

# 基于刚柔耦合模型的黄鳝剖切机仿真及试验

刘明勇<sup>1</sup>, 朱林<sup>1</sup>, 欧阳周寰<sup>1</sup>, 向雪<sup>1</sup>, 李平<sup>2</sup>, 闫春爱<sup>3</sup>

(1. 湖北工业大学农机工程研究设计院, 武汉, 430068; 2. 荆州市集创机电科技股份有限公司, 荆州, 434025;  
3. 武昌工学院智能制造学院, 武汉 430065)

**摘要:** 针对目前黄鳝人工剖切费时、费力且安全性差等难点, 该研究以体表黏滑的鲜活黄鳝为研究对象, 设计了一款小型黄鳝自动剖切机。首先, 测定了黄鳝基本物理参数以及相关力学参数。其次, 基于刚柔耦合原理, 将黄鳝鱼体与夹持轮、滑道的接触等效为刚度—阻尼模型, 运用 Abaqus 与 Adams 仿真软件建立其刚柔耦合模型。以鱼体输送时间、输出速度、夹持力、整机振动为试验指标, 探究弹簧刚度、滑道倾角、夹持轮转速等单因素对试验指标的影响。结果表明, 随着弹簧刚度增大, 夹持力先增大后降低, 整机振动幅度降低, 而输送时间和输出速度影响不大。随着滑道倾角增大, 鱼体输出时间减少, 而输出速度、夹持力、整机振动增大。随着夹持轮转速的增大, 鱼体输送时间、输出速度、夹持力、整机振动均增大。在单因素分析基础上进行多因素分析, 获得优化工况为夹持轮转速 600 r/min、弹簧刚度  $1.2 \times 10^3$  N/m、滑道倾角  $16^\circ$ 。最后, 开展黄鳝自动剖切机加工试验, 测得的振动参数以及鱼体输出速度与仿真结果接近, 且鲜活黄鳝在优化工况下剖切效果良好。研究结果为小型黄鳝剖切机设计提供参考。

**关键词:** 黄鳝; 刚柔耦合; 多因素分析; 试验; 剖切机; 模型

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403072

中图分类号: S147.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-20-0052-09

刘明勇, 朱林, 欧阳周寰, 等. 基于刚柔耦合模型的黄鳝剖切机仿真及试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 52-60. doi:

10.11975/j.issn.1002-6819.202403072 <http://www.tcsae.org>

LIU Mingyong, ZHU Lin, OUYANG Zhouhuan, et al. Simulation and experiment of *Monopterus albus* dissecting machine based on rigid-flexible coupling model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(20): 52-60. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403072 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

黄鳝肉质鲜嫩, 营养价值高, 是深受国内外消费者喜爱的鱼类。据调查, 2023 年国内黄鳝养殖产量达 33.4 万 t<sup>[1]</sup>, 具有广阔的市场前景。目前中国黄鳝主要以人工宰杀为主, 由于黄鳝体型细长且身上附着有黏液, 人工宰杀存在劳动强度高、工效低、安全性差等诸多问题。

国内现有黄鳝剖切机构的研究成果主要为专利。林天祥<sup>[2]</sup>发明的黄鳝宰杀器实现了半自动宰杀功能, 而且可以自适应黄鳝大小。夏明友<sup>[3]</sup>设计了一组自适应夹持块用于固定黄鳝, 但缺少输送机构。别传召<sup>[4]</sup>设计的宰杀机利用黄鳝自身重力下滑进入旋转的压鳝槽内完成剖切。程娟<sup>[5]</sup>发明的简易黄鳝宰杀装置利用螺旋型刀片旋转固定输送黄鳝。李平等<sup>[6]</sup>研制的黄鳝初加工机台实现剖切过程自动化, 提出黄鳝宰杀需要有专门的输送和限位装置。刘明勇等<sup>[7]</sup>设计出一款利用动弹簧连接夹持轮组件的小型黄鳝剖切机, 可以高效输送黄鳝并有较好的自适应功能。

在鱼类加工研究方面, 国内外学者做出了许多有益探索。万鹏等<sup>[8]</sup>研制了鲜活黄鳝剖切装置, 通过正交试

验得到了其较优的加工工况。夏伟伟等<sup>[9]</sup>设计了淡水鱼往复式去脏装置, 通过试验得出较优的工作参数。黄鹏飞等<sup>[10]</sup>设计了带式夹送淡水鱼剖鱼机并进行试验, 确定了白鲢鱼的最优皮带间距高度取值范围。邹伟等<sup>[11]</sup>研制一种由间歇输送系统、刀具夹具驱动系统、控制系统等组成的淡水鱼连续式去头尾装置。胡晓亮等<sup>[12]</sup>以竹筴鱼为试验对象, 采用正交试验设计, 研究输送带线速度、剖切刀转速和去脏轮转速与竹筴鱼去脏后可接受性评分之间的关系。目前国内水产品加工设备设计与试验研究<sup>[13-15]</sup>, 其夹持方式对于体表黏滑的黄鳝不可靠。国外的鱼类加工平台多为切片机与输送机<sup>[16]</sup>, BOOMAN 等<sup>[17]</sup>开发出一种新型鱼骨分离器, 能处理质量达 3 kg 的硬骨鱼。MUHAMMED 等<sup>[18]</sup>设计了一种用于鱼类加工的小型鱼肉骨分离器, 使用尼龙带输送鱼体。YAMAMOTO 等<sup>[19]</sup>设计了一款通用的肉类切片机, 通过刀架循环上下移动和置肉平台向前输送将肉切为薄片。综合国内外学者研究, 目前黄鳝剖切机缺少稳定输送机构且整机体积较大, 不适合量产。

目前已有开展黄鳝剖切机夹持过程仿真试验研究, 可以有效进行机器优化设计, 提高研发效率。并且建立刚柔耦合模型能极大提高仿真精度、准确模拟设备振动特性。诸多学者<sup>[20-25]</sup>通过建立刚柔耦合模型对机器的振动性能进行研究, 对机器的设计变量进行优化, 提高机器的性能, 通过对比试验结果与仿真结果, 验证仿真模型的准确性。

收稿日期: 2024-03-11 修订日期: 2024-05-10

基金项目: 湖北省农机装备补短板核心技术应用攻关项目 (HBSNYT202221)

作者简介: 刘明勇, 博士, 副教授, 研究方向为机械摩擦学、机械系统动力学及农机创新设计。Email: lmy8508@hbut.edu.cn

国外的鱼类加工设备多为切片与输送机械<sup>[26]</sup>，并不适合用来处理鳝类的鱼。国内鱼类加工设备研究主要针对常见淡水鱼，由于没有较为稳定的夹持输送结构，目前仍存在体积较大、操作复杂、通道易阻塞导致效率降低等缺点<sup>[27-29]</sup>。本文在深入研究黄鳝加工设备和机械仿真类成果后，在前期设计的鳝鱼自动剖切机<sup>[30]</sup>基础上对其进行优化，设计了一款小型黄鳝剖切机，建立整机与鱼体夹持过程刚柔耦合仿真模型，通过刚柔耦合仿真<sup>[31]</sup>研究各个因素对鱼体输送时间、输出速度、夹持力的影响，在此基础上对整机的振动进行分析。通过单因素与优化分析获得剖切机的最优工况，并进行黄鳝剖切试验与振动测试，以期小型黄鳝剖切机设计提供参考。

## 1 黄鳝剖切机工作原理及结构设计

黄鳝自动剖切机整机结构原理如图 1a 所示，主要由电机、传动机构、喂入机构、输送和剖切机构组成。电机启动后，动力通过同步带传递到刀轴上使剖刀高速转动；同时刀轴右侧的同步带也将动力传递到锥齿轮轴上并降速，保证夹持轮与剖刀有一定速差。滑道与夹持轮形成的间隙构成剖切口，刀片设置在剖切口前方，采用圆形刀逆向转动<sup>[32]</sup>，设计剖刀直径为 70 mm<sup>[30]</sup>，材料选用食品级合金钢。集料箱底面为倾斜设置，黄鳝体表黏滑<sup>[33]</sup>，鲜活黄鳝倒入集料箱后会顺着斜面进入滑道，在重力和滑道内限位的作用下以一定初速度进入夹持轮并被其捕获，其中集料箱中设计档条和档柱以避免黄鳝拥堵。夹持轮表面设有棘状限位，用于增大与表面黏滑鱼体的摩擦。黄鳝进入夹持轮后沿滑道方向向外输送并经过刀片被剖开。通过不同的喂入通道可实现黄鳝的剖腹或剖背加工。夹持轮为锥台体，上下设置弹性件且可在异形轴上下滑动。其目的是将下压黄鳝稳定在滑道上，自适应体态不均匀的鱼体以及大小不同的黄鳝，保证夹持的可靠性。整体结构如图 1b 所示。

黄鳝鱼骨主要分布在头部，试验发现黄鳝鱼骨与剖刀的接触会产生较大阻力，若黄鳝头部剖切成功则鱼体能顺利完成剖切。头部接触剖刀后受力分析如图 1c 所示。

根据鱼体与夹轮的几何关系可知

$$\begin{cases} \alpha = 90^\circ - \varphi - \beta \\ f_1 = [(G + F_2)\cos\beta + F_n\cos\alpha - F_T\sin\alpha]\mu \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\mu$  为鱼体在滑道上的摩擦系数

根据图 1c，鱼体顺利经过剖刀并完成剖切，受力应满足沿滑道向前的力大于阻力。

$$\begin{aligned} (G + F_2)\sin\beta + F_1\cos\beta - f_1 \\ > F_T\cos\alpha + F_n\sin\alpha \end{aligned} \quad (2)$$

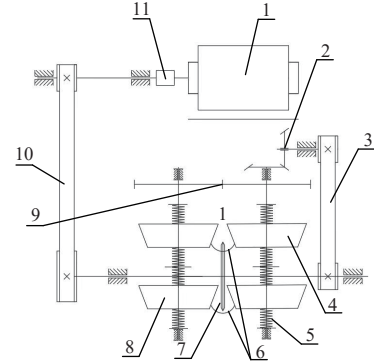
将式 (1) 代入式 (2) 得

$$\begin{aligned} (G + F_2)(\sin\beta - \mu\cos\beta) + F_1\cos\beta > \\ F_T\sin(\varphi + \beta)(1 - \mu) + F_n\cos(\varphi + \beta)(1 + \mu) \end{aligned} \quad (3)$$

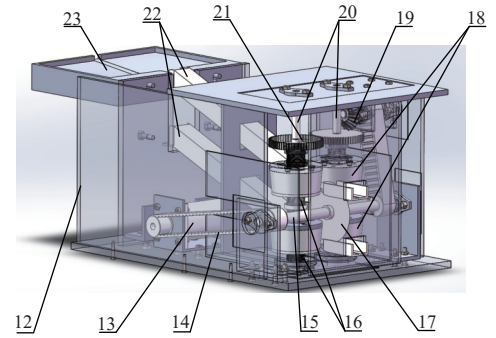
式中  $\mu$  为鱼体在滑道上的摩擦系数。

由式 (3) 可知，通过改变夹轮间隙或表面形状，即增大  $F_1$  有利于鱼体输送。通过加快剖刀转速，减小  $F_T$ 、 $F_n$  从而减小剖刀对鱼体的阻力，增大滑道倾角或降低滑

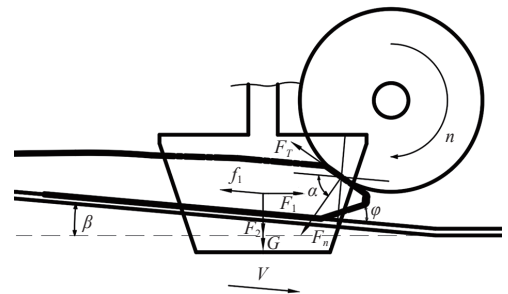
道摩擦系数  $\mu$  均有利于鱼体向前输送完成剖切。



a. 黄鳝自动剖切机结构原理  
a. Structural principle diagram of automatic *Monopterus albus* cutting machine



b. 黄鳝自动剖切机模型图  
b. Model diagram of automatic *Monopterus albus* cutting machine



c. 头部受力分析  
c. The force analysis of head

1.电机 2.锥齿轮副 3.同步带 II 4.剖腹夹轮 5.弹簧 6.滑道 7.剖刀 8.剖背夹轮 9.直齿轮副 10.同步带 I 11.联轴器 12.机架 13.调速电机 14.同步带 15.刀轴 16.弹簧 17.圆形刀片 18.夹持轮 19.锥齿轮 20.输出轴 21.直齿轮 22.滑道 23.集料箱

注： $F_1$  为夹持轮对鱼体作用力的水平分力，N； $F_2$  为夹持轮对鱼体作用力的垂直分力，N； $G$  为鱼体重力，N； $F_T$  为剖刀对鱼作用力的切向分力，N； $F_n$  为剖刀对鱼作用力的法向分力，N； $f_1$  为鱼体的摩擦力，N； $\alpha$  为剖刀对鱼作用力的法向分力与滑道的夹角， $(^\circ)$ ； $\varphi$  为黄鳝头部倾角， $(^\circ)$ ； $\beta$  为滑道倾角， $(^\circ)$ ； $n$  为刀具转速， $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

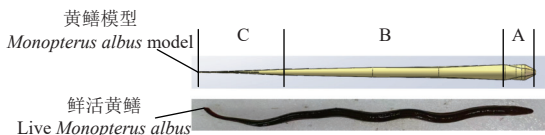
1. Motor 2. Bevel gear pair 3. Synchronous belt II 4. Laparotomy clamp wheel 5. Spring 6. Slide 7. Split knife 8. Split back clamp 9. Spur gear pair 10. Synchronous belt I 11. Coupling 12. Frame 13. Speed regulating motor 14. Synchronous belt 15. Cutter shaft 16. Spring 17. Circular blade 18. Clamping wheel 19. Bevel gear 20. Output shaft 21. Spur gear 22. Slide 23. Aggregate box  
Note:  $F_1$  is the horizontal component of the clamping wheel force on the fish body, N;  $F_2$  is the vertical component of the clamping wheel force on the fish body, N;  $G$  is fish weight force, N;  $F_T$  is the tangential component of the cutting force on the fish, N;  $F_n$  is the normal component of the cutting force on the fish, N;  $f_1$  is the friction force of the fish body, N;  $\alpha$  is the angle between the normal component force of the knife on the slide and the slide,  $(^\circ)$ ;  $\varphi$  is eel head angle,  $(^\circ)$ ;  $\beta$  is slope angle,  $(^\circ)$ ;  $n$  is the tool speed,  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ .

图 1 剖切机整机结构及原理分析

Fig.1 Structure and principle analysis of the cutting machine

## 2 黄鳝本构模型建立

以黄鳝为试验对象,水产市场购买鲜活黄鳝,长度为160~240 mm,质量为30~50 g,体宽最粗直径为8 mm,形态特征如图2。用Solidworks软件建立黄鳝模型,并将黄鳝分为头部A、身体B和尾部C三段,如图2所示。



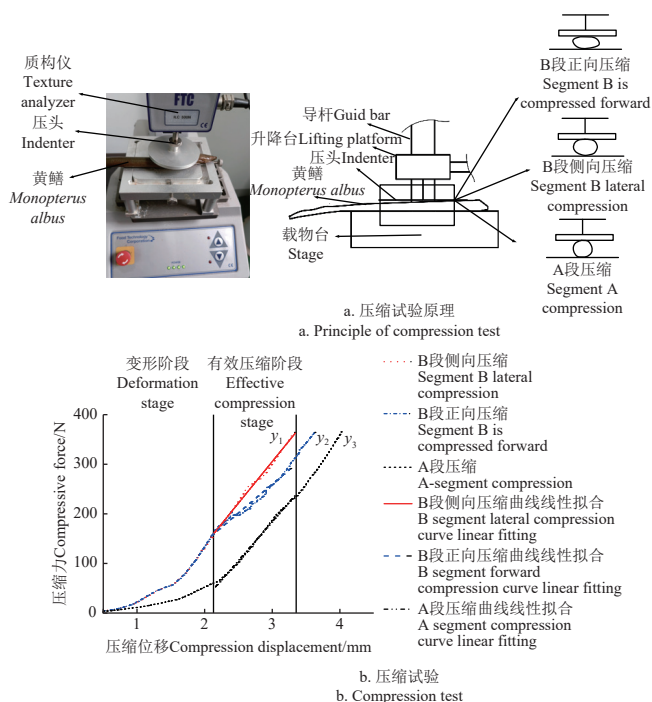
注: A 为黄鳝头部; B 为黄鳝身体部位; C 为黄鳝尾部。

Note: A is the head of *Monopterus albus*; B is the body part of *Monopterus albus*; C is the tail of *Monopterus albus*

图2 黄鳝模型

Fig.2 *Monopterus albus* model

采用TMS-Pro质构仪搭建压缩试验平台如图3a,输入质构仪压缩程序后将黄鳝固定在载物台上,对鲜活黄鳝分别进行A段、B段正向、B段侧向3次压缩试验,得到鱼体压缩位移—压缩力曲线如图3b。



注:  $y_1$  为B段侧向压缩力;  $y_2$  为B段正向压缩力;  $y_3$  为A段压缩力。  
Note:  $y_1$  is the lateral compression force of segment B;  $y_2$  is the forward compression force of segment B;  $y_3$  is the compression force of section A.

图3 黄鳝压缩试验

Fig.3 Compression test of *Monopterus albus*

从图3可以看出随着压缩位移增大,曲线斜率逐渐增加,压缩力先缓慢增大达到一定值后曲线斜率变化较小。这是由于在压缩时压头会先将黄鳝压变形到一定程度,这个阶段主要压缩的是黄鳝肌肉组织。将黄鳝压实后结构更加紧凑,开始压缩骨质结构。每条曲线后半程的有效压缩位移与斜率相近,后续压缩过程中近似弹性压缩。同时,在实际的鱼体夹持输送过程中,压缩位移基本一致,所以将鱼体等效为弹性模型。为了准确描述夹持过

程中黄鳝与夹持轮和滑道的接触,其刚度与摩擦系数均由试验测得,将图中的3条曲线做线性拟合后方程为

$$\begin{cases} y_1 = -197.96 + 167.87x \\ y_2 = -87.95 + 115.92x \\ y_3 = -285.79 + 156.74x \end{cases} \quad (4)$$

其中  $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$  分别为三段压缩过程中的压缩力, N;  $x$  为压缩位移, mm; 方程拟合决定系数  $R^2$  分别 0.995, 0.976, 0.997。

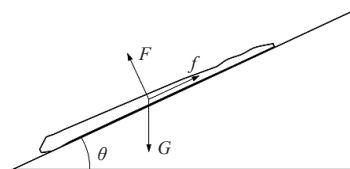
刚度根据式(5)计算

$$k = \frac{p}{\delta} \quad (5)$$

其中  $k$  为鱼体刚度, N/mm;  $p$  压缩压力, N;  $\delta$  为压缩位移, mm。

由于黄鳝肌肉和骨骼分布不均匀等因素,鱼体刚度  $k$  值会有所差别。在仿真中黄鳝与其他物体的接触等效为均质的刚度—阻尼模型,所以取3条曲线有效压缩位移斜率的平均值得到鱼体的刚度约为  $1.47 \times 10^5$  N/m。阻尼等参考相关文献<sup>[34-35]</sup>,取值为 200 N·s/m,黄鳝肌肉组织与肌肉纤维类似。

黄鳝与夹持轮及滑道的摩擦系数使用斜面法测量,如图4。定制与滑道和夹持轮相同材质与形状特征的平板,一端放置量角器,将黄鳝放于板上缓慢升高板另一端,观察黄鳝开始滑动时平板倾角  $\theta$  ( $^\circ$ ),则摩擦系数等于  $\tan\theta$ 。测得黄鳝与滑道静摩擦系数  $\mu_1$  和动摩擦系数  $\mu_{11}$  接近,约为 0.07;黄鳝与夹持轮静摩擦系数  $\mu_2$  约为 0.64,动摩擦系数  $\mu_{22}$  约为 0.55。



注:  $G$  为黄鳝自重, N;  $F$  为斜面对黄鳝支持力, N;  $f$  为斜面对黄鳝的摩擦力, N。

Note:  $G$  is the weight of *Monopterus albus*, N;  $F$  is the supporting force of inclined surface on *Monopterus albus*, N;  $f$  is the friction force of the inclined surface on the *Monopterus albus*, N.

图4 摩擦系数测定

Fig.4 Test of friction coefficient

参考其他相关领域仿真的接触参数<sup>[20]</sup>,综合试验得到黄鳝接触模型接触参数如表1。

## 3 夹持输送系统刚柔耦合模拟仿真分析

### 3.1 刚柔耦合多体动力学模型建立及仿真

为准确模拟整机振动及工作情况,将剖切机的夹持输送系统导入Adams中,并建立刚柔耦合模型。黄鳝与夹持轮和滑道的接触参数参考表1,定义夹持轮与轴为柔性接触、锥齿轮轴与直齿轮轴为柔性接触、锥齿轮传动组为刚性接触、夹持轮与鱼为刚柔接触、鱼体与滑道为刚性接触、两夹轮轴相对与轴承设置转动副,轴承设置固定。模型中轴承座、滑道、止推环、锥齿轮设为刚体。将轴与夹持轮用Abaqus柔性化并创建接口导入



Adams 中，将主要运动件在 Abaqus 中柔性化。考虑到计算收敛准则与精度，将夹持轮划分为 23 092 个网格，齿轮轴为 8 420 个网格。设置外部连接点与接口后进行模态分析，计算得到夹持轮和齿轮轴的前 15 阶频率的模态文件，用创建的接口将文件转存为 mnf 格式。在 Adams 中用 mnf 格式的零件替换原本刚体零件，得到整机刚柔耦合模型如图 5 所示。模型中 Y 轴为重力方向，Z 轴为滑道方向，X 轴为两夹持轮中心连线方向。

表 1 接触参数

Table 1 Contact parameters

参数 Parameters	数值 Values
刚度 Stiffness/ (N·m <sup>-1</sup> )	147 000
力指数 Force index	2.2
阻尼 Damping/ (N·s·m <sup>-1</sup> )	200
穿透深度 Penetration depth/m	0.01
静摩擦系数 Coefficient of static $\mu_1$	0.07
动摩擦系数 Coefficient of dynamic friction $\mu_{11}$	0.07
静摩擦系数 Coefficient of static $\mu_2$	0.64
动摩擦系数 Coefficient of dynamic friction $\mu_{22}$	0.55

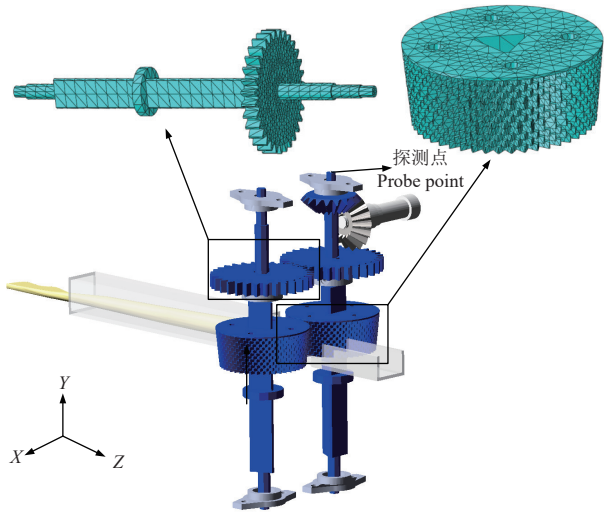


图 5 刚柔耦合模型

Fig.5 Rigid-flexible coupling model

3.2 典型刚柔耦合结果分析

在鱼体上设置一个沿滑道向前的牵引力，模拟鱼体沿倾斜滑道的下滑力，大小等于重力在滑道方向的分量减去鱼体与滑道的摩擦阻力。由于鱼腹部皮较薄、肌肉组织较少，试验发现剖刀剖切过程不会有较大阻力，故将剖切阻力忽略。按照表 1 定义鱼体与滑道及夹持轮的接触参数，夹持输送过程模拟结果如图 6 所示。

图 6 可以看出受力集中在齿轮轴两端、齿轮轴与夹持轮接触部分。这是由于轴两端固定在轴承座两端，此处承受夹持输送过程主要的径向力和锥齿轮的啮合力，夹持轮在输送过程也会承受一定的与鱼体相互作用力。

图 7a 为鱼体夹持剖切过程变化图。鱼体在牵引力的作用下沿滑道向前，此时速度缓慢增加。头部刚接触夹持轮时由于夹持轮整体沿滑道方向的速度相对鱼体较小，鱼体在碰撞后速度会短暂下降。当黄鳝受到沿滑道向前的合力大于阻力，鱼头会在接触夹持轮后被其捕获嵌入

其间间隙，并增大与夹持轮的接触力将鱼体加速。考虑振动与鱼体自身大小不均匀等因素，身体进入夹持轮后鱼体速度会上下波动，但平均速度接近夹持轮表面线速度。鱼体输出夹持轮后由于重力影响，速度继续增加随后彻底退出滑道。

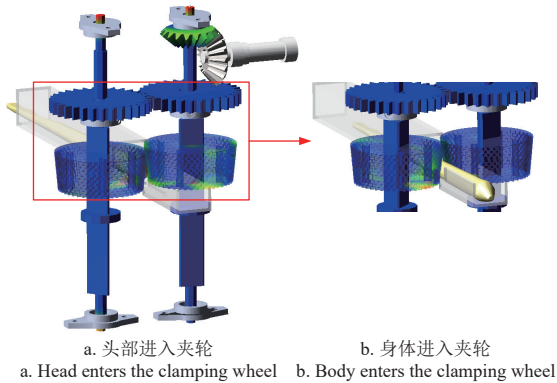


图 6 黄鳝进入夹轮过程

Fig.6 The process of *Monopterus albus* entering the clamping wheel

图 7b 可以看出鱼体对夹持轮最大的力为沿 X 方向的径向力，Y 和 Z 方向力较小。头部进入夹持轮的过程各个方向力达到最大，波动明显。这是因为黄鳝头部体积较大，仿真输送过程中挤压穿透同样较深，导致接触力变大。经过约 0.1 s，黄鳝头部进入夹持轮后沿滑道方向的力会在平衡位置上下波动，并且力逐渐减小，输送时间约 0.19 s，输出时鱼体沿滑道向外的速度为 1.5 m/s，接近夹持轮表面线速度。

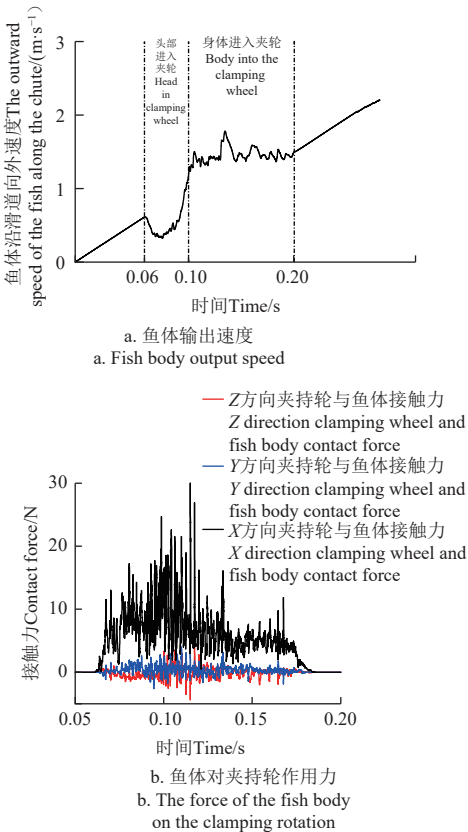
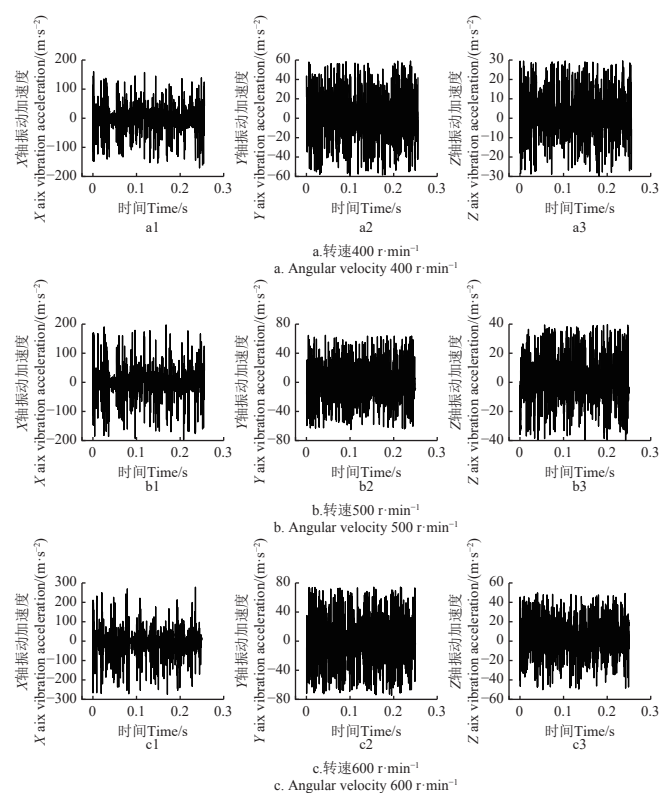


图 7 仿真结果

Fig.7 Simulation result

在刚柔耦合模型中设置一个探测点,与柔性轴端绑定位置,用于测定输出轴端的振动。后续振动试验也将探测点安装于端部轴承。测定结果如图 8,其中  $X$  轴方向的振动加速度波动最大,范围在  $\pm 300 \text{ m/s}^2$  之内,而  $Y$  轴方向与  $Z$  轴方向的振动加速度波动较小,在  $\pm 80 \text{ m/s}^2$  之内。图 8 可以看出,随着转速增加,探测点在各个方向的振动加速度均明显增大,加速度波动更加剧烈。转速为  $400 \text{ r/min}$  时,  $X$  轴方向振动加速度范围为  $\pm 150 \text{ m/s}^2$ ; 转速为  $600 \text{ r/min}$  时,  $X$  轴方向振动加速度范围增加到  $\pm 250 \text{ m/s}^2$ 。其原因可能是因为受力主要集中在两根竖直布置的柔性齿轮轴上,轴为两端固定支撑,沿  $X$  方向的刚度整体较低。在仿真中发现两轴受力沿  $X$  方向波动最大,所以反映到探测点上也是  $X$  轴方向振动加速度波动最大。



注: a1 a2 a3 分别为  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴振动加速度。  
Note: the accelerations of vibration along the  $X$ ,  $Y$ , and  $Z$  axes are represented by a1, a2, and a3, respectively.

图 8 整机振动情况  
Fig.8 Vibration of the machine

## 4 仿真试验及结果分析

### 4.1 单因素试验分析

考虑到黄鳝剖切机在工作过程中会发生振动,为确保机器有较高的工作效率以及良好的剖切效果,同时不会发生剧烈的振动影响使用寿命。结合团队前期大量试验分析,确定夹持轮转速范围为  $400 \sim 600 \text{ r/min}$ 、弹簧刚度范围为  $1.0 \times 10^3 \sim 1.4 \times 10^3 \text{ N/m}$ 、滑道倾角范围为  $8^\circ \sim 16^\circ$ ,在此基础上开展单因素试验。黄鳝在夹持输送过程中,夹持力为一个重要指标。夹持力过小会使夹持过程不可靠,鱼体在输送过程翻转挣扎导致剖切质量变

差。为得到合适的夹持力,以输送过程鱼体与夹持轮作用力的平均值为目标。整机的振动幅值也需控制在合适范围,考虑到  $X$  轴方向振动最大,因此选取  $X$  轴方向振动加速度为目标。现选取鱼体输出速度、输送时间,以及  $X$  轴振动加速度和夹持力为目标,夹持轮转速、弹簧刚度、滑道倾角为试验因素进行单因素试验。

为探究夹持轮转速对鱼体输送的影响规律,设定弹簧刚度为  $1.2 \times 10^3 \text{ N/m}$ 、滑道倾角为  $8^\circ$  进行单因素试验,得到的结果如图 9 所示。可知,随着转速增加,鱼与夹持轮之间的夹持力也会增加,呈线性关系,且输送时间随之减少,这是因为夹持轮转速升高导致鱼体在夹持时振动更加明显,导致黄鳝受力变大,当鱼体被夹持轮捕获后整体前进速度会接近夹持轮表面线速度,所以转速增大会减短输送时间。

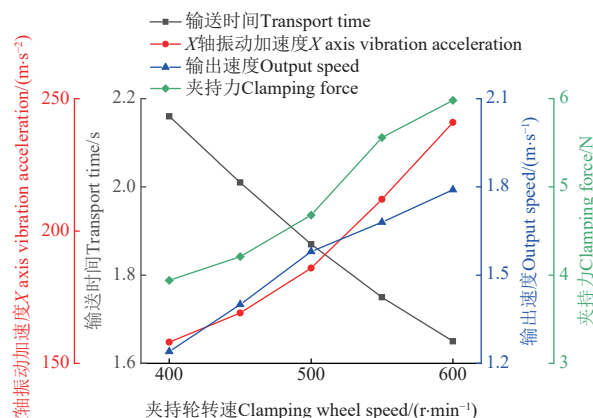


图 9 夹持轮转速对鱼体输送影响  
Fig.9 Effects of speed of clamping wheel on fish transport

设定转速为  $500 \text{ r/min}$ 、滑道倾角为  $12^\circ$  进行单因素试验,探究弹簧刚度对鱼体输送的影响,得到的结果如图 10 所示。由图 10 可知,弹簧刚度增加,鱼体受力呈现先增加后降低的趋势,受力在弹簧刚度  $1.2 \times 10^3 \text{ N/m}$  附近达到最大。前半部分受力随刚度变大的原因是由于弹簧刚度增大后,输送过程中夹持轮的轴向位移减小,黄鳝进入夹持轮后夹持轮向下压住鱼体的轴向力越来越大。后段随着刚度增加,受力逐渐减小,是因为夹持轮的振动越来越小,两者之间的冲击减小,沿  $X$  轴方向的力会降低,导致鱼体受到的平均力下降。弹簧固定在轴端,夹持轮的振动随着弹簧刚度增大而减小,整机  $X$  轴振动加速度也随之减小。在不同弹簧刚度作用下鱼体输送时间和输出速度的最大变化率分别为  $3.3\%$  和  $3.9\%$ ,对其影响并不大。

设定转速为  $500 \text{ r/min}$ 、弹簧刚度为  $1.2 \times 10^3 \text{ N/m}$  进行单因素试验,探究滑道倾角对鱼体输送的影响,结果如图 11 所示。

由图 11 可知,改变滑道倾角会使黄鳝进入夹持轮时速度变大,减小头部进入夹持轮的时间。随着滑道倾角增加,鱼体输出速度变快,鱼体受力也会随之增加,受力增加后会进一步导致  $X$  轴振动加速度变大。当滑道倾角从  $8^\circ$  增加到  $16^\circ$  时,  $X$  轴振动加速度增加了  $16\%$ ,而

当转速从 400 r/min 增加到 600 r/min 时， $X$  轴振动加速度增加了 53%。

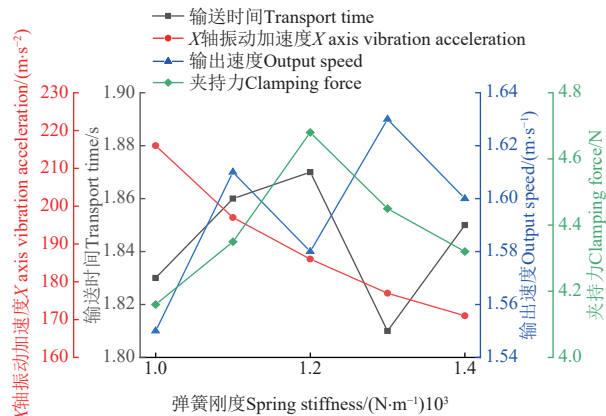


图 10 弹簧刚度对鱼体输送影响

Fig.10 Effects of spring stiffness on fish transport

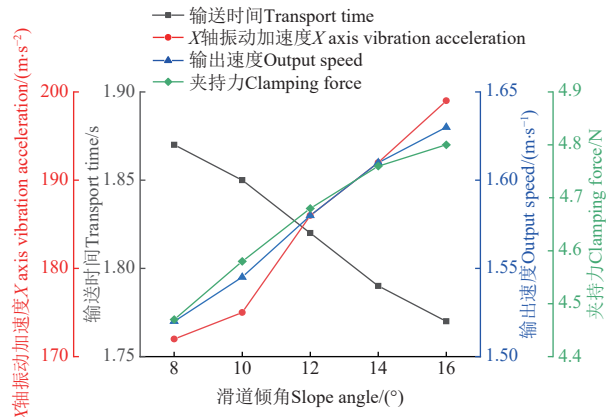


图 11 滑道倾角对鱼体输送影响

Fig.11 Influence of slope Angle on fish transport

4.2 多因素试验结果与分析

为研究自动剖切机作业参数对鱼体输出速度以及夹持力的影响规律并确定优化参数，以鱼体输出速度  $Y_1$  及

平均夹持力  $Y_2$  为响应值，以夹持轮转速  $x_1$ 、弹簧刚度  $x_2$ 、滑道倾角  $x_3$  作为影响因子开展响应面试验。根据相关剖切机试验研究<sup>[8]</sup>，进行多因素试验方案设计，结果如表 2 所示。

由表 3 方差分析结果可知，方程评价指标输出速度仿真值和夹持力的  $P$  值均小于 0.000 1，表明回归模型极显著，其决定系数  $R_1^2$  值为 0.98、 $R_2^2$  值为 0.99，表明模型与试验值拟合程度较好。以输出速度为指标的模型中， $x_1$ 、 $x_3$  的  $P$  值小于 0.01，说明对模型影响极为显著； $x_2$ 、 $x_1^2$ 、 $x_3^2$  的  $P$  值大于 0.05，说明对模型影响不显著。以夹持力为指标的模型中， $x_1$ 、 $x_1^2$ 、 $x_3^2$  对模型影响极显著； $x_1x_2$ 、 $x_2x_3$ 、 $x_1x_3$ 、 $x_2^2$  对模型影响不显著。得到输出速度  $Y_1$  和夹持力  $Y_2$  的回归函数值与夹轮转速  $x_1$ 、弹簧刚度  $x_2$ 、滑道倾角  $x_3$  的三元二次回归方程为：

表 2 多因素试验设计方案与结果

Table 2 Multi-factor experimental design scheme and results

试验号	夹持轮转速 Clamping wheel holding speed $x_1/(r \cdot \min^{-1})$	弹簧刚度 Spring stiffness $x_2/(N \cdot m^{-1})$	滑道倾角 Slope Angle $x_3/(^{\circ})$	输出速度 Output speed $Y_1/(m \cdot s^{-1})$	夹持力 Clamping force $Y_2/(N)$
1	500	$1.2 \times 10^3$	12	1.58	4.68
2	500	$1.0 \times 10^3$	8	1.49	4.13
3	400	$1.4 \times 10^3$	12	1.27	4.24
4	600	$1.4 \times 10^3$	12	1.83	6.17
5	600	$1.2 \times 10^3$	16	1.90	6.12
6	400	$1.0 \times 10^3$	12	1.33	4.30
7	400	$1.2 \times 10^3$	16	1.39	4.07
8	600	$1.2 \times 10^3$	8	1.73	6.03
9	500	$1.2 \times 10^3$	12	1.58	4.68
10	600	$1.0 \times 10^3$	12	1.79	5.95
11	500	$1.2 \times 10^3$	12	1.58	4.68
12	500	$1.4 \times 10^3$	8	1.54	4.29
13	500	$1.0 \times 10^3$	16	1.63	4.24
14	400	$1.2 \times 10^3$	8	1.31	3.94
15	500	$1.2 \times 10^3$	12	1.58	4.68
16	500	$1.4 \times 10^3$	16	1.61	4.71
17	500	$1.2 \times 10^3$	12	1.58	4.68

表 3 回归方程方差分析

Table 3 Analysis of variance of regression equation

误差来源 Source of error	平方和 Sum of squares		自由度 Degree of freedom	均方 Mean square		F 值 F value		P 值 P value	
	$Y_1$	$Y_2$		$Y_1$	$Y_2$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_1$	$Y_2$
模型 Model	0.509 5	9.31	9	0.056 6	1.03	259.87	91.91	< 0.000 1	< 0.000 1
$x_1$	0.475 3	7.45	1	0.475 3	7.45	2 181.76	661.57	< 0.000 1	< 0.000 1
$x_2$	0	0.078	1	0	0.078	0.057 4	6.93	0.817 6	0.033 8
$x_3$	0.026 4	0.070 3	1	0.026 4	0.070 3	121.41	6.24	< 0.000 1	0.041 1
$x_1x_2$	0.002 5	0.019 6	1	0.002 5	0.019 6	11.48	1.74	0.011 6	0.228 6
$x_1x_3$	0.002	0.000 4	1	0.002	0.000 4	9.3	0.035 5	0.018 6	0.855 9
$x_2x_3$	0.001 2	0.024	1	0.001 2	0.024	5.62	2.13	0.049 5	0.187 5
$x_1^2$	0.000 1	1.47	1	0.000 1	1.47	0.483 2	130.71	0.509 4	< 0.000 1
$x_2^2$	0.001 7	0.047 5	1	0.001 7	0.047 5	7.73	4.22	0.027 3	0.079
$x_3^2$	0.000 2	0.225 2	1	0.000 2	0.225 2	1.09	20	0.331 8	0.002 9
残差 Residual	0.001 5	0.078	7	0.000 2	0.011 3				
失拟项 Lack of fit	0	0	4	0	0				
误差 Pure error	0	0	4	0	0				
总和 Total sum	0.511	9.39	16						

注：  $P < 0.01$ （极显著）；  $0.01 \leq P < 0.05$ （显著）；  $P \geq 0.05$ （不显著）；  $x_1$  为夹持轮转速编码值；  $x_2$  为弹簧刚度编码值；  $x_3$  为滑道倾角编码值。  
Note:  $P < 0.01$  (very significant);  $0.01 \leq P < 0.05$  (significant);  $P \geq 0.05$  (not significant);  $x_1$  is the coded value of the speed of the clamping wheel;  $x_2$  is the coded value of spring stiffness;  $x_3$  is the coded value of slope angle.



$$\begin{cases} Y_1 = 1.58 + 0.24x_1 + 0.0013x_2 + 0.058x_3 \\ + 0.025x_1x_2 + 0.023x_1x_3 - 0.018x_2x_3 - 0.005x_1^2 \\ - 0.02x_2^2 + 0.0075x_3^2 \\ Y_2 = 4.68 + 0.965x_1 + 0.0988x_2 + 0.0938x_3 \\ + 0.07x_1x_2 - 0.01x_1x_3 + 0.0775x_2x_3 + 0.5912x_1^2 \\ - 0.1063x_2^2 - 0.2312x_3^2 \end{cases} \quad (6)$$

分析  $P$  值可知各参数对输出速度  $Y_1$  的影响由大到小顺序为:  $x_1$ 、 $x_3$ 、 $x_2$ ; 对夹持力  $Y_2$  的影响由大到小顺序为:  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 。多因素试验中的夹持轮转速、弹簧刚度、滑道倾角均是在单因素中考虑振动后确定的范围。因此, 确定优化工况时不需要再次考虑振动, 仅考虑对输出速度与夹持力的影响。结合单因素中弹簧刚度对鱼体输送影响分析结果, 弹簧刚度对输出速度影响不大, 而当弹簧刚度为  $1.2 \times 10^3$  N/m, 此时夹持力最大, 因此确定优化工况下的弹簧刚度为  $1.2 \times 10^3$  N/m。当夹持轮转速越大,

夹持力和输出速度越大; 当滑道倾角越大, 夹持力和输出速度越大。因此, 无论是以夹持力或是输出速度为评价指标时, 夹持轮转速与滑道倾角均是取最大值, 即夹持轮转速 600 r/min、滑道倾角  $16^\circ$  时为最优工况。通过大量的剖切试验发现当倾角和转速取更大值时, 黄鳝剖切效果较差同时机器振动更加剧烈。因此综合单因素和多因素试验, 得到剖切机最优工况为夹持轮转速 600 r/min、弹簧刚度  $1.2 \times 10^3$  N/m、滑道倾角  $16^\circ$ , 所对应的  $Y_1$  和  $Y_2$  分别为 1.9 m/s 和 6.1 N。

## 5 黄鳝剖切试验

### 5.1 整机振动试验

试验仪器采用丹麦 B&K 测振仪, 将振动传感器固定在轴承座上, 另一端连接前端, 接收整机的加速度信号。启动剖切机后测定 3 个方向的振动加速度, 测定结果如图 12。

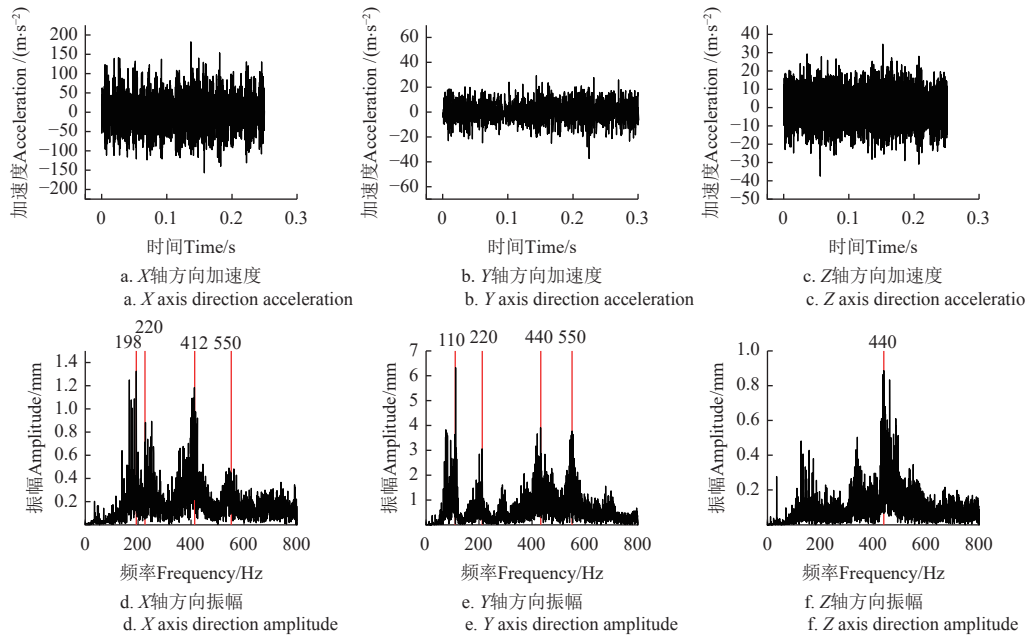


图 12 振动测定结果

Fig.12 Vibration measurement results

试验时电机转速设定 330 r/min, 转频为 5.5 Hz。同步带轮 I 齿数分别为 20 齿与 40 齿, 每个齿的啮合转频分别为 110 Hz 和 220 Hz, 所以此处也出现振幅的峰值。同步带轮 II 齿数分别为 40 齿与 20 齿, 每对齿的啮合转频为 440 Hz 和 220 Hz。锥齿轮齿数为 36, 对应的啮合频率为 198 Hz。直齿轮齿数 50, 对应转频为 550 Hz。在图 12 的振动试验频谱图中均有相应峰值对应, 验证了试验的准确性。试验得到的  $X$  轴振动加速度波动相较于  $Y$  轴和  $Z$  轴明显较大,  $X$  方向加速度变化范围在  $\pm 140$   $\text{m/s}^2$  之内,  $Y$  方向加速度变化范围在  $\pm 40$   $\text{m/s}^2$  之内,  $Z$  方向加速度变化范围在  $\pm 25$   $\text{m/s}^2$ , 与仿真结果中图 8 范围接近, 验证了刚柔耦合仿真模型的准确性。

### 5.2 鱼体输出速度测试试验

试验设备采用黄鳝剖切机、高速相机、长直尺。测试原理是在剖切机一侧设置高速相机, 将直尺贴在剖切

机另一侧侧壁上。试验对象为水产市场购买的新鲜活体鳝鱼, 体长为 160~240 mm, 质量为 30~50 g 左右, 体宽 0.5~0.8 cm, 大小尺寸接近。

将黄鳝喂入剖切机, 在优化工况条件下进行剖切试验, 拍摄鱼体输出视频, 观察鱼体的位移。测试结果如图 13 所示, 鱼体位移约为 15 cm, 时间间隔约为 0.08 s, 即速度约为 1.87 m/s。随着电机转速提高, 鱼体输出速度随之提高, 且速度接近夹持轮表面线速度, 与仿真的鱼体输出试验吻合, 剖切效果如图 14 所示。



图 13 鱼体输出速度试验

Fig.13 Fish body output speed test



图 14 剖切效果

Fig.14 Cutting results

## 6 结 论

1) 设计了一款小型黄鳝剖切机, 介绍了整机结构及工作原理。整体由传动机构、喂入机构、夹持剖切机构组成。试验得到黄鳝的力学参数, 建立了黄鳝的接触模型。

2) 将主要运动机构柔性化导入 Adams, 建立了较为准确的剖切机传动系统刚柔耦合模型。分别开展单因素和响应面试验, 研究了滑道倾角、夹持轮转速、弹簧刚度对鱼体输出速度、鱼体受力、整机振动的影响。试验表明: 在可接受的整机振动范围内, 最优工况为夹持轮转速 600 r/min、弹簧刚度  $1.2 \times 10^3$  N/m、滑道倾角  $16^\circ$ 。此工况下黄鳝有较快的输出速度及较大的夹持力。

3) 进行了整机剖切试验, 测试了整机振动情况与输送情况, 与仿真接近, 验证了刚柔耦合模型的准确性。

## 【参 考 文 献】

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2023.06.
- [2] 林天祥. 带钉子的黄鳝宰杀器: CN108208099A[P]. 2018-06-29.
- [3] 夏明友. 一种泥鳅、黄鳝剖切装置: CN112425637A[P]. 2021-03-02.
- [4] 别传召. 黄鳝宰杀机: CN105454387B[P]. 2019-07-26.
- [5] 程娟. 简易黄鳝宰杀装置: CN109090195A[P]. 2018-12-28.
- [6] 李平, 张黎, 杜开松, 谢娟. 一种黄鳝、泥鳅初加工机台: CN112450254B[P]. 2022-02-25.
- [7] 刘明勇, 韩新光, 欧阳周寰, 等. 自适应式宰杀机: CN115644219A[P]. 2023-01-31.
- [8] 万鹏, 汪荣, 李梦珂, 等. 鲜活黄鳝剖切装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(22): 220-228.  
WAN Peng, WANG Rong, LI Mengke, et al. Design and experiments of the sectioning device for the fresh *Monopterus albus*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(22): 220-228. (in Chinese with English abstract)
- [9] 夏伟伟, 孟庆国, 张畅原, 等. 淡水鱼往复去脏装置设计与工艺优化[J]. 食品与机械, 2021, 37(1): 124-129.  
XIA Weiwei, MENG Qingguo, ZHANG Changyuan, et al. Design and process optimization of reciprocating gutting device for freshwater fish[J]. Food and Machinery, 2021, 37(1): 124-129. (in Chinese with English abstract)
- [10] 黄鹏飞, 谭鹤群, 张春吉, 等. 带式夹送淡水鱼剖鱼机的研制[J]. 食品与机械, 2016, 32(12): 83-86.  
HUANG Pengfei, TAN Hequn, ZHANG Chunji, et al. Design of freshwater fish splitter by belt-clamp[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(12): 83-86. (in Chinese with English abstract)
- [11] 邹伟, 万鹏, 付豪, 等. 淡水鱼连续式去头尾装置的研制[J]. 食品与机械, 2018, 34(4): 107-111.  
ZOU Wei, WAN Peng, FU Hao, et al. Development of continuous head-tail removal device for freshwater fish[J]. Food and Machinery, 2018, 34(4): 107-111. (in Chinese with English abstract)
- [12] 胡晓亮, 陈庆余, 沈建. 正交试验优化竹筴鱼去脏加工工艺[J]. 东北农业大学学报, 2014, 45(5): 97-102.  
HU Xiaoliang, CHEN Qingyu, SHEN Jian. Optimization of removal process of jack mackerel by orthogonal test[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2014, 45(5): 97-102. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王小琴. 一种高压冲洗型去鳞剖鱼机: CN202011318642.8[P]. 2021-03-23
- [14] 莫盛秋. 一种鱼类去鳞开膛机的设计[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(6): 236-238.  
MO Shenqiu. Design of one kind of machine for scrape the scales and tipper[J]. China Agricultural Machinery Chemistry News, 2013, 34(6): 236-238. (in Chinese with English abstract)
- [15] 万鹏, 黄俊, 谭鹤群, 等. 淡水鱼腹背定向装置设计及试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 28-35.  
WAN Peng, HUANG Jun, TAN Hequn, et al. Design and experiment of ventral and dorsal orientation device for freshwater fish[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(6): 28-35. (in Chinese with English abstract)
- [16] HILDUR E, BERGUR G, VALDIMAR Ó. Automation in the fish industry[J]. Animal Frontiers, 2022, 12(2): 32-39.
- [17] BOOMAN A, MARQUEZ A, PARIN M A, et al. Design and testing of a fish bone separator machine[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(3): 474-479
- [18] MUHAMMED M, MANJUNATHA N, MURTHY K V, et al. Design and testing of small scale fish meat bone separator useful for fish processing[J]. Food Sci Technol, 2015, 52: 3520-3528.
- [19] YAMAMOTO T. Machine for immediately killing living fish: JP2013153683A[P]. 2013-08-15.
- [20] 李海同, 吴崇友, 沐森林, 等. 基于 ANSYS-ADAMS 的立式油菜制晒机铺放角形成机理[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 96-105.  
LI Haitong, WU Chongyou, MU Senlin, et al. Formation mechanism of laying angle of vertical rape windrower based on ANSYS-ADAMS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(14): 96-105. (in Chinese with English abstract)
- [21] 高自成, 赵凯杰, 李立君, 等. 悬挂振动式油果采摘执行机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 9-17.  
GAO Zicheng, ZHAO Kaijie, LI Lijun, et al. Design and experiment of suspended vibratory actuator for picking *Camellia Olerfera* fruits[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(21): 9-17. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘好, 徐梓翔, 许洪斌, 等. 基于刚柔耦合模型的微耕机振动特性分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(24): 250-256.  
LIU Yu, XU Zixiang, XU Hongbin, et al. Analysis of vibration characteristics for power tillers based on a rigid-flexible coupling model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(24): 250-256. (in Chinese with English abstract)
- [23] 汪洋, 傅茂海, 马成成, 等. 刚柔耦合分析在杠杆式基础制动装置中的应用[J]. 机械设计与制造, 2023(6): 42-46.  
WANG Yang, FU Maohai, MA Chengcheng, et al. The coupled analysis in the application of based brake lever[J]. Journal of Mechanical Design and Manufacturing, 2023(6): 42-46. (in Chinese with English abstract)
- [24] 宜亚丽, 赵腾, 陈美宇, 等. 基于刚柔耦合的复合滚柱活齿传动动态特性分析[J]. 振动与冲击, 2023, 42(4): 179-184.  
YI Yali, ZHAO Teng, CHEN Meiyu, et al. Characteristics analysis of a composite roller movable tooth based on rigid-



- flexible coupling[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(4): 179-184. (in Chinese with English abstract)
- [25] 赵丽娟, 范佳艺, 李明昊, 等. 采煤机截割部行星架可靠性设计[J]. 机械工程学报, 2019, 55(8): 192-200. ZHAO Lijuan, FAN Jiayi, LI Minghao, et al. Reliability design of shearer's planet carrier[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(8): 192-200. (in Chinese with English abstract)
- [26] 胡晓亮, 陈庆余, 沈建. 小杂鱼去脏工艺参数的优化[J]. 现代食品科技, 2013, 29(11): 2728-2734. HU Xiaoliang, CHEN Qingyu, SHEN Jian. Optimization of the process parameters of small miscellaneous fish gutting[J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(11): 2728-2734. (in Chinese with English abstract)
- [27] 唐勇, 杨荣建. 一种泥鳅或黄鳝剖切设备: CN201710822359.0[P]. 2017-11-21.
- [28] 董延妍. 一种泥鳅或黄鳝剖切碎骨设备: CN201910727791.0[P]. 2021-02-09.
- [29] 朱世龙. 一种黄鳝养殖用宰杀装置: CN202011588071.X[P]. 2021-02-19.
- [30] 刘明勇, 欧阳周寰, 韩新光, 等. 鳝鱼自动剖切机设计与试验[J]. 食品与机械 2024,40(2): 97-103, 226. LIU Mingyong, OUYANG Zhou huan, HAN Xin guang, et al. Design and test of automatic eel dissecting and cutting machine[J]. Food and Machinery 2024, 40(2): 97-103,226. (in Chinese with English abstract)
- [31] 李俊潇, 何泽银, 陶平安, 等. 旋叶式压缩机多刚柔耦合建模与叶片动态接触激励分析[J]. 振动与击, 2022, 41(5): 20-26. LI Junxiao, HE Zeyin, TAO Pingan, et al. Multi-rigid-flexible coupling modeling of rotary vane compressor and dynamic contact excitation analysis of blade[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(5): 20-26. (in Chinese with English abstract)
- [32] 胡晓亮, 陈庆余, 沈建. 竹筴鱼去脏加工用剖切刀具的优化试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 270-277. HU Xiaoliang, CHEN Qingyu, SHEN Jian. Optimization test of profiling tool for filleting processing of mackerel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(12): 270-277. (in Chinese with English abstract)
- [33] 宋长太. 针对黄鳝习性改进养殖技术[J]. 渔业现代化, 1998(4): 13-14. SONG Changtai. Improvement of culture technology for eels[J]. Fishery Modernization, 1998(4): 13-14. (in Chinese with English abstract)
- [34] MILLARD M, FRANKLIN D W,HERZOG W.A three filament mechanistic model of musculotendon force and impedance[J]. ELIFE, 2024,12:RP88344
- [35] 杨丽凤, 毛书灿, 汪兰, 等. 宰杀方式对鳝鱼肌肉品质的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(1): 132-138. YANG Lifeng, MAO Shucan, WANG Lan, et al. The effect of slaughtering methods on the muscle quality of eels[J]. Design and test of automatic eel dissecting and cutting machine, 2023, 39(1): 132-138 (in Chinese with English abstract)

## Simulation and experiment of *Monopterus albus* dissecting machine based on rigid-flexible coupling model

LIU Mingyong<sup>1</sup>, ZHU Lin<sup>1</sup>, OUYANG Zhouhuan<sup>1</sup>, XIANG Xue<sup>1</sup>, LI Ping<sup>2</sup>, YAN Chunai<sup>3</sup>

(1. Hubei University of Technology, Hubei Agricultural Machinery Institute, Wuhan 430068, China; 2. Jingzhou Jichuang Electromechanical Technology Co., Ltd., Jingzhou 434025, China; 3. Intelligent Manufacturing Institute, Wuhan, Wuchang Institute of Technology 430065, China)

**Abstract:** *Monopterus albus* is one of the popular aquatic fish in Asia. Manual processing of eel cannot fully meet the large-scale production at present, due to the time-consuming, laborious, and low safety. In view of its slender and slimy body, an eel-cutting machine is required for the consumption of *Monopterus albus*. In this study, a miniature machine of automatic cutting was designed for the living *Monopterus albus* with a sticky surface. The machine consisted of conveying, clamping, and cutting parts. The double-clamped wheel to roller was used to capture the eel for transportation during cutting. The switch between laparotomy and back dissection was realized to change the feeding channel. The adaptive mechanism was equipped to meet the requirements of different sizes of eel cutting. Firstly, the geometry and weight parameters of *Monopterus albus* were measured using a straight ruler and precision electronic balance. The tribological parameters on the surface of *Monopterus albus* were measured by the inclined plane. The mechanical parameters of *Monopterus albus* meat were verified by compression test. Secondly, according to the rigid-flexible coupling principle, the rigid-damping model was equivalent to the contact between the *Monopterus albus* body and the clamping wheel and slide. The rigid-flexible coupling model was established by Abaqus and Adams simulation software. The analysis model was optimized to take the conveying time of the fish body, output speed, clamping force, and whole machine vibration as the test indexes in single-factor tests, such as the spring stiffness, slope Angle of the slide, and the speed of the clamping wheel. The results show that the clamping force first increased and then decreased with the increase of spring stiffness and the vibration amplitude of the whole machine decreased. But there was little influence on conveying time and output speed. The output time of the fish body decreased with the increase of slope angle, while the output speed, clamping force, and vibration of the whole machine increased. There was an increase in the conveying time of the fish body, the output speed, the clamping force, and the vibration of the whole machine, with the increase of the speed of the clamping wheel. The single- and multi-factor analyses were carried out to obtain the optimal working conditions. Specifically, the clamping wheel speed was 600 r/min, the spring stiffness was 1 200 N/m, and the slope angle was 16°. Finally, the processing experiment was performed on the automatic cutting machine for eel. There was consistency in the vibration amplitude range and the relationship between the three directions of the machine measuring points with the theoretical analysis. At the same time, the output speed of the fish body output machine was also measured to better agree with the theoretical analysis. The cutting of the machine under optimal working conditions has fully met the requirements. The correctness of the theoretical analysis was also verified by the test. The rigid-flexible coupling model can provide a strong reference to research and develop the subsequent equipment.

**Keywords:** *Monopterus albus*; rigid-flexible coupling; multifactor analysis; experiments; dissecting machine; model