

基于 CFD 技术的水轮机性能预估

覃延春, 罗兴, 郑小波

(西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: CFD(计算流体力学)作为一门不断发展和成熟的学科已在航空、能源、水利等相关领域得到广泛应用. 介绍了 CFD 技术及其应用. 通过对水轮机内部流场进行 CFD 分析, 可以提供各流动部件损失计算的数据进而计算出水轮机的效率. 总结了较精确的水轮机各部件水力损失计算公式. 指出了现有的水轮机性能预估方法存在的难点和问题, 提出了一些新的见解.

关键词: 水轮机; 性能预估; 损失计算; CFD

中图分类号: TV734.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2004)07-0021-03

目前我国水电事业迅速发展, 水电在电力行业中的比重逐年增加, 除在建的长江三峡水电站外, 在建和拟建的还有龙滩、小湾、向家坝、溪洛渡、水布垭和白鹤滩等一大批大型或超大型电站. 水轮机是水电站能量转换的主要部件, 其性能直接影响到电站的效益. 研究一种新的水轮机需要进行多次模型试验和反复修改设计才能得到满意的结果, 这样往往导致研究周期长, 研究费用多, 远远不能满足我国水电事业快速发展的要求, 为了更快更省地研究出新型水轮机, 开展水轮机性能预估方面的研究工作是十分必要的.

1 CFD 技术及应用

1.1 CFD 技术简介

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, 简称 CFD)是 20 世纪 60 年代起伴随着计算机技术的发展而迅速崛起的新兴学科. 经过半个世纪的发展, 这门学科已相当成熟, 各种 CFD 通用性软件包陆续出现并成为商品化软件, 性能日趋完善, 应用范围不断扩大. 时至今日, CFD 技术的应用早已超越传统的流体力学和流体工程的范畴, 如航空、航天、船舶、动力、水利等, 而扩展到化工、核能、冶金、建筑、环境等许多相关领域中^[1].

CFD 方法是对流场的控制方程组用数值方法将其离散到一系列网格节点上, 并求其离散数值解的一种方法. 控制所有流体流动的基本规律是质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律, 由它们可以分别导出连续性方程、动量方程和能量方程, 得到纳维

尔-斯托克斯偏微分方程组, 简称为 N-S 方程组^[2].

N-S 方程组是流体流动所必须遵守的普遍规律. 在守恒方程组基础上, 加上反映流体流动特殊性质的数学模型(如湍流模型、燃烧模型、多相流模型等)和边界条件、初始条件, 构成封闭的方程组来描述特定流场、流体的流动规律. 具体的流场控制方程组分为 3 类: 椭圆型、抛物型和双曲型偏微分方程组. 从物理意义上概括地说, 椭圆型方程与时间变量无关, 仅与空间变量的二次导数项有关, 一般用作描述定常情况的控制方程; 抛物型与双曲型方程不仅与空间变量导数项有关, 而且分别和时间变量的一阶和二阶导数项有关, 用于描述非定常情况下的控制方程.

CFD 数值求解方法主要包括有限差分法、有限容积(控制容积)法、有限元法、边界元法、有限分析法、谱分析法、数值积分变换法、格子-Boltzmann 法等, 虽然后几种方法近几年来有很大的发展, 并已成功地解决了一些问题, 但就方法的成熟程度、实施的难易及应用的广泛性而言, 有限容积法和有限元法仍具有相当优势. 对上述 3 种不同类型方程, 椭圆型方程一般采用有限元法, 抛物型和双曲型方程则采用有限容积法较好^[3].

1.2 CFD 技术的应用

水轮机的模型试验是获得真机数据的必不可少的重要手段, 但实验研究面临着周期长、投资费用多等实际困难, 且试验的手段、数据的精度和可靠性容易受测试仪器和客观环境的制约和影响. CFD 技术的出现正好弥补了这一缺陷. 它是一种具有投资小、

周期短、精度高等特点的有效研究流体流动的方法,可以解决理论分析和试验研究中无法解决的复杂流动问题。

在水轮机设计中,如果能对水轮机进行整体一体化解析,也就没有必要进行中间解析领域的流入/流出边界条件假定,只需要指定蜗壳入口、尾水管出口的边界条件就可以进行有信赖度的解析。整体解析是将蜗壳入口、固定导叶、活动导叶、转轮至尾水管出口的全部作为内部解析流动的解析方法。对水轮机进行性能预估,我们可以采用水轮机整体解析的方法,利用三维实体造型软件对水轮机计算域进行建模,然后利用 CFD 软件对计算域进行全三维黏性解析,通过解析我们可以得到水轮机计算流域内丰富的流场信息,这些信息包括流域内的速度场分布、压力场分布、流线分布的数据和图形,根据这些数据和图形我们可以初步判断水轮机性能的优劣。在内部流场计算的基础上,把 CFD 分析的结果作为损失分析的初始条件,对不同单位转速下一系列工况导水机构某些确定的开度进行连续计算,进而得到一系列工况点的效率值,根据这些效率值就可以绘制水轮机的综合特性曲线,并可通过与实验数据进行对比,验证预估的可靠性。

2 水轮机水力损失计算

预估水轮机的能量特性,就是根据转轮及其他过流部件的几何参数,计算出不同单位转速和不同导叶开度下水轮机的参数,包括最优工况参数、导水机构定常开度曲线、综合特性曲线的效率等。对于给定的水轮机过流部件几何形状(包括导水机构和转轮叶片系形状)和给定的导水机构开度,求出水轮机在不同单位转速下的单位流量和效率值。不同工况下水轮机效率由式(1)确定

$$\eta = 1 - \sum h \quad (1)$$

式中: $\sum h$ 为过流部件中无因次水头水力损失的总和; η 为水轮机效率。

水轮机的过流部件由蜗壳、固定导叶和活动导叶、转轮及尾水管等 4 部分组成。在过流部件中水流为不可压缩的黏性流动,因黏性影响而产生的能量损失主要由过流部件表面的水流摩擦损失和水流梯度变化剧烈处的局部水力损失引起。对于这个部分的计算方法本文参考了文献[4~6]。

2.1 蜗壳和座环的水力损失

$$h_c = \frac{k_c}{2g} \frac{\varphi_0}{360F_0} (Q_{11})^2 \quad (2)$$

式中: φ_0, F_0 分别为蜗壳进口断面包角和面积; k_c 为经验系数,推荐在 $\varphi_0 = 180^\circ$ 时取 0.07 ~ 0.09,在

$\varphi_0 = 345^\circ$ 时取 0.22 ~ 0.24; Q_{11} 为单位流量。

2.2 固定导叶和活动导叶的水力损失

导水机构中的能量损失通过计算单个叶栅翼型损失和冲击损失确定。翼型损失可以在考虑外部流动中附加流动时得到的沿实际流线的边界层计算后得到。计算表明,翼型损失一般可按二维叶栅平均表面的流动计算确定:

$$h_p = \frac{1}{2gH} \int_0^1 C_x \left(\frac{\bar{C}_{1B}}{\sin\beta_B} \right)^2 d\bar{\psi} \quad (3)$$

式中: $\bar{\psi} = \psi/\psi_{\max}$ ($0 \leq \bar{\psi} \leq 1$), 为平均流动的相对函数,其中 $\psi_{\max} = Q/2\pi$; C_x 为翼型阻力系数; $\bar{C}_{1B}, \beta_B$ 分别为轴面速度分量和导水机构叶栅出口水流角。

叶栅冲击损失:

$$h_y = \frac{1}{2gH} \int_0^1 \bar{C}_1^2 (\text{cth}\beta_{BX} - \text{cth}\beta_y)^2 d\bar{\psi} \quad (4)$$

式中: β_{BX} 为在平均流动的不同流面上的进水边的相对水流角; β_y 为在进水边无冲击绕流情况下相应的水流角; $\bar{C}_1$ 为进口轴面速度。

2.3 转轮的水力损失

采用与计算导叶的水力损失的相似方法,以翼型损失和冲击损失的总和的形式确定转轮叶片系的损失。

2.4 尾水管的水力损失

尾水管的能量损失由内部水力损失和转轮后的漩涡损失的总和表示。

$$h_{om} = \frac{1}{2gH} \left(1 - \eta_{om} \right) \left(\frac{Q_{11}}{F} \right)^2 + h_{\mu} + h_m + h_{oc} + h_v \quad (5)$$

式中: $\frac{1}{2gH} \left(1 - \eta_{om} \right) \left(\frac{Q_{11}}{F} \right)^2$ 为尾水管入口的内部水力损失,其中 F 为进口断面面积, η_{om} 为经验恢复系数, $\eta_{om} = 0.7 \sim 0.75$; h_{μ}, h_m, h_{oc} 和 h_v 分别为环量损失、感应损失、轴向涡旋损失及转轮后的附加流动能量损失,计算公式如下:

$$h_{\mu} = \frac{1}{2gH} \int_0^1 (\omega R - \bar{C}_1 \text{cth}\beta)^2 d\bar{\psi} \quad (6)$$

$$h_m = \frac{1}{2gH} \int_0^1 (\bar{C}_1 - \bar{C}_l)^2 d\bar{\psi} \quad (7)$$

$$h_{oc} = K_{oc} \frac{(\omega R^2 - R\bar{C}_1 \text{cth}\beta)^2}{2gH} \quad (8)$$

$$h_v = \frac{1}{24gQH} \int_0^1 \left[(\Delta C_l)^2 + \frac{(2\Delta G \Delta C_{1l})}{\bar{C}_1} \right] d\bar{\psi} \quad (9)$$

式中: R 为旋转半径; β 为圆周速度与决定速度的夹角; Q 为流量; $\bar{C}_l$ 为势流速度; ΔC_l 为转轮出口的附加流动速度差; ΔG 为转轮出口绝对运动的能量差; K_{oc} 为经验系数。

另外,在预估轴流式水轮机性能时必须补充计

算末端损失,该损失与叶片和转轮室之间间隙的漏水有关,类似于有限翼展内的损失.在混流式水轮机损失平衡中,圆盘损失起重要作用,因此也必须加以考虑^[6,7].

3 性能预估研究的发展和存在问题

从开展水轮机性能预估工作到取得一定的进展,国内外的科研工作者利用各种各样的数值方法和数值工具对水轮机内部的流动进行模拟计算,产生了不同的水轮机性能预估方法.例如瞿伦富等^[5]根据能量性能参数要求,在水轮机内部流动的基础上,建立了混流式水轮机流量预估及各过流部件的损失预估公式,并编制了计算程序.由计算得到的水轮机流量、效率及限制流量值和实验结果比较,符合较好. Helmut K^[6]利用全段模拟方法对高比转速混流式水轮机的综合特性曲线进行了数值预测,将计算得到的综合特性曲线与实验结果进行比较,两者一致性较好.彭国义等^[7]用动量积分方程计算了水轮机叶片三维旋转边界层,给出了叶面正交曲线坐标曲率及相关几何参数的简洁计算公式.在此基础上提出了一套水轮机转轮性能预估的计算模型,得到了合理的计算结果.德国的 Schilling R 等^[8]利用 CFD 软件在检查数值离散化误差的基础上对离心泵叶轮和混流式转轮的水力损失进行了数值分析,数值计算结果和精确实验结果比较,一致性较好.虽然这些方法都取得了一定的成果,但水轮机性能预估仍然存在着缺陷和不足,总结如下:

a. 近年来关于流场分析计算的理论不断发展,从准三维计算发展到全三维黏性流动计算,但由于水轮机内部流动是极为复杂的紊流流动,需要考虑多种影响因素,故目前没有一种理论能完全真实地反映水轮机内部的实际流动状态.如何发展一种理论以提高反映水轮机内部流态的真实程度,这将是一项长期、艰巨而又复杂的任务.

b. 现有的性能预估方法在设计工况下的预测结果与实验结果具有较好的一致性,但是在非设计工况下,往往产生较大的偏离,因而达不到水轮机性能预估的效果.因此改进性能预估方法和提高非设计工况下的预估精度也是科研工作者亟待解决的问题.

c. 在流态解析中,从蜗壳进口至尾水管出口的各部件水力损失计算模型的计算精度不高,目前主要进行以现有的损失模型为标准的损失解析.今后应开展叶片弯度和厚度的冲击损失及叶片进出水边的非正常流态的损失研究,改进各损失模型,进一步提高损失解析精度.

d. 在 CFD 技术应用方面,与国外相比我国水轮

机性能预估方面 CFD 技术应用的较少,且在 CFD 的实体造型、参数设置及计算结果与实测值的分析比较上存在不小的差异.

尽管近 10 年来 CFD 技术取得了巨大进步,但在绝对精度和水力机械能量损失计算的可靠性上还存在不确定性.因此,对 CFD 领域的科学家和工程师来说,在最优工况和发生强烈流动分离的部分负荷工况下对流体机械内真实流动进行精确数值模拟仍是最大的挑战^[9].

4 结 语

作为当前最先进的研究流体流动工具,CFD 技术能为我们提供直观流场的数据和图形.然而,水轮机的能量性能预估研究是一项复杂的工作,如何把 CFD 技术和水力损失分析有效结合并成功地运用到性能预估中仍然处于摸索阶段.如果能把 CFD 技术和传统的分析水力效率的损失分析结合起来,相信一定能提高水轮机性能预估的精度,进而代替模型试验的部分工作以缩短设计周期和减少投资,更好地为水电事业发展服务.

参考文献:

- [1] 钟英杰,都晋燕,张学梅. CFD 技术及现代工业中的应用[J]. 浙江工业大学学报, 2003, 31(3): 284 ~ 289.
- [2] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2001. 2 ~ 6.
- [3] 姚征,陈康民. CFD 通用软件综述[J]. 上海理工大学学报, 2002, 24(2): 137 ~ 144.
- [4] Захаров А. В. 水轮机能量特性曲线预估[J]. 国外大电机, 2001(4): 66 ~ 70.
- [5] 瞿伦富,朱为民,林汝长,等. 混流式水轮机能量性能预估研究[J]. 水力发电学报, 1994(2): 66 ~ 74.
- [6] Helmut K. 用计算流体力学分段模拟方法实现混流式水轮机的数值预测[J]. 国外大电机, 1999(3): 33 ~ 39.
- [7] 彭国义,郭齐胜,罗兴,等. 水轮机转轮三维边界层计算及性能预估研究[J]. 水利学报, 1999(10): 80 ~ 87.
- [8] Schilling R. 水力机械损失的数值分析[J]. 国外大电机, 2000(3): 62 ~ 66.
- [9] 三浦诚二. 二十一世纪水轮机性能预测[J]. 国外大电机, 1999(3): 76 ~ 78.

(收稿日期 2004-06-20 编辑 骆超)

