

三峡机组活动导叶表面空蚀的数值研究

Numerical Research on the Guide Vane Surface Cavitation of the Three Gorges Unit

彭玉成, 石高明

华中科技大学能源学院

摘要：针对三峡电站机组发生在活动导叶表面的空蚀现象，采用流体动力学的数值方法研究了活动导叶表面的压力分布特征。首先，给出了基于 RANS 的计算结果，发现在正常情况下，活动导叶表面不可能发生空蚀，这也与设计理念相吻合；其次，在 RANS 结果的基础上，给出了基于 LES 的计算结果，发现表面的微小凸起会导致空化的发生，同时也使得表面的压力脉动幅值非常高，除了产生的空化会进一步破坏表面以外，这也会加剧活动导叶表面的疲劳破坏。

关键词：活动导叶，空化，STAR-CD，数值仿真

Abstract: The pressure distribution on the guide vane surface of the Three Gorges Unit is researched using CFD method for the consideration of cavitation appeared on the guide vane surface. At first, computational results using RANS are given out and these results show that cavitation should not appear under normal circumstances which agree with the design concept. Secondly, computational results using LES are given out together with the RANS results. The LES results indicate that the micro-convex on the surface may lead to cavitation. At the same time, the amplitude of pressure fluctuation is very high, which will result in further damages besides that due to the cavitation.

Key words: guide vane, cavitation, STAR-CD, numerical simulation

1 引言

三峡左岸电站 ALSTOM 机组 11F 和 VGS 机组 9F 的活动的导叶负压面存在不同程度的侵蚀。其中 11F 的活动导叶负压面有大面积锈蚀，呈点或片状，有明显凹凸感。用丙酮清洗除锈，显示该部位表面粗糙，见图 1。10F 活动导叶存在类似的现象，5F、6F、13F、14F 活动导叶也有轻微的表面浸蚀现象存在。另外，11F 转轮叶片上也有两处锈蚀。

9F 的活动导叶负压面表面油漆基本脱落，转轮表面油漆也基本脱落。但 9F 与 11F 有很大的不同，9F 主要是在导叶表面的中上部分布大小不一的麻坑，而且在麻坑的尖端有高温烧蚀的现象（发蓝），见图 2。在 VGS 的其它机组也发现了同样的情况，但要比 9F 轻得多。

为了研究上述现象发生的原因，本文结合机组实际运行工况，采用 STAR-CD 求解器^[1]给出了基于 RANS(Reynolds-Average Numerical Simulation)和 LES(large-eddy simulation)的流体动力学的数值分析结果。



图 1. ALSTOM 机组 11F 活动导叶负压面浸蚀区域 图 2. VGS 机组 9F 活动导叶浸蚀部位高温现象

2 基于 RANS 的稳态数值分析

2.1 计算域与空间离散

计算域包括从蜗壳进口到尾水管出口在内的过流通道。图 3 为整个计算域的空间造型,其中为显示清晰将部分区域设置为半透明,右上角为转轮造型。

为了对过流通道内的流动进行数值解析,将图 3 中的计算域离散成 1850760 个六面体网格单元,图 4 为整个计算域的网格,图 5 为固定导叶、活动导叶及转轮部分的网格局部放大。

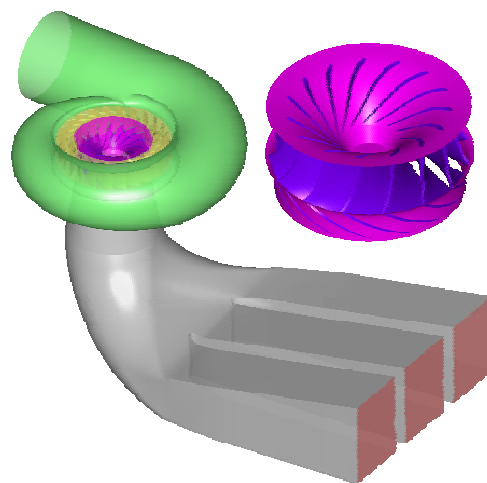


图 3. 计算域整体造型

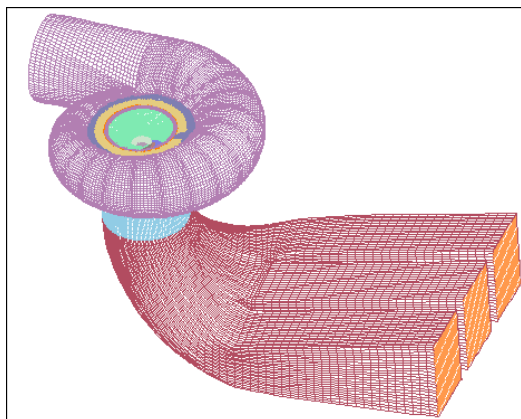


图 4. 蜗壳的网格

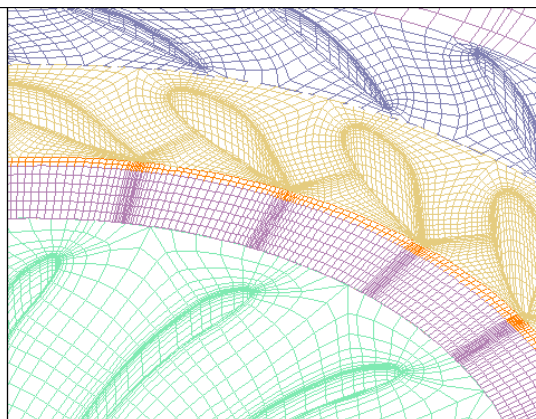


图 5. 固定导叶和活动导叶的网格

2.2 计算工况与边界条件

根据投产以来机组实际运行的情况,本文对表 1 中所示的工况点进行计算,其中效率根据 ALSTOM 真机运转特性曲线确定。

表 1. 计算工况

开度(%)	出力(MW)	效率(%)	上游水位(m)	下游水位(m)	转速(rpm)
86	560	94	138	65	75

结合表 1 中的数据,并考虑到从引水管路到蜗壳进口处的沿程损失,根据下述(1)式和伯努利方程^[2],可以得到表 2 所示的计算边界条件与参考压力。

$$\eta = \frac{P}{\rho g q_v H} \quad (1)$$

上式中, η 表示效率, P 表示机组出力, ρ 表示水的密度, g 表示重力加速度, q_v 表示体积流量, H 表示水头。

表 2. 计算边界条件与参考压力

叶轮转速(rpm)	蜗壳进口流量(m ³ /s)	蜗壳进口处参考压力(Pa)
75	845.51	859391.61

2.3 宏观的计算结果

对计算结果进行分析,可以得到表 3 中的统计结果。与表 1 中的数据比较,可见计算结果与实际情况接近。水头根据文献[3]计算,计算区域从蜗壳进口到尾水管出口。

表 3. 宏观计算结果

动水头(m)	静水头(m)	总水头(m)	轴功率(MW)	效率(%)	轴向力(kN)	径向力(kN)
1.27	72.28	73.55	564.42	92.09	12959.81	208.84

2.4 压力与速度分布

图 6 显示了活动导叶负压面及座环处的绝对压力分布,其中以不同的颜色对应不同的压力,红色区域表示高压,蓝色区域表示低压,具体数值见图中的图例。从图中可以看出,活动导叶表面的最低压力出现在下半部分的出口处,约为 4.5 个大气压,但与汽化压力 2370Pa 相距甚远。

图 7 显示了转轮叶片表面的绝对压力的分布,最低压力出现在转轮叶片的出水边,此处的压力已经低于汽化压力。

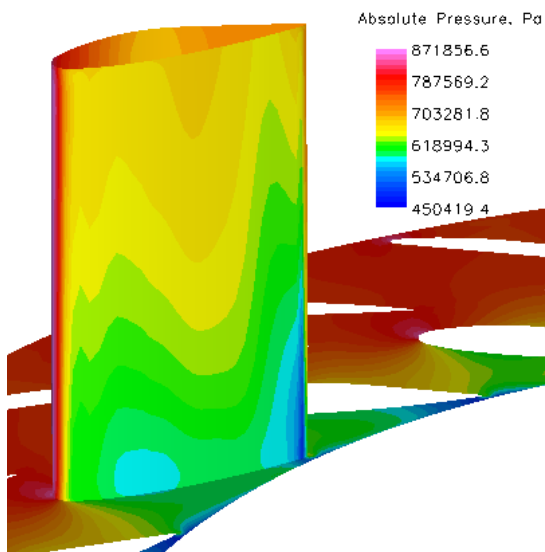


图 6. 活动导叶负压面及座环处的压力分布

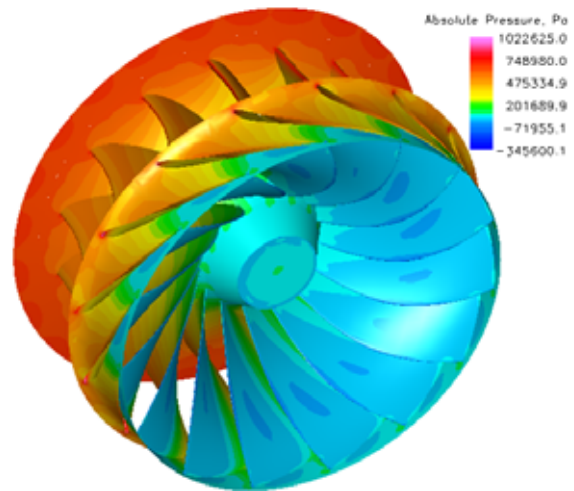


图 7. 转轮叶片的压力分布

综上所述,在所计算的过流通道内,压力最低的位置在转轮叶片的出水边,而且绝对压力已经

低于汽化压力,而活动导叶表面的最低压力约为 4.5 个大气压,过流通道内的其他位置的压力也均高于汽化压力。

因此,在正常情况下,活动导叶表面不可能发生大面积连续区域的空化现象。从实际情况上看,活动导叶表面的浸蚀呈离散的点状分布,因此有可能是局部的表面凸起或凹陷导致的空化。本文也给出了基于 LES 的局部流动特征及其分析。

3 基于 LES 的动态数值分析

3.1 计算域与空间离散

因为只是研究活动导叶表面的局部的细节流动特征,本文以二维的带有微小凸起的平板代替活动导叶表面。图 8 显示了计算域的模型,单位为 mm。图中以 0.5mm 高,5mm 宽的矩形凸台表示活动导叶表面上的微小凸起。图中将凸台放大,为方便后文叙述标注了 4 个监视点和坐标原点。图中的点 P_{ref} 表示压力参考点。

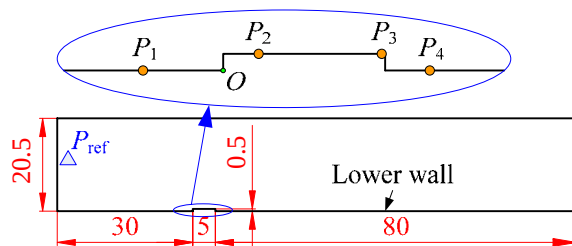


图 8. 计算域模型及监视点位置

图 9 中显示了凸台后缘附近的网格细节。可以看到,为了充分考虑边界层的影响,网格在近壁面附近采用 STAR-CD 的 Embedded refinement^[1]功能进行了特别的加密处理,在近壁面处第一层网格的厚度为 0.005mm。因为是二维问题,在垂直于纸面的方向只有一层网格。参与计算在内的网格总数为 86580。

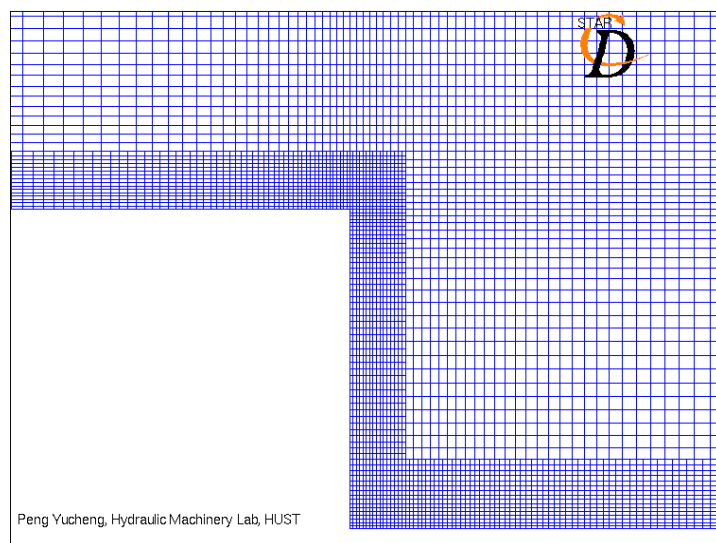


图 9. 凸台后缘区域的网格细节

此外，因为涉及到空化分析，指定压力参考点及压力具体数值很重要。本文中根据上述 RANS 分析的结果来设置进口速度和压力参考值。

3.2 不考虑空化模型的计算结果

图 10 显示了某一时刻凸台的绝对压力分布，其中蓝色的点表示低压，从图中可以看出，在凸台前端处存在一个压力低于汽化压力的区域，表明此处已经发生空化。为了进一步说明空化发生情况，这里引入空化模型再次进行计算。

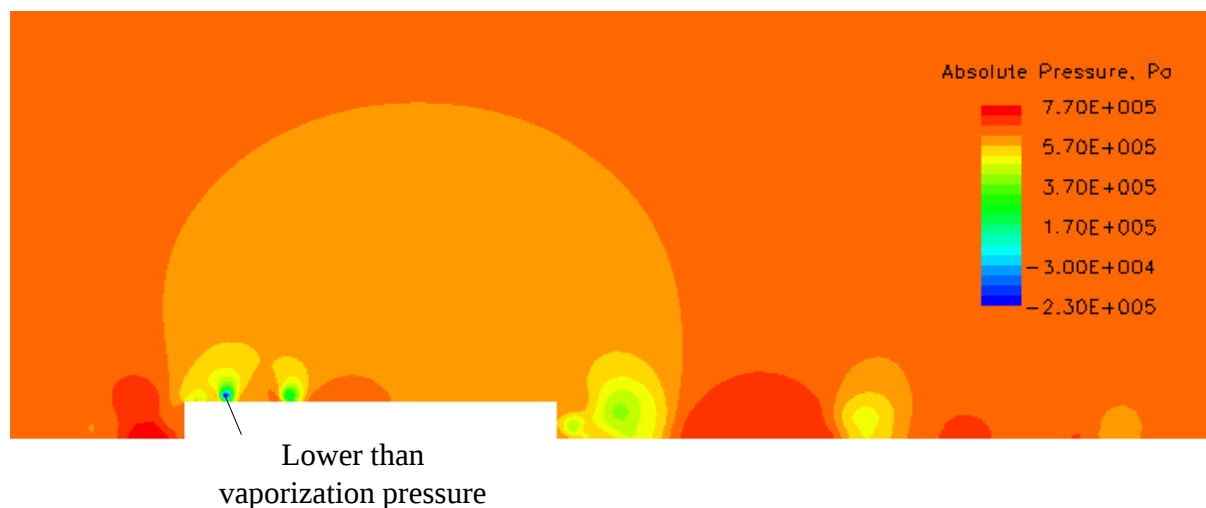


图 10. 某一时刻凸台附近的压力分布

3.3 考虑空化模型的计算结果

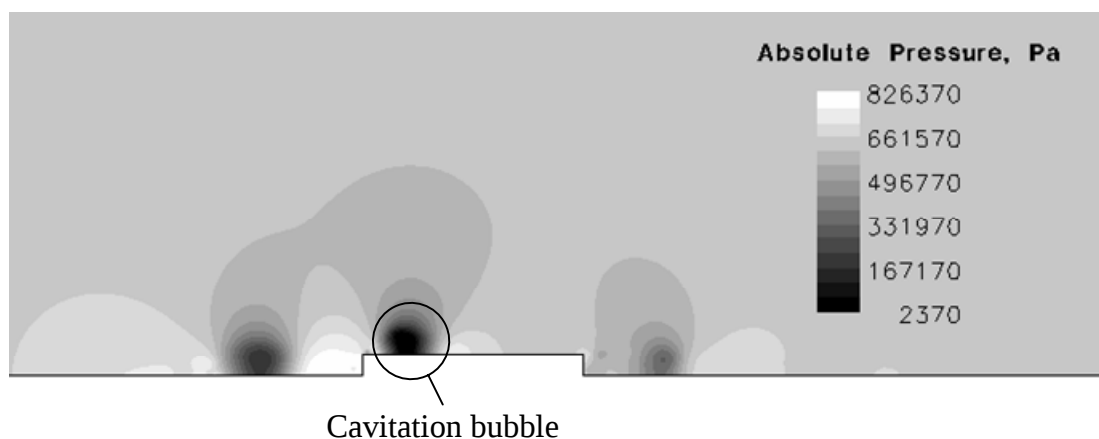


图 11. 引入空化模型后某个时刻的压力分布

图 11 为引入空化模型后，某个时刻流场中的绝对压力分布，可以从图中看到明显的空化区域。对其他时刻的压力分布进行分析，发现不仅仅在凸台前端存在空化，在凸台之前和凸台后端也存在空化。篇幅有限，这里不再给出压力分布云图。

对 STAR-CD 生成的 ecd 文件进行处理，可以获得监视点在每个时间步的速度和压力数据。实际操作中，在凸台壁面附件定义了大量的监视点，对这些数据进行对比分析，发现在整个下壁面上，图 8 中的 P_2 点的压力脉动幅值最大，达到 2.2 个大气压，因此峰峰值达 4.4 个大气压之多，见图 12。

图 12 中，上面的子图为压力随时间的变化曲线，横坐标为时间步，纵坐标为绝对压力值，单位 Pa；下面的子图为压力的频谱图，横坐标（以对数刻度显示）为频率，单位 Hz，纵坐标为幅值，单位 Pa。在频谱子图中，分别用不同的符号标志出了 4 个主要的频率成分，并列出了频率值和对应的幅值。

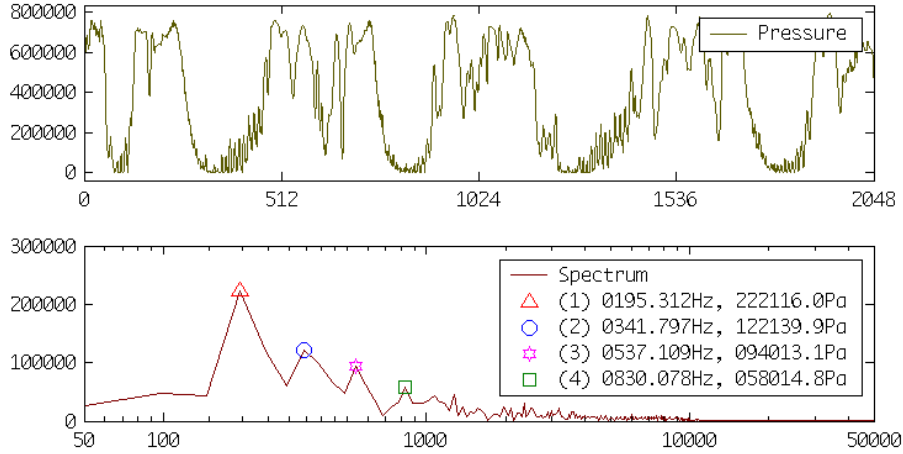


图 12. P_2 点的压力随时间的曲线及频谱

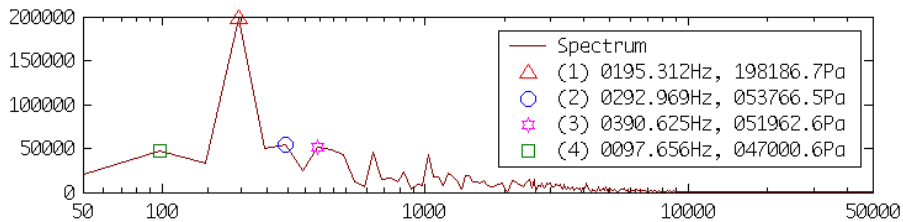


图 13. P_1 点的压力频谱图

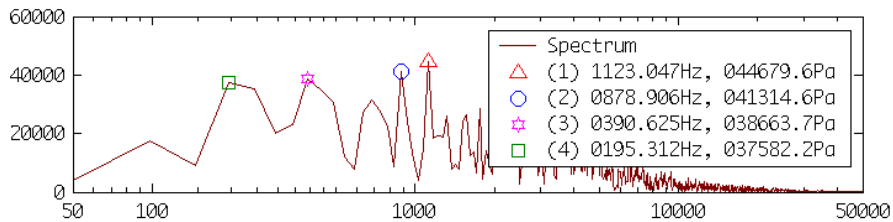


图 14. P_3 点的压力频谱图

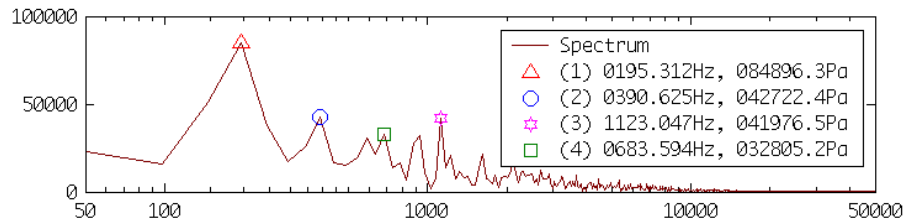


图 15. P_4 点的压力频谱图

图 13 和图 14 分别表示 P_1 和 P_3 点的压力脉动的频谱，在这两个地方均有空化发生。图 15 为 P_4 点的压力频谱，在该点没有发生空化，但压力脉动的幅值及频率是不容忽视的。

4 结论

从三峡水电机组运行实际情况看,在正常工况下,活动导叶表面不会发生传统意义上的空化现象,本文基于 RANS 的流体动力学数值分析也说明了这一点。然而,根据 LES 的动态数值分析表明,活动导叶表面的微小凸起,比如被破坏了的表面涂层等,会导致空化的发生,同时也导致了压力脉动呈现高频率、大幅值的特征,因此,除了空化会对导叶表面产生破坏以外,这种特征对活动导叶表面以及涂层的破坏也是不容忽视的,会加剧活动导叶表面的疲劳破坏,从而导致进一步的侵蚀。

参考文献

- [1] Computational Dynamics Ltd. STAR-CD Documentation.
- [2] 张克危. 流体机械原理. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [3] 彭玉成, 张克危, 陈喜阳. 基于 CFD 数值解析的轴流泵优化设计. 水泵技术, 2005, 5: 24 - 26.