

# 绞吸式挖泥船疏浚动态特性与仿真系统设计

丁宏锴,倪福生

(河海大学机电工程学院,江苏常州 213022)

**摘要** 对绞吸式挖泥船疏浚动态特性的数学模型和仿真系统设计进行了探讨.采用面向对象的 Visual C++ 语言和 Microsoft Foundation Class 图形函数,仿真不同疏浚工况下的动态特性,有助于指导挖泥船的高效、安全运行.

**关键词** 数学模型;仿真;动态特性;绞吸式挖泥船

**中图分类号** :U616;TP391.9 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2002)06-0040-04

我国江河湖库众多,泥沙淤积问题严重,清淤疏浚是提高大江、大河、大湖防洪及通航能力行之有效的工程措施.在机械疏浚工程中,淤积泥沙或粘性土在绞刀或斗轮的切削作用下与水混合形成高浓度泥浆,并在泥泵的抽吸与推动下,通过各种途径输送到排泥场.由于疏浚土质、河床形态和作业过程的复杂性,严格地讲,疏浚工况是非恒定的.对于多泵和多船接力远距离输送系统,其清淤过程,特别是启动、停机过程的动态特性,将更为复杂,直接关系到挖泥船设备的安全高效运行.因此,研究泥泵管道系统的动态特性变化,仿真疏浚实际作业过程,对于船员掌握先进的疏浚设备,高效的作业方法,避免泥泵出现汽蚀乃至整船意外事故的发生,具有重要的意义.

以疏浚工程中应用较为广泛的绞吸式挖泥船为例,开发基于 Windows 9X/NT/2000 的挖泥船疏浚动态系统仿真数学模型,实时显示疏浚作业过程中挖泥船动态的俯视图、侧视图、横剖面图及各项性能参数,帮助船员对挖泥船进行有效的操作和控制,提高疏浚效率和安全性.

## 1 数学模型的建立

在实际的疏浚作业过程中,被输送泥浆的密度和特性随时间变化,导致泥泵进口真空度和出口压力随之发生变化.泵出口压力的变化一方面会引起泵轴扭矩的变化,另一方面又会使泥浆流速发生变化,这就意味着混合物会加速或减速,管道的阻力随之发生变化.泥泵在泥浆通过时,会对泥浆的密度和固体颗粒或泥团特性的变化迅速作出响应,而管道的阻力却是由贯穿整个管道的混合物流动决定的,对泥浆密度和固体颗粒或泥团特性的变化,响应相对缓慢,这就构成了一个复杂的动态系统<sup>[1,2]</sup>.

挖泥船疏浚过程包含土壤切削和泥浆输送两个过程,在实际的疏浚作业中,水流、风力和波浪等的作用也不容忽视.从动态特性研究的角度来看,泥浆输送过程是疏浚作业的核心部分.鉴于水下土壤切削涉及机械、岩土、流体力学等多门学科,切削机理和固液混合过程十分复杂,为简便起见,本文将切削过程作为泥浆输送过程的一个边界条件来处理.

### 1.1 泥泵柴油机机组旋转运动

挖泥船上一般采用柴油机直接驱动或通过减速箱驱动泥泵,在稳定状态下,柴油机输出的扭矩  $T_{de}$  等于泥泵做功所需的扭矩  $T_{in}$ .此时柴油机的角加速度为零.如果柴油机的扭矩负载大于额定全扭矩点(图 1 A 点)则转速下降,柴油机在满喷油量下工作,即 A-B 线.对大多数柴油机而言,随着转速的下降,燃油泵的喷油效率相对提高,而使扭矩略有增加.一般情况下,近似认为在 A-B 线工作范围内扭矩保持不变,也就是柴油机在所谓的恒扭矩区工作(即功率  $N$  与转速  $n$  之比  $N/n = \text{常数}$ ).随着泥泵流量进一步增加,柴油机的

转速持续下降,在工作点 B 处,没有足够的空气进行完全燃烧,此时会发生“堵转”,扭矩急速下降。B 点又称为“冒烟极限”点,此时的运转极为不利,将加剧柴油机的磨损。A - C 线是柴油机近似的恒速工作区。在此区域内,柴油机负荷下降时,转速略有上升,这是调速器控制的结果,转速的微小变化取决于调速器的调节特性。

上述特性说明,负载的变化导致柴油机转速变化,变化的快慢还取决于泥泵柴油机机组的惯性。所以,泥泵柴油机机组旋转运动的数学模型可表示为<sup>[2]</sup>

$$(I_{de} + I_{cp} + I_{gb}) \frac{d\omega}{dt} = T_{de} - T_{ht} \quad (1)$$

式中:  $I_{de}$ ——柴油机的转动惯量;  $I_{gb}$ ——齿轮箱的转动惯量;  $I_{cp}$ ——离心泥泵的转动惯量;  $T_{de}$ ——柴油机输出扭矩;  $T_{ht}$ ——离心泥泵负载所需扭矩;  $\omega$ ——角速度。

在稳定状态下,柴油机所输出的扭矩  $T_{de}$  等于水泵的负载扭矩  $T_{ht}$ , 柴油机处于稳定运行状态,角加速度为零。如果  $T_{de}$  大于  $T_{ht}$ , 柴油机转速增加; 反之, 柴油机减速。假定两扭矩之差近似地正比于实际角速度与额定角速度的差值<sup>[2]</sup>:

$$(T_{de} - T_{ht}) = K_f(\omega_{sp} - \omega) \quad (2)$$

式中:  $K_f$ ——比例系数;  $\omega_{sp}$ ——额定转速。式(2)代入式(1)得

$$(I_{de} + I_{gb} + I_{cp}) \frac{d\omega}{dt} = K_f(\omega_{sp} - \omega) \quad (3)$$

设  $(I_{de} + I_{gb} + I_{cp}) = I_t$ ,  $\tau_{de} = \frac{I_t}{K_f}$ , 则上述一阶系统的解为

$$\omega = \omega_0 + (\omega_{sp} - \omega_0)(1 - e^{-(t-t_0)/\tau_{de}}) \quad (4)$$

$\omega_0$  是初始时刻  $t = 0$  的角速度, 设时间步长为  $\Delta t$ , 则在时段  $n$  的角速度

$$\omega_n = \omega_{n-1} + (\omega_{sp} - \omega_{n-1})(1 - e^{-\Delta t/\tau_{de}}) \quad (5)$$

### 1.2 泥泵特性

泥泵特性包括扬程(压力)特性、功率特性、效率特性和汽蚀特性等。数值计算时,可根据模型特性换算得到原型特性,并根据原模型尺寸比,对换算结果加以修正。也可以将泥泵的实测性能曲线直接输入计算机。根据相似定律可近似求得泵在不同转速下的特性参数值。

### 1.3 管道阻力损失

浆体流动的阻力损失与浆体管道输送的流型密切相关。在浆体管道输送中,可能出现的流型变化主要有伪均质流(也称准均质流)、非均质悬浮流、滑动床与非均质悬浮流及定床跃移流 4 种,如图 2 所示,  $Y$  表示管道断面上某点距管底的距离,  $D$  为管道内径,  $V_c$  为管道的临界流速,  $V_H$  为非均匀流与伪均匀流间的过渡流速,  $V_d$  为定床跃移流与非均匀悬浮流间的过渡流速。在伪均质流中,管内浆体浓度大致呈均匀分布;非均质悬浮流中,虽然固体颗粒仍处于悬浮状态,但管中从上到下出现浓度梯度,下部浓度明显高于上部;滑动床与非均质悬浮流中,固体颗粒大部分集中于管道底部,并整体沿管壁滑动;在定床跃移这一流型中,管道下部已形成一定厚度的颗粒定床,定床上部浆体浓度较低。试验研究表明,流型不同,浆体管道输送的阻力变化规律也不一样。从图 3 可知,在伪均质流区,浆体的阻力损失为线性变化,且与清水的阻力损失曲线大致平行;进入非均质区,随流速减小,浆体的阻力损失逐渐增大,曲线开始上凹,中间出现一最低点。这一点处,浆体阻力损失最小,与此相应的流速就称为临界流速。当流速逐渐小于临界流速时,流型由动床转变为定床。图中  $V_m$  为浆体流速,  $\Delta P_m$  为管长  $\Delta L$  上的浆体压力损失。

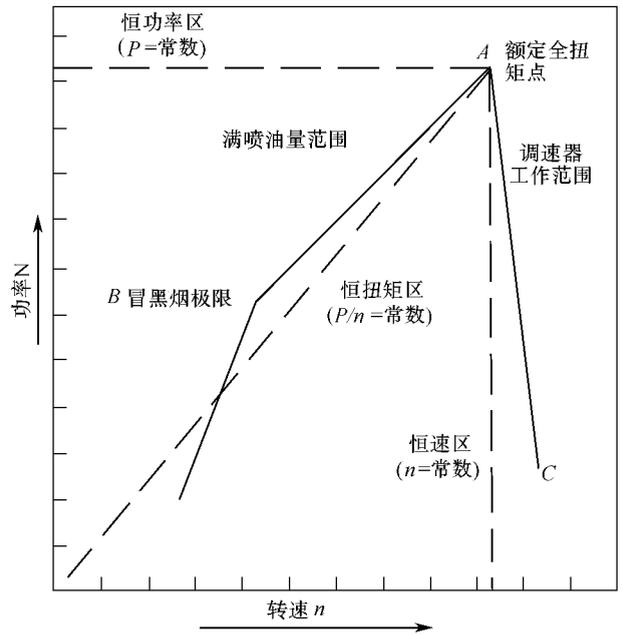


图 1 柴油机特性

Fig.1 Characteristics of diesel engine

浆体浓度分布	浆体的速度分布	浆体流型
		伪均质流 $V \gg V_c$ $V > V_H$
		非均质悬浮流 $V > V_H$ $V \gg V_c$
		滑动床与非均质悬浮流 $V > V_c$
		定床跃移流 $V < V_c$

图2 浆体输送流型

Fig.2 Flow patterns of slurry transport

浆体管道输送阻力损失的内在机理是极其复杂的.高浓度浆体中较细颗粒在一定流速下以悬移形式运动,靠水流紊动能支持颗粒,并以水流基本相同的速度运动.较粗颗粒在同一流速下,依靠颗粒离散力支持,以推移形式运动,这种离散力传递到底床后以摩擦阻力形式消耗掉,故推移运动直接消耗水流能量<sup>[3]</sup>.

### 1.4 泥泵管道能量平衡方程

泥泵管道系统应满足方程

$$\sum_{i=1}^n \Delta P_i = \Delta P_m + \sum_{j=1}^m \zeta_j \frac{1}{2} \rho_m V_m^2 + \rho_m g H_t + \rho_m L \frac{dV_m}{dt} \quad (6)$$

式中:  $\Delta P_i$ ——泥泵管道系统第  $i$  台泵的出口与进口的压力差;  $\zeta_j$ ——局部阻力件的阻力系数;  $H_t$ ——管道爬升高度;  $\rho_m$ ——浆体的密度;  $\frac{dV_m}{dt}$ ——浆体的加速度;  $L$ ——管道长度.公式(6)的左端为系统各台泥泵产生的压力总和;右端第1项为管道沿程阻力损失,第2项给出了管道所有弯管、阀门等附件的阻力损失,第3项为浆体势能的变化,第4项为浆体的惯性能.

## 2 仿真系统的设计

### 2.1 系统结构

系统仿真对象为挖泥船疏浚作业时的动态特性,人们感兴趣的特性参数有每台泥泵入口的真空度及出口压力,泥泵功率和效率,挖泥船的产量,管道流体的流速等.由所建立的数学模型,根据相互作用关系将各子系统的数学模型连接起来,从整体上反映系统的动态特性.为了满足实时仿真的需要,可以对数学模型作适当简化,以达到减少计算量的目的.

绞吸式挖泥船疏浚动态特性仿真系统建立在单PC机上.由用户给定初始的参数即可进行动态仿真.系统模块由挖泥船俯视图,侧视图,横剖面视图及特性参数视图等构成.在模拟过程中可以实时监视挖泥船各部分的工作状态,从而实现挖泥船高效、安全运行.

疏浚动态特性仿真系统的数据由数据库管理.系统驻留数据库已经保存有泥泵、柴油机、管道的基本特性参数,用户设定了模拟的初始参数后,系统调用数据库中当前模块的相关参数,由计算机处理得到系统所要求解的特性参数,由显示模块实现动态显示.每一次模拟的所有数据都保存在由用户创建的数据库中,用

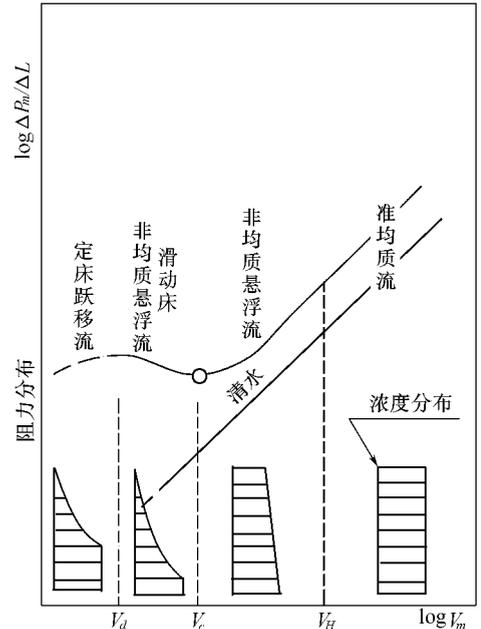


图3 流型与浆体阻力

Fig.3 Flow patterns vs. slurry flow resistance

户可以将显示的数据保存为多种文件格式,可实现数据查询、打印等.当然,在模拟过程中,用户可以灵活地与系统进行交互.图 4 为系统的数据流程图.

## 2.2 软件环境及函数类库的实现

软件环境采用 Windows 9 X/NT/2000 作为开发平台,与 Unix 系统相比,它具有软件资源丰富,价格便宜等优点,而且由于计算机处理速度和存储量的增加,它完全可以满足实时动态仿真的要求.开发工具采用 Visual C++ 和汇编语言,由于 C++ 面向对象的特点,它的数据结构丰富、可重用性强、易于扩展<sup>[4]</sup>.

数学模型的求解是仿真系统设计的关键.编制类型安全、重用性强,算法高效精确的函数类库,对于实时模拟疏浚作业至关重要.合理的层次结构、符合工程实际模型的函数类库将有助于系统的维护和软件升级.

## 3 结 语

绞吸式挖泥船疏浚动态特性仿真,使疏浚作业复杂的作业过程和参数变化过程可视化,便于挖泥船技术人员直观形象地理解和掌握挖泥船工作特性,合理地确定系统布置和施工方案,有效地避免设备低效率运行甚至意外事故的发生.

### 参考文献:

- [1] Ni F, Hu P, Wang Q. Numerical simulation of hydraulic transients in hydropower plant using safety membranes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1996, 122(6): 298 ~ 300.
- [2] Miedema S A. Modeling and simulation of the dynamic behavior of a pump/pipeline system[A]. 17th Annual Meeting & Technical Conference of the Western Dredging Association[C]. New Orleans: 1996.
- [3] 张兴荣. 管道水力输送[M]. 北京: 水利水电出版社, 1997. 54 ~ 67.
- [4] Richard C, Tom Archer. Visual C++ Bible[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001. 84 ~ 87.

## Dynamic behavior and simulation system design of a cutter suction dredger

DING Hong-kai, NI Fu-sheng

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Hohai Univ.  
Changzhou Branch, Changzhou 213022, China)

**Abstract:** A discussion is made on the mathematical model of the dynamic behavior of a cutter suction dredger and its simulation system design. The dynamic characteristics of dredging under different conditions can be simulated by use of Object-Oriented Programming(OOP) Visual C++ and graphic function of Microsoft Foundation Class(MFC), which are helpful to the efficient and safe operation of a cutter suction dredger.

**Key words:** mathematical model; simulation; dynamic behavior; cutter suction dredger

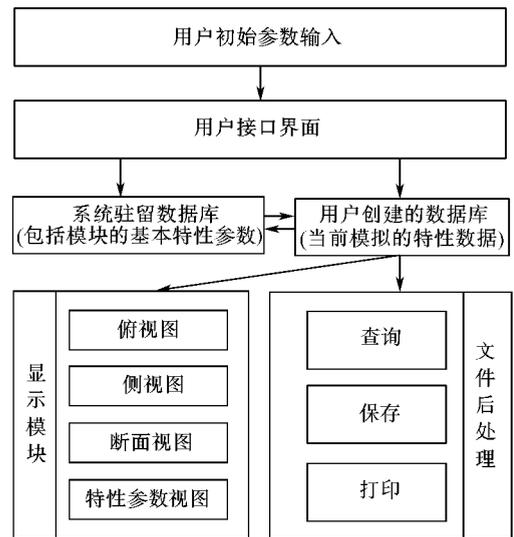


图 4 系统数据流程

Fig.4 Flow chart of system data