



“浚澜”号大挖深全电驱拼装式 绞吸挖泥船研制

陈九肖^{1,2}, 刘荣振¹

(1. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461; 2. 天津市疏浚工程技术企业重点实验室, 天津 300457)

摘要: 针对我国江河湖库清淤工程中泥沙淤积严重、传统绞吸挖泥船施工成本高且环保性能差的问题, 进行“浚澜”号大挖深全电驱拼装式绞吸挖泥船的研制。对船舶总布置、主尺度、动力配置、连接装置及智能控制系统进行研究。采用柴油机和岸电双动力驱动, 纯岸电驱动施工成本降幅达 66.7%, 同时减少碳排放; 绞刀、水下泵和舱内泵采用变频电机驱动, 智能控制泥泵和绞刀转速, 提高吸入浓度, 降低施工成本; 配备自主研发的高效泥泵和绞刀系统, 输送效率提高 10% 以上, 绞刀采用薄片化设计, 挖掘效率提高 15% 以上。“浚澜”号成功实现了 25 m 挖深的全电驱拼装式绞吸挖泥船的设计与建造, 其在施工成本控制、环保性能、挖掘效率和吸入效率等方面均取得了显著效果。

关键词: 绞吸挖泥船; 变频控制; 全电驱; 连接装置

中图分类号: U674.31; U616+.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)12-0010-07

Research and development of “Junlan” large depth fully electric drive assembled cutter suction dredger

CHEN Jiuxiao^{1,2}, LIU Rongzhen¹

(1. CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Dredging Engineering Technology for Enterprises, Tianjin 300457 China)

Abstract: In response to the serious sedimentation in dredging projects of rivers, lakes, and reservoirs in China, as well as the high construction cost and low environmental protection performance of traditional cutter suction dredgers, the development of the “Junlan” large depth fully electric drive assembled cutter suction dredger is carried out. The overall layout, main dimensions, power configuration, connection devices, and intelligent control system of the ship are studied. Diesel and shore electric dual power drive are used, and the construction cost of pure shore electric drive is reduced by 66.7%, while reducing carbon emissions. The cutter, underwater pump, and cabin pump are driven by variable frequency motors, which intelligently control the speed of the mud pump and cutter to increase suction concentration and reduce construction costs. Equipped with independently developed high-efficiency mud pump and cutter system, the conveying efficiency is increased by more than 10%. The cutter is adopted a thin slice design, and the excavation efficiency is increased by more than 15%. The “Junlan” is successfully achieved the design and construction of a fully electric drive assembled cutter suction dredger with a depth of 25 m, and achieves significant effect in construction cost control, environmental protection performance, excavation efficiency, and suction efficiency.

Keywords: cutter suction dredger; variable frequency control; all electric drive; connecting device

收稿日期: 2025-04-23 录用日期: 2025-05-14

作者简介: 陈九肖(1981—), 男, 高级工程师, 从事疏浚工程技术研究及疏浚工程船舶研发工作。

我国的水资源丰富, “江河湖库”非常多, 泥沙淤积的问题十分严重。黄河下游河段淤积累计超过 55 亿 m^3 , 长江洞庭湖约 60 亿 m^3 , 陕西省 296 座水库的平均库容淤损率高达 28.8%。泥沙淤积导致河床抬高, 湖泊、水库容量减少, 对防洪、航运、水资源的利用以及生态环保等方面产生不利影响^[1-4]。对于清淤工程, “挖”一直是直接有效地解决泥沙淤积问题的措施, 绞吸式挖泥船作为“挖”的一种手段, 在清淤中发挥着不可替代的作用^[5-7]。

近 10 年来我国在大型绞吸挖泥船的研发上正在逐步追赶世界先进水平。2008—2018 年国内各疏浚公司建造的大型自航和非自航绞吸挖泥船约

70 艘。国内绞吸挖泥船装备技术不断进步, 并通过产学研用相结合、自主创新的方式, 消化吸收国外先进技术, 取得了众多关键技术成果, 有力推进了我国绞吸挖泥船装备的国产化进程, 同时也促进了内河小型绞吸船的发展^[8-12]。

目前国际上内河绞吸船, 比较成熟的有 IHC 公司的 Beaver 系列和 DAMEN 公司的 CSD 系列绞吸船, 这两个系列的绞吸挖泥船基本涵盖了各种内河施工工况的需求, 参数见表 1 和 2。近几年随着国家对于生态文明建设和水资源保护的高度重视, 内河绞吸船正在往大挖深、高功率、全电驱、自动化、节能环保的方向发展。

表 1 IHC 公司 Beaver 系列绞吸挖泥船参数
Tab. 1 Parameters of IHC Company's Beaver series cutter suction dredger

船舶型号	总长/m	船长/m	型宽/m	型深/m	设计吃水/m	挖深/m	排泥管直径/mm	总装机功率/kW	绞刀功率/kW	泥泵功率/kW	横移绞车液压/kN	横移锚质量/kg
Beaver30	16.5	12.40	4.50	1.35	0.85	6	300	294	30	250	25	160
Beaver40	20.5	13.41	5.72	1.51	1.05	8	400	483	55	409	40	240
Beaver45	26.6	16.96	6.99	2.01	1.25	10	450	895	110	764	57	360
Beaver50	33.0	22.65	7.87	2.44	1.50	14	500	1 350	170	1 258	90	500
Beaver65	58.0	43.50	12.44	2.97	1.90	18	650	2 819	700	1 706	240	1 500

表 2 DAMEN 公司 CSD 系列绞吸挖泥船参数
Tab. 2 Parameters of DAMEN Company's CSD series cutter suction dredger

型号	总长/m	船长/m	型宽/m	型深/m	设计吃水/m	挖深/m	排泥管直径/mm	绞刀功率/kW	泥泵功率/kW	横移绞车液压/kN
CSD250	19.0	11.5	4.20	1.5	0.90	6	250	30	254	50
CSD350	26.0	16.5	6.00	1.5	0.80	9	350	55	447	50
CSD450	30.8	19.8	6.90	2.0	1.20	12	450	110	970	75
CSD500	38.5	25.5	7.95	2.0	1.05	14	500	180	954	120
CSD650	61.2	49.3	10.50	2.8	1.65	18	650	700	1 825	270

本文研制的船舶主要是针对大型水库清淤工程的需要, 同时也能满足其他疏浚和清淤工程。水库很多是水源地, 环保要求高, 需要船舶能够有较好的环保功能。水库的水深较大, 要求挖深超过 20 m, 同时排距不少于 3 km。在清淤工程完成后, 还能处理一些较硬的土质, 绞刀功率不低于 500 kW。针对这些基本需求, 开展船舶的设计研究。

1 船舶设计和建造特点

内河绞吸船与大型绞吸挖泥船相比, 主要的施工设备和施工原理基本相同。对于适用于“江河

湖库”的绞吸挖泥船, 除了大型绞吸挖泥船应有的功能要求外, 还应具备一些适用于“江河湖库”施工要求的特点: 为了能够适应浅水的江河和深水的湖库清淤工程, 船舶的挖深范围应该足够大, 既能满足小挖深的要求, 也能实现大挖深的需要。有些工程施工环境距离人员居住区较近, 船舶应具备绿色施工的要求, 降低施工对自然环境和居住环境的污染。偏远地区工程, 船舶无法通过航道进入施工区, 应能够通过陆地运输船舶, 具备拆装组合的功能。船舶主要用于清淤工程, 对于土质较硬的工程, 船舶的挖掘系统应具备一定的切削能力, 能够适应不同土质的施工要求。

本文船舶根据水库清淤工程的需要, 挖深能够覆盖大部分水库深度, 设定挖深为 25 m。能够达到远距离输送要求, 最大排距为 5 km, 船舶的产量最大达到 2 000 m³/h。为了最大限度地提高环保施工能力, 船舶采用全电驱形式, 配备岸电接入系统。

2 船舶研制要点

2.1 总布置和主尺度设计

根据所研制的船舶的船型特点, 船舶设计为可拆分运输的形式的船体结构, 根据绞吸挖泥船的布置要求进行功能划分, 并要满足运输的长度、宽度、高度的要求, 将船体结构划分为主浮箱、前边浮箱前段(左)、前边浮箱后段(左)、前边浮箱前段(右)、前边浮箱后段(右)、后边浮箱(左)、后边浮箱(右)、龙门架共 8 个部分, 船体结构之间采用连船装置和螺栓进行连接, 方便拆装。龙门架结构布置在前边浮箱前端, 用于布置起升桥架的滑轮组, 船体浮箱拼装见图 1。



图 1 船体浮箱拼装

Fig. 1 Assembly of hull floating box

主船体结构在满足拆分要求的情况下, 划分 6 个大的空间。在绞吸船进行总布置设计中, 需要考虑施工设备的尺寸、甲板布置空间、船舶的整体浮态以及各主要设备间的连接等因素。绞吸挖泥船由于前端布置桥架系统, 需要开槽, 并且桥架系统的质量大, 大部分绞吸挖泥船都是桥架端重力大、浮箱浮力小, 船舶整体浮态为艏倾。因此布置上需要将主要舱内设备布置在船舶的后端。本文船舶设计中主浮箱布置舱内泥泵、舱内电机和配电间。后边浮箱布置主柴油发电机组和燃油舱及压载舱, 在靠近船中的前边浮箱后段(右)布

置液压设备舱和液压油舱。台车系统布置在后边浮箱间的开槽中。桥架系统布置在前边浮箱间的开槽中。桥架结构根据运输要求, 分为绞刀前端、桥架中段和桥架后段 3 个部分, 绞刀前端布置绞刀系统和水下电机, 桥架中段布置水下泥泵和水下电机, 桥架后段布置耳轴系统和横移锚系统。驾驶室和休息室通过具有减震功能的连接装置布置在主浮箱前端的主甲板上。抛锚杆系统布置在前边浮箱前段(左)和前边浮箱后段(右)的甲板上。在龙门架结构的前端通过钢丝绳拉伸和铰点连接, 为绞刀设置维修平台结构, 便于维修绞刀。在主浮箱的后端甲板上布置岸电接入撬块, 在需要接入岸电进行施工时安装, 不需要接入岸电时, 撬块可以拆卸掉, 用柴油发电机组驱动。

船长取决于船舶整体布置形式。本文船舶在布置上由前向后布置有桥架系统、主浮箱结构和台车系统。主浮箱结构根据泥泵、泥泵电机和配电间内设备的尺寸, 设计长度为 22 m。桥架结构为设计最大挖深 25 m 的要求, 长度设计为 35 m, 考虑浮态的要求, 前部浮力和桥架重力的平衡, 前边浮箱整体设计为 30 m 的两段结构, 中间采用有密封结构的螺栓连接。后边浮箱根据布置主柴油发电机组、燃油舱和台车轨道的需要, 设计长度为 23 m。船舶的船体长为 53 m。

型宽取决于主浮箱的宽度和左右边浮箱的宽度构成。为了满足陆地常规设备运输的要求, 主浮箱和边浮箱宽度设计为 3.95 m, 可以满足在主浮箱内布置 1 台功率为 1 800 kW 舱内泥泵和电机, 左右边浮箱内各布置 1 台 2 000 kW 的柴油发电机组。同时船舶的型宽还要综合考虑绞吸挖泥船在施工作业时横移拉力产生的倾侧力矩, 甲板上在一侧的排泥管线内泥浆产生的倾侧力矩, 以及钢桩施工中下放后产生的倾侧力矩对稳定性的影响, 使船舶稳定性满足航行、作业和避风工况的要求。本文船舶的型宽设计为 11.95 m。

型深在常规绞吸船的设计中, 主要取决于机舱

内设备的高度和船舶所需的干舷。由于本文船舶需要满足陆地运输要求, 整体高度不能超过 3.5 m。浮箱上大的设备设计为可拆卸形式, 高度小于 0.5 m 的小型构件和设备为固定式, 因此浮箱的高度控制在 3 m 以下, 本文船舶最大的舱内设备为 2 台 2 000 kW 的主柴油发电机组, 高度为 2.2 m, 在进行船舶的整体重力、浮力和稳性的初步估算后, 船舶的设计吃水在 1.8 m, 型深设计为 2.9 m。

本文船舶航区取内河 A 级航区, 船体结构强

度及稳性满足 A 航区要求, 可以通过拖航调遣船舶到施工地点。当偏远地区没有航道可以通航时, 船舶可以拆分陆地运输调遣, 可以满足内陆的所有“江河湖库”环保清淤工程和疏浚工程的需要。

“浚澜”号设计确定的主要参数为: 总长 68.3 m, 型宽 11.95 m, 型深 2.9 m, 吃水 1.8 m, 最小挖深为 3.0 m, 最大挖深为 25 m, 最大排距 5 km, 标准疏浚能力可达 2 000 m³/h。船舶总布置见图 2, 三维效果见图 3。

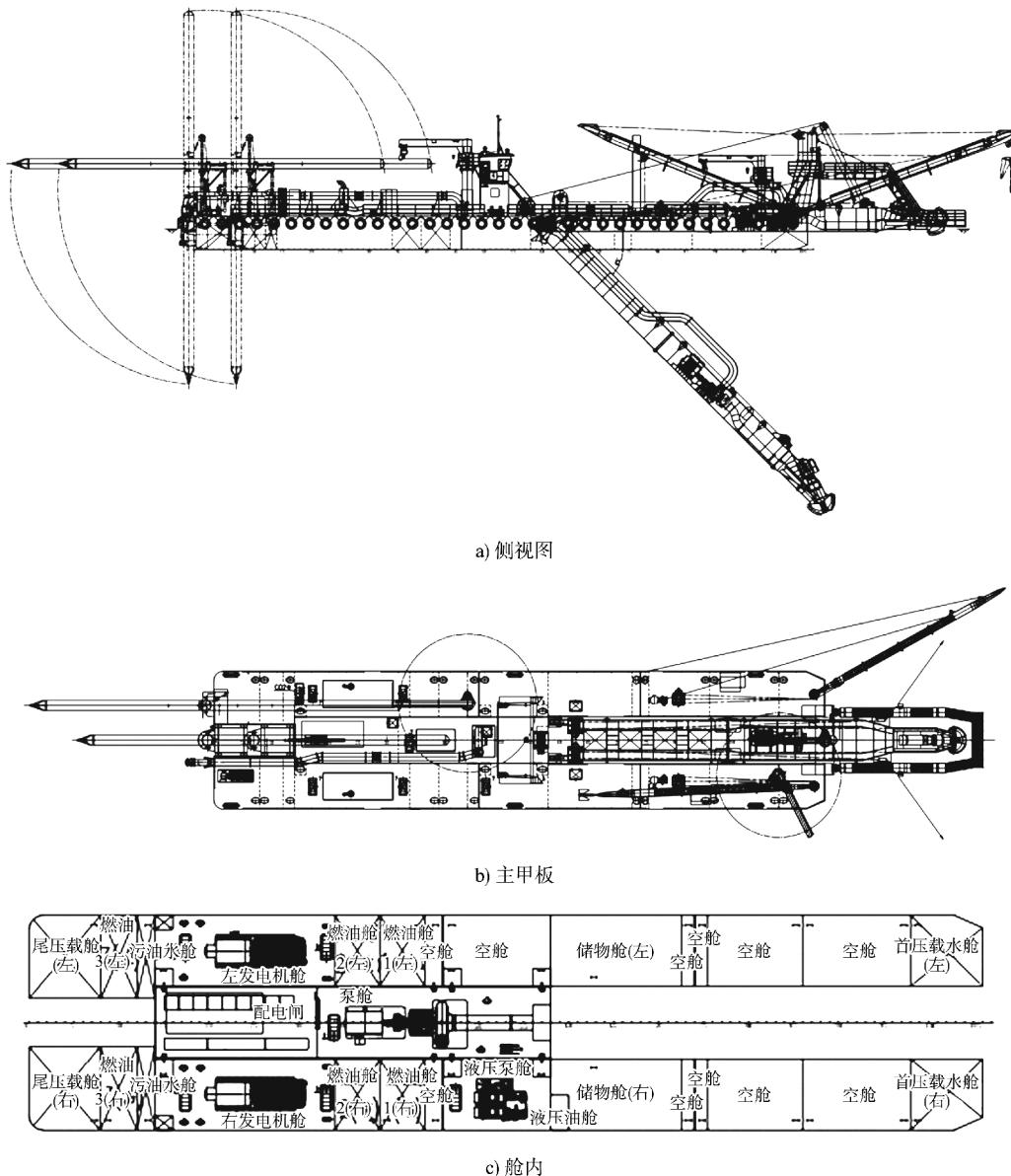


图 2 船舶总布置

Fig. 2 Ship general layout

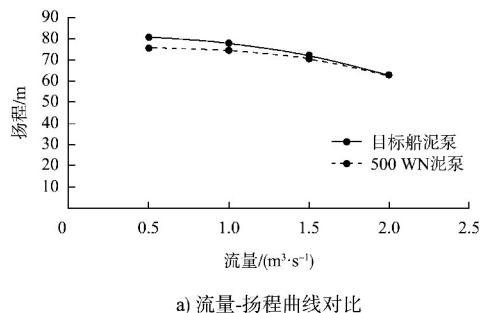


图 3 船舶三维效果
Fig. 3 3D rendering of ship

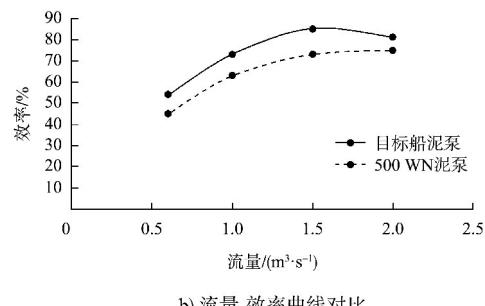
2.2 主要设备配置

“浚澜”号配备 2 台 2 000 kW 的柴油发电机组, 给全船供电。同时配备 1 套高压岸电接入设备, 可以接入岸电施工。2 套供电系统可以根据工程需要自主选择, 在偏远施工地区不能够接入岸电施工时采用柴油发电机组施工, 施工更灵活; 在有岸电能够接入的施工地区, 接入岸电施工, 更节能环保。柴油发电机组供电成本为 2.1 元/(kW·h), 使用岸电仅为 0.7 元/(kW·h), 成本降幅达 66.7%, 同时可以减少碳排放, 保证了船舶绿色环保施工。

“浚澜”号配备自主开发的 1 台舱内泥泵和水下泥泵, 舱内泥泵清水流量 6 000 m³/h, 扬程为 70 m, 轴功率为 1 800 kW, 由 1 台变频电机驱动; 水下泥泵的清水流量 6 000 m³/h, 扬程为 30 m, 轴功率为 700 kW, 由 1 台水下变频电机驱动。两款泥泵结构设计更加紧凑, 满足了内河装备模块化要求。目前在该流量范围内使用的泥泵型号为 500 WN, 进行研发的新泥泵与 500 WN 泥泵的对比, 结果见图 4。由于水下泵的效率更高, 比较以舱内泵为主, 在设计点扬程一致的情况下, 泥泵效率提高 10%。



a) 流量-扬程曲线对比



b) 流量-效率曲线对比

图 4 泥泵特性曲线对比
Fig. 4 Comparison of characteristic curves of mud pumps

绞刀采用 1 台 600 kW 的水下变频电机驱动, 配备五臂通用绞刀, 采用自主研发的刀齿连接装置, 使用电动扳手快速拆装刀齿, 提高工作效率。刀臂采用薄片化的设计理念, 可有效减小刀臂的切削阻力, 提高挖掘效率 15% 以上, 能够在 25 m 挖深的条件下, 顺利开挖硬质黏土、中等密实砂土等疏挖困难的土质, 大幅提高了船舶施工适用范围。

由于船舶要满足可拆分陆地运输的要求, 整体的空间布置紧凑, 舱内被拆分成小的空间, 甲板的空间有限, 本文船舶的一些施工辅助设备采用液压形式, 配备 1 套由电机驱动的液压系统, 给横移绞车、桥架起升绞车、起锚绞车、锚杆回转绞车以及台车的起升油缸、行程油缸和倾倒油缸提供动力。

“浚澜”号的绞刀、水下泵和舱内泵都采用变频电机驱动, 施工时可以根据横移绞车的横摆速度调节转速, 通过智能控制系统使泥泵转速与绞刀横摆速度相匹配, 在横摆速度快时, 泥泵转速增加; 横摆速度慢时, 泥泵转速减少, 从而提高吸入浓度, 降低施工成本, 提高施工效率。

2.3 浮箱连接装置

船体是通过连接装置把各个浮箱分段连接在一起组成船体结构, 浮箱之间的力是通过连接装置完成力的传递, 因此连接装置要拆卸方便, 具有足够的强度, 同时又能减少泄漏风险。内河小型绞吸挖泥船设计上主要的设备都布置在主浮箱上, 两侧的边浮箱用于提供浮力和布置施工设备及功能舱室, 因此浮箱之间是主浮箱压住边浮箱, 为单向力的传递形式, 采用的连接装置主要是挂

钩和螺栓连接。本文船舶的主要设备分别布置在主浮箱和边浮箱上, 主浮箱和边浮箱之间的力, 由于船舶的两大施工设备桥架和台车作用, 船舶会受到中拱弯矩, 因此在一个浮箱上的连接装置会受到不同方向的力的作用, 单向力传递形式的

挂钩连接不再适用。本文船舶采用的是双向力传递的连接装置, 能够实现两个方向受力的传递, 同时配合锤头螺栓的设计, 可以只在一个浮箱之内就完成连接, 减少连接和拆卸的时间, 同时降低密封件泄漏的风险。连接装置三维图见图 5。

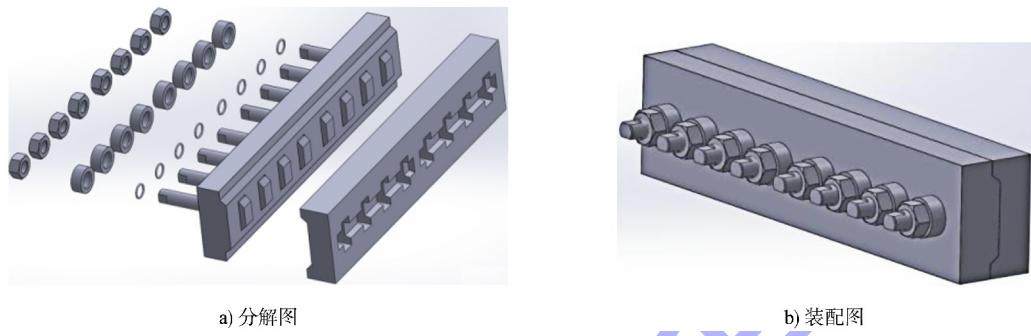


图 5 连接装置三维图
Fig. 5 3D rendering of connecting device

2.4 智能控制系统

“浚澜”号搭载了为其量身打造的环保疏浚监控系统。该系统凭借智能感知技术、高效控制算法以及强大的数据挖掘与分析能力, 实现对疏浚作业过程的决策支持, 运行参数的精准微调与施工的高效控制。该系统还集成自主研发的智能无源疏浚浓度计, 有效解决了传统放射源浓度计在环保方面的短板, 进一步提升了船舶的环保标准^[13]。考虑船舶拆装的特殊性, 连接器以航插为主, 疏浚台仅提供必要的人机交互操纵设备, 其余在工作站及远程集中控制室中进行控制。

2.5 船舶建造要点

船体结构在建造中的主要难点是各个浮箱之间拼装结构精度的控制。精度控制不到位, 各个连接构件有误差, 影响船舶的拆装使用和结构强度。其中主浮箱与左右两个前边浮箱的连接的同时, 还要与起吊桥架的龙门结构连接。在主浮箱、前边浮箱和龙门架结构的连接中共有 8 个连接面的连接控制要求, 需要控制安装误差在 2 mm 以内。为了保证建造精度, 采用先制作浮箱、后焊接连接面的方法。当浮箱都制作完成后, 将各个浮箱分段按照设计要求拼在一起, 然后安装连接装置和连接耳板, 浮箱和连接装置及连接耳板定位完成后, 再将浮箱分开, 然后将浮箱与焊接连

接装置和耳板进行焊接, 同时控制焊接变形, 完成连接装置的安装。这样制作能够很好地控制安装精度并保证结构强度。

由于船舶是可拆装的船体结构, 在浮箱与浮箱之间的连接除了有连接装置, 还有各种电缆、管系和控制线缆, 这些电缆、管系和控制线缆很多需要布置在甲板上, 甲板的空间需要进行合理的布置, 因此需要保证连接的电缆、管系和控制线缆尽量短, 同时减少跨过浮箱之间次数, 从而减少连接接头, 使船舶在调运拆装时更方便。实船见图 6。



图 6 实船
Fig. 6 Actual ship

3 结语

- 1) “浚澜”号采用双动力驱动形式, 提供了更灵活的施工选择, 尤其适用于偏远地区和有岸电接入条件的施工区域。
- 2) “浚澜”号采用全电驱系统与变频控制技术

应用, 大幅提升了挖掘浓度, 降低施工成本。

3) “浚澜”号的智能控制系统与环保疏浚监控系统, 通过智能感知技术、高效控制算法和数据挖掘能力, 实现对疏浚作业的精准控制。

4) “浚澜”号创新型的连接装置和模块化设计, 简化连接和拆卸过程, 提高了拼装的安全性和便捷性。

5) “浚澜”号自主研发的高效泥泵和绞刀系统, 提高了挖掘效率和吸入效率。

6) “浚澜”号是国内首次实现 25 m 挖深的全电驱拼装式绞吸挖泥船, 为后续进行大型江河湖库用环保绞吸挖泥船的设计提供了参考。

参考文献:

- [1] 曹慧群, 周建军. 我国水利清淤疏浚的发展与展望[J]. 泥沙研究, 2011(5): 67-71.
- [2] CAO H Q, ZHOU J J. Development and prospect of dredging at water conservancy works in China[J]. Journal of sediment research, 2011(5): 67-71.
- [3] 龙毓骞, 梁国亭. 黄河下游断面资料数据库及冲淤分布初步分析[J]. 水文, 2002, 22(4): 28-31, 52.
- [4] LONG Y Q, LIANG G T. Range survey on database and deposition of the lower Yellow River[J]. Journal of China hydrology, 2002, 22(4): 28-31, 52.
- [5] 胡春宏, 吉祖稳, 黄永健, 等. 我国江河湖库清淤疏浚实践与分析[J]. 泥沙研究, 1998(4): 49-57.
- [6] HU C H, JI Z W, HUANG Y J, et al. Analysis on dredging practice in rivers, lakes and reservoirs [J]. Journal of sediment research, 1998(4): 49-57.
- [7] 吴金勇, 刘宇智. 多泵串联技术在环保疏浚工程中的应用[J]. 水运工程, 2018(S1): 49-53, 104.
- [8] WU J Y, LIU Y Z. Application of multi-pump series technology in environmental dredging engineering [J]. Port & waterway engineering, 2018(S1): 49-53, 104.
- [9] 严丽芳. 太湖生态清淤底泥处理技术比选分析[J]. 东北水利水电, 2020, 38(11): 45-46.
- [10] YAN L F. Comparison and analysis of ecological desilting sediment treatment technologies in the Taihu Lake [J]. Water resources & hydropower of Northeast China, 2020, 38(11): 45-46.
- [11] 朱伟, 侯豪, 孙继鹏, 等. 河湖库淤积治理中底泥清淤的内涵与发展方向[J]. 水利学报, 2024, 55(4): 456-467.
- [12] ZHU W. HOU H, SUN J P, et al. Connotation and development direction of river, lake and reservoir sediment dredging [J]. Journal of hydraulic engineering, 2024, 55(4): 456-467.
- [13] 任岗, 张文芳. 水库清淤的必要性与可行性分析[J]. 浙江水利科技, 2010(6): 34-35.
- [14] REN G, ZHANG W F. Necessity and feasibility of dredging for reservoirs [J]. Zhejiang hydrotechnics, 2010(6): 34-35.
- [15] 王健, 孔凡震. “天鲲号”自航绞吸船核心技术应用研究[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(1): 58-62, 67.
- [16] WANG J, KONG F Z. Applied research on key technology of Tiankun self-propelled cutter suction dredger[J]. China harbour construction, 2017, 37(1): 58-62, 67.
- [17] 何炎平, 谭家华, 谷孝利, 等. “宇大 1 号”大型绞吸式挖泥船设计要点[J]. 船海工程, 2010, 39(2): 8-11.
- [18] HE Y P, TAN J H, GU X L, et al. The design key points of the Yuda-1 large cutter suction dredger[J]. Ship & ocean engineering, 2010, 39(2): 8-11.
- [19] 蒋如宏, 何炎平, 余龙, 等. 大型绞吸式挖泥船台车系统的设计研究[J]. 船舶工程, 2007, 29(3): 41-43.
- [20] JIANG R H, HE Y P, YU L, et al. Design study on large car-type system of cutter suction dredger [J]. Ship engineering, 2007, 29(3): 41-43.
- [21] 李铭志, 何炎平, 黄超. 超大型绞吸挖泥船泥沙输送系统优化设计[J]. 水运工程, 2017(2): 166-172.
- [22] LI M Z, HE Y P, HUANG C. Optimal design of slurry transportation system on very large cutter suction dredger[J]. Port & waterway engineering, 2017 (2): 166-172.
- [23] 苏召斌, 于航健, 陈九肖, 等. 绞吸挖泥船环保清淤功能的研发[J]. 水运工程, 2020(S1): 72-76.
- [24] SU Z B, YU H J, CHEN J X, et al. Research and development of environmental desilting function of cutter suction dredger [J]. Port & waterway engineering, 2020(S1): 72-76.
- [25] 陈定, 王野, 苏召斌. 绞吸挖泥船泥浆浓度的无放射源环保测量技术[J]. 水运工程, 2020(S1): 95-99.
- [26] CHEN D, WANG Y, SU Z B. Environmentally friendly mud concentration measurement technology of cutter suction dredger without radioactive source [J]. Port & waterway engineering, 2020(S1): 95-99.

(本文编辑 王璁)