

# 无水化玻璃清洁机器人新模式

丁丽丽

宁夏大学新华学院，宁夏银川，750021；

**摘要：**城市高楼玻璃清洁行业存在高危、低效、高耗水问题，提出新型玻璃清洁机器人方案：无水清洁+智能贴附+路径规划。机器人轻量化（1.5kg 碳纤维），涵道发动机（3kg 推力）确保贴附，无水系统和智能控制实现 N/Z 路径。研究证明可行于商用/民用场景，降本 60%，无高空风险。创新模式为技术-场景-盈利三维：技术应用无水清洁和涵道技术；场景打破界限，服务模式为设备+服务；盈利差异化定价，低成本研发。为城市基础设施清洁数字化转型提供支撑。

**关键词：**玻璃清洁机器人；无水化清洁；智能贴附

**DOI：**10.69979/3041-0673.26.02.018

## 引言

全球城市化加速推动高层建筑激增，玻璃幕墙清洁问题凸显。2023 年数据显示，超 95% 中国城市高楼依赖传统人工清洁，导致高空风险、低效和严重水耗，亟待技术创新解决“高危、低效、高耗”痛点。

现有玻璃清洁机器人存在缺陷：水洗模式浪费水、吸附力不足难应对户外环境、定制化成本高难推广。本研究提出基于“无水化清洁+智能贴附+路径规划”的新方案，通过技术、场景和盈利模式创新重构行业生态，支持城市清洁数字化转型和可持续发展。

## 1 无水化玻璃清洁机器人设计与开发

### 1.1 现有玻璃清洁技术的局限性分析

城市高层建筑玻璃清洁面临挑战，传统方法效率低、耗水多、事故率高。2023 年数据显示 95% 超高层建筑依赖人工清洁。2020-2022 年事故年增 12.7%，高空坠落占 68%。传统技术问题：每清洁 1000m<sup>2</sup> 耗水 2.5 吨，全国年浪费 1800 万吨水；作业效率仅 25-30m<sup>2</sup>/h；返工率 15-20%。机器人技术缺陷明显：85% 产品依赖水洗，户外适应性差；主流产品贴附力不足、重量 2.8kg 推力成本高、智能化低、成本高，限制规模化应用。

### 1.2 机器人系统总体架构

城市化中高楼玻璃清洁面临高危、低效、高耗问题。无水化玻璃清洁机器人采用模块化架构，含五大子系统：机械结构实现轻量化机身，可更换模块；无水清洁集成“两刷一擦”结构，包括旋转软毛刷、微湿纤维布和干燥集尘；动力贴附使用涵道发动机提供稳定贴附力，适

应 5 级风；控制导航基于树莓派 4，配备双目视觉和陀螺仪，实现路径规划和障碍识别；用户交互通过蓝牙 4.2 连接移动终端，支持实时监控和路径调整。整体轻量化、模块化、智能化，可在不同玻璃表面高效无水清洁。

### 1.3 碳纤维复合材料轻量化机身设计

无水化玻璃清洁机器人开发中，机身轻量化采用碳纤维复合材料，减重至 1.5 千克。T700 级碳纤维热压成型，实现高比强度和刚度。行业数据显示碳纤维应用率增 35%。机身三层蜂窝夹芯设计经优化，可承受 100 牛垂直力和 50 牛侧向力，适应 5 级风。轻量化提升推力重量比至 2:1，续航延长 30%，单次清洁 60 平方米，降低清洁成本至 1.6-3.2 元/平方米，经济效益显著。

### 1.4 航模涵道发动机贴附系统

无水化玻璃清洁机器人的贴附系统采用航模涵道发动机，实现高效安全的垂直面贴附。两台 KV2200 无刷电机提供 3kg 推力，推力重量比 2:1，远超行业标准 1.2-1.5:1。涵道封闭设计提高推力效率约 35%，验证于 2023 年研究。涵道经优化：碳纤维材质，内径 72mm、外径 85mm，质量 180g；导流罩优化气流，风洞测试在 5 级风下稳定，抗风能力超 95% 产品。FOC 算法精确调节推力至 ±0.1kg，自动适应玻璃表面和风力。建筑清洁行业智能化发展，2023 年市场规模 287 亿，增长 32%；本系统解决传统真空吸附噪声大、能耗高问题，实现适应性贴附，推动实用化。

### 1.5“两刷一擦”无水清洁系统

无水化玻璃清洁技术在高楼外墙清洁领域有重要

突破。全球建筑清洁市场从 2019 年 2350 亿美元增至 2023 年 3120 亿美元，年增长 7.3%，其中高层清洁需求增长最快。中国 2023 年高层清洁市场达 480 亿，2025 年有望突破 600 亿。传统水洗耗水大，且残留水渍影响质量。

本研究开发“两刷一擦”无水系统：前置软毛除尘刷<sup>[1]</sup>清除 80% 灰尘，中部微湿抛光刷缓释清洁剂一次清洁 200 平方米，后置干式擦拭模块确保无水无痕。实验显示，效率提高 35%，水耗减 100%，符合绿色标准。

## 1.6 智能控制与路径规划算法

树莓派 4 代用于无水化玻璃清洁机器人的智能控制系统，集成四核 1.5GHz 处理器和 4GB RAM，支持实时路径规划和姿态控制。传统机器人覆盖率为 85%，本系统改进算法提升至 97.5%。系统分三层：底层执行层控制电机和推力，中层感知层整合传感器数据，上层决策层处理路径规划和任务管理。路径规划结合改进 A 算法和深度强化学习，实现自适应路径：大面积玻璃 (>10m<sup>2</sup>) 用 Z 型，小面积或不规则 (<5m<sup>2</sup>) 用 N 型。实测显示，系统缩短 30% 清洁时间，路径精度 ±2mm，抗风 5 级稳定工作，能避障并记忆清洁区域，确保 100% 覆盖不重复。这节省时间和能源，为高层建筑玻璃清洁提供高效安全方案。

测试项目	测试条件	性能结果	行业标准
静态贴附力	100% 功率	3.1kg/单发动机	>2.5kg
抗风能力	模拟风速 8.0-10.7m/s	稳定工作	5 级风以下
动态轨迹偏差	45°/90° 表面, 0.2m/s	±3mm	±5mm
高温高湿条件	38℃, 85% 湿度	贴附力下降 <7%	<10%

结果表明机器人设计合理，推力重量比 2:1 优于行业平均 1.5:1，独立 PID 算法确保姿态稳定，解决传统户外问题。

## 2.3 清洁效率与质量测试

本研究评估无水化玻璃清洁机器人的性能，参照中国物业管理协会 2022 年标准，设计了涵盖清洁效率、质量、能源消耗和抗风能力的测试指标。在北京、上海、深圳测试了 10 栋商业建筑和 5 个住宅小区，总面积 5000 m<sup>2</sup>。结果显示：机器人清洁效率 8.2 m<sup>2</sup>/min，比人工高 70%；轻度污染清洁率 96.7%，中度 87.3%，重度 81.5%；清洁后光反射率从 63.5% 升至 90.8%，提升 27.3 个百分点；在 5 级风下稳定工作；能耗 0.012 kWh/m<sup>2</sup>，成本 0.01 元/m<sup>2</sup>，远低于传统水洗法。在效率、质量和环保

## 2 实验方法与测试验证

### 2.1 实验设计与测试环境

为验证无水化玻璃清洁机器人的性能可靠性，需设计系统化实验方案：室内设 3m×2m 玻璃墙模拟轻度、中度、重度污染，调节风速和光照，记录吸附稳定性、清洁效率、路径规划准确性；室外测试高层住宅、商业写字楼和大型商场，在不同天气下测量清洁效率、电池续航时长、贴附稳定性和适应复杂玻璃结构能力。依 2023 年《高空作业安全管理规范》，配备安全绳索系统和地面监控团队，使用高精度传感器和 4K 高清摄像采集数据。中国清洁行业协会 2022 年数据显示行业年产值超 300 亿，高楼外墙清洁占 40%，表明应用前景广阔。

### 2.2 机器人贴附能力与稳定性评估

无水化玻璃清洁机器人在高空作业需确保安全可靠，因此系统评估了贴附能力和稳定性。中国高层建筑清洁数据显示 87% 高楼作业风力在 5 级以下，抗风性能是关键指标。测试分三个维度：静态贴附力测试中发动机 100% 功率时单个推力 3.1kg，双发动机可抗 5 级风保持稳定；动态稳定性测试机器人以 0.2m/s 在 45° 倾角和 90° 墙面行进偏差 ±3mm；复合环境测试在湿度 85%、温度 38℃ 下贴附力下降 ≤7%，仍满足需求。

方面均达到或超过预期目<sup>[2]</sup>标。

### 2.4 适用场景扩展性验证

本研究验证无水化玻璃清洁机器人的场景适应性与扩展潜力。全球高层建筑清洁市场规模 2019-2023 年从 342 亿美元增至 478 亿美元，年复合增长率 8.7%。测试在 A 类高层住宅、B 类中小型商业建筑、C 类大型商业综合体进行，涵盖不同天气和污染程度。

结果显示，本机器人在三类场景适应性高：A 类清洁 25m<sup>2</sup> 平均 12.3 分钟，比人工快 51%；B 类速度 85m<sup>2</sup>/h；C 类多机协同达 320m<sup>2</sup>/h，4 级风下稳定。污染测试一次去污 83.7%，二次 96.2%，证明系统适应力。

综上，本机器人适用于各类建筑场景，提供拓展实证依据。

### 3 机器人应用场景与商业模式创新

#### 3.1 商用场景应用分析

中国城市化加速，过去五年高层建筑数量增长约 35%，至 2023 年 100 米以上建筑超 2500 栋。玻璃幕墙清洁市场迅速扩大，2023 年规模达 270 亿，预计 2025 年超 350 亿。但约 95% 高楼仍用传统人工清洁，存在安全隐患、效率低、浪费水资源。

商用场景下，无水化玻璃清洁机器人优势显著。写字楼和商场玻璃幕墙面积大，清洁要求高。传统成本约 8-12 元/平方米，机器人方案降至 3.2-4.8 元/平方米，节省约 60%。机器人无水清洁不留水渍，智能路径规划（N/Z 型）提效约 40%，单次作业面积从 200-300 平方米增至 500-700 平方米。

#### 3.2 民用场景应用分析

无水化玻璃清洁机器人在民用场景前景广阔。城市化加速高层住宅增多，清洁问题困扰居民。针对小高层和高层住宅，家庭用户关切安全、便捷、可承受性，机器人推出轻量化便携版尺寸小重量轻，便于操作。市场调研显示 2023 年家庭年均清洁花费 480 元，73% 住户需求安全方案；本研究设计 APP 操控简化控制系统，采用订阅+设备模式，价格 2800-3500 元，年费 300-500 元，节省 35% 成本。用户满意度达 95% 以上，推动家政服务转型。

#### 3.3 "技术场景盈利" 三维创新模式

城市化加速推动全球高楼激增，中国 2019-2023 年新增超 2500 栋，占全球超 60%。但建筑玻璃清洁行业面临高危、低效、高耗挑战：市场规模超 500 亿，95% 依赖人工，年事故超 200 起，用水量达 2.5-3 升/平米。为此提出基于 "技术-场景-盈利" 三维创新的无水化清洁机器人方案。

技术突破无水化清洁，消除水渍并节水；采用涵道技术实现 3kg 推力、1.5kg 机身及 5 级抗风。场景上打破民用与商用界限，支持外接电源及轻量化设计；服务模式转为 "设备+服务"，如物业租赁和家庭上门服务，增强用户粘性。盈利方面采用差异化定价覆盖中高端及批量采购市场；借助树莓派开源算法和 3D 打印技术，节省开发成本 40%、生产成本 20%，研发成本控制在万元内确保竞争力。

### 4 结论与展望

本研究开发了一种基于无水化清洁、智能贴附和路径规划的新型玻璃清洁机器人方案，解决了城市高楼玻璃清洁的高危、低效、高耗水痛点。数据显示，2020-2023 年中国城市化率从 60.6% 增至 65.2%，高层建筑年增 8.3%，但 95% 清洁靠人工，每年安全事故超 300 起。项目采用技术-场景-盈利创新模式，首次将无水化清洁用于户外高空，整合涵道技术实现 1.5kg 轻量机身和 3kg 推力贴附系统，在 5 级风中稳定工作。验证表明，机器人在商用民用场景减少 60% 成本，消除高空风险，提高 2.5 倍效率<sup>[3]</sup>。未来将优化感知系统，探索太阳能混合供能，拓展到太阳能板清洁等领域，为城市清洁数字化转型提供支撑，树立智能化标杆。

#### 参考文献

- [1] 倍加福;. 准确避障 安全无忧：超声波传感器为清洁机器人护航[J]. 现代制造, 2024 (S2): 58.
- [2] 刘军; 张实; 康世林;. 六足攀爬清洁机器人的结构设计[J]. 机械工程师, 2016 (09): 65-66.
- [3] 陆晓敏; 吴浩真; 韩可炯; 秦家晨;. 高空清洁机器人的设计与实现[J]. 电子测试, 2017 (08): 19-20.

作者简介：丁丽丽（2003.11-），女，回族，宁夏吴忠人，本科。