排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2018 年 6 月 June 2018 | 第 36 卷 第 6 期 Vol. 36 No. 6

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.16.0116

离心泵瞬时启动过程的仿真

吴绍科[1*]，张跃文[2]，张鹏[2]
（1. 中交水运规划设计院有限公司信息系统设计所，北京 100007；2. 大连海事大学省级重点实验室船舶动力装置故障监测实验室，辽宁 大连 116026）


吴绍科

摘要：为了更进一步研究高比转数大功率离心泵的瞬时工况，应用 Flowmaster 软件搭建离心泵运行模型，根据实际测量参数设置边界条件进行仿真并与试验结果进行对比，在可信的情况下，针对泵不同的启动方式进行仿真分析，量化了星-三角启动的优点. 在此基础上，在不同阀门开度下，获得了离心泵的瞬时启动转速、流量、功率和出口压力的特性曲线，进而进行量纲一化分析. 结果表明，星-三角启动属于缓慢启动方式，启动过程平缓，且整个过程中功率增长均匀，对设备冲击小；在离心泵的启动过程中，流量上升特性主要取决于电动机自身的启动特性，且在初期时上升缓慢，使流量达到稳定的时间大大滞后于转速达到稳定的时间；量纲为一的系数一直变化，与准稳态假设不符，从而得出离心泵启动时清晰的瞬态过程.

关键词：离心泵；Flowmaster；启动；瞬态特性
中图分类号：TK311；S277.9　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2018)06-0461-05

吴绍科，张跃文，张鹏. 离心泵瞬时启动过程的仿真[J]. 排灌机械工程学报，2018，36(6)：461-465.
WU Shaoke，ZHANG Yuewen，ZHANG Peng. Simulation on performance of centrifugal pump during rapid startup period[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2018，36(6)：461-465.(in Chinese)

Simulation on performance of centrifugal pump during rapid startup period

WU Shaoke[1*]，*ZHANG Yuewen*[2]，*ZHANG Peng*[2]
(1. Water Transport Planning and Design Co. Ltd.，China Communications Construction Company Limited，Beijing 100007，China；2. College of Marine Engineering，Dalian Maritime University，Dalian，Liaoning 116026，China)

Abstract：To further research instantaneous characteristics in the centrifugal pump during the startup period，first，the results simulated by the software Flowmaster was compared with the experimental results，and then the situation that pump started up by different ways was simulated and analyzed. It shows that star-delta starting is in favour of the pump compared to the direct-starting. Based on this，Flowmaster was used to simulate the instantaneous starting speed，flow rate，power and outlet pressure of the centrifugal pump with the different valve openings. At last，the non-dimensional analysis was carried out. The results show that the star-delta starting belongs to the slow-start and is better than the direct-starting. In the start-up process of the centrifugal pump，flow rate characteristics are mainly determined by the motor starting characteristics and rise slowly at the beginning. The time that the flow rate reaches the stability from zero lags far behind the time that the rotating speed does. The dimensionless coefficient varies all the time and it can not be inconsistent with the quasi-steady state assumption.

收稿日期：2016-05-24；**修回日期**：2016-09-14；**网络出版时间**：2018-05-14
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180514.1104.002.html
基金项目：中国船级社项目(9215294)
第一作者简介：吴绍科(1992—)，男，四川广安人，工程师(通信作者，wushaoke@pdiwt.com.cn)，主要从事海事信息化和管网状态监测研究.
第二作者简介：张跃文(1967—)，男，辽宁大连人，教授(15541133566@163.com)，主要从事智能船舶研究.

Key words: centrifugal pump; Flowmaster; startup; transient characteristics

离心泵作为流体输送机械,被广泛运用于各行各业. 目前,大多数的研究局限于离心泵工作在稳定工况下[1-2]. 实际上,泵停止或开启或调阀时,整个管路的工况处于十分不稳定的状态,压力、流量等参数都产生剧烈的波动,明显区别于稳态工况,启动瞬间严重偏离设计工况点.

LEFEBVRE 等[3]在离心泵工况发生瞬态变化时进行试验,得出离心泵的瞬态特性与准稳态假设不合. TSUKAMOTO 等[4-5]对离心泵的瞬时启动和停机过程进行了理论和试验研究,表明准稳态和瞬态区别的主要原因在于脉冲压力以及围绕叶片环量的延迟. 国内,杨从新等[6]对离心泵启动特性进行了三维数值模拟. 胡征宇等[7]、吴大转等[8-10]、王乐勤等[11]、LI 等[12]对离心泵的启动过程进行了理论研究和试验验证. 以上工作均为试验研究,试验过程费时费力且不确定因素很多,为了对离心泵的启动瞬时过程特性进行更深一步的研究,文中应用热流体系统仿真分析软件 Flowmaster 对离心泵进行仿真,模拟离心泵不同启动方式下的不同特性,量化离心泵的不同启动方式的不同特性,进而研究星-三角启动方式下的不同阀门开度离心泵启动过程中的流量、转速、出口压力以及功率的瞬时变化特性,最后运用量纲为一的流量和扬程变化曲线揭示离心泵的启动过程的瞬态变化规律.

1 仿真试验及不同启动方式对比

1.1 Flowmaster 建模仿真

Flowmaster 作为面向工程的一维流体仿真软件,其原理是分解系统结构成相对应的设备和节点所形成的网络,用流动的介质和元件描述各种结构内流情况[13-14]. 文中运用 Flowmaster 流体软件进行仿真建模,属于一维仿真的方法.

试验模型由离心泵、循环管路、球阀和动力装置组成,如图 1 所示. 图中元件 1 和 7 表示恒压水箱,水面压力为 0.101 325 MPa;元件 3 和 5 表示无缝钢管,长度 $L=10$ m,半径 $r=0.762$ m,设置管路模型为 Colobrook-White 模型,表面粗糙度为 0.025 mm;元件 4 为球阀,开度可以设置为 0-1,也可以设置为动态过程;元件 11 为星-三角启动控制装置. 当控制装置不和泵直接连接时,离心泵可以设置启动方式为直接启动. 节点 1,2,3,4,5 分别是系统监控点,实时地对系统的参数进行监测,其中节点 3 监测的是离心泵的出口压力. 离心泵选用高比转数水泵,主要的设计参数为流量 $Q=1.917$ m^3/h,扬程 $H=13.3$ m,转速 $n=485$ r/min,功率 $P=250$ kW.

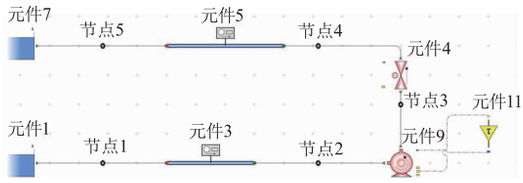


图 1 离心泵瞬间启动特性试验模型图

Fig. 1 Experiment model of centrifugal pump during rapid start-up period

离心泵的进出口管路皆为无缝钢管. 模型中设置离心泵的流量扬程特性曲线如图 2 所示,其中离心泵参数均来自离心泵实际试验测量,由于对于流量扬程的测量是稳态过程,因此测量容易实现,同时也使整个仿真过程的数据更加贴近实际试验,图 2 中标注的点为离心泵的设计工况点.

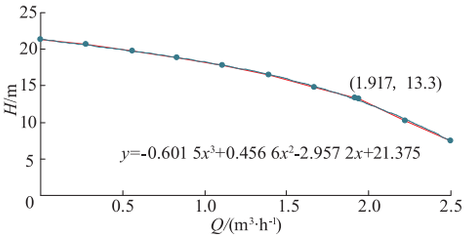


图 2 离心泵流量-扬程特性曲线

Fig. 2 Flow-head curves of centrifugal pump

1.2 不同启动方式的对比

首先设置离心泵的启动方式为直接启动,球阀开度为 1,步长设置为 0.01 s,0 s 的时候开始启动,运行时间长度 0 ~ 10 s,得到最后结果,由于离心泵很快达到稳定状态,这里绘制出 2 s 时间内直接启动下的转速和功率随时间变化图,如图 3 所示. 接着将星-三角启动装置与离心泵直接关联上,即泵的启动方式为星-三角启动,阀门开度、步长和时间相同,运行时间 0 ~ 10 s,得到最后结果. 将直接启动与星-三角启动方式下的试验结果进行对比,如图 4 所示.

由图 3,4 对比可知,在出口阀开度为 1.0 的情况下,直接启动下转速由 0 加速到设定值的时间是 0.32 s,相对于星-三角启动方式的 2.72 s,启动所需的时间短. 但是,直接启动过程中,功率会产生瞬

时冲击，最大值为 267 kW，比额定功率超出了 7%，这对离心泵是不利的，特别是大功率离心泵，会对整个电网产生一定程度的伤害. 而星－三角启动方式下，达到设定功率的时间虽然比直接启动时间长，但是启动过程平缓，整个启动过程中功率增长均匀，更加适合大功率离心泵的启动. 因此，文中采取星－三角启动方式.

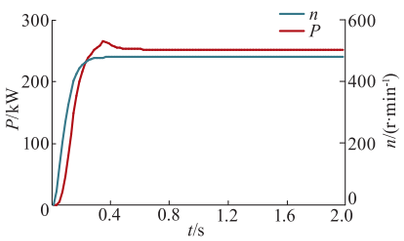


图 3　直接启动方式下的功率及转速特性曲线

Fig. 3　Power and rotating speed curves under direct start-up

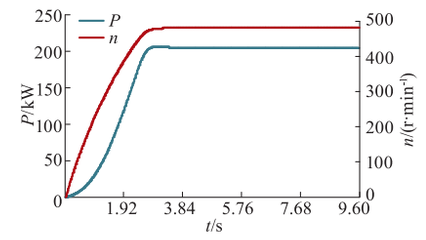


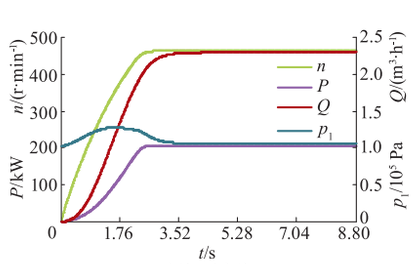
图 4　星－三角启动瞬态变化曲线

Fig. 4　Transient curves of star－delta starting

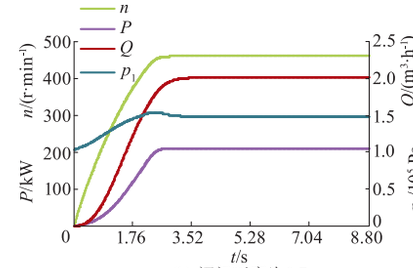
2　不同阀门开度下的启动瞬态结果

2.1　试验结果

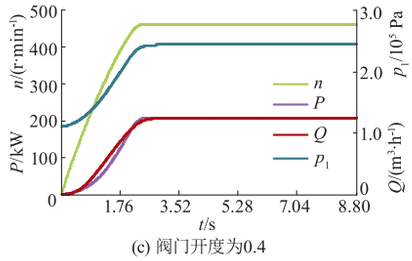
图 5 为离心泵在星－三角启动方式下，将球阀调整到不同开度所得到的转速 n、流量 Q、功率 P 和出口压力 p_1 的特性曲线图.



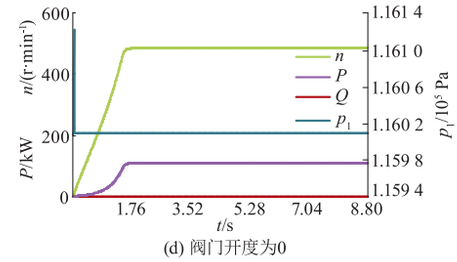
(a) 阀门开度为1.0



(b) 阀门开度为0.7



(c) 阀门开度为0.4



(d) 阀门开度为0

图 5　不同阀门开度下的离心泵瞬间启动特性曲线

Fig. 5　Transient curves of start-up at different valve openings

对于离心泵而言，当转速不变时，功率随着阀门的开度或者流量的增加而明显增加，进而电动机所输出的转矩也增大. 图 5d 中，阀门开度为 0，所输出的轴功率仅为 108 kW，相比较于图 5a 中阀门开度为 1.0 时候的功率输出，明显小了很多. 因此一般离心泵启动时建议封闭启动，关闭排出阀. 转矩的增大理论上会影响离心泵的转速上升特性. 试验证实，在 4 种不同阀门开度情况下，转速上升特性变化很小，基本都在 2.72 s 时转速达到最大值. 不同之处在于，当阀门开度为 0，即流量为 0 时，启动后的转速最高，为 483 r/min；阀门开度为 1.0 时，流量为 2.29 m^3/s，转速最低，为 464 r/min. 这说明在离心泵的启动过程中，转速上升特性主要取决于电动机自身的启动特性. 这个结论与实际离心泵试验是相符合的[15].

相对于转速的上升，流量的上升是滞后于转速的. 在离心泵启动初期，流量上升比较缓慢，之后上升速率增快，而后上升缓慢，直至流量保持稳定. 初期上升缓慢是由于管道内流体均呈现静止状态，离心泵刚启动运行，带动管道内液体一起流动. 同时，随着阀门开度的增加，流量达到稳定的时间越滞后，流量上升的延迟也越严重.

在 4 种阀门开度下，阀门开度从 0 到 1.0，功率达到稳定时的数值分别为 108，208，210，214 kW，可

见随着系统流量的增加,轴功率增加. 由于采用了星－三角启动方式,离心泵所产生的功率冲击基本可以忽略不计,不仅保护了负载设备,也保护了电网系统. 且离心泵启动时功率达到最大值时的时间为2.72～3.10 s不等,离心泵的突然启动对电网的冲击不大.

在4种阀门开度下,离心泵出口压力达到稳定的值分别为0.105 7,0.148 0,0.243 0 MPa,所对应的阀门开度分别为1.0,0.7,0.4. 阀门全关时,由于离心泵封闭启动,离心泵出口压力产生瞬时压力上升,随后回落到正常,这与离心泵出口处的流体达到稳定状态有关. 总而言之,离心泵的启动呈现出十分明显的瞬时特性.

2.2 量纲一化分析

在测得离心泵瞬时流量和进出口压力的情况下,离心泵瞬时扬程计算公式为

$$H=\frac{p_2-p_1}{\rho g}+\frac{1}{2g}\left(\frac{Q}{900\pi}\right)^2\left(\frac{1}{d_2^4}-\frac{1}{d_1^4}\right), \tag{1}$$

式中:p_2,p_1 分别为离心泵的进出口压力,即仿真模型中节点2和3的实时监控值;ρ 为水的密度;d_1,d_2 分别为离心泵泵体的进出口直径. 同时,由于已经根据实际试验获得离心泵的流量－扬程特性曲线,可以应用线性拟合的方法得到流量－扬程的计算关系式[16-18]为

$$H=0.601\ 5Q^3+0.456\ 6Q^2-2.957\ 2Q+21.375, \tag{2}$$

式(1)和(2)可以互补,相互验证,从而得到离心泵的瞬时扬程.

为了消除转速对结果的影响,对流量和扬程进行量纲一化处理,量纲为一的扬程 C_H 和流量 C_Q 为

$$C_H=\frac{gH}{u_2^2/2},C_Q=\frac{Q}{\pi d_2 b_2 u_2}, \tag{3}$$

式中:d_2,b_2 分别为叶轮的出口直径和出口宽度;u_2 为叶轮出口周向速度.

图6为量纲为一的流量随时间的变化曲线.

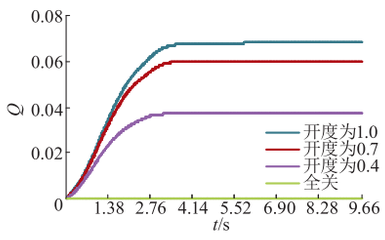


图6 量纲为一的流量随时间的变化曲线

Fig. 6 Flow－time curves

由图6可以得出,量纲为一的流量随着时间的推移呈现持续上升趋势,同样在刚启动的时候上升比较缓慢. 离心泵的启动是快速变化的过程. 准稳态过程指出,量纲为一的流量和量纲为一的扬程为恒定值. 文中可以得出,二者的数值都不恒定,随着时间的变化一直在变化,严重偏离了准稳态过程. 准稳态假设无法适用于离心泵的瞬时启动特性.

3 结 论

在离心泵的启动过程中,转速上升特性主要取决于电动机自身的启动特性,且在初期上升缓慢,使流量达到稳定的时间大大滞后于转速达到稳定的时间,且延迟时间随着阀门开度的增加而加长. 由于采用了缓慢启动的方式,功率增长均匀,基本不存在冲击现象,同时,与实际试验过程相比,由于采用了星－三角启动方式,随着阀门开度的减小,启动功率减小,定量分析了封闭启动的优点. 量纲为一的系数也随着时间的变化一直变化,与准稳态曲线严重偏离,与准稳态假设不符. 总之,泵的启动过程呈现出清晰的瞬态行为.

参考文献(References)

[1] 刘超. 离心泵振动故障分析及排查措施[J]. 化工设备与管道, 2016, 53(4):64－65.
LIU Chao. Analysis of fault due to vibration occurred in centrifugal pump and troubleshooting measures [J]. Process equipment & piping, 2016, 53(4):64－65. (in Chinese)

[2] 郭建,邱澄宇. 离心泵和管路效率分析[J]. 集美大学学报,2004,9(3):250－254.
GUO Jian, QIU Chengyu. Analysis on efficiency of centrifugal pump and pipeline [J]. Journal of Jimei University, 2004, 9 (3): 250－254. (in Chinese)

[3] LEFEBVRE P J, BARKER W P. Centrifugal pump performance during instantaneous operation [J]. Journal of fluids engineering, 1995, 117(2): 123－128.

[4] TSUKAMOTO H, OHASHI H. Transient, characteristics of a centrifugal pump during startup period [J]. ASME journal of fluids engineering, 1982, 104(1): 6－13.

[5] TSUKAMOTO H, MATSUNAGA S, YONEDA H, et al. Transient characteristics of a centrifugal pump during stopping period [J]. ASME journal of fluids engineering, 1986, 108(4): 392－399.

[6] 杨从新,杨斌. 离心泵在启动阶段的瞬态三维数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2010, 28(2): 122－126.

YANG Congxin, YANG Bin. Centrifugal pump in the startup stage of three dimensional transient numerical simulation [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering,2010,28 (2): 122 - 126. (in Chinese)

[7] 胡征宇,吴大转,王乐勤. 离心泵快速启动过程的瞬态水力特性外特性研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2005,39(5): 605 - 608.
HU Zhengyu, WU Dazhuan, WANG Leqin. Transient hydraulic characteristics of centrifugal pump during rapid start up process [J]. Journal of Zhejiang University(engineering science),2005,39 (5): 605 - 608. (in Chinese)

[8] 吴大转,王乐勤,胡征宇. 离心泵快速启动过程外部特性的实验研究[J]. 工程热物理学报,2006,27(1): 68 - 70.
WU Dazhuan,WANG Leqin, HU Zhengyu. Experimental study on the external characteristics of centrifugal pump during rapid starting [J]. Journal of engineering thermal physics, 2006, 27 (1): 68 - 70. (in Chinese)

[9] 吴大转,王乐勤,胡征宇. 离心泵快速启动过程瞬态水力特性的数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版),2005,39(9): 1427 - 1430, 1454.
WU Dazhuan, WANG Leqin, HU Zhengyu. Numerical simulation of transient hydraulic characteristics of centrifugal pump during quick start process [J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2005, 39 (9): 1427 - 1430,1454. (in Chinese)

[10] 吴大转,徐斌杰,李志峰. 离心泵瞬态操作条件下内部流动的数值模拟[J]. 工程热物理学报,2009,30 (2): 781 - 783.
WU Dazhuan, XU Binjie, LI Zhifeng. Numerical simulation of internal flow in a centrifugal pump under transient operating conditions [J]. Journal of engineering thermophysics, 2009,30 (2): 781 - 783. (in Chinese)

[11] 王乐勤,吴大转. 混流泵管路负载快速变化过程瞬态特性的实验研究[J]. 通用机械, 2003(2): 65 - 68.
WANG Leqin, WU Dazhuan. Experimental study on transient characteristics of a mixed flow pump with rapid load change process [J]. General machinery, 2003 (2): 65 - 68. (in Chinese)

[12] LI Z F,WU D Z, WANG L Q, et al. Numerical simulation of the transient flow in a centrifugal pump during starting period[J]. Journal of fluid engineering, 2010, 132(8):1 - 8.

[13] 王福军,白绵绵,肖若富. Flowmaster 在泵站过渡过程分析中的应用[J]. 排灌机械工程学报,2010,28 (2): 144 - 148.
WANG Fujun,BAI Mianmian, XIAO Ruofu. Flowmaster in pump transition process analysis application [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2010,28 (2): 144 - 148. (in Chinese)

[14] 党德功,张天强,高清秀,等. 使用 FLOWMASTER 模拟和优化柴油机的供油系统[J]. 铁道机车车辆,2003,23(1): 116 - 120.
DANG Degong, ZHANG Tianqiang, GAO Qingxiu, et al. Using Flowmaster simulation and optimization of diesel engine fuel supply system [J]. Railway vehicle, 2003,23 (1): 116 - 120. (in Chinese)

[17] 张玉良,朱祖超,崔宝玲. 离心泵快速启动过程的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2013,34(11): 56 - 60.
ZHANG Yuliang, ZHU Zuchao, CUI Baoling. Experimental study on the rapid start up process of centrifugal pumps [J]. Journal of engineering thermal physics, 2013,34 (11): 56 - 60. (in Chinese)

[18] 吴小平,把多铎,胡沙沙, 等. 基于 MATLAB 离心泵特性曲线的拟合与绘制[J]. 中国农村水利水电,2010(11): 144 - 146.
WU Xiaoping,BA Duoduo, HU Shasha, et al. Centrifugal pump characteristic curve fitting and mapping based on MATLAB[J]. China rural water and hydropower, 2010(11):144 - 146. (in Chinese)

(责任编辑　盛杰)