

# 考虑水质状况的空化流计算理论\*

王磊 常近时

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

**【摘要】** 传统的空化流计算理论均以气穴内与表面上压力为常数,并等于海拔高度为零时的 20℃ 清水汽化压力作为空化流的计算边界条件,把空化和汽化概念混为一谈,而且没有考虑水质状况对空化压力特性的重要影响。本文通过水质状况对空化压力特性影响的分析,提出了考虑水质状况的空化流计算理论与方法。该理论对势流理论和多相流理论的空化计算均适用。最后通过水轮机流场的计算实例验证了水质条件对空化流场流动特性的显著影响。

**关键词:** 空化流 空化压力 水质状况 水轮机

**中图分类号:** TK734; TV131.3<sup>+</sup>2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)03-0062-05

## Computational Theory of Cavitating Flows with Consideration of Influence of Water Quality

Wang Lei Chang Jinshi

(College of Water Conservancy & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

### Abstract

In conventional computational theory of cavitating flows, it is assumed that the pressure within the cavity or on the cavity surface remains constant and is equal to the vapor pressure of the clean water at 20℃ and at zero altitude. The cavitation is confused with the vaporization, and the effect of water quality on cavitation pressure characteristic is not taken into account. The effect of water quality on cavitation pressure characteristic was analyzed and the computational theory and method of cavitating flows that considered the influence of water quality was proposed. The theory is suitable for both the potential theory and two phase method for cavitating flow simulation. Finally the validation results for cavitating flows in a hydraulic turbine indicated the significant influences of water quality on the cavitating flow performance.

**Key words** Cavitating flow, Cavitation pressure, Water quality, Hydraulic turbine

### 引言

空化是水体压力降低至某一临界值时,相应产生空泡或空穴的现象。当空泡运动至压力稍高处溃灭时,将造成以水作为工质的水轮机、泵、船用螺旋推进器以及水工建筑物等构件过流表面发生高频微观冲击破坏,在工程上造成巨大的经济损失。为了减少这种损失,提高机器的运行效率、稳定性与可靠性,近百年来许多国家的学者对空化流动进行了研

究,提出以各种假设为前提的计算理论与计算方法。

20世纪50~60年代之前,空化流计算以古典的射流理论与势流线性理论为主。70年代后广泛采用数值计算,并相继出现各种三维非线性理论局限空化流计算理论<sup>[1]</sup>与两相流计算方法<sup>[2-4]</sup>。但由于缺乏有效的观测手段,至今还难以用试验严格验证这些理论计算结果和某些前提假设的正确性。

这些计算理论与方法都没有计入水质特性对空化流场计算及其结果的影响,计算多采用海拔高度

为零时的 20℃ 清水作为对象,临界空化压力  $H_v$  取 0.24 m 水柱高。许多教科书中甚至认为该值即为水的汽化压力或饱和蒸汽压力值,把空化这一主要基于水中空化核子数量与大小的气体多变过程同水从液相向汽相转化的相变过程混为一谈。此外,常取气穴内和边界上压力等于常数,即等于水的汽化压力作为计算边界条件。这些概念同水的空化实际严重不符,当然计算结果不可能符合实际现象。

实际上地球上的天然水中均含有不同数量泥沙、有机物等固体微粒,并均承受因海拔高度不同而不同的宇宙射线电离量的影响,从而影响水中空化核子的数量与尺寸,也就从根本上影响水质的空化压力特性。

尽管人们早就注意到水中泥沙与宇宙射线两个因素对空化核子数量与尺寸可能有重要影响,但只是在近些年来通过大量试验才真正揭示了这种影响水质空化压力特性的规律<sup>[5-8]</sup>。这些成果不仅为确定水轮机、水泵的安装高度提出了全新的理念和方法,而且对空化流场的正确计算提供了新的理论依据。

## 1 考虑水质状况的空化流计算理论

传统的空化流计算的基本概念是<sup>[9-11]</sup>:

- (1) 空化发生的边界条件是压力低于当时温度下水的汽化压力或饱和蒸汽压力,水体发生空化。
- (2) 空化流计算时广泛采用气穴内部与表面压力为常数,且该压力与地处海拔高度为零时清水的汽化压力为 0.24 m 作为边界条件。
- (3) 空化流的相似准测数以空化数  $\lambda$  来表示

$$\lambda = \frac{p_{\infty} - p_v}{\frac{1}{2}\rho v_{\infty}^2}$$

式中  $p_{\infty}$ 、 $v_{\infty}$ ——未受干扰的液体压力、速度  
 $p_v$ ——空化压力,计算时取  $p_v$  为常数

由于  $p_v$  值与海拔高度、泥沙浓度有着十分重要的关系,实际不为常数,所以空化流动的模拟必须保证水质条件基本相同。

水的空化压力特性以初生空化压力、临界空化压力随水质不同而变化的特性来表示。在温度一定的情况下,水体因内压力降低产生第一批气泡时的空化压力称为初生空化压力;当产生大量气泡而使水体处于沸腾状态时的空化压力称为临界空化压力。当压力为两者之间时,对应于不同的空化状态。

文献[5~8]通过对不同水质空化压力特性的测定与研究,发现清水的初生、临界空化压力值随海拔高度的增加而增大,如图 1 所示。图中横坐标 A、B、C、D、E、F 分别对应北京(实验室所在地)、青铜

峡、八盘峡、龙羊峡、拉萨、那曲的海拔高度。含沙水的初生、临界空化压力随泥沙浓度的增大而增大,近似呈线性关系,如图 2 所示。分析指出:随地点海拔高度的增大,宇宙射线电离量增加,从而激发水体中气核数量增多、尺寸增大,导致了水体空化压力值的增加;含沙水中的泥沙浓度增大,使得隐藏在固体颗粒表面缝隙处的气核数量增多,导致了空化压力值的增加。因此,水体的空化压力特性受海拔高度、泥沙浓度的影响。

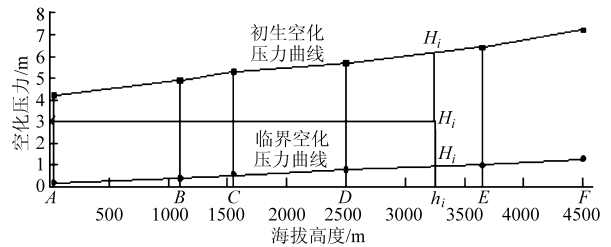


图 1 清水空化压力与海拔的关系

Fig. 1 Cavitation pressure characteristics of clean water

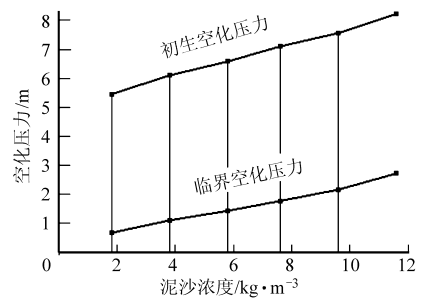


图 2 青铜峡含沙水空化压力特性

Fig. 2 Cavitation pressure characteristics of sand water in Qingtongxia hydropower station

水的空化压力特性与海拔高度或泥沙浓度的关系如图 3 所示。从图中可以看出,即使在同一种水质条件下(相同的海拔高度或泥沙浓度),初生空化与临界空化压力也有较大的差值,其间有无限个空化压力  $H_i$ ,对应着无限多个空化状态。如在某翼型的空化绕流计算中,当翼型上最低压力点  $M$  为初生空化压力时,该点出现单一气泡,如图 4a 所示。当  $M$  点的压力继续降低,空穴区域增大;空穴区域内出现无限个大小各异的气泡,有着不同的空化压力值,如图 4b 所示。当  $M$  点的压力为临界空化压力时,空穴充分发育,此时气穴内的气泡犹如水体沸腾,如图 4c。图 5 为翼型空化发生不同状态时背面压力分布。当空化初生时,背面出现单一点的压力等于水质的初生空化压力;空化发展时,空穴内有无限个空化状态对应着不同的空化压力  $H_i$ 。传统的空化流计算理论广泛采用气穴内部和表面压力为常数进行计算,计算出的空穴区域压力分布也为一常数<sup>[12]</sup>,与空穴发育的实际情况不符。

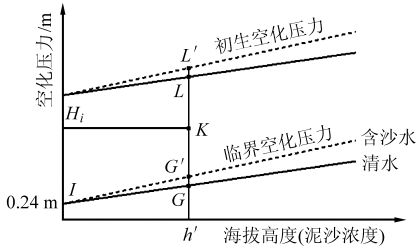


图3 水质空化压力特性

Fig. 3 Cavitation pressure characteristics of water quality

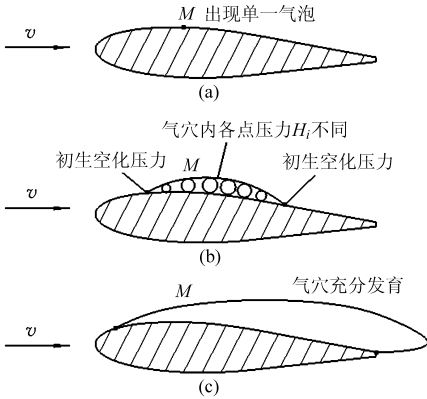


图4 翼型上空穴发展状况

Fig. 4 Cavity development on the hydrofoil

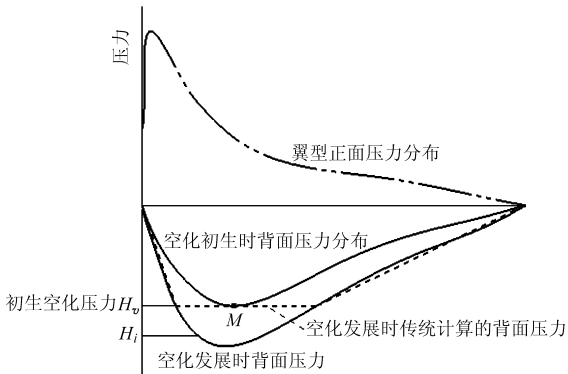


图5 翼型正背面压力分布

Fig. 5 Pressure on the hydrofoil

鉴于上述情况,可以认为不管采用什么方法计算何种类型的空化流场,如果不考虑水质的具体情况,特别是天然的工质水所处的海拔高度与泥沙相对含量对空化压力特性的重大影响,计算结果不可能符合实际;为了获得有工程实际意义的、符合实际的计算结果,必须以实际工程应用的工质水作为对象进行空化流场计算;为了进行空化流场的准确计算,必须针对实际工程引用水质,测定出空化压力特性,作为计算的边界条件,也作为机组安装高程计算的依据。

## 2 应用实例

### 2.1 空化压力值的选取

为了比较不同水质条件以及同种水质下不同空

化发展状态对空化流场计算的影响,计算将选用图3中海拔高度与水质空化压力特性关系中的I、G、K3点处的空化压力作为空化发生的边界条件。I点为海拔为零时清水的临界空化压力;G点为海拔高度为2448m时临界空化压力;K点为海拔高度为2248m时水质初生与临界空化压力的中间点。各点的空化压力如表1所示。

表1 计算点处的空化压力值

Tab. 1 Cavitation pressure of computed points

计算点	I	G	K
空化压力/Pa	2452	7259	31406

### 2.2 流动控制方程

基于空泡动力学的两相流计算方法分析水质状况对水轮机空化流场的影响。空化流系统中采用两相流3个成分,即水、蒸汽和不可压缩气体。流体相为水与不可压缩气体的混合相,空化流被认为是流体相与蒸汽相的均匀混合,并发生质量传递。流体相与蒸汽相享有共同的速度条件,且保持热平衡性。因此,空化流动只需一组动量方程来描述,其主控制方程的质量、动量方程以及气体相的体积分控制方程为<sup>[3-4]</sup>

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v \alpha_v) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_v u_i \alpha_v) = R_e - R_c \quad (3)$$

式中  $\rho$ ——混合相密度  $\rho_v$ ——蒸汽相密度  
 $u_i$ ——速度相  $x_i$ ——笛卡尔坐标  
 $\alpha_v$ ——气体体积分数  $p$ ——压力相  
 $\tau_{ij}$ ——应力相

$R_e, R_c$ ——流体相、蒸汽相质量传递率

气泡增长和凝缩取决于流体的压力  $p$  和空化压力  $p_v$ 。当  $p_v - p > 0$  时,气泡增长、膨胀;当  $p_v - p < 0$  时,气泡凝缩、破碎。计算中选取表1中不同的  $p_v$  值,对应不同的空化状态。

湍流模型为 RNG  $k-\varepsilon$ , 该模型是对标准  $k-\varepsilon$  的修正模型,更适用于高应变率或大曲率过流面的复杂几何流场,详细的计算方法见文献[13]。

### 2.3 水轮机水质空化流数值计算

采用商业 CFD 软件,CFX-TASCflow,对混流式水轮机进行定常空化流计算,分析水质状况对空化流场的影响。对流项离散格式为二阶精度格式,扩散项采用中心差分格式。计算残差精度收敛至  $1 \times 10^{-4}$ 。

2.3.1 网格和边界条件

图 6 为计算所选用的混流式水轮机的几何造型及计算网格。水轮机的直径为 0.42 m, 活动导叶为 24 个, 转轮叶片 15。表 2 为水轮机计算所选用的工况点。为了进行网格的无关性分析, 采用 3 种不同的结构化网格, 网格节点数分别为 234 360 (粗), 492 000 (中), 829 000 (好)。

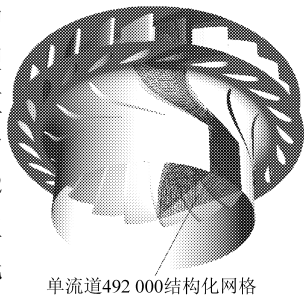


图 6 计算区域与网格

Fig. 6 Structured mesh for computation

表 2 计算工况点

Tab. 2 Computational points at nominal flow rate

工况点	导叶开度 $A_0/\text{mm}$	单位流量 $Q_{11}/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	单位转速 $N_{11}/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$
$Q_n$	18	0.440	68

计算选取水轮机的单流道区域, 采用周期性边界条件。采用时均化滑移面对导叶与转轮交界面进行速度矢量平均化处理, 保证计算的连续性, 如图 7 所示。进口条件为上游来流速度条件, 出口条件为绝对压力出口。此外, 转动部件采用旋转坐标系, 固体墙壁采用相对墙及标准壁面函数, 湍流模型为 RNG  $k-\varepsilon$  模型。计算中雷诺数约为  $1.307 \times 10^6$ , 气泡的初始半径为  $2 \times 10^{-6}$ , 不可压缩气体的质量分数为  $5 \times 10^{-4}$ 。有关不可压缩气体的质量分数以及气泡半径的影响见文献[14]。

2.3.2 计算结果与分析

图 8 给出最优工况下空化压力  $p_v = 2452 \text{ Pa}$  时水力矩的计算与试验结果的比较值。结果显示: 中等和较好的网格计算结果与试验结果有较好的一致性, 而粗网格在空化系数较小时, 收敛较困难, 并且

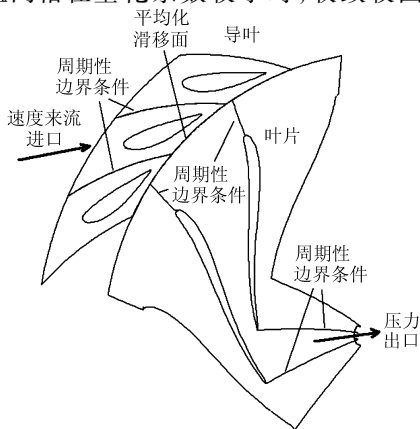


图 7 边界条件

Fig. 7 Boundary conditions

不能预测出水力矩的下降过程。因此, 以下的计算均采用节点为 492 000 的网格。

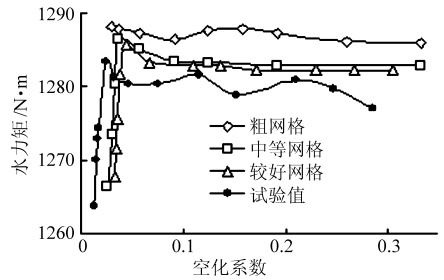


图 8 网格无关性分析

Fig. 8 Grid dependence analysis on hydraulic torque

图 9 为空化系数  $\sigma = 0.05$  时不同空化压力值下, 靠近下环处叶片间流面(图 10)的压力等值线分布图。从图中可以看出: 叶片出水边出现低压区域, 空化压力值变化时, 叶片间流面上压力发生明显变化; 空化压力值越大, 流道内的低压区域越大。

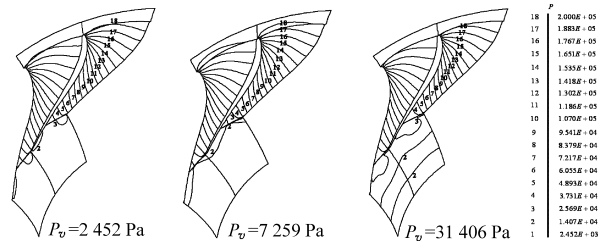


图 9  $\sigma = 0.05$  时不同空化压力靠近下环处叶片间流面压力等值线分布

Fig. 9 Pressure contours on section surface with varying cavitation pressure at  $\sigma = 0.05$

图 11 为  $\sigma = 0.05$  时不同空化压力值下叶片背面(图 10)气体体积分数分布图。随着空化压力值的增加, 叶片背面出水边位置气体区域面积增大, 气体体积分数从空化压力  $p_v = 2452 \text{ Pa}$  时的 0.359 增加到  $p_v = 31406 \text{ Pa}$  时的 0.879, 叶片上翼型空化朝着更为严重的方向发展。

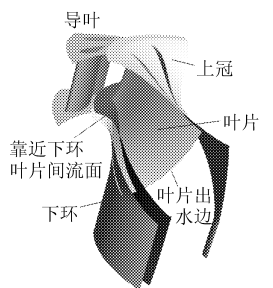


图 10 水轮机流道示意图  
Fig. 10 Section surface in hydraulic turbine passage

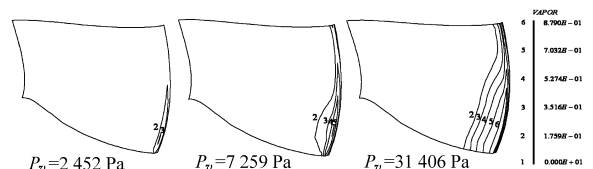


图 11  $\sigma = 0.05$  时不同空化压力叶片背面气体体积分数分布

Fig. 11 Vapor volume fractions on blade suction side with varying cavitation pressure at  $\sigma = 0.05$

图12为 $\sigma=0.05$ 时叶片出水边的(图10)气体体积分数分布。由图可以看出,出水边上气体体积分数的最大值出现在靠近转轮下环处;随着空化压力的增加,气体体积分数明显增大,气体体积分数从空化压力值 $p_v=2\ 452\text{ Pa}$ 时的0.129增大到 $p_v=31\ 406\text{ Pa}$ 时的0.329,出水边的空化越来越严重。

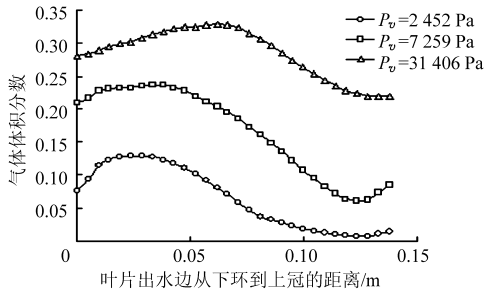


图12  $\sigma=0.05$ 时不同空化压力叶片出水边气体体积分数分布

Fig. 12 Vapor volume fractions on trailing edge of blade suction side at  $\sigma=0.05$

从叶片间流面上的压力分布、叶片背面和出水边的气体体积分数分布来看,空化压力值的变化对水轮机流场流动特性产生巨大影响;空化压力值越

高,空化现象越为严重,从而验证了水质条件对于空化流场计算的重要性。

### 3 结论

(1) 传统的空化流计算理论中采用当时温度下清水的汽化压力或饱和蒸汽压力作为空化发生的边界条件,把空化和汽化的概念混淆,而且没有考虑水质对水体空化压力的影响。

(2) 水体的初生空化与临界空化压力受水质条件包括海拔高度、泥沙浓度的影响而变化。即使在同一种水质下,初生空化与临界空化压力值之间存在着不同的空化状态。对于考虑水质状况的空化流计算,应该结合实际水质的空化压力特性,选择合适的空化压力值作为空化流计算的边界条件。

(3) 以某一水轮机转轮内的空化流场计算为例,不同水质状况下的空化流计算结果显示:以不同的空化压力值作为空化发生的边界条件,流场内变化明显;空化压力值越高,空化现象发生越为严重,从而验证了水质条件对空化流场计算的重要影响。

### 参 考 文 献

- 1 Kinnas S A, Fine N E. A numerical nonlinear analysis of the flow around two-and three dimensional partially cavitating hydrofoils [J]. J. Fluid Mech., 1993, 254:81 ~ 151.
- 2 Chen Y, Heister S D. A numerical treatment for attached cavitation [J]. Trans. ASME, J. Fluids Eng., 1994, 116(3): 613 ~ 626.
- 3 Singhal A K, Athavale M M, Li H Y, et al. Mathematical basis and validation of the full cavitation model [J]. Trans. ASME, J. Fluids Eng., 2002, 124(3):617 ~ 623.
- 4 Mejri I, Bakir F, Rey R, et al. Comparison of computational results obtained from a homogeneous cavitation model with experimental investigations of three inducers [J]. Trans. ASME, J. Fluids Eng., 2006, 128(6):1 308 ~ 1 323.
- 5 Chang Jinshi. Decisive influence of the ionization strength of cosmic rays on the cavitation characteristics of pure water [J]. Science in China Series E; Technological Sciences, 2008, 38(11):1 970 ~ 1 975.
- 6 杨娟丽,王均,常近时. 万家寨水电站水中含沙对空化压力的影响[J]. 水利水电技术, 2005, 36(5):64 ~ 67.  
Yang Juanli, Wang Jun, Chang Jinshi. Effect of sediment-laden flow on cavitation pressure inside of hydraulic machineries in Wanjiashai Hydropower Station [J]. Water Resources Hydropower Engineering, 2005, 36(5):64 ~ 67. (in Chinese)
- 7 王磊,朱茹莎,常近时. 青铜峡与八盘峡水电站水中泥沙含量对空化压力的影响[J]. 水力发电学报, 2008, 27(4): 44 ~ 47.  
Wang Lei, Zhu Rusha, Chang Jinshi. Effect of sand concentration in water on cavitation pressure in Qingtongxia and Bapanxia Hydropower Stations [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(4): 44 ~ 47. (in Chinese)
- 8 常近时. 水质状况对泵装置空化性能的重要影响[J]. 排灌机械, 2008, 26(2):23 ~ 26.  
Chang Jinshi. The important effect of the state of water quality on cavitation pressure performance of the pump device [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2008, 26(2):23 ~ 26. (in Chinese)
- 9 Knapp R T, Daily J W, Hammitt F G. Cavitation[M]. New York: McGraw-Hill, 1970.
- 10 Sedov L I. Two-dimensional problems in hydrodynamics and aerodynamics [M]. Izdatel'stvo Nauka, Moscow, 1980:221 ~ 231.
- 11 Nishiyama T, Ito J. Calculation of partially cavitating hydrofoil by singularity method. Part 1: 2D isolated hydrofoil [J]. Trans. JSME, 1977, 43(370):2 165 ~ 2 174.

(5) 单机组变速优化运行数学模型及求解,是泵站多机组优化运行的前提之一,该方法可为泵站站间乃至南水北调工程梯级泵站群的优化运行、大型泵站改造提供参考。

### 参 考 文 献

- 1 董益林,刘光临,徐叶琴. 大型双速全调节轴流泵及其应用[J]. 水利学报,1995,26(5):18~24.  
Dong Yilin, Liu Guanglin, Xu Yeqin. Adjustable axial-flow pump with double speed and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 26(5): 18~24. (in Chinese)
- 2 李虹,孙松. 施行峰谷电价后调速水泵供水费用探讨[J]. 中国给水排水,1999,15(4):35~36.  
Li Hong, Sun Song. Study on water supply cost of variable speed pump under peak-valley electricity price [J]. China Water and Wastewater, 1999, 15(4): 35~36. (in Chinese)
- 3 胡彦明. 利用电网的峰谷电价实现泵站经济运行[J]. 水电厂自动化,2004(2):97~100.  
Hu Yanming. Realization of pump's economic operation by utilizing peak-valley electricity price of electric power network [J]. Hydropower Plant Automation, 2004(2): 97~100. (in Chinese)
- 4 冯晓莉,仇宝云,黄海田. 南水北调东线江都排灌站优化运行研究[J]. 水力发电学报,2008,27(4):130~134.  
Feng Xiaoli, Qiu Baoyun, Huang Haitian. Research on operation optimization of Jiangdu Pump Station at the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(4): 130~134. (in Chinese)
- 5 张德虎,吕冬明,孙尔军. 大型泵站变频调速运行技术及节能分析[J]. 能源研究与利用,2001(6):33~34.  
Zhang Dehu, Lü Dongming, Sun Erjun. Operation technology and energy saving analysis on frequency control of large scale pump station [J]. Energy Research and Utilization, 2001(6): 33~34. (in Chinese)
- 6 Sabet M H, Coe J Q. Models for water and power scheduling for the California state water project [J]. Water Resources Bulletin, 1986, 22(4): 587~596.
- 7 Barnes Jr G W, Chung F I. Operational planning for California water system [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1986, 112(1): 71~86.
- 8 李继珊. 多级泵站优化调度及经济运行研究[J]. 水利学报,1992,12(12):18~20.  
Li Jishan. Study on optimal and economic operation of multi-grade pump station [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 12(12): 18~20. (in Chinese)
- 9 Cooper I, Cooper Mary W. Introduction to dynamic programming [M]. New York: Pergamon Press, 1981.
- 10 程吉林,郭元裕,金兆森,等. 大系统数学规划试验优选方法及应用[J]. 中国科学:E辑,1998,28(3):105~108.  
Cheng Jilin, Guo Yuanyu, Jin Zhaosen, et al. Theory and application of a mathematical programming and optimal experimental method for large-scale systems [J]. Science in China: Series E, 1998, 28(3): 105~108. (in Chinese)
- 11 程吉林. 大系统试验选优理论与应用 [M]. 上海:上海科技出版社,2002.
- 12 袁春元. 混流泵叶轮流场计算与性能试验[J]. 农业机械学报,2008,39(3):52~55.  
Yuan Chunyuan. Numerical calculation of turbulent flow and performance experiment of mixed flow pump impeller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 52~55. (in Chinese)
- 13 刘超,严登丰,卢心虹,等. 水泵变速运行研究[J]. 水泵技术,1987(3):54~59.  
Liu Chao, Yan Dengfeng, Lu Xinhong, et al. Research on operation of pumps with variable speed [J]. Pump Technology, 1987(3): 54~59. (in Chinese)
- 14 储训. 混流泵变速特性试验研究[J]. 水泵技术,1989(4):54~59.  
Chu Xun. Study on characteristics of variable speed in mixed-flow pumps [J]. Pump Technology, 1989(4): 54~59. (in Chinese)

(上接第 66 页)

- 12 任静,常近时. 混流式水轮机转轮内三元空化流场的预测[J]. 水利学报,1998,29(7):8~11.  
Ren Jing, Chang Jinshi. Analysis of 3-D cavity flow field in the runner of mixed-flow hydraulic turbine [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 29(7): 8~11. (in Chinese)
- 13 Yakhot V, Orszag S A, Tangham S, et al. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique [J]. Phys. Fluids, 1992, 4(7): 1510~1520.
- 14 Watanabe T. Development of a marine propeller simulator considering wake and cavitation [D]. Tokyo: University of Tokyo, 2004.