耙吸船以拖带方式调遣浮式疏浚管线案例研究

梁海永，刘展雄，林晓悠
（中交广航疏浚有限公司，广东 广州 510230）

摘 要：依托马尔代夫远海岛礁疏浚工程，针对缺乏专业拖轮支持及长距离调遣工况，开展了耙吸挖泥船“浚洋 1”拖带浮式疏浚管线的案例研究。文章总结了工程实践中应用的 3 种典型拖带方式：“水滴形”、“倒水滴形”与“并列顺拖”，并基于流体动力学原理建立阻力计算模型，结合实船主拖缆参数与现场环境数据，进行了反算与校核。研究结果表明：管线拖带几何形态是决定拖带阻力的关键因素，“水滴形”方式因迎流投影面积最大，在 6 kn 航速下理论总拉力高达 3 734 kN，超过双缆系统极限破断力，是导致首次调遣断缆事故的根本原因；“并列顺拖”方式利用大直径管线的刚度与水动力分离效应，有效降低了约 87.2%的水动力阻力，理论拉力仅为 479 kN，安全系数大于 5.0。该案例验证了“并列顺拖”方式在深远海长距离调遣中的安全性与经济性，所构建的阻力评估模型可为类似工程的缆绳选型与航速决策提供量化参考。

关键词：耙吸船；疏浚管线；拖带方式；阻力模型
中图分类号：U6；U616 **文献标志码：**A **文章编号：**2095-7874(2026)11-0087-06
doi：10.7640/zggwjs202611014

Case study on towing mobilization of floating dredging pipelines by trailing suction hopper dredgers

Liang Haiyong, Liu Zhanxiong, Lin Xiaoyou
（CCCC Guanghang Dredging Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510230, China）

Abstract: Relying on a dredging project in the remote islands of the Maldives, this paper presents a case study of floating dredging pipelines towed by the Trailing Suction Hopper Dredger(TSHD) *Junyang 1* under the working conditions of limited professional tugboats and long-distance mobilization. The paper summarized three typical towing methods applied in engineering practice: the "teardrop-shaped" pattern, the "inverted teardrop-shaped" pattern, and the "parallel towing" pattern; a resistance calculation model was established based on the principles of fluid dynamics, and back-calculation and verification were carried out with main towing cable parameters of the actual vessel and on-site environmental data. The results indicate that the geometric configuration of the pipeline is the critical factor determining towing resistance. The "teardrop-shaped" method, with the largest frontal area, generated a theoretical total towing force of 3 734 kN at a speed of 6 kn, exceeding the ultimate breaking strength of the dual-cable system; this was identified as the root cause of the cable breakage accident during the first mobilization. In contrast, the "parallel towing" method utilizes the stiffness of large-diameter pipelines and hydrodynamic separation effects to effectively reduce hydrodynamic resistance by approximately 87.2%, resulting in a theoretical towing force of only 479 kN and a safety factor greater than 5.0. This case study validates the safety and economic efficiency of the "parallel towing" method for deep-sea long-distance mobilization. The developed resistance assessment model can provide a quantitative reference for cable selection and speed selection in similar engineering projects.

Key words: trailing suction hopper dredger; dredging pipeline; towing method; resistance model

收稿日期：2025-11-21 修回日期：2026-09-28
作者简介：梁海永（1982— ），男，广西贵港人，高级工程师，测绘工程专业。E-mail：lianghyprivate@163.com

0 引言

马尔代夫岛间运输极度依赖海上交通，工程物资调配面临严峻挑战。在一般疏浚吹填项目推进过程中，管线调遣方式多采用拖轮或登陆艇拖航或装船运输，此类方式虽操作灵活，但在长距离、多节点、多任务的场景中，普遍面临周期长、调遣效率低、运输成本高、对接与装卸环节复杂等难题，尤其在马尔代夫等偏远岛国，当地基础设施薄弱、中大型工程船舶设备稀缺，拖轮租赁困难，严重制约了现场施工组织效率。

针对上述问题，依托马尔代夫 Ayla 酒店岛吹填工程，创新性地提出并实施了“耙吸船拖带自浮疏浚管线”的调遣方案，通过在耙吸船尾部以缆绳连接吹填管线，利用耙吸船自身调遣航行过程完成管线拖带，规避了传统模式中对专业拖轮的依赖，显著压缩了调遣时间、节约了设备成本与人力资源。

目前，国内外学者对浮管拖带技术已有一定研究基础。李世森等[1]通过试验验证了柔性自浮管线在长距离拖带中的稳定性；张林[2]与李松涛等[3]系统总结了大口径输泥管的维护要求及辅助施工工艺；在理论研究方面，金邦杰等[4]、王猛等[5]重点分析了漂浮软管的弯曲和动态特性，Gao 等[6]、Kobayashi 等[7]则从流体动力学角度深入研究了漂浮软管在波浪与流场作用下的力学特性与运动响应。然而，现有研究多集中于管线本体结构性能或单一水动力特性分析，对不同拖带构型下管线整体阻力特性的定量研究明显不足，尤其缺乏能够指导工程实践的缆绳选型标准与航速决策参数体系。

本文基于马尔代夫远海岛礁疏浚工程，针对耙吸船拖带浮式疏浚管线的特殊工况，重点分析“水滴形”、“倒水滴形”与“并列顺拖”3 种典型拖带方式的水动力特性差异，建立阻力计算模型，量化评估不同构型下的拖带阻力，为缆绳选型与航速决策提供理论依据，同时为类似深远海工程的管线调遣提供可借鉴的技术方案。

1 案例概况

随着马尔代夫 Ayla 酒店岛吹填施工任务的推进，项目现场需对数条长距离吹填管线进行远距离海上调遣，用于后续项目吹填作业。受限于马尔代夫市场基础设施匮乏以及拖轮资源极度紧缺，传统由拖轮执行管线拖带调遣的方式在实际操作中难以实施，遂提出以耙吸船兼具施工与拖带职能的调遣策略，尝试解决管线远距离运输的关键瓶颈。

2024 年 3 月，第 1 批管线调遣任务正式实施，所调遣自浮管线总长约 1 080 m，管径为 1.1 m，管线由每节 12 m 的自浮橡胶管通过法兰连接而成，调遣里程为 106 n mile，由“浚洋 1”号耙吸船承担拖带任务。“浚洋 1”总长约 170.20 m，型宽为 31.00 m，型深为 12.20 m，满载吃水 11.00 m，泥舱载量 21 000 m^3，配备 2 台总功率 21 600 kW 的主柴油机，平均吃水 11.00 m 时航速可达 16.3 kn。拖带设备配置方面，船舶配备 1 条已插接琵琶头（1.5 m）的拖带钢丝缆，长 260 m，直径 52 mm，破断拉力 1 471 kN；另配备 6 条已捻好马眼（1.5 m）的聚丙烯系缆，每条长 200 m，破断拉力 625 kN。甲板设备包括 30 t 甲板吊，跨距 4~23.3 m，为管线连接与固定作业提供支持。

作业期间海况良好，马尔代夫海域处于东北季风期末期，平均风速约 4.9 m/s，有效波高约 1.0 m，表层流速 0.3~0.5 m/s，水温 28~30 ℃，能见度 15~20 km。

该次拖带采用 2 根直径 52 mm 的钢丝缆，通过卸扣分别固定于管线两端法兰拖曳眼板，通过形成“水滴形”拖带状态（见图 1）维持管线整体稳定。管线采用自浮式橡胶软管，单位长度重量约 150 kg/m，内置闭孔泡沫浮力材料，浮力富余系数 1.15，单节抗拉强度≥2 000 kN，接头连接强度≥150 kg/m。然而，在航行过程中，其中一侧缆绳在中途发生断裂，造成管线结构一度漂移失控，尽管最终通过回收操作得以控制风险，但此事件表明项目团队对缆绳受力情况不清晰，拖带作业存在明显的安全隐患。



图 1 “水滴形”拖带方式

Fig. 1 "Teardrop-shaped" towing pattern

鉴于第 1 次调遣经验，2024 年 9 月及 10 月，在 Ayla 酒店岛与 FB 项目岛间 154 n mile 航程的来回浮管调遣任务中，马尔代夫海域进入西南季风期，环境条件显著变化，现场实测平均流速 0.5~0.7 m/s，平均风速约 5.1 m/s，有效波高约 1.3 m，水温 28~30 ℃，能见度 5~10 km。通过调整浮管拖带方式策略，此次作业改为将缆绳固定于管线中部位置，两侧管线自然在水面展开并随船体前进方向拖曳。如图 2 现场航拍图像所示“倒水滴形”拖带方式，管线从中部起点向后张开后再自然回卷，呈现明显的非对称弧形轨迹。这种形态与第 1 次拖带方式中管线前部拖挂、后部回收所形成的“水滴形”形态在结构上方向相反，但在空间构型和弯曲幅度上具有相似性。

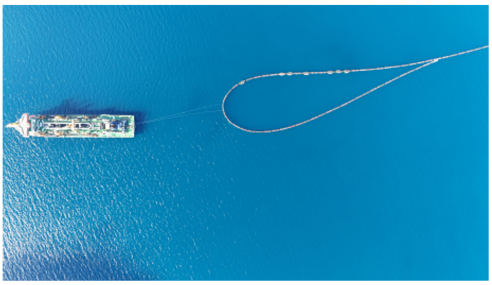


图 2　“倒水滴形”拖带方式

Fig. 2　"Inverted teardrop–shaped" towing pattern

本次拖带作业未再出现缆绳断裂或管线失稳现象，拖带任务顺利完成，调遣时间与耗油量均处于可控范围内。然而，由于该拖带方式缺乏理论支撑，现场施工人员对于其受力机制、管线姿态演化及拖带安全边界仍难以准确判断，因此尽管该方式在操作中可行，但尚不能作为可推广模式直接应用于更长距离或更复杂海况条件下的工程。

2025 年 3 月，在 Ayla 酒店岛与 Maadhoala 项目间 116 n mile 航程的自浮管线调遣任务中，需调遣的管线总长约 800 m，马尔代夫海域重回东北季风期，环境条件相对温和，平均风速约 4.5 m/s，有效波高约 0.8 m，流速 0.4~0.6 m/s。项目团队在充分吸取前 2 次经验的基础上，首次采用“并列顺拖”方式进行布置（见图 3）。将 800 m 管线拆分为 2 段 400 m 管线，2 段管线之间采用钢丝绳捆绑卡扣固定的方式进行连接，每隔 100 m 设置 1 处固定点，并排顺流拖带。该方式大幅减小了自浮管线的迎流投影面积，在操作过程中实现了极高的拖带稳定性与成本控制。该方式具备更好的实用性与经济性，建议在后续工程中予以推广。



图 3　“并列顺拖”拖带方式

Fig. 3　"Parallel towing" towing pattern

综上所述，3 次管线调遣任务虽然均成功完成，但由于作业前并未建立系统的理论模型，也缺乏对缆绳选型、拖带布置与航速选择等关键参数的量化支撑，作业方案主要依靠经验制定，难以精准预测拖带过程中的受力风险。在此背景下，本文从实践出发，尝试对 3 种典型拖带方式进行系统分析，为后续工程调遣决策提供理论支持与方法指导。

2　案例研究

在海上疏浚自浮管线的拖带作业中，管线的几何形态直接决定了其水动力阻力的大小，进而影响拖带系统的安全性。针对上述案例中出现的 3 种典型拖带方式，本章旨在建立基于流体动力学的受力分析模型，通过将复杂的工程工况转化为简易可计算的数学模型，定量地分析不同拖带布置形态下的管线阻力与缆绳张力，构建一套能够突破单一案例局限、适用于一般条件下的远海柔性管线拖带作业的参数评估方法。

2.1　模型假设与适用条件

本模型主要适用风速<6 m/s、有效波高<1.5 m、流速<0.8 m/s 的相对平静水域；管径 0.8~1.5 m，单节长度 10~15 m，橡胶材质自浮管线，浮力富余系数≥1.1。海况恶化时，波浪带来的动态载荷将显著增加，本文模型不再适用。鉴于海洋环境的复杂性，为分析影响拖带力的主要矛盾，对拖带管线系统作出以下条件假设：

1）管线为柔性、不可拉伸结构，漂浮于水面，浮力与自重基本平衡，因此忽略管线受力中的重力和浮力对水平阻力的影响。

2）拖带过程中耙吸船保持低速（航速小于 6 kn）、稳定地航行在相对平静的水域，无加速度，整体系统受力平衡。为简化模型计算，模型仅考虑恒定流速下的平均流体阻力，暂不考虑高

频波浪下的动态耦合效应，波浪带来的额外负荷在安全系数中予以预留。

3）管线所受的阻力主要由形状阻力与摩擦阻力两类构成，形状阻力源于管线迎流面的压力差，起主要作用；摩擦阻力源于管壁与水流的黏性剪切作用，在长距离拖带中不可忽略。

4）假设缆绳为理想柔性体，无刚度，仅承受拉力，忽略其自重。

2.2 建立模型

1）第 1 种拖带方式：两端锚固的“水滴形”。

该方式下，管线两端通过缆绳连接至船尾两侧，受到航行方向的流体阻力，在水中形成平缓弯曲的“水滴形”（见图 4）。其力学特征表现为管线两端受约束的对称弯曲。

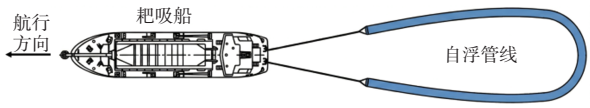


图 4 “水滴形”拖带示意图

Fig. 4 "Teardrop–shaped" towing diagram

考虑其极限状态，即管线在水流牵引作用下弯曲形成一段完整半圆弧，此时缆绳所受拉力最大。设定 L 为参与拖带的自浮管线总长度（m），R 为管线弯曲形成的半圆弧半径总长度（m）。根据几何关系可知 $R=L/\pi$，则第 1 种拖带方式的理论迎流面投影长度 L_{p1} 为：

$$L_{p1}=2R=\frac{2L}{\pi} \tag{1}$$

管线所受的水动力阻力主要由形状阻力和摩擦阻力构成。在匀速拖带条件下，沿航向的总拖带拉力与管线所受总水动力阻力相平衡，设第 1 种拖带方式下的总拖带拉力为 F_1，根据流体阻力通用公式，可得其计算表达式为：

$$F_1=\frac{1}{2}\rho C_D A v^2+\frac{1}{2}\rho C_f S_1 v^2 \tag{2}$$

式中：F_1 为第 1 种拖带方式下的总拖带拉力，N；ρ 为海水密度，kg/m^3，取 ρ=1 025 kg/m^3；C_D 为形状阻力系数，参考圆柱体绕流经典数据，横向迎流时可取 1~1.2，斜向迎流时约为 0.6~1.0，顺流迎流时仅为 0.2~0.4；A 为迎流投影面积，m^2，根据圆柱体几何特性，迎流投影面积可转化为 $A=L_{p1}\cdot D=2DL/\pi$，其中 D 为自浮管线外径，m；v 为相对水流速度，即船速，kn；C_f 为摩擦阻力系数，在湍流状态下采用 Blasius 经验公式 $C_f=0.074/Re^{1.5}$，其中 Re 为雷诺数，对于一般海上漂浮圆管，雷诺数取 105~106（无量纲）；S_1 为单位长度的湿表面积，近似为 $S_1=\pi DL$。

将式（1）代入式（2）得：

$$F_1=\rho C_D\frac{DL}{\pi}v^2+\frac{1}{2}\rho C_f\pi DLv^2 \tag{3}$$

2）第 2 种拖带方式：中部系缆的“倒水滴形”。

在此种拖带方式下，管线中部与缆绳连接，水中形态呈现为明显的回卷弯曲曲线，两侧向后拖曳展开成近似“倒水滴形”平面布局，管线两端顺流延伸并回弯靠近（见图 5）。

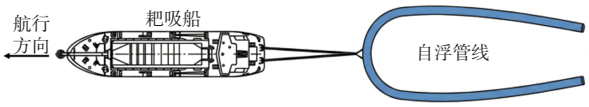


图 5 “倒水滴形”拖带示意图

Fig. 5 "Inverted teardrop–shaped" towing diagram

尽管该形态在外观上类似第 1 种方式，但其受力结构完全不同。在第 2 种方式中，由于缆绳系结于管线中部，管线两侧为自由端，结构主要由水流阻力与管线柔性决定，缺乏张力控制边界，管线在尾流作用下会发生显著的回卷效应，导致迎流投影面积呈现非线性变化。为解决这一非定形结构的计算难题，以管线完全横向展开时的迎流投影面积为基准，引入工程修正系数 β，对实际迎流投影面积进行折减。β 为实际迎流投影面积与完全横向流迎流投影面积之比。若管线完全平直，β=1，即迎流投影面积最大；若管线弯曲、部分回卷，则迎流投影变短，β 减小。通过对第 2 次拖带作业航拍照片的观察与测量，并结合类似柔性体拖曳的试验数据，确定本案例中 β 的取值范围约为 0.1~0.3，即：

$$\beta\approx L_{p2}/L \tag{4}$$

式中：L_{p2} 为管线第 2 种拖带方式时的有效迎流投影长度，m。

此时，第 2 种拖带方式下的总拉力 F_2 的计算模型修正为：

$$F_2=\frac{1}{2}\rho C_D\beta DLv^2+\frac{1}{2}\rho C_f\pi DLv^2 \tag{5}$$

3）第 3 种拖带方式：“并列顺拖”拖带

将管线拆分为 2 段，并列拖带，为了确保 2 列管线在拖航期间始终保持稳定的平行姿态，在 2 段 400 m 管线之间每隔 100 m 采用钢丝绳捆绑卡扣固定，共设置 3 处固定点。在理想情况下，2

段短管线与水流方向近似一致排列(见图 6)，管身横向投影较小，迎流投影面积主要由 2 段管线前端截面积构成，设第 3 种拖带方式的迎流投影面积为 A_3，则：

$$A_3=\frac{\pi D^2}{2} \tag{6}$$

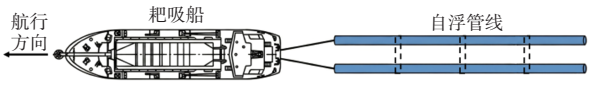


图 6　“并列顺拖”拖带示意图

Fig. 6　"Parallel towing" towing diagram

摩擦阻力仍分布在 2 段管线外表面，湿表面积与前 2 种拖带方式相同。此时第 3 种拖带方式下，总拉力 F_3 表达式为：

$$F_3=\frac{1}{4}\rho C_D\pi D^2v^2+\frac{1}{2}\rho C_f\pi DLv^2 \tag{7}$$

而受到船舶航行路线及风浪的影响，管线在实际拖带过程中可能会出现略微的偏移，与航行方向产生一定的角度，引入偏移角度 α 为实际管线管身与航向的夹角。根据实践经验，取 α 角度范围约为 0~15°，此时总拉力 F_3 表达式为：

$$\begin{cases} F_3=\dfrac{1}{4}\rho C_D\pi D^2v^2+\dfrac{1}{2}\rho C_f\pi DLv^2 & \alpha=0 \\ F_3=\dfrac{1}{2}\rho C_D(L\sin\alpha)Dv^2+\dfrac{1}{4}\rho C_D\pi D^2v^2+\dfrac{1}{2}\rho C_f\pi DLv^2 & 0<\alpha\leqslant 15° \end{cases} \tag{8}$$

2.3　案例计算分析

为验证上述模型的有效性，分析缆绳断裂原因，选取耙吸船航速为 6 kn 条件下，对 3 种典型拖带方式分别求解其迎流投影面积、湿表面积、形状阻力、摩擦阻力与总拉力。输入参数如下：管径 D=1.1 m，管长 L=1 080 m(方式 1、方式 2)及 L=800 m(方式 3)；海水密度 ρ=1 025 kg/m³。形状阻力系数 C_D 取 1.0，摩擦阻力系数 C_f 依据雷诺数计算取 0.002 3。3 种拖带方式下得出的最不利结果如表 1 所示。

表1　3 种拖带方式计算最不利结果汇总

Table 1　Summary of the most unfavorable results calculated for the three towing methods

拖带方式	迎流投影面积/m²	湿表面积/m²	形状阻力/kN	摩擦阻力/kN	总拉力/kN
方式 1	756	3 732	3 692	42	3 734
方式 2	356	3 732	1 740	42	1 782
方式 3	227	3 732	448	31	479

由表 1 可知，3 种方式的总拉力呈现较大差异。方式 1 因管线横向展开，迎流投影面积最大，导致形状阻力占主导地位，总拉力高达 3 734 kN；方式 3 通过改变管线姿态，将迎流投影面积减小了约 70%，总拉力仅为方式 1 的 12.8%，有效降低了约 87.2%的水动力阻力。

2.4　不同航速缆绳匹配性与受力分析

为解释工程中发生的断缆事故，需引入具体的船舶缆绳参数进行校核。根据船舶相关资料，该船主拖缆为已捻好马眼(1.5 m)的拖带钢丝缆，长 260 m，直径 52 mm，破断拉力 1 471 kN。实际作业中采用双缆拖带，考虑到双缆受力不均匀系数(取 0.85)，拖带系统的许用破断力上限 F_L 为：$F_L\approx$2 500 kN，工程安全系数取 K=3.0，则建议的安全工作拉力应控制在 833 kN 以内。

1) 方式 1(“水滴形”)：计算拉力 3 734 kN 远超安全工作拉力，甚至超过缆绳系统的极限破断力 2 500 kN。这一理论分析结果与第 1 次调遣中发生的断缆事故吻合，从力学角度证实了“水滴形”方式在长距离、6 kn 航速拖带工况下的不可行性。

2) 方式 2(“倒水滴形”)：计算拉力 1 782 kN 小于极限破断力，未发生断缆，但已超过建议的安全工作拉力 833 kN，安全裕度较低，仅适用于短距离或海况极佳时的临时调遣。

3) 方式 3(“并列顺拖”)：计算拉力 479 kN 远小于安全工作拉力，安全系数约为 5.2。证明该方式是深远海长距离调遣的最优解。

为进一步指导现场作业，基于上述模型绘制了 3 种拖带方式下航速与总拉力的关系曲线(见图 7)。随着航速增加，总拉力呈二次方增长。实际可基于缆绳安全工作拉力(833 kN)反算各拖带方式的安全航速范围，为工程决策提供量化依据。

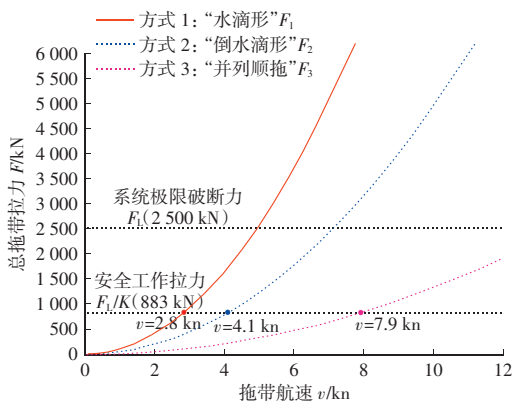


图 7　耙吸船拖带管线航速与拉力关系图

Fig. 7　TSHD towing pipeline speed versus towing force

基于“浚洋 1”缆绳的安全工作拉力（833 kN）反推安全航速上限：方式 1 安全航速仅为 2.8 kn，无法满足远距离调遣的时效性要求；方式 2 安全航速约为 4.1 kn，需严格限制船速；方式 3 在 7.9 kn 航速下计算拉力仍小于安全限值，理论上可满足耙吸船全速航行要求，受管线自身结构强度限制，建议航速控制在 6~7.9 kn。

3 结语

针对远海疏浚工程中耙吸船拖带自浮管线的技术难题，本文结合流体动力学理论与工程实测数据，建立了 3 种典型拖带方式的阻力分析模型，通过对比研究得出以下结论。

1）管线几何形态是影响拖带阻力的决定性因素。通过 3 种拖带方式的对比分析，发现管线在水流中的空间形态直接决定了迎流投影面积大小，进而影响总阻力。“水滴形”方式因管线横向展开，迎流投影面积最大，6 kn 航速下总阻力达 3 734 kN；“倒水滴形”通过管线回卷效应，迎流投影面积减少53%，阻力降至 1 782 kN；而“并列顺拖”方式充分利用管线刚度与水流方向，将迎流投影面积降至最小，阻力仅为 479 kN。这一规律具有普适性，适用于不同管径、不同长度的自浮管线拖带作业。

2）拖带方式选择需综合考虑安全性和经济性。基于“浚洋 1”号耙吸船的缆绳参数和工程安全系数，建立拖带方式选择标准：当管线长度超过 1 080 m 或管径大于 1.1 m 时，“水滴形”方式在 6 kn 航速下必然超载，应严格避免；“倒水滴形”需将航速控制在 4.1 kn 以下；“并列顺拖”适用于长距离、大管径管线调遣，可实现 6~7.9 kn 安全航速，且安全系数大于 5.0。

3）“并列顺拖”方式是深远海调遣的最优解。在缺乏专业拖轮支持的远海环境下，“并列顺拖”方式通过管线分段、并排布置，大幅降低水动力阻力，提高了调遣安全性与效率。该方式不仅解决了马尔代夫远海岛礁疏浚工程的实际问题，也为全球岛礁建设、海上能源开发等领域的管线调遣提供了新思路。后续研究可进一步探索波浪环境下的动态载荷影响，完善极端海况条件下的安全评估方法。

参考文献：

[1] 李世森，秦春荣，程顺波. 疏浚船自浮管线拖带稳定性与安全性试验研究[C]//第十四届国际海洋与极地工程大会. 土伦：ISOPE，2004：70–76.
Li S S, Qin C R, Cheng S B. Experimental study on towing stability and safety of dredger self–floating pipeline[C]//Proceedings of the fourteenth international offshore and polar engineering conference. Toulon: ISOPE, 2004: 70–76.

[2] 张林. 疏浚泥管特性及应用分析[J]. 船舶物资与市场，2020(10)：77–78.
Zhang L. Characteristics and application analysis of dredging mud pipeline[J]. Marine Equipment/Materials & Marketing, 2020(10): 77–78.

[3] 李松涛，谭元译. 平板驳辅助耙吸挖泥船对码头前沿浮泥施工工艺[J]. 水运工程，2020(6)：204–208.
Li S T, Tan Y Y. Utilizing flat–bottom barge to assist TSHD in dredging fluid mud at wharf frontage[J]. Port & Waterway Engineering, 2020(6): 204–208.

[4] 金邦杰，赵宏林，高强，等. 漂浮软管的弯曲和动态特性分析[J]. 石油机械，2019，47(1)：37–43.
Jin B J, Zhao H L, Gao Q, et al. Analysis of bending and dynamic behavior of floating hose[J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(1): 37–43.

[5] 王猛，张捷. 悬链系泊系统中的粘接软管[J]. 海洋工程装备与技术，2015，2(1)：40–44.
Wang M, Zhang J. Bonded hose in CALM system[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2015, 2(1): 40–44.

[6] Gao X, Xu Z, Xu W, et al. Cross–flow vortex–induced vibration (VIV)responses and hydrodynamic forces of a long flexible and low mass ratio pipe[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2019, 7(6): 179.

[7] Kobayashi T, Nishihata T, Nozaki H. Study on motion analysis of spar type floating towing[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2(Coastal Engineering), 2022, 78(2): 655–660.