大型轴流泵装置模型试验的压力脉动

郑　源，刘　君，周大庆，茅媛婷，刘美琴
（河海大学 水利水电工程学院，江苏 南京 210098）

摘　要：为了研究轴流泵内部压力脉动在不同叶片安放角度和扬程下的变化规律及特性，结合南水北调某新建泵站，采用物理模型试验方法，在叶轮进口、叶轮出口和出水流道壁面上布置了3个压力脉动测点，通过改变模型泵的扬程进行试验，采集了转轮模型叶片安放角为±4°及0°的压力脉动信号，并进行了幅值和频谱分析. 结果表明，叶轮进口处比叶轮出口处压力脉动大；随着叶片安放角度的增大，3个测点的压力脉动均有所增加，但在叶轮进口和叶轮出口，增加幅度不大. 在小扬程工况下，压力脉动的频率值仍以叶片通过频率为主；在高扬程工况下，低于1倍叶片通过频率的低频脉动会随着流量的减小，幅值越来越大，并占据主导地位.

关键词：轴流泵；装置；压力脉动；模型试验；频谱分析；幅值分析
中图分类号：TH3　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1674－8530(2010)01－0051－05

Pressure pulsation of model test in large-size axial-flow pump

Zheng Yuan, Liu Jun, Zhou Daqing, Mao Yuanting, Liu Meiqin
(School of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: In order to study the rules and characteristics of pressure fluctuation under different blade angle and head in an axial-flow pump, the method of physical model test was used to study a new pumping station in South-to-North water diversion. Three measuring points were arranged in impeller inlet, outlet and outlet conduit. By changing head of model pump, the pressure pulsation signals were collected for blade angle of ±4° and 0°. The amplitude distribution and frequency was analysed. The test results show that pressure pulsation of impeller inlet responses more strongly than that of impeller outlet. The pulsation of the three measuring points are increased with blade angle increasing, but the changes are small both in impeller inlet and outlet. In condition of small head, the frequency of blades are dominant. In the condition of large water head, the pulsation whose frequency is smaller than blades frequency is dominant and its amplitude increase with the flow decreaseing.

Key words: axial-flow pump; arrangement; pressure pulsation; model test; frequency analysis; amplitude distribution analysis

随着轴流泵机组在南水北调工程中的大量应用，其安全稳定性受到普遍关注. 压力脉动是影响泵站安全稳定的重要因素之一[1]，因而对轴流泵压力脉动特性的研究至关重要，而到目前为止，国内外学者对压力脉动的研究大多集中在水轮机及离心泵等方面[2]，对轴流泵压力脉动特性的研究不多.

对于泵内非稳定流场的压力脉动特性研究，通常有物理模型试验和数值模拟两种方法. 王福军等人采用大涡模拟方法，对轴流泵三维非定常湍流进行了数值模拟和研究[3].

收稿日期：2009－10－09
基金项目："十一五"国家科技支撑计划重大项目(2006BAB04A03)
作者简介：郑　源(1964—)，男，山东日照人，教授，博导(zhengyuan@hhu.edu.cn)，主要从事流体机械及水利水电工程研究.
刘　君(1984—)，男，河南信阳人，硕士生(liujunrr@qq.com)，主要从事流体机械及水利水电工程研究.

万方数据

南水北调某新建泵站的装置模型叶轮为3片叶片，叶轮直径为300 mm，转速为1 250 r/min，导叶为6片. 本研究结合此泵站，采用物理模型试验方法[4-7]，对轴流泵叶轮进出口及出水流道的压力脉动进行测量，并对其幅值和频谱进行分析.

1 模型试验测点布置

分别调整转轮模型叶片安放角为±4°及0°进行试验. 测量系统由压力传感器、计算机数据采集系统组成. 本次试验布置了3个压力脉动试验测点，分别布置在叶轮进口、叶轮出口和出水流道壁面上. 模型测点布置见图1.

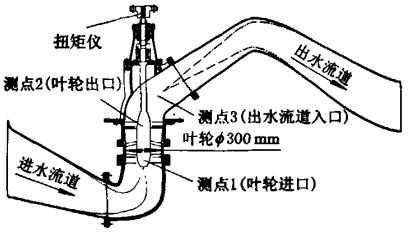


图1 模型测点布置示意图

Fig. 1 Schematic of model measuring points

传感器采用昆山双桥传感器测控技术有限公司提供的BME－1100压力传感器，量程为0～200 kPa，满幅输出5 V，零压输出200±100 mV，测试电压24 V.

信号采集采用北京英华达EN900便携式旋转机械振动采集仪及配套分析系统. 信号采集方式为非细化方式，即每组采集数据为1 024个点(4周期×256点). 机组转速为1 250 r/min. 采集通道设置为14，15和16通道，分别为叶轮进口、叶轮出口、出水流道压力脉动信号，对应测点1，2和3.

数据采集前，调整模型泵的扬程，待流量和扬程稳定后，进行数据采样.

2 试验结果与分析

试验采集了水泵叶片安放角为－4°，0°，4°时，扬程分别为1.8，2.4，3.4，3.7和4 m下的叶轮进、出水口和出水流道压力脉动信号. 对采集到的压力脉动数据进行统计，并进行幅值和频谱分析.

2.1 压力脉动幅值

压力脉动的幅值分析通常采用时域内混频幅值的相对值来进行描述. IEC有关规程推荐采用概率统计方法分析脉动波形的混频双峰值，国内外也偏向于按置信度来计算混频的压力脉动峰峰值[8-9]. 因此，本试验结果按97%置信度混频给出.

压力脉动相对幅值 A_r 定义为压力脉动波形的双振幅峰峰值与试验水头的比值：

$$A_r = \frac{\Delta H}{H} \times 100\%$$

式中 H 为试验水头，m；ΔH 为压力脉动双振幅峰峰值，m.

2.1.1 扬程与压力脉动相对幅值的关系

图2是叶片安放角度为－4°时，3个测点的扬程、流量和压力脉动相对幅值之间的关系.

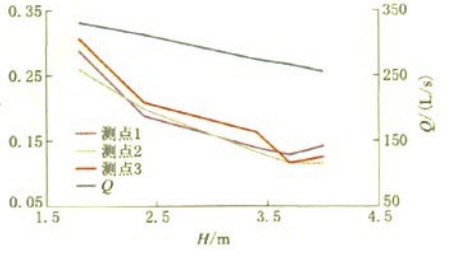


图2 扬程、流量和相对幅值之间的关系
(叶片安放角－4°时)

Fig. 2 Relation of water head, flow and relative amplitude (when blade angle is －4°)

由图2可见，随着扬程的增加，压力脉动相对幅值减小，在设计工况扬程3.7 m时，压力脉动的相对幅值降到最小. 参考水泵装置模型特性曲线(图3)可知，设计工况扬程3.7 m处于高效率区. 可见，轴流泵一旦在偏离高效率区(或者最优工况区)运行时，压力脉动增大.

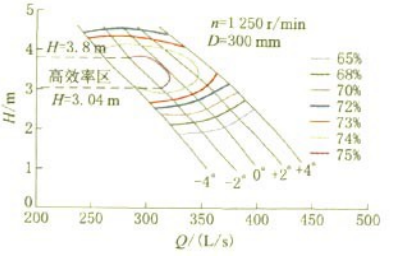


图3 水泵装置模型特性曲线

Fig. 3 Model characteristic curve of pump device

叶轮导叶等过流部件一般是基于最优工况而进行设计的. 在最优工况下，水流离开叶轮时的切向速度较小，压力脉动较小；当水泵运行偏离最优工况时，叶轮出口的流速分布就含有一定的切向速度分量，这些切向速度分量可能会产生旋转涡带或者脱流现象，而机组在该状况下运行就会产生压力脉动，并可能引

万方数据

发噪音、空化空蚀和振动. 这也说明,对高效率区有着直接影响的因素例如叶轮、导叶等过流部件的几何形状,均与压力脉动有着一定的联系. 因此在泵站运行时,尽量保证机组在最优工况区下工作,不仅能提高运行效率,也能减小压力脉动.

2.1.2 叶片安放角度对压力脉动的影响

如图4,观察各测点处分别在3个叶片安放角度下(-4°,0°,4°),压力脉动相对幅值与扬程之间的关系,可以看出,叶轮进口处存在着比较明显的压力脉动;叶轮出口处的压力脉动比进口处减小,出水流道处的压力脉动比叶轮出口处又有所增加. 这主要是因为叶轮进口处受到叶片旋转的影响,水流运动剧烈,振动明显;叶轮出口处水流由于受到导叶的整流和引导,压力脉动得到控制;出水流道处已经远离叶片处,受到叶片旋转的影响相对较小,但由于此处测点处于流道拐弯处,水流流速方向突然改变,泵内湍流发生不规则运动,压力脉动增强. 这也反映了流道的几何形状对压力脉动有影响.

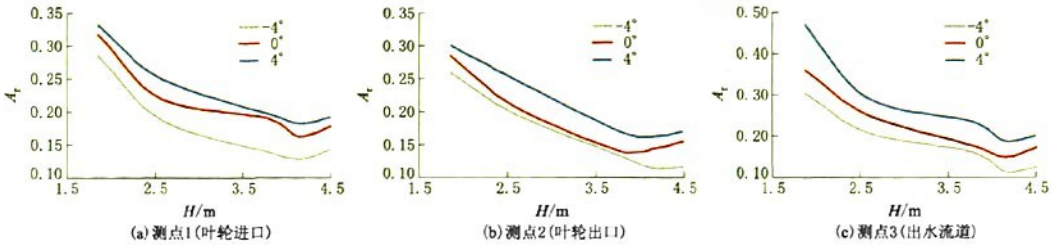


图4 不同测点在不同角度下相对幅值与扬程的关系

Fig. 4 Realtion of relative amplitude and water head in different blade angles

在同一测点下,随着叶片安放角度的增大,压力脉动均有所增加,但在叶轮进口和叶轮出口测点处,不同角度的相对幅值变化值在0.015~0.02之间;在出水流道测点,不同角度的相对幅值变化值在0.05~0.1之间.

2.1.3 不同测点扬程改变下压力脉动相对幅值

3个测点在试验最小扬程1.8 m和设计扬程3.7 m处的压力脉动相对幅值变化值(差值)的比较见图5.

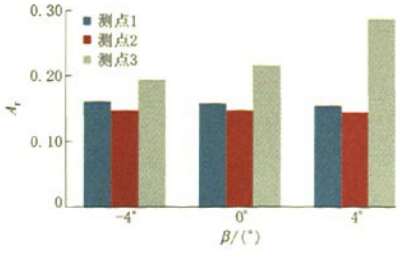


图5 3个测点在试验扬程改变下A_r值变化值的比较

Fig. 5 Comparison of relative amplitude change of pressure pulsation when water head changes

由图5可以发现,在不同叶片安放角β下,测点2即叶轮出口处压力脉动变化值分别为0.145,0.144和0.141,变化微小;测点1即叶轮入口处相对幅值变化值分别为0.159,0.156和0.151,同样变化不大;而测点3即出水流道相对幅值变化较大,分别为0.191,0.212和0.283. 因此,不同的叶片安放角度对叶轮进出口脉动幅值的变化值影响不大,而测点3可能是由于处于流道拐角处,受流量变化的影响大的原因,故脉动幅值变化受角度影响较大.

2.2 压力脉动频谱

对采集到的压力脉动信号进行傅立叶变换,分析其频率分布. 为了便于分析,主次频均以转频$\left(f=\frac{n}{60}, n\text{为转速}\right)$的倍数来表示. 对各不同工况下进出水口、出水流道处的压力脉动信号进行分析,列出其主频(F1)及次频(F2,F3)的频率和幅值(A_i). 由于篇幅限制,仅附上-4°时的压力脉动频谱分析结果(表1),以及-4°下3个测点在设计扬程的时域频域图(图6,图中A为振幅). 为了便于分析转频对脉动频率的影响,将频域图横坐标改为转频倍数(N).

1)由表1和图6可见,在3个测点位置,压力脉动的频率均以泵的叶片通过频率(3倍频)为主,但可发现在后两个测点处,3倍主频的位置,振幅均比叶轮进口小,这是因为测点2受到导叶的整流平顺作用,振幅减小,而测点3处除了受到导叶作用,主要是离叶片渐远,所以受到叶频的影响也较小. 导叶叶片数对脉动频率的影响(6倍频)可以在图6的频域图中观察到;但是表现得并不明显.

此外,由于压力脉动频率变化范围较宽,脉动信号在传输过程中较易受到干扰,其中就包括2.4倍

万方数据

频(即转频 20.833 3×2.4=50 Hz)也就是 50 Hz 的电源干扰比较明显,这意味着观测到的 2.4 倍频压力脉动主要是虚假脉动.在小扬程工况下,压力脉动的频率值仍以叶片通过频率为主;在高扬程工况下,由于泵内湍流强烈的不规则运动,低于 1 倍叶片通过频率的低频脉动会随着流量的减小,幅值越来越大,并占据主导地位.

2)图 7 所示为 -4°时出水流道测点的频域图,可以发现,除了泵的叶片通过频率(3 倍频)以外,还出现了 0.25 倍频占据主频地位的现象.因此在出水流道处,叶片旋转频率对压力脉动的影响仍然存在,但已不如叶轮进出口处强;在流体流出导叶后,由于远离叶片,叶片对其影响已经很不明显,低频脉动开始占主导地位.

表 1 -4°时的压力脉动频谱分析

Tab. 1 Frequency analysis of pressure pulsation when blade angle is -4°

扬程/m	频谱参数	测点 1(叶轮进口)			测点 2(叶轮出口)			测点 3(出水流道)		
		F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
1.8	N	3	2.4	0.25	3	2.4	1	3	0.25	1
	A_i/m^2	73.68	24.12	8.92	69.05	23.46	20.82	69.71	37.34	34.69
2.4	N	3	2.4	1	3	1	2.4	3	1	2.4
	A_i/m^2	76.32	20.82	6.94	69.71	24.12	21.48	69.05	28.08	19.49
3.4	N	3	2.4	2	3	2.4	1	3	1	2.4
	A_i/m^2	84.91	21.48	14.20	63.77	22.14	20.82	61.78	25.44	23.46
3.7	N	3	2.4	2	3	2.4	1	3	1	2.4
	A_i/m^2	79.63	23.46	14.20	50.55	24.12	24.12	49.89	26.10	24.12
4.0	N	3	2.4	1	3	2.4	1	3	0.25	2
	A_i/m^2	78.38	23.89	13.47	48.67	22.45	23.17	41.22	22.75	21.89

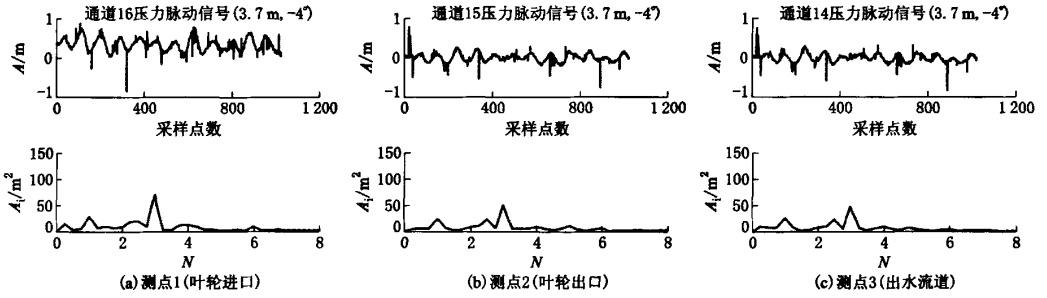


图 6 不同测点在设计扬程下的时域频域图

Fig. 6 Charts of time domain and frequency domain in design head

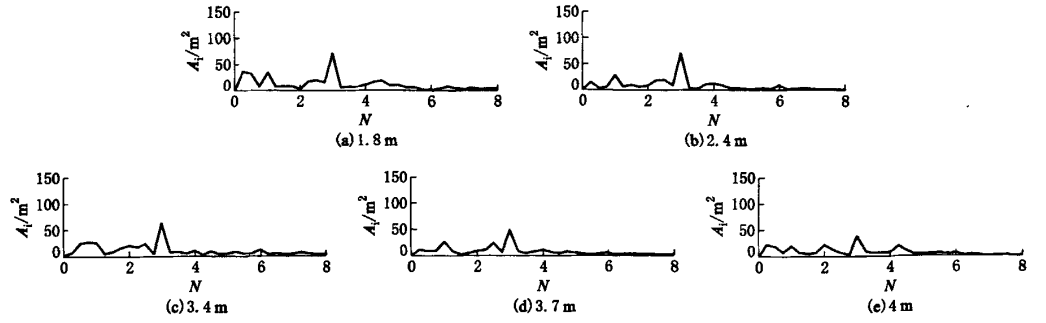


图 7 不同扬程下测点 3(出水流道)频域图

Fig. 7 Frequency domain chart of measuring point 3(outlet conduit) in different head

万方数据

3 结 论

1)轴流泵模型装置在偏离高效率区运行时,压力脉动增大;叶轮进口处存在比较明显的压力脉动,叶轮出口处压力脉动比进口处小,出水流道处的压力脉动比叶轮出口处又有所增加;不同的叶片安放角度对叶轮进出口脉动幅值的变化值影响不大.

2)随着叶片安放角度的增大,3 个测点的压力脉动均有所增加,但在叶轮进口和叶轮出口,相对幅值变化值在 0.015 ~ 0.02 之间;在出水流道测点,不同角度的相对幅值变化值在 0.05 ~ 0.1 之间;试验扬程变化对叶轮进出口的压力脉动影响较小,对出水流道处影响较大;导叶叶片数对脉动频率的影响不大.

3)在 3 个测点位置,压力脉动的频率均以叶片通过频率为主.后两个测点处,3 倍主频的位置其振幅均比转轮进口小.在小扬程工况下,压力脉动的频率值仍以叶片通过频率为主;在高扬程工况下,低于 1 倍叶片通过频率的低频脉动会随着流量的减少,幅值越来越大,并占据主导地位.

4)本研究分别对轴流泵装置模型叶轮进出口及出水流道进行了压力脉动测量与分析.研究成果对揭示轴流泵的压力脉动特性具有一定意义,并为提高轴流泵运行稳定性提供有益参考.后续工作将就轴流泵装置模型与泵站实际运行测量的压力脉动,进行比较分析和研究.

参考文献(References)

[1] 刘 超.水泵及水泵站[M].北京:科学技术文献出版社,2003.

[2] 郑 源,佟晨光,须伦根,等.基于小波包分析的水泵机组振动信号去噪[J].排灌机械,2008,26(6):55 - 57.
Zheng Yuan, Tong Chenguang, Xu Lungen, et al. Vibration signal de-noising of pump unit based on wavelet packets transform[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2008,26(6):55 - 57. (in Chinese)

[3] 王福军,张 玲,张志民.轴流泵不稳定流场的压力脉动特性研究[J].水利学报,2007,38(8):1003 - 1008.
Wang Fujun, Zhang Ling, Zhang Zhimin. Analysis on pressure fluctuation of unsteady flow in axial-flow pump [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007,38(8): 1003 - 1008. (in Chinese)

[4] 杨敬江.排涝泵站立式轴流泵装置模型试验[J].排灌机械,2008,26(6):20 - 23.
Yang Jingjiang. Model experiment of vertical axial-flow pump system for drainage pumping station[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2008,26(6):20 - 23. (in Chinese)

[5] 郑 源,张 飞,蒋小欣,等.贯流泵装置模型试验转轮出水口压力脉动研究[J].流体机械,2007,35(1): 1 - 7.
Zheng Yuan, Zhang Fei, Jiang Xiaoxin, et al. Research on outlet pressure pulsation of reverse operation in tubular pump model experiment [J]. *Fluid Machinery*, 2007,35(1):1 - 7. (in Chinese)

[6] 杨敏官,刘 栋,贾卫东,等.离心泵叶轮内部三维湍流流动的分析[J].江苏大学学报:自然科学版,2006,27(6):524 - 527.
Yang Minguan, Liu Dong, Jia Weidong, et al. Analysis on turbulent flow in impeller of centrifugal pump[J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2006,27(6):524 - 527. (in Chinese)

[7] 中水北方勘测设计研究有限责任公司. SL 140—2006 水泵模型及装置模型验收试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,2007.

[8] Spence R, Amaral-Teixeira J. A CFD parametric study of geometrical variations on the pressure pulsations and performance characteristics of a centrifugal pump[J]. *Computers and Fluids*, 2009,38(6): 1243 - 1257.

[9] Jong-Sik C. Analytical prediction on the pump-induced pressure pulsation in a pressurized water reactor[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2000,27(15):1373 - 1383.

(责任编辑 张文涛)

万方数据