

广州深隧技术专栏

深层排水隧道系统泵站的三维数值模拟分析

王广华, 陈彦, 李昀涛, 钟毅, 李文涛, 周建华, 陈贻龙
(广州市市政工程设计研究总院, 广东 广州 510060)

摘要: 采用 Fluent 模型模拟了广州市东濠涌深层排水隧道泵站的三维流场, 通过两种不同运行工况模拟, 分析了泵站集水池、进水流道的水流过程, 确定了不利流态区域及相应的工程解决方案。研究表明, 闭式进水流道有较好的自清能力, 当流量达到或者接近设计流量 $48 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 进水管中有很高的流速, 有利于固体颗粒在水平管路内的输送, 但是隧道出水井的上升流速太低 ($0.12 \sim 0.66 \text{ m/s}$), 固体物质会进入竖井并沉积下来。在系统分洪运行工况中, 启动排洪泵时需同步启动带除砂功能的排空泵, 防止泥砂在泵站竖井中沉积。

关键词: 深层隧道; 泵站; 流场; CFD

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)06-0013-05

Three-dimensional Numerical Analog Analysis on Pumping Station in Deep Drainage Tunnel

WANG Guang-hua, CHEN Yan, LI Yun-tao, ZHONG Yi, LI Wen-tao, ZHOU Jian-hua,
CHEN Yi-long

(Guangzhou Municipal Engineering Design and Research Institute, Guangzhou 510060, China)

Abstract: The Fluent model is adopted to simulate the three-dimensional fluid field of a pumping station in the Donghao Creek drainage tunnel, Guangzhou. The sump flow processes and the inlet channel in two different operating conditions of the pumping station were analyzed through the simulation operation. As a result, the unfavorable fluid section was determined, and the relative engineering solutions were figured out. It is indicated that the covered pump intake chamber was capable of a self-cleaning. When the flow was close to design level ($48 \text{ m}^3/\text{s}$), the solid horizontal transportation occurred easily due to the relatively high velocities in the inlet tunnels. However, when the velocity in the drop shaft was in a low range from 0.12 to 0.66 m/s , solid will begin to settle in the shaft due to the low upflow velocity in the outlet well of the tunnel. In the flood distribution conditions, in order to prevent the sediment from depositing in the pumping station shaft, the drainage pump has to be started together with the emptying pump for its degritting function.

Key words: deep tunnel; pumping station; fluid field; Computational Fluid Dynamics

城市深层排水隧道系统可有效地缓解城市内涝、合流制溢流 (CSO) 等问题, 已在美国、英国、日本、新加坡等多国成功运用。为了有效解决东濠涌雨季频繁出现合流污水溢流和内涝的问题, 广州市

开展了东濠涌深层隧道排水系统的试验段工程。由于深层隧道尾端的排水泵站流量较大, 泵站集水池的流态对水泵的运行影响很大, 不规则的流态会导致泵站运行故障, 从而影响深层排水系统功能的发

挥。随着数值模拟技术的发展,通过计算流体动力学(CFD)模拟,可以精确直观地得出泵站内水流流态和速度分布^[1,2]。罗灿等^[3]采用CFD技术对闸站结合式侧向进水泵站进水池前池和进水池的流态进行了数值模拟,分析发现存在不良流态并提出泵站进水池的优化措施;李效旭等^[4]采用CFD三维模拟软件对深圳市沙井排水泵站前池整流进行了数值模拟及水力优化。

本研究采用计算流体力学软件Fluent建立了泵站、集水池和流道的三维流体力学模型,分析了不同工况下的泵站运行情况,确定了不利流态的区域,以指导泵站集水池和流道的设计。

1 数值模拟方法

建立模型的步骤分为数学描述、数值求解、边界和初始条件的设置三部分。流体的基本控制方程包括连续性方程、动量守恒方程及方程相应的定解条件。基于对泵站内水流特性的考虑,可将该水流视为不可压缩粘性流体。

连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中 u, v, w ——分别为速度的三个分量

动量方程(Navier-Stokes方程):

$$\begin{cases} X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial v}{\partial t} \\ Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial w}{\partial t} \end{cases} \quad (2)$$

式中 ρ ——流体密度

ν ——流体的运动粘滞系数

Fluent软件是用有限体积法来求解泵站划分网格后每个节点的雷诺平均的N-S方程。这里采用目前计算流体动力学领域广泛采用的有限控制容积法对控制方程进行了离散,并用SIMPLE算法对离散后的代数方程组进行求解。

2 模拟边界条件

2.1 设计条件

广州市东濠涌深层排水隧道系统工程内容主要包括长约1.77 km、内径为5.3 m的深层隧道,长约1.4 km、内径为3 m的排水管道,4座入流竖井,1座排水泵站。排水泵站包含上下两个部分构筑物。上

部集水池尺寸为38.9 m×21.5 m,顶部标高为8.3 m,底部标高为-11.0 m;下部圆柱形竖井尺寸为 $\varnothing 12$ m,顶部标高为-11.0 m,底部标高为-33.86 m。集水池底部平面如图1所示,8台排涝泵安装在集水池内。采用筒式潜水泵,扬程为126~200 kPa,单台流量为6 m³/s,出水筒体直径为1.6 m。

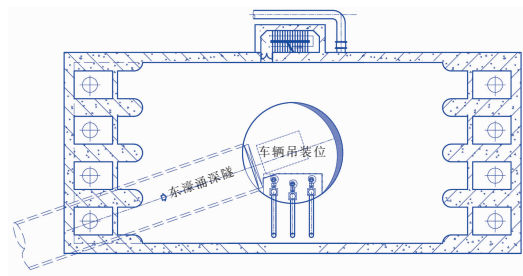


图1 集水池底部平面图

Fig. 1 Bottom plan of collection tank

排水泵站剖面如图2所示。

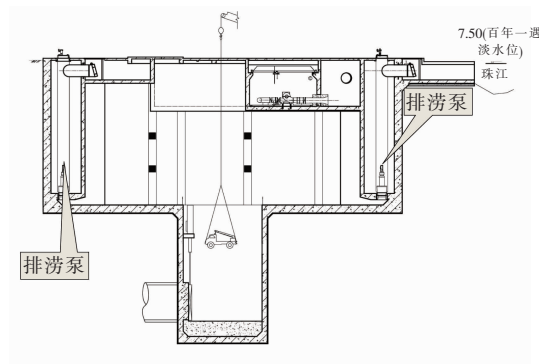


图2 排水泵站剖面图

Fig. 2 Cross-section of drainage pumping station

本次模型建模泵站进水流道采用“G”型流道(见图3)。流道宽度 $b=3.3$ m,长度 $l+e_1=4.3$ m,流道之间隔墙长7.3 m,宽2.1 m,采用圆角处理。

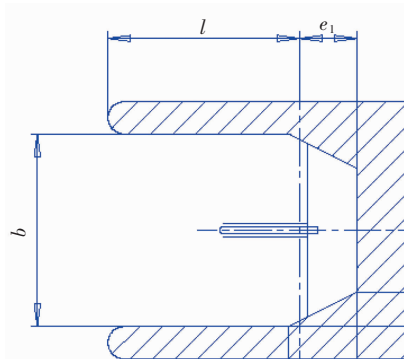


图3 “G”型流道示意图

Fig. 3 “G” flow passageway

泵站三维模型见图4。

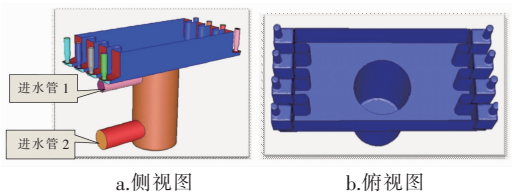


图 4 排水泵站模型

Fig. 4 Model of drainage pumping station

2.2 模拟工况

对泵站不同运行模式下的两种最不利条件下的工况进行模拟分析(见表 2)。

表 2 模拟工况

Tab. 2 Simulation situation

模拟 工况	运行模式	单台泵流 量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	总流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	进水管 1 流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	进水管 2 流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水位/ m
1	8 台水泵 同时运行	6.0	48.0	10.0	38.0	4.2
2	2 台泵 同时运行	5.0	10.0	2.1	7.9	-4.2

3 模拟结果分析

3.1 竖井和进水池速度分布

图 5 为竖井和进水池纵向剖面的流速分布图。

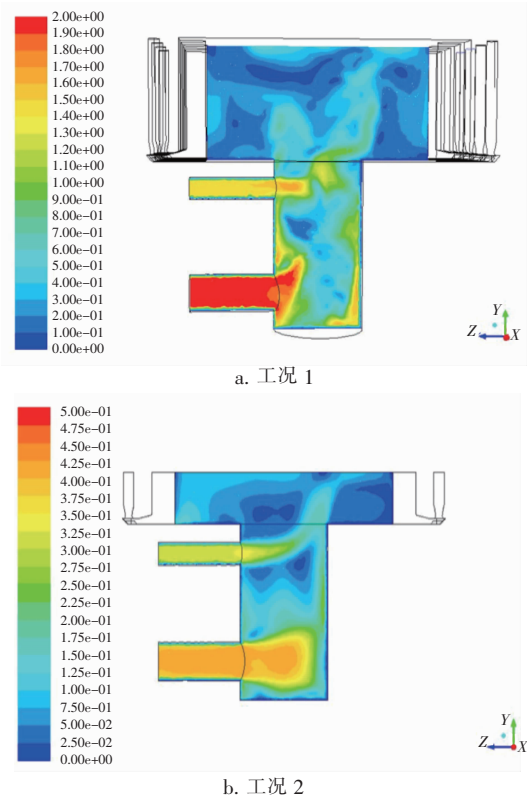


图 5 竖井和进水池纵向剖面流速分布

Fig. 5 Vertical velocity profile of shaft and inflow pool

工况 1 进水管 1 和进水管 2 的流速超过 1.5 m/s,进水池中接近池底的区域流速非常低 ($<0.1 \text{ m/s}$)。

工况 2 进水管 1 和进水管 2 流速为 0.3 ~ 0.4 m/s,进水池中接近池底的区域流速均较低。

图 6 为竖井中标高为 -33 m 和 -12 m 处的流速分布图。工况 1 标高为 -12.0 m 位置的平均流速为 0.66 m/s,标高为 -33.0 m 位置的平均流速为 1.5 m/s。工况 2 标高为 -12 m 处平均流速为 0.12 m/s,标高为 -33.0 m 位置的平均流速为 0.21 m/s。

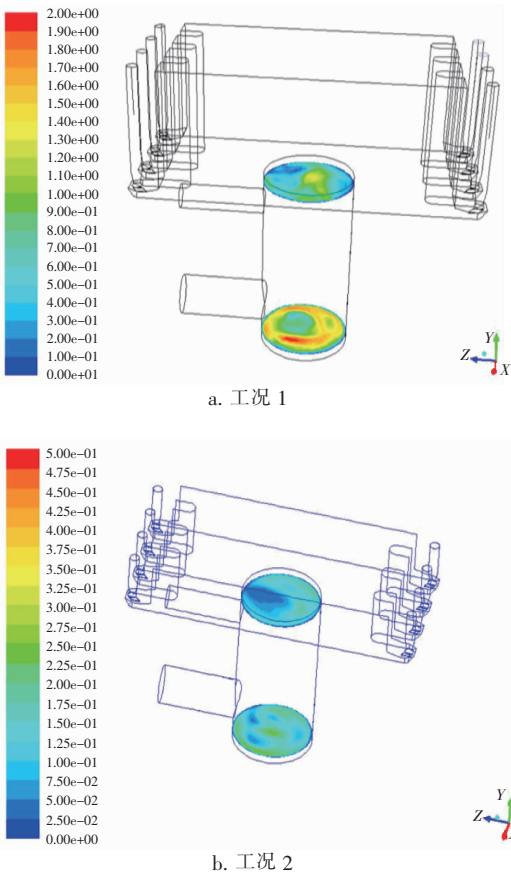
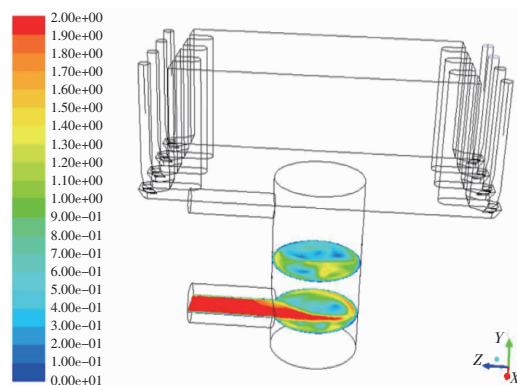


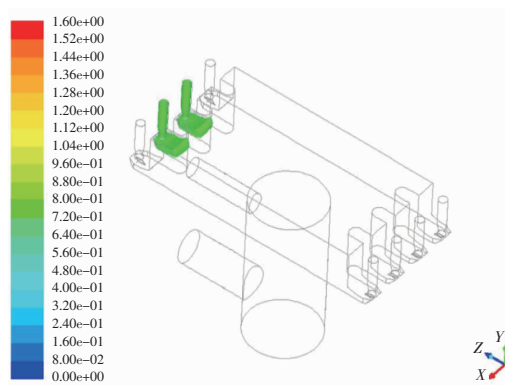
图 6 竖井中标高为 -33 m 和 -12 m 处的流速分布

Fig. 6 Flow velocity at the elevation of -33 m and -12 m in the shaft

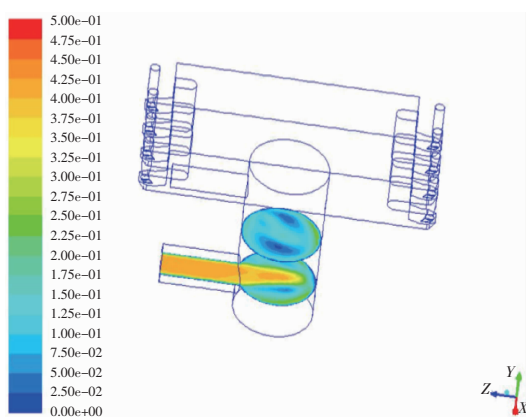
图 7 为竖井中标高为 -29 m 和 -22 m 处的流速分布图。工况 1 进水管 2 内流速较高(约 2 m/s),不对称的射流可能会在竖井中形成漩涡,这对竖井内的排空泵造成不利影响,标高为 -29 m 处平均流速为 1.48 m/s,标高为 -22.0 m 处平均流速为 1.0 m/s。工况 2 进水管 2 内流速约 0.4 m/s,标高为 -29 m 处平均流速为 0.28 m/s,标高为 -22.0 m 位置的平均流速为 0.16 m/s。



a. 工况 1



b. 工况 2



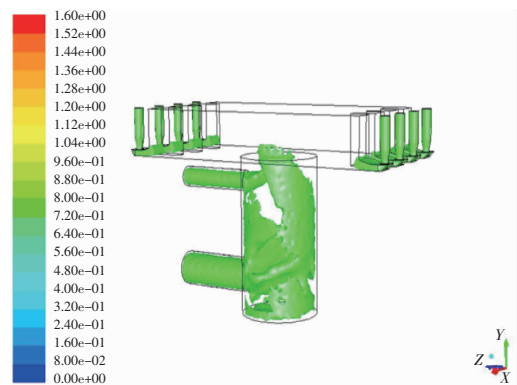
b. 工况 2

图7 竖井中标高为-29 m和-22 m处的流速分布

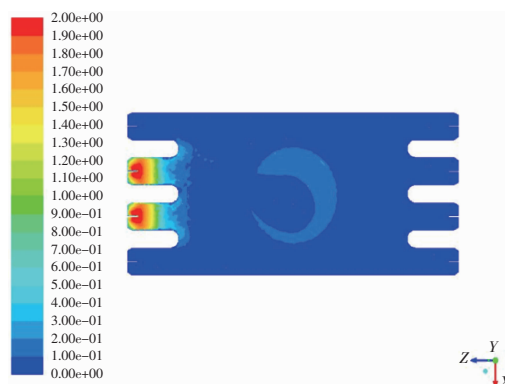
Fig. 7 Flow velocity at the elevation of -29 m and -22 m in the shaft

3.2 泵站集水池流速分布与平面流线

图8为两种工况下流速稳定的区域示意图。由图8可以看出,不管是高流量还是低流量情况下,水泵流道的流速都较为稳定,基本在 0.8 m/s 。这说明本工程设计采用的“G”型闭式进水水道设计具有较好的自清能力和稳定流态。



a. 工况 1



b. 工况 2

图9 标高为-10.80 m处的流速分布

Fig. 9 Flow velocity distribution at -10.80 m

可以看出,工况1水泵位置水流状况良好,8台水泵都在均等的水流条件下运行;在进水流道中,实现了水流整体加速进入水泵吸水喇叭口,没有观察

到死水区;但进水池内流速较低($<0.1\text{ m/s}$),可能发生沉淀。工况2的2台水泵同时运行,泵站水流条件良好;进水流道亦实现了水流整体加速进入水泵吸水喇叭口,没有观察到死水区;但是进水池本身的流速比工况1更低,水流状况较差。

平面流线图见图10。

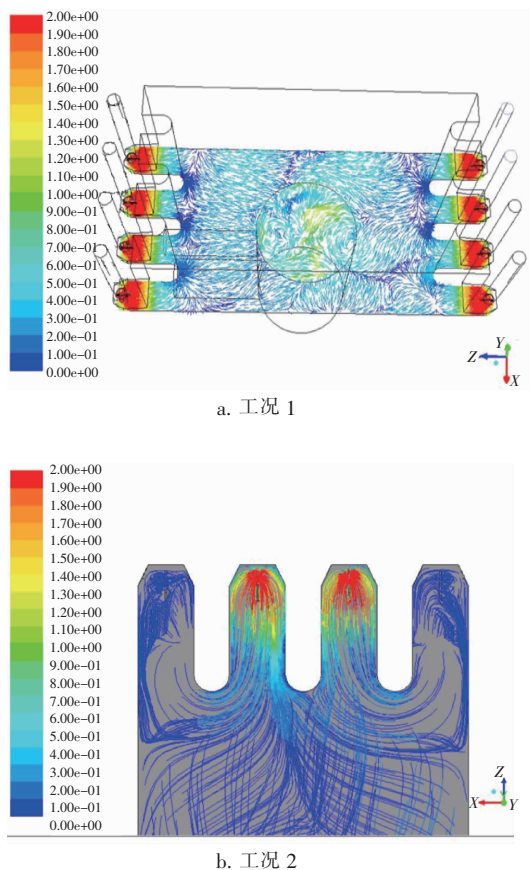


图10 标高为 -10.80 m 处的平面流线图

Fig. 10 Plane flow chart at -10.80 m

与工况1相比,工况2从竖井中向上的直接水流会在进水池中产生轻微的相对不均匀的流动,但是因其绝对流速太小而不至于对进水流道的流态产生负面影响。两种模拟工况下,进水池池底(标高在 -11.00 m 之上的部分)流速较低,可能会导致相当数量的被输送到进水池的细微固体物质在此沉淀。但泵站竖井内上升流速较低,如在泵站流量为 $48\text{ m}^3/\text{s}$ 的条件下,上升平均流速仅为 0.42 m/s ,因此在水流上升过程中,泥砂几乎不会随水流进入进水泵,携带的泥砂量可以忽略不计。

4 结语

采用Fluent模型对东濠涌排水隧道尾端的排洪

泵站进行了三维数值模拟,分析了排洪工况下两种水泵运行工况的泵站水流过程,确定了不利流态的区域。模拟结果表明,闭式进水流道有较好的自清能力,推荐采用闭式进水流道。当流量达到或者接近设计流量 $48\text{ m}^3/\text{s}$ 时,进水管道中有很高的流速,有利于固体颗粒在水平管路内的输送,但是竖井中的流速太低,上升平均流速仅为 0.42 m/s ,不能有效输送来水中的所有物质,固体物质会进入竖井并沉积下来。因此,在系统分洪运行工况中,启动排洪泵时需同步启动带除砂功能的排空泵,防止泥砂在泵站竖井中沉积。在泵站进水池池底(标高在 -11.00 m 之上的部分),携带的泥砂量可以忽略。

参考文献:

- [1] Pratap K, Chavan D S. CFD analysis of flow in pump sump to check suitability for better performance of pump [J]. Int J Mech Eng Robot, 2013, 1(2): 59-65.
- [2] Mi Z H, Zhou D Q, Mao Y T. Three-dimensional CFD simulation of solid-liquid two-phase flow in the pumping station forebay with sills [A]. 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems [C]. UK: IOP Publishing, 2012.
- [3] 罗灿,刘超. 多机组泵站侧向进水特性模拟和改进研究[J]. 水力发电学报, 2015, (1): 207-214.
- [4] 李效旭,郑源,茅媛婷,等. 大型泵站侧向进水前池模拟及水力优化[J]. 水电能源科学, 2011, (7): 132-135.



作者简介:王广华(1976-),男,湖北公安人,工学博士,研究方向包括大口径排水系统、水力模型、水污染控制与污泥处理处置等。

E-mail: 75302423@qq.com

收稿日期:2017-01-10