

浅谈混流式水轮机内流场对机组性能的影响

黄鑫¹, 郭永洪², 马志军², 苏豪娟¹

(1. 四川省紫坪铺开发有限责任公司, 四川 成都 610000; 2. 都江堰双柏电力有限责任公司, 四川 都江堰 611830)

摘要:利用 fluent 软件对该型号水轮机内流场求解三维时均 N-S 方程, 得到三种工况下水轮机各部件内部流体流动细节, 结果表明: 该水轮机在设计水头下运行时, 各部件水力性能表现相对良好; 在偏离设计水头运行时, 各个部件水力性能表现不一, 水流状态不理想, 水力部件的结构有待改善, 同时, 也可通过调整机组的运行范围, 达到保护机组的目的。

关键词:混流式水轮机; 流场; 数值模拟; 机组性能; 空化空蚀

中图分类号:TK733+.1; TV131.3; TM401+.2

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2018)04-0049-02

0 引言

水轮发电机组运行性能的好坏, 直接影响到水电站乃至电力系统的经济与安全运行^[1]。因此, 提高水轮机组的效率及稳定性对国家的能源战略具有重大而深远的意义。近年来, 随着水利水电工程的发展, 水轮发电机组的单机容量和尺寸不断增大, 水轮机的转速也随之提高, 但在稳定运行方面却出现了越来越多的问题, 严重影响了机组的安全稳定运行。

目前, 国内外针对水轮机内水流扰动问题的研究方法主要有理论分析、模型试验、真机试验和数值分析四种。本文采用数值模拟的方法, 利用 Fluent 软件对某型号混流式水轮机内流场进行数值模拟, 分析该型号水轮机在不同工况下的运行特性, 并讨论运行工况对机组水力性能的影响, 为水轮机的设计和水力机组的运行方式提供参考。

1 模型及计算方法

1.1 物理模型及网格

利用 UG 软件对水轮机进行物理建模, 包括蜗壳、座环、导叶、转轮和尾水管, 用 Gambit 软件对模型进行网格划分。由于模型较复杂, 采取分块划分的方式, 分别对蜗壳、座环、导叶、转轮、尾水管水体划分网格。采用结构化网格和非结构化网格相结合的方式, 并对流动状态变化较大区域的网格进行局部加密, 最终网格节点数 98 万。

1.2 数学模型

水轮机内的水流流动是一个复杂的三维不可压缩粘性湍流, 可用流体的连续方程和 N-S 方

程描述。即:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = \frac{\partial p^n}{\partial x_i} + \frac{\partial [\mu_e (\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j})]}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中 ρ 为密度; u_i, u_j 为平均速度 ($i, j = 1, 2, 3$); p^n 为等效压力; μ_e 为流体粘性系数。

采用 RNGk-ε 模型使方程封闭:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} [\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k + \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} [\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] + \frac{C_{1\epsilon}^* \epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$; $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$; $C_\mu = 0.09$; $\alpha_k = \alpha_\epsilon$
 $= 1.39$; $C_{1\epsilon}^* = C_{1\epsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}$; $C_{1\epsilon} = 1.42$; $C_{2\epsilon} = 1.68$; $\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\epsilon}$; $\eta_0 = 4.337$; $\beta = 0.012$ 。

1.3 边界条件及计算方法

由于水轮机内部水流流动是一个复杂的三维不可压缩粘性湍流, 因此, 采用分离式求解器稳态求解时均 N-S 方程。湍流模型选择 RNG k-ε 模型, 蜗壳进口断面设为速度入口, 尾水管出口设为 outflow, 不同流体域之间的数据交换采用差值的方式, 交界面设为 interface, 用滑移网格模型处

理转轮区域与导叶、尾水管区域的耦合问题,上冠、下环和导叶壁面均设为 Moving Wall。速度压力耦合采用经典的 SIMPLE 算法。为了更精确的模拟湍流,动量方程中的对流项离散格式设置为二阶迎风格式,其他方程采用默认格式。

1.4 工况点的选取

随着导叶开度的不同,水轮发电机组会经历几个不同的工况区。根据机组运转特性曲线,可将机组划分为低效率工况区、强涡带工况区和稳定运行区。为了便于分析和比较,分别在最大水头、最小水头、设计水头下各选择一个工况点进行计算。各工况点参数如下表 1 所示。

表 1 工况点参数表

工况点	水头 /m	流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	导叶开度 / $^\circ$	出力 /MW
1	110(设计水头)	296	24	300
2	141(最大水头)	243.52	18	320
3	68(最小水头)	148.16	20	85

2 计算结果及分析

2.1 导叶区域流场计算结果及分析

水流流经蜗壳进入固定导叶区域,在固定导叶部分形成速度环量,保证流量沿圆周方向均匀分配。活动导叶通过改变导叶开度控制流入转轮区域的流量,引导水流按一定的方向进入转轮,形成与改变进入转轮的水流环量,从而达到调整出力的目的。通过模拟实验,得出结果是三种工况下固定导叶背面压力均小于正面压力,活动导叶头部到尾部压力逐渐降低,速度逐渐增大,在圆周方向对称性较好。固定导叶和活动导叶头部有较小的撞击,但没有形成脱流,可通过改变导叶安放角度来调整其头部水流撞击问题。总体来说,导叶区域水流状态尚可。

2.2 转轮区域流场计算结果及分析

水流通过转轮时,一方面沿弯曲的叶片做相对运动,另一方面又随叶片旋转,流动十分复杂。水流经过导叶引导后,应基本沿轴向均匀分配,各叶片上压力、速度应呈中心对称。从实验中可以看出,三种工况下,叶片正面从进水边到出水边逐渐降低,正、背两面形成一定的压力差;工况 1 条件下,叶片正、背面压力等值线与进出水边有一定角度,但总体尚可,基本可以满足要求;工况 2 条件下叶片正、背面进水边附近压力等值线基本与

进水边平行,而出水边附近压力等值线与出水边近似垂直,在出水边靠近下环处形成回流,叶片背面从进水边到出水边压力逐渐增大,在出水边靠近上冠的位置压力达到最大,此种压力分布对叶片的强度提出了较高要求;工况 3 条件下叶片正、背面压力从进水边到出水边逐渐降低,压力等值线与进出水边基本平行,进水边压力梯度大于出水边,但在背面靠近下环处压力较低,此部位易造成空化空蚀现象。总体来说,工况 1、工况 3 条件下,转轮叶片压力分布尚可,工况 1 在进水边背面附近形成小范围负压区,易造成空化空蚀现象,而工况 3 条件下空化空蚀区转移至叶片背面靠近下环的大片区域,工况 2 条件对水轮机运行较不利,叶片背面存在大范围的空蚀区域。

2.3 尾水管区域流场计算结果及分析

尾水管作用是要将转轮出口水流引向下游,利用转轮高出下游水面的那一段位能,并要回收一部分转轮的出口动能,其内部流态主要依赖于转轮出口水流的流态。水流流经肘管弯曲部分时,流线发生弯曲,肘管底部附近压力会增大,流速降低,而上部压力减小,流速增大,造成下部水流收缩,上部水流扩散,形成涡流滞水区。水流流经水平扩散段时,由于离心力的作用逐渐消失,断面压力分布又趋于均匀,在肘管段具有较高压力的水流此时压力要降低,水流加速呈收缩状;肘管段压力较低、流速较高的水流此时压力增加、流速降低,水流呈扩散状,形成另一涡流滞水区。同时,由于转轮的旋转作用,在直锥段及肘管段中的水流呈螺旋形运动,直到水平扩散段才逐渐消失。图 1-图 3 给出了三种工况下尾水管内水流迹线图,从图中可以看出,工况 1 下尾水管进口水流圆周方向速度几乎为零,基本没有涡带,水流状态较好;工况 2 下尾水管进口水流有一定的圆周速度,在直锥段产生较小涡带,并在发展至尾端过程中

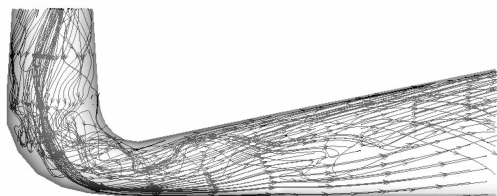


图 1 工况 1 尾水管水流迹线图

(下转第 68 页)

批准的施工措施、业主和监理工程师签发的有关文件、会议纪要等。

4.2 监理工程师审核并报业主

监理工程师在收到承包商的变更项目单价报告书后应在合同规定期限内完成审核,主要审核变更项目产生的真实性、合规性、合理性、必要性和变更项目作业方案的思路是否符合工程实际等,并将审核意见报业主。监理人的审核意见一式三份,并附有承包人的变更项目单价报告书,加盖监理单位公章,并由项目总监理工程师签字。

4.3 业主复核

业主合同主管部门在收到监理工程师的审核意见后根据现行的本地区、本行业价格控制政策,依据现行的定额和标准,按照合同的相关约定和实施变更项目的施工方案进行复核。

4.4 三方签字确认

完成上述 3 个程序后,变更项目单价由业主合同主管部门经理、总监理工程师和承包商项目经理代表三方签字确认,并加盖单位公章,作为合

(上接第 50 页)

逐渐减弱;工况 3 下尾水管进口水流圆周速度较大,在直锥段产生较强涡带,并在发展至尾部时没有减弱,在尾水管出口位置还存在有较大旋涡。

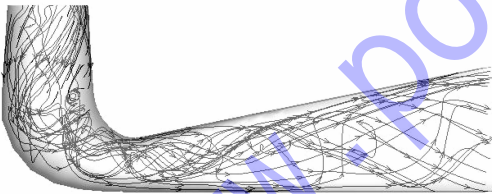


图 2 工况 2 尾水管水流迹线图

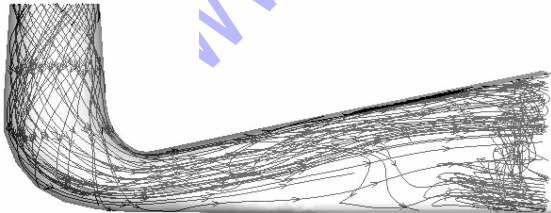


图 3 工况 3 尾水管水流迹线图

3 结论

本文利用 CFD 技术对某电厂水轮机内流场

同文件的补充。

5 结语

在市场经济条件下,业主和施工单位间存在工程建设目标的统一性和各自利益的矛盾性。定价方法要在对立统一中找到结合点,以利于制定出科学、公正、合理、合法的变更项目价格。工程变更项目的价格会直接影响工程投资,所以处理好变更项目价格是工程管理的一项重要内容。

参考文献:

- [1] 柯洪. 建设工程计价. 中国计划出版社. 2017.
- [2] 皮飏. 水电合同项目价格调整和新增项目单价确定. 人民长江. 2008.
- [3] 董宇. 工程变更项目综合单价确定及其争议管理研究. 天津理工大学. 2012.
- [4] 陈淮明. 工程造价在工程管理中应对措施探讨. 四川工程造价. 2015.

作者简介:

蔡翠杰(1977-),女,山东单县人,经济师,学士,从事工程造价与管理工作。

(责任编辑:卓政昌)

进行数值模拟,得到三种工况下导水机构、转轮叶片及尾水管内的水流变化规律。研究表明,该水轮机在设计水头下运行时,各部件水力性能表现相对良好;在偏离设计水头运行时,各个部件水力性能表现不一,水流状态不理想,水力部件的结构有待改善,同时,也可通过调整机组的运行范围,达到保护机组的目的。

参考文献:

- [1] 刘大恺. 水轮机(第三版)[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996. 10.

作者简介:

黄鑫(1990-),男,河南开封人,研究生学历,助理工程师,主要从事电厂水利机械及监控系统研究;

马志军(1986-),男,四川都江堰人,本科学历,工程师,主要从事水电站管理;

郭永洪(1970-),男,四川都江堰人,本科学历,助理工程师,主要从事水电站管理;

苏豪娟(1983-),女,河南南阳人,工程师,大专学历,主要从事电力生产。

(责任编辑:卓政昌)