

基于 FEM 的鲶鱼去头加工装置 运动参数优化试验

Study on optimization of motion parameters of catfish headless processing device based on FEM

李晨阳¹ 单慧勇¹ 张程皓¹ 田云臣² 卫勇¹

LI Chen-yang¹ SHAN Hui-yong¹ ZHANG Cheng-hao¹ TIAN Yun-chen² WEI Yong¹

(1. 天津农学院工程技术学院, 天津 300384; 2. 天津农学院计算机与信息工程学院, 天津 300384)

(1. College of Engineering and Technology, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China;

2. College of Computer and Information Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

摘要:目的:提高中国淡水鱼加工业前处理过程的机械化与自动化水平。方法:利用数值分析软件 ANSYS/LS-DYNA 构建鲶鱼去头切割仿真模型,采用有限单元法(FEM)对鲶鱼去头过程进行仿真分析及运动参数优化,以最小切割功耗为优化目标调整刀片转速及输送速度两项运动参数,并通过样机试验验证仿真结果的准确性。结果:当刀片转速为 850 r/min、输送速度为 14 cm/s 时鱼头切割断面平整且光滑,断面感官较好,去头加工效率也能得以保证。结论:建立的圆盘刀切割鱼头仿真模型虽可以对运动过程进行一定的描述,但精度有待提升。

关键词:去头加工;圆盘刀;有限单元法;数值模拟

Abstract: Objective: Improve the mechanization and automation of the pretreatment process of China's freshwater fish processing industry. **Methods:** The catfish head cutting simulation model is constructed by the numerical analysis software ANSYS/LS-DYNA, and the catfish head removal process is simulated and analyzed and the motion parameters are optimized by FEM. The blade speed and transportation speed are adjusted with the minimum cutting power consumption as the optimization goal, and the accuracy of the simulation results is verified by the prototype test. **Results:** When the speed of the blade is 850 r/min and the conveying speed is 14 cm/s, the cutting section of the fish head is smooth and smooth, the sensory of the section is good, and the cutting efficiency of the head can be guaranteed. **Conclusion:** The

established simulation model of disc cutter cutting fish head can describe the motion process, but the accuracy needs to be improved.

Keywords: head cutting; disc cutter; finite element method; numerical simulation

在淡水鱼精深加工中,前处理是整套工艺的首要环节,传统大宗淡水鱼前处理加工主要包括致昏、分级与定向、“三去”(去鳞、去头尾、去内脏)、切片等环节,其加工质量直接影响淡水鱼后续加工和产品品质^[1]。在机械化去头方面,国内外现有设备大多采用圆盘刀进行切割,切割系统的耐用性、稳定性及在切割过程中的平滑度直接影响切割质量及运行效率。

近年来,数值模拟技术为圆盘刀切割问题的研究提供了新的方法^[2]。蒋连琼^[3]以回转式圆盘刀切割器作为研究对象,对圆锯片锯切枝条的过程进行显式动态的数值模拟仿真。龚境一^[4]运用力学试验等手段对青菜头的本构模型进行了分析,以此为基础在 ANSYS/LS-DYNA 软件中建立了圆锯片切割青菜头的数值分析模型,使用该模型对圆锯片切割青菜头运动参数进行了数值模拟。Meng 等^[5]利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元数值模拟软件对圆锯片切割桑枝过程中的应力和切削力变化进行分析,采用多因素正交试验法研究了不同参数对圆锯片切割系统的影响,确定了圆锯片切割系统的最佳参数。郇晓龙等^[6]利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对铡切机构切割过程进行计算机仿真,通过正交试验确定影响切割功耗的主次因素及最优水平组合。中国针对鲶鱼的去头加工机械研究存在空白,不适当的加工参数会使得切割断面感官较差,得肉率低。研究拟利用 ANSYS/LS-DYNA 软件构建鲶鱼去头切割仿真模型,采用 FEM 对鲶鱼去头过

基金项目:国家重点研发计划(编号:2020YFD0900600);现代农业产业技术体系资助项目(编号:CARS-47);天津市海水养殖产业技术体系项目(编号:ITTMRS2021000)

作者简介:李晨阳,男,天津农学院在读硕士研究生。

通信作者:单慧勇(1977—),男,天津农学院副教授,硕士。

E-mail: tjshyyr@sina.com

收稿日期:2022-02-09 **改回日期:**2022-05-13

程进行仿真分析及运动参数优化,并通过样机试验验证仿真结果的准确性,以期为鲢鱼去头加工机传动系统的设计提供数据支撑。

1 基于 FEM 的去头过程仿真分析

1.1 有限元分析模型建立

切割过程中,在鱼体与刀片接触的临界状态时,随着传送带向前输送,刀片切入鱼体,鱼体表面鱼肉组织被破坏,刀片对其产生挤压力 F 及静摩擦力 f ,其静摩擦力 f 沿着刀刃切线方向,同刀片运动方向一致,挤压力方向沿刀片法线方向^[7]切割受力如图 1 所示。根据建立数值分析模型的简化原则,简化后模型包括鱼肉及鱼骨两部分。

对同一批次(1.5±0.3) kg 的鲢鱼进行形体参数测量,获取鱼体建模尺寸参数,并采用电子万能试验机对鲢

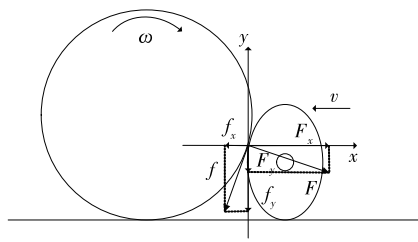


图 1 鱼体切割处受力图

Figure 1 Force diagram at the cut of fish fillet

鱼鱼肉和鱼骨分别进行压缩、剪切、拉伸等处理,检测不同机械处理方式下鱼肉和鱼骨的力学特性参数。由于鲢鱼力学特性为各向异性,因此在试验过程中应检测各方向的弹性模量、剪切模量等数据,同时结合相关文献^[8],确定鱼体模型相关参数,见表 1。

表 1 鱼体材料参数[†]

Table 1 Fish body material parameters

材料	密度/(kg·m ⁻³)	E_x /MPa	E_y /MPa	E_z /MPa	G_{xy} /MPa	G_{yz} /MPa	G_{zx} /MPa	μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{zx}
鱼肉	793	2.530	2.120	2.120	0.321	0.486	0.486	0.45	0.37	0.37
鱼骨	150	3.316	3.316	3.316	8.976	8.976	8.976	0.30	0.30	0.30

[†] E_x 表示头尾轴方向的弹性模量; E_y 表示腹背轴方向的弹性模量; E_z 表示左右轴方向的弹性模量; G_{xy} 表示头尾轴方向上的剪切模量; G_{yz} 表示左右轴方向上的剪切模量; G_{zx} 表示腹背轴方向上的剪切模量; μ_{xy} 表示头尾轴方向上的泊松比; μ_{yz} 表示左右轴方向上的泊松比; μ_{zx} 表示腹背轴方向上的泊松比。

确定鱼体形体参数后建立鱼体几何模型,将其分为前部、切割部、后部 3 大部分进行建模。由于在进行鱼头切割过程中,主要受力点在切割部,因此仿真建模时,需将切割部尺寸进行精准定义。由鱼体形体参数可知,鱼体最宽部位及最高部位均在鱼体头部切割轨迹线附近,体宽主要分布在 7.8~9.2 cm,体高主要分布在 7.5~8.5 cm,其平均值分别为 8.5,8.0 cm,因此建立一长轴为 8.5 cm,短轴为 8 cm 的椭圆,进行拉伸便形成切割部,设定拉伸长度 10 cm,同时,在切割部中心位置,设一直径为 1 cm 的鱼骨;建立前部吻端长轴 5 cm 短轴 3 cm 的椭圆,与切割部椭圆进行拉伸放样,拉伸长度为 10 cm;建立后部尾端长轴 7 cm 短轴 6 cm 的椭圆,与切割部椭圆进行拉伸放样,拉伸长度为 30 cm。由于前部及后部对仿真结果影响较小,因此为简化计算,对鱼体切割部网格划分较为稠密,其余无接触部分网格划分较为粗放,模型网格划分结果如图 2 所示。

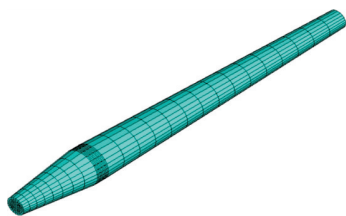


图 2 鱼体模型网格划分效果

Figure 2 Meshing effect of fish body model

建立直径 28 mm、厚 2 mm 的圆盘刀模型,刀片材料为钢材 1Cr17Mn6Ni5N,该材料密度为 7 930 kg/m³,弹性模量 2.03 MPa,泊松比 0.3。对圆盘刀进行均匀网格划分,结果如图 3 所示。对模型的材料参数、约束、载荷及接触等定义完成后,设置合适的求解控制及输出参数进行求解计算^[9]。

1.2 数值模拟与分析

在圆盘刀转速为 1 000 r/min、鱼体输送速度为 10 cm/s 的条件下进行去头仿真试验,该过程中锯切力及功率的变化曲线如图 4 所示。

图 5(a)~图 5(c)为圆盘刀切割鱼头过程的应力云图,整个切割过程从 0.43 s 开始持续 0.6 s 左右,切割过程中最大锯切力为 75.86 N,出现在 0.72 s 左右切割鱼骨位

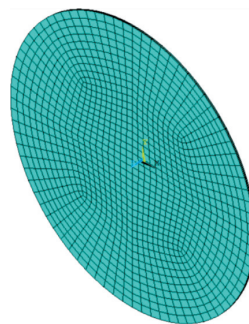


图 3 刀片模型网格划分效果

Figure 3 Blade model meshing effect

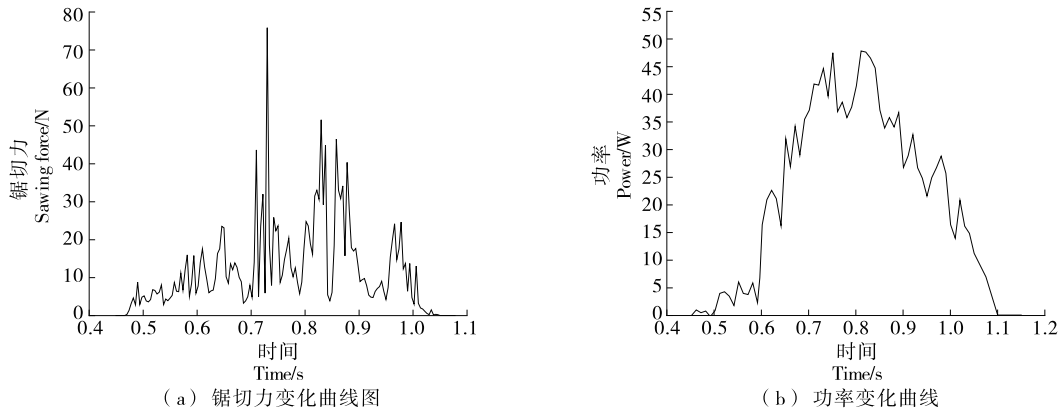


图 4 锯切力及功率的变化曲线

Figure 4 Change curve of sawing force and power

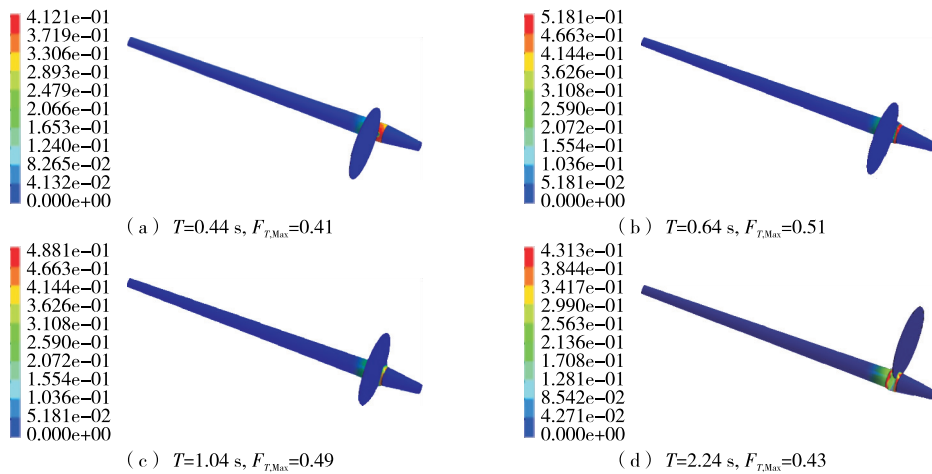


图 5 去头过程应力云图

Figure 5 Stress cloud diagram of fish head cutting process

置。圆锯片切割鱼头的过程中锯切力曲线存在波动,主要原因是高速切割中存在重割现象,造成相邻位置鱼体受力减小。从功率变化曲线可知,切割鱼体消耗的最大功率为 50 W,切割初始阶段功率较小,伴随着切割面积增加,功率逐渐波动增大,当完全切断鱼头后,功率回到初始零值,同时对功率变化曲线积分得到所消耗的功为 29.87 J。切割完成后鱼体仍存在残余应力,如图 5(d)所示。

1.3 有限元分析模型试验验证

为了验证圆盘刀切割鱼头的有限元分析模型的准确性,以锯切力及切割功耗为评价指标进行实际去头试验验证。由于去头切割时间较短,仅 0.6 s 左右,通过计算机 Matlab 编程读取三相变频器输出的瞬间电压电流来获得切割所需功耗,在刀盘驱动轮四周布置 8 块磁铁,利用 PLC 高速计数功能读取霍尔开关在去头过程中通断次数,从而计算出对应刀盘转速,通信方式及参数见图 6。

选取体重为(1.5±0.3) kg 的鲶鱼进行试验,在刀片

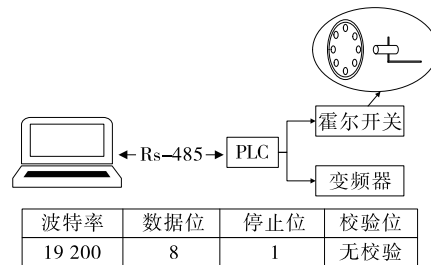


图 6 通信方式及参数设定

Figure 6 Communication method and parameter setting

转速为 1 000 r/min、鱼体输送速度为 10 cm/s 的条件下,测量 5 组去头切割过程中的电压及电流,计算其锯切力及功耗,结果见表 2。

由表 2 可知,仿真与实际试验的最大锯切力相对误差为 23.49%,平均功耗误差为 25.62%。实际试验的最大锯切力与平均功耗均小于仿真数据,其原因主要在于两方面:① 仿真过程中将鱼体进行简化,鱼体内脏等部分均用鱼肉进行等效代替;② 仿真参数设置与实际参数存

表 2 去头切割试验结果

Table 2 De-head cutting test results

试验号	最大锯切/N	功耗/J
1	63.8	23.761
2	65.3	22.879
3	61.9	23.671
4	63.1	25.289
5	65.3	23.287
平均值	63.9	23.778
仿真误差/%	18.75	25.62

在误差。但此误差对于去头过程的运动参数优化影响较小,通过仿真可以获得与实际相应的数值变化规律。

2 基于 FEM 的去头过程运动参数优化

2.1 单因子试验

为了研究刀片转速对锯切力的影响,刀片转速选取水平为 400,600,800,1 000,1 200,1 400 r/min,选定鱼体输送速度 10 cm/s,将仿真模型 K 文件中转速参数依次进行修改并进行仿真试验。为了研究鱼体输送速度对锯切力的影响,刀体输送速度选取水平为 5,10,15,20,25,30 cm/s,刀片转速设定为 1 000 r/min,将仿真模型 K 文

件中鱼体输送速度依次进行修改并进行仿真试验,结果见图 7。由图 7 可知,最大锯切力随刀片转速的增加呈现先减小后增大的趋势,最小值出现在 800 r/min。最大锯切力随输送速度的增大呈现缓慢上升趋势,在 15~20 cm/s 时变化幅度最大,达到 8.1 N,在 10~15 cm/s 时变化幅度最小,仅增大 1.9 N。

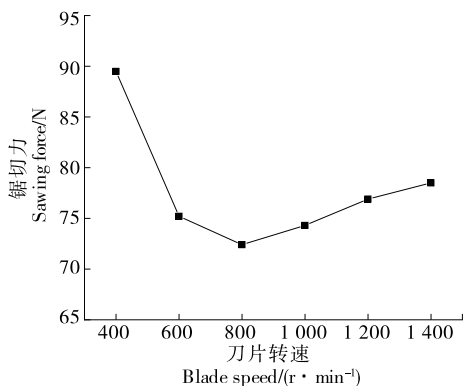
2.2 二次回归正交组合试验

采用二次回归正交组合试验^[10-11]研究切割功耗与刀片转速、鱼体输送速度间的关系。由于刀片转速为 600~1 000 r/min、鱼体输送速度为 10~15 cm/s 时锯切力相对较小,因此选取该范围为二元二次回归正交组合试验因子水平。试验因子编码见表 3,二次回归正交组合试验设计见表 4。

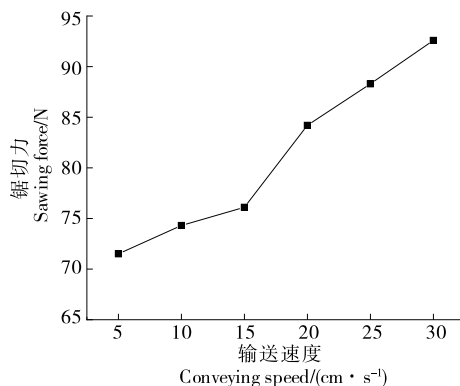
对表 4 进行二元二次方程回归分析,建立切割功耗与运动参数的函数关系:

$$Y = 587.46082 - 0.55821X_1 - 48.8477X_2 + 0.02171X_1X_2 + 0.00016X_1^2 + 1.13275X_2^2 \quad (1)$$

由表 5 可知,模型 $P=0.002$,表明模型极显著;失拟项 $P=0.0634 > 0.05$,表明该模型与实际值具有较好的拟合性;模型决定系数与模型调整决定系数分别为 $R^2 = 0.9536, R_{Adj}^2 = 0.9204$,表明预测值与实际值相关性较高。



(a) 最大锯切力随刀片转速变化趋势



(b) 最大锯切力随输送速度变化趋势

图 7 最大锯切力随各因素变化趋势

Figure 7 The maximum sawing force changes with various factors

表 3 二元二次回归正交组合试验因子编码表

Table 3 Binary quadratic regression orthogonal combination test factor coding table

水平	X_1 刀片转速/($r \cdot \min^{-1}$)	X_2 输送速度/($cm \cdot s^{-1}$)
上星号臂 γ	1 000.000	15.000
上水平 1	957.853	14.473
零水平 0	800.000	12.500
下水平 -1	642.147	10.527
下星号臂 $-\gamma$	600.000	10.000
变化间距 Δj	157.853	1.973

各项目对切割功耗的影响均极显著($P < 0.01$)^[12-13]。由 F 值可知,输送速度对切割功耗影响相对较大。

由图 8 可知,当刀片转速 < 800 r/min 时,切割功耗与输送速度呈负相关;当刀片转速 > 800 r/min 时,切割功耗随着输送速度的提升呈先减小后增大的趋势;当输送速度 < 13 cm/s 时,切割功耗与刀片转速呈负相关;当输送速度 > 13 cm/s 时,切割功耗与刀片转速呈正相关。

2.3 去头过程运动参数优化

采用 Design Expert 最优解方案,在约束范围内,设定功耗最小为优化目标,从而获得去头过程刀片转速与输送速度匹配的最优运动参数,结果见图 9。

优化结果表明,当刀片转速为 848.258 r/min、输送速度为 13.916 cm/s 时,对应的切割功耗最低为 23.925 9 J。结合生产实际,确定优化后刀片转速为 850 r/min、输送

速度为 14 cm/s。

2.4 去头过程运动参数优化的验证实验

选取体重在(1.5±0.3) kg 的鲈鱼进行试验,通过变频器调节刀片转速及输送速度,试验中测量锯切力、功耗与仿真数据进行对比。试验参数及结果如表 6 所示。

经样机去头后,记录各运动参数(刀片转速,输送速度)下鱼头切割断面效果。结果表明:采用优化后的运动参数“850 r/min, 14 cm/s”“800 r/min, 10 cm/s”“800 r/min, 15 cm/s”处理,鱼头切割断面平整光滑,无明显缺损现象,断面感官较好;当运动参数为“600 r/min, 10 cm/s”“1 000 r/min, 10 cm/s”时,鱼头切割断面平整但略微粗糙,鱼身有明显缺损和撕裂;当运动参数为

表 4 二次回归正交组合试验设计

Table 4 Quadratic regression orthogonal combination experiment design

序号	X ₁	X ₂	Y 功耗/J
1	-1	-1	54.189 0
2	1	-1	29.797 5
3	-1	1	24.446 0
4	1	1	27.097 0
5	-1.267	0	38.949 0
6	1.267	0	26.379 0
7	0	-1.267	38.353 5
8	0	1.267	28.446 0
9	0	0	27.766 5
10	0	0	26.409 5
11	0	0	24.846 5
12	0	0	24.174 5
13	0	0	25.838 0

表 5 二次模型的方差分析结果†

Table 5 Analysis of variance results of the quadratic model

项目	平方和	自由度	均方	F	P
模型	841.13	5	168.23	28.76	0.000 2**
X ₁	196.77	1	196.77	33.63	0.000 7**
X ₂	280.77	1	280.77	47.99	0.000 2**
X ₁ X ₂	182.83	1	182.83	31.25	0.000 8**
X ₁ ²	80.51	1	80.51	13.76	0.007 6**
X ₂ ²	100.24	1	100.24	17.14	0.004 4**
残差	40.95	7	5.85		
失拟项	33.16	3	11.05	5.67	0.063 4
误差	7.79	4	1.95		
总离差	882.08	12			

† ** 表示差异极显著(P<0.01), * 表示差异显著(P<0.05);R²=0.953 6,R_{adj}²=0.920 4。

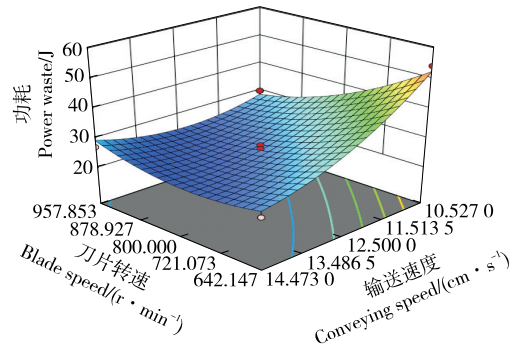


图 8 切割功耗与运动参数三维曲面图

Figure 8 3D surface graph of cutting power consumption and motion parameters

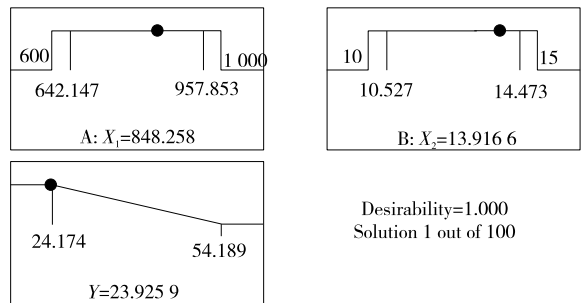


图 9 运动参数优化结果

Figure 9 Motion parameter optimization results

表 6 样机平台试验参数及结果

Table 6 Prototype platform test parameters and results

序号	运动参数		仿真结果		试验结果		误差	
	刀片转速/(r · min ⁻¹)	输送速度/(cm · s ⁻¹)	锯切力/N	功耗/J	锯切力/N	功耗/J	锯切力/%	功耗/%
1	800	10	71.2	38.897	63.5	31.633	12.12	22.96
2	850	14	76.4	26.276	64.6	20.445	18.27	28.52
3	800	15	75.9	24.982	65.2	22.063	16.41	13.23
4	600	10	78.2	63.189	65.4	57.382	19.57	10.12
5	600	20	89.5	44.897	77.8	39.169	15.04	14.62
6	1 000	5	69.9	76.278	58.6	68.991	19.28	10.56
7	1 000	10	74.3	30.848	62.7	26.218	18.50	17.66

“600 r/min, 20 cm/s”“1 000 r/min, 5 cm/s”时, 鱼头切割断面不平整且十分粗糙, 鱼身严重缺损和撕裂, 断面感官较差。因此, 优化后的运动参数不仅功耗较低, 且其切割断面较好, 能达到工艺要求。

3 结论

利用数值分析软件 ANSYS/LS-DYNA 构建了圆盘刀切割鱼头过程仿真模型, 采用有限单元法对去头过程进行仿真分析及运动参数的优化, 并通过样机试验对仿真结果的准确性进行验证。样机试验表明当刀片转速为 850 r/min、输送速度为 14 cm/s 时鱼头切割断面平整且光滑, 断面感官较好, 去头加工效率也能得以保证。但由于建立的圆盘刀切割鱼头仿真模型虽可以对运动过程进行一定的描述, 但精度有待提升, 现有建模参数是经一定试错而来, 后续将对模型材料参数的确定进行进一步的研究。

参考文献

- [1] 李玲, 宗力, 王玖玖, 等. 大宗淡水鱼加工前处理技术和装备的研究现状及方向[J]. 渔业现代化, 2010, 37(5): 43-46, 71.
LI L, ZONG L, WANG J J, et al. Research status and development trend of massive freshwater fish pre-treatment processing technology and equipment[J]. Fishery Modernization, 2010, 37(5): 43-46, 71.
- [2] SUN Y H, LAI R S, JIN G C. Cutting part research of machine for cutting mulberry branch [J]. Advanced Materials Research, 2011, 421: 246-249.
- [3] 蒋连琼. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的圆锯片锯切过程仿真研究[D]. 南宁: 广西大学, 2013: 7-8.
JIANG L Q. Simulation study of circular saw cutting process based on ANSYS/LS-DYNA[D]. Nanning: Guangxi University, 2013: 7-8.
- [4] 龚境一. 青菜头切割装置的设计与优化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018: 20-22.
GONG J Y. Design and optimization of tumorous stem mustard cutting device[D]. Chongqing: Southwest University, 2018: 20-22.
- [5] MENG Y M, WEI J D, WEI J, et al. An ANSYS/LS-DYNA simulation and experimental study of circular saw blade cutting system of mulberry cutting machine[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157: 38-48.
- [6] 郇晓龙, 尤泳, 王德成, 等. 小型组合式王草铡切打浆机优化设

计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 10.

HUAN X L, YOU Y, WANG D C, et al. Optimization design and experiment on small cutting and beating machine of king grass[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3):10.

- [7] 张汉石. 苹果枝条锯切力学试验仿真与探究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020: 17-23.
ZHANG H S. Simulation and research on cutting mechanics experiment of apple branches[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020: 17-23.
- [8] 张程皓. 淡水鱼开腹去脏与切片加工机设计研究[D]. 天津: 天津农学院, 2021: 72-74.
ZHANG C H. Design of laparotomy viscera remover and slicing machine for freshwater fish[D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2021: 72-74.
- [9] 薛忠. 木薯茎秆切割力学特性与仿真分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018: 109-131.
XUE Z. Cutting mechanical characteristics and simulation analysis of cassava stalk [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018: 109-131.
- [10] 葛宜元. 试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015: 152-155.
GE Y Y. Experimental design method and application of design expert software[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2015: 152-155.
- [11] 郝杰林. 工厂化叶菜定植盘清洗系统优化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020: 35-39.
HAO L J. Optimization study on cleaning system of leafy vegetable planting tray [D]. Chongqing: Southwest University, 2020: 35-39.
- [12] 王升力, 黄雪琴, 郭诗, 等. 响应面法优化虾壳中虾青素提取工艺的研究[J]. 陕西农业科学, 2016, 62(2): 1-5.
WANG S L, HUANG X Q, GUO S, et al. Optimization of astaxanthin extraction from shrimp shell by response surface methodology[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2016, 62(2): 1-5.
- [13] 贾娟, 王婷婷, 傅航, 等. 响应面优化超声辅助法提取杜仲叶中绿原酸的工艺研究[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(3): 97-103.
JIA J, WANG T T, FU H, et al. Ultrasonic assisted extraction technique optimization of chlorogenic acid from eucommia ulmoides leaves by response surface methodology[J]. Storage and Process, 2021, 21(3): 97-103.

(上接第 67 页)

- [26] 张瑜文, 谢学立, 黄绵佳, 等. 真空浓缩法与旋转蒸发法提取青蒿素的比较[J]. 热带生物学报, 2015, 6(3): 325-328.
ZHANG Y W, XIE X L, HUANG M J, et al. Comparison of vacuum concentration and rotary evaporation methods in Aartemisinin extraction[J]. Journal of South China University of Tropical Agriculture, 2015, 6(3): 325-328.
- [27] 程甲, 赵善贞, 齐娜, 等. 食品检验检测使用浓缩仪的评价验

收[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(16): 5 755-5 759.

- CHENG J, ZHAO S Z, QI N, et al. Evaluation and acceptance of concentrators used in food inspection and testing[J]. Food Safety and Quality Detection Technology, 2020, 11(16): 5 755-5 759.
- [28] MATUSZEWSKI B K, CONSTANZER M L, CHAVEZ-ENG C M. Strategies for the assessment of matrix effect in quantitative bioanalytical methods based on HPLC-MSMS[J]. Analytical Chemistry, 2003, 75(13): 3 019-3 030.