



吹填施工中管道水力输送原理分析

王朋

(中交天航南方交通建设有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 吹填施工涉及到管道水力输送理论知识, 包括泵机、泥泵、管道组成的联合系统, 各子系统相互关联、相对复杂。疏浚管理人员理解难度较大, 并对水力输送过程中出现的问题分析不准确。本文针对上述问题, 采用能量守恒分析法, 对管道水力输送原理进行解析、推导经验公式以及实例分析。可以加深疏浚管理人员对原理及公式的理解, 更准确地预测吹填产能, 分析解决施工中的技术问题, 实现精细化管理以及规避相关风险。

关键词: 吹填; 管道; 水力输送; 原理解析

中图分类号: U 655.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S2-0049-04

Principle of hydraulic pipeline transport in hydraulic reclamation construction

WANG Peng

(CCCC TDC Southern Communication Construction Co. Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: Hydraulic reclamation construction involves theoretical knowledge of hydraulic pipeline transport, including that of the combined system composed of pumps, mud pumps, and pipelines, and the subsystems are interrelated and relatively complex. Consequently, the dredging management personnel find it difficult to obtain a proper understanding and analyze problems encountered in the process of hydraulic transport inaccurately. Regarding the above problems, this paper adopts energy conservation analysis to analyze the principle of hydraulic pipeline transport, derive empirical formulas, and analyze examples. Dredging management personnel can thereby deepen their understanding of the principle and formulas, predict the production capacity of hydraulic reclamation more accurately, analyze and solve technical problems in construction, achieve fine management, and avoid relevant risks.

Keywords: hydraulic reclamation; pipeline; hydraulic transport; principle analysis

常用疏浚船舶设备主要有绞吸船、耙吸船、抓斗船、铲斗船、链斗船。其中前二者涉及泥泵-管道输送原理, 即柴油机或电机、泥泵、管道内流体力学相关知识的组合, 相对复杂, 而且与施工过程中生产率的发挥密切相关。在施工过程中, 预测不同吹距、不同土质情况下的吹填产能; 同一土质、同一吹距下是否变管径以增加产能或防止堵管^[1]; 短管路情况下采取措施避免超负荷施工等, 均需要利用经验公式进行测算。因此疏浚吹填技术管理人员需要清晰地了解船舶管道输送原理, 预判和防范施工相关风险, 更好地指导现场施工。

1 能量守恒定律在流体中的表现形式(伯努利方程式)

1.1 水体的能量

水中压力能、重力势能、动能常互相转换。微元水体能量计算如下:

$$E_{\text{压}} = F_{\text{压}} \Delta L = (P \Delta A) (\Delta V / \Delta A) = P \Delta V \quad (1)$$

$$E_p = \Delta m g h \quad (2)$$

$$E_k = 1/2 \Delta m v^2 \quad (3)$$

式中: $F_{\text{压}}$ 为压力; P 为压强; ΔA 为微元水体压力作用面积; ΔV 为微元水体体积; Δm 为微元水体质量; ρ 为密度; g 为重力加速度; h 为相对高度; v 为速度。

收稿日期: 2022-07-11

作者简介: 王朋(1981—), 男, 高级工程师, 从事港口航道与海岸工程施工技术管理工作。

1.2 能量守恒定律,水体能量转换典型分析

根据能量守恒定律,在无能量增加、不考虑阻力损失的情况下,图 1 中 1-1 断面 1 点与 2-2 断面 2 点满足下列方程:

$$P_1\Delta V + \Delta mgh_1 + 1/2\Delta mv_1^2 = P_2\Delta V + \Delta mgh_2 + 1/2\Delta mv_2^2 \quad (4)$$

式中: P_1 、 h_1 、 v_1 分别为 1 点的压强、相对高度、流速; P_2 、 h_2 、 v_2 分别为 2 点的压强、相对高度、流速。

两边同除以微元水体体积 ΔV , 得:

$$P_1 + \rho gh_1 + 1/2\rho v_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + 1/2\rho v_2^2 \quad (5)$$

式中: 密度 $\rho = \Delta m / \Delta V$ 。单位体积压强能、单位体积重力势能、单位体积动能单位均为 $(N/m^2) \cdot m^3 = Nm$, 与能量量纲一致。物理意义为单位体积流体的压强能、重力势能以及动能之和等于常量。

考虑出水管的阻力,沿程摩阻耗能为 $(l/D)\lambda_w \cdot 1/2\rho v^2$, 与管线长度 l 、管径 D 、沿程摩阻系数 λ_w 以及速度 v 相关; 局部摩阻耗能为 $\zeta_w \cdot 1/2\rho v^2$, 与局部摩阻系数 ζ_w 以及速度 v 相关。则式(5)变为:

$$P_1 + \rho gh_1 + 1/2\rho v_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + 1/2\rho v_2^2 + (l/D)\lambda_w \cdot 1/2\rho v^2 + \sum \zeta_w \cdot 1/2\rho v^2 \quad (6)$$

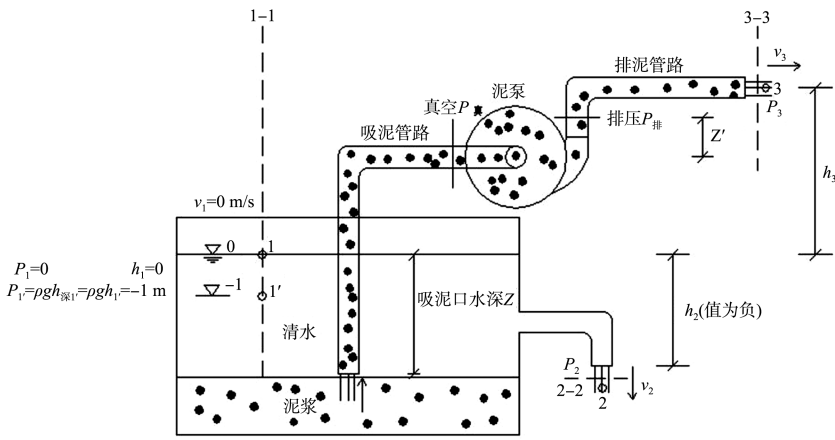


图 1 水体能量分析

1.3 泥泵-管道作用下泥浆能量转换分析

如图 1 吸泥口到 3-3 断面的能量增加耗用情况包括: 泥泵做功提供能量为 $P_{排} - P_{真} + \rho_m gZ'$, 管道沿程摩阻耗能为 $(l/D)\lambda_m \cdot 1/2\rho_m v^2$, 局部摩阻耗能为 $\sum \zeta_m \cdot 1/2\rho_m v^2$, 压能变化为 $-\rho_w gZ$, 重力势能变化为 $\rho_m gZ + \rho_m gh_3$, 动能变化为 $1/2\rho_m v_3^2$ 。其中, $P_{排}$ 为排压表排压、 $P_{真}$ 为真空表真空(为负值)、 ρ_m 为泥浆密度、 Z' 为真空表排压表高度差、 λ_m 为泥浆沿程摩阻系数、 ζ_m 为泥浆局部摩阻系数、 Z 为吸泥口至水面高度(挖深)、 h_3 为水面到排泥口高度(排高)、 ρ_w 为水密度、 v_3 为出口流速。根据能量守恒定律得:

$$(P_{排} - P_{真} + \rho_m gZ') = (l/D)\lambda_m \cdot 1/2\rho_m v^2 + \sum \zeta_m \cdot 1/2\rho_m v^2 + (\rho_m gZ - \rho_w gZ + \rho_m gh_3) + 1/2\rho_m v_3^2 \quad (7)$$

将能量量纲转化为疏浚常用的水头 H 量纲, 等式两边同时除以 g 得:

$$H = (l/D)\lambda_m \cdot 1/2\rho_m v^2/g + \sum \zeta_m \cdot 1/2\rho_m v^2/g + (\rho_m Z - \rho_w Z + \rho_m h_3) + 1/2\rho_m v_3^2/g \quad (8)$$

式(8)中, 左侧为泥泵扬程, 右侧为泥浆管路总耗水头。根据右侧方程绘制出不同土质、泥浆浓度、管径、管线长度以及不同流速下的管路流量-扬程特性曲线, 见图 2。沿程摩阻系数 λ_m 及局部摩阻系数 ζ_w 可经过试验统计确定。

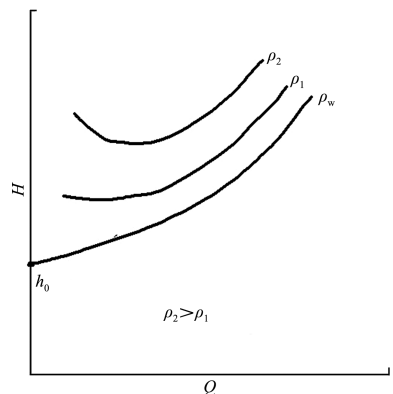


图 2 管路 Q-H 特性曲线

2 泥泵特性

泥泵是一种输送泥浆的离心泵。其基本性能参数包括：流量 Q (m^3/h)、扬程 H (m)、轴功率 N_p 、水功率 N_u 、效率 η 、转速 n 、比转速 n_s 、真空度 U 和需要的汽蚀余量 (NPSH_r) (或允许吸入真空度,或允许吸上高度)。泥泵性能参数在离心泵外还有允许通过最大球径 $f^{[2]}$ 。

2.1 泥泵清水流量扬程特性

泥泵流量扬程特性可以由 $Q-H$ 特性曲线反映,不同转速下具有不同的曲线。

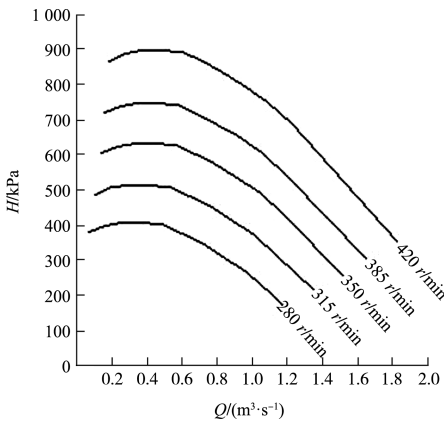


图 3 泥泵清水 $Q-H$ 特性曲线

由图 3 可知,当泥泵转速不变时扬程随流量的增大呈减小趋势;在相同流量下,转速高者扬程大;在相同扬程下,转速高者流量大。

流量增加时,扬程下降较多的曲线称为陡降型,相反则称为平坦型。对于疏浚施工,宜用陡降型泥泵。因为当浓度增大、流量减小时,根据泥泵特性,扬程可较大幅度地增加,对泥浆提供较大的推动力,有利于管道中泥浆输送和减少堵塞的危险^[3]。

2.2 泥泵泥浆流量扬程特性

泥浆越接近均匀的单相介质,扬程功率增加越接近泥浆密度的倍数,效率降低越小;泥浆越接近不均匀的两相介质,扬程增加越少或下降越多,功率增加越多,效率降低越多,见图 4。

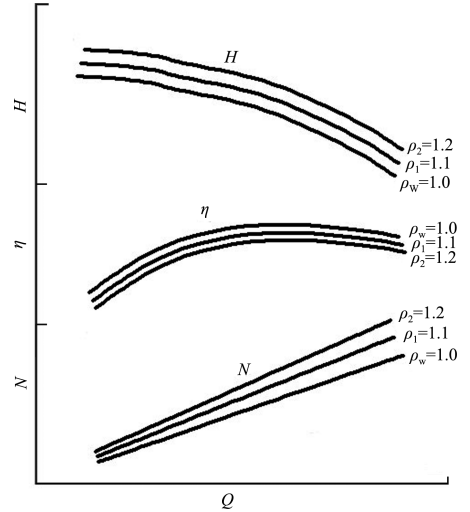


图 4 泥泵泥浆 $Q-H$ 、 $Q-\eta$ 、 $Q-N$ 特性曲线

3 泥泵—管道输送工况点

泥泵工况指泥泵的工作状态,决定了挖泥生产率及比油耗率,单位为 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot 1\,000\text{ m})$ 。

如图 5,泥浆在输送过程中,假设泥浆的土质条件、密度等不发生变化,流量大于 Q_m 时,因管路所需水头大于泥泵所产生水头,管路中能量不足以维持流量,流量下降;流量小于 Q_m 时,因泥泵所产生水头超过管路所需水头,管路中能量过剩,流量上升;流量等于 Q_m 时,管路所需水头与泥泵所产生水头相等,泥泵可维持平衡运转,图中 K 点即为泥泵的工况点^[4]。

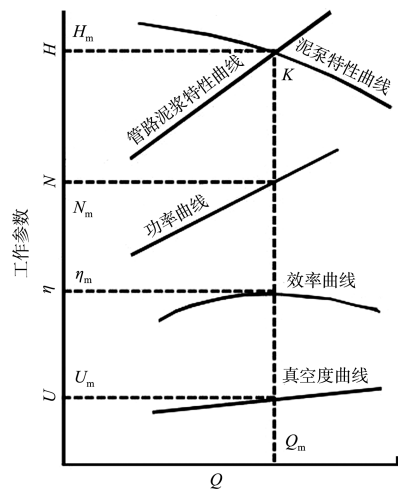


图 5 泥泵泥浆工况点

在施工输送过程中绞吸船的管线长度、排高、泥浆密度、泥浆土质条件等常发生变化，泥泵工况点也随着发生变化。因此在实际施工中，泥泵工况点是一个变量，可根据施工条件限制以及泥浆浓度控制情况等确定泥泵工况范围，进而测算生产效率。

4 短管路条件下超负荷原因分析及解决措施

图6工况点1~3中， H 降低的幅度较 Q 增加的幅度小，所以泥泵水功率 QH 依次增加，短管路所需功率最大。当定速柴油机转速恒定、管路过短时，为达到所需功率，可通过增加柴油机进油量以增加负荷。但是由于转速不变时进气量也不变，过多的进油量会使缸内燃烧不充分，导致冒黑烟，严重影响设备安全。性能参数 α 为空气余量系数； N_e 为离心泵轴功率； g_e 为比油耗率； η_e 为离心泵轴效率； P_e 为负荷，见图7。

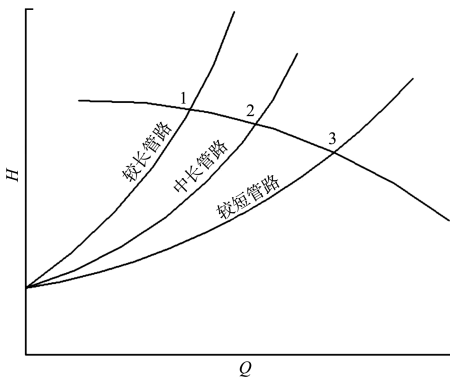


图6 泥泵不同管路工况点

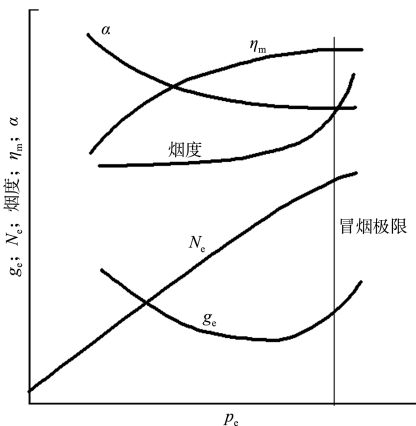


图7 泥泵短管路超负荷分析

如图8，工况点4为加缩口后的工况，泥泵特性没有改变，管路特性曲线变陡，交于工况点4。根据泥泵特性，流量比扬程对功率的影响更大。因此流量减小扬程增大，功率减小。在泥泵转速不变的情况下负荷下降，保证了正常运转。工况点5为加浓度后的工况，泥泵特性及管路特性均上抬，交于工况点5。根据特性曲线，虽然扬程和浓度增大但流量减小，功率减小，在泥泵转速不变的情况下负荷下降，保证了正常运转。

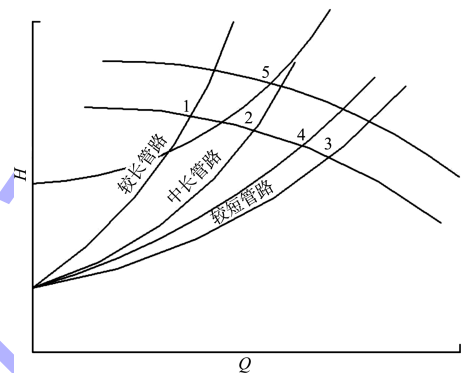


图8 短管路下改善工况点

5 生产率测算

疏浚工程施工前可参照《疏浚与吹填工程设计规范》相关章节，根据泥泵-管路特性，结合土质、管线情况，考虑气蚀、恒转矩以及恒功率等条件，确定泥泵工况点范围和测算生产率^[5]。

6 结论

1) 通过能量守恒定律对泥泵管道输送能转换过程进行分析，结合离心泵特性、管道特性，理解泥泵、管道输送的原理，建立泥泵管道输送泥浆工况点计算模型，提前测算绞吸船输送不同土质、不同吹距以及不同管径等的产能情况。

2) 通过疏浚、吹填施工实践及理论分析，为施工提供理论指导；做好生产能力预判，为项目管理决策提供依据；把握施工跟踪统计分析关键点，不断积累验证及提高。