

# 超大容量水斗式水轮机水力特性数值模拟分析

林云发,程永光,王 斌

(武汉大学 水资源工程与调度全国重点实验室,湖北 武汉 430072)

**摘要:**为满足超高水头、超大容量水电站建设需求,提出了一种额定水头1 000 m,单机容量接近800 MW的三转轮立轴串联水斗式水轮机方案。阐明了这种通过增多转轮来增大容量的设计理念和结构组成,给出了方案的理论设计参数,并应用CFD模拟预测了其水力特性、分析和优化转轮及转轮室流态。研究表明:三转轮水斗式水轮机的额定工况效率可达87%,工作特性曲线变化平稳。转轮室溅水干扰是影响效率的主要因素。通过优化各层转轮相对位置和喷嘴方位,可一定程度提高效率,减小力矩振荡,保证出力稳定。此初步尝试证明了概念的可行性,也发现溅水优化的重要性,能为后续优化研究提供参考。

**关键词:**水斗式水轮机;转轮设计;CFD模拟;工作特性;转轮室优化;溅水干扰

**中图分类号:**TV734.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.12396/znsd.230847

林云发,程永光,王斌.超大容量水斗式水轮机水力特性数值模拟分析[J].中国农村水利水电,2024(2):192-198+204. DOI:10.12396/znsd.230847.

LIN Y F, CHENG Y G, WANG B. An analysis of the hydraulic characteristics of huge pelton turbine by CFD simulations [J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(2):192-198+204. DOI:10.12396/znsd.230847.

## An Analysis of the Hydraulic Characteristics of Huge Pelton Turbine by CFD Simulations

LIN Yun-fa, CHENG Yong-guang, WANG Bin

(State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China)

**Abstract:** To meet the requirements of developing high head and huge capacity hydropower plants, this paper proposes a new Pelton turbine that joints three runners by one vertical shaft to have a rated head of 1 000 m and a single unit capacity close to 800 MW. The design concept of increasing capacity by increasing the number of runners and the structural components of the new turbine-generator unit are explained, the theoretical design parameters of the runner are calculated and presented, the performance characteristics and the flow patterns in runner and casing are predicted and optimized by CFD simulation. The results show that the rated operating efficiency of the turbine can reach 87%, and the operating characteristic curves are smooth for different heads and outputs, the water splashing interference in the casing is an important factor affecting the efficiency of the turbine. By optimizing the layout of the runners and nozzles in the casing to suppress the splashing interference, the efficiency level, torque oscillation, and operation stability of the Pelton turbine can be improved. This preliminary attempt has demonstrated the feasibility of the concept and also found the importance of optimizing the water splashing in the casing, which has reference values for further researches.

**Key words:** Pelton turbine; runner design; CFD simulation; performance characteristics; casing optimization; water splashing interference

## 0 引言

随着西南水电资源开发加速,高水头、大容量水斗式水轮

机成为重要可选机型<sup>[1-3]</sup>。目前世界上立轴单转轮水斗式水轮机的水头已达1 800 m,喷嘴数多达6个,但最大单机容量仅423 MW<sup>[4]</sup>;相比于反击式水轮机,水斗式水轮机在单机容量上

收稿日期:2023-05-31 接受日期:2023-08-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51839008)。

作者简介:林云发(2000-),男,硕士研究生,研究方向为水力机械及系统,E-mail:yflin@whu.edu.cn。

通讯作者:程永光(1968-),男,教授,博士,研究方向为水力机械及系统,E-mail:ygcheng@whu.edu.cn。

仍偏小。为了满足超大型水电站对单机容量的特殊要求,亟需研发水头 1 000 m、容量 700 MW 以上的水斗式水轮机<sup>[5]</sup>。

国内外学者在水斗式水轮机研究上已取得不少重要成果<sup>[2,3,6,7]</sup>。有关水力特性模拟研究上,韩凤琴等<sup>[8-10]</sup>探究了水斗式水轮机的射流干扰现象,指出射流干扰影响效率并提出解决措施;曾崇济<sup>[11,12]</sup>模拟了多喷嘴水斗式水轮机内部流态演变,分析了流动干扰导致水力效率下降的机理;GUPTA 等<sup>[13]</sup>模拟不同工况的水斗流态、受力,总结了网格、湍流模型和时间步长对模拟结果的影响;XIAO 等<sup>[14]</sup>模拟了 5 种工况下原型水斗式水轮机的动态特性,获得与现场试验吻合很好的结果;蒋勇其<sup>[15]</sup>分析了启动过程转轮力矩、压力脉动、应力等参数变化规律,发现初期转轮节圆所受冲击力最大,随着转速增加,脉冲压力幅值减小但频率增高;尤建锋<sup>[16]</sup>等分析了飞逸过渡过程转轮流态、力矩的变化规律,并发现射流冲击水斗背部现象。在水斗式水轮机设计方面,SOLEMSLIE<sup>[17]</sup>提出了描述水斗几何体型方法,改进了传统设计理论;AUDRIUS 等<sup>[18]</sup>探究了一种通用的水斗水轮机转轮优化方法,并通过流态模拟来验证;符杰等<sup>[19]</sup>分析 6 喷嘴水斗式水轮机水斗斗叶受力强度,优化了水斗型线,改善了水斗根部区域射流条件。陈婧等<sup>[20]</sup>分析了配水环管受力特性,得到明确的配水环管受力变化规律;ZHANG 等<sup>[21]</sup>发现配水机构中的二次流,并证明二次流会影响射流,进而影响效率;PETLEY 等<sup>[22]</sup>探寻了不同转轮室的设计对溅水干扰的影响,为转轮室优化设计出了建议。

上述水斗式水轮机流动特性和优化设计方面的研究已较为深入,但有关提升单机容量以适应特殊开发条件的研究不多。受研发技术、制造条件、工程需求等因素的限制<sup>[5]</sup>,目前国内的水斗式水轮机主要在 800 m 水头段以下<sup>[23-25]</sup>,较少超过

1 000 m 水头<sup>[26]</sup>,最大单机容量在 500 MW 以下<sup>[27]</sup>;在国际上,一部分电站水斗式水轮机水头超过了 1 000 m<sup>[28]</sup>,但最大单机容量仅 423 MW<sup>[4]</sup>,远远不满足当前西部某超大型电站的建设需求。对于大容量的单转轮水斗式水轮机来说,提升单机容量往往需要增大转轮直径,增加转轮质量,但目前制造设计运行大容量单转轮的研发技术和制造条件有限<sup>[27]</sup>,且转轮直径的增加会伴随着厂房的横向尺寸增大,增加工程投资。鉴此,本文提出并验证一种水斗式水轮机可选方案:采用三转轮立轴串联,使容量倍增。下文首先介绍三转轮立轴串联水斗式水轮机的设计理念和结构组成,然后给出理论设计参数,接着 CFD 模拟流态和预测水力特性,最后优化转轮室布置以提升水力特性。

## 1 三转轮立轴串联水斗式水轮机方案基本概念

### 1.1 高水头与大容量兼顾

目前国际上 1 000 m 水头级水斗式转轮设计已较成熟,单机容量可接近 300 MW<sup>[4]</sup>。应用单转轮设计和制造的成熟技术和经验,通过串联转轮,可以使单机容量大幅增加。设计目标是:额定水头 1 000 m,三转轮串联后单机容量接近 800 MW,以兼顾高水头和大容量水力资源开发需求。

### 1.2 三转轮立轴串联水斗式水轮机结构组成和方案特点

提出的三转轮水斗式水轮机组为立轴布置,包括立轴串联的 3 个转轮<sup>[29]</sup>、悬式水轮发电机、一分三隔壁岔管<sup>[30]</sup>、配水环管等,整体结构示意图如图 1。

水轮机为立轴串联形式,通过联轴器将 3 个技术成熟的转

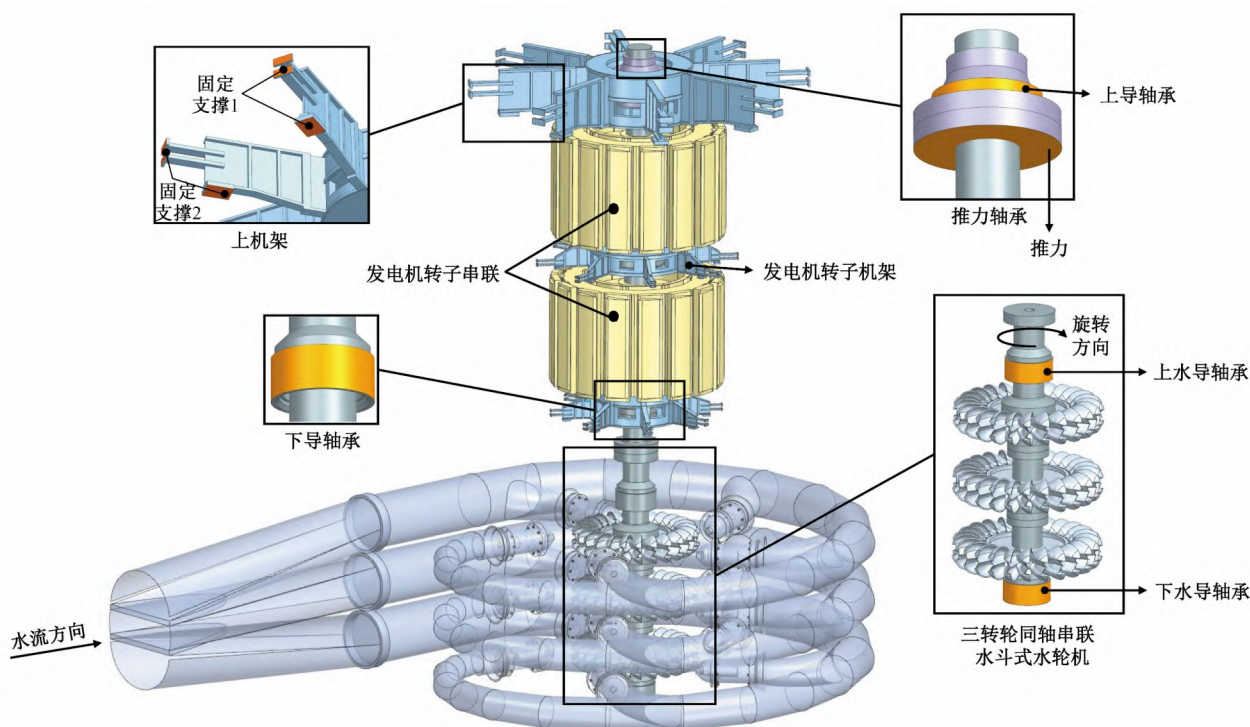


图 1 三转轮立轴串联水斗式水轮机整体示意图

Fig.1 Schematic of the Pelton turbine that joints three runners by one vertical shaft

轮串联,结为一体;考虑到转轮与转轮之间特殊的水流喷射条件,间距须以减小溅水干扰为原则,综合考虑安全阈值、轴系稳定等因素进行合理取值。为了保证三转轮立轴串联的运行稳定性,设置了上水导轴承和下水导轴承,以承担机械、电磁及水力不平衡力导致的转轮径向力。

发电机采用悬式结构,也通过串联方式将两台技术成熟的发电机结为一体。原因是,虽然我国已投产了1 000 MW的混流式水轮发电机组<sup>[31]</sup>,但它们的转速较低,而本机组转速较高,无法直接应用。为了承受轴向力和径向力,设上导轴承和推力轴承,结合在上机架上;设中导轴承和下导轴承,分别设置在发电机转子机架和下机架上,承受机组转动径向力和刹车制动力。

一分三隔壁岔管是新型的岔管型式,通过渐变段将主管分隔为三条支管,渐变段内两片隔壁肋板分隔出三条通道,肋板特殊设计保证三条通道的断面积一致,且管壁应力均匀。支管后接配水环管,分三层,每层设5个喷嘴,形成射流以驱动三层转轮。

这种布置方式的优点是:①控制机组直径,缩小厂房跨度,有利于数十台机组布置;②采用成熟技术,克服单转轮大容量方案的转轮制造和结构强度难题。

## 2 立轴串联三转轮参数理论设计

拟定的主要设计参数为:①设计水头1 000 m;②引用流量95.1 m<sup>3</sup>/s,单层引用流量31.7 m<sup>3</sup>/s;③单转轮额定出力280 MW,3个转轮立轴串联,单机容量有望达到800 MW;④水斗式水轮机在实际运行的过程中存在9%~10%的水头损失<sup>[32]</sup>,初设理论效率为90%。

### 2.1 水斗体型设计

以往经验表明,性能优良的水斗的基本断面型线大同小异,可相互参考<sup>[33]</sup>。借鉴CJA475-W-125水轮机转轮结构设计形式<sup>[34]</sup>,综合考虑三转轮水斗设计的各项理论设计参数,构建CJW14型水斗,如图2所示。

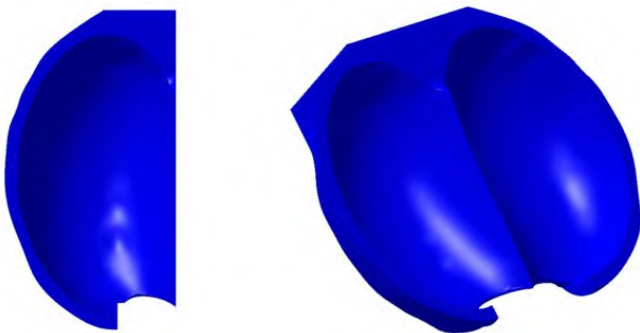


图2 CJW14型水斗体型图

Fig.2 3D geometry of the CJW14 bucket

### 2.2 三转轮间距设计

水斗式水轮机的转轮室溅水干扰问题是影响效率的重要因素<sup>[35,36]</sup>。对于三转轮水斗式水轮机来说,溅水干扰问题更为突出,三转轮间距须特别设计。本文参照ZHANG的研究思路<sup>[37]</sup>,选取水斗出水边某流体质点位置建立平面坐标系,构建

水流出流的物理模型,用曲线S描述流体质点出流后的轨迹,应用T表示流体质点的x方向位移,应用 $h_a$ 表示流体质点的y方向位移,应用 $C_2$ 表示流体质点的绝对速度,应用 $W_2$ 表示流体质点的相对速度,应用 $U_2$ 表示流体质点的牵连速度,应用 $\alpha_2$ 表示流体质点的出射角,具体如图3所示。

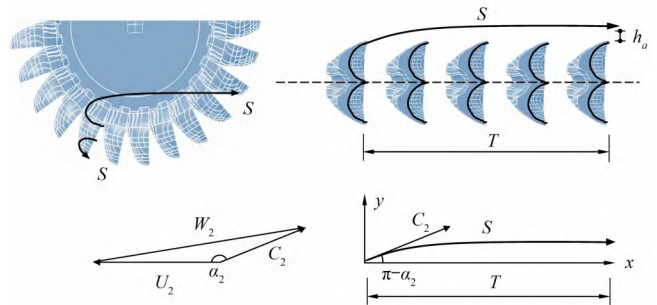


图3 单转轮出流理论推导示意图

Fig.3 Schematic for derivation of outflow of single runner

考虑重力对流体质点的影响,则可得到流体质点在x和y方向上的位移:

$$x = C_{2x,0}t \quad (1)$$

$$y = C_{2y,0}t - \frac{1}{2}gt^2 \quad (2)$$

式中: $C_{2x,0}$ 和 $C_{2y,0}$ 为流体质点在x和y方向的初速度;t为流体质点从出流到离开转轮的时间。

流体质点y方向位移的表达式通过变换可考虑为 $y = f(x)$ ,而又有 $x=T$ ,则y方向的判断条件可确定为:

$$y = f(T) > h_a \quad (3)$$

考虑流体质点的极限情况,即质点刚好在x方向位移T距离后,在y方向的运动距离为 $h_a$ ,则临界条件为:

$$T = C_{2x,0}t \quad (4)$$

$$h_a = C_{2y,0}t - \frac{1}{2}gt^2 \quad (5)$$

将式(4)和式(5)合并消除时间t,并引入 $\tan \alpha_2 = -C_{2y,0}/C_{2x,0}$ 关系式,则临界条件下x方向的初始速度 $C_{2x,0}$ 表达式为:

$$C_{2x,0}^2 = -\frac{1}{2} \frac{gT}{\frac{h_a}{T} + \tan \alpha_2} \quad (6)$$

对于立轴单转轮水轮机,给出 $\alpha_2$ 、 $C_0$ 、 $U_2$ 值即可得到y方向的运动距离 $h_a$ 。带入设计参数得到 $C_{2x,0}=28.415$  m/s, $h_a=0.984$  m。而对于立轴三转轮水斗式水轮机来说,判断条件应该改变为 $H > 2h_a$ ,H为三转轮间距。则 $H > 2h_a=1.97$  m,考虑一定的安全阈值,最终确定 $H=2$  m。

汇总三转轮水斗式水轮机主要技术参数如表1所示。

## 3 三转轮水斗式水轮机特性 CFD 模拟预测

基于前述水轮机设计参数,进行CFD数值模拟分析,探究三转轮水轮机能量特性,总结流态规律。

### 3.1 计算条件

#### 3.1.1 模型构建及简化

应用CATIA软件构建三转轮水斗式水轮机模型,分为静止区域(Stator)和运动区域(Rotor),其中运动区域包括三转轮水

表1 三转轮水斗式水轮机理论设计主要参数表

Tab.1 Basic parameters for theoretical design of Pelton turbine

参数	数值	参数	数值
水轮机型号	CJW14-L-340/5×24.1	射流速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	139
比转速 $n_q$	20.56	额定水头/m	1 000
容积率 $\varphi$	0.11	额定流/( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )	95.1
速度比 $k_m$	0.48	喷嘴直径/mm	241
转轮外径/mm	4 319.46	额定出力/MW	840
节圆直径/mm	3 400	额定转速/( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )	375
水斗数	25	三转轮间距 $s$ /mm	2 000
喷嘴数	15	水轮机效率/%	90
水斗外宽/mm	800.78	喷嘴效率/%	99
水斗内宽/mm	726.79	流速系数	0.99

斗式水轮机,静止区域包括喷嘴及转轮室。综合考虑转轮室的尺寸及空气流动影响范围,选取转轮室形状为圆柱形<sup>[38]</sup>,转轮室半径取为转轮节圆直径 $D_m$ 的3倍<sup>[39]</sup>,如图4所示。

### 3.1.2 边界条件及计算参数设置

计算模型在 ANSYS Fluent 中进行求解,湍流模型选用 SST  $k-\omega$  模型<sup>[39,40]</sup>,多相流模型采用 VOF 模型的隐格式,第一相为空气,第二相为水。选用 SIMPLEC 算法<sup>[41]</sup>实现速度与压力耦合,采用二阶迎风格式保证计算精度。喷嘴进口为速度入口,给定喷嘴入口速度为 139 m/s,静止区域底部为压力出口,压力

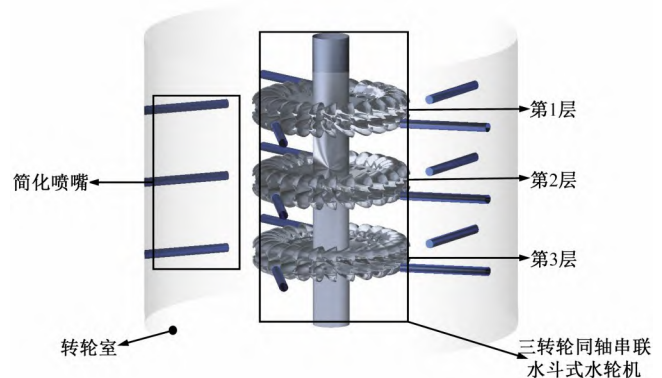


图4 三转轮水斗式水轮机数值模拟模型示意图

Fig.4 CFD simulation model of the Pelton turbine

值为大气压,不同区域界面均采用 interface 连接。运动区域采用滑移网格模型,转速设置为 375 r/min。计算过程中,残差收敛目标值为  $10^{-4}$ ,时间步长为  $0.000\ 01\ \text{s}$ <sup>[34]</sup>,每个时间步长最大迭代次数为 20 次。

### 3.1.3 网格划分及无关性验证

计算网格中静止区域(Stator)为六面体网格,运动区域(Rotor)为四面体网格(图5)。通过计算稳定工况下的效率及力矩值,对网格无关性进行验证,发现网格多于 1 436 万后,效率和力矩变化已平稳(图6),最终确定网格数为 1 645 万。

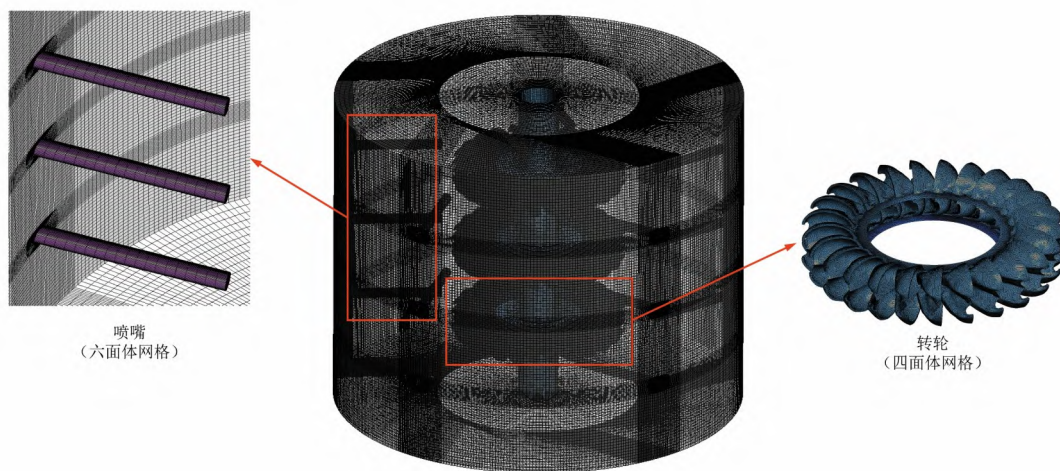


图5 网格划分示意图

Fig.5 Display of simulation mesh

## 3.2 计算结果分析

### 3.2.1 能量特性

(1)额定工况分析。计算所得额定工况的效率变化过程如图7,呈周期性变化,主频为 156.25 Hz,是 25 倍转频,与水斗数对应。时均功率为 769 MW,时均效率为 83.7%,与理论设计值相差约 6.3%,原因应是转轮室水流喷射复杂,影响喷嘴射流及转轮旋转<sup>[36]</sup>。

(2)工作特性分析。水斗式水轮机水电站适合承担变化频繁、变幅较大的负荷。单转轮水斗式水轮机可通过调节针阀来改变流量,进而调节出力。而三转轮水斗式水轮机则能进行针阀和层间联合控制,即调整工作的针阀数与转轮数,配合调节针阀开度来扩大出力调节范围。

不同水头下三层转轮均工作的工作特性曲线见图8。可见效率随水头的变化幅度较小,在 1% 之内;功率曲线随水头大致线性变化,功率大小主要决定于水头。

另外,选取 5 个工作水头(900、980、1 000、1 020、1 050 m),保证水头不变让一层(第1层)、二层(第1层和第3层)、三层转轮分别运行,计算 15 个工况点,绘制出工作特性曲线如图9所示。可见效率随着出力的增大而增大;在不同工作转轮层数中,均以水头 1 050 m 的功率最高,是因为针阀开度不变,水头和效率均较高。

### 3.2.2 流态演变

为了说明能量特性特点的流态机理,将图7中 p1、p2 典型时刻点的三转轮水轮机流态图展示如图10。

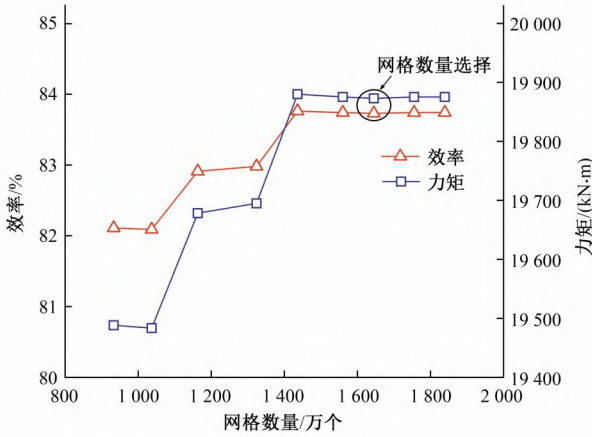


图6 网格无关性分析

Fig.6 Analysis of mesh independence

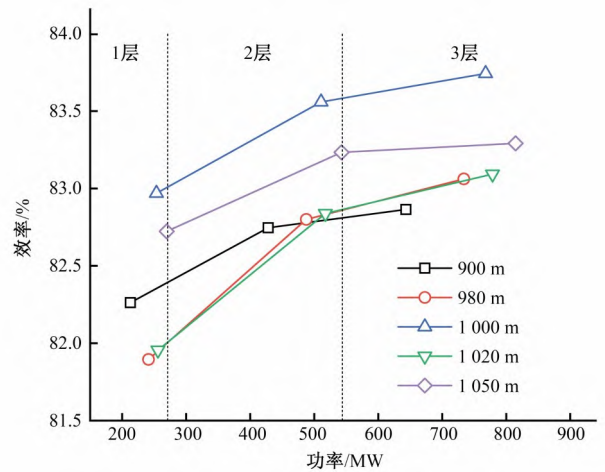


图9 三转轮水斗式水轮机工作特性曲线

Fig.9 Efficiency curves of the Pelton turbine that joints three runners by one shaft

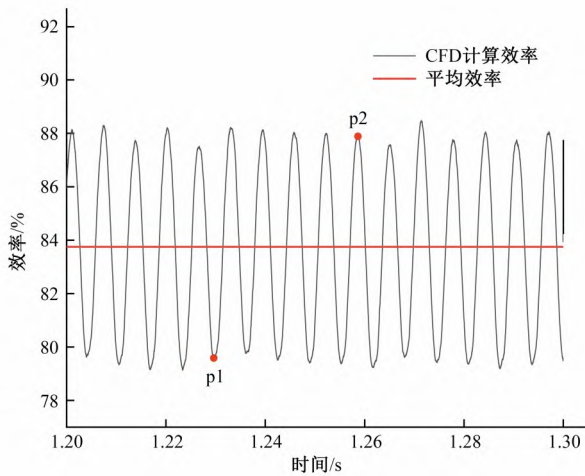


图7 三转轮水斗式水轮机效率波动曲线

Fig.7 Efficiency curve of Pelton turbine

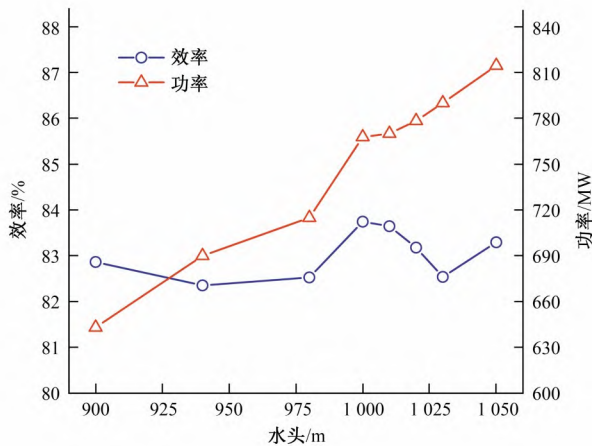


图8 不同水头变化下三层转轮均运行的工作特性曲线  
Fig.8 Performance curves of the Pelton turbine operating under different heads

对比两个典型时刻点的全局流态发现,在效率较高时间点 p2 的转轮室内雾状液滴相对较少,而在效率较低的时间点 p1 转轮室内流态混乱,液滴较多。并且两个时间点均有第2层喷嘴射流速度明显降低和第2层转轮的水斗侧面及根部存在较多汇集溅水的现象。结合局部流态图分析,认为射流冲击转轮旋

转的过程中,从相邻两转轮水斗排出的水流相撞并聚集,在转轮室内形成具有一定速度的雾状液滴,干扰喷嘴正常射流和转轮旋转。

#### 4 转轮与转轮室布置优化

基于上述溅水干扰现象分析,提出改变喷嘴布置方位和水斗相对位置的2个优化方案。优化方案1:保持水斗角度和第1层和第3层喷嘴位置不变,将第2层喷嘴整体旋转 $36^\circ$ ,以错开射流,可减小水流飞溅;优化方案2:第1层和第3层转轮的水斗错位 $7.2^\circ$ (半个水斗角度)布置,可减小射流同步导致的力矩波动幅值。

初始方案和2个优化方案的CFD计算结果列于表2和图11。可见初始方案的平均效率为83.7%,优化方案1的平均效率为84.4%,效率提升约0.7%;优化方案2的平均效率为87.0%,效率提升约4.3%。

优化方案的力矩峰-峰值均较初始方案降低:优化方案1的力矩峰-峰值为 $1054.32\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,力矩振荡降低幅度54.4%;优化方案2的力矩峰-峰值为 $941.16\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,力矩振荡降低幅度59.3%。对比结果表明,优化方案2在减小力矩振荡方面的表现较为良好,这对于延长转轮疲劳寿命有重要价值。

#### 5 结论

本文提出了一种额定水头1000 m、出力接近800 MW的水斗式水轮机方案,阐明了其三转轮立轴串联增容设计理念,给出了理论设计参数,并应用CFD进行模拟验证和优化。结论如下:

- (1)三转轮立轴串联增容理念基于现有成熟转轮设计和制造技术,有较好可行性。
- (2)CFD模拟得到的水轮机效率约87%,最大出力约791.1 MW,工作特性曲线高效区宽广。
- (3)转轮室内溅水干扰是影响三转轮水轮机效率均值和力矩波动幅值的主要因素。
- (4)优化水斗、喷嘴的布置,能改善流态,提高水轮机效率,

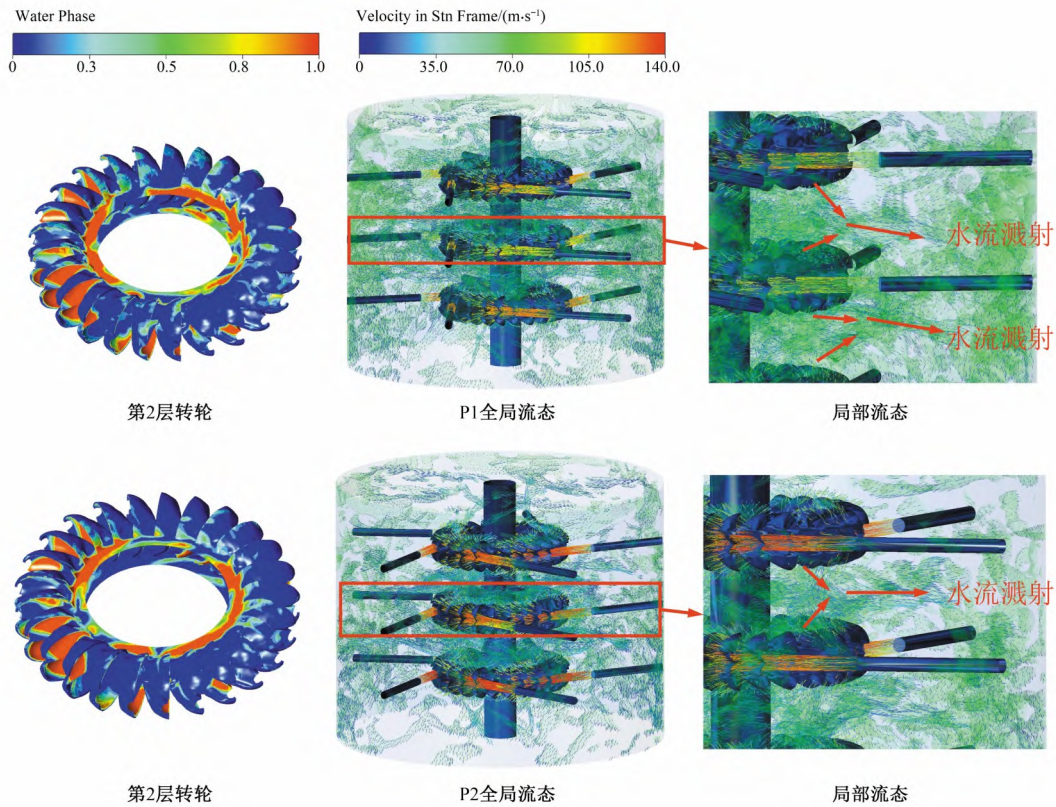


图 10 典型时刻点的三转轮水轮机运行流态图

Fig.10 Flow patterns of the Pelton turbine at typical instants

表 2 初始方案与 2 个优化方案对比汇总表

Tab.2 Comparison between the initial scheme and two optimization schemes

方案	优化措施	时均效率/%	时均功率/MW	力矩峰-峰值/(kN·m)	力矩波动降低幅度/%
初始方案	-	83.7	768.9	2 312.37	-
优化方案 1	喷嘴错位	84.4	774.9	1 054.32	54.4
优化方案 2	第 1、第 3 层水斗错位	87.0	791.1	941.16	59.3

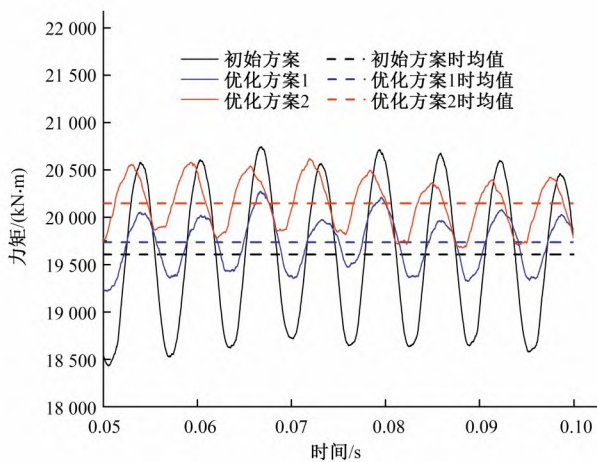


图 11 初始方案与 2 个优化方案力矩波动曲线

Fig.11 Torque oscillation curves of the initial and two optimized schemes

降低力矩波动幅值。

本文初步研究证明,这种三转轮立轴串联的超大容量水斗式水轮机值得深入研究,后续可开展进一步水力优化,同时关注结构优化。

参考文献:

[1] 罗兴铸, 朱国俊, 冯建军. 水轮机技术进展与发展趋势[J]. 水力发电学报, 2020,39(8):1-18.  
 LUO X Q ZHU G J, FENG J J. Progress and development trends in hydraulic turbine technology [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020,39(8):1-18.

[2] 罗兴铸, 戈振国, 朱国俊, 等. 冲击式水轮机技术进展与发展趋势[J]. 水力发电学报, 2023,42(2):116-134.  
 LUO X Q, GE Z G, ZHU G J, et al. Progress and development trends in Pelton turbine technology [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023,42(2):116-134.

[3] ZIDONIS A, BENZON D S, AGGIDIS G A. Development of hydro impulse turbines and new opportunities [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015,51:1 624-1 635.

[4] 何 峰, 胡定辉, 何志锋, 等. 西藏扎拉水电站冲击式水轮机选型设计探讨[J]. 水利水电快报, 2019,40(12):34-36.  
 HE F, HU D H, HE Z F, et al. Discussion on selection and design of impulse turbine for zhala hydropower station in tibet [J]. Express Water Resources&Hydropower Information, 2019,40(12):34-36.

[5] 高曾江, 冯雪萍, 刘世泽, 等. 大中型水斗式水轮机的关键技术[J]. 大电机技术, 2021(3):63-68.  
 GAO Z J, FENG X P, LIU S Z, et al. Key technologies of large and medium-sized pelton-turbine [J]. Large Electric Machine and

- Hydraulic Turbine, 2021(3):63-68.
- [6] GE X F, SUN J, CHU D D, et al. Sediment erosion on pelton turbines: a review [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2023,36(1):64.
- [7] SUN J, GE X F, ZHOU Y, et al. Research on synergistic erosion by cavitation and sediment: A review [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023,95:106-399.
- [8] 韦彩新, 韩凤琴, 许萍, 等. 冲击式水轮机射流干涉研究[J]. 华中科技大学学报, 2001(4):82-84.  
WEI C X, HAN F Q, XU P, et al. Research on jet interference of pelton turbine [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2001(4):82-84.
- [9] 肖业祥, 郑爱玲, 韩凤琴, 等. CFD法研究多喷嘴冲击式水轮机的射流干涉[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2007(3):66-70.  
XIAO Y X, ZHENG A L, HAN F Q, et al. Study on jet interference of multi nozzle impact turbine using CFD method [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2007(3):66-70.
- [10] 韩凤琴, 肖业祥, 久保田乔. 旋转水斗内的非定常射流干涉[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2007,35(6):25-28.  
HAN F Q, XIAO Y X, KUBOTA T. Unsteady jet interface in a rotating bucket [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2007,35(6):25-28.
- [11] ZENG C J, XIAO Y X, LUO Y Y, et al. Hydraulic performance prediction of a prototype four-nozzle Pelton turbine by entire flow path simulation [J]. Renewable Energy, 2018,125:270-282.
- [12] 曾崇济. 冲击式水轮机内流特性及流动干扰现象研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.  
ZENG C J. Research on the internal flow characteristic and flow interference in the pelton turbine [D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.
- [13] GUPTA V, PRASAD V, KHARE R. Numerical simulation of six jet Pelton turbine model [J]. Energy, 2016,104:24-32.
- [14] XIAO Y X, WANG Z W, ZHANG J, et al. Numerical and experimental analysis of the hydraulic performance of a prototype Pelton turbine [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part a-Journal of Power and Energy, 2014,228(1):46-55.
- [15] 蒋勇其, 程永光, 尤建锋. 水斗式水轮机启动过程CFD模拟分析[J]. 水电能源科学, 2017,35(1):172-176.  
JIANG Y Q, CHENG Y G, YOU J F. CFD Simulation of Starting Process of Pelton Turbine [J]. Water Resources and Power, 2017,35(1):172-176.
- [16] YOU J F, LAI X, ZHOU W, et al. 3D CFD simulation of the run-away process of a Pelton turbine [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part a-Journal of Power and Energy, 2016,230(2):234-244.
- [17] SOLEMSLIE B W, DAHLHAUG O G. A reference pelton turbine-design and efficiency measurements [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2014,22(1):012-004.
- [18] ZIDONIS A, PANAGIOTOPOULOS A, AGGIDIS G A, et al. Parametric optimisation of two Pelton turbine runner designs using CFD [J]. Journal of Hydrodynamics, 2015,27(3):403-412.
- [19] 符杰, 宋文武, 王辉艳. 冲击式水轮机斗叶根部型线优化设计[J]. 农业机械学报, 2012,43(9):62-65.  
FU J, SONG W W, WANG H Y. Optimization design of bucket roots type line for pelton turbines [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2012,43(9):62-65.
- [20] 陈婧, 马震岳, 赵凤遥, 等. 冲击式水轮机配水环管结构分析与设计优化[J]. 水力发电, 2009,35(4):64-66+83.  
CHEN J, MA Z Y, ZHAO F Y, et al. Research on structure analysis and design optimum of distributing pipe of impulse [J]. Water Power, 2019,35(4):644-66+83.
- [21] ZHANG Z, CASEY M. Experimental studies of the jet of a Pelton turbine [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part a-Journal of Power and Energy, 2007,221(A8):1181-1192.
- [22] PETLEY S, AGGIDIS G A. Transient CFD and experimental analysis for improved Pelton turbine casing designs [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019,240(2):022-005.
- [23] 龙斌, 杨珉. 超高水头水电站冲击式水轮机的选型设计[J]. 中国水能及电气化, 2018(9):31-34.  
LONG B, YANG M. The type-selection design of impulse turbine in ultrahigh water head hydropower station [J]. China Water Power & Electrification, 2018(9):31-34.
- [24] 王海旭. 冶勒水电站120 MW水斗式水轮发电机组[J]. 水力发电, 2004(11):35-37.  
WANG H X. 120 MW pelton hydro-generating unit for yele hydropower project [J]. Water Power, 2004(11):35-37.
- [25] 安刚. 公格尔水电站大型水斗式水轮机设计[J]. 小水电, 2018(5):45-47.  
AN G. Design of large bucket turbine for gong'er hydropower station [J]. Small Hydro Power, 2018(5):45-47.
- [26] 滕文炳. 天湖水电站高水头水轮发电机组的选择[J]. 广西水利水电, 1993(增1):85-90.  
TENG W B. Selection of high-head water-turbine generator set of the tianhu hydropower station [J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 1993(S1):85-90.
- [27] 蔡爽, 杨彬, 张海库, 等. 500 MW级冲击式水轮机设计制造可行性研究[J]. 大电机技术, 2023(1):53-59.  
CAI S, YANG B, ZHANG H K, et al. Feasibility study on design and manufacture of 500 MW pelton turbine [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2023(1):53-59.
- [28] 代永成. 国外水电设备公司设计制造水平[J]. 东方电气评论, 1997(4):290-301+283.  
DAI Y C. Design and manufacturing level of foreign hydropower equipment companies [J]. Dongfang Electric Review, 1997(4):290-301+283.
- [29] CHIARELLI M, HASMATUCHI V C, AMINI A, et al. On-site measurements of the dynamic behaviour of Pelton turbines in the context of predictive maintenance [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022,11079(1):012-096.
- [30] 程永光, 苏凯, 黄骞, 等. 一种一分三的隔壁岔管[P]. 湖北省:CN113606411B, 2022-8-16.  
CHENG Y G, SU K, HUANG Q, et al. A type of one to three partition bifurcated pipe[P]. Hubei: CN113606411B, 2022-08-16.
- [31] 王新洪, 宋佳音, 王伟. 白鹤滩右岸水轮发电机转子磁极铁心制造技术优化[J]. 电站系统工程, 2023,39(2):65-67.

(下转第204页)

取能力提取信号波形特征,另一方面信号经过 EEMD 分解后用近似熵构建信号特征向量,将两种信号特征融合后输入 BP 神经网络分类。得出以下结论。

(1) 信号经过 1D-CNN 与 EEMD-ApEn 得到的特征可以补充彼此的不足,多维度构建的融合特征反映信号更广泛、更深层的信息,进而提高故障辨识的准确性。

(2) 与传统基于 CNN 故障诊断相比,本文提出的基于 1D-CNN 与近似熵融合故障诊断方法在一定程度上降低错误的概率,为水电机组故障诊断提供了新思路。

#### 参考文献:

- [1] 王 飞, 李同春, 胡继刚, 等. 复杂地基上重力坝深层抗滑稳定分析[J]. 人民长江, 2011, 42(增2):61-63+70.  
WANG F, LI T C, HU J G, et al. Deep anti-sliding stability analysis of gravity dams on complex foundations [J]. People's Yangtze River, 2011, 42(S2):61-63+70.
- [2] 蒋文君, 胡 晓, 张 培, 等. 基于 EEMD 近似熵的水电机组振动信号特征提取[J]. 水力发电学报, 2020, 39(6):18-27.  
JIANG W J, HU X, ZHANG P, et al. Vibration feature extraction for hydropower units based on ensemble empirical mode decomposition and approximate entropy [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(6):18-27.
- [3] 胡 晓, 肖志怀, 刘 东, 等. 基于 VMD-CNN 的水电机组故障诊断[J]. 水电能源科学, 2020, 38(8):137-141.  
HU X, XIAO Z H, LIU D, et al. Fault diagnosis of hydropower units based on VMD-CNN [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(8):137-141.
- [4] 杨 彤, 王卫玉, 张 培, 等. 基于 CEEMDAN 和混合灰狼算法优化 SVM 的水电机组故障诊断方法[J]. 水电能源科学, 2022, 40(3):195-198.  
YANG T, WANG W Y, ZHANG P, et al. Fault diagnosis of hydropower unit based on CEEMDAN and hybrid grey wolf algorithm to optimize SVM [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(3):195-198.
- [5] 王 琦, 邓林峰, 赵荣珍. 基于改进一维卷积神经网络的滚动轴承故障识别[J]. 振动与冲击, 2022, 41(3):216-223.  
WANG Q, DENG L F, ZHAO R Z. Fault recognition of rolling bearing based on improved 1D convolutional neural network [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(3):216-223.
- [6] 李世晓, 杜锦华, 龙 云. 基于一维卷积神经网络的机电作动器故障诊断[J]. 电工技术学报, 2022, 37(增1):62-73.  
LI S X, DU J H, LONG Y. Fault diagnosis of electromechanical actuators based on one-dimensional convolutional neural network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37 (S1):62-73.
- [7] 徐晶璐, 郑 源, 于 洋, 等. 基于卷积神经网络的水电机组轴心轨迹类型识别[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(5):471-476.  
XU J J, ZHENG Y, YU Y, et al. Identification of axis orbit type of hydropower unit based on convolution neural network [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39 (5):471-476.
- [8] 章 余, 景 博, 焦晓璇, 等. 基于改进的 CNN-SVM 的机载燃油泵故障诊断[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(6):137-142.  
ZHANG Y, JING B, JIAO X X, et al. Fault diagnosis of airborne fuel pumps based on improved CNN-SVM [J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(6):137-142.
- [9] WU Z, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1):1-41.
- [10] PINCUS S M. Approximate entropy as a measure of system complexity [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1991, 88(6):2297-2301.
- [11] 蒋文君. 基于改进集合经验模态分解的水电机组特征提取与故障分析[D]. 武汉:武汉大学, 2021.  
JIANG W J. Feature extraction and fault analysis of hydropower units based on improved ensemble empirical mode decomposition [D]. Wuhan: Wuhan University, 2021.
- [12] WANG X H, SONG J Y, WANG W. New manufacturing process of hydro-generator rotor pole core for baihetan project [J]. Power System Engineering, 2023, 39(2):65-67.
- [13] 周晓泉, 周文桐. 论水斗式水轮机动力性能[J]. 大电机技术, 2008(1):44-49+62.  
ZHOU X Q, ZHOU W T. The discussion of the dynamical performance for pelton turbine [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2008(1):44-49+62.
- [14] 周文桐, 周晓泉. 水斗式水轮机基础理论与设计[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007.  
ZHOU W T, ZHOU X Q. Basic theory and design of bucket turbine [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.
- [15] 蒋勇其. 冲击式水轮机流固耦合数值模拟研究[D]. 湖北武汉:武汉大学, 2017.  
JIANG Y Q. Flow-induced vibration analysis of pelton turbine [D]. HubeiWuhan: Wuhan University, 2017.
- [16] STAUBLI T, BISSEL C, KARAKOLCU A, et al. Efficiency increase by jet quality improvement and reduction of splashing water in the casing of Pelton turbine [C]// 16th International Seminar on Hydropower Plants, 2016.
- [17] RENTSCHLER M, NEUHAUSER M, MARONGIU J C. Understanding casing flow in Pelton turbines by numerical simulation [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016, 49.
- [18] ZHANG Z. Pelton turbine [M]. Swiss Federal Institute of Technology in Zurich: Springer, 2016.
- [19] PETLEY S, AGGIDIS G A. Estimating the energy loss in pelton turbine casings by transient CFD and experimental analysis [J]. International Journal of Fluid Machinery and Systems, 2019, 12(4):400-417.
- [20] ZIDONIS A, AGGIDIS G A. State of the art in numerical modelling of Pelton turbines [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 45:135-144.
- [21] LORENTZ F B. CFD analysis of a pelton turbine [D]. Norwegian University of Science and Technology, 2012.
- [22] 张鹏程, 胡栋樑, 程永光, 等. 双转轮对旋式鱼类友好水轮机:概念及转轮优化[J]. 水力发电学报, 2021, 40(8):65-72.  
ZHANG P C, HU D L, CHENG Y G, et al. Fish-friendly turbine with two counter-rotating runners. Concepts and runner optimization [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(8):65-72.

#### (上接第198页)