

# 第一章 渔具理论与渔具设计方法

## 1.1 渔具理论与渔具设计

著名的渔具，是在整个人类历史发展过程中，由各国渔民创造的一切良好渔具自然选择的结果。直至二十世纪，渔民的实际经验才经受了科学的检验。这项工作首先由杰出的苏联学者 Ф.И. 巴拉诺夫完成，他从 1912 年起开始提出各种主要渔具的理论，并建立了捕捞技术和捕捞组织的理论基础。由于巴拉诺夫学派的著作发表，渔具的设计理论也得到了发展。捕捞工程师掌握这一理论，就具备了科学地解决改进捕捞技术的各种具体问题的工具。

渔具设计实践中，按复杂程度可以将设计目的分为以下几种：

制定进一步改进目前使用的渔具的设计方案。其任务在于：力求运用一切可能的手段改进现有结构。譬如，应用更有效的材料；改进渔具属具和渔具形状；制定更完善的建造工艺；寻求减轻结构和降低造价的可能性；加快捕捞操作等。

制定采用新技术手段，即采用捕捞系统新因素（包括渔船、捕鱼机械、监控测量仪器等）的设计方案。其任务在于使渔具最优化。即根据捕捞系统的新因素来改变渔具特性。

提出使现有渔具适于在新渔场捕捞新对象的设计方案。其任务在于：经试捕后（为获得原始资料），重新制定渔具设计方案，改动渔具，使其在新渔场条件下顺利捕捞。

制定新式渔具的设计方案，以适应鱼类行为方面出现的新因素。这种设计方案包括设计独创性的渔具结构、结构计算和生产试验。经不断改进，新型渔具达到生产中顺利使用所需要的完善程度。科学论证是这种设计的主要部分。

建造渔具时，首先要运用渔民几百年的经验，因为在这些经验中汇集着人们点滴积累起来的有关各种鱼类在不同水域内，包括天然生活条件和捕捞过程中鱼类行为方面的知识。捕捞过程的科学研究加快认识的过程，充实只有用精确科学方法、水下观测仪器和其他特制仪器才能得到的情报。

在大多数情况下，单独使用渔具、渔船、机械、控制和操纵捕捞过程的仪器不可能捕到鱼，只有联合构成一个系统才具有捕鱼能力，而渔具是整个捕捞系统的主要构成部分。

“渔具理论与设计”这门课程的研究对象，是建造最佳渔具的基本思想、基本原则和计算方法、实验方法的综合，同时考虑鱼类行为及其栖息介质、渔船、机械和捕捞系统其他要素的特点。

## 1.2 渔具设计用的鱼类特性及其行为

为了设计渔具，首先必须了解某种鱼类在外界因素作用下集群、回游的特点，以及在捕捞期内的生理状况。上述特性包括：关于形成鱼群的空间和时间、鱼群密度和形状尺寸

的资料；鱼类及其群体游泳、下沉、上浮速度的数据；考虑到水的透明度和水底颜色，不同照度和渔具构件颜色对鱼类视觉的影响；鱼类对声响、电场、热场的反应；决定渔具选择性能鱼类生物测定特性和行为特点。渔具选择性能，是指一定种类和尺寸的鱼从网中逃逸和被捕获的概率。

确定一项渔具的设计性能，也必须考虑大量使用这种渔具对鱼类资源可能带来的总体影响。这一总体影响，在资源总量的一定部分按种类、尺寸和性别的选择中显示出来。根据使用渔具的结构特点、使用方法和数量的不同，捕捞生产可能是合理的，也可能是不合理的，甚至是灾难性的，这在近年来已变得愈加清楚了。

渔具的选择性，根据一定种类、各种体长的鱼被捕获的数量（百分数）计算。过滤性渔具（如拖网）选择性能曲线的典型形状，示于图1（曲线AOB）。曲线拐点O所对应的鱼体长度，相当于逃逸和被捕获的鱼的数量均为50%。这一

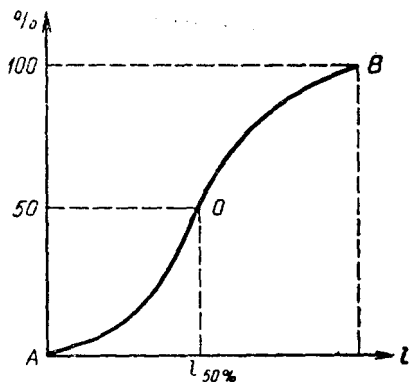


图1 渔具选择性曲线

体长  $l_{50\%}$  与渔具集鱼部分网目内尺寸  $B$  的比值，称为选择性系数  $k_s$ ，即

$$k_s = \frac{l_{50\%}}{B} \quad (1-1)$$

对于一定鱼类，决定  $k_s$  值的因素包括：鱼体尺寸（周长）、鱼类的活动性、在渔具中停留时间，以及渔具的特性（网目尺寸、网衣材料、缩结、空间位置、结构和应用方法）。大量地将渔具网目由一种改成另一种尺寸，将引起渔获物成分与数量的变化。根据对这种变化的估价，能够采取组织合理捕捞的措施，并且科学地论证渔业法规。选择性问题，在 А. И. 特列雪夫（Трешев）的著作中可见到全面的阐述<sup>1)</sup>。

### 1.3 鱼类最小捕捞尺寸

鱼类最小捕捞尺寸，根据既定地区相应的渔业法规决定。设计者在满足渔业法规要求的同时，还必须使设计渔具有最大的效能，并且考虑这种渔具不是单个地使用，而是用于装备大量捕捞船队。

船队可能取得的渔获量，依赖于捕捞种群的生物量，而生物量又取决于鱼类做为捕捞对象时的年龄（及相应体长）。如图 2 所示，某一代鱼的数量  $N$  随年龄  $t$  的增加而减少，同时每一条鱼的质量随年龄而增加（图 3）。当鱼的数目为  $N_t$ ，年龄为  $t$  时，某一代鱼的生物量为

$$G_t = N_t q_t \quad (1-2)$$

1) А. И. 特列雪夫，选择性捕捞的科学基础，食品工业出版社，1974。

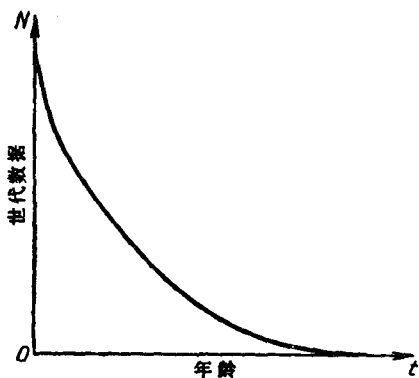


图 2 鱼类世代数量随年龄的变化

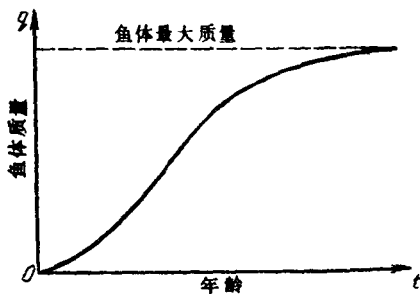


图 3 鱼体质量随年龄的变化

式中  $q_t$  —— 一条  $t$  龄鱼的质量。

$N_i$  在自然死亡的影响下减少,  $q_t$  随时间而增长。这两个过程发展的结果, 使世代生物量在某一时刻达到最大值。同这一时刻相对应的鱼体长度  $l_t$ , 就是为保证最佳捕捞效果, 渔具应当捕捞的最小鱼体尺寸。当然, 这里的尺寸  $l_t$ ,

应相当于种群中性成熟的鱼体长度，且不小于渔业法规中规定的尺寸。

作为举例，图 4 表示 R 比维尔顿 (Beverton) 和 C.

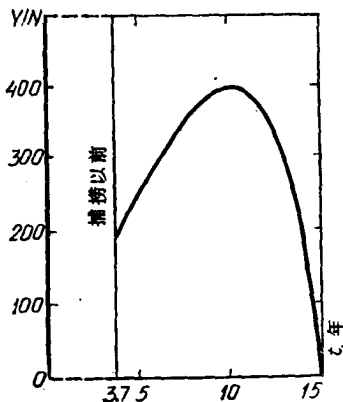


图 4 相对渔获量随年龄的变化

霍尔特 (Holt) 在《经济鱼类数量变动》一书中，列举的北海比目鱼种群数学模式的研究结果。由图 4 可见，捕捞十龄鱼 ( $t=10$ ) 可得到最大相对渔获量  $Y/N$ 。这里，与前述计算中开始成为捕捞对象的成鱼 ( $t=3.7$ ) 相比，捕获量增加了一倍。自然，北海比目鱼捕捞群体的最大生物量，也属于从 10 龄鱼开始捕捞的情况。

按 M.M. 罗津什坦 (Розенштейн) 和 В.И. 托尔马契夫 (Толмачев) 提出的方法，鱼的最小捕捞尺寸可按下述方法确定。

在时刻  $t + \Delta t$ ，世代生物量为

$$G_{t+\Delta t} = N_{t+\Delta t} q_{t+\Delta t} \quad (I-3)$$

当世代生物量达到最大值时， $G_{t+\Delta t}/G_t = 1$ ，于是比较 (I-3) 式和 (I-2) 式，我们得到

$$\frac{G_{t+\Delta t}}{G_t} = \frac{N_{t+\Delta t}}{N_t} \cdot \frac{q_{t+\Delta t}}{q_t} = 1 \quad (I-4)$$

相对减少率  $\varphi$ ，与世代自然死亡数量减少的实际规律无

关，可以写作

$$\varphi = \frac{N_t - N_{t+\Delta t}}{N_t} = 1 - \frac{N_{t+\Delta t}}{N_t} \quad (\text{I-5})$$

或者计及 (I-4) 式，有

$$\varphi = 1 - \frac{q_t}{q_{t+\Delta t}} \quad (\text{I-6})$$

鱼体质量  $q$  与体长  $l$  的关系表示为

$$q = al^n \quad (\text{I-7})$$

式中  $a$  和  $n$ ——常数，表示鱼类的特征 ( $n \approx 3$ )。这时有

$$\varphi = 1 - \left( \frac{l_t}{l_{t+\Delta t}} \right)^n \quad (\text{I-8})$$

我们假设鱼体长度与其年龄成正比，即

$$l_t = ct, \quad (\text{I-9})$$

$$l_{t+\Delta t} = c(t + \Delta t) = l_t + c\Delta t. \quad (\text{I-10})$$

所以

$$\varphi = 1 - \left( \frac{1}{1 + \frac{c\Delta t}{l_t}} \right)^n \quad (\text{I-11})$$

如以年为单位计算  $t$ ，且取  $\Delta t = 1$  年，则

$$\varphi = 1 - \left( \frac{1}{1 + \frac{c}{l_t}} \right)^n \quad (\text{I-12})$$

由此，鱼类最小捕捞体长  $l_{\min}$  为

$$l_{\min} = \frac{c}{\sqrt[n]{\frac{1}{1-\varphi}} - 1} \quad (\text{I-13})$$

于是，为了确定  $l_{min}$  仅需知道  $c$ 、 $n$  和  $\varphi$ ，而  $c$  和  $n$  值可根据鱼类生物的测定特性确定； $\varphi$  在中等年龄的某一范围可认为是定值，并由 (1-6) 式按鱼体实际质量  $q_t$  和  $q_{t+\Delta t}$  来决定，其中年龄分别是  $t$  和  $t+\Delta t$ 。

渔具的合理使用数量，通常不是设计者的任务。它属于鱼类资源与计划捕捞量（最佳渔获量）之间的最适关系问题，是捕捞组织的主要议题，Ф.И. 巴拉诺夫曾提出解决这一问题的基本思想。这一问题的现代研究状况，А. В. 扎索萨夫 (Засосов) 在《捕捞的理论基础》一书中进行了全面阐述。

## 1.4 渔具结构类型的选择

设计者根据自己对将来捕捞特点的理解和委托人经济技术上的可能性，从各种渔具中选择最适宜的渔具类型。例如，为了捕捞疏散的鱼群，使用流刺网或延绳钓，以围捕广大水域，而能源及其他消耗最少。反之，密集鱼群用拖网、围网捕捞，虽然作业中消耗较大，但可以由高渔获量补偿。捕捞沿一定路线顺岸边回游的鱼类，最好使用各种定置渔具。近年来，渔具设计者有时将传统渔具同用物理的和其他效应强化的捕捞作业方法结合在一起。

渔具类型一经选定，下一步任务就是选择供设计用的具体结构，作为母型网。为顺利完成这一任务，必须深刻地研究预定作业海区及按捕捞对象和生态特点与其类似的其他海区的捕捞生产经验。渔具设计中一切后续工作的成效，在很大程度上取决于母型网的选择是否恰当。

## 1.5 渔具最佳技术性能的论证

渔具设计理论最基本的目的是：根据已知的鱼类行为特点、鱼对各种刺激物的反应，以及水域、渔船、捕捞系统及其他要素的特点，论证直接计算渔具最佳特性的方法。但是，直接建立这些特性间的正式的数学关系式是极其复杂的问题<sup>1)</sup>。实际上，随着设计理论的发展，与其他理论的发展一样，出现了提出和解决这一大范围内的单独的、逐步复杂的问题的可能性。

任何工程结构的设计中，校核计算具有重要的意义，它可用来校核设计者主观选定的结构的主尺度及其他特性的恰当程度。对于渔具，这种方法首先由 Ф.И.巴拉诺夫提出。为此，他应用了数学、物理、理论力学、流体力学和其他学科的有关内容。在此基础上，他拟定了以下一般计算章节，如：确定作用在渔具上的外力；渔具做为柔性线体系的计算；用解析法和力学模拟法计算渔具的形状和作用在上面的力，以及其他章节。Ф.И.巴拉诺夫制定的方法，用于设计主要类型渔具的计算<sup>2)</sup>。他在建立渔具工程计算理论和设计理论方面的一系列论著，又由他的许多学生和追随者所发展。由田内森三郎教授建立的日本学派，对渔具结构选择的工程理论也有很大贡献。

实际上，只有将实际物体简化为示意图之后，才可能进

1) В.Н.麦里尼科夫，(Мельников)，控制捕捞对象的基础，食品工业出版社，1975。

2) Ф.И.巴拉诺夫，工业捕鱼技术，食品工业出版社，1960。

行渔具的计算。由于这一原因，渔具工程校核计算的结果是定性的，不带有定量的性质，所以一般说来，需经试验来检验。到目前为止，在我国和国外采用经验方法进行渔具的设计还是很普遍的。通常，渔具的设计从说明对设计渔具的基本要求开始，而这些要求与必须设计新渔具的原因有关。设计者根据个人的经验和当时的构思，规定新设计渔具的基本要素，并在此基础上拟定试验网的设计文件。随后，用这一试验网进行海上试验。根据试验结果改进试验网，并再次试验，直到最终得出可以采用的方案。但是，为此有时耗费几年的时间。

随着捕捞技术的发展，渔具基本要素最优化问题变得愈来愈迫切。由此可以定义渔具设计的正问题与逆问题的概念。正问题是指根据渔具设计任务书的要求，确定渔具最优化结构要素和渔具运动特性；逆问题是指校核选用的渔具结构要素与渔具运动特性是否符合设计任务要求。

由正问题的含义可以看出，传统的校核计算方法不能解决这类问题。为此，在六十年代我们发展了渔具设计中应用相似方法的思想<sup>1)</sup>。这样，可以从理论上论证从母型网已知的技术和捕捞特性，直接得出设计网技术和捕捞特性的计算方法。

## 1.6 渔具的技术特点

从工程角度看，渔具是一种特殊的结构物。绝大部分渔

1) A.Л. 弗里德曼，渔具理论与设计，食品工业出版社，1969。

具是网渔具，它提供了90%以上的世界渔获量。以后的叙述中“渔具”这一概念就是指网渔具，其他渔具均特别说明。渔具的特点是结构的柔软性、形状的可变性、空间位置的可变性和相对较短的使用期限。作用在渔具上的外力和渔具的形状及其在空间的位置相互制约，这就使计算问题变得非常复杂。当网具无负荷和无联接或者无属具时，网衣薄壳根本无固定形状。具有外负荷和联接，网壳呈现的形状是多种多样的。

水动力是一种主要外负荷。确定水动力的数值，由于网衣（渔具主要结构材料）的特点而存在困难。网衣不是一种密实体，而是容易渗透的壳体，液体不仅从网目中通过，而且同时绕流网具。此外，渔具构件、网目、网线在形状上，以及出现的负荷在数值上是各向异性的。由于网衣在纲索上的缩结不同及其他原因，同一片渔网可能具有不同形状并承受不同的负荷。

渔具的运动可能是定常的和非定常的。在前一种情况中，速度、运动方向以及作用力，不随时间而变化。例如，固定在不变水流中的渔具问题、做匀速直线运动的渔具问题，属于这一情况。第二种情况中，运动的速度和方向随时间变化。这种情况例如有，拖网瞄准捕捞任意运动的鱼群问题、波浪中起下网的问题。

选好渔具结构和确定尺寸之后，进一步必须确定外力作用下渔具的工作形状和空间位置，因为正是这些特性决定了捕捞的成效。同样也必须保证渔具、联接结构和属具具有适当的强度。

## 1.7 确定网材料快速磨损的 渔具强度尺寸

按许用应力（负荷）计算结构物和机械的强度是一般通用的计算方法。但是，对渔具这种柔性结构，工作过程中负荷分布会变化，因而最初选用的安全系数不能保证渔具构件的强度相等和网衣、纲索结构材料的合理利用。所以，渔具强度不是按许用应力，而是按破断负荷计算为宜。这里，不采用结构整体的总安全系数，而是选取个别最重要构件的超载系数，并考虑网材料的快速磨损。

渔具及其零件，在整个计划使用期间（ $t$ 天）应该具有足够的强度。我们用  $R$  表示零件的初始强度，而  $R_0$  为报废时（ $t$ 天）零件的剩余强度。这时，零件的磨损过程可表示为

$$R - R_0 = aRt^k \quad (\text{I-14})$$

式中： $a$  和  $k$ ——参数，分别表示材料的特点和磨损程度随时间的变化。

为了确定参数  $a$  和  $k$ ，需要在相当于作业的条件下进行专门的观察和试验。

我们假设零件的成本  $F$ ，与材料工作截面积决定的初始强度  $R$  成正比。相应地，零件每日折旧费用  $F/t$  表示 或者说与  $R/t$  成正比。报废前零件的工作期限，我们用（I-14）式表示：

$$t = \left( \frac{R - R_0}{aR} \right)^{1/k} \quad (\text{I-15})$$

这时

$$\frac{R}{t} = \frac{a^{1/k} R^{(1+k)/k}}{(R-R_0)^{1/k}} \quad (I-16)$$

( I-16 ) 式所示函数取最小值时，折旧费最小，并与材料无关。所以，由条件

$$\frac{d}{dR} \left[ \frac{R^{(1+k)/k}}{(R-R_0)^{1/k}} \right] = 0$$

我们求出

$$\begin{aligned} & \frac{(1+k)}{k} [R(R-R_0)]^{1/k} \\ & - \frac{1}{k} R^{(1+k)/k} (R-R_0)^{(1-k)/k} = 0 \end{aligned} \quad (I-17)$$

应用 ( I-17 ) 式，可以求出不同  $k$  值下的磨损安全系数  $n=R/R_0$ 。譬如， $k=1$  时，得到  $n=2$ ，而当  $k=2$  时， $n=1.5$ 。剩余强度  $R_0$  的数值，是强度计算的基础，它由对现有渔具及其零件的使用经验的研究决定。

## 1.8 校核计算图

为了简化校核计算，渔具的实际结构用计算图代替，而计算图是一种表示实际渔具及其作用力的示意图。网衣表面看做是理想的柔性薄壳，且不计弹性变形。

一般来说，渔具是一种空间体系。为简化计算，将这种空间体系看做是几个独立的平面体系的综合，而这些平面体系是实际渔具的投影或者截面。

譬如，许多渔具是由长度大、高度较小的垂直网壁构成

的。它的形状与负荷，可以通过研究两个计算图确定（图 5）。

第一个计算图（图 5a）是渔具的水平投影。若网壁只在两端固定，并承受垂直于网衣的均匀水流作用，则要研究的是任意一根纲绳的形状与负荷问题。这里假定，整个网衣表面所承受的水阻力由两根纲绳各承受一半。这时，我们计算的情况是：负荷沿长度均匀分布、两端固定的柔性线。求出作用在纲绳上的外力，然后计算纲绳的形状、张力和支点反力。这类问题的解析解法和图解解法，在第四章和第五章中说明。

第二个计算图（图 5b）是网衣的垂直投影（截面图），我们也可以将它表示为以一定方式固定和承载的平面柔性线。

为了便于表达作用在各种渔网垂直截面的力的计算图，常常研究沿上纲单位长度（例如 1 米）网片的平衡，这段网片是设想用二垂直平面由上纲至下纲从网壳中切割出来的。水对这段网衣的压力，取决于网衣的形状；而网衣的形状又依赖于水压力。所以，为了确定渔网截面的作用力与形状，

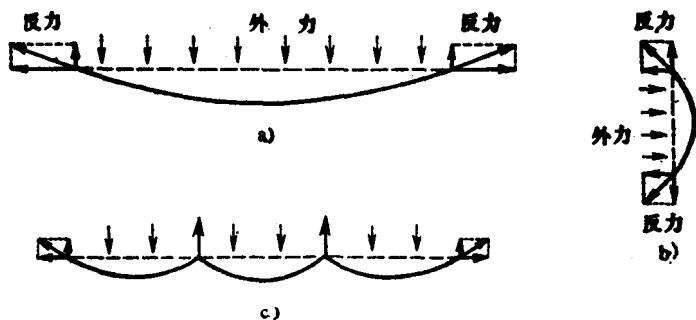


图 5 网壁计算图

通常采用逐步近似法。经过几次近似计算，确定出一段网衣的真正形状和水对它的压力值。若已知渔网的总长度，则可以计算出整个渔具的水压力、浮力和沉降力。

渔具除两端固定外，也常常设有中间支点，这可减少纲绳的负荷，并使它具有较正常的形状（例如，用桩固定，建网的导向垣网获得较平直的形状）。上述情况的计算图（建网、垣网的水平投影）示于图 5c。图中支点之间的每一段网，做为在相应负荷作用下的单根柔性线研究。确定垂直截面形状与张力的计算图，原则上类似前面分析过的情况（见图 5b）。若渔具支点具有一定自由度（如用锚和锚索固定），问题就变得更为复杂。在类似情况中，最好采用力学模拟法求解（见第八章）。

若渔具高度不是常数（地曳网各段网衣高度不同），相应地外负荷沿长度分布不均匀。绘制计算图时（图 6）将渔具分成几段，并假定每段的高度相同，负荷均匀分布。随后，可应用象图解静力学方法（见第五章），确定外力、纲绳张力和联接点的负荷。

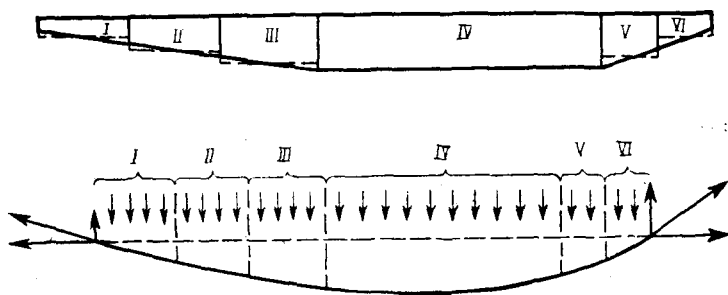


图 6 不同高度网壁计算图

需要考虑网衣自重的计算中，计算图原则上不变。在这种情况下，将水阻力和重力的两组平行力系的合力系做为外力。通过试验解决类似问题的方法，见第七章。

外负荷沿高度分布不均匀，也应算作复杂情况。譬如，围网计算存在这种情况，就必须确定收绞过程中网壁的形状、纲绳的位置和属具的数量。计算图（图7a）表示用二垂直平面从围网中截出的宽一米、承受相应负荷的一段网衣AB。这段截出的网衣与渔具其余部分的水平约束，这里不加以考虑。就是在这些简化下，计算图用解析法求解仍非常复杂，所以常常求助于试验方法。

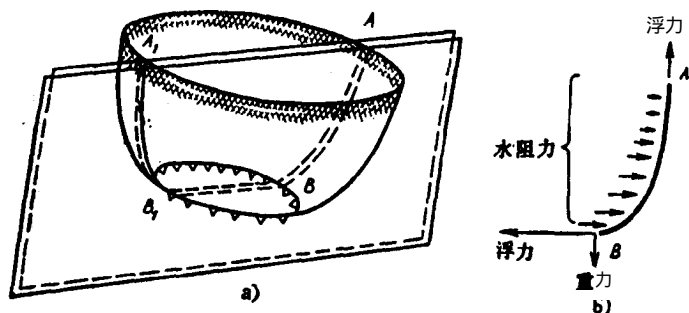


图7 负荷沿高度变化的计算图

为了确定围网收绞的负荷，一般研究沿下纲（准确说是沿括纲）围网水平截面的计算图。图8中，部分括纲用折线AOB表示。括纲张力与底环和网衣之间的水阻力、括纲

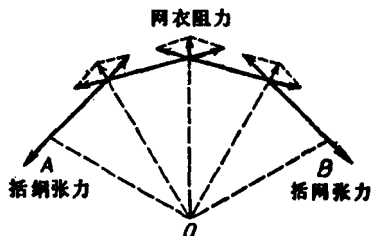


图8 围网括纲负荷计算图

与底环的摩擦力达成平衡。

我们将平面系统独立原理也应用于拖网设计的近似计算中，这里渔具实际的空间系统假定划分为平面系统。现研究拖网水平扩张计算图（图 9），基于上述，图中不出现垂向力；图 10 表示变水层拖网垂直扩张计算图，相应地，这里不出现水平力。

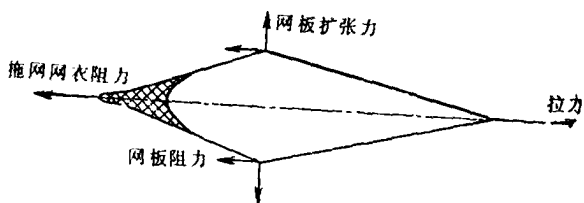


图 9 拖网水平扩张计算图

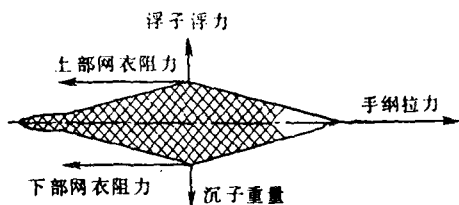


图 10 拖网垂直扩张计算图

上述计算图独立原理，并不总是适用的。若选择的计算图带来很大误差，则可以应用力学模拟法和模型试验法（见第七章）。采用某种方法确定出力的大小，然后计算渔具形状、