

水力机械空化研究综述

边丽媛¹, 唐学林¹, 吴玉林²

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 清华大学热能工程系, 北京 100084)

摘要 从理论分析、实验研究和数值模拟 3 个方面对水力机械空化进行综述。分析空化的发生机理, 认为理论分析方法仅针对单空泡的空化流动进行分析, 理论分析无法对复杂的水力机械空化流动给出符合实际的理论解, 需采用实验研究和数值模拟相结合的研究方法。水力机械空化研究已从二维单相定常模式发展到三维多相湍流模式, 构建包含质量、动量和能量交换的空化模型对空化流动数值模拟十分必要。同时, 开展水力机械空化在线监测系统, 有效监测和预防空化发生也将成为此领域内的研究重点。

关键词 空化; 水力机械; 理论分析; 实验研究; 数值模拟

中图分类号 TK7 **文献标识码** A **文章编号** 1006-764X(2011)S1-0091-04

18 世纪, 欧拉指出: “水管中某处的压强降到负压时, 水会从管壁分离, 该处将形成真空”的说法以来, 19 世纪末, 英国一艘驱逐舰螺旋桨叶片出现了效率严重下降的现象。许多学者提出了“空化”的概念, 将其定义为由于压强降低使水(或其他液体)发生汽化的过程。

空化问题一直是困扰水力机械发展的首要问题之一。空化发生时, 水力机械内液体的能量交换受到干扰和破坏, 导致其工作寿命缩短和效率下降, 产生振动和噪声, 严重时会使液流中断, 不能工作^[1]。

空化的分类方式有很多, 按空化的发生、发展过程可分为初生空化、发展空化和超空化。按空化的发生条件和水动力特性可分为游移型空化-空泡型空化、固定型空化-片状空化(空化云)、漩涡型空化和振荡型空化。但具体到水力机械中的空化往往不是单独一种, 而是几种类型空化同时出现^[2]。

水力机械主要包括水轮机和水泵, 空化的发生由其内部流动特性决定, 要完全避免并不现实, 但通过深入研究空化机理, 合理优化水力设计, 适当改善运行条件来提高水力机械的抗空化性能是可行的, 这已成为目前水力机械领域研究的热点。

1 研究方法

1.1 理论研究

空化涉及流体力学、空泡动力学和热力学等多

种理论。最初采用空泡动力学研究空化机理, 揭示其本质规律。1917 年, 由 Rayleigh 建立了用于描述不可压缩液体中气泡动力学的理论模型。其可以求出空泡周围流体内压强的瞬态分布以及泡径随时间的变化情况。1949 年 Plesset, 在考虑液体的可压缩性后改进了 Rayleigh 方程, 得到的方程被称为 Rayleigh-Plesset(雷利)方程^[3-5]。

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{p_v - p}{\rho_1} - \frac{2\Omega}{\rho_1 R} - \frac{4\mu\dot{R}}{\rho_1 R} \quad (1)$$

式中: R 为空泡半径; $\dot{R}$ 为空泡增长速度; $\ddot{R}$ 为空泡增长加速度; p_v 为空泡内压力; p 为液体压力; Ω 为表面张力; ρ_1 为液体密度; μ 为液体动力黏度。

在此基础上, 许多学者对于空化机理做了大量的研究。Arndt^[6]于 1981 年研究了涡旋空化和空化产生的噪音、超空化等问题, 阐述了空化类型和特性。1993 年, 夏维洪^[7]分析了空化发生时的液体含气量、水质等因素, 得到雷诺数可表征液体黏性, 并影响边界层的分离, 以致影响壁面最小压力点分布, 即初生空化位置的结论。

伴随着理论分析的成熟, 众多学者开始进行空化模型的早期探讨。1989 年 Kubota 等^[8]将空泡动力学方程中的压力结合在 N-S 方程中形成了改进的空化流动模型, 重点考虑了空泡体积变化的影响, 适于模拟空化的非定常特性。2000 年 Kunz 等^[9]提出

的汽液质量转换的空化模型,考虑了空化发生时相变的热力学过程,采用凝结和蒸发来控制汽液守恒。2002 年 Singhal^[10]等发展的完全空化模型,充分考虑了空化流动中的相变、湍流压力脉动、空泡动力学和不可凝结性气体在流体中的影响。

空化发生的机理复杂,影响因素很多,而理论分析方法仅针对单空泡的空化流动进行分析,对于控制方程、求解条件和求解域等都是非常复杂的水力机械空化流动,理论分析只能提供基础指导,无法给出符合实际的理论解,随后进一步发展到实验研究和数值模拟方法。

1.2 实验研究

空化实验可视、直观,能综合考虑影响流动的各种因素,对于真实流动过程进行客观可靠的模拟^[11]。实验对象主要分为模型和原型水力机械两类。

早期的实验方法是通过外部途径研究水力机械空化工况下的整体性能和空化相关问题。常近时^[12]研究了水质状况和宇宙射线电离强度对清水空化压力特性的影响。Wu 等^[13]研究了空泡离心泵瞬时启动的水力性能,结果表明,快速启动可延迟空化,但在低吸入压力和高回转速度工况下,启动速度再快,空化也不可避免。

随着可视化技术的发展,实验方法已转向空化流动内部发展规律的观测。主要包括空化流场的测量、空化状态的噪声监测、压强脉动监测。其中空化流场的测量是分析水力机械空化性能的重要途径,其测量方法分类如图 1 所示。

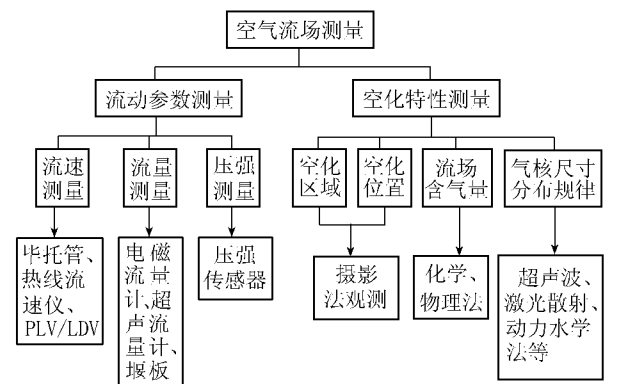


图 1 空化流场测量方法分类

2006 年 Foeth 等^[14]利用 PIV 观测了三维水翼空化绕流速度场的发展,以及空化发生、发展和片状/云状空化的脱落等演变过程。Zuo 等^[15]通过高速拍摄技术,记录了空化云体积震荡的空化共振特性。Bai 等^[16]通过同样方法分析了凹坑结构的超声空化特性,有助于理解和预测空蚀。Dong^[17]采用压力传感器和瞬时接收器,进行了有/无通气状态下的高速绕流圆柱伸出物的压力和空化特性的实验研究。

近年来主要使用空化发生时产生的振动和噪声来监测空化状态的噪声。Ni 等^[18]对离心泵进行实验研究发现,空化发生时,靠近叶片进口边首先出现周期性摆动,进而导致准同步振动,此特性可用来监测空化初生。并提出,使用 Higuchi 提出的分形方法可以成功地用来监测空化初生以及空化发展的全过程的结论。Cemeti^[19]分别对装有闭式叶轮和半开式叶轮的离心泵进行测试,得出泵的特有频率,精确区分出由空化引起的振动和噪声,以便进行监测。

由于模型实验中,空化现象的比尺效应及众多因素的影响在实验台上尚无法有效地控制,实验结果难以完全真实地反映真机的空化性能;原型实验周期长、费用高,不利于设计初期进行多方案比较;加之 CFD (Computational fluid dynamics) 技术的飞速发展,数值模拟空化流动,既可以弥补理论分析方法无法在复杂空化问题中应用的缺点;又可以节约模型实验成本;且计算精度高、速度快,可以模拟出整个流场的流态,不受实验中固有约束条件的影响,准确地得到流场特性,越来越受到研究机构的青睐。

1.3 数值研究

1.3.1 空化流动数值模拟

空化流的数值模拟研究,从最初的无黏性势流模式发展到湍流模式;从二维流场模拟发展到三维流场模拟;从单相模拟发展到多(两)相模拟;并进而发展到空化多相湍流模拟。空化多相湍流模拟的研究分类如图 2 所示。

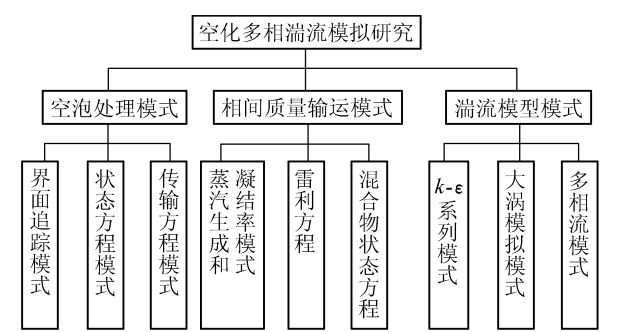


图 2 空化多相湍流模拟的研究分类

对水力机械空化流动进行数值模拟,重点是研究选择合理的空化模型和湍流模型;并针对空泡流场内两相交界面处大的密度梯度,采用高分辨率的离散格式求解空泡流场,以保证计算的精度和稳定性。由于水力机械的特殊结构和空化发生的复杂机理,常综合以上多种方式进行研究,以得到精确稳定的计算结果,为水力机械优化设计提供参考和依据。水力机械空化流动进行数值模拟采用以下主要计算模型。

早期的水力机械空化研究大多以翼型为研究对

象。Wang 等^[20]建立了气液密度比与压力系数间的五阶空化模型,根据压力系数是否小于临界压力系数来判断空化是否发生,利用 Smagorinsky 模型数值模拟 NACA0015 水翼的片状/云状空化流,结果表明此 LES 空化模型优越于其他模型。Olivier^[21]等数值模拟二维翼型的空化流动,将流体视为密度随压力变化的均质可压混合物。重点研究空化初生的位置、云状空化的形成、空化和非空化状态下升力和阻力系数、翼型壁面所受压力以及空化引起的振动频率等,与实验数据相吻合。

在翼型研究充分发展的基础上,许多学者进行了水泵等复杂水力机械的空化研究。Necker 等^[22]使用 CFD 软件对水平轴灯泡贯流式水轮机进行不同体积流量下空化流动数值模拟,得出不同托马斯系数下的效率曲线,并以实验进行验证。Liu 等^[23]提出了一个改进传质表达式的混合模型,并用以模拟湍流的空化流动,结果与实验值吻合良好。

1.3.2 空化模型数值研究

a. 基于界面追踪方法和空泡的雷利方程。认为空泡内压力等于液体的饱和蒸汽压,流场计算仅仅针对液体进行,即两相间仅仅存在液相对气相的单向耦合。Srinivasan 等^[24]通过动量方程中添加源项来考虑空化引起的动量变化,利用 RNG^{k-ε}湍流模型,对二维喷嘴流动的空化流进行了数值研究,结果表明,计算的非定常空化云特性与实验结果定性吻合较好,同时,也预测了回射流和逆压力梯度对空化的影响,但没考虑非冷凝气体的影响。Inanc 等^[25-26]提出了一个以界面动力学为基础的空化模型,该模型提供了对适用于现有的以运输方程为基础模型中经验参数的直接解释。进一步对非定常流动进行计算,将压力算子分裂算法(PISO)推广到处理时间步长的空化流动,特别是对空化和湍流模型的耦合中。

b. 基于混合物多相流模型和状态方程模型。Wu 等^[27]提出了一个模拟两相混合非定常空化流动的模型,该模型通过密度压力函数得到局部压缩方程。Tamura^[28]提出了一个可适用于可压缩性流体的空泡动力学基本模型。该模型具有较高的效率和稳定性,还可用于进行空蚀的估计。其基本思想是通过合理的假设,将雷利方程转化为一个更为简单的方程,通过试验验证了此方程在二维流动领域的准确性。

c. 基于混合物多相流模型和空泡雷利运动方程。Qin 等^[29]借助于 RNG^{k-ε}模型获得空泡周围的速度场和压力场,然后分别采用几种空化模型(绝热模型、等温模型、辐射模型、导热模型、导热和辐射组合

模型)来模拟收缩-扩散喷嘴内的游移型空化泡的生成、溃灭和回弹等过程,计算表明,传导传热和辐射模型的计算结果与实验数据非常吻合,最后把单空泡推广应用于空化云模拟中。Nouri 等^[30]提出了假定黏性下的二维非定常空化流动模型,该方程耗散项考虑了与空泡产生和溃灭的联系。模拟结果与实验数据吻合良好,说明引入黏性项,模型的数值计算能力和收敛性都有所改善。Zhu 等^[31]在空泡动力学基础上提出了一种新的均质流动理论来预测空泡溃灭过程。此模型充分考虑了空泡成长过程中表面张力、黏性、液体可压缩性、热力学效应、辐射、交界面气液相变和化学反应的影响。并将此模型和大涡模拟方式结合起来,进行空化流动翼型绕流的数值模拟验证模型有效性。

d. 基于动理学的两相流模型。徐宇等^[32]采用微观动理学方法,基于颗粒速度分布函数守恒规律的 Boltzmann 方程,考虑了泡径变化引起的质量、动量传递和两相间存在滑移速度,即相间的双向耦合,建立了两相空化流的控制方程。最后,用二维 Venturi 管内空化流实验数据验证了此模型。基于 Shan - Chen 模型的单组分多相流 LBM,张新明等^[33]把水体中空化现象的模拟发展到了三维,研究了低压下水体中气核半径与空化现象的相互关系,成功再现了低压下水体中微小气核发展成气泡的过程,并进一步研究了水体依次流经低压区、高压区时空化产生、发展、溃灭的全过程。

2 研究展望

空化流动从本质上是一种非定常气液两相流动,气泡和水体有着复杂的质量、动量和能量交换关系,不同于常规的气液两相流动。虽然水力机械空化研究已取得了一系列成果,但仍存在很多问题,有待进一步改进。

2.1 理论分析方面

由于空化流动的复杂机理,工程实际中常常使用非空化流动的计算结果来推测空化流动的状况。不能充分考虑气泡对主流场的干扰,计算误差较大。对空化流动进行理论分析,因为在空泡相连续扩散方程中考虑了凝结/汽化生成率,所以在空泡运动模型中就应考虑气液两相间的质量扩散;空泡动力学模型也应考虑相界面处的动量交换,才能得到更为精确的理论解。

2.2 数值模拟研究方面

空化流动数值模拟在水力机械方面的研究及应用日趋成熟,但在空化模型研究方面,关于空泡的生成、发育、溃灭和回弹等动态过程的分析还不够精

确。例如,空化发生时空泡的热力学特性的考虑还不完善。在空泡前期成长阶段,泡内热力学特性表现为等温成长过程;在后期成长阶段,泡内外压力接近相等,泡成长率表现为传热控制阶段;在空泡溃灭阶段,泡内热力学特性表现为绝热阶段。另外,还要考虑空泡发育过程惯性力的影响。所以,应根据空化的热力学机制,从不可逆热力学和非平衡相变的分子运动论推导出两相间的非平衡质量交换方程,构建包含相变引起的质量、动量和能量输移的空化模型。

2.3 实验研究方面

水力机械内部流动特性决定空化发生的必然性,但在实际运行中,可以利用监测系统的全过程流动监测,通过空化发生时产生的振动和噪声,有效监测并预防空化的发生。而目前对水力机械空化的监测大多应用于实验室模型研究时期,在线监测方面发展尚不完善。伴随传感器技术和计算机技术的发展,使用高精度、智能化的传感器开发监测系统,并及时提取空化特征进行信号处理将成为空化监测领域的研究趋势。

3 结 语

从理论分析、实验研究和数值模拟 3 个方面对水力机械空化机理进行阐述。提出以理论分析为指导,进行数值模拟和实验研究已成为目前主要研究趋势。

在数值模拟中,空化模型的选择对空化流动数值模拟起着决定性的作用。因此,应构建包含质量、动量和能量交换的空化模型,发展更为优化的数值模拟方法以及实验条件得到更为精确的结果。总结出数值模拟研究方法已成为目前应用最广泛的空化流动研究方法。

在工程实际中,开发水力机械空化在线监测软件。通过空化发生时产生的振动和噪声预测其发生区域和时间,并有效预防空蚀破坏,提高水力机械的抗空化性能也将成为水力机械空化流动领域日后研究的热点。

参考文献:

[1] RUS T, DULAR M, SIROK B, et al. An investigation of the relationship between acoustic emission, vibration, noise, and cavitation structures on a Kaplan turbine[J]. Journal of Fluids Engineering, 2007, 129(9): 1112-1122.

[2] LI S C. Cavitation of hydraulic machinery[M]. London: Imperial College Press, 2000.

[3] NAGENDRA D, ADITYA C, STEVEN F. Large eddy simulation of turbulent-cavitation interactions in a venturi nozzle[J].

Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 2010, 132(12): 121-301.

[4] CHRISTOPHER EARLS BRENNEN. Cavitation and bubble dynamics[M]. New York and Oxford: Oxford University Press, 1995.

[5] 吴光焱, 杨敏官, 康灿. 轴流泵叶轮内空化的数值模拟与实验研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(18): 2229-2232.

[6] ARNDT R E A. Cavitation in fluid machinery and hydraulic structures[J]. Ann Rev Fluid Mechanical, 1981, 13: 273-328.

[7] 夏维洪. 水质和空化比尺效应[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1993, 8(1): 9-16.

[8] KUBOTA A, KATO H. Unsteady structure measurement of cloud cavitation on a foil section[J]. Journal of Fluids Engineering, 1989, 111(3): 204-210.

[9] KUNZ R F, BOGER D A, STINEBRING D R, et al. A pre-conditioned navier-stokes method for two-phase flows with application to cavitation prediction[J]. Computers Fluids, 2000, 29: 849-875.

[10] SINGHAL A K, ATHAVALE M M, LI Hui-ying, et al. Mathematical basis and validation of the full cavitation model[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3): 617-624.

[11] DUPLAA S, COUTIER-DELGOSHA O, DAZIN A, et al. Experimental study of a cavitating centrifugal pump during fast startup[J]. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 2010, 132(2): 021-31.

[12] 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(3): 23-26.

[13] WU Da-zhuan, WANG Le-qin, HAO Zong-rui, et al. Experimental study on hydrodynamic performance of a cavitating centrifugal pump during transient operation[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(2): 575-582.

[14] FOETH E J, Van DOORNE C W H, Van TERWISGA T, et al. Time resolved PIV and flow visualization of 3D sheet cavitation[J]. Experiments in Fluids, 2006, 40: 503-513.

[15] ZUO Zhi-gang, LI Shen-cai. An attribution of cavitation resonance: volumetric oscillations of cloud[J]. Journal of Hydrodynamic, 2009, 21(2): 152-158.

[16] BAI Li-xin, XU Wei-lin, ZHANG Fa-xing, et al. Cavitation characteristics of pit structure in ultrasonic field[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(7): 1974-1980.

[17] DONG Zhi-yong. An experimental investigation of pressure and cavitation characteristics of high velocity flow over a cylindrical protrusion in the presence and absence of aeration[J]. Journal of Hydrodynamic, 2008, 20(1): 60-66.

[18] NI Yong-yan, YUAN Shou-qi, PAN Zhong-yong. Detection of cavitation in centrifugal pump by vibration methods[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 21(5): 46-49.

(下转第 102 页)

参考文献：

[1] ABBOTT M B. Introducing hydroinformatics[J]. Journal of Hydroinformatics ,1999 ,1(1) 3-19.

[2] 向先全 ,陶建华.水信息学及其在水环境中的应用研究综述[J].生态环境学报 ,2009 ,18(4) :1587-1593.

[3] 陶建华.计算水力学和水力信息学[C]//1994 年全国水动力学研讨会文集.北京 :海洋出版社 ,1994 :803-807.

[4] ABBOTT M B. Hydroinformatics :information technology and the aquatic environment[M]. Aldershot :Avebury Technical , 1991.

[5] ABBOTT M B. Towards the hydraulics of hydroinformatics era [J]. Journal of Hydraulic Research ,2001(4) 339-349.

[6] 顾正华 ,唐洪武 ,李云 ,等.水信息学与智能水力学[J].河海大学学报 :自然科学版 ,2003 ,31(5) 518-521.

[7] XU J , HOOD R. Modeling biogeochemical cycles in Chesapeake Bay with a coupled physical-biological mode[J]. Estuarine ,Coastal and Shelf Science ,2006 ,69(1/2) :19-46.

[8] YAMANE N , NAKATSUJI K. Field data collection and modeling for verification of an ecosystem model in Osaka Bay [J]. Estuarine and Coastal Modeling ,1997 ,4 :196-210.

[9] MURRAY A G ,PARSLOW J S. Modelling of nutrient impacts in Port Phillip Bay :a semi-enclosed marine Australian

[10] CHAUK W. A three-dimensional eutrophication modeling in Tolo Harbour[J]. Applied Mathematical Modelling ,2004 ,28 (9) 849-861.

[11] CHEN Q ,MYNETT A E. Integration of data mining techniques with heuristic knowledge in a fuzzy logic modelling of eutrophication in Taihu Lake[J]. Ecological Modelling ,2003 , 162 :55-67.

[12] HUGH W ,FRIEDRICH R. Towards a genetic artificial neural network model for dynamic prediction of algal abundance in freshwater lakes[J]. Ecological Modelling ,2001 ,146 :69-84.

[13] BARCIELA R M ,GARCIA E ,FERNANDEZ E. Modelling primary production in a coastal embayment affected by upwelling using dynamic ecosystem models an artificial neural networks[J]. Ecological Modelling ,1999 ,120 :199-211.

[14] 穆迪 ,袁德奎 ,陶建华.地理信息系统在渤海湾水体富营养化研究中的应用[J].海洋技术 ,2006 ,25(1) :73-77.

[15] 向先全 ,陶建华.基于 GA-SVM 的渤海湾富营养化模型 [J].天津大学学报 ,2011 ,44(3) 215-220.

[16] 向先全 ,陶建华.基于模糊识别和遗传神经网络的渤海湾叶绿素 a 预测研究[J].海洋环境科学 ,2011 ,30(2) : 239-242.

[17] 向先全 ,陶建华.基于模糊识别和遗传神经网络的渤海湾叶绿素 a 预测研究[J].海洋环境科学 ,2011 ,30(2) : 239-242.

[18] 向先全 ,陶建华.基于模糊识别和遗传神经网络的渤海湾叶绿素 a 预测研究[J].海洋环境科学 ,2011 ,30(2) : 239-242.

[19] CERNETIC J. The use of noise and vibration signals for detecting cavitation in kinetic pumps [J]. Mechanical Engineering Science ,2009 ,223 :1645-1655.

[20] WANG G ,OSTOJA-STARZEWSKI M. Large eddy simulation of a sheet/cloud cavitation on a NACA0015 hydrofoil[J]. Applied Mathematical Modelling ,2007 ,31(3) 417-447.

[21] OLIVIER-DELGOSHA ,FRNCOIS D ,JACQUES A A ,et al. Numerical prediction of cavitating flow on a Two-Dimensional symmetrical hydrofoil and comparison to experiments[J]. Journal of Fluids Engineering ,2007(129) 279-292.

[22] NECKER J ,ASCHENBRENNER T. Model test and CFD calculation of a cavitating bulb turbine[C]//25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems ,Timisoara , Romania :Earth Environmental science ,2010.

[23] LIU Shu-hong ,LI Sheng-cai ,ZHANG Liang ,et al. A mixture model with modified mass transfer expression for cavitating turbulent flow simulation[J]. Engineering Computations : International Journal for Computer-Aided Engineering and Software ,2008 ,25(4) 290-304.

[24] SRINIVASAN V ,SALAZAR A J ,SAITO K. Numerical simulation of cavitation dynamics using a cavitation-induced-momentum-defect (CIMD) correction approach[J]. Applied Mathematical Modeling ,2009 ,33 :1529-1559.

[25] INANC S ,WEI S. Interfacial dynamics-based modelling of turbulent cavitating flows ,part2 :time-dependent computations [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids ,

ecosystem[J]. Marine and Freshwater Research ,1999 ,50(6) : 597-611.

[10] CHAUK W. A three-dimensional eutrophication modeling in Tolo Harbour[J]. Applied Mathematical Modelling ,2004 ,28 (9) 849-861.

[11] CHEN Q ,MYNETT A E. Integration of data mining techniques with heuristic knowledge in a fuzzy logic modelling of eutrophication in Taihu Lake[J]. Ecological Modelling ,2003 , 162 :55-67.

[12] HUGH W ,FRIEDRICH R. Towards a genetic artificial neural network model for dynamic prediction of algal abundance in freshwater lakes[J]. Ecological Modelling ,2001 ,146 :69-84.

[13] BARCIELA R M ,GARCIA E ,FERNANDEZ E. Modelling primary production in a coastal embayment affected by upwelling using dynamic ecosystem models an artificial neural networks[J]. Ecological Modelling ,1999 ,120 :199-211.

[14] 穆迪 ,袁德奎 ,陶建华.地理信息系统在渤海湾水体富营养化研究中的应用[J].海洋技术 ,2006 ,25(1) :73-77.

[15] 向先全 ,陶建华.基于 GA-SVM 的渤海湾富营养化模型 [J].天津大学学报 ,2011 ,44(3) 215-220.

[16] 向先全 ,陶建华.基于模糊识别和遗传神经网络的渤海湾叶绿素 a 预测研究[J].海洋环境科学 ,2011 ,30(2) : 239-242.

[17] 向先全 ,陶建华.基于模糊识别和遗传神经网络的渤海湾叶绿素 a 预测研究[J].海洋环境科学 ,2011 ,30(2) : 239-242.

[18] 向先全 ,陶建华.基于模糊识别和遗传神经网络的渤海湾叶绿素 a 预测研究[J].海洋环境科学 ,2011 ,30(2) : 239-242.

[19] CERNETIC J. The use of noise and vibration signals for detecting cavitation in kinetic pumps [J]. Mechanical Engineering Science ,2009 ,223 :1645-1655.

[20] WANG G ,OSTOJA-STARZEWSKI M. Large eddy simulation of a sheet/cloud cavitation on a NACA0015 hydrofoil[J]. Applied Mathematical Modelling ,2007 ,31(3) 417-447.

[21] OLIVIER-DELGOSHA ,FRNCOIS D ,JACQUES A A ,et al. Numerical prediction of cavitating flow on a Two-Dimensional symmetrical hydrofoil and comparison to experiments[J]. Journal of Fluids Engineering ,2007(129) 279-292.

[22] NECKER J ,ASCHENBRENNER T. Model test and CFD calculation of a cavitating bulb turbine[C]//25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems ,Timisoara , Romania :Earth Environmental science ,2010.

[23] LIU Shu-hong ,LI Sheng-cai ,ZHANG Liang ,et al. A mixture model with modified mass transfer expression for cavitating turbulent flow simulation[J]. Engineering Computations : International Journal for Computer-Aided Engineering and Software ,2008 ,25(4) 290-304.

[24] SRINIVASAN V ,SALAZAR A J ,SAITO K. Numerical simulation of cavitation dynamics using a cavitation-induced-momentum-defect (CIMD) correction approach[J]. Applied Mathematical Modeling ,2009 ,33 :1529-1559.

[25] INANC S ,WEI S. Interfacial dynamics-based modelling of turbulent cavitating flows ,part2 :time-dependent computations [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids ,

[26] INANC S ,WEI S. Interfacial dynamics-based modelling of turbulent cavitating flows ,part1 :Model development and steady-state computations [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids ,2004 ,44 :975-995.

[27] WU Lei ,LI Chuan-jing ,LI Jie ,et al. Numerical simulations of 2D periodic unsteady cavitating flows [J]. Journal of Hydrodynamics ,2006 ,18(3) 341-344.

[28] TAMURA Y. Improvement of bubble model for cavitating flow simulations[J]. Journal of Hydrodynamic ,2009 ,21(1) :41-46.

[29] QIN Z ,BREMHORST K ,ALEHOSSEIN H ,et al. Simulation of cavitation bubbles in a convergent-divergent nozzle water jet [J]. Journal of Fluid Mechanics ,2007 ,573 :1-25.

[30] NOURI N M ,MOGHIMI M ,MIRSAEEDI S M H. Unsteady modelling of cavitating flow with artificial viscosity[J]. Mechanical Engineering Science ,2009 ,223 :1-10.

[31] ZHU B ,WANG H. Numerical prediction of impact force in cavitating flows[C]//25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems ,Timisoara ,Romania :Journal of Fluids Engineering Transactions of the ASME ,2010.

[32] 徐宇 ,吴玉林 ,唐学林.用动理学方法推导空化流的控制方程[J].清华大学学报 ,2003 ,43(10) :1416-1419.

[33] 张新明 ,周超英 ,SLAM SHAMS ,等.用格子 Boltzmann 方法数值模拟三维空化现象[J].物理学报 ,2009 (12) : 8406-8414.

(收稿日期 2010-09-25 编辑 :方宇彤)