排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2017 年 1 月 Jan. 2017 | 第 35 卷 第 1 期 Vol. 35 No. 1

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.15.0287

液力减速器模型空化特性数值模拟及试验研究


董亮

董亮[1]，肖佳伟[2]，明加意[1]，刘厚林[1]
（1.江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心，江苏 镇江 212013；2.常州博瑞电力自动化设备有限公司，江苏 常州 213025）

摘要：为了研究液力减速器内部流场空化特性，基于 ANSYS CFX 软件，采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型，选取液力减速器模型单个流道作为研究对象，对其在泵轮外环壁不同压力时进行数值模拟，并搭建减速器试验台，进行降压性能试验. 将数值模拟结果与试验结果进行对比分析，验证了数值模拟方法对液力减速器空化特性预测是可靠的. 研究结果表明：数值模拟方法获得的性能曲线与试验结果变化趋势一致，且可以捕捉到空化初生状态，数值模拟与试验结果平均误差为 3.24%，可较好地反映液力减速器内部空化特性；随着泵轮外环壁压力不断降低，空化最先发生在泵轮叶片吸力面靠近轮毂的位置，之后向叶片中部扩大，直至占据叶片吸力面大部分区域；空泡分布在径向存在不均匀性，泵轮外环壁压力为 0.25 MPa 时，空化区域面积比（S_c/S）随着径向位置（r/R）的增大呈现先增大后减小的趋势，空化现象在流道靠近轮毂位置（$r/R=0.3\sim0.5$ 处）较为严重.

关键词：液力减速器；流道；空化；数值模拟；试验研究
中图分类号：S277.9；TH137.33　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2017)01-0001-05

董亮，肖佳伟，明加意，等. 液力减速器模型空化特性数值模拟及试验研究[J]. 排灌机械工程学报，2017，35(1)：1-5.
DONG Liang，XIAO Jiawei，MING Jiayi，et al. Numerical simulation and experimental study on cavitation behavior of hydraulic retarder model[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2017，35(1)：1-5.(in Chinese)

Numerical simulation and experimental study on cavitation behavior of hydraulic retarder model

DONG Liang[1]，*XIAO Jiawei*[2]，*MING Jiayi*[1]，*LIU Houlin*[1]
(1. National Research Center of Pumps，Jiangsu University，Zhenjiang，Jiangsu 212013，China；2. NR Electric Power Eletronics Co. Ltd.，Changzhou，Jiangsu 213025，China)

Abstract：To study the cavitation behavior of hydraulic retarder，the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model and Zwart-Gerber-Belamri cavitation model were chosen to simulate the cavitating flow in a single channel of a retarder model when the outer wall of the pump impeller was subject to different pressure levels based on ANSYS CFX. Additionally，a test stand was established to carry out performance tests at reduced pressure levels，and the predicted performance were compared with the measured values to validate the accuracy of numerical simulation. The results show that the error in prediction is 3.24%，indicating the retarder with a better internal cavitation characteristic. With the decrease of pressure on the outer wall of impeller，the vapor first occurs on the blade suction side close to the hub，and then

收稿日期：2015-12-21；**网络出版时间**：2017-01-09
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20170109.0844.016.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51509111)；中国博士后科学基金资助项目(2015M581734)；江苏高校优势学科建设工程项目
作者简介：董亮(1981—)，男，黑龙江齐齐哈尔人，副研究员，博士后(dongliang@ujs.edu.cn)，主要从事离心泵内流场分析研究.
肖佳伟(1990—)，男，江苏泰州人，硕士(通信作者，xjw0713@163.com)，主要从事 CFD 液力传动研究.

develops toward the middle of blade till covers the most area of the suction side. The vapor is distributed in the radial direction unevenly. The dimensionless cavity area (S_c/S) increases first and then decreases with the increase of radial position (r/R) when the external wall pressure is at 0.25 MPa. The cavitation near the hub position ($r/R=0.3-0.5$) is more serious.

Key words: hydraulic retarder; channel; cavitation; numerical simulation; experimental study

现代汽车传统的制动器大多采用摩擦制动式，即依靠工作部件之间摩擦力的作用产生制动力，并将汽车机械能转化为热能. 然而，制动器的制动能力会随着温度升高而急剧下降，因此摩擦制动不适合长时间连续工作. 为了解决该问题，需要在汽车上加装辅助制动系统. 液力减速器作为一种辅助制动装置，将输入的机械能转化为液体动能，然后液体以较高的速度冲击定轮，最终将车辆的机械能以液流冲击、摩擦等形式转化为热能消耗掉[1]，实现车辆制动.

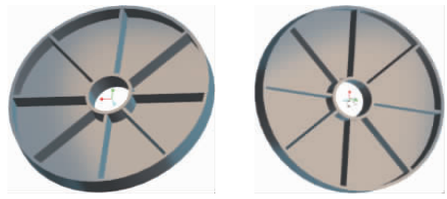
空化是液体内局部压力降低时，液体内部或液固交界面上蒸汽或气体的空穴(空泡)的形成、发展和溃灭的过程[2]. 空化使液力减速器性能降低，同时产生剧烈的振动与噪声，因此空化是液力减速器设计过程需要避免的一个问题. 液力减速器是液力偶合器的一种派生类型，工作在液力偶合器的制动工况，其理论研究是在液力变矩器及液力偶合器的研究已经相对成熟的基础上发展起来的[3]. 因此，在研究方法上可以借鉴液力变矩器以及液力偶合器的设计和试验方法.

国内外对液力机械空化的研究鲜有报道，仅有一些学者对液力变矩器进行了相关试验研究. ROBINETTE等[4-5]通过改变液力变矩器初始压力，采集到不同空化程度时液力变矩器噪声变化特性；WATANABE 等[6]对液力变矩器涡轮的空化现象进行可视化研究，捕捉到了空化初生发生在涡轮叶片根部. YU 等[7-8]对液力变矩器的内流场空化特性进行数值模拟，对比了有空化和无空化发生时变矩器性能的变化. 何延东[9]和陈见[10]分别应用 CFD 软件对液力偶合器内流场进行仿真分析，揭示其流场的流动规律和特性.

液力传动机械的数值模拟研究已经趋于成熟，但是国内对其空化特性的研究相对较少. 文中采用数值模拟和试验相结合的方法，以液力减速器模型机为研究对象，采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型，以常温水(温度 20～30 ℃，密度 1 000 kg/m^3，饱和蒸汽压 3 169 Pa)作为工作介质，通过改变样机内流场压力对其内部的空化特性进行分析，预测空化区域及范围，以探讨空化发生的机制.

1 几何模型

以液力减速器试验模型为研究对象，该模型由泵轮和涡轮组成，叶片数都为 8，如图 1 所示. 表 1 为泵轮和涡轮的主要几何参数，其中 D_1 为减速器外圆直接，D_2 为内圆直径，δ 为泵轮和涡轮之间间隙，H 是叶轮直叶片的高度，Z 为叶片数.



(a) 泵轮 (b) 涡轮

图 1 液力减速器模型

Fig. 1 Hydraulic retarder model

表 1 液力减速器模型主要几何参数

Tab. 1 Main geometric parameters of hydraulic retarder model

部件	D_1/mm	D_2/mm	δ/mm	H/mm	Z
泵轮	290	70	2	25	8
涡轮	290	70		17	8

2 数值模拟

2.1 控制方程

空化流可以看作一种均匀的气液混合流动，各相具有相同的速度和压强. 空化流场的控制方程包括气液混合介质的连续性方程、动量守恒方程以及气相体积分数的运输方程，其中气相体积分数运输方程是求解流场中两相分布.

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_m u_j)}{\partial x_j}=0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho_m u_i)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\mu_t)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\delta_{ij}\right)\right], \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\alpha_v\rho_v)}{\partial t}+\frac{\partial(\alpha_v\rho_v u_j)}{\partial x_j}=R, \tag{3}$$

式中：ρ_m，ρ_v 分别为混合介质密度、气相密度；α_v 为气相体积分数；u_i，u_j 分别为速度分量；δ_{ij} 为克罗内克数；R 为相间质量传输率；μ，μ_t 分别为混合介质动力黏度、湍流黏度.

2.2　空化模型

空化模型采用 Zwart – Gerber – Belamri 模型[11]，即

$$R_e=F_{vap}\frac{3\alpha_{ruc}(1-\alpha_v)\rho_v}{R_B}\sqrt{\frac{2(p_v-p)}{3\rho_l}},p<p_v, \tag{4}$$

$$R_c=F_{cond}\frac{3\alpha_v\rho_v}{R_B}\sqrt{\frac{2(p-p_v)}{3\rho_l}},p>p_v, \tag{5}$$

式中：α_{ruc} 为成核位置体积分数；R_B 为空泡半径；p，p_v 分别为流场压力和汽化压力；F_{vap}，F_{cond} 分别为蒸发和凝结过程的 2 个经验校正系数[12].

2.3　网格划分及边界条件

工作介质在液力减速器里的流动非常复杂，在对液力减速器进行 CFD 计算时进行如下假设[13]：

1）研究工作介质的动力情况，不考虑工作介质的温度变化.

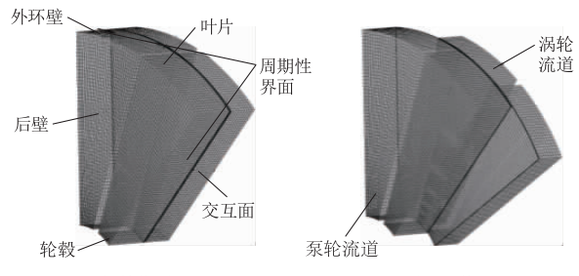
2）液力减速器中所有构件为绝对刚体.

3）除进出口外，工作介质不从其他任何部位进入流道.

4）忽略叶轮间无叶栅区的泄漏，从上游流出的工作液完全等量地进入下游叶轮.

5）在同一工况下，同一叶轮每个流道的流场特性相同.

基于上述假设，为提高计算效率，只选取一个流道进行计算分析. 对选取的流道采用 ICEM – CFD 软件进行六面体网格划分，并定义边界面，如图 2a 所示，图 2b 为采用滑动网格技术网格旋转移动后的状态.



(a) 初始位置　　(b) 滑移后网格

图 2　网格划分

Fig. 2　Computational mesh

流道的边界面主要分为 3 个类型：① 外环壁、后壁、叶片和轮毂；② 交互面；③ 周期性界面. 计算区域存在复杂的分离、回旋流以及二次流现象，对近壁区进行加密处理，使计算区域内 y^+ 不超过 30，确保近壁区有足够的节点来满足采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型进行湍流计算. 最终采用的泵轮和涡轮网格数分别为 68 204 和 42 918.

在空化和非空化条件下的定常模拟时，边界条件的设置相同. 计算区域的轮毂和叶片以等角速度随流体绕转轴旋转，因此相对于旋转坐标系而言，它们是静止的，边界条件设置为“stationary wall”. 外环壁与后壁设置为“moving wall”，旋转方向与流体的旋转方向相反，转速大小相同. 外环面压力值由试验确定，泵轮和涡轮之间的交界面设置为动静转子，收敛精度设置为 10^{-3}.

在定常计算的基础上进行非定常计算，修改动静部件的耦合模型为“transient rotor stator”，时间域上采用二阶全隐格式进行离散，根据额定转速设置时间步长为 3.7×10^{-4} s，即每时间步内叶轮旋转 4°，共进行泵轮旋转 10 周的计算，采用最后稳定的 3 周计算结果进行分析.

3　试验研究

3.1　试验台与换热系统

试验台主要由电动机、离合器、轴承支架、转速转矩传感器和液力减速器模型等构成，其布置如图 3 所示. 电动机的额定功率为 50 kW，额定转速为 1 450 r/min. 转速转矩传感器的转矩量程为 500 N·m，转速量程为 10 000 r/min. 电动机通过变频器调节转速在 0 ~ 1 450 r/min 内变化.

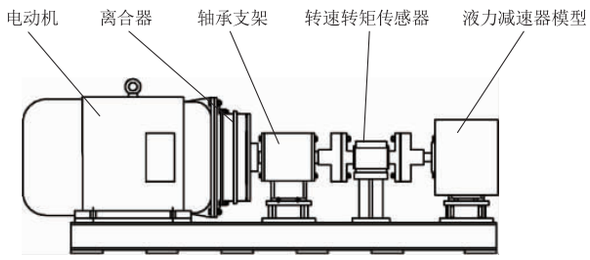


图 3　试验台示意图

Fig. 3　Hydraulic retarder test stand

图 4 为减速器试验台换热系统. 工作介质水经泵增压注入液力减速器模型降温，模型进出口检测水的温度和压力，模型壳体上装溢流阀防止腔内压力过高.

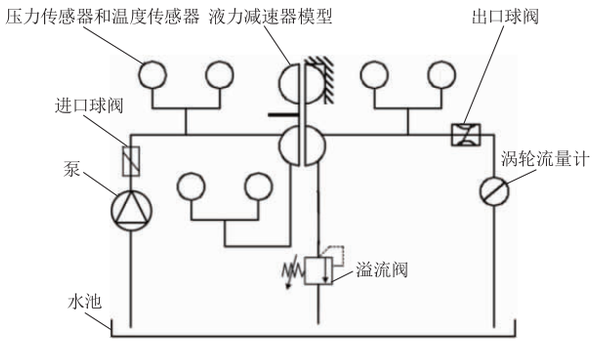


图4 试验台换热系统

Fig. 4 Heat exchange system in stand

3.2 试验步骤

以水为工作介质进行全充液试验,系统进出口和减速器壳体上装有温度和压力传感器对水的温度和压力进行监测,减速器出水口在正上方以保持腔内全充液. 增压泵从水池取水注入减速器给其降温,同时通过换热系统出口阀开度控制减速器腔体内压力为0.60,0.50,0.40,0.35,0.30,0.25和0.20 MPa进行降压性能试验.

4 数值模拟与试验结果对比分析

4.1 空化性能曲线

试验及数值模拟时,采用降低外壁面压力的方式得到如图5所示的空化性能曲线,图中:纵坐标 T 为泵轮上的制动转矩;横坐标 p 为泵轮外壁面的压力.

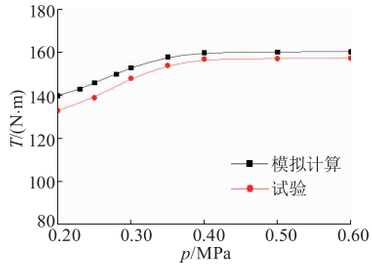


图5 拟合曲线对比

Fig. 5 Comparison of fitted curves with experimental data

由图5可以看出:数值模拟值和试验值比较接近,表明所采用的模型和数值模拟方法可以反映减速器内部流场的特性;在数值模拟中,泵轮外壁面压力从0.60 MPa降低到0.20 MPa,制动转矩下降了12.5%;各工况点制动转矩的数值模拟结果与试验结果的平均误差为3.24%;外壁面压力为0.20 MPa时空化严重,产生最大误差为5.26%;数值模拟中随着泵轮外壁面压力逐渐升高,泵轮扭矩呈递增趋势,这是因为压力的升高抑制了空化,这和试验所测数据趋势一致,达到了较高的预测精度.

4.2 流道径向截面空泡体积分布

当减速器内液体压力低于工作温度下饱和蒸汽压力时,液体中空泡微团析出并聚集成固定型空穴微团. 图5中压力高于0.40 MPa时转矩几乎无变化,因此文中主要研究压力低于0.40 MPa的情况. 图6为泵轮外壁面压力分别为0.40,0.30,…,0.20 MPa等6种情况下的泵轮单个流道径向截面的空泡体积分数分布.

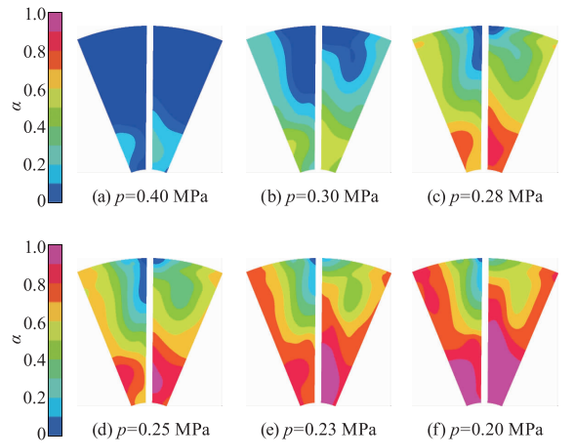


图6 泵轮径向截面空泡体积分数分布

Fig. 6 Volume fraction distribution in cross sections of pump impeller

由图6可以看出;当压力为0.40 MPa时,几乎无空化发生(见图6a);压力降低,泵轮空化区首先在吸力面靠近轮毂的位置发生(见图6b,c);随着泵轮外壁面压力逐渐降低,空泡微团在离心力与液流的作用下,空化区域从轮毂位置逐渐向外缘区域扩大,直到占据大部分叶片吸力面(见图6d,e,f).

4.3 流道轴向截面空泡面积分布

为了清晰地说明空化充分发展时,流道不同轴向截面的空化分布情况,图7给出了泵轮外环壁压力为0.25 MPa时,空化区域面积比(S_c/S)随径向位置(r/R)的变化情况. 图中:纵坐标 S_c/S 代表截面空化区域所占的比例大小,其中 S_c 表示流道截面空泡所占面积,S 表示流道截面面积;横坐标 r/R 代表截面的径向位置,其中 r 表示流道截面半径,R 表示泵轮外径. 由图7可以看出:空泡分布在径向并不均匀,空化面积比 S_c/S 在靠近轮毂处($r/R=0.25\sim0.40$)随着径向位置 r/R 的增大而增大,直至在 $r/R=0.40$ 处空化面积比达到最大值0.8,在 $r/R=0.4\sim1.0$ 处随着 r/R 的增大而减小;整个泵轮区域,空化区域的面积比 S_c/S 随 r/R 的增大呈先增大

再减小的趋势,在叶片靠近轮毂位置($r/R=0.3\sim0.5$)空化现象较为严重.

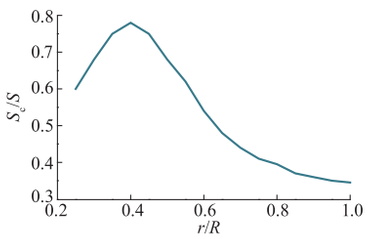


图7　空化面积径向分布

Fig. 7　Dimensionless cavity area in radial direction

5　结　论

应用ANSYS CFX软件对液力减速器模型单个流道发生空化时内流场进行数值模拟,预测减速器内部流动的空化特性,并与试验结果进行对比,得到结论如下:

1)制动转矩的数值模拟结果与试验结果的平均误差为3.24%.外壁面压力为0.20 MPa时空化严重,产生最大误差为5.26%,验证了空化数值模拟对工程应用中液力减速器性能预测的可靠性.

2)随着液力减速器泵轮外环壁压力不断减小,空化首先发生在泵轮叶片吸力面靠近轮毂的位置,之后向叶片中部扩大,直到占据了叶片吸力面大部分区域.

3)外环壁压力为0.25 MPa时,空化区域面积比随着径向位置的增大呈先增大再减小的趋势,在流道靠近轮毂位置空化现象较为严重.

参考文献(References)

[1] 过学迅,时军. 车辆液力减速制动器设计和试验研究[J]. 汽车工程, 2003, 25(3):239-242.
GUO Xuexun, SHI Jun. The design and experimental study of a vehicle hydraulic retarder [J]. Automotive engineering, 2003, 25(3):239-242. (in Chinese)

[2] 杨敏官,孙鑫恺,高波,等. 离心泵内部非定常空化流动特征的数值分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2012, 33(4): 408-413.
YANG Minguan, SUN Xinkai, GAO Bo, et al. Numerical analysis of unsteady cavitating flow characteristic in centrifugal pump [J]. Journal of Jiangsu University (natural science edition), 2012, 33(4): 408-413. (in Chinese)

[3] 罗邦杰. 工程机械液力传动[M]. 北京:机械工业出版社,1991.

[4] ROBINETTE D L, SCHWEITZER J M, MADDOCK D G, et al. Predicting the onset of cavitation in automotive torque converters—part I: designs with geometric similitude [J]. International journal of rotating machinery, 2008: 803940.

[5] ROBINETTE D L, SCHWEITZER J M, MADDOCK D G, et al. Predicting the onset of cavitation in automotive torque converters—part II: a generalized model [J]. International journal of rotating machinery,2008:312753.

[6] WATANABE S, OTANI R, KUNIMOTO S, et al. Vibration characteristics due to cavitation in stator element of automotive torque converter at stall condition [C]// Proceedings of the ASME 2012 Fluids Engineering Summer Meeting. Rio Grande, Puerto Rico:[s. n.], 2012: 1-7.

[7] YU D,KORIVI V,ATTIBELE P,et al. Torque converter CFD engineering—part Ⅰ:torque ratio and K factor improvement through stator modifications [J]. SAE paper, 2002-01-0883.

[8] YU D,KORIVI V,ATTIBELE P,et al. Torque converter CFD engineering—part Ⅱ: performance improvement through core leakage flow and cavitation control [J]. SAE paper, 2002-01-0884.

[9] 何延东. 基于CFD的大功率调速型液力偶合器设计[D]. 长春:吉林大学,2009.

[10] 陈见. 基于三维流动计算的液力减速器性能仿真研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2008.

[11] ZWART P, GERBER A G, BELAMRI T. A two-phase model for predicting cavitation dynamics [C]//Proceedings of ICMF 2004 International Conference on Multiphase Flow. Yokohama, Japan:[s. n.], 2004: 1-11.

[12] MEJRI I, BAKIR F, RER R. Comparison of computational results obtained from a homogeneous cavitation model with experimental investigations of three inducers [J]. Journal of fluids engineering, 2006, 128(6): 1308-1323.

[13] 田华,葛安林,马文星,等. 液力变矩器泵轮内流场的数值分析[J]. 吉林大学学报(工学版),2004,34(3): 378-382.
TIAN Hua, GE Anlin, MA Wenxing, et al. Numerical analysis on internal flow field in pump wheel of a torque converter [J]. Journal of Jilin University (engineering and technology edition), 2004,34(3):378-382. (in Chinese)

(责任编辑　陈建华)