

船舶操纵性约束模测量系统设计与分析

王飞¹, 马雪泉², 谢凤伟², 吴永顺³

(1. 上海交通大学 船建学院, 上海 200240; 2. 上海船舶运输科学研究所有限公司, 上海 200135;
3. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011)

摘要: 为解决实验室船舶操纵性约束模实验中的测量及数据分析处理技术问题, 开发组建实验测量系统, 推导数据分析处理方法, 以期实现约束模实验的测量与数据在线分析处理; 根据前期研究经验, 设计了较为完善的测量硬件系统方案; 为实现约束模中精确的零相位整周期测量要求, 采用光电开关利用数据采集卡的硬件触发启动功能, 并给出了整数周期测量的方案; 利用最小二乘拟合及傅里叶分析等方法推导出各船舶水动力导数数据处理方法; 在此基础上, 作为重点编写了完整的在线测量与数据在线分析程序, 主要功能内部独立实现; 该系统手工介入频率低, 基本实现了测量的自动化, 效率得到大幅提高; 最后进行实际测量验证, 数据的拟合结果与测量结果符合良好, 验证了该系统的可靠性; 同时处理结果显示船舶附加质量导数 Y_0 同船舶惯性质量很接近, 而导数 Y'_0, N'_0 数值很小, 近于零。

关键词: 船舶操纵性; 约束模; 平面运动机构; 傅里叶分析; 最小二乘拟合; 数据采集

Design and Data Analysis for Ship Maneuverability Captive Model Test Measurement System

WANG Fei¹, MA Xuequan², XIE Fengwei², WU Yongshun³

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;
2. Shanghai Ship and Shipping Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200135, China;
3. Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China)

Abstract: To solve the practical experiment measurement and data processing problems for ship maneuverability captive model tests, a hardware system is designed and developed, data processing algorithms are derived to obtain the on-line hydrodynamic derivatives. According to previous research experience, a comprehensive measuring system is developed as well as the measuring schemes; to achieve precise timing at zero-phase angle for starting data acquisition, a high-speed infrared photoelectric switch is employed with the help of the trigger function of the data acquisition card, and a scheme is proposed to ensure the integral number of motion period. Utilizing least-square fitting and Fourier analysis methods, the data analysis algorithms are derived to fulfill the object of identifying ship maneuverability derivatives. As the key object of this paper, the measuring and analysis software program is written, which meets the practical requirements of captive model tests with satisfaction, its main and elementary functions are implemented internally with little outer dependency, the program requires little human interference and achieve an agreeable level of automation. The model experiment is carried out to demonstrate the hardware and software of the system, which give the agreeable results. Meanwhile, the results show that the ship's derivative Y_0 is very close to its inertial mass, and the derivative values of Y'_0, N'_0 are very small, close to zero.

Keywords: ship maneuverability; captive model test; PMM; Fourier analysis; least square fitting; data acquisition

0 引言

船舶操纵性是船舶一种最为基本的航海性能, 随着现代新型船舶的出现、航运业的发展及海上航行密度的提高, 新建船舶必须满足国际海事组织“IMO 船舶操纵性标准”中的要求, 为此需要在设计阶段展开研究, 准确预报实船的操纵性能。迄今通过建立运动方程, 展开约束模实验, 确定水动力导数, 来进行数值仿真计算, 是预报船舶操纵性基本的、可靠的研究手段^[1-3]。

约束模实验通常采用平面运动机构 (PMM, planar mo-

tion mechanism) 在水池或水槽中展开, 其可以进行斜拖、横荡、艏摇及组合等诸多约束模实验。约束模实验的基本原理在理论上很早就已经提出, 但作为实际工程应用问题, 实现这些原理的技术, 鲜有公开文献发表, 特别是精确的、可靠的实验测量及数据分析处理技术^[3-4]。为此本文以此为背景, 利用已有的平面运动机构设备, 展开测量与数据分析技术研究。设计测量软硬件方案, 推导数据处理与分析算法, 编写程序, 以期实现数据在线测量、分析与处理。为保证系统的自主性, 本文不借助 Matlab、LabView 等外

收稿日期: 2023-03-10; 修回日期: 2023-04-14。

基金项目: 上海交通大学决策咨询课题 (JCZXSJB2020)。

作者简介: 王飞 (1979-), 男, 博士。

引用格式: 王飞, 马雪泉, 谢凤伟, 等. 船舶操纵性约束模测量系统设计与分析 [J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(2): 14-21.

部工具, 基本及主要功能内部自主实现。

1 测量分析系统方案设计

约束模实验通常利用平面运动机构在拖曳水池或水槽中展开, 其中平面运动机构固定于拖车框架上, 一般独立操控; 船模通过测力天平经过可升降的无摩擦机构连接于平面运动机构上, 船模自由升沉纵倾。实验时平面运动机构带动船模向前运动, 流体作用在船模上的作用力最终以模型约束力的形式作用在测量天平上, 这些作用力输入测量分析系统完成实验数据采集与处理分析。

对应的测量及数据分析程序, 为保证效率与便捷性, 具有以下基本功能:

- 1) 作用力及传感器等信号在线采集显示;
- 2) 数据采集兼具手动开始及触发开始;
- 3) 平面运动机构运动姿态监测;
- 4) 舵角螺旋桨转速等外设的在线操控;
- 5) 较完善的数据后处理功能, 包括水动力导数的在线计算及图表绘制;
- 6) 良好的扩展性, 以兼容不同的仪器设备。

相对于其它常规测量系统, 本文系统需要在有较强电磁干扰环境下, 精确解决横荡船摇等动态约束模实验的零相位起始整周期测量问题; 确保测量在运动周期的零相位开始, 并精确测量整数个周期。

根据这些目的, 本文在已有的平面运动机构的基础上, 组建了如图 1 所示的实验测量分析系统。为了确定横荡、船摇等动态约束模实验的零相位, 本文在平面运动机构上额外设置了开始触发装置 (光电开关), 并将其接至数据采集系统的触发端口上。

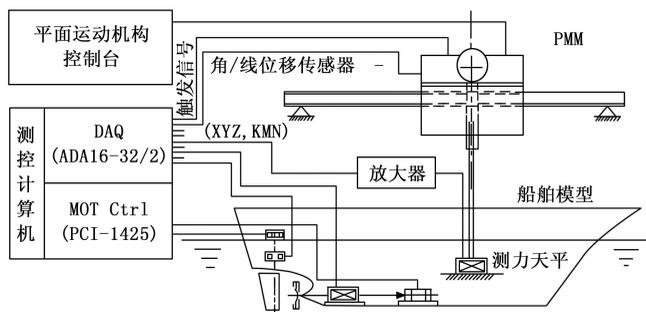


图 1 约束模测量系统方案示意图

整个测量系统设备主要包括以下几部分:

- 1) 平面运动机构: 本实验室已有设备, 运动幅度达 1.0 m, 为独立操控。
- 2) 数据采集: 康泰克多功能 PCI 数据采集卡 1 套, 16 位精度, 采集的数据包括测力天平作用力、平面运动机构姿态、触发信号等。
- 3) 运动控制: 研华 4 路步进/伺服电机控制卡 1 套, 用于控制舵角及螺旋桨转速。
- 4) 光电开关: 采用红外对射光电开关, TTL 数字信号输出以降低干扰; 数量共 3 个, 其一安装于平面运动机构

中心, 作为触发信号使用; 另两个安装于两侧, 用于左右限位报警。

5) 辅助机构: 舵角控制采用步进电机, 螺旋桨转速控制采用伺服电机, 共 4 个电机, 分别对应左舵右舵和左桨右桨; 线位移传感器及角位移传感器各一个, 用于测量平面运动机构的横向位移和艏向角度。

1.1 数据采集方案

数据采集系统由 16 位 32 通道康泰克 PCI 数据采集卡组成, 其具有硬件触发启动及触发停止功能, 用于采集测力天平的输出电压信号, 同时采集角位移及线位移传感器等信号, 配合测量分析程序完成数据的在线采集、处理、显示及存盘等功能。

1.2 零相位整周期测量方案

对于横荡、船摇等动态约束模实验, 其测量起始点需要从正弦函数 $y = \sin(\omega t)$ 的相位零点开始, 也即一个运动周期的起始时刻开始数据采集。由于 PMM 从开始运动到稳定自身有一个启动过程, 前面 2、3 个周期是过渡的, 后续周期才是稳定可用的。精准控制 (计时控制精度为毫秒级) 在一个周期的起始时刻开始数据采集, 手工无法实现, 只能采用硬件触发的方式开启。

本文采用以数字信号输出的红外光电对射开关, 以触发方式来启动数据采集。其中光电开关位于 PMM 中心位置, 其信号接至数据采集卡的触发端口, 当其光线没被阻挡时输出低电平, 而当 PMM 由左侧运动至该位置时光线被其上的一微小挡板阻断, 光电开关输出 5 V 高电平, 数据采集卡自动开启数据采集。同时为数据处理检测之用, 该触发信号一并接入采集卡的采集通道。

在编写测量分析系统程序时, 需将采集模式设置为触发启动模式。程序中, 点击开始后首先使用采集卡触发函数 AioSetAiStartTrigger 设置信号上升沿为启动模式, 然后使用函数 AioResetAiMemory 和 AioStartAi 启动数据采集, 此时程序并未开始采集数据, 只是监测触发信号, 收到触发信号后才真正开始采集。待采集 3、4 个周期后, 使用 AioStopAi 停止采集。

数据采集完成要停止时, 因傅里叶分析的要求, 采样时长必须精确地为运动周期的整数倍, 手工无法实现, 硬件触发停止也有诸多不便。本文采用软件方法实现: 数据采集完成后, 对光电开关信号进行处理, 检测其上升沿信号, 以最后一个偶数次上升沿作为停止时刻, 此时刻之前的数据为有效数据, 进行在线处理, 此后的数据直接忽略。

1.3 平面运动机构姿态监测

监测系统是为了实时记录整个系统的运动姿态, 主要作参考之用, 为后期数据处理分析提供运动姿态数据。该部分由角位移传感器、线位移传感器和数据采集卡组成。其中角位移传感器通过塑料绝缘件连接于平面运动机构的船摇轴上, 线位移传感器通过塑料绝缘件连接于平面运动机构的横荡机构上, 这两个传感器信号全部接入数据采集卡由采集系统进行后台采集。

1.4 桨舵的控制

本文采用研华四路运动控制卡来程控船模的舵角和螺旋桨转速, 舵角采用步进电机进行控制, 螺旋桨转速采用伺服电机进行控制, 以 CW/CCW 脉冲方式运行^[5]。其中第 1, 2 路用于控制左、右舵的舵角, 以点位模式运行; 第 3, 4 路用于控制左、右桨的转速, 以速度模式运行。

测量分析程序中, 舵角的控制采用如下方式实现: 使用函数 Acm_SetF64Property 设置转舵的起始速度 (PAR_AxVelLow)、运行速度 (PAR_AxVelHigh), 加速度 (PAR_AxAcc)、减速度 (PAR_AxDec) 和 TS 过渡曲线 (PAR_AxJerk), 为减小转舵扰动, 运行速度应为小量, 可设置为 1~3°/s; 然后使用 Acm_AxMoveAbs 或 Acm_AxChangePos 驱动电机转动舵角。螺旋桨转速的控制实现方法类似, 首先使用函数 Acm_SetF64Property 设置起始速度、运行速度、加速度、减速度及过渡曲线, 其中运行速度为螺旋桨的目标转速, 然后使用函数 Acm_AxMoveVel 或 Acm_AxChangeVel 转动螺旋桨; 停止则使用 Acm_AxStopDecEx 函数。

2 约束模方程及数据处理方法

本文采用如下三自由度船舶操纵性运动控制方程:

$$\begin{cases} (m - X_{\dot{u}})\dot{u} - (m - Y_{\dot{v}})vr + X = X_m u^2 + X_{vv}v^2 + X_{rr}r^2 + X_{vr}vr \\ (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + mur + Y = Y_v v + Y_r r + Y_{|v|} |v| + Y_{|r|} |r| \\ (I_{zz} - N_{\dot{r}})\dot{r} + N = N_{\dot{v}}\dot{v} + N_v v + N_r r + N_{|v|} |v| + N_{|r|} |r| \end{cases} \quad (1)$$

式中, m, I_{zz} 分别为船舶的质量及转动惯量; u, v, r 分别为船舶纵向、横向速度及转首角速度, 其上面的点表示对时间求导, 即运动加速度; X, Y, N 分别为船舶纵向、横向及艏向的约束力; 而各个带下标的 X, Y, N 分别为对应的水动力导数, 如 X_m 为纵向水动力关于 u 的二阶导数, Y_v 为横向水动力关于 v 的一阶导数, 限于篇幅其余导数意义可参考文献 [3], 而对应的无因次导数在其后加撇号 (') 表示。本文限于篇幅仅简要给出斜拖、横荡和艏摇 3 种约束模实验的方程及数据分析处理方法。

2.1 斜拖数据处理

斜拖实验为稳态实验, 船模运动速度为 U , 漂角为 β , 其余运动参数为零, 将其代入式 (1) 得斜拖约束模方程:

$$\begin{cases} X(\beta) = X_m u^2 + X_{vv} v^2 \\ Y(\beta) = Y_v v + Y_{|v|} |v| \\ N(\beta) = N_v v + N_{|v|} |v| \end{cases} \quad (2)$$

式中, $u = U \cos(\beta), v = -U \sin(\beta)$, X_m 本文用零漂角的值直接进行计算; 对于该斜拖方程, 在测量完不同漂角的约束力后, 将其转换为基本的 $y = a + bx$ 线性函数, 应用最小二乘拟合算法^[6-8] 计算各水动力导数, 转换公式为:

$$\begin{cases} X - X_m u^2 = X_{vv} v^2 \xrightarrow{x_1 = X - X_m u^2, y_1 = X_{vv} \cdot x_1} \\ \frac{Y}{v} = Y_v + Y_{|v|} |v| \xrightarrow{x_2 = Y/v, y_2 = Y_v + Y_{|v|} \cdot x_2} \\ \frac{N}{v} = N_v + N_{|v|} |v| \xrightarrow{x_3 = N/v, y_3 = N_v + N_{|v|} \cdot x_3} \end{cases} \quad (3)$$

根据操纵性研究国际惯例, 需将有因次导数转换为无因次形式, 本文采用 $C = F / (0.5\rho L^2 U^2)$ 的形式进行无因次化。

2.2 横荡数据处理

横荡为动态实验, 一般只用于分析惯性类水动力导数。船模速度为 U , 平面运动机构横向作 $y = a \cdot \sin(\omega t)$ 运动, 运动幅值为 a , 角频率为 ω , 将其求导确定横向速度及加速度并代入式 (1), 得横荡约束模方程:

$$\begin{aligned} Y(t) &= (m - Y_{\dot{v}})a\omega^2 \sin(\omega t) + Y_v a\omega \cos(\omega t) + \\ &Y_{|v|} a^2 \omega^2 |\cos(\omega t)| \cos(\omega t) \\ N(t) &= -N_{\dot{v}} a\omega^2 \sin(\omega t) + N_v a\omega \cos(\omega t) + \\ &N_{|v|} a^2 \omega^2 |\cos(\omega t)| \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (4)$$

根据傅里叶分析的原理^[6-8], 对应水动力导数为:

$$\begin{aligned} a\omega^2 (m - Y_{\dot{v}}) &= Fourier_sin1(Y) \\ a\omega^2 N_{\dot{v}} &= -Fourier_sin1(N) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $Fourier_sin1(Y)$ 表示计算作用力 Y 的傅里叶 \sin 项 1 阶次系数, 其余类似。

为保证精度, 需要改变横荡幅值 a 进行多个工况的测量, 本文建议 5 个以上幅值。在所有工况测量完成后, 根据上式应用最小二乘拟合算法计算导数 $(m - Y_{\dot{v}})$ 和 $N_{\dot{v}}$, 其最小二乘转换公式为:

$$\begin{aligned} a\omega^2 (m - Y_{\dot{v}}) &= Fourier_sin1(Y) \\ \frac{y_4 = Fourier_sin1(Y)}{x_4 = a\omega^2} &\rightarrow y_4 = (m - Y_{\dot{v}})x_4 \\ a\omega^2 N_{\dot{v}} &= -Fourier_sin1(N) \\ \frac{y_5 = -Fourier_sin1(N)}{x_5 = a\omega^2} &\rightarrow y_5 = N_{\dot{v}}x_5 \end{aligned} \quad (6)$$

2.3 艏摇数据处理

艏摇实验为动态实验, 船模速度为 U , 平面运动机构横向作 $y = a \cdot \sin(\omega t)$ 运动, 艏向作 $\Psi = \arctan(a\omega/U \cos(\omega t))$ 运动, 漂角 $\beta = 0$, 将这些运动参数代入式 (1), 并进行傅里叶分析, 可得到对应的水动力导数的艏摇运动方程:

$$\begin{aligned} X_r Fourier_cos0 \left\{ \frac{k^2 \omega^2 \sin^2(\omega t)}{[1 + k^2 \cos^2(\omega t)]^2} \right\} = \\ Fourier_cos0 \{ X - X_m U^2 [1 + k^2 \cos^2(\omega t)] \} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} Y_r Fourier_sin1 \left[\frac{-k\omega \sin(\omega t)}{1 + k^2 \cos^2(\omega t)} \right] + \\ Y_{rr} Fourier_sin1 \left\{ \frac{-k^2 \omega^2 |\sin(\omega t)| \sin(\omega t)}{[1 + k^2 \cos^2(\omega t)]^2} \right\} \approx \\ Fourier_sin1(Y - ma^2 \omega^2 \sin(\omega t) \cos(\psi)) \end{aligned} \quad (8)$$

$$k\omega^2 (I_{zz} - N_{\dot{r}}) \approx Fourier_cos1(N) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} N_r Fourier_sin1 \left[\frac{-k\omega \sin(\omega t)}{1 + k \cos(\omega t)} \right] + \\ N_{rr} Fourier_sin1 \left\{ \frac{-k^2 \omega^2 |\sin(\omega t)| \sin(\omega t)}{[1 + k^2 \cos^2(\omega t)]^2} \right\} \approx \end{aligned}$$

$$Fourier_sin1(N) \quad (10)$$

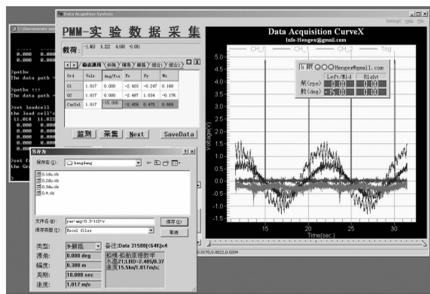
式中, $k = a\omega/U$, ψ 为艏向角, 以上各水动力导数本文建议用合速度周期均值 U_m 进行无因次化, 其均值近似为:

$$U_m = U \left(1 + \frac{k^2}{4} - \frac{3k^4}{64} + \frac{15k^6}{256} \right) \quad (11)$$

为保证精度, 特别是高阶项导数的精度, 需要改变幅值 a 进行 (≥ 5) 个工况的测量。在所有工况测量完成后, 根据式 (7) ~ (10) 应用最小二乘拟合算法计算各个水动力导数。其最小二乘转换公式为同式 (3)、(6) 类似, 限于篇幅不再给出。

3 测量分析程序

在以上工作的基础上, 本文编写了测量及数据处理分析程序^[8-12]。该程序全部采用 C 语言编写, 可运行于 Win2000~Win10 系统, 主要功能内部自主实现, 程序界面如图 2 所示。为兼顾扩展性, 程序分为两大部分, 即专用的主控程序部分和通用的辅控程序部分 (舵角控制、转速控制、运动指示等), 辅控程序由主控程序联机在线自动操控, 也可手控运行。



(a) 主控



(b) 辅控

图 2 船舶约束模测量分析程序

程序中已内置配套传感器的系数, 可以直接使用, 也可重新标定。数据记录方面, 采用 Excel 以多页表形式存储所有设置性、结果性数据, 而原始测量数据因数量巨大则以二进制文件另行保存。

在进行测量前, 首先根据实验类型将程序数据处理方式调至斜拖、横荡或艏摇等界面; 并根据需要进行传感器系数标定及零点采集。

测量时, 程序在线完成数据的采集与结果的计算处理, 并记录存盘。当每组约束模所有工况完成后, 通过程序菜单或字符控制台模式, 进入水动力导数的在线分析处理界

面, 在线计算各水动力导数, 检验导数拟合曲线及原始测点曲线。如发现拟合曲线和测点曲线偏差较大, 则表明数据可能存在较大误差, 可直接再次进行重新测量即可, 而不用等后期发现问题后再来重测。

3.1 传感器标定

作为一项基本功能, 程序已内置传感器的标定功能。标定时将程序数据处理调至标定界面, 根据需要进行测力传感器、线位移传感器及角位移传感器的标定。

本文采用两点线性方法标定:

$$y = k(u - u_0) \quad (12)$$

其中: y 为传感器对应的物理量, u 为传感器输出电压, u_0 为电压零点。标定流程如图 3 所示 (以线位移传感器为例)。

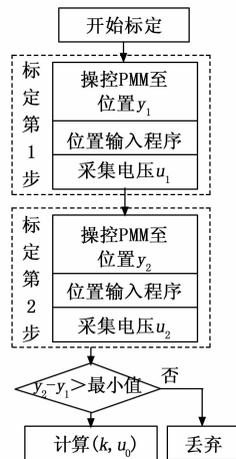


图 3 传感器系数标定流程

其中, 需保证精度两步中传感器的物理量差 ($y_2 - y_1$) 足够大, 否则忽略该传感器的标定, 其仍采用原先值。

标定结束后, 程序自动记录这些传感器系数和电压零点。因传感器的零点在不同情况下一般会出现一些变化, 故程序中电压零点可以单独另行设置。

3.2 数据在线采集与处理

因作者通常使用的数据采样速率均较高 (≥ 1000 Hz), 程序中不能采用软件轮询的方式进行数据采集与处理。本文采用硬件缓存采集方式进行, 简要方案或步骤如下。

1) 进行采集设置: 设置数据采集率, 采样通道, 设置后台 FIFO 缓存采集方式。

2) 设置后台回调函数, 此函数负责数据在线采集与处理, 并绘制显示实时曲线; 为防止程序堵塞, 该回调函数仅进行最基本的数据处理与显示。

3) 数据采集完成后, 停止当前工况的采集, 对测量数据进行初步处理。对于斜拖, 因其是稳态工况, 直接计算各约束力 (X, Y, N) 的均值并作记录; 对于横荡艏摇等动态工况, 首先对触发信号进行处理以确定实际运动周期, 然后采用傅里叶分析, 计算约束力的各个阶次的傅里叶系数, 本文中计算零阶至三阶傅里叶系数, 并作记录。

待每组约束模所有工况完成后, 进行水动力导数的在

线处理；采用式 (2)、(3) 对斜拖中间结果进行最小二乘拟合确定斜拖导数，采用式 (5) ~ (10) 对横荡船摇结果进行最小二乘拟合确定其各自导数。

3.3 主控辅控程序的互联

在测量过程中，为提高效率，辅控程序自动接受并执行主控程序指令，无需手工介入。联机时主控程序自动下发运动指令并监测运动状态，辅控程序则接收指令驱动机构运动，并向主控返回当前状态。在程序中，它们之间采用以下方式建立通讯互联：

- 1) 主控程序使用函数 FindWindow 搜寻辅控程序。
- 2) 主控程序使用函数 SendMessage 向辅控程序发送握手消息，辅控程序应答，建立通讯。
- 3) 主控、辅控程序使用函数 PostMessage 互相通讯互联。

4 实验测量及分析

在测量分析系统开发完成后，本文进行了简单的实际测试，以验证以上各项工作。测量对象如图 4 所示，船模长度为 2.485 m，船模质量 $m=56.5 \text{ kg}$ ($m'=0.0719$)；实验水温 $21 \text{ }^\circ\text{C}$ ，流体密度 997.996 kg/m^3 ；船模运动速度根据实船目标航速采用傅汝德相似原理进行确定，为 1.017 m/s ；斜拖时，漂角工况共 11 个，分别为 $\beta=-30, -20, -15, -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 30^\circ$ ；横荡及船摇时，PMM 运动设定周期 10 s ，运动幅度 $a=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 \text{ m}$ 。下面给出具体的测量结果，并作简要分析。

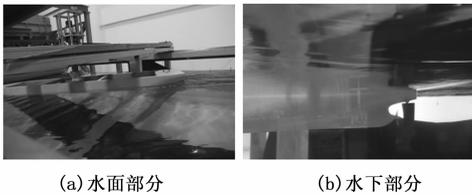


图 4 实验测量船模

4.1 测量过程及结果分析

斜拖实验为稳态运动测量，漂角依次由 -30° 调整至 30° ，每工况采样时间 $\geq 20 \text{ s}$ ，取其时间均值作为最终结果，表 1 给出了斜拖不同漂角时的模型约束力。

表 1 斜拖约束力测量结果

漂角/ $^\circ$	X/N	Y/N	N/(N·m)
-30	-5.129	-38.132	-23.846
-20	-4.005	-17.996	-12.044
-15	-3.509	-11.207	-8.477
-10	-3.057	-5.859	-5.411
-5	-2.635	-2.033	-2.898
0	-2.421	-0.151	-0.152
5	-2.484	1.660	2.732
10	-2.818	5.113	5.258
15	-3.134	10.281	8.331
20	-3.625	16.851	11.852
30	-4.267	36.202	23.309

因船体左右对称，理论上，约束力 X 关于漂角偶对称，约束力 Y 和 N 关于漂角奇对称。但测量中因模型加工误差、安装偏差、测力天平误差等各种因素影响，这 3 个约束力关于漂角并不完全对称性。测量结果显示，约束力 X 对称性稍差，其原因为 X 数值较小，一个小的误差就会产生较大的影响；而约束力 Y 和 N 因其数值较大，误差影响较小，其对称性比较理想。整体而言，斜拖测量结果是比较理想的。

横荡和船摇实验为动态运动测量，实验时首先启动平面运动机构进行横荡船摇运动，待平面运动机构运动 2、3 个周期到达稳定后，然后在程序中点击开始采集，以触发启动方式开启数据采集，随后当平面运动机构运动到中间，也即相位零点时，程序根据光电开关触发信号，自动开启数据采集。

图 5 和图 6 给出了部分横荡和船摇测量结果，图中包括了模型约束力 (X, Y, N)，触发信号 (Trig) 及平面运动机构横向位移 y 和船向角 ψ 的历时曲线，其中触发信号单位为电压 V，横向位移单位为 m，船向角单位为 rad。

结果显示：数据采集开始时刻正好对应触发信号前面的上升沿，无延后或超前；触发信号约 5 秒一次，分别对

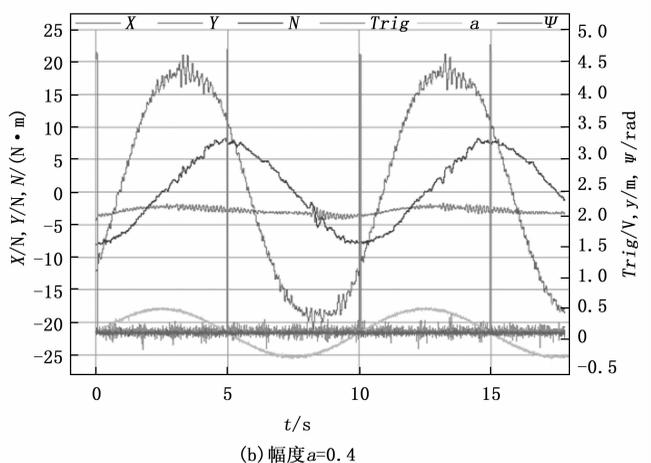
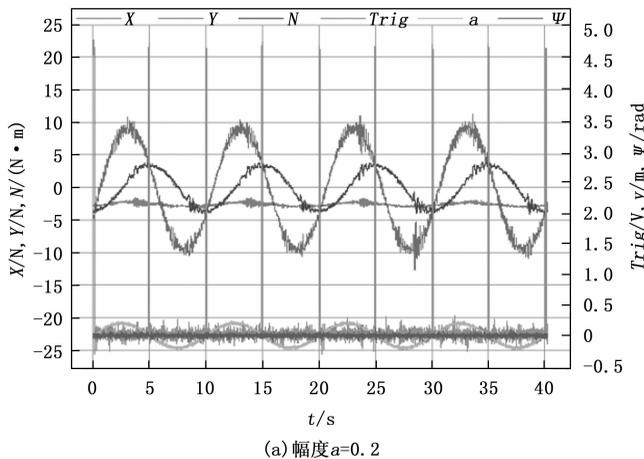


图 5 横荡测量原始数据

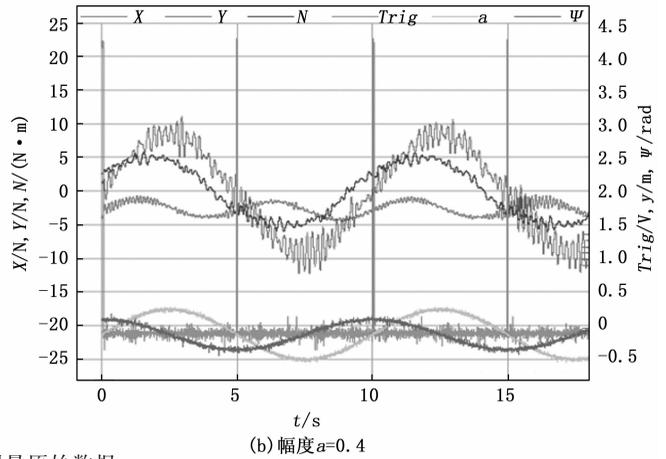
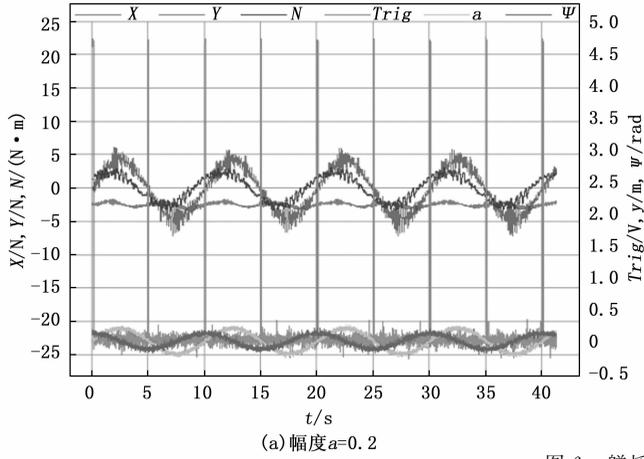


图 6 船摇测量原始数据

应 0° 和 180° 相位, 高电平时间极短, 仅几十个毫秒, 对应光电开关被挡板阻挡的时间; 约束力 (X, Y, N) 横荡时表现为较理想三角函数曲线, 而船摇时则表现为变形的三角函数曲线, 其原因为高阶项作用力的影响较大以致曲线变形; 而平面运动机构横向位移曲线 y , 为理想的正弦函数曲线, 零时刻位移 $y=0$, 运动幅值和设定值一致, 可以认为平面机构的运动, 测量系统姿态监测结果同预期结果一致; 图 6 显示船摇时, 船向角曲线同位移曲线相差 90° 相位, 角度幅值和设定值一致, 符合预期结果。

编写的测量程序在稳态测量、动态测量、触发采集、运动监测等方面, 测量结果和预期结果一致, 满足约束模实验的各项要求。

4.2 数据处理结果

根据以上测量结果, 进行数据处理分析, 以确定对应的水动力导数。根据式 (3) 对斜拖数据进行在线数据处理, 结果如图 7 所示, 其中的点线为测量数据, 连续曲线为导数的拟合结果; 可见 X 作用力拟合有些偏差, 其导数精度可能有些偏低, 而 Y, N 作用力拟合结果很好, 说明 Y, N 导数的精度较高。

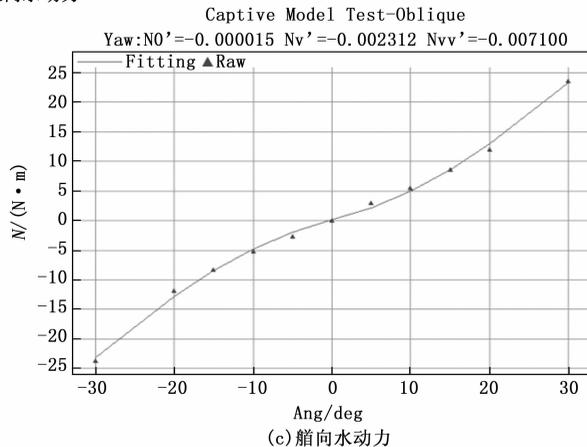
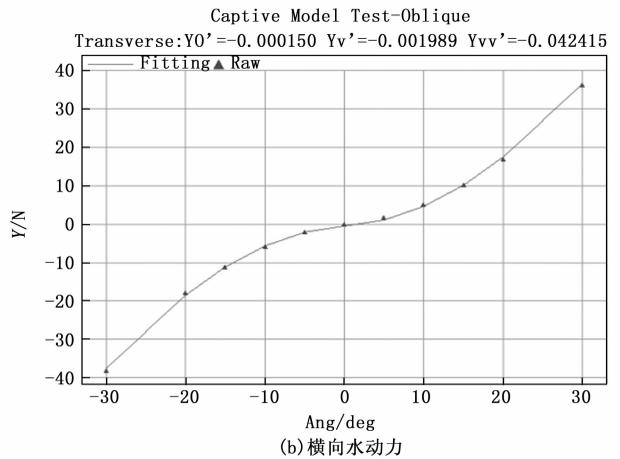
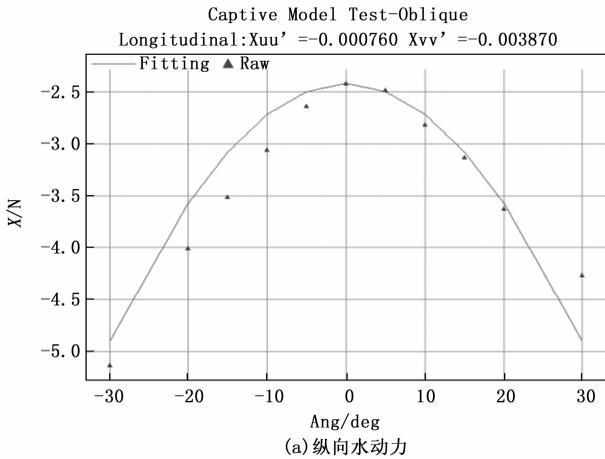


图 7 斜拖水动力导数处理结果

根据式 (5)、(6) 对横荡数据进行在线数据处理, 结果如图 8 所示。

根据式 (7) ~ (10) 对船摇数据进行在线数据处理, 结果如图 9 所示。

根据以上处理结果可以看出, 测量结果同水动力导数的拟合曲线, 除个别点外均符合得较好; 说明了本文测量系统及数据分析处理方法的正确性与可靠性。

综合以上各图表, 船舶的水动力导数如表 2 所示。

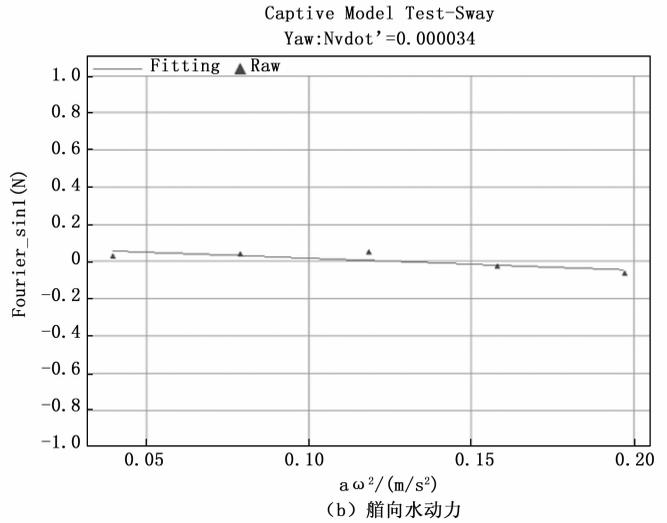
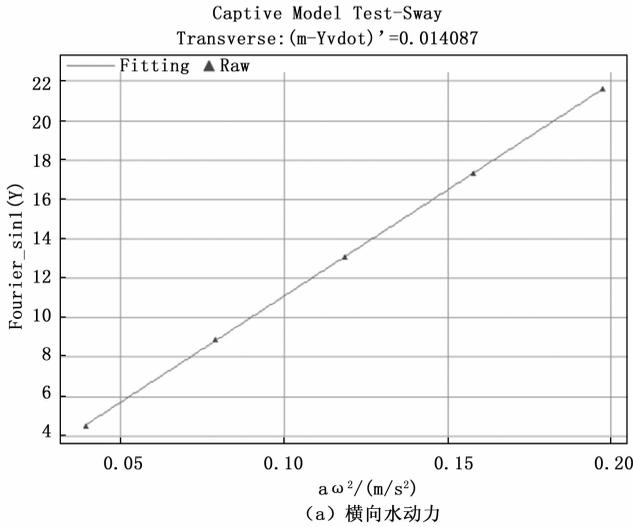


图 8 横荡水动力导数处理结果

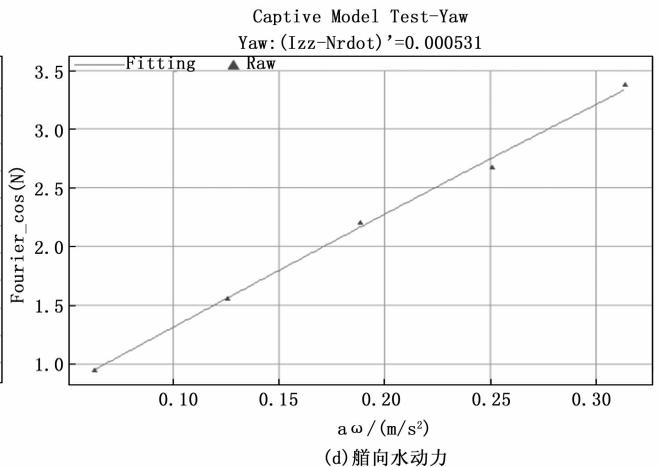
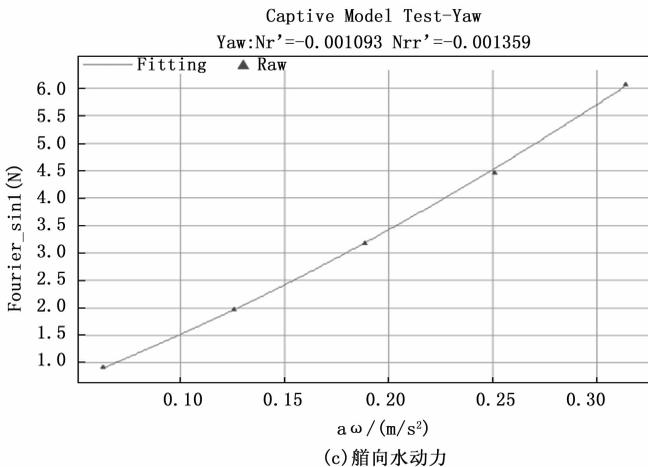
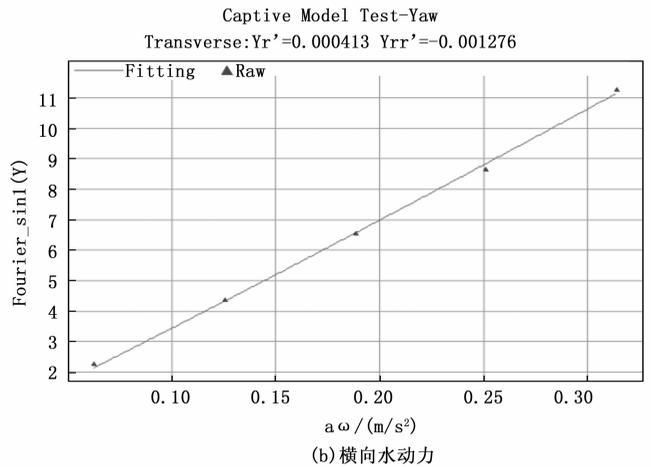
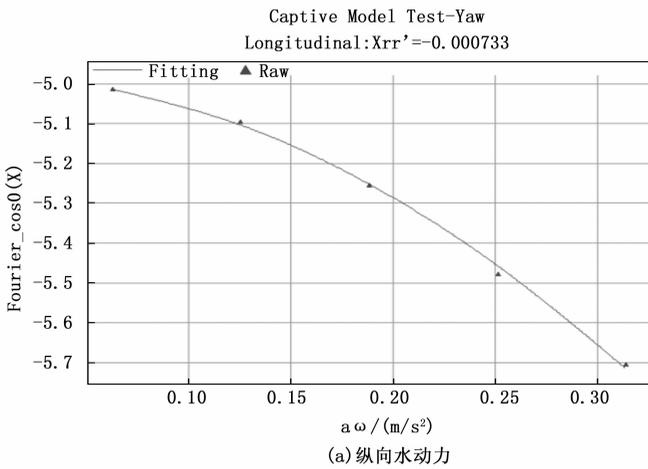


图 9 船摇水动力导数处理结果

表 2 水动力导数处理分析结果

导数	结果	导数	结果
X'_{uu}	-0.000 76	X'_{rr}	-0.000 733
X'_{uv}	-0.003 87	Y'_{rr}	0.000 413
Y'_{vv}	-0.001 99	Y'_{rr}	-0.001 28
Y'_{uv}	-0.042 4	N'_{vv}	-0.007 10
N'_{vv}	0.000 034	N'_{vv}	-0.002 31
$(I_{xx} - N_r)'$	0.000 531	N'_{rr}	-0.001 09
Y'_{vv}	-0.006 90	N'_{rr}	-0.001 36

结果显示, 一些意义明显的水动力导数有以下特征: 导数 Y'_{rr} , N'_{vv} 数值上为一个量, 其原因为船舶前后体大致相当, 但并不完全对称, 故其值一般是一个很小的数; 而导数 Y'_{uv} 其值和惯性质量 m' 很接近, 这同常规船舶的经验数据完全一致。

4.3 触发信号及运动周期分析

横荡及艏摇测量结果曲线显示, 数据采集起始时刻位于触发信号 (Trig) 的上升沿起点及止点之间, 但上升沿时间极短, 不足 1~2 ms, 触发信号 (光电开关信号) 上升沿在采集系统中不一定会记录下来。

故在测量完成后确定实际运动周期时, 需将光电开关信号起始的 1~2 s 数据跳过, 检测其后第偶数次 (偶数次对应 360° 相位) 上升沿信号作为实际周期; 同时结果显示触发信号中有一定的噪声, 为剔除噪声干扰本文建议以触发信号上升幅度大于 50% 高电平作为判断基准, 以确保系统的可靠性。

同时对测量结果分析发现, 系统存在横荡艏摇运动实际周期同设定值不一致问题。实测结果图 5 及图 6 显示第 4 周期的上升沿对应约 40.026 s, 对应周期为 10.006 5 s, 同设定周期 10 s 相比偏差约为 0.7%。其原因可能为 PMM 和测量系统的计时基准有些差异; 为了保证数据处理精度, 本文建议使用实测周期进行数据处理。

4.4 噪音与振动问题

测量结果显示, 信号噪声及振动一直比较大, 特别是靠近 PMM 艏摇电机的地方, 而离其较远的线位移传感器噪声则相对小许多, 这些噪声可能会对结果造成一定的负面影响。为了减小噪声干扰^[13-20], 可能要增设零相移滤波器对信号进行滤波处理, 这些待以后改进。

5 结束语

本文的工作解决了船舶操纵性约束模实验测量中相关应用技术问题, 基于平面运动机构设计给出了较为完整的约束模实验测量分析系统, 并成功应用于实际工程实验。文中采用数据采集卡、运动控制卡及各类传感器等组建了约束模测量系统, 并采用光电开关来精准实现横荡艏摇实验数据采集的触发启动, 解决了动态实验中的零相位整周期测量问题; 推导给出了约束模各水动力导数的数据处理

分析方法, 采用 C 语言开发了较为完善的约束模实验测量及数据处理分析程序, 可实现约束模实验的在线处理与分析, 完成各水动力导数的辨识。通过实际测量, 验证了本文所开发的系统。本文研究的展开, 对于类似实验运动机构或技术的开发可提供有益参考。

参考文献:

- [1] ITTC (International Towing Tank Conference). Recommended procedures and guidelines, captive model test [C] // ITTC Conference, Wuxi, 2017: 133-137.
- [2] OXGeneral. SNSimuEx-ship numerical simulator and captive model test-hengex@gmail.com [EB/OL]. (2023-03-10) [2023-06-10-21]. <http://oxgeneral.orgfree.com/snsimu>.
- [3] 范尚雍. 船舶操纵性 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [4] 郝亚平. 船舶性能试验技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [5] 王 飞, 吴小锋. 风洞舰船模型运动控制系统设计与开发 [J]. 实验室研究与探索, 2019 38 (12): 89-93.
- [6] 张韵华. 数值计算方法和算法 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [7] 陈丽娟. 计算方法 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2020.
- [8] WILLIAM H P, SAUL A T, WILLIAM T V. Numerical Recipes in C: the art of scientific computing [M]. Second edition. New York USA: Syndicate Press of Cambridge University, 1997: 196-532.
- [9] 应甫臣, 刘迎辉. C++ 到 VC++ 精彩 100 例 [M]. 北京: 电脑爱好者杂志社, 2002.
- [10] 韩 帅, 孟晓鑫, 陈 欢. 浅议通过 VB 编程实现计算机通讯 [J]. 电子测试, 2015, 9: 43-45.
- [11] 欧如月. MFC 多线程技术在串口通信中的应用 [J]. 信息与电脑 (理论版), 2017, 15: 171-172.
- [12] 袁 野. MFC 应用程序多线程混合显示界面方法研究 [J]. 电脑知识与技术, 2014, 32: 7630-7631.
- [13] 王高理. 伺服电机控制技术的应用与发展 [J]. 轻工科技, 2019, 35 (2): 64-65.
- [14] 孙 斌. 伺服电机的应用及技术控制研究 [J]. 自动化应用, 2017 (8): 67-68.
- [15] 杨毅德. 模拟电路 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2004.
- [16] 王 飞, 吴小锋. 风洞模型载荷实验测控技术研究 [C] // 中国空气动力学测控专委会七届三次全国学术交流会议论文集, 湖南芷江, 2018: 151-157.
- [17] 吴小锋, 王 飞, 叶永林. 模型风载荷实验测量系统开发与研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (3): 34-38.
- [18] 宋春华. 伺服电机泵系统不同联接方式的噪声和振动研究 [J]. 微特电机, 2010, 38 (9): 19-21.
- [19] 何颖安, 安晓莉. 无限脉冲响应切比雪夫数字带通滤波器的设计 [J]. 电子制作, 2023, 31 (2): 96-99.
- [20] 姜恩华, 周建芳, 邹 锋, 等. FIR 数字滤波器综合实验设计 [J]. 曲阜师范大学学报 (自然科学版), 2023 49 (1): 64-68.