doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.04.004

西风带海洋环境观测技术研究

冯月永,周　达,周文清,邬海强,康建军,李虎林,张　倩,张建涛,张晓旭,李林奇
(国家海洋技术中心,天津　300112)

摘　要:南大洋海况常年较恶劣,导致现场观测资料匮乏。中国首套南大洋西风带环境观测浮标于 2019 年 1 月 1 日布放在新西兰东南近 53°S 海域,现场实时观测并传输风向、风速、气温、气压、相对湿度、海表层温盐、海流、波浪等数据资料。该套锚定浮标也是我国首次布放超过 4 500 m 水深的极端环境观测浮标系统。布放运行结果表明,我国已具备研发极端环境海洋资料浮标的技术基础和深海浮标布放作业经验,研发的西风带环境观测浮标可长期运行在南大洋西风带海域,进行长期海上水文气象和动力环境参数观测。

关键词:南大洋;西风带;海洋观测;浮标
中图分类号:P715.2　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1003-2029(2019)04-0021-06

西风带位于副热带高气压带与副极地低气压带之间(大致在南北纬 35°~65°之间),副高向副极地低压的气流在地转偏向力的作用下,偏转成西风(北半球为西南风,南半球为西北风),因此西风是在西风带的盛行风。在其控制地区,西风一般比较强劲,在海洋上造成较大的风浪。

由于南大洋是一片开阔海域,印度洋、太平洋、大西洋在这里交汇,无陆地阻挡,形成绕南极大陆的一个闭环,西风受到的摩擦力小,海水畅流无阻,流速极快, 形成环绕南极洲由西向东的西风漂流,是全球洋流系统的最强劲的洋流。该海域常年西风不断,气旋频繁,风大浪高,气候恶劣,常年盛行 5~6 级的西风和 4~5 m 高的涌浪,7 级以上的大风天气全年各月都可达 7 d 以上, 平均 2~3 d 就有一个气旋经过,特别是强气旋来临时,可造成西风带内狂风和高达十几米的巨浪[1]。船只航行极为危险,故被称为“魔鬼西风带”,也称“咆哮西风带”。受地理位置影响, 在 63°W 附近南半球西风带海域南北方向最狭窄,为约 56°S~62°S 间的 6°范围内,在 20°E 附近该海域南北方向最宽, 为约 35°S~67°S 间的 32°范围内。

西风带南大洋海洋环境具有风浪强、流速大、能量足的特点,船只航行和浮标布放运行都具有极大的困难。

1　研究意义和手段

南大洋连通了地球上的印度洋、太平洋、大西洋三大洋盆,也连接了全球大洋环流的上层和深层环流,南大洋会显著影响地球的气候形态以及碳和营养盐的循环,其变化具有全球性影响。然而,受西风带作用影响,南大洋常年海况恶劣,使观测设备很难在该海域正常运行,造成世界各国对南大洋的观测资料短缺和片段化,使得对南大洋变化的成因及其可能导致的影响很难进行准确评估[2]。因此,迫切需要可持续的观测设备,用于发现、解释和应对南大洋的变化,进而准确评估其可能产生的影响。

针对我国及世界上浮标观测网中极端环境深海锚系浮标的薄弱环节,研发适应南大洋西风带的极端环境海气界面观测锚系浮标系统势在必行。与其他观测手段相比,锚系资料浮标具有长期、连续、实时、全天候、准确度高、使用灵活、经济等特点[3]。浮标观测技术首先需解决浮标结构在极端环境下的生存问题,进一步提高系统中各分系统的可靠性

收稿日期:2019-02-28
作者简介:冯月永(1975-),男,高级工程师,主要从事海洋环境监测 / 观测资料浮标技术研究。E-mail:fengyueyong@vip.sina.com

和稳定性。

2 关键技术问题

2.1 结构设计技术

相比于目前浮标应用的其他海域，西风带海域具有强风浪的特点，浮标的工作环境极为恶劣。为提高西风带浮标系统抵抗恶劣海洋环境的能力，保障系统在海上长期无故障运行，该浮标的结构设计将基于现有浮标的工程经验，主要采取以下技术措施。

（1）材料的选择

为了提高浮标塔架和标体的强度，同时保证浮标的防腐蚀性能，浮标所有的金属构件均采用不锈钢材料加工而成，既提高了浮标结构的强度，又可以解决传统铝制材料短期需要维护的问题。

（2）塔架的设计

由于西风带海域风速极大，该浮标的塔架拟将现有浮标的方桌形基架改为四周向上收缩的塔型基架，并在基架的主要受力节点处采用桁架型加强筋，进一步提高塔架的刚度，除传感器的连接处外，减少螺栓连接，尽可能采用焊接连接。

塔架（如图 1 所示）位于标体以上，由不锈钢型材构成塔型基架，基架上部和中部设有仪器安装架，上部仪器安装架用来安装风传感器、铱星天线、航标灯、GPS、AIS 航标等设备，中部仪器安装架用于安装温湿传感器、方位传感器等，并在上部仪器安装架外围设有仪器防护圈，为浮标在布放、回收及维护过程中传感器的可靠、安全运行提供保障。太阳能电池板倾斜固定在塔架的底部，其安装架采用不锈钢材料，线缆通过防水接线头进入太阳能板座内部，既保证了较好的光照效能，又减小了风阻力对浮标姿态的影响，并具有良好的防水性能。

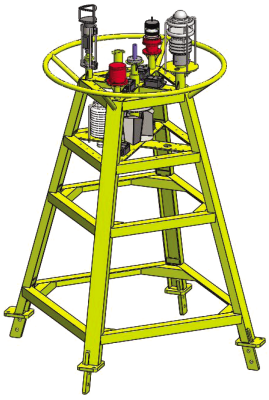

图 1 浮标塔架

（3）标体的设计

浮标的标体（如图 2 所示）主要由浮力舱、仪器舱和浮标底座组成。考虑到西风带海域具有强风浪，浮标的标体采用不锈钢材料焊接为一个整体，并在主要的受力点处增设加强筋，进一步增强标体的强度和刚度，增强标体的抗风浪能力。

浮力舱设置在仪器舱的外围，为耐压水密舱，并在内部设有型钢骨架，使浮标体具有足够的强度，并为浮标提供所需的浮力。仪器舱设置在标体中央，其横截面为直径 600 mm 的圆形。仪器舱底部放置蓄电池组，电池组固定装置上部安装波浪传感器，既可以降低浮标重心，又提高了波浪测量值的准确性。仪器舱中部安装数据采集控制器和电源控制器，通过螺栓将其密封在仪器舱内。在标体的四周设计了 4 个仪器安装井，用于固定表层温盐、海流等设备。

为了增加浮标的稳性，在标体下方设计 1 个浮标底座，由钢质材料的圆管连接组成 1 个支架来支撑浮标。该支架的上半部分用于调节浮标配重，下半部分中间配有连接耳，用于连接浮标系留系统。浮标整体组装图如图 3 所示。

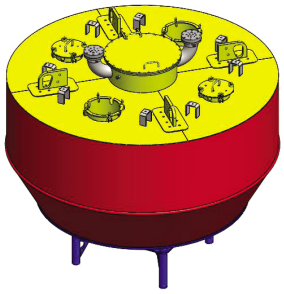

图 2 标体

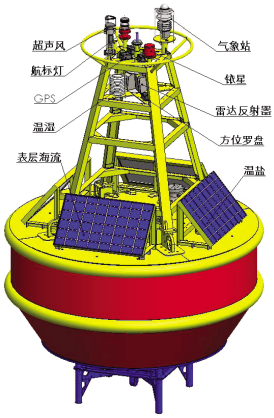

图 3 浮标整体组装图

2.2 锚系设计技术

锚泊系统是浮标监测系统的重要组成部分，是保障本极端环境监测浮标系统正常工作的重要部件。它的作用是提供一个稳定的系泊力，使监测浮标系统能够抵抗风、浪、流及各种气象要素的综合作用，在恶劣的海洋环境中长期系泊定位，不走锚，不断缆，锚系的水下姿态必须满足浮标系统设计指标和测量仪器的使用要求。

浮标系统的布放水深约为 4 500 m，为了保证锚泊系统在南大洋恶劣的海洋环境中长期可靠运行，本锚系采用 S 型锚系型式（如图 4 所示），上下

两端配有锚链,中间部分配置尼龙绳 1 000 m 4 段、500 m 2 段、200 m 2 段、100 m 1 段、50 m 1 段。该种锚系型式具有对浮标布放水深的准确度要求低的特点,其中间的尼龙绳部分为调节系统,具有高弹性和高能量吸收性能,可实现锚系在恶劣海况的高动力负荷环境下的可靠运行。

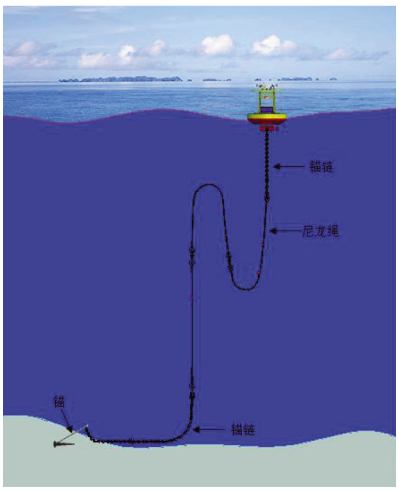

图 4　浮标锚系配置示意图

2.3　数据采集技术

数据采集系统是浮标系统的核心部分。为保障浮标正常采集数据，浮标采用双数据采集系统设计,每个数据采集器均按照设定的工作时序,自动采集、处理、存储观测数据,并将处理后的数据通过无线通信方式实时发送到岸站。分别将数据存储在 SD 卡和 Flash 模块中,保证数据的有效获取。采用软件和硬件双看门狗设计,保障系统的可靠运行。

数据采集处理控制系统作为浮标系统的核心部分,主要完成数据采集、处理、存储、传输和过程控制等,其可靠性能直接关系到整个浮标系统的可靠运行。

为了提高浮标数据采集系统的可靠性,系统采取双机热备份设计。采用互相独立且内部硬件相同的两套采集系统,两者均按照既定时序开机工作并互为主备,当其中任一系统出现故障时,浮标采集系统仍能正常工作。主备系统相互独立工作,分别采集对应的完全相同的两组传感器,并通过通讯系统将数据发送至岸站接收系统,由岸站接收系统进行数据接收处理,并进行数据优良的判断。通过这种设计方法，首先可以有效提高浮标工作的可靠性;其次,可以减少对浮标的改动工作,并将仲裁处理交由上位机完成,降低了系统实施难度,提高了系统工作效率。

在原有成熟的浮标数据采集系统技术基础上,针对本次浮标工作环境,需要对数据采集系统进行以下部分的设计改进工作。

(1) 低功耗设计工作

由于工作环境恶劣，且浮标处于高纬度地区,太阳能充电效率无法保证,因此需要进行低功耗方面的工作。由于项目搭载传感器较少,可以考虑进行采集电路的优化,以减少非必要的损耗。同时基于原有技术基础,对工作时序进行优化,在非采集工作期间，仅保留看门狗电路和通讯板电路工作,尽可能减少损耗。

(2) 抗异常情况设计工作

长时间的恶劣工作环境可能对外部仪器产生严重的损坏。传感器的供电与通信是通过线缆与采集系统连接,因此外部线缆损坏导致的短路等异常情况均有可能发生. 为了避免这种异常情况对采集系统的影响，可增加防短路设计和防电击功能,提高系统稳定性。

(3) 通讯功能改进工作

浮标采用铱星方式进行通讯,浮标姿态和布放位置对通讯信号质量均有可能产生影响。为了保证通讯成功率,增设了握手协议和数据补发功能。

(4) 电磁兼容性

电路设计上采用电路板的覆铜设计,减小地线阻抗,提高抗干扰能力;降低压降,提高电源效率。

2.4　可靠性仿真计算分析设计

浮标在波浪中的运动性能是浮标的重要性能之一,其在波浪中的运动状态将直接影响到浮标系统的工作状态,甚至威胁浮标的生存。因此,计算浮标在波浪中的运动状态十分必要。

对浮标而言,有 6 个自由度运动,分别为纵荡(surge)、横荡(sway)、垂荡(heave)、横摇(roll)、纵摇(pitch)、艏摇(yaw)。但是,从工程应用实际来讲,对浮标生存及工作性能影响最大的是横摇、纵摇与垂荡(升沉)响应。浮标为圆盘形对称型结构,横摇与纵摇方向结构基本相同,故在浮标的设计过程中重点考量了运动响应最大的 0°波浪入射下,浮标的横摇和垂荡响应,进而评价浮标的水动力性能。

2.4.1　计算模型　对水动力分析而言,浮体的主尺寸是最重要的,倒角、零件等细节大多对其水动力性能影响很小,可以简化[4],计算时以光滑的圆盘型浮体为模型,采用国际通用的多体水动力学软件进行分析,计算海域尺度为 1 000 m × 200 m × 4 000 m,

计算模型如图 6 所示。

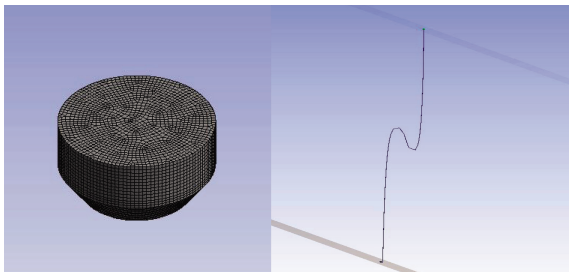

图 6 计算模型

2.4.2 频域分析 在线性假设条件下,浮体的运动幅值与规则波的波幅成正比。模拟浮标在不同周期波浪条件下的运动,通过其运动响应输出,考察浮标在横摇和垂荡这两个主要运动中的幅值变化及其随波运动的特性。

浮体自由漂浮运动状态下,在规则波中的运动响应可由响应幅值算子 *RAO* (Response Amplitude Operator)描述,*RAO* 是浮体运动响应无因次化的响应幅值算子[5],其计算方法为:

$$RAO=\frac{\text{运动响应幅值}}{\text{规则波幅值}}$$

不同频率波浪作用下,浮标横摇及垂荡运动响应曲线如图 7~图 8 所示。

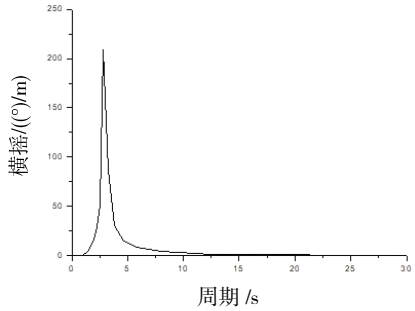

图 7 浮标横摇运动响应

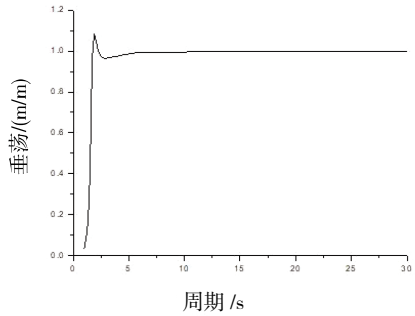

图 8 浮标垂荡运动响应

观察浮标的运动响应曲线(如图 7 所示)可知,随着入射波浪周期的增大,横摇响应幅值呈现出先增大后减小的趋势,并在波浪周期为 2.8 s 处出现极值,这是因为浮标的横摇和垂荡是在恢复力的作用下做简谐运动而产生,当入射波的频率和浮标的固有频率相同时,浮标运动与波浪运动产生共振,从而在这个频率处横摇运动幅值会达到一个极值,当波频与浮标的固有频率岔开时,共振也随之消失。同理,由图 8 可知,浮标垂荡运动周期约为 1.9 s,当波浪周期大于 7 s 后,浮标升沉响应几乎保持为 1,浮标随波性能良好。浮标拟投放海域常年处于 6 级海况以上,波周期较大,该浮标可以避开共振周期,横摇小且随波性能良好,符合设计要求。

2.4.3 时域分析 根据浮标拟投放海域的实际情况,设计浮标工作海况为风速 40 m/s,流速 0.15 m/s,波高 7.5 m,此海况下,基于艾里波浪理论计算的浮标运动响应如图 9~图 10 所示。

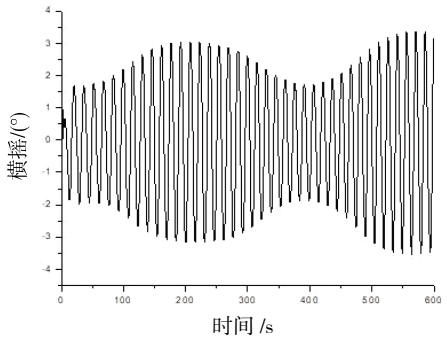

图 9 浮标横摇时程曲线

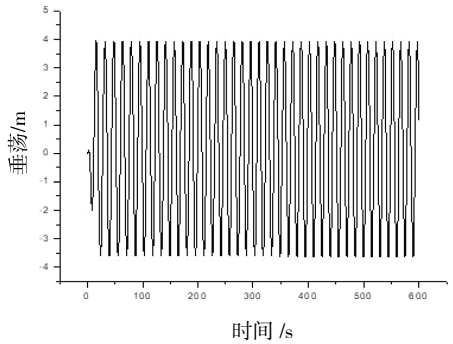

图 10 浮标垂荡时程曲线

从此海况的时域计算结果看,浮标稳定后升沉范围在-3.5~4 m 之间(如图 10 所示),表现较为稳定;横摇运动在 600 s 的时间域中(如图 9 所示),横摇角度远小于浮标的稳性消失角,浮标不会倾覆,满足设计要求。

3 示范运行与数据分析

运用本文技术研发的西风带海洋环境监测浮标系统参加了中国第 35 次南极科学考察,搭载船

“雪龙号”于 2018 年 11 月 2 日从上海出发,于 2019 年 1 月 1 日将浮标系统布放于受西风带作用明显的南大洋近中心海域,浮标布放现场如图 11 所示,浮标布放站位如图 12 所示。

图 11　浮标布放

图 12　浮标位置

目前,浮标系统运行正常。截止到 2 月 28 日 23 时,应获得海上数据 1 406 组,实获数据 1 327 组,数据获取率为 94.38%。期间,经历 4 次较大气旋过程(1 月 3 日、1 月 8 日、1 月 20 日、2 月 2 日),观测到最大 25.8 m/s 的风速数据和 12.3 m 的波浪数据,风速以西向为主,波向以北向为主。风、浪、气压数据分析图如图 13 所示。

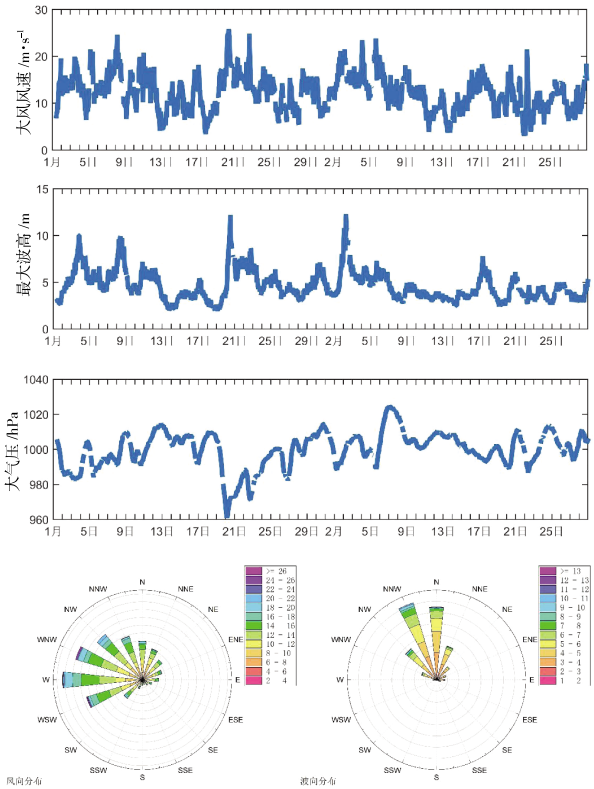

图 13　浮标观测数据曲线图

4　结 论

本文在我国现有海洋观测浮标工程经验的基础上,通过解决浮标系统的结构设计、数据采集、锚系设计等关键技术问题,并利用三维势流理论通过频域和时域进行了仿真验证,研制出了我国首套适应于南大洋海域的极端环境观测浮标系统。该套浮标系统在南大洋已运行了 3 个月,期间观测的最大波高达到 12.3 m。浮标运行结果表明:我国海洋资料浮标经过 30 多年的发展, 适应极端环境运行的关键技术已成熟[6],在极端海洋环境下长期业务化运行已具备初步条件,可以作为研究西风带作用下的南大洋的基本设备,保障提供长期现场实时观测数据。

参考文献:

[1] Schulz E W, Josey S A, Verein R. First air-sea flux mooring measurements in the Southern Ocean [J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(16):16606.

[2] Henrique Rapizo, Alexander V Babanin, Eric Schulz, et al. Observation of wind-waves from a moored buoy in the Southern Ocean[J]. Ocean Dynamics, 2015, 65(9-10):1275-1288.

[3] 冯月永,张倩,李虎林,等. 海上锚定抗冰环境监测平台技术研究[J]. 海洋技术学报,2017,36(3):57-61.

[4] Schulz E W, Grosenbaugh M A, Pender L, et al. Mooring design using wave-state estimate from the Southern Ocean [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2011, 28(10):1351-1360.

[5] 孙辰.“白龙”浮标标体设计及动力学分析[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2014.

[6] 李民, 刘世萱, 王波,等. 海洋环境定点平台观测技术概述及发展态势分析[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(3):36-42.

Research on Westerlies Environmental Observation Technology

FENG Yue-yong, ZHOU Da, ZHOU Wen-qing, WU Hai-qiang, KANG Jian-jun, LI Hu-lin, ZHANG Qian, ZHANG Jian-tao, ZHANG Xiao-xu, LI Lin-qi

National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, *China*

Abstract: The harsh ocean environment of the Southern Ocean leads to the lack of in-situ observation data. China's first Westerlies Environmental Observation Buoy was deployed on Jan 1st, 2019 near -53°S, southeast of New Zealand, to measure and transmit in-situ observation data of wind speed, wind direction, air temperature, pressure, humidity, sea surface temperature and salinity, current, wave, etc. It is the first extreme environmental observation buoy in China deployed in water up to 4 500 m depth. The results show that China already has a technological base for the development of data buoys for extreme environments and has obtained experience in the deployment of deep-sea buoys. The Westerlies Environmental Observation Buoy developed by China could measure hydrometeorological and dynamic parameters for long-term unattended operation in the Southern Ocean.

Key words: Southern Ocean; Westerlies; ocean observation; buoy