

· 施 工 ·



挖泥船泥浆输送系统的工作范围和施工优化

李铭志¹, 何炎平¹, 诸葛玮², 黄超¹

(1. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240; 2. 中港疏浚有限公司, 上海 200120)

摘要: 针对疏浚作业中输送系统工作效率和经济性随工况变化会出现较大波动的问题, 分析土质、排距、管径、输送浓度等因素的可施工范围及临界流速、汽蚀余量对系统工作范围的限制, 研究输送浓度变化引起的系统产量和效率变化规律, 并就典型案例给出了特定工作条件下优化施工的方法, 供施工人员参考。

关键词: 泥沙; 管道输送; 工作范围; 优化施工

中图分类号: U 616⁺.21

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)04-0201-04

Working range and operation optimal of slurry transportation system in dredger

LI Ming-zhi¹, HE Yan-ping¹, ZHUGE Wei², HUANG Chao¹

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. CHEC Dredging Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: In view of the sharp fluctuation in efficiency and economy of slurry transportation by pipeline, we analyze the ranges of particle size, transportation distance, pipe diameter, delivery concentration and the restriction of critical velocity and net positive suction head (NPSH), study the change laws of efficiency and economy of slurry transportation system caused by the change of transportation concentration, and propose the optimal construction method under specific working condition.

Keywords: silt; pipeline transportation; working range; operation optimal

从19世纪第一批配离心泵的吸泥船诞生以来, 这种可以不间断工作的泥沙输送方式以其高效、经济和节能的优点得到了大力推广, 到20世纪50年代后期, 泥沙管道输送已经占据了疏浚工程的大部分市场。但是, 严格的说, 无论是高效还是经济, 都需建立在科学的系统设计基础之上, 也要建立在恰当的操纵运作基础之上。

泥沙管道输送系统是个非常庞大繁杂的系统, 包含诸多机械设备, 涉及数个学术领域。这个庞大的系统不单因为符合“木桶理论”会因受到某个因素的限制而大大降低其经济性, 而且其经济性会随输送介质(尤其指颗粒粒径和输送浓度)的变化或者输送设备的匹配运行而出现较大波动。

在系统设计之初, 一般都会针对目标工程或者目标工况(典型工况)进行优化设计, 并兼顾其更大的可工作范围, 使得系统能够在典型工况时效率最高、经济性最好, 也能够更加广泛的工况条件下施工。那么, 如何在一般工况下达到最高效率和最小能耗, 是施工人员一直以来探索的问题。

本文将详细介绍土质、排距、输送浓度、临界流速及汽蚀余量决定的系统工作范围, 分析输送浓度变化引起的系统产量和效率变化规律。

1 工作范围

每个泥浆管道输送系统都有它相应的可工作

收稿日期: 2014-06-26

作者简介: 李铭志(1983—), 男, 工程师, 从事船舶设计及研究。

范围,包括可输送的颗粒粒径范围、排距范围、输送管路管径范围及输送浓度范围等,颗粒粒径、排距等因素都是相互影响和制约的^[1]。

1.1 颗粒粒径的范围

在排距、输送管径和输送浓度等参数保持不变的情况下,随着输送颗粒粒径的增大,输送系统的管路水头损失会逐渐增大,泥泵可提供的水头则随之减小。图 1 显示某挖泥船输送细沙、中沙和粗沙时的水头变化情况。

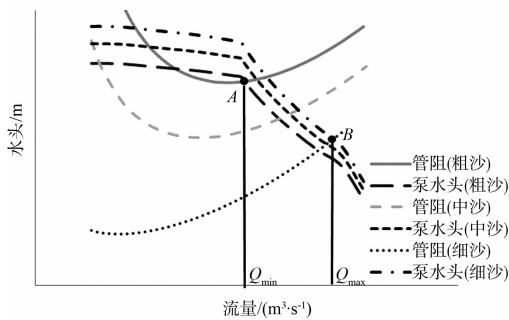


图 1 颗粒粒径的范围

图 1 所示输送系统输送粗沙时工作在 A 点,此时系统水头损失较高,泥泵工作在额定功率和额定转速附近,效率较高,同时,泥泵驱动系统的效率也通常较高。如果此时沙颗粒继续增大,管路水头损失会继续增大,而泵能够提供的水头则随之减小,可能需要降低泥浆浓度来维持系统运行。因此,输送系统工作在 A 点时要根据输送泥沙颗粒的变化范围设定适当的安全余量,否则系统容易在颗粒粒径或者浓度变化的时候堵管。从图 1 可以看出,系统输送细沙时工作在 B 点,此时由于管路水头损失较小,流速较大,泥泵驱动无法提供足够的功率,因此采用降转速工作。此时系统已因驱动泥泵的柴油机效率较低而不太经济,如果泥沙颗粒更小,流量将进一步增大,驱动柴油机需要继续降速,柴油机会因为到达其冒烟区而无法正常工作,可提高泥浆的浓度来增加产量和改善柴油机工作状况,如为多泵串联作业,则还可减少工作的泥泵数量。可见,系统在此排距、输送管径和输送浓度等参数保持不变的情况下,图 1 所示系统可输送的粒径范围为细沙到粗沙对应的粒径范围。

1.2 输送距离的范围

在颗粒粒径、输送浓度等因素确定的条件下,系统的输送距离(排距)也存在一个范围。显然,管路水头损失会随排距的增加而成比例增加。图 2 显示某挖泥船在特定工况下随排距不同的水头损失情况。

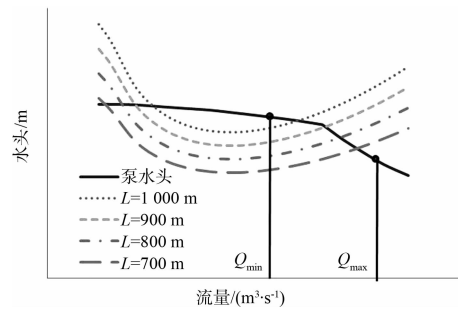


图 2 输送距离的范围

系统排距的上限由泵能够提供的水头决定,即最长排距工作点泵水头等于管水头损失,并且保证在流速降低时泵水头相对于管路水头损失有一定安全余量、工作点流量相对于临界流速有一定安全余量。其下限由泥泵驱动冒烟点或者最低工作转速决定。

1.3 输送浓度的范围

随着输送浓度的增大,运行在额定转速、功率富裕的泥泵提供的水头将持续增大,泥管水头损失也随之增大,见图 3。

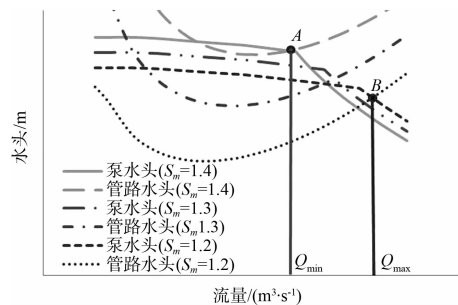


图 3 输送浓度的范围

图 3 所示系统在输送比重为 1.2 的浆体时,工作在点 B,此时流量较大、浓度较低、产量相对较小。如果浓度继续降低,随着管路水头损失的减小,工作点流量随之增大,但系统产量和经济性都会随之降低。随着输送浓度的提高,泵水头和管路水头损失都随之增大,工作点向上移动

到点 A, 此时流量较小, 浓度较大, 产量较高, 经济性也相对较好。如果此时继续提高输送浓度, 系统可能会因为工作在管路阻力最小点附近, 不能提供足够的安全余量而不稳定。

1.4 管路管径的范围

如果颗粒粒径、输送浓度等因素不变, 在同一输送速度的时候, 随着管路管径的增加, 工作点流量显然会相应增大, 产量因此大幅提高, 图 4 显示不同管径在输送同一浓度土质时的管路水头损失情况。

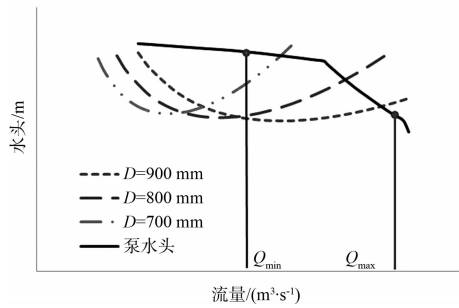


图 4 管路管径的范围

系统管径的下限由泵驱动设备在恒速区的工作范围决定, 同时要考虑临界流速的限制和施工效率。其上限由泥泵驱动冒烟点或者最低工作转速决定。为了避免管阻过低导致驱动柴油机长时间运行在冒烟区, 通常在管路系统增加缩口, 以增加系统阻力, 使柴油机运行在恒转矩区。

1.5 临界流速和汽蚀余量的限制

除上述几种因素限制了系统的可施工范围之外, 系统还受到两个非常重要因素的限制, 一个是临界流速, 一个是汽蚀余量。这两个因素和泥管管径、颗粒粒径、输送浓度等诸多因素有关。

关于临界流速有很多种计算方法, 但是涉及的因素和各因素的影响趋势基本是一致的。式(1)是长期应用于疏浚工程计算的 Durand 公式^[2]:

$$v_k = K_D \sqrt{2gD(S-1)} \quad (1)$$

式中: D 为管道直径; g 为重力加速度; S 为颗粒比重; 而 K_D 是 Schiller 等在 Durand 公式的基础上, 基于中值粒径 d_{50} 给出的修正系数^[3]:

$$K_D = 1.3C^{0.125}(1 - e^{-6.9d_{50}}) \quad (2)$$

式中: C 为浆体体积浓度。

从式(2)可以看出, 随着管径的增大, 临界流速增大; 体积浓度越高, 临界流速越大 (当体积浓度增大到一定程度时, 由于颗粒之间的相互作用加剧, 即颗粒脉动速度增大, 临界流速会相对减小, 但是工程作业中达不到这么大的浓度, 因此不考虑这种情况); 中值粒径 d_{50} 越大, 临界流速越大 (当颗粒由粗细不均匀的颗粒组成时, 不同粒径的颗粒之间相互作用, 细颗粒相对增大了浆体的黏性, 因此临界流速会相对较小)。

输送作业中, 泥泵的有效汽蚀余量 $NPSHA$ 必须大于其需要的汽蚀余量 $NPSHR$ 。否则, 泵容易被汽蚀。 $NPSHR$ 由泵本身的设计决定, $NPSHA$ 由式(3)^[4]计算:

$$NPSHA = a - (\alpha + \xi) \frac{v_z^2}{2g} \cdot S_m - \frac{L_z}{100} \cdot w_{100} - (z - a)(S_m - 1) + \frac{(P_0 - P_{air})}{\rho_w g} \quad (3)$$

式中: a 为泵安装高度; α 、 ξ 分别为管道吸口和其它局部损失系数; v_z 为吸口段管道流速; L_z 为吸口段管道长; w_{100} 为吸口段管道每 100 m 水头损失; z 为吸口深 (挖深); P_0 为大气压强; P_{air} 为水气化压强; S_m 为泥浆比重。

图 5 显示某挖泥船输送特定土质时的临界流速和汽蚀余量限制流速。

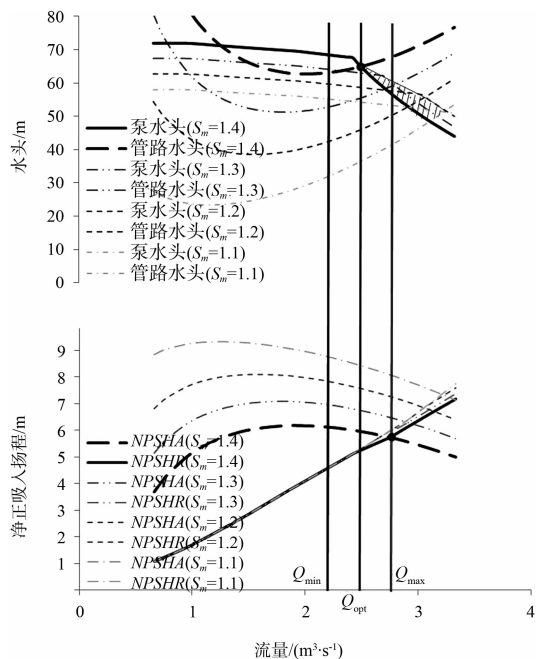


图 5 临界流速和汽蚀余量

从图 5 可以看出,随着泥浆浓度的增加,由于管阻的增加,泥泵实际汽蚀余量减小,而泥泵所需汽蚀余量因工作点流量的减小而减小得相对很少,因此汽蚀限制的流速将进一步减小。

2 产量和经济性分析

在泥泵恒转矩的工作区域内,系统产量和经济性将随排距缩短、泥管管径的增大和输送浓度提高而迅速提高。在恒转速区域,随着管阻的增加流速减小要比恒转矩区快,因此其产量和经济性随之增加的幅度要比恒转矩区小。当工作点管阻随工作点流量的变化速度等于浓度的变化速度时,产量达到最大,之后将随之减小,见图 6。

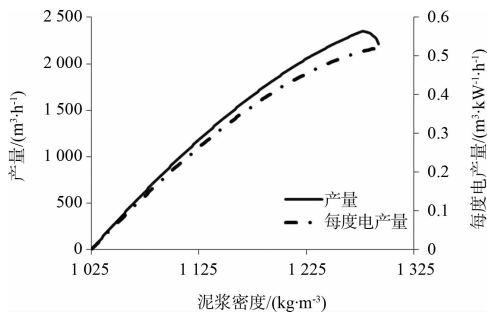


图 6 输送浓度与产量、每度电产量的关系

从图 6 可以看出,当输送浓度达到一定程度后,随着浓度的上升,造成系统流速的大幅下降,以至于流速的下降速度大于体积浓度的上升速度,因此系统产量开始下降。图 6 所示每度电产量的最大值出现的时机比产量最大值较晚,但此现象并不能说明系统的最经济工作点浓度大于最大产量工作点浓度。在柴油机驱动泥泵的系统情况恰恰相反,最经济工作点浓度小于最大产量工作点浓度,因为驱动柴油机的最大效率出现在额定功率、额定转速点(最大产量点)之前。图 7 显示输送流量和产量、每度电产量、体积浓度的关系曲线。

3 匹配运行

以上分析都是固定搭配的基础上分析的,事实上,一个疏浚系统通常都可以有多泵串联、高低速搭配等多种运行方式。

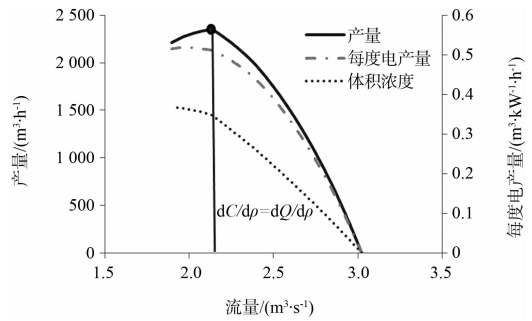


图 7 输送流量与产量、每度电产量、体积浓度关系

对于驱动设备具有恒扭矩功能,并且运行在高速恒扭矩区的泥泵,其功率为:

$$P_w = P_N (n_w/n_N) \tag{4}$$

式中: P_w 为泥泵消耗功率; P_N 为泥泵额定功率; n_w 为泥泵工作转速; n_N 为泥泵额定转速。

当工作速度 n_w 降低到等于低速额定速度 n_L 时,从式(4)可得:

$$(P_N - P_w) / P_N = (n_N - n_L) / n_N \tag{5}$$

式(5)说明,如果驱动端在恒转速区工作点和恒扭矩工作点的效率相当,当驱动低速运行泥泵的柴油机功率富裕比 $(P_N - P_w) / P_N$ 与泥泵高低速差比 $(n_N - n_L) / n_N$ 相等的时候,宜采用高速运行,因为此时虽然高低速运行的效率和产量相当,但是在恒扭矩区域运行更加稳定。例如某船泥泵高速为 340 r/min,低速为 278 r/min,泵额定功率为 2 750 kW,由于排距的加大和输送浓度的提高,泵只能运行在恒转速 278 r/min、2 250 kW 时,即可切换为 340 r/min 恒扭矩运行(图 8)。

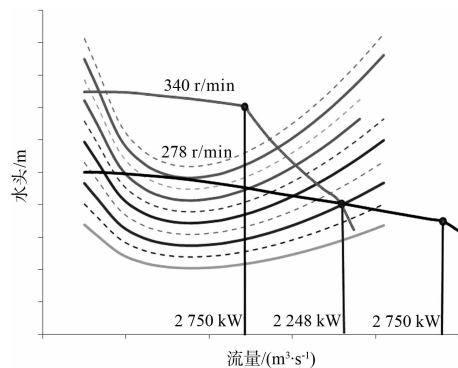


图 8 绞吸挖泥船双速泥泵运行曲线

对于驱动设备没有恒扭矩功能的泥泵,由于驱动设备能提供的功率一般比恒扭矩时的功率要高,因此宜更早转换为高速运行。(下转第 213 页)