

水田回转式单侧修筑埂机设计与试验

王金峰¹ 宋育岭¹ 翁武雄² 许朝阳¹ 朱朋运¹

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 福建农林大学机电工程学院, 福州 350002)

摘要: 为提高水田修筑埂机机械筑埂效率,降低作业时筑埂劳动强度,解决现有传统水田单侧修筑埂机在水田拐角处无法连续机械修筑田埂的问题,本文设计一种基于多连杆回转调节机构的水田回转式单侧修筑埂机。阐述了其关键组成部件横向偏移机构与回转调节机构的结构设计及工作原理。构建了横向偏移机构与回转调节机构运动学模型,通过运动学分析确定横向摆臂Ⅰ、横向摆臂Ⅱ和回转摆臂长度分别为1 260、672、284 mm,并确定各步进电动缸安装位置。以运动学分析为基础,设计了多连杆回转调节控制系统。进行了水田回转式单侧筑埂机回转调节性能试验及田间性能试验。回转调节性能试验结果表明,横向摆臂Ⅰ、横向摆臂Ⅱ及回转摆臂随时间变化的回转角度与相对应的理论值之间均方误差分别为0.45、0.49、0.86(°)²。在整个回转周期内,所有摆臂随时间变化的回转角度与相对应的理论值之间的均方误差为0.64(°)²,表明该机具在整体回转作业过程表现出较高的稳定性。田间性能试验结果表明,直线部分所筑田埂各测量位置坚实度平均值均不小于1 085 kPa,直线度平均值均不大于10.4 mm,拐角处所筑田埂各测量位置坚实度平均值均不小于1 027 kPa,直线度平均值均不大于9.39 mm,均满足水田筑埂农艺要求。

关键词: 水田; 修筑埂机; 多连杆机构; 控制系统

中图分类号: S224.1*6

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)08-0023-12

OSID:



Design and Experiment of Single-sided Embankment Construction Machine for Paddy Fields with Rotating Mechanism

WANG Jinfeng¹ SONG Yuling¹ WENG Wuxiong² XU Zhaoyang¹ ZHU Pengyun¹

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Aiming to enhance the efficiency of mechanical dike construction in paddy fields and reduce labor intensity during operations, a suspended single-side dike construction machine was designed for paddy fields based on a multi-link rotary adjustment mechanism. This machine addressed the inability of traditional single-side dike construction machines to achieve continuous mechanical dike construction at paddy field corners. The study elaborated on the structural design and working principles of key components: the lateral offset mechanism and rotary adjustment mechanism. A kinematic model of the lateral offset mechanism and rotary adjustment mechanism was constructed. Through kinematic analysis, lengths of lateral swing arm I, lateral swing arm II, and rotary swing arm were determined as 1 260 mm, 672 mm, and 284 mm, respectively, and installation positions of each stepper electric cylinder were identified. Based on kinematic analysis, a multi-link rotary adjustment control system was designed. Performance tests were conducted on the rotary adjustment and field performance of the suspended single-side dike construction machine. Results of the rotary adjustment performance test showed mean square errors between rotational angles of lateral swing arm I, lateral swing arm II, and rotary swing arm over time and their corresponding theoretical values as 0.45(°)², 0.49(°)², and 0.86(°)², respectively. The mean square error value between rotational angles of all swing arms over time and their corresponding theoretical values throughout entire rotary cycle was 0.64(°)², indicating high stability during overall rotary operation of the machine. The field performance test results showed that the average soil compaction at each measurement point of the embankments constructed along the straight

收稿日期: 2025-01-10 修回日期: 2025-01-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD2001100)和黑龙江省自然科学基金项目(ZL2024E001)

作者简介: 王金峰(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事智能水田农业装备研究,E-mail: jinfeng_w@126.com

sections was no less than 1 085 kPa, and the average straightness was no more than 10.4 mm. At the corner sections, the average soil compaction at each measurement point of the embankments was no less than 1 027 kPa, and the average straightness was no more than 9.39 mm. All results met the agronomic requirements for embankment construction in paddy fields.

Key words: paddy field; construction of embankment machines; multi link mechanism; control system

0 引言

水田田埂全程机械化修筑对于提升筑埂效率、提高筑埂质量具有关键意义^[1-4]。笔直、坚固的田埂,不仅是增强水田蓄水能力的重要保证,也是节约水资源的关键手段,对于推动标准化农田建设具有重大意义^[5]。尽管目前水田修筑埂机已能够完成直线部分的田埂修筑,但在水田田埂拐角处实现连续机械化修筑,依然是亟待解决的主要技术难题之一^[6]。

国外对水田筑埂机具及筑埂技术研究起步较早,其中日本已基本实现水田全程机械化、自动化筑埂作业^[7]。日本研制的筑埂机大多以水田单侧筑埂机为主,随着技术不断创新,筑埂机具智能化、自动化程度不断提高^[8]。日本松山有限公司 CZR351 型水田单侧修筑埂机,基于机电液等多项技术进行机构设计,具备在工作过程中实现旋耕、镇压部件的自动换向功能^[9]。日本小桥工业生产有限公司 XR750F 型筑埂机搭载横向偏移机构,并以无线通讯为控制手段,驾驶员可以通过操控遥控器对镇压部件进行自主调节^[10]。国内对筑埂机具研究工作起步较晚,机具普遍机械化、自动化程度不高^[11]。筑埂机具主要分为水田单侧筑埂机与水田双侧筑埂机 2 种。刘明勇等^[12]设计的水田双侧筑埂机具有偏心振动压实筑埂机构,通过在镇压辊内安装偏心块,使其在工作中受到离心力,实现对田埂振动压实,提高筑埂质量。王金峰等^[13]设计的水田双向修筑埂机,借助电动推杆实现了作业部件 180° 的水平回转,并配备有自动锁定装置。设计的修筑埂机可通过拖拉机倒行方式,对拐角处田埂进行修筑。虽然该筑埂机具在解决拐角处田埂修筑问题上表现出色,但其仍存在一定问题。由于在拐角处修筑过程中,需通过拖拉机倒行方式修筑剩余田埂,需驾驶员不断调整筑埂机作业位置以与已修筑田埂相契合,增大了操作难度,降低了工作效率。

基于上述分析,为提高筑埂全程机械化水平,提高筑埂效率,解决拐角处无法连续机械修筑田埂问题,本文设计基于多连杆回转调节机构的水田回转式单侧修筑埂机。通过控制回转调节机构中步进电动缸伸缩改变旋耕装置及镇压装置作业角度,使其

在水田拐角处始终按直线修筑田埂。

1 整机结构及工作原理

1.1 整机结构

整机结构如图 1 所示,水田回转式单侧筑埂机主要由三点挂接装置、悬挂支撑总成、横向偏移机构、摆臂、回转调节机构、旋耕集土装置、镇压装置、耕深调节装置、尾轮及传动系统组成。

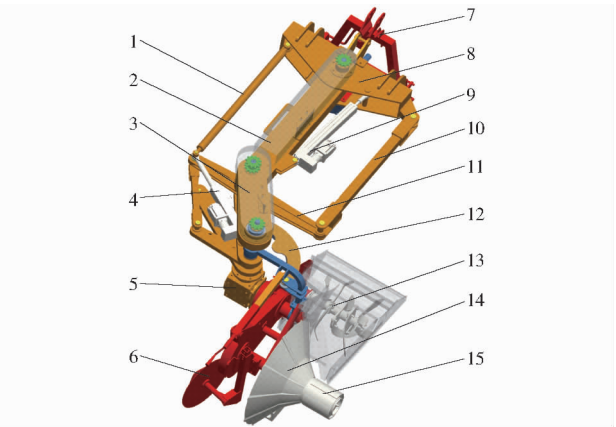


图 1 悬挂式单侧修筑埂整机结构示意图
Fig. 1 Schematic of a suspended single-side ridge building machine

1. 左圆柱连杆 2. 横向摆臂 I 3. 横向摆臂 II 4. 步进电动缸 II 5. 副变速箱 6. 尾轮 7. 三点挂接装置 8. 悬挂支撑总成 9. 步进电动缸 I 10. 右方形连杆 11. 主连杆 12. 大回转连杆 13. 旋耕刀组 14. 侧向镇压羽片 15. 阶梯式镇压辊

整机主要作业部件包括横向偏移机构、回转调节机构、旋耕装置、镇压装置。横向偏移机构直接连接于悬挂支承总成,配备 2 个步进电动缸,控制机构横向摆动。回转调节机构连接于横向偏移机构下方,配备 1 个步进电动缸,控制旋耕、镇压装置作业角度。旋耕装置与镇压装置由回转摆臂固定于整体机具右侧,其中旋耕装置位于前端,负责土壤切削与抛送作业,而位于后端的镇压装置则对经旋耕装置抛送的土壤进行压实,实现筑埂成型。

1.2 传动系统与工作原理

水田回转式单侧修筑埂机传动系统如图 2 所示,拖拉机尾部动力传动轴通过万向联轴器与筑埂机主变速箱直接耦合,实现初级动力传动。经主变速箱调速后,动力通过链传动系统传递至回转调节机构下方的副变速箱,以完成二级动力传递。在此

传动体系中,旋耕装置与镇压装置转速比为 3:2,而拖拉机驱动输入主轴与旋耕装置转速比为 1:1。主传动连接单元通过与轴承铰接的横向偏移机构,确保在调整耕作深度时,整个传动系统运行不受影响。

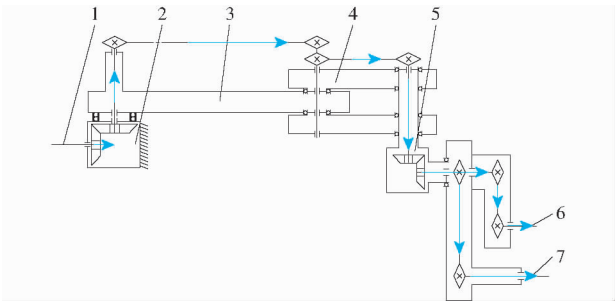


图 2 传动系统示意图

Fig. 2 Schematic of transmission system

1. 主动力输入轴 2. 主变速箱 3. 横向摆臂 I 4. 横向摆臂 II
5. 副变速箱 6. 旋耕装置输入轴 7. 镇压装置输入轴

作业前,根据搭载的不同拖拉机型号,调节步进电动缸 I 和步进电动缸 II 伸缩长度,通过调整横向偏移机构初始横向偏移距离,以保证旋耕装置与镇压装置在拖拉机后轮外侧进行筑埂作业。当拖拉机行驶至水田拐角处时,由于拖拉机及筑埂机自身长度,导致无法继续沿直线修筑田埂,此时通过控制步进电动缸伸缩使拖拉机在转弯的同时,旋耕装置与镇压装置依旧能够直线向前作业,当拖拉机完成转弯后,停车筑埂作业,继续调节步进电动缸伸缩完成剩余部分田埂修筑工作。

2 关键装置设计

2.1 旋耕装置

旋耕装置作为主要触土作业部件,其集土性能是影响筑埂质量的关键^[14]。旋耕装置由旋耕刀组和旋耕刀轴组成^[15-17],结构如图 3 所示。在旋耕作业过程中,取土弯刀最先与地面土壤产生接触,负责对位于取土区域的土壤及杂草执行切割作用,并将其输送至抛土区域。随后,抛土弯刀对输送至该区域的土壤执行二次旋切处理,并将处理后的土壤向侧后方挡土罩壳内抛送,以实现土壤集中汇聚。切型弯刀主要对旧土壤进行旋切加工,形成阶梯状断面土层,此操作有利于减少旋耕作业过程中遭遇的阻力,并有效提高碎土效率,为镇压装置筑埂成型提供便利^[18]。参照文献[18]确定取土弯刀、抛土弯刀及切型弯刀回转半径为 270、230、145 mm。

2.2 镇压装置

镇压装置由侧向镇压羽片和阶梯式镇压辊组成^[19],结构如图 4 所示。侧向镇压羽片由 10 个尺寸、形状相同的弹性羽片以阶梯式排列方式安装在镇压辊筒边缘圆周上,可有效降低土壤附着性,提升

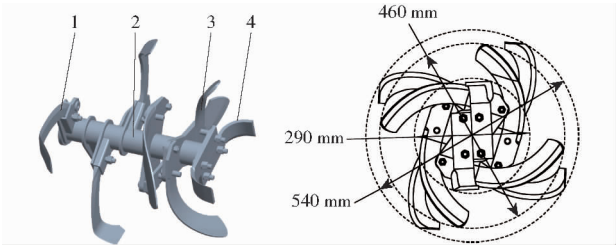


图 3 旋耕装置

Fig. 3 Schematic of rotary tillage device

1. 取土弯刀 2. 旋耕刀轴 3. 抛土弯刀 4. 切型弯刀

装置耐磨性,且在高速旋转过程起到振动打击压实的作用。在作业过程中,弹性羽片与镇压辊筒协同作用,对旋耕装置汇集到挡土罩壳内的土壤施加推压夯实,从而形成坚实田埂^[20]。结合农艺要求,设计弹性羽片和阶梯式镇压辊结构参数如表 1 所示。

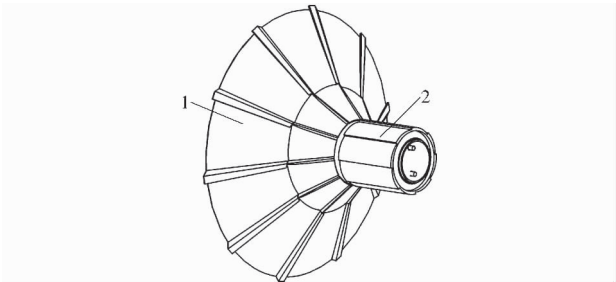


图 4 镇压装置

Fig. 4 Schematic of suppression device

1. 叠加式弹性羽片 2. 阶梯式镇压辊

表 1 弹性羽片与阶梯式镇压辊设计参数

Tab. 1 Design parameters of elastic blades and stepped compression rollers

参数	数值
镇压辊筒外径/mm	180
镇压辊筒长度/mm	400
镇压辊筒厚度/mm	4
镇压辊筒阶梯高度/mm	5
镇压辊筒阶梯个数	8
弹性羽片外圆直径/mm	800
弹性羽片厚度/mm	4
弹性羽片数量	10
单个弹性羽片弯折角度/(°)	150

2.3 多连杆回转调节机构

多连杆回转调节机构由横向偏移机构和回转调节机构组成,通过两机构协调配合解决水田拐角处田埂连续修筑的问题。整体结构如图 5 所示,主要由悬挂支撑总成、左圆柱连杆、横向摆臂 I、主连杆、步进电动缸 III、步进电动缸 II、小连杆、右方形连杆、步进电动缸 I、横向摆臂 II 和大回转连杆等组成。

作业前通过调节步进电动缸 I 和步进电动缸 II 伸缩长度控制机具横向偏移,确保筑埂机具可适应不同农田作业环境,提高机具适用性。横向偏移机

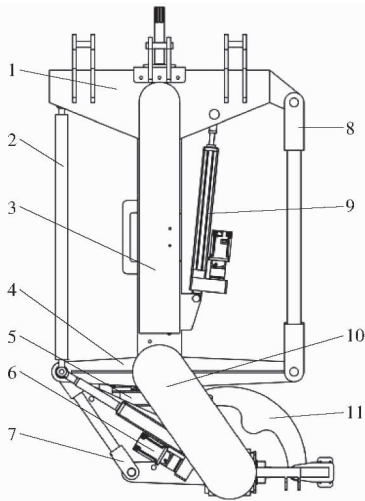


图5 多连杆回转调节机构示意图

Fig. 5 Schematic of multi link rotary adjustment mechanism

1. 悬挂支撑总成 2. 左圆柱连杆 3. 横向摆臂 I 4. 主连杆
5. 步进电动缸 III 6. 步进电动缸 II 7. 小连杆 8. 右方形连杆
9. 步进电动缸 I 10. 横向摆臂 II 11. 大回连连杆

构可确保在前行作业时,拖拉机外侧车轮不会行驶在旧田埂上;在对侧田埂修筑时,操作员可在拖拉机驾驶舱内对筑埂设备进行微调,以确保旋耕装置和压实装置能精准、迅速地对准已修筑的田埂另一侧,减少因拖拉机移动而调节作业部件次数,提高作业效率。

2.3.1 横向偏移机构

横向偏移机构采取双平行四边形上下共边的结构进行设计。每个四边形内置 1 个步进电动缸,通过调节其伸缩长度改变平行四边形横向偏移距离,以达到在不改变作业部件作业角度的同时控制作业部件横向摆动。由于筑埂机作业时需要搭载在大功率拖拉机上,因此首先需明确拖拉机转弯轨迹。

拖拉机转弯时,左、右前轮转向角不相等,满足阿克曼转向理论^[21-23]。结合拐角处田埂位置,绘制拖拉机拐角处转弯轨迹简图,如图 6 所示。

在拖拉机转弯筑埂作业时,采用最大转向角度转弯,能够将后悬挂筑埂机位置尽可能靠近田埂边界,进而缩短筑埂机各连杆长度,从而提升机具整体稳定性。以拐角处相互垂直 2 条田埂为横纵轴建立直角坐标系。由图 6 几何关系可知

$$R_{\min} = \sqrt{\left(\frac{L}{\sin\varphi_R} + a\right)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad (1)$$

$$r = \sqrt{\left(\frac{L}{\tan\varphi_R} - \frac{a_1}{2}\right)^2 + l_1^2} \quad (2)$$

$$l = \sqrt{a^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2} \cos\left(\varphi_R - \arctan \frac{D}{2a}\right) + \frac{a_1}{2} \quad (3)$$

式中 l ——拖拉机后轮轮距中心点至右侧边界田埂距离,mm

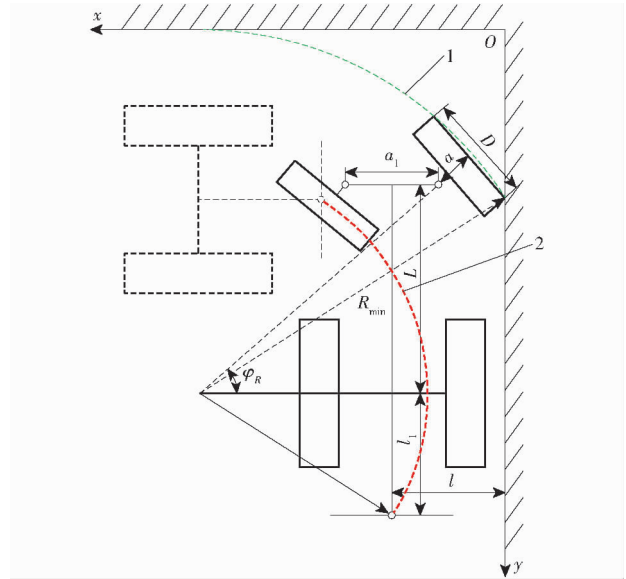


图6 拖拉机水田拐角处转弯轨迹简图

Fig. 6 Schematic of turning trajectory of tractor at corner of paddy field

1. 拖拉机右轮转向轨迹 2. 拖拉机后悬中心运动轨迹

l_1 ——拖拉机后轮轴至悬挂支承总成中心距离,mm

a_1 ——拖拉机前轮轮距,mm

a ——拖拉机前轮转动中心点至前轮外侧距离,mm

L ——拖拉机轴距,mm

D ——拖拉机前轮直径,mm

r ——后悬挂中心点转弯半径,mm

$R_{\min}$ ——最小转弯半径,mm

明确拖拉机在水田拐角处最佳运动轨迹后,需对整体作业装置进行运动轨迹分析。探究各摆臂在拐角处筑埂临界位置,以确定各摆臂长度参数。整体运动轨迹简图如图 7 所示。图中虚线表示机具起始转弯位置,实线表示完成拐角处田埂修筑后拖拉机和筑埂机位置。由图 7 可知,在拖拉机完成转弯后,拖拉机后三点悬挂中心至铰连中心点 G 运动轨迹垂线距离为定值,可得

$$L_{AE} \sin\theta_1 + L_{EG} \sin\theta_3 = \sqrt{r^2 - l_1^2} + l - l_1 - l_2 \quad (4)$$

式中 L_{AE} ——横向摆臂 I 长度,mm

L_{EG} ——横向摆臂 II 长度,mm

θ_1 ——横向摆臂 I 与悬挂支撑总成夹角, (°)

θ_3 ——横向摆臂 II 与主连杆夹角, (°)

l_2 ——铰连中心点 G 至田埂距离,mm

在完成拐角处筑埂时,摆臂 I 和摆臂 II 位置如图 7 中蓝色线所示。为减少各杆件长度,提高整体机具稳定性,使摆臂 I 和摆臂 II 在此时共线。在三角形 AGH 中可得

$$(L_{AE} + L_{EG})^2 = L_{GH}^2 + L_{AH}^2 \quad (5)$$

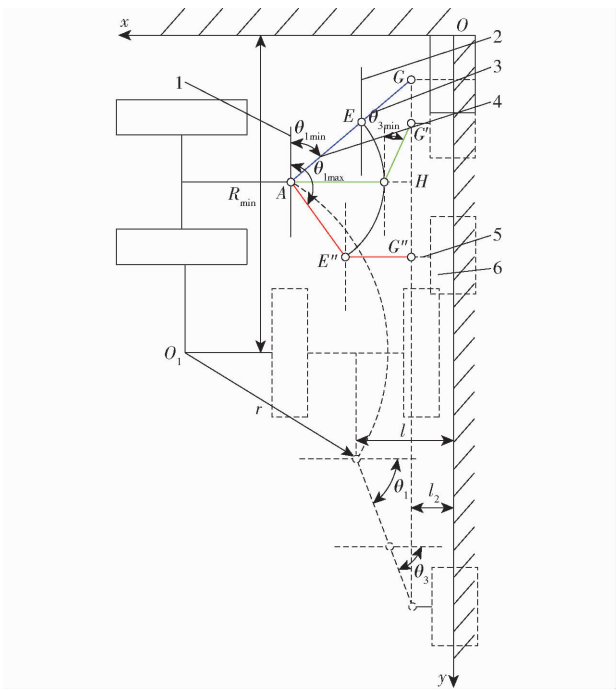


图 7 水田拐角处整体转弯轨迹简图

Fig. 7 Diagram of overall turning trajectory at corner of paddy field

1. 悬挂支撑总成 2. 主连杆 3. 横向摆臂 II 4. 横向摆臂 I
5. 回转摆臂 6. 旋耕镇压装置

式中 L_{GH} ——三角形 AGH 中 GH 长度, mm

L_{AH} ——三角形 AGH 中 AH 长度, mm

结合图 7 可得

$$(L_{AE} + L_{EG})^2 = (R_{\min} - \sqrt{r^2 - l_1^2} - l_2)^2 + (\sqrt{r^2 - l_1^2} + l - l_1 - l_2)^2 \quad (6)$$

分析式(4),可得当 $\sin\theta_3$ 取最小值时即 θ_3 取最小角度时, $\sin\theta_1$ 有最大值为 1,即 θ_1 为 90° 。此时横向摆臂 I 和横向摆臂 II 位置如图 7 绿色线所示。为留出足够的各连杆安装距离,取 $\theta_{3\min}$ 为 20° 。以纽荷兰 110-90 型拖拉机各参数进行设计,经实际测量得 $D = 1\,200\text{ mm}$ 、 $a_1 = 1\,000\text{ mm}$ 、 $a = 600\text{ mm}$ 、 $L = 2\,300\text{ mm}$ 、 $\varphi_R = 42^\circ$ 、 $l_1 = 1\,100\text{ mm}$ 。根据镇压装置参数确定 $l_2 > 500\text{ mm}$,为给回转摆臂留出安装距离,取 $l_2 = 800\text{ mm}$ 。将已知参数代入式(4)、(6)联立求得 $L_{AE} = 1\,260\text{ mm}$ 、 $L_{EG} = 672\text{ mm}$ 。即横向摆臂 I 长度为 $1\,260\text{ mm}$,横向摆臂 II 长度为 672 mm 。

确定横向摆臂 I 和横向摆臂 II 长度后结合图 7 几何关系可得

$$\theta_{1\min} = \arcsin \frac{L_{AH}}{L_{AG}} \quad (7)$$

$$\theta_{1\max} - 90^\circ = \arccos \frac{L_{AH} - L_{EG}}{L_{AE}} \quad (8)$$

将已知参数代入式(7)、(8)得 $\theta_{1\min} = 50.43^\circ$, $\theta_{1\max} = 139.55^\circ$ 。

为确定步进电动缸安装位置,需对横向偏移机构在临界位置运动过程进行分析。由于在修筑埂机作业过程中,旋耕装置入土深度由拖拉机三点悬挂系统和耕深调节装置共同控制。确定入土深度后,机具作业高度将保持恒定。因此,多连杆回转调节机构运动方式为平面运动,且该机构实际为平面机构,因此将其简化为平面问题进行分析(图 8)。

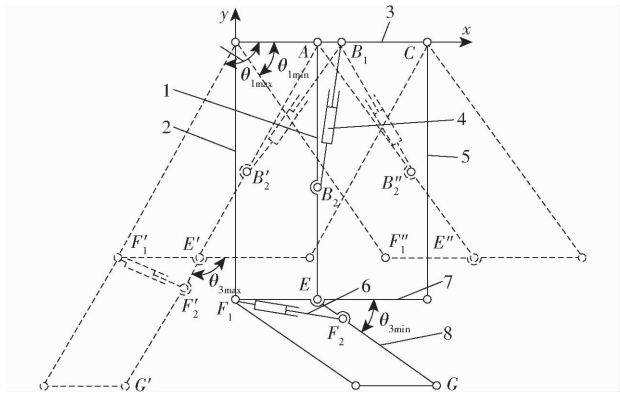


图 8 偏移机构简图

Fig. 8 Diagram of offset mechanism

1. 横向摆臂 I 2. 左圆柱连杆 3. 悬挂支撑总成 4. 步进电动缸 I 5. 右方形连杆 6. 主连杆 7. 步进电动缸 II 8. 横向摆臂 II

其中 $A, B_1, C, B_2, E, F_1, F_2$ 为各铰连点, $B_2'', B_2', E', E'', F_1', F_1'', F_2', G'$ 为取极限位置时各铰连点所处位置。根据大型拖拉机上拉杆位置设计悬挂支撑总成总长度为 950 mm 。为留出步进电动缸 I 安装距离,设计 l_{AC} 大于 l_{OA} ,最终确定 l_{OA} 为 400 mm , l_{AC} 为 550 mm 。选用深圳市雷赛智能控制股份有限公司 86CM120 型大扭矩混合式步进马达,其最大扭矩 $12\text{ N}\cdot\text{m}$ 。搭载聚鼎 DDA80 系列电动缸,其中步进电动缸 I 最小安装距 680 mm ,行程 230 mm ;步进电动缸 II 最小安装距 330 mm ,行程 230 mm ;步进电动缸 III 最小安装距 480 mm ,行程 230 mm 。

当 θ_1 取最小值时,在 $\triangle AB_1B_2''$ 中,由余弦定理可得

$$\cos\theta_{1\min} = \frac{l_{AB_1}^2 + l_{AB_2''}^2 - l_{B_1B_2''}^2}{2l_{AB_1}l_{AB_2''}} \quad (9)$$

当 θ_1 取最大值时,在 $\triangle AB_1B_2'$ 中,由余弦定理可得

$$\cos\theta_{1\max} = \frac{l_{AB_1}^2 + l_{AB_2'}^2 - l_{B_1B_2'}^2}{2l_{AB_1}l_{AB_2'}} \quad (10)$$

将步进电动缸 I 最小安装距高 680 mm 作为 $l_{B_1B_2'}$,设计步进电动缸 I 一端安装在距点 A 右侧 200 mm 处,即 l_{AB_1} 为 200 mm 。代入式(9)求得 $l_{AB_2''}$ 为 792 mm 。将 l_{AB_1} 和 $l_{AB_2''}$ 代入式(10)求得 $l_{B_1B_2'}$ 为 826 mm ,小于步进电动缸 I 最大安装距离 (910 mm)。最终

确定步进电动缸 I 一端安装距点 A 右侧 200 mm 处,另一端安装在距点 A 下方 792 mm 处。

当 θ_3 取最小值时,在 $\triangle EF_1F_2$ 中,由余弦定理可得

$$\cos\theta_{3\min} = \frac{l_{EF_2}^2 + l_{EF_1}^2 - l_{F_1F_2}^2}{2l_{EF_2}l_{EF_1}} \quad (11)$$

筑埂机随动筑埂阶段,为提高筑埂稳定性,使横向摆臂 I 回转角等于横向摆臂 II 回转角度,即 $\theta_1 = \theta_3$,因此以 $\theta_{1\max} = \theta_{3\max}$ 确定横向摆臂 II 安装位置。在 $\triangle E'F_1'F_2'$ 中,由余弦定理可得

$$\cos(180^\circ - \theta_{3\max}) = \frac{l_{E'F_1'}^2 + l_{E'F_2'}^2 - l_{F_2'F_1'}^2}{2l_{E'F_1'}l_{E'F_2'}} \quad (12)$$

将步进电动缸 II 最小安装距离 330 mm 作为 $l_{F_1'F_2'}$ 代入式 (12) 中,求得 $l_{E'F_2'}$ 为 100 mm。将 l_{EF_1} 和 l_{EF_2} 代入式 (11) 可得 $l_{F_1F_2}$ 为 495 mm,小于步进电动缸 II 最大安装距离 (530 mm)。最终确定步进电动缸 II 安装在距点 E 100 mm 处。完成横向偏移机构关键部件参数设计。

2.3.2 回转调节机构

回转调节机构示意图如图 9 所示。主要由步进电动缸 III、回转支承臂、大回转连杆、小回转连杆和回转摆臂组成。

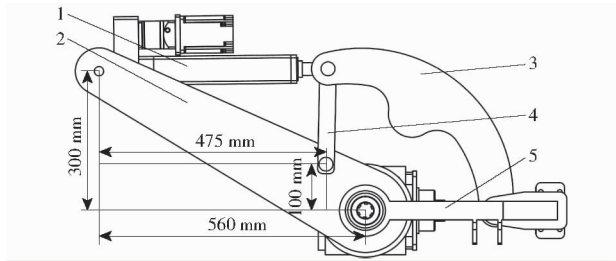


图 9 回转调节机构示意图

Fig. 9 Schematic of rotary adjustment mechanism

1. 步进电动缸 III 2. 回转支承臂 3. 大回转连杆 4. 小回转连杆 5. 回转摆臂

为确定大回转连杆安装位置,需对回转调节机构进行运动学分析。与偏移机构相同,回转机构运动也为平行于地面的平面运动,因此回转调节运动简图如图 10 所示。以铰连点 G_1 为中心原点建立平面直角坐标系。其中 A_1 、 B 、 C_1 、 D_1 为回转调节 90° 后各杆件铰连位置点。 θ_1 为步进电动缸 III 回转角, θ_2 为小回转连杆回转角, θ_4 为大回转连杆回转角, θ_5 为旋耕筑埂部件回转角。

根据图 10 中各杆件关系可得在 $\triangle A_1BD_1$ 中机构封闭矢量方程式为

$$\overrightarrow{A_1B} + \overrightarrow{BD_1} = \overrightarrow{A_1D_1} \quad (13)$$

同理可得出四边形 $BD_1G_1C_1$ 中的机构封闭矢量方程为

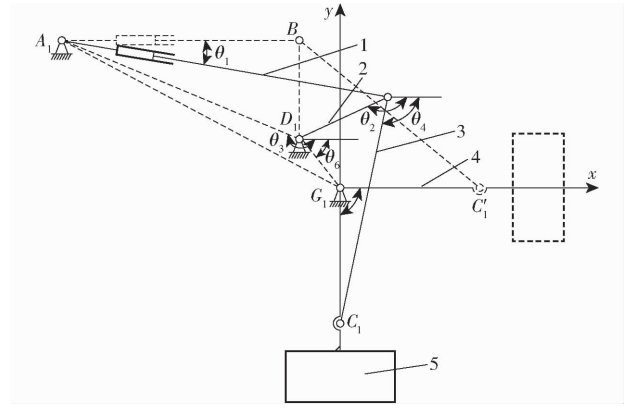


图 10 回转调节机构简图

Fig. 10 Schematic of rotary adjustment mechanism

1. 步进电动缸 III 2. 小回转连杆 3. 大回转连杆 4. 回转摆臂 5. 旋耕筑埂部件

$$\overrightarrow{BD_1} + \overrightarrow{D_1G_1} + \overrightarrow{G_1C_1} = \overrightarrow{BC_1} \quad (14)$$

将矢量方程式 (13)、(14) 转换为指数矢量方程式可得

$$L_{A_1B}e^{i\theta_1} + L_{BD_1}e^{i\theta_2} = L_{A_1D_1}e^{i\theta_3} \quad (15)$$

$$L_{BD_1}e^{i\theta_2} + L_{D_1G_1}e^{i\theta_6} + L_{G_1C_1}e^{i\theta_5} = L_{BC_1}e^{i\theta_4} \quad (16)$$

式中 L_{A_1B} ——步进电动缸 III 长度, mm

L_{BD_1} ——小回转连杆长度, mm

L_{BC_1} ——小回转连杆长度, mm

$L_{A_1D_1}$ ——铰连点 A_1 至 D_1 距离, mm

$L_{D_1G_1}$ ——铰连点 D_1 至 G_1 距离, mm

$L_{C_1G_1}$ ——铰连点 C_1 至 G_1 距离, mm

θ_3 —— A_1D_1 与 x 轴夹角, ($^\circ$)

θ_6 —— D_1G_1 与 x 轴夹角, ($^\circ$)

应用欧拉公式 $e^{i\theta} = \cos\theta + i\sin\theta$ 将式 (15)、(16)

实部和虚部分离为解析式可得

$$\begin{cases} L_{A_1B}\sin\theta_1 + L_{BD_1}\sin\theta_2 = -L_{A_1D_1}\sin\theta_3 \\ L_{A_1B}\cos\theta_1 = -L_{BD_1}\cos\theta_2 - L_{A_1D_1}\cos\theta_3 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} L_{BC_1}\sin\theta_4 = L_{G_1C_1}\sin\theta_5 + L_{G_1D_1}\sin\theta_6 + L_{BD_1}\sin\theta_2 \\ L_{BC_1}\cos\theta_4 - L_{BD_1}\cos\theta_2 = L_{G_1C_1}\cos\theta_5 + L_{G_1D_1}\cos\theta_6 \end{cases} \quad (18)$$

对式 (17) 进行化简可得

$$L_{A_1B} = -L_{A_1B}\cos(\theta_2 - \theta_3) + \sqrt{L_{BD_1}^2 - L_{A_1D_1}^2\sin^2(\theta_2 - \theta_3)} \quad (19)$$

进一步推导可得

$$\theta_2 = \theta_3 + \arccos \frac{L_{A_1B}^2 - L_{BD_1}^2 - L_{A_1D_1}^2}{2L_{BD_1}L_{A_1D_1}} \quad (20)$$

求解方程式 (18) 可得

$$A\sin\theta_5 + B\cos\theta_5 + C = 0 \quad (21)$$

其中 $A = 2(L_{G_1C_1}L_{G_1D_1}\sin\theta_6 + L_{G_1C_1}L_{BD_1}\sin\theta_2)$

$B = 2(L_{G_1C_1}L_{G_1D_1}\cos\theta_6 + L_{G_1C_1}L_{BD_1}\cos\theta_2)$

$$C = L_{G_1C_1}^2 + L_{G_1D_1}^2 + L_{BD_1}^2 - L_{BC_1}^2 + 2L_{G_1D_1}L_{BD_1} \cdot (\sin\theta_6 \sin\theta_2 + \cos\theta_6 \cos\theta_2)$$

最终得旋耕筑埂部件回转角度与步进电动缸回转角度关系为

$$\tan \frac{\theta_5}{2} = \frac{A \pm \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{B - C} \quad (22)$$

将已知参数及步进电动缸Ⅲ最小安装距离 480 mm 代入式(22), 最终确定回转摆臂长为 284 mm 即大回转连杆一端安装在距铰连点 G_1 右侧 284 mm 处。步进电动缸Ⅲ最大伸缩量 668 mm 小于 680 mm, 满足要求。

回转调节机构作为直接控制旋耕筑埂部件作业角度关键机构, 其回转稳定性是保证所筑田埂具有较高直线度与坚实度的关键因素, 因此需对回转调节机构进行力学分析, 探究步进电动缸能否提供稳定扭矩, 保证回转调节稳定性。随着拖拉机转弯, 旋耕筑埂部件顺时针转动至 90° , 步进电动缸Ⅲ不断伸长, 机构稳定性逐渐降低, 因此以最终临界位置进行受力分析。对杆 G_1C_1 进行分析, 如图 11 所示, 对点 G_1 取矩可得

$$F_{C_1B} \sin\theta l_{G_1C_1} - Pl_{G_1P} = 0 \quad (23)$$

对式(23)化简可得

$$F_{C_1B} = \frac{Pl_{G_1P}}{\sin\theta l_{G_1C_1}} \quad (24)$$

式中 F_{C_1B} ——杆 C_1B 上的力, N
 P ——旋耕筑埂部件作业时所受阻力, N
 θ ——杆 C_1B 和杆 C_1G_1 的夹角, $(^\circ)$

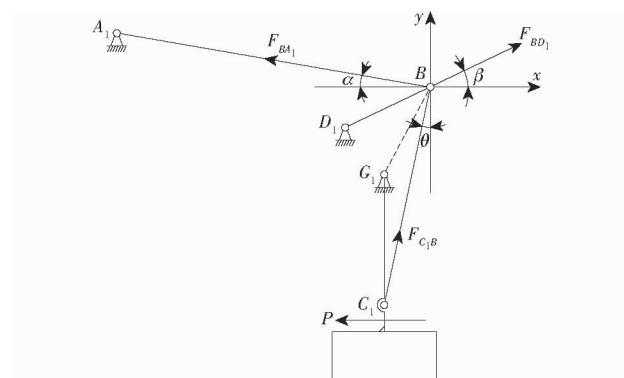


图 11 受力分析

Fig. 11 Stress analysis diagram

对点 B 进行分析, 如图 11 所示。以点 B 为坐标原点建立平面直角坐标系可得

$$F_{BA_1} \cos\alpha + F_{C_1B} \sin\theta + F_{BD_1} \cos\beta = 0 \quad (25)$$

$$F_{BA_1} \sin\alpha + F_{C_1B} \cos\theta + F_{BD_1} \sin\beta = 0 \quad (26)$$

联立式(25)、(26)可得

$$F_{BA_1} \sin(\alpha + \beta) = F_{C_1B} \cos(\theta + \beta) \quad (27)$$

将式(24)代入式(27)整理得

$$F_{BA_1} = \frac{Pl_{G_1P} \cos(\theta + \beta)}{\sin\theta l_{C_1G_1} \sin(\alpha + \beta)} \quad (28)$$

式中 F_{BA_1} ——步进电动缸Ⅲ上的力, N

F_{BD_1} ——小回转连杆上的力, N

α ——步进电动缸Ⅲ与 x 轴夹角, $(^\circ)$

β ——小回转连杆与 x 轴夹角, $(^\circ)$

步进电动缸主要由步进电机、减速齿轮、滚珠丝杠、缸体等部分组成^[24]。步进电动缸推力与步进电机输出转矩间的关系为

$$T = \frac{FS}{2\,000\pi\eta} \quad (29)$$

式中 T ——步进电机输出转矩, N·m

S ——丝杠导程, mm

η ——丝杠传动效率

F ——所受合力, N

在实际作业中为保证回转调节过程安全可靠, 实际电动机转矩为

$$T_1 = C_1 C_2 T \quad (30)$$

式中 T_1 ——实际步进电机输出转矩, N·m

C_1 ——电气安全系数

C_2 ——负载安全系数

根据回转调节机构设计参数可得 $l_{G_1P} = 332$ mm, $l_{G_1C_1} = 284$ mm, $\theta = 27.7^\circ$, $\alpha = 9.88^\circ$, $\beta = 25.46^\circ$ 。根据文献[25]可得旋耕筑埂部件作业时所受水平阻力 $P = 1\,050$ N。根据所选步进电机型号可知 $S = 4$, $\eta = 0.5$, 将已知参数代入式(29)可得步进电动缸输出最大转矩为 2.64 N·m。根据实际工作情况, 电源输出电压在负载耗电量增加的情况下呈现降低趋势。因此, 为确保提供足够的输出电压, 将电气安全系数设定为 2。同时, 考虑到实际作业中存在机具不平稳、摩擦力、旋耕筑埂部件阻力变化等因素, 将负载安全系数 C_2 定为 2, 将 T 、 C_1 和 C_2 代入式(30)可求出实际步进电机所提供最大转矩需大于 10.56 N·m, 小于所选择的步进电机最大稳定转矩 12 N·m, 设计满足要求。

3 控制系统设计

3.1 硬件设计

水田回转式单侧筑埂机在拐角处的田埂修筑工作, 是通过多连杆回转调节机构内 3 个步进电动缸的协同工作, 精确控制作业部件回转角度, 以确保其沿直线路径进行田埂修筑。因此, 修筑笔直且坚实的田埂, 须实现对步进电动缸精准且平稳控制。设计的驱动步进电机控制系统遵循模块化的设计思路, 包括主控单元、供电单元、监测单元、通信单元以及执行单元^[25-26]。

控制系统硬件组成如图 12 所示,主要包括主控制器 STC89C52RC 型单片机,位置信息采集机械限位开关、HC-05 型嵌入式蓝牙无线通信单元、24 V 铅酸电池、升压变压器、降压变压器、雷赛智能 MDA860H 型数字式两相步进电机驱动器、86 步进电机。系统工作原理为:根据拖拉机起始作业位置

及筑埂地点,在人机交互界面调节步进电动缸 I,步进电动缸 II 伸缩长度,并选择直线筑埂模式。当行驶至拐角处时,选择随动筑埂模式,当拖拉机完成 90°转弯后,选择停车筑埂模式,完成拐角处剩余田埂修筑作业。各单元之间通过 HC-05 型嵌入式蓝牙单元进行通信。

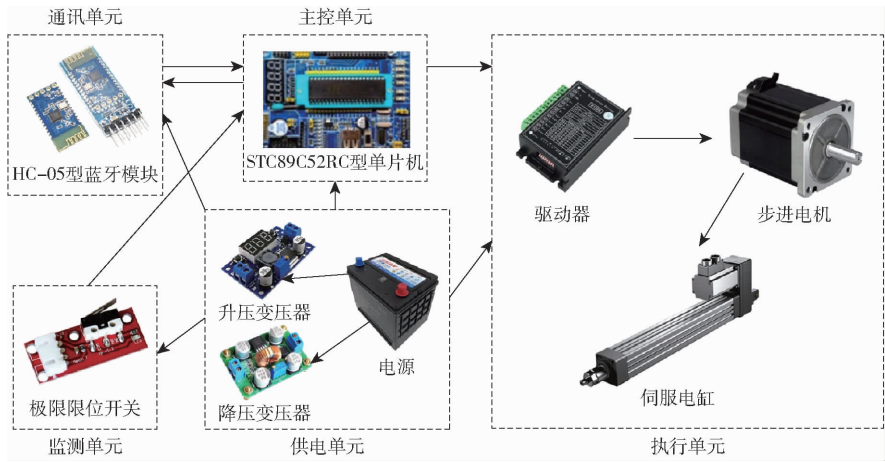


图 12 控制系统硬件组成

Fig. 12 Hardware composition of control system

3.2 软件设计

根据控制系统整体模块化设计理念,对不同模块进行程序设计^[27-28]。其中单片机主控制程序主要由系统初始化程序、执行模块中步进电机执行程序和串口程序、位置信息采集处理程序等组成。蓝牙无线通信程序包括执行命令程序及信息反馈程序。

单片机主控制程序结构图如图 13 所示。其中包括直线筑埂模式 (Model_1)、随动筑埂模式 (Model_2) 和停车筑埂模式 (Model_3)。“Key_1”、“Key_2”、“Key_3”分别为第 I、第 II、回转摆臂机械限位开关判断标志变量。“Offset”、“Turn”和“String”分别为横向偏移机构控制、回转调节机构控制和字符串选择的判断标志变量。“Dirmotor_1”、“Dirmotor_2”和“Dirmotor_3”分别为步进电机 I、II 和 III 回转调节执行标志变量。作业时,在人机交互界面通过虚拟按键分别对“Offset”与“Turn”进行赋值选择筑埂模式,通过蓝牙无线通信单元将命令数据传送至单片机,单片机解析数据中的筑埂模式,对 3 个步进电动缸进行控制,实现不同筑埂模式下多连杆回转调节。

4 验证试验

4.1 转向性能试验

多连杆回转调节机构回转调节精度和稳定性,是实现拐角处田埂标准修筑的关键。通过比较在拐角处筑埂各个阶段中,横向摆臂与回转摆臂的实际

回转角度与预期回转角度的偏差,评估控制系统整体精准性和稳定性。试验时,选用 John Deere 公司 904 型拖拉机作为驱动设备。利用拖拉机三点悬挂机构将整个修筑埂机悬挂在空中,确保其与地面保持水平且在进行回转调节时避免与地面产生碰撞。试验过程如图 14 所示。

由于回转调节作业时,筑埂机悬挂支承总成相对与多连杆回转调节机构相对位置保持不变,因此选择悬挂支承总成作为参考,分别标记横向摆臂 I、II 和回转摆臂与悬挂支承总成夹角为 ϕ_1 、 ϕ_2 和 ϕ_3 作为各摆臂回转角。标记位置如图 15 所示。

在回转调节性能试验时,将 HDR-CX450 型数码相机定位于筑埂机具中心正下方。为了模拟实际作业条件,设拖拉机前进速度为 0.8 km/h,利用 Creo5.0 软件对拐角处筑埂过程进行运动学仿真,以此计算回转调节作业总耗时为 43 s,分为随动筑埂阶段 18 s 和停车筑埂阶段 25 s。在整个试验过程,每 0.5 s 截取图像,共获得 86 幅用于计算分析的图像。选用均方误差作为多连杆回转调节控制系统控制性能评价指标。对试验数据进行处理,各阶段回转角度如图 16 所示。

计算随动筑埂阶段和停车筑埂阶段横向摆臂 I 随时间变化的回转角度与相对应的理论值之间均方误差分别为 0.50、0.41(°)²,整个回转周期均方误差为 0.45(°)²;筑埂各阶段横向摆臂 II 随时间变化的回转角度与理论值之间均方误差分别为 0.39、0.55(°)²,整个回转周期均方误差为 0.49(°)²;筑埂

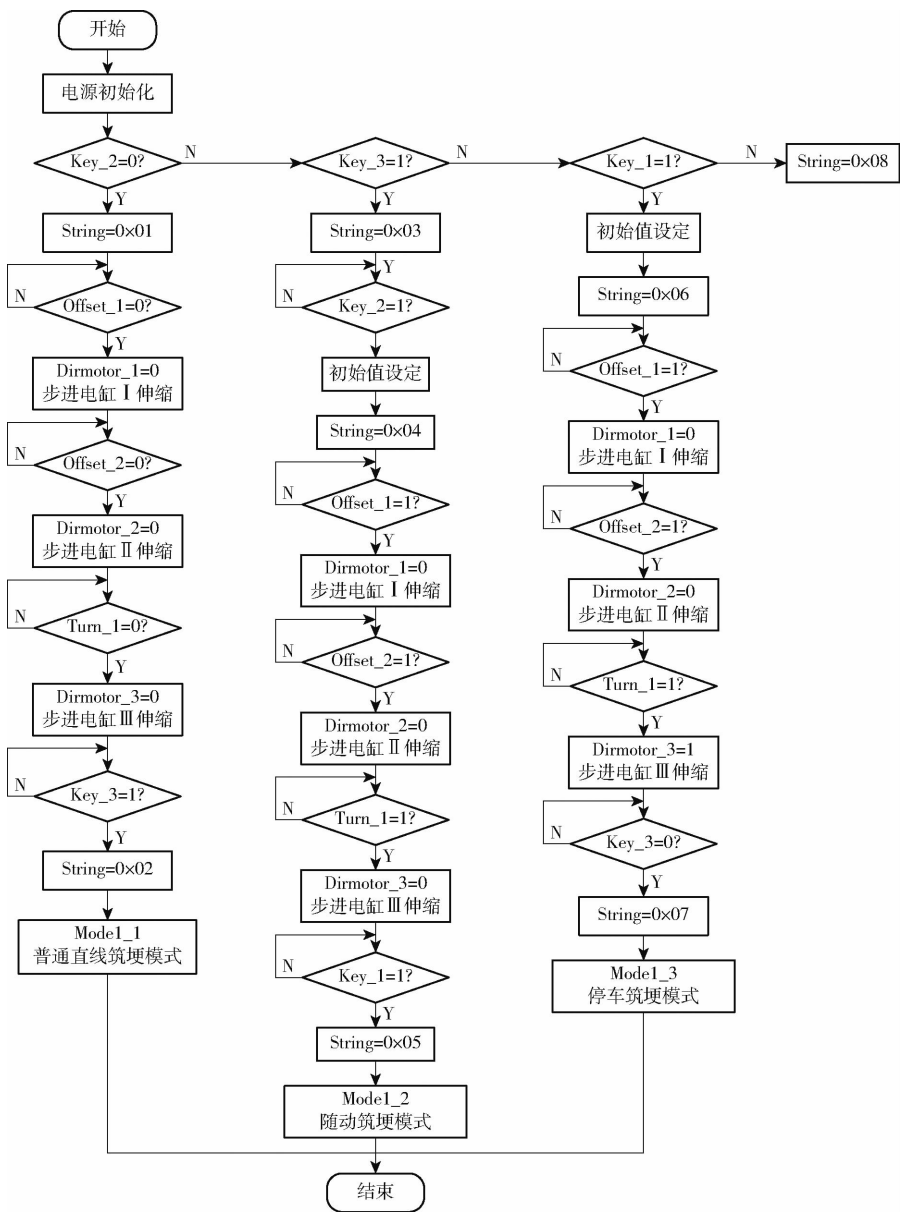


图 13 主控制程序流程图

Fig. 13 Main control program flowchart



图 14 回转调节性能试验

Fig. 14 Rotary adjustment performance test diagram

各阶段回转摆臂随时间变化的回转角度与相对应的理论值之间均方误差分别为 $0.90, 0.85(^{\circ})^2$, 整个回转周期均方误差为 $0.86(^{\circ})^2$; 整个回转周期内, 各摆臂随时间变化的回转角度与相对应的理论值之间均方误差为 $0.64(^{\circ})^2$ 。结果表明, 在不同阶段和摆臂类型中, 回转角度实际测量值与理论值之间存在一定误差, 但总体上保持在较低水平。多连杆回转调节机构与理论设计所规划的回转调节过程基本吻合,

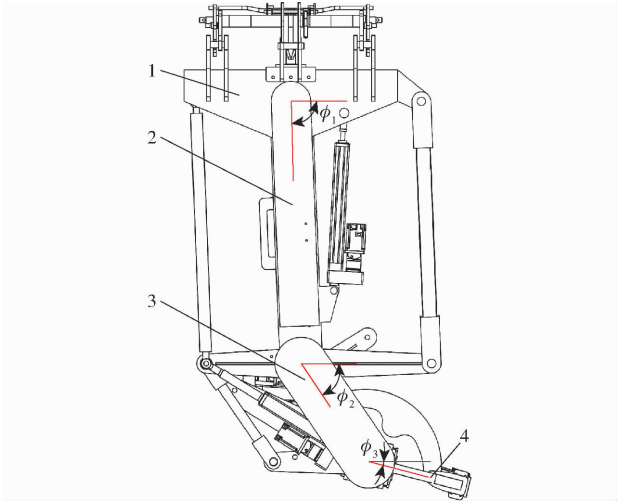


图 15 标记位置

Fig. 15 Mark position

1. 悬挂支承总成 2. 横向摆臂 I 3. 横向摆臂 II 4. 回转摆臂

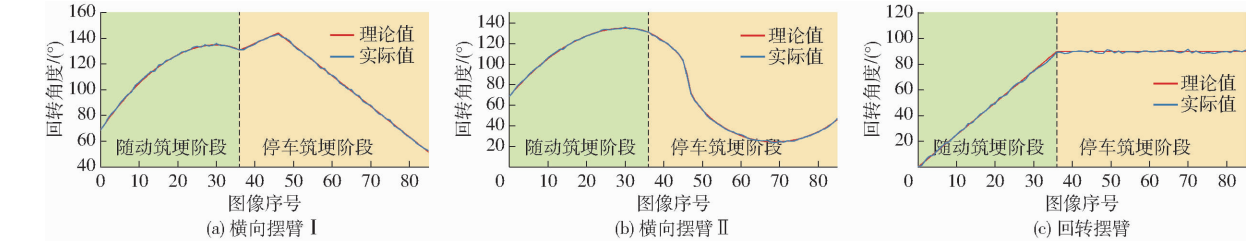


图 16 各摆臂回转角度
Fig. 16 Swivel angles for each arm

控制系统具有较高的控制精度。

4.2 田间验证试验

为了进一步验证水田回转式单侧修筑埂机筑埂性能,于 2024 年 5 月在黑龙江省哈尔滨市东北农业大学试验田进行田间作业性能试验。田间环境温度 16℃,环境相对湿度 60%,风力 2~3 级,田间试验地块土壤坚实度 200~220 kPa,土壤含水率 25%~27%,搭载动力机具为纽荷兰 110-90 型拖拉机。选择田埂直线度与田埂坚实度为检验筑埂性能评价指标。

田间性能试验分为普通直线筑埂试验以及拐角处筑埂试验。普通直线筑埂试验:根据文献[6]可知,拖拉机前进速度和旋耕镇压装置工作转速是影响筑埂性能的主要因素。因此控制拖拉机动力输出轴工作转速为 540 r/min,选择前进速度 0.8、1.0、1.2 km/h。试验时,调整多连杆回转调节机构至 Model_1 普通直线筑埂状态,为保证筑埂所需土壤量调节作业部件作业深度为 200 mm。作业时,前 5 m 区域为启动区,使机具达到稳定的筑埂状态。拐角处筑埂试验:控制拖拉机动力输出轴工作转速为 540 r/min,前进速度为 0.8 km/h。当拖拉机行驶至水田拐角处时,在控制系统人机交互界面选择 Model_2 筑埂模式,此时将方向盘向左侧打满,进行拐角处随动筑埂。当拖拉机完成转弯后,选择 Model_3 筑埂模式,进行停车定点筑埂,完成拐角处剩余田埂修筑任务。共进行 3 组试验,田间试验如图 17 所示。

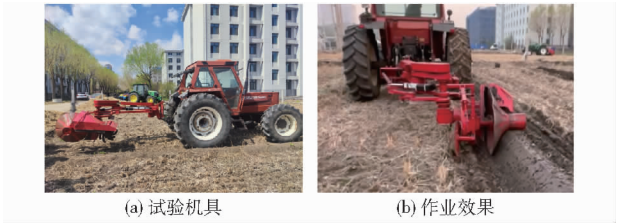


图 17 田间试验
Fig. 17 Field experiment

4.3 试验结果与分析

(1) 田埂直线度

根据拖拉机行驶路线,制定 1 条平直且相同方

向的参考线。选取机具稳定后所筑田埂进行标注,每 1 m 设立 1 个标记点。然后在这些标记点上画 1 条与参考线垂直的直线,记录下各标记点到参考线距离为 d_i ,普通直线筑埂测量结果如表 2 所示。拐角处筑埂测量结果如表 3 所示。

表 2 普通直线筑埂模式田埂直线度测试结果											
Tab.2 Test results of straightness in conventional straight ridge construction mode											
mm											
前进速度/ (km·h ⁻¹)	测试值										平均值 直线度
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1.2	38	25	23	35	41	26	15	10	20	32	26.5 10.04
1.0	25	14	37	26	18	10	16	22	32	30	23.0 8.59
0.8	23	16	32	18	26	14	22	16	20	30	21.7 6.11

表 3 拐角处田埂直线度测试结果											
Tab.3 Test results for straightness of field ridges at corners											
mm											
田埂序号	测试值										平均值 直线度
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	10	15	18	20	22	24	33	35	36	35	25.7 9.93
2	12	13	17	18	21	22	29	35	33	35	23.5 8.87
3	15	11	19	22	27	28	29	33	33	34	21.7 8.02

由表 2、3 可知,当前进速度为 1.2、1.0、0.8 km/h 时所筑田埂直线度为 10.04、8.59、6.11 mm。拐角处所筑田埂直线度为 9.93、8.87、8.02 mm,均满足水田农艺筑埂要求。

(2) 田埂坚实度

在筑埂作业完成后,由于土壤含水率较高,新筑田埂结构尚未稳固,因此待筑埂作业完成 6 h,田埂坚实度趋于稳定后对不同前进速度下所筑田埂进行坚实度测量。测量位置包括田埂顶部、田埂肩部以及田埂侧部。每间隔 50 mm 选择 1 个测量面,测量深度为 100 mm,每条田埂共计测量 30 个样点。依照此测量方式对普通直线筑埂 3 种前进速度下 3 条田埂以及拐角处所筑 3 条田埂进行测量。共测量 180 个样点,计算坚实度变异系数及平均值,测量结果如表 4、5 所示。

如表 4、5 可知,筑埂作业速度的提升会导致所筑田埂坚实度呈下降趋势,同时其坚实度变异系数

表 4 普通直线筑埂模式田埂坚实度测试结果

Tab.4 Test results of embankment firmness for conventional straight-line embankment construction mode

前进速度/ (km·h ⁻¹)	埂顶		埂肩		埂侧	
	坚实度	坚实度	坚实度	坚实度	坚实度	坚实度
	平均值/ kPa	变异系 数/%	平均值/ kPa	变异系 数/%	平均值/ kPa	变异系 数/%
0.8	1 127	5.59	1 922	5.14	2 154	4.95
1.0	1 101	5.66	1 915	5.21	2 134	5.18
1.2	1 085	5.82	1 901	5.43	2 108	5.32

表 5 拐角处田埂坚实度测试结果

Tab.5 Test results of embankment firmness at corners

田埂 序号	埂顶		埂肩		埂侧	
	坚实度	坚实度	坚实度	坚实度	坚实度	坚实度
	平均值/ kPa	变异系 数/%	平均值/ kPa	变异系 数/%	平均值/ kPa	变异系 数/%
1	1 027	6.71	1 926	5.90	2 028	5.57
2	1 134	7.18	1 830	6.71	2 008	6.29
3	1 140	6.02	1 919	5.88	2 105	5.42

也随之增大。在对同一田埂相同截面测量中,发现埂侧坚实度高于埂肩,而埂肩坚实度又高于埂顶,其中埂肩与埂侧坚实度相差较小,但均显著高于埂顶坚实度。拐角处所筑田埂坚实度小于直线部分所筑田埂,田埂坚实度变异系数也比直线部分较高。这是因为在拐角处田埂修筑时,需要 3 个步进电动缸进行伸缩调整,使机具作业时稳定性降低。结果显示,普通直线筑埂模式下田埂整体埂顶坚实度不低于 1 085 kPa,埂肩坚实度不低于 1 901 kPa,埂侧坚实

度不低于 2 108 kPa。坚实度变异系数均不大于 5.82%。拐角处田埂整体埂顶坚实不低于 1 027 kPa,埂肩坚实度不低于 1 830 kPa,埂侧坚实度不低于 2 008 kPa。坚实度变异系数均不大于 7.18%。满足水田农艺筑埂要求。

5 结论

(1)设计了一种基于多连杆回转调节机构的水田回转式单侧修筑埂机。该机具能够通过对内部 3 个步进电动缸伸缩量进行控制,从而调整旋耕筑埂部件作业角度,实现在水田拐角处连续机械修筑田埂。

(2)结合拖拉机转弯轨迹及多连杆回转调节机构运动学模型,确定关键运动部件横向摆臂Ⅰ、横向摆臂Ⅱ和回转摆臂长度分别为 1 260、672、284 mm。并确定了各步进电动缸安装距及安装位置。完成多连杆回转调节机构整体设计。

(3)设计了多连杆回转调节控制系统,通过模块化设计理念实现对步进电动缸精准控制,保证回转调节过程准确性与稳定性。

(4)回转调节试验结果表明,整个回转周期内,各摆臂随时间变化的回转角度与相对应的理论值之间的均方误差为 0.64(°)²,具有较高稳定性。田间试验结果表明,直线部分所筑田埂各测量位置坚实度平均值不小于 1 085 kPa,直线度平均值不大于 10.40 mm;拐角处所筑田埂各测量位置坚实度平均值不小于 1 027 kPa,直线度平均值不大于 9.39 mm,均满足水田筑埂农艺要求。

参 考 文 献

[1] 李泽华,马旭,李秀昊,等. 水稻栽植机械化技术研究进展[J]. 农业机械学报,2018,49(5):1-20.
LI Zehua, MA Xu, LI Xiuhao, et al. Research progress of rice transplanting mechanization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(5):1-20. (in Chinese)

[2] 左兴健,武广伟,付卫强,等. 风送式水稻侧深精准施肥装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(3):14-21.
ZUO Xingjian, WU Guangwei, FU Weiqiang, et al. Design and experiment on air-blast rice side deep precision fertilization device[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(3):14-21. (in Chinese)

[3] WANG Jinfeng, WANG Zhentao, WENG Wuxiong, et al. Development status and trends in side-deep fertilization of rice[J]. Renewable Agriculture and Food Systems,2022,37(5):550-575.

[4] 罗锡文,王在满. 水稻生产全程机械化技术研究进展[J]. 现代农业装备,2014(1):23-29.
LUO Xiwen, WANG Zaiman. Research progress on mechanization technology throughout rice production [J]. Modern Agricultural Equipment,2014(1):23-29. (in Chinese)

[5] CAO Chen, LIN Meiwei, HE Liang, et al. The impact of water-saving irrigation on rice growth and comprehensive evaluation of irrigation strategies[J]. Agronomy,2024,14(7):1363.

[6] 王金峰,翁武雄,刘俊麟,等. 水田双向修筑埂机设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(2):40-48.
WANG Jinfeng, WENG Wuxiong, LIU Junlin, et al. Design and experiment of bi-directional ridger for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(2):40-48. (in Chinese)

[7] 李耀明,徐立章,向忠平,等. 日本水稻种植机械化技术的最新研究进展[J]. 农业工程学报,2005,21(11):182-185.
LI Yaoming, XU Lizhang, XIANG Zhongping, et al. Research advances of rice planting mechanization in Japan[J]. Transactions of the CSAE,2005,21(11):182-185. (in Chinese)

[8] 关振君. DTZG-01 型水田筑埂机的设计研究[J]. 农业科技与装备,2011(10):20-22.

[9] 翁武雄. 水田双向修筑埂机设计与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2019.
WENG Wuxiong. Design and experiment study on bi-directional ridger for paddy field[D]. Harbin: Northeast Agricultural

University, 2019. (in Chinese)

- [10] 王金武,唐汉,王金峰,等.悬挂式水田单侧修筑埂机数值模拟分析与性能优化[J].农业机械学报,2017,48(8):72-80.
WANG Jinwu,TANG Han,WANG Jinfeng,et al. Numerical analysis and performance optimization experiment on hanging unilateral ridger for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 72-80. (in Chinese)
- [11] 张新中,张瑞宏,缪宏,等.新型筑埂机的设计与试验[J].农业装备技术,2017,43(2):11-13.
- [12] 刘明勇,蔡昊,胡成龙,等.偏心振动压实式筑埂机的仿真分析及试验[J].农机化研究,2023,45(2):21-28.
LIU Mingyong, CAI Hao, HU Chenglong, et al. Research on the identification and weight of key influencing factors of agricultural mechanization development level[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(2): 21-28. (in Chinese)
- [13] 王金峰,翁武雄,鞠金艳,等.水田双向修筑埂机回转调节自动锁定装置设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(3):57-67,98.
WANG Jinfeng, WENG Wuxiong, JU Jinyan, et al. Design and experiment of rotation adjustment and automatic locking device of bi-directional ridger for paddy field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 57-67, 98. (in Chinese)
- [14] 车刚,张伟,万霖,等.基于灭茬圆盘驱动旋耕刀多功能耕整机设计与试验[J].农业工程学报,2012,28(20):34-40.
CHE Gang, ZHANG Wei, WAN Lin, et al. Design and experiment of multifunctional tillage machine with driven bent blade by stubble ploughing disk[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 34-40. (in Chinese)
- [15] LI Shoutai, CHEN Xiaobing, CHEN Wei, et al. Soil-cutting simulation and parameter optimization of handheld tiller's rotary blade by smoothed particle hydrodynamics modelling and Taguchi method[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 179: 55-62.
- [16] ZHANG Xiongye, ZHANG Lihua, HU Xu, et al. Simulation of soil cutting and power consumption optimization of a typical rotary tillage soil blade[J]. Applied Sciences, 2022, 12(16): 8177.
- [17] 郑侃,何进,李洪文,等.反旋深松联合作业耕整机设计与试验[J].农业机械学报,2017,48(8):61-71.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of combined tillage implement of reverse-rotary and subsoiling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 61-71. (in Chinese)
- [18] 王金武,唐汉,王金峰,等.1DSZ-350型悬挂式水田单侧旋耕镇压修筑埂机的设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(1):25-37.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Design and experiment on 1DSZ-350 type hanging unilateral rotary tillage compacting ridger for paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 25-37. (in Chinese)
- [19] WENG Wuxiong, CHENG Weixiang, CHEN Longbin, et al. Optimization of working parameters for rotary-cutting soil collection device: experiment and simulation[J]. Agriculture, 2024, 14(1): 38.
- [20] 王金峰,林南南,王金武,等.单侧筑埂机镇压筑埂装置工作动力学参数测试与试验[J].农业机械学报,2017,48(8):81-86,104.
WANG Jinfeng, LIN Nannan, WANG Jinwu, et al. Design and experiment on working dynamics parameters of single-side ridger [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 81-86, 104. (in Chinese)
- [21] 王金峰,翁武雄,鞠金艳,等.基于遥控转向的水田行间除草机设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(9):97-105.
WANG Jinfeng, WENG Wuxiong, JU Jinyan, et al. Design and test of weeder between rows in rice field based on remote control steering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 97-105. (in Chinese)
- [22] XIONG Guangming, LI Xiaoyun. Dynamic path following control of a ground Ackerman steering robot to avoid a collision[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2017, 26(2): 174-182.
- [23] 杨洋,张刚,查家翼,等.基于直流电机与全液压转向器直联的自动转向系统研究[J].农业机械学报,2020,51(8):44-54,61.
YANG Yang, ZHANG Gang, ZHA Jiayi, et al. Design of automatic steering system based on direct connection of DC motor and full hydraulic steering gear[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 44-54, 61. (in Chinese)
- [24] 严亮,张波,梁维刚,等.步进电动缸在石油钻台机械手上的应用研究[J].机械工程师,2021(7):20-22.
YAN Liang, ZHANG Bo, LIANG Weigang, et al. Study on the application of servo electric cylinder in derrick floor manipulator [J]. Mechanical Engineer, 2021(7): 20-22. (in Chinese)
- [25] 翁武雄.标准水田机械筑埂关键技术及回转式单侧筑埂机研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2022.
WENG Wuxiong. Research on key technology of standard mechanical ridge building and rotary single side ridger in paddy field [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [26] 王金峰,吕振阳,赵敏义,等.基于处方图的水稻侧深变量施肥控制系统设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(9):151-162.
WANG Jinfeng, LÜ Zhenyang, ZHAO Minyi, et al. Design and experiment of rice side-deep variable rate fertilization control system based on prescription diagrams[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 151-162. (in Chinese)
- [27] 俞国燕,张嘉伟,张园,等.基于SSAPSO-PID的白胡椒熟化温度控制系统设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(5):589-596.
YU Guoyan, ZHANG Jiawei, ZHANG Yuan, et al. Design and test of temperature control system for white pepper curing based on SSAPSO-PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 589-596. (in Chinese)
- [28] 王金峰,朱明运,初宇航,等.精准喷施型水田自适应除草机设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(2):195-205.
WANG Jinfeng, ZHU Pengyun, CHU Yuhang, et al. Design and experiment of precision spray-type adaptive weeder for paddy fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 195-205. (in Chinese)