doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.007

# 双吸离心泵关阀启动过程的瞬态特性研究\*

刘竹青 朱 强 杨 魏 黎耀军

(中国农业大学水利与土木工程学院,北京100083)

摘要:采用数值模拟手段,研究双吸离心泵关阀启动过程的瞬态特性,数值模拟计算域为整个闭式回路,选取的湍流模型是 SST - SAS 模型。计算过程中通过改变叶轮的旋转加速度来控制泵的启动历时变化,进而达到模拟不同 启动历时对于泵启动过程瞬态特性的影响。数值结果与实验结果吻合良好,研究发现:在启动规律都为直线加速 情况下,启动历时对于泵扬程峰值的影响很小;全回路三维模型用来模拟泵启动过程得到的瞬态扬程外特性相比 于局部边界的数值模拟结果更为接近实验值;蜗壳内部的压力脉动变化与泵的启动历时有较大关系,随着泵启动 历时的减小,蜗壳隔舌处会产生较大的低频压力脉动。

关键词:双吸离心泵 快速启动过程 瞬态特性 数值模拟 中图分类号:TH311 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2015)10-0044-05

# Transient Characteristics of Double-suction Centrifugal Pump during Starting Period under Shut-off Condition

Liu Zhuqing Zhu Qiang Yang Wei Li Yaojun

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Centrifugal pump start up process is a complex transient process. Along with the rapid rise of the impeller rotating speed in a short period of time, its characteristic parameters that include head, flow, and shaft power would change rapidly, which may have a very big impact on pump body and system's secure and stable operation. Therefore, it is very important to do research about the safety and stability of the pump during the startup process. Research of centrifugal pump is mainly concentrated in steady conditions, the application of centrifugal pump is gradually expanding, centrifugal pump will work under unsteady conditions, such as start, stop and other transient conditions, and the working conditions of pump are complicated transient process, which will make a great difference to the safe and stable operation of pump body and the system. Numerical simulation was used to study its transient characteristics during starting period, the computational domain was the entire closed test rig and the model selected was SST - SAS model. During calculating the startup time was controlled by varying the rotational acceleration of the process, then the transient characteristics of pump startup process under different startup time were studied. Combined with the experimental data, it was found that the transient head of the experiment showed good agreement with simulation, and it was also concluded that the peak of the pump head size was little affected by the startup time during the same startup rule of linear type; three-dimensional numerical simulation of the whole circuit was more accurate than the numerical simulation of the local boundary when simulated during the pump startup process; volute pressure pulsation had a great relationship with the pump startup time, and with the decrease of pump startup time, the volute tongue would produce bigger low-frequency pressure-pulse.

Key words: Double-suction centrifugal pump Rapid startup process Transient characteristics Numerical simulation

#### 引言

离心泵启动过程是一个复杂的瞬态过程。伴随 着叶轮转速在短时间内的迅速上升,其扬程、流量、 轴功率等外特性参数也在快速变化,对泵体和系统 的安全、稳定运行的影响也很大。离心泵在启动时 的瞬态效应明显有别于稳态过程,核电站冷却循环 泵在启动过程中对管路产生的冲击,直接影响核反 应堆系统的安全稳定运行<sup>[1]</sup>。而且启动过程还会 伴随着汽蚀空化等现象的发生,对泵的安全稳定运 行带来不利影响<sup>[2]</sup>。因此,研究泵启动过程的安全 稳定性至关重要。

近些年来,国内外学者开始重视流体机械瞬态 水力特性的研究,尤其是水泵运行快速瞬变过程的 研究。Tsukamoto 等<sup>[3-4]</sup>较为系统地对一低比转速 离心泵进行了快速启动的实验和数值计算,结果表 明在快速启动过程中准稳态计算与泵实际的瞬态性 能有着很大的差别。Lefebvre 等<sup>[5]</sup>通过控制叶轮转 速和管路流量,在闭式试验台测试了离心泵启动过 程的转速和杨程。吴大转等<sup>[6-7]</sup>通过离心泵快速启 动外特性试验,发现关阀启动后功率冲击最大;同时 提出基于动网格和非共形网格边界的"动态滑移区 域法",利用层流模型对一低比转速离心泵的快速 启动过程进行了非定常数值模拟。许斌杰等[8]对 离心泵连接管路的整个封闭系统进行了启动过程的 数值模拟,该方法避免了给定进出口边界条件所带 来的计算误差,但是封闭管路能否完全替代整个封 闭系统进行计算还需进一步验证。

本文对双吸离心泵的全回路系统进行建模计 算,采用 CFX 中 SST - SAS 模型对泵启动过程进行 数值模拟,计算了3组不同启动历时(0.5、1、2s)的 关阀启动过程,通过与外特性实验结果的对比,对数 值模拟结果进行验证,并对叶轮内部流动和瞬态特 性进行分析。

# 1 数值模拟方法

# 1.1 计算模型

数值计算所用双吸泵为南水北调中线工程某泵



站所用双吸离心泵的模型泵,基本参数为:泵进口直径 100 mm、出口直径 80 mm,叶轮出口直径 130 mm, 额定流量 80 m<sup>3</sup>/h,额定扬程 15 m,额定转速 2 950 r/min,叶片数 6,比转数 148.91。该闭式试验 台三维模型如图 1 所示。计算域选取除了普通的泵 体结构外,还有管路和进出口压力罐,这一计算模型 尺寸很大,对计算能力的要求很高。为了满足关阀 启动,在出口阀门位置将管路断开,整个计算域只需 要给定叶轮加速的条件。



Fig. 1 Three-dimensional model of closed test rig

#### 1.2 网格划分

本文的计算域包含整个闭式回路系统,在 网格划分上采用结构化网格和非结构化网格组 合,进而满足模型的计算需求。采用 ICEM CFD 对泵体部分进行结构化网格划分,管路和储水 罐则采用非结构化网格。叶片壁面和前后盖板 壁面采用边界层网格,第1层网格高度设为 0.025 mm 和 0.09 mm,层数分别为 20 层和 10 层,各部件网格和局部放大示意图如图 2 所示。

# 1.3 计算方法和边界条件

采用商业软件 CFX 进行数值模拟,湍流模型采用 SST - SAS 模型,该模型是一种 LES/RANS 混合 方法<sup>[9-11]</sup>,它也借鉴了 DES 中长度尺度的思路,使 远离壁面的非稳态区域能够根据当地网格动态地调 整 RANS 的长度尺度,从而克服 DES 模型处理 RANS/LES 交界面困难的问题。

由于计算域是整个闭式回路,进出口条件不需 要给定,壁面均采用无滑移条件,叶轮部分为旋转区



(c)

图 2 计算域各部分网格 Fig. 2 Each part of computational grids (a)吸水室 (b)叶轮 (c) 蜗壳 域,从零开始加速转动,加速过程为直线加速,通过 CCL语言编译控制,不同启动历时可通过控制其加 速系数来实现,其方程为

$$n(t) = n_{\max} \frac{t}{t_{\tau}}$$

式中 n<sub>max</sub>——启动完成后的最大转速

 $t_{T}$ ——叶轮从零加速到最大转速的启动历时 t——计算过程的时间

蜗壳、吸水室和闭式环路均为静止域,叶轮和蜗 壳、叶轮和吸水室之间的交界面选用 Transient Rotor-Stator 的动静交界面模型。初始时间步长为  $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$  s,当叶轮加速到 0.5 s 之后,采用的 时间步长为  $\Delta t = 2.0 \times 10^{-4}$  s,同一时间步内迭代求 解的收敛系数为 1.0 × 10<sup>-4</sup> 。瞬态模拟采用 3 台主 频 2.0 GHz、搭载 Intel Xeon E5 – 2600 八核处理器的 高性能计算集群,共耗时 960 h 完成。

## 2 结果与分析

#### 2.1 外特性结果

通过数值模拟得到离心泵不同启动历时下的启 动过程瞬态扬程特性曲线,与实验值进行对比,如 图 3 所示。



图 3 3 种启动历时进出口压差模拟值与实验值对比

Fig. 3 Three start simulations for import and export pressure difference values compared with experimental values

 $(a) \ 0.5 \ s \quad (b) \ 1 \ s \quad (c) \ 2 \ s$ 

从图 3 可以发现数值模拟的结果与实验值吻合 得较为良好,数值模拟的启泵过程压差变化趋势都 是先慢后快,到达额定转速时的扬程峰值较为接近。 0.5 s 启泵工况下,转速的增加不是完全呈直线型, 总启动历时超过了 0.5 s,可能是由于启动时间过 短,电动机变频效果不够显著而导致。此外,0.5 s 启泵时进出口压差实验值的增长曲线出现较大波动 是由于泵启动时的共振效应引起的,2 s 启泵时有冲 击扬程产生,但数值模拟效果未显现出来。总体来 看,数值模拟结果在加速阶段和稳定阶段都没有较 大波动,整体趋势与实验值很接近,模拟结果与实验 结果基本相符。

本文也针对同样的泵型,建立了如图 4 所示的 局部边界模型,进行了 0.5 s 关阀启动过程的非定 常模拟,将两者的瞬态扬程结果与实验值进行对比, 如图 5 所示。从图中可以看出:全回路模拟的扬程 外特性结果与实验值更为接近。在开始的 0.5 s 加 速阶段,三者的瞬时压差增长趋势比较相近,而在稳 定后,局部边界模拟的扬程则低于全回路模拟的扬 程,相对偏差约为 8.52%。分析其原因可能是:局 部边界模拟时,给定的进口边界条件是零流量,出口 边界条件是自由出流,而实际启动过程中,该模型的 进口处流量不一定为零,而且出口处的回流不能有 效模拟出来,由此导致最终计算结果有一定的误差。 说明采用全回路数值模拟的方法来模拟泵启动过 程,其结果更准确。



图 4 局部边界模拟三维模型图







#### 2.2 瞬态特性对比

为了更好地分析启泵时各个时刻的瞬态特性, 选取泵转速达到590、1180、1770、2360、2950 r/min 时,研究不同启动历时工况和稳态工况下,泵的外特 性变化,如图6所示,图中稳态结果表示采用若干组 25



不同启动工况的瞬态计算和稳态计算中压力和流线变化图 图 7

Fig. 7 Pressure and streamline graph of transient and steady-state calculations under different starting conditions (a) 0.5 s, 590 r/min (b) 1 s, 590 r/min (c) 2 s, 590 r/min (d) 准稳态, 590 r/min (e) 0.5 s, 1180 r/min (f) 1 s, 1180 r/min (g) 2 s, 1 180 r/min (h) 准稳态,590 r/min (i) 0.5 s, 1 770 r/min (j) 1 s, 1 770 r/min (k) 2 s, 1 770 r/min (1) 准稳态,1770 r/min (m) 0.5 s, 2 360 r/min (n) 1 s, 2 360 r/min (o) 2 s, 2 360 r/min (p) 准稳态,2 360 r/min (q) 0.5 s, 2950 r/min (r) 1 s, 2950 r/min (s) 2 s, 2950 r/min (t) 准稳态, 2950 r/min

工况,各个转速下对应的泵体内部压力,2 s 启动工况会略大于其他工况。

启动过程中,随着叶轮转速的增加,蜗壳内压力 会随之增加。为了探究不同启动历时工况对蜗壳区 域压力脉动的影响,数值模拟过程中,在蜗壳中心轴 面上设置了系列监测点,监测点位置分布如图 8 所 示。将数值模拟得到的各监测点相对压力数据,经 过快速傅里叶变换(FFT)分析,得到各点的频域图。 图 9(图中 f<sub>d</sub> 表示该点处的压力脉动频率;f 表示叶 轮的转动频率)所示分别为不同启动历时工况下, 叶轮达到额定转速之后,蜗壳的压力脉动频域图。 图中可以看出隔舌附近的压力脉动变化最为强 烈<sup>[13-15]</sup>,0.5 s 和 1 s 启动工况下,测点 1 处都有较 大幅值的低频脉动产生,而且在 0.5 s 启动工况下 低频压力脉动为主频。1 s 和2 s 启动工况下,测点2 的 压力脉动幅值大于测点1 的脉动幅值,而且其主频和 次频分别是叶频的12 倍和24 倍,远大于0.5 s 工况时 的压力脉动频率。这说明随着启动历时的增加,各测 点的主频和次频都呈现向高频移动的趋势。



图 8 蜗壳上 7 个监测点位置分布

Fig. 8 Seven monitoring locations distribution on volute



图 9 蜗壳各测点的压力脉动频域图



# 3 结论

采用 SST - SAS 模型,对一个闭式双吸泵试验 台进行全回路的关阀启动过程的三维非定常数值模 拟,研究了泵启动历时对泵扬程及涡壳内压力脉动 特性的影响,得到如下结论:

(1) 在启动规律均为直线加速过程时,0.5、1、 2 s 启动历时对泵的扬程峰值影响很小。 (2)采用全回路模型进行双吸泵启动过程的数 值模拟,避免了局部边界模型模拟中瞬态进、出口边 界条件难以给定的问题,可以获得与实验值更为吻 合的模拟结果。

(3) 双吸泵的启动历时对其外特性的影响并不明显,但是对蜗壳内压力脉动的影响较显著,随着启动历时的减小,蜗壳隔舌处低频压力脉动幅值明显增大。

#### 参考 文 献

- 1 关醒凡.现代泵技术手册[M].北京:宇宙出版社,1995.
- 2 吴大转,王乐勤. 高速混流泵汽蚀特性与汽蚀性能改善方法[J]. 农业机械学报,2006,37(9):93-96.
  Wu Dazhuan, Wang Leqin. Study on cavitation behavior of high-speed mixed flow pump and cavitation performance improvement method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(9):93-96. (in Chinese)
- 3 Tsukamoto H, Hashi O. Transient characteristics of a centrifugal pump during starting period [J]. ASME Journal of Fluid Engineering, 1982, 104(1): 6-13.
- 4 Tsukamoto H, Matsunaga S, Yoneda H. Transient characteristics of a centrifugal pump during stopping period[J]. ASME Journal of Fluid Engineering, 1986, 108(4): 392 399.
- 5 Lefebvre J, Barker W P. Centrifugal pump performance during transient operation [J]. ASME Journal of Fluid Engineering, 1995, 117(2): 123 - 128.
- 6 吴大转,王乐勤,胡征宇.离心泵快速启动过程外部特性的试验研究[J].工程热物理学报,2006,27(1):68-70.
  Wu Dazhuan, Wang Leqin, Hu Zhengyu. Experimental study on explicit performance of centrifugal pump during starting period [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(1):68-70. (in Chinese)

55

Numerical Methods in Fluids, 2004, 45(1):79-108.

- 5 Coirier W J, Jorgenson P C E. A mixed volume grid approach for the Euler and Navier-Stokes equations [C] // Proceedings of the 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1996.
- 6 Luo H, Baum J D, Lohner R. High-Reynolds number viscous flow computations using an unstructured-grid method [J]. Journal of Aircraft, 2005, 42(2):483-492.
- 7 Kallinderis Y, Ward S. Prismatic grid generation for three-dimensional complex geometries [J]. AIAA Journal, 1993, 31(10):1850 1856.
- 8 Kallinderis Y, Khawaja A, Mcmorris H. Hybrid prismatic/tetrahedral grid generation for complex geometries [J]. AIAA Journal, 1996, 34(2):291-298.
- 9 Khawaja A S. General semi-structured grid generation for complex 3-D geometries with dispatate length scales [D]. Austin, TX: The University of Texas at Austin, 1998.
- 10 刘学强,伍贻兆,夏健.用混合网格求解三维可压雷诺平均 Navier Stokes 方程[J]. 计算力学学报,2002,19(3):265-269. Liu Xueqiang, Wu Yizhao, Xia Jian. Solution of the 3D turbulence Navier - Stokes equations using hybrid grids[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2002, 19(3):265-269. (in Chinese)
- 11 陈坚强, Mack A. 用混合网格模拟绕 X-38 粘性流动[J]. 空气动力学学报,2002,20(1):96-101. Chen Jianqiang, Mack A. Hypersonic viscous flow computition over X-38 with hybrid meshes[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2002,20(1):96-101. (in Chinese)
- 12 Pébay P, Baker T. Analysis of triangle quality measures [J]. Mathematics of Computation, 2003, 72(244):1817-1839.
- 13 Borouchaki H, George, Paul Louis. Parametric surface meshing. Part I: theoretical aspects [J]. Comptes Rendus de lAcade-mie des Sciences Series I Mathematics, 1997, 324(7): 833-837.
- 14 Hestenes M R, Stiefel E. Methods of conjugate gradients for solving linear systems [J]. Journal of Research of the National Bureau Standards, 1952, 49:409 436.
- 15 裴雪重,唐韶华,夏一天.黄金分割律在中医学理论中有重要表现[J].中国中医基础医学杂志,1996,2(4):13-14.
- 16 袁亚湘,孙文瑜.最优化理论与方法[M].北京:科学出版社,1997.
- 17 王海涛,朱洪.改进的二分法查找[J].计算机工程,2006,32(10):61-63.
  Wang Haitao, Zhu Hong. Modified binary search[J]. Computer Engineering, 2006, 32(10):61-63. (in Chinese)
- 18 李晓俊,袁寿其,潘中永,等. 基于结构化网格的离心泵全流场数值模拟[J]. 农业机械学报,2013,44(7):50 54,49.
- Li Xiaojun, Yuan Shouqi, Pan Zhongyong, et al. Numerical simulation of whole flow field for centrifugal pump with structured grid
  - [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(7):50-54,49. (in Chinese)

#### (上接第48页)

- 7 李志峰,吴大转,王乐勤,等. 离心泵启动过程瞬态特性的试验[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(5):390-393. Li Zhifeng, Wu Dazhuan, Wang Leqin, et al. Experiment on instantaneous characteristics in centrifugal-pump during startup period[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(5): 390-393. (in Chinese)
- 8 许斌杰,李志峰,吴大转,等. 离心泵启动过程瞬态特性的研究[J]. 中国科技论文在线, 2009, 4(9): 645 647. Xu Binjie, Li Zhifeng, Wu Dazhuan, et al. Numerical simulation for transient turbulence flow of centrifugal pump during starting period[J]. Sciencepaper Online, 2009, 4(9): 645 - 647. (in Chinese)
- 9 阎超,于剑,徐晶磊,等. CFD 模拟方法的发展成就与展望[J]. 力学发展, 2011, 41(5): 562 589. Yan Chao, Yu Jian, Xu Jinglei, et al. On the achievements and prospects for the methods of computational fluid dynamics[J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(5): 562 - 589. (in Chinese)
- 10 任芸,刘厚林,舒敏骅,等. 考虑旋转和曲率影响的 SST k-ω 湍流模型改进[J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 120-124. Ren Yun, Liu Houlin, Shu Minhua, et al. Improvement of SST k-ω turbulence model and numerical simulation in centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 120-124. (in Chinese)
- 11 Majidi K. Numerical study of unsteady flow in a centrifugal pump[J]. ASME Journal of Turbo Machinery, 2005, 127(2): 363 371.
- 12 张玉良,朱祖超,林慧超,等. 关死点处离心泵启动过程的数值模拟[J]. 力学季刊, 2012, 33(3): 437-440. Zhang Yuliang, Zhu Zuchao, Lin Huichao, et al. Numerical simulation of unsteady flow in centrifugal pump during startup period at shut-off condition[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2012, 33(3): 437-440. (in Chinese)
- 13 Jose G, Jesus M, Fernandez O, et al. Unsteady flow patterns for a double suction centrifugal pump[J]. ASME Journal of Fluid Engineering, 2009, 131(7): 749-757.
- 14 丛国辉,王福军. 双吸离心泵隔舌区压力脉动特性分析[J]. 农业机械学报,2008,39(6):61-63. Cong Guohui, Wang Fujun. Numerical investigation of unsteady pressure fluctuations near volute tongue in a double-suction centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6):61-63. (in Chinese)
- 15 Barrio R, Parrondo J, Blanco E. Numerical analysis of the unsteady flow in the near-tongue region in a volute-type centrifugal pump for different operating points [J]. Computers and Fluids, 2010, 39(5): 859 870.