

CFD Comparative analysis of the flow channels in the front and rear shafts of the pumping station based on STAR-CCM+

Yang Zhang

Shanghai Municipal Engineering Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., Yangpu District, Shanghai, 200082, China

Abstract

Based on the engineering data of water conservancy pumping stations, this paper uses STAR-CCM+ software to conduct CFD simulation calculation studies on the inlet and outlet flow channels of the pumping station with vertical shafts respectively, and obtains the distribution laws of hydraulic characteristics of the flow channels before and after the vertical shaft. Through the analysis and comparison of the calculation results, it can be known that due to the existence of the shaft in the flow channel, the fluid flow velocity passing through the shaft section increases. When the pump station shaft is arranged in the outlet flow channel, the outlet flow channel is diffused flow. There is a distinct low-speed zone at the tail of the shaft, which significantly increases the head loss. The head loss of the front-mounted flow channel of the shaft is much smaller than that of the rear-mounted flow channel of the shaft.

Keywords

STAR-CCM+; Vertical shaft channel; Numerical simulation

基于 STAR-CCM+ 的泵站前后竖井流道 CFD 对比分析

张洋

上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司，中国·上海 200082

摘要

本文依据水利泵站工程资料，运用STAR-CCM+软件对设竖井的泵站进、出水流道分别进行CFD仿真计算研究，得到竖井前置、竖井后置流道水力特性分布规律。通过计算结果分析对比可知，由于流道中竖井的存在，经过竖井段流体流速增加；当泵站竖井布置在出水流道中，出水流道为扩散流动，竖井尾部存在明显低速区，显著增大水头损失，竖井前置式流道水头损失远小于竖井后置式流道。

关键词

STAR-CCM+; 竖井流道; 数值模拟

1 STAR-CCM+ 软件简介

STAR-CCM+ (Computational Continuum Mechanics) 是 Siemens 集团旗下 CD-adapco 公司推出的一款计算流体力学 (CFD) 软件。STAR-CCM+ 内部整合了从几何模型建立、网格划分、网格处理、运行计算到数据后处理的全过程于一身，与传统的流体动力学运用 UG 建模、Gambit 剖分网格、Fluent 计算、Tecplot360 后处理的流程相比较，使用方式更加灵活快捷。同时 STAR-CCM+ 软件拥有很高兼容性，几何模型支持常见的 UG、SOLID WORKS、CATIA、Pro/E 等软件模型格式；内置网格形式为六面体网格、四面体网格、多面体网格等，对 Gambit、ICEM 等网格剖分软件生成 case

及 mesh 格式网格类型文件，也能很好地兼容；在边界层模拟方面，支持自定义棱柱层模拟壁面边界条件；在计算模型和边界处理方面，STAR-CCM+ 包含了主流 CFD 计算软件中绝大部分计算模型供自由选择；此外，STAR-CCM+ 后处理界面友好，内置绘图及数据处理功能，同时支持数据导出功能，提供了多元化处理方案。STAR-CCM+ 在传热学及船舶、汽车等工业领域已有成熟应用，但在传统水利行业中应用较少。

竖井贯流机组因为占地紧凑且拥有很好水力性能在平原地区大流量、低扬程泵站中运用广泛，本文主要依据工程中实际泵站流量、扬程参数，运用 STAR-CCM+ 软件对水利工程中竖井流道布置位置进行建模计算，旨在求解出前置、后置竖井流道水利特性，对泵站工程建设提出合理化建议。

【作者简介】张洋（1991-），男，中国江苏盐城人，硕士，工程师，从事水利水电工程研究。

2 计算模型

本文研究内容以某在建排涝泵站为依据，泵站设计排涝流量为 $160\text{m}^3/\text{s}$ ，设计净扬程 0.32m 。本排涝泵站属于大流量、低扬程泵站，泵站选址周边有古建筑，用地较为紧张，因此拟采用竖井流道布置方案，共设四台竖井贯流泵机组，单台机组主要性能参数如下：排涝设计总扬程 $H=0.72\text{m}$ （包含水力损失），单机设计流量 $Q=40\text{m}^3/\text{s}$ ，叶轮直径 $D=3900\text{mm}$ ，转速 $n=60\text{r}/\text{min}$ ，水泵配套电机功率 $P=900\text{kW}$ ，电压 10kV ，8级，齿轮箱传动比 12.4 。

针对此泵站特征参数，按照水力优化设计和规则化设计方法分别设计了竖井前置、竖井后置两种流道方案进行对比分析。其中竖井前置流道进口断面宽度 9.0m ，断面高度 5.2m ，进水流道长 17.2m ，流道进口处流速 $0.85\text{m}/\text{s}$ ，直管式出水流道长度 22.44m ，出水断面宽 8.0m ，出水断面高 4.8m ，流道出口处流速 $1.04\text{m}/\text{s}$ 。竖井后置出水流道长 21.44m ，出水断面宽 9.0m ，出水断面高度 5.2m ，直管式进水流道长 18.2m ，进水断面宽度 9.0m ，进水断面高 5.2m 。两种形式流道泵站底板总长相同均为 47.4m ，具体尺寸及外型参数如下图 1、2 所示。

3 计算方案

3.1 几何模型建立

STAR-CCM+ 内部自带建模功能，但为了流道尺寸更加精准、模型更加完善，本文流道模型的建立用 Siemens 公司开发 Unigraphics NX8.0 软件，按照上文中优化所得竖井前置、竖井后置流道参数，按等比例还原分别建立不同进、出水流道体型参数，并在流道进口及出水侧布置水池，部分三维模型结构如下图 3 所示。将建好的模型导入 STAR-CCM 软件中并对特征线进行拆分，将部分进行重新命名与定义，标准进出水平面便于确定边界条件。

3.2 网格划分及网格检查

STAR-CCM 内置网格划分功能，可以直接在软件内进行网格划分，本文选用 Automated Mesh 功能自动划分网格并修补包面，主网格选用多面体网格，网格基本尺寸为 0.05m ，在网格边界设置 6 层棱柱层模拟壁面边界条件，同时插入水平与垂直方向截面衍生物，通过检查截面上网格密度及大小以检查内部网格质量，最终各进、出水流道模型网格生成数目在 650 万 -950 万之间，网格质量如图 4 所示，网格质量满足要求。

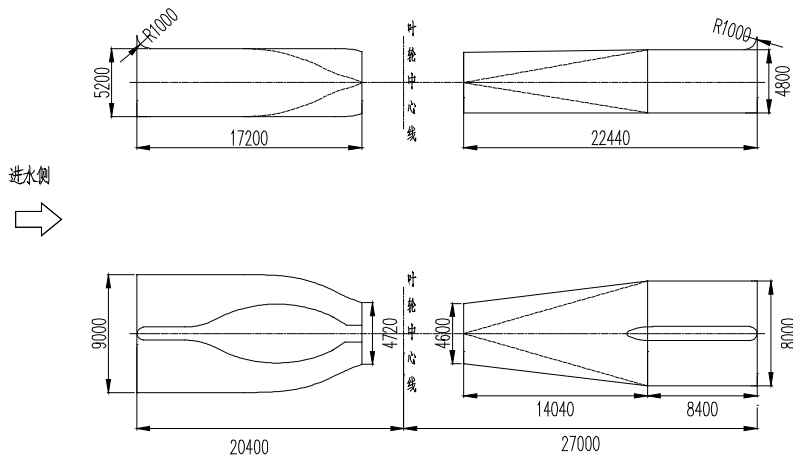


图 1：竖井前置流道尺寸图

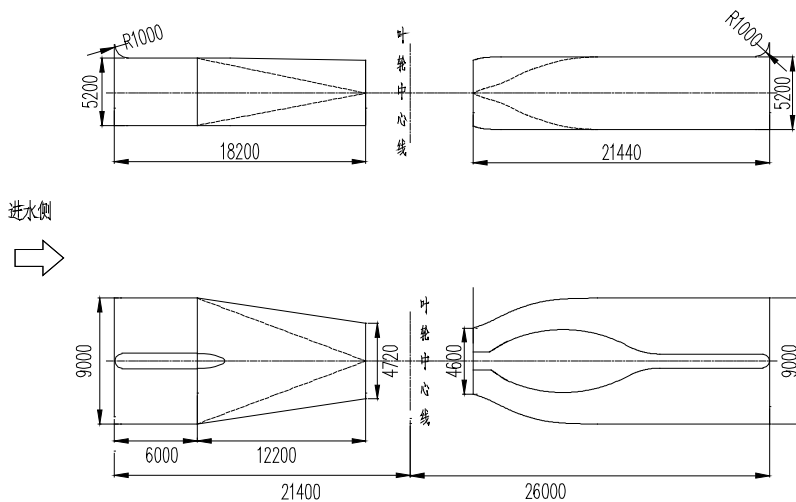


图 2：竖井后置流道尺寸图

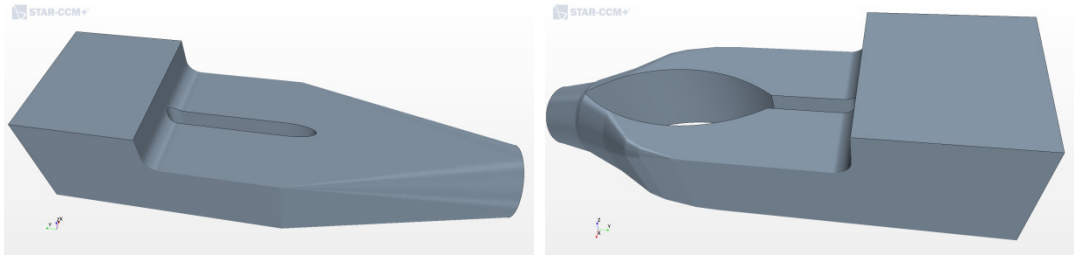


图 3: 流道三维模型结构图

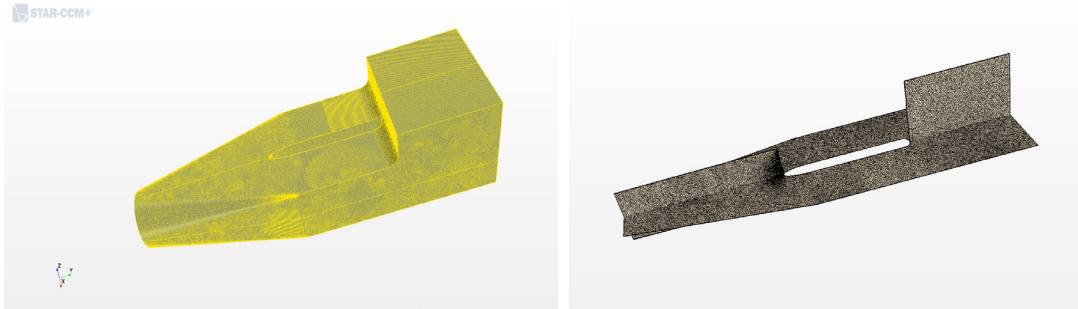


图 4: 部分几何模型网格图

3.3 物理模型边界条件

物理模型选用 $k-\varepsilon$ 三维湍流模型，设置重力为 $-z$ 方向，重力加速度为 9.81m/s^2 ；设置气液两相流并分别编辑空气与水为恒密度，输入用户自定义函数在 z 轴大于额定工况下水位高程为气体，低于额定工况水位高程为液体；采用分离流隐式不定长计算。设计工况下流道进出口完全淹没，流道进口边界采用质量流边界，额定流量下质量流率为 $4 \times 10^4 \text{kg/s}$ ，出口边界定义压力边界，初始气体压力为一个标准大气压，其他边界为壁面边界。根据工程经验，计算沿程水头损失时，混凝土管道糙率一般选用 0.14 ，经推算得壁面边界条件绝对粗糙高度为 0.048 。

3.4 计算设置观测值

设置计算时间步长为 0.05s ，最大计算步数为 10000 ，最大内部迭代步数为 10 ，计算过程中可以通过视图窗口中 Residuals 曲线监测残差，同时设置衍生监测平面，监测入口绝对压力平均值及进、出口流速平面均匀性偏差，并绘制对应压力-时间曲线。由监测结果可知：当计算步长约 1600 ，计算时间 80s 左右时，流态基本稳定，取此时计算结果进行分析。

4 计算结果对比分析

4.1 流道内流场计算结果

竖井前置流道及竖井后置流道平面截面衍生物速度云图分布如下图 7 所示，三维流场流线示意图如下图 8 所示。

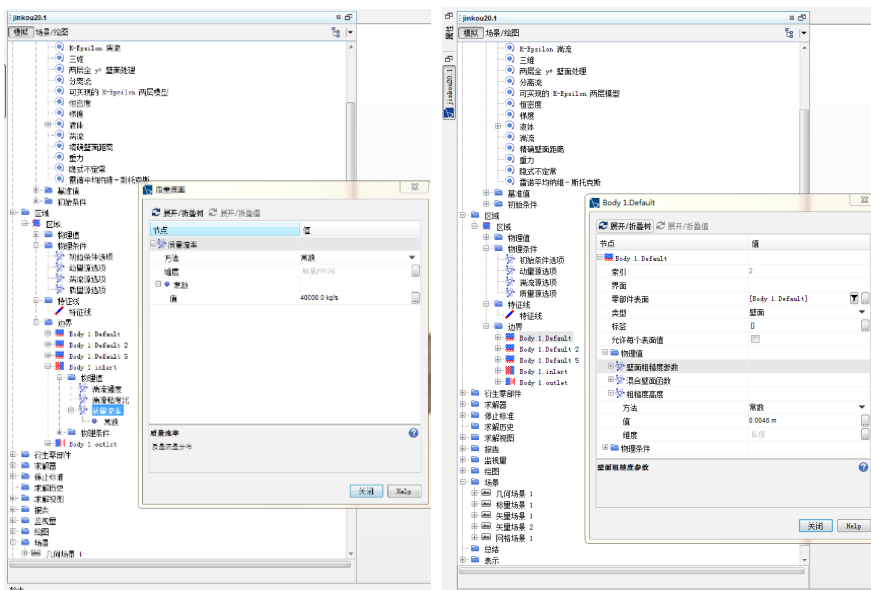


图 5: 部分物理模型及边界条件定义

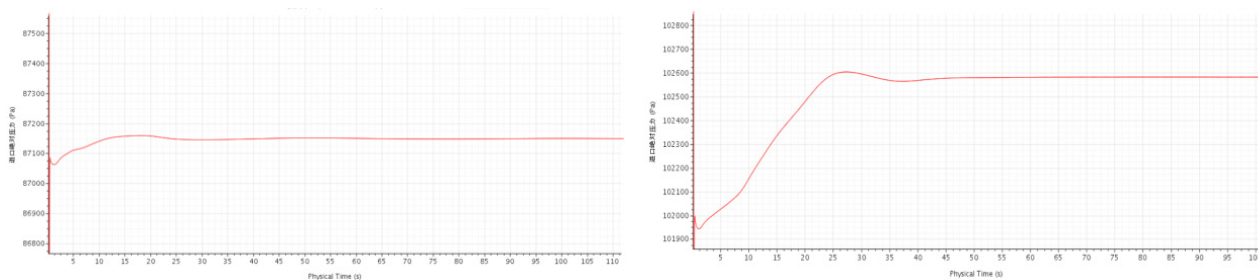


图 6: 部分监测点监测数据图

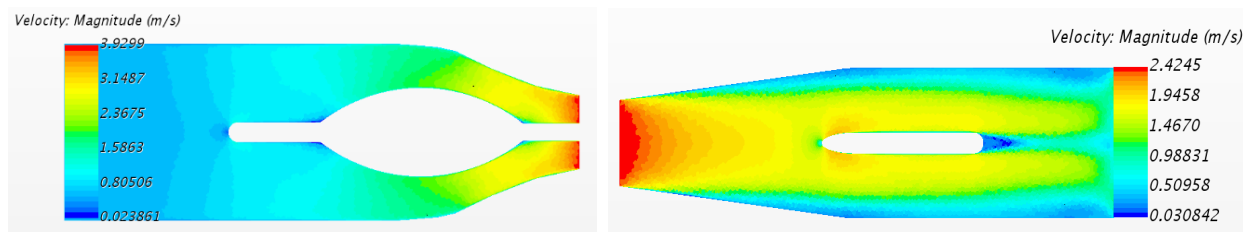


图 7.1 竖井前置式进出水道速度云图

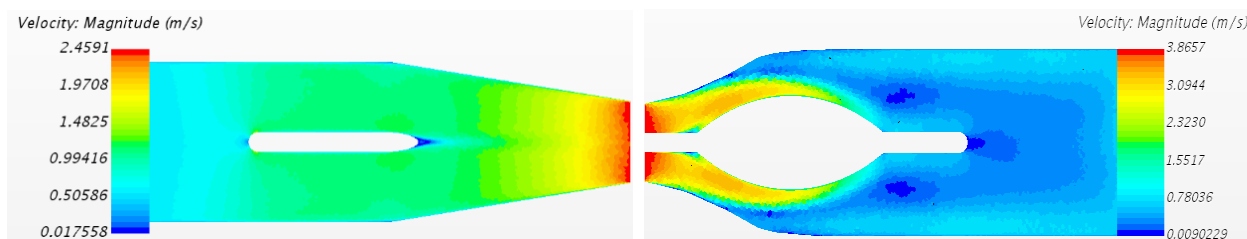


图 7.2 竖井后置式进出水道速度云图

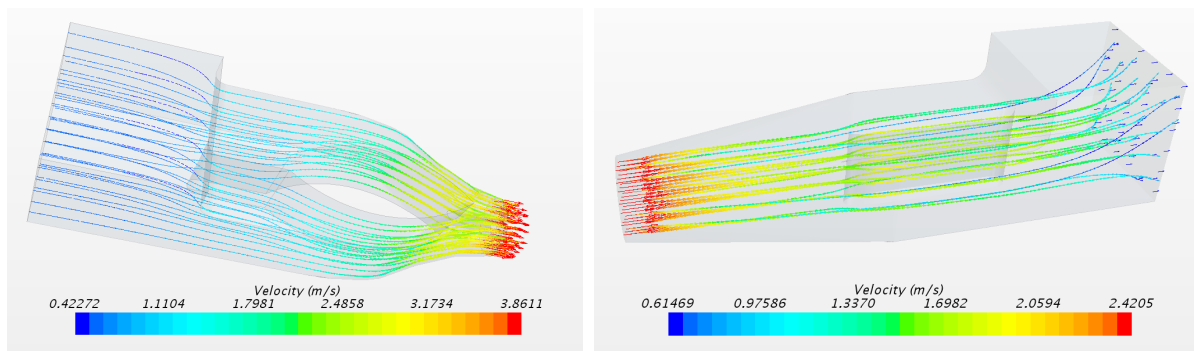


图 8.1 竖井前置式进出水道流场图

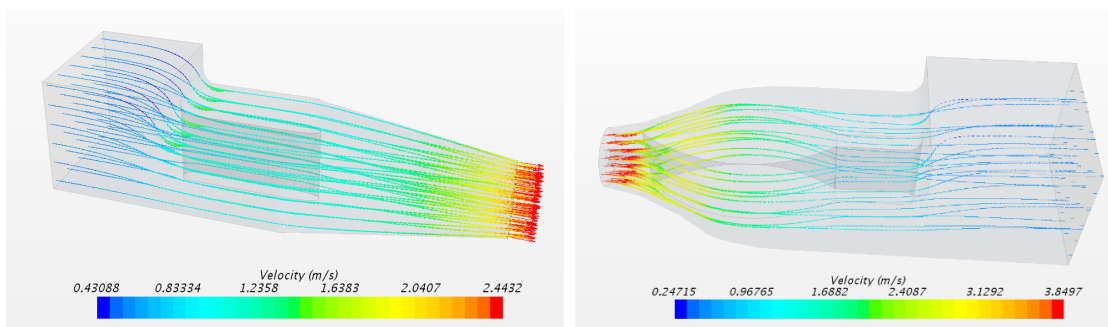


图 8.2 竖井后置式进出水道流场示意图

根据计算结果可知,在竖井前置流道中,进水流道断面均匀收缩,水流流态属于收缩流动,流速从进水处开始均匀增加,到水泵进口侧水流速度达到最大值。直管式出水流道内水流流动属于扩散流动,除支墩侧流道中心线附近存在较小区域低速区,出水流道其他流域无明显低速区,流态较好。

在竖井后置流道中,直管式进水流道水流速度均匀增加,到水泵进口侧流速达到最大值。竖井式出水流道由于受竖井结构影响,在平面方向上,经过竖井段后形成明显大范

围的低速区,一直延伸至出水侧,出流流道水力损失必然受此低流速区影响。

4.2 水力损失计算结果

为进一步对比竖井前置、后置形式水力损失,根据流道内部的速度及进、出口压力监测结果,流道出口流速分布均匀度、流道出口速度加权平均角度,运用伯努利方程计算进、出水流道水力损失 Δh 结果如表1表示(计算损失中未包括拦污栅、门槽等部位水头损失)。

表1 进出水流道水力特性计算结果(流量 $Q=40\text{m}^3/\text{s}$)

序号	方案	进水流道水力损失 / cm	出水流道水力损失 / cm	进出流道合计 / cm	水泵进口流速 分布均匀度 V_u / %	水泵进口速度 加权平均角度 $\bar{\theta}$ / °
1	竖井前置式	3.64	4.85	8.49	95.88	89.02
2	竖井后置式	1.44	17.52	18.96	96.18	88.91

根据计算结果可知,竖井布置在进水流道中,水流过流段面积减小,流速增大,进水流道水头损失略有增加,水头损失增加量为2.20cm,水头损失增加率为152%;当竖井布置在出水流道中,出水流道水头损失显著增大,水头损失增加量为12.67cm,水头损失增加率为261%。水泵进口处流速分布均匀度均大于95%,进口处流速加权平均角近似相等,两种形式水泵进口处流态基本相同。结合文中4.1节论述可知:直管式出水流道竖井后置流道中低速区扰动对水头损失影响很大,大片低速区显著增加经过竖井出水流道水头损失。

5 结论

竖井在平面上挤占了流道过流断面积,增大经过竖井段水流流速,从而增加了竖井流道的水力损失。在竖井前置的情况下,竖井式流道内的流动属收缩流动,竖井式流道内的水流在平面和立面方向水流均能均匀加速,到达水泵进口断面时流速分布均匀;在竖井后置的情况下,竖井式流道内的流动属扩散流动,在竖井尾部较大的范围内形成较为明显低速区,分布在流道中心线两侧,明显增加流道的水力损失。综上所述,泵站进水流道竖井布置方案要优于出水流道竖井

布置方案。

参考文献

- [1] 陈加琦,朱泉荣,苏志敏,周正富,陈松山.基于特征尺寸规则化的竖井贯流泵装置研究[J].水力发电学报,2019,38(02):101-111.
- [2] 孙振兴,周勇胜,陈云帆,黄学军,李冬州.大型潜水泵站竖井式出水流道的水力性能研究[J].中国给水排水,2018,34(05):52-56.
- [3] 陈加琦,苏志敏,王梦成,濮菊琪,陈松山.竖井贯流泵装置水力特性的数模分析[J].中国农村水利水电,2018(07):152-157.
- [4] 王秋景,郑源,阚阚.竖井贯流泵装置进出水流道优化分析[J].水电能源科学,2015,33(08):132-135.
- [5] 夏焱,汤方平,石丽建,谢传流,张文鹏.双向竖井贯流泵装置数值模拟及试验分析[J].中国农村水利水电,2017(07):149-153.
- [6] 丽建,刘新泉,汤方平,姚悦铃,谢荣盛,张文鹏.双向竖井贯流泵装置优化设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(12):85-91.
- [7] 孙衍,李尚红,颜蔚,成立.竖井式贯流泵装置进出水流道优化CFD[J].中国农村水利水电,2018(08):186-189+193.
- [8] Sun J, Tsukamoto H. Off-design performance prediction for diffuser pumps[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2001, 215(2):191-201.