排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2012 年 3 月 Mar. 2012 | 第 30 卷 第 2 期 Vol. 30 No. 2

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2012.02.011

基于 CFD 的发动机冷却水泵汽蚀性能预测

李伟，施卫东，张华，裴冰，陆伟刚
（江苏大学流体机械工程技术研究中心，江苏 镇江 212013）

摘要：以雷诺时均 N-S 方程为基本控制方程，采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型及多相流模型，利用计算流体动力学软件 CFX 模拟了发动机冷却水泵内部的三维湍流流场，对某一叶轮严重损坏的发动机冷却水泵外特性性能和汽蚀性能进行预测，并分析叶轮损坏原因，观察冷却水泵叶轮内部汽蚀情况. 模拟结果表明：在 85 ℃下模型泵的临界汽蚀余量约为 10.7 m，在表压为 0 时已发生了较为严重的汽蚀现象，叶轮破坏主要是由汽蚀引起. 通过与试验数据进行对比验证，水泵在 285 L/min 设计流量下扬程为 6.1 m，远远低于常温下的数值模拟结果，说明该泵在实际运行工况下已发生严重汽蚀，试验结果与数值预测结论基本吻合. 研究结果对于改善发动机冷却水泵的汽蚀性能、防止和减轻空化现象产生提供理论依据，也为判断和模拟发动机冷却水泵的汽蚀破坏提供了一个快速、准确的计算方法.

关键词：发动机冷却水泵；汽蚀性能；三维湍流流场；临界汽蚀余量；性能预测
中图分类号：S277.9；TH313　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2012)02-0176-05

Cavitation performance prediction of engine cooling water pump based on CFD

Li Wei, *Shi Weidong*, *Zhang Hua*, *Pei Bing*, *Lu Weigang*
(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: The three-dimensional turbulent flow in an engine cooling water pump with the impeller, which has ever been severely damaged in operation, was simulated employing the time-averaged N-S equations, the standard $k-\varepsilon$ turbulence model and multiphase flow model by CFX software. The characteristics and cavitation performance were predicted and the reasons for the impeller damage were clarified by observing the flow variable distributions in the impeller of the pump. The numerical simulation results indicat that the critical *NPSH* of the pump is about 10.7 m at 85 ℃, and a serious cavitation occurs under zero gauge pressure, it is suggested that cavitation causes the impeller damage. The experimental head of the pump is 6.1 m at the design flow rate of 285 L/min, it is well below the numerical simulation head under room temperature, thus a serious cavitation has occurred in the real operating conditions; such a conclusion based on the predicted results is basically consistent with the experimental observations. The numerical results provide a theoretical basis for improving the cavitation performance or preventing from or mitigating cavitation in an engine cooling water pump. It offers a fast and precise computational method for simulating and identifying cavitation damage in engine cooling water pumps as well.

Key words: engine cooling water pump; cavitation performance; three-dimensional turbulent flow; critical *NPSH*; performance prediction

收稿日期：2011-12-24
基金项目：江苏省自然科学基金资助项目(BK 2011505)；江苏高校优势学科建设工程项目；江苏省研究生创新计划项目(CX09B_196Z)
作者简介：李伟(1979—)，男，河南信阳人，助理研究员，博士研究生(lwjiangda@ujs.edu.cn)，主要从事流体机械及工程研究.
施卫东(1964—)，男，江苏如东人，研究员，博士生导师(wdshi@ujs.edu.cn)，主要从事流体机械及工程的研究.

冷却水泵是汽车发动机闭式循环冷却系统中输送冷却水的主要部件,其性能好坏,不仅影响汽车的动力性、经济性, 而且关系到整机的寿命. 与普通水泵相比,冷却水泵具有工作水温高、转速变化范围大、结构尺寸受总体限制和必需产生一定流量及扬程等特点. 然而水泵在高温、高转速和大流量工况下运转时容易产生汽蚀,导致水泵的扬程和效率等性能急剧下降[1-3],并破坏过流部件,产生噪声和振动. 水泵长期在汽蚀下运行,叶轮将受气泡溃灭时的强力冲击而侵蚀,严重时甚至穿孔[4-5].

国内外对普通离心泵的汽蚀现象及其危害进行了深入研究[6-7]. 但对汽车发动机冷却水泵的研究主要集中在试验装置与性能提高方面,对汽蚀性能的三维数值模拟和性能预测研究很少. 钟绍俊等[8]对汽车水泵测试系统进行了研究,采用 LabVIEW 软件开发了汽车水泵综合性能试验台系统,实现了数据采集、控制、分析处理的自动化. 刘婷婷等[9]对汽车水泵性能进行了三维数值模拟及结构改进,提出了 减小叶轮的出口安放角,增大扩散管的截面积,采用蜗壳高度渐变等措施,大大改善了水泵性能. 高莹等[10]应用计算流体动力学软件 Fluent 对 498 型发动机冷却水套内的流场进行模拟计算,分析了水泵内流场对发动机内冷却水流动的影响,发现水泵内流场直接影响缸体水套和机油冷却器内冷却水的分布以及整体水套流场仿真计算的精度.

文中针对某一破坏的发动机冷却水泵叶轮进行研究,初步判断为汽蚀破坏. 利用 CFD 软件对水泵进行两相流计算,观察冷却水泵叶轮内部气泡体积分布,并计算其临界汽蚀点,对计算结果进行分析,发现叶轮破坏的原因,为预防和减轻冷却水泵的汽蚀现象提供理论依据.

1　研究对象及数值计算

文中选用 WPS 型柴油机冷却水泵作为研究对象,水泵工作条件及基本参数分别为温度 85 ±2 ℃,介质清水,流量 Q = 285 L/min,扬程 H = 14 m,转速 n = 3 700 r/min;叶轮为半开式,叶轮外径 98 mm,叶轮进口直径 60 mm,叶轮出口宽度11 mm,叶轮进口安放角 37°,出口安放角 30°,8 叶片;吸水室截面为环形,直径 90 mm,蜗壳截面近似为矩形.

1.1　几何模型

计算区域包括吸水室进口到蜗壳出口整个流道. 采用 Pro/E 软件按照二维水力图生成三维立体图,模型如图 1 所示.

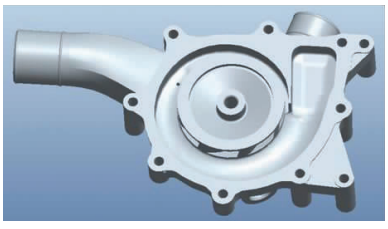
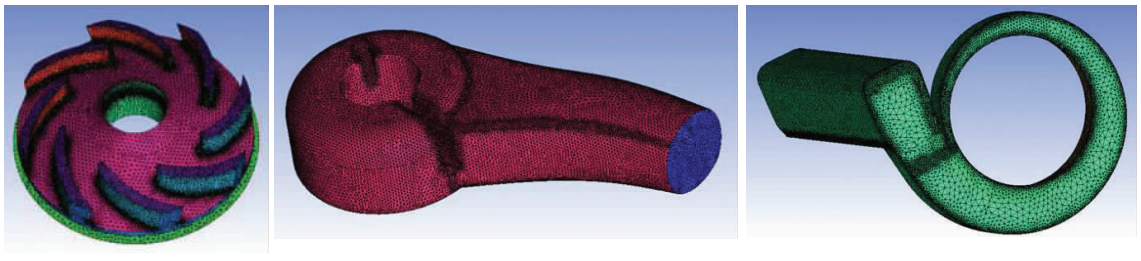


图 1　冷却水泵几何模型
Fig. 1　Geometric model of cooling water pump

1.2　网格划分

采用商用网格划分软件 ICEM,根据各个表面的曲率变化等特征设置不同的网格大小,并对壁面尤其是曲率半径较大地方的网格进行加密,在较好地捕捉水泵外形特征的同时保证了边界层处的合理网格分布. 网格采用自动生成的全四面体网格,各个区域的网格质量均在 0. 3 以上.

网格模型包含 3 个区域,分别为吸水室、压水室、叶轮区域,即完整的过流区域. 为了降低网格大小对计算精度的影响,并保证合理的计算时间,文中对网格进行了无关性研究,一共划分了 3 种大小不同的网格,通过分别计算其在设计工况下的扬程来判断网格大小的影响,网格无关性结果见表 1. 当网格总数为 2 030 000,2 670 000 时,扬程波动已经非常小,选择 2 030 000 作为本次数值计算的最终网格总数,网格划分如图 2 所示.



(a) 叶轮　　(b) 吸水室　　(c) 压水室

图 2　计算区域网格
Fig. 2　Mesh for numerical domains

表1 网格无关性研究结果

Tab.1 Vane angles of leading edge at hub and tip

	网格总数/10^4	预测扬程/m
网格1	138	13.813
网格2	203	13.488
网格3	267	13.467

1.3 计算模型

利用计算流体动力学软件CFX对过流部件流场进行数值计算,以雷诺时均N-S方程作为基本控制方程,采用标准$k-\varepsilon$双方程湍流模型及多相流模型模拟泵内三维湍流.边界条件采用压力进口,质量出口.采用MRF相对滑移网格技术处理动静区域问题.

结合软件自身对水泵计算的适用度与精确度,本次数值计算采用25 ℃下的水和空气进行计算,最后根据数值计算的汽蚀性能曲线估算85 ℃时水泵的汽蚀性能.

2 性能预测

2.1 外特性预测

对模型泵的设计工况点进行外特性数值模拟,结果分别为流量285 L/min,转速3 700 r/min,计算扬程13.488 m,水力效率55.8%.

2.2 汽蚀性能预测

根据国家标准当水泵扬程下降3%时,为该泵发生汽蚀的临界点.由外特性预测结果可知,模型泵数值计算扬程为13.488 m,当扬程下降到13.015 m时,认为该泵已经发生汽蚀.泵进口压力继续下降,泵内汽蚀现象严重加剧,开始产生大量的气泡,并堵塞流道,泵的扬程和效率开始急剧下降.同时气泡运动到高压区溃灭,对零件表面造成较大的破坏作用.汽蚀性能曲线如图3所示.

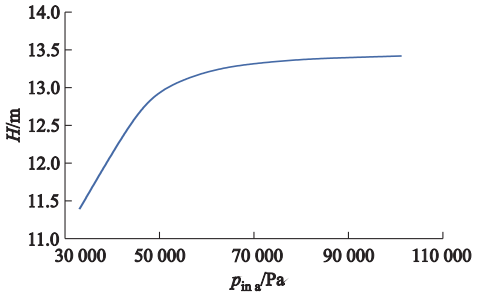


图3 汽蚀性能曲线

Fig.3 Cavitation performance curve

表2为汽蚀性能预测数据,表中$p_{in\,a}$,$p_{in\,r}$分别为进口绝对压力、进口相对压力.可以看出,叶轮在水温25 ℃下,临界汽蚀点的相对压力约为-50 kPa.

表2 汽蚀性能预测数据

Tab.2 Cavitation performance forecasts data

$p_{in\,a}$/Pa	$p_{in\,r}$/kPa	H/m	η/%
101 268	0	13.42	0.558
91 268	-10	13.40	0.553
81 269	-20	13.38	0.551
71 268	-30	13.33	0.549
61 269	-40	13.25	0.544
51 268	-50	13.02	0.536
46 269	-55	12.74	0.530
41 269	-60	12.27	0.519
33 070	-70	11.39	0.490

2.3 叶轮内部气体体积分布

汽蚀状态下,叶轮模型内部气体体积分布如图4所示.可以看出:从相对压力为0 kPa的点至临界汽蚀点(约-50 kPa)之间,气体体积分数为20%的分布区域逐渐扩大,开始时只有少量气泡产生,因此扬程和效率略有下降;但当相对压力低于临界汽蚀点后,气体体积分数为20%的分布区域开始急剧增大,低压区范围扩大,汽蚀现象严重,气泡开始堵塞流道,泵的扬程、效率急剧下降.

3 试验验证

为验证数值计算结果的准确性,进行外特性试验.在泵转速为3 700 r/min时,介质加温至85 ℃左右,在设计流量285 L/min下扬程为6.1 m.这与数值计算结果存在一定的差异,分析原因主要是由于数值计算的模型相比汽车冷却水泵的真实进口做了一定的简化;另外试验是在85 ℃水温下进行,而数值计算的介质温度为25 ℃,在不同的温度下,介质的汽化压力、动力黏度、密度等都会有一定的变化.

将25 ℃下的发动机冷却水泵临界汽蚀余量换算到85 ℃下的临界汽蚀余量,25 ℃下的饱和蒸汽压力为3.17 kPa,85 ℃下的饱和蒸汽压为57.80 kPa,两者差值为54.63 kPa,在不考虑不同温度下密度变化的影响,其临界汽蚀余量可近似为原有温度下的汽蚀余量加(减)两者温度下的饱和蒸汽压的差值[11].所以85 ℃下模型的临界汽蚀余量约为51.27+54.63≈105.90 kPa,即10.7 m.

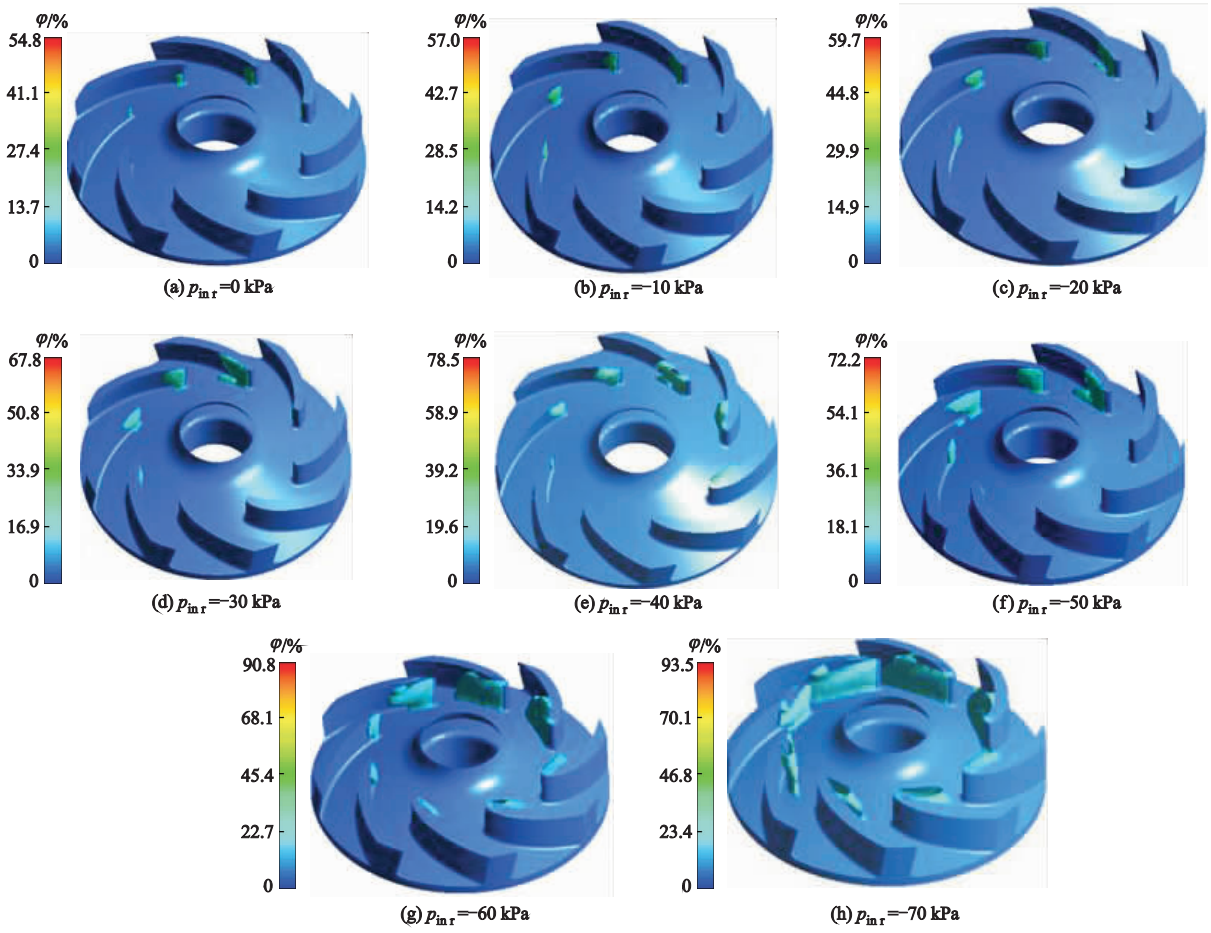


图 4　叶轮内部气体体积分布

Fig. 4　Vapor volume fraction distribution in impeller

通过外特性试验,对比分析可知,当水温为 85 ℃左右时,水泵在设计流量 285 L/min 下扬程为 6.1 m,远远低于常温下的数值计算结果,说明该泵在实际运行工况下已发生严重汽蚀;在 85 ℃时,模型泵在表压为 0 的情况下也已经有较为严重的汽蚀现象发生,根据数值模拟预测结果及外特性试验可知造型叶轮破坏的主要原因为汽蚀破坏.

4　结　论

利用流体计算软件 CFX,采用标准 $k-\varepsilon$ 方程湍流模型及多相流模型对已发生汽蚀破坏的发动机冷却水泵叶轮进行性能预测,观察冷却水泵叶轮内部汽蚀流态分布,并与试验结果对比分析,得到结论如下:

1) 发动机冷却水泵的叶轮破坏主要是由汽蚀引起,冷却水泵的汽蚀性能预测为判断和模拟叶轮的汽蚀破坏提供了一个快速、准确的计算方法.

2) 通过观察冷却水泵叶轮内部汽蚀流态分布情况,可以直观地看出叶轮内部汽蚀发生的主要部位以及随着入口压力的降低,汽蚀破坏的严重程度.由此,可以通过改变吸水室进口直径的大小、叶轮外形尺寸和叶片型线等措施,对发动机冷却水泵的汽蚀性能进行优化,并可进行数值计算验证.

参考文献(References)

[1] Rudolf Bachert, Bernd Stoffel, Matevž Dular. Unsteady cavitation at the tongue of the volute of a centrifugal pump[J]. Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(6):061301.

[2] Dular M, Bachert R, Bernd S, et al. Experimental evaluation of numerical simulation of cavitating flow around hydrofoil [J]. European Journal of Mechanics B: Fluids, 2005, 24(12): 522 – 538.

[3] Duplaa S, Coutier-Delgosha O, Dazin A, et al. Experimental study of a cavitating centrifugal pump during fast startups [J]. Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(2):021301.

[4] Long X, Yao H, Zhao J. Investigation on mechanism of

critical cavitating flow in liquid jet pumps under operating limits [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(9/10):2415 - 2420.

[5] Thai Quangnha, Lee Changjin. The cavatation behavior with short length blades in centrifugal pump[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010,24 (10): 2007 - 2016.

[6] 王勇,刘厚林,袁寿其,等. 离心泵内部空化特性的CFD模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2):99 - 103.
Wang Yong, Liu Houlin, Yuan Shouqi, et al. CFD simulation on cavitation characteristics in centrifugal pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2):99 - 103. (in Chinese)

[7] 潘中永,倪永燕,李红,等. 离心泵汽蚀特性分析[J]. 排灌机械,2008,26 (4):35 - 38.
Pan Zhongyong, Ni Yongyan, Li Hong, et al. Analysis on cavitation characteristic in centrifugal pump [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2008,26 (4):35 - 38. (in Chinese)

[8] 钟绍俊,黄镇海,黄艳岩. 基于PLC的汽车发动机冷却水泵性能测试系统设计[J]. 机床与液压,2007,35 (4):177 - 179.
Zhong Shaojun, Huang Zhenhai, Huang Yanyan. Design of the performance test system for the cooling pump based on PLC[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2007, 35(4):177 - 179. (in Chinese)

[9] 刘婷婷,王彤,杨波,等. 汽车水泵性能三维数值模拟及结构改进[J]. 工程热物理学报,2009,30(6):961 - 963.
Liu Tingting, Wang Tong, Yang Bo, et al. Numerical simulation and structure improvement for a car pump with opened centrifugal impeller[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(6):961 - 963. (in Chinese)

[10] 高莹,刘铁刚,李君. 水泵内流场对发动机内冷却水流动CFD计算精度的影响[J]. 汽车工程,2008,30 (6):514 - 517.
Gao Ying, Liu Tiegang, Li Jun. The influence of internal flow field of water pump on the accuracy of CFD analysis for engine coolant flow[J]. Automotive Engineering, 2008,30(6):514 - 517. (in Chinese)

[11] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京:中国宇航出版社,2011.

(责任编辑 陈建华)

(上接第175页)

[8] Fujiyama K, Kim C H, Hitomi. Performance and cavitation evaluation of marine propeller using numerical simulations[C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Marine Propulsors. Hamburg:[s. n.], 2011.

[9] 王磊, 常近时. 混流式水轮机转轮优化设计的空化流计算[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 98 - 102.
Wang Lei, Chang Jinshi. Cavitation simulation of Francis turbine Runner for hydraulic optimization design[J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2009, 40(9): 98 - 102. (in Chinese)

[10] 谭磊,曹树良. 基于滤波器湍流模型的水翼空化数值模拟[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2010,31(6): 683 - 686.
Tan Lei, Cao Shuling. Numerical simulation of hydrofoil cavitation based on filter-based model[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2010, 31 (6): 683 - 686. (in Chinese)

[11] Liu C J, Wang Y S. Numerical simulation and analysis of cavitation performance of waterjet[C]//Proceedings of the International Conference of Waterjet Propulsion. London:[s. n.], 2008.

(责任编辑 陈建华)