

文章编号: 1000-8152(2008)03-0578-05

疏浚系统泥浆浓度的自校正前馈控制

王庆丰, 唐建中, 闭治跃

(浙江大学 流体传动及控制国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 采用CARMA模型表示泥浆浓度过程, 并通过现场的实验数据, 利用最小二乘算法对泥浆浓度过程的数学模型进行了辨识; 在不同工作点上的辨识结果表明泥浆浓度过程具有参数时变和外部干扰作用明显等特点. 本文提出了一种自校正控制和前馈补偿相结合的控制方案; 控制系统利用在线检测的过程数据, 采用递推最小二乘算法连续更新系统前向通道和可测量干扰通道的传递函数. 利用更新的系统模型设计控制器参数, 控制器的调节目标是使系统未来时刻的总体方差趋于最小. 以900型挖泥船为基础, 通过实验的方式检验了本文提出的控制方案的性能. 实验结果表明该方法在系统作业环境变化, 时滞较大的条件下仍能使泥浆浓度基本保持稳定, 具有较强的抗干扰能力和良好的跟踪性能.

关键词: 疏浚作业; 浓度控制; 前馈控制; 自校正控制

中图分类号: TP29

文献标识码: A

Self-tuning feedforward control of slurry concentration in a dredging system

WANG Qing-feng, TANG Jian-zhong, BI Zhi-yue

(State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control of Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: A CARMA model is introduced to represent the slurry concentration process. With experimental data obtained on-site, this model is identified by using the least-squares method. Identifications, which are carried out on different working locations, show that the model parameters of a slurry concentration process varies with time, and external influences exhibit remarkable impacts on the process. A control scheme, incorporated self-tuning control with feedforward control, is introduced for controlling the slurry concentration. With process data acquired online, the control system continuously updates the process model by using the Recursive-Least-Squares (RLS) method. With the updated process model, a control law is determined to minimize the sum-square-error beyond future steps. Experiments have been carried out on a type-900 dredger. Results show that the control performance is satisfactory in various dredging environments, even though the time-lag is significant. The control system effectively compensates external disturbances, and has excellent tracking ability.

Key words: dredging operation; concentration control; feedforward control; self-tuning control

疏浚作业在海洋开发、港口建设、农田水利和环境保护等方面有非常广泛的应用. 绞吸式疏浚作业系统具有挖深范围大、对土质的适应性好等优点, 是国内外主要发展的疏浚设备之一. 为了进一步降低作业成本、提高作业效率, 国内外研究机构和制造单位自20世纪90年代就已开始对绞吸式疏浚作业过程的自动化进行研究^[1~4]. 疏浚作业过程中泥浆浓度的建模与控制是实现疏浚作业自动化的关键, 对于提高疏浚作业的产量和效率都有重要影响.

1 绞吸式疏浚作业系统的工作原理(Working principle of cutter suction dredger)

疏浚作业的目的是将水下的土壤、岩石等挖掘并输送到指定的排泥场所. 绞吸式疏浚作业系统的基本构成如图1. 系统主要由切削系统和泥浆输送系统构成. 切削系统由刀具(绞刀或斗轮)及其驱动系统构成. 在工作过程中, 切削刀具在水下旋转和平移, 连续地切削土壤并使土壤或岩石与附近的水混合. 泥浆输送系统由柴油机、泥泵和管道构

成. 泥泵入口侧管道的一端位于切削刀具附近并与刀架一起水平摆动. 在柴油机的驱动下, 泥泵的入口端形成负压并通过吸泥管道把切削后的泥水混合物吸入泵内, 然后通过泥泵将混合物输送到指定的排泥场所.

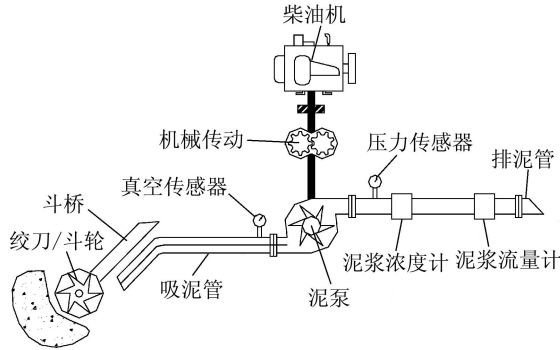


图1 疏浚作业系统的构成

Fig. 1 Constitution of dredging system

2 系统分析与建模(System analysis and modeling)

疏浚作业过程中浓度控制的目标是对泥浆输送管道内混合物的浓度进行控制. 影响管道内泥浆浓度的因素主要包括实际的土壤切削量、泥水混合效率和输送系统的吸入效率. 影响疏浚作业泥浆浓度的因素较多, 国内外的学者从不同的角度对泥浆浓度的形成过程进行了研究^[5~7]. 要从疏浚作业系统运行机理上建立泥浆浓度的数学模型是不现实的. 从过程控制的需要出发, 利用统计、实验和参数估计的方法建立泥浆浓度的模型是比较合理的选择.

疏浚作业过程中对泥浆浓度的控制主要通过横移系统对切削刀具的水平运动速度进行控制来实现. 泥浆输送系统驱动功率的变化对管道内泥浆浓度有一定影响. 由于泥泵驱动轴上的驱动转矩是可以检测的, 因此可以将上述因素归结为一种可以测量的扰动作用.

在考虑系统干扰的条件下可用如下的CARMA模型来描述疏浚系统的泥浆浓度过程:

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-d_1}B(z)u(k) + z^{-d_2}B_1(z^{-1})v(k) + \xi(k), \quad (1)$$

式中: $y(k)$ 为系统输出, 即 k 时刻的泥浆浓度;

$u(k)$ 为系统输入, 为 k 时刻横移液压系统电液比例阀的电压控制信号;

d_1, d_2 分别为控制通道和可测干扰通道的延时;

$v(k), \xi(k)$ 分别为 k 时刻可测和随机干扰;

z^{-1} 为单位后移算子;

$$A(z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{n_a} a_i z^{-i},$$

$$B(z^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_b} b_i z^{-i},$$

$$B_1(z^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_{b1}} b_{1i} z^{-i}.$$

将式(1)重写为如下的向量形式:

$$y(k) = \varphi^T(k-1)\theta + \xi(k). \quad (2)$$

式中 $\varphi(k)$ 和 θ 分别为数据和参数向量

$$\varphi(k-1) =$$

$$[-y(k-1), -y(k-2), \dots, -y(k-n_a),$$

$$u(k-d_1), u(k-d_1-1), \dots, u(k-d_1-n_b),$$

$$v(k-d_2), v(k-d_2-1), \dots, v(k-d_2-n_{b1})]^T,$$

$$\theta = [a_1, a_2, \dots, a_{n_a}, b_0, b_1, \dots,$$

$$b_{n_b}, b_{10}, b_{11}, \dots, b_{1n_{b1}}]^T.$$

以式(2)为基础, 利用最小二乘参数估计方法可以从试验数据中估计各项参数和系统阶数^[8]. 对从现场采集的10组(每组100个)实测数据用计算机进行离线处理. 确定在采样周期为0.5 s的情况下, 疏浚泥浆系统模型的阶次为 $n_a = 2, n_b = n_{b1} = 1$. 时延为 $d_1 = 10, d_2 = 6$; 泥浆浓度过程可用下式表示:

$$y(k) = -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) + b_0 u(k-10) + b_1 u(k-11) + b_{10} v(k-6) + b_{11} v(k-7) + \xi(k). \quad (3)$$

通过对在不同作业环境和作业条件下的测取的数据进行拟合, 发现系统模型的时延和阶次稳定, 但是系统参数向量变化比较明显. 以下是在疏浚作业系统两个不同的稳定工作点上辨识得到的数学模型:

$$\begin{aligned} y(k) = & 1.002y(k-1) - 0.0755y(k-2) + \\ & 0.0153u(k-10) + 0.0067u(k-11) + \\ & 0.04845v(k-6) - 0.0411v(k-7) + \xi(k), \\ y(k) = & 1.027y(k-1) - 0.1038y(k-2) + \\ & 0.0182u(k-10) + 0.0088u(k-11) + \\ & 0.0609v(k-6) - 0.0493v(k-7) + \xi(k). \end{aligned}$$

3 泥浆浓度的参数自校正前馈控制(Self-tuning feedforward control of slurry concentration)

从前面的分析中可以确定疏浚泥浆系统的数学模型是参数时变的,而且存在较大的时滞.采用传统的最优控制和直接反馈控制对这样的系统难以得到良好的控制效果.自校正控制通过自动辨识被控过程参数自动整定控制器,在参数时变的控制过程中有非常广泛的应用.在一般的参数自校正控制器设计过程中,多专注于被控过程前向通道的参数估计和补偿,使闭环控制系统某一性能指标极小化或满足期望的零极点要求^[9,10].对于泥浆浓度控制过程,外部可测量干扰对系统输出的作用比较明显,如果能借鉴传统的前馈控制方法对可测量干扰的影响作用加以补偿,对提高系统的控制性能会有好处.因此,本文采用自校正控制与前馈控制相结合的参数自校正前馈控制方法对泥浆浓度进行控制,控制方案如图2.

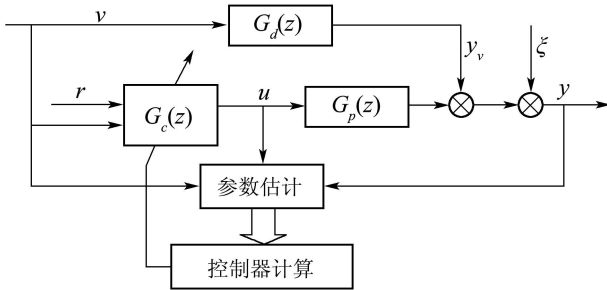


图2 参数自校正前馈控制

Fig. 2 Self-tuning feedforward control

图中: r 为给定的期望浓度; $G_p(z) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}z^{-d_1}$ 为泥浆系统前向通道传递函数; $G_d(z) = \frac{B_1(z^{-1})}{A(z^{-1})}z^{-d_2}$ 为可测扰动通道传递函数; $G_c(z)$ 为前馈补偿最小方差控制器.

与常规的最小方差控制器设计类似,本文假设系统(1)中的随机干扰 $\xi(k)$ 为一平稳随机过程,可以表示为一个由白噪声信号 $\varepsilon(k)$ 激励的最小相位系统的输出,即

$$\xi(k) = \frac{D(z^{-1})}{C(z^{-1})}\varepsilon(k) = \frac{1+d_1z^{-1}+\dots+d_mz^{-m}}{1+c_1z^{-1}+\dots+c_mz^{-m}}\varepsilon(k). \quad (4)$$

将不可测随机干扰通道的传递函数(4)进行分解:

$$\frac{D(z^{-1})}{C(z^{-1})} = K(z^{-1}) + \frac{P(z^{-1})}{C(z^{-1})}z^{-(d_1+1)}, \quad (5)$$

式中

$$\begin{cases} K(z^{-1}) = 1 + k_1z^{-1} + \dots + k_{d_1}z^{-d_1}, \\ P(z^{-1}) = p_0 + p_1z^{-1} + \dots + p_{m-1}z^{-(m-1)}. \end{cases} \quad (6)$$

由式(5)可得

$$D(z^{-1}) = C(z^{-1})K(z^{-1}) + P(z^{-1})z^{-(d_1+1)}, \quad (7)$$

第 (d_1+1) 步的随机干扰作用的预测可以写成

$$\begin{aligned} \xi(k+d_1+1|k) &= \frac{D(q^{-1})}{C(q^{-1})}\varepsilon(k+d_1+1) = \\ &= \frac{P(q^{-1})}{C(q^{-1})}\varepsilon(k) + K(q^{-1})\varepsilon(k+d_1+1). \end{aligned} \quad (8)$$

由于是时域方程,上式中复变量 z^{-1} 用时移算子 q^{-1} 代替,下同.式(8)中最后一项计算时需要知道 k 时刻以后的随机干扰量,不能计算,所以实际上是不可预测的,不应当包括在实际可预测随机干扰作用中.实际可预测的随机干扰作用为

$$\varepsilon(k+d_1+1|k) = \frac{P(q^{-1})}{C(q^{-1})}\varepsilon(k). \quad (9)$$

由于随机干扰通道为一最小相位系统,上式中 $\varepsilon(k)$ 可以用下式反算:

$$\begin{aligned} \varepsilon(k) &= \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})}\xi(k) = \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})}[y(k) - \\ &= \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})}q^{-d_1}u(k) - \frac{B_1(q^{-1})}{A(q^{-1})}q^{-d_2}v(k)], \end{aligned} \quad (10)$$

结合式(9)(10)可得

$$\begin{aligned} \xi(k+d_1+1|k) &= \\ &= \frac{P(q^{-1})}{D(q^{-1})}[y(k) - \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})}q^{-d_1}u(k) - \frac{B_1(q^{-1})}{A(q^{-1})}q^{-d_2}v(k)], \end{aligned} \quad (11)$$

此外,可测干扰通道第 d_1+1 步的干扰作用预测为

$$\begin{aligned} y_v(k+d_1+1|k) &= \frac{B_1(q^{-1})}{A(q^{-1})}q^{-d_2}v(k+d_1+1) = \\ &= \frac{B_1(q^{-1})}{A(q^{-1})}q^{d_1-d_2+1}v(k), \end{aligned} \quad (12)$$

对于疏浚系统有 $d_1 > d_2$,因此预测第 (d_1+1) 步的干扰作用需要用到 k 时刻以后的可测量干扰值.为了计算需要,在此假设 k 时刻以后的可测干扰输入与 $v(k)$ 相等即

$$v(k+i) = v(k), 0 < i \leq d_1 - d_2, \quad (13)$$

综合式(1)(11)(12)可得系统超前 d_1+1 步的预报输出表达式为

$$\begin{aligned}
y(k+d_1+1|k) &= \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})}qu(k) + y_v(k+d_1+1|k) + \\
\xi(k+d_1+1|k) &= \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})}qu(k) + \frac{B_1(q^{-1})}{A(q^{-1})}q^{d_1-d_2+1}v(k) + \\
&\frac{P(q^{-1})}{D(q^{-1})}[y(k) - \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})}q^{-d_1}u(k) - \\
&\frac{B_1(q^{-1})}{A(q^{-1})}q^{-d_2}v(k)] = \\
&\frac{P(q^{-1})}{D(q^{-1})}y(k) + \frac{C(q^{-1})K(q^{-1})qB(q^{-1})}{A(q^{-1})D(q^{-1})}u(k) + \\
&\frac{C(q^{-1})K(q^{-1})q^{d_1-d_2+1}B_1(q^{-1})}{A(q^{-1})D(q^{-1})}v(k). \quad (14)
\end{aligned}$$

取性能指标函数 J 为

$$J = E\{[y(k+d_1+1|k) - r(k+d_1+1)]^2 + \lambda u^2(k)\}, \quad (15)$$

式中 $r(k+d_1+1)$ 为 $k+d_1+1$ 时刻的期望浓度, $\lambda > 0$; J 对于 $u(k)$ 最小化可得

$$\begin{aligned}
\frac{\partial J}{\partial u(k)} &= 2[y(k+d_1+1|k) - r(k+d_1+1)] \\
&\frac{\partial y(k+d_1+1|k)}{\partial u} + 2\lambda u(k) = 0, \quad (16)
\end{aligned}$$

由于 $y_v(k+d_1+1|k)$ 和 $\xi(k+d_1+1|k)$ 为干扰作用, 与 $u(k)$ 无关, 而且 $A(z^{-1})$ 是首1的, 所以

$$\frac{\partial y(k+d_1+1|k)}{\partial u(k)} = \frac{\partial[\frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}qu(k)]}{\partial u(k)} = b_1,$$

从式(16)可以求出使式(15)最小化的前馈补偿最小方差控制律

$$\begin{aligned}
u(k) &= \frac{b_1}{\lambda}[r(k+d_1+1) - y(k+d_1+1|k)] = \\
&\frac{b_1}{\lambda}[r(k+d_1+1) - \frac{P(q^{-1})}{D(q^{-1})}y(k) - \\
&\frac{C(q^{-1})K(q^{-1})qB(q^{-1})}{A(q^{-1})D(q^{-1})}u(k) - \\
&\frac{C(q^{-1})K(q^{-1})q^{d_1-d_2+1}B_1(q^{-1})}{A(q^{-1})D(q^{-1})}v(k)],
\end{aligned}$$

将上式移项整理得

$$\begin{aligned}
u(k) &= \\
&[D(q^{-1})A(q^{-1})r(k+d_1+1) - P(q^{-1}) \\
&A(q^{-1})y(k) - q^{-d_1-d_2+1}C(q^{-1})K(q^{-1})B_1(q^{-1})
\end{aligned}$$

$$v(k)]/[C(q^{-1})K(q^{-1})qB(q^{-1}) + \frac{\lambda}{b_1}D(q^{-1})A(q^{-1})]. \quad (17)$$

控制律(17)在总体上使性能指标(15)接近于极小, 同时利用可测量干扰对系统进行补偿, 结合了自校正控制和前馈补偿控制的优点. 对自校正前馈控制的计算步骤总结如下:

1) 初始化模型参数和计算变量;

2) 测取数据 $y(k), v(k)$;

3) 利用文献[8]介绍的递推算法估计系统前向及干扰通道的模型参数 $\hat{A}(z^{-1}), \hat{B}(z^{-1}), \hat{B}_1(z^{-1}), \hat{C}(z^{-1}), \hat{D}(z^{-1})$;

4) 按式(5)计算 $P(z^{-1}), K(z^{-1})$;

5) 按式(17)计算控制量 $u(k)$;

6) $k \rightarrow k+1$, 返回2).

注1 在实际运算过程中, 参数向量的估计值 $\hat{\theta}(k)$ 是波动的, 为了平滑控制参数和控制量, 在参数估计过程中有必要引入如下形式的一阶低通滤波器对参数进行平滑:

$$\theta(k+1) = a\hat{\theta}(k+1) + (1-a)\theta(k), a > 0.$$

注2 由于各种误差的影响, 当估计的随机扰动通道的模型参数 $\hat{C}(z^{-1}), \hat{D}(z^{-1})$ 出现不稳定的零极点时, $\hat{C}(z^{-1}), \hat{D}(z^{-1})$ 需要沿用上一步的估计值.

4 实验验证(Experimental verification)

浙江大学与浙江省疏浚公司合作, 通过对一艘国产900型绞吸式挖泥船进行改造, 建立了以工控机和AD/DA控制卡(AD7214)为基础的泥浆浓度控制系统. 为了测试控制算法的有效性, 同时对本文介绍的控制算法和经典的PID控制算法进行了测试. PID控制器的参数按照扩充临界比例度法整定. 实验时系统的控制采样周期为0.5 s.

1) 泥浆浓度恒值控制实验.

根据疏浚作业的历史经验, 疏浚作业过程中80%以上的时间都期望泥浆浓度保持稳定, 泥浆浓度恒值控制是疏浚作业最重要的工作状态. 当设定期望浓度为25%时, 两种控制器的控制实验结果如图3、图4和图5显示了两次实验过程中可测干扰信号的变化过程. 由于两次实验在相同环境中先后进行, 系统的干扰作用可近似认为是相同的, 实验结果有一定的可比性. 从实验结果可以确定自校正前馈控制器的总体性能要优于PID控制器. 两者的均方误差($\sum e^2/n$)分别为1.7143和12.1078, 自校正前馈控制器的误差更小.

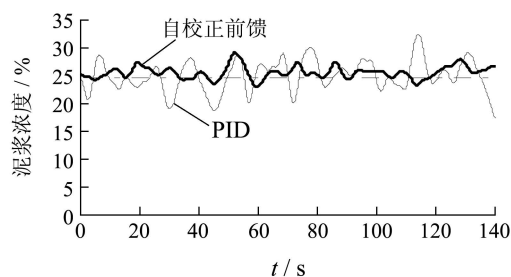


图3 泥浆浓度实验曲线

Fig. 3 Experiment curves of slurry concentration

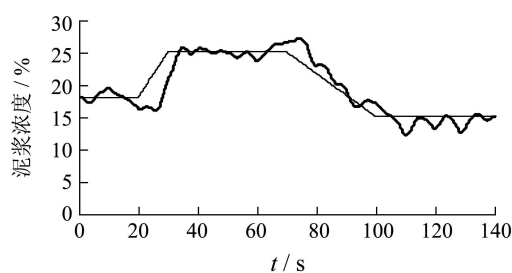


图6 泥浆浓度跟踪实验曲线

Fig. 6 Experiment curve of slurry concentration tracking

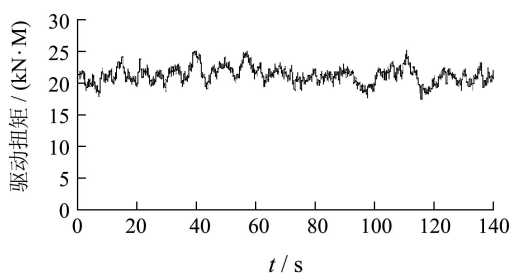


图4 PID控制器实验时输送系统驱动力矩

Fig. 4 Driving torque when experiment with PID controller

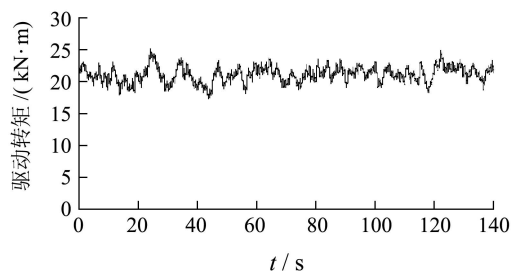


图5 自校正前馈控制器实验时输送系统驱动力矩

Fig. 5 Driving torque when experiment with self-tuning feedforward controller

2) 泥浆浓度跟踪实验.

泥浆浓度跟踪实验在手工作业过程中很难实现,但对自动化疏浚作业过程的启动、停止、排障等操作有一定的影响.从控制角度而言,浓度跟踪实验是检验系统控制性能非常有用的工具.图6表示了采用自校正前馈控制器时系统的输出,细实线表示期望的浓度变化轨迹.可以看出控制器基本能跟踪变化的期望浓度轨迹.

参考文献(References):

- [1] MIEDEMA S A. Automation of a cutter suction dredge[C] // *Proceedings of WODCON XVI*. Kuala Lumpur, Malaysia: [s.n.], 2001.
- [2] WANG Q F, TANG J Z. Research on expert system for dredging production optimization[C] // *Proceedings of the 6th World Congress on Control and Automation*. Dalian, China: [s.n.], 2006.
- [3] IHC. Efficient dredging: the next generation[J]. *Ports and Dredging*, IHC Holland, 2004.
- [4] MIEDEMA S A. The modelling of the swing winches of a cutter dredge in relation with simulators[C] // *Texas A & M 32nd Annual Dredging Seminar*. Warwick, Rhode Island, 2000.
- [5] KONING J de, MIEDEMA S A, ZWARTBOL A. Soil/Cutterhead Interaction under Wave Conditions[C] // *Proceedings of the WODCON X*. Singapore: [s.n.], 1983.
- [6] BURGER M den. Mixture forming in a cutterhead[C] // *CEDA Dredging Days*. Amsterdam: [s.n.], 1997.
- [7] BURGER M den, VLASBLOM W J, TALMON A M. Influence of Ladder Inclination Angle and Particle Size on Cutterhead Production[C] // *Proceedings WODCON*. Kuala Lumpur, Malaysia: [s.n.], 2001.
- [8] 王顺晃, 舒迪前. 智能控制系统及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [9] CLARK D W, GAWTHROP P J. Self-tuning controller[J]. *Proceedings of the IEE*, 1975, 122(9): 929 – 934.
- [10] ALLIDINA A Y. Generalized self-tuning controllers[J]. *Proceedings of the IEE*, 1980, 127(1): 13 – 18.

作者简介:

王庆丰 (1963—), 男, 现为浙江大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为电液控制工程、机电系统计算机控制, 主持了20多项国家、国防型号和省部级科研项目, 有7项成果通过国家及省部级科研鉴定, E-mail: tangjizime@163.com;

唐建中 (1973—), 男, 浙江大学博士研究生, 主要研究方向为机电系统的自动化控制;

闭治跃 (1973—), 男, 浙江大学博士研究生, 主要研究方向为疏浚作业泥浆输送系统的故障诊断与控制.