

沙集泵站流致噪声特性数值模拟分析

张小雨¹, 成 立¹, 颜红勤^{2*}, 蒋红樱²

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009;

2. 江苏省水利工程科技咨询股份有限公司, 江苏 南京 210029)

摘要:随着江苏境内泵站改造工作的开展, 泵内部流体非定常流动引起的流致噪声越来越成为影响环境的突出问题。针对在实际运行中噪声问题较为严重的沙集泵站, 采用CFD/CA相结合的数值模拟方法, 对比分析不同流量工况下叶片偶极子声源诱导的泵内流致噪声特性。计算结果表明, 叶片偶极子声源诱导的流致噪声主要包括宽频噪声和离散噪声, 声压级主频为叶频(20 Hz); 在叶片偶极子声源的影响下, 声压级较大值主要出现在叶轮进口附近, 小流量工况下诱发的流致噪声最为强烈。

关键词: 泵站; 流致噪声; 数值模拟

中图分类号: TV675

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2022)09-0001-0005

Numerical simulation analysis of flow-induced noise characteristics of Shaji Pumping Station

ZHANG Xiaoyu¹, CHENG Li¹, YAN Hongqin², JIANG Hongying²

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Jiangsu Province Water Engineering Sci-tech Consulting Co., Ltd., Nanjing 210029, China)

Abstract: With the development of pumping station reconstruction in Jiangsu, the flow-induced noise caused by the unsteady flow of fluid inside the pump has increasingly become a prominent problem affecting the environment. Aiming at the Shaji pumping station with serious noise problems in actual operation, the numerical simulation method combining CFD/CA was used to compare and analyze the flow-induced noise characteristics in the pump induced by the vane dipole sound source under different flow conditions. The calculation results show that the flow-induced noise induced by the vane dipole sound source mainly includes broadband noise and discrete noise, and the main frequency of the sound pressure level is the vane frequency (20 Hz). The large value mainly occurs near the inlet of the impeller, and the flow-induced noise is the most intense under the condition of small flow.

Key words: pumping station; flow-induced noise; numerical simulation

泵站是集水力机械、电气设备与水工建筑物于一身的水利工程^[1-2], 江苏作为南水北调东线工程的源头, 境内分布着大量水泵站。由于江苏地处我国

大陆东部沿海地区中部, 位于长江和淮河下游, 地势平坦且低洼, 所以江苏境内的泵站多是立式泵站。这些泵站具有扬程低、流量大以及年利用小时

收稿日期: 2022-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(51779214); 江苏省南水北调科技研发项目(SSY-JS-2020-F-43); 江苏省水利科技项目(2020027)

作者简介: 张小雨(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事泵站工程研究。E-mail: 1092607756@qq.com

通信作者: 颜红勤(1973—), 男, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事泵站工程技术咨询。E-mail: 1448625167@qq.com

数多等特点,在跨区域调水、防洪排涝以及改善生态环境等方面发挥着关键作用,为现代化经济建设作出巨大的贡献。因此泵站安全高效运行对于抵御自然灾害,保证农业稳产高产,对江苏省国民经济稳定持续发展起巨大作用。

随着我国泵站工程技术的发展,江苏省内大中型立式泵站改造工作的深入开展,水泵机组的噪声逐渐成为影响环境的突出问题,严重时甚至会危害身体健康。水泵噪声不仅仅局限于机械振动噪声,按发声机理还包括流致噪声^[3]。水泵机械噪声多是由于水泵转动部件和传动装置等质量不平衡、制造工艺或者安装质量较差等因素诱发的,随着制造工艺以及对水泵机械振动方面的认知的进步,目前水泵机械噪声在很大程度上得到优化,因此对于水泵机械振动噪声已无太大的改善空间。水泵流致噪声是指泵内部流体与固体边界相互作用以及泵内部流体的非定常流动所引起的辐射噪声^[4-7],这类噪声形成机理较为复杂,影响因素也较多,逐渐成为泵类流体机械降噪减振研究的关键。

由于沙集泵站建成时间较早,在实际运行过程中发现存在噪声超标严重等问题,因此本文针对沙集泵站不同流量工况下泵内流致噪声特性进行数值模拟分析。

1 工程概况

沙集泵站位于睢宁沙集镇南2 km的徐洪河上,距洪泽湖72 km,1993年竣工投运,是徐洪河第二级泵站(江水北调第五梯级泵站),南水北调中运河线并行泵站。该站与沙集船闸、废黄河北闸组成一级水利枢纽,可直接抽引洪泽湖水,在保障徐州地区工农业生产、航运、环保及调节骆马湖水位方面起着重要的作用,同时具有分泄黄墩湖地区洪水等功能^[8-9]。

该工程整体结构采用闸站结合的形式,中间为抽水能力50 m³/s的抽水站,两侧布置设计流量为200 m³/s的节制闸,全部工程按I级水工建筑物设计,抗震标准按9度地震烈度设防。

沙集泵站为堤身式块基型结构,采用肘形进水流道,平直管出水流道,快速闸门断流,进水流道进口设置检修闸门,快速闸门采用绳鼓式快速启闭机操作。安装5台套1800HD-10.5型立式混流泵,单机设计流量为10 m³/s,设计扬程10.5 m,抽水额定转速是300 r/min,配套TL1600-20/2150主电机5台,功率1 600 kW,总装机容量8 000 kW。其水位组合

和特征扬程见表1和表2。

表1 沙集泵站水位组合

工况	下游水位/m	上游水位/m	净扬程/m
设计工况	▽12.00	▽21.50	9.50
最低工况	▽15.50	▽19.73	4.23
最高工况	▽12.00	▽22.50	10.50
平均工况	▽13.50	▽21.10	7.60

表2 沙集泵站特征扬程

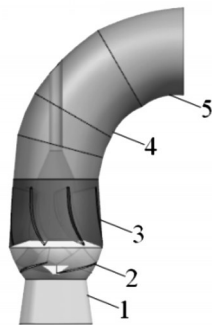
扬程	净扬程/m	总扬程/m
设计扬程	9.50	9.70
最低扬程	4.23	4.43
最高扬程	10.50	10.70
平均扬程	7.60	7.80

注:总扬程中考虑拦污栅、门槽损失0.2 m。

2 计算模型及数值模拟设置

2.1 计算模型

由于受计算资源的限制,在进行流致噪声特性分析时,需将进出水流道简化为进出水管道,采用UG三维建模软件构建声学计算模型,计算域包括进口段、叶轮、导叶、弯管和出口段5个部分,其中叶轮为旋转部件,其余皆为静止部件。其中设计流量为10 m³/s,泵弯管出水口径为1 800 mm,转速为300 r/min,叶轮叶片数为4,导叶叶片数为7。其三维造型如图1所示。



1. 进口段 2. 叶轮 3. 导叶 4. 弯管 5. 出口段

图1 三维造型

2.2 声学网格划分

由于该计算模型尺寸较大,且本文只研究泵内部声场,为避免资源浪费,选用直接边界元法进行声学仿真计算。声学直接边界元,只需将声学空间

离散成面网格,而无论是线性有限元模型还是边界元模型,都是假设在最小波长内有6个网格单元,即最大单元边长要小于最高计算频率点处波长的 $1/6^{[10-11]}$,因此,声学网格的单元尺寸与计算频率应满足如下对应关系:

$$L \leq \frac{c}{6f_{\max}} \quad (1)$$

式中: L 为网格单元尺寸; c 为声音在流体介质中的传播速度; f_{\max} 为最高计算频率。

声音在水中的传播速度为1 500 m/s,本文最高计算频率为400 Hz,结合计算模型的复杂程度,最终将网格尺寸定为60 mm,满足声学计算要求。划分的声学边界元网格如图2所示。

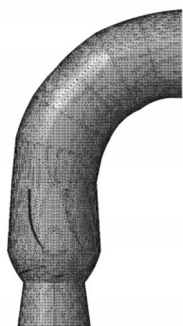


图2 声学网格示意

2.3 数值模拟及声学监测点设置

流致噪声特性数值模拟建立在流场计算的基础上,采用SST $k-\omega$ 湍流模型进行定常和非定常计算,非定常计算以定常计算为初始条件,本文为满足后续声学计算的要求,特将时间步长设为0.00111 s,即叶轮旋转 2° 所需时长,计算8个周期,总时长设为1.6 s,取后4个周期的计算结果进行分析,以得到较为可靠的压力脉动信号。

将声学网格和压力脉动数据导入到声学软件,建立流体材料并赋予其属性,本文流体材料为水,其中水的密度为1 000 kg/m³,水中声速为1 500 m/s,进行声学网格前处理,其目的是为了检查及修正声学网格,以保证该网格能适应声学直接边界元环境。由于压力脉动信息是附着在流体网格上的,而流场网格和声场网格单元节点不一致,因此需将数据映射转移到声学网格上,并进行快速傅里叶变换。在定义扇声源前,需将叶片分段,每一个分段相当于一个“紧致”的声源。在进行数值计算前,定义无反射边界条件,将模型壁面设为全反射壁面,泵进、出口设为全吸声属性,声阻抗值设为 $\rho \cdot c = 15 \times 10^5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

通过设置声学监测点,能够更清晰地了解声学计算结果,以更好地分析泵内部声压分布情况。声学监测如图3所示。其中,P1为叶轮进口监测点,P2为叶轮出口监测点,P3为导叶出口监测点,P4为弯管监测点,Inlet与Outlet为泵进出口监测点。



图3 声学监测点示意

3 计算结果分析

3.1 外特性验证

沙集泵站试验与数值模拟外特性对比见图4。由图4可知,数值模拟曲线与试验曲线整体走向基本相同,吻合度较高。在 $0.8 Q_{\text{bep}}$ 至 $1.0 Q_{\text{bep}}$ 时,扬程计算值比试验值大,而 $1.0 Q_{\text{bep}}$ 至 $1.2 Q_{\text{bep}}$ 时试验值则大于计算值,在设计流量下,扬程计算值与试验值达到一致,均为10.5 m。数值模拟的效率整体上是高于模型试验的,这是由于对模型进行了一些简化,且在计算过程中忽略了实际运行时的能量损失,在设计点时,效率达到89%,此时效率试验值与效率计算值之间的差值小于1%。

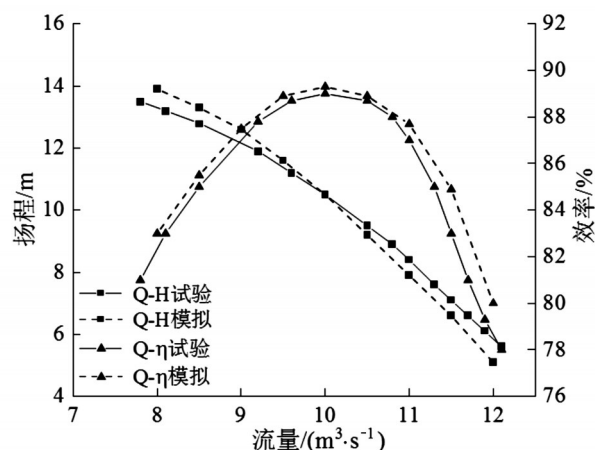


图4 试验与数值模拟外特性对比

3.2 叶片偶极子声源诱发的噪声

针对沙集泵站,对8 m³/s($0.8 Q_{\text{bep}}$)、10 m³/s($1.0 Q_{\text{bep}}$)以及12 m³/s($1.2 Q_{\text{bep}}$)3种流量工况下叶片偶极子声

源诱发的泵内部声场进行对比分析。

图5为不同流量工况下叶片偶极子声源在各监测点的声压级频率响应曲线。由图5可知,3种流量工况下的声压级频率响应曲线趋势基本相似,各监

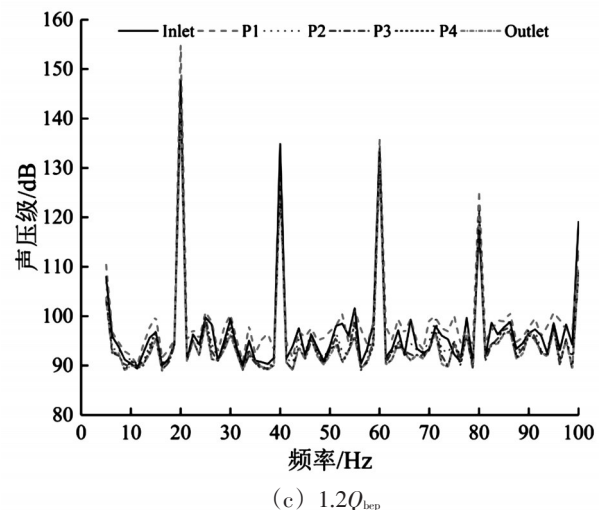
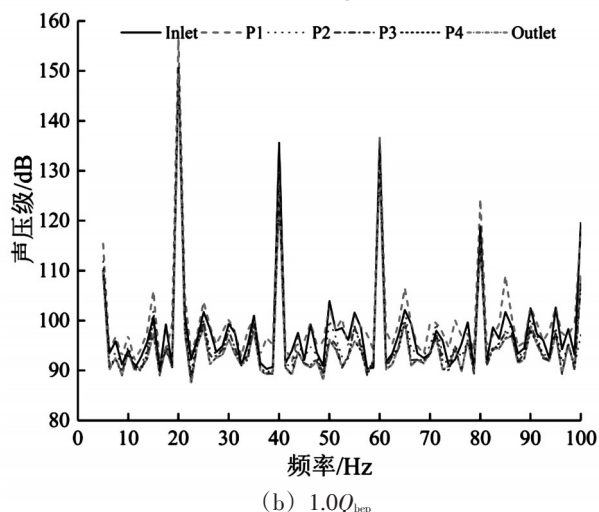
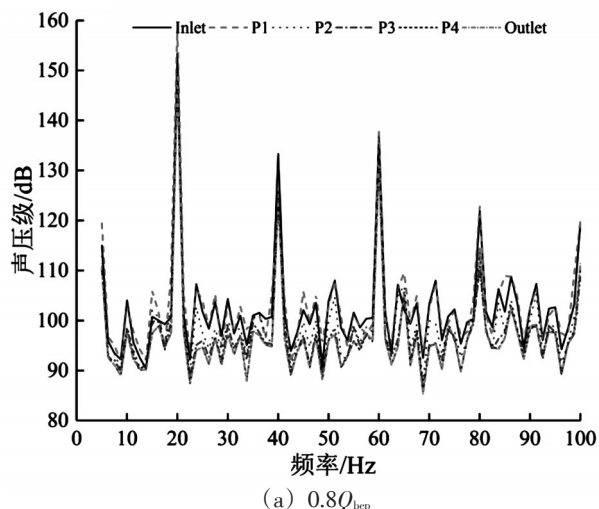


图5 不同流量工况下叶片偶极子声源在监测点的声压级频率响应曲线

测点声压级整体上随着流量的增大逐渐减小,不同工况下声压级值均随着频率的增大呈现降低的趋势。叶片偶极子声源诱导的噪声主要包括宽频噪声和离散噪声,不同流量工况的声压级频响曲线均呈现出较强的离散特性,离散值均出现在叶频及其倍频处,表明叶轮与导叶的动静干涉作用引起的周期性压力脉动是导致流致噪声产生的主要原因,在20 Hz时声压级出现最大值,说明叶频是流致噪声的主频。对比3幅图可以发现,不同流量工况下叶轮进口监测点的声压级整体上均要高于其他声学监测点,这是因为在叶片偶极子声源的影响下,叶轮进口附近为最主要的噪声源。

由图5可知,叶轮进口监测点处的声压级较大,因此为进一步对比分析,做出如图6所示的不同流量工况下叶片偶极子声源在叶轮进口监测点(P1)的声压级频率响应曲线图。由图6可知,小流量工况下的声压级值最大,设计流量工况次之,大流量工况最小,这是由于小流量工况下泵内部流动较不稳定,引起的压力脉动更为剧烈,所以产生的流致噪声更强。

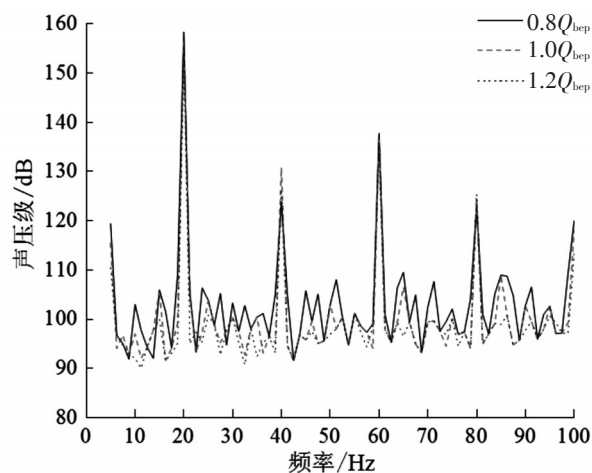


图6 不同流量工况下叶片偶极子声源在P1监测点的声压级频率响应曲线

图7为设计流量工况下叶片偶极子声源诱导的前三阶叶频处混流泵边界元表面声压级分布。由图7可知,在泵进口段声压梯度变化明显,声压波动较大,声压级最大值均出现在叶轮进口附近,这与监测点分析结果较为一致。在进口区域还可以看到声压级较大值与较小值交替出现,呈现偶极子特性,随着频率增大,偶极子特性越来越明显。通过对比3幅图不难看出,随着频率升高,边界元表面的声压级最大值与最小值都呈现出衰减的趋势,衰减

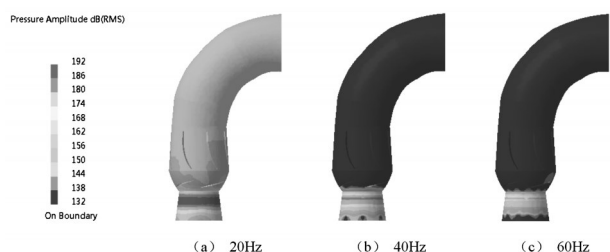


图7 1.0 Q_{bep} 下叶片偶极子声源边界元表面声压级云图

的速度随着频率的增大逐渐放缓。

由图7可知,叶频(20 Hz)时为声压级值较大的频率点,因此对该频率点下的3种流量工况时的内声场进行比较分析。叶频处各工况下的边界元表面声压级分布如图8所示。对比这3幅图可以看出,不同流量工况的声压级分布较为相似,弯管处的声压基本无明显变化,说明此处的声场较为稳定;小流量与设计流量时的声压级值相差不大,但设计流量下的最小声压级区域比小流量大;随着流量的增加,声压级逐渐呈现出下降的趋势,大流量下的最大声压级区域较其他两种工况更小,说明此时的压力脉动幅度较小。

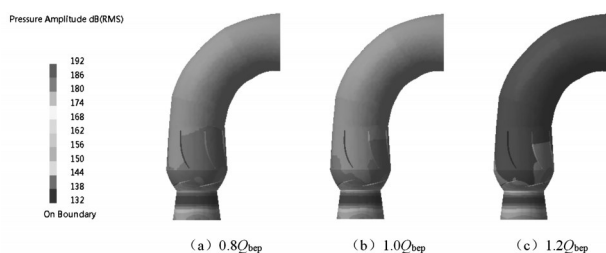


图8 20 Hz下不同流量工况叶片偶极子声源边界元表面声压级云图

4 结 语

(1)通过对沙集泵站进行声场数值模拟可以得出,叶片偶极子声源诱导的流致噪声主要包括宽频噪声和离散噪声,不同流量下均呈现出较强的离散

特性,声压级离散值主要出现在叶频及其倍频处,主频为叶频(20 Hz),且随着频率的增加,声压级整体上呈下降的趋势。

(2)在叶片偶极子声源的影响下,叶轮进口附近为最主要的噪声源,因此声压级较大值主要出现在叶轮进口附近;各监测点声压级整体上随着流量的增大逐渐减小,说明小流量工况下泵内部流动较不稳定,进而引起的压力脉动更为剧烈,导致诱发的流致噪声更为强烈。

参考文献:

- [1] 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009.
- [2] 王福军. 水泵与水泵站[M]. 北京:中国农业出版社, 2010.
- [3] LANGTHJEM M A, OLHOFF N. A numerical study of flow-induced noise in a two-dimensional centrifugal pump. Part I. Hydrodynamics[J]. Journal of Fluids & Structures, 2004, 19(3): 349-368.
- [4] 袁寿其, 司乔瑞, 薛菲, 等. 离心泵蜗壳内部流动诱导噪声的数值计算[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2): 93-98.
- [5] 王宏光, 徐小龙, 杨爱玲, 等. 轴流泵流动噪声数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(3): 199-203.
- [6] 郑源, 陈宇杰, 毛秀丽, 等. 混流泵压力脉动特性及其对流动诱导噪声的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 67-73.
- [7] 季燕羽, 吴贤芳, 刘厚林, 等. 轴流泵内部流动诱导噪声数值研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(7): 130-134.
- [8] 莫兆祥, 江敏, 周韩宝, 邵翀. 沙集站机组逆转发电相关技术的探讨[J]. 中国农村水利水电, 2007(3): 72-74.
- [9] 刘斌, 张占, 魏伟, 蔡磊. 自动化监控系统在沙集抽水站中的应用[J]. 水电能源科学, 2011, 29(6): 160-162.
- [10] 詹福良, 徐俊伟. Virtual. lab Acoustics 声学仿真计算从入门到精通[M]. 北京:国防工业出版社, 2013.
- [11] 李增刚, 詹福良. Virtual. lab Acoustics 声学仿真计算高级应用实例[M]. 北京:国防工业出版社, 2010.