

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 SIMPLEC 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 $k-\epsilon$ 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 $k-\epsilon$ 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

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。

表 2 无黏模型计算结果

Table 2 Calculated results of using inviscid model

工况	力矩 $M/$ (N·m)	流量 $Q/$ (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/ (m·s ⁻¹)
1	79.41	40.20	27.12	86.0	- 21.481	4.002 9
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	- 2.482 4

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 $0.735 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,与理想情况接近;工况 1 为 $4.002 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,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 $- 2.482 4 \text{ m} \cdot$

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,与工程实际相符。



图 2 无黏模型得到的叶片表面的压力分布/Pa

Fig. 2 The pressure distribution in the runner blade used in inviscid model

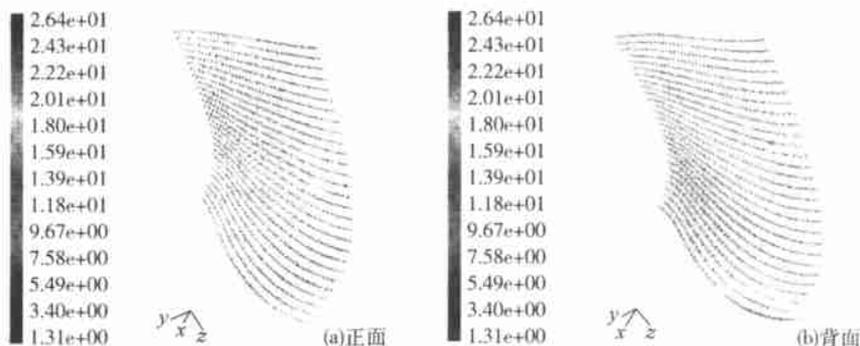


图 3 叶片表面流体的速度分布/(m·s⁻¹)

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

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。

表3 层流模型计算结果

Table 3 Calculated results of using laminar model

工况	力矩 M / (N·m)	流量 Q / (L·s ⁻¹)	水头 H / m	效率/%		叶片最低 压力/kPa	出口圆周速度/ (m·s ⁻¹)
				计算值 η_c	试验值 η_e		
1	79.35	40.20	27.12	94.92	86.0	-21.081	3.9983
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

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。

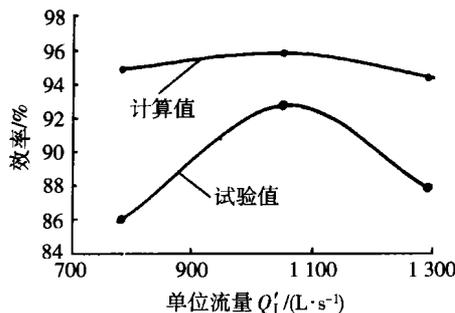


图4 层流模型计算结果与试验结果

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 - ϵ 湍流模型相比可节省30%~40%。

参考文献

- [1] 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 SIMPL-EC method for predicting incompressible fluid flows[J]. Numerical Heat Transfer, 1984(7):147~163