

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802084

# 基于极大似然法改进的船摇预报

魏永松 刘童 薛熙 南雪健 刘昭

(中国卫星海上测控部 江阴 214400)

**摘要:** 船摇数据是航天测量船执行任务中需要实时处理的一种重要的数据。为了提高实时船摇预测精度,提出了一种基于改进极大似然法的  $M$  步船摇预报方法。利用现有的比较稳定的 40 点端点平滑算法,解决了现有 210 点滤波算法(极大似然法)初始精度不高的问题。改进后的极大似然法不仅初始精度得到了提升,所需的滤波点数比现有算法少。利用某次任务实时数据作为检验,仿真运行结果表明改进后算法初始精度比原算法高,滤波点数也大为降低,与理论分析一致。

**关键词:** 滤波;极大似然法;端点平滑;船摇预报;测量

**中图分类号:** TN965    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 590.35

## Ship rock data prediction based on improved maximum likelihood method

Wei Yongsong Liu Tong Xue Xi Nan Xuejian Liu Zhao

(China Satellite Marine Track Control Department, Jiangyin 214400, China)

**Abstract:** The ship rock data is one of important data which need to be handled real-time during the mission of track and control ship. In order to improve the accuracy of the ship rock data, the paper proposes an improved  $M$ -step maximum likelihood ship rock data predictive method. The proposed method uses the stable 41 point-endpoint smoothing algorithms to solve the low accuracy level of the beginning 210-point filtering algorithm, which is also called maximum likelihood method. Besides, the proposed method need less filtering data than existing 210-point filtering algorithm. The paper uses some ship rock data from a real-time mission as a simulation data, and the simulation results show the effectiveness of the proposed algorithm.

**Keywords:** filtering; maximum likelihood method; endpoint smoothing; ship rock predictive; measurement

## 0 引言

陆上设备的基座是固定的,测量船在海上受风浪等因素的影响,船载雷达也在不停地随船的变化而变化。因此,在海上跟踪测量航天器目标时,除了固有的目标的相对角运动外,船摇也会引起视轴的相对目标的角运动,船摇运动对测角元素(方位角和俯仰角)影响最大<sup>[1-3]</sup>。船载雷达在跟踪测量航天器目标的同时,也要对船的位置和姿态进行同步的测量。对船载雷达所获取的数据进行船位和船姿等修正,从而获得较为精确的测量结果,此外利用船摇前馈量的计算还可以有效降低船摇对雷达等设备的影响<sup>[4-6]</sup>。在航天测量船上,测量船体姿态和船位的是惯性导航系统<sup>[7]</sup>。在最新的测量船上,捷联惯导分别安装在相关船载测量设备的基座下。捷联惯导主要由惯性测量单元和单轴旋转机构组成,惯性测量单元直接安装在单轴旋转机构上。相比老的测量船惯性导航系统,对船载测量设备所获得的数据

的修正时减少了变形数据的转换,修正结果相对更为准确。船体姿态以及船位数据即船摇数据的处理对于测量船外测数据的处理有着极为重要的意义。如何提高船摇数据处理的效果一直是航天测量船外测数据处理中一个很重要的研究课题。船摇数据的处理,从统计意义上讲,就是利用船摇测量随机矢量给出船摇状态随机矢量的估计<sup>[7]</sup>。现有的处理方法很多,其中基于状态方程的船摇估计方法包括极大似然方法<sup>[8]</sup>、采用时间序列分析处理方法<sup>[9-11]</sup>、卡尔曼滤波方法<sup>[12]</sup>和最小二乘法<sup>[13-15]</sup>。现跟踪测量过程中采用的方法有 210 点滤波(极大似然方法)和 41 点平滑(最佳平滑法)。在实际使用过程中,使用 41 点平滑较多。

本文主要针对现有使用的两种算法 210 点滤波和 41 点平滑方法的精度进行了分析,并重点分析了 210 点滤波算法精度的影响因素,给出了此算法使用策略。介绍了船摇运动的模型,分析了 210 点滤波算法的原理和船摇精度,并提出了改进后的滤波算法。

收稿日期:2018-11-20

### 1 船摇运动的微分方程描述

船在海洋中航行或者在码头停泊时,在外力的作用下会产生位移和摇摆,根据文献[7,16],可以用一组微分方程近似描述,形式如下:

$$a_1 \ddot{h} + b_1 \dot{h} + d_1 \ddot{\Psi} + e_1 \dot{\Psi} + g_1 \Psi = F$$

$$a_2 \ddot{\Psi} + b_2 \dot{\Psi} + c_2 \Psi + d_2 \ddot{h} + e_2 \dot{h} + g_2 h = M \quad (1)$$

横摆、横摇与船摇之间的耦合方程为:

$$a_3 \ddot{\eta} + b_3 \dot{\eta} + c_3 \ddot{\theta} + d_3 \dot{\theta} + e_3 \dot{k} + g_3 k = F_3$$

$$a_4 \ddot{\eta} + b_4 \dot{\eta} + c_4 \ddot{\theta} + d_4 \dot{\theta} + m_4 \theta + e_4 \dot{k} + g_4 k = F_4$$

$$a_5 \ddot{\eta} + b_5 \dot{\eta} + c_5 \ddot{\theta} + d_5 \dot{\theta} + e_5 \dot{k} + g_5 k = F_5 \quad (2)$$

式中:  $h$  为升沉;  $\eta$  为横摆;  $\Psi$  为纵摇;  $\theta$  为横摇;  $k$  为艏摇。 $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, g_i, 1 \leq i \leq 5$  与  $m_4$  与船体各要素相关。等式右边的  $F, M, F_3, F_4$  和  $F_5$  是作用在船体上的外力的函数,这些系数是时变参数,随外部的条件变化而变化。实际使用时,不直接使用上述表述方式,为了更好地将极大似然法应用在船摇参数预报上,将上述模型进行了简化。假设:

- 1) 不考虑升沉对纵摇耦合的影响;
- 2) 不考虑纵、横、艏摇摆之间的耦合影响;
- 3) 不考虑横摆对横摇、艏摇的耦合影响。

式(1)可以简写成如下。

纵摇方程:

$$\tilde{a}_1 \ddot{\Psi} + \tilde{b}_1 \dot{\Psi} + \tilde{c}_1 \Psi = d_1 \quad (3)$$

横摇方程:

$$\tilde{a}_2 \ddot{\theta} + \tilde{b}_2 \dot{\theta} + \tilde{c}_2 \theta = d_2 \quad (4)$$

艏摇方程:

$$\tilde{a}_3 \ddot{K} + \tilde{b}_3 \dot{K} + \tilde{c}_3 K = d_3 \quad (5)$$

式(3)~(5)中各系数都是随时间变化的,为了简化问题,假设在一次识别过程中其系数是不变的即分段固化的方式。

船摇的数据中隐含一些规律,比如船摇的周期等。如果能确定船摇数据所隐含的船摇周期对建立比较符合实际的模型具有很重要的实际意义。文献[13,17]中提出了利用周期辨识方法分别对测量船的艏摇、横摇、纵摇3个方向的数据进行了分析研究,找出各自的隐含周期,本文据此也计算相应时间段内的船摇的隐周期。

### 2 船摇预测极大似然方法

现经常使用的方法有210点滤波和41点平滑,其中210点滤波就是依据极大似然法得到。推导过程较为复杂,不再赘述,其具体结果如下:

由极大似然法,可以得到:

$$\hat{X}_{k+1|k} = \phi_{11} \hat{X}_{k|k} + \phi_{12} \hat{X}_{k|k} \quad (6)$$

其中,

$$\phi_{11}(K) = \left[ \sum_{j=1}^K X_j \hat{X}_{j-1|j-1} \sum_{j=1}^K \hat{X}_{j-1|j-1}^2 - \sum_{j=1}^K \hat{X}_{j-1|j-1} \hat{X}_{j-1|j-1} \sum_{j=1}^K X_j \hat{X}_{j-1|j-1} \right] / \Delta$$

$$\phi_{12}(K) = \left[ \sum_{j=1}^K \hat{X}_{j-1|j-1}^2 \sum_{j=1}^K X_j \hat{X}_{j-1|j-1} - \sum_{j=1}^K \hat{X}_{j-1|j-1} \hat{X}_{j-1|j-1} \sum_{j=1}^K X_j \hat{X}_{j-1|j-1} \right] / \Delta$$

$$\Delta = \sum_{j=1}^K \hat{X}_{j-1|j-1}^2 \sum_{j=1}^K \hat{X}_{j-1|j-1}^2 - \left( \sum_{j=1}^K \hat{X}_{j-1|j-1} \hat{X}_{j-1|j-1} \right)^2$$

在实时计算过程中,为了使计算简单,一般将上式中的  $\hat{X}_{j-1|j-1}, \hat{X}_{j-1|j-1}^2$  改用指数递推滤波来代替。

在实际使用的指数滤波器作端点平滑输出,其具体计算公式如下:

$$\hat{X}_{v+5} = \sum_{j=0}^4 [-d_j \hat{X}_{v+j} + g_j X_{v+5-j}] \quad (7)$$

$$\hat{X}_{v+5} = \sum_{j=0}^4 [-d_j \hat{X}_{v+j} + g_j / \Delta T \cdot X_{v+5-j}] \quad (8)$$

式中:  $d_i, g_i$  是权系数,事先给定;  $\Delta T$  是进入滤波的时间间隔。该方法用迭代的方式进行,前面5点用0代替,逐步收敛。

将算法归纳如下:

算法1: 210点滤波船摇滤波算法
1) $k=1$ , 对实测船体姿态角进行五点指数滤波,得到 $\hat{X}_{j-1 j-1}, \hat{X}_{j-1 j-1}^2$ ;
2) 积累210点上述滤波后得到的船摇姿态,进行210点滤波;
3) 由式(6),求 $\phi_{11}, \phi_{12}$ , 进行船摇姿态三步;(50、100和150 ms)预测;
4) 求位置预测 $X_{k+1 k} = \phi_{11} X_{k k} + \phi_{12} \hat{X}_{k k}$ ;
5) 用五点指数滤波求 $\hat{X}_{j-1 j-1}, \hat{X}_{j-1 j-1}^2$ ;
6) 实测船体姿态数据结束 $k$ 时刻;

值得注意的是,在实际使用中,船摇姿态3个要素是并行计算滤波并行预测的。每次预测的时候会同时需要积累相同的数据量,上述方法只能预报50 ms后的船体姿态角。为了预报150 ms船摇,实际使用时,将第1次预报值作为实测值进行第2次预报,再将第2次预报值作为实测值进行第3次预报,所预报的值就是150 ms后的船摇预报值。

### 3 船摇预测精度分析

本文中考虑实际中的三步预报精度,即:

$$\hat{\sigma}(3) = \left[ \frac{1}{N-3} \sum_{t=1}^{N-3} (x_{t+3} - \hat{x}_t(3))^2 \right] \quad (9)$$

式(9)实际上也是  $k$  时刻预测  $k+150$  ms 的

MSE(mean square error)均方根误差。此处,以原始的测量数据当作准确值比较计算,此处只用均方根误差比较方法的优劣,不能作为实际精度来使用。

本文选取了码头系泊、航渡过程、执行任务期间 3 组典型数据来进行分析。在码头系泊时,船体由于缆绳的缘故,船体姿态变化较小;航渡过程中,船体姿态受不同程度风浪等外界因素影响,船体姿态变化较大;执行任务期间,由于释放了减摇鳍,船体姿态相对变化较小。为了说明以极大似然法为基础的滤波方法的有效性,将 41 点平滑的三步预测精度进行了对比。

表 1 所示给出了 3 种情况下两种滤波方法 的 MSE 和最大误差值。

表 1 3 种场景下船摇误差对比 (角秒)

数据批次	方法	均方根误差	最大误差
航渡过程	横摇(210 点)	6.11	178.74
	横摇(41 点)	18.27	73.53
	纵摇(210 点)	3.53	18.41
	纵摇(41 点)	14.04	16.88
码头系泊	横摇(210 点)	0.85	22.25
	横摇(41 点)	1.01	4.66
	纵摇(210 点)	0.42	5.91
	纵摇(41 点)	0.46	1.69
实际使用	横摇(210 点)	0.062	0.27
	横摇(41 点)	0.11	0.45
	纵摇(210 点)	0.058	0.28
	纵摇(41 点)	0.11	0.49

通过表 1 可以看出,在 3 种场景下的 210 点滤波算法的三步预测精度都要比 41 点要好,但是最大误差比 41 点平滑要大。

$\Psi$ 。在两种算法下的误差对比曲线如图 1 所示,从图 1 可以看出,在航渡过程中,船体横摇姿态数据 210 点滤波三步预测的初始偏差绝对值较大,随着滤波的进行,偏差迅速变小,趋于稳定,且较长时间段内由于 41 点平滑的结果。41 点平滑的三步预测较为稳定,没有偏差从大到小这一变化过程,但从表 1 中也可看出,其总体的三步精度要比 210 点滤波差。

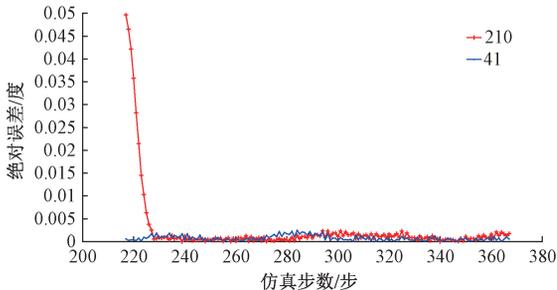


图 1 船摇角横摇角  $\Psi$  两种算法下的误差绝对值

鉴于 210 点滤波有一个精度改善的过程,以及前面提及船摇数据的周期性,针对 210 点滤波算法中的积累数据的步长,本文设置了步长从为 21~210,观察船摇数据三步预测精度的变化。图 2~6 所示分别对应的是 3 种场景下的横摇数据或纵摇数据的三步预测精度与积累数据步长之间的关系。

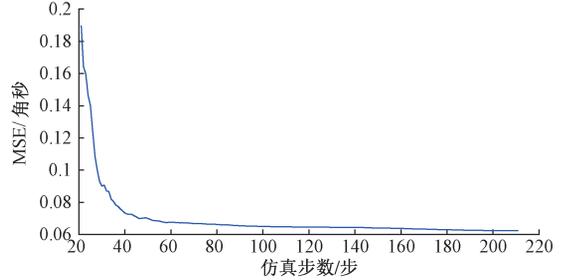


图 2 实战任务船摇角横摇角  $\Psi$  的 MSE 与滤波点数关系

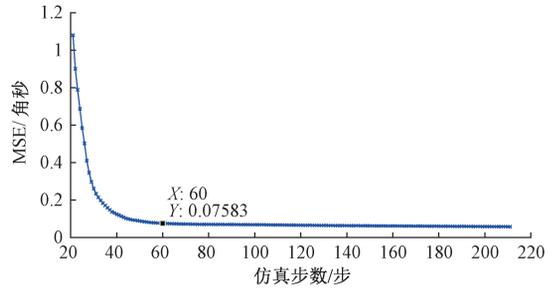


图 3 实战任务船摇角纵摇角  $\theta$  的 MSE 与滤波点数关系

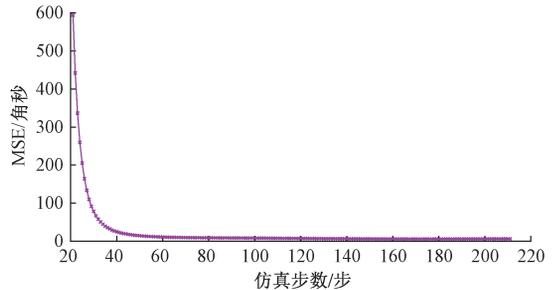


图 4 航渡过程船摇横摇角  $\Psi$  的 MSE 与滤波点数关系

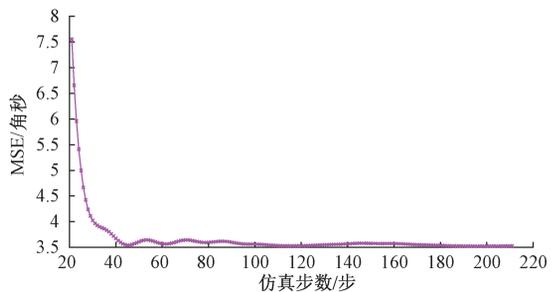


图 5 航渡过程船摇纵摇角  $\theta$  的 MSE 与滤波点数关系

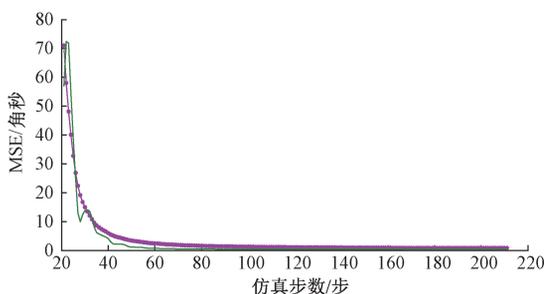


图6 码头系泊船摇角横摇角  $\Psi$  和纵摇角  $\theta$  的 MSE 与滤波点数关系

从图2~6可以看到,随着滤波数据的积累步长变大,3种场景下的船摇预测算法的三步预测精度都变小。积累数据越少,三步预测精度越差。其变化趋势都是从21点开始,三步预测精度越来越好,到了某个步长后,变化趋缓。从图2可以看出,步长为67与步长为210的三步预测精度相差无几。同样的情况也出现在图3中,步长为60与步长为210三步预测精度类似。同时,值得注意的是,在选取积累数据等于相应的数据周期时,滤波算法的精度并没有显著变化。相同的情况也发生在航渡过程和码头系泊中横摇角和纵摇角,即如图4~6所示。但是,在周期数左右的步长所对应的精度都在精度趋于稳定期间。

通过上述数据对比发现,210点滤波的有一个收敛数据精度变好的过程,41点平滑则表现稳定。

回顾算法1过程中,滤波算法的初始值是  $\hat{X}_{j-1|j-1}$ 、 $\hat{X}_{j-1|j-1}$ ,是由指数递推滤波得到。该算法是一个迭代收敛算法,由五点指数递推式(10)和(11)可以得出,该算法中的  $\hat{X}_{v+j}$ ,  $\hat{X}_{v+j}$ ,  $j=0, \dots, 4$  初始值为0。如图7所示,纵轴为绝对误差,单位为度,横轴为仿真步数。实曲线为船摇位置分量原始数据,点曲线为端点平滑数据,在20点之后,数据精度才有所提高。船摇速度分量没有原始值,无法对此做出直观对比,但从图7所示,前面几点数据滤波结果与实际相差较大的,不适合作为210点滤波的初始值。在设置滤波步长为  $k$  时,已经使用五点指数递推滤波算法进行了  $k$  次滤波输出,包括前面递推误差较大的地方。

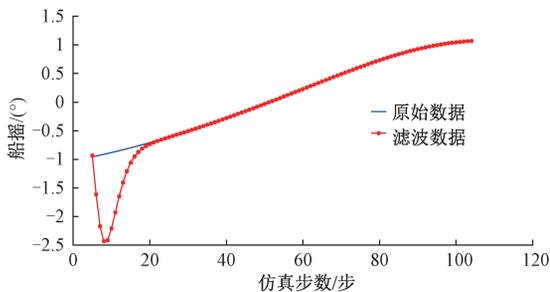


图7 五点指数递推端点平滑

当  $k$  取得较大的时候,五点指数递推滤波已经趋于收敛,滤波算法的初始值精度高,得出的三步预测精度也较高。这也是图1中210点滤波初始绝对值误差比较大的原因。为了验证这一结果,本文设置给定一组初始值不为0(利用41点平滑产生的  $\hat{X}_{j-1|j-1}$ 、 $\hat{X}_{j-1|j-1}$ )的五点指数递推滤波,其他保持不变。得到表2所示结果。

表2 船摇误差对比 (°)

方法	均方根误差
初始值为0	0.122 743
初始值不为0	0.084 409

在初始值不为0的情况下,精度得到大为改善。基于此本文给出改进的算法2,该算法有效地解决了五点指数递推滤波的初始值问题,并且在最大程度上保留原有的算法,给实现该算法带来了便利。

算法2:  $M$  点滤波船摇滤波算法

- 1)  $k=1$ ,对实测船体姿态角进行41点端点平滑得到五点初始值;
- 2) 将上述初始值代入五点指数滤波,得到  $\hat{X}_{j-1|j-1}$ 、 $\hat{X}_{j-1|j-1}$ ;
- 3) 积累  $M$  点上述滤波后得到的船摇姿态,进行  $M$  点滤波;
- 4) 由式(6),求  $\phi_{11}$ 、 $\phi_{12}$ ,进行船摇姿态三步(50、100和150 ms)预测;
- 5) 求位置预测  $X_{k+1|k} = \phi_{11} X_{k|k} + \phi_{12} \hat{X}_{k|k}$ ;
- 6) 用五点指数滤波求  $\hat{X}_{j-1|j-1}$ 、 $\hat{X}_{j-1|j-1}$ ;
- 7) 实测船体姿态数据结束  $k$  时刻

为了便于实际使用,210点滤波算法中的数据积累不需要设置为210,设置为  $M$ ,根据可设置为在这一期间内的所测的隐周期附近大小的数值,这样可积累数据量变少,提高了原有算法的鲁棒性。

为了验证算法2的有效性,选择某航次中的惯导数据作为处理对象,  $M=67$ 。图8所示为改进后的算法与现有

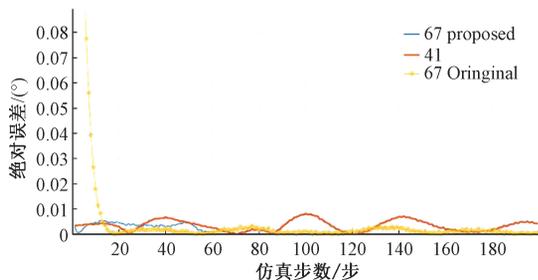


图8 改进的  $M$  点滤波算法与现有两种算法比较

的 210 点滤波算法和 41 点平滑算法对比。改进后的算法极大地改进了算法收敛速度,消除了 210 点滤波算法初始误差较大的缺点,同时,其整体滤波效果也比 41 点平滑更好。

#### 4 结 论

本文分析了船摇运动的运动模型以及船摇数据隐周期特性。分析了 210 点滤波算法的原理,并将之与 41 点平滑算法进行了精度比较分析。最后,在最少改变现有任务软件的基础上,提出了 210 点滤波算法的改进算法,并用仿真结果验证该算法的有效性。但是,初始值的设定仍然对算法初期精度比较敏感,如何获得所需积累数据少、适用性更广的算法是下一步研究的问题。

#### 参 考 文 献

- [1] 李晓勇,张忠华,何晶.船体变形对航天测量船外弹道测量的影响[J].飞行器测控学报,2006,25(3):7-12.
- [2] 齐润东.舰载相控阵雷达船摇补偿[J].系统工程与电子技术,1998(4):4-8.
- [3] 张忠华,李晓勇,何剑伟,等.船载测量设备外弹道测量数据误差特性分析[J].现代雷达,2007,29(5):49-54.
- [4] 王恒,李永刚,陈亮,等.测量船船摇前馈数据处理方法研究及应用[J].飞行器测控学报,2011,30(2):64-69.
- [5] 杨奕飞,王恒.基于时间序列预报模型的船摇前馈量计算[J].现代雷达,2009,31(10):51-54.
- [6] 张玉良,耿天文,刘永凯.动基座光电平台视轴自稳定控制系统设计[J].国外电子测量技术,2015,34(9):38-42.
- [7] 张忠华.航天测量船船姿数据处理方法[M].北京:国防工业出版社,2009.
- [8] 吴孟达,易东云,吴翊.船摇数据实时处理的一种新方法[J].航天控制,1996(4):27-30.
- [9] 李晓勇,杜志军,陈贵明.航天测量船船体姿态数据的时序分析处理方法[J].载人航天,2005(3):38-43.
- [10] 徐希宝,邓育民,段方振,等.船摇数据的时间序列模型处理[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2013,15(4):143-147.
- [11] 张忠华,吴孟达.船摇数据实时滤波与预报的时序法[J].中国惯性技术学报,2000,8(4):24-30.
- [12] 李晓勇,张忠华,张同双,等.航天测量船船摇数据特性分析[J].中国惯性技术学报,2006,14(3):27-30,41.
- [13] 刘利生.外测数据事后处理[M].北京:国防工业出版社,2005.
- [14] 蔡浩.基于梯度型最小二乘滤波的船摇隔离度测试研究[J].计算机测量与控制,2017,25(7):21-24.
- [15] 吴金美,凌晓冬,胡上成,等.基于最小二乘和最速梯度准则的船摇数据自适应滤波算法[C].空天资源的可持续发展——第一届中国空天安全会议论文集,2015:547-550.
- [16] 杨丽丽.基于 GM 模型进行舰船纵摇参数预测[J].国外电子测量技术,2013,32(3):55-57,62.
- [17] 郑振宇,王英福,郑智林.基于 STM32 的舰船横摇周期测量与存储系统设计[J].国外电子测量技术,2016,35(2):102-106.

#### 作者简介

魏永松,助理工程师,主要研究方向为分布式预测控制与航天测控相关应用。

E-mail:wysel574@163.com