doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.012

基于 EDEM 的鱼苗分选机设计与工作参数优化

刘　虎　龚　宇　张　彪　陈　源　周明刚
（湖北工业大学湖北省农业机械工程研究设计院，武汉 430068）

摘要：针对工厂化水产养殖工程中，需要对不同生长阶段的鱼苗按照大小进行高效率、高准确率的分级，进而实现分池养殖的需求，设计了一种辊道式鱼苗分选试验样机。采用离散元软件建立了鱼苗-机械部件耦合仿真模型，以分选机的工作参数作为试验因素，以分选效率、分鱼准确率作为评价指标，进行仿真，并通过试验验证了仿真结果的准确性；基于建立的耦合仿真模型，进行了单因素及多因素正交影响仿真分析，确定了各工作参数的主次顺序及最优的参数组合。结果表明，各因素对分鱼准确率和分选效率影响的主次顺序均为辊道倾角、进鱼量和辊道转速。以提高分鱼准确率和分选效率为原则，运用 Design-Expert 8.0.5 软件进行了参数优化，确定了最优组合为：辊道转速 138.40 r/min、辊道倾角 10.47°、进鱼量 3.00 尾/s。研究结果可为鱼苗分级设备的优化设计提供重要参考。

关键词：鱼苗分选机；仿真模型；工作参数；参数优化；EDEM
中图分类号：S969　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2020)01-0114-08　　**OSID**：

Design and Optimization of Working Parameters of Fry Sorting Machine Based on EDEM

LIU Hu　GONG Yu　ZHANG Biao　CHEN Yuan　ZHOU Minggang
(*Hubei Agricultural Machinery Engineering Research and Design Institute*, *Hubei University of Technology*, *Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: In view of the industrial aquaculture, it is necessary to classify the fry in different growth stages according to their sizes with high efficiency and accuracy, so as to meet the requirement of separate cultivation, a roller-type fry sorting test prototype was designed. The coupling model of fry-mechanical components was established by using discrete element software. As the working parameters of the sorting machine were used for the experimental factors, and the sorting efficiency and accuracy of fish-dividing were used for evaluation indexes, the simulation results were obtained and verified by experiments. Finally, the single factor and orthogonal influence simulation analysis was carried out based on the established coupled simulation model, and the primary and secondary order for each working parameter and the optimal parameter combination were determined. The results showed that the primary and secondary order of the influence factor for the sorting accuracy was: roller lifting angle, fish intake and roller speed, and the primary and secondary order of the sorting efficiency was: roller lifting angle, fish intake and roller speed. Based on the principle of improving the sorting accuracy and efficiency, the parameters were optimized by Design-Expert 8.0.5 software, and the optimal combination was determined as follows: the roller speed was 138.40 r/min, the roller lifting angle was 10.47°, and the fish intake was 3.00 tails/s. The research results would provide an important reference for the optimization design of the following fry grading equipment.

Key words: fry sorting machine; simulation model; working parameters; parameter optimization; EDEM

收稿日期：2019-10-13　修回日期：2019-11-18
基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFD0701704)、湖北省教育厅科学技术研究计划项目(Q20181410)和湖北省自然科学基金项目(2018CFB281)
作者简介：刘虎(1986—)，男，讲师，博士，主要从事机械结构设计及可靠性研究，E-mail：liuhumaster@163.com
通信作者：周明刚(1969—)，男，教授，博士，主要从事振动与噪声研究，E-mail：zhoumg@aliyun.com

0　引言

伴随着我国水产养殖业转型升级以及智慧渔业战略的部署，水产养殖面积逐年增加，当前水产养殖总产量已经稳居世界首位。但是，我国水产养殖技术仍然落后，无法解决养殖过程中投喂无序、饲料浪费等问题，其重要原因之一是分选机械相对比较落后，无法实现高品质的分级作业[1-4]。目前，水产养殖分选作业主要依靠人工进行，专用机械比较少，难以根据鱼苗本身特性实现精准分级。针对当前的养殖状况，国内学者对鱼苗分选机械技术与方法进行了一系列研究。文献[5]设计了一种淡水鱼头尾与腹背定向装置，以鲢鱼为定向对象，通过理论分析和倾斜振动台面试验，获得了鱼体与机械间的摩擦特性。文献[6]研制的喷水滚筒式鱼苗大小分选装置，通过两台电机和换流器改变滚筒旋向，得出了旋向与筒速、喷水压力和分选鱼体宽之间的关系。文献[7]设计的分鱼机，采用胶带式辊轴分级方法，能依据不同鱼苗规格，实现分级间距调整。但上述研究鲜有关于鱼苗分选机分选性能方面的研究，且当前的分选机械大多根据天平与杠杆称量原理进行分级，不适合在有水环境下进行鱼苗的称量分选。因此按照鱼苗体型参数和三等级分选目标，以体宽作为判别条件对鱼苗分选。

本文设计一种辊道式鱼苗分选机，阐述其工作原理与整机结构，并依据试验鱼苗分选状态，运用离散元软件建立鱼苗-机械部件耦合仿真模型，经试验验证其仿真的准确性，最后对其工作参数进行单因素及多因素正交影响仿真分析，得到较优参数组合，为分级机械性能优化提供理论参考。

1　整机结构与工作原理

1.1　整机结构

鱼苗分选试验机整机结构如图 1 所示，主要由动力传输机构、水道装置、间距调节分选装置和倾角调节装置等组成。其中水道装置、间距调节分选装置和倾角调节装置是机具主要工作执行部件。通过水道装置在分选辊表面形成水膜，完成鱼苗快捷筛选且降低鱼皮损伤。通过间距调节分选装置，实现奇数分选辊与偶数分选辊分级间距的调整，进而满足不同规格鱼苗分级作业要求。通过倾角调节装置和机架共同配合，实现间距调节装置与水平地面夹角的调整，进而调节鱼苗沿辊道下落速度。

1.2　工作原理

工作原理如图 2 所示，该鱼苗分选机依靠电机提供动力，靠倾角调节装置和分选辊的转动实现倾角调节和分选作业。吸鱼泵首先将鱼苗传送至进鱼装置，通过该装置上的分离漏斗滤去水中部分杂质。然后在倾角调节装置作用下的鱼苗被输送到间距调节分选装置，该装置设计 6 根分选辊，每根分选辊主要由 3 段直径依次递减的空心轴组成，其旋转方向如图 2 所示。可以使鱼苗在沿辊道下落的过程中进行小中大依次分级，体宽稍小鱼苗落至适合辊道间距下的导鱼槽上，体宽较大则进下一级间距分级，从而完成鱼苗的整个分选过程。

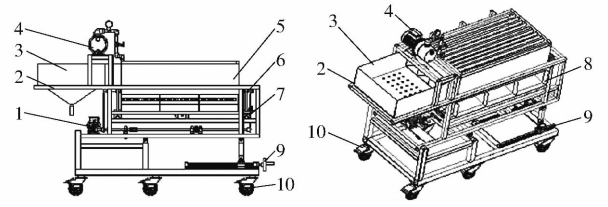


图 1　鱼苗分选机整机结构图

Fig. 1　Structure diagrams for whole machine of fry sorting

1. 动力传输机构　2. 机架　3. 进鱼装置　4. 水道装置　5. 分鱼罩壳　6. 间距调节分选装置　7. 传动链条　8. 导鱼槽　9. 倾角调节装置　10. 行走脚轮

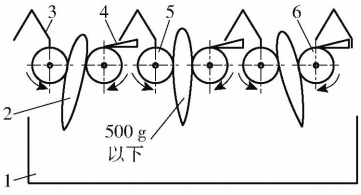


图 2　鱼苗分选机工作原理图

Fig. 2　Working principle diagram

1. 导鱼槽　2. 鱼苗　3. 固定挡鱼板　4. 移动挡鱼板　5. 奇数分选辊　6. 偶数分选辊

2　关键机构设计

2.1　倾角调节装置

该装置主要由上下机架、前后铰链、滚珠螺母、驱动丝杆等组成，其结构如图 3 所示。其中上下机架通过前后铰链铰接，并与连杆铰接于移动板，驱动丝杆带动滚珠螺母，使移动板下滑块在导轨上作直线移动，进而可调整安装于上机架的辊道与下机架

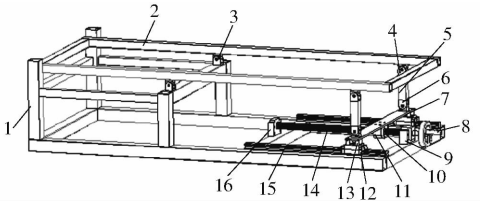


图 3　倾角调节装置结构图

Fig. 3　Structure diagram of tilt adjustment device

1. 下机架　2. 上机架　3. 前铰链　4. 后上铰链　5. 连杆　6. 后下铰链　7. 移动板　8. 刻度盘手轮　9. 固定侧轴承座　10. 滚珠螺母　11. 螺母座　12. 滑块　13. 垫管　14. 驱动丝杆　15. 导轨　16. 支撑侧轴承座

水平面的夹角。

辊道角度直接影响鱼苗沿着辊道下落的速度，进而影响其分选性能。角度越大，鱼苗在辊道摩擦的时间越短，使先进入的鱼没来得及分选，被后来的鱼推入下一间距，导致分选性能严重降低。因此，为保证鱼苗在辊道上平稳分选，最终确定辊道倾角为 0 ~ 20°。

2.2 分选装置

鱼苗分选装置主要由挡鱼板、轴承座及分选辊等组成，结构如图 4 所示。其中奇数分选辊通过移动轴承座固定在移动板上，而移动板与连接杆形成刚性连体。为适应不同规格鱼苗的分选，驱动丝杆带动连接杆左右移动，进而可调整与偶数分选辊间的分级间距。

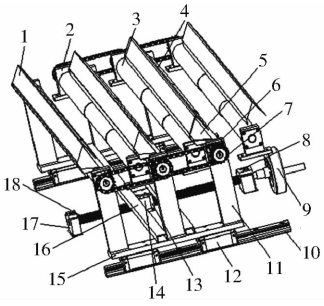


图 4 分选装置结构图

Fig. 4 Structure diagram of sorting device

1. 固定挡鱼板 2. 固定轴承座 3. 固定分选辊 4. 移动分选辊 5. 移动挡鱼板 6. 传动链条 7. 链轮 8. 固定侧轴承座 9. 刻度盘手轮 10. 导轨 11. 移动轴承座 12. 滑块 13. 滚珠螺母 14. 螺母座 15. 移动板 16. 连接杆 17. 支撑侧轴承座 18. 驱动丝杆

分选辊是鱼苗分选装置中的关键零部件，其结构尺寸特点对分选效果具有重要影响。本文的分选辊尺寸依据草鱼体宽-体质量数据确定，如图 5 所示，从图中可知，体宽 y 与体质量 x 的关系为 $y = 3.69x^{0.4156}$，根据前后两级鱼苗的体质量相差 10% ~ 20% 的设计目标，确定相邻分选辊间距延轴向以 2 mm逐级递增。同时考虑到辊轴的安装空间，确定分选辊延轴向逐级递减的 3 个不同直径分别为 58、56、54 mm。为保证鱼苗在每段不同直径段辊道上有充足的分选时间，不同直径段辊道长度确定为 400 mm，分选辊如图 6 所示。相邻分选辊的最大间距依据质量为 500 g 的鱼苗对应的体宽 58 mm 确定，其延轴向逐级递增，分别为 56、58、60 mm，且该分级间距可按照鱼苗规格进行调节。

3 仿真模型建立与试验验证

为加快仿真速度和模型收敛性，对上述整机模型简化，并运用离散元软件 EDEM 建立鱼苗-机械

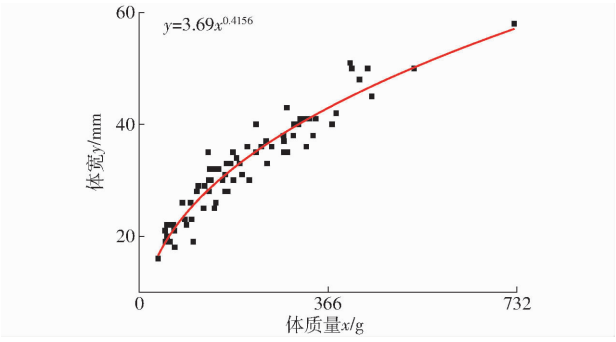


图 5 体宽-体质量增长拟合曲线

Fig. 5 Body width-body mass growth fitting curve

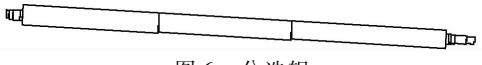


图 6 分选辊

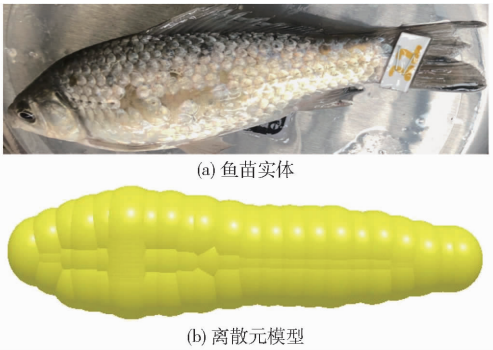
Fig. 6 Sorting roller diagram

部件耦合仿真模型，以分级作业的工作参数为试验因素，得出仿真结果，且结合试验验证仿真的准确性，为后续进行单因素及多因素正交影响仿真分析奠定基础。

3.1 仿真模型建立

3.1.1 鱼苗模型

为真实还原鱼苗分选状态，保证仿真模拟可靠性，以鲫鱼鱼苗为研究对象，通过电子秤等仪器测得鱼苗的平均体宽、体高、体长之比为 1∶1.5∶6，平均密度为 1 800 kg/m^3。考虑到鲫鱼体型近似纺锤体，躯干断面呈梭型，关于腹背轴线呈左右对称[8]，故运用 EDEM 软件多球面组合方式按体宽分级规格建立 3 种体宽尺寸离散元鱼苗模型，如图 7 所示。



(a) 鱼苗实体

(b) 离散元模型

图 7 鱼苗三维模型

Fig. 7 Fry model

3.1.2 分选机模型

为了合理有效地仿真模拟与计算，结合鱼苗分选机相关的作业参数，对整机模型简化，将倾角调节装置简化为角度支座，分选机主体构件抽象为进鱼通道、分选辊道和矩形导鱼槽，简化结果如图 8 所示。分选机材料属性均为 45 号钢，泊松比为 0.31，剪切模量为 7×10^{10} Pa，密度为 7 800 kg/m^3。

3.1.3 仿真模型参数确定

由于鱼苗表面的粘弹性，采用 Hertz - Mindlin

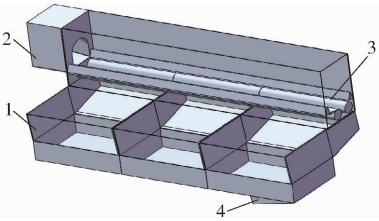


图 8　分选机模型

Fig. 8　Sorting machine model diagram

1. 导鱼槽　2. 进鱼通道　3. 分选辊道　4. 角度支座

(JKR)接触模型[9-10]，以模拟鱼苗之间、鱼苗与机械间相互作用。并通过摩擦角试验(图 9)、虚拟仿真标定和参照文献[5-11]等方法对 45 号钢-鱼苗、鱼苗-鱼苗的动静摩擦因数和恢复系数测定，测定的相关参数结果如表 1 所示。

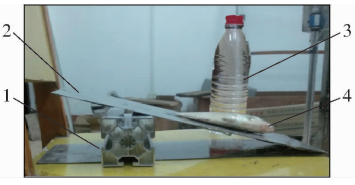


图 9　摩擦角试验

Fig. 9　Friction angle test

1. 角度支座　2. 45 号钢　3. 水瓶　4. 鱼苗

表 1　仿真材料接触参数

Tab. 1　Simulation material contact parameters

材料	动摩擦因数		静摩擦因数		恢复
	无水	有水	无水	有水	系数
45 号钢-鱼苗	0.35	0.15	0.40	0.20	0.50
鱼苗-鱼苗		0.015		0.01	0.50

3.1.4　仿真设置

依据机具实际分选过程，在虚拟分鱼仿真过程中，设置鱼苗位于进鱼一侧进行初始作业。以常规工况下的分选机进行仿真，分析其参数与分选性能。为保证仿真的可靠性，设置鱼苗初始速度为 0.5 m/s，其固定时间步长为 10%(Rayleigh 时间步长 10%)，并根据文献[12]设置鱼苗的泊松比为 0.45，剪切模量为 1.64×10^6 Pa，其网格尺寸为 $2R_{min}$，其中 R_{min} 为组成鱼苗模型最小的颗粒半径(6 mm)。仿真开始时分选辊道反向旋转，同时鱼苗开始生成，直至鱼苗全部生成后 10 s 仿真结束，仿真过程如图 10 所示。采用 EDEM 后处理模块统计分选过程结束后各导鱼槽内鱼苗的数量，以此计算分鱼准确率及分选效率。

3.2　试验验证

3.2.1　试验条件

为检验基于 EDEM 软件的鱼苗分选机虚拟仿真的准确性，在实际工况下进行整机验证试验，试验条件如图 11 所示。从图 11a 所示样本中选取多条

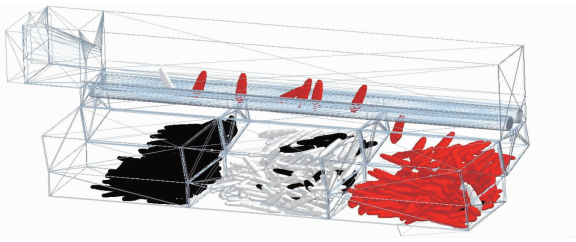
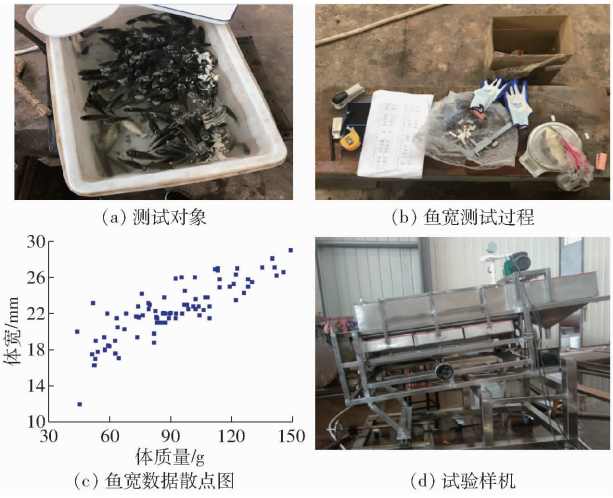


图 10　仿真过程图

Fig. 10　Simulation process diagram

鲫鱼鱼苗进行鱼宽测试，测试过程如图 11b 所示，进而得到图 11c 所示的鱼苗体宽与体质量散点图，以此选取小、中、大 3 等级鱼苗各 40 尾，并结合图 11d 所示的鱼苗分选机样机(试验样机采用三相 380 V 变频器改变辊道转速)，进行试验验证。



(a) 测试对象　(b) 鱼宽测试过程　(c) 鱼宽数据散点图　(d) 试验样机

图 11　试验条件

Fig. 11　Test conditions

3.2.2　评价指标

综合试验样机实际的工作情况，并查阅相关资料[13-21]，以分鱼准确率 y_1、分选效率 y_2 作为分选作业的评价指标，其定义为

$$y_1=\frac{n_1}{n_3}\times100\% \tag{1}$$

$$y_2=\frac{n_2}{n_3}\times100\% \tag{2}$$

式中　n_1——在同样的分选作业时间下，被正确分选的鱼苗数量，尾

n_2——在同样的分选作业时间下，落入导鱼槽里的鱼苗数量，尾

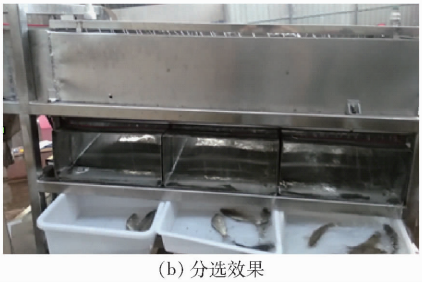
n_3——在同样的分选作业时间下，投入分选机中的鱼苗总数量，尾

3.2.3　试验结果及分析

分选试验如图 12 所示，结合试验条件，以各工作参数(辊道转速、辊道倾角、进鱼量)为试验因素，以分鱼准确率 y_1 作为分选作业的评价指标，所得试验结果如图 13 所示。



(a) 分选过程



(b) 分选效果

图 12 鱼苗分选试验

Fig. 12 Fry sorting test

图 13a 为分鱼准确率随辊道转速变化的试验和仿真结果,可以发现试验和仿真结果均呈现先急剧增大后缓慢减小的趋势,其整体相对误差为 10.56%。

图 13b 为分鱼准确率随辊道倾角变化的试验和仿真结果,可以发现试验和仿真结果均呈现先缓慢增加后缓慢减小的趋势,其整体相对误差为 24.73%。

图 13c 为分鱼准确率随进鱼量变化的试验和仿真结果,可以发现试验和仿真结果呈现线性递减的趋势,其整体相对误差为 21.72%。

由于在虚拟仿真试验中,分选机鱼苗入口处生成的鱼苗离散性和均匀性较好,而实际试验中,分选机鱼苗投入的连续性和均匀性较差,且水道对鱼苗表面始终存在喷淋压力,试验得到的分鱼准确率低于仿真的分鱼准确率。但是从总体上看,试验结果和仿真结果具有较好的一致性。

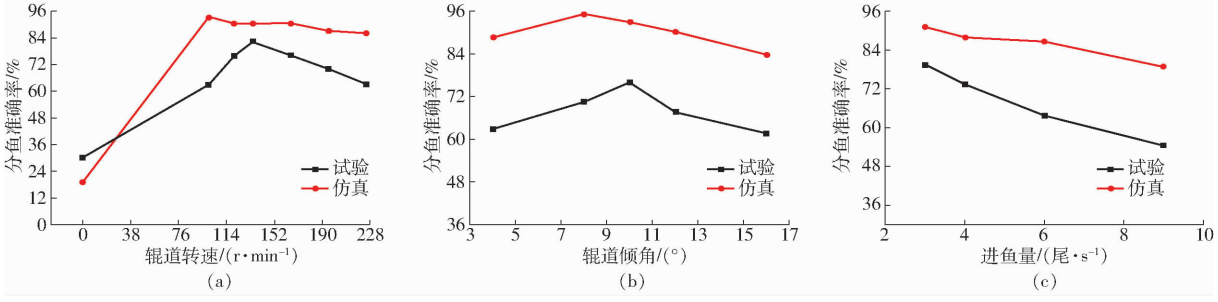


图 13 分鱼准确率随分选机工作参数的变化曲线

Fig. 13 Variation trend of fish splitting accuracy with sorting machine working parameters

4 EDEM 仿真试验与分析

4.1 单因素影响分析

4.1.1 辊道转速对分鱼准确率的影响

辊道转速是影响鱼苗分选效果的主要因素之一,当前分选机转速一般取值范围为 0 ~ 400 r/min。本文主要是在辊道倾角 θ 为 12°,进鱼量 3 尾/s 时,通过建立的模型仿真分析两分选辊反向旋转时转速对分鱼准确率的影响,结果如图 14 所示。可以发现,随着转速的增加,分鱼准确率呈现先急剧增大后缓慢减小的趋势,且在转速为 110 r/min 左右时,3 段间距分鱼准确率均达到最大值。

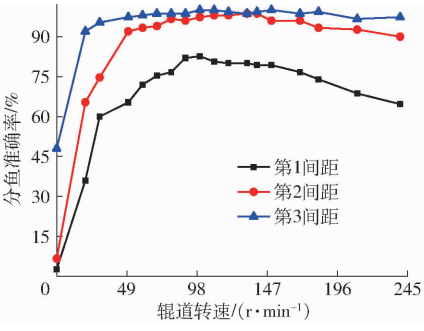


图 14 分鱼准确率随转速变化曲线

Fig. 14 Changing curves of split fish accuracy rate with speed

4.1.2 辊道倾角对分鱼准确率的影响

辊道倾角指的是安装于上机架的辊道与水平地面所形成的夹角。本文在转速为 150 r/min 与进鱼量 3 尾/s 时,通过建立的模型仿真分析辊道倾角对分鱼准确率的影响。仿真结果如图 15 所示。可以发现随着角度的增加,分鱼准确率呈现先急剧增大后减小的趋势,且在辊道倾角为 8°左右时,3 段间距分鱼准确率均达到最大值。

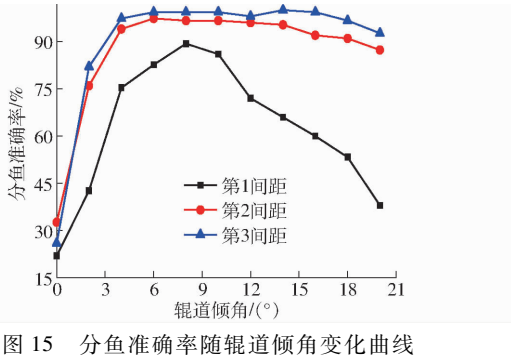


图 15 分鱼准确率随辊道倾角变化曲线

Fig. 15 Changing curves of fish accuracy with roll inclination

4.1.3 进鱼量对分鱼准确率的影响

进鱼量决定鱼苗在辊道上的离散程度,进而影

响分鱼效果。如图 16 所示，本文在转速为 150 r/min 与辊道倾角 θ 为 8°时，通过建立的模型仿真分析辊道上的进鱼量对分鱼准确率的影响。仿真结果如图 16 所示，可以发现，随着进鱼量的增加，分鱼准确率呈现线性递减的趋势，且在进鱼量等于 3 尾/s 时，3 段间距分鱼准确率达到最大值。

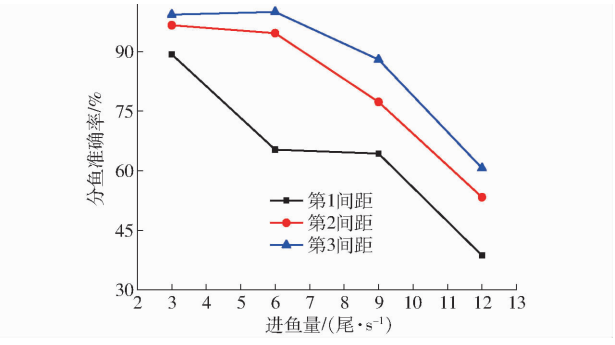


图 16　分鱼准确率随进鱼量变化曲线

Fig. 16　Changing curves of accuracy of fish according to amount of fish entering

4.2　多因素正交影响分析

4.2.1　仿真试验设计

综合考虑单因素影响分析结果，确定了如表 2 所示的各工作参数（辊道转速、辊道倾角、进鱼量）的试验因素水平，并以分鱼准确率 y_1 及分选效率 y_2 作为评价指标，根据 $L_{16}(4^5)$ 正交试验表安排仿真试验[22]，以此确定最优工作参数组合。其仿真试验结果及方差分析如表 3 和表 4 所示，表中 A、B、C 为辊道转速、辊道倾角、进鱼量水平值。

表 2　试验因素水平

Tab. 2　Test factors and levels

水平	因素		
	辊道转速 a/(r·min^{-1})	辊道倾角 b/(°)	进鱼量 c/(尾·s^{-1})
1	80	4	3
2	100	8	6
3	120	12	9
4	140	16	12

4.2.2　试验结果分析与优化

在分级规格范围内，分鱼准确率和分选效率越高，表明综合作业分选性能越好。由表 3 仿真试验极差分析可知，影响分鱼准确率指标的 3 个主次因素顺序为：辊道倾角 B、进鱼量 C、辊道转速 A，其较优参数水平组合为 $B_3C_1A_2$；影响分选效率的 3 个主次因素顺序为：辊道倾角 B、进鱼量 C、辊道转速 A，其较优参数水平组合为 $B_4C_1A_1$。并综合实际作业分选要求，可确定影响机具分选性能的主次顺序为辊道倾角、进鱼量、辊道转速。

表 3　试验方案与结果

Tab. 3　Test plan and results

试验序号		试验因素 A	试验因素 B	试验因素 C	试验指标 y_1/%	试验指标 y_2/%
1		1	1	1	69.11	91.11
2		1	2	2	69.77	97.55
3		1	3	3	75.78	99.78
4		1	4	4	74.44	100
5		2	1	2	54.00	81.11
6		2	2	1	91.56	99.33
7		2	3	4	72.44	100
8		2	4	3	82.89	100
9		3	1	3	48.00	74.44
10		3	2	4	42.89	71.55
11		3	3	1	92.67	99.33
12		3	4	2	86.44	99.33
13		4	1	4	38.89	66.00
14		4	2	3	78.44	99.55
15		4	3	2	89.33	99.33
16		4	4	1	84.22	99.55
	K_1	289.10	210.00	337.56		
	K_2	300.89	282.66	299.54		
	K_3	270.00	330.22	285.11		
	K_4	290.88	327.99	228.66		
y_1	R	30.89	120.22	108.90		
	较优水平		A_2、B_3、C_1			
	因素主次		B、C、A			
	较优组合		$B_3C_1A_2$			
	K_1	388.44	312.66	389.32		
	K_2	380.44	367.98	377.32		
	K_3	344.65	398.44	373.77		
	K_4	364.43	398.88	337.55		
y_2	R	43.79	86.22	51.77		
	较优水平		A_1、B_4、C_1			
	因素主次		B、C、A			
	较优组合		$B_4C_1A_1$			

通过 Design-Expert 8.0.5 软件对正交试验数据进行方差分析，以此判断各试验因素对评价指标的显著性，如表 4 所示。从表 4 可知，方差分析与表 3 极差分析结果一致，即进鱼量 C 对分鱼准确率影响显著（$F > F_{0.05}$），辊道倾角 B 对分鱼准确率影响非常显著（$F > F_{0.01}$），辊道转速 A 对分鱼准确率影响不显著（$F < F_{0.05}$）；进鱼量 C 对分选效率影响显著（$F > F_{0.05}$），辊道倾角 B 对分选效率影响非常显著（$F > F_{0.01}$），辊道转速 A 对分选效率影响不显著（$F < F_{0.05}$）。

为得到最佳工作参数组合，结合试验结果和方差分析，采用多目标多变量优化方法，对正交试验进行优化设计。以提高分鱼准确率和分选效率为原则，建立数学模型

表 4 分选性能指标方差分析

Tab. 4 Analysis of variance of sorting performance indicators

试验指标	差异源	离差平方和	自由度	均方	F	显著性
y_1	A	124.83	3	41.61	1.57	
	B	2373.48	3	791.16	29.83	**
	C	1529.66	3	509.89	19.22	*
	误差列	477.45	6	79.58		
y_2	A	280.41	3	93.47	6.87	
	B	1233.45	3	411.15	30.23	**
	C	373.26	3	124.42	9.15	*
	误差列	244.85	6	40.81		

注：* 表示显著；** 表示非常显著。$F_{0.01}(3,6)=27.91$，$F_{0.05}(3,6)=8.94$。

$$\begin{cases}\max\ y_1\\ \max\ y_2\\ \text{s.t.}\begin{cases}80\ \text{r/min}\leqslant a\leqslant 140\ \text{r/min}\\ 4^\circ\leqslant b\leqslant 16^\circ\\ 3\ \text{尾/s}\leqslant c\leqslant 12\ \text{尾/s}\\ 30\%\leqslant y_1(a,b,c)\leqslant 100\%\\ 60\%\leqslant y_2(a,b,c)\leqslant 100\%\end{cases}\end{cases}\tag{3}$$

基于 Design-Expert 8.0.5 软件中的 Optimization 模块对式(3)求解分析，可得到多组优化后的参数组合。并对优化后参数进行结果分析，发现当参数组合为辊道转速 138.40 r/min、辊道倾角 10.47°、进鱼量 3.00 尾/s 时，综合分选作业性能最好，其分鱼准确率为 97.99%，分选效率为 95.29%。

对优化后的工作参数组合进行仿真分析验证，得到分鱼准确率为 94.22%，分选效率为 99.77%。与优化结果相比，仿真的分鱼准确率和分选效率的相对误差分别为 3.84% 和 4.70%。

5 结论

(1)设计了一种辊道式鱼苗分选机，对该机器的工作机理与整机结构进行阐述，确定了关键机构的结构参数，为鱼苗分选机械的优化设计提供了参考。

(2)通过仿真进行单因素及多因素正交影响分析，结合多目标多变量优化方法，对试验结果展开优化设计。结果表明，各因素对分鱼准确率和分选效率影响的主次因素顺序均为辊道倾角、进鱼量和辊道转速。兼顾以提高分鱼准确率和分选效率为原则，采用 Design-Expert 8.0.5 软件中的 Optimization 模块进行参数优化，确定了较优组合为：辊道转速 138.40 r/min、辊道倾角 10.47°、进鱼量 3.00 尾/s，此时机具综合分选作业性能最佳。

参 考 文 献

[1] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京：中国农业出版社，2017.

[2] 肖君林. 鲤鱼苗和商品鲤的活动式分级装置[J]. 渔业现代化，1980(3)：55－55.

[3] 鲁伟. 网箱养殖鱼类分级与起捕技术的试验研究[D]. 青岛：中国海洋大学，2004.

[4] 殷远，朱清澄，宋利明，等. 西北太平洋秋刀鱼分鱼系统的改进[J]. 上海海洋大学学报，2011，20(2)：284－289.
YIN Yuan, ZHU Qingcheng, SONG Liming, et al. Improvement measures of the Northwest Pacificsaury separating system[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2011, 20(2): 284－289. (in Chinese)

[5] 高星星，谭鹤群. 淡水鱼头尾与腹背定向装置的设计与试验[J]. 农业工程学报，2011，27(5)：342－347.
GAO Xingxing, TAN Hequn. Design and experiment of directional transport device of freshwater fish bodies[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 342－347. (in Chinese)

[6] 彭永章. 喷水滚筒式鱼苗大小分选装置[J]. 渔业现代化，1998(3)：17－21.

[7] 彭磊，王小洁，白雪松，等. 辊道式分鱼机：CN106804689A[P]. 2017－06－09.

[8] 伍献文，刘建康. 鱼[M]. 北京：中华书局，1954.

[9] 王国强，王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安：西北工业大学出版社，2010.

[10] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉：武汉理工大学出版社，2010.

[11] 雷树德，谭鹤群. 链式剖鱼机的研制与试验研究[J]. 农机化研究，2009，31(9)：81－84.
LEI Shude, TAN Hequn. Research on the chain fish shearing machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(9): 81－84. (in Chinese)

[12] 朱国，谭鹤群. 鱼体在剖鱼机夹片中受力有限元分析[J]. 农业工程学报，2008，24(4)：44－48.
ZHU Guo, TAN Hequn. Finite element analysis of loaded silver carp in fish shearing machine clips[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 44－48. (in Chinese)

[13] 王相友，孙景彬，许英，等. 拨辊推送式马铃薯清选分选机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(10)：316－322，279.
WANG Xiangyou, SUN Jingbin, XU Ying, et al. Design and experiment of potato cleaning and sorting machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 316－322, 279. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20171040&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.040. (in Chinese)

[14] 赖庆辉，袁海阔，胡子武，等. 滚筒板齿式三七种苗分离装置结构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2018，49(4)：

121 – 129.
LAI Qinghui, YUAN Haikuo, HU Ziwu, et al. Design and experiment on seedling separation device of *Panax notoginseng* seedlings based on roller zigzag mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 121 – 129. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20180414&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.014 (in Chinese)

[15] 冯常建, 毕阳, 胡文威, 等. 基于 EDEM 数值模拟的沙棘脱果滚筒筛仿真试验[J]. 林业机械与木工设备, 2016, 44(6):34 – 37.
FENG Changjian, BI Yang, HU Wenwei, et al. Simulation test on sea buckthorn defruiting roller screen based on EDEM numerical simulation[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2016, 44(6):34 – 37. (in Chinese)

[16] 吕金庆, 于佳钰, 冯雪, 等. 辊式马铃薯分级机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(2):323 – 332.
LÜ Jinqing, YU Jiayu, FENG Xue, et al. Design and experiment of roller potato grading machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2):323 – 332. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20190237&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.037. (in Chinese)

[17] 陈龙, 张克平, 樊宏鹏, 等. 基于 EDEM 的带式输送机工作过程仿真分析[J]. 林业机械与木工设备, 2016,44(9): 17 – 19.
CHEN Long, ZHANG Keping, FAN Hongpeng, et al. Simulation analysis of the belt conveyor's working process based on EDEM[J]. Foresty Machinery & Woodworking Equipment, 2016, 44(9):17 – 19. (in Chinese)

[18] 李学强, 卢延芳, 苏国梁, 等. 多功能马铃薯清选输送机的设计[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(7):1832 – 1835.
LI Xueqiang, LU Yanfang, SU Guoliang, et al. Design on multi-functional potato cleaning conveyor[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(7):1832 – 1835. (in Chinese)

[19] 袁巧霞, 陈红, 刘清生, 等. 三层滚筒式银杏分级机的设计[J]. 华中农业大学学报, 2004, 23(3):359 – 362.
YUAN Qiaoxia, CHEN Hong, LIU Qingsheng, et al. Designing on three-layer-cylindrical grader of gingko nuts[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2004, 23(3):359 – 362. (in Chinese)

[20] 王维, 王亚妮, 王佩, 等. 5X – 150 型核桃分选机的研制[J]. 农业技术与装备, 2018, 337(1):75 – 76,78.
WANG Wei, WANG Yani, WANG Pei, et al. 5X – 150 walnut sorting machine development[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2018, 337(1):75 – 76,78. (in Chinese)

[21] 吴明亮, 谢方平, 唐伦, 等. 杂交水稻工程化制种窝眼型孔分选机分选筒设计[J]. 农业工程学报, 2010, 26(13):1 – 4.
WU Mingliang, XIE Fangping, TANG Lun, et al. Design of separating cylinder of pocket hole separating machine on large-scale seeding production for hybrid rice[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(13):1 – 4. (in Chinese)

[22] 赵选民. 试验设计方法[M]. 北京:科学出版社, 2010.