

## 基于 UKF 多步和 BP 修正的船舶升沉运动测量方法\*

张 琴 董慧芳 刘敦康 张蒸忠 胡 雄

(上海海事大学物流工程学院 上海 201306)

**摘 要:** 为提高海上风机安装时的稳定性和精准性,需要对浮式起重船进行升沉运动补偿。但由于惯性系统测量的船舶升沉运动信息存在随机漂移和相位超前问题,严重影响升沉补偿系统的实时性和精确性,故本文提出基于 UKF 多步和 BP 修正的船舶升沉运动测量方法。基于 Stewart 波浪运动实验平台模拟船舶升沉运动,采用加速度惯性测量系统采集升沉位移和加速度信息,建立运动的状态空间模型;由此模型建立 UKF 观测器,并用状态转移矩阵根据动态检测的升沉运动超前相位进行多步观测,消除升沉运动的随机漂移和相位超前;进而结合 UKF 多步观测值和观测残差训练 BP 预测模型,通过预测的残差来实时修正多步观测器的观测值,提高测量精度。Stewart 平台试验表明,本文测量方法解决了实时检测中船舶升沉运动的漂移和相位超前问题,测量精度可达 90%。

**关键词:** 升沉运动测量;惯性测量系统;UKF 多步观测器;BP 残差修正

**中图分类号:** U666 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1099

Ship heave motion measurement method based on UKF multi-step  
and BP correction

Zhang Qin Dong Huifang Liu Dunkang Zhang Zhengzhong Hu Xiong

(Shanghai Maritime University, School of Logistics Engineering, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** In order to improve the stability and veracity of offshore wind turbine installation, it is necessary to perform the heave compensation of the floating crane. But the ship heave motion measured by the inertial system has the characteristics of the random drift and the advanced phase, which seriously affects the real time ability and accuracy of the heave compensation system. So this paper proposes a ship heave motion measurement method based on UKF multi-step observer and BP residual correction. Based on the Stewart wave motion experiment platform, the ship heave motion is simulated, and the inertial measurement system is used to collect heave displacement and acceleration information, then the state space model of the motion is established. Thus, a UKF observer is established by the state space model, and then the state transition matrix is used to perform multi-step observation according to the advanced phase of the heave motion of dynamic detection, to eliminate the random drift and the advanced phase of heave motion. And then, UKF multi-step observer and observation residual are applied to train the BP residual prediction model, and then the prediction residual is used to correct the observation of the multi-step observer online to improve measurement accuracy. The experiments based on Stewart platform show that the proposed method solves the problems of the random drift and the advanced phase of ship heave motion, and the measurement accuracy can be improved to 90%.

**Keywords:** heave motion measurement; inertial measurement system; multi-step UKF observer; BP residual correction

## 0 引 言

随着对清洁能源的重视,运用浮式起重船安装大功率风机也逐渐成为趋势。然而浮式起重船在复杂多变的海域环境中产生剧烈的升沉运动,导致无法进行安全有效的起吊作业和精准安装,因此需要实时精确的升沉补偿系统<sup>[1-2]</sup>。

浮式起重船的升沉补偿系统首先需要惯性技术进行升沉运动检测,由测得的升沉运动加速度经过二次积分得到船舶升沉位移信息<sup>[3]</sup>。由惯性测量元件(加速度传感器)测量得到运动信息被应用在很多领域<sup>[4-5]</sup>,但是由于惯性测量元件和惯性积分存在静电偏差和微电扰动,测量得到的升沉位移会出现随机的漂移和相位超前现象,严重影响测量

收稿日期:2022-03-02

\* 基金项目:国家自然科学基金(NSFC 62073213)、国家高技术研究发展计划项目(2013AA041106)资助

精度。许多学者通过改进数字低通滤波器来解决相位差的问题,但会出现收敛时间较长、稳定性不足的问题,不适合在线测量。文献[6]改进了传统用于升沉测量的数字滤波器,首先设计阻带衰减足够大的低通滤波器,通过互补方法将其转换为时延很小的高通滤波器,解决了数字滤波器相位差的问题,但存在低频衰减较慢并且收敛时间较长等问题。文献[7]在升沉滤波器的基础上通过实时修正传递函数的零点和极点,解决了相位问题,但是存在稳定性问题,有局限性。文献[8]运用带限傅里叶组合算法对船舶升沉运动进行频率估计,抑制传感器噪声和零偏,但未进一步利用实测数据对算法进行验证。文献[9]设计了自适应数字滤波器,利用互补方法降低传统数字滤波器的延时,其次通过快速傅里叶变换得到升沉运动频率特性,设计出最优的滤波器截止频率。文献[10]利用傅里叶变换求出平均海浪高度和最优剪切频率,由此求出使升沉滤波器误差达到最小的参数,但是最优截止频率和最优剪切频率容易受外界传感器误差的干扰而失真,导致滤波器效果不理想。卡尔曼滤波算法(Kalman filter, KF)也广泛应用在非线性的测量领域<sup>[11-14]</sup>,文献[15]利用扩展卡尔曼滤波进行船舶升沉运动测量,但增加了算法的复杂性,无法实时测量比较复杂的海况。文献[16]采用无迹卡尔曼滤波(unscented Kalman filter, UKF)测量船舶运动,得到了比较精确的船舶测量,但是没有考虑实际系统的干扰。在船舶非线性运动系统中,由于周围环境和系统特性的影响,采集数据时会引入随机的干扰,造成运动的漂移、相位误差,这严重影响船舶升沉补偿系统性能。UKF 非常适合于船舶运动这种非线性运动的测量,为进一步解决相位问题,本文提出 UKF 多步观测器。因 BP 神经网络方法具有快速预测的性能,文献[17-18]将 BP 神经网络用于船舶横摇运动预测中,得到了较好的预测结果,但是在实际应用中,单一的 BP 模型无法解决船舶升沉运动的漂移问题。考虑到 BP 神经网络能够在小样本的情况下,快速地进行预测,很适合用于船舶运动的实时研究,因此将 BP 神经网络和本文提出的 UKF 多步观测器相结合,进行观测值的残差修正。

在此基础上,本文提出了基于 UKF 多步和 BP 修正(UKF 多步-BP 修正)的船舶升沉运动测量方法,用来消除因惯性测量系统导致船舶升沉运动产生的漂移、相位超前问题。

## 1 惯性元件测量船舶升沉运动分析

### 1.1 升沉运动测量误差分析

由于环境影响和器件自身的特性,惯性测量元件加速度传感器的实际测量信息存在常值零偏和噪声:

$$a_c = \ddot{h} + b + \zeta \quad (1)$$

式中:  $h$  为升沉位移;  $b$  为加速度的常值零偏;  $\zeta$  为测量噪声。需要运用惯性测量系统对加速度信息进行滤波和积分处理,才能得到升沉位移  $h$ 。但是在实际测量过程中,一方面由于惯性测量系统(加速度传感器和惯性积分)存在静电

偏差和微电扰动,导致测量的船舶运动存在随机的漂移现象;另一方面由于系统内置数字滤波特性,测量的船舶运动也存在相位超前问题,如图 1 所示。

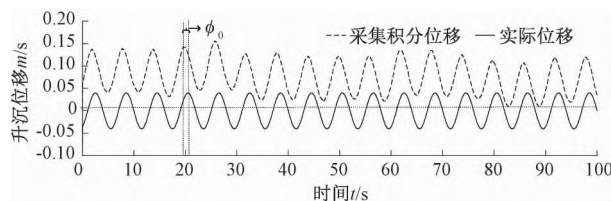


图 1 含漂移和相位超前现象的升沉运动对比

由图 1 可知,由惯性测量系统测量得到的船舶升沉运动存在很严重的随机漂移和相位超前现象。设惯性测量系统带来的超前相位大小为  $\phi_0$ , 则对应的超前时间  $t_0$ 。由超前时间  $t_0$  和升沉位移  $h$  可以得到式(2)相位超前误差。

$$\begin{cases} t_0 = \phi_0 / \omega \\ h = a \sin(\omega t + \phi) \\ \Delta h = |a \sin(\omega t + \phi) - a \sin(\omega(t + t_0) + \phi)| = \\ 2a |\sin(\phi_0 / 2)| \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\omega$  为升沉位移的频率。由此可知存在相位超前  $\phi_0$  会引为位移幅值 2 倍的误差,导致主动升沉补偿的效果明显变差。

因此本文提出 UKF 多步观测和 BP 残差修正的船舶升沉运动测量方法,解决两个主要的问题:1)惯性测量系统的静电偏差和微电扰动引起的升沉运动漂移误差;2)升沉运动相位超前误差。

### 1.2 升沉运动测量方案

基于对惯性测量系统测量船舶升沉运动的误差分析,本文提出了 UKF 多步和 BP 修正(UKF 多步-BP 修正)的船舶运动测量方法,如图 2 所示。惯性测量系统主要由加速度计和惯性积分组成,用来采集船舶升沉位移和升沉加速度,根据其关联关系建立由状态转移矩阵和测量矩阵组成的状态空间模型。并在此基础上搭建 UKF 观测器,由超前相位计算观测步数,进行多步观测,并运用测量和估计的误差调整检测值,消除测量数据的漂移和相位超前。针对 UKF 多步观测器的测量残差,采用 BP 神经网络进行残差预测修正。用滑动窗口不断更新 BP 残差预测模型的输入,实现实时的残差预测及修正,可进一步提高测量的精度。

## 2 UKF 基本原理

船舶升沉运动是复杂的非线性运动,UKF 在卡尔曼滤波的基础上运用 UT 变换将非线性系统转换成线性系统,因此与 KF 方法相比,UKF 更适用于船舶升沉运动的非线性模型。UT 技术主要通过  $2n+1$  个 sigma 点的线性回归来线性化随机变量的非线性函数,是随机变量的扩展,这种线性化要比扩展卡尔曼(extended Kalman filter, EKF)的泰勒级数线性化更准确,计算量也相对较小,更适用于实时测量。

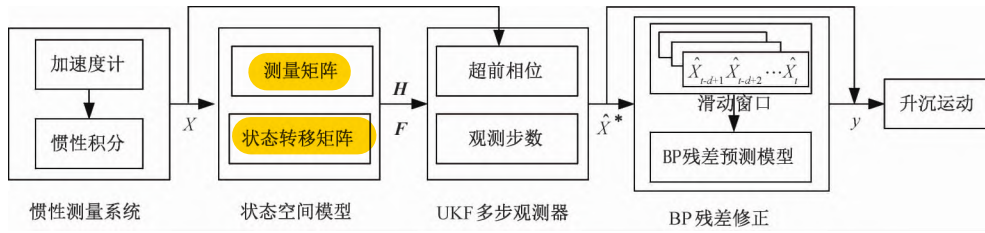


图 2 UKF 观测-BP 残差修正的船舶运动测量方法

针对船舶升沉运动测量问题,状态方程和量测方程可以描述为如下:

$$\begin{cases} X_k = F_{k/k-1} X_{k-1} + q_k \\ Z_k = H_k X_k + r_k \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $X_k$  为状态变量,  $Z_k$  为量测变量,  $F_{k/k-1}$  为状态转移矩阵,  $H_k$  为量测矩阵,  $q_k$  为系统误差,  $r_k$  为测量噪声。

基于式(3)船舶升沉运动的状态空间模型,UKF 多步观测器算法推导如下。

1) 给定  $k-1$  时刻的状态估计  $\hat{X}_{k-1/k-1}$ , 协方差  $P_{k-1/k-1}$ , 利用 UT 变换选取  $2n+1$  个 sigma 点。

$$\begin{cases} \chi_{k-1/k-1}^0 = \hat{X}_{k-1/k-1}, i = 0 \\ \chi_{k-1/k-1}^i = \hat{X}_{k-1/k-1} + \sqrt{n+\lambda} [\sqrt{P_{k-1/k-1}}]_i, \\ i = 1, 2, \dots, n \\ \chi_{k-1/k-1}^{n+i} = \hat{X}_{k-1/k-1} - \sqrt{n+\lambda} [\sqrt{P_{k-1/k-1}}]_i, \\ i = n+1, n+2, \dots, 2n \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $n$  为状态向量的维数,  $\lambda$  为比例因子, 用于调节 sigma 点在均值范围的分布。

2) 根据式(3)状态空间模型进行 sigma 点传播, 由一步预测方程进行时间更新, 由量测方程进行量测值更新。

一步预测方程:

$$\begin{cases} \chi_{k/k-1}^i = F_{k/k-1} (\chi_{k-1/k-1}^i), i = 1, 2, \dots, 2n \\ x_{k/k-1} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^m \chi_{k/k-1}^i \end{cases} \quad (5)$$

量测方程:

$$\begin{cases} Z_{k/k-1}^i = H_k (\chi_{k/k-1}^i), i = 1, 2, \dots, 2n \\ \hat{z}_{k/k-1} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^m Z_{k/k-1}^i \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $w_i^m$  为每个 sigma 点对应的均值权值为:

$$\begin{cases} w_0^m = \lambda / (n + \lambda) \\ w_i^m = 1 / 2(n + \lambda) \quad i = 1, 2, \dots, 2n \end{cases} \quad (7)$$

3) 计算观测反馈增益  $K_k$  和协方差阵  $P_{k/k}$ 。

通过中间变量  $S_k$ 、 $C_k$  观测反馈增益  $K_k$  为:

$$\begin{cases} S_k = \sum_{i=0}^{2n} w_i^c (Z_{k/k-1}^i - \hat{z}_{k/k-1}) (Z_{k/k-1}^i - \hat{z}_{k/k-1})' + R_k \\ C_k = \sum_{i=0}^{2n} w_i^c (\chi_{k/k-1}^i - \hat{X}_{k/k-1}) (Z_{k/k-1}^i - \hat{z}_{k/k-1})' \\ K_k = C_k S_k^{-1} \end{cases} \quad (8)$$

协方差  $P_{k/k}$  更新为:

$$\begin{cases} P_{k/k-1} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^c (\chi_{k/k-1}^i - x_{k/k-1}) (\chi_{k/k-1}^i - x_{k/k-1})' + Q_k \\ P_{k/k} = P_{k/k-1} + K_k S_k K_k' \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $R_k$  为量测噪声矩阵, 取值与传感器参数相关;  $Q_k$  为过程噪声矩阵;  $w_i^c$  为每个 sigma 点对应的方差权值为:

$$\begin{cases} w_0^c = w_0^m + (1 - \alpha^2 + \beta) \\ w_i^c = 1 / 2(n + \lambda) \quad i = 1, 2, \dots, 2n \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\alpha \in (0, 1]$ ,  $\beta$  为先验知识常数, 高斯分布时最优值为 2。

### 3 UKF 多步观测和 BP 残差修正方法

#### 3.1 船舶升沉运动状态空间模型

船舶升沉运动在短时间内可以看作是由不同幅值、不同相位的余弦波叠加而成, 即可以表示为:

$$h(t) = \sum_i^n h_i(t) = \sum_i^n A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) + \Delta h \quad (11)$$

式中:  $A_i$ 、 $\omega_i$ 、 $\varphi_i$  分别为第  $i$  个余弦分量的幅值、频率、相位,  $\Delta h$  为拟合船舶升沉运动的误差, 可以看作是随机的误差。

考虑到升沉位移和升沉加速度的关系及测量误差的影响, 故取状态变量  $x$  为:

$$x = [h_1 \quad \dot{h}_1 \quad h_2 \quad \dot{h}_2 \quad \dots \quad h_n \quad \dot{h}_n \quad \Delta h]$$

构建船舶升沉运动状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = F(t)x(t) \\ z(t) = H(t)x(t) \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $F(t)$  是状态转移矩阵,  $H(t)$  是观测矩阵, 如下所示:

$$F(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -\omega_1^2 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_2^2 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$\omega_i = 2\pi f_i$$

$$H(t) = [1 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad \dots \quad 1]$$

在实际的应用中须将连续时间信号  $x(t)$  离散化为采

样值  $X(kT)$ ,  $T$  为采样的时间间隔, 得到离散的升沉运动状态空间模型:

$$\begin{cases} X_k = F_{k/k-1} X_{k-1} \\ Z_k = H_k X_k \end{cases} \quad (13)$$

则离散化后的状态转移矩阵和观测矩阵分别为:

$$F_{k/k-1} = e^{F(t)T}$$

$$H_k = H(t)$$

由式(13)可知, 通过状态转移矩阵  $F_{k/k-1}$  可以将  $k-1$  时刻的状态值  $X_{k-1}$  进行一步预测得到  $k$  时刻的状态值  $X_k$ 。在实际应用中由于系统因素, 导致采集信息有一定的相位滞后, 因此一步观测无法满足实际需求, 基于此提出 UKF 多步观测方法。

### 3.2 UKF 多步观测模型

传统的 UKF 观测模型是由一步预测方程进行时间更新的, 由预测值和量测值结合消除升沉位移的漂移误差。但是在实际测量中出现的相位误差, 传统的 UKF 观测模型并不能解决, 因此在本文中由船舶升沉运动的超前相位、频率和采样间隔的关系计算观测步数  $m$ , 利用状态转移矩阵进行多步观测, 用来消除船舶升沉运动的相位误差。

由式(13)设计 UKF 多步观测器为:

$$\begin{cases} \hat{X}_{k/k} = \hat{X}_{k/k-1} + K_k (z_k - \hat{z}_{k/k-1}) \\ m = \phi / (\omega T) \\ \hat{X}_{k/k}^* = F_{k/k-1}^m \hat{X}_k \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $\hat{X}_0 = X_0$ ,  $T$  为采样时间间隔,  $\phi$  为二次积分位移的超前相位,  $\omega$  为升沉运动的频率。

由式(14)可知, 本文所提出的多步观测器, 由状态转移矩阵来建立多步观测矩阵  $F^m$ , 将估计出来的最优值  $\hat{X}_{k/k}$  进行多步预测, 消除相位误差, 得到最后的多步观测值  $\hat{X}_{k/k}^*$ 。

本文提出的 UKF 多步观测器的实时观测流程如图 3 所示。首先由惯性测量系统检测船舶升沉运动  $X_t$ , 建立船舶升沉运动的状态空间模型(状态转移矩阵  $F$ 、量测矩阵  $H$ ), 由于船舶升沉运动是实时变化的, 需要实时更新 UKF 多步观测器参数。设定大小为  $N$  的时间窗, 每隔  $\Delta t$  (10~30 s) 更新时间窗内船舶升沉运动时间序列  $X_{t-N}, \dots, X_t$ , 并进行快速傅里叶变换得到  $n$  个主要的运动频率, 用于实时更新 UKF 多步观测器的状态转移矩阵  $F$ 。运用激光传感器作为参考系统得到实际升沉运动, 然后和惯性测量系统输出比较得出超前相位, 计算观测步数建立 UKF 多步观测。

由 UKF 多步观测可以消除由惯性测量系统导致的船舶升沉运动的随机漂移和相位超前, 但是由于船舶升沉运动实时变化很快, 观测得到的升沉运动有一定的残差, 为进一步提高测量精度, 在 UKF 多步观测器的基础上提出了运用 BP 残差预测模型进行观测值的修正。

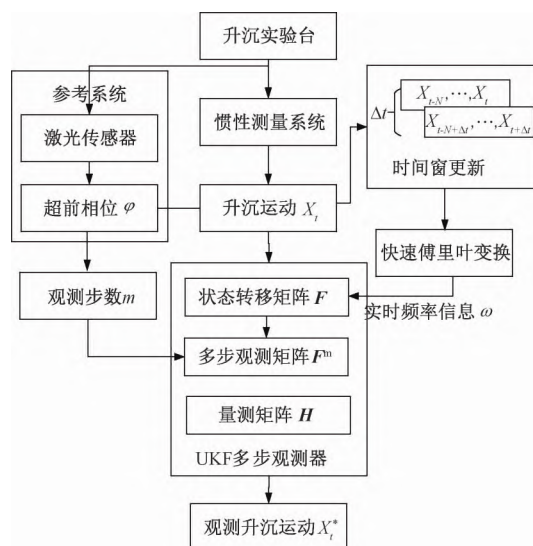


图 3 船舶升沉运动 UKF 实时观测量流程

### 3.3 BP 残差预测模型

BP 神经网络在深度学习中由于其快速性和准确性被广泛应用, 主要由输入层、隐藏层和输出层组成。BP 神经网络其结构简单, 运算较快, 因此比起其他复杂的神经网络适合于船舶升沉运动的实时测量。将 UKF 多步观测的输出  $\hat{X}_t^*$  作为 BP 残差预测模型的输入, 选取合适的滑动窗口  $d$ , 即为输入样本节点数, 输出样本节点数为 1。输入层经过隐藏层传送到输出层, 其隐含层输出和预测输出分别如下:

$$D = f\left(\sum_{m=1}^i (\omega_{mb} [\hat{X}_{t-d+1}^* \quad \hat{X}_{t-d+2}^* \quad \dots \quad \hat{X}_t^*]^T) - \gamma_b\right) \quad (15)$$

$$y_j = f\left(\sum_{n=1}^i (\omega_{nj} D) - \delta_j\right) \quad (16)$$

式中:  $[\hat{X}_{t-d+1}^* \quad \hat{X}_{t-d+2}^* \quad \dots \quad \hat{X}_t^*]^T$  为  $t$  时刻神经元的输入,  $\omega_{mb}$  为输入层与隐藏层的连接权值,  $\omega_{nj}$  为隐藏层与输出层的连接权值,  $\gamma_b$  为输入层神经元阈值,  $\delta_j$  为输出层神经元阈值,  $f$  为 Sigmoid 激活函数。

在实时测量中由训练好的 BP 模型进行船舶升沉运动观测值残差的预测, 然后与观测值相结合得到最优的升沉运动  $\tilde{X}_t$  如下:

$$\tilde{X}_t = \hat{X}_t^* + y_j \quad (17)$$

## 4 Stewart 平台试验分析

采用 Stewart 波浪运动试验平台、惯性测量元件和激光传感器搭建实验环境对所设计的算法进行验证。如图 4 所示, 首先运用 Stewart 平台模拟不同等级海况下的船舶升沉运动, 然后使用惯性测量元件(加速度传感器)测量升沉加速度, 经过惯性积分可得到船舶的升沉位移, Modbus 数据采集模块负责不同模块间的通信功能, 即可由上位机



得到船舶升沉运动信息并进行实时处理。Modbus 模块可以对船舶运动信息进行无线采集,更加方便了船舶升沉补

偿。本文运用激光传感器检测实际的升沉运动信息,对所提出的测量方法进行验证。

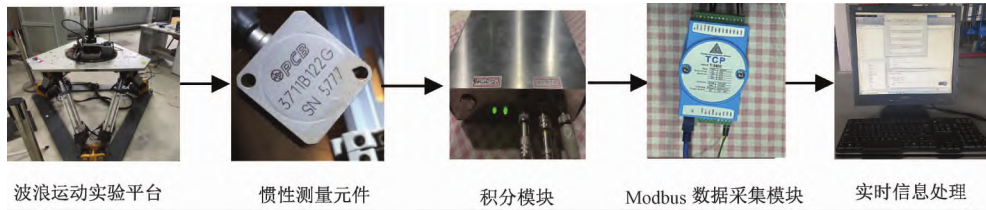


图 4 基于 Stewart 船舶升沉运动测量示意图

船舶的升沉运动由海浪运动引起,随着海况等级的变化而变化,表 1 所示为 4~6 级的海况参数。根据 Stewart 波浪运动实验平台,将实际海况的幅值比例缩小,分别选取 3 组试验来验证本文测量方法。

根据对船舶升沉运动的频率分辨率要求,选取 30 s 作为时间窗口对船舶升沉运动进行快速傅里叶变换实时更新频率信息。设置初始观测值为  $X_0 = [0 \ 0 \ 0]$ , 滤波均方误差初值估计矩阵  $P_0 = 0.1 * \text{eye}(3)$ , 信号模型噪声协方差矩阵  $Q_k = 10^{-5} * \text{eye}(3)$ , 量测噪声方差  $R_k = 0.022$ 。BP 残差修正模型参数设置:滑动窗口为 50 个步长,即输入节点为 50,隐藏层节点设置为 10,输出节点为 1,采用梯度下降法进行训练,学习率为 0.01,训练最大次数

表 1 模拟 4~6 级海况及试验参数

模拟海况及试验类型	波高/m	平均周期/s
4 级	2.01	5.1
试验 1	0.03	5.0
5 级	3.32	6.6
试验 2	0.04	6.0
6 级	5.15	8.2
试验 3	0.05	8.0

为 1 000 次。对波浪实验平台输入试验 1~3 的运动激励信号,船舶升沉测量实验结果如图 5~7 所示。

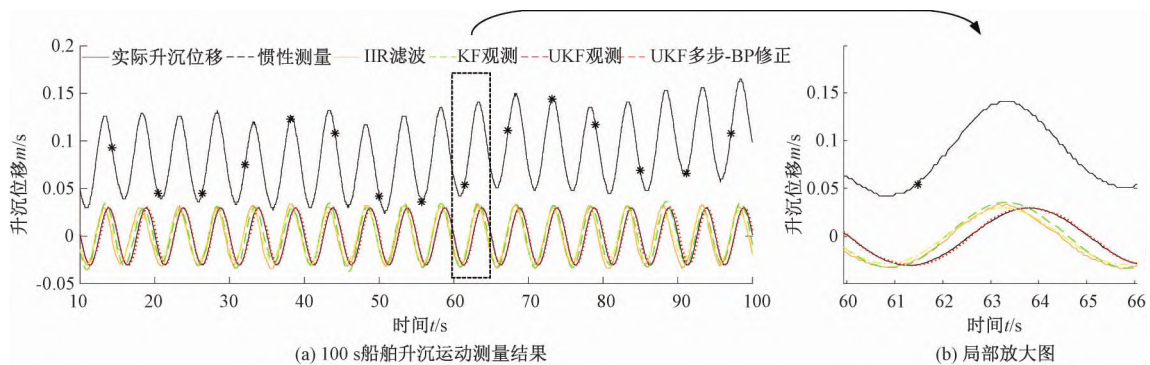


图 5 试验 1 模拟 4 级海况下船舶升沉运动测量实验结果

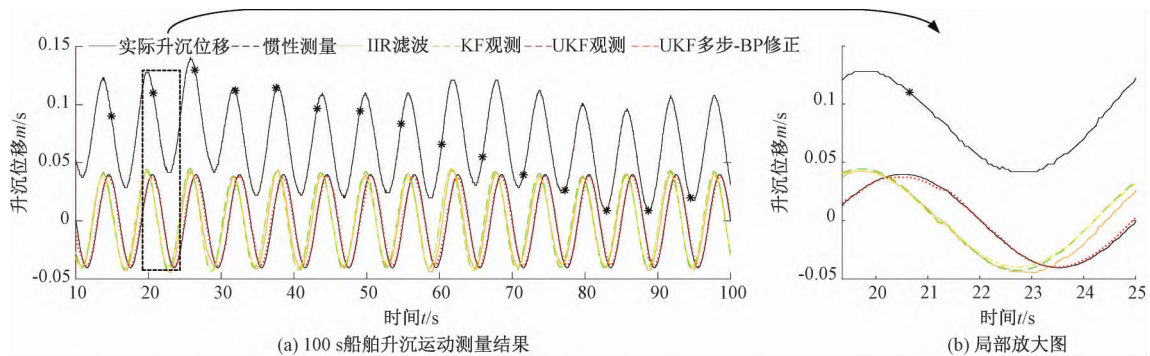


图 6 试验 2 模拟 5 级海况下船舶升沉运动测量实验结果

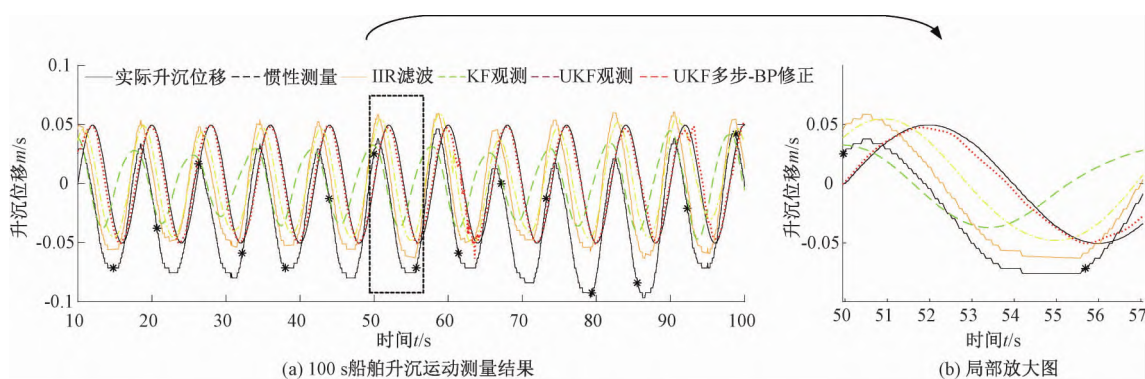


图 7 试验 3 模拟 6 级海况下船舶升沉运动测量实验结果

为了验证本文所提算法的有效性,本试验用 IIR 滤波方法、KF 观测方法、UKF 观测方法与本文提出的 UKF 多步-BP 修正方法进行比较,试验结果如图 5~7 所示。由图 5 可知,在试验 1 模拟的 4 级海况中,对应的船舶升沉运动频率较高、幅值较低,由惯性测量得到的运动漂移较为严重,存在相位超前问题,如图 5(a)黑色标星线所示;运用 IIR 滤波、KF 观测和 UKF 观测可以去除漂移,但是无法解决相位问题;而 UKF 多步-BP 修正方法,如图 5(a)点状虚线所示,在消除漂移的基础上进行相位的改进,在波峰波谷的地方也可以进行有效的修正。

在试验 2 模拟的 5 级海况中,如图 6 所示,船舶升沉运动频率降低,幅值增高,如图 6(a)黑色标星线所示;IIR 滤波方法能消除漂移,但测量产生的毛刺无法解决,如图 6(b)灰实线所示,这样会造成补偿平台抖动,不利于平台作业;而此时 UKF 多步-BP 修正方法跟踪效果明显优于其他方法,如图 5(a)点状虚线所示。

在图 7 中,试验 3 模拟的 6 级海况情况下,船舶升沉运动频率较低,幅值较高,惯性测量运动漂移降低,但是产生了幅值损失的情况,如图 7(a)黑色标星线所示;此时 KF 观测产生幅值损失,可达 40%,如图 7(b)条状虚线所示;UKF 观测和 IIR 滤波方法也产生了一定的损失;采用 UKF 多步-BP 修正方法可以解决相位超前和幅值损失导致的残差,进而提高船舶升沉运动的跟踪精度,如图 7(a)点状虚线所示。

综上,随着海况等级的增加,船舶升沉运动的频率降低,幅值增大,惯性系统测量输出的误差也变得更大,因此对测量方法的要求也就越高。本文方法在不同海况下都能消除因惯性测量导致的船舶升沉运动的随机漂移和相位超前,并对幅值损失导致的残差进行修正,得到了精确的船舶运动信息。

本文采用均方根误差 (RMSE) 来衡量测量的精度,误差结果如表 2 所示。

由表 2 可知,本文提出的方法对于不同海况下的船舶升沉运动都能很好地消除漂移和相位超前问题。相比于惯性测量输出,IIR 滤波、KF 观测和 UKF 观测在一定程度

表 2 不同海况下船舶升沉运动测量误差

	均方根误差 RMSE/m		
	试验 1	试验 2	试验 3
惯性测量	0.069 2	0.084 3	0.046 9
IIR 滤波	0.038 2	0.030 8	0.039 2
KF 观测	0.043 0	0.024 5	0.049 1
UKF 观测	0.034 9	0.023 7	0.029 4
UKF 多步-BP 修正	0.007 2	0.005 5	0.013 6

上可以减少误差,但是远不如本文所提 UKF 多步-BP 修正测量方法,其中本文所提方法 RMSE 减少了至少 75%,升沉测量精度达到 90%,实现了船舶升沉运动的精确测量,满足浮式起重船升沉补偿系统的测量需求。

综上所述,本文方法适合于低频、复杂海况下的船舶升沉运动测量,解决了传感器测量过程中产生的漂移和相位误差问题。

## 5 结 论

本文将 UKF 算法用于消除惯性测量系统测量船舶升沉运动存在的漂移和相位超前问题,并在 UKF 多步观测的基础上加入 BP 残差修正模型,提高了船舶升沉运动的测量精度。首先,基于 Stewart 波浪运动实验平台模拟船舶升沉运动,对惯性测量元件采集的运动信息进行了误差分析。然后,建立船舶运动 UKF 观测的状态空间模型,运用快速傅里叶变换对状态空间模型的频率信息进行实时更新,并用状态转移矩阵进行多步观测,输出船舶升沉运动的观测值。最后,由 BP 残差预测模型修正 UKF 观测值。利用 Stewart 平台试验验证本文算法的可行性,与实际升沉运动(激光传感器测量值)进行比较,UKF 多步-BP 修正方法较好地消除积分产生的漂移和相位超前问题,测量误差小于 0.01 m,实现了精确的船舶升沉运动测量。

## 参考文献

- [1] REN Z, SKJETNE R, VERMA A S, et al. Active heave compensation of floating wind turbine installation using a catamaran construction vessel[J].

- Marine Structures, 2021, 75: 102868.
- [2] 蔡东伟,刘荣华,张作礼,等.一种主动升沉波浪补偿控制系统研究[J].船舶工程,2012,34(S2):103-106.
- [3] WOODACRE J K, BAUER R J, IRANI R A. A review of vertical motion heave compensation systems [J]. Ocean Engineering, 2015, 104: 140-154.
- [4] 余博嵩,何姣,曹晓钟.基于 MEMS 的海洋漂流浮标运动姿态测量系统设计[J].电子测量技术,2019,42(10):99-104.
- [5] 于永军,张翔,王新志,等.运动加速度在线估计的非线性惯性航姿算法研究[J].仪器仪表学报,2020,41(6):19-26.
- [6] YAN G, SU X J, WENG J, et al. Measurement of ship's heave motion based on INS and zero-phase-delay digital filter[J]. Journal of Navigation & Positioning, 2016,4(2):91-92.
- [7] RICHTER M, SCHNEIDER K, WALSER D, et al. Real-time heave motion estimation using adaptive filtering techniques [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2014, 47(3):10119-10125.
- [8] 黄卫权,李智超,卢曼曼.基于 BMFLC 算法的舰船升沉测量方法[J].系统工程与电子技术,2017,39(12):2790-2795.
- [9] 陈琦,李格伦,李智刚.用于船舶升沉运动估算的自适应数字滤波器[J].中国惯性技术学报,2018,26(4):421-427.
- [10] 奔粤阳,杨立胜.舰船升沉测量的自适应算法[J].电光与控制,2020,27(1):64-67,78.
- [11] 张正本,马同伟.基于卡尔曼一致滤波和分布式协作网络控制的多目标跟踪[J].电子测量与仪器学报,2018,32(3):127-134.
- [12] 解迎刚,王晓,曾佳佳,等.基于卡尔曼滤波的主动波浪补偿系统研究[J].计算机工程与应用,2015,51(21):36-40.
- [13] 孙超,张美君.基于 Kalman 滤波的头盔运动姿态的预测方法[J].国外电子测量技术,2015,34(2):82-86.
- [14] 黄椰,黄靖,肖长诗,等.基于双目立体视觉的船舶轨迹跟踪算法研究[J].计算机科学,2017,44(1):308-313.
- [15] KÜCHLER S, EBERHARTER J K, LANGER K, et al. Heave motion estimation of a vessel using acceleration measurements [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2011, 44(1): 14742-14747.
- [16] 卢道华,付怀达,王佳,等.基于 IMU 与 UKF 的船舶升沉运动信息测量方法[J].北京航空航天大学学报,2021,47(7):1323-1331.
- [17] 张泽国,尹建川,柳成.基于自适应变异 PSO-BP 算法的船舶横摇运动预测[J].舰船科学技术,2016,38(23):69-73.
- [18] 张泽国,尹建川,胡江强,等.基于减聚类 ANFIS 模型的船舶横摇运动实时预测[J].上海海事大学学报,2017,38(1):7-11,67.

#### 作者简介

张琴,硕士研究生导师,主要研究方向为多海域分布式船舶系统的运动预测及补偿控制研究。

E-mail: qinzhang@shmtu.edu.cn

董慧芳,硕士,主要研究方向为船舶运动测量及预测方法研究。

E-mail: 2638115662@qq.com

刘敦康,硕士,主要研究方向为多海域分布式船舶系统的运动预测。

E-mail: 1584819207@qq.com

张蒸忠,硕士,主要研究方向为波浪补偿控制方法研究。

E-mail: 1246647614@qq.com

胡雄(通信作者),教授,工学博士,教授博导,主要研究方向为结构健康监测。

E-mail: huxiong@shmtu.edu.cn