

黄琳,周勇,张国忠,等.手扶水力冲刷式挖藕机设计与试验[J].华中农业大学学报,2021,40(5):207-216.

DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.05.025

手扶水力冲刷式挖藕机设计与试验

黄琳,周勇,张国忠,涂鸣,刘沿,王宏波,吴泽栋

华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉 430070

摘要 针对目前莲藕(*Nelumbo nucifera* Gaertn)机械化收获程度低、作业劳动强度大、莲藕采收效率低的问题,设计了一种手扶水力冲刷式挖藕机。该挖藕机采用液压系统控制污水潜水泵和喷头的往复运动,并利用 2 个污水潜水泵分别配置 1 个喷头的方式工作,保障水流有足够的流量与压力;应用 AMESim 软件对液压控制系统进行仿真,仿真结果显示,液压系统运行良好。以设计的手扶水力冲刷式挖藕机喷头的喷射角度、喷头的入泥深度、推移液压缸的移动速度为试验因素,以冲刷深度、浮出率为试验指标,开展三因素三水平的 Box-Behnken 试验,并进行响应面分析及参数优化分析。试验结果表明,当喷射角度为 30° 、入泥深度为 -24 mm 、移动速度为 10 cm/s 时,设计的挖藕机冲刷性能达到最优状态,此时挖藕机冲刷深度为 302 mm ,莲藕浮出率为 90% 。

关键词 莲藕;挖藕机;机械化采挖;水力冲刷;液压系统;AMESim

中图分类号 S 225.7 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)05-0207-10

藕(*Nelumbo nucifera* Gaertn),又称莲藕,属睡莲科植物,具有很高的药用价值,是一种重要的农业经济作物,在我国有广泛的种植^[1]。莲藕采挖作业环境恶劣,早期主要依靠工人翻挖莲藕上层的泥土,劳动效率低,劳动强度过大。目前主要依靠工人手持水枪冲刷莲藕上层的泥土,对工人的操作要求较高,机械化程度较低。随着我国人口老龄化,挖藕工人年龄普遍偏大,新生力量不足,莲藕的机械化收获为今后发展的必然趋势^[2]。

为了实现莲藕的机械化采收,国内外研究人员对挖藕机械进行了相关探索。黄海东等^[3]研制的 4CWO-3.2 型船式挖藕机集莲藕采挖、清洗作业于一体,同时该机采用双向螺旋机构带动喷头往复运动。王维等^[4]研制的 4SWJ-1 型船式水力挖藕机由钢丝绳牵引前进,可避免挖藕机主动轮卡死的现象。2004 年研制的 4CW-2.6 型船式挖藕机采用铲泥板与高压水枪相结合的方式对莲藕进行采挖^[5]。1980 年代,日本研制出了带高压泵的喷流式 I 型、宽幅 II 型以及泵定置式小型(简称 III 型)挖藕机,该系列挖藕机作业机动性差,不适合规模化种植^[6]。

目前莲藕采挖机械化发展水平较低,满足市场需求的莲藕采挖产品较少。为提高莲藕的采挖效率及减少工人的劳动强度,本研究结合水力冲刷挖藕方式,设计了一种手扶水力冲刷式挖藕机,该挖藕机采用“二对二”的配置方式,即 2 个污水潜水泵分别配置 1 个喷头,通过液压系统控制污水潜水泵的工作转速和喷头的往复运动,实现水力冲刷挖掘莲藕,以期对挖藕机的设计和优化提供参考。

1 材料与方法

1.1 挖藕机结构与工作原理

1)挖藕机结构。该挖藕机主要由柴油发动机、污水潜水泵、浮筒、液压控制系统、喷头和喷头连接装置等组成(图 1)。挖藕机底盘浮筒采用可发性聚苯乙烯 EPS 泡沫压缩成型。藕田水中主要含有藕叶、水草及泥沙,为避免堵塞,选择叶轮为流道式的污水潜水泵作为抽水装置。挖藕机动力由柴油发动机提供。污水潜水泵悬挂装置位于机架的中后方,液压马达、污水潜水泵从上至下依次通过螺栓连接置于悬挂装置上。液压马达与污水潜水泵之间用联

收稿日期:2021-07-02

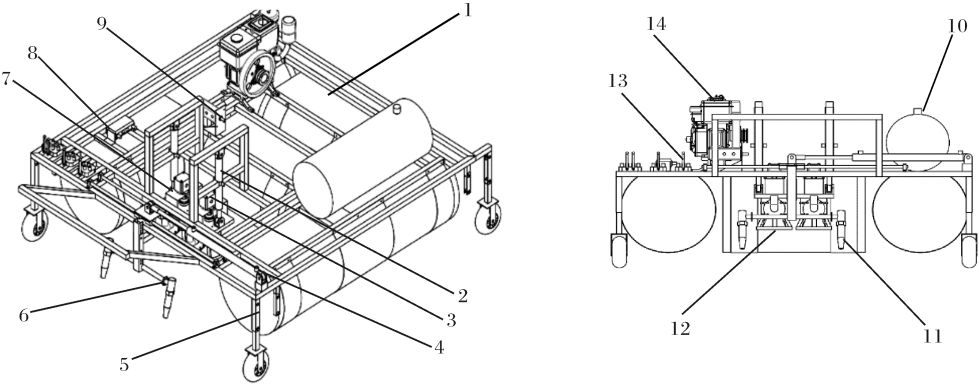
基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2662020GXPY015);财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系(CARS-24-D-02)

黄琳,E-mail:759181123@qq.com

通信作者:周勇,E-mail:zhyong@mail.hzau.edu.cn

轴器相连。挖藕机采用 2 个污水潜水泵,每个污水潜水泵由 1 个液压马达控制。升降液压缸对污水潜水泵悬挂装置进行高度调节,从而控制污水潜水泵的吸水高度。换向阀、喷头连接装置、推移液压缸从左至右依次位于机架的后方,喷头连接装置可根据

水深在竖直方向上对喷头的喷水高度进行上下调节及角度喷射调节,推移液压缸控制其在水平方向上的移动。为保持挖藕机的平衡性,柴油发动机位于机架左上方,液压油箱位于机架的右上方。挖藕机主要参数如表 1 所示。



1.浮筒 Float; 2.升降液压缸 Hydraulic cylinder for lifting; 3.液压马达 Hydraulic motor; 4.推移液压缸 Hydraulic cylinder for pushing; 5.折叠脚 Foldable support; 6.喷头连接装置 Nozzle connection device; 7.污水潜水泵悬挂装置 Sewage submersible pump suspension device; 8.同步阀 Hydraulic synchronizing valve; 9.三联液压泵 Three-through hydraulic pump; 10.液压油箱 Hydraulic tank; 11.喷头 Nozzle; 12.污水潜水泵 Sewage submersible pump; 13.换向阀 Directional valve; 14.柴油发动机 Diesel engine.

图 1 手扶水力冲刷式挖藕机结构图

Fig.1 Structure diagram of walking hydraulic scour type lotus root digging machine

表 1 挖藕机主要技术参数

指标 Index	数值 Value
柴油发动机功率/kW Diesel engine power	13.24
柴油发动机转速/(r/min) Diesel engine speed	2 200
污水潜水泵流量/(m ³ /h) Flow of sewage submersible pump	10.52
污水潜水泵转速/(r/min) Speed of sewage submersible pump	2 005
工作幅宽/mm Working width	1 200
最大挖藕深度/mm Maximum digging depth	302

2)工作原理。在进行水力冲刷前,为便于污水潜水泵吸水,将与升降液压缸相连的污水潜水泵悬挂装置调节到合适高度。水力冲刷时,液压马达带动水泵轴高速旋转,在离心力作用下,泥水从污水潜水泵出口通过出水管直接流入喷头,喷头将泥水的压力能转换成动能,进而使其加速喷出。与此同时,喷头调节装置在推移液压缸的作用下带动喷头在水平方向上左右移动,覆盖于莲藕上方的泥土因受到射流的反复冲刷,其破碎后不断被水流带走,最后莲藕裸露在水底,在自身浮力作用下浮出水面,再由人工打捞完成莲藕的采挖作业。挖藕机通过人工手扶

控制其前进方向,当挖藕机确定一处工作位置后,在此位置前后往复运动相应时间后再继续前进寻找下一工作位置,如此循环重复,以进行挖藕作业。

1.2 关键部件的设计

1)浮筒的设计。选用的浮筒内芯为可发性聚苯乙烯 EPS 泡沫压缩成型,外壳为加厚膜和全封网处理,保护浮筒内部的泡沫不受破坏,同时具有一定的强度、耐腐蚀性。经估算样机除浮筒外总质量约为 500 kg,为使浮筒产生相应浮力支撑整机,设计浮筒结构如图 2 所示。浮筒形状为半圆柱形,可增大受力面积同时便于安装加工^[7]。浮筒浮力根据公式(1)计算:

$$\begin{cases} \theta = 2\arctan\left(\frac{d/2}{H-r}\right) \\ S = \pi r^2 - \frac{\theta \pi r^2}{360} + \frac{d}{2}(H-r) \\ V_{\text{排}} = L \cdot S \\ F_{\text{浮}} = \rho_{\text{液}} g V_{\text{排}} \end{cases} \quad (1)$$

对式(1)简化可得式(2):

$$F_{\text{浮}} = \rho_{\text{液}} g L \left[\pi r^2 + \frac{d}{2}(H-r) - \frac{\pi r^2}{180} \arctan\left(\frac{d/2}{H-r}\right) \right] \quad (2)$$

式(1)~(2)中: θ 为圆心角,(°); d 为浮筒的截

面宽, m ; H 为浮筒的高, m ; r 为浮筒的半径, m ; S 为浮筒的侧面积, m^2 ; V 为浮筒的体积, m^3 ; L 为浮筒的长, m ; $F_{\text{浮}}$ 为浮筒在水中收到的浮力, N ; $\rho_{\text{液}}$ 为水的密度, $\rho_{\text{液}} = 1\,000\text{ kg/m}^3$; g 为重力加速度, $g = 10\text{ m/s}^2$; $V_{\text{排}}$ 为浮筒浸入水中的体积, m^3 。

由式(2)可知,浮筒浮力主要与浮筒的截面宽 d 、浮筒的高 H 、浮筒的半径 r 、浮筒的长 L 有关。考虑整机尺寸,设计6个浮筒支撑整机,单个浮筒尺寸设计为 $d = 330\text{ mm}$, $H = 550\text{ mm}$, $r = 300\text{ mm}$, $L = 900\text{ mm}$,将相关数据代入式(2)可得单个浮筒浮力为 $2\,300\text{ N}$,考虑藕田作业环境复杂,为保证挖藕机正常运行,设计挖藕机载荷最大时浮筒只浸入水中一半,此时浮筒的浮力约为 $1\,100\text{ N}$,则6个浮筒可提供总浮力约为 $6\,600\text{ N}$,其可支撑质量约为 660 kg ,远远大于样机除浮筒外的总质量,满足所要求。

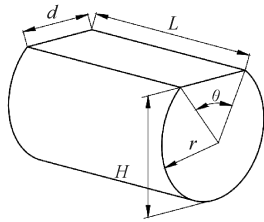


图2 浮筒结构图

Fig.2 Structural drawing of buoy

2) 喷头的设计。喷头的结构如图3所示,喷头的内部截面形状为锥直形,喷头的主要结构参数为:进水口内径 D ,出水口内径 d ,收缩角 α ,喷头长度 H ,喷头总长 L ,长径比 C_p (喷头圆柱段长度 l /出水口内径 d)。由于水泵的出水口内径为 35 mm ,所以喷头的进水口内径 D 为 35 mm 。为保证好的射流集束性,选取收缩角 α 为 13° , $d = 20\text{ mm}$,长径比 C_p 为 $2^{[8-10]}$ 。根据文献[11]可知:

$$\begin{cases} H = 3.75d \\ L = 3H \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, H 为喷头长度, mm ; d 为喷头出水口内径, mm ; L 为喷头总长, mm 。则喷头长度为 75 mm ,喷头总长为 225 mm 。

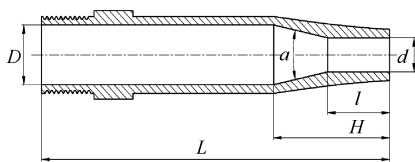
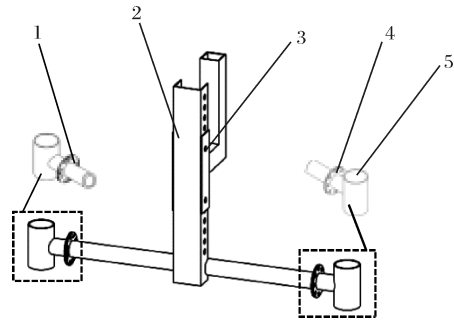


图3 喷头结构图

Fig.3 Structure drawing of nozzle

3) 喷头连接装置的设计。喷头的角度调节及高度调节关系冲刷效果。合适的喷头连接装置可以减少管路对挖藕机的水能量损失(图4)。将污水潜水泵的出水口与喷头连接装置中的喷头接口上端直接相连。喷头通过螺纹连接与喷头连接口下端相连,2个喷头对称布置,间距为 600 mm ,即在 600 mm 行程的液压缸的推动下,挖藕机的工作幅宽为 $1\,200\text{ mm}$ 。角度连接片上以 45° 为间隔,开直径为 8 mm 的圆孔。角度固定片上开4个直径为 8 mm 的腰型孔,将角度连接片与角度固定片上的孔对齐,再用螺栓连接锁紧加固即可实现多角度自由调节。U型不锈钢槽Ⅰ每隔 25 mm 开1个直径为 10 mm 的孔,不锈钢槽总长 500 mm ,U型不锈钢槽Ⅱ总长 200 mm ,间隔 160 mm 开2个直径为 10 mm 的孔,将2块U型槽上的孔相对通过螺栓连接紧固即可上下调节喷头与泥面之间的距离。



1.角度固定片 Angle fixing piece; 2.U型不锈钢槽Ⅰ U-shaped stainless steel groove I; 3.U型不锈钢槽Ⅱ U-shaped stainless steel groove II; 4.角度连接片 Angle connecting piece; 5.喷头连接口 Nozzle connection port.

图4 喷头连接装置结构图

Fig.4 Structure diagram of nozzle connection device

1.3 液压系统设计

1) 液压原理图。液压控制回路主要用来控制挖藕机的水力冲刷,是挖藕机的重要组成部分,液压原理图如图5所示。发动机带动三联泵从油箱吸油,三联泵的3个出油口将液压油的流动路线分成3条支路,各条支路相互独立,互不干扰。第1条支路的液压油流进两路三位四通换向阀,一路换向阀控制升降液压缸上下运动,升降液压缸有2个,通过同步阀控制其同步;另一路控制阀控制推移液压缸左右移动,通过节流阀控制流量进行调速。第2条支路的液压油通过三位四通换向阀和节流阀流进液压马达,液压马达的转速快慢由节流阀控制。第3条支路与第2条支路相同。流进液压缸和液压马达的液压

油最后都通过与各自相连的三位四通换向阀的回油口流回油箱^[12-14]。选用三联液压泵为 CBN-F306/F306/304, 液压马达为 1MM1P35, 液压缸为 40/50×25。

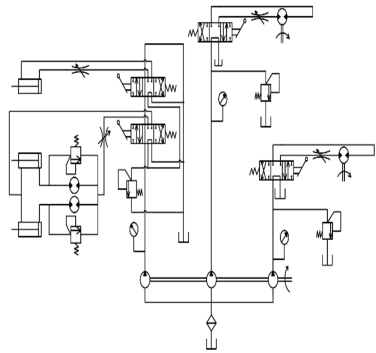
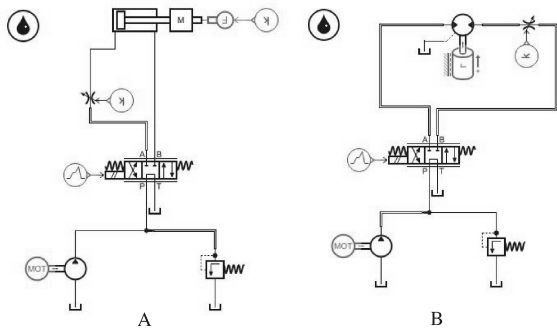


图 5 液压原理图

Fig.5 Hydraulic schematic diagram

2)建立 AMESim 液压系统模型。由于选用的三联泵的各个油腔之间不串油, 3 条液压支路相互独立, 所以单独对液压马达支路、液压缸支路进行仿真分析, 其 AMESim 模型如图 6 所示。根据液压元件的型号和系统的作业环境设置各元件仿真模型的参数。选用的液压泵的额定转速为 2 000 r/min, 柴油发动机的转速为 2 200 r/min, 为使二者转速匹配, 使用带传动将柴油发动机传入液压泵的转速降低到 2 000 r/min, 在液压仿真时将柴油发动机的转速设为 2 000 r/min, 主要参数设置如表 2 所示^[15-16]。



A: 推移液压缸支路仿真模型 Branch simulation model of the hydraulic cylinder for pushing; B: 液压马达支路仿真模型 Branch simulation model of hydraulic motor.

图 6 液压系统仿真模型

Fig.6 Simulation model of hydraulic system

3) 仿真结果。由图 7A 可知, 当节流阀的阀口信号为 0.55 时, 液压缸的运行速度可达到最大值 11 cm/s; 阀口的信号为 0.01 时, 液压缸的运行速度达到最小值, 为 2 cm/s; 阀口信号在 0.01~0.11 时, 液压缸的移动速度处于明显的变化阶段, 阀口信号在

表 2 AMESim 模型元件主要参数

Table 2 Main parameters of AMESim model components

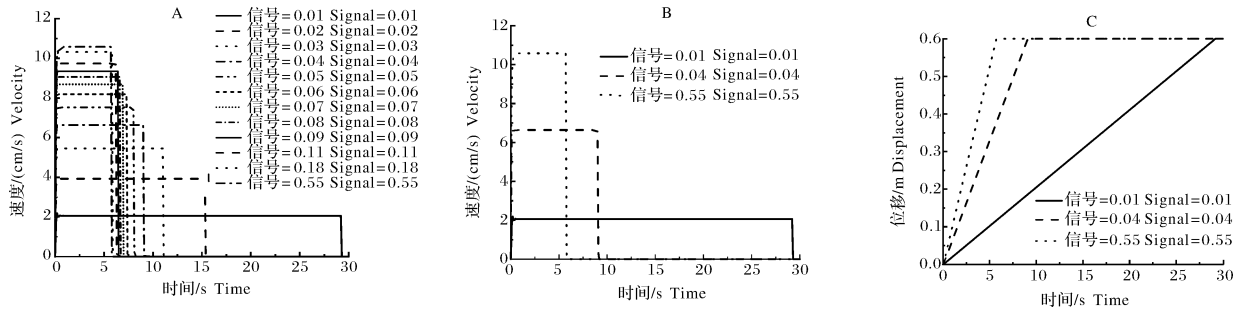
名称 Component name	参数 Parameter	数值 Value
柴油发动机 Diesel engine	转速/(r/min) Speed	2 000
液压泵(液压缸支路) Hydraulic pump (Hydraulic cylinder branch)	排量/(mL/r) Displacement	4
液压缸 Hydraulic cylinder	内径及杆径/mm Piston diameter and rod diameter	40×25
溢流阀 Pressure relief valve	开启压力/MPa Cracking pressure	16
变量节流阀 Adjustable restrictive valve	控制信号范围 Signal range	0~1
液压泵(液压马达支路) Hydraulic pump (Hydraulic motor branch)	排量/(mL/r) Displacement	6
液压马达 Hydraulic motor	排量/(mL/r) Displacement	3.4
溢流阀 Pressure relief valve	开启压力/MPa Cracking pressure	23
变量节流阀 Adjustable restrictive valve	控制信号范围 Signal range	0~1

0.11~0.55 时, 液压缸的移动速度处于微小变化阶段, 此时不适合调节液压缸的移动速度。因此, 选择阀口信号为 0.55、0.04、0.01 进行单独分析。由图 7B、C 可知, 当阀口信号为 0.55 时, 液压缸的移动速度为最大值 11 cm/s, 大约 5 s 可达到液压缸的最大行程; 当阀口信号为 0.04 时, 液压缸的移动速度为 6.5 cm/s, 大约 9 s 可达到液压缸的最大行程; 当阀口信号为 0.01 时, 液压缸的移动速度为 2 cm/s, 29 s 可达到液压缸的最大行程。

由图 8 可知, 当节流阀的阀口开到最大时液压马达的转速可达到 2 995 r/min。此水泵可允许的最大转速为 2 860 r/min。考虑到水泵的转速超过最大转速会造成水泵内部的密封圈损毁, 将节流阀的开口适当调小, 当阀口信号值为 0.05 时, 液压马达的转速可达到 2 862 r/min。

4) 液压系统调节性能。为了验证仿真的准确性及对推移液压缸的移动速度进行标定, 在进行冲刷性能试验之前先对液压系统进行调节试验。在挖藕机正常工作后使用转速测速仪对液压马达的转速进行测定, 重复 3 次取平均值为液压马达的转速值, 同时使用超声波流量计对此转速下水泵的出水量进行测试。经测定液压马达的转速为 2 005 r/min, 水泵的流量为 10.52 m³/h。通过调节试验发现节流阀

的阀口开至最大时液压马达的转速达到 2 005 r/min,低于液压仿真分析结果,通过分析可知,由于挖藕作业是在含有泥沙的环境里,当水泵的进水口泥沙量过多,会使液压马达的负载加大,从而使马达的转速变慢同时油管发热、节流阀等液压元件的使用、液压油管过长等因素对液压系统的压力造成了损失。



A:推移液压缸多速度运行曲线图 Multi speed operation curve of the hydraulic cylinder for pushing; B:推移液压缸的运行速度曲线图 Speed operation curve of the hydraulic cylinder for pushing; C:推移液压缸的运行位移曲线图 Displacement operation curve of the hydraulic cylinder for pushing.

图7 液压缸仿真结果曲线图

Fig.7 Simulation result curve of hydraulic cylinder

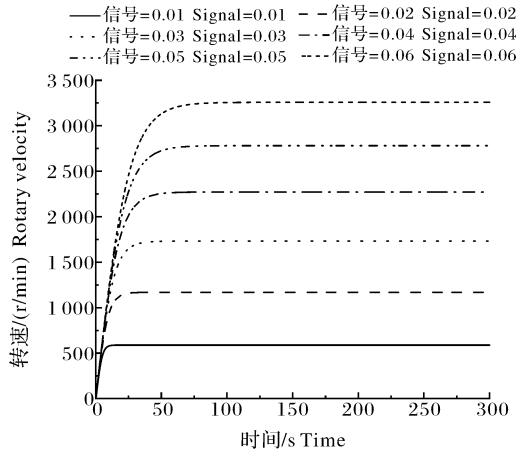


图8 液压马达转速曲线图

Fig.8 Speed curve of hydraulic motor

推移液压缸移动速度的标定:将节流阀的阀口调至合适位置,测定推移液压缸的活塞杆伸出至极限位置时所用的时间,根据公式:

$$v = \frac{s}{t} \quad (4)$$

式(4)中, v 为推移液压缸的移动速度,cm/s; s 为推移液压缸活塞杆的总长,cm; t 为推移液压缸活塞杆伸出所用时间,s。经测定,将节流阀的阀口调至最大时,液压缸的移动速度约为 10 cm/s;将节流阀的阀口打开 2/3 圈时,液压缸的移动速度约为 6 cm/s;将节流阀的阀口打开 1/4 时,液压缸的移动速度约为 2 cm/s。此后的试验相应的速度值将按以上相应节流阀的开口大小来调节。

1.4 性能试验

1)试验方法。在华中农业大学室外水槽以莲藕为试验对象开展了手扶水力冲刷式挖藕机的性能试验(图 9)。试验水槽长 10 m,宽 2.7 m。试验莲藕的品种为鄂莲 1 号,平均长度 704 mm,平均直径 86.748 mm,平均质量 1 825 g。为验证挖藕机是否具有藕田适应性,试验前先将莲藕以前后 300 mm 的间距埋入泥下 250~300 mm 的位置,再将泥土压实,静泡 1 d 后开展试验,每组试验 10 枝莲藕。试验仪器与设备有挖藕机、钢尺、转速测速仪、计时器等。



图9 性能试验

Fig.9 Performance test

2)评价指标。目前国内外对莲藕的机械化采收技术研究较少,缺乏相关的评价技术指标。本试验结合当前人工采收莲藕的要求,以冲刷深度、莲藕浮

出率为试验指标,作为考察样机冲刷性能的依据^[17-18]。

冲刷深度(H)可由公式(5)计算得到。

$$H = H_2 - H_1 \tag{5}$$

式(5)中, H_1 为作业前泥层上表面至水面的距离,mm; H_2 为作业后泥层上表面至水面的距离,mm。

莲藕浮出率(A)可由公式(6)计算得到。

$$A = \frac{m}{M} \times 100\% \tag{6}$$

式(6)中, m 为在试验区作业后浮出莲藕的质量,g; M 为在试验区埋入莲藕的总质量,g。

2 结果与分析

2.1 冲刷性能试验

考虑挖藕机的作业要求,以喷头的喷射角度(喷头的中轴线与竖直方向的夹角)、推移液压缸的移动速度、喷头的入泥深度(喷头的入泥深度为喷头与泥面之间的距离,喷头在泥面之上为“+”,在泥面之下为“-”,与泥面相切为“0”)为试验因素,以冲刷深度、浮出率为试验指标,设计三因素三水平 Box-Behnken 试验,共进行 17 组试验,每组试验重复 3 次,

取平均值为试验结果^[19-20]。挖藕机在一工作位置冲刷 1 min 后再继续前进到下一工作位置^[21]。喷头冲刷示意图如图 10 所示,各试验因素水平及编码如表 3 所示,试验方案及结果如表 4 所示。

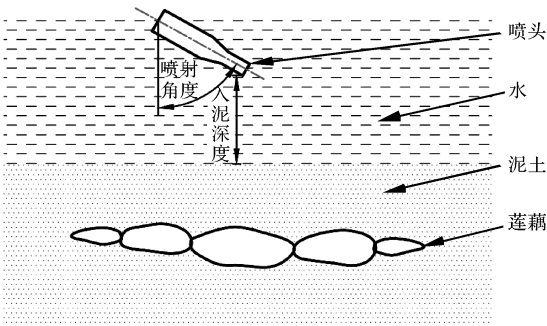


图 10 喷头冲刷示意图

Fig.10 Schematic diagram of nozzle flushing

表 3 Box-Behnken 试验因素水平编码表

Table 3 Box-Behnken design of factors and levels

水平 Levels	喷射角度 $X_1/(^\circ)$ Jet angle	入泥深度 X_2/mm The depth into the mud	移动速度 $X_3/(\text{cm/s})$ Moving speed
+1	60	50	10
0	45	0	6
-1	30	-50	2

表 4 试验方案及结果

Table 4 Test design and results

试验号 Test No.	喷射角度 $X_1/(^\circ)$ Jet angle	入泥深度 X_2/mm The depth into the mud	移动速度 $X_3/(\text{cm/s})$ Moving speed	冲刷深度 H/mm Scour depth	浮出率 $A/\%$ Floating rate
1	30.00	-50.00	6.00	289	83
2	60.00	-50.00	6.00	270	47
3	30.00	50.00	6.00	234	17
4	60.00	50.00	6.00	195	0
5	30.00	0.00	2.00	269	30
6	60.00	0.00	2.00	243	18
7	30.00	0.00	10.00	289	83
8	60.00	0.00	10.00	269	53
9	45.00	-50.00	2.00	267	31
10	45.00	50.00	2.00	186	0
11	45.00	-50.00	10.00	293	87
12	45.00	50.00	10.00	242	27
13	45.00	0.00	6.00	265	43
14	45.00	0.00	6.00	268	44
15	45.00	0.00	6.00	272	47
16	45.00	0.00	6.00	264	40
17	45.00	0.00	6.00	270	42

2.2 显著性检验与回归方程

试验数据采用 Design-Expert 8.0.5 软件进行分析,建立冲刷深度 H 、浮出率 A 的回归方程。

1)冲刷深度 H 。方差分析如表 5 所示。该回归模型显著,失拟检验不显著,此回归模型有效。试验因素 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_2^2 达到极显著水平; X_2X_3 达到显著水平;其他各项均不显著。由表 5 中的 F 值分析可知,影响冲刷深度的主次因素为喷头的入泥深度、推移液压缸的移动速度、喷头的喷射角度。将不显著项删除后得到回归方程,如式(7)所示。

$$H = 267.80 - 13.00X_1 - 32.75X_2 + 16.00X_3 + 7.50X_2X_3 - 20.65X_2^2 \quad (7)$$

表 5 冲刷深度 H 方差分析

Table 5 ANOVA for percentage of scour depth H

变异来源 Variation source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
模型 Model	14 123.64	9	1 569.29	48.76	<0.000 1**
X_1	1 352.00	1	1 352.00	42.01	0.000 3**
X_2	8 580.50	1	8 580.50	266.59	<0.000 1**
X_3	2 048.00	1	2 048.00	63.63	<0.000 1**
X_1X_2	100	1	100.00	3.11	0.121 3
X_1X_3	9	1	9.00	0.28	0.613 3
X_2X_3	225	1	225.00	6.99	0.033 2*
X_1^2	0.095	1	0.095	2.943E-003	0.958 2
X_2^2	1 795.46	1	1 795.46	55.78	0.000 1**
X_3^2	0.095	1	0.095	2.943E-003	0.958 2
残差 Residual	225.3	7	32.19		
失拟项 Lack of fit	180.5	3	60.17	5.37	0.069 0
纯误差 Pure error	44.8	4	11.20		
总和 Total sum	14 348.94	16			

注: ** 差异极显著($P<0.01$); * 差异显著($0.01<P\leq 0.05$);下同。Note: **, Highly significant($P<0.01$); *, Significant($0.01<P\leq 0.05$); the same as below.

2)浮出率 A 。浮出率方差分析如表 6 所示。该回归模型显著,失拟检验不显著,此回归模型有效。试验因素 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_2X_3 、 X_2^2 达到极显著水平; X_1X_2 达到显著水平;其他各项均不显著。由表 6 中的 F 值分析可知,影响浮出率的主次因素为喷头的入泥深度、推移液压缸的移动速度、喷头的喷射角度。

将不显著项删除后得到回归方程,如式(8)所示。

$$A = 43.20 - 11.88X_1 - 25.50X_2 + 21.38X_3 + 4.57X_1X_2 - 7.25X_2X_3 - 8.10X_2^2 \quad (8)$$

表 6 浮出率方差分析

Table 6 ANOVA for percentage of floating rate

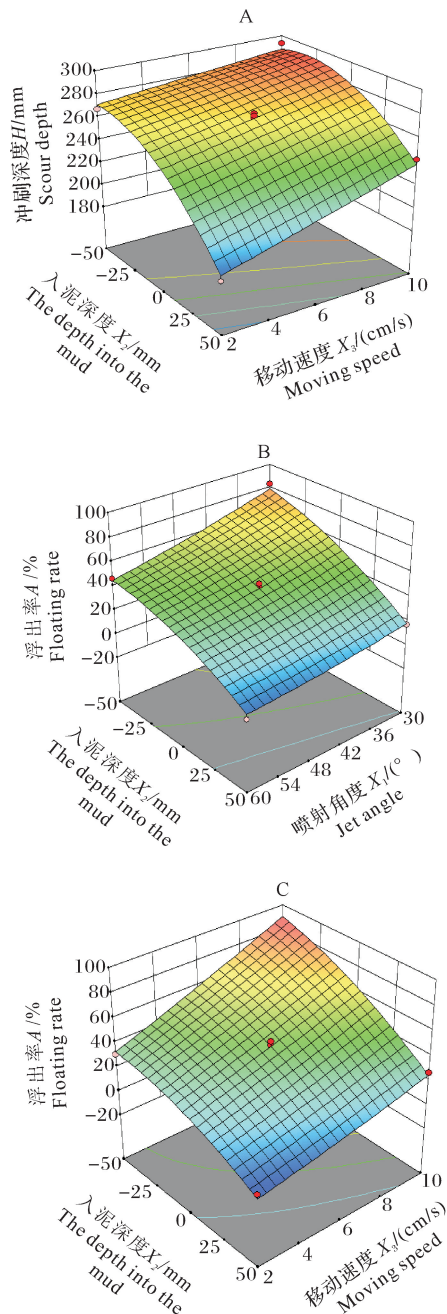
变异来源 Variation source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
模型 Model	10 651.98	9	1 183.55	78.49	<0.000 1**
X_1	1 128.13	1	1 128.13	74.82	<0.000 1**
X_2	5 202.00	1	5 202.00	344.99	<0.000 1**
X_3	3 655.13	1	3 655.13	242.41	<0.000 1**
X_1X_2	90.25	1	90.25	5.99	0.044 3*
X_1X_3	81.00	1	81.00	5.37	0.053 6
X_2X_3	210.25	1	210.25	13.94	0.007 3**
X_1^2	11.46	1	11.46	0.76	0.412 2
X_2^2	276.25	1	276.25	18.32	0.003 7**
X_3^2	5.57	1	5.57	0.37	0.562 6
残差 Residual	105.55	7	15.08		
失拟项 Lack of fit	78.75	3	26.25	3.92	0.110 1
纯误差 Pure error	26.80	4	6.70		
总和 Total sum	10 757.53	16			

2.3 响应曲面分析

由表 5 和表 6 可知,喷射角度 X_1 、入泥深度 X_2 、移动速度 X_3 对冲刷深度和浮出率均有显著影响,但它们的交互项影响不显著。对有显著影响的交互项进行响应曲面分析。

1)冲刷深度。由图 11A 可知,当入泥深度一定时,冲刷深度随着移动速度的增大而增大,即冲刷深度与移动速度呈正相关关系;当移动速度一定时,冲刷深度随着入泥深度的增大呈先增大随后减小的趋势。

2)浮出率。由图 11B 可知,当喷射角度一定时,浮出率随着入泥深度的增大呈先增大随后减小的趋势;若入泥深度一定时,浮出率随着喷射角度的减小而增大,即浮出率与喷射角度呈负相关关系。由图 11C 可知,当移动速度一定时,浮出率随着入泥深度的增大呈先增大随后减小的趋势;若入泥深度固定,浮出率随着移动速度的增大而增大,即浮出率与移动速度呈正相关关系。



A: X_2X_3 交互作用对冲刷深度的响应曲面 Response surface of scour depth in X_2X_3 interaction; B: X_1X_2 交互作用对浮出率的响应曲面 Response surface of floating rate in X_1X_2 interaction; C: X_2X_3 交互作用对浮出率的响应曲面 Response surface of floating rate in X_2X_3 interaction.

图 11 响应曲面图

Fig.11 Response surface

2.4 参数优化

为获得挖藕机作业时的最优参数组合,对回归模型进行优化分析。挖藕机的水力冲刷深度是决定

挖藕机采挖出莲藕的关键因素,因此将冲刷深度作为重点考察目标,约束条件为:

$$\begin{cases} H = \max(X_1, X_2, X_3) \\ 87 \leq A \leq 100 \\ 30 \leq X_1 \leq 60 \\ -50 \leq X_2 \leq 50 \\ 2 \leq X_3 \leq 10 \end{cases} \quad (9)$$

当喷射角度为 30° 、入泥深度为 -24.19 mm、移动速度为 10 cm/s 时挖藕机的冲刷性能达到最优状态,其冲刷深度为 299.963 mm,浮出率为 99.994% 。为验证仿真结果的可靠性,根据实际作业将入泥深度取为 -24 mm、喷射角度为 30° 、移动速度为 10 cm/s 开展验证试验,试验重复 3 次,取其结果的平均值,则冲刷深度为 302 mm,浮出率为 90% 。

3 讨论

为减轻劳动强度,提高莲藕的采挖效率,本研究设计了一种手扶水力冲刷式挖藕机。采用喷头与污水潜水泵“二对二”的配置方式,提供足够的流量和压力。液压系统仿真分析和调节性能试验表明,液压系统满足工作要求,但应注意泥水对转速的影响。通过冲刷性能试验表明,喷头的喷射角度、喷头的入泥深度、推移液压缸的移动速度均对挖藕机的冲刷深度和浮出率有极显著影响;喷头的入泥深度和推移液压缸的移动速度的交互作用对冲刷深度和浮出率有极显著影响;喷头的喷射角度和喷头的入泥深度的交互作用对莲藕的浮出率有显著影响。通过 Design-Expert 8.0.5 软件的参数优化分析,在喷射角度为 30° 、入泥深度为 -24 mm、移动速度为 10 cm/s 时挖藕机的冲刷性能达到最优状态,通过试验验证,冲刷深度为 302 mm,浮出率为 90% ,试验时的系统误差可能使浮出率的试验结果比仿真优化结果略低。

参考文献 References

- [1] 王绍金.莲藕种植要点及产业发展思路[J].中国果菜,2018,38(4):48-50.WANG S J.Key point of planting technology on lotus root and industrial development ideas[J].China fruit and vegetable,2018,38(4):48-50 (in Chinese with English abstract).
- [2] 刘义满,柯卫东,黄新芳.莲藕人工采挖和机械采挖技术[J].长江蔬菜,2014(21):10-15.LIU Y M,KE W D,HUANG X F.

- Artificial and mechanical excavation techniques of lotus root [J]. Journal of Changjiang vegetables, 2014(21): 10-15 (in Chinese).
- [3] 黄海东, 张国忠, 夏俊芳, 等. 4CWO-3.2 型船式挖藕机的研制 [J]. 湖北农机化, 2008(3): 24-25. HUANG H D, ZHANG G Z, XIA J F, et al. Research and development of 4CWO-3.2 type ship dredging machine [J]. Hubei agricultural mechanization, 2008(3): 24-25 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王维, 顾宝兴, 姬长英. 4SWJ-1 型船式水力挖藕机研制 [J]. 农业机械, 2009(4): 88-90. WANG W, GU B X, JI C Y. Research and development of 4SWJ-1 ship type hydraulic lotus root digging machine [J]. Farm machinery, 2009(4): 88-90 (in Chinese).
- [5] 李超. 4CW-2.6 型船式挖藕机实现四个创新 [J]. 农机科技推广, 2011(8): 57. LI C. Four innovations of 4CW-2.6 ship type lotus root digging machine [J]. Agriculture machinery technology extension, 2011(8): 57 (in Chinese).
- [6] 张耀宏, 姜喆雄. 喷流式挖藕机的研制 [J]. 粮油加工与食品机械, 1982(8): 33-38. ZHANG Y H, JIANG Z X. Research and development of jet type lotus root digging machine [J]. Cereals and oils processing and food machinery, 1982(8): 33-38 (in Chinese).
- [7] 徐文强. 高压水力水田莲藕采挖机设计与试验 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2018. XU W Q. Design and experiment of high pressure hydraulic excavator of mining lotus paddy field [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [8] 张绍槐. 喷射钻井理论与计算 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1986. ZHANG S H. Theory and calculation of jet drilling [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986 (in Chinese).
- [9] CHEN L, SIORES E, WONG W C K. Optimising abrasive waterjet cutting of ceramic materials [J]. Journal of materials processing technology, 1998(74): 251-254.
- [10] HASHISH M, DU-PLESSIS M P. Prediction equations relating high velocity jet cutting performance to stand off distance and multipasses [J]. Journal of engineering for industry, 1979, 101(3): 311-318.
- [11] 李震, 刘新泰, 张玉宝. 喷嘴结构参数对射流流场影响的仿真与研究 [J]. 煤矿机械, 2012, 33(1): 63-65. LI Z, LIU X T, ZHANG Y B. Structural parameters of jet nozzle affect jet flow field simulation and research [J]. Coal mine machinery, 2012, 33(1): 63-65 (in Chinese with English abstract).
- [12] 刘晓明. 地铁钢轨打磨机整体及液压系统设计 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015. LIU X M. The overall scheme and hydraulic control system design of metro rail grinding machine [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [13] 王会丽. 棉花移栽机关键部件的研究与试验 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2017. WANG H L. Design and experiment study on key component of cotton transplanter [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [14] 郭洋民. 水田莲藕采挖机设计与研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2015. GUO Y M. The research and design of lotus digging machine for paddy field [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [15] 梁全, 谢基晨, 聂利卫. 液压系统 AMESim 计算机仿真进阶教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016. LIANG Q, XIE J C, NIE L W. Advanced course of AMESim computer simulation of hydraulic system [M]. Beijing: China Machine Press, 2016 (in Chinese).
- [16] 付永领, 齐海涛. LMS Imagine. Lab AMESim 系统建模和仿真实例教程 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011. FU Y L, QI H T. LMS image. Lab AMESim system modeling and simulation example tutorial [M]. Beijing: Beihang University Press, 2011 (in Chinese).
- [17] 冯闯闯. 螺旋推进式挖藕机设计与试验 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2020. FENG C C. Design and experiment of screw-propelled type lotus root digging machine [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [18] 林一涛. 乘坐式浮筒挖藕机设计与试验 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2019. LIN Y T. Design and experiment of a ride type float digging machine for lotus root [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [19] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理 (第2版) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008. LI Y Y, HU C R. Experimental design and data processing [M]. 2nd ed. Beijing: Science press, 2008 (in Chinese).
- [20] 徐向宏, 何明珠. 试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2010. XU X H, HE M Z. Experimental design and application of Design-Expert and SPSS [M]. Beijing: Science Publishing, 2010 (in Chinese).
- [21] 吴昊. 射流自旋式挖藕机工作机理与试验研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2018. WU H. Study on experimental and working mechanism of jetting spin type digging lotus root machine [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018 (in Chinese with English abstract).

Design and experiment of walking hydraulic scour type lotus root digging machine

HUANG Lin, ZHOU Yong, ZHANG Guozhong, TU Ming,
LIU Yan, WANG Hongbo, WU Zedong

*College of Engineering, Huazhong Agricultural University/
Key Laboratory of Agricultural Equipment
in Mid-Lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,
Wuhan 430070, China*

Abstract At present, the mechanized harvest of lotus roots is low, the labor intensity of workers is high, and the harvesting efficiency of lotus roots is low. Therefore, a walking hydraulic scour type lotus root digging machine was designed. Hydraulic system was used to control the reciprocating movement of sewage submersible pump and nozzle. Two sewage submersible pumps were used to control one nozzle respectively to make the water flow have enough flow and pressure. The hydraulic control system was simulated and analyzed by AMESim, it was found that the hydraulic system works well through the adjustment test of the hydraulic system. In addition, a Box-Behnken test was carried out, and the response surface analysis and parameter optimization analysis were carried out, where the jet angle of the nozzle, the depth of the nozzle into the mud and the moving speed of the hydraulic cylinder for pushing were taken as the test factors, while the scour depth and the floating rate as test indexes for design. The experimental results show that when the jet angle of the nozzle is 30° , the depth of the nozzle into the mud is -24 mm , and the moving speed of the hydraulic cylinder for pushing is 10 cm/s , the scouring performance of the machine reaches the optimal state, at this moment the scour depth is 302 mm , and the floating rate is 90% . The research can provide reference for the design and optimization of the lotus root digging machine.

Keywords lotus root; lotus root digging machine; mechanized mining and excavation; hydraulic scour; hydraulic system; AMESim

(责任编辑:陆文昌)