

基于样本熵的高水头混流式水轮机稳定性分析

朱国俊¹ 陈旻甲¹ 冯建军¹ 刘可然² 罗兴铨¹

(1. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048; 2. 浙江富安水力机械研究所, 杭州 311121)

摘要: 机组的压力脉动是表征水轮机稳定性的主要参数之一, 但仅基于压力脉动幅值判定水轮机的稳定性存在一定的局限性。采用多通道压力脉动同步采集系统同步采集某高水头混流式水轮机部分负荷下多部位压力脉动数据, 然后综合互相关分析和互补集合经验模态分解(CEEMD)方法提取各压力脉动信号的主分量, 对各压力脉动信号的主分量数据进行样本熵计算, 获得不同测点在运行范围内的样本熵分布规律。结果表明: 在部分负荷下, 尾水管内部的空腔涡带仍然是影响高水头混流式水轮机稳定性的主要因素; 可根据水轮机各部位压力脉动信号主分量的频率信息推断水轮机内部水力不稳定源的类型; 关键测点处压力脉动幅值分布规律与样本熵分布规律的对比表明, 压力脉动信号主分量的样本熵变化趋势能够反映水轮机内部流动状态的变化趋势。

关键词: 高水头混流式水轮机; 压力脉动; 互补集合经验模态分解; 样本熵; 内部流态观测

中图分类号: TK733+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)07-0134-07

OSID:



Stability of High Head Francis Turbine Based on Sample Entropy

ZHU Guojun¹ CHEN Minjia¹ FENG Jianjun¹ LIU Keran² LUO Xingqian¹

(1. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

2. Zhejiang FINE Institute of Hydraulic Machinery, Hangzhou 311121, China)

Abstract: Pressure fluctuation is one of the main parameters to judge turbine stability. However, there is limitation in judging turbine stability based on the amplitudes of pressure fluctuation only. By applying the multi-channel high precision pressure fluctuation test system, the pressure fluctuation in different parts of a high head Francis turbine under partial load were collected synchronously. Then the principal components of each pressure fluctuation data were extracted by cross-correlation analysis and complete ensemble empirical mode decomposition (CEEMD) method. Finally, the sample entropy of principal component data of each pressure fluctuation signal was calculated. And then the distribution of sample entropy of different monitor points in operating range was obtained. Base on the results, it can be concluded that vortex rope in draft tube was still the main factor affecting the stability of high head Francis turbine under part load condition. And the frequency information of the principal component of the pressure fluctuation at each part of the Francis turbine can be used to infer the type of the hydraulic instability source. According to the joint comparison of the pressure fluctuation amplitude distribution and the sample entropy distribution at key monitor points, it can be proved that the variation trend of the sample entropy of principal component of pressure fluctuation can reflect the stability of hydraulic turbine. Therefore, the trend analysis of the sample entropy of principal component of pressure fluctuation can be popularized as a technical method to study the variation of the inner flow state of turbine.

Key words: high head Francis turbine; pressure fluctuation; CEEMD; sample entropy; flow pattern observation

0 引言

效率、空化数和稳定性是评价水轮机水力性能

的三大指标^[1]。其中, 稳定性是水轮机乃至电站能否正常运行的主要判据。水轮机的振动或流道内的压力脉动信号是机组稳定性的外在表征^[2-3], 研究

收稿日期: 2020-03-13 修回日期: 2020-04-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1501900)和国家自然科学基金项目(51909212, 52079108)

作者简介: 朱国俊(1984—), 男, 讲师, 主要从事水力机械优化设计研究, E-mail: guojun_zhu1984@126.com

通信作者: 冯建军(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事流体机械内流机理研究, E-mail: jianjunfeng@xaut.edu.cn

水轮机各测点压力脉动特征可为水轮机失稳水力根源研究提供可靠依据。

目前,关于水轮机内部压力脉动特性的研究较多。如文献[4]总结了国内外在混流式水轮机尾水管涡带振动机理方面的研究成果;文献[5]将空腔危害水力机械稳定性的理论应用于水轮机间隙空化研究,论证了间隙空化和高倍频压力脉动的关系;文献[6]以国内某水电厂 200 MW 混流式水轮机为研究对象,采用真机试验的方法研究了尾水管压力脉动特性;文献[7]基于数值模拟方法分析了导叶开度变化对尾水管涡带形状及压力脉动特征的影响;文献[8]提出在尾水管直锥段设置鳍片抑制混流式水轮机部分负荷工况下压力脉动的方法。还有很多学者对水轮机内部压力脉动特性进行了相关研究^[9-14]。然而,大部分研究是从内部流场机理方面解释压力脉动的成因,或从压力脉动信号本身的特征出发建立特征库,以便用于故障诊断,而关于建立一种辅助判定水轮机稳定性的技术方法的研究很少。在建立水轮机转轮水力模型的过程中经常需要对比同一部位测点的压力脉动特性,但仅以压力脉动信号幅值作为依据进行比较时会出现幅值相等或者极其接近的情况,这就需要另外一种辅助判定准则,对水轮机的稳定性进行判断。因此,需要从压力脉动信号数据中进一步提取信息,以辅助水轮机稳定性的判断。

本文提出一种基于压力脉动信号样本熵变化规律判定水轮机稳定性的方法。采用互补集合经验模态分解 (Complete ensemble empirical mode decomposition, CEEMD) 方法对压力脉动信号进行分解,在获得压力脉动信号数据的主分量后对主分量进行样本熵计算。然后结合水轮机内部流场观测和压力脉动幅值数据,验证基于压力脉动信号主分量样本熵变化规律分析水轮机内部流动状态的可靠性。

1 试验装置及测点布置

1.1 试验装置

混流式水轮机压力脉动数据均为实测数据。以“一带一路”沿线老挝某高水头水电站项目的模型水轮机为对象开展压力脉动测试试验,试验在浙江富安水力机械研究所满足 IEC60193 测试要求的高精度水力试验台上完成。模型水轮机的相关参数如表 1 所示。

水力机械试验台上安装的模型水轮机整体试验装置及模型水轮机转轮的实物图如图 1 所示。其

表 1 模型水轮机参数

Tab.1 Parameters of model hydraulic turbine	
参数	数值
模型转轮直径 D_1/m	0.5
模型转轮叶片数	15(长叶片)、15(短叶片)
相对导叶高度 $\bar{b}_0$	0.12
活动导叶数	24
固定导叶数	23
设计单位流量 $/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	0.2
设计单位转速 $/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	62.5

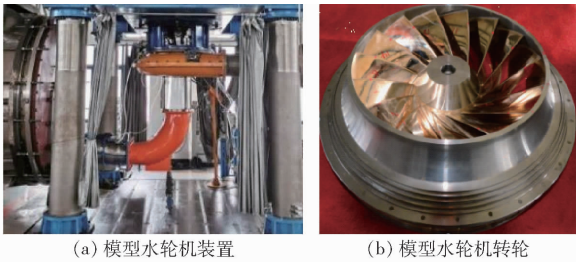


图 1 模型水轮机装置及试验转轮
Fig. 1 Hydraulic turbine model and model runner

中,模型水轮机的尾水管锥管段采用透明有机玻璃加工,方便观测尾水管内部流态。

1.2 压力脉动测点布置

采用多通道高精度压力脉动采集系统获取水轮机各部位的压力脉动,在模型水轮机的活动导叶与转轮间的无叶区、尾水管锥管以及尾水管肘管上均布置了 2 个压力脉动测点,测点布置的位置如图 2 (图中 D_2 表示转轮出口直径,数字为测点序号)所示。

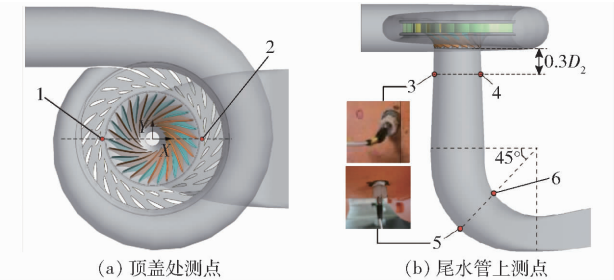


图 2 压力脉动测点布置图

Fig. 2 Location of pressure fluctuation monitoring points

所有测点的压力脉动数据在试验过程中实现同步采集,这样可确保准确全面地反映水轮机运行中的整体稳定性,压力脉动传感器采用美国 PCB 公司生产的 M112A 型高频压力脉动传感器,采集所得的数据经过采集卡传输至计算机。在本文中,水轮机压力脉动测试数据和稳定性分析只针对 3 个部分负荷开度下共 15 组工况开展,工况的具体参数如表 2 所示。

表 2 中,每个活动导叶开度下均包含 5 个工况,分别对应不同的真机运行水头,其中水头 262 m 代

表 2 测试工况参数

Tab.2 Parameters of experimental conditions				
工况 编号	开度/ (°)	单位转速/ (r·min ⁻¹)	单位流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	真机运行 水头/m
1	6	67.6	0.077 4	262
2	6	65.4	0.079 1	280
3	6	63.2	0.081 6	300
4	6	61.1	0.082 8	320
5	6	59.4	0.086 1	340
6	10	67.6	0.134 0	262
7	10	65.4	0.136 2	280
8	10	63.2	0.139 3	300
9	10	61.1	0.142 7	320
10	10	59.4	0.146 0	340
11	14	67.6	0.188 7	262
12	14	65.4	0.192 6	280
13	14	63.2	0.197 4	300
14	14	61.1	0.200 5	320
15	14	59.4	0.201 9	340

表真机的最小运行水头,水头 340 m 代表真机的最高运行水头,额定水头为 300 m。表 2 中的 15 个工况均为部分负荷工况,所有工况对应的负荷均小于 85% 额定负荷。

2 压力脉动数据的分析理论

2.1 CEEMD 计算流程

高水头混流式水轮机各测点的压力脉动信号本质是非平稳时间序列,快速傅里叶变换是最常用的分析处理方法^[15]。除此之外还有小波变换^[16]、希尔伯特-黄变换^[17]、经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)^[18-20]等近年来使用较多的分析方法。其中,EMD 相比于小波变换的优势在于避免了量化误差的引入以及小波基函数的主观选取,但是仍存在模态混叠的缺陷。

综合比较上述方法,本文采用 CEEMD^[21-22]对压力脉动信号进行处理。CEEMD 算法是通过加入互补的噪声来协助完成 EMD 的信号分解。由于加入的是互补的、独立并相同分布的噪声,两者完全负相关,所以在两组分解信号重构的时候可以最大限度地消除冗余噪声,这也是该算法的最显著优点。具体的算法流程如图 3 所示。

2.2 信号主分量选取方法及样本熵计算

将测试所得的压力脉动信号采用 CEEMD 算法进行分解以后会获得多个对应不同瞬时频率的固有模态分量(Intrinsic mode function, IMF),从这些 IMF 分量中筛选出主要分量时须有统一的评判标准。采用互相关系数来完成 IMF 主要分量的选取。假如存在两组相同时间尺度的时间序列信号 $x(t)$

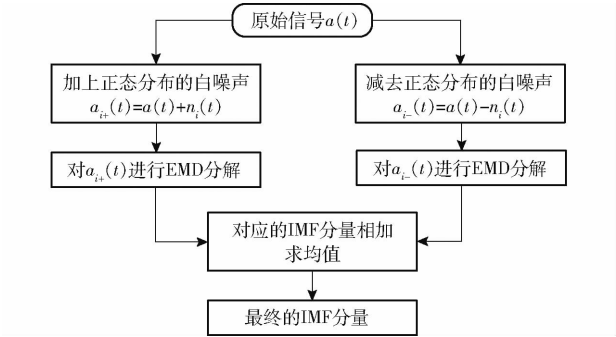


图 3 CEEMD 算法流程图
Fig.3 Algorithm flow chart of CEEMD

和 $y(t)$,则这两组时间序列信号的互相关系数 R_{xy} 的计算公式为

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^m (x(i) - \bar{x})(y(i) - \bar{y})}{(\hat{X}_m \hat{Y}_m)^{1/2}} \tag{1}$$

其中 $\hat{X}_m = \sum_{i=1}^m (x(i) - \bar{x})^2 \quad (m=1,2,\cdots,N) \tag{2}$

$\hat{Y}_m = \sum_{i=1}^m (y(i) - \bar{y})^2 \quad (m=1,2,\cdots,N) \tag{3}$

- 式中 $\hat{X}_m$ —— $x(t)$ 在时间尺度 m 下的去均值累积平方和
 $\hat{Y}_m$ —— $y(t)$ 在时间尺度 m 下的去均值累积平方和
 $x(i)、y(i)$ ——两个时间序列信号中的采样数据
 $\bar{x}$ —— $x(t)$ 在整个采样时间的均值
 $\bar{y}$ —— $y(t)$ 在整个采样时间的均值
 m ——时间序列信号中的不同时间尺度
 N ——时间序列信号在整个采样时间的数据点数

计算获得的互相关系数 R_{xy} 均在 0 ~ 1 的范围内,数值越高代表两个时间序列的相关性越强。在筛选获得主要 IMF 分量以后,对其进行样本熵计算。样本熵是一种定量衡量非平稳时间序列复杂程度的数值,可以用于衡量经过提取后的水轮机压力脉动信号主分量的复杂性。因此当两个压力脉动信号的峰峰值相等或者极其接近时,压力脉动信号主分量的样本熵可用于辅助评判水轮机的稳定性。样本熵 E_s ^[23-24] 的最终理论计算公式为

$$E_s(k,r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(-\ln \frac{A^k(r)}{B^k(r)} \right) \tag{4}$$

式中 k ——模式维数 r ——相似容限

但由于信号数据的长度 N (即采样点数)都是有限值,所以 E_s 的实际计算公式为

$$E_s(k,r,N) = -\ln \frac{A^k(r)}{B^k(r)} \tag{5}$$

k 和 r 都是预先确定的常系数, k 取 2.0, r 则通常取 $(0.1 \sim 0.25)R_{Std}$, R_{Std} 为 CEEMD 分解前原始信号的标准差。 $A^k(r)$ 和 $B^k(r)$ 的含义在文献[25]中有详细介绍, 在此不再赘述。

3 试验与结果分析

3.1 压力脉动信号数据的分析流程

如图 2 所示, 本文试验中的压力脉动测点共布置了 6 个, 但沿水轮机旋转轴线呈对称分布, 因此每个测试部位只需取一个压力脉动测点的数据进行分析即可。 本文最终选取测点 1、3 和 5 获得的压力脉动数据进行后续研究。 各测点所采集得到的脉动压力数据都转换为水头 $\tilde{H}$ 以便于数据处理。 在采集获得压力脉动的时域数据以后, 先要对其进行主分量提取, 因为提取压力脉动信号主分量可以摒弃信号里面的其它干扰因素, 更直观地反映信号的本质。

由于试验工况有 15 个, 每个工况下有 3 个压力脉动测点数据, 所以总的压力脉动信号数据有 45 组。 45 组压力脉动信号数据分解后分量多达 405 个, 为了节约篇幅, 本文只以工况 2 下测点 1 的信号数据为例, 说明单个压力脉动信号数据进行 CEEMD 分解和样本熵计算的流程。 工况 2 (开度为 6° , 单位转速为 65.4 r/min , 单位流量为 $0.0791 \text{ m}^3/\text{s}$) 下的测点 1 (顶盖上游) 采集得到的时域压力脉动数据如图 4 所示。

根据水轮机行业的试验测试标准, 表征测点压力脉动振幅的无量纲特征幅值 H_{Amp} 的计算公式为

$$H_{Amp} = \frac{\Delta H}{H} \times 100\% \tag{6}$$

式中 ΔH ——压力脉动时域数据在 97% 置信区间内的峰峰值, m

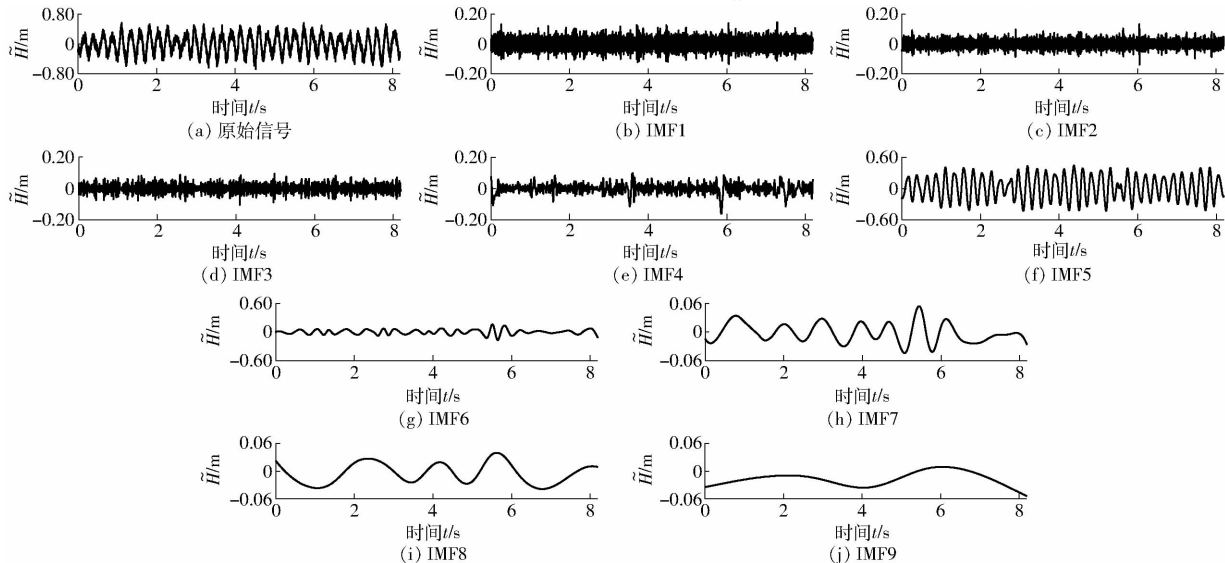


图 5 工况 2 下测点 1 的压力脉动信号 CEEMD 分解

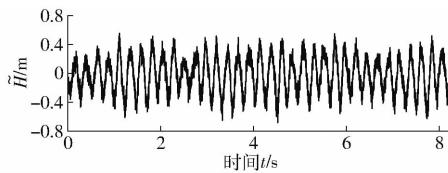


图 4 工况 2 下测点 1 的压力脉动信号

Fig. 4 Pressure fluctuation signals of monitoring point 1 under condition 2

H ——模型试验时的水轮机工作水头, m

由于高水头混流式水轮机模型试验测试时的工作水头固定为 30m, 所以根据式(6)可计算得到图 4 所示测试信号的压力脉动振幅 H_{Amp} 为 3.052%。 将该测点的压力脉动信号进行 CEEMD 分解, 可得到如图 5 所示的 IMF 分量图。

获得各 IMF 分量以后, 采用第 2 节提及的互相关分析方法计算各 IMF 分量与原始信号的互相关系数 R_{xy} , 并选取 R_{xy} 最高的 IMF 分量作为主要 IMF 分量。 例如, 在图 5 中, R_{xy} 最高的分量为 IMF5, 因此选择 IMF5 作为工况 2 下测点 1 的压力脉动信号主分量, 并对其进行样本熵的计算, 最终计算得到 IMF5 的样本熵为 0.0363。 上述对单个压力脉动信号数据的分析过程全部采用程序实现, 如此可循环对各工况下不同测点的压力脉动信号进行处理, 处理后可获得对应的压力脉动信号主分量, 但每个压力脉动信号的 IMF 主分量序号不一定相同。

3.2 试验结果分析

因为本文只选取了测点 1、3 和 5 作为分析对象, 所以下文只针对这 3 个测点的压力脉动信号数据进行分析。 采用 3.1 节的方法对 3 个测点在不同工况下的压力脉动信号数据进行处理, 获得每个压力脉动信号数据对应的 IMF 主分量。 随后对这些

Fig. 5 CEEMD decomposition of pressure fluctuation signal of monitoring point 1 under condition 2

主分量波形进行快速傅里叶变换,并统计出不同开度下主分量的主频随真机运行水头的变化规律,如图 6 所示。图 6 中,所有主频均按其与转频的比值 f/f_n 表示。

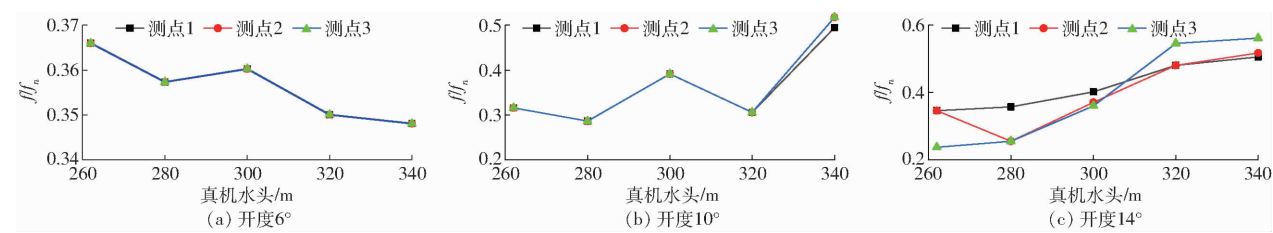


图 6 3 个测点处压力脉动主分量的主频统计

Fig. 6 Dominant frequency statistics of principal components of pressure fluctuation at three monitoring points

从图 6 中可以看出,在极小开度 6°时,3 个测点处各工况下压力脉动信号主分量的主频均相同,均位于 0.34 ~ 0.37 倍转频之间,属于低频。在开度为 10°和 14°时,各工况下压力脉动信号主分量的主频开始出现差异,但主频数值仍低于 0.6 倍转频,所以仍属于低频成分。

在高水头混流式水轮机内部,诱发压力脉动的水力根源通常为动静干涉、卡门涡或尾水管空腔涡带。前两种水力根源诱发的压力脉动均为高频压力脉动,只有尾水管空腔涡带诱发的压力脉动为低频压力脉动,且主频在 1 倍转频以下。结合图 6 可知,在活动导叶开度为 6°和 10°下的所有工况,水轮机顶盖、尾水管锥管及肘管处的压力脉动主分量均为尾水管空腔涡带产生的低频压力脉动。在活动导叶开度为 14°下,除工况 12 以外,其余工况下各测点的压力脉动主分量也均由尾水管内部的空腔涡带所诱发。在工况 12 时,顶盖处测点 1 的压力脉动主分量频率与尾水管内的两个测点均不一致,因此该工况下顶盖测点的压力脉动主分量可能由其它原因所引发。尾水管内部的流场观测结果也验证了该结论,限于篇幅,图 7 只给出了 3 个开度下对应额定水头时的尾水管内部流态,即工况 3、8、13 下的尾水管内部流态加以证明。

图 7 中尾水管内部空腔涡带的形状都采用白色虚线进行了描绘,从图 7a 和图 7b 中可以看出,在额定水头 6°和 10°这两个小开度工况下,尾水管内部均出现了明显的尾水管空腔涡带,且空腔涡带的形状粗壮,呈微螺旋型。实际观测中,该尾水管内部的空腔涡带一直作旋转摆动,并发出较大噪声,所以可判断出尾水管涡带是尾水管内部压力脉动的主要源头。同时,尾水管内部明显的压力脉动现象不仅影响下游肘管段的稳定性,还向上游传播影响到了上游顶盖处测点的压力脉动,所以在图 6a 和图 6b 中,3 个测点的压力脉动主分量的主频都基本一致。当活动导叶开度增大到

14°以后,尾水管内部空腔涡带的尺度明显缩减,从图 7c 中可以看出大尺度空腔涡带已明显缩小为只在转轮泄水锥附近摆动的双螺旋小涡带,由此导致了图 6c 中开度 14°下压力脉动主分量的主频出现差异。

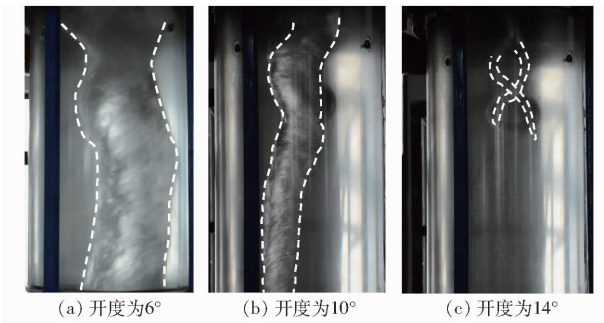


图 7 额定水头下不同开度时的尾水管流态

Fig. 7 Flow pattern in draft tube at different opening under rated head

3.3 压力脉动的样本熵计算分析

为了分析不同工况下压力脉动信号的特征,本文将 CEEMD 分解后得到的所有压力脉动信号的主分量进行了样本熵计算,并对 3 个测点下的压力脉动信号主分量的样本熵变化规律进行了三次曲面拟合,结果如图 8d ~ 8f 所示。在图 8a ~ 8c 中则给出了常规稳定性评价所需计算的 3 个测点下的压力脉动幅值 H_{Amp} 。

按常规水轮机稳定性分析方法,综合测点的压力脉动信号幅频特性以及内部流态试验图像可以判定混流式水轮机内部的流动状态是否为非稳定流动,并据此推断水力不稳定源的类型。因此,综合本文图 6、7 以及图 8a ~ 8c 中的结果可知,活动导叶开度为 6°(极小开度)时,水轮机内部存在尾水管空腔涡带不稳定流动现象并造成幅值较高的压力脉动,表明水轮机内部流动处于不稳定状态,但随着导叶开度增大到 10°和 14°时,这种不稳定现象逐渐减弱,水轮机的运行状态向稳定状态发展,压力脉动的幅值也回落至较小值。最终,水轮机的稳定性变化方向如图 8a ~ 8c 中白色箭头所

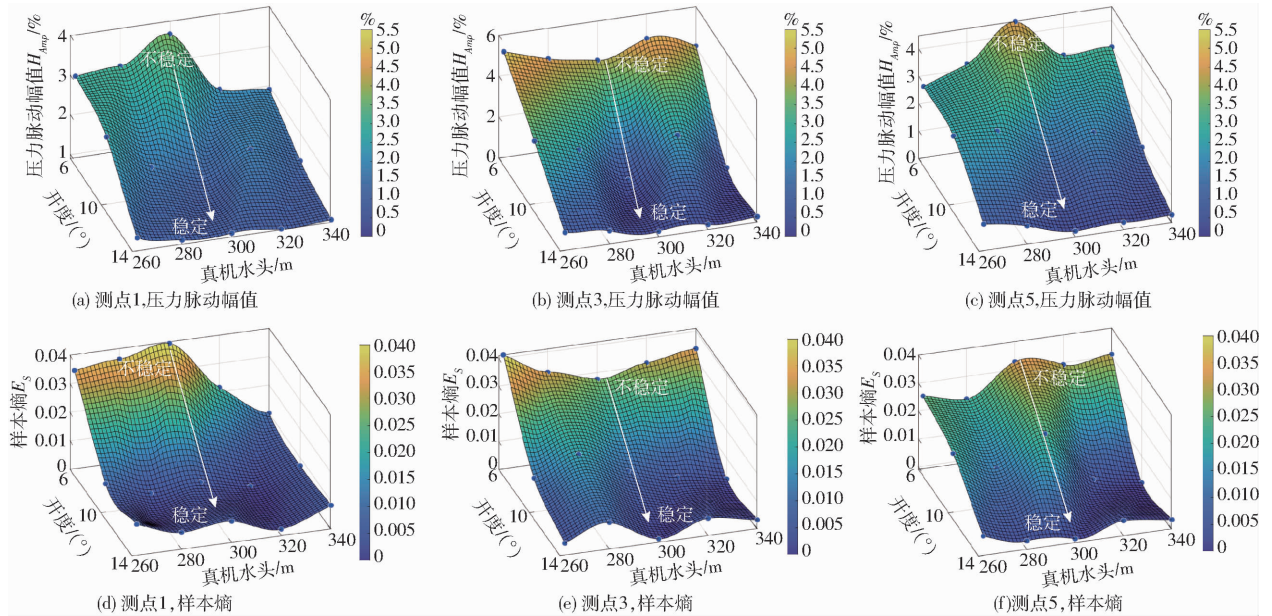


图 8 运行范围内 3 个测点的压力脉动幅值和主分量样本熵的变化规律

Fig. 8 Variation law of pressure fluctuation amplitude and principal component sample entropy of three measuring points in operation range

示。上述试验结果表明,部分负荷工况下尾水管空腔涡带是影响高水头混流式水轮机稳定性的根源之一。

图 8d ~ 8f 展示了压力脉动信号主分量的样本熵在整个测试范围内的分布规律。结合图 8d ~ 8f 的结果与前述分析得到的水轮机稳定性变化方向可知,当水轮机运行在相对不稳定状态下时(活动导叶开度为 6°),3 个测点处压力脉动信号主分量的样本熵均较高。随着活动导叶开度逐渐增加,水轮机运行状态趋于稳定后,压力脉动信号主分量的样本熵与压力脉动幅值一样呈现出明显的下降规律。由此可见,测点处压力脉动信号主分量的样本熵随机组运行状态的变化规律与压力脉动幅值 H_{Amp} 相似,可以在一定程度上反映水轮机内部流动状态的变化趋势。因此,压力脉动信号主分量的样本熵分析可作为一种研究水轮机内流状态变化趋势的技术方法。

4 结论

(1)在部分负荷工况下,增加活动导叶开度可以显著减小尾水管空腔涡带的尺度,进而降低水轮机各部位压力脉动的振幅。这也证明,部分负荷工况下尾水管空腔涡带是影响高水头混流式水轮机稳定性的主要因素。

(2)综合水轮机模型试验流态观测和各测点处压力脉动信号主分量的频谱分析结果可以发现,水轮机各部位处压力脉动信号主分量的频率信息可准确地反映水轮机内部是否存在水力不稳定源,因此可据此推断水力不稳定源的类型。

(3)各测点处压力脉动信号主分量的样本熵在高水头混流式水轮机运行范围内的变化趋势可以反映水轮机内部流动状态的变化趋势,因此,压力脉动信号主分量样本熵分析可作为研究水轮机内流状态变化趋势的技术方法。

参 考 文 献

- [1] 吴子娟,梁武科,董玮,等. 活动导叶分布圆直径对混流式水轮机水力性能的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5):140-147.
WU Zijuan, LIANG Wuke, DONG Wei, et al. Influence of guide vane distribution circle diameter on performance and internal flow characteristics of Francis turbine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 140-147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190516&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.016. (in Chinese)
- [2] NISHI M, KUBOTA T, MATSUNAGA S, et al. Surging characteristics of conical and elbow-type draft tubes[C]// IAHR Section Hydraulic Machinery, Equipment and Cavitation. Stirling 12th Symposium, 1984: 272-283.
- [3] SÉBASTIEN A, NICOLET C, TSUJIMOTO Y, et al. Cavitation surge modelling in Francis turbine draft tube[J]. Journal of Hydraulic Research, 2014, 52(3):399-411.
- [4] 王小龙,刘德民,刘小兵,等. 高水头混流式水轮机尾水管压力脉动综述[J]. 水电与抽水蓄能, 2020, 6(2):58-66.

- WANG Xiaolong, LIU Demin, LIU Xiaobing, et al. A review on pressure fluctuations in the draft tube of high-head Francis turbine[J]. *Hydropower and Pumped Storage*, 2020, 6(2):58–66. (in Chinese)
- [5] 徐洪泉, 何成连, 孟龙, 等. 间隙空化对贯流式水轮机压力脉动特性的影响[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(3):96–102.
XU Hongquan, HE Chenglian, MENG Long, et al. Effect of clearance cavitation on pressure pulsation characteristics of bulb turbine[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(3):96–102. (in Chinese)
- [6] 乔亮亮, 陈启卷. 基于真机试验的尾水管压力脉动研究[J]. *中国农村水利水电*, 2014(6):137–140.
QIAO Liangliang, CHEN Qijuan. Research on the pressure fluctuation of draft tube based on field test in typical heads[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014(6):137–140. (in Chinese)
- [7] 齐继贺. 混流式水轮机尾水管涡带及压力脉动数值模拟[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(3):168–172.
QI Jihe. Numerical simulation of Francis turbine draft tube vortex and pressure pulsation[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2017, 28(3):168–172. (in Chinese)
- [8] 张锐志, 西道弘, 罗先武. 尾水管壁面加鳍对混流式水轮机压力脉动的影响[J]. *空气动力学学报*, 2020, 38(4):788–795.
ZHANG Ruizhi, NISHI Michihiro, LUO Xianwu. Effects of fin installation on pressure fluctuation in a Francis turbine draft tube[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2020, 38(4):788–795. (in Chinese)
- [9] 徐用良, 覃大清, 孟晓超. 试验水头和空化系数对混流式水轮机尾水管压力脉动影响的试验研究[J]. *大电机技术*, 2019(1):57–63.
XU Yongliang, QIN Daqing, MENG Xiaochao. Experimental study of the influence of Thoma number and model test head on Francis turbine draft tube pressure fluctuation[J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2019(1):57–63. (in Chinese)
- [10] 史广泰, 李金, 徐清清, 等. 不同水头下混流式水轮机尾水管内流动特性分析[J]. *人民长江*, 2019, 50(12):177–181.
SHI Guangtai, LI Jin, XU Qingqing, et al. Analysis of draft tube flow characteristics of Francis turbine under different heads[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(12):177–181. (in Chinese)
- [11] 肖琼, 张春泽, 夏林生, 等. 水泵水轮机泵工况压力脉动和转轮受力特性[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(7):53–62.
XIAO Qiong, ZHANG Chunze, XIA Linsheng, et al. Pressure pulsation and runner mechanical property during pumping mode of pump-turbine[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(7):53–62. (in Chinese)
- [12] 朱迪, 肖若富, 陶然, 等. 水泵水轮机泵工况非设计工况流态与压力脉动分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(12):77–84.
ZHU Di, XIAO Ruofu, TAO Ran, et al. Analysis of flow regime and pressure pulsations under off-design condition in pump mode of pump-turbine[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12):77–84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161211&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.011. (in Chinese)
- [13] 郑源, 蒋文青, 陈宇杰, 等. 贯流式水轮机低频脉动及尾水管涡带特性研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(4):165–171.
ZHENG Yuan, JIANG Wenqing, CHEN Yujie, et al. Investigation on low frequency pulsating and draft tube vortex of tubular turbine[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(4):165–171. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180419&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.019. (in Chinese)
- [14] 孙龙刚, 郭鹏程, 罗兴铸. 水轮机尾水管涡带压力脉动同步及非同步特性研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(9):122–129.
SUN Longgang, GUO Pengcheng, LUO Xingqi. Investigation on synchronous and asynchronous characteristics of pressure fluctuations towards precessing vortex rope in Francis turbine draft tube[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(9):122–129. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190914&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.014. (in Chinese)
- [15] PADMA G, ACHANTA D P. Medical image fusion based on laws of texture energy measures in stationary wavelet transform domain[J]. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 2020, 30(3):22393.
- [16] 卢娜. 基于多小波的水电机组振动特征提取及故障诊断方法研究[D]. 武汉:武汉大学, 2014
LU Na. Multiwavelets based vibration feature extraction and fault diagnosis methods for hydro-turbine generating unit[D]. Wuhan:Wuhan University, 2014. (in Chinese)
- [17] 赵荣珍, 张琛, 邓林峰. 基于 EEMD 与模糊信息熵的旋转机械故障诊断方法[J]. *兰州理工大学学报*, 2020, 46(3):39–44.
ZHAO Rongzhen, ZHANG Chen, DENG Linfeng. Fault diagnosis method of rotating machinery based in both EEMD and fuzzy information entropy[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2020, 46(3):39–44. (in Chinese)
- [18] 李彦军, 陈超, 裴吉, 等. 不同空化工况下轴流泵装置压力脉动试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(12):158–164.
LI Yanjun, CHEN Chao, PEI Ji, et al. Experiment on pressure fluctuation of axial flow pump system under different cavitation conditions[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(12):158–164. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181220&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.020. (in Chinese)

- Ji Longlong, XIE Huanxiong, YANG Hongguang, et al. Based on EDEM_ Simulation analysis of RecurDyn coupling potato dry soil cleaning device [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021,42(1): 109 – 115. (in Chinese)
- [19] HOSSAIN M M. The impact of HRM practices on job satisfaction in bangladesh: evidence from women employees of private sector[J]. China-USA Business Review,2020,19(1):10 – 24.
- [20] 李世超,曹如月,季宇寒,等. 基于不同电机的拖拉机自动导航转向控制系统性能对比[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(增刊):40 – 49.
LI Shichao, CAO Ruyue, JI Yuhan, et al. Performance comparison of tractor automatic navigation steering control system based on different motors [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(Supp.): 40 – 49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s007&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.007. (in Chinese)
- [21] 郭建斌,牛红林,韩玉花,等. 基于 PLC 的养殖场氨气生物氧化装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(3): 310 – 316.
GUO Jianbin, NIU Honglin, HAN Yuhua, et al. Design and test of ammonia biological oxidation device based on PLC [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(3): 310 – 316. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170339&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.039. (in Chinese)
- [22] 陈浩,彭天博,肖路. 基于 PLC 和 HMI 的工业窑炉监控系统设计[J]. 工业控制计算机,2020,33(11):46 – 47,52.
CHEN Hao, PENG Tianbo, XIAO Lu. Design of industrial kiln monitoring system based on PLC and HMI [J]. Industrial Control Computer, 2020,33(11): 46 – 47,52. (in Chinese)
- [23] 王昱,吴鹏,曾志雄,等. 规模化猪舍废气复合净化系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(4):344 – 352.
WANG Yu, WU Peng, ZENG Zhixiong, et al. Design and test of compound purification system for waste gas from large-scale piggery [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(4): 344 – 352. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200439&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.039. (in Chinese)
- [24] 孙杰. 棉花打顶机打顶高度自动控制系统的研究与试验[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2015.
SUN Jie. Design and experimental study of automatic control system for topping height of cotton topping machine [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [25] 孙杰,张学军,史增录,等. 棉花打顶机自动测距控制系统的设计[J]. 安徽农业科学,2015,43(12):369 – 370,390.
SUN Jie, ZHANG Xuejun, SHI Zenglu, et al. Design of automatic ranging control system for cotton topping machine [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015,43(12): 369 – 370,390. (in Chinese)

(上接第 140 页)

- [19] 罗雪莲,刘桂英,刘香银. 基于小波变换与希尔伯特-黄变换的微电网暂态电能质量扰动检测及辨识研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(3):182 – 188.
LUO Xuelian, LIU Guiying, LIU Xiangyin. Study on detection and identification of transient power quality disturbances of micro grid based on wavelet transform and Hilbert – Huang transform [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(3):182 – 188. (in Chinese)
- [20] 曾祥,周晓军,杨辰龙,等. 基于经验模态分解和 S 变换的缺陷超声回波检测方法[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11):414 – 420.
ZENG Xiang, ZHOU Xiaojun, YANG Chenlong, et al. Ultrasonic defect echoes identification based on empirical mode decomposition and S transform [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11):414 – 420. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161156&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.056. (in Chinese)
- [21] ZHANG Junrong, TANG Huiming, WEN Tao, et al. A hybrid landslide displacement prediction method based on CEEMD and DTW – ACO – SVR-cases studied in the three gorges reservoir area[J]. Sensors, 2020, 20(15):4287.
- [22] ZHANG Yongan, YAN Binbin, AASMA Memon. A novel deep learning framework: prediction and analysis of financial time series using CEEMD and LSTM[J]. Expert Systems with Applications, 2020, 159:113609.
- [23] ZHU Lida, LIU Changfu, JU Changyu, et al. Vibration recognition for peripheral milling thin-walled work pieces using sample entropy and energy entropy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(9):3251 – 3266.
- [24] 但长林,李三雁,张彬. 基于样本熵和 SVM 的滚动轴承故障诊断方法研究[J]. 中国测试, 2020, 46(11):37 – 42.
DAN Changlin, LI Sanyan, ZHANG Bin. Research on fault diagnosis method for rolling element bearings based in sample entropy and SVM [J]. China Measurement and Test, 2020, 46(11):37 – 42. (in Chinese)
- [25] RICHMAN J S, RANDALL M J. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy [J]. American Journal of Physiology Heart & Circulatory Physiology, 2000, 278(6): 2039 – 2049.