

基于机器学习的LNG气化器排水自由跌水换热入口水流方向优化研究

杨 艳, 唐玉阳, 李东阳*

长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年9月1日; 录用日期: 2026年9月9日; 发布日期: 2026年9月29日

摘 要

本文基于计算流体力学对基于自由跌水的江水源LNG气化器排水升温过程进行了数值模拟, 获得了在不同入口流速下及入口水流方向角对排水升温性能的影响规律。水流与渠道底部接触时最大速度随着入口水流方向角的增大而减小。当水流方向角在 0° 到 60° 之间时, 出口温度随水流方向角的增大而增大; 当水流方向角超过 60° 后, 出口温度随水流方向角的增大而减小。基于机器学习构建了入口水流方向角、入口流速与出口温度之间的预测模型。进一步基于梯度下降算法, 以最大化出口水温为目标, 获得了在入口流速为 3 m/s 时, 最优的入口水流方向角(59.798°), 此时水流的出口温度为 280.5 K , 相较于入口水流方向角为 0° 时, 出口温度提升了 3 K 。

关键词

LNG气化器排水, 自由跌水, 数值模拟, 机器学习, 水流方向优化

Optimization of Water Flow Direction for Free-Falling Water Heat Exchange in LNG Vaporizer Drainage via Machine Learning

Yan Yang, Yuyang Tang, Dongyang Li*

Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: September 1, 2026; accepted: September 9, 2026; published: September 29, 2026

Abstract

Based on computational fluid dynamics, this study conducted a numerical simulation of the heating

*通讯作者。

文章引用: 杨艳, 唐玉阳, 李东阳. 基于机器学习的 LNG 气化器排水自由跌水换热入口水流方向优化研究[J]. 流体力学, 2026, 14(3): 139-147. DOI: 10.12677/ijfd.2026.143013

process of LNG vaporizer drainage using free-falling river water. The influence of different water flow direction angles on the heating performance under varying inlet flow velocities was investigated. The maximum velocity when the water flow contacts the channel bottom decreases as the inlet flow direction angle increases. The outlet temperature increases with the increase of the flow direction angle when the angle is between 0° and 60° . However, when the angle exceeds 60° , the outlet temperature decreases as the angle further increases. Furthermore, a machine learning-based prediction model was developed to establish the relationship between the inlet flow direction angle, flow velocity, and outlet temperature. Using the gradient descent algorithm with the objective of maximizing the outlet water temperature, the optimal inlet flow direction angle was determined to be 59.798° at an inlet flow velocity of 3 m/s. At this angle, the outlet water temperature reaches 280.5 K, representing an increase of 3 K compared to the case with a 0° inlet flow direction angle.

Keywords

LNG Vaporizer Drainage, Free-Falling Water, Numerical Simulation, Machine Learning, Water Flow Direction Optimization

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

江水源 LNG 气化装置是适配内河接收站与船舶的清洁能源核心设备,以江水为天然热源,通过热交换原理使低温 LNG 气化为常温天然气,搭配循环水路实现水资源高效利用,降低能耗与成本。在自由跌水中,上游水流高程骤降变化自由跌落到下游,不仅能起到消能作用,也可利用与环境空气热交换来调节水温[1]-[4]。自由跌水可为江水源 LNG 气化装置排水的升温提供一种可行的方式。

李乃稳等[5]探究了工程中常见的陡坡粗糙矩形明渠的自由跌水水力特性,发现跌坎上游为急流,坎末水深与上游临界水深的比值呈线性相关,且受跌水影响的上游长度仅与底坡、糙率有关。郑胜意[6]为解决自由跌水冲刷河床和消能效率低的问题,提出了折坡水垫消能概念。发现折坡可有效控制回水,同时增大流量会形成大尺度回旋;有跌坎时能形成“软水垫”减少底板冲击,大幅降低冲刷风险。周聪颖等[7]针对自由跌水的水利特性、量水试验和理论研究三方面开展研究,发现利用跌坎水深与临界水深之比可以精确测量明渠流量。

基于计算流体力学的数值模拟可精确反映自由跌水过程中各物理量场的变化,逐渐成为研究自由跌水水利特性的重要手段。尹杨松[8]采用 VOF 法与三维水动力学模型对弗汝德数为 1.74 的来流的明渠自由跌水展开数值研究。发现最大压力区与最大切应力区并非同一区域,前者处于水流冲击区,后者位于冲击区下游。陈婷[9]采用 VOF 法结合 $k-\varepsilon$ 双方程模型对小流量自由跌水开展了三维数值模拟,推导了跌水长度计算公式,并对比模拟、试验与公式计算结果,结果表明三者误差处于可接受范围。Afrin 等[10]针对水平光滑圆管上游满流状态下的自由跌水展开了数值研究,发现空腔出流工况下跌坎水深与临界水深比值为 0.75,且两种流态下跌坎断面无量纲压力分布规律一致,模拟数据与文献数据契合度良好。

Irzoiki 等[11]采用人工神经网络探究半圆渠道中自由跌水的水流流量和河床糙率影响因素,模型预测结果与实验结果吻合度良好,发现临界水深对自由跌水流量的影响占比达 85.8%,底坡影响占比仅 1.1%。Raikar 等[12]通过神经网络建立末端水深与临界水深的关联,发现在缓流状态下当临界水深与渠道直径比

不超过 0.4 时,末端水深和临界水深的比值为 0.705,并建立了在急流状态下末端水深比、无量纲流量与渠道底坡的经验关系式。Roushangar 等[13]采用前馈神经网络与自适应神经模糊推理系统两种方法对阶式溢洪道自由跌水的消能特性展开研究,发现两种神经网络模型均能可靠地预测该场景下的消能效果,且自适应神经模糊推理系统性能更优。张晓萍等[14]以水电站溢洪洞自由跌水为研究对象,用神经网络优化挑坎体型参数,发现当斜切角为 25°、挑射角为 29°、扩散角为 6°时,水舌弧长最长且冲刷最小,为跌水消能构件优化提供了新思路。

尽管国内外学者对自由跌水进行了一定的研究,但对基于自由跌水的换热性能的研究较少。鲜有人研究自由跌水过程中水流方向对其换热性能的影响。水流方向会显著影响水流与空气换热的路径,进而影响基于自由跌水中 LNG 气化器排水“水-空气”换热性能及水温恢复效果。基于此,本文通过计算流体力学对基于自由跌水中 LNG 气化器排水“水-空气”换热过程进行数值模拟,研究水流方向角度和流速对排水升温性能的影响规律,基于机器学习建立了不同入口水流方向角度与流速下渠道出口水温的预测模型,进一步耦合梯度下降算法对以排水恢复温度最高为目标,对不同流速下入口水流方向角度进行了优化研究,获得了不同入口流速下最优的入口水流方向,为构建和设计高效基于自由跌水中 LNG 气化器排水升温过程提供了一定的参照依据。

2. 数学模型

2.1. 控制方程

本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型来研究基于自由跌水中 LNG 气化器排水“水-空气”换热性能。在 VOF 模型,引入体积分数 α 来描述空气和水所占体积分数份额, $\alpha=1$ 表示计算网格内主流体为水, $\alpha=0$ 表示计算网格内主流体为空气, α 在 0 和 1 之间表征水和空气的过渡界面。模型的控制方程如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{D\mathbf{u}}{dt} = \mathbf{f} + \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho t)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad } T\right) + S_T \quad (3)$$

体积分数 α 的演化方程:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{u}) = 0$$

湍动能 k 和湍动能耗散率 ε 由以下方程描述:

$$\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\nu_m}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \eta_i \frac{\partial u_i}{x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial(u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\nu_m}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (5)$$

2.2. 机器学习模型

本文采用全连接神经网络构建了自由跌水模型的出口水温的预测网络,全连接神经网络是最基础、最经典的神经网络结构之一。其核心特点就是相邻层的神经元之间的完全两两连接,每一层的神经元接受上一层的所有神经元的输出作为输入,并将自身的输出传递给下一层的所有神经元。为避免单次随机划分带来的预测偏差、提升模型泛化能力,本文采用交叉验证方式完成数据集训练与测试,取多轮平均误差作为模型精度评价依据。在本研究中输入层包含有两个神经元,对应两个特征,分别是入口水流方向角度与流速,包含有两个隐藏层,输出层为一个神经元,为出口水流温度的预测值[15][16]。

3. 模型验证与网格独立性验证

3.1. 模型验证

首先基于罗先伟[17]论文中无水垫池中几何参数进行了数值模拟,水舌最大流速模拟值为 8.77 m/s,与该文献中通过实验测得的 8.87 m/s 高度吻合,相对误差较小(1.1%),验证了本文所采用的 VOF 两相流模型与 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型的准确性。

3.2. 几何模型

本文的计算模型如图 1 所示。上游为江水源 LNG 气化器排水,入口水温为 279 K。跌落高度 ab 为 4 m, bc 与 de 均为 1 m,入口 cd 为 0.1 m, fg 为 8 m。水流入口设置为 cd、bc、de 与 fg 三个区域空气的接触面设置为压力入口边界条件,出口 gh 设置为压力出口边界条件,其余均为壁面边界条件。数值模拟计算了夏季环境温度为 303 K 时不同入口水流角度(0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 80°)不同入口流速(1 m/s、1.5 m/s、2 m/s、2.5 m/s 和 3 m/s)共 35 种工况下基于自由跌水中 LNG 气化器排水“水-空气”换热性能。

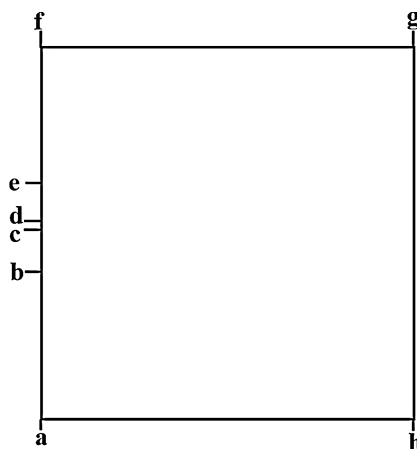


Figure 1. Geometric model for the numerical simulation of “water-air” heat exchange during free-falling water drainage in an LNG vaporizer

图 1. LNG 气化器排水自由跌水“水-空气”换热数值计算几何模型

3.3. 网格独立性验证

为了保证仿真计算的准确性以及稳定性,这里选取入口水流角度为 60° ,速度为 3 m/s 情形进行计算,获得不同网格数量下自由跌水换热后 LNG 气化器排水出口水温。如图 2 所示,当网格数量超过 55,640 时,计算结果基本不随网格变化,故为保证计算结果的准确性以及计算的速度,因此后续计算选择网格数量为 55,640。

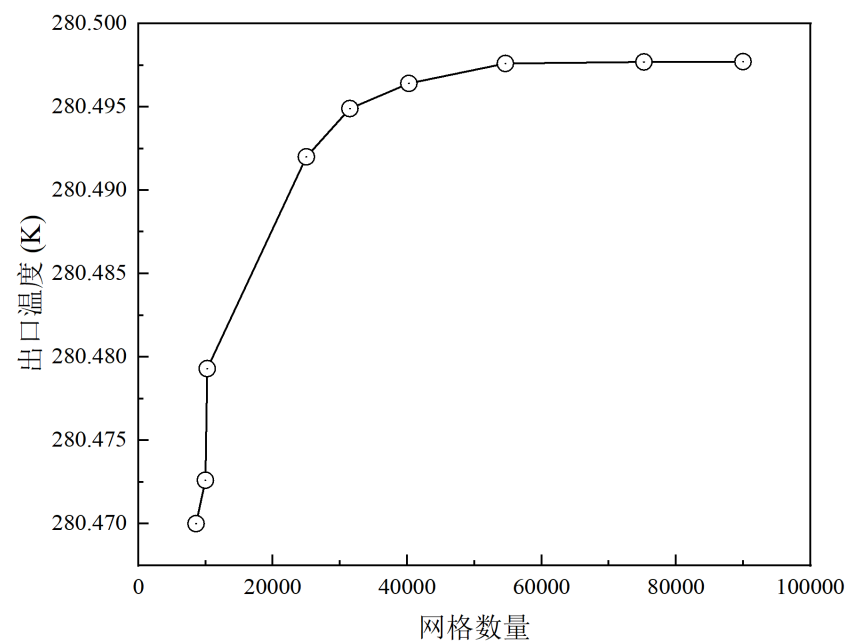


Figure 2. Outlet water temperature across different grid numbers
图 2. 不同网格数量下的出口水温

4. 结果与讨论

4.1. 入口水流方向角度对 LNG 气化器排水流动特性的影响

图 3 为当入口流速为 3 m/s，水流方向角度分别为 0°、45°以及 80°时自由跌水渠道中温度场与速度

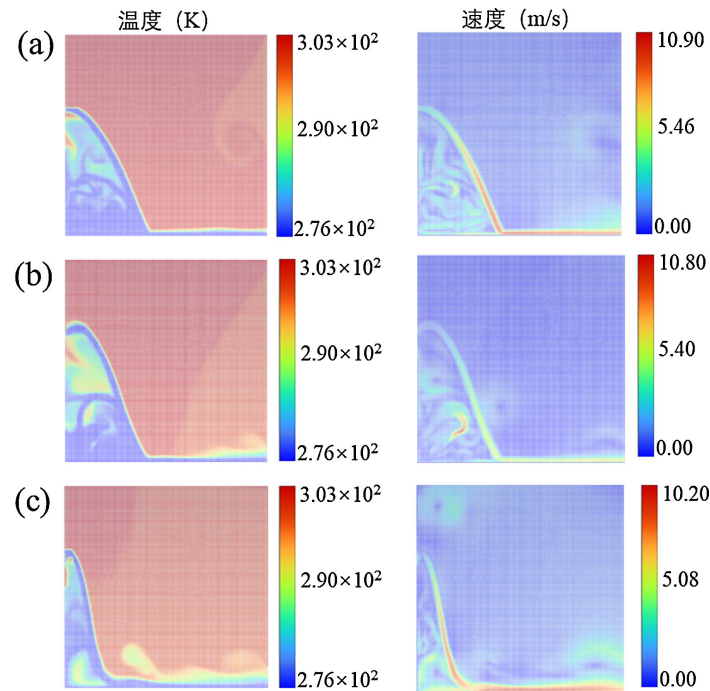


Figure 3. Internal channel temperature and velocity fields for different water flow angles: (a) 0°; (b) 45°; (c) 80°
图 3. 不同水流方向角度下的渠道内部温度场与速度场: (a) 角度为 0°; (b) 角度为 45°; (c) 角度为 80°

场云图。从温度场云图中可以发现适当增大水流方向角度可以提高水与热空气的接触面积与换热时间,进而提高换热效率,使出口温度增加,如果水流方向角度过大,不足以形成明显的抛物线形水流,与空气接触面积较小,故换热效果并不显著。由速度云图可知当水流方向角度为 0° 时,水流与渠道底部接触时最大速度为 10.9 m/s ; 当水流方向角度为 45° 时,水流与渠道底部接触时最大速度为 10.8 m/s ; 当水流方向角度为 80° 时,水流与渠道底部接触时最大速度为 10.2 m/s 。

4.2. 入口水流方向角度对 LNG 气化器排水换热性能的影响

图 4 为当入口流速为 3 m/s 时, LNG 气化器排水出口温度随水流方向角的变化情况。从图中可以看出,当水流方向角在 0° 到 60° 之间时,出口温度随水流方向角的增大而增大; 当水流方向角超过 60° 之后,出口温度随水流方向角的增大而减小。主要原因是当水流方向角在 0° 到 60° 之间时,相较于水流方向角为 0° 的水流与空气的接触面积更大,接触时间更长,换热效果更明显。之后随着水流方向角增加,出口温度减小则是因为水流方向角过大,与空气接触面积较小,接触时间较短,故换热效果并不显著。

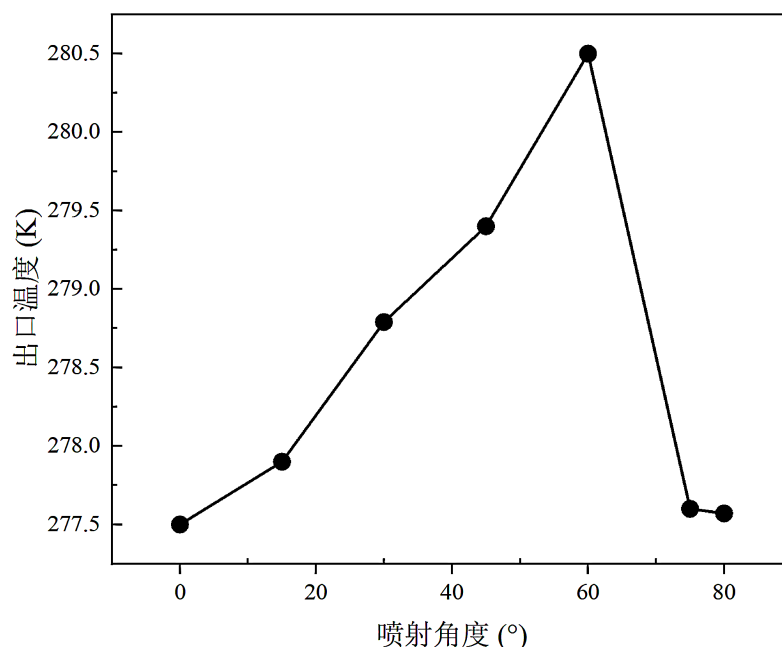


Figure 4. Effect of different water flow angles on outlet water temperature

图 4. 水流方向角对出口水温的影响

图 5 为水流方向角为 60° 时,出口温度随入口流速变化的情况。从图中可以看出出口温度随入口流速的增加而增加,主要原因是水流的入口流速越快,水流与空气的接触面积越大,与空气的扰动也更剧烈,换热效果显著。

4.3. 基于机器学习的出口水温预测及水流方向角优化

基于数值模拟计算了不同入口水流角度(0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 80°)不同入口流速(1 m/s 、 1.5 m/s 、 2 m/s 、 2.5 m/s 和 3 m/s)共 35 种工况下的出口水流温度,建立了入口水流方向角和流速与出口温度的数据库,进一步基于神经网络搭建了出口水温预测模型。输入为入口水流方向角与入口流速,输出为出口水温。如图 6 所示,预测模型在测试集中表现良好,平均误差为 0.037 K ,证明了所构建的预测模型的准确性。

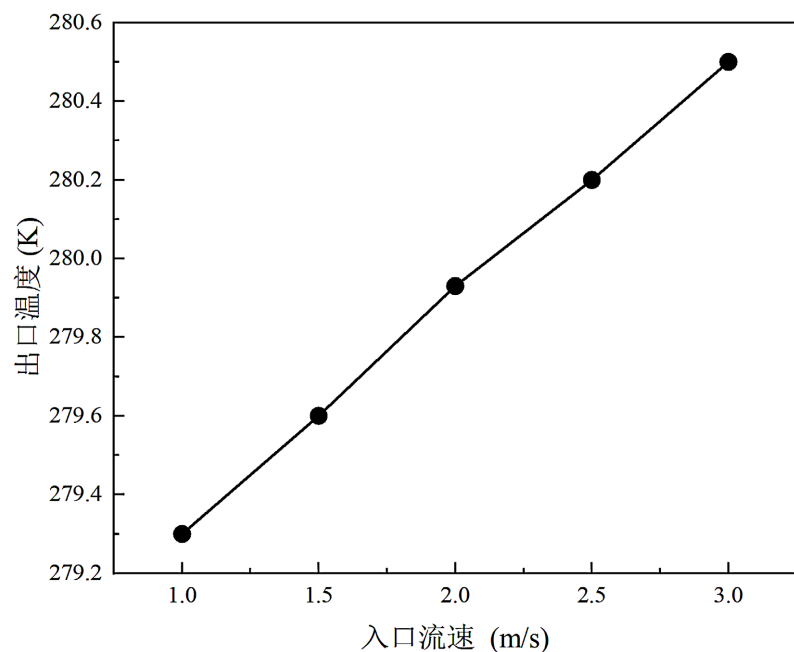


Figure 5. Effect of inlet flow velocity on outlet water temperature

图 5. 入口流速对出口水温的影响

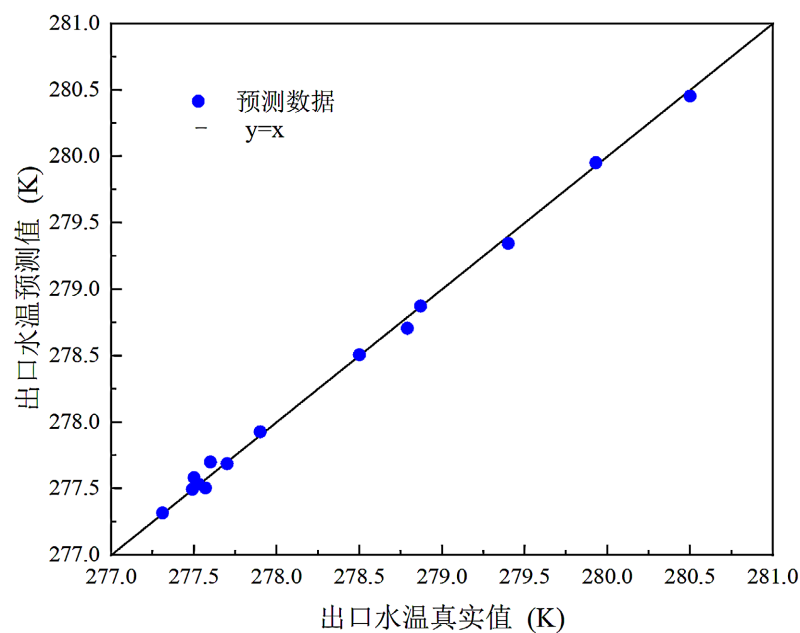


Figure 6. Accuracy validation for outlet water temperature prediction network

图 6. 出口水温预测网络的精度验证

由前文分析可知存在最优的水流方向角,使基于自由跌水的 LNG 气化器排水恢复温度最高。为了获得最优的水流方向角,本文采用梯度下降算法进行寻优。梯度算法是一种用于求解函数极值的优化算法。梯度是一个向量,其方向指向函数在该点上升最快的方向,而负梯度方向则是函数在该点下降最快的方向。从初始点出发,沿着负梯度方向不断调整参数,逐步降低目标函数值,直至达到目标函数的最小值或接近最小值的点。假设目标函数为 $J(\theta)$,其中 θ 是由所有需要优化的参数组成的向量。在梯度下降算

法中, 参数 θ 的更新公式为:

$$\theta_i := \theta_i - \alpha \frac{\partial J(\theta)}{\partial \theta_i} \quad (6)$$

式中, i 表示参数向量 θ 中的第 i 个参数; α 被称为学习率, 它决定了每次参数更新的步长大小, α 过大可能导致错过最优解甚至无法收敛, 过小则会使算法收敛速度过慢[18] [19]。

基于梯度下降的方法, 以最大化出口水温为目标, 获得了在入口流速为 3 m/s 时, 最优的入口水流方向角(59.798°), 此时水流的出口温度为 280.5 K, 相较于入口水流方向为 0°出口温度提升 3 K。如下图 7 所示为最优入口水流方向角下渠道内的温度和速度云图, 水流最大速度为 10.3 m/s。

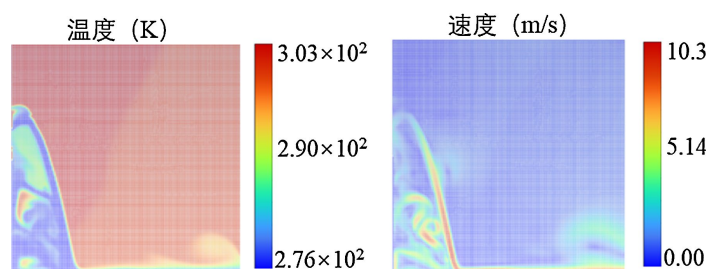


Figure 7. Temperature field and velocity field under optimal operating conditions
图 7. 最优工况下的温度场与速度场

5. 结论

(1) 本文基于计算流体动力学获得了在不同入口流速下, 不同入口水流方向角对基于自由跌水的江水源 LNG 气化器排水升温性能的影响规律。结果表明, 水流与渠道底部接触时最大速度随着入口水流方向角的增大而减小, 当水流方向角度为 0°时, 水流与渠道底部接触时最大速度为 10.9 m/s; 当水流方向角度为 80°时, 最大速度为 10.2 m/s。当水流方向角在 0°到 60°之间时, 出口温度随水流方向角的增大而增大; 当水流方向角超过 60°后, 出口温度随水流方向角的增大而减小。

(2) 基于机器学习构建了入口水流方向角、入口流速与出口温度之间的预测模型。在预测值与真实值的平均误差为 0.037 K, 证明了所构建的预测模型的准确性。

(3) 基于梯度下降算法, 以最大化出口水温为目标, 获得了在入口流速为 3 m/s 时, 最优的入口水流方向角(59.798°), 此时水流的出口温度为 280.5 K, 相较于入口水流方向为 0°时, 出口温度提升了 3 K。

(4) 本文获得的换热规律与最优入口角度仅在本研究设定的几何结构与边界条件下成立。跌落高度、入口尺寸等几何参数会改变水舌形态、水流停留时间与流场湍流特性, 调控气液换热机制并造成最优角度偏移。后续可开展多参数耦合分析, 完善自由跌水排水升温相关研究。

致 谢

本论文属于单位科研成果, 依托“科研平台: 河湖光热资源综合利用湖北省工程研究中心”开展相关研究。

参考文献

- [1] 刘韩生. 跌水与陡坡[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [2] 姜宝林, 王世荣. 我国跌水工程发展综述[J]. 黑龙江大学工程学报, 2010, 37(z1): 78-83.
- [3] 刘明. 小型跌水与陡坡在不同地形落差的经济比较[J]. 湖南水利水电, 2013(3): 37-39.

- [4] 《中国水利百科全书》编辑委员会, 编著. 中国水利百科全书[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [5] 李乃稳, 何孟, 刘超, 等. 陡坡粗糙矩形明渠中自由跌流的水力特性[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(6): 83-89.
- [6] 郑胜意. 自由跌水折坡水垫水力特性研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2018.
- [7] 周聪颖, 袁磊, 张与馨, 等. 明渠自由跌水水力特性及其在流量计量上的应用[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(05): 106-114.
- [8] 尹杨松. 基于 VOF 法的自由跌水水力特性研究[J]. 四川水利, 2018, 39(1): 3-6.
- [9] 陈婷. 小流量自由跌水长度及消能研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2016.
- [10] Afrin, T., Kaye, N.B., Khan, A.A. and Testik, F.Y. (2017) Numerical Investigation of Free Overfall from a Circular Pipe Flowing Full Upstream. *Journal of Hydraulic Engineering*, **143**, Article ID: 04017004. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001289](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001289)
- [11] Irzooki, R.H. and Najem, A.S. (2022) Study the Affecting Factors on Free Overfall Flow and Bed Roughness in Semi-Circular Channels by Artificial Neural Network. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, **29**, 69-78. <https://doi.org/10.25130/tjes.29.4.8>
- [12] Raikar, R.V., Nagesh Kumar, D. and Dey, S. (2004) End Depth Computation in Inverted Semicircular Channels Using Anns. *Flow Measurement and Instrumentation*, **15**, 285-293. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2004.06.003>
- [13] Roushangar, K., Akhgar, S., Salmasi, F. and Shiri, J. (2016) Neural Networks- and Neuro-Fuzzy-Based Determination of Influential Parameters on Energy Dissipation over Stepped Spillways under Nappe Flow Regime. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, **23**, 57-62. <https://doi.org/10.1080/09715010.2016.1235472>
- [14] 张晓萍, 张建民. 基于 BP 神经网络的复合型挑坎体型参数反演研究[J]. 水利水电技术, 2022, 53(4): 138-147.
- [15] Jia, B. and Zhang, Y. (2023) Spectrum Analysis for Fully Connected Neural Networks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, **34**, 10091-10104. <https://doi.org/10.1109/tnnls.2022.3164875>
- [16] Liu, Z., Liu, Y., Yan, X., Liu, W., Nie, H., Guo, S., et al. (2025) Automatic Network Structure Discovery of Physics Informed Neural Networks via Knowledge Distillation. *Nature Communications*, **16**, Article No. 9558. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-64624-3>
- [17] 罗先伟. 自由跌水冲坑深度及水垫消能研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2017.
- [18] Xia, Y. and Ji, Y. (2025) Application of a Novel Metaheuristic Algorithm Inspired by Adam Gradient Descent in Distributed Permutation Flow Shop Scheduling Problem and Continuous Engineering Problems. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 21692. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01678-9>
- [19] Yang, N., Tang, C. and Tu, Y. (2023) Stochastic Gradient Descent Introduces an Effective Landscape-Dependent Regularization Favoring Flat Solutions. *Physical Review Letters*, **130**, Article ID: 237101. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.130.237101>

符号说明

ρ ——密度, kg/m^3
 $\mathbf{u}$ ——速度矢量, m/s
 T ——温度, K
 α ——体积分数

下角标

i ——方向