文章编号: 1672 - 3317 (2020) 04 - 0090 - 06

# 基于CFD的泵安装位置对一体化泵站水力特性影响研究

颜红勤<sup>1</sup>,蒋红樱<sup>1</sup>,成立<sup>2\*</sup>,李尚红<sup>3</sup>,王 默<sup>4</sup>,陈 伟<sup>2</sup> (1.江苏省水利工程科技咨询股份有限公司,南京 210029; 2.扬州大学 水利科学与工程学院,江苏 扬州 225009; 3.江苏省江都水利工程管理处, 江苏 扬州 22520; 4.海南省水利水电勘察设计研究院安徽分院,合肥 230000)

摘 要: 【目的】探究一体化泵站不同水泵安装位置对其内部流动特性以及水力性能的影响。【方法】以2个左右 对称安置的潜水轴流泵为研究对象,在流速为198 m<sup>3</sup>/h条件下,基于 CFD 分析泵安装中心距L、2 台泵间距S 等关 键位置参数对一体化泵站流动特性影响。【结果】由于集水池内水流不对称和泵吸水影响,泵 I 与泵 II 的水力效率、 泵进口流速均匀度有一定差异,其中泵 I 水力效率较泵 II 高 4%左右,泵 I 进口流速均匀度较泵 II 高 1%~4%。一体 化泵站 2 台泵中心距的改变对水泵水力效率影响较小,而对泵吸水均匀性影响较大。一体化泵站 2 台泵间距的改变 对水泵的水力效率影响较大,而当泵间距达到一定值后对泵吸入均匀影响较小,但集水池内流态随之更加恶化。【结 论】在该一体化泵站背景下,建议安装 2 台泵的一体化泵站中心距L 推荐值 0.4 R,泵间距 S 推荐值 0.6 R。

关键词:一体化泵站;安装位置;数值模拟;水力性能

中图分类号: TV131.4

文献标志码:A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020042

颜红勤, 蒋红樱, 成立, 等. 基于 CFD 的泵安装位置对一体化泵站水力特性影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(4): 90-95.

YAN Hongqin, JIANG Hongying, CHENG Li, et al. Study on the Influence of Pump Installation Location on the Hydraulic Performance of Integrated Pumping Station by CFD[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(4): 90-95.

## 0引言

【研究意义】目前我国城市化进程较快,城乡 供水排水需求与日俱增,迫切需要建设泵站进行及 时的输送<sup>[1-3]</sup>。目前使用居多的仍然是混凝土泵站, 但其具有占地面积大、建设周期长、投资较大、耗 费人力、物力等缺点,同时混凝土泵站建成后不易 移动<sup>[4-6]</sup>。一体化泵站是一种比较新型的泵站,从制 造、安装到维护都较简便,可被广泛应用。另外, 一体化泵站的建设可解决一定的当地土地紧缺以及 环境污染问题。

【研究进展】迄今为止,国内有许多学者对一体化泵站做出了研究。尹富荣<sup>[7]</sup>提出了相关大型组合 泵站的一体化设计。谈正强<sup>[8]</sup>进行了一体化泵站内部 复杂流动模拟与分析,提出了顺序并联和对称并联2 种方案。张子旭等<sup>[9]</sup>在不同运行方式下,指出了一体 化预制泵站中潜水泵对称运行时,入口偏流角较小; 一体化预制泵站的应力从筒底到筒顶逐渐减小,应变则逐渐增大。成立等<sup>[10]</sup>研究了一体化泵站底部自清洁措施。【切入点】前人对一体化泵站的研究主要还是偏重于工程中的具体应用,对潜水轴流泵及其水泵安装位置的影响研究较少。

【拟解决的关键问题】通过数值模拟,选取潜水 轴流泵为研究对象,改变一体化泵站中心距 *L*、泵间 距 *S*,进行计算分析一体化泵站内部流动特性及其对 水力性能的影响。

## 1 计算模型与方法

#### 1.1 研究物理模型

一体化泵站结构包含集水池,2 台左右对称安置的潜水式轴流泵,内部包括叶轮,导叶和2个潜水电机,以及1个进水口和2个出水管道。根据文献和厂家运行实践,一体化泵站的筒体有效容积与流量的关系为: $V=Q_b/4Z_{max}$ ,其中 $Q_b$ 为泵流量, $Z_{max}$ 为最大启停次数(10~30次/h)。本文计算取 $Z_{max}$ 为15次匹配有效容积和泵流量关系。本文 CFD 计算筒体水体为直径和高均为1m的圆柱筒,水泵流量198 m<sup>3</sup>/h,叶轮直径为120 mm,叶片数为3,转速为2400 r/min。

收稿日期: 2020-02-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779214);南京市水务科研项目(201803);江苏省水利科技项目(2018025) 作者简介:颜红勤(1973-),男。教授级高级工程师,硕士,主要从事

**東站工程技术咨询。E-mail: 1448625167@qq.com 嘉站工程技术咨询。E-mail: 1448625167@qq.com** 

**通信作者:**成立(1975-),男。教授,博士生导师,博士,主要从事 泵站工程研究。E-mail: chengli@yzu.edu.cn

#### 1.2 网格剖分

将一体化泵站分为集水池、泵体、喇叭口,出 水管道等4部分进行分块网格剖分。采用 ICEM CFD 软件对泵体进行网格剖分,喇叭口、出水管道和集 水池采用 Mesh 软件进行网格划分。图1为泵体部分 网格。



图 1 泵体部分网格划分

Fig.1 Part grid division of pump body

由于标准 $k-\varepsilon^{[11-12]}$ 模型形式简单,对算法的适应性很强; RNG $k-\varepsilon^{[13-14]}$ 模型和 Realizable  $k-\varepsilon^{[15]}$ 模型模拟具有较高的主流剪切率和存在较大曲率壁面情况的流场。通过 3 种模型计算比较发现标准 $k-\varepsilon$ 模型收敛较好,最终选取标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型进行研究。

在泵体、出水管、喇叭口部分满足网格数量要求的前提下,对集水池进行网格无关性分析,采用网格数量为 30 万~130 万,并用水泵 I 效率作为评判指标。最终集水池计算域网格数量为 120 万(图 2)。



#### 1.3 计算方法及边界条件

运用 ANASYS CFX 进行数值模拟,基于不可压 缩流体的连续性方程和雷诺时均 N-S 方程,忽略热 交换,离散格式采用一阶迎风格式,收敛精度为 10<sup>5</sup>。 在进水口前加一进水段,使得水流进入进水口时充 分发展为紊流运动,进口边界条件设置于进口段的 进口断面上,采用中等紊流密度(Medium Intensity) 5%,出口边界条件设置为 1 个标准大气压;在固体 边壁处规定无滑移条件,近壁面采用 Scalable Wall Function 函数法处理,动静交界面采用冻结转子 (Frozen Stator)模型,以保证交界面的连续性。

## 2 结果与分析

### 2.1 中心距对一体化泵站水力性能的影响

一体化泵站水泵安装位置参数包括水泵安装的中 心距 L 和泵间距 S (图 3),中心距 L 为 2 台水泵所 在出水管道的水平中心点到集水池中心距离。表 1 为 研究方案相关参数设置。为探究不同的中心距 L 对一 体化泵站水力性能的影响,给定固定进口条件为质量 流: Q 读=198 m<sup>3</sup>/h,喇叭口悬空高为 0.6 D<sub>L</sub>, D<sub>L</sub> 为喇 叭口直径,2 水泵叶轮中心的泵间距为 S=0.6 R。分别 研究中心距 L=0.2 R、L=0.4 R、L=0.6 R 下一体化泵站 内部流动特性。

表 2 为中心距变化对 2 台水泵效率影响变化曲线 与泵进口流速均匀度随中心距变化曲线。由表 2 可知, 泵中心距对水泵水力效率影响较小,在泵中心距 0.4 *R* 时泵进口流速均匀度最高。中心距对水泵水力效率影 响较小,但由于集水池内水流不对称和泵吸水影响, 泵 I 与泵 II 的水力效率、泵进口流速均匀度有一定差 异,其中泵 I 水力效率较泵 II 高 4%左右,泵 I 进口流 速均匀度较泵 II 高 1%~4%。



图 3 计算参数示意图

Fig.3 Calculation parameters diagram

#### 表1 研究方案

古安是	中心距	泵间距	
万乘马	Center distance	Pump distance	
1	0.2 <i>R</i>		
2	0.4 <i>R</i>	0.6 <i>R</i>	
3	0.6 R		
4		0.6 R	
5	0.4 <i>R</i>	0.8 <i>R</i>	
6		1.0 <i>R</i>	

注 R为一体化泵站集水池横断面半径。

Note R nespresents Cross section radius of the collecting tank of the integrated pumping station.

 Table 2
 Influence of center distance on hydraulic efficiency of

pump and uniformity of flow velocity at pump inlet

中心距	效率 Efficiency/%		流速均匀度	
			Flow uniformity/%	
Center distance	泵I	泵II	泵I	泵II
	Pump I	Pump II	Pump I	Pump II
0.2 <i>R</i>	48.0	44.0	66.2	65.2
0.4 <i>R</i>	47.6	43.6	73.8	70.8
0.6 R	47.8	44.5	66.1	64.9

为分析集水池内 2 台泵中心距对流态和流速分 布影响,分别取 1-1、2-2 纵断面和喇叭口下方 3-3、 4-4 横断面进行分析,特征断面具体位置如图 4 所示。



# 图 4 特征断面示意图 Fig.4 Special section diagram

图 5 为不同中心距下,2 台水泵中心所在 YZ 平 面集水池部分纵断面(断面 2-2)流态和速度云图, 图 6 为不同中心距下集水池横断面 3-3 流态和速度云 图,图 7 为不同中心距下喇叭口处断面 4-4 流态和速 度云图。

由图 5 可知,当中心距 L 为 0.2 R 时,入水口处 流速较快,集水池内水流上下扩散,2泵出水管道后 方偏上位置均出现较明显的漩涡;当中心距L为0.4 R时,入水口处流速较快,出水管道后方漩涡减小, 但在管道前方上部位置均出现较小漩涡;当中心距L 为 0.6 R 时,入水口处流速较平缓,池内水流上下扩 散,2泵出水管道后方偏上位置的漩涡消失,但在出 水管道前方水流漩涡面积明显增大。纵断面速度分 布在3种不同管道中心距下大致相同。由图6可知, 在喇叭口下方均出现漩涡与高速区,水流发生偏移。 方案 2 中,喇叭口相对位置处出现漩涡,流场较杂 乱; 方案 3 中, 流线明显发生偏移, 严重影响喇叭 口进水条件。随着中心距增加,2管道中心连线与后 方壁面的减小,管道后方的流速分布趋于均匀。由 图 7 可知,当中心距 L为 0.2 R和 0.4 R时,流线不 对称,弯曲度较大;当中心距 L=0.6 R 时,流线弯曲 度有所改善, 流态相对较好。由图 7 可知, 在集水

池中心区域的流速最高,并随距离壁面的距离减小, 流速也逐渐减小,但在2管道连线中心靠后位置出现 一流速较大区域。











泵 II

泵 I

(b) Plane2 L/R=0.4



(c) 方案 3 *L/R*=0.6

(c) Plane3 L/R=0.6



Fig.5 Flow pattern and velocity contour map in pool with different center distances





图 7 不同中心距下喇叭口处 4-4 断面流线与速度云图

Fig.7 Streamline and velocity contour of section 4-4 with different center distances

#### 2.2 泵间距对一体化泵站水力性能的影响

为探究不同的泵间距 *S* 对一体化泵站水力性能 的影响,分别研究泵间距 *S* 为 0.6 *R*、0.8 *R* 和 1.0 *R*, 3 个方案一体化泵站内部流动特性。

表 3 为泵间距变化时 2 台水泵效率和泵进口流 速均匀度。由表 3 可知,泵 I 的水力效率值较泵 II 高,泵 I 水力效率在泵间距 0.4 R 时最高,泵 II 水力 效率随着 2 台泵间距增大而下降。随着泵间距加大, 泵进口流速均匀度下降。

表 3 不同泵间距时泵水力效率与泵进口流速均匀度

 Table 3
 Influence of pump distance on hydraulic efficiency of

pump and uniformity of flow velocity at pump inlet								
	效率 Efficiency/%		流速均匀度 Flow uniformity/%					
泵间距								
Pump distance/S	泵I	泵II	泵I	泵 II				
	Pump I	Pump II	Pump I	Pump II				
0.6 R	47.3	43.6	73.8	71.8				
0.8 R	49.9	43.0	67.2	65.7				
1.0 R	48.9	42.0	67.8	65.6				

图 8 为不同泵间距下, 2 泵中心连线所在平面集 水池纵断面(断面1-1)流态和流速云图,图9为不 同泵间距下集水池横断面 3-3 流态和速度云图,图 10 为不同泵间距下喇叭口处断面 4-4 流态和速度云 图。由图 8 可知,当泵间距 S 为 0.6 R 时,管道间有 一明显的流线集中点,流速分布不均匀,流态较差; 当泵间距 S 增大为 0.8 R 时,管道间流线分布有所改 善,较为均匀。在2管道间的水流集中点向上偏移; 当泵间距 S 增大到 1.0 R 时, 2 管道间流线弯曲度稍 加严重,在靠近泵II出水管道一侧出现漩涡。由图9 和图 10 可知, 2 股旋转的水流在 2 水泵连线中点左 前方的位置汇合,随泵间距的增加,旋转流线的旋 转半径均绕管道逐渐增加, 使得 2 管道间的流线趋 于均匀和平顺。当泵间距 S 为 0.6 R 时,喇叭口的下 方区域在集水池中心位置出现较小的漩涡, 但在喇 叭口入口截面漩涡消失,流线与流速分布较为对称:

当泵间距 *S* 为 0.8 *R* 时,集水池中部近水泵 II 一侧出 现较明显的漩涡,泵后侧流速分布较对称,集水池内 靠近来水方向侧流线与流速分布不均匀。当泵间距 *S* 为 1.0 *R* 时,集水池中心无较明显的漩涡,泵后侧流 速分布较差,泵前侧左右流线分布不均匀,流线偏向 泵 II 汇集,导致水泵 II 附近流态较恶劣,这也是水力 效率较泵 II 低的原因之一。



图 8 不同泵间距集水池内流态及流速云图

Fig.8 Flow pattern and velocity contour map in pool with different pump distances



Fig.9 Streamline and velocity contour of 3-3 section with

different pump distances



different pump distances

## 3 讨论与结论

1)采用 CFD 技术对一体化泵站 2 台泵运行安装 位置进行了数值模拟研究,获得了泵中心距和泵间距 等参数对集水池和泵吸水流态及水力性能影响。

2)2 泵虽采用对称布置,由于集水池内水流不对称和泵吸水影响,泵 I 与泵 II 的水力效率、泵进口流

速均匀度有一定差异,其中泵 I 水力效率较泵 Ⅱ 高 4%左右,泵 I 进口流速均匀度较泵 Ⅱ 高 1%~4%。

3)一体化泵站2台泵中心距的改变对水泵水力 效率影响较小,而对泵吸水均匀性影响较大。而当 泵间距达到一定值后对泵吸入均匀影响较小,但集 水池内流态随之更加恶化。

4) 建议 2 台泵的一体化泵站中心距 L 推荐值 0.4 R, 泵间距 S 推荐值 0.6 R。

在一体化泵站对称并联与顺序并联 2 种方案中, 对称并联中筒体部的流速参数分布不均匀,顺序并 联方案中入流速度更高<sup>[8]</sup>。一体化泵站在不同运行方 式下,水泵对称运行时,入口偏流角较小;液位越 低时,流速越高<sup>[9]</sup>。但本文研究发现,不同泵安装位 置情况下,各泵的水力效率有明显差异,同时对泵 进口流速均匀度也将产生不同的影响。后期将对一 体化泵站多相流进行展开研究,进一步探讨有关一 体化泵站内部流动特性。

**致谢:**感谢扬州大学江苏省水利动力工程重点实验室提 供相关计算和研究条件!

#### 参考文献:

- 张宜涛, 华国轩, 钟翔燕, 等. 排海管涵截流改造在滨海城市黑臭 水体整治中的应用[J]. 给水排水, 2019, 45(7): 51-55.
   ZHANG Yitao, HUA Guoxuan, ZHONG Xiangyan, et al. Case study of the sewage interception technology in control the urban black and odorous waters in coastal cities[J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(7): 51-55.
- [2] 梅杰,刘国东,夏成城,等.数值法与解析法在地下水环境影响评价中的应用研究[J].灌溉排水学报,2019,38(8):107-112.
   MEI Jie, LIU Guodong, XIA Chengcheng, et al. Application of numerical method and analytical method in groundwater environmental impact assessment[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(8):107-112.
- [3] 王延召,张耀哲. 渠系节点悬移质淤积分布数值模拟[J]. 灌溉排水 学报, 2018, 37(5): 81-85.
  WANG Yanzhao, ZHANG Yaozhe. Numerical simulation of distribution of sediment deposition on the joints in canal systems[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(5): 81-85.
- [4] 许巧哲,崔硕垚.山区小城镇污水集中处理设计[J]. 给水排水, 2016, 42(S1): 160-162.
  XU Qiaozhe, CUI Shuoyao. Design for centralized treatment of sewage in small towns in mountainous areas[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(S1): 160-162.
- [5] 查智力,刘超, 严天序,等. 井筒式泵装置水力特性数值模拟[J].
   南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 189-195.
   ZHA Zhili, LIU Chao, YAN Tianxu, et al. Numerical simulation of

hydraulic characteristics of wellbore pump installation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 189-195.

- [6] 尉鉴洋, 卢方, 徐海峰, 等. 可组装一体化钢制移动泵站在排水系统中的应用[J]. 中国给水排水, 2012, 28(8):106-108.
  WEI Jianyan, LU Fang, XU Haifeng, et al. Application of assembled integrated steel mobile pumping station to drainage system[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(8): 106-108.
- [7] 尹富荣. 大型组合泵站的一体化设计[J]. 中国给水排水, 2003, 19(3): 104.
   YIN Furong. Integrated design of large-scale combined pump station[J].
   China Water & Wastewater, 2003, 19(3): 104.
- [8] 谈正强.一体化预制泵站内部复杂流动模拟与分析[D]. 镇江: 江苏 大学, 2018.

TAN Zhengqiang. Numerical simulation and analysis of complex flows in the integrated prefabricated pumping station[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.

- [9] 张子旭, 王凯, 陈昆, 等. 不同运行方式对一体化预制泵站流动特性 和筒体强度的影响[J]. 中国农村水利水电, 2019(4): 162-167, 171. ZHANG Zixu, WANG Kai, CHEN Kun, et al. The influence of different operation modes on flow characteristics and cylinder strength for integrated prefabricated pumping stations[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(4): 162-167, 171.
- [10] 成立,王默,车晓红,等.一种一体化泵站底部自清洁方法[P]. 江 苏:CN105002980A, 2015-10-28.
  CHENG Li, WANG Mo, CHE Xiaohong, et al. An integrated pumping station bottom self-cleaning method [P]. Jiangsu: CN105002980A, 2015-10-28.
- [11] LAUNDER B E, SPALDING D B. Lectures in mathematical models of turbulence[R]. London: Academic Press, 1972.
- [12] 王福军,唐学林,陈鑫,等.泵站内部流动分析方法研究进展[J].水利学报,2018,49(1):47-61,71.
  WANG Fujun, TANG Xuelin, CHEN Xin, et al. A review on flow analysis method for pumping stations[J]. Journal of Hydraulic
- Engineering, 2018, 49(1): 47-61, 71.
  [13] 刘飞,何姣云,龙振华. 基于 CFD 的 90° 弯管水头损失计算的参数 敏感性分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(8): 79-83.
  LIU Fei, HE Jiaoyun, LONG Zhenhua. Parameter sensitivity analysis of water head loss calculation f90° curved pipe based on CFD[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(8): 79-83.
- [14] 蒋沛,陈新明. U 形渠道半圆柱形量水槽的数值模拟[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(3): 68-72.
   JIANG Pei, CHEN Xinming. Numerical simulation of semicircular

cylinder measuring flume in U-shaped channel[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(3): 68-72.

[15] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, et al. A new k-ε eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows[J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227-238.

# Study on the Influence of Pump Installation Location on the Hydraulic Performance of Integrated Pumping Station by CFD

YAN Hongqin<sup>1</sup>, JIANG Hongying<sup>1</sup>, CHENG Li<sup>2\*</sup>, LI Shanghong<sup>3</sup>, WANG Mo<sup>4</sup>, CHEN Wei<sup>2</sup>

(1. Hydraulic Engineering Science and Technology Consultation Limited Company of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China;

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

3. Jiangsu Jiangdu Water Conservancy Project Management Office, Yangzhou 225220, China;

4. Anhui Branch of Hainan Provincial Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute, Hefei 230000, China)

**Abstracts:** [Background] With the rapid development of urbanization, however, a large amount of urban water is also generated, and urbanization construction is seriously affected, which requires timely delivery by pumping stations. At present, most concrete pump stations are used, but they have the disadvantages of large floor area, long construction period, large investment, labor and material resources, etc. At the same time, it is difficult to move the concrete pump station after it was completed. Integrated pumping station is a relatively new type of pumping station, which is relatively simple to manufacture, install and maintain, with the implementation of the national sponge city strategy, the integrated pump station has been promoted at home and abroad and can be widely used. In addition, the construction of integrated pumping stations can solve certain local land shortages and environmental pollution problems. So far, many domestic scholars have researched integrated pumping stations. Previous studies on integrated pumping stations mainly focused on specific applications in engineering, and there was less research on the impact of submersible axial flow pumps and their installation locations. [Objective] In order to explore the influence of different pump installation positions on the internal flow characteristics and hydraulic performance of the integrated pumping station, [Method] we take two submersible axial flow pumps arranged symmetrically as the research object, under a certain flow condition, and the physical model was established by UG software, and the pump body was meshed with ICEM CFD software. The horn inlet, outlet pipe, and collecting tank were meshed with Mesh software. The influence of key position parameters such as the distance between pump installation centers and the distance between two pumps on the flow characteristics of the integrated pumping station was analyzed based on CFD. [Result] The results showed that the hydraulic efficiency of pump I and pump II was different due to the asymmetry of water flow in the sump and the influence of pump water absorption. The hydraulic efficiency of pump I was about 4% higher than that of pump II, and the uniformity of flow velocity at the inlet of pump I was 1%~4% higher than that of pump II. The change of the center distance of two pumps in the integrated pumping station had little effect on the hydraulic efficiency of the pump, but had great influence on the uniformity of water absorption of the pump. The change of the distance between the two pumps in the integrated pumping station had a great influence on the hydraulic efficiency of the pump, but when the distance reached a certain value, it had little influence on the suction uniformity of the pump, but the flow pattern in the sump becomes worse. [Conclusion] In the context of this integrated pumping station, it is suggested that the recommended center distance L of the integrated pumping station with two pumps is 0.4 R, and the recommended distance S of the pump is 0.6 R.

Key words: integrated pumping station; installation position; numerical simulation; hydraulic performance

责任编辑:白芳芳