

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.19.011

# 基于CFD的深潜池循环给水系统模拟分析

陈文杰<sup>1</sup>, 肖奕鸣<sup>1</sup>, 许为民<sup>1</sup>, 吴昌永<sup>2</sup>, 李浩然<sup>1</sup>, 王伟<sup>1</sup>,  
王盼新<sup>2</sup>

(1. 中国建筑东北设计研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110000; 2. 中国环境科学研究院  
环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100012)

**摘要:** 目前国内深潜池建设工程少、运维时间短,相关研究还处于探索阶段,缺乏相应的标准指导工程建设。而深潜池的规模一般较大,很难通过实验获得水流速度和方向等参数。为了给深潜池池水循环系统设计的校核、优化提供技术指导,以建筑内深潜池的流体域为研究对象,通过计算流体力学(CFD)模拟技术探索了不同工况时深潜池给水口的适合参数、布置方式以及运行过程的流速、流线分布情况。结果表明,送水口采用小孔径、螺旋状,且底部为主、侧流为辅的布置方式,可以达到较好的水流均匀性和循环效果,有效降低了对人员的潜在危险。

**关键词:** 深潜池循环给水系统; 计算流体力学; 稳态模拟; 水力流场分析; 守恒控制方程

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2024)19-0069-06

## CFD-based Simulation of Deep Diving Pool Circulating Water Supply System

CHEN Wen-jie<sup>1</sup>, XIAO Yi-ming<sup>1</sup>, XU Wei-min<sup>1</sup>, WU Chang-yong<sup>2</sup>, LI Hao-ran<sup>1</sup>,  
WANG Wei<sup>1</sup>, WANG Pan-xin<sup>2</sup>

(1. China Northeast Architectural Design & Research Institute Co. Ltd., Shenyang 110000, China;  
2. Research Center of Environmental Pollution Control Engineering Technology, Chinese Research  
Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** In China, there are hitherto a limited number of construction projects for deep diving pools, and the operation and maintenance period is relatively short. Relevant research is still at the exploratory stage, and there is a dearth of corresponding standards to guide the construction of such projects. Nevertheless, the scale of deep diving pools is typically large, and it is challenging to obtain parameters like water velocity and direction through experiments. To offer technical guidance for the verification and optimization of the design of the deep diving pool water circulation system, the fluid domain of the deep diving pool within the building was selected as the research object, and the appropriate parameters, layout mode, flow rate, and streamline distribution of the deep diving pool water supply port under different working conditions were investigated through CFD simulation technology. The water supply outlet adopted the configuration of small apertures and a spiral form, with the bottom flow

基金项目: 中建东北院科技研发课题(DBY-2022-17); 长江生态环境保护修复二期研究项目(2022-LHYJ-02-0202-005)

通信作者: 王盼新 E-mail: wangpanxin\_hit@126.com

being dominant and the side flow being supplementary. This could achieve better uniformity of water flow and circulation performance, and effectively reduce the potential hazard to personnel.

**Key words:** deep diving pool circulating water supply system; CFD; steady-state simulation; hydraulic analysis; conservation governing equations

民用深潜池是为了体验潜水运动而建设的服务性设施,被广泛应用于深潜体验、潜水员训练、深海装备测试、科学研究等领域。对深潜池的物理特性,如水体流动状态、温度、压力等物理参数的精准控制在深潜池的运行过程中尤为关键。水流的流速和方向会对深潜池内的水体产生影响,靠近给水口处会因高速水流产生湍流,进而引起整个流体域的水流运动,对水流扰动速度控制得当可在保证人员安全的前提下实现池水循环,以达到模拟深海水流及池水清洁的目的和效果。因此,深潜池的补水、更新池水及池水质量的控制主要通过深潜池的给水口完成,故给水口的参数配置对流场分布起决定性作用,需要慎重考虑。若各给水口间距过大,则会产生无法通过给水口进行控制的水流区域;若位置过近,则不同给水口之间难以避免会相互影响。给水口的流速及流量控制也应重点关注,若给水口处水流速度过大,则湍流强度过大,在深潜池内的潜水用户可能会有危险<sup>[1]</sup>;若水流速度过小,又难以扰动深潜池内部的水体。总而言之,为了对整体流体域进行更精确控制,用多次模拟计算的方式确定给水口的位置选择和流量配比不失为一种科学有效的方法<sup>[2]</sup>。

因此深潜池给水口的设计要点在于给出适合的流量分配比例、布口位置,使整个池水无“死水区”“滞水区”“短流区”以防污染物堆积,同时能实现良好的水流条件,并可在一定范围内调节配套设施的工况,形成不同的流场分布,给潜水者良好的深潜体验。因深潜池的容量大、给水口多、系统复杂、水流影响因素多,无法通过传统的实验、理论计算方式获得合理的分析结果,故采用计算流体力学(CFD)的方法对深潜池进行几何建模,采用有限元方法进行数值求解。CFD是一种通过数值方法模拟和分析流体流动及传热现象的学科<sup>[3]</sup>。它基于流体力学原理和数值计算方法,使用计算机进行流场数值求解,以求得流体流动和相关物理现象的定量预测和分析。采用该方法在前期校核设计方案,并

进行设计优化改进,以便满足工程项目的使用需求,笔者主要利用CFD模拟分析流体的流动特性,并进行相关分析计算。

## 1 工程概况与研究方法

### 1.1 工程概况

拟建的深潜池项目位于中国北方地区,深潜池总容积为12 712 m<sup>3</sup>,流体域最大深度为66 m、最小深度为1.2 m,深度阶梯错落分布,流体域中间设有直径为1.8 m的玻璃廊道。深潜池三维空间见图1。

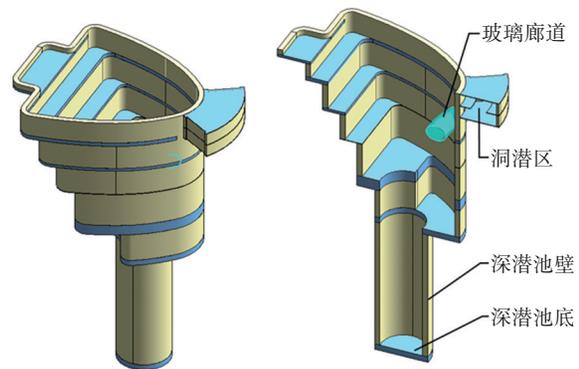


图1 深潜池三维空间示意

Fig.1 Three-dimensional space of deep diving pool

### 1.2 研究方法

流体流动受物理守恒定律支配,建立控制方程是解决流体力学问题的必要步骤,为简化编程计算的工作量,采用守恒型控制方程。基本的控制方程包括质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程和组分输运方程<sup>[4]</sup>。虽然这些方程的变量不同,但它们都反映了单位时间单位体积内物理量的守恒性质。上述控制方程可以用下列通用形式表示:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S \quad (1)$$

展开形式为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial z} \right) + S \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $t$ 为时间; $\rho$ 为密度; $S$ 为广义源项; $\Gamma$ 为广义扩散系数; $\phi$ 为通用变量,可以代表 $u$ 、 $v$ 、 $w$ 等求解变量, $u$ 、 $v$ 、 $w$ 分别为速度矢量 $\mathbf{u}$ 在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的分量;温度设定为恒定值。

式(1)中各项依次为瞬态项、对流项、扩散项和源项。对于特定的方程, $\phi$ 、 $\Gamma$ 和 $S$ 都具有特定的形式,本研究涉及到的方程主要包括连续方程及动量方程。

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

$x$ 动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (4)$$

$y$ 动量方程:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \quad (5)$$

$z$ 动量方程:

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \quad (6)$$

以上控制方程经过适当的数学处理,如采用中心差分格式、一阶迎风格式、混合格式等,即可用于求解不同类型的流体流动问题,对于不同 $\phi$ ,可给定 $\Gamma$ 及 $S$ 并加上实际问题的初始条件和边界条件,重复迭代调用程序进行计算,求解问题。

由于CFD的复杂性及计算机软硬件的多样性,目前市面上有多款商用原件可供CFD模拟计算使用,比较常用的软件包括COMSOL、OpenFOAM、ANSYS等<sup>[5]</sup>。其中COMSOL提供了友好的用户界面,建模直观且易于理解,特别擅长处理耦合场问题,如热传导与电磁场的综合分析;OpenFOAM作为一个开源的CFD软件包,以其灵活性和处理复杂问题的能力而闻名,用户可以对软件进行更改、定制,但是它需要一定的编程技能,上手较难;ANSYS是一款广泛应用于工程领域的有限元分析软件,适用于结构力学、流体力学、热传导、电磁场等领域,具有强大的求解器和模型库,适用于大规模、高精度的工程分析<sup>[6]</sup>。

由于本研究是对流体力学单一物理场进行分

析计算,且ANSYS具有友好的用户界面,无需大量的编程知识就可以使用,故采用ANSYS-FLUENT软件对深潜池的水流速度和水流组织进行分析。在模拟的过程中,设流体域内存在湍流流动,采用coupled压力速度耦合方法<sup>[7]</sup>、RNG  $k-\varepsilon$ 湍流模型进行模拟分析<sup>[8]</sup>,认为深潜池内水流为单相流。考虑深潜池使用时池水参数相对恒定,做出以下假设:①深潜池中流体的物性参数(如流体的密度与黏度等)为常数;②水在模拟条件下为不可压缩流体;③深潜池壁面为无滑移边界。

## 2 CFD模拟分析

### 2.1 几何模型构建及网格划分

根据上述模型,运用ANSYS-Design Modeler模块在CFD软件内建模。为了分析深潜池流体域内的水流分布及速度情况,对实际深潜池建筑模型进行简化,只重点保留深潜池内流体域的区域,将横穿流体域的玻璃廊道也考虑在内,形成一个有自由溢流面的流体空间。

考虑到本工程曲面较多,若采用六面体结构化网格会产生因几何曲率较大而导致网格质量难以有效控制的问题,故处理过程中采用四面体网格划分<sup>[9]</sup>,控制标准网格尺寸为0.5 m,对送水口位置的网格进行进一步加密处理,对曲面位置进行膨胀处理<sup>[10]</sup>,如图2所示。根据布置送水口数量的不同,控制网格单元数量在833 779~1 612 445之间。

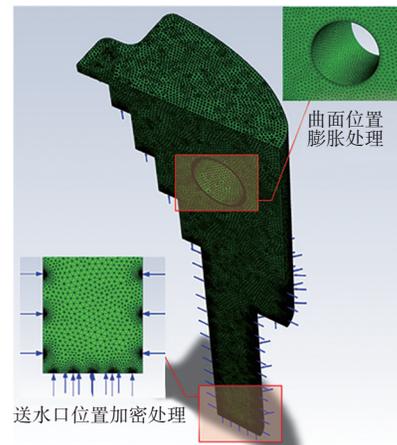


图2 深潜池流体域网格划分示意

Fig.2 Fluid domain mesh of deep diving pool

### 2.2 分区配置

依据多次模拟的结果,流量分配遵循竖向涌流为主划定服务区,现将整个深潜池区域按照最大水深及建筑造型分为7个区域,如图3所示。

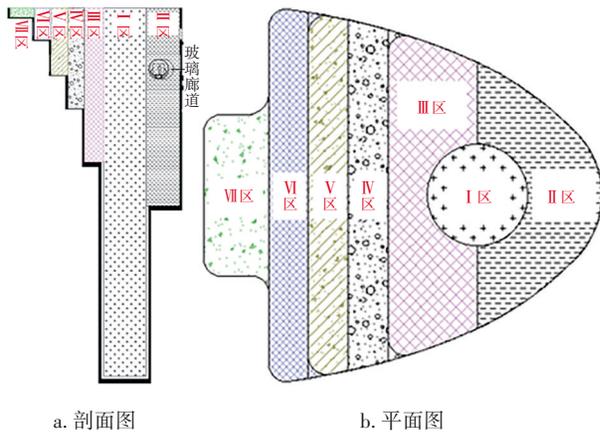


图3 深潜池区域划分示意

Fig.3 Area division schematic of deep diving pool

2.3 模拟工况

结合工程实际情况及设计思路,深潜池循环周期选定为 8 h,对 3 种工况的设计方案进行模拟分析。

工况一:采用大孔径送水口,在低流速下进行送水,送水量集中在深潜池的下部,40 m 以下布置 143 个送水口,其送水量为 1 557 m<sup>3</sup>/h,深潜池总送水量为 1 802 m<sup>3</sup>/h,即 40 m 以下区域的送水量占总送水量的 86%。I 区桶状区域壁面送水口采用水平和竖直夹角为 30°交替布置,其他壁面送水口采用水平向内的方式送水。送水口总数为 177 个,送水速度为 0.1~0.2 m/s。

工况二:采用小孔径送水口,在高流速下进行送水,40 m 以下布置 55 个送水口,其送水量为 972 m<sup>3</sup>/h,总送水量为 1 621 m<sup>3</sup>/h,即 40 m 以下区域的送水量占总送水量的 60%。所有壁面送水口均采用竖直夹角为 30°布置。送水口总数为 113 个,送水速度为 0.4~1.0 m/s。

工况三:采用小孔径送水口,在高流速下进行送水,40 m 以下布置 72 个送水口,其送水量为 952 m<sup>3</sup>/h,总送水量为 1 593 m<sup>3</sup>/h,即 40 m 以下区域的送水量占总送水量的 60%。所有壁面送水口均采用竖直夹角为 30°、水平夹角为 60°布置,同水平高度送水口呈螺旋状布置。送水口总数为 157 个,送水速度为 0.4~1.1 m/s。

每一个送水口为速度入口,流体域上表面出口为自由出流,全部深潜池容积空间为流体域,内部流体为水,属于不可压缩流体。

3 结果与讨论

深潜池的总容积为 12 712 m<sup>3</sup>,循环周期为 8 h,相应的理论循环流量为 1 589 m<sup>3</sup>/h。本工程案例中,池体最大截面为 581 m<sup>2</sup>,最小断面流速为 7.6×10<sup>-4</sup> m/s。本研究以此速度作为水流有效流动的最小速度。

图 4 为工况一水流速度云分布情况。可以看出,此工况不能满足全流体域各点速度均不小于最小有效流动速度的期望目标,底部送水口的影响范围有限,较浅池水处易产生白区(即速度小于最小有效流动速度的区域),流体域未形成有效的整体水流向,方向相对送水口的作用水流相冲,导致动能损失。部分水流仅在 I 区范围内形成涡旋,并不能在送水作用下到达出水位置,易形成污染物聚集。较低区域水流的混合效果较好,能有效进行扰动。较高区域大部分水流速度小于水流有效流动的最小速度,即高区水流速度不能完全满足要求。

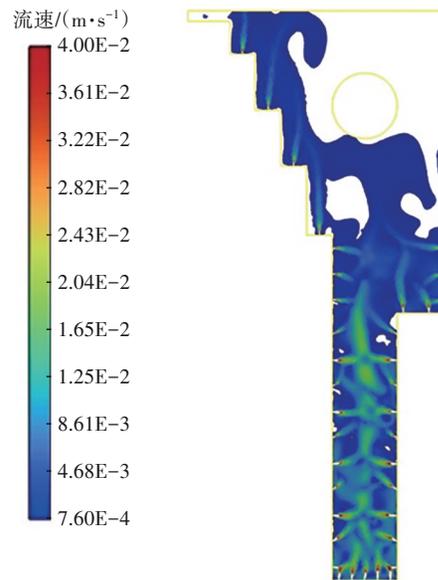


图4 工况一水流速度云分布情况

Fig.4 Velocity cloud distribution of water flow in working condition 1

图 5 为工况二水流速度云分布情况。可知,水流效果较工况一有所改善,此时的水流接力更加顺畅,全流体域有多处涡旋,有利于水流混合,水流最终能在理想状态下到达出口位置。深潜池较高位置水流混合的情况较好,除送水口直接作用区域外,速度均匀,适宜潜水功能。且在当前模拟条件下能够基本保证整个流体域的各点流速均不小于

最小有效流动速度,除了流体域 I 区下方的圆柱体流体域外,其他区域水流顺畅。流体域 I 区下方的圆柱体流体域内的水流情况复杂,虽然将水平向内的送水口改成竖直夹角为 $30^\circ$ 送水后减少了相对方向水流的对冲作用导致的能量损失,但仍形成剧烈的不规则扰动,这种水力状况有导致潜水者陷入危险的可能,所以当前的模拟工况可用于深潜池的换水过程,但不宜用于有人在池中深潜的运行情况。

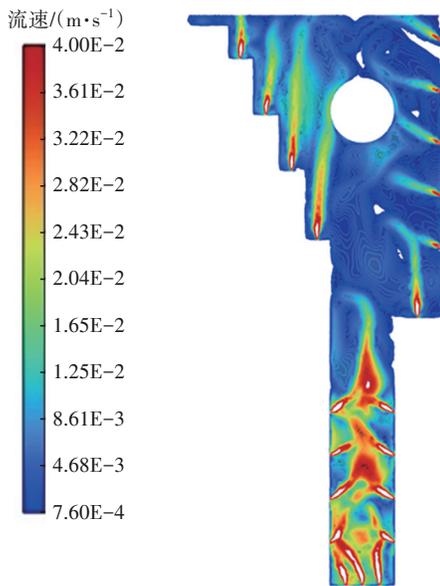
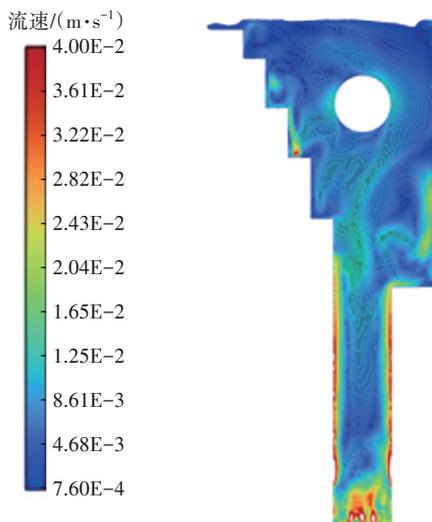


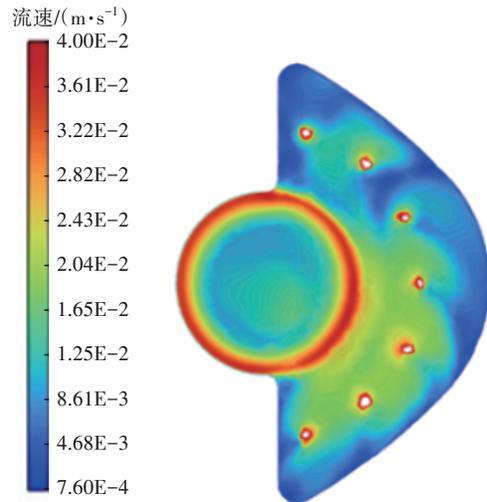
图5 工况二水流速度云分布情况

Fig.5 Velocity cloud distribution of water flow in working condition 2

图6为工况三水流速度云分布情况和31 m高度处横向切面云图。



a. 水流速度云分布情况



b. 31 m高度处横向切面云图

图6 工况三水流速度云分布情况和31 m高度处横向切面云图

Fig.6 Velocity cloud distribution of water flow and transverse cut map at a height of 31 meters in working condition 3

从图6可以看出,该工况下全流体域的水流条件良好,速度分布更为合理,竖直方向上,水流速度自下而上逐步减小,即与潜水人员分布从下而上逐渐增多相契合。整体满足速度不小于最小有效流动速度的期望目标,全流体域速度方向整体向上,各送水口之间无恶性干扰影响,阶梯处接力效果明显。圆柱体的流体域水流贴壁面螺旋向上,与浅水区水流混合后能顺利到达出水口,无明显死区,水流互相借力作用明显。

综上所述,工况一的布口多、经济性高、人员潜在危险较低,但流速均匀性和循环效果差;工况二的布口少、循环效果较好,但经济性低、人员潜在危险高、流速均匀性差;工况三的布口多、孔径小、经济性较低,但人员潜在危险低、流速均匀性和循环效果好。通过对比可知,对送水口的角度进行水平和垂直方向的调整后能够有效改善水流的均匀性和循环效果,也能有效降低人员潜在的危险性,经济性上,虽然工况三布口较多,但为了实现高速送水,大多数送水口为小孔径,故并不会引起成本的大量增加。

#### 4 结论

① 在深潜池送水口设计过程中,当深潜池的池体截面较大时,采用小孔径送水口高流速送水的

方式优于大孔径送水口低流速送水,高流速水流量能让池水更好地循环,以达到换水清洁的目的。

② 布置筒状池体时,送水口在水平面和竖直面均使用角度布口,且同一水平面的布口形成螺旋状时,能加大池体内水流的混合程度,使池体内的水力状况得到极大改善,让池水混合更加均匀。同时能使高流速区集中在池体壁面,让深潜池中心的使用部位处于低流速区,让深潜用户潜水体验更加安全。

③ 深潜池内的流场速度较小,应注重送水口布置的合理性,其流量应以底部配水为主、侧壁导流为辅,可形成良好的流线。

④ 通过对深潜池不同工况下的水流情况进行模拟分析,发现给水口的布置位置和流量流速对池水流态有重要影响,同时也为深潜池设计提供了一定思考,即不能只简单地从换水次数上计算给水口流量,也要同时考虑水流对深潜池内潜水人员的干扰,避免因送水速度过大而导致的潜水危险。在工况三条件下,实现了较好的水流均匀性和循环效果,但由于该设计工况下补水口角度与常规项目有所差异,可能需要施工管理人员在给水口施工过程中多加留意,对施工质量进行控制管理,以期达到设计效果。

#### 参考文献:

- [1] EICHHORN L, LEYK D. Diving medicine in clinical practice [J]. Deutsches Ärzteblatt International, 2015, 112(9): 147-157.
- [2] YAİCI W, GHORAB M, ENTCHEV E, *et al.* Three-dimensional unsteady CFD simulations of a thermal storage tank performance for optimum design [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 60(1/2): 152-163.
- [3] YADAV A S, BHAGORIA J L. Heat transfer and fluid flow analysis of solar air heater: a review of CFD approach [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 23: 60-79.

- [4] TEY W Y, ASAKO Y, SIDIK N A C, *et al.* Governing equations in computational fluid dynamics: derivations and a recent review [J]. Progress in Energy and Environment, 2017, 1: 1-19.
- [5] GUPTA N, BHARDWAJ N, KHAN G M, *et al.* Global trends of computational fluid dynamics to resolve real world problems in the contemporary era [J]. Current Biochemical Engineering, 2020, 6(3): 136-155.
- [6] MAKSUM Y, AMIRLI A, AMANGELDI A, *et al.* Computational acceleration of topology optimization using parallel computing and machine learning methods: analysis of research trends [J]. Journal of Industrial Information Integration, 2022, 28: 100352.
- [7] FERREIRA G G, LAGE P L, SILVA L F L, *et al.* Implementation of an implicit pressure-velocity coupling for the Eulerian multi-fluid model [J]. Computers & Fluids, 2019, 181: 188-207.
- [8] KOUTSOURAKIS N, BARTZIS J G, MARKATOS N C. Evaluation of Reynolds stress,  $k-\varepsilon$  and RNG  $k-\varepsilon$  turbulence models in street canyon flows using various experimental datasets [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2012, 12(4): 379-403.
- [9] LI H, ZENG W, MORVAN J M, *et al.* Surface meshing with curvature convergence [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2014, 20(6): 919-934.
- [10] WEI P, LU D T, HUANG T, *et al.* Hexahedral mesh smoothing via local element regularization and global mesh optimization [J]. Computer-Aided Design, 2015, 59: 85-97.

**作者简介:**陈文杰(1981- ),男,陕西大荔人,本科,正高级工程师,公司级副总工程师,国家公用注册设备(给水排水)工程师,一级注册消防工程师,注册咨询工程师,主要从事建筑给排水设计与研究工作。

**E-mail:**756190936@qq.com

**收稿日期:**2023-12-25

**修回日期:**2024-02-12

(编辑:任莹莹)