

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2016.15262

围网网具性能研究进展

许柳雄^{1, 2, 3, 4}, 唐浩¹

1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306;
2. 上海海洋大学 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;
3. 上海海洋大学 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海 201306;
4. 上海海洋大学 上海市远洋渔业协同创新中心, 上海 201306

摘要: 很多国家与地区的围网渔业在近海和远洋都有着较快速的发展。随着渔业管理日趋严格、能源成本的提升以及科学技术的发展, 生态保护和能源节约日益受到关注。围网网具的研究也步入到性能优化的阶段。本文对国内外关于围网网具性能研究的文献进行梳理, 概括了利用海上实测、模型试验和数值模拟方法研究围网作业性能的热点问题(沉降性能, 网具受力, 网具形状等), 为围网的网具结构设计、渔法改进和围网性能优化提供基础依据。

关键词: 围网; 网具性能; 沉降性能; 网具受力; 几何形状; 水动力系数

中图分类号: S972

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2016)03-0713-14

世界很多国家与地区的围网渔业在近海和远洋都有着较快的发展。围网产量为世界第二大渔业产量, 占世界总渔获量的 25%~30%, 且围网捕捞是单网次产量最高的一种渔法^[1]。其作业原理是利用中上层鱼类的表层集群行为, 采用圈捕的方式, 通过收绞底纲完成包围鱼群, 达到捕鱼目的。

早在公元前 13 世纪埃及就已经出现了围网渔具。中国是从事围网捕捞较早的国家之一, 清初屈大均《广东新语》中已有关于有环围网渔具结构的记载。1900 年左右, 小型机动双船围网作业方式由美国传入冰岛和挪威, 并逐渐盛行于欧洲其他沿海国家。此后, 随着捕捞对象的变动和机动渔船的发展, 在外海进行的单船围网作业开始在美国西海岸和北欧的一些国家出现。中国机轮单船围网是在机帆船有环围网的基础上发展起来的, 最初于 1948 年在烟台近海试捕鲑鱼、竹筴鱼获得成功^[1]。20 世纪 50 年代, 日本引入光诱鱼

群技术进行围网作业, 中国此时开始利用机动渔船进行双船和单船围网作业。60 年代中期中国机轮光诱围网作业获得成功^[2]。

围网捕捞技术最初应用于鱿鱼、鲑鱼、沙丁鱼和鳀鱼等小型鱼种的捕捞, 后来扩展到表层金枪鱼渔业中^[3]。据记载, 最早应用围网捕获的对象为鱿鱼, 在 1863 年由渔民使用。捕捞鲑鱼始于 1893 年, 世界上第一艘围网船在加利福尼亚海域作业捕捞。随后由于技术革命, 使得围网捕获大型鱼类成为可能, 其中梭鱼、鲑鱼等最为典型^[4]。而目前最受关注的金枪鱼, 早在 1914 年就开始应用围网捕获, 沙丁鱼则是在 1940 年左右进行围网捕捞的。

近 100 年是现代围网发展最活跃的时期, 尼龙网片和动力滑车的发明与引进是革命性的转变, 使得大型的围网网具能够用于实际操作, 为现代化围网渔业的发展奠定了基础^[3]。传统的手工小型围网过渡至工业化的大型围网期间, 机械设备

收稿日期: 2015-07-01; 修订日期: 2015-09-06.

基金项目: 国家 863 计划项目(2012AA092302); 上海市教委水产学高原高峰学科建设项目(B2-5005-13-0001-5); 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室开放基金项目(A-0209-15-0503-6).

作者简介: 许柳雄, 教授, 主要从事远洋渔业资源开发和渔具渔法研究. E-mail: lxxu@shou.edu.cn

慢慢替代了原有的手工捕鱼设备, 围网绞机、动力滑车、雷达等设备的引进大大提升了围网作业效率, 随后液压动力滑车、大型绞机、电浮标、海鸟雷达、小艇或直升机等先进设备的出现, 又为围网发展带来了新的生命。

以前的捕捞技术是建立在渔业资源相对比较丰富, 能源成本较低以及捕捞对环境影响较小的基础上, 但随着渔业资源不断被开发利用, 现在的渔具渔法更关注于生态环境的保护, 以及能源成本的节约, 从而引发了渔具设计理念的转变: 捕捞效率提升—选择性捕捞(selective fishing)—高效低影响捕捞(LIFE fishing)—平衡捕捞(balanced harvest)。在国际渔业管理的大趋势下, 围网网具的发展是围网渔业经营者或操作者一直关注的问题之一。早期的学者更多地关注围网捕捞效率的提升, 通过改变网具本身属性(浮沉力、网片材料、网目尺寸、网线直径、结节类型、和缩结系数等)和优化渔法(放网时间、放网角度、海流条件、风速风向、跑纲长度、和括纲长度等), 运用海上实测和模型试验手段对围网网具作业特性进行研究, 提高捕获效率^[5], 这些做法一直延续至今。如今, 围网网具发展步入到了网具性能优化的阶段, 这主要是渔业管理的驱动, 使人们不仅仅只关注高效的围网网具, 而是更多地去关注生态保护及节能的优化网具; 研究方法也从传统的海上实测和模型试验, 增加了计算机模拟方法。

1 围网尺度、结构及作业流程

围网的尺度根据渔法、作业深度、目标鱼种和船舶性能的不同而变化。一般来说, 沙丁鱼和鲑鱼围网长 200~300 m, 现代金枪鱼围网长 1500~2300 m。日本双船围网尺度是世界上最大的, 为 2300 m×300 m。美国和其他金枪鱼围网使用单船作业捕捞鲣鱼、黄鳍、蓝鳍和长鳍, 尺度为 1700 m×300 m。挪威和冰岛捕捞鲱鱼和鲑鱼的围网尺度偏小, 约 500 m×200 m。世界著名围网网具尺度有 6 种, 包括秘鲁鳀鱼围网: 585 m×52 m; 加利福尼亚金枪鱼围网: 900 m×81 m; 挪威金枪鱼围网: 1440 m×162 m; 南非沙丁鱼围网: 668 m×72 m;

鳀鱼围网: 477 m×63 m; 冰岛围网: (414~252) m×(162~252) m^[4]。

围网类渔具按网具结构特征分为有囊和无囊两种; 按作业方式又可分为单船和双船作业。单船作业的无囊围网, 如金枪鱼围网、鲑鱼围网, 能从事外海和远洋生产, 作业规模较大, 渔获量较高, 是现代渔具之一。双船作业的有囊和无囊围网规模相对较小, 作业渔场一般在沿岸近海。有囊围网与拖网相似, 具有一囊两翼, 主要作业方式是利用两翼包围鱼群, 迫使鱼群进入网囊。无囊围网是由长带型网片组成, 主要由取鱼部、主网衣、后网头、括纲、跑纲、沉子和沉子纲、浮子和浮子纲等组成^[5-6]。众多关于围网性能的研究主要是针对无囊围网。因此, 本文侧重对无囊围网的主要性能进行梳理概括。以金枪鱼围网为例, 其主网衣由长条网片组成, 顶部装配有上缘网、浮子纲和浮子, 底部装配有下缘网、底纲和底环, 括纲穿过底环, 起到聚拢网具的作用。具体作业流程: 网具的取鱼部一端固定于辅助的大艇之上, 另一端随母船进行圆周运动^[7-8]。完成放网后, 则通过收绞底纲聚拢网具, 直至迫使鱼群进入网具终端的取鱼部, 最后通过抄网将渔获转移进入母船的鱼舱之内。

2 围网性能研究的热点指标

围网网具主要的性能指标有: 网具沉降性能, 网具几何形状, 网具受力等, 这是由围网捕捞操作过程决定的。首先, 围网网具必须在规定时间内沉降到一定深度, 才能避免鱼群逃逸^[9-10]。因此, 沉降深度和沉降速度最能反映网具的沉降性能指标。其次, 包围鱼群后应有足够的空间供鱼群活动, 否则鱼群极有可能从网口未闭合处或下纲边缘处逃逸。因此, 围网的几何形状和空间变化也是网具作业性能的体现^[11]。最后, 在完成水平包围鱼群时, 要快速收绞括纲, 尤其在金枪鱼围网捕获自由鱼群时, 由于自由鱼群的灵活性, 需快速收绞括纲完成彻底包围鱼群; 另外, 网具若受力不均匀容易导致破网或滚纲事故^[12]。因此, 网具的受力也能反映网具的性能。

围网运动属于非定常运动, 网具形态变化也极其复杂, 在不同操作阶段影响网具性能的因素各异。除网具材料、下纲重量、网目、缩结系数等网具本身因素外, 海况环境因素(流速大小、波浪、风速风向)及渔法因素(包围时间、放网速度、括纲长度、绞收速度等)均影响网具的作业性能^[8-13]。本文对国内外关于围网网具性能研究的文献进行梳理, 概括了研究围网作业性能的热点问题, 为围网的网具结构的设计、渔法的改进和围网性能优化提供基础依据。

3 围网网具性能研究方法

围网性能研究的主要方法有 3 种: 海上实测、模型试验和数值模拟。早在 20 世纪中期, 就有学者利用海上实测和水槽模型试验对围网网具进行

设计和改造, 而围网数值模拟自 20 世纪末以来有了较快速的发展^[14-22]。在渔具设计与改进的进程中, 3 种研究方法并不是独立的, 它们是相辅相成的, 但也各有优缺点(表 1)。

围网网具性能研究通过模型试验和海上试验得到了一定的发展。目前来说, 围网网具数值模拟研究将成为围网网具性能研究的一个新的发展方向。随着计算机技术的发展, 利用计算机, 结合网衣固有的结构特点, 对网衣张力和形状进行数值计算和模拟, 以预测网衣在水中的形状和张力已经成为可能, 大大促进了渔具作业性能的研究, 是当今渔具研究的重要手段。国内外许多学者都进行了计算机数值模拟网具的研究, 并取得了良好的效果。可以预见的是, 通过数值模拟、模型试验和海上实测的相互验证, 是今后的一个趋势。

表 1 围网研究方法
Tab. 1 The research method of purse seine

研究方法 research method	优点 advantages	缺点 disadvantages
海上实测 full scale test at sea	获得渔具在真实工况下的性能指标	海况条件较难控制; 研究成本较高
模型试验 model test	试验条件可控; 便于观察测量; 成本低	制作的模型网难与实物网完全相似; 模型试验条件与海上实测有差异等
数值模拟 numerical simulation	成本低; 省时; 易于操作; 可预测并推演网具在不同条件下的张力与形状的相应变化	基本参数的不确定性; 数据计算量较大

4 围网沉降性能研究

4.1 网片沉降性能

网片是构成围网网具最主要的单元, 渔具研究者通过对网片性能的研究, 在一定程度上能够了解围网网具的性能。表 2 列出了不同年代的学者关于影响网片沉降性能各因素的研究成果。表 2 显示, 网片沉降试验于 20 世纪 70 年代初开始。随着网线材料的不断更替, 机械化设备对网具性能的要求越来越高。如今的网片沉降性能是如何表现的, 需我们开展工作进行研究。影响网片沉降性能的因素较多, 除表 2 所外, 还有缩结系数、网片结节、试验条件等因素。网片沉降试验为研究围网沉降性能提供了基础的参考依据, 在设计及优化围网网具时, 可为选取网线材料、网目尺寸、浮沉比等关键参数, 以满足实际围网作业对

沉降性能的需求提供参考。

4.2 围网沉降性能——海上实测

早期, 关于围网沉降性能的海上测试主要集中在改变网具本身的属性(下纲载荷、网线材料、网目形状、网目尺寸、网头形状等)上。由于缺少先进测量仪器, 以及海上实测的困难, 获得的数据也有一定的局限性, 较多研究仅对沉降性能与个别因素关系进行定性描述。20 世纪 80 年代到 90 年代, 日本学者野村正恒^[32]分别对涤纶、尼龙和克里蒙(Cremona)制作的相同结构的围网进行测试, 发现涤纶和尼龙围网的沉降速度比克里蒙围网快, 原因是涤纶和尼龙的水阻力较克里蒙小。崔建章等^[33]通过海上测试数据发现: 下纲沉降速度与下纲载荷的 1/2 次方成正比关系; 相同重量的载荷对翼端的沉降作用最大, 取鱼部次之, 中部最小; 并建议沉降力的集中载荷应为翼端最

表 2 网片沉降性能
Tab. 2 The sinking performance of net

影响因素 factor	学者 scholar	年份 year	研究对象 subject	研究结果 result
下纲载荷 load along the leadline	Konagaya ^[5]	1971	围网网片	在各因素中, 下纲载荷对沉降性能的影响程度最大
	冯维山 ^[23-24]	1991	三种矩形网片	得出最佳沉降载荷; 临界值的出现不仅与下纲载荷有关, 还与网片材料、网片规格等因素有关
		1996	平面网片	增加下纲载荷是加快网具下沉速度的重要因素
	许传才 ^[25]	1998	网片	随着沉子质量的增加, 网片沉降速度逐渐增快
网衣载荷 load of netting 网衣材料 netting material	Thorsteinsson ^[26]	1973	网衣上加沉子纲	增加网衣载荷有利于提高沉降速度
	冯维山 ^[27]	1998	网片上装配沉子	沉降速度的提高不仅与网衣载荷有关, 还与网衣载荷的装配位置和载荷比有关
	Kim ^[20]	2004	不同材料的网片	高密度材料的沉降性能较低密度材料的好
网目 mesh size	Steinar ^[28]	1980	不同类型网片	网片沉降性能与网目形状、结节类型有关
	冯维山 ^[29]	1988	六角形网目和四角形网目	相同下纲载荷下, 六角形网目较四角形网目更利于沉降, 主要原因为六角形网目的网线张力小
	宋来军等 ^[30]	2003	不同网目尺寸网片	网目越小, 相同大小的网片就越重, 沉降得越快; 网目越大则相反
	孙满昌等 ^[31]	2003	方形网目的网片	方形网目比菱形网目的选择性要好, 即方形网目利于沉降

大, 取鱼部次之, 中部最小。Beltestad^[34]研究发现六角形网目围网的沉降速度较菱形网目围网更大, 因为六角形网目的扩张以及在网壁垂直伸展时有更小的水阻力。Misund 等^[35]对增大网目尺寸的鲑鱼围网进行海上测试, 发现增大网目尺寸有利于改善网具沉降性能, 且不会导致围捕的鱼群逃逸。2003 年, 宋来军等^[30]提出, 把原三角形网头改为方形结构网头可加快网具下纲的自然沉降速度。同年, Kim 等^[22]对单船围网系统进行海上测试, 总结了沉降深度与放网时间的关系。

除网具本身属性影响网具沉降性能外, 海况因素和渔法因素很大程度上也影响着围网的沉降性能。早在 1986 年, Park^[36]就研究得出, 海流是众多环境因素中影响网具沉降性能最为重要的因子, 其主要影响网具的沉降速度和网衣在水中的形态。随后, 刘树椿^[37]在 1988 年对深水围网沉降性能进行海上测试, 发现提高沉降性能不仅可以通过改变网具本身属性(比重大、滤水性好的网线材料, 增大下纲配重等), 还可以通过在放网时对海况条件进行判别得以实现。括纲长度也是影响网具沉降性能的重要因素, 刘树椿^[37]对括纲与网

具沉降的关系进行了分析, 发现相同流速条件下, 括纲长度与网具沉降深度成正比; 相同括纲长度下, 流速与网具沉降深度成反比。除海流、括纲因素外, 包围时间、放网速度、绞收括纲速度、跑纲长度等因素也对围网沉降性能存在一定的影响。这是因为围网沉降性能差异性是在各种因素综合影响下体现的, 而这一观点在现代大型金枪鱼围网网具沉降性能研究中得到了较好的印证。

上海海洋大学围网技术团队自 2006 年开始研究金枪鱼围网网具, 先后在上海市科委和科技部 863 项目的支持下, 海上实测调查和模型试验相结合, 取得了一定的成果。王春雷^[11]通过对大型金枪鱼围网的海上实测研究, 发现网具各部位的自然沉降速度是不同的, 从快到慢依次为: 后网头、网具中部、取鱼部, 研究结果与许柳雄等^[10]吻合; 海流大小与网具沉降性能成反比, 海流越大, 越不利于网具沉降, 这一结果与 Park^[36]一致。许柳雄等^[10]的研究还表明, 实物网的沉降深度约为理论沉降深度的 86.9%, 仅为最大拉直高度(311.1 m)的 51.4%, 仍有较大的沉降空间。随后, 周成等^[38]采用多元回归分析了渔具操作因素、渔

场环境数据与网具沉降深度的关系,发现放网时间、流速和括纲长度对网具沉降深度影响显著,其中流速是最为显著的因子。唐浩等^[3]采用广义可加模型分析了围网沉降深度与各因子之间的关系,得出120 m水层流速是影响沉降深度的最重要因子,并证实了60 m和120 m水层流速与沉降深度的关系是非线性的,因此建议采用GAM模型分析多因素影响沉降性能的问题。针对金枪鱼围网的两种典型渔法——捕捞漂流物随附群渔法和捕捞自由鱼群渔法,唐浩等^[39]利用Bootstrap和GAM方法对自由鱼群渔法和漂流物随附群渔法的网具性能差异进行量化分析,得到不同渔法下影响沉降速度的因素存在差异的结论。

4.3 围网沉降性能——模型试验

渔具模型试验是按照有关相似准则将实物网按一定尺度缩小制作成模型,在水槽或天然水域中进行测试,分析所测网具的物理几何性能的一种方法。模型试验可以帮助解决实物网在海上实测中较难测量的网具性能因素(如受力,网形等)情况。

渔具在水中时,柔性体网衣的形状和受力会相互制约。存在外力作用,网衣形状会发生变化,从而导致网衣上作用力的分布改变,带来形状和作用力的相互影响。鉴于渔具的复杂性,常用的动力相似无法满足渔具模型试验的需求。因此,学者提出适合渔具模型试验的专门的相似准则,如田内准则、狄克逊准则等^[40]。围网和拖网的作业方式不同,模型试验研究的内容也有差异。但是到目前为止,还没有一个完全适合围网的模型试验准则。考虑到围网渔具尺寸较大,同时缺乏专业的试验水池,因此,有些学者就采用结构相近的网片试验来研究围网的沉降性能。冯维山^[23-24]就是采用这种方式,通过改变网目尺寸载荷和沉降力配备等对网片的性能进行研究,从理论上提出了围网沉降性能的分析建议。无论是网片模型试验还是围网模型试验,都要通过对不同因素的调节进行网具沉降性能的试验研究,从而最终为实物网的改进提供参考依据。

早年间学者对围网的研究主要集中在围网本身属性的改变,包括网片材料、网目尺寸、缩结

系数等。1954–1958年, Iitaka^[14-16, 41-43]采用田内准则制作模型网,开展了一系列关于沙丁鱼围网模型的试验。1966–1971年,日本学者小長谷庸夫^[44-48]也开展了一系列模型试验,通过改变模型网的 d/a (d 为网线直径, a 为目脚长度)和配重,发现小的 d/a 沉降速度快,且沉降速度近似与 $1/\sqrt{d/a}$ 成比例关系,但网衣配重对沉降速度的影响较小;随后的试验又证明,沉降速度与下纲沉子重量的平方根成比例关系;在研究缩结系数与沉降性能关系的模型试验中,发现缩结大的模型网沉降速度快;在研究最大工作深度的试验当中,发现围网达到最大深度出现在收绞操作的4/10或者5/10阶段。因此,建议在开始收绞操作前增加一定的待网时间。1994年日本学者野村正恒^[32]对涤纶、尼龙和克里蒙(Cremona)制作的相同结构的围网进行模型试验,比较不同 d/a 下围网沉降的速度,发现沉降速度与 d/a 成反比关系。20世纪末, Kim等^[49-51]开展了一系列研究,通过改变网线材料、 d/a 和沉降力进行围网模型对比试验,结果表明高密度材料的沉降性能好于较低密度材料。日本学者Katiandagho等^[52]采用缩结率分别为25%、30%、34%、40%和50%的五种简化的围网,在循环水槽中进行模型试验。结果显示,缩结率为34%时沉降最快;缩结率为25%和30%时,两者沉降速度差异不大;最大沉降深度能达到理论深度的91%;缩结率30%的围网效率最高。同时,他们利用田内准则制作新设计的竹筴鱼围网模型网(尺度比为A: 1/76.7, B: 1/141.1)进行试验,结果显示,两种模型网最大沉降深度出现在放网时间的53%和40%,随后沉降速度开始减小。开始绞收时,模型网A沉降深度达到围网深度的72%,而模型网B达到86%。Iitaka^[53]也利用田内准则,制作尺度比为1/250和1/10的模型网进行试验,发现整个下纲边缘的沉降运动是按照相同比率进行的,并对整个围网放网和收绞过程进行拍摄,研究网具在不同时刻的形态变化。小長谷庸夫^[64]根据田内准则制作的围网模型网,考察了沉降性能在有流和无流下变化的情况,结果显示,在无流情况下,围网工作深度较有流时深;而在有流时,

放网速度快的下纲深度较放网速度慢的深;在有流的情况下,网衣阻力小、网片重、水平缩结系数大的围网有较好的沉降性能表现。Widagdo 等^[54]通过对小型围网的主网衣部位进行改进试验,得出网目越大沉降越深,网线材料密度越大沉降速度越快的结论。

由于之前关于围网模型试验所选取的缩放尺度较大,许柳雄等^[9]则根据田内准则,选择大小尺度比分别为 $\lambda=20$, $\lambda'=1$, 制作金枪鱼围网模型网,在开阔的水域进行试验。结果表明,下纲重量和放网速度均对下纲沉降速度有影响,主要趋势为随着下纲重量的增加和放网速度加快,围网下纲沉降速度加快。随后,唐浩^[55]在许柳雄等^[9]研究的基础上,通过统计模型分析得出:下纲重量对沉降性能有显著性影响,而放网速度对沉降性能的影响并不显著,但两者对沉降深度的交互影响显著。围网沉降速度并不是一味地随着下纲重量的增加而增加,这一观点与冯维山^[23-24]吻合。

围网网具在垂直方向受到重力的作用而下沉,水平方向受到母船牵引做圆周运动。因此,围网网具受到黏性力和重力的共同作用。理想的模型试验不仅要保持几何相似、运动相似,还要在动力相似上满足雷诺数(黏性相似)、弗洛德数(重力相似)、斯特劳哈尔数(非正常流动时间相似)、牛顿数(牛顿力相似)、刚度系数(抗弯刚度相似)、变形系数(伸长变形相似)相等。但在实际中无法满足所有条件的相似或相等,模型试验中动力相似的准则选取主要依据的是网具受到的主导作用力,围网则是重力占主导作用。因此,要满足重力相似准则,即要求弗洛德数相等,以狄克逊准则为代表。通过对围网模型试验研究的梳理,我们发现大多数研究采用的准则为田内准则,今后应探讨和开展利用重力相似准则进行围网模型试验的工作。

5 围网网具受力和几何形状研究

海上实测的困难及复杂性导致围网网具受力和空间形状测量工作一直未能顺利开展。为了优化设计围网网具,传统做法是利用理论分析和模型试验对围网网具的受力和空间形状进行研

究,从而为设计改进实物网网具提供参数依据。如今,可利用计算机建模技术,实现网具受力和空间形态的可视化,并通过改变不同参数,进行围网网具优化设计。然而,开展围网网具受力和空间形状研究工作,其前提是对网片水动力性能有所掌握。其中,网片水动力系数是数值建模和理论分析的关键因素。

5.1 网片水动力系数研究

网衣是渔具最重要的构件之一,是一种特殊的海洋工程结构物。因其具有柔韧性,主要表现在外负荷作用下形状的易变,且有张力变化。网衣在外负荷的作用下产生大位移和大变形,致使渔具性状发生变化,而渔具性状的变化会引起作用在渔具上的外负荷重新发生变化,从而导致渔具形状的变化^[56]。网衣受力及性状的改变与网具本身的设计、作业方式以及在水中所受水流和波浪所产生的水动力都有着密切的关系。网片的水动力特性是网衣研究的关键问题,而水动力系数的研究在水动力特性研究中占有重要地位。动水槽试验是研究网片水动力系数的重要手段,较多的研究提出了不同的半经验公式,但仍未有统一的适应不同参数网片的水动力系数公式,主要原因是网片材料密度、网目形状、网线粗糙程度等可能会影响到水动力性能。开展网片的水动力学特性的研究,对于渔具设计理论、计算机建模、优化渔具设计有着实际的应用意义。

测量网片水阻力的方法主要有 3 种:船上测量法、水槽测量法和风洞测量法。为了了解影响网片水动力的因素有哪些,并且推导相关公式,有关学者根据理论对水动力与各影响因素之间的关系提出一些假设,进行理论分析,得到一些推论,然后通过试验进行对比修正。以日本、前苏联、德国、英国的学者提出的假设为代表,其中最具代表性的是日本学者田内森三郎 20 世纪 30 年代初对作用在网片上的水动力进行了研究分析,提出了著名的田内理论假说^[40]。

国内外学者主要通过对平面网片在不同水流冲角下的水阻力和升力的测定,获得网片阻力的经验公式^[57-61]。然而在研究当中,由于试验条件

和方法的不同, 获得的实验结果也不一致。同样, 选取的材料参数不同, 提出的经验公式也有不同的表达形式, 这也是网片水动力性能研究一直以来备受争论的原因。

物体在水中的阻力主要是表面摩擦力和形状阻力。经典的阻力公式形式为:

$$R = C_x \frac{\rho S V^2}{2} \quad (1)$$

式中, S : 特征面积, m^2 ; C_x : 阻力系数, 无量纲; V : 网片和水流相对速度, m/s ; ρ : 水的密度, kg/m^3 ; R : 阻力, N 。

这一阻力公式被广泛应用于网片水动力系数研究当中, 只不过公式中的特征面积 S 为网片的线面积。作用于网片上的流体力包括水阻力(F_D)

和升力(F_L), 因次分析可推导出水动力是包含阻力系数 C_D 和升力系数 C_L 的函数, 阻力和升力的表达式分别为:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho S V^2 \quad (2)$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho S V^2 \quad (3)$$

式中, ρ 是流体密度(kg/m^3); S 是网片的法向投影面积(线面积, m^2); V 是流体的速度(m/s)。

学者利用公式(2)和(3)推算网片的水动力系数。之前关于网片水动力的研究, 大多认为阻力系数为一定值或在一定范围内。随后有学者考虑不同因素对阻力系数的影响, 通过试验得出一些经验的阻力系数公式(表 3)。

表 3 水动力系数研究
Tab. 3 Study on hydrodynamic coefficient

年份 year	学者 scholar	影响因素 factor	水动力系数公式 formula
1979	Milne ^[57]	占空率, 结节	法向阻力系数: 有结节时: $C_D = 1.0 + 1.365S + 0.780S^2$ 无结节时: $C_D = 1.0 + 1.885S + 2.343S^2$ 占空率 $S = 2d/a$
1990	Aarsnes 等 ^[58]	占空率, 冲角	$C_D = 0.04 + (-0.04 + S - 1.24S^2 + 13.7S^3) \sin \theta$ $C_L = (0.57S - 3.54S^2 + 10.1S^3) \sin 2\theta$ 网片平行水流时, 水阻力系数为常数值 0.04, 与占空率无关。
1998	Lee 等 ^[59]	冲角	冲角为任意角时的阻力系数: $C_D = C_{D0} + (C_{D90} - C_{D0}) \sin^2 \theta$ C_{D0} 为冲角为 0 度时的阻力系数, 约为 90 度时的 5%。
2011	Hosseini 等 ^[60]	网线直径为特征长度的雷诺数, 冲角	$C_D = (-1.3894 \sin^2 \theta + 3.2198 \sin \theta + 1.0896) * 1.7887 Re_n^{-0.2591}$ $C_L = -0.6696 \sin^3 \theta + 0.1323 \sin^2 \theta + 0.5325 \sin \theta + 0.0089$
2012	Kumazawa 等 ^[61]	基于水力半径的雷诺数, 占空率, 冲角	网片与水流垂直: $C_D = 40.8(Re_m)^{-0.6} + 1.05$ $Re_m = \rho v m / \mu$ 网片与水流平行: $C_D = 0.066S^{-0.8} Re_n^{-0.065}$ 网片与水流有 $C_D = C_{D90} \sin \theta + (C_{D0} - 2S \sin \theta) \cos^2 \theta$ $C_L = 0.8S^{0.3} C_{D90} \sin^{1.2} \theta \cos \theta$ m 为水力半径与占空率的比值, 方形或菱形网目: $h = a/4$ 。 $m = a^3/4(2da - d^2)$, C_{D90} 和 C_{D0} 为网片垂直和平行水流阻力系数。

通过表 3 可发现水动力系数与雷诺数、占空率和冲角有关。但阻力系数受各种因素的综合影响, 如网目缩结、网目几何形状、材料粗糙程度、编织形式等都有可能对水动力系数产生影响。今后应考虑更多因素进行试验, 逐步完善不同类型网片的水动力系数研究。

5.2 围网网具受力研究

围网网具受力——海上测试: 1984 年崔建章等^[62]在海上实测了围网括纲的张力及不同时刻下纲的沉降深度, 探求了括纲张力的变化规律。1991 年胡明培等^[63]通过理论分析, 求解在绞纲过程中的最大倾侧力矩和张力的方向角, 结合力的

作用点位置,推导出起网力矩和横摇角关系的公式,为研究和设计围网渔船的稳性提供了理论基础。1993年陆赤等^[64]海上测试了机轮围网主要纲索(上纲、下纲、括纲、跑纲和拖缆)在不同操作阶段的受力情况,分析得出了纲索的最大张力以及受力特点。例如,上纲受力复杂,时间较长,而下纲则与之相反,并建议各纲索的安全系数设为10。2003年韩国学者 Kim^[22]海上测试得到,在收绞括纲8 min时,网具张力达到最大,且张力与收绞时间呈抛物线关系。

围网网具受力——模型试验:1963年 Iitaka^[53]通过理论分析双船围网在水中运动时的阻力,利用田内准则制作尺度为1/250模型网A和1/10模型网B进行试验。围网受力分析表明,在收绞初期,模型网A张力增加较为剧烈,而模型网B张力变化剧烈出现在整个收绞过程的1/6时。1966—1971年小長谷庸夫^[44-48]开展了相对比较全面的围网模型试验,重点对不同条件下,收绞过程中网具张力变化进行了试验测定。1966年的试验中发现收绞速度和张力之间呈线性关系,随着收绞速度的增加,张力变大;1970年的研究发现,张力与 d/a 和网衣配重呈比例关系;1971年的研究得出,张力与沉子重量成比例关系,且括纲张力与网的深度也粗略地成比例关系,但并未发现张力与缩结系数显著成比例关系。1986年日本学者 Katiandagho 等^[52]利用田内准则制作新设计的竹筴鱼围网模型网(A的尺度比为1/76.7, B的尺度比为1/141.1)进行试验。结果显示,影响括纲收绞速度和收绞时间的主要因素是括纲张力,模型网A的张力变化明显大于B,这可能是模型网的设计与尺寸的不同导致的。2014年唐浩^[55]在开阔水域中对大型金枪鱼围网模型网性能进行测试,发现在放网初期,大艇牵引网具的张力变化较为剧烈,之后处于平稳状态,原因是放网初期网具连接大艇之间的网衣及纲索处于松弛状态,而随后迅速拉紧绷直,导致张力迅速增大。2015年 Zhou 等^[65]进行了金枪鱼围网模型网动水槽试验,发现取鱼部的张力大于后翼端部位,换算成实物网时,取鱼部和翼端的张力分别为300 kN和200 kN。

5.3 围网网具几何形状研究

模型试验能够直接观测围网模型网在不同条件下、不同操作阶段的几何形状。1966年小長谷庸夫^[45]通过模型试验绘制了围网在收绞操作阶段的网型形态,发现若渔船没有因为收绞操作而进入网圈内,则在收绞末期取鱼部的浮子会沉入水中,然而另外两种情况(放完网后渔船在网圈中,因收绞渔船在网圈中)不会出现以上现象。1971年小長谷庸夫研究得出,在收绞过程中围网的形状变化与 d/a 有关, d/a 较小时,收绞过程中围网极少出现“杯状”的网型^[46]。同年,他试验分析了模型网在不同沉子配重时的几何形状,发现沉子越重,网壁越拉伸,形成的包围体积就越大。随后,他不仅对无流状态下连续变化的网形结构进行了研究,还对相同沉子配重、不同缩结系数的模型网的网形进行了分析。发现无流情况下,括纲越松弛则网形越大;收绞过程中,缩结系数为0.1的模型网呈现出较好的网形“杯状”^[47-49]。1984年, Liu 等^[66]对收绞过程中底纲的形状变化进行了分析。1986年日本学者 Katiandagho 等^[47]对模型网A(尺度比为1/76.7)和模型网B(尺度比为1/141.1)进行试验,发现收绞速度与围网底部张开面积(从最初围网底部张开面积到最终收绞结束)的平方根值呈线性关系,虽然模型网B的括纲长度较A的长,但模型网B的底部张开面积关闭速度比A快。2000年 Kim^[19]对围网模型网在收绞阶段封闭体积的变化作了一定探讨。2015年 Zhou 等^[65]对金枪鱼围网模型网进行水槽试验,研究了不同放网方位时下纲的水平形态和水平包围面积,得出在逆流方位下放网,网具的沉降深度最大,且超过静水时的放网深度。随着摄像设备和模型试验技术的不断发展,研究围网网具几何形状将会摆脱之前的简单描述带来的不确定性和误差,迎来更加精确的分析研究。

5.4 围网数值模拟

20世纪90年代,数值模拟被引入渔具渔法研究当中,随后被广泛应用于研究拖网、网箱、延绳钓、围网等渔具。数值模拟不仅可以帮助我们直观了解网具沉降性能,还可以使网具受力和空间几何形状的变化实现可视化,为现代围网渔具

优化设计提供便捷。

围网的渔法由放网、收绞和起网三个部分组成^[67]。在这上述三个部分的每一过程中, 围网的三维空间形状会根据海洋环境的状况和捕捞的操作而发生变化, 由于这些因素的复杂性, 数值模拟计算变得更加复杂。与大多数渔具类似, 围网网具系统较复杂, 网形变化和受力等是非线性的。因此, 围网网具的建模是复杂的, 而且必须是非线性的形式。首先, 数值模拟的开发需要系统的建模; 其次, 非线性模型的稳定性和精确计算是必要的; 最后, 数学模型的有效性应该通过实

测的验证。如果数值模型能够实现以上流程, 则模拟可用于评估渔具行为和验证渔具操作。之前的数值模拟研究大多应用于拖网和网箱等渔具中, 而围网网具数值模拟的研究主要在近 10 年(表 4)。

随着不同情况下围网网形模拟技术的成熟, 已有研究延伸到对目标鱼种的行为轨迹进行动态模拟。Kim 等^[68]和 Hosseini 等^[60]就模拟了在围网包围过程中鱼的行为特性, 并以三维动画的形式将放网过程与鱼类行为轨迹的相应变化呈现出来, 有效地结合了数值模拟与鱼类行为的研究, 增加了数值模拟的实用性。

表 4 围网数值模拟研究
Tab. 4 Numerical simulation of purse seine

时间 year	学者 scholar	研究方法 research method	研究结果 result
2005	Lee 等 ^[69]	运用质量弹簧模型建立牛顿力学方程模型。	模拟了围网放网、包围和收绞括纲的动态。
2007	Kim 等 ^[70]	采用质点弹簧系统对围网进行了数值模拟, 并用海上实验验证数值模拟结果。	开发了能从渔具设计网图中自动生成数学模型的模拟程序; 对比海上实测数据, 模拟深度偏低; 优化设计: 高密度网具沉降性能较好。
2009	Kim 等 ^[71]	使用有限元法对受到合力作用后发生位移的围网的 3D 几何形状进行了模拟, 并与实测对比。	模拟出了由于绞纲张力使船向网圈中心漂流所形成的浮子纲的心形形状, 与海上实测相比有一定的相似度。
2011	Hosseini 等 ^[60]	采用阻力系数改进质点弹簧系统模型, 对围网放网操作进行动态模拟。	优化设计方面: 采用大网目网片的围网使用网线材料较重的网衣, 有较好的沉降性能表现, 新设计的网在收绞过程中的阻力小, 且注重工作深度减少失败网次频率。
2011	王敏法 ^[12]	利用有限元理论, 建立围网网具的三维数学模型。	三维数学模型有效地应用于围网网具系统的动态数值模拟当中, 并模拟了围网的放网过程。
2015	Tenningen ^[72]	利用声纳图像 3D 模拟竹荚鱼围网和鱼群的形状体积。	评估围网体积和网中鱼群的数量, 释放捕获过多的鱼群。
2015	Zhou 等 ^[73]	应用集中质量法的方法对围网建模。	模拟了金枪鱼围网的放网过程, 并提出隐式算法可减少计算载荷和提高模型稳定性。

6 研究展望

本文对围网网具发展、网具性能研究方法和主要热点指标等进行了概述, 可帮助了解围网网具性能研究的主要内容和关键问题, 为优化围网网具提供参考资料。虽然, 有关学者已经对围网网具性能研究作了大量研究工作, 但仍有些问题有待我们去发现和解决。以下从海上实测、模型试验、数值模拟三种研究方法入手, 对今后的研究进行展望。

(1) 海上实测。以往的研究主要集中在网具沉降性能方面, 而网具受力和几何形状变化等方面仍未深入研究, 主要原因之一是之前测试仪器较落后。随着更多先进测试仪器(网位仪、深水压力传感器、声纳数据收录仪等)的引进, 为将来的海上测试提供了保障。在设计海上实测试验方案时, 应尽可能通过仪器收集网具受力、纲索投放速度、网具入水后的形状等数据, 尤其是网具入水后的形态变化数据对改进网具模型试验和验证数值模拟结果至关重要。因此, 关于围网的几何形状和

受力变化受环境影响和渔法影响的研究是今后海上测试的重点。

另外,之前关于沉降性能的研究主要集中在影响因素与沉降性能之间的关系上,主要是为模型试验或数值模拟提供参数改变的依据。但沉降性能是受各种因素交互影响的,如何标准化沉降性能指标,是今后的研究热点。海上实测结果不仅仅为了科学研究,更重要的是为实际生产提供指导,而生产者最关心的是捕获的成功与否。因此,研究捕获率与网具性能之间的关系是切实可行的。

(2) 模型试验。模型试验是我们对围网网具进行优化改进的重要手段,但关键在于模型准则的选取。目前大部分学者均采用田内准则制作模型网进行试验,然后利用试验结果对模型准则进行修正,尚未有采用其他准则的模型试验研究。因此,模型准则的探讨是围网模型试验中的一个关键问题,有待深入。

目前围网的模型试验主要通过对网具自身属性的改变,如下纲重量、网衣载荷、网具材料、网具构造等方面,针对渔法的优化研究较少。今后研究中,可增加网具受力、放网方位、放网速度、绞纲速度、跑纲括纲长度、流速等因素变化条件下的网具性能表现方面的研究。另,围网模型试验中可直接通过摄像观测不同操作阶段的网具几何形状变化,可为数值模拟的验证提供依据。

(3) 数值模拟。网片的水动力系数是数值模拟所需的关键参数,目前数值模拟研究中采用的水动力系数各异,且在围网数值模拟中水动力系数的选取是一直以来争论的话题。之前研究水动力系数主要考虑的因素有:冲角、雷诺数、占空率等,但水动力系数受各种因素的综合影响,如网目缩结、网目几何形状、材料粗糙程度、编织形式等均可能对水动力系数产生影响。因此,应考虑更多因素研究围网网片的水动力系数。

渔具数值模拟最重要的两部分为数值建模和数值解析。构成围网结构的部件有网片、浮沉子和各种钢索,由于渔具本身特性所致,在数值建模中主要考虑的问题有:如何简化模型结构,即

把不同部件看作什么样的几何单元,并如何连接。一般而言,建模时会把整个系统当作有限个体具有一定关系的质量点组成,这些质点由无质量的不可扭动的弹簧连接。因此,把目脚看作弹簧,把结节以及浮沉子看作质点,纲索被分为有限个由弹簧连接的质点。在数值解析中选择适合的解析方法是尤为重要的,其次水阻力系数、刚度系数、捻度系数、伸长变形系数等参数的选定也极为关键,再者就是选用网目群化法的基本条件等问题。虽然,数值模拟可提供较便利的途径实现网具的优化设计,但其准确性仍需海上实测和模型试验结果验证。今后的研究重点应是完善围网数值模拟,通过改变不同参数,实现围网优化设计的可视化。

影响围网性能的要害众多,渔具性能是综合性的体现,不仅与渔具本身属性有关,还与海况条件、船长经验、渔船动力等因素有关。随着研究方法和仪器设备的发展,使得早期以研究网具本身属性影响渔具性能的方式得以拓展,统计方法为研究海况及人为因素影响渔具性能提供了思路,数值模拟和水槽试验为研究渔具形态提供了保障。针对围网网具,渔具数值模拟与鱼类行为学的结合,为数值模拟的实用性又增色不少,是非常有意义的课题。另外,已有研究尝试对围网取鱼部的部分网衣进行改造,替换为柔性网格网衣,可避免网内鱼群拥挤,减少死亡率,针对网具不同部位的改造是否对此部位的网具性能产生影响,也是值得我们去探索的。生态型围网捕捞的发展方向是平衡捕捞,指将捕捞压力(死亡率)分散到所有营养层次以确保维持不同物种、不同个体大小之间的营养关系的一种管理战略。平衡捕捞往往利用营养金字塔来表示,说明捕捞活动应如何在不同营养层次上进行,以便与相应的生产力水平成比例。因此,平衡捕捞也是围网捕捞所面临的又一挑战。

参考文献:

- [1] Sun M C. Marine Fishery Technology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014. [孙满昌. 海洋渔业技术学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014.]

- [2] Sun Z Z. Introduction to Fishing Gear in the Yellow Sea and Bohai Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 2014. [孙中之. 黄渤海区渔具通论[M]. 北京: 海洋出版社, 2014.]
- [3] Tang H, Xu L X, Zhou C, et al. Impact factors of sinking performance for tuna purse seine based on the generalized additive model[J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(6): 944-950. [唐浩, 许柳雄, 周成, 等. 基于 GAM 模型研究金枪鱼围网沉降性能影响因素[J]. 水产学报, 2013, 37(6): 944-950.]
- [4] Pravin P. Purse seine and its operation[Z]. Matsyapuri P O, Cochin-682 029, Kerala: Central Institute of Fisheries Technology, 2002.
- [5] Konagaya T. Studies on the design of the purse seine[J]. J Fac Fish Pref Univ Mie-Tsu, 1971, 8(3): 209-233.
- [6] Xu L X. Theory and Design of Fishing Gear[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004. [许柳雄. 渔具理论与设计学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.]
- [7] Bromhead D, Foster J, Attard R, et al. A review of the impact of fish aggregating devices (FADs) on tuna fisheries[R]. Australian Bureau of Rural Sciences, Canberra, 2000.
- [8] Lan G C. Study on sinking performance of tuna purse seine by model test[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011. [兰光查. 基于模型试验的金枪鱼围网沉降性能研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.]
- [9] Xu L X, Lan G C, Ye X C, et al. Effect of the leadline weight and net setting speed on sinking speed of the tuna purse seine[J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 35(10): 1563-1571. [许柳雄, 兰光查, 叶旭昌, 等. 下纲重量和放网速度对金枪鱼围网下纲沉降速度的影响[J]. 水产学报, 2011, 35(10): 1563-1571.]
- [10] Xu L X, Wang M F, Ye X C, et al. Measurement and analysis of sinking characteristics of tunapurse seine[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(5): 1161-1169. [许柳雄, 王敏法, 叶旭昌, 等. 金枪鱼围网沉降特性[J]. 中国水产科学, 2011, 18(5): 1161-1169.]
- [11] Wang C L. Sinking performance of 1664.5m×394.3m tuna purse seine in the western and central Pacific Ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2008. [王春雷. 中西太平洋 1664.5m×394.3m 金枪鱼围网沉降性能研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2008.]
- [12] Wang M F. Development of the 3D numerical model tuna purse seine gear[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011. [王敏法. 金枪鱼围网网具数值模拟初步研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.]
- [13] Tang H, Xu L X, Wang X F, et al. Evaluation of tuna purse seine performance between model test and on-sea measurements[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(4): 884-892. [唐浩, 许柳雄, 王学昉, 等. 金枪鱼围网模型试验结果与海上实测的比较评估[J]. 中国水产科学, 2013, 20(4): 884-892.]
- [14] Iitaka Y. Model experiments on the sardine purse seine operating in Hyuganada-VI[J]. Bull Jpn Soc Sci Fish, 1958, 24(6-7): 407.
- [15] Iitaka Y. Model experiments on the sardine purse seine operating in Hyuganada-V[J]. Bull Jpn Soc Sci Fish, 1957, 23(9): 511.
- [16] Iitaka Y. Model experiments on the sardine purse seine operating in Hyuganada-IV[J]. Bull Jpn Soc Fish Technol, 1956, 22(7): 389.
- [17] Kristjonsson H. Modern Fishing Gear of the World - Second Edition[M]. London: Fishing News Books, 1981: 254-255.
- [18] Kim H Y, Lee C W, Shin J K, et al. Dynamic simulation of the behavior of purse seine gear and sea-trial verification[J]. Fish Res, 2007, 88(1-3): 109-119.
- [19] Kim Y H. Geometry of the model purse seine in relation to enclosed volume during hauling operation[J]. Fish Aquat Sci, 2000, 3(2): 156-162.
- [20] Kim S J. An analysis of the sinking resistance of a purse seine. (2) The case of a model purse seine with different netting materials and sinkers[J]. Bull Korean Soc Fish Technol, 2004, 40(1): 29-36.
- [21] Hosseini S A. The sinking performance of the tuna purse seine gear with large-meshed panels using numerical method[J]. Fish Sci, 2011, 77(4): 503-520.
- [22] Kim S J, Choi C M, Chung Y J M. Studies on the improvement of the productivity of the purse seine fishery[J]. Bull Korean Soc Fish Technol, 2003, 39(2): 99-111.
- [23] Feng W S. The experimental research on sinking characteristic of plane netting with different distribution of sinking force on netting[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 1996, 11(4): 35-42. [冯维山. 沉力分布对平面网片沉降特性影响的试验[J]. 大连水产学院学报, 1996, 11(4): 35-42.]
- [24] Feng W S. Experiment research on sinking characteristic of purse seine leadline[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 1990, 5(3): 37-43. [冯维山. 围网下纲沉降特性试验研究[J]. 大连水产学院学报, 1990, 5(3): 37-43.]
- [25] Xu C C. Research and analysis on the subsiding regularity of sinkers in water[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 1998, 13(4): 22-27. [许传才. 球形沉子在水中沉降规律的研究[J]. 大连水产学院学报, 1998, 13(4): 22-27.]
- [26] Thorsteinnsson G. Icelandic purse seines with double leadline-construction and experience[J]. Modern Fish Gear World, 1973, 3: 273-279.
- [27] Feng W S. The distribution of sinking-load of purse seine[J].

- Journal of Fishery Sciences of China, 1998, 5(3): 82–87. [冯维山. 围网沉降载荷分布[J]. 中国水产科学, 1998, 5(3): 82–87.]
- [28] Steinar O. Russian hexagon mesh is proved in Norway[J]. World Fish, 1980, 29(2): 47–50.
- [29] Feng W S. Characteristics analysis about purse seine with hexagonal mesh[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 1988(3–4): 63–74. [冯维山. 六角形网目围网特性分析[J]. 大连水产学院学报, 1988(3–4): 63–74.]
- [30] Song L J, Su X F. Main problems and countermeasure in Chinese engine-driven purse seine gears[J]. Fisheries Science, 2003, 22(6): 32–35. [宋来军, 苏晓飞. 浅谈我国机轮围网网具存在的主要问题及对策[J]. 水产科学, 2003, 22(6): 32–35.]
- [31] Sun M C, Zhang J, Qian W G. The comparison between results of model test and theoretical calculations of the hydrodynamic resistance of Sea Station cage[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2003, 12(4): 319–323. [孙满昌, 张健, 钱卫国. 飞碟型网箱水动力模型试验与理论计算比较[J]. 上海水产大学学报, 2003, 12(4): 319–323.]
- [32] Nomura M. The New Fisheries General[M]. Tokyo: Seizando-Shoten Publishing Co. Ltd., 1994: 10–13. [野村正恒. 最新漁業技術一般[M]. 東京: 成山堂書店, 1994: 10–13.]
- [33] Cui J Z, Lu C, Huang S L. Test and analysis on sinking performance of purse seine[J]. Marine Fisheries, 1984, 6(1): 7–10. [崔建章, 陆赤, 黄硕琳. 围网沉降性能测试和分析[J]. 海洋渔业, 1984, 6(1): 7–10.]
- [34] Beltestad A K. Purse seines with hexagonal mesh[R]. Southwest Fisheries Center Admin Rep, 1981.
- [35] Misund O, Dickson W, Beltestad A. Optimization of purse seines by large-meshed sections and low lead weight. Theoretical considerations, sinking speed measurements and fishing trials[J]. Fish Res, 1992, 14(4): 305–317.
- [36] Park S J. A study on the fishing ability of the mackerel purse seine operating and the fishing condition in the sea area of Cheju Island[J]. Bull Mar Res Inst Cheju Nat Univ, 1986, 22(3): 42–46.
- [37] Liu S C. An experimental research on sinking performance of purse seine in deeper waters of the East China Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 1988, 12(2): 95–104. [刘树椿. 深水围网沉降性能的测试及渔法研究[J]. 水产学报, 1988, 12(2): 95–104.]
- [38] Zhou C, Xu L X, Zhang X F, et al. Multiple regression analysis of the factors affecting the sinking performance of large-scale tuna purse seine[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(3): 672–681. [周成, 许柳雄, 张新峰, 等. 大型金枪鱼围网沉降性能影响因子的多元回归分析[J]. 中国水产科学, 2013, 20(3): 672–681.]
- [39] Tang H, Xu L X, Wang X F, et al. Differences of gear performance of tuna purse seine between the two kinds of typical fishing method[J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(2): 275–283. [唐浩, 许柳雄, 王学昉, 等. 两种典型渔法金枪鱼围网网具性能差异[J]. 水产学报, 2015, 39(2): 275–283.]
- [40] Zhou Y Q. Mechanics of Fishing Gear[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004. [周应祺. 渔具力学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.]
- [41] Iitaka Y. Model experiments on the sardine purse seine operating in Hyuganada-I[J]. Bull Jpn Soc Fish, 1954, 20(7): 571–575.
- [42] Iitaka Y. Model experiments on the sardine purse seine operating in Hyuganada-II[J]. Bull Jpn Soci Fish, 1955, 21(1): 6–11.
- [43] Iitaka Y. Model experiments on the sardine purse seine operating in Hyuganada-III[J]. Bull Jpn Soc Fish, 1955, 21(7): 459–462.
- [44] Konagaya T. Study on the purse seine-I: Effect of the pursuing velocity[J]. Jpn Soc Fish Sci, 1966, 32(6): 507–510. [小長谷庸夫. 巾着網の研究—I: 締結速度について[J]. 日本水産學會誌, 1966, 32(6): 507–510.]
- [45] Konagaya T. Study on the purse seine-II: Effect of the mesh and the specific gravity of webbing[J]. Jpn Soc Fish Sci, 1971, 37(1): 8–12. [小長谷庸夫. 巾着網の研究—II: 網地の目合と比重の影響[J]. 日本水産學會誌, 1971, 37(1): 8–12.]
- [46] Konagaya T. Study on the purse seine-III: On the effect of sinkers on the performance of a purse seince[J]. Jpn Soc Fish Sci, 1971, 37(9): 861–865. [小長谷庸夫. 巾着網の研究—III: 沈降力の効果[J]. 日本水産學會誌, 1971, 37(9): 861–865.]
- [47] Konagaya T. Study on the purse seine-IV: The influence of hanging and net depth[J]. Jpn Soc Fish Sci, 1971, 37(9): 866–870. [小長谷庸夫. 巾着網の研究—IV: 縮結と網たけについて[J]. 日本水産學會誌, 1971, 37(9): 866–870.]
- [48] Konagaya T. Study on the purse seine-V: Effects of the “waiting time” and the under water current on the pursuing operation[J]. Jpn Soc Fish Sci, 1971, 37(10): 939–943. [小長谷庸夫. 巾着網の研究—V: 待ち時間および底潮の影響[J]. 日本水産學會誌, 1971, 37(10): 939–943.]
- [49] Kim S J, Park J S. Characteristics of the motion of a purse seine. (1) The sinking behaviour of a model purse seine with different netting materials[J]. Bull Korean Soc Fish Technol, 1995, 31(4): 362–371.

- [50] Kim S J, Park J S. Characteristics of the motion of a purse seine. (2) An analysis of the sinking characteristics of a model purse seine with different netting materials[J]. Bull Korean Soc Fish Technol, 1995, 31(4): 372–378.
- [51] Kim S J, Park J S. An analysis of sinking resistance for a purse seine—the case of a model seine with different d/l[J]. Bull Korean Soc Fish Technol, 1998, 34(3): 274–282.
- [52] Katlandagho E M, Imai T. Fundamental studies on the fishing efficiency of purse seine[J]. Mem Kagoshima Univ Res Center S Pac, 1985, 6(2): 229–247.
- [53] Iitaka Y. Studies on the mechanical characters of purse seine[D]. Kyoto: Kyoto University, 1963.
- [54] Widagdo A, Lee C W, Lee J. Calculating and measuring the sinking performance of small-scale purse seine gear in Java, Indonesia, to improve the gear[J]. Fish Aquat Sci, 2015, 18(2): 221–227.
- [55] Tang H. Analysis on sinking performance of tuna purse seine by sea trials and model tests[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014. [唐浩. 基于海上实测和模型试验的金枪鱼围网沉降性能分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.]
- [56] Wan R, Hu F X, Tokai T. A static analysis of the tension and configuration of submerged plane net[J]. Fish Sci, 2002, 68(4): 815–823.
- [57] Milne P H. Fish and Shellfish Farming in Coastal Waters[M]. England: Fishing News Books Ltd., 1979: 185–187.
- [58] Aarsnes J V, Rudi H, Løland G. Current forces on cage, net deflection[R]. Engineering for Offshore Fish Farming, Proceedings of the Conference Organized by the Institution of Civil Engineers, London, 1990: 137–152.
- [59] Lee C W, Jang C S, Kim M S, et al. Measurements of mid-water trawl system and dynamic characteristics[J]. Bull Korean Soc Fish Technol, 1998, 34(3): 294–301.
- [60] Hosseini S A, Lee C W, Kim H S, et al. The sinking performance of the tuna purse seine gear with large-meshed panels using numerical method[J]. Fish Sci, 2011, 77(4): 503–520.
- [61] Kumazawa T, Hu F X, Kinoshita H, et al. Hydrodynamic characteristics of plane minnow netting made of high-strength polyethylene (Dyneema)[J]. Nippon Suisan Gakk, 2012, 78(2): 180–188.
- [62] Cui J Z, Lu C. Testing and analyzing of the tension on bridle for purse seine[J]. Journal of Fisheries of China, 1984, 8(4): 339–342. [崔建章, 陆赤. 围网底环纲张力的测试和分析[J]. 水产学报, 1984, 8(4): 339–342.]
- [63] Hu M Y, Zhou Y Q, Wei Y H, et al. Realtime records and analysis of outer force acting on purse seiner during hauling procedure[J]. Journal of Fisheries of China, 1991, 15(1): 17–25. [胡明培, 周应祺, 韦义辉, 等. 围网渔船起网时受力的实测与分析[J]. 水产学报, 1991, 15(1): 17–25.]
- [64] Lu C, Cui J Z. Measurement and analysis of the tension of main lines for purse seine[J]. Journal of Fisheries of China, 1993, 17(3): 257–261. [陆赤, 崔建章. 机轮围网主要纲索受力测定和分析[J]. 水产学报, 1993, 17(3): 257–261.]
- [65] Zhou C, Xu L, Hu F, et al. The kinetic deformation of tuna purse seine: A model experiment on different shooting patterns at uniform current[J]. Fish Res, 2015, 169: 18–25.
- [66] Liu D C, Sato O, Nashimoto K, et al. Configuration of lead line of purse seine during pursing[J]. Bull Fac Fish Hokkaido Univ, 1984, 35(4): 234–242.
- [67] Kim Y H. Geometry of the model purse seine in relation to enclosed volume during hauling operation[J]. Fish Sci Tech, 2000, 3(2): 156–162.
- [68] Kim Y H, Park M C, Ha S W. Simulation and three-dimensional animation of skipjack behavior as capture process during purse seining[J]. Fish Sci Tech, 2008, 11(2): 113–123.
- [69] Lee C W, Lee J H, Cha B J, et al. Physical modeling for underwater flexible systems dynamic simulation[J]. Ocean Eng, 2005, 32(3–4): 331–347.
- [70] Kim H, Lee C, Shin J, et al. Dynamic simulation of the behavior of purse seine gear and sea-trial verification[J]. Fish Res, 2007, 88(1–3): 109–119.
- [71] Kim Y H, Park M C. The simulation of the geometry of a tuna purse seine under current and drift of purse seiner[J]. Ocean Eng, 2009, 36(14): 1080–1088.
- [72] Tenningen M, Peña H, Macaulay G J. Estimates of net volume available for fish shoals during commercial mackerel (*Scomber scombrus*) purse seining[J]. Fish Res, 2015, 161: 244–251.
- [73] Zhou C, Xu L X, Zhang X F, et al. Application of numerical simulation for analysis of sinking characteristics of purse seine[J]. J Ocean Univ China, 2015, 14(1): 135–142.

Gear performance of the purse seine: A review

XU Liuxiong^{1,2,3,4}, TANG Hao^{1,3}

1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
3. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education; Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
4. Collaborative Innovation Center for National Distant-water Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: Purse seine fishing has developed rapidly in inshore and offshore fisheries in many parts of the world. The ecological balance and energy crisis are receiving increasing attention, together with the strict management of fisheries, growing energy consumption, and scientific and technological developments. Therefore, in this context, the optimal design of the purse seine is a very important issue for the industry. This study summarizes the study approaches used to address the difficult questions about the gear performance of the purse seine (sinking performance, tension force, and geometry), based predominantly on sea trials, model experiments, and dynamic simulations. An optimization strategy for the purse seine is proposed to improve the configuration of the gear and the operational technology, and to optimize the performance of the purse seine gear.

Key words: purse seine; gear performance; sinking performance; tension force; geometry; hydrodynamic coefficient

Corresponding author: XU Liuxiong. E-mail: lxxu@shou.edu.cn