

白鲢在振动平台上的头尾定向规律研究

向云鹏 谭鹤群 万鹏 黄鹏飞 杨重兴

华中农业大学工学院, 武汉 430070

摘要 以白鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)和倾斜振动平台为研究对象,分析白鲢在倾斜振动平台上的运动规律。采用Matlab软件对白鲢鱼体在倾斜振动平台上的运动进行数值模拟,结果表明,定向时间随激振力大小、激振力与台面夹角、台面倾角、激振力频率变化。选择质量为1 kg左右的白鲢,分别以试制的振动定向设备和高速摄影仪为试验装置和监测装置,通过数值模拟其在不同输入参数条件下的定向时间和定向成功率,得到台面倾角、激振力大小、激振力与台面夹角、激振力频率等因素对白鲢定向时间和定向成功率的影响规律。数值模拟和定向试验均表明,采用倾斜振动平台可以实现鱼体的头尾定向,在适宜的参数范围内,定向成功率可以达到100%,且定向时间随台面倾角、激振力大小、激振力与台面夹角、激振力频率的增大而降低。数值模拟结果与定向试验结果一致,表明所建立的鱼体运动模型能较好地描述鱼体在振动平台上的运动。

关键词 白鲢; 振动定向; 头尾定向; 定向时间; 激振力

中图分类号 TS 254.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2017)01-0130-09

中国是世界上的渔业大国,其水产品总量连续多年位居世界第一,2014年为6 461.52万t,其中淡水鱼的产量占水产品总量的49%左右^[1]。但淡水鱼加工业起步晚、发展慢^[2],与发达国家相比,存在基础研究薄弱、加工与综合利用率低等问题^[3]。包括分级、定向、去鳞、去头去内脏等在内的前处理技术是淡水鱼加工的重要环节^[4],其中分级技术、去鳞技术、去头去内脏技术发展较快。目前,主要采用质量大小分级、大小分级、品种分级等^[5-7]分级技术,去鳞技术则包括化学去鳞和机械去鳞^[8-10]2类方法,去头去内脏则主要采用机械方式进行^[11-13]。定向是指将鱼体头尾和腹背按一定方向要求整理好,以方便后续机械化加工。目前,淡水鱼的定向技术的发展相对缓慢。鱼体定向的手段根据其工作原理可分为2种类型,第1类是光电式,如事先采用传感器检测头尾,需要执行头尾定向时,根据传感器传递的信息执行机构翻转^[14];第2类是机械式,如徐颂波等^[15]利用鱼体头尾弯曲刚度的不同采用机械手段实现了鱼的头尾判断,但这种方式却不能实现鱼头尾的一致定向。振动输送定向是一种机械式定向方法。有关振动输送定向的研究较多,如玉米^[16-17]、水

稻^[18-19]、大蒜^[20]等的定向播种以及水稻秧苗的有序抛秧^[21]、工件的有序传送^[22]等,都是通过振动输送过程中控制被输送物体到达输送目的端的姿态,使被输送物体产生所期望的定向效果。高星星等^[23]、刘伟^[24]以白鲢为研究对象,采用振动平台验证了在振动输送过程中进行鱼体头尾和腹背定向的可行性。本研究以高星星等^[23]、刘伟^[24]研究为基础,进一步对白鲢在振动台面上的运动过程进行理论分析与试验研究,探讨振动平台结构及振动工艺参数对鱼体定向的影响,为鱼体振动定向装置的研发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 振动设备的结构设计

根据试验对象白鲢的体型特征、激振形式、激振力幅值等要求,对振动设备的支撑方式、台面倾角调节方式、驱动方式等进行设计,最终得到振动设备(图1)。如图1所示,长1 600 mm、宽800 mm的振动台面通过支架与4个弹簧架设在底座上,台面两侧各安装1台振动电机。台面倾角可在25°~45°范围内以5°为间隔进行调节,振动电机激振力与台面

收稿日期: 2016-05-15

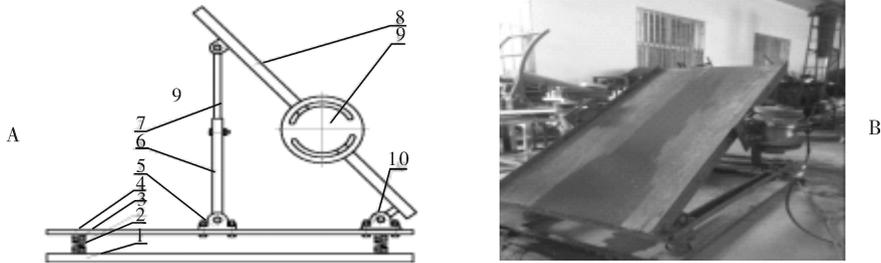
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2013PY126)

向云鹏, 硕士研究生. 研究方向: 农产品加工技术与装备. E-mail: 136157134@qq.com

通信作者: 谭鹤群, 博士, 副教授. 研究方向: 农产品加工技术与装备. E-mail: thq@mail.hzau.edu.cn

的夹角可在 $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 范围内调节。振动电机选用 YZS-3-6 偏心振动电机(武汉利得尔机电有限公司生产),单台电机质量为 32 kg,每个偏心块质量为 1.7 kg,单台电机激振力幅值为 3 kN,额定转速为 930 r/min。购置规格为 $8 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的弹簧,弹簧中径为 72 mm,簧丝直径为 8 mm,弹

簧自由高度为 150 mm,其节距为 32 mm,有效圈数为 4.44 圈。整个平台参振质量约为 184 kg。试验时,白鲢以相同的初始姿态放到倾斜台面上端,在振动作用下,鱼在从台面上端往下端运动的过程中逐步形成头朝下尾朝上的姿态,从而实现鱼的头尾定向。



A: 振动设备结构简图 Structure diagram of vibration device; B: 振动设备实物图 Physical diagram of vibration device; 1.底架 Chassis; 2.弹簧 Spring; 3.弹簧导向柱 Spring oriented column; 4.导轨 Guide rails; 5.动滑块组 Moving block; 6.下伸缩杆 Retractable spear below; 7.上伸缩杆 Retractable spear up; 8.台面骨架 Table frame; 9.电机座 Motor seat; 10.定滑块组 Fixed sliding block.

图 1 振动装置

Fig.1 Vibration device

1.2 鱼在头尾振动定向设备上的运动

1)定向的原理。图 2 为白鲢在振动平台上运动时在台面平面内的受力示意图,图示状态鱼的体长方向与下滑方向垂直,点 O 为鱼体质心。在质心两侧, f_{1y} 为鱼头部分受到的摩擦力的合力, f_{2y} 为鱼身部分受到的摩擦力的合力, G_1 为鱼的重力在鱼质心处沿滑动方向的分力。鱼处在振动设备上时,当 $G_1 > f_{1y} + f_{2y}$ 时,鱼会沿着台面向下滑。当 f_{2y} 对鱼体质心的转矩大于 f_{1y} 对鱼体质心的转矩时,鱼在沿台面向下滑的同时会发生转动,实现头朝下、尾朝上的定向。

激振力示意图,图中 N 为台面的法线方向, k_1 为单根弹簧垂直刚度,经计算为 24.4 N/mm; k_2 为单根弹簧的水平刚度,经测试,大小约为 4 N/mm; F 为电机总的激振力, F_1 为 F 沿垂直方向的分力, F_2 为 F 沿水平方向的分力; α 为激振力与台面的夹角, θ 为台面的倾角。

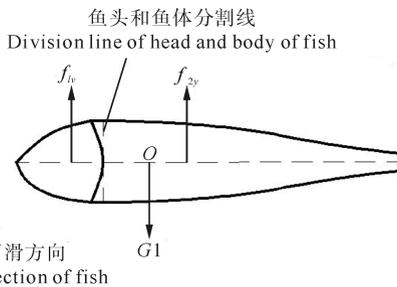


图 2 鱼体在台面平面内的受力示意图
Fig.2 Force sketch map of the fish on the platform plane

2)力学模型建立。为了得出鱼在振动台面上的运动规律,假设鱼体在下滑过程中,不脱离振动台面。以此为基础,对鱼进行物理学建模,并对其进行运动学和动力学分析。

①振动平台的运动学分析。图 3 为振动平台受

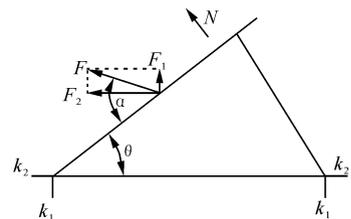


图 3 振动平台激振力分析

Fig.3 Exciting force sketch map of the platform

总激振力的大小为^[25]: $F = 2m_0 \omega^2 \sin(\omega t)$,式中, m_0 为单台偏心电机偏心块的总质量,大小为 6.8 kg; r 为偏心电机的偏心距,最大偏心距为 0.046 5 m; ω 为电机的角速度,rad/s; t 为时间,s。

由此得 F_1 、 F_2 的大小为:

$$\begin{cases} F_1 = F \sin(\alpha - \theta) = 2m_0 \omega^2 \sin(\omega t) \sin(\alpha - \theta) \\ F_2 = F \cos(\alpha - \theta) = 2m_0 \omega^2 \sin(\omega t) \cos(\alpha - \theta) \end{cases}$$

振动平台沿垂直方向和水平方向的振动可视为单自由度振动,计算时忽略阻尼。对于单自由度无阻尼简谐振动,振子运动方程为^[26]: $Mx + Kx = F_0 \sin(\omega t)$,式中, M 为单自由度无阻尼系统参振系统的质量,kg; K 为单自由度无阻尼系统弹性系数,

N/m ; x 为振子的位移, m ; F_0 为作用于系统上的简谐力的大小, N ; ω 为简谐振动的频率, rad/s ; t 为简谐振动的的时间, s 。其稳态解为^[26]:

$$x(t) = F_0 \sin(\omega t) / |K - M\omega^2|$$

垂直方向振动平台的位移为:

$$x_1(t) = \frac{2m_0 r \omega^2 \sin(\alpha - \theta) \sin(\omega t)}{|4k_1 - M\omega^2|}$$

水平方向振动平台的位移为:

$$x_2(t) = \frac{2m_0 r \omega^2 \cos(\alpha - \theta) \sin(\omega t)}{|4k_2 - M\omega^2|}$$

沿台面法线方向的总位移为:

$$x_N(t) = x_1(t) \cos\theta + x_2(t) \sin\theta$$

本研究中, 选取的 ω 范围超过了共振区, 即 $M\omega^2 - 4k_1 > 0$, $M\omega^2 - 4k_2 > 0$, 因此, $x_N(t) = 2m_0 r \omega^2 \sin(\omega t) \left(\frac{\sin(\alpha - \theta) \cos\theta}{M\omega^2 - 4k_1} + \frac{\cos(\alpha - \theta) \sin\theta}{M\omega^2 - 4k_2} \right)$

则沿台面法线方向的加速度为:

$$a_N(t) = -2m_0 r \omega^4 \sin(\omega t) \left(\frac{\sin(\alpha - \theta) \cos\theta}{M\omega^2 - 4k_1} + \frac{\cos(\alpha - \theta) \sin\theta}{M\omega^2 - 4k_2} \right)$$

②鱼体物理模型的建立。现实中, 鱼头部分较硬, 可视作刚体, 而鱼身部分富有弹性, 可视为弹性体。当鱼未脱离台面运动时, 鱼头在沿台面垂直方向与台面的运动一致, 鱼头受到的支持力为: $N_1 = m_1 g \cos\theta - m_1 a_N$, 式中, m_1 为鱼头的质量, kg ; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 。

鱼身具有弹性, 其在台面上的振动模型可视为被动隔振模型(图 4), 图 4 中 $x_N(t)$ 为振动台面沿台面法线方向的位移, y_t 为鱼身沿台面法线方向的位移, c 为鱼体和台面之间的等效阻尼系数, k 为鱼身的等效弹性系数。

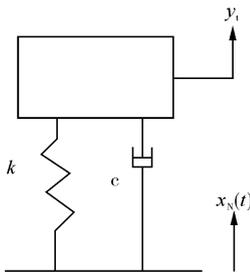


图 4 鱼身振动模型图

Fig.4 Vibration model of the fish's body

鱼身沿台面法线方向的位移为^[27]: $y_t = A \sqrt{(k^2 + c^2 \omega^2)} / D \cdot \sin(\omega t)$ 。本研究中, $A = x_N(t) / \sin(\omega t)$; $D = (c\omega)^2 + (k - m_2 \omega^2)^2$; $j = -\arctan(m_2$

$c\omega^3 / (k^2 - km_2 \omega^2 + c^2 \omega^2)$), 其中 m_2 为鱼身的质量, kg 。鱼身受到支持力为: $N_2 = m_2 g \cos\theta - m_2 \ddot{y}_t$, 式中, m_2 为鱼身的质量, kg ; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 ; θ 为台面的倾角, ($^\circ$)。

③鱼在振动台面上力学模型的建立。图 5 为白鲢沿台面运动的动力学分析图, 图中 y 方向为台面纵向轴线方向, x 方向沿台面垂直于 y 方向。 v 为鱼质心处的速度, v_1 为鱼头质心处的速度, v_2 为鱼身质心处的速度。 γ, δ 分别为 v_1, v_2 与 y 方向的夹角。以鱼头指向 $-y$ 方向, 鱼尾指向 y 方向为鱼体初始体位, 经过时间 t , 鱼头沿逆时针方向旋转的角度定义为体位角 φ , 则鱼体转动的角速度: $\omega_0 = d\varphi/dt$ 。

刘伟^[24]对鱼体在台面上的运动轨迹拟合研究指出, 鱼体质心在运动过程中沿 x 方向几乎没有位移。因此, 略去其 x 方向的合力, 则鱼体运动和转动方程为:

$$\left. \begin{aligned} m \frac{dv}{dt} &= mg - f_1 \cos\gamma - f_2 \cos\delta \\ J \frac{d^2\varphi}{dt^2} &= T \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, J 为鱼绕质心的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; m 为鱼整体的质量, kg 。假设白鲢在下滑的过程中, 其质心处的速度 v 始终指向 y 方向, 则

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \arctan(\omega_0 l_1 \cos\varphi / (v + \omega_0 l_1 \sin\varphi)) \\ \delta &= \arctan(\omega_0 l_2 \cos\varphi / (v - \omega_0 l_2 \sin\varphi)) \end{aligned} \right\}$$

设鱼头受到的摩擦力为鱼头质心处的摩擦力 f_1 , 鱼身受到的摩擦力为鱼身质心处的摩擦力 f_2 。

则鱼头部分和鱼身部分受到的摩擦力分别为:

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= \mu_1 N_1 = \mu_1 (m_1 g \cos\theta - m_1 a_N) \\ f_2 &= \mu_2 N_2 = \mu_2 (m_2 g \cos\theta - m_2 \ddot{y}_t) \end{aligned} \right\}$$

式中, μ_1 为鱼头与台面的摩擦系数; μ_2 为鱼身与台面的摩擦系数。由质心的定义可知, 鱼头部分和鱼身部分重力对鱼体质心的合转矩为 0, 略去重力项, 则鱼体绕质心的转矩:

$$T = -f_1 \sin\gamma l_1 \cos\varphi - f_1 \cos\gamma l_1 \sin\varphi - f_2 \sin\delta l_2 \cos\varphi + f_2 \cos\delta l_2 \sin\varphi$$

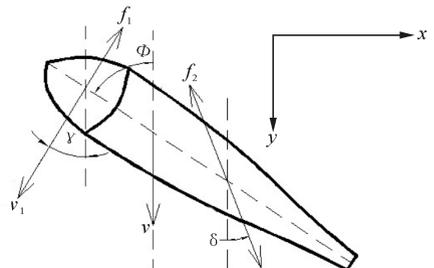


图 5 鱼体动力学分析

Fig.5 Dynamic analysis of the fish

1.3 鱼在振动台面上运动规律的数值模拟

1) 力学模型参数的确定。① 试验对象的体型参数。选择质量为 1 050 g 的白鲢, 鱼体长(不含尾鳍)为 390 mm。采用重心测量方法^[28], 测得鱼重心距吻端距离 155 mm, 试验后将鱼头切下, 测得鱼头质量为 330 g, 鱼身质量为 720 g, 鱼头重心距吻端距离 55 mm, 鱼身重心距吻端距离 190 mm。则鱼头部分质心、鱼身部分质心距离鱼质心部分的距离分别为 $l_1=100\text{ mm}$ 、 $l_2=35\text{ mm}$ 。则试验对象的体型参数为: 鱼整体质量 m 为 1.05 kg, 鱼头质量 m_1 为 0.33 kg, 鱼身质量 m_2 为 0.72 kg, 鱼头距鱼质心距离 l_1 为 0.1 m, 鱼身距鱼质心距离 l_2 为 0.035 m。

② 摩擦系数的测定。设置台面倾角 $\theta=35^\circ$, 将鱼头和鱼身以 20° 体位角初始状态分别放在台面上端(台面静止无振动), 松手后鱼头和鱼身将分别在自身重力的牵引下下滑, 记录鱼头和鱼身从开始运动到离开台面的下滑时间。下滑时间采用下列方法确定: 用高速摄影仪记录整个试验过程, 高速摄影仪的拍摄速率设为 300 fps。试验结束后以 29 fps 的速率回放视频, 记录鱼头和鱼身开始运动的初始时刻 t_1 和离开台面的时刻 t_2 , 则下滑时间为: $t=(t_2-t_1)\times 29/300$ 。鱼体和鱼身的摩擦系数采用下列公式进行计算:

$$\left. \begin{aligned} s &= \frac{1}{2}at^2 \\ a &= g \sin\theta - \mu g \cos\theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, s 为运动的位移, m ; t 摩擦系数测定对象的运动时间, s ; a 为摩擦系数测定对象的运动加速度, m/s^2 ; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 ; θ 为台面倾角, $(^\circ)$; μ 为待测物体的摩擦系数。将 t 代入式(2), 得出鱼头和鱼身与台面间的摩擦系数分别为 $\mu_1=0.3$, $\mu_2=0.48$ 。

③ 其他参数的确定。本研究中, 假设鱼体处于弹性变形阶段, 初取鱼身压缩量为 2 mm, 由胡克定律算得等效弹性系数 $k=3\ 528\text{ N/m}$ 。为了确定等效阻尼系数和鱼体绕质心的转动惯量, 设计如下试验: 设置台面倾角 $\theta=35^\circ$, 激振力与台面夹角 $\alpha=30^\circ$, 偏心距 $r=0.030\ 5\text{ m}$, 电机角速度 $\omega=51.55\text{ rad/s}$ (通过变频器调节, 转速测量仪检测), 将白鲢以初始体位角为 $\varphi=20^\circ$ 的形式摆放, 重复 10 次振动定向试验。测定白鲢在台面上的运动时间和离开台面时的体位角(通过屏幕量角软件测得)。试验结

果, 10 次振动定向试验的最终平均体位角为 160.9° , 平均运动时间为 1.116 s, 将其他参数代入式(1), 结合试验结果, 计算得等效阻尼 $c=50\text{ N}\cdot\text{s/m}$, 系数 $J=0.001\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

2) 定向角的确定。定向效果的评价指标是定向成功率 and 定向时间, 而定向成功率需用定向角来衡量。在振动台面上完成头尾定向后, 鱼将进入一个渐变滑道进行腹背定向。当鱼吻端与滑道内壁接触时, 若 φ 大于某一临界值 φ_1 , 则鱼能完成定向, 而小于该临界值则不能完成定向, 该临界值称为定向角。图 6 为渐变滑道尺寸图, 图中 β 为渐变滑道与其中心线之间的夹角。根据白鲢的体高、体长, 渐变滑道的初始宽度及高度分别设置为 160、400 mm, 其最终宽度为 b , b 为 90~100 mm。由此可算出 β 为 $4.3^\circ\sim 5^\circ$ 。

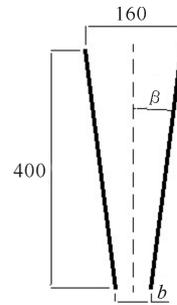


图 6 渐变滑道图

Fig.6 Figure of the gradient slide

图 7 为白鲢定向角的计算图, 图中 y 为白鲢滑动方向, l 为鱼体质心距离吻端的长度, λ 为渐变滑道法线方向与鱼体长方向的夹角 ($\lambda=\varphi-90^\circ-\beta$), p 为鱼吻端受到的渐变滑道的压力, f_k 为吻端受到的摩擦力。

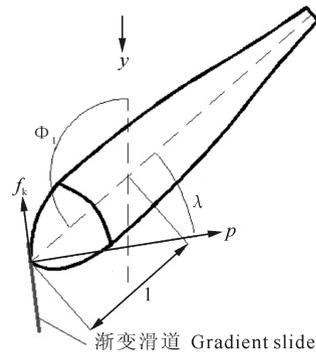


图 7 定向角计算图

Fig.7 Calculation diagram of the orientation angel

若 p 对鱼质心的转矩大于 f_k 对鱼质心的转矩,

则鱼就会继续转动,由此有: $pl\sin\lambda > f_k l\cos\lambda$,即 $pl\sin\lambda > \mu pl\cos\lambda$, $\mu < \tan\lambda$,式中, μ 为鱼吻端与渐变滑道处的摩擦力,试验测得其值为 0.7。可知只要满足 $\varphi > 90^\circ + \beta + \arctan(\mu)$,则鱼能继续转动,由此求出定向角 φ_1 为 130° 。

3) 鱼体在振动台面上运动的数值模拟。鱼体力学模型式(1)是一个高度耦合的方程组,难以求解。因此,本研究采用 Matlab 对其进行数值求解,分析激振力、激振力与台面夹角、台面倾角、激振频率对定向时间(鱼体达到定向角所需时间)的影响。鱼的初始体位角为 0° 时,初始时刻不存在转矩,模拟时,鱼体不发生转动,因此,需设置一定的初始体位角。初始体位角过小,模拟的时间会增大,而初始体位角过大,则失去了模拟的意义,因此,模拟时鱼的初始

体位角设为 20° 。模拟激振力对定向时间的影响时,设定 $\omega = 53.65 \text{ rad/s}$ 、 $\alpha = 30^\circ$ 、 $\theta = 25^\circ$ 。以 $2m_0r$ 来度量激振力的大小,对 $2m_0r$ 为 $0.6 \text{ kg}\cdot\text{m}$ ($F = 1\,727 \text{ N}$)、 $0.5 \text{ kg}\cdot\text{m}$ ($F = 1\,439 \text{ N}$)、 $0.4 \text{ kg}\cdot\text{m}$ ($F = 1\,151 \text{ N}$)、 $0.3 \text{ kg}\cdot\text{m}$ ($F = 863 \text{ N}$)这 4 种情况进行模拟。模拟激振力与台面夹角对定向时间的影响时,设定 $\omega = 53.65 \text{ rad/s}$ 、 $\theta = 25^\circ$ 、 $F = 863 \text{ N}$ 。对 α 为 30° 、 45° 、 60° 、 75° 这 4 种情况进行模拟。模拟台面倾角对定向时间的影响时,设定 $\omega = 53.65 \text{ rad/s}$ 、 $\alpha = 30^\circ$ 、 $F = 863 \text{ N}$ 。对 θ 为 25° 、 30° 、 35° 、 40° 这 4 种情况进行模拟。模拟激振频率对定向时间的影响时,设定 $F = 1\,550 \text{ N}$ 、 $\alpha = 30^\circ$ 、 $\theta = 25^\circ$ 。对 ω 为 50 、 53 、 56 、 59 rad/s 这 4 种情况进行模拟。模拟的结果见图 8。

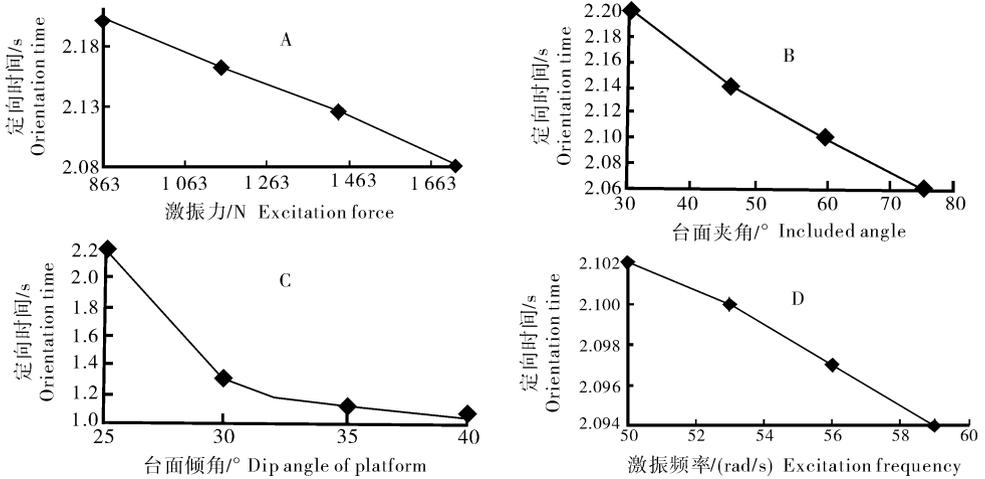


图 8 数值模拟结果

Fig.8 Results of numerical simulation

模拟结果显示,随着激振力、激振力与台面夹角、台面倾角、激振频率的增大,定向时间均随之降低。从图 8A、B、D 可以看出,当激振力、激振力与台面夹角变化、激振力频率增大时,定向时间随之近乎线性下降;而图 8C 中当台面倾角增大时,定向时间先快速下降,随后下降趋势变缓。

1.4 定向试验

1) 试验材料。白鲢质量 $1.00 \sim 1.25 \text{ kg}$;自制振动试验装置(如图 1);EX-F1 高速摄影仪;日本 Casio 公司生产,拍摄帧速设为 300 fps ;泽川 G5M-5.5T4-1A 型变频器;安川电气有限公司生产,适用功率 5.5 kw ,频率调节范围 $0 \sim 50 \text{ Hz}$;DT-2234B 型转速测量仪;广州市速为电子科技有限公司生产,精度为 $\pm 0.05\%$ 。

2) 试验方法。试验主要考察台面的倾角 θ 、激

振力 F 、激振频率 ω 、激振力与台面的夹角 α 对定向的影响。而 $F = 2m_0r\omega^2 \sin(\omega t)$,当仅考察激振力对定向的影响时,可以调节偏心距 r 来改变激振力;当考察激振频率对定向的影响时,仅改变频率是不够的,因为当改变激振频率时,激振力也发生了变化,因此,需要同时改变偏心距。激振频率 ω 的改变通过如下方法实现:通过变频器调节电机频率,同时利用转速测量仪测量。试验因素水平如表 1 所示。

试验指标为定向时间、定向成功率。试验后得出平均定向时间(以下简称定向时间) t_0 、平均最终角度 φ_f (以下简称终角)、平均最终时间 t_f (以下简称终时);定向成功率与定向成功的次数有关,试验时若鱼体最终体位角不小于定向角 130° ,即认为定向成功。根据前期研究经验,设计如下试验过程:每

表 1 试验因素与水平

Table 1 Factors and levels

水平 Level	台面倾角 $\theta/(\circ)$ Dip angle of platform	偏心距 r/m Eccentric distance	频率 $\omega/(\text{rad/s})$ Frequency	夹角 $\alpha/(\circ)$ Included angle
1	25	0.042 9	51.55	30
2	30	0.039 6	53.65	45
3	35	0.035 5	56.70	60
4	40	0.030 5	61.10	75

种因素为 1 组实验, 每组实验下一个水平为 1 轮实验, 每轮试验重复 30 次。为保证与模拟的一致性, 试验时鱼体初始体位角为 20° , 试验过程中用高速摄影仪记录下白鲢的运动情况, 完成 1 轮试验后调整振动台面参数进行下 1 轮试验, 直到完成 1 组试验。

2 结果与分析

2.1 台面倾角对定向时间的影响

设置 $F = 1\ 333.5\ \text{N}$ ($r = 0.030\ 5\ \text{m}$)、 $\alpha = 30^\circ$ 、 $\omega = 56.7\ \text{rad/s}$, 进行台面倾角改变试验, 表 2 是试验的结果。图 9 中 A-D 分别为台面倾角为 25° 、 30° 、 35° 、 40° 时试验所测得的最终角度处于 2 个极限状态的情况。试验结果表明, 随着台面倾角的增大, 平

均时间以及平均终时均减小; 定向成功率皆达到了 100%, 平均终角在 $151^\circ \sim 186^\circ$ 。方差分析结果表明: 台面倾角改变对定向时间的影响极显著 ($P < 0.01$)。

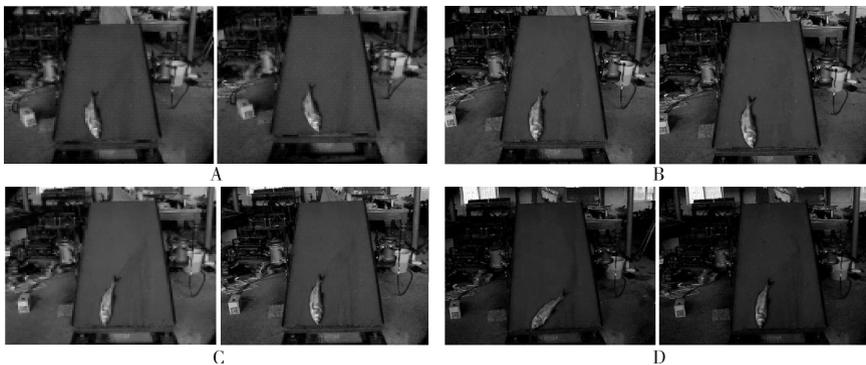
2.2 激振力对定向时间的影响

设置振动设备参数 $\theta = 25^\circ$ 、 $\alpha = 90^\circ$ 、 $\omega = 56.7\ \text{rad/s}$ 进行激振力大小改变试验, 表 3 为试验的结果。图 10A-D 分别为激振力大小为 1 875.7、1 731.4、1 552.1、1 333.5 N 时试验所测得的最终角度处于 2 个极限状态的情况。试验结果表明, 随着激振力大小的增大, 平均时间及平均终时减小; 定向成功率皆达到了 100%, 平均终角在 $170^\circ \sim 175^\circ$ 。方差分析结果表明: 激振力大小对定向时间有极显著影响 ($P < 0.01$)。

表 2 台面倾角改变试验

Table 2 Results of experiment of dip angle's change

台面倾角 $\theta/(\circ)$ Dip angle of platform	成功率 $\sigma/\%$ Success rate	定向时间 t_0/s Orientation time	终角 $\varphi_f/(\circ)$ Final angle	终时 t_f/s Final time
25	100.00	1.268 ± 0.093	185.4 ± 9.1	1.489 ± 0.089
30	100.00	1.096 ± 0.068	177.4 ± 7.4	1.264 ± 0.065
35	100.00	1.004 ± 0.033	172.9 ± 4.4	1.140 ± 0.034
40	100.00	0.878 ± 0.025	151.5 ± 11.9	0.938 ± 0.044



A-D 分别为台面倾角为 25° 、 30° 、 35° 、 40° 时最终角极限状态 A to D show the limit state of final angle of fish body at 25° 、 30° 、 35° 、 40° of dip angle of platform.

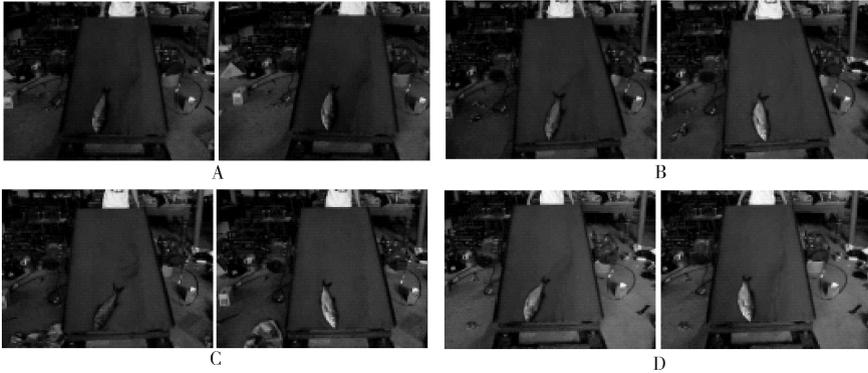
图 9 不同台面倾角下的最终角极限状态

Fig.9 Limit state of final angle under different dip angle of platform

表 3 激振力改变试验

Table 3 Results of experiment of exciting force size's change

激振力 F/N Excitation force	成功率 $\sigma/\%$ Success rate	定向时间 t_0/s Orientation time	终角 $\varphi_f/(\circ)$ Final angle	终时 t_f/s Final time
1 875.7	100.00	0.922 ± 0.034	174.0 ± 3.6	1.040 ± 0.040
1 731.4	100.00	0.988 ± 0.060	172.9 ± 7.7	1.099 ± 0.083
1 552.1	100.00	1.049 ± 0.056	175.0 ± 14.8	1.190 ± 0.078
1 333.5	100.00	1.125 ± 0.034	170.0 ± 10.2	1.242 ± 0.030



A-D 分别为激振力大小为 1 875.7、1 731.4、1 552.1、1 333.5 N Limit state of final angle when excitation force is 1 875.7、1 731.4、1 552.1、1 333.5 N.

图 10 不同激振力大小下的最终角极限状态

Fig.10 Limit state of final angle under different excitation force

2.3 激振力与台面夹角对定向时间的影响

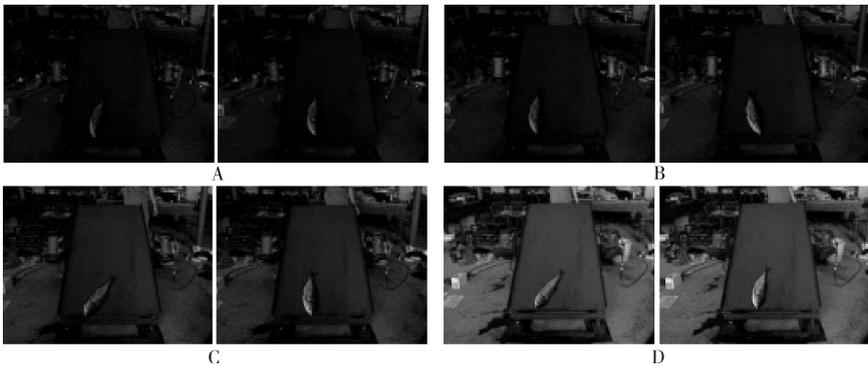
设置振动设备参数 $F = 1\ 333.5\ N$ 、 $\theta = 25^\circ$ 、 $\omega = 56.7\ rad/s$ 行激振力与台面夹角改变试验,表 4 为试验的结果。图 11 中 A-D 分别为激振力与台面夹角为 30° 、 45° 、 60° 、 75° 时试验所测得的最终角度处

于 2 个极限状态的情况。试验结果表明,随着激振力与台面夹角的增大,平均时间以及平均终时减小;定向成功率虽然均为 100%,但可以看出平均终角呈现出减小的趋势。方差分析结果表明,激振力与台面夹角对定向时间的影响极显著($P < 0.01$)。

表 4 激振力与台面夹角改变试验

Table 4 Results of experiment of angel change between exciting force and platform

夹角 $\alpha/(\circ)$ Included angle	成功率 $\sigma/\%$ Success rate	定向时间 t_0/s Orientation time	终角 $\varphi_f/(\circ)$ Final angle	终时 t_f/s Final time
30	100.00	1.410 ± 0.135	176.9 ± 3.9	1.598 ± 0.128
45	100.00	1.184 ± 0.052	182.2 ± 5.4	1.353 ± 0.055
60	100.00	1.175 ± 0.021	161.2 ± 13.3	1.266 ± 0.033
75	100.00	1.171 ± 0.034	150.0 ± 10.3	1.217 ± 0.045



A-D 分别为激振力与台面夹角为 30° 、 45° 、 60° 、 75° 时最终角极限状态 Limit state of final angle when angle between exciting force and platform is 30° 、 45° 、 60° 、 75° .

图 11 不同夹角下的最终角极限状态

Fig.11 Limit state of final angle under different angle between excitation force and platform

2.4 激振频率对定向时间的影响

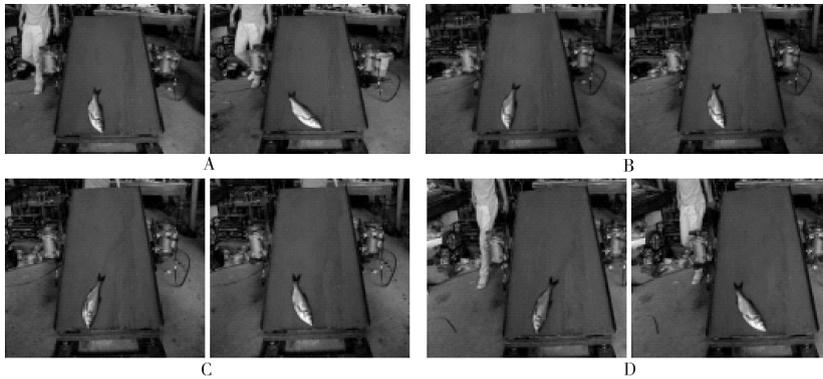
设置振动设备参数 $F=1\ 333.5\ \text{N}$ 、 $\theta=25^\circ$ 、 $\alpha=30^\circ$ 进行激振频率改变试验, 表 5 为试验的结果。图 12 中 A-D 分别为激振频率为 51.55、53.65、56.7、61.1 rad/s 时试验所测得的最终角度处于 2 个极限

状态的情况。试验结果表明, 激振力不变, 而激振力频率增大时, 平均时间以及平均终时先增大后减小; 定向成功率均达到了 100%, 平均终角先减小后增大, 继而再呈现减小的趋势。方差分析结果表明, 激振力频率对定向时间的影响极显著 ($P<0.01$)。

表 5 激振频率改变试验

Table 5 Results of experiment of frequency change of exciting force

激振频率 ω /(rad/s) Excitation frequency	成功率 σ % Success rate	定向时间 t_0 /s Orientation time	终角 φ_f (°) Final angle	终时 t_f /s Final time
51.55	100.00	1.427±0.214	209.3±12.8	1.677±0.208
53.65	100.00	1.644±0.177	183.4±8.4	1.854±0.176
56.70	100.00	1.495±0.131	189.6±14.3	1.701±0.144
61.10	100.00	1.321±0.115	188.8±16.5	1.539±0.139



A-D 分别为激振频率为 51.55、53.65、56.70、61.10 rad/s 时最终角极限状态 Limit state of final angle when exciting frequency is 51.55, 53.65, 56.70, 61.10 rad/s.

图 12 不同激振频率下的最终角极限状态

Fig.12 Limit state of final angle under different excitation frequency

3 讨论

研究表明^[24], 相对于圆振动这种形式, 往复振动设备在实现鱼体头尾腹背定向时具有更高的成功率。本研究的数值模拟和试验结果均表明, 往复振动平台能实现鱼体的头尾定向, 因此, 采用振动平台进行鱼体定向整理是可行的, 在适宜的参数范围内, 定向成功率可以达到 100%。鱼体头尾定向时间随台面倾角的增大、激振力的增大、激振力与台面夹角的增大和激振频率的增大而降低。但激振力大小与激振频率的增大将受到振动平台强度的限制。采用本研究所得出的鱼体运动模型, 对各因素对定向效果影响的数值模拟结果与试验结果一致, 表明本研究所得出的鱼体运动模型能较好地描述鱼体在振动平台上的运动。本研究所建立的理论模型对于频率对定向的影响不能完全描述, 可能的原因是: 理论分析采用的是线性模型, 计算时弹性系数和阻尼系数不随频率变化, 而实际上当频率变化时, 用于建模的弹性系数和阻尼系数都将发生变化。试验时鱼体的

参数也会有所改变, 并不一定完全符合计算的参数, 因而理论分析只能作定性分析。本研究中物理建模时只把鱼体分成了两个部分, 进一步研究时可考虑将整条鱼分为多个部分, 使之成为多自由度模型, 对每部分进行物理建模, 这样可使得推导的结果更加准确, 更切合实际。

参 考 文 献

- [1] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴 2015[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- [2] 宋迁红, 赵永锋. 我国淡水鱼加工产业浅析[J]. 科学养鱼, 2014(9): 12-14.
- [3] 柏芸, 熊善柏. 我国淡水鱼加工业现状、问题与对策[J]. 湖北农业科学, 2010(12): 3159-3161.
- [4] 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: 43-46.
- [5] 王坤殿, 万鹏, 谭鹤群, 等. 淡水鱼体质量在线检测及分级系统的设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2016, 35(2): 122-128.
- [6] WHITE D J, SWELLINGEN C, STRACHAN N J C. Automated measurement of species and length of fish by computer vision[J]. Fisheries research, 2006, 80(4): 203-210.

- [7] 张志强.基于机器视觉的淡水鱼品种识别及重量预测研究[D].武汉:华中农业大学,2011.
- [8] 吕飞,沈军梁,金炉俊,等.鱼皮酶法去鳞技术的研究[J].浙江农业科学,2013(7):872-874.
- [9] 程世俊,万鹏,宗力,等.连续式弹簧刷去鳞机的研制与试验[J].渔业现代化,2012(3):46-50.
- [10] 莫盛秋.一种鱼类去鳞开膛机的设计[J].中国农机化学报,2013(6):236-238.
- [11] 彭三河,徐武.链式淡水鱼加工前处理装置的研制[J].食品与机械,2013(2):139-142.
- [12] 张帆,万鹏,宗力,等.白鲢鱼头切割力学特性的试验与分析[J].华中农业大学学报,2016,35(3):122-127.
- [13] 陈庆余,沈建,欧阳杰,等.典型海产小杂鱼机械去脏试验[J].农业工程学报,2013,29(20):278-285.
- [14] PEGORARO G, WADELL L G A. Apparatus for aligning and uniformly orienting fish;5291983[P].1994-03-08.
- [15] 徐颂波,徐学渊.鱼体定向输送装置设计的可行性分析[J].浙江水产学院学报,1990(2):131-134.
- [16] KHALEDIAN M R, MAILHOL J C, RUELLE P, et al. Adapting PILOTE model for water and yield management under direct seeding system: the case of corn and durum wheat in a mediterranean context [J]. Agricultural water management, 2009,96(5):757-770.
- [17] HARUN Y, ENGIN C. Tillage effects and energy efficiencies of subsoiling and direct seeding in light soil on yield of second crop corn for silage in Western Turkey[J]. Soil and tillage research, 2006,90(1/2):250-255.
- [18] 张斌,俞亚新.超级稻稻种定向播种的原理研究[J].浙江理工大学学报,2008(4):454-456.
- [19] 俞亚新,赵匀,张斌,等.基于稻种胚胎定向排列的排种器及参数优化[J].江苏大学学报,2008,29(3):194-197.
- [20] 荐世春,刘云东.大蒜播种机蒜瓣自动定向控制装置的试验研究[J].农业装备与车辆工程,2009(10):28-29.
- [21] 李建平,赵匀,臧少锋,等.有序抛秧振动输送机构的模态分析与试验研究[J].农业工程学报,2005,21(3):115-117.
- [22] 朱梅,管巧娟.气动人工肌肉驱动的定向传送振动盘设计[J].液压与气动,2008(2):9-10.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 哈尔滨工业大学理论力学教研室.理论力学[M].7版.北京:高等教育出版社,2009:264-273.
- [26] 师汉民,黄其柏.机械振动系统—分析、建模、测试、对策[M].3版.武汉:华中科技大学出版社,2013:39-40.
- [27] SINGIRESU S R.机械振动[M].4版.李欣业,张明路,译.北京:清华大学出版社,2009:216-219.
- [28] 雷树德.小型剖鱼机的研制[D].武汉:华中农业大学,2009.
- [29] 张乾能,朱国,宗力.鲢鱼鱼体抗压特性的研究[J].食品科学,2009,30(11):95-98.

Theoretical analysis and experimental study about head-tail orientation rule of silver carp on vibration platform

XIANG Yunpeng TAN Hequn WAN Peng HUANG Pengfei YANG Chongxing

College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract The inclined vibration platform and silver carps were used to explore theoretical basis of the vibration device for orientating fish's head and tail. The motion rules of silver carps on the platform were theoretically studied. After obtaining parameters of a fish, the movement of the fish on the inclined vibration platform was simulated by Matlab. The relationship of orientation time with size of excitation force, angle between excitation force and platform, dip angle of platform and frequency of excitation force was investigated. Taking self-manufactured orientation equipment as test equipment, high-speed camera as monitoring device and silver carps weighted about 1 kg as research objects, the orientation time and orientation success rates under different input parameters were studied. Based on the results of numerical simulation and experiment, the rules of orientation time and success rates with size of exciting force, angle between exciting force and platform, dip angle of platform and frequency of exciting force were described, which will provide important basis for designing the orientation device of freshwater fish head and tail.

Keywords silver carps; vibration orientation; orientation of head and tail; orientation time; excitation force

(责任编辑:陆文昌)