

文章编号: 2095-2163(2020)01-0099-05

中图分类号: TN919

文献标志码: A

# 舰艇垂向波浪补偿装置的压力传感测量技术

张贵荣, 梁国杰

(中国人民解放军 92601 部队, 广东 湛江 524009)

**摘要:** 舰艇垂向波浪补偿装置是保障舰艇稳定运行的关键构件, 为了提高舰艇垂向波浪补偿装置的压力准确计量能力, 提出基于分布式阵列传感量化融合跟踪检测的舰艇垂向波浪补偿装置压力测量技术。采用压力传感器进行舰艇垂向波浪补偿装置的压力数据采集, 对采集的舰艇垂向波浪补偿装置压力数据进行融合处理, 提取压力数据的能量谱特征量, 采用高阶谱的谱峰识别技术实现舰艇垂向波浪补偿装置的压力传感测量。在集成 DSP 环境下进行压力传感测量系统的硬件设计。测试结果表明, 该方法能有效实现对舰艇垂向波浪补偿装置的压力传感测量, 测量精度较高, 抗干扰性较好。

**关键词:** 舰艇; 垂向波浪补偿装置; 压力; 传感; 测量; 计量

## Pressure sensing measurement technology of vertical wave compensation device for warship

ZHANG Guirong, LIANG Guojie

(NO. 92601 Troops of PLA, Zhanjiang Guangdong 524009, China)

**[Abstract]** The vertical wave compensation device of warship is the key component to ensure the stable operation of warship. In order to improve the accurate pressure measurement ability of ship vertical wave compensation device, a pressure measurement technology of ship vertical wave compensation device based on distributed array sensor quantitative fusion and tracking detection is proposed. The pressure data of ship vertical wave compensation device are collected by pressure sensor, the pressure data of ship vertical wave compensation device are merged and processed, the energy spectrum characteristic quantity of pressure data is extracted, and the pressure sensing measurement of ship vertical wave compensation device is realized by using the spectral peak recognition technology of high order spectrum. The hardware design of pressure sensing measurement system is carried out in integrated DSP environment. The test results show that this method can effectively realize the pressure sensing measurement of the vertical wave compensation device of the warship, and the measurement accuracy is high and the anti-interference is good.

**[Key words]** warship; vertical wave compensation device; pressure; sensing; measurement; metering

## 0 引言

舰艇垂向波浪补偿装置是通过压力实现舰艇垂向波浪的稳定性控制, 结合反馈补偿控制的方法, 实现舰艇垂向波浪抑制, 提高舰艇垂向的稳定性<sup>[1]</sup>。在进行舰艇垂向波浪补偿装置的质量维护过程中, 需要对舰艇垂向波浪补偿装置的压力进行精确计量和测量, 构建舰艇垂向波浪补偿装置的压力测量模型, 通过压力传感器装置, 进行舰艇垂向波浪补偿装置的压力数据采集, 结合信息融合和特征分析技术, 实现舰艇垂向波浪补偿装置的压力传感测量, 提高舰艇的稳定性, 相关的舰艇垂向波浪补偿装置压力传感测量方法研究受到人们的极大关注。

对舰艇垂向波浪补偿装置的压力传感测量是建立在对压力传感数据采集和信息融合基础上, 结合传输延时分配方法和统计分析方法, 进行传感信息跟踪融合和特征匹配, 实现压力的精确计量<sup>[2-3]</sup>, 但传统方法进行舰艇垂向波浪补偿装置的压力传感测

量中存在误差扰动较大和特征分辨能力不好的问题。对此, 本文提出基于分布式阵列传感量化融合跟踪检测的舰艇垂向波浪补偿装置压力测量技术。采用压力传感器进行舰艇垂向波浪补偿装置的压力数据采集, 对采集的舰艇垂向波浪补偿装置压力数据进行融合处理, 结合谱分析方法, 进行压力传感测量, 并实现对压力传感测量系统的硬件设计, 最后进行仿真测试分析, 展示了本文方法在提高压力传感测量能力方面的优越性能。

## 1 压力数据采集和融合处理

### 1.1 波浪补偿装置的压力数据采集

为了实现对舰艇垂向波浪补偿装置的压力传感测量, 首先构建舰艇垂向波浪补偿装置的压力数据采集模型, 采用压力传感器进行原始压力数据采集, 考虑由  $N$  个压力传感器节点组成的压力测量阵列, 采用分布式阵列组网设计的方法<sup>[4]</sup>, 进行补偿装置的压力测量, 得到测量方程描述为:

**作者简介:** 张贵荣(1979-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 压力计量、传感器技术研究。

**收稿日期:** 2019-10-18

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{\Gamma}(k)\mathbf{w}(k), \quad (1) \\ \mathbf{z}_i(k) &= \mathbf{H}_i(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{u}_i(k), \quad i = 1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{x}(k) \in \mathbf{R}^{n \times 1}$  为压力状态;  $\mathbf{A}(k) \in \mathbf{R}^{n \times n}$  为状态转移矩阵;  $\mathbf{w}(k)$  表示压力传感器的阵列能量分布向量, 表示为均值为零且方差为  $\mathbf{Q}(k)$  的干扰分量;  $\mathbf{\Gamma}(k)$  为压力传感信号中心频率;  $\mathbf{z}_i(k) \in \mathbf{R}^{p \times 1}$  为第  $i$  个传感器的进行舰艇垂向波浪补偿装置压力信息采集的测量值;  $\mathbf{H}_i(k) \in \mathbf{R}^{p \times n}$  为相应的测量矩阵; 压力信息测量的干扰信息分量  $\mathbf{u}_i(k) \in \mathbf{R}^{p \times 1}$  是均值为零且方差为  $\mathbf{D}_i(k)$  的高斯白噪声。

通过优化阵元分布进行压力传感器部署, 得到传感器监测的基元向量  $\mathbf{w}(k)$  与测量数据  $\mathbf{u}_i(k)$  之间的关联性特征分布, 压力信息测量的最优传感节点部署模型为:

$$\begin{cases} E\{\mathbf{w}(k) \mathbf{u}_i^T(k)\} = \mathbf{B}_i(k), \quad i = 1, 2, \dots, N; \\ E\{\mathbf{u}_i(k) \mathbf{u}_j^T(k)\} = \mathbf{D}_{ij}(k), \quad i, j = 1, 2, \dots, N, \text{且 } i \neq j. \end{cases} \quad (3)$$

压力信息测量的传感器阵元初始状态  $\mathbf{x}(0)$  均值为  $\mathbf{x}_0$ , 方差为  $\mathbf{P}_0$ , 且独立于  $\mathbf{w}(k)$  和  $\mathbf{u}_i(k)$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ 。基于分布式阵列传感量化融合跟踪的方法进行压力数据采集, 得到统计特征量:

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_i(k) &= \mathbf{z}_i(k) + \mathbf{q}_i(k) = \\ & \mathbf{H}_i(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{u}_i(k) + \mathbf{q}_i(k) := \\ & \mathbf{H}_i(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}_i(k), \end{aligned} \quad (4)$$

其中, 舰艇垂向波浪补偿装置的输出量化噪声  $\mathbf{q}_i(k)$  的方差满足:

$$\mathbf{R}_q^i(k) = E[\mathbf{q}_i(k) \mathbf{q}_i^T(k)] \leq \text{diag}\{\Delta_i^2(k, 1)/4, \Delta_i^2(k, 2)/4, \dots, \Delta_i^2(k, p)/4\} := \bar{\mathbf{R}}_q^i(k), \quad (5)$$

其中,  $\Delta_i(k, r)$  表示  $k$  时刻第  $i$  个测量节点检测到的舰艇垂向波浪补偿装置压力信息, 对第  $r$  个分量压力信号进行分段滤波, 固定量化步长,  $r = 1, 2, \dots, p$ 。得到舰艇垂向波浪补偿装置的传感压力信息采样输出为:

$$\begin{cases} E\{\mathbf{w}(k) \mathbf{v}_i^T(k)\} = \mathbf{B}_i(k); \\ E\{\mathbf{v}_i(k) \mathbf{v}_j^T(k)\} = \mathbf{R}_v(k) = \mathbf{D}_i(k) + \bar{\mathbf{R}}_q^i(k) \leq \mathbf{D}_i(k) + \bar{\mathbf{R}}_q^i(k); \\ E\{\mathbf{v}_i(k) \mathbf{v}_j^T(k)\} = \mathbf{D}_{ij}(k), \quad i, j = 1, 2, \dots, N, \text{且 } i \neq j. \end{cases} \quad (6)$$

根据对舰艇垂向波浪补偿装置的压力传感原始数据采集结果, 结合数据聚类和信息融合的方法, 进行压力测量。

## 1.2 压力数据的融合处理

在上述采用压力传感器进行舰艇垂向波浪补偿装置的压力数据采集的基础上, 对采集的舰艇垂向波浪补偿装置压力数据进行融合处理<sup>[5]</sup>, 在固定阵元个数、平均阵元间距的条件下, 得到压力测量的扩维测量方程可表示为:

$$\mathbf{M}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{V}(k), \quad (7)$$

其中, 舰艇垂向波浪补偿装置压力传感扩维测量值  $\mathbf{M}(k) = [\mathbf{m}_1^T(k), \mathbf{m}_2^T(k), \dots, \mathbf{m}_N^T(k)]^T$ ; 扩维测量矩阵  $\mathbf{H}(k) = [\mathbf{H}_1^T(k), \mathbf{H}_2^T(k), \dots, \mathbf{H}_N^T(k)]^T$ ; 信号中心频率分布  $\mathbf{V}(k) = [\mathbf{v}_1^T(k), \mathbf{v}_2^T(k), \dots, \mathbf{v}_N^T(k)]^T$ , 且方差满足:

$$\begin{aligned} E[\mathbf{V}(k) \mathbf{V}^T(k)] &= \\ \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{R}}_v^1(k) & \mathbf{D}_{12}(k) & \cdots & \mathbf{D}_{1N}(k) \\ \hat{\mathbf{D}}_{21}(k) & \mathbf{R}_v^2(k) & \cdots & \mathbf{D}_{2N}(k) \\ \hat{\mathbf{e}} & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\mathbf{D}}_{N1}(k) & \mathbf{D}_{N2}(k) & \cdots & \mathbf{R}_v^N(k) \end{bmatrix} &= \mathbf{R}_V(k), \end{aligned} \quad (8)$$

压力数据序列的栅瓣与信号带宽之间的关联特征量  $\mathbf{w}(k)$  与  $\mathbf{V}(k)$  的相关性为:

$$\begin{aligned} E[\mathbf{w}(k) \mathbf{V}^T(k)] &= \\ [\mathbf{B}_1(k) \quad \mathbf{B}_2(k) \quad \cdots \quad \mathbf{B}_N(k)] &:= \mathbf{B}(k), \end{aligned} \quad (9)$$

由于  $\mathbf{R}_V(k)$  是一正定的实对称阵, 采用自适应波束形成方法, 进行脉冲宽度估计和谱特征提取<sup>[6]</sup>, 并将  $\mathbf{R}_V(k)$  唯一地分解为:

$$\mathbf{R}_V(k) = \mathbf{L}(k)\mathbf{R}(k)\mathbf{L}^T(k), \quad (10)$$

其中,  $\mathbf{R}(k) = \text{diag}\{r_1(k), r_2(k), \dots, r_{N_q}(k)\}$  为线性调频对角阵;  $\mathbf{L}(k)$  为单位下三角阵, 采用模糊聚类方法进行压力数据的融合处理, 在融合中心, 得到舰艇垂向波浪补偿装置压力扩维测量方程可以转化为:

$$\check{\mathbf{M}}(k) = \check{\mathbf{H}}(k)\mathbf{x}(k) + \check{\mathbf{V}}(k), \quad (11)$$

其中,

$$\begin{aligned} \check{\mathbf{M}}(k) &= \mathbf{L}^{-1}(k)\mathbf{M}(k) := [\check{\mathbf{M}}_1^T(k), \check{\mathbf{M}}_2^T(k), \dots, \check{\mathbf{M}}_N^T(k)]^T; \\ \check{\mathbf{H}}(k) &= \mathbf{L}^{-1}(k)\mathbf{H}(k) := [\check{\mathbf{H}}_1^T(k), \check{\mathbf{H}}_2^T(k), \dots, \check{\mathbf{H}}_N^T(k)]^T; \\ \check{\mathbf{V}}(k) &= \mathbf{L}^{-1}(k)\mathbf{V}(k) := [\check{\mathbf{v}}_1^T(k), \check{\mathbf{v}}_2^T(k), \dots, \check{\mathbf{v}}_N^T(k)]^T. \end{aligned} \quad (12)$$

结合高阶谱特征提取方法<sup>[7]</sup>, 得到舰艇垂向波浪补偿的压力补偿输出为:

$$E[\check{\mathbf{V}}(k)] = \mathbf{0}, \quad E[\check{\mathbf{V}}(k) \check{\mathbf{V}}^T(k)] = \mathbf{R}(k), \quad (13)$$

令  $\mathbf{R}_i(k) = \text{diag}\{r_{(i-1)q+1}(k), r_{(i-1)q+2}(k), \dots,$

$r_{(i-1)q+q}(k) \} (i = 1, 2, \dots, N)$ , 则将压力数据的融合矩阵  $\mathbf{R}(k)$  重写为  $\mathbf{R}(k) = \text{diag}\{\mathbf{R}_1(k), \mathbf{R}_2(k), \dots, \mathbf{R}_N(k)\}$ , 结合高阶统计量分析方法, 有  $\mathbf{R}_i(k) = E[\tilde{\mathbf{v}}_i(k) \tilde{\mathbf{v}}_i^T(k)]$ 。得到第一个阵元测量的压力信息为:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{B}}(k) &= E[\mathbf{w}(k) \tilde{\mathbf{V}}^T(k)] = \\ E[\mathbf{w}(k) \mathbf{V}^T(k)] [\mathbf{L}^{-1}(k)]^T &=: \\ [\tilde{\mathbf{B}}_1(k) \quad \tilde{\mathbf{B}}_2(k) \quad \dots \quad \tilde{\mathbf{B}}_N(k)] &. \end{aligned} \quad (14)$$

结合上述算法设计, 实现对压力传感数据融合处理, 根据数据融合结果进行量化跟踪识别, 提高压力测量的准确性。

### 2 压力传感测量算法优化

在上述进行了数据采集的基础上, 进行压力传感测量优化, 本文提出基于分布式阵列传感量化融合跟踪检测的舰艇垂向波浪补偿装置压力测量技术, 提取压力数据的能量谱特征量, 采用高阶谱的谱峰识别技术实现舰艇垂向波浪补偿装置的压力传感测量<sup>[8]</sup>, 测量方程为:

$$\mathbf{x}(k+1) = \Phi(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{J}(k)\tilde{\mathbf{M}}(k) + \tilde{\mathbf{w}}(k), \quad (15)$$

其中,

$$\begin{cases} \Phi(k) = [\mathbf{A}(k) - \mathbf{J}(k)\tilde{\mathbf{H}}(k)]; \\ \tilde{\mathbf{w}}(k) = \mathbf{I}(k)\mathbf{w}(k) - \mathbf{J}(k)\tilde{\mathbf{V}}(k). \end{cases} \quad (16)$$

$$\mathbf{J}(k) = \mathbf{I}(k)\tilde{\mathbf{B}}(k) \mathbf{R}^{-1}(k), \quad (17)$$

此时, 接收信号  $\tilde{\mathbf{w}}(k)$  的方差为  $\tilde{\mathbf{Q}}(k) = E[\tilde{\mathbf{w}}(k) \tilde{\mathbf{w}}^T(k)] = \mathbf{I}(k)[\mathbf{Q}(k) - \tilde{\mathbf{B}}(k) \mathbf{R}^{-1}(k) \tilde{\mathbf{B}}^T(k)] \mathbf{I}^T(k)$ ; 而  $\tilde{\mathbf{w}}(k)$  与  $\tilde{\mathbf{V}}(k)$  的协方差为  $E[\tilde{\mathbf{w}}(k) \tilde{\mathbf{V}}^T(k)] = 0$ , 得到优化的压力测量扩维特征量  $\tilde{\mathbf{w}}(k)$  与  $\tilde{\mathbf{V}}(k)$  互不相关。设定压力补偿调节系数, 调节因子  $\lambda(k)$  为:

$$\lambda(k) = \begin{cases} c(k), & c(k) > 1; \\ 1, & c(k) \leq 1. \end{cases} \quad (18)$$

以阵列能量为约束对象, 得到  $c(k) = \text{tr}[\mathbf{N}(k)] / \text{tr}[\mathbf{C}(k)]$ , 当输出的状态特征量满足:

$$\begin{cases} \mathbf{N}(k) = \mathbf{V}_0(k) - \beta \mathbf{R}(k) - \tilde{\mathbf{H}}(k) \tilde{\mathbf{Q}}(k-1) \tilde{\mathbf{H}}^T(k); \\ \mathbf{C}(k) = \Phi(k-1) \mathbf{P}(k-1|k-1) \Phi^T(k-1) \tilde{\mathbf{H}}^T(k) \tilde{\mathbf{H}}(k). \end{cases} \quad (19)$$

得到压力传感测量的适应度函数为:

$$\mathbf{V}_0(k) = \begin{cases} \gamma(1) \gamma^T(1), & k = 1; \\ \frac{[\rho \mathbf{V}_0(k-1) + \gamma(k) \gamma^T(k)]}{1 + \rho}, & k > 1. \end{cases} \quad (20)$$

$$\gamma(k) = \tilde{\mathbf{M}}(k) - \tilde{\mathbf{H}}(k) \hat{\mathbf{x}}(k|k-1), \quad (21)$$

其中,  $\gamma(k)$  和  $\hat{\mathbf{x}}(k|k-1)$  分别是测量值和预测值;  $\rho$  是相关性因子;  $\beta$  是调频因子。综上分析, 对采集的舰艇垂向波浪补偿装置压力数据进行融合处理, 提取压力数据的能量谱特征量<sup>[9]</sup>, 实现压力测量, 得到测量的递推计算公式:

$$\mathbf{Y}(k|k-1) = \{\mathbf{I} - \mathbf{F}(k-1) [\mathbf{F}(k-1) + \tilde{\mathbf{Q}}^{-1}(k-1)]^{-1}\} \times \mathbf{F}(k-1), \quad (22)$$

$$\mathbf{Y}(k|k) = \mathbf{Y}(k|k-1) + \tilde{\mathbf{H}}^T(k) \mathbf{R}^{-1}(k) \tilde{\mathbf{H}}(k), \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{y}}(k|k-1) &= \lambda^{-1}(k) \{\mathbf{I} - \mathbf{F}(k-1) [\mathbf{F}(k-1) + \tilde{\mathbf{Q}}^{-1}(k-1)]^{-1}\} \times [\Phi^{-1}(k-1)]^T [\hat{\mathbf{y}}(k-1|k-1) + \hat{\mathbf{i}}(k-1)], \end{aligned} \quad (24)$$

$$\hat{\mathbf{y}}(k|k) = \hat{\mathbf{y}}(k|k-1) + \tilde{\mathbf{H}}^T(k) \mathbf{R}^{-1}(k) \tilde{\mathbf{M}}(k), \quad (25)$$

其中:

$$\begin{cases} \mathbf{F}(k-1) = \lambda^{-1}(k) [\Phi^{-1}(k-1)]^T \mathbf{Y}(k-1|k-1) \Phi^{-1}(k-1); \\ \hat{\mathbf{i}}(k-1) = \mathbf{Y}(k-1|k-1) \Phi^{-1}(k-1) \mathbf{J}(k-1) \tilde{\mathbf{M}}(k-1). \end{cases} \quad (26)$$

补偿装置的压力输出预测值  $\hat{\mathbf{y}}(k|k-1)$  及其响应特征量为  $\mathbf{Y}(k|k-1)$ , 测量误差函数为:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{y}}(j, k|k) = \hat{\mathbf{y}}(j-1, k|k) + \tilde{\mathbf{H}}_j^T(k) \mathbf{R}_j^{-1}(k) \tilde{\mathbf{M}}_j(k); \\ \mathbf{Y}(j, k|k) = \mathbf{Y}(j-1, k|k) + \tilde{\mathbf{H}}_j^T(k) \mathbf{R}_j^{-1}(k) \tilde{\mathbf{H}}_j(k). \end{cases} \quad (27)$$

其中,  $\hat{\mathbf{y}}(0, k|k) = \hat{\mathbf{y}}(k|k-1)$ ,  $\mathbf{Y}(0, k|k) = \mathbf{Y}(k|k-1)$ 。结合收敛性条件, 得到本文设计的舰艇垂向波浪补偿装置的压力传感测量算法是收敛的。

### 3 系统硬件设计与实现

在上述进行了舰艇垂向波浪补偿装置的压力传感测量算法设计的基础上, 进行系统的硬件设计, 在集成 DSP 环境下进行压力传感测量系统的嵌入式设计, 压力测量系统主要由 AD 信息采集模块、舰艇垂向波浪补偿控制模块、总线传输模块、上位机通信模块、压力信息处理模块和人机交互模块等构成<sup>[10]</sup>, 系统的总体设计构架如图 1 所示。

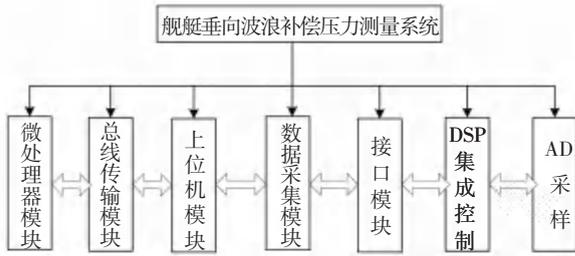


图 1 压力测量系统的总体设计构架

Fig. 1 The overall design architecture of the pressure measurement system

在 DSP 高速信号处理芯片中,进行舰艇垂向波浪补偿装置压力测量系统的硬件开发,采用 32 位嵌入式设计方法进行舰艇垂向波浪补偿装置压力测量系统的输出信息采样,采用 ADI 公司的 ADSP21160 处理器系统作为嵌入式处理器,使用 ADI 公司的 EE-NOTE68 设计舰艇垂向波浪补偿装置压力测量系统的上位机,得到系统的硬件设计如图 2 所示。

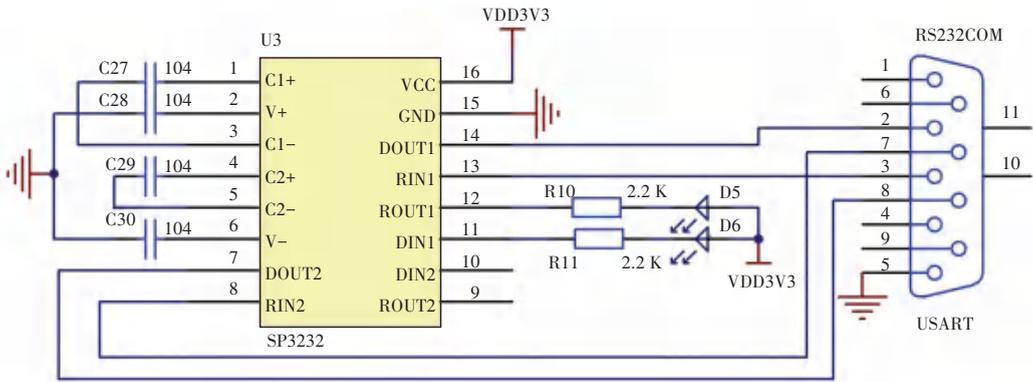


图 2 系统硬件设计电路图

Fig. 2 System hardware design circuit diagram

### 4 实验测试分析

为了测试本文方法在实现舰艇垂向波浪补偿装置的压力测量中的性能,进行实验分析,设定压力测量的多通道数据记录动态范围:-10 dB~+20 dB,舰艇垂向波浪补偿装置的压力信息采样率:≥200 KHz,舰艇垂向波浪补偿装置的控制指令脉冲宽度为 2 s,压力传感信号的调制幅度在 4 V 以内,得到舰艇垂向波浪补偿装置的压力测量输出如图 3 所示。

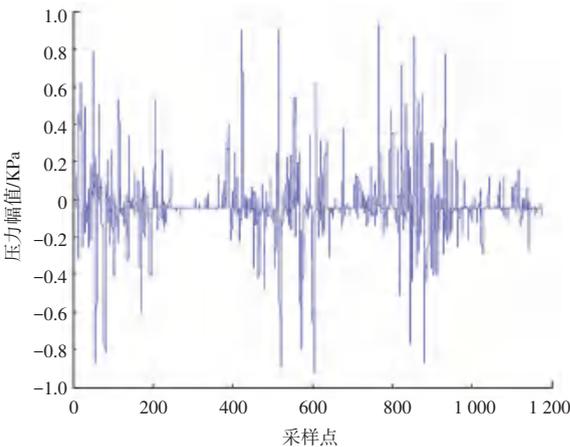


图 3 舰艇垂向波浪补偿装置的压力测量输出

Fig. 3 Pressure measurement output of ship vertical wave compensation device

分析图 3 得知,采用本文方法能有效实现对舰艇垂向波浪补偿装置的压力传感测量,测量输出的谱峰较高,说明抗干扰性较好。测试不同方法进行压力测量的准确性,得到对比结果如图 4 所示,分析图 4 得知,本文方法进行舰艇垂向波浪补偿装置压力测量的精度较高,误差较小。

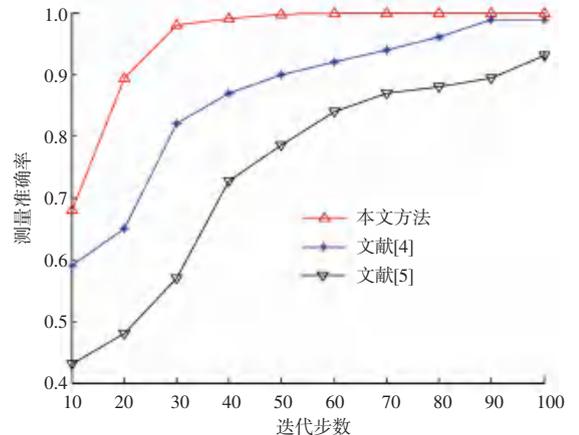


图 4 测量准确性对比

Fig. 4 Comparison of measurement accuracy

### 5 结束语

构建舰艇垂向波浪补偿装置的压力测量模型,通过压力传感器装置,进行舰艇垂向波浪补偿装置 (下转第 108 页)