

基于支持向量机的长江口气象潮预报方法研究

张策, 石景元*, 王晶晶

(上海海事测绘中心, 上海 200090)

摘要: 以长江口实测潮位、气象逐时资料为基础,建立了基于支持向量机的气象潮预报模型,研究探讨了长江口水域气象潮预报的可行性,认为潮流应作为支持向量机的输入因子之一;通过将支持向量机气象潮预报值与长江口部分潮位站天文潮预报值叠加,修正天文潮预报结果。经与实测资料对比发现,该方法可明显提高潮位预报精度。

关键词: 长江口;支持向量机;气象潮;预报

中图分类号: P732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)06-0001-05

0 引言

潮汐由天文潮和气象潮两部分组成。天文潮是由天体因子造成的海水周期性运动,具有明显的规律性;气象潮则由气象因素造成,具有一定的随机性。目前,关于天文潮的研究,无论是潮汐理论^[1-3]还是预报方法^[4-7]均已相对成熟,而针对气象潮的研究相对较少。由于气象潮的潮高(振幅)小于天文潮,且具有不确定性和随机性,预报周期也相对较短(一般为1~7天),加之没有成熟的理论依据,因此给研究带来了极大困难。钱睿智等^[8]根据研究区域区间泄流和季风影响具有连续性的特性,建立了南水北调东线源头潮汐预报实时校正模型。张泽国等^[9]提出了一种基于灰色数据处理群模块化(Gray-Group Method of Data Handling)潮汐水位实时预测模型,该模型将潮汐分解为两部分:由天体引潮力形成的天文潮和由各种天气及环境因素引起的非天文潮。柳成等^[10]针对调和分析法无法精确预测非天文潮的问题,提出了一种基于支持向量机(Support Vector Machine, SVM)的模块化潮汐预报模型。

对于气象潮的研究,目前主要采用神经网络和

SVM方法,二者均需一定数量的样本进行学习,再根据输入因子进行预报,其输入因子主要为潮位、风和气压,尚未考虑潮流因子。本文以长江口水域为研究对象,综合考虑风、潮位、潮流和气压等影响因子,采用SVM法预报气象潮,从方法上探索长江口水域气象潮预报的可行性,以提高潮位预报精度。这既可为相关研究应用提供借鉴,对精细化利用水深资源、提升长江口航道的通航能力也具有一定的现实意义。

1 支持向量机

SVM是一类按监督学习方式对数据进行二元分类的广义线性分类器,其决策边界是对学习样本求解得到的最大边距超平面。SVM于1964年提出,20世纪90年代后得到快速发展,并衍生出一系列改进和扩展算法。它不仅展现出优秀的学习性能,且已由最初的分类任务成功扩展到回归、概率密度估计和异常值检测等问题的处理中^[11]。SVM可通过核方法进行非线性分类,将原问题空间中的训练样本转化为特征空间中线性可分的训练样本,因此核函数是SVM方法的关键所在。

收稿日期: 2025-04-10。

基金项目: 水利部重大科技项目(SKS-2022087)。

作者简介: 张策(1991-),女,工程师,学士,主要从事海洋测绘研究。E-mail:957143412@qq.com

*通信作者: 石景元(1984-),男,正高级工程师,硕士,主要从事海洋测绘研究。E-mail:26218428@qq.com

SVM方法通过样本数据训练模型,并在训练好的模型中进行预测。假设其训练样本数据为 (x_i, y_i) ,其中 $i = 1, 2, \dots, n$,则:

$$y_i = wx_i + b \quad (1)$$

式中: w 为权值向量; b 为偏置值。

利用二次规划求解其函数回归问题,得到其约束条件下相对应的样本,此称为支持向量,从而得到非线性回归函数:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (a_i - a_i^*) K(x_i, x_j) + b \quad (2)$$

式中: a 和 a^* 是拉格朗日乘子; n 为支持向量个数; $K(x_i, x_j)$ 为核函数。

2 气象潮预报方法

2.1 基础资料

气象潮的影响因子包括风、气压、地形、水体密度、潮位及潮流等。对于某特定水域,地形、水体密度等在短时间内变化不大,因此,气象潮重点考虑风、气压、潮位和潮流4个影响因子。

长江口是我国第一大河口,拥有我国河口地区规模最大的深水航道。为更好地服务于船舶航行安全、充分利用有限的水深资源,上海海事测绘中心在长江口水域设置了多个潮位站(位置见表1),长期监测长江口水域的潮位信息。本次研究的潮位资料以此为基础,通过潮汐调和分析方法分离气象潮,即气象潮为实测潮位与天文潮的差值。气象(风速、气压)资料采用金山、南槽东、鸡骨礁、吴淞站的监测资料,潮流资料则通过长江口整体二维潮

流数学模型计算获得^[12]。

表1 各潮位站概要

Tab.1 The locations of tidal stations

站名	经度(°E)	纬度(°N)
吴淞	121°30'49"	31°23'26"
牛皮礁	122°15'06"	31°08'12"
鸡骨礁	122°23'12"	31°10'18"
南槽东	122°07'44"	31°03'44"
金山大件	121°27'10"	30°46'21"
绿华山	122°36'48"	30°49'09"
马迹山	122°25'54"	30°40'46"

2.2 预报方法

之前学者采用SVM或神经网络方法进行气象潮预报时,输入因子均未考虑潮流因子。本文通过潮流数学模型建模和验证^[12]发现,潮流对气象潮的影响不可忽视。在该数学模型中,长江口水域风速分别考虑无风、西风风速6 m/s和15 m/s,不考虑气压作用;模型边界采用大潮潮型,牛皮礁站潮差约为3.6 m,则气象潮为有风条件下与无风条件下水位的差值。图1为鸡骨礁站不同风速条件下潮流对气象潮的影响,由图可见,涨潮流和落潮流对气象潮的影响不同,涨潮时气象潮振幅相对更大,因此在SVM建模中,潮流应作为输入因子纳入考虑。

本文SVM的输入因子为潮位(h)、风(W)、气压(P)和潮流(U)4个因子(见图2),其中风、潮流均分解为相应的 X (正东)、 Y (正北)方向分量。核函数对于SVM预测模型至关重要,本文采用高斯核函数

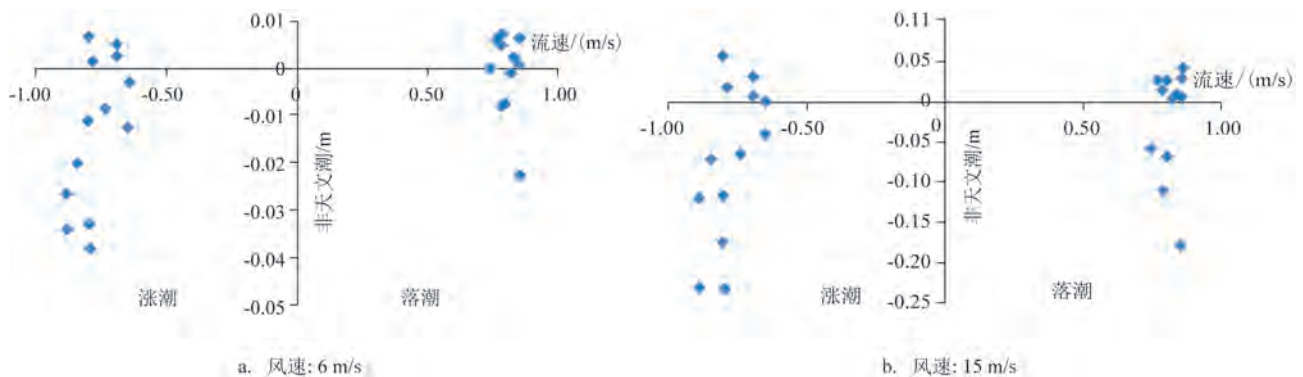


图1 西风条件下鸡骨礁站潮流与气象潮的关系

Fig.1 The relationship between tidal currents and meteorological tides at the Jigujiao Station under westerly wind

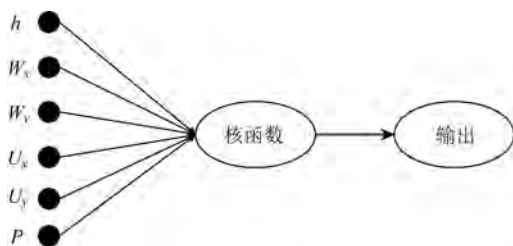


图2 支持向量机建模示意图

Fig.2 Schematic diagram of Support Vector Machine modeling

(又称径向基函数),表达式如下:

$$K(x, z) = \exp\left(-\frac{\|x - z\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

式中: x 为输入参数; z 为输出值; σ 为函数的宽度参数,其取值方法是,通过计算所有样本对间的欧氏距离矩阵,取距离中位数作为 σ 基准值。 σ 终止误差取0.005,为常见经验阈值,用于控制优化算法的收敛条件,既可确保模型参数充分优化,又能避免因过度迭代导致的资源浪费。

2.3 气象潮预报

受气象资料的限制,本文以牛皮礁站和鸡骨礁站为例,分析气象潮预报方法的可行性。牛皮礁站样本学习时间为2015年6月1—30日,预报时间为2015年7月1—10日;鸡骨礁站样本学习时间为2018年7月1—31日,预报时间为2018年8月1—10日,样本时间间隔均为1 h。图3—4为气象潮预报值与实测值的对比,由图可见,牛皮礁和鸡骨礁站的气象潮预报值与实测值总体趋势一致,但个别时刻误差相对较大,主要因为气象因素复杂多变,且本文样本时间间隔为1 h,时间跨度相对较大。表2为SVM模型气象潮预测结果的相关系数和均方差统计。由表可知,在考虑潮流因子的气象潮预报中,牛皮礁和鸡骨礁站的预报精度基本接近,相关系数在0.6左右,均方差约为0.07 m,说明本文建立的支持向量机模型能够预报长江口水域气象潮,并具有一定的精度。

3 气象潮预报应用

以长江口2018年全年的潮位、气象资料为代表,分析气象潮预报的可行性。选取长江口6个潮

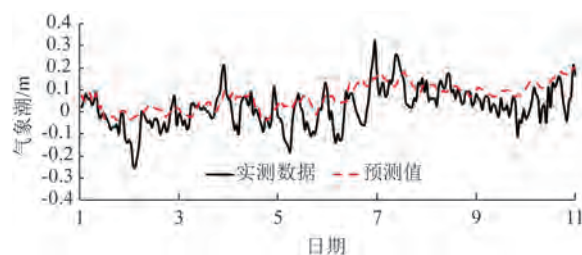


图3 2015年7月牛皮礁站气象潮预报对比

Fig.3 Comparison of meteorological tide forecasts at Niupijiao Station in July 2015

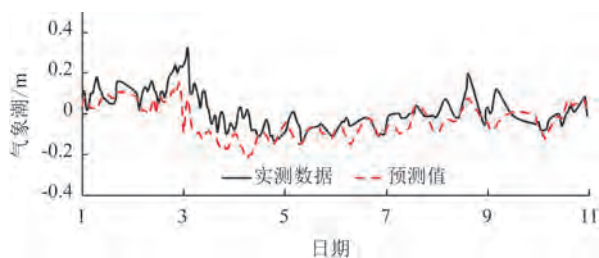


图4 2018年8月鸡骨礁站气象潮预报对比

Fig.4 Comparison of meteorological tide forecasts at Jigujiao Station in August 2018

表2 支持向量机模型气象潮预测精度分析

Tab.2 Analysis of the prediction accuracy of meteorological tides by the Support Vector Machine model

对比类别	2015年牛皮礁站	2018年鸡骨礁站
相关系数	0.579	0.632
均方差/m	0.070	0.074

位站,分别为吴淞、南槽东、鸡骨礁、金山大件、马迹山和绿华山(位置见表1);选取4个气象站,分别为金山站、南槽东、鸡骨礁、吴淞,对应站点的潮流资料由数学模型计算获得。由于气象资料未能覆盖所有潮位站,因此,马迹山、绿华山的气象资料采用距离最近的南槽东气象站资料(见表3)。采用128个分潮计算上述潮位站的天文潮,进而分离天文潮以得到气象潮。

以2018年1—7月的相关资料作为学习样本,应用2.3节所述气象潮预报方法,预报2018年8—12月的气象潮过程,进而将预报的气象潮值叠加到天文潮预报值中,修正天文潮预报结果,通过分析预报潮位误差,探讨气象潮预报的应用价值。

以鸡骨礁站为例,具体方法如下:

表3 选取的2018年气象潮预报潮位站与采用的气象资料
站点

Tab.3 Meteorological tide forecast stations and
corresponding meteorological data in 2018

编号	潮位站	气象站
1	吴淞	吴淞
2	金山大件	金山站
3	鸡骨礁	鸡骨礁
4	绿华山	南槽东
5	马迹山	南槽东
6	南槽东	南槽东

①对鸡骨礁站2018年的潮位资料,采用128个分潮进行调和分潮,分离出天文潮和气象潮;

②获取样本学习时间段(2018年1—6月)的天文潮、气象潮及气象资料;

③提取数学模型计算得到的鸡骨礁站对应样本学习时间段的潮流过程;

④建立SVM模型,选取合理的核函数及计算参数,进行样本学习;

⑤输入预报时间段(2018年7—12月)的风、潮流、潮位、气压等样本资料,预报气象潮;

⑥修正预报时间段的天文潮值,即修正潮位=天文潮预报值+气象潮预报值;

⑦开展误差分析。

以实测潮位与预报潮位之间的差值表示误差,表4统计了修正天文潮前后的潮位误差。从表中可以看到,当天文潮叠加SVM预报的气象潮后,潮位预报精度均有不同程度的提高。鸡骨礁站误差小于0.10 m的潮位比例提升达9.1%,说明本文建立的SVM模型能够有效预报气象潮,提高潮位预报精度。

表4 潮位误差统计分析(单位:%)

Tab.4 Statistical analysis of tidal errors (unit: %)

潮位站	误差≤0.10 m			误差≤0.20 m			误差≤0.30 m		
	未考虑 气象潮	考虑 气象潮	差值	未考虑 气象潮	考虑 气象潮	差值	未考虑 气象潮	考虑 气象潮	差值
吴淞	54.2	57.1	2.9	84.5	88.7	4.2	94.1	96.2	2.1
金山大件	39.2	41.9	2.7	65.9	71.2	5.3	83.9	87.4	3.5
鸡骨礁	53.8	62.9	9.1	85.3	91.6	6.2	95.2	97.6	2.4
绿华山	67.5	73.4	5.9	96.6	97.8	1.2	98.7	99.3	0.6
马迹山	66.0	72.8	6.8	95.7	96.7	0.9	98.1	99.2	1.1
南槽东	54.6	54.9	0.3	82.7	82.8	0.1	92.4	93.7	1.3

4 结论

在分析总结既往关于气象潮预报方法的基础上,以长江口水域潮位站的潮位、气象资料为依托,结合数学模型计算结果,建立支持向量机气象潮预报模型,研究了长江口水域气象潮预报的可行性。主要结论如下:

①通过潮流数学模型研究发现,潮流对气象潮的影响不可忽视,涨潮流和落潮流阶段的气象潮存在明显区别,因此,潮流应作为支持向量机预报模型的输入因子纳入考虑。

②建立了以风、潮位、潮流、气压为输入因子的

支持向量机模型,用于预报长江口水域气象潮。通过对2018年部分潮位站的误差统计分析发现,将本文预报的气象潮与天文潮叠加后,可显著提高潮位预报精度,这对精细化利用长江口水域有限的水深资源、提升通航能力具有重要现实意义。

③在实际应用中,由于风、潮位、潮流、气压等水文气象因素的预报存在一定不确定性,因此气象潮一般仅作短期预报,且应根据气象变化情况及时修正,以尽可能提高预报精度。

参考文献:

[1] 姜兆敏,王如云,黄金城. 风暴潮与天文潮非线性相互作用的理

- 论分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(4): 447-450.
- JIANG Z M, WANG R Y, HUANG J C. Nonlinear interaction between storm surges and astronomical tides[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004, 32(4): 447-450.
- [2] 李煜. 非负矩阵分解在潮汐分析和预报中的应用研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
- LI Y. Study on nonnegative matrix factorization on tidal analysis and prediction[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.
- [3] 张承志. 伽利略卫星的平衡形状参数和潮汐耗散因子[J]. 天文学进展, 2001, 19(2): 151-155.
- ZHANG C Z. Equilibrium shapes and tidal dissipation factors of Galilean satellites[J]. Progress in Astronomy, 2001, 19(2): 151-155.
- [4] 刘潘, 李树军, 艾丛芳. 不同潮汐预报模式在近海海域的准确度评估[J]. 水利规划与设计, 2017(10): 73-76.
- LIU P, LI S J, AI C F. Accuracy evaluation of different tidal forecasting models in offshore waters[J]. Water Resources Planning and Design, 2017(10): 73-76.
- [5] 林勋励. 长江口天文潮预报修正的一种方法[J]. 海洋预报, 1985(1): 34-42.
- LIN X L. An adjusting method of astronomical tide forecast in the Changjiang estuary[J]. Marine Forecasts, 1985(1): 34-42.
- [6] 王代锋, 洪华生, 商少平, 等. 基于潮汐表数据同化的天文潮数值预报模型及其模拟预报效果[J]. 台湾海峡, 2010, 29(2): 154-158.
- WANG D F, HONG H S, SHANG S P, et al. A numerical model for tide forecasting from assimilation of tide table data and its forecasting results[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2010, 29(2): 154-158.
- [7] 王青颜. 海口湾风暴增水与天文潮非线性关系初步分析[J]. 海洋预报, 2005, 22(1): 45-49.
- WANG Q Y. Preliminary analysis of the nonlinear relationship between storm surge and astronomical tide in Haikou Bay[J]. Marine Forecasts, 2005, 22(1): 45-49.
- [8] 钱睿智, 李国芳, 王永东. 南水北调东线源头潮汐预报模型研究[J]. 人民长江, 2018, 49(20): 35-39.
- QIAN R Z, LI G F, WANG Y D. Research on tidal forecasting model for source of eastern route project of south-to-north water diversion[J]. Yangtze River, 2018, 49(20): 35-39.
- [9] 张泽国, 尹建川, 柳成. 基于Grey-GMDH的模块化实时潮汐预报[J]. 中国海洋大学学报, 2018, 48(11): 140-146.
- ZHANG Z G, YIN J C, LIU C. Modular real-time tidal level prediction based on Grey-GMDH[J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(11): 140-146.
- [10] 柳成, 尹建川. 一种高精度的短期潮汐预报模型[J]. 上海海事大学学报, 2016, 37(3): 74-80.
- LIU C, YIN J C. A high-accuracy short-term tide prediction model[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2016, 37(3): 74-80.
- [11] 孙德山. 支持向量机分类与回归方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2004.
- SUN D S. The researches on support vector machine classification and regression methods[D]. Changsha: Central South University, 2004.
- [12] 季凯敏, 路川藤. 长江口外潮汐精细化模型研究与精度分析[J]. 海洋技术学报, 2019, 38(5): 64-67.
- JI K M, LU C T. Research and precision analysis on the tide model outside the Yangtze River estuary[J]. Journal of Ocean Technology, 2019, 38(5): 64-67.

Research on meteorological tide forecasting method in the Yangtze River Estuary based on Support Vector Machine

ZHANG Ce, SHI Jingyuan, WANG Jingjing

(Shanghai Hydrography Centre, Shanghai 200090, China)

Abstract: Based on the measured tide level and hourly meteorological data in the Yangtze River Estuary, a Support Vector Machine model for meteorological tide prediction is established, and the feasibility of meteorological tide prediction in the Yangtze River estuary is discussed. The results suggest that the tidal current could be one of the input factors of Support Vector Machine. Superposing the predicted meteorological tide on the predicted astronomical tide at some tide stations corrects the predicted astronomical tide in the Yangtze River Estuary, which improves the precision of the tide level forecasts significantly.

Key words: Yangtze River Estuary; Support Vector Machine; meteorological tide; forecast