

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.04.009

大型水斗式水轮机配水环管水力性能数值模拟

徐广文¹ 陈创新² 朱俊昌³ 郑源⁴

(1. 广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州 510600; 2. 茂名市粤能电力股份有限公司, 广东 茂名 525000;
3. 江苏省东海县水务局, 江苏 东海 223000; 4. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 采用商用 CFD 数值模拟软件对大型水斗式水轮机配水环管的水力性能进行数值模拟研究。模拟结果表明,从配水环管进口到距进口渐远的各出口的水力损失具有逐渐增大的趋势,而且从进口到各出口的平均水力损失随着流量的增大而增大。根据实际需要,对配水环管出口不同的开启组合方案进行模拟,比较后得出性能较优的组合方案,可为指导电站的高效运行提供依据。

关键词 水斗式水轮机 配水环管 水力性能 数值模拟

中图分类号 :TK735⁺.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2008)04-0030-02

Numerical simulation of hydraulic properties of water distribution pipe in large-scale Pelton turbine/XU Guang-wen¹, CHEN Chuang-xin², ZHU Jun-chang³, ZHENG Yuan⁴(1. Guangdong Power Test and Research Institute, Guangzhou 510600, China; 2. Yueneng Electric Power of Maoming City, Ltd, Maoming 525000, China; 3. Water Affair Bureau of Donghai County, Donghai 223000, China; 4. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : With a water distribution pipe with 6 outlets in the Yele Hydropower Plant as an example, the hydraulic properties of water distribution pipe in large-scale Pelton turbine are studied with CFD commercial software. The numerical simulation results show that the hydraulic loss increases gradually from the inlet to the six outlets, and the average hydraulic loss from the inlet to the six outlets increases with the water discharge. Comparison of numerical simulation results of different outlet-opening schemes, according to the actual operating conditions of the Yele Hydropower Plant, yields an optimal outlet-opening scheme that can provide a basis for effective operation of hydropower plants.

Key words : Pelton turbine; water distribution pipe; hydraulic property; numerical simulation

水斗式水轮机适用于高水头、小流量水力条件,在地理环境特殊的西部地区应用广泛。我国水斗式水轮机的研究起步较晚。在数值计算方面,与混流式、轴流式水轮机相比,水斗式水轮机的研究才刚起步,主要集中在转轮斗叶和射流方面^[1-6],而针对配水环管的研究不多,对配水环管的重视程度与发达国家相比远远不够^[7]。配水环管在水斗式水轮机组中的作用和混流式机组中的蜗壳类似,即将水流均匀地分配给各出口。配水环管对水斗式水轮机的效率影响颇大,特别是在机组不能满负荷运行的情况下影响更大,因此研究配水环管的水力性能,并确定合理的出口开启组合方案以保证机组高效运行,是一项十分有意义的工作,可以为水斗式水轮机的优化设计提供参考。

当前,计算流体力学(简称 CFD)软件已成为解决各种流体流动与传热问题的强有力工具,广泛应用于水利、航运、流体机械等各领域。文中,笔

者采用商用 CFD 软件 FLUENT 对国内某大型水斗式水轮机的配水环管水力性能进行模拟研究。

1 数学模型及边界条件

本文研究的流动是不涉及能量交换的单一流体的恒定流动,所以只需要遵循质量守恒和动量守恒定律。

质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \tag{1}$$

式中源项 S_m 是从分散的二级相中加入到连续相的质量,也可以是任何的自定义源项。

在惯性(非加速)坐标系中 i 方向上的动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \tag{2}$$

作者简介 徐广文(1980—),男,江苏盐城人,硕士研究生,从事水力机组过渡过程的仿真计算。E-mail: jhxgw@hhu.edu.cn

式中: P 为静水压力; τ_{ij} 为应力张量分量; ρg_i 和 F_i 分别为 i 方向上的重力体积力和外部体积力(如离散相相互作用产生的升力)。 F_i 包含了其他的模型相关源项,如多孔介质和自定义源项。应力 τ_{ij} 由式(3)给出:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \tag{3}$$

计算中采用标准 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型,其中相关的系数为 $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$ 。采用有限体积法、一阶迎风格式、全隐式方案,对湍流流场的控制方程组进行离散化处理,建立相应的离散方程,同时运用 SIMPLEC 算法对离散方程进行求解。本文的数值模拟计算中,进口根据已知进口流量和压力分别采用速度进口边界和压力进口边界进行模拟,壁面附近采用壁面函数进行模拟。

2 数值模拟对象及计算工况

数值模拟对象是冶勒电站水斗式水轮机的 6 个出口配水环管。配水环管属于环形结构,6 个出口环向均匀分布(图 1),是一个强烈弯曲和分岔的变断面输水管,其中 1~5 号出口与环管构成 5 个岔管,每个岔管处装有用于分流和起加强固定作用的月牙形内加强肋板。图 1 是根据配水环管实际尺寸使用 Pro/ENGINEER^[8-9]构造的三维实体图,基本参数为:额定流量 $Q_r = 23.62 \text{ m}^3/\text{s}$,设计水头 $H_r = 580 \text{ m}$,进口直径 $D = 1.7 \text{ m}$,岔管侧管断面直径 $D_i = 0.82 \text{ m}$ ($i = 1 \sim 6$)。

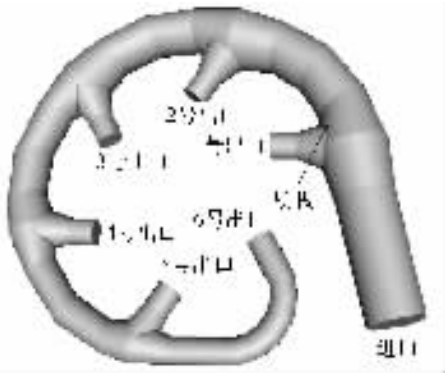


图 1 配水环管三维图

笔者采用适应性强的非结构四面体网格对几何外形复杂的配水环管进行网格划分(网格间距 100,总网格数约 360 000),并模拟了环管流量分别为 Q_r , $0.75 Q_r$, $0.5 Q_r$, 1~6 号出口全部开启和出口流量为额定值(出口对称布置,每个出口的额定流量为环管额定流量的 1/6),1~6 号出口分别单独开启、两两组合开启(分别同时开启 1 号和 4 号、2 号和 5 号、3 号和 6 号)、四四组合开启(1 号、2 号、4 号和 5 号

同时开启、2 号、3 号、5 号和 6 号同时开启、1 号、3 号、4 号和 6 号同时开启)等 16 组工况。其中环管流量为 Q_r , 1~6 号出口全部开启时还考虑了无肋板的情况。采用上述两两组合开启和四四组合开启方式可避免水轮机大轴产生径向不对称水推力^[10]。

3 数值模拟结果与分析

配水环管进口到各个出口的水力损失由 FLUENT 软件计算的进口和出口总压相减得出,总压包括静水压力和动水压力两部分。各种工况下的水力损失计算结果见表 1。为观察局部水力损失情况,分别在配水环管 5 个岔管的进出口截取了多个断面。

表 1 不同工况下的水力损失

环管 流量	水力损失 h_f/m						
	1 号 出口	2 号 出口	3 号 出口	4 号 出口	5 号 出口	6 号 出口	平均 值
Q_r (无肋板)	1.22	2.57	2.73	2.77	3.19	2.84	2.55
Q_r	1.18	2.61	2.74	2.82	3.43	2.95	2.62
$0.75 Q_r$	0.56	1.32	1.41	1.37	1.68	1.51	1.31
$0.5 Q_r$	0.25	0.59	0.66	0.61	1.10	0.70	0.64
$1/6 Q_r$	0.35	0	0	0	0	0	0.35
$1/6 Q_r$	0	0.35	0	0	0	0	0.35
$1/6 Q_r$	0	0	0.41	0	0	0	0.41
$1/6 Q_r$	0	0	0	0.52	0	0	0.52
$1/6 Q_r$	0	0	0	0	0.87	0	0.87
$1/6 Q_r$	0	0	0	0	0	1.28	1.28
$2/6 Q_r$	0.29	0	0	0.58	0	0	0.44
$2/6 Q_r$	0	0.46	0	0	0.87	0	0.67
$2/6 Q_r$	0	0	0.70	0	0	1.28	0.99
$4/6 Q_r$	0.52	0.81	0	1.10	1.16	0	0.90
$4/6 Q_r$	0	1.28	1.39	0	1.57	2.44	1.68
$4/6 Q_r$	0.52	0	0.75	1.04	0	1.33	0.91

注 水力损失为 0 表示该出口关闭。

由表 1 可知,从进口到 6 个出口的平均水力损失随着流量的增大而增大, $0.5 Q_r$ 时的损失约为 Q_r 时的 24.4%, $0.75 Q_r$ 时的损失约为 Q_r 时的 50%。除了 6 号出口,其余出口距离进口越远其水力损失越大,当水流经过 5 号出口时达到最大,在 Q_r 时为 3.43 m。经过 6 号出口时水力损失反而降低,下降幅度约为 14%。除去配水环管中的肋板,平均水力损失下降不大于 2.7%,说明肋板的存在对配水环管的能量性能影响不大。

管路中的水力损失一般分为沿程水力损失和局部水力损失^[11],其中沿程水力损失与流经管道长度成正比,而局部水力损失与管路形状密切相关,大都发生在管径急剧变化和分岔处,且比沿程水力损失显著。1 号出口的损失相对较小,这是因为相对后面的几个出口,水流在第 1 个分岔管(下转第 36 页)

层指标则应选择一座健康水库或建库前该区域的生态状况作为标准。健康综合指数的界限则应通过同类的健康水库或者水库健康运行状况并结合专家的经验进行综合确定。

5 结 语

水库健康评价涉及的范围较广,包括大坝安全评价、水库效益和水库生态评价等,需要应用概率与数理统计、模糊数学、系统科学等方面的知识。由于水库的健康评价还处于起步阶段,还有很多方面需要完善,如健康评价的方法、健康指标的选择及定量分析、健康指标资料的收集、健康标准的确定等。本文只是在这方面作一个初步探索。

- a. 提出水库健康效应的概念,分析水库健康评价的意义和特征。
- b. 分析影响水库健康状况的因素。
- c. 初步建立水库健康评价的结构指标体系,介绍各层各指标定量描述的方法,并提出水库健康综合指数的概念和计算方法。

参考文献:

[1] 阿里木·吐尔逊. 坝基老化岩-水-化学作用数值模拟研

(上接第 31 页)进行分流前是均匀流,水流平稳地进入分岔管,加上没有后面出口的折管损失,所以损失要小。至于 6 号出口,水流在管内是紧靠外侧壁面流动,不经过类似分岔管那样形状变化剧烈的部分,而对于配水环管,主要的损失是分岔管处的损失。考虑到这些因素,尽管水流所经路程最远,从进口到 6 号出口的损失比进口到 5 号出口的损失小,这是合理的。

从 6 个出口开启的不同组合方案(单出口、双出口、四出口开启)的数值模拟结果可知,当只开启 1 个出口时,1 号、2 号出口水力损失最小,均为 0.35 m,比水力损失最大的出口低约 0.93 m;开启 2 个出口时,1 号、4 号出口同时开启水力损失最小,为 0.44 m,比最大损失的组合低约 0.55 m;开启 4 个出口时,1 号、2 号、4 号、5 号出口同时开启水力损失最小,为 0.90 m,较最大损失的组合低约 0.78 m。

4 结 语

通过对水斗式水轮机配水环管从进口到 6 个出口全流道的三维定常湍流的数值模拟计算,得出配水环管的水力损失与流量之间的关系^[12]:从进口到 6 个出口的平均水力损失随着流量的增大而增大。同时也验证了水力损失与管路长度和形状之间的相互关系。根据现场实际情况,模拟出口的不同开启

究 D]. 南京: 河海大学, 2005.
[2] 吴中如, 顾冲时. 重大水工混凝土结构病害检测与健康诊断 M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
[3] SEIDOU O, CLAUDE M, BENOIT R. Risk management of hydroelectric reservoirs [J]. Canadian Journal of Civil Engineering 2003, 30(6):1111-1122.
[4] 高永胜, 王浩, 王芳. 健康水库内涵及评价指标体系的建立 J]. 水利发展研究 2005, 5(9):1-6.
[5] 马晓辉, 彭汉兴, 杨光中, 等. 大坝环境水质特征与化学潜蚀 J]. 水利学报 2001(10):44-47.
[6] 刑林生. 混凝土坝老化性状分析研究 J]. 大坝与安全, 2005(3):4-8.
[7] 侯玉成. 土石坝健康诊断理论与方法研究 D]. 南京: 河海大学, 2005.
[8] 倪晋仁, 刘元元. 河流健康诊断与生态修复 J]. 中国水利 2006(13):4-10.
[9] 中国水利百科全书编委会. 中国水利百科全书 M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006:1297-1298.
[10] SHANNON C E, WEAVER W. The mathematical theory of communication M]. Urbana, IL: University of Illinois Press, 1949.
[11] 许树柏. 层次分析法原理: 实用决策方法 M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.

(收稿日期 2007-10-19 编辑: 方宇彤)

组合方案, 比较得出性能较优的方案, 为电站的高效运行提供了重要依据。

参考文献:

[1] 韩凤琴, 林志文, 肖业祥, 等. 非定常喷嘴射流形状预测研究 J]. 水电能源科学 2005, 23(3):14-16.
[2] 韩凤琴, 久保田乔, 刘洁. 数值模拟冲击式水轮机内部非定常流动 J]. 华中科技大学学报 2000, 28(11):14-16.
[3] 韦彩新, 韩凤琴, 许萍, 等. 冲击式水轮机射流干涉研究 J]. 华中科技大学学报 2001, 29(4):82-84.
[4] 韩凤琴, 久保田乔. 冲击式水轮机性能换算的新理论提案: I J]. 华中理工大学学报 2000, 28(3):105-107.
[5] 韩凤琴, 刘洁. 冲击式水轮机性能换算的新理论提案: II J]. 华中理工大学学报 2000, 28(11):11-13.
[6] 许萍, 韦彩新. 水斗数对转轮性能影响的实验研究 J]. 华中科技大学学报 2003, 31(3):89-91.
[7] 埃杰尔. 水斗式水轮机 M]. 黄益生, 译. 北京: 机械工业出版社, 1990.
[8] 张胜兰, 赵景山, 付勇智. Pro/ENGINEER Wildfire(野火版)实用培训教程 M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
[9] 孙江宏, 段大高. Pro/ENGINEER d2000i 高级功能应用及二次开发 M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
[10] 潘家铮. 压力钢管 M]. 北京: 电力工业出版社, 1982.
[11] 李家星, 赵振兴. 水力学 M]. 南京: 河海大学出版社, 2001.
[12] 韩正忠, 王敬, 兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用 M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005.

(收稿日期 2007-05-31 编辑: 骆超)