

内河船舶推进设备选型与适配性研究

王国跃

中交水利水电建设有限公司 浙江 宁波 315200

摘要：内河航运是我国综合交通运输体系的重要组成部分，推进设备的合理选型与适配性直接关系到船舶的营运效率、能耗水平与航行安全。本文系统分析了内河船舶推进设备的主要类型及其技术特点，深入探讨了推进设备选型的关键影响因素，包括航道条件、船舶类型、动力需求、环境约束等。研究表明，内河船舶推进设备的选型应综合考虑推进效率、机动性能、可靠性与经济性的平衡，针对不同内河航区的自然条件和营运特征，在常规螺旋桨、全回转推进器、喷水推进装置、对转桨及电力推进系统中做出科学决策。本文旨在为内河船舶设计制造与更新改造中的推进设备选型提供理论依据与技术参考。

关键词：内河船舶；推进设备；选型分析；适配性评估；推进效率

引言

内河航运凭借运能大、能耗低、污染小、占地少等优势，在区域协调发展和综合交通体系中作用突出。我国通航里程居世界前列，船舶正加速向大型化、标准化、绿色化发展，推进设备选型成为提升综合性能的关键。作为动力系统的核心执行单元，推进设备直接影响船舶的快速性、机动性、经济性与可靠性。相比远洋船舶，内河船舶航行环境更复杂——航道狭窄弯曲、水深多变、水流不均、桥梁船闸密集，对推进设备适配性提出更高要求。然而当前选型实践中仍存在过度依赖经验、理论支撑不足、评估不全面等问题，导致部分船舶效率低、机动差、能耗高。因此，系统研究推进设备选型与适配性，构建科学决策方法，对提升内河船舶技术水平、推动航运高质量发展具有重要理论与现实意义。

1 内河船舶主要推进设备类型与技术特征

1.1 常规螺旋桨

常规固定螺距螺旋桨是内河船舶应用最为广泛的推进设备，其结构简单、制造成本低、维护方便。根据桨叶数量的不同，可分为三叶、四叶及多叶桨。四叶桨因振动特性优于三叶桨，在内河船舶中应用较多。常规螺旋桨在船舶设计吃水条件下可获得较高的推进效率，通常可达0.55至0.70。然而，其在浅水工况下效率下降明显，倒车性能相对有限，且对主机转速波动较为敏感。

1.2 可调螺距螺旋桨

可调螺距螺旋桨通过液压机构调节桨叶角度，使主机在恒定转速下实现船舶航速的无级调节。其突出优势在于：可实现主机与螺旋桨的最佳匹配，部分负荷工况下燃油经济性较好；操纵灵活，倒车无需改变主机转向；适应不同航行工况的能力较强。但可调螺距螺旋桨

结构复杂，制造成本约为常规螺旋桨的两至三倍，且桨毂尺寸较大，对伴流场均匀性要求较高，内河水域含沙量较高时磨损问题较为突出。

1.3 全回转推进器

全回转推进器可实现推进方向360度连续变化，具备卓越的机动性能。其主要形式包括Z型传动和L型传动两种。全回转推进器可使船舶实现原地回转、横向平移等特殊操纵动作，极大提升了在狭窄水域、繁忙港口中的航行安全性。该类型推进设备广泛应用于港作拖轮、渡轮及部分特殊用途内河船舶^[1]。但全回转推进器的传动效率相对较低，水动力损失约为5%至10%，且设备造价高昂，维护技术要求高。

1.4 喷水推进装置

喷水推进装置通过水泵吸入水流并以高速喷出产生反作用推力，具有高速工况推进效率高、浅水适应性强、附体阻力小、操纵灵敏等优点。尤其适用于航速较高（一般大于25节）的内河高速船、公务船及旅游船。喷水推进装置无外置螺旋桨，可有效避免螺旋桨触底损坏风险，且噪声振动水平较低。但低速工况下效率较差，倒车性能复杂需依赖转向喷口或倒车斗，且流道设计对船体线型有一定要求。

1.5 对转桨与串列桨

对转螺旋桨由同轴或前后布置的两个反向旋转的螺旋桨构成，可有效回收尾流旋转能量，推进效率较常规单桨提高10%至15%。该技术多见于部分高性能内河船舶及推进要求特殊的工程船。串列桨则是在同一轴上前后布置两个桨叶，适用于功率大但直径受限的场合。两类推进装置均存在结构复杂、轴系布置困难、维护成本高等问题。

1.6 电力推进系统

电力推进系统采用发电机组或电池组供电,通过电动机驱动推进器,实现了动力源与推进器的柔性解耦。该系统在负荷响应、转速调节、噪声控制及能量管理方面具有显著优势,尤其适用于对舒适性、排放及操纵灵活性要求较高的内河客船、渡船及公务船。近年来,随着电池技术进步与成本下降,纯电动及混合动力推进系统在内河船舶中的应用快速增长。电力推进系统的初始投资较高,能量密度有待进一步提升。

表1:内河船舶主要推进设备技术性能对比

推进设备类型	推进效率	浅水适应性	机动性能	结构可靠性	维护成本	初始投资
常规螺旋桨	高	中	中	高	低	低
可调螺距螺旋桨	较高	中	较高	中	中	较高
全回转推进器	中	高	高	中	较高	高
喷水推进装置	较高(高速)	高	较高	较高	中	较高
对转桨	高	中	中	中	较高	中
电力推进系统	较高	取决于推进器	高	高	中低	高

注:推进效率一栏中“较高”指接近或优于常规桨但受工况影响较大;电力推进系统本身的能量转换效率略低于机械直驱,但其运行匹配优势可弥补。

2 内河推进设备选型的关键影响因素

2.1 航道水深与宽度条件

内河航道水深具有显著的季节性变化特征,枯水期与丰水期水深差异可达数米。在浅水条件下,船体与河底之间的水流加速导致压降增大,产生所谓“浅水效应”,表现为船舶阻力增加、推进效率下降、螺旋桨空化加剧。对于常年航行于浅水航区的船舶,应优先选择喷水推进装置或直径较小、盘面比较大的螺旋桨,以降低桨叶负荷,延缓空化发生。航道宽度影响船舶的操纵空间,狭窄航道对推进设备的机动性能提出较高要求。全回转推进器或加装导流罩的螺旋桨可显著改善船舶在受限水域的操纵能力^[2]。此外,对于需要频繁进出船闸的船舶,推进设备应具备良好的正倒车切换性能与低速控制精度。

2.2 水流速度与流向特征

在上游航段或急流航段,水流速度可达每秒2至3米,船舶需要克服较大的水流阻力。此时应选择推力负荷能力较强的推进设备,适当加大螺旋桨直径或采用导管螺旋桨以提高系柱推力。在下游航段或库区航段,水流平缓,对推进设备的低速经济性要求更高。对于常年航行于顺逆流交替工况的船舶,可调螺距螺旋桨能够通过调整桨角适应不同负荷需求,避免主机超负荷或低效

运行。而对于需要频繁进行逆向操纵的港口作业船舶,全回转推进器所提供的高效倒车能力具有明显优势。

2.3 船舶类型与营运模式

干货船的推进设备选型侧重于提高运输经济性,强调燃油消耗率与航速的平衡;耙吸挖泥船、液货船(油船、化学品船)除经济性外,还需关注推进系统的安全性与冗余设计,通常要求采用双桨双舵配置;集装箱船对航速要求较高,推进设备应具有良好的高速效率;客船与渡轮对噪声、振动及舒适性有严格要求,电力推进或低噪声螺旋桨设计成为优选方案;拖轮与顶推船则需要较大的系柱拖力,导管螺旋桨或全回转推进器应用较为普遍。船舶营运模式同样影响选型决策。长航线船舶应优先考虑推进效率与燃油经济性;短航线高频次船舶需关注操纵灵活性与靠离泊效率;工况多变船舶适合采用可调螺距螺旋桨或电力推进系统,以实现负荷自适应调节。

2.4 动力装置特性匹配

柴油机作为内河船舶最常用的主机,其功率输出特性、转速范围与燃油消耗率曲线需与螺旋桨的推进特性曲线相吻合。合理的匹配应保证在设计工况点附近,主机与螺旋桨均处于高效区运行。主机功率与推进设备的匹配需考虑以下要点:其一,螺旋桨的转速—功率特性(通常为三次方关系)应与主机的扭矩特性相适应;其二,在部分负荷工况下,主机与推进设备应维持良好的配合,避免主机冒黑烟、燃烧恶化或推进设备效率大幅下降;其三,在加速、减速及倒车等过渡工况下,推进系统应具备足够的响应能力。电力推进系统通过电力电子变换装置可实现推进电动机的精确转速与转矩控制,有效解耦了原动机与推进设备之间的刚性连接,为优化匹配提供了更大自由度。

2.5 环保与排放约束

我国内河航道已全面实施船舶排放控制区政策,对氮氧化物、硫氧化物及颗粒物排放设定了严格限值。推进设备通过影响主机工况负荷进而间接影响排放水平:匹配良好的推进系统可使主机运行于经济工况区,有助于降低单位功率排放量。此外,水下辐射噪声对环境生态的影响日益受到关注。内河航道往往穿越生态敏感区与居民聚居区,螺旋桨噪声可能对水生生物及沿岸居民造成不良影响。采用大侧斜螺旋桨、增加桨叶数量、优化桨叶叶梢形状等设计措施可有效降低噪声水平。喷水推进装置因无外置螺旋桨,水下噪声显著低于常规推进形式。电力推进系统消除了主机直接驱动产生的机械振动与噪声,进一步改善了声环境^[3]。

2.6 经济性因素

初始投资包括设备购置费、安装调试费及必要的船体改动费用；运营成本主要包括燃油消耗、维护修理、备件更换及人工费用；全生命周期费用则综合了初始投资与运营成本的现值总和。不同推进设备的成本差异显著：常规螺旋桨方案初始投资最低，可调螺距螺旋桨约为常规方案的两倍至三倍，全回转推进器及喷水推进装置的投资更高。但高效率推进设备带来的燃油节约与维护成本降低，可能在全生命周期内实现更好的经济性。选型决策应采用全生命周期成本分析方法，综合考虑设备寿命、能源价格、维修周期等因素，避免单纯追求低初始投资而忽视长期运营效益。

3 基于航区特征的适配性选型策略

3.1 不同等级航道的适配建议

根据我国内河航道等级标准，推进设备选型应因航道条件差异而异。一级、二级航道（如长江、珠江航道）水深充足、尺度大，适合大型标准化船舶，常规螺旋桨在效率与经济性上优势明显；集装箱船和快速客船可选用对转桨或高效导管桨以提升航速。三级、四级航道（如甬江航道）水深受限且具季节性，宜采用盘面比大、直径小的螺旋桨或喷水推进以减小浅水损失；频繁过闸或弯道航行时，可加装导流罩或配置全回转推进器增强操纵性。五级及以下航道水浅弯多，常规推进适配困难，推荐优先使用喷水推进；小功率船舶可选挂桨机，全回转推进器虽机动性优，但需权衡投资成本。

3.2 特殊通航环境适配要点

对于水流湍急的三峡库区变动回水段、西江急流段等特殊航区，船舶需具备克服大流速水流的能力。推荐采用高系柱推力系数的导管螺旋桨或可调螺距螺旋桨，其中可调螺距方案在逆流航段可通过调整桨角维持有效推力，顺流航段则适当减小桨角以降低主机负荷。对于含沙量较高的黄河、某些支流航段，泥沙磨损是推进设备面临的主要问题。应选择耐磨材料（不锈钢、镍铝青铜）制造的螺旋桨，适当增加桨叶厚度并优化叶型以减缓磨损速率^[4]。喷水推进装置的过流部件磨损问题较为突出，需设置有效的泥沙过滤与分离装置。可调螺距螺旋桨的活动机构在含沙水流中故障率较高，应谨慎选用。对于穿越生态保护区或城市核心区的航道，水下噪声控制成为推进设备选型的重要约束。电力推进配合大侧斜低噪声螺旋桨是首选方案，喷水推进装置具有噪声低的先天优势。应避免采用高速运转的小直径螺旋桨，该类

型设备易产生高声强宽带噪声。

3.3 船舶尺度与功率等级匹配

船舶尺度与推进功率对设备选型具有约束作用。小功率（100千瓦以下）内河船舶适用挂桨机、艉机驱动或小型喷水推进装置，常规轴系螺旋桨因安装空间与成本考量应用较少。中等功率（100至1000千瓦）是内河船舶的主力区间，常规螺旋桨、导管桨及可调螺距螺旋桨均有广泛应用，具体选型应根据船舶类型与营运要求确定。大功率（1000千瓦以上）内河船舶多见于大型顶推船队、万吨级货船、耙吸挖泥船及大型客滚船，双桨配置成为标准方案以改善操纵性与冗余度，全回转推进器在大功率港作拖轮中具有不可替代的地位。船舶主尺度对推进设备选型的限制体现在螺旋桨直径受艉部线型与吃水深度约束。当理论最佳直径受限于安装条件时，可采用多桨方案、对转桨方案或喷水推进方案作为替代。喷水推进装置的进水口尺寸要求同样需与船体底部线型协调，避免因进水流量不足导致推进性能下降。

4 结语

内河船舶推进设备选型是一项融合流体力学、船舶设计、动力工程与管理科学的系统工程。研究表明：一是推进设备类型多样（如常规螺旋桨、可调螺距桨、全回转推进器、喷水推进、对转桨及电力推进），各有适用场景，需基于技术特性精准选择；二是选型受航道条件（尤其浅水适应性）、船型与营运模式、动力匹配及环保要求等五大因素影响，其中浅水适应性是内河船舶的核心考量；三是应实施差异化策略——高等级航道优选高效常规螺旋桨，低等级航道宜用喷水或全回转推进，含沙水域注重耐磨性，生态敏感区强调低噪声；四是未来应聚焦高效节能、智能自适应控制与绿色动力融合等方向，兼顾当前需求与长远发展。科学选型可显著提升船舶效率、经济性与安全性，支撑内河航运高质量发展。

参考文献

- [1]董国祥,朱仁传.船舶推进与动力装置[M].北京:科学出版社,2020.
- [2]陈顺怀,周国强.船舶推进系统适配性评价方法研究[J].船舶工程,2022,44(5):23-29.
- [3]王志东,杨松林.内河限制航道船舶推进性能分析[J].水运工程,2021(8):67-73.
- [4]张永生,李军.电力推进在内河船舶中的应用与展望[J].船电技术,2020,40(3):15-20.