

# 车载活鱼运输制动阶段力学特性

涂群资<sup>1</sup> 杨咏文<sup>1</sup> 黄汉英<sup>1</sup> 李路<sup>1</sup> 赵思明<sup>2</sup> 熊善柏<sup>2</sup>

1. 华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070;

2. 华中农业大学食品科学技术学院, 武汉 430070

**摘要** 以鲫、草鱼、鳊、黄颡鱼为试验材料, 研究车载活鱼在直线加减速运输过程中鱼体受力情况。利用最小二乘法, 以高斯函数作为拟合函数, 分别对以 40、60、80 km/h 直线行驶时制动阶段的力值曲线进行拟合, 运用粒子群算法对拟合后曲线进行优化, 最终曲线的决定系数为 0.902~0.986, 标准误差为 0.058~0.145, 拟合效果良好。分析了不同种类鱼和车速对拟合曲线的影响, 结果表明, 直线行驶时速度越大, 制动阶段拟合曲线的比例系数及峰宽参数越大, 在相同情况下, 制动时鲫所受冲击最大(38.02 N), 黄颡鱼最小(15.69 N), 直线行驶时的车速和鱼的种类对位置参数无明显影响, 直线行驶时的车速对拟合曲线的指数无明显影响。最后对制动阶段压力测试板进行受力分析, 结果表明, 制动阶段压力实测值较理论值相比偏小, 相对误差在 15.990% 以内。

**关键词** 活鱼运输; 制动力学曲线; 曲线拟合; 最小二乘法; 粒子群算法

**中图分类号** S 981.16 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2019)04-0143-06

水果、禽蛋、猪、牛等在运输中难免会受到振动、挤压等胁迫, 相关研究主要集中在模拟运输振动对果品、蛋品的影响上<sup>[1-3]</sup>, 以及猪、牛等在运输中的应激反应上<sup>[4-5]</sup>, 而对活鱼运输中力学特性方面的研究还鲜见报道。目前国内外活鱼运输的研究主要集中于采用麻醉<sup>[6]</sup>、低温运输<sup>[7-8]</sup>、水质调节<sup>[9-10]</sup>等技术和方法来提高活鱼运输的存活率, 以及研究不同运输条件下鱼的生理应激反应与鱼肉品质的变化<sup>[6, 11]</sup>。然而, 活鱼在运输过程中由于路况及车况变化, 不同鱼种力学特性不同<sup>[12]</sup>, 鱼体会受到碰撞、挤压等外力的影响, 过度的外力作用会导致鱼体损伤和生理功能的紊乱, 影响鱼肉品质, 严重的甚至导致死亡<sup>[13-15]</sup>。因此, 对活鱼运输过程中的力学特性研究具有十分重要意义。笔者开展对车载活鱼运输力学特性的研究, 建立车载活鱼运输制动阶段的力学模型, 旨在为车载活鱼运输应激研究和运输装备研制提供理论依据和基础参数。

## 1 材料与方法

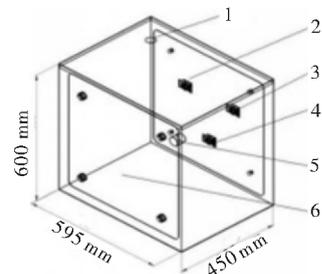
### 1.1 试验材料

试验鱼来自湖北省洪湖市大型水产市场, 暂养于试验生态水槽中, 水温(10±0.2)℃, 保证鱼的

健康及活性。鱼总质量约为 64.0 kg。其中, 鲫平均质量(350±35)g/尾, 草鱼平均质量(1 250±125)g/尾, 鳊平均质量(550±55)g/尾, 黄颡鱼平均质量(200±30)g/尾。

### 1.2 试验设备与仪器

1) 鱼箱。自制亚克力材料鱼箱, 总容积: 160 L。如图 1 所示。



1: 进水口 Water intake; 2, 3, 4: 单点传感器 Single point sensor; 5: 出水口 Water outlet; 6: 压力测试板 Pressure test board.

图 1 鱼箱结构示意图

Fig.1 Structure diagram of fish tank

2) 压力数据采集系统。压力测试采用 7 个电阻应变式传感器, 其中 3 个量程为 50 N 的传感器分别独立安装, 用于测量单点冲击力, 4 个量程为 300 N 的传感器合并安装构成 1 个压力测试板(量程为

收稿日期: 2018-08-13

基金项目: 现代农业产业技术体系专项资金(CARS-45-27)

涂群资, 硕士研究生, 研究方向: 智能化检测与控制技术. E-mail: tqz20170214@163.com

通信作者: 黄汉英, 副教授, 研究方向: 智能化检测与控制技术. E-mail: hhywmx@mail.hzau.edu.cn

1 200 N)。压力传感器安装于鱼箱内壁,如图 1、图 2 所示。传感器精度 0.5%,防水等级为 IP 68,传感器输出信号经过滤波放大器后,整定为 $\pm 5$  V 的标

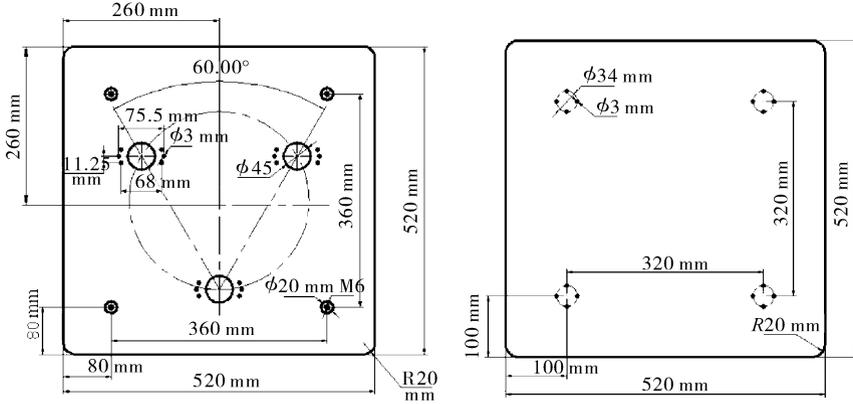


图 2 传感器位置示意图

Fig.2 Location diagram of sensors

集前将流体静压置零,压力测试板和单点压力传感器测试的压力来自流体动压,鱼和水密度近似相等,故鱼受力近似等于水受力。

### 1.3 试验方案

运输车为福特全顺 15 座商务车,拆除后座,将鱼箱安装在运输车后座处,鱼箱摆放方向:压力测试板靠近车头。一般情况下,水产品活体运输时鱼水质量之比为 1:1~1:3<sup>[16]</sup>,本试验鱼水质量比为 1:1,鱼箱装载量 80%。试验场地:湖北省洪湖市新堤大道(4 车道公路),车道宽 3.25 m。

车辆直线加减速行驶。运输车载试验鱼分别从静止以约  $1 \text{ m/s}^2$  的加速度加速到 40 km/h,匀速保持 30 s,再制动至汽车静止,制动加速度约  $-2 \text{ m/s}^2$ ,测量并记录此过程的力值信息,重复 3 组。在此试验基础上,分别提高速度至 60、80 km/h,重复上述试验过程和操作,依次对鲫、草鱼、鳊、黄颡鱼进行同样试验。

### 1.4 数据预处理

本研究在数据采集过程中由于传感器采样频率高且采集过程混杂有振动、噪声等干扰成分,导致后续的数据分析和处理产生了误差甚至错误。为了能够从获取的力值信息中快速、有效地提取出有用的特征信息,需要对力值曲线进行滤波、平滑等处理以减小或消除信号中的干扰<sup>[17]</sup>。本研究运用 Matlab 中 smooth 函数对力值信息进行平滑滤波,其原理是对其进行低通滤波处理。

### 1.5 曲线拟合及参数优化

本研究应用最小二乘法对直线行驶状态制动阶

准电压信号。用高速采集卡(采样频率 100 kHz),试验中设置采样频率为 2.5 kHz,使用配套应用软件对压力信号进行采集、显示和保存。试验数据采

段力值曲线进行拟合,拟合函数为高斯函数(Gaussian),力值曲线拟合公式如下:

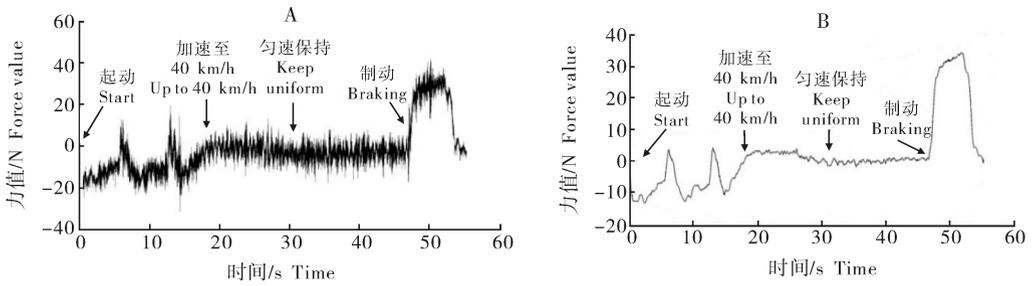
$$F = ae^{-\left|\frac{t-b}{c}\right|^n} \quad (1)$$

式(1)中, $F$  为力值, $t$  为时间, $a$  为比例系数, $b$  为曲线峰值位置参数, $c$  是曲线的峰宽参数, $c$  越大,曲线峰越宽。指数  $n$  与曲线形状有关,当  $n > 3$  时,曲线接近方波。拟合过程在 Matlab 曲线拟合工具箱中实现。曲线拟合之后,采用粒子群算法对拟合参数进行优化。粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)是计算智能领域的一种群体智能的优化算法,该算法是在对鸟类捕食行为的研究中发现的,当鸟类进行捕食时,获取食物最快最直接的方法就是搜索目前距离食物最近的鸟的周围区域,是一个不断寻求局部最优解和全局最优解的过程<sup>[18]</sup>。拟合结果的评价指标:决定系数  $R^2$  越接近 1,标准误差 RMSEC 越接近 0,说明拟合效果越好。

## 2 结果与分析

### 2.1 直线行驶力值曲线

车载鲫运输直线行驶力值曲线滤波处理前后对比如图 3 所示。由图 3 可知,力值曲线平滑效果较好,既保留了原曲线的变化趋势,又消除了尖峰脉冲对结果分析造成的影响。行驶过程中,起动加速度约  $1 \text{ m/s}^2$ ,制动加速度约  $-2 \text{ m/s}^2$ 。由图 3B 可知,运输车起动阶段力值曲线出现 2~3 次波峰,是由于车辆换挡所致。运输车在匀速保持阶段,鱼受到的压力几乎为零,出现一个较大波峰,是由于制动



鲫 Crucian, 40 km/h, 1 m/s<sup>2</sup>; A: 原始力值曲线 The original force value curve; B: 平滑滤波力值曲线 Smoothing force value curve.

图 3 车载活鱼运输力值曲线

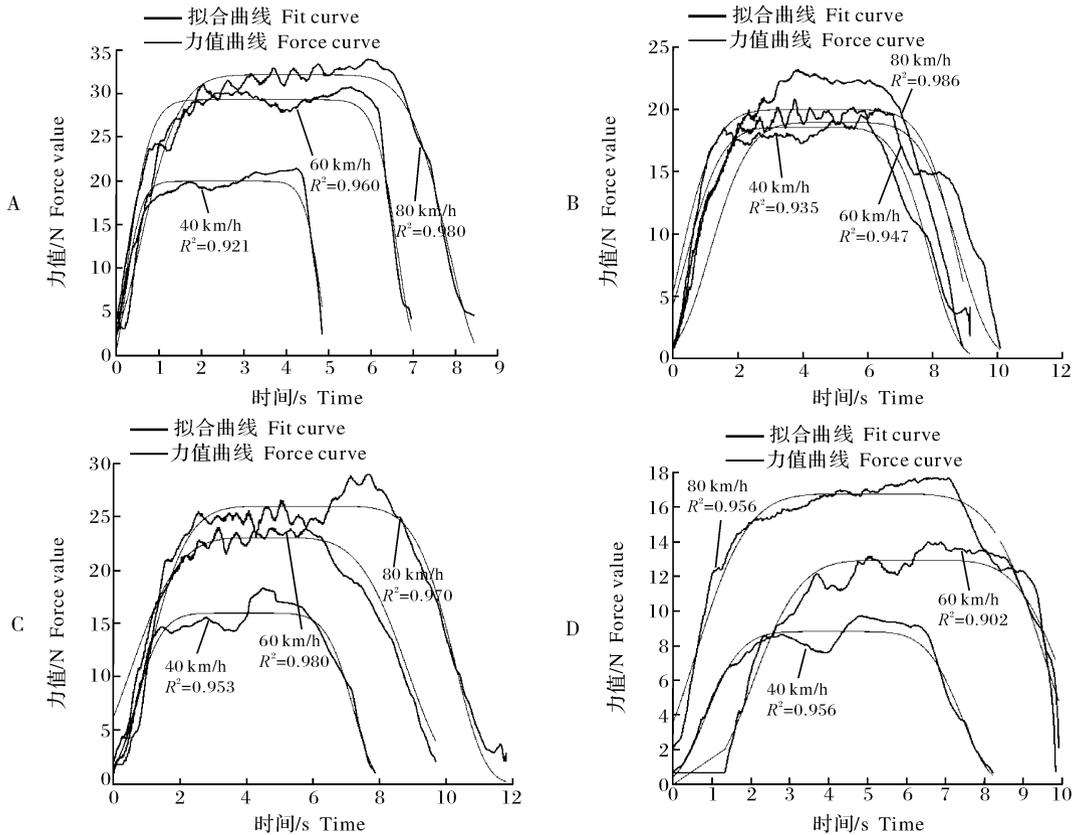
Fig.3 Force value curve of live fish transportation

惯性所致,即制动过程鱼受到的压力最大,不同车辆行驶条件下制动曲线因车速与鱼的种类不同而有差异。

### 2.2 制动阶段力值曲线拟合

采用本文“1.5”中公式(1)对力值曲线进行拟合,利用粒子群算法优化后的力值曲线如图 4 所示,各行驶参数下拟合指标如表 1 所示,车速对 a、b、c、n 的影响如图 5 所示。由图 4 可知,4 种鱼在制动过程中平稳状态时的力值随行驶速度的增加而增加,

这是由于行驶速度越大,加速过程越长,维持加速需要的力越大,鱼体所受的力越大。由表 1 可知,采用上述优化方法对不同种类鱼及不同行驶速度下的制动阶段力值曲线拟合决定系数为 0.902~0.986,标准误差为 0.058~0.145,拟合效果良好。由图 5 可知,比例系数 a 与车速成线性关系,车速越高,比例系数 a 越大,制动时鱼体受到的力也越大。其中,鲫的比例系数最大,黄颡鱼的比例系数最小,草鱼和鳊的比例系数基本接近,这说明在相同条件



A: 鲫 Crucian; B: 草鱼 Grass carp; C: 鳊 Bream; D: 黄颡鱼 Yellow catfish.

图 4 制动阶段曲线拟合

Fig.4 Curve fitting of braking stage

表 1 拟合模型评价指标

Table 1 The evaluation index of fitted model

试验用鱼 Tested fish	行驶速度/(km/h) Speed	决定系数 $R^2$	定标标准差 RMSEC	剩余平方和 RSS	回归平方和 ESS
鲫 Crucian	40	0.921	0.121	180.063	2 276
	60	0.960	0.142	348.821	8 438
	80	0.980	0.124	320.874	16 374
草鱼 Grass carp	40	0.935	0.139	356.811	6 765
	60	0.947	0.119	445.163	6 649
	80	0.986	0.076	130.839	9 107
鳊 Bream	40	0.953	0.102	206.587	4 354
	60	0.980	0.093	211.190	10 271
	80	0.970	0.145	608.248	1 937
黄颡鱼 Yellow catfish	40	0.956	0.058	68.879	1 545
	60	0.902	0.093	185.129	1 907
	80	0.956	0.081	167.577	3 643

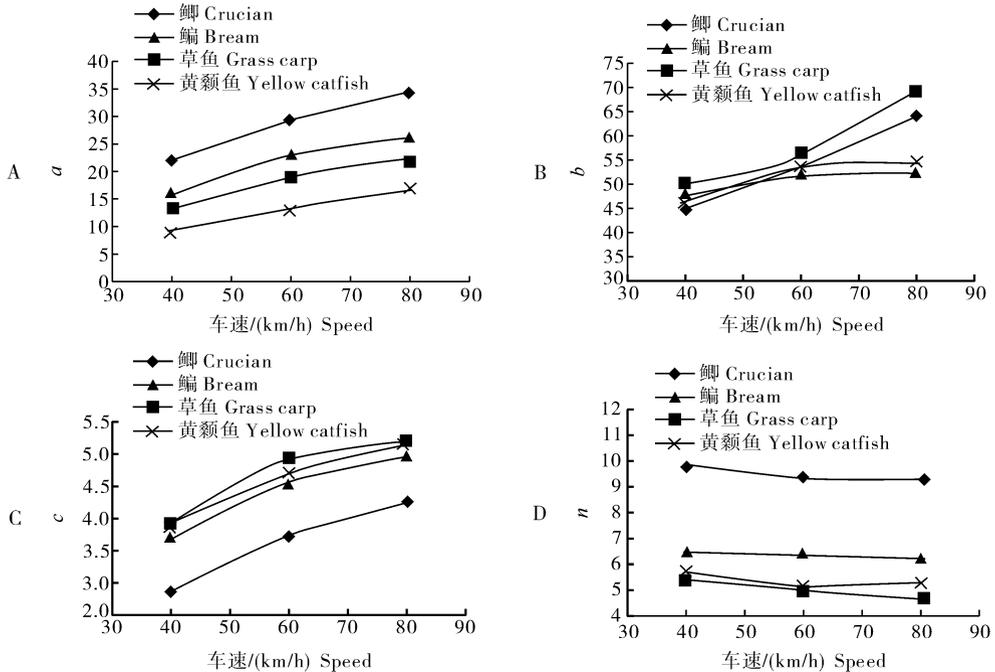


图 5 车速和鱼种对  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $n$  的影响

Fig.5 The speed of vehicles and fish species impacts on  $a, b, c, n$

下的制动过程中,鲫所受冲击最大,黄颡鱼最小。位置参数  $b$  与车速无关,只与制动时刻有关,在高速时其值略微升高,主要原因是高速时计时误差引起的。制动曲线的峰宽参数  $c$  随车速升高而升高,即车速越高,制动所需时间越长,制动峰越宽。鲫的峰宽最小,黄颡鱼的峰宽最大,草鱼和鳊的峰宽基本接近,这说明在制动过程中,鲫制动时间最短,受到的瞬间冲击最大,黄颡鱼制动时间最长,受到的瞬间冲击最小。拟合曲线的指数  $n$  大于 4,即制动曲线均为方波,与车速无关。

### 2.3 制动阶段受力分析

车辆制动过程中力值的变化趋势:先上升至峰值,继而稳态保持一段时间后下降。这主要是制动后鱼和水的惯性对压力测试板撞击所致。

现对理论动压<sup>[19]</sup>计算,如图 6 所示,压力测试板竖直无倾角,液面高度为  $h$ ,压力测试板底部距箱底部距离为  $a$ ,宽度为  $b$ ,一般鱼和水的密度接近,设鱼水流体密度为  $\rho$ (本研究按  $\rho=1 \text{ g/cm}^3$  计算)。假设运输车制动时,流体相对压力测试板匀速流动,速度为  $V_1(V_1=a_1t_1$ ,其中  $a_1$  为制动加速度, $t_1$  为

制动时力值上升至峰值所用的时间),则流体产生的压力  $F$  可按下式计算:

$$F = \rho Q V_1 \quad (2)$$

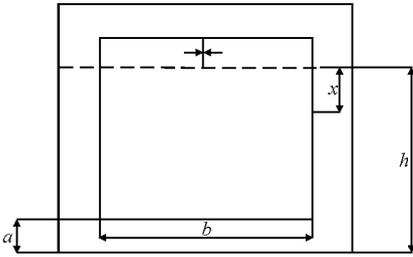


图 6 鱼箱左视图

Fig.6 Left view of fish tank

式(2)中,  $Q$  为接触压力测试板的流体流量,  $Q = S \cdot V_1$ ;  $S = (h - a) \cdot b$  为压力测试板的面积。

则压力测试板所受流体压力:

$$F = \rho Q V_1 = \rho Q V_1^2 = \rho b (h - a) V_1^2 \quad (3)$$

本研究中,  $b = 520 \text{ mm}$ ,  $a = 75 \text{ mm}$ ,  $h = 525 \text{ mm}$ 。经计算,制动阶段压力理论值和实测值的误差如表 2 所示。由表 2 可知,理论计算值比实测值略大,在低速制动时(40 km/h),实测压力值与理论计算值误差较小,小于 5.576%;而在高速制动时(60,80 km/h)误差较大,最大误差为 15.990%,这是因为在高速运行时,制动加速度和制动时间的测量误差较大。

表 2 制动压力实测值与理论值的误差

Table 2 Error of measured value and theoretical value of brake pressure

行驶速度/(km/h) Speed	测试鱼类 Tested fish	实测值/N Measured value	理论值/N Theoretical value	相对误差/% Relative error
0	无鱼 No fish	0.676	0.686	1.450
40	鲫 Crucian	21.521	22.295	3.597
40	草鱼 Grass carp	18.169	18.973	4.423
40	鳊 Bream	15.641	16.513	5.576
40	黄颡鱼 Yellow catfish	8.634	9.016	4.427
60	鲫 Crucian	28.704	32.791	14.237
60	草鱼 Grass carp	18.542	21.413	15.486
60	鳊 Bream	22.579	26.097	15.582
60	黄颡鱼 Yellow catfish	12.681	14.426	13.756
80	鲫 Crucian	38.024	42.748	12.423
80	草鱼 Grass carp	21.707	25.176	15.982
80	鳊 Bream	25.470	29.371	15.314
80	黄颡鱼 Yellow catfish	15.690	18.199	15.990

### 3 讨论

利用最小二乘法,以高斯函数作为拟合函数,对鲫、草鱼、鳊和黄颡鱼分别以 40、60、80 km/h 直线行驶时制动阶段的力值曲线进行拟合,运用粒子群算法对拟合后曲线进行优化,最终拟合效果良好。同时分析了不同种类鱼和车速对拟合曲线的影响,当直线行驶时速度越大,制动阶段拟合曲线的比例系数及峰宽参数越大,在相同情况下,制动时鲫所受冲击最大,黄颡鱼最小。另外在直线行驶时的车速和鱼的种类对位置参数无明显影响,直线行驶时的车速对拟合曲线的指数无明显影响。最后对制动阶段压力测试板进行受力分析,结果表明制动阶段压力实测值与理论值相比偏小。本研究试验时汽车行驶由人工操作且路况复杂,使得数据采集存在误差,并且鱼体所受冲击力复杂,由鱼体间的作用力、鱼体与水间的摩擦力、鱼体与箱体间的作用力和鱼体本身的重力等构成,在后续研究中,应选择质量相近的鱼进行试验,以此来分析鱼体在不同运动情况下的

受力特点,并利用拟合曲线对车载活鱼在直线加减速运输过程中鱼体受力情况进行预测验证,以获得活鱼在运输阶段的适宜压力范围,为活鱼运输提供理论支持。

### 参 考 文 献

- [1] 潘俨,车凤斌,董成虎,等.模拟运输振动对新疆杏呼吸途径和品质的影响[J].农业工程学报,2015,31(3):325-331.
- [2] 李萍.黄花梨模拟运输振动引起的机械损伤与品质损害[D].杭州:浙江大学,2014.
- [3] 白红武,滕光辉,袁正东,等.鸡蛋在运输中产生破蛋的试验研究[J].中国家禽,2005,27(23):4.
- [4] 全炳昭,章寿民,邵莹,等.长途运输性应激对商品猪的影响[J].中国农业科学,1986,19(5):95.
- [5] 邓红雨.公路运输条件下牛的运输应激反应研究[D].郑州:河南农业大学,2013.
- [6] 刘骁,谢晶,杨茜,等.无水保活条件下团头鲂生理应激及鱼肉品质的变化[J].农业工程学报,2016,32(3):295-300.
- [7] 聂少伍,洪苑乾,黄汉英,等.低温活鱼运输箱监控系统研制[J].渔业科学进展,2014(4):110-117.
- [8] 朱健康,卢俊杰,游远新,等.海水活鱼运输装置及应用效果试验[J].农业工程学报,2005,21(10):187-189.

- [9] 胡培培,刘汝鹏,赵忠波,等.运输时间和密度对翘嘴鲌皮质醇、耗氧率及氧气袋内水质的影响[J].水生生物学报,2014,38(6):1190-1194.
- [10] 洪苑乾,胡月来,黄汉英,等.活鱼运输箱水质自动监控系统的研究[J].渔业现代化,2013(5):48-52,63.
- [11] 徐钢春,杜富宽,聂志娟,等.10‰盐度对长江刀鲚幼鱼装载和运输胁迫中应激指标的影响[J].水生生物学报,2015,39(1):66-72.
- [12] 常正,黄汉英,涂群资,等.车载活鱼力学响应特性[J].华中农业大学学报,2018,37(2):117-121.
- [13] 李勇男,刘海英,苏从毅.鱼类的运输应激反应诱发因素、影响及缓解措施[J].食品工业科技,2015,36(23):391-394.
- [14] VEISETH-KENT E.Changes in muscle and blood plasma proteomes of Atlantic salmon (*Salmo salar*) induced by crowding [J].Aquaculture,2010,309(4):272-279.
- [15] LÓPEZ-PATIÑO M A, HERNÁNDEZ-PÉREZ J, GESTO M, et al.Short-term time course of liver metabolic response to acute handling stress in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* [J].Comparative biochemistry & physiology part a molecular & integrative physiology,2014,168(2):40-49.
- [16] 谢佳彦,朱爱意.几种重要水产品活体运输技术研究[J].水产科学,2010,29(9):532-536.
- [17] 肖立波,任建亭,杨海峰.振动信号预处理方法研究及其 MATLAB实现[J].计算机仿真,2010(8):330-333;337.
- [18] 刘建华,张永晖,周理,等.一种权重递增的粒子群算法[J].计算机科学,2014,41(3):59-65.
- [19] 黑慧欣,罗照华,程金华,等.攀西地区镁铁质岩浆成矿系统的流体动力学模型[J].地学前缘,2015,22(3):333-347.

## Mechanical characteristics of vehicle-mounted live fish in transport braking phase

TU Qunzi<sup>1</sup> YANG Yongwen<sup>1</sup> HUANG Hanying<sup>1</sup> LI Lu<sup>1</sup> ZHAO Siming<sup>2</sup> XIONG Shanbai<sup>2</sup>

1.College of Engineering, Huazhong Agricultural University/  
Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River,  
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China;

2.College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University,  
Wuhan 430070, China

**Abstract** Crucian, grass carp, bream and yellow catfish were used to study the stress distribution of car-borne live fish in the process of linear acceleration and deceleration. Using the least squares method and Gaussian function as the fitting function, the force value curves of the braking phase when traveling in a straight line of 40, 60, 80 km/h were respectively fitted, and the particle swarm algorithm was used to optimize the curve after fitting. The final curve had a coefficient of determination between 0.902 and 0.986, and the standard error was between 0.058 and 0.145. The fitting effect was good. The results of analyzing effects of different types of fish and vehicle speed on the fitting curve showed that the greater the speed in straight-line driving, the larger the proportional coefficient and peak width parameter of the braking curve of the braking phase. Under the same situation, the squid was most affected by the braking (38.02 N) and the carp was the smallest (15.69 N). The speed of the vehicle and the type of fish in the straight line had no obvious influence on the position parameters, and the speed of the vehicle during straight running had no significant influence on the index of the fitted curve. The results of analyzing the force of the pressure test board in the braking phase showed that the measured value of the pressure in the braking phase was smaller than the theoretical value, and the relative error was less than 15.990%.

**Keywords** transportation of live fish; braking mechanical curve; curve fitting; least squares; particle swarm optimization