

基于实测资料海洋内孤立波诊断模型设计

邓冰¹, 陈凤贵¹, 肖义国¹, 徐振华²

(1. 北京应用气象研究所, 北京 100029; 2. 中科院海洋研究所, 山东 青岛 266071)

摘要: 目的 基于实测的海洋资料, 研究设计海洋内孤立波诊断模型。方法 首先对实测的 ADCP 海洋资料和温度链资料进行质量控制处理, 然后利用海洋内波动力学理论和诊断分析技术, 建立提取海洋内波特征的诊断模型。结果 成功设计了能够提取海洋内波振幅、内波周期、变差流矢量时间序列、内波波致流和内波传播方向的诊断模型。结论 该诊断模型通过实测的温度链、潜标、ADCP 等连续观测的海洋资料, 可诊断出海洋内波周期、内波振幅等特征要素, 为实施海洋水文气象保障提供了重要技术手段。

关键词: 内孤立波; 诊断分析; 实测资料

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2014.03.003

中图分类号: P731 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)03-0010-04

Diagnosis Model Design of Internal Solitary Waves Based on In-situ Data

DENG Bing¹, CHEN Feng-gui¹, XIAO Yi-guo¹, XU Zhen-hua²

(1. Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029, China;

2. Institute of Oceanology, Chinese academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

ABSTRACT: **Objective** To research and design a diagnosis model for oceanic internal solitary waves, based on the measured ocean data. **Methods** Firstly, the measured ADCP marine data and temperature data were processed, and then the diagnosis model of ocean internal wave feature was established by using the ocean internal wave dynamics theory and diagnosis technology. **Results** The diagnosis scheme was designed for extracting the amplitude, period, internal wave-induced flow and wave propagation direction. **Conclusion** The diagnosis model could diagnose the characteristic factor of ocean internal wave, such as period and amplitude, by using the measured temperature chain, submersible buoy and ADCP continuous observations of ocean data, which provided an important technical means for the implementation of marine hydrometeorological safeguards.

KEY WORDS: ocean internal wave; diagnostic analysis; in-situ data

海洋内波是发生在海洋内部的重力惯性波, 具有水下魔鬼之称。长期以来, 对海洋内波的研究一

收稿日期: 2014-01-07; 修订日期: 2014-02-22

Received: 2014-01-07; Revised: 2014-02-22

作者简介: 邓冰(1963—), 女, 江苏人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为海洋学应用。

Biography: DENG Bing(1963—), Female, from Jiangsu, Ph. D., Senior engineer, Research focus: applied oceanology.

直是海洋科技工作者努力钻研的前沿课题。海洋内波是重要的海洋中尺度现象,由于内波发生机制的复杂性以及时间空间特征的随机性而成为海洋领域研究的难点。海洋内波的研究不仅在整个海洋动力学的理论研究中占有重要的地位,而且对海洋环境与资源开发和保护、军事应用及推动其他相关学科的深入研究和发 展都具有重要的价值。我国近海区域是海洋内波的多发区。海洋内波对潜艇、声纳、鱼雷等水下武器装备作战运用有着非常重要的影响^[1-2]。由于海洋内波是发生在海洋内部,因此对 内波特征要素的了解目前不能通过直接测量得到,需要通过对流场、密度场的诊断得到内波的特征信息。笔者利用 CTD 温盐资料和 ADCP 流场资料设计了提取内波振幅、周期、流速和流向的诊断方案。

1 海洋资料处理

内波是一种宽频振动,其频率范围在当地惯性频率到浮力频率之间。常见的波长为几十米至几十千米,周期为几分钟至几十小时,振幅一般为几米至几十米,最大振幅可达一二百米^[3]。中国海基本每个季节都有着明显的海水层化现象^[4],为内波的发生和传播提供了介质,而周围复杂且不稳定的流场特征又给内波的发生提供了扰动源。因此该海域内波频发,其中最为普遍的内波是内孤立波和内潮波。内孤立波具有强非线性,常常由强内潮裂变生成。

内波的振幅通常以等密度线的起伏来衡量,但因直接测量海水密度非常困难,通常用等温线或等盐线的起伏来代替^[5]。在海洋中能引起等温线振动的因素主要有:潮汐、太阳辐射、内波、风、浪等。潮汐使海水等温线发生周期性的起伏,但其升降幅度等于同天文潮引起的海面的升降幅度,也就几米的量级。太阳辐射也会使海水温度增高,使等温线出现日周期的变化,但这些变化主要集中在海水表层,不会波及整个水体。因此当海水中层或者温跃层附近的等温线出现了大的起伏时,一般可以认定发生了内波^[6]。一般情况下强度弱的内波对水下平台和武器装备不会造成大的影响,基于内波实际保障的需求,文中仅考虑当海水中层或温跃层附近的等温线出现超过 10 m 振幅时,认定发生了内波。

由于现场观测的海洋环境资料具有不同的格式,需对搜集到的 CTD 资料和 ADCP 资料进行预处

理,进行校对检验和格式编排,使资料的数据集(物理要素测量值的集合)和元信息(如测量的时间、地点、方式、质量控制等)在准确性、规范性方面满足完整性要求和一定的规格指标。为方便读取和自动化处理,对数据格式制定了标准,其中对温盐流数据要求为一整天的多层观测资料,数据的时间间隔要求为 1 min,垂向深度间隔为 1 m,现场观测数据如果不满足要求需先进行插值处理。文中利用 Akima 插值方法^[7],边界资料采用线性差值。在插值过程中规定连续缺少 3 层以上按缺测处理。

Akima 方法规定,在 2 个实测点之间进行内插,除了要用到这 2 个点的实测值以外,还用到了与这 2 个点相邻的 4 个点上的实测值,也就是说在 2 个点之间内插需要用到 6 个实测点。设用 $i(i=1,2,\dots,6)$ 表示这 6 个实测资料的序号,其坐标为 (x_i, y_i) ,插值点 (x, y) 位于第 3 和第 4 个实测点之间,即 $x_3 < x < x_4$,则插值点 y 可用式(1)计算:

$$y = p_0 + p_1(x - x_3) + p_2(x - x_3)^2 + p_3(x - x_3)^3 \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} p_0 = y_3 \\ p_1 = t_3 \\ p_2 = [3(y_4 - y_3)/(x_4 - x_3) - 2t_3 - t_4]/(x_4 - x_3) \\ p_3 = [t_3 + t_4 - 2(y_4 - y_3)/(x_4 - x_3)]/(x_4 - x_3)^2 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, t_3 和 t_4 分别是第 3 和第 4 号实测点要素的斜率,分别用 1, 2, 3, 4, 5 和 2, 3, 4, 5, 6 号点上的实测值表示,在一般的情况下, t_3 和 t_4 可用式(3)计算:

$$t_i = (|m_{i+1} - m_i| m_{i+1} + |m_{i-1} - m_{i-2}| m_i) / (|m_{i+1} - m_i| + |m_{i-1} - m_{i-2}|) \quad (i=3, 4) \quad (3)$$

式中: m_i 为斜率,它用式(4)表示:

$$m_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (4)$$

2 内波信息提取

2.1 用 CTD 资料提取

由于孤立波的非线性较强,其波形一般并不对称,因此通过计算其半波宽度的方法提取内波振幅和周期,选取内波到来前和波峰到达时刻的等温线所在深度的差值即为内波的振幅,二者时间差的 2

倍即为内波的周期^[8]。海洋内波示意如图1所示, H_2, H_1 分别表示上层水深和下层水深, ζ 表示内波振幅, $z = H_2 - \zeta$ 。

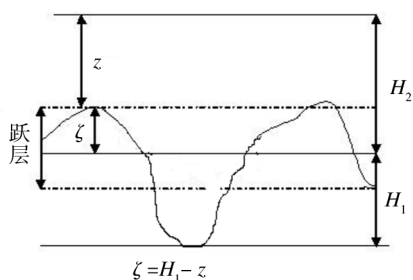


图1 海洋内波示意

Fig. 1 Schematic diagram of ocean internal waves

2.2 用 ADCP 资料提取

利用 ADCP 资料可提取内波波致流和内波传播方向^[9]。

将实测海流进行标准化处理获得多个时间相应、长度相等的实测流的时间序列。采用梯形积分公式计算得到平均全流时间序列,再由诸实测流与平均全流时间序列之差,获得各变差流的时间序列。

定点 ADCP 海流观测资料分解为北分量 $u(z, t)$ 和东分量 $v(z, t)$, 以北分量为例:

$$u(z, t) = \bar{u}(z) + \tilde{u}(z, t) + \Delta u(z, t) \quad (5)$$

对每个确定的深度 z , 其中不随时间变化部分 $\bar{u}(z)$ 为:

$$\bar{u}(z) = \frac{1}{T} \int_0^T u(z, t) dt \quad (6)$$

由式(7)得到剩余流成分为:

$$\Delta u(z, t) = u(z, t) - \bar{u}(z) - \tilde{u}(z, t) \quad (7)$$

潮流可分为正压潮流 $\tilde{u}_{btr}$ 和斜压潮流 $\tilde{u}_{bc}$, 即:

$$\tilde{u}(z, t) = \tilde{u}_{btr}(t) + \tilde{u}_{bc}(z, t)$$

其中:

$$\tilde{u}_{btr}(t) = \frac{1}{H} \int_0^H \tilde{u}(z, t) dz \quad (8)$$

$$\tilde{u}_{bc}(z, t) = \tilde{u}(z, t) - \tilde{u}_{btr}(t) \quad (9)$$

考虑到背景余流等的影响,当跃层上下侧平均变差流的相位差约 $180^\circ + 10^\circ$, 同时对应着一个持续时间为 $5 \sim 40$ min 的流速激增过程时,表示内孤立波的发生过程。

根据内波理论可知,如果内波流的剪切层深度小于水深的一半,说明该内波为下凹型内孤立波,由

此对应上层变差流方向即为内波的传播方向。反之说明内波为上凸型内孤立波,对应下层变差流方向即为内波的传播方向,同时上层和下层变差流的大小即为内波流的振幅。内波动力诊断流程构架如图2所示。

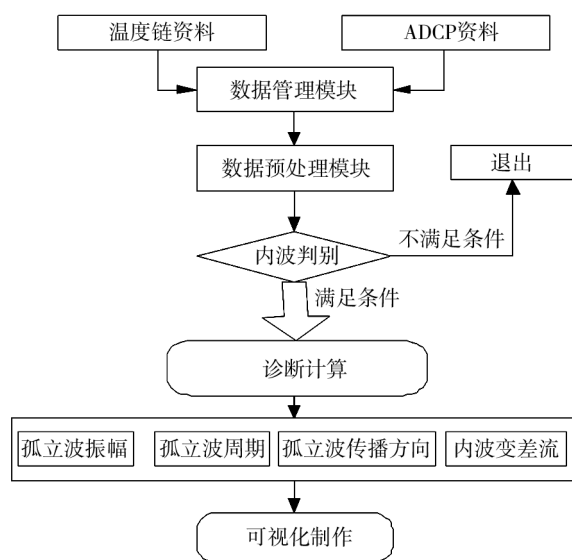


图2 海洋内波动力诊断流程

Fig. 2 Dynamic diagnosis process of internal wave

3 海洋内波信息诊断个例

本文利用2005年南海东沙群岛附近海域温度链资料和 ADCP 资料诊断南海孤立波的特征要素。由于不同海域背景的水文条件和天文潮流等不同,内孤立波的振幅大小并不一致,南海东沙群岛附近内孤立波最大振幅可达170 m,而浅海大陆架区内孤立波振幅一般为10~40 m左右。根据前面所述的辨识标准,针对东沙海域实例进行了分析。对温度链资料处理后得到的等温线随时间的演变如图3所示。可以看出,图3中曲线为一个包含8个孤立子的下凹型内孤立波列,经计算选定孤立子的振幅18 m,周期为22.5 min。

选定时刻内波流的矢量分布如图4所示。可以看出,内波传播方向为西北偏西,内波流最大可达0.5 m/s,剪切流最大可达0.75 m/s。星号所示位置明显出现约20 min的流速增大过程,流速增大到0.4 m/s,明显高于当地0.2 m/s的背景流,在45 m深处存在一个剪切界面,由此可认为这是一个内孤立波的过境过程。根据内波理论可知,上层海流的

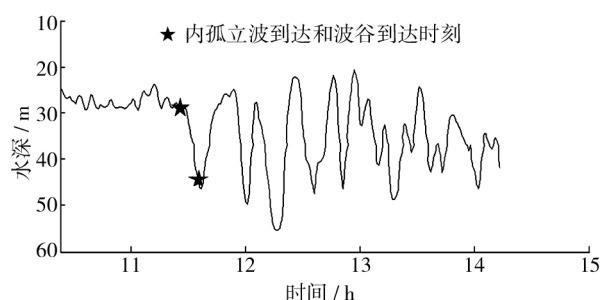


图 3 28 °C 等温线的分布

Fig. 3 Distribution of 28 °C isotherm

方向为内波的传播方向。

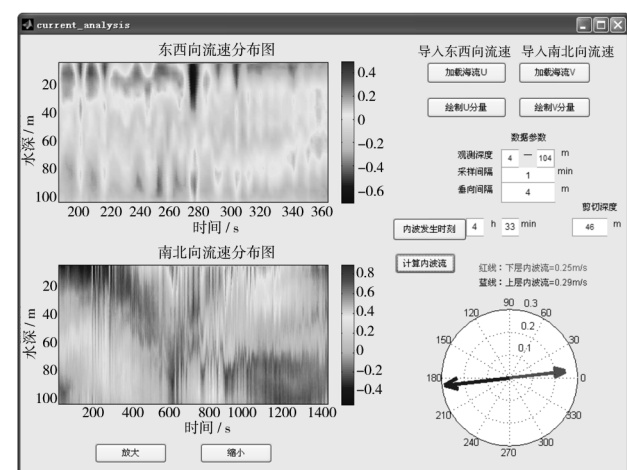


图 4 内波流场诊断

Fig. 4 Diagnosis chart of internal flow field

4 结语

海洋内波对海洋声学、海洋资源开发、海洋生态环境保护、海洋军事和海洋工程等方面都具有重要影响,海洋内波研究是一个国际性研究热点。海洋内波信息诊断分析技术是研究内波特性的基础。根据海洋内波动力学理论与方法,建立提取海洋内波特性的诊断模型,对实测的温度链、潜标、ADCP 等连续观测资料进行动力分析诊断,可以诊断出内波周期、内波振幅、变差流矢量时间序列及内波波致流、内波传播方向等内波特征要素。由于海洋内波特性十分复杂,目前我国南海海域孤立波诊断算法还不能完全满足自动化工作的需求,内波特征参数提取需要通过相关专业知识的修正,未来南海孤立波诊断技术将朝着业务自动化方向发展。

参考文献:

- [1] 蒋国荣,张军,施伟来. 海洋内波及其对海战的影响[M]. 北京:气象出版社,2009.
JIANG Guo-rong,ZHANG Jun,SHI Wei-lai. Ocean Internal Waves and Its Influence of Sea Battle[M]. Beijing: Meteorological Press,2009.
- [2] 孔大伟,吕杨. 海洋环境对声纳系统影响研究[J]. 装备环境工程,2012,9(4):68—70.
KONG Da-wei,LYV Yang. Study on the Influence of Marine Environment on the Sonar System[J]. Equipment Environmental Engineering,2012,9(4):68—70.
- [3] 方欣华,杜涛. 海洋内波基础和中国海内波[M]. 青岛:中国海洋大学出版社,2004.
FANG Xin-hua,DU Tao. The Foundation of Oceanic Internal Waves and Chinese Haineibo[M]. Qingdao:China Ocean University Press,2004.
- [4] 杨学猛,刘彦森,蒋行海. 浅海目标辐射噪声矢量场特性实验研究[J]. 装备环境工程,2010,7(4):42—44.
YANG Xue-meng,LIU Yan-sen,JIANG Xing-hai. Study on Characteristics of Shallow Water Target Radiated Noise Field Vector[J]. Equipment Environmental Engineering,2010,7(4):42—44.
- [5] 赵俊生,耿世江. 北黄海内波场特征[C]//中国海洋学文集(3). 北京:海洋出版社,1992:11—15.
ZHAO Jun-sheng,GENG Shi-jiang. Internal Wave Field Characteristics in the Northern Yellow Sea[C]//Oceanography in China(Vol. 3). Beijing:Ocean Press,1992:11—15.
- [6] 陈上及,马继瑞. 海洋数据处理分析方法及其应用[M]. 北京:海洋出版社,1991.
CHEN Shang-ji,MA Ji-rui. Method and Application of Marine Data Analysis[M]. Beijing:Ocean Press,1991.
- [7] 杜涛,吴巍,方欣华. 海洋内波的产生与分布[J]. 海洋科学,2001(4):45—46.
DU Tao,WU Wei,FANG Xin-hua. Generation and Distribution of Ocean Internal Waves[J]. Ocean Science,2001(4):45—46.
- [8] 张铭,邓冰,赵艳玲. 不同模态海洋内波特征的诊断分析[J]. 海洋预报,2007,24(1):22—26.
ZHANG Ming,DENG Bing,ZHAO Yan-ling. Diagnostic Analysis of Internal Wave Modes[J]. Ocean Forecast,2007,24(1):22—26.
- [9] 孙文俊,沈斌坚. 海洋内波 ADCP 监测技术研究[J]. 热带海洋学报,2010,29(4):170—173.
SUN Wen-jun,SHEN Bin-jian. Study of ADCP Monitoring Technology of Ocean Internal Waves[J]. Journal of Tropical Oceanography,2010,29(4):170—173.