

DOI:10.19423/j.cnki.31-1561/u.2022.06.010

“昊海龙”超大型自航绞吸挖泥船开发

费 龙 张晓枫 单铁兵

(中国船舶及海洋工程设计研究院 上海 200011)

[摘 要] 超大型自航绞吸挖泥船不仅具备海底岩土超强挖掘和长距离高效输送的作业能力,还具有高海况适应和高度自治能力,已成为港口、人工岛和吹填造陆等重大基础设施建设不可替代的装备,为大型疏浚公司发展的首选船型。该文分析了国际上超大型自航绞吸挖泥船的发展态势,回顾了我国大型绞吸挖泥船的发展历程。简述了绞吸挖泥船的工作原理和系统组成,从疏浚土质、产量、挖深、排距和环境条件等方面分析了绞吸挖泥船设计应重点考虑的因素。全面分析了“昊海龙”设计方案中的船型与总布置、绞刀驱动、桥架结构设计、泥砂输送、柔性钢桩、全电力驱动和居住舱室减振等关键技术,其采用的绞刀双电机长轴驱动、双壳箱型桥架结构、泥泵三泵组合、柔性钢桩和全电力驱动等技术对超大型绞吸挖泥船是非常适宜的。文中提出的绞吸挖泥船设计原理和对“昊海龙”设计技术的介绍,可为超大型自航绞吸挖泥船开发提供参考。

[关键词] 超大型自航绞吸挖泥船;总体布置;挖掘;输送;柔性钢桩;全电力驱动

[中图分类号] U674.31 [文献标志码] A [文章编号] 1001-9855(2022)06-0010-010

On Development of Ultra-Large Self-Propelled Cutter Suction Dredger “HAO HAI LONG”

FEI Long ZHANG Xiaofeng SHAN Tiebing

(Marine Design & Research Institute of China, Shanghai 200011, China)

Abstract: The ultra-large self-propelled cutter suction dredger not only has the operating capacity of the ultra-strong excavation and the long-distance efficient transportation of the seabed rock, but also has the adaptability to high sea state and the ability of high autonomy. It has become the irreplaceable equipment for major infrastructure constructions, such as port, artificial island and land reclamation, which is the preferred ship type to be developed for large dredging companies. This paper analyzes the development of the international ultra-large self-propelled cutter suction dredger, and reviews the development history of the large cutter suction dredger in China. The operating principle and system composition of the cutter suction dredger are briefly described to analyze the key factors to be considered in the design of the cutter dredger regarding the dredging soil quality, capacity, digging depth, discharge distance and environmental conditions. It comprehensively analyzes the key technologies of the design scheme of the “HAO HAI LONG”, such as the ship type and general arrangement, the cutter drive, the structure design of the bridge, the mud and sand transportation, the flexible steel pile, the full electric drive and the vibration reduction of the accommodation. The technologies of the long-shaft drive with double motor for cutters, the double shell box type bridge structure, the combination of three dredging pumps, the flexible steel pile and the full electric drive are very suitable for the ultra large cutter suction dredger. The design principle of the cutter suction dredger and the design technology of the “HAO HAI LONG” can provide references for the development

收稿日期: 2022-08-04; 修回日期: 2022-10-09

作者简介: 费 龙 (1966-), 男, 本科, 研究员。研究方向: 船舶及海洋工程设计。

张晓枫 (1980-), 男, 本科, 研究员。研究方向: 船舶及海洋工程设计。

单铁兵 (1982-), 男, 博士, 高级工程师。研究方向: 船舶及海洋工程设计。

of the ultra large self-propelled cutter suction dredger.

Keywords: ultra-large self-propelled cutter suction dredger; general arrangement; excavation; transportation; flexible steel pile; full electric drive

0 引 言

在各类挖泥船中, 绞吸挖泥船几乎可以挖掘海底各种土质, 如: 淤泥、砂、黏土甚至岩石, 能够直接将挖掘物通过排泥管线水力输送到指定地点, 具有很高的作业效率, 并可通过钢桩定位和桥架实现精准挖掘。因此, 绞吸挖泥船凭借其对土质广泛的适应能力、精确挖掘和高施工效率, 一直是河道清淤、港口航道建设和吹填造地工程的主力^[1]。

21 世纪初, 随着疏浚领域的拓展, 绞吸挖泥船已不仅需要面对诸如港口、航道建设和维护等传统疏浚工程, 还要面对大型填海造地、基槽开挖和海底岩土开挖等新兴工程, 这就对绞吸挖泥船的作业环境适应性、绞刀切削力、产量、挖深及排距等性能提出更高的要求^[2], 促使绞吸挖泥船向大型化发展。大部分绞吸挖泥船只在本国区域内施工作业, 一般采用非自航的形式。超大型绞吸挖泥船为提高使用率, 需考虑适用于各种类型疏浚工程的要求, 在使用年限内可能会在多个工程场所施工作业, 调遣次数比较频繁, 若采用拖航或半潜船运输, 调遣费用极其昂贵, 远超增加一套推进设备所需的成本; 另外, 因受拖船和半潜船等辅助船舶的制约, 工期也无法保障。自航绞吸挖泥船不受外界因素的限制, 在自航功能上增加的费用也远低于非自航船调遣的费用, 并且提高了绞吸挖泥船的利用率, 具有更好的经济性^[3]。

随着疏浚市场对外开放和全球化趋势的快速发展, 在 market 需求的驱动下, 各大型疏浚公司纷纷启动超大型自航绞吸挖泥船的建造。2003 年, Jan de Nul 公司建造了自航绞吸挖泥船 J. F. J. de Nul 号^[4], 总装机功率为 27 240 kW, 绞刀功率为 6 000 kW。2005 年, DEME 公司建造了总装机功率为 28 200 kW 的自航绞吸挖泥船 D' Artagnan 号, 绞刀功率为 6 000 kW^[5]。2012 年, Van Oord 公司建造了超大型自航绞吸挖泥船 Artemis 号^[6], 总装机功率为

24 658 kW, 绞刀功率为 4 400 kW。2020 年, Boskalis 公司建造了总装机功率为 23 886 kW 自航绞吸挖泥船 Krios 号^[7], 绞刀功率为 4 200 kW。这些总装机功率 20 000 kW 以上的超大型自航绞吸挖泥船不仅具备海底岩土超强挖掘和长距离高效输送的作业能力, 还具有高海况适应和高度自治能力, 已成为港口、人工岛及吹填造陆等重大基础设施建设的主力装备, 是大型疏浚公司发展的首选船型。

进入 21 世纪, 中国绞吸挖泥船大型化发展经历了 3 个阶段。2005 年至 2009 年为开发应用阶段, 开发了一大批装机功率 10 000 ~ 13 000 kW 的非自航大型绞吸船, 设置水下泵 (电轴驱动)、绞刀采用液压马达驱动 (功率 1 280 kW), 代表船型有新海鳄和新海鯤。2010 年至 2014 年为技术发展阶段, 开发了一批装机功率 13 000 ~ 19 000 kW 的大型绞吸船, 绞刀和水下泵由变频电力驱动, 绞刀功率大于 2 000 kW, 代表船型有新海豚和云浚二号。期间, 我国建造了由德国提供基本设计和疏浚装备的自航绞吸挖泥船天鲸号, 绞刀功率 4 200 kW。2015 年至今为技术创新阶段, 开发了一批全电驱的自航绞吸挖泥船, 采用柔性钢桩、大功率绞刀挖掘系统, 具有岩石挖掘和长距离输送能力, 以及高度自治和高海况适应能力, 代表船型有 2018 年交付、绞刀功率 6 600 kW、总装机功率 25 843 kW 的天鲲号, 以及 2021 年交付、绞刀功率 7 800 kW、总装机功率 26 443 kW 的昊海龙号。

以上 6 艘代表船型均由中国船舶及海洋工程设计研究院设计。可以看到, 天鲲号和昊海龙号这 2 型超大型自航绞吸挖泥船的成功研制, 是我国自主设计和建造绞吸挖泥船历程中一个新的里程碑。

国内外具有代表意义的最新超大型自航绞吸挖泥船主要技术参数如下页表 1 所示。从中可以看到, 天鲲号和昊海龙号的总装机功率、绞刀功率和泥泵总功率等均超过国外同类船, 标志着我国超大型自航绞吸船研制能力已经进入国际先进行列。



表 1 4 型大型自航绞吸挖泥船主要技术参数

编 号	技术指标	昊海龙号	天鲲号	Krios 号	Artemis 号
1	建成年份	2021	2018	2020	2012
2	总长 /m	148.0	140.0	152.0	131.5
3	型宽 /m	29.0	27.8	28.0	27.8
4	型深 /m	9.2	9.0	8.9	9.0
5	最大挖深 /m	38.0	35.0	35.0	32.4
6	总装机功率 /kW	26 443	25 843	23 886	24 658
7	绞刀设计功率 /kW	7 800	6 600	4 200	4 400
8	泥泵总功率 /kW	16 250	17 000	15 600	15 000
9	吸管直径 /mm	1 000	1 000	1 000	1 000
10	排管直径 /mm	1 000	1 000	1 000	1 000

1 绞吸挖泥船设计原理

绞吸挖泥船属水力式挖泥船，设置有绞刀、桥架、吸排管路、泥泵、定位和横移装置等疏浚专用设备。绞吸挖泥船采用定点、摆动和步进方式，通过绞刀挖掘海底土质，利用泥泵吸取挖掘物，并通过管线直接将泥水混合物输送至指定地点。绞吸挖泥船通常用装机功率、生产量或排泥管径表征其施工能力，用挖深、挖宽、排距、单位产量和作业海况等作为其性能指标。

绞吸挖泥船作业系统有：

- （1）挖掘系统，包括绞刀、绞刀轴、齿轮箱、电机或液压马达和桥架。
- （2）吸排系统，包括吸口、吸管、水下泥泵、舱内泥泵或甲板泥泵、泵与泵之间的串联管、排泥管、呼吸阀、转动弯管。
- （3）定位系统，包括主辅钢桩系统或三缆定位系统、横移绞车、横移缆及锚、导向摆动滑轮。
- （4）桥架起升系统，包括桥架起升绞车、起升钢缆、起升滑轮组。
- （5）抛锚杆系统，包括抛锚杆、起锚绞车、回收绞车、钢缆等。
- （6）装驳系统，包括装驳架、靠驳绞车等。

（7）疏浚监控系统，包括绞刀监控、泥泵监控、横移绞车监控、桥架起升监控、主辅钢桩及台车位置或三缆定位系统监控、抛锚杆监控、疏浚剖面 and 轨迹显示、挖深监控、流量浓度与产量监测、吃水和油水装载监测。

绞吸挖泥船的设计主要考虑以下几个方面：

- （1）挖掘的土质。一方面，依据挖掘的土质计算分析绞刀所需的切削力；另一方面，挖掘时绞刀产生的切削力由桥架和横移缆承受，并传递到船体、钢桩、起桥绞车和横移绞车，因此船体、钢桩、桥架、横移的设计也与挖掘土质相关。另外，输送流速要求也与土质的粒径相关，土质粒径越大，要求的流速越高，会影响到泥泵参数的确定。
- （2）疏浚产量。产量通常用流量与浓度乘积表示，取决于绞刀的挖掘能力及泥泵的吸入和输送能力。绞刀的挖掘能力是指绞刀切削底质的产量，泥泵的吸入能力是指泥泵流量和其所能达到的吸入与输送浓度。在较大挖深时，只配置舱内泥泵或甲板泥泵的绞吸挖泥船为了避免泥泵汽蚀而不得不降低挖泥浓度，为此，具有较大挖深的绞吸挖泥船通常配置水下泥泵，利用水下泥泵的正压提高挖泥浓度。
- （3）挖掘深度。钢桩及桥架的强度和刚度、泥泵吸入性能需满足设定挖深性能指标，水深越深，

对钢桩、桥架刚度和泥泵的吸入性能要求就越高。目前绞吸挖泥船的最大挖深达到 45 m。

(4) 挖掘物输送距离(排距), 挖掘物输送动力就是船上设置的泥泵, 泥泵的排出压力决定了排距。为了增加输送距离, 大型绞吸挖泥船大都配置 3 台泥泵, 采用串联方式满足长排距的要求。

(5) 作业环境条件。绞吸挖泥船是在漂浮状态下采用钢桩和横移系统定位进行挖泥作业, 根据作业海况条件来开展钢桩和横移外载荷计算分析, 进行钢桩强度校核和横移系统能力分析, 以及定位系统设计。超大型绞吸挖泥船通常采用柔性钢桩来提高其高海况条件下的适应能力。



图 1 昊海龙超大型自航绞吸挖泥船

2 昊海龙号船型与总布置

2.1 船 型

昊海龙号为超大型自航绞吸挖泥船, 采用艏钢桩、艉桥架和全电力驱动的船型, 配置双桨、双转动导管, 甲板室安装气动减振装置, 具有挖掘强风化岩以及抗压强度 50 MPa 以内中弱风化岩的能力, 适用于国内外港口航道疏浚、岛礁建设及大型吹填造地工程。

昊海龙号疏浚能力为 $7\,000\text{ m}^3/\text{h}$, 最大排距可达 18 000 m, 最大挖深 38 m。外形见图 1。



2.2 功 能

昊海龙号设置 4 台主发电机组, 形成全船电网, 为绞刀、水下泵、舱内泵、绞车与推进等系统供电, 对于不同的挖泥工况, 可以采用 2 台、3 台或 4 台主发电机组并车模式运行。船上设置 1 台单壳水下泵和 2 台双壳舱内泵, 通过水下泵与 2 台舱内泵串联工作, 可以实现水下泵单泵、水下泵与舱内泵双泵或三泵串联挖泥输送作业。桥架前端绞刀由 2 台变频电机通过长轴系驱动, 可以根据不同的土质选择单电机或双电机工作模式。上甲板后部左右各设 1 台起桥绞车, 通过钢丝绳和滑轮组起降桥架; 中部设置 2 台横移绞车, 通过钢丝绳、横移滑轮和横移锚, 使船体绕定位桩摆动挖泥作业。船舶中部左

右舷各设有 2 套装驳装置, 可实现水下泵挖泥装驳作业, 船上每舷设置 2 台恒张力靠驳绞车, 配合驳船停靠和移位。艉部每舷各设置 1 套抛锚杆装置, 通过起锚绞车进行起 / 抛锚。

2.3 总布置

绞吸挖泥船为功能、布置型船, 沿纵向可分为艉部绞刀桥架挖掘系统区域、艏部动力及输送系统区域和艏部钢桩台车定位系统区域三大部分。昊海龙号艏部布置钢桩台车、排岸快速接头、航行锚系统; 艏部布置机舱、泥泵电机舱、泵舱和辅泵舱, 甲板上设置生活楼; 艉部布置绞刀桥架、起桥绞车、横移绞车、抛锚杆和龙门架。具体布置见下页图 2。



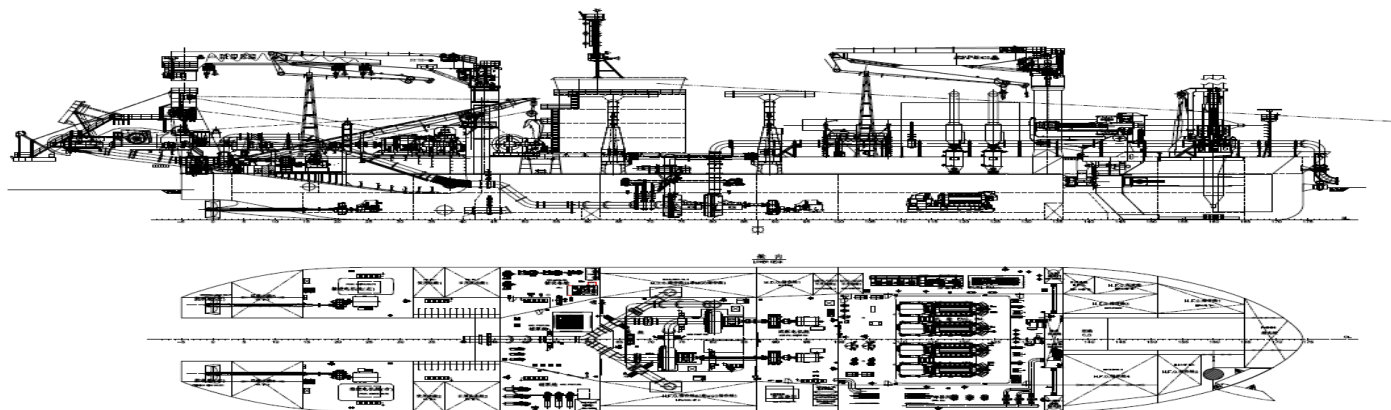


图2 吴海龙号总布置图

3 吴海龙号关键系统设计

3.1 挖掘系统

3.1.1 绞刀驱动系统

吴海龙号可挖掘淤泥、黏土、密实砂质土、砾石、强风化岩以及中弱风化岩等多种土质，具备广泛的工程适用性。绞刀桥架端部设置重型绞

刀，重型绞刀由2台4 250 kW 变频电机经齿轮箱及长轴驱动；长轴由4根中间轴、3个中间轴承、1根绞刀轴和1个绞刀轴承等组成，轴承采用水润滑以符合绿色环保要求，具体布置见图3。双电机驱动绞刀功率为7 800 kW，单电机驱动绞刀功率为4 250 kW。绞刀转速为0 ~ 30 r/min 时，采用恒扭矩控制；30 ~ 40 r/min 时，为恒功率控制。

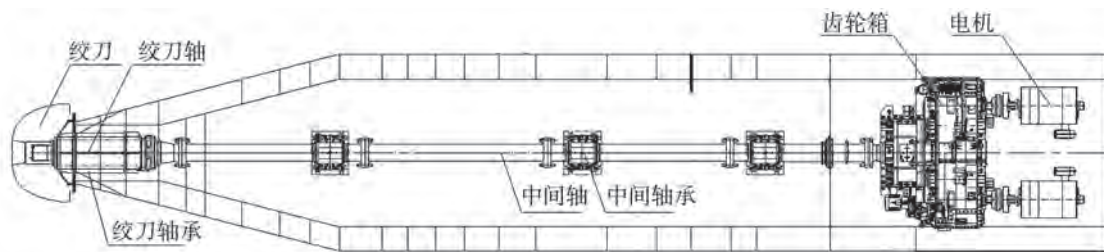


图3 绞刀驱动系统布置图

3.1.2 桥架结构设计

重型绞刀挖岩时对桥架冲击力极大，因此对桥架强度和刚度要求极高。吴海龙号桥架采用箱型结构，两侧设计双壳以提高桥架强度和刚度。桥架设计需开展绞刀切削力和桥架受力计算分析，并对桥架整体结构和桥架耳轴等局部高应力区域进行有限元分析以及桥架结构优化设计（桥架结构设计流程见下页图4），确保桥架具备足够强度和刚度。

吴海龙号桥架结构有限元模型见下页图5。整个桥架系统重达2 000 t，在确保桥架具备足够的强

度和刚度的同时，保证了足够的对地压力，从而杜绝因挖掘岩石时反作用力过大而出现“跳刀”的问题，满足工程需要。

根据工程需要，吴海龙号挖深范围设定为7 ~ 38 m。如此大的挖深范围，采用单铰点显然难以实现设计目标。因此，该船采用高、低双铰点形式，桥架安装于上铰点可适用于浅水域施工，安装于下铰点可适用于深水域施工；通过上下铰点切换，对桥架位置进行调整，实现不同挖深的要求。具体布置见后页图6。

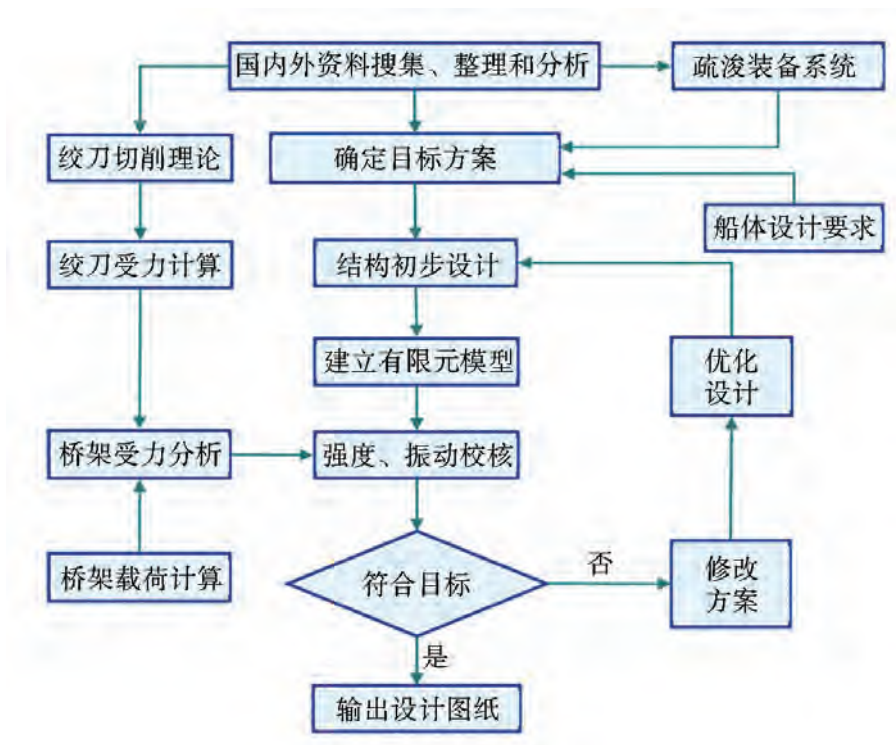


图 4 桥架结构设计流程

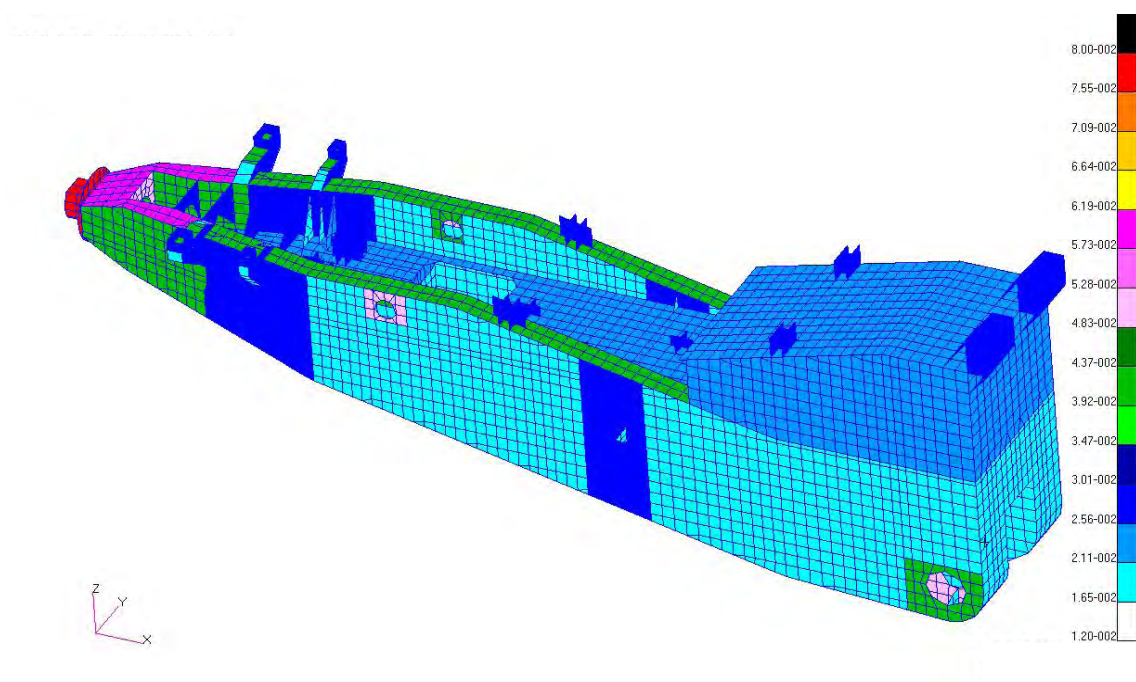


图 5 桥架结构有限元计算模型

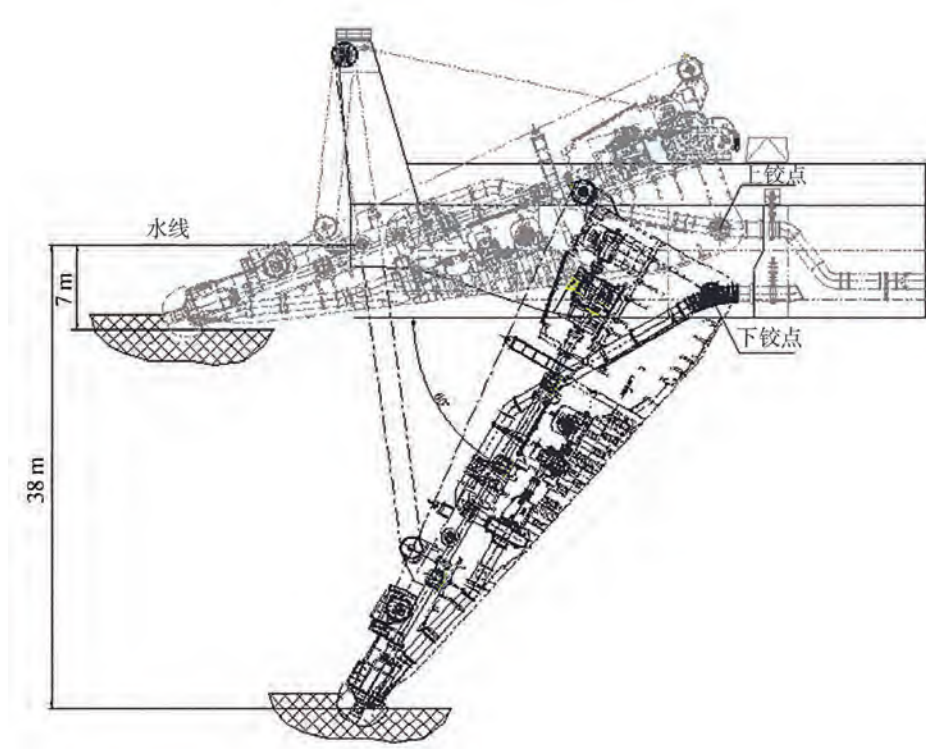


图6 绞刀桥架双铰点设计

3.2 泥砂输送系统

昊海龙号配备了强大的泥泵输送系统，采用4 250 kW 水下泥泵串联2台6 000 kW 舱内泥泵的工作方式（系统图见图7），泥泵总功率高达

16 250 kW，可根据工程需求灵活选择单台水下泥泵装驳作业或短距离输送排岸、2台泥泵串联中距离输送排岸或3台泥泵串联长距离输送排岸。

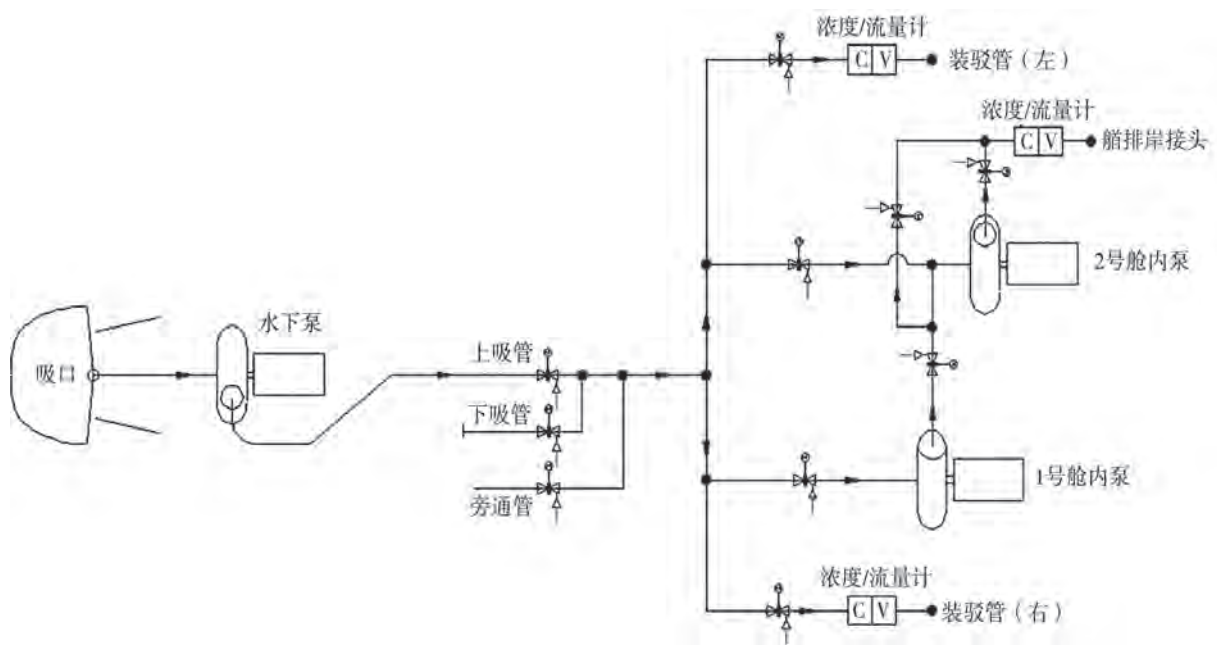


图7 泥砂输送系统图

该船3台泥泵均采用变频电机驱动, 通过对长距离管道输送技术的研究, 建立并优化了泥泵、管径、土质、浓度和多泵泥砂输送的水力模型, 解决了不同土质和不同排远多泵多组合泥砂高效、低耗能输送的难题, 实现了长排距、高效率和多工况的泥浆输送, 具有广泛的工程适应性。该船泥砂输送性能见图8, 最大排距达到了18 km 超长距离的要求。

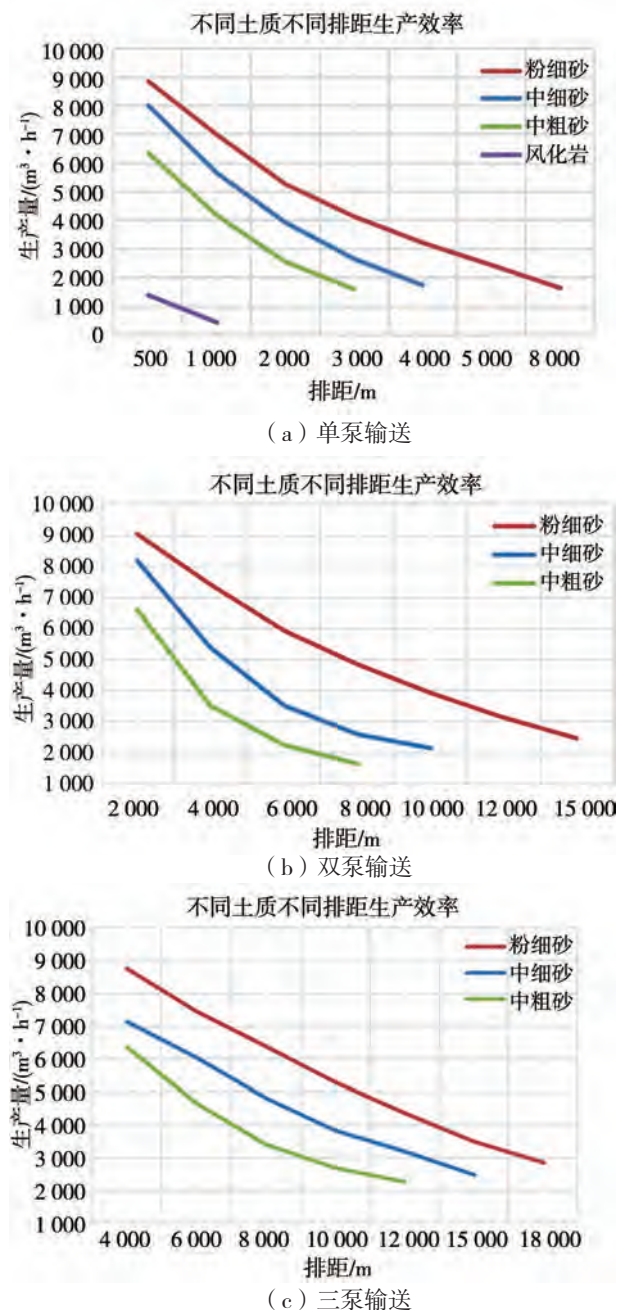


图8 昊海龙号泥砂输送性能曲线

3.3 柔性钢桩台车定位系统

绞吸挖泥船作业时采用钢桩定位, 在恶劣海况下, 船舶会发生严重的纵摇和纵荡, 使钢桩发生偏转弯曲, 钢桩的受力会急剧增大, 造成钢桩断裂。为提高在恶劣海况下的作业性能, 昊海龙号除了增加船体尺度、优化线型以及结构加强等常规手段外, 还配置了1套柔性钢桩台车定位系统, 参见图9。通过柔性缓冲的作用, 可以补偿船舶纵摇和纵荡, 从而大大抵消船舶运动带来的载荷, 解决了绞吸挖泥船在恶劣海况条件下, 施工作业定位能力弱、可作业时间短以及安全性无法保障等难题, 极大地提高了该船的适应性、可作业性和安全性。

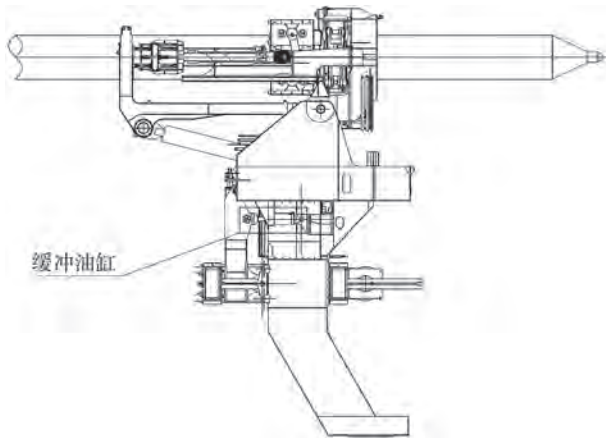


图9 昊海龙号柔性钢桩台车

其基本原理如下: 当钢桩所受力不超过正常工作值时, 带有钢桩保护装置的钢桩台车为刚性。当载荷超过预定极限时, 钢桩台车可以沿与挖泥船纵摇相反的方向摆动, 起到缓冲作用, 以保护作业中的钢桩。钢桩保护通过2个特殊设计的液压缓冲油缸来实现。当钢桩所受载荷低于预定极限值时, 缓冲油缸活塞杆始终处于中间位置, 此时的钢桩为刚性。当钢桩所受载荷超过预定极限值时, 缓冲油缸活塞杆开始伸缩动作, 避免钢桩过载, 此时的钢桩为柔性。过载保护系统允许钢桩台车向船首和船尾倾斜 2° , 通过两组缓冲油缸来控制台车摆幅角度。缓冲油缸预定极限载荷值通过1套氮气蓄能器和1套测量系统自动调整, 氮气蓄能器与缓冲油缸连接, 通过调节蓄能器内的压力, 来设定缓冲油缸极限载

荷的阈值。2°的倾斜角度完全可以覆盖船舶在恶劣海况下的纵摇幅度,达到柔性缓冲的目的,避免了恶劣海况下因钢桩受力过载而发生断桩的风险,确保了钢桩定位的安全性。

3.4 全电力驱动系统

采用全电力驱动的绞吸挖泥船对施工条件的适用性强,可适用于淤泥、黏土、密实砂质土、砾石、强风化岩以及中弱风化岩等多种土质,并可根据工程需要灵活选择单泵或多泵串联进行泥浆输送。而传统的柴油机或柴油机/电动机混合驱动模式,因不同作业工况下作业设备负荷变动大,很难保证柴油机和主要设备始终在最佳运行范围工作^[8]。

昊海龙号采用全电力驱动技术, 设置 4 台 5 760 kW 主发电机组及 1 台 1 200 kW 辅发电机组, 形成全船电网统一为绞刀、舱内泥泵、水下泥泵、推进系统、绞车和液压系统等设备供电。绞刀、舱内泥泵、水下泥泵、推进系统和绞车等主要设备均采用变频驱动, 对不同土质、不同挖深、不同排距等各类作业工况均有非常好的适应性, 并保证施工的高效率。根据不同工况下的功率负荷需求, 通过功率管理系统灵活控制单台或数台发电机组并联为全船设备提供电力, 使柴油机在各种多变的工况下始终处于合理高效的负荷范围, 从而降低油耗, 提高船舶营运的经济性, 也避免了负载突加对柴油机造成的冲击和损伤^[8]。昊海龙号全电力驱动系统配置见图 10。

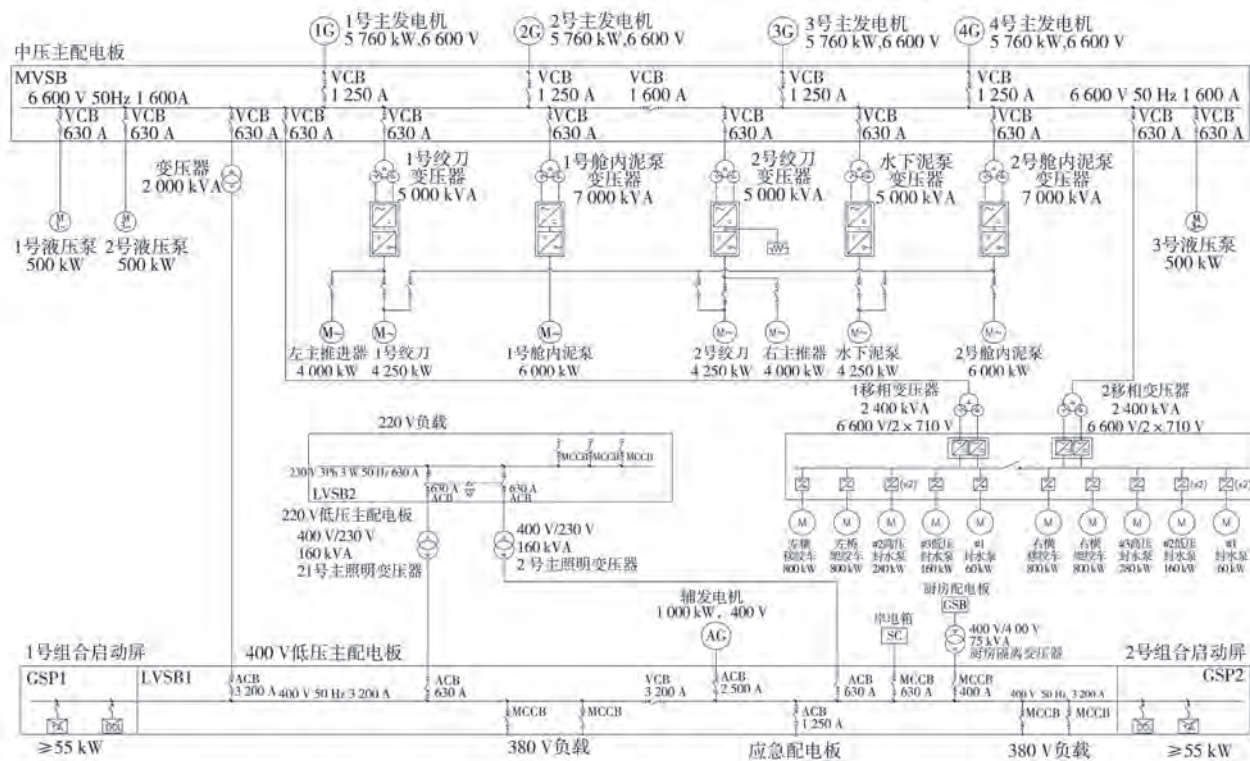


图 10 昊海龙号全电力驱动系统配置

3.5 居住舱室减振降噪

绞吸挖泥船的作业特点决定了它别具一格的总体布置格局：船体一端设置绞刀桥架、龙门吊架及抛锚杆等系统，另一端设置定位系统，而居住舱

室及驾驶室一般都置于主甲板以上的船中区域。绞吸挖泥船在施工作业时,动力系统和各种疏浚设备将长时间重载运行,这也使船上的人员长期受到各设备运行引起的振动噪声的困扰。随着装机功率的加大,这个问题在超大型绞吸挖泥船上变得尤为突

出。如何有效降低振动噪声、改善船员的生活工作环境, 已成为设计的重点和难点^[8]。

昊海龙号在居住舱室设计中, 针对超大型绞吸挖泥船挖掘岩石时产生强劲低频振动的问题, 通过分析研究激励源、船体固有频率及减振系统之间

的匹配关系, 特别采用了气动弹性隔振技术(见图 11), 将船员卧室等对振动噪声要求较高的处所集中置于上甲板中部, 并用气动弹性减振器架起, 有效阻隔挖掘岩石时产生的低频振动向生活区传递, 改善了船员的工作和生活环境^[8]。

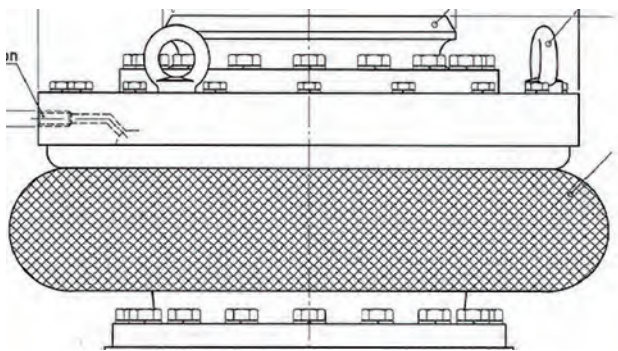


图 11 气动减振装置

4 结 语

本文分析了国际上超大型自航绞吸挖泥船发展态势, 回顾了我国大型绞吸挖泥船的发展历程, 扼要介绍了绞吸挖泥船工作原理和系统组成, 总结了绞吸挖泥船设计应重点考虑的因素; 并从船型与总布置、绞刀驱动、桥架结构设计、泥砂输送、柔性钢桩、全电力驱动、居住舱室减振等关键技术, 全面介绍昊海龙号的设计方案。其采用的绞刀双电机长轴驱动、双壳箱型桥架结构、泥泵三泵组合、柔性钢桩和全电力驱动等技术, 对超大型绞吸挖泥船非常适宜, 可为超大型自航绞吸挖泥船开发提供参考。

天鲲号和昊海龙号等超大型自航绞吸挖泥船的研制成功, 是我国自主设计和建造绞吸挖泥船历程中一个新的里程碑。这些超大型自航绞吸挖泥船不仅具有超强岩土挖掘和长距离高效输送的作业能力, 还具有对不同工况和恶劣高海况的强适应能力, 其总装机功率、绞刀功率和泥泵总功率等主要技术参数均超过国外最新同类船, 标志着我国超大型自航绞吸船研制能力已经进入国际先进行列。

参考文献

- [1] 费龙, 丁勇, 程峰, 等. 耙吸、绞吸挖泥船工程设计[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2018: 147-291.
- [2] 张晓枫, 丁勇, 王倩, 等. 大型绞吸挖泥船开发设计[C]//第十九届世界疏浚大会. 2010: 338-344.
- [3] 张晓枫, 费龙, 刘学勤, 等. “天鲲”号超大型自航绞吸挖泥船总体设计技术[J]. 船舶工程, 2019(2): 32-38.
- [4] OVERHAGEN J, BOOR M, KIK A, et al. On the conceptual design of large cutter suction dredgers; consideration for making choices[C]//Proceedings of the World Dredging Congress. 2004.
- [5] 刘厚恕. 印象国内外疏浚装备[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 256-341.
- [6] VAN Oord. Equipment: cutter suction dredger Athena/Artemis[EB/OL]. [2022-08-04]. www.vanoord.com.
- [7] BOSKALIS. Equipment sheet: Krios self propelled, seaworthy cutter suction dredger[EB/OL]. [2022-08-04]. www.boskalis.com.
- [8] 张晓枫, 费龙. 5 000 kW 绞刀功率自航绞吸挖泥船研发[C]//中国第五届国际疏浚技术发展会议. 2017: 558-565.

