

综 述

声音导鱼技术的分析与展望

胡运燊^{1,2}, 石小涛², 刘德富², 陈 帅³, 王从锋², 陈求稳², 郑 胜¹, 白艳勤²

(1. 三峡大学 理学院, 宜昌 443002;

2. 三峡大学 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002;

3. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090)

Technology Analysis and Outlook for the Sound Guidance Fish

HU Yun-shen^{1,2}, SHI Xiao-tao², LIU De-fu², CHEN Shuai³, WANG Cong-feng²,
CHEN Qiu-wen², ZHENG Sheng¹, BAI Yan-qin²

(1. College of Science, China Three Gorges University, Yichang 443002, P. R. China;

2. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region,
China Three Gorges University, Yichang 443002, P. R. China;

3. Key Laboratory of East China & Oceanic Fishery Resources Exploitation and Utilization,
Ministry of Agriculture, Shanghai 200090, P. R. China)

摘要: 声音导鱼技术对保护鱼类有重要的实际价值和深远意义,其研究重点是声音如何让鱼类产生趋避行为及如何准确的让鱼类产生趋或者避的行为。从生理学和行为学的角度对声音导鱼的生物学基础进行了分析;讨论了声音导鱼的关键技术,包括鱼类趋避行为对声音的响应关系、鱼类声域的确定、鱼类声音信号的采集、鱼类声波信号的数字化处理以及实际声场中声波的叠加技术等,并根据声音对鱼类诱驱作用的原理建立了一个声音导鱼的大坝模型,分析了大坝实现声音诱驱鱼的关键要素;展望了声音导鱼技术的发展前景和方向。

关键词: 声音;鱼类;行为控制;声域;信号采集;水利工程

中图分类号: TB56, S973.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2013)04-0089-06

随着水利建设的快速发展,我国已建成了许多大坝,如三峡大坝、葛洲坝、二滩和小浪底等。大坝在带来巨大社会经济利益的同时,也给生态环境带来巨大的影响。在各种影响鱼类资源量的因素中,水轮机可能导致鱼类存活率下降,过鱼设施可能过鱼效果不佳。避免鱼类进入水轮机以及协助鱼类通过过鱼设施的关键环节之一是将鱼类驱赶或诱导至特定区域。因此,在建造大坝时,设计者们通常设置了一些拦鱼装置阻挡鱼类进入泄洪口和水轮机的进水口,或设置了与过鱼设施配套的辅诱措施。尽管

取得了一定的效果,但导鱼效果依然有待提高,寻求更好的趋避鱼类方法迫在眉睫。

鱼类对光信号、电信号、流场、声音等都比较敏感,如何利用这些外界因素来实现导鱼,是近年来许多学者拟解决的问题。研究者提出了一种鱼类行为控制技术(乔云贵等, 2011)。鱼类行为控制技术是根据鱼类对声音、光照、电场及流场等物理刺激的反应规律来控制鱼类运动方向及活动范围的相关技术。由于光、电信号在水中衰减严重,而大范围水域下光照、流场、电场的控制难点较大,光电技术一般用于短距离、小范围内的行为控制。声信号在水中有着衰减小、传播速度快、影响范围广的特点,为鱼类驱诱技术提供了新的研究方向。近年来,研究者对声音导鱼做了研究(Loeffelman et al, 1991; Nestler & Ploskey, 1996; Jame & GIBSON, 2002; Myberg, 1972),希望通过声音来达到驱鱼或诱鱼的目的。本文对声音导鱼系统的原理与技术进行分析,为声音导鱼研究提供参考。

收稿日期:2013-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(50979049, 51009082, 51210105017);水利部公益性行业科研专项(201201030, 201201028-02);水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室开放基金。

通讯作者: 郑胜, 1965年生,教授,主要从事图像处理、目标识别、神经网络与智能控制研究。E-mail: zsh@ctgu.edu.cn

作者简介: 胡运燊, 1988年生,男,硕士研究生,主要从事计算机科学与鱼类行为交叉研究。E-mail: huyunshen888@163.com

1 声音导鱼的生物学基础

1.1 鱼类发声和听力的生理学基础

目前,关于鱼类发声系统的研究报道很多,主要集中在海洋动物发声系统的研究,但其发声机理还没有系统的报道,需要研究的内容包括振动产生声音的特定组织、产生声音的能量来源、声音的调制、声音能量在水体中的耦合等。目前已知大约 100 种鱼类存在发声行为,不同鱼类发出的声音不同,同种鱼类发出的声音也会随着不同的环境及昼夜节律、季节等发生变化。鱼类发出的声波频率在 5 ~ 5 000 Hz,大多数鱼类发出的声波频率在 1 kHz 以下 (Fay & Popper, 1999; Mann et al, 1997)。

鱼类听觉系统是鱼类对外界声音环境产生应激反应的主要系统。鱼类的听觉系统包括耳、气鳔及其他外周附属结构和听觉中枢 (Maria et al, 2009)。研究者对鱼类是否存在鱼耳进行了研究,发现部分鱼类存在鱼耳 (Chapman, 1973)。鱼的耳相当于哺乳类动物的内耳,有 3 个半规管和椭圆囊的前庭管;包括球状囊和听囊,是听觉器官的主要部分。鱼只有内耳,生在眼后的头内。内耳是个椭圆囊,上有小孔,可以感觉平衡。鱼体内的鱼鳔能起到辅助内耳的作用 (Sand & Enger, 1973)。此外,在鱼体表面的两侧,还可以见到一条长长的横线,叫做侧线,覆盖在侧线上的鳞片,叫做线鳞,上有管孔,内与皮肤侧线管系统相连,外与外界相通,能感觉水波的振动,接受低音和超低音频率 (申钧, 1983; Myberg et al, 1976; Maria et al, 2009)。

1.2 鱼类对声音的趋避行为

鱼类能够依靠内耳和侧线对各种声音刺激产生相应的感觉,并由此出现各种各样的行为反应——趋音性 (Maria et al, 2009; Hawkins, 1986)。朱存良 (2007) 在鱼类行为生态学研究进展中指出鱼类的趋音性包括正趋音性和负趋音性 2 种类型。正趋音性表现为在外界声音刺激下趋向声源,例如,近年来开始出现的“声诱渔业”、“海洋牧场”便是以鱼类的这种正趋音性为根据的 (Vassalini et al, 2003); 负趋音性表现为鱼在声音刺激下避开声源的方向游动,研究者常根据鱼类的这种负趋音性利用声音来阻拦和驱赶鱼群。值得指出的是,并非所有的鱼类都会出现正趋音性或者负趋音性,有些鱼类对声音刺激的反应非常迟钝,甚至毫无反应,表现为中性反应。张国胜等 (2010) 通过用 300 Hz 脉冲音对许氏平鲈幼鱼进行诱集实验,探讨了在 300 Hz 脉冲波断

续音刺激下许氏平鲈幼鱼诱集效果,最终实验结果表明 300 Hz 脉冲音对许氏平鲈幼鱼有明显的诱集作用。张沛东等 (2005) 研究了鲤、草鱼在声音刺激下对八字门的反应,实验结果得出 2 种实验鱼对 400 Hz 正弦波连续音的刺激反应敏感,在声音刺激下,2 种鱼八字门的通过率非常高,得出声音对鲤、草鱼的诱导作用显著。Taft (1995) 对声音驱赶鱼类做了实验研究,结果表明声音频率在 150 ~ 200 Hz 范围内击退鱼类的效果明显。因此,不同鱼类表现出对声音的不同行为反应。

2 声音导鱼的关键技术

声音导鱼的关键技术在于首先找到合适的声音,然后通过某种特殊的方式让这种声音在水中形成一定大小和频率的声波来实现诱驱鱼 (Kline et al, 1992; Jamie & GIBSON, 2002; 邢彬彬等, 2009)。其中需要解决的难题总结起来有 2 个方面:①如何选择声音的波形、大小和频率等;②如何实现声音在水下产生有效声波。解决了这 2 个难点后,可以通过播放鱼类畏惧的声音来驱鱼,播放鱼类喜欢的声音来引诱鱼。实现这些目的需要做的研究概括起来如图 1。

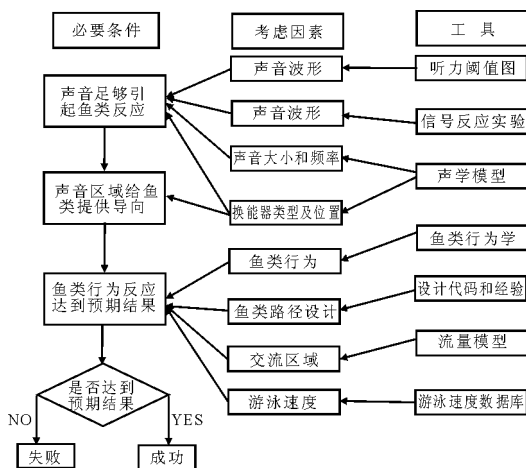


图 1 声音导鱼技术示意

Fig. 1 Voice guide fish technical sketch

2.1 鱼类趋避行为对声音的响应关系

鱼类表现出对声音不同的趋避行为 (Dunning et al, 1992)。例如,在水中敲击铁链时,比目鱼就从海底向发声处游来,而鲟却不喜欢,避而远之。一般认为,鱼类对同类的游泳声和摄食声、异性的求偶声等呈正趋音性;而对其同类的负伤声和逃避声、外敌的摄食声和游泳声以及渔船、渔具发出的异常声等呈负趋音性 (朱存良, 2007)。鱼类的这种反应规律具

有一定的生物学意义,在其索饵、生殖及防御等各种行为中起着很大的作用。另外,何大仁和蔡厚才(1998)在鱼类行为学研究中指出,同音调和强度持续不变的声音相比较,鱼类往往对音调和强度不断变化的声音有较好的反应。张沛东等(2004)在音响驯化对鲤和草鱼的诱引研究中指出,鱼类听觉对频率和强度不变的声音刺激的适应是非常迅速的,所以长期处在这种性质的声场中的鱼类,其听力将会明显下降,对此种声音即使开始呈正趋音性(或负趋音性)的反应,最终也将会变为呈中性反应;此外,声强必须大于某一阈值后才会引起新的反应,声音越大,反应也越强烈。

声音导鱼的目标是实现声音对鱼类行为的影响,需要了解鱼类趋避行为对声音的响应关系。Hawkins(1986)通过实验证明了鱼类对不同频率的声音有不同的行为反应。Nestler等(1992)研究了鲱对声音频率及声音大小的反应,当声音大小为160~175 dB、频率为100~1 000 Hz时,鲱惊吓反应的时间很短,当声音大小为187~200 dB、频率为 $124.6 \times 10^3 \sim 130.9 \times 10^3$ Hz时,鲱逃离声源处60 m外,时间长达1 h,实验结果表明声音的大小及频率对鱼类的趋避行为有影响。因此,了解鱼类趋避行为对声音的响应关系是实现声音导鱼的关键环节之一。鱼类行为与声音之间的响应关系尚需进一步研究,应用声音实现导鱼的实践也有一定的提升空间。

2.2 鱼类敏感声域的确定

鱼类能听到的声音是由声音的大小和频率来决定的。不同大小和频率的声音对鱼类的刺激是不同的,须通过不断实验找出鱼类听力的阈值图。Nedwell等(2002)研究了虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)的听力(图2),虹鳟对声音强度的敏感值为116 dB、100 Hz。蔡亚能(1978)介绍了一种测量鱼类听觉的方法:首先对鱼做手术,将0.5 mm的银丝电极安放在鱼的脑与球状囊之间的球状囊感觉上皮处,然后将鱼放在水下一定深度,将插入的电极用电线连接到水下放大器上;最后通过在水下放置的喇叭播放各种不同频率和大小的声音,来自鱼的信号将被水下差分放大器放大,并在双线示波器上显示出来,通过显示的微音器电位大小就可以知道鱼对该种声音的听力能力,通过数据统计就可以得出鱼的听力阈值图。

在得出鱼类听力阈值图后,就可以知道鱼类最敏感的声音的大小和频率的范围。在驱鱼和诱鱼时,就可以确保播出的声音在鱼类听觉的最敏感区,

可以有效提高实践应用的效果和成功率。

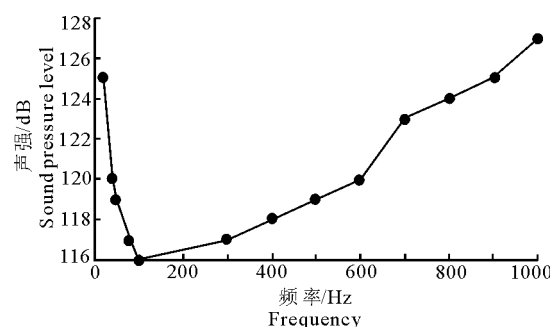


图2 虹鳟听力阈值

Fig.2 Hearing threshold figure of *Oncorhynchus mykiss*

2.3 鱼类声音信号的采集

绝大多数的鱼类发出的声音是无法直接用人耳来听到的。对于这些听不到的声音,在还没有知道其波形特点的情况下,是无法直接用计算机来合成的。在诱驱鱼实验中,如果用鱼类同伴或者异性的声音来诱捕鱼,用鱼类天敌的声音来驱赶鱼,可以达到较好的实验效果,这有利于声音诱驱鱼实验研究的长远发展。但由于无法使鱼在特定时间和地点发声,且鱼发出的声音大多是人耳无法听到的,同时环境噪声也会干扰探测鱼的声音,因此如何采集鱼类声音信号的问题亟待解决。一般条件下通过普通的水听器是很难探测到所需要的鱼的声音,这就需要使用特殊的探测鱼声音信号的装置。崔秀华等(2012)研究了鱼声信号检测系统,对于探测到的声音,需要通过计算机模拟出鱼类声音的时域波形图。Sprague(2000)指出鱼鳔发声信号的产生是由声肌神经收缩和鱼鳔阻尼共振共同作用决定的;前者决定了声信号波形振荡上升的过程,后者决定了随后的振荡衰减过程。Rosenberg(1971)在研究声门脉冲的形状对语音质量的影响时,提出了用分段函数合成的脉冲来代替自然声门脉冲的思路,类比于声门脉冲的合成方法,在分析成鱼和中鱼单个声音脉冲信号时,将最大振幅之前的振荡上升部分称之为part1,随后的振荡衰减部分为part2。根据这个原理,张赛等(2011)提出运用以下公式所示的分段指数正弦振荡函数来合成大黄鱼发声信号。

$$P = \begin{cases} A_0 + A_1 e^{\gamma t} \cos(\omega t + j) & t < \tau \\ A_0' + A_1' e^{\gamma' t} \cos(\omega' t + j') & t \geq \tau \end{cases} \quad (1)$$

式中, τ 为脉冲幅度最大时刻; γ 和 γ' 为衰减指数,反映了声音信号幅度变化的快慢程度; ω 和 ω' 为振荡频率,反映了声音信号的振荡快慢; j 和 j' 为初始相位; A_1 和 A_1' 为初始振幅; A_0 和 A_0' 为静态量。

2.4 鱼类声波信号的数字化处理

声音采集装置是运用话筒将声音转换成电信号,采集到的电信号是属于模拟信号。为了将原始模拟声音信号变为数字信号,必须经过采样和量化2个步骤,从而得到时间和幅度上均为离散的数字声音信号。根据采样定理(贾中云等,2012),当采样频率大于信号的2倍带宽时,采样过程不会丢失信息,利用理想滤波器可从采样信号中不失真地重构原始信号波形。在将声音信号进行数字化前,必须先经过防混叠滤波,然后声音信号通过A/D变换转换成数字信号。防混叠滤波器为一带通滤波器,其作用有2个:其一是抑制输入信号中频率超过 $f_s/2$ 的所有分量(f_s 为采样频率),以防止混叠干扰;其二为抑制50 Hz的市电干扰。A/D变换包括取样、量化和编码,其作用是把连续声音信号转为时间和幅度都是离散的数字信号(黄英来,2006)。声音的数字化处理过程如图3。

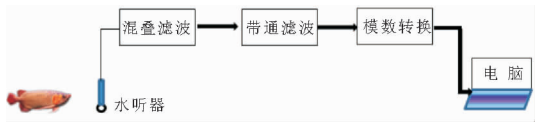


图3 鱼类声波信号数字化处理过程

Fig.3 Fish acoustic signal digital processing

数字化的声音信号将依次存入一个数据区,在处理时,按帧从数据区中取出数据。通常,声音信号处理的帧长取为20 ms(取样频率为11 kHz,相当于每帧220个采样值)。在取数据时,前一帧和后一帧之间的交叠部分称为帧移。帧移与帧长的比值一般取为0~1/2。李宏松等(2006)提出为了减少帧起始和结束处的信号不连续性,在得到短时的声音信号后,要对声音信号进行加窗的操作,为了使每帧在频谱上的能量更集中,最好能在分帧的同时进行加窗处理。窗函数的选择将影响到声音信号的结果,常用的窗有方窗、汉明窗、汉宁窗。

方窗(Rectangular Window):

$$w(n) = \begin{cases} 1 & (0 \leq n \leq N-1) \\ 0 & (n < 0 \text{ 或 } n \geq N) \end{cases} \tag{2}$$

汉明窗(Hamming Window):

$$w(n) = \begin{cases} 0.54 - 0.46\cos(\frac{2\pi n}{N-1}) & (0 \leq n \leq N-1) \\ 0 & (n < 0 \text{ 或 } n \geq N) \end{cases} \tag{3}$$

汉宁窗(Hanning Window):

$$w(n) = \begin{cases} 0.5(1 - \cos(\frac{2\pi n}{N-1})) & (0 \leq n \leq N-1) \\ 0 & (n < 0 \text{ 或 } n \geq N) \end{cases} \tag{4}$$

式中, N 为窗口长度。对声音信号的时域分析来说,窗函数的形状很重要,虽然矩形窗的平滑比较好,但容易使波形细节丢失,并且会产生泄露现象,而汉明窗则能有效地克服泄露现象,所以,在声音辨认系统中加窗的方法大致以汉明窗口为常见。

2.5 实际声场中声波的叠加

由于自然界中存在各种各样的环境噪声,在自然环境中任意一点的声音都是多个声音共同作用的结果。在实际的声音诱驱鱼装置中,通常是多个扬声器组成的扬声器阵列,空间中每一点的声音都是各个扬声器加上外界环境噪声共同作用的结果(Zeddies et al,2010)。张国胜等(2012)指出水下环境噪声是水声信道中的一种干扰背景场,包括海洋噪声、生物噪声、地震噪声、雨噪声和人为噪声(航海、工业、钻探等噪声),大坝泄洪时也会产生很大的环境噪声。在海洋环境噪声场中,声波来源广泛,不同声源场产生不同频率和声级的噪声,同一频率范围的噪声可能由1个或多个声源产生。鉴于环境噪声时时刻刻都存在,实验中只要不是人为刻意制造的噪声,通常可以忽略其对实验的影响。在扬声器阵列中,同一个声音同时通过多个扬声器发出声波,那么空间中某点的声音实际上是多列简谐波共同作用的结果,这点的瞬时声压就等于各列波在这点的瞬时声压之和 $p_t = \sum_{i=1}^n p_i$,写成声压级的形式为 $Lp_t = 10 \lg(\sum_{i=1}^n 10^{0.1Lp_i})$ 。假设有2个声源,而且2个声源发出的声音都为相同频率不同振幅的余弦波,空间中某点与2声源的距离分别为 x_1 、 x_2 ,则2列波在这点的瞬时声压分别为:

$$\begin{cases} p_1 = p_{A1} \cos(\omega t - kx_1) = p_{A1} \cos(\omega t - \phi_1) \\ p_2 = p_{A2} \cos(\omega t - kx_2) = p_{A2} \cos(\omega t - \phi_2) \end{cases} \tag{5}$$

式中, p_1 、 p_2 为第1、2列波在 P 点的瞬时声压,单位Pa; p_{A1} 、 p_{A2} 为第1、2列波的声压幅值,单位Pa; ϕ_1 、 ϕ_2 为第1、2列波的初相位, $\phi_1 = kx_1$ 、 $\phi_2 = kx_2$ 。

$$p_t = p_1 + p_2 = p_{A1} \cos(\omega t - \phi_1) + p_{A2} \cos(\omega t - \phi_2) \tag{6}$$

$$p_t = p_{At} \cos(\omega t - \phi_0) \tag{7}$$

式中: $\phi_0 = \text{tg}^{-1} \frac{p_{A1} \sin \phi_1 + p_{A2} \sin \phi_2}{p_{A1} \cos \phi_1 + p_{A2} \sin \phi_2}$

$$p_{At}^2 = p_{A1}^2 + p_{A2}^2 + 2p_{A1}p_{A2} \cos(\phi_2 - \phi_1)$$

这2列波的相位差 $\Delta \phi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda}(x_2 - x_1)$ 。如果声场中某点的 x_2 、 x_1 为定值,则这2列波

有固定相位差。这种具有相同频率和固定相位差的声波称为相干波,它们的叠加就是相干波叠加。2列相干波在空间某些地方始终加强,在空间某些地方始终减弱,这种现象称为干涉现象。

2.6 声音导鱼效果的模拟——以大坝实现声音驱鱼为例

实现声音在水中播放,一般需要经过以下步骤:声音通过声音信号发生器发送到功率放大器中,功率放大器提高声音的功率即声音的响度,然后通过水下喇叭播放出来(Birmann,1999)。根据这些原理和装置,可以在大坝附近设计一个带有水下扬声器阵列的装置(Loeffelman et al,1991;Nestler et al,1996;特恩彭尼,2002)。当大坝泄水时,可以通过播放某种鱼类畏惧或不喜欢的声音,让鱼类远离大坝出水口,从而有效保护鱼类免受伤害。图4(Nedwell et al,2002)是一种带有声音驱鱼装置的大坝模型,包含有很多水下扬声器,扬声器排列成一排。

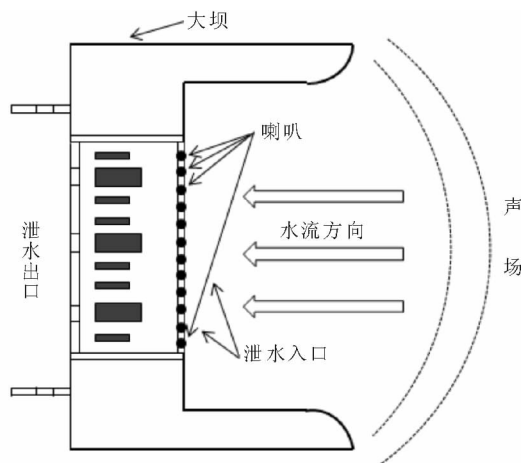


图4 一种带有扬声器阵列装置的大坝模型

Fig.4 A device with a loudspeaker array of dam model diagram

对于声音导鱼的大坝模型还有很多种,不同的大坝结构对应有不同的扬声器阵列形式,产生的声音叠加效果也不同。在大坝泄洪时,通过扬声器播放鱼类畏惧的声音,播出来的声音会在大坝前产生一个大范围的声场。如果能保证在离坝前一段距离范围内的声音大小和频率在鱼类声音敏感域内,当鱼群接近大坝时,一旦鱼类感受到播放出的声音并产生畏惧感时,鱼群就不会继续靠近,从而有效阻止鱼群进入大坝泄洪入口,有效减少因大坝泄洪而带来的鱼类的伤亡。

3 总结与展望

声音导鱼是一项较新的技术,尽管其已经有了

一定的实践基础,但总体上尚处于初步发展阶段。近年来,我国水电工程的建设规模不断扩大,建设的水平也不断提高,水电建设过程中对鱼类保护的要求也在提高,定向导鱼技术在防止鱼类进入水轮机、诱导鱼类进入过鱼设施或特定区域有较大的应用空间。同时,我国海域面积辽阔、海洋生物种类繁多,“蓝色农业”已经成为我国农业发展的前沿领域之一,成为未来解决资源和环境问题的战略领域,而声音导鱼技术有望在蓝色农业发展过程中发挥特定作用,如实现大规模诱捕鱼。因此,开展声音导鱼技术的研究具有深远而重大的意义,不仅可以配合水电开发实现驱诱鱼进而保护鱼类,而且可以在海洋牧场中诱捕鱼从而带来经济效益。在有关声音导鱼研究尚不充分的背景下,有必要深入挖掘导鱼技术。未来对声音导鱼技术的研究具体包括:① 鱼类的发声机制及鱼类的声音信号的采集与数字化,② 鱼类能感受到的声音的大小和频率规律图,③ 鱼类对声音的趋避行为研究,④ 水下扬声器阵列摆放模式及实际声音区域中各点声音的合成图,⑤ 通过计算机模拟仿真鱼类在声场下的行为反应。

参考文献

- 蔡亚能. 1978. 鱼类听觉的现场电生理研究[J]. 海洋科技资料, (1): 58-63.
- 崔秀华, 胡国兵, 崔金魁. 2012. 鱼声信号检测系统的设计与实现[J]. 科学技术与工程, 12(25): 6416-6419.
- 何大仁, 蔡厚才. 1998. 鱼类行为学[M]. 厦门: 厦门大学出版社: 46-72.
- 黄英来. 2006. 基于动物声音的个体辨认技术的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学.
- 贾中云, 李秀梅, 董文. 2012. “数字信号处理”中采样定理的教学探索[J]. 中国电力教育, (29): 52-53.
- 李宏松, 苏健民, 黄英来, 等. 2006. 基于声音信号的特征提取方法的研究[J]. 信息技术, (1): 91-95.
- 乔云贵, 黄宏亮, 陈帅, 等. 2011. 气泡幕在鱼类行为研究中的应用[J]. 现代渔业信息, 26(12): 29-32.
- 申钧. 1983. 鱼类听觉器官的结构与功能[J]. 生理科学与进展, 14(1): 58-62.
- 特恩彭尼. 2002. 诱鱼过坝的新型音响导鱼系统[J]. 水利水电快报, 23(23): 19-20.
- 张沛东, 张国胜, 张秀梅, 等. 2004. 音响驯化对鲤鱼和草鱼的诱引作用[J]. 集美大学学报, 9(2): 110-115.
- 张沛东, 张国胜, 张秀梅, 等. 2005. 鲤、草鱼在声音刺激下对八字门的反应行为研究[J]. 大连水产学院学报, 20(3): 212-217.
- 张国胜, 张阳, 王利民, 等. 2010. 300Hz 脉冲音对许氏平鲷幼

- 鱼的驯化效果[J]. 大连海洋大学学报, 25(5):413 – 416.
- 张国胜, 顾晓晓, 邢彬彬, 等. 2012. 海洋环境噪声的分类及其对海洋动物的影响[J]. 大连海洋大学学报, 27(1): 89 – 94.
- 张赛, 魏翀, 徐晓辉, 等. 2011. 大黄鱼声音信号合成方法研究[J]. 声学技术, 30(6): 235 – 236.
- 邢彬彬, 张国胜, 陈帅, 等. 2009. 声音对不同体长鲤的诱集效果[J]. 大连水产学院学报, 24(2): 120 – 124.
- 朱存良. 2007. 鱼类行为生态学研究进展[J]. 养殖技术, (1): 20 – 24.
- Birmann M. 1999. Assessment of a high frequency sound fish diversion system at the Annapolis tidal generating station with notes about the survival of fish moving seaward at the Annapolis causeway [M]//Gibson A J F, Myers R A. Sound system installation and sound field measurements Acadia Centre for Estuarine Research. Wolfville: Nova Scotia: 68 – 97.
- Chapman C J. 1973. Field studies of hearing in teleost fish [J]. Helgol Wiss Meeressunter, 24: 371 – 390.
- Dunning D J, Ross Q E, Geoghegan P G, et al. 1992. Alewives avoid high-frequency sound [J]. North American Journal of Fisheries Management, 12: 407 – 416.
- Fay R R, Popper A N. 1999. Comparative Hearing. Fish and Amphibians [M]. New York: Springer – Verlag Press: 363 – 411.
- Hawkins A D. 1986. Underwater sound and fish behavior. Behaviour of teleost [M]. Sydney: CROOM HELM London & Sydney: 114 – 152.
- Jamie A, GIBSON F. 2002. Effectiveness of a High-Frequency-Sound Fish Diversion System at the Annapolis Tidal Hydroelectric Generating Station, Nova Scotia [J]. North American Journal of Fisheries Management, 22: 770 – 784.
- Klinec, David A, Loeffelman, et al. 1992. New-signal development process and sound system for diverting fish from water intakes: Proceedings of the 54th Annual Meeting of the American Power Conference, April 1, 1992 [C]. Columbus: Illinois Inst of Technology Author affiliation: 427 – 432.
- Loeffelman P H, Klinec D A, Van Hassel J H. 1991. Fish protection at water intakes using a new signal development process and sound system: Proceedings of the International Conference on Hydropower, July 24, 1991-July 26, 1991 [C]. New York: ASCE: 355 – 365.
- Maria Wilson, Eric W, Montie, et al. 2009. Ultrasound detection in the Gulf menhaden requires gas-filled bullae and an intact lateral line [J]. The Journal of Experimental Biology, 212: 3422 – 3427.
- Myberg Jr A A, Gordon C R, Klmley A P. 1976. Sound Reception in fish [M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company: 149 – 228.
- Myberg A A. 1972. Using sound to influence the behavior of free-ranging marine animals [J]. Behavior of Marine Animals, 2: 435 – 468.
- Mann D A, Lu Z, Popper A N. 1997. A clupeid fish can detect ultrasound [J]. Nature, 389 – 341.
- Nedwell J R, Turnpenny A W H, Lambert D R. 2002. Guiding Fish with Sound: The Acoustics of Behavioral Barrier Design: American Fisheries Society Symposium 2002 [C]. Baltimore, USA.
- Nestler J M, Ploskey Gene. 1996. Sound way to save fish [J]. Civil Engineering, 66(9): 58 – 61.
- Nestler J M, G R Ploskey, J Pickens, et al. 1992. Responses of blueback herring to high-frequency sound and implications for reducing entrainment at hydropower dams [J]. North American Journal of Fisheries Management, 12: 667 – 683.
- Rosenberg A E. 1971. Effect of Glottal Pulse Shape on the Quality of Nature Vowels [J]. JASA, 49(2): 583 – 590.
- Sand O, Enger P S. 1973. Evidence for an auditory function of swimbladder in cod [J]. J Exp Biol, 59: 405 – 414.
- Sprague W. 2000. The single sonic muscle twitch model. the sound – production in the weakfish, Cynoscion regalis [J]. JASA, 108(5): 2403 – 2437.
- Taft E P, Winchell F C, Amaral S V, et al. 1995. Recent advances in sonic fish deterrence: Proceedings of the 1995 International Conference on Hydropower, July 25, 1995-July 28, 1995 [C]. Holden: Alden Research Lab: 1724 – 1733.
- Vassalini Gennaro, Fedrizzi, Marco. 2003. Underwater sound level in intensive fish farming: Proceedings of the Tenth International Congress on Sound and Vibration, July 7, 2003-July 10, 2003 [C]. Monterotondo: Institute of Acoustics Author affiliation: 2643 – 2649.
- Zeddies, David G, Fay R R, et al. 2010. Sound source localization by the plainfin midshipman fish, *Porichthys notatus* [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 127(5): 3104 – 3113.