

# 基于不定场流动及动力响应分析的 水轮机运行区划分

王正伟<sup>①\*</sup>, 秦亮<sup>②</sup>, 曾季弟<sup>③</sup>, 林家洋<sup>③</sup>, 杨金义<sup>④</sup>, 陈伟江<sup>④</sup>, 罗永要<sup>①</sup>, 阎宗国<sup>①</sup>

① 清华大学热能系水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;

② 中交天津航道局有限公司, 天津 300042;

③ 福建水口发电有限公司, 福州 350800;

④ 黄河万家寨水利枢纽有限公司, 偏关 036412

\* E-mail: [wzw@mail.tsinghua.edu.cn](mailto:wzw@mail.tsinghua.edu.cn)

收稿日期: 2008-09-19; 接受日期: 2009-05-03

国家自然科学基金(批准号: 50879036, 50879088)和水沙科学与水利水电工程国家重点实验室统筹课题(批准号: 2009T3)资助项目

**摘要** 水轮发电机组运行状态随运行工况不同而存在明显的差别. 研究了万家寨水电站两种型号的大型混流式机组与水口电站同一种型号两台大型轴流转桨式机组的运行性能和运行区划分方法; 发现影响万家寨机组运行稳定性的最主要因素为尾水管内涡带引起的水压力脉动, 影响水口水电站机组安全运行的有水力脉动引起的活塞杆动应力、桨叶动应力及转轮水推力等; 综合分析在运转特性曲线上绘制的影响机组安全运行参数的分布云图, 绘出水轮发电机组的安全运行区、过渡运行区和禁止运行区.

**关键词**  
水轮机  
运行区  
水压力脉动  
动应力

## 1 引言

水轮发电机组是多部件组合的复杂结构动力机械, 在运行过程中的振动问题难以避免, 很多大型电站机组关键部件也出现了裂纹问题. 引起振动的原因主要有机械、电磁、水力三大类. 水力引起的振动与机械和电磁引起的振动不同, 由于流道形状固定, 通过导叶和桨叶调节, 改变了水流的运动状态, 水力原因引起的振动是难以避免的. 由涡带、脱流、水压脉动以及空蚀等引起的振动, 情况复杂, 在某些运行工况易造成机组的强烈振动. 水轮机在各种工况下的水流状态差异很大, 在某些工况下占主导地位的不稳定流动, 在其它工况下可以变得很弱甚至消失.

在中国, 水电站多担任调峰调荷任务, 机组负荷

变化大, 稳定性问题涉及面宽, 再加上电厂运行调度没有充分考虑水电机组的运行特点, 稳定性问题并未有效地得到重视和解决. 近十年来, 我国 20 多座国内制造或国际引进的大型机组投产运行, 由于没有充分考虑机组的运行特点, 机组在不安全运行区域长期运行所引发的事故时有发生. 广西红水河上的岩滩水电站混流式水轮机转轮直径 8 m, 随着电厂运行水位的提高, 在小负荷时机组尾水管出现强烈的低频水压脉动. 当运行水头大于 60 m, 导叶开度 70% 左右时, 厂房结构出现剧烈的振动, 噪声极大, 人员在发电机层楼板上难以站稳, 并曾导致操作盘误动作<sup>[1]</sup>. 黄河上游李家峡电站单机容量 400 MW, 为目前西北电网中最大机组, 原型观测曾发现在 131 m 水头下, 2 号机组负荷为 80 MW 时出现强烈的接近转

频的振动, 顶盖、下机架等处垂向振动严重超标, 但由于机组长期担任调峰任务, 单机负荷经常只有 0~100 MW, 严重影响了机组的使用寿命. 湖南五强溪水电站 5 台机组都存在振动范围大、幅值大的问题. 电站强振发生在低负荷工况<sup>[2]</sup>, 此时尾水管内存在强烈的 0.125~0.625 Hz 的低频振动分量, 其中个别振动频率与厂房建筑物的自然频率非常接近, 导致厂房产生共振. 三峡电站机组也在低负荷区存在一个很强烈的窄带振动区.

发达国家很多水电站都担任基荷, 机组在最优区附近运行, 安全运行问题较少, 但机组本身运行区的特点是一样的. 文献[3]的研究结果表明在偏离最优区运行时, 叶片正背面压力分布不均匀程度明显增加. 文献[4]应用空蚀调查的新方法, 发现在不同区域机组的空蚀性能差异很大, 并把空蚀因素作为机组优化运行的限制条件.

虽然现代水轮发电机组在设计之初电站对机组都会提出一个经常运行的区域要求, 但是这种要求往往是从大原则出发的, 区域边界多为直线连接, 是一种粗略的运行区要求, 并且从模型试验换算得到的原型机组运行区也不能充分反映机组的实际运行情况, 加上大型水轮机组结构的复杂性, 即使是同一个电站、同一种型号、同一个制造厂及同一个安装公司安装的机组, 其运行性能也会有稍许差别.

国内外早就有一些专家提出了“红灯区”、“绿灯区”、“黄灯区”等与运行区划分相关的概念, 有一些专家提出了避振运行的思想, 并在机组运行中得到应用. 如吉尔吉斯斯坦纳伦河上的 Toktogul 水电厂的机组, 在运行中直接避开振动区运行<sup>[5]</sup>. 目前许多科研和运行单位都开始重视机组运行区问题, 但开展的工作都大致是通过电站的外特性测量来确认绘出运行区, 总体上认识还不够深入, 实践经验也比较少.

完善可靠科学的运行区划分应涉及到对原型机组的振动、摆度、水压力脉动、噪音、动应力、效率、磨损等性能在不同运行工况下的完整观测分析, 并应用理论计算手段了解把握机组整体流道的非定常流动、关键部件流固耦合模态、动应力、轴承转子动力特性、多相流动特性、部件疲劳寿命等. 在经过以上深入研究获得机组各方面性能的前提下, 对所有外部特征及内部特征进行系统综合, 才能得到充分反映机组的综合运行性能的水轮机运行区划分图.

本文一方面分析总结影响机组稳定运行的内外

原因, 另一方面通过万家寨混流式机组与水口轴流转浆机组的运行区划分工作来阐述机组运行区的划分理论方法及重要的工程应用意义. 万家寨混流式机组与水口轴流转浆机组的参数见表 1.

## 2 水轮机运行区划分依据

机组的运行状态是由机组的振动、轴系的摆度、噪声、水压力脉动、静应力、动应力、空蚀与磨损、运行效率等指标表现的. 所有这些指标在水轮机不同的运行工况下都呈现出不同的量值, 即使是同一个运行工况, 因为上下游水位的不同机组运行状态表现出来的这些特征也不一样. 水轮发电机组关键位置不同运行工况下的振动特性、轴系摆度、噪声、水压力脉动、运行效率、某些位置的应力状态等参数可以通过现场真机在线或离线实测获得, 并表现出同一工况下的多值性. 而空蚀与磨损尽管有一些测量仪器如空蚀检测仪等可以开展实测分析, 但破坏程度往往要停机观测才能明晰, 通过即时测量来与具体的工况关系进行分析会比较困难. 应力状态、疲劳分析、空化、整体水压力脉动与水推力等与运行工况的关系往往通过计算分析与模型机组实验结果来获得更详细的认识. 由于水轮机组运行环境的复杂性, 其电磁拉力、水压力脉动、轴系不对中等等都会导致实测数据的随机性. 通过计算与实测分析来得到整体运行区的机组性能是划分运行区的基础. 下面选择几个关键参数进行分析.

### 2.1 应力

在水轮机结构设计中都会计算考虑结构的刚强

表 1 混流式和轴流转浆机组的参数

Parameters	Francis turbine unit		Kaplan turbine unit
	No. 1~4	No. 5~6	No. 1~7
Runner diameter (m)	6.1	5.848	8
Rated output (MW)	183.7	183.7	200
Rotational speed (r/min)	100	100	107.14
Rated Flow rate (m <sup>3</sup> /s)	210	210	468
Minimum head (m)	50	50	30.9
Rated head (m)	68	68	47
Maximum head (m)	80	80	57.8 (now up to 61)
Number of blades $Z_b$	13	13	6
Number of stay vanes $Z_s$	24	19	24
Number of guide vanes $Z_g$	24	20	24

度要求, 一般根据经验公式或者现代强度分析理论进行结构静应力计算, 通常电站运行后也容易处理静应力设计不当引起的结构破坏问题, 不同运行工况下的静应力特性是不同的, 而设计中一般都考虑到最大的情况并留有裕量. 但电站机组运行过程中都体现了动应力的特性. 由于水流产生的动荷载十分复杂, 动应力对机组的影响不能只考虑其幅值是否超过材料的强度, 还要考虑动应力的频率作用特征, 因为足够多的循环扰动会使结构形成疲劳裂纹甚至完全断裂破坏, 转轮等部件不能在动应力较大且频率较高的区域长期运行. 由于动应力特性分析复杂, 结构设计中难以精确考虑, 往往导致机组在运行中出现裂纹问题, 根据中国 10 多个大电站进口机组调研结果, 所有机组转轮都出现了不同程度的裂纹问题, 影响机组的安全运行. 深入分析原因都认为是某些运行区中工作动应力过大引起的. 本文通过理论计算分析, 找出了动应力特性与运行工况的关系, 为运行区划分提供了依据.

### 2.2 振动

振动过大会引起零部件的疲劳破坏, 产生裂纹或焊缝开裂; 使得各部位的紧固连接件松动, 从而产生破坏. 振动是动荷载与结构物作用特性的最明显反映, 一般来说振动小的工况机组运行安全性较好,

振动剧烈的工况则较差. 有些运行工况动荷载的频率与结构物的频率相近还有可能会引起机组或厂房楼板的共振, 使得振幅剧烈加大, 机组的使用寿命缩短, 严重时还会产生故障迫使机组停机检修, 从而给水电站造成经济损失. 岩滩电站在某些运行区就产生了机组与厂房的共振现象.

### 2.3 水压力脉动

水压力脉动是影响水轮发电机组运行的重要因素, 也是机组振动能量的主要来源, 其随运行工况变化特征明显. 具体来说, 发生在水轮发电机组运行过程中的脉动主要有叶道涡、卡门涡线、尾水管涡带<sup>[6]</sup>、动静干涉 RSI(rotor-stator interaction)压力脉动<sup>[7]</sup>等.

图 1 为各种水力现象与工况的关系(感谢哈尔滨大电机研究所提供).

## 3 大型水电站运行区划分研究

运行区的划分要考虑到电站的实际运行情况、调节的便利性及电网的具体要求等综合因素. 下面通过工程实例来分别研究混流式水轮机与轴流式水轮机的运行区划分方法.

### 3.1 混流式水轮机运行区划分研究

对万家寨水电站两种不同型式的混流式机组进

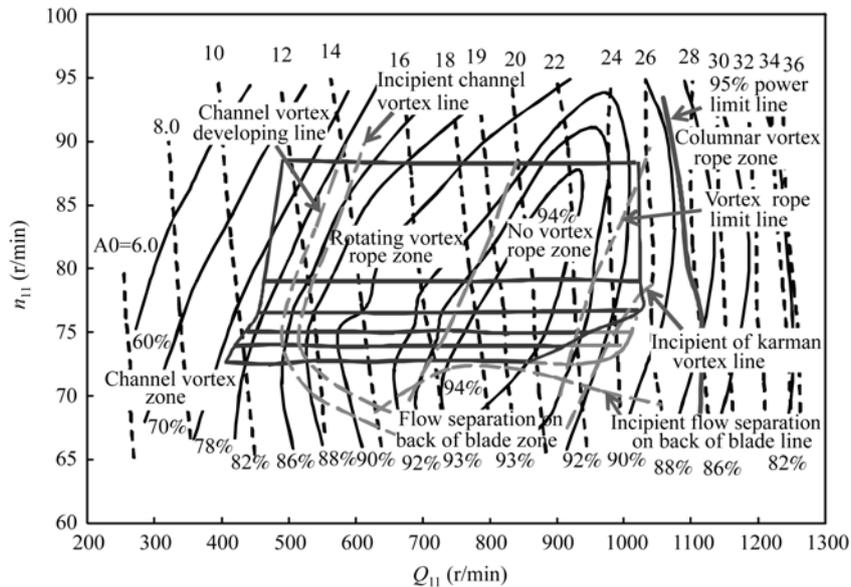


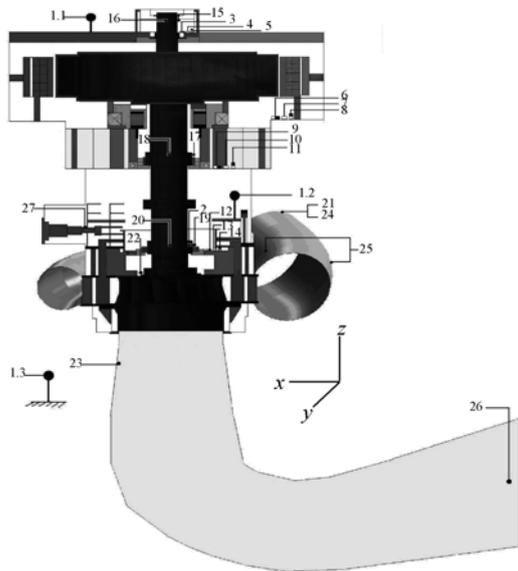
图 1 混流式模型水轮机不同类型涡在运行范围内的分布示意图

行了完整的现场测试, 每种机组的测试包含振动、摆度、噪音、水压力脉动等数据, 测点布置情况如图 2 所示.

首先对万家寨大型水利枢纽工程由某公司设计制造的 5 号水轮发电机组结构在低、中、高三种运行水头的不同出力工况下, 尾水脉动压力双幅值与水轮机推力轴承处的垂向振动位移双幅值的原型观测数据进行分析, 图 3~5 给出各种情况下二者随负荷的变化关系. 从图 3~5 上可以明显看出, 在额定水头下, 尾水脉动双幅值与推力轴承处垂向位移随机组负荷的变化十分相似, 在低负荷区较大, 接近额定功率的

高负荷区脉动值与振动值较小, 尤其是在低负荷区尾水脉动与推力轴承处的垂向振动变化基本趋于一致, 并且脉动最大值与垂向振动最大值都出现在相同的测试工况下, 该工况推力轴承垂向振动的主频和尾水脉动的主频率都为机组的转频 1.67 Hz. 低、高运行水头下的测试数据也显示, 尾水脉动与机组垂向振动具有以上这种规律.

图 6 为 68 m 水头 30 MW 负荷工况下机组垂向振动与水压脉动的相关系数图. 从图 6 中可以看出压力脉动、顶盖垂向振动、下机架垂向振动三者之间具有很强的周期相关性: 压力脉动与顶盖垂向振动相



- 1: Noise;
- 2: Speed;
- 3—5: Vibrations on the upper bracket;
- 6—8: Vibrations on the stator base;
- 9—11: Vibrations on the lower bracket;
- 12—14: Vibrations on the head cover;
- 15,16: Swing of the upper guide bearing;
- 17,18: Swing of the lower guide bearing;
- 19,20: Swing of the turbine guide bearing;
- 21: Hydraulic pressure fluctuations at the inlet of the spiral case;
- 22: Hydraulic pressure fluctuations at the head cover;
- 23: Hydraulic pressure fluctuations in the draft tube;
- 24: Hydraulic pressure at the inlet of the spiral case;
- 25: Hydraulic pressure different in the spiral case;
- 26: Hydraulic pressure at the outlet of the draft tube;
- 27: Servomotor rod displacement.

图 2 混流式水轮发电机组现场试验测点布置示意图

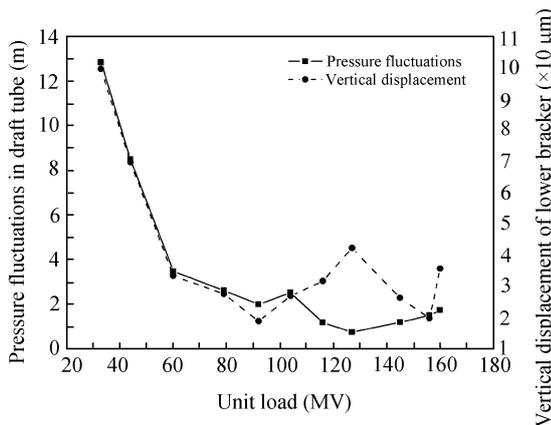


图 3 万家寨 5 号机组 59.2 m 水头下尾水脉动与推力轴承处垂向振动随负荷变化

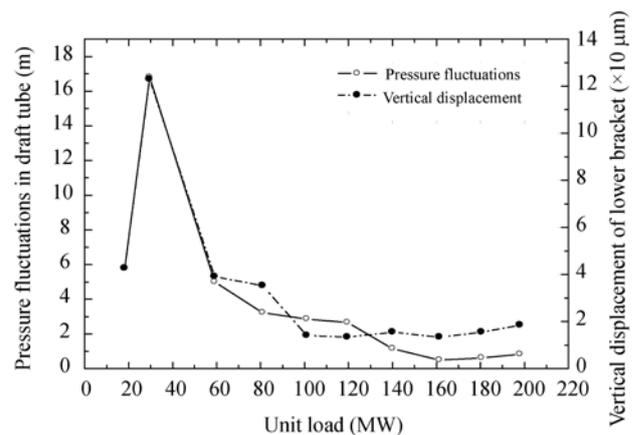


图 4 万家寨 5 号机组 68 m 水头下尾水脉动与推力轴承处垂向振动位移随负荷变化

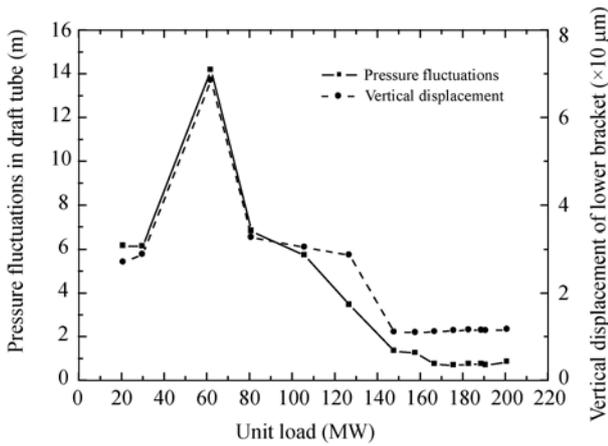


图5 万家寨5号机组75.5 m水头下尾水脉动与推力轴承处垂向振动位移随负荷变化

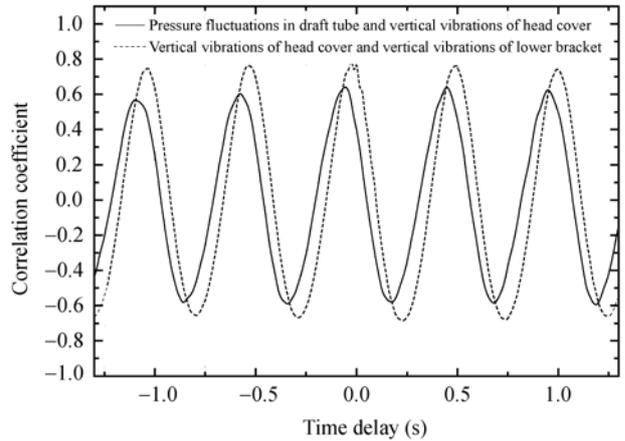


图6 水压脉动与机组垂向振动相关系数

关系系数最大值为0.6530, 时间延迟 $\tau$ 等于-0.054 s; 顶盖垂向与推力轴承垂向振动相关系数最大值为0.7910, 时间延迟 $\tau$ 为-0.026 s. 从时间延迟上还可以看出压力脉动先于顶盖垂向振动, 而顶盖垂向振动又先于推力轴承的垂向振动, 即振动是由顶盖通过水轮机主轴、发电机主轴传导到推力轴承下机架结构, 说明压力脉动是振动的来源.

距尾水进入门1 m 机坑处噪声的变化规律也与尾水管水压脉动规律极其相似, 低负荷较大, 水头越高, 超过标准95 dB的区域越宽. 水导摆度及机架的水平向振动的变化趋势与尾水管水压脉动、噪声以及顶盖垂直振动有所不同, 摆度值在高水头工况有比低水头工况小的趋势, 总体上与水头和负荷关系不大, 机械因素可能是水平向振动和摆度较大的主要原因. 因此运行区按8 m 水压脉动等值线作为禁止运行区的边界, 并根据高效运行要求合理延长至50 m 水头段. 过渡运行区和安全运行区的边界以叶片进口边背面初生空蚀线为基准绘制. 过渡运行区水压脉动较大, 机组不宜长期运行. 而稳定运行区效率高, 机组运行稳定. 图7为万家寨5号机组运行区划分结果.

万家寨2号机组由另一公司设计制造, 与5号机组影响运行稳定性的根本原因相同, 垂向振动及噪音都与尾水脉动变化规律相近, 因此也按照尾水脉动为运行区划分依据, 划分结果如图8所示. 所不同的是2号机禁止运行区范围较大, 在此区运行时, 导叶与转轮动静干涉、叶道涡等与引水系统水体整体或局部水体互相作用形成强水压力脉动区, 并且随着

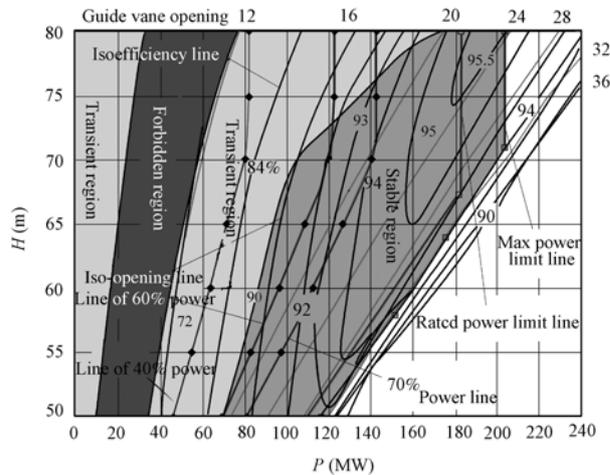


图7 万家寨5号水轮机运行区划分图

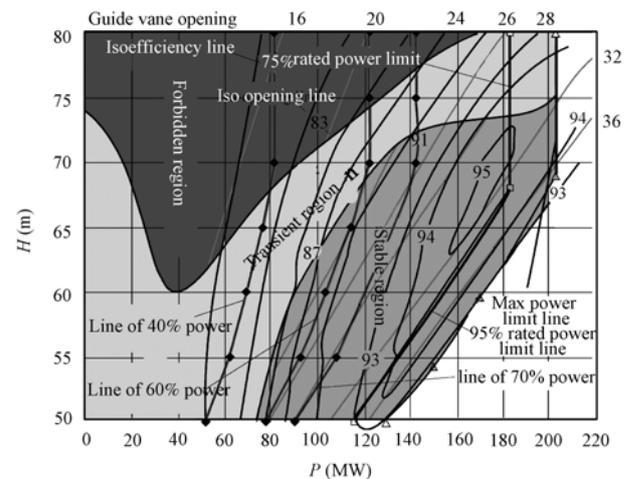


图8 万家寨2号水轮机运行区划分图

水头的升高, 水压脉动越强烈.

据电厂运行人员介绍, 机组以前在禁止运行区运行时, 感觉振动很大, 恶劣的工作环境常使人感到很不舒服甚至恐惧. 而按照以上运行区运行, 机组在稳定运行区内运行可以明显感觉到电站振动很小, 对电厂运行人员的健康与工作环境影响不大.

从以上两种机型的运行特性曲线上可以看出 2 号机的最优效率区在电站额定水头 68 m 附近, 5 号机的最优效率区高出机组的最高运行水头, 按照水轮机常规的设计选型思想, 2 号水轮机选型比 5 号机选型更合理. 但从运行区的划分结果来看, 5 号机的禁止运行区范围远小于 2 号机的禁止运行区范围, 从实际运行情况来看 5 号机运行稳定性也优于 2 号水轮机, 转轮叶片裂纹程度也较 2 号机轻. 从水力设计思路分析, 机组的综合运行稳定性与水头的变幅与设计水头的比值有关, 该值越小越有利于电站的安全运行, 万家寨机组的水头变幅达 30 m, 按照 2 号机设计水头 67.70 m 计算, 比值为 0.44, 按照 5 号机的设计水头 81.19 m 计算, 比值降低至 0.37, 对此本文仅提供一个思考, 说明设计水头的选取对运行性能是有很大影响的.

### 3.2 轴流式水轮机运行区划分研究

在水口水电站机组的长期在线监测与流场、结构计算分析的基础上, 对机组运行状态进行综合评定, 根据振动、摆度、桨叶扭矩和关键部件静动应力、疲劳寿命等关键指标的分析, 开展了水口水电站 1 号和 3 号机组的运行区划分研究. 在线监测系统布置情况如图 9 所示.

对长期在线监测获得的数据进行分析, 图 10 和 11 为两种水头下, 水口 1 号机组振动与脉动随负荷的变化情况.

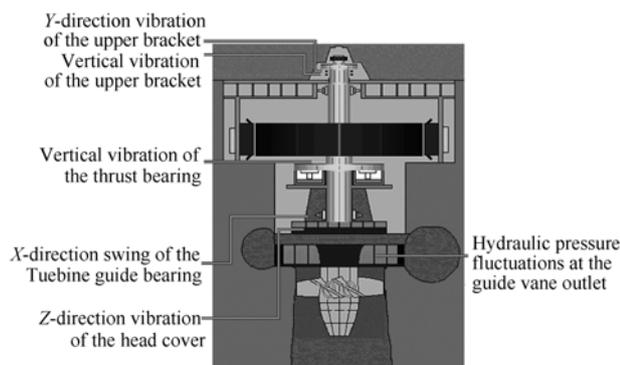


图 9 水口水电站轴流机组在线监测系统

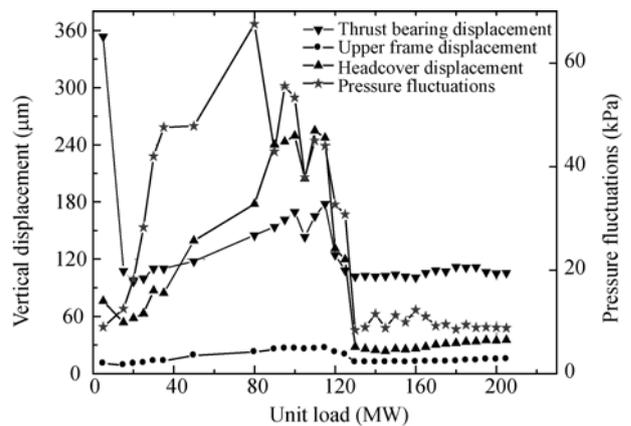


图 10 水口 1 号机 58 m 水头脉动与垂向振动随负荷变化

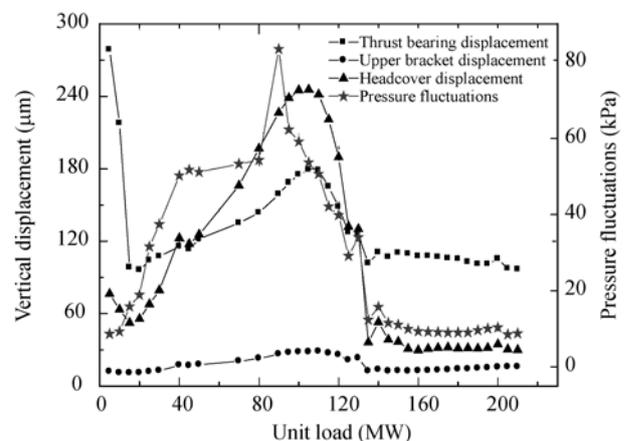


图 11 水口 1 号机 62 m 水头脉动与垂向振动随负荷变化

变化情况. 可见导叶出口压力脉动与水平振动、摆度及垂向振动随负荷的变化基本相似. 对所有运行水头下测试数据的相关性分析也表明(图 12~15)导叶出口压力脉动与摆度、振动数据相关性较好. 因此, 主要以导叶出口压力脉动等值线(图 15)为划分运行区的一个依据. 与混流式机组不同, 轴流转浆机组水压力脉动幅值绝对值较小. 由于只获得了部分运行区的测试结果, 所以需要仿真计算来补充分析.

针对水口轴流转浆机组进行动应力分析与疲劳寿命分析. 动应力的分析步骤为: 先进行机组从蜗壳进口至尾水管出口的全流道非定常流场计算, 获得整个流道流固耦合面的动荷载情况, 再将此动荷载施加到叶片有限元模型上进行瞬态计算. 作者应用该方法对多个原型电站进行了计算, 流体计算得到的尾水管脉动压力幅值及主频与电站原型观测基本一致, 计算所得的动应力主频与转轮叶片表面的压力

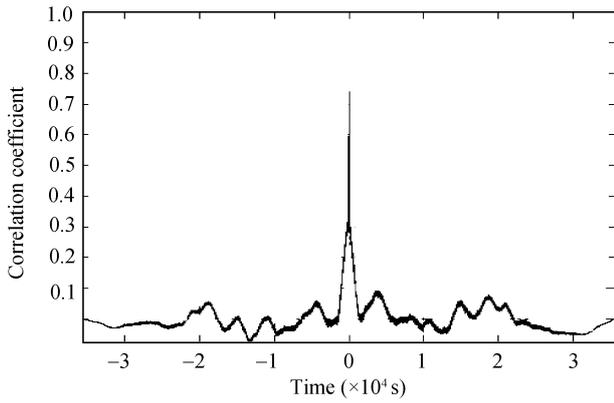


图 12 导叶出口水压力脉动与顶盖 z 向振动相关系数

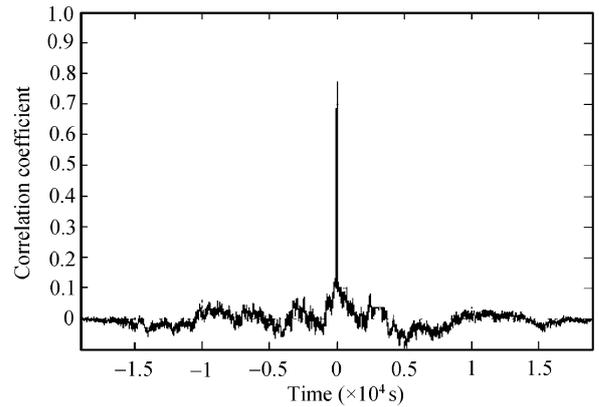


图 14 导叶出口压力脉动与水导 x 向摆度相关系数

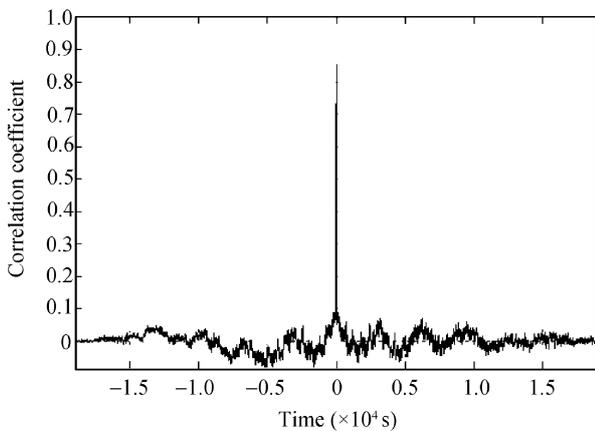


图 13 导叶出口压力脉动与上架架 y 向振动相关系数

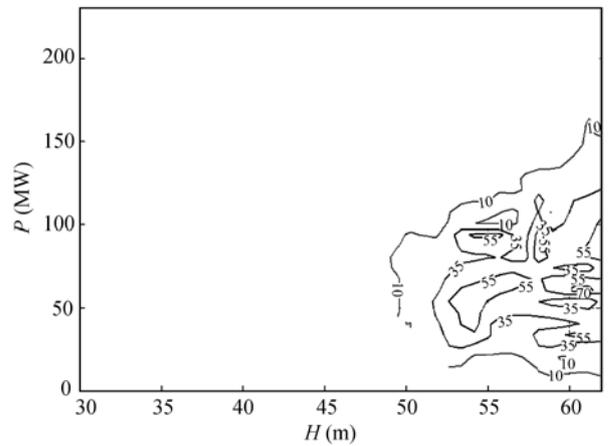


图 15 水口 1 号机导叶出口压力脉动等值线

脉动主频一致, 与尾水管内低压涡带的主频之和或差为 1 倍转频, 这也与电站中实测得到的转轮叶片动应力频率特性一致<sup>[8]</sup>。

疲劳寿命分析是在以上动应力分析的基础上进行的。由于水轮机疲劳破坏一般属于低周疲劳, 所以采用局部应变法, 综合考虑残余应力、表面状态、载荷类型、缺口、尺寸、材料状态等因素对疲劳寿命的影响, 并结合原型观测疲劳分析数据最终确定疲劳影响系数, 然后根据材料应变-寿命曲线及疲劳损伤累积理论得到疲劳寿命分析结果。活塞杆的疲劳计算显示裂纹起始于卡槽应力集中部位, 与实际情况相符<sup>[9]</sup>。转轮叶片的计算结果显示裂纹起始于叶片根部焊缝处, 向叶片母材延伸, 与实际情况相符<sup>[8]</sup>。

图 16 和 17 分别为桨叶动应力与活塞杆(卡环结构)动应力和疲劳寿命分析结果。可见, 在高水头低负荷区和低水头高负荷区动应力较大, 疲劳计算结果

也表明在这两个区域运行疲劳寿命较短, 尤其在高水头低负荷区。

综合动应力的计算结果发现导叶出口压力脉动 35 kPa 等值线区域内, 桨叶动应力较大, 疲劳计算结果也表明机组在该区内运行时更容易出现裂纹, 疲劳寿命较短。因此以导叶出口压力脉动 35 kPa 等值线作为禁止运行区域边界的依据。由于运行区的划分不仅要从水压力脉动性能、关键位置振动摆度、叶片疲劳破坏、活塞杆疲劳破坏、效率等多方面来综合, 还要考虑到电站的实际运行情况, 调度的便利性及电网的具体要求等综合因素, 所以从偏于安全的角度取平滑过渡连接形成禁止运行区。

在 50~60 m 水头运行范围内取导叶出口压力脉动 10 kPa 等值线上半段作为过渡运行区的边界, 与计算所得的桨叶扭矩 95 t·m 等值线(图 18)相衔接形成过渡运行区边界。采用桨叶扭矩等值线作为过渡

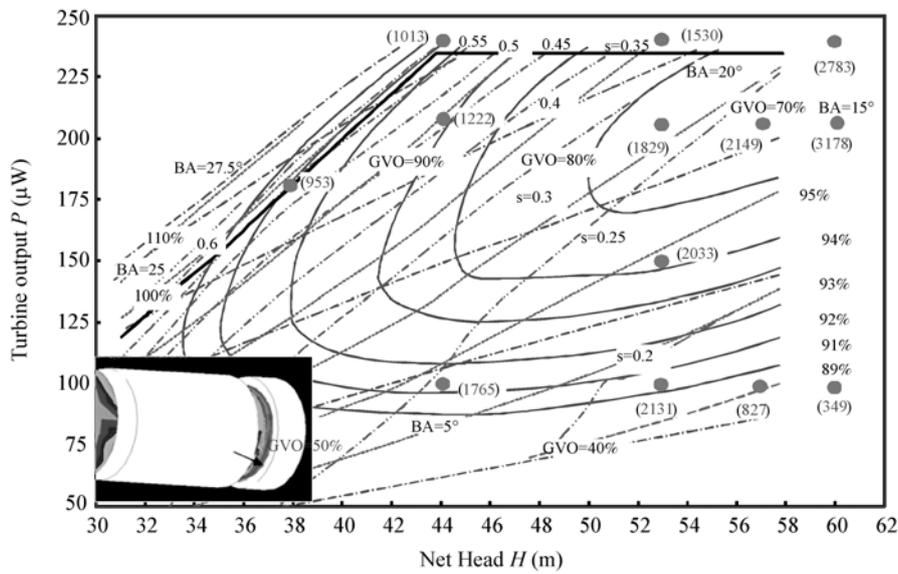


图 16 桨叶等效应力均值及动应力幅值((129.26, 13.95)中前一个数字指应力平均值, 后一个数字指动应力幅值)

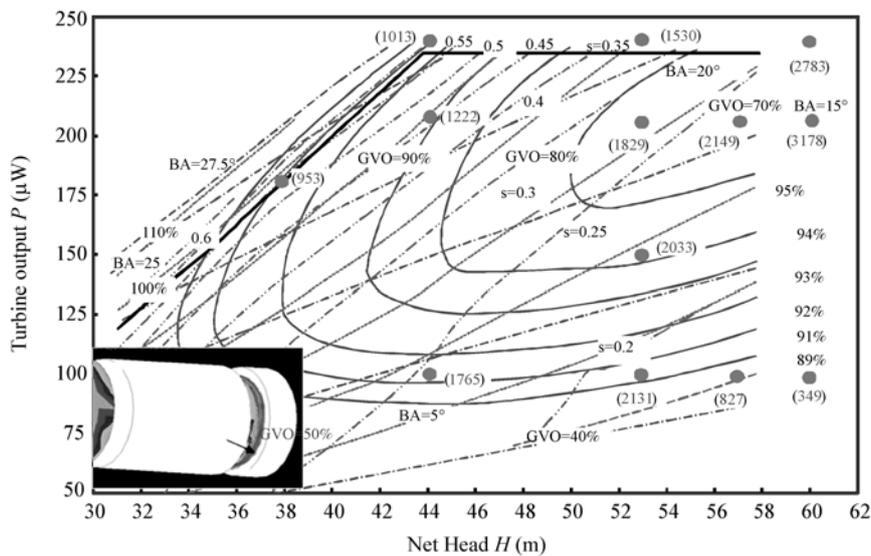


图 17 卡环结构活塞杆疲劳寿命分布图

运行区边界是考虑到较大的桨叶扭矩对枢轴、操作架、活塞杆等机构有较大的影响, 水口电站的活塞杆构件发生过多断裂事故. 在对水口电站的动应力计算中发现除了高水头低负荷区外, 在低水头的高负荷区卡环结构活塞杆的动应力也较大(图 19), 所以也应对该区域内的机组运行进行限制. 该区域的边界由导叶出口压力脉动 13 MPa 等值线作为控制依据形成低水头高负荷过渡运行区边界. 图 20 为水口 1 号

机组运行区划分结果.

同理对 3 号机组进行运行区划分, 须指出的是水口水电站 7 台机组虽然水轮机型号完全相同, 但由于水轮机组运行的复杂性, 制造、加工、安装上的细微差别都可能引起机组运行上的差别, 比如水封间隙的不均可以引发机组极大的水力不平衡振动. 实测的水口 1 和 3 号机的运行安全性上就存在差别, 与 1 号机的运行区相比将 3 号机的禁止运行区范围向下扩大(图 21).

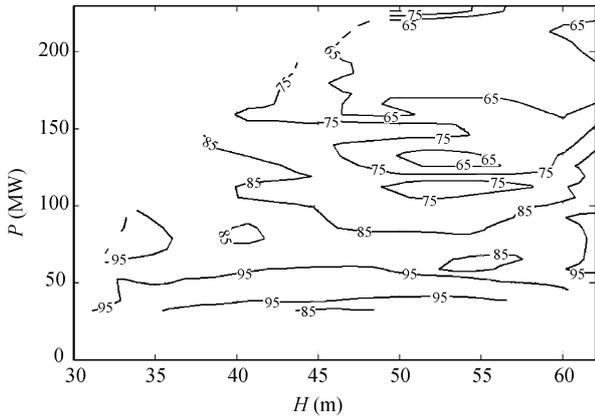


图 18 桨叶扭矩等值线仿真计算结果等值线

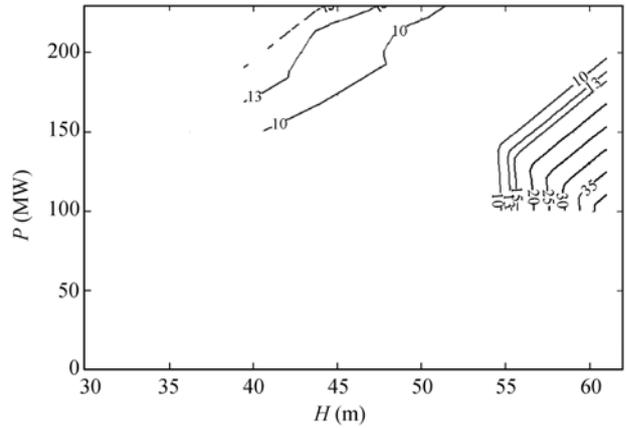


图 19 卡环结构活塞杆动应力仿真计算结果等值线

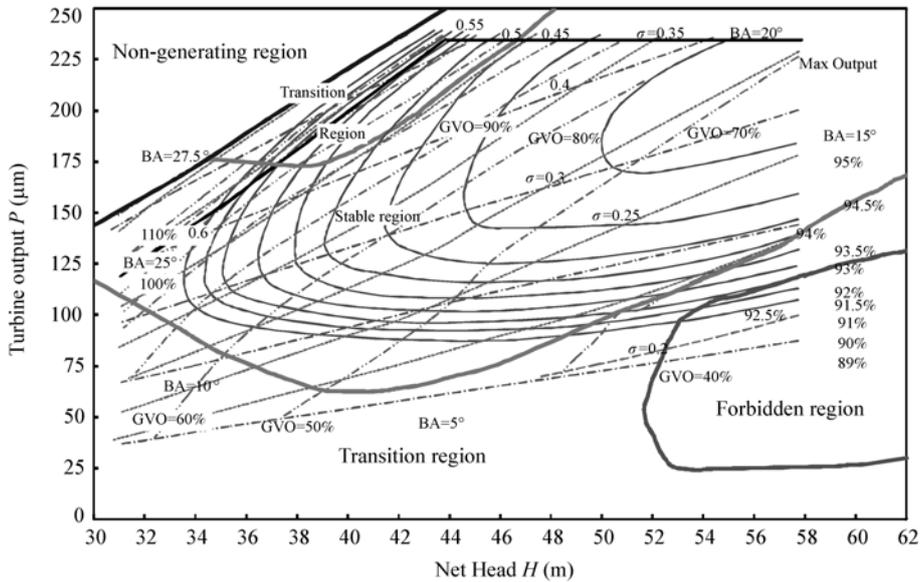


图 20 水口 1 号机运行区划分图

#### 4 总结

(1) 本文分析总结了影响机组安全运行的内在原因, 分析了体现运行安全性的关键指标参数.

(2) 对于万家寨水电站两种不同型式的混流式机组, 通过电站实测与流场和动力特性理论分析, 找到影响机组运行安全性的最关键因素为尾水管内涡带引起的水压力脉动, 通过绘出尾水管内水压力脉动等值线和综合考虑空化、振动、效率等因素确定了机组的运行区.

(3) 对于水口水电站轴流转浆机组, 通过流场和

关键部件动应力计算分析, 以及大量的现场实测数据分析, 采取以活塞杆等关键部件动应力和疲劳寿命为控制量, 再综合考虑振动、效率等因素绘制了机组的运行区.

(4) 机组运行在过渡运行区和禁止运行区时, 存在不同程度的空蚀和振动, 应使机组尽量在安全区运行, 少在过渡区运行, 严格避免在禁止区运行. 实践证明根据划分的运行区运行后, 明显改善了电站机组的运行性能, 提高了机组的运行效率, 得到电站运行人员的高度认可, 为合理调度与优化运行打下了坚实的基础.

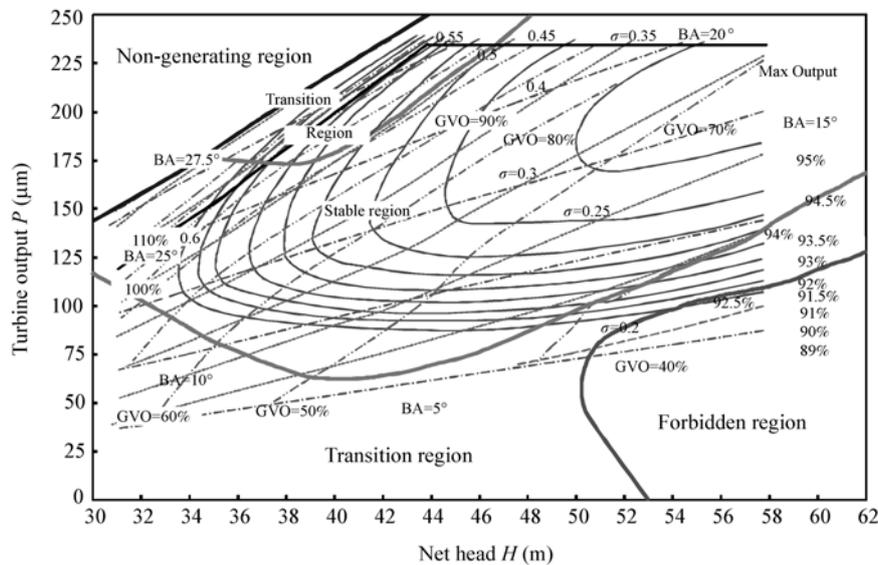


图 21 水口 3 号机运行区划分图

(5) 本文提出的运行区划分方法采取了具体电站灵活分析的原则. 可以看出同一个电站的不同机型运行区有明显的差别, 即使是同一个电站同一种机型, 运行区也有所区别, 充分体现了水力诱导的结构问题的复杂性. 这些研究工作将为其它电站划分运行区提供借鉴, 具有很强的工程应用和理论分析

意义.

(6) 在后续其他电站机组运行区研究中, 将逐步总结特定机组运行区划分中各种影响因素的权重, 并对不同电站不同机型的划分原则进行深入分析总结, 研究通用性划分依据及特定机组的特定参数划分原则.

## 参考文献

- 1 王泉龙. 浅谈水轮机振动的研究. 大电机技术, 2001, (7): 12-14
- 2 唐卫平. 五强溪水电厂机组的振动状况及初步试验结果. 华中电力, 1999, 12(5): 42-44
- 3 Suzuki T, Nagafuji T, Komiya H, et al. Flow behavior around stayvanes and guidevanes of a Francis turbine. J Fluid Eng, 1996, 118(1): 110-115
- 4 Bajic B. Multidimensional diagnostics of turbine cavitation. J Fluid Eng, 2002, 124(4): 943-950
- 5 张东胜. 赴吉尔吉斯斯坦国 Toktogul 水电厂考察报告. 青海电力, 1999, (2): 9-14
- 6 王正伟, 周凌九, 黄源芳. 尾水管涡带引起的不稳定流道计算与分析. 清华大学学报, 2002, 42(12): 1647-1650
- 7 Wang Z W, Zhou L J. Simulations and measurements of pressure oscillations caused by vortex ropes. J Fluid Eng, 2006, 128(4): 649-55
- 8 Zhou L J, Wang Z W, Xiao R F, et al. Analysis of dynamic stresses in Kaplan turbine blades. Eng Comput, 2007, 24(8): 74-762
- 9 Wang Z W, Luo Y Y, Zhou L J, et al. Computation of dynamic stresses in piston rods caused by unsteady hydraulic loads. Eng Failure Anal, 2008, 15(1-2): 28-37