

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209429

基于 MEMS 惯性传感器的波浪测量系统设计与实现

张泽凯 梁 旗 唐 健 姚雨林

(上海机电工程研究所 上海 201109)

摘要: 波浪测量系统能够在固定海域、全天候、全天时地自动监测海洋的波高、周期和波向。设计了基于 STM32F429 处理器和 MTI-3-8A7G6T 惯性传感器的波浪测量系统。完成波浪测量系统的算法及软件设计,其中波高和波周期的测量采用在频域内对加速度进行二次积分,可以有效避免直流分量对积分结果的影响,同时在频域内进行数字滤波,滤除加速度计零偏误差和低频随机噪声;波向的测量是利用水平合成加速度与磁航向的夹角获得。通过软件设计将测波算法成功移植到 STM32F429 处理器中,实现波浪测量功能。经实验验证,针对不同波高和波周期的波浪,波浪测量系统的测量误差都在规定范围内。系统对波浪特征值解算准确,长时间运行稳定,满足高精度和高可靠性的测量要求。

关键词: 波浪测量;频域二次积分;加速度;磁航向

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Design and implementation of wave measurement system based on MEMS inertial sensor

Zhang Zekai Liang Qi Tang Jian Yao Yulin

(Shanghai Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai 201109, China)

Abstract: The wave measurement system can automatically monitor the wave height, period and direction of the ocean in a fixed area, all weather and all day. A wave measurement system based on STM32F429 processor and MTI-3-8A7G6T inertial sensor is designed. The algorithm and software design of the wave measurement system were completed, in which the wave height and wave period were measured by integrating the acceleration twice in the frequency domain, which could effectively avoid the influence of the DC component on the integral result. Meanwhile, the digital filtering was carried out in the frequency domain to filter out the zero deviation error of the accelerometer and the random noise of low frequency. The measurement of wave direction is obtained from the Angle between horizontal resultant acceleration and magnetic heading. The wave measurement algorithm is successfully transplanted into STM32F429 processor through software design to realize the wave measurement function. Experimental results show that the measurement errors of the wave measurement system are within the specified range for waves with different wave heights and wave periods. The system can solve the wave characteristic value accurately, run stably for a long time, and meet the requirements of high precision and high reliability.

Keywords: wave measurement; quadratic integration in the frequency domain; acceleration; magnetic course

0 引 言

海洋监测是认识海洋、研究海洋、开发利用海洋的基础,海洋监测仪器则是海洋监测的工具和手段。近海海浪的监测多采用波浪测量系统,能够全天候、全天时地自动监测海洋的波浪高度、波浪周期和波浪传播方向,能实现监测数据的自动采集、处理和发送,波浪测量系统在海上大规模业务化应用,已成为海洋环境立体监测网的最重要监测设

备之一,直接为海洋预报、防灾减灾、海上交通、海上军事活动等服务^[1]。

目前加拿大的 TRIAXYS 定向波浮标用于波浪的实时监测,可精确测量波高,波周期和波向。内部集成三轴加速度计、三轴陀螺仪、磁力计,以及处理器。三轴加速度计用来测量沿浮标 3 个相互正交的 X、Y 和 Z 轴的加速度,三轴陀螺仪用来测量横滚、俯仰和偏航三轴的旋转速度,磁力计用于测量航向。荷兰的波浪骑士浮标,提供基于加速度计

收稿日期:2022-03-28

和GPS传感器两个版本,其基于加速度计的波浪测量系统,内部集成声电流计,不仅可以进行波高、波周期和波向测量,还可以测量表面海流;其基于GPS传感器的波浪测量系统,利用GPS接收信号的多普勒效应测量波浪,能够测量波高、波周期、波向。

国内由海洋仪器仪表研究所设计的SBF3-2型波浪浮标可用于波高、波周期、波向以及水温的监测,采用固态三维加速度计和小失真度的数字积分技术,利用垂直加速度计和水平加速度计结合的原理来实现波浪测量。由中国海洋大学设计的SZF型波浪浮标采用重力加速度原理测量波浪,利用浮标内的波高倾斜一体化传感器输出跟随波面运动的加速度数据,对加速度数据进行二次积分计算,得到反映波浪升沉运动的电压信号,再利用A/D芯片对电压信号进行模数转换,得到波浪运动轨迹,最后采用统计学方法计算波高和波周期特征值;波浪方向是利用方位传感器测量浮标运动的纵倾、横倾和方位三组参数解算得到^[2]。

目前我国现有波浪测量系统存在体积大、集成度低、成本高等问题。首先体积大即导致其在海上的随波性变差,继而导致解算的波浪特征值存在一定误差;其次波浪测量系统硬件集成度低,系统硬件未及时更新换代,导致系统功耗过大,需要经常出海维护;最后波浪测量系统的成本决定着海洋立体监测网的建设,波浪测量系统需要在我国广阔海域大规模布署,所以波浪测量系统需要做到低成本设计。

本文针对我国现有波浪测量系统存在的问题设计了一款高精度、高可靠性、低功耗、小型化、低成本、集成度高的波浪测量系统,来实现对波浪高度、波浪周期、波浪方向的测量和处理^[3]。在设计上实现了可移植、可扩展、模块化、可配置等特点,方便集成于多种规格的波浪浮标内部用作波浪测量功能,有力地推进了我国海洋监测仪器设备的发展。

1 系统组成及工作原理

波浪测量系统集成于波浪浮标内部,波浪浮标为在海上实现安全、准确的波浪监测需要具有承受波浪冲击的高强度浮标体,实现可靠测波的高精度波浪测量系统,保证长期作业的大容量电源系统等,通过这些子系统分工协作才能够实现对波浪数据的准确测量、处理与通信。如图1所示为波浪浮标实物图。

波浪浮标工作过程为:首先锚系将浮标体固定于相关海域,浮标体跟随波浪作随波运动;然后波浪测量系统准确的跟踪波浪水质点运动轨迹,解算得到波高、波周期、波向等波浪特征值,将解算得到的数据通过串口传输给控制模块;接着控制模块将数据经北斗通信终端传输到北斗卫星,最后通过北斗卫星广播给用户,用户完成数据接收,从而完成对相关海域进行波浪实时监测的目的^[4]。

波浪测量系统作为波浪浮标内部的核心部件,是波浪数据测量和处理中心,包括处理器、传感器以及相应软件,

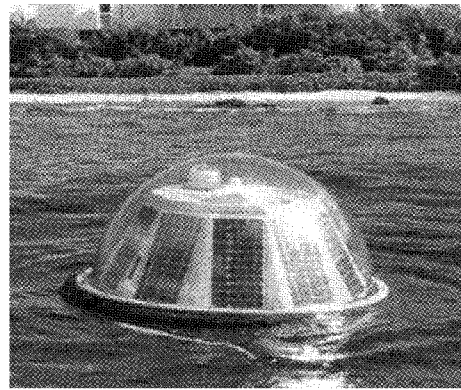


图1 波浪浮标实物图

能够完成对加速度计、磁力计等的信号采集和处理,能够完成对测量数据的内部存储,并将波高、波周期、波向等数据通过串口对外传输^[5]。波浪测量系统在海上长期工作要具有对传感器的分时控制、加电、休眠功能,且具有大容量和稳定存储能力。

1.1 系统组成

首先,波浪测量系统利用处理器采集三轴加速度计、三轴陀螺仪、磁力计的原始数据解算波高、波周期、波向;其次,具有定时采样工作周期,处理器定时唤醒系统进行波浪数据测量处理,整点时刻采用高精度时钟芯片来实现;然后,系统在完成数据采集、处理、发送后立刻进入休眠状态以降低功耗^[6];最后,每次采样过程结束后,将系统工作状态和波浪特征值通过串口对外传输,同时将原始数据及波浪特征值存储于内部存储卡,以备后续监测数据的回放及工作状态的检查。综上所述,波浪测量系统的方案设计如图2所示。

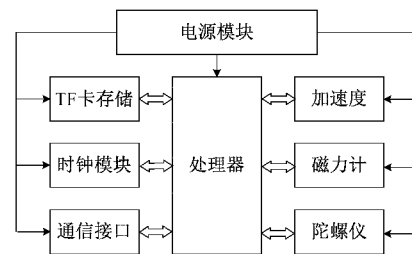


图2 波浪测量系统方案设计

1.2 工作原理

基于加速度计的波浪测量系统在测量波浪时,由于其良好的随波性跟随波浪做随波运动,系统的运动即代表了波面水质点的运动状态,此时加速度计会输出体现水质点运动状态的Z轴竖直加速度数据,离散的加速度数据由传感器传输给处理器做位移计算处理,即处理器通过采集一系列竖直加速度数据经二次积分处理来估算出波浪水质点的运动轨迹,进而采用统计学方法得到波高、波周期。波向的测量是利用水平合成加速度与磁航向的夹角获得。

2 系统硬件设计

波浪测量系统以嵌入式微处理器和惯性传感器为核心将采集到的波浪数据进行处理、传输、存储等操作,波浪特征值的计算除了需要可靠的计算方法外,还需要可靠的测量系统硬件设计作为依托,因此硬件的开发设计至关重要,直接影响着测量参数的准确度。

2.1 硬件总体设计

在硬件选型设计过程中,根据波浪测量系统技术指标要求和系统设计原则。考虑到 CPU 计算能力、速度、存储容量及外围接口分配,传感器精度、接口互连电平要求,工业级要求等,采用基于 Cortex-M4 内核的 STM32F429 处理器采集 MTI-3-8A7G6T 惯性传感器的数据并运行测波算法解算得到波高、波周期和波向等波浪特征值。其中 MTI-3-8A7G6T 惯性传感器集成三轴加速度计、三轴磁力计、三轴陀螺仪,可以作为姿态与航向参考系统 (attitude and heading reference system, AHRS)。系统的组成部分主要包括处理器,惯性传感器,时钟模块,TF 卡存储,通信接口和电源模块六部分。波浪测量系统的硬件组成框图如图 3 所示。

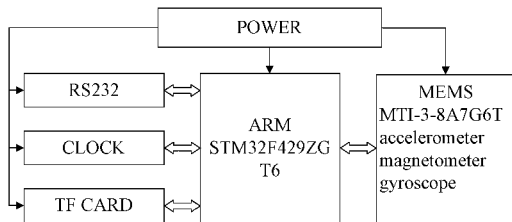


图 3 波浪测量系统硬件组成框图

从图 3 中可以看出信号的流向, MEMS 惯性传感器输出的加速度和姿态数据经串行接口传输给处理器,处理器进行数据解码并运行测波算法解算出波高、波周期,同时磁力计解算的真实地磁航向结合水平面合成加速度方向就可以得到波浪的地理波向^[7]。处理器将波浪测量数据经串行接口对外传输,同时将原始数据以及解算得到的波浪测量数据存储到 TF 卡中以备后续监测数据的回放分析;时钟芯片经北斗卫星通信的精确授时提供波浪测量系统的准确工作开始时间;电源模块为各个子系统提供稳定且平滑的直流电源。通过以上各功能模块协调运行共同完成波浪特征值的采集、处理、传输、存储。

2.2 惯性传感器电路设计

针对波浪测量系统对小型化的需求,采用 MTI-3-8A7G6T 九轴 MEMS 惯性传感器,内部集成三轴加速度计、三轴陀螺仪、三轴磁力计、高精度晶体和低功率单片机,其中单片机用于运行传感器融合算法,传感器数据输出完全可配置,不仅可以输出九轴惯性数据,还可以输出俯仰、翻滚和偏航姿态数据,可用作姿态与航向参考系统,这对波向解算提供很大便利^[8]。

根据波浪测量对惯性数据的需求对传感器进行配置,如图 4 所示为传感器配置现场图,传感器数据传输输出包括数据包计数、采样时间精度、加速度、角速度、欧拉角、四元数、磁场、状态字。

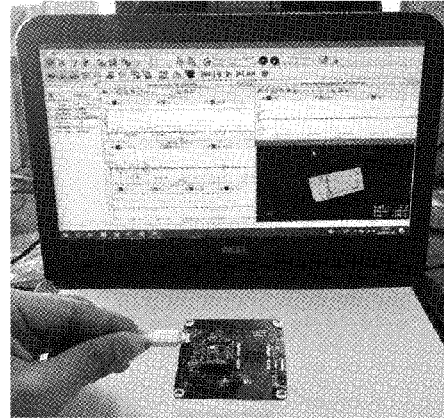


图 4 传感器配置

2.3 单板设计

波浪测量系统工作海况复杂,电磁环境恶劣,为了保证电路系统具有良好的电磁兼容性,以及对信号完整性和电源完整性的考虑。在系统单板设计过程中,首先为了降低去耦电容的回路电感,电容摆放尽量靠近芯片电源引脚,去耦电容有关布线加宽,过孔尽量打在焊盘上,从而降低等效串联电感 ESL;其次,晶体靠近处理器放置,时钟输出到负载的走线短且宽,走线上无过孔,减少信号的反射,保证晶体输出信号的阻抗连续性;然后电源模块布局远离 MEMS 惯性传感器,防止热量升高对传感器的影响;最后采用 4 层电路板设计,地层作为第二层,构成信号的小环路回流,这样不仅可以改善信号完整性和电源完整性问题,也能够改善环路的射频辐射^[9]。

波浪测量系统实物如图 5 所示,其尺寸仅为 60 mm × 60 mm,高度仅为 20 mm,做到小型化设计要求。硬件系统均采用工业级芯片,并且整机系统经考机测试通过了标准中规定的极限温度条件。

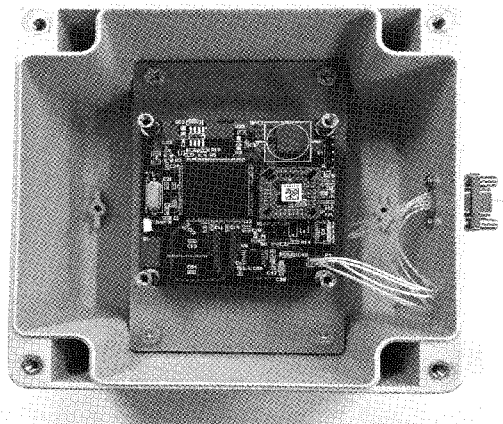


图 5 波浪测量系统实物图

3 系统软件设计

测波算法和软件设计作为波浪测量系统中的关键一环,决定着波浪测量的范围、准确性等重要指标。

3.1 测波算法设计

波浪测量系统采集一系列竖直加速度值来解算水质点运动轨迹,加速度计实际工作中,由于内部长期温升以及海况复杂导致电磁环境恶劣等其他外部因素,会使加速度信号含有干扰串入的直流分量。本设计采用对加速度数据频域积分法,首先将机体坐标系下的加速度数据转换为导航坐标系下的加速度数据,时域加速度信号经快速傅里叶变换转换为频域加速度信号,在频域内对加速度信号进行二次积分运算。在对加速度信号进行频域积分处理时,需要考虑实际的波浪频率范围,有效的波浪周期通常为 2~20 s,对无效的加速度计零偏误差和低频随机噪声信号需要采用滤波器进行滤波。然后经过快速傅里叶逆变换获得时域内波浪运动轨迹。最后采用统计学方法得到波高和波周期特征值^[10]。

3.2 自适应滤波器设计

在频域内进行数字滤波首先就是利用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)将加速度信号进行离散傅里叶变换,然后在频域内分析其频谱分布情况,将加速度计零偏误差和低频随机噪声信号分布的频率带在滤波器中滤除,经数字滤波后保留下来的是加速度有效信号,最后再通过快速傅里叶逆变换(inverse fast Fourier transform, IFFT)将频域信号恢复成时域信号。

自适应滤波器的截止频率是依据输入信号而自适应变化的,这样就可以适应复杂海况上噪声的频率分布不断发生变化的情况,从而实现加速度信号的最优滤波。原频率在做 FFT 的过程中由于其存在功率泄露,会使一部分能量发散到其他频率上,鉴于低频是频域积分误差的主要来源,需要选择合适的滤波器下限截止频率^[11]。当取不同低频滤波器下限截止频率进行计算时,经仿真验证解算出的波高和波周期结果相差很大,经与真实值比对,发现选择波浪运动频率乘上 0.35 倍后的频率为滤波器下限截止频率时所得结果误差最小,滤波器下限截止频率即为幅值谱谱峰处对应频率的 0.35 倍,这样对海浪有用信号的保留和低频随机噪声的滤除两者达到最优的折衷,但还是无法完全消除低频分量的影响,即误差不可避免,但自适应滤波后的结果已完全逼近真实值。

利用简易波浪模拟装置采集到的波高为 2.1 m,周期为 6 s 加速度数据绘制幅值谱,进行滤波对比分析。如图 6 所示为波高 2.1 m 周期 6 s 的加速度幅值谱对比,上图为固定下限截止频率 0.01 Hz,上限截止频率为 2 Hz 带通滤波后的幅值谱,如图 6 所示为自适应滤波后的幅值谱。

从上面的幅值谱对比可以看出,加速度计零偏误差主要分布在 0 Hz 附近,通过频域内的自适应滤波可以自动调

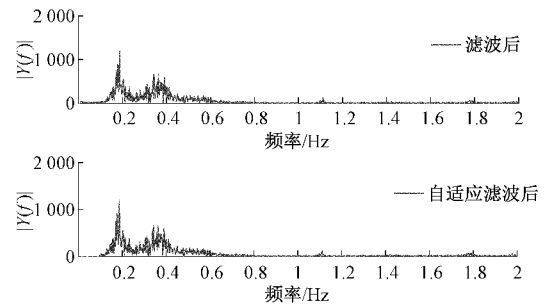


图 6 波高 2.1 m 周期 6 s 加速度幅值谱对比

整不同频率波浪的下限截止频率,对于波浪的加速度低频随机噪声有更好的定位,可以更有效地滤除 0 Hz 附近的加速度计零偏误差和低频随机噪声,同时保留完整的有用信号。这样就可以避免加速度数据在频域内经两次积分计算波高受到加速度计零偏误差的影响^[12]。

3.3 频域二次积分

通过 FFT 对加速度信号进行时频域变换,将时域信号变换为频域信号,在频域内进行二次积分运算,在频域内积分是利用加速度信号正弦和余弦的积分互换关系,能够有效避免时域信号的直流分量误差在积分过程中的累积放大,在频域内进行加速度的二次积分来解算波高,最后经 IFFT 得到积分后时域内波浪运动轨迹。

依然利用波浪模拟装置测得的加速度数据,进行自适应滤波后在频域内二次积分,再经过 IFFT 得到波浪运动轨迹,经仿真验证得到的升沉运动轨迹与波浪测量系统真实运动情况大致一致。如图 7 所示为波高 2.1 m,周期 6 s 的加速度数据、时域积分位移轨迹、自适应滤波后频域积分位移轨迹、去均值处理后频域积分位移轨迹。

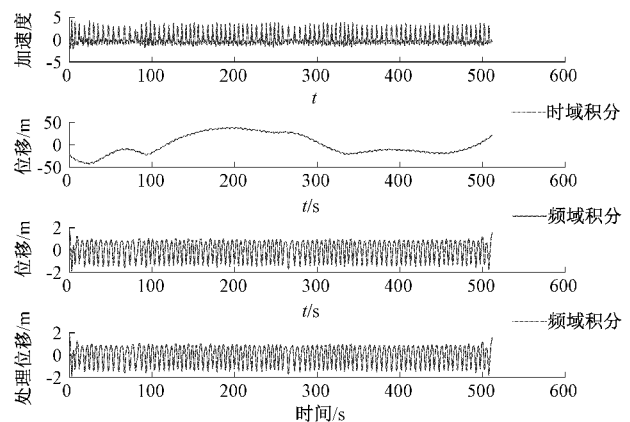


图 7 波高 2.1 m 周期 6 s 波浪运动轨迹对比

其中第 4 个图为频域积分后的位移减去位移均值后的波浪位移轨迹,即计算波浪特征值采用的波浪运动轨迹,位移均值即为波浪位移零线,采用上跨零点法即可得到波高和波周期特征值。从图中可见经频域二次积分后波浪按真实的运动轨迹反演,不会再产生漂移与误差,效果良好,其波形近似正弦曲线,与真实运动情况一致^[13]。而在时域内

进行二次积分后,波浪运动轨迹发散,结果已经失真并畸变。在频域内进行二次积分得到的波浪运动轨迹有效地解决了信号在积分过程中的漂移问题,说明波高和波周期算法设计的有效性。

3.4 软件设计

波浪测量系统的软件设计要实现传感器的数据采集、算法运行、数据输出等多个任务。通过系统软件设计,波浪测量系统可以完成波浪特征值的解算,完成系统与用户的交互,用户通过串口启动系统工作指令,根据系统提供的时间整点索取波浪特征值,还可以通过 TF 卡存储波浪特征值。整个系统工作的主程序是:上电—自检—采集—处理—发送—存储—关机。

根据波浪测量系统的功能需求,软件采用模块化设计,将软件划分为时钟控制模块、数据采集处理模块、数据存储模块、串口通信模块。其中在软件设计时主要体现在如下几点:

- 1) 处理器通过 I2C 接口读取精确的北京时间,系统按时切换测量工作状态与休眠状态;
- 2) 处理器通过 SPI 接口降频采集传感器原始数据,并对 32 位单精度浮点数据进行解码^[14];
- 3) 测波算法由 M 语言转换为处理器平台兼容的 C 语言;
- 4) 处理器使用 FATS 文件系统存储波浪特征值及波高原始数据到 TF 卡;
- 5) 通过 RS232 串口接收启动工作指令、传感器测试、时钟授时指令,并对外发送波浪特征值;

系统为在海洋恶劣环境中节省用电,系统在采集完数据后,软件要及时将相关处理器、传感器切换到休眠状态,即低功耗模式,系统软件流程图如图 8 所示。

波浪测量系统工作过程为:系统在每天 24 个整点输出波浪特征值,首先在整点前 9 min 系统上电,为传感器稳定输出延时 10 s;然后通过串口接收传感器测试、时钟校时指令,系统正确响应后,通过串口接收启动工作指令,处理器开始采集惯性传感器原始数据,并进行解码,采样完 2 048 个数据点后,系统进行算法处理,解算得到波高、波周期和波浪特征值;接着将波高、波周期以及波向特征值和原始数据存储到 TF 卡;最后将波浪特征值数据通过串口对外发送,系统随即进入睡眠模式。

4 试验结果

为了验证波浪测量系统工作可靠性,将波浪测量系统在国家海洋计量站进行了校准测试。波浪测量系统校准机构为双环旋转桁架式正弦结构,校准时,将波浪测量系统安装在旋转桁架的卡具上,控制电机使桁架按指定的旋转周期匀速旋转。通过铰链的控制使卡具在旋转过程中始终保持向上状态,从而波浪测量系统在跟随桁架旋转时,也始终保持竖直向上姿态。卡具到双环旋转桁架中心的距离为波



图 8 系统软件流程图

浪高度的一半,即模拟波浪的高度可以通过调整卡具的位置来调整;桁架旋转一周的时间为波周期,即波浪的周期可以通过控制电机的转速来调整,从而实现波浪测量系统针对各种波高和波周期的波浪进行全方位校准^[15]。桁架的运动轨迹是圆周运动,波浪测量系统反应的是垂直位移,结合起来,波浪测量系统的运动轨迹是给定波高和波周期的正弦运动,如图 9 所示为双环旋转桁架式正弦模拟装置。

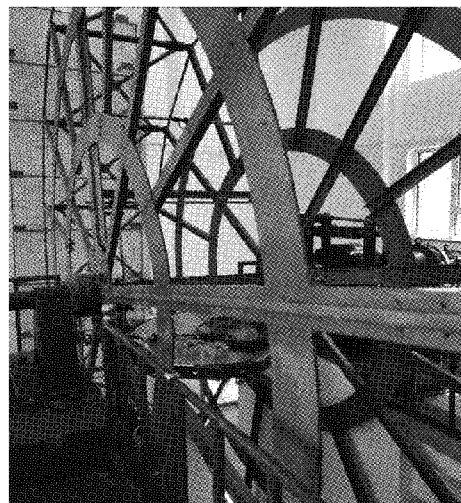


图 9 正弦模拟装置

4.1 试验步骤

- 1) 根据波高校准点,将波浪测量系统固定在校准装置的桁架上;

2) 波浪测量系统系统上电,延迟 10 s 后,PC 机发送启动工作指令,为方便试验,波浪测量系统试验过程中通过锂电池供电;

3) 设定好校准装置的旋转周期即波周期,启动桁架带动波浪测量系统旋转,当桁架进入匀速旋转状态后开始进行波浪测量,校准装置在采样周期内每转动一周即模拟一个正弦波浪,波浪测量系统同步采集波浪的波高和波周期,通过 TF 卡读取测量数据;

4) 记录模拟波浪的波高和波周期标准值,记录波浪测量系统相应的波高和波周期测量值;

5) 计算波高和波周期测量值与标准值之间的误差。

试验现场图片如图 10 所示。

4.2 试验分析

经过完整的波浪测量系统校准实验,国家海洋计量站

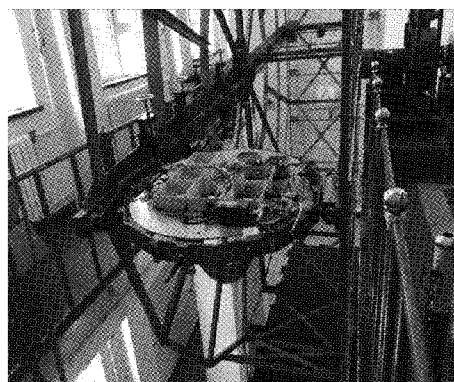


图 10 试验现场图

统计测量数据后给出校准实验结果,其中结果中给出波高与波周期的测量误差,校准结果如表 1 所示。

表 1 波高与波周期测量值的误差校准结果

标准值	波高	m	1.0						
	波周期	s	25.0	10.3	6.4	4.7	3.7	3.0	2.6
测量值	有效波高	m	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	有效波周期	s	25.5	10.4	6.4	4.8	3.9	3.1	2.6
误差	波高	m	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	波周期	s	0.5	0.1	0.0	0.1	0.2	0.1	0.0
标准值	波高	m	3.0						
	波周期	s	25.0	14.2	9.9	7.6	6.2	5.2	4.5
测量值	有效波高	m	3.1	3.1	3.1	3.1	3.0	3.0	3.0
	有效波周期	s	25.1	14.3	9.9	8.2	6.0	5.0	4.9
误差	波高	m	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
	波周期	s	0.1	0.1	0.0	0.6	-0.2	-0.2	0.1
标准值	波高	m	6.0						
	波周期	s	25.0	16.8	12.7	10.2	8.5	7.3	6.4
测量值	有效波高	m	6.4	6.3	6.1	6.1	6.2	6.1	6.1
	有效波周期	s	25.3	17.0	12.8	10.3	8.5	7.3	6.4
误差	波高	m	0.4	0.3	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1
	波周期	s	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0

波浪测量系统对波高和波周期的测量结果都接近模拟波浪的真实值,几乎一致。由于波高测量误差标准为 $(0.3+5\% \times \text{标准值})\text{m}$,校准结果显示波高测量误差都在规定范围内;波周期测量误差标准为 $\pm 0.5\text{ s}$,校准结果显示波周期测量误差都在规定范围内,从而验证了波浪测量系统在波高和波周期测量方面的可靠性和准确性。从侧面证明了系统硬件平台的可靠性,测波算法的有效性,软件执行的稳定性。经过长时间的校准测试,波浪测量系统采集数据准确、长时间运行稳定可靠^[16]。

4.3 波向测量试验

针对波浪方向的测量验证,是在某试验水池进行的测量,将波浪测量系统放置在泡沫箱内,保持了系统良好的

随波性,跟随水池内造波机制造的波浪进行随波运动,现场试验图片如图 11 所示。

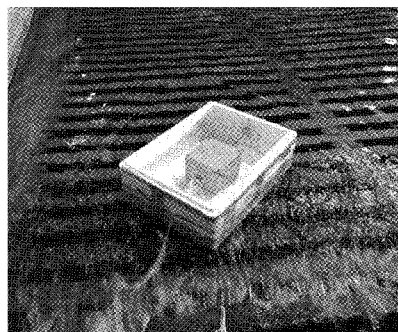


图 11 波向测量现场

波向实验的结果如表 2 所示,波向测量误差标准规定为 $\pm 10^\circ$,实验结果都在误差规定范围内,验证了波浪测量系统对波向计算的准确性。

表 2 波向测量结果

标准值	220°			
测量值	213°	210°	221°	215°
误差	7°	10°	9°	5°

5 结 论

本文基于 MEMS 惯性传感器设计了波浪测量系统,主要包括波浪测量系统硬件测量平台的设计和波浪测量算法的设计与实现。测量系统以处理器 STM32F429 为计算核心,MTI-3-8A7G6T 惯性传感器采集波浪原始数据,TF 卡存储处理器解算后的波浪特征值和波浪原始数据,RS232 通信接口与控制模块进行通信,负责将解算得到的波浪特征值发送给控制模块。系统在国家海洋技术中心进行了校准试验,通过校准结果可以看出,本文设计的波浪测量系统满足技术指标,具备基本的测波功能,为海上试验做好了准备。

参考文献

- [1] 张时青,宋德舜,赖章高,等.基于惯性测量的波浪测量仪的实现[J].中国高新科技,2021(7):2.
- [2] 王晨阳,王收军,陈松贵,等.基于加速度计和陀螺仪的波浪测量方法[J].科学技术与工程,2019,19(6):44-49.
- [3] 刘国栋.波浪浮标数据处理方法研究[D].天津:天津大学,2012.
- [4] 赵杰,惠力,初士博,等.基于三轴加速度的波浪测量技术研究[J].海洋技术学报,2015,34(5):66-70.
- [5] 王晨阳.基于惯性测量元件的波浪测量方法研究[D].天津:天津理工大学,2019.
- [6] 刘路,王收军,陈松贵,等.基于 MEMS 加速度计的波高测量装置[J].科学技术与工程,2019,19(30):8.

- [7] 朱明垒.小型海洋资料浮标数据采集系统的设计[D].青岛:中国海洋大学,2013.
- [8] 李俊文,刘惠康,张孝春.基于 ARM 的波浪浮标设计[J].电子技术应用,2014,DOI:10.3969/j.issn.0258-7998.2014.09.005.
- [9] 党超群,张锁平,齐占辉,等.基于北斗卫星系统的深远海 GPS 波浪浮标数据传输研究[J].传感器与微系统,2016,35(1):46-48.
- [10] 余白石,张素伟.基于有限傅立叶级数法的浮标测波算法研究[J].数字海洋与水下攻防,2021,DOI:10.19838/j.issn.2096-5753.2021.02.001.
- [11] ZHAO H Y, SUN J W, FAN X T, et al. Numerical simulation of wave energy convertor of ocean data buoy[J]. Shandong Science, 2016.
- [12] 王晨阳.基于惯性测量元件的波浪测量方法研究[D].天津:天津理工大学,2019,29(6):9-18.
- [13] 王凯,刘凯,李拓,等.可重构高速数据加密系统设计和实现[J].电子测量技术,2021,44(19):8-15.
- [14] 何健,袁双,李芳,等.基于 GPU+FPGA 异构计算资源的日标信息智能处理技术[J].空天防御,2021,DOI:10.3969/j.issn.2096-4641.2021.03.002.
- [15] 孙永芳,秦旭,王晓松. ARM9 高速实时多任务数据采集系统的算法优化[J].单片机与嵌入式系统应用,2011,11(7):7-9.
- [16] 张义鑫,张果.水下回路通信电信号传输特性仿真研究[J].电子测量与仪器学报,2021,35(4):204-210.

作者简介

张泽凯,助理工程师,主要研究方向为综测试系统设计。

E-mail:zhangzekai_159@163.com

梁旗,高级工程师,主要研究方向为测试系统设计。

E-mail:287106303@qq.com

唐健,工程师,主要研究方向为测试性研究。

E-mail:tangjiancs@163.com

姚雨林,工程师,主要研究方向为测试系统设计。

E-mail:forestyao911@163.com