

分类号: S22
密 级: 公开

学校代码: 10363
学 号: 2220830144



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目 基于FAHP-QFD的互花
米草清理机设计研究

论 文 作 者 徐晋炀
校 内 导 师 张学东
校 外 导 师 徐洪军
专业学位类别 艺术硕士
研究方向(领域) 产品与交互设计

论文提交日期: 2025年5月2日

分类号: S22

单位代码: 10363

密 级: GK

学 号: 2220830144

题 目 基于 FAHP-QFD 的互花米草清理机设计研究

题 目 Research on the Design of a Cleaning Machine
for Spartina alterniflora Based on FAHP- QFD

学生姓名: 徐晋炆

校内导师: 张学东

校外导师: 徐洪军

专业学位类别: 艺术硕士

研究方向 (领域): 艺术设计 (产品与交互设计)

论文提交日期: 2025 年 5 月 2 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：



日期：2025 年 5 月 2 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：



日期：2025 年 5 月 2 日

指导教师签名：



日期：2025 年 5 月 2 日

基于 FAHP-QFD 的互花米草清理机设计研究

摘 要

互花米草在滨海湿地等区域迅速蔓延扩散,严重挤压了本土物种的生存空间,破坏了生态系统的结构与功能。在此情形下,开展互花米草清理机的创新设计研究尤为迫切。因此本研究将针对互花米草清理过程中的实际需求,结合模糊层次分析法 (FAHP) 与质量功能展开 (QFD) 的研究框架,设计一款针对互花米草清理的大型机器产品。

首先,基于现有互花米草清理设备的研究成果,对互花米草生长区域开展实地调研。梳理互花米草生物学特性和现有清理方案,归纳互花米草清理利益相关者的诉求,提炼互花米草清理设备的产品需求。其次,基于产品需求分析构建 FAHP 模型,借助模糊判断矩阵,确定互花米草清理机各项需求的权重顺序,从而确定需求的重要程度。第三,运用 QFD 将用户需求转化为清理机的具体功能,通过构建质量屋 (HOQ) 分析确定核心功能的设计要点。第四,针对功能之间可能出现的冲突问题,展开矛盾矩阵分析,为功能冲突提供创新性解决方案。建立功能-行为-结构的映射关系,实现互花米草清理机从清理作业启动到结束各环节功能与行为的有机关联,并将互花米草清理机的功能行为映射至产品结构体系。最终,开展设计工作,制作互花米草清理机的模型方案。对模型方案进行系统评估与分析,筛选出最契合互花米草清理实际需求、综合性能最优的方案。

基于 FAHP-QFD 的互花米草清理机，采用模块化集成设计，融合刈割、翻耕、收割及收集等核心功能模块，搭建起一体化作业体系。在驾驶舱设计方面，通过开展空间布局优化与功能重构，拓宽了驾驶舱空间视野，提升了空间利用率。针对交互界面，简化界面信息层级和操作逻辑，降低操作人员的认知负荷。此外，依照农机相关标准，设计相应警示标志，进一步提升设备的安全性。

本研究提出的互花米草清理机打破了传统设备功能单一的局限，挖掘并满足了用户在互花米草清理作业的功能需求，为同类产品的创新升级提供了优化路径，有力推动互花米草清理设备朝着多功能化、人性化方向发展。抑制互花米草对生态系统的干扰，从而推动我国生态系统朝着健康、稳定的方向持续发展。

关键词：互花米草，FAHP，QFD，清理机设计，功能创新

Research on the Design of a Cleaning Machine for *Spartina alterniflora* Based on FAHP- QFD

ABSTRACT

The rapid spread of *Spartina alterniflora* in coastal wetlands and other areas has severely squeezed the living space of native species and disrupted the structure and function of ecosystems. In this context, carrying out innovative design research on *Spartina alterniflora* cleaning machines has become particularly urgent. Therefore, this study aims to design a large-scale machine product for *Spartina alterniflora* cleaning by addressing the actual needs in the cleaning process and integrating the research framework of the Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP) and Quality Function Deployment (QFD).

First, based on existing research achievements on *Spartina alterniflora* cleaning equipment, field research was conducted in the growth areas of *Spartina alterniflora*. The biological characteristics of *Spartina alterniflora* and existing cleaning solutions were sorted out, the demands of stakeholders in *Spartina alterniflora* cleaning were summarized, and the product requirements for *Spartina alterniflora*

cleaning equipment were refined. Second, an FAHP model was constructed based on product requirement analysis. Using a fuzzy judgment matrix, the weight order of various requirements for the *Spartina alterniflora* cleaning machine was determined to clarify the importance of each requirement. Third, QFD was applied to transform user needs into specific functions of the cleaning machine. Through constructing a House of Quality (HOQ), the design key points for core functions were identified. Fourth, to address potential functional conflicts, a contradiction matrix analysis was carried out to provide innovative solutions for resolving conflicts. The mapping relationship among functions, behaviors, and structures was established to realize the organic connection between the functions and behaviors of the *Spartina alterniflora* cleaning machine from the start to the end of the cleaning operation, and the functional behaviors were mapped to the product structure system. Finally, the design work was carried out to develop a model scheme for the *Spartina alterniflora* cleaning machine. The model schemes were systematically evaluated and analyzed to select the scheme that best meets the actual needs of *Spartina alterniflora* cleaning and has the optimal comprehensive performance.

The *Spartina alterniflora* cleaning machine based on FAHP-QFD adopts modular integrated design, integrating core functional modules such as mowing, tilling, harvesting, and collecting to build an

integrated operation system. In the design of the cockpit, the spatial layout was optimized and functions were reconstructed to broaden the visual field and improve space utilization. For the interactive interface, the information hierarchy and operation logic were simplified to reduce the cognitive load on operators. In addition, warning signs were designed in accordance with agricultural machinery standards to further enhance equipment safety.

The *Spartina alterniflora* cleaning machine proposed in this study breaks the limitation of single-function traditional equipment, identifies and satisfies users' functional needs in *Spartina alterniflora* cleaning operations, provides an optimization path for the innovative upgrading of similar products, and strongly promotes the development of *Spartina alterniflora* cleaning equipment toward multifunctionality and humanization. This study helps inhibit the interference of *Spartina alterniflora* with ecosystems and promotes the sustainable development of China's ecosystems toward health and stability.

KEY WORDS: *Spartina alterniflora*, FAHP, QFD, design of cleaning machine, Functional innovation

目录

摘 要	I
ABSTRACT	III
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究现状	2
1.2.1 互花米草研究现状	2
1.2.2 互花米草清理研究现状	4
1.2.3 基于 FAHP-QFD 的产品研究现状	5
1.3 研究目的和意义	8
1.4 研究内容与方法	8
1.4.1 研究内容	8
1.4.2 研究方法	10
1.5 研究创新	10
第 2 章 互花米草清理研究	12
2.1 互花米草的生长环境与特性	12
2.2 互花米草的清理方法	14
2.2.1 清理方法分析	14
2.2.2 清理方法的应用分析	17
2.3 现有清理设备的分析	19
2.3.1 相关清理设备分析	19
2.3.2 现有互花米草清理设备分析	21
2.4 本章小结	24
第 3 章 互花米草清理机的需求研究与分析	25
3.1 互花米草清理整体研究框架	25
3.2 互花米草清理设备需求研究	26
3.2.1 需求调研方法	26

3.2.2 调研方式	27
3.2.3 用户群体划分	28
3.3 互花米草清理机需求的获取与分类	29
3.3.1 需求获取实践	29
3.3.2 需求访谈汇总	31
3.3.3 需求清单确立	34
3.4 构建需求层次模型	36
3.4.1 建立多目标的层级结构	36
3.4.2 构建对比判断矩阵	38
3.4.3 需求要素权重	39
3.4.4 互花米草清理需求综合权重分析	42
3.5 本章小结	44
第 4 章 互花米草清理机的功能设计	45
4.1 功能研究方法框架	45
4.2 互花米草清理机的质量屋构建	45
4.2.1 互花米草清理设计功能划分	45
4.2.2 构建设计要素质量屋	48
4.2.3 设计要素分析	51
4.3 互花米草清理设备功能结构的协同优化设计	54
4.3.1 设计要素问题冲突解决	54
4.3.2 用户功能行为映射	57
4.3.3 产品预期结构映射	59
4.4 本章小结	60
第 5 章 互花米草清理设备设计方案	61
5.1 互花米草清理设机的定位	61
5.2 互花米草清理设备设计推演	62
5.2.1 结构提取	62
5.2.2 方案一推演	63
5.2.3 方案二推演	64

5.2.4 设计最优方案评估	65
5.3 最终方案设计	67
5.3.1 整机设计	67
5.3.2 整机运行设计	69
5.3.3 操作区域人机设计	72
5.3.4 安全设计	80
5.3.5 可用性测试	82
5.4 本章小结	83
第 6 章 总结与展望	84
参考文献	86
附录 1	93
附录 2	96
附录 3	97
附录 4	101
攻读学位期间获得研究成果目录	102
致谢	103

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

互花米草源于北美东海岸和墨西哥海湾，是一种多年生草本植物，通常生活在潮间带和沼泽地^[1]。在 20 世纪 70 年代被引入我国，初衷是为了保滩护岸、促淤造陆。然而，由于其强大的繁殖能力与适应能力，在我国沿海湿地迅速扩散蔓延，带来了一系列严重的生态、经济与社会问题（图 1-1）。互花米草疯狂生长，排挤本地原生植物的生长，导致湿地植物群落结构单一化，众多依赖湿地原生植物生存的昆虫、鸟类、底栖动物等生物的栖息地遭到严重破坏，生物多样性急剧下降。此外，互花米草密集根系改变了土壤的理化性质，使得土壤通气性和透水性变差，影响了土壤微生物的群落结构与功能，对整个湿地生态系统的物质循环和能量流动造成干扰。

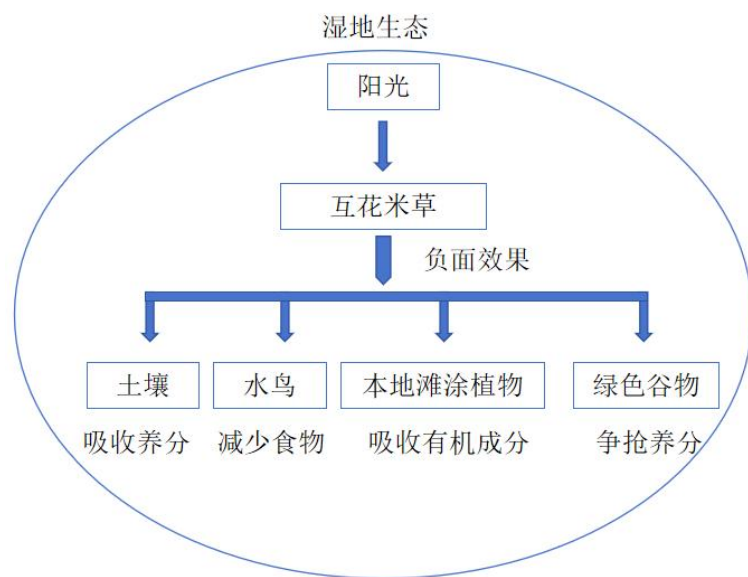


图 1-1 互花米草入侵生态危害

（图片来源：作者自绘）

在互花米草持续肆虐的入侵态势下，我国迅速部署并实施了一系列全面且有力的清理措施，从精准防控到生态修复再到智能监测最后完成长效管理的全链条

[1] 谢舒雅,李香兰.互花米草入侵对中国滨海湿地土壤碳收支的影响[J].生态环境学报,2024,33(10):1516-152

体系,在互花米草清理工作中取得了令人瞩目的阶段性成果,并提出了多种清理手段。尽管如此,互花米草对我国湿地生态安全与可持续发展构成的威胁依旧严峻。总体来看,已应用的清理手段还存在着技术体系不完善、治理成本过高等问题;同时,治理完成后部分区域面临的二次入侵更是对防治技术提出了严峻的挑战^[2]。现有清理方案存在三方面提升空间:其一,机械装备在复杂潮间带的清理效率有待加强;其二,生态修复周期较长,需要开发更高效的土壤功能恢复方法;其三,多技术协同应用模式尚未成熟,难以发挥最大效能。未来,应重点突破多技术协同应用模式,构建一体化智能决策系统,实现对互花米草的精准监测与高效治理。同时,加强公众参与机制建设,形成政府主导、科技支撑、社区协同的可持续防控体系,凝聚各方力量,共同守护湿地生态安全。

因此亟需完成新型互花米草清理机的设计应用,实现流程的精准化与自动化,大幅提升作业效率。推动互花米草清理方式朝着智能化、高效化方向优化升级,强化国家生态安全防线,切实守护好我国珍贵且脆弱的生态资源,为生态系统的修复与可持续发展提供坚实保障。

1.2 研究现状

1.2.1 互花米草研究现状

从互花米草被引入我国伊始,众多学者便将目光聚焦于此,展开深入研究。在不同时期,随着认知的不断深化,学界对于互花米草的态度也历经转变。通过 Cite Space 生成的互花米草的时间图谱(图 1-2),模块聚类值(Q)为 0.4838 (>0.3),说明该结果具有显著性。平均轮廓值(S)为 0.8563 (>0.7),说明该结果具有可信度^[3]。根据 Cite Space 提供的 Q 值和 S 值评判, Q>0.3 表明结构划分显著, S>0.7 则表明时间图谱结果令人信服。

[2] 赵燕,王森,杨文清,等.中国互花米草防治措施研究进展及展望[J].生物安全学报,2022,31(03):210-216.

[3] 郭鑫,陆莎,杜欢政.我国快递包装绿色转型的研究现状及未来趋势[J].包装工程,2023,44(19):238-247.

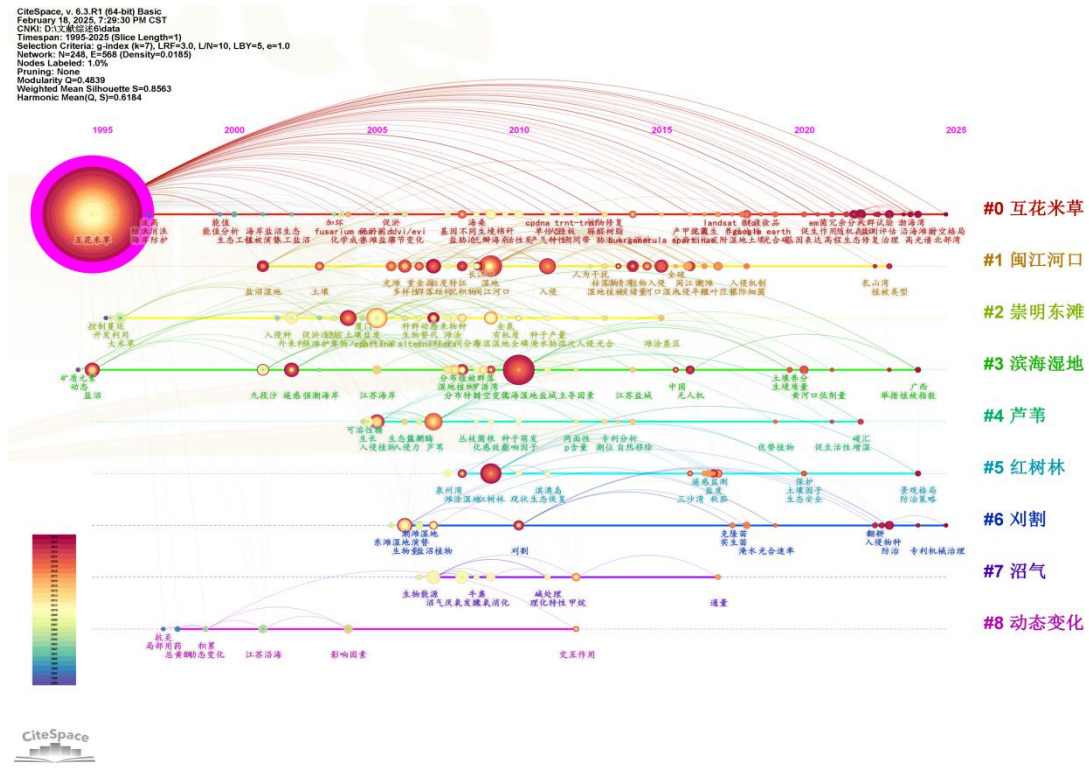


图 1-2 Cite Space 生成互花米草清理研究时间图谱

(图片来源: 作者自绘)

在时间图谱中, 国内互花米草的清理历程主要可划分为三个阶段, 即引进阶段、泛滥阶段和控制发展阶段。在引进阶段, 仲崇信等人^[4]对互花米草的应用与价值展开分析, 指出互花米草在提升河口海岸系统生产力、保障饲料供给、实现保滩护岸等方面具有重要意义。徐国万等人^[5]针对互花米草的特征及其在潮滩湿地上的生物量进行研究, 剖析了互花米草的生物学特性, 发现其在潮滩湿地环境中生物量表现较优。

在互花米草引进初期阶段, 学术界主要聚焦于其生态工程价值的挖掘, 针对互花米草开展了耐盐基因筛选、促淤保滩机制等基础研究。

进入泛滥阶段, 林贻卿等人^[6]分析互花米草的生物学特征, 分析其对所在地区生态、经济等多方面产生的正负影响, 并梳理了国际上已采取的控制措施, 进

[4] 仲崇信, 蒋福兴, 张正仁. 海滩植被的生态意义及利用价值[J]. 海洋开发, 1985 (4): 36-39.

[5] 徐国万, 卓荣宗, 曹豪, 等. 互花米草生物量年动态及其与滩涂生境的关系[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1989 (3): 230-235.

[6] 林贻卿, 谭芳林, 肖华山. 互花米草的生态效果及其清理探讨[J]. 防护林科技, 2008 (3): 119-123, 142.

而提出相应的互花米草管理建议。陈潘等人^[7]系统梳理了互花米草入侵对鸟类栖息地、食物资源、繁殖以及群落结构等方面的生态影响,提出应开展长期、大尺度且多因子的监测研究以及多物种比较研究,构建生态评价模型,并制定科学有效的互花米草管理策略。盛强等^[8]通过实施反复刈割措施,探寻出对互花米草生长具有一定控制效果的方法,淹水刈割可能是河口生态系统中清理大面积互花米草最为有效的手段,但在后续管理过程中,需采取相应措施以降低对底栖动物及土著植物的不利影响。

在泛滥阶段,学者们开始尝试从不同的角度出发,开展多维度防控研究。探究其入侵机制,构建风险评估模型。为后续控制发展阶段中精准防控到生态修复,再到智能监测最后实现长效管理的除治理论模式夯实理论根基。

进入当前控制发展阶段,谢宝华等人^[9]在春季萌芽前修筑堤坝,保持 20 cm 的淹水深度,在营养生长期后期进行贴地刈割,并持续淹水,次年重复相同操作,同时需对邻近的互花米草分布区域同步开展清理工作,以防止二次入侵。张丽平等^[10]人以闽东滨海湿地的互花米草为研究对象,开展刈割结合不同遮荫率的试验,结果表明不同遮荫率对互花米草的生物量和渗透调节物质具有显著影响。

在控制发展阶段,学者进行了全方位、多维度的互花米草清理方法研究,从生态原理、机械工程到资源管理等层面发力,通过反复试验与技术创新,成功构建起一套完善的互花米草清理方案。为后续进一步开展互花米草的资源化利用,夯实了稳固的前期基础。

1.2.2 互花米草清理研究现状

入侵物种对生态环境和农业生产造成了严重危害,近年来,国家通过《环保装备制造业高质量发展行动计划(2022-2025年)》和《“十四五”工业绿色发展规划》等政策文件,鼓励企业通过技术创新推动生态机械设备的研发。政策通过财政补贴、税收优惠等手段,激励企业研发新型环保机器,以降低研发成本并促

[7] 陈潘, 张燕, 朱晓静, 等.互花米草入侵对鸟类的生态影响 [J]. 生态学报, 2019, 39 (7): 2282-2290.

[8] 盛强, 黄铭垚, 汤臣栋, 等.不同互花米草清理措施对植物与大型底栖动物的影响 [J]. 水生生物学报, 2014, 38 (2): 279-290.

[9] 谢宝华, 王安东, 赵亚杰, 等.刈割加淹水对互花米草萌发和幼苗生长的影响 [J]. 生态学杂志, 2018, 37 (2): 417-423.

[10] 张丽平, 周亚圣, 刘君成, 等.遮荫对刈割互花米草生物量及渗透调节物质的影响 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2019, 39 (4): 142-148.

进技术升级。在此背景下,针对入侵物种清理的技术研究取得了显著进展,相关发明专利不断涌现。

在物理防治上,郭衍锋等人^[11]发明了一种互花米草清理翻耕船,该设备通过旋耕组件和施料组件的协同作用,能够适应滩涂环境,通过旋耕刀具的旋转和粉剂的释放,实现了高效灭除互花米草的目标。顾燕飞等人^[12]提出了一种基于旋耕机和酵素菌的生态修复方法,通过将入侵植物打碎并利用酵素菌促使其腐烂,不仅有效灭除了入侵植物,还将其转化为有机肥料,实现了资源化利用。

研究人员主要将目光放在已有机械的合理改装。已有的机械在结构、动力等方面具备一定基础。研究人员根据互花米草的根系分布、植株密度以及茎干韧性等,对大型农机的切割部件进行优化,从而提升了清理效果,在加快清理速度的同时,降低了清理中对周边生态环境的附带损害。

在综合防治技术方面,陈浩等人^[13]提出了一种淡水淹没清理互花米草的综合方法,结合物理防治(淹水、刈割、翻耕等)、化学防治(除草剂)和生物防治(生物替代),成功恢复了滩涂生态系统。该方法在黄海滩涂的示范基地中取得了显著成效,恢复了湿地植被并吸引了大量水鸟栖息。沈浩等人^[14]提出了一种生物-物理联合控制方法,通过塑料遮阳网抑制互花米草生长,并在遮阳网上开孔种植本地植物,实现了退草还林的长期清理目标。

大量的科研人员针对这一入侵物种申请了诸多专利,逐步发展为物理、化学、生物相结合的多元化综合清理模式。这些技术不仅提高了清理效率,还注重生态修复和资源化利用,为入侵物种的防控提供了科学依据和实践参考。未来,随着政策支持和技术创新的持续推进,入侵物种清理技术将朝着更加高效、环保和可持续发展的方向发展。

1.2.3 基于 FAHP-QFD 的产品研究现状

这些技术在不断迭代优化的过程中,面临着如何科学权衡不同清理手段和评估其对生态环境综合影响的复杂问题。托马斯·L·萨蒂(Thomas L. Saaty)在 20

[11] 郭衍锋,杨景鹏,王振兴,等.一种互花米草清理翻耕船[P].广东省:CN202410148855.2,2024-04-16.

[12] 顾燕飞,杜皓,曹世伟,等.一种生态修复工程中入侵植物的灭除方法[P].上海市:CN201610663621.7,2017-05-17.

[13] 陈浩,成海,陈亚芹,等.一种淡水淹没清理互花米草的综合方法[P].江苏省:CN202111086675.9,2021-11-30.

[14] 沈浩,马克明,李婷,等.一种互花米草生物-物理控制方法[P].广东省:CN201510782852.5,2018-07-27.

世纪 70 年代提出了层次分析法 (AHP) ^[15], 该方法在经济、工程以及管理等多个领域中得到了极为广泛的应用。它为复杂决策问题提供了系统性的解决方案, 有效推动了各领域决策过程的科学化与精细化。质量功能展开 (QFD) 由日本质量管理专家赤尾洋二 (Yoji Akao) 和水野滋 (Mizuno Shigeru) 于 20 世纪 60 年代末至 70 年代初提出。在汽车、电子、机械制造等众多行业发挥关键作用, 帮助企业更好地将顾客需求转化为产品设计和生产过程中的技术要求及质量控制要点^[16]。近年来, 不少学者聚焦于用户需求, 构建系统化的产品开发流程, 将 AHP (层次分析法) 与 QFD (质量功能展开) 相结合, 通过 AHP 确定各项需求的权重, 以此明确核心需求, 再利用 QFD 把这些需求转化为具体的设计要求, 从而增强产品的实用性, 提升其在市场中的竞争力。

Fang 等人^[17]运用 KANO 模型对需求进行分类, 借助 AHP 确定各项需求权重, 利用 QFD 将需求转化为具体设计要求, 最后并采用 PUGH 决策矩阵评估设计方案, 开发出智能手机药物管理应用程序, 提升老年人服药依从性问题。Neira 等人^[18]提出了一种基于模糊 Kano-AHP-DEMATEL-QFD 的智能产品设计方法。该方法通过量化用户需求并确定其优先级, 实现了设计参数的优化权衡, 为复杂产品的开发提供了理论支持。郑祖芳等人^[19]结合 AHP、QFD 和 TRIZ, 设计了一款适应性强、功能多样的玉米联合收割机。该研究通过实地调研和用户需求分析, 解决了对行收割和收割流程优化等关键问题, 验证了组合理论在实际设计中的有效性。Wang 等人^[20]借助 GT 深入挖掘提取设计标准, 再通过 AHP 确定用户需求评价指标的权重, 采用 QFD 将用户转化为具体的技术要求, 识别温室梨授粉无人机的关键需求, 并提出极具针对性的解决策略。

[15] 熊婷婷,林莹雪,安雪琪.基于 AHP-QFD 理论的履带式移动破碎机设计[J].机械设计,2023,40(S2):27-32.

[16] 易菲.基于 QFD/TRIZ 理论的人宠共用生态家具设计[J].装饰,2023,(06):136-138.

[17] Fang M, Yang W, Li H, Pan Y. Enhancing User Experience through Optimization Design Method for Elderly Medication Reminder Mobile Applications: A QFD - Based Research Approach[J]. Electronics, 2023, 12(13):2860.

[18] Neira - Rodado D, Ortiz - Barrios M, De la Hoz - Escorcía S, Paggetti C, Noffrini L, Fratea N. Smart product design process through the implementation of a fuzzy Kano - AHP - DEMATEL - QFD approach[J]. Applied Sciences, 2020, 10(1792).

[19] 郑祖芳,陈建峰.基于 AHP-QFD-TRIZ 组合的玉米联合收割机设计[J/OL].农机化研究,1-9[2025-02-22].

[20] Wang T, Zhao Y, Li Pang LL, Cheng Q. Evaluation method and design of greenhouse pear pollination drones based on grounded theory and integrated theory[J]. PloS one, 2024, 19(10):e0311297.

在 AHP 和模糊集理论的基础上,通过不断研究和实践,将两者相结合,推动了模糊层次分析法的形成和发展,使其成为一种独立的、系统的多准则决策方法,拓展引入非线性隶属函数、三角模糊数等数学算法,提高决策模型的效率和精度^[21]。FAHP-QFD 创新设计方法也已经在功能性产品开发中得到了广泛的应用,通过 FAHP 对复杂的用户需求进行量化分析,能够更好的确定各需求权重,从而界定核心需求。

王昀等人^[22]借助 FAHP 与 QFD 集成模型,关联用户需求与设计要点,通过 FAHP 明确各项需求的权重,再由 QFD 将这些需求合理转化为切实可行的设计要求,为可成长式家具的设计提供了指导与参考。袁菁菁等人^[23]探索了以山西“黎侯虎”为核心的产品设计路径,借助 FAHP 对各项影响因素进行量化分析,分析关键要素,运用 QFD 将抽象的用户需求转化为切实可行的设计需求,成功为非遗元素融入产品设计开辟全新途径。

在 FAHP-QFD 等方法的应用上,需要打破理论与实践的壁垒,亟需深入洞察用户需求,匹配设计要素,进一步提升产品设计的精准性与适应性。

随着时代的发展,科技与用户需求的复杂多元,互花米草清理机在设计层面上仍然临诸多挑战,主要体现在以下几个方面:

第一,尽管当下众多学者已围绕互花米草清理展开大量研究,然而在针对用户群体分析以及探究用户与清理机器适配性方面,存在欠缺。为进一步提升清理技术的普适性,深入开展此方面研究迫在眉睫。

第二,在清理技术向智能化、自动化迈进的进程中,虽然政策扶持力度持续加大,但在设计创新层面,存在明显短板。新技术、新材料未能有效与新外观设计等创新要素深度融合,需借助设计创新推动清理作业智能化水平的提升,适应实际清理需求。

第三,FAHP - QFD 的相关研究多聚焦于通用设计思路与方法应用,较少围绕入侵物种的清理,尤其是互花米草独特的清理作业的需求。因此有待从产品需

[21] 涂波,李雯雯.基于 FAHP-FBS 融合的自行车房车车载人机界面设计研究[J].装饰,2024,(10):139-141.

[22] 王昀,陈枫.基于共生体系的成长式儿童课桌椅创新设计研究[J].家具与室内装饰,2024,31(08):10-16.

[23] 袁菁菁,汤繁稀.基于 FAHP/QFD/SWOT 的山西“黎侯虎”可拼装体验产品设计[J].包装工程,2024,45(20):433-441+452.

求层面出发提升互花米草清理设备的设计水平,增强机器在各类复杂且特殊作业环境下的应用价值。

1.3 研究目的和意义

本研究的目的旨在分析互花米草的清理需求,设计出科学且系统的清理机器。以期在互花米草的分布区域达成理想的清理成效。通过对互花米草生长特性、现有清理方法以及用户需求的分析,丰富互花米草的清理策略并拟定相应的设计方案,促进用户与清理机之间的人机交互体验,实现清理流程的高效化与精准化。

理论意义:本研究综合运用用户群体分析、模糊层次分析法以及质量功能展开等方法,为互花米草清理工作开拓了新的理论视野与方法路径。基于生态、设计、机械、人因等多学科领域为生态清理的产品设计构建全新的理论框架,提供了具有创新性的指导理论。

实践意义:当前互花米草清理机在用户需求考量方面存在欠缺,本研究综合优化用户需求、契合生态特性、确保技术可行性、兼顾可持续性以及提升社会效益等多个维度,探寻互花米草清理的可行路径。优化清理机的功能设计,提升互花米草清理相关利益者的需求满足感,从长远角度保障湿地生态系统的恢复与稳定。

1.4 研究内容与方法

1.4.1 研究内容

本课题将基于用户需求的基础上提出互花米草的清理设计路径,构建互花米草清理的多层次的设计策略体系(图 1-3)。

本课题研究内容具体包括以下六部分:

第一章为绪论。阐述课题研究背景,分析互花米草清理研究课题的背景与环境,表明课题的研究目的、意义、内容、方法与创新点,构建本课题研究框架。

第二章为互花米草清理研究。分析互花米草的清理现状,大体可归纳为物理防治、化学防治和生物防治三类。对现有的各类互花米草清理方法进行总结,探索新的研究方法。

第三章为互花米草清理机的需求研究与分析。以实地调研与专家访谈的形式获取不同利益群体的意见,构建 FAHP 模型,对生态效益、经济效益、社会效益、技术可行性等以及生物多样性恢复、成本投入、作业效率、设备适应性等。获取

各指标之间的相对重要性判断数据，确定各指标的权重，明确在互花米草控制过程中不同需求的优先级。

第四章为互花米草清理清理机的功能设计。采用质量功能展开（HOQ），将 FAHP 的需求分析结果，转化为具体的功能要求。在功能设计过程中，为解决功能冲突问题，运用其创新原理与问题解决工具，对功能冲突进行识别与化解，从而保障功能设计。最后，借助功能-行为-结构的行为映射进实现从高权重的功能需求出发，经由行为分析，最终映射至整体结构设计，为互花米草清理机的最终设计实践提供理论支撑。

第五章为互花米草清理设备的设计方案。在整合前文各项分析内容的基础上，剖析互花米草清理机的功能需求与结构要素，拟定出两套设计方案。随后，运用模糊综合评价法，从需求指标出发对这两套方案进行全面评估，筛选出最优方案。针对选定的最优方案，开展进一步的优化工作，对方案中的细节进行完善，提升清理设备的整体性能与质量，以确保其能够高效、稳定地完成互花米草的清理任务。

第六章为总结与展望。对本课题研究进行概括总结，分析本课题在研究及实践中存在的局限与不足之处，对未互花米草的清理与生态设备的发展进行展望。

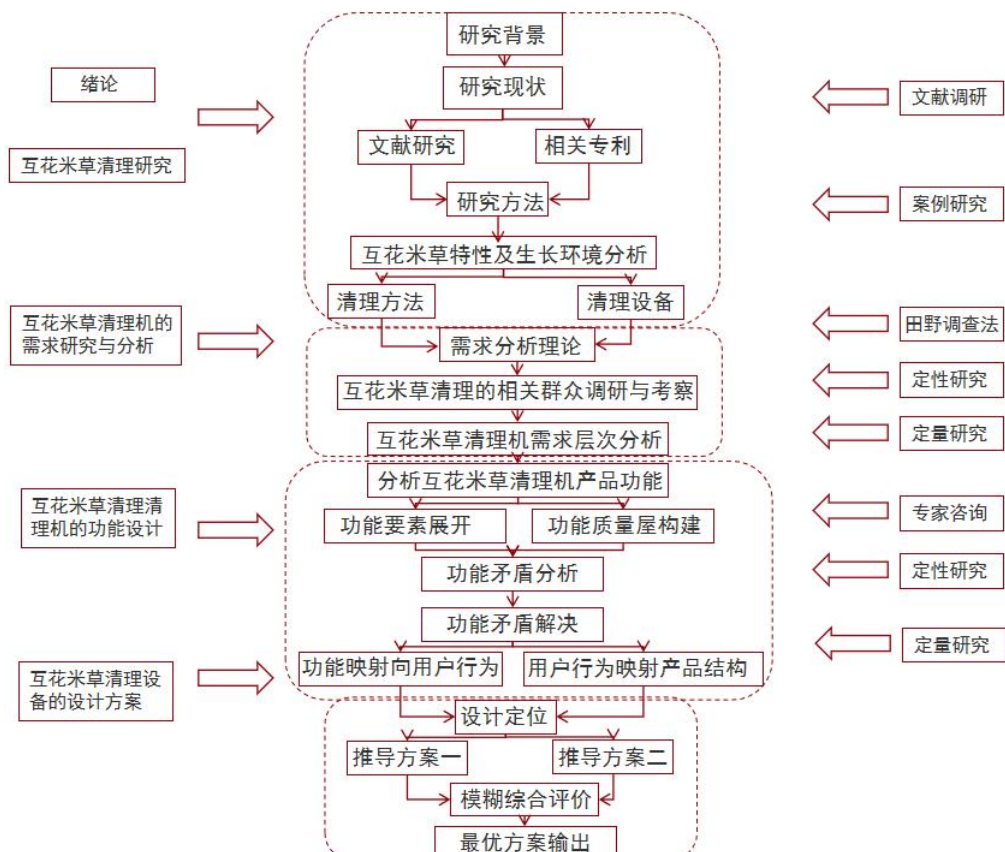


图 1-3 研究内容

(图片来源: 作者自绘)

1.4.2 研究方法

(1) 文献研究法

通过图书馆和文献库, 搜集国内外与互花米草清理课题相关的资料。研究范围涵盖互花米草的生物学特性、控制技术等等, 对相关文献资料进行阅读、归纳、整理, 为本课题研究提供理论支撑。

(2) 案例分析法

收集国内外互花米草清理的案例, 分析其相应的清理设备采用的具体防治策略、实施过程中的关键环节, 比较多个案例, 提炼出具有普适性和可操作性的互花米草清理方案。

(3) 专家访谈法

对生态、机械、人因、设计等领域的专家进行访谈, 将专家的专业知识和经验融入到课题研究的各个环节, 为构建互花米草控制的多层次评价指标体系以及设计清理设备提供专业指导。

(4) 定性研究法

基于实地观察记录、访谈资料以及案例分析的研究结果, 采用 KJ 法对实地观察记录、采访资料及典型区域清理案例进行系统分析。将获取的资料进行收集并整理。提炼出互花米草清理过程中的关键影响因素, 涵盖利益相关者的态度与行为模式, 以及政策因素对清理工作产生的影响等方面。

(5) 定量研究法

在定性研究的基础上, 采用 FAHP、QFD 等量化分析方法, 对互花米草清理相关问题进行量化分析。获取各指标之间相对重要性的判断数据, 运用数学方法计算各指标的权重值, 明确不同需求在互花米草控制过程中的优先级。

1.5 研究创新

研究视角创新: 本研究创新性地提出一种互花米草清理机的设计方法, 提升互花米草清理需求与产品设计的关联性, 将设计核心从传统的技术与功能层面, 转移至实际的用户需求层面, 把产品设计与生态系统恢复进行有机融合, 探索出创新性解决方案。

研究方法创新: 在互花米草清理机的设计方法上开辟创新性的研究路径, 融合 FAHP (模糊层次分析法) 与 QFD (质量功能展开) 的设计方法。挖掘用户需求并剖析其中的关键要点, 针对性地解决设计过程中的功能设计问题。为互花米草清理机的持续优化升级提供有力支撑, 引领相关产品朝着更高效、更智能、更贴合用户需求的方向发展。

第2章 互花米草清理研究

2.1 互花米草的生长环境与特性

互花米草起初因其强大的固滩护堤能力被引入我国,在沿海滩涂生态修复中发挥了重要作用。然而,随着时间推移,其极强的繁殖能力和生态竞争优势逐渐显现,导致本土物种栖息地丧失、滩涂生态系统失衡等一系列生态问题。近年来,随着生态文明建设的深入推进,社会各界对互花米草的危害性认识不断深化,对其态度也从最初的积极利用转向全面防控,对于互花米草这一外来入侵物种,社会各界的认知和态度经历了从积极引入到全面防控的显著转变。(图 2-1)

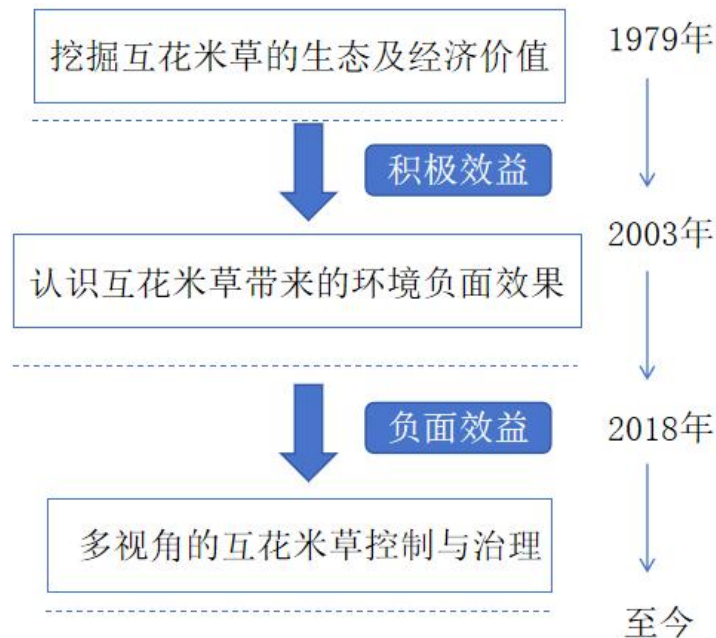


图 2-1 互花米草在中国的应对态度

(图片来源: 作者自绘)

互花米草现主要分布在中国上海、江苏、浙江、福建、广东、香港等省份。互花米草生于潮间带,植株耐盐耐淹,抗风浪,种子可随风浪传播,互花米草殖方式为根茎或种子繁殖。具有改良土壤、净化空气、绿化环境、防风抗浪,抑制沙滩风沙、增加湿地面积等生态功能^[24]。

[24]江灿,贾俊鹤,杨颖,等.互花米草在中国的 40 年: 认知演变与清理对策[J].生态学报,2024,44(20):8944-8956.

互花米草占领盐沼的方式首先是侵入中高潮位盐沼,然后通过淤积,使盐沼涂面抬高并进一步向周边扩展^[25]。在湿地主要呈现显著的带状分异,其中中高潮滩盐沼受周期性浸没,而中低潮滩盐沼在潮汐湍流能量增强作用下发育为高孔隙水交换速率的沉积环境。互花米草在中高潮滩和中低潮滩的盐沼生态系统中都能生长。在中、低、高潮滩,其种群分布分别呈现出零星分布、斑块分布以及连片分布等不同特征(见图 2-2)。



图 2-2 互花米草潮滩的分布特征

(图片来源: https://www.sohu.com/a/432273682_659628)

互花米草是禾本科米草属的多年生草本植物(图 2-3);地下部由短而细的须根和根状茎组成,根系发达;植株茎秆坚韧、直立,茎节具叶鞘,叶腋有腋芽;叶片互生,长披针形,具盐腺,叶表有白色粉状的盐霜出现,圆锥花序;花期 8-10 月^[26]。控制互花米草的扩张,减轻其入侵造成的生态破坏已成为我国滨海湿地保护的重要问题。由于生态系统可入侵性特征,互花米草其对环境 and 土著生物的适应性强,以物种入侵力为基础,恰当时间的入侵通道也为成功入侵创造了入侵时机,加快了其扩张和入侵的速度^[27]。在生长与繁殖特性方面,互花米草具有极强的无性繁殖能力,其地下根状茎纵横交错,在适宜条件下,每年可向外扩展数米,通过根状茎上的不定芽迅速形成新的植株。

[25] 胡林军.沿海滩涂互花米草物理治理方法[J].港口科技,2024,(11):38-42+44.

[26] 王洁,顾燕飞,尤海平.互花米草清理措施及利用现状研究进展[J].基因组学与应用生物学,2017,36(08):3152-3156.

[27] 邓自发,安树青,智颖飘,等.外来种互花米草入侵模式与爆发机制[J].生态学报,2006(8):2678-2686.

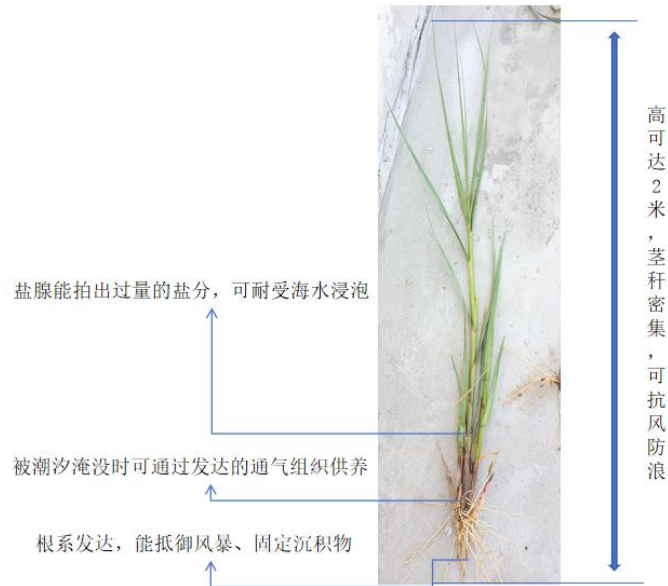


图 2-3 互花米草的组织结构介绍

(图片来源：作者整理自绘)

2.2 互花米草的清理方法

2.2.1 清理方法分析

在互花米草的物理清理手段中，人工拔除以及机械刈割等方式在小规模区域应用时，能够展现出一定成效。其环境友好性体现在无化学残留特性，但受限于人力成本与作业效率，难以满足大面积入侵斑块的清理需求。经过“刈割+翻耕”方法清理互花米草 6 个月后，互花米草清理区内大型底栖动物的丰度、生物量和能质恢复到光滩的水平，并且群落结构也能够恢复到与光滩相似的状态^[28]。

在实地调研过程中，收集到滨海湿地保护联合创新中心中复旦大学研发的一项实用新型专利（图 2-4）。该装置为人工操作模式，操作人员通过下踩动作使其深入土壤，内置的机械动力装置随即瞬间发力，能够按照预设的力度与角度，将互花米草连根拔起，确保根系完整移除。

[28] 李佳骏,金双,李汝佳,等.刈割+翻耕清理互花米草后滦南湿地大型底栖动物群落结构变化特征[J].湿地科学,2024,22(03):349-358.



图 2-4 互花米草清理设备专利

(图片来源: 作者拍摄)

综合清理技术是指把不同清理技术配合使用,通常可以取得更好的清理效果,因此研究与应用最为广泛^[29]。能够从多个维度对清理对象施加影响,从而弥补单一技术的局限性,显著提升整体清理成效。整个清理过程遵循分阶段、分区域的动态策略。在不同阶段,依据互花米草的生长特性以及生态环境的变化,灵活调整清理技术的组合与实施方式;在不同区域,充分考虑地理条件、生态基础等差异,因地制宜地制定针对性清理方案,以此实现可持续清理的长远目标。具体的实施方案详见表 2-1。

表 2-1 综合清理技术方案 (表格来源: 作者自制)

综合方法	方案
刈割+淹水	在春季萌芽前,原地挖土修筑简易堤坝,使互花米草分布区保持淹水 20 cm。在互花米草结实前,贴地刈割互花米草,清除互花米草克隆苗,然后继续维持淹水 20cm ^[9] 。
刈割+翻耕	刈割+翻耕方法清理互花米草 6 个月后,互花米草清理区内大型底栖动物的丰度、生物量和能质恢复到光滩的水平 ^[28] 。
刈割+遮荫	刈割后 1 层、2 层、3 层遮荫处理,平均透光率分别为 15.27%、2.29%、0.31%,地上部分分别于 11 月、7 月、7 月全部死亡 ^[30] 。

[29] 谢宝华,韩广轩.入侵植物互花米草防治:理念、技术与实践[J].中国科学院院刊,2023,38(12):1924-1938.

[30] 赵相健,李俊生,柳晓燕,等.刈割加遮荫对互花米草生长和存活的影响[J].广西植物,2017,37(03):303-307.

此外,在早期和部分地区曾实施过化学法清理,常用的除草剂包括高效盖草能、滩涂米草除控剂、草甘膦、草铵膦以及咪唑烟酸等^[31]。在2022年,霞浦县林业局与福建兴华农林高新技术研究所工作人员协同作业(图2-5),借助无人机喷洒化学药剂开展互花米草清理工作,以促进滩涂生态环境的恢复及生物多样性的提升。



图 2-5 互花米草清理化学药剂喷洒无人机

(图片来源: <http://cmstop.ndsw.com/p/80587.html>)

然而,化学清理方式可能会对周围环境和动植物造成一定危害,进而破坏本地土壤和生态系统^[32]。在生态系统中,底栖生物对于维持生态平衡起着至关重要的作用,而农药的大面积喷洒可能会对它们产生毒害效应,致使生物多样性遭受损害。此外,农药残留还可能对土壤和水体造成污染,改变土壤的理化性质,影响水体质量,进而破坏整个生态系统的平衡与稳定状态。

此外还有生物替代法,是根据植物群落演替的自身规律,利用有经济或生态价值的本地植物取代入侵植物的一种生态学防治技术^[33]。从理论层面而言,该方法具备可持续性与生态友好性的显著优势,有望在不破坏生态平衡的前提下,实现对互花米草的长效清理。目前,生物控制方法主要包括引入天敌和生物替代等途径。以盐城湿地为例,当地的麋鹿对互花米草具有一定的取食习性,通过麋鹿的采食行为,在一定程度上减少了互花米草的种群数量。还可以在互花米草清理区域种植芦苇、盐地碱蓬等本土植物,利用这些乡土植物与互花米草竞争生存空间,从而达到抑制互花米草生长的目的。但在特定地区找出快速、有效、安全的

[31] 赵燕,王森,杨文清,等.中国互花米草防治措施研究进展及展望[J].生物安全学报,2022,31(03):210-216.

[32] 王红,阚文静,谭晓璇,等.互花米草化学清理对天津附近海域水质和沉积物质量的影响[J].海洋通报,2022,41(05):572-581.

[33] 刘倩,李媛媛,王萍,等.外来种互花米草的入侵生态学研究进展[J].海洋湖沼通报,2023,45(03):155-163.

替代种以及防除方法仍是个难题^[34],引进天敌生物的安全性与可控性在实际操作中难以做到把控,稍有差池,就极有可能触发新的生物入侵危机,给生态环境带来难以预估的后果。由于生态系统的复杂性和生物间相互作用的微妙性,筛选出既能对互花米草产生显著抑制作用,又不会对本地生态系统造成负面影响的天敌生物并非易事。一旦引入不当,极有可能引发新的生物入侵问题,给原本就脆弱的生态环境带来更大的灾难。

2.2.2 清理方法的应用分析

笔者于 2024 年 1 月下旬走访了江苏省盐城市大丰区的湿地地区,目前该地区的互花米草清理已完成了阶段性胜利,笔者对已歇业的互花米草清理机械进行了观察与拍摄(图 2-6 左)。大丰地区的互花米草清理机械以挖掘机的改装为主,能够在短时间内对大范围的互花米草实施翻耕作业。在青岛,互花米草的治理工作主要采用刈割 + 翻耕组合治理法,运用翻耕船对相关区域开展后期翻耕治理工作(图 2-6 右)。在沿海滩涂等互花米草大面积泛滥的区域,机器收割类产品展现出显著优势,能够迅速降低互花米草的植被覆盖度,有效遏制其扩散势头。相较于人工拔除机,机器收割极大地提升了工作效率,能够在较短时间内完成大面积的作业任务,大幅节省了人力成本与时间成本。



图 2-6 互花米草清理物理清理设备

(图左来源: 作者拍摄; 图右来源: <https://news.bandao.cn/a/571466.html>)

目前主流的清理方法是利用机械设备将互花米草地上部分进行割除,从而在短时间内显著降低互花米草的生物量,削弱其光合作用能力,减少对周边环境养分、水分及光照等资源的竞争。虽较人工拔除效率提升,却面临湿地异质地形的双重约束:一方面软质沉积物界面限制大型设备进入核心区,另一方面机械扰动引发的土壤紧实度变化可能导致原生植被的次生退化。

[34] 谢宝华,韩广轩.外来入侵种互花米草防治研究进展[J].应用生态学报,2018,29(10):3464-3476.

通常需要进入生态修复环节，选择适宜本地生长的本土植物进行种植。这些本土植物能够更好地适应本地生态环境，与周边生物形成稳定的生态关系，逐步恢复生态系统的多样性与稳定性，实现生态系统的自我修复与良性循环。

对于入侵种群的分布格局与扩散特征，清理策略呈现梯度化设计（图 2-7）。在零星定殖阶段，优先采用人工物理清除结合根系隔离技术，通过阻断克隆繁殖体库的形成遏制种群扩张；中等扩散规模实施刈割、药剂等方法协同调控，抑制地下生物量再生；对于大规模单优群落，则采用围堰与带水刈割。该分级清理体系通过匹配入侵强度与生态承载力的动态平衡，对互花米草的不同分布特征进行控制。

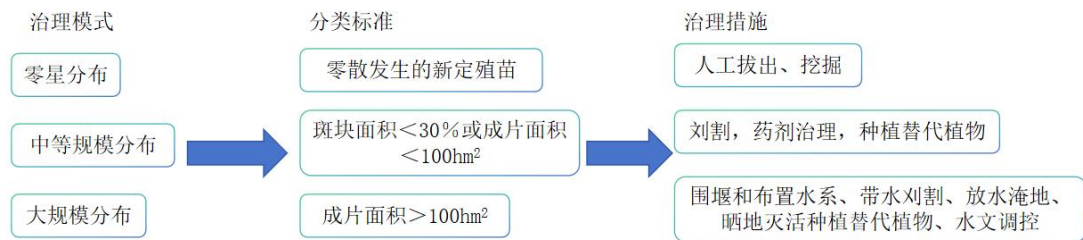


图 2-7 互花米草不同分布的治理措施

（图片来源：作者自绘）

在具体清理实践中，针对互花米草在不同潮滩生境的分布特征，形成了梯度化的综合清理技术体系（图 2-8）。对于中高潮滩区域，采用刈割与围淹为主体的物理干预手段，通过周期性收割削弱植株再生能力；在低潮滩，高程越高，环境条件越有利于互花米草根茎苗定植，则结合旋耕作业同步破坏种子库与地下根茎，实现对有性繁殖和无性繁殖的双重抑制。

根据种群密度差异采取分阶清理策略，入侵初期零星分布的幼苗优先采用人工拔除；中等规模扩散区实施刈割与药剂协同控制；当形成大面积单优群落时，则通过构建生态围堰创造局部淹水环境，配合刈割设备进行系统性清除。

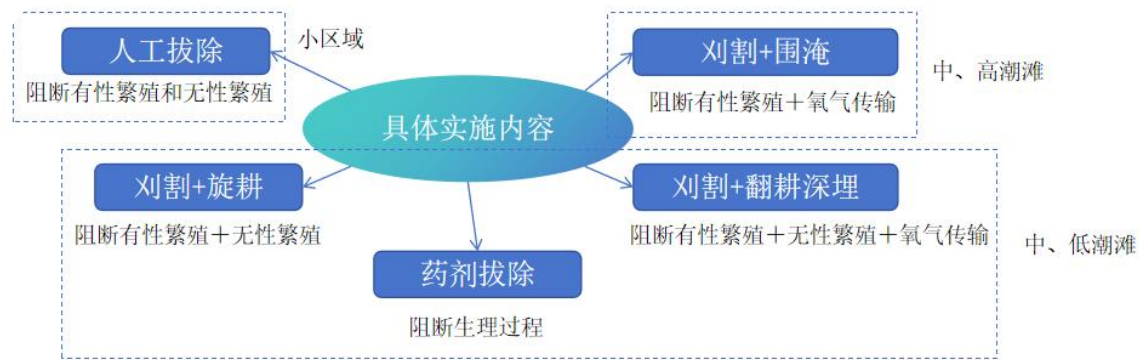


图 2-8 互花米草不同分布的清理措施

(图片来源：作者自绘)

当前互花米草清理技术体系虽已形成因地制宜的解决方案,但其核心始终围绕刈割技术构建动态防控网络。刈割始终承担着基础性调控功能,是物理清除的起点。

2.3 现有清理设备的分析

2.3.1 相关清理设备分析

目前机械清理是互花米草清理手段的中心,笔者对中国农机网的相关资料进行收集。相关的清理机械耕作类的机械以不同的切割或翻耕装置为主要载体,可适配多种耕作农具(表 2-2)。其工作原理是利用犁铧的特殊形状,切入土壤并将土垡抬起、破碎和翻转,能有效改善土壤结构,掩埋地表的杂草、残茬以及肥料,为后续种植创造良好的土壤条件。不同类型的犁,如铧式犁、圆盘犁等,适用于不同质地的土壤。旋耕机通过高速旋转的旋耕刀,对土壤进行切碎和搅拌,能快速破碎土块,使土壤变得疏松细碎。

表 2-2 不同切割或翻耕装置 (表格来源：作者整理)

序号	名称	图例	特点
1	南昌南旋 1L-325 悬挂式铧式犁成交 价格		翻耕、 悬挂适配性 强

2	山东天盛 1LY(SX) 系列圆盘型		土壤适应性广、液压翻转功能
3	沃 1GKN-180 型		碎土搅拌高效、作业适应性强

收割类机械的首要功能是对土地植物进行高效收割（表 2-3）。通常配备强力的割台系统，通过旋转刀片、割刀或横向切割装置，将成熟作物从地面割断。机械能够快速通过田间作业，大幅度提高收割效率，特别适用于大面积农田的作业，减少人工收割的劳动强度和时间。

表 2-3 不同收割类机械（表格来源：作者整理）

序号	名称	图例	特点
1	4LZ-0.3 型乐丰动力小型稻麦收割机		作业高效集成、自走式设计、切碎处理精细
2	重庆鑫源 1GZL-130A (自走履带式)		履带适应性强、耕作功能实用、操作灵活便捷

3	1LY 325 圆盘犁拖拉机		土壤适应性广、耕翻效果优异、作业阻力小
---	----------------	--	---------------------

收获类的机械是一种集成性的农业机械，可实现作物收割、脱粒、清选等多道工序的连续作业（表 2-4）。通过割台将作物切割下来，然后输送至脱粒装置，通过滚筒与凹板之间的相互作用使谷粒从作物上脱落，再经过清选系统将谷粒中的杂质去除。

表 2-4 不同收获类机械（表格来源：作者整理）

序号	名称	图例	特点
1	科乐（CLAAS）JAGUAR 850 自走式青贮饲料收获机		青贮处理、强劲动力与适应性、智能化
2	新疆牧神 4YZB-5 型自走式玉米联合收获机		玉米专收一体化、高效作业、结构稳定可靠
3	久保田 EX 系列		半喂入精准收割、清选系统、地形适应性强

2.3.2 现有互花米草清理设备分析

上海鑫叁元实业有限公司设计的一款针对互花米草清理的手推车，鑫叁元手推式互花米草清除机（HC - C001）（图 2-9）。该机械设备采用单缸四冲程汽油发动机，提供稳定且充足的动力支持，确保设备能够在各种环境下顺畅运行。清除机能够处理直径达 50mm 的植被，特别适用于滩涂等平坦地形区域。在操作上，

这款清除机采用人工手动控制前进,作业人员可以根据现场的实际情况和植被分布灵活调整设备行进方向。设备主要通过物理刈割,直接切断互花米草的草茎和根系,阻止互花米草的再生,达到清除的效果,有效应对互花米草的泛滥问题。从适用场景来看,这款清除机适合用于滨海湿地、滩涂等互花米草入侵严重的区域。由于整体机身较小,这款设备特别适用于小范围的互花米草清除,但也需要较为大量的人力和物力投入,以确保清除工作的高效性和彻底性。



图 2-9 鑫叁元手推式互花米草清除机 (HC - C001)

(图片来源: <https://shanghai01039118.11467.com/product/4181245.asp>)

福建漳州、泉州丰泽区等地采用改装后的水陆挖掘机进行互花米草的物理清理(图 2-10)。通过翻挖根部、深埋或旋耕等方式破坏植株根系,适用于大规模连片互花米草的快速清理。水陆挖掘机具有强大的挖掘和破坏能力,能够翻挖互花米草的根部,同时通过旋耕等技术手段对根系进行破坏。由于这款机械属于大型机械,相比人工或其他传统设备,显著缩短了清理时间,大大提升了大规模清理作业的速度。该设备能的履带行进结构能够适应滩涂泥泞和地形起伏的复杂环境,在恶劣的作业条件下也能保持稳定的作业表现。



图 2-10 福建漳州、泉州丰泽区等地改进的清理机

(图片来源: https://www.qzfz.gov.cn/zwgk/xwzx/fzxw/202211/t20221125_2805667.htm)

在闽江河口湿地采用了“刈割+旋耕”与人工清理结合的清理方式(图 2-11)。针对连片的互花米草入侵区域,旋耕机发挥了重要作用。这种专门用于清理工作的旋耕机,能够高效地对地面进行翻耕,强力破坏互花米草的根系。对于零星分布的互花米草区域,采用人工挖除的方法。“刈割+旋耕”从根本上破坏了互花米草的根系,极大地提升了清除这些外来入侵植物的效果,有效防止其再生。人工加机器的清理方法既适用于大规模的互花米草清理工作,又能在滩涂等湿地特殊地段发挥作用,极大地缩短了清理时间,提升工作效率。



图 2-11 闽江河口湿地人工加机器的清理方式

(图片来源: http://www.fzcl.gov.cn/xjwz/zjcl/zrdl/202210/t20221017_4451732.htm)

从清理方式和设备类型的视角出发,上述针对互花米草的清理设计能够归纳为不同的类别(表 2-5)。

表 2-5 不同机械清理特征(表格来源: 作者自制)

	机械旋耕	机械挖除	人工拔除
使用场景	湿地连片区域		零星分布区域
工作原理	通过旋耕刀破坏互花米草的根系	翻挖根部、深埋等方式破坏植株根系	直接用人力将互花米草连根拔起

优势	高效破坏根系, 适用于大规模清理工作	挖掘和破坏能力强, 适应复杂地形, 作业稳定	操作灵活
局限性	对于零星分布的互花米草清理不便	属于大型机械, 在小范围区域操作不便	人力投入大, 工作效率相对较低

2.4 本章小结

本章阐述了互花米草清理研究的关键内容。剖析了互花米草的生长环境与特性, 以及在潮间带的分布的空间规律。在清理方法层面, 梳理了物理清理、化学清理、综合清理及生物替代等技术手段。通过设备分析, 归纳了通用农业机械的工作原理与特点, 进而聚焦现有的互花米草清理设备。当前互花米草清理已形成多技术融合、多设备协同的治理体系, 但仍需在技术效率提升、智能化装备研发等方面持续探索。

第3章 互花米草清理机的需求研究与分析

3.1 互花米草清理整体研究框架

本研究以用户需求调研为出发点,研究用户的行为模式、使用习惯、心理诉求以及潜在期望,进而界定用户需求。近年来,以用户为中心的设计理念逐渐受到设计师的重视^[35]。用户需求反映了用户在使用产品或服务过程中期望获得的功能、体验与价值。在不同情境下,用户需求呈现出多样性和动态性,随着时间、使用环境和用户个体差异的变化,需求也会随之变化。从产品功能的角度来看,满足用户需求是产品设计的关键。

FAHP-QFD 的理论应用已在创新型产品开发中取得了显著成果,互花米草清理的研究中依赖于对相关利益者需求的深入分析,FAHP 引入了模糊数学,对传统 AHP 方法进行了优化,能够在面对复杂、模糊及主观性较强的因素时,更加精准地评估各因素的相对重要性,对复杂因素进行优先级排序。再通过 QFD 将用户的需求转化为具体的功能要求,有助于理解并满足用户期望,确保产品设计在各环节上能够充分响应这些需求,从而优化清理效果。FAHP 与 QFD 理论的结合,不仅增强了设计决策的科学性与合理性,还能够确保产品设计与用户需求之间的协调与匹配,进而提升互花米草清理机工作效果。

首先通过用户调研收集并分析清理产品的需求,针对相关利益者进行调研走访,明确其对互花米草清理产品的基本要求。在需求收集与整理后,运用 KJ 法对各相关人员的需求进行归纳总结,并使用 FAHP 模型对不同人群的需求进行层次分析,建需求要素评估矩阵,确定各因素的相对重要性。

随后,通过 QFD 将收集到的用户需求转化为具体的功能要求,构建质量屋(HOQ),明确每个设计需求对应的功能参数,确定用户需求与功能需求之间的重要度。在功能优化过程中,首先对功能结构进行优化,再将功能映射为行为,行为映射为结构,进一步推动互花米草清理机的设计创新与功能优化。

最终,完成互花米草清理机的创新设计。通过多学科、系统化的分析和方法

[35] 田心如, 谢云峰, 赵项. 基于用户需求的智能家居产品设计路径研究[J]. 家具与室内装饰, 2023, 30(1):15-21

整合，确保了互花米草清理机设计的科学性、高效性与实用性，提高了产品设计的可操作性和实施效果（图 3-1）。

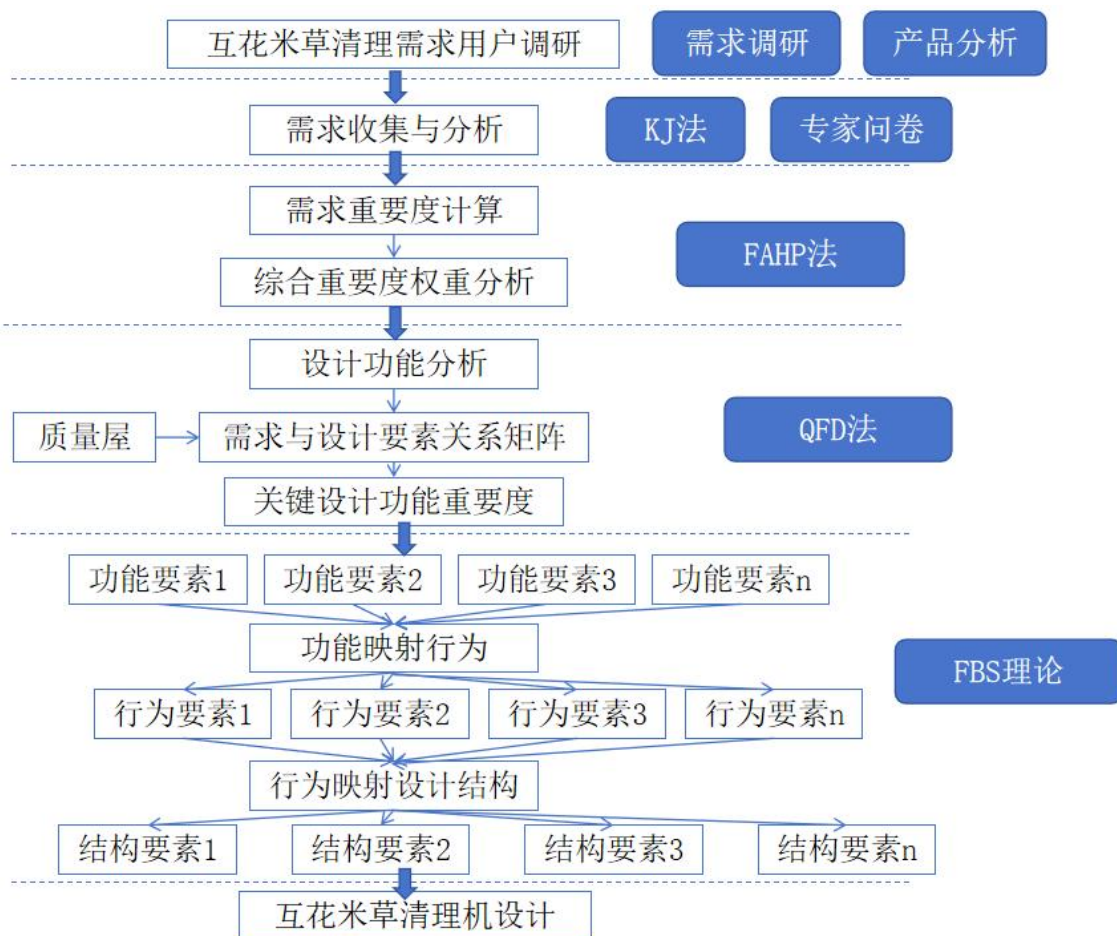


图 3-1 互花米草清理机研究方法

（图片来源：作者自绘）

3.2 互花米草清理设备需求研究

3.2.1 需求调研方法

需求研究的核心目的是通过对互花米草清理过程中所涉及的各个环节进行分析，探索和理解操作模式、操作流程以及所面临的障碍，从而揭示出设计实践中的关键问题。在研究方法上，需求研究将结合定性与定量两种研究方法，确保全面和多角度的需求收集与分析。确定关于互花米草清理需要调研的内容后，采用田野调查、专家问卷和案例分析等调研手段，与相关操作人员进行对话访谈，识别设备使用中的难点和未被满足的需求。对不同群体进行分类，并依据参与程度和决策权重界定核心群体。运用亲和图（KJ）法明确作业需求，进而构建用户画像。同时，借助模糊层次分析法（FAHP）量化不同群体需求的优先级。通

过多维度挖掘利益相关者的需求，探寻设备功能设计中的潜在创新契机，优化设计策略，保障设备能够切实响应互花米草清理中的多元需求，提供切实可行的设计方案（图 3-2）。

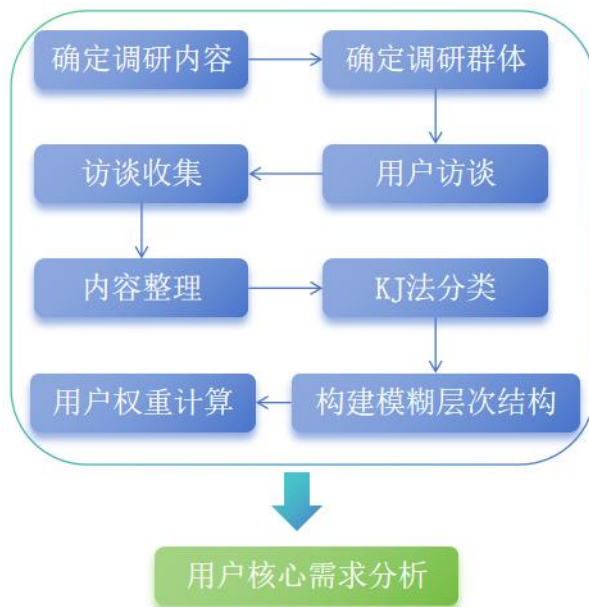


图 3-2 互花米草清理用户需求挖掘

（图片来源：作者自绘）

3.2.2 调研方式

基于前期对互花米草治理需求的系统性分析，为全面获取具有实践指导价值的研究数据，本研究针对互花米草清理工作者作为重要调研对象，采用结构化访谈与问卷调查相结合的方式，围绕五大核心维度展开深入调研。被调查者的基本信息、工作经历与现状、工具设备使用体验、工作中的困难与解决案例、改进建议与研究现状，构建用户需求的调查原始问卷（表 3-1）。

表 3-1 原始调研问卷（表格来源：作者自制）

编号	问题
1	请您简要介绍自己（可包括工作单位、职务 / 身份等）。
2	您参与互花米草治理工作，从事该工作已有多少年？
3	目前贵团队主要采用哪些互花米草治理方法呢？
4	在治理过程中，您使用过哪些工具或设备？
5	您对使用过的这些工具或设备，在操作便捷性、效率、耐用性等方面的

体验如何?

6 作为一线工作者,您在互花米草治理工作中遇到的最大困难或痛点是什么?

7 在治理过程中,是否有成功解决难题的经历?能否简要描述具体解决过程?

8 您认为当前互花米草治理工作可从哪些方面进行改进?

9 您从事相关研究工作,目前正在开展哪些与互花米草治理相关的研究项目?

10 您觉得当前互花米草治理的机器方面研究存在哪些不足之处?

11 从提升除治水平出发,您认为现有的除治设备在工作速度、覆盖面积等方面存在哪些不足?

12 对于现有的除治设备,您期望在功能上进行哪些升级?

3.2.3 用户群体划分

在确定研究问题后,对不同角色进行分类,根据参与深度与决策权界定核心群体。将利益相关者划分为三个维度:负责政策制定的管理层(宏观决策层)、提供技术支持的科研团队(中观研究层)、直接参与作业的施工队伍(微观操作层)。这三个层级的需求既相互关联又各有侧重,共同构成了设备设计的综合指导框架。

管理人员作为顶层设计者,其需求主要体现在政策执行与生态效益方面。近年发布的《互花米草综合清理实施方案》等文件,可以提炼出四大核心诉求:第一,强调清理过程必须遵循自然规律,优先采用环境友好型技术手段;第二,要求建立动态监测机制,确保清理效果的可视化评估;第三,注重清理工作的经济性,在设备投入与生态收益间寻求平衡;第四,推动多方协作机制,促进跨部门数据共享。

科研人员的需求可能集中于清理技术的创新以及相关数据的获取。作业机器需具备精准的切割能力,能够针对互花米草植株实施精确切割,最大限度减少对周边生态环境的附带影响。机器要在作业过程中实时且记录互花米草切割时的各

类关键参数，如切割力度、切割频率、切割深度等，为后续的科学研究的优化提供依据。同时需要降低互花米草的复发率，从而为湿地生态系统的自然恢复和生态重建奠定基础。

施工人员作为互花米草清理设备的直接使用者，其使用流程是对清理机最直接的反馈，需求具有鲜明的操作导向性。据相关报告指出，部分设备存在地形适应能力不足的问题，在泥泞滩涂作业时常常陷入停滞。同时，操作界面若设计得过于复杂，会严重影响施工队伍对清理机械的理解与操作。此外，由于施工地区地质条件特殊，现有的行走轮设计在干硬地面能正常运行，但在松软泥滩环境中极易下陷，极大地制约了作业效率。

3.3 互花米草清理机需求的获取与分类

3.3.1 需求获取实践

盐城作为我国面积最大、生态系统最完整的沿海湿地，其互花米草治理经验具有显著的典型性和代表性。但是近年来，盐城核心区的植被群落变得越来越均匀，生物多样性和生态价值都在下降^{[36][37]}。因此笔者于 2024 年 6 月中旬，综合运用线下走访与线上调研相结合的方式，对江苏省湿地生态公益保护实践基地、江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区、盐城市自然资源和规划局等单位开展实地调查与专家咨询工作。盐城下辖的东台市（图 3-3）、响水县（图 3-4）、大丰区（图 3-5）在互花米草清理工作中取得突破性进展，形成了一套行之有效的治理模式与实践经验。



[36] 罗锋,代建成,陈治澎,等.盐沼植被分布动态监测及驱动力分析[J/OL].河海大学学报(自然科学版):1-12

[37] Zhang H B, Liu Y Q, Xu Y, et al. Impacts of *Spartina alterniflora* expansion on landscape pattern and habitat quality: a case study in Yancheng Coastal wetland, China[J]. Applied Ecology & Environmental Research, 2020, 18(3).

图 3-3 东台地区互花米草清理过程

(图片来源：由盐城资源规划局拍摄并提供)



图 3-4 响水地区互花米草清理过程

(图片来源：由盐城资源规划局拍摄并提供)



图 3-5 大丰地区互花米草清理过程

(图片来源：由盐城资源规划局拍摄并提供)

针对施工队员、科研人员及保护区管理者等关键群体开展深度调研，调研的样本需具备两年以上相关领域从业经验。其中施工队员 8 人、科研人员 2 人、保护区管理者 2 人。采用用户访谈法获取互花米草治理的用户需求，通过原始问卷调研与开放性自由陈述相结合的信息采集模式（图 3-6）。并通过开放性问题的访谈对象对除治工作中的需求进行自由描述，结合实际工作经验，分享治理过程中的痛点、成功案例及改进建议，以获取更具情境性与创新性的质性数据。



图 3-6 采访地点与采访照片
(图片来源：作者拍摄)

3.3.2 需求访谈汇总

对来自大丰、东台、射阳等地的一线工作者展开需求访谈，涵盖江苏盐城水利建设有限公司、中交上航局、自然资源和规划局林业服务中心等等。调研对象年龄跨度从 25 岁至 52 岁，在治理工作中积累了一定实践经验（表 3-2）。

表 3-2 用户访谈信息（表格来源：作者自制）

访谈方式	姓名	从事方向	从事时长
线下	李*	生态方向博士研究生	9
	蔡**	生态方向博士研究生	9
	陈**	自然规划局	3
	邓**	农机操作人员	7
	李**	农机操作人员	4
	罗**	农机操作人员	3
	徐**	互花米草清理人员	3
线上	吴**	农机操作人员	6
	单**	互花米草清理人员	3
	徐**	互花米草清理人员	3
	赵**	互花米草清理人员	2
	赵**	自然保护区	9

本次调研覆盖 12 位用户，其中受访者单**现年 52 岁。自 2023 年起，

他全程深度参与大丰区（二标段）与 V-1 标段的互花米草治理工作，从初期除治到后期管护各环节均积累了丰富的丰富实践经验，详见表（3-3）。

表 3-3 用户访谈回答（表格来源：作者自制）

题项（原始问卷）	回答（精简）
3	通常采用“刈割 + 围淹”“人工挖除”“围堰隔水翻根筑垄”等物理治理法，2023 年计划对挡潮圩外区域试用化学除治法。
4	使用过的设备包括履带式收割机、旋耕机、浮筒 / 履带挖掘机、机耕船、推土机、拖拉机、工程驳船、无人机、GPS 测量仪等。
5	目前的问题在于农业机械因滩涂淤泥易陷机，需浮筒挖掘机救援，履带宽度不足、橡胶履带易损；浮筒挖掘机适应深淤泥层，履带挖掘机带钢板适用于地质较好区域；机耕船除治效果差，已弃用；推土机 / 拖拉机 / 工程驳船依地形辅助运输；无人机用于施工管理与远程投送，GPS 辅助测量范围。
6	常用的方法高滩面蓄水难，需要更换治理方法；1.4 万亩区域仅单入口，港汊多、通勤及燃油补给耗时，部分人员需无人机送饭。
7	基于《互花米草除治技术手册》，采用围堰、隔水、翻根、筑垄，能够达到治理的理想效果。
8	5-10 月（生长旺盛期）为最佳除治时机，断营养供给效果最佳；复发率验收宜在 11 月（经二次补治后），避免 5 月前休眠期误判。
9	建议除治后尽快种植碱蓬、柹柳等本土耐盐碱植物，修复滩涂生态，为麋鹿、鸟类提供栖息地。
10	设备需适应滩涂淤泥地形，主流刈割设备为履带收割机和浮筒挖掘机改装刀头；浮筒挖掘机适应性强但成本高。
11	增加设备燃油储备箱，减少补能损耗；加大收割机割台、挖掘机抓斗宽度，提升单次作业覆盖效率。

12	加装北斗定位导航系统，实现自主智能作业；安装自动探测装置，精准控制刈割留茬高度或开挖深度。
自由描述	在实际工作中，希望强化操作性能，针对滩涂复杂工况，通过智能化、模块化设计提升设备的操控灵敏度与环境适应性；开发循环利用功能，鉴于互花米草在生物质能源、有机肥原料等领域的潜在价值，可研发配套装置实现收割物的就地处理与高效回收；改进工业设计，通过人机工程学优化设备外观与操作界面，提升作业舒适性与安全性，进而增强整体使用体验。

在实地调研中，一线工作者反馈了互花米草治理工作中的诸多难题。为便于对比分析与后续研究，对其余 11 位受访者的关键信息进行系统梳理与提炼，结合实际工作需求，形成关键回答汇总表格（表 3-4）。

表 3-4 关键回答汇总 （表格来源：作者自制）

需求	具体需求描述
1	建议提高机器在湿地中的移动效率，提高设备对滩涂地质的适应性。
2	建议优化刈割设备的结构设计，提高收割效率。
3	优化设备的造型外观，在满足功能性需求的基础上，借鉴湿地生态元素进行设备外观造型设计，提升操作人员的视觉舒适度与操作体验。
4	建议引入导航系统，设定作业范围，实现设备自主行走、智能作业，降低人工干预频率，提高作业精度与效率。
5	安装自动探测、自动控制刈割留茬高度或挖机开挖深度的智能设备，提高工作精度。
6	希望能够加大收割的面积，增加一次行走的有效作业覆盖宽度。
7	增加设备燃油箱容积或额外配备燃油储备箱，提升持续工作时长。
8	通过采用高强度轻量化合金材料与模块化设计，降低制造成本。优化设备维护结构，减少易损件数量与更换难度，延长设备使用寿命。
9	提高设备易损件的耐用性，减少设备故障和维修次数。
10	设计可视化触控操作界面，开发智能化辅助操作系统，指导操作人员完成复杂操作，提升操作便捷性。

- 11 将高效切割装置、数据采集传感器、智能控制系统集成于一体，实现互花米草收割、土壤数据监测、作业参数记录等功能。
- 12 配备多重安全防护装置，包括紧急制动系统、防倾覆传感器、漏电保护装置等，全方位保障操作人员的人身安全。
- 13 设备自动化程度高，所需投入的人力数量少，降低人工成本与劳动强度。

3.3.3 需求清单确立

通过对湿地工作者需求的详细记录与分类，运用 KJ 法对互花米草清理设备的需求信息进行系统分析。提炼原始语句为简洁的表述，并记录于便利贴上；剔除重复需求的数据，将剩余便利贴内容并列呈现；依据需求属性差异进行分类，为每个类别赋予概括性标题，构成二级需求（图 3-7）。



图 3-7 KJ 法的分析应用

（图片来源：作者自绘）

根据表 3-4 提炼出的关键需求，运用 KJ 法梳理出互花米草清理机的四个需求层级（图 3-8）。

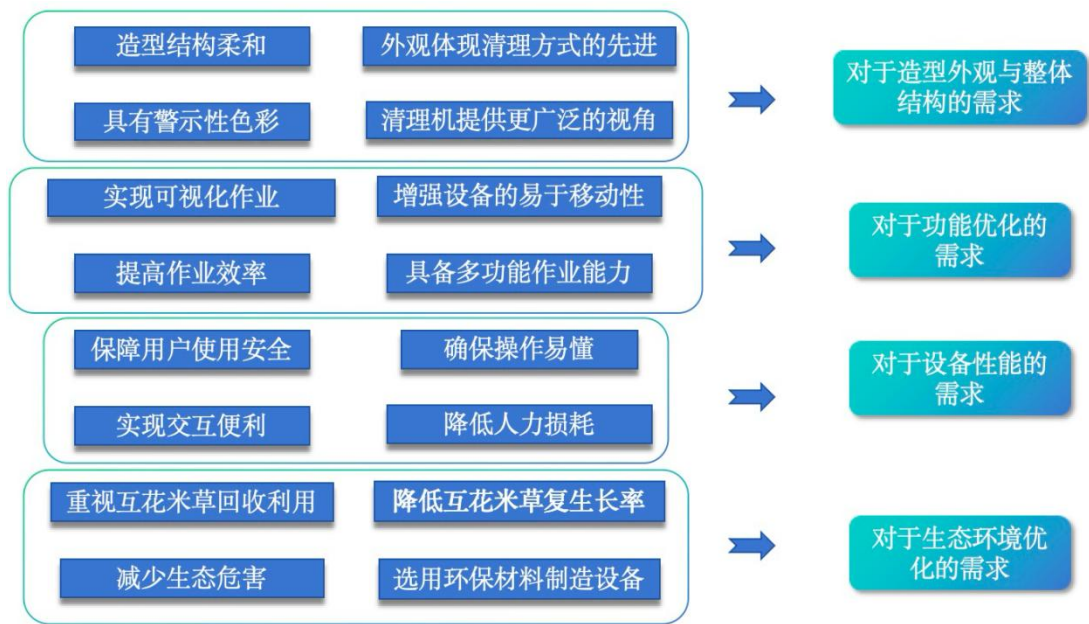


图 3-8 KJ 法分类

(图片来源：作者自绘)

将需求的短句缩写为需求词语，其中一级需求为互花米草清理设备的需求要素，二级需求分为外观设计、功能性、可靠性、生态兼容，三级需求是具体功能点（表 3-5）。

表 3-5 需求合并（表格来源：作者自制）

序号	二级需求	三级需求
1	外观设计	科技感
2		贴合自然
3		警示色调
4		开阔视野
5	功能性	可视化作业
6		易于移动
7		作业效率
8		多功能作业
9	可靠性	使用安全
10		操作易懂
11		交互便利
12		低人力损耗

13		低生态危害
14	生态兼容性	复生长率低
15		互花米草回收
16		低生态扰动

根据用户需求的划分和痛点，制定出目标用户的人物画像，将目标用户在生理特征、心理状态、个人偏好、行为习惯等多个维度的特征予以具体化与标签化处理，从而实现对用户特征、期望以及需求的洞察与理解，绘制使用人员的用户画像（图 3-7）。



人群：陈大勇
年龄：45岁
性别：男
职业：湿地植物防治和生态修复任务
工作经验：2年以上从事互花米草生态修复的工作经验。

用户故事：驾驶履带收割机行进时，淤泥时常漫过履带，一旦深陷其中，只能无奈等待浮筒挖掘机救援。狭窄的割台为完成一片区域的清理，不得不反复往返，高强度的操作让人腰酸背痛、疲惫不堪。不仅如此，现有设备智能化程度极低，复杂繁多的按键与操作流程，新上手的工人需要花费大量时间学习，极大地拖慢了互花米草治理的整体进度。

痛点：设备的操作界面如果过于复杂或不直观，用户在短期内无法熟练操作。在面对环境时适应性差，无法高效执行防治任务，导致作业效率降低。

目标：希望设备的操作更加智能，操作界面简洁直观，像手机触屏般轻松调节作业参数；动力强劲，即使遇到根系密集区域也能顺畅切割，大幅提升清理效率；在湿地行走能够更加便捷，操作起来更加舒适。

图 3-9 用户画像

（图片来源：作者自绘）

3.4 构建需求层次模型

3.4.1 建立多目标的层级结构

采用模糊层次分析法构建多层次需求评估体系，通过对决策问题进行层次化分解，并将各级因素之间的关系用判断矩阵表示。首先将访谈、观察获取的原始需求信息进行分层级结构化处理，建立包含目标层、准则层及指标层的评估模型^[38]；再通过专家赋权与一致性检验，计算各层级要素的模糊权重向量，最终输出需求优先级排序矩阵。FAHP 计算步骤如图 3-10 所示。

[38] Yanwen W, Peng C, Chen F. Security assessment of coal mine power grid voltage based on an improved AHP-FCE[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022.

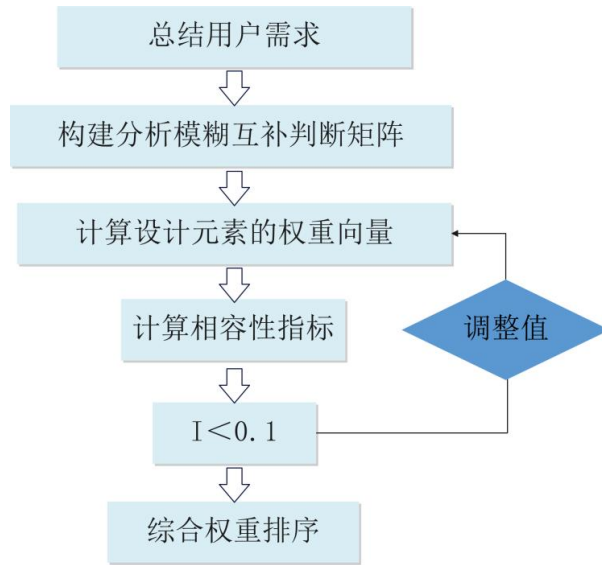


图 3-10 FAHP 计算流程

(图片来源：作者自绘)

针对聚类的调研数据信息，构建用户需求层次结构模型，首先，将用户需求归纳为四个准则层次：外观设计（A）、功能性（B）、可靠性（C）和生态兼容性（D）。在此基础上，进一步细化为子准则层，其中外观设计包含科技感（A1）、贴合自然（A2）、警示色调（A3）、开阔视野（A4）；功能性包括可视化作业（B1）、易于移动（B2）、作业效率（B3）、多功能作业（B4）、可靠性包括使用安全（C1）、操作方式易懂（C2）、交互便利（C3）、低人力耗损（C4）；生态兼容性则涵盖低互花米草回收（D1）、复生长率低（D2）、低生态危害（D3）和低生态扰动（D4）。最终，构建了一个完整的需求层次模型，帮助深入分析用户的多维需求（图 3-11）。

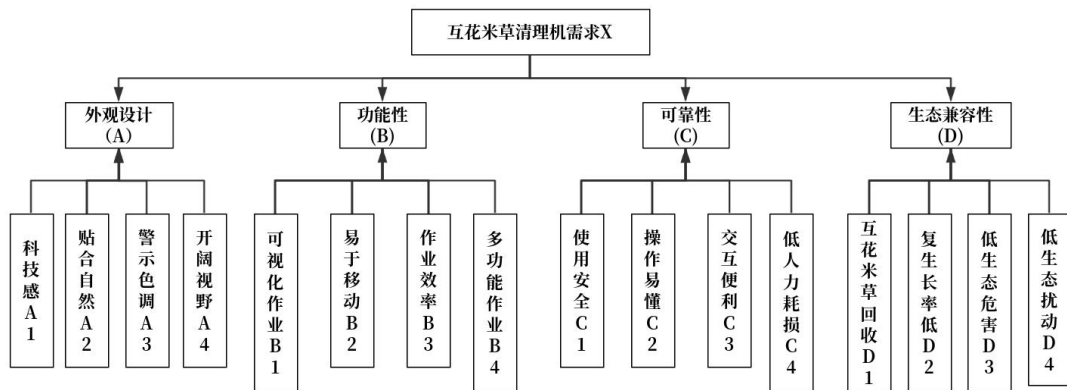


图 3-11 FAHP 需求层级架构

(图片来源：作者自绘)

3.4.2 构建对比判断矩阵

在模糊层次分析法过程中，为了避免单一的定性结果，通常将要素成对比进行比较，以确定要素之间的相对重要性。判断矩阵反映了层次结构中每个变量的重要性，是该方法的核心部分。在模糊层次分析法的过程中，为了避免单一的定性结果，通常成对比较元素以确定其相对重要性。判断矩阵反映了层次结构中每个变量的重要性，是该方法的核心组成部分。在这项研究中，参照 0.1 ~ 0.9 级的标定法构建模糊判断矩阵^[39]。该标度法具有简单、易于使用等优势，0.1-0.9 比例标度的定义见表 3-6。

表 3-6 0.1-0.9 标度及含义

(表格来源：作者自制)

标度	含义	标度值说明
0.5	同等重要	两种因素具有相同的重要程度
0.6	稍微重要	两种因素相比，前者比后者稍微重要
0.7	明显重要	两种因素相比，前者比后者明显重要
0.8	非常重要	两种因素相比，前者比后者非常重要
0.9	极端重要	两种因素相比，前者比后者极端重要
0.1,0.2,0.3, 0.4	反比较	若因素 r_i 与因素 r_j 相比较得到判断 $r_{ij}=0.6$ ，则 $r_{ji}=1-0.6=0.4$

根据表 3-6 中的比率标度，成对比较参数以评估其相对重要性。针对各参数展开两两对比，判断矩阵如下式 (3-1) 所示^{[40][41]}。而矩阵的性质则由公式 (3-2) 与公式 (3-3) 予以界定。

[39] Jia Y ,Wang J ,Han X , et al. Application and Performance Evaluation of Industrial Internet Platform in Power Generation Equipment Industry [J]. Sustainability, 2023, 15 (20):

[40] Wongvilaisakul W ,Netinant P ,Rukhiran M . Dynamic Multi-Criteria Decision Making of Graduate Admission Recommender System: AHP and Fuzzy AHP Approaches [J]. Sustainability, 2023, 15 (12):9758.

[41] Ahmad M N, Maidin N A, Rahman M H A, et al. Conceptual design selection of manual wheelchair for elderly by analytical hierarchy process (AHP) method: A case study[J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2017, 12(17): 6710-6719.

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

$$a_{ij} + a_{ji} = 1 \quad (3-2)$$

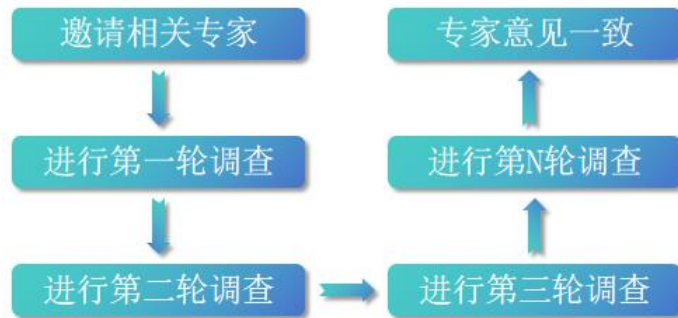
$$a_{ii} = 0.5 \quad (3-3)$$

3.4.3 需求要素权重

本研究邀请复旦大学条子泥湿地研究院博士研究生 3 名；湿地管理与清理专家 2 名；人机交互领域的设计学讲师 2 名，以及工业设计研究生 3 名。通过德尔菲法进行专家问卷调查（图 3-12），专家依据标度量表对各评估指标进行两两比较，进而评定其相对重要性并生成相应的标度值。

图 3-12 德尔菲法

（图片来源：作者自绘）



最终，对专家评分结果进行汇总，确保评估指标的权重分配具有科学性与一致性，根据公示（3-4）计算权重向量 W 。

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)}, i = 1, 2, \dots, n \quad (3-4)$$

其中， $\sum_{j=1}^n a_{ij}$ 为第 i 行的元素之和。

其中，互花米草清理需求层级矩阵见表 3-6。

表 3-7 X 层判断矩阵（表格来源：作者自制）

X	A	B	C	D
A	0.5	0.1	0.2	0.3
B	0.9	0.5	0.5	0.7
C	0.8	0.5	0.5	0.6
D	0.7	0.3	0.4	0.5

计算出模糊判断矩阵权重向量分别为：(0.175, 0.300, 0.283, 0.247)。

其中，互花米草外观设计层级矩阵见表 3-8。

表 3-8 A 层判断矩阵 (表格来源: 作者自制)

A	A1	A2	A3	A4
A1	0.5	0.3	0.2	0.3
A2	0.7	0.5	0.4	0.3
A3	0.8	0.6	0.5	0.4
A4	0.7	0.7	0.6	0.5

计算出模糊判断矩阵权重向量分别为：(0.192, 0.242, 0.275, 0.292)。

其中，互花米草功能性层级矩阵见表 3-9。

表 3-9 B 层判断矩阵 (表格来源: 作者自制)

B	B1	B2	B3	B4
B1	0.5	0.4	0.4	0.3
B2	0.6	0.5	0.4	0.5
B3	0.6	0.6	0.5	0.4
B4	0.7	0.5	0.6	0.5

计算出模糊判断矩阵权重向量分别为：(0.217, 0.250, 0.258, 0.275)。

其中，互花米草可靠性层级矩阵见表 3-10。

表 3-10 C 层判断矩阵 (表格来源: 作者自制)

C	C1	C2	C3	C4
C1	0.5	0.6	0.6	0.6
C2	0.4	0.5	0.5	0.6
C3	0.4	0.5	0.5	0.5
C4	0.4	0.4	0.5	0.5

计算出模糊判断矩阵权重向量分别为：(0.275, 0.250, 0.242, 0.233)。
其中，互花米草生态兼容性层级矩阵见表 3-11。

表 3-11 D 层判断矩阵 (表格来源：作者自制)

D	D1	D2	D3	D4
E1	0.5	0.5	0.7	0.6
E2	0.5	0.5	0.6	0.6
E3	0.3	0.4	0.5	0.6
E4	0.4	0.4	0.4	0.5

计算出模糊判断矩阵权重向量分别为： $W = (0.275, 0.267, 0.233, 0.225)$ 。
为确保计算结果的严谨性，需要对模糊判断矩阵进行一致性检验，见公式 3-5。

$$W_i^* = \frac{W_i}{W_i + W_j}, (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (3-5)$$

利用权重向量构建模糊判断矩阵的特征矩阵 $W = (W_{ij})_{n \times n}$ 。再通过公式 (3-6) 计算模糊判断矩阵与其特征值矩阵的相容性指标，如果相容性指标 $I \leq 0.1$ 时，则认为模糊判断矩阵的一致性检验通过，值越小，表示决策者对模糊判断矩阵一致性的要求越高。

$$I(A, W^*) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij} + w_{ij} - 1|}{n^2}, (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (3-6)$$

计算出的特征矩阵公示 (3-7)、(3-8)、(3-9)、(3-10)、(3-11)：

$$W_A^* = \begin{bmatrix} 0.500 & 0.539 & 0.547 & 0.574 \\ 0.461 & 0.500 & 0.508 & 0.535 \\ 0.453 & 0.492 & 0.500 & 0.527 \\ 0.426 & 0.465 & 0.473 & 0.500 \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

$$W_B^* = \begin{bmatrix} 0.500 & 0.442 & 0.411 & 0.397 \\ 0.558 & 0.500 & 0.468 & 0.453 \\ 0.589 & 0.532 & 0.500 & 0.485 \\ 0.603 & 0.547 & 0.515 & 0.500 \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

$$W_C^* = \begin{bmatrix} 0.500 & 0.465 & 0.457 & 0.441 \\ 0.535 & 0.500 & 0.492 & 0.476 \\ 0.543 & 0.508 & 0.500 & 0.484 \\ 0.559 & 0.524 & 0.516 & 0.500 \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

$$W_D^* = \begin{bmatrix} 0.500 & 0.524 & 0.532 & 0.541 \\ 0.476 & 0.500 & 0.508 & 0.518 \\ 0.468 & 0.492 & 0.500 & 0.509 \\ 0.459 & 0.482 & 0.491 & 0.500 \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

$$W_E^* = \begin{bmatrix} 0.500 & 0.507 & 0.541 & 0.500 \\ 0.493 & 0.500 & 0.534 & 0.543 \\ 0.459 & 0.466 & 0.500 & 0.509 \\ 0.450 & 0.457 & 0.491 & 0.500 \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

根据式 (3-7)，计算求得 $I(A, W_A^*) = 0.098 < 0.1$ ， $I(B, W_B^*) = 0.094 < 0.1$ ， $I(C, W_C^*) = 0.058 < 0.1$ ， $I(D, W_D^*) = 0.038 < 0.1$ ， $I(E, W_E^*) = 0.054 < 0.1$ 。以上的各模糊判断矩阵均 < 0.1 ，通过一致性检验，数据可靠有效。

3.4.4 互花米草清理需求综合权重分析

基于模糊层次分析法 (FAHP) 得到的分析结果，可以为后续设计过程提供关键的理论依据和方向指导，具体结果见表 3-12。

表 3-12 综合权重计算及排序 (表格来源: 作者自制)

准则层	权重	子准则层	权重	综合权重	综合排序
A	0.175	A1	0.192	0.0336	16
		A2	0.242	0.0423	15
		A3	0.275	0.0481	14

B	0.300	A4	0.292	0.0511	13
		B1	0.217	0.0651	9
		B2	0.250	0.0750	4
		B3	0.258	0.0774	3
		B4	0.275	0.0825	1
C	0.283	C1	0.275	0.0778	2
		C2	0.250	0.0708	5
		C3	0.242	0.0685	6
		C4	0.233	0.0659	8
D	0.242	D1	0.275	0.0665	7
		D2	0.267	0.0645	10
		D3	0.233	0.0564	11
		D4	0.225	0.0545	12

在互花米草清理设备的需求层级体系中，功能性（B）权重达 0.300，在整个需求架构中占据核心地位。其子准则层综合排序里，多功能作业 0.0825 综合权重排序第一，施工场景具有复杂性与多样性，对设备具备多任务处理能力有着极为迫切的需求，单一功能的设备已难以契合实际施工的复杂工况。作业效率综合权重为 0.0774，排序为第三，施工人员期待机器能够缩短施工周期，高效的作业效率有助于降低时间成本，提升整体清理项目的效益。易于移动综合权重为 0.0750，在复杂多变的湿地环境对设备机动性的特殊且严苛的要求，设备需具备灵活穿梭于不同地形区域的能力，以保障清理工作的顺利推进。可视化作业综合权重为 0.0651，施工人员需要清晰的作业路径指引，提升了作业效率。

可靠性（C）权重为 0.283，在互花米草清理需求层级中位列第二。在可靠性的子准则层综合排序中，使用安全综合权重 0.0778，是机器投入使用的底线与前提，任何情况下，保障施工人员的安全都是重中之重。操作方式易懂综合权重 0.0708，简单的操作方式能够使施工人员快速熟悉设备操作流程，减少操作失误，提升工作效率。交互便利综合权重 0.0685，交互便利程度直接影响着设备的使用效率与施工人员的操作体验，通过有效减少因操作繁琐或反馈信息不明确导致的操作失误，提高作业效率。低人力耗损综合权重 0.0659，表明在实际

施工过程中, 需要降低人力依赖, 提高设备自动化程度, 有效控制人力成本支出。

生态兼容性 (D) 权重为 0.242, 在互花米草清理需求层级中位列第三。在生态兼容性的子准则层综合排序中, 回收互花米草综合权重 0.0665, 回收互花米草综合权重为 0.0665, 需要通过清理机对互花米草进行回收利用, 不仅能够减少互花米草的二次污染, 还能在一定程度上为清理项目创造额外的经济效益, 降低清理成本。复生长率低综合权重 0.0645, 需要考虑互花米草的切割方式与根茎处理, 从而有效抑制互花米草的再次生长, 实现长期生态修复。低生态危害综合权重 0.0564, 在当前生态保护理念的大背景下, 尽可能做到环境优先, 控制互花米草清理机的污染排放, 降低清理机对生态系统的负面影响。低生态扰动综合权重 0.0545, 需要从产品的全生命周期的视角出发, 保护原有生态环境。

外观设计 (A) 在整个需求层级体系中呈现出辅助性特征, 权重为 0.175, 排序最后。在外观设计的子准则层综合排序中, 开阔视野综合权重 0.0511, 外观提供开阔的视野对操作安全性有着直接的影响, 施工人员能够观察作业区域, 有助于及时发现潜在风险, 保障作业安全。警示色调综合权重 0.0481, 构成安全防护的重要视觉要素, 在复杂的施工环境中, 外观配备醒目的警示色调可有效避免安全事故的发生。造型贴合自然综合权重为 0.0423, 清理机在整体造型上应该与周边环境实现融合, 增强其在自然场景中的协调性。科技感综合权重 0.0336, 施工人员对于设备外观设计中的迭代的感知需求在设计中的重要性不高。

互花米草清理需求的需求层级递进关系呈现功能性到可靠性到生态兼容性最后到外观设计的需求优先级序列。前三位综合权重指标多功能作业、作业效率、使用安全均直接关联施工效率与安全。

3.5 本章小结

本章围绕互花米草清理机的需求展开了研究与分析。在产品设计方法上, 运用 KJ 法归纳总结, 通过 FAHP 确定需求优先级, 在需求层次模型构建中, 建立多目标层级结构, 互花米草清理设备需求优先级依次为功能性、可靠性、生态兼容性和外观设计, 明确了如多功能作业、作业效率、使用安全等核心需求, 为后续设计创新研究提供了坚实的理论依据和方向指导。

第4章 互花米草清理机的功能设计

4.1 功能研究方法框架

基于所明确的用户需求，进行功能转换，需要将抽象的需求具象化为产品的核心功能。分析产品的特性，将产品特性和产品设计进行匹配，得到映射关系，以指导产品功能设计^[42]。在此基础之上，提出了互花米草清理设备的基本产品构成形态。为了实现这一产品形态框架，研究采用了 QFD - TRIZ - FBS 的设计流程，将用户需求与产品设计策略进行融合，具体设计流程图 4-1。

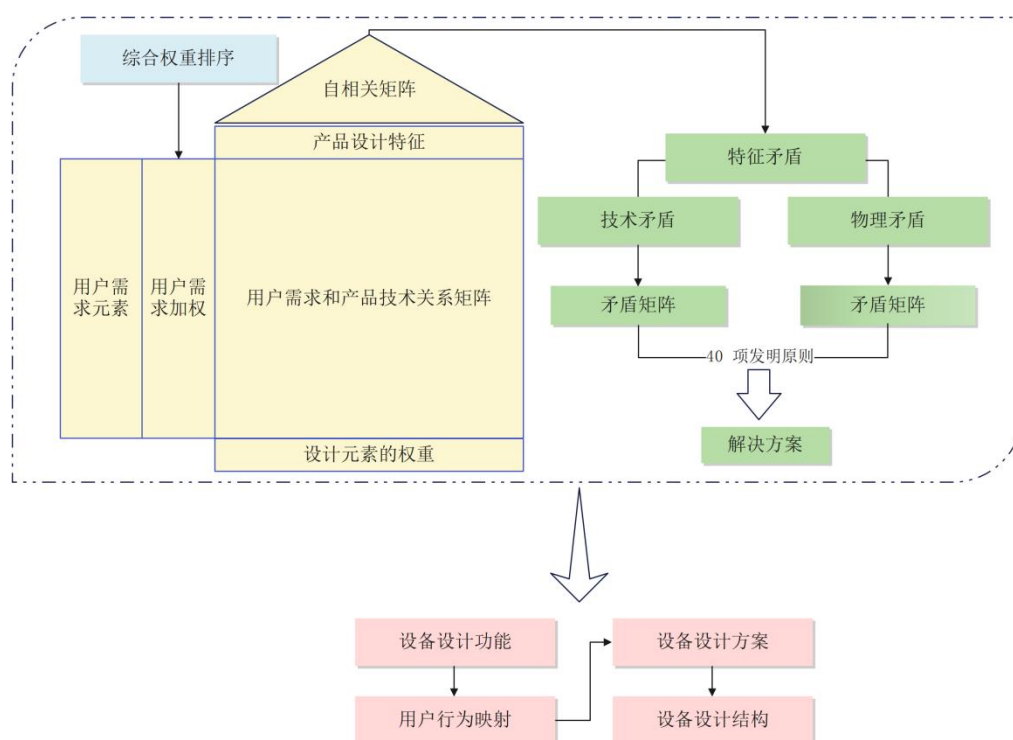


图 4-1 功能研究方法框架

(图片来源：作者自绘)

4.2 互花米草清理机的质量屋构建

4.2.1 互花米草清理设计功能划分

从传统的操作流程来看，并结合前期调研走访的用户清理流程。清理设备由操作员在操作端进行操作，先定位需要清理互花米草的地区。借助设备的移动部

[42] 李洋,刘国闯,刘苏,等.基于 AHP-QFD 的共享老年代步车人机工程设计[J].包装工程,2023,44(18):52-60.

分和动力部分，使机器移动。在此过程中，如果未发现互花米草，机器继续移动寻找；若发现互花米草，则进入清理环节。清理过程包含机器切割和机器翻耕两个步骤。机器切割环节，主要依靠切割部分和动力部分来完成对互花米草的切割；切割后，进行回收互花米草的操作，这需要动力部分和回收部分协同工作。机器翻耕同样需要动力部分的支持，目的是进一步处理清理区域，确保清理效果。清理完成后，机器返回，结束本次清理任务，传统的互花米草清理具体流程见图 4-2。

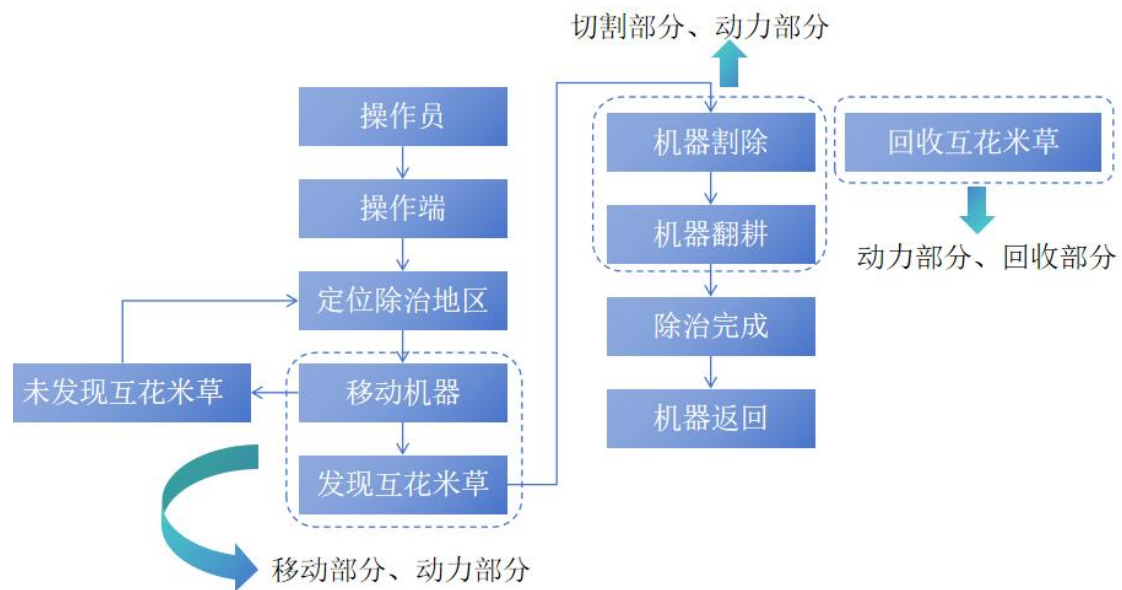


图 4-2 传统互花米草清理机流程

(图片来源：作者自绘)

再结合模糊层次分析法中确定的用户需求权重，将这些客户需求转化为设计功能^[43]对产品特性与设计元素之间的映射功能予以梳理与呈现，本研究的互花米草清理设备特征应包括核心功能层、人机交互层、基础结构层三个维度（图 4-3）。

在核心功能层中，刈割功能占据着核心地位。考虑到作业环境多为淤泥质滩涂等极端恶劣场景，清理设备必须具备稳定的作业效能，以确保能够达到预先设定的工作速率标准。在执行互花米草收割操作的过程中，设备应同步实现高效的回收作业，尽可能降低对传统深埋处置方式的依赖程度。

在人机交互系统构建方面，配备的触控屏应该简洁直观，即便是缺乏专业背

[43] Villanueva P, Bona S, Lostado-Lorza R, et al. Morphological Design of a Bicycle Propulsion Component Using the Hierarchical Analysis Process (AHP)[J]. Applied Sciences, 2023, 13(13): 7792.

景知识的操作人员，亦能迅速掌握操作要领并流畅开展作业。在安全防护机制设计上，需要能够及时感知潜在危险，并迅速触发相应的风险规避机制，保障操作人员的人身安全与设备的稳定运行。应该采用模块化结构，简化部件应用流程，缩短维护作业时间，设备应有辅助清理系统，辅助操作人员完成在不同环境下的各类作业需求。

在基础结构层，采用履带式或多轮驱动的行进方式，优化底盘结构，确保机器在各类复杂多变的地形条件下，维持稳定的行驶状态。在动力系统选型与配置方面，可配备通过混合供电的模式，满足长时间连续作业的需求，大幅延长设备的续航时间。

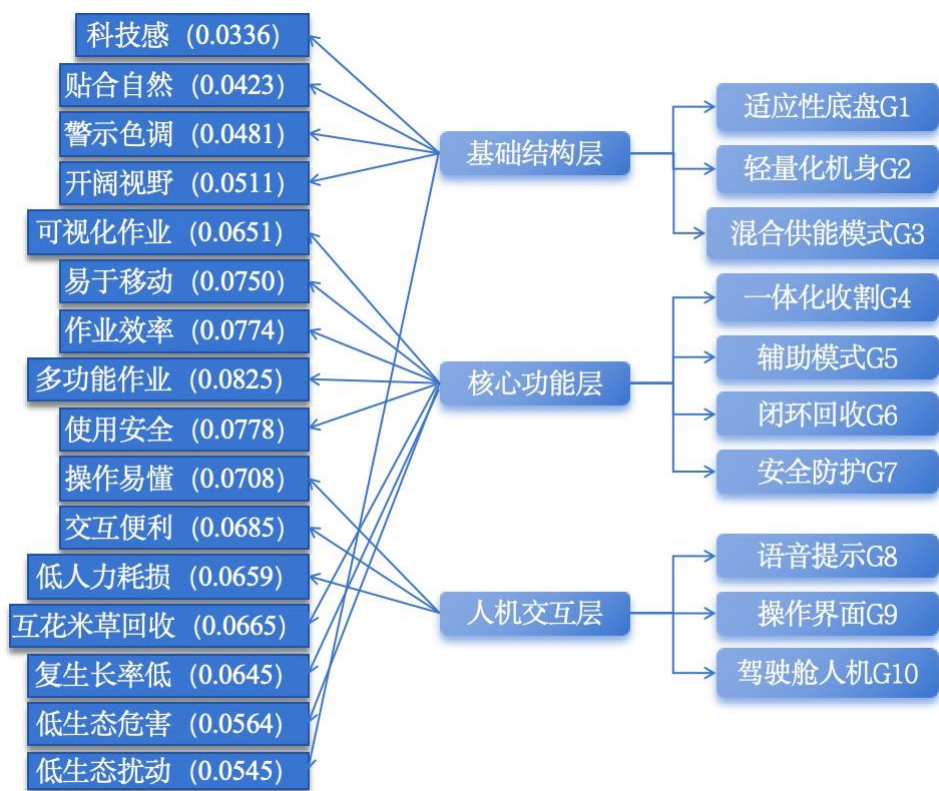


图 4-3 互花米草清理机功能模型

(图片来源：作者自绘)

从开发模块化、维护便捷性与用户体验升级，适配湿地清理中环境多变、生态敏感、操作人员专业性差异大的特殊需求出发。互花米草清理机可划分为基础层-功能层-交互层，基础层确保设备在湿地环境中的物理稳定性与持续运行能力，核心层集中关键技术模块，交互层降低使用门槛并提升人机协作流畅度，具体功能特征见表 4-1。

表 4-1 互花米草清理机功能及说明 (表格来源: 作者自制)

具体功能	说明
适应性底盘 (G1)	针对互花米草常生长于湿地、滩涂等复杂地形环境, 通过性强的行走轮, 能够保证设备在复杂地形下稳定行驶。
轻量化机身 (G2)	轻量化机身降低设备的动力消耗, 提高能源利用效率, 减少设备在复杂地形移动时对地面的压力, 降低对作业环境的扰动。
混合供能模式 (G3)	保证设备在不同工况下的稳定电力供应, 又能提高能源利用效率, 降低运行成本与环境污染。
一体化收割 (G4)	设备能够在同一作业流程中, 完成对互花米草从切割到收集的过程, 解决效率低下、遗漏等问题。
辅助模式(G5)	驾驶中辅助驾驶员调整设备的作业参数, 从而实现最佳的清理效果。
闭环回收(G6)	在收割互花米草后, 将其直接输送至专门的回收装置内, 能够避免在回收过程中互花米草残体散落造成二次污染。
安全防护(G7)	保障操作人员人身安全与设备稳定运行, 设置物理防护装置, 降低作业过程中的安全风险。
语音提示(G8)	在设备启动、运行、出现故障、即将进行关键操作等不同阶段, 向操作人员及时传达相关信息, 提升操作的准确性与安全性。
操作界面(G9)	用直观易懂的菜单形式呈现各类操作选项与设备状态信息, 方便操作人员进行指令输入与设备运行状况的实时监控。
驾驶舱人机 (G10)	从人体工程学角度出发, 对设备的驾驶舱进行优化设计, 营造良好的操作环境, 提升操作人员的工作舒适度与作业体验。

4.2.2 构建设计要素质量屋

QFD 理论可以联系用户需求与技术参数, 以实现需求的转换^{[44][45]}, 质量之屋 (HOQ) 是客户分析工具的声音^[46], 将用户需求转化为产品设计与生产流程中

[44] Villanueva P, Bona S, Lostado-Lorza R, et al. Morphological Design of a Bicycle Propulsion Component Using the Hierarchical Analysis Process (AHP)[J]. Applied Sciences, 2023, 13(13): 7792.

[45] Dai J, Blackhurst J. A four-phase AHP-QFD approach for supplier assessment: a sustainability perspective[J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(19): 5474-5490.

[46] Hridoy R M, Parvez M S, Mohsin N. Joining methods of Analytic Hierarchy Process (AHP), Kano Model and Quality Function Deployment (QFD) to improve the tractor's seat design for tractor drivers in Bangladesh[J].

的一系列关键要素，具体涵盖设计要素、产品功能要素、零部件要素、工艺要素以及生产要素等，具体应用流程见图 4-4。

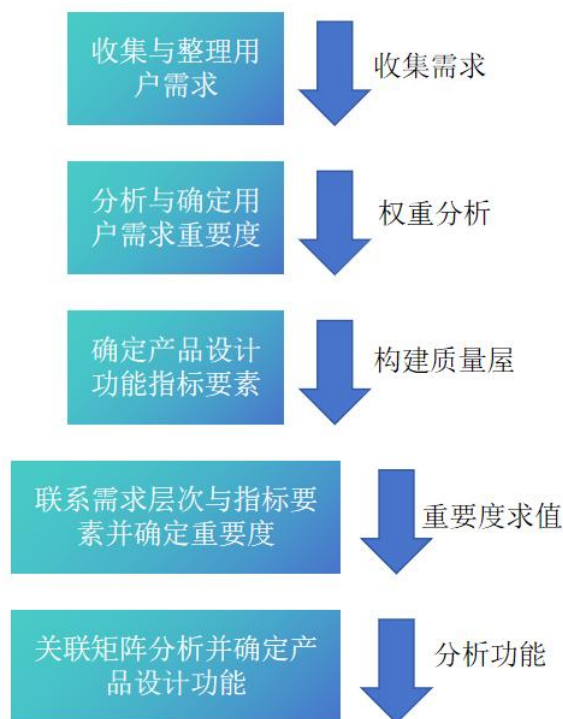


图 4-4 QFD 应用流程图

(图片来源：作者自绘)

质量屋（HOQ）作为一种系统化的分析工具，其结构包含多个关键部分：左墙记录着用户需求以及与之对应的权重，呈现用户对不同需求的重视程度；天花板罗列设计要素、质量特性、功能特征等，这些要素是实现产品功能的关键技术点；房间部分构建了左墙用户需求要素与天花板设计要素之间的关系矩阵，通过该矩阵能够直观展现二者关联程度；地板呈现天花板要素的权重结果，这一结果综合反映了各项设计要素的重要性；屋顶是相关矩阵，用于分析各设计要素之间的相互影响关系；右墙则是对竞争对手的评估，以便明确自身产品在市场中的定位，HOQ 的具体形式见考图 4 - 5。

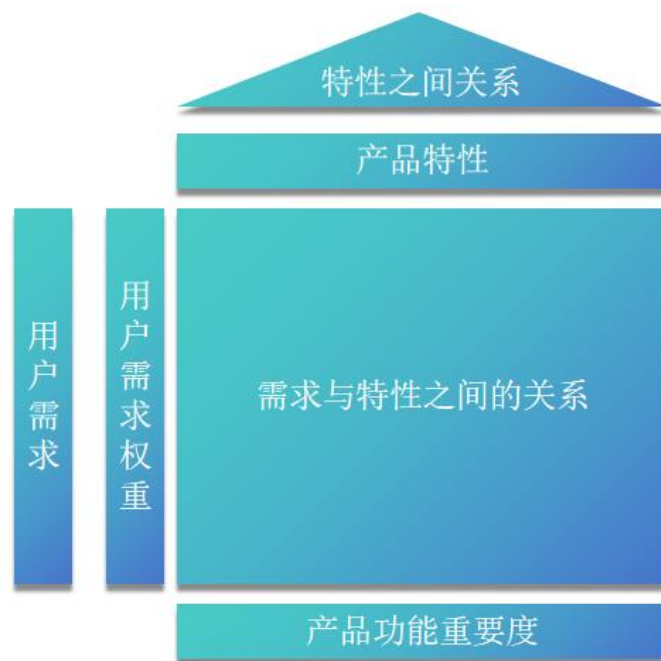


图 4-5 HOQ 应用形式

(图片来源：作者自绘)

为判断用户需求与设计功能之间的关系重要程度，将用户需求与功能设计要素纳入质量屋进行分析。通过构建用户需求重要度与设计特性关系矩阵，明确各设计特性对应的重要度数值，进而判断设计特性的重要程度。从而把握设计过程中的关键问题，识别出需要重点改进的设计特性。为确定用户需求与设计功能之间的重要度关系，采用 0、1、3、5、7、9 这几个数字进行赋值，各赋值所代表的含义详见表 4-2。

表 4-2 QFD 质量屋赋值含义（表格来源：作者自制）

赋值	代表形状	含义
0	无	没有关系
1	○	微弱联系
3	△	较弱联系
5	◇	一般联系
7	☆	密切联系
9	□	非常密切联系

将已明确的 16 项用户需求要素，按照既定顺序逐一将代表形状填入质量屋的左墙区域。与此同时，与之对应的 10 项设计功能也被列置于质量屋的天花板位置。在此坚实基础，进一步构建起互花米草清理设备的设计规划屋。

依据既定的数值体系，运用公式 4-1，对各项矩阵中的产品特性进行权重计算，以此量化各特性在整体设计中的重要程度。

TIR_j 表示第 j 个产品特性绝对权重数值；

CIR_i 表示第 i 个用户需求权重；

R_{ij} 表示第 i 个用户需求与第 j 个产品特性的相关关系赋值。

$$TIR_j = \sum_{i=1}^n CIR_i R_{ij}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4-1)$$

4.2.3 设计要素分析

通过一系列分析与计算，最终确定并获得各设计特性的重要程度数值及相应排名。

在基础结构层方面（图 4-6），G1 适应性底盘得分 3.5955，一款具备高度适应性的底盘，对于保障设备在复杂地形下的移动性能、维持高效作业效率，以及确保使用安全起着决定性作用。G2 轻量化机身加权得分为 2.0649，需深入探索车身结构设计的优化方案，在满足轻量化设计指标的同时，可通过仿生结构设计和环保材料应用达成轻量化目的。G3 混合供电系统加权计算得分为 2.3446，该系统在运行过程中，需兼顾作业效率与能源环保性，可以采用清洁能源组合方案，以实现高效与环保的双重效益。

需求	综合权重	基础结构层		
		适应性底盘	轻量化机身	混合供能模式
科技感	0.0336		☆	
贴合自然	0.0423		☆	
警示色调	0.0481			
开阔视野	0.0511		△	
可视化作业	0.0651			
易于移动	0.0750	□	□	○
作业效率	0.0774	□	☆	□
多功能作业	0.0825	☆		◇
使用安全	0.0778	□		△
操作易懂	0.0708			○
交互便利	0.0685			○
低人力耗损	0.0659	◇		△
互花米草回收	0.0665	△		
复生长率低	0.0645	△		
低生态危害	0.0564	△		☆
低生态扰动	0.0545	○	△	
设计功能重要度		3.5955	2.0649	2.3446

图 4-6 互花米草清理机基础结构层功能质量屋分析

(图片来源: 作者自绘)

在核心功能层上(图 4-7), G4 一体化收割经加权得分为 5.8526, 整个设备的清理效能方面起着决定性作用。为了实现更高效、更彻底的互花米草收割与回收, 需要要对切割方式和回收方式进行优化, 以此提升设备的清理能力和作业质量。G5 辅助模式为附带的操作辅助功能的, 其加权得分为 3.6877, 可以设计通过操作界面、语音等方面进行辅助, 提升操作的便捷性。G6 闭环回收加权得分为 3.2102。需要采用模块化设计策略, 将设备划分为多个功能, 用于完成整个回收流程。G7 安全防护方面的加权得分为 1.2492, 需要从硬件设施设计环节进行全面完善。

需求	综合权重	核心功能层			
		一体化收割	辅助模式	闭环回收	安全防护
科技感	0.0336	○	△		○
贴合自然	0.0423				
警示色调	0.0481				□
开阔视野	0.0511				
可视化作业	0.0651	△	□	△	
易于移动	0.0750	△			
作业效率	0.0774	□	△	◇	
多功能作业	0.0825	□	☆	◇	○
使用安全	0.0778	□	☆	△	□
操作易懂	0.0708	□	□	◇	
交互便利	0.0685	◇	□	△	
低人力耗损	0.0659	□		☆	
互花米草回收	0.0665	□	△	□	
复生长率低	0.0645	□	△	△	
低生态危害	0.0564	□		△	
低生态扰动	0.0545				
设计功能重要度		5.8526	3.6877	3.2102	1.2492

图 4-7 互花米草清理机基础核心功能质量屋分析

(图片来源: 作者自绘)

在人机交互层面(图 4-8), G8 语音提示的加权得分为 3.0058 在现有语音提示功能的基础上, 需要进一步拓展其功能范畴, 添加针对操作安全风险的语音预警内容, 引导操作人员遵循正确的操作流程, 从而有效降低安全事故发生的概率。G9 操作界面加权得分为 3.3133, 在多种需求的驱动下, 其优化方向明确。

由于操作界面在人机交互体系中占据关键地位,其设计的优劣直接影响用户的操作体验与设备的易用性。因此,通过科学的方法优化界面布局设计,进一步提升交互的便捷性与流畅性,对于提升设备整体性能具有重要意义。G10 驾驶舱人机加权得分 2.0456,在满足基本操作需求的基础上,应依据实际应用场景的特点以及用户反馈数据,运用人机工程学原理适度优化与操作舒适相关的设计。

需求	综合权重	人机交互层		
		语音提示	操作界面	驾驶舱人机
科技感	0.0336			
贴合自然	0.0423			
警示色调	0.0481			
开阔视野	0.0511			
可视化作业	0.0651	○	□	
易于移动	0.0750		☆	
作业效率	0.0774	△	◇	□
多功能作业	0.0825	△	☆	△
使用安全	0.0778	◇	△	△
操作易懂	0.0708	◇	□	○
交互便利	0.0685	☆	□	△
低人力耗损	0.0659			☆
互花米草回收	0.0665		○	
复生长率低	0.0645			
低生态危害	0.0564			
低生态扰动	0.0545			
设计功能重要度		1.7673	3.629	1.9151

图 4-8 互花米草清理机人机交互层功能质量屋分析
(表格来源: 作者自制)

基于以上分析结果,得出设计功能重要度排序(图 4-9)。一体化收割的重要度显著高于其他功能,该功能在产品重要度优先级,不仅是用户的核心诉求所在,也是本研究实现产品差异化的关键要素。辅助模式、闭环回收以及驾驶舱人机交互功能属于次优先级,在产品开发的阶段性规划中,同样需要进行优化与完善,从而确保核心功能的优先实现。适应性底盘与混合供能模式,主要考虑到产品整体性能的提升以及用户体验的综合优化,这两项功能同样需要被纳入产品开发的整体框架之中,作为提升产品综合竞争力的重要组成部分。

安全防护和语音提示功能的重要度相对较低, 优先级排序中处于较后位置。但是, 在 FAHP 的分析过程中, 安全防护所关联的操作安全维度在需求评估体系中占据较高权重。从产品安全性和可靠性的综合视角考量, 该功能对于保障用户安全和确保设备稳定运行具有不可忽视的重要意义, 因此在产品开发过程中必须给予充分的重视。

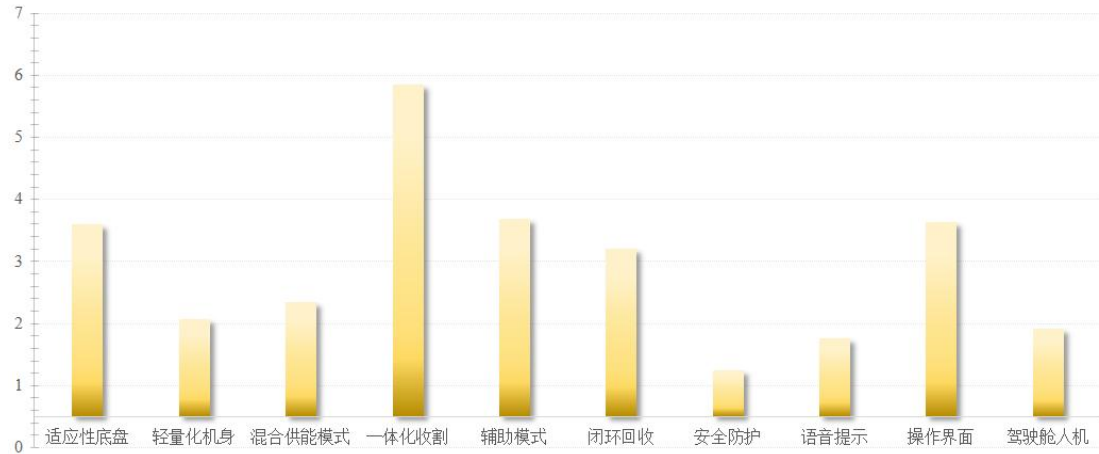


图 4-9 互花米草清理机功能要素权重
(表格来源: 作者自制)

4.3 互花米草清理设备功能结构的协同优化设计

4.3.1 设计要素问题冲突解决

QFD 能有效识别用户需求并确定产品技术需求的重要度, 但在规划技术解决方案方面存在局限^[47]。TRIZ (Theory of Inventive Problem Solving, 发明问题解决理论) 是由苏联工程师 Genrich Altshuller 及其团队在 20 世纪 40 年代末提出的一种创新方法论。TRIZ 的核心思想是通过分析大量的创新专利和技术发展, 发现创新的规律和解决技术问题的常见模式, 从而帮助解决复杂的技术问题并激发新的创意。TRIZ 是解决特定问题或创新方法冲突的系统过程^[48]。针对互花米草清理设备的功能冲突问题, 运用 TRIZ 理论进行解决, 具体解决流程图 4-10。

[47] 马怀宇, 孟明辰. 基于 TRIZ/QFD/FA 的产品概念设计过程模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, (11): 56-59.

[48] Yao W, Wang C, Pang J, et al. Research and development of fully enclosed wire-shell support structure technology for deep soft rock roadway based on TRIZ theory. [J]. Scientific reports, 2024, 14 (1): 3279-3279.



图 4-10 TRIZ 理论应用流程

(图片来源：作者自绘)

根据质量屋理论中的自相关矩阵，结合 QFD 的分析结果，对设计要素之间的相互关系进行分析（图 4-11）。表格中的“+”表示二者之间存在正相关关系，即一项技术的改进将优化另一项技术；“-”则表示二者之间为负相关关系，即一项技术的改进可能导致另一项技术的恶化。

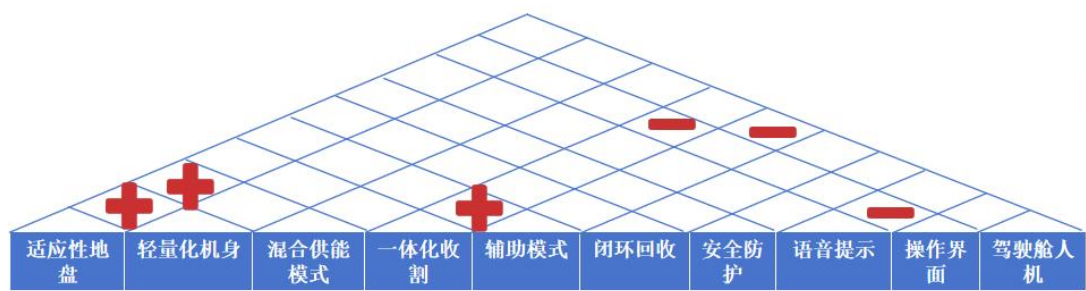


图 4-11 互花米草清理机功能矛盾

(图片来源：作者自绘)

基于二者所呈现的内在联系与逻辑关联，详细的分析过程与关系见表 4-3。

表 4-3 互花米草清理机功能相互关系（表格来源：作者自制）

功能要素		关系	说明
一体化收割	辅助模式	正相关	辅助模式能够自动调节收割过程中的各项参数，提高效率，使得一体化收割系统

适应性底 盘	混合供电 系统	正相关	的表现更优化，提升智能化系统可以进一 步提升收割效果和灵活性。
			混合供电系统能够提供更强的动力支持， 以适应不同地形环境，特别是在需要大功 率或者长时间运作的情况下，适应性底盘 能够更好地与混合供电系统协同工作。
轻量化机 身	适应性底 盘	正相关	轻量化的机身有助于提高适应性底盘的 灵活性和稳定性，减轻重量能够提升底盘 的适应性和适应不同环境的能力。
一体化收 割	操作界面	负相关	一体化收割可能采用统一的操作系统或 设计，过于集中的一体化设计可能限制了 操作界面的定制和个性化，使得操作界面 可能会变得复杂和不够直观。
辅助模式	驾驶舱人 机	负相关	智能模式可能导致操作员必须适应更多 的系统逻辑，减少了人工干预的自由度， 影响操作员的舒适度与操控感。
操作界面	语音提示	负相关	过多的语音提示可能会干扰用户的操作 体验，尤其是在操作界面本身设计简洁明 了的情况下。语音提示的过度使用可能会 分散用户的注意力，导致操作不流畅。

借助 TRIZ 理论体系中的阿奇舒勒矛盾矩阵，对互花米草清理设备的零件特性展开分析，识别其中存在的负相关关系。完成特性间负相关关系的识别后，将这些负相关技术按照 TRIZ 理论的方法，抽象转化为 39 个标准工程技术参数。根据阿奇舒勒矛盾矩阵表，能够找出与之对应的发明原理，具体的分析内容见表 4-4。

表 4-4 互花米草清理机功能矛盾分析（表格来源：作者自制）

冲突 序号	矛盾	矛盾 类型	改善参数	恶化参数	发明原理
01	一体化收割-操作界	技术	装置的复杂性	可操作性	27, 9, 26,

	面	矛盾	(36)	(33)	24
02	辅助模式-驾驶舱人		自动化程度	可操作性	1, 12, 34,
	机		(38)	(33)	3
03	操作界面-语音提示		可操作性(33)	可靠性(27)	27, 17, 8,
					40

其中 01 为一体化收割与操作界面矛盾该矛盾属于技术矛盾, 在这种情况下, 关键问题是如何在保持一体化收割功能的同时, 使操作界面不至于过于复杂。运用发明原理的复制原理 (26) 解决, 复制成熟农机操作界面的操作设计, 降低用户学习成本, 从而实现设备在保持较低复杂度的前提下, 完成目标任务。

其中 02 为辅助模式与驾驶舱人机属于技术矛盾, 此矛盾的核心问题在于如何平衡智能模式的自动化程度与操作员的控制感, 避免系统过度智能化而影响操作的舒适性和控制感。运用发明原理的等势性 (12) 解决, 保持操作界面层级一致, 可以支持手动调节和自动模式的参数预设。并通过降低系统的复杂度, 减少操作员的学习曲线, 提高系统的接受度。

其中 03 为操作界面与语音提示矛盾该矛盾类型为技术矛盾, 这一矛盾的关键问题是如何通过有效的语音提示系统, 在减少噪声干扰的同时, 不降低操作的可操作性。可以采用发明原理维数变化 (17), 采用语音、灯光闪烁、触觉反馈的多维提方法, 减少单一模式误判, 提升用户体验, 同时确保信息的有效传递。

4.3.2 用户功能行为映射

FBS 模型主要包括两种映射, 分别为功能-行为映射和行为-结构映射^[49]。根据 HOQ 的设计特征要素指标和 TRIZ 理论分析结果进行梳理。提炼出基本需求, 进而归纳得出基本功能需求。其次, 将已明确的产品功能, 对应映射至预期行为的范畴内, 以探究功能实现过程中的具体行为模式与逻辑, 最后开展功能分析及预期行为分析 (图 4-12)。

[49] 任梦阳.基于 QFD-FBS 方法的老年人助浴产品设计研究[D].天津大学,2022.

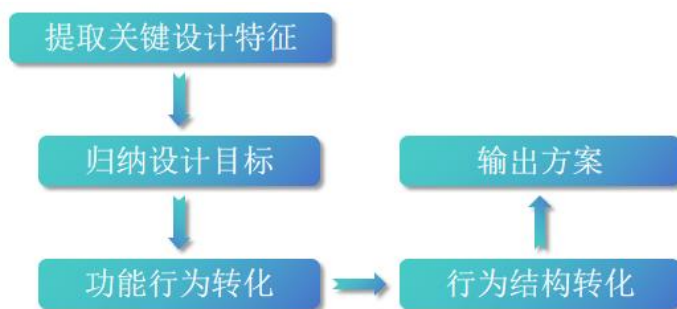


图 4-12 FBS 映射关系

(图片来源：作者自绘)

综合 FAHP 和 QFD 分析的结果, 互花米草的清理设备设计应先从一体化收割、辅助模式、安全防护、操作界面、适应性底盘、闭环回收这六项设计要素出发, 并对用户的与其预期行为进行映射 (图 4-13)。

从功能行为的映射来看, 操作人员通过控制设备的操作界面, 借助辅助模式开启互花米草生长区域的定位流程。锁定目标区域后, 操作人员驾驶清理设备驶向目标区域, 启动切割装置, 快速切断互花米草植株。与此同时, 传送装置同步响应, 将切割后的植株顺畅输送至设备预设的回收区域。在这一流程里, 安全防护功能的行为也在同步进行。当切割装置在作业过程中遭遇潜在危险状况时, 设备内置的语音预警系统提前发出语音警报, 提醒操作人员注意。紧急制动系统与防护栏等安全防护结构迅速响应, 紧急制动系统能够瞬间切断设备动力, 使设备停止危险动作; 防护栏则从物理层面为操作人员构建起安全屏障, 保障操作人员的人身安全。辅助模式还具备远程协调功能, 对互花米草的生长区域进行测绘, 为后续的收割规划以及长期监测工作提供地理信息基础。设备完成收割后, 自动对收割的互花米草进行压缩、打包等预处理行为, 收集完成后返回指定地点, 清空回收箱的互花米草。

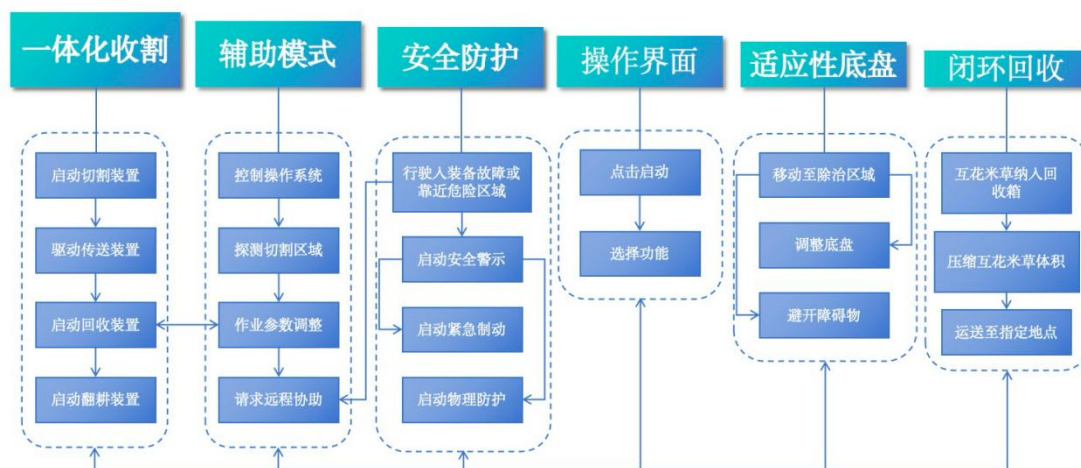


图 4-13 功能映射预期行为

(图片来源：作者自绘)

4.3.3 产品预期结构映射

根据功能-行为映射的分析结果，对用户实际使用场景进行还原，将用户预期行为逐步转化为互花米草清理设备的具体结构（图 4-14）。

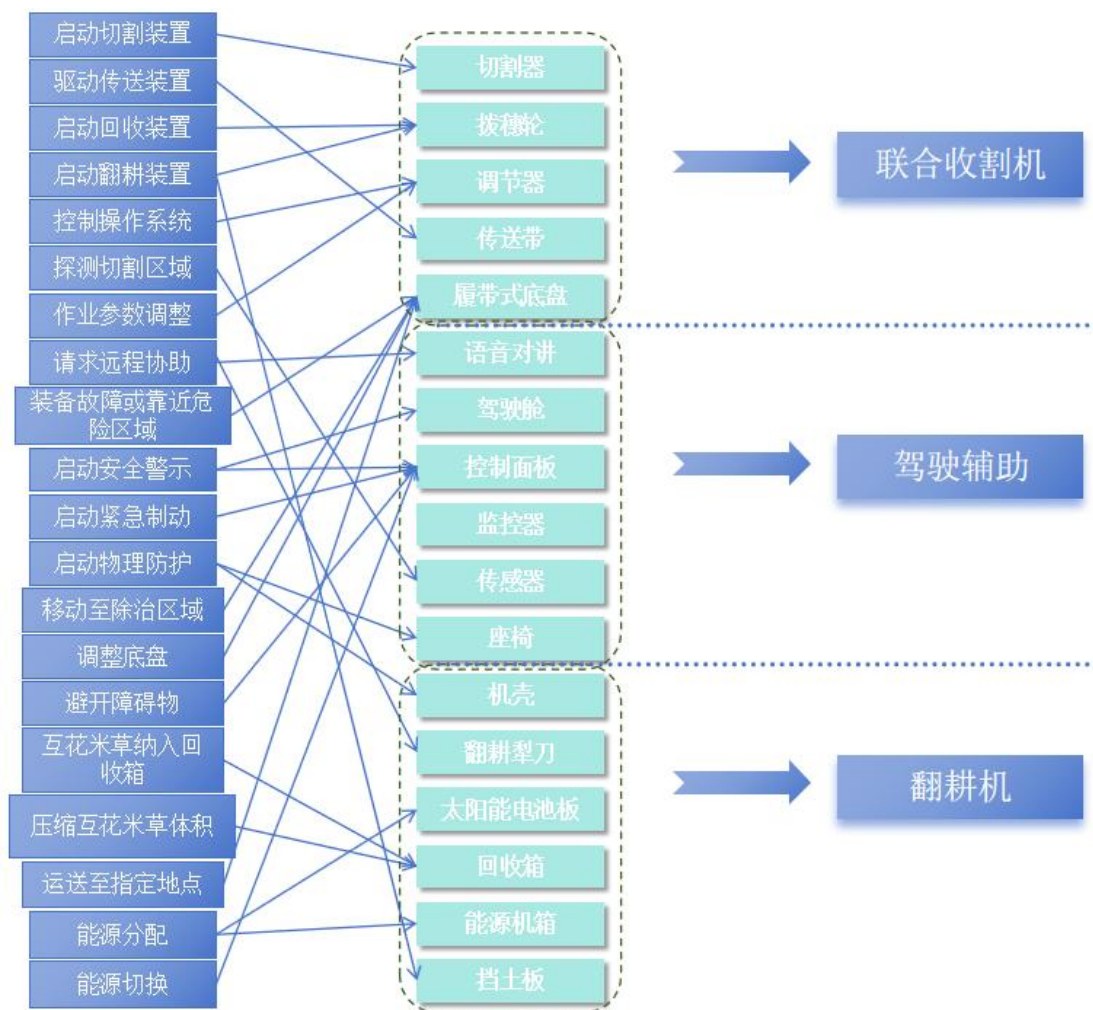


图 4-14 行为映射结构

(图片来源：作者自绘)

从互花米草功能层到结构层的映射转可知, 把这些预期行为转化为产品结构, 并对产品结构进行归类。用户预期对互花米草进行切割、传送、回收等操作。为实现这些行为, 产品结构包含切割器、拔穗轮用于切割互花米草; 传送带负责传送物料; 调节器辅助设备运行调节。在实际作业中, 启动切割装置、驱动传送装置、启动回收装置等用户行为, 可通过这些结构配合完成, 实现对互花米草的初步处理和收集。用户在操作清理机过程中, 有控制操作、探测区域、请求协助以及应对安全风险等预期行为。对应的产品结构有语音对讲、驾驶舱、控制面板、监控器等。语音对讲便于请求远程协助; 驾驶舱和控制面板用于控制操作系统; 监控器可探测切割区域以及应对装备故障、靠近危险区域等情况, 启动安全警示等操作, 保障驾驶及作业过程的安全与顺畅。用户预期对互花米草进行翻耕处理, 还包括移动至除治区域、避开障碍物、将互花米草纳入回收箱等操作。产品结构上, 履带式底盘实现移动; 翻耕型刀进行翻耕; 太阳能电池板和能源机箱负责能源分配与切换, 为设备运行提供动力; 回收箱用于收纳互花米草, 在整个过程中, 移动至除治区域、调整底盘、避开障碍物等行为, 通过这些结构协同实现, 完成对互花米草清理的进一步处理。

4.4 本章小结

本章聚焦互花米草清理机的功能设计, 分析并构建了清理机的功能体系。采用 QFD - TRIZ -FBS 协同设计流程, 将抽象需求转化为具体功能, 提出清理设备的基本产品构成形态, 为后续设计工作奠定基础。QFD 确定技术需求后, 引入 TRIZ 理论解决设计要素间的冲突问题, 找到对应的发明原理, 借助 FBS 模型进行用户功能行为映射和产品预期结构映射, 将功能需求对应到预期行为, 再转化为具体产品结构, 使清理机的功能设计更加科学、合理且具有可操作性, 为互花米草清理机的实际研发提供了有力支撑。

第 5 章 互花米草清理设备设计方案

5.1 互花米草清理设机的定位

在设计前需要结合互花米草生长特性与当地生态特点,明确清理机械的作业时间。根据专家建议,本研究设计的互花米草清理机最适宜在互花米草的 4-6 月份生长期使用。在此期间,互花米草的根系尚未完全成熟,对其进行清除能够更有效地切断并清除根系,通过前端切割与后端的回收能够防止其进一步扩散和生长。在互花米草幼苗期实施物理收割措施,能够显著抑制其过度生长,从而控制其扩散并维持生态平衡^{[50][51]}。

根据 FAHP (模糊层次分析法) 对造型设计要素的权重分析结果,科技感与贴近自然的造型被确定为关键设计方向。产品的造型应尽量地避免使用直线,宜采用优美自然的曲线方式,凸显人文关怀的设计理念^[52]。需要从形态语言、仿生造型等多个层面协同发力。从形态语言角度出发,采用曲面设计。通过合理运用曲面,拓展驾驶者的操作视野,减少因传统直线设计所带来的视觉盲区,使驾驶者在作业过程中能够更全面、清晰地观察周围环境。同时,曲面的运用还能在视觉与触觉上减少机械所带来的压迫感。当使用者与产品进行交互时,无论是操作按钮、握持把手,曲面设计都能更好地贴合人体工程学原理,大幅提升人机交互的舒适度,让操作变得更加流畅、自然,真正实现科技与人文、自然的完美融合。

互花米草清理机的配色方案设计工作时,需要提升在野外复杂环境,诸如滩涂、湿地等场景中的可见性与安全性,作为选取警示色的核心目标。互花米草多生长于沿海滩涂、河口湿地等区域,该类环境呈现出显著的高湿度、强腐蚀性以及高机械应力特点。长期处于高湿环境中,普通材质极易因水汽侵蚀而生锈、老化,严重影响设备的使用寿命与性能。需要考虑到互花米草清理机的特殊作业环境,其材质需要耐高湿度、强腐蚀性、高机械。

[50] Li H, Zhang L. An experimental study on physical controls of an exotic plant *Spartina alterniflora* in Shanghai, China[J]. Ecological Engineering, 2008, 32:11-21.

[51] XIE B, HAN G. Control of invasive plant *Spartina alterniflora*: Concept, technology and practice[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version), 2023, 38:1924-1938.

[52] 王朝侠,徐从意.仿生设计在产品趣味性设计中的应用[J].包装工程,2017,38(14):193-197.

5.2 互花米草清理设备设计推演

5.2.1 结构提取

根据结构映射对应的产品，针对联合收割机、驾驶辅助设备以及翻耕机，收集并相关产品的造型结构资料。在此基础上，通过绘制草图呈现初步设计构思。明确关键部件的布局，展现各部分的大致形态，以此为后续设计搭建基础框架。

以农机的收割结构作为结构元素，提取其主线条，经简化、拉伸等操作，构建出互花米草切割部分的轮廓线。在此基础上，后续可开展细节处理与结构优化工作（图 5-1）。



图 5-1 收割结构草图推演

(图片来源：农机网收集整理自绘)

以农机的操作舱作为结构元素，提取其主线条，经简化、拉伸等操作，构建出驾驶室的轮廓线。在此基础上，后续可开展细节处理与结构优化工作（图 5-2）。

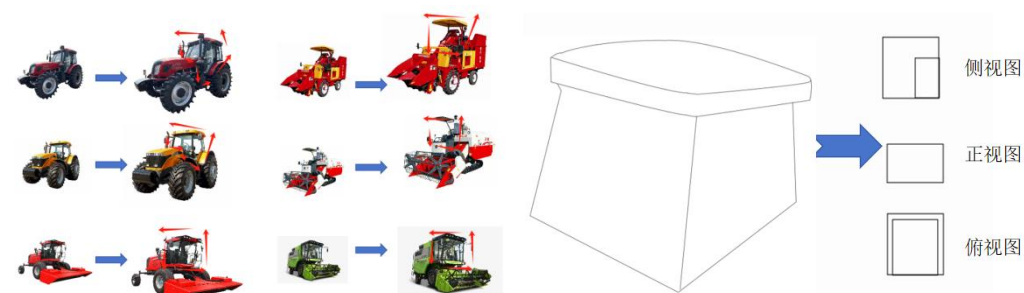


图 5-2 驾驶舱结构草图推演

(图片来源：农机网收集整理自绘)

以翻耕机作为结构元素，提取其主线条，经简化、拉伸等操作，构建出翻耕部分的轮廓线。在此基础上，后续可开展细节处理与结构优化工作（图 5-3）。

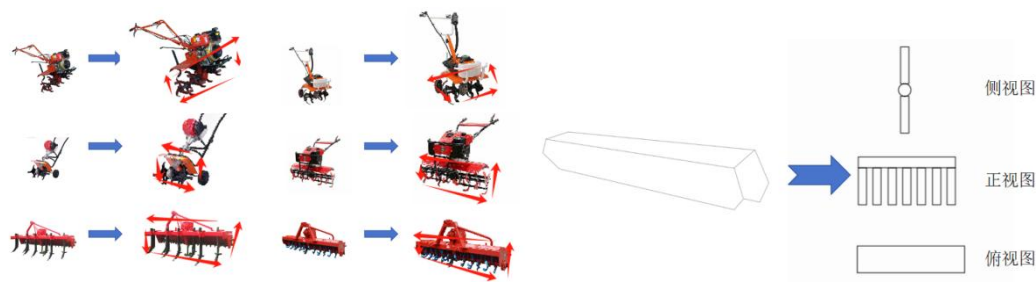


图 5-3 翻耕结构草图推演

(图片来源: 农机网收集整理自绘)

以行走履带作为结构元素, 提取其主线条, 经简化、拉伸等操作, 构建出行走部分的轮廓线。在此基础上, 后续可开展细节处理与结构优化工作 (图 5-4)。



图 5-4 履带结构草图推演

(图片来源: 农机网收集整理自绘)

5.2.2 方案一推演

方案一集成联合收割、驾驶辅助、翻耕的功能, 设计可以下几个模块, 具体见图 5-5。

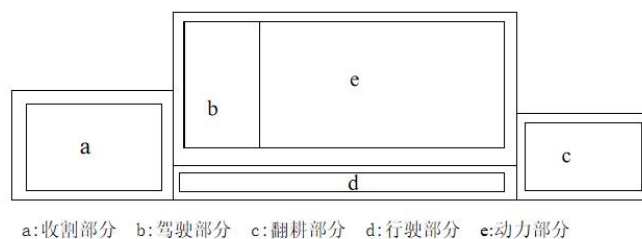


图 5-5 整体造型推演

(图片来源: 作者自绘)

方案一 (图 5-6) 采用驾驶员直接操控模式, 前端收割装置融合刈割结构、拨穗轮与机械臂, 通过联动作业实现大范围互花米草切割回收, 右侧驾驶舱能够提供全景视野灵活调整作业动作。底部行走系统采用轮履复合的高履带行走设计, 确保设备在湿地等复杂地形稳步行进, 兼顾稳定性与牵引力。尾部集成双重功能

结构，既通过输出装置完成收割作物的输送，又配备翻耕组件对互花米草实施翻耕处理，无缝衔接后续治理环节。整机以模块化系统架构，将作物处理、移动作业、二次翻耕等功能有机串联，构建起高效稳定的作业体系，不仅提升清理效率与操作便捷性。

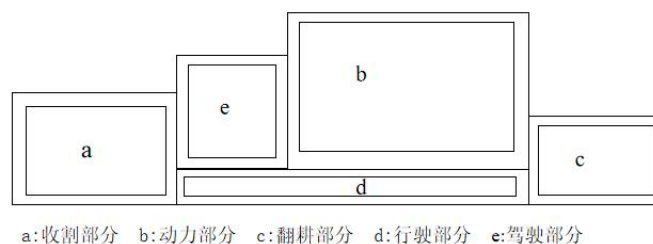


图 5-6 推演方案一

(图片来源：作者自绘)

5.2.3 方案二推演

方案二集成联合收割、驾驶辅助、翻耕的功能，设计可以以下几个模块，具体见图 5-7。



a:收割部分 b:动力部分 c:翻耕部分 d:行驶部分 e:驾驶部分

图 5-7 整体造型推演

(图片来源：作者自绘)

方案二（图 5-8）延续驾驶人员操控模式，以一体化设计构建高效作业体系。中部驾驶舱采用全景视野布局，助力操作人员精准定位互花米草生长区域，前端配备定制化切割系统，精准切断植株后，即刻联动内置智能输送装置，将收割草料自动化转运至机身存储仓完成集中收纳。底部履带式底盘强化地形适配性能，即便在湿地、滩涂、潮间带等互花米草密集分布区域，仍可保持稳定行进作业。整套系统形成收割-输送-存储全链条机械化闭环作业模式，以高度集成化的功能

架构，为互花米草治理及生态修复工程提供强力支撑，提升治理作业的效率与专业精度。



图 5-8 推演方案二

(图片来源：作者自绘)

5.2.4 设计最优方案评估

针对以上两种方案，采用模糊综合评价法，能够更好地处理复杂的情况，并通过变换和最大隶属度来实现对事物的客观评价^[53]。模糊综合评价法是由美国自动控制专家查德于 1965 年的提出是一种基于模糊数学的综合评价方法，它将多个评价结果以模糊数学的形式进行量化处理，用以解决非确定性的主观问题^[54]。

对两套设计方案进行主观评价。评价标准分为非常满意、相对满意、一般、有点不满意和非常不满意五个层次。每个级别都有相应的分数：非常满意 90 分，相对满意 80 分，中性 70 分，有点不满意 60 分，非常不满意 50 分。评价得分向量 $T = (90, 80, 70, 60, 50)^T$ 。

$$W_X = (0.175 \ 0.300 \ 0.283 \ 0.242) ;$$

$$W_A = (0.192 \ 0.242 \ 0.275 \ 0.292) ;$$

$$W_B = (0.217 \ 0.250 \ 0.258 \ 0.275) ;$$

$$W_C = (0.275 \ 0.250 \ 0.242 \ 0.233) ;$$

$$W_D = (0.275 \ 0.267 \ 0.233 \ 0.225) 。$$

构建模糊综合评价矩阵。根据评价者的主观评价结果构建模糊综合评价矩阵，评价者依据四种评价等级对子准则中 12 项设计要素进行评价，最终得到各设计要素相对于评价等级的隶属度。在评价矩阵中，S1 表示经济性评价矩阵的评价结果，S2 表示功能性评价矩阵的评价结果，S3 表示可靠性准则层评价矩阵的评价结果，S4 表示生态兼容性评价矩阵的评价结果，现以方案 1 为例，统计结果

[53] 邓盛勇,廖建军.基于 AHP—FCE 的大学校园疗愈景观提质设计研究[J].现代园艺,2025,48(07):79-82.

[54] 朱云峰. 基于模糊层次分析法的金箔文创产品设计研究[J]. 包装工程, 2022(22): 341-349.

如下，基于 10 名评价者的主观评价结果，构建了一个模糊的综合评价矩阵。评估人员利用 5 个评价水平对子标准内的 16 个需求元素进行了评估，最终得出了不同评价水平下每个设计元素的成员程度。每个评价者对 16 个需求元素提供了独立的评价，并基于这些评价结果构建了相应的评价矩阵 5-1、5-2、5-3、5-4。

$$S_1 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.5 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.6 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

$$S_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.1 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.4 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.0 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0.0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

$$S_3 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.1 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.4 & 0.5 & 0 \\ 0.2 & 0.0 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0.0 & 0 & 0.6 & 0.2 & 0.2 \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

$$S_4 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0 \end{bmatrix} \quad (5-4)$$

计算各准则层对优化方案 1 的评价权重向量：

$$P_1 = W_A * S_1 = (0.197 \ 0.407 \ 0.396 \ 0 \ 0) ;$$

$$P_2 = W_B * S_2 = (0.185 \ 0.177 \ 0.580 \ 0.055 \ 0) ;$$

$$P_3 = W_C * S_3 = (0.185 \ 0.177 \ 0.580 \ 0.055 \ 0) ;$$

$$P_4 = W_D * S_4 = (0.302 \ 0.327 \ 0.326 \ 0.045 \ 0) .$$

构建二级评价矩阵 (5-5) :

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.197 & 0.407 & 0.396 & 0 & 0 \\ 0.185 & 0.177 & 0.580 & 0.055 & 0 \\ 0.185 & 0.177 & 0.580 & 0.055 & 0 \\ 0.302 & 0.327 & 0.326 & 0.045 & 0 \end{bmatrix} \quad (5-5)$$

将评价矩阵计算结果转换为百分制，计算最终评价得分：

$$W = W_x * P = (0.302 \ 0.327 \ 0.326 \ 0.045 \ 0)$$

最终，结果经加权处理得出方案 1 得分为 78.86。同理可计算出方案 2 的最终评价得分为 84.02（图 5-9）。

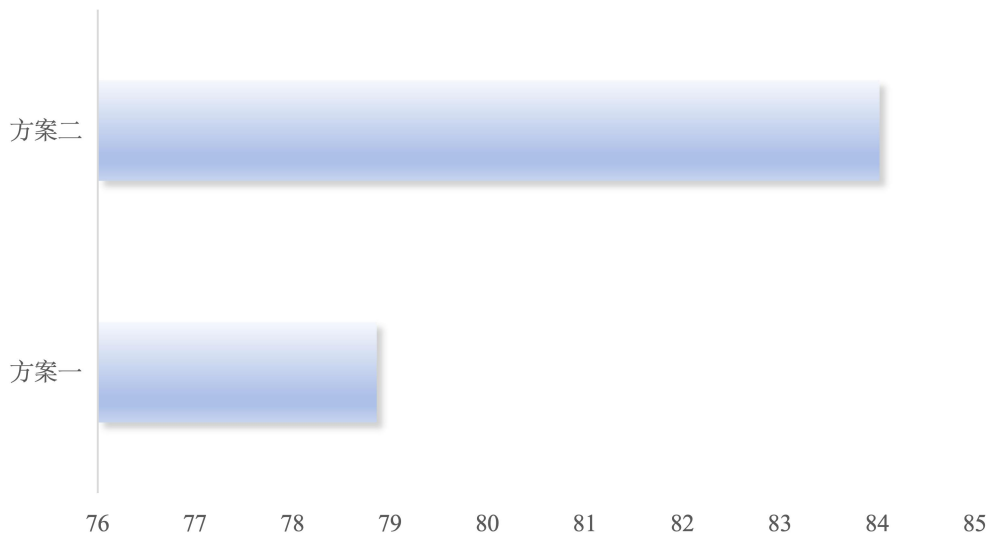


图 5-9 模糊综合评价结果

（图片来源：作者自绘）

根据加权结果可知，方案 2 > 方案 1，因此，选择方案 2 为最优设计方案，进行后续的深入优化。

5.3 最终方案设计

5.3.1 整机设计

对其开展细节优化工作，进而完成最终效果图（图 5-10）。驾驶舱与收割部件在结构上相互独立却通过设备控制系统形成功能联动。驾驶舱作为操控核心，能够提高广阔的视野并进行控制收割部件的切割，保障驾驶室内操作空间的舒适性与操控便利性，又通过合理的空间定位设计，确保动力模块、回收模块等在垂直方向上互不干扰，最终实现各模块有序运行的作业状态。



图 5-10 互花米草清理机三视图

(图片来源：作者自绘)

履带底盘的尺寸设计构成设备地形适应性的核心技术参数体系。通过前端较高且向后逐步递减的履带高度梯度设计，配合履带长度、轮组间距及链节结构参数通过延长接地长度与增大接触面积，提升滩涂作业时的抗陷性能。侧边的互花米草收集箱与能源供给模块采用共箱式集成设计，通过空间正交布局实现功能耦合，收集箱位于底盘上端，其收获口与切割装置出料口形成倾角的重力输送通道。能源舱采用双动力组合设计，大容量电池组提供清洁电力，既满足不同工况需求，又能实现设备的可持续运转。

在顶视图中，可以清晰看到设备的五大模块动力系统、收割装置、存储仓、履带底盘及操控系统的组成。前端装有带沥水孔的铲体结构，这些沥水孔能有效滤除翻耕过程中混入的泥水，进而降低设备运行阻力。顶部的太阳能电板运用模块化快接设计，可依据光照条件灵活调节角度，为设备补充清洁能源。尾部则设置了标注和相应的警示灯，用于提醒作业时注意安全，顶部太阳能板与尾部的LED 警示灯组在工业设计语言上达成了统一，这种设计不仅保障了作业效率，还实现了清洁能源补充与安全警示功能的优化集成。

该互花米草清理机爆炸图展示了由 a-o 部件构成的功能体系（图 5-11）。a 为动力模块，作为能源储蓄核心，为整机切割、输送等作业提供能量支撑；b 是模块化设计的收集箱外壳；c 由回收箱与能源箱复合构成，承担植株存储功能并优化空间利用；d 为箱体支撑结构，凭借高强度材质稳固设备主体，保障模块协作运行；e 作为翻耕装置的挡泥板，通过结构设计有效阻挡作业中泥土飞溅，改善操作环境；f 是切割装置前端机械臂组件，作为执行切割的关键结构，调整切割尺寸作用于植株；g 为切割后回收箱，用于集中收纳切割完成的植株，便于后续处理；h 为履带总成，作为移动单元，为设备提供湿地行进动力与地形适应能

力；i 是设备搭载的太阳能电板，通过光能转化辅助能源供给，提升节能效率；j 为驾驶室玻璃罩，采用防护材质兼顾操作视野与外部防护；k 是驾驶室安全保护网，通过物理防护设计强化驾驶区域安全保障；l 为驾驶室，集成操控系统，为操作人员提供稳定作业空间；m 为拨穗轮，通过翻拨待收割植株，辅助后续清理工序流畅进行；n 是切割设备刀头组件，直接执行对互花米草的切割动作；o 为履带轮组成零件，包含螺栓等紧固结构，确保履带系统的装配强度与运行稳定性。



图 5-11 最终设计方案爆炸图

(图片来源：作者自绘)

5.3.2 整机运行设计

设备的收割需求功能可以通过前端切割器实现，启动切割装置，能够快速切断互花米草植株，拨穗轮辅助将植株有序导入切割区域，提升切割效率与效果(图 5-12)。在切割部分的前端设有若干小孔，这些小孔能够将作业过程中卷入的泥土排出，以此减小清理机前进时所面临的阻力(图 5-13)。



图 5-12 切割模拟图

(图片来源：作者自绘)



图 5-13 收割部分优化

(图片来源：作者自绘)

驱动传送装置与启动回收装置，可将切割后的互花米草及时运送至回收箱，实现连续作业，大大提高收割的效率（图 5-14）。



图 5-14 互花米草回收流程

(图片来源：作者自绘)

随后，启动翻耕装置，搭配翻耕型刀，可对清理区域进行翻耕处理，破坏互花米草的根系，抑制其再生（图 5-15）。通过控制操作系统，操作人员可以根据操作面板调整作业参数，根据互花米草的生长密度和高度，灵活调节切割器的高度、切割速度等参数。



图 5-15 互花米草翻耕流程

(图片来源：作者自绘)

探测切割区域功能可利用传感器提前感知作业环境，为作业提供数据支持。当操作人员遇到技术难题时，还能请求远程协助，通过语音对讲等方式与远程专家实时沟通，及时解决问题，确保清理工作顺利进行。当装备出现故障或靠近危险区域时，设备能够启动安全警示，发出声光警报，提醒操作人员注意。同时，紧急制动系统可迅速响应，立即停止设备运行，避免危险发生。

在场景行进的过程中，履带式的底盘能赋予设备良好的通过性（图 5-16）。在行进过程中，驾驶员根据地形变化调整底盘，避开障碍物，确保设备稳定运行，高效完成清理任务。



图 5-16 互花米草清理机场景图

(图片来源：作者自绘)

将互花米草纳入回收箱后，通过压缩装置压缩互花米草体积，从而提升存储空间。能源供应上，设备采用混合供电系统，太阳能电池板可在光照充足时将太阳能转化为电能，实现清洁能源的利用。能源机箱负责能源的存储和管理，能源分配系统合理调配电力，优先满足关键功能部件的用电需求，提高能源利用效率。

回收箱底部的过滤孔在收集切割后的互花米草根茎并自然分离淤泥杂质。（图 5-17）淤泥和杂质通过孔洞自然排出，降低了后续处理的难度和成本，避免了对回收材料的污染，确保了清洁高效的回收过程。



图 5-17 互花米草清理机底部沥孔

(图片来源：作者自绘)

5.3.3 操作区域人机设计

基于 FAHP 的评估结果显示，多功能作业在各评估指标中综合权重位列第一，交互便利性的权重排序仅为第六。作为多功能作业功能价值的重要载体，交互设计的优劣直接关乎驾驶员使用体验的好坏。因此，在后续优化与设计中，亟需着重关注并提升交互便利性，以保障多功能作业性能的充分发挥，切实增强驾驶员的使用体验。农机产品作业环境较为复杂，用户需要长期在紧张的工作环境中进行人机交互，体力消耗大且精神负担重^[55]。互花米草清理机的人机操作区域核心目标之一便是最大程度地简化操作流程，提升用户驾驶过程中的舒适度。

互花米草清理工作通常处于复杂且环境多变的野外湿地，驾驶员需要在有限时间内高效完成清理任务，操作区域内的各类控制元件需要布局合理，易于驾驶员快速识别与操作，避免因操作复杂而导致误操作。对操作区域的用户空间进行的优化也至关重要，需根据人体工程学原理，确定操作区域的空间大小，确保驾驶员在长时间作业过程中，身体各部位都能保持自然舒适的状态，减少因空间局促或不合理导致的身体疲劳与不适。根据用户的操作习惯安排各个操作部件的位置，使驾驶员在操作过程中手臂、手腕等肢体的运动轨迹流畅自然（图 5-18）。

[55] 王沈策,史雨霖,张奕宇.以用户为中心的农机产品设计研究综述[J].包装工程,2024,45(06):24-36.

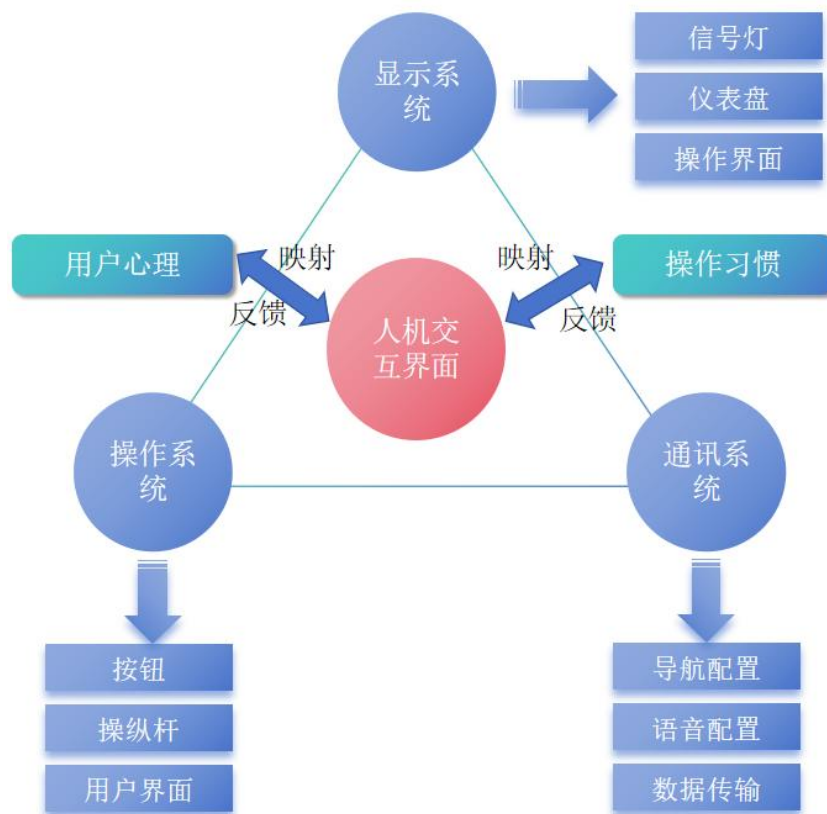


图 5-18 操作区域人机设计思路

(图片来源：作者自绘)

需要根据需求分析中的人性化操作与简易设计理念，构建起便捷的操控体系。在此基础上，参考《GB/T 10000-2023》中国成年人人体尺寸，整合相关 18-70 岁的人体尺寸数据（表 5-1）。

表 5-1 驾驶舱人机尺寸

(表格来源：http://www.weboos.cn/assets/basicStandard/std_3048701.pdf)

人体尺寸项目	P5 (52kg)	P50 (68kg)	P95 (88kg)	平均
坐姿眼高	740mm	798mm	856mm	798mm
坐姿肩高	560mm	611mm	664mm	612mm
坐姿肘高	220mm	267mm	314mm	267mm
大腿长度	434mm	479mm	526mm	480mm
手长	171mm	184mm	198mm	184mm
手功能高	681mm	696mm	823mm	733mm

健康成年人头部的水平偏转范围，通常左右各为 55° ，由此形成的直视角度可达 110° 。在手臂活动方面，单只手臂的舒适活动空间呈一个特殊的半圆区域，

其中前方 140° 属于舒适活动角度范围, 在此区间内手臂运动自然流畅, 不易产生疲劳; 后方 40° 则为极限角度, 手臂在此角度活动时 would 感到较为吃力。因此, 将人视线角度内与双手活动的交错点视为黄金操作区域^[56]。根据人体尺寸调整各部件布局, 确保操作流程高效, 提升使用体验 (图 5-19)。

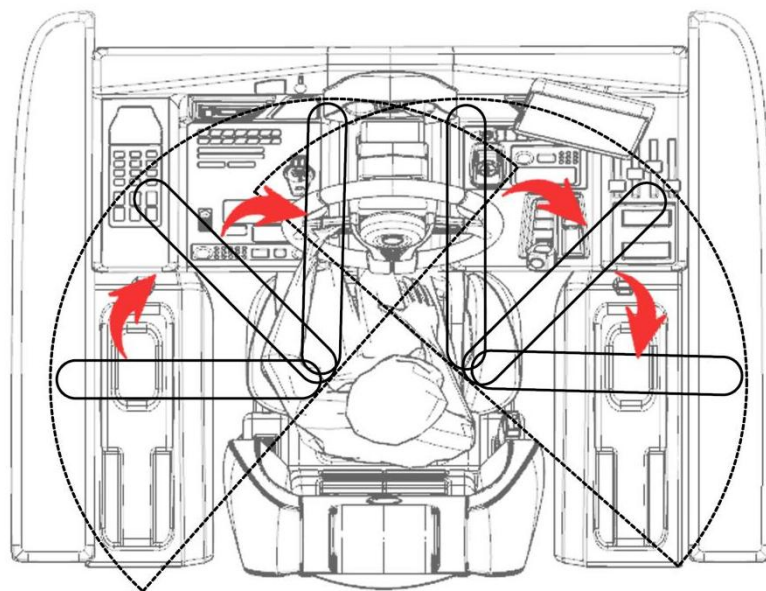


图 5-19 操作区域活动范围

(图片来源: 作者自绘)

开阔视野的综合排序为 13, 考虑到互花米草清理机的作业场景中, 驾驶员的视线起着极为关键的作用。驾驶员头部水平偏转范围左右各为 55° , 无需过度转动头部, 便能直接获取前方大部分区域的信息, 同时直视角度达 110° (图 5-20)。在清理作业时, 凭借这一视线范围, 驾驶员可快速扫视清理路径, 判断清理机行进方向是, 确保切割装置作用于互花米草, 避免误触周边障碍物。



[56] 邵友晨. 基于人类工效学理论的小型农机产品设计研究[D]. 景德镇陶瓷大学, 2024.

图 5-20 驾驶舱视野模拟

(图片来源：作者自绘)

按键面板与右侧人机交互界面可协同配合使用（图 5-21），基于 TRIZ 理论的维数变化原理，创新设计智能多维信息提示系统与可视化工作台。实现复杂作业环境下关键信息的精准传递，提升可操作性与安全性。



图 5-21 驾驶舱功能分区

(图片来源：作者自绘)

面板集成切割装置开关、翻耕系统启动、拨穗轮运作等功能键，轻触即可触发对应作业模块，实现收割、翻耕、输送等流程的无缝衔接。同时，借助右侧控制区的旋钮与调节杆，调控作业参数。依据植株密度灵活调整切割刀头转速，根据地形条件适配翻耕深度，按照收割节奏匹配输送系统速度，精准满足复杂场景的差异化作业需求。此外，面板上的红色按键具备紧急停止与警示双重功能，突发状况下，操作人员可快速按下，即刻停止设备运行或触发警示信号，为作业安全筑牢防线。方向盘后方的仪表盘聚焦设备基础运行状态可视化呈现，通过速度指针、动力系统工况指示灯等元素，帮助操作人员快速获取设备动力输出、行进状态等基础参数，确保对设备运行情况的实时掌控。座椅两侧及控制端边缘设计的储物空间，为操作手册、通讯设备、水杯等常用物品提供规范存放区域，既便于操作人员随时取用，又避免作业过程中物品杂乱对操作产生干扰，进一步优化操作体验。

座椅可调节高度和前后位置，靠背角度可调，踏板布局适应不同腿长，踏板间距适当，避免误操作。方向盘角度和大小合适，控制杆和按钮应在肘部范围内。

显示器应稍微向下倾斜，距离眼睛适中。采用黑色皮质的座椅，增强用户的使用感，搭配多角度调节功能（座椅高度、靠背倾斜度、头枕位置均可灵活调整），能有效缓解操作人员长时间作业的肌肉疲劳，为高效操控提供生理层面的支持，同时视野开阔。通过旋转方向盘，掌控履带底盘的转向、前进与后退。

整个控制端将显示、操控、调节功能有机融合，实现设备移动、作业模块启动、参数调整的一体化操作。操作人员无需频繁切换操作区域，即可在舒适环境中完成对互花米草清理全流程的精准控制。

操作易懂的综合权重排序为第 5，可以优化操作区域的功能定位与用户操作逻辑，进行交互界面设计。农机操作界面作为机械与操作员之间的重要交互平台，直接影响着农机操作的效率和用户体验^[57]。在界面尺寸上，增大显示器屏幕尺寸使得驾驶员更加方便的获得相关信息，减轻驾驶员第一时间观察显示屏信息的认知难度^[58]。工业控制的界面类型分为:菜单选择屏、静态文本屏、动态文本屏和参数设定屏（表 5-2）^[59]。

表 5-2 驾驶舱人机界面（表格来源：作者自制）

面类型	功能	适用场景	特点
菜单选择屏	提供功能选项供 用户导航与操作	需要多任务切换的 控制系统	层次化结构，支 持多级菜单
静态文本屏	显示固定不变的 文本信息	设备标识、操作说明 等静态信息展示	内容固定，无需 实时更新
动态文本屏	实时显示系统状 态或数据	实时数据监控、报警 信息展示	内容随运行状态 动态更新
数设定屏	允许用户输入或 修改系统参数	需要用户干预的参 数配置场景	交互式输入，支 持数值调整

基于 TRIZ 理论中的复制原理，驾驶界面优化设计可借鉴成熟农机的操作界面布局（图 5-22），通过模块化分区设计，将收割参数调节、动力控制、导

[57] 魏亚敏.基于视觉传达设计的农机操作界面优化研究[J].农机化研究,2025,47(01):199-204.
[58] 余俊学,薛占坡,郑坤,等.基于农机手心理负荷试验的小型拖拉机操纵台人机界面优化[J].拖拉机与农用运输车,2024,51(03):22-28+66.
[59] 李由,付卫强,包涵,等.农机车载电子设备用户界面框架设计[J].黑龙江八一农垦大学学报,2014,26(06):84-87+100.

航显示等核心功能进行独立划分，以此降低新用户的学习成本，实现操作界面的高效易用与低复杂度平衡。

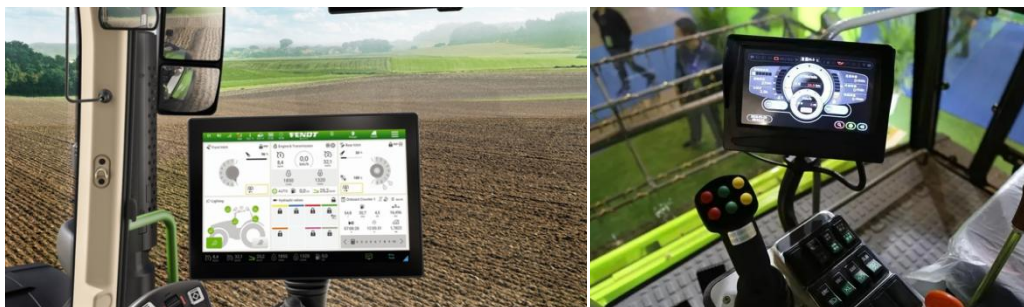


图 5-22 成熟农机界面设计

(图片来源: 图左: <https://www.jiemian.com/article/8195922.html>;

图右来源: <https://www.nongjitong.com/news/2018/431879.html>)

互花米草清理机显示屏界面的功能设计旨在切实满足其实际作业需求。围绕操作便利性、信息获取高效性与作业安全性三大核心维度进行优化设计，构建起包含菜单选择屏、静态文本屏、动态文本屏、参数设定屏在内的多功能交互界面体系（图 5-23）。其中，菜单选择屏支持作业模式、设备参数等功能的快速切换；静态文本屏用于呈现设备基础信息与操作规范；动态文本屏实时反馈作业数据与环境参数；参数设定屏则为驾驶人员提供个性化作业参数调整入口。该界面系统通过多屏协同设计，为互花米草清理作业提供科学、高效且安全的操作支撑，有效提升作业效率与管理水平。

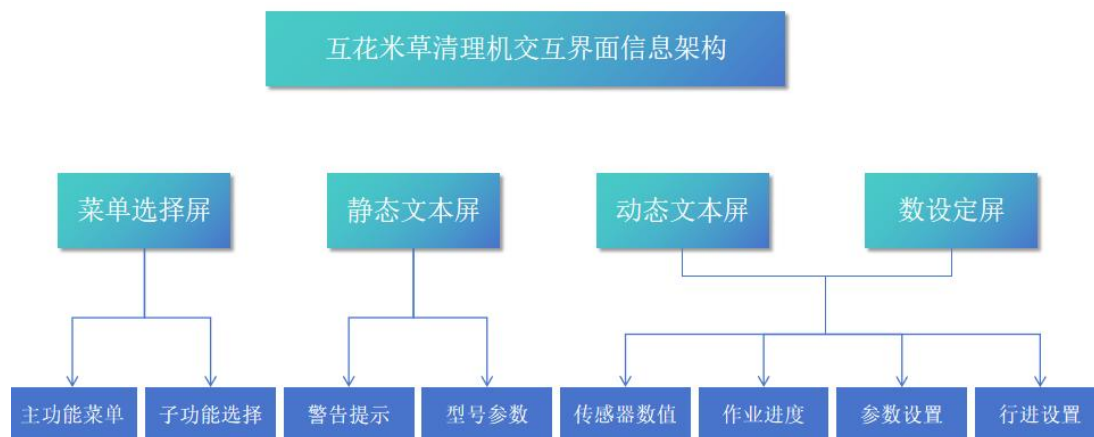


图 5-23 登录界面设计

(图片来源: 作者自绘)

登录界面采用分区域布局，顶部固定显示当前时间和日期，方便用户快速确认信息（图 5-24）。中间区域突出显示用户头像、工号和姓名，密码框支持指纹

识别功能，需要同时验证才能进入功能界面，增强设备的权限，提升使用的安全性。底部设计了一排简洁的功能图标，包括“操作手册”“语音转换”“安全指南”和“设置”，每个图标对应设备的操作指南，能够辅助新手快速入门。背景选用湿地清晨的实景照片，让长期在户外工作的人员感到亲切和放松，以及在清理互花米草过程中的使命感。整个界面通过清晰的模块划分、直观的图标引导和自然的动画效果，让用户能快速找到所需功能，同时兼顾了操作的便捷性和使用的安全性。

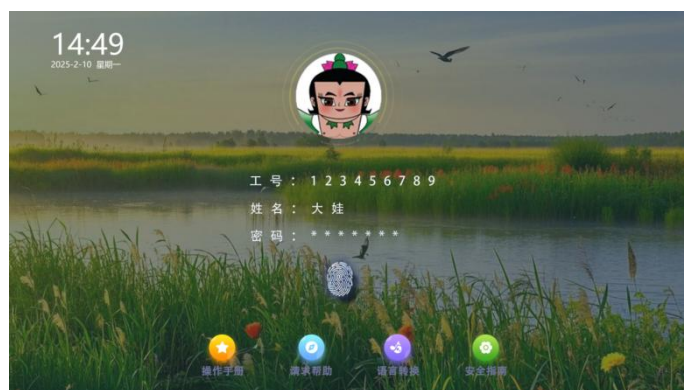


图 5-24 登录界面设计

(图片来源：作者自绘)

在进入系统后，便可呈现出功能界面（图 5-25）。该界面采用模块化布局，将“导航”“作业日志”“作业参数”等核心功能以图标矩阵形式整齐排列，每个功能独立成区，符合农机手快速切换操作的使用习惯。所有操作区域均采用大尺寸触控按钮，确保在手套操作场景下仍能精准点击。界面采用深绿色系作为主色调，既符合农业机械的专业属性，又能有效缓解长时间作业的视觉疲劳。左侧固定侧边栏整合用户头像、实时天气信息和快捷操作入口，通过统一的浅灰色背景与主功能区分。在复杂作业环境中，可通过视觉快速定位功能区域，提升操作效率。



图 5-25 功能界面设计

(图片来源：作者自绘)

此导航界面作为主界面的子界面，导航界面以动态箭头和实时道路轨迹为主要元素，展示具体要行驶的方向（图 5-26）。配备语音提醒，引导操作人员行驶方向，例如在直行时，会提示前方直行，并跳转执行箭头。同时，叠加了北斗卫星地图，实现动态调整，能够实时反馈作业路径，在界面的左上角，设置“退出导航”按钮，方便用户在到达制定地点后终止导航操作。右下角则配备了“SOS”的紧急按键，在紧急情况下，用户只需点击就能触发求助信号。此外，还加入了路面不平度预警功能，当检测到超过 15° 的坡度时，图标会变为黄色闪烁状态，警示降低行驶速度。当设备靠近边界时，会触发震动反馈，有效降低了误操作的风险。



图 5-26 导航界面设计

(图片来源：作者自绘)

该界面作为主功能的子界面，将“机械臂控制”与“翻耕犁刀调节”划分为智能 / 手动双模式（图 5-27）。智能模式下，系统通过集成土壤硬度传感器和作物密度识别摄像头，自动匹配最优参数组合，根据实时情况调节精度 $\pm 1\text{mm}$ ；手动模式开放全参数控制权限，数值调节区采用“当前值 +/- 按钮”组合设计，支持 $\pm 1\text{mm}$ 步进调节，确保操作精度可视化。所有调节按钮采用凹陷式设计，长按 3 秒激活编辑状态，系统检测到异常操作时自动冻结调节功能。红色“SOS”紧急按键采用 0.3 秒紧急响应机制，按下后立即冻结所有机械动作，启动应急照明，并向控制中心发送包含位置信息的求救信号。该设计将提升运行中复杂参数的调节效率，降低误操作率，从而提升相关用户的使用体验。

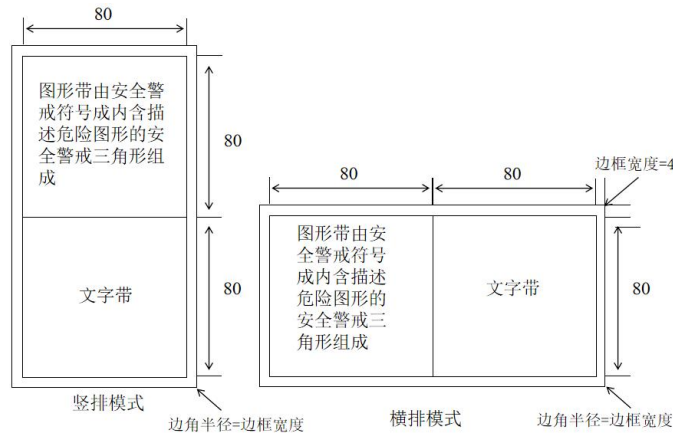


图 5-27 作业参数界面设计
(图片来源：作者自绘)

5.3.4 安全设计

使用安全的综合权重排序为第 2，产品的安全性必须要建立在产品本身安全以及操作者安全理解和操作的基础上^[60]。在互花米草清理机的操作场景中，危险警告发挥着极为关键的作用。通过醒目的标识、清晰的文字以及独特的信号等多种形式，对潜在的危险进行直观呈现，从而辅助操作者更为精准、高效地识别出对应的危险。

依据中国国家标准化管理委员会所规定的《农林拖拉机和机械、草坪和园艺动力机械用安全标志和危险图形的设计和使用原则》，该标准对安全标志带的设计规范作出了详细说明，从标志带的尺寸大小、材质选择，到其上标志的排列布局、间距设置等 (图 5-28) 在设计对应的警示标识时，需严格遵循这些规范要求。标志带尺寸的确定，要综合考虑机械作业环境的能见度以及操作人员的可视距离，以保证在不同光线条件下都能被清晰识别。



[60] 叶振合,李鑫.农机产品的安全性设计研究[J].农机化研究,2013,35(06):29-32.

图 5-28 安全标志标准尺寸

(图片来源: GB 10396-2006)

黄色标识: 主要分布于驾驶区域。“驾驶请勿吸烟” 的黄色标识, 提醒操作人员, 驾驶舱内严禁吸烟, 从而有效避免因吸烟导致的作业事故或明火引发的火灾; “请系好安全带” 的黄色标识, 警示作业人员规范使用安全带, 保障行车安全, 为驾驶安全提供保障。“工作请勿靠近” 提醒操作人员在操作过程中勿靠近危险部位。

橙色标识: “注意脚下 小心摔倒” 的橙色标识, 提示农机驾驶人员上下驾驶舱时, 地面距离过高, 操作人员需留意, 避免摔伤。“传递危险 请勿用手” 针对链条、齿轮等互花米草的传动部件, 提醒操作人员切勿直接触碰, 以防夹伤割伤; “请勿用手触碰零件” 针对机身外露零件, 避免误触受伤。

红色标识: 在机械作业区域至关重要。“工作请勿靠近” 的红色标识, 提醒非操作人员, 在农机作业时严禁靠近工作区域, 避免卷入、碰撞等危险。行进区域, “小心履带碾压” 的红色标识, 提示要注意农机履带的移动范围, 防止肢体被碾压; “切割部件 小心触碰” 的红色标识, 警示人员在清理或维修切割部件时要人身安全。

该标识覆盖农机在操作、驾驶、作业的各个场景, 助力操作人员精准识别潜在风险, 规范自身操作行为, 切实保障人身安全与设备的正常运行 (图 5-29)。

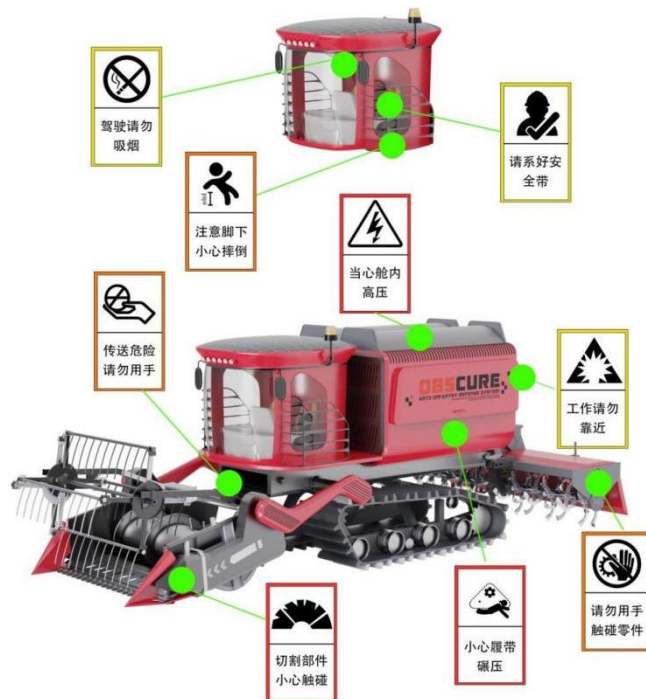


图 5-29 安全标志引用实例

(图片来源: 作者自绘)

5.3.5 可用性测试

为科学评估互花米草清理机显示屏交互设计的可用性, 本研究采用系统可用性量表 (System Usability Scale, SUS) 作为核心评估工具^[61], 能够在短时间内输出具有统计学意义的可用性评估结果^[62]。邀请了农机操作人员和互花米草清理作业驾驶人员参与测评。向每一位参与者详细说明了本次测试的目的、流程以及相应的操作步骤与测试目的, 让他们了解到本研究互花米草清理机的优化部分, 在充分沟通并确保参与者理解相关信息后, 研究人员向所有受试者发放了 SUS 标准化量表。该量表包含 10 个陈述性问题, 问题采用 5 点李克特量表计分方式 (1 代表强烈反对, 2 代表反对, 3 代表中立, 4 代表同意, 5 代表强烈同意), 这种量化方式能精确衡量受试者对每个问题的认同程度。测试结束后, 对收集到的数据进行整理与分析, 最终结果见图 5-30。

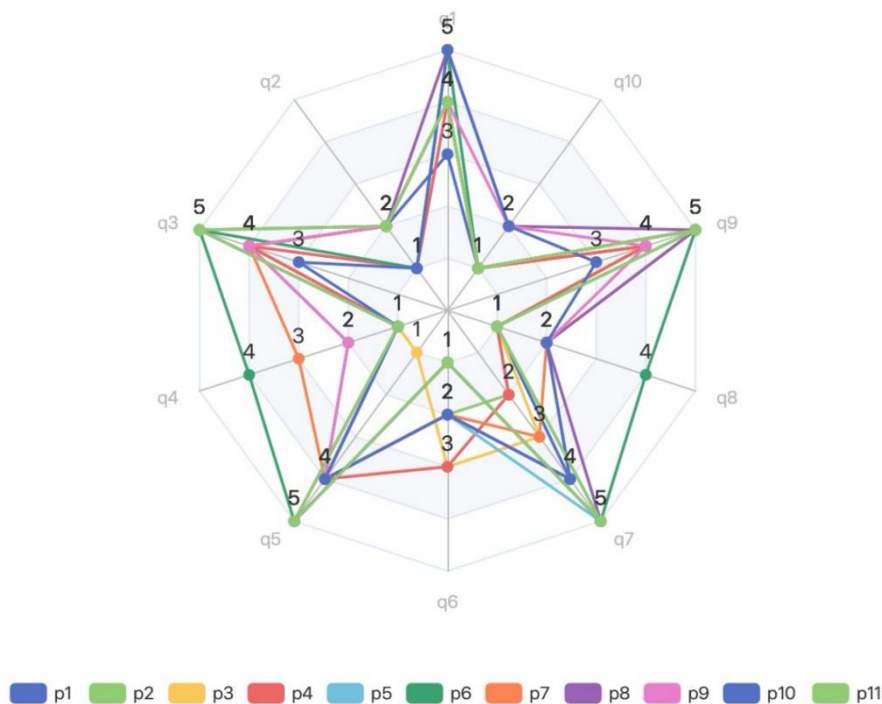


图 5-30 SUS 用户评估结果

(图片来源: 作者自绘)

最终得出 SUS 的计算结果平均分达到 80.7 分。在 SUS 的评分体系里,

[61]潘飞,姜可,王东琦.基于眼动追踪技术的购票网站可用性设计研究[J].包装工程,2020,41(24):243-247.

[62]张家祺,武晋昭,丁泽英,等.基于设计事理学的公交系统体验设计研究[J].包装工程,2023,44(10):125-133+146.

这一分数处于“良好”区间，表明该清理机在操作便捷性、功能实用性、界面友好度等多个关键维度表现出色。这意味着本研究设计的互花米草清理机，在整体可用性方面表现卓越，能够切实满足不同用户群体在实际作业、科研监测以及生态保护管理过程中的多样化需求，为互花米草清理工作提供了强有力的设备支持，有望显著提升清理工作的效率与质量，助力相关区域的生态环境修复与保护。

5.4 本章小结

本章聚焦互花米草清理设备设计。依据其生长和生态特点定位设备，提取相关产品造型结构资料后绘制两个设计方案，运用模糊综合评价法确定最优方案。

在最终设计中，整机设计优化模块结构布局，提升地形适应性、能源效率和作业安全性；整机运行设计明确收割、回收等作业流程，提高清理效率；操作区域人机设计依据人体工程学，合理布局部件、设计交互界面，提升用户体验；安全设计遵循国家标准设置警示标识，保障人员和设备安全；通过 SUS 量表进行可用性测试，结果表明该设备操作便捷、功能实用，能满足多方面需求。

第 6 章 总结与展望

本研究以互花米草生态治理为核心，对相关机械设备、互花米草清理以及需求群体特征等方面进行分析，构建了 FAHP-QFD 的集成设计方法框架，实现互花米草清理机的开发设计与研究。

本文贡献如下：

（一）通过实地调研与文献研究，本研究首先对互花米草清理设备进行调研，收集了用户需求、设计痛点及潜在机会点，总结了产品改进的关键要素。分析了互花米草清理的需求，明确了利益相关者、清理需求以及相关设备设计的用户需求，将这些需求要素引入 FAHP 理论框架，并运用 FAHP 方法确定了各项产品需求的权重，有效解决了传统设计方法在生态设备多目标决策中存在的模糊性问题，为类似研究提供了可量化的决策路径。

（二）在需求要素明确之后，采用质量功能展开（QFD）工具，将用户需求转化为产品设计要素。通过 QFD 工具的运用，将用户需求与产品功能之间的关系进行映射，确保功能能够回应不同需求。在此基础上，对互花米草清理设备的功能进行了优化，帮助解决设备设计过程中遇到的功能冲突问题。进一步将产品的设计功能映射到具体的行为，再通过行为映射到清理机的结构设计。确保设计方案从功能到结构的连贯性与优化，最终提出了切实可行的设计方向，为后续的产品开发提供了坚实的理论基础和实践指导。

（三）根据产品结构与国家相关法律法规，提出互花米草清理机的详细方案设计，包括整机设计、运行设计、人机交互设计以及交互界面设计等多个方面。提出两套设计方案并进行评估，针对最优方案的各个模块进行了功能性布局与优化，确保设备能够在复杂环境下稳定、高效的运行。运行设计则重点关注设备的操作系统的简化、人机系统的优化以及作业效率的提升，基于用户的操作习惯与需求，在保证作业精度的同时，提升设备的工作效率。

本研究仍然存在一定的局限性，并将在后期工作中进行完善：

（一）局限性：由于资源的限制，本研究未能制作出实物样机，无法通过实地测试进一步验证设计方案的效果。此外，本研究的样本区域主要在盐城地区，但设备在不同地区的适应性仍需进一步优化，特别是在不同气候和地形下的作业

能力。

(二) 后期工作: 互花米草清理工作将在不断变化的生态环境中进行, 因此设备在复杂环境中的适应性仍需进一步提高, 尤其是在不同湿地条件下的作业效率和稳定性。随着生态环境保护需求的日益增加, 未来的研究将更加注重设备的能源利用效率和环境友好性, 推动清理设备在环保方面的创新。最后, 设备的商业化应用和普及将依赖于更多跨学科的合作, 以确保清理设备在实现社会效益的同时, 能够支持其可持续发展。

参考文献

- [1] 谢舒雅,李香兰.互花米草入侵对中国滨海湿地土壤碳收支的影响[J].生态环境学报,2024,33(10):1516-1524.
- [2] 赵燕,王森,杨文清,等.中国互花米草防治措施研究进展及展望[J].生物安全学报,2022,31(03):210-216.
- [3] 郭鑫,陆莎,杜欢政.我国快递包装绿色转型的研究现状及未来趋势[J].包装工程,2023,44(19):238-247.
- [4] 仲崇信, 蒋福兴, 张正仁.海滩植被的生态意义及利用价值 [J]. 海洋开发, 1985 (4): 36-39.
- [5] 徐国万, 卓荣宗, 曹豪, 等.互花米草生物量年动态及其与滩涂生境的关系 [J]. 植物生态学与地植物学学报, 1989 (3): 230-235.
- [6] 林贻卿, 谭芳林, 肖华山.互花米草的生态效果及其清理探讨 [J]. 防护林科技, 2008 (3): 119-123, 142.
- [7] 陈潘, 张燕, 朱晓静, 等.互花米草入侵对鸟类的生态影响 [J]. 生态学报, 2019, 39 (7): 2282-2290.
- [8] 盛强, 黄铭垚, 汤臣栋, 等.不同互花米草清理措施对植物与大型底栖动物的影响 [J]. 水生生物学报, 2014, 38 (2): 279-290.
- [9] 谢宝华, 王安东, 赵亚杰, 等.刈割加淹水对互花米草萌发和幼苗生长的影响 [J]. 生态学杂志, 2018, 37 (2): 417-423.
- [10] 张丽平, 周亚圣, 刘君成, 等.遮荫对刈割互花米草生物量及渗透调节物质的影响 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2019, 39 (4): 142-148.
- [11] 郭衍锋, 杨景鹏, 王振兴, 等.一种互花米草清理翻耕船[P].广东省:CN202410148855.2,2024-04-16.
- [12] 顾燕飞,杜皓,曹世伟,等.一种生态修复工程中入侵植物的灭除方法[P].上海市:CN201610663621.7,2017-05-17.
- [13] 陈浩,成海,陈亚芹,等.一种淡水淹没清理互花米草的综合方法[P].江苏省:CN202111086675.9,2021-11-30.

- [14] 沈浩,马克明,李婷,等.一种互花米草生物-物理控制方法[P].广东省:CN201510782852.5,2018-07-27.
- [15] 熊婷婷,林莹雪,安雪琪.基于 AHP-QFD 理论的履带式移动破碎机设计[J].机械设计,2023,40(S2):27-32.)
- [16] 易菲.基于 QFD/TRIZ 理论的人宠共用生态家具设计[J].装饰,2023,(06):136-138.
- [17] Fang M, Yang W, Li H, Pan Y. Enhancing User Experience through Optimization Design Method for Elderly Medication Reminder Mobile Applications: A QFD - Based Research Approach[J]. Electronics, 2023, 12(13):2860.
- [18] Neira - Rodado D, Ortiz - Barrios M, De la Hoz - Escorcía S, Paggetti C, Noffrini L, Fratea N. Smart product design process through the implementation of a fuzzy Kano - AHP - DEMATEL - QFD approach[J]. Applied Sciences, 2020, 10(1792).
- [19] 郑祖芳,陈建峰.基于 AHP-QFD-TRIZ 组合的玉米联合收割机设计[J/OL].农机化研究,1-9.
- [20] Wang T, Zhao Y, Li Pang LL, Cheng Q. Evaluation method and design of greenhouse pear pollination drones based on grounded theory and integrated theory[J]. PloS one, 2024, 19(10):e0311297.
- [21] 涂波,李燮雯.基于 FAHP-FBS 融合的自行式房车车载人机界面设计研究[J].装饰,2024,(10):139-141.
- [22] 王昀,陈枫.基于共生体系的成长式儿童课桌椅创新设计研究[J].家具与室内装饰,2024,31(08):10-16.
- [23] 袁菁菁,汤繁稀.基于 FAHP/QFD/SWOT 的山西“黎侯虎”可拼装体验产品设计[J].包装工程,2024,45(20):433-441+452.
- [24] 江灿,贾俊鹤,杨颖,等.互花米草在中国的 40 年: 认知演变与清理对策[J].生态学报,2024,44(20):8944-8956.
- [25] 胡林军.沿海滩涂互花米草物理治理方法[J].港口科技,2024,(11):38-42+44.
- [26] 王洁,顾燕飞,尤海平.互花米草清理措施及利用现状研究进展[J].基因组学与

- 应用生物学,2017,36(08):3152-3156.
- [27] 邓自发,安树青,智颖飙,等.外来种互花米草入侵模式与爆发机制[J].生态学报,2006(8):2678-2686.
- [28] 李佳骏,金双,李汝佳,等.刈割+翻耕清理互花米草后溁南湿地大型底栖动物群落结构变化特征[J].湿地科学,2024,22(03):349-358.
- [29] 谢宝华,韩广轩.入侵植物互花米草防治:理念、技术与实践[J].中国科学院院刊,2023,38(12):1924-1938.
- [30] 赵相健,李俊生,柳晓燕,等.刈割加遮荫对互花米草生长和存活的影响[J].广西植物,2017,37(03):303-307.
- [31] 赵燕,王森,杨文清,等.中国互花米草防治措施研究进展及展望[J].生物安全学报,2022,31(03):210-216.
- [32] 王红,阚文静,谭晓璇,等.互花米草化学清理对天津附近海域水质和沉积物质量的影响[J].海洋通报,2022,41(05):572-581.
- [33] 刘倩,李媛媛,王萍,等.外来种互花米草的入侵生态学研究进展[J].海洋湖沼通报,2023,45(03):155-163.
- [34] 谢宝华,韩广轩.外来入侵种互花米草防治研究进展[J].应用生态学报,2018,29(10):3464-3476.
- [35] 田心如,谢云峰,赵项.基于用户需求的智能家具产品设计路径研究[J].家具与室内装饰,2023,30(11):15-21
- [36] 罗锋,代建成,陈治澎,等.盐沼植被分布动态监测及驱动力分析[J/OL].河海大学学报(自然科学版):1-12
- [37] Zhang H B, Liu Y Q, Xu Y, et al. Impacts of *Spartina alterniflora* expansion on landscape pattern and habitat quality: a case study in Yancheng Coastal wetland, China[J]. Applied Ecology & Environmental Research, 2020, 18(3).
- [38] Yanwen W, Peng C, Chen F. Security assessment of coal mine power grid voltage based on an improved AHP-FCE[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022.
- [39] Jia Y ,Wang J ,Han X , et al. Application and Performance Evaluation of Industrial Internet Platform in Power Generation Equipment Industry [J]. Sustainability, 2023, 15 (20):15116.

- [40] Wongvilaisakul W ,Netinant P ,Rukhiran M . Dynamic Multi-Criteria Decision Making of Graduate Admission Recommender System: AHP and Fuzzy AHP Approaches [J]. Sustainability, 2023, 15 (12):9758.
- [41] Ahmad M N, Maidin N A, Rahman M H A, et al. Conceptual design selection of manual wheelchair for elderly by analytical hierarchy process (AHP) method: A case study[J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2017, 12(17): 6710-6719.
- [42] 李洋,刘国闯,刘苏,等.基于 AHP-QFD 的共享老年代步车人机工程设计[J].包装工程,2023,44(18):52-60.
- [43] Villanueva P, Bona S, Lostado-Lorza R, et al. Morphological Design of a Bicycle Propulsion Component Using the Hierarchical Analysis Process (AHP)[J]. Applied Sciences, 2023, 13(13): 7792.
- [44] Bhattacharya A. Integrating AHP with QFD for robot selection under requirement perspective[J]. International journal of production research, 2005, 43(17): 3671-3685.
- [45] Dai J, Blackhurst J. A four-phase AHP–QFD approach for supplier assessment: a sustainability perspective[J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(19): 5474-5490.
- [46] Hridoy R M, Parvez M S, Mohsin N. Joining methods of Analytic Hierarchy Process (AHP), Kano Model and Quality Function Deployment (QFD) to improve the tractor's seat design for tractor drivers in Bangladesh[J]. American Journal of Industrial and Business Management, 2020, 10(05): 1073.
- [47] 马怀宇,孟明辰.基于 TRIZ/QFD/FA 的产品概念设计过程模型[J].清华大学学报(自然科学版),2001,(11):56-59.
- [48] Yao W ,Wang C ,Pang J , et al. Research and development of fully enclosed wire-shell support structure technology for deep soft rock roadway based on TRIZ theory. [J]. Scientific reports, 2024, 14 (1): 3279-3279.
- [49] 任梦阳.基于 QFD-FBS 方法的老年人助浴产品设计研究[D].天津大学,2022.
- [50] Li H, Zhang L. An experimental study on physical controls of an exotic plant *Spartina alterniflora* in Shanghai, China[J]. Ecological Engineering, 2008,

32:11-21.

- [51] XIE B, HAN G. Control of invasive plant *Spartina alterniflora*: Concept, technology and practice[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version), 2023, 38:1924-1938.
- [52] 王朝侠,徐从意.仿生设计在产品趣味性设计中的应用[J].包装工程,2017,38(14):193-197.
- [53] 邓盛勇,廖建军.基于 AHP—FCE 的大学校园疗愈景观提质设计研究[J].现代园艺,2025,48(07):79-82.
- [54] 朱云峰. 基于模糊层次分析法的金箔文创产品设计研究[J]. 包装工程, 2022(22): 341-349.
- [55] 王沈策,史雨霖,张奕宇.以用户为中心的农机产品设计研究综述[J].包装工程,2024,45(06):24-36.
- [56] 邵友晨.基于人类工效学理论的小型农机产品设计研究[D].景德镇陶瓷大学,2024.
- [57] 魏亚敏.基于视觉传达设计的农机操作界面优化研究[J].农机化研究,2025,47(01):199-204.
- [58] 余俊学,薛占坡,郑坤,等.基于农机手心理负荷试验的小型拖拉机操纵台人机界面优化[J].拖拉机与农用运输车,2024,51(03):22-28+66.
- [59] 李由,付卫强,包涵,等.农机车载电子设备用户界面框架设计[J].黑龙江八一农垦大学学报,2014,26(06):84-87+100.)
- [60] 叶振合,李鑫.农机产品的安全性设计研究[J].农机化研究,2013,35(06):29-32.
- [61] 王晓曦,熊伟.质量功能展开中顾客需求重要度确定的粗糙层次分析法[J].计算机集成制造系统,2010,16(04):763-771.
- [62] 陈媛,宋端树,辜俊丽.集成 QFD/TRIZ/AHP 的产品创新设计模式研究[J].包装工程,2017,38(20):150-155.
- [63] 苏建宁,魏晋.基于 AHP/QFD/TRIZ 的玫瑰花蕾采摘机设计[J].机械设计,2020,37(08):121-126.
- [64] Wang C ,Zhang J ,Liu D , et al. An AI-Powered Product Identity Form Design Method Based on Shape Grammar and Kansei Engineering: Integrating Midjourney and Grey-AHP-QFD [J]. Applied Sciences, 2024, 14 (17):

7444-7444.

- [65] Martínez L A ,Melo G P ,Gutiérrez V G , et al. Application of the AHP-QFD methodology in the sustainability analysis of a trifunctional adsorbent for inorganic micropollutants from contaminated water [J]. Separation and Purification Technology, 2024, 351 128027-.
- [66] Zheng H ,Liu L ,Zhang Q , et al. Children ' s Hospital Environment Design Based on AHP/QFD and Other Theoretical Models [J]. Buildings, 2024, 14 (6): 1499-1499.
- [67] Ulas C ,Selcuk C ,Cengiz K . A hybrid risk assessment method for mining sector based on QFD, fuzzy inference system, and AHP [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2020, 39 (5): 6047-6058.
- [68] Onar Ç S ,Büyükoçkan G ,Öztayşi B , et al. A new hesitant fuzzy QFD approach: An application to computer workstation selection [J]. Applied Soft Computing, 2016, 46 1-16.
- [69] 王铁,吕梦茹.质量功能展开与 AHP 在铁路货运中的应用[J].计算机集成制造系统,2018,24(01):264-271.
- [70] 李畅,任家骏,李爱峰,等.以提升用户满意度为导向的工程机械产品网页设计研究[J].包装工程,2017,38(04):102-107.
- [71] 张子楠.QFD 与 FAHP 在软件开发项目中的应用[J].现代电子技术,2014,37(23):118-121.
- [72] Huang T S ,Bulut E ,Duru O . Service quality assessment in liner shipping industry: an empirical study on Asian shipping case [J]. Int. J. of Shipping and Transport Logistics, 2015, 7 (2): 221-242.
- [73] Alinezad A ,Seif A ,Esfandiari N . Supplier evaluation and selection with QFD and FAHP in a pharmaceutical company [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68 (1-4): 355-364.
- [74] Xu J ,Zhang X ,Liao A , et al. Research on Innovative Design of Towable Caravans Integrating Kano-AHP and TRIZ Theories [J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), 2024, 15 (3):991-1001.

- [75] 梁立成,傅晓强,张滨,等.基于 GEE 与随机森林的象山港互花米草动态监测[J].林业资源管理,2023,(03):38-45.
- [76] 宋国贤,朱丽莎,钮栋梁.崇明东滩湿地的保育与利用[J].人民长江,2009,40(08):31-34.
- [77] 赵纤纤,徐浩,荆辉,等.基于专利计量的互花米草研究进展分析[J].海洋科学,2024,48(05):89-106.
- [78] 钦佩,张焕仕,覃凤飞.互花米草生态工程[M]. 化学工业出版社: 2019. 331.
- [79] 钦佩,安树青,颜京松.生态工程学[M]. 南京大学出版社: 2019. 367.

附录 1

FAHP 问卷:

非常感谢您参与互花米草清理机的课题研究。现开展基于 FAHP 理论的调研问卷,旨在剖析互花米草清理机的需求权重。通过问卷结果明确各项设计权重,为后续一系列设计工作提供数据支撑与指导。

感谢您抽出宝贵时间参与本次问卷调查!

评分说明

标度	含义	标度值说明
0.5	同等重要	两种因素具有相同的重要程度
0.6	稍微重要	两种因素相比,前者比后者稍微重要
0.7	明显重要	两种因素相比,前者比后者明显重要
0.8	非常重要	两种因素相比,前者比后者非常重要
0.9	极端重要	两种因素相比,前者比后者极端重要
0.1,0.2,0.3,0.4	反比较	若因素 r_i 与因素 r_j 相比较得到判断 $r_{ij}=0.6$, 则 $r_{ji}=1-0.6=0.4$

准则层元素重要度比较评分

	评分	
外观设计 (A)		功能性(B)
外观设计(A)		可靠性(C)
外观设计(A)		生态兼容性(D)
功能性(B)		可靠性(B)
功能性(B)		生态兼容性(D)
可靠性(C)		生态兼容性(D)

外观设计准则层元素重要度比较评分

	评分	
科技感(A1)		贴合自然(A2)
科技感(A1)		警示色调(A3)
科技感(A1)		开阔视野(A4)
贴合自然(A2)		警示色调(A3)
贴合自然(A2)		开阔视野(A4)
警示色调(A3)		开阔视野(A4)

功能性准则层元素重要度比较评分

	评分	
可视化作业(B1)		易于移动(B2)
可视化作业(B1)		作业效率(B3)
可视化作业(B1)		多功能作业(B4)
易于移动(B2)		作业效率(B3)
易于移动(B2)		多功能作业(B4)
作业效率(B3)		多功能作业(B4)

可靠性准则层元素重要度比较评分

	评分	
使用安全(C1)		操作易懂(C2)
使用安全(C1)		交互便利(C3)
使用安全(C1)		低人力损耗(C4)
操作易懂(C2)		交互便利(C3)
操作易懂(C2)		低人力损耗(C4)
交互便利(C3)		低人力损耗(C4)

生态兼容性准则层元素重要度比较评分

	评分	
低生态危害(D1)		复生长率低(D2)
低生态危害(D1)		互花米草回收(D3)
低生态危害(D1)		低生态扰动(D4)
复生长率低(D2)		互花米草回收(D3)
复生长率低(D2)		低生态扰动(D4)
互花米草回收(D3)		低生态扰动(D4)

附录 2

模糊综合评价方案二评分:

得分矩阵:

$$S_1 = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.2 & 0.3 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$S_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

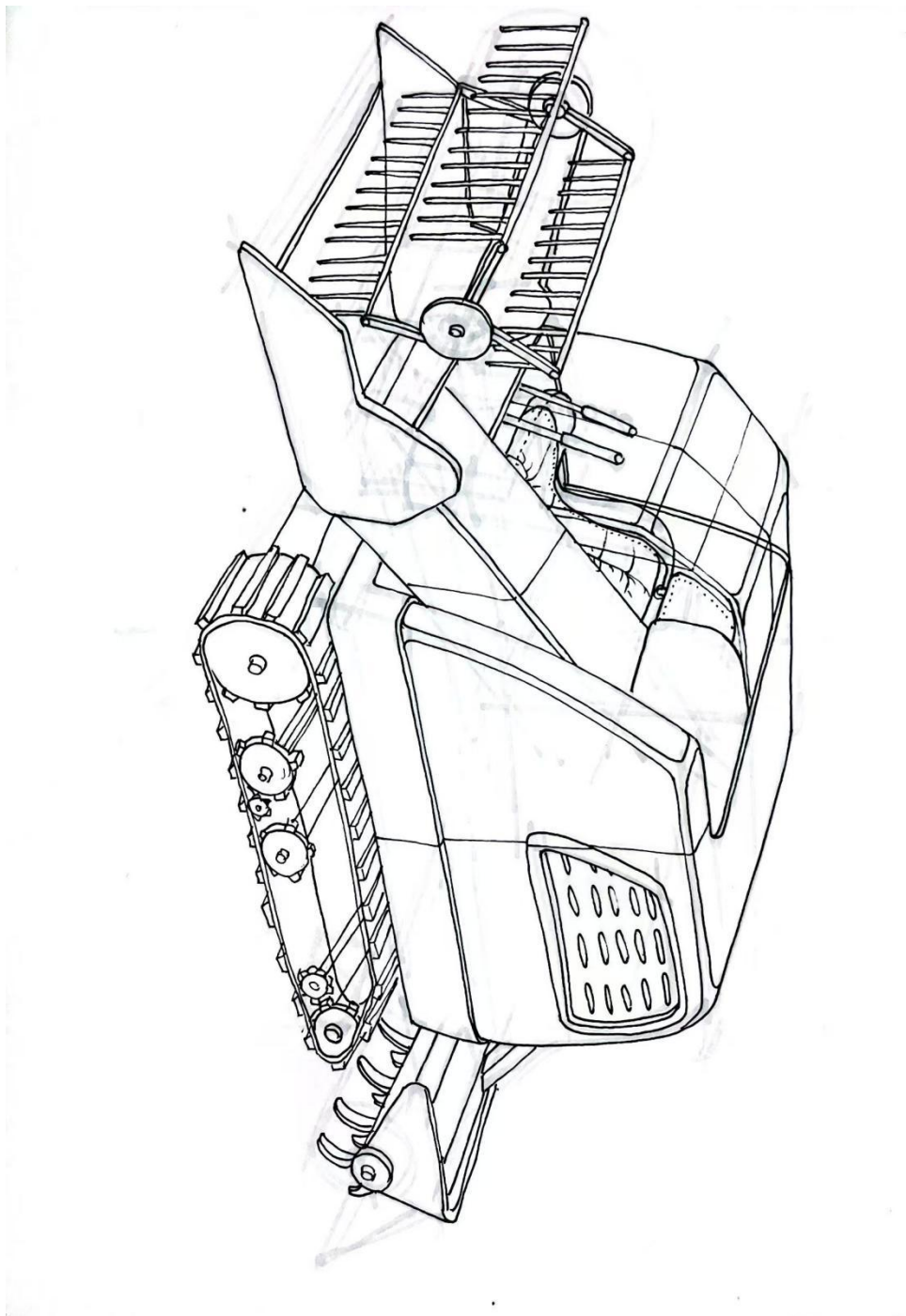
$$S_3 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

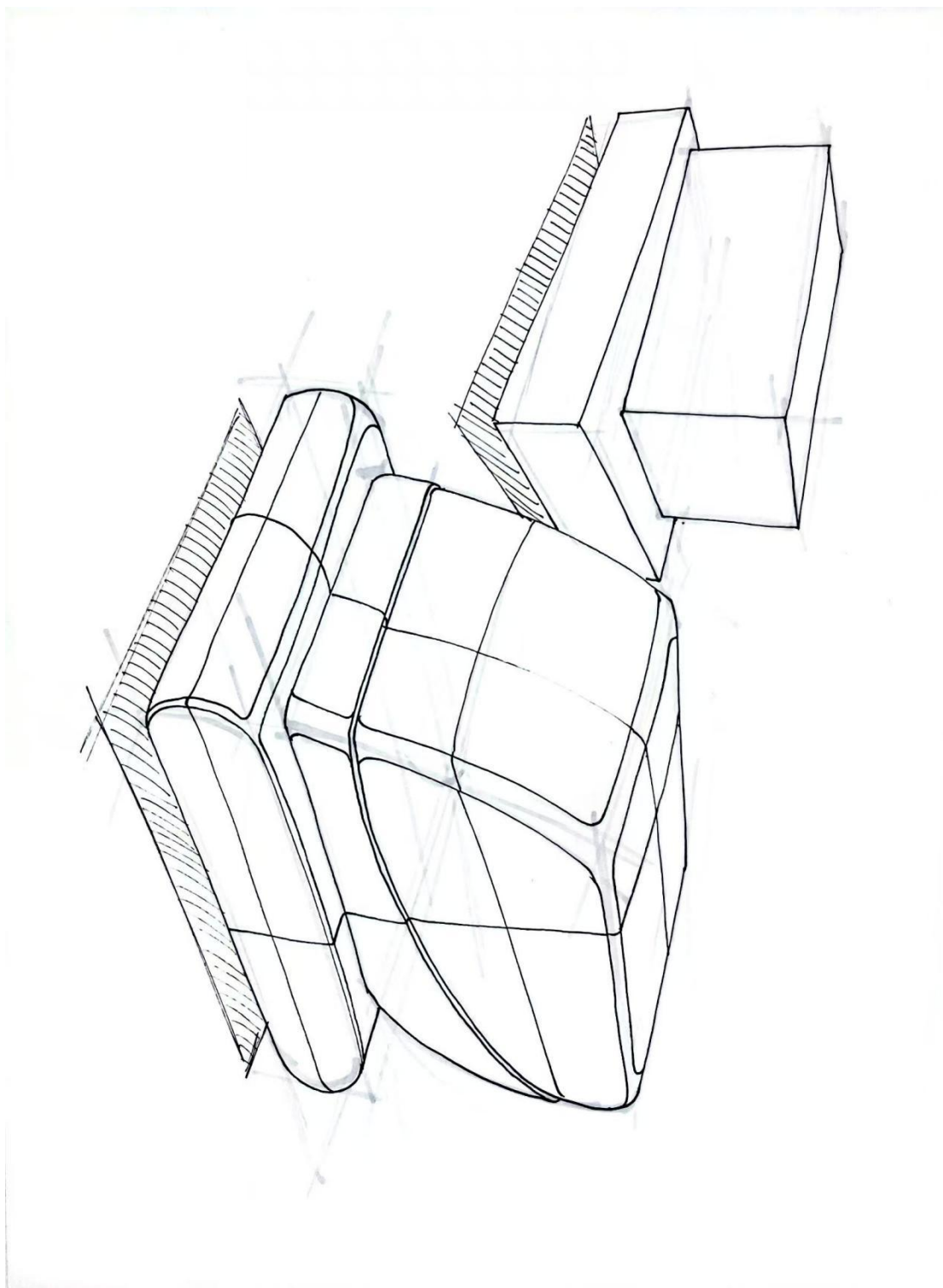
$$S_3 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

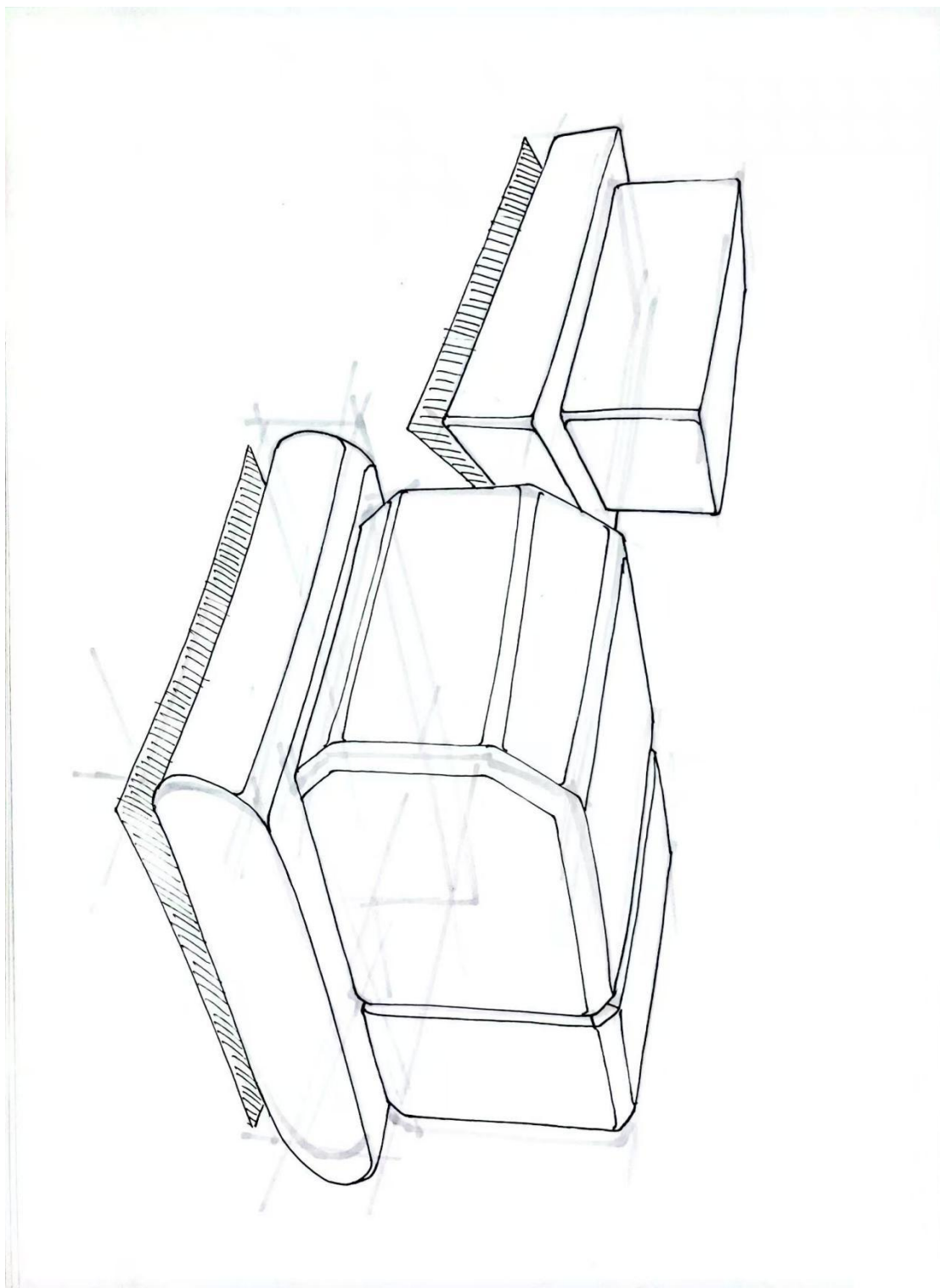
$$p = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.543 & 0.276 & 0.181 & 0 & 0 \\ 0.553 & 0.340 & 0.107 & 0 & 0 \\ 0.520 & 0.326 & 0.154 & 0 & 0 \\ 0.545 & 0.327 & 0.128 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

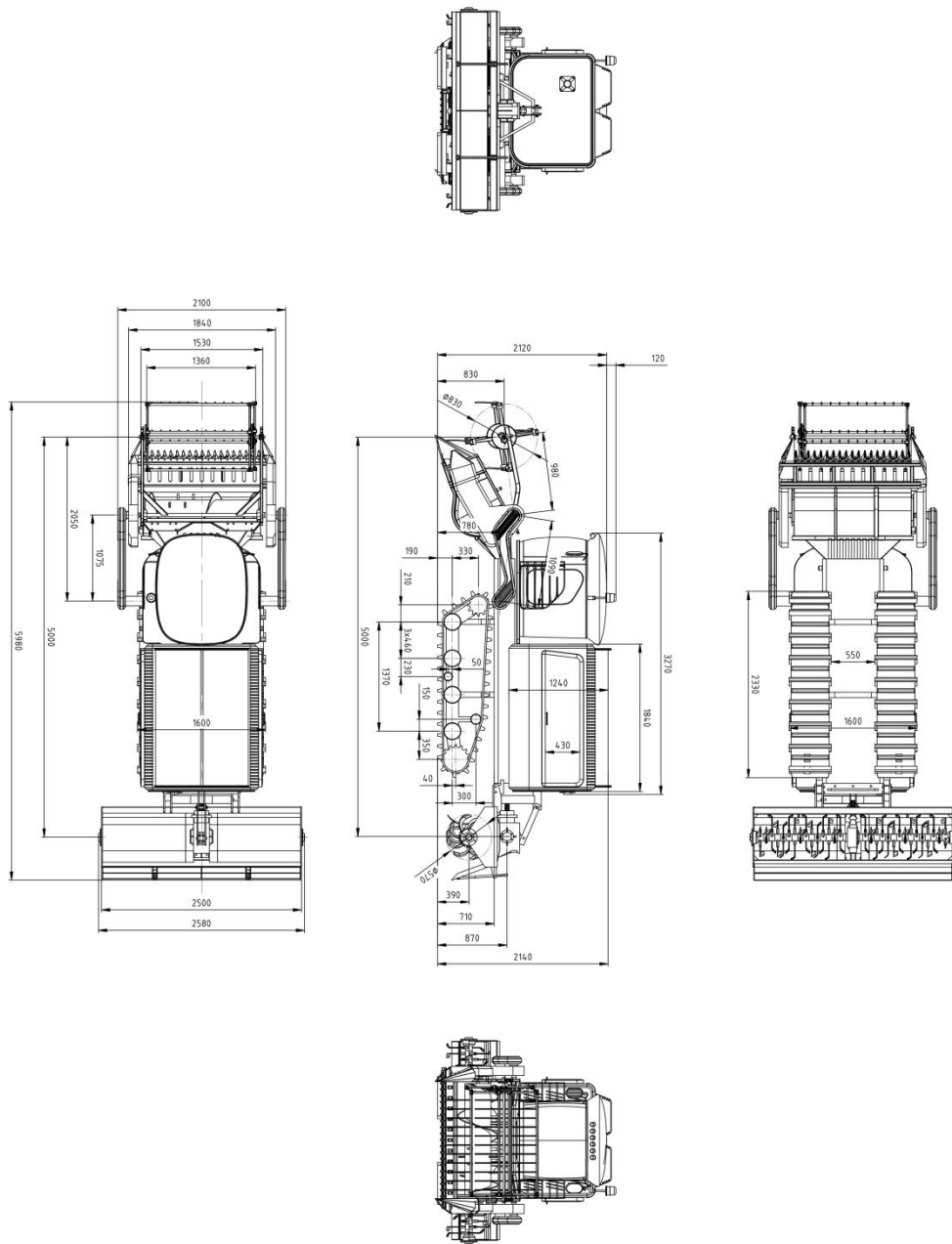
附录 3

草图:









附录 4

题目	强烈反对	反对	中立	同意	强烈同意
1. 我认为我会经常使用这个系统。					
2. 我觉得这个系统不必要地复杂。					
3. 我认为这个系统易于使用。					
4. 我认为使用这个系统需要技术人 员的协助。					
5. 我觉得这个系统的各项功能整合 的很好。					
6. 我觉得这个系统存在太多不一致 之处。					
7. 我认为大多数人能很快学会使用 这个系统。					
8. 发现使用这个系统非常繁琐。					
9. 我在使用这个系统时感到非常 有信心。					
10. 真正使用这个系统之前, 我需要 学习很多东西。					

攻读学位期间获得研究成果目录

- [1]2023 年第十一届未来设计师·全国高校数字艺术大赛——三等奖
- [2]2023 年第十一届未来设计师·全国高校数字艺术大赛——三等奖
- [3]2023 年第十一届未来设计师·全国高校数字艺术大赛——二等奖
- [4]2024 年第二届安徽省乡村振兴创新创业大赛——三等奖
- [5]2024 年第二届安徽省乡村振兴创新创业大赛——三等奖
- [6]2024 年第十届安徽省工业设计大赛——三等奖

致谢

行文至此，硕士生涯已圆满收官。谨以最诚挚的谢意，致敬我的导师张学东教授，三年硕士生涯的引领我在学术道路上探索真知；感恩我的父母，二十余载养育之恩化作我逐梦的底气；更要向始终默默支持我的李欣莲女士道一声感谢，照亮我前行的漫漫长夜。

花有重开日，人无再少年，值此离别之际，愿以今日之所学，赴明日之山海。前路漫漫亦灿灿，唯愿初心不改，步履不停。

尚禮敦學 唯實惟新

