

刘冉,周勇,张国忠,等.往复式水力冲刷挖藕装置试验平台设计与试验[J].华中农业大学学报,2025,44(5):229-240.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.05.023

## 往复式水力冲刷挖藕装置试验平台设计与试验

刘冉,周勇,张国忠,陶国瑛,唐楠锐,唐昊建,宿衍强

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

**摘要** 针对目前传统水力挖藕喷头的固定冲刷方式存在作业效率低、漏冲现象严重的问题,设计一种往复式水力冲刷挖藕装置试验平台。利用Fluent仿真对喷头形状开展单因素试验,得到喷头最优形状为锥柱形。基于EDEM-Fluent耦合仿真对喷头关键尺寸及工作参数开展正交试验,得到喷头最优参数为出水口直径15 mm、离泥高度50 mm及射流角度 $30^{\circ}$ 。采用积分法对喷头运动轨迹及冲刷面积进行理论分析,并利用Matlab计算得到喷头理论最优前进速度为17.3 mm/s、摆动速度为130.7 mm/s。基于往复式水力冲刷挖藕装置试验平台开展单喷头冲刷淤泥性能试验,结果显示喷头关键尺寸及工作参数仿真试验可靠。为探究射流角度、前进速度、摆动速度对莲藕挖净率的综合影响,开展Box-Behnken中心组合性能试验,结果显示,当射流角度为 $27.4^{\circ}$ 、前进速度为10.6 mm/s、摆动速度为191.1 mm/s时,莲藕挖净率最大,仿真模拟与台架试验结果显示莲藕挖净率分别为93%和91%。

**关键词** 往复式水力冲刷; 莲藕挖藕机; 液压系统; Fluent流体仿真; Fluent-EDEM耦合仿真

**中图分类号** S225.92 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)05-0229-12

莲藕(lotus root)又称湖藕、菜藕等,是莲的地下膨大茎,生长在泥下约0.15~0.35 m深度处,单支长度可达0.5~2.0 m,口感微甜爽脆,可作为润喉清痰、清热解毒的药材,还可加工成藕粉、藕片等农副产品,是我国重要水生经济作物<sup>[1-4]</sup>。我国莲藕广泛种植于湖北、江苏及山东等省份,种植历史已有3 000 a,现我国种植总面积已超40万 $\text{hm}^2$ ,年总产量达749.9万t,创造了巨大经济价值<sup>[5-7]</sup>。

目前我国藕农主要依赖人工采挖来进行莲藕采收,方法有铲式采挖和手持水枪式采挖2种。铲式采挖是使用挖藕专用锹将莲藕上方淤泥翻开,然后取出藕。手持水枪式采挖则是利用高压水枪冲刷莲藕上方及周围的淤泥,然后将莲藕从泥中抽出或等待莲藕自动浮出水面。以上2种采挖方式劳动强度极大且作业效率较低。近些年国内外众多学者研发了许多不同形式的莲藕采收机械,基本原理都是将水力冲刷系统搭载在浮筒<sup>[8-10]</sup>、船体<sup>[11-13]</sup>、水田轮<sup>[14]</sup>、履带<sup>[15-20]</sup>、螺旋滚筒<sup>[21-22]</sup>等行走装置上,但喷头冲刷方式较为单一,大多为固定冲刷且冲刷效率低,漏冲现象严重,严重影响了莲藕采收效率。

为进一步提高莲藕采收效率,本研究设计一种往复式水力冲刷挖藕装置试验平台,对水力系统进行设计与优化,详细分析喷头运动轨迹对冲刷面积的影响,考察各因素对挖藕效果的影响,以期对莲藕采收机械的研究及推广提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 总体结构与工作原理

往复式水力冲刷挖藕装置试验平台总体结构如图1所示,主要由液压站、液压油缸、分水器高度调节装置、双向螺旋往复丝杆、分水器角度调节装置、挖藕喷头、模拟藕田土槽、电动绞盘、分水器、直线滑块导轨、汽油箱、高压水管、水泵、汽油发动机及轨道机架等组成。

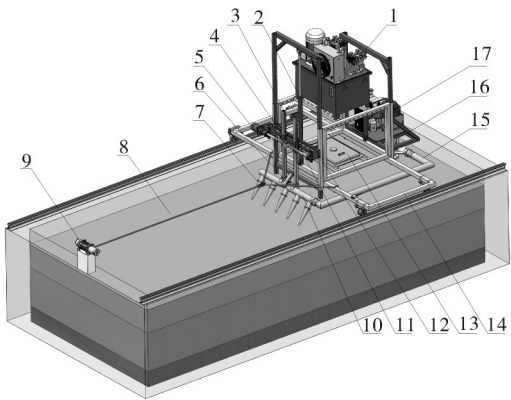
试验平台的动力由三相异步电机、汽油发动机及直流电机3部分构成,三相异步电机驱动液压油泵,从而带动整个液压系统正常工作,汽油发动机与水泵直联并为其提供动力,直流电机驱动绞盘转动,进而牵引整体前进。挖藕工作时,先调节前后置液压油缸升降,使挖藕喷头和水泵抵达适宜深度,同时

收稿日期:2024-08-24

基金项目:国家特色蔬菜产业技术体系专项(CARS-24-D-02)

刘冉,E-mail:1752165744@qq.com

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



1. 液压系统 Hydraulic system; 2. 液压油缸 Hydraulic cylinder; 3. 分水器高度调节装置 Water distributor height adjusting device; 4. 双向螺旋往复丝杆螺母 Reciprocating screw nut; 5. 液压马达 Hydraulic motor; 6. 分水器角度调节装置 Water distributor angle adjusting device; 7. 挖藕喷头 Lotus root digging nozzle; 8. 模拟藕田土槽 Simulated lotus root field soil groove; 9. 电动绞盘 Electric winch; 10. 分水器 Water distributor; 11. 双向螺旋往复丝杆 Reciprocating screw; 12. 直线滑块导轨 Linear slider guide; 13. 汽油箱 Petrol tank; 14. 机架 Frame; 15. 高压水管 High-pressure water hose; 16. 水泵 Water pump; 17. 汽油发动机 Petrol engine.

图1 挖藕装置试验平台总体结构图  
Fig.1 Overall structural diagram of the lotus root digging device test platform

改变销子孔位还可调节喷头射流角度。液压马达驱动双向螺旋往复丝杆转动,丝杆螺母带动直线导轨滑块做往复运动,从而带动分水器喷头做往复摆动,同时水泵底部吸水,经高压水管和分水器后,最后由喷头喷出以冲刷莲藕上方淤泥,直至莲藕靠自身浮力自动浮出水面后进行人工捡拾,装置主要性能参数如表1所示。

表1 装置主要性能参数	
Table1 Main performance parameters	
参数 Parameter	数值 Value
外形尺寸(长×宽×深)/m Dimensions of test soil tank( $L \times W \times D$ )	2.2×1.5×1.5
作业速度/(mm/s) Operating speed	0~150
作业幅宽/mm Working width	1 600
水泵入水深度/mm Pump depth	0~300
喷头往复摆动速度/(mm/s) Nozzle reciprocating speed	0~300

1.2 汽油机水泵选型与分水器结构设计

通过实地调研得知,挖藕工人在采挖莲藕时所用水泵扬程为20 m。考虑到水路能量损失,选择湖南万象机械有限公司生产的绞刀式污水泵,该水泵流量为80 m<sup>3</sup>/h,扬程为30 m,出水口直径为75 mm。

配套动力选用隆鑫2P77F型汽油发动机,该机最大功率为17.1 kW,最大扭矩为48 N·m,额定转速为3 000 r/min。

鉴于模拟藕田土槽尺寸及分水器往复摆动要求,将分水器设计为侧端单口进水和5个出水口,结构如图2所示。为减少水路能量损失,设置分水器直径 $D$ 与水泵出水口直径一致。设置分水器总长度 $L$ 为1 000 mm,出水口间隔距离 $C$ 为250 mm。为方便出水口与喷头用螺纹连接,在出水口内面加工DN50螺纹,即出水口直径 $d$ 为57 mm。连接水泵和分水器之间的水管,材质采用消防高压软管,为减少水路能量损失,选取直径为75 mm的消防高压软管,软管两头采用消防快接头分别与分水器、水泵连接,操作方便且工作可靠。

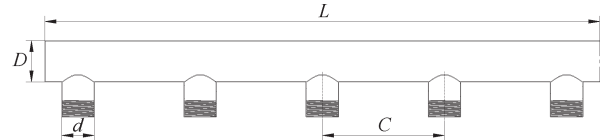


图2 分水器结构图  
Fig.2 Distributor structure diagram

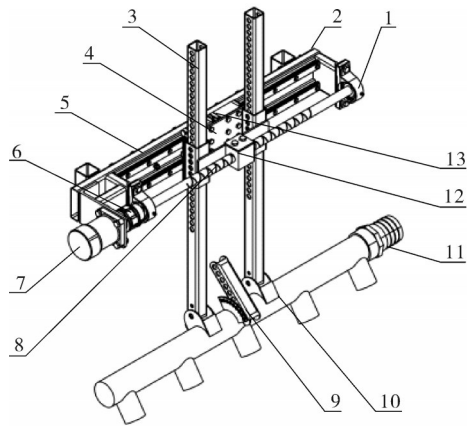
1.3 分水器多轴运动装置设计

该装置主要由双向螺旋往复丝杆、直线滑块导轨、液压马达、高度和角度调节方管等组成,结构如图3所示。双向螺旋往复丝杆的功能是将液压马达的旋转运动转化成丝杆螺母的往复线性运动,并通过连接板带动导轨滑块进行往复运动,最终带动分水器进行往复线性运动。通过改变高度和角度调节方管的孔销位置,可以调节分水器的射流高度和射流角度。基于模拟藕田土槽尺寸和分水器长度,将双向螺旋往复丝杆设计为直径25 mm、行程475 mm、螺距25 mm、总长875 mm。

1.4 喷头形状设计及优化

经对湖北省莲藕采收实地调研和查阅相关资料<sup>[23]</sup>,建立3种挖藕喷头结构,如图4所示。为探究最佳射流特性的喷头形状,拟定3种喷头的结构参数相同:喷头入水口直径 $D$ 为57 mm、喷头出水口直径 $d$ 为20 mm、圆锥段总长 $L$ 为150 mm、圆柱入口段长度 $H$ 为20 mm、圆柱和扇形出口段长度 $h$ 为30 mm、扇形出水口宽度 $B$ 为40 mm。利用Fluent软件对以上3种喷头形状开展单因素试验,假设管路及源动力保持不变且忽略喷头结构对水泵供水性能的影响。

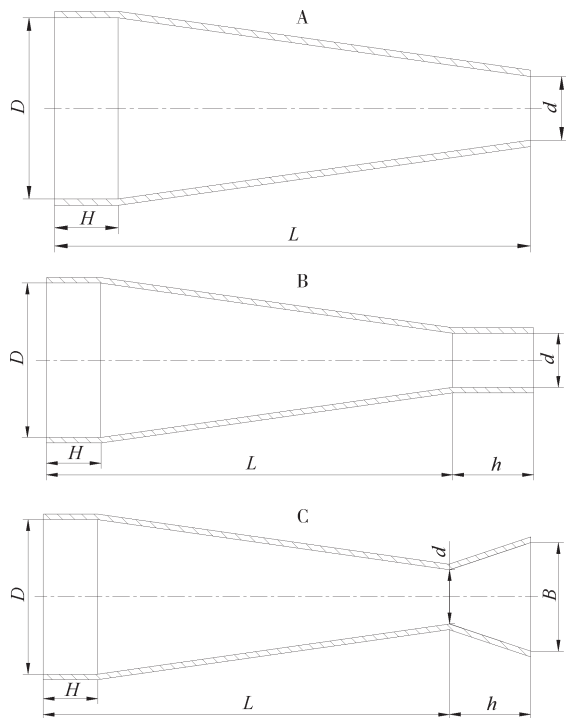
根据水泵额定流量为80 m<sup>3</sup>/h,可计算单个喷头入水口的额定流量为16 m<sup>3</sup>/h,即在Fluent中边界条



1. 轴承座 Bearing housing; 2. 导轨底座 Guide rail base; 3. 高度调节方管 Height adjustable square tube; 4. 连接板 Connection plate; 5. 直线导轨 Linear guide; 6. 联轴器 Coupling; 7. 液压马达 Hydraulic motor; 8. 双向螺旋往复丝杆 Bidirectional helical reciprocating screws; 9. 角度调节方管 Angle adjustable square tube; 10. 分水器 Water distributor; 11. 消防快接水头 Fire protection quick connect head; 12. 双向螺旋往复丝杆螺母 Reciprocating screw nut; 13. 导轨滑块 Guide rail slider.

图3 分水器多轴运动装置结构图

Fig.3 Structure of manifold multi-axis motion device



A: 圆锥形 Conic; B: 锥柱形 Conical-cylindrical; C: 扇形 Sector.

图4 3种喷嘴结构示意图

Fig.4 Three types of printheads

件设置每秒入口流入质量为 4.44 kg, 出口压力为水深 400 mm 处的压强 4 kPa, 湍流模型为 K-epsilon 模型, 采用 Simple 算法进行求解计算, 迭代次数设置为

1 000 次, 当变量残差值均低于  $1 \times 10^{-3}$  时, 仿真结果收敛并停止迭代计算。

喷头剖面流体速度云图中的红色部分为等速核区域(图5), 其面积大小可反应喷头射流冲击能力强弱; 喷头中心轴线流体速度变化可直观了解该喷头产生的射流在淹没状态时流速衰减情况; 喷头进出口截面压力变化增量可反映喷头增压能力; 喷头出口截面处流体的湍流强度可反映该喷头产生射流的稳定性, 湍流强度越小表明射流越稳定。综上, 选择以上4个指标作为单因素试验指标, 仿真试验结果如图5所示。由图5和图6可知, 锥柱形喷头等速核区域面积最大、射流速度衰减最慢, 表明锥柱形喷头射流冲击能力强且射流聚集性好。由图7可知, 锥柱形喷头的进出口截面压力增量较大且湍流强度最小, 表明锥柱形喷头增压能力强且射流稳定性较好。综上, 锥柱形喷头较其他2种喷头更适宜于挖藕作业。

### 1.5 喷头关键尺寸及工作参数确定

喷头的出水口直径、离泥距离和射流角度等关键尺寸及工作参数对喷头射流性能有较大影响<sup>[24]</sup>。基于对喷头形状的研究, 通过 EDEM-Fluent 耦合静网格仿真的方法, 来模拟单个锥柱形喷头固定冲刷淤泥的过程, 探究喷头离泥高度  $a$ 、出水口直径  $b$  及射流角度  $c$  对锥柱形喷头射流性能的影响关系, 以土壤冲刷深度  $y_1$  和宽度  $y_2$  为试验指标, 因素水平编码如表2所示, 按照正交表  $L_9(3^4)$  设计得到如表3所示的试验方案。

采用 SolidWorks 软件对锥柱形喷头进行三维建模并将其导入 Fluent 软件中, Fluent 软件中仿真算法选择欧拉法, 耦合边界条件、湍流模型、计算步长与本文“1.4 喷头形状设计及优化”一致。在 EDEM 软件中建立长、宽、高分别为 800、800、450 mm 的颗粒床, 其中 Hertz-Mindlin with JKR 模型是考虑颗粒间范德华力影响和黏性接触的模型<sup>[25-26]</sup>, 由于土槽内土壤具有黏性, 因此土壤-土壤间、土壤-铁间均采用 JKR 接触模型。通过环刀法测得土槽泥土的密度为  $1\,710\text{ kg/m}^3$ , 其他仿真参数选用课题组前期研究已完成标定且公布的本征参数和接触参数<sup>[27]</sup>。

由表4可知, 冲刷深度  $y_1$  随离泥高度  $a$ 、出水口直径  $b$  及射流倾角  $c$  增加而减小; 冲刷宽度  $y_2$  随出水口直径  $b$  增加而减小, 随射流倾角  $c$  增加而增加, 随离泥高度  $a$  增加呈现先增加减小, 其原因为: 当喷头紧贴淤泥表面时, 射流坑内淤泥不易被冲刷出来, 而当喷



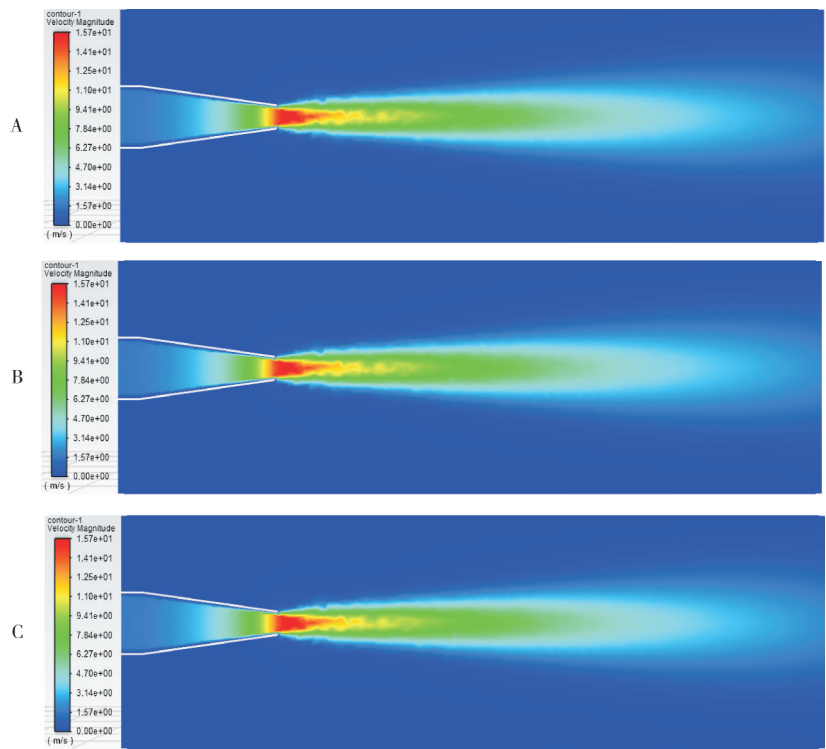


图 5 喷头剖面流体速度云图  
Fig.5 Nozzle profile fluid velocity cloud

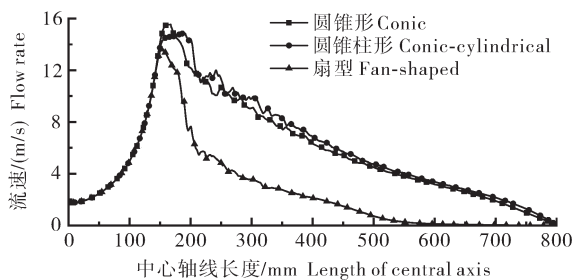


图 6 喷头中心轴线流体速度变化曲线  
Fig.6 Fluid velocity variation curve at nozzle centre axis

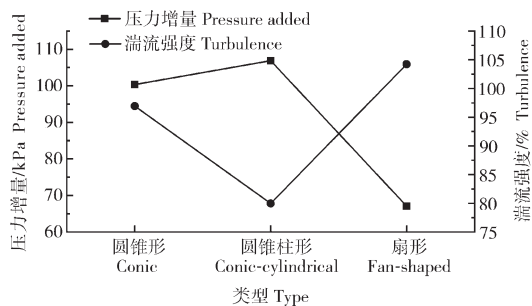


图 7 喷头进出口截面压力变化和湍流强度  
Fig.7 Pressure variation and turbulence intensity of nozzle inlet and outlet sections

头离淤泥高度过大时,射流水束能量损失严重,难以对淤泥产生显著冲刷作用。极差分析只说明了试验因素对试验指标的影响趋势,由于本研究为多指标问题,仅通过极差分析难以得到最优方案,还需对试

验结果进行方差分析,如表 5 所示,综合试验因素对各指标的影响显著性,最终确定最优方案。

表 2  $L_9(3^4)$  正交试验因素水平编码表

Table 2  $L_9(3^4)$  orthogonal test factor level coding table

编码 Code	$a/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	$c/(^\circ)$
1	0	15	0
2	50	20	30
3	100	25	60

表 3  $L_9(3^4)$  正交试验方案及结果

Table 3  $L_9(3^4)$  orthogonal test programme and results

序号 No.	$x_1$	$x_2$	空列 Blank	$x_3$	$y_1/\text{mm}$	$y_2/\text{mm}$
1	1	1	1	1	447.9	121.5
2	1	2	2	2	377.1	131
3	1	3	3	3	177.9	137.6
4	2	1	2	3	269.5	230.1
5	2	2	3	1	371.2	117.7
6	2	3	1	2	243.8	129
7	3	1	3	2	391.6	162.5
8	3	2	1	3	177.2	150.2
9	3	3	2	1	195.9	33.6

注: $x_1$ 、 $x_2$ 和 $x_3$ 为喷头离泥高度、出水口直径和射流角度的编码值。Note: $x_1$ 、 $x_2$  and  $x_3$  are coded values nozzle height above mud, outlet diameter and jet angle.

表 4 喷头关键参数极差分析表  
Table 4 Extreme variance analysis table of  
nozzle key parameters

指标 Norm	项目 Item	<i>a</i>	<i>b</i>	空列 Blank	<i>c</i>
<i>y</i> <sub>1</sub> /mm	<i>K</i> <sub>1</sub>	1 002.9	1 109	868.9	1 014.9
	<i>K</i> <sub>2</sub>	884.5	925.5	842.4	1 012.5
	<i>K</i> <sub>3</sub>	764.6	617.5	940.7	624.6
	<i>k</i> <sub>1</sub>	334.3	369.7	289.6	338.3
	<i>k</i> <sub>2</sub>	294.8	308.5	280.8	337.5
	<i>k</i> <sub>3</sub>	254.9	205.8	313.6	208.2
	<i>R</i>	79.4	163.9	32.8	130.1
	因素主次 Prioritise factors	<i>bca</i>			
	优方案 Optimization	<i>b</i> <sub>1</sub> <i>c</i> <sub>1</sub> <i>a</i> <sub>1</sub>			
	<i>K</i> <sub>1</sub>	390.1	514	400.7	272.8
<i>y</i> <sub>2</sub> /mm	<i>K</i> <sub>2</sub>	476.8	398.9	394.7	422.4
	<i>K</i> <sub>3</sub>	346.2	300.2	417.7	517.9
	<i>k</i> <sub>1</sub>	130	171.3	133.6	90.9
	<i>k</i> <sub>2</sub>	158.9	133	131.6	140.8
	<i>k</i> <sub>3</sub>	115.4	100.1	139.2	172.6
	<i>R</i>	43.5	71.2	7.6	81.7
	因素主次 Prioritise factors	<i>cba</i>			
	优方案 Optimization	<i>c</i> <sub>3</sub> <i>b</i> <sub>1</sub> <i>a</i> <sub>2</sub>			

由表 5 可知,离泥高度 *a* 对冲刷宽度 *y*<sub>2</sub> 影响为显著因素( $P<0.05$ ),对冲刷深度 *y*<sub>1</sub> 影响并不显著( $P>0.05$ ),因此重点考虑冲刷宽度较佳时,离泥高度 *a* 取 *a*<sub>2</sub> 为优水平;出水口直径 *b* 对冲刷深度 *y*<sub>1</sub> 和冲刷宽度

*y*<sub>2</sub> 影响均为显著( $P<0.05$ ),且对于 2 个考察指标的优水平均为 *b*<sub>1</sub>,故出水口直径 *b* 取 *b*<sub>1</sub> 为优水平;射流角度 *c* 对冲刷宽度 *y*<sub>2</sub> 的影响为极显著( $P<0.01$ ),对冲刷深度 *y*<sub>1</sub> 的影响为显著( $P<0.05$ ),但对于 2 个考察指标的优水平不相同,对冲刷宽度 *y*<sub>2</sub> 影响时,优水平为 *c*<sub>3</sub>,对冲刷深度 *y*<sub>1</sub> 影响时,优水平为因素 *c*<sub>1</sub>,但当射流角度 *c* 处于 *c*<sub>1</sub> 和 *c*<sub>2</sub> 时,冲刷深度的变化不大,但冲刷宽度变化较大,故射流角度 *c* 取 *c*<sub>2</sub> 为优水平。综上优方案为 *a*<sub>2</sub>*b*<sub>1</sub>*c*<sub>2</sub>,但该方案不在已做正交试验项目之中,需做重复仿真试验取平均值,试验结果为冲刷深度 433.2 mm,冲刷宽度 126.6 mm。

优方案的冲刷深度 *y*<sub>1</sub> 处于所作试验中的次优结果,但是与最优值相差不大,且远大于正交试验中的平均值;优方案的冲刷深度 *y*<sub>2</sub> 为已做试验项目的中等水平状态,但是与所作试验冲刷宽度的均值 134.8 mm 相差不大,分析原因为因素 *c* 对冲刷宽度 *y*<sub>2</sub> 影响为极显著因素,故因素 *c* 取 30° 时,冲刷宽度变化显著。故最终确定方案 *a*<sub>2</sub>*b*<sub>1</sub>*c*<sub>2</sub> 为优方案,即喷头的离泥高度为 50 mm、出水口直径为 15 mm、射流倾角 30° 时,挖藕喷头具有较佳的淤泥冲刷性能。

1.6 单喷头运动轨迹分析及优化

为探究挖藕喷头往复直线摆动冲刷机制并提高冲刷效率,对单喷头的运动轨迹及冲刷面积进行理论分析,并利用 Matlab 软件对喷头运动轨迹进行优化,最终得到喷头最优前进速度和摆动速度。假设单喷头有效射流冲刷水束截面为圆形,由“1.5 喷头关

表 5 喷头关键参数试验结果方差分析  
Table 5 Anova table of test results of nozzle key parameters

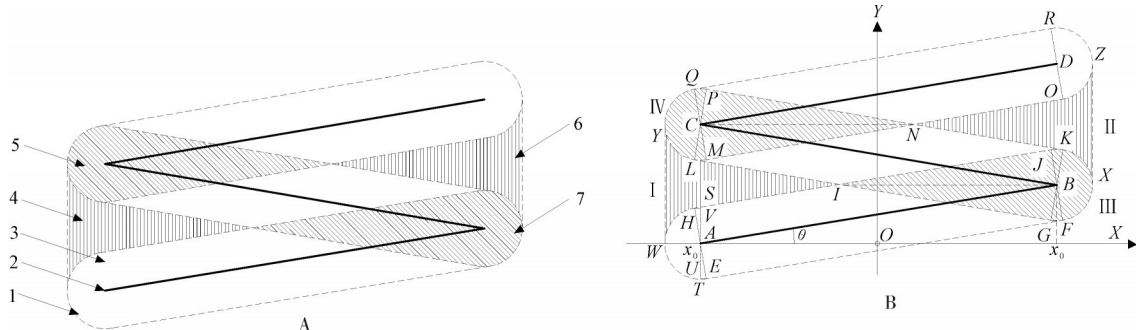
指标 Norm	变异来源 Source of variation	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>
冲刷深度 <i>y</i> <sub>1</sub> Scouring depth	模型 Model	84 232.913	6	14 038.819	16.282	0.039*
	<i>x</i> <sub>1</sub>	9 464.607	2	4 732.303	5.488	0.154
	<i>x</i> <sub>2</sub>	41 123.167	2	20 561.583	23.847	0.040*
	<i>x</i> <sub>3</sub>	33 645.140	2	16 822.570	19.510	0.049*
	误差 Errors	1 724.487	2	862.243		
	总计 Total	867 413.400	9			
冲刷宽度 <i>y</i> <sub>2</sub> Scrub width	模型 Model	20 757.420	6	3 459.570	72.240	0.014*
	<i>x</i> <sub>1</sub>	2 940.620	2	1 470.310	30.702	0.032*
	<i>x</i> <sub>2</sub>	7 640.660	2	3 820.330	79.773	0.012*
	<i>x</i> <sub>3</sub>	10 176.140	2	5 088.070	106.245	0.009**
	误差 Errors	95.780	2	47.890		
	总计 Total	184 392.560	9			

注:\*\*表示影响极显著, $P<0.01$ ;\*表示影响显著, $0.01\leq P<0.05$ ,下同。Note:\*\* indicates that the impact is extremely significant, $P<0.01$ ;\* indicates that the impact is significant, $0.01\leq P<0.05$ ,the same as below.

键尺寸及工作参数确定”知该截面圆直径 $d$ 为126.6 mm,圆廓线随喷头中心运动,最终得到整体冲刷区域。由于喷头运动曲线具有周期性,现取其中3段轨迹并将该冲刷区域分为1次冲刷区、重冲区及漏冲区,如图8A所示。

1)喷头中心运动轨迹曲线方程。单喷头运动的

绝对运动轨迹是由台架平台前进匀速直线运动与双向螺旋往复丝杆螺母相对于台架平台的往复直线摆动所组成的一种复合运动,运动轨迹呈现折线状。以运动轨迹对称轴线上某点为坐标原点 $O$ ,以往复运动方向为 $X$ 轴,以前进方向为 $Y$ 轴,创建平面直角坐标系,如图8B所示。



A:单喷头运动轨迹与冲刷范围图 Single spray nozzle trajectory and flushing range diagram; B:单喷头运动轨迹与冲刷范围坐标图 Coordinate diagram of single nozzle trajectory and flushing range; 1. 冲刷范围廓线 Flushing range contour; 2. 喷嘴中心运动轨迹 Nozzle centre trajectory; 3. 一次冲刷区 Primary flushing zone; 4. 漏冲区 I Leakage zone I; 5. 重冲区 IV Heavy flushing zone IV; 6. 漏冲区 II Leakage zone II; 7. 重冲区 III Heavy flushing zone III.

图8 单喷头运动分析图

Fig.8 Single nozzle motion analysis diagram

喷头单段摆动所需时间 $t_0$ 的计算表达式为:

$$t_0 = \frac{2x_0}{v_s} \quad (1)$$

式(1)中: $x_0$ 为丝杆螺母行程两端点坐标,mm; $v_s$ 为丝杆螺母往复运动速度,mm/s。

AB、BC、CD段曲线方程的计算表达式分别为:

$$AB: \begin{cases} x = -x_0 + v_s t \\ y = v_m t \end{cases} \quad (2)$$

$$BC: \begin{cases} x = x_0 - v_s(t - t_0) \\ y = v_m t \end{cases} \quad (3)$$

$$CD: \begin{cases} x = -x_0 + v_s(t - 2t_0) \\ y = v_m t \end{cases} \quad (4)$$

式(2)~(4)中: $v_m$ 为台架前进速度,mm/s; $t$ 为运动时间,s; $t_0$ 为喷嘴单段摆动所需时间,s。故可得出喷头中心运动轨迹任意一点轨迹方程的计算表达式为:

$$\begin{cases} x_i = (-1)^n \{x_0 - v_s[t - (n-1)t_0]\} \\ y_i = v_m t \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: $x_i, y_i$ 为喷嘴中心轨迹任意一点坐标; $n$ 为摆动段数,其值取1到 $n$ 。

2)重冲区及漏冲区面积计算。区域I与区域II为喷头有效射流范围达不到的漏冲区,区域III与区域IV为喷头有效射流范围相重合的重冲区,将对以上区域面积进行理论分析并用积分法表示。

AB段有以下数量关系:

$$\tan \theta = \frac{v_m t_0}{v_s t_0} = \frac{v_m}{v_s} \quad (6)$$

$$\theta = \arctan \frac{v_m}{v_s} \quad (7)$$

式(6)~(7)中: $\theta$ 为曲线AB与 $x$ 坐标轴夹角,°。

曲线EF和曲线HJ为喷头在AB段运动时冲刷面积的轮廓曲线,在任意时间 $t$ 时,曲线EF的纵坐标始终比曲线AB小 $|AU|$ 长度,横坐标始终比曲线AB大 $|EU|$ 长度,曲线HJ的纵坐标始终比曲线AB大 $|AV|$ 长度,横坐标始终比曲线AB小 $|HV|$ 长度,由此可得曲线EF、HJ的曲线方程的计算表达式,分别如式(8)~(9)所示,并分别记为 $f_1(x, y)$ 、 $f_2(x, y)$ :

$$\begin{cases} x = -x_0 + v_s t + \frac{d \sin \theta}{2} \\ y = v_m t - \frac{d \cos \theta}{2} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x = -x_0 + v_s t - \frac{d \sin \theta}{2} \\ y = v_m t + \frac{d \cos \theta}{2} \end{cases} \quad (9)$$

同理,BC段运动时冲刷面积的轮廓曲线LG、PK曲线方程表达式,分别如式(10)、(11)所示,并分别记为 $f_3(x, y)$ 、 $f_4(x, y)$ ;CD段运动时冲刷面积的轮廓曲线MO、QR曲线方程的计算表达式,分别如式

(12)、(13)所示,并分别记为 $f_5(x,y)$ 、 $f_6(x,y)$ 。

$$\begin{cases} x = x_0 - v_s(t - t_0) - \frac{d \sin \theta}{2} \\ y = v_m t - \frac{d \cos \theta}{2} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} x = x_0 - v_s(t - t_0) + \frac{d \sin \theta}{2} \\ y = v_m t + \frac{d \cos \theta}{2} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} x = -x_0 + v_s(t - 2t_0) + \frac{d \sin \theta}{2} \\ y = v_m t - \frac{d \cos \theta}{2} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} x = -x_0 + v_s(t - 2t_0) - \frac{d \sin \theta}{2} \\ y = v_m t + \frac{d \cos \theta}{2} \end{cases} \quad (13)$$

以A点 $(-x_0, 0)$ 、B点 $(x_0, 2x_0 \tan \theta)$ 、C点 $(-x_0, 4x_0 \tan \theta)$ 、D点 $(x_0, 6x_0 \tan \theta)$ 为圆心的圆弧HE、JG、PM、RO曲线方程的计算表达式,分别如式(14)~(17)所示:

$$(x + x_0)^2 + y^2 = \frac{d^2}{4} \quad (14)$$

$$(x - x_0)^2 + (y - 2x_0 \tan \theta)^2 = \frac{d^2}{4} \quad (15)$$

$$(x + x_0)^2 + (y - 4x_0 \tan \theta)^2 = \frac{d^2}{4} \quad (16)$$

$$(x - x_0)^2 + (y - 6x_0 \tan \theta)^2 = \frac{d^2}{4} \quad (17)$$

圆弧曲线HE上半部分弧线HW曲线方程的计算表达式,如式(18)所示,记为 $f_7(x,y)$ :

$$\sqrt{(x + x_0)^2 + y^2} = \frac{d}{2} \quad (18)$$

圆弧曲线JG下半部分弧线GX、上半部分弧线JX曲线方程的计算表达式分别如式(19)~(20)所示,并分别记为 $f_8(x,y)$ 、 $f_9(x,y)$ :

$$\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - 2x_0 \tan \theta)^2} = -\frac{d}{2} \quad (19)$$

$$\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - 2x_0 \tan \theta)^2} = \frac{d}{2} \quad (20)$$

圆弧曲线PM下半部分弧线MY、上半部分弧线PY曲线方程的计算表达式分别如式(21)~(22)所示,并分别记为 $f_{10}(x,y)$ 、 $f_{11}(x,y)$ :

$$\sqrt{(x + x_0)^2 + (y - 4x_0 \tan \theta)^2} = -\frac{d}{2} \quad (21)$$

$$\sqrt{(x + x_0)^2 + (y - 4x_0 \tan \theta)^2} = \frac{d}{2} \quad (22)$$

圆弧曲线RO下半部分弧线OZ曲线方程的计算表达式,如式(23)所示,记为 $f_{12}(x,y)$ :

$$\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - 6x_0 \tan \theta)^2} = -\frac{d}{2} \quad (23)$$

将以上各曲线进行联立可得相交点坐标,如表6所示。

表6 各曲线交点坐标表

Table 6 Coordinates of intersection points of curves		
曲线 Curve 1	曲线 Curve 2	交点横坐标 Intersection point abscissa
$f_7$	X轴 X-axis	$x_W = -x_0 - \frac{d \sin \theta}{2}$
$f_2$	$f_7$	$x_H = -x_0 - d \sin \theta$
$f_2$	$f_3$	$x_I = x_0 - \frac{v_s d \cos \theta}{2v_m} - \frac{d \sin \theta}{2}$
$f_3$	$f_8$	$x_G = x_0 - \frac{d \sin \theta}{2}$
$f_8$	X轴 X-axis	$x_X = x_0 + \frac{d \sin \theta}{2}$

漏冲区Ⅰ、Ⅱ的面积计算表达式为:

$$S_I = \int_{x_W}^{x_H} [f_{10}(x,y) - f_7(x,y)] dx + \int_{x_H}^{x_I} [f_3(x,y) - f_2(x,y)] dx \quad (24)$$

$$S_{II} = \int_{x_N}^{x_K} [f_5(x,y) - f_4(x,y)] dx + \int_{x_K}^{x_Z} [f_{12}(x,y) - f_9(x,y)] dx \quad (25)$$

重冲区Ⅲ、Ⅳ的面积计算表达式为:

$$S_{III} = \int_{x_I}^{x_G} [f_2(x,y) - f_3(x,y)] dx + \int_{x_G}^{x_X} [f_9(x,y) - f_8(x,y)] dx \quad (26)$$

$$S_{IV} = \int_{x_Y}^{x_M} [f_{11}(x,y) - f_{10}(x,y)] dx + \int_{x_M}^{x_N} [f_4(x,y) - f_5(x,y)] dx \quad (27)$$

当喷头漏冲区面积最小、重冲区面积最大时,能保证挖藕冲刷效果最佳,此时的前进速度和摆动速度也是最佳。将上式和各点坐标输入到Matlab软件中进行数学建模并优化求解计算,最终求得最佳前进速度 $v_m$ 为17.3 mm/s,摆动速度 $v_s$ 为130.7 mm/s。

## 1.7 液压系统设计

液压控制回路是试验平台的重要组成部分<sup>[28]</sup>,主要包括双向螺旋往复丝杆液压马达回路、前置升降液压缸回路、后置升降液压缸回路,液压原理图如图9所示。电机带动齿轮泵从油箱吸油,齿轮泵出油口连接调速阀,通过三通接头将油路分成2条支路。第1条支路的液压油流经压力表、单向节流阀及三位四通换向阀,控制用于驱动双向螺旋往复丝杆的液压马达运动。第2条支路的液压油流经压力表、单向



节流阀、三通接头及三位四通换向阀,控制前后置升降液压缸上下运动,进而控制双向螺旋清淤搅龙入泥深度、喷头离泥高度及水泵入水深度等参数。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。电机选用为 YE3-112M-A 型三相异步电机,齿轮泵选用为 CBN-E325,3 个三位四通换向阀均选用 ZT-L12 手动多路换向阀,单向节流阀选用为 LA-H10L,调速阀选用为 LKF60,液压马达选用为 BM2-50,前后置液压油缸分别选用为 HSG40-700 和 HSG40-500。

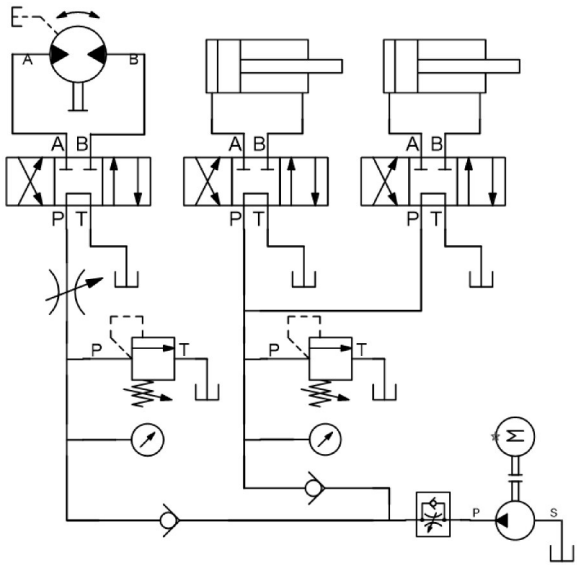


图 9 液压原理图  
Fig.9 Hydraulic schematic diagram

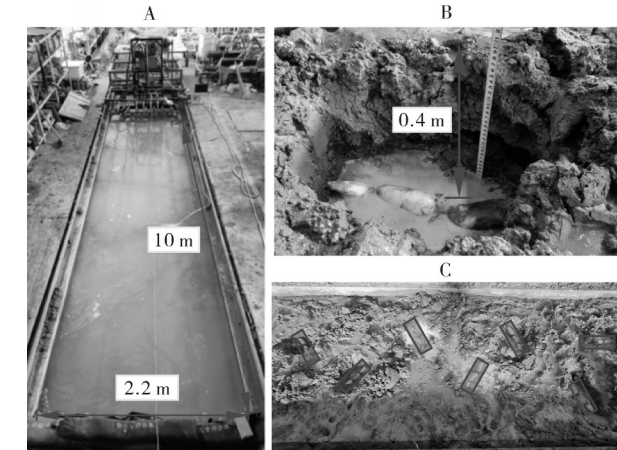
1.8 台架试验条件与材料

2024 年 6 月 21 日在华中农业大学校内水田试验土槽进行台架试验(图 10A)。使用土壤紧实度仪、卷尺、钢尺、卤素水分测试仪等仪器设备对土槽试验条件进行测量,测定结果如下:土槽长、宽、高尺寸分别为 10、2.2、1 m,泥脚深度为 0.183 m,水深为 0.3、0.4 m 深处土壤坚实度为 0.92 kPa,0.4 m 深处土壤含水率为 57%。试验材料选用湖北常见的“鄂莲 6 号”当季早藕,测得其平均长度、平均直径、平均质量分别为 0.504 m、0.087 m、1.852 kg,将莲藕预埋在泥下 0.4 m 深度处(图 10B),按照常见的莲藕生长方向进行埋藕,每次试验埋藕 30 支(图 10C)。

2 结果与分析

2.1 单喷头冲刷淤泥性能试验

为验证喷头关键尺寸及工作参数仿真试验的可靠性,根据仿真试验的优化结果,设置挖藕喷头的离



A: 试验土槽 Experimental soil tank; B: 埋藕深度 Burial depth of lotus root; C: 部分埋藕位置 Partial buried lotus root position.

图 10 莲藕预埋效果及试验环境图

Fig.10 Lotus root pre-buried effect and test environment diagram

泥高度为 50 mm、出水口直径为 15 mm,射流倾角为 30°,往复丝杆不转动(喷头不摆动),只对单个挖藕喷头进行定点冲刷泥土试验,试验重复 3 次取平均值,每次试验冲刷时间为 30 s,试验结果如表 7 所示。

表 7 单喷头冲刷性能验证试验方案及结果

Table 7 Single nozzle flushing performance

verification test		mm
试验序号 Test No.	冲刷深度 Scouring depth	冲刷宽度 Scrub width
1	411.5	115.5
2	405.3	118.2
3	407.9	116.7
平均值 Average	408.2	116.8

与上文优化仿真试验得到的冲刷深度 433.2 mm、冲刷宽度 126.6 mm 相比较,冲刷深度相差 5.8%、冲刷宽度相差 7.7%,总体偏差不大,故可验证上文仿真试验数据可靠。

2.2 Box-Behnken 中心组合性能试验

为获取往复水力冲刷挖藕装置试验平台的较优组合参数,选取射流角度  $a$ 、前进速度  $b$  和摆动速度  $c$  为影响因素,以莲藕挖净率  $A$  为试验指标,开展 Box-Behnken 中心组合试验,因素水平编码如表 8,试验方案及结果如表 9 所示,莲藕挖净率  $A$  计算公式如下:

$$A = \frac{m}{M} \times 100\% \tag{28}$$

式(28)中: $m$  为浮出莲藕的质量,  $g$ ;  $M$  为预埋莲藕的总质量,  $g$ 。

莲藕挖净率的方差分析结果如表 10 所示,该回



表 8 Box-Behnken 仿真试验因素水平编码

Table 8 Box-Behnken simulation test factor level coding

编码 Code	$a/(^{\circ})$	$b/(\text{mm/s})$	$c/(\text{mm/s})$
−1	0	10	0
0	30	20	100
1	60	30	200

表 9 Box-Behnken 仿真试验方案及结果

Table 9 Box-Behnken simulation test programme and results

序号 No.	$x_1$	$x_2$	$x_3$	挖净率/% Surfacing rate
1	−1	−1	0	89
2	1	−1	0	53
3	−1	1	0	22
4	1	1	0	7
5	−1	0	−1	36
6	1	0	−1	24
7	−1	0	1	88
8	1	0	1	60
9	0	−1	−1	37
10	0	1	−1	6
11	0	−1	1	91
12	0	1	1	36
13	0	0	0	50
14	0	0	0	51
15	0	0	0	54
16	0	0	0	46
17	0	0	0	48

注： $x_1$ 、 $x_2$  和  $x_3$  为射流角度、前进速度和摆动速度的编码值。  
Note:  $x_1$ 、 $x_2$  and  $x_3$  are the values of jet angle, forward speed and swing speed.

归模型极显著( $P<0.01$ )且失拟项不显著( $P>0.05$ ),表明回归方程拟合度较好, $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 和 $x_2^2$ 对莲藕挖净率影响极显著( $P<0.01$ ), $x_2x_3$ 对莲藕挖净率影响显著( $P<0.05$ ),其余项对莲藕挖净率影响均不显著( $P>0.05$ ),且各因素对莲藕挖净率影响的主次顺序为:前进速度、摆动速度、射流角度,剔除回归模型中不显著项后得到各因素与莲藕挖净率  $A$  之间的二次回归方程为:

$$A=49.8-11.38x_1-24.88x_2+21.5x_3-6x_2x_3-8.28x_2^2$$

(29)

由回归模型显著性分析可知,前进速度和摆动速度对莲藕挖净率交互影响显著,而其余交互影响不显著。为直观分析交互作用与莲藕挖净率之间的

表 10 莲藕挖净率方差分析

Table 10 Analysis of variance for lotus root surfacing rate

变异来源 Source of variation	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	$F$	$P$
模型 Model	10 293.89	9	1 143.77	55.20	$<0.000\ 1^{**}$
$x_1$	1 035.13	1	1 035.13	49.95	$0.000\ 2^{**}$
$x_2$	4 950.13	1	4 950.13	238.89	$<0.000\ 1^{**}$
$x_3$	3 698.00	1	3 698.00	178.46	$<0.000\ 1^{**}$
$x_1x_2$	110.25	1	110.25	5.32	0.054 5
$x_1x_3$	64.00	1	64.00	3.09	0.122 3
$x_2x_3$	144.00	1	144.00	6.95	0.033 6*
$x_1^2$	6.32	1	6.32	0.304 9	0.598 0
$x_2^2$	288.32	1	288.32	13.91	$0.007\ 4^{**}$
$x_3^2$	4.00	1	4.00	0.193 2	0.673 5
失拟项 Lack of fit	145.05	7	20.72		
误差 Pure error	108.25	3	36.08	3.92	0.109 9
总和 Total	36.80	4	9.20		

注: \*\*表示影响极显著,  $P<0.01$ ; \*表示影响显著,  $0.01\leq P<0.05$ , 下同。Note: \*\* indicates that the impact is extremely significant,  $P<0.01$ ; \* indicates that the impact is significant,  $0.01\leq P<0.05$ , the same as below.

关系,利用 Design-Expert 12 绘制射流角度取  $30^{\circ}$  时,前进速度与摆动速度对莲藕挖净率的交互作用响应曲面图(图 11)。当前进速度一定时,莲藕挖净率随着摆动速度增大而增大;当摆动速度固定时,莲藕挖净率随着前进速度增大而减小。

为寻找莲藕挖净率在以上因素范围内最高时的参数组合,以莲藕挖净率  $A$  最高为目标函数,以射流角度  $a$ 、前进速度  $b$ 、摆动速度  $c$  为约束条件,对所建立的二次回归模型优化求解,目标函数与约束条件为:

$$\begin{cases} \max A \\ \text{s.t.} \begin{cases} 0^{\circ}\leq a_s\leq 60^{\circ} \\ 10\text{ mm/s}\leq b_s\leq 30\text{ mm/s} \\ 100\text{ mm/s}\leq c_s\leq 200\text{ mm/s} \end{cases} \end{cases}$$

(30)

借助 Design-Expert 12 软件进行莲藕挖净率  $A$  的优化分析,得到最佳参数组合为:射流角度  $a$  为  $27.4^{\circ}$ 、前进速  $b$  为  $10.6\text{ mm/s}$ 、摆动速度  $c$  为  $191.1\text{ mm/s}$ ,对应莲藕挖净率为  $93\%$ 。为验证优化参数的可靠性,以最优参数组合开展 3 次重复试验,得到平均莲藕挖净率为  $91\%$ ,与预测值误差为  $2.2\%$ ,故参数优化结果可靠。

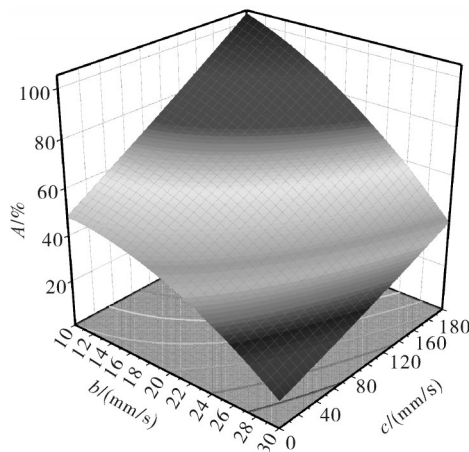


图11 响应曲面图

Fig.11 Response surface plot

### 3 讨论

本研究设计了一种往复式水力冲刷挖藕装置试验平台,采用全液压驱动,工作幅宽为1 600 mm。为探究喷头形状对喷头射流冲刷性能的影响,利用Fluent软件开展了单因素仿真试验,得到了最优喷头形状为锥柱形。为探究喷头关键尺寸及工作参数对喷头冲刷土壤深度和宽度的综合影响,利用EDEM-Fluent耦合仿真开展了 $L_9(3^4)$ 正交仿真试验,得到喷头最优参数为出水口直径15 mm、离泥高度50 mm、射流角度 $30^\circ$ 。为探究喷头运动轨迹对喷头冲刷面积的影响,对喷头运动轨迹及冲刷面积进行了数学建模及理论分析,并利用Matlab软件仿真获得喷头理论运动最优前进速度和摆动速度分别为17.3、130.7 mm/s,对液压系统进行了设计与选型。基于往复式水力冲刷挖藕装置试验平台,开展了单喷头冲刷淤泥性能试验,验证了喷头关键尺寸及工作参数仿真实验的可靠性。为探究射流角度、前进速度、摆动速度对莲藕挖净率的综合影响,开展Box-Behnken中心组合性能试验,建立了以莲藕挖净率为目标的多元回归模型,得出最优参数组合为射流角度 $27.4^\circ$ 、前进速度10.6 mm/s、摆动速度191.1 mm/s,此时莲藕挖净率预测值为93%,性能试验结果为91%,与预测值误差为2.2%。

### 参考文献 References

- [1] 贾乐,刘瑞玲,房祥军,等.莲藕采后主要致腐真菌分离鉴定及生物学特性研究[J].核农学报,2022,36(3):661-668. JIA L, LIU R L, FANG X J, et al. Identification and biological characteristics of dominant spoilage fungi in postharvest lotus roots[J]. Journal of nuclear agricultural sciences, 2022, 36(3): 661-668 (in Chinese with English abstract).
- [2] 吴茜,刘智勇,李国文,等.莲藕的功能特性及其产品开发前景分析[J].食品与发酵科技,2020,56(6):108-112. WU Q, LIU Z Y, LI G W, et al. Functional characteristics of lotus root and analysis of its product development prospects [J]. Food and fermentation sciences & technology, 2020, 56(6): 108-112 (in Chinese with English abstract).
- [3] 汪薇,李晓,杨宏,等.超高压处理对鲜切莲藕品质及其贮藏性的影响[J].华中农业大学学报,2016,35(2):101-107. WANG W, LI X, YANG H, et al. Effects of ultra high hydrostatic treatment on the quality of fresh-cut lotus roots during storage[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2016, 35(2): 101-107 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李维华,焦伟,李永武,等.莲藕收获机械研究现状及发展趋势[J].农业装备与车辆工程,2023,61(2):66-68. LI W H, JIAO W, LI Y W, et al. Research status and development trend of lotus root harvesting machinery [J]. Agricultural equipment & vehicle engineering, 2023, 61(2): 66-68 (in Chinese with English abstract).
- [5] 王峰莹,罗弘娟,彭景教.莲藕种植要点及莲藕产业发展思路[J].河北农机,2024(3):94-96. WANG F Y, LUO H J, PENG J J. Key points of lotus root planting and ideas of lotus root industry development [J]. Hebei farm machinery, 2024(3): 94-96 (in Chinese).
- [6] 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 points of planting technology on lotus root and industrial development ideas [J]. China fruit & vegetable, 2018, 38(4): 48-50 (in Chinese with English abstract).
- [7] 余有成,郝应昌,王党党.北方莲藕种植技术[J].陕西农业科学,2014,60(1):120-122. YU Y C, HAO Y C, WANG D D. Planting techniques of lotus root in North China [J]. Shaanxi journal of agricultural sciences, 2014, 60(1): 120-122 (in Chinese).
- [8] 玉苏甫江·艾米都力.水射流式莲藕采挖机的设计与试验研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2022. Yusufjiang Emiduli. Design and experimental study of water jet lotus root digger [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [9] 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. HUANG L, ZHOU Y, ZHANG G Z, et al. Design and experiment of walking hydraulic scour type lotus root digging machine [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(5): 207-216 (in Chinese with English abstract).
- [10] 吴昊,夏俊芳,张国忠,等.基于EDEM-Fluent仿真的自旋射流式挖藕机的设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(5):9-14. WU H, XIA J F, ZHANG G Z, et al. Design and experiment of spin-jet flow type lotus root digging machine based on

- EDEM-Fluent[J].Transactions of the CSAE,2018,34(5):9-14(in Chinese with English abstract).
- [11] 杨大亮.船式自动挖藕机设计与应用[J].农业机械,2022(5):88-90.YANG D L.Design and application of boat type automatic lotus root digger[J].Agricultural machinery,2022(5):88-90(in Chinese).
- [12] 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.Development of 4SWJ-1 ship hydraulic lotus rooter[J].Agricultural machinery,2009(4):88-90(in Chinese).
- [13] 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.Development of 4CWO-3.2 boat-type lotus root digger[J].Hubei agricultural mechanization,2008(3):24-25(in Chinese).
- [14] 刘向军,王艾伦,李世杰,等.一种新型手扶挖藕机的结构设计与研究[J].安徽农业科学,2018,46(10):179-182.LIU X J,WANG A L,LI S J,et al.Research and design on an automatic walking dig lotus root machine[J].Journal of Anhui agricultural sciences,2018,46(10):179-182(in Chinese with English abstract).
- [15] 王洪昌,陈龙,李正博,等.履带浮筒式挖藕机滑橇支承装置设计与试验[J].农业工程学报,2024,40(10):44-54.WANG H C,CHEN L,LI Z B,et al.Design and test of the skateboard support device for crawler float-type lotus root excavator[J].Transactions of the CSAE,2024,40(10):44-54(in Chinese with English abstract).
- [16] 刘莫尘,梁文倩,肖化超,等.履带式自走水力采藕机设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(S2):61-70.LIU M C,LIANG W Q,XIAO H C,et al.Design and test of tracked self-propelled hydraulic root harvester[J].Transactions of the CSAM,2023,54(S2):61-70(in Chinese with English abstract).
- [17] 白国瑞,张国忠,姚荣苗,等.履带浮筒式挖藕机底盘设计与试验[J].安徽农业大学学报,2022,49(4):659-665.BAI G R,ZHANG G Z,YAO R M,et al.Design and test of chassis of crawler pontoon lotus root digger[J].Journal of Anhui Agricultural University,2022,49(4):659-665(in Chinese with English abstract).
- [18] 李锋霞,张佳,黄勇,等.履带自走式莲藕收获机的结构设计[J].南方农机,2022,53(4):1-4.LI F X,ZHANG J,HUANG Y,et al.Structural design of crawler self-propelled lotus root harvester[J].China southern agricultural machinery,2022,53(4):1-4(in Chinese).
- [19] 张翔.射流挖掘式挖藕机关键部件设计与性能试验[D].武汉:华中农业大学,2022.ZHANG X.Design and performance test of key components of jet digging lotus root digger[D].Wuhan:Huazhong Agricultural University,2022(in Chinese with English abstract).
- [20] 高雪峰,洪占勇,姚友丹.大功率莲藕采收机的研制[J].农机化研究,2021,43(2):94-98.GAO X F,HONG Z Y,YAO Y D.Development of high-power lotus root harvesting machine[J].Journal of agricultural mechanization research,2021,43(2):94-98(in Chinese with English abstract).
- [21] 冯闯闯,周勇,涂鸣,等.螺旋推进式挖藕机的设计与试验[J].甘肃农业大学学报,2020,55(4):191-199.FENG C C,ZHOU Y,TU M,et al.Design and experiment of screw-propelled type lotus root digging machine[J].Journal of Gansu Agricultural University,2020,55(4):191-199(in Chinese with English abstract).
- [22] 刘沿.双螺旋推进式挖藕机关键部件设计与试验[D].武汉:华中农业大学,2022.LIU Y.Design and test of key components of double helix propeller lotus root digger[D].Wuhan:Huazhong Agricultural University,2022(in Chinese with English abstract).
- [23] 薛胜雄,黄汪平.高压水射流技术与应用[M].北京:机械工业出版社,1998.XUE S X,HUANG W P.Technology and application of high pressure water jet[M].Beijing:China Machine Press,1998(in Chinese).
- [24] 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.Working mechanism and experimental study of jet spinning lotus root digger[D].Wuhan:Huazhong Agricultural University,2018(in Chinese with English abstract).
- [25] JOHNSON K L,KENDALL K,ROBERTS A D.Surface energy and the contact of elastic solids[J].Proc.R.Soc.Lond.A,1971,324:301-313.
- [26] GILABERT F A,ROUX J N,CASTELLANOS A.Computer simulation of model cohesive powders[J/OL].Physical review E,2007,75(1):011303[2024-08-24].https://doi.org/10.1103/PhysRevE.75.011303.
- [27] 焦俊.基于EDEM-FLUENT耦合的莲藕主藕体水力冲刷过程仿真与试验[D].武汉:华中农业大学,2021.JIAO J.Simulation and experiment of hydraulic scouring process of main lotus root based on EDEM-FLUENT coupling[D].Wuhan:Huazhong Agricultural University,2021(in Chinese with English abstract).
- [28] 闻邦椿.机械设计手册[M].北京:机械工业出版社,2010.WEN B C.Mechanical design manual[M].Beijing:Machinery Industry Press,2010(in Chinese).

## Design and testing of experiment platform for reciprocating hydraulic flushing and digging device for lotus roots

LIU Ran, ZHOU Yong, ZHANG Guozhong, TAO Guoying,  
TANG Nanrui, TANG Haojian, SU Yanqiang

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

**Abstract** An experiment platform for reciprocating hydraulic flushing and digging device for lotus roots was designed to solve the problem of low operating efficiency and serious leakage existing in the fixed flushing method of traditional hydraulic digging nozzles for lotus roots. Fluent simulation was used to conduct one-factor experiments on the shape of the nozzle and obtain the cone-column shape as the optimal shape. EDEM-Fluent coupled simulation was used to carry out  $L_9(3^4)$  orthogonal experiments on the key dimensions and working parameters of the nozzle and obtain the optimal parameters for the nozzle being a diameter of water outlet of 15 mm, a height of mud clearance of 50 mm, and a jet angle of  $30^\circ$ . The integral method was used to theoretically analyze the trajectory and flushing area of nozzle. The optimal forward speed and swing speed of the nozzle in theory were calculated with Matlab to be 17.3 and 130.7 mm/s. The performance of a single nozzle flushing silt was tested based on the test platform of reciprocating hydraulic flushing and digging device. The results verified the reliability of key dimensions and working parameters of the nozzle obtained from the simulation experiments. A Box-Behnken center combination performance test was conducted to investigate the comprehensive effects of jet angle, forward speed, and swing speed on the digging rate of lotus roots. The results showed that the digging rate of lotus roots was the highest when the jet angle, the forward speed, and the swing speed was  $27.4^\circ$ , 10.6 mm/s, and 191.1 mm/s. The digging rate of lotus roots in the simulation and the test platform was 93% and 91%. It will provide reference for studying the principles of harvesting machinery and hydraulic flushing of lotus roots.

**Keywords** reciprocating hydraulic flushing; digging machine for roots of lotus; hydraulic system; Fluent fluid simulation; Fluent-EDEM coupled simulation

(责任编辑:陆文昌)