

# 鱼类通过混流式水轮机转轮时受压强及剪切损伤的概率分析

朱国俊, 吉龙娟, 冯建军\*, 罗兴铤

(西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

**摘要:** 鱼类在通过混流式水轮机流道时会遭遇最低压强及压强梯度引发的压强损伤以及剪切应力引发的剪切损伤。为了辨识混流式转轮中压强损伤和剪切损伤的主次关系, 进而有针对性的开展混流式转轮的鱼类生态友好性能优化, 该文基于计算流体动力学分析方法研究了不同水头条件下混流式转轮内超出压强以及剪切损伤阈值的体积分布规律, 并获得了不同工况下混流式转轮内压强、压强梯度以及剪切应力引发鱼类受损的概率。结果表明: 鱼类受压强及剪切损伤的概率与流量成正相关关系, 对于该文分析的混流式转轮, 鱼类受最低压强损伤的概率在最小水头的最大流量工况下达到最大值 9.1%, 剪切损伤及高压强梯度损伤的概率在额定工况下达到最大, 分别为 0.823% 和 8.31%。在相同工况下进行 3 种损伤概率的对比后发现, 在大流量工况下, 鱼类受最低压强和高压强梯度损伤的概率更大, 在小流量工况下则是压强梯度损伤概率相对较高, 所以综合分析结果可知最低压强和高压强梯度是开展亲鱼型混流式转轮优化时需要考虑的主要因素, 而剪切应变率则是次要因素。

**关键词:** 鱼; 流量; 数值分析; 水轮机; 混流式转轮; 鱼类损伤概率; 压强损伤; 剪切应力损伤

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.008

中图分类号: TK733<sup>+</sup>.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-02-0055-08

朱国俊, 吉龙娟, 冯建军, 罗兴铤. 鱼类通过混流式水轮机转轮时受压强及剪切损伤的概率分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 55—62. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.008 <http://www.tcsae.org>

Zhu Guojun, Ji Longjuan, Feng Jianjun, Luo Xingqi. Probability evaluation of pressure and shear damage for fish passing through francis turbine runner[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(2): 55—62. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.008 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

目前, 水能资源开发所引发的生态环境问题一直没有得到有效解决, 其中矛盾最突出的一个方面就是水电工程对鱼类生态造成的负面影响, 严重时甚至导致某些鱼类种群濒临灭绝<sup>[1-4]</sup>, 进而影响水产渔业的发展。水电站中的水轮机设备是引发鱼类损伤的主要根源之一, 美国陆军工程师兵团 (united states army corps of engineers, USACE) 的研究人员发现, 水轮机诱发鱼类伤亡的机理主要包括机械损伤、压强损伤、剪切损伤和空化损伤等<sup>[5-6]</sup>。机械损伤是水力机械直接作用于鱼体的损伤, 目前可通过确定性概率公式进行计算<sup>[7-8]</sup>。鱼类在水轮机中受压强及剪切损伤的程度则主要与鱼的大小、鱼类所承受的压强梯度及剪切率有关<sup>[9-10]</sup>, 目前仍没有明确的概率计算公式。

水轮机内较大的压强梯度和剪切率会导致过机鱼类出现鱼鳔爆裂、眼球外凸、血管充血破裂、肌肉撕裂等损伤<sup>[11-12]</sup>, 为此, 国内外很多学者对过机鱼类的压强、剪切损伤型式及阈值开展了研究。如: Abernethy 等<sup>[13]</sup>开展了一系列的试验研究后发现, 水轮机流道中的鲑鱼

在压强降低率为 3.5 MPa/s 时并无明显受伤; Neitzel 等<sup>[14-15]</sup>将多种不同类型的鱼类释放到具有淹没射流的水槽中以观察和分析由剪切力以及湍流引起的鱼类损伤情况, 并以剪切应变率作为指标衡量鱼类在水流中所受到的剪切强度, 最终获得了鱼类在受到剪切流作用下不发生明显损伤的剪切应变率阈值为 500 s<sup>-1</sup>; Guensch 等<sup>[16]</sup>则细化研究了高速射流所引起的鱼类损伤型式, 并指出高速水流对鱼类的强力拖拽作用是鱼类体内损伤的主要原因; Normandeaus 等<sup>[17]</sup>综合计算流体动力学方法和现场试验观测以评估水轮机中流体剪切应力对鱼类的损伤程度, 并指出了大型轴流式水轮机中可能造成鱼类死亡的强剪切应力区域; 邵奇等<sup>[18]</sup>通过试验研究获得了鲫鱼不受损伤的压强梯度阈值; 李成等<sup>[19]</sup>则研究了轴流式水轮机转轮的叶片数、泄水锥结构与过机幼鱼所受压强损伤的相关性。综观目前的研究进展可知, 确保鱼类在水轮机内部不受压强、剪切损伤的压强梯度阈值和剪切应变率阈值已获得大量研究并形成了较为成熟的成果, 但关于如何综合这些研究成果量化分析鱼类受混流式转轮诱发的压强及剪切损伤的概率仍极为少见。

混流式水轮机转轮由于其叶栅稠密度大、变工况条件下的涡系时空结构复杂, 所以鱼类在通过混流式转轮时可能会受到多种损伤机制的联合作用。为了辨识混流式水轮机转轮诱发鱼类伤亡的主次因素, 以便有针对性的开展混流式转轮的鱼类生态性能优化, 本文以计算流体动力学分析方法为基础建立了量化计算混流式转轮内

收稿日期: 2018-08-21 修订日期: 2018-10-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51339005); 国家自然科学基金项目 (51679195); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目 (2018JM5102)

作者简介: 朱国俊, 讲师, 研究方向为水力机械优化设计理论及鱼类生态友好型水轮机设计。Email: guojun\_zhu1984@126.com

\*通信作者: 冯建军, 教授, 研究方向为流体机械流动理论及优化设计、流体机械振动与稳定性分析。Email: jianjunfeng@xaut.edu.cn

部鱼类受压强及剪切损伤概率的方法。首先采用计算流体力学分析方法对混流式水轮机进行全流道计算, 然后引用使鱼类不发生损伤的压强及剪切应变率阈值为指标, 分析获得不同工况下混流式转轮内部超出损伤阈值的区域分布规律及体积大小, 并分别统计不同工况下混流式转轮内部超出压强阈值及剪切应变阈值的体积占转轮流道总体积的百分比作为鱼类受损伤概率, 最后根据统计结果辨识不同工况下使鱼类受到损伤的主次因素, 同时进一步分析这些因素的致损概率随工况变化的规律, 从而为混流式转轮的鱼类生态性能优化提供有价值的参考。

1 水轮机内部流动数值分析

1.1 几何模型和网格划分

以某电站安装的原型混流式水轮机作为研究对象, 该水轮机的主要参数为: 额定水头  $H_r=106\text{ m}$ , 最大水头  $H_{\max}=120\text{ m}$ , 最小水头  $H_{\min}=73\text{ m}$ , 额定流量  $Q_r=104.1\text{ m}^3/\text{s}$ , 额定出力  $P_r=100\text{ MW}$ , 额定转速  $n_r=214.3\text{ r/min}$ , 转轮直径  $D_1=3.5\text{ m}$ , 转轮叶片数为 15, 活动导叶和固定导叶的数目都为 24 个, 该机组的全流道三维模型如图 1 所示。

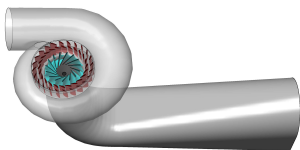
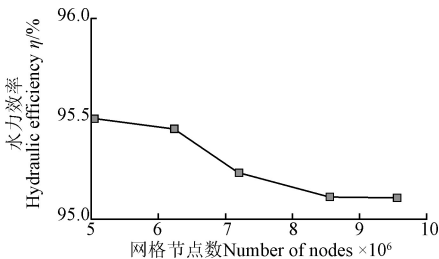
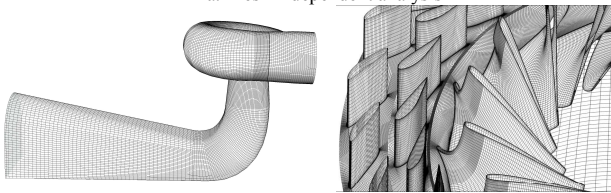


图 1 水轮机模型  
Fig.1 Model of hydroturbine

计算域网格划分是开展数值分析首要步骤, 网格划分也对数值模拟的准确性有重要影响。为提高数值求解的收敛性和准确性, 对水轮机全流道采用六面体结构化网格划分。参照文献[20], 总网格数以水轮机水力效率为标准开展网格无关性验证, 验证结果如图 2a 所示。



a. 网格无关性分析  
a. Mesh independent analysis



b. 蜗壳及尾水管网格  
c. 导叶及转轮网格  
b. Mesh of volute and draft tube c. Mesh of guide vane and runner

图 2 网格示意图及无关性分析

Fig.2 Sketch of mesh and mesh independent analysis

当网格节点总数为  $9.56\times10^6$  时, 水力效率的波动小于 1%, 满足水轮机数值计算对网格无关性的要求, 所以选择该节点数的网格作为最终的网格方案, 机组全流道的网格如图 2b 和图 2c 所示。

1.2 数值计算的边界条件和可靠性分析

合理的边界条件对数值计算而言至关重要, 在本文的水轮机数值计算中, 计算域的进口为蜗壳进口, 进口边界条件设置为质量流量, 计算域的出口为尾水管的出口, 出口边界根据尾水管出口的淹没深度给定静压边界条件, 固体壁面设置为无滑移壁面, 定常计算时转动部件与静止部件间的交界面采用冻结转子法连接。在 N-S 方程求解过程中, 控制方程中的对流项采用二阶差分格式进行离散, 并选用水轮机数值模拟中常用的 SST  $k-\omega$  湍流模型进行数值模拟计算<sup>[21-22]</sup>。为验证数值计算的可靠性, 在额定、最大和最小水头条件下的 50%~100% 机组额定功率范围内各选取了 6 个工况点进行定常计算, 工况如表 1 所示, 其中工况 R1 为水轮机额定工况。

表 1 计算工况参数  
Table 1 Parameter of simulation condition

工况编号 Condition No.	出力 Output power	水头 Head $H/\text{m}$	流量 Discharge $Q/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$
M1	$100\%P_r$	最大水头 Maximum head $H_{\max}$	90.3
M2	$90\%P_r$		81.8
M3	$80\%P_r$		77.8
M4	$70\%P_r$		73.8
M5	$60\%P_r$		66.0
M6	$50\%P_r$		58.0
R1	$100\%P_r$	额定水头 Rated head $H_r$	104.1
R2	$90\%P_r$		92.1
R3	$80\%P_r$		82.2
R4	$70\%P_r$		73.2
R5	$60\%P_r$		64.1
R6	$50\%P_r$		50.5
L1	$100\%P_r$	最小水头 Minimum head $H_{\min}$	87.4
L2	$90\%P_r$		79.5
L3	$80\%P_r$		71.9
L4	$70\%P_r$		64.2
L5	$60\%P_r$		56.5
L6	$50\%P_r$		45.8

注:  $P_r$  为水轮机的额定出力。  
Note:  $P_r$  represented the rated output power of hydroturbine.

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

将试验测试所得的水轮机模型水力效率根据国际电工委员会标准 IEC 60193<sup>[23]</sup>进行修正, 最后即可获得原型水轮机在对应工况点下的水力效率试验值。将获得的原型水轮机效率试验值与数值模拟的结果进行对比, 结果如图 4 所示。

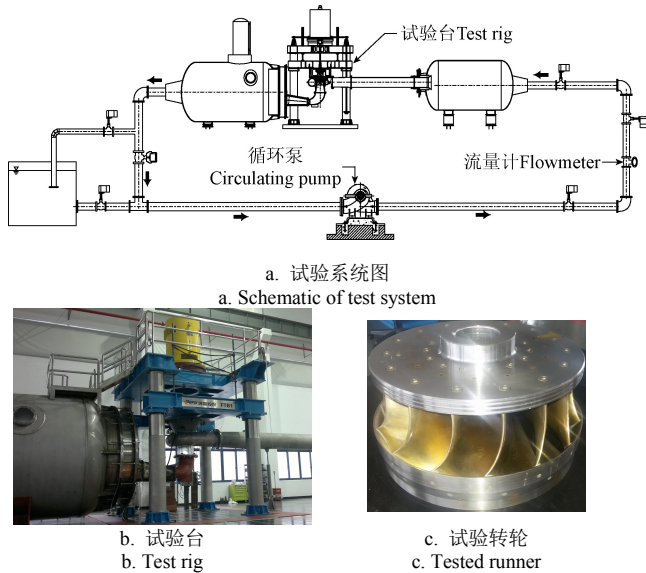


图 3 试验系统及试验转轮图

Fig.3 Diagram of test system and tested runner

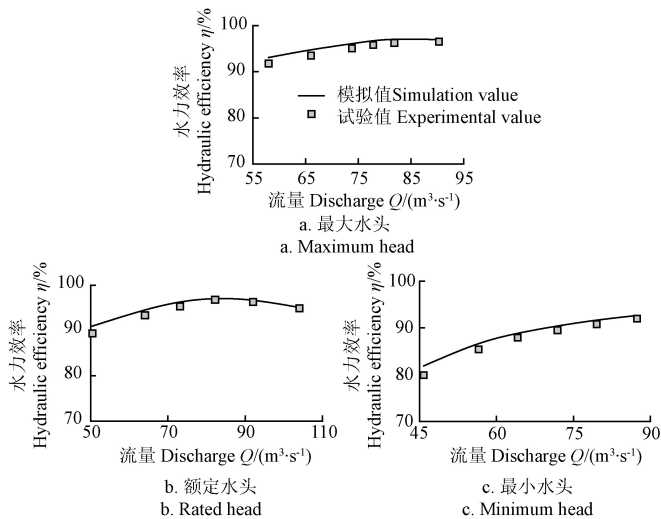


图 4 不同水头下水轮机水力效率模拟值与试验值对比

Fig.4 Comparison between simulation and experimental values of hydraulic efficiency of hydroturbine under different heads

从图 4 中可以看出, 各水头下水轮机水力效率的模拟值随流量的变化规律与试验值相同。数值模拟得到的水力效率略大于试验值, 其中最大的偏差值为 1.98%, 出现在最小水头最小流量工况, 即工况 L6。数值计算和试验结果之间的差异是由于数值计算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, 这些间隙的存在不仅会引起容积泄漏, 还会使转轮上冠、下环与间隙内部的水流摩擦而产生摩阻力矩<sup>[24]</sup>, 所以数值计算所得水力效率值略高, 但总体计算偏差小于 2%, 表明数值计算结果是可靠的。

## 2 鱼类受压强及剪切损伤的概率计算方法

在亲鱼型水轮机的研发中, 本文拟针对的鱼类对象是陕西特有的秦岭细鳞鲑, 属于鲑科鱼种。由于秦岭细鳞鲑属于国家二级保护野生动物, 因此捕捉其开展损伤阈值研究需要申请特许猎捕证, 而且捕捉数量也有限制。

考虑到这些复杂因素, 在量化分析混流式转轮诱发的鱼类损伤概率大小时, 本文选择了国外通过试验研究获得的鲑类鱼种损伤阈值作为参考。

### 2.1 鱼类的压强及剪切损伤阈值

混流式水轮机转轮内部流道几何形状复杂, 水流特性变化迅速, 过机鱼类在转轮中将受到压强及剪切损伤。引发鱼类压强损伤的主要因素包括压强梯度和最低压力值, 流体的剪切应变则是导致鱼类剪切损伤的主要因素。

压强梯度和压强主要致损的鱼类器官是鱼鳔, 鱼类鱼鳔的可膨胀体积有限, 过快的压强下降梯度会导致鱼鳔的急速膨胀从而引发鱼鳔破裂致损。此外, 即使压强下降梯度很慢使得鱼类鱼鳔缓慢膨胀, 但最终的目标压力值如果低于某一阈值的话还是会使鱼类的鱼鳔过度膨胀甚至破裂从而造成鱼类伤亡。根据文献[12]中太平洋西北国家试验室的试验研究成果, 使过机鲑类鱼种不发生压强损伤的最低压强值为 50.66 kPa、最高压强梯度为 3.5 MPa/s, 因此本文界定混流式转轮内部致使鱼类受压强损伤的区域时也采用这 2 个阈值作为标准。

流体的剪切变形主要致使鱼类本体在强剪切作用下扭曲, 一旦鱼体的扭转或扭曲度超出鱼体所能承受的极限即致使鱼类受伤, 而流体的剪切变形程度大小通常通过剪切应变率来衡量, 因此剪切应变率可作为分析鱼类是否会受到剪切损伤的标准。剪切应变率在流体力学中又称为角变形率, 是表征流体微团剪切变形大小的物理量, 其计算公式如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \\ \gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别代表笛卡尔坐标系下  $x$ 、 $y$ 、 $z$  这 3 个坐标方向上的速度,  $\text{m/s}$ ;  $\gamma_{xy}$ 、 $\gamma_{zx}$ 、 $\gamma_{yz}$  则分别代表笛卡尔坐标系下  $xy$ 、 $zx$ 、 $yz$  这 3 个平面上的剪切应变率,  $\text{s}^{-1}$ 。

根据文献[13]、[14]的试验研究成果, 致使鲑类鱼种受损伤的剪切应变率阈值为  $500 \text{ s}^{-1}$ , 因此本文也选取其作为界定混流式水轮机内使鱼类受剪切损伤区域的标准。

### 2.2 压强及剪切损伤概率的计算

鱼类在进入混流式水轮机以后必然要经过混流式转轮以到达下游, 因此混流式水轮机内部的鱼类通过混流式转轮的事件概率等于 1。在此基础上, 定义鱼类通过混流式转轮时受到压强及剪切损伤的事件代号如表 2 所示。

表 2 损伤事件代号

Table 2 Code of damage event

事件代号 Event code	事件内容 Event contents
A	鱼类通过混流式转轮时由最低压强引发的损伤
B	鱼类通过混流式转轮时由剪切流动引发的损伤
C	鱼类通过混流式转轮时由高压强梯度引发的损伤

则  $P(A)$ 、 $P(B)$ 、 $P(C)$ 代表了鱼类受最低压强、剪



切损伤及高压强梯度损伤的概率,这些概率可保守的按照转轮流道内部致使鱼类受损伤的区域占转轮流道总体积的百分比进行计算,计算公式如下式(2) — (4)所示。

$$P(A) = \frac{V_p}{V_{\text{total}}} \times 100\% \quad (2)$$

$$P(B) = \frac{V_s}{V_{\text{total}}} \times 100\% \quad (3)$$

$$P(C) = \frac{V_{pg}}{V_{\text{total}}} \times 100\% \quad (4)$$

式(2) — (4)中,  $P(A)$ 、 $P(B)$ 、 $P(C)$ 分别为鱼类受最低压强、剪切损伤及高压强梯度损伤的概率;  $V_p$ 为混流式转轮内压强低于 50.66 kPa 的区域所占的体积,  $\text{m}^3$ ;  $V_s$ 为混流式转轮内剪切应变率高于  $500 \text{ s}^{-1}$  的区域所占的体积,  $\text{m}^3$ ;  $V_{pg}$ 为混流式转轮内压强梯度高于  $3.5 \text{ MPa/s}$  的区域所占的体积,  $\text{m}^3$ ;  $V_{\text{total}}$ 为混流式转轮内部过流区域

的总体积,  $\text{m}^3$ 。根据数值计算结果提取转轮流道内部超出损伤阈值的区域体积后即可根据式(2) — (4)进行损伤概率的计算。

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 鱼类受最低压强的损伤概率分析

在数值计算结果中,以最低压强的损伤阈值为基准提取了转轮内部压强超出压强损伤阈值的区域体积分布进行分析。由于各水头条件下转轮内压力超出压强损伤阈值的体积随流量变化的趋势相似,所以图5中只给出了额定水头条件下转轮内压强超出阈值的体积分布进行分析。

图5中的部位1为转轮叶片出水边,转轮内压力超出压强损伤阈值的体积主要出现在该部位,且随着流量增加而增大。图5中的部位2为转轮上冠泄水锥,在100%额定出力的工况下该部位也出现了超出压强损伤阈值的体积。

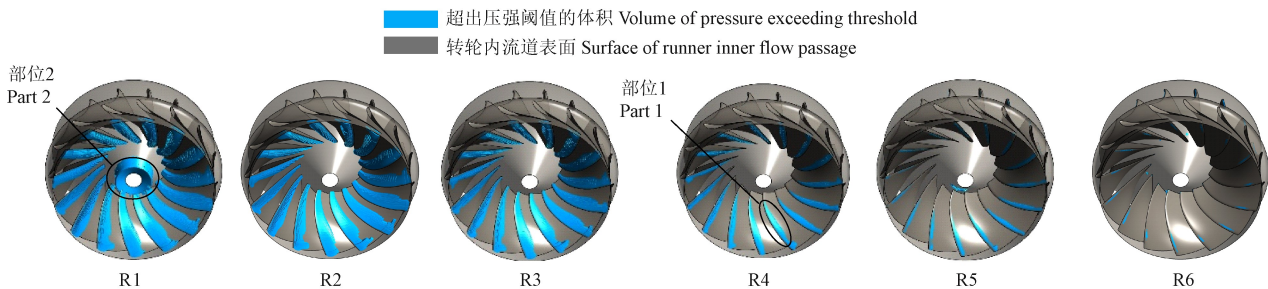


图5 额定水头下转轮内压强超出阈值的体积分布

Fig.5 Volume distribution of pressure exceeding threshold in runner at rated head

为了量化统计流量对鱼类受最低压强损伤概率的影响,图6给出了根据式(2)计算所得的鱼类受最低压强损伤概率  $P(A)$  随流量的变化曲线。

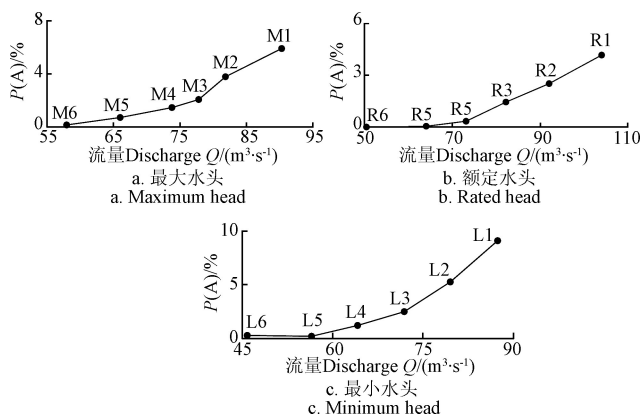


图6 不同水头下最低压强损伤概率  $P(A)$  随流量的变化趋势

Fig.6 Tendency of damage probability  $P(A)$  caused by minimum pressure change with discharge at different heads

根据图6可知,在各个水头下,最低压强损伤概率  $P(A)$  的最大值都出现在100%额定出力工况。其中,最小水头下  $P(A)$  的最大值等于9.1%,是3个水头下  $P(A)$

的最大值。 $P(A)$ 随流量增加的原因是流量增大使得转轮内部低压区域增加,从而导致鱼类在通过转轮流道时受最低压强损伤的概率增加,由此可见,流量与鱼类受最低压强损伤概率  $P(A)$  具有明显的正相关关系。

#### 3.2 鱼类受剪切损伤的概率分析

造成鱼类剪切损伤的区域需要采用剪切应变率进行判定。在转轮流道中的任何区域,只要  $\gamma_{xy}$ 、 $\gamma_{xz}$  及  $\gamma_{yz}$  中的任意一个超出了损伤阈值都会导致鱼类受到剪切损伤。由于各水头条件下剪切应变率超出损伤阈值的体积随流量变化的趋势相似,限于篇幅,在图7中也只给出了额定水头条件下转轮流道内部剪切应变率超出损伤阈值的分布情况。

从图7中可以看出,剪切应变率超出损伤阈值的区域基本都集中在部位1(叶片表面)、部位2(转轮上冠)以及部位3(转轮下环)附近。因为当粘性流体绕流固体壁面时,壁面附近的流体由于受壁面以及流体粘性摩擦力的影响必然会产生高速度梯度,进而产生较大的剪切应变率。在转轮流道内部不出现强烈涡旋的条件下,流道壁面附近的剪切应变率在整个转轮流场内部的数值最大。图8给出了根据式(3)计算所得的鱼类受剪切损伤概率  $P(B)$  随流量的变化曲线。

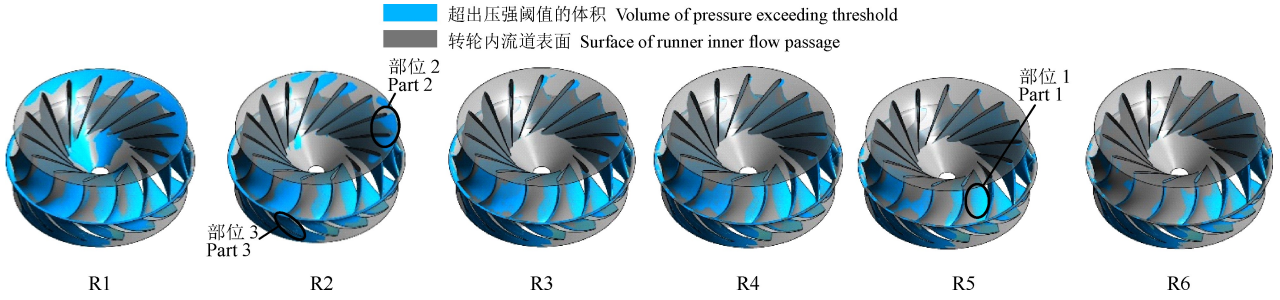
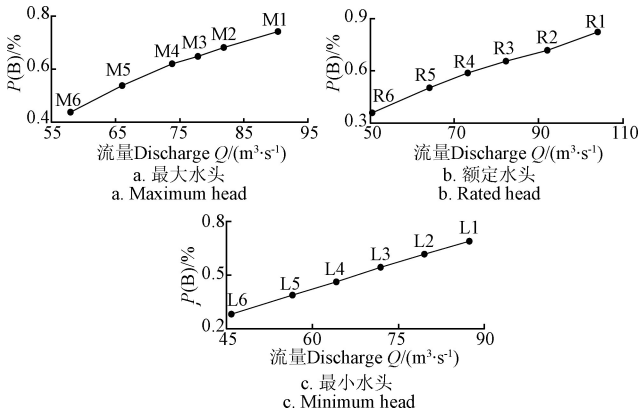


图 7 额定水头下转轮内剪切应变率超出阈值的体积分布

Fig.7 Volume distribution of shear strain rate exceeding threshold in runner at rated head

图 8 不同水头下剪切损伤概率  $P(B)$  随流量的变化趋势Fig.8 Tendency of damage probability  $P(B)$  caused by shear stress change with discharge at different heads

从图 8 的曲线中可以发现, 鱼类受剪切损伤的概率  $P(B)$  随着流量的增加而提高, 该趋势与最低压强损伤概率  $P(A)$  的变化趋势相同。在所有的计算工况中,  $P(B)$  的最大值为 0.823%, 出现在额定水头下的额定流量工况也即水轮机的额定工况 R1。通过对比图 6 和图 8 中相同工况下的  $P(A)$  和  $P(B)$  发现, 在水轮机出力超过 70% $P_r$  的工况

M1~M3、R1~R3 以及 L1~L3,  $P(B)$  的数值远远小于  $P(A)$ , 这表明水轮机在大流量工况下运行时, 转轮流道内部致使鱼类受剪切损伤的区域远小于使鱼类受最低压强损伤的区域, 即鱼类受到最低压强损伤的概率更大。

### 3.3 鱼类受高压强梯度损伤的概率分析

致使鱼类受损伤的压强梯度的本质概念是压强随时间的变化率, 这已在文献[25]和[26]中获得说明。对于水轮机内部流场的稳态计算结果, 计算流道内部的压强梯度可以根据文献[25]和[26]提出的计算方法进行计算, 该方法的计算公式如式 (5) 所示。

$$\frac{dp}{dt} = V \cdot \nabla p \quad (5)$$

式中  $\nabla p$  为压强随距离的梯度, Pa/m;  $V$  为速度矢量, m/s。

式 (5) 通过间接的方法求解出了水轮机稳态流场内部的压强梯度, 根据该公式对混流式转轮内部的压强梯度进行计算, 并在数值计算结果中获取超出压强梯度损伤阈值的区域分布。限于篇幅且各水头下转轮内超出压强梯度损伤阈值的区域分布类似, 图 9 中只给出了额定水头下转轮内超出压强梯度损伤阈值的区域分布。

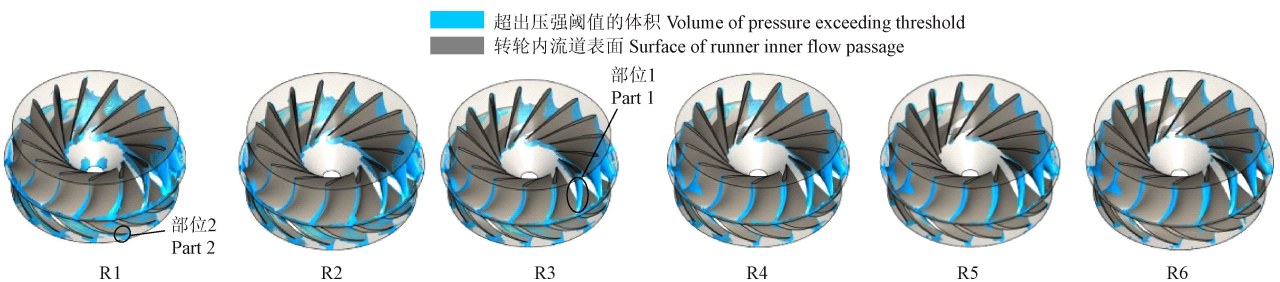


图 9 额定水头下转轮内压强梯度超出阈值的体积分布

Fig.9 Volume distribution of pressure change rate beyond threshold in runner at rated head

从图 9 中可以看出, 高压强梯度区主要集中于部位 1 (叶片进口边) 和部位 2 (叶片出口边) 附近, 这 2 处高压强梯度区的产生是由于水流进、出转轮叶片流道时过流面积发生突变所导致。为了进一步量化对比分析各工况下高压强梯度导致的鱼类损伤概念, 按式(4)统计了各工况下  $P(C)$  的数值, 并作出各水头下  $P(C)$  随流量变化的曲线如图 10 所示。

综合比较图 6、图 8 和图 10 发现, 高压强梯度引发的损伤概率  $P(C)$  随流量的变化趋势与前 2 种损伤概率相

同, 随流量增大都呈现提高的趋势, 这表明流量的增大使得转轮流道内部的高压强梯度区域增加。在所有的计算工况中, 高压强梯度引发的损伤概率  $P(C)$  的最大值为 8.31%, 出现在水轮机的额定运行工况 R1, 其他 2 个水头下高压强梯度引发的损伤概率的最大值都略小于额定工况下的值。

通过对比图 6、图 8 及图 10 中相同工况下鱼类受最低压强损伤概率  $P(A)$ 、受剪切损伤概率  $P(B)$  和受高压强梯度损伤概率  $P(C)$  可以发现, 在大流量工况下 (工况

M1~M3、R1~R3 以及 L1~L3) 鱼类受最低压强损伤的概率和受高压强梯度损伤概率的数值量级相同, 两者都远高于鱼类受剪切损伤概率。在小流量工况(工况 M4~M5、R4~R5 以及 L4~L5) 下则是鱼类受高压强梯度的损伤概率最高。

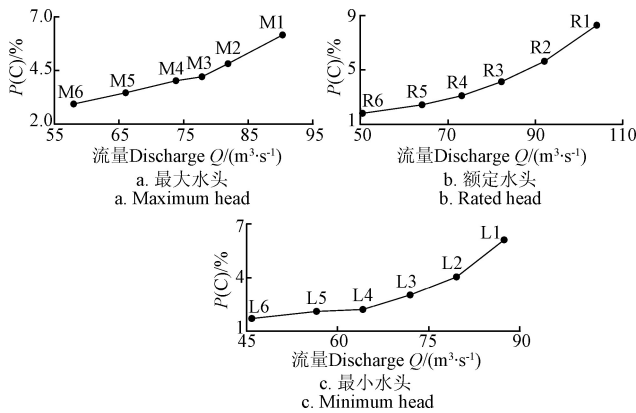


图 10 不同水头下压强梯度损伤概率  $P(C)$  随流量变化趋势

Fig.10 Tendency of damage probability  $P(C)$  caused by pressure gradient change with discharge at different heads

综上所述, 在亲鱼型混流式转轮优化设计的过程中, 最低压强及压强梯度是相对较为主要的损伤因素, 也是叶片几何及参数优化需要考虑的 2 个主要方面。此外, 混流式转轮叶片对鱼类的机械撞击也是造成鱼类过机损伤的主要原因之一, 在文献[27]中作者已计算获得了额定水头下转轮叶片撞击所导致的鱼类死亡概率, 因此以该水头下的 6 个工况为例, 本文将转轮内最低压强及压强梯度所造成的损伤概率进行对比, 如图 11 所示。

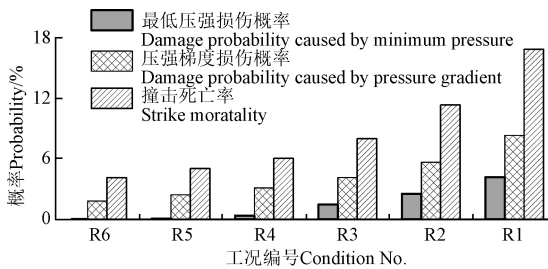


图 11 损伤概率对比

Fig.11 Comparison of damage probability

从图 11 中可以看出, 额定水头下转轮叶片撞击所造成的鱼类死亡率大于转轮内最低压强及压强梯度所造成的鱼类伤亡率。额定水头下鱼类撞击死亡率最高值出现在工况 R1, 数值为 16.85%, 是工况 R1 下最低压强损伤概率的 4.05 倍、压强梯度损伤概率的 2.03 倍。由此可见, 在混流式转轮内部, 转轮叶片撞击是造成鱼类伤亡的首要影响因素, 压强梯度排第 2, 转轮内最低压强排第 3。由此可见, 在开展亲鱼型混流式转轮的设计及优化时, 首先需要在满足能量性能的前提下采用尽可能少的叶片数, 以此降低叶片对鱼类的撞击率并提高叶片通道内的整体压力; 然后, 以降低转轮叶片内的最大压强梯度为目标开展叶片叶型的优化, 从而最终获得亲鱼性能高的混流式转轮。

## 4 结 论

本文以计算流体动力学理论为基础开展了鱼类通过混流式转轮时受压强及剪切损伤概率的分析, 主要结论如下:

1) 混流式转轮内, 压强损伤及剪切损伤的区域分布各有特点, 压强超出损伤阈值的区域主要分布于转轮叶片吸力面出水边, 压强梯度超出损伤阈值的区域主要分布于叶片进口边与出口边及叶片与下环交接处, 剪切应变率超出损伤阈值的区域主要分布于转轮上冠、下环及叶片的表面。

2) 在相同水头前提下, 鱼类受最低压强、剪切损伤及高压强梯度损伤的概率  $P(A)$ 、 $P(B)$  和  $P(C)$  都随着流量的增加而提高, 表明这 3 种损伤概率与流量呈正相关关系。对于本文分析的混流式转轮,  $P(A)$  在最小水头下的最大流量工况达到最大值 9.1%,  $P(B)$  和  $P(C)$  则在水轮机额定工况下达到最大, 分别为 0.823% 和 8.31%。

3) 通过相同工况下鱼类受最低压强、剪切损伤及高压强梯度损伤的概率对比发现, 鱼类遭受最低压强损伤和高压强梯度损伤的可能性更大, 同比而言, 剪切损伤发生的可能性很小, 所以在开展亲鱼型混流式转轮优化时, 最低压强和压强梯度是需要考虑的主要因素, 而剪切应变率是次要因素。

## [参 考 文 献]

- [1] Deng Zhiquan, 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.
- [2] Winter H V, Van Densen W L T. Assessing the opportunities for upstream migration of non-salmonid fishes in the weir-regulated River Vecht[J]. Fisheries Management & Ecology, 2010, 8(6): 513–532.
- [3] Zigler S J, Dewey M R, Knights B C, 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(1): 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 with English abstract)
- [5] Odeh M, Sommers G. New design concepts for fish friendly turbines[J]. International Journal on Hydropower & Dams, 2000, 7(3): 64–70.
- [6] 杨春霞, 郑源, 张玉全, 等. 鱼类友好型水轮机设计研究综述[J]. 中国工程科学, 2018, 20(3): 96–101.  
Yang Chunxia, Zheng Yuan, Zhang Yuquan, et al. A review of research on the design of fish-friendly hydraulic turbines[J]. Engineering Sciences, 2018, 20(3): 96–101. (in Chinese with English abstract)
- [7] 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]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 102–108.  
Pan Qiang, Zhang Desheng, Shi Weidong. Optimization

- design of fish-friendly axial-flow pump based on blade strike model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 102—108. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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 with English abstract)
- [9] 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—420.
- Liao Cuilin, Lu Li, Li Teyou, et al. Research progress and suggestion of fish friendly turbine[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2014, 12(4): 414—420. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王煜, 姜德政, 戴会超. 对“亲鱼型水轮机”的思考[J]. 水电能源科学, 2010, 28(2): 131—133.
- Wang Yu, Jiang Dezheng, Dai Huicaho. Thinking of “fish friendly turbine”[J]. Water Resources And Power, 2010, 28(2): 131—133. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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, 2009(6): 1285—1301.
- [12] 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.
- [13] Abernethy C S, Amidan B G, Čada G F. Simulated passage through a modified Kaplan turbine pressure regime: A supplement to “Laboratory studies of the effects of pressure and dissolved gas supersaturation on turbine passed fish”[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 73(1): 1—16.
- [14] Neitzel D A, Richmond M C, Dauble D D, et al. Laboratory studies on the effects of shear on fish: Final report[R]. USA: The Pacific Northwest National Laboratory, Richland, 2000.
- [15] Neitzel D A, Dauble D D, Čada G F, et al. Survival estimates for juvenile fish subjected to a laboratory generated shear environment[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2004, 133(2): 447—454.
- [16] Guensch G R, Mueller R P, McKinstry C A, et al. Evaluation of fish-injury mechanisms during exposure to a high-velocity jet[R]. USA: Pacific Northwest National Laboratory, 2002.
- [17] Normandeaus I, Skalski J R. Fish survival investigation relative to turbine rehabilitation at Wanapum Dam, Columbia River, Washington[R]. Ephrata, Washington: Report Prepared for Grant County Public Utility District No. 2, 1996.
- [18] 邵奇, 李海锋, 吴玉林, 等. 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—12.
- Shao Qi, Li Haifeng, Wu Yulin, et al. The experiment of the damage to fishes from the changing of the pressure gradient [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(10): 7—12. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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 with English abstract)
- [20] 罗兴锜, 李文锋, 冯建军, 等. 贯流式水轮机飞逸过渡过程瞬态特性 CFX 二次开发模拟[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 97—103.
- Luo Xingqi, Li Wenfeng, Feng Jianjun, et al. Simulation of runaway transient characteristics of tubular turbine based on CFX secondary development[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(13): 97—103. (in Chinese with English abstract)
- [21] 冯建军, 李文锋, 席强, 等. 混流式水轮机主轴中心孔补水对尾水管性能的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 66—72.
- Feng Jianjun, Li Wenfeng, Xi Qiang, et al. Influence of water admission through main shaft central hole on performance of Francis turbine draft tube[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(3): 66—72. (in Chinese with English abstract)
- [22] 郑小波, 翁凯, 王玲军. 叶片尾部形状对双向贯流式水轮机性能的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 76—81.
- Zheng Xiaobo, Weng Kai, Wang Lingjun. Effect of blade tail's shape on hydraulic performance of bidirectional bulb turbine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(6): 76—81. (in Chinese with English abstract)
- [23] Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines model acceptance tests: CEI/IEC 60193:1999 [S]. [1991-11].
- [24] 冯建军, 罗兴锜, 吴广宽, 等. 间隙流动对混流式水轮机效率预测的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 53—58.
- Feng Jianjun, Luo Xingqi, Wu Guangkuan, et al. Influence of clearance flow on efficiency prediction of Francis turbines[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(5): 53—58. (in Chinese with English abstract)
- [25] Hecker G E, Cook T C. Development and evaluation of a new helical fish-friendly hydroturbine[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131(10): 835—844.
- [26] Cook T C, Hecker G E, Faulkner H B, et al. Development of a more fish tolerant turbine runner, advanced hydropower turbine project[R]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 1997.
- [27] 朱国俊, 吉龙娟, 冯建军, 等. 混流式转轮叶片数对鱼类撞击死亡率的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 153—160.
- Zhu Guojun, Ji Longjuan, Feng Jianjun, et al. Effect of blade numbers of francis runners on fish strike mortality[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 153—160. (in Chinese with English abstract)



## Probability evaluation of pressure and shear damage for fish passing through francis turbine runner

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:** Hydropower is a major source of renewable, noncarbon-based electrical energy. Although hydropower has many environmental advantages, hydropower dams alter the natural ecohydrological conditions of the rivers and cause significant ecological impact, especially for fish that live in or migrate through impounded river systems. Injury and mortality of fish that pass through hydraulic turbines and other downstream passage routes can result from several mechanisms, such as rapid and extreme pressure changes, shear stress, strike, cavitation, and grinding. For example, a large or fast pressure drop can lead to internal bleeding of fish, rupture of the swim bladder or vapor bubbles in eyes, which will result in direct mortality and reduces the ability to escape predators in the tailrace. Shear stress can causes fish scales flake, muscle tissue tearing, bruising, and even the fish body are cut off. So understanding the biological responses of fish to the conditions of hydraulic turbine is important for designing advanced fish-friendly turbines. Since the injury of fish may be caused by a combination of multiple damage mechanisms, it is necessary to identify primary and secondary damage mechanisms by research. In this paper, the computational fluid dynamic analyze method was adopted to simulate the three dimensional turbulent flow in an francis turbine. The simulation was conducted at different discharge conditions of maximum, rated and minimum head. The rated head of the turbine  $H_r$  is 106 m, the maximum head  $H_{\max}$  is 120 m and the minimum head  $H_{\min}$  is 73 m. The whole flow passage of the turbine was discretized by hexahedron structured mesh, and the SST  $k-\omega$  turbulence model was used in the simulations. Then, the fish friendly threshold for pressure, pressure change rate and shear strain rate were used to analyze the volume size and distribution that may lead to the damage of fish. The ratio of the volume exceeding the fish friendly threshold to the total volume of the runner channel was defined as the fish damage probability. Finally, according to the calculation results, the main and secondary mechanisms of fish damage under different conditions were identified. Meanwhile, the law between the probability of fish injury caused by these mechanisms and the working conditions was further analyzed. From the results it can be seen that the volume which the pressure beyond the threshold in runner is mainly distributed at the outlet of the suction side of the runner blade, and the volume which the pressure change rate beyond the threshold is distributed at the leading and trailing edge of the runner blade. Besides, the volume which the shear strain rate beyond the threshold is distributed near the wall of the crown, band and runner blade. The fish damage probability caused by pressure, shear stress and pressure change rate were defined as  $P(A)$ ,  $P(B)$  and  $P(C)$  respectively in this paper. Based on the results of this paper, the probability  $P(A)$  reaches the maximum value at the condition L1. And the probability  $P(B)$  and  $P(C)$  reach the maximum value at the rated condition R1. The maximum value of  $P(A)$ ,  $P(B)$  and  $P(C)$  are 9.1%, 0.823% and 8.31% respectively. By comparing the fish damage probability of pressure, pressure change rate and shear stress under different discharge conditions at the same head, it can be concluded that the minimum pressure and the pressure change rate are the two important factors to prevent fish damage. The shear stress is less important than that of them. Therefore, in the process of designing fish friendly francis turbine runner, the pressure in the runner must be raised as much as possible. Meanwhile, the pressure change rate in runner must also be decreased.

**Keywords:** fish; discharge; numerical simulation; hydraulic turbine; francis runner; fish damage probability; pressure damage; shear stress damage