

淡水鱼头尾及腹背自动定向方法

郭子淳^{1,2} 黄家悻^{1,2} 王水传^{1,2} 俞舜廷¹ 陈远辉¹ 张林泉¹

(1. 广东省现代农业装备研究所水产工程装备技术研究开发中心, 广州 510630;

2. 农业农村部华南现代农业智能装备重点实验室, 广州 510630)

摘要: 鱼体头尾及腹背自动定向是推进淡水鱼全程机械化加工的重要前提。基于水平振动方法和视觉图像识别技术设计自动头尾和腹背定向装置。通过对鱼体在头尾定向振动台上的受力分析和运动状态分析, 阐明鱼体转动原理和头尾前进原理, 将鱼体在振动台上的运动状态分为4种, 基于此分析了鱼体成功进行头尾定向的条件。结合图像识别技术, 创制导向机构、视觉识别系统、剔除机构、V形腹背定向执行机构、V形校正输送机构, 实现鱼体自动腹背作业。以鲫鱼、草鱼、白鲢3种典型淡水鱼为试验对象, 以鱼体完成定向时间和成功率作为评价指标, 探究了鱼体种类、输送带类型、振动幅度、振动频率对鱼体头尾定向效果的影响规律, 并探究鱼体种类对腹背定向效果的影响规律。试验结果表明: 鱼体在振动台上的头尾前进运动状态理论计算与试验结果一致, 证明本文理论计算可以有效指导实际头尾定向作业。输送带为倒三角纹时, 鱼体才能完成头尾定向作业。鱼体头尾定向效果随振动幅度和频率增大而提升, 当振动幅度大于160 mm时整机振动剧烈, 因此最优幅度为160 mm; 当频率大于5 Hz, 定向效果变化不明显, 因此最优频率为5 Hz。腹背定向效果由输送带输送速度和机器视觉识别准确率决定, 各类鱼体腹背定向时间保持在15 s、定向成功率在95%~97%范围内。研究结果可为鱼体自动定向装置工艺参数设计和选择提供技术参考。

关键词: 淡水鱼; 头尾定向; 腹背定向; 水平振动

中图分类号: S985.1; S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S2-0141-11

Efficient Automatic Method for Head-tail and Ventral-dorsal Directional Transportation of Freshwater Fish

GUO Zichun^{1,2} HUANG Jiayi^{1,2} WANG Shuichuan^{1,2} YU Shunting¹ CHEN Yuanhui¹ ZHANG Linquan¹

(1. Research Center of Aquatic Engineering Equipment Technology,

Guangdong Institute of Modern Agricultural Equipment, Guangzhou 510630, China

2. Key Laboratory of Modern Agricultural Intelligent Equipment in South China,

Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510630, China)

Abstract: Automatic head-tail and ventral-dorsal directional transportation is an important prerequisite for promoting the mechanized processing of freshwater fish. Based on horizontal vibration method and visual image recognition technology, an automatic head-tail and ventral-dorsal directional transportation device was designed. The principle of fish body rotation and the principle of head and tail advance were expounded by analyzing the force and motion state of fish body on the shaking table. The motion states of the fish on the shaking table were divided into four types, and the conditions for the fish to achieve head-tail directional transportation were analyzed. Combined with the image recognition technology, the guide mechanism, visual recognition system, elimination mechanism, V-shaped ventral-dorsal directional transportation actuator and V-shaped correction conveying mechanism were created to realize the automatic ventral-dorsal directional transportation. Finally, three typical freshwater fishes, crucian carp, Grasscarp and silver carp, were selected as the test objects, and the orientation completion time and success rate were used as the evaluation indexes. The effects of fish species, conveyor belt type, vibration amplitude and vibration frequency on the head-tail directional transportation of fish were explored, and the effects of fish species on the ventral-dorsal directional transportation were also explored. The test results showed that the theoretical calculation of the forward motion state of fish on the

收稿日期: 2022-06-30 修回日期: 2022-08-10

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2021B0202060001)和乡村振兴战略专项省级项目(粤财农[2022]92号)

作者简介: 郭子淳(1993—),男,助理工程师,主要从事智能水产装备研究,E-mail: 977768854@qq.com

通信作者: 黄家悻(1980—),女,高级工程师,博士,主要从事农业智能装备与信息化研究,E-mail: 2796426373@qq.com

shaking table was consistent with the experimental results, it was proved that the theoretical calculation can effectively guide the actual head end orientation process. When the conveyor belt was only inverted triangle, the fish can complete the head-tail directional transportation. The effect of head-tail directional transportation was increased with the increase of vibration amplitude and frequency. When the vibration amplitude was greater than 160 mm, the whole machine vibrated violently, so the optimal amplitude should be 160 mm. When the frequency was greater than 5 Hz, the change of orientation effect was not obvious, so the optimal frequency should be 5 Hz. The ventral-dorsal directional transportation effect was determined by the conveying speed of the conveyor belt and the accuracy of machine vision recognition. The ventral-dorsal directional transportation time of all kinds of fish was kept at 15 s, and the orientation success rate was stable in the range of 95% ~ 97%. The research results can provide technical reference for the design and selection of technological parameters of fish automatic orientation device.

Key words: freshwater fish; head-tail directional transportation; ventral-dorsal directional transportation; horizontal vibration

0 引言

中国是渔业大国,水产品总量一直占据世界首位。2020年我国淡水产品养殖总量 3.23464×10^7 t,其中淡水鱼养殖产量 2.76136×10^7 t,占淡水产品养殖总量的85.37%;淡水产品加工量 4.1151×10^6 t^[1],仅占淡水产品养殖总量的12.72%,总体加工率偏低。鱼类加工产品有鱼片、鱼糜及其制品等,提高了鱼类的附加值,对渔业发展、提升我国水产品国际竞争力具有尤为重要的作用^[2-3]。目前,国内也有部分水产加工企业进行鱼类加工生产,前处理工序包括杀鱼、放血、清洗、排序喂料、去鳞、去内脏,其中排序喂料环节指的是将鱼体按照规整的头尾朝向和腹背朝向一条一条的排列放入加工设备中^[4],也是当前国内水产加工行业使用人工最为普遍的环节之一,工作量大、劳动强度高、排列效率低、人工成本高,并且存在人与产品交叉感染的风险^[5-6]。

鱼体定向技术原理主要可以分成3种:鱼体重心位置偏向头部位置^[7-11]、鱼体头尾刚度不同^[12-13]、鱼体腹背轴向不对称^[14-16]。国外鱼体定向喂料技术研究起步较早^[17-18],早在1979年德国BADDER开发了“巴达”485型自动分级机^[19],主要用于鲱鱼、鲑鱼或类似鱼的自动定向,通过倾斜振动机构实现鱼体头尾定向、驱动压轮和压板组合机构实现鱼体腹背定向;PETER等^[20]采用倒置圆锥体结构形成旋流,将鱼体从上部放入,利用鱼体重心靠近鱼头特征,在底部排水口实现鱼体头部先出;GIULIANO^[12]通过传感器检测输送带上鱼体的头尾位置,利用转盘和滑道组合机构,实现鱼体的头尾定向;MARIUSZ等^[21]分析了鱼体在辊轴转动过程中的受力情况,得出鱼体会绕质心在对转辊轴中完成腹朝下、背朝上的旋转运动,并利用一对倾斜平行的对转辊轴验证了该结论。但国外鱼体定向技术的处理对象多为海水鱼,其体型、外观与淡水鱼差异较

大,因此不能直接应用于国内淡水鱼定向环节中。

在国内,徐颂波等^[22]利用鱼体头尾部分刚度不同的特点,通过压轮转动和压板夹入,鱼头向前的鱼体由于鱼体变形量较小可以直接进入滑道,而鱼尾向前的鱼体由于鱼体变形量较大随压轮转动后再以头朝前姿态进入滑动。向云鹏等^[23]分析了鱼体在倾斜平面上的转矩情况,研发了振动式倾斜定向机构,可以实现鱼体头尾定向。高星星等^[24]利用鱼体轴向不对称的特征,采用渐变滑道方式,鱼体在滑动中受到两侧渐变壁挤压,从而产生可让鱼体腹部下翻的力矩,实现鱼体腹背定向。然而无论是压轮转动头尾定向方式还是渐变滑道腹背定向方式,对鱼体均有一定的损伤;另外振动式倾斜头尾定向方式和渐变滑道腹背定向方式只是在理想状态下分析鱼体力矩状态,而在实际生产条件中鱼体表面一般为湿润状态,其光滑性影响摩擦力的产生,从而容易使鱼体定向失败。

本文综合考虑鱼体重心特点和外观特点,考虑实际加工过程中的生产条件,提出基于水平振动方法的头尾定向技术和基于图像识别的腹背定向技术,研究鱼体在摩擦带上的运动状态,分析鱼体头尾定向成功条件;设计“V形”结构方式完成鱼体腹背定向,从实现鱼体无损高效的定向工序。通过鱼体定向试验,验证理论计算结果,探索鱼体种类、输送带类型、振动幅度、振动频率对头尾定向和腹背定向的影响,为鱼体自动定向装置工艺参数的设计和选择提供技术参考。

1 鱼体头尾定向装置设计

1.1 鱼体头尾定向装置总体结构

鱼体头尾定向装置结构示意图如图1所示。设计的鱼体水平振动头尾定向装置主要由振动台、振动机构、机架组成。水平振动机构由YVP90L-2型三相变频电机、WPO70型减速机、偏心圆盘、联动轴组成,以三相电机为动力源,通过减速机实现转速的

调控,减速机上装配偏心圆盘,圆盘通过联动轴带动振动台在直线轴承上形成水平往复直线运动,即水平振动。振动频率可通过调整减速机减速比进行控制,振动幅度可通过连接圆盘上不同偏心距孔位进行调控。偏心距为 50、60、70、80、90 mm 时,可实现 100 ~ 180 mm 的振幅调整。YVP90L-2 型三相变频电机转速可调范围为 280 ~ 3 800 r/min, WPO70 型减速机减速比为 1/10,因此振动频率调控范围为 1 ~ 6 Hz。

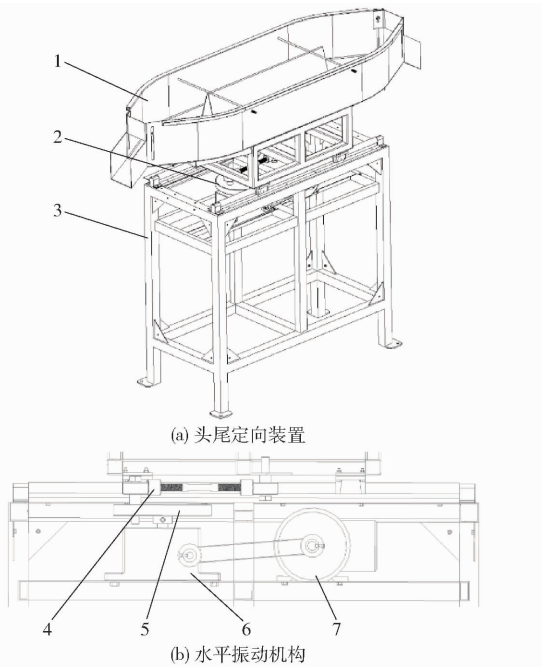


图 1 鱼体头尾定向装置结构示意图

Fig.1 Schematics of head-tail directional transportation device

- 1. 振动台 2. 水平振动机构 3. 机架 4. 联动轴 5. 偏心圆盘
- 6. 减速机 7. 三相变频电机

该鱼体头尾定向装置两端均为出料口,通过提升机将物料提高,并在装置的居中位置落入,通过水平振动方式完成鱼类的头尾定向,并在两端处出料。

1.2 鱼体头尾定向原理

1.2.1 鱼体转动原理

当鱼体长轴垂直于振动方向掉落至振动台上时,鱼体受力分析情况如图 2 所示。

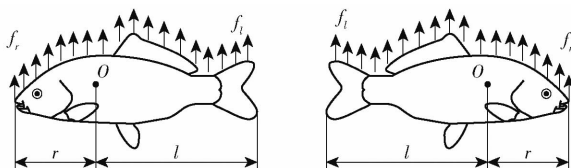


图 2 鱼体长轴垂直于振动方向时的受力情况

Fig.2 Stress condition of fish body when its long axis was perpendicular to vibration direction

点 O 为鱼体质心位置,鱼体长轴方向受到摩擦力 f ,以质心点 O 为分割线,鱼头部分摩擦力合力为 f_r ,鱼尾部分摩擦力合力为 f_l 。鱼体还受到垂直于振

动台的重力和与之平衡的支持力,可忽略不计。因此,鱼体对质心点 O 的合力矩为

$$M_o = M_{fr} - M_{fl} \quad (1)$$

式中 M_o ——鱼体质心点 O 处合力矩, $N \cdot m$

M_{fr} ——鱼头部分力矩, $N \cdot m$

M_{fl} ——鱼尾部分力矩, $N \cdot m$

以鱼体质心点 O 为原点、鱼体长轴方向为 x 轴建立坐标轴。设鱼体在点 x 处的截面积为 $S(x)$,则摩擦力矩为

$$M_{fr} = f_r r = \int_{-r}^0 \mu_1 \rho g x S(x) dx \quad (2)$$

$$M_{fl} = f_l l = \int_0^l \mu_2 \rho g x S(x) dx \quad (3)$$

式中 r ——鱼吻到质心点 O 的距离, m

l ——鱼尾端到质心点 O 的距离, m

μ_1 ——鱼头部分与输送带间的摩擦因数

μ_2 ——鱼尾部分与输送带间的摩擦因数

ρ ——鱼体密度, kg/m^3

g ——重力加速度, m/s^2

鱼体对质心点 O 的合力矩可以表示为

$$M_o = \int_{-r}^0 \mu_1 \rho g x S(x) dx - \int_0^l \mu_2 \rho g x S(x) dx \quad (4)$$

由于质心点 O 位于鱼体偏鱼头部分位置,故 $r < l$,且鱼头部分摩擦因数小于鱼尾部分摩擦因数,即 $\mu_1 < \mu_2$,可以得到 $M_o \neq 0$,而质心点 O 约在鱼体短轴对称位置,因此鱼体始终会绕质心点 O 旋转,直至鱼体长轴与振动方向平行。

1.2.2 头尾前进原理

假设鱼体已经完成绕质心点 O 旋转至长轴与振动方向平行,在振动方向上鱼体只受到摩擦力 f 作用。当鱼头朝向与振动前进方向一致时,鱼体受到顺鳞方向摩擦力 f_s ;当鱼头朝向与振动前进方向相反时,鱼体受到逆鳞方向摩擦力 f_n 。

当鱼体掉落振动台中,假设此时鱼头朝向与振动前进方向相同时,鱼体运动状态可以分为 2 个阶段,并且形成循环直至输送至振动台出口。设鱼体质量为 m ,头尾定向振动台振动频率为 n ,振动幅度为 Z ,鱼体顺鳞方向摩擦因数为 μ_s ,鱼体逆鳞方向摩擦因数为 μ_m 。

(1) 第 1 阶段

鱼体受到顺鳞方向摩擦力 f_s 的作用,开始做匀加速直线运动,初始速度 $v_0 = 0$ m/s ,其加速度 a_1 表达式为

$$a_1 = \frac{f_s}{m} = \frac{\mu_s mg}{m} = \mu_s g \quad (5)$$

经过时间 t_1 后,鱼体速度加速至与振动台前进

速度相同时,开始做匀速直线运动,此时鱼体速度 v_1 、鱼体位移 S_1 分别为

$$v_1 = a_1 t_1 = \mu_s g t_1 \quad (6)$$

$$S_1 = \frac{1}{2} a_1 t_1^2 = \frac{1}{2} \mu_s g t_1^2 \quad (7)$$

此时可分为两种情况:

①若振动台前进时间足够长,即 $\frac{1}{2n} > t_1$ 时,鱼体在振动台上做匀加速直线运动,直至与振动台前进速度相同,形成匀速直线运动,再经时间 t_2 后,该过程鱼体速度 v_2 、鱼体位移 S_2 分别为

$$v_2 = \frac{\frac{Z}{2}}{\frac{1}{2n}} = \frac{Zn}{2} = v_1 \quad (8)$$

$$S_2 = v_2 t_2 = v_1 t_2 = \mu_s g t_1 t_2 \quad (9)$$

由式(8)、(9)可以计算得到

$$t_1 = \frac{Zn}{2\mu_s g} \quad (10)$$

则有

$$S_1 = \frac{(Zn)^2}{8\mu_s g} \quad (11)$$

$$S_2 = \frac{Znt_2}{2} \quad (12)$$

$$t_2 = \frac{1}{2n} - t_1 \quad (13)$$

②若振动台前进时间不足以让鱼体加速至与振动台前进速度相同,即振动台单程前进时间内鱼体均处于匀加速直线运动状态,即 $\frac{1}{2n} = t_1$, 鱼体运动状态进入第2阶段。

综上,鱼体在第1阶段中的末速度为

$$v' = \begin{cases} \frac{\mu_s g}{2n} & \left(\frac{1}{n} \leq \frac{Zn}{\mu_s g}\right) \\ \frac{Zn}{2} & \left(\frac{1}{n} > \frac{Zn}{\mu_s g}\right) \end{cases} \quad (14)$$

鱼体在第1阶段中鱼体总位移 S' 的表达式为

$$S' = \begin{cases} \frac{\mu_s g}{8n^2} & \left(\frac{1}{n} \leq \frac{Zn}{\mu_s g}\right) \\ \frac{(Zn)^2}{8\mu_s g} + \frac{Znt_2}{2} & \left(\frac{1}{n} > \frac{Zn}{\mu_s g}\right) \end{cases} \quad (15)$$

(2)第2阶段

振动台开始向鱼尾方向前进,此时鱼体受到逆鳞方向摩擦力 f_n 的作用,开始做匀减速直线运动,经时间 t_3 后,鱼体速度减速至与振动台前进速度相同时,开始做匀速直线运动,该过程鱼体加速度 a_2 、末速度 v_3 、位移 S_3 分别为

$$a_2 = \frac{-f_n}{m} = \frac{-\mu_n mg}{m} = -\mu_n g \quad (16)$$

$$v_3 = v' + a_2 t_3 = \begin{cases} \frac{\mu_s g}{2n} - \mu_n g t_3 & \left(\frac{1}{n} \leq \frac{Zn}{\mu_s g}\right) \\ \frac{Zn}{2} - \mu_n g t_3 & \left(\frac{1}{n} > \frac{Zn}{\mu_s g}\right) \end{cases} \quad (17)$$

$$S_3 = v' t_3 + \frac{1}{2} a_2 t_3^2 =$$

$$\begin{cases} \frac{\mu_s g}{2n} t_3 - \frac{1}{2} \mu_n g t_3^2 & \left(\frac{1}{n} \leq \frac{Zn}{\mu_s g}\right) \\ \frac{Zn}{2} t_3 - \frac{1}{2} \mu_n g t_3^2 & \left(\frac{1}{n} > \frac{Zn}{\mu_s g}\right) \end{cases} \quad (18)$$

此时也需要分为两种情况进行分析:

①若振动台向鱼尾方向前进时间足够长,即 $\frac{1}{2n} > t_3$ 时,鱼体在振动台上做匀减速直线运动,直至与振动台前进速度相同,形成匀速直线运动,再经时间 t_4 后,该过程鱼体速度 v_4 、鱼体位移 S_4 分别为

$$v_4 = -\frac{\frac{Z}{2}}{\frac{1}{2n}} = -\frac{Zn}{2} = v_3 \quad (19)$$

$$S_4 = v_4 t_4 = v_3 t_4 = \frac{Zn}{2} t_4 =$$

$$\begin{cases} -\left(\frac{\mu_s g}{2n} - \mu_n g t_3\right) t_4 & \left(\frac{1}{n} \leq \frac{Zn}{\mu_s g}\right) \\ -\left(\frac{Zn}{2} - \mu_n g t_3\right) t_4 & \left(\frac{1}{n} > \frac{Zn}{\mu_s g}\right) \end{cases} \quad (20)$$

由式(17)、(19)可知

$$t_3 = \begin{cases} \frac{\mu_s g + Zn^2}{2n\mu_n g} & \left(\frac{1}{n} \leq \frac{Zn}{\mu_s g}\right) \\ \frac{Zn}{\mu_n g} & \left(\frac{1}{n} > \frac{Zn}{\mu_s g}\right) \end{cases} \quad (21)$$

$$t_4 = \frac{1}{2n} - t_3 \quad (22)$$

②若振动台前进时间不足以让鱼体加速至与振动台前进速度相同,即振动台单程前进时间内鱼体均处于匀减速直线运动状态,即 $\frac{1}{2n} = t_3$ 时,鱼体运动状态重复进入第1阶段。

综上,鱼体在第2阶段中的末速度 v'' 为

$$v'' = \begin{cases} \frac{\mu_s g - \mu_n g}{2n} & \left(\frac{1}{n} \leq \frac{Zn}{\mu_s g}, 1 \leq \frac{\mu_s g + Zn^2}{\mu_n g}\right) \\ \frac{Zn^2 - \mu_n g}{2n} & \left(\frac{1}{n} > \frac{Zn}{\mu_s g}, 1 \leq \frac{2Zn^2}{\mu_n g}\right) \\ -\frac{Zn}{2} & \left(\frac{1}{n} \leq \frac{Zn}{\mu_s g}, 1 > \frac{\mu_s g + Zn^2}{\mu_n g}\right) \\ -\frac{Zn}{2} & \left(\frac{1}{n} > \frac{Zn}{\mu_s g}, 1 > \frac{2Zn^2}{\mu_n g}\right) \end{cases} \quad (23)$$

第 2 阶段中鱼体总位移 S'' 的表达式为

$$S'' = \begin{cases} \frac{2\mu_s g - \mu_n g}{8n^2} & \left(\frac{1}{n} \leq \frac{Zn}{\mu_s g}, 1 \leq \frac{\mu_s g + Zn^2}{\mu_n g} \right) \\ \frac{Z}{4} - \frac{\mu_n g}{8n^2} & \left(\frac{1}{n} > \frac{Zn}{\mu_s g}, 1 \leq \frac{2Zn^2}{\mu_n g} \right) \\ \frac{Zn}{2} t_4 & \left(\frac{1}{n} \leq \frac{Zn}{\mu_s g}, 1 > \frac{\mu_s g + Zn^2}{\mu_n g} \right) \\ \frac{Zn}{2} t_4 & \left(\frac{1}{n} > \frac{Zn}{\mu_s g}, 1 > \frac{2Zn^2}{\mu_n g} \right) \end{cases} \quad (24)$$

为了保证鱼体在振动台上以头朝前姿态持续前进,则至少需要满足 $S' - S'' > 0$,可分为以下 4 种情况讨论:

当 $\frac{1}{n} \leq \frac{Zn}{\mu_s g}, 1 \leq \frac{\mu_s g + Zn^2}{\mu_n g}$ 时,鱼体在振动台中的运动过程为:先匀加速直线运动后匀减速直线运动,则鱼体位移 $S' + S''$ 必定大于 0,可以保证在一个振动周期中鱼体始终朝鱼头方向前进,完成头尾定向作业。

当 $\frac{1}{n} \leq \frac{Zn}{\mu_s g}, \frac{\mu_s g + Zn^2}{\mu_n g} < 1$ 时,鱼体在振动台中的运动过程为:先匀加速直线运动后匀减速直线运动再匀速直线运动,只有鱼体位移 $S' - S'' > 0$,即当 $\frac{\mu_s g}{8n^2} - \frac{Zn}{2} t_4 > 0$ 时,鱼体可以完成头尾定向作业。

当 $\frac{1}{n} > \frac{Zn}{\mu_s g}, 1 \leq \frac{2Zn^2}{\mu_n g}$ 时,鱼体在振动台中的运动过程为:先匀加速直线运动后匀速直线运动再匀减速直线运动,则鱼体位移 $S' + S''$ 必定大于 0,可以保证在一个振动周期中鱼体始终朝头方向前进,完成头尾定向作业。

当 $\frac{1}{n} > \frac{Zn}{\mu_s g}, \frac{2Zn^2}{\mu_n g} < 1$ 时,鱼体在振动台中的运动过程为:先匀加速直线运动后匀速直线运动再匀减速直线运动最后匀速直线运动,只有鱼体位移 $S' - S'' > 0$,即 $\frac{(Zn)^2}{8\mu_s g} + \frac{Znt_2}{2} - \frac{Zn}{2} t_4 > 0$ 时,鱼体可以完成头尾定向作业。

2 鱼体腹背定向装置设计

2.1 鱼体腹背定向装置总体结构

鱼体腹背定向装置示意图如图 3 所示。设计的鱼体腹背定向装置主要由导向机构、视觉识别系统、剔除机构、V 形腹背定向执行机构、V 形校正输送机构组成。鱼体在前一工序完成头尾定向后,首先进入腹背定向装置的导向机构。由于从头尾定向装置出来的鱼可能存在重叠的状态,将重叠鱼体用拨

件拨下实现单条分离,因此导向机构上设有鱼体渐变导向板和分拨组方便后续工序的完成。鱼体导向分离后保持居中状态进入到视觉识别系统内,通过工业 CCD 摄像头进行图像识别,判断鱼体的头尾方向和腹背方向,视觉判断信号反馈至剔除机构和 V 形腹背定向执行机构。剔除机构由气缸和拨叉组成,实现头尾定向不成功的鱼体去除作业。V 形腹背定向执行机构由气缸和 V 形输送带组成,V 形输送带由固定在滑轨上的左侧输送带和右侧输送带组成,其中气缸根据视觉反馈信号推动 V 形输送带的左右滑动,实现鱼体的腹背定向作业。鱼体经过腹背定向后,进入 V 形校正输送机构,实现鱼体以鱼身直立的姿态进入下一工序装置中。

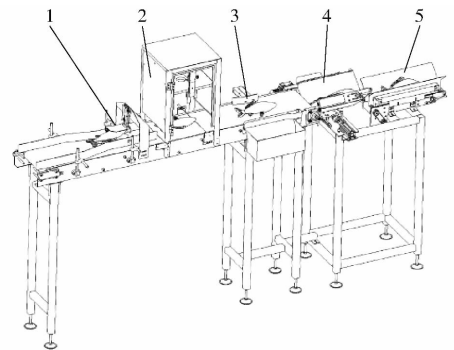


图 3 腹背定向装置结构示意图

Fig. 3 Schematic of ventral-dorsal directional transportation device

1. 导向机构 2. 视觉识别系统 3. 剔除机构 4. V 形腹背定向执行机构 5. V 形校正输送机构

2.2 鱼体腹背定向关键部件设计

2.2.1 导向机构

导向机构主要通过改变鱼体输送宽度和高度的方式实现鱼体的单条分离排列,因此导向机构设计为渐变通道与分拨式组合结构。如图 4 所示,渐变通道由两边导向板组成,导向板通过 4 根螺旋顶杆调节通道宽度,分拨拨片通过气缸实现分拨高度,因此导向机构可以根据加工批次鱼体种类和大小进

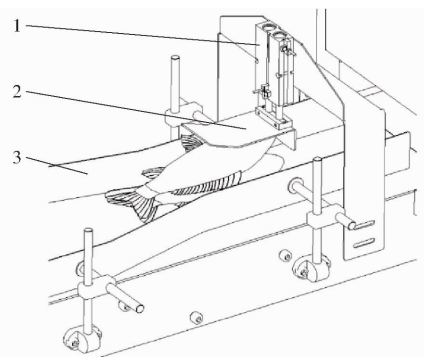


图 4 导向机构示意图

Fig. 4 Schematic of guide mechanism

1. 气缸 2. 分拨拨片 3. 导向板

行渐变通道宽度和分拨高度的调整,实现装置处理对象的多样化。

工作原理:重叠鱼体进入渐变通道,经导向板摆正鱼身,第1条鱼头经过对射开关后,拨片开始往下运动,将重叠的鱼体拨下,实现鱼体的单条分离排列。

2.2.2 视觉识别系统

视觉识别系统如图5所示,主要由工业 CCD、平板光源、对射开关及固定支架组成,通过视觉识别系统的作用对鱼类进行头部和尾部、腹部和背部的判断,随后发出关于鱼体形态信号,包括头朝前背向上、头朝前背向下、头朝后背向上、头朝后背向下、识别异常5种信号。

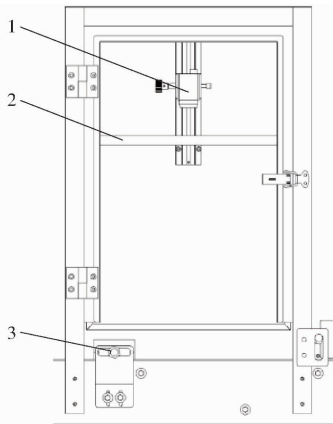


图5 视觉识别系统

Fig. 5 Visual recognition system

1. 工业 CCD 2. 平板光源 3. 对射开关

工作原理:经单条分离排列后的鱼体进入摄像箱体内,鱼头经过对射开关,触发工业 CCD 相机,对鱼体进行实时摄像,工控机内模板自动匹配识别算法,判断鱼体头尾和腹背方向,视觉识别效果如图6所示。工业 CCD 相机内控制板将判断结果以高电平信号方式反馈到 PLC 输入端口,PLC 检测到信号后,控制执行后续工序。

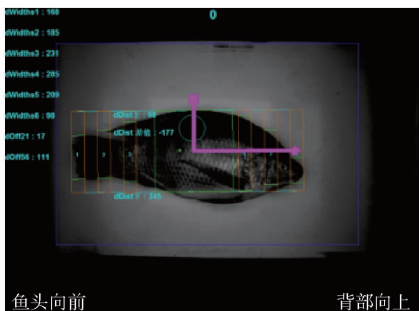


图6 视觉识别效果图

Fig. 6 Visual recognition rendering

2.2.3 剔除机构

剔除机构如图7所示,主要以拨叉方式实现头尾方向错误姿态鱼体的去除,由气缸、拨叉和剔除筐组成。工作原理:鱼体在前一工序中被视觉识别系统判

断为尾朝前、头朝后的错误姿态时,工业 CCD 相机将信号反馈到剔除机构的气缸运动件,气缸动作使拨叉打开,将错误姿态鱼体往剔除筐中掉落,实现剔除。

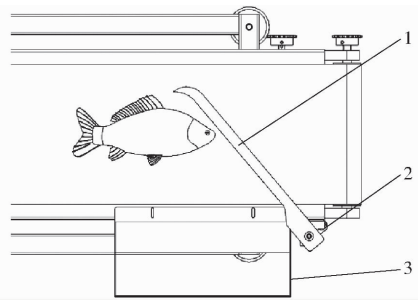


图7 剔除机构示意图

Fig. 7 Schematic of culling mechanism

1. 拨叉 2. 气缸 3. 剔除筐

2.2.4 V形腹背定向执行机构

V形腹背定向执行机构由左右两侧输送带、滑轨、气缸和缓冲器组成,如图8所示。左右两侧输送带设计成V字型,槽底高度比前端输送带低,根据前期试验得到V形输送带夹角为 120° 时,可以实现前端输送带上的鱼体更加顺利地掉入V形输送带中;气缸可以推动V形输送带在滑轨上左右移动,实现V形输送带可根据鱼体姿态选择左右两侧输送带的顺利对接,初始状态下由左侧输送带对准前端输送带。工作原理:①若鱼体在前端输送带时处于头朝前、背朝左的姿态时,如图9所示,气缸不动作,V形输送带保持在初始位置,当鱼体从前端输送带掉入左侧输送带后,鱼体即可形成背部朝上、腹部朝下姿态。②若鱼体在前端输送带时处于头朝前、背朝右的姿态时,如图10所示,气缸推动V形输送带到左侧,V形输送带的右侧输送带对准前端输送带,当鱼体从前端输送带掉入右侧输送带后,鱼体即可形成背部朝上、腹部朝下姿态,完成定向后V形输送带立即复位至初始位置。

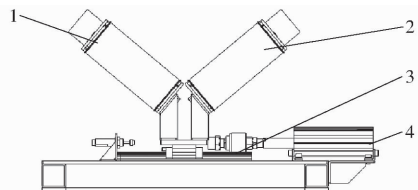


图8 V形腹背定向执行机构示意图

Fig. 8 Schematic of V-shaped ventral-dorsal directional transportationl actuator

1. 左侧输送带 2. 右侧输送带 3. 滑轨 4. 气缸

2.2.5 V形校正输送机

V形校正输送机由驱动电机、输送带及校正挡边组成(图11),校正挡边设计成V字形,可以使得鱼体形成直立的姿态,并保持姿态进入下一工序的装置中。

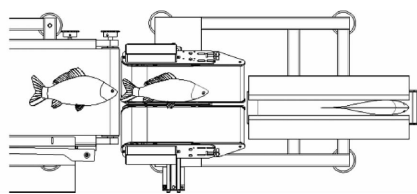


图9 鱼体在前端输送带处于头朝前、背朝左姿态时腹背定向执行示意图

Fig.9 Schematic of ventral-dorsal directional transportation execution when fish body was in posture of head facing forward and back facing left when it was on front conveyor belt

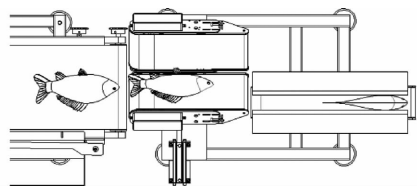


图10 鱼体在前端输送带处于头朝前、背朝右姿态时腹背定向执行示意图

Fig.10 Schematic of ventral-dorsal directional transportation execution when fish body was in posture of head facing forward and back facing right when it was on front conveyor belt

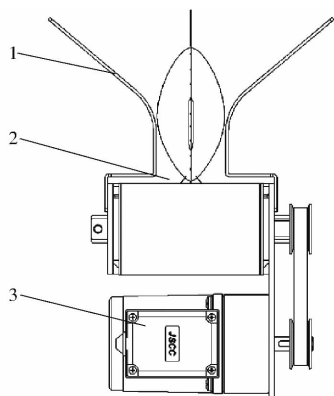


图11 V形校正输送机构示意图

Fig.11 Schematic of V-shaped correction conveying mechanism

1. 校正挡边 2. 输送带 3. 驱动电机

工作原理:鱼体在V形腹背定向执行机构中完成腹背定向动作后,掉落到V形校正输送机构中,鱼体在校正挡边的导向作用下形成直立姿态,并由下方输送带传送至下一工位。

3 鱼体自动定向试验

为探讨不同设计参数对鱼体定向效率和成功率的影响,以鲫鱼、草鱼和白鲢为研究对象,开展鱼体自动定向试验,以探讨相关设计参数对鱼体定向的影响规律。

3.1 头尾定向试验

试验装置以304不锈钢为材料,如图12所示,

电机功率为1.5 kW,电压为380 V,外形尺寸为2 100 mm × 830 mm × 1 650 mm,振动频率可调范围为1 ~ 6 Hz,振动幅度可调范围为100 ~ 180 mm。



图12 头尾定向试验装置实物图

Fig.12 Physical drawing of head-tail directional transportation test device

以鲫鱼、草鱼和白鲢为研究对象,鱼体样本购于某市场,每种10条,样本外表完好、无残缺。试验前,将鱼体拍晕,并保持表面湿润。鱼体样本质量与不同类型输送带的摩擦因数如表1所示。

表1 鱼体参数

Tab.1 Fish body parameters

鱼类	质量/g	输送带类型	顺鳞摩擦因数 μ_s	逆鳞摩擦因数 μ_n
鲫鱼	250 ± 10	倒三角纹	0.30	0.90
		一字纹	0.75	0.80
		草坪纹	0.60	0.70
草鱼	1 000 ± 10	倒三角纹	0.30	0.80
		一字纹	0.55	0.65
		草坪纹	0.50	0.80
白鲢	1 500 ± 20	倒三角纹	0.60	1.30
		一字纹	0.80	1.10
		草坪纹	1.15	1.60

采用鱼体头尾定向时间和头尾定向成功率作为自动头尾定向效果的评价指标。头尾定向时间 T 定义为鱼体从喂料口进入装置到定向完成并输送至装置出口的时间;头尾定向成功率 P 定义为鱼体定向成功次数与定向总体次数之比。

根据前文分析可知,影响鱼体头尾定向效果的主要因素为鱼体种类、输送带类型、振动幅度、振动频率,本文采用单因素控制变量方法进行鱼体头尾定向规律研究。每组试验随机选取5条鱼进行测试,重复3次,结果取平均值。图13为头尾定向试验过程。

3.1.1 鱼体种类对头尾定向效果的影响

为探讨不同鱼体种类对头尾定向效果的影响规律,设定鱼体头尾定向试验装置的振动频率为5 Hz,振动幅度为160 mm,定向输送带类型为倒三角纹输送带,研究鲫鱼、草鱼、白鲢对头尾定向效果的影响



图 13 鱼体在振动台上的定向试验过程

Fig. 13 Experimental process of fish orientation on shaking table

规律,试验结果如表 2 所示。

表 2 不同鱼体种类时头尾定向效果

Tab. 2 Effects of different fish species on head-tail directional transportation

鱼类	定向时间/s	定向成功率/%
鲫鱼	2.35	100
草鱼	2.23	100
白鲢	2.05	100

从表 2 可以看出,不同鱼体种类对头尾定向效果具有一定影响,相同振动频率和振动幅度条件下,头尾定向效果由优到差依次为白鲢、草鱼、鲫鱼。

在振动频率为 5 Hz、振动幅度为 160 mm、定向输送带类型为倒三角纹输送带时,可以计算得到:鲫鱼运动状态符合第 2 种情况,鱼体在水平振动台上经过一次振动后的总位移为 $S_A = S' - S'' = 0.0062 \text{ m}$;草鱼运动状态符合第 2 种情况,鱼体在水平振动台上经过一次振动后的总位移为 $S_B = S' - S'' = 0.0101 \text{ m}$;白鲢运动状态符合第 4 种情况,鱼体在水平振动台上经过一次振动后的总位移为 $S_C = S' - S'' = 0.0115 \text{ m}$ 。即 $S_C > S_B > S_A$,与试验测试的头尾定向效果排序一致。

3.1.2 输送带类型对头尾定向效果的影响

为探讨输送带类型对头尾定向效果的影响规律,设定鱼体头尾定向试验装置的振动频率为 5 Hz,振动幅度为 160 mm,选用鲫鱼为试验对象,研究倒三角纹、一字纹、草坪纹 3 种输送带类型对头尾定向效果的影响规律,试验结果如表 3 所示。

表 3 不同输送带类型时头尾定向效果

Tab. 3 Effect of different conveyor belts on head-tail directional transportation

输送带类型	定向时间/s	定向成功率/%
倒三角纹	2.35	100
一字纹		0
草坪纹		0

从表 3 可以看出,输送带类型对头尾定向效果影响较大,在振动频率为 5 Hz、振动幅度为 160 mm 条件下,鲫鱼可以在倒三角纹输送带上完成

头尾定向作业,而在一字纹和草坪纹输送带表面上做来回滑动运动,无法完成头尾定向作业。

以鲫鱼为研究对象,在振动频率为 5 Hz、振动幅度为 160 mm 条件时,可以计算得到:在倒三角纹输送带上鱼体运动状态符合第 2 种情况,鱼体在水平振动台上经过一次振动后的总位移为 $S_A = S' - S'' = 0.0062 \text{ m} > 0$;在一字纹输送带上鱼体运动状态符合第 3 种情况,鱼体在水平振动台上经过一次振动后的总位移为 $S_D = S' - S'' = -0.0026 \text{ m} < 0$;在草坪纹输送带上鱼体运动状态符合第 3 种情况,鱼体在水平振动台上经过一次振动后的总位移为 $S_E = S' - S'' = -0.0019 \text{ m} < 0$ 。计算结果表明,鲫鱼在倒三角纹输送带上可以完成头尾定向作业,而在一字纹和草坪纹输送带上无法完成头尾定向作业,与试验测试结果一致。

3.1.3 振动幅度对头尾定向效果的影响

为探讨振动幅度对头尾定向效果的影响规律,设定鱼体头尾定向试验装置的振动频率为 5 Hz,选用鲫鱼为试验对象,定向输送带类型为倒三角纹输送带,研究不同振幅对头尾定向效果的影响规律,试验结果如表 4 所示。

表 4 不同振动幅度时头尾定向效果

Tab. 4 Effect of different vibration amplitudes on head-tail directional transportation

振动幅度/mm	定向时间/s	定向成功率/%
100	3.53	100
120	2.71	100
140	2.62	100
160	2.35	100
180	1.83	100

试验过程中发现,头尾定向试验装置振动幅度在 100 ~ 180 mm 范围内,鱼体头尾定向成功率均为 100%。但当装置振动幅度大于 160 mm 时,整机振动剧烈,不宜长时间在该工况下运行。

从表 4 中可以看出,鱼体头尾定向效率会随着振动幅度增大而提升。试验装置振动幅度从 100 mm 到 120 mm 过程,鱼体头尾定向时间缩短趋势明显;振幅大于 120 mm 时,定向时间变化趋势由平缓逐渐变成快速缩短状态。

以鲫鱼为研究对象,在振动频率为 5 Hz、定向输送带类型为倒三角纹输送带条件时,可以计算得到:当振动幅度为 100 mm 时,鲫鱼运动状态符合第 4 种情况,鱼体在水平振动台上经过一次振动后的总位移为 $S_F = S' - S'' = 0.0035 \text{ m}$;当振动幅度为 120 mm 时,鲫鱼运动状态符合第 2 种情况,鱼体在水平振动台上经过一次振动后的总位移为 $S_G = S' - S'' =$

0.005 0 m;当振动幅度为 140 mm 时,鲫鱼运动状态符合第 2 种情况,鱼体在水平振动台上经过一次振动后的总位移为 $S_H = S' - S'' = 0.005 3$ m;当振动幅度为 160 mm 时,鲫鱼运动状态符合第 2 种情况,鱼体在水平振动台上经过一次振动后的总位移为 $S_A = S' - S'' = 0.006 2$ m;当振动幅度为 180 mm 时,鲫鱼运动状态符合第 2 种情况,鱼体在水平振动台上经过一次振动后的总位移为 $S_I = S' - S'' = 0.007 7$ m。即 $S_F < S_G < S_H < S_A < S_I$,与试验测试的头尾定向效果排序一致,且变化趋势也一致。

3.1.4 振动频率对头尾定向效果的影响

为探讨振动频率对头尾定向效果的影响规律,设定鱼体头尾定向试验装置的振动频率为 5 Hz,选用鲫鱼为试验对象,定向输送带类型为倒三角纹输送带,研究不同振动频率对头尾定向效果的影响规律,试验结果如表 5 所示。

表 5 不同振动频率时头尾定向效果

Tab.5 Effect of different vibration frequencies on head-tail directional transportation

振动频率/Hz	定向时间/s	定向成功率/%
2	5.01	100
3	3.48	100
4	2.51	100
5	2.35	100
6	1.52	100

试验过程中发现,头尾定向试验装置振动频率在 2 ~ 6 Hz 范围内,鱼体头尾定向成功率均为 100%。但当装置振动频率小于 3 Hz 时,鱼体在输送带上有轻微打滑,定向时间较长。

从表 5 可以看出,鱼体头尾定向效率会随着振动频率增大而提升。试验装置振动频率从 2 Hz 到 5 Hz 过程,鱼体头尾定向时间缩短趋势明显;频率大于 5 Hz 时,定向时间变化趋势平缓。

以鲫鱼为研究对象,在振动幅度为 160 mm、定向输送带类型为倒三角纹输送带条件时,可以计算得到:当振动频率为 2 Hz 时,鲫鱼运动状态符合第 4 种情况,鱼体在水平振动台上经过一次振动后的总位移为 $S_J = S' - S'' = 0.001 5$ m;当振动频率为 3 Hz 时,鲫鱼运动状态符合第 4 种情况,鱼体在水平振动台上经过一次振动后的总位移为 $S_K = S' - S'' = 0.003 3$ m;当振动频率为 4 Hz 时,鲫鱼运动状态符合第 4 种情况,鱼体在水平振动台上经过一次振动后的总位移为 $S_L = S' - S'' = 0.005 8$ m;当振动频率为 5 Hz 时,鲫鱼运动状态符合第 2 种情况,鱼体在水平振动台上经过一次振动后的总位移为 $S_A = S' - S'' = 0.006 2$ m;当振动频率为 6 Hz 时,鱼体在水平

振动台上经过一次振动后的总位移为鲫鱼运动状态符合第 2 种情况, $S_M = S' - S'' = 0.014 2$ m。即 $S_J < S_K < S_L < S_A < S_M$,与试验测试的头尾定向效果排序一致,且变化趋势也一致。

3.2 腹背定向试验

3.2.1 试验装置

试验装置以 304 不锈钢为材料,如图 14 所示,电机功率为 0.5 kW,电压为 380 V,外形尺寸为 3 000 mm × 700 mm × 1 870 mm,输送带类型为 PVC 输送带,输送速度可调整范围为 0 ~ 0.42 m/s。



图 14 腹背定向试验装置实物图

Fig.14 Physical drawing of ventral-dorsal directional transportation test device

3.2.2 试验材料

腹背定向试验装置喂料口连接头尾定向装置的出料口,鱼体头尾定向后直接进入腹背定向装置中,继续完成腹背定向试验。

3.2.3 试验方法与评价指标

采用鱼体腹背定向时间和腹背定向成功率作为自动定向效果的评价指标。腹背定向时间 T 定义为鱼体从喂料口进入装置到定向完成并输送至装置出口的时间;腹背定向成功率 P 定义为鱼体定向成功次数与定向总体次数百分比。

3.2.4 鱼体种类对腹背定向效果的影响

为探讨不同鱼体种类对腹背定向效果的影响规律,设定鱼体腹背定向试验装置输送速度为 0.2 m/s,研究鲫鱼、草鱼、白鲢对腹背定向效果的影响规律,试验结果如表 6 所示。图 15、16 为腹背定向试验过程。

表 6 不同鱼体种类时腹背定向的效果

Tab.6 Effect of fish species on ventral-dorsal directional transportation

鱼类	定向时间/s	定向成功率/%
鲫鱼	15	96.8
草鱼	15	95.6
白鲢	15	95.9

由试验结果可以看出,腹背定向试验装置的定向效率和成功率由输送带输送速度和机器视觉识别准确率决定,机器视觉识别准确率在 95% ~ 97% 之



图 15 重叠鱼经过导向机构被分拨拨叉分开
Fig. 15 Overlapping fish separated by distributing fork through guide mechanism



图 16 鱼体单条排列完成腹背定向工序
Fig. 16 Single arrangement of fish completes ventral-dorsal directional transportation process

间,因此不同类别鱼体腹背定向时间相同、定向成功率保持稳定。

4 结论

(1)通过对鱼体在头尾定向振动台上的受力分

析和运动状态分析,阐明了鱼体转动原理和头尾前进原理:①由于鱼体质心偏向鱼头位置,在水平振动台上,鱼体始终会绕质心旋转,直至鱼体长轴与振动方向平行。②当鱼体鱼尾方向转动至与振动方向平行时,根据不同的振动幅度、频率和鱼体顺逆鳞摩擦因数,鱼体运动状态可分为 4 种情况,只有当总位移 $S' - S'' > 0$ 时,鱼体才能完成头尾定向作业。

(2)搭建了鱼体头尾定向试验装置以及腹背定向试验装置,其中头尾定向装置以水平振动方式为定向原理,可实现振幅 100 ~ 180 mm 和频率 1 ~ 6 Hz 的调整;腹背定向试验装置以机器视觉方式为定向原理,由导向机构、视觉识别系统、剔除机构、V 形腹背定向执行机构、V 形校正输送机构组成,可实现鱼体自动导向及单条排列、自动视觉识别、自动剔除错误姿态鱼体、自动腹背定向。

(3)完成了鱼体自动定向试验,试验结果表明:鱼体头尾前进运动状态理论计算与试验结果一致,证明该理论计算可以有效指导头尾定向装置的工艺参数优化。输送带为倒三角纹时,鱼体头尾定向效果最为明显。鱼体头尾定向效果随振动幅度增大而提升,但振动幅度大于 160 mm 时整机振动剧烈,因此最优幅度为 160 mm。鱼体头尾定向效果随振动幅度增大而提升,当频率大于 5 Hz,定向效果变化不明显,因此最优频率为 5 Hz。腹背定向效果由输送带输送速度和机器视觉识别准确率决定,各类鱼体腹背定向时间保持在 15 s、定向成功率在 95% ~ 97% 范围内。

参 考 文 献

- [1] 农业部渔业渔政管理局. 2021 年中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [2] 杨敏丽, 白人朴, 刘敏. 建设现代农业与农业机械化发展研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 5 - 11.
YANG Minli, BAI Renpu, LIU Min. Development of agricultural mechanization and construction of modern agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 5 - 11. (in Chinese)
- [3] 艾正茂, 谭鹤群, 万鹏. 基于机器视觉的日本鲭定向装置设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(2): 208 - 216.
AI Zhengmao, TAN Hequn, WAN Peng. Design and experiment of a mackerel orientation device based on machine vision[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(2): 208 - 216. (in Chinese)
- [4] 林启仪, 穆金才. 鱼体定向机械的初步探索[J]. 渔业机械仪器, 1980(4): 7 - 9.
LIN Qiyi, MU Jincui. Preliminary exploration of fish body orientation machine[J]. Fishery Machinery and Instruments, 1980(4): 7 - 9. (in Chinese)
- [5] 万鹏, 黄俊, 谭鹤群. 淡水鱼腹背定向装置设计及试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 8 - 15.
WAN Peng, HUANG Jun, TAN Hequn. Design and test of orientation device for freshwater fishes' abdomen and back[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(6): 8 - 15. (in Chinese)
- [6] 单慧勇, 张程皓, 李晨阳. 鱼加工生产线头尾定向调理上料系统设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(3): 7 - 11.
SHAN Huiyong, ZHANG Chenghao, LI Chenyang. Design and test of directional conditioning feeding system for fish processing and production[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(3): 7 - 11. (in Chinese)
- [7] 刘伟. 淡水鱼头尾、腹背定向机理研究及设备研制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
LIU Wei. Study on the mechanism of head-tail and ventral-dorsal directional transportation of freshwater fish and development of equipment[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [8] WENZEL W. Device for sorting fish: USA 4613031[P]. 1986 - 09 - 23.
- [9] ANDRESEN H, HAMMEREN J E, OPPHEIM P A. Device for orientating fish; EP, 2498616[P]. 2013 - 05 - 01.

- [10] 万鹏, 郭三琴, 杨俊, 等. 淡水鱼水平往复振动头尾定向输送方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4): 40-48.
WAN Peng, GUO Sanqin, YANG Jun, et al. Horizontal reciprocating vibration method for head-to-tail directional transportation of fresh water fish[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(4): 40-48. (in Chinese)
- [11] 王帅, 卢威, 杨淑洁. 一种鱼体定向装置: CN 201921899678.2[P]. 2020-06-12.
- [12] GIULIANO W. Apparatus for aligning and uniformly orienting fish; USA 5291983[P]. 1994-03-08.
- [13] WERNER G K. Method and apparatus for gutting fish; USA 5980376[P]. 1999-11-09.
- [14] 黄俊. 淡水鱼头尾及腹背定向方法与试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
HUANG Jun. Study on the method and experiment of head-tail and ventral-dorsal directional transportation of freshwater fish [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [15] LEANDER L. Method and apparatus for orientation of fish upon a conveyor; USA 5115903[P]. 1992-05-26.
- [16] 周彤, 徐皓. 北欧渔业装备情况考察[J]. 渔业机械仪器, 2000(6): 3-6.
ZHOU Tong, XU Hao. Investigation on fishery equipment in northern Europe[J]. Fishery Machinery and Instruments, 2000(6): 3-6. (in Chinese)
- [17] HORST K H, PONTOW H. Method and apparatus for turning over and stretching fish fillets; USA 4985409[P]. 1990-08-25.
- [18] KRAGH H. Fish processing machine with alignment devices and methods for realigning fish during processing; USA 7252584 [P]. 2007-08-07.
- [19] 路光明. 西德 Baader 型鱼类加工处理机械[J]. 渔业机械仪器, 1979(4): 46-50.
LU Guangming. West German Baader type fish processing machinery[J]. Fishery Machinery and Instruments, 1979(4): 46-50. (in Chinese)
- [20] PETER B K, JAMES W L. Device and method for volitionally orienting fish; USA 5816196[P]. 1998-10-06.
- [21] MARIUSZ K, KRZYSZTOF G. The new method of setting the small fishes back in the desired direction[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83: 99-105.
- [22] 徐颂波, 徐学渊. 鱼体定向输送装置设计的可行性分析[J]. 浙江海洋学院学报, 1990(2): 131-134.
XU Songbo, XU Xueyuan. A feasibility study on the development of mechanism for the directional transport of fish bodies[J]. Journal of Zhejiang College of Fisheries, 1990(2): 131-134. (in Chinese)
- [23] 向云鹏, 谭鹤群, 万鹏. 白鲢在振动平台上的头尾定向规律研究[J]. 华中农业大学学报, 2017, 36(1): 130-138.
XIANG Yunpeng, TAN Hequn, WAN Peng. Theoretical analysis and experimental study about head-tail orientation rule of silver carp on vibration platform[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2017, 36(1): 130-138. (in Chinese)
- [24] 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)