

履带式可爬楼导盲仪的结构设计

廖正楠, 罗培毅, 吴炳聪, 谢婷婷, 林颂轩, 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8月20日; 录用日期: 2025年9月15日; 发布日期: 2025年9月24日

摘要

当前, 导盲机器人在环境检测等方面存在的技术问题, 严重影响了产品性能, 制约了市场推广。本文首先针对环境检测这一关键技术难点, 设计了一款多功能导盲仪; 其次, 为提升地形适应能力, 基于履带式全地形适应结构, 重点强化了其爬楼功能; 最后, 运用UG软件建立了该履带式可爬楼导盲仪的三维模型。这种履带式设计显著提升了产品在多场景下的适应性, 有效提高了导盲仪的工作效率和用户体验。

关键词

履带式, 可爬楼, 多功能, 导盲仪

The Structural Design of Crawler-Type Stair-Climbing Guide Device for the Blind

Zhengen Liao, Peiyi Luo, Bingcong Wu, Tingting Xie, Songxuan Lin, Xianghui Zhan*

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

Received: Aug. 20th, 2025; accepted: Sep. 15th, 2025; published: Sep. 24th, 2025

Abstract

At present, the technical problems of guide robots in environmental detection and other aspects have seriously affected product performance and restricted market promotion. In this paper, a multi-functional guide is designed for the key technical difficulty of environmental detection. Secondly, in order to improve the terrain adaptability, based on the tracked all-terrain adaptation structure, the climbing function is strengthened. Finally, the three-dimensional model of the crawler climbable guide is established by using NX software. This tracked design significantly improves the

*通讯作者。

文章引用: 廖正楠, 罗培毅, 吴炳聪, 谢婷婷, 林颂轩, 占向辉. 履带式可爬楼导盲仪的结构设计[J]. 人工智能与机器人研究, 2025, 14(5): 1207-1217. DOI: 10.12677/airr.2025.145114

product's adaptability in multiple scenarios, effectively improving the work efficiency and user experience of the guide.

Keywords

Crawler, Climbable Building, Multifunction, Guide Device for the Blind

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

1.1. 研究背景

全球视力障碍人群数量庞大且持续增长,推动导盲行业市场规模不断扩大。以中国为例,视力障碍者已超过 1700 万,对导盲产品与服务的需求日益迫切。目前主流的导盲方式有导盲犬和传统导盲杖,均存在显著局限。传统导盲杖主要依赖触觉感知地面接触障碍物,对空中障碍物,如低垂的树枝、广告牌等难以察觉,功能单一。导盲犬则需专业机构进行长达 1~2 年的训练,成本高达数万元。目前国内导盲犬数量不足 200 只,远不能满足庞大需求。此外,在十字路口、地铁站等复杂交通环境中,盲人普遍面临判断车辆动向、速度及适应嘈杂环境的困难,出行风险较高。为应对这些挑战并满足市场需求,本研究研发设计了一款履带式可爬楼导盲仪。该设备通过多功能模块设计,结合履带式结构的创新应用,实现了爬楼功能,显著拓展了其在复杂地形和多样化场景中的适用性。

1.2. 研究现状

为应对视障人士出行中长期存在的挑战,学术界与工业界不断探索将机器人技术应用于辅助导航,推动了智能导盲设备与爬楼机器人两大交叉领域的迅速发展。早期智能导盲设备主要基于传统导盲杖进行电子化增强,通过集成超声波、红外或激光雷达等传感器探测障碍,并借助振动或语音向用户发出警示。这类设备显著提升了对前方及空中障碍物的感知能力,但其移动平台始终未能突破轮式结构的限制。轮式结构在平坦路面上虽具有效率高、能耗低的优点,却完全无法跨越楼梯、路缘石等垂直障碍,严重限制了用户的自主活动范围,在复杂城市环境中仍存在“最后一米”的通行障碍。

在爬楼机器人方面,目前主要存在轮式、履带式和腿足式三种移动机构。

轮式爬楼机器人:通常采用行星轮组、连续切换轮组等特殊轮系结构。这类机器人平移动力性能好,但结构复杂,控制难度高,在楼梯上的稳定性与承载能力较差,且振动和噪音较大,难以直接应用于对安全性和舒适性要求极高的导盲场景。

腿足式机器人:通过模拟人类或动物步态实现运动,具有极高的地形适应性和灵活性。然而,其技术复杂度极高,成本昂贵,能耗巨大,且当前的控制算法在面对动态、未知环境时仍存在稳定性与实时性风险,目前主要集中于军事、科研等高价值领域,距离民用普及遥遥无期[1]。

履带式爬楼机器人:采用单条或多条履带作为移动机构,通过履带环绕轮系产生的连续接触面来适应楼梯形状。其优点是牵引力大、稳定性好、越障能力强、控制相对简单。然而,传统履带机器人多为工业或军用设计,普遍存在重量大、噪音高、结构僵硬等问题,且缺乏为人机交互而设计的感知与导引系统,无法直接用作导盲设备。

综上所述, 现有技术未能有效解决视障人士在复杂地形, 尤其是楼梯环境下的自主、安全通行难题。轮式导盲设备缺乏越障能力, 腿足式机器人受限于成本与技术成熟度, 传统履带式机器人则欠缺导盲应用所需的轻量化、低噪声与人机交互能力。为彻底突破该难题, 本研究创新性地设计了一款履带式可爬楼导盲仪, 以填补当前市场空白, 为视障人士提供一种真正具备“全地形、全场景”通行能力的智能导盲解决方案, 具有重要的社会意义与应用前景[2]。

2. 履带式可爬楼导盲仪总体结构

为满足导盲仪在复杂现实场景中的应用需求, 特别是突破传统导盲设备爬楼的瓶颈, 本设计采用了以履带动态变形为核心的可变形履带底盘行走机构[3]。在结构设计上, 针对爬楼功能需求对履带系统进行了优化: 通过导轨滑移机构改变驱动轮位置, 使履带前端上翘自适应楼梯倾角。控制系统融合 Real Sense D435 的深度感知与 MPU6050 姿态数据, 实时计算电机扭矩需求。基于此设计, 利用 Unigraphics NX (UG) 软件建立了履带式可爬楼导盲仪的三维模型, 如图 1 所示。

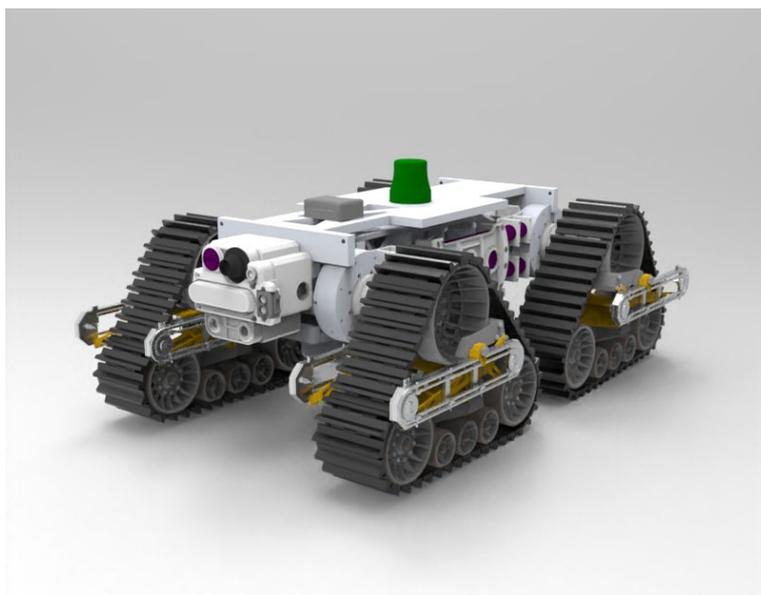


Figure 1. Overall structure diagram of the crawler climbable guide device
图 1. 履带式可爬楼导盲仪总体结构图

3. 动力选型

3.1. 驱动系统选型

为满足楼梯攀爬的持续大扭矩及复杂地形自适应需求, 左右履带采用独立无刷直流电机 + 行星减速器驱动。此方案相较于传统舵机 MG996R 具备扭矩提升 26 倍、热稳定性提高 300% 的优势, 确保在坡度 $\leq 35^\circ$ 的楼梯场景下可靠运行。

3.2. 电源模块

在履带式可爬楼导盲仪中, 电源模块直接决定设备的安全性、续航能力和环境适应性。本设计电源系统采用定制的 48V 60Ah 磷酸铁锂电池(CATL LF60P 电芯)满足轻量化需求, 通过 JW3316 BMS 实现四重保护。同时搭配 300W 20A 同步降压转换模块, 型号 Vicor DCM3623, 将 48V 电池电压高效($\eta > 92\%$)

转化为 12V/5V，是导盲仪电源模块中高压转低压的核心枢纽，其性能保证了电子系统的稳定性。本设计所选电池的型号及具体参数如表 1 所示。

Table 1. Battery technical data

表 1. 蓄电池技术数据

型号	标准电压/V	充电电流/A	容量/AH	尺寸 mm	重量 Kg
CATL LF105 16S1P	48	30	60	207*174*45	14.8

3.3. 处理传感器

为提升导盲仪在爬楼及崎岖地形下的动力控制精度与运行安全性，本设计引入 MPU6050 六轴姿态传感器。该传感器实时监测设备俯仰角及角速度，实现动力输出的自适应调节与倾覆风险预警。无刷电机驱动模块(型号：57BLF03)与 MPU6050 姿态传感器构成闭环控制系统。系统运行时，传感器实时采集设备倾角与角速度数据；当检测到爬楼俯仰角 $>30^\circ$ 时，控制器将电机扭矩输出提升至峰值 18 N·m；当横滚角 $>15^\circ$ 时，则触发差速转向补偿并振动告警。此设计显著增强了复杂地形下的动力适应性与操作安全性。

技术可行性分析：

(1) 功能匹配度

6 轴运动检测：MPU6050 集成 3 轴加速度计和 3 轴陀螺仪，可实时、精确捕捉导盲仪的倾斜角度、角速度及振动状态，满足爬楼时重心稳定性监测需求。体积小，节省空间，适合空间受限的嵌入式设备。

内置 DMP 引擎：支持硬件级姿态解算(输出四元数/欧拉角)，可直接获取俯仰角和横滚角，降低主控 CPU 负载，尤其适合实时性要求高的运动控制。

(2) 电气兼容性

供电需求：工作电压 2.375V~3.46V，但模块通常兼容 5V 输入。

通信接口：I²C 协议占用 MCU 资源少，布线简单。标准 I²C 接口，可直接输出数字信号，避免模拟信号调理电路设计。

(3) 动态性能适配

爬楼动作响应：陀螺仪带宽最高 256 Hz，可跟踪快速姿态变化。

抗冲击能力：耐受 10,000 g 机械冲击，适应履带越障时的剧烈振动。

3.4. 深度相机

本设计集成 Intel Real Sense D435 深度相机(图 2)，通过实时三维场景重建与楼梯特征识别，为动力系统提供前瞻性地形预判，实现无刷电机扭矩、转速及转向的预适应调节，显著提升爬楼效率与越障安全性[4]。该深度相机具备以下核心特性：

(1) 全局快门设计：深度传感器采用全局快门 CMOS，实现所有像素同步曝光，有效避免设备高速移动时产生的图像畸变与运动模糊。此特性尤其适用于对快速运动物体精准捕捉要求高的场景，如机器人高速行进、无人机避障及工业动态检测。

(2) 超宽视场角：提供水平视场角 HFOV 约 $85^\circ\sim 91^\circ$ ，垂直视场角 VFOV 约 $58^\circ\sim 65^\circ$ ，对角线视场角 DFOV 超 90° 。宽视场显著增大了单帧数据的空间覆盖范围，减少感知盲区，为机器人/无人机提供更早的障碍物预警时间。

(3) 近距离感知能力：最小感知距离为 0.11~0.17 m，支持对贴近物体进行有效扫描。

(4) 高帧率深度流：支持最高 90 fps@848 × 480 及 30 fps@1280 × 720 分辨率的深度数据输出。高帧率特性满足实时性要求严苛的应用场景(如 SLAM、实时避障算法)，有效降低运动状态估计与决策延迟。



Figure 2. Schematic diagram of the Intel Real Sense D435 depth camera
图 2. Intel Real Sense D435 深度相机示意图

4. 功能模块

4.1. 地形感知模块

通过 Intel Real Sense D435 深度相机构建环境三维点云地图，融合激光雷达 SLAM 定位与超声波近场盲区检测实现楼梯精准识别、动态障碍物追踪和地形区分功能。履带触觉反馈：底部压力传感器检测履带 - 台阶接触状态，输出台阶高度、深度、倾角实时数据，为动力调节提供依据。

4.2. 运动执行模块

结合履带相位同步控制实现平顺攀爬。通过主动轮扭矩突增以及导向轮的抬升实现台阶过渡，可以达到消除履带悬空，平稳啮合台阶的物理效果。双电机相位同步控制，履带速度波动 <0.1 m/s，可实现连续爬楼。零半径转向的策略使转弯空间 $<0.8 \times 0.8$ m²，可适应狭窄平台。

4.3. 安全交互模块

此模块可实现爬楼场景专属引导，通过手柄脉冲振动和语音提示实时预判，及时将预判反馈给用户，为用户的出行提供了安全保障。在攀爬阶段，每级台阶上升会随渐进式振动反馈，实现实时倾角提示。另外还有风险干预功能，当横滚角 $>15^\circ$ 时会触发三频蜂鸣告警和自动降速功能，当履带出现打滑时，会触发触觉紧急制动信号。

5. 履带爬楼结构分析

5.1. 履带整体分析

本设计在原有履带基础上增加了可移动导轨设计，导轨位移带来主动轮位置变化，使主动轮能前后位移形成斜面，模仿坦克攀爬姿态。履带爬楼结构的核心结构组成如图 3，爆炸结构展示如图 4 所示。

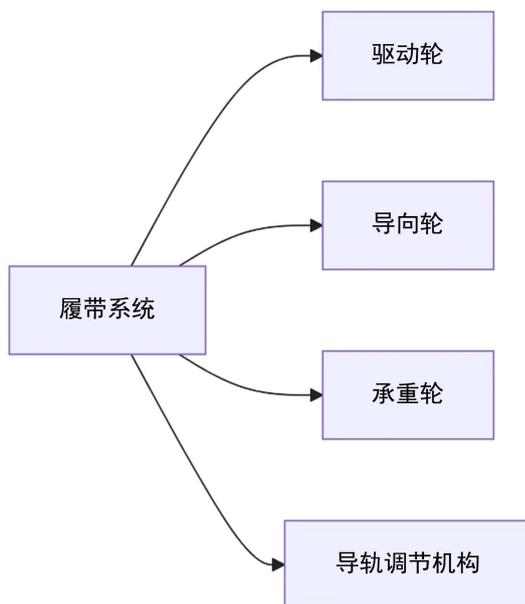


Figure 3. Core structure composition
图 3. 核心结构组成



Figure 4. Rail structure
图 4. 导轨结构

驱动轮连接电机输出轴，主动牵引履带运动，通过高位安装和导轨滑动设计来改变履带接地形态。导向轮用来维持履带张力，引导履带的走向，内部装有弹性预警装置可以使其自适应履带形变。承重轮组用于分散设备重力，缓冲地面冲击。导轨调节机构主要控制驱动轮前后位移，可通过电动推杆/液压缸驱动来调节导轨行程，其工作状态如图 5 所示，默认状态如图 6 所示。本设计突破了传统履带设备对标准楼梯的依赖，可拓展至消防、救援等复杂场景[5]。

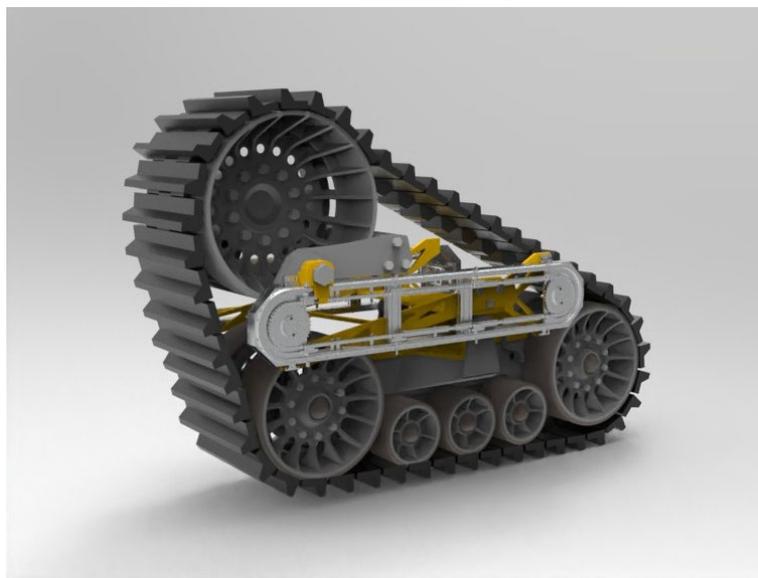


Figure 5. Schematic diagram of the working status of the guide rail
图 5. 导轨工作状态示意图

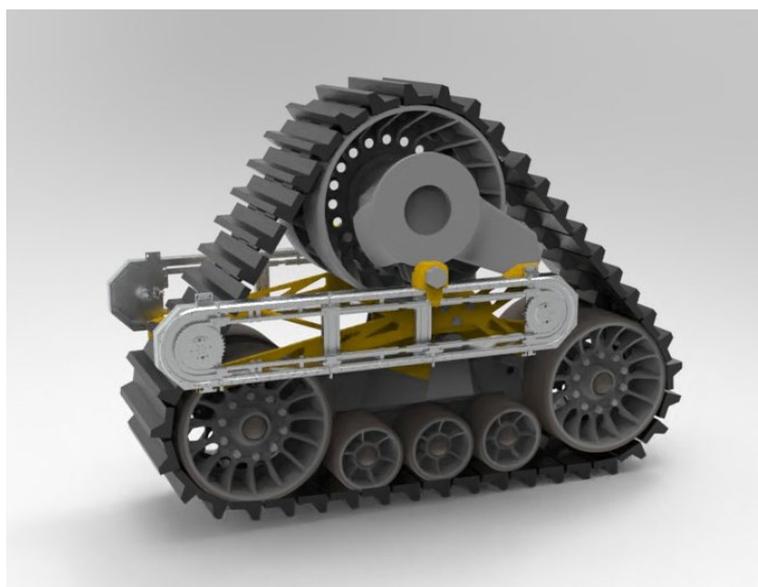


Figure 6. Schematic diagram of default state of guide rail
图 6. 导轨默认状态示意图

5.2. 履带支撑架仿真分析

为了得出模型的可行性，本次仿真分析选取履带中的支撑架构，履带支撑架构在整体运行中有着关键作用，需要一定的承受能力和稳定性，在分析支撑架构之前，对架构结构进行简化，去除其他部分复杂的细节，避免分析过程中软件停止运行。

首先给架构添加材料，整框架材料设置为合金钢，然后对架构进行固定约束，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 2000 N，侧面受力为 1000 N，添加完压力对整框架进行网格化后进行分析。架构的固定和附加压力如图 7 所示。

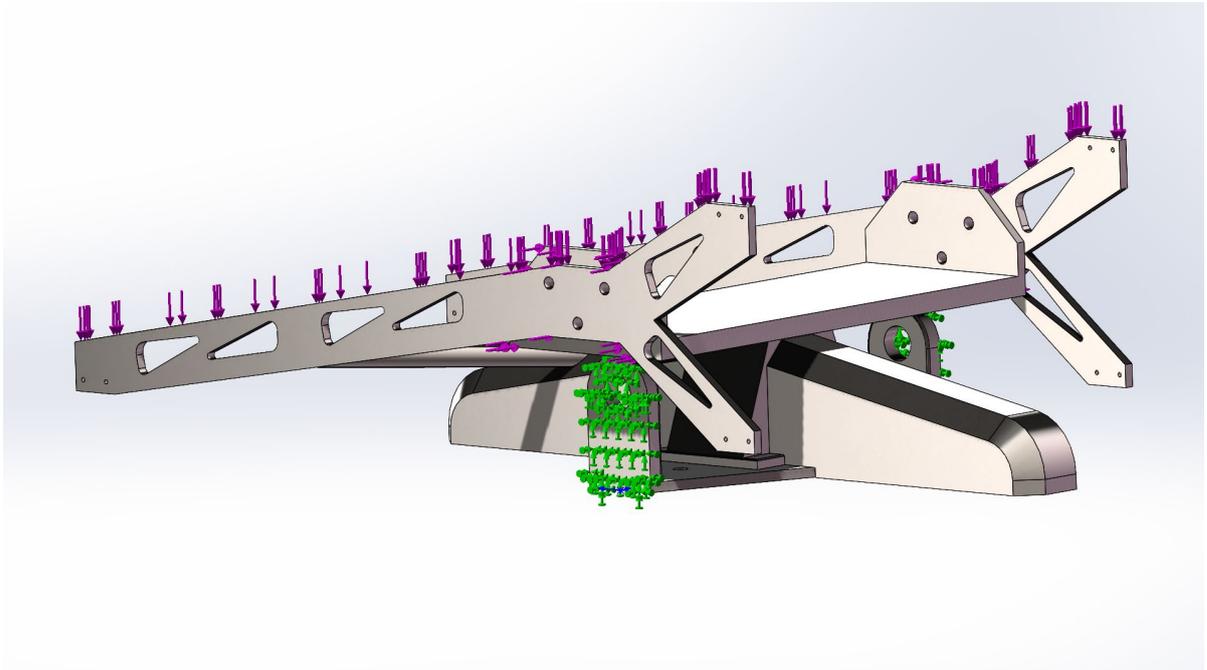


Figure 7. Architectural constraints, force diagram
图 7. 架构约束, 受力图

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 8, 图 9, 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 $3.406 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ 强度符合使用要求。位移仿真结果如图 10, 可得最大位移量为 1.001 mm。

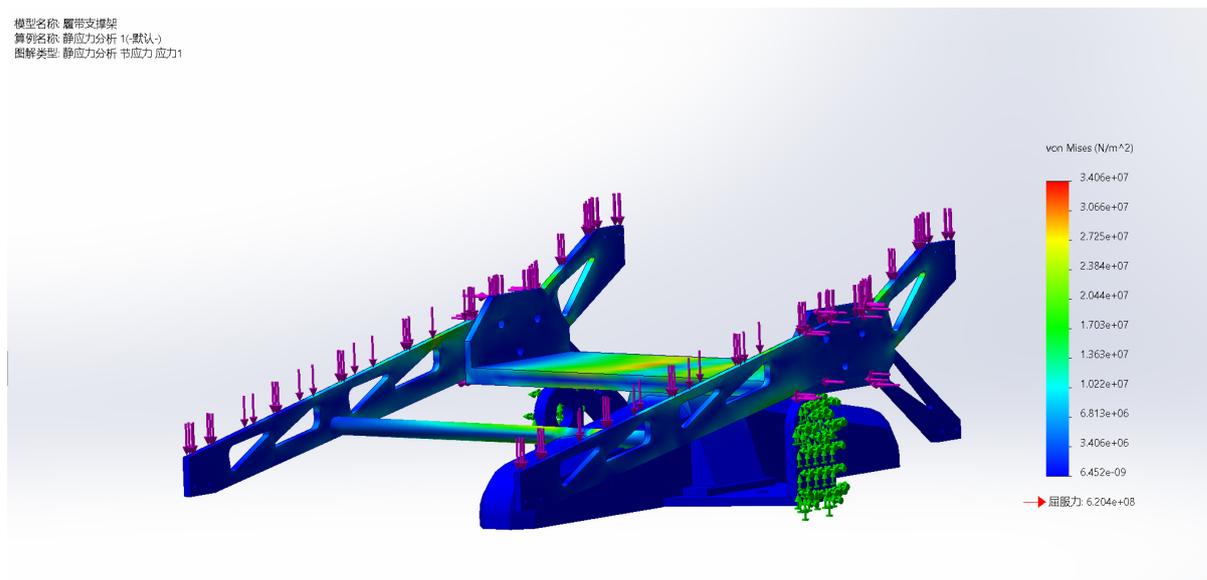


Figure 8. Stress diagram
图 8. 应力图

模型名称: 履带支架架
 算例名称: 静应力分析 1(默认)
 图例类型: 静态位移_位移1

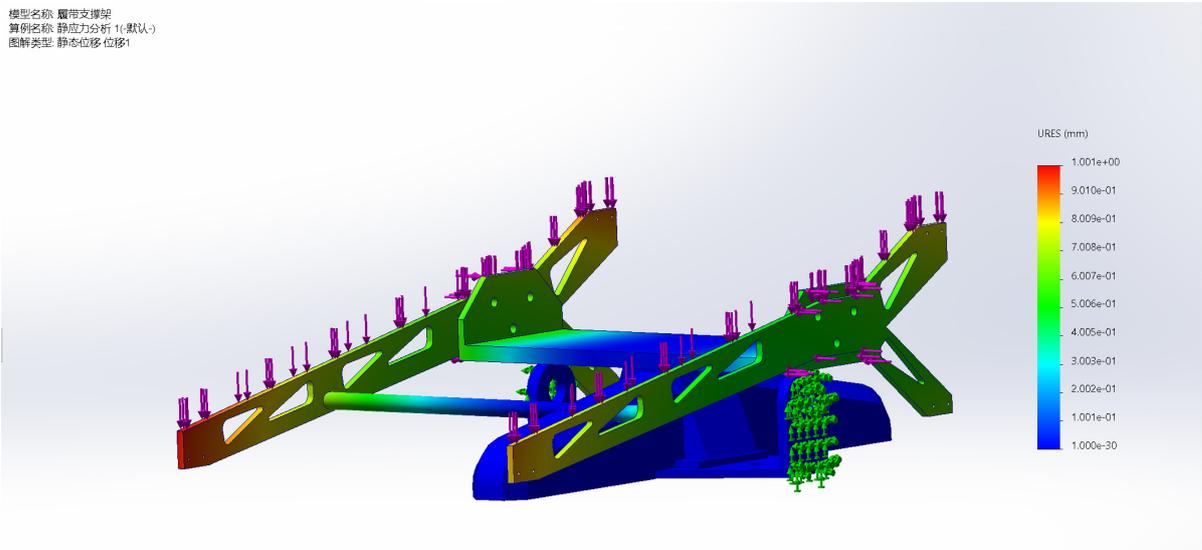


Figure 9. Strain diagram

图 9. 应变图

模型名称: 履带支架架
 算例名称: 静应力分析 1(默认)
 图例类型: 静态位移_应变1

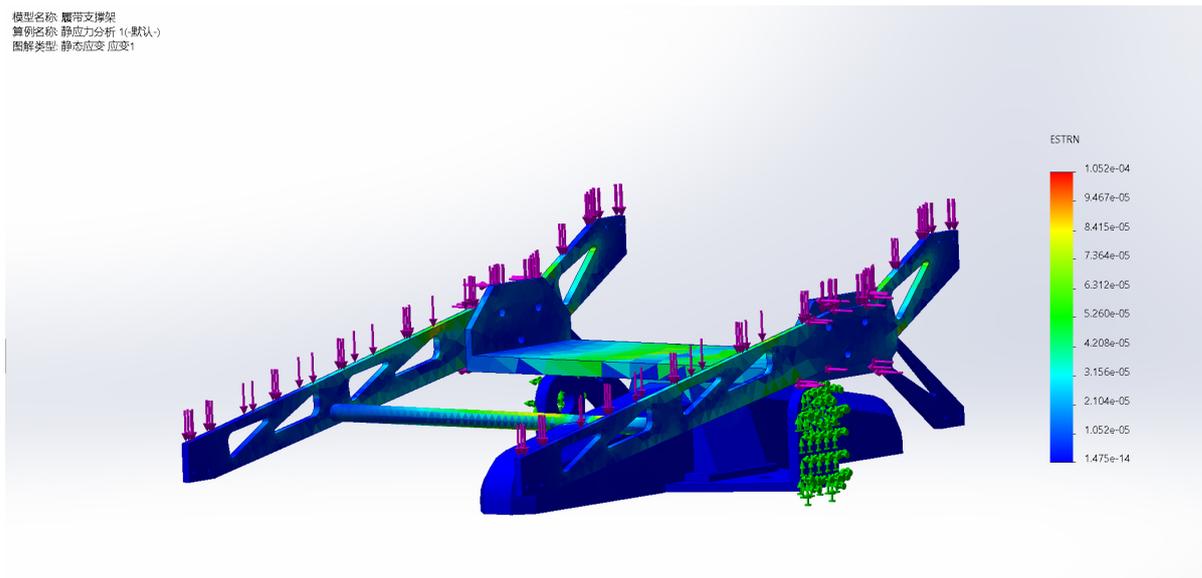


Figure 10. Displacement diagram

图 10. 位移图

6. 讨论

本研究成功研发的履带式可爬楼导盲仪，初步实现了为视障人士提供全地形通行能力的设计目标。为了更清晰地展示本设计与现有技术的差异，我们将关键性能指标进行了横向对比，如表 2 所示。

6.1. 核心优势

如上表所示，本设计最显著的优势在于填补了市场空白，在成本可控的前提下，首次将可靠的爬楼能力与针对性的智能导盲功能相结合，实现了从“避障”到“通障”的质变。本设计并非简单的机械改造，而是将自适应履带底盘、多传感器融合感知、环境建模与导航、以及多模态人机交互深度集成，形

成了一个完整的解决方案，其技术成熟度与实用性远高于腿足式方案，人机交互设计远优于工业履带方案。具有良好的应用针对性，一切设计以视障用户的实际需求为中心，能够很好的适应家庭和公共场所的楼梯宽度。

Table 2. Horizontal comparison of key performance indicators
表 2. 关键性能指标横向对比

特性指标	轮式爬楼机器人	腿足式机器人	履带式机器人	履带式可爬楼导盲仪
爬楼能力	无	优秀	无	优秀
平地效率	高	低	中	中
机械复杂度	低	极高	中	中 - 高
控制难度	低	极高	中	中
噪音水平	低	中 - 高	高	中
人机交互针对性	有	无	无	有
适用场景	平坦路面	复杂地形	平地，山路	日常复杂城市地形、楼梯
优劣分析	可适用于大多平地场景，结构简单，造价低	基本实现全场景覆盖，结构复杂，研究成本高	适用于没有高低台阶差的大多地面，结构相对简单	使用三角履带的结构设计改良，实现传统履带机器人无法上台阶的缺点，结构相对复杂

6.2. 劣势与挑战

尽管在轻量化(约 18 kg)、成本和噪音控制上已进行优化，但该导盲仪在便携性、用户经济负担、运行噪音、安全认证及极端环境适应性方面仍面临显著挑战。其重量对部分用户携行仍显不便，售价较高可能影响普及，室内噪音易引起关注，相关安全认证法规尚不完善，且在光滑、不规则或过高台阶上的性能仍存在局限。

6.3. 未来研究方向

未来研究将着力于通过采用碳纤维等轻质材料及模块化设计以大幅减重，借助规模化生产和创新商业模式降低成本，应用超静音电机与声学优化技术将噪音控制在 45 分贝以下，并通过引入冗余传感器、AI 视觉识别和主动悬挂系统提升安全性与复杂环境适应性，同时积极参与标准制定推动产品合规化。

尽管面临重量、成本和法规等现实挑战，但本研究所提出的履带式可爬楼导盲仪代表了一个充满希望的发展方向。它并非一个完美的终点，而是一个坚实的起点。通过持续的技术迭代、成本优化和标准建立，本研究有望从实验室原型真正走向千家万户，从根本上提升视障群体的移动自由和生活品质。

7. 结论

针对视障群体在楼梯环境中的通行壁垒，本文设计了一种基于可变形履带底盘的智能导盲仪。通过创新设计驱动轮导轨滑移机构，实现履带倾角 15°~35°动态调节，攻克了非标楼梯的适应性难题。另外，在控制方面融合了 Real Sense D435 的深度视觉与 MPU6050 姿态传感，构建楼梯识别模型及扭矩自适应

算法, 具有全地形通过性、安全可靠、续航经济性三个核心优势。以我国 2860 万视障者为目标群体, 可大量减少公共设施无障碍改造的费用, 带来了良好的社会效益。未来工作将聚焦太阳能补电系统与 AI 语义地图导航, 进一步拓展应用场景至救灾机器人领域, 为特殊人群独立出行提供可靠技术路径。

参考文献

- [1] 刘彪亮, 王德伦, 高媛. 基于犬类生物特征的四足机器人腿部机构设计[J]. 机械设计与制造工程, 2025, 54(8): 49-53.
- [2] 武墨晗, 荣学文, 范永. 导盲机器人研究现状综述[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(14): 1-13.
- [3] 段伟, 王元刚, 陈月. 一种导盲机器人行走机构设计[J]. 机械工程师, 2015(11): 48-49.
- [4] 李子康. 基于视听融合的导盲机器人的设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2017.
- [5] 施晓东. 双履带机器人移动系统爬楼性能研究[J]. 科学技术创新, 2020(28): 1-2.