

带有缺陷的轴流水轮机叶片的动力特性分析

孙志斌^{1,2}

(1.江西省水利科学研究院,江西 南昌 330029; 2.江西省水工安全工程技术研究中心,江西 南昌 330029)

摘要: 流体交变载荷产生的动应力是水轮机叶片产生裂纹的重要因素,严重影响了电站的安全生产和机组的稳定运行.本文通过加载交变动应力的瞬态强度分析,研究了缺陷叶片的动应力幅值及缺陷位置处的应力集中现象,量化出缺陷叶片在缺陷处的应力集中数值.本文在对比正常叶片和缺陷叶片之间存在的固有频率差异前提下,通过 CFD 数值计算和 FEM 强度分析,获得了两种叶片出现最大动应力时刻的危险点,并对比了它们动应力幅值差异.

关键词: 轴流叶片;动应力;缺陷;动态特性

中图分类号: TK730.3+23

文献标识码: A

文章编号: 1004-4701(2015)01-0030-05

0 引言

轴流水轮机叶片在运行过程中常受到流场产生的压力、旋转惯性力以及自身重力的共同作用.由于轴流水轮机转轮的设计要求决定了叶片的悬臂梁式结构,因此在工程实践中,分布不均的交变的作用力经常会导致转轮叶片产生裂纹.裂纹是产生疲劳破坏的典型特征^[1],严重影响机组的正常稳定运行.因此,轴流叶片的动应力特性分析对预测电站安全运行具有十分重要的意义^[2].

然而,由于叶片不同部位所受的水压力不尽相同,在以往的强度分析中为了降低计算难度,往往将叶片表面所受水压力近似看作均匀压力或通过经验公式得到近似值,计算结果会产生较大的误差^[3].因此,本文分析流场中的交变载荷产生的动应力对叶片的作用,合理地模拟叶片的受力情况并对有缺陷的轴流叶片做动应力分析,对实际生产具有指导意义.

1 计算方法

1.1 流场分析

水轮机引水部件内部的真实流动是三维粘性不可压缩的非定常水流流动.用 N-S 方程来描述,其连续方

程和动量方程的表达式为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0$$
$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \gamma \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + f_i \quad (1)$$

式中, u_i 为瞬时速度; p 为瞬时压强; ρ 为密度; γ 为流体分子运动粘性系数.当选用与转轮主轴一起旋转的非惯性坐标系来描述相对运动时, u_i 为相对速度,体积力 f_i 表示哥氏力和离心力的影响^[4,5].

1.2 强度分析

结构强度计算的有限元方程为:

$$[M]\{\delta''\} + [C]\{\delta'\} + [K]\{\delta\} = \{Q_c\} + \{P\} + \{R\} - \{F_0\} \quad (2)$$

其中, $[M]$ 为结构质量矩阵, $[C]$ 为结构阻尼矩阵, $[K]$ 为结构刚度矩阵, $\{Q_c\}$ 为结构在原始状态下的离心力载荷向量, $\{P\}$ 为结构表面上的等效节点载荷向量, $\{F_0\}$ 为结构初应力引起的等效节点载荷向量, $\{R\}$ 是节点集中向量力^[6,7].

2 计算分析

本文对某电站的模型机进行了计算分析,该水轮机的协联工况为:单位流量 839.99 L/s,单位转速 133.625 r/min,本研究在协联工况下进行计算分析.本

文通过 UG 软件进行三维实体建模,并利用 ANSYS-CFX 软件,进行全流道三维非定常流体力学分析。

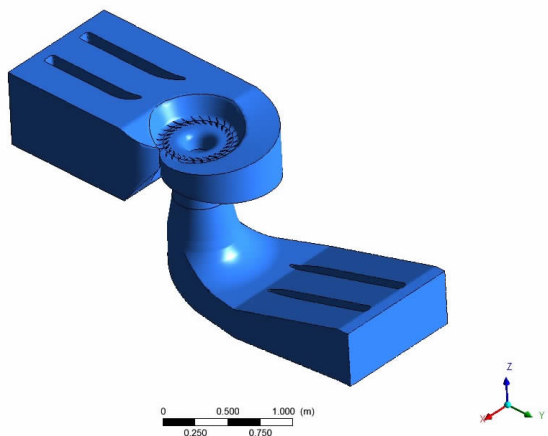
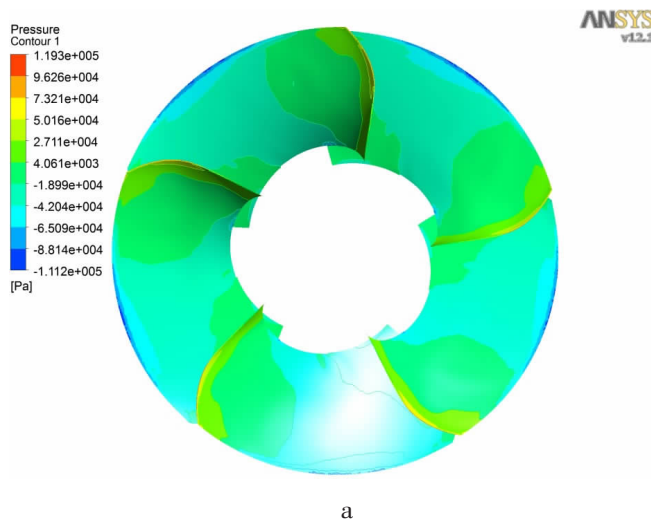


图 1 轴流水轮机全流道模型



a

2.1 流场计算

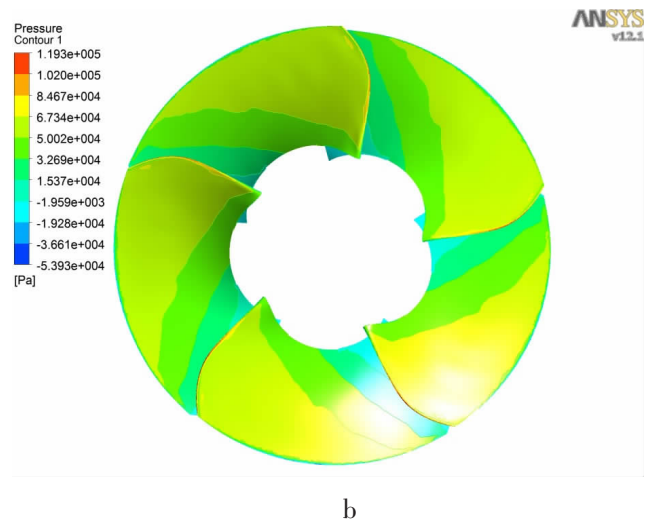
对水轮机进行全流道网格划分,网格划分所采用的技术:采用非结构化网格技术;叶片区域采用局部加密技术,动静部分之间采用 GGI(general grid interfaces)拼接网格技术。流场计算中所取的流场域是从蜗壳进口到尾水管出口的区域。入口边界条件为流速,出口边界条件为压力,给定为一个标准大气压。文中所研究的流动是稳定的绝热不可压缩流动。

通过 CFD 的三维非定常数值计算,取出叶片各点的整周流场压力数据,如图 2 所示。

2.2 刚强度分析

2.2.1 模态分析

选取转轮中的 1 个叶片,利用 ANSYS 软件进行有限体积法的强度计算,叶片几何模型和计算网格如图 3



b

图 2 叶片压力云图(a 为正面,b 为背面)

所示。叶片的物理参数:弹性模量为 300 GPa;泊松比为 0.27;密度为 8 050 kg/m³;重力加速度为 9.81 m/s²;容许应力为 196 MPa;极限破坏应力为 780 MPa。

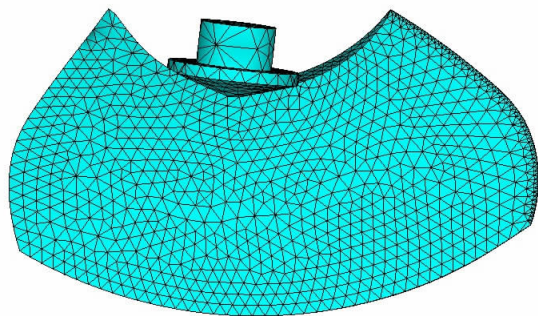


图 3 有限元网格划分

根据某电站水轮机叶片的缩孔实际情况,在叶片内部建立铸造缩孔模型,缩孔为长半轴和短半轴分别为 4mm 和 2mm 的椭球体。分别对正常叶片和有缺陷叶片进行有限元网格划分(见图 3),采用四面体单元,参数如表 1。

表 1 叶片有限元单元节点数对比表

叶片类型	节点数
正常叶片	16 385
缺陷叶片	18 028

叶片约束条件:叶片法兰通过枢轴与转轮连接,刚度很大,作固定端处理,法兰靠枢轴侧面上所有节点均约束为 3DOF。计算后,得到叶片模态分析应变云图如图 4 所示,并取出叶片前 5 阶固有频率如表 2 所示。

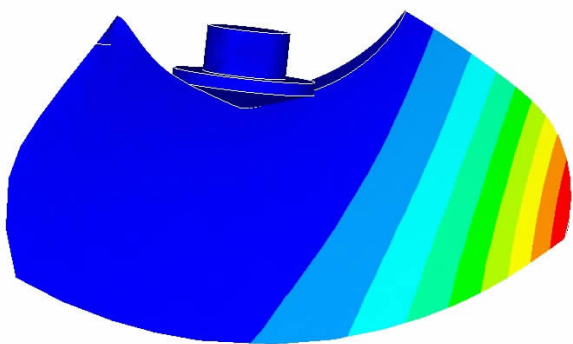


图4 叶片模态分析应变云图

表2 前5阶固有频率对比表

阶数	频率 / Hz	
	正常叶片	缺陷叶片
1	777.1	776.95
2	1 079.6	1 079
3	1 446.7	1 444.9
4	1 721.1	1 712.7
5	1 909.7	1 909.3

2.2.2 叶片的动态特性分析

从流场分析中非定常数值计算提取出动荷载,按单位时间步长加载到有限单元节点上。

$$\text{单位步长} = \frac{2\pi}{\omega \cdot 360} = 0.000\ 157\ 247$$

除此之外,水轮机叶片在运行过程中,还要承受旋转惯性和叶片结构本身的自重。其中旋转惯性力可以通过施加旋转角速度实现。

如图5所示,FEM的瞬态计算结果分别找出了两种叶片的最大应力点,都位于叶片出水边上端面和法兰

相接的地方。

由于叶片最大应力点前320步的应力值都在4~40MPa之内,最大应力都出现在后40步,所以对比后40步的应力值如图6所示。

表3 两种叶片的应力幅值对比表

叶片类型	最大应力值 / MPa
正常叶片	79.798 8
缺陷叶片	107.897

由表3可见,缺陷叶片相对正常叶片的动应力峰值有35.2%的提升。

通过取同一位置处的节点的最大应力值,对比缺陷叶片的缩孔位置处的应力集中情况(见图7)。

显然,缺陷叶片的缩孔对叶片产生了一定的应力集中。

3 结果分析

3.1 流场分析结果

从图2、图3所示的叶片正背面水压力分布图中可以看出,叶片正背面水压力的最大值和最小值分别出现在进水边和出水边靠近轮毂的部位,且从进水边到出水边由正压到负压逐渐变小。

3.2 强度计算结果

(1)由于有缩孔的存在,有缺陷叶片的固有频率比正常叶片的固有频率要稍小一些但差值不大,可忽略不计,这就说明,缩孔、砂眼等铸造缺陷在固有频率这一项参数上的差异性不明显。

(2)通过动态特性分析可以发现,轴流叶片的最

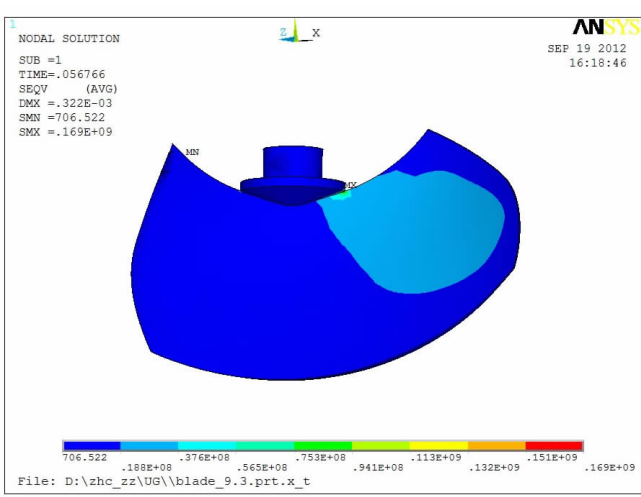
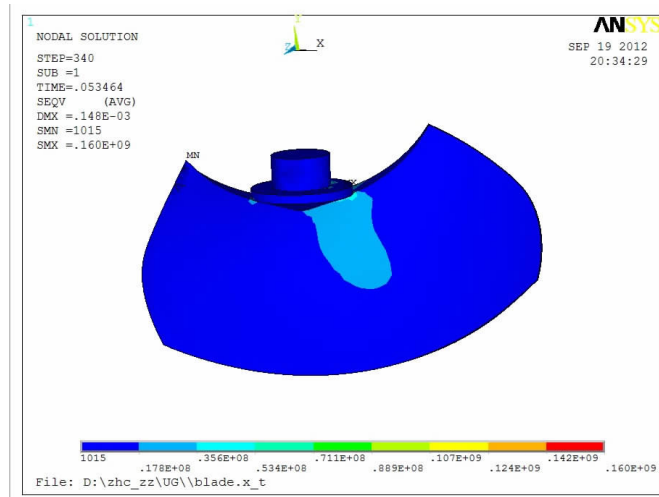


图5 最大动应力时刻应力云图(左为正常叶片,右为缺陷叶片)

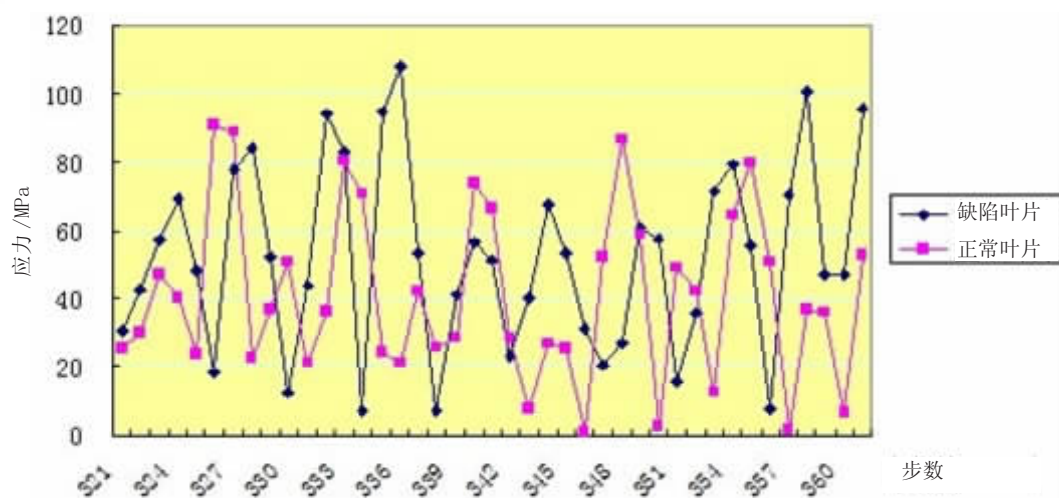


图6 两种叶片320~360步的动应力值

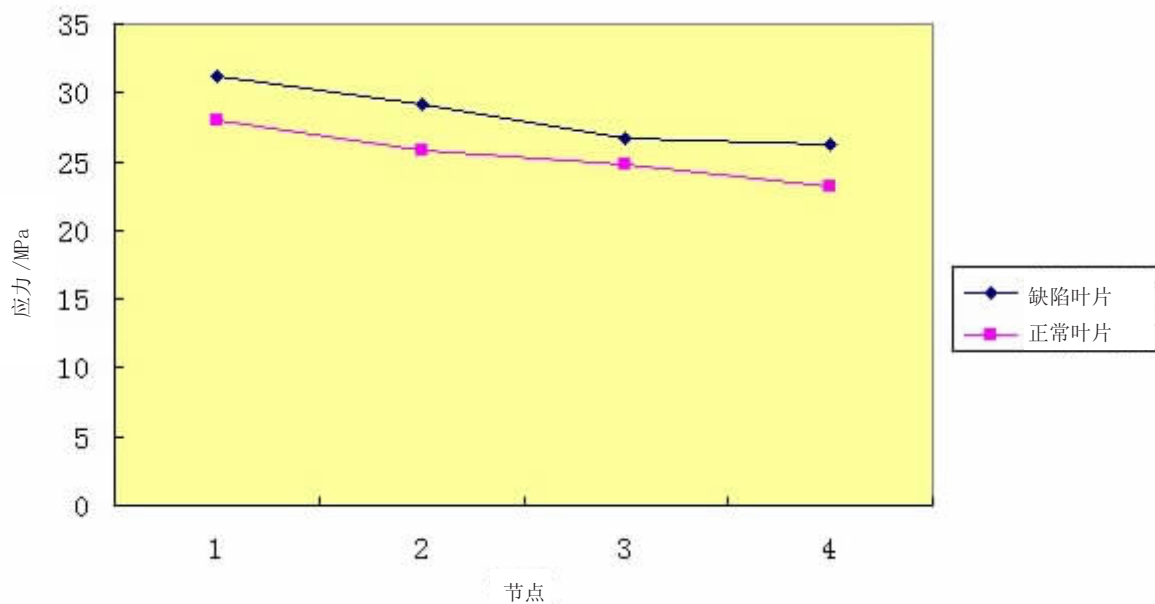


图7 缺陷位置处的节点应力幅值

危险部位,即最大动应力点位于叶片出水边上端面和法兰相接处,这与以往电站的叶片断裂位置相符。这是由于轴流叶片的特殊悬臂梁结构,使得约束集中于枢轴处,极易造成叶片和枢轴的连接处的应力幅值偏大,这也是叶片在设计 and 铸造过程中需要考虑到的强度问题^[8]。

(3)对比正常叶片和缺陷叶片的最大应力点幅值时刻的应力云图(图5)和最大动应力节点的应力值(图6)可以看出,缺陷叶片的最大应力点的应力幅值比正常叶片高出35.2%,另外,缺陷叶片在20~40 MPa的应力偏大区域面积要明显比正常叶片的要大,并有向叶片尾部延伸的趋势。

(4)缺陷位置附近节点动应力幅值对比图(图7)表明:在缺陷位置处明显会产生一定程度的应力集中,应力提升程度大概在11%左右,虽然幅值不是非常高,但由于其交变的频率较高,长时间动载荷的交替冲击也会对叶片造成疲劳破坏^[9]。

4 结语

本文通过加载交变动应力的瞬态强度分析,研究了某模型水轮机的全流道三维非定常湍流数值计算,量化出缺陷叶片在缺陷处的应力集中数值。通过FEM强度分析,获得了两种叶片出现最大动应力时刻的危险点

和动应力幅值差异性。因此,轴流叶片的动应力特性分析对预测电站安全运行具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] 米毓德.混流式水轮机转轮疲劳设计方法的研究[J].大电机技术.1991(01).
- [2] 罗永要,王正伟,梁权伟.混流式水轮机转轮动载荷作用下的应力特性[J].清华大学学报(自然科学版),2005(2):235-237.
- [3] 薛伟,陈昭运.水轮机叶片裂纹原因及预防措施研究[J].大电机技术,2002(5):42-45.
- [4] 郑小波,罗兴铸,郭鹏程.基于 CFD 分析的轴流式叶片动应力问题研究

- [J].水力发电学报.2009(03).
- [5] 徐斌.混流式水轮机转轮流固耦合的动力特性分析[D].西安:西安理工大学,2006.
- [6] 郑小波,罗兴铸,郭海军.基于 CFD 分析的轴流式转轮叶片刚度分析[J].水力发电学报,2006,25(5):121-124.
- [7] 商威,廖伟丽,郑小波.考虑流固耦合的轴流式叶片强度分析[J].河海大学学报(自然科学版),2009(4):441-445.
- [8] 潘罗平等.迪什林水电站转轮动应力测试及裂纹原因分析[J].大电机技术,2008(6):36-40.
- [9] SAEED M.Finite element analysis:theory and application with ANSYS[M].Upper Saddle River,NJ:Prentice Hall.2003.

Dynamic behavior analysis of axial-flow turbine blades added dynamic stress

SUN Zhi-bin^{1,2}

(1. Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China;

2. Jianagxi Provincial Research Center on Hydraulic Structures, Nanchang 330029, China)

Abstract: The dynamic stress produced by fluid alternating load is the important factor of appearing blade cracks, which seriously affected the station safety and the stable operation of the unit. Based on analyzing the transient intensity of loading alternating dynamic stress, the dynamic stress amplitude of the defect blade and stress concentration phenomenon of defect location are studied. The stress concentration values of the defects at the defect turbine blade is calculated. Based on comparing the natural frequency difference between normal blade and defect blade and through CFD numerical calculation and intensity analysis of FEM, the dangerous points of maximum dynamic stress on this two kinds of blades appeared and the dynamic stress amplitude difference between them is compared.

Key words: Axial-flow turbine blade; Dynamic stress; Defect; Dynamic behavior

编辑:张绍付

(上接第 26 页)

4 结语

本文运用微积分和泰森多边形理论,结合现有水文(水位)站数量和分布、鄱阳湖湖盆特征和不同时期水情特点,研究鄱阳湖水文(水位)站分区水位与面积、水位与容积关系,推求星子站动态水位对应的鄱阳湖区

面积、容积,开展湖泊动态水位~面积、水位~容积理论研究和实践。此研究成果将在湖泊研究、植被调查、生态保护、鄱阳湖生态经济区建设中得到广泛应用。同时,随着水位观测资料的延长,水文站网的加密,鄱阳湖水位~面积、水位~容积关系成果将更加真实可靠。通过此项研究,为我国大湖水域建立动态水位~面积、水位~容积关系提供科学方法。

Study on the relationship between dynamic level-area and level-volume of Poyang Lake

LI Guo-wen, YU Zhong-wen, CHEN Jia-lin

(Jiangxi Provincial Hydrology Bureau, Nanchang 330002, China)

Abstract: The establishment of dynamic level-area and level-volume is proposed in this paper. Aimed at water difference produced by different water regime changes, using calculus and Thiessen polygons theory, combined with the existing hydrologic (water level) stations' quantity and distribution, Poyang Lake basin characteristics and hydrologic characteristics in different periods, the relationship of hydrologic (water level) stations' partition table and area, water level and volume of Poyang Lake is studied. The theoretical study and practice of the relationship of Poyang Lake region dynamic level-area and level-volume are made.

Key words: Poyang Lake; Dynamic; Water level; Area; Volume; Research

编辑:刘颖