

基于CFD的潮流能水轮机数值模拟研究

张强¹, 郑源², 陈会向¹

(1. 河海大学 能源与电气学院, 南京 211100; 2. 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 南京 210098)

摘要: 为了开发一种水力性能良好的水平轴潮流能水轮机, 以Fluent软件为平台, 利用CFD技术, 对潮流能水轮机进行三维湍流数值模拟; 利用三种具有不同特征翼型形成两种类型共8种不同叶片, 对这8种叶片形成的水轮机流场进行三维数值模拟计算。模拟结果发现, 水轮机叶片叶尖采用对称翼型及叶根采用弯度较大翼型能够获得较好的水力性能。最优方案水轮机内部流场流态良好, 符合设计要求。

关键词: 潮流能; 潮流能水轮机; 数值模拟; 叶片设计; 翼型

中图分类号: TM619 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0518-04

Numerical simulation of tidal current energy turbine based on CFD

ZHANG Qiang¹, ZHENG Yuan², CHEN Hui xiang¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to develop a horizontal axis tidal current energy turbine with high hydraulic performance, three dimensional numerical simulation was applied to simulate the tidal current energy turbines using CFD technology with FLUENT as the platform. Three different airfoil shapes were used to form a total of eight blades of two types, and the flow fields of the turbine produced by the eight blades were simulated. The results showed that the turbine with the symmetrical airfoil in the tip of blade and large camber airfoil in the root of blade has better hydraulic performance. The flow pattern of the optimal turbine is good and can meet the design requirements.

Key words: tidal current energy; tidal current energy turbine; numerical simulation; blade design; airfoil

在已知的各种形式海洋能中, 潮流能的能流密度最大。相对于风能、太阳能等能源, 它的能量更加集中。同时潮流能的能量转换装置具有较小几何尺度的优势, 尺寸数10 m左右的机组其装机容量可达百kW级^[1]。几何尺度的优势使它施工更加灵活方便, 同时对海洋生态环境的影响也较小。基于这样的原因, 潮流能正越来越受到国内外人们的重视。我国海洋潮流能储量丰富, 潮流能理论平均功率为13 940 MW^[2], 其开发利用潜力巨大。

潮流能水轮机是潮流能能量转换的重要装置, 对开发及利用潮流能十分重要。其动力原理、机械构造以及能量特性是目前潮流能开发的研究重点和难点。其中水平轴潮流能水轮机是获取潮流能的常用装置。

国外的潮流发电研究开始于20世纪70年代中期, 2004年英国的MCT公司成功制造出第一台并网型, 额定容量300 kW的机组。从总体来看, 与国外相比我国潮流能发

电技术还比较落后。我国潮流能开发利用项目容量都在百kW内, 且大部分为国家资助项目, 国内企业或公司还没有参与, 各项技术的提升空间较大。

本文拟通过建立不同形式叶片和水轮机的三维模型, 利用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)技术进行基于不可压缩连续方程、雷诺时均NS方程和SA湍流模型的三维数值模拟计算, 以期得到一种效率及出力均较高的潮流能水轮机。

1 叶片及水轮机模型

1.1 叶片型式及翼型选择

为了寻找到一种较优的叶片, 在对已有不同特征翼型水动力性能分析比较^[3,4]的基础上, 本文利用三种不同翼型形成的叶片进行分析, 分别是NACA 63-212、NACA 6409和NACA 4412^[6](图1)。其中, NACA 63-212是一种对称翼

收稿日期: 2014-07-28 修回日期: 2015-04-19 网络出版时间: 2015-05-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150513.1553.022.htm>

作者简介: 张强(1991-), 男, 江苏东台人, 主要从事流体机械数值模拟方面研究。E-mail: qiangzh0309@163.com

通讯作者: 郑源(1964-)男, 山东日照人, 教授, 博士, 从事流体机械及工程研究。E-mail: zhengyuan@hhu.edu.cn

型,其相对弯度很小,厚度适中;NACA 6409 相对弯度较大,但是相对厚度较小;NACA 4412 的相对弯度和相对厚度均介于 NACA 63-212 和 NACA 6409 之间。

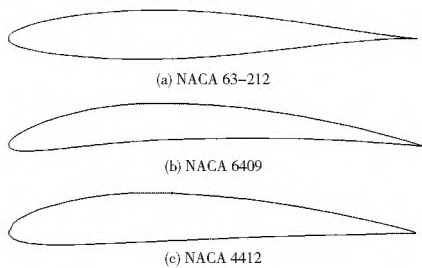


图 1 三种翼型形状对比

Fig. 1 Comparison of three airfoil shapes

根据现有翼型理论,弯度越大的翼型,其升力系数越大,翼型的升阻比也越大,则整体装置的能量转换性能也越好,但是其结构强度及过流能力则相对减弱。因而最终的叶片采用何种翼型,还需要通过进一步的数值模拟结果进行分析研究。

本次叶片设计,选择了两种不同类型的叶片进行分析对比(图 2):第一类与风力机叶片类似,叶尖较窄而叶根较宽;第二类与普通贯流式水轮机叶片类似,叶尖较宽而叶根较窄。



图 2 两种型式叶片形状对比

Fig. 2 Comparison of two types of blade shapes

每类型式的叶片,分别采用上述三种翼型,按照表 1 形成 4 种不同叶片。两类叶片型式共产生 8 种叶片做进一步分析比较。

表 1 四种叶片所采用翼型

Tab. 1 Airfoil types of four blades

叶片编号	叶尖翼型	叶根翼型
1	NACA 63-212	NACA 6409
2	NACA 63-212	NACA 4412
3	NACA 6409	NACA 63-212
4	NACA 4412	NACA 63-212

1.2 水轮机三维模型构建

水轮机叶片的叶尖及叶根扭角相对于叶轮旋转平面分别为 5° 和 30° 。转轮直径为 3 m,轮毂直径 0.9 m,轮毂比为 0.3。考虑到流动的充分发展,计算区域沿流动方向取 20 m,垂直流动方向取 5 m。最终,建立的叶片及转轮的模型见图 3。

2 数值计算原理和方法

2.1 计算方法

CFD 是在流动基本方程(质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程)控制下对流动进行的数值模拟。本文的研究介质是海水,其流动为不可压缩黏性湍流,在潮流能水轮机的应用中热交换很小且可以忽略不计,因此不考虑能量守恒方

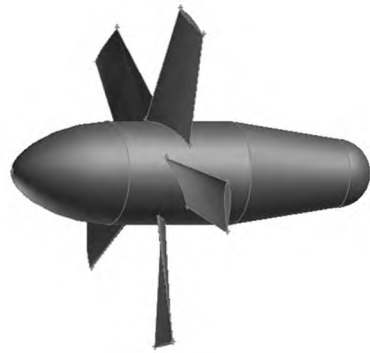


图 3 叶片及转轮模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of blade and runner model

程,而控制方程采用连续性方程及三维定常 NS 方程^[7]进行求解计算。Spalart Allmaras 模型作为一种单方程涡粘系数模型,在湍流对流动影响不大,需要有较好的边界层计算效果同时网格精度要求不高时可以选择^[9]。多次计算表明,采用该模型收敛速度快,计算结果与试验接近,因此本文选用了 Spalart Allmaras 模型,并以壁面函数法修正。

为保证计算精度,选择二阶迎风格式进行离散,隐式求解,各松弛因子均采用默认值。离散后方程组不能直接求解,需通过修正方法进行调整,本文采用在 SIMPLE 算法基础上改进的 SIMPLEC 算法。控制方程的离散选用 Standard 方式,压力项采用二阶格式。动静相干模型采用简单明了的多跟踪观察参考量系模型(MRF)^[10]。

2.2 网格划分

考虑到模型结构的不规则性和流动的复杂性,采用非结构网格对计算区域进行划分:

对于叶轮段,由于直接划分体网格比较困难且需要对叶片进行细致的流态分析,所以先对面进行网格划分,即划分叶片压力与吸力面,单元类型选用 Tri,划分方式选择 Pave;然后进行体网格的划分。由于转轮叶片区域结构较复杂,故对其所在区域进行局部加密技术。叶轮段网格节点数为 117 866,单元数为 594 253。

对于流道段,则直接进行体网格的划分,单元类型选用 Tet/Hybrid,划分方式选择 TGrid(混合网格)。流道段网格节点数为 79 689,单元数为 433 446。

忽略机壳与轮缘间的间隙流动,动静部分之间采用 GGI 拼接网格技术。叶轮段及流道段的网格质量 EquiAngle Skew 均控制在 0.85 以下,满足计算要求。

计算区域的整体网格划分见图 4。

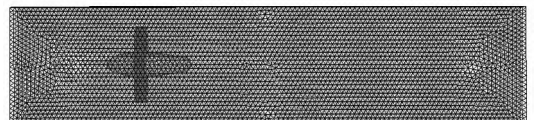


图 4 叶片及转轮整体网格划分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the grids of blade and runner model

2.3 边界条件

由于研究介质海水为不可压缩流体,入口断面处速度(即无穷远来流速度)已知,且进、出口断面压力无变化,故选取进口边界条件为速度进口(velocity inlet);由于出流边界上的压力和速度均未知,选择自由出流(outflow)作为出口边

界条件;速度进口流速大小为 2 m/s, 方向为 + X 轴; 转轮区流体随转轮旋转, 转速为 50 r/min; 流道区内流体为静止, 不同区域边界设置交界面(interface)。

此外, 将轮毂, 叶片等部件都设成旋转状态。

3 计算结果及分析

利用 CFD 软件对两类共 8 种叶片形成的水轮机三维流场进行数值模拟计算, 水轮机出力及效率见表 2 和 3。

表 2 第一类叶片型式计算结果

Tab. 2 Calculation results of the first type of blade

叶片编号	流量 / (m ³ · s ⁻¹)	进口总压 / Pa	出口总压 / Pa	扭矩 / (N · m)	出力 / kW	效率 (%)
\tilde{N} -1	40.43	1 468.67	499.42	3 236.24	16.94	43.24
\tilde{N} -2	40.43	4 656.37	3 769.18	2 925.22	15.32	42.70
\tilde{N} -3	40.43	5 032.68	3 986.04	3 334.91	17.46	41.26
\tilde{N} -4	40.43	2 719.69	1 793.44	2 927.54	15.33	40.93

表 3 第二类叶片型式计算结果

Tab. 3 Calculation results of the second type of blade

叶片编号	流量 / (m ³ · s ⁻¹)	进口总压 / Pa	出口总压 / Pa	扭矩 / (N · m)	出力 / kW	效率 (%)
\tilde{O} -1	40.43	5 198.18	4 081.44	3 465.34	18.14	40.19
\tilde{O} -2	40.43	5 661.87	4 622.95	3 216.30	16.84	40.09
\tilde{O} -3	40.43	5 672.19	4 406.33	3 640.99	19.06	37.25
\tilde{O} -4	40.43	2 486.95	1 381.13	3 240.54	16.97	37.95

由表 2、表 3 可以看出, 第一类叶片型式其出力均低于同翼型组成的第二类叶片型式, 但是效率均高于第二类叶片型式; 第二类叶片型式最高出力能够达到 19 kW, 但是其对应的效率仅为 37.25%。分析其原因, 主要在于两类叶片型式的模型差异。对于水轮机来说, 叶片是影响其能量转换性能的关键, 而一个叶片的能量转换性能又主要是由叶尖部分决定的。第一类叶片型式采用较窄的叶尖翼型, 因而其水力损失会相对较小, 但是相对应的做功能力就会较差, 因而在外特性上表现出来的就是出力相对较低而效率相对较高。第二类叶片型式采用较宽翼型, 其水力损失会相对较大, 做功能力会较好, 在外特性上表现出较高的出力和较低的效率^[14-12]。

两类叶片型式计算结果内在规律相似, 对第一类叶片型式计算结果进行分析, 第二类叶片型式分析同理: \tilde{N} -1、 \tilde{N} -2 两种叶片的叶尖均采用 NACA 63-212 翼型, 叶根则分别采用 NACA 6409 和 NACA 4412 翼型, \tilde{N} -1 的效率稍大于 \tilde{N} -2, 而出力明显大于 \tilde{N} -2。这是由于弯度较大的 NACA 6409 翼型具有更大的升力系数和升阻比, 因而能够获得更大的出力^[13]。由于叶尖的翼型相同, 两个叶片水力损失相差不大, 能量转换性能相当, 即效率相近。 \tilde{N} -3 和 \tilde{N} -4 叶片的情况与此类似。

\tilde{N} -1 和 \tilde{N} -3 两种叶片采用相同的翼型构成, 只是分别在叶尖和叶根的位置进行调换。两种叶片出力效果相近, \tilde{N} -3 略大于 \tilde{N} -1, 但是 \tilde{N} -1 效率明显大于 \tilde{N} -3。原因在于: 叶片采用的翼型相同, 因而其出力相差不大; \tilde{N} -1 叶片的叶尖为对称翼型 NACA 63-212, 而 \tilde{N} -3 叶片叶尖为弯度较大的翼型 NACA 6409, 叶尖是水轮机能量转换性能的关键, \tilde{N} -1 叶片叶尖翼型的水力损失明显大于 \tilde{N} -3 叶片叶尖翼型, 因而 \tilde{N} -1 叶片的效率高于 \tilde{N} -3 号叶片。对比 \tilde{N} -2 号、 \tilde{N} -4 号叶片可以

得出同样结论。

综合分析两种叶片型式计算结果, \tilde{N} -1 号叶片和 \tilde{O} -1 号叶片的水力性能分别在两类叶片中相对突出, 两种叶片的叶尖均采用 NACA 63-212 的对称翼型, 而叶根则采用弯度较大的 NACA 6409 翼型。两种叶片出力仅相差 1.2 kW, 但是效率相差接近 3%, 因而从外特性来看 \tilde{N} -1 号叶片为 8 种叶片中的较优叶片。

下面对 \tilde{N} -1 号和 \tilde{O} -1 号叶片的表面静压分布情况进行比较分析, 两个叶片压力面及吸力面压力分布如图 5 所示。

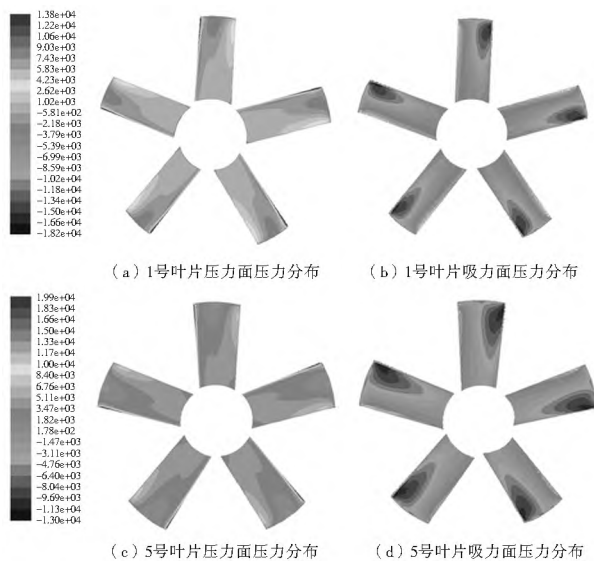


图 5 两种叶片压力云图

Fig. 5 Pressure nephogram of two blades

两种叶片的压力云图整体分布规律较为相似, 压力梯度变化较均匀, 压力面压强明显大于吸力面压强, 因而能够表现出良好的水力性能。压力面压强分布为: 从进水处呈现最大静压, 然后向出水处过渡的过程中先逐渐减小, 然后又继续增大直到出水处; 吸力面压强分布则是从进水处的最小静压一直增大直到出水处。

比较两种叶片, \tilde{O} -1 号叶片压力面静压分布较为均匀, 没有明显的分层现象; \tilde{N} -1 号叶片压力面静压分布则有较为明显的分层现象。两种叶片吸力面均存在明显的低压区, 但是 \tilde{O} -1 号叶片的低压区较为分散, 而 \tilde{N} -1 号叶片低压区则较为集中, 因而从气蚀性能来看 1 号叶片要优于 \tilde{O} -1 号叶片, 但总体来说影响不大^[14-15]。 \tilde{O} -1 号叶片压力面与吸力面的压差要高于 \tilde{N} -1 号叶片, 因而在外特性上表现出更高的出力。

通过上述外特性和内特性的比较分析, 最终选择 \tilde{N} -1 号叶片为较优叶片。

图 6 为最终选用水轮机流线图。从图中可以看出整个流道内流线上、下对称, 顶部和底部流线顺直, 无不良流态。在水轮机转轮体后流线呈绕流道中心的螺旋线状, 流态较为

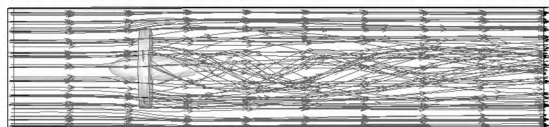


图 6 水轮机流态图

Fig. 6 Flow pattern of the turbine

顺畅,无明显的漩涡及涡带产生。

4 结语

本文利用两种类型、三种翼型形成 8 种不同叶片,通过 CFD 软件对 8 种叶片的水轮机分别进行三维数值模拟计算,分析了这些水轮机的效率、出力和转轮叶片表面静压分布情况,得到一种综合表现较优的潮流能水轮机。水轮机流道内部水流流态良好,流线平滑,无回流、局部漩涡等不良流态。模拟结果表明,叶尖采用对称的 NACA 63212 翼型及叶根采用弯度较大的 NACA 6409 翼型形成的两种类型叶片均在同类型叶片中水力性能表现最好。

参考文献(References):

- [1] 王树杰. 柔性叶片潮流能水轮机水动力学性能研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009. (WANG Shu jie. Study on hydrodynamic performances of a tidal current energy conversion device with flexible blade turbine[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. (in Chinese))
- [2] 崔民选. 中国能源发展报告[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2007. (CUI Min xuan. Development report on China's energy[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2007. (in Chinese))
- [3] 李德顺. 水平轴风力机专用翼型的空气动力学性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008: 32-46. (LI De shun. Investigation of aerodynamic performance of special airfoils for horizontal axis wind turbine[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2008: 32-46. (in Chinese))
- [4] 岑美, 李龙, 李健. 基于 FLUENT 分析弯度对翼型性能的影响[J]. 中国农村水利水电, 2008, 09: 128-130+133. (CEN Mei, LI Long, LI Jian. Analysis of the influence of airfoil's camber on the performance based on FLUENT[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008, 09: 128-130+133. (in Chinese))
- [5] Walter P. Wolfe, Stuart S. Ochs. CFD calculations of S809 aerodynamic characteristics. AIAA Paper 97-0973: F8
- [6] 钱翼稷. 空气动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004, 9. (QIAN Yi ji. Aerodynamics[M]. Beijing: Beihang University Press, 2004, 9. (in Chinese))

- [7] 王惠民, 赵振兴. 工程流体力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2004: 45-64. (WANG Hu i min, ZHAO Zhen xing. Engineering fluid mechanics[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2004: 45-64. (in Chinese))
- [8] 王惠民. 流体力学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. (WANG Hu i min. Hydromechanics basis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese))
- [9] 李文华, 苏明军. 常用湍流模型及其在 FLUENT 软件中的应用[J]. 水泵技术, 2006(04): 39-40+31. (LI Wen hua, SU Ming jun. Common turbulence model and its application on FLUENT[J]. Pump Technology, 2006(04): 39-40+31. (in Chinese))
- [10] 王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (WANG Fu jun. Computational fluid dynamics analysis principle and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [11] 马舜, 李伟, 刘宏伟, 等. 水平轴潮流能发电系统能量捕获机构研究[J]. 机械工程学报, 2010(18): 150-156. (MA Shun, LI Wei, LIU Hong wei et al. Research on the energy capture device of horizontal axis tidal current energy conversion systems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010(18): 150-156)
- [12] 袁金雄. 基于 Fluent 的潮流能提取水动力影响数值研究[J]. 人民黄河, 2013(02): 125-127. (YUAN Jin xiong. Numerical study on hydrodynamic impact of tidal current energy extraction based on software of fluent[J]. Yellow River, 2013(02): 125-127. (in Chinese))
- [13] 康海贵, 郭伟. 竖轴水轮机三维水动力响应的数值模拟[J]. 太阳能学报, 2013(03): 537-541. (KANG Hai gui, GUO Wei. Three dimensional numerical simulation for hydrodynamic response of vertical axis tidal current turbine[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2013(03): 537-541. (in Chinese))
- [14] 刘胜柱. 水轮机内部流动分析与性能优化研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005. (LIU Sheng zhu. Flow field analysis and hydraulic performance optimization for hydraulic turbine[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005. (in Chinese))
- [15] 刘德民, 程宦, 袁凌丽. 潮流能水轮机水力特性研究[J]. 东方电机, 2013(6): 9-12. (LIU De min, CHENG Huan, YUAN Ling li. Analysis on hydraulic characteristics of tidal current energy turbine[J]. Dongfang Electrical Machine, 2013(6): 9-12. (in Chinese))

(上接第 481 页)

- [9] 苏未安, 陈秀洪. 用旋转矢量法研究“拍”现象[J]. 江西理工大学学报, 2009, 30(1): 60-63. (SU Wei an, CHEN Xiuhong. Study on “beat” phenomenon with the method of rotating vector[J]. Journal of Jiangxi University of Science and Technology, 2009, 30(1): 60-63. (in Chinese))
- [10] 王永涛, 臧勇, 吴迪平等. CSP 轧机扭振中“伪拍振”的研究[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(2): 210-213. (WANG Yong tao, ZANG Yong, WU Di ping, et al. Fake beating vibration in main driving torsion of CSP mill[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(2): 210-213. (in Chinese))
- [11] 周康巍. 拍现象与外差变频的区别[J]. 大学物理, 1983, (5): 1-4. (ZHOU Kang wei. The difference between the beat phenomenon and heterodyne frequency[J]. DaXue WuLi, 1983, (5): 1-4. (in Chinese))
- [12] 练继建, 李成业, 刘昉, 等. 环境激励下二滩拱坝拍振机理研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(3): F7. (LIAN Ji jian, LI Cheng ye, LIU Fang, et al. Beat vibration of earth arch dam under ambient excitation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012,

- 31(3): F7. (in Chinese))
- [13] 练继建, 崔广涛, 黄锦林. 导墙结构的流激振动研究[J]. 水利学报, 1998, (11): 33-37. (LIAN Ji jian, CUI Guang tao, HUANG Jin lin. Study on flow induced vibration of spillway guide wall[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, (11): 33-37. (in Chinese))
- [14] 徐国宾, 尹伟波, 练继建, 等. 糯扎渡水电站溢流道泄槽流激振动试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(6): 24-27. (XU Guo bin, YIN Wei bo, LIAN Ji jian, et al. Experimental study on flow-induced vibration in spillway chute of Nuozhadu hydropower station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(6): 24-27. (in Chinese))
- [15] 崔广涛, 安刚, 李军. 低水头大流量溢流坝系统水激振动研究[J]. 水利学报, 1994, (1): 10-18. (CUI Guang tao, An Gang, LI Jun. Flow-induced vibration of low head and large discharge overflow dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, (1): 10-18. (in Chinese))