

复式作业双轴旋耕机的刀轴设计与试验

丁杰源^{1a}, 吴群彪^{1b}, 李洋^{1b}, 孙钦虎^{1b}, 卞鸿飞^{1a}, 奚小波²

(1. 江苏科技大学 a. 苏州理工学院; b. 机电与动力工程学院, 江苏 张家港 215600;

2. 扬州大学 机械工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘要:针对秸秆还田存在耕深不足的问题,设计一种大耕深且稳定性高的旋耕机。通过分析旋耕刀运动时受到的土壤阻力和旋耕刀端点运动轨迹,采用双轴Z形阶梯状空间结构和双轴分层旋耕切土工艺,得到旋耕刀轴空间布局和旋耕刀排列,设计出双轴旋耕施肥播种复式作业机。通过田间试验验证,该机具能够实现平均耕深大于22 cm的工作要求,耕深稳定性约为93%,实现了深耕碎土和施肥播种一次性作业,大大节省了耕作能耗和成本,可为今后双轴旋耕机的设计与研究提供参考。

关键词:分层旋耕;旋耕刀;双轴;复式作业

中图分类号:S222.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)06-0024-04

Design and Test of Knife Roll for Double-axis Rotary Tillage Machine

DING Jieyuan^{1a}, WU Qunbiao^{1b}, LI Yang^{1b}, SUN Qinhu^{1b}, BIAN Hongfei^{1a}, XI Xiaobo²

(1. a. Suzhou Institute of Technology; b. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhangjiagang 215600, China;

2. College of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: A double-axis rotary tillage compound machine is designed to solve the problem of insufficient tillage depth in straw returning. Through the analysis on soil resistance during rotary blade movement and the trajectory of rotary tiller, double-axis Z-shaped ladder space structure and double-axis layered rotary tillage soil cutting technology are adopted to obtain the spatial layout of rotary cutter shaft and arrangement of rotary blades. Thus the double-axis rotary tillage compound machine with fertilization and sowing functions being designed. The field experiments verify that the machine meets the working requirements of average tillage depth greater than 22 cm with tillage depth stability as about 93%, and realizes one-time operation of deep tillage and fertilization and sowing significantly saving energy and cost of farming, which has certain reference significance for the design and research of double-axis rotary tiller in the future.

Keywords: stratified rotary tillage; rotary blade; twin shaft; multiple operation

0 引言

随着农业技术的进步,农作物秸秆数量也逐渐增多,但农作物秸秆综合利用率不高,我国大部分地区的农作物秸秆采用就地焚烧的方式处理,严重污染了环境,也造成了自然资源的浪费^[1]。秸秆全量回归耕作发展很快,对于保护土壤资源具有很大的益处,可以降低秸秆焚烧对于生态环境的各种负面影响,促进碳素回归土壤,改善耕地的质量和提高土壤的生产能力;还可以使秸秆中所含的矿物质返回农作物土壤中,补偿农作物对土壤环境的消耗,促进农田养分均衡,实现农业的健康可持续发展^[2-3]。

旋耕机在农作物种植过程中因具有通用性强、操作简单、良好的切土能力和碎土能力强等优点,在我国农村普遍使用。同时,复式作业旋耕机能有效减少作业次数,减轻土壤结构的破坏和压实,提高工作效率,减少能源消耗

和种植成本^[4-5]。目前旋耕机多为单轴式,因为受到旋耕刀转速、刀具回转半径和机具功耗的限制影响,目前的机具不能很好地满足秸秆还田的要求^[6]。

为满足秸秆还田的要求,提高旋耕深度,本文使用双轴分层切土原理设计旋耕机,以便更好地实现秸秆全量还田,降低秸秆与土壤的比例,为农作物生长提供更有利的土壤环境,从而提高种植效益。

1 双轴旋耕机结构设计

1.1 双轴分层切土原理

因卧式旋耕机应用范围更广,工作性能更为完备,且成本更小,经济性能好,同时还考虑到双轴的空间布置问题,本设计选用卧式旋耕机。该旋耕机前旋耕刀轴在后旋耕刀轴的前上方,前旋耕刀先旋耕一定深度的土层,后旋耕刀在前旋耕刀作业的基础上继续旋耕,达到22 cm的大

基金项目:苏州市农业科技创新项目(SNG2021038)

第一作者简介:丁杰源(2000—),男,江苏盐城人,本科,研究方向为机械设计制造及自动化,1732772892@qq.com。

耕深,如图 1 所示。

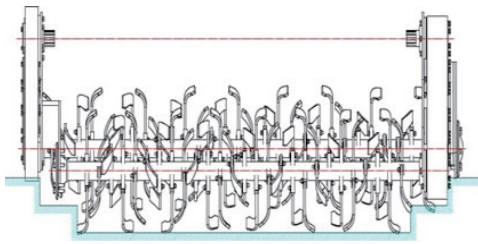
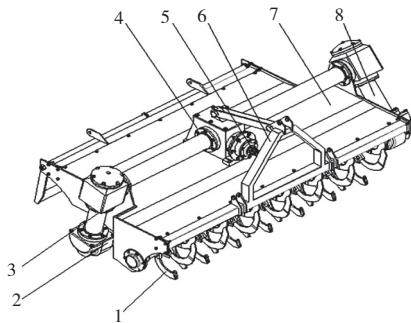


图 1 双轴结构示意图

1.2 旋耕机总体结构

为了满足秸秆全量还田的需要,采用双轴分层切土的工艺,设计出轴管传动式双轴旋耕机的总体结构,如图 2 所示。



1—前旋耕总成;2—后旋耕总成;3—左侧边传动总成;4—传动箱总成;5—动力输出轴;6—悬挂装置;7—机架总成;8—右侧边传动总成。

图 2 旋耕机总体结构示意图

2 旋耕刀轴设计

旋耕机机具整体结构包括 Z 形阶梯空间结构和双轴分层旋耕结构,两者在旋耕刀轴设计完备的基础上才能实现,因此旋耕刀轴设计是本机具的核心。

2.1 传动设计方案

参照汽车传动方案,传动轴是汽车传动系统的主要部件,机具采用侧边轴管传动,传动轴强度要求以及动态特性对机具安全影响较大,优化传动系统的尺寸和结构,从而提高动力传递的效率和可靠性^[7],如图 3 所示。轴管传动所需的齿轮和轴承的数量大大减少,传动效率能够提升 10% 左右。

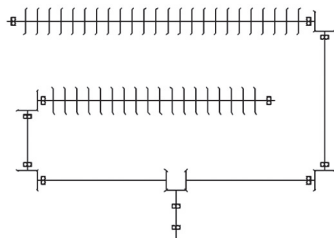


图 3 传动方案示意图

本设计配套拖拉机动力输出轴的转速为 720 r/min,

各级锥齿轮的齿数 $Z_1 \sim Z_6$ 分别为 12、21、13、17、13、17。

$$i = \frac{Z_1 Z_3 Z_5}{Z_2 Z_4 Z_6} \quad (1)$$

$$n = 720 \times i \quad (2)$$

式中: i 为传动比; n 为旋耕刀轴的实际转速, r/min。

根据式(1)和式(2)计算出旋耕刀轴的实际转速为 240.59 r/min。

2.2 旋耕刀选择

双轴的布置要保证合理,避免工作时前后刀轴的旋耕刀发生碰撞,同时保证后刀轴侧边传动箱和旋耕刀所对应的作业区域被前刀轴旋耕刀作业区域覆盖,便于后旋耕刀入土继续旋耕。

机具采用 IT225 型号的旋耕刀,如图 4 所示。

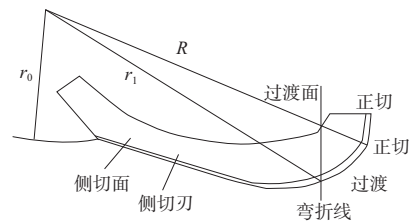


图 4 旋耕刀示意图

旋耕机作业时,土壤会对旋耕刀产生土壤阻力,土壤阻力随着耕作深度和切土面积不断变化,因此,对最大土壤阻力进行计算,计算公式如下:

$$N = 0.7abK \quad (3)$$

式中: N 为土壤阻力, N; a 为旋耕刀耕作幅宽, cm; b 为旋耕机耕作深度, cm; K 为土壤比阻, N/cm²。

取 $a = 5.5, b = 22, K = 6$, 则 $N = 0.7 \times 5.5 \times 22 \times 6 = 508.2$ 。

因此本机具的最大土壤阻力为 508.2 N。

2.3 旋耕刀的运动分析

耕机作业时,旋耕刀刀面上各运动轨迹是余摆线^[8]。旋耕刀端点的运动轨迹如图 5 所示,其运动方程为

$$\begin{cases} x = R\cos\omega t + v_m t \\ y = -R\sin\omega t \end{cases} \quad (4)$$

式中: R 为刀片回转半径, mm; ω 为刀片回转角速度, rad/s; ωt 为刀片转角, rad; v_m 为旋耕机前进速度, m/s; t 为时间, s。

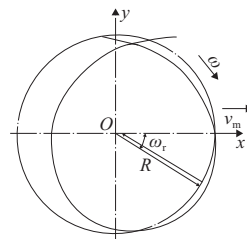


图 5 刀片端点的运动轨迹

旋耕刀端点回转的切线速度和旋耕机前进速度的比值为旋耕速比 λ , 其公式为:

$$\lambda = R\omega/v_m \quad (5)$$

$$\omega = n\pi/30 \quad (6)$$

由 $n = 240.59, v_m = 1.4, R = 225$, 算得: $\omega = 25.18, \lambda = 4.05 > 1$ 。

旋耕机作业时,耕层底部会有波浪形凸起,耕层底部凸起高度 α_1 与旋耕速比 λ 、刀片回转半径 R 和同一切块小区内旋耕刀数 Z 有关,早耕时 Z 取 2~3,水耕时取 1~2。关系如图 6 所示,关系式为

$$\frac{\alpha_1}{R} = 1 - \cos \left[\frac{\pi}{Z(\lambda-1)} \right] \quad (7)$$

本设计 Z 取 2, 则 $\alpha_1 = 29.25 \text{ mm}$ 。

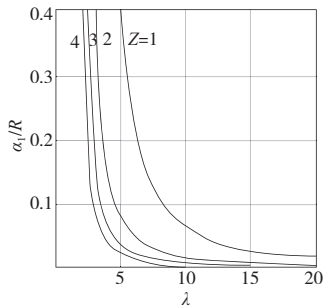


图 6 耕底凸起高度

在旋耕机前进方向的垂直平面内,连续两把旋耕刀切下的土壤厚度,称为切土节距,其公式为:

$$S = 6000v_m / (nZ) \quad (8)$$

$$S = \pi R / (5\lambda Z) \quad (9)$$

式中 S 为切土节距, mm。计算得: $S = 3.14 \times 225 / (5 \times 4.05 \times 2) \approx 17$ 。

2.4 旋耕刀的排列设计

卧式旋耕机的旋耕刀转向分为正转和反转两种方式。正转有利于在较湿软的土壤上作业,但土壤平整度和灭茬效果不突出;反转作业后土壤平整度和灭茬效果比正转好,但切削阻力更大,功率消耗更高。最终选择前轴正转、后轴反转的方式^[9]。

选用的旋耕刀数量较多,防止旋耕刀轴左右两侧受到的侧向力不平衡,同时考虑到抛土性能,旋耕刀的排布方式选用双头螺旋线排列方式。

设计计算过程如下:

$$b' = a + \Delta b \quad (10)$$

$$Z' = 1000BZ/b' \quad (11)$$

式中: b' 为旋耕刀间距, mm; Δb 常取 15~25 mm; Z' 为旋耕刀轴刀片数量,取偶数; B 为旋耕机工作幅宽, m。

旋耕刀的工作幅宽取 55 mm, 每个旋耕刀之间的距离为 70 mm, 前旋耕刀轴刀片数量为 56 个, 如图 7 所示。后旋耕刀轴刀片数量为 48 个, 如图 8 所示。

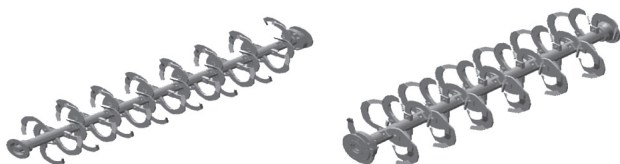


图 7 前刀轴排列

图 8 后刀轴排列

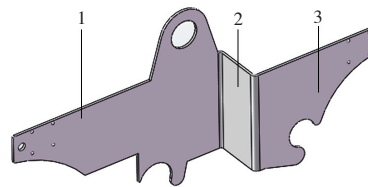
旋耕刀的排列对旋耕机的工作质量、切土组转矩、平衡性能和功耗等都有一定的影响,它是决定旋耕机性能的重要因素之一^[10]。

设计要求每根旋耕刀轴上的左弯刀和右弯刀的数量相等,并各形成一条螺旋线在旋耕刀轴的圆周和轴向方向上均匀有序地排列,每转过一个相位角都有一个弯刀入土,旋耕刀轴受力均匀,同时保证作业时左右两侧侧向力平衡,减小旋耕机组的转矩,左右弯刀尽可能交替入土^[11-12]。最后要保证每个切土区间内的左右两把弯刀切土节距、切土阻力和磨损程度相近。

2.5 Z 型空间结构

双轴结构的设计需要对两侧的异型侧板进行固定。本机具的关键部件之一是两侧的异型侧板,侧板决定了后旋耕刀轴是否能在前旋耕刀轴作业后的基础上进行二次深入旋耕,确保秸秆还田的效果。

前旋耕刀轴安装在外部侧板上,后旋耕刀轴和传动箱安装在内部侧板上。后旋耕刀轴安装宽幅小于前旋耕刀轴,使后旋耕刀轴完全位于前旋耕刀轴的耕作范围内,保证后旋耕刀轴可以在前旋耕刀轴旋耕后的基础上进行二次耕作,实现 22 cm 大耕深,结构如图 9 所示。



1—内部侧板;2—中间侧板;3—外部侧板。

图 9 侧板结构示意图

3 田间试验

为了验证所设计旋耕机耕深情况,在扬州大学扬子津东校区的试验田进行旋耕试验。

试验方法参照国家标准的旋耕机作业质量行业标准(NY/T499—2002)。机具采用前进速度为 3.06 km/h, 试验选取两个行程, 每个行程各 10 个测点, 对机具作业后的耕深进行测量, 试验结果见表 1。

表 1 耕深试验结果 单位: cm

测点	行程		测点	行程	
	1	2		1	2
1	22.2	25.5	6	24.8	23.1
2	24.3	22.3	7	21.5	22.8
3	21.3	24.5	8	23.3	24.8
4	21.7	25.2	9	21.8	21.5
5	22.1	21.7	10	22.1	23.2

根据表 1 数据和农业机械设计手册相关计算公式算出试验结果, 结果如表 2 所示。

计算公式为:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^m a_i}{m} \quad (12)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (a_i - A)^2}{m - 1}} \quad (13)$$

$$V = S/A \times 100\% \quad (14)$$

$$U = 1 - V \quad (15)$$

式中: A 为平均值; m 为测试次数; a_i 为测试值; S 为标准差; V 为变异系数; U 为稳定性系数。

表2 试验结论

测试项目	行程 1	行程 2
平均值/cm	22.83	23.44
标准差/cm	1.46	1.43
耕深稳定性/%	93.50	93.91

4 结语

1) 设计 Z 形双轴空间结构和双轴分层旋耕切土方式, 实现深度旋耕和秸秆全量还田方面的技术突破。

2) 试验证明, 双轴旋耕复式作业机工作后, 平均耕深大于 22 cm, 耕深稳定性约为 93%, 能够满足秸秆全量还田的要求。

3) 双轴分层旋耕切土方式实现了深耕碎土和施肥播种一次性复式作业, 节省了耕作的能耗和成本。

参考文献:

- [1] 杜艳玲, 周怀平, 杨振兴, 等. 长期不同秸秆还田方式对褐土磷素组分的影响[J]. 山西农业科学, 2019, 47(11): 1947-1954, 1959.
- [2] 杨冬静, 谢逸萍, 张成玲, 等. 不同秸秆还田模式土壤微生物多样性分析[J]. 江西农业学报, 2021, 33(6): 34-42.
- [3] 于美婷, 李春雅, 李华泰, 等. 秸秆还田对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 江西农业学报, 2021, 33(1): 33-39.
- [4] 张吉强, 牛子儒, 李玉华, 等. 基于大葱移栽机的卧式旋耕机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(8): 41-45.
- [5] 钱筱琳, 宋仕凤, 杨飞, 等. 基于 Pro/E Manikin 的旋耕施肥播种一体机人机评价与造型设计[J]. 机械设计, 2018, 35(8): 121-124.
- [6] 李永波, 于虹, 张瑞宏, 等. 基于 Matlab 的新型双轴旋耕机的优化设计[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(3): 4-6.
- [7] 陶德清, 崔勇, 陈引生, 等. 轴管传动式双轴旋耕机的设计与分析[J]. 南方农机, 2017, 48(21): 30-33.
- [8] 李绪, 吴雪梅, 高贵, 等. 深施肥机旋耕部件关键参数设计与试验[J]. 农机化研究, 2018, 40(8): 198-202, 207.
- [9] 朱继平, 陈伟, 袁栋, 等. 不同刀片形式对反转旋耕机作业性能的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(21): 235-240.
- [10] 陈伟, 朱继平, 陈小兵, 等. 旋耕刀排列方式对反转旋耕机作业性能的影响研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(11): 205-209, 215.
- [11] 彭才望, 孙松林. 旋耕机作业参数设计对拖拉机功耗的影响研究[J]. 南方农机, 2020, 51(1): 2-3, 6.
- [12] 张引航, 李守太, 曹中华, 等. 微耕机旋耕刀弯刀排列优化仿真分析[J]. 南方农机, 2021, 52(9): 71-73, 82.

收稿日期: 2022-04-13

(上接第 9 页)

5 结语

本文构建基于认知不确定可靠性产品功能优化算法流程, 根据总体功能分析、子功能概率化、可信度分配、最优不确定设计变量及迭代计算获取优选功能组合等步骤, 计算出可靠性指标, 针对目标多组解决方案, 求解出指定概率满足一组约束的最优解。举高消防车的研发是一个具体而复杂的过程, 其中包含确定性功能需求、不确定性功能需求及未知功能需求。基于认知不确定可靠性优化模型, 以举高消防车为例, 进行需求分析及功能分解, 建立认知集合, 代入认知不确定可靠性算法流程, 获取满足设计需求最优功能解, 对增强企业新产品开发能力及核心竞争力、提高产品设计可靠性、避免大量冗余工作具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 方永锋, 程正伟, 许勇. 区间参数串、并联与 k/n 表决系统可靠性计算方法[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(3): 69-71, 80.
- [2] 欧阳惠卿, 舒文华, 薛季爱. 基于可靠性分析的电梯制动器设计方

案优化方法[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(4): 199-201.

- [3] 张清源, 文美林, 康锐, 等. 基于确信可靠性的功能、性能与裕量分析方法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(5): 1413-1419.
- [4] 于俊涛, 邓卫, 王巨, 等. 基于近似移动矢量的证据理论可靠性设计优化方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(8): 59-67.
- [5] 邱志平, 夏海军. 基于功能度量法的桁架结构非概率可靠性拓扑优化方法研究[J]. 计算力学学报, 2021, 38(4): 423-429.
- [6] 郑霞忠, 郭雅薇, 石法起, 等. 塔机作业模糊认知可靠性与失误分析方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(6): 98-103.
- [7] 胡钧铭, 黄洪钟, 黄鹏. 基于模糊层次分析法的工业机器人可靠性分配[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(21): 8965-8969.
- [8] 陈俊. 水下耐压结构多部件协同优化与可靠性分析[J]. 船海工程, 2022, 51(3): 85-89, 103.
- [9] 冯欣怡, 孙祥凯. 不确定信息下分式半无限优化问题的近似最优性刻画[J]. 应用数学和力学, 2022, 43(6): 682-689.
- [10] 孙占瑞, 张勇, 张小静. 基于功能分析法的消防救援车设计[J]. 中国工程机械学报, 2020, 18(1): 51-55.

收稿日期: 2022-06-17