

学校代码：10264  
研究生学号：D020201007

# 上海水产大学

# 博士学位论文

题 目： 鱿钓渔业中集鱼灯的优化配置研究

英文题目： Study on the optimal allocation of fish  
aggregation lamps in squid jigging fisheries

专 业： 捕捞学

研究方向： 渔具渔法选择性

姓 名： 钱卫国

指导教师： 孙满昌 教授

二〇〇五年五月二十八日

## 鱿钓渔业中集鱼灯的优化配置研究

### 摘要

世界近海底层渔业资源普遍衰减，一些主要渔业国家都积极向公海及深海开发新的渔业对象，其中头足类已成为开发的重要渔业资源之一。联合国粮农组织视头足类为人类未来最大的蛋白质食品来源，并将它列为积极开发的目标。目前，捕捞头足类最主要的作业方式是光诱鱿钓作业。所谓光诱鱿钓就是利用头足类的趋光和摄食习性，运用集鱼灯灯光和自动化钓机及拟饵复合伞钩进行诱捕的一种渔业。

我国的远洋光诱鱿钓渔业开始于1989年，至今已拥有相当规模的专业性生产队伍。该渔业的发展不仅间接减轻了中国近海渔业资源的捕捞压力，改善了近海渔业的作业结构，缓减了沿海居民的就业压力，增加了我国的出口创汇，并在国际鱿钓渔业的发展中取得了应有的权益。

在鱿钓渔业中，集鱼灯占有十分重要的地位，集鱼灯光源的选择和合理配置直接影响到鱿钓渔业的生产效益。长期以来，由于在鱿钓作业渔场，各渔船之间存在一种盲目的光力竞争问题，误以为集鱼灯总功率越大捕捞效益越高，使得集鱼灯总功率逐年攀升，从而导致了不必要的能源损耗等。特别是近年来石油价格在世界范围内都大幅度上涨，鱿钓渔业在燃油上的投入比重也大为增加，其中集鱼灯的燃油消耗要占到鱿钓渔船总燃油消耗的50%以上。由此可知，在集鱼灯装

备和燃油消耗上的投入已经开始对鱿钓渔业的经营效益产生了比较明显的影响。为了合理有效地利用集鱼灯灯光，对鱿钓集鱼灯进行优化配置研究是十分必要的。

鱿钓渔业中集鱼灯的优化配置研究是一个综合性的研究课题，它主要包括：捕捞对象（头足类）的趋光特性，海水的光学特性，新型集鱼灯的开发和研制，背景光对鱿钓作业的影响，鱿钓渔船不同集鱼灯总功率时的水中照度分布，集鱼灯总功率的合理配置，集鱼灯在鱿钓渔船上的最佳布置，鱿钓渔船之间的合理作业间距等。

本文对头足类的趋光特性、海水的光学特性、集鱼灯的光学特性、背景光对鱿钓作业的影响等仅作了简要的分析和探讨。重点研究鱿钓渔船不同集鱼灯总功率时的水中照度分布、鱿钓渔船集鱼灯总功率的合理配置、集鱼灯在鱿钓渔船上的合理布置，以及鱿钓渔船之间的合理作业间距等。

鱿钓渔船集鱼灯的水中照度分布是研究集鱼灯优化配置的基本依据。由于目前关于集鱼灯水中照度分布的几种计算方法在实际计算中误差很大，并不十分适合于计算鱿钓渔业中集鱼灯灯光在水中的照度分布，为此，需要建立一种新的比较合理的集鱼灯水中照度计算方法。

根据集鱼灯的光学特性和光在海水中传播的一般规律，结合鱿钓渔船集鱼灯布置的有关参数（如间距、盏数、灯高等），建立了集鱼灯灯光在水中光强度分布的叠加法计算模式，并开发了相关的计算程序，可以计算不同种类集鱼灯、不同集鱼灯布置参数时的水下任意一点理

论照度值。另外，还开发了水体体积计算程序，对某确定照度值，使用该程序可搜索获得该照度在水中所有数据点的坐标，并估算该等照度曲面所围水体的体积。

使用所开发的计算程序，对三种不同型号的集鱼灯（2kW型、3kW型、4kW型）配置的比较研究中指出：在相同总功率时，不同船长的鱿钓渔船的集鱼灯配置均以2kW型配备为最佳。另外，对我国为数众多的8154型鱿钓渔船使用1kW、2kW型集鱼灯的配置情况进行比较分析，指出在相同总功率的情况下，2kW型比1kW型的集鱼灯更适合于8154型鱿钓渔船。

对我国不同种类鱿钓渔船的集鱼灯合理配置进行了研究。研究表明：

(1) 对于船长40~45m的鱿钓船，其集鱼灯总功率可设置在230~250kW之间，目前该类鱿钓渔船的集鱼灯总功率一般为240kW，其总功率配置是比较合适的；对于240kW配置的鱿钓船，集鱼灯灯距一般可选择0.6~0.64m，目前的集鱼灯灯距一般为0.55m，因此可增大集鱼灯灯距；集鱼灯灯高可在5.0~5.5m之间选择，目前的集鱼灯灯高一般为5.0m，其灯高基本合适。

(2) 对于船长45~50m的鱿钓船，其集鱼灯总功率可设置在240~260kW之间，目前该类鱿钓渔船的集鱼灯总功率一般为260kW，其总功率基本合适，但可考虑适当降低些；对于260kW配置的鱿钓船，集鱼灯灯距一般可选择0.58~0.67m，目前的集鱼灯灯距一般为0.58m，

其灯距基本合适；集鱼灯灯高可在 5.8~6.2m 之间选择，目前集鱼灯的灯高一般为 6.2m，其灯高基本合适。

(3) 对于船长 50~60m 的鱿钓船，其集鱼灯总功率可设置在 240~270kW 之间，目前该类鱿钓渔船的集鱼灯总功率一般为 280kW，其总功率偏大，应适当降低总功率；对于 280kW 配置的鱿钓船，集鱼灯灯距一般可选择 0.61~0.67m，目前集鱼灯的灯距一般为 0.62m，其灯距基本合适；集鱼灯灯高可在 6.2~6.6m 之间选择，目前集鱼灯的灯高一般为 5.7m，其灯高还可适当增大。

(4) 对于船长 60~70m 的鱿钓船，其集鱼灯总功率可设置在 330~350kW 之间，目前该类鱿钓渔船的集鱼灯总功率一般为 360kW，其总功率偏大，应适当降低总功率；对于 360kW 配置的鱿钓船，集鱼灯灯距一般可选择 0.58~0.68m，目前集鱼灯的灯距一般为 0.65m，其灯距基本合适；集鱼灯灯高可在 6.9~8.2m 之间选择，目前集鱼灯的灯高一般为 7.5m，其灯高基本合适。

对目前 8154 型鱿钓渔船使用 1kW 型集鱼灯时的总功率配置进行研究，结果表明：集鱼灯总功率可选择为 106~116kW，且当集鱼灯总功率为 112kW 时，8154 型鱿钓渔船的效益最好。

本文还对不同船长鱿钓渔船的合适照度间距和最小许可作业间距进行了理论分析和研究，结果表明：对于集鱼灯总功率分别为  $P_1$  (kW)、 $P_2$  (kW) 两艘渔船，其合适照度间距  $L_s$  (n mile) 的经验计算公式为：

$$L_s = 0.061 \times [Ln(P_1) + Ln(P_2)] - 0.060 ; \text{ 其最小许可作业间距 } L_z \text{ (n mile)}$$

的计算公式为： $L_z = 0.061 \times [Ln(P_1) + Ln(P_2)] + 0.058$ 。根据公式，当两艘鱿钓渔船的集鱼灯功率均为 100kW 时，最小许可作业间距为 0.62 n mile；当集鱼灯功率均为 240kW 时，最小许可作业间距为 0.73 n mile；当集鱼灯功率均为 300kW 时，最小许可作业间距为 0.75 n mile。

**关键词：** 鱿钓渔船，集鱼灯，优化配置，水中照度，照度计算模式，灯光功率，作业间距，鱿钓渔业

# Study on the optimal allocation of fish aggregation lamps in squid jigging fisheries

## Abstract

Traditional offshore benthic fisheries resources are depleting worldwide. At present, main fishing nations have been actively in exploiting new species and new fishing ground in high seas and deep sea, cephalopod is one of the major fisheries resources being exploited. FAO considers cephalopod resources as the biggest source of protein food for human beings in the future, and list it as one of highest priority species to be exploited. Currently, the most common fishing method in squid fishery is jigging with light. Modern distant water squid jigging with light aggregation is a new fishing method, which applied phototaxy and feeding behavior mechanism of cephalopod to catch them by using fish aggregation lamps, automatic squid jigger and compound umbellate-like hooks with artificial bait.

China began to develop distant water squid jigging fishery in 1989, and the fishing fleet has developed rapidly in the past decade. Development of distant water squid jigging has alleviated indirect pressure on Chinese offshore fisheries resources, helped the adjustment of fishing operation structure of offshore fisheries, mitigated employment pressure of

coastal residents, increased export earning, and strived for our rights and interests, in exploiting activley in high seas squids resource.

Fish aggregating lamp play a key role in squid jigging fishery, light source and deployment of fish aggregation lamp have a direct influence upon fishing efficiency of squid jigging fishery. It is misunderstanding in the past years that lamps abuse and competition in equipment of light power have exsited for a long time in squid jigging fishery because of the misunderstanding that the stronger the total light power equipped, more benefits the fishing boat can obtain. Consequently, the input proportion to fuel in squid jigging fishery has increased greatly. Fuel expenditure of fish aggregation lamps almost accounts for over 50% of total fuel consumption in a squid jigging vessel. Cost on fish aggregation lamp and fuel consumption has a significant influence upon economic benefit of squid jigging fishery. Particularly, in recent years, petroleum price is rising rapidly worldwide. Therefore, it is necessary to study the effective utilization of fish aggregation lamp in squid jigging fishery.

Research on efficient utilization of fish aggregation lamp light in squid jigging fishery is a compression works, which including mainly phototaxy of target species (Cephalopod), optic characteristics of seawater, development and manufacture of fish aggregation lamp and its light source, effect of background light on fishing operation, underwater illumination

distribution of squid jigging vessel by different light power of fish aggregation lamp, rational total power allotment of fish aggregation lamp in squid jigging vessel, minimum allowable deployment of fish aggregation lamps in squid jigging vessel, rational distance between two squid jigging vessels for effective fishing.

The paper briefly analyzes phototaxy of Cephalopod, optic characteristics of seawater, optic characteristics of fish aggregation lamp, effects of background light on squid jigging operation, and focus on underwater illumination distribution formed by varied total power of fish aggregation lamp on board, rational total power allotment of fish aggregation lamp in squid jigging vessel, rational deployment of fish aggregation lamps in squid jigging vessel, rational distance between two squid jigging vessel.

Underwater illumination distribution of fish aggregation lamp is very important in determining on the optimal allocation of fish aggregation lamps in squid jigging fisheries. Currently, several computation methods produced great errors when used to calculation of the underwater illumination distribution of fish aggregation lamp, indicating they are unfit to the calculation underwater illumination distribution of fish aggregation lamp in squid jigging fisheries, so it is necessary to develop a new, relative rational and precise calculation method of underwater illumination

distribution.

Based on optic characteristics of fish aggregation lamp and common laws of light diffusion in the seawater, associated with related coefficients of fish aggregation lamp deployment i.e., distance between two lamps, number of lamp, and height of lamp hanged, the paper develops a new superposition calculated model of underwater illumination distribution offish aggregation lamp light and programmed calculation procedure, which can calculate theoretic illumination value at a random underwater location by various distribution curve of luminous intensity corresponding to different coefficients of fish aggregation lamp. Additionally, a program of water mass volume calculation has been also developed.

Comparative study of three different types of fish aggregation lamp deployment (Type 2kW, Type 3kW, and Type 4kW) reveals the optimal fish aggregation lamp deployment of squid jigging vessel with different length overall under various total powers is Type 2kW. Additionally, comparison analysis on deployment of fish aggregation lamp Type 1kW and 2kW used widely in squid jigging vessel Type 8154, shows that squid jigging vessel Type 8154 prefer 2kW to 1kW on the if same total light power is equipped with.

The paper studies rational deployment of fish aggregation lamp on board Chinese squid jigging vessels with different LOA by additive

algorithmic procedure which has developed. The result shows that as to squid jigging vessel with 40~45m LOA, its total power of fish aggregation lamp can set at 230~250kW, at present, it is generally 240kW and the deployment of that is suitable. The distance between two fish aggregation lamp should be between 0.6~0.64m in the mentioned vessel type. The hanged height of fish aggregation lamp can be selected in the range of 5.0~5.5m. As usual, distance between two fish aggregation lamp is 0.55m and the height of fish aggregation lamp is 5.0m, so distance between two fish aggregation lamp can be increased and the height of fish aggregation lamp is suitable. As to squid jigging vessel with 45~50m LOA,, its total power of fish aggregation lamp can set at 240~260kW. Generally its total power is 260kW, so its total power can be decreased. The distance between two fish aggregation lamp deployed between 0.58~0.67m; the height of fish aggregation lamp hanged can be selected in the range of 5.8~6.2m. At present, lamp distance is 0.58, so lamp distance is suitable; and the lamp height is 6.2m, so it is basically suitable. As to squid jigging vessel with 50~60m LOA,, its total power of fish aggregation lamp can set at 240~270kW; but the total power is a little more than theoretical value amount to 280kW generally, it is essential to reduce total power for this type of vessel. The distance between two fish aggregation lamp can be deployed between 0.61~0.67m. Most vessels set lamp distance as 0.62m,

which is basically suitable. The height of fish aggregation lamp hanged can be selected in the range of 6.2~6.6m. The lamp height of most vessels is 5.7m and can be increased. As to squid jigging vessel with 60~70m LOA,, its total power offish aggregation lamp can set to 330~350kW. Total lamp power is generally 360kW in above type of vessel, which should be decreased. The distance between two fish aggregation lamp deployed between 0.58~0.68m, the height offish aggregation lamp hanged can be selected in the range of 6.9~8.2m. At present, lamp distance is 0.65m and lamp height 7.5m, which are both meet to theoretical value.

The paper also studys total light power deployment of fish aggregation lamps on board Type 8154 squid jigging vessel, its fish aggregation lamp is Type 1kW. The result shows total power of fish aggregation lamp can be selected in the range of 106~116kW, and the optimal operation benefit of this type fishing vessel can be obtained, when total power offish aggregation lamp reach 112kW,

Finally, for different length overall, the nearest illumination distance and the minimum allowable operation distance between two squid jigging vessels has been theoretically analyzed in the paper, it shows that the computation formula of the nearest illuminate distance between two squid jigging vessels is  $L_s = 0.061 \times [Ln(P_1) + Ln(P_2)] - 0.060$ , the formula of the minimum allowable operation distance between two squid jigging vessels

is  $L_z = 0.061 \times [Ln(P_1) + Ln(P_2)] + 0.058$ , where,  $P_1$ (kW) and  $P_2$ (kW) stand for the total power of fish aggregating lamps equipped with on the two responsive squid jigging vessel. With the formula, the minimum allowable operation distance between two vessels is 0.62 n mile for squid jigging with 100kW light power each. The minimum allowable operation distance between two vessels is 0.73 n mile for squid jigging with 240kW light power each. The minimum allowable operation distance between two vessels is 0.75 n mile for squid jigging with 300kW light power each.

**Keywords:** squid jigging vessel; fish aggregation lamp; optimal allocation; underwater illumination; computation model of illumination; light power; distance between two squid jigging vessels; squid fisheries

## 引言

头足纲(Cephalopoda)俗称头足类，主要包括乌贼目(Sepioidea)、枪形目(Teuthoidea)和八腕目(Octopoda)。在全球海洋渔业资源中，头足类(特别是柔鱼科Ommastrephidae)，被认为是三种未充分开发利用的渔业种类之一<sup>[1]</sup>。世界上从事头足类生产的国家和地区有30多个，其中日本、韩国、中国(包括台湾)、西班牙、阿根廷、泰国等为主要的生产国。

捕捞头足类的作业方式主要有钩钓、拖网和流刺网等，其中光诱钓捕是最重要的作业方式之一，其产量约占头足类总产量的60%左右<sup>[2-5]</sup>。日本渔民早在17世纪就开始利用钩钓作业，其产量曾占日本头足类总产量的95%<sup>[2]</sup>。拖网是第二大作业方式，其产量约占世界头足类总产量的25%<sup>[5]</sup>。流刺网也曾是重要的作业方式之一，其产量约占世界头足类总产量的10%，特别是在北太平洋公海海域<sup>[6]</sup>。但由于联合国在第46届大会上通过了第46/215号“关于大型公海流刺网捕鱼活动及其对世界大洋和海的海洋生物资源的影响”决议，从1993年1月1日起，在各大洋和公海海域全面禁止大型流刺网作业<sup>[7]</sup>。因此，目前捕捞头足类的主要作业方式为钩捕和拖网。另外，还有其他一些传统的作业方式如围网、耙刺类、陷阱类等<sup>[8-9]</sup>，但这些作业方式的产量占头足类总产量的比例较小，约为15%左右。

现代的远洋光诱鱿钓渔业就是应用头足类的趋光和摄食习性，运

用集鱼灯灯光和自动化钓机及拟饵复合伞钩进行诱捕头足类的一种新的渔业<sup>[1]</sup>（光诱鱿钓作业示意图参见图 1）。

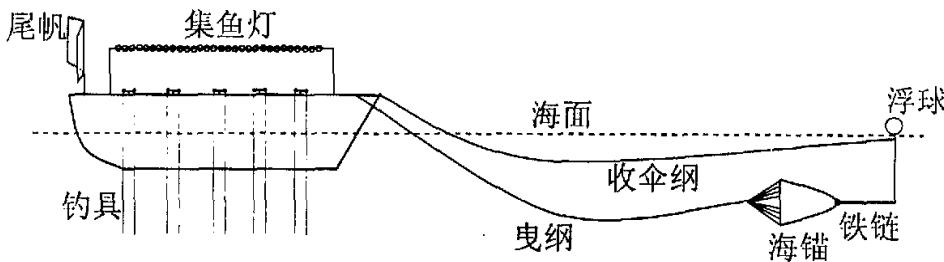


图 1 光诱鱿钓作业示意图

Fig.1 Squid jigging operation

当今世界上最为重要的经济头足类如太平洋褶柔鱼 (*Todarodes pacificus*)、柔鱼 (*Ommastrephes bartarmi*)、西南大西洋阿根廷滑柔鱼 (*Illex argentinus*)、秘鲁海域的茎柔鱼 (*Dosidicus gigas*) 等，均采用光诱钓捕作业，其年产量累计在 100 万 t 以上<sup>[10]</sup>，在世界头足类产量中占着极为重要的地位。

我国远洋鱿钓渔业始于 1989 年，最初开发的是日本海太平洋褶柔鱼资源<sup>[10-13]</sup>，自 1993 年起开发了北太平洋柔鱼资源，随后相继开发和利用了南太平洋新西兰双柔鱼 (*Nototodarus sloani*)、西南大西洋的阿根廷滑柔鱼和秘鲁外海的茎柔鱼资源等。2003~2004 年我国开发印度洋西北部海域的莺乌贼 (*Symlectoteuthis oualaniensis*) 资源和渔场，取得了初步成功<sup>[14-15]</sup>。

目前我国鱿钓渔获的年总产量维持在 20~25 万 t 左右，占远洋捕

捞总产量的 25% 以上，柔鱼类年总产值达 20 亿元左右<sup>[1]</sup>。我国现有鱿钓作业渔船 500 多艘，占远洋作业渔船总数的 30% 以上，其中专业大型鱿钓渔船有 100 艘以上，形成了专业性的、具有相当规模的鱿钓渔业生产队伍。

近十几年来，我国科研工作者对光诱鱿钓渔业作了大量的研究工作，具体包括中心渔场的开发和探索<sup>[16-28]</sup>、钓捕技术的研究<sup>[29-34]</sup>，捕捞对象的生物学特性研究<sup>[35-39]</sup>，以及鱿钓助渔设备的研制开发<sup>[40-45]</sup>等。这些研究对我国鱿钓渔业的发展起到了十分重要的作用。

然而，作为鱿钓渔业中的重要环节——集鱼灯，我国在该方面的研究还十分薄弱。特别是在鱿钓集鱼灯灯光的有效利用方面，我国的研究基本上是处在起步阶段。集鱼灯灯光在鱿钓作业中是起着关键作用的，集鱼灯光源的性能优劣及其合理布置，直接影响到诱鱼效果和捕捞效率<sup>[46-47]</sup>。对鱿钓集鱼灯进行优化配置研究，合理有效地利用鱿钓集鱼灯光源，将会对整个鱿钓渔业的可持续发展起到积极的推动作用。

鱿钓集鱼灯在水中的照度分布是鱿钓集鱼灯优化配置研究的重点<sup>[48]</sup>，但是在渔场进行实际测量的难度很大，而目前又缺乏一种比较合适的方法来进行相关计算。为此，本文将以集鱼灯的光学特性和海水的光学特性为基础，根据鱿钓渔船集鱼灯布置的有关参数，建立集鱼灯在海水中照度分布的理论计算模式，并使用该模式对不同鱿钓渔船集鱼灯的水中照度分布进行计算。同时，根据头足类趋光的适宜照度

等，对不同鱿钓渔船的集鱼灯布置进行评价，并提出相关建议。文章还将对不同鱿钓渔船配备不同种类集鱼灯时的水中照度分布进行计算，通过对各种配置情况的比较，指出不同鱿钓渔船应配备哪种集鱼灯更为合适。此外，为避免鱿钓作业船因相互之间的灯光干扰而造成不必要的光能浪费等，文章还将对不同鱿钓渔船不同总功率时的最小许可作业间距进行研究，并建立相应的计算公式。

通过本文的研究，不仅可为鱿钓渔船合理配置集鱼灯提供理论参考，也有利于促进我国鱿钓渔业的可持续发展，并可为将来对鱿钓渔船集鱼灯灯光总功率进行管制，以及维护鱿钓渔场的作业秩序等提供依据。

## 第1章 绪论

### 1.1 鲣钓渔业中集鱼灯优化配置研究的必要性

#### 1.1.1 问题的提出

资源和粮食保障是全人类共同关心的话题。渔业资源作为人类食物的一个重要组成部分，为人们提供了大量的动物蛋白。在我国，渔业是一项传统的基础产业，和农业、林业、畜牧业一样，渔业是保证粮食安全、改善人类生活、促进社会和国民经济发展的一个重要产业。随着渔业在国民经济中的地位和作用的显著提高，发展渔业已经成为农村经济新的增长点，对调整和优化农业产业结构、增加农民收入、繁荣农村经济等方面发挥了重要作用。

海洋渔业资源是指海洋水域中所蕴藏的经济动植物的群体数量，包括鱼类、甲壳类、软体动物类、水生哺乳动物及其他水生动物、水生植物（主要是藻类）等。有关研究表明，海洋鱼类共有 11675 多种，其中 200m 水深以内的约占 45% 左右。现代世界公海渔业中最受关切的是大洋性渔业资源，据 FAO 统计，公海大洋性渔业资源有 400 多种，其中鱼类有 230 多种，头足类有 70 多种<sup>[49]</sup>。

近几十年来，由于环境污染和过度捕捞导致了世界各国近海渔业资源的严重衰竭，如何在发展渔业经济和资源保护之间取得平衡得到了世界各国越来越多的重视。20 世纪 60 年代末开始，许多渔业国家相继确立了 200 海里专属经济区，1982 年又通过了“联合国海洋法公约”，促使沿海国家加强了其管辖区域内资源的保护和管理，极力限制他国渔船在专属经济区内从事捕捞作业等<sup>[50]</sup>。一些渔业大国的远洋渔业也因此面临着严重威胁，于是都积极开发新的渔业对象，其中，头足类已成为开发的重要渔业资源之一<sup>[10, 13]</sup>。头足类渔业具有资金成本相对较低、见效较快等特点，成为许多渔业生产者的投资方向，联合国粮农组织视头足类资源为人类未来最大的蛋白质食品来源，并将它列为积极开发的目标鱼种。

头足类是重要的海洋经济动物，广泛分布于太平洋、大西洋和印度洋各海域，

全球海域的头足类约有 750 多种，分隶于 43 科 146 属<sup>[51]</sup>。Voss (1973) 估计<sup>[3]</sup>，浅海性头足类的资源量大于 740 万 t，大洋性头足类的资源量为浅海性头足类的 8~60 倍；另据粮农组织 1977 年的评估<sup>[52]</sup>，认为大洋性的头足类资源量为 2.5~7.5 亿 t；董正之<sup>[53]</sup>（1991）利用海洋食物链中抹香鲸与中型头足类的捕食者与被捕食者的关系，估算出世界大洋中的头足类的资源量为 4.2~6.6 亿 t，可见其资源量是非常大的。在 70 多种经济头足类中，被规模开发利用的种类仅占 1/3<sup>[11]</sup>，这些已被开发的头足类几乎都是生活在大陆架的种类或是在近海洄游的大洋性种类，开发较为集中的是在西北太平洋、中西太平洋、西南太平洋、非洲的西北海岸和地中海等海域，而大多数大洋性种类基本上没有开发利用<sup>[54]</sup>。由此可见，头足类资源的开发前景是十分广阔的。

目前，捕捞头足类的主要作业方式是钓钩和拖网，拖网主要用来捕捞浅海性的乌贼科、蛸科和枪乌贼科等；而钓钩主要用来捕捞大洋性的柔鱼类，该渔业在我国俗称鱿钓渔业。

日本是最先发展鱿钓渔业的国家之一，至今已有三百多年的历史了<sup>[6]</sup>。无论从理论上还是应用上，日本都堪称当今世界上鱿钓渔业最先进的国家。

纵观日本的鱿钓历史，诱集鱿鱼所使用的光源，也逐步在改进着。最早使用松明、树根等制成的火炬。而后是乙炔灯、打气煤油灯和液化气灯。到了 19 世纪 30 年代，以干电池为能源的白炽灯开始充当鱿钓集鱼灯。第 2 次世界大战以后，出于动力化、电气化的发展，鱿鱼钓渔业开始使用由交流电作为供电系统的大功率的白炽灯。从此，鱿鱼钓渔业急速兴旺起来，特别是 1965 年成功开发使用了自动鱿鱼钓机并将其改善之后<sup>[55]</sup>，鱿钓渔业在日本渔业中的地位更加重要。

在鱿钓渔业的发展过程中，渔船的大型化和照明装置技术的发展，使得光力增大的倾向愈发明显。所以，在这个发展过程中，光力合理化的主张也被多次提出来。日本首次提出“光力合理化”是在 1973 年第一次“石油危机”的时候<sup>[56]</sup>。当时，为了响应这个号召，把那时所用的白炽灯、卤素灯替换成“省能源的放电灯”。但这种放电灯被积极广泛地使用于鱿钓渔业是在 1980 年以后，最初是在离岸较远海域和远洋海域的大型和中型渔船中普及的，然后才在沿岸作业的小型船上普及开来。

日本鱿钓渔业从战后集鱼灯的电气化开始到 1980 年的这段期间，白炽灯、卤素灯的光力急速增长，在这个阶段中化在集鱼灯装备和燃料消耗上的经费的增大已经开始对经营产生了制约。原本以为放电灯的应用能成为解决这种状态的对策，可是实际上反而加速了光力增大的倾向<sup>[56]</sup>。此外，由于在同一渔场中渔船之间的互相竞争，使得光力显著增加，从而使得鱿钓渔业的经营效益受到影响。

1991 年，在日本全国小型鱿钓渔业联络协议会中认为，为了使鱿钓渔业经营稳定化，必须实施“灯光强度限制”使鱿钓集鱼灯的过剩装备回复到正常状态，会中深入讨论并准备着手研究鱿钓集鱼灯光力适正化的问题。经过日本渔业工作者 1993~1996 年四年的努力，日本鱿钓渔船的光力竞争才基本得以抑制<sup>[56]</sup>。

当前，我国在鱿钓集鱼灯灯光的有效利用研究方面还处在初级阶段<sup>[46]</sup>。由于鱿钓作业渔场相对拥挤，多数渔船常常会集中在同一个海域中作业，显然，分布在其中的各渔船不同的明亮程度，形成了渔场中复杂的光场状态，使得整个渔场都有一种被照亮的感觉。由此，渔民们很自然地就会想到，如果灯光比其它渔船亮的话，就可能会钓更多的鱿鱼。这样一来，就潜在地引发了我国鱿钓渔船及鱿钓企业之间的集鱼灯功率竞争问题。

纵观我国远洋鱿钓发展史，在鱿钓渔业发展初期，鱿钓渔船基本为 8154 型改装船，当时的集鱼灯配置功率在 84~100kW 左右<sup>[40, 57]</sup>。由于那时我国的鱿钓技术尚处于摸索阶段，捕捞技术与日本有很大差距，鱿钓产量低于同期作业的日本渔船是比较正常的。但是因为主观上感到灯越亮可能鱼越多，特别是受到日本鱿钓船集鱼灯高功率配置的影响，作业渔船的灯光强度开始逐年增强<sup>[58]</sup>。

目前，我国部分 8154 鱿钓渔船的集鱼灯配置已上升到 120~240kW，一些专业鱿钓船的总功率在 240~360kW。另外，有一些单位和个人误以为灯光功率和渔获效益成正比，于是盲目增加灯光总功率，结果渔获量非但没有理所当然地得到提高，而又导致了不必要的能源损耗等。特别是近几年来，石油价格在世界范围内都大幅度提升，这无疑给鱿钓渔业附加了更多的额外费用。为使鱿钓渔业可持续发展，必须遵循“少投入、多产出”的理念。因此，“如何合理布置集鱼灯、如何正确使用集鱼灯”以达到鱿钓集鱼灯的优化配置及灯光的有效利用等问题，正逐渐受到我国渔业生产者和科研工作者越来越多的关注。

### 1.1.2 研究的必要性

我国远洋鱿钓渔业经过十几年的历程，逐步发展壮大，现已成为我国当前远洋渔业的一大支柱产业<sup>[59]</sup>。远洋鱿钓渔业的发展，大大缓减了我国近海渔场的捕捞压力，对近海生态环境保护和渔业养护也起到了一定的作用，减轻了沿海居民的就业压力，增加了我国的出口创汇，并在国际鱿钓渔业的发展中取得了应有的权益<sup>[60]</sup>。发展鱿钓渔业是我国“十五”渔业发展规划的重要内容之一，同时，也是农业部“十五”远洋渔业发展规划中重点发展的三个鱼种之一。

目前，鱿钓渔业在我国仍处于发展与稳定提高的阶段<sup>[61]</sup>。尽管我国的鱿钓渔业取得了较好的产量，但一些基础的研究工作跟不上生产发展的要求，与日本、韩国和中国台湾等国家和地区有很大的差距，所以有必要加强对鱿钓及其相关技术领域的研究工作，来指导我国的鱿钓渔船进行合理有效的生产。

我国国内还没有系统开展鱿钓集鱼灯优化配置方面的研究，作为集鱼灯灯光有效利用研究的主要内容，本课题的研究是我国在鱿钓基础研究领域的又一次深入，该课题的研究成果将直接服务于我国鱿钓事业，有益于促进鱿钓效益的整体提高和保障鱿钓渔业的可持续发展。此外，该项研究对我国渔业主管部门将来制定鱿钓渔船灯光标准、集鱼灯最高灯光功率限制，以及鱿钓渔船最小许可作业间距等方面提供依据和参考。

## 1.2 国内外研究状况

### 1.2.1 国外研究状况

集鱼灯在鱿钓渔业中有着十分重要的地位。围绕着集鱼灯灯光的有效利用等方面，国外进行了许多的研究，主要包括以下几个方面：

#### （1）捕捞对象（头足类）的视觉及趋光特性

头足类的视觉及趋光特性是光诱鱿钓作业的基本因素，国外在该方面作了比较多的研究。目前的研究多数是围绕头足类的视网膜结构，采用组织学解剖与电生理相结合的方法，测定头足类的视网膜在光照下的视觉敏感度曲线来进行描述的<sup>[62-67]</sup>，而关于头足类对光行为反应的基础研究却并不是很多<sup>[68-70]</sup>。

Wolken<sup>[71]</sup>（1958）的研究中指出头足类有非常发达的眼睛，在构造特点上，它们的眼睛跟鱼类等脊椎动物相似，但头足类的视网膜仅由一种视细胞群组成，属于感杆型。在头足类的视网膜上每平方毫米的视觉细胞个数是不同的，章鱼类的视觉细胞为64000个，乌贼类为105000个，柔鱼类为162000个（与人眼的视觉细胞160000个相近）。

小仓通男<sup>[72]</sup>（1972）研究指出：枪乌贼的适宜光强为0.1~10lx，且能感受0.01lx的弱光；铃木恒山<sup>[73]</sup>（1976）在海上观测到枪乌贼分布在0.5~10lx等照线以远的光区；小仓通男<sup>[74]</sup>（1978）报道了柔鱼对各种发光强度的诱鱼灯的趋光行为特性，认为柔鱼的趋光性与视神经细胞的数量有联系。

稻田博史等<sup>[75-76]</sup>（1992）对太平洋褶柔鱼、柔鱼的适应光强进行研究，指出头足类是一种趋光性很强的海洋生物，其视网膜中具有“视紫红质”、“视网膜色素”两种光敏色素体，其光谱吸收峰值分别为480nm、495nm左右，这一范围正好是短波蓝绿光波段。

#### （2）鱿钓渔场的光学性质

鱿钓渔场的光学性质对集鱼灯灯光在水中的传递有着重要的影响。小仓通男等<sup>[77-78]</sup>（1982、1992）研究中指出了影响光在海水中传播的两个主要因素是海水

透明度和光的颜色(波长),透明度越高,光线传递的范围越大,距离越远;波长越短,衰减系数越小,传播距离越远。稻田博史等<sup>[76]</sup>(1995)使用PRR-600水中分光放射照度计对北太平洋中东部海域鱿钓渔场的光场分布进行实际测量,认为海水的光学衰减系数一般为0.1左右,研究还指出集鱼灯灯光在海水中传播时,最容易通过海水的光其波长大体在450~490nm之间。崔渐珍等<sup>[79]</sup>(1998)对日本海鱿钓渔场各主要海区的海水光学特性进行过研究,光学衰减系数一般为0.1~0.2左右。

### (3) 集鱼灯的水中照度分布

鱿钓渔船集鱼灯的水中照度分布是研究灯光有效利用的基础。有元贵文等<sup>[56]</sup>(1996)组织测量了鱿钓渔船集鱼灯功率在30kW、75kW、100kW时离船不同水平距离5~50m、水深0~30m的水中照度分布。研究指出鱿钓船周围的灯光照度分布,其水平方向上的衰减速度要小于垂直方向的衰减速度。同时还测量了集鱼灯功率分别为30kW和100kW的两艘渔船在相距50m时的船间照度分布,以及集鱼灯功率分别为75kW和100kW的两艘渔船在相距55m时的船间照度分布。尽管在实际生产中,一般不会出现船间距50m左右的作业情况,但试验指出了测量的方法以及两条船作用下海水中照度分布的一般情况。此外,还对同一艘船在集鱼灯功率分别为360kW和180kW时,网托架前导轮下的光照度分布进行了测量。测量结果表明,在功率相差两倍的情况下,除了表层的照度差异较大外,深层水的照度差别不大,如在360kW时,1lx的等照度曲线在35m,0.001lx的等照度曲线在93m;而在180kW时,1lx的等照度曲线在30m,0.001lx的等照度曲线在90m。

日本学者佐佐木<sup>[80]</sup>(1953)、今村<sup>[81-85]</sup>(1961、1968、1972)、柳川<sup>[86]</sup>(1973)曾使用点光源方法对光诱渔业中集鱼灯的水中照度进行计算。由于点光源计算方法的前提是假设集鱼灯的发光特点是各向同性的,这显然与集鱼灯各向异性的事实在不符的,因此该计算方法会造成很大的误差。但是对于一些小型渔船,其灯光布置相对集中,为简化计算,可以考虑使用点光源计算方法。

崔渐珍等<sup>[87]</sup>(2002)建立了线光源水中照度计算模式,对日本19总吨鱿钓渔船不同总功率时的水中照度进行了计算,并使用水中照度实际测量值进行检验,

发现当理论计算值 $\times 65\%$ 时，与实际测量值比较吻合。线光源水中照度计算方法的假设是将鱿钓渔船上所有的集鱼灯作为一列线光源进行考虑的，并以微段光源积分的形式进行计算，这与鱿钓渔船集鱼灯的实际情况有很大差别。特别是当鱿钓渔船两列集鱼灯的距离较大时（如我国的 8154 型鱿钓渔船两列灯的平均间距为 5.4m），将两列灯最为一列线光源来计算必然会加大计算误差。因此，该计算方法并不适合于我国的鱿钓渔船。

#### （4）集鱼灯总功率的合理配置

集鱼灯总功率的合理配置是鱿钓集鱼灯灯光有效利用的核心问题，该方面的研究一直得到国外渔业工作者的重视。日本在 20 世纪 70 年代曾进行过该方面的试验，结果表明：鱿钓船集鱼灯功率增大，其渔获量也随着增大，但是光强有个峰值，超过这个峰值，产量并不随集鱼灯功率的增强而增加<sup>[74, 77]</sup>；对于 10~20 吨级的小型鱿钓船，其峰值为 40kW，相当于每米船长 2~2.5kW（1972~1974 年）；而 1979 年的研究表明峰值为 50kW，相当于每米船长 3~4kW。对于 60~80 吨级的中型鱿钓船，1974 年的研究认为其峰值为 150kW，按每吨位所配备的集鱼灯功率来看，相当于 2.36kW/t。

80 年代以后，以小仓通男为代表的一些学者就进行了“鱿钓渔业中集鱼灯的适合光强与渔获率的研究”，其主要的研究对象是太平洋褶柔鱼<sup>[74, 77-78]</sup>。在这里他们主要围绕“光强与渔获量（渔获效率）的关系”、“经营利润”两个指标分析和探讨了不同中、小型鱿钓渔船的适合光强。

在 1993~1996 年期间，日本对不同吨级的鱿钓渔船进行了总功率配置方面的研究，指出：250-300 吨级大型鱿钓船集鱼灯总功率的上限是 300kW；135 吨级左右的中型船集鱼灯总功率的上限是 250kW；多数 19 总吨的小型鱿钓船的灯光功率在 180kW 左右。同期，围绕着水下灯节能、诱集范围广的特点，进行了大量的试验对比工作<sup>[75-76]</sup>。研究表明：增加一倍的灯光功率并不能产生相应倍数的灯光进入海水中，而在渔获产量方面的差异并不很大；即便两艘渔船在灯光功率上有极端的差异，也不意味着明亮的一方能捕到更多的鱼。研究还指出：一般地，日本的小型鱿钓渔船灯光功率在 100kW 以下时，随着灯光功率的增加渔获量也随之增加；但是在 150kW 到 200kW 时，渔获量不再随灯光功率增大而增加。

另有研究表明<sup>[6]</sup>：现有鱿钓渔船上的灯光存在很大的能源浪费问题，在海况平静时，如果船上的集鱼灯向海面的入射角超过 70°，则有 97%以上的光在海面上被反射，故从经济成本和能源损耗这个角度来看，仅仅考虑增加集鱼灯数量是十分不可取的。

此外，崔浙珍等<sup>[88-90]</sup>（2003）也从集鱼灯燃油消耗等方面对当前集鱼灯使用状况进行了分析。

#### （5）鱿钓渔船的作业间距

关于鱿钓渔船的作业间距方面的研究并不是很多，崔浙珍等<sup>[91]</sup>（1997）根据线光源计算模式，以 0.01lx 为背景照度指标，指出 19 总吨小型鱿钓渔船当集鱼灯总功率为 100kW 时，其彼此间的作业距离应不小于 800m。但在研究中也未能进行实际的测量和验证。

#### （6）集鱼灯及其光源的开发和研制

光诱鱿钓渔业的发展与集鱼灯的开发和研制是紧密相连的。长期以来，国外在该方面作了大量的研究。鱿钓目前所使用的集鱼灯多数是白光集鱼灯，其灯光在海水中的穿透力较低，考虑到即使成倍提高功率也不能有效增加透入水中的光量<sup>[92]</sup>，因而积极开发新的集鱼灯光源是值得提倡的。

由于短波段的光具有在海水中传播穿透力强的特点，故日本渔业研究者十分提倡使用蓝绿色金属卤化物集鱼灯。但同时也指出，如果在船上全部布置一种颜色（如绿色）的集鱼灯，将会对船上工作人员的视觉产生损害等。

另外，考虑到由于水上灯光不能有效进入水中，故围绕着水下集鱼灯具有节能、诱集范围广、穿透能力强等特点，开展了许多相关的试验，研究证明了使用水下集鱼灯作业在一定程度上能获得较好的渔获。

最近，日本还计划从 2005 年 3 月开始，研究使用蓝色发光二极管 LED (light emitting diode) 集鱼灯来替代目前的金属卤化物集鱼灯，以达到节省能源消耗、改善工作环境等目的。

#### （7）背景光的影响

背景光对鱼类行为的影响，国外作了较多的研究<sup>[93-97]</sup>。林秀明等<sup>[93]</sup>（1949）

研究发现鱼眼的视觉阈值在有月光时为 0.01~0.1lx，比无月光时的阈值（0.0001~0.001lx）大 100 倍。因此，在有月光下鱼类对人工光线的趋集反应就差多了。根据实测结果，在有月光时用 100cd 的水上灯诱鱼时，水深 20m 处的光照度相当于月光在该处的照度（见表 1-1）。这就是说，100cd 的集鱼灯在水深 20m 处已完全失去了诱集鱼的作用，所以月光对光诱效果的影响很显著。

表 1-1 月光与集鱼灯的水中照度（参林秀明<sup>[1]</sup>，1956）

Tab.1-1 The underwater illumination of the moonlight and the aggregating fish lamp

水深 (m)	0	2	5	10	20	30
月亮（满月）	0.24	0.197	0.146	0.0884	0.0324	0.0120
集鱼灯（100cd）	100.0	20.5	2.43	0.368	0.0338	0.00556

注：表中数据为海水衰减系数为 0.1 时所测。

川本信之<sup>[94]</sup>（1955）认为鱼眼对光亮度的阈值变化是与网膜感受器敏感性的变化相联系的，因为背景光强度从 0.01~0.1lx 向更高强度的转变过程，实际上完成了由棒体视觉向锥体视觉的过渡（光适应）。在有月光的夜晚海面强度起伏在 0.01~0.1lx，由于鱼眼对这种光适应的结果，使诱鱼光的强度增加到 100lx 以上，月光照明影响了鱼眼对光适应的条件，所以也影响了鱼眼对人造光源的反应。

前田弘<sup>[95-96]</sup>（1956）使用白炽灯模拟月光对饲养在水槽中的鱿鱼进行了观察，认为月光的存在作为一种弱光能改变鱼视觉的适应状态。浜部基次<sup>[97]</sup>（1964）对月光下鱿鱼的行为进行了研究，表明鱿鱼在月光下比较活跃，但由于月光不仅照射到海水表面，而且渗透到一定的深度，这样月光作为背景光降低了人工光源照明的强度，使鱼眼对光源的辨认阈增加，这样鱼就不能在光源附近稳定集群，鱼的行为处于离散的状态，从而显著地减少了捕捞量。

### 1.2.2 国内研究状况

在我国鱿钓渔业发展的初期阶段，对集鱼灯的研究主要集中在集鱼灯的推广使用以及配套设备的国产化研究等方面，而基础和理论研究工作有所欠缺。到了

90 年代后期，我国科研人员才开始逐步进行相关的理论研究工作。

### (1) 捕捞对象（头足类）的趋光特性

我国在鱼类视觉方面的研究多数针对的是一些硬骨鱼类<sup>[98-106]</sup>，而在头足类视觉及趋光特性方面的研究不多<sup>[107-109]</sup>，特别是对于目前主要的几种远洋鱿钓捕捞对象，均未作过视觉生理方面的研究。但在 70、80 年代，我国的部分科研工作者曾对近海的几种头足类作过视觉方面的研究。例如，何大仁等<sup>[107]</sup>（1979）研究指出杜氏枪乌贼 (*Loligo duvaucelii*) 的适宜光照区为 0.1~10lx，对短波段的颜色光有最大趋光率，以蓝光为适宜，绿光和紫光次之；郑美丽等<sup>[108]</sup>（1980）、柴敏娟等<sup>[109]</sup>（1982）研究指出曼氏无针乌贼 (*Sepiella maindroni de Rochebrune*) 没有分辨颜色的能力，为色盲。

### (2) 水下集鱼灯

在水下集鱼灯方面，国内作了较多的研究<sup>[110-115]</sup>。实际生产试验说明，水下灯在晚上可以作为水上集鱼灯的一种补充光源，水下灯的使用使得白天鱿钓作业成为可能，有利于促进钓捕产量的提高，使用水下灯时可使晚上鱼发时间提前 1 个小时以上；但是水下灯在夜间使用时会带来一些副作用，如鱿钓深度加深等。

此外，钱卫国等<sup>[115]</sup>（2005）根据 5kW 金属卤化物水下灯（型号为 MTW50HG）和 5kW 卤素水下灯（型号为 QW5-200）的水中照度实测据，对这两种水下灯的光强分布作了比较，指出金属卤化物水下灯和卤素水下灯光照度的衰减曲线分别为： $I = 28.74 \times e^{-0.0952r}$  和  $I = 6.29 \times e^{-0.0914r}$ ；金属卤化物灯 0.01 lx 等光照度曲面所包含的水体体积为  $244.6 \times 10^4 m^3$ ，是卤素灯的 1.67 倍。

### (3) 水上集鱼灯

1、水上集鱼灯照度分布的理论计算。傅恩波等<sup>[116]</sup>（1999）曾使用点光源模式对集鱼灯的水中照度分布进行了有关的理论计算和模型试验，但其计算和试验的灯为小功率的白炽灯，与鱿钓渔船实际的情况有所差异。

郑国富<sup>[117]</sup>（1999）使用经验公式计算了光诱浮拖网渔船不同功率时的水中照度分布，并使用 0.01lx 等照度曲线所围水体作为对鱿鱼光诱的有效范围、照度为 0.1-10lx 的水体作为鱿鱼集群的范围，对作业渔场的光场变化和渔具的适应性进

行了分析。该经验公式计算方法主要有两个方面的不足：一是其所适用的灯光系统以白炽灯为主与目前鱿钓集鱼灯所使用的金属卤化灯有很大的区别；另一方面是在计算水中某处照度时，该方法先是计算水中该位置对应的海面照度，然后将海面照度以指数衰减的方式计算水中该位置的照度，显然这是不符合光的折射和反射定律的。

张丽蕊<sup>[118]</sup>（2004）根据鱿钓集鱼灯各向异性的配光特点，对集鱼灯灯光在水中的光强分布计算方法进行了初步探讨，并对8154型鱿钓渔船周围30m以内某等照度曲面所围水体体积，从曲面积分的角度进行了估算。由于该计算方法未考虑海面对光反射所造成的能力损失，同时也未考虑船舷高度对光阻碍等边界条件，使得计算结果偏大。尽管关于等照度曲面所围水体体积计算方法很复杂，且所计算的水体体积范围很有限，但该研究中首次对等照度曲面所围的水体体积计算方法进行了探讨，这为如何衡量鱿钓渔船集鱼灯的合理配置提供了借鉴。

此外，钱卫国等<sup>[119]</sup>（2004）对集鱼灯海面照度的计算方法进行了比较研究，建立了关于灯光在海水表面照度分布的新的计算方法，并使用鱿钓渔船集鱼灯的实际配置参数进行了相关的计算和探讨。

**II、水上集鱼灯照度分布的实际测量。**上海水产大学鱿钓技术组于2003、2004年9~11月在印度洋西北海域的莺鸟贼渔场，使用IU-2B型水下灯光照度计，对鱿钓集鱼灯灯光在船侧滚轮直接下方的照度进行了实际测量<sup>[120-122]</sup>。测量内容具体包括：1kW型、2kW型金属卤化集鱼灯（包括新灯和使用1年后的旧灯）、500W型高压钠灯和500W型白炽灯不同总功率时的水中照度等。

测量表明：对于2kW型金属卤化集鱼灯，当总灯数为120盏时，在距船舷3.0m处的垂直断面，其水深5m内的光照度多在100lx以上，10lx的等光照度曲线在20m水层左右，0.1lx等光照度曲线则分布在45m水层附近，0.01lx等光照度曲线则分布在65m水层附近；当总灯数从120盏下降到60盏时，尽管减少了一半的灯光总功率，除表层的照度差异较大外，深水层照度减少的幅度很小；60盏×2kW新灯在水中相同水深的照度要比60盏×2kW旧灯的照度高20%以上。

**III、水上集鱼灯总功率的合理配置。**陈永茂<sup>[58]</sup>（1999）根据1995~1997年的调查情况，对鱿钓渔船集鱼灯功率配置的经济性分析方面，认为8154型鱿鱼钓船

的总功率在理论上应不超过 184kW。

钱卫国等<sup>[120]</sup> (2004) 根据印度洋弯鸟贼渔场的实际生产统计, 指出一艘配备集鱼灯总功率 240kW 的渔船, 只需使用 112~160kW 的集鱼灯功率就能获得较好的渔获效果, 特别是当集鱼灯总功率为 114kW 时, 其单位功率每小时的渔获产量最大。

IV、水上集鱼灯的合理布置。陈新军等<sup>[47]</sup> (2004) 对 8154 型鱿钓渔船的集鱼灯配置作了理论分析和研究。认为 8154 型鱿钓渔船的集鱼灯离水面高度取 5.3m, 舷边距取 1.4m 时, 灯光照射到海面的能量和范围最大。

#### (4) 背景光对鱿钓作业的影响

蓝晞文<sup>[123]</sup> (1992) 指出, 月光是面辐射光源, 而人工光源是点辐射光源, 当月光作为背景光时, 人工光源的光场变得更加复杂。月光减弱人工光源的信号意义, 对光诱渔业而言, 减弱了鱼类对光源亮度的敏感性, 减小了人工光源的光诱范围和效果; 因而, 月光对光诱渔业效果影响很大, 月光越亮, 光诱效果越差, 无月光夜, 光诱效果好。

曾岳祥<sup>[124]</sup> (1994) 根据日本海鱿钓渔场的生产数据, 研究了月光夜与非月光夜的渔获差异, 发现无月夜的产量要占到总产量的 70%以上。

此外, 郑基<sup>[125]</sup> (1997)、王晓辉<sup>[126]</sup> (1998)、陈新军<sup>[127]</sup> (1998)、钱卫国<sup>[121]</sup> (2004) 在北太平洋、新西兰、印度洋阿拉伯海等鱿钓渔场也都发现了月光夜时鱿钓产量相对较低的现象, 可见月光和渔获效果有着显著的关系。

### 1.2.3 存在的问题

综上所述, 国内外关于集鱼灯灯光的有效利用研究主要围绕头足类的视觉特性、渔场的海水光学特性、集鱼灯的水中照度分布、集鱼灯的应用效果, 以及背景光的影响等方面进行的。尽管取得了一定的研究成果, 但是尚有以下几个方面没能得到解决:

(1) 在灯光作用下头足类视觉的适应性方面未能作出十分明确的解释, 也未能指出不同的头足类对光最敏感的照度范围。

(2) 鲅钓渔场的海水光学特性是因地而异的，目前所研究的只是日本海和北太平洋的局部海域，其它洋区鲅钓渔场的海水光学特性未作研究。

(3) 国外对不同吨位鲅钓渔船集鱼灯的总功率作了限制，但目前国内的研究中尚未明确指出不同鲅钓渔船集鱼灯的总功率应该如何配备。

(4) 国内外的研究中均未指出不同的鲅钓渔船，其水上集鱼灯在渔船甲板上方应如何更合理的布置。

(5) 目前的研究也均未指出不同的鲅钓渔船应选择什么型号（功率）的集鱼灯比较合适。

(6) 尽管崔渐珍对日本 19 总吨小型鲅钓渔船的作业距离作了研究，但尚没有对不同种类的鲅钓渔船（特别是我国的鲅钓渔船）之间应该保持多大的作业间距作出相关研究。

(7) 对于鲅钓渔船周围不同距离不同水层的照度分布，虽然作了一些测量工作，但由于海上测光操作的难度很大，而深水层照度因受到测光仪器精度和电缆线长度等的限制而不能测量，所以目前的测量数据很有限，不足以用来研究不同类型鲅钓渔船的水中照度分布。

(8) 尽管可以使用点光源计算方法、线光源计算方法和经验计算方法等来计算和研究集鱼灯在水中的照度分布，但这几种计算方法在计算原理和计算的精确性上都有很大的局限性，也并不适合于我国的鲅钓渔船，故需建立一种新的集鱼灯水中照度的理论计算模式。

## 1.3 研究内容及其体系

### 1.3.1 研究内容和目标

本研究主要分为三大部分，一是“基础理论研究部分”，二是“水中照度计算模型的建立和基本应用部分”，三是“鱿钓渔船集鱼灯优化配置的实证分析部分”。

“基础理论研究部分”的主要内容包括集鱼灯的光学特性、头足类的视觉特性、海水的光学特性、鱿钓渔船集鱼灯的基本布置等，其中头足类的视觉特性和海水的光学特性是在前人研究的基础上进行分析和探讨的，集鱼灯的光学特性是在实验基础上进行分析和论述的。

“水中照度计算模型的建立和基本应用部分”则是在基础理论研究的基础上，建立集鱼灯水中照度模型，并用实际测量数据对模型进行验证；随后使用该计算模型进行船侧周围水中照度的计算和分析，以此对模型的基本应用进行介绍。

“鱿钓渔船集鱼灯优化配置的实证分析部分”则是根据不同类型的鱿钓渔船的不同集鱼灯布置情况，分别进行集鱼灯的合理布置研究，并对不同类型的集鱼灯配置问题进行研究，另外还对不同鱿钓渔船的最小许可作业间距进行分析和研究。

本文的目的是围绕鱿钓集鱼灯的优化配置这一研究课题，根据海水的光学特性、集鱼灯的基本特性、鱿钓渔船的集鱼灯布置参数等，建立集鱼灯水中照度的理论计算模式；通过对鱿钓渔船集鱼灯水中照度的理论计算，依据头足类趋光的适宜照度等，对鱿钓集鱼灯的选择和具体布置进行研究，对不同类型鱿钓渔船集鱼灯配置进行评价，对鱿钓渔船的合理作业间距进行探讨；通过上述分析和探讨，为进一步的研究工作和渔业管理提供参考。

### 1.3.2 研究体系及框架

本研究体系是通过以下5个章节来实现的。

第1章为“绪论”部分，主要包括：鱿钓集鱼灯有效利用这一课题的提出及

其研究的必要性，并对国内外相关的研究现状及有关问题作出分析和探讨。

第2章为“基本理论探析”，主要包括：头足类的视觉特性及趋光行为；海水的光学特性、人工光源在海水中的传播特性和光场分布特点等；集鱼灯的种类及不同集鱼灯的光学特性；鱿钓渔船集鱼灯的基本布置等。

第3章为“水中照度分布理论模式”，主要包括：集鱼灯水中照度分布的几种常用计算方法的介绍；集鱼灯水中照度分布计算模式的建立及其检验；不同集鱼灯配置参数时的等照度曲面、曲线的制作，以及等照度曲面所围水体体积的计算等。

第4章为“实证分析”，主要包括：不同种类集鱼灯配置的比较研究；不同鱿钓船集鱼灯的合理配置；8154型鱿钓渔船集鱼灯总功率的配置研究；鱿钓渔船合理作业间距的研究等。

第5章为“结论和探讨”。主要内容为对本研究的一些主要结论进行概括和探讨。

上述5个章节中，第1章为问题的提出，第2章为基本理论的分析和讨论，第3章是模型的建立和应用，第4章是实证分析和具体研究部分，第5章对上述的研究结果进行归纳和讨论。文章的框架结构见图1-1。

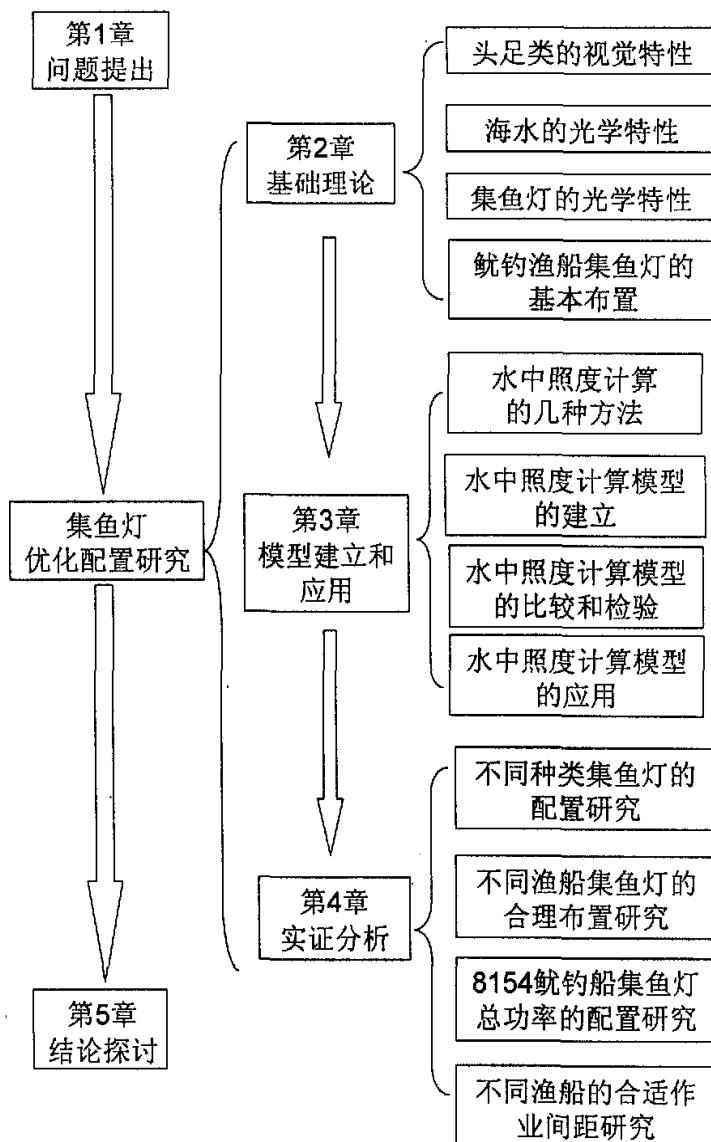


图 1-1 论文框架

Fig.1-1 The configuration of the dissertation

## 第2章 基本理论探析

由前所述，光诱鱿钓就是应用头足类的趋光和摄食习性，运用集鱼灯灯光和自动化钓机及拟饵复合伞钩进行诱捕头足类的一种新的捕捞渔业，因而，鱿钓集鱼灯的优化配置必然是一个综合性的研究课题。具体来讲，该课题的研究要涉及到物理光学、水光学、应用光学、生物学、鱼类行为学、捕捞学等众多的学科。根据论文的研究需要，本章主要针对头足类的视觉及其趋光习性、海水的光学特性、鱿钓集鱼灯的光学特性、鱿钓渔船集鱼灯的基本布置等4个方面的内容进行分析和探讨。

### 2.1 头足类的视觉及其趋光习性

头足类具有非常发达的眼睛，其视觉特性与它的趋光性、发光现象、体色变化以及摄食、繁殖、集群、防御和游泳等行为均有密切的联系<sup>[128-129]</sup>。研究头足类视觉对分析头足类行为、设计改进鱿钓渔法等方面都具有重要的理论和实践意义。

#### 2.1.1 头足类眼睛的基本构造

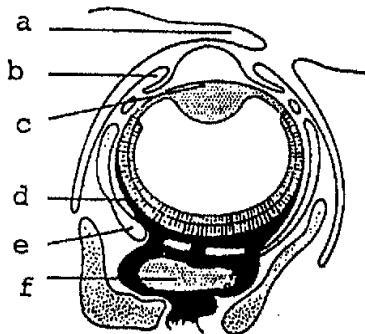
头足类眼球是由巩膜、视网膜等组成（见图2-1）。在构造特点上，头足类的眼睛跟鱼类等脊椎动物相似，并且都是属于折射型的，能把照射到眼睛瞳孔上的光线折射聚焦在视网膜上，形成物象。

巩膜（sclera）是在眼球的最外层，起保护眼球的作用，巩膜在眼球前方部分是透明的角膜（cornea），光线可透过角膜落到晶状体上。头足类的角膜比较扁平，与水中生活相适应，有保护眼球免受外界损伤的作用<sup>[130]</sup>。

眼球的最内层为视网膜（retina），是产生视觉作用所在的部位。它有两种视觉细胞，即圆柱（或杆状细胞 rod cell）及圆锥细胞（cone cell）。圆柱细胞是收

纳光线强弱的刺激，起到头足类感知光觉的作用；圆锥细胞是收纳光波长短的刺激，起到头足类感知色觉的作用<sup>[130-136]</sup>。有神经分布到视网膜上，视神经通出的地方无视觉作用，称为盲点。

眼内有晶状体（或称水晶体 lens），是由无色透明成群的细胞组成，无血管和神经，通常为球状。晶状体与角膜之间的空腔充满水状液（aqueous humor），是一种透明而流动性大的液体，有反光的能力；晶状体与视网膜之间的空腔充满玻璃液（vitreous humor），是一种粘性很强的胶状物，能固定视网膜的位置。



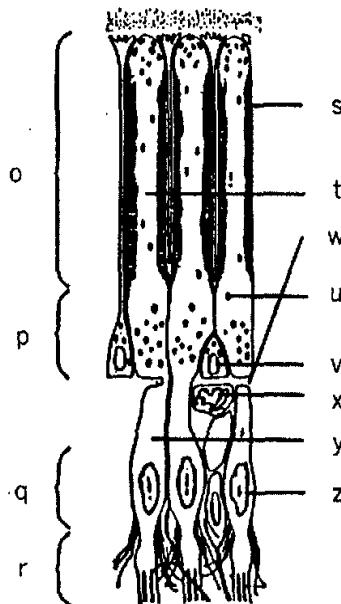
a: 角膜；b: 虹膜；c: 水晶体；d: 视网膜；e: 巩膜；f: 视神经叶

图 2-1 头足类的眼球构造 (Duke-Elder<sup>[131]</sup>, 1958)

Fig.2-1 The eyeball construction of cephalopod

## 2.1.2 头足类的视觉特性

头足类视网膜（见图 2-2）中含有两种光敏色素体系，即视紫红质和视网膜色素。这两种视色素的存在是与视觉过程中视色素循环有密切关系的。前者的光谱吸收峰值在 475~500nm，后者为 470~522nm，依种类不同而异。Young<sup>[137]</sup> (1962) 组织学研究表明：枪乌贼视细胞的伸缩和色素的位移速度均较其它头足类快，对光刺激十分敏感。罗会明<sup>[129]</sup> (1985) 指出：对同一种头足类来说，视网膜色素的吸收峰值比视紫红质的吸收峰值向长波段方向移动了 15~20nm (见表 2-1)，但这种情况并不意味着头足类具有色觉功能。何大仁<sup>[107]</sup> (1979 年) 研究指出：杜氏枪乌贼对短波段的颜色光有最大趋光率，以蓝光为适宜，绿光和紫光次之。



o: 感杆层; p: 黑色素层; q: 视细胞核层; r: 神经纤维层; s: 感杆; t: 视细胞外节; u: 黑色素颗粒;  
v: 支持细胞; w: 外限膜; x: 血管; y: 视细胞内核; z: 视细胞核

图 2-2 头足类视网膜结构 (Tazaki<sup>[132]</sup>, 1967)

Fig.2-2 The retina construction of cephalopod

表 2-1 头足类视网膜中光敏色素的吸收峰值 (罗会明<sup>[129]</sup>, 1985)

Tab.2-1 The observe value of retina of cephalopodus

种类	鱿鱼	大乌贼	枪乌贼	章鱼
视紫红质	480	486	500	475
视网膜色素	495	508	522	490
酸性间视紫红质	488	495	500	503
碱性间视紫红质	378	378	380	380

注: 表中数据单位为 nm。

头足类视网膜对光反应的敏感度在明适应和暗适应两种情况下是不同的。根据日本学者的研究结果<sup>[138-141]</sup>, 在明适应时, 头足类对光谱的吸收峰值为绿色光谱(波长 500~530nm); 在暗适应时, 光谱的吸收峰值为青色光谱(波长 460~490nm)。头足类视网膜对光反应的敏感度曲线参见图 2-3。

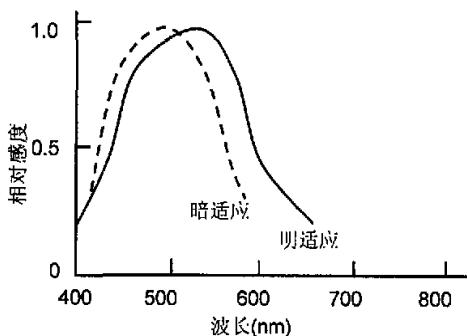


图 2-3 头足类视网膜对光反应的敏感度

Fig.2-3 The sensitivity of cephalopodous retina to the light

### 2.1.3 头足类的趋光性

日本对头足类的趋光特性有较多的研究<sup>[134-135、142-145]</sup>。小仓通男<sup>[142]</sup>(1976)报导了枪乌贼(*Teuthoidea*)对各种发光强度的诱鱼灯的趋光行为特性。开亮 100W 的白炽灯时, 枪乌贼能很好地聚集在光源附近, 组成密度较高的趋光群体; 如果光强增大(这里指提高电源压力), 枪乌贼鱼群游动变得活跃, 有分散的倾向; 将集鱼灯改变为 500W 的白炽灯光时, 由于光线更强, 枪乌贼群体分散的倾向更加显著, 并有起浮到水面的倾向; 如果此时改变使用 40W 的水银荧光灯, 枪乌贼就会立即逃到背离光源一侧的阴暗处; 而改为使用 20W 的水银萤光灯时, 枪乌贼能在光源一侧滞留并集群, 群体密度较高, 游动缓慢。

有学者认为枪乌贼对颜色光是有趋光反应的<sup>[134、144]</sup>。观察发现枪乌贼在绿光下能集群游动, 群体稳定, 移动缓慢, 青白光次之在白炽灯光下则惊慌地游动。另有资料表明太平洋褶柔鱼对 560nm 的光(黄绿光), 台湾枪乌贼(*Loligo Tanwensis*)对 510~540nm 的光(蓝绿光)都有最大的趋光反应。据测定杜氏枪乌贼对短波段的颜色光趋光反应最大, 以蓝光为适宜, 绿光和紫光次之。因此, 枪乌贼比较喜欢短波段光, 这可能跟它们栖息于水质清、水色低的水域环境特点相适应的。但由于种类不同, 生态习性上有所差异, 对短波光的最适光色也必有不同。

安井达夫<sup>[145]</sup>(1972)研究指出: 枪乌贼具有十分明显的趋光特性, 并且枪乌贼具有既喜弱光又怕强光的特点; 何大仁<sup>[107]</sup>(1979)研究发现: 杜氏枪乌贼趋光

程度会随背景光不同而异，在生殖季节的月夜趋光率特别高，即表明枪乌贼的趋光习性会随海况条件、栖息水层、性腺成熟度、胃饱满度、背景光强度等情况的不同而不同；欧瑞木<sup>[146]</sup>（1990）研究提出：枪乌贼对光的反应呈阳性，趋光性较强，见到灯泡或明亮之物，则群起围绕其游泳，经久不散；光源移动，则会追逐光源而游动，且幼体比成体更加明显。不同头足类趋光性的强弱有所差异，这不仅与柔鱼类、枪乌贼类、乌贼类的栖息水层有关，而且与视神经细胞的数量有联系。一般来说，柔鱼类、枪乌贼类的趋光性要强于乌贼类。

#### 2.1.4 头足类的适宜照度

一般地，趋光鱼类在光照区内不都是聚集在集鱼灯下活动的，而是选择各自喜好的照度范围内进行活动。鱼类趋光反应中产生最大趋光率时的光照强度，称为适宜照度。

光照区被诱集的不同种类的鱼在离光源一定的距离和区域内形成最密集的鱼群，这一有限的范围通常称为鱼类最适宜的照度区。

不同鱼类的适宜照度是各不相同的，小仓通男<sup>[142]</sup>（1976）测得枪乌贼的适宜照度区为0.1~10lx，但对于0.01lx的弱光仍能感受，对杜氏枪乌贼趋光行为的研究得其适宜照度区也是0.1~10lx。铃木恒由<sup>[147]</sup>（1986）在海上观测到枪乌贼分布在0.5~10lx等照线以远的光区；何大仁等<sup>[107]</sup>（1979）研究指出杜氏枪乌贼的适宜光照区为0.1~10lx。郑美丽等<sup>[108]</sup>（1980）研究指出曼氏无针乌贼的适宜照度为0.01~10lx，为弱趋光的头足类。

生产实践中发现，当一艘渔船从灯光附近的强光区缓缓驶向弱光区，由探鱼仪记录下的水下趋光鱼群的映象是存在很大差异的。在很强的光照区里一般不能记录到鱼群映象；随着光照强度的减弱，映象从无到有，从稀散到密集，映象的难度也逐渐增大；在某一强度的光照区，鱼群映象的浓度达到最大，浓黑一片，船再驶向更弱的光照区时，鱼群映象又从浓黑逐渐变得浅淡，最后逐渐消失。

趋光鱼群映象的这一变化，反映出鱼群在光照区里的数量分布特点，这一情况具有普遍性。显然，趋光鱼群最密集的光照区的光照强度，就是该种鱼群的适

宜照度。在水域环境中，鱼总要寻找适合于它栖息的光照强度。

灯光捕鱼生产中的集鱼技术，就是以适宜照度为其理论依据的。在同一灯光的水下光场中，不同的趋光鱼类将各自聚集在自己所特有的适宜照度区内。另有研究指出<sup>[81]</sup>，趋光鱼群在自己的适宜照度区内呈现一种“着迷”的状态。如果灯光的照明强度有所增减，鱼群也一定会追随适宜照度的移动，上浮或下沉到某一水层的一定范围内。这样，人们就有可能利用鱼类的在这种趋光特性，把诱鱼灯过渡到集鱼灯，使原来分布在大范围的适宜照度逐渐移动而聚集在小范围内，鱼群也必然随之而聚集，形成密集的可捕捞趋光鱼群，比如鱿钓渔业中常用的变色灯技术就是使用这一原理。

## 2.2 海水的光学特性

头足类在一定的水域环境中生存，在适应这一特定的外界环境时，头足类眼睛的结构和功能都会有相应的变化<sup>[129]</sup>。分析光在海水中的传播特征是理解鱼类各种视觉现象适应意义的基础<sup>[148]</sup>，这方面的知识也是设计水上、水下光源所必需的。

### 2.2.1 海洋中光线分布的基本情况

光线对鱼类的生活有着重要的影响。多数鱼类的仔鱼在水层中的分布，都随着光线的昼夜变化而变化。白天在强光下离开表层，而在傍晚则转向表层。光线对鱼类的摄食也有一定的影响<sup>[149]</sup>，一般鱼类多在白天特别在清晨和傍晚进行摄食活动，而在黑夜则停止进食，反映了光与视觉及摄食有关。

海洋中光线的分布强度一般用透明度来表示<sup>[150]</sup>。除沿岸或内湾受大陆影响严重的地区，光线透入水层衰减十分剧烈外，大多透明度很大，最大可达50m以上。但是透明度并不代表光线存在的范围，光线穿入的深度还要大得多。

根据光线穿透的水层，可分为三层：即由水面至水下80m的区间为真光层，光线充足，动植物繁茂；水下80m到400m的区间为弱光层，只有少量光线透入，植物数量已经很少，只有少量硅藻；400m以下为无光层，只有动物而基本没有植物存在了。

所有这三层均有鱼类分布，但在视觉器官的适应方面有很大的差异。真光层中鱼类眼睛发达的程度正常；弱光层中的鱼类常具有较大而发达的眼以弥补光度之不足，大洋性的头足类就是属于这一层的；无光层中的鱼类其视觉器趋向两个不同的方向发展：一是具有特别发达的眼睛并常常具有发光器；另一是眼睛退化或无眼，而代之以感觉器官，如侧线器官、触觉器官等。

### 2.2.2 光在海水中的传播

#### （1）光在海面的反射和折射

一般地，光线射到海面以后，一部分被海面所反射，另一部分则经过折射进

入水中（参见图 2-4）。而在有波浪的海面，光在海水表面还会呈现出复杂的漫反射现象<sup>[151-152]</sup>。反射和折射现象均遵守反射定律和折射定律<sup>[153-155]</sup>，即入射光线、反射光线、折射光线同在一平面上，光线可逆，入射角（ $\theta$ ）等于反射角（ $\theta'$ ），入射角的正弦（ $\sin \theta$ ）等于折射角的正弦（ $\sin \gamma$ ）与折射系数（ $n$ ）的乘积。即，

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta = \theta' ; \\ \sin \theta = n \times \sin \gamma \quad (\text{对于海水 } n = 1.33) . \end{array} \right. \quad (1)$$

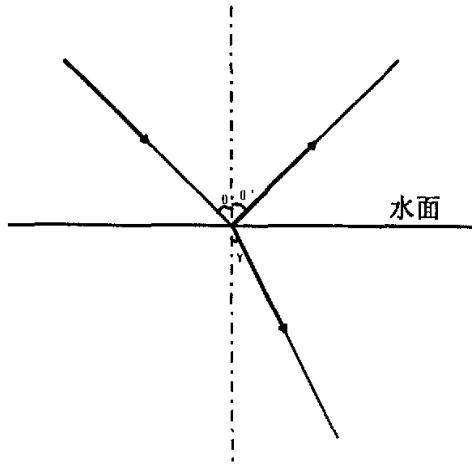


图 2-4 光线的反射和折射  
Fig.2-4 The reflection and refraction of light

由于海面对光线的反射，实际进入海水的光强要小得多。在平静的海面，按照 Frensel (菲涅耳) 法则<sup>[156]</sup>，根据公式 (2) 可求得光能折射比  $\beta_\theta$  (也称光的渗透率)。

$$\beta_\theta = 1 - 0.5 \times \left[ \frac{\operatorname{tg}^2(\theta - \gamma)}{\operatorname{tg}^2(\theta + \gamma)} + \frac{\sin^2(\theta - \gamma)}{\sin^2(\theta + \gamma)} \right] \quad (2)$$

式中： $\gamma$  为点入射角为  $\theta$  时的折射角 (弧度)。

图 2-5 是当灯的高度为 6.2m 时，求得的从光源直接下方到船侧方向的各距离

的入射率。根据该图，光源直接下方的入射率几乎为 100%；水平距离 100m，即入射角度 86.4° 时，下降到约 32%；随着与光源的距离进一步变远，水面上的光的渗透率下降，船侧方向水平距离 800m，入射角度 89.5° 时，下降到约 5%。

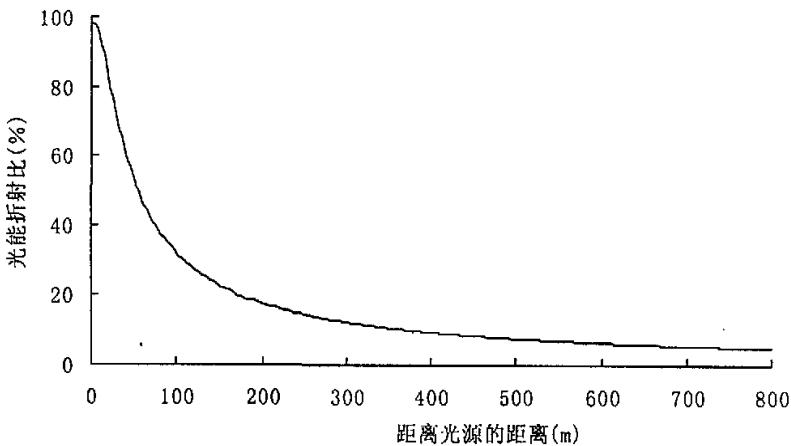


图 2-5 离光源不同距离的渗透率  $\beta_\theta$

Fig.2-5 Penetration rate ( $\beta_\theta$ ) according to the distance from light source.

## (2) 海水的吸收和散射

当折射光线在海水中传播时，由于被水质点、有机物质、无机盐和悬浮微粒吸收和散射，光强度随着深度增加不断衰弱；在这种吸收和散射的综合作用下，光在水中的传播，就随深度的增加而不断衰减。不同波长衰减系数不一样，长波衰减快，短波衰减慢；衰减系数也与海水中的有机物质，悬浮物质的多少有关，近海大，外海小。

一般来说，海水越清澈吸收系数越小<sup>[150]</sup>。例如被过滤的海水，对可见光的吸收接近于蒸馏水；浅海或近海因有大量悬浮物质，所以吸收比蒸馏水和过滤的海水都大得多。

I、吸收。光在海水中的吸收可由下式表示：

$$I_z = I_0 \times EXP(-\beta \times z) \quad (3)$$

式中： $I_z$  为水深  $z$  处的光强 (cd)， $I_0$  为海面处的光强 (cd)， $z$  为水深 (m)， $\beta$  称为吸收系数。

由式 (3) 可知，吸收系数  $\beta$  越大，光被吸收得越强烈。

在不同的海水中，光通过 1m 水层的吸收系数与波长有关。在蒸馏水中，波长为 500nm 的绿光，其吸收系数为 0.02，所以绿光在深 1m 处的光能强度为  $I = I_0 \times EXP(-0.02) = 0.98I_0$ 。即被吸收了 2%，而波长为 670nm 的红光，其吸收系数为 0.3，按同样计算可得约 26% 被吸收，所以通过 1m 厚的水层，红光比绿光的减弱快很多。

图 2-6 为日光进入不同水型 (见表 2-2) 1m 深处的透射率曲线。由图 2-6 可知，可见光部分被吸收相对还是较少的。而到了光谱的红外部分，则几乎全部被吸收，因为光的长波部分比短波部分更易被吸收。所以，选用不同的集鱼灯光源会影响到照射的范围和诱集鱼类的范围。

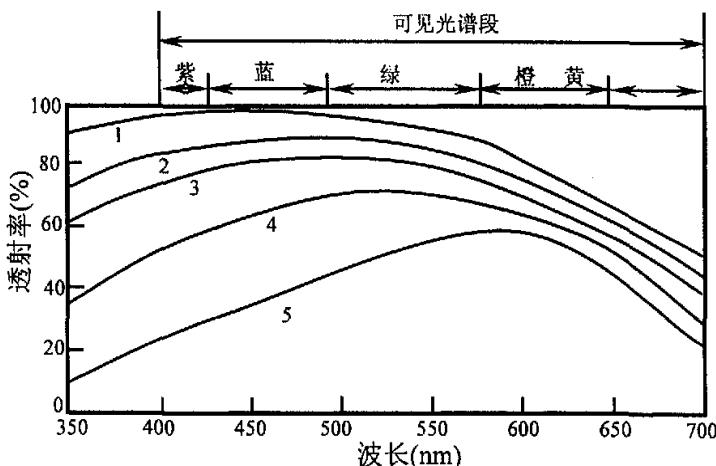


图 2-6 光进入不同水型 1m 深处的透射率曲线 (唐逸民<sup>[149]</sup>, 1981)  
Fig.2-6 The curve of transmission ratio about light enter into different water in 1 meter

表 2-2 不同水型的光学特性 (唐逸民<sup>[153]</sup>, 1981)

Tab.2-2 The optical character of different water

序号	水型	特征
1	大洋清水	低生产力海区(特别是低纬度海区)的大洋清水; 水色 0-2
2	大洋标准水	中纬度和低纬度海区中等生产力的大洋水; 水色 2-5
3	大洋浊水和沿岸 清水	高生产力海区, 特别是浮游生物繁殖期的海水; 以及热带沿岸水, 特别是大陆架深水区的海水; 水色 5-8
4	沿岸标准水	中等生产力的沿岸水和大陆架一般海区的海水; 水色 8-10
5	沿岸浊水	浮游生物大量繁殖的河口和沿岸水; 由于波浪作用搅起大量悬浮物质的近岸水; 水色 10

II、散射。散射简单地可以看作是光对直线传播方向的偏离<sup>[153]</sup>。光在海水中的散射有两种截然不同的情况, 即由海水本身产生的散射和由悬浮粒子所引起的散射。纯海水引起的散射在温度和压力的影响下变化不大, 而粒子对光的散射却与颗粒性物质的大小和浓度有很大关系。

散射研究中的重要因素是体积散射函数, 它是用散射角度的函数来表示散射率。研究表明不同大洋水团的体积散射函数的形状十分相似<sup>[153]</sup>, 这就说明在大洋中粒子散射的重要特征没有多大差异。而沿岸水由于深受陆地径流的影响, 常常含有大量的陆生物质, 使得其散射率通常要高于大洋水。

光在海水中还会表现出多次散射, 在清澈的大洋水中, 由于颗粒体积小浓度低, 多次散射比较微弱, 在大多数情况下可以不予考虑。

散射能引起光分布的变化, 散射的结果也使光能减弱, 与式(3)类似, 可得射达 z 米深的光能强度为:

$$I_z = I_0 \times EXP(-k \times z) \quad (4)$$

式中:  $I_z$  为水深 z 处的光强(cd),  $I_0$  为海面处的光强(cd), z 为水深(m), k 为散射系数。

对于海水质点或海水中所含细小微粒来说, 其散射系数与波长的四次方成反比。可见, 波长越长, 散射越少; 反之, 短波的散射要比长波来得强。所以, 当太阳光通过清澈的大洋水时, 波长较短的兰光比黄光和红光散射强烈, 散射光呈

蓝色。

### 2.2.3 海水的光学衰减系数

光线进入海水后，受到海水中悬浮颗粒、溶解物质和浮游生物等的影响而衰减。光线在海水中的分布及其性质的变化对海水透明度的分布、海洋生物的繁殖与分布等有重要的影响，而且海水的光学性质通常是研究水团分布、跃层位置、海洋流系等的重要资料<sup>[147]</sup>。海水光学衰减系数也可以说是海水清洁或浑浊程度的反映<sup>[158-160]</sup>。因此研究海水光学衰减系数的分布变化规律，是很有意义的。

由上述可知，影响海水光学衰减系数包括吸收和散射两过程。吸收效应是海水中的溶解物质和悬浮微粒对光的直接吸收产生的。散射效应则主要是由悬浮颗粒对光的散射使光束偏离原来路径而造成的光能损失。光因在水中受到散射和吸收而衰减。考虑到光能在海水中传播时，既有吸收又有散射，则透过z米深处的光能强度I可由式（3）和（4）得到：

$$I = I_0 \times EXP[-(\beta + k) \times z] = I_0 \times EXP(-\mu \times z) \quad (5)$$

式中： $\mu$  为衰减系数。

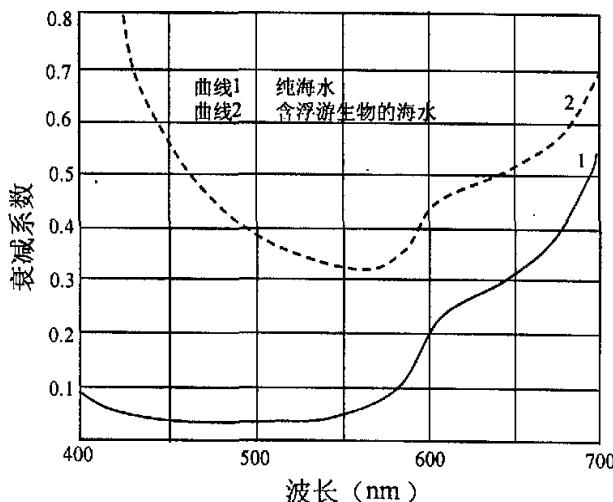


图 2-7 不同波长时的衰减系数

Fig.2-7 The attenuation coefficient of different wavelength

从纯海水和含浮游生物海水对各种波长可见光的衰减系数（见图 2-7）可以看出，含浮游生物海水的衰减系数比纯海水大。纯海水中波长为 400~500nm 的光波(如绿光波长 500nm 左右)，衰减系数较小，所以透射率大。波长大于 580nm 的光波(如红光波长 670nm 左右)，衰减系数显著增大，即光能很快减弱，这表明绿光透射率大，红光透射率小。

研究表明，大洋性清澈海水的光学衰减系数一般为 0.1 左右。海水衰减系数与海水的透明度盘深度（也称透明度，单位为 m）存在着一定的经验关系。例如，白光衰减系数  $\mu$  与白色透明度盘深度  $D_w$  的关系<sup>[80]</sup>为：

$$\mu = \frac{1.7}{D_w} \quad (6)$$

## 2.2.4 人工光源在海水中的光场特性

相对趋光鱼类而言，人工光源发出的光在海水中可形成四个部分<sup>[129]</sup>，即不良感光区，良好感光区，微弱感光区和不感光区（见图 2-8）。

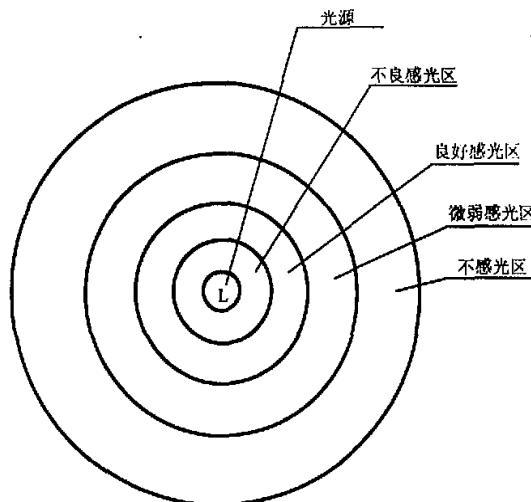


图 2-8 人工光源光场分布示意图

Fig.2-8 The distributing of artificially light source

不良感光区：紧靠光源的照明区。此外光线极强，超过了鱼类等动物的眼所能忍受的范围。一般说来，鱼类在此区域都表现负趋光反应，迅速离去。

良好感光区：在不良感光区外围的照明区域。这个区域的光照强度适合于鱼眼的视觉要求，所以在这个区域内鱼类会主动趋向光源。游聚集群，因而可称为趋光区域。这个区域，有一定的宽度。

微弱感光区：是良好感光区外围的光照区域，其最外沿就是阀值强度的光照水平。这种阀值强度光线，就是指刚刚能使鱼眼产生兴奋，感觉到光的刺激存在光强度。不过在这个区域本身，鱼类通常是无法做出正趋光反应的和负趋光反应的。鱼可能因为感受到光的刺激而越过这个区域进入良好感光区，产生趋光反应；也可能由于某些原因仅仅感到有光的刺激而辨别不出来光源的发向，无法产生定向运动而游离这个光照区。

不感光区：是照明区的最外围的区域。这个区域的光照强度低于阀强度（可称阀下光强度），不能为鱼眼所感受。

增加人工光源的功率，诱集的范围扩大，但不良感光区域也将扩大，这就有可能使趋集而来的鱼群又游离光源，从而影响渔获。因而对于光诱鱿钓渔业，鱿钓渔船集鱼灯的配置效果应该是：在同样的灯光功率下，具有较大的诱集范围和较大的良好感光区。

结合前面的分析可知，头足类能感受  $0.01\text{lx}$  的弱光，因而在研究和讨论鱿钓集鱼灯的配置时，一般将  $0.01\text{lx}$  等照度曲面所围的水体作为该船的最大有效诱集范围，另外将  $0.1\text{lx}$  和  $10\text{lx}$  之间的水体作为该船的良好感光区。

## 2.3 鲅钓集鱼灯的种类和光学特性

与一般的照明光源相似，鲅钓集鱼灯的光学特性包括光通量、光强度、光照射度、光亮度、发光效率、光源的色温和显色性、配光曲线，以及灯的寿命和光束维持率等。本节先对集鱼灯的种类作以介绍，然后对集鱼灯的配光曲线、照度特性和灯的寿命和光束维持率进行比较分析，并对鲅钓渔船集鱼灯的一般布置情况进行说明。

### 2.3.1 鲅钓集鱼灯的种类

#### (1) 集鱼灯的种类

光诱鲅钓渔业所使用的光源最早是由松明、树根等制成的火炬<sup>[6]</sup>。随着相关产业的发展和科技的进步，曾先后使用乙炔灯、打气煤油灯和液化气灯作为诱集光源，这些被称为非电光源集鱼灯。到了十九世纪三十年代，以干电池为能源的白炽灯开始充当鲅钓集鱼灯，最后才逐步演变成电光源集鱼灯系统<sup>[161]</sup>。集鱼灯的有关分类见图 2-9。

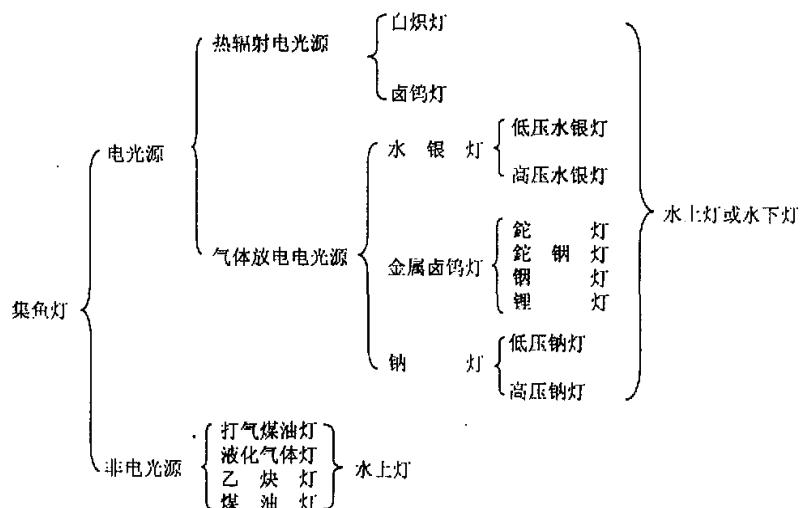


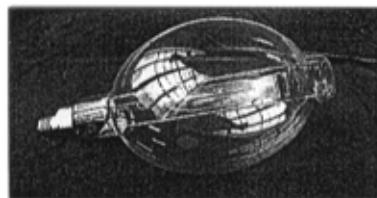
图 2-9 集鱼灯种类  
Fig.2-9 The kinds of fish attracting lamps

另从当前鱿钓渔业中所使用的集鱼灯来看，集鱼灯的种类还可作如下划分：

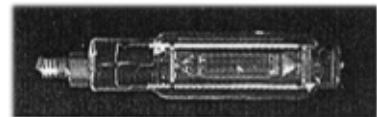
- I、按发光原理分<sup>[162]</sup>，主要有热辐射电光源（如白炽灯、卤钨灯）和气体放电电光源（如水银灯、钠灯、金属卤钨灯）；
- II、按灯光系统分，主要有水上集鱼灯（俗称集鱼灯，）、水下集鱼灯（俗称水下灯）和变色灯（通常为白炽灯或高压钠灯）；
- III、按灯光功率分，主要有1kW、1.5kW、2kW、3kW、4kW（1~4kW集鱼灯的基本参数见表2-3）和5kW（主要为水下灯）的集鱼灯，其中1kW、2kW的国产集鱼灯在当前的鱿钓渔业中应用最普遍；
- IV、按集鱼灯形状分，主要有球形集鱼灯和直管形集鱼灯两种（见图2-10），但目前球形集鱼灯用的最多，使用直管形集鱼灯的不多；

表2-3 几种集鱼灯的基本参数  
Tab.2-3 The basic parameter of several kinds of fishing lamps

集鱼灯型号	功率 (W)	电源电压 (V)	光通量 (Lm)	平均寿命 (h)	全长×直径 (cm)×(cm)
DC-1000BT	1000	220	110000	4000	39.7×18.0
DC-1500BT	1500	220	160000	3000	39.6×19.0
DC-2000BT	2000	220	220000	3000	49.0×23.0
DC-3000BT	3000	220	330000	2500	53.0×26.3
DC-4000BT	4000	220	440000	2500	53.0×26.3



(a) 球形集鱼灯



(b) 直管形集鱼灯

图2-10 鱿钓集鱼灯

Fig.2-10 Fish aggregation lamps in squid jigging fisheries

V、按发光颜色分，主要有白光集鱼灯、蓝光集鱼灯和绿光集鱼灯，其中绿光和蓝光集鱼灯仅在国内外部分船上使用，多数鱿钓渔船使用的是白光集鱼灯。

## (2) 几种集鱼灯的基本特点

I、白炽灯 (Incandescent lamp)。白炽灯是热辐射电光源的一种，问世较早，也是最早被用作集鱼灯的一种电光源。如作为水下灯时，结构比较特殊，必须水密和耐压，并由抗腐蚀材料制成。白炽灯发光效率低，一般为 10~20 lm/W。其光谱除了 360~760 nm 为可见光外，大部分为红外线，峰值也在红外区。只有 10% 的能量转化为可见光。也就是说它的大部分能量分布在光谱的长波段，而短波段的很少。若从鱼类对光谱的感觉角度来看，白炽灯辐射的绝大部分能量，不能被鱼类感觉，所以诱鱼效率低。同时，靠近光源处有很强的光，鱼类趋光时无法接近，只能在离光源一定距离的区域集群。

白炽灯虽然发光效率低，但由于价格便宜，安装方便，不需要其它附件，通电开灯迅速，可用变压器任意调节电压灯光强度，以适应集鱼的要求，因此目前普遍使用。与气体放电灯相比，白炽灯的电光转换效率较低，寿命也比较短，所以，当高效、长寿的气体放电灯亮相后，它就逐渐被替代了。

II、卤钨灯 (Tungsten halogen lamp)。卤钨灯是利用卤钨循环原理而研制成功的新一代的白炽灯。利用卤素与钨的物化作用，使从钨丝上蒸发出来并沉积在灯泡玻壳上的钨原子，重新返回钨丝，这不仅大大提高了白炽灯的寿命(一般为 2000h)，而且还可使灯泡的玻壳不发黑而长期保持高透光率，另外，卤钨灯的体积可做得比普通白炽灯小，发光效率也略有提高<sup>[162-163]</sup>。

与气体放电类灯相比，卤钨灯具有价格低廉、电路简单、对电源要求不高、光谱连续而显色性好、光强可调范围大、操作和维护均很方便等优点。因此，在金属卤化物灯应用于鱿钓渔业之前，卤钨灯仍是最广泛使用的鱿钓集鱼灯。碘是最早采用的卤化循环剂，以后又陆续采用溴、溴化氢和卤素的碳氢化合物等作为循环剂。例如上海水产大学的浦苓号实习船（我国首批远洋鱿钓探捕船之一，原是日本熊本县水产学校的实习船），它的集鱼灯系统用的就是碘钨灯<sup>[40]</sup>。

III、低压水银荧光灯 (Low pressure fluorescent lamp)。低压水银荧光灯是最早成熟的气体放电灯<sup>[162]</sup>，也是最早引入鱿钓业的一种气体放电灯。它的发光效率约为 30~70Lm/W，寿命可达上千乃至几千小时，价格也不贵。但由于单灯功率有限(功率最大的商品灯大概是 40W)、应用上也比较麻烦(灯管两端电极易受海水和盐雾的侵蚀而引起故障，并需配置镇流器和起辉器而使电路较复杂，布置也不方便)，因而未被渔民所沿用。

IV、高压水银荧光灯(High pressure fluorescent lamp)。高压水银荧光灯通常也称为高压汞灯，它是利用高气压水银蒸汽放电而发光的，它介于辉光放电与弧光放电之间的气体放电电光源。其发光原理为：当电源开关合上后，电压经镇流器加在电极之间，首先由启动电极及其附近的主电极，形成辉光放电，接着两主电极开始弧光放电。弧光放电后，两主电极间的电压低于主电极与启动电极间的辉光放电电压，辉光放电停止。随着主电极的放电，水银逐渐气化，发出可见光和紫外线，紫外线又激发外层玻璃壳内壁的荧光粉，则灯泡发光。

高压水银荧光灯有 15~17%的能量用于产生可见光，而在可见光区，它的相对光谱能量分布，主要由 404.7nm (紫)、435.8nm (蓝)、546.1 nm (绿)以及 577~579nm (黄)组成蓝绿色，与白炽灯比较，具有发光效率高，一般为 35~60 lm/W，比白炽灯高 3~4 倍；光色好，呈蓝绿色，适应于诱鱼；体积小，寿命长，一般为数千小时至一万小时。但就整个光效而言，只有 30 lm/W。当工作电压过高时会自动熄灭，再启动需要 5~10min，并且光强度不能调节，价格昂贵。

使用高压水银荧光灯时，必须注意配用镇流器，否则会使灯泡损坏；灯泡安装最好处于垂直状态，横向安装发光效率较低；灯泡熄灭后，须冷却一段时间，待水银气压降低后再启动使用。

与低压水银荧光灯相比，高压水银荧光灯的发光效率虽不算高，但单灯功率大为提高，寿命也可达上万小时。然而，一方面由于它的价格较高，另一方面，有研究表明<sup>[40]</sup>，尽管相同功率的高压汞灯所产生的照度比起白炽灯来要高出许多倍，高压汞灯的光线在水中的穿透性也好于白炽灯的光线，但它们的诱集鱿鱼的效果却差不多（这可能与高压汞灯的显色性较差有关），另外，炽热状态的高压汞灯一旦熄灭，则要等到它冷却后才能被再次点燃，因此，高压汞灯的应用也受到

了制约。

V、低压钠灯 (Low pressure sodium lamp)。低压钠灯在许多方面和低压水银灯相似，具有典型的低压金属蒸汽放电的特性。低压钠灯的光效很高，普通低压钠灯 SOX180 光效为 180Lm/W，经济型低压钠灯 SOX-E131 可达 200Lm/W。低压钠灯的辐射只要集中在波长为 589.0nm 和 589.6nm 的黄色钠共振线上，单色性很强，也即显色性差。在低压钠灯中，绝大部分的辐射能集中在钠 D 线上，具有很高的发光效率。低压钠灯的主要优点是光束维持率高、寿命长、透雾性强。

VI、高压钠灯 (High pressure sodium lamp)。高压钠灯是在单晶或多晶体氧化铝陶瓷管（因为这些材料能抵抗高温钠腐蚀）中建立起来的一种高压钠蒸汽放电灯。和高压汞蒸汽放电类似，高压钠蒸汽放电具有收缩的电弧，有高的电流密度和气体温度。高压钠灯使用时发出金白色光，它具有发光效率高、耗电少、寿命长、透雾能力强和不诱虫等优点。标准型 400W 高压钠灯的光效为 125Lm/W，寿命超过 24000h。但普通高压钠灯的光色较差，一般显色指数  $R_a$  只有 15~30，相关色温约 2000°K。但显色改进型高压钠灯和高显色性高压钠灯已研制成功并得到使用。

高压钠灯是一种高强度气体放电灯泡。由于气体放电灯泡的负阻特性，如果把灯泡单独接到电网中去，其工作状态是不稳定的，随着放电过程继续，它必将导致电路中电流无限上升，最后直至灯光或电路中的零、部件被过流烧毁。所以，高压钠灯必须串联与灯泡规格相应的镇流器后方可使用。

VII、金属卤化物灯 (Metal halide lamp)。金属卤化物灯又称金卤灯，是在高压汞灯的基础上添加某些金属卤化物成份而研制发展起来的第三代气体放电灯<sup>[168]</sup>。如加入碘化铊为碘化汞灯，即铊灯；加入碘化铊和碘化铟则为铊铟灯。此灯与高压汞灯大致相同，同之处在于石英玻璃管内不仅充有水银和氩气，还加入碘化铊或碘化铟；此外，灯管中启动电极因易烧坏而被取消，所以启动需要触发器。

金属卤化物灯的发光原理是：当金属卤化物灯受到触发器高频高压的脉冲触发后，高压汞弧放电产生的热量，使石英放电壁受热，温度升高至 1000°K，金属卤化物便从管壁蒸发成蒸汽，并向灯泡中心扩散，汞弧放电中心的气体温度高于 6000°K，金属卤化物分解为金属蒸汽和卤素蒸汽，金属原子被汞弧中高速电子碰

撞后激发发光。同时金属原子与卤素原子也会向温度低的管壁扩散，而重新化合成金属卤化物，如此循环下去，发光后由电源直接供电，工作电压 220V，但需限流器限制灯管内的电流量，以保证灯管正常工作。

金属卤化物灯最早是在 60 年代开始应用于舞台照明，由于技术上的原因，其真正普及应用并进入鱿钓渔业，约始于 80 年代<sup>[55]</sup>。金属卤化物灯的高光效(约 90~110Lm/W)、高强度(日本的渔用金卤灯单灯功率一般已做到 2kW~5kW)、长寿命(10000h)以及优良的显色性(Ra~65)，使其在众多的电光源产品中脱颖而出。

1989 年我国首次改装舟渔 651、652 轮为鱿鱼钓渔船时，选用了国产 ZJD 系列金属卤化物灯作为鱿钓集鱼灯<sup>[40]</sup>，并取得初步成功。国产 ZJD 系列金属卤化物灯一直沿用至今。现在，新配置的鱿钓集鱼灯系统，除需要调节光强等少数场合仍使用白炽灯外，几乎全都采用金属卤化物灯。

### 2.3.2 鱿钓集鱼灯的主要光学特性

#### (1) 集鱼灯的配光曲线

对各向异性的光源，其发光强度随方向而变化。为形象化，对于各向异性的光源，多用曲线表示其发光强度函数。自原点向各径方向取矢量，矢量的长度与该方向的发光强度成正比，将各径矢量的端点联起来，就得到光源的发光强度随方向改变的发光强度曲线，引用极坐标可得发光强度的极坐标函数  $I = I(i, \phi)$ ，称为配光曲线<sup>[167]</sup>。

图 2-11 为不同功率 (1kW 型、2 kW 型、3kW 型、4kW 型) 四种球形集鱼灯的配光曲线。从图中可以明显看出，集鱼灯功率和种类不同，其在各个方向的发光强度也是不同的，随着集鱼灯功率的增大，其发光强度也相应增大。

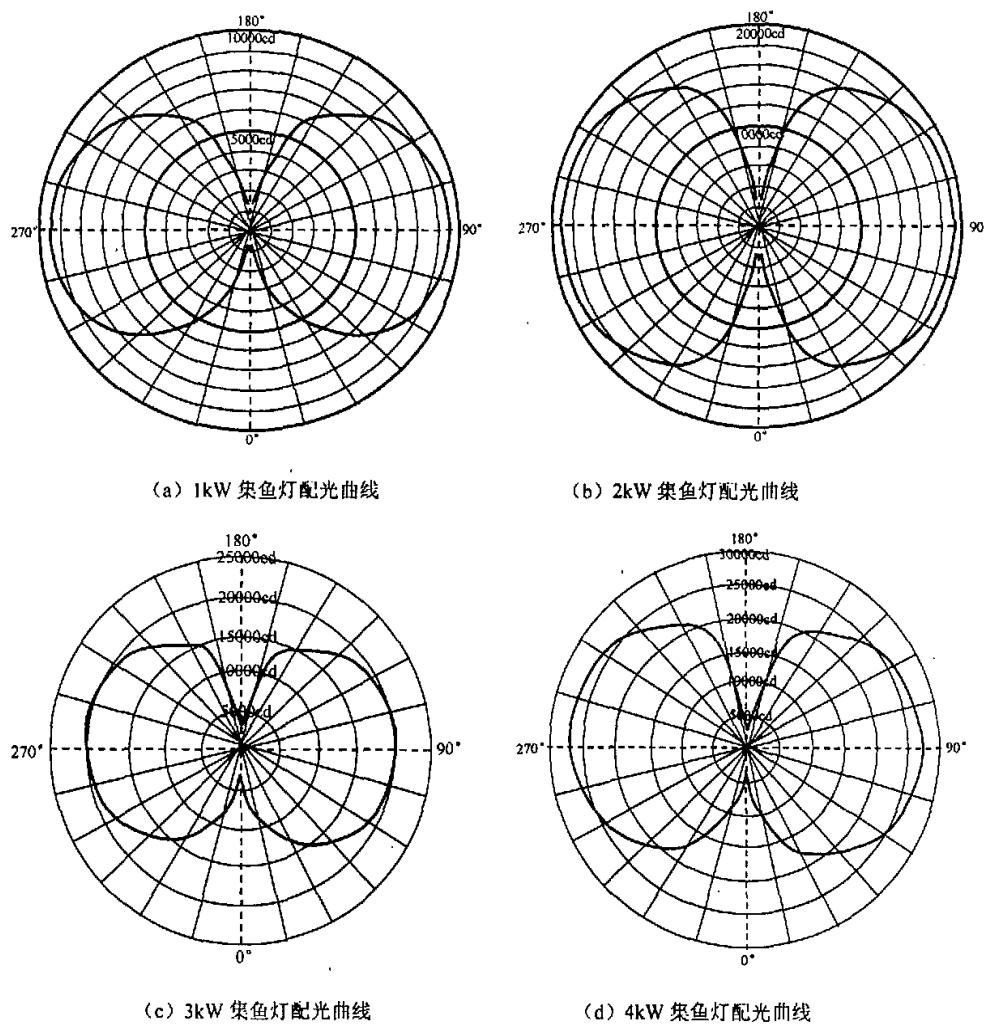


图 2-11 各种集鱼灯的配光曲线

Fig.2-11 Distribution of luminous intensity of different fishing lamps

上述 4 种型号的集鱼灯在 0~90° 范围的发光强度见表 2-4。使用极坐标方程分别对 4 种型号的集鱼灯发光强度进行拟合, 得到各自的配光曲线极坐标函数如下:

1kW型集鱼灯:  $I_\theta = -3375.6 + 12786.7 \times \sqrt{\sin \theta}$ ;

2kW型集鱼灯:  $I_\theta = 1778.75 + 18851.2 \times \sqrt{\sin \theta}$ ;

3kW型集鱼灯:  $I_\theta = -1075.03 + 20704.6 \times \sqrt{\sin \theta}$ ;

4kW 型集鱼灯:  $I_\theta = -5175.17 + 32039.8 \times \sqrt{\sin \theta}$ 。

表 2-4 各种集鱼灯不同方向的发光强度

Tab.2-4 The luminous intensity of different fishing lamps in different direction

角度	弧度	1kW 型	2kW 型	3kW 型	4kW 型
90	1.571	9500	19400	20000	27500
85	1.484	9400	19300	19800	27200
80	1.396	9300	19200	19600	27100
75	1.309	9200	19000	19400	27000
70	1.222	9100	18800	19000	26500
65	1.134	9000	18500	18500	26000
60	1.047	8700	18400	18000	25000
55	0.960	8500	18200	17800	22500
50	0.873	8000	18000	17000	22000
45	0.785	7500	17800	16400	21000
40	0.698	6500	17200	16000	20000
35	0.611	6000	16400	15000	18500
30	0.524	5200	16000	13000	17000
25	0.436	4500	15000	11500	16000
20	0.349	4000	14000	10000	13500
15	0.262	3000	10000	9000	10000
10	0.175	2000	8000	8000	7000
5	0.087	1000	5000	6000	6000
0	0	/	/	/	/

注: 表中照度单位为 cd (坎德拉)。

## (2). 集鱼灯的照度特性

图 2-12 为 1~4kW 型各种集鱼灯 (高 2.5m) 在空气中不同距离的照度情况。

从图中可以看出, 集鱼灯的种类不同, 其照度特性是不同的。在距离相同的情况下, 集鱼灯功率越大, 该处所对应的照度值越大, 特别是当离光源的水平距离小于 20m 时, 各不同功率的集鱼灯照度值相差很大, 但随距离的进一步增加, 这种差异逐渐减少。从变化趋势来看, 各集鱼灯自灯下到距离 3m 的地方照度呈增加趋势 (这与集鱼灯的配光曲线有关, 光源垂直下方的发光强度相对较低); 3m 以后的照度基本上是随距离增大而按指数规律递减。

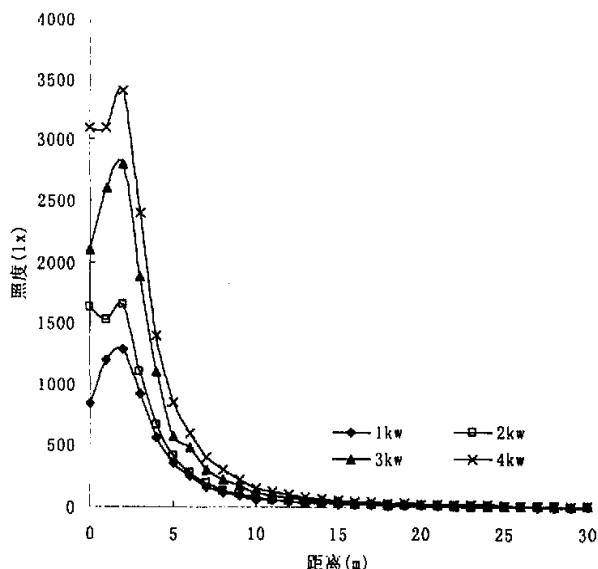


图 2-12 4 种集鱼灯不同距离的照度

Fig.2-12 The luminance in different distance of 4 kinds of fishing lamps

### (3) 集鱼灯的光谱特征

由于各种集鱼灯光源的辐射特性不同，它们的辐射能（或辐射功率）按波长分别的情况也不一样，这就是所谓的集鱼灯的光谱特征<sup>[163]</sup>。

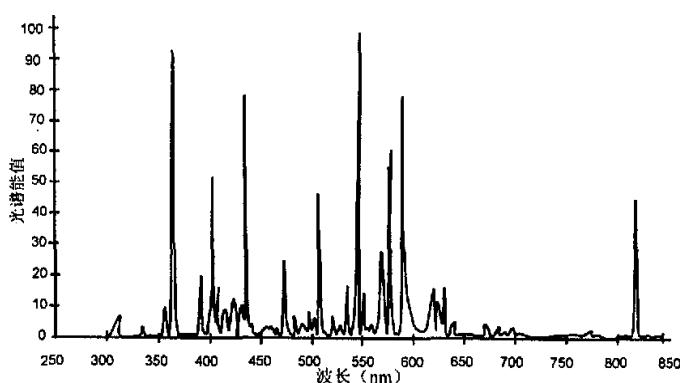
图 2-13 MHL-2000AM 集鱼灯的光谱特征 (崔浙珍<sup>[163]</sup>, 1997)

Fig.2-13 The spectrum of MHL-2000AM fishing lamp

图 2-13 为 MHL-2000AM 集鱼灯所放射的光谱特征情况。显然，如果改变光源所发出来的光谱特征，例如让其仅放射出某一狭窄波长区域的光，就能使光源

发出某一种频率（颜色）范围的光。考虑到集鱼灯紫外线对船员人体健康的影响，集鱼灯制造时，应尽可能割除 400nm 以下的紫外光线。

为了能更有效地诱集头足类，集鱼灯所发出来的光应该能比较接近头足类的光谱敏感曲线<sup>[68]</sup>。目前国内部分鱿鱼钓船上有使用发绿色光（波长 500~530nm）的集鱼灯，尽管尚没有数据表明其渔获显著高于使用白色光源的鱿钓渔船，但作为一种集鱼灯有效利用的一个方面，使用颜色灯这一问题是值得探讨的。

#### （4）集鱼灯的寿命和光束维持率

集鱼灯的寿命是评价集鱼灯性能的一个重要指标。集鱼灯的寿命有全寿命和有效寿命之分。集鱼灯的全寿命是指集鱼灯从点亮到不能正常工作的时间。集鱼灯的有效寿命是指当灯所发出的光下降到其初始值的 80%（或 70%）时所已经点亮的时间。

各种灯的寿命都有不同的决定因素。如白炽灯的寿命是由钨丝的蒸发率决定的，而气体放电灯的寿命在很大程度上依赖于电极的寿命，而电极的寿命与灯的开关次数是密切联系的。

实验证明，随着使用时间的不断增长，灯的发光效率在不断的减低，人们一般用光束的维持率曲线来表示光源光束下降的这一趋势。图 2-14 为两种不同金属卤化物灯的光束维持率曲线图，显然光源的种类不同，其发光效率的下降程度也是不同的。

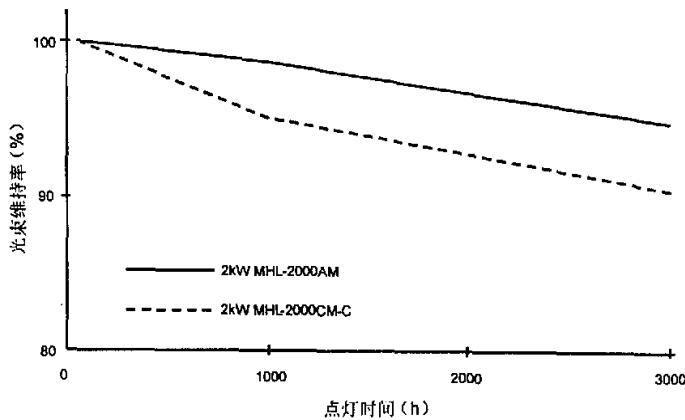


图 2-14 集鱼灯的光束维持率（崔浙珍<sup>[91]</sup>，1997）

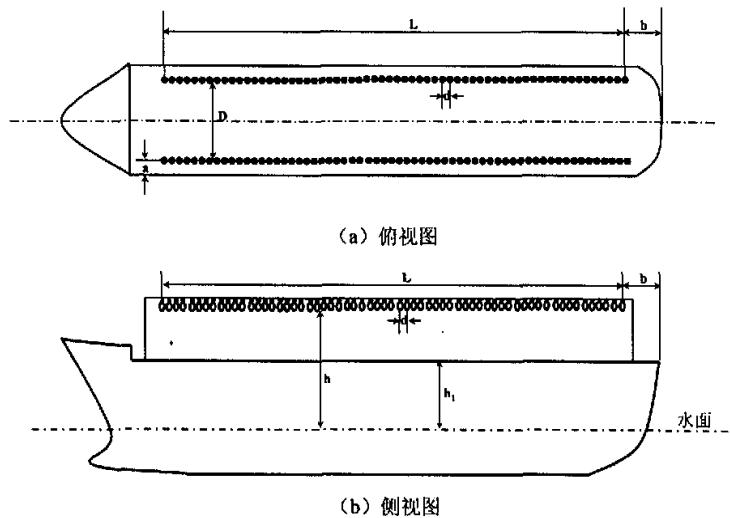
Fig.2-14 The keep ratio of light of fishing lamps

## 2.4 鱿钓渔船集鱼灯的基本布置

集鱼灯的合理布置直接影响到鱿钓渔船生产情况。一般来说，鱿钓渔船的尺寸和吨位不同，其集鱼灯的配置情况也是不同的。

### 2.4.1 鱿钓渔船集鱼灯的一般布置

集鱼灯在鱿钓船上一般是分两列布置的，左右舷各一列，集鱼灯距离船甲板有一定的高度，通常是2.5~4.5m左右。为了在船下形成阴影区，集鱼灯应布置在船体的甲板内侧，根据目前鱿钓渔船的船型特征和甲板建筑布置等，集鱼灯一般与船舷的距离为1.0~1.5m左右。集鱼灯的总功率布置除了要考虑渔船的供电能力外，还与渔船的长度有关，船的长度不同，每列灯所安装的集鱼灯个数也不同，目前每列集鱼灯的灯数一般为40~80盏。另外，为免集鱼灯发生相互碰撞和阻碍彼此光线的传播，相邻两个集鱼灯要保持一定的距离，一般至少要保持一个集鱼灯的直径距离。集鱼灯在鱿钓船上的一般布置参见图2-15。



a—集鱼灯距离舷边的距离，简称舷边距；D—两列集鱼灯的水平距离，简称灯间距；  
L—每列集鱼灯的总长度，简称灯长；b—最后一个集鱼灯与船尾的距离，简称灯尾距；  
d—每两个相邻集鱼灯的间距，简称灯距；h—集鱼灯离水面的高度，简称灯高；  
h<sub>1</sub>—船舷离水面的高度，简称舷高。

图 2-15 鱿钓渔船集鱼灯的布置情况  
Fig.2-15 The arrangement of fishing lamps on the squid jigging vessel

## 2.4.2 鲬钓船集鱼灯的配置现状

目前，我国国内鱿钓渔船主要包括两种类型<sup>[57]</sup>，一种是“改装型鱿钓船”，另一种是“专业鱿钓船”。其中，“改装型鱿钓船”主要由三大类组成，即拖网渔船改装船（该类船在我国的鱿钓渔船中所占比例最高，约占目前鱿钓船总数量的80%以上，其中8154型又占该类渔船数的70~80%，其船长一般在40~45m）、金枪鱼船改装船（船长一般在45~50m）、运输船（船长一般在50~60m）；而“专业鱿钓船”一般为近年新造的渔船，其船长均在60m以上。国内鱿钓渔船集鱼灯的一般配置见表2-5。

从表2-5可以看到，船长40~45m的鱿钓渔船的集鱼灯总功率为240kW，船长45~50m的鱿钓渔船的集鱼灯总功率为260kW，船长50~60m的鱿钓渔船的集鱼灯总功率为280kW，船长60~70m的鱿钓渔船的集鱼灯总功率为360kW。另从表中还可以看出，不同鱿钓渔船其集鱼灯布置参数是不同的。

表2-5 鱿钓渔船集鱼灯的一般布置参数

Tab.2-5 The arrangement parameters of fishing lamps on the squid jigging vessel

船型	改装型鱿钓船		专业鱿钓船
船长 $L_0$ (m)	40~45	45~50	50~60
灯光长度 L (m)	35~38	38~43	43~53
总功率 W(kW)	240	260	280
灯离水面高 h(m)	5.0	6.2	5.7
船舷离水面高 $h_1$ (m)	2.5~3.0	3.0~3.5	3.5~4.5
灯距 d(m)	0.55	0.58	0.62
舷边距 a(m)	0.8~1.1	1.0~1.3	1.2~1.4
两列灯之间的距离 D(m)	5.0~5.5	5.5~6.0	6.0~7.0
近船尾第1盏灯与船尾的距离 b(m)	1.4~2.2	2.0~2.4	2.0~2.4

## 2.5 小结

(1) 头足类具有明显的趋光特性，其视网膜对光反应的敏感度在明适应和暗适应两种情况下是不同的，在明适应时，头足类对光谱的吸收峰值为绿色光谱；在暗适应时，光谱的吸收峰值为青色光谱。头足类的适宜光照度一般为 0.1~10lx，但仍能感受到 0.01lx 的弱光。

(2) 光线进入海水后，受到海水中悬浮颗粒、溶解物质和浮游生物等的作用而衰减，影响海水光学衰减系数的主要吸收和散射这两过程。一般地，外洋海水的光学衰减系数要比近海的小，清澈大洋海水的光学衰减系数一般为 0.1 左右。

(3) 集鱼灯的光谱特征是不同的，为了能更有效的诱集头足类，集鱼灯所发出来的光应该能比较接近头足类的光谱敏感曲线。集鱼灯具有明显的各向异性特征，与点光源各向同性的发光特点是不同的。国内鱿钓渔船目前所用的集鱼灯多数为白光金属卤化物灯，其功率多数为 2kW 型，部分为 1kW 型的。

(4) 我国国内鱿钓渔船主要包括两种类型，一种是“改装型鱿钓船”，另一种是“专业鱿钓船”。按渔船长度，可分为 4 种类型：船长 40~45m、船长 45~50m、船长 50~60m、船长 60~70m。不同的鱿钓渔船其集鱼灯布置是不同的。

## 第3章 水中照度分布理论模式

集鱼灯是光诱鱿钓渔业的主要辅助设备，对提高渔获效率起到非常重要的作用。因此，关于集鱼灯在水中的灯光照度分布研究一直是光诱鱿钓渔业研究中的一个重要组成部分。本章首先对国内外3种常用的集鱼灯照度计算方法作了简单介绍；随后，在考虑集鱼灯配光特性的基础上，结合集鱼灯布置的有关参数（如间距、盏数、灯高等），尝试建立一种新的水中光照度分布的理论计算模式。并使用“新世纪61号”鱿钓渔船舷边水中照度的实际测量数据，以及“龍冲丸”鱿钓渔船舷侧不同距离不同水深的照度实际测量数据，对所建立的水中光照度分布计算模式进行检验。最后，根据该理论计算模式，对“新世纪61号”鱿钓渔船的水中照度分布进行计算和分析，同时建立水中等照度曲面所围水体体积的计算方法，为下文的研究打下基础。

### 3.1 集鱼灯水中照度分布的几种计算方法

在鱿钓渔业中，关于集鱼灯水中照度计算的常用方法主要有以下3种：点光源计算方法、线光源计算方法，以及经验计算方法，本节将分别进行简要介绍。

#### 3.1.1 点光源计算方法

所谓点光源计算方法就是将集鱼灯光源当作是各向同性的点光源来考虑的一种照度计算方法。

如图3-1所示，从水面上高度为 $h$ (m)的点光源放射的光到达水面上的被照点P时，水平面照度可用下式求得<sup>[86, 116]</sup>：

$$E_h = \left( \frac{I}{R^2} \right) \cdot \cos\theta \quad (1)$$

式中： $I$ 是与点光源距离1m的光度(cd)； $R$ 为光源到P点的直线距离(m)； $\theta$ 为光源在P点的入射角(弧度)。

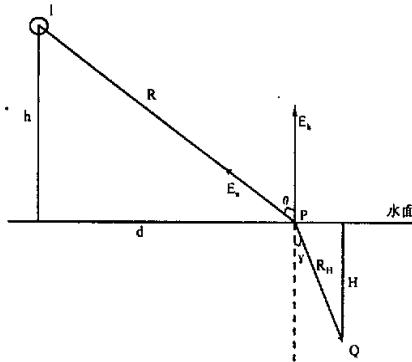


图 3-1 点光源计算方法示意图

Fig.3-1 Point source model

由于光从空气进入水面时，部分光能要被反射，则对于 P 点直接下方（下文中海面某点照度均指该点直接下方（-0m）处的照度）的水平面照度可由下式求得：

$$E_h' = E_h \cdot \beta_\theta = \left( \frac{I}{R^2} \right) \cdot \cos \theta \cdot \beta_\theta \quad (2)$$

式中： $\beta_\theta$  为光在 P 点处的光能折射比，按照 Fresnel 法则<sup>[156]</sup>，计算公式表达如下：

$$\beta_\theta = 1 - 0.5 \times \left[ \frac{\tan^2(\theta - \gamma)}{\tan^2(\theta + \gamma)} + \frac{\sin^2(\theta - \gamma)}{\sin^2(\theta + \gamma)} \right] \quad (3)$$

式中： $\gamma$  为 P 点入射角为  $\theta$  时的折射角（弧度）。

$$\text{由折射定律得: } \sin \theta = n \cdot \sin \gamma \quad (4)$$

其中：n 为空气的相对折射率，对于海水可取  $n = 1.33$ 。

对于水面下深度为 H (m) 的 Q 点，光从 P 点 (-0m 处) 到 Q 点的过程中，由于海水的吸收和散发，经过  $R_H$  的距离后，衰减为 P 点 (-0m 处) 照度的  $e^{-\mu R_H}$ ，即：

$$E_Q = E_h \cdot e^{-\mu \cdot R_H} \quad (5)$$

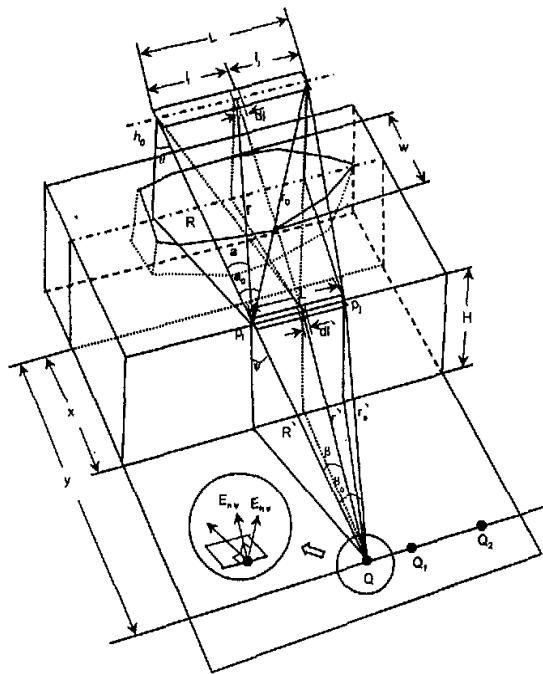
式(5)中:  $\mu$ 为海水的衰减系数;  $R_H = \frac{H}{\cos \gamma}$ 。

由式(1)~(5)可以求得某一单独点光源在水中任意一点的光照强度。

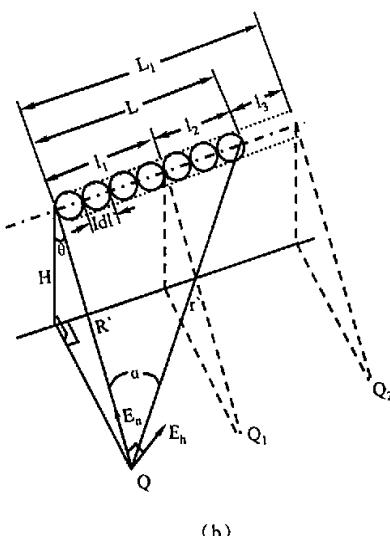
在使用点光源方法时, 可以有两种不同的计算方式。第1种: 就是假设将所有的集鱼灯考虑成一个位于渔船中心一定高度的大功率的点光源; 第2种: 将每一个集鱼灯都单独对被照点进行照度计算, 然后将该点的照度全部叠加起来。由于第1种方法在计算中十分简便, 故在实际应用中采用较多, 下文有关点光源的计算中也将使用第1种计算方式。

### 3.1.2 线光源计算方法

所谓线光源计算方法就是把船上的两列集鱼灯考虑成一细长带型的光源来进行照度计算的一种方法。



(a)



(b)

图 3-2 线光源计算方法示意图 (崔浙珍<sup>[1]</sup>, 2003)

Fig.3-2 Line source model

如图 3-2 (a) 所示, 将船上的集鱼灯考虑成离水面上高为  $h$  (m), 长度为  $L$  (m) 的线光源, 然后把光源的微小长度作为点光源来计算照度, 再把它进行全长积分即可得到被照点的照度<sup>[87-88]</sup>。

当光从发射角  $\theta$  在  $\theta + \Delta\theta$  (但  $\theta + \Delta\theta < \pi/2$ ) 的范围放射时, 从线光源的微小部分  $dl$  的  $P_i$  在  $P_j$  点方向的光度为  $Idl \cos \alpha$ , 由包含光源一端的垂直平面内海面上的折射点  $P_i$  到  $P_j$  各点的法线照度  $dE_n(lx)$  由下式求得。

$$dE_n = \left( \frac{Idl \cos \alpha}{r^2} \right) \cos \alpha \quad (6)$$

因此全长  $L$  的光源的海面上折入点  $P_i$  到  $P_j$  各点的法线照度  $E_n$  由下式求得:

$$E_n = \int_{0}^{\alpha_0} dE_n = \frac{I}{2R} (\alpha_0 + \sin \alpha_0 \cos \alpha_0) \quad (7)$$

其中:  $\alpha_0 = \tan^{-1}(\frac{L}{R}) = \tan^{-1} \frac{L}{\sqrt{h_0^2 + x^2}}$

到达海中的被照点 Q 的光量  $dE_{n\psi}$  由于海面的反射而减少，乘以渗透率 ( $\beta_\theta$ ) 的光量进入到水中，而且光在水中前进  $r'$  (m) 的过程由于吸收和散发海水而衰减为  $e^{-\mu r'}$ 。则到达海中的被照点 Q 的法向照度  $dE_{n\psi}$  由下式求得：

$$dE_{n\psi} = E_n \cdot k_\psi \cdot e^{-\mu r'} \cdot \cos^2 \beta \cdot dl' \quad (8)$$

这里  $E_n$  是集鱼灯光源单位长度光强度 (I) 和小型鱿鱼钓渔船的主要规格求出的海面折入点  $P_i$  到  $P_j$  各点的水面照度，在海面上形成假想的线光源状态。

由图 3-2 (a) 可知，集鱼灯光源发射的光到达 Q 点，需经海面上的点 P 折入，由光的反射和折射定律可知， $\sin \theta = n \cdot \sin \psi$ 。这里，n 为对空气的海水的相对折射率，一般取  $n=1.33$ 。

因此，全长 L 光源的水中被照点 Q 的法向照度  $E_{n\psi}$  由式 (8) 显示如下。

$$E_{n\psi} = \int_0^{\beta_0} dE_{n\psi} = \int_0^{\beta_0} (\alpha_0 + \sin \alpha_0 \cdot \cos \alpha_0) \cdot \beta_\theta \cdot e^{-\mu r'} \cdot \cos^2 \beta \cdot dl' \quad (9)$$

这里， $\angle P_i Q P_k = \beta$ ， $dl' = R' \cdot \sec^2 \beta \cdot d\beta$ ， $R' = r' \cdot \cos \beta$ ，把它代入式 (9)，求得下式：

$$\begin{aligned} E_{n\psi} &= \frac{I}{2R} (\alpha_0 + \sin \alpha_0 \cdot \cos \alpha_0) \cdot \beta_\theta \cdot r' \cdot e^{-\mu r'} \times \int_0^{\beta_0} \cos \beta \cdot d\beta \\ &= \frac{I}{2R} (\alpha_0 + \sin \alpha_0 \cdot \cos \alpha_0) \cdot \beta_\theta \cdot r' \cdot e^{-\mu r'} \cdot \sin \beta_0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{被照点 Q 的照度 } E_{n\psi} = E_{n\psi} \cdot \cos \psi \quad (11)$$

根据式 (6) ~ (11)，可以计算得到集鱼灯在 Q 点的水中照度。

通过光源中一点的垂直面上  $Q_1$  的各照度  $E_{hQ_1}$  用下式来表示：

$$E_{hQ_1} = E_{l_1} + E_{l_2} \quad (12)$$

式中： $E_{l_1}$  表示长度为  $l_1$  的光源在  $Q_1$  点的照度； $E_{l_2}$  表示长度为  $l_2$  的光源在  $Q_1$  点的

照度:  $l_1$ 、 $l_2$  是包括光源一端的内侧方向的长度,  $l_1 + l_2 = L$ , 参见图 3-2 (b)。

从光源一端离开处的垂直面上  $Q_2$  的各照度  $E_{Q_2}$  由下式可求得:

$$E_{hQ_2} = E_{L_1} - E_{l_1} \quad (13)$$

式中:  $E_{L_1}$  表示长度为  $L_1$  的光源在  $Q_2$  点的照度;  $E_{l_1}$  表示长度为  $l_1$  的光源在  $Q_2$  点的照度;  $L_1$  表示把光源的一端延长到  $Q_2$  点时的光源长度,  $l_1$  表示的把光源的一端延长到  $Q_2$  的假想距离,  $L + l_1 = L_1$ , 参见图 3-2 (b)。

### 3.1.3 经验计算方法

这里的经验计算方法<sup>[117, 164]</sup>是指由上海市水产研究所、山东海洋学院物理系、上海灯泡一厂等单位于 70 年代提出的灯光水中照度计算方法。该公式与国外广泛使用的旦特莱半经验公式相一致<sup>[165]</sup>, 其表达式如下:

$$E_h = \sum_{L=1}^2 \sum_{N=1}^k E_{r_{N \cdot L}} = \sum_{N=1}^2 \sum_{L=1}^k \frac{I \cos(i_{N \cdot L})}{h^2 \cos(j_{N \cdot L})} \cdot \frac{\beta_\theta \cdot e^{-\alpha u}}{\left[ \frac{1}{\cos(i_{N \cdot L})} + \frac{\mu}{n \cdot h} \right] \left[ \frac{1}{\cos(j_{N \cdot L})} + \frac{\mu}{n \cdot h} \right]} \quad (14)$$

式中:  $E_{r_{N \cdot L}}$  为第  $L$  排第  $N$  个光源在海面上  $P$  点的光强度 (lx);  $k$  为每列灯的个数;  $I$  是与光源距离 1m 的光度 (cd);  $h$  为灯到海面的高度 (m);  $\cos(i_{N \cdot L})$  为第  $L$  排第  $N$  个光源在  $P$  点的入射角 (弧度);  $\cos(j_{N \cdot L})$  为第  $L$  排第  $N$  个光源在  $P$  点往水下方向的折射角 (弧度);  $\alpha$  为光源衰减系数, 对金属卤化物灯  $\alpha$  取 1.63;  $\mu$  为海水的吸收系数;  $n$  为海水的折射系数, 一般取 1.33;  $\beta_\theta$  同前述公式 (3)。

对于  $P$  点下水深为  $H$  (m) 的一点  $Q$ , 其照度可由下式得到:

$$E_Q = e^{-0.25 \times \alpha \cdot H} \cdot \varepsilon \cdot E_h \quad (15)$$

式中:  $\varepsilon$  为照度计测量误差的修正值, 对金属卤化物灯  $\varepsilon=0.3148$ 。

### 3.2 集鱼灯水中照度分布计算模式的建立

本节在考虑集鱼灯配光特性的基础上，结合集鱼灯布置的有关参数（如间距、盏数、灯高等），尝试建立一种新的水中光照度分布的理论计算模式。

#### 3.2.1 理论计算模式的假设条件

在建立集鱼灯水中照度计算模式前，假设有以下理想条件：

- (1) 集鱼灯具备相同配光特性，相邻集鱼灯的间距相等，灯以两排平行直线的方式排列，且所有灯离水面的垂直距离都相等；
- (2) 不考虑网托架及甲板高层建筑对光线的阻碍；
- (3) 水面是平静的，光线在海面只作一次入射；
- (4) 海水光场的化学性质一定，将光的吸收、散射仅作为一次衰减来计算；
- (5) 假设水面是全黑的，不受月亮等背景光的影响。

#### 3.2.2 建立坐标系

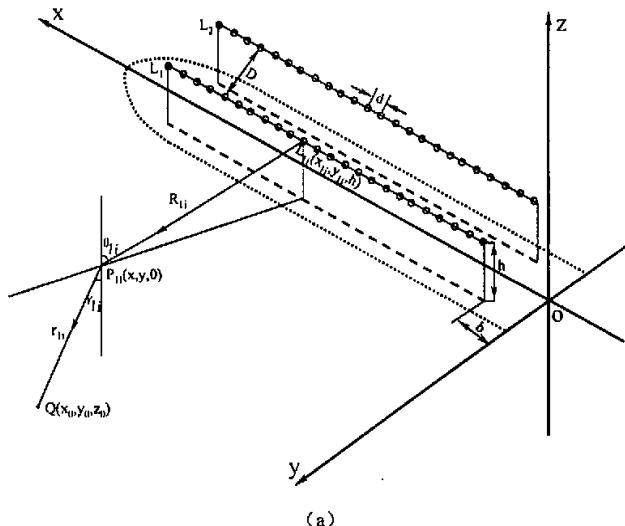
首先，建立以船舯线在水面上的垂直投影线为 X 轴，以船尾在水面上的垂直投影线为 Y 轴，垂直向上方向为 Z 轴的三维直角坐标系，见图 3-3。

参照图 3-3，第  $L_1$  列灯第  $i$  个集鱼灯的坐标  $L_{1i}(x_{1i}, y_{1i}, z_{1i})$ ，( $i=1, 2, \dots, n_1$ ) 可由下式得到：

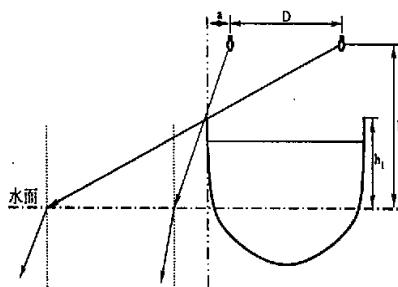
$$\begin{cases} x_{1i} = b + (i-1) \cdot d \\ y_{1i} = \frac{D}{2} \\ z_{1i} = h \end{cases} \quad (16)$$

第  $L_2$  列灯第  $j$  个集鱼灯的坐标  $L_{2j}(x_{2j}, y_{2j}, z_{2j})$ , ( $j=1, 2, \dots, n_2$ )

$$\begin{cases} x_{1j} = b + (j-1) \cdot d \\ y_{1j} = -\frac{D}{2} \\ z_{1j} = h \end{cases} \quad (17)$$



(a)



(b)

$h$  为灯离水面高度;  $h_1$  为船舷距水面高度;  $d$  为集鱼灯间距;  $a$  为集鱼灯距舷边距离;  $D$  为两列灯之间的距离;  $b$  为船尾第一个灯距船尾的距离;  $L_1$  表示第 1 列集鱼灯;  $L_2$  表示第 2 列集鱼灯;  $R_{1i}$  为灯  $L_{1i}$  到入射点  $P_{1i}$  的距离;  $r_{1i}$  为入射点  $P_{1i}$  到点  $Q(x_0, y_0, z_0)$  的距离。

图 3-3 集鱼灯水中照度计算模式示意图

Fig.3-3 Model concept of squid gathering-fish lamp for underwater illuminate calculation.

由上述假设条件可知, 以左舷侧为例, 对于水下任意一点  $Q(x_0, y_0, z_0)$ , 从第  $L_i$  列灯上的任意一盏灯  $L_{ii}(x_{ii}, y_{ii}, h)$  上发出的光将会经由水面上唯一的一点  $P_{ii}(x, y, 0)$  折射而来。显然灯  $L_{ii}$ 、 $P_{ii}$  点及  $Q$  点组成的平面应满足几何定律和光的折射定律。

由几何关系可得:

$$\frac{y - y_{ii}}{x - x_{ii}} = \frac{y_0 - y}{x_0 - x} \quad (18)$$

考虑到船首尾方向照度计算的复杂性, 本文仅对船侧方向水中照度进行计算。参照图 3-3 (a)、3-3 (b), 式 (18) 中  $x_0, y_0$  的范围因满足如下条件:

$$0 \leq x_0 \leq L_{\text{船长}}, \quad y_0 \geq \frac{D}{2} + a \cdot \left( \frac{h_i}{h - h_i} + 1 \right).$$

由折射定律可得:

$$\begin{cases} \sin \theta_{ii} = n \cdot \sin \gamma_{ii} \\ \sin \theta_{ii} = \frac{\sqrt{(y - y_{ii})^2 + (x - x_{ii})^2}}{\sqrt{(y - y_{ii})^2 + (x - x_{ii})^2 + h^2}} \\ \sin \gamma_{ii} = \frac{\sqrt{(y - y_0)^2 + (x - x_0)^2}}{\sqrt{(y - y_0)^2 + (x - x_0)^2 + (z_0)^2}} \end{cases} \quad (19)$$

式 (19) 中,  $\theta_{ii}$  为集鱼灯  $L_{ii}$  在  $P_{ii}$  点的入射角,  $\gamma_{ii}$  为集鱼灯  $L_{ii}$  在  $P_{ii}$  点入射角为  $\theta_{ii}$  时的折射角,  $n$  为空气的相对折射率, 对于海水可取  $n = 1.33$ 。

当  $L_{ii}$  点坐标和  $Q$  点坐标已知时, 可根据式 (16) ~ (19) 求得入射点  $P_{ii}$  的坐标。参照图 3-4 坐标系可知, 当集鱼灯以一定的参数布置时 (如灯离水面垂直距离为  $h$ , 平均灯距为  $d$ , 两列灯的横距为  $D$  等), 那么任意一盏灯的坐标都是已知的, 故对于水下任意一点, 都可以根据式 (16) ~ (19), 求得其相应的水面入射

点的坐标。

由图 3-3 (b) 可知, 要使某一集鱼灯的光线照射到水面上的一入射点, 则该集鱼灯射往水面上相应入射点的光线应不受船舷和甲板的阻碍, 即应满足如下关系式:

$$z > h_i \quad (20)$$

式 (20) 中,  $h_i$  为船舷距离水面高度;  $z$  为入射点  $P_{ii}(x, y, 0)$  与集鱼灯  $L_{ii}(x_{ii}, y_{ii}, z_{ii})$  的所在直线与左舷边所在平面的交点离水面高度, 即应满足如下两个方程。

入射点  $P_{ii}(x, y, 0)$  与集鱼灯  $L_{ii}(x_{ii}, y_{ii}, z_{ii})$  的两点直线方程为:

$$\frac{x - x}{x - x_{ii}} = \frac{y - y}{y - y_{ii}} = \frac{z - 0}{0 - h} \quad (21)$$

左舷边的平面方程为:

$$y = \frac{D}{2} + a \quad (22)$$

由式 (21)、(22) 可得:

$$z = \frac{\frac{D}{2} + a - y}{y_{ii} - y} \cdot h \quad (23)$$

### 3.2.3 集鱼灯灯光的传递过程分析

显然, 光线从  $L_{ii}$  传递到  $Q$  点的过程中包含 3 部分不同的光能损失, 即: 从  $L_{ii}$  到  $P_{ii}$  点水面 (+0m) 处, 由于空气引起的光能损失; 从  $P_{ii}$  点水面 (+0m) 处到  $P_{ii}$  点水面 (-0m) 处, 由于光的传播介质不同及反射引起的光能损失; 从  $P_{ii}$  点水面 (-0m) 处传递到  $Q$  点的过程中, 由于水的吸收、散射等引起的光能的衰减。

根据鱿钓渔船集鱼灯的光传递的上述情况，以下将分别对这 3 部分的光能损失进行分析。

### (1) 从 $L_{li}$ 到 $P_{li}$ 点水面 (+0m) 处

对于第  $L_i$  列灯上的任意一盏集鱼灯  $L_{li}$ ，设其在  $P_{li}$  点水面 (+0m) 处的照度为  $E_{P_{li}}^+$ ，入射角为  $\theta_{li}$ ，该灯照到  $P_{li}$  点的光强度为  $I_{\theta_{li}}$ 。

按照三角函数关系，参照图 3-3 可得：

$$\cos \theta_{li} = \frac{\sqrt{(x_{li} - x)^2 + (y_{li} - y)^2}}{\sqrt{(x_{li} - x)^2 + (y_{li} - y)^2 + (h - 0)^2}}; \quad (24)$$

对于集鱼灯  $L_{li}$ ，在  $\theta_{li}$  方向上距离为  $R_{li}$  的一点  $P_{li}$  水面 (+0m) 处的照度，可按点光源的计算公式计算该处的照度，即：

$$E_{P_{li}}^+ = \frac{I_{\theta_{li}}}{(R_{li})^2} \cdot \cos \theta_{li} = I_{\theta_{li}} \cdot \frac{\sqrt{(x_{li} - x)^2 + (y_{li} - y)^2}}{[(x_{li} - x)^2 + (y_{li} - y)^2 + (h - 0)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (25)$$

式 (25) 中， $I_{\theta_{li}}$  可根据不同集鱼灯的配光曲线获得。球形金属卤化物灯的配光曲线参见图 2-11。

### (2) 从 $P_{li}$ 点水面 (+0m) 处到 $P_{li}$ 点水面 (-0m) 处

对于第  $L_i$  列灯上的任意一盏集鱼灯  $L_{li}$ ，设其在  $P_{li}$  点水面 (-0m) 处的照度为  $E_{P_{li}}^-$ 。由于光从空气进入水面时，部分光能要被反射，则对于  $P_{li}$  点直接下方 (-0m) 处的水平面照度可由下式求得：

$$E_{P_{li}}^- = E_{P_{li}}^+ \cdot \beta_{\theta_{li}} \quad (26)$$

式 (26) 中： $\beta_{\theta_{li}}$  为光在  $P_{li}$  点处的光能折射比，按照 Fresnel 法则，计算公式如下：

$$\beta_{\theta_{ii}} = 1 - 0.5 \times \left[ \frac{\operatorname{tg}^2(\theta_{ii} - \gamma_{ii})}{\operatorname{tg}^2(\theta_{ii} + \gamma_{ii})} + \frac{\sin^2(\theta_{ii} - \gamma_{ii})}{\sin^2(\theta_{ii} + \gamma_{ii})} \right] \quad (27)$$

式(27)中:  $\gamma_{ii}$  为集鱼灯  $L_{ii}$  在  $P_{ii}$  点入射角为  $\theta_{ii}$  时的折射角。

(3) 从  $P_{ii}$  点水面 (-0m) 处传递到  $Q$  点

对于第  $L_1$  列灯上的任意一盏集鱼灯  $L_{ii}$ , 设其在  $Q$  点处的照度(法向照度, 下同)为  $E_{Q_{ii}}$ 。光从  $P_{ii}$  点水面 (-0m) 处传递到  $Q$  点的过程中, 由于海水的吸收和散发, 在经过了  $r_{ii}$  的距离后衰减为  $P_{ii}$  点水面 (-0m) 处照度的  $e^{-\mu r_{ii}}$ , 即:

$$E_{Q_{ii}} = E_{P_{ii}}^- \cdot e^{-\mu r_{ii}} \cdot \cos \gamma_{ii} \quad (28)$$

式(28)中,  $\mu$  为光在水中的衰减率, 可由下式求得:

$$\mu = \frac{1.7}{D} \quad (29)$$

式(29)中  $D$  为水的透明度, m。

### 3.2.4 集鱼灯水中照度计算的表达式

由以上各式可知, 第  $L_1$  列上所有集鱼灯(设第  $L_1$  列集鱼灯灯数为  $n_1$ )在  $Q$  点的照度为:

$$E_{Q_1} = \sum_{i=1}^{n_1} E_{Q_{ii}} = \sum_{i=1}^{n_1} E_{P_{ii}}^- \cdot e^{-\mu r_{ii}} \cdot \cos \gamma_{ii} \quad (30)$$

同理, 可求得第  $L_2$  列(设第  $L_2$  列集鱼灯灯数为  $n_2$ )上所有集鱼灯在  $Q$  点的照度为:

$$E_{Q_2} = \sum_{j=1}^{n_2} E_{Q_{jj}} = \sum_{j=1}^{n_2} E_{P_{jj}}^- \cdot e^{-\mu r_{jj}} \cdot \cos \gamma_{jj} \quad (31)$$

由此，在两列集鱼灯的作用下， $Q$  点处的总照度为：

$$E_Q = E_{Q_1} + E_{Q_2} = \sum_{i=1}^n E_{P_{1i}}^- \cdot e^{-\mu \cdot r_{1i}} \cdot \cos \gamma_{1i} + \sum_{j=1}^{n_2} E_{P_{2j}}^- \cdot e^{-\mu \cdot r_{2j}} \cdot \cos \gamma_{2j} \quad (32)$$

由上述的理论推导可知，本计算模式实际上是在考虑了集鱼灯各向异性特征的基础上，将各集鱼灯在某一照射点的照度进行几何叠加的一种计算方法，为便于区别，下文中称该方法为“叠加法”。

为了计算方便，根据式 (16) ~ (32)，使用 C++ 语言对“叠加法”进行编程。使用该程序可得到不同集鱼灯配置时的船侧水下任意一点的照度值。程序设计思路和流程见附件 1 和附件 2。

### 3.3 理论计算模式的比较和检验

本节使用“新世纪 61 号”鱿钓渔船的集鱼灯布置参数，使用四种计算方法对船舷边的水中照度进行计算，与实际测量数据进行比较，并在理论上对四种计算方法进行比较和探讨。另外，根据“龍沖丸”鱿钓渔船的集鱼灯布置参数，使用对舷侧不同距离不同水深的照度进行计算，并使用实际测量数据对所建立的水中光照度分布计算模式（叠加法）进行检验。

#### 3.3.1 四种理论计算方法的比较

##### (1) 四种计算方法与实测值的比较

根据新世纪 61 号轮（系浙江远洋渔业公司普陀分公司鱿钓渔船）集鱼灯布置的有关参数（参见图 3-4、图 3-5），该船左舷所装的集鱼灯都是 2kW 的金属卤化物灯（其配光曲线参见图 2-11（b）），共 60 盏，总功率为 120kW。现假设各灯的发光性能没有显著差异，其单个灯的光通量均为 220000Lm。

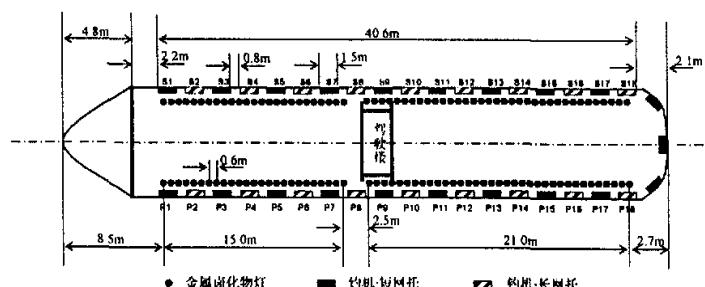


图 3-4 新世纪 61 号渔船集鱼灯和钓机布置俯视图

Fig.3-4 The platform of fish aggregation lamps and jigging machine on Xinshiji No.61

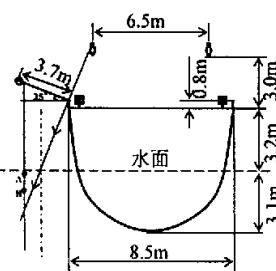


图 3-5 新世纪 61 号渔船集鱼灯和钓机断面示意图

Fig.3-5 The Section figure of fish aggregation lamps and jigging machine on Xinshiji No.61

根据新世纪 61 号渔船集鱼灯的布置参数（图 3-4、图 3-5），使用点光源计算法、线光源计算法、经验计算法、叠加法，对左舷 60 盏集鱼灯在左舷长网托架（P<sub>2</sub>、P<sub>4</sub>、P<sub>6</sub>、P<sub>8</sub>、P<sub>10</sub>、P<sub>12</sub>、P<sub>14</sub>、P<sub>16</sub>、P<sub>18</sub>）滚轮直接下方水深分别为 0.1m、2.0m 处的照度进行计算（测量方法见附件 6）。计算结果见表 3-1、表 3-2。

表 3-1 水深 0.1m 各处的照度计算值和实测值

Tab.3-1 The calculated value and the measure value in the depth of 0.1 meters

钓机	点光源方法	线光源方法	经验方法	叠加法	实测平均值
P2	691.6	5575.6	1076.4	1746.0	2050.2
P4	1500.7	5450.8	1461.5	3196.5	2760.1
P6	3687.3	5530.6	1622.7	4109.3	3115.2
P8	9448.2	5577.6	1627	4453.1	3452.3
P10	15548.5	5590.9	1672.7	4557.7	3621.5
P12	9448.2	5576.9	1751.9	4540.9	3452.1
P14	3687.3	5529.1	1724.6	4384.4	3240.5
P16	1500.7	5449.4	1547.7	3910.8	3118.9
P18	691.6	5586.3	1170.1	2774.0	2804.2
离差均值	5305.6	2665.1	1670.3	885.4	
关联度	0.79	0.68	0.80	0.90	

表 3-2 水深 2.0m 各处的照度计算值和实测值

Tab.3-2 The calculated value and the measure value in the depth of 2.0 meters

钓机	点光源方法	线光源方法	经验方法	叠加法	实测平均值
P2	473.0	3744.6	496.3	1438.9	1620.7
P4	1026.3	3652.8	673.8	2529.3	2158.3
P6	2521.6	3706.3	748.1	3278.2	2210.6
P8	6461.3	3738.3	750.1	3580.9	2412.1
P10	10633	3747.7	771.2	3672.6	2875.8
P12	6461.3	3738.8	807.7	3658.0	2640.2
P14	2521.6	3707.3	795.4	3520.2	2585.4
P16	1026.3	3653.8	713.5	3107.6	2414.7
P18	473.0	3737.5	539.5	2207.6	2211.6
离差均值	3514.6	1492.9	1769.6	844.2	
关联度	0.75	0.65	0.79	0.85	

对水深 0.1m 各处的照度，将实测平均值作为母序列，四种计算方法的理论值作为子序列，使用灰色系统关联分析得到：点光源方法所得的理论值与实测平均值的关联系数为 0.79，线光源方法所得的理论值与实测平均值的关联系数为

0.68，经验方法所得的理论值与实测平均值的关联系数为 0.80，叠加法所得的理论值与实测平均值的关联系数为 0.90。由此可见，使用叠加法所得的理论值与实测平均值的关联度是最高的。

同样，对水深 2.0m 各处的照度，将实测平均值作为母序列，四种计算方法的理论值作为子序列，使用灰色系统关联分析得到：点光源方法所得的理论值与实测平均值的关联系数为 0.75，线光源方法所得的理论值与实测平均值的关联系数为 0.65，经验方法所得的理论值与实测平均值的关联系数为 0.79，叠加法所得的理论值与实测平均值的关联系数为 0.85。由此可见，对水深 2.0m 各处的照度情况，使用叠加法所得的理论值与实测平均值的关联度也是最高的。

由表 3-1、表 3-2 可知，在 0.1m、2.0m 水层，使用叠加法计算的结果要比其它三种方法的计算结果更接近实际测量的平均值。此外，使用叠加法计算的结果与实际测量平均值的离差均值也是最小的。因而，使用叠加法来进行集鱼灯水中照度的理论计算相对更为精确。

## (2) 四种计算方法的理论讨论

I、点光源方法。在光诱渔业发展初期，集鱼灯的灯数一般为 1~2 个，此时水下被照射点的照度计算用点光源概念是适合的<sup>[166]</sup>。但随着该渔业的发展以及灯光研究的进展，集鱼灯个数和光源输出功率不断的增加，现在的鱿鱼钓渔船按点光源的概念来计算水中照度会使误差很大。现在普遍使用的金属卤化物灯，其发光特性显然是各向异性的，而点光源计算的前提是假设各向同性，由此必然产生计算上的误差。

但有关研究<sup>[87]</sup>表明：若光源的长度为 L，当离灯的高度（或距离）大于  $5 \times L$  时，该光源是可以被看作为点光源进行计算的，且其计算误差在 1% 以下。那么，对于本文中的新世纪 61 号鱿钓渔船，其光源长度 L 为 38.5m，则距离船舷 196.75m ( $5 \times 38.5 + 4.25$ m，其中 4.25m 为船的一半宽度) 以外的照度是可以考虑按点光源来计算的。

II、线光源方法。线光源方法的计算中考虑了集鱼灯发光的各向异性特征，由荒川久幸、崔渐珍等的研究结果证实线光源方法有一定的可行性<sup>[87]</sup>。但是该方

法在计算过程中，是将船上两列集鱼灯合为一列线光源来进行考虑的，事实上船上两列集鱼灯的间距是比较大的（如新世纪 61 号的两列灯间距为 6.2m），这种忽略必然会导致计算的误差较大，因而，该方法并不十分可取。

III、经验计算方法。经验公式是在 70 年代，根据当时光源和灯光系统的发展水平而提出的。该计算方法不考虑集鱼灯的配光特性（各向异性），且其照度计算式较适合于白炽灯或铊铟灯等灯光系统<sup>[164]</sup>，而对目前我国鱿钓渔船的普遍使用的集鱼灯（金属卤化物灯）的照度计算并不十分合适，使用上有一定的局限性。

IV、叠加法。该计算方法考虑了集鱼灯光源的配光特性，具体计算中，是把每一盏灯在被照点的照度进行累加来获得该点的照度值。相比之下，比其它几种计算方法考虑的更为全面。由前面的分析可以推断，使用该方法的计算精度相对最好。

### 3.3.2 理论计算模式的检验

尽管通过上述的比较，认为叠加法要比其它三种计算方法更为合适，但为了进一步验证该模式的可行性，需对鱿钓渔船外围的水中照度分布进行实测和比较。在鱿钓作业渔场进行船周外围水中测光的难度比较大，所以这里将使用日本的有关资料对叠加计算模式进行进一步的验证。

表 3-3 龙冲丸集鱼灯布置参数（参有元贵文<sup>[56]</sup>，1996）

Tab.3-3 The arrangement parameters of fishing lamps on the squid jigging vessel

船长 $L_0$ (m)	22.0
灯光长度 $L$ (m)	17.0
总功率 $W$ (kW)	76
集鱼灯数 $N$ (盏)	38
灯离水面高 $h$ (m)	3.4
船舷离水面高 $h_1$ (m)	1.6
灯距 $d$ (m)	0.94
舷边距 $a$ (m)	1.1
两列灯之间的距离 $D$ (m)	2.6
近船尾第 1 盏灯与船尾的距离 $b$ (m)	1.2

根据日本 19 总吨小型鱿钓渔船（龙冲丸）的集鱼灯布置参数<sup>[56]</sup>（见表 3-3），

使用叠加法计算程序对船舯一侧不同位置的照度进行计算。实际测量值和所得的理论计算值（根据日本近海鱿钓渔场实际测量海域的海水特性，衰减系数取 $\mu = 0.15$ ）见表 3-4。根据表 3-4 数据绘制的等照度曲线见图 3-6。

表 3-4 不同位置的实际测量值和理论计算值  
Tab.3-4 the calculated value and the measure value in different place

水平距离	水深	实测值	计算值	水平距离	水深	实测值	计算值
1.5	0	110	/	20	4	55	60.3
1.5	4	3	/	20	6	40	44.2
1.5	6	2	/	20	8	35	38.6
1.5	8	1.1	/	20	10	25	27.3
1.5	10	0.2	/	20	12	10	10.9
5	0	2000	2250.3	20	14	8	8.8
5	2	600	1121.1	20	16	5.5	6.4
5	4	250	667.2	20	18	3	3.7
5	6	100	/	20	20	1	1.5
5	8	40	/	20	22	0.1	0.2
5	10	25	/	30	0	140	156.4
5	12	6	/	30	2	35	38.8
5	14	4	/	30	4	10	11.6
5	17	0.2	/	30	6	8	9.6
10	0	1200	1318.2	30	8	6	6.8
10	2	400	530.6	30	10	4	4.8
10	4	300	348.3	30	12	3	3.6
10	6	120	131.5	30	14	2	2.5
10	8	60	67.9	30	16	0.3	0.4
10	10	35	38.4	40	0	40	43.2
10	12	20	/	40	2	12	12.4
10	14	10	/	40	4	4	4.4
10	16	5	/	40	6	1	1.2
10	18	2	/	40	7	0.2	0.3
10	20	0.4	/	50	0	20	21.1
20	0	400	422.8	50	2	3	3.5
20	2	90	97.5	50	4	0.8	0.9

注：表中实测值参照（参有光贵文<sup>[56]</sup>，1996）。

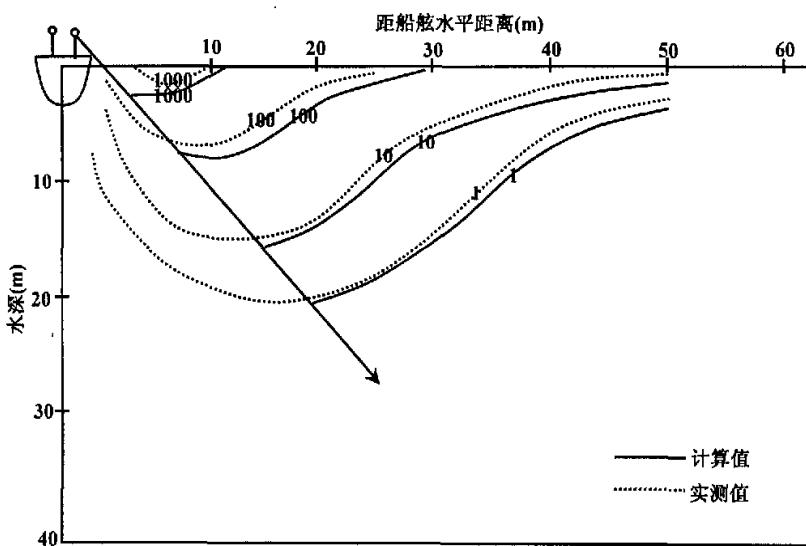


图 3-6 实际测量值和理论计算值的比较  
Fig.3-6 Compare between the calculated value and the measure value

由表 3-4 和图 3-6 可知，使用叠加方法计算的理论值均要略大于实际测量值，这主要是因为本计算模式是在理想状态下进行计算的，未考虑甲板高层建筑对灯光的阻碍等，因而计算值要略大于实际测量值。

从图 3-6 中还可以看出，使用叠加法计算所得到的水中等照度曲线的形状与实测的等照度曲线形状十分相似，可见使用叠加法模式计算的水中照度基本上符合鱿钓渔船周围实际照度的分布情况。

### 3.4 叠加法理论计算模式的应用

本节根据所建立的叠加法计算模式,对新世纪 61 号鱿钓渔船周围的水中照度分布情况进行计算和分析,使用有关的计算结果制作船侧的等照度曲面,并建立等照度曲面所围水体体积的计算方法。然后,根据水体体积计算方法对不同海水衰减系数对鱿钓渔船集鱼灯在水中的照度分布的影响进行分析和研究。

#### 3.4.1 鱿钓船周围的水中照度分布

根据新世纪 61 号渔船(参见图 3-4、图 3-5)的实际尺寸数据(两排灯的水平横距  $D=6.5m$ ,集鱼灯距舷边距离  $a=1.0m$ ,灯离水面高  $h=6.2m$ ,船舷距水面高度  $h_1=3.0m$ ,灯间距  $d=0.5m$ ,船尾第 1 个灯距船尾距离  $b=2.7m$ ,灯光总功率为  $2kw \times 120$  盏),当衰减系数取  $\mu=0.1$  时,使用所编程序对船舷方向 100m、水深 100m、船长 49.7m 范围(计算步长为 0.1m)的水体中的照度进行计算。

##### (1) 不同总功率时的水中照度分布

图 3-7 为船中部(离船尾 25m)右舷侧在不同集鱼灯功率时的水中照度分布(海水衰减系数  $\mu=0.1$ )。图中实线表示总功率为 240kW 时(左右舷各 60 盏 2kW 的集鱼灯)的水中照度分布曲线;图中虚线表示总功率为 120kW 时(左右舷各 30 盏 2kW 的集鱼灯)的水中照度分布曲线。

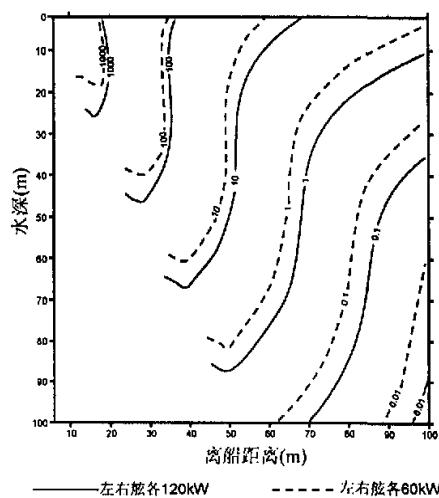


图 3-7 不同集鱼灯功率时的水中等照度曲线分布

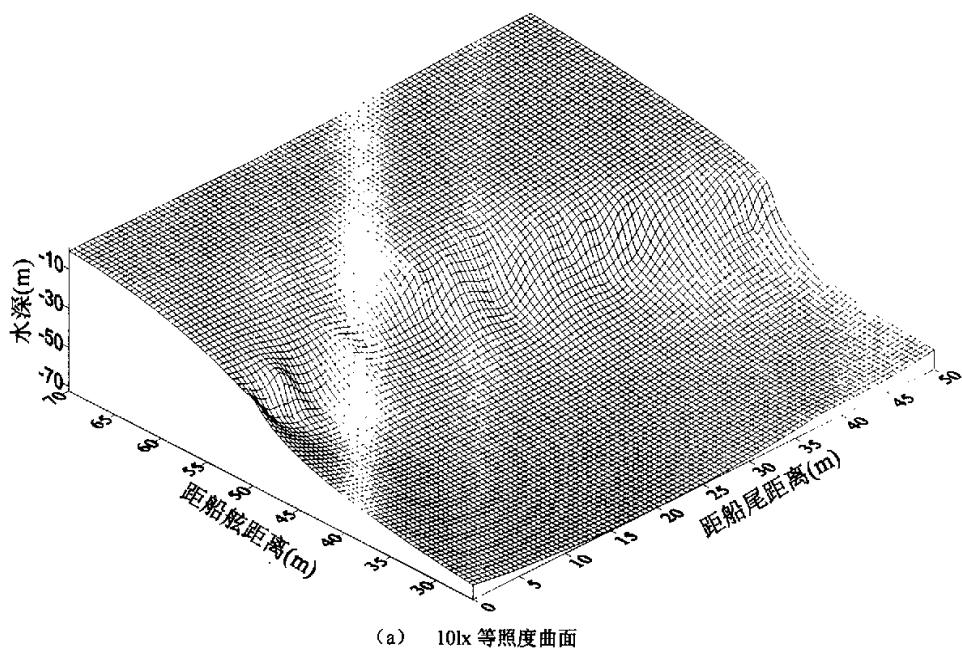
Fig.3-7 Contours of underwater irradiance of different out power of fishing lamps

由图 3-7 可以看出, 尽管灯光总功率从 240kW 到 120kW 下降了一半, 各等照度曲线并非成倍变浅变近, 而且变化幅度不大, 如 100lx 的等照度曲线在两种不同功率情况时相距仅 2~5m。随着等照度曲线数值的下降, 两曲线的距离有少许加大, 如 10lx 的等照度曲线在两种不同功率情况时相距为 3~10m 左右, 1lx 的等照度曲线在两种不同功率情况时相距为 4~10m 左右。

### (2) 船舷一侧的等照度曲面

使用所编程序, 还可搜索某一照度值 (如 10lx、1lx 等) 在一定范围内的所有位置点的坐标, 然后根据船舷一侧某照度值所处的不同水中位置点坐标值, 使用 SURFUR7.0 软件绘制等照度曲面图。

图 3-8 为集鱼灯功率为 240kW 时不同照度值的水中等照度曲面。其中, 图 3-8 (a) 为集鱼灯功率为 240kW 时照度值为 10lx 的水中等照度曲面。图 3-8 (b) 为集鱼灯功率为 240kW 时照度值为 1lx 的水中等照度曲面。通过等照度曲面图基本可以看出船舷一侧某照度值的分布情况。



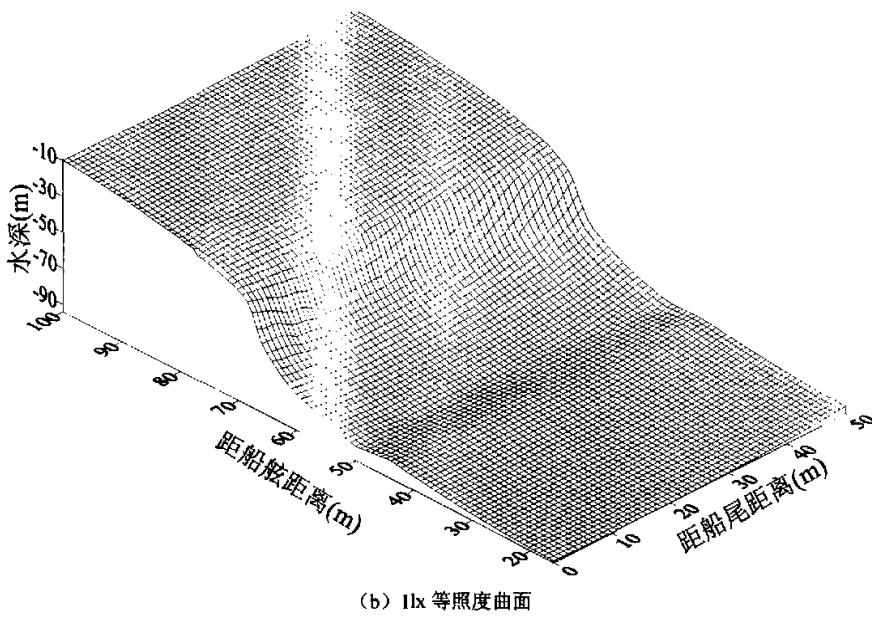


图 3-8 集鱼灯功率 240kW 时的等照度曲面

Fig.3-8 The iso-illuminance curve surface of fishing lamps with 240kW out power

### 3.4.2 不同样照度曲面所围水体体积的计算

在鱿钓集鱼灯研究中,为了比较分析不同集鱼灯配置时的诱集范围,有时需要对某照度值所含的水体体积进行估算。对于图 3-8 所示的各等照度曲面,很难确定其照度分布函数  $f(x, y, z)$ ,然后使用体积积分公式  $V = \iiint f(x, y, z) dx dy dz$  来进行计算。为此,可以考虑使用水柱元体积累加的方法来估算。

如图 3-9,选取某一微小水柱,显然其体积:

$$dV = dx \times dy \times z_{xy} \quad (33)$$

式中  $z_{xy}$  表示该微小水柱的高度, m。

则整个曲面所围的水体体积为:

$$V = \sum dV = \sum dx \times dy \times z_{xy} \quad (34)$$

根据所编的程序,可以获得不同照度的水下各点坐标。当将  $x$ 、 $y$  方向的计

算步长  $dx$ 、 $dy$  设为某一单位长度（如  $dx = dy = 0.1$ ），则（34）式可以转化为：

$$V = dx \times dy \times \sum z_{xy} \quad (35)$$

式（35）中， $z_{xy}$  为某照度（如 10lx、1lx、0.1lx、0.01lx 等）在某位置的深度值，当该位置位于光照区时， $z_{xy}$  可由程序搜索得到；当该位置位于船体阴影区时，使用该照度所处的最大水深值进行估算。

根据式（35），对叠加法理论照度计算程序进行补充和修改，可得到不同等照度曲面所围水体体积的计算程序（程序设计流程参见附件 3）。

使用所建立的水体体积计算程序，得到集鱼灯功率为 240kW 时 10lx 水中等照度曲面与水面所围的水体体积为  $124738.4\text{m}^3$ ，1lx 水中等照度曲面与水面所围的水体体积为  $342140.8\text{m}^3$ 。

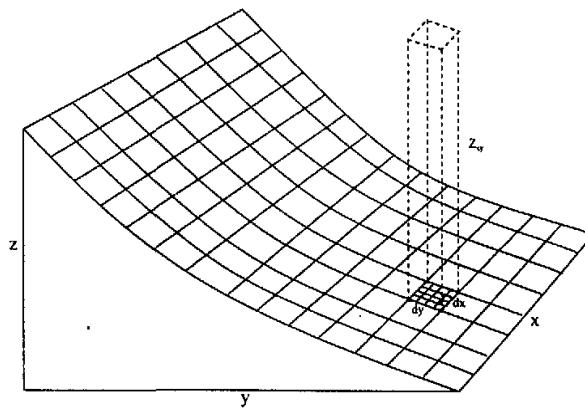


图 3-9 水体体积计算示意图  
Fig.3-9 Calculation of water volume

### 3.4.3 海水衰减系数对水中照度的影响

#### (1) 不同海水衰减系数时的照度分布

图 3-10 为集鱼灯总功率为 240kW 时，船中部（离船尾 25m）右舷侧在不同海水衰减系数情况时的水中照度分布。

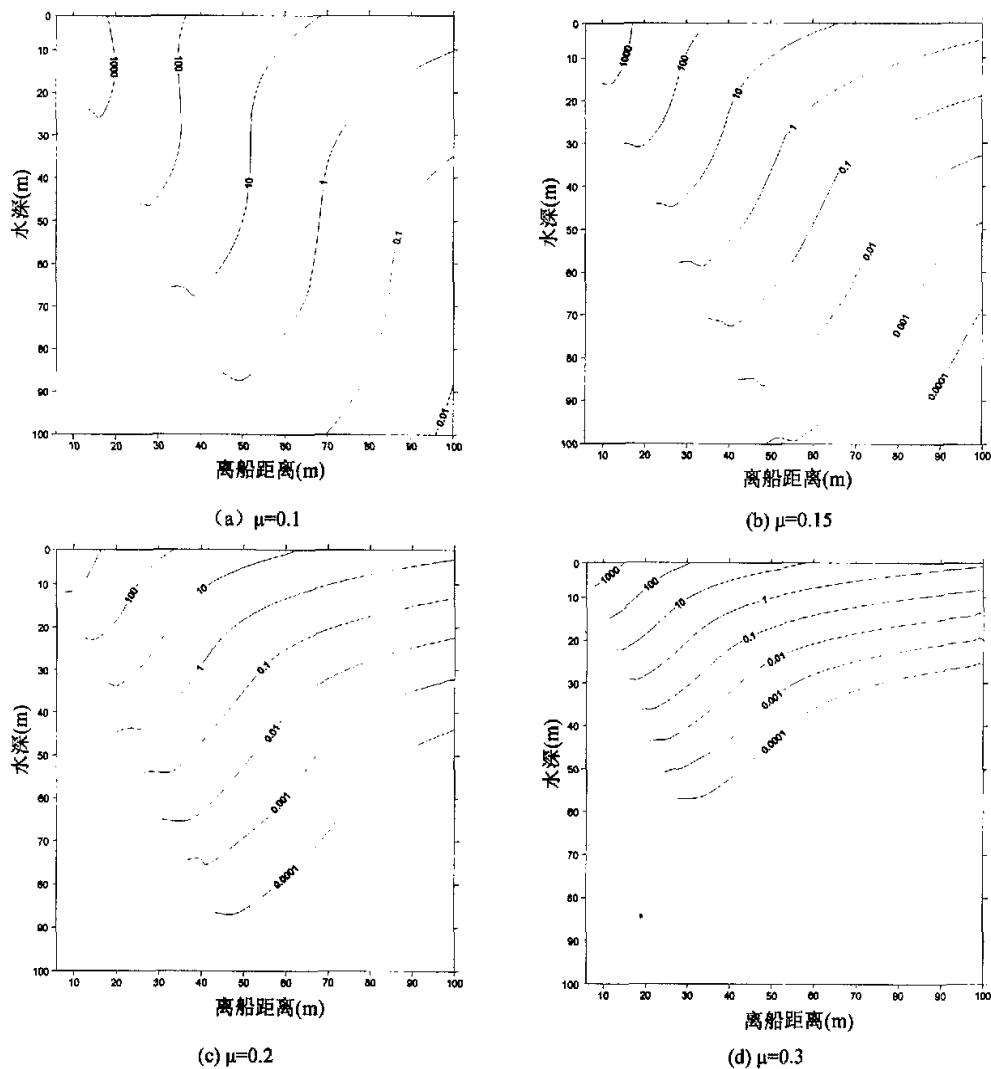


图 3-10 不同海水衰减系数时的等照度曲线

Fig.3-10 The iso-illuminance curve in different attenuation coefficient

图 3-10 (a) 为衰减系数  $\mu=0.1$  时的照度分布, 由图可知, 离船侧 18m 附近的表层照度在 1000lx 左右, 离船侧 37m 附近的表层照度在 100lx 左右, 离船侧 78m 附近的表层照度在 10lx 左右, 而离船 100m 附近的表层照度在 4lx 左右。

随着海水衰减系数的增大, 船侧的表层照度逐渐减少。由图 3-10 (b) 可以看出, 当衰减系数  $\mu=0.15$  时, 表层照度 100lx 的位置离船侧为 35m, 表层照度 10lx

的位置离船侧为 65m，离船侧 100m 处照度为 2lx 左右。当衰减系数  $\mu=0.2$  时，表层照度 100lx 的位置离船侧为 32m，表层照度 10lx 的位置离船侧为 62m，离船侧 100m 处照度为 1.5lx 左右（图 3-10 (c)）。当衰减系数  $\mu=0.3$  时，表层照度 100lx 的位置离船侧为 30m，表层照度 10lx 的位置离船侧为 56m，离船侧 100m 处照度为 1.1lx 左右（图 3-10 (d)）。

从图 3-10 各等照度曲线变化趋势来看，光强在水平方向的衰减要比其在垂直方向缓慢一些。衰减系数不同，其等照度曲线是不同的。

## (2) 不同衰减系数时的水体体积比较

根据上述水体体积计算程序，得到集鱼灯功率为 240kW 时 100lx、10lx 水中等照度曲面与水面所围的水体体积  $V_{100}$ 、 $V_{10}$  见表 3-5。

表 3-5 不同衰减系数时的诱集水体体积

Tab.3-5 the attracting water volume in different attenuation coefficient

衰减系数	$\mu=0.1$	$\mu=0.15$	$\mu=0.2$	$\mu=0.3$
$V_{100}$ ( $m^3$ )	67273.9	41748.2	21947.5	11182.5
$V_{10}$ ( $m^3$ )	124738.4	72686.3	53489.6	16565.0

由表 3-5 可得，对于 100lx 水中等照度曲面与水面所围的水体体积  $V_{100}$ ，当衰减系数比为 0.1: 0.15: 0.2: 0.3 时，其所围的水体体积比为 7.53: 4.39: 3.23: 1.00。而对于 10lx 水中等照度曲面与水面所围的水体体积  $V_{10}$ ，当衰减系数比为 0.1: 0.15: 0.2: 0.3 时，其所围的水体体积比为 6.02: 3.73: 1.96: 1.00。

### 3.5 小结

(1) 在本文的研究中, 将集鱼灯按照几何定律和折射定律分别进行照度的叠加计算, 理论上来说更为确切些。根据鱿钓渔船的集鱼灯布置实际参数, 使用四种不同的理论计算方法进行计算, 结果表明本文所建立的叠加法相对更为正确。此外, 使用本模式所计算的船侧各不同水层处的照度分布曲线形状, 与日本实际测量的舷侧水中照度分布曲线在形状上比较接近。

(2) 本研究建立了不同渔用集鱼灯水中照度的计算模式, 并开发了相关的计算程序, 可以计算不同配光特性、不同集鱼灯布置参数时的水下任意一点理论照度值。另外, 可以根据某确定照度值, 使用程序搜索该照度的所有数据点, 可以估算该照度曲面所围水体的体积, 并建立了等照度曲面所围水体体积的计算程序。

(3) 集鱼灯总功率变化时, 浅层水的照度差异较明显, 随着深度的增大, 照度值的差异减少。海水衰减系数不同时, 水中等照度曲线的形状也不同, 衰减系数越大, 照度在垂直方向衰减越快, 等照度曲线越平坦。

(4) 在集鱼灯水中照度分布的各种计算方法中, 显然都没有考虑各光源之间的干扰, 也都忽略了背景光、甲板高层建筑对光线传播的阻碍, 以及假定海况天气都是良好的前提条件下进行水中照度计算的。但实际情况和需考虑的因素是十分复杂的, 需要作更全面的分析和研究, 以便对计算方法进行更好的修正。

## 第4章 实证分析

本章主要包括4部分的研究内容。第1部分，对不同鱿钓渔船分别装配2kW型、3kW型、4kW型集鱼灯时的水体诱集体积进行比较，同时对8154型鱿钓渔船使用1kW型、2kW型集鱼灯时的水体诱集体积进行比较，指出在假定集鱼灯总功率一致的前提下最佳使用哪一类型的集鱼灯。第2部分，根据我国不同鱿钓渔船的集鱼灯（均为2kW型集鱼灯）布置参数，使用叠加法水中照度计算模式，对鱿钓渔船不同集鱼灯配置时的水中照度分布和相应的水体诱集体积分别进行计算，并以此对不同鱿钓渔船的集鱼灯布置进行分析和评价。第3部分，考虑到我国众多的8154型鱿钓渔船基本上使用1kW型集鱼灯，根据生产统计数据、不同总功率时的水体诱集体积以及集鱼灯的成本和耗油因素等，对该类渔船集鱼灯总功率的最佳配置进行了具体的研究。第4部分，对不同鱿钓渔船不同总功率时的最大有效诱集距离等进行计算，研究鱿钓渔船不同总功率时的最小许可作业间距。

### 4.1 不同种类集鱼灯配置时的比较研究

目前，我国鱿钓渔船所使用的集鱼灯多数为2kW型的集鱼灯，但近来有部分作业船尝试用高功率的集鱼灯（3kW型、4kW型）来替代2kW型的集鱼灯，为此，本文将对这种不同型号的集鱼灯配置进行比较研究，对高功率集鱼灯使用的合理性进行评价。另外，国内的多数的8154型鱿钓渔船使用的是1kW型的集鱼灯，其中有一部分该类渔船使用2kW型的集鱼灯，本文也将对这两种不同的配置进行比较。

头足类的适宜照度一般为，并能对0.01lx的弱光产生反应。因而，在本研究中以0.01lx作为有效诱集的最低照度值，并将0.01lx等照度曲面所围的水体体积称为最大有效诱集水体体积 $V_{0.01}$ （考虑到船两侧的对称性，本文仅计算船舷一侧的水体体积）；另将0.1lx等照度曲面所围的水体体积称为 $V_{0.1}$ ，将10lx等照度

曲面所围的水体体积称为  $V_{10}$ , 而 0.1lx 和 10lx 等照度曲面之间的水体作为头足类的适宜照度区, 该部分的水体体积以  $V_{0.1-10}$  表示, 在数值上  $V_{0.1-10} = V_{0.1} - V_{10}$ 。

为比较各种集鱼灯配备的合理性, 在假定集鱼灯总功率一定的条件下, 分别使用不同种类的集鱼灯在鱿钓船上均匀布置, 并计算和比较不同情况下的最大有效诱集体积  $V_{0.01}$ , 以及适宜照度区水体体积  $V_{0.1-10}$ 。

#### 4.1.1 2~4kW 型集鱼灯不同配置时的比较

使用 2kW、3kW、4kW 三种型号的集鱼灯, 分别对四种不同船长的鱿钓船(各鱿钓渔船集鱼灯的一般配置见表 4-1) 在不同总功率时的配置情况进行比较分析。假定各船集鱼灯配置的其它参数不变, 在不同总功率时, 使集鱼灯等距离均匀布置, 则其相应的集鱼灯灯距配置情况见表 4-2。

表 4-1 鱿钓渔船集鱼灯的一般布置参数

Tab.4-1 The arrangement parameters of fishing lamps on the squid jigging vessel

船型	改装型鱿钓船		专业鱿钓船
船长(m)	40~45	45~50	50~60
灯光长度 (m)	38.0	43.0	48.0
总功率(kW)	240	260	280
集鱼灯数(盏)	120	130	140
灯离水面高(m)	5.0	6.2	5.7
船舷离水面高(m)	2.5	4.0	4.6
灯距(m)	0.55	0.58	0.62
舷边距(m)	1.1	1.0	1.0
两列灯之间的距离(m)	5.4	6.5	6.2
近船尾第 1 盏灯与船尾的距离(m)	2.0	2.7	3.0

表 4-2 鱿钓渔船不同情况时的集鱼灯配置

Tab.4-2 The arrangement parameters of fishing lamps on the squid jigging vessel

船长 (m)	总功率 (kW)	2kW 型集鱼灯		3kW 型集鱼灯		4kW 型集鱼灯	
		灯数 (盏)	灯距 (m)	灯数 (盏)	灯距 (m)	灯数 (盏)	灯距 (m)
40~45	240	120	0.64	80	0.97	60	1.31
45~50	264	132	0.66	88	1.00	66	1.34
50~60	288	144	0.68	96	1.02	72	1.37
60~70	360	180	0.69	120	1.03	90	1.39

根据表 4-2 的数据, 使用各鱿钓渔船相应的集鱼灯布置参数, 利用“叠加法”水体体积计算程序(海水衰减系数取 0.1, 计算步长为 0.1m, 下同), 分别进行水体体积计算, 获得  $V_{0.01}$ 、 $V_{0.1}$ 、 $V_{10}$ , 并计算得到  $V_{0.1-10}$ 。各鱿钓渔船不同配置情况时的水体体积计算结果见表 4-3、4-4、4-5、4-6。

表 4-3 船长 40~45m 鱿钓渔船不同集鱼灯配置时的水体体积

Tab.4-3 The attracting water volume of squid jigging vessel which is 40 to 45 meters in length with different fishing lamps

集鱼灯种类	$V_{0.01}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1-10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )
2kW 型	8.58	5.95	1.24	4.71
3kW 型	7.83	5.42	1.12	4.30
4kW 型	7.61	5.39	1.11	4.28

表 4-4 船长 45~50m 鱿钓渔船不同集鱼灯配置时的水体体积

Tab. 4-4 The attracting water volume of squid jigging vessel which is 45 to 50 meters in length with different fishing lamps

集鱼灯种类	$V_{0.01}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1-10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )
2kW 型	8.71	6.00	1.29	4.71
3kW 型	7.94	5.47	1.16	4.30
4kW 型	7.73	5.43	1.15	4.28

表 4-5 船长 50~60m 鱿钓渔船不同集鱼灯配置时的水体体积

Tab. 4-5 The attracting water volume of squid jigging vessel which is 50 to 60 meters in length with different fishing lamps

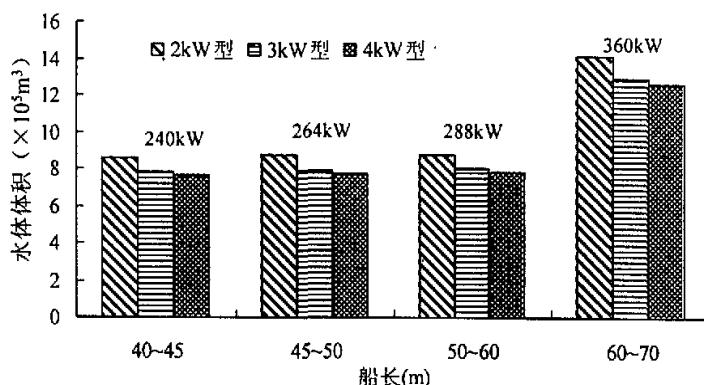
集鱼灯种类	$V_{0.01}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1-10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )
2kW 型	8.76	6.00	1.32	4.68
3kW 型	7.99	5.47	1.19	4.27
4kW 型	7.85	5.44	1.19	4.25

表 4-6 船长 60~70m 鱿钓渔船不同集鱼灯配置时的水体体积

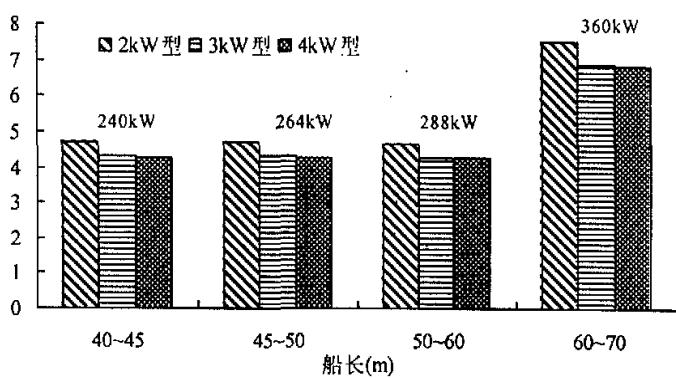
Tab. 4-6 The attracting water volume of squid jigging vessel which is 60 to 70 meters in length with different fishing lamps

集鱼灯种类	$V_{0.01}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1-10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )
2kW 型	14.18	9.71	2.20	7.51
3kW 型	12.93	8.85	1.98	6.87
4kW 型	12.66	8.80	1.97	6.82

根据表 4-3、4-4、4-5、4-6 的有关数据, 绘制得到图 4-1。由图 4-1 (a) 可以看出, 在长度分别为 40~45m (集鱼灯总功率 240kW)、45~50m (集鱼灯总功率 264kW)、50~60m (集鱼灯总功率 288kW)、60~70m (集鱼灯总功率 360kW) 的鱿钓船上, 当集鱼灯以 2kW 型进行配备时, 其最大有效诱集体积  $V_{0.01}$  最大; 当集鱼灯以 3kW 型进行配备时, 其最大有效诱集体积  $V_{0.01}$  次之, 但在数值上要小 0.8~1.2×10<sup>5</sup>m<sup>3</sup> 左右 (参见表 4-3、4-4、4-5、4-6), 而当集鱼灯以 4kW 型进行配备时, 其最大有效诱集体积  $V_{0.01}$  最小。从图 4-1 (b) 也可以看出, 当集鱼灯以 2kW 型进行配备时, 其适宜照度区水体体积  $V_{0.1-10}$  最大, 以 3kW 型进行配备时次之, 以 4kW 型进行配备时最小。



(a) 0.01lx 等照度曲面所用水体体积



(b) 0.1-10lx 等照度曲面所用水体体积

图 4-1 不同鱿钓渔船不同集鱼灯配置时的水体体积

Fig.4-1 The attracting water volume of different squid jigging vessels with different fishing lamps

另外,根据不同渔船不同集鱼灯配置时的舷侧水中等照度分布曲线(图4-2),明显可以看出,当配置2kW型的集鱼灯时,各等照度曲线所处的水层相对也是最深的。

因而,从最大有效诱集体积和适宜照度区水体体积这两个角度来看,在相同总功率时,不同船长的鱿钓渔船的集鱼灯配置均以2kW配备为最佳。

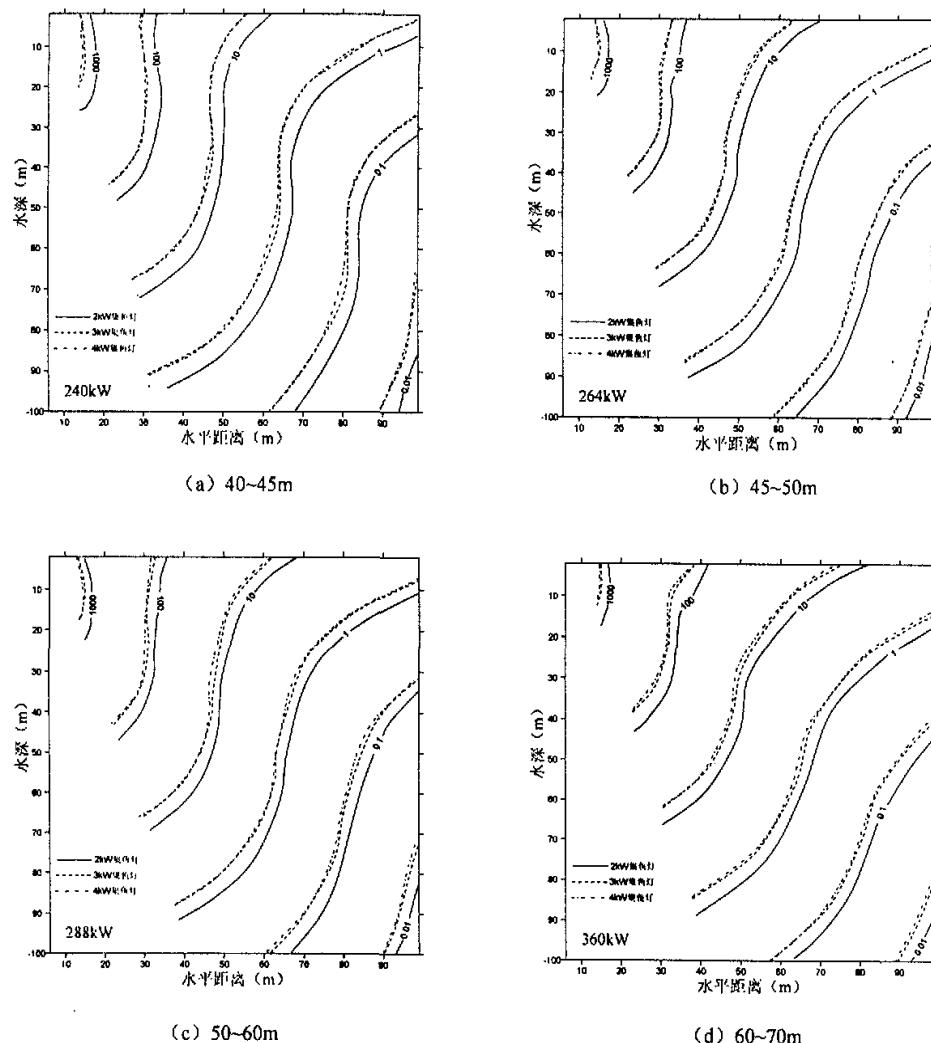


图4-2 不同鱿钓渔船不同集鱼灯配置时的水中等照度曲线分布

Fig.4-2 Contours of underwater irradiance of different squid jigging vessels with different fish aggregation lamps

#### 4.1.2 1~2kW型集鱼灯不同配置时的比较

根据 8154 型鱿钓渔船集鱼灯布置的一般情况（见表 4-7），在总功率分别为 120kW、112kW、100kW、80kW 时，分别使用 1kW、2kW 型的集鱼灯进行配置，并计算相应的诱集水体体积。计算结果见表 4-8，不同情况时的水中等照度曲线见图 4-3。

表 4-7 8154 型鱿钓船的集鱼灯布置参数

Tab.4-7 The arrangement parameters of fishing lamps on the 8154 squid jigging vessel

船长(m)	43.5
灯光长度 (m)	38.0
灯离水面高(m)	5.0
船舷离水面高(m)	2.5
舷边距(m)	1.1
两列灯之间的距离(m)	5.4
近船尾第 1 盏灯与船尾的距离(m)	2.7

表 4-8 8154 型鱿钓船不同集鱼灯配置时的水体诱集体积

Tab.4-8 The attracting water volume of 8154 squid jigging vessel with different fishing lamps

集鱼灯总功率 (kW)	1kW 型		2kW 型	
	$V_{0.01}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1-10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.01}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1-10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )
120	7.60	2.98	7.78	3.05
112	7.47	2.92	7.65	2.99
100	7.26	2.85	7.43	2.91
80	7.60	2.98	7.78	3.05

从表 4-8 可以看出，当 8154 型鱿钓渔船的集鱼灯总功率分别为 120kW、112kW、100kW、80kW 时，使用 1kW 型集鱼灯配置时的最大水体诱集体积  $V_{0.01}$  和适宜照度区水体体积  $V_{0.1-10}$ ，均要小于 2kW 型集鱼灯配置时对应的水体体积。

另从图 4-3 也可看出，在相同总功率时，使用 1kW 型集鱼灯配置时的船侧各等照度曲线的深度，也略浅于 2kW 型集鱼灯配置时所对应的等照度曲线深度。

因此，在相同总功率时，8154 型鱿钓渔船的集鱼灯配置以 2kW 型的配备为最好。

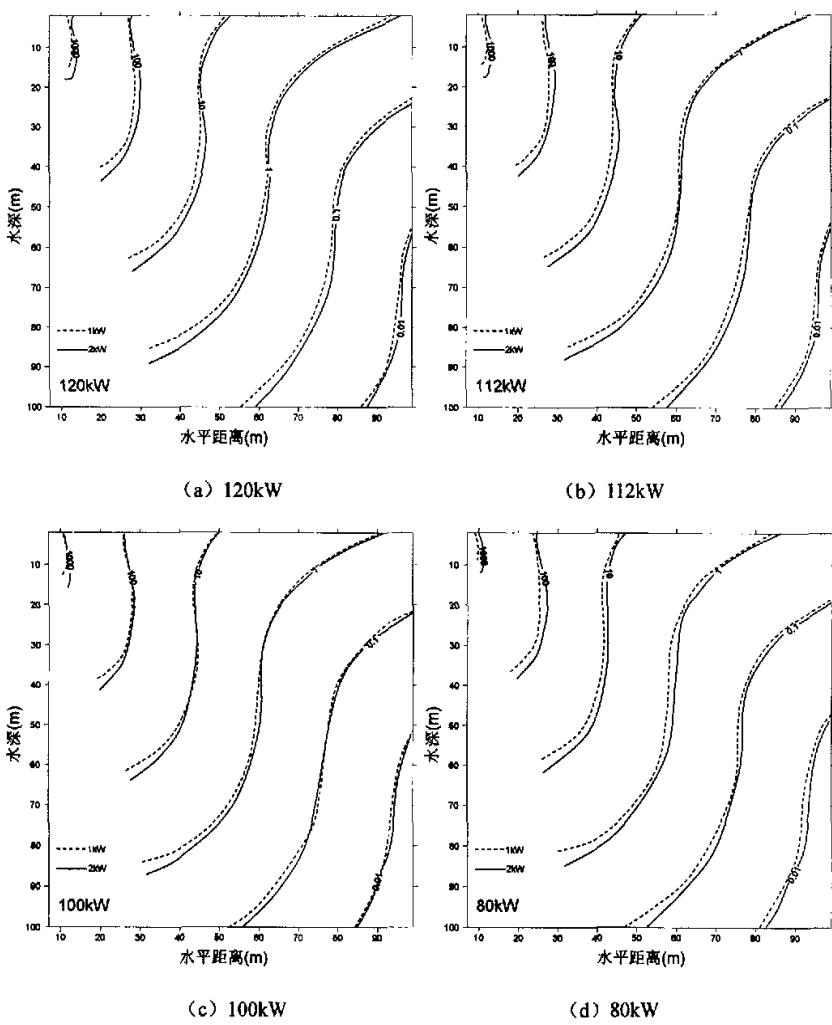


图 4-3 8154 鱿钓渔船不同集鱼灯配置时的水中等照度曲线分布  
 Fig.4-3 Contours of underwater irradiance of 8154 squid jigging vessels with different fish aggregation lamps

## 4.2 不同鱿钓渔船集鱼灯的合理配置

在我国国内，除了 8154 型鱿钓渔船有使用 1kW 型的集鱼灯外，基本上都是使用 2kW 型的集鱼灯。由前面的分析可知，2kW 型集鱼灯在不同船长的鱿钓船上的配置相对是最好的。为此，本文将对不同船长的鱿钓渔船如何合理配置 2kW 型集鱼灯进行具体的分析和研究，并对目前各类鱿钓渔船集鱼灯的配置情况作出评价。

### 4.2.1 灯光总功率的合理配置

各种不同船长鱿钓渔船的集鱼灯布置参数见表 4-1。现假设其它参数不变，当各船的集鱼灯总功率变化时，研究灯光总功率变化与最大有效诱集范围的关系。

由表 4-1 的参数，使用“叠加法”程序，求得集鱼灯总功率变化时所对应的最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  和适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$ ，计算结果见附表 1-4。

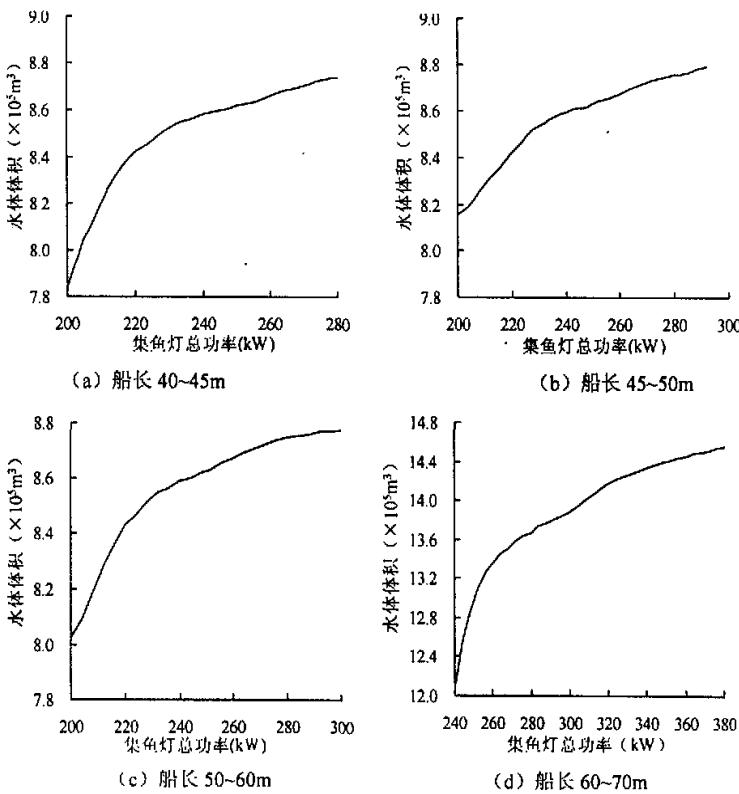


图 4-4 不同集鱼灯总功率时的  $V_{0.01}$   
Fig.4-4 The value of  $V_{0.01}$  with different out power of fishing lamps

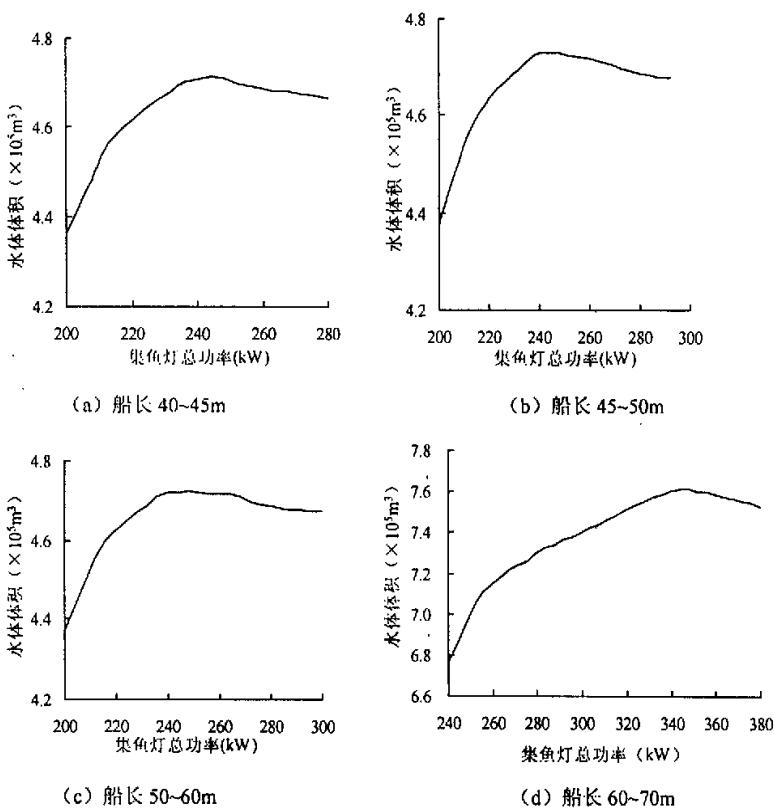


图 4-5 不同集鱼灯总功率时的  $V_{0.1-10}$   
Fig.4-5 The value of  $V_{0.1-10}$  with different out power of fishing lamps

根据计算结果（附表 1-4），得到集鱼灯总功率变化时，所对应的最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  和适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  的变化曲线，分别见图 4-4 和图 4-5。

从图 4-4 (a) 可以看出，随着集鱼灯总功率从 200kW 增加到 280kW，最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  也不断增大，其中，集鱼灯总功率从 200kW 到 220kW 变化时， $V_{0.01}$  增加很快，而当集鱼灯总功率从 220kW 到 280kW 变化时， $V_{0.01}$  随功率变化的增加速度逐渐减慢。从图 4-5 (a) 可以看出，随着集鱼灯总功率从 200kW 增加到 280kW，适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  先是逐渐上升，并在 230~250kW 附近达到最大值，然后随功率的增加而缓慢下降。考虑到鱿钓渔船集鱼灯的布置，应使最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  和适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  都比较大，故对于船长 40~45m 的鱿钓船，其集鱼灯总功率可在 230~250kW 之间选择。目前该类鱿钓渔船的集鱼灯总功率一般为 240kW，因此其总功率配置是比较合适的。

从图 4-4 (b) 可以看出, 随着集鱼灯总功率从 200kW 增加到 292kW, 最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  也不断增大, 其中, 集鱼灯总功率从 200kW 到 240kW 变化时,  $V_{0.01}$  增加很快, 而当集鱼灯总功率从 240kW 到 280kW 变化时,  $V_{0.01}$  随功率变化的增加速度逐渐减慢。从图 4-5(b)可以看出, 随着集鱼灯总功率从 200kW 增加到 280kW, 适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  先是逐渐上升, 并在 240~260kW 附近达到最大值, 然后随功率的增加而缓慢下降。考虑到鱿钓渔船集鱼灯的布置, 应使最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  和适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  都比较大, 故对于船长 45~50m 的鱿钓船, 其集鱼灯总功率可在 240~260kW 之间选择。目前该类鱿钓渔船的集鱼灯总功率一般为 260kW, 因此其总功率基本合适, 但可考虑适当降低些。

从图 4-4 (c) 可以看出, 随着集鱼灯总功率从 200kW 增加到 300kW, 最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  也不断增大, 其中, 集鱼灯总功率从 200kW 到 230kW 变化时,  $V_{0.01}$  增加很快, 而当集鱼灯总功率从 230kW 到 280kW 变化时,  $V_{0.01}$  随功率变化的增加速度逐渐减慢。从图 4-5(c)可以看出, 随着集鱼灯总功率从 200kW 增加到 300kW, 适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  先是逐渐上升, 并在 240~270kW 附近达到最大值, 然后随功率的增加而缓慢下降。考虑到鱿钓渔船集鱼灯的布置, 应使最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  和适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  都比较大, 故对于船长 40~45m 的鱿钓船, 其集鱼灯总功率可在 240~270kW 之间选择。目前该类鱿钓渔船的集鱼灯总功率一般为 280kW, 其总功率偏大, 应适当降低总功率。

从图 4-4 (d) 可以看出, 随着集鱼灯总功率从 240kW 增加到 380kW, 最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  也不断增大, 其中, 集鱼灯总功率从 240kW 到 260kW 变化时,  $V_{0.01}$  增加很快, 而当集鱼灯总功率从 260kW 到 380kW 变化时,  $V_{0.01}$  随功率变化的增加速度减慢。从图 4-5 (d) 可以看出, 随着集鱼灯总功率从 240kW 增加到 380kW, 适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  先是逐渐上升, 并在 330~350kW 附近达到最大值, 然后随功率的增加而缓慢下降。考虑到鱿钓渔船集鱼灯的布置, 应使最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  和适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  都比较大, 故对于船长 60~70m 的鱿钓船, 其集鱼灯总功率可在 330~350kW 之间选择。目前该类鱿钓渔船的集鱼灯总功率一般为 360kW, 其总功率偏大, 应适当降低总功率。

#### 4.2.2 集鱼灯灯距的合理设置

根据表 4-1 的集鱼灯布置数据, 现假设其它参数不变, 当集鱼灯灯距变化时, 研究集鱼灯灯距变化与最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  和适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  的关系。计算结果参见附表 5-8。

根据附表 5-8 的计算结果, 得到集鱼灯灯距变化时, 所对应的最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  和适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  的变化曲线, 见图 4-6 和图 4-7。

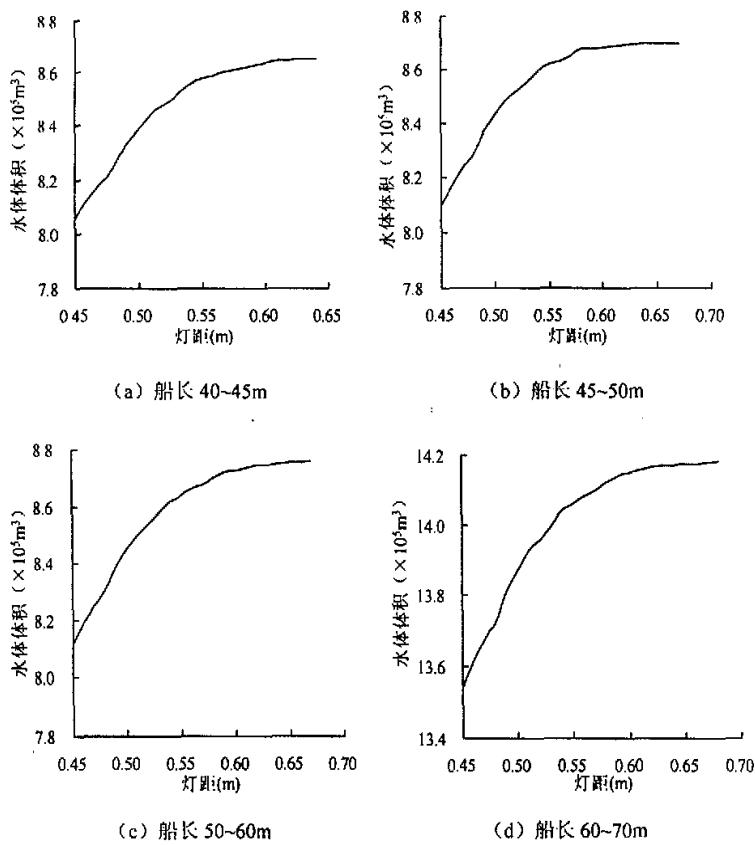
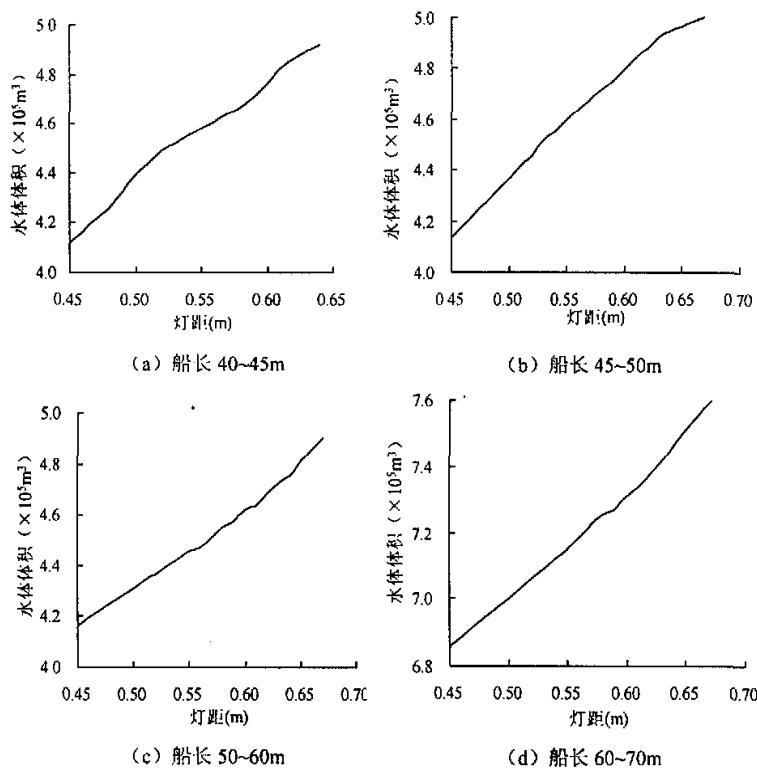


图 4-6 集鱼灯灯距变化时所对应的  $V_{0.01}$

Fig.4-6 The value of  $V_{0.01}$  with different space between of fishing lamps

图 4-7 集鱼灯灯距变化时所对应的  $V_{0.1-10}$ Fig.4-7 The value of  $V_{0.1-10}$  with different space between of fishing lamps

从图 4-6 (a) 可以看出，随着集鱼灯灯距从 0.45m 增加到 0.64m 时，最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  也不断增大。特别是当集鱼灯灯距从 0.45m 到 0.55m 变化时， $V_{0.01}$  增加很快，而当集鱼灯灯距从 0.55m 到 0.64m 变化时， $V_{0.01}$  随功率变化的增加速度逐渐减慢。从图 4-7 (a) 可以看出，随着集鱼灯灯距从 0.45m 到 0.64m 变化时，适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  基本上是呈线性逐渐上升。考虑到鱿钓渔船集鱼灯的布置，应使最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  和适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  都比较大，因此鱿钓渔船集鱼灯的灯距可选择大一些。对于船长 40~45m 的鱿钓船（总功率 240kW），其集鱼灯灯距可在 0.6~0.64m 之间选择。目前该类鱿钓渔船集鱼灯的灯距一般为 0.55m，因此可增大集鱼灯灯距。

从图 4-6 (b) 可以看出，随着集鱼灯灯距从 0.45m 增加到 0.67m 时，最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  也不断增大。特别是当集鱼灯灯距从 0.45m 到 0.57m 变化时， $V_{0.01}$  增加很快，而当集鱼灯灯距从 0.58m 到 0.64m 变化时， $V_{0.01}$  随功率变化的增

加速度逐渐减慢。从图 4-7 (b) 可以看出, 随着集鱼灯灯距从 0.45m 到 0.64m 变化时, 适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  基本上是呈线性逐渐上升; 而集鱼灯灯距从 0.64m 到 0.67m 变化时, 适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  的增加速度逐渐减慢。考虑到鱿钓渔船集鱼灯的布置, 应使最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  和适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  都比较大, 因此对于船长 45~50m 的鱿钓船 (总功率 260kW), 其集鱼灯灯距可在 0.58~0.67m 之间选择。目前该类鱿钓渔船集鱼灯的灯距一般为 0.58m, 因此其集鱼灯灯距基本合适, 但可考虑适当增大。

从图 4-6 (c) 可以看出, 随着集鱼灯灯距从 0.45m 增加到 0.67m 时, 最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  也不断增大。特别是当集鱼灯灯距从 0.45m 到 0.60m 变化时,  $V_{0.01}$  增加很快, 而当集鱼灯灯距从 0.61m 到 0.67m 变化时,  $V_{0.01}$  随功率变化的增加速度逐渐减慢。从图 4-7 (c) 可以看出, 随着集鱼灯灯距从 0.45m 到 0.67m 变化时, 适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  基本上是呈线性逐渐上升。考虑到鱿钓渔船集鱼灯的布置, 应使最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  和适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  都比较大, 因此鱿钓渔船集鱼灯的灯距可选择大一些。对于船长 50~60m 的鱿钓船 (总功率 280kW), 其灯距可在 0.61~0.67m 之间选择。目前该类鱿钓渔船的集鱼灯的灯距一般为 0.62m, 其集鱼灯灯距基本合适。

从图 4-6 (d) 可以看出, 随着集鱼灯灯距从 0.45m 增加到 0.68m 时, 最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  也不断增大。特别是当集鱼灯灯距从 0.45m 到 0.57m 变化时,  $V_{0.01}$  增加很快, 而当集鱼灯灯距从 0.58m 到 0.68m 变化时,  $V_{0.01}$  随功率变化的增加速度逐渐减慢。从图 4-7 (d) 可以看出, 随着集鱼灯灯距从 0.45m 到 0.68m 变化时, 适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  基本上是呈线性逐渐上升。考虑到鱿钓渔船集鱼灯的布置, 应使最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  和适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  都比较大, 因此鱿钓渔船集鱼灯的灯距可选择大一些。对于船长 60~70m 的鱿钓船 (总功率 360kW), 其集鱼灯灯距可在 0.58~0.68m 之间选择。目前该类鱿钓渔船的集鱼灯的灯距一般为 0.65m, 其集鱼灯灯距基本合适。

#### 4. 2. 3 集鱼灯灯高的合理设置

根据表 4-1 的数据, 现假设其它参数不变, 当集鱼灯灯高变化时, 研究集鱼

灯高变化与最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  和适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  的关系。计算结果见附表 9-12。

根据附表 9-12 的计算结果, 得到集鱼灯灯高变化时, 所对应的最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  和适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  的变化曲线, 见图 4-8 和图 4-9。

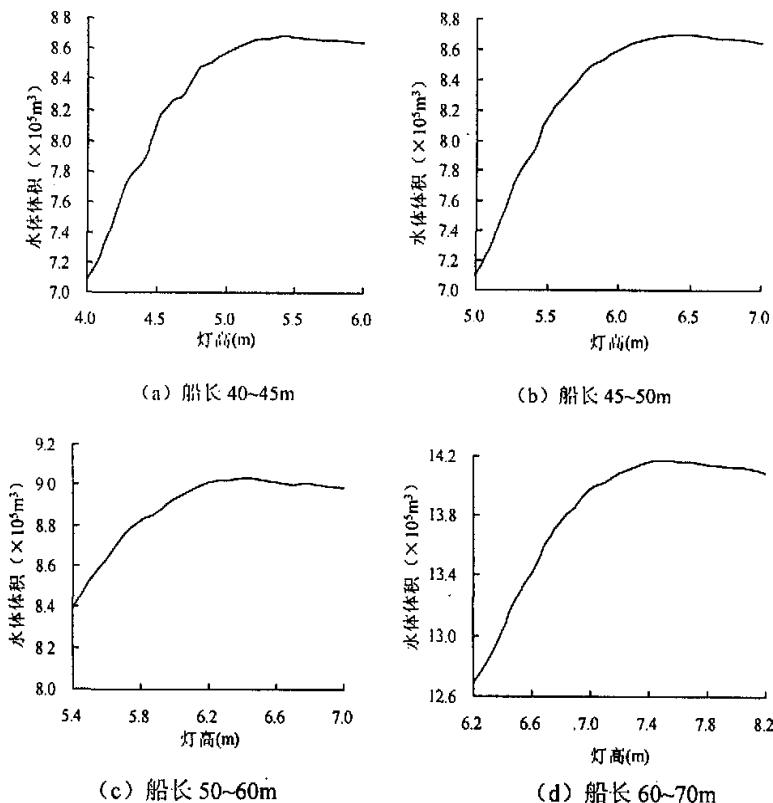


图 4-8 集鱼灯灯高变化时所对应的  $V_{0.01}$

Fig.4-8 The value of  $V_{0.01}$  with different height of fishing lamps

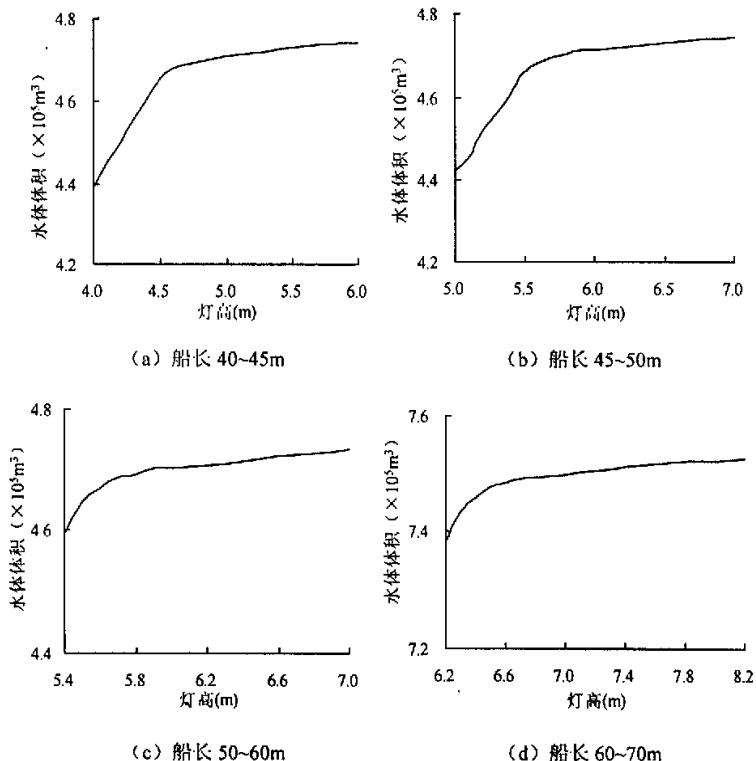


图 4-9 集鱼灯灯高变化时所对应的  $V_{0.1-10}$

Fig.4-9 The value of  $V_{0.1-10}$  with different height of fishing lamps

从图 4-8 (a) 可以看出, 随着集鱼灯灯高从 4.0m 增加到 6.0m 时, 最大有效诱集水体体积先是不断增大, 并在 5.0~5.5m 附近达到最大值, 随后  $V_{0.01}$  随灯高的增加而有所减小。从图 4-9 (a) 可以看出, 随着集鱼灯灯高从 4.0m 增加到 6.0m 时, 适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  总体上是逐渐上升。特别是当灯高从 4.0~4.7m 增加时, 适宜照度水体体积增加很快, 而当灯高增加到 4.7m 以后, 适宜照度水体体积增加的幅度很小。考虑到鱿钓渔船集鱼灯的布置, 应使最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  和适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  都比较大, 因此, 对于船长 40~45m 的鱿钓船(总功率 240kW), 其集鱼灯灯高可在 5.0~5.5m 之间选择。目前该类鱿钓渔船的集鱼灯的灯高一般为 5.0m, 其集鱼灯灯高基本合适, 但可考虑适当增大些。

从图 4-8 (b) 可以看出, 随着集鱼灯灯高从 5.0m 增加到 7.0m 时, 最大有效诱集水体体积先是不断增大, 并在 6.2~6.5m 附近达到最大值, 随后  $V_{0.01}$  随灯高

的增加而有所减小。从图 4-9 (b) 可以看出，随着集鱼灯灯高从 5.0m 增加到 7.0m 时，适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  总体上是逐渐上升。特别是当灯高从 5.0~5.7m 增加时，适宜照度水体体积增加很快，而当灯高增加到 5.7m 以后，适宜照度水体体积增加的幅度很小。考虑到鱿钓渔船集鱼灯的布置，应使最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  和适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  都比较大，因此，对于船长 45~50m 的鱿钓船（总功率 260kW），其集鱼灯灯高可在 6.2~6.5m 之间选择。目前该类鱿钓渔船的集鱼灯的灯高一般为 6.2m，其集鱼灯灯高基本合适，但可考虑适当增大些。

从图 4-8 (c) 可以看出，随着集鱼灯灯高从 5.4m 增加到 7.0m 时，最大有效诱集水体体积先是不断增大，并在 6.2~6.6m 附近达到最大值，随后  $V_{0.01}$  随灯高的增加而有所减小。从图 4-9 (c) 可以看出，随着集鱼灯灯高从 5.4m 增加到 7.0m 时，适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  总体上是逐渐上升。特别是当灯高从 5.4~5.8m 增加时，适宜照度水体体积增加很快，而当灯高增加到 5.8m 以后，适宜照度水体体积增加的幅度很小。考虑到鱿钓渔船集鱼灯的布置，应使最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  和适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  都比较大，因此，对于船长 50~60m 的鱿钓船（总功率 280kW），其集鱼灯灯高可在 6.2~6.6m 之间选择。目前该类鱿钓渔船的集鱼灯的灯高一般为 5.7m，其集鱼灯灯高应适当增大。

从图 4-8 (d) 可以看出，随着集鱼灯灯高从 6.2m 增加到 8.2m 时，最大有效诱集水体体积基本上呈线性增大。从图 4-9 (d) 可以看出，随着集鱼灯灯高从 6.2m 增加到 8.2m 时，适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  总体上是逐渐上升。特别是当灯高从 6.2~6.8m 增加时，适宜照度水体体积增加很快，而当灯高增加到 6.9m 以后，适宜照度水体体积增加的幅度很小。考虑到鱿钓渔船集鱼灯的布置，应使最大有效诱集水体体积  $V_{0.01}$  和适宜照度水体体积  $V_{0.1-10}$  都比较大，因此，对于船长 60~70m 的鱿钓船（总功率 360kW），其集鱼灯灯高可在 6.9~8.2m 之间选择。目前该类鱿钓渔船的集鱼灯的灯高一般为 7.5m，其集鱼灯灯高基本合适。

综上所述，对各不同船长鱿钓渔船的集鱼灯配置可以得到如下结论（参见表 4-9）：

对于船长 40~45m 的鱿钓船，其集鱼灯总功率可设置在 230~250kW 之间，目前该类鱿钓渔船的集鱼灯总功率一般为 240kW，其总功率配置是比较合适的；对

于 240kW 配置的鱿钓船，集鱼灯灯距一般可选择 0.6~0.64m，目前的集鱼灯灯距一般为 0.55m，因此可增大集鱼灯灯距；集鱼灯灯高可在 5.0~5.5m 之间选择，目前的集鱼灯灯高一般为 5.0m，集鱼灯灯高基本合适，但可考虑适当增大。

对于船长 45~50m 的鱿钓船，其集鱼灯总功率可设置在 240~260kW 之间，目前该类鱿钓渔船的集鱼灯总功率一般为 260kW，因此其总功率可考虑适当降低些；对于 260kW 配置的鱿钓船，集鱼灯灯距一般可选择 0.58~0.67m，目前的集鱼灯灯距一般为 0.58m，其灯距基本合适，但可考虑适当增大；集鱼灯灯高可在 5.8~6.2m 之间选择，目前集鱼灯的灯高一般为 6.2m，其集鱼灯灯高基本合适。

对于船长 50~60m 的鱿钓船，其集鱼灯总功率可设置在 240~270kW 之间，目前该类鱿钓渔船的集鱼灯总功率一般为 280kW，其总功率偏大，应适当降低总功率；对于 280kW 配置的鱿钓船，集鱼灯灯距一般可选择 0.61~0.67m，目前集鱼灯的灯距一般为 0.62m，其集鱼灯灯距基本合适；集鱼灯灯高可在 6.2~6.6m 之间选择，目前集鱼灯的灯高一般为 5.7m，其集鱼灯灯高还可适当增大。

对于船长 60~70m 的鱿钓船，其集鱼灯总功率可设置在 330~350kW 之间，目前该类鱿钓渔船的集鱼灯总功率一般为 360kW，其总功率偏大，应适当降低总功率；对于 360kW 配置的鱿钓船，集鱼灯灯距一般可选择 0.58~0.68m；目前集鱼灯的灯距一般为 0.65m，其集鱼灯灯距基本合适；集鱼灯灯高可在 6.9~8.2m 之间选择，目前集鱼灯的灯高一般为 7.5m，其集鱼灯灯高基本合适。

表 4-9 鱿钓集鱼灯配置情况

Tab.4-9 The allocation of fish attracting lamps on the squid jigging vessel

	船长	40~45m	45~50m	50~60m	60~70m
集鱼灯总功率	合适总功率	230~250	240~260	240~270	330~350
	目前总功率	240	260	280	360
	评价	合适	合适	偏高	偏高
集鱼灯间距	合适灯间距	0.6~0.64	0.58~0.67	0.61~0.67	0.58~0.68
	目前灯间距	0.55	0.58	0.62	0.65
	评价	偏高	合适	合适	合适
集鱼灯灯高	合适灯高	5.0~5.5	5.8~6.2	6.2~6.6	6.9~8.2
	目前灯高	5.0	6.2	5.7	7.5
	评价	合适	合适	偏低	合适

### 4.3 8154 型鱿钓渔船集鱼灯总功率的合理配置

目前，我国的 8154 型鱿钓渔船主要在北太平洋海域作业，且大部分该类渔船都配置 1kW 型的集鱼灯。根据舟山海洋渔业公司 8154 型鱿钓渔船的实际调查资料，得到目前集鱼灯及相应设备配置的一般情况（表 4-10），以及鱿钓渔船 2001~2003 年的生产情况（表 4-11）。

表 4-10 8154 型鱿钓渔船集鱼灯及相应设备情况  
Tab.4-10 Fishing lamp and the equipment of 8154 squid jiggling vessel

设备	数量	单价(元)	使用寿命(年)
1kW 集鱼灯	120	600	2
安定器	60	800	4
灯座	120	120	2

表 4-11 8154 型鱿钓渔船及其生产情况  
Tab.4-11 The 8154 squid jiggling vessel and the products

船名	船长 (m)	船宽 (m)	作业 日次	集鱼灯功率 (kW)	年总产量 (t)	平均日产量 (t)
舟渔 648	43.5	7.6	170	120	217.5	1.3
舟渔 643	43.5	7.6	180	120	307.5	1.6
舟渔 647	43.5	7.6	182	120	226.5	1.2
舟渔 695	43.5	7.6	176	120	241.0	1.3
舟渔 659	43.5	7.6	190	120	274.5	1.4
舟渔 675	43.5	7.6	193	120	279.0	1.4
舟渔 692	43.5	7.6	194	120	272.5	1.4
舟渔 687	43.5	7.6	188	120	310.0	1.6
平均	43.5	7.6	184	120	266.1	1.4

注：表中数据为 2001~2003 年平均值；单个集鱼灯功率为 1kW。

根据表 4-11 的数据，集鱼灯功率每增加 2kW（考虑到每 1 台安定器连接 2 盏 1kW 集鱼灯），所需的经费 P 主要由三部分组成：集鱼灯(每 1 盏价格  $P_1$ ，共 2 盏)、集鱼灯安定器(每 1 台价格  $P_2$ )和灯座等(每 1 个价格  $P_3$ ，共 2 个)。即：

$$P_0=2\times P_1+P_2+2\times P_3=2\times 600+800+2\times 120=2240 \text{ (元)}$$

假定集鱼灯及其设备可使用两个航次（每年 1 个航次），则每 2kW 集鱼灯每年的平均投资为  $P_1=P_0/2=1120$  元。

另外，由于集鱼灯所需的电力是由燃油发电而供应的，所以在考虑增加集鱼灯功率的同时，还要考虑到所增加的燃油消耗费用。假定每增加 1kW 的集鱼灯，8154 型鱿钓渔船柴油机的输出功率相应增加 1kW，以燃油消耗率 0.211Kg/kW.h 计算<sup>[167]</sup>，每 2kW 集鱼灯每天（以作业时间 10h 计算）的燃油消耗 C 为：  
 $C=0.211\times10\times2=4.22$  (Kg)。

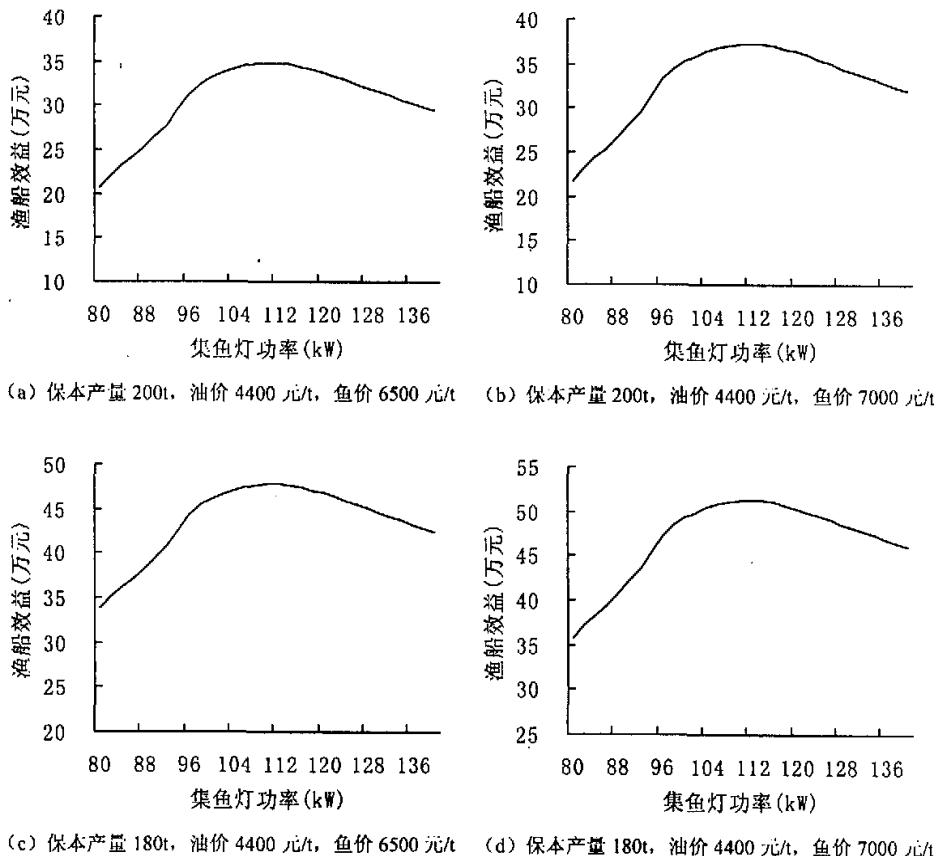
表 4-12 不同集鱼灯总功率时的年生产效益

Tab.4-12 Net yearly production value in different total out power of fishing lamps

总功率(kW)	水体体积 $V_{0.01}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	产量 (t)	保本产量 (t)	鱼价 (元/t)	总效益 ( $\times 10^4$ 元)
80	5.94	218.2	200	6500	20.8
82	6.02	221.0	200	6500	22.1
84	6.08	223.3	200	6500	23.2
86	6.14	225.5	200	6500	24.2
88	6.21	228.1	200	6500	25.4
90	6.28	230.6	200	6500	26.6
92	6.35	233.1	200	6500	27.8
94	6.44	236.4	200	6500	29.4
96	6.53	239.9	200	6500	31.3
98	6.60	242.4	200	6500	32.5
100	6.65	244.2	200	6500	33.2
102	6.69	245.7	200	6500	33.7
104	6.73	247.0	200	6500	34.1
106	6.76	248.2	200	6500	34.5
108	6.79	249.2	200	6500	34.7
110	6.81	250.1	200	6500	34.8
112	6.83	250.8	200	6500	34.8
114	6.84	251.3	200	6500	34.7
116	6.85	251.6	200	6500	34.4
118	6.86	251.8	200	6500	34.1
120	6.86	252.0	200	6500	33.8
122	6.86	252.1	200	6500	33.4
124	6.87	252.2	200	6500	33.0
126	6.86	252.0	200	6500	32.5
128	6.86	252.0	200	6500	32.0
130	6.86	252.0	200	6500	31.6
132	6.86	252.0	200	6500	31.2
134	6.86	252.1	200	6500	30.7
136	6.86	252.1	200	6500	30.3
138	6.86	252.1	200	6500	29.8
140	6.87	252.1	200	6500	29.4

根据目前的石油平均售价 4400 元/t 计算, 平均每 2kW 集鱼灯每年 (以实际作业 180d 计算) 耗油费用  $P_2$  为:  $P_2=4400\div1000\times4.22\times180=3342.24$  (元)。于是, 集鱼灯功率每增加 2kW 每年的总费用  $P_3$  为:  $P_3=P_1+P_2=4462.24$  (元)。

由上述分析, 可计算得到不同集鱼灯总功率时的年生产效益 (见表 4-12)。根据表 4-12, 可以绘制得到年生产效益与集鱼灯总功率的关系曲线, 见图 4-10(a)。同理, 还可以得到不同情况下 (不同鱿鱼价格、不同保底成本、不同石油价格) 的年生产效益与集鱼灯总功率的关系图, 见图 4-10。



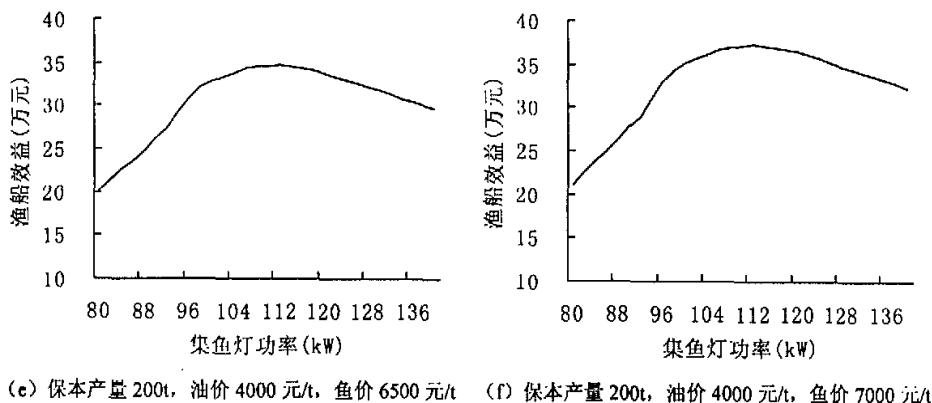


图 4-10 集鱼灯总功率与年生产效益的关系

Fig. 4-10 The relationship between total out power of fishing lamps and the net yearly product value

根据目前鱿钓生产的实际情况,由图可知4-10(a),当集鱼灯总功率在由80kW增加到100kW左右时,年生产效益增加很快;当集鱼灯总功率在106~116kW时,8154型鱿钓渔船的年生产效益较高,当集鱼灯总功率为112kW时,年生产效益最高;当集鱼灯功率在112kW以上继续增加时,年生产效益开始下降。因此,8154型鱿钓渔船的集鱼灯功率在现有的120kW基础上应有所下降,集鱼灯总功率不宜再增加。

由上一节析可知,当8154型鱿钓渔船集鱼灯的总功率为112kW时,使用2kW型的集鱼灯要比使用1kW型集鱼灯时的诱集水体体积大。故可假定在112kW时,使用56盏2kW型的集鱼灯(集鱼灯单价以1000元计算)来替代112盏1kW型的集鱼灯(集鱼灯单价以600元计算)进行生产,假定安定器和灯座的价格不变,则使用2kW型的集鱼灯在设备投资上每年可节省经费2万元左右。

## 4.4 鲅钓渔船合理作业间距的研究

随着鲅钓渔船集鱼灯总功率的不断增大，在相对拥挤的鲅钓渔场，渔船之间的灯光干扰也更加明显，不仅影响了鲅钓作业的效果，同时还造成了集鱼灯总功率一再盲目增加的不良趋向。为使集鱼灯灯光得到更有效的利用，减免不必要的能源损耗，有必要对鲅钓渔船的最小许可作业间距进行探讨。本节将根据集鱼灯灯光在海面照度分布情况，结合头足类视觉对光的适应性以及渔船抛海锚等作业因素，对鲅钓渔船的最小许可作业间距进行分析和研究。

### 4.4.1 合适照度间距

鲅钓作业时，背景光特别是月光对鲅钓产量的影响是十分明显的，研究表明夜间海面的照度在满月时约  $0.2\text{lx}$ ，月牙天时为  $0.01\text{lx}$  左右<sup>[123]</sup>，为此，在探讨鲅钓渔船不产生灯光干扰的合适间距时，可以将  $0.2\text{lx}$  或  $0.01\text{lx}$  作为背景照度来进行探讨<sup>[91]</sup>。此外，由于头足类的适宜照度在  $0.1\text{lx} \sim 10\text{lx}$  之间，并能感受  $0.01\text{lx}$  的弱光<sup>[78, 107-108]</sup>，因而当背景照度为  $0.01\text{lx}$  时就已经干扰了鲅钓渔船之间的诱集作业，故研究中可使用  $0.01\text{lx}$  作为背景照度指标来进行分析。

为求得鲅钓渔船灯光不相互干扰的最小间距  $L_s$ （以下称合适照度间距，m），需先求得不同总功率时海面某一照度（考虑到两船灯光在海面的相互叠加，研究中取该照度值为  $0.005\text{lx}$ ）离船的最大距离。一般地，船中部位水平方向的照度要大一些，故选取船中  $FF'$  方向（参见图 4-11）为该照度离船最大距离的计算方向。

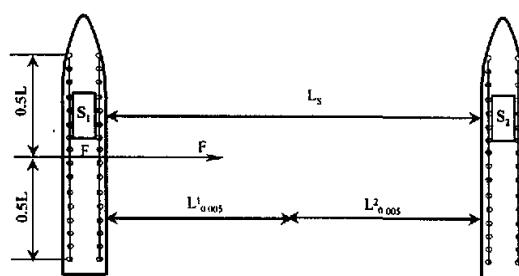


图 4-11 鲅钓渔船合适照度间距示意图

Fig.4-11 The nearest illuminate distance between two squid jigging vessel

当船上集鱼灯总功率变化时, 计算  $FF'$  方向上海面照度为 0.005lx 处与船的距离, 对于船  $S_1$  该距离以  $L_{S1}$  (m) 表示, 对于船  $S_2$  该距离以  $L_{S2}$  (m) 表示, 则两船的合适照度间距:

$$L_S = L_{S1} + L_{S2} \quad (1)$$

### (1) 船长 40~45m 鲬钓渔船合适照度间距

使用所编的程序, 可以获得船长 40~45m 鲬钓渔船集鱼灯总功率为 20~280kW 时, 照度值分别为 0.005lx、0.01lx 的位置与船的最远距离  $L_{0.005}$  和  $L_{0.01}$ 。有关参数及计算结果见表 4-13 (计算中, 取海水衰减系数  $\mu = 0.1$ , 下同)。

表 4-13 船长 40~45m 鲬钓渔船不同总功率时的最远距离  $L_{0.005}$  和  $L_{0.01}$

Tab.4-13 The maximum distance of 0.005lx and 0.01lx to the squid jigging vessel in different total out power

总灯数 (盏)	总功率 (kW)	集鱼灯间距 (m)	$L_{0.005}$ (m)	$L_{0.01}$ (m)
10	20	9.50	246.0	206.1
20	40	4.22	293.5	246.1
30	60	2.71	325.3	272.9
40	80	2.00	350.0	293.6
50	100	1.58	370.3	310.7
60	120	1.31	387.8	325.4
70	140	1.12	403.2	338.3
80	160	0.97	417.0	350.0
90	180	0.86	429.6	360.6
100	200	0.78	441.2	370.3
110	220	0.70	452.0	379.3
120	240	0.64	462.0	387.8
130	260	0.59	471.4	395.7
140	280	0.55	480.3	403.2

根据表 4-13 有关数据, 可得海面照度值为 0.01lx、0.005lx 各位置的距离同鲲钓渔船不同总功率时的变化曲线, 见图 4-12。

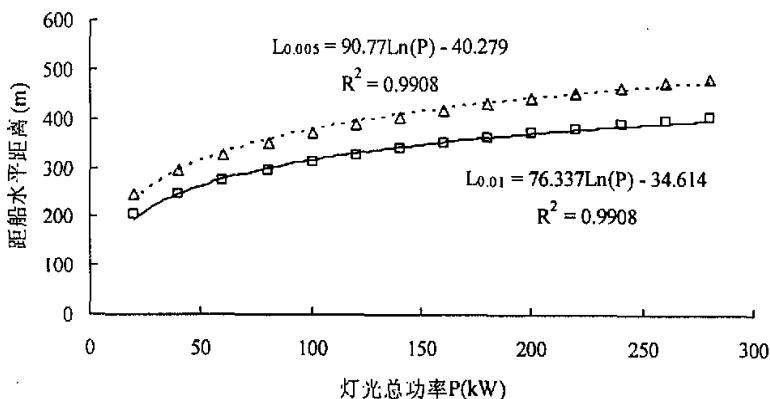


图 4-12 船长 40~45m 鱿钓渔船灯光总功率同  $L_{0.005}$  和  $L_{0.01}$  的关系

Fig.4-12 Distance from the squid jigging vessel which is 40 to 45 meters in length to the 0.005 lx and 0.01lx under-surface in relation to the different total out power

由图 4-12 可知, 船长 40~45m 鱿钓渔船灯光总功率同  $L_{0.005}$  (0.005lx 处与船距离) 的关系式为:  $L_{0.005} = 90.77 \times \ln(P) - 40.279$ ; 总功率同  $L_{0.01}$  (0.01lx 处与船距离) 的关系式为:  $L_{0.01} = 76.337 \times \ln(P) - 34.614$ 。

考虑到两船灯光在海面的相互叠加, 为使两船不相互干扰从而影响诱集鱿鱼, 因此, 集鱼灯总功率分别为  $P_1$  (kW)、 $P_2$  (kW) 的两艘渔船的合适照度间距  $L_s$  (m) 可由下式表示:

$$L_s = 90.77 \times [\ln(P_1) + \ln(P_2)] - 80.518 \quad (2)$$

由式 (2) 可得, 当两艘船 (船长 40~45m) 的集鱼灯功率均为 100 kW 时, 它们的合适照度间距应不少于 740.6m 才能不产生相互干扰; 而当两艘船的集鱼灯功率均为 200 kW 时, 其合适照度间距最低应不少于 882.4m。对于目前船长 40~45m 的鱿钓渔船的集鱼灯配备 (240kW), 其合适照度间距应不少于 924m。

## (2) 船长 45~50m 鱿钓渔船的合适照度间距

使用所编的程序, 可以获得船长 45~50m 鱿钓渔船集鱼灯当总功率分别为

20~300 kW 时, 照度值分别为 0.005lx、0.01lx 的位置与船的最远距离。有关参数及计算结果见表 4-14。

表 4-14 船长 45~50m 鲣钓渔船不同总功率时的最远距离  $L_{0.005}$  和  $L_{0.01}$ 

Tab.4-14 The maximum distance of 0.005lx and 0.01lx to the squid jigging vessel in different total out power

总灯数 (盏)	总功率 (kW)	集鱼灯间距 (m)	$L_{0.005}$ (m)	$L_{0.01}$ (m)
10	20	10.75	273.4	229
20	40	4.78	326.3	273.5
30	60	3.07	361.8	303.3
40	80	2.26	389.2	326.4
50	100	1.79	411.8	345.4
60	120	1.48	431.3	361.8
70	140	1.26	448.4	376.2
80	160	1.10	463.9	389.2
90	180	0.98	477.8	401.0
100	200	0.88	490.7	411.8
110	220	0.80	502.8	421.9
120	240	0.73	513.9	431.3
130	260	0.67	524.4	440.1
140	280	0.62	534.3	448.4
150	300	0.58	543.7	456.3

根据表 4-14 有关数据, 可得海面照度值为 0.01lx、0.005lx 各位置的距离同舢舨渔船不同总功率时的变化曲线, 见图 4-13。

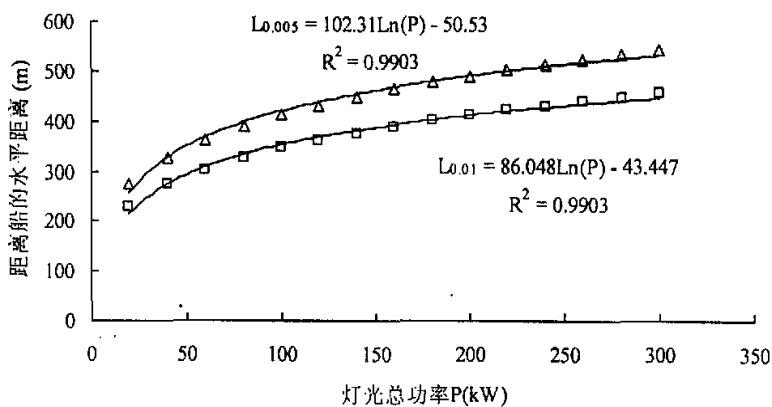
图 4-13 船长 45~50m 鲣钓渔船灯光总功率同  $L_{0.005}$  和  $L_{0.01}$  的关系

Fig.4-13 Distance from the squid jigging vessel which is 45 to 50 meters in length to the 0.005 lx and 0.01lx under-surface in relation to the different total out power

由图 4-13 可知, 船长 45~50m 鲅钓渔船灯光总功率同  $L_{0.005}$  (0.005lx 处与船距离) 的关系式为:  $L_{0.005} = 102.3 \times \ln(P) - 50.53$ 。

考虑到两船灯光在海面的相互叠加, 为使两船不相互干扰从而影响诱集鱿鱼, 因此, 集鱼灯总功率分别为  $P_1$  (kW)、 $P_2$  (kW) 的两艘渔船的合适照度间距  $L_s$  (m) 可由下式表示:

$$L_s = 102.3 \times [\ln(P_1) + \ln(P_2)] - 101.06 \quad (3)$$

由式 (3) 可得, 当两艘船 (船长 45~50m) 的集鱼灯功率均为 100 kW 时, 它们的合适照度间距应不少于 841.2m 才能不产生相互干扰; 而当两艘船的集鱼灯功率均为 200 kW 时, 其合适照度间距最低应不少于 983.0m。对于目前船长 45~50m 的鲅钓渔船的集鱼灯配备 (260 kW), 其最小的合适照度间距应不少于 1036.7m。

### (3) 船长 50~60m 鲅钓渔船的合适照度间距

使用所编的程序, 可以获得船长 50~60m 鲅钓渔船集鱼灯总功率分别为 20~300Kw 时, 照度值分别为 0.005lx、0.01lx 的位置与船的最远距离。计算结果见表 4-15。

表 4-15 船长 50~60m 鲅钓渔船不同总功率时的最远距离  $L_{0.005}$  和  $L_{0.01}$   
Tab.4-15 The maximum distance of 0.005lx and 0.01lx to the squid jigging vessel in different total out power

总灯数 (盏)	总功率 (kW)	集鱼灯间距 (m)	$L_{0.005}$ (m)	$L_{0.01}$ (m)
10	20	12.00	262.2	219.6
20	40	5.33	313	262.3
30	60	3.43	347.1	290.9
40	80	2.53	373.3	313.0
50	100	2.00	395.0	331.3
60	120	1.66	413.7	347.0
70	140	1.41	430.1	360.9
80	160	1.23	444.9	373.3
90	180	1.09	458.3	384.6
100	200	0.98	470.7	395.0
110	220	0.89	482.2	404.6
120	240	0.81	492.9	413.7
130	260	0.75	503.0	422.1
140	280	0.70	512.5	430.1
150	300	0.65	521.5	437.7

根据表 4-15 有关数据, 可得海面照度值为 0.01lx、0.005lx 各位置的距离同鱿钓渔船不同总功率时的变化曲线, 见图 4-14。

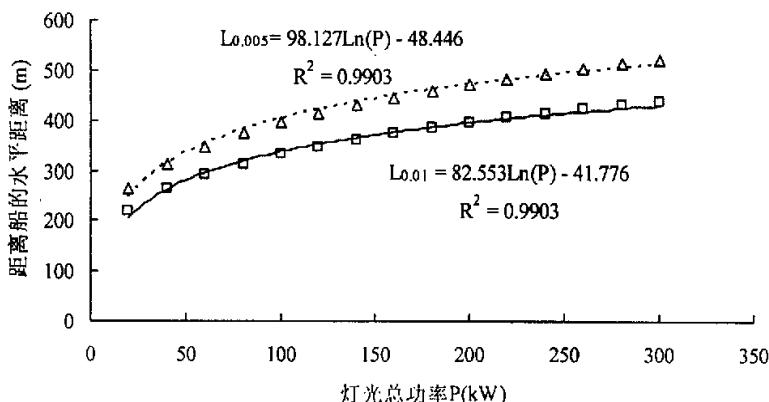


图 4-14 船长 50~60m 鱿钓渔船灯光总功率同  $L_{0.005}$  和  $L_{0.01}$  的关系

Fig.4-14 Distance from the squid jigging vessel which is 50 to 60 meters in length to the 0.005 lx and 0.01lx under-surface in relation to the different total out power

由图 4-14 可知, 船长 50~60m 鱿钓渔船灯光总功率同  $L_{0.005}$  (0.005lx 处与船距离) 的关系式为:  $L_{0.005} = 98.127 \times \ln(P) - 48.446$ 。

考虑到两船灯光在海面的相互叠加, 为使两船不相互干扰从而影响诱集鱿鱼, 因此, 集鱼灯总功率分别为  $P_1$  (kW)、 $P_2$  (kW) 的两艘渔船的合适照度间距  $L_s$  (m) 可由下式表示:

$$L_s = 98.127 \times [\ln(P_1) + \ln(P_2)] - 96.892 \quad (4)$$

由式 (4) 可得, 当两艘船 (船长 50~60m) 的集鱼灯功率均为 100 kW 时, 它们的合适照度间距应不少于 806.9m 才能不产生相互干扰; 而当两艘船的集鱼灯功率均为 200 kW 时, 其合适照度间距最低应不少于 942.9m。对于目前船长 50~60m 的鱿钓渔船的集鱼灯配备 (280 kW), 其最小的合适照度间距应不少于 1009.0m。

#### (4) 船长 60~70m 鱿钓渔船的合适照度间距

使用所编的程序, 可以获得船长 60~70m 鱿钓渔船集鱼灯总功率分别为

20~400kW 时, 照度值分别为 0.005lx、0.01lx 的位置与船的最远距离。计算结果见表 4-16。

表 4-16 船长 60~70m 鲬钓渔船不同总功率时的最远距离  $L_{0.005}$  和  $L_{0.01}$   
Tab.4-16 The maximum distance of 0.005lx and 0.01lx to the squid jiggling vessel in different total out power

总灯数 (盏)	总功率 (kW)	集鱼灯间距 (m)	$L_{0.005}$ (m)	$L_{0.01}$ (m)
10	20	15.25	299.9	250.9
20	40	6.78	358.1	300.0
30	60	4.36	397.1	332.8
40	80	3.21	427.3	358.2
50	100	2.54	452.2	379.2
60	120	2.10	473.6	397.2
70	140	1.79	492.5	413.1
80	160	1.56	509.5	427.3
90	180	1.39	524.9	440.3
100	200	1.24	539.1	452.2
110	220	1.13	552.3	463.3
120	240	1.03	564.5	473.6
130	260	0.95	576.1	483.4
140	280	0.88	587.0	492.5
150	300	0.82	597.3	501.2
160	320	0.77	607.2	509.5
170	340	0.73	616.5	517.3
180	360	0.69	625.5	524.9
190	380	0.65	634.1	532.1
200	400	0.62	642.4	539.1

根据表 4-16 有关数据, 可得海面照度值为 0.01lx、0.005lx 各位置的距离同鲅钓渔船不同总功率时的变化曲线, 见图 4-15。

由图 4-15 可知, 船长 60~70m 鲅钓渔船灯光总功率同  $L_{0.005}$  (0.005lx 处与船距离) 的关系式为:  $L_{0.005} = 118.65 \times \ln(P) - 82.747$ 。

考虑到两船灯光在海面的相互叠加, 为使两船不相互干扰从而影响诱集鲅鱼, 因此, 集鱼灯总功率分别为  $P_1$  (kW)、 $P_2$  (kW) 的两艘渔船的合适照度间距  $L_s$  (m) 可由下式表示:

$$L_s = 118.65 \times [\ln(P_1) + \ln(P_2)] - 165.494 \quad (5)$$

由式(5)可得,当两艘船(船长60~70m)的集鱼灯功率均为100kW时,它们的合适照度间距应不少于927.3m才能不产生相互干扰;而当两艘船的集鱼灯功率均为200kW时,其合适照度间距最低应不少于1091.8m。对于目前船长60~70m的鱿钓渔船的集鱼灯配备(360kW),其最小的合适照度间距应不少于1231.3m。

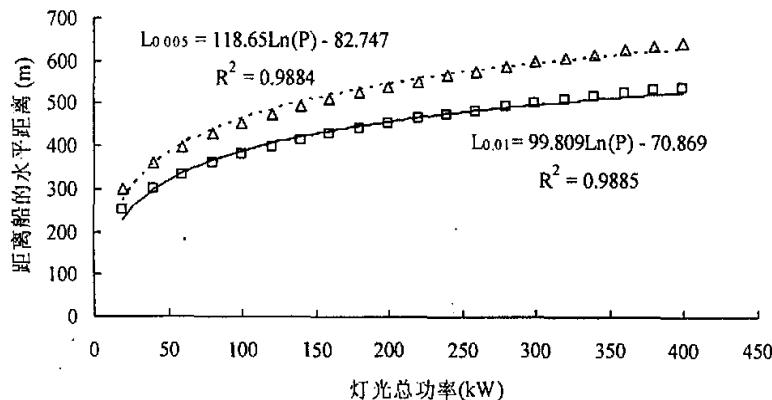


图 4-15 船长 60~70m 鱿钓渔船灯光总功率同  $L_{0.005}$  和  $L_{0.01}$  的关系

Fig.4-15 Distance from the squid jigging vessel which is 60 to 70 meters in length to the 0.005lx and 0.01lx under-surface in relation to the different total out power

### (5) 8154型鱿钓渔船的合适照度间距

使用所编的程序,可以获得8154型鱿钓渔船集鱼灯(1kW型)总功率为10~130kW时,照度值分别为0.005lx、0.01lx的位置与船的最远距离。计算结果见表4-17。

根据表4-17有关数据,可得海面照度值为0.01lx、0.005lx各位置的距离同鱿钓渔船不同总功率时的变化曲线,见图4-16。

由图4-16可知,8154型鱿钓渔船灯光总功率同  $L_{0.005}$  (0.005lx处与船距离)的关系式为:  $L_{0.005} = 74.983 \times \ln(P) + 21.496$ 。

表 4-17 8154 型鱿钓渔船不同总功率时的最远距离  $L_{0.005}$  和  $L_{0.01}$ 

Tab.4-17 The maximum distance of 0.005lx and 0.01lx to the squid jigging vessel in different total out power

总灯数 (盏)	总功率 (kW)	集鱼灯间距 (m)	$L_{0.005}$ (m)	$L_{0.01}$ (m)
10	10	9.50	205.0	171.6
20	20	4.22	244.8	205.1
30	30	2.71	271.5	227.5
40	40	2.00	292.1	244.9
50	50	1.58	309.1	259.2
60	60	1.31	323.7	271.5
70	70	1.12	336.6	282.3
80	80	0.97	348.2	292.1
90	90	0.86	358.7	300.9
100	100	0.78	368.4	309.1
110	110	0.70	377.4	316.6
120	120	0.64	385.8	323.7
130	130	0.59	393.7	330.3

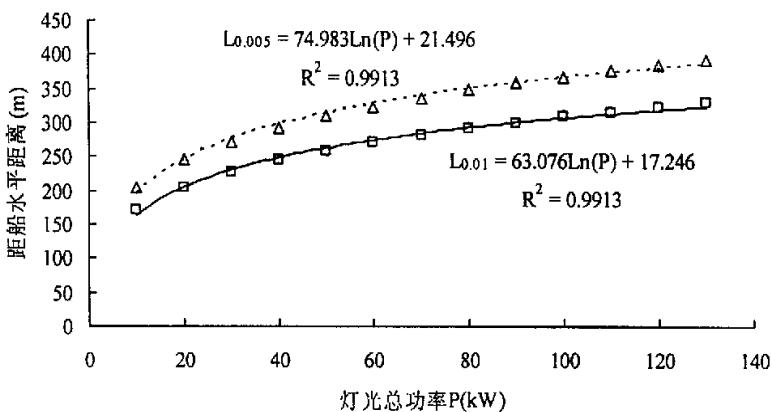
图 4-16 8154 型鱿钓渔船灯光总功率同  $L_{0.005}$  和  $L_{0.01}$  的关系

Fig.4-16 Distance from the 8154 squid jigging vessel to the 0.005 lx and 0.01lx under-surface in relation to the different total out power

考虑到两船灯光在海面的相互叠加,为使两船不相互干扰从而影响诱集鱿鱼,因此,集鱼灯总功率分别为  $P_1$  (kW)、 $P_2$  (kW) 的两艘渔船的合适照度间距  $L_s$  (m) 可由下式表示:

$$L_s = 74.983 \times [Ln(P_1) + Ln(P_2)] + 42.992 \quad (6)$$

由式(6)可得,当两艘8154鱿钓渔船的集鱼灯功率均为80kW时,它们的合适照度间距应不少于700.1m才能不产生相互干扰;而当两艘船的集鱼灯功率均为100kW时,其合适照度间距应不少于733.6m。对于目前8154鱿钓渔船的集鱼灯配备(120kW),其合适照度间距应不少于761.0m。

通过上述分析,可以得到不同鱿钓渔船在不同集鱼灯总功率时的合适照度间距的计算公式,见表4-18。通过表4-18可以计算得到不同类型鱿钓渔船的合适照度间距。

表4-18 不同鱿钓渔船合适照度间距的计算公式

Tab.4-18 The formula of interval distance between different squid jigging vessels

渔船1	渔船2	最近作业间距计算公式
船长40~45m	船长45~50m	$L_s = 90.77 \times [Ln(P_1) + Ln(P_2)] - 80.518$
船长40~45m	船长45~50m	$L_s = 90.77 \times Ln(P_1) + 102.3 \times Ln(P_2) - 90.809$
船长40~45m	船长50~60m	$L_s = 90.77 \times Ln(P_1) + 98.127 \times Ln(P_2) - 88.725$
船长40~45m	船长60~70m	$L_s = 90.77 \times Ln(P_1) + 118.65 \times Ln(P_2) - 123.026$
船长40~45m	8154鱿钓渔船	$L_s = 90.77 \times Ln(P_1) + 74.983 \times Ln(P_2) - 18.763$
船长45~50m	船长45~50m	$L_s = 102.3 \times [Ln(P_1) + Ln(P_2)] - 101.06$
船长45~50m	船长50~60m	$L_s = 102.3 \times Ln(P_1) + 98.127 \times Ln(P_2) - 98.976$
船长45~50m	船长60~70m	$L_s = 102.3 \times Ln(P_1) + 118.65 \times Ln(P_2) - 133.277$
船长45~50m	8154鱿钓渔船	$L_s = 102.3 \times Ln(P_1) + 74.983 \times Ln(P_2) - 29.034$
船长50~60m	船长50~60m	$L_s = 98.127 \times [Ln(P_1) + Ln(P_2)] - 96.892$
船长50~60m	船长60~70m	$L_s = 98.127 \times Ln(P_1) + 118.65 \times Ln(P_2) - 131.193$
船长50~60m	8154鱿钓渔船	$L_s = 98.127 \times Ln(P_1) + 74.983 \times Ln(P_2) - 26.95$
船长60~70m	船长60~70m	$L_s = 118.65 \times [Ln(P_1) + Ln(P_2)] - 165.494$
船长60~70m	8154鱿钓渔船	$L_s = 118.65 \times Ln(P_1) + 74.983 \times Ln(P_2) - 61.251$
8154鱿钓渔船	8154鱿钓渔船	$L_s = 74.983 \times [Ln(P_1) + Ln(P_2)] + 42.992$

注:表中 $P_1$ 、 $P_2$ 分别表示渔船1、渔船2的灯光总功率,kW;除8154鱿钓渔船的集鱼灯为1kW型外,其余渔船的集鱼灯为2kW型。

考虑到作业渔场中鱿钓渔船的多样性，为了使计算公式更具有普遍意义，将各鱿钓渔船总功率从 10kW 到 400kW 变化时的  $L_{0.005}$  的分布情况绘制成图 4-17。

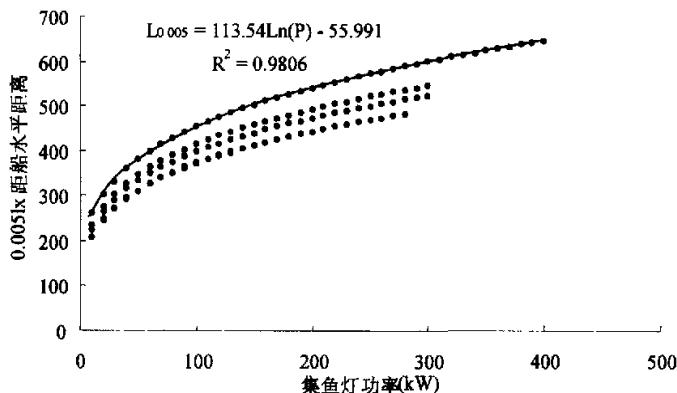


图 4-17 鱿钓渔船集鱼灯总功率同海面上 0.005lx 某处距船最远距离的关系  
Fig.4-17 Distance from squid jigging vessel to the 0.005 lx in relation to the light power

为使不同船长的鱿钓渔船均不发生集鱼灯灯光相互干扰的情况，则应取不同总功率所对应  $L_{0.005}$  (m) 的最大值，即选取图 4-17 所示数据点分布的外包络线。对该包络线数据拟合，可得到不同集鱼灯功率  $P$  (kW) 所对应  $L_{0.005}$  (m) 的变化曲线方程：

$$L_{0.005} = 113.54 \times \ln(P) - 55.991 \quad (7)$$

因此，集鱼灯功率分别为  $P_1$  (kW)、 $P_2$  (kW) 两艘渔船的合适照度间距  $L_s$  (m) 可由下式表示：

$$L_s = 113.54 \times \ln(P_1) - 55.991 + 113.54 \times \ln(P_2) - 55.991$$

整理得：

$$L_s = 113.54 \times [\ln(P_1) + \ln(P_2)] - 111.982 \quad (8)$$

考虑到渔船间距习惯上用海里 (1 n mile=1852m) 表示，因此合适照度间距  $L'_s$  (n mile) 为：

$$L'_s = 0.061 \times [\ln(P_1) + \ln(P_2)] - 0.060 \quad (9)$$

#### 4.4.2 最小许可作业间距

在鱿钓渔场实际作业中，通常出现的情况是：当鱿钓渔船 $S_1$ 于夜间光诱钓捕作业时，鱿钓渔船 $S_2$ （渔船夜间抛锚及钓捕作业时，均是开启集鱼灯的）自较远距离外驶往船 $S_1$ 附近，并进行抛锚作业（参见图 4-18a）。

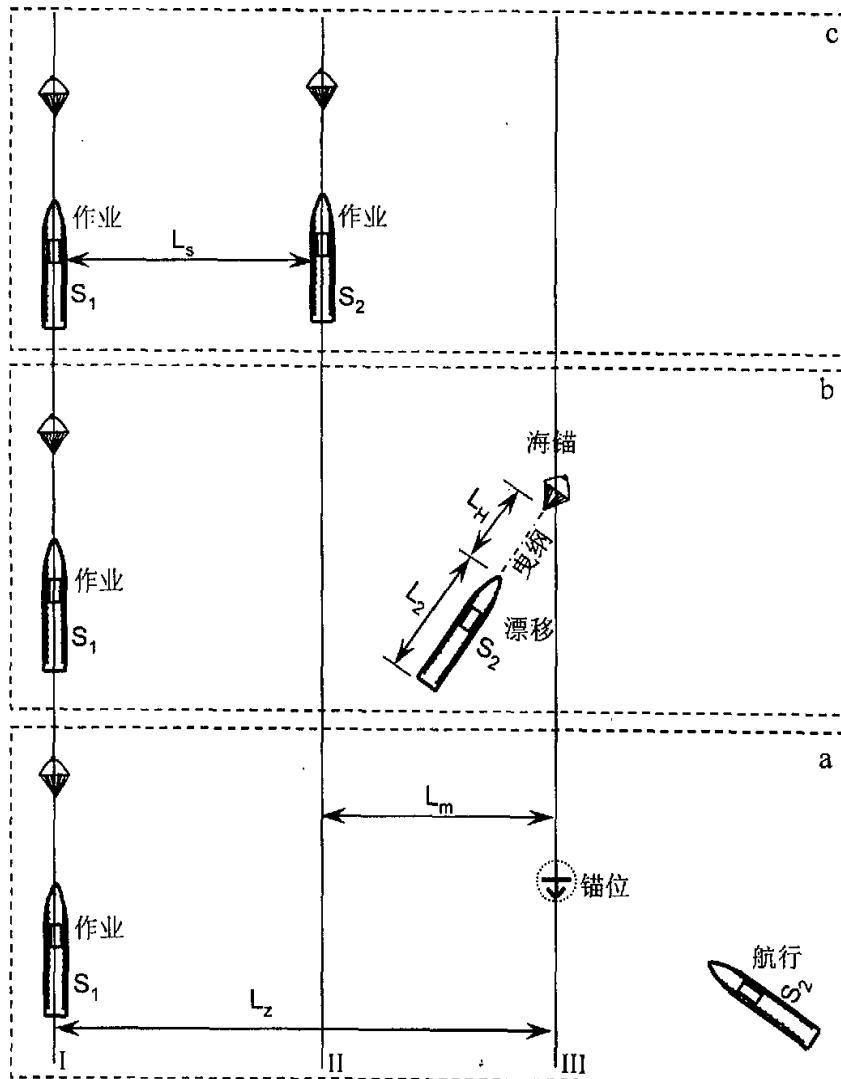


图 4-18 鱿钓渔船抛锚作业示意图  
Fig. 4-18 Anchoring operation of squid jigging vessel

由前面关于合适照度距离的分析可知，为了不影响渔船  $S_1$  的诱集和生产作业，渔船  $S_2$  在漂移的过程中至少应与渔船  $S_1$  保持一个“合适照度距离  $L_s$ ”（参见图 4-18c）。由于在抛海锚的过程中，渔船需要进行倒车、顺车等船舶操纵，且抛锚刚结束时海锚还未充分受力，使得渔船在抛锚后的一段时间内处于漂移的状态。因此，渔船  $S_2$  的抛锚位置至少应在“合适照度距离  $L_s$ ”以外水平距离大于  $L_m$  (m, 渔船最大漂移距离) 的某处（参见图 4-18b）。即渔船  $S_2$  的抛锚位置与船  $S_1$  的最小距离  $L_z$  (m, 下称最小许可作业间距) 应为：

$$L_z = L_s + L_m \quad (10)$$

渔船和海锚共同作用下的漂移是一个复杂的运动过程，为研究方便本文假定海锚在未充分受力前在原抛锚位置是静止的，那么渔船最大漂移距离  $L_m$  (m) 受到所放曳纲长度  $L_H$  (m, 一般为 150m)，以及渔船  $S_2$  自身的长度  $L_2$  (m, 一般为 40~70m) 的限制，即：

$$L_m = L_2 + L_H \quad (11)$$

由式 (8)、(10)、(11) 可得鱿钓渔船的最小许可作业间距  $L_z$  (m) 为：

$$L_z = 113.54 \times [Ln(P_1) + Ln(P_2)] - 111.982 + L_2 + L_H \quad (12)$$

式 (12) 中，假定船长  $L_2$  取最大船长为 70m，曳纲长度  $L_H$  取 150m，则可得到下式：

$$L_z = 113.54 \times [Ln(P_1) + Ln(P_2)] + 108.018 \quad (13)$$

若将距离单位以海里 (n mile) 来表示时，最小许可作业间距  $L_z$  (m) 为：

$$L_z = 0.061 \times [Ln(P_1) + Ln(P_2)] + 0.058 \quad (14)$$

根据式 (14)，可以绘制得到两艘鱿钓渔船不同集鱼灯功率情况下，所对应最小许可作业间距的等距离曲线簇，见图 4-19。

由图 4-19 可以看出，当两艘鱿钓渔船的集鱼灯功率均为 100kW 时，最小许

可作业间距为 0.62n mile 左右；当两艘鱿钓渔船的集鱼灯功率均为 240kW 时，最小许可作业间距为 0.73n mile 左右；当两艘鱿钓渔船的集鱼灯功率均为 300kW 时，最小许可作业间距为 0.75n mile 左右。

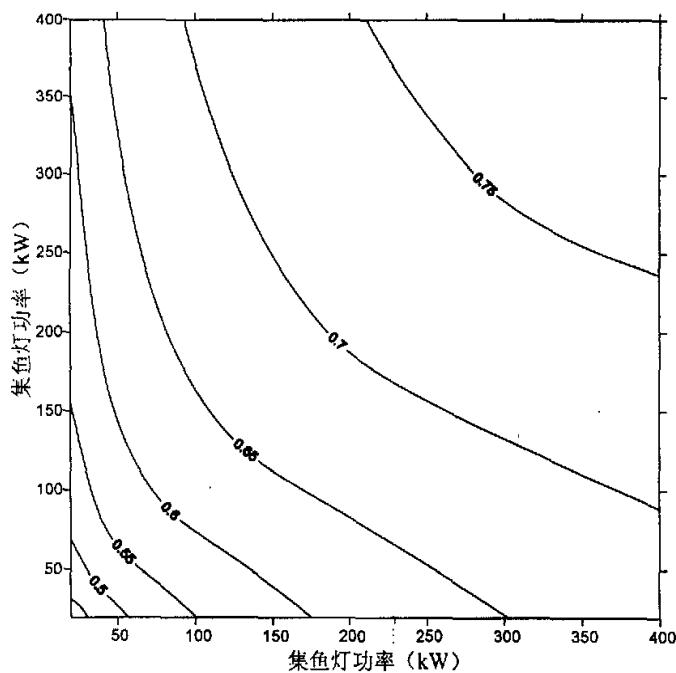


图 4-19 鱿钓渔船最小许可作业间距等距离曲线  
Fig. 4-19 Iso-distance curve according to the light output of two squid jigging vessels

## 4.5 小结

(1) 本章使用叠加法理论计算程序, 对三种不同型号的集鱼灯(2kW型、3kW型、4kW型)配置的比较研究中指出: 在相同总功率时, 不同船长的鱿钓渔船的集鱼灯配置均以2kW型配备为最佳。另外, 在相同总功率时, 使用1kW型、2kW型集鱼灯对8154型鱿钓渔船的集鱼灯配置情况进行比较分析, 指出该船配备2kW型集鱼灯较好。

(2) 对不同船长的四种鱿钓渔船的集鱼灯合理配置进行了研究, 结果表明:

对于船长40~45m的鱿钓船, 其集鱼灯总功率可设置在230~250kW之间, 目前该类鱿钓渔船的集鱼灯总功率一般为240kW, 其总功率配置是比较合适的; 对于240kW配置的鱿钓船, 集鱼灯灯距一般可选择0.6~0.64m, 目前的集鱼灯灯距一般为0.55m, 因此可增大集鱼灯灯距; 集鱼灯灯高可在5.0~5.5m之间选择, 目前的集鱼灯灯高一般为5.0m, 集鱼灯灯高基本合适, 但可考虑适当增大。

对于船长45~50m的鱿钓船, 其集鱼灯总功率可设置在240~260kW之间, 目前该类鱿钓渔船的集鱼灯总功率一般为260kW, 因此其总功率可考虑适当降低些; 对于260kW配置的鱿钓船, 集鱼灯灯距一般可选择0.58~0.67m, 目前的集鱼灯灯距一般为0.58m, 其灯距基本合适, 但可考虑适当增大; 集鱼灯灯高可在5.8~6.2m之间选择, 目前集鱼灯的灯高一般为6.2m, 其集鱼灯灯高基本合适。

对于船长50~60m的鱿钓船, 其集鱼灯总功率可设置在240~270kW之间, 目前该类鱿钓渔船的集鱼灯总功率一般为280kW, 其总功率偏大, 应适当降低总功率; 对于280kW配置的鱿钓船, 集鱼灯灯距一般可选择0.61~0.67m, 目前集鱼灯的灯距一般为0.62m, 其集鱼灯灯距基本合适; 集鱼灯灯高可在6.2~6.6m之间选择, 目前集鱼灯的灯高一般为5.7m, 其集鱼灯灯高还可适当增大。

对于船长60~70m的鱿钓船, 其集鱼灯总功率可设置在330~350kW之间, 目前该类鱿钓渔船的集鱼灯总功率一般为360kW, 其总功率偏大, 应适当降低总功率; 对于360kW配置的鱿钓船, 集鱼灯灯距一般可选择0.58~0.68m, 目前集鱼灯的灯距一般为0.65m; 其集鱼灯灯距基本合适; 集鱼灯灯高可在6.9~8.2m之间选择, 目前集鱼灯的灯高一般为7.5m, 其集鱼灯灯高基本合适。

(3) 对 8154 型鱿钓渔船的集鱼灯总功率配置进行研究发现：当集鱼灯总功率在 106~116kW 时，8154 型鱿钓渔船的年生产效益较高，当集鱼灯总功率为 112kW 时，年生产效益最高；当集鱼灯功率在 112kW 以上继续增加时，年生产效益开始下降。因此，8154 型鱿钓渔船的集鱼灯功率在现有的 120kW 基础上应有所下降，集鱼灯总功率不宜再增加。

(4) 本章提出了合适照度间距的概念，并进行了分析和研究，得到了不同船长不同集鱼灯功率时的合适照度间距计算公式（参见表 4-30）。另外，还建立了具有普遍适用意义的经验计算公式： $L_s = 0.061 \times [Ln(P_1) + Ln(P_2)] - 0.060$ ，式中： $P_1$  (kW)、 $P_2$  (kW) 为两艘渔船各自的集鱼灯功率， $L_s$  (n mile) 为合适照度间距。本章还对鱿钓渔船的最小许可作业间距作了解释，并建立了相应的计算公式： $L_z = 0.061 \times [Ln(P_1) + Ln(P_2)] + 0.058$ ，式中： $P_1$  (kW)、 $P_2$  (kW) 为两艘渔船各自的集鱼灯功率， $L_z$  (n mile) 为最小许可作业间距。

## 第5章 结论和探讨

### 5.1 主要结论

(1) 本研究以集鱼灯各向异性的配光特征为基础,结合鱿钓渔船集鱼灯布置的有关参数(如集鱼灯灯距、集鱼灯灯数、集鱼灯灯高、集鱼灯舷边距等),建立了集鱼灯灯光在水中照度分布的叠加法计算模式。

(2) 根据叠加法计算模式,开发了相关的 C++ 计算程序,使用该程序可以计算鱿钓渔船在不同集鱼灯配光特性、不同布置参数时的水下任意一点理论照度值。另外,根据某确定照度值,使用程序可搜索获得该照度的所有数据点坐标,并依此进行某等照度曲面的水体体积计算;在该基础上,本研究也建立了水体体积估算的计算程序,可计算任一等照度曲面所围水体的体积。

(3) 使用所开发的计算程序,对鱿钓渔船使用三种不同型号集鱼灯(2kW型、3kW型、4kW型)配置时的水体体积  $V_{0.01}$  和  $V_{0.1-10}$  进行了比较研究。结果表明在相同总功率时,不同船长的鱿钓渔船的集鱼灯配置均以 2kW 型配备为最佳。另对我国为数众多的 8154 型鱿钓渔船使用 1kW、2kW 型集鱼灯的配置情况进行比较分析,指出在相同总功率的情况下,2kW 型比 1kW 型的集鱼灯更适合于 8154 型鱿钓渔船。

(4) 使用所开发的计算程序,对我国不同种类鱿钓渔船的集鱼灯合理配置(主要为集鱼灯总功率、集鱼灯灯距、集鱼灯灯高)进行了分析和评价。结果表明:

对于船长 40~45m 的鱿钓船,其集鱼灯总功率可设置在 230~250kW 之间,目前该类鱿钓渔船的集鱼灯总功率一般为 240kW,其总功率配置是比较合适的;对于 240kW 配置的鱿钓船,集鱼灯灯距一般可选择 0.6~0.64m,目前的集鱼灯灯距一般为 0.55m,因此可增大集鱼灯灯距;集鱼灯灯高可在 5.0~5.5m 之间选择,目前的集鱼灯灯高一般为 5.0m,集鱼灯灯高基本合适,但可考虑适当增大。

对于船长 45~50m 的鱿钓船,其集鱼灯总功率可设置在 240~260kW 之间,目前该类鱿钓渔船的集鱼灯总功率一般为 260kW,因此其总功率可考虑适当降低

些；对于 260kW 配置的鱿钓船，集鱼灯灯距一般可选择 0.58~0.67m，目前的集鱼灯灯距一般为 0.58m，其灯距基本合适，但可考虑适当增大；集鱼灯灯高可在 5.8~6.2m 之间选择，目前集鱼灯的灯高一般为 6.2m，其集鱼灯灯高基本合适。

对于船长 50~60m 的鱿钓船，其集鱼灯总功率可设置在 240~270kW 之间，目前该类鱿钓渔船的集鱼灯总功率一般为 280kW，其总功率偏大，应适当降低总功率；对于 280kW 配置的鱿钓船，集鱼灯灯距一般可选择 0.61~0.67m，目前集鱼灯的灯距一般为 0.62m，其集鱼灯灯距基本合适；集鱼灯灯高可在 6.2~6.6m 之间选择，目前集鱼灯的灯高一般为 5.7m，其集鱼灯灯高还可适当增大。

对于船长 60~70m 的鱿钓船，其集鱼灯总功率可设置在 330~350kW 之间，目前该类鱿钓渔船的集鱼灯总功率一般为 360kW，其总功率偏大，应适当降低总功率；对于 360kW 配置的鱿钓船，集鱼灯灯距一般可选择 0.58~0.68m，目前集鱼灯的灯距一般为 0.65m，其集鱼灯灯距基本合适；集鱼灯灯高可在 6.9~8.2m 之间选择，目前集鱼灯的灯高一般为 7.5m，其集鱼灯灯高基本合适。

(5) 使用所开发的计算程序，结合 8154 型鱿钓渔船的生产统计数据和燃油消耗等因素，对 8154 型鱿钓渔船的集鱼灯总功率配置进行研究。结果表明当集鱼灯总功率在 106~116kW 时，8154 型鱿钓渔船的年生产效益较高，当集鱼灯总功率为 112kW 时，年生产效益最高；当集鱼灯功率在 112kW 以上继续增加时，年生产效益开始下降。因此，8154 型鱿钓渔船的集鱼灯功率在现有的 120kW 基础上应有所下降，集鱼灯总功率不宜再增加。

(6) 本研究在国内首次提出了合适照度间距和合适作业间的概念，并进行了理论分析和研究，得到了不同船长不同集鱼灯功率时的最近作业船间距计算公式（参见表 4-30）。由计算公式可知：对于目前船长 40~45m 的鱿钓渔船的集鱼灯配备（240kW），其合适照度间距应不少于 924m；对于目前船长 45~50m 的鱿钓渔船的集鱼灯配备（260 kW），其合适照度间距应不少于 1036.7m；对于目前船长 50~60m 的鱿钓渔船的集鱼灯配备（280 kW），其合适照度间距应不少于 1009.0m；对于目前船长 60~70m 的鱿钓渔船的集鱼灯配备（360kW），其合适照度间距应不少于 1231.3m；对于目前 8154 鱿钓渔船的集鱼灯配备（120kW），其合适照度间距应不少于 761.0m。

另外，还建立了具有普遍适用意义的合适照度间距经验计算公式：

$L_s = 0.061 \times [Ln(P_1) + Ln(P_2)] - 0.060$ ，式中： $P_1$  (kW)、 $P_2$  (kW) 为两艘渔船各自的集鱼灯功率， $L_s$  (n mile) 为合适照度间距。

文章还建立了鱿钓渔船最小许可作业间距的计算公式：

$L_z = 0.061 \times [Ln(P_1) + Ln(P_2)] + 0.058$ ，式中： $P_1$  (kW)、 $P_2$  (kW) 为两艘渔船各自的集鱼灯功率， $L_z$  (n mile) 为最小许可作业间距。

根据公式，当两艘鱿钓渔船的集鱼灯功率均为 100kW 时，最小许可作业间距为 0.62 n mile 左右；当两艘鱿钓渔船的集鱼灯功率均为 240kW 时，最小许可作业间距为 0.73 n mile 左右；当两艘鱿钓渔船的集鱼灯功率均为 300kW 时，最小许可作业间距为 0.75 n mile 左右。

## 5.2 有关探讨

(1) 头足类的视觉特性是鱿钓集鱼灯有效利用研究的一个组成部分。在本文中，尚没有对之进行更深层的分析和实验研究。故在文章的相应分析中，是以部分头足类趋光的一般适宜照度 (0.1~10lx) 和头足类对光反应的最低照度 (0.01lx) 来进行有关探讨的。在相近的研究中，郑国富曾使用 0.01lx 等照度曲线所围水体（截面积）作为对鱿鱼光诱的有效范围，以照度为 0.1~10lx 的水体（截面积）作为鱿鱼集群的范围，对作业渔场的光场变化和渔具的适应性进行了探讨；在本文中是以船侧各等照度曲线所围水体体积来进行比较和研究的。另外，崔渐珍曾使用 0.01lx 照度离船的最大距离分析了日本 19 总吨小型鱿钓渔船的最近作业间距；在本文中，考虑到两艘作业鱿钓船在水中的照度叠加等，使用 0.005lx 照度离船的最大距离，对我国各类鱿钓渔船的作业间距进行研究。头足类的视觉生理是集鱼灯灯光有效利用研究的基础之一，期以在将来的研究中能对头足类特别是大洋性头足类的视觉生理进行较为深入的研究。

(2) 本文的研究中指出了海水的光学衰减系数对集鱼灯灯光在水中的传播影响很大，衰减系数不同，集鱼灯灯光在水中的照度分布是不同的。但是鱿钓作业渔场是有其固有的海洋环境机制，通常无法有选择地寻找海水清澈的区域来进行

生产作业。因此，这种由于作业海域不同，而使得同一灯光条件下的海中照度分布不同是不可避免的。考虑到头足类趋光的适宜照度会因种类而异，故测定各主要鱿钓作业渔场的海水光学衰减系数对合理使用集鱼灯灯光是很有意义的。在本文的研究中，考虑到鱿钓渔场的水体基本上均为大洋性清澈海水（海水光学衰减系数一般为 0.1 左右），故使用海水光学衰减系数 0.1 来进行计算的，这可能会对计算结果和相关的分析造成一定的影响。

(3) 鱿钓集鱼灯其发光的特性是各向异性的，以 2kW 型鱿钓集鱼灯为例，其 0~90°方向的发光强度在 2000~19500cd 之间；当将 2kW 型鱿钓集鱼灯作为各向同性的点光源时，其各方向的发光强度为 17500cd。因此，将鱿钓集鱼灯作为点光源计算会使误差加大。

(4) 不同灯光种类的集鱼灯其光谱特性也是不同的。由于海水比较容易通过 450~495nm 的蓝绿光，在金属卤化物灯的设计中应考虑到合理使用该波段的光。尽管波长更短的光更易通过，但必须要考虑割除紫外线，以免对人体造成损伤等。另外，集鱼灯的发光效率会因为使用时间的增长而不断减低，为保证鱿钓生产的效率，因定期作一次更换。

(5) 在本文的研究中，将集鱼灯灯光在水中的照度分布情况，按照光线传播的几何定律和折射定律分别进行照度的叠加计算，理论上来说更为合理。根据“新世纪 61 号”鱿钓渔船的集鱼灯布置实际参数，使用四种不同的理论计算方法进行计算，结果表明本文所建立的叠加法相对更为正确。此外，使用本模式所计算的船侧各不同水层处的照度分布曲线形状，与日本实际测量的舷侧水中照度分布曲线在形状上比较接近。

然而，尽管研究结果基本反映了鱿钓船舷侧照度分布的一般情况，与其它照度计算方法相比，该模式在理论上也更加确切，但其假设条件同样是理想化的。如本计算模式也未考虑各光源之间的干扰，未考虑甲板高层建筑对光线传播的阻碍，也都忽略了背景光的影响，以及假定海况天气都是良好的前提条件下进行照度计算的，而实际情况和需考虑的因素（如海浪等）是十分复杂的。因此，需要作更全面的分析和研究，以便对计算方法进行更好的修正。

(6) 本文主要研究了鱿钓渔船中部舷侧方向的剖面部分,对于实际上鱿鱼聚集在船体直接下方(船体阴影部分)的照度没有进行计算。因而,有必要通过水槽试验与实际测量相结合的方法进行研究,并建立船体阴影区部分的水中照度计算模式等。另外,为了能更好地探讨海中光场环境与头足类行为的关系,应该把光作为不同波长的能力来表示,因此,建立不同波长的光在水中的照度分布的计算方法也是很有必要的。

(7) 本文关于集鱼灯合理布置的研究中,仅对集鱼灯的总功率、集鱼灯的灯距、集鱼灯的高度进行了研究。由于目前鱿钓渔船集鱼灯的舷边距一般均为1.0~1.4m之间,计算中发现,舷边距在这样一个范围内变化时,水体体积 $V_{0.01}$ 和 $V_{0.1-10}$ 在数值上的变化十分微小,故没有对集鱼灯的舷边距进行具体的分析。集鱼灯的舷边距和高度直接影响到光线在船舷边的入射角度,在具体的设置中,应考虑鱿钓渔船自身的船型特征和机钓钓线入水位置与船舷距离等因素。

(8) 鱿钓渔船集鱼灯灯光的有效利用是一个极为复杂的系统工程,除了集鱼灯的合理布置以外,还涉及到合理使用变色灯技术、水下灯技术、集鱼灯灯罩的使用、新型集鱼灯的开发等,这些都有待在以后进行更深入的研究。

### 5.3 本文的创新之处

- (1) 建立了鱿钓集鱼灯水中照度分布的叠加法计算模式。
- (2) 提出了鱿钓渔船集鱼灯合理配置的研究方法。
- (3) 在国内首次对鱿钓渔船的合适照度间距、最小许可作业间距进行了分析和研究,并建立了有关的计算公式。

### 5.4 本文的不足之处

- (1) 本研究在讨论头足类的趋光和适宜照度时,未能分鱼种和海区对不同柔鱼的趋光习性及其适宜照度进行实验和深入研究。具体应用和研究中,借鉴了国内外对头足类视觉研究的成果,即将0.1~10lx作为适宜照度,将0.01lx作为影响柔鱼行为的最低照度。

(2) 对于船体阴影部分某照度所围水体体积的估算,本文是以该照度值的最大水深来进行相关计算的,这会对该部分水体体积的估算造成较大的误差。

(3) 除 8154 型鱿钓渔船(使用 1kW 型集鱼灯)外,由于未能收集到相关的产量、成本等资料,本文在分析其它鱿钓渔船(使用 2kW 型集鱼灯)的合理配置时,是以最大适宜照度区范围和最大诱集水体范围为衡量标准的,应作进一步的研究。

## 5.5 下一步的研究计划

(1) 对叠加法计算程序进一步进行优化设计,以提高运行速度。此外,通过对程序的更深一步开发,建立一个对不同渔船进行集鱼灯合理配置的应用程序。

(2) 对鱿钓集鱼灯在渔船阴影部分的光线传递进行深入分析,建立鱿钓渔船阴影部分水中照度的计算方法,并开发相关的计算程序。

## 附件 1：集鱼灯水中照度计算模式 C++ 程序设计的基本思路

一、输入初始条件：灯离水面高度  $h$  (6.5m); 船舷距水面高度  $h_l$  (4.0m); 集鱼灯间距  $d$  (0.5m); 集鱼灯距舷边距离  $a$  (1.0m); 两列灯之间的距离  $D$  (6.5m); 船尾第一个灯距离船尾的距离  $b$  (2.7m); 第一列灯的个数  $n_l$  (60 个); 第二列灯的个数  $n_2$  (60 个); 衰减系数  $\mu$  (0.1)。

二、程序基本目标：输入水下任意一点坐标  $Q(x_0, y_0, z_0)$ ，求该点在集鱼灯作用下的照度。

### 三、程序的建立过程

1、首先，确定各个集鱼灯的坐标。

第一列灯第  $i$  个集鱼灯的坐标  $L_{1i}(x_{1i}, y_{1i}, z_{1i})$ , ( $i=1, 2, \dots, n_l$ )

$$x_{1i} = b + (i-1)d; \quad y_{1i} = D/2; \quad z_{1i} = h;$$

第二列灯第  $j$  个集鱼灯的坐标  $L_{2j}(x_{2j}, y_{2j}, z_{2j})$ , ( $j=1, 2, \dots, n_2$ )

$$x_{2j} = b + (j-1)d; \quad y_{2j} = -D/2; \quad z_{2j} = h;$$

2、然后，对水下任意一点  $Q(x_0, y_0, z_0)$ ，求船上任意一盏集鱼灯在海面对应的入射点坐标  $P(x, y, 0)$ 。

如，对于第一列灯第  $i$  个集鱼灯  $L_{1i}(x_{1i}, y_{1i}, z_{1i})$  相对  $Q(x_0, y_0, z_0)$  的入射点为  $P_i(x, y, 0)$ ，其  $x$ ， $y$  值由下列条件求得：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{y - y_{1i}}{x - x_{1i}} = \frac{y_0 - y}{x_0 - x} \\ \frac{\sqrt{(y - y_{1i})^2 + (x - x_{1i})^2}}{\sqrt{(y - y_{1i})^2 + (x - x_{1i})^2 + h^2}} = 1.33 \times \frac{\sqrt{(y - y_0)^2 + (x - x_0)^2}}{\sqrt{(y - y_0)^2 + (x - x_0)^2 + (z_0)^2}} \\ y_0 > y > y_{1i} \end{array} \right.$$

3、随后，求各盏集鱼灯在其上述对应入射点的入射角 $\theta$ 、折射角 $\gamma$ 、光能折射比 $\beta_\theta$ 、入射点的发光强度 $I_\theta$ 、海面上照度 $E_{P_{1i}}^+$ 、海面下照度 $E_{P_{1i}}^-$ 。

对第一列灯第*i*个集鱼灯 $L_{1i}(x_{1i}, y_{1i}, z_{1i})$ ，要使其到达 $Q(x_0, y_0, z_0)$ 点，则其与水面入射点 $P_{1i}(x, y, 0)$ 的连线（入射光线）不能被船舷阻挡，即应满足式 $z' > h_i$ ，式中 $h_i$ 为船舷距离水面的高度， $z'$ 表示船舷所在垂直平面与入射光线交点的纵向坐标值， $z'$ 由下式求得：

$$z' = \left( \frac{D/2 + a - y}{y_{1i} - y} + 1 \right) \cdot h;$$

显然，当 $z' \leq h_i$ 时， $E_{P_{1i}}^+ = 0$ ；

当 $z' > h_i$ 时， $E_{P_{1i}}^+$ 按如下步骤计算：

$$\text{入射角: } \theta_{1i} = \arccos \frac{h}{\sqrt{(x_{1i} - x)^2 + (y_{1i} - y)^2 + h^2}}; \quad 0 < \theta_{1i} < \pi/2;$$

$$\text{折射角: } \gamma_{1i} = \arccos \frac{-z_0}{\sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0)^2}}; \quad 0 < \gamma_{1i} < \pi/2;$$

$$\text{光能折射比: } \beta_{\theta_{1i}} = 1 - 0.5 \times \left[ \frac{\operatorname{tg}^2(\theta_{1i} - \gamma_{1i})}{\operatorname{tg}^2(\theta_{1i} + \gamma_{1i})} + \frac{\sin^2(\theta_{1i} - \gamma_{1i})}{\sin^2(\theta_{1i} + \gamma_{1i})} \right]$$

集鱼灯发光强度:  $I_{\theta_b} = 1561.72 + 17647.4 \times \sqrt{\sin \theta_b}$  (不同集鱼灯其系数不同)。

$$\text{于是得到, 海面上照度: } E_{P_b}^+ = I_{\theta_b} \cdot \frac{h}{[(x_b - x)^2 + (y_b - y)^2 + h^2]^{\frac{3}{2}}}$$

$$\text{海面下照度: } E_{P_b}^- = E_{P_b}^+ \cdot \beta_{\theta_b}$$

#### 4、最后求得 Q 点的照度

对第一列灯第 i 个集鱼灯  $L_b(x_b, y_b, z_b)$ , 其光线到达 Q 点的过程中, 在水中经过的距离为  $r_b$ , 可由下式求得:

$$r_b = \sqrt{(y - y_0)^2 + (x - x_0)^2 + (z - z_0)^2}$$

根据光在海水中传播的衰减规律, 可得第一列灯第 i 个集鱼灯在 Q 点的照度:

$$E_{Q_b} = E_{P_b}^- \cdot e^{-\mu r_b} \cdot \cos \gamma_b$$

于是, 可得第一列灯在 Q 点的照度:

$$E_{Q_1} = \sum_{i=1}^{n_1} E_{Q_{bi}}$$

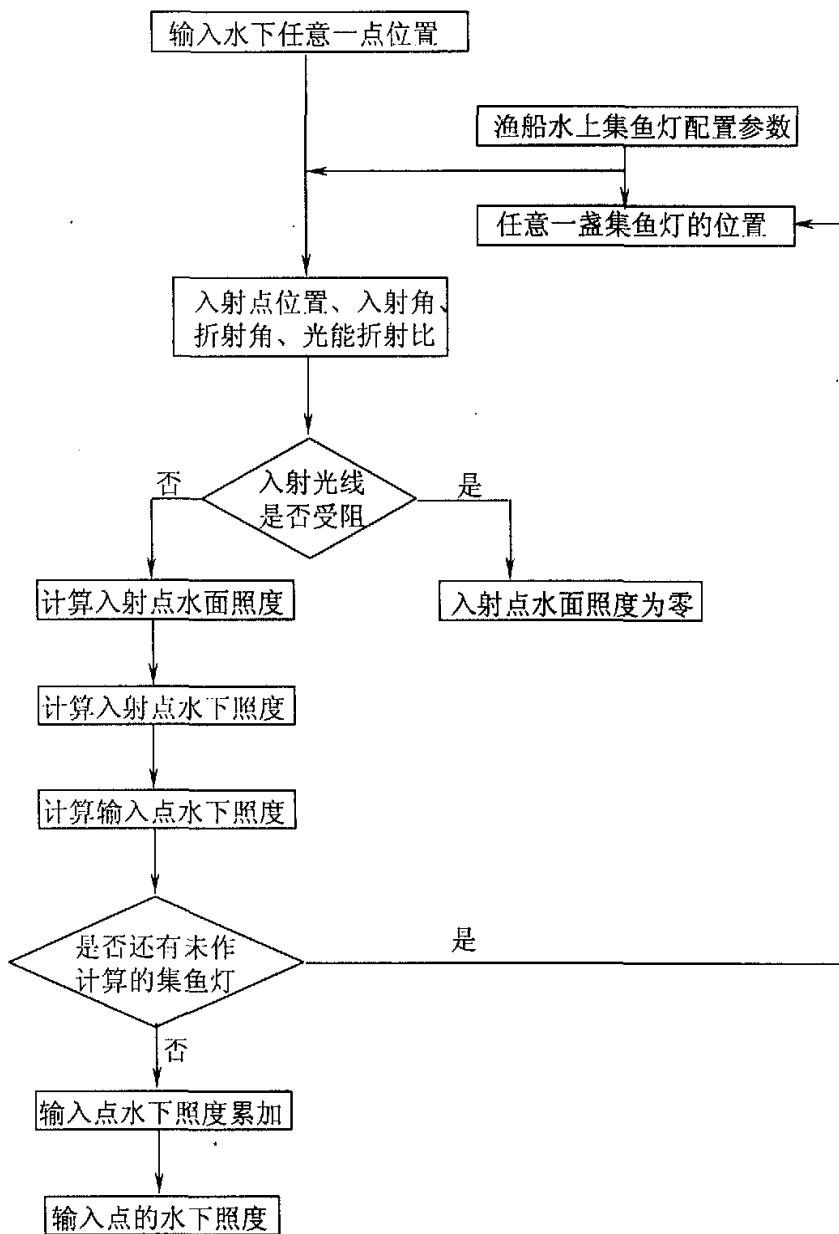
同理, 可求得第二列灯在 Q 点的照度:

$$E_{Q_2} = \sum_{i=1}^{n_2} E_{Q_{bi}}$$

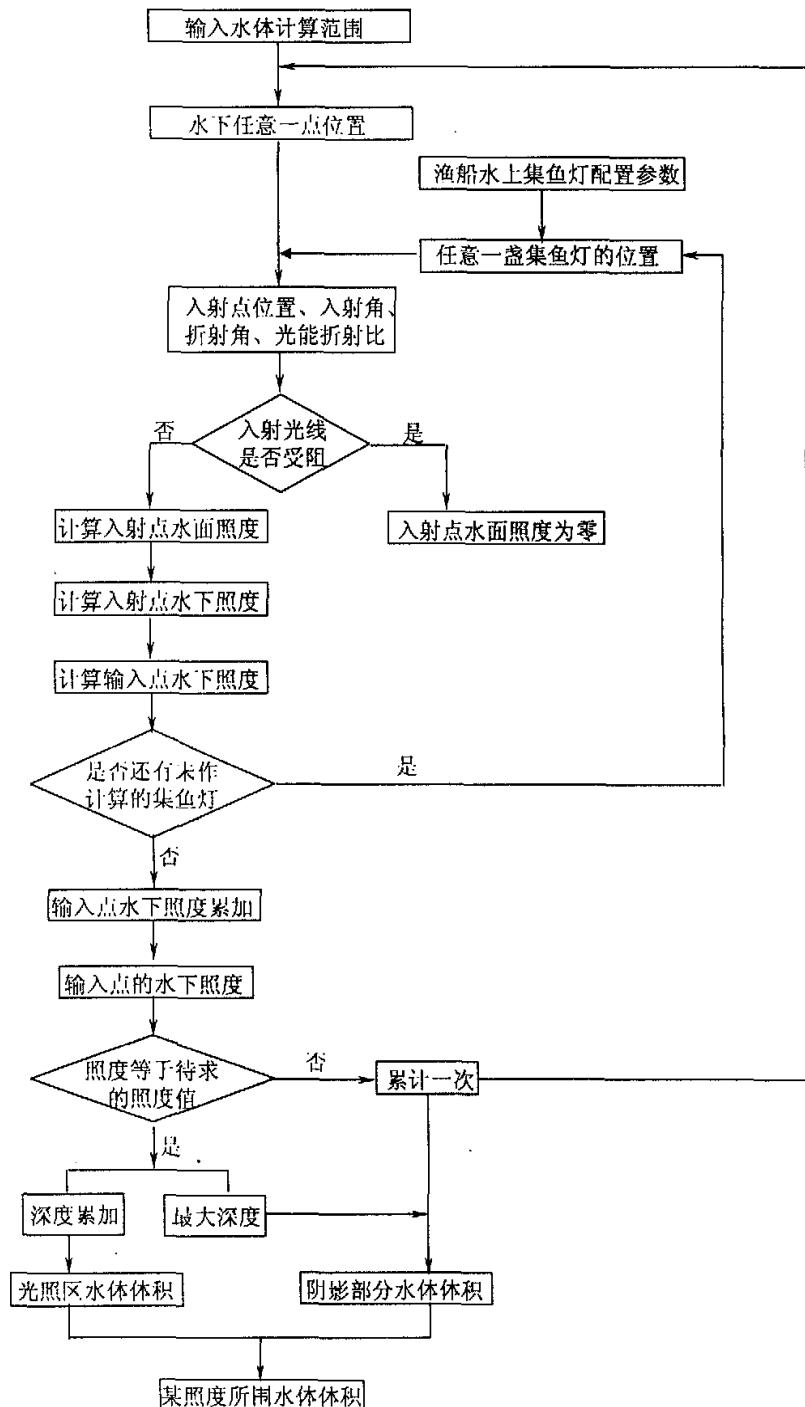
则 Q 点在两列灯下的照度:

$$E_Q = E_{Q_1} + E_{Q_2}$$

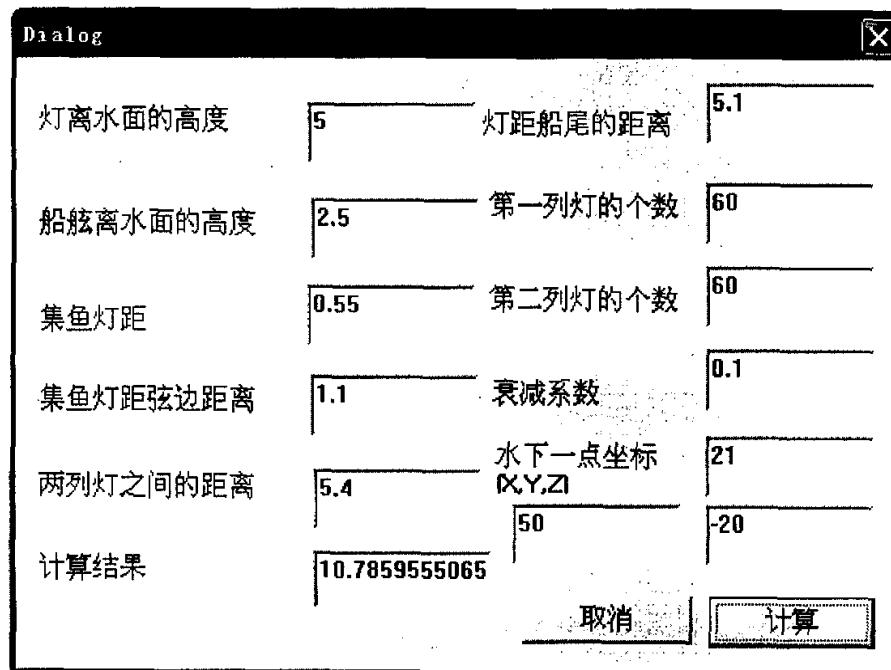
## 附件 2：集鱼灯水中照度计算程序的基本设计流程



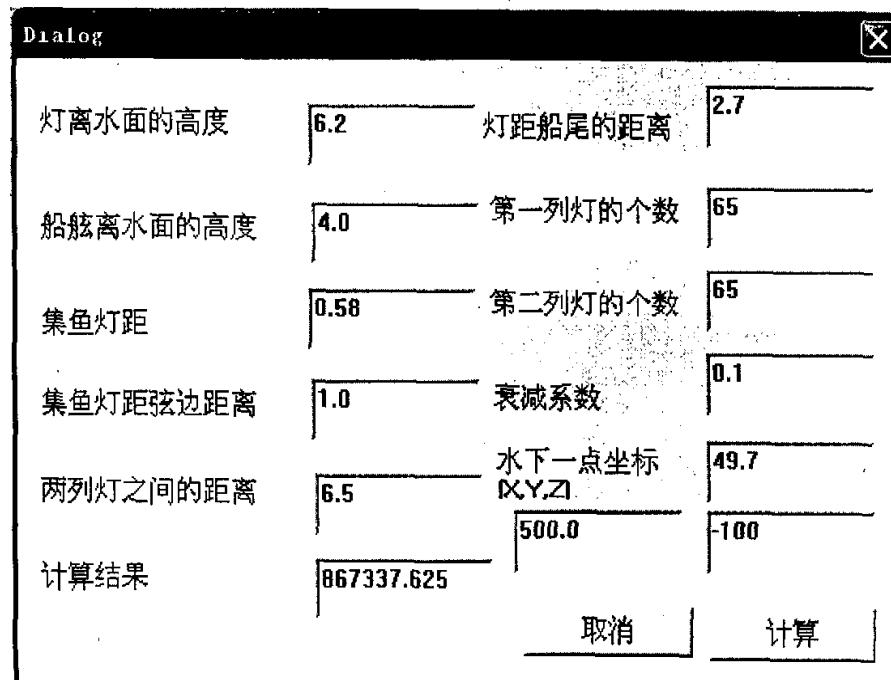
### 附件3：水体体积计算程序的基本设计流程



## 附件 4：程序运行界面



图：水下某一点的照度计算

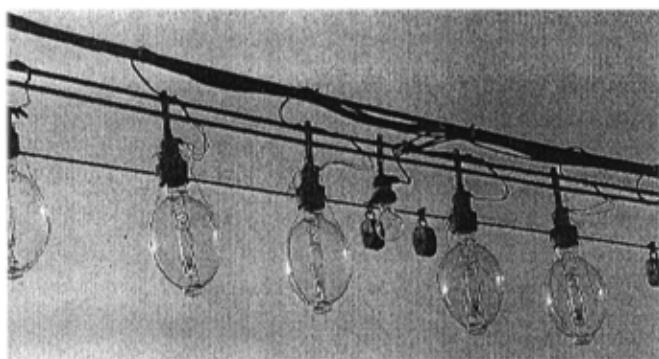


图：水中某一范围某等照度曲面的水体体积计算

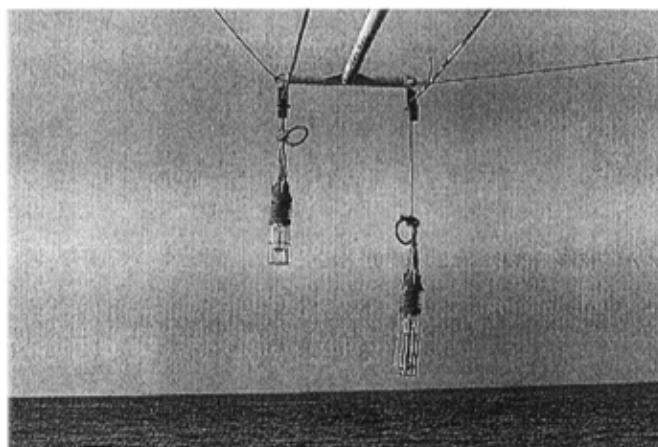
## 附件 5：鱿钓渔船及设备



图：专业鱿钓渔船



图：水上集鱼灯



图：水下集鱼灯

## 附件 6：水中光强测试材料和方法

### 1、测定海域和时间

测定海域为  $15^{\circ}\text{N} \sim 16^{\circ}\text{N}$ 、 $60^{\circ}\text{E} \sim 61^{\circ}\text{E}$ 。测定时间为 2003 年 10 月 13 日。

### 2、试验船与集鱼灯

试验船为浙江省远洋渔业公司普陀分公司的“新世纪 61 号”。该船长 49.7m，型宽 8.5m，总吨位为 581t，主机功率 441kW，SE-58 型钓机 37 台，船员 28 名。

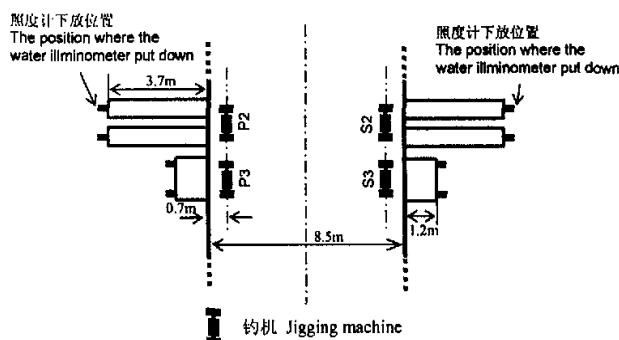
集鱼灯为金属卤化物灯，其功率为 120 盏  $\times 2\text{kW}$ ，均匀布置在两舷。相邻两个金属卤化物灯的平均间距为 0.6m。集鱼灯离甲板的平均高度为 3.0m，集鱼灯与船舷的水平距离为 1.0m。

### 3、测光设备

测光仪器为日本石川产业株式会社制造的水下灯光照度计，型号为 IU-2B。照度测定范围为 0~200000 lx，测光精度为 0.1 lx。水下测光的极限深度为 50m。

### 4、测定方法和数据处理

测定水中光照度时，在左右舷双号钓机（共 18 台）近船艏方向的长网托架滚轮处（见右图，该位置与船舷的水平距离为 3.0m，即  $3.7\text{m} \times \cos 35^{\circ}$ ，其中 3.7m 为网托架长度， $35^{\circ}$  为网托架的水平夹角），垂直下放测光传感器。测定水层为 0m、2m、5m、10m、15m、20m、25m 及 30m。



图：新世纪 61 号渔船光强度测量示意图

附表 1-12:

表 1 船长 40~45m 鲅钓渔船不同集鱼灯总功率时的诱集水体体积

总功率 (kW)	$V_{0.01}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1-10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )
200	7.83	5.46	1.10	4.36
204	8.01	5.55	1.13	4.43
208	8.14	5.63	1.15	4.48
212	8.27	5.72	1.17	4.55
216	8.36	5.78	1.19	4.59
220	8.42	5.82	1.20	4.62
224	8.46	5.85	1.21	4.64
228	8.50	5.88	1.22	4.66
232	8.54	5.91	1.23	4.68
236	8.56	5.94	1.24	4.70
240	8.58	5.95	1.24	4.71
244	8.59	5.96	1.25	4.71
248	8.60	5.97	1.26	4.71
252	8.62	5.96	1.26	4.70
256	8.64	5.96	1.27	4.69
260	8.66	5.96	1.28	4.69
264	8.68	5.97	1.28	4.68
268	8.70	5.97	1.29	4.68
272	8.71	5.97	1.30	4.67
276	8.73	5.97	1.30	4.67
280	8.74	5.98	1.31	4.67

表 2 船长 45~50m 鲅钓渔船不同集鱼灯总功率时的诱集水体体积

总功率 (kW)	$V_{0.01}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1-10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )
200	8.15	5.48	1.10	4.38
204	8.19	5.57	1.13	4.44
208	8.26	5.66	1.15	4.51
212	8.31	5.74	1.18	4.56
216	8.37	5.79	1.19	4.61
220	8.42	5.84	1.20	4.63
224	8.47	5.87	1.21	4.66
228	8.52	5.90	1.22	4.68
232	8.55	5.93	1.23	4.70
236	8.58	5.96	1.24	4.72
240	8.60	5.98	1.25	4.73
244	8.61	5.98	1.25	4.73

248	8.62	5.99	1.26	4.73
252	8.64	5.99	1.27	4.72
256	8.65	5.99	1.27	4.72
260	8.67	6.00	1.28	4.72
264	8.70	6.00	1.29	4.71
268	8.71	6.00	1.29	4.71
272	8.73	6.00	1.30	4.70
276	8.75	6.00	1.31	4.69
280	8.76	6.00	1.31	4.69
284	8.77	6.00	1.32	4.68
288	8.78	6.00	1.33	4.68
292	8.79	6.01	1.33	4.68

表3 船长50~60m 鲅钓渔船不同集鱼灯总功率时的诱集水体体积

总功率 (kW)	$V_{0.01}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1-10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )
200	8.02	5.47	1.10	4.37
204	8.09	5.56	1.13	4.43
208	8.19	5.65	1.15	4.49
212	8.29	5.73	1.18	4.56
216	8.36	5.79	1.19	4.60
220	8.43	5.83	1.20	4.63
224	8.47	5.86	1.21	4.65
228	8.52	5.89	1.22	4.67
232	8.55	5.92	1.23	4.69
236	8.57	5.95	1.24	4.71
240	8.59	5.97	1.25	4.72
244	8.60	5.97	1.25	4.72
248	8.62	5.98	1.26	4.73
252	8.63	5.99	1.26	4.72
256	8.66	5.99	1.27	4.72
260	8.67	6.00	1.28	4.72
264	8.70	6.00	1.29	4.72
268	8.71	6.00	1.29	4.71
272	8.72	6.00	1.30	4.70
276	8.74	6.00	1.31	4.69
280	8.75	6.00	1.31	4.69
284	8.75	6.00	1.32	4.68
288	8.76	6.00	1.32	4.68
292	8.77	6.00	1.33	4.68
296	8.77	6.01	1.33	4.68
300	8.77	6.01	1.34	4.67

表4 船长60~70m 鲢鱼渔船不同集鱼灯总功率时的诱集水体体积

总功率 (kW)	$V_{0.01}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1-10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )
240	12.04	8.35	1.59	6.76
244	12.56	8.53	1.67	6.86
248	12.83	8.66	1.71	6.95
252	13.08	8.80	1.76	7.05
256	13.26	8.90	1.79	7.11
260	13.35	8.96	1.81	7.15
264	13.45	9.01	1.83	7.19
268	13.51	9.07	1.84	7.22
272	13.58	9.10	1.86	7.25
276	13.63	9.14	1.87	7.26
280	13.66	9.19	1.88	7.30
284	13.75	9.22	1.89	7.33
288	13.77	9.25	1.91	7.34
292	13.81	9.29	1.92	7.37
296	13.85	9.32	1.94	7.38
300	13.89	9.35	1.95	7.40
304	13.94	9.38	1.96	7.43
308	14.00	9.41	1.97	7.44
312	14.06	9.45	1.98	7.47
316	14.11	9.49	1.99	7.49
320	14.18	9.52	2.01	7.51
324	14.21	9.56	2.03	7.54
328	14.24	9.60	2.05	7.56
332	14.28	9.65	2.07	7.58
336	14.30	9.67	2.09	7.59
340	14.34	9.72	2.11	7.61
344	14.37	9.74	2.13	7.61
348	14.39	9.76	2.15	7.61
352	14.41	9.78	2.17	7.60
356	14.44	9.79	2.19	7.60
360	14.46	9.78	2.20	7.58
364	14.48	9.78	2.21	7.57
368	14.50	9.78	2.22	7.56
372	14.52	9.78	2.23	7.55
376	14.53	9.78	2.24	7.54
380	14.56	9.78	2.25	7.53

表5 船长40~45m 鲬钓渔船不同集鱼灯灯距时的诱集水体体积

灯距 (m)	总功率 (kW)	$V_{0.01}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1-10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )
0.45	240	8.05	5.25	1.13	4.12
0.46	240	8.13	5.30	1.14	4.17
0.47	240	8.19	5.36	1.15	4.21
0.48	240	8.24	5.41	1.15	4.26
0.49	240	8.33	5.49	1.17	4.32
0.50	240	8.39	5.56	1.17	4.39
0.51	240	8.44	5.62	1.18	4.44
0.52	240	8.48	5.68	1.19	4.49
0.53	240	8.52	5.71	1.19	4.52
0.54	240	8.56	5.75	1.20	4.55
0.55	240	8.58	5.78	1.20	4.58
0.56	240	8.59	5.81	1.20	4.61
0.57	240	8.61	5.85	1.21	4.64
0.58	240	8.62	5.87	1.21	4.67
0.59	240	8.62	5.92	1.21	4.71
0.60	240	8.64	5.97	1.21	4.76
0.61	240	8.65	6.03	1.21	4.82
0.62	240	8.65	6.08	1.21	4.86
0.63	240	8.65	6.11	1.21	4.89
0.64	240	8.65	6.13	1.21	4.92

表6 船长45~50m 鲬钓渔船不同集鱼灯灯距时的诱集水体体积

灯距 (m)	总功率 (kW)	$V_{0.01}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1-10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )
0.45	260	8.09	5.27	1.13	4.14
0.46	260	8.17	5.33	1.14	4.18
0.47	260	8.23	5.38	1.15	4.23
0.48	260	8.28	5.43	1.16	4.27
0.49	260	8.37	5.49	1.17	4.32
0.50	260	8.43	5.54	1.18	4.36
0.51	260	8.48	5.60	1.19	4.41
0.52	260	8.52	5.65	1.19	4.46
0.53	260	8.56	5.71	1.20	4.51
0.54	260	8.60	5.75	1.20	4.55
0.55	260	8.62	5.80	1.21	4.59
0.56	260	8.63	5.85	1.21	4.64
0.57	260	8.65	5.89	1.21	4.68
0.58	260	8.67	5.93	1.22	4.72
0.59	260	8.67	5.97	1.22	4.75

0.60	260	8.68	6.01	1.22	4.80
0.61	260	8.69	6.06	1.22	4.84
0.62	260	8.69	6.10	1.22	4.88
0.63	260	8.69	6.14	1.22	4.92
0.64	260	8.69	6.16	1.22	4.95
0.65	260	8.69	6.18	1.22	4.96
0.66	260	8.69	6.21	1.22	4.99
0.67	260	8.69	6.22	1.22	5.00

表7 船长50~60m 鲅钓渔船不同集鱼灯灯距时的诱集水体体积

灯距 (m)	总功率 (kW)	$V_{0.01}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1-10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )
0.45	280	8.11	5.30	1.14	4.16
0.46	280	8.19	5.34	1.15	4.19
0.47	280	8.25	5.38	1.16	4.22
0.48	280	8.30	5.41	1.16	4.25
0.49	280	8.39	5.45	1.17	4.28
0.5	280	8.45	5.49	1.18	4.31
0.51	280	8.50	5.53	1.19	4.34
0.52	280	8.54	5.56	1.20	4.37
0.53	280	8.58	5.60	1.20	4.40
0.54	280	8.62	5.63	1.21	4.43
0.55	280	8.64	5.66	1.21	4.45
0.56	280	8.66	5.69	1.21	4.47
0.57	280	8.68	5.73	1.22	4.51
0.58	280	8.70	5.77	1.22	4.55
0.59	280	8.72	5.80	1.22	4.57
0.6	280	8.73	5.84	1.22	4.62
0.61	280	8.74	5.86	1.22	4.64
0.62	280	8.75	5.91	1.23	4.69
0.63	280	8.75	5.95	1.23	4.73
0.64	280	8.75	5.99	1.23	4.76
0.65	280	8.75	6.05	1.23	4.82
0.66	280	8.76	6.09	1.23	4.86
0.67	280	8.76	6.13	1.23	4.90

表8 船长60~70m 鲅钓渔船不同集鱼灯灯距时的诱集水体体积

灯距 (m)	总功率 (kW)	$V_{0.01}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1-10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )
0.45	320	13.54	8.75	1.90	6.86
0.46	320	13.61	8.79	1.91	6.89
0.47	320	13.67	8.83	1.91	6.92
0.48	320	13.73	8.87	1.92	6.95

0.49	320	13.81	8.91	1.93	6.97
0.50	320	13.87	8.95	1.94	7.00
0.51	320	13.92	8.98	1.95	7.03
0.52	320	13.96	9.02	1.96	7.06
0.53	320	14.00	9.05	1.96	7.09
0.54	320	14.04	9.09	1.97	7.12
0.55	320	14.06	9.12	1.97	7.15
0.56	320	14.08	9.16	1.97	7.19
0.57	320	14.10	9.20	1.98	7.23
0.58	320	14.13	9.24	1.98	7.26
0.59	320	14.14	9.26	1.98	7.27
0.60	320	14.15	9.30	1.98	7.32
0.61	320	14.16	9.33	1.98	7.34
0.62	320	14.17	9.37	1.99	7.38
0.63	320	14.17	9.41	1.99	7.42
0.64	320	14.17	9.46	1.99	7.47
0.65	320	14.18	9.50	1.99	7.51
0.66	320	14.18	9.54	1.99	7.55
0.67	320	14.18	9.58	1.99	7.60
0.68	320	14.18	9.61	1.99	7.62

表 9 船长 40~45m 络钓渔船不同集鱼灯灯高时的诱集水体体积

灯高 (m)	总功率 (kW)	$V_{0.01}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1-10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )
4.0	240	7.09	5.38	0.99	4.39
4.1	240	7.25	5.47	1.02	4.45
4.2	240	7.52	5.55	1.05	4.50
4.3	240	7.75	5.64	1.09	4.55
4.4	240	7.87	5.71	1.11	4.60
4.5	240	8.12	5.80	1.14	4.66
4.6	240	8.25	5.84	1.16	4.68
4.7	240	8.31	5.86	1.17	4.69
4.8	240	8.47	5.89	1.20	4.69
4.9	240	8.51	5.91	1.21	4.70
5.0	240	8.58	5.93	1.22	4.71
5.1	240	8.62	5.94	1.23	4.71
5.2	240	8.65	5.95	1.23	4.72
5.3	240	8.67	5.96	1.24	4.72
5.4	240	8.68	5.96	1.24	4.72
5.5	240	8.67	5.97	1.24	4.73
5.6	240	8.67	5.97	1.24	4.73

5.7	240	8.65	5.98	1.24	4.74
5.8	240	8.65	5.98	1.24	4.74
5.9	240	8.65	5.98	1.24	4.74
6.0	240	8.63	5.98	1.24	4.74

表 10 船长 45~50m 鲅钓渔船不同集鱼灯灯高时的诱集水体体积

灯高 (m)	总功率 (kW)	$V_{0.01}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1-10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )
5.0	260	7.11	5.42	0.99	4.42
5.1	260	7.27	5.47	1.02	4.45
5.2	260	7.54	5.58	1.06	4.52
5.3	260	7.77	5.65	1.09	4.56
5.4	260	7.92	5.72	1.12	4.61
5.5	260	8.14	5.81	1.15	4.66
5.6	260	8.27	5.85	1.17	4.68
5.7	260	8.37	5.88	1.18	4.70
5.8	260	8.49	5.90	1.20	4.70
5.9	260	8.53	5.92	1.21	4.71
6.0	260	8.60	5.93	1.22	4.71
6.1	260	8.64	5.94	1.23	4.72
6.2	260	8.67	5.95	1.23	4.72
6.3	260	8.69	5.96	1.24	4.72
6.4	260	8.70	5.97	1.24	4.73
6.5	260	8.70	5.97	1.24	4.73
6.6	260	8.69	5.98	1.24	4.73
6.7	260	8.68	5.98	1.24	4.74
6.8	260	8.67	5.98	1.24	4.74
6.9	260	8.67	5.99	1.25	4.74
7.0	260	8.65	5.99	1.24	4.74

表 11 船长 50~60m 鲅钓渔船不同集鱼灯灯高时的诱集水体体积

灯高 (m)	总功率 (kW)	$V_{0.01}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1-10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )
5.4	280	8.39	5.77	1.17	4.59
5.5	280	8.52	5.84	1.19	4.65
5.6	280	8.64	5.88	1.21	4.67
5.7	280	8.75	5.92	1.23	4.69
5.8	280	8.82	5.93	1.24	4.69
5.9	280	8.87	5.95	1.25	4.70
6.0	280	8.93	5.96	1.26	4.70
6.1	280	8.97	5.97	1.27	4.71
6.2	280	9.01	5.98	1.28	4.71
6.3	280	9.02	5.99	1.28	4.71
6.4	280	9.03	6.00	1.28	4.71
6.5	280	9.03	6.00	1.28	4.72
6.6	280	9.02	6.01	1.28	4.72

6.7	280	9.00	6.01	1.28	4.73
6.8	280	9.01	6.01	1.29	4.73
6.9	280	9.00	6.01	1.29	4.73
7.0	280	8.99	6.02	1.29	4.73

表 12 船长 60~70m 鲬钓渔船不同集鱼灯灯高时的诱集水体体积

灯高 (m)	总功率 (kW)	$V_{0.01}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )	$V_{0.1-10}$ ( $\times 10^5 m^3$ )
6.2	320	12.69	9.35	1.96	7.38
6.3	320	12.84	9.40	1.97	7.43
6.4	320	13.02	9.43	1.97	7.46
6.5	320	13.26	9.45	1.98	7.48
6.6	320	13.41	9.47	1.98	7.48
6.7	320	13.63	9.48	1.99	7.49
6.8	320	13.76	9.48	1.99	7.49
6.9	320	13.86	9.49	1.99	7.49
7.0	320	13.98	9.50	2.00	7.50
7.1	320	14.02	9.51	2.00	7.50
7.2	320	14.09	9.51	2.01	7.51
7.3	320	14.13	9.52	2.01	7.51
7.4	320	14.16	9.53	2.02	7.51
7.5	320	14.18	9.53	2.02	7.51
7.6	320	14.16	9.54	2.02	7.52
7.7	320	14.16	9.55	2.03	7.52
7.8	320	14.15	9.55	2.03	7.52
7.9	320	14.13	9.56	2.03	7.52
8.0	320	14.13	9.56	2.04	7.52
8.1	320	14.11	9.57	2.04	7.52
8.2	320	14.09	9.57	2.05	7.53

## 参考文献

1. 王尧耕、陈新军. 世界大洋性经济柔鱼类资源及其渔业[M].北京: 海洋出版社, 2005, 1-68.
2. Arnold,G.p. Squid: a review of their biology and fisheries [J]. Winistry of Agriculture, Fisheries and Food, Lowestoft, UK, Labortory leaflet , 1979,(48):37.
3. Voss,G.L. Cephalopod resources of the world [C]. FAO Fish. Circ.,1973, (149):1-75.
4. Rathjen. W.F. and Voss,G.L. The cephalopod fisheries[C]. In: P.R. Boyle (Editor). Cephalopod Life cycle[M]. London: Academic Press, 1987,(2):23-28.
5. Rathjen. W.F. Cephalopod capture methods: An Overview [J]. Bull. Mar.Sci., 1991,(49):494-505.
6. 稲田博史, 小仓通男. イカ釣漁業における集魚灯の変化[J]. 东京水产大学渔业报告, 1998, (24): 189-207.
7. 乐美龙. 关于北太平洋禁用大型远洋流网作业问题[J]. 上海水产大学学报, 1995, 4 (1): 53-61.
8. Hernando.A.M and Flores. E.C. The Philippine squid fisheries: A Review [J]. Mar. Fish.Rev., 1981, (43):13-20.
9. Pierce, G.J. and Guerra. A. Stock assessment methods used for cephalopod fisheries[J]. Fish .Res., 1994,(21):255-285.
10. 王尧耕, 陈新军. 世界头足类资源开发现状和中国远洋鱿钓渔业发展概况[J]. 上海水产大学学报, 1998, 7(4): 283-287.
11. 陈新军. 世界头足类资源及其开发利用[J]. 上海水产大学学报, 1996, 5(3): 193-199.
12. 孙满昌, 陈新军. 北太平洋柔鱼脱钩率研究[J]水产学报, 1996, 20(2): 144-150.
13. 陈新军, 王尧耕. 中国远洋鱿钓渔业的发展前景[J]. 中国渔业经济研究, 1999, (2): 38-39.
14. 陈新军, 钱卫国. 印度洋西北部海域莺乌贼资源密度分布的初步分析[J]. 上海

- 水产大学学报, 2004, 13 (3): 218-223.
15. 田思泉, 钱卫国, 陈新军. 印度洋西北部海域莺乌贼渔获量、渔获率和脱钩率的初步研究[J]. 上海水产大学学报, 2004, 13 (3): 224-229.
16. 陈新军. 西北太平洋柔鱼渔场与水温因子的关系[J]. 上海水产大学学报, 1995, 4 (3): 181-185.
17. 陈新军. 关于西北太平洋的柔鱼渔场形成的海洋环境因子的分析[J]. 上海水产大学学报, 1997, 6 (4): 263-267.
18. 陈新军. 北太平洋(160°E~170°E)大型柔鱼渔场的初步研究 [J]. 上海水产大学学报, 1999, 8 (3): 197-201.
19. 唐玉顺. 西北太平洋柔鱼渔场与流隔间的关系[J]. 上海水产大学学报, 1996, 5 (2): 110-114.
20. 傅恩波, 俞庆福, 李永等. 北太平洋红柔鱼渔场分析[J]. 大连水产学院学报, 1998, 13 (4): 32-36.
21. 刘洪生, 杨红, 章守宇. 北太平洋西经海域(175°W~170°W)温盐分布及其与柔鱼渔场关系的初步研究[J]. 上海水产大学学报, 2001, 10 (3): 229-233.
22. 刘洪生, 陈新军. 北太平洋中东部海域温盐分布及其与鱿钓渔场关系的研究[J]. 湛江海洋大学学报, 2002, 22 (1): 34-39.
23. 钱卫国, 孙满昌. 北太平洋中部柔鱼中心渔场分析[J]. 海洋渔业, 2002, 24 (增刊): 20-26.
24. 钱卫国. 北太平洋中东部海域柔鱼渔场成因分析与提高钓捕率的研究[D]. 上海水产大学硕士论文, 2002, 1-56.
25. 田思泉. 西北太平洋柔鱼资源、作业渔场时空分布及其与表温关系的研究[ D ]. 上海水产大学硕士论文, 2003, 1-68.
26. 陈新军, 钱卫国, 许柳雄等. 北太平洋 150°E~165°E 海域柔鱼重心渔场的年际变动[J]. 湛江海洋大学学报, 2003, 23 (3): 26-32.
27. 陈新军, 钱卫国, 许柳雄等. 北太平洋 150°E~165°E 海域柔鱼鱿钓渔场及其预报模型研究[J]. 海洋水产研究, 2003, 24 (4): 1-6.
28. 陈新军, 许柳雄. 北太平洋 150°E~165°E 海域柔鱼渔场与表温及水温垂直结

- 构的关系[J]. 海洋湖沼通报, 2004, (2): 36-44.
29. 许柳雄, 尼龙钓线颜色、粗度和钓线长度对日本海太平洋褶柔鱼钓获率的影响[J]. 水产学报, 1994, 18 (4): 340-343.
30. 孙满昌, 陈新军. 北太平洋柔鱼对钓钩颜色的选择性研究[J]. 水产学报, 1997, 21 (2): 210-214.
31. 陈新军, 黄洪亮. 大型柔鱼钓捕技术的初步研究[J]. 上海水产大学学报, 1999, 8 (2): 170-173.
32. 张圣海, 孙满昌. 北太平洋中部柔鱼钓作业中手钓技术的分析与探讨[J]. 海洋渔业, 1999, 21 (3): 116-118.
33. 孙满昌, 钱卫国. 浅析提高北太平洋鱿钓作业的捕捞技术[J]. 海洋渔业, 2001, 23 (4): 178-181.
34. 张健, 孙满昌. 北太平洋鱿钓作业中机钓技术的应用研究[J]. 海洋渔业, 2002, 24 (增刊): 27-31.
35. 孙满昌, 张圣海, 钱卫国. 北太平洋中东部海域的柔鱼生物学特征研究[J]. 海洋渔业, 2001, 23 (1): 21-24.
36. 陈新军. 新西兰海域双柔鱼的生物学研究[J]. 中国水产科学, 1999, 6(1): 27-32.
37. 叶旭昌, 陈新军. 阿根廷滑柔鱼生物学特性的初步研究[J]. 海洋渔业, 2002, 24 (增刊): 46-51.
38. 陈新军, 田思泉, 叶旭昌. 西北太平洋柔鱼种群的聚类分析[J]. 上海水产大学学报, 2002, 11 (4): 335-341.
39. 叶旭昌, 陈新军. 印度洋西北海域莺乌贼生物学特性初步研究[J]. 上海水产大学学报, 2004, 13 (4): 316-322.
40. 倪谷来. 我国鱿钓业中集鱼灯应用的现状[J]. 上海水产大学学报, 1996, 5(1): 38-42.
41. 倪谷来. 几种日产鱿鱼钓机剖析及我国鱿鱼钓机的发展方向[J]. 渔业机械仪器, 1996, 23 (3): 26-31.
42. 胡文伟, 倪谷来. 鱿鱼钓机的研究设计与试验(上)[J]. 渔业机械仪器, 1992, 19 (1): 31-35.

43. 倪谷来, 胡文伟. 鱿鱼钓机的研究设计与试验(下) [J]. 渔业机械仪器, 1992, 19 (1): 31-35.
44. 倪谷来. 5kW 水下集鱼灯镇流器的研制[J]. 上海水产大学学报, 2002, 11(4): 400-402.
45. 张丽珍, 吴燕翔, 胡明婧. 卷扬机系统的国产化设计[J]. 机电工程, 2003, 20(2): 25-27.
46. 陈新军. 我国光诱鱿钓渔业一些技术问题的探讨[J]. 海洋渔业, 1996, 18 (2): 82-84.
47. 陈新军, 钱卫国, 郑奕. 鱿钓船灯光有效利用的初步研究[J]. 上海水产大学学报, 2004, 13 (2): 176-179.
48. 崔浙珍, 荒川久幸, 中村善彦等. 日本海のイカ釣り漁場における海水の光学的水型と集魚灯の透過特性 [J]. 日本水产学会誌, 1998, 64 (4): 650-657.
49. FAO. Review of state of world Marine Fishery Resources. FAO Fish.Tech.Pap,1978, (335) :1-3.
50. 乐美龙. 国际海洋渔业管理趋势及其对我国渔业的影响[J]. 中国渔业经济研究, 1998, (3): 9-11.
51. 董正之. 中国农业百科全书(水产业卷)[C]. 北京: 农业出版社, 1994, 361-363.
52. Okutani. T. Stock assessment of cephalopod resources fished by Japan. FAO Fish. Tech. Pap,1977,173:1-62.
53. 董正之. 世界大洋经济头足类生物学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1991.
54. Worms. J. World fisheries for Cephalopods: ASynoptic Overview. In:J.F.Caddy(Editor), Advances in Assessment of World Cephalopod Resources. FAO Fish. Tech. Pap., 1978,231:1-20.
55. 铃木恒出, 稲田博史, 坂田浩二等. スルメイカ集魚灯の有效利用について [J]. 北海道大学水产学部研究公报, 1985, 36 (20): 69-77.
56. 有元贵文. 小型乌贼垂钓光力适正化探讨事业实态调查实证调查报告书总汇编[A]. 全国渔业协同组合联合会, 1996, 1-34.
57. 胡明婧. 鱿钓渔船及其装备的探讨[J]. 上海水产大学学报, 1996, 5 (4):

- 226-234.
58. 陈永茂, 贾复. 鱿鱼钓船集鱼灯功率配置的经济性分析[J]. 大连水产学院学报, 1999, 14 (3): 75-78.
59. 罗福才, 贾复, 陈龙. 中国远洋鱿钓渔业的发展与前景[J]. 大连水产学院学报, 2000, 16 (2): 138-144.
60. 王尧耕. 当前世界柔鱼类资源和市场进展——兼谈我国鱿钓业发展的思考[J]. 上海水产大学学报, 1996, 5 (2): 107-109.
61. 胡明培, 陈新军. 中国远洋鱿钓渔业的可持续发展探讨[J]. 上海水产大学学报, 2000, 9 (2): 157-162.
62. Watanabe Yasuhiro, Inada Hiroshi, Takayama Tuyoshi. Retinal adaptation of neon flying squid *Ommastrephes bartrami* at capture with jigs and fishing lights[J]. Nippon Suisan Gakkaishi 1997, 63 (6) :899-904.
63. ASFAI. Optical characteristics of monofilament nylon gut in squid angling fisheries. ASFAI, 1992, 22 (10) :259.
64. H. Arakawa , S. Choi , T. Arimoto , and Y. Nakamura. *Relationship between underwater irradiance and distribution of Japanese common squid under fishing lights of a squid jigging boat*[J]. Fisheries Sci, 1998, (42): 48.
65. Takayama Tsuyoshi, Inada Hiroshi, Watanabe Toshihiro. Retinomotor response and iris function of neon flying squid *Ommastrephes bartrami* to lighting [J]. Nippon- Suisan- Gakkaishi, 1998, 64 (4): 631-635.
66. Ogura.M., Ishikawa, Y. and Nasumi T. Summary of lecture given at autumtern meeting of Jap. Soc. of Sc.Fish[J]. Tokyo, Jap.Soc. of Sc. Fish, 1973, 5.
67. Karibe, S., Ishikawa, Y. and Honma, K. Stud. Rep. Niigata Prefect[J]. Fish. Exp. Stn. 1974, 29-43.
68. Ogura.M. and Nasumi. T. Fishing Lamps and Light Attraction for Squid Jigging[C]. FAO Fisheries Report. 1975, (170):93-96.
69. Ogura.M. Study on the Resonable Light Intensities for Squid Jigging Fisheries and its Fisheries Efficiency. Report of Scientific Research-aid fund 1977-1978[J].

1978, 26

70. Hirayama, N. Attraction Lamp for Squid Fisheries and its Utilization Efficiency[J]. Jap. Far Sea Squid Fish. Ass., 1982, 45-54.
71. Wolken, J. J., Biophysic and Biochem Cyto. 1958, (4) : 835-838.
72. 小仓通男. イカ釣漁業における集魚灯[J]. 水産世界. 1972, (4): 44-46.
73. 铃木恒出. イカ釣漁業[J]. 水産世界, 1976, 25 (3): 80-88.
74. 小仓通男. イカ釣漁業における集魚灯の適正光力と漁獲効率に関する研究 [J]. 昭和 52~53 年度科学硏究費補助金研究成果報告書, 1978, 22-30.
75. 稲田博史, 广川純夫, 谷津明彦. 大型アカイカの昼釣り操業における水中集魚灯の効果[J]. 日本水产学会誌, 1996, 62 (1): 73-77.
76. Inada H, Hirika wa S, Miyazaki K.,etc. *Capturing characteristics on daytime jigging operation for large-size neon flying squid Ommastrephes bartrami with underwater fishing light*[J]. Nippon Suisan Gakkaishi. 1995, 61 (5): 732-737.
77. 小仓通男, 有元 貴文, 三次 信輔等. イカつり漁業用集魚灯—さの有效利用について[A]. 全国综合大型 イカつり漁業协会, 1982, 52-58.
78. 小仓通男. イカ釣漁業と火光[J]. 日本水产学会誌, 1992, 38 (8): 881-889.
79. 崔渐珍, 荒川久 幸, 中村善彦等. 日本海のイカ釣り漁場における海水の光学的水型と集魚灯の透過特性 [J]. 日本水产学会誌. 1998, 64 (4): 650-657.
80. 佐佐木忠義. 集魚灯[M]. 东京: 朝倉書店, 1953, 154.
81. 今村豊. 灯火漁業の研究-II. サバの跳ね釣りについて[J]. 日本水产学会誌, 1961, 27 (5): 430-436.
82. 今村豊. 灯火漁業の研究-III. 灯火利用の釣り漁業について[J]. 日本水产学会誌, 1961, 27 (5): 437-439.
83. 今村豊. 灯火漁業の研究-IV. サンマ棒受网法について[J]. 日本水产学会誌, 1961, 27 (5): 440-445.
84. 今村豊. 渔业における火光の集魚効果とちの操業の研究—III[J]. 日本水产学会誌, 1968, 6 (3): 26-44.
85. 今村豊. 火光利用の漁業について(综合报告) [J]. 日本水产学会誌, 1972,

- 38 (8): 877-880.
86. 柳川三郎. 集鱼灯の特性に关系研究の研究-I 点光源による水中照度の计算法について[J]. 东水大研报, 1973, 60 (1): 1-7.
87. 崔渐珍, 荒川久幸, 有远贵文等. 线光源モデルを用いた小型イカ钓り渔船集鱼灯の水中照度分布解析[J]. 日本水产学会誌, 2003, 69 (1): 44-51.
88. 崔渐珍, 中村善彦. 小型イカ钓り渔船の集鱼灯光源出力条件別照明经费と适正光源出力[J]. 水产工学, 2003, 40 (1): 39-46.
89. 崔渐珍. 小型イカ钓り渔船の照明经费と适正光力[J]. 海洋水产, 2003, (3): 9-14.
90. 崔渐珍. 小型イカ钓り渔船のトソ数と集鱼灯光力别渔获量[J]. 海洋水产, 2003, (2): 7-13.
91. 崔渐珍, 中村善彦, 有远贵文等, 集魚灯による小型イカ釣り漁船周辺の海面照度分布[J]. 日本水产学会誌, 1997, 63 (2): 160-165.
92. 石用敏夫. 最近の集魚灯について. 渔船[J]. 1997, (327): 44-51.
93. 林秀明, 西村实, 池龟安道. 月令とスルメイカ漁況の関係[J]. 北水試月報, 1949, 6 (7): 1-4.
94. Kawamoto,N. (川本信之): Studies on the influence of the moonlight upon efficiency of the fish lamp[J]. Rept. Fac. pref. Univ. Mie. 1955, 1 (3): 355-364.
95. Macda, H(前田弘). Statistical analyses of the influences of various lights upon the distribution of fishes in aquarium. II.-Distribution of aquarium fishes adapted to weak light[J]. Bull. Japan. Soc. Sci. Fish, 1956, 22(1): 1-4.
96. Macda, H(前田弘). Statistical analyses of the influences of various lights upon the distribution of fishes in aquarium. III.-Effects of conditions of adaptation and of presence or absence of the weak light[J]. Bull. Japan. Soc. Sci. Fish, 1956, 22(1): 5-8.
97. 浜部基次. 月齢に伴うスルナイカの生态行动[J]. 日本水产学会誌, 1964, 30 (3): 209-215.
98. 杨雄里, 寿天德, 李震元等. 鲫鱼视网膜敏感度在明适应过程中的变化[J]. 生物

- 化学与生物物理学报, 1978, 10 (1): 15-25.
99. 俞文剑.在光梯度条件下蓝圆鲹、鲐鱼的行为反应[J].厦门大学学报(自然科学版), 1978, (4): 1-12.
- 100.罗会明, 郑微云.鳗鲡幼鱼生长发育中趋光行为地的研究[J].厦门大学学报(自然科学版). 1979, (4): 104-111.
- 101.刘理东, 何大仁, 郑微云.普通鲻鱼和棱鲻视觉特性的电生理研究[J].厦门大学学报自然科学版, 1986, 25 (2): 227-232.
- 102.蔡厚才, 郑国成, 金礼赞.几种鲤科幼鱼视觉运动反应特性研究[J].浙江水产学院, 1987, 6 (1): 39-47.
- 103.蔡厚才, 金礼赞, 郑国成.鲫鱼(*Carassius auratus*)视觉运动反应特性的研究[J].海洋湖沼通报, 1989, (4): 80-85.
- 104.何大仁, 徐永淦.五种海水鱼视网膜结构的比较[J].台湾海峡, 1993, 12 (4): 342-350.
- 105.章厚泉, 何大仁.青石斑鱼视网膜运动反应的特性[J].海洋与湖沼, 1991, 22 (5): 417-421.
- 106.章厚泉, 何大仁.青石斑鱼视网膜运动反应产生机制[J].海洋学报, 1991, 13 (6): 838-843.
- 107.何大仁, 肖金华, 罗会明等.杜氏枪乌贼趋光行为的研究[J].厦门大学学报, 1979, 3: 99-103.
- 108.郑美丽, 肖金华, 郑微云等.曼氏无针乌贼的趋光特性[J].厦门大学学报(自然科学学报), 1980, 19 (3): 91-99.
- 109.柴敏娟, 郑微云.头足类视觉特性的电生理研究II.无针乌贼视网膜电图的光敏感性[J].海洋学报, 1982, 4 (6): 784~787.
- 110.陈新军.白天使用水下灯钓捕大型柔鱼的初步试验[J].中国水产科学, 2000, 7 (2): 119-120.
- 111.陈新军.北太平洋海域白天利用水下灯钓捕大型柔鱼的试验报告[J].上海水产大学学报.2000, 9(2): 172-174.
- 112.陈新军.北太平洋海域白天利用水下灯钓捕大型柔鱼的试验报告[J].上海水产

- 大学学报, 1999, 9 (2): 172-174.
- 113.钱卫国, 孙满昌. 水下灯在鱿钓作业中的集鱼效果[J]. 渔业现代化, 2000, (6): 10-11.
- 114.王晓晖, 陈新军. 灯诱鱿鱼钓船水下灯助诱作业试验报告[J]. 中国水产, 1998, (11): 42-43.
- 115.钱卫国, 陈新军, 孙满昌. 2种水下集鱼灯水中光强分布及其比较研究[J]. 中国水产科学, 2005, 12 (2): 173-178.
- 116.傅恩波, 陈永茂, 吴文展等. 鱿鱼钓集鱼灯配置方法的探讨[C]. 中国水产捕捞学术研讨会论文集, 1999, 37-42.
- 117.郑国富. 诱鱼灯光场计算及其对光诱鱿鱼浮拖网作业的影响[J]. 台湾海峡, 1999, 18 (2): 215-220.
- 118.张丽蕊. 光诱鱿钓渔业中光强分布的模型建立[D]. 上海水产大学硕士学位论文, 2004, 1-36.
- 119.钱卫国, 王飞. 集鱼灯海面照度计算方法的比较研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2004, 23(4): 285-290.
- 120.钱卫国, 孙满昌, 田思泉. 鱿钓渔船集鱼灯水中照度分布与渔获效率研究[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2004, 9 (4): 322-327.
- 121.钱卫国, 孙满昌, 张健. 高压钠灯在阿拉伯海莺鸟贼钓捕中的应用效果研究[J], 海洋水产研究, 2004, 25 (4): 285-290.
- 122.上海水产大学印度洋莺鸟贼调查课题组. 2003 年度印度洋莺鸟贼资源探捕调查成果汇编 (A), 2003, 1-128.
- 123.蓝晞文. 月光夜光诱渔业光场[J]. 福建水产, 1992, (4): 59-63.
- 124.曾岳祥. 日本海鱿钓作业技术初探[J]. 浙江水产学院学报, 1994, 13 (2): 99-103.
- 125.郑基. 光诱鱿鱼钓生产技术研究[J]. 中国水产, 1997, (2): 38-40.
- 126.王晓辉. 灯诱鱿鱼钓船水下灯助诱作业试验报告[J]. 海洋渔业, 1998, 20(3): 122-125.
- 127.陈新军. 新西兰周围海域双柔鱼渔场及其渔获分布[J]. 上海水产大学学报, 1998, 7 (2): 93-101.

- 128.俞文钊.鱼类趋光生理[M].北京:农业出版社, 1980.
- 129.罗会明.海洋经济动物趋光生理[M].福建科学技术出版社, 1985.
- 130.何大仁, 蔡厚才.鱼类行为学[M].福建: 厦门大学出版社, 1998.
- 131.Duke-Ekder.S. The eye in evolution[M]. Lonton: Henry Kimpton, 1958:144.
- 132.Tazaki.K. Science for Living Body[J]. 1967,(18):166-176.
- 133.奈须敬二、奥谷乔司、小仓通男. イカその生物から消费で[M]. 成山堂书店, 1991.
- 134.田村 保. 鱼の眼の机能の研究方法[J].日本水产学会誌.1963, 29 (1): 75-89.
- 135.田村 保. 鱼类网膜の明暗顺应の状态との关系[J]. 日本水产学会誌, 1957, 22 (12): 742-746.
- 136.Eiichi Hasegawa, Hiroshi Kobayashi, Hiroshi Niwa. Retinomotor Response of the Fish Concentrated around an Underwater Lamp[J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1990, 56 (2): 367.
- 137.Young. J. Z. Light and Dark-Adaptation in the Eyes of some Cephalopods[J], Zool. Soc. 1962,140 (2): 255-272.
- 138.Hiroshi Inada. Retinomotor Response and Retinal Adaptation of Japanese Common Squid *Todarodes pacificus* at Capture with Jigs[J]. Nippon-Suisan-Gakkaishi, 1996,62 (5): 663-669.
- 139.渡部俊广, 稲田博史, 高山刚等. 集鱼灯下ご钓获されたアカイカの网膜运动反应と虹彩の遮光机能[J]. 日本水产学会誌, 1997, 63 (6): 899-904.
- 140.高山刚, 稲田博史, 渡部俊广. 灯光に対するアカイカの网膜运动反应と虹彩の遮光机能[J]. 日本水产学会誌.1998, 64 (4): 631-635.
- 141.井上实.鱼类の対光行动とその生理-鱼类の対光行动[J]. 日本水产学会誌.1972, 38 (8): 907-912.
- 142.小仓通男. いかつり渔业における集鱼灯と钓り具の有效利用に関する研究 [J].水产世界, 1976, 25 (3) .
- 143.Tsuneyoshi Suzuki, Hiroshi Inada, Hiroya Takahashi.Retal Adaptation of Japanese Common Squid (*Todarodes pacificus Steenstrup*) [J]. Bull.Fac.Fish.

- Hokkaido Univ., 1985, 36 (4): 191-199.
144. 小林 博. 鱼类の対光行動とその生理-水産動物における光感觉と明度の関連[J]. 日本水产学会誌, 1972, 38 (8): 913-920.
145. 安井达夫. 水产世界[J], 1972, 21 (2): 42-46.
146. 欧瑞木. 鲍鱼[M]. 北京: 海洋出版社, 1990: 71-139.
147. 铃木恒山. スルメイカの光に対する生理反应と集魚灯の省エネ対策について [J]. 日本水产资源保护协会月报, 1986, (266): 11-26.
148. 赵传茵, 唐小曼, 陈思行. 鱼类的行动[M]. 北京: 农业出版社, 1989.
149. 唐逸民. 水产海洋学基础[M]. 北京: 农业出版社, 1981.
150. 赵俊生, 吴曙初(译), N.G. 杰尔洛夫(著). 北京: 海洋光学[M]. 科学出版社, 1981.
151. 罗路. 光的传播与色散[J]. 广州师院学报: 自然科学版. 1998.19(7): 83-86.
152. 蔡启铭, 杨平. 有风浪太湖水体的光照传输模式[J]. 海洋与湖沼. 1993, 24 (3): 286-295.
153. 母国光, 戴元龄. 光学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1978.
154. 荆工, 史尔. 应用光学[M]. 北京: 国际工业出版社, 1973.
155. 王楚, 汤俊雄. 光学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2001.
156. Matthias Wloka. Fresnel reflection technical report[R]. Nvidia corporation , 2002, 1-18.
157. 潘学良(译), G.Kullenberg(丹麦). 不同洋区光学参数之间的关系[J]. 海洋译丛, 1982, (1): 37-45.
158. 石之琅(译), S.O.Duntley(美国). 海中的光[J]. 海洋译丛, 1966, (3): 13-31.
159. 张清凌, 陈楚群, 施平. 南沙群岛海域水体漫衰减系数 Kd(490)的特性研究[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(1): 9-16.
160. 张彩云, 商少平, 胡建宇等. 台湾海峡 1997 年 8 月至 1999 年 8 月份海水光学衰减系数的分布特征[J]. 台湾海峡, 2001, 20 (1): 127-131.
161. 三次 信辅, 武富. 水中集魚灯に関する研究—I, 水中 S-B ランプ[J]. 水工研技报, 渔业生产—I. 1983: 27-31.

- 162.周太明. 光源原理与设计[M].上海: 复旦大学出版社, 2004.
- 163.蔡祖泉等.电光源原理引论[M].上海: 复旦大学出版社, 1988.
- 164.夏章英.光诱围网[M].北京: 海洋出版社, 1989.
- 165.张闻迪, 关福明, 杨作升(译), 默顿斯 L E(著).水中摄影学—理论与实践[M].北京: 科学出版社, 1979.
- 166.有元贵文, 崔 淳珍, 荒川久幸. 集鱼灯技术[J]. 日本水产学会誌, 1999, 65(1): 123-124.
- 167.蔡学廉, 林成景. 渔船柴油机 200 问[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1991.

## 致谢

本文是在导师孙满昌教授精心指导下完成的。值此佳时，特向导师致以最真挚的感激和敬意！感谢导师六年来对我无微不至的教育和关怀，使我能专心于专业课题的研究并学有所成。我期望能在做人、育人、学术和科研等方面全面进步，以不负导师谆谆教导之恩。

本文在写作中得到陈新军教授的鼎力帮助，我对他表示十分的感谢。另外，陈新军教授长期以来对我如兄长和朋友一般，在生活上对我热情帮助，使我免于忙于生计而荒废学业，再次表示感谢。

本文得到周应祺教授、王尧耕教授、许柳雄教授的审阅和指正，特表示感谢。多年来，承蒙你们的关爱和言行身授，使我获益菲浅。你们特色的人格魅力和博艺多识是我学习的榜样。

在本文的实验过程中，得到新世纪 61 号、浙岱远渔 807 轮全体船员的大力帮助，并得到嘉宝电子协力有限公司、复旦大学电光源研究所的友情协助，特致谢意！

在本文的实验和写作中，还得到张丽蕊老师、管文江老师、田思泉博士、张健博士、朱国平博士、张硕博士等的帮助，在此作以谢意！

思忆八岁致学，择日已二十余年，回首往昔之风情历历，不甚感叹。生命的交融中，邂逅了多少的亲朋师友，于今，可曾安好？时光的流逝中，悄悄无心的忽略，并不改变我对你们的思念。值此论文完成之际，特向所有我认识的人们衷心地道一声感谢，是你们多姿了我的生命，是你们精彩了我的内涵。

最后，我为我远方的父母、姐弟和亲人以及我的女友李雅琦送上最真情的谢意！这些年来，你们辛苦了！我想着你们！

## 博士在读期间论文发表情况

1. 北太平洋中部柔鱼中心渔场分析.海洋渔业(增刊),2002,第1作者.
2. 北太平洋 150° E—165° E 海域柔鱼重心渔场的年际变动.湛江海洋大学学报,2003,第2作者.
3. 北太平洋 150° E—165° E 海域柔鱼鱿钓渔场及其预报模型研究.海洋水产研究,2003,第2作者.
4. 鱿钓渔船集鱼灯水中照度分布与渔获效率研究.集美大学学报(自然科学版),2004,第1作者.
5. 套网法对张网渔具选择性的影响.水产学报,2004,第3作者.
6. 集鱼灯海面照度计算方法的比较研究.浙江海洋学院学报(自然科学版),2004,第1作者.
7. 鱿钓船灯光有效利用的初步研究.上海水产大学学报,2004,第2作者.
8. 高压钠灯在阿拉伯海莺乌贼钓捕中的应用效果研究.海洋水产研究,2004,第1作者.
9. 印度洋西北部海域莺乌贼资源密度分布的初步分析.上海水产大学学报,2004,第2作者.
10. 印度洋西北部海域莺乌贼渔获量、渔获率和脱钩率的初步研究.上海水产大学学报,2004,第2作者.
11. 2种水下集鱼灯水中光强分布及其比较研究.中国水产科学,2005,第1作者.
12. 鱿钓船水上集鱼灯的光照度分布及钓捕效果分析.水产学报,2005,第1作者.