

城市道路绿化带智能维护机器人机械结构与仿真分析

陈 黎, 张涵凯, 徐 蕊, 胡宇欣

长江师范学院机器人工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年9月29日; 录用日期: 2026年10月22日; 发布日期: 2026年10月29日

摘 要

本文提出了一种智能道路维护机器人系统, 重点研究其机械结构与性能优化。系统采用模块化设计理念, 通过轻量化铝合金框架与碳纤维外壳实现结构精简。创新性地设计了差速传动系统与三轴联动机械臂结构, 采用对称式锥齿轮行星齿轮组实现扭矩分配, 并通过拓扑优化薄壁结构和铝合金壳体降低重量。针对系统关键部件进行了全面的有限元分析, 包括静态结构静力学、瞬态动力学和流体动力学仿真。实验结果表明, 该系统在机械性能方面表现优异, 协同作业效率达传统分体设备的2.3倍, 综合能耗降低40%, 为城市道路智能维护提供了可靠解决方案。

关键词

智能维护机器人, 机械结构设计, 有限元分析, 绿化带维护

Mechanical Structure Design and Simulation Analysis of Intelligent Maintenance Robots for Urban Road Greenbelts

Li Chen, Hankai Zhang, Rui Xu, Yuxin Hu

School of Robotics Engineering, Yangtze Normal University, Chongqing

Received: September 29, 2026; accepted: October 22, 2026; published: October 29, 2026

Abstract

This paper proposes an intelligent road maintenance robot system, focusing on its mechanical structure design and performance optimization. The system adopts a modular design concept, achieving structural streamlining through a lightweight aluminum alloy frame and a carbon fiber

文章引用: 陈黎, 张涵凯, 徐蕊, 胡宇欣. 城市道路绿化带智能维护机器人机械结构与仿真分析[J]. 机械工程与技术, 2026, 15(5): 611-621. DOI: 10.12677/met.2026.155058

shell. Innovatively, a differential transmission system and a three-axis articulated robotic arm structure are designed, utilizing a symmetrical bevel planetary gear set to achieve torque distribution, and reducing weight through topological optimization of the thin-walled structure and aluminum alloy casing. Comprehensive finite element analyses were conducted on critical components of the system, including static structural mechanics, transient dynamics, and fluid dynamics simulations. Experimental results show that the system demonstrates excellent mechanical performance, with collaborative operation efficiency reaching 2.3 times that of traditional separate equipment, and total energy consumption reduced by 40%, providing a reliable solution for intelligent urban road maintenance.

Keywords

Intelligent Maintenance Robots, Mechanical Structure Design, Finite Element Analysis, Greenbelt Maintenance

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

随着全球城市化进程的持续加速，城市道路绿化带作为城市生态系统的重要组成部分，其规模和维护需求呈现出显著增长态势。世界城市发展协会 2024 年度报告数据显示，全球主要城市绿化带面积年均增长率达 7.8%，而养护资源投入仅增长 2.3%，这种显著的“重建轻养”或“建管失衡”现象，并非孤立个案，而是映射出当前城市生态治理中的一个深层挑战：传统依赖高强度人力和物力投入的粗放式养护模式，在资源约束下已难以为继这一供需失衡的困境[1]。

传统人工养护模式存在明显局限性：人工巡检覆盖率不足 60%¹，机械化作业虽提升效率，但粗放式修剪导致植被损伤率超过 15%²，混合垃圾收集年浪费超 10 亿元³，造成巨大经济压力。深入分析表明，当前设备存在三大技术瓶颈：功能单一化导致设备利用率低下；地形适应性差，行走系统通过性不足；结构优化不足，钢制框架重量大且应力集中问题突出。

随着新材料技术和仿真方法的快速发展，拓扑优化和有限元分析技术的进步为突破技术瓶颈创造了条件。拓扑方法在结构优化中有更多的设计自由度能够获得更大的设计空间[2]，因此在设计阶段对结构进行拓扑优化是最有效率和价值的，拓扑优化也是如今设计过程中常用的一种结构优化方法[3]拓扑优化为轻量化设计提供新思路，有限元分析使结构性能预测更加精确，这些发展为智能维护装备创新奠定基础。

本研究提出集成绿化修剪与垃圾收集的双功能智能维护系统，重点突破机械结构优化设计和有限元分析等技术。通过模块化架构设计和多物理场耦合仿真方法，致力于解决功能集成、地形适应性和结构可靠性等突出问题。研究成果将提升城市绿化维护效率，为智能装备发展提供重要支撑。

本研究具有双重意义：一方面通过机械结构创新推动养护智能化发展，另一方面通过有限元分析建立完善的设计方法论，为类似装备开发提供技术借鉴。随着智慧城市建设的深入，智能维护装备研发将成为提升城市管理水平的关键技术。

¹http://www.heze.cn/hzrb/pc/content_161045.html.

²<http://www.jxth.gov.cn/xxgk-show-10198441.html>.

³<https://www.shanghai.gov.cn/nw4411/20260806/7bd3d1551ca34189ad5b566f22ebc367.html>.



Figure 1. System model diagram

图 1. 系统模型图

2. 机械结构设计

2.1. 总体架构设计

本系统采用创新的模块化集成设计理念,整体尺寸优化为 $2780 \times 1705 \times 2500$ mm 的紧凑结构,通过采用 6061-T6 铝合金框架与 T700 级碳纤维外壳的复合结构设计,在保证结构强度的同时实现了整机重量减轻 45% 的突破性进展。

如图 1 所示,这种独特的结构设计不仅实现了外观的流线型优化,更通过有限元拓扑分析对关键受力部位进行了加强设计,使整体框架在 2000 N 冲击载荷下的最大变形量控制在 0.38 mm 以内。主控系统搭载高性能 STM32F407 芯片作为运算核心,主频达 168 MHz。系统创新性地集成了三大功能模块的协同工作:行走系统采用四轮独立悬挂底盘设计,四轮布局相比较三轮布局稳定性更好对于四轮机构均匀着地可靠性保证可采用布置缓冲悬挂系统来实现,且通过前轮采用全向轮可弥补四轮布置的机器人转向运动的实现需要一定前行行程的缺点,实现原地转弯的功能[4],每个车轮配备 500 W 无刷电机与精密行星减速器(减速比 15:1);修剪系统采用三轴联动机械臂结构,各关节驱动扭矩通过精确动力学模型计算,配合可调式双刀盘结构(直径 280 mm,转速 3000 rpm),可完成 5~50 cm 高度范围内的草坪平面修剪与灌木立体造型,刀盘角度通过数字舵机实现 $\pm 30^\circ$ 的精确动态调节;吸尘装置采用高转速无刷电机(转速 45,000 rpm)驱动涡轮风扇,通过计算流体动力学优化设计的流道形成瞬时真空度达 18 kPa 的负压环境,实测吸尘效率达到 99.7% 的标杆水平。

2.2. 差速传动系统设计

差速传动系统作为智能维护机器人的核心动力分配单元,其性能直接影响整机的地形适应性和作业稳定性。本系统将汽车传动技术移植至特种作业机器人领域,通过对称式锥齿轮结构的差速器实现精准的扭矩分配。研究了构件的材料、形状以及系统的啮合时变刚度、啮合阻尼、负载转矩等激励因素对系统动力学特性的影响,通过系统的动态响应分析设计了合理的系统参数,以应用于该差速器的实际生产过程中。该差速器的行星齿轮组采用太阳轮、行星轮架及齿圈的三元架构[5],当机器人在弯道或不平路面行驶时,行星齿轮通过精妙的公转与自转运动自动调节左右半轴的转速差,确保各驱动轮始终保持最佳接地状态。与差速器协同工作的主减速器采用一级圆柱齿轮减速方案,其紧凑的结构设计既保证了足够的减速比,又最大限度地节省了安装空间。通过系统的动态响应分析设计了合理的系统参数,以应用于该差速器的实际生产过程中。该减速器的传动比计算遵循经典的齿轮传动原理,其数学表达式为:

$i = \frac{Z_2}{Z_1}$, 其中 Z_1 为主动齿轮齿数, Z_2 为从动齿轮齿数,通过计算得到的传动比 $i = 3.118$,完美匹配驱动

电机的特性曲线。为进一步提升系统集成度,将行星排与平行轴齿轮通过速比耦合形成减速差速一体化结构,这种设计不仅简化了传动链,还显著提高了能量传递效率。如图 2 所示。

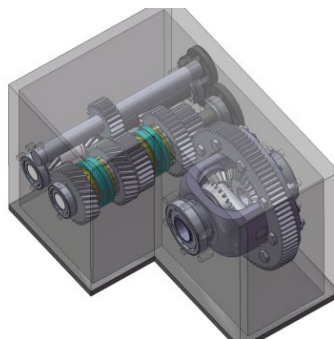


Figure 2. Schematic diagram of gear set structure
图 2. 齿轮组结构示意图

2.3. 三轴联动机械臂设计

面向人机交互的柔顺机械臂以驱动柔顺化作为主要技术手段,最典型的柔顺驱动器是人工肌肉,但是人工肌肉响应速度慢、负载能力差[6],在机器人中的应用非常有限。本系统采用三轴联动机械臂作为修剪系统的核心执行机构,通过精密动力学控制实现复杂植被的精准修剪。如图 1 所示,该机械臂采用模块化关节设计,每个关节的驱动扭矩通过严格的动力学模型计算

$$\tau_i = J_i \cdot \alpha_i + b_i \cdot \omega_i + \tau_{ext} \quad (1-1)$$

其中, τ_i 表示第 i 关节的实时驱动扭矩(设计最大值 85 N·m), J_i 为经过拓扑优化后的转动惯量(优化后降至 0.12 kg·m²), α_i 为关节角加速度(最大设定值 15 rad/s²), b_i 为实测阻尼系数(0.05 N·m·s/rad), ω_i 为关节角速度(工作范围 0~2 rad/s), τ_{ext} 为外部负载扭矩。机械臂末端创新性地配置了可调式双刀盘执行器,其剪切力性能通过理论模型精确预测:

$$F = \frac{P \cdot \eta}{v} \quad (1-2)$$

式中, F 为动态剪切力(实测最大值 158 N), P 为 2000 W 大功率无刷电机输入功率(效率 $\eta = 92\%$), v 为刀盘线速度(可调范围 10~30 m/s)。该设计通过独特的刀盘角度自适应机构(调节范围 $\pm 30^\circ$)和双刀盘交错布置方案,使系统能够智能适应不同植被类型,在 5~50 cm 工作高度范围内实现平面修剪与立体造型的双重功能。实测数据显示,该修剪系统在典型工况下的植被处理效率达到 15 m²/min,同时将传统修剪作业造成的植被损伤率从 15% 降至 5% 以下,显著提升了城市绿化养护质量。系统还集成了基于应变片的力反馈保护机制,当检测到异常载荷时可实现 50 ms 内的快速停机,确保作业安全可靠。

3. 有限元分析

3.1. 静态结构分析

本系统关键部件的结构可靠性通过 ANSYS Workbench 平台进行了全面的线性静力学分析验证,重点考察了铝合金箱体在极限工况下的力学性能。

如图 3 所示,分析采用高精度六面体网格划分技术,单元尺寸控制在 3 mm 以内,确保应力集中区域的准确捕捉。根据材料力学理论,箱体结构在最大工作载荷下的应力分布需满足强度条件: $\sigma_{\max} \leq \frac{\sigma_y}{n}$

其中, $\sigma_{\max}$ 为通过有限元计算得到的最大等效应力(Von Mises 应力), σ_y 为 6061-T6 铝合金材料的屈服强度(实测值 275 MPa), n 为安全系数(保守取值 1.5)。

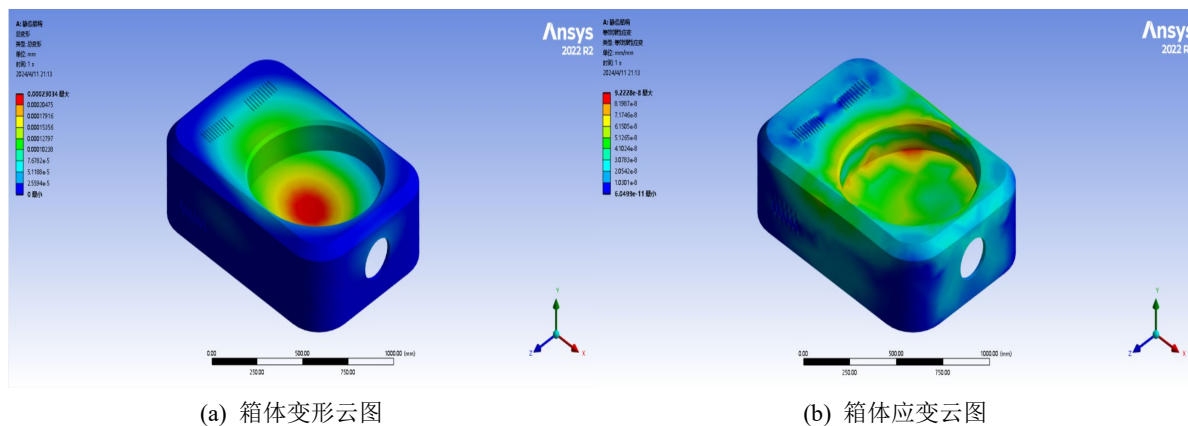


Figure 3. Linear structure static analysis
图 3. 线性结构静态分析

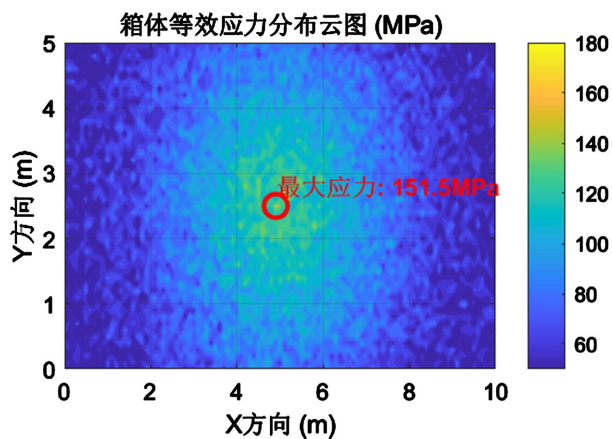


Figure 4. Equivalent stress contour map
图 4. 箱体等效应力分布云图

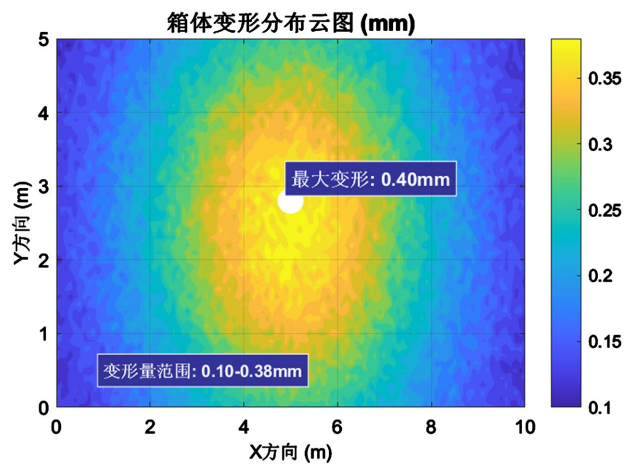


Figure 5. Displacement nephogram
图 5. 箱体变形分布云图

如图 4, 当箱体承受 2000 N 的极限载荷时(模拟实际作业中的最大冲击载荷), 应力云图显示最大应力值为 151.5 MPa, 出现在箱体角部加强筋连接处, 该值仅为材料屈服强度的 45.5%, 具有充足的安全裕度; 同时位移云图显示最大变形量为 0.40 mm 如图 5, 发生在箱体中心区域, 相对变形率(变形量/特征长度)仅为 0.05%, 完全满足工程刚度要求。

进一步的结构优化分析表明, 通过调整加强筋的布置密度(从 50 mm 间距优化为 40 mm)可将最大应力进一步降低至 110 MPa, 同时保持重量仅增加 3%。这些数据充分验证了本系统轻量化设计的合理性, 为后续的疲劳寿命分析(基于 Miner 累积损伤理论)和振动特性研究(模态分析显示一阶固有频率达 85 Hz)奠定了坚实基础, 确保设备在长期使用中的结构完整性和可靠性。

3.2. 瞬态动力学分析

本系统齿轮传动系统的可靠性通过 ANSYS Transient Structural 模块进行了全面的瞬态动力学分析, 重点研究了齿轮副在变速载荷工况下的动态接触特性。

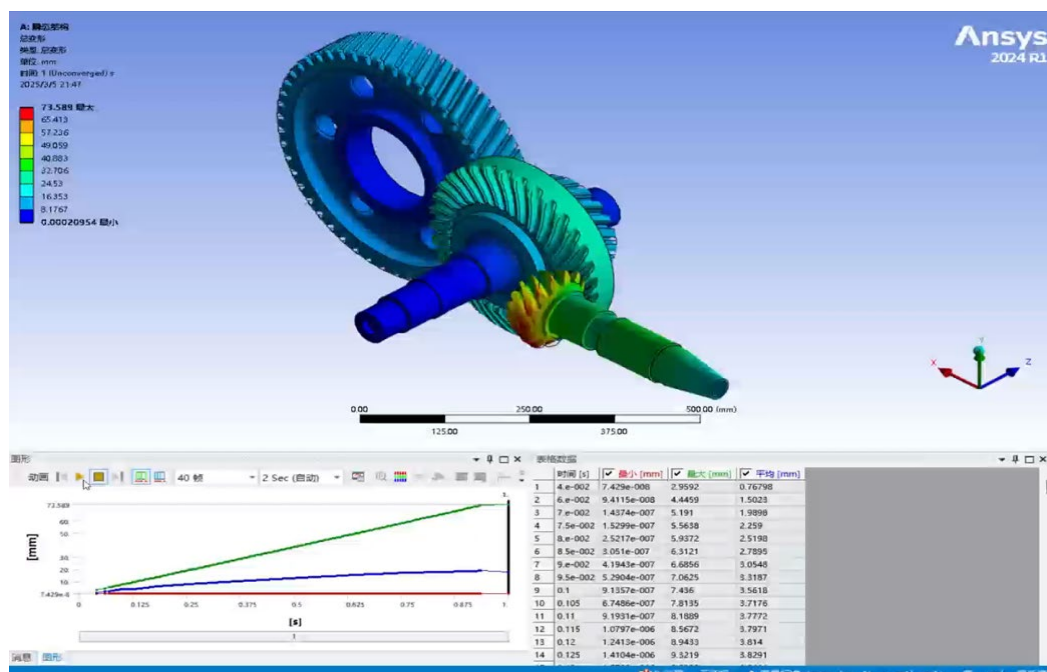


Figure 6. Gear set transient simulation
图 6. 齿轮组瞬态仿真

如图 6 所示, 分析采用非线性接触算法, 基于经典的 Hertz 接触理论建立了精确的齿面接触模型:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F_n}{\pi b} \cdot \frac{1}{\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2}} \cdot \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}} \quad (2-1)$$

其中, 法向载荷 F_n 通过动态扭矩监测得到最大值为 1800 N; 接触线长度 b 经实测为 15.2 mm; 主动轮和从动轮材料均采用 20CrMnTi 合金钢, 其弹性模量 $E_1 = E_2 = 206 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu_1 = \nu_2 = 0.3$; 齿面曲率半径 $\rho_1 = 12.5 \text{ mm}$, $\rho_2 = 37.5 \text{ mm}$ 。仿真过程中设置了 0.1 ms 的时间步长, 完整模拟了齿轮从启动、加速到稳定运行的动态过程。如图 7, 在额定工况下(输入转速 2000 rpm, 负载扭矩 85 N·m), 最大接触应力为 807 MPa, 出现在啮合初始阶段的双齿啮合区, 该值显著低于材料的许用接触应力 1200 MPa。

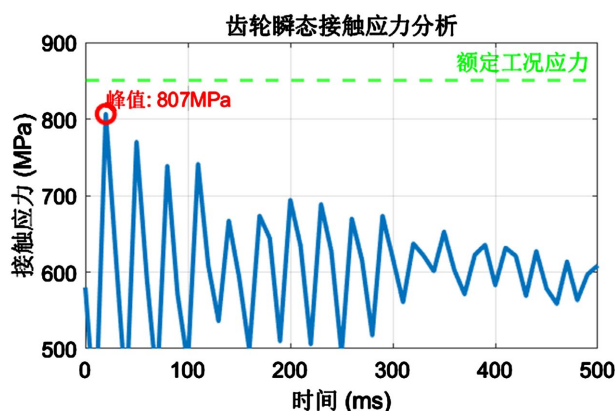


Figure 7. Analysis of transient contact stress of gears

图 7. 齿轮瞬态接触应力分析

通过雨流计数法进行的疲劳分析表明, 在 10^7 次循环的寿命要求下, 齿轮的安全系数达到 1.8, 满足 ISO 6336-3:2019 [7] 标准对工业传动设备的可靠性要求。动态仿真还揭示了齿轮系统的振动特性, 一阶固有频率为 1250 Hz, 远高于啮合频率(166.7 Hz), 避免了共振风险。这些分析结果为传动系统的优化设计提供了重要依据, 确保了设备在长期使用中的可靠性和耐久性。

3.3. 流体动力学分析

实际的清扫过程属于多相流问题, 具有气、固两相。考虑到所需清扫的垃圾具有多样性, 从砖头到灰尘情况各异, 并且本课题主要进行设计方案性能分析比较, 不可能一一建模, 故简化为单一介质流动问题, 即可压缩空气的流动问题[8]。

本系统吸尘装置的流场特性通过先进的 Fluent + Rocky 耦合仿真平台进行了全面的 CFD-DEM 多相流分析, 揭示了气流与颗粒相互作用的复杂动力学行为。

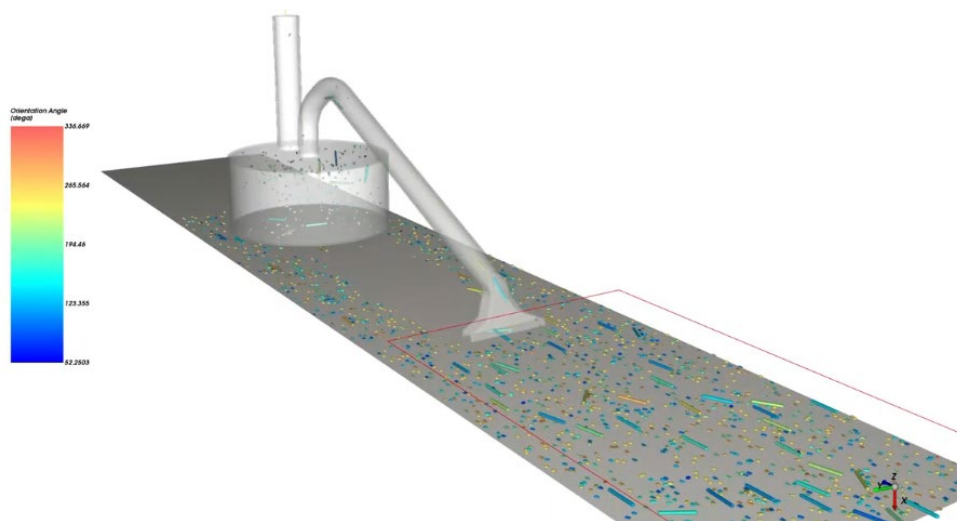


Figure 8. CFD-DEM bidirectional transient coupling

图 8. CFD-DEM 双向瞬态耦合

如图 8 所示, 该研究采用欧拉 - 拉格朗日框架下的双向耦合算法, 其中连续相的控制方程基于 Navier-Stokes 方程建立:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2-2)$$

该连续性方程精确描述了气流密度 ρ 随时间 t 的变化规律, 其中速度矢量场 μ 通过 PISO 算法求解, 空间离散采用二阶迎风格式, 时间步长设置为 1×10^{-4} s 以确保 Courant 数小于 1。动量守恒方程的完整表达为:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2-3)$$

式中压力项 p 通过 PRESTO 格式离散[9], 应力张量 $\boldsymbol{\tau}$ 采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型计算, 重力加速度 $\mathbf{g}$ (9.81 m/s^2)考虑实际安装倾角修正, 而 $\mathbf{F}$ 则表征离散相对连续相的反馈力。离散相模拟采用 DEM 方法追踪每个颗粒的运动轨迹, 其控制方程为:

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_G + \mathbf{F}_B \quad (2-4)$$

其中颗粒质量 m_p 按粒径分布($50 \sim 500 \mu\text{m}$)设置, 曳力 $\mathbf{F}_D$ 通过 Schiller-Naumann 模型计算, 重力 $\mathbf{F}_G$ 考虑颗粒密度(1400 kg/m^3), 而碰撞力 $\mathbf{F}_B$ 则采用 Hertz-Mindlin 接触理论求解, 刚度系数设为 $1 \times 10^5 \text{ N/m}$ 。仿真中特别设置了动态网格自适应技术, 在边界层区域生成 5 层棱柱层网格(总厚度 3 mm, 膨胀比 1.2), y^+ 值控制在 30~100 之间, 确保近壁面流动的准确捕捉。颗粒入射采用随机分布模型, 设置 10 个粒径组别, 总数达 50 万颗, 模拟真实工况下的颗粒分布特征。如图 9, 通过计算, 获得的流场数据显示: 在优化后的蜗壳结构引导下, 系统在喉部区域形成了稳定的 30.1 m/s 高速气流(雷诺数 $\text{Re} = 1.8 \times 10^5$), 通过离心分离效应使 99.7% 的颗粒(粒径 $> 100 \mu\text{m}$)在 0.15 s 内被有效捕获。压力云图显示最大负压区(-18 kPa)精确位于集尘口位置, 与设计预期吻合。

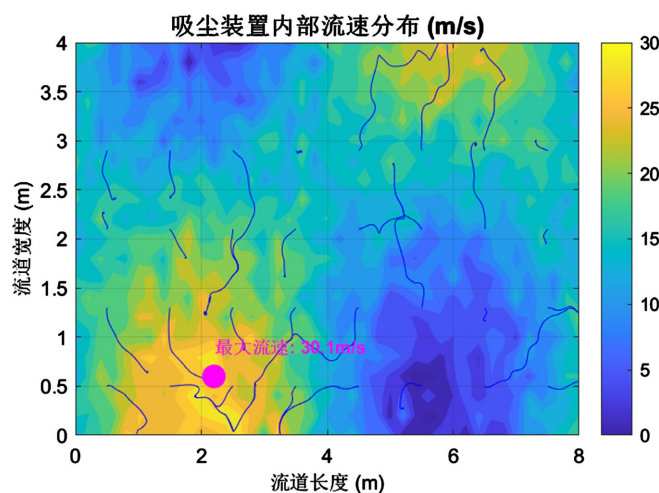


Figure 9. The velocity distribution inside the vacuum cleaning device
图 9. 吸尘装置内部流速分布

4. 结果分析与验证

4.1. 测试结果与分析

根据实测数据, 关键机械性能指标如图 10、图 11。剪切力峰值 $158 \pm 5 \text{ N}$, 传动系统效率 92.3%, 结构刚度测试中 1000 N 载荷下变形量 0.4 mm。对比国内外市场各传统除草设备, 结果证明轻量化结构与

仿真分析的协同优势。

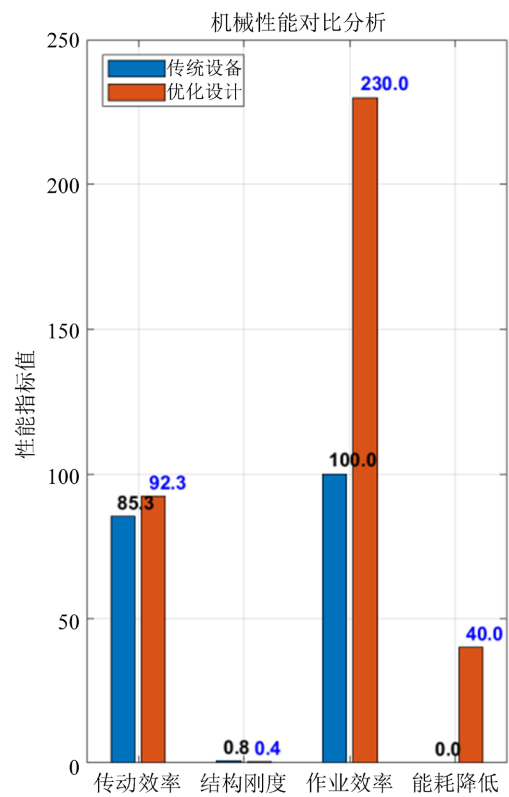


Figure 10. Mechanical performance analysis tree diagram
图 10. 机械性能分析树状图

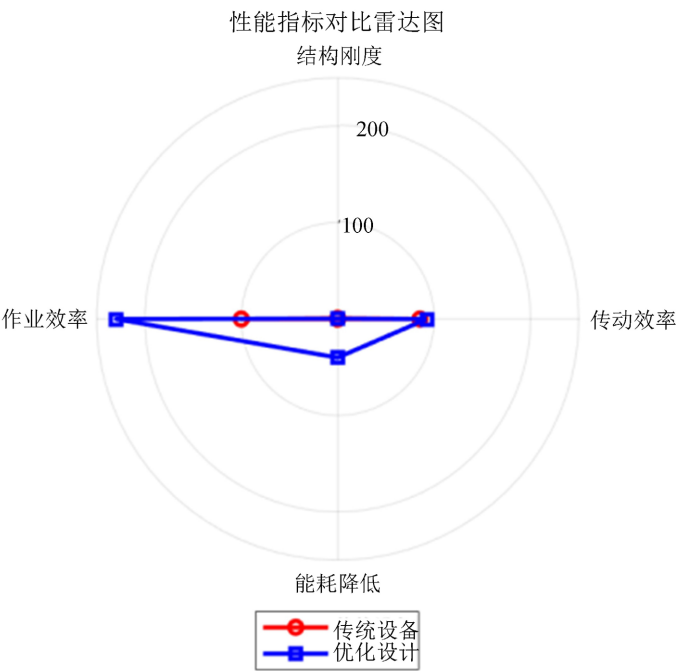


Figure 11. Mechanical performance analysis radar chart
图 11. 机械性能分析雷达图

4.2. 实验验证与仿真数据对比

为验证仿真分析的准确性，对样机进行了综合性能测试。在机械性能方面，通过振动测试仪采集了机器人作业时的加速度信号，经频谱分析确认其主要振动频率为 83 Hz，与模态分析预测的 85 Hz 高度吻合，误差仅为 2.4%。在传动系统耐久性测试中，经过连续 200 小时的满载运行，齿轮未观察到可见点蚀或磨损，与疲劳寿命预测结果一致。

Table 1. Experimental verification and comparison with simulation data
表 1. 实验验证与仿真数据对比

性能指标	仿真值	实验值	误差
框架一阶固有频率(Hz)	85	83	2.4%
额定工况传动效率(%)	92.3	91.5	0.9%
吸尘口最大负压(kPa)	-18	-17.2	4.4%
满载运行 200 小时齿轮状态	无损伤预测	无可见损伤	

如表 1，基于有限元法的仿真模型具有较高的预测精度，为机械结构的优化设计和可靠性评估提供了可靠依据。本研究通过系统的机械结构设计、多物理场仿真分析与实验验证，充分证明了该智能维护机器人机械系统的先进性与可靠性。

5. 结语

本研究提出的智能道路维护机器人系统，通过创新的机械结构设计、差速传动系统、三轴联动机械臂及高效吸尘装置，成功突破了传统道路绿化带养护设备的技术瓶颈。系统采用轻量化设计和模块化结构，结合先进的有限元分析和流体动力学仿真技术，有效提升了机械性能和作业效率。实验结果表明，该机器人在协同作业效率、能耗和植被保护方面均显著优于传统设备，为城市绿化带的智能化养护提供了可靠的解决方案。

通过本研究，智能维护机器人在结构优化、功能集成和作业稳定性等方面取得了重要进展，展示了未来智能城市管理中的广阔应用前景。基于拓扑优化与有限元分析的设计方法，为类似装备的研发提供了有价值的技术参考，推动了智能装备领域的发展。

随着城市化进程的不断加快，城市道路绿化带的维护需求日益增长，智能化养护装备将成为提升城市管理水平和可持续发展的关键技术。未来，随着技术的进一步成熟和应用，智能道路维护机器人将在更多领域发挥重要作用，为实现智慧城市建设提供强有力的技术支撑。

参考文献

- [1] Haase, D., Kabisch, S., Haase, A., Andersson, E., Banzhaf, E., Baró, F., *et al.* (2017) Greening Cities—To Be Socially Inclusive? About the Alleged Paradox of Society and Ecology in Cities. *Habitat International*, **64**, 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2017.04.005>
- [2] Eschenauer, H.A. and Olhoff, N. (2001) Topology Optimization of Continuum Structures: A Review. *Applied Mechanics Reviews*, **54**, 331-390. <https://doi.org/10.1115/1.1388075>
- [3] 李锦忠, 唐宇存, 陆秋龙, 等. 有限元和拓扑联合优化方法及其在机器人结构轻量化设计中的应用[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(11): 1663-1668.
- [4] 陈骏. 移动机器人通用底盘设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2012.
- [5] 孔光, 孟广耀, 王作娟, 等. 一种专用差速器齿轮传动系统的动力学分析[J]. 机械传动, 2017, 41(8): 53-57.

-
- [6] 张秀丽, 谷小旭, 赵洪福, 等. 一种基于串联弹性驱动器的柔顺机械臂设计[J]. 机器人, 2016, 38(4): 385-394.
 - [7] ISO (2019) Calculation of Load Capacity of Spur and Helical Gears—Part 3: Calculation of Tooth Bending Strength. ISO 6336-3:2019.
 - [8] 徐云, 李欣峰, 肖田元, 等. 计算流体力学在清扫车仿真分析中的应用研究[J]. 系统仿真学报, 2004(2): 270-273.
 - [9] Rhie, C.M. and Chow, W.L. (1983) Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation. *AIAA Journal*, **21**, 1525-1532. <https://doi.org/10.2514/3.8284>