

影响轴流转桨式水轮机过鱼能力的关键运行参数

王 煜¹,翟振男²,姜德政²

(1. 三峡大学水利与环境学院,湖北 宜昌 443002; 2. 长江电力股份有限公司,湖北 宜昌 443002)

摘要:为减小鱼类在水轮机流道内遭受损伤的概率,提高水轮机过鱼能力,在明确鱼类通过水轮机流道遭受损伤的机理的基础上,结合流道三维水动力分布特性和过机鱼类水动力损伤阈值,构建水轮机流道水动力过鱼能力评价方法。以长江四大家鱼幼鱼通过葛洲坝水电站 ZZ500 型水轮机流道下行为研究实例,探讨影响轴流转桨式水轮机过鱼能力的关键运行参数。结果表明:轴流转桨式水轮机运行水头、流量、导叶开度、桨叶转角及出力对流道过鱼能力都存在一定影响,关键影响参数为水轮机运行水头和导叶开度。水轮机运行在低水头、大流量、大出力、高效率工况时,流道空间水动力特性对过机鱼体造成损伤的概率较小,流道水动力过鱼能力最强。

关键词:水轮机;运行参数;过鱼能力;水动力特性;数值模拟

中图分类号:TV136⁺.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)02-0056-07

Key operation parameters affecting fish passing capability in Kaplan turbines//WANG Yu¹,ZHAI Zhennan²,JIANG Dezheng² (1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China)

Abstract: In order to reduce the probability of fish injury and improve the fish passing capability for water turbines, an evaluation method for fish passing capability was established based on the fish damage mechanism. Combined with a three-dimensional hydrodynamic distribution characteristic of the turbine passage and the hydrodynamic damage threshold of the fish, the evaluation method was proposed for fish passing ability. The key operation parameters for Kaplan turbines were discussed based on the study case in which the juvenile of the four major Chinese carps in the Yangtze River passing through the ZZ500 turbine passage in the Gezhouba Hydropower Station. The results show that the operating head, flow rate, guide vane opening, blade angle and power output of the Kaplan turbine all have certain influence on the fish passing capability, and the key influence parameters are operating head and guide vane opening. When the turbine operates under the conditions of low head, large flow, large output and high efficiency, the probability of fish injury caused by the spatial hydrodynamic characteristics of the flow passage is small, and the fish passing capacity of the turbine passage is the best.

Key words: water turbine; operating parameters; fish passing capacity; hydrodynamic characteristic; numerical simulation

大坝阻隔了鱼类洄游及上下游种群基因交流的通道,对鱼类资源发展带来不利影响^[1-2]。鱼类随水电站发电泄流主动或被迫进入水轮机流道,可能遭受水轮机流道极端水动力特性及复杂结构造成的损伤,甚至死亡。国内外学者研究成果表明鱼类通过水轮机流道下行可能受到的伤害机理分为机械、压强、剪切力和空蚀 4 种原因^[3-6],其中机械损伤主要为过机鱼体与水轮机构件表面的撞击、挤压和摩擦损伤,与鱼体尺寸、流道结构及鱼体下行轨迹有关;压强、剪切力及空蚀损伤主要为水轮机流道内压强、压强陡降、流速梯度、涡旋、湍动等极端水动力条件对过机鱼体造成的水动力损伤^[7],如压强陡降引起的鱼鳔破裂和栓塞,导致鱼类死亡^[8],负压引起的鱼体身体失衡和鱼鳃受损^[9],流速梯度引起的剪切应力导致鱼体眼睛损伤、体表挫伤、鳞片撕裂、鱼鳃翻开、身体失衡^[10]等,与水轮机结构及运行参数有关^[11]。

国内外相关学者通过水电站原型过鱼试验和实验室水动力单因子损伤实验相结合的方式针对水轮机过机流对所挟鱼体造成水动力损伤的关键因子^[12-15]进行研究。Bradly 等^[16]通过在哥伦比亚河下游释放传感器鱼及实验室模拟实验,得出大西洋鲑鱼通过水轮机流道遭受压力损伤的关键因子为鱼体进入水轮机前的适应压强与流道内最低压强的比

值。Deng 等^[10-12]通过将大马哈鱼放入模拟水轮机流速梯度的水流环境中,得出鱼类通过水轮机流道下行受到剪切力损伤与流速梯度成正比。美国西太平洋国家实验室^[17]针对虹鳟鱼,硬头虹鳟鱼,春季和秋季大鳞大马哈鱼,美洲西鲱鱼承受模拟水轮机流道水力剪切的实验研究中表明,当水流流速应变率大于 500 (s cm)^{-1} 时,研究鱼种均遭受明显水力剪切损伤。综上所述,水轮机流道内水流流速、流速梯度、压强及压强梯度是造成过机鱼体遭受水动力损伤的关键水动力因子,水轮机不同运行参数下流道水动力特性将会对鱼体安全通过水轮机流道下行产生影响。为探明影响轴流转桨式水轮机流道水动力过鱼能力的关键运行参数,本文通过构建水轮机流道水动力过鱼能力评价方法,识别影响葛洲坝 ZZ500 轴流转桨式水轮机流道水动力过鱼能力的关键运行参数,为构建鱼类友好的水轮机生态运行方式提供技术支撑。

1 水轮机流道水动力过鱼能力评价方法

鱼类通过水轮机流道下行受到水动力损伤的主要原因为:①过低的压强和急剧变化的压强梯度造成的气压损伤;②流道间隙、过流表面及水流涡旋引起的流速应变造成的剪切损伤;③过低的压强引起水轮机汽蚀导致的空蚀损伤^[18-20]。因此,本文在评价河流水环境对鱼类栖息、繁殖适合程度的河流内流量增量法 (IFIM)^[21] 基本原理的基础上,提出采用水轮机流道内可能对过机鱼体产生水动力损伤的空间体积与流道总体积比值 P_{WUV} (percent of weighted usable volume, 鱼类加权可利用体积占比) 来评价水轮机流道水动力过鱼能力的方法。

1.1 流道水动力特性对过机鱼体产生水动力损伤区域判别方法

a. 网格剖分水轮机全流道区域,通过水轮机稳定运行工况下全流道三维水动力数值计算,获取各网格体积单元水动力参数值;

b. 逐一将流道各网格体积单元的压强、流速及与相邻体积单元的压强梯度和流速梯度与过机鱼种相应的压强、流速、压强梯度、流速梯度损伤阈值进行对比,筛选出超出鱼类损伤阈值的体积单元作为水动力可能损伤单元,其逻辑判别式为

$$E_{pdi} = \{ (P_i < P_0) \vee (v_i > v_0) \vee (P_{gi} > P_{g0}) \vee (v_{gi} > v_{g0}) \} \quad (1)$$

式中: E_{pdi} 为判别体积单元 i 是否为鱼体水动力可能损伤单元的逻辑变量,变量值为 1 则单元 i 为鱼体水动力可能损伤单元; P_i 、 v_i 、 P_{gi} 、 v_{gi} 分别为体积单元 i 的压强、流速、与相邻体积单元的最大压强梯度、

与相邻体积单元的最大流速梯度值; P_0 、 v_0 、 P_{g0} 、 v_{g0} 为过机鱼种遭受损伤的压强、流速、压强梯度、流速梯度损伤的阈值。

c. 由于鱼类通过水轮机流道是否受到水动力损伤不但与流道内水动力特性有关,还与鱼体规格 (体长 L_0 、体积 V_0) 有关,因此还需根据水动力可能损伤单元体积、过机鱼体体积、相邻水动力可能损伤单元间距等进一步综合评判体积单元 i 是否对过机鱼类产生水动力损伤。综合评判原则为:①相邻水动力可能损伤单元中心距小于鱼体体长 $1/2$,说明鱼体同时受两个体积单元水动力作用,损伤概率较大,其相邻水动力可能损伤单元都定义为水动力损伤单元;②水动力可能损伤单元体积大于过机鱼体个体平均体积的 $1/2$,说明鱼体通过该体积单元,大面积承受超出其损伤阈值的水流水动力作用,损伤概率高,定义该体积单元为鱼体水动力损伤单元。评判水动力可能损伤单元 i 是否为水动力损伤单元的逻辑判别式如下:

$$E_{di} = \{ (\Delta S_{ij} < 0.5L_0) \vee (V_i > 0.5V_0) \} \quad (2)$$

式中: E_{di} 为判别水动力可能损伤体积单元 i 是否为鱼体水动力损伤单元的逻辑变量,变量值为 1 则单元 i 为鱼体水动力损伤单元; ΔS_{ij} 为可能损伤体积单元 i 与其相邻最近的可能损伤体积单元 j 中心点间距, V_i 为编号为 i 的可能损伤单元体积。

1.2 流道水动力过鱼能力评价方法

对水轮机全流道各体积单元逐一进行鱼类水动力损伤单元判别,识别所有鱼类水动力损伤单元并对其空间体积进行叠加运算,得出流道内造成过机鱼体水动力损伤的空间总体积,将其与水轮机全流道空间体积相比,得出流道鱼类水动力损伤体积占比,再将流道空间整体 1 减去水动力损伤体积占比,得出流道空间对过机鱼体不造成水动力损伤的区域占比,即鱼类加权可利用体积占比 P_{WUV} 作为量化指标评价水轮机流道水动力过鱼能力。

$$P_{WUV} = \left(1 - \frac{\sum V_i}{V_s} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: $\sum V_i$ 为水轮机流道内鱼体水动力损伤单元体积总和; V_s 为水轮机全流道空间总体积。

P_{WUV} 越大,说明水轮机流道空间对过机鱼体不造成水动力损伤的体积越大,鱼类通过水轮机流道下行越安全,反之亦然。

2 轴流转桨式水轮机运行参数对流道水动力过鱼能力的影响

轴流转桨式水轮机具有过流能力大,运行范围

广,运行效率高等优点,被广泛应用于低水头径流式水电站,其流道是上下游水体贯通的主要通道,为鱼类过坝提供了直接通道。为探明影响轴流转桨式水轮机水力过鱼能力的关键运行参数,本文以葛洲坝水电站 ZZ500 型轴流转桨式水轮机为例,运用流道水力过鱼能力评价方法,识别影响长江四大家鱼幼鱼通过 ZZ500 轴流转桨式水轮机流道安全下行过坝的关键运行参数。

2.1 研究对象基本参数

葛洲坝水电站是长江干流上第一座大型径流式水电站,对长江鱼类的洄游和基因交流有着重要的影响^[22-24]。葛洲坝 ZZ500 型水轮机为典型的大型轴流转桨式水轮机,其主要参数见表 1。

表 1 葛洲坝 ZZ500-LH-1020 水轮机主要参数

参数	数值	单位
最大水头	27.00	m
最小水头	8.30	m
额定水头	18.60	m
额定功率	129	MW
额定转速	62.5	r/min
转轮直径	10.20	m
吸出高度	-7.00	m
设计点流量	825.0	m ³ /s

长江青、草、鲢、鳙四大家鱼是长江流域主要经济鱼类,占我国淡水鱼类总产量的 80%。四大家鱼属于江湖半洄游性鱼类,在湖泊中育肥,在长江中上游产卵^[25]。由于具有下行过坝需求的为四大家鱼幼鱼,因此水轮机流道水力过鱼能力评价主要针对鱼类幼鱼(0 龄或 1 龄)展开,其体长通常在 20 cm 以下。通过前期研究已明确四大家鱼幼鱼受水轮机流道水力因子损伤的阈值^[9-26](表 2)。

表 2 四大家鱼幼鱼水力因子损伤阈值

水力因子	损伤阈值	单位	鱼体遭受水力损伤条件
最大流速	14.24	m/s	水流流速大于流速损伤阈值
最大流速梯度	1780	s ⁻¹	水流流速梯度大于流速梯度损伤阈值
最小压强	-61325	Pa	水流压强小于压强损伤阈值
最大压强梯度	19445.2	Pa/m	水流压强梯度大于压强梯度损伤阈值

2.2 水轮机全流道三维水力数值模拟

2.2.1 几何模型的构建及网格剖分

由于轴流转桨式水轮机流道结构复杂,各部分水力特性相差较大,故其流道空间依照水流顺序划分为蜗壳区域(进水口工作闸门至固定导叶出口面间的流道空间)、活动导叶区域、转轮区域、尾水管区域(图 1),各区域分别采用八叉树网格剖分法进行网格剖分。采用水轮机额定工况下不同网格数

量的数值模拟出力误差值进行网格无关性验证,当全流道网格数量为 600.7 万时,水轮机出力误差波动小于 2%,满足水轮机数值计算对网格无关性要求,选用该网格划分方案为最终网格方案(表 3)。

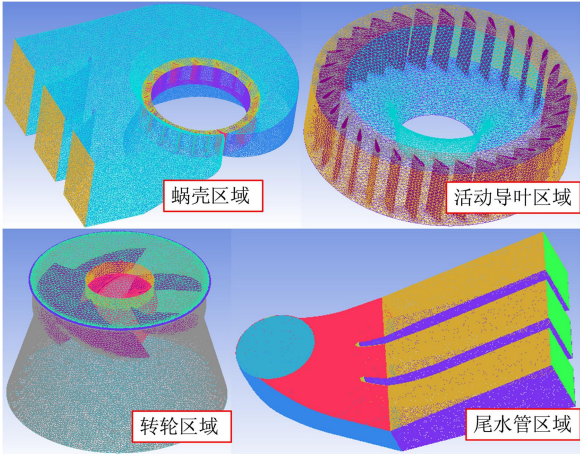


图 1 ZZ500 水轮机流道空间区域及网格剖分示意图

表 3 水轮机流道网格数量

流道区域	网格数量/个	网格数量占比/%
蜗壳区域	1256321	21
活动导叶区域	1487671	25
转轮区域	1733395	29
尾水管区域	1529785	25

2.2.2 水轮机流道水力数值模拟方法

计算域采用水电站进水口闸门断面水流平均流速作为上游边界条件,尾水管出口自由出流为下游边界条件,蜗壳、座环、转轮室、尾水管壁面为无滑移壁面,转轮叶片、轮毂、泄水锥等壁面采用旋转壁面条件。水轮机流道内水流的运动采用不可压雷诺平均 Navier-Stokes 方程和连续方程进行描述,选用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型进行水力数值模拟计算^[27]。为验证数值计算的可靠性,采用额定工况下水轮机出力数值模拟值与实测值对比,得出数值模拟出力值误差小于 2%,表明数值计算结果可靠(表 4)。

表 4 数值模型可靠性分析

ZZ500 水轮机额定工况	机组流量/(m ³ ·s ⁻¹)	出力/MW
实测数值	825	129
数值模拟计算结果	823.5	127.75

2.2.3 计算工况的拟定

为识别轴流转桨式水轮机不同运行参数(水头 H 、流量 Q 、导叶开度 α_0 、桨叶转角 φ)对流道水力过鱼能力的影响,在葛洲坝 ZZ500 水轮机运行范围内,按照流量、水头等间距取值,实现运行范围样本工况全覆盖的原则,选取不同水头、不同出力下的典型运行工况 101 组(图 2)。针对选取的各运行工况,分别采用构建的水轮机流道水力过鱼能力评价方法进行过鱼能力评价。

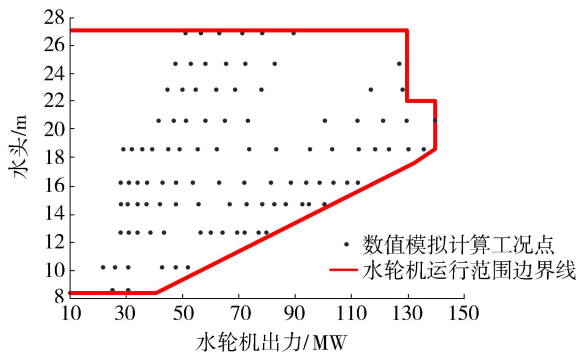


图2 ZZ500型水轮机数值模拟工况

2.3 水轮机不同运行参数对水道水动力过鱼能力的影响

根据葛洲坝 ZZ500 水轮机全运行范围内 101 组不同运行参数工况水道水动力过鱼能力量化评价结果得出:在水轮机稳定运行范围内水道具有较好的水动力过鱼能力,水道鱼类加权可利用体积占比 P_{WUV} 均达到 92% 及以上,其中最小值(92%)发生在水轮机最大水头(26.4 m)、最小导叶开度(280 mm)和桨叶转角(-10°)的低流量($268.99 \text{ m}^3/\text{s}$)运行工况,说明水轮机在高水头、低流量运行工况下,其水道水动力特性对过机鱼体具有最大的损伤威胁;而较低水头(12.6 m),较大流量($6521.2 \text{ m}^3/\text{s}$)工况运行时,水道具有最大 P_{WUV} (97.6%),说明 ZZ500 水轮机运行在此工况下水道对家鱼幼鱼造成水动力损伤的概率最小。

为识别影响轴流转桨式水轮机过鱼能力的关键运行参数,分别将葛洲坝 ZZ500 水轮机运行范围内 101 组运行工况的主要运行参数与 P_{WUV} 进行相关性分析。

2.3.1 运行水头 H

由水轮机各工况下 $P_{WUV}-H$ 关系图(图 3)可见,随着 H 的增加, P_{WUV} 呈逐渐下降的趋势,其中在最大水头(26.4 m)运行条件下,不同流量工况的水道 P_{WUV} 均小于 93%;而在最小水头(8.6 m)条件下,水道最大 P_{WUV} 可达到 97.5%,说明 H 越高鱼体在水道内遭受水动力损伤概率越大。同时, H 越高,其同一运行水头下不同流量工况的水道 P_{WUV} 变化范围越小,说明当水轮机运行在高水头下,其水道 P_{WUV} 受流量、导叶开度等其他运行参数影响较小,水道水动力特性对下行鱼类十分不利。

2.3.2 流量 Q

根据 101 组运行工况 $P_{WUV}-Q$ 关系图(图 4), P_{WUV} 随 Q 的增加呈现上升的趋势,说明流量的增加使家鱼幼鱼通过该水轮机水道下行时遭受水动力损伤的概率减小,水道水动力过鱼能力增强。当 $Q >$

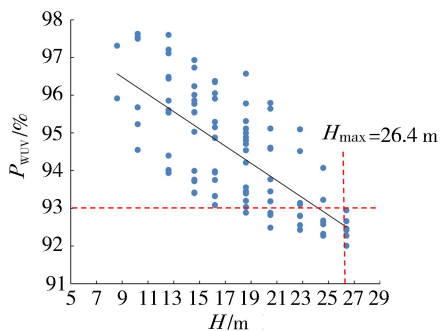


图3 ZZ500 水轮机 $P_{WUV}-H$ 关系

$402 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, P_{WUV} 均达到 94% 以上,水道适合鱼类下行的空间较大,鱼类在水道内受水动力损伤的概率较低。

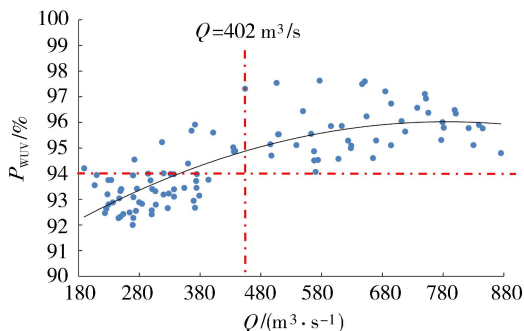


图4 ZZ500 水轮机 $P_{WUV}-Q$ 关系

2.3.3 导叶开度 α_0

由各运行工况下 $P_{WUV}-\alpha_0$ 关系图(图 5)可见: P_{WUV} 与 α_0 呈正相关, α_0 越大,水道水动力特性适合家鱼幼鱼下行的空间区域越大,水道具有较好的水动力过鱼能力。当 $\alpha_0 > 460 \text{ mm}$ (相对开度为 0.65) 时, $P_{WUV} > 94\%$,且 α_0, P_{WUV} 越大,水道水动力过鱼能力越强。根据国外关于鱼类在水轮机水道遭受水动力损伤的相关研究^[7-17],鱼类通过水轮机座环及活动导叶区域主要遭受因导叶间隙产生的流速梯度引起的剪切应力损伤。因此, α_0 的增大,可增加导叶间过流断面面积,减小流速梯度,进而降低流速突变对鱼体造成剪切应力损伤,提高水道过鱼能力。另外, α_0 的增加,同时增加了水轮机流量,优化了水道空间的水流状态,进一步提高水道水动力过鱼能力。

2.3.4 转轮桨叶转角 φ

轴流转桨式水轮机转轮桨叶与活动导叶保持协联关系,以提高水轮机运行效率。根据葛洲坝 ZZ500 水轮机 101 组运行工况下桨叶转角与 P_{WUV} 关系图(图 6),可得出轴流转桨式水轮机水道水动力过鱼能力随桨叶转角的增大有增大的趋势。桨叶转角小于 -5° 的运行工况,大部分工况的水道 P_{WUV} 在 0.92~0.94 范围内;当桨叶转角大于 -5° 时,水道 P_{WUV} 基本都大于 0.94。 P_{WUV} 较高($\geq 97\%$)的工况

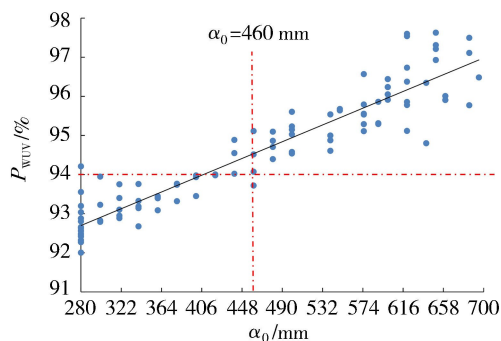


图5 ZZ500 水轮机 $P_{WUV}-\alpha_0$ 关系

桨叶转角在 $-2^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 之间,说明轴流转桨式水轮机桨叶转角为正值时,流道 P_{WUV} 较高,特别是在水轮机运行在最优工况 ($\varphi=0^{\circ}$) 及附近区域,流道具有较好水动力过鱼能力。当 $\varphi>+10^{\circ}$ 时,随桨叶角度增加流道 P_{WUV} 值呈现下降趋势,说明当水轮机偏离最优工况运行,流道水流水动力条件恶化,不但降低水轮机运行效率还增加了对过机鱼体造成水动力损伤的概率。

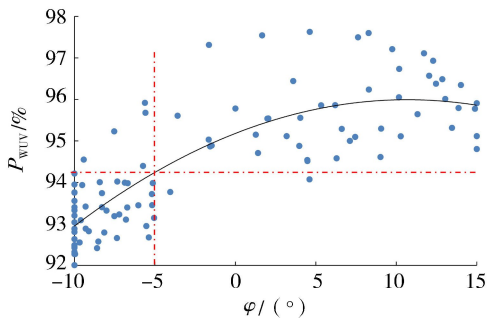


图6 ZZ500 水轮机 $P_{WUV}-\varphi$ 关系

2.3.5 水轮机出力 N

水轮机出力受其运行水头、流量、效率共同影响,是评价水轮机运行效益的关键指标。水轮机运行稳定性与其出力有较强的相关性,一般情况下,水电站运行在其额定出力的 70% 以上,机组具有较好的运行稳定性。根据葛洲坝 ZZ500 水轮机 101 组运行工况 $P_{WUV}-N$ 关系图 (图 7) 可见,水轮机出力大于其额定出力的 70% (90 MW) 时, P_{WUV} 均大于 94%,说明水轮机运行在大出力的稳定运行区域,流

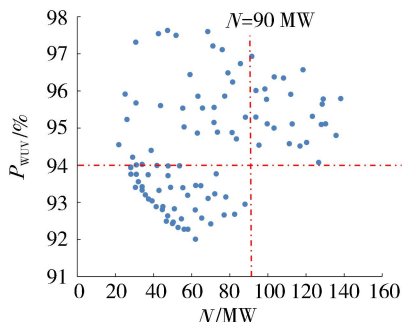


图7 ZZ500 水轮机 $P_{WUV}-N$ 关系

道水动力特性也具有较好的“亲鱼”性能。在水轮机小出力工况,多数工况 P_{WUV} 较小,但也有少量工况 P_{WUV} 较大,说明在水轮机出力较低时,其流道水动力特性稳定性较差,其流道水动力过鱼能力受流量、导叶开度等其他运行参数的影响较大,但整体 P_{WUV} 略低,对过机鱼体带来不利影响。因此,水轮机运行在大出力工况,不但具有较好的发电效益和运行稳定性,其流道水动力特性也更加适合鱼类通过其安全下行。

3 结论与讨论

a. 轴流转桨式水轮机在稳定运行工况下,流道具有较高的家鱼幼鱼加权可利用体积占比,葛洲坝 ZZ500 型水轮机均达到 92% 以上,说明低水头大流量的轴流转桨式水轮机流道空间具有较好的水动力过鱼能力,可作为鱼类安全下行的直接通道。

b. 水轮机运行水头及导叶开度与其流道水动力过鱼能力有明显的相关性。水头越高,流道空间使过机鱼体遭受水动力损伤的区域越大,鱼类通过水轮机流道下行受到水动力损伤的概率越大;导叶开度越大,流道 P_{WUV} 越大,流道水动力过鱼能力越好。说明水轮机运行水头与导叶开度是影响流道水动力过鱼能力的关键运行参数。

c. 轴流转桨式水轮机过机流量与桨叶转角对流道水动力过鱼能力有一定影响。流道水动力过鱼能力随流量增大而增大,但当流量趋于水轮机最大流量时,流道空间鱼类加权可利用体积占比趋于某一稳定值。水轮机桨叶转角运行在最优工况附近区域,流道 P_{WUV} 较大,水动力过鱼能力最优;桨叶转角为正值,流道水动力过鱼能力优于桨叶转角为负值的工况。

d. 水轮机运行在额定出力及其附近大出力工况时,流道 P_{WUV} 较大,具有较好水动力过鱼能力。

由此可见,影响轴流转桨式水轮机水动力过鱼能力的关键运行参数为运行水头及导叶开度,同时过机流量、桨叶转角及出力对其也有一定影响。水轮机运行在大流量、低水头、大出力工况,不但具有较高的发电效益和运行稳定性,同时也具有较好的水动力过鱼能力。这与 Cada 等^[7-18]得出的水轮机过机鱼体存活率是一个关于转轮叶片转角、导叶开度、水流状态的复杂函数的研究结论基本相近。

上述结论得出轴流转桨式水轮机运行参数对其流道水动力过鱼能力具有较为明显的影响,故可通过优化水轮机运行参数建立鱼类友好的水轮机生态运行方式,以提高其流道水动力过鱼能力。然而,鱼类通过水轮机流道下行还可能因与流道构件的撞

击、摩擦、挤压等遭受到机械损伤,其损伤概率与鱼体下行轨迹、流道尺寸、鱼体尺寸等因素密切相关,因此下一步研究还应以鱼类水动力损伤概率及机械损伤概率综合评价水轮机流道过鱼能力。另外,本文主要针对四大家鱼 1 龄以下的幼鱼通过轴流转桨式水轮机流道下行进行研究,鱼体尺寸与流道水动力计算网格单元尺寸相差不大,对于尺寸较大的成鱼,在判定水动力损伤单元区域时应进一步分析和讨论。

参考文献:

[1] 王煜,戴会超,戴凌全. 三峡蓄水运行后中华鲟产卵场水动力特性分析[J]. 水力发电学报, 2013,32(6): 122-126. (WANG Yu, DAI Huichao, DAI Lingquan. Hydrodynamic characteristics analysis of Chinese sturgeon spawning ground after operation of Three Gorges Project [J]. Journal of Hydroelectric Engineering. 2013, 32 (6): 122-126. (in Chinese)).

[2] 常剑波,陈永柏,高勇,等. 水利水电工程对鱼类的影响及减缓对策[C]// 中国水利学会 2008 学术年会. 海口:中国水利学会,2008.

[3] 兰塞姆 B H,田超. 美国哥伦比亚河中游幼鲑鱼过坝流域监测[J]. 水利水电快报, 2009,30(10): 8-11. (RANSOM B H, TIAN Chao, Monitoring of juvenile salmon in the middle reaches of the Columbia River in the United States [J]. Water Resources and Hydropower Express, 2009,30(10): 8-11. (in Chinese))

[4] 乌帕德亚伊 D,王振华. 英国观察:鱼类友好的水轮机设计的最新进展[J]. 小水电, 2007,137(5): 5-7. (UPADHYAYI D, WANG Zhenghua. UK watch: recent developments in fish-friendly turbine design [J]. Small Hydropower, 2007,137(5): 5-7. (in Chinese))

[5] 奥德 M,马小俊,刘渝. 亲鱼水轮机设计新概念[J]. 水利水电快报, 2001,22(4): 1-5. (ORDE M, MA Xiaojun, LIU Yu. New concept of Fish-Friendly turbine design [J]. Water Resources and Hydropower Express, 2001, 22(4): 1-5. (in Chinese))

[6] FRASER S, WILLIAMSON B J, NIKORA V, et al. Fish distributions in a tidal channel indicate the behavioural impact of a marine renewable energy installation [J]. Energy Reports, 2018,4: 65-69.

[7] CADA G F. The development of advanced hydroelectric turbines to improve fish passage survival[J]. Fisheries, 2001,26(9): 14-23.

[8] BROWN R S, CARLSON T J, GINGERICH A J, et al. Quantifying mortal injury of juvenile chinook salmon exposed to simulated hydro-turbine passage [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2012,141 (1): 147-157.

[9] 王煜,翟振男,杨路通,等. 四大家鱼幼鱼响应模拟水轮机流道压力变化研究[J]. 水生生态学杂志, 2021,42 (2): 86-93. (WANG Yu, ZHAI Zhennan, YANG Lutong, et al. Experimental study on the turbine passage pressure variation acting on juvenile of chinese carps [J]. Journal of Hydroecology, 2021, 42 (2): 86-93. (in Chinese))

[10] DENG Z, GUENSCH G R, MCKINSTRY C A, et al. Evaluation of fish-injury mechanisms during exposure to turbulent shear flow [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2005,62(7): 1513-1522.

[11] 王煜,李成,张洋. 水轮机转轮结构与过机幼鱼受压强损伤相关性研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36 (10): 110-120. (WANG Yu, LI Cheng, ZHANG Yang. Correlation of runner structure and juvenile fish pressure injury [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(10): 110-120. (in Chinese))

[12] DENG Zhiqun, MUELLER R P, RICHMOND M C, et al. Injury and mortality of juvenile salmon entrained in a submerged jet entering still water[J]. North American Journal of Fisheries Management, 2010, 30 (3): 623-628.

[13] HOU Hongfei, DENG Zhiqun, MARTINEZ J J, et al. A hydropower biological evaluation toolset (HBET) for characterizing hydraulic conditions and impacts of hydro-structures on fish[J]. Energies, 2018,11(4): 1-13.

[14] RICHMOND M C, SERKOWSKI J A, EBNER L L, et al. Quantifying barotrauma risk to juvenile fish during hydro-turbine passage [J]. Fisheries Research, 2014, 154: 152-164.

[15] ODEH M, SOMMERS G. New design concepts for fish friendly turbines[J]. International Journal on Hydropower & Dams, 2000,7(3): 64-70.

[16] BRADLY A, TRUMBO M L, AHMANN J F, et al. Improving hydroturbine pressures to enhance salmon passage survival and recovery [J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2014,24(3): 955-965.

[17] NEITZEL D, RICHMOND M C, DAUBLE D, et al. Laboratory studies on the effects of shear on fish [R]. Washington:Pacific Northwest National Laboratory, 2000.

[18] ODEH M. A summary of environmentally friendly turbine design concepts [R]. Washington: U. S. Department of Energy Idaho Operations Office, 1999.

[19] KILLGORE K, JACK M S T. Evaluation of propeller-induced mortality on early life stages of selected fish species [J]. North American Journal of Fisheries Management, 2001,21(4): 947-955. .

[20] BROWN R S, CARLSON T J, WELCH A E, et al. Assessment of barotrauma from rapid decompression of depth-acclimated juvenile chinook salmon bearing radiotelemetry transmitters [J]. Transactions of the

- American Fisheries Society, 2007,138(6): 1285-1301.
- [21] 英晓明,李凌. 河道内流量增加方法 IFIM 研究及其应用[J]. 生态学报, 2006(5): 1567-1573. (YING Xiaoming, LI Ling. Review on instream flow incremental methodology (IFIM) and applications [J]. ACTA Ecologica Sinica, 2006(5): 1567-1573. (in Chinese))
- [22] 班璇,李大美. 葛洲坝枢纽工程对中华鲟产卵场的生态水文学影响研究[EB/OL]. [2021-06-30]. <https://max.book118.com/html/2017/0326/97098661.shtm>
- [23] 李建,夏自强,王远坤,等. 葛洲坝下游江心堤对中华鲟产卵场河道动能梯度影响[J]. 水电能源科学, 2009(2): 79-82. (LI Jian, XIA Ziqiang, WANG Yuankun, et al. Study on influence of Adjustment Project in Gezhouba downstream on kinetic river energy gradient in Chinese sturgeon spawning ground [J]. Hydroelectric energy science, 2009(2): 79-82. (in Chinese))
- [24] 余志堂,许蕴珩,周春生,等. 关于葛洲坝水利枢纽对长江鱼类资源的影响和保护鲟鱼资源的意见[J]. 水库渔业, 1981(2): 18-24. (YU Zhitang, XU Yungan, ZHOU Chunsheng, et al. Suggestions on the influence of Gezhouba Hydropower Project on the fish resources of the Yangtze River and the protection of sturgeon resources [J]. Reservoir Fisheries, 1981(2): 18-24. (in Chinese))
- [25] 郭文献,谷红梅,王鸿翔,等. 长江中游四大家鱼产卵场物理生境模拟研究[J]. 水力发电学报, 30(5): 68-72. (GUO Wenxian, GU Hongmei, WANG Hongxiang, et al. Study on physical habitat simulation of four major Chinese carps spawning ground in the middle reach of Yangtze River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(5): 68-72. (in Chinese))
- [26] 王煜,翟振男,李金峰. 家鱼幼鱼对水轮机流道水力剪切响应实验研究[J]. 水力发电学报, 2020,39(4): 10-20. (WANG Yu, ZHAI Zhennan, LI Jinfeng. Experimental study on effect of fluid shear on juveniles of four major Chinese carp species [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(4): 10-20. (in Chinese))
- [27] 翟振男. 轴流转桨式水轮机“亲鱼”性能评价研究[D]: 宜昌:三峡大学, 2019.
(收稿日期:2021-07-10 编辑:郑孝宇)

+++++
(上接第 40 页)

- [16] 赵萍,夏自强,陈起川,等. 卡普恰盖水库对伊犁河径流特征及下游生态径流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(6): 482-487. (ZHAO Ping, XIA Ziqiang, CHEN Qichuan, et al. Influences of Kapchagay Reservoir on runoff characteristics and ecological runoff in lower reaches of Ili River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(6): 482-487. (in Chinese))
- [17] 唐蕴,王浩,严登华,等. 嫩江流域近 45 年来径流演变规律研究[J]. 地理科学, 2009, 29(6): 864-868. (TANG Yun, WANG Hao, YAN Denghua, et al. Evolutionary regularity of runoff of Nenjiang River Basin in period 1956-2000[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(6): 864-868. (in Chinese))
- [18] 许玉凤,陈宸,陈洪升. 2001—2013 年云贵高原土地利用动态变化分析[J]. 中国水土保持, 2018(11): 44-48. (XU Yufeng, CHEN Chen, CHEN Hongsheng. Dynamic variations of land use of Yunnan-Guizhou Plateau in the period of 2011-2013[J]. Soil and Water Conservation in China, 2018(11): 44-48. (in Chinese))
- [19] 巩灿娟. 沂河流域中上游地区土地利用/覆被变化水文效应的分析与模拟[D]. 济南:山东师范大学, 2014.
- [20] 王莺,王劲松,武明,等. 土地利用和气候变化对嘉陵江流域水文特征的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 135-142. (WANG Ying, WANG Jinsong, WU Ming, et al. Impacts of the land use and climate changes on the hydrological characteristics of Jialing River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1): 135-142. (in Chinese))
- [21] 杨春喜. 九项工程同期开工 龙江兴水拉开序幕[J]. 水利科学与寒区工程, 2008(11): 21-23. (YANG Chunxi. Nine projects started in the same period and Longjiang water kicked off [J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2008(11): 21-23. (in Chinese))
- [22] 刘晓笛. 基于 SWAT 模型的和田河上游气候和土地利用变化的水文效应模拟[D]. 曲阜:曲阜师范大学, 2019.
- [23] 孙新国,彭勇,周惠成. 基于 SWAT 分布式流域水文模型的下垫面变化和水利工程对径流影响分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 33-39. (SUN Xinguo, PENG Yong, ZHOU Huicheng. Impacts of land cover change and hydraulic project on runoff based on SWAT distributed watershed hydrological model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(1): 33-39. (in Chinese))
- [24] 娄华超,刘瑞芬. 东洋河流域土地利用及气候变化对径流的影响[J]. 人民长江, 2020, 51(7): 82-88. (LOU Huachao, LIU Ruifen. Effect of land use and climate change on runoff in Dongyang River Basin [J]. Yangtze River, 2020, 51(7): 82-88. (in Chinese))
(收稿日期:2021-02-23 编辑:郑孝宇)