

基于感应电流测量的海峡水通量海底缆线观测系统设计

连展^{1,2,3}, 官晟^{1,2,3}, 魏泽勋^{1,2,3}, 王新怡^{1,2,3}, 孙宝楠^{1,2,3}

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061; 3. 青岛海洋科学与技术国家实验室区域海洋动力学和数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266061)

摘要: 首先回顾了基于海底缆线的海峡水通量观测理论方法的发展历程, 对基于电压测量的水通量反演方法进行了梳理, 重点阐述了其中的关键观测要素和主要误差来源。为了提升系统可靠性、摒弃外界因素干扰, 提出了一种基于感应电流测量的观测方法。对比传统方法, 分析了本方法的优缺点, 评估了基于本方法的海洋观测系统建设需求和可能性。最后应用本系统建立的一个理想海域——青岛胶州湾湾口各类海洋要素的典型取值范围, 通过合理的特征尺度估算和量纲分析, 估计了基于电流测量的观测系统中的各类设备的参数要求, 其中关键测量器材——电流表至少应满足观测量程覆盖 $10^{-1} \sim 10^1$ mA, 观测精度大于 $1 \mu\text{A}$, 取样频率大于 $1/60$ Hz。在电学测量仪器中, 适应本系统要求的器材较普遍, 可选择的测量仪器种类较丰富。

关键词: 海底缆线; 海水通量观测系统; 电流测量; 建设方案

中图分类号: P714^{+.1} 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)10-0071-05
doi: 10.11759/hyxx20160229001

重点海峡水通道的水通量观测历来被视为海洋观测中的一个重要目标^[1]。基于海底缆线的海峡水通道海水通量观测技术的发展历史由来已久^[2-3], 其特有的连续断面观测能力, 可克服传统海洋观测手段仅能依靠单点观测、定时观测等手段获取离散数据的缺点^[4], 为海洋流系监测、海湾水交换能力等研究工作提供良好的连续数据支撑^[5]。

迄今为止, 我国尚未有类似系统的建设经验。随着近年来沿海各类工程设施的发展, 基于海底缆线的海洋观测系统建设迎来了一个良好的发展契机^[6]。因此, 我们有必要对整个观测系统所应用到的方法、原理进行梳理, 从理论和技术设计层面对此类观测系统的建设做好准备。

青岛胶州湾湾内各类海洋工程和海水养殖产业众多, 对海湾与外海水通量的长期监测有重要的实际意义。我们应用胶州湾湾口各类海洋要素的典型取值范围, 估算了目标海洋通道测量值的量值范围, 对所设计观测系统的关键测量仪器给出了选择标准, 对系统整体设计方案提出了构想。

1 基于海底缆线的海峡水通量观测方法

1.1 传统方法——基于感应电压测量

应用海底缆线对海水流动展开观测的电磁学理论研究最早始于 Stommel^[2], 后经 Longuet-Higgins^[7]、

Larsen 和 Stanford 等^[8]的不断发展, 已经形成了一套比较完善的理论系统。基于此理论的观测系统在美国佛罗里达外海已经连续成功运行了超过 30 a^[9]。

该方法原理是通过测量得到海底缆线两端的电势差, 然后利用该电势差的大小和变化, 反演通过整个海洋垂向断面的海水通量。设坐标系 x, y 方向分别为东西方向和南北方向, z 方向为 xy 平面法线方向。设地球磁场为 F , 则 F 分别存在 F_x, F_y, F_z 分量。海峡水道中的海水携带带电粒子切割磁力线即可在海峡两侧形成电势差。

海底缆线两端的电势差 $\Delta\phi$ 主要由 3 部分组成:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_V + \Delta\phi_G + \Delta\phi_N \quad (1)$$

$\Delta\phi_V$ 为 $\Delta\phi$ 主要组成部分, 其产生原因为带电粒子随海水运动, 切割地球磁力线导致的电荷空间分布累积, 该空间累积产生的电场中电场线方向垂直于流

收稿日期: 2016-02-29; 修回日期: 2016-05-05

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2012G03); 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目(U1406404)

[Foundation: Basic Scientific Fund for National Public Research Institutes of China, No. 2012G03; NSFC-Shandong Joint Fund for Marine Science Research Centers, No. U1406404]

作者简介: 连展(1982-), 男, 山东青岛人, 助理研究员, 硕士, 主要从事海洋环流方面研究, 电话: 0532-88967320, E-mail: lianzhan@fio.org.cn; 官晟, 通信作者, 工程技术带头人, 主要从事海洋物理应用技术方面研究, 电话: 0532-88967320, E-mail: gsh30@163.com

体流线, 电势分布也与之对应。如果该电荷空间分布在流体流动方向不均匀, 则同时也会生成一个沿流体流动方向的电场, 该电场产生的电势差为 $\Delta\phi_G$ 。 $\Delta\phi_N$ 为误差电势差, 主要由温度、盐度和海洋-海底线缆连接处电化学反应引起的导电特性变化决定。若本系统的空间范围较小, 海水温盐特性在此特征尺度内变化不大, 则 $\Delta\phi_G$ 可忽略。同时, 根据已有系统的建设经验, $\Delta\phi_N$ 也可被估算修正, 并且在相当长一段时间内保持稳定, 不对最终结果造成明显影响。因此本理论中人们的主要关注点应为 $\Delta\phi_V$ 。

在实际情况下, 海底沉积物和大陆架等均有导电能力, 其产生的竖直和水平方向的导通电流会对 $\Delta\phi_V$ 造成削弱。即通过仪器测量得到的电势差 $\Delta\phi_O$ 要通过复杂的换算才能最终得到 $\Delta\phi_V$ 。传统的换算方法是通过海底沉积物取样、对大陆架分层结构开展分析、对海水电导率、岸线长度以及海水深度等参数进行测量, 建立不同电路之间的关系, 最终应用电路原理学知识确定 $\Delta\phi_V$ 和 $\Delta\phi_O$ 之间的关系。由于所涉及的参数过多, 且部分需要人为估计给定。当本系统建立在相对远离人工干扰且水深流急的海域时, 因本身背景观测值量级较大, 以上参数可以通过大量实地观测给出相对误差较小的估计值。但本观测系统若建立于城市近海, 观测目标流量可能较小, 导致目标电势差也较小, 对上述参数的人为估计导致的偏差可能淹没目标信号。同时系统沿岸人为活动较多, 各类相关电学参数也可能随时间改变。这提示我们针对不同系统建立环境, 有必要提出一种新的设计方案。

1.2 改进方法——基于感应电流测量

由于海底沉积物和大陆架有漏电回路, 故可将该海-陆系统视作一个电源整体, 海底沉积物和大陆架电阻的组合为该电源的内阻 R_1 , 利用已存在的海底缆线, 根据它的材料和长度估算出它的电阻为 R_2 , 并在缆线上串联一个外电源 U , $\Delta\phi_O$ 为传统观测系统实际测量值, $\Delta\phi_V$ 为目标测量值。

若在 t_1 时刻取外电源电压为 U_1 , 此时该回路满足:

$$\Delta\phi_V = -U_1 + I_1 R_1 + I_1 R_2 \quad (2)$$

其中 I_1 为 t_1 时刻该回路中的电流, 可在缆线处用电表测得。该系统的电路结构示意图见图 1。

若取与 t_1 时刻相距足够短的 t_2 时刻, 可认为在此时间尺度内 $\Delta\phi_V$ 不变, 取外电源电压为 U_2 且 $U_2 \neq U_1$, 并用电表测出此时回路电流 I_2 , 则 t_2 时刻满足下式:

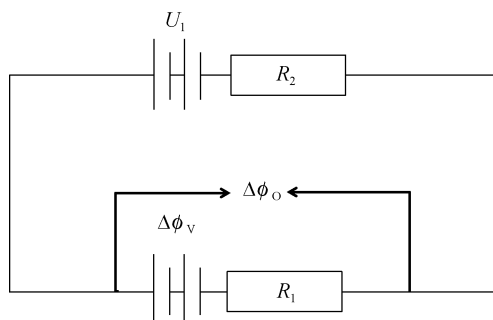


图 1 系统电路图

Fig. 1 Electrical circuit

$$\Delta\phi_V = -U_2 + I_2 R_1 + I_2 R_2 \quad (3)$$

将(2)、(3)两式作差即可求得 R_1 和 R_2 的关系:

$$R_1 = \frac{U_1 - U_2 - (I_1 - I_2)R_2}{I_1 - I_2} \quad (4)$$

再将 R_1 回带到(2)式即可得到 t_1 时刻海水流动产生的电压 $\Delta\phi_V$ 。本方法虽不是通过直接测量的方法求得 $\Delta\phi_V$, 但可以通过换算关系由已知的电阻和测得的感应电流计算得到 $\Delta\phi_V$ 。

这样, 虽然我们要人为提供一个外部电源并且增加了测量次数, 但是在整个系统中, 全部参数均可以通过直接测量的方法严格确定, 使得整个系统的可靠性大大提高, 避免了估算海水、海峡两岸及沉积物等的导电性质所可能带来的误差。同时, 本系统的待测参数量值相对较小, 仪器线路连接状态可能会对测得量值有所影响, 同时船只经过和观测系统周边的人工设施引起的电磁干扰等都有可能对引起系统测值的偏离。但是本系统的方案基础决定了这所有干扰项都可以被统一视为“内阻(R_1)”导致, 因此其引起的误差可以被多次测量并求解方程组的方法一并消除。

外部电源以及多次测量这两个限制条件, 是一个本着长期连续观测为目的的观测系统所容易实现的。在实际海洋中, 整个海峡断面内海水平均流动的变化周期往往是以分钟乃至小时为单位的, 因此以相对海水流动变化较短的时间连续观测也较易实现。

1.3 海水流量的反演

海水感应电动势 $\Delta\phi_V$ 与单位时间海峡水通量 V 存在以下关系:

$$\Delta\phi_V = \alpha BV \quad (5)$$

式中, B 为当地背景地球磁场强度, α 为需要确定的修正系数。在系统建立后, 我们可以通过数值模拟、船只走航或其他定点观测手段, 给出一定时段内 V

的估计数值,在同步测量 $\Delta\phi_V$ 的基础上,应用最小二乘法等数学手段,给出合理的 α 取值。在此关系参数确定之后,即可以应用 $\Delta\phi_V$ 的测量值连续独立反演 V 。由此我们可以发现,在本系统建立初期,一定量的传统海洋观测手段作为系统调试依据仍是必不可少的。

2 基于电流测量的海水通量观测系统设计——以胶州湾湾口为例

2.1 观测设备选型

国际上基于海底缆线电压测量的海峡水通量观测系统已经并不罕见,对本系统的有关设备选择已经有了较成熟的参考意见。而基于海底缆线电流测量的相关观测系统迄今为止较为少见,为了对本系统所涉及的观测要求精度和量程有所掌握,我们应用胶州湾湾口的典型尺度参数对本系统对观测设备的参数要求进行了分析。

依据以上分析,海底电缆导体中的感应电流与海底电缆的电阻和因为海水切割地球磁场产生的电势差 $\Delta\phi_V$ 之间的关系为:

$$I_V = \frac{\Delta\phi_V + U}{R_1 + R_2} \quad (6)$$

式中, U 为人为增加的电源电压, R_1 为海水与沉积物、大陆架等导电介质构成的电路电阻, R_2 为海底电缆电阻。

以青岛近海胶州湾湾口水道为例,通道空间尺度约为宽 10 km, 平均水深约 20 m, 通过此水道的海水平均流速量级可考虑为 10^{-1} m/s^[10], 则单位时间内该通道海水通量量级为 10^4 m³/s。本海域的海水温度、盐度和地球磁场强度等也可设定为同纬度近海典型值。基于以上特征参数,应用量纲估算的方法,参照 Nolasco 等^[11]的实际观测结果(海水体积通量与感应电动势的换算系数为 720 m³/(s·mV)), 在此水道内因海水流动导致的感应电动势 $\Delta\phi_V$ 量值应为 10^1 mV。此系统中的电源为我们任意设计,因此也可将其电压 U 给定为 10^1 mV。根据国外已有的类似近海观测系统经验, R_1 的数值约为 $10^1 \Omega$ ^[11]。海底缆线种类若采用较常见的交联聚乙烯绝缘缆线,其通常电阻为 1 Ω /km, 对应上述关系式中的 R_2 量值应为 $10^1 \Omega$ 。综合分析以上量纲,将其代入公式(6)中,可得系统的观测目标——感应电流量值应为 10^0 mA。

因此,整个观测系统的关键设备——电流观测设备,对其的技术参数要求应至少能满足观测量程

覆盖 10^{-1} mA 至 10^1 mA, 观测精度大于 1μ A, 取样频率大于 1/60 Hz。符合以上要求的该类电学测量仪器较为常见,如安捷伦(Agilent) 3458A 型台式电流表即可满足本系统的搭建需要。其量程为 100 nA~1 A, 测量速度为 1 350 读数/s, 最高灵敏度为 1 pA, 24 h 精度为 14×10^{-6} 。

除此之外,本系统还需配置一个外部电源,此电源的关键指标为稳定性,要求该电源输出的电压波动小于流速变化引起的电压波动。根据以上分析,可满足该条件的稳压电源也较普遍,如远方 EVERFINE WY3020 精密数显直流稳压电源。其输出电压分辨率为 0.1 mV, 输出电压漂移为 $\pm 0.01\%$ 读数。

2.2 系统设计方案

本观测系统设计示意图见图 2。在最理想情况下,本系统将依托于连接青岛主城区和黄岛区的退役供电或通信海底电缆建立。穿越整个海峡断面的海底电缆在一端岸基接地,另一端从海水中延伸出后先后串联精密电流表和稳定电源,最终同样接地。在此端建设可长期固定记录数据的岸基设施,有规律地连续存储对应的观测时间、供电电压和测得的电流数据。观测时间间隔可分为两种,一种间隔较长的取样可设计以分钟为时间单位,同时每次记录数据时还需设计以秒为时间单位的多次短间隔取样,通过间接计算的方法求得最终所需结果。

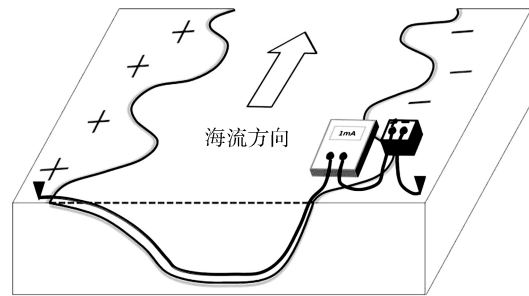


图 2 系统设计示意图

Fig. 2 Diagram of the observational system

3 小结

本文回顾了整个观测理论方法的发展历程,然后提出了一种基于电流测量的观测方法。该方法可以不必定量分析底质非绝缘沉积物、沿岸水平回路、接线柱腐蚀等引入系统的较稳定误差因素;由于短时间内多次测量,也不需定量分析船舶、电磁干扰、地磁变化等随机误差因素,提升了测量系统准确性

和可实现程度。观测系统建立较为便捷,可以直接搭载于各类海底缆线之上,对缆线不需要进行较大规模的调整和改装。

在此我们针对青岛近海胶州湾的具体海域状况设计了测量系统方案,并进行了关键设备的选型,下一步将开展现场试验,进一步提升基于电流测量的海水通量观测方法的实用性。

参考文献:

- [1] 田川, 王树新, 徐霄阳. 台湾海峡夏季与冬季的水体及热盐通量观测[J]. 海洋科学, 2015, 39(1): 110-115.
Tian Chuan, Wang Shuxin, Xu Xiaoyang. The observation of transport of volume, heat and salt through the Taiwan Strait in summer and winter[J]. Marine Sciences, 2015, 39(1): 110-115.
- [2] Stommel H, The theory of the electric field induced in deep ocean currents[J]. Journal of Marine Research, 1948, 7(3): 386-392.
- [3] Larsen J C. Transport and heat flux of the Florida Current at 27 degrees N derived from cross-stream voltages and profiling data: theory and observations[J]. Royal Society of London Philosophical Transactions, 1992, 338(1650): 169-236.
- [4] 刘长华, 王春晓, 贾思洋, 等. 锚泊式海洋剖面观测浮标系统[J]. 海洋科学, 2014, 38(8): 99-102.
Liu Changhua, Wang Chunxiao, Jia Siyang, et al. The system of mooring marine profiling observation buoy[J]. Marine Sciences, 2014, 38(8): 99-102.
- [5] 王新怡, 连展, 李淑江, 等. 海底缆线在海洋观测中的应用[J]. 海洋科学, 2012, 36(11): 111-113.
Wang Xinyi, Lian Zhan, Li Shujiang, et al. Applications of submarine cables on oceanic observations[J]. Marine Sciences, 2012, 36(11): 111-113.
- [6] 连展, 官晟, 魏泽勋, 等. 基于海底缆线的海洋观测系统在我国近海应用的前景分析[J]. 海洋开发与管理, 2015, 31(11): 33-36.
Lian Zhan, Guan Sheng, Wei Zexun, et al. Analysis of the prospect of application of marine observation system based on submarine cable in offshore China[J]. Ocean Development and Management, 2015, 31(11): 33-36.
- [7] Longuet-Higgins M S. The electrical and magnetic effects of tidal streams[J]. Geophysical Journal International, 1949, 5(Supplement 8): 285-307.
- [8] Larsen J C and Sanford T B. Florida current volume transports from voltage measurements[J]. Science, 1985, 227(4684): 302-304.
- [9] Garcia R F and Meinen C S. Accuracy of Florida current volume transport measurements at 27°N using multiple observational techniques[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2014, 31(5): 1169-1180.
- [10] 曹丛华, 白涛, 高松, 等. 胶州湾高分辨率三维风暴潮漫滩数值模拟[J]. 海洋科学, 2013, 37(2): 118-125.
Cao Conghua, Bai Tao, Gao Song, et al. High resolution 3D storm surge and inundation numerical model used in the Jiaozhou Bay[J]. Marine Sciences, 2013, 37(2): 118-125.
- [11] Nolasco R, Soares A, Dias J M, et al. Motional induction voltage measurements in estuarine environments: the Ria de Aveiro Lagoon (Portugal)[J]. Geophysical Journal International, 2006, 166(1): 126-134.

Designing a submarine cable observation system using water flux through a strait based on motion-induced electric current

LIAN Zhan^{1,2,3}, GUAN Sheng^{1,2,3}, WEI Ze-xun^{1,2,3}, WANG Xin-yi^{1,2,3}, SUN Bao-nan^{1,2,3}

(1. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 2. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China; 3. Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Received: Feb. 29, 2016

Key words: submarine cable; observation system of water flux; measure of electric current; development scheme

Abstract: In this paper, first, we review the course of developing a submarine cable observational system using water flux through a strait. Second, by analyzing the inverse method of water flux when measuring the motion-induced voltage, we focus on the key observational elements and the main error sources. In order to improve the reliability of the observation system and reduce interference, we propose a new observational system based on measuring the motion-induced electric current. By comparing with the traditional method, we analyze the advantages and disadvantages of the proposed method and evaluate the demand and possibility of constructing such an observation system. Finally, by using the typical ranges of marine elements in the mouth of the Jiaozhou Bay, Qingdao, which is an ideal area for building the observation system; furthermore, by estimating the characteristic scale and conducting a dimension analysis, we find the parameter requirements of devices that are present in a system, which measures the motion-induced electric current. An ammeter with an observational accuracy of greater than $1\ \mu\text{A}$ and a sampling rate higher than $1/60\ \text{Hz}$ is required to measure in the range of 10^{-1} — $10\ \text{mA}$, which is the key measurement equipment used for this system. This requirement is common in electrical measurement instruments, and a wide variety of devices with such specifications are available.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)