

疏浚管线阻力系数计算模型及典型工程应用

秦亮¹, 李金峰²

(中交天津航道局有限公司, 天津 300461)

摘要: 疏浚管路浆体阻力系数是水力式挖泥船输送受限施工工况产能预测的基础指标, 针对阻力系数的计算, 国内外公式繁多, 但均属于半经验半理论公式, 试验条件较为理想、公式适用性有一定限制, 往往无法有效指导实际生产施工。文中介绍了利用挖泥船施工历史数据进行浆体阻力系数推算的方法, 并开发阻力系数计算软件, 以绞吸船在天津临港长距离吹填施工为例进行了案例分析, 可为相似工况的产能预测项目提供依据。

关键词: 疏浚管线; 阻力系数; 密度分布; 平均密度; 平均阻力

中图分类号: U616; U615.353

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2018)09-0006-05

doi: 10.7640/zggwjs201809002

Calculation model of pipeline resistance coefficient and the application of typical engineering

QIN Liang¹, LI Jin-feng²

(CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: The resistance coefficient of dredging pipelines slurry is the basic index of hydraulic dredger's production prediction when transportation is limited. For the calculation of resistance coefficient, there are many formulas at home and abroad, but they all belong to the semi empirical and semi theoretical formula. The experimental conditions are ideal, and the applicability of the formulas is limited, which can't effectively guide the actual production and construction to some extent. We introduced the method to calculate the resistance coefficient of slurry using dredger construction history data, and developed the calculation software of slurry resistance coefficient. Taking the long distance dredging and filling construction of cutter suction dredger in Tianjin Port as an example, we carried out the cased analysis, which can provide the basis for production prediction project under similar working conditions.

Key words: dredging pipeline; resistance coefficient; density distribution; average density; mean resistance

0 引言

随着疏浚工程技术的发展, 土质复杂及长距离输送造成的输送生产受限工况越来越多。在这种情况下, 如何较为准确预测输送生产率, 指导船舶选型及施工组织安排是摆在疏浚技术人员面前的重要课题。

疏浚输送受限工况, 如要推求船舶生产能力, 必须获得输送管路阻力特性, 而获得管路阻力特

性必须要依据阻力系数进行求取, 常规阻力系数的求取依据土质特性, 可按照各种半经验半理论公式进行计算^[1], 但是现实应用中存在以下几种典型情况: 1) 此类公式往往与实际情况偏差较大, 或对于成球黏土、大粒径块石输送等特殊土质没有规范认可的计算公式; 2) 土质没有勘探资料, 或由于疏浚地勘指标与常规港工建筑需要指标不同, 地勘报告中疏浚相关特性指标不明, 无法判断适用的计算公式; 3) 土质为混合土, 疏浚施工过程中不可能分离开来施工, 计算公式适用性差。

利用历史施工数据进行阻力系数计算可避免以上问题, 田俊峰^[2]、田会静^[3]等人在这方面做出

收稿日期: 2017-12-05 修回日期: 2018-07-16

作者简介: 秦亮 (1979—), 男, 辽宁鞍山人, 博士后, 教授级高级工程师, 主要从事疏浚技术研究管理工作。

E-mail: 63223944@qq.com

研究, 在此基础上, 本文考虑时滞误差消除、平均密度求取等核心问题, 提出一种根据已有历史施工数据进行阻力系数的推求方法和计算模型, 该方法利用大量施工数据进行反分析, 并考虑到施工过程中, 流速、吸入密度实时变化情况, 及固体物与水流运动速度不同造成的滑移现象, 获得较为精确的管线沿程浆体密度分布图形, 在此基础上, 求取对应密度情况下的阻力系数, 达到指导工程实践的目的。

1 模型建立需要解决的核心问题

1.1 基本公式

水力式挖泥船输送生产率受限时, 一般是管线较长或土质成块等工况, 这种状态下局部阻力系数相对沿程阻力系数来说较小, 工程应用上可以忽略。因此, 船舶总排压与泥浆管路流速可以简化为下式^[4]:

$$P_m = \lambda_m \times \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2g} + (Z - X) \times \rho_m \times g \quad (1)$$

式中: P_m 为输送泥浆时船舶总排压, $m \cdot H_2O$; λ_m 为管路浆体阻力系数; X 为排压测量仪器所在位置高程, m ; Z 为管口中心点位置高程, m ; L 为折算标准钢管长度, m 。

其中折算标准钢管长度是在标准管径条件下, 通过排压测量仪器后的水上管、水下管、岸管长度和折算系数求得, 计算公式如下^[5-6]:

$$\text{标准钢管长度} = \text{岸管长度} + \text{浮管长度} \times \text{浮管折算系数} + \text{水下管长度} \times \text{水下管折算系数}$$

当岸管管口加缩口时, 或实际使用的水上管、水下管、岸管管径与标准管径不符时, 可通过表 1、表 2 查询确定等效管线长度。

表 1 缩口换算对应表

Table 1 Corresponding table on throat conversion

实际管径/mm	缩口直径/mm	换算管长/m
800	600	140
	550	220
	500	360
	450	580
	400	960
900	600	320
	550	480
	500	740
	450	1 170
	400	1 930

注: 换算管长是指缩口换算为实际管径时的等效管长。

表 2 管径换算对应表

Table 2 Corresponding table on pipe diameter conversion

实际管径/mm	标准管径/mm	换算倍数
700	800	1.95
800	900	1.80
900	1 000	1.70

注: 换算倍数是指实际管线管径换算为标准管径时, 实际管线长度需要乘以的倍数。

依据式(1), 在已知施工排压、流速、浆体密度、管径、管线长度、管口高程与排出传感器高程差的情况下可反求出阻力系数 λ_m 。

1.2 模型核心问题

图 1 为典型水力式挖泥船吹填施工过程流速、密度历时曲线。从图中可以看出流速、密度时刻都在变化过程中, 实际上计算阻力系数 λ_m 所需的排压也在时刻变化过程中, 式(1)中仅管径、管线长度、管口高程与排压传感器高程差等几何量为固定值。

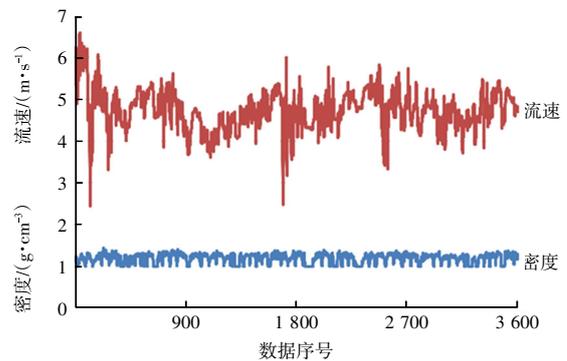


图 1 绞吸船施工过程流速、密度过程线

Fig. 1 Velocity & density line of CSD in construction process

因此, 密度 ρ_m 、流速 V 、排压 P 如何取值就成为阻力系数计算模型需要解决的核心问题。

从能量平衡原理可知, 管路的沿程阻力是管路内所有泥浆沿流道产生的总阻力, 对于密度 ρ_m 来说, 瞬时密度仅代表密度仪表断面处的泥浆瞬时密度, 不能代表管路内的平均泥浆密度, 因此, 在计算阻力系数时以往采用密度计记录的瞬时密度值参与公式计算的方式明显不合理。对于流速来说, 在封闭等径管路内任何一个断面的同一时刻流速是相同的。对于排压来说, 不考虑动态加速特性, 任何一个时刻排压与管路沿程总阻力是相同的。也就是说, 流速和排压可以使用瞬时值,

而密度必须考虑采用管路内的平均密度，才能形成合理的对应关系。同时，对于密度和排压来说，密度计和排压表安装位置之间的距离引起密度值相对排压值的时滞误差，需要采取适当方式消除。

因此，密度值时滞误差的消除，以及任意时刻管路内泥浆的平均密度的求取成为建立阻力系数计算模型的关键。在选取分析数据时，尽量选择流速、排压参数较为平稳的时间段，泥浆没有明显加速、减速状态，即保证排泥管内泥浆的流态稳定，否则流速、排压的取值可能会出现较大误差。

2 计算模型的建立

2.1 时滞误差消除

管路内泥浆平均密度计算之前要解决一个问题，即由于密度计与排压表安装位置之间的距离引起的密度时滞误差。

以绞吸船为例，绞吸船的 2 号泵排压表(后称排压表)与密度计一般安装在排泥管上，而排压表一般靠近 2 号舱内泵，密度计靠近船尾管，由于排压表与密度计的安装位置沿管路有一段距离，这样会导致密度值后效误差的引入，即通过排压表测得了某时刻的排压值，而这一时刻经过排压表断面的泥浆密度要延迟一段时间才能显示在密度计上，即密度计读数相对于排压表读数有时间上的滞后，滞后时间差称为时滞，这为管路平均密度的计算带来了后效误差，只有消除了时滞的影响才能准确地计算管路平均密度。

首先对流速、密度、排压数据使用插值的方法将相邻数据的时间间隔缩小至 Δt ，得到泥浆流速和密度的矩阵 V 、 D 。设绞吸船上排压表与密度计的距离为 l ，泥浆中土颗粒的滑移比 S_r 。第 i 个数据的序号用 $n_{i,1}$ 表示，它对应的时间为 $t_{i,1}$ ，泥浆密度为 $D(n_{i,1})$ ，排泥管中泥浆流速为 $V(n_{i,1})$ ，寻找 $n_{i,2}$ 满足：

$$\begin{cases} \sum_{k=n_{i,1}}^{n_{i,2}-1} \{[V(k)+V(k+1)]/2 \times \Delta t\} \times S_r < l \\ \sum_{k=n_{i,1}}^{n_{i,2}} \{[V(k)+V(k+1)]/2 \times \Delta t\} \times S_r \geq l \end{cases}$$

序号 $n_{i,1}$ 、 $n_{i,2}$ 在数据系列中对应的时间分别是 $t_{i,1}$ 、 $t_{i,2}$ ，设时间差矩阵 $\mathbf{delta_t}$ ，则有： $\mathbf{delta_t}(i) = (t_{i,2} - t_{i,1})$ ，将密度值 $D(n_{i,1})$ 前移时间差 $\mathbf{delta_t}(i)$ ，即 $D(n_{i,1}) = D(n_{i,2})$ 。即使用时间积分的思想消除了泥浆密度值的时滞误差。

2.2 平均密度求取

进行管路平均密度的求取，需要考虑管线长度和泥浆运移速度的变化，以及任一断面泥浆从排压表进口断面到管路出口总的泥浆运移规律。

设排压表至管路出口的距离分别为 L_1 、 L_2 、 L_3 ，管径分别为 D_1 、 D_2 、 D_3 ，流速表处管径为 D_1 ，流速矩阵为 v_1 ，管径 D_2 、 D_3 处流速为 $v_2 = (\frac{D_1}{D_2})^2 \times v_1$ 、 $v_3 = (\frac{D_1}{D_3})^2 \times v_1$ 。

泥浆密度为 den ，相邻数据的时间间隔为 ΔT ，泥浆中土颗粒的滑移比 S_r 。第 i 个数据的序号用 $n_{i,1}$ 表示，它对应的时间为 $t_{i,1}$ ，消除时滞误差后的泥浆密度为 $den(n_{i,1})$ ，排泥管中泥浆流速为 $v(n_{i,1})$ 。

寻找 $n_{i,3}$ 满足：

$$\begin{cases} \sum_{k=n_{i,1}}^{n_{i,3}-1} \{[v_3(k)+v_3(k+1)]/2 \times \Delta T\} \times S_r < L_3 \\ \sum_{k=n_{i,1}}^{n_{i,3}} \{[v_3(k)+v_3(k+1)]/2 \times \Delta T\} \times S_r \geq L_3 \end{cases}$$

寻找 $n_{i,4}$ 满足：

$$\begin{cases} \sum_{k=n_{i,3}}^{n_{i,4}-1} \{[v_2(k)+v_2(k+1)]/2 \times \Delta T\} \times S_r < L_2 \\ \sum_{k=n_{i,3}}^{n_{i,4}} \{[v_2(k)+v_2(k+1)]/2 \times \Delta T\} \times S_r \geq L_2 \end{cases}$$

寻找 $n_{i,5}$ 满足：

$$\begin{cases} \sum_{k=n_{i,4}}^{n_{i,5}-1} \{[v_1(k)+v_1(k+1)]/2 \times \Delta T\} \times S_r < L_1 \\ \sum_{k=n_{i,4}}^{n_{i,5}} \{[v_1(k)+v_1(k+1)]/2 \times \Delta T\} \times S_r \geq L_1 \end{cases}$$

定义排压表至管路出口的泥浆平均密度为 \overline{den} ，3 种管径管道内浆体质量分别为 M_1 、 M_2 、 M_3 ， $M = M_1 + M_2 + M_3$ ，管道总容积为：

$$VOL = (\pi \times D_1^2 \times L_1) / 4 + (\pi \times D_2^2 \times L_2) / 4 + (\pi \times D_3^2 \times L_3) / 4$$

$$M_1(n_{i,5}) = \sum_{k=n_{i,1}}^{n_{i,3}} [den(k) \times \frac{\pi \times D_3^2}{4} \times \frac{[v_3(k)+v_3(k+1)]}{2} \times S_r \times \Delta T]$$

$$M_2(n_{i,5}) = \sum_{k=n_{i,3}}^{n_{i,4}} [den(k) \times \frac{\pi \times D_2^2}{4} \times \frac{[v_2(k)+v_2(k+1)]}{2} \times S_r \times \Delta T]$$

$$M_3(n_{i,5}) = \sum_{k=n_{i,4}}^{n_{i,5}} [den(k) \times \frac{\pi \times D_1^2}{4} \times \frac{[v_1(k)+v_1(k+1)]}{2} \times S_r \times \Delta T]$$

平均密度的计算公式如下:

$$\overline{den}(n_{i,s}) = \frac{M_1(n_{i,s}) + M_{21}(n_{i,s}) + M_1(n_{i,s})}{VOL}$$

可根据以下公式计算泥浆密度为 $\overline{den}(n_{i,s})$ 时的管路阻力系数 λ_m 。

$$P_m = \lambda_m \times \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2g} + (Z-X) \times \rho_m \times g$$

3 软件编译及应用

基于以上阻力系数计算模型的基本原理, 编制阻力系数计算软件, 通过设定计算时间步长和其他边界条件、导入施工数据, 其中边界条件中考虑了泥沙颗粒滑移比、输送管路中不同管径等因素。

软件计算结果: 1) 显示出流速、平均密度与管阻系数之间的关系。2) 可以导出计算结果, 计算结果中记录了每 1 个时间步长的计算数据和结果。3) 可以显示任意时间点管路内的泥浆密度分

布, 直观反映泥浆密度分布的变化趋势。

4 工程实例分析

4.1 阻力系数分析

滨海型绞吸船天凤船 2010 年 12 月—2011 年 3 月在临港产业区 T9 施工区施工, 疏挖土质为淤泥质土, 原状土密度 1.74 g/cm³, 吹填管线管径 900 mm, 标准岸管吹距约 12.3 km, 生产效率达到 2 200 m³/h, 经现场试验土质在管线中输送的滑移比接近 1。

截取吹填施工数据约 6 h, 数据时间间隔 2 s, 排压表与密度表距离 50 m, 设定计算模型的时间步长 30 s, 滑移比 0.99。计算结果显示管路内泥浆平均密度 1.178 g/cm³, 流速表平均流速 4.84 m/s, 平均排压 1 412 kPa (14.12 bar), 阻力系数平均值为 0.021。流速、平均土颗粒浓度与阻力系数的关系如图 2 所示。典型计算结果如表 3 所示。

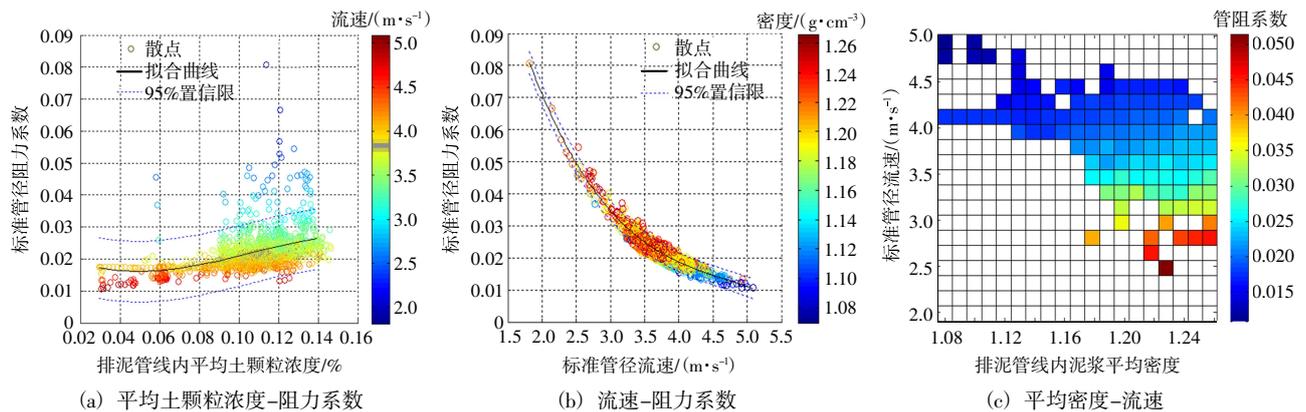


图 2 流速-平均土颗粒浓度-阻力系数关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of relationship between velocity & average density & resistance coefficient

表 3 典型计算结果(部分截取)

Table 3 Typical calculation results (partial interception)

序号	瞬时密度/(g·cm ⁻³)	排压/(10 kPa)	流速表流速/(m·s ⁻¹)	管径 1 流速/(m·s ⁻¹)	管径 1 泥沙流速/(m·s ⁻¹)	管径 2 流速/(m·s ⁻¹)	管径 2 泥沙流速/(m·s ⁻¹)	管径 3 流速/(m·s ⁻¹)	管径 3 泥沙流速/(m·s ⁻¹)	管内平均密度	瞬时阻力系数
1	1.32	154.0	4.60	4.60	4.55	3.63	3.60	3.63	3.60	1.25	0.025
2	1.22	148.1	4.83	4.83	4.78	3.82	3.78	3.82	3.78	1.25	0.022
3	1.21	137.7	4.69	4.69	4.64	3.71	3.67	3.71	3.67	1.25	0.021
4	1.33	142.7	4.67	4.67	4.62	3.69	3.65	3.69	3.65	1.25	0.022
5	1.28	146.4	4.66	4.66	4.61	3.68	3.65	3.68	3.65	1.25	0.023
6	1.28	148.6	4.50	4.50	4.46	3.56	3.52	3.56	3.52	1.25	0.025
7	1.26	149.0	4.57	4.57	4.52	3.61	3.57	3.61	3.57	1.25	0.024
8	1.22	146.5	4.51	4.51	4.46	3.56	3.53	3.56	3.53	1.25	0.025
9	1.36	149.4	4.63	4.63	4.58	3.66	3.62	3.66	3.62	1.25	0.024
10	1.32	150.9	4.79	4.79	4.74	3.78	3.75	3.78	3.75	1.25	0.022

从图 2 中可以看出, 阻力系数与流速相关性极强, 随着流速上升, 阻力系数单调下降并趋于

稳定, 可见长距离输送淤泥质土时, 开足泵转、保持高流速可以降低管线阻力, 同时尽量提高挖

掘浓度，可保持较高产量的同时燃油消耗较低。

需指出的是，疏浚输送施工的特性就是波动性，土质不均匀，泵效变化、杂物等都可能引起输送状态的变化，根据上述数据，可以设置不同置信区间确定偏保守或激进的回归曲线用于生产

预测。

典型时间点管路内沿程密度分布如图3所示。可以看出随着时间推移，管路内泥浆分布逐渐变化的情形，在管线堵管发生时，可以采取这种方法确定管线堵塞的大致位置，进行精确排堵。

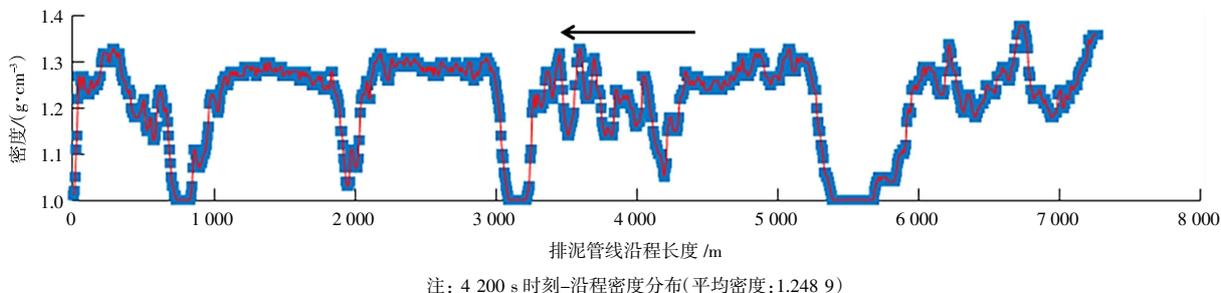


图3 典型时间点管路内沿程密度分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the distribution of density in pipeline at a certain time

4.2 长吹距生产率的预测

完成对特定土质组成的泥浆在不同流速、密度等工况情况下的阻力系数推算，推算结果可对长吹距输送受限情况下的生产效率进行预测。

图4为根据天凤船T9施工区施工数据推算的绞吸船900 mm管径、12 000 m输送距离输送密度1.1、1.2淤泥质土的生产率测算结果，两种工况下的泥浆流速均大于临界流速，滑移比按0.99计算，原状土密度按1.75计算，生产效率分别达到1 240 m³/h、2 076 m³/h。

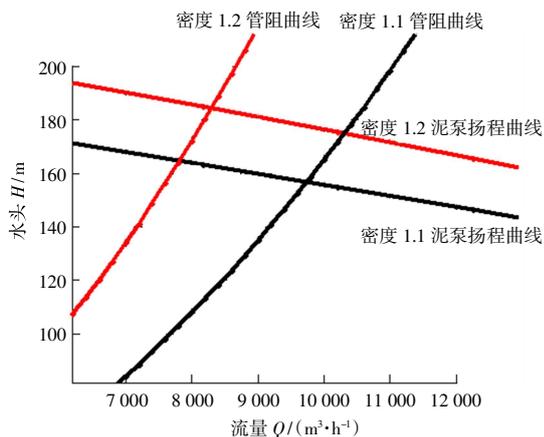


图4 泥泵管路工况点计算

Fig. 4 Calculation of working condition point of mud pump pipeline

5 结语

采用历史施工数据反分析求算管路阻力系数的方法可弥补理论计算方法适用范围不足的问题，最为简单的计算方式为对应瞬时点进行取值，然后大量数据取平均进行分析，但是该方法没有考

虑密度及排压时刻变动、管路内泥浆分布不均匀的情况，本方法考虑了密度时滞误差、流速及管路内平均密度实时变化、泥沙颗粒滑移等因素，给出了管路内平均密度计算的方法，以上数据计算过程均可通过计算机编码实现，计算结果更加准确可信。

基于本方法，可建立不同土质于不同管径管路内在不同浓度、流速情况下的阻力系数数据库，达到指导工程实践的目的。

参考文献:

- [1] JTS 181-5—2012, 疏浚与吹填工程设计规范[S]. JTS 181-5—2012, Design code for dredging and reclamation works [S].
- [2] 田俊峰, 顾明, 丁树友, 等. 绞吸挖泥船计算机辅助疏浚决策系统[J]. 水运工程, 2005(3): 20-23. TIAN Jun-feng, GU Ming, DING Shu-you, et al. Computer-aided dredging monitoring and decision-making system of cutter suction dredger[J]. Port & Waterway Engineering, 2005(3): 20-23.
- [3] 田会静, 王士伦, 秦亮, 等. 挖泥船输送系统计算分析软件研制[J]. 水运工程, 2017(8): 62-66. TIAN Hui-jing, WANG Shi-lun, QIN Liang, et al. Development of dredger transportation analysis system[J]. Port & Waterway Engineering, 2017(8): 62-66.
- [4] 绞吸挖泥船泥泵输泥计算手册[M]. 天津: 天津市航浚科技服务有限公司, 1996. Calculation manual for sludge transfer of cutter suction dredger[M]. Tianjin: Tianjin Navigation & Dredging Technology Service, 1996.
- [5] 疏浚技术[Z]. 天津: 天津航道局, 1997. Dredging technology[Z]. Tianjin: Tianjin Dredging Co., Ltd., 1997.
- [6] 疏浚工程手册[M]. 上海: 上海航道局, 1994. Dredging engineering manual[M]. Shanghai: Shanghai Dredging Co., Ltd., 1994.