doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.018

水产养殖无人导航明轮船运动仿真与试验

洪剑青^{1,2} 赵德安¹ 孙月平¹ 张 军¹ 刘星桥¹ (1.江苏大学电气信息工程学院,镇江 212013; 2.镇江市高等专科学校机械系,镇江 212003)

摘要:无人导航明轮船依据目前经验公式计算的明轮推力和实际推力偏差较大,不利于控制系统的设计,为此给出 明轮驱动力计算方法,建立明轮船水动力仿真模型,并据此进行了正航和回转仿真。为验证模型,在试验艇上安装 高精度 GPS 设备及通信装置,在设定明轮船航速 0.4 m/s、左明轮转速 60 r/min、右明轮转速 40 r/min 条件下进行了 试验,测量并记录了航行轨迹数据,经 GPS 设备测量得到的回转直径为 3.2 m。仿真和试验结果表明,通过控制明 轮可以使明轮船实现正航和回转运动,具有较好的低速机动性和操纵性。

关键词:水产养殖;明轮船;运动模型;导航;仿真

中图分类号: S969.19; U664.32 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)03-0124-07

Motion Simulation and Test of Aquaculture Unmanned Navigation Paddlewheel Vehicle

Hong Jianqing^{1,2} Zhao Dean¹ Sun Yueping¹ Zhang Jun¹ Liu Xingqiao¹

School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
 Department of Mechanical Engineering, Zhenjiang College, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Those works of aquaculture, such as cleaning aquatic weed, feeding, and increasing the oxygen content in the water body and so on were tedious and burdensome. China's aging population led to labor tensions, high labor costs. In order to solve the employment problem of the aquaculture industry, reduce labor costs and improve labor efficiency, a universal water surface operating platform for the aquaculture industry-unmanned navigation paddlewheel vehicle was proposed. The characteristics of the boat motion were analyzed; the method for calculating the paddlewheel driving force was gave according to the hydrodynamic theory and Newton's law, which overcame larger error by using the old original formula. The hydrodynamic equations of the paddlewheel vehicle were constructed, based on the characteristics of paddle vehicle movement and Fossen's theory of ship motion model, and then was simulated by computer and experimented by experimental boat. With an installed high-precision GPS equipments and communications equipment on the experimental boat, sailing trajectory data was measured and recorded. Boat was set at speed of 0.4 m/s, the left paddle of 60 r/min, and the right paddle of 40 r/min conditions, turning diameter measured by the GPS device was 3.2 m. The results of simulation and experiment show that the paddlewheel could make the boat realize ahead and turning motion and the boat has better mobility at low speed, the paddlewheel vehicle is very suitable for aquaculture. Digital model provided a way for the study of paddlewheel vehicle motion control and system design, optimization in the future.

Key words: aquaculture; paddlewheel vehicle; modeling; GPS; simulation

收稿日期:2015-08-03 修回日期:2015-11-22

基金项目: 江苏省"十二五"农业支撑项目(BE2013402)、江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD, No. 6-2011)、江苏省高校研究生科研 创新计划项目(CXLX12_0661)和镇江市重点研发(现代农业)计划项目(NY2015022)

作者简介:洪剑青(1971一),男,博士生,镇江市高等专科学校副教授,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: hongjianqing@163.com 通信作者:赵德安(1956一),男,教授,博士生导师,主要从事机器人控制技术和计算机控制应用研究,E-mail: dazhao@ujs.edu.cn

125

引言

中国是水产品消费大国。水产养殖在国内已经 形成产业规模,成为人民生活和国民经济不可或缺 的组成部分,产值高达几百亿元^[1-6]。2014年,国 内仅河蟹养殖面积就已经达到53.33万hm²。水产 养殖生产过程中,每日都需要进行投饵、增氧、环境 监测、病虫害监测等作业,工作单调繁重。水产养殖 通常位于内河湖泊,养殖水域一般流速较低,风浪较 小,水深较浅,水面之下情况复杂,水域面积相对较 小,因此不适合普通螺旋桨船工作。明轮船具有吃 水浅、转弯半径小、低速机动性好的特点。将无人导 航明轮船作为载体,安装相关设备,可以制成多种水 面作业装备,例如自动投饵船、移动式增氧机等,是 适应水产养殖的重要装备。

明轮的工作并不完全处于水面之下,因此明轮 船的效率比较低,但是明轮可以通过拍击水面产生 垂直方向的升力,从而减少明轮船的吃水深度。为 了解明轮船的运动规律和低速机动性以及为进一步 优化明轮船的设计提供理论依据,建立明轮船的数 字化模型是必然途径。目前国内文献主要集中于明 轮驱动力计算和分析^[6-11],其中已有文献对推力的 计算,大多没有综合考虑明轮叶片入水攻角、航速、 水流速度、叶片数量等因素,因此在实际使用中发 现,依据目前已有经验公式计算所得的明轮推力和 实际推力偏差较大,这对明轮船运动控制系统的设 计易产生不利影响。而关于明轮船数字仿真模型和 运动控制,均未见文献报道。

基于以上研究现状,本文针对无人导航明轮船 提出导航系统方案,根据几何和牛顿定律及水动力 学原理,给出明轮驱动力计算方法,然后在文 献[12]给出的船舶运动方程的基础上,结合明轮船 的工作特点,构建明轮船的运动方程和控制方程,最 后进行仿真验证和实船试验。

1 无人导航明轮船的导航系统方案

无人导航明轮船的导航系统如图1所示。明轮 船导航系统包括固定基站、移动站、电台、卫星、明轮 船、监控站等。基站架设于陆地上,固定不动。本项 目在试验明轮船上安装移动站、电台、通信装置等。 固定基站和移动站之间通过电台交互信息实现高精 度 DGPS 定位测量。试验船自带通信装置,通过通 信基站,接收服务器发送的工作任务和指令,并向服 务器发送本船定位、工作状态等信息。

明轮船本体主要包括:电控箱(用来装控制设备、电台、电池等)、工作台(用于固定电控箱)、船体



Fig. 1 Nobody navigation paddle vehicle navigation system

(2个)、明轮(2个, 左、右各1个)、船体连接固定板 (前、后各1个)、传动装置(左、右各1个)、驱动电 动机(左、右各1个)、GPS 定位设备等, 如图2所 示。其他设备还有无线通信装置、遥控装置等。明 轮船上安装的 GPS 定位设备移动站通过电控箱内 的电台与陆地上固定基站通信, 实现高精度定位。 在电控箱内安装有 ARM 控制电路板、电动机驱动 器等。ARM 控制板通过串口通信装置读取 GPS 定 位信息。本项目试验船由双 GPS 天线定位, 一个在 船头, 一个在船尾。通过2个高精度 GPS 定位天 线, 不仅可以计算出明轮船的位置, 还可以计算出航 速、航向、船艏位置、船尾位置。



Fig. 2 Architecture paddle vehicle

1. 电控箱 2. 工作台 3. 船体 4. 明轮 5. 船体连接固定板
 6. 传动装置 7. 驱动电动机 8. GPS 定位设备

2 明轮作用力分析与计算

明轮船的航向、航速均是通过控制左、右明轮旋 转实现的。计算明轮驱动力是建立明轮船运动仿真 模型和精确控制明轮船的基础。

2.1 明轮机构

明轮结构如图 3 所示。常见明轮主要有 4 叶桨 或者 6 叶桨。明轮本体主要包括驱动轴和多片叶片 (蹼板),划水主要依靠叶片,有的明轮带有加强筋、





轮辐等设施。

明轮驱动系统由驱动电动机、传动机构、明轮等 构成。明轮中心轴由电动机驱动,带动叶片做旋转 运动。为配合前进、后退,叶片可正反向旋转,产生 使明轮船前进和后退所需动力。

2.2 明轮驱动力

明轮驱动水体的作用效果如图 4 所示。明轮船 以航速 V_a 在水面前行,明轮以转速 n 旋转,叶片边 缘旋转速度为 V_i 。被驱动的水体流速发生变化,设 单位时间内水体速度变化量为 ΔV 。由于明轮船和 叶片均处于运动过程中, ΔV 的大小受叶片转速、明 轮船航速、叶片入水攻角等多个因素影响,是一个动 态变化量。明轮叶片做圆周运动,被驱动水体的流 速变化量 ΔV 的方向向斜下方(在有限范围内)。如 图 4 所示,在水平方向上, ΔV 产生水平分量 ΔV_u ,在 垂直方向上产生垂直分量 ΔV_v 。航速 V_a 即水体相 对于船体的水流速度。根据牛顿定律,明轮驱动水 体后产生的作用力,可以分解为水平方向作用力和 垂直方向作用力。水平方向作用力推动明轮船前 进,即推力 T;垂直方向作用力抬升明轮船体,即升 力L。







根据牛顿定律, F = ma, a 为加速度, m 为物质 质量, 加速度 a 在数值上即为单位时间内速度的增 量。对于被驱动水体, 在自然状态下, 是不可压缩流 体。被驱动水体速度的单位时间内变化量 ΔV_{H} 即 加速度 a。因此, 单个明轮推力 T_{d} 的计算式为

$$T_{d} = m_{1}a = m_{1}\Delta V_{H} = m_{1}(V_{H} - V_{o})$$
(1)

$$\Delta V_{H} = V_{t} \sin(90^{\circ} - \theta) - V_{o}$$
⁽²⁾

式中 0——叶片浸没深度角



Fig. 5 Blade speed analysis

而根据圆周定律,叶片边缘速度 V_i 为

$$V_t = \pi n D \tag{3}$$

式中 n——明轮转速,r/s

D——明轮叶片直径,m

将式(2)、(3)代入式(1),得到明轮单个叶片驱动力 *T_a*为

$$T_d = m_1 \Delta V_H = m_1 (V_t \cos\theta - V_o)$$

关于 m₁ 的计算, 根据文献 [13 - 14] 水动力学 推导得到

$$m_1 = \rho \pi \frac{1}{2} \left(\frac{c}{2}\right)^2 s \tag{4}$$

式中 c——叶片入水深度

$$T_{d} = \rho \pi \frac{1}{2} \left(\frac{c}{2}\right)^{2} s \left(V_{t} \cos \theta - V_{o}\right) = \frac{1}{8} \rho \pi c^{2} s \left(V_{t} \cos \theta - V_{o}\right)$$
(5)

由于明轮叶片的浸没深度、形状、攻角等因素对 推力有影响,将这些因素综合成一个推力系数 K_r。 综合式(5),单明轮推力最终计算公式为

$$T_{d} = \frac{1}{8} \rho \pi c^{2} s B (\pi n D \cos \theta - V_{o}) K_{T}$$
 (6)

式中 B——单个明轮叶片数

K_r可以通过明轮敞水试验得到。同理,对明轮 船垂直方向受力和速度进行分析,可以得到单明轮 垂直方向升力 L_d 计算公式为

$$L_{d} = \frac{\rho \pi c^{2} s}{8} B \pi n D K_{L} \sin \theta \tag{7}$$

式中 K_L——升力系数

3 无人导航明轮船水动力模型的建立

为了对明轮船的运动特性进行分析,必须建立 明轮船运动过程的数字仿真模型。本文根据 Fossen 理论的船舶运动模型^[11],结合明轮船的工作特点, 建立明轮船仿真运动方程。

如图 6 所示,按照国际上对于船舶运动描述所 采用的坐标系设置方法,设立无人导航明轮船的运 动坐标系。原点位于明轮船的重心,*x* 轴在明轮船 的纵中剖面内,指向船艏;*y* 轴与纵中剖面垂直,指 向右舷,平行于水线面;*z* 轴在纵中面内,指向船底 方向,与水线面垂直。



Fig. 6 Reference coordinates system

3.1 明轮船受力分析

明轮船结构如图 7 所示。主要包括船体和驱动 明轮。驱动明轮共有 2 个,分别位于船体左、右两 侧。明轮船其他辅助设备不直接与水面接触或位于 水线之上,没有水动力产生,仅仅作为船体质量的一 部分,暂不考虑细节。且由于明轮船航速很低,空气 阻力可以忽略不计。



明轮船在静水中,受到重力和浮力的作用。当 明轮船开始工作的时候,明轮旋转,明轮船前进,船 体不仅受到重力和浮力,还会受到阻力、明轮产生的 推力、以及明轮旋转拍击水面产生的升力。由于明 轮船左右对称,只要两侧明轮产生同样的推力 T_1 、 T_2 ,明轮船可以直线前进。如果两侧推力不等,即 $T_1 \neq T_2$,则明轮船产生绕z轴的扭矩。明轮拍击水 面,在产生推力T同时,还产生升力L。若左右升力 相同,则仅仅产生沿z轴方向的升力L₁+L₂;若两侧 明轮升力不同,则会产生绕x轴的扭矩。明轮船作 为水面运动艇,只考虑与明轮船的平面运动有关内 容,不讨论明轮船的垂荡、横摇运动。

3.2 无人导航明轮船的数学模型

Fossen 在文献[11,14-18]中总结了普通舵控 方向、螺旋桨驱动船舶的非线性、四自由度数学模型,即

$$\begin{cases} (m' + m'_{x})u' - (m' + m'_{y})v'r' = X' \\ (m' + m'_{y})v' + (m' + m'_{x})u'r' + m'_{y}\alpha'_{y}\dot{r}' - m'_{y}l'_{y}\dot{p}' = Y' \\ (I'_{x} + J'_{x})\dot{p}' - m'_{y}l'_{y}\dot{p}' - m'_{x}l'_{x}u'r' + W'G'_{M}\phi' = K' \\ (I'_{z} + J'_{z})\dot{r}' + m'_{y}\alpha'_{y}\dot{v}' = N' - Yx'_{G} \end{cases}$$

$$\tag{8}$$

所有数据都经过无因次化处理。

螺旋桨推进、舵控方向船舶水动力方程的 X'、 Y'、K'、N'分别为

$$\begin{cases} X' = X'u'^{2} + (1 - t_{i})T'(J) + X'_{vr}v'r' + X'v'^{2} + X'_{rr}r'^{2} + X'_{\phi\phi}\phi'^{2} + cRXF'_{N}\sin\delta' \\ Y' = Y'_{v}v' + Y'_{r}r' + Y'_{p}p' + Y'_{\phi}\phi' + Y'_{vvv}v'^{3} + Y'_{rrr}r'^{3} + Y'_{vvr}v'^{2}r' + Y'_{vr\phi}r'r'^{2} + Y'_{v\phi\phi}v'^{2}\phi' + Y'_{v\phi\phi}v'\phi'^{2} + Y'_{rr\phi}r'^{2}\phi' + Y'_{r\phi\phi}r'\phi'^{2} + (1 + \alpha H)F'_{N}\cos\delta' \\ K' = K'_{v}v' + K'_{r}r' + K'_{p}p' + K'_{\phi}\phi' + K'_{vvv}v'^{3} + K'_{rrr}r'^{3} + K'_{vvr}v'^{2}r' + K'_{vrr}v'r'^{2} + K'_{v\phi\phi}v'^{2}\phi' + K'_{v\phi\phi}v'\phi'^{2} + Y'_{r\phi\phi}r'^{2}\phi' + Y'_{r\phi\phi}r'\phi'^{2} - (1 + \alpha H)z'_{R}F'_{N}\cos\delta' \\ N' = N'_{v}v' + N'_{r}r' + N'_{p}p' + N'_{\phi}\phi' + N'_{vvv}v'^{3} + N'_{rrr}r'^{3} + N'_{vvr}v'^{2}r' + N'_{v\phi\phi}r'\phi'^{2} + (1 + \alpha H)z'_{R}F'_{N}\cos\delta' \end{cases}$$

$$N' = N'_{v}v' + N'_{r}r' + N'_{p}p' + N'_{\phi}\phi' + N'_{vvv}v'^{3} + N'_{rrr}r'^{3} + N'_{vvr}v'^{2}r' + N'_{v\phi\phi}r'\phi'^{2} + (x'_{R} + \alpha_{H}x'_{H})F'_{N}\cos\delta'$$

$$(9)$$

式中 *F'_N*——螺旋桨推力 δ'——舵角

t,——推力减额量

X'、Y'、K'、N'----水动力系数

所有数据经过无因次化处理。

由于明轮船工作的时候,没有螺旋桨。明轮船的推进力由左、右2个明轮旋转产生,左明轮推力 *T_d*、右明轮推力*T_d*,总推力为

$$T_{T} = \operatorname{sign}(n_{1}) T_{d1} + \operatorname{sign}(n_{2}) T_{d2}$$
 (10)

式中 T_T——总推力

- n1-----左明轮旋转转速
- *n*₂——右明轮旋转转速,*T*_d取正数为正转, 取负数为反转

sign——符号函数

当明轮转速相等、方向相同时, $n_1 = n_2$,则 $T_{d1} = T_{d2}$,明轮船绕 z 轴的扭矩为零。当左明轮和右明轮转速相反或不等时,明轮船产生绕 z 轴的扭矩。由 左、右明轮转差引起的扭矩为

$$N_{T} = (T_{d1} - T_{d2}) \frac{b}{2}$$
(11)

式中 b——船宽

由于明轮被安装于船舶的中轴之上,中轴始终 平行于 y 轴,且明轮方向不可改变,所以 T_{d_1} 、 T_{d_2} 始 终平行于 x 轴、垂直于 z 轴。

根据明轮船的工作特点,将 Fossen 模型的 X'、 Y'、K'、N'改变为

$$\begin{cases} X' = X'_{uu}u'^{2} + (1 - t_{t})T'(J)T'_{T} + X'_{vr}v'r' + X'v'^{2} + X'_{rr}r'^{2} + X'_{\phi\phi}\phi'^{2} \\ Y' = Y'_{v}v' + Y'_{r}r' + Y'_{p}p' + Y'_{\phi}\phi' + Y'_{vvv}v'^{3} + Y'_{rrr}r'^{3} + Y'_{vvr}v'^{2}r' + Y'_{vrr}v'r'^{2} + Y'_{vv\phi}v'^{2}\phi' + Y'_{v\phi\phi}v'\phi'^{2} + Y'_{rr\phi}r'^{2}\phi' + Y'_{r\phi\phi}r'\phi'^{2} \\ K' = K'_{v}v' + K'_{r}r' + K'_{p}p' + K'_{\phi}\phi' + K'_{vvv}v'^{3} + K'_{rrr}r'^{3} + K'_{vrr}v'r'^{2} + Y'_{r\phi\phi}r'\phi'^{2} + K'_{v\phi\phi}v'^{2}\phi' + K'_{v\phi\phi}v'\phi'^{2} + Y'_{rr\phi}r'^{2}\phi' + Y'_{r\phi\phi}r'\phi'^{2} + K'_{v\phi\phi}v'^{2}\phi' + K'_{vv\phi}v'\phi'^{2} + Y'_{rr\phi}r'^{2}\phi' + Y'_{r\phi\phi}r'\phi'^{2} + K'_{L} \\ N' = N'_{v}v' + N'_{r}r' + N'_{p}p' + N'_{\phi}\phi' + N'_{vvv}v'^{3} + N'_{rrr}r'^{3} + N'_{vrr}v'^{2}r' + N'_{vr\phi}r'^{2}\phi' + N'_{v\phi\phi}v'^{2}\phi' + N'_{v\phi\phi}v'\phi'^{2} + N'_{v\phi\phi}v$$

(12)

其中,*T_r*可以由式(10)求得,*N_r*由式(11)获取。上述各参数均需要无因次化。将式(12)代入式(8)就 是完整的明轮船运动的水动力方程。

3.3 控制方程

根据文献[8]和已经得到的水动力方程(8),经 过推导,可以得到明轮船的控制方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\frac{X' U^2}{m'_{11} L}}{-(-m'_{33}m'_{44}Y' + m'_{32}m'_{44}K' + m'_{42}m'_{33}N') U^2}{\det M' L} \\ \frac{-(m'_{42}m'_{33}Y' + m'_{32}m'_{42}K' + m'_{22}m'_{33}N' - m'_{22}^2N') U^2}{\det M' L^2} \\ \frac{-(m'_{42}m'_{33}Y' + m'_{32}m'_{42}K' + m'_{22}m'_{33}N' - m'_{22}^2N') U^2}{(u'\cos\psi' - v'\sin\psi'\cos\phi') U} \\ (u'\sin\psi' - v'\cos\psi'\cos\phi') U \\ (u'\sin\psi' - v'\cos\psi'\cos\phi') U \\ \frac{-(m'_{32}m'_{44}Y' + m'_{22}m'_{44}K' - m'_{42}^2K' + m'_{32}m'_{42}N') U^2}{\det M' L^2} \\ \frac{-(m'_{32}m'_{44}Y' + m'_{22}m'_{44}K' - m'_{42}^2K' + m'_{32}m'_{42}N') U^2}{\mu' L} \end{bmatrix}$$

$$(13)$$

其中

$$m'_{11} = m' + m'_x$$
 $m'_{22} = m' + m'_y$
 $m'_{32} = -m'_y l'_y$ $m'_{42} = -m'_y \alpha'_y$
 $m'_{33} = l'_x + J'_x$ $m'_{44} = l'_2 + J'_2$
det $M' = m'_{22}m'_{33}m'_{44} - m'_{32}{}^2m'_{44} - m'_{42}{}^2m'_{33}$
式中 m'_z 一附加质量或者附加惯性矩

4 明轮船仿真与试验

4.1 明轮船仿真

明轮船的原始参数由厂家提供,如表1所示。

表1 明轮船参数

Tab. 1 Paddle vehicle parameters

参数	数值
船体宽 b/mm	850
船体长 L/mm	1 400
明轮直径 D/mm	330
驱动电动机最高转速/(r·min ⁻¹)	350
明轮最高转速/(r·min ⁻¹)	220
行走速度/(m·min ⁻¹)	15 ~ 20

明轮船驱动系统的控制结构如图 8 所示。将通 过 GPS 测量获取的当前位置数据送入控制器,将明 轮船的目标航向、航速信息也送入控制器,经过解析 运算后生成左右明轮的控制信号,分别送给左明轮 驱动器和右明轮驱动器。由左、右明轮驱动电动机 的控制器分别独立控制左、右电动机转速。

根据明轮船参数计算各水动力系数,无因次化 后代入上述明轮船运动模型,并使用 Matlab 软件进 行计算机仿真。仿真模型如图9 所示。

保持两侧明轮转速一致时,明轮船的直线跟踪 特性仿真结果如图 10 所示。

从图 10 中可以发现,当保持两侧明轮转速一致 的时候,两侧明轮推力相等,在无外力干扰条件下,





明轮船能够保持直线航行。

设定航速 0.4 m/s, 左明轮转速 60 r/min, 右明 轮转速 40 r/min, 保持两侧明轮的转速差值恒定, 即 两侧推力差值恒定。明轮船绕 z 轴产生扭矩, 产生 回转运动, 初始回转半径稍大, 随后趋向稳定转弯半 径, 半径约 1.5 m。如果降低航速, 加大两侧明轮转 速差, 可以进一步降低转弯半径。通过回转特性的 仿真可以观察明轮船的偏航控制效果。回转仿真结 果如图 11 所示。

图 11 仿真结果表明:所搭载的明轮可以控制明 轮船航向和航速。明轮船在低速航行时,具有较小 的转弯半径和较好的机动特性。

4.2 试验验证

采用的明轮船试验艇如图 12 所示。试验艇是 双体艇。为了增加试验艇的稳定性和负载能力, 两侧增设了浮筒。浮筒的增加导致明轮船的水动 力参数发生变化,需要重新计算。明轮船上所携 带高精度 GPS 定位设备,可以测量明轮船的实时





Fig. 11 Rotary paddle vehicle simulation



图 12 明轮船试验艇 Fig. 12 Experimental paddle vehicle

位置,动态定位精度达到 ±1 cm,可以满足测量精度需要。

2015 年 5 月 9 日下水试验。试验当天为多云, 阵风 3 ~ 4 级,温度 16 ~ 25℃,水流速度 0.05 m/s, 在封闭池塘内进行试验。试验主要目的是验证明轮 船的直线跟踪特性和回转特性。GPS 设备采集的实 时位置信息通过无线网络传送到岸上的接收计算机 进行数据记录。通过试验采集试验艇的 GPS 航迹坐标 绘制明轮船的航迹图。试验结果如图 13、14 所示。



图 13 说明明轮船可以进行直线跟踪航行。在 图 14 的轨迹记录中,可以看出:在航速 0.4 m/s、左 明轮转速 60 r/min、右明轮转速 40 r/min 的条件下, 明轮船进行了回转运动。稳定回转直径约 3.3 m, 且初始回转半径要稍大一点,与仿真效果符合。在 试验图中,由于有流水干扰的作用,明轮船回转位置 发生了漂移,但是回转半径可控且稳定。



Fig. 14 Slewing characteristic test track diagram

5 结论

(1) 描述了明轮船的运动特点, 指出在内河浅 水水域航行和水产养殖领域, 明轮船所具有优势, 值 得推广。

(2)根据几何定律、牛顿运动定理和水动力学的相关原理,在分析明轮运动的基础上,给出了明轮

推力计算公式和升力计算公式。该公式是明轮船运 动方程的基础。

(3)根据经典的由 Fossen 提出的船舶模型,在 结合明轮船工作特点的基础上,推导建立了明轮船 运动数学模型和控制方程,并且通过仿真和试验进 行验证。证明了双明轮驱动的明轮船在低速条件 下,可以实现正航、回转、偏航等运动。这是螺旋桨 驱动船舶无法实现的,说明明轮船符合水产养殖行 业的作业要求。

(4)明轮船是较好的水产养殖作业通用平台。 在明轮船上安装不同的设备,可以改装成水草清理 船、移动增氧机船、自动巡航投饵船、无人智能水质 监测船等,这些都是现代水产养殖行业信息化、智能 化的关键装备,也是解决目前劳动力紧张、降低生产 成本的必然措施。仿真模型的建立为以后进一步研 究、改进、优化明轮船和控制系统的设计提供了数字 化方法,为分析明轮船运动过程和特点提供了一个 有力工具。

参考文献

- 1 孙月平,赵德安,洪剑青,等. 河蟹养殖船载自动均匀投饵系统设计及效果试验[J]. 农业工程学报, 2015,31(11):31-39. SUN Yueping, ZHAO Dean, HONG Jianqing, et al. Design of automatic and uniform feeding system carried by workboat and effect test for raising river crab[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(11):31-39. (in Chinese)
- 2 孟祥宝,黄家怿,谢秋波,等. 基于自动巡航无人驾驶船的水产养殖在线监控技术[J]. 农业机械学报,2015,46(3):276-281. MENG Xiangbao, HUANG Jiayi, XIE Qiubo, et al. Online monitoring equipment for aquaculture based on unmanned automatic cruise boat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(3):276-281. (in Chinese)
- 3 SUN Yueping, ZHAO Yuyan, ZHAO Dean, et al. Design of automatic aquaculture workboat driven by air propellers[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014,556 562: 2553 2558.
- 4 马从国,赵德安,秦云,等. 基于现场总线技术的水产养殖过程智能监控系统[J]. 农业机械学报,2007,38(8):113-115. MA Congguo, ZHAO De'an, QIN Yun, et al. Intelligent monitoring and control for aquiculture process based on fieldbus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 113-115. (in Chinese)
- 5 胡金有,王靖杰,张小栓,等.水产养殖信息化关键技术研究现状与趋势[J].农业机械学报,2015,46(7):251-263. HU Jinyou, WANG Jingjie, ZHANG Xiaoshuan, et al. Research status and development trends of information technologies in aquacultures[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(7):251-263. (in Chinese)
- 6 李道亮,傅泽田,马莉,等.智能化水产养殖信息系统的设计与初步实现[J].农业工程学报,2000,16(4):135-138. LI Daoliang, FU Zetian, MA Li, et al. Design and development of intellectual aquacultural information system[J]. Transactions of the CSAE,2000,16(4):135-138. (in Chinese)
- 7 张剑波. 浅海明轮驳船快速性能研究[J]. 中国海洋平台,1997,12(6):247-249.
- 8 杨月琳,尚士友.水草收割机船舶推进器的建模与仿真分析[J]. 农机化研究,2009(9):14-16.
- 9 范金玲.水草收割船切割装置参数化建模及有限元分析[D].保定:河北农业大学,2013.
- 10 陈金稳,张丽珍,柏春祥. SCSGJ-2.6 型小型水草收割机明轮的优化设计[J]. 安徽农业科学,2008,36(8):3467-3469.
- 11 BATCHELOR G K. An introduction to fluid dynamics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1967: 470-474.
- 12 FOSSEN T I. Guidance and control of ocean vehicles [M]. Trondheim, Norway: John Wiley and Sons, Inc., 1994.
- 13 BOWEN W C, ALEXANDER K V. CFD analysis of a high speed paddlewheel [C] // 17th Australasian Fluid Mechanics Conference Auckland, 2010: 412-415.
- 14 WANG Jianhua, GU Wei, ZHU Jianxin, et al. An unmanned surface vehicle for multi-mission applications [C] // International Conference on Electronic Computer Technology, 2009:358 361.
- 15 ZHEN Li. Path Following with roll constraints for marine surface vessels in wave fields [D]. Michigan: University of Michigan, 2009.
- 16 DAVID Harte, NEIL Bose, ROBERT Clifford, et al. An application of paddlewheel propulsion to a high speed craft [C] // Second International Symposium on Marine Propulsors, 2011:427 434.
- 17 杨海,李威,张金尧,等. 移动装备捷联惯性导航系统误差补偿技术研究[J]. 农业机械学报,2015,46(8):361-366,378. YANG Hai, LI Wei, ZHANG Jinyao, et al. Error compensation technology of strapdown inertial navigation system for mobile equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(8):361-366,378. (in Chinese)
- 18 邬备,王德成,王光辉,等.小型自走式割草机仿形装置仿真分析与试验[J].农业机械学报,2015,46(7):123-129. WU Bei, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Simulation analysis and experiment of profiling device of small self-propelled mower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(7):123-129. (in Chinese)
- 19 安菲莫夫,瓦干诺夫,巴甫连科.船舶牵引计算[M].刑国江,柏桢,译.北京:人民交通出版社,1985:164-168.