

混流式转轮叶片数对鱼类撞击死亡率的影响

朱国俊 吉龙娟 冯建军 罗兴铨
(西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

摘要: 鱼类在通过水轮机流道时会受到其内部高速旋转的转轮叶片撞击而出现伤亡。为了优化某电站混流式转轮的鱼类通过生存率,综合计算流体动力学分析方法与鱼类-叶片撞击的数学模型,研究了不同优化转轮方案下的鱼类撞击死亡率及机组能量性能,获得了混流式水轮机过流量及转轮叶片数对鱼类死亡率的影响规律。研究结果表明,在额定水头下,鱼类通过转轮的撞击死亡率与转轮的流量以及叶片数呈正相关关系;对于原始转轮,当流量增加到额定流量时,鱼类通过转轮的撞击死亡率达到了 16.85%;而叶片数为 13 和 11 的两个优化转轮则使额定流量下的鱼类撞击死亡率比原始转轮分别降低了 2.93 和 5.3 个百分点。最后,通过分析两个优化转轮的鱼类生态性能与能量性能,选择采用 13 叶片的优化转轮作为最终方案。

关键词: 水轮机; 混流式转轮; 鱼类撞击死亡率; 叶片撞击模型; 数值模拟

中图分类号: TK733+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)08-0153-08

Effect of Blade Numbers of Francis Runners on Fish Strike Mortality

ZHU Guojun JI Longjuan FENG Jianjun LUO Xingqi
(Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The fish in the dam reservoir will die from the strike of rotating runner blade with high speed when passing the turbine flow passage. In order to improve the survival rate of the fish, a method for evaluating the strike mortality of fish in Francis turbine runner was presented. This method contained three steps. Firstly, the CFD method was adopted to obtain the velocity field inside the Francis turbine runner. Secondly, based on the blade-strike model and the absolute velocity distribution on the inlet of runner, the probability of fish struck the runner blade was calculated. Finally, according to the fitting model of radial basis function (RBF) neural network, the lethality rate of fish owing to blade strike was obtained, and then the strike mortality of fish passed through the runner could be calculated. Based on this method, the strike mortality of fish of the initial and the optimized runner at different operation points were calculated. The influence of the turbine discharge and blade numbers on the mortality rate of fish was researched. From the result, it can be concluded that the mortality rate of fish passed through the runner was positively correlated with the discharge and the number of runner blades under the rated head. For the initial runner, the strike mortality rate of fish reached 16.85% at rated point. Compared with the initial runner, the strike mortality rate of fish at rated point was reduced by 2.93 and 5.3 percentage points, which meant these two optimized runner had better ecological performance of fish than the initial runner. According to the comparison of ecological performance and hydraulic efficiency, the optimized runner with 13 blades was chosen as the final scheme. The research methods and contents can provide valuable reference for the fish friendly optimization of Francis turbine.

Key words: hydraulic turbine; Francis runner; strike mortality of fish; blade strike model; numerical simulation

0 引言

水电站在阻断河流进行发电时不可避免地会对河流中的水生生物生态造成影响,其中鱼类生态就是最为典型的一种。在水电站上游卵生并孵化成长后的洄游鱼类意图回到下游的路径会被大坝阻断,

尽管有鱼道的存在,但是水轮机进水口的巨大抽吸作用仍然使部分鱼类通过水轮机流道到达下游。一些实验研究早已发现,鱼类在通过水轮机流道遭遇伤害是其过坝伤亡率较高的主要原因^[1],水轮机所造成的鱼类死亡不仅使鱼类的生存以及物种多样性受到威胁,水质也会因鱼类伤亡而受到污染^[2-4]。

鱼类通过水轮机时可能伤亡的主要机理分为以下 4 种^[5]:机械式、剪切式、压力式以及空化式,机械式又包括叶片撞击、鱼类沿固体壁面磨损及卡在狭窄通道间被研磨致伤或致死,其中叶片撞击是造成鱼类伤亡最主要的原因。为了量化分析叶片撞击造成的鱼类伤亡,VON RABEN^[6]提出了叶片与鱼类撞击模型的一般形式,以预测鱼类与转轮叶片之间撞击的概率。BELL^[7]及 FERGUSON 等^[8]则分别将叶片撞击模型用于分析小鱼的伤亡率和水轮机对鱼类迁徙造成的影响。DENG 等^[9-11]对鱼类在常规水轮机内受旋转叶片撞击损伤的概率计算以及撞击致死率的评估计算模型进行研究,形成了一种适用于轴流式转轮的叶片撞击概率模型。潘强等^[12-13]将叶片撞击模型应用到轴流泵中,对某一轴流泵的鱼友好性能开展分析,并进行了鱼友好型轴流泵的优化设计。赵文龙等^[14]基于鱼友好型设计理念对轴流式水轮机原始模型进行几何形状优化,改型后的模型效率与功率都有所降低,但水力性能的下降仍在可接受范围内,对设计优化鱼友好型水轮机具有指导性意义。李成等^[15-16]研究发现,转轮叶片数的减少和泄水锥相对高度的增加将降低幼鱼受压力以及压力梯度损伤的几率,并对长江流域的中华鲟在轴流式水轮机内部的过机机理及损伤概率进行了研究,发现转轮至尾水管直锥段区域是鱼体通过轴流式水轮机下行受压力损伤的主要区域。

综合上述研究成果可知,国内外大部分关于鱼类通过水轮机的伤亡率研究都是针对轴流式机型进行的,对混流式水轮机造成的鱼类伤亡率量化分析以及提升混流式转轮鱼类通过存活率的相关研究较少。混流式水轮机转轮部件的叶栅稠密度大、转速高,所以叶片与鱼类的高速撞击是引起鱼类通过混流式水轮机时伤亡的最主要原因,其过机死亡率也远高于其他常规机型^[17],因此目前迫切需要建立一种量化鱼类通过混流式水轮机转轮时死亡率的方法。

本文综合计算流体动力学理论和鱼类-叶片撞击模型建立一种计算混流式转轮鱼类撞击死亡率的方法。采用经过可靠性验证的数值模拟方法分析获得水轮机内部的流动参数,然后以鱼类与叶片撞击的数学模型为基础,结合径向基神经网络响应技术

计算获得不同流量工况下转轮叶片造成的鱼类撞击死亡率。采用该方法对某电站安装的原型混流式转轮及两个鱼类生态优化转轮进行鱼类撞击死亡率分析,并确定最终的优化方案。

1 混流式水轮机内部流动的数值模拟

1.1 几何模型和网格划分

研究对象为重庆市某电站所安装的原型混流式水轮机转轮,该水轮机转轮的标称直径 D_1 为 3.5 m,导叶高度为 0.875 m,固定导叶和活动导叶的数量都是 24 个,转轮叶片的个数为 15 个。水轮机正常工作时额定水头为 106 m,额定转速为 214.3 r/min,额定功率为 100 MW。数值分析时的首要步骤是采用 UG 对原型混流式水轮机的整体过流部件进行三维建模,图 1 为建立完成的水轮机全流道三维模型。

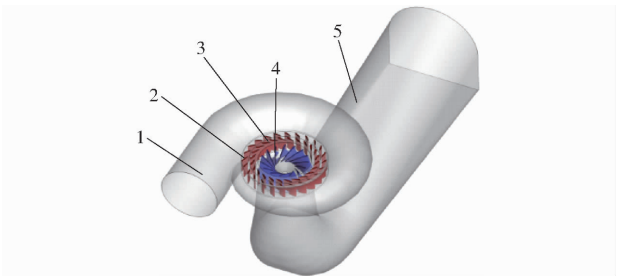


图 1 水轮机全流道三维模型

Fig. 1 3D model of turbine full passage

1. 蜗壳 2. 固定导叶 3. 活动导叶 4. 转轮 5. 尾水管

在几何模型建立完成后,对几何模型进行网格划分以便进行计算流体动力学分析。网格的质量影响着计算结果的准确性,为了保证数值计算的精度,对整个几何模型采用结构化六面体网格进行划分,并在各过流部件的近壁面处进行加密,各部件网格如图 2 所示。

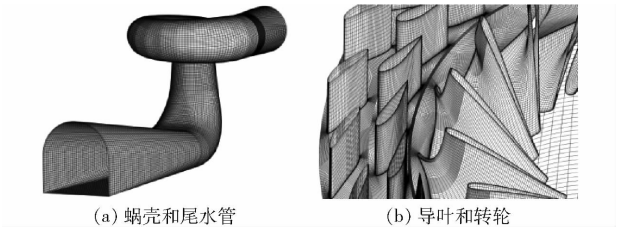


图 2 水轮机全流道的计算网格

Fig. 2 Simulation mesh of whole flow passage of hydroturbine

为确保网格数量不会对计算结果产生影响,以额定点的水力效率为评判依据对整体计算网格进行无关性验证,验证结果如表 1 所示。经过验证后得到水轮机全流道模型的网格节点总数约为 956 万。

1.2 边界条件

混流式水轮机内部的流动参数通过求解雷诺时均 N-S 方程获得,整个求解过程通过计算流体动

表 1 网格无关性验证

Tab.1 Mesh independence verification

网格节点总数	水力效率/%
5 044 494	95.50
6 235 945	95.45
7 202 667	95.26
8 558 108	95.12
9 562 972	95.10

力学软件 ANSYS CFX 完成。水轮机内部流动的数值计算边界条件给定：蜗壳进口断面作为进口边界，进口边界条件设置为质量流量；尾水管出口断面作为出口边界，以断面平均静压为边界条件；固体壁面全部设置为无滑移壁面，采用冻结转子法耦合连接转轮和活动导叶、尾水管之间的动静交接面。雷诺时均 N-S 方程的求解过程中，对流项采用二阶差分格式进行离散，湍流模型采用 SST $k-\omega$ 湍流模型，通过检测雷诺时均 N-S 方程的迭代残差判断计算是否收敛，收敛准则设置为最大残差小于 10^{-4} 。

1.3 数值模拟结果的可靠性分析

额定水头是水轮机运行权重最大的水头，在水轮机的额定水头下，从机组的 45% ~ 100% 额定功率范围内选取了 6 个不同的流量工况点进行性能的数值分析，工况点的参数如表 2 所示，其中工况 1 的流量即等于额定流量 Q_r 。

表 2 工况点参数

Tab.2 Parameters of operating conditions

工况编号	额定水头 H/m	流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
1 (额定工况)	106	104.1 (额定流量)
2	106	92.1
3	106	82.2
4	106	73.2
5	106	64.1
6	106	50.5

为验证上述工况下数值模拟所得结果的可靠性，将数值计算所得的混流式水轮机水力效率与实验值进行对比。

该混流式水轮机模型的水力效率已通过图 3 所示的水轮机模型实验台测试获得。该实验台的效率测试综合误差在 $\pm 0.20\%$ 范围内，实验台的各项装置符合 IEC 60193 和 GB/T 15613 等规范对水力机械实验台的要求。

将实验测试所得的水轮机模型水力效率根据文献[18]给出的公式进行修正后，最后即可获得原型水轮机在对应工况点下的水力效率实验值。将获得的原型水轮机效率实验值与数值模拟的结果进行对

比，如图 4 所示。

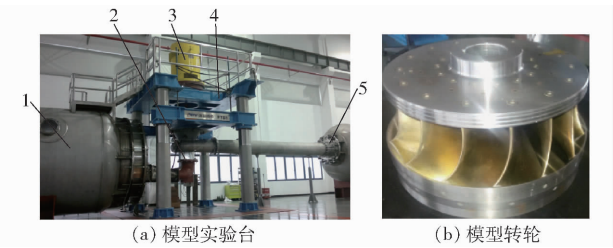


图 3 水轮机模型实验装置

Fig.3 Model experiment device of hydroturbine

1. 上游水箱 2. 水轮机 3. 测功电动机 4. 实验台架 5. 下游水箱

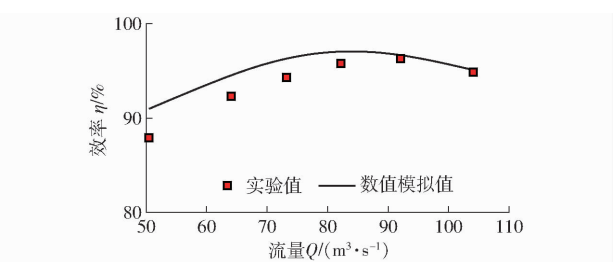


图 4 数值模拟结果与实验值对比

Fig.4 Comparison between numerical simulation results and experimental values

从图 4 可以看出，数值模拟所得结果与实验结果变化趋势相同，两者的吻合程度很好，表明数值模拟的结果可靠。数值模拟得到的水力效率略大于实验值，这是由于在数值模拟的过程中没有考虑转轮与机组顶盖之间、转轮与机组基础环之间的间隙。这些间隙不仅会导致容积泄漏，还会使转轮的上冠与下环在旋转过程中与间隙内部的水流摩擦而产生摩擦损失，所以效率数值计算值略高于实际效率。

2 鱼类与叶片撞击模型

由于混流式转轮的叶栅稠密度大，转轮转速高，因此鱼类在通过混流式水轮机转轮时的主要伤亡机理为撞击损伤。鱼类与混流式转轮的撞击伤亡率分析需要通过鱼类-叶片撞击的数学模型开展，本文所采用的撞击数学模型是对 FERGUSON 等^[8]的叶片撞击模型进行变换后获得。

根据文献[8]的混流式转轮叶片撞击模型理论，假设鱼为一维线性模型，且游动方向与水流方向相同且没有主动滑移，那么鱼的游动速度就是水流的绝对速度，游动方向就是绝对速度的方向。鱼在游经转轮的过程中通过叶片前缘平面的时间为 Δt ，则根据文献[8]的观点，转轮叶片前缘在 Δt 时间内转动的弧线距离 ΔS 与叶片前缘转动轨迹上两相邻叶片前缘的弧线长度 S 的百分比即为理论上的鱼类与叶片撞击率 P_s, P_s 的计算公式为

$$P_s = \frac{nN}{60} \frac{l \sin \alpha}{V_r} \times 100\% \tag{1}$$

式中 n ——转轮叶片数
 N ——水轮机转速 l ——鱼长
 V_r ——叶片进口绝对速度的径向分量
 α ——鱼的游动方向与叶片圆周运动方向的夹角,即叶片进口水流的绝对速度和切向速度的夹角

式(1)在计算撞击率 P_s 时需要同时求出角度 α 和叶片进口水流的径向速度。为了简化撞击率 P_s 的计算过程,根据图 5 所示的水轮机转轮叶片前缘的速度分解图对 P_s 的计算公式进行变换改进。

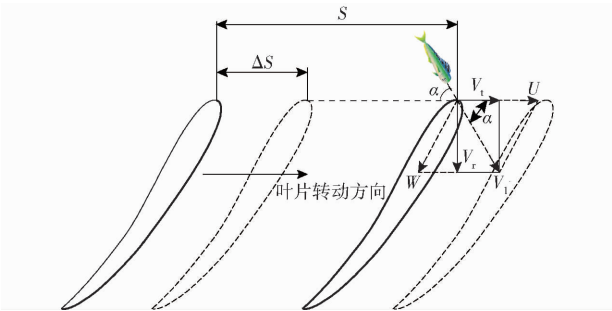


图 5 叶片前缘的速度分解

Fig. 5 Resolution of velocity at blade leading edge

从图 5 可以看出,绝对速度 V_1 由相对速度 W 和圆周速度 U 合成,然后绝对速度 V_1 又可分解为径向速度分量 V_r 和切向速度分量 V_t ,则绝对速度 V_1 的计算公式为

$$V_1 = \sqrt{V_r^2 + V_t^2} \tag{2}$$

同时,根据图 5 可知,鱼的游动方向与叶片前缘的运动方向(即圆周方向)的夹角为 α ,则根据速度三角形可得 $\sin \alpha$ 的计算公式为

$$\sin \alpha = \frac{V_r}{V_1} \tag{3}$$

将式(3)代入式(1),最终可得改进后的鱼类与叶片撞击率计算公式为

$$P_s = \frac{nN}{60} \frac{l}{V_1} \times 100\% \tag{4}$$

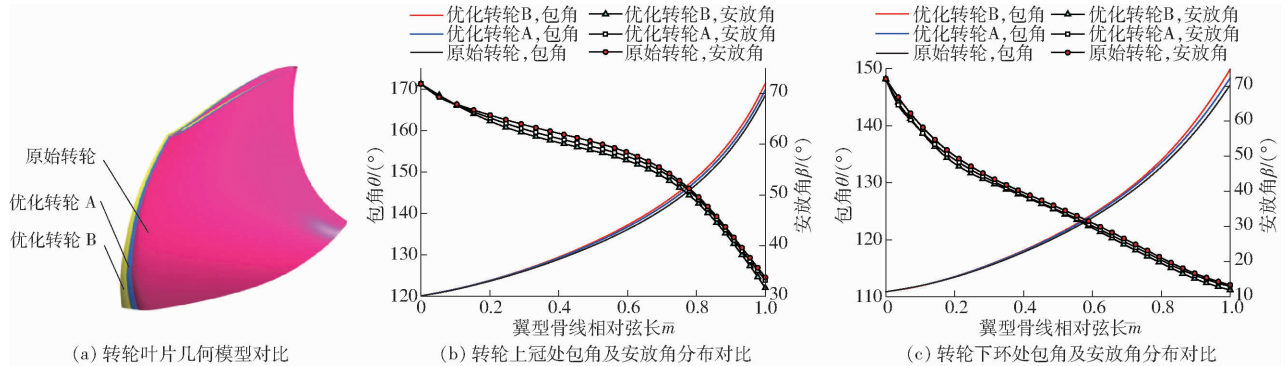


图 6 原始转轮和优化转轮的几何特征对比

Fig. 6 Comparison of geometric feature between initial and optimized runner

根据式(4)可以看出,在通过混流式转轮时,鱼类与叶片撞击率受多种因素共同影响。当鱼通过混流式转轮时,鱼类与叶片撞击率与鱼长、水轮机转速、叶片数成正比,与叶片进口水流的绝对速度成反比。在转轮的设计参数中,叶片数的调整可显著影响通过转轮的鱼类与叶片的撞击率。

3 转轮的鱼类生态性能优化

由于电站所处流域有多种珍稀鱼类,且原始水轮机转轮在设计时并没有考虑鱼类生态性能,所以需要原始转轮进行鱼类生态性能优化,优化的主要目的是提高鱼类通过存活率。撞击损伤是混流式转轮中鱼类伤亡的主要机理,所以优化的首要目标就是降低鱼类与叶片的撞击率。根据式(4)可知叶片数是直接影响鱼类与叶片撞击率的关键因素,同时叶片数又对转轮的水力性能有显著影响,为了在降低鱼类与叶片撞击率的同时确保转轮的额定单位流量不变,本文以原始转轮叶片为基础,通过减少叶片数及改变各流面上叶片翼型的包角分布规律分别获得了叶片数为 13 和 11 的优化转轮 A 和优化转轮 B,转轮叶片的几何特征对比如图 6 所示。

从图 6 可以看出,优化转轮与原始转轮的包角和安放角在叶片进口边处相同,优化转轮在叶片数减少的同时通过调整翼型从进口到出口的安放角分布增加了叶片的包角,以保证转轮的设计单位流量不变。

3.1 转轮优化前后的鱼类撞击率分析

在获得优化转轮以后,根据第 1 节中的数值模拟方法对两个优化转轮方案下的水轮机在表 2 所列的 6 个工况下的性能进行了计算,然后再根据第 2 节中的式(4)计算鱼类与叶片的撞击率。由式(4)可知,鱼类与叶片的撞击率 P_s 与转轮进口前来流的绝对速度有关,因此首先需要对转轮进口前水流的绝对流速进行分析。在图 7 中给出了优化转轮与原始转轮在工况 1(大流量)、工况 3(中等流量)和工

况 6(小流量)下的转轮进口周向平均绝对速度沿叶高方向的分布。

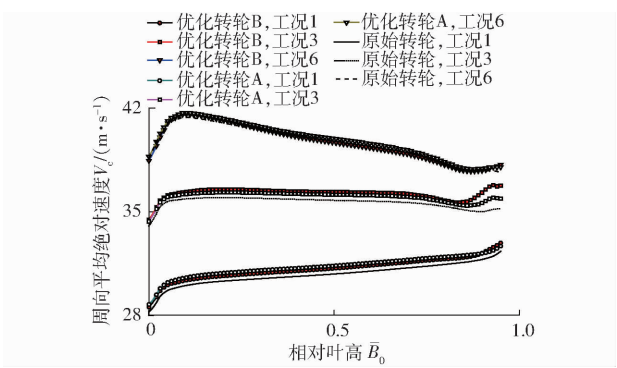


图 7 转轮进口处的周向平均绝对速度分布

Fig. 7 Distribution of circumferential average absolute velocity at inlet of runner

从图 7 可以看出, V_c 在转轮进口沿上冠到下环是不断变化的。其中工况 3 由于与最优工况邻近, 所以该工况下从上冠到下环的 V_c 的分布比较均匀, 而偏离最优工况较远的工况 1 和工况 6, V_c 沿转轮叶高方向则具有明显的梯度, 因此, 在计算鱼类与叶片的撞击率 P_s 时, 转轮进口的绝对速度 V_l 的数值可取为 V_c 从上冠到下环间的平均值 $\bar{V}_c$, 即式(4)中的绝对速度 $V_l = \bar{V}_c$ 。

通过数值计算的结果获得转轮进口的绝对速度 V_l 后以鱼长为 150 mm 的鱼类为分析对象, 按照式(4)对优化转轮和原始转轮进行不同流量工况下的撞击率 P_s 的计算, 各流量工况以及不同转轮方案对应的鱼类撞击率 P_s 如图 8 所示。

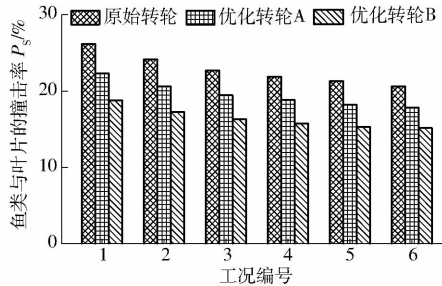


图 8 鱼类撞击率对比

Fig. 8 Comparison of strike probability of fish

由图 8 可以看出, 对于同一个混流式转轮而言, 当鱼类通过转轮流道下行时, 撞击率 P_s 随着流量的增加而呈增大趋势, 这与水泵中获得的结论相反^[19], 其原因是因为在水泵装置中, 鱼类与叶片的撞击率与泵叶轮进口的轴面速度成反比, 所以当流量增大时, 水泵装置中鱼类与叶片的撞击率减小。

当流量一定时, 优化转轮 A 和优化转轮 B 由于叶片数的减少, 过流通道增大, 鱼类撞击率 P_s 相比原始转轮得到降低, 在所分析的 6 个工况下撞击率的平均降低幅度为 3.3 与 6.4 个百分点, 其中, 在额

定工况下优化转轮 A 和优化转轮 B 的撞击率相比原始转轮分别下降了 3.9 与 7.4 个百分点。由此可见, 合理降低叶片数可以有效减小鱼类与叶片的撞击率。

3.2 转轮优化前后的鱼类撞击致死率分析

当鱼类与转轮叶片撞击后, 由于受伤程度不同并不是所有的鱼类都会死亡。鱼类受叶片撞击后的损伤程度与鱼的撞击速度、鱼长 l 、转轮叶片的前缘厚度 t 有很大关系。由于假定鱼类游动方向与水流方向相同且没有主动滑移, 所以当鱼类与叶片相撞时, 根据图 5 中的速度分解图可得鱼类相对于叶片的速度即等于水流相对于转轮叶片的速度 W , 即鱼类与叶片的撞击速度等于相对速度。

为研究撞击对鱼类所造成的损伤, AMARAL 等^[20]对多种不同长度的鱼类以及不同前缘厚度 t 的翼型进行了组合实验, 鱼类的鱼长 l 与叶片前缘厚度 t 的比值 l/t 的变化范围为 0.75 ~ 25, 实验中鱼类撞击速度的变化范围为 3 ~ 12 m/s。在经过大量的实验以后, 研究得出鱼的撞击存活率 P_l 、鱼长 l 与叶片前缘厚度 t 的比值 l/t 以及鱼类撞击速度 W 三者之间关系, 通过该关系可获得特定 l/t 条件下不同撞击速度所造成的撞击存活率 P_l , 则撞击致死率 P_D 的公式为

$$P_D = 1 - \min(100\%, P_l) \quad (5)$$

本文中 P_l 的计算将依据鱼长与叶片前缘厚度比值 l/t 、鱼类撞击速度 W 与鱼的撞击存活率 P_l 三者间的响应关系进行, 首先根据文献[20]的实验研究数据, 采用径向基神经网络算法拟合建立 l/t 、 W 与 P_l 间的响应关系。径向基神经网络是一种学习收敛速度较快的前向神经网络, 能够很好地逼近各种非线性函数。它使用基函数对样本点附近的点进行插值, 输出线性加权和, 然后快速准确地建立响应关系。本文中径向基神经网络的基函数选取为变指数样条基函数, 该基函数 $g(x)$ 的计算公式为

$$g(x) = \|x - x_j\|^c \quad (6)$$

式中 x ——输入层的信号

x_j ——径向基函数中心

$\|\cdot\|$ ——Euclid 范数

c ——欧氏距离的指数

式(6)中 $c \in (0.2, 3)$, c 在神经网络建立的过程中会自适应调整。采用径向基神经网络拟合文献[20]的实验研究数据后, 得到 l/t 、 W 与 P_l 的响应关系如图 9 所示。在图 9 中, l/t 和 W 作为自变量, P_l 作为因变量。

图 9 所示的响应模型的决定系数 R^2 经过分析大于 0.8, 因此可以满足计算要求。从图 9 可以看

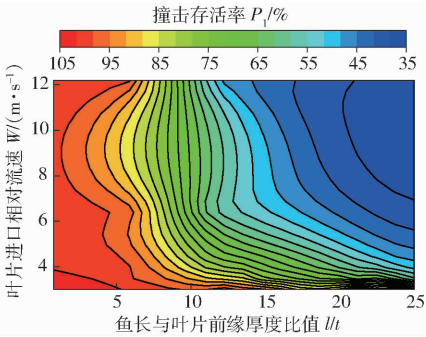


图 9 撞击后存活率响应模型

Fig. 9 Response model of survival rate after strike

出,当鱼类以一定的撞击速度与转轮叶片前缘相撞,其撞击后的存活率 P_1 随鱼长与叶片前缘厚度的比值 l/t 的增加而减小,即鱼类越长,叶片前缘厚度越薄,鱼类受撞击后越容易死亡。

响应模型的建立为鱼类撞击存活率 P_1 的计算提供了条件,但准确获得 P_1 的数值仍需确定 l/t 和 W 。本文所分析的混流式水轮机转轮的叶片前缘平均厚度 t 为 38.5 mm,鱼长 l 在前文中已知为 150 mm,则两者之比 l/t 为 3.9,不同转轮方案进口处水流的相对速度 W 则需要通过数值模拟的结果提取。在提取出各工况下转轮进口的相对速度 W 以后即可进行各转轮方案下的鱼类撞击存活率 P_1 的计算,并进一步应用式(5)计算获得各转轮方案下撞击致死率 P_D 的分布,计算分析所得的转轮进口的相对速度 W 和 P_D 如图 10 所示。

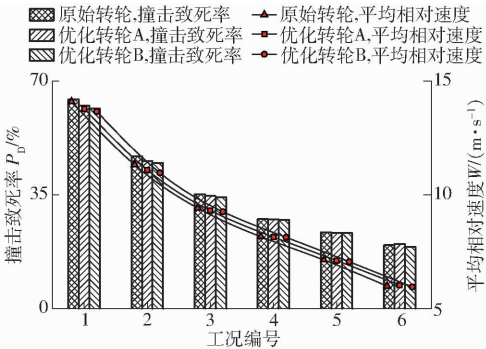


图 10 相对速度及撞击致死率对比

Fig. 10 Comparison of relative velocity and strike lethality rate

由图 10 可以看出,对于同一个转轮而言,流量的增加使得撞击致死率在不断提高,其原因是当导叶开度和流量增加时,根据转轮进口的速度三角形变化可知水流的相对速度也在增大,即鱼的撞击速度 W 在增大,从而导致鱼类撞击致死率随之增加。在工况 1 即额定流量工况时,3 个转轮方案的撞击致死率分别达到了 64.3%、62.35%、61.6%,远大于小流量工况的致死率,由此可见,流量对撞击致死率有决定性影响。当以流量相同为前提进行不同转

轮方案的撞击致死率对比时发现,鱼类的撞击致死率在各流量工况下并无太明显的差别。

在获得了各工况下鱼类与叶片的撞击率 P_s 以及鱼类撞击致死率 P_D 以后,各工况下的鱼类撞击死亡率 P_F 由两者相乘获得,据此可计算获得不同转轮方案下的鱼类撞击死亡率 P_F ,如图 11 所示。

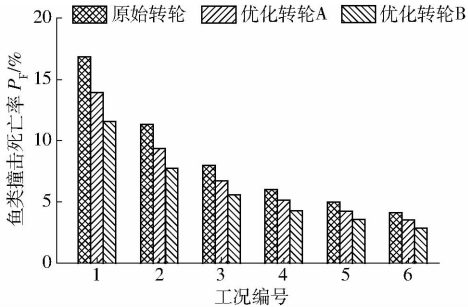


图 11 鱼类撞击死亡率

Fig. 11 Strike mortality of fish

由图 11 可以看出,在额定水头下,相同转轮所对应的鱼类撞击死亡率随流量增加呈现明显的增大趋势,即鱼类通过混流式转轮时受到叶片撞击而死亡的概率与转轮的流量呈正相关的关系。对于本文所研究的不同叶片数的混流式转轮,在额定流量下, P_F 分别达到了 16.85%、13.92%、11.55%,而在流量最小的工况 6 则分别只有 4.1%、3.54%、2.9%,由此可知,在水轮机长期运行的额定工况点,鱼类的过机死亡率是最高的。同时,通过鱼类撞击死亡率的对比也发现,优化转轮 A 和优化转轮 B 使得额定流量工况下的鱼类撞击死亡率分别降低了 2.93 和 5.3 个百分点,并使得所分析的 6 个工况下的撞击死亡率平均降低了 1.4 和 2.6 个百分点,由此表明两个优化转轮都提升了鱼类通过混流式转轮的存活率,其中 11 叶片的优化转轮 B 的效果最好,这也说明在减少叶片数的前提下对转轮的包角分布进行优化可以达到提升鱼类通过存活率的目的。

3.3 转轮优化前后的水力效率对比

叶片数的减少以及安放角分布的变化必然会影响转轮的水力效率,由于额定水头是运行权重最大的水头,因此通过第 1 节中的数值模拟方法对两个优化转轮方案下的水轮机进行了额定水头下的水力性能分析,得到水轮机的整机水力效率对比如图 12 所示。

由图 12 可以看出,额定水头下的 86% ~ 100% 额定流量范围内,优化转轮 A 使得水轮机保持了与原始机组几乎相同的水力效率。当流量小于 86% 额定流量时,优化转轮 A 对应的水轮机性能开始下降,下降幅度随着流量的减少而增大,在流量最小的工况 6 下,水轮机效率相比原始值的降幅为 0.72%。与原始转轮和优化转轮 A 相比,优化转轮

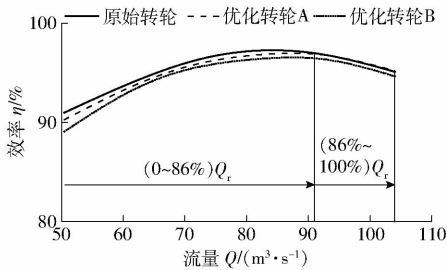


图 12 转轮优化前后的的水轮机效率对比

Fig. 12 Comparison of turbine efficiency before and after runner optimization

B 使得水轮机的整体性能都出现了降低,额定水头的 6 个工况下的整机效率相比原始水轮机的平均降幅为 0.92%,其中在额定流量下效率下降了 1.9%。效率下降所引发的后果是水轮机在对应的流量下将出现功率不足的情况,由此可见优化转轮 B 对机组的能量性能产生了不利的影响。

综合上述分析可知,优化转轮 A 虽然在部分流量工况下的能量性能略差于原始转轮,但在额定流量附近其性能并无下降,也即机组满负荷发电时其功率不受影响,但优化转轮 B 则使额定水头下水轮机整体水力效率下降,会导致满负荷发电时功率不足的情况。综合对比两个优化转轮后,选择优化转

轮 A 作为最终的鱼类生态优化转轮。

4 结论

(1)通过分析不同流量下混流式转轮与鱼类的撞击模型发现,鱼类与叶片的撞击率与转轮进口前的绝对速度成反比,鱼类在通过混流式转轮时,其与转轮叶片的撞击率随流量增加呈增大趋势,与水泵中获得的结论相反。

(2)通过对比分析不同叶片数的优化转轮与原始转轮的鱼类撞击死亡率可知,鱼类通过转轮的撞击死亡率与转轮过流量以及转轮叶片数呈正相关,对于需要进行鱼类生态优化的混流式水轮机转轮,可在减少叶片数的前提下对转轮的包角分布规律进行优化,以降低鱼类撞击死亡率。

(3)对于本文所研究的混流式水轮机,13 叶片的优化转轮 A 和 11 叶片的优化转轮 B 分别使得额定水头下各工况的鱼类撞击死亡率平均降低了 1.4 和 2.6 个百分点,其中额定流量下的撞击死亡率分别降低了 2.93 和 5.3 个百分点,明显提升了转轮的鱼类生态性能,但优化转轮 B 对水轮机的水力性能有较为不利影响,因此选择优化转轮 A 作为最终的鱼类生态优化转轮。

参 考 文 献

1 National Research Council. Upstream: salmon and society in the Pacific Northwest[M]. Washington D.C Upstream: Salmon and Society in the Pacific Northwest, 1996.

2 WINTER H V, VAN D W, Assessing the opportunities for upstream migration of non-Salmonid fishes in the weir-regulated river vecht[J]. Fisheries Management and Ecology, 2001, 8: 513 – 532.

3 STEVEN J Z, MICHAEL R D, BRENT C K, et al. Hydrologic and hydraulic factors affecting passage of paddlefish through dams in the upper mississippi river[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2004, 133: 160 – 172.

4 易雨君,王兆印. 大坝对长江流域洄游鱼类的影响[J]. 水利水电技术,2009,40(1):29 – 33.

YI Yujun, WANG Zhaoyin. Impact from dam construction on migration fishes in Yangtze River Basin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(1): 29 – 33. (in Chinese)

5 兰昊,张思青. 环保式过鱼水轮机发展及研制探讨[J]. 人民长江,2005,46(21):71 – 75.

LAN Hao, ZHANG Siqing. The research and development of environmentally fish friendly turbine[J]. People Yangtze River, 2005, 46(21): 71 – 75. (in Chinese)

6 VON RABEN K. Zur Frage Der beschadigung van fischen durch turbinen[J]. Die Wasserwirtschaft, 1957(4): 97 – 100.

7 BELL M C. Revised compendium on the success of passage of small fish through turbines[R]. Portland: U. S. Army Corps of Engineers, 1991.

8 FERGUSON J W, PLOSKEY G R, LEONARDSSON K L, et al. Combining turbine blade-strike and life cycle models to assess mitigat[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2008, 65(8):1568 – 1585.

9 DENG Zhiqun, CARLSON T J, DAUBLE D D, et al. Fish passage assessment of an advanced hydropower turbine and conventional turbine using blade-strike modeling[J]. Energies, 2011, 4(1): 57 – 67.

10 DENG Zhiqun, CARLSON T J, SIMMONS C S, et al. Six-degree-of-freedom sensor fish design and instrumentation[J]. Sensors, 2007, 7(12): 3399 – 3415.

11 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(30): 623 – 628.

12 潘强,张德胜,施卫东. 基于叶片撞击模型的鱼友好型轴流泵优化设计[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(12):102 – 108.

http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151215&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.015.

PAN Qiang, ZHANG Desheng, SHI Weidong. Optimization design of fish-friendly axial-flow pump based on blade strike model

- [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 102–108. (in Chinese)
- 13 潘强,施卫东,张德胜,等. 泵站用轴流泵鱼友好型设计及鱼类存活率预测[J]. 排灌机械工程学报,2017,35(1):42–49.
PAN Qiang, SHI Weidong, ZHANG Desheng, et al. Axial-flow pump fish-friendly design and prediction of fish survival rate in pumping station[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(1): 42–49. (in Chinese)
- 14 赵文龙,周大庆,林奇峰. 基于鱼类友好理念的水轮机改型及特性分析[J]. 中国农村水利水电,2017,4(3):177–180.
ZHAO Wenlong, ZHOU Daqing, LIN Qifeng. Hydraulic turbine modification and characteristics analysis based on fish friendly concept[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017, 4(3): 177–180. (in Chinese)
- 15 李成,王煜. 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.
LI Cheng, WANG Yu. Study on correlation between turbine runner structure and pressure injury of juvenile [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(10): 110–120. (in Chinese)
- 16 李成,王煜. 轴流式水轮机流道内压力分布对幼鱼影响研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2015,37(6):65–69.
LI Cheng, WANG Yu. Study on the influence of pressure distribution on juvenile fish in Kaplan turbines passage[J]. Journal of Sanxia University(Natural Science Edition), 2015, 37(6): 65–69. (in Chinese)
- 17 THOMAS C C, HECKER G E, FADHER H B, et al. Development of a more fish tolerant turbine runner advanced hydropower turbine project[R]. Massa Chusetts; Alden Research Laboratory, 1997.
- 18 国际电工委员会. 60193–1999 水轮机 IEC 国际标准译丛(一)(水轮机部分)[S]. 北京:中国标准出版社,1999.
- 19 ESCH B P M V. Fish injury and mortality during passage through pumping stations[J]. Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(7):3412–3427.
- 20 AMARAL S V, HECKER G E, DIXON D A. Designing leading edges of turbine blades to increase fish survival from blade strike [R]. Palo Alto, USA: Electric Power Research Institute, 2011.
- ~~~~~

(上接第 137 页)

- 18 MIGUEL A F. Non-Darcy porous media flow in no-slip and slip regimes[J]. Thermal Science, 2012, 16(1):167–176.
- 19 JOURABIAN M, FARHADI M, RABIENATAJ D A A, et al. Lattice Boltzmann simulation of melting phenomenon with natural convection from an eccentric annulus[J]. Thermal Science, 2013, 17(3):877–890.
- 20 ALKSHAISH J A, ESFAHANI J A. Lattice Boltzmann simulation of turbulent natural convection: enclosure heated from below [J]. Journal of Thermophysics & Heat Transfer, 2017, 31(4):1–10.
- 21 CAO N, CHEN S, JIN S, et al. Physical symmetry and lattice symmetry in the lattice Boltzmann method[J]. Physical Review E Statistical Physics Plasmas Fluids & Related Interdisciplinary Topics, 1997, 55(1):21–24.
- 22 MEN Y, LAI Y, DONG S, et al. Research on CO dispersion of a vehicular exhaust plume using lattice Boltzmann method and large eddy simulation[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 52:202–214.
- 23 BHAGWAT M J, LEISHMAN J G. Correlation of helicopter rotor tip vortex measurements[J]. AIAA Journal, 2000, 38(2): 301–308.
- 24 RAMASAMY M, LEISHMAN J G. Benchmarking particle image velocimetry with laser doppler velocimetry for rotor wake measurements[J]. AIAA Journal, 2007, 45(11):2622–2633.
- 25 BAUKNECHT A, EWERS B, SCHNEIDER O, et al. Blade tip vortex measurements on actively twisted rotor blades[J]. Experiments in Fluids, 2017, 58(5):49–64.
- 26 BAUKNECHT A, MERZ C B, RAFFEL M, et al. Blade-tip vortex detection in maneuvering flight using the background-oriented schlieren technique[J]. Journal of Aircraft, 2014(6):1–13.
- 27 魏鹏,史勇杰,徐国华. 复杂旋翼流场的耦合欧拉-拉格朗日数值方法[J]. 航空学报,2013,34(7):1538–1547.
WEI Peng, SHI Yongjie, XU Guohua. Coupled Eulerian–Lagrangian method for complicated rotor flow field prediction[J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2013, 34(7):1538–1547. (in Chinese)
- 28 DUGA A T, DELELE M A, RUYSEN K, et al. Development and validation of a 3D CFD model of drift and its application to air-assisted orchard sprayers[J]. Biosystems Engineering, 2017, 154:62–75.
- 29 HILZ E, VERMEER A W P. Spray drift review: the extent to which a formulation can contribute to spray drift reduction[J]. Crop Protection, 2013, 44(1):75–83.
- 30 中国民用航空总局运输管理司. 飞机喷雾飘移现场测量方法:MH/T 1050—2012[S]. 北京:中国民用航空局,2012.
- 31 中国民用航空总局运输管理司. 农业航空作业质量技术指标:MH/T 1002—1995[S]. 北京:中国民用航空局,1995.