

养殖网箱动力分析的研究进展*

詹杰民, 苏炜

中山大学应用力学与工程系, 广州 510275

E-mail: stszjm@zsu.edu.cn

摘要: 网箱的动力分析是养殖网箱设计和优化的基础。本文介绍动力分析的研究发展历程, 以及相关的重要理论、实验和数值模型的研究进展。

关键词: 外海水产业, 柔性结构, 水动力, 渔网

1、网箱养殖的重要意义

根据世界权威专家估计, 到2035 年全世界养殖年产量将达到6200 万吨。但如果按年消费提高1% 计, 则养殖年产量必须达到12400 万吨才能满足新世纪人类对动物蛋白质的需求。根据FAO 1996 年世界养殖产量的分类统计表明: 海水鱼类养殖产量仅占养殖总产量的4% , 显示出海水鱼类养殖具有良好的发展前景^[1]。深海地区水质优良, 污染少, 自净能力也比较好, 鱼类生长迅速。在国内外, 基于可持续发展的战略角度出发, 海洋渔业的发展正在进行结构性的调整, 即从捕捞转向养殖, 尤其是网箱养殖。网箱养殖是高产出、高效益的水产集约化养殖方式之一。目前我国沿海网箱大部分分布在沿海港湾, 现有网箱技术科技含量低, 抗风浪能力差, 使得网箱养殖集中在近岸的港湾水域和半封闭型海湾, 既污染了环境, 也制约了新养殖水域的开拓。发展集约化深海(相对于港湾而言)网箱养殖业, 符合生态环保要求, 已成为世界各国的共识。因此, 因而有关深海网箱的研究得到了越来越多的关注目前, 具有非常重要的实际意义。

2、网箱的构成和分类

网箱主要由框架、网衣, 浮子和锚泊绳索等构成。世界上目前深水网箱类型繁多, 主要有重力式全浮网箱、碟形网箱、海洋圆柱网箱、强力浮式网箱、方形组合网箱、张力腿网箱、SEA浮绳式网箱、Sadco箱、金属双重网箱等等。近20年来, 以挪威为代表的大型深水网箱在全世界各地得到了迅速而持续的发展, 并取得了显著的成效, 被认为式目前海水养殖最成工的典范。我国目前有下列三种: 重力式聚乙烯网箱, 浮绳式网箱和碟形网箱这三种^[1]。其中以挪威为代表的重力式聚乙烯网箱基本上都是圆形, 设计性能为抗风能力12级, 抗浪能力5m, 抗流能力小于1m/s。挪威式网箱成本低, 但由于结构柔软, 在风浪作用下变形较大, 养殖密度较低, 也较容易破坏, 我国目前引进或消化生产的网箱大部分属于这种类型。在浙江, 福建和广东等地, 已有相当一部分网箱在风浪下破坏。浮绳式网箱具有较强的抗风浪性能, 最大的特点是全柔性, 随波浪上下波动, 但是抗流性较差, 日本最早使用。以美国为代表的碟型网箱则具有很好的抗流性能, 箱体在2.25节流速下也不会变形, 整个网箱可以下潜或者上浮, 以避免大的风浪下的损失和方便捕捞^[2], 养殖密度高, 舒适度也较好。但飞碟型网箱成本高, 网片往往要用高强度的防弹材料制成, 而且在激流下产生强烈震荡的机会比挪威式网箱高, 且换网箱困难。在亚洲, 日本和韩国也正在加大研究开发力度在网箱的研制。也取得了很好的效果。

*资金来源: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20020558013); 国家自然科学基金(10272118)

3、网箱性能评价指标

网箱的性能主要是以下四点：首先必须保证网箱各部分有足够的结构强度，如网片在波流长期作用下的磨损断裂的研究，网箱锚泊系统的稳定性和锚绳的强度疲劳研究等。其次是网箱的有效养殖空间的保持，因为鱼类正常生存是需要足够的空间的。水流是造成网箱体积损失的重要原因，研究网箱在水流作用下的体积损失率具有相当重要的实际意义。第三网箱还应有控制流经箱内水流量的功能^[3]。大多数鱼类抵御水流的能力是有限的，在养殖中发现，即使是在大水流的环境下能够生存的鱼类，为抵御水流耗费了大量的体能，影响了正常的进食，对养殖生产不利。最后实际中则还需要考虑可操作性，一个典型的例子是网箱的配重，增加重力式网箱的配重有利于减小网衣的变形，增加有效养殖体积，而受力却没有大的变化。但配重大小对网箱操作管理如清洗更换网衣具有一定影响，需结合实际合理选择。

4、研究网的动力性能的重要意义

波浪和水流对海洋结构物的作用是一种比较复杂水动力学问题，其与网箱这一附带柔性网衣的特种结构物的相互作用更是复杂。不同的海区的水文，天气条件直接影响到网箱的设计，由于传统的网箱设计仍以经验方法为主，加之对其进行管理和维护的方案尚不很成熟，当大风浪经过时往往会造成极大的破坏。这就要求深海网箱生产厂家必须根据海区条件来定制深海网箱，因此很有必要对网箱水动力学进行研究，这关系到材料、结构、网型、敷设和固泊的正确选择和良好的使用。网箱在波流的作用下的水动力性质对于设计和安装网箱都有非常重要的参考意义。例如在不同的海区，首先根据当地水文气象资料分析风浪尺寸，海流的速度，根据风浪海流要素的统计规律推算设计波浪，水流速度，进而估算波浪作用力，校和网箱材料结构强度，计算网箱的变形，这些分析都必须在对网箱结构特别是网衣这种柔弹性结构的水动力性能分析的基础之上才能完成。研究一套计算机模拟网箱系统能够减少产品设计周期，能够避免频繁水池试验，减少花费，极大降低开发成本的前提下高效的设计出能充分适合特定海区条件的网箱产品。

5、网箱动力分析发展历史和现状

目前，刚性结构动力行为的研究较为成熟（黄祥鹿 陆鑫森^[4]，1992），而无论在国内外，柔性网结构在波浪作用下的行为（Baldwin, etc^[5]，2000，莫才成^[6]，1999，Bris etc^[7]，1999）的研究均比较少。而在已有柔性网结构的研究中，大都是出于工程设计的要求来进行的，即利用线性波浪理论对结构进行受力分析，进而进行强度分析，然后考虑安全性的要求，给出设计方案。这样做，能够在一定程度上解决实际问题。但不能充分适应柔性结构向大型化复杂化发展的趋势，也不能适应现场复杂的水文和地形等环境条件。

要建立能正确解决实际问题的模型，实验是必不可少的（詹等^[8]，2002）。例如，需要测定网箱的阻力系数，测定网架、网片的材料力学参数及振动模态，测定结构在波浪作用下的响应特征和行为，测量波浪在网箱附近的破碎特征等等。我们将通过理论，计算和实验相结合的方法，形成可用于实际的动力分析模型。

在国外，网状结构的力学性能的研究已经有了很长一段历史，如Terada^[9]早在1914年发表的论文，以及Milne¹⁰在1972年发表的博士论文，Thresher和Nath(1975)年利用凝聚质量点法数值模拟了一个系泊装置，尽管这是个简单的问题，但是这是利用质量点法模

拟网结构的开始。目前主要两种的研究方法，试验研究（有时是现场的实地观测）和理论预测/数值模拟。世界各地的多所研究机构的科学家建立了各种模拟水流作用在渔网上的力，以及渔网的运动的动力学模型。

Kwakami (1964)^[11]提出了一个简单的经验公式来计算在正向来流作用下在网面所受的阻力。Aarsnes(1990)^[12]等作者通过一系列的试验研究推导出计算来流作用下网面的升力和阻力的经验公式。但是他们的经验公式没有考虑到由于网的变形所产生的平面内的力相互抵消的效果，同时阻力系数随雷诺数Re的变化没有考虑进去，更主要的是，他们的经验公式中没有包含流体加速度项，这样就不能考虑在波浪作用下的受力计算。

Gignoux和Messier(1999)^[13]基于映射系数的概念建立一个模拟网运动的求解方法。他们的计算结果与Mannuzza(1995)^[14]的试验结果进行了验证。法国Bessonneau 和Marichal (1998)^[15]提出了一种迭代的数值方法来模拟拖网的变形。文中他们利用一组刚性杆来模拟柔弹性的网状结构。日本Suzuki等作者(2003)^[16]采用质量弹簧单元的方法模拟了渔网的动力学行为，并由此开发了NaLa“网的变形和受力分析系统”，韩国Lee等作者(2004)^[17]采用的是弹簧质量单元和隐式积分的方法模拟了柔性网的受力变形。他们也成功的开发了拖网的计算机模拟系统。美国Tsukrov^[18]等作者构造了一致性单元来模拟一块网面内所受的载荷以及水动力的响应，他们的研究成果已经被应用到一种应用在开放海域的张力腿网箱上(Tension leg cage)。挪威Lader^[19]等作者利用超单元模拟柔性网面在波流作用下的水动力性质，他们分析了在不同的沉子配重，波浪周期，来流速度以及网的密实度，浮子的运动这5种工况下网所受到的冲击力的大小。

我国网箱养鱼已有20多年的历史，农业部水产局自1986年起，把抗风浪网箱的研究列为重点项目，进行攻关。目前在浅海抗风浪网箱研究方面已经取得了一定的成果，但在海外抗风浪网箱研究方面与日本、挪威等渔业发达国家相比差距还比较大，特别是对新材料和新结构的研究较少。

李玉成等对碟形^[20]及拟碟形^[21]网箱的受力特性进行了系列试验研究，并获得了两种网箱水动力特性的相关成果，据此对常见的重力式、碟形及拟碟形深水网箱在各种水流、波浪以及波流组合的条件下锚绳受力特性进行研究^[22]。为网箱设计及结构形式的选择提供一定的参考依据。章守宇^[23]等提出了碟形网箱的水动力数值计算方法，获得了特定条件下网箱受力特性的一些认识。夏泰淳对深水网箱的阻力其估算方法进行了探讨。

詹杰民^[8]等考虑了雷诺数，网的密实度，以及网型的影响，对作用在网面以及圆形网箱上的来流阻力进行了试验研究。并以Morison公式为基础，同时考虑了正向力和切向力的情况，对几种常见形状以及网型的网箱的阻力做了计算和比较^[24]。宋伟华^[25]采用小直径圆柱体绕流理论和网渔具理论为基础的经验水动力计算法，分别考虑网箱框架是刚性体、网衣和绳索是柔性体的特征，结合正弦波理论对方形网箱及其构件受到的水平波浪力特性进行了分析研究，理论给出了波浪力迭加算法，并把计算结果与小尺度的网箱水槽实验进行对比验证。王鲁民^[26]采用网箱模型试验，对周长50m，深8m的HDPE双管圆形重力式网箱，在不同配重、网片规格和流速条件下的阻力性能进行研究。王飞^[27]通过对浙江省嵊泗县鳗局岛圆柱形网箱所受流速的海上实测，导出在水流作用下在一定条件下，圆柱形网箱网衣水阻力公式，并与模型试验结果进行了比较。

5、结语

目前我国在网箱动力分析的研究主要集中在对国外成熟的网箱研究成果的引进消化吸收上，远不能满足我国抗风浪网箱发展的需要。

参考文献

- [1]. 郭根喜.我国深水网箱养殖产业化发展存在的问题与基本对策[J].水产科技,2005,(3).
- [2]. 徐君卓.国外大型深水养殖网箱类型介绍[J].中国水产,2001,(10).
- [3]. 钱春茂,周永平,徐皓.深水抗风浪网箱的应用与改进[J].渔业现代化,2003,(6).
- [4]. 黄祥鹿,陆鑫森.“海洋工程流体力学及结构动力响应”,上海交通大学出版社,1992.
- [5]. Baldwin, K, Celikkol, B, Steen, R, Michelin, D, Muller, E, Lavoie, P(2000). Open ocean aquaculture engineering: mooring & net pen deployment, Marine Technology Society Journal, 34 (1): pp53-58
- [6]. 莫才成.“海上箱网在台风波浪中的工程行为”,99 海岸海洋资源与环境学术研讨会论文集,广州,2000
- [7]. Le Bris, F.; Marichal, D. (1999). Numerical and experimental study of submerged flexible nets: Applications to fish farms, Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. 3, p 749-755.
- [8]. 詹杰民,胡由展,赵陶,孙明光.渔网水动力试验研究及分析[J],海洋工程,2002(5)
- [9]. Terada, T., Sekine, I., Nozaki, T., 1914. Study on the resistance of fishing net against flow of water. Journal of the Imperial Fisheries Institute, Tokyo 10 (5), 1-23.
- [10]. Milne, P.H., 1972. Fish and Shellfish Farming in Coastal Waters. Fishing News (Books), London.
- [11]. Kawakami, T. Kawakami, The theory of designing and testing fishing nets in model. In: Modern Fishing Gear of the World vol. 2, Fishing News (Books), London (1964).
- [12]. Aarsnes et al. J.V. Aarsnes, H. Rudi and G. Loland, Current forces on cage, net deflection. In: Engineering for Offshore Fish Farming, Thomas Telford, London (1990), : 137-152.
- [13]. Gignoux and Messier, H. Gignoux and R.H. Messier, Computational modeling for fin-fish aquaculture net pens, Ocean. Eng. Int. 3 (1999) (1), : 12-22.
- [14]. Mannuzza, Mannuzza, M. Hydrodynamic Forces on Floating Offshore Aquaculture Cages. Master Thesis, University of Maine, 1995 :153.
- [15]. Bessonneau J.S, Marichal D. Study of the dynamics of submerged supple nets (applications to trawls). Ocean Eng. 1998; 25: 563-583.
- [16]. Katuya Suzuki . Validity and visualization of a numerical model used to determine dynamic configurations of fishing nets. Fish. Sci. 2003; 69: 695-705.
- [17]. Lee, C.-W. , Lee, J.-H. , Cha, B.-J. , Kim, H.-Y. , Lee, J.-H. Physical modeling for underwater flexible systems dynamic simulation Ocean Engineering Volume 32, Issue 3-4, 3 March 2005, : 331-347
- [18]. I. Tsukrov, O. Eroshkin, D. Fredriksson, M.R. Swift and B. Celikkol, Finite element modeling of net panels using a consistent net element, Ocean Eng. 30 (2003) (2), pp. 251-270.
- [19]. P. Lader and A. Fredheim, Modeling of Net Structures Exposed to 3D Waves and Current, Open Ocean Aquaculture IV, St. Andrews, Canada (2001)
- [20]. 李玉成,宋芳.碟形网箱水动力特性[C].2003 年度海洋工程学术会议论文集,2003.
- [21]. 李玉成,宋芳,张怀慧,董国海.拟碟形网箱水动力特性的研究[J].中国海洋平台,2004,(1).
- [22]. 李玉成; 桂福坤; 宋芳; 滕斌; 漂浮状态下重力式及碟形网箱锚绳受力特性的比较[J].水产学报,2005,(4)
- [23]. 章守宇,刘洪生.飞碟型网箱的水动力学数值算法[J].水产学报,2002,(6).
- [24]. J.M. Zhan ,X.P. Jia, Y.S. Li , M.G. Sun, G.X. Guo and Y.Z. Hu .Analytical and experimental investigation of drag on nets of fish cages .Aquacultural Engineering Available online 27

October 2005

[25]. 宋伟华,梁振林,关长涛,赵芬芳,黄六一,朱立新.方形网箱水平波浪力的迭加计算和实验验证.海洋与湖沼[J] 2004(5)

[26]. 王鲁民,黄洪亮,王明彦.圆形重力式网箱阻力性能研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2004,(4).

[27]. 王飞.水流作用下圆柱形网箱阻力的数值计算 浙江海洋学院学报(自然科学版) 2004(6)

Advance in Dynamic Analysis of Fish Cages

J. M. Zhan and W. Su

Department of Applied Mechanics and Engineering, Zhongshan University,
Guangzhou 510275

E-mail: stszjm@zsu.edu.cn

Abstract: The dynamic analysis of net cages in wave and current is needed to improve design, performance and reliability of such structures. The research history of net cages, including the relevant important theories, experiments and numerical models, are reported in the paper.

Keywords: open ocean aquaculture, flexible structure, hydrodynamics, fishing net