3D 欧拉法和层流模型对水轮机转轮内部流场的数值模拟

崔学明 李连超 王海松 常近时

(中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083)

摘 要 3D 欧拉法和层流解法都具有控制方程个数少,计算简单、省时的特点,均能够快速地在最优工况点附近 得到合理的数值解,可以用于转轮叶片的初步的水力计算和其他湍流模型计算结果的校核。分别应用这 2 种算法 对一混流式水轮机转轮内部流体的三维流动进行了数值模拟,方程离散采用有限体积法,插值采用二阶迎风格式, 压力-速度耦合采用 SIMPL EC 算法,计算了 3 个典型工况(最优工况、大流量工况和小流量工况),得到了转轮内部 合理的速度分布和压力分布。最优工况点的效率计算值比试验值高 3.09 个百分点,计算所需时间比标准 k- 湍流 模型少 30 %~40 %。

关键词 转轮; 3D 欧拉法; 层流; 数值模拟 中图分类号 TV 136.1 文章编号 1007-4333(2003)04-0066-04 文献标识码 A

Numerical simulation of flow field in hydraulic turbine runner based on 3D euler method and laminar model

Cui Xueming, Li Lianchao, Wang Haisong, Chang Jinshi

(Water Conservance and Civil Engineering College , China Agricultural University , Beijing 100083 , China)

Abstract 3D Euler method and laminar method have some characteristics of few control equations and simple calculation process and little CPU time. Using the two methods can obtain reasonable numerical simulation results about the point of optimum operating condition rapidly, primary hydraulic calculation in hydraulic turbine runner blade can be used and the calculated results of other turbulence models was verified. Based on the two methods, the 3D flow field of a Francis turbine runner was simulated through computing three typical operating conditions (the optimum operating condition, large flow rate operating condition and little flow rate operating condition) and reasonable distributing of velocity and pressure in the turbine runner was obtained. The distributions of control equations was used the method of finite volume, a method named SIMPLEC was used in order to calculate the velocity and pressure. The results showed that the calculated efficiency at the optimum operating condition is 3.09 % larger than test value and the CPU time is 30 % ~ 40 % less than the time of using the standard k^- turbulence model.

Key words hydraulic turbine runner; 3D Euler method; laminar flow; numerical simulation

水轮机转轮内部流体的真实流动是非定常、有 旋的、不可压缩的、三维黏性流动。人们一直在寻找 适合于水轮机转轮内部流动计算的数值分析方法。 3D 欧拉法能够反映出三维效应和有旋效应,可以在 最优工况点附近得到合理的转轮内部流体的速度和 压力分布,同时可以用来分析导叶和其他过流部件 的流态。1990 年, Abdallah 用 Poisson 方法求解了 轴流式水轮机转轮内部的无黏流动⁽¹⁾。3D 欧拉法 不考虑黏性,无法计算效率⁽²⁾,但可以通过统计规 律或经验公式来估算最优工况点附近的黏性损失; 而考虑黏性项,直接求解 N-S 方程组的一种 3D 黏 性流解法——层流模型,在水轮机转轮内部流场计 算中应用的文献较少。文献[3]分别用层流和湍流 模型对一轴流式水轮机转轮的内部流场进行了计

收稿日期:2002-09-06

基金项目:中国机械联合会三峡水利枢纽工程成套设备研制项目(ZZ01-01-01)

作者简介:崔学明,博士研究生;常近时,博士生导师,教授,主要从事水电站动力设备性能优化和水电站过渡过程的研究

算,取得了满意的结果。本文中尝试用 3D 欧拉法 和层流解法进行水轮机转轮内部流场的数值模拟。 这 2 种计算方法都具有控制方程个数少,计算简单、 省时的特点,均能够快速地在最优工况点附近得到 合理的数值解,可以用于转轮叶片的初步的水力计 算和校核其他湍流模型的计算结果。

1 无黏模型

对于定常、不可压缩的理想流体,在水轮机转轮 以角速度 绕固定轴 z 旋转的相对直角坐标系(x, y, z)中,其 Euler 方程为:

连续方程
$$\partial u_{j}/\partial x_{j} = 0$$
 (1)
动量方程 $u_{j} \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} = f_{i} - \frac{1}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial x_{i}}$ (2)

式中: u_i , u_j (i, j = 1,2,3)为相对速度(m·s⁻¹),分 别对应 u, v, w; x_i , x_j (i, j = 1,2,3)代表坐标方向 x, y, z; 为流体密度, kg·m⁻³; p 为流体压力, N· m⁻²; f_i 为单位质量力,分别为 $f_1 = {}^2x + 2 v$, $f_2 = {}^2y - 2 u$, $f_3 = g$ 。

Euler 方程只包含 3 个速度分量和 1 个压力,因 而方程组是封闭的,只要给定初始条件和边界条件 便可求解。

2 层流模型

对于定常、不可压缩流体,在水轮机转轮以角速 度 绕 z 轴旋转的相对直角坐标系(x,y,z)中,其 层流运动的控制方程^(3,4)为:

连续方程
$$\partial u_j / \partial x_j = 0$$
 (3)

动量方程
$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\partial x_i} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\partial x_i} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)$$
 (4)

式中, μ 为流体的动力黏性系数,N·(s·m⁻²)。

3 边界条件及数值解法

3.1 边界条件

1)进口条件。通过给定的计算工况点的单位流 量及活动导叶的出流位置和出流角,求出计算控制 体进口的径向速度 V,和切向速度 V,采用旋转柱 面坐标系。

2) 出口条件。出口位置的流体物理量沿流线方 向变化, 梯度为 0。本文中采用质量流量出口。

3) 周期性条件。在转轮进口向上游,出口向下

游延伸的计算域的两侧,给定周期性边界条件,即

$$|_{R} = |_{L} (= u, v, w, p)$$

3.2 网格划分及数值解法

1) 网格划分。选取一混流式水轮机转轮内 2 叶 片之间的过流通道(整个转轮过流通道的 1/13) 进 行计算。计算域进口为导叶出口,出口为尾水管直 锥段底部(图 1)。为保证网格剖分的精度,采用结 构化网格,网格剖分后的计算结点数为 87 000 个, 迭代的收敛精度设为 0.000 01。达到设定收敛精度 每个计算工况点的计算时间约需 2 h(P4 微机,主频 1.4 GHz,内存 512 MB)。



图1 计算控制体

Fig. 1 The calculative field

2)数值解法。控制方程的离散采用有限体积 法;离散方程的求解采用 SIMPLEC 算法^[5];动量方 程的差分方式采用二阶迎风格式;压力系数 0.1~ 0.3,动量系数 0.5~0.7,在最优工况点附近取大 值,远离最优工况点时取小值。

4 数值计算结果与分析

4.1 模型转轮的主要参数

转轮直径 $D_1 = 350 \text{ mm}$,叶片数 Z = 13,导叶相 对高度 $B_0 = 0.315$,导叶分布圆直径 $D_0 = 416 \text{ mm}$, 试验水头 H = 30 m。

表1示出数值计算的3个计算工况点的参数, 其中,工况2为最优工况点,工况1为小流量工况点 (60%负荷),工况3为大流量工况点(出力限制线 上)。

表1 计算工况点的参数

Table 1 Parameters of typical operating condition	Table 1	Paramete	ers of typical	l operating	condition
---	---------	----------	----------------	-------------	-----------

参数	工况 1	工况 2	工况 3
角速度 /(rad s ⁻¹)	128.72	127.50	127.82
单位流量 Q /(L s ⁻¹)	785	1 050	1 290
单位转速	78.0	77.8	78.0

4.2 应用无黏模型的计算结果

表 2 示出应用无黏模型得到的计算结果,可以 作出以下判断: 1) 在同一单位转速(同一水头)下,叶片力矩(单 位力矩,为整个转轮力矩的 1/13) 的计算值随流量 增大而增大,这是符合规律的。

Table 2 Calculated resoults of using inviscid model						
工况	力矩 M∕ (N ⋅m)	流量 <i>Q/</i> (L s ⁻¹)	水头 H/m	效率试验值 √ %	叶片最低压力∕ kPa	出口圆周速度⁄ 人 (m ·s ^{- 1})
1	79.41	40.20	27.12	86.0	- 21.481	4.0029
2	120.43	53.77	30. 38	92.8	- 79.022	0. 735 6
3	141.48	66.06	29.52	87.9	- 117.388	- 2.4824

表 2 无黏模型计算结果

2) 随着流量的增大,叶片最低压力点的压力降低,工况3叶片背面的最低压力为-117.388 kPa, 这意味着大流量工况下有发生汽蚀的危险。

3) 工况 2 转轮出口圆周速度计算值为0.735 6 m s⁻¹,与理想情况接近;工况 1 为 4.002 9 m s⁻¹, 转轮出口具有较大的环量,此工况下尾水管将产生 压力脉动,造成水轮机的不稳定运行。大量计算结 果表明,流量越小转轮出口圆周速度越大,这与实际 情况一致。工况 3 的出口圆周速度为 - 2.482 4 m · s⁻¹,在这种大流量工况下,随着流量的增大,出口圆 周速度的负值也增大。

图 2 示出最优工况下叶片正、背面的压力分布。 正面的压力梯度不大,分布较均匀,而背面存在很大 的压力梯度,最低压力点出现在接近出水边靠近下 环的地方,计算结果和理论相吻合。图 3 示出最优 工况下叶片正、背面流体的速度分布。正面速度变 化不大,背面在靠近下环处速度上升明显,与工程实



图 2 无黏模型得到的叶片表面的压力分布/Pa





图 3 叶片表面流体的速度分布/ $(m s^{-1})$

Fig. 3 The velocity distribution in the runner blade used in inviscid model

7

4.3 层流模型的计算结果

表 3 给出应用层流模型得到的计算结果,最优 工况点(工况 2)的效率计算值为 95.89 %,比试验值 高 3.09 个百分点,这表明在最优工况点用层流模型 是可以预测转轮的水力性能的。最优工况点叶片表 面压力和速度分布与无黏流动模型结果相似,3个 计算工况点其他项目计算结果的分析同 4.2 无黏模 型,在此不再赘述。

Table 3 Calculated results of using laminar model							
 \D	力矩 M/	流量 Q/	水头 H/	效率/ %		叶片最低	出口圆周速度/
上况	(N •m)	(L s ⁻¹)	m	计算值。	试验值。	压力/ kPa	(m s ⁻¹)
1	79.35	40.20	27.12	94.92	86.0	- 21.081	3. 998 3
2	120.48	53.77	30.40	95.89	92.8	- 79.156	0.7393
3	141.44	66.06	29.54	94. 52	87.9	- 117.634	- 2.4762

表 3 层流模型计算结果

4.4 计算结果与试验结果的比较

图 4 示出层流模型的计算结果与试验结果,在 最优工况点附近计算结果与试验结果接近,层流模 型能够正确地模拟转轮内的流动并能预测其水力性 能。偏离最优工况,特别是在小流量和大流量工况 下,无黏模型和层流模型的计算结果与试验结果相 差甚远。





Fig. 4 The computing results of using laminar model vs the test results

5 结 论

1) 在最优工况点附近, 无黏模型和层流模型的 计算结果均与试验结果接近; 偏离最优工况点, 模型

则不适用。

2)这2种计算模型都具有控制方程个数少,计 算简单、快速的特点,可用于转轮叶片初步的水力计 算和转轮水力性能的预测,且可以校核其他湍流模 型的计算结果。

3)2种计算模型计算所需时间相差不大,和标 准 k- 湍流模型相比可节省 30%~40%。

参考文献

- Abdallah S, Smith C F. Three-dimensional solutions for inviscid incompressible flow in turbo-machines [J]. J of Turbo-machinery, 1990,112:391 ~ 398
- [2] Schilling R, Riedel N, Ritzinger S. A critical review of numerical models predicting the flow through ydraulic machinery blades[A]. Beijing: Proceedings of the XVII IAHR Symposim, 1994.15 ~ 31
- [3] 林斌良,许协庆.水轮机转轮内部层流和湍流的三维计算[J].水利学报,1990(3)22~32
- [4] Batchelor G K. An introduction to fluid dynamics [M]. Cambridge, England: Cambridge Univ Press, 1967.
- [5] Van Doormaal J P, Raithby G D. Enhancements of the SIMPLEC method for predicting incompressible fluid flows[J]. Numerical Heat Transfer, 1984(7):147~163