



## 现代耙吸挖泥船节能减排技术的发展与应用

侯晓明, 朱 荣, 黄伟明  
(中交上海航道局有限公司, 上海 200002)

**摘要:** 耙吸挖泥船是高能耗的施工船舶, 研究和应用节能减排技术降低能耗, 不仅可以为疏浚企业节省燃油费用, 还可以减少船舶造成的环境污染, 获得经济和环保双重效益。介绍挖泥船节能减排的含义和评价指标, 从船型设计、推进动力系统优化、疏浚机械和集成监控系统开发及设计建造单耙挖泥船等方面讨论耙吸挖泥船节能减排技术的发展及应用现状。

**关键词:** 耙吸挖泥船; 节能减排技术; 应用现状

中图分类号: U 616<sup>75</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)01-0039-06

### Development and application of energy-saving technology for modern trailing suction dredgers

HOU Xiao-ming, ZHU Rong, HUANG Wei-ming

(CCCC Shanghai Dredging Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

**Abstract:** The trailing suction hopper dredger is such a kind of construction ships with high energy consumption. By the study and application of energy-saving technology, not only the fuel costs could be saved, also the environmental pollution caused by ships could be reduced, therefore both economic and environmental benefit could be achieved. By introducing the definition of energy conservation and evaluation of the trailing suction hopper dredger, this paper discusses the energy-saving technology and present application status of ship design, power equipment, the development of dredging machinery and integrated monitoring system, and construction of single suction pipe dredgers.

**Key words:** trailing suction dredger; energy-saving technology; present application status

由于国际油价快速上涨, 疏浚企业营运成本的构成因素发生了显著的变化, 燃料费所占疏浚成本的比重已从30%上升到40%, 并有不断攀升之势。耙吸挖泥船的装机功率是普通运输船的几倍, 作为疏浚企业的能耗大户, 如何降能增效, 已成为整个行业的一个重要研究课题。优秀船型的开发、动力装置、疏浚机械、辅助设备、集成监控等节能减排技术方面的发展和应用, 不仅可以为疏浚企业节约能源, 还可减少排放造成的环境污染, 获得经济和环保双重效益。

#### 1 耙吸挖泥船节能减排的含义

耙吸挖泥船具有挖泥装舱、自航运输、底开门抛泥、抽舱排岸及艏喷等功能, 广泛用于航道和港口疏浚、基础设施建设、城市人居以及能源工程, 在挖泥船队中占有重要地位。疏浚企业一般通过计算万方油耗来反映挖泥船的节能减排水平, 同样舱容的耙吸船在同等条件和施工工况下, 每万方疏浚土在整个施工周期中油耗越低, 说明该船在节能减排方面技术越先进, 经济性更好。

收稿日期: 2012-11-22

作者简介: 侯晓明(1960—), 男, 高级工程师, 主要从事船舶设备管理、船舶通讯与自动化控制与管理等工作。

## 2 耙吸挖泥船节能减排技术的主要评价指标

### 1) 舱容系数。

为衡量泥舱舱容与船舶主尺度之间的关系,通常采用舱容系数这一概念,即泥舱容积( $C$ )与船长( $L$ )、型宽( $B$ )和型深( $D$ )乘积的比值( $C/LBD$ ),是表征耙吸船装载能力的指标之一。同样舱容时,较大的舱容系数表明挖泥船的主尺度小,航行阻力小,油耗低,排放少。同时还意味着资源消耗少,初投资省。

### 2) 单位舱容功率。

单位舱容功率为国际上常用的比较耙吸挖泥船节能减排技术水平的参数之一,该数值小代表耙吸船单方所匹配的主机功率小,能耗低,从节能减排角度说明技术先进。

### 3) 航行比功率。

航行比功率是国际上另一个衡量耙吸挖泥船能耗水平和经济性的重要指标,表示单位航速下运输单位载重土方时所消耗的主机功率,以 $\text{kW}/(\text{t}\cdot\text{kn})$ 为单位,它更能准确反映出耙吸船运能与实际能耗之间的关系。同样运能下这一数值越小,所需的推进功率越低,油耗更省。

### 4) 载重系数。

载重系数( $DWT/A$ )是表征耙吸船装载能力的又一个重要参数。通常耙吸船的装载能力涵盖舱容和装载量两个方面。同样载重量的耙吸船,载重系数越高意味着船舶自身质量轻,油耗相对较省,建造成本也低。

### 5) 方形系数。

方形系数 $C_b$ 是表征船体水线以下肥瘦程度的一个重要参数。同等排水量下通过增大方形系数可以减少船舶主尺度,减轻空船重量,增加运力,从而提高经济性。

### 6) 溢流损失。

这是反映耙吸挖泥船装舱效率的一个指标,通常用百分比来表示。同样舱容的挖泥船在有效装舱时间内,泥舱实际泥土装载量和挖泥船产量计读数偏差小,说明溢流损失少,装舱效率高,能源浪费少。溢流损失还和泥沙特性、泥舱形状有关。有效控制溢流损失还可减少对水体的污染。

### 7) 挖泥装舱时间。

挖泥装舱时间在一定的条件下可以表征耙吸船的装舱效率和能源利用水平,它和泥砂特性、泥泵性能、耙头设计、泥舱大小与形状、溢流损失、环境等诸多因素有关。

### 8) 排岸时间。

排岸时间反映耙吸挖泥船在进行舢吹、舢喷作业时,排空泥舱内所载疏浚土的时间。同等条件下,排岸时间短,表示排岸效率高,油耗也低。

## 3 耙吸挖泥船节能减排技术的发展与应用

现代耙吸挖泥船日渐大型化、智能化,高效节能是其技术发展的主攻方向。按照全生命周期设计原则进行全领域优化设计,长球鼻艏、浅吃水、双艏鳍、分水舢等技术的发展与应用,高效泥泵、水下泵、耙头等疏浚机械的开发,疏浚自动化方面的研究;共轨、电喷柴油机,新型导管螺旋桨、中压变频系统、柴油机废气和冷却水的余热再利用、废气处理等方面均取得了进展和突破。

### 3.1 节能型耙吸挖泥船的总体设计

耙吸挖泥船总体设计涉及主尺度、线型、总体布局、阻力与推进、强度计算和校核、质量重心与浮态、稳性以及操纵性能等方面。需采用先进的技术手段和设计理念,进行研究计算乃至模型试验,使船型方案得以优化,实现高效节能目的。

#### 3.1.1 主尺度的选择

通过对长宽比 $L/B$ 、宽度吃水比 $B/d$ 、方形系数 $C_b$ 、泥舱容积系数、载泥量系数、菱形系数等不同尺度方案的分析、论证,确定最优的主尺度,确保吃水、航速、舱容系数、装载量系数以及航行比功率等主要性能指标达到设计要求。

#### 3.1.2 型线设计的优化<sup>[1]</sup>

型线设计与船舶快速性、适航性、稳性、装载能力等性能指标关系重大。耙吸船大部分时间在浅水狭窄水域航行和作业,因此浅吃水性征对其具有特殊意义,加之航速的不断提高,传统的外飘式首柱以及常规的船尾形式已很难满足其浅水作业性能的需要,国外近十年来的实践经验表明,球首和尾鳍对改善阻力和推进性能、提高运

载能力十分有效,这是因为:随着方形系数的日益肥大,从平行舢体到首尾段之间的线型变化相当大,肥大球艏的采用有利于型线的平缓过渡;耙吸船在浅水中航行时船艏会产生较大的波峰和波谷,导致航行阻力增大,而球艏的采用可有效降低兴波阻力;长球艏还有助于浮态的改善。而双尾鳍对增大方形系数、减小黏压阻力,改善尾部流态、增加泥舱长度等均具有良好的效果,这在“刚果河”等新建超大型耙吸船上再次得到验证。国内方面,中船708研究所近年来也结合自身实践,完成了“球鼻首+V型艏+导流鳍”和“球鼻首+双尾鳍+导流鳍”二型船的线型开发及应用,并达到节能效果。

### 3.2 船体结构优化技术

耙吸挖泥船的结构形式和常规货船差别较大,不仅主甲板和泥舱甲板上有着纵通的连续大开口,而且底部有若干个泥门、溢流筒,使得舢断面上的剖面模数进一步降低。同时,由于泥舱长度通常不到船长的50%,载荷相对集中。另外泥舱装载也不如运输船均匀,使得船体承受的弯矩和剪力要大,并且挖泥的装卸周期很短,耙吸挖泥船一天之中装、卸作业周期就有8~10次,甚至更多。参与总纵弯曲的构件,反复经受中垂、中拱弯曲应力的变化,故对疲劳强度、刚度等要求亦较运输船高。20世纪90年代,IHC公司与法国BV船级社共同开发了挖泥船结构有限元(FEM)计算方法,尤其是在某些构件上,利用DNV软件,通过结构建模、有限元计算、高强度钢材的应用,优化了结构设计,使空船质量进一步减轻,从而提高了载重量。

### 3.3 挖泥干舷的研究

耙吸挖泥船一般在沿海遮蔽水域作业,在风浪条件恶劣的情况下可以进港避风。在相同的船舶尺度下如何减小干舷,提高装载量从而提高经济性是一新的课题。为此IHC公司和法国BV船级社合作,对挖泥干舷和稳性校核方法进行研究,并提出了相应的稳性衡准及对设备的要求(即所谓的DR67)。国内方面,CCS也制定和修改了相关规范、规则,于2006年最终实现了挖泥干舷的

应用,使耙吸船的装载能力有了显著提高。

## 3.4 动力系统的发展和应用

### 3.4.1 高效节能柴油机的开发应用

耙吸挖泥船的主机大多选用中速柴油机。近年来柴油机制造商一直在进行节能减排方面的研究,在船用中速机市场独占鳌头的WARTSILA公司研发的向气缸内喷水技术可以使WARTSILA 46机的 $NO_x$ 降至10 g/kWh以下,并可以减少冷却水的消耗,此方法还适用于老机器的改造。WARTSILA还在研究向气缸内喷射蒸汽,使 $NO_x$ 进一步降至3g/(kW·h),热效率提高3%~5%,达到50%。目前W46和W64机燃油消耗率仅为172 g/(kW·h),已达到低速机的水平<sup>[2]</sup>。

另外,近几年柴油机电喷、共轨技术发展很快。VIT电子喷油系统装置采用微机控制,可即时将柴油机工况的各类参数,如主机转速、曲轴转角、燃烧压力、扫气泵压力以及排气温度等数值输入微机进行综合分析处理,使得负荷变化时,油泵自动调整供油提前角,使柴油机在部分负荷时有较高的爆压,在高负荷运行时最高燃烧压力不超过额定值,实现燃油在气缸内的燃烧过程的最佳控制,有效地改善了柴油机运转时的经济性<sup>[3]</sup>。ACERT技术全称为Advanced Combustion Emissions Reduction Technology,主要为CAT柴油发动机所采用,通过对燃油供给、电子控制、进气管理和后处理4个发动机技术进行控制,以达到使发动机烟雾最小化,减少气体排放,降低噪音,提高燃油效率。C175-16是CAT发动机首款采用ACERT核心技术进行设计建造的发动机,可以达到无需对尾气进行后处理就能满足IMO Tier II的排放标准。

### 3.4.2 耙吸挖泥船推进动力系统优化配置

#### 1) 主机复合驱动技术。

现代大型耙吸挖泥船均配置有大功率泥泵、高压冲水泵等疏浚设备。主要有满载/轻载航行、低速挖泥装舱、抽舱排岸3种不同的工况。主要设备在不同工况时所要求功率不一样。最佳的动力系统配置必须合理兼顾3种不同的主要工况,为此提出了复合驱动技术的概念,由过去柴油机

“一对一”的直接驱动方式，变革为主机一机多带的动力配置形式，即一台主机同时驱动多种设备。目前耙吸船的动力配置主要有“一拖三”和“一拖二”2种复合驱动形式。“一拖三”指主机通过输出端的双输出齿轮箱分带推进器和轴带发电机，自由端带舱内泥泵，这种方式一般要求柴油机80%~100% rpm运转时有恒扭矩特性，机舱布置困难，对船舶浮态控制要求高，但维修简单。“一拖二”技术是指主机通过输出端的双输出齿轮箱分带推进器和轴带发电机或输出端带螺旋桨，自由端带发电机，主机运行平稳，取消了泥泵对柴油机80%~100% rpm恒扭矩要求，装机功率进一步降低，同时对泥泵的布置和调速更灵活，疏浚机械采用变频驱动，可适应更多的疏浚工况。上述两种复合驱动方式各有千秋，取决于耙吸船挖深、船东要求等，需要经过反复论证，确定系统的设计方案。耙吸船借助“复合驱动技术”，使得各种工况下能充分利用动力系统提供的功率，从而减少柴油机装船台数和装船功率，节省了能耗，获得更加明显的经济效益。

#### 2) 高效导管螺旋桨的研究与应用。

推进效率是影响挖泥船经济效率的主要因素，如何优化船、机、桨的配合特性，提高推进效率是挖泥船设计时重点研究的课题之一。近10年来，欧洲国家的科研人员研究开发了一些新型螺旋桨，增大螺旋桨直径且降低转速，提高螺旋桨敞水效率，使推力减额因数增加以及增大伴流分数，在推进功率不变的情况下，可提高航速4%~5%，个别情况甚至达到8%~10%。WARTSILA (LIPS) 公司开发的HR高效导流管的推进效率比19A导流管提高4%。因此，设计低转速大直径导管桨，与其选配最佳船尾形状是船舶节能的重要措施之一<sup>[4]</sup>。

#### 3.4.3 采用主机轴带发电机

由于耙吸挖泥船集挖、运、抛、舢吹舢喷于一身，主推进柴油机在一个施工周期内负荷变化大。当处于部分负荷工作时，其经济性较差，耗油率增加。应用主机轴带发电机技术，不仅可使主机工作在效率高的运行区域，而且还可以减少柴油机的装机数量，降低初投资，便于机舱布置<sup>[4]</sup>。

#### 3.4.4 辅发电柴油机燃烧劣质油

国外部分耙吸船辅发电柴油机燃烧与主机相同的重质燃油，实现了燃用单一品种油，节约燃油开支，同时也使机舱布置和管路布置大大简化，减少维修工作量<sup>[5]</sup>。

#### 3.4.5 废气处理和利用技术

##### 1) 降低微粒的新技术。

目前最普遍的方法是在排气管上加装一个微粒捕获器，用来捕获废气中的微粒，并在一定的工况或条件下加以清洁，使微粒捕获器得到再生。就目前而言，再生的方法有很多，但受捕获器材料、工艺等的限制，捕获器再生的可靠性不能很好地保证，还需要广泛地研究。还有静电捕获技术、旋风分离PM技术、燃油添加剂技术等也在广泛深入地研究，但这些技术离实用仍有差距<sup>[6]</sup>。

##### 2) 降低NO<sub>x</sub>的新技术。

在降低柴油机的NO<sub>x</sub>方面，目前通常采用在排气中加入还原剂与NO<sub>x</sub>进行还原反应的方法。还原NO<sub>x</sub>的方法有：选择非催化还原、非选择催化还原和选择催化还原。国外进入实用化的技术包括选择催化还原技术和NO<sub>x</sub>吸附催化技术，采用的还原剂主要是氨和尿素<sup>[6]</sup>。

##### 3) 采用EGR废气再循环技术。

废气再循环技术(EGR)是通过回引部分废气与新鲜空气共同参与燃烧反应，利用废气中含有大量化学惰性气体(CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>等)具有较高的比热这一特性来降低NO<sub>x</sub>的生成。因为NO<sub>x</sub>的生成条件是高温富氧，而废气的引入一方面使混合气热容量增大，造成使相同量的混合气升高同样温度所需热量增加，从而降低最高燃烧温度；另一方面废气对新鲜气的稀释也相应降低了氧的浓度，从而有效地抑制NO<sub>x</sub>的生成。EGR与其它技术相结合是改善发动机整体性能发展的总趋势。采用氧化催化剂与EGR反馈控制能同时改善PM和NO<sub>x</sub>；采用高压共轨喷油系统，结合高EGR率可使NO<sub>x</sub>和烟度同时大幅下降；改进燃烧系统和冷却EGR可进一步降低NO<sub>x</sub>排放<sup>[7]</sup>。

##### 4) 柴油机排气与冷却水余热的再利用。

燃油在气缸内燃烧后的热量大部分被排气和冷却水带走，只有小部分热量得以充分利用。

现在最为普遍的就是配置废气锅炉以及主机暖缸利用冷却水热量,燃气透平也是利用主机排气废热。为进一步回收柴油机废气热量,欧洲一些船舶设计公司开始研究在废气锅炉之后增设一热管锅炉,对柴油机的排气余热进行二次回收;同时主机采用高低温冷却系统,利用低温系统38~42℃的冷却水来加热油舱,高温系统80~90℃的冷却水来加热日用柜。相对而言其结构复杂,但在达到同样冷却效果的前提下淡水冷却器面积更小<sup>[8]</sup>。

#### 3.4.6 优化机舱布置,改善主机进气环境

挖泥船的机舱空间相对较小,机舱布置应首先满足总体布局,机电设备及其辅机布置合理,同时,机舱周围环境应满足推进柴油机进气的需求,使主机燃烧良好,排气顺畅,从而达到节能减排的目的。

### 3.5 主要疏浚机械的研究

耙吸挖泥船要完成复杂的挖泥作业,更有赖于各种疏浚装备的开发、选型和相互间的合理匹配,才能达到高效和节能的目的。

#### 3.5.1 泥泵

泥泵历来被视为耙吸挖泥船的核心设备——相当于人的“心脏”。耙吸船的泥泵又分为舱内泵和水下泵两种,舱内泵根据扬程又分低压泵、中压泵、高压泵几种。由于舱内泥泵吸入性能限制一般只适用于-50 m左右水深,在大深度采砂工程中则采用机电一体化的电驱动水下泥泵。泥泵选型、参数、吸入性能、效率等方面直接影响到耙吸船的装舱和排岸效率,一般根据船型、土质类型、产量、挖深、排岸等进行选择。目前国外对泥泵研究较深的有荷兰IHC、美国GIW、德国LMG等公司,国内有石家庄水泵厂、中交上航局工业公司等。荷兰IHC公司及其前身有150多年的挖泥船制造经验,目前泥泵清水效率已超过85%,产品分布从500 mm口径到1 400 mm,压头从低压、中压、到高压,形成了标准化系列产品。

#### 3.5.2 耙头

耙头也是耙吸挖泥船的关键装备之一。一个性能优越的耙头,不仅吸入性能好,对不同泥质挖掘的适应性强,单位时间内的挖掘产量高,

而且耙头在挖泥时产生的阻力小,以降低挖掘成本。普通耙头一般以机械挖掘为主,高压冲水为辅,主要适用于松散土质。近几年来,以荷兰IHC为首的国内外疏浚设备制造商通过针对性的研究,成功开发了不同类型、装有不同耙齿、适应不同土质的主动耙头,在挖泥试验中取得了良好的挖掘效果,提高了耙吸挖泥船的综合经济性。

#### 3.5.3 装驳系统的设置

如果耙吸挖泥船设计为单耙,另一舷可以配置一套装驳系统。研究和实践表明耙吸挖泥船借助装驳系统和泥驳配合疏浚作业,在30 km以上长距离运沙工作中,使“挖”、“运”分离,能有效地提高挖泥船利用率,达到高效装运,减少综合油耗,降低施工成本。

#### 3.5.4 装舱系统

装舱系统主要包括装舱管系、消能箱形式、溢流筒和泥舱形状。进舱管系的设计应综合考虑全船的空间布置、管路走向、分流管的角度和闸伐设置,同时还要结合不同疏浚土质的沉降速度、漂流距离以及对泥舱的扰动,以保证泥舱的装舱效果以及装载平衡。消能箱是挖泥船装舱系统的一项关键设备,其目的是对进舱泥浆进行消能,减少扰动,提高沉淀效果。消能箱的形式、数量和泥泵参数、装舱管系布置、溢流筒位置和大小、泥舱尺寸和形状有关,需经过大量数模、试验来确定。通过优化装舱过程中的溢流和泥浆沉淀的研究,目前新造耙吸船上的装舱效率有了明显提高,降低了装舱时间,减少了溢流损失,带来了巨大的经济效益和环保效果。国外不少耙吸船还对溢流水采取了循环利用,不仅进一步提高了吸入浓度,还减轻了水体污染。

### 3.6 疏浚集成监控技术

经过多年研究开发,耙吸挖泥船疏浚集成监控技术日益提高,已由传统的驾驶室分立设置、多人操纵的疏浚控制台、操耙控制台发展为采用网络化和带完整SCADA功能的综合集成管理系统,将绝大部分开关、控制按钮、仪表、指示灯(除应急操作之外)用计算机屏幕和键盘取代实现一人操作。该系统下层通过独立的PLC系统对全

船疏浚液压系统、疏浚设备、推进控制系统和电站等进行数据采集和自动控制,上层通过SCADA系统实现对全船各系统的图形化操作和显示,并可对疏浚过程中产生的各种数据、故障状态进行分析、存储、回放、打印;同时通过DT/DP功能实现动力定位和动态跟踪,极大地提高施工精度,减少疏浚废方,确保工程质量,达到节能减排的目的。

随着计算机技术、控制技术、信息技术、软件技术、传感器融合技术、现场总线和系统集成技术的成熟,近几年IHC公司结合大量的实际经验、数据积累,在自航耙吸挖泥船上开发了一套智能挖泥(a smart dredger)、一人桥楼(one-man bridge)系统,并成功运用在比利时DEME疏浚公司30,000 m<sup>3</sup>耙吸船刚果河(M/V CONGO RIVER)等多艘挖泥船上<sup>[9]</sup>。该技术不仅降低了船员的劳动强度,改变了以往耙吸船的操作方式,更能通过计算机对施工过程的各种参数记录与分析得出最佳施工工艺与方案,达到提高挖泥效率,降低油耗之目的。

### 3.7 单耙船发展的新趋势<sup>[1]</sup>

由于国内外各大疏浚设备制造商、疏浚企业、科研单位开发的高效耙头、高效泥泵、消能箱等疏浚机械,吸入浓度大大增加,沉淀效果越来越好。如果采用单耙单泵设计,使得另一舷的推进主机可以在吹岸时来驱动另一泥泵,而这一泥泵为接力高压泵,在两泵串联情况下,吹距增加,大大增强了承包工程时吹填作业的灵活性。单耙设计已被欧洲疏浚公司广泛采用,尤其是在挖掘中细砂的情况下,浓度可以提高40%以上,这种设计基本可以满足装舱时间的要求,而且单耙具有如下优点:维护保养简单,可节省50%的耙管成本费用;在同一推进功率下,有更大的推力分配,使单耙头得到更大的挖掘力,破土能力更强,在某种意义上,同一挖掘能力下,装机马

力减少,从而达到节能目的;单耙装舱还可以减少泥舱内泥浆扰动,减少溢流,达到减少污水外溢,从而保护环境。

## 4 结语

目前,推动疏浚企业挖泥船的节能减排工作,迫切需要加大投入,除了在新技术方面要进行创新外,还要通过不断开发节能型挖泥船,重点研究开发高效耙头、泥泵及其它主要疏浚机械,同时提升耙吸船自动化管理水平,提高施工效率。作为疏浚企业,在船队的使用管理上,更应该努力遵循“适宜技术”理念,严格控制总排放量,以便在国际市场上具有更强的竞争能力。

## 参考文献:

- [1] Andre Kik. Design optimization of trailing suction hopper dredgers—how to achieve the maximum result with your investment[C]// Shanghai: Proceedings of the First Chinese International Dredging Congress, 2003: 429-442.
- [2] 李勇. 船舶设计中节能技术应用研究[J]. 科技市场经济, 2009(11): 6-7.
- [3] 俞振廷. 通过对VIT机构的调节实现船舶节能的探索[J]. 航海技术, 2004(5): 49-50.
- [4] 彭斌. 船舶节能技术应用综述[J]. 舰船科学技术, 2005(S1): 3-6.
- [5] 徐立华. 船舶节能措施概述[J]. 造船技术, 2000(4): 19-21.
- [6] 宋波. 宁智. 柴油机的新技术[J]. 内燃机, 2002(1): 19-21.
- [7] 李彩芬. 李国岫. 柴油机废气再循环技术的应用研究[J]. 柴油机, 2004(1): 20-22.
- [8] 丁晓映. 船舶主机余热利用与节能新途径[J]. 福建能源开发与节约, 2001(4): 19-20.
- [9] IHC. Ports and Dredging[R]. 2011, E178: 14.

(本文编辑 郭雪珍)