



Structural Design and Analysis of Slope Weeding Robot

Mingle Wang

School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, China

Email: 2667868288@qq.com

How to cite this paper: Wang, M.L. (2025) Structural Design and Analysis of Slope Weeding Robot. *Open Access Library Journal*, 12: e14494.
<https://doi.org/10.4236/oalib.1114494>

Received: October 24, 2025

Accepted: November 21, 2025

Published: November 24, 2025

Copyright © 2025 by author(s) and Open Access Library 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

Abstract

With the development of The Times, urban greening has become a very important indicator. Weeding robots are also gradually entering the greening industry. However, when weeding on slopes, they still face difficulties such as easy slipping during slope operations, low operation safety, and low weeding efficiency. This paper analyzes the structure of the weeding robot by using the operation demand decomposition method and idealized models to address problems such as easy slipping on slopes, low operation safety, and difficulty in weeding. It also optimizes the design of related structures to break through terrain limitations and achieve precise weeding. In the hardware design of the slope weeding robot, the walking system adopts a multi-wheel independent suspension structure to enhance the passability of the weeding machine. In the overall layout, the center of gravity is lowered in advance to enable it to run on slopes and maintain the stability of the vehicle body. When choosing weeding tools, a high-speed rotating grass cutting line structure is adopted, which has a higher weeding efficiency and causes less damage to the environment. The energy source is mainly high-capacity lithium batteries, which can meet the single-charge battery life of 4 to 8 hours.

Subject Areas

Mechanical Engineering

Keywords

Slope Weeding Robot, Precise Weeding, Work on Sloping Land

1. 引言

除草机，作为农业生产和园林维护中不可或缺的机械设备，其发展历程反映了人类对高效、便捷生产方式的不懈追求，以及科技进步在农业和园艺

领域的深度应用。从最初简单的手动工具到如今高度智能化、自动化的先进设备，除草机的演变见证了工业革命、科技革命对传统劳作模式的深刻变革。在全球农业现代化进程加速、城市化水平不断提高的大背景下，除草机市场需求持续增长，技术创新日新月异。自动化及半自动化机械已经逐步取代人工从事高强度高危工作，除草机器人也随着科技的发展逐步取代传统除草，在农业现代化与园林管理智能化的浪潮下，除草机器人的研究与应用突破了传统除草模式的局限，对农业生产、生态保护、产业升级及社会资源优化具有多维度的重要意义，但是传统除草机在进行坡地作业时会有翻车以及传统刀片对坡地以及对自身刀片会有伤害所以在农业现代化与园林管理智能化的浪潮下，除草机器人的研究与应用突破了传统除草模式的局限，对农业生产、生态保护、产业升级及社会资源优化具有多维度的重要意义实现更加高效化，经济化，环保化的除草作业。

2. 坡地除草机器人参数计算及结构设计与分析

2.1. 除草参数计算

对于除草参数的计算，首先需要搞清楚所需要除掉的草的种类，需要的剪切力等。查阅资料得知草坪的草种类主要分为冷季草(主要包括高羊茅，早熟禾，黑麦草)。热季草(主要包括狗牙根，结缕草，野牛草)。其中高羊茅质地最为坚韧，其切割力相对其他草也较大查阅资料得知其所需切割力大致为30-50N，我们以此来计算出除草电机的最大功率并且留有0.2倍的冗余。割草线的半径为25cm，

知道最大剪切力以及剪切半径之后可以根据公式：

$$T = F * R$$

计算出电机所需要的负载为：

$$T = F * R = 50 * 0.25 = 12.5 \text{ NM.}$$

此外还需要考虑到电机的安全系数，查阅相关资料(电机安全系数表)电机的安全系数K取1.3。

$$T_{\text{实际}} = T * 1.3 = 12.5 * 1.3 = 16.25 \text{ NM.}$$

割草线的剪切效率依赖于合理的转速，转速过低会导致除草效率低下，还会导致托草等现象，转速过高会导致割草线断裂等危险情况，查阅资料得知割草线规范转速为4000~7000 rmp (见表1)。

表 1. 割草线结构电机转速选择-摘自百度全科(有改动)

类型/用途	空载转速(RMP)	适用场景	建议：先根据草质与工作量先确定转速范围再按所选机型的空载转速乘以0.7~0.85估算实际切割转速以确保切割效果与设备寿命兼顾
普通家用	3500~5000	细草嫩草修剪	
标准家用	5000~7000	普通草坪杂草	
中高端家用	7000~9000	粗草，高草	
专业级	9000~12,000	灌木，硬草	

计算电机所需要的功率为:

$$P = (T * N) / 9550 = (4000 * 16.25) / 9550 = 6.8 \text{ KW.}$$

供电方式为电池供电。电池电压为 24 V。

综合电机参数为($n = 4000 \text{ rpm}$, $P = 6.8 \text{ KW}$, 电压 24 V) (剪切力已留有冗余所以此处不用留冗余)。

2.2. 行走系统参数计算

除草机主要是一个前驱的小车，要求能在坡地运行，用理想化模型进行分析，首先假设下车是一个匀质的各项理想的一个长方体，并对其受力分析，首先对其进行平地运行的分析，分析结果为只要动力足够小车就能够在平地平稳运行[1]，接下来是对小车坡地运行的相关分析以下是相关受力分析图。

如图 1, 图 2 先对下车进行基础的受力分析, 对小车所受重力进行微分得

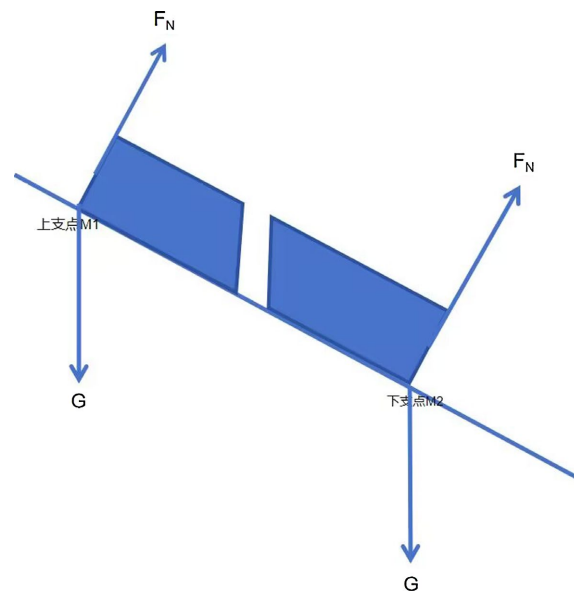


图 1. 小车上支点受力微分分解图

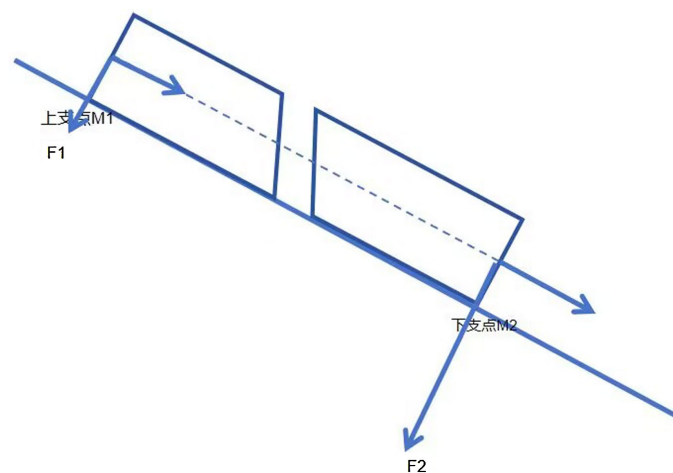


图 2. 小车上支点合力图

到图 1 小车上下支点所受重力图显然小车的上支点(上面轮子)受力是远小于小车下止点(下面轮子)这种情况的主要因为重力受力不均匀导致的,而且随着坡度的增大其程度更加明显。

最后得到这样一个受力分析图,可以看到在坡地小车除了受到一个向下的力之外还会受到一个力偶的作用,主要是因为小车上止点和下止点受力不同而引起的变化,只要达到一个临界值,小车便会发生翻转,也就是坡度达到一定的值的时候小车在坡地作业就会发生翻转,从而无法完成作业内容。本文借助了重心位置与极限倾斜角的关系[2]来解释为什么会发生这种情况。

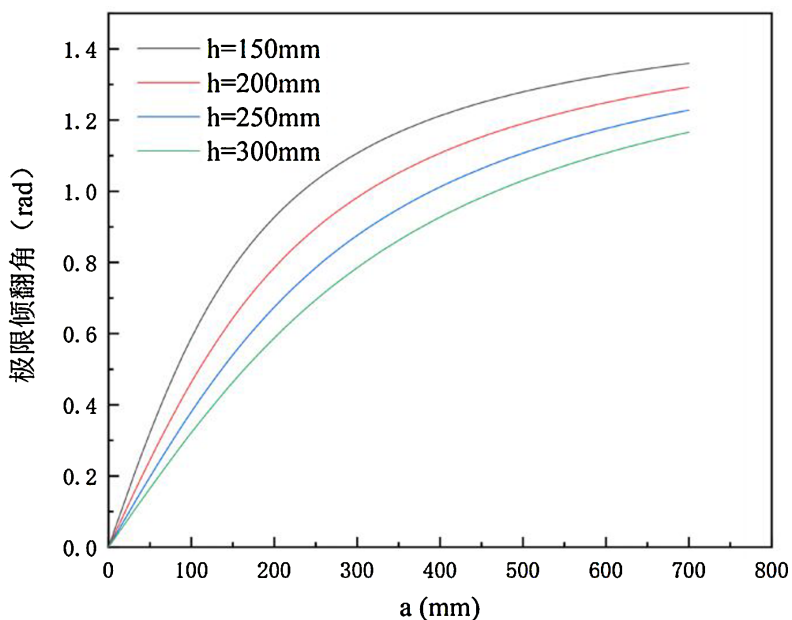


图 3. 小车上坡时极限倾斜角随 a (小车重心到后轮直线的距离)变化关系曲线

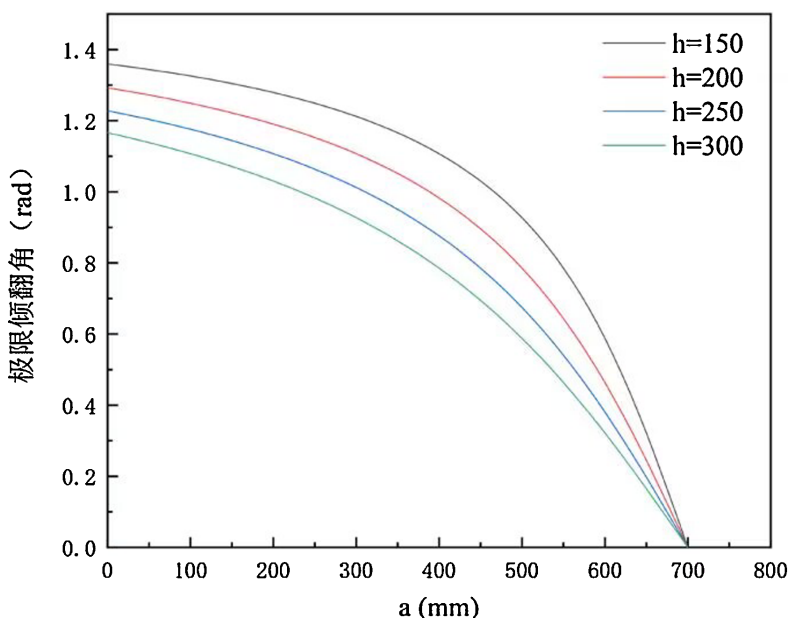


图 4. 小车下坡时极限倾斜角随 a (小车重心到后轮直线的距离)变化关系曲线

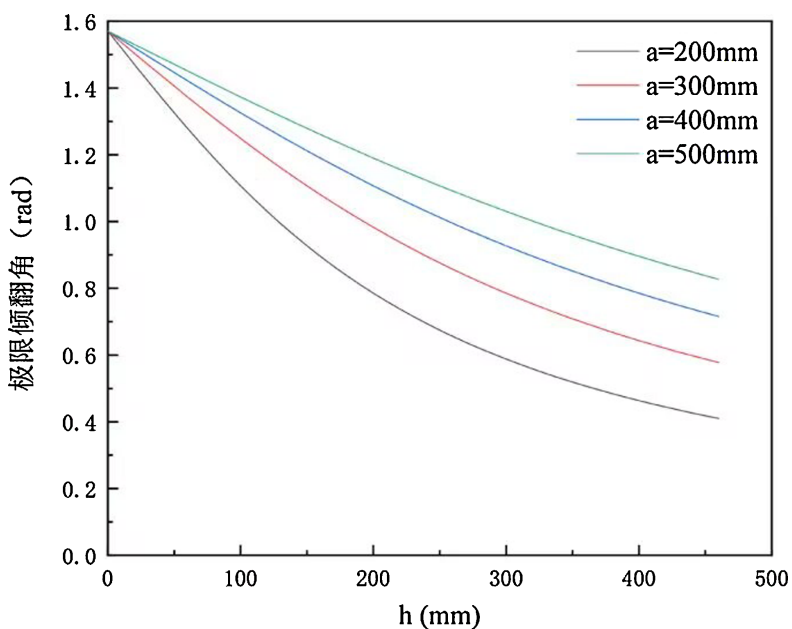


图 5. 小车在坡地在纵向运行时极限倾角与 h (小车重心与坡地的垂直距离) 关系曲线

以上重心位置与极限倾角的关系都是参考自[2]。

所以只要减少小车下止点所受的力，或者减小车的尺寸来减小这个力偶对小车的作用，所以解决小车翻转这个问题有两条解决思路，一：减小小车下支点的受力。二：将小车重心降低，减小力偶距，从而减少对小车的影响(见图 3~5)。小车在坡地横向运行也是同样的分析方法，但是没有办法使小车的重心靠近左支点或者右支点，所以小车横向运行时只能采取第二种解决思路，就是减小小车的尺寸使小车具有一定的宽高比，将重心降低从而减少因重力分布不均而产生力偶矩的大小来使小车能在坡地平稳运行[1]。

解决除草机在坡地翻转的情况一共有两种思路，一，减小小车下支点的受力；二，降低重心，使小车具有一定的长宽比，宽高比，使小车能够在坡地平稳地纵向或横向运行。

对于小车的相关设计，两种解决思路都有所选择。一，对于减小小车小车下止点受力有两种思路(1，利用液压或电机来调节配重块来平衡因为重力分布不均匀而产生大的力矩。2，将小车重心前置并下沉，让小车上止点在平地受力比下止点大，这样在坡地的时候就能使重力分布相对均匀。)二，对于横向运行同样可以采用调节配重块的方法平衡力矩，也可以使小车具有一定的宽高比来使重心降低，减小力矩的作用效果。所以对除草机的相关设计因为经费原因，只能放弃最优方案(调节配重块)选择第二种方案[1]。

将小车重心前置在保证坡地运行稳定的同时也可以为其提供足够的下压力，能保证足够的动力。

让小车有一个较大的接地比压，将重心降低使小车能够在坡地稳定地横向运行[3]。

在小车整体布置完成后将 1 (电池电控等机构)前置将整体重心控制在前轮稍后的位置，将重心严格控制在轮轴靠后的位置确保小车在坡地运行

时的稳定性[4]。

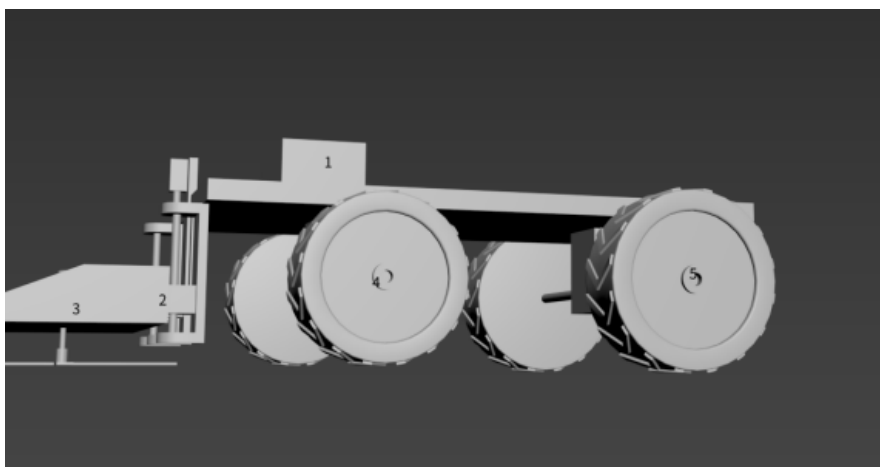


图 6. 除草机器人大体模型。1 (电池电控等); 2 (升降系统); 3 (除草系统); 4 前轮以及驱动机构); 5 (后轮) (3DSMAX 制作)。

以下是对小车相关数据的计算, 整体算下来, 小车自重大约 30 KG (见图 6), 小车运行速度约 1M/S。因为摩擦因数的限制, 小车的动力由轮上摩擦力来提供, 所以因为摩擦因数的限制, 查阅资料得知车辆爬坡的最大坡度为 40°左右, 所以按 40°来计算小车所需要的动力。

$$P = F \cdot v \cdot 1000$$

滚动阻力系数:

橡胶轮 - 草地滚动阻力系数 f 通常取 0.08 - 0.15 [5]

阻力系数 F 取 0.15 (为坡地运行留冗余)

坡地阻力计算:

$$F_{\text{坡}} = M \cdot G \cdot \cos \alpha$$

$$F_{\text{坡}} = 30 \cdot 10 \cdot 0.64 = 192 \text{ N}$$

滚动阻力计算:

$$F_{\text{滚}} = M \cdot G \cdot \cos \alpha \cdot f$$

$$F_{\text{滚}} = 30 \cdot 10 \cdot 0.64 \cdot 0.15 = 28$$

电机总功率计算:

$$P_{\text{总}} = f \cdot v \cdot 1000$$

$$P_{\text{总}} = (F_{\text{坡}} + F_{\text{滚}}) \cdot 1 \cdot 1000 = 220 \text{ W}$$

安全系数取 1.3 (电机安全系数表)

$$P_{\text{实际}} = P_{\text{总}} \cdot K = 220 \cdot 1.3 = 286$$

单电机功率:

$$P = P_{\text{实际}} \cdot 2 = 286 \cdot 2 = 572$$

小车为双电机前驱, 由于前面计算已经留有大量冗余, 为了体现经济性所以小车单电机功率在 120 W 左右。

根据前面除草半径 $R = 25$ 我们所采用的小车宽度大概在 50 公分，小车宽长比和高宽比都设为 0.8 这样小车不仅具有较好的坡地运行稳定性，还能节省材料，体现经济性[6] (见表 2)。

表 2. 坡地除草机器人的整体参数

整体尺寸(mm)	割草线半径(mm)	割草幅度(mm)	前轮半径(mm)
1100 * 500 * 400	250	500	150
后轮半径(mm)	刀具转速(rmp)	行进速度(m\s)	
100	4000	1	

根据以上数据搭建出实体模型并进行了测试，测试结果发现，改进后小车坡地运行稳定性更好，除草相对传统除草机更加高效。

3. 总结与未来展望

3.1. 总结

坡地除草机器人的核心设计需突破两大难题：地形适应性与除草高效性，目前开发已围绕这两点形成关键技术方向。

动力与行走系统：通过调整接地面积降低接地比压，避免在坡地打滑或陷车，在整体布局上将除草机整体重心降低且前置，提高了坡地运行作业的稳定性和适应性。

除草执行机构：除草采用高速旋转割草线结构，提高割草效率，降低对环境的影响(地皮，灌木苗木，假山等)。

能源供给：受坡地作业场景限制，多采用大容量锂电池供电，单次续航约 4~8 小时，以应对长时间作业需求。

3.2. 未来发展期望

提升复杂地形适应能力：因为成本的限制，我们只能放弃最佳方案，希望在未来能够有资本和能力去完成最佳方案(利用陀螺仪感知坡度变化并调节配重块对车身进行调整提高稳定性)期望突破当前 45° 的坡度限制，研发可适应碎石地、陡坡梯田等更复杂地形的行走结构，例如借鉴仿生学设计的“蜘蛛式”多足行走系统，进一步降低地形对作业的限制。

智能决策与协同作业：未来机器人应具备更强的自主决策能力，可根据杂草种类、密度自动选择除草方式(物理/化学)；同时支持多机协同作业，通过云端系统分配任务，提升大面积坡地的除草效率。

优化能源与环保性能：探索太阳能辅助供电模式，延长续航时间；研发更环保的物理除草技术，如超声波除草、高压电击除草，彻底摆脱对化学药剂的依赖，符合绿色农业发展需求。

降低成本与简化操作：当前设备成本较高，期望通过规模化生产与核心部件国产化，降低售价；同时开发更简洁的人机交互界面，让农户无需专业知识即可快速上手操作。

Conflicts of Interest

The author declares no conflicts of interest.

References

- [1] 肖洋轶, 庞文彬, 宋仕娟. 外加力偶矩下的刚体在固定面上的纯滚动[J]. 机械工程师, 2010(9): 19-20.
- [2] 王楷雯. 坡地茶园电动除草机关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- [3] 贺焕利. 车辆稳定性控制系统设计与分析[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2014, 28(6): 25-31.
- [4] 李一然, 李璐. 窄足爬坡机器人结构及控制电路设计[J]. 计算技术与自动化, 2016, 35(3): 58-62.
- [5] 张玉明, 沙州. 整车行驶阻力系数插值计算方法研究[J]. 汽车实用技术, 2024, 49(23): 61-65.
- [6] 许宁, 孟庆山, 武文璇, 孙志强, 董继伟, 李平, 张兴国. 丘陵山区果园智能除草机器人结构设计与控制研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2024, 62(12): 11-17.

Appendix 1. Abstract and Keywords in Chinese

坡地除草机器人的结构设计与分析

摘要: 随着时代的发展, 城市绿化已经成为一项非常重要的指标, 除草机器人也在逐渐进入绿化行业, 但是在坡地除草时仍然面临坡地作业容易打滑, 作业安全性低, 除草效率低等困难。着重针对坡地易打滑、作业安全性低、杂草清除难度大等问题利用作业需求拆解法以及理想化模型对除草机器人的结构进行分析, 并对相关结构进行优化设计, 从而突破地形限制, 并实现精准除草。在对坡地除草机器人的硬件设计上, 行走系统采用多轮独立悬挂结构, 提升除草机通过性, 在整体布局上将重心前置降低, 使其能够在斜坡运行并保持车身稳定; 在除草刀具的选择上采用高速旋转的割草线结构, 对环境破坏更小, 除草效率更高, 对环境破坏更小。能源以大容量锂电池为主, 满足 4~8 小时单次续航。

关键词: 坡地除草机器人, 精准除草, 坡地作业