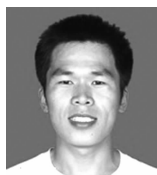


· 施 工 ·



基于模型的耙吸挖泥船 溢流损失估计及模型验证

曹祥志¹, 李 炜², 李 彦¹, 齐 亮¹

(1. 江苏科技大学电子信息学院, 江苏 镇江 212003; 2. 航道疏浚技术交通行业重点实验室, 上海 200136)

摘要: 对大型耙吸式挖泥船的装舱作业过程做了充分研究, 重点解决了泥舱模型的溢流损失估计问题。利用多组实测数据, 对3种泥舱沉积模型的估计效果进行了数据验证和评估分析, 给出最终的评估结果。这一理论成果将应用于以后的挖泥船辅助决策和自动控制应用中。

关键词: 耙吸式挖泥船; 泥舱模型; 溢流密度; 最优化

中图分类号: U 674.31

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)10-0184-05

Overflow density estimation and model validation in trailing suction hopper model

CAO Xiang-zhi¹, LI Wei², LI Yan¹, QI Liang¹

(1. School of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;

2. Key Laboratory of Waterway Dredging Technology, Ministry of Transport, Shanghai 200136, China)

Abstract: Focusing on solving the overflow density estimation problem in a hopper, we study the loading process in a trailing suction hopper dredger. Using multiple sets of experimental data, we verify the estimated results of the three hopper models and give the final data validation and analysis results. The research results can be applied to a dredger's auxiliary decision-making and application of automatic control in later research.

Keywords: trailing suction hopper dredger; hopper model; overflow density; optimization

在大型耙吸式挖泥船上, 装舱过程中泥舱溢流筒的溢流流量和溢流密度不能够直接用传感器获取, 这给后装舱过程的优化机理研究和耙吸式挖泥船辅助决策系统的实际应用增加了困难。

在国内外的相关研究中, 已经提出了一些基于挖泥船泥舱的沉积模型, 并部分给出了计算溢流损失的方式方法。但是, 这些模型在装舱过程的优化中应用还有一定的困难, 原因是这些模型都是基于对物理现象的详细模拟, 模型包括很多不确定的参数, 加上优化算法过于复杂, 很难满足实时控制的要求。本文利用挖泥船实测数据, 对简化的和可降低计算复杂程度的3种泥舱模型在溢流损失中的应用效果做对比分析和模型验

证^[1], 给出了验证结果, 证明了模型在以后挖泥船辅助决策系统中应用的可行性。

1 装舱过程

根据不同的工况, 挖泥船会采取不同的施工方式, 但装舱过程基本上都包括3个不同的阶段^[1]:

阶段1: 舱内装载混合物的高度 h , 低于溢流筒的高度 h_0 时(泥舱内的沉积过程见图1), 为初始装舱阶段。

阶段2: 当舱内混合物的高度达到溢流筒的高度 h_0 时, 开始溢流阶段。因为溢流筒的位置保持不变, 则泥舱内的混合物体积也保持不变, 该阶

收稿日期: 2014-04-17

作者简介: 曹祥志(1988—), 男, 硕士研究生, 从事船舶自动化研究。

段也称为恒体积阶段。这一阶段, 上层的低密度混合物从溢流筒溢流出舱外。

阶段 3: 从挖泥船达到其最大吃水到装舱结束。此阶段通过降低溢流筒高度 h_o , 在排出低密度的上层混合物的同时保持泥舱内质量不变。该阶段也称为恒载质量阶段。

国内的挖泥船装舱过程基本为阶段 1 和阶段 2, 即溢流筒高度在装舱过程中基本保持不变。本文也基于前两个阶段做具体的研究分析。

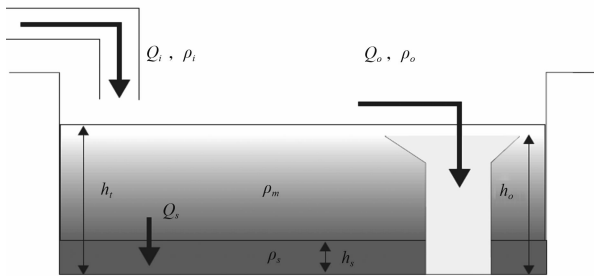


图 1 泥舱沉积过程

2 泥舱沉积模型

泥舱模型是装舱过程中最重要的模型。泥舱模型与耙头模型、泥泵-管线模型一起构成了泥舱装载的整个环节。装舱过程模型框图见图 2^[1-2]。

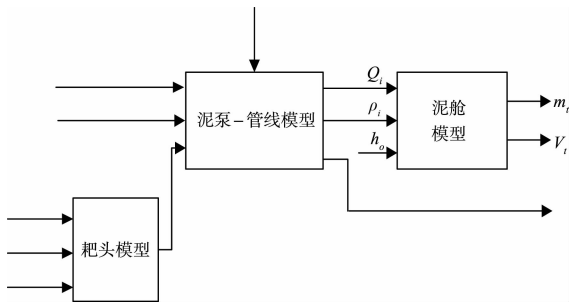


图 2 装舱过程模型框图 (突出泥舱模型)

2.1 体积和质量平衡方程

利用实测数据, 通过体积和质量方程可以计算出溢流密度。该计算方法是利用对质量和体积的平衡进行微分计算来实现的, 求解到的输出密度有噪声, 本文采用递推平均滤波算式平滑数据^[3]。

$$\bar{Q}_{o,k} = Q_{i,k} - \frac{1}{T_s} (V_{t,k+1} - V_{t,k}) \quad (1)$$

$$\bar{\rho}_{o,k} = \frac{Q_{i,k}\rho_{i,k} - \frac{1}{T_s} (m_{t,k+1} - m_{t,k})}{\bar{Q}_{o,k}} \quad (2)$$

式中: k 表示离散时间步长; T_s 为采样时间; Q_i 为进舱混合物流量; Q_o 为溢流混合物流量; ρ_i 为进舱混合物密度; ρ_o 为溢流混合物密度; m_t 为装舱总质量; V_t 为泥舱混合物总体积。

模型输出的密度将与通过方程(1)、(2)和实测数据计算出的输出密度进行比较。

2.2 溢流流量

若溢流出的混合物自由通过溢流筒, 其溢流流量 Q_o 可由下式给出^[1]:

$$Q_o = k_o \max (h_t - h_o, 0)^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

式中: k_o 为不确定值, 取决于溢流筒形状和周长等参数值。而溢流筒为满筒 (若在溢流筒内装阀门) 时, 则应使用以下模型:

$$Q_o = k_o \sqrt{2g \max (h_t - h_o, 0)} \quad (4)$$

由上述公式知, 模拟溢流流量时是存在不确定性的, 具有开关性质。

2.3 溢流密度

溢流密度 ρ_o 的计算需要明确泥舱内沙床以上混合物密度的分布情况。该混合物密度是随高度变化的递减函数, 形式不确定并且是随时间变化的。本文利用线性模型、指数模型和水层模型来估计溢流密度值并做对比和验证分析^[1]。

下面将 3 种模型的估计和验证问题汇总如下:

$$\dot{V}_t = Q_i - Q_o \quad (5)$$

$$\dot{m}_t = Q_i \rho_i - Q_o \rho_o \quad (6)$$

$$\dot{h}_{t2} = \frac{k_{pc}}{\tau_c} (m_{t,max} - m_t) - k_{ac} (h_{t2} - h_o) \quad (7)$$

$$h_{t2} = h_t + k_{pc} (m_{t,max} - m_t) \quad (8)$$

$$h_o = \min [\max (h_{t2}, h_{o,min}), h_{o,max}] \quad (9)$$

$$Q_o = k_o \max (h_t - h_o, 0)^{\frac{3}{2}} \quad (10)$$

$$\rho_o = \begin{cases} \max [\rho_s - k_{\rho t} (h_o - h_s), \rho_w] & \text{线性模型} \\ \rho_w + (\rho_s - \rho_w) e^{-k_{\rho c} (h - h_s)} & \text{指数模型} \\ \frac{(\rho_m - \rho_w) Q_{ms}}{Q_{ms} + Q_w} + \rho_w & \text{水层模型} \end{cases} \quad (11)$$

式中: h_t 为装舱高度; h_o 为溢流筒高度。

3 溢流参数估计和泥舱模型验证

3.1 施工工况

对于上述的泥舱模型，本文采用“新海虎9”在河北曹妃甸的实测数据进行参数估计和模型验证。

河北曹妃甸港的工况参数：土壤性质为细沙；其中饱和泥浆密度由施工员设定，为 1.87 t/m^3 ；中值粒径为 0.036 mm 。

3.2 溢流参数估计

通过模型估算的溢流量(船次1)的结果见图3。

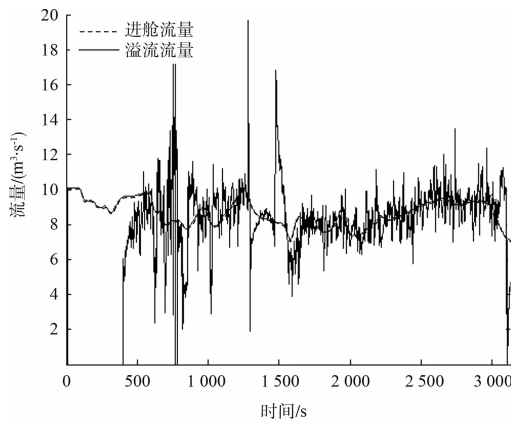
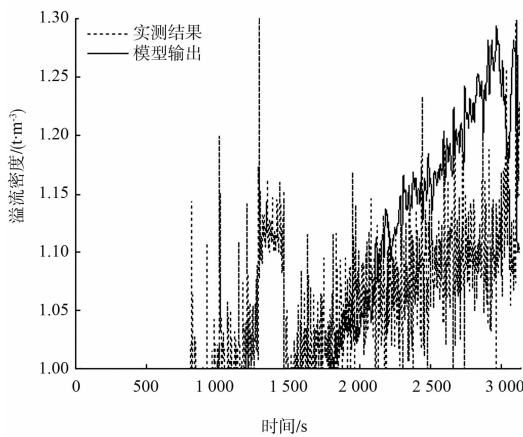


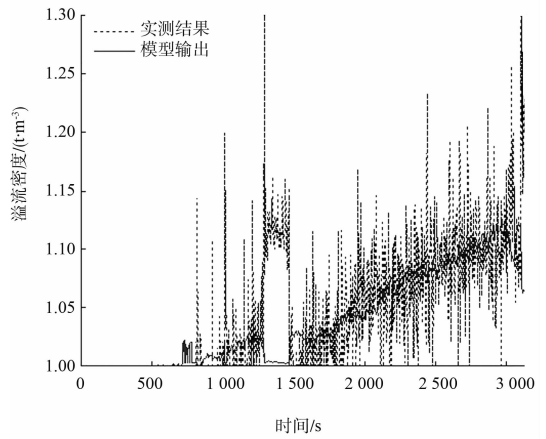
图3 进舱流量与估算溢流量 (船次1)

通过模型估算的溢流密度与实测结果的比较见图4。

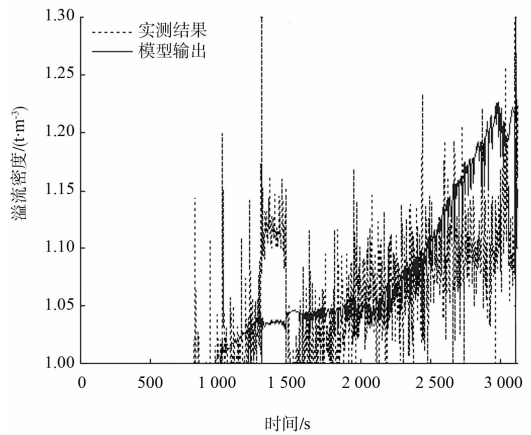
从图4的对比结果可以看出，线性模型在溢流的初始阶段对密度的估计值过低，在后期通过对密度的过高估计来补偿前期的误差；指数模型显现出溢流密度较平稳的增长趋势，也更接近于



a) 线性模型



b) 指数模型



c) 水层模型

图4 模型估算溢流密度与实测结果比较

根据平衡方程计算出的实测结果；水层模型前期对溢流密度的估计值也过低，在后期也通过过高估计来补偿，密度与实测结果偏差最大。在疏浚细沙时，水层模型的效果明显没有指数模型理想。水层模型要求对所研究混合物的沉积过程和泥舱结构有较深入的了解，否则模型对混合物密度的分段常数式的划分并不能达到很好的预测效果。

3.3 泥舱模型验证

由式(5)、(6)知装舱质量 m_i 与模型的具体形式无关，可以用于验证估算的溢流量与溢流密度的准确性，验证结果见图5，可以看出指数模型的拟合效果最佳。

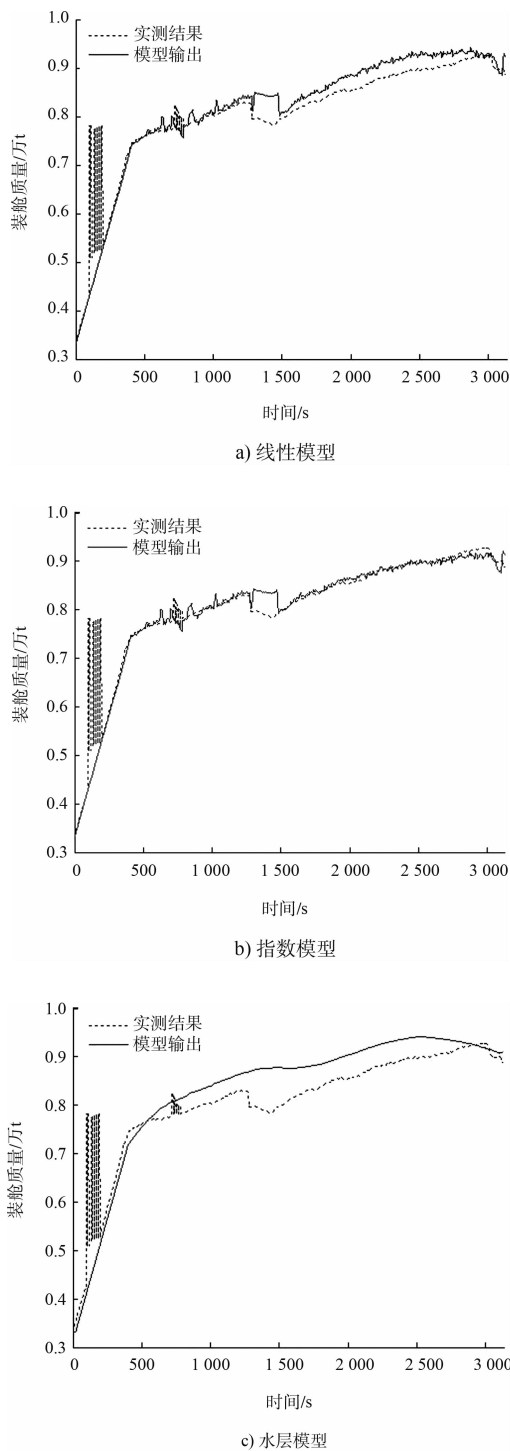


图 5 模型估算装舱质量与实测结果比较

4 模型性能的量化^[1,4]

4.1 方差评估指标 (VAF)

方差评估指标对噪声信号不是很敏感, 即便输入的信号为噪声依然能给出合理的模型评估结果。方差评估指标先对测量信号 y 的 $\text{var}(y)$ 方差的剩余方差进行加权。VAF 的最大值为 1, 然而

对于不准确的模型 VAF 可能为负值。

$$VAF = 1 - \frac{\text{var}(y - \hat{y})}{\text{var}(y)} \quad (12)$$

式中: y 为测量数据; \hat{y} 为预测数据。

4.2 价值函数 (J)

利用平方和来实现非线性校准过程预测误差的最小化, 即价值函数的最小化目标。价值函数通过模式搜索法校准那些不能直接使用线性最小二乘法计算的数据, 以实现最小化。平方和的定义为:

$$J(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [\hat{y}(k, \theta) - y(k)]^2 \quad (13)$$

式中: k 为采样时刻; θ 为预估的参数; $\hat{y}(k, \theta)$ 为预估的数据; $y(k)$ 为实测数据; N 为采样总数。

利用挖泥船“新海虎 9”号在河北曹妃甸 5 个船次的疏浚实测数据, 采用上述 2 个模型性能的量化指标对模型估算的溢流流量和溢流密度进行评估, 结果见表 1。

表 1 泥舱模型评估结果

船次	线性模型		指数模型		水层模型	
	\bar{J}	VAF	\bar{J}	VAF	\bar{J}	VAF
1	536.2	0.76	504.7	0.79	655.5	0.67
2	291.4	0.98	224.5	0.99	366.6	0.99
3	514.4	0.93	487.6	0.94	1358.1	0.71
4	193.7	0.99	181.0	0.99	435.2	0.96
5	868.2	0.72	866.4	0.72	995.1	0.64
均值	480.8	0.88	452.8	0.89	762.1	0.79

从以上 5 个船次的实测可知, 3 个泥舱模型都能够依据泥舱的装舱过程给出溢流参数的估计结果。比较 3 个模型的验证结果, 指数模型的方差评估指标均值最大, $VAF = 0.89$, 最接近实际装舱情况; 价值函数值也最小, $J = 452.82$ 。线性模型也给出了不错的估计结果, 但从溢流密度的估计情况分析, 该模型在溢流过程的前期过低地估计了溢流密度, 在后期则通过过度校正来弥补前期的误差^[5], 通过验证结果也可以得知该模型不如指数模型能更好地接近实际装舱过程。水层模型的表现效果最差。从分析结果可知, 指数模型的表现效果最佳。

5 结论

1) 将基于泥舱的动态沉积模型应用于传感器不可测量溢流损失的参数估计。根据实测数据,给出了线性模型、指数模型、水层模型的溢流密度估计值和对比结果。

2) 利用与模型具体形式无关的装舱质量验证了不同模型的准确性,给出了评估结果。实测数据的验证结果表明,指数模型的估计值与装舱质量实测值的拟合效果最好,表明模型的估计效果最佳。

3) 部分与土质状况有关的参数考虑还不够充分,对土质情况做进一步研究将有利于提高模型估计的准确性。

4) 最终的评估结果可以应用于基于装舱过程的挖泥船辅助决策系统中。

参考文献:

[1] Braaksma J. Model-based control of hopper dredgers[D]. Netherlands: Delft University of Technology, 2008: 30, 57.

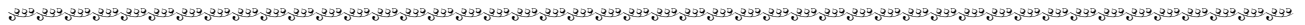
[2] Braaksma J, Klaassens J B, Babuska R, et al. A computationally efficient model for predicting overflow mixture density in a hopper dredger[J]. Terra et Aqua, 2007, 106: 10-28.

[3] Pawef M Stano. Nonlinear state and parameter estimation for hopper dredgers[D]. Delft: Delft University of Technology, 2013: 141-156.

[4] 李云旺,王玉铭.耙吸挖泥船溢流损失的分析[J].船舶, 2005(6): 16-22.

[5] Braaksma J, Babuska R, Klaassens J B, et al. Model predictive control for optimization the overall dredging performance of a trailing suction hopper dredger [C]. Proceedings of the 18th World Dredging Congress, 2007: 1 263-1 274.

(本文编辑 武亚庆)



著作权侵权通报

经查实,马一雾、王武刚同志发表于本刊2014年1期《混凝土防渗墙对坝坡稳定作用机理的有限元分析》一文,显著侵犯了高江林同志2012年发表的博士论文《基于渗流与应力耦合的防渗墙与坝体相互作用研究》之著作权。为端正文风,治病救人,维护作者著作权不受侵犯和科技期刊政治与社会责任,决定:将马一雾、王武刚同志侵权论文从本刊论文发表序列中撤下(包括收录本刊电子期刊数据库收录序列);对马一雾、王武刚同志提出通报批评;侵权作者进入本刊黑名单一年。

《水运工程》编辑部
2014年9月