

学校编码: 10384

密级\_\_\_\_\_

学号: 22620061152403

廈門大學

硕士学位论文

数据同化在潮汐数值模拟和预报中的应用

研究

Application of Data Assimilation Method in Tide Simulation  
and Prediction in the Taiwan Strait

王代锋

指导教师姓名: 洪华生 教授

专业名称: 环境管理

论文提交日期: 2009 年 8 月

论文答辩时间: 2009 年 8 月

学位授予日期: 2009 年 月

2009 年 8 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 摘要

本论文建立了一个台湾海峡潮汐数值模型,研究的重点是将数据同化技术用于该潮汐数值模型中,以进一步提高该模型模拟和预报的准确度。这里分别采用了两种同化方法:(1)集合 Kalman 滤波同化方法;(2)直接同化方法。

考虑就单站点来说,潮汐数值预报的准确度一般明显低于基于长期潮汐观测数据调和与分析所得的潮汐的预报准确度。而且调和与分析所得到的潮汐数据对各种实测水位数据来说,由于不包含天气和海浪等因素的影响因而更能反映实际天文潮的变化情况。因此,本论文参与同化和验证同化效果的数据均采用潮汐表公布的数据。

在集合 Kalman 滤波同化方法中,本论文同化了东山站、厦门站、娘宫站、崇武站及三沙站的“潮汐表”上的潮位数据。为确定该模型截断半径和集合数这两个参数,考虑了 6 种取值的截断半径、7 种取值的集合数共 42 种参数组合情况,以模拟准确度和计算相同时段的潮汐值所需时间为标准,通过实验,确定该模型最优参数组合为:东山、厦门、娘宫、崇武 4 个站最优截断半径取 35 km,三沙站最优截断半径取 30 km;5 个站最优集合数取为 20。在含集合 Kalman 滤波同化的潮汐数值模型两参数取最优参数取值时,对该模型进行检验,检验结果表明:将集合 Kalman 滤波同化方法用于潮汐数值模拟中是可行的,同化验潮站的调和与分析值对验潮站本身及其邻近网格点的改进最大;该模型中当 5 个验潮站没有数据同化进去时,其中东山、厦门、娘宫、崇武 4 个站的模拟准确度在接下来的 12 h 内仍有所提高。

对直接同化方法中,本论文同化了计算域内 63 个验潮站的“潮汐表”上的潮位数据,实验表明:模型能显著改善验潮站及其附近网格水位点的预报结果,对其他水位点的预报结果也有不同程度的提高。据统计福建沿岸共有 90 个水位点,其中验潮站对应的水位点有 17 个,与验潮站相邻的水位点有 28 个,模型能显著改善至少有 45 个水位点预报结果。总体而言,直接同化方法也能明显改善福建沿岸天文潮的数值预报结果。

**关键词:** 数据同化; 集合 Kalman 滤波; 潮汐数值模型

## Abstract

A normal tide numerical model is established for the Taiwan Strait and its surrounding sea areas. In order to improve the accuracy of the model's numerical simulation, an Ensemble Kalman Filter (EnKF) data assimilation technique is considered in the model, and this model is called 'A tide numerical model with EnKF'. Another tide numerical model which is straightly assimilating data from 2009 Tide Table called 'Tide forecasting model by assimilating data from the book of Tide Table' is also established.

Considering that the accuracy of normal tide numerical simulation is less than that of the data from Tide Table which is the main bays' harmonic analysis forecasting data based on the long-term tide observations, therefore, the model assimilating data in our study is used from the Tide Table.

As to the model of 'A tide numerical model with EnKF', five stations are taken into account, which are Dongshan, Xiamen, Nianggong, Chongwu and Sansha. In order to decide EnKF the best parameter combination of two parameters, the cut radius and ensemble number, we consider 42 kinds of parameter combinations at each station. Based on the accuracy of numerical simulation and the time spent in calculating the same period of tide, we can define the best parameter combination at each station. Numerical experiments show that for Dongshan, Xiamen, Nianggong and Chongwu stations, the best value of cut radius is 35 km, for Sansha, 30 km. There is a unique best value of ensemble number for five stations and the value is 20. It is shown from numerical experiments that data assimilation with EnKF method could improve the accuracy of tide simulations and tide predictions in the following 12 hours in the Taiwan Strait.

As to the model of 'Tide forecasting model by assimilating data from the book of Tide Table', 63 stations in the computational domain are taken into account. By carrying out some numerical experiments, the conclusion is that the new model can improve the accuracy of the tidal results compared with the normal tide model. There

are 90 gridding wet points along Fujian coast, and 17 points of those are stations, and 28 wet points around 17 stations, which means that this new model can at least improve 45 wet points accuracy distinctly compared with normal numerical tide model.

**Key words:** data assimilation; Ensemble Kalman Filter; tide numerical model

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 目 录

摘 要.....	i
Abstract.....	ii
<b>第一章 绪 论.....</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景和研究意义 .....	1
1.2 数据同化方法简介 .....	2
1.2.1 最优插值方法.....	2
1.2.2 变分同化方法.....	7
1.2.2.1 伴随方法.....	8
1.2.2.2 遗传算法.....	9
1.2.3 Kalman 滤波同化方法 .....	10
1.2.3.1 标准 Kalman 滤波同化方法.....	10
1.2.3.2 扩展 Kalman 滤波同化方法.....	12
1.2.3.3 稳态 Kalman 滤波同化方法.....	13
1.2.3.4 集合 Kalman 滤波同化方法.....	13
1.3 Kalman 滤波同化方法应用综述.....	14
1.4 数据同化在潮汐数值模拟和预报中的研究进展 .....	15
1.5 研究目标和研究内容 .....	16
1.5.1 研究目标.....	16
1.5.2 研究内容.....	16
1.6 论文结构 .....	17
<b>第二章 研究方法.....</b>	<b>18</b>
2.1 研究区域潮汐数值模型的建立 .....	18
2.1.1 基本方程.....	18
2.1.2 差分方案.....	18
2.1.3 初始条件和边界条件.....	19
2.1.3.1 初始条件.....	19

2.1.3.2 边界条件.....	19
2.1.3.3 边界数据来源.....	20
2.2 集合 Kalman 滤波计算原理与步骤.....	20
2.3 潮汐数值模型中集合 Kalman 滤波数据同化的技术路线 .....	23
<b>第三章 潮汐数值模型中集合 Kalman 滤波数据同化的参数确定及同化检验 .....</b>	<b>25</b>
3.1 参数确定 .....	25
3.1.1 实验设计.....	25
3.1.2 参数确定.....	26
3.2 同化检验 .....	29
3.2.1 检验一.....	29
3.2.2 检验二.....	37
3.2.3 检验三.....	37
3.2.4 检验四.....	39
3.3 本章小结 .....	40
<b>第四章 基于潮汐表数据同化的潮汐数值预报模型 .....</b>	<b>41</b>
4.1 基于潮汐表数据同化的天文潮数值预报模型介绍 .....	41
4.2 数据同化 .....	42
4.2.1 数据准备.....	42
4.2.2 同化方法.....	42
4.3 讨论 .....	43
4.3.1 验潮站常规模型模拟与同化模型模拟对比.....	43
4.3.2 与验潮站相邻的水位点的模拟结果讨论.....	43
4.3.2.1 三都澳里面的水位点.....	43
4.3.2.2 兴化湾里面的水位点.....	45
4.3.2.3 湄洲湾里面的水位点.....	47
4.3.3 处于两个验潮站之间的水位点的模拟结果讨论.....	48
4.4 本章小结 .....	49



<b>第五章 总结与展望</b> .....	<b>50</b>
5.1 本论文的主要工作总结 .....	50
5.2 下一步的工作 .....	51
<b>参考文献</b> .....	<b>52</b>
<b>致 谢</b> .....	<b>55</b>
<b>攻读硕士学位期间完成的论文</b> .....	<b>57</b>

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## Contents

Abstract in Chinese .....	i
Abstract in English .....	ii
<b>Chapter 1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
1.1 Research Purpose and Significance .....	1
1.2 Introduction of Data assimilation methods .....	2
1.2.1 Optimum Interpolation.....	2
1.2.2 Variational Data Assimilation .....	8
1.2.2.1 Adjoint Method .....	8
1.2.2.2 Evolution Direction Genetic Algorithm.....	10
1.2.3 Kalman Filter .....	10
1.2.3.1 Standard Kalman Filter .....	10
1.2.3.2 Extended Kalman Filter .....	13
1.2.3.3 Steady-state Kalman Filter.....	13
1.2.3.4 Ensemble Kalman Filter .....	14
<b>1.3 Review of the use of Kalman Filter .....</b>	<b>14</b>
<b>1.4 Research progress of Data Assimilation in Tide Simulation and Prediction.....</b>	<b>15</b>
<b>1.5 Research Goal and Content .....</b>	<b>16</b>
1.5.1 Research Goal .....	16
1.5.2 Research Content .....	17
<b>1.6 Structure of the Paper .....</b>	<b>17</b>
<b>Chapter 2 Introduction of the Model.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Introduction of the Tide Model.....</b>	<b>18</b>
2.1.1 Basic Equations.....	18
2.1.2 Difference Scheme.....	18
2.1.3 Initial Conditions and Boundary Conditions .....	19

2.1.3.1 Initial Conditions .....	19
2.1.3.2 Boundary Conditions .....	19
2.1.3.3 Data Source of Boundary Conditions .....	20
<b>2.2 Steps and Principle of Ensemble Kalman Filter .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3 Scheme of the Tide Model With Ensemble Kalman Filter.....</b>	<b>23</b>
<b>Chapter 3 Parameters Decision and Assimilation Validation of the Tide Model with Ensemble Kalman Filter .....</b>	<b>24</b>
<b>3.1 Parameters Decision .....</b>	<b>24</b>
3.1.1 Experiments Design .....	24
3.1.2 Parameters Decision.....	25
<b>3.2 Assimilation Validation.....</b>	<b>28</b>
3.2.1 Validation One .....	28
3.2.2 Validation Two .....	35
3.2.3 Validation Three.....	36
3.2.4 Validation Four.....	38
<b>3.3 Conclusion of This Chapter .....</b>	<b>38</b>
<b>Chapter 4 Tide Forecasting Model by Assimilating Data from Tide Table .....</b>	<b>40</b>
<b>4.1 Introduction of the Tide Forecasting Model By Assimilating the Data From Tide Table .....</b>	<b>40</b>
<b>4.2 Data Assimilation .....</b>	<b>41</b>
4.2.1 Data Prepare.....	41
4.2.2 Assimilation Method.....	42
<b>4.3 Discussion.....</b>	<b>42</b>
4.3.1 Comparison of Stations' Forecasting Results .....	42
4.3.2 Discussion of the Forecasting Results of the Points Near Stations .....	43
4.3.2.1 Points in Sandouao.....	43
4.3.2.2 Points in Xinghuawan Bay.....	44

4.3.2.3 Points in Meizhou Bbay.....	46
4.3.3 Discussion of the Forecasting Results of the Points Located Between Two Stations.....	47
<b>4.4 Conclusion of This Chapter .....</b>	<b>48</b>
<b>Chapter 5 Summary and Expection.....</b>	<b>49</b>
5.1 Summary of Our Work.....	49
5.2 Future Work .....	50
<b>References .....</b>	<b>51</b>
<b>Acknowledgements.....</b>	<b>54</b>
<b>Accomplished papers .....</b>	<b>56</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景和研究意义

潮汐现象与人类有着密切的联系,它对人类从事海上生产和军事活动都有着很大的影响,比如对海上捕捞、海上勘探开发、桥梁建设、港口设计等都需要完整的潮汐资料。居住在沿海的居民,这种体会更加清楚和深刻,每年台风季节,当热带风暴登陆的时候,会引起沿海潮位的异常上升,也就是风暴潮,风暴潮能否造成灾害在很大程度上看其是否与天文潮的高潮阶段相叠加。如果风暴潮与天文潮高潮相叠加往往会导致海域水位暴涨,乃至海水侵溢内陆,造成漫滩,酿成巨灾。当然如果风暴潮潮位非常高,即使没有遇到天文潮高潮,也会造成严重潮灾,但同样的风暴潮如果遇到天文潮高潮上,其引起的潮灾则更为严重。所以,我们有必要掌握准确的潮位资料。

潮汐数据的获得,早期主要是利用验潮站长期定点观测,船只的调查等手段。随着科技的进步,计算机技术的飞速发展,人们实现用数值模型来模拟和预报潮汐值,这一研究方法得到蓬勃发展起来<sup>[1-20]</sup>。时至今日,潮汐数值模拟和预报的准确度有很大的提高,但是潮汐的模拟和预报总是存在误差。首先,从描述潮汐运动的基本方程来讲,基本方程往往不能精确地反映潮汐的复杂运动,而且迄今为止,对复杂的非线性基本方程我们尚找不到一种数学方法能够求得基本方程的解析解,而只能借助于数值方法,将微分方程离散化,在离散化的过程中就产生了误差。其次,从求解离散化的方程时使用的水边界条件来讲,当模型考虑的计算域大,水边界较长,如本文所考虑的计算域东西跨度为 2220 km、南北跨度为 1330 km,北、东、南三个边界皆为水边界,并且模型所用的水边界条件来自全球数模,水边界上没有实测资料验证,也就是说,水边界条件本身就带有误差,而使得潮汐数值模拟和预报带有误差。最后,从求解过程中底摩擦系数及水深数据难以精确确定的角度来讲,潮汐数值模拟和预报存在误差也是在所难免的。

随着我国海洋观测技术的快速发展和观测手段的不断改进,现在可以快速的得到大量的观测资料。对这些资料进行处理和利用的数据同化技术,受到越来越多的关注与重视。

数据同化就是将观测数据或准确度更高的数据和数值模拟数据通过某种方法有效的结合起来,最后得到更加客观的分析结果。数据同化可以改进数值预报的时效和准确度,现在已经不容置疑,而且已经有大量的数值实验证实<sup>[21-34]</sup>。

## 1.2 数据同化方法简介

资料分析和为数值预报产生一个准确协调的初值是同化的主要内容和功能。从这个角度说,同化的来源可以追溯到早期的天气数值预报的“主观分析”中。之后,“主观分析”发展到了客观分析。“同化”一词在数值预报广泛使用之前,客观分析的方法已经经历了由多项式拟合到逐步订正法、逼近法、最优插值的发展过程<sup>[35-40]</sup>。随着如地波雷达、卫星等资料的出现,开始考虑在客观分析中引入这些资料的问题,有人把这个引入过程叫做“同化”。随着同化的理论和技术的发展,其内容已经超出了原先的单纯客观分析的范围,内容包括质量控制、客观分析、初始化和为下一次同化的背景场所做的短期预报。同化的功能也不单单是为数值预报构造初值,在观测系统的评估、资料分析、在目标性观测研究等方面也有着广泛应用。

数据同化方法已由过去的简单同化方法,发展到现在的具有较好的数学物理模式基础的数据同化方法;从过去的三维同化方法,发展到现在的四维同化方法。其中,当前使用频率较高的数据同化方法有四维变分同化方法和 Kalman 滤波同化方法。下面简单介绍一下几种主要的数据同化方法。

### 1.2.1 最优插值方法

最优插值法是数据同化中较常见的一种方法,在气象学方面应用较多,在海洋学方面的应用不是很多。值得参考的是朱江等<sup>[41]</sup>对最优插值法进行研究,并利用该方法发展了一个海温的短期数值预报的同化系统,并进行了一些试验;杨晓霞等<sup>[42]</sup>对最优插值法中相关函数的参数选取、测站分布与插值系数的关系,求解插值系数的方法以及初估场对插值的影响做了实验研究;马寨璞和井爱芹<sup>[43]</sup>根据常规的插值算法,在引入时间关联的基础上,详细推导了动态最优插值法的具体同化表达式,利用这些公式,可以处理常见的在海洋观测数据同化中存在的时间错位问题,并做了同化试验; Akmaev<sup>[44-45]</sup>从理论与数值模式两个方面探讨了使

用最优插值方法对上层大气的数据同化的问题, 所论述的理论可以借鉴用到海洋学领域上。

最优插值法基本原理是: 格点上的分析值是由格点的背景值加上修订值而得到的, 其修订值由周围各测站的观测值与背景值之间的差异加权求得, 其权重系数(即最优插值系数)应该使得网格点分析值的误差达到最小。建立合理的预报误差协方差是最优插值的基础。用数学表达式表达如下:

$$F_i^a = F_i^b + \sum_{j=1}^J w_{ij} [F_j^o - F_j^b] \quad (1.1)$$

其中:

$j$  表示测站(或数据格点);

$J$  表示测站(数据格点)总数;

$i$  为分析网格点;

$I$  表示分析格点总数;

$a$  表示分析,  $b$  表示背景,  $o$  表示观测;

$F_i^a$  表示分析网格点  $i$  处的分析值;

$F_i^b$  表示分析网格点  $i$  处的背景值;

$F_j^o$  表示数据网格点  $j$  处的观测值;

$F_j^b$  表示数据网格点  $j$  处的背景值;

$w_{ij}$  表示权重。

最优插值法中最主要就是  $w_{ij}$  的确定。  $w_{ij}$  确定原则是使分析误差达到最小。

进行一系列数学处理后, 有:

$$\sum_{k=1}^J w_{ik} \{ \langle [F_j^o - F_j^t][F_k^o - F_k^t] \rangle + \langle [F_j^b - F_j^t][F_k^b - F_k^t] \rangle \} = \langle [F_i^b - F_i^t][F_j^b - F_j^t] \rangle$$

$$\Leftrightarrow [O + B] w_{ij} = B_i$$

其中:

$O$  为观测误差协方差;

$B$  为背景误差协方差;

$B_i$  为背景方差矩阵列向量。

当观测数据的维数与分析网格点处背景数据的维数不一致时候, 构造映射矩

阵  $H$  (一个双线性插值算子), 该矩阵将分析网格点处的背景值映射到观测点的位置, 可以得到观测位置的背景值, 在映射得到的背景值与观测数据 (二者均是数据点上的值, 区别于分析格点) 的基础上进行处理。

分析格点上的背景值设为  $X$ , 则在  $H$  作用下, 将背景值 (分析格点) 转化为观测位置 (数据点位置) 上的背景值  $Z$ , 即:  $Z=HX$

引进  $K$ , 使  $W=KH$ , 要求  $W$  转化为求  $K$ 。

最优插值法最终转化为如下同化公式:

$$F^a = F^b + BH^T (HBH^T + O)^{-1} (F^o - Z)$$

$$\text{令 } K, K = BH^T (HBH^T + O)^{-1} \quad (1.2)$$

$$\text{则: } F^a = F^b + K(F^o - HX) \quad (1.3)$$

最优插值法也就是利用 (1.2) 式计算出权重, 然后用 (1.3) 式计算出分析网格格点的分析值。它需要对每个分析网格格点解 (1.2) 式, 如果对每一个分析格点使用的测站及要素个数较多, 那么该方法的计算量也很大。

在使用最优插值法时候, 可以参看以下几点:

(1) 几个矩阵的维数分别为:  $K(I \times J), B(I \times I), H(J \times I), O(J \times J)$ ;

$$(2) K_{IJ} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1J} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{I1} & k_{I2} & \dots & k_{IJ} \end{bmatrix}, \text{ 其中, } I \text{ 表示分析网格点的个数; } J \text{ 表示数据}$$

网格点的个数;  $k_{ij}$  表示第  $i$  个分析格点对应于数据格点  $j$  的权重。

这样, (1.3) 式可以写成  $F_i^a = F_i^b + \sum_{j=1}^J k_{ij} (F_j^o - H_{ji} X_i), i=1, 2, \dots, I$ , 就可以求出每个分析格点的分析值数据。

求解  $K$  的时候, 首先要求出背景误差协方差  $B$ 、观测算子  $H$  和观测误差协方差  $O$ 。

(3)  $B(I \times I)$  分析网格格点之间的误差协方差;

$$B_{II} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \dots & B_{1I} \\ B_{21} & B_{22} & \dots & B_{2I} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{I1} & B_{I2} & \dots & B_{II} \end{bmatrix}, \text{ 其中, } B_{11} \text{ 表示第一个分析网格点与自己的误差}$$



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库