



# 基于神经网络和最大产量估算的挖泥船横移控制

宋冬鹏, 张路生

(中交天津航道局有限公司, 天津市疏浚工程技术企业重点实验室, 天津 300457)

**摘要:** 针对目前绞吸挖泥船疏浚作业依靠人工手动操作无法保持较高产量的问题, 研究了影响绞吸挖泥船产量的控制参数。采用神经网络预测和最大产量估算方法, 得出在不同条件下挖泥船横移控制系统的最优控制参数, 同时对此控制参数进行了对比仿真试验。结果表明: 在一个不含边界减速的有效横移周期内, 仿真产量高于实船操作产量。该方法可为绞吸挖泥船疏浚施工中横移系统的自动控制提供理论依据与技术参考, 使绞吸挖泥船可以兼顾不同的控制要求和性能限制条件, 在一个横移周期内稳定输出最大产量。

**关键词:** 绞吸挖泥船; 疏浚作业; 边界控制; 神经网络; 横移控制

**中图分类号:** TP 273<sup>+</sup>.1; U 616

**文献标志码:** A

## Lateral movement control of cutter suction dredger based on neural network and maximum output estimation

SONG Dong-peng, ZHANG Lu-sheng

(Tianjin Key Laboratory for Dredging Engineering Enterprises, CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300457, China)

**Abstract:** In view of the problem that the current cutter suction dredger dredging operation cannot rely on manual operation to maintain the high yield, this paper studies the control parameters affecting the yield of cutter suction dredger. By using the method of neural network prediction and maximum yield estimation, the optimal control parameters of the lateral movement control system of the dredger under different conditions are obtained. At the same time, the control parameters are compared and simulated. The simulation results show that the simulation yield is higher than that of the real ship in an effective period without boundary deceleration. The method studied in this paper can provide theoretical basis and technical reference for the automatic control of the lateral movement system in the dredging construction of cutter suction dredger, so that the cutter suction dredger can take into account different control requirements and performance constraints to stabilize the maximum output in a lateral movement cycle.

**Keywords:** cutter suction dredger; dredging operation; boundary control; neural network; transverse control

绞吸挖泥船是一种主要的疏浚施工船舶, 目前我国绞吸挖泥船疏浚作业基本停留在人工手动操作模式下, 施工人员通过长期的经验积累, 可以凭借经验操作挖泥船保持较高产量。国内一些科研人员对产量控制中的横移控制系统进行了研究, 魏长赞<sup>[1]</sup>基于 RBF-ARX 理论建立横移过程模

型; 朱文亮等<sup>[2]</sup>提出了一种基于 BP 神经网络的疏浚横移过程状态空间建模方法; 杨金宝<sup>[3]</sup>提出了基于 LM 算法的双隐含层 BP 神经网络产量预测模型。

基于神经网络和最大产量估算的横移控制研究是以绞吸挖泥船的疏浚作业产量优化目标为导

**收稿日期:** 2020-04-02

**作者简介:** 宋冬鹏 (1988—), 男, 工程师, 从事挖泥船疏浚系统维护工作。

向、性能边界条件作为控制参数限制条件, 分析不同参数对产量的影响后利用 BP 神经网络对关键控制参数进行目标范围估算, 并将所有影响产量的控制参数输出至横移系统控制模型中控制横移绞车动作, 达到可以兼顾不同的控制要求和限制条件且在一个横移周期内稳定输出最大产量的目的, 同时也可以为施工人员参数设置及操作控制提供支持。

1 基于 BP 神经网络的最大产量横移控制系统设计

1.1 系统结构

以中交天津航道局有限公司自有挖泥船作为实船模型, 建立基于 BP 神经网络的最大产量横移控制系统, 同时获取控制系统所需的挖泥船参数。以该条绞吸挖泥船施工时间段为例, 获取疏浚过程关键输入、输出数据后, 即可用于最大产量计算模型进行寻优计算, 同时也应用于 BP 神经网络训练及 BP 神经网络控制参数估算。

系统各部分结构功能描述如下:

- 1) 信号处理。对 PLC 所采集的数据进行处理, 获取疏浚过程关键输入、输出数据。
- 2) 最优产量目标值计算。通过最优产量目标值计算, 可以得到在参数限制范围内的最大浓度、流速、管路压力。
- 3) 船舶性能边界条件控制。控制船舶输出参数的范围, 包含水下泵吸入真空范围、总排出压力范围、管路水头消耗范围、管路流速范围、泥泵柴油机功率限制等。
- 4) BP 神经网络预测产量。利用 BP 神经网络可以对挖泥船产量进行预测, 通过大量的历史数据, 可以对神经网络进行训练, 进而得到较为匹配的产量预测值。
- 5) BP 神经网络预测最大吸入真空范围。分析参数对结果的影响程度, 确定吸入真空值对产量的预测影响远大于其他参数。进而控制横移速度, 使吸入真空保持在一定的区间内, 产量满足理论最大值。
- 6) 横移系统控制功能。通过联合运用 5 个子控制系统对横移系统进行自动控制, 在保证绞吸

挖泥船疏浚设备安全的基础上, 调整横移绞车的横移速度至预期横移速度, 从而达到最佳生产效率。

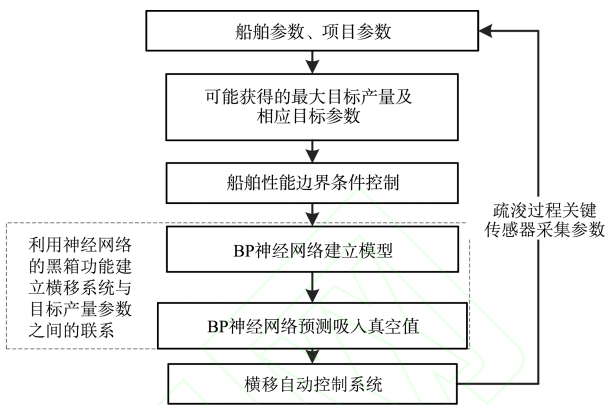


图 1 控制系统各部分功能

1.2 边界控制条件及最大产量的计算

绞吸挖泥船装备有水下泥泵、舱内泥泵, 可以根据两泥泵串联公式绘制两泵串联的清水流量-压力曲线、清水流量-功率曲线。

排泥管路压力及阻力限制在最大产量值曲线中已计算, 此处不做讨论。流速需要高于最低流速, 在经济流速附近, 泥泵功率不可以超过其功率边界范围, 即可满足限制条件。除用公式计算外, 临界流速也可以通过查表获得。

在已知天然土密度的条件下, 通过查表可知, 在有水下泵的条件下, 不同土质的最大瞬时浓度已知。对于不同转速、不同浓度对应的泥浆功率, 可以利用公式进行计算。在求得不同转速、不同浓度对应的泥浆功率表后获得不同转速、不同浓度对应的泥浆功率图, 并由此获得泥浆功率限制范围。

接下来, 计算泥浆浓度最优值和相应的浓度、流速、压头等参数。计算这些参数需要计算两泵串联条件下不同转速清水流量-扬程, 不同转速、不同浓度泥浆流量-扬程。

考虑各种土质的换算系数, 即采用以下公式进行泥浆扬程-流量计算。

$$H_m = H_w [K_H (\rho_m - 1) + 1]$$
 (1)

式中:  $H_m$ 、 $H_w$  分别为泥浆及清水扬程 (0.1 m 水柱);  $\rho_m$  为泥浆密度 ( $t/m^3$ );  $K_H$  为土质换算系数, 按表 1 取值。

表 1 土质换算系数

土质分类	淤泥、黏土、粉土	中、细砂	粗砂、砾石
土质换算系数 $K_H$	0.75	0.50	0.25

管路清水特性计算参考管路清水总消耗水头公式，管路泥浆总消耗水头计算参考管路泥浆总消耗水头公式，管路泥浆总消耗水头公式为：

$$h_m = \sum \xi_{m_s} \frac{v_s^2}{2g} + \lambda_m \frac{l_s}{D_s} \frac{v_s^2}{2g} + Y(\rho_m - \rho_w) + \rho_m \frac{v_d^2}{2g} + \sum \xi_{m_d} \frac{v_d^2}{2g} + \lambda_m \frac{l_d}{D_d} \frac{v_d^2}{2g} + \rho_m Z \quad (2)$$

式中： $h_m$  为管路泥浆总水头(m 水柱)； $\sum \xi_{m_s}$  为泥泵吸入口前所有吸泥管部分泥浆局部阻力(包括泥口、橡胶接头或球形接头、弯管、闸阀、三通等)之和； $v_s$  为吸泥管平均流速(m/s)； $\lambda_m$  为泥浆沿程阻力系数； $l_s$  为吸泥管直管长(m)； $D_s$  为吸泥管内径(m)； $Y$  为水面距离海底距离(m)； $\rho_m$  为泥浆密度(t/m<sup>3</sup>)； $\rho_w$  为清水密度(t/m<sup>3</sup>)； $v_d$  为排泥管路平均流速(m/s)； $\sum \xi_{m_d}$  为从泥泵排出口至排泥管出口全部排泥管附件(包括船上弯管、三通、闸阀、橡胶软管、水上、水下排泥弯管、陆上弯管、三通、闸阀等)局部阻力之和； $\sum l_d$  为从泥泵排出口至排泥管出口所有的泥管直管部分长度总和(m)； $D_d$  为船上排泥管内径(m)； $Z$  为排高(水面至排泥管出口中心之高度)(m)。

将两泵串联条件下不同转速清水流量-扬程曲线、不同转速和不同浓度泥浆流量-扬程曲线、管路清水特性曲线、管路泥浆总消耗水头曲线在一张图上显示，为管路清水泥浆工况曲线，其交点即为不考虑船舶性能边界条件的泥泵工况点<sup>[4]</sup>。

如考虑船舶性能边界条件，将最低流速限制、功率限制和管路清水泥浆工况曲线共同绘制于一张图，即可求出含边界控制值的最优泥浆浓度、流速值。

1.3 通过 BP 神经网络预测浓度及横移速度

绞吸挖泥船疏浚产量计算公式中的两个组成部分是浓度和流速，流速已经由最优产量计算模型确定，故只需要控制机具使管路中的泥浆达到

目标浓度即可达到目标产量。利用 BP 神经网络建立预测模型对浓度进行预测，进而建立控制参数与浓度之间的关系。建立 BP 神经网络模型后，随着输入参数的数量增加，可以不断训练神经网络使之更加准确。

神经网络训练中，筛选数据是很重要的一环，BP 神经网络并不能判断时间错后而引起的误差，如绞吸挖泥船吸入真空和横移速度，相对于浓度而言是时间提前的。因吸口位置在绞刀处，相对于密度计有泥浆流过船体输泥管线本身的距离，故需要按照流速计算运动时间。还有密度计会出现显示值跳动情况，密度值变化相对于浓度变化范围过小的情况，都会影响神经网络的预测，故需要筛选数据后进行训练。

以天航局电天牛系列绞吸挖泥船为例，通常情况下，对绞吸挖泥船浓度影响较大的参数有横移速度、桥梁下放深度等。因现场施工条件复杂，暂不考虑随时改变桥梁下放深度，故与浓度预测相关的参数有横移速度、流速、浓度、吸入真空、绞刀深度、绞刀 1 号电机实际电流、绞刀 1 号电机实际电压、绞刀 2 号电机实际电流、绞刀 2 号电机实际电压等。

神经网络产量预测主要代码在此不一一列举，其余代码为调取已知数据块。

本文参数仿真所使用的神经网络有一个隐含层和一个输出层。使用的训练算法为莱文贝格-马夸特方法(Levenberg-Marquardt algorithm)，在非线性数中，可以提供在一定范围内最小的数值解。该方法可以中和高斯-牛顿算法和梯度下降法，取长补短。

神经网络训练结束后，可以利用神经网络分析参数对结果的影响程度。通过不同种参数的组合，如只保留横移速度和其他值进行浓度预测，只保留吸入真空和其他值进行浓度预测，单独用其他值小范围变化值进行预测等，判断输入参数对结果的影响。通过对比分析，可以只考虑吸入真空对产量的影响，而吸入真空值是采集量、横



移速度是控制量, 可以通过控制吸入真空值的范围来控制横移速度, 使产量满足理论最大值。通过查找历史数据记录, 若满足理论最大产量值的预测真空值小于施工过程中已有的最大真空值, 则此控制条件可行。

最后, 验证此模型是否有效, 通过查找历史数据, 获得一个不含边界减速的有效横移周期时间。在此时间段内, 对比 BP 神经网络预测的理论最大产量与实际产量, 只要预测产量高于实船操作产量, 此模拟即具有实际意义。

1.4 横移自动控制系统的的设计

本文所设计的横移自动控制系统由 5 个子控制系统组成, 分别为: 绞刀扭矩控制系统、水下泵真空控制系统、总排出压力控制系统、泥浆流速控制系统、泥浆浓度控制系统。此系统通过各子控制系统联动控制, 每一个子系统的设定值需要根据 BP 神经网络预测值或疏浚作业优化目标中临界压力、最低流速、最大浓度等设定。

该横移自动控制系统可根据需要启用相应的子控制系统; 各子控制系统对横移速度的影响具有同等的优先级; 当某个子控制系统的限制条件最先生效时, 则优先响应该子控制系统的控制策略。

2 横移控制器参数设置仿真分析

以本文船舶为例, 绞刀下沿吸泥口处距密度计约 110 m, 训练时已根据流速计算时间并调整实船数据表格。训练取实船有效样本 3 500 个, 通过 BP 神经网络预测出连续 676 个预测值, 所用 BP 神经网络含一个隐含层和一个输出层。最大的训练次数设置为 100, 因泛化能力检查 6 次满足停止条件, 故实际训练的次数为 20, 均方误差最大值为 0.015 4, 设定的均方误差为 0.000 04。预测结果见图 2。

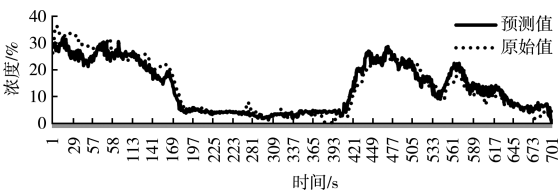


图 2 BP 神经网络预测值

在预测过程中, 神经网络性能训练至第 14 代时, 训练结果最理想, 均方误差为 0.014 896。由神经网络回归分析结果可知, 相关系数为 0.959 6, 非常接近于 1, 说明模型预测精度较高。

通过以上分析可知, 神经网络预测效果较好, 通过神经网络测试预测值和实船实际值对比可以进一步确认神经网络的预测效果较为可靠, 预测浓度值与原始实际浓度值基本匹配。

由实船参数和项目参数求得理论最大产量曲线的浓度值为 40%、流速值为 5.175 m/s, 船端记录瞬时最大浓度值为 60.39%、瞬时最大流速值为 5.217 m/s。船端最大流速值与计算值相对应, 但最大浓度值超过理论值, 由经验可知, 产生此数值原因可能为泥底表面凹凸不平等情况, 故最大浓度依然采取 40% 计算<sup>[5]</sup>。

限制条件中, 由于装有水下泥泵, 故无需考虑吸入真空限制; 最大产量值曲线中排泥管路压力及阻力限制已存在, 满足条件; 流速高于最低流速, 在经济流速附近, 也满足限制条件; 曲线中密度不超过功率边界范围。综上, 各项参数均在允许范围内。

利用已训练好的 BP 神经网络可预测在绞刀机电流、电压、绞刀深度变化不大的情况下, 控制横移速度使吸入真空接近 -0.8 bar (-80 kPa), 产量接近最大值 40%。由历史数据记录可知, 此吸入真空值所对应的其他变量与神经网络实际预测所用变量接近, 浓度同样接近, 所以此值预测结果满足要求。历史记录中最大真空值超过此范围, 是可行的。

把以上控制参数输入至横移自动控制系统后, 即可得到如下控制条件:

- 1) 绞刀扭矩控制系统。其参数按照下值设置: 在横移系统控制过程中, 当绞刀扭矩超过设定值的 85% 后, 降低横移速度。
- 2) 水下泵真空控制系统。其参数按照下值设置: 根据 BP 神经网络横移速度所对应的真空度预测结果, 水下泵吸入真空压力大于 -0.8 bar (-80 kPa) 后打开真空释放阀, 水下泵吸入真空压

力大于 $-0.9\text{ bar}$  ( $-90\text{ kPa}$ )后限制横移速度。

3) 总排出压力控制系统。其参数按照下值设置: 总排出压力超过横移控制(设定值为 $11.9\text{ bar}$ )后, 降低横移速度。此设定值为最大产量预测中最大排出压力值。

4) 泥浆流速控制系统。其参数按照下值设置: 在实施过程中, 泥浆流速低于 $5.17\text{ m/s}$ 后, 降低横移速度。此设定值为最优产量预测中最小产量交点流量所对应流速值。

5) 泥浆浓度控制系统。其参数按照下值设置: 泥浆密度超过 $1.295\text{ t/m}^3$ 后首先降低横移速度, 继续超过 $1.395\text{ t/m}^3$ 后打开真空释放阀。泥浆密度设定值为根据实船工况参数求得的最大密度值。

由历史数据可知, 一个不含边界减速的有效横移周期约为 $678\text{ s}$ 。在此时间段内, 理论最大产量约为 $705\text{ m}^3$ , 实际平均约为 $541\text{ m}^3$ , 所获得的理论产量高于实船操作产量, 故此模拟具有实际意义。

### 3 结论

1) 通过建立船舶性能边界条件控制系统, 控制挖泥船输出参数在安全范围内。

2) 通过建立挖泥船最优产量计算系统, 使挖泥船产量跟随保持在理论最佳值。

3) 排除泥浆输送时间差对训练神经网络的干扰, 使训练误差更小。在考虑到泥泵吸入真空与浓度计显示存在一定时间差等因素的条件下, 进

行 BP 神经网络数据筛选和调整。训练结果满足神经网络性能指标、神经网络回归分析指标, 最终通过实船数据验证, 建立满足要求的 BP 神经网络浓度预测模型。

4) 通过已建立的 BP 神经网络预测模型, 预测最大浓度所对应的吸入真空值, 确定横移系统横移速度调整范围, 横移速度调整范围满足边界条件控制模型要求。

5) 建立横移自动控制系统, 通过实时更新的疏浚作业优化目标的计算结果、边界控制条件模型的限制结果向横移自动控制系统不断提供最优参数设置值, 使横移自动控制系统满足跟随最大产量的施工动作要求。

### 参考文献:

- [1] 魏长赞, 倪福生, 戴伟, 等. 绞吸挖泥船横移过程的预测控制系统研究[J]. 机械设计与制造工程, 2018, 47(1): 70-74.
- [2] 朱文亮, 倪福生, 魏长赞, 等. 挖泥船疏浚横移过程线性二次型产量最优控制[J]. 船舶工程, 2016, 38(S2): 230-235.
- [3] 杨金宝, 倪福生, 魏长赞, 等. 基于双隐含层 BP 神经网络的绞吸挖泥船产量预测[J]. 计算机与数字工程, 2016, 44(7): 1234-1237.
- [4] 徐玉华, 岳文飞. 绞吸船施工输送过程分析[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(9): 62-65.
- [5] 王其松, 严军, 邓家泉. 绞吸式挖泥船产量优化研究[J]. 水运工程, 2013(3): 48-55.

(本文编辑 武亚庆)