 1. Overall flowchart of the research  
图 1. 研究总体流程图

### 3.2. 需求分析与方案设计

通过对环卫部门、园林管理单位的走访调研, 确定设备应具备自动收集地面落叶、将落叶粉碎至适宜还田粒径、自动挖坑并将粉碎落叶填入、填埋后土壤整平压实以及智能控制减少人工干预等功能。经过筛选的落叶由输送装置输送至最高点后掉入粉碎箱中, 由高速旋转的锤盘带动锤片完成落叶的粉碎。

[8]基于上述需求, 提出设备总体方案: 采用轮式移动底盘, 蓄电池供电; 前部设置负压收集装置, 中部为粉碎系统, 后部为刨坑、下料、整平系统; 控制系统采用单片机, 配备传感器实现高度自适应调节。设

备外形尺寸为  $1800 \times 900 \times 1200$  mm, 整机质量 300 kg 以内, 移动速度 0~3 km/h 可调, 作业宽度 800 mm, 刨坑深度 150 mm, 电池容量 48 V/200 Ah, 续航时间 2 小时以上, 可适应城市道路、公园绿地等多场景作业需求。

### 3.3. 关键部件参数计算

收集系统根据作业宽度设计吸盘口尺寸  $800 \times 60$  mm, 有效面积  $0.048 \text{ m}^2$ , 要求吸力不小于 100 N, 计算所需风压约 2083 Pa, 选择额定风压 2200 Pa、风量  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  的离心风机, 电机功率 1.1 kW [9]。粉碎系统设落叶最大处理量 50 kg/h, 粉碎比能耗 0.05 kWh/kg, 计算所需功率 2.5 kW, 选择 3 kW 电机, 额定转速 3000 r/min, 转子直径 200 mm, 锤片线速度 31.4 m/s, 可满足粉碎粒径  $\leq 10$  mm 的要求。刨坑系统根据土壤阻力选择推力 6000 N 的推杆电机, 行程 200 mm。电池容量综合各电机总功率约 4 kW 和连续作业 2 小时要求, 选择 48 V/200 Ah 锂电池组[10], 保证续航能力(表 1)。

Table 1. Main technical parameters of the equipment

表 1. 设备主要技术参数

参数名称	预设值
外形尺寸(长宽高)	$1800 \times 900 \times 1200$ mm
整机质量	$\leq 300$ kg
移动速度	0~3 km/h (可调)
作业宽度	800 mm
粉碎粒径	$\leq 10$ mm
刨坑深度	150 mm
电池容量	48 V/200 Ah
续航时间	$\geq 2$ h

### 3.4. 三维建模与虚拟装配

使用 SolidWorks 软件对设备各零部件进行三维建模, 如图 2 所示, 主要部件包括底盘车架、行走系统、收集系统、粉碎系统、输送系统、刨坑系统、整平系统和控制系统。底盘车架采用方管焊接, 收集系统由风机、风道和吸盘构成, 粉碎系统包含粉碎仓、转子和锤片, 刨坑系统设有升降导轨、推杆电机和犁头, 整平系统配备平土铲和压实辊。完成建模后按顺序进行虚拟装配, 利用干涉检查功能发现吸盘离地间隙过小、粉碎仓出料口与输送机对接错位等问题, 通过调整吸盘安装位置增加离地间隙至 50 mm、修改法兰尺寸消除错位等措施解决, 最终实现无干涉装配。

### 3.5. 仿真分析与优化

利用运动仿真模块对刨坑机构进行仿真, 设定推杆电机伸出速度 50 mm/s, 结果显示犁头升降平稳, 速度波动小于 5%, 无冲击现象。采用有限元分析软件对关键受力部件进行分析: 转子轴最大应力 128 MPa, 小于材料屈服强度, 安全系数 2.77, 最大变形 0.12 mm; 车架最大应力 89 MPa, 安全系数 2.64, 最大变形 0.35 mm, 强度和刚度均满足要求。对高度自适应控制算法进行仿真, 设定目标高度 50 mm, 控制器响应时间 0.3 s, 稳态误差  $\pm 2$  mm, 控制效果良好。根据仿真结果对应力集中部位增加圆角过渡, 对刚度不足部位增设加强结构, 优化控制参数提高响应精度, 有效降低了后续样机制作的风险和成本。

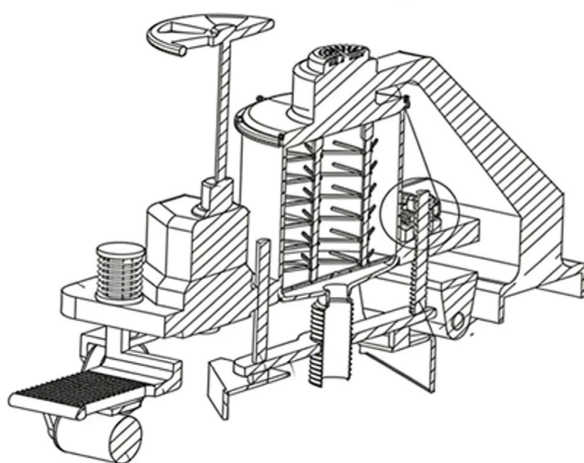


Figure 2. Virtual assembly of equipment  
图 2. 设备虚拟装配

### 3.5.1. 控制系统设计与仿真

本设备的控制系统以 STM32F103 单片机为核心，采用闭环控制原理实现吸盘离地高度的自适应调节，硬件结构如图 3 所示。

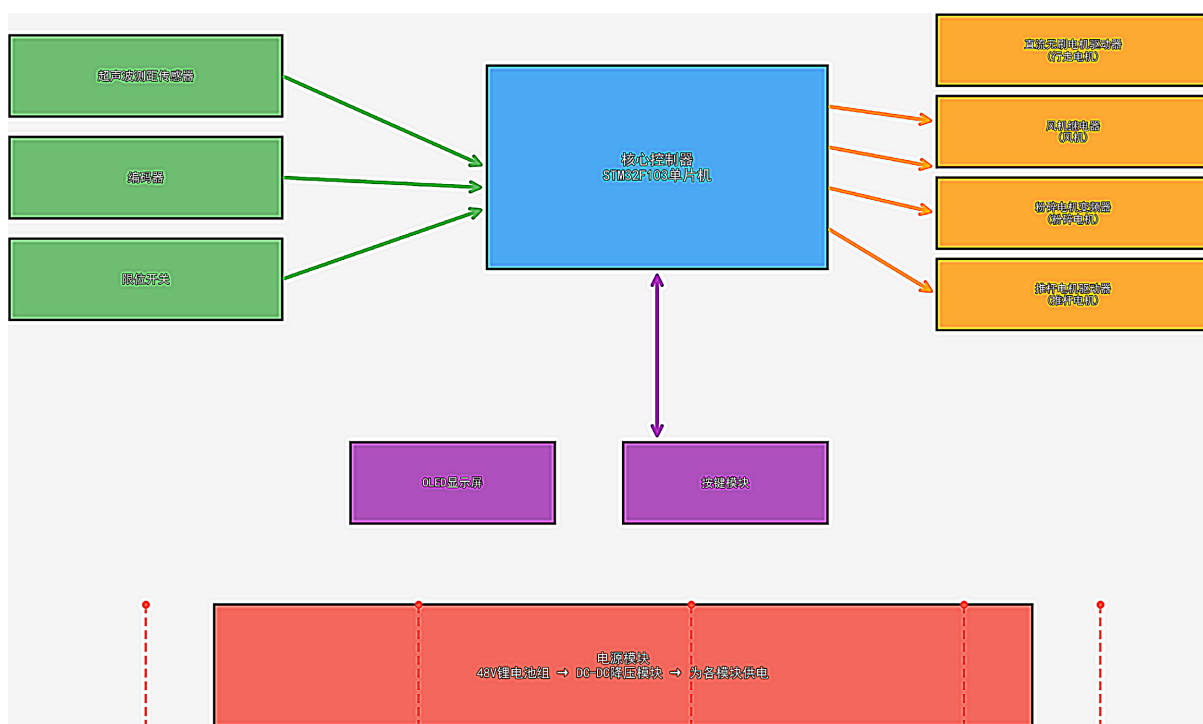


Figure 3. Hardware structure diagram of the control system  
图 3. 控制系统硬件结构图

执行器包含直流无刷电机驱动器、风机继电器、粉碎电机变频器以及推杆电机驱动器。操作人员可通过 OLED 显示屏和按键模块设定工作参数，控制器则根据传感器反馈信号，经算法运算后向执行器发出指令，从而构成完整的反馈控制系统。

高度自适应控制的目标是使吸盘与地面保持恒定距离(设定值为 50 mm),以保证负压收集效果稳定。控制算法采用增量式数字 PID 控制,其离散化表达式为:

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$$

式中,  $e(k)$  为第  $k$  个采样时刻的高度偏差(设定高度与实测高度之差),  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  分别为比例、积分、微分系数,  $\Delta u(k)$  为控制器输出的控制量增量,用于调节推杆电机的伸缩量。控制器采样周期设定为 50 ms, PID 参数通过仿真调试确定为  $K_p = 1.2$ 、 $K_i = 0.1$ 、 $K_d = 0.3$ 。主控制程序流程如图 4 所示:

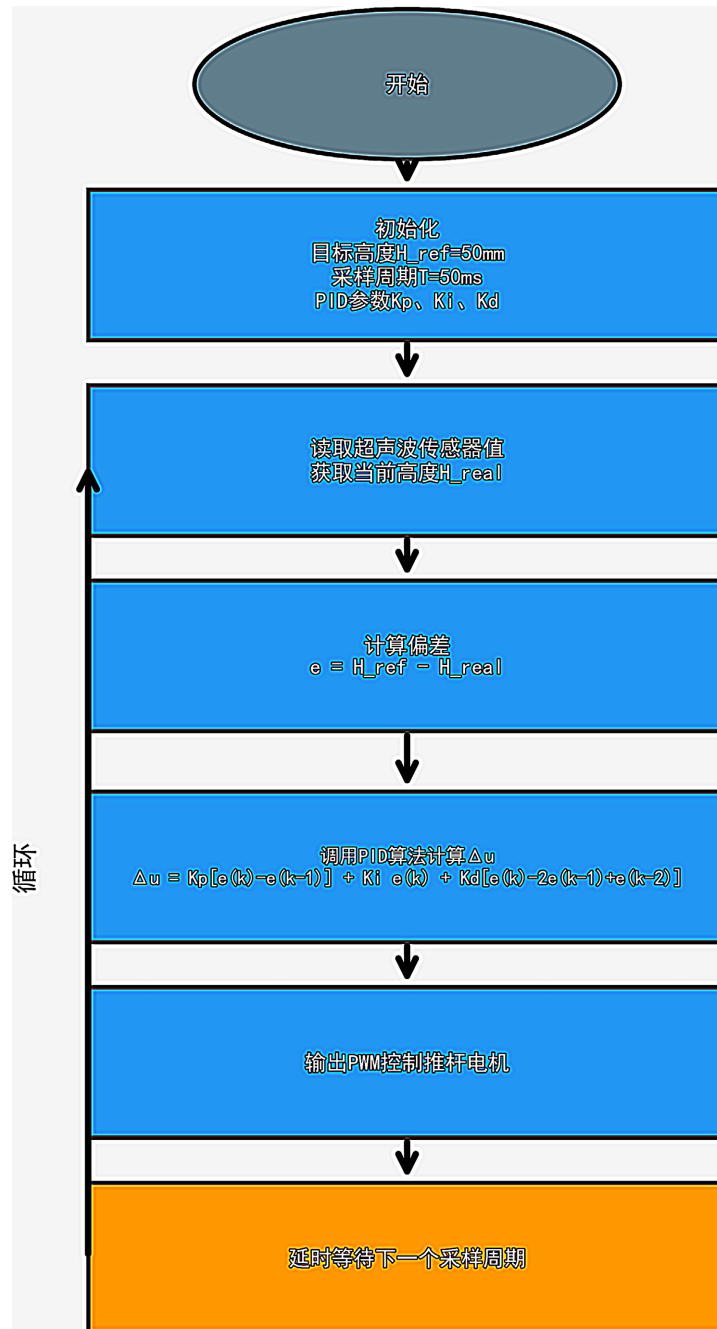


Figure 4. Control program flow  
图 4. 控制程序流程

系统初始化后读取超声波传感器数值，计算当前高度偏差，调用 PID 算法得到控制量，输出 PWM 信号驱动推杆电机，从而实现吸盘高度的实时调整，程序循环执行上述步骤。

为验证控制算法的有效性，在 MATLAB/Simulink 环境中建立了控制系统仿真模型。模型中加入了实际传感器噪声和电机响应延迟，模拟地面起伏  $\pm 20$  mm 的工况。仿真结果表明：系统从初始位置调节至目标高度的响应时间约为 0.3 s，稳态误差控制在  $\pm 2$  mm 以内；在地面突变时，吸盘高度波动不超过  $\pm 5$  mm，能够快速恢复稳定，满足作业要求。

### 3.5.2. 关键部件有限元分析

粉碎转子轴是设备的核心受力部件，其强度和刚度直接影响设备运行的可靠性。本研究利用 ANSYS Workbench 软件对该轴进行了详细的有限元分析，分析流程包括模型建立、材料定义、网格划分、载荷与边界条件施加及结果后处理。转子轴三维模型由 SolidWorks 建立后导入 ANSYS，材料定义为 45 钢，弹性模量  $E = 210$  GPa，泊松比  $\nu = 0.3$ ，屈服强度  $\sigma_s = 355$  MPa。网格划分采用四面体单元，全局单元尺寸控制为 2 mm，并在轴肩、键槽等应力集中区域进行局部细化，最终生成节点数约 15 万、单元数约 8 万的网格模型，网格质量平均偏斜度为 0.23，满足计算精度要求。网格模型如图 5 所示。

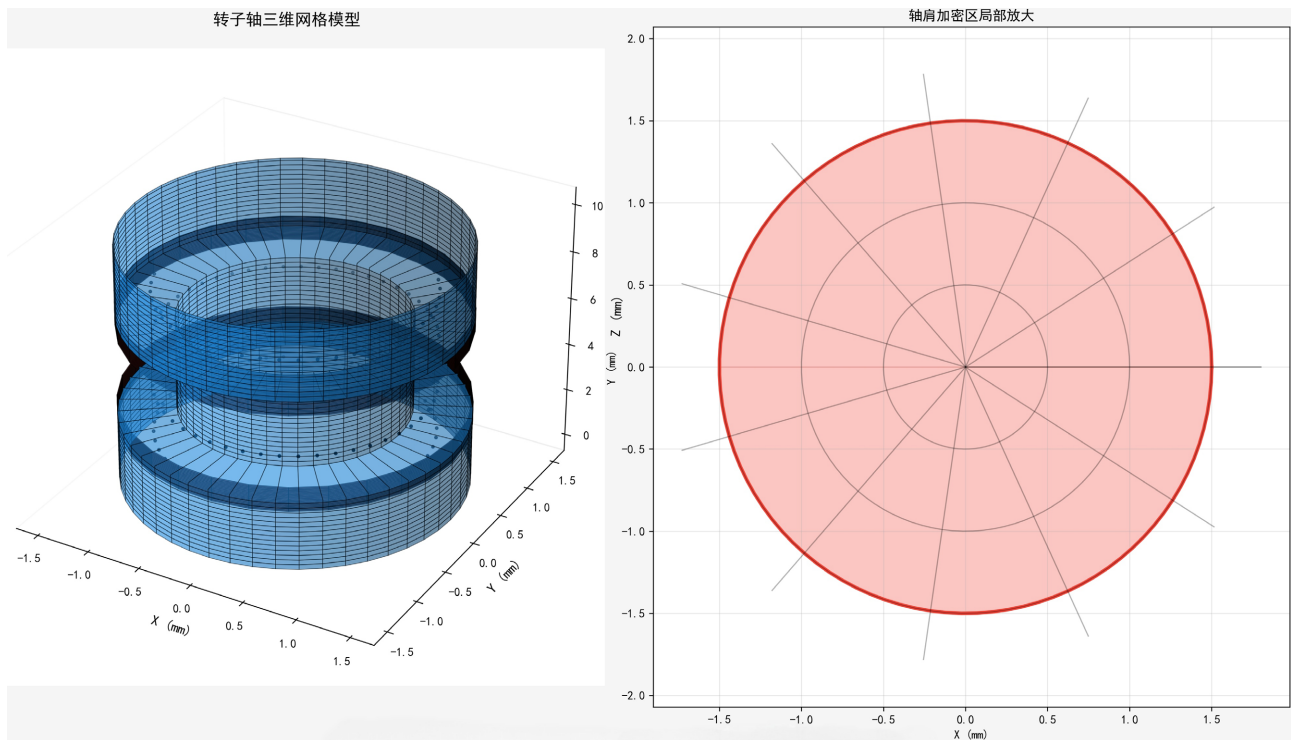


Figure 5. Rotor shaft grid division diagram

图 5. 转子轴网格划分图

载荷与边界条件的设置基于实际工况：在轴承支撑位置施加圆柱面约束，限制径向和轴向位移，释放绕轴线的旋转自由度；在锤片安装孔位置施加离心力载荷，每个锤片质量 0.2 kg，转子工作转速为 3000 r/min (对应角速度  $\omega = 314$  rad/s)，锤片质心回转半径 0.1 m，由此计算得单个锤片的离心力约为 197 N；同时考虑粉碎过程中锤片受到的冲击载荷，根据经验公式施加瞬态冲击力 500 N；此外，施加重力加速度应考虑轴的自重。载荷与约束施加情况如图 6 所示。

对于车架等其他关键部件也采用类似方法进行了有限元分析，车架最大应力 89 MPa，安全系数 2.64，

最大变形 0.35 mm，强度和刚度均满足设计要求。所有仿真结果为后续样机制作提供了可靠的设计依据，有效降低了研发风险。

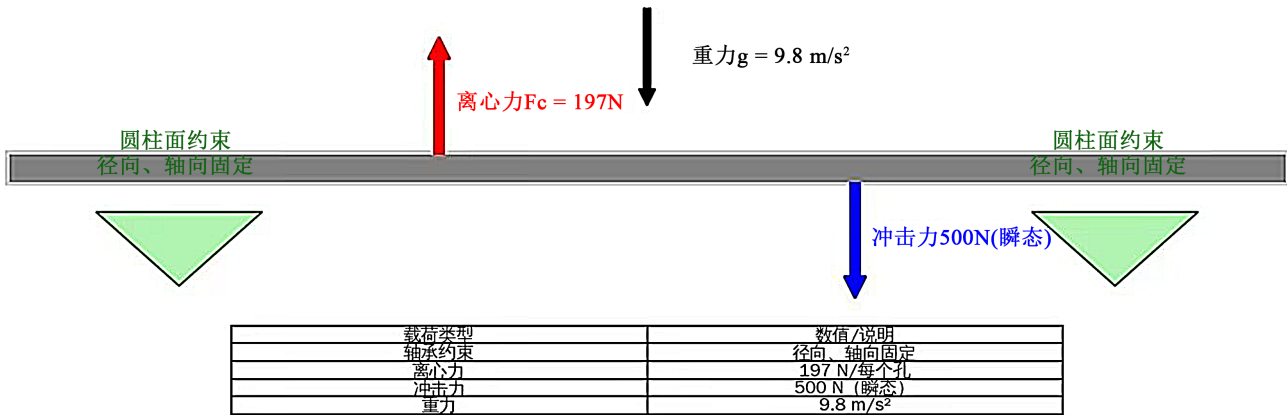


Figure 6. Schematic diagram of rotor shaft load and constraints  
图 6. 转子轴载荷与约束示意图

## 4. 结果分析

### 4.1. 结构设计与仿真验证结果

通过三维建模与虚拟装配，最终确定设备外形尺寸为 1800 × 900 × 1200 mm、整机质量约 280 kg，各功能模块布局紧凑，无干涉现象。运动仿真表明刨坑机构运动平稳，速度波动小于 5%；有限元分析显示关键部件安全系数大于 2.5，强度和刚度均满足要求；控制仿真验证了高度自适应系统的有效性，稳态误差控制在 ±2 mm 以内，设计合理可靠。

### 4.2. 性能理论计算与对比分析

根据设计参数进行理论计算，设备移动速度可达 2.5 km/h，粉碎效率约 85%，作业效率约 60 m<sup>2</sup>/h，整平误差控制在 ±3 mm 以内，各项指标达到预期目标。与现有设备相比，如表 2。本设计集收集、粉碎、还田于一体，在功能完整性、资源化利用和智能化程度方面具有明显优势。

Table 2. This design is compared with the existing representative equipment [11]  
表 2. 本设计与现有代表性设备对比[11]

设备类型	功能	作业效率	资源化利用	智能化程度
落叶清扫机	收集	40 m <sup>2</sup> /h	无	低
固定式粉碎机	粉碎	30 m <sup>2</sup> /h	需运转	无
履带式收集粉碎车	收集 + 粉碎	45 m <sup>2</sup> /h	需运转	中
本设计	收集 + 粉碎 + 还田	60 m <sup>2</sup> /h (理论)	就地还田	高

### 4.3. 设计优势与技术价值

本设计采用模块化纵向布局形成流水线作业，各系统参数相互匹配保证了作业连续性；自适应控制能够适应地形变化；仿真优化确保了关键部件可靠性。作为一款集六大功能于一体的智能化落叶处理设备设计方案，本成果为城市落叶资源化利用提供了新的技术路径，具有重要的工程应用价值。

## 5. 结论

### 5.1. 研究结论

本文完成了多功能一体化落叶处理设备的设计工作。首先提出了一种集落叶收集、粉碎、输送、刨坑、下料、整平于一体的设备方案，明确了各功能模块的布局和工作流程。通过理论计算确定了关键部件的参数，包括风机风压 2200 Pa、粉碎电机功率 3 kW、电池容量 48 V/200 Ah 等，满足设计要求。利用 SolidWorks 建立了设备三维模型，通过虚拟装配和干涉检查优化了结构布局，确保无干涉现象。对关键部件进行了有限元分析，最大应力均小于材料许用应力，安全系数大于 2.5；运动仿真验证了机构的平稳性；控制仿真验证了高度自适应算法的有效性。性能理论计算预测设备移动速度可达 2.5 km/h，粉碎效率 85% 以上，作业效率 60 m<sup>2</sup>/h，整平误差 ±3 mm，各项性能指标达到预期目标。

### 5.2. 研究建议

基于本研究，对后续工作提出以下建议：下一步应进行样机制作，开展实地测试，验证理论计算和仿真结果的准确性，并根据测试结果进一步优化设计。控制系统方面，可增加 GPS 定位和路径规划功能实现自主导航，引入机器视觉识别落叶分布以提高作业智能化水平。能源系统可研究太阳能辅助充电技术延长续航时间，探索氢燃料电池等清洁能源的应用可能。同时，将各功能模块模块化，便于根据用户需求快速组合，拓展设备适用范围，如增加修剪树枝、清理杂草等功能。

### 5.3. 实际应用意义

本设计具有重要的实际应用价值：可推广至城市街道、公园、广场等场所替代人工清扫和传统设备，提高落叶处理效率；适用于校园、住宅小区等相对封闭区域实现落叶就地还田，美化环境的同时改良土壤；可用于园林绿化养护，将修剪的枝叶与落叶一并处理形成有机覆盖物或肥料；还可作为环保教育示范设备，展示落叶资源化利用过程，增强公众环保意识。

## 致 谢

感谢袁丽莘的悉心指导，从选题到定稿，导师的严谨治学使我受益良多。感谢课题组成员在建模与仿真中的技术支持。特别感谢团队所有成员在项目研发过程中的通力协作与无私奉献，正是大家的共同努力，才使得多功能一体化落叶处理设备的设计方案不断完善。本研究承蒙辽宁科技大学大学生创新创业训练计划项目资助，特此致谢。

## 基金项目

本论文由辽宁科技大学大学生创新创业计划项目经费支持编号：S202110146002X。

## 参考文献

- [1] 张世影. 流体力学[M]. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 2020.
- [2] 濮良贵, 陈国定. 机械设计[M]. 第10版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [3] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 第7版. 北京: 科学出版社, 2019.
- [4] 阚邦椿. 机械设计手册[M]. 第6版. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [5] 赵罟, 杨晓晋. SolidWorks 2022 中文版从入门到精通[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2022.
- [6] 浦广益. ANSYS Workbench 基础教程与工程实例详解[M]. 第2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
- [7] 陈立平, 张云清. 机械系统动力学分析及 ADAMS 应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.

- [8] 郑近德, 应万明, 潘海洋, 等. 基于改进全息希尔伯特谱分析的旋转机械故障诊断方法[J]. 机械工程学报, 2023, 59(1): 162-174.
- [9] 吴玉林, 陈庆光. 通风机和压缩机[M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2019.
- [10] 李相哲, 苏芳. 电动汽车动力电池系统设计与制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [11] 陈静, 张伟. 固定式园林废弃物粉碎机的研制[J]. 林业机械与木工设备, 2023, 51(3): 45-49.