文章编号:1000-8152(2007)06-0924-05

## 柔性长鳍波动推进流体动力测试平台

### 谢海斌, 沈林成

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:为辅助研究鱼类MPF推进模式中的柔性长鳍波动推进动力学问题,论文研究了构建柔性长鳍波动推进流体动力测试平台的技术方案.论文首先根据功能需求确定了测试平台的总体结构,并着重讨论了作为受试模型的柔性长鳍仿生装置以及具有6分力与6自由度运动参数测量功能的流体动力测量系统的设计与实现.测试平台利用仿 生装置模拟仿生对象多种波动运动模式,借助测量系统对受试模型的各种波动运动进行静态与动态流体动力/力矩 测量,并通过测控系统对整个平台进行远程测控.论文研究的测试平台将为柔性长鳍波动推进机理及控制技术研究 提供重要试验平台.

关键词:柔性长鳍;波动推进;流体动力;测试平台;仿生装置 中图分类号: TP212 文献标识码: A

### Test platform of hydrodynamic force produced by undulation of long flexible fin

#### XIE Hai-bin, SHEN Lin-cheng

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

**Abstract:** A technical scheme is presented to construct the test platform of hydrodynamic force produced by undulation of the long flexible fin, which will be an supplementary tool for studying dynamics of the long flexible fin undulatory propulsion belonging to fish MPF (median and/or pair fin) propulsion mode. Firstly, the architecture of test platform is determined according to the functional requirements. Secondly, the bionic device of the long flexible fin is designed as a tested model and the measurement system of hydrodynamic force capable of measuring 6 degreees of freedom forces and motion parameters. The test platform utilizes the bionic device to imitate diversified undulatory movement modes of the bionic object, uses the measurement system to obtain the hydrodynamic forces and moments under the static and dynamic conditions, and realizes remote operation through the measurement and control system. The test platform will be an important platform used to studying the mechanism and control of the long flexible fin undulatory propulsion.

Key words: long flexible fin; undulatory propulsion; hydrodynamic force; test platform; bionic device

#### 1 引言(Introduction)

鱼类MPF(median and/or pair fin)推进模式中的弓 鳍目模式(amiiform)、裸背鳗科模式(gymnotiform) 和鳞鲀科模式(balistiform)等鱼类(图1所示)主要是 依靠波动轻质柔软的长鳍获得推力,并可通过改变 鳍面产生的推进行波波形、波频、波长和波传播方 向等要素控制推力的大小和方向<sup>[1~3]</sup>.这种推进方 式具有流体扰动小并可产生矢量推力等显著优点, 具有广阔的应用前景和理论研究价值.然而目前国 内外对柔性长鳍波动推进方式的研究尚属起步,文 献少,研究层次和深度都不够<sup>[1,2]</sup>.



柔性长鳍波动推进技术要真正迈向实用,必需首 先揭示其推力产生及高效推进原理.作为典型的三 维非定常流问题,柔性长鳍波动推进动力学问题短

收稿日期: 2006-06-13; 收修改稿日期: 2006-11-29.

基金项目:国家部委预研基金资助项目.

期内难以获得理论上的突破,因此借助试验手段寻 求突破将是一条可行之路.受生物活体观测试验不 可控的限制,机理研究所需的运动学及动力学数据 难以充分获得.因而研制模仿仿生对象柔性长鳍结 构与功能的试验装置及流体动力测量系统,构建柔 性长鳍波动推进流体动力测试平台,用以获取给定 推进波模式下各种波动参数对应的流体动力学参数 及流场结构数据,成为辅助柔性长鳍波动推进机理 研究的有效手段,同时也将为基于柔性长鳍波动推 进的水下机器人运动/姿态控制模型辨识和控制算 法验证提供技术支撑<sup>[4~6]</sup>.

本文以柔性长鳍波动推进流体动力测试平台的 研制为背景,主要介绍测试平台的功能需求和总体 结构,并着重研究柔性长鳍仿生装置和流体动力测 试系统的设计与实现.

# 2 测试平台总体结构(Architecture of the test platform)

研制柔性长鳍波动推进流体动力测试平台的主要目的是利用柔性长鳍仿生装置模仿仿生对象的多种波动运动模式,并通过流体动力测试系统获取对应模式下鳍面与载体所受流体动力/力矩数据.该平台主要服务于柔性长鳍波动推进动力学研究以及柔性长鳍波动推进水下机器人运动/姿态控制模型辨识与控制算法验证.整个测试平台由测控系统、柔性长鳍仿生装置(受试模型)和流体动力测量系统3部分构成,其总体结构如图2所示.





为硬件平台,主要执行如下功能:① 通过基本串口 与场外子系统进行通讯,接收控制指令和上传测量 数据;② 根据控制指令实时解算仿生装置各驱动器 的控制参数,并通过扩展串口对受试模型的波动运 动实施控制;③ 通过AD扩展模块和串口扩展模块 分别接收流体动力测量系统的测力传感器阵列与惯 组模块测得的力与6自由度线/角加速度信号,并进 行数据预处理.

场外子系统以便携式PC为硬件平台,主要执行 如下功能:①提供人机交互界面,用以控制场内子 系统的工作模式和监测其运行状态;②设置柔性长 鳍波动模式和运动参数并生成相应的控制指令,通 过场内子系统实现受试模型的远程控制;③实时解 算当前试验条件下受试模型所受的流体动力及力 矩;④通过虚拟仪器仪表对测量数据及解算结果进 行显示、分析与存储;⑤通过扩展接口与其他外测 设备相连.

# 4 柔性长鳍仿生装置(Bionic device of the long flexible fin)

# **4.1** 仿生装置设计与实现(Design and realization of the bionic device)

作为受试模型,柔性长鳍仿生装置用于实现仿生 对象的多种波动运动模式,以满足给定推进波模式 下各种波动参数对应的非定常流体动力/力矩测试 需要.

根据柔性长鳍推进波的产生原理, 鳍面各种推 进波模式是通过所有鳍条按照一定的运动规律和相 位关系协调摆动实现的<sup>[7]</sup>.因此, 为达到实现多种推 进波模式及其多参数可控的设计意图, 仿生装置共 设计有17根鳍条(按照香农(Shannon)采样定理, 可拟 合1~4个波长的标准正弦行波), 并为每根鳍条设计 了独立的驱动及控制系统. 鳍条摆动机构采用"舵 机驱动一齿轮传动"结构设计, 并按照双并列线 性结构排列以减小装置总长度. 鳍面被设计为"鳍 条/柔性蹼"结构, 鳍条采用弹簧钢片制成, 并内嵌 到弹性较好的橡胶材料制成的柔性蹼中. 仿生装置 根据测控系统下传的舵机控制参数实时调节每个舵 机角度, 使鳍条按照期望的运动规律和相位关系摆 动, 并带动鳍面运动来实现设定的各种推进波模式. 柔性长鳍仿生装置的实物照片如图3所示.



图 3 柔性长鳍仿生装置 Fig. 3 Bionic device of long flexible fin

### **4.2** 柔性长鳍波动运动控制(Undulatory movement control of the bionic long flexible fin)

当鳍条数量N、间距d和长度分布确定后, 仿生装置的推进波模式完全由鳍条摆角运动函数 $\theta(k,t)$ 决定.  $\theta(k,t)$ 可表示为

$$\theta(k,t) = A(k)f[\omega t + \varepsilon_0(k)] + \theta_a(k).$$
(1)

其中: k为鳍条序号,  $k = 1, 2, 3, \cdots, N$ ; t为时间;  $f(\cdot)$ 为任何以 $2\pi$ 为周期且值域为[-1,1]的周期性泛 函, 即 $f[\varepsilon(t)] = f[\varepsilon(t) \pm 2\pi]$ , 用以描述鳍条的周 期性运动规律; A(k)为鳍条的摆动幅值函数(非负 函数), 它决定了鳍面波动曲面的包络形状, 是描述 推进波波形的重要参数;ω为鳍条摆动角频率,根 据 $f(\cdot)$ 的周期性可知波动频率 $f = 1/T = |\omega/2\pi|$ , 此外ω取值的正负还确定了鳍面推进行波的传播 方向;  $\varepsilon_0(k)$ 为鳍条运动的初始相位函数, 它通过 描述鳍条间的相位关系确定推进波波长特征和 初始相位(用 $\varepsilon_0(1)$ 描述),对于波长为 $\lambda$ 的等波长波 动模式,可将 $\epsilon_0(k)$ 设定为沿波长方向线性函数, 即 $\varepsilon_0(k) = (2\pi d/\lambda)(k-1) + \varepsilon_0(1); \theta_q(k)$ 为鳍条 对称轴偏角函数,用以描述鳍条对称轴偏离仿生装 置纵对称面的程度和分布状况. 仿生装置通过合理 设置 $f(\cdot), A(k), \theta_a(k), \varepsilon_0(k)$ 和 $\omega$ 能够模拟仿生对象 的多种波动运动模式,并实现推进波的多参数控制, 因此,该装置是辅助柔性长鳍波动推进机理研究的 重要试验系统.





假定鳍条等长,且将 $f(\cdot)$ 取为正弦函数,即f(x)= sin x,通过改变 $A(k), \theta_a(k), \varepsilon_0(k)$ 和 $\omega$ 实现柔性长鳍 各种推进波波动模式的仿真结果如图4所示.图4(a) (b)(c)为柔性长鳍曲面在鳍面坐标系OX<sub>q</sub>Y<sub>q</sub>Z<sub>q</sub>(其定 义如图6所示)的OX<sub>q</sub>Z<sub>q</sub>平面上的投影,其中横坐标 为鳍条序号k.图4(d)为定义在OX<sub>q</sub>Y<sub>q</sub>Z<sub>q</sub>中的柔性长 鳍3维曲面,其中:X坐标为鳍条序号k,Y与Z坐标 为无量纲数.



图 4(b) 通过 $\varepsilon_0(k)$ 实现变波长波动模式控制













# 5 流体动力测量系统(Measuring system of hydrodynamic force)

## **5.1** 系统构成及工作原理(System constitute and operational principle)

流体动力测量系统以6分力测量子系统为核心, 通过机械接口模块与受试模型相连,并在静水水池 中完成静态与动态流体动力测试.其中,6分力测量 子系统由测力传感器阵列、2自由度运动导向滑轨 与运动测量模块构成.测力传感器通过冗余设计并 按正交结构配置,用以实现6分力/力矩测量;2自由 度运动导向滑轨使试验模型具有平面运动能力,并 可实现静态测试与动态测试的切换(本文所指的静 态与动态测试是针对载体在流场中是否运动而言 的);运动测量模块采用高精度的6自由度惯组实现 受试模型的线/角加速度测量,其测量信号被用于解 算惯性力、载体运动状态以及补偿测试系统振动引 起的力测量误差.流体动力测量系统与柔性长鳍仿 生装置之间的安装关系如图5所示.



图 5 测量系统与仿生装置之间的安装关系 Fig. 5 Connected relation between measuring system with bionic device

### **5.2** 流体动力测量原理(Philosophy of measurement of hydrodynamic force)

首先定义测量坐标系OX<sub>c</sub>Y<sub>c</sub>Z<sub>c</sub>、载体坐标系 OX<sub>b</sub>Y<sub>b</sub>Z<sub>b</sub>和 鳍 面 坐 标 系OX<sub>q</sub>Y<sub>q</sub>Z<sub>q</sub>.OX<sub>c</sub>Y<sub>c</sub>Z<sub>c</sub>用 于建立静力平衡方程及推算流体动力解算公式; OX<sub>b</sub>Y<sub>b</sub>Z<sub>b</sub>用于描述受试模型在流场中的姿态及其 流体动力学系数; OX<sub>q</sub>Y<sub>q</sub>Z<sub>q</sub>用于描述鳍面的波动运 动及其产生的推力与力矩. 受试模型的重心与浮 心在OX<sub>c</sub>Y<sub>c</sub>Z<sub>c</sub>中的矢径分别为 $\vec{r}_c = (X_c, Y_c, Z_c)^{\text{T}},$  $\vec{r}_B = (X_B, Y_B, Z_B)^{\text{T}}; OX_bY_bZ_b 在OX_cY_cZ_c$ 中的姿 态用偏航角 $\psi$ 、俯仰角 $\theta$ 与横滚角 $\varphi$ (231欧拉角)描 述, 因此OX<sub>c</sub>Y<sub>c</sub>Z<sub>c</sub>到OX<sub>b</sub>Y<sub>b</sub>Z<sub>b</sub>的变换矩阵为C<sup>b</sup><sub>c</sub> = A<sub>1</sub>( $\varphi$ )A<sub>3</sub>( $\theta$ )A<sub>2</sub>( $\psi$ ); OX<sub>q</sub>Y<sub>q</sub>Z<sub>q</sub>在OX<sub>b</sub>Y<sub>b</sub>Z<sub>b</sub>中的安装 参数用矢径 $\vec{r}_q = (x_q, y_q, z_q)^{\text{T}}$ 和方位角( $\alpha_q, \beta_q, \gamma_q$ ) (131欧拉角)表示, 因此OX<sub>b</sub>Y<sub>b</sub>Z<sub>b</sub> 到OX<sub>q</sub>Y<sub>q</sub>Z<sub>q</sub>的变 换矩阵为C<sup>b</sup><sub>b</sub> = A<sub>1</sub>( $\gamma_q$ )A<sub>3</sub>( $\beta_q$ )A<sub>1</sub>( $\alpha_q$ )<sup>[8]</sup>. 坐标系统 定义及仿生装置的受力分析如图6所示.

当受试模型通过机械接口模块与6分力测量子系统安装固定后,可将试验模型与机械接口模块一起看作刚体进行受力分析.根据动静法在OX<sub>c</sub>Y<sub>c</sub>Z<sub>c</sub>中建立静力平衡方程:

$$\vec{F}_{C} + \vec{G}_{C} + \vec{G}_{B} + \vec{B}_{B} + \vec{F}_{L} - (M+m)\vec{a} = 0, \quad (2)$$
  
$$\vec{M}_{C} + \vec{r}_{C} \times \vec{G}_{C} + \vec{r}_{C} \times \vec{G}_{B} + \vec{r}_{B} \times \vec{B}_{B} + \vec{M}_{L} - \mathbf{I}_{0}\vec{\xi} = 0. \quad (3)$$

其中:  $\vec{F}_C$ ,  $\vec{M}_C$ ,  $\vec{G}_C = \vec{r}_C \times \vec{G}_C$ 为接口模块承受的测力传感器阵列的反作用力与力矩及其自身所受的重力与重力矩(质量为m);  $\vec{G}_B$ ,  $\vec{B}_B$ ,  $\vec{r}_C \times \vec{G}_B$ ,  $\vec{r}_B \times \vec{B}_B$ 为受试模型(质量为M)所受的重力、浮力及其相应的矩;  $\vec{F}_L = \vec{M}_L$ 为由于鳍面波动及载体运动引起的流体动力/力矩;  $\vec{a}$ ,  $\vec{\xi}$ ,  $I_0$ 分别为分析对象在惯性系中的线/角加速度及对 $OX_cY_cZ_c$ 原点的惯量张量.



图 6 坐标系统定义及仿生装置受力分析图 Fig. 6 Definition of coordinate system and



传感器阵列采用14只KM-02型测力传感器按照等臂正交结构配置以满足同时进行6分力测量的设计要求,其配置结构如图7所示.由图可得 $\vec{F}_C 与 \vec{M}_C$ 为

$$\begin{bmatrix} \vec{F}_C \\ \cdots \\ \vec{M}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 - f_4 \\ f_5 + f_6 - f_2 - f_3 \\ f_{11} + f_{12} + f_{13} + f_{14} - f_7 - f_8 - f_9 - f_{10} \\ l \times (f_8 + f_{14} - f_{10} - f_{12}) \\ l \times (f_9 + f_{11} - f_7 - f_{13}) \\ l \times (f_2 + f_5 - f_3 - f_6) \end{bmatrix}.$$
(4)

### **5.3** 流体动力测试流程(Testing process of hydrodynamic force)

方程(2)和(3)中除 $\vec{F}_C = \vec{M}_C$ 为已知量外,其他分量都为未知参数,因此进行流体动力/力矩静态与动态测量之前,需先后经过6分力测量子系统初始校准、受试模型重力与重心以及浮力与浮心辨识等准备过程,分别获取 $\vec{G}_C$ , $\vec{r}_C \times \vec{G}_C$ ,m, $\vec{G}_B$ , $\vec{r}_C \times \vec{G}_B$ ,M, $\vec{r}_C$ , $\vec{B}_B$ , $\vec{r}_B \times \vec{B}_B$ 以及 $\vec{r}_B$ 等参数.

流体动力/力矩测量分作静态与动态测量两个 步骤,静态测量主要是获得鳍面波动引起的流体动 力/力矩,动态测量主要是获得试验模型运动引起 的流体动力/力矩.将 $\vec{F}_L$ 与 $\vec{M}_L$ 按照引起的原因而非 受力部位表示为两个成分的叠加: $\vec{F}_L = \vec{T} + \vec{R}$ ,  $\vec{M}_L = \vec{M}_T + \vec{M}_R$ .其中 $\vec{T}, \vec{M}_T$ 与 $\vec{R}, \vec{M}_R$ 被分别看作 是鳍面波动与载体运动引起的流体动力/力矩.

静态测量时由于受试模型没有运动,因此 $\vec{F}_L = \vec{T}, \vec{M}_L = \vec{M}_T, \vec{A}$ 忽略测力系统的振动,则假 定 $\vec{a},\vec{\xi}$ 为零,否则利用运动测量模块的信号解算 出 $\vec{a}$ 与 $\vec{\xi}$ 作为修正项.根据式(2)(3)可得

$$\vec{T}(c) = (M+m)\vec{a} - \vec{F}_C - \vec{G}_C - \vec{G}_B - \vec{B}_B, (5)$$
  
$$\vec{M}_T(c) = \mathbf{I}_0 \vec{\xi} - \vec{M}_C - \vec{r}_C \times \vec{G}_C - \vec{r}_C \times \vec{G}_B - \vec{r}_B \times \vec{B}_B.$$
(6)

动态测量时将*T*,*M*<sub>T</sub>看作是在相同鳍面波动条件下静态测量试验中获得的结果,因此可得

$$\vec{R}(c) = (M+m)\vec{a} - \vec{F}_C - \vec{G}_C - \vec{G}_B - \vec{B}_B - \vec{T}(c),$$
(7)

$$\vec{M}_{R}(c) = \mathbf{I}_{0}\vec{\xi} - \vec{M}_{C} - \vec{r}_{C} \times \vec{G}_{C} - \vec{r}_{C} \times \vec{G}_{B} - \vec{r}_{B} \times \vec{B}_{B} - \vec{M}_{T}(c).$$
(8)

由于载体与鳍面所受的流体动力/力矩定义 在 $OX_bY_bZ_b$ 中,因此需对定义在 $OX_cY_cZ_c$ 中的 $\vec{r}(c)$ ,  $\vec{R}(c), \vec{M}_T(c) 与 \vec{M}_R(c)$ 按如下公式进行坐标转换:

$$\vec{F}(b) = C_c^b \vec{F}(c), \tag{9}$$

$$\dot{M}(b) = C_c^b [\dot{M}(c) - \vec{r_c} \times \vec{T}(c)].$$
 (10)

上两式将 $\vec{T}$ ,  $\vec{R}$ 和 $\vec{M}_T$ ,  $\vec{M}_B$ 分别表示为 $\vec{F}$ ,  $\vec{M}$ .

当只以鳍面受力为研究对象时,还需将 $\vec{T}(b)$ 与 $\vec{M}_{T}(b)$ 按如下公式转换到 $OX_{q}Y_{q}Z_{q}$ 中:

$$\vec{T}(q) = C_b^q \vec{T}(b), \tag{11}$$

$$M_T(q) = C_b^q [M_T(b) - \vec{r}_q \times T(b)].$$
(12)

### 6 结论(Conclusion)

本文研究了构建柔性长鳍波动推进流体动力测试平台的技术方案.该平台以柔性长鳍仿生装置为

受试模型,模拟仿生对象多种波动运动模式,并实现 推进波多参数可控;设计具有6分力测量、2自由度 运动导向以及载体运动参数测量等功能的流体动力 测试系统,以满足受试模型在各种波动运动参数下 的流体动力/力矩的静态与动态测量要求;受试模型 与流体动力测试系统通过测控系统连接起来,实现 用户对整个平台的远程测控.

借助柔性长鳍波动推进流体动力测试平台,可以 获得柔性长鳍各种波动参数下的流体动力/力矩数 据及其关系.这不仅为波动推进机理的理论研究提 供验证手段,也为CFD仿真结果的有效性提供直接 证据,同时也是基于这种推进方式的水下机器人运 动/姿态控制模型辨识与算法验证的有效工具.因此 本文研究并设计的测试平台是支撑柔性长鳍波动推 进技术研究的重要试验平台.

#### 参考文献(References):

- 沈林成, 王光明. 仿鱼长鳍波动推进器研究的进展与分析[J]. 国防 科技大学学报, 2005, 27(4): 96 – 100.
   (SHEN Lincheng, WANG Guangming. Research progress and analysis of underwater biomimetic propulsor employing long-fin undulations[J]. *J of National University of Defense Technology*, 2005, 27(4): 96 – 100.)
- [2] HU Tianjiang, LI Fei, WANG Guangming, et al. Morphological measurement and analysis of gymnarchus niloticus[J]. J of Bionics Engineering, 2005, 2(1): 25 – 31.
- [3] 王光明, 胡天江, 李非, 等. 长背鳍波动推进游动研究[J]. 机械工程 学报, 2006,42(3): 88 – 92.
  (WANG Guangming, HU Tianjiang, LI Fei, et al. Research on swimming by undulatory long dorsal fin propulsion[J]. *Chinese J of Mechanical Engineering*, 2006, 42(3): 88 – 92.)
- [4] SFAKIOTAKIS M, LANE D M, DAVIES J B C. Review of fish swimming modes for aquatic locomtion[J]. *IEEE J of Oceanic Engineering*, 1999, 24(2): 237 – 252.
- [5] CONSI T R, SEIFERT P A, TRIANTAFYLLOU M S, et al. The dorsal fin engine of the seahorse (Hippocampus sp.)[J]. *J of Morphology*, 2001, 248: 80 – 97.
- [6] 喻俊志,陈尔奎,王硕,等. 仿生机器鱼研究的进展与分析[J]. 控制 理论与应用, 2003, 20(4): 485 – 491.
  (YU Junzhi, CHEN Erkui, WANG Shuo, et al. Research evolution and analysis of biomimetic robot fish[J]. *Control Theory & Aplications*, 2003, 20(4): 485 – 491.)
- [7] 谢海斌,张代兵,沈林成.柔性长鳍仿生装置波动控制技术[J]. 国防科技大学学报,2006,28(5):99-103.
  (XIE Haibin, ZHANG Daibing, SHEN Lincheng. Undulation control on the bionic device of long flexible fin[J]. J of National University of Defense Technology, 2006, 28(5): 99-103.)
- [8] 孙世贤,黄圳圭.理论力学教程[M].长沙:国防科技大学出版社, 1997:99-102.
   (SUN Shixian, HUANG Chuangui. Tutorial of Theoretical Mechan-

*ics*[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1997: 99 – 102.)

作者简介:

谢海斌 (1977—), 男, 博士研究生, 目前主要从事仿鱼机器人

#### 研究, E-mail: xhb2575\_sx@sina.com;

**沈林成** (1965—), 男, 国防科学技术大学机电工程与自动化学 院教授, 博士生导师, 研究方向为机器人控制、任务规划等.