

水稻种植机行走装置的研究现状分析

胡冰*, 付袁, 王人齐, 蹇承志, 田波, 伏晓东, 吕小荣#

四川农业大学, 四川 雅安

收稿日期: 2022年10月21日; 录用日期: 2022年11月18日; 发布日期: 2022年11月30日

摘要

我国是世界上种植水稻面积最大、产量最多的国家之一, 同时我国的水稻的生产种植历史也非常悠久。水稻作为我国重要的经济作物之一, 其播种环节更是生产环节的关键阶段之一, 水稻种植机器的行走装置对实际田间的适应能力、通过性能将直接影响种植效率与后续生产质量的好坏, 本文阐述了国内外行走机构的研究现状, 从各类行走装置的种类、工作特点、对土地压实作用的影响以及作业过程中的田间通过性等方面综述了当前行走装置的研究问题, 同时分别总结了各种行走装置应用于水田作业领域的优势, 并分析了一种螺旋式推进行驶装置与水稻直播机结合的可行性, 为后续的水田行走装置的设计提供参考。最后, 展望了未来螺旋推进行驶装置在水稻播种领域发展方向。

关键词

水稻直播, 行驶装置, 螺旋式推进装置

Analysis of the Research Status of Rice Planter Running Device

Bing Hu*, Yuan Fu, Renqi Wang, Chengzhi Jian, Bo Tian, Xiaodong Fu, Xiaorong Lv#

Sichuan Agricultural University, Ya'an Sichuan

Received: Oct. 21st, 2022; accepted: Nov. 18th, 2022; published: Nov. 30th, 2022

Abstract

China's rice production and planting history is very long, and China is also one of the countries with the largest rice cultivation area and the largest output in the world. Rice as one of the important cash crops in China, its sowing link is one of the key stages of the production link, rice planter machine running device to the actual field adaptability, through performance will directly af-

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 胡冰, 付袁, 王人齐, 蹇承志, 田波, 伏晓东, 吕小荣. 水稻种植机行走装置的研究现状分析[J]. 农业科学, 2022, 12(11): 1161-1171. DOI: 10.12677/hjas.2022.1211161

fect the planting efficiency and subsequent production quality of the good or bad, this paper expounds the research status of domestic and foreign walking institutions, from the types of various running devices, working characteristics, the impact on land compaction in the operation process and other aspects of the current research problems of running gear. At the same time, the advantages of various running devices in the field of paddy field operation are summarized, and the feasibility of combining a spiral propulsion driving device with a rice live broadcast machine is analyzed, which provides reference for the subsequent design of paddy field running device, and finally, the development direction of spiral propulsion driving device in the field of rice sowing is prospected in the future.

Keywords

Rice Live Broadcast, Driving Devices, Screw Propulsion Device

Copyright © 2022 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

我国水稻的种植生产的历史非常悠久，同时我国也是世界上种植水稻面积最大、产量最多的国家之一。水稻作为我国重要的经济作物之一，其播种环节更是水稻生产环节的关键阶段之一，对于水稻种植机器而言，其行走装置本身对实际田间的适应能力、土地通过性能、稳定性能等特征，将直接影响其种植效率与后续生产效率的高低，因此，了解不同行走机构的特点，发挥其相应的优势，将会是保障水稻种植生产稳定与高效的重要因素。本文从目前水稻种植机所应用的传统行走装置，阐述了国内外对轮式行走机构与履带式行走机构的研究现状，另外，对螺旋式行走机构这种新型行走机构进行了相关调研，并分析了一种螺旋式推进行驶装置与水稻直播机结合的可行性。通过对国内外研究现状的分析，轮式行走机构发展历程较长，技术较为成熟，但是即使做出针对性的优化，在水田环境中行驶时，依然会出现打滑、侧翻等问题；而履带式行走装置增加了其泥地通过性，能够有效应对恶劣的土地环境，但自身结构复杂，较为笨重；螺旋式行走装置结合了两者的优势，自身结构简单，同时能够应对恶劣环境，具有较大的研究前景。不同地方的土壤环境有所不同，水田种植环境相较于让其他土壤环境更为恶劣，因此分析各种行走装置的特点，不仅能为后续的行走装置的设计提供参考，而且选择合适的行走装置应用于水田作业，才能有效解决田间通过性与稳定性的问题，减小土地压实作用的影响，最终保障水稻种植环节的稳定与高效，以及后续生产环节的顺利进行。在此基础上，本文对相关行走装置的研究与分析，为研究和发展相应的水稻种植机器以及保障其后续工作稳定和高效做出贡献。

2. 传统的水稻种植机的行走装置

2.1. 轮式行走装置研究现状

2.1.1. 轮式行走装置的特点

轮式行走装置在水稻种植机的应用十分常见且广泛，对于应用于水稻种植的轮式行走装置主要特点在以下几个方面：首先，由于轮式行走装置运动时与地面接触面小、摩擦阻力小，故其机动性好，行驶速度快；其次，其生产制造技术成熟，造价相对较低。最后，但是在水稻种植环境中，轮式行走装置的通过性较差，需要对轮胎进行特殊改装才能克服在泥地打滑、空转、下陷等情况。通过改装轮胎以提高自身通过性与承载能力的同时，也牺牲了自身一定的机动性与平稳性。

2.1.2. 轮式行走装置的国外研究现状

国外的研究与应用轮式行走装置的起步比较早, 2000年, 来自加拿大的 R.A. McBride 带领团队对液体厩肥施具上的车轮运行装置的性能进行了实验分析[1], 以表征土壤与车辆的相互作用, 并测量拖运装有橡胶履带(2721X635), 高浮力轮胎或常规卡车轮胎的满载储罐吊具时的燃料需求, 测量结果显示行走机构的类型对牵引杆吃水和燃油消耗都具有显著影响, 其中轮式行走机构燃油消耗较小。

国外对水田轮式行走装置的研究早于国内, 其中日本对水田拖拉机开展了深入的研究[2], 不论是基础理论研究还是产品设计实践, 都代表了当今世界上水田拖拉机领域的最先进水平。久保田公司的产品则是其中的佼佼者, 其水田作业的功率段主要以 51.5~69.9 kW (70~95 马力) 为主, 行走线路多采用动力换向、同步器换挡传动系, PTO 线路则多采用扭转减振器、湿式多片离合器, 整机高度体现了对产品的可靠性、适应性、舒适性以及经济性等方面的充分考虑。

2.1.3. 轮式行走装置的国内研究现状

国内研究应用轮式行走装置在水稻播种领域的发展历程比较漫长, 在 1998 年, 杨坚团队就发明了自走型分流式小型水稻直播机[3], 该水稻直播机采用轮式行走装置, 工作时将后轮拆去、前轮更换为水田轮, 水田轮可以提高机器运动时的附着性能、通过性能, 以及减少机器陷入泥地的问题, 从而保证了农艺播种量的要求。

同年, 来自沈阳农业大学的孙忠英团队研究了农业机器行走装置[4], 发现使用轮式行走装置进行作业时, 会对土壤产生压实作用, 其作用大小取决于装置的负荷与重心的配置。土壤压实不仅会破坏土壤结构导致土壤板结, 也会影响作物生长。

2006 年, 廖一峰团队对轮式拖拉机在水田或湿软土壤上牵引性能进行了探讨[5], 一般轮胎拖拉机下水田时, 由于拖拉机具有较大的重量, 在水田中必然陷下并形成较深的辙沟; 水田土壤将粘结在轮胎花纹之间而形成积泥, 使轮胎变成光滑的泥轮而无法与土壤产生剪切的推进作用。轮胎在水田中产生显著滑转, 使拖拉机推进缓慢, 甚至不能行驶。如严重滑转时, 驱动轮把土壤挖起, 加深沉陷, 甚至使整台拖拉机陷入水田, 无法动弹。

目前我国在水田中使用的轮式拖拉机多以旱地作业型为主的拖拉机或水旱兼作型作业为主的拖拉机通过换装水田型轮胎局部改进而来[6]。不能适应承压力低的烂泥田, 存在易下陷、打滑等缺陷; 在防泥水密封保护、防夹草带泥、防腐防锈、水田通过性、机动性等方面均存在着明显不足。

综上所述, 国内外对轮式行走装置的使用时十分广泛的, 轮式行走机构在结构设计上比较简单、生产技术较为成熟, 生产成本较低。在水田种植领域, 轮式行走装置应用也比较普遍, 为了保证其在水田环境中的通过性能与行驶稳定性, 需要增加轮式行走装置对地面的接触面, 提高土地的通过性能; 但是, 这种对轮式行走机构的局部改装, 仍然存在不能很好适应水田作业环境、出现下陷、打滑的可能。

2.2. 履带式行走装置研究现状

2.2.1. 履带式行走装置的特点

履带式行走装置在水稻种植机的应用较为常见, 履带式行走装置相较于其他行走装置, 由于自身履带与地面的接触面积大、接地比压低, 故其具有良好的承载能力, 同时具备了一定的转向能力、转弯半径小; 履带式行走装置具有良好的越障性能与适应能力。但是履带式行走装置自身结构相对复杂、制作成本高, 且总体结构重量较大。其运动所需的牵引力较大、机动性较差、行驶速度缓慢, 此外, 在水田进行工作时, 履带会对土壤进行压实, 从而影响正常的出苗率。

2.2.2. 履带式行走装置的国外研究现状

履带式行走装置在国外应用广泛, 尤其是在一些土地条件比较恶劣的条件下; 对履带式行走装置的

研究也比较成熟。1994年,来自日本的崇光广之和他的团队开发了运动方程,用于分析履带式车辆在软地和坚实地直行推进时的动态行为[7]。通过实验验证了仿真模型的有效性。测量了地面的动态特性,以确定沉降和剪切,同时考虑到磁滞,实验试验结果与理论结果吻合良好。

2008年,乔尔·阿尔卡拉斯团队研发了农业运输用增程式混合动力电动履带式拖拉机[8],采用了履带式行走装置,保证其内燃机能耗低的同时提高了其在实际农业运输的稳定性,相比于传统农业运输装置降低了能量消耗。

2015年,学者 Michal Allman 与他的团队比较了不同类型的林业机械行走装置对土壤表层压实的影响[9],并确定了导致最大压实的土壤含水量水平。通过在斯洛伐克和捷克共和国的八个地点分别进行了测量,测量结果发现支撑履带式行走装置运动的土壤的堆积密度较低。

近年来,对履带式行走装置的研究也仍在持续,2021年,来自韩国的学者洪俊荣与他的团队分析了小型履带式拖拉机在农业田间作业期间的功率需求[10],试验结果表明履带式拖拉机的平均功率要求因有效载荷和操作阶段的不同而有所不同。为改进小型履带式拖拉机的原型并将其商业化提供指导,以便在农田上实际使用。

2.2.3. 履带式行走装置的国内研究现状

履带式行走装置在国内研究与应用虽然起步比国外缓慢,但是也逐步发展起相对应的研究与应用。

在1981年,张文凤团队对履带行走机构在水田的通过性进行了试验研究[11],通过对履带式行走机构进行水田实际试验后,发现在选择合适的履带板型与机组重心可以保证其自身良好水田的通过性,将应用履带式行走机构于水田农业机械做好理论基础。

2006年,来自中国地质大学的姜威团队将履带式行走装置应用于水田作业联合收割机[12],通过调节履带宽度与接地长度的比值,使其在水田地的通过性能符合要求,不发生下陷的情况。

2010年,赵瑜团队研究分析了履带式行走机构运动时的受力情况[13],从分析结果中发现:履带式行走机构的牵引力主要由履带挤压土壤而产生的地面反作用力。这就说明了履带式行走机构在运动的时候会对土壤产生相应的压紧力。

近年来,对于履带式行走装置的研究一直都在持续。一些学者对履带式行走装置的压实作用有了不同的看法:2020年,丁肇,李耀明与任利东等学者对履带式行走机构压实作用下的土壤应力分布均匀性进行了分析[14],发现履带式行走机构因具有较小的接地压力而被逐渐应用在农业机具上,以减小对土壤的压实。然而由于履带下应力分布的不均匀,导致农业机具对土壤的最大应力并未有效减小,对土壤较长的压力作用时间反而增加了土壤被压实的风险。

丁肇,李耀明与任利东等学者还进一步发现[15],虽然与轮胎相比,履带具有更大的接地面积,能够有效减小车辆对土壤的平均压力。然而履带与土壤接触面间的应力分布极不均匀,应力主要集中在各承重轮下方,所以即使是采用履带式,其自身重力都会对土壤进行压实。

综上所述,现阶段,国内外对于履带式行走装置的应用都还有所局限,大多都应用于土地条件恶劣的环境,采用柴油发动机作为动力源,对环境有一定的污染;其结构较为复杂,整体重量大,操作复杂,不适用于小型场地的工作。此外,将履带式行走装置与农业生产结合时,其对土壤压实的影响不能被忽视。

3. 新型水稻种植机的行走装置

3.1. 螺旋推进式行走装置研究现状

3.1.1. 螺旋推进式行走装置的特点

螺旋推进式行走装置运动部件较少、结构相对简单,主要由螺旋叶片与螺旋滚筒等结构组成。螺旋

滚筒不仅具有良好的承载能力，且一定的体积也为自身提供了浮力，这以结构特征也让其成为“浮”式水田行走装置变成可能。螺旋推进式行走装置是利用滚动摩擦进行运动，在运动过程中，其动力强劲、灵活性高，对软泥、水田等恶劣地面环境的通过性与适应性强。但是螺旋推进式行走装置在相对平整、光滑的地面行驶时，反而会变得无所适从，甚至可能损坏地面，加速螺旋叶片的磨损。

3.1.2. 螺旋推进式行走装置的国外研究现状

在国外将螺旋推进器作为行走装置的研究已经有很久的历史。螺旋推进式行走装置最早应用在螺旋推进车上。

第一个将螺旋推进理论应用到机械行走机构的人是 Colonel John Stevens，他在 1804 年设计制造了螺旋推进汽艇[16]，并在纽约河成功进行了行驶。在 1868 年，美国发明家 Jacob Morath 进一步提出了螺旋推进车的设计概念，1957 年，一家德国公司设计出螺旋推进两栖车并参加了汉诺威展览会[17]。

1961 年，为了帮助美军解决在东南亚国家淤泥、沼泽等复杂环境下的机动作战问题，克莱斯勒公司将螺旋推进车辆在软土地面和水中分别进行了模型试验[17]，之后在 1962、1963 年共生产了两辆实车——“Marsh Screw Amphibian”。克莱斯勒公司的试验，使得这种沼泽螺旋两栖车(MSA)的实用性能、通过性能得到了肯定，如下图 1 所示。

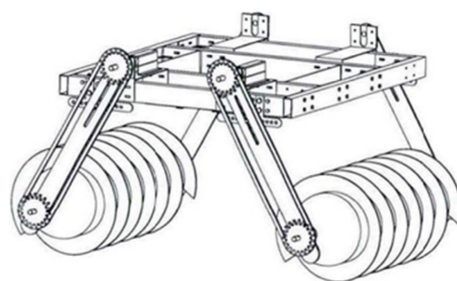


Figure 1. MSA model car
图 1. MSA 模型车

到了 21 世纪初期，日本的 Kenji Nagaoka, Masatsugu Otsuki 等人基于传统的车辆地面力学理论[18]，建立了车辆在软土地面上的数学模型，并对土壤剪切力和应力轨迹进行了三维运动的仿真分析，这有助于加深对土壤特性的理解。关于模型结构参数的分析也可以为将来的结构设计提供一定的参考。但由于没有实车试验研究，一些理论模型分析的结果存在着误差，需要进一步用试验来修正模型。

3.1.3. 螺旋推进式行走装置的国内研究现状

国内对于螺旋推进式行走装置的研究起步较晚，对螺旋推进系统的研究来源于地面车辆的研究。我国最早对螺旋推进机构的研究是为了提高我国农业机械化的水平，主要是研究适用于水田作业的机械。

1991 年，针对水田作业，四川省农机所研究员刘明相，设计制作了双轴差距螺旋水耕机[19]，之后，来自江西省粮食局的余林生成功设计并制作了螺旋双驱动农耕地，大大提高了农机作业效率。随后，多功能等距锥形螺旋耕作机上成功的运用了螺旋驱动理论，在 2004 年的农业生产中，双螺旋式耕作推进器也展现了不可磨灭的优势。

2003 年，军事交通学院的赵玉凡等人[20]，将螺旋推进器为主要研究对象，运用地面车辆系统的理论，建立螺旋叶片上任意一点的运动轨迹数学模型以及与螺旋滚筒相互作用的淤泥软土的流变模型，之后建立了螺旋叶片与土壤之间受力的数学模型，研究出了滚筒所受阻力、阻力矩。该研究分析了螺旋滚筒作为行走机构时，其与土壤间相互作用的模型，为此后方面的研究提供了一定的基础理论。

2014 年至今, 来自装甲兵工程学院的郭晓林等人, 以 1:6 MSA 为原型, 对螺旋推进器进行了大量仿真研究。通过建立螺旋滚筒动力学及运动学模型, 对轴向方向推进力进行研究[21], 得出了螺旋滚动所受的地面推进力与滑转率间的关系[22]; 通过对整车及内外侧滚筒建立仿真, 研究了转向性能与各结构参数间的关系, 并运用差速转向原理对螺旋推进器的转向系统进行优化[23]。

2020 年, 来自华中农业大学的冯闯闯团队, 设计了一种自主行走的螺旋推进式挖藕机[24], 主要结构包括螺旋推进底盘和喷流装置等, 如下图 2 所示, 凭借螺旋推进式行走装置对田地间环境的良好适应性, 提高了挖藕机的作业效率与工作稳定性。并且, 在同年, 重庆交通大学的万玉春等人, 设计研究了一种近海沼泽地螺旋推进船[25], 利用螺旋推进装置的通过性与适应性, 解决了船舶难以适应沼泽地的问题。



Figure 2. Screw propelled digging machine
图 2. 螺旋推进式挖藕机

2021 年, 靳航嘉团队利用螺旋驱动式行走装置的良好通过性与平稳性[26], 开发了螺旋驱动式粮仓机器人, 利用其独特的行走装置克服了目前粮仓管理中的粮面平整, 施药, 翻倒等作业主要靠人工完成, 存在成本高, 费时费力, 工作环境差等缺点, 且解决了因粮面松软, 现有粮面行驶机构存在易下陷, 易倾覆和行驶不便的问题。

综上所述, 螺旋推进式行走装置具有良好的通过性和平稳性, 能够适应恶劣的土地环境, 因此, 也可以将其应用到水稻播种领域也是一种不错的选择。但是在现阶段, 国内外对于螺旋推进车的研究都还有限, 大多采用柴油发动机作为动力源, 其结构较为复杂, 体积庞大, 操作复杂, 不适用于小型场地的作业。此外, 将螺旋推进车与农业结合的前例也罕见。本设计将研究设计一种新型结构的螺旋推进车, 并将其与水稻直播相结合, 实现装置的结构简单化, 操作智能化。

下面以一种应用螺旋推进式行走装置的水稻直播机进行相关的分析。

3.2. 一种远程控制螺旋式直播水稻机器

3.2.1. 结构特点

该远程水稻直播机主要由播种系统、控制系统、行驶系统、机械系统、辅助系统等组成, 如下图 3 所示。

1) 播种系统: 采用两个轮式播种器, 由单独电机为其提供动力以实现播种两行水稻的需求; 同时配合风泵, 实现气吹式播种, 满足水稻直播的播种深度。

2) 控制系统: 利用 STM32 构建局域网, 使得手机端可通过相应 app 对机器发送相应指令, 使得机

机器人正常行驶、工作。

3) 行驶系统：由轮毂电机驱动螺旋滚筒，为机器提供平稳向前的持续驱动力。

4) 机械系统：由钢架、连接架、螺纹杆、轴承座等组成，为其余各系统提供支撑和固定。

5) 辅助系统：由一些电子设备如：继电器、降压稳压器、电瓶等组成，为各个系统相互配合工作提供保障。

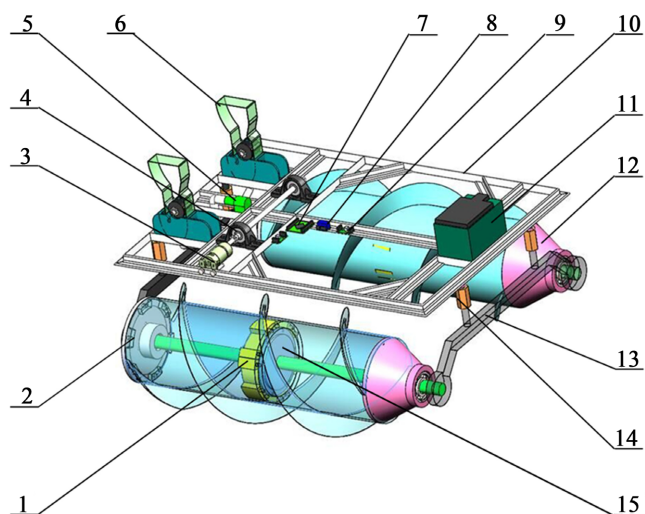


Figure 3. Overall structural design drawing (1. Hoop; 2. Back cover; 3. Seeder motor; 4. Bearing seat; 5. Fan; 6. Seeder; 7. Microcontroller; 8. Relay; 9. Buck regulator; 10. Rack; 11. Battery; 12. Front cone cover; 13. Telescopic frame; 14. Telescopic sleeve; 15. Hub motor)

图 3. 总体结构设计图(1. 抱箍; 2. 后盖; 3. 播种器电机; 4. 轴承座; 5. 风机; 6. 播种器; 7. 单片机; 8. 继电器; 9. 降压稳压器; 10. 机架; 11. 电瓶; 12. 前锥盖; 13. 伸缩架; 14. 伸缩套筒; 15. 轮毂电机)

针对水稻水直播稀泥地的工作环境特点，螺旋叶片的行进方式以及农艺等要求，确定螺旋推进式水稻播种机器人行走装置的设计要求如下：

- 1) 采用螺旋推进的方式实现在稀泥地中的前进；
- 2) 装置结构紧凑，便于移动，采用智能设备远程控制，操作简便；
- 3) 单程播种两行，播种的株距及行距如下表 1；
- 4) 控制系统响应准确，满足对装置前进、后退、转弯等行走要求的控制。

将农机与农艺相结合，本装置的主要技术参数如下表 1 所示：

Table 1. Main technical parameters

表 1. 主要技术参数

| 参数名称 | 数值 |
|-------------------|-----------|
| 最大装载质量 m_2 (kg) | ≤ 15 |
| 行距(mm) | 30 |
| 株距(mm) | 12 |
| 行驶速度(m/s) | 1 |

3.2.2. 工作原理与过程

工作原理主要分为两个部分，分别是控制原理与运动原理。

1) 控制原理：主要以 ESP8266 为服务器搭建热点供手机上的 app 连接，并通过 STM32 接受手机端 app 发送的指令从而控制直播机器人的启停行走。具体过程：手机端发送前进指令后，由 STM32 接收信号后并处理，使轮毂电机转动，进而带动滚筒滚动，从而实现机器向前行驶；

2) 运动原理：螺旋推进式行走装置的螺旋叶片旋转前进时，能有效降低接地压力，行驶时不易陷入地面。如下图 4 所示，通过螺旋叶片的旋转前进，能提供轴向推动动力，克服轴向阻力；通过带动螺旋叶片的转动，轮毂电机以转动的方式提供径向力，克服横向泥土的粘力；通过改变螺旋滚筒的转向，实现前进后退；通过两轮的差速控制，实现转弯。螺旋叶片在淤泥里旋转前进时，叶片向后挤压表面水层与部分土壤，通过形成的反作用力实现装置的前进，有效解决了陷入泥土导致无法前进的问题。

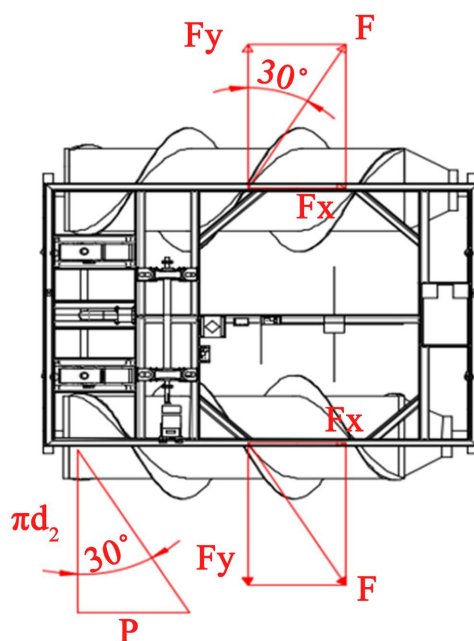


Figure 4. Force analysis diagram of the motion of the spiral running gear

图 4. 螺旋式行走装置运动受力分析图

整机工作过程主要由准备阶段和执行阶段组成：

1) 准备阶段：在开始播种前，根据农艺要求准备适量的水稻种子，并更换合适的排种盘；同时调节驱动排种盘转动的转速，使得其与整机前进的运动速度相匹配，并且符合水稻种植农艺要求；提前用手机端的 app 链接机器上的 WIFI 模块，确保手机端指令可以被机器准确接收与执行。

2) 执行阶段：当进行水稻播种时，如下图 5 所示，将试验样机放入水稻田中同时打开风泵与排种器的电源开关，排种器排出的种子会受到风压的作用播入田地，从而达到符合农艺要求的播种深度，螺旋式行走装置接收到前进的指令后，由滚筒内的轮毂电机驱动装置转动，由于螺旋叶片的存在，使得旋转产生的扭矩转化为向前的驱动力，从而实现机器向前行驶；当需要进行转弯时，通过手机端 app 发送相应的指令，调整两侧轮毂电机的转速，使得螺旋滚筒具有一定的转速差，转速差越大转弯半径越小，从而实现机器转向操作越迅速。



Figure 5. Prototype test drawing
图 5. 样机试验图

在实际水稻播种中，为保证水稻播种的质量，还应注意对播种间距和深度调节。

1) 对于实际播种间距调整，是取决于整机行驶速度、排种盘转速两者之间的配合，为与水稻播种农艺要求一致，必须分别调节轮毂电机的转速与控制排种机的直流电机的转速，使得实际播种速度可以满足播种农艺要求；

2) 对于播种深度的调节，主要与机身整体高度、风泵作业速度以及作业环境的土壤黏度相关；为了达到农艺要求的播种深度，通过田间实地试验，采用调节连接架伸缩高度与控制风泵出风口风速相互配合的方式，以达到农艺要求的播种深度。

4. 未来的发展趋势

随着计算机技术、人工智能技术、传感器技术以及制造技术的不断发展，水稻种植机的行走装置越来越朝着自动化、智能化、环保化、和谐化的方向发展。水稻种植机的行走装置要与实际生产相结合，优化其结构的同时提高自身的作业效率，不同的行走装置在不同地区的地形条件发挥其相应的结构优势、同时，减少其他方面的不足，增强适应能力。在未来研制水稻种植机的行走装置时，结合北斗导航技术、传感器技术和视觉识别技术可以使其完成自动分析田间实地情况、规划相应路线并完成相应的运动轨迹；最后，未来将使用更加环保的能源作为动力，以减少水稻播种机对田间环境、自然气候的影响。

5. 结语

水稻是我国重要的粮食作物，选择合适的行走装置是水稻种植机能够高效地完成播种指标的重要保障，也是进行后续水稻生产的基础。本文通过对目前应用于水稻种植机的行走装置的研究现状进行阐述，分析了不同种类的行走装置应用于水稻种植机的特点。可以发现，目前对轮式行走装置的国内外研究较为成熟，但在水田等恶劣环境中也会出现难以移动、压实土壤等状况；履带式行走装置虽然解决了恶劣土壤条件下的通过性问题，但自身仍存在机身结构复杂、整体较重、土壤压实的状况；螺旋式行走装置无论是在整体结构的复杂程度、还是对环境的适应能力、土地通过性能都具有一定的优势，此外，它也兼顾传统行走装置的优点，如灵活的转向性能、良好的行驶性能等。

因此，螺旋式行走装置具有良好的发展潜力，是未来优化水稻种植机的重要组成部分之一。未来对水稻种植机的行走装置研究，不能只在模拟田地或连作田研究，更应着重分析在轮作田里的装置行走性能、土壤压实状况的研究，这样才能正确分析行走装置对土壤状况的实际影响，更符合水稻种植的实际生产。同时，水稻种植机的行走装置将与智能控制系统相结合，配备多种传感系统，实时监测作业环境参数并反馈给系统进行路径规划。不断朝着智能化、无人化的方向发展，进而不断提高水稻种植的生产水平。

致 谢

首先要感谢就是我的指导老师吕小荣老师，大二时期有幸跟随吕老师开始了科研兴趣项目的研究，也是本次论文的选题之处。

在吕老师的言传身教下，使我在做项目、写论文的过程中不仅学到了丰富的专业知识，严谨认真的研究态度，还让我在实践动手方面得到了锻炼，学会了灵活思考问题、运用所学专业知识解决问题。在吕老师的指引下，项目研究以及本次论文培养了我的科研兴趣，也大大的锻炼了我的科研创新能力。往后的人生，我将不负韶华，珍惜时光，用所学的知识创造价值奉献社会，永远心存感恩兢兢业业，不负恩师厚望。

基金项目

1) 成都市科技重点研发支撑计划项目(200-YF05-01084-SN)。2) 国家现代农业产业技术体系四川豆类杂粮创新团队专项(SCCXTD-2023-20)。

参考文献

- [1] McBride, R.A., McLaughlin, N.B. and Veenhof, D.W. (2000) Performance of Wheel and Track Running Gear on Liquid Manure Spreaders. *Canadian Agricultural Engineering*, **42**, 19-25.
- [2] 任德良, 刘金丹, 袁靖, 刘方圆, 张学谦, 朱龙坤. 浅谈水田轮式拖拉机设计[J]. 拖拉机与农用运输车, 2020, 47(5): 1-3.
- [3] 杨坚, 韦林, 覃振友, 黄亦其. 2BD-8 自走型分流式小型水稻直播机[J]. 农业机械学报, 1998, 29(4): 177-180.
- [4] 孙忠英, 李宝筏. 农业机器行走装置对土壤压实作用的研究[J]. 农业机械学报, 1998, 29(3): 172-174.
- [5] 廖一峰. 轮式拖拉机在水田或湿软土壤上牵引性能的探讨[J]. 南方农机, 2006(4): 29-30.
- [6] 李晨硕, 邹娇蓉, 李继光. 水田作业轮式拖拉机的设计探讨[J]. 拖拉机与农用运输车, 2017, 44(6): 7-10+17.
- [7] Sogo, H., Hasegawa, M., et al. (1994) Dynamic Behavior of Crawler-Type Vehicles: The Experimental Examination of Straight Propelling. *JSME International Journal. Ser. C, Dynamics, Control, Robotics, Design and Manufacturing*, **37**, 123-129. <https://doi.org/10.1299/jsmec1993.37.123>
- [8] Alcaraz, J.M., Yamashita, J. and Sato, K. (2008) Development of a Range-Extender Type Hybrid-Electric Crawler Tractor for Agricultural Transport (Part 1). *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, **70**, 75-76.
- [9] Allman, M., Jankovský, M., et al. (2015) Soil Compaction of Various Central European Forest Soils Caused by Traffic of Forestry Machines with Various Chassis. *Forest Systems*, **24**, e038. <https://doi.org/10.5424/fs/2015243-07541>
- [10] Ali, M., Islam, M.N., Reza, M.N., Hong, J.G., Gulandaz, M.A. and Chung, S.O. (2021) Analysis of Power Requirement of a Small-Sized Tracked-Tractor during Agricultural Field Operations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **924**, Article ID: 012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/924/1/012017>
- [11] 张文凤, 赵兵. 金属履带行走机构水田通过性的试验研究[J]. 农业机械学报, 1981(2): 84.
- [12] 姜威, 刘天舒, 朱维才. 水田作业联合收割机行走装置设计[J]. 农业机械, 2006(22): 78-79.
- [13] 赵瑜, 闫宏伟. 履带式行走机构设计分析和研究[J]. 新技术新工艺, 2010(5): 50-53.
- [14] 丁肇, 李耀明, 任利东, 等. 履带式行走机构压实作用下土壤应力分布均匀性分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 52-58.
- [15] 丁肇, 李耀明, 唐忠. 轮式和履带式车辆行走对农田土壤的压实作用分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 10-18.
- [16] Rossell, H.E. and Chapman, L.B. (1949) Principles of Naval Architecture. Society of Naval Architects and Marine Engineers, Singapore, 11.
- [17] Dugoff, H. and Ehrlich, I. (1967) Model Tests of Buoyant Screw Rotor Configurations. *Journal of Terramechanics*, **4**, 9-22. [https://doi.org/10.1016/0022-4898\(67\)90123-1](https://doi.org/10.1016/0022-4898(67)90123-1)
- [18] Nagaoka, K., Otsuki, M., Kubota, T. and Tanaka, S. (2010) Terramechanics-Based Propulsive Characteristics of Mobile Robot Driven by Archimedean Screw Mechanism on Soft Soil. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, Taipei, 18-22 October 2010, 4946-4951. <https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5651010>
- [19] 刘明相, 王德骥. 双轴轴距螺旋水耕机[J]. 农村实用工程技术, 1991(2): 26.

-
- [20] 赵玉凡, 陈军, 万剑, 刘洪泉, 袁一, 常明. 一种特殊行走机构——螺旋推进器的研究[C]//中国农业机械学会成立 40 周年庆典暨 2003 年学术年会论文集. 2003: 144.
- [21] 郭晓林, 刘杰, 赵炎, 等. 螺旋推进器在湿软地面推进力的仿真分析[J]. 装甲兵工程学院学报, 2014, 28(3): 47-50.
- [22] 郭晓林, 刘杰, 赵炎, 等. 螺旋推进车转向动力学分析[J]. 装甲兵工程学院学报, 2015(10): 20-24.
- [23] 郭晓林, 刘杰, 赵炎, 等. 螺旋推进车辆转向动力学特性仿真分析[J]. 装甲兵工程学院学报, 2015(4): 47-51.
- [24] 冯闯闯. 螺旋推进式挖藕机设计与试验[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- [25] 万玉春, 张洪燕, 李万田, 等. 近海沼泽地螺旋推进船[J]. 黑龙江科技信息, 2020(5): 186-187.
- [26] 靳航嘉, 吴文福, 吴子丹, 等. 螺旋驱动式粮仓机器人行走机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 20-26.