



风浪后报系统研究与开发*

郭延祥, 田琦

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 随着筑港向远海、深水、开敞环境发展, 缺乏风、浪实测资料严重影响筑港质量和进度。通过对大气科学和海洋学资料收集、模型研究和集成开发, 形成以再分析数据和实测数据为基础、中尺度大气模式 WRF 和第 3 代海浪模式 WWⅢ为核心的风浪后报系统。系统采用 B/S 架构和浏览器作为人机接口、Linux 大型并行计算服务器和 MPI 为模型运行环境, 采用网络和指令形式实现 WEB 服务对模型的控制, 采用用户、项目、模型、类型、实例分级实现对大量模型的管理。该系统可对任意海区任意时段的风场、深水波浪场进行后报模拟。实例验证表明, 该方法和系统可较好模拟台风场及相应的波浪场。

关键词: 风场; 波浪; 后报; WRF; WWⅢ

中图分类号: TV 139.2⁺1; U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)10-0040-06

Study and development of wind and wave hindcast system

GUO Yan-xiang, TIAN Qi

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The lack of actual measurement data of wind and ocean surface wave can seriously affect the quality and schedule of harbor development with the expansion of harbor construction to open water. Through the investigation and research on the data, observations, and models about meteorology and oceanography, based on observations and reanalysis data, integrating the mesoscale meteorological model, WRF, and the 3rd generation ocean wave model, WaveWatchⅢ(WWⅢ), a wind and ocean wave hindcast and simulation system comes into reality. It utilizes B/S architecture and browser as human-computer interface. The models run in a mass parallel computer cluster, named calculation server, with LINUX and MPI as software environment. The model controlling from WWW server is implemented through a web service program which runs in calculation server, receiving instructions from WWW server and then run appropriate model accordingly. Large number of model instances are organized by firstly categorized as WRF and WWⅢ, and then graded into user, projection, model, type and application. This system can hindcast and simulate the wind field in any domain and simulate the ocean surface wave field in any ocean domain. The application of this system shows that this method and system can simulate the typhoon and its wave field correctly.

Keywords: wind; ocean surface wave; hindcast; WRF; WWⅢ

近年来, 筑港技术获得长足的进步, 随着筑港向远海、深水、开敞环境发展^[1], 缺乏远海风、浪等基础自然条件的实测资料, 严重影响了工程质量和进度。现有港航工程主要在近海, 风、浪

条件大都有实测数据或有相邻的工程做参考, 海港水文研究重点是波浪在浅水区的传播变形。对风和外海波浪的研究一般采用天气图推算海面风场、采用经验方法推算深水波浪^[2], 这些方法需

收稿日期: 2016-06-16

***基金项目:** 水利部黄河泥沙重点实验室开放课题基金资助 (2012003)

作者简介: 郭延祥 (1974—), 男, 博士后, 高级工程师, 从事河流海岸水沙数值模拟。

要较多的实测数据和对研究海区有一定的经验认识,并不适用于远海地区。研究远海地区风、浪条件对远海和海外筑港意义重大。

作为气象的一个主要要素,风是大气科学的重要研究对象。气象领域有较为完善的全球大气观测网络和预报方法体系,特别是近年来大量卫星遥感等非常规观测数据的爆发式增长、模式物理过程的改善、四维同化技术的发展以及大规模并行计算机的支持,使包含风要素的气象场预报、后报精度得到大幅提高^[3-4],使再分析风场和后报风场达到工程应用的精度要求^[5]。而且,在世界气象组织(WMO)的领导下,气象领域的国际合作非常紧密,这些观测数据及分析产品可以在WMO成员和气象机构间自由获取^[6]。目前国际在用的大气模式主要有美国海洋大气局(NOAA)开发的WRF、Eta,欧洲中期天气预报中心(ECMWF)开发的IFS和中国气象局开发的GRAPES。这些气象观测数据和大气模式可以为港航工程提供重要的风要素参考^[7],所得高精度的风场产品可以作为海浪模型的驱动风场。

海浪(外海波浪)是海洋学的主要研究内容。目前全球范围的海浪观测系统主要由浮标、卫星高度计和志愿船组成,与全球气象观测系统集成在一起,可随气象观测数据一起获取^[8]。海浪数学模型目前已经发展到第3代,与前两代一样基于海浪谱能量平衡方程,主要特点是可不对谱形做预先假设以及考虑了非线性波-波相互作用^[9]。目前国际在用的典型第3代海浪模型主要有欧洲波浪模式计划开发的WAM^[10]、美国环境预报中心(NCEP)开发的WAVEWATCH III(WW III)^[11]、Delft大学开发的SWAN^[12]以及商业化模型DHI MIKE SW模型。WAM是最早的第3代海浪模式,WW III适用于深海;SWAN和SW可采用非结构网格,更多考虑了地形、水深变化、底摩擦等,适合于近岸波浪模拟。在风场准确的情况下,对海浪模拟可达到较高精度^[13]。将气象学与海洋学领域的风、浪相关数据和模型应用于港航工程建设是提高远海和海外风浪数据较少地区筑港安全的一条切实可行的途径。

1 风浪后报系统

预报是大气科学和海洋学领域应用的主流,而且,由于各研究机构有自己固定的研究范围,常见的预报系统都是针对固定区域,模式参数在后台调整^[14-15]。港航专业最需要获得的是历史风浪情况,即后报应用;其次,港航工程的区域是变化的,随之模型参数也应该能随着工程应用的不同设置不同的值;再次,根据海港水文规范,一般要得出50 a一遇波参数,数据系列时间应不小于20 a,需要建立多个时段的模型,随着工程应用增多,模型数量将非常庞大,模型管理也是一项重要工作。港航应用的上述特点决定了不能将海洋气象的预报系统简单移植到港航工程。

1.1 风浪后报系统整体框架

风浪后报系统总体上分为两大部分:采用中尺度大气模式WRF后报指定海区的高精度风场,采用第3代海浪模式WW III模拟指定海区的深水波浪场。2000年到现在的大气模式初始条件和边界条件数据使用FNL数据,1979—2000年使用CFSR全球再分析数据^[16]。大气模式地形、土地利用等静态数据使用WRF模式自带数据,WW III地形使用Etop1^[17]或Etop2全球地形数据。WW III的驱动风场可以使用WRF后报风场、CFSR风场、卫星风场或CCMP风场,使用多种风场进行设计的主要原因是WRF计算时间太长,连续后报几十年不现实,适合后报台风场,而且对于风速不是很大的季风,CFSR、卫星风场或CCMP等再分析风场精度较高,可直接用于海浪模型的驱动风场^[18]。系统流程见图1。

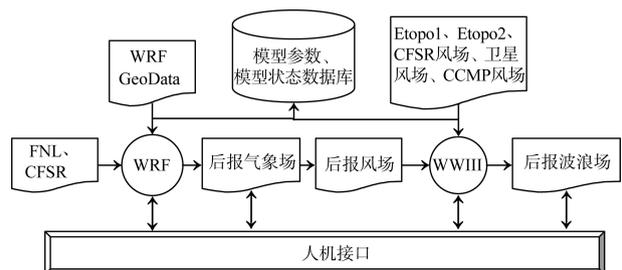


图1 风浪后报系统流程

地形数据、再分析数据和风场数据提前准备好并保存于磁盘上固定位置。通过人机接口配置

WRF 模式，配置信息和模式运行状态信息保存于数据库中。模式状态分为未建、已建未运行、运行未成功和运行成功 4 种，根据模式状态确定模式可进行何种操作，通过人机接口提供给用户，用户指定操作后，后台模式进行相应操作。WRF 模式运行成功后通过人机接口接收后处理指令可查看模式结果，其中有一个后处理为提取海面上 10 m 风场，形成 WW III 可读取格式。WW III 的配置、运行和后处理原理与 WRF 相似，风场可指定为系统提供的 4 种风场中的 1 种。

1.2 风浪后报系统关键技术

1.2.1 人机接口

一般用户的系统为 Windows 桌面，软件的可视化界面有客户端 (C/S) 和基于浏览器页面 (B/S) 两种，为了尽可能方便使用，系统选用 B/S 界面，用户只要有浏览器即可，并不需要额外安装软件。用户页面与 WEB 服务的异步交互采用 AJAX。模式配置参数、运行状态等信息采用数据库保存。

1.2.2 模型运行环境

WRF 要求的运行环境必须是 Linux，WW III 可以是 Windows 或 Linux，都支持大规模并行计算。因此，统一将这两个模型都布置在 Linux 并行计算服务器上，并行环境采用 MPI，数据格式支持 NetCDF、GRIB1/2，绘图环境采用 NCL 和 GrADS。

1.2.3 模型控制

两个模型都是普通可执行程序，不能通过 WEB 直接调用，需要在 WEB 服务与模型程序之间建立中间服务模块，为此专门开发了模型控制程序。其流程见图 3。

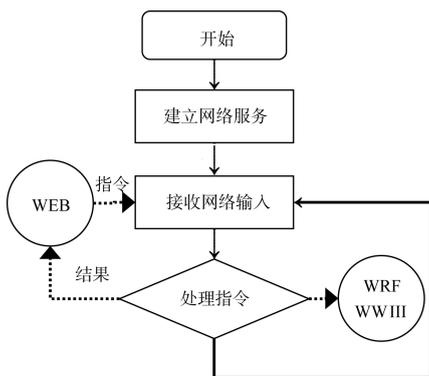


图 3 模型控制流程

模型控制程序运行在计算服务器上，可直接操作模型程序和文件。通过建立网络服务，接收通过网络传过来的指令及相关信息，可以和外部程序实现通信。接收用户通过 WEB 服务发来的指令，发送模型运行结果。模型控制程序可以直接访问数据库，从而获得模型参数，进行配置数学模型、修改模型状态等操作。在计算服务器上也建立 WEB 服务，将 WRF 和 WW III 模型路径设为网络路径，则用户通过该 WEB 服务可以直接查看、下载数学模型路径下的文件。

1.2.4 模型管理

模型以树状形式分为 5 级进行组织管理，分别是用户、项目、模型、类型、实例，其中模型类型为组成 WRF 或 WW III 的各模块，WRF 由预处理系统 WPS 和主模式 WRFV3 两个模块组成（其他模块暂未考虑），WW III 由提取地形、生成网格、初始条件、提取风场、生成输入场、单计算域模拟、多计算域模拟、提取场结果、场结果绘图、提取点结果、点结果绘图共 11 个模块组成。因一个 WRF 程序只能含一个 WPS 和一个 WRFV3，所以每个类型下不再细分，即 WPS 和 WRFV3 既是类型也是模型实例，而 WW III 每个类型下可建立多个实例。

2 应用实例

采用本文所开发的系统后报了加勒比海地区 200809 号台风 IKE 引起的风浪场。WRF 模型时间为 2008-09-01T12:00—2008-09-16T00:00。计算域中心坐标为 70° W、24° N，网格尺寸 21 km × 21 km，网格数为 387 × 287，模拟范围约为 112° W ~ 28° W、6° S ~ 48° N。初边条件采用 FNL1° X1° 数据，每天 4 次 (0:00、6:00、12:00、18:00)，其他模型主要参数见表 1。

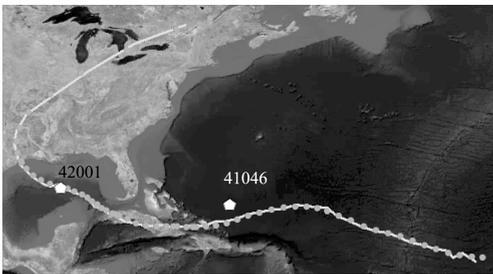
WW III 模型范围与风场相同，模型范围经度 111.75° W ~ 28.25° W、纬度 6.25° S ~ 48.5° N，模型分辨率为 0.25° × 0.25°，模型地形采用全球海地地形 Etopo-1，分辨率为 1 分，最大全局时间步、最大 x-y 和 k-θ 的 CFL 时间步、最小源项时间步分别取 900、950、900、300 s，频率增长因子、最小

频率、波数、波谱方向数和第一方向偏移依次设为 1.1、0.041 18 Hz、25、24、0, 模型全为闭边界, 即不考虑外界涌浪输入。

表 1 200809 号台风 IKE 后报 WRF 参数

参数	取值数值
动力核心	ARW
计算域个数	1
地表数据分辨率	2 分
时间步长	30 s
输出间隔	360 min
地图投影	墨卡托
微物理过程	WSM6
长波辐射	RRTMG
短波辐射	RRTMG
表面层	Revised MM5 M-O
陆面层	unified Noah
边界层	YSU
积云方案	BMJ
格点分析逼近	使用
格点表面分析逼近	使用

实测值取距离台风路径最近的 42001 (89.668°W, 25.897°N) 和 41046 (68.481°W, 23.866°N) 两浮标观测值 (图 4), 观测要素主要包括风速、风向、波高、谱峰周期和平均周期。



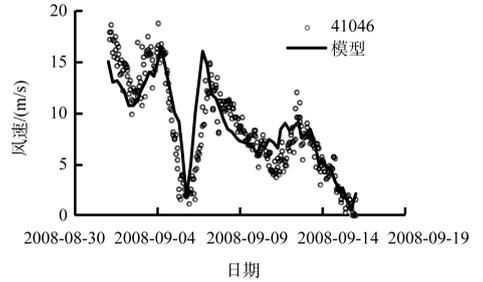
注: 实线为后报路径, 圆点为实际路径。

图 4 200809IKE 台风路径检验

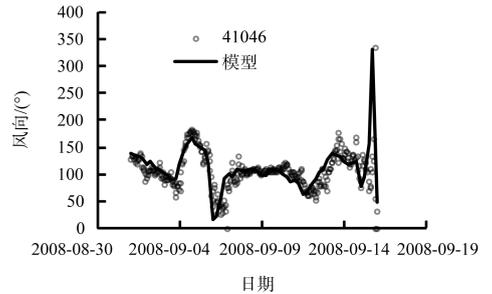
WRF 模型后报的台风路径与美国台风预报中心分析的台风路径对比见图 4。采用格点分析逼近的 WRF 模型较好地模拟出该台风的整体路径, 相应转向时间也较为接近。

图 5、6 分别为后报风速风向与实测值对比情况, 整体吻合良好。41046 浮标受本次台风影响时段为 9 月 6 日—15 日, 9 月 6 日以前风速较大主要是受另一个热带风暴 GUSTAV 影响, 本文不作研究。不过从模拟过程来看, 本文所建立的模型可

以较好地模拟这两场台风经过 41046 浮标时的风速风向。尤其是对台风引起的最大风速, 41046 实测 2008IKE 最大风速 15 m/s, 发生在 09-07T02:50, WRF 计算最大风速为 16 m/s, 发生在 09-06T18:00, 风速相差 1 m/s, 相对误差仅为 6.7%。

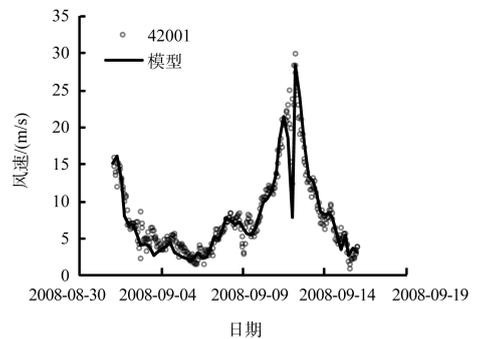


a) 风速

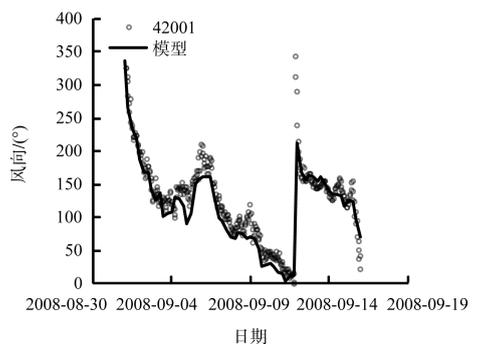


b) 风向

图 5 41046 浮标风速风向对比



a) 风速



b) 风向

图 6 42001 浮标风速风向对比

对于 42001 浮标, 风速风向计算值与实测值整体吻合也较好, 实测最大风速 30.1 m/s, 发生时间为 09-12T02:50, 计算最大风速为 28.4 m/s, 发生时间为 09-12T06:00, 相应时间的实测风速为 29.7 m/s, 相对误差仅为 5.3%。

图 7、8 为 WW III 模型计算的有效波高和平均周期与实测值对比情况, 整体吻合良好。尤其是 42001 浮标, 由本次台风引起的最大波高为 9.23 m, 发生在 09-11T16:50, 相应的计算值为 9.2 m, 发生在 09-12T08:00, 绝对误差 0.03 m, 相对误差 3%。41046 浮标所计算的整体波高周期的发展过程及中小波高周期基本与实测相符, 但两次波高极大值相差较大, 在 09-04T02:50、09-06T23:50 测得波高极大值分别为 6.29、6.46 m, 对应计算值分别为 4.69、4.67 m, 绝对误差分别为 1.6、1.79 m, 相对误差分别为 25%和 27.7%。造成这种误差的原因是当时整个计算域包含多个气旋, 并且几个气旋位于计算边界位置, 波高周期不仅受 IKE 台风影响, 还与远处气旋形成的涌浪关系较大, 使计算的波高周期偏小。

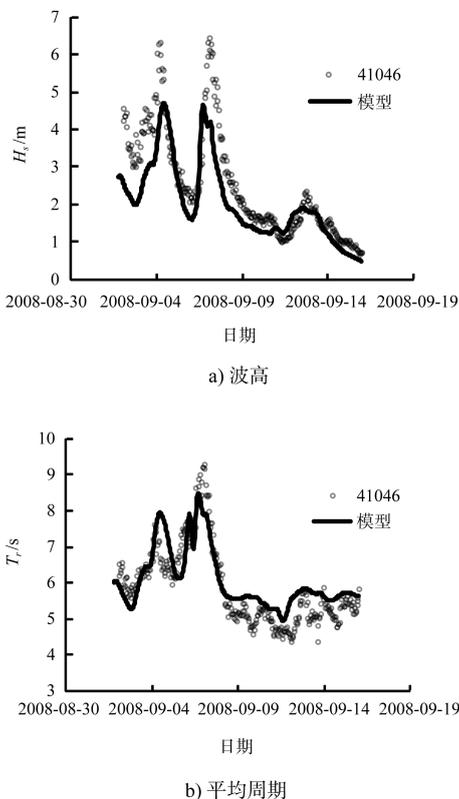


图 7 41046 浮标波高、平均周期对比

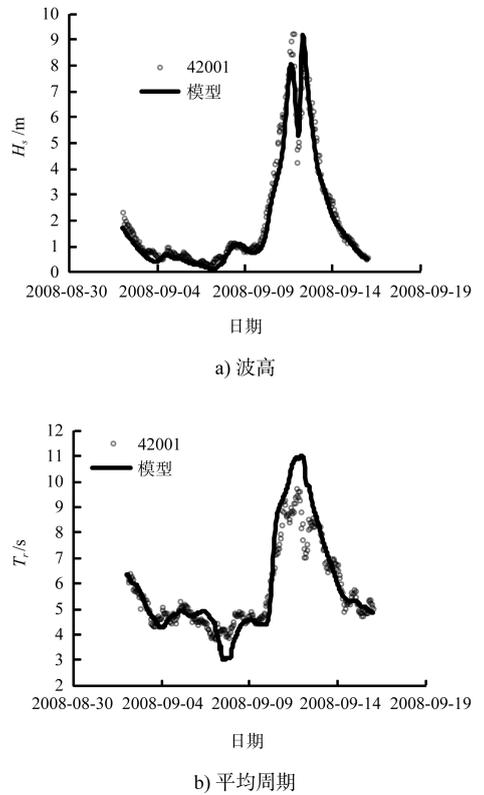


图 8 42001 浮标波高、平均周期对比

3 结论

- 1) 现代大气再分析数据和中尺度大气模式后报风场已经达到较高的精度, 所后报的台风场可以作为海浪模式的驱动风场。
- 2) 在风场准确的情况下, 第 3 代海浪模式能较准确模拟外海深水波浪场, 可以达到港航工程应用精度要求。
- 3) 港航工程风浪后报的特点是变参数、模型多, 有针对性地开发风浪后报系统可以明显降低建模难度、提高建模效率, 同时改善模型管理的系统性和便利性。

参考文献:

[1] 吴澎, 曹凤帅. 我国深水港口建设技术进展[C]//中国海洋工程学会. 第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上册). 北京: 海洋出版社, 2013, 12-18.

[2] JTS 145-2—2013 海港水文规范[S].

[3] Huang X Y, Xiao Q, Barker D M, et al. Four-dimensional variational data assimilation for WRF: Formulation and preliminary results [J]. Monthly Weather Review, 2009, 137: 299-314.

- [4] 张大林. 大气科学的世纪进展与未来展望[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 812-823.
- [5] Weisse R, Feser F. Evaluation of a method to reduce uncertainty in wind hindcasts performed with regional atmosphere models [J]. Coastal Engineering, 2003, 48(4): 211-225.
- [6] Hayes J. The world weather watch today [EB/OL]. WMO Bulletin, 2008, 57(1): 8-16. (2015-05-12) [2016-05-06] http://library.wmo.int/pmb_ged/bulletin_57-1_en.pdf.
- [7] 李孟国, 肖辉. 外海深水波要素确定方法比较[J]. 水运工程, 2010(7): 1-5.
- [8] Pierre Q, Denis C F. Global altimeter SWH data set-February 2016 [EB/OL]. Laboratoire d'Océanographie Spatiale. 2016, ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/swath/altimeters/waves/documentation/altimeter_wave_merge_11.2.pdf.
- [9] 闻斌, 刘俊. 海浪数值模式研究回顾与进展[J]. 海洋预报, 2006, 23(4): 76-83.
- [10] The WAMDI Group. The WAM model-a third generation ocean wave prediction model [J]. Journal of Physical Oceanography, 1988, 18: 1775-1810.
- [11] Hendrik L T. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14 [R/OL]. Environmental Modeling Center Marine Modeling and Analysis Branch. 2009. <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch>.
- [12] The SWAN team. Swan user manual [R/OL]. Delft University of Technology. 2010. <http://www.swan.tudelft.nl>.
- [13] 徐丽丽, 肖文军, 石少华, 等. WaveWatch III 和 SWAN 模型嵌套技术在业务化海浪预报系统中的应用及检验[J]. 海洋通报, 2015, 24(3): 283-294.
- [14] 周水华, 俞胜宾, 梁昌霞, 等. 南海海浪业务化数值预报系统检验 [J]. 海洋通报, 2012, 29(6): 30-36.
- [15] 尹尽勇, 徐晶, 曹越男, 等. 我国海洋气象预报业务现状与发展 [J]. 气象科技进展, 2012, 2(6): 17-26.
- [16] Saha S, Moorthi S, Pan H L, et al. The NCEP climate forecast system reanalysis [J]. Bull Amer Meteor Soc, 2010, 91: 1015-1057.
- [17] Amante C, Eakins B W. ETOPO1 1 arc-minute global relief model: Procedures, data sources and analysis, NOAA technical memorandum NESDIS NGDC-24 [R/OL]. National Geophysical Data Center, NOAA. 2009. doi: 10.7289/V5C8276M
- [18] 张洪生, 辜俊波, 王海龙, 等. 利用 WAVEWATCH 和 SWAN 嵌套计算珠江品附近海域的风浪场[J]. 海洋气象学, 2013, 32(1): 8-17.

(本文编辑 武亚庆)

~~~~~

(上接第 33 页)

#### 4 结语

随着经济的转型升级, 临港经济区港、产、城的一体化发展越来越迫切。在“多规合一”背景下, 以港口经济理论为指导, 构建了一套解决临港经济区规划的技术体系, 提出关键技术问题的解决方案, 是对临港经济区“多规合一”规划的有益探索与实践。

#### 参考文献:

- [1] 王唯山, 魏立军. 厦门市“多规合一”实践的探索与思考[J]. 规划师, 2015(2): 46-56.
- [2] 史国光, 朱善庆. 实践新的发展观-全面提升港口发展质量[J]. 中国港口, 2004(5): 9-11.

(本文编辑 郭雪珍)