

鱼类友好型水轮机设计研究综述

杨春霞¹, 郑源^{1,2}, 张玉全¹, 罗红英²

(1. 河海大学能源与电气学院, 南京 211100; 2. 西藏农牧学院, 西藏林芝 860000)

摘要: 当鱼类资源通过常规水轮机时会不可避免地受到损伤。受伤和死亡的鱼类会对水域造成污染, 从而制约了水电工程的生态发展。针对鱼类下行过坝的措施及存在的问题, 笔者介绍了鱼类通过水轮机流道下行时可能受到的伤害机理, 主要分为机械、压力、剪切力和空蚀四种。鱼体的损伤程度与鱼体的种类、尺寸、进入水轮机系统的方式等因素有关。本文根据过鱼损伤机理, 提出目前鱼类友好型水轮机设计的主要思路, 阐述了传统的水轮机进行鱼类友好设计的准则和典型的鱼类友好型水轮机的设计理念。

关键词: 鱼类友好型水轮机; 鱼体损伤机理; 水动力; 设计优化

中图分类号: TV74 **文献标识码:** A

A Review of Research on the Design of Fish-Friendly Hydraulic Turbines

Yang Chunxia¹, Zheng Yuan^{1,2}, Zhang Yuquan¹, Luo Hongying²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Linzhi 860000, Tibet, China)

Abstract: Fish suffers inevitable injuries when passing a common hydraulic turbine. Injury and mortality of fish will cause pollution to the water. This will restrict the ecological development of the hydropower project. Aiming at the measures for downstream passage of the fish and existing problems, four kinds of injury mechanisms, namely, mechanical, pressure, shear force and cavitation injuries, are introduced in this paper. The injury degree of fish is related to the type and size of the fish body and the way to enter the hydraulic turbine system. According to the injury mechanisms, the main idea of the design of a fish-friendly hydraulic turbine is put forward. The criteria for designing a conventional fish-friendly hydraulic turbine and the design philosophy of a typical fish-friendly hydraulic turbine are expounded.

Keywords: fish-friendly hydraulic turbine; fish injury mechanism; hydrodynamic force; design optimization

一、前言

水电被归类为可再生能源,《可再生能源发展“十三五”规划》指出可再生能源是中国非化石能源

的主力,也是中国未来能源转型的依托。“十三五”可再生能源发电装机总量年均增长 4.25×10^7 kW、总投资规模将达 2.5 万亿元。清洁低碳能源将是“十三五”期间能源供应增量的主体 [1,2]。党的

收稿日期: 2018-05-09; 修回日期: 2018-05-16

通讯作者: 杨春霞, 河海大学, 讲师, 主要研究方向为水轮机优化设计及海洋能开发; E-mail: yangchunxia@hhu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国能源技术革命的技术方向和体系战略研究”(2015-ZD-09); 国家自然科学基金青年项目“基于潮汐发电贯流式水轮机水动力特性的过鱼伤害机理研究”(51709086)

本刊网址: www.enginisci.cn

“十九大”报告提出要坚持新发展理念。发展是解决我国一切问题的基础和关键，发展必须是科学发展，必须坚定不移贯彻创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念，坚持人与自然和谐共生。目前，生态环境保护已经成为国家和社会关注的热点问题。在美国，绿色环保组织基于三文鱼的生态问题长期呼吁拆除哥伦比亚河下游的 Bennevilee、Dalles、John Day、McNary 四座电站大坝，缅因州肯纳贝克河上的爱德华兹水坝最终于 1999 年拆除，成为一个标志性事件。2015 年，重庆市“小南海电站”建设项目被环境保护部叫停的事件，也折射出我国水电开发中面临的巨大生态困境。然而，简单地将“鱼”与“水电”对立起来的认识显然是不可取的。考虑水电开发和生态的协调发展已经成为共识，专家学者和管理者千方百计地寻找能够缓解筑坝对鱼类洄游阻隔的办法。为上行过坝鱼设置鱼梯、升鱼机、鱼闸等通道；下行过坝鱼则主要通过溢洪道或水轮机泄放到下游。

二、鱼类下行过坝措施及存在问题

目前所有下行过鱼设施都会对鱼类产生一定程度的影响，且有些过鱼设施工程造价高、施工难度大，还可能影响水电站的发电量 [3]。

(1) 当采用机械运输时，耗费的人力和财力大，且鱼类在捕捞和运输过程中会受到不可控制的伤害；

(2) 鱼类通过溢洪道下行的存活率受流速、水头因素的影响，溢洪道作为目前常用的鱼类下行过坝措施，效果很不理想；

(3) 幼鱼旁路系统，常规工程中很难有横穿大坝的旁路水道，若是采用驳船和卡车运鱼，需要耗费大量的人力和财力，且在运输过程中不可避免地会造成幼鱼死亡；

(4) 采用水表面通道，幼鱼被诱导收集后仍需要通过机械运输或者溢流堰过坝。

对鱼类通过各种过鱼设施的生存率进行评估后发现，所有过鱼设施都会对鱼类产生一定程度的影响。

事实上，无论采用何种下行鱼类过坝措施，都无法避免会有一部分鱼类随着水流进入水轮机。因此，降低水轮机对鱼类的伤害，提高鱼类过坝存活

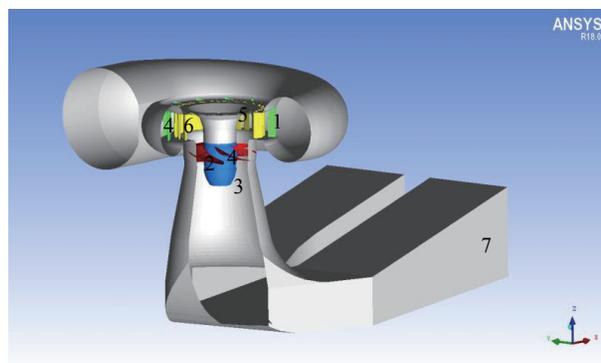
率，对水轮机及其流道进行改造十分重要。有研究表明，鱼类通过设计良好的水轮机的存活率要高于通过溢洪道的存活率。

三、鱼类通过水轮机的损伤机理研究

鱼类通过水轮机时的存活率主要依赖于鱼类通过水轮机系统时采取的路径。一旦鱼体离开前池，进入水轮机系统，它受到的伤害就和流道内非常迅速的几何物理变化和水流流动特性变化密切相关。1995 年，美国陆军工程师团 (USACE) 成立了一个水轮机流道鱼类存活率研究小组。通过分析，小组专家们将鱼类通过水轮机流道下行时可能受到的伤害机理分为机械、压力、剪切力和空蚀四种原因 [4~6]。图 1 给出了水轮机不同区域可能造成伤害的原因。

(一) 机械原因

鱼随水流通过水轮机流道时，直接与旋转的转轮叶片相撞、摩擦，摩擦伤害程度取决于流量和流速、水轮机叶片数目和间距以及流道的几何形状，但是并不能确定或区别由于摩擦所造成的损伤的量，鱼的死亡率随转轮圆周速度的增加而增加；通过活动导叶和固定导叶等固定机械部件引起的擦伤；鱼卡在叶片末端与外壳之间受到擦伤，可以通过检查鱼体判断擦伤情况，如局部擦伤、深层割伤，甚至是斩首伤害。但是，无法精确地判断伤害是由摩擦还是擦伤造成的，并且一些由擦伤造成的基本症状也有可能是其他的损伤机制所造成。



1—压力上升；2—压力突降；3—空化；4—撞击；5—擦伤；
6—剪切力；7—湍流

图 1 水轮机不同区域可能造成伤害的原因

鱼在撞击水轮机系统部件时可能会产生伤亡。鱼体撞击水轮机系统部件的可能性取决于几个因素：鱼的大小、叶片的数目及其间距、水轮机转速、流速和流量等。早在 1957 年，Raben [7] 就提出了一种叶片撞击模型，预测鱼类和涡轮叶片的潜在撞击概率，随后很多研究者拓展这个模型并应用在不同的涡轮机械中。直接的目测观察不到撞击伤亡的相关死亡率，也无法证明概率预测模型。Ploskey 等 [8,9] 将其应用在水轮机中，采用确定的和随机的叶片撞击模型来把新安装的新型水轮机过鱼性能和已有的水轮机进行比较。通过确定性模型预测的受伤率高于实验中受伤率，通过随机性模型的预测结果和实验结果基本一致。Esch 等 [10,11] 将叶片撞击模型应用在泵中，投入 1253 条鲤鱼到轴流泵中，在一个较宽的运行范围内研究鱼的损伤率，测量到的鲤鱼死亡率和叶片撞击模型得到的数据相一致。Deng 等 [12] 通过对原型尺寸的活鱼生存研究和物理水轮机模型中使用浮子的观察发现，两种叶片撞击概率预测模型相当。随机模型的预测比确定性模型的预测更接近实验数据，因为随机模型考虑了鱼接近水轮机转轮叶片前缘的方向。潘强等 [13] 研究了一种应用在轴流泵中的叶片撞击数学模型，对某一轴流泵鱼类通过性能进行了预测，包括叶片撞击概率、撞击死亡率和鱼类死亡率。

(二) 压力原因

水流通过水轮机流道进行能量转换时水压力发生改变，鱼从高压侧移动到低压侧时，因压力急剧变化使鱼体受到损伤，鱼体损伤的程度取决于压差的大小和梯度、鱼的类型、尺寸等因素。鱼体能承受的压力变化是和它们进入水轮机系统前已经适应的压力相关的，根据 USACE 的研究，鱼体承受压力的变化范围是从低水头水电站绝对压力（146 kPa）到高水头电站的绝对压力（605 kPa）。

有研究认为鱼对压力的降低比对压力的增加更敏感。压力和死亡率相关是因为鱼鳔减压而受到的损伤。图 2 为实验室测得的由于压力急剧下降导致的鱼死亡率情况。Xu 等 [14] 研究草鱼在射流泵中的运动及伤害情况，指出压力与速度变化导致的应力可能导致鱼鳃与鱼鳞的损伤，非对称的流道扩散可能造成鱼体与固壁的碰撞。

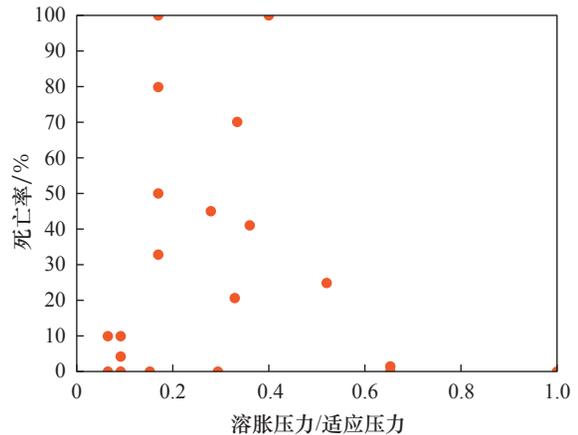


图 2 实验室测得由于压力急剧下降导致的鱼死亡率情况

(三) 剪切力和湍流原因

水流通过水轮机流道进行能量转换时水压力发生改变。水轮机过流流道中靠近固体边界附近出现较大的剪切应力，剪切力和湍流越大，鱼类受伤的可能性越大。最高剪切力值接近于流体和固体速度之间的交界面，比如叶片前缘、固定导叶和活动导叶。福伊特团队利用计算流体力学（CFD）分析来证实上述区域的高剪切力。当鱼进入水轮机系统中的“破坏性”剪切力区域时，鱼会受到伤害，有时甚至是致命的。伤害的程度和鱼的种类、大小及进入剪切带的方式有关。

大多数轴流式水轮机在活动导叶和转轮叶片之间有间隙，从这些间隙中的泄漏以及水轮机非最优工况在高剪切力区域导致流动分离从而产生涡。量化这些高剪切应力区域可以协助水轮机的设计和运行，从而减少剪切力区域，增强鱼的生存能力。例如，对于轴流式水轮机，最大化地倾斜叶片，并使叶片前缘角度和速度矢量相匹配从而减少涡，使剪切力区域减少。在混流式水轮机中，尾水管涡流中的漩涡也有相关的剪切力，并且可能是鱼受到伤害的剪切力的主要来源。

Neitzel 等 [15] 通过实验得到了鱼类对剪切速度的安全极限受鱼种类和方位的影响，用应变率作为强度指标来描述鱼在剪切环境中所受到的水动力，在应变率等于或小于 500 cm/s 时鱼没有明显损伤。Cada [16] 通过数值模拟及原型实验相结合的方法对幼蛙通过轴流式水轮机受到的剪切力损伤进行研究，结果得出水轮机流道中可能造成鱼体损伤

或死亡的剪切力区域为固定导叶与活动导叶附近区域、转轮区域及尾水管区域。

(四) 空蚀原因

空化气泡在产生和溃灭时所产生的高压冲击波会使鱼类产生损伤。

Turnpenny 等 [17] 采用水下火花发生装置来产生空化气泡, 试验中, 一组连续汽泡在试验鱼头部及身体周围溃灭, 并没有对试验鱼造成组织损伤, 但这并不代表水轮机内的空化气泡不会对过机鱼造成损伤。这种装置被认为并没有达到真正水轮机中空化气泡溃灭时产生的高能量水平。邵奇等 [18] 采用人工模拟方法模拟鲤鱼、草鱼、鲫鱼不同大小个体在不同水轮机工况条件下的损伤, 发现负压状态下压力梯度对鱼类的生存构成威胁, 鱼鳔受损, 在肝、肾等处有出血点。

四、鱼类友好型水轮机设计概念

(一) 鱼类友好型水轮机设计思路

目前, 国内外正积极努力研究既能高效发电又能帮助鱼类安全下行的鱼类友好型水轮机 [19~22]。研究者们对鱼类友好型水轮机的设计研究主要从以下思路着手: ①确定设计和评估标准, 包括: 确定过鱼目标存活率, 确定水轮机目标效率; ②初步计算水轮机的外形尺寸, 并进行三维几何建模; ③采用 CFD 技术对水轮机流场进行模拟, 根据计算结果对水轮机进行优化, 使得上述的机械、压力、剪切力、空蚀等因素满足目标鱼体的存活率要求, 同时还需满足水轮机的效率目标。

(二) 鱼类友好型水轮机设计进展

1. 鱼类友好型转桨式水轮机设计

美国能源部启动了“先进水电站水轮机系统科研计划 (AHTS)”, 该计划的目的是提出既能减少对鱼类损伤, 又能提高水轮机运行效率的鱼类友好型水轮机设计方案。在该计划中, 福伊特集团 (Voith) 提出了鱼类友好型转桨式水轮机的设计理论: 转桨式水轮机可高效率运行, 没有空蚀, 可降低伤害鱼类的概率; 除去转子中心体、叶片和转轮室中环附近的间隙, 包括导叶处的缝隙, 转轮体、叶片及出水环间的缝隙, 以降低鱼类受伤概率, 并

提高水轮机效率; 去除导叶的突出部分, 并通过变柱形出水环为球形出水环以减少间隙, 同时提高能效; 适当地布置固定导叶与活动导叶位置, 以消除因撞击而使鱼类受伤的可能性 [23,24]; 采用生物降解的润滑液、润滑脂和无润滑脂的活动导叶轴瓦, 避免有害的污染物进入水中; 抛光所有的表面焊缝, 以降低对鱼的擦伤等。

2. 鱼类友好型贯流式水轮机设计

目前鱼类友好型贯流式水轮机的设计主要按以下方法进行优化: ①增大转轮直径, 并相应降低转轮转速; ②减少转轮叶片数量, 减小转轮体积, 减小叶片长度, 采用厚的叶片前缘; ③减少导叶突起; ④增加导叶与叶片之间的距离; ⑤合理布置活动导叶和固定导叶, 使其位置及方向趋于一致; ⑥优化压力梯度, 减少压力突变。

3. 鱼类友好型混流式水轮机设计

鱼类友好型混流式水轮机的设计主要从以下几方面着手: ①减少叶片数, 加大流道尺寸; ②采用较厚的叶片进口边, 使转轮的效率和水头特性曲线更平坦; ③降低导叶的悬臂, 以消除产生有害涡流的间隙, 增加导叶对转轮之间的距离, 并使导叶与固定导叶对齐等。

4. 其他鱼类友好型水轮机设计

奥尔登 (Alden) 公司侧重于设计全新的水轮机 [25]。奥尔登水轮机采用螺旋状的叶片及叶片前缘装置旋转罩来消除常出现在叶缘附近的低压涡流阻力, 使鱼类可恰好从转轮叶片与座环的间隙通过, 如图 3 所示。通过 CFD 数值模拟计算表明, 在叶片附近, 流动沿着下游方向, 并且在轮毂和轮缘之间的叶片表面没有流动分离, 如图 4 所示。虽然奥尔登水轮机设计目标是消除可能造成鱼类伤亡的关键因子, 但其模型实验结果表明, 虽然保证了水轮机的高效率, 但水流在尾水管处存在大量漩涡, 这有可能使鱼类在通过尾水管时被绕晕, 致使其到下游后易被其他鱼类或鸟类捕食。

阿尔斯通 (ALSTOM) 研制了一种最小间隙转轮 (简称 MGR), 其概念为除结构上必须的间隙外, 叶片与轮毂、叶片与转轮室之间无间隙或者间隙尽可能小 [26]。最小间隙转轮设计可以减小与间隙相关的碾磨、空化、剪切力及湍流所引起的过鱼损伤。ALSTOM 的设计人员还提出了一种设计方法称为“最小间隙导叶 (MGGV)”, 即完全消除导叶外伸结构。

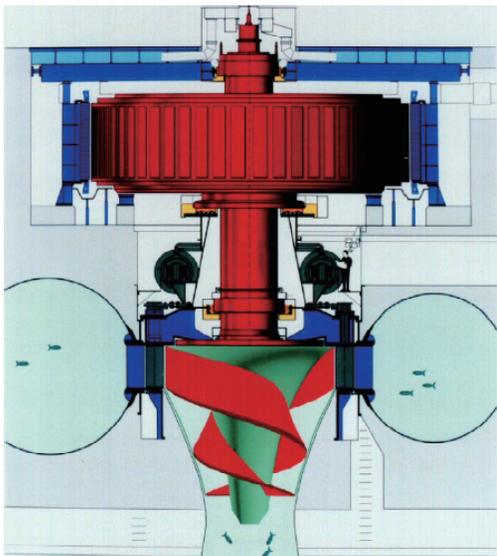


图3 奥尔登鱼友型水轮机示意图

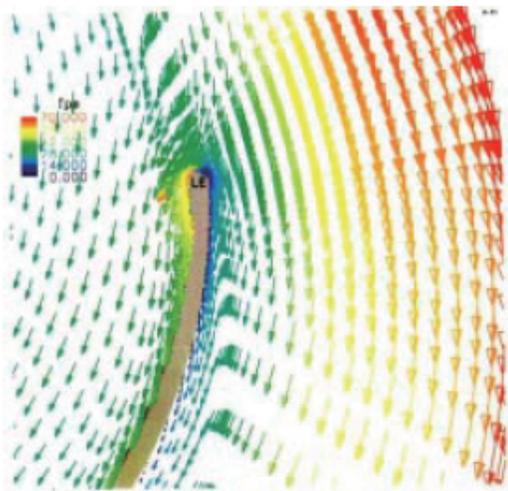


图4 奥尔登水轮机转轮前缘流速分布

这一创新设计是采用回转表面底环嵌入一物，每只导叶处有一个嵌入物，嵌入物的形状保证了在任何导叶开度下导叶与底环之间无间隙。MGGV 的应用可以完全取消导叶外伸结构，极大地减小流场中的剪切力区和导水机构下游区域的紊流，从而提高过机鱼的存活率。此外，ALSTOM 公司还开发了涡旋形水轮机（Vortex Turbine），其采用涡旋形的外壳取代传统水轮机中容易伤害鱼群的固定导叶与活动导叶，使水流以适当的进水角进入转轮而减小对鱼群的伤害。然而这种机型主要用于小型水电站，其直锥形的尾水管虽有利于鱼群通过，但会增加下游河床的冲刷和水电站的开挖高程。

此外，格兰特县公共事业管理区的工程师

和 Voith 的代表组成研究团队，以美国瓦纳普姆（Wanapum）水电站（共 10 台机组）为依托进行鱼类友好型水轮机研究 [3,27]，如图 5 所示。研究内容包括：转轮尺寸和叶片数的改变、降低转轮安装高程以改善空化性能、延长固定导叶以改善流态、活动导叶和固定导叶对齐、尾水管改型等。通过这些综合设计研究，使水轮机内部流态更平稳，提高水力性能。



图5 瓦纳普姆水电站鱼类友好型水轮机

五、总结与展望

（1）我国大型水电基地所在河流内珍贵洄游鱼类对压力、剪切力等损伤因子的承受阈值尚不明确，需对它们的生物特性、行为特性进行深入研究，确定各种特殊水动力学条件下鱼类伤害的阈值，建立相应的鱼类友好型水轮机设计的生物准则。

（2）设计研究合理的试验系统，分析压力、水流剪切力、空化特性以及机械碰撞等对鱼体伤害情况的量化影响，并观察不同试验环境下鱼类的行为特性和反应。

（3）目前我国正在大力发展海洋能资源，开展我国海洋典型鱼类在海洋发电装备水动力学条件下的伤害机理研究意义重大。

（4）已有的多种鱼类友好型水轮机大多是基于轴流式水轮机进行的开发，对于鱼类友好型的混流式水轮机还有待深入研究。

参考文献

- [1] 陈学婧. 清洁低碳能源将成“十三五”能源供应增量主体 [N]. 中国电力报, 2017-01-06 (001).
Chen X J. Clean and low carbon energy will become the “13th Five-Year” energy supply incremental subject [N]. China Electric Power News, 2017-01-06 (001).
- [2] 郑宇花, 迟远英, 李佳霖, 等. “十三五”期间我国经济—能源—

- 环境系统变量发展预测 [J]. 工业技术经济, 2016 (1): 105–110.
- Zheng Y H, Chi Y Y, Li J L, et al. China's economy-energy-environment system variables development analysis during the Thirteenth Five-Year Plan [J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2016 (1): 105–110.
- [3] 廖翠林, 陆力, 李铁友, 等. 鱼友好型水轮机研究进展及建议 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(4): 414–419.
- Liao C L, Lu L, Li T Y, et al. The state of the art and suggestions on fish-friendly turbine [J]. *Journal of China Institute Water Resources and Hydropower Research*, 2014, 12(4): 414–419.
- [4] Čada G, Loar J, Garrison L, et al. Efforts to reduce mortality to hydroelectric turbine-passed fish: Locating and quantifying damaging shear stresses [J]. *Environmental Management*, 2006, 37(6): 898–906.
- [5] Frenkel V, Kimmel E, Iger Y. Ultrasound-induced cavitation damage to external epithelia of fishskin [J]. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 1999, 25(8): 1295–1303.
- [6] Heisey P G, Mathur D, Euston E T. Fish injury and mortality in spillage and turbine passage [C]. San Francisco: The 1995 International Conference on Hydropower Part 1 (of 3), 1995.
- [7] Raben K V. Regarding the problem of mutilations of fishes by hydraulic turbines [J]. *Fisheries Research Board of Canada, Translation Series*, 1957, 448(4): 97–100.
- [8] Ploskey G R, Carlson T J. Comparison of blade-strike modeling results with empirical data [M]. Richland Washington: Pacific Northwest National Laboratory, 2004.
- [9] Ferguson J W, Ploskey G R, Leonardsson K, et al. Combining turbine blade-strike and life cycle models to assess mitigation strategies for fish passing dams [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2008, 65(8): 1568–1585.
- [10] Cheng L, Esch B P M V. Blade interaction forces in a mixed-flow pump with vaned diffuser [C]. Vail, Colorado: ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, 2009: 165–173.
- [11] Esch B P M V, Spierts I L Y. Validation of a model to predict fish passage mortality in pumping stations [J]. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*, 2014, 71(12): 1910–1923.
- [12] Deng Z Q, Carlson T J, Ploskey G R, et al. Evaluation of blade-strike models for estimating the biological performance of Kaplan turbines [J]. *Ecological Modeling*, 2007, 208(2–4): 165–176.
- [13] 潘强, 张德胜, 施卫东. 基于叶片撞击模型鱼友好型轴流泵优化设计 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 102–108.
- Pan Q, Zhang D S, Shi W D. Optimization design of fish-friendly axial-flow pump based on blade strike model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2015, 46(12): 102–108.
- [14] Xu M S, Long X P, Cheng H Y, et al. Experimental and numerical investigation on jet fish pumps [C]. Tokyo: The 13th Asian International Conference on Fluid Machinery, 2015.
- [15] Neitzel D A, Richmond M C, Dauble D D, et al. Laboratory studies on the effects of shear on fish [R]. Idaho Falls: Pacific Northwest National Laboratory, 2000.
- [16] Cada G F. A review of studies relating to the effects of propeller-type turbine passage on fish early life stages [J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 1990, 10(4): 418–426.
- [17] Turnpenny A W H, Davis M H, Fleming J M, et al. Experimental studies relating to the passage of fish and shrimps through tidal power turbines [R]. England: Marine and freshwater biology, National Power, 1992.
- [18] 邵奇, 李海锋. 水力机械内压力变化梯度对鱼类损伤的模拟试验 [J]. 机械工程学报, 2002, 38(10): 7–11.
- Shao Q, Li H F. Simulating experiment on fish damage caused by the pressure gradient in hydraulic machinery [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(10): 7–11.
- [19] Amaral S V, Hecker G E, Allen G, et al. Development and application of a fish-friendly turbine [J]. *International Journal on Hydropower and Dams*, 2010, 17(4): 74–77.
- [20] Čada G F. The development of advanced hydroelectric turbines to improve fish passage survival [J]. *Fisheries*, 2001, 26(9): 14–23.
- [21] Čada G F. Shaken, not stirred: The recipe for a fish-friendly turbine [C]. Atlanta: 1997 International Conference on Hydropower Part 1 (of 3), 1997.
- [22] Upadhyay D, O'Nians J, Paish O, et al. Recent developments in the design of fish-friendly turbines [J]. *International Journal on Hydropower & Dams*, 2006, 13(3): 130–133.
- [23] Odeh M, Sommers G. New design concepts for fish friendly turbines [J]. *International Journal on Hydropower & Dams*, 2000, 7(3): 64–70.
- [24] Odeh M. A Summary of environmentally friendly turbine design concepts [R]. Massachusetts: United States Geological Survey-BRD S.O. Conte Anadromous Fish Research Center, 1999.
- [25] Abernethy C S, Amidan B G, Čada G. Fish passage through a simulated horizontal bulb turbine pressure regime: A supplement to laboratory studies of the effects of pressure and dissolved gas supersaturation on turbine-passed fish [M]. Washington: Pacific Northwest National Laboratory Richland, 2003.
- [26] Brown S. Innovations in turbine design and fish protection at Wanapum, USA [J]. *International Journal on Hydropower & Dams*, 2006, 13(4): 71–72.
- [27] Dauble D D. Biological assessment of the advanced turbine design at Wanapum Dam [R]. Richland: Pacific Northwest National Laboratory, 2005.