

基于 ANSYS 的水轮机转轮流固耦合分析

李海亮, 严锦丽*, 王旭峰

(浙江富春江水电设备股份有限公司, 浙江 杭州 310013)

摘要: 为了得到水体作用下的混流式水轮机转轮的应力分布规律和变形特征, 应用 ANSYS 有限元分析软件, 采用流固耦合分析方法对某混流式水轮机转轮进行了分析。通过建立全流道分析模型, 得到了转轮叶片上准确的水压力分布。将流场计算结果应用到结构场中, 对转轮不同工况下的刚、强度进行了计算, 得到了转轮精确的结构应力和变形。计算结果表明, 该转轮在水体作用下最大应力值小于材料许用应力, 能够满足强度设计要求; 变形量小于设计预留间隙值, 保证了转轮在运行时不会与止漏环内表面刮擦, 从而引起止漏环脱落; 转轮部件的应力数据对准确评估转轮使用寿命具有一定的实际意义。

关键词: 混流式水轮机; 转轮; 流固耦合; 有限元; ANSYS

中图分类号: TH114; TK703.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)09-1093-04

Fluid structure coupling analysis of turbine runner based on ANSYS

LI Hai-liang, YAN Jin-li, WANG Xu-feng

(Zhejiang Fuchunjiang Hydro-power Equipment Co., Ltd., Hangzhou 310013, China)

Abstract: In order to gain the stress and strain distribution of the francis-turbine runner in water, the fluid-solid coupling method was used to calculate characteristic of francis-turbine runner by ANSYS software. Through the establishment of full flow channel model, the precise hydraulic pressure distribution of blades was obtained. The results of flow field were applied in the structure field, the stiffness and strength of runner under different conditions were calculated, the runner's precise structure stress and deformation were obtained. The computational results show that the maximum stress of runner is less than the allowable stress of the material in water, it meets the strength requirement of design. The deformation is also less than the reserved clearance, it ensures that the runner does not scratch the inside surface of the labyrinth at running, which can make it fall off. The stress data of runner has certain practical significance for the accurate assessment of runner service life.

Key words: francis turbine; runner; fluid-structure coupling analysis; finite element; ANSYS

0 引 言

当今, 水轮机组朝着大容量、巨型化的方向发展, 使得机组各部分部件更容易发生刚、强度弱化的现象。虽然现在加工工艺不断提高, 各种新型材料得到深入开发并得到广泛应用, 然而这些依然无法阻止机组转轮叶片裂纹的生成。如凤滩二号机上世纪 70 年代末投产, 2006 年经扩容改造, 改造机与 2007 年 6 月并网发电, 当年 9 月首检时即发现有 3 块叶片出水边出现

裂纹^[1]; 天生桥一级 2000 年投入运行, 2002 年初小修时发现转轮有裂纹^[2]; 万家寨^[3]、老江底^[4]、黄丹^[5]等机组均有转轮出现裂纹的现象。如何解决或减少类似现象的发生呢? 目前对裂纹的处理多停留在事后的补救上^[6], 虽然能够延长叶片裂纹再次发生的周期, 但是问题并没有得到解决^[7-8]。通过对转轮进行更加精准地计算, 得到更逼近于真实状态的应力和变形, 从而为设计提供更可靠的科学数据, 让问题在设计阶段就得到妥善的处理, 才是解决问题的最好方法和有效途径。

ANSYS 软件是一种融合结构、流体、电磁、声、热等于一体的大型通用有限元分析软件。该软件现已经成功开发到 14.0 版本,并研发了 Workbench 操作平台。

本研究基于 ANSYS-Workbench 操作平台,采用流固耦合的分析方法对某大型混流机转轮进行分析,以得到转轮在水体作用下的不同工况的应力和变形值。

1 原理分析

流固耦合问题从求解方法上可以分为顺序耦合和直接耦合两种。顺序耦合是将流场和结构场控制方程在时间和空间上交替代代,耦合作用不同步^[9-11]。水轮机的流固耦合计算,目前均采用顺序耦合方法。分析顺序为先对流场进行计算,得到转轮表面的水压力数据,作用到转轮并引起转轮的表面形状的改变。这种改变又引起流场发生变化,依次迭代,得到一个流体结构耦合体平衡状态下结果。

采用 CFD 流体分析软件对水轮机流场进行分析计算,可得到转轮叶片水力压力数据。将该流体场计算结果导入结构场,并作为载荷施加在叶片上,结合重力和离心力,可实现转轮在结构场中流固耦合计算分析。本研究还对结构变形后反作用于流体的情况进行了继续迭代。采用该方法的主要原因是水轮机转轮结构在弹性范围内的变形相对于转轮直径尺寸数值太小,在流固顺序耦合时,叶片变形对流场的影响所得到的计算结

果对流场的影响微乎其微,忽略这种影响得到的计算结果非常逼近真实值,在工程上完全可以接受^[12]。

流固耦合分析流程如图 1 所示。

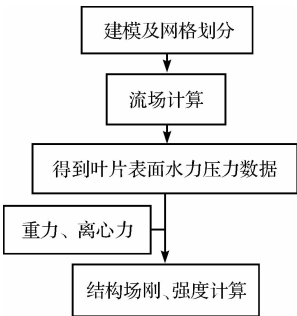


图 1 顺序流固耦合求解流程

2 机组参数

以某大型混流式水轮机为例,本研究对机组参数进行了流固耦合分析。选取基本参数如下:

- 水轮机型号:HL-LJ-314;
- 额定出力:67.7 MW;
- 最高水头:93.81 m;
- 额定水头:86 m;
- 最小水头:77 m;
- 额定转速:214.3 r/min;
- 飞逸转速:429 r/min;
- 叶片数:13。
- 转轮结构材料如表 1 所示。

表 1 某混流式水轮机转轮材料参数

部件	材料名称	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	屈服极限/MPa	强度极限/MPa
上冠	ZG00Gr13Ni5Mo	206	0.3	7 850	560	750
叶片	ZG00Gr13Ni5Mo	206	0.3	7 850	560	750
下环	ZG00Gr13Ni5Mo	206	0.3	7 850	560	750

3 流场分析结果

本研究采用 CFD 软件,建立了完整的流场计算模型,如图 2 所示。经计算得到转轮叶片表面水压力分

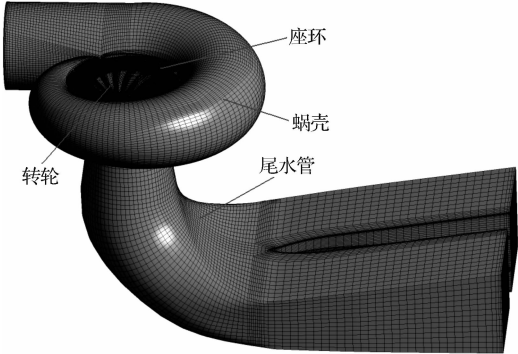


图 2 流场计算模型

布,如图 3 所示。

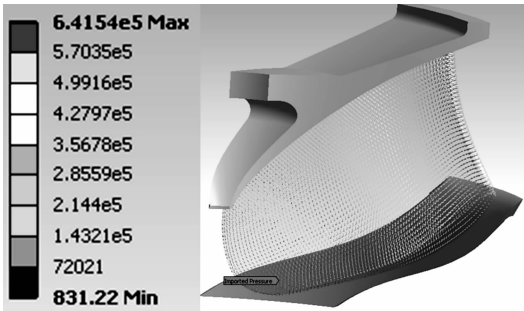


图 3 叶片表面水压力分布

从图 3 中可以看到,转轮叶片的水压并非均匀作用在叶片上,而是沿叶片进水边至出水边依次降低。叶片进水边最大水压力为 0.641 MPa。

4 结构场刚强度分析

4.1 模型前处理

结构场分析在 ANSYS-Workbench 操作平台下进行。转轮有 13 片叶片,周向均匀分布,转轮平面图如图 4 所示。

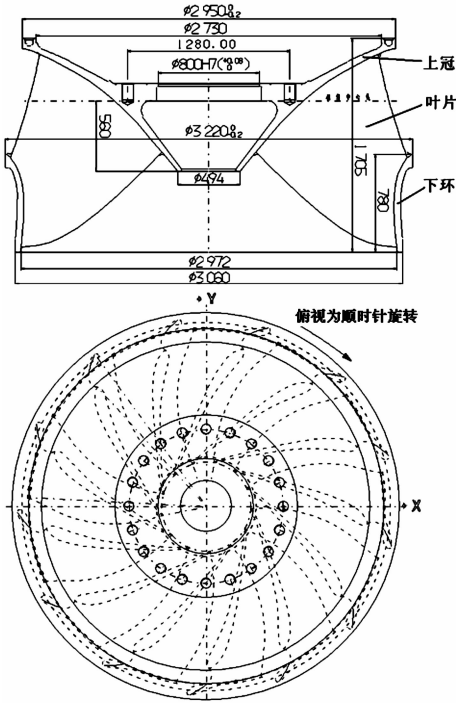


图4 转轮平面几何模型

从几何结构上来说,该转轮为周期循环对称结构;从载荷上来分,该转轮载荷亦为周期对称分布,工况及载荷如表 2 所示。在 ANSYS 分析软件中,对于几何与载荷均为周期对称的结构,可以采用周期对称模型进行分析。取最小周期对称单元,该转轮分析可以取结构的 1/13,即包含一个完整叶片的单元结构,作为分析对象。为保证分析精度,对分析模型进行全六面体网格划分。

工况及载荷如表 2 所示。

表 2 工况及载荷

工况	载荷
额定	叶片表面水压力,额定离心力、重力
飞逸	飞逸离心力、重力

约束:在循环对称面做周期循环对称约束,同时上冠与主轴把合位置位移全约束。

网格划分如图 5 所示。

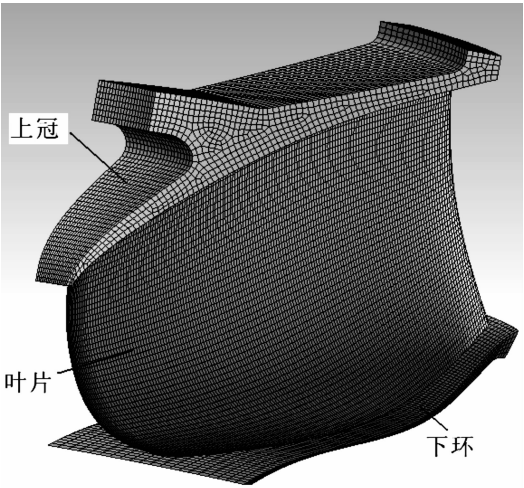


图5 结构场计算模型

4.2 计算结果

额定工况下应力分布与变形结果如图 6、图 7 所示。

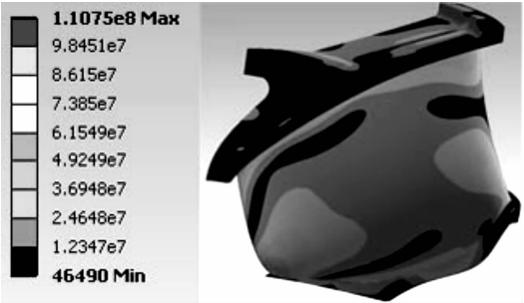


图6 额定工况下转轮应力云图

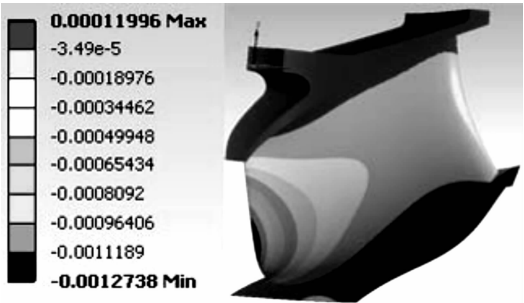


图7 额定工况下径向位移云图

飞逸工况下应力分布与变形结果如图 8、图 9 所示。

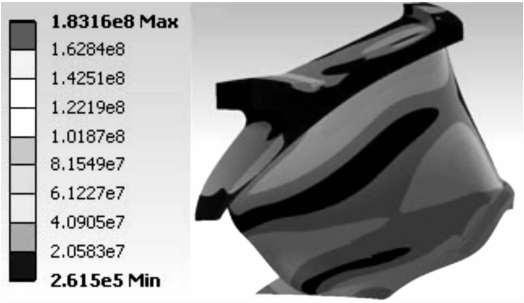


图8 飞逸工况下转轮应力云图

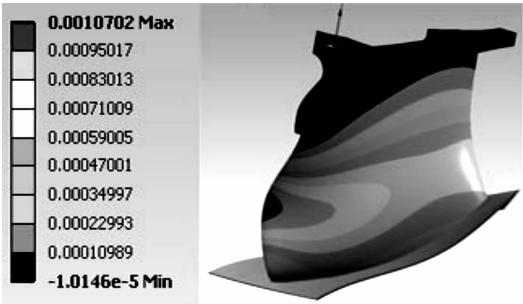


图9 飞逸工况下径向位移云图

计算结果如表 3 所示。

表 3 转轮应力变形结果

	额定		飞逸	
	应力/MPa	径向位移/mm	应力/MPa	径向位移/mm
上冠	77.83	0.12	103.7	0.11
叶片	110.7	-1.27	183.2	1.07
下环	69.4	0.12	136	0.47

4.3 结果评价

(1)计算结果显示额定工况下转轮的最大应力为 110.7 MPa,发生在叶片出水边靠近下环位置;飞逸工况下转轮的最大应力为 183.2 MPa,发生在叶片出水边靠近上冠位置。合同规定,额定工况下最大许用应力为材料屈服极限的 1/5,飞逸工况下最大许用应力为材料屈服极限的 2/5,即 112 MPa 和 224 MPa。计算应力均小于材料的许用应力。

(2)额定工况下叶片出水边水力作用下向在径向收缩 1.27 mm。这表明在额定运行时,流体的冲击作用大于其自身离心力作用。

(3)转轮上止漏环处预留间隙为 1.2 mm,下止漏环处预留间隙为 1.5 mm。计算数据显示上冠最大径向位移为 0.12 mm,下环最大径向位移为 0.47 mm。上冠、下环径向变形量小于转轮上下止漏环处预留间隙值。所以,转轮径向变形对机组运行没有影响。

(4)该转轮刚强度能够满足机组安全稳定运行要求。

5 结束语

研究表明,转轮运行时最大应力发生在叶片出水边靠近上冠、下环位置,这与一般转轮的裂纹发生

位置吻合,说明了计算结果的正确性。转轮上冠、下环的径向位移小于止漏环预留间隙,保证了转轮在运行时不会刮擦止漏环内表面,从而引起止漏环脱落事故的发生。更加接近实际的应力值是转轮进行寿命评估的一个重要前提,本研究采用流固耦合分析方法对转轮进行分析,能够更加准确地揭露转轮运行时应力分布规律和变形规律,为转轮结构的准确评估提供科学有效数据支持。

另外,该案例的分析也为进一步对混流式水轮机转轮的研究积累了一定的经验。

参考文献(References):

[1] 陈红平,方幸裕. 凤滩电站二号机组转轮叶片裂纹处理[J]. 水电站机电技术,2012,35(2):43-45.

[2] 张兴栋,黄少洪. 天生桥一级水电站水轮机转轮裂纹原因分析[J]. 水电自动化与大坝监测,2004,28(3):19-21.

[3] 胡永利. 万家寨水轮机转轮裂纹原因浅析和处理[J]. 水电工程技术,2006(2):68-70.

[4] 任启森,郭建伟,刘光宁. 老江底水电站水轮机水力稳定性分析[J]. 水力发电,2011,37(10):1-3.

[5] 严祥兵. 黄丹电站水轮机转轮叶片裂纹的处理[J]. 大型铸锻件,2008(2):36-37.

[6] 梁卫. 水轮机转轮叶片裂纹分析及补强处理[J]. 华电技术,2010,32(2):62-66.

[7] 李德红. 紧水滩电站 2 号机转轮叶片裂纹的修复处理[J]. 华东电力,2011,39(11):1955-1957.

[8] 谢欣. 岩滩水电厂 2 号水轮机转轮更换后运行状况分析[J]. 红水河,2012,31(5):46-48.

[9] 肖若富,王正伟,罗永要. 基于流固耦合的混流式水轮机转轮静应力特性分析[J]. 水力发电学报,2007,26(3):120-124.

[10] 郑军,杨昌明,朱利,等. 离心泵叶轮流固耦合分析[J]. 流体机械,2013(2):25-29.

[11] 杨忠高,程意丽,李勤科. 基于有限元流固耦合方法的高速空气主轴特性分析[J]. 机电工程技术,2011,40(8):16-18.

[12] 王福军,赵薇. 大型水轮机不稳定流体与结构耦合特性研究 I:耦合模型及压力场计算[J]. 水利学报,2011,42(12):1385-1391.

[编辑:洪炜娜]