

赵坊朋, 崔激, 李志斌, 等. 基于固-流-热耦合的移动式曝气装置扰流增温特性[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(6): 1196-1204. ZHAO F P, CUI W, LI Z H, et al. Investigation of ice disturbance characteristics of mobile aeration device based on solid-fluid-thermal coupling[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(6): 1196-1204. (in Chinese)

基于固-流-热耦合的 移动式曝气装置扰流增温特性

赵坊朋¹, 崔激¹, 李志斌², 陈阳²

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300350; 2. 水利部南水北调规划设计管理局, 北京 100038)

摘要: 移动式曝气装置通过推流螺旋和曝气扰动水体掺混, 提升水面温度, 阻碍渠道水流结冰, 可延长寒区渠道冬季输水时间。为对移动式曝气装置在明渠水环境中的运行进行计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟, 基于固-流-热耦合模拟技术, 对不同装置曝气参数和运行条件下的明渠水流物理场进行仿真分析, 并对装置运行效果进行评价。结果表明: 移动式曝气装置对渠道水流表层温度有一定提升作用, 增加曝气速度, 可以增强水体的温度掺混效果; 曝气深度的增加能够扰动更深层的较高温水体, 但考虑岸坡影响, 推荐 1.5 m 深度的曝气参数; 增大行走纵距可以提高影响水体范围, 但会产生“低温断层区”, 最优行走纵距为 2 m; 行进速度对温度提升影响趋势先减弱后增强, 行进速度大于 2 m/s 时, 速度越大, 装置对渠道水流的扰流增温效果越好。

关键词: 冰期输水; 曝气; 水温掺混; 固-流-热耦合

中图分类号: TV133 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0119

长距离调水工程作为国家基础性设施, 对缓解受水区水资源短缺局面具有重要意义。由于显著的纬度差和南北冻融的气象条件影响, 北部地区的调水工程面临冬季渠道结冰问题。渠道冬季结冰可能会形成冰坝、冰帽和冰塞, 对渠道护坡、隧洞、节制闸、渡槽、桥墩等处的安全过流产生不利影响^[1], 同时, 由于冰体的形成, 也让输水渠道冬季运行经历流冰输水、冰盖输水等复杂工况^[2-4], 渠道输水效率严重受限^[5]。渠道输水结冰问题不可避免, 兼顾工程安全和输水效率已成为工程输水运行的重大挑战^[6-8]。

为保证渠道安全, 提高冬季输水效率, 学者们开展了大量研究并提出相应措施。一是输水调度, 根据气候、渠道运行特征等对渠道输水进行调控, 在保障工程安全下考虑输水效率的提高。穆祥鹏等^[9]提出水位-流量串级反馈控制算法建立渠道冰期运行控制模型, 控制冰盖下安全输水并实现冬季适量供水目标。Karl 等^[10]利用 RIVICE 模型模拟了多芬

河不同冻结时期的河流水位, 确定多芬河沿岸冬季洪水输送的安全。段文刚等^[11]将南水北调中线总干渠多年冰期观测数据与渠道调度方案结合分析, 提出了预防冰害水流控制条件。输水调度能够保证河道整体调水安全, 最大程度避免大面积冰害的发生, 但多数的调度方法目的是让河流快速形成冰盖, 保证冰盖下安全输水, 这就使输水效率大大降低, 例如在南水北调大清河流域, 冰盖下的输水使河段流量降低了 40%~52%。二是物理措施防冰, 实施各种措施阻碍冰的形成, 提高工程安全输水流量。秦子鹏等^[12]开展抽水融冰试验, 分析了不同水井运行方式下整个引水明渠沿程水温的变化情况, 使明渠水温得到显著改善, 延缓了渠道结冰时间。江浩源等^[13]在北疆试验基地验证了风光能蓄热增温技术系统的实际应用效果, 利用风能太阳能提高渠基土温进而延缓渠道表面结冰。王毓国等^[14]对输水渠道电热防冰技术的加热效果和运行功率进行计算研究, 并在某渠道进行现场试验, 为提高防冰效

收稿日期: 2024-01-10 修回日期: 2024-09-24 网络出版时间: 2024-09-26

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240925.1752.012>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202503)

作者简介: 赵坊朋(2001—), 男, 山西晋中人, 主要从事水工结构工程研究。E-mail: z_fangpeng@tju.edu.cn

通信作者: 崔激(1977—), 男, 山东诸城人, 教授, 博导, 主要从事水工结构工程研究。E-mail: cuiwei@tju.edu.cn

率提供了理论基础。另外曝气方法能够对水体的垂直分层产生影响^[15-16],被大量应用于闸门桥墩处保护水工建筑物。输水调度与物理防冰技术应用能够在保护河道安全的同时最大程度保证河道输水效率。其中,移动式曝气扰冰^[17]是提出的一种新型物理防冰方法,通过推流曝气的方式实现水体掺混,引起水面温度升高,同时装置的移动特性使扰动水体范围更大,进而有效延缓甚至阻碍渠道水面结冰,保证输水流量。移动式曝气作为增加长距离河道输水工程冬季输水能力的主动措施,其工作适应条件和扰流增温效果尚缺少有针对性的研究。

计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)数值模拟是流体研究的可靠手段。Wang等^[18]结合重叠网格方法和CFD方法模拟预测轮船倒转螺旋桨对停泊的影响。Ma等^[19]基于重叠网格技术提出了改良的多相流数值模拟方法,能够有效处理结构撞击水波的大振幅运动。基于重叠网格方法的固-流-热耦合技术能够很好地处理固体对流体的作用,反应水体物理场的变化情况。

因此,基于CFD固-流-热耦合技术对移动式曝气扰冰装置的扰流增温效果进行仿真模拟,研究不同装置曝气参数、运行条件下水面温度变化情况,为优化装置及运行提供参考。

1 基本原理

1.1 曝气扰流增温原理

冬季河流失热结冰的主要原因是水体和外界的热交换。由于外界环境下的热交换,渠道水流会发生过冷,渠道表面温度会降到0℃以下,在湍流作用下形成“种子晶体”诱导冰的形成,冰水平衡后温度恢复到0℃,进一步形成冰体^[20-21]。水体过冷事件中,水面温度是冰晶形成的关键因素之一^[22]。

试验模拟热交换示意图如图1。在平稳的水流以及大气与水体温差较小的条件下,水体温度是分层的,水体底部温度为4℃^[23-24]。移动式曝气装置主要核心构件为曝气管和推流螺旋。装置基于水体的逆分层现象,通过曝气的方式将上下层水体进行掺混,同时加入螺旋推流增强掺混效果,利用水层之间的能量交换,补充表层水体的热量损失,阻碍过冷事件中冰晶的形成。同时,装置的可移动性能够扩大有效工作范围,进而推迟渠道表面的结冰时间,保证渠道正常输水流量。

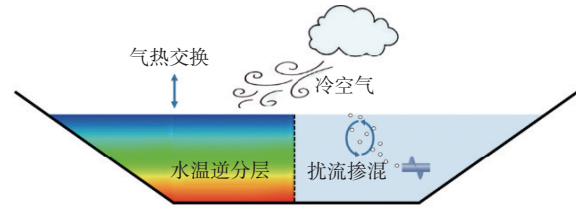


图1 试验模拟热交换

Fig. 1 Schematic diagram of simulated heat exchange

1.2 固-流-热耦合理论

数值模拟采用CFD模拟技术,利用流体力学计算软件Fluent对装置的运行过程和水体的场变化进行模拟。模拟通过流固单向耦合实现曝气构件对流体流场的影响,并采用热流耦合实现对水气热交换条件下水体温度场变化的模拟,耦合过程见图2。

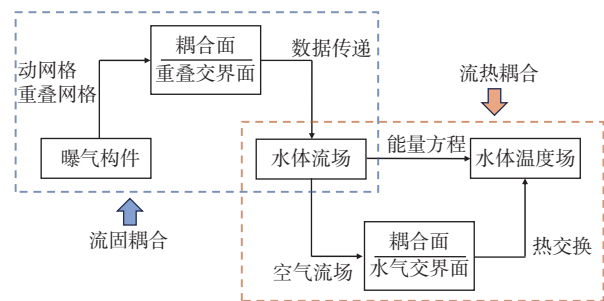


图2 固-流-热耦合过程

Fig. 2 Solid-fluid-thermal coupling process

在Fluent计算软件中,通过动网格算法模拟固体边界的运动,将曝气构件轮廓视为不可变形的固体边界,采用重叠网格方法和动网格算法相结合的方式模拟运动边界对水体流场的影响,进而达到流固耦合的目的。重叠网格技术将曝气构件与水体分为两套网格进行嵌套,两套网格相互独立,在重叠交接面处进行数据传递。重叠交界面的信息交互采用线性插值的方法^[25-26]。

流体力学方法不仅需计算控制流体流动的基本物理量质量与动量,还需对能量进行分析。这些量遵循质量守恒[式(1)~式(3)]、动量守恒[式(4)~式(6)]和能量守恒[式(7)]方程,表达式分别为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (1)$$

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (2)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (3)$$

式中: t 为时间,s; ρ_m 为混合物密度, kg/m^3 ; ∇ 为算符

矢量, $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$; \vec{v}_m 为混合物质量平均速度, m/s; α_k 是 k 相的体积分数; ρ_k 为 k 相的密度, kg/m^3 ; \vec{v}_k 为 k 相的速度, m/s。在本研究中 $n=2$, 仅有空气和水两相。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = \nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} - \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \quad (4)$$

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (5)$$

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (6)$$

式中: μ_m 为混合物的黏度, Pa/s; $\nabla \vec{v}_m$ 是速度梯度, 1/s; \vec{F} 是体力, N/m^3 ; $\vec{v}_{dr,k}$ 为次相 k 的偏移速度, m/s。当前的混合模型中, 假定相间无滑动, 两相偏移速度均为 0。

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} E) = \rho f \vec{v} + \nabla \cdot (P \cdot \vec{v}) + \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (7)$$

式中: E 是流体的总能量密度, J/kg; \vec{v} 是流体的速度矢量, m/s; f 为单位体积的体积力, N/m^3 ; P 是应力张量, N/m^2 ; k 是流体的传热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T 是温度, K; ∇T 是温度梯度, K/m; S 为流体的内热源及由于

黏性作用流体机械能转换为热能的部分, W/m^3 。

建立水气交界面处的水气热交换来实现水体和大气之间的流热耦合。不同风速下冰期河湖与大气热交换系数 h_{sa} ^[27] 可描述为

$$h_{sa} = (1 + 0.25V_z)h_{sa,0} \quad (8)$$

式中: V_z 为风速, 文中为 1 m/s; $h_{sa,0}$ 为风速为 0 时热交换系数, 参数选取参考中国北部调水工程北京、保定、沈阳、包头段的平均热交换系数 $h_{sa,0} \approx 10.0 \text{ K}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。

2 模型构建及模拟方案

2.1 计算模型

2.1.1 几何模型和重叠网格

将水流运行环境和曝气构件分离构建几何模型并进行网格剖分。在计算网格的建立过程中, 采用 ANSYS 中 scdm 模块对模型进行边界命名, 用 Fluent-Mesh 对网格进行自动剖分, 兼顾模型结构和动网格计算特性, 网格单元采用多面体单元。图 3(a) 为单个曝气构件模型图, 由螺旋叶片和圆柱管 2 部分组成, 圆柱管进行曝气, 螺旋叶片旋转扰动水体。2 个构件划分网格数量为 19 万个。

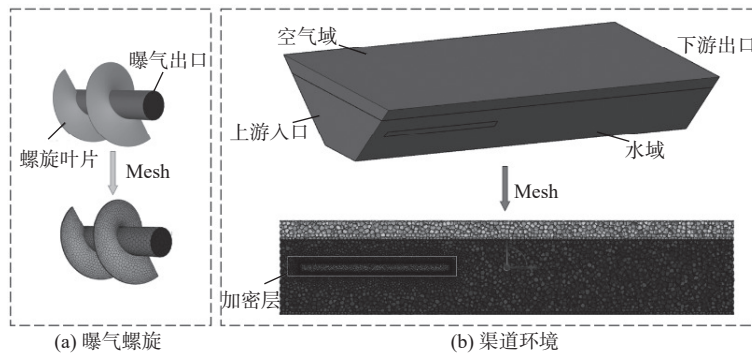


图 3 计算网格划分

Fig. 3 Calculate meshing

运行环境几何模型见图 3(b)。根据实际情况构建梯形断面渠道水体及大气环境。渠道水域长 24 m, 宽 24 m, 渠底宽 8 m, 水域高度为 4 m; 空气域高 0.5 m。考虑模拟过程中曝气构件运动区域的动网格计算, 为提高模拟计算精度, 在构件运动区域进行网格加密, 环境模型总网格划分数量为 400 万个。

利用重叠网格技术将两者结合, 运行环境作为背景网格, 曝气构件为前景网格, 对前景网格进行动网格设置进而模拟曝气构件在水体中移动运行。

2.1.2 边界条件

根据所要模拟的物理场设置边界条件并进行动

网格设置实现初始化场模拟。

渠道水域。渠道上游入口为水相入口, 定义水相入口为速度入口, 速度设置为 0.35 m/s, 温度采用 UDF 设置为水面到渠底 0~4 °C 梯度分布, 液相体积分数为 1; 渠道下游出口为水相出口, 定义出口为压力出口, 压力采用 UDF 按水力梯度设置水压, 回流全部为液相; 渠道岸坡和渠道用无滑移壁面来表示; 水面边界为与空气接触的内部交界面; 水体整体初始化速度和温度与入口一致, 从而实现水体流场和温度场的模拟。

大气环境。大气上游入口为气相入口, 定义为

速度入口,速度为 0.5 m/s,温度设定为我国北方某城市一月平均气温 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[28];其余不与岸坡接触的边界设置为压力出口,表压为 0,回流相为气相;初始化速度和温度与入口一致,模拟流动冷空气环境。

曝气构件。曝气构件于背景环境进行重叠结合,结合边界设置为重叠交界,并根据重叠边界建立重叠区域;曝气条件通过设置曝气入口边界进行调整,曝气管入口为气相速度入口,速度为 0.5 m/s(装置运行模拟工况),温度为 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$;螺旋叶片边界设置为无滑移壁面;对整体前景构件网格进行动网格设置,分别定义相应的重心,采用 UDF 进行两个构件运行参数的导入,UDF 内容根据模拟方案中运行路线进行编写,从而实现整体推流曝气运行的模拟。

2.1.3 数值求解方法

模型应用 Fluent 有限体积法进行求解,曝气扰动属于欧拉多相流的范畴,多相流模型采用混合模型。流体流动速度变化时会出现湍流波动,从而引起各流体介质间动量、能量以及质量浓度的交换,采用适用范围更加广泛的 SST $k-\omega$ 模型表示。求解设置中,为保证计算稳定,将压力的欠松弛因子修正到 0.2;采用 SIMPLE 算法进行压力速度耦合;空间离散化中,梯度格式采用 Least Squares Cell-Based,压力采用 PRESTO!格式,动量方程、体积分数、湍流动能、比耗散率均采用一阶迎风格式。由于网格数量多,模拟计算采用超算并行计算。

2.2 数值模拟方案

研究曝气装置在一定区域范围内的扰流增温效果,针对曝气装置自身曝气参数和运行参数两方面进行模拟方案设计。

2.2.1 曝气参数

考虑曝气速度 v_0 和曝气位置 h ,通过改变曝气入口边界的速度参数和曝气构件模型位于水下的深度调整两个参数。模拟速度参数分别为 0.3、0.5 和 0.7 m/s,曝气位置分别为水下 0.5、1.0、1.5 和 2.0 m,基于控制变量法对参数组合设计,模拟方案见图 4。每组计算时间均为 20 s。在对物理性能的模拟中,

曝气构件仅在设计空间位置处进行推流曝气,根据水体表面平均温度、最高温度及温度分布分析其曝气效果。

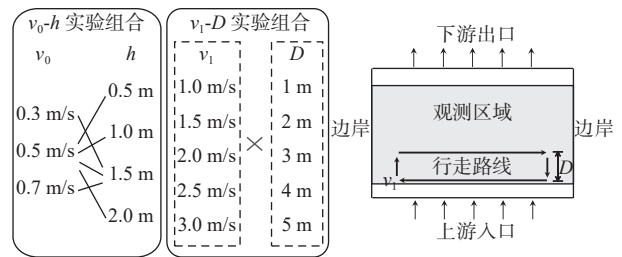


图 4 模拟方案

Fig. 4 Simulation scheme

2.2.2 运行参数

考虑行进速度 v_1 和行走路线纵距 D ,通过用户自定义函数设置动网格的运动参数调整不同的行进速度和行走纵距。行进速度分别为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m/s,行走纵距分别为 1、2、3、4、5 m,对 2 个参数进行 5×5 组合设计,共 25 种设计工况,每组计算时间为 45 s。装置物理特性依据 v_0-h 组合模拟结果进行选取。通过观察特定区域水面的温度变化情况分析装置运行扰流增温效果见图 4。

3 计算结果分析

3.1 曝气参数分析

按照方案一对 2 个曝气参数的扰流增温效果进行模拟计算。曝气装置在长 10 m、宽 5 m、深 4 m 的六面体水域中运行,根据水面温度变化分析不同参数的扰流增温效果。

3.1.1 曝气速度分析

曝气口位于水下 1.5 m 处,调节曝气速度观察对水体的影响。图 5(a)为 $v_0=0.5\text{ m/s}$ 时流场的变化情况。构件叶片螺旋推流和曝气共同作用下,水体流场发生明显变化。构件向下游的范围的流速提高近 0.1 m/s,在气泡上升的路径上速度提高 0.1~0.3 m/s。气泡对路径偏上游区域的水体存在反向的扰动,流速有所下降,路径及下游的水体速度增加明显。速度的提升可阻碍水面冰层的形成。

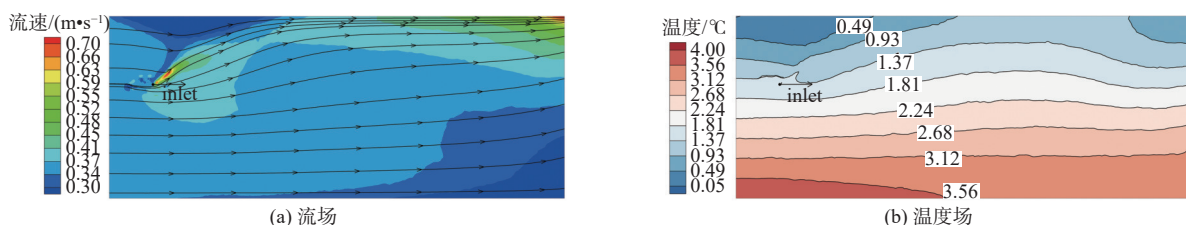


图 5 竖直断面流场与温度场分布

Fig. 5 Vertical cross-section flow and temperature field distribution

流场变化会引起温度场变化,分布见图 5(b)。曝气引起水体间温度的掺混,水体温度场沿着流线方向发生波动。水体靠近水面部分温度显著提高,水面绝大部分区域温度升高 0.3 °C,局部最高温度有 1 °C 的提升。可见,通过曝气对水面温度具有良好的提升效果。

图 6 为不同曝气速度曝气过程中水面的平均温度变化曲线。在运行前 4 秒为气泡上升阶段,水面温度的升高基本由水层间的热交换造成,3 种工况水面温度变化基本一致。4~6 s 时间段内,温度有微小下降,主要是因为低温的气泡先达到水面,进而引起了水面温度的微小波动。6 s 之后气泡带动水体紊动、掺混,水面温度开始逐渐升高,曝气速度越大,对水体的扰动越剧烈,水体温度掺混效果越好,水面温度上升也更高。

图 7 为不同曝气速度下水面的温度分布,结合温度变化曲线分析可知:随着曝气速度的增加,水面温度的提升效果逐级增强。在曝气速度为

0.3 m/s 时,水面平均温度升高 0.38 °C,水面温度最高温度升高 0.80 °C。在曝气速度为 0.5 m/s 时,局部最大温度升高 1 °C,水面整体平均温度上升 0.45 °C。在曝气速度达到 0.7 m/s 时,水面温度的提升效果最为显著,最大温升 1.10 °C,水面平均温度达到 0.53 °C。

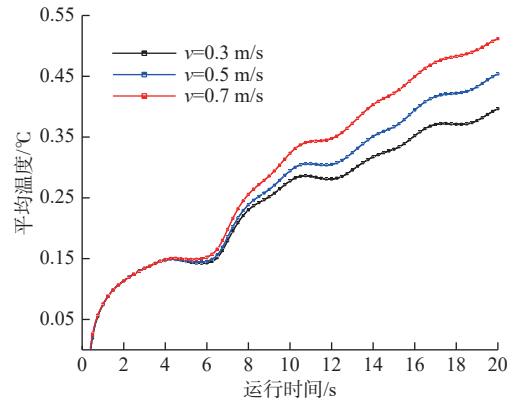


图 6 不同曝气速度下水面平均温度变化曲线
Fig. 6 Variation curves of average water surface temperature under different aeration rates

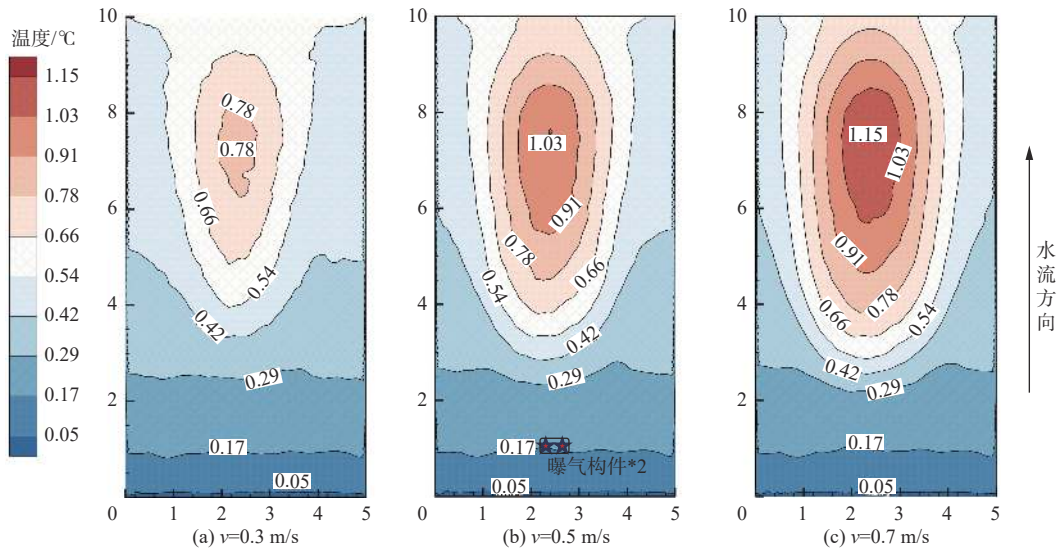


图 7 不同曝气速度下水面的温度分布

Fig. 7 Temperature distribution of the water surface at different aeration rates

3.1.2 曝气深度分析

曝气深度越大,所能扰动的水层温度越高。对曝气速度为 0.5 m/s,曝气深度为水下 0.5、1.0、1.5 和 2.0 m 的工况分别进行计算,得到在不同位置曝气引起的水面温度变化。

不同曝气位置水面平均温度变化曲线见图 8。运行前 14 s 时间内不同曝气深度引起的表层水温升高差别不大。从 14 s 开始,曝气深度越大,表层水温升高越明显。但同时也发现,0.5 m 和 1.0 m 的曝气深度升温效果差异不显著,大于 1.5 m 之后,升温显

著增加。需要指出的是,受渠道坡度影响,曝气口深度越大,曝气装置运行时距渠坡距离也将增加,渠坡附近扰流增温效果也会减弱,因此,综合考虑扰流增温效果和渠坡影响,推荐 1.5 m 为适宜的曝气深度。

3.2 运行参数分析

按照实验方案二给出的 25 种工况展开数值模拟,探究纵距和速度 2 个路径行走参数与扰流增温效率之间的关系。

3.2.1 行走纵距分析

图 9 为在行走速度 2.5 m/s、不同行走纵距运行

后水面的温度分布情况,装置运行起点已在图中标出。曝气装置移动运行使区域水体的温度发生掺混,水面升温效果显著。从图 9 可以看到,水面不同区域存在约 1.10 ℃ 的温度差,温度较高区域集中在渠道中心,最低区域为上游进水处。对比 $D=1、2\text{ m}$ 的温度分布可以看出,较大行走纵距下温度更高的区域大且集中,等温线密集,扰流增温效果更好。当 D 增加到 5 m 时,受水流流动影响,扰动前期影响的水体即将流出观测区且无法及时对上游新流入观测面的水体进行扰动,水面温度提升范围反而有所减少,造成了如图所示的较大的低温断层区。

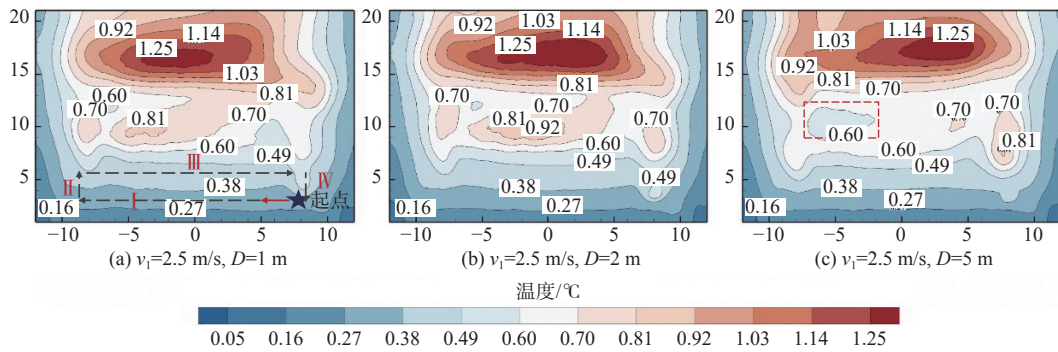


图 9 不同纵距下温度分布

Fig. 9 Temperature distribution at different longitudinal distances

图 10 为各行走速度参数在不同纵距工况下的水面平均温度曲线。在行进速度低的工况下,水面温度的提升效果对行走纵距的敏感性较小,维持在相对平稳的水平。在行进速度高的工况下,水面平均温度随着纵距的增加呈现先升高后降低的趋势。纵距 $D=2\text{ m}$ 时出现峰值,后随着纵距的增加,平均温度逐渐变低,甚至在 $D=5\text{ m}$ 的工况下,水面温度提升效果要小于 $D=1\text{ m}$ 的工况,这与上述提到的低温断层区有密切的关系。

3.2.2 行走速度分析

选取纵距 $D=3\text{ m}$ 、不同行走速度运行后水面温度分布情况见图 11。行走速度 $v_1=1.0\text{ m/s}$ 时,在水流流速的作用下,水面明显升温区呈倾斜分布;由于在行走路径 I 段末到 III 段扰动区域出现了重叠,水面左侧位置出现升温集中区域。当行走速度增加到 1.5 m/s 时,可以看到,温度掺混效果有所减弱,原因是行走速度的增大,局部范围内的曝气量减少。同时,由于行走速度的增加,发生二次扰动的区域增加,升温区呈现出从倾斜分布转变为横向分布的趋势。随着行走速度的增大,二次扰动的对水体掺

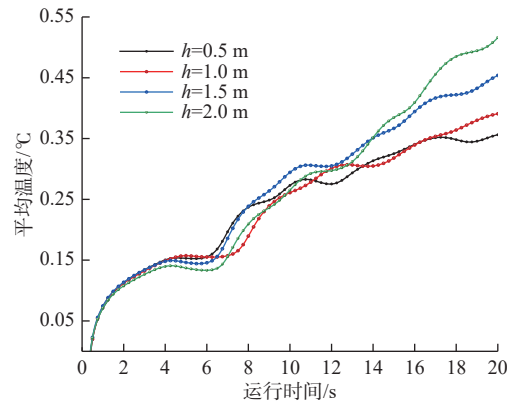


图 8 不同曝气位置下水面平均温度变化曲线

Fig. 8 Variation curves of average water surface temperature at different aeration positions

混的积极效果大于由局部曝气量减少带来的消极影响,水面升温区逐渐扩大,效果也越来越好。到 $v_1=3.0\text{ m/s}$ 时,在模拟时间内沿路径 I~IV 可循环行走将近 4 次,水面观测区平均温度提升 $0.669\text{ }^\circ\text{C}$ 。全部工况下水面平均温度结果见表 1,不同纵距下行走速度对温度提升影响趋势基本相同,先减弱后增强。

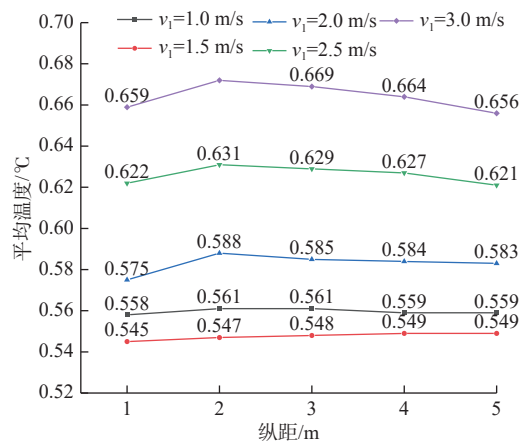


图 10 不同纵距工况下的水面平均温度曲线

Fig. 10 Average water surface temperature curves under different longitudinal conditions

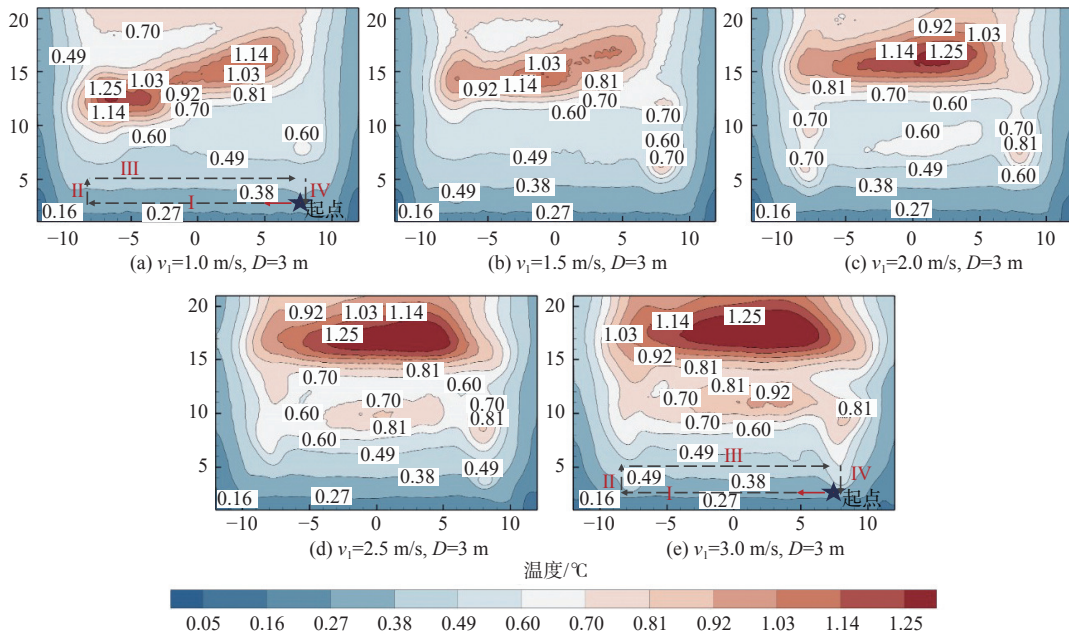


图 11 不同行走速度温度分布

Fig. 11 Temperature distribution plot for different travel speeds

表 1 平均温度

运行参数	单位: °C				
Tab. 1 Average temperature	D=1 m	D=2 m	D=3 m	D=4 m	D=5 m
$v_1=1.0$ m/s	0.558	0.561	0.561	0.559	0.559
$v_1=1.5$ m/s	0.545	0.547	0.548	0.548	0.549
$v_1=2.0$ m/s	0.575	0.588	0.585	0.584	0.583
$v_1=2.5$ m/s	0.622	0.631	0.629	0.627	0.621
$v_1=3.0$ m/s	0.659	0.672	0.669	0.664	0.656

4 结论

基于 CFD 固-流-热耦合模拟技术,分析曝气扰冰装置的曝气速度、曝气深度、行进速度和行走纵距 4 个参数对水面温度变化影响,研究结论如下:

增加曝气速度可以增强水体的掺混效果。曝气速度快,曝气量大,对水体的扰动越剧烈,水面温度的提升越高。

曝气深度能够提高温度提升的上限,深层的水温高,掺混引起的温度提升也越大。但是,由于更深处的曝气产生的扰动所要抵抗的水压更大,在曝气量不够大的情况下,深层曝气引起的扰动会随着水流向上迁移而逐渐变平缓,同时综合考虑坡度影响,推荐 1.5 m 深度为适宜装置参数。

扩大行走纵距能够增大扰动水面的范围,在局部区域会进行二次掺混,进而提高水面温度,但过大纵距会导致低温断层区的出现,不利于扰流增温效率的提高。推荐装置运行的适宜行走纵距

为 2 m。

在速度小于 2 m/s 时,较慢的行走速度局部曝气量大,温度掺混效果反而较强;在速度大于 2 m/s 后,速度加快使装置在行走路径上进行二次扰动,对增温效果的提升大于局部曝气量减少产生的削弱影响,速度越大水面温度提升效果越好。不同纵距下行走速度对温度提升影响都呈现先减弱后增强的趋势。

需要指出的是,上述参数都与装置重量、能耗等密切相关,实践中宜采取优化算法进行多方案深度比选。

参考文献:

- [1] 韩红卫,周家宝,李昱,等.黑龙江上游开江期河道特征对冰流速度的影响[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(3):581-588. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0058.
- [2] 黄国兵,杨金波,段文刚.典型长距离调水工程冬季冰凌危害调查及分析[J].南水北调与水利科技,2019,17(1):144-149. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0020.
- [3] 刘孟凯.南水北调中线工程总干渠冰期输水调控仿真研究[J].农业工程学报,2019,35(16):95-104. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.16.011.
- [4] 温世亿,杨金波,段文刚,等.南水北调中线 2014—2015 年度冬季冰情原型观测[J].人民长江,2015,46(22):99-102. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.22.023.

- [5] 潘佳佳,郭新蕾,王涛,等. 基于全气象参数的南水北调中线冬季水气热交换模型 [J]. *水利学报*, 2024, 55(2): 179-189. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20230287](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20230287).
- [6] 杨开林. 长距离输水水力控制的研究进展与前沿科学问题 [J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 424-435. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20150824](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20150824).
- [7] 陈维江,左丽,黄明海,等. 南水北调中线工程总干渠冬季大流量输水水温调控措施 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(6): 1064-1071. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdk.2023.0103](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdk.2023.0103).
- [8] 练继建,杨德明,赵新. 南水北调中线工程冬季输水冰情风险研究 [J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(1): 63-70. DOI: [10.3880/j.issn.1006-7647.2023.01.010](https://doi.org/10.3880/j.issn.1006-7647.2023.01.010).
- [9] 穆祥鹏,陈文学,崔巍,等. 长距离输水渠道冰期运行控制研究 [J]. *南水北调与水利科技*, 2010, 8(1): 8-13. DOI: [10.3969/j.issn.1672-1683.2010.01.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-1683.2010.01.003).
- [10] KARL E L, MAURICE S, RICHARD W. Modelling ice cover formation of a lake-river system with exceptionally high flows[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 82: 36-48. DOI: [10.1016/j.coldregions.2012.05.006](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.05.006).
- [11] 段文刚,黄国兵,杨金波,等. 长距离调水明渠冬季输水冰情分析与安全调度 [J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(6): 96-104. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdk.2016.06.017](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdk.2016.06.017).
- [12] 秦子鹏,宗全利,田艳,等. 寒区引水明渠抽水融冰试验 [J]. *武汉大学学报*, 2017, 50(2): 168-173. DOI: [10.14188/j.1671-8844.2017-02-002](https://doi.org/10.14188/j.1671-8844.2017-02-002).
- [13] 江浩源,王正中,孟晓栋,等. 高寒区输水渠道渠基蓄热增温防冻胀技术原型试验 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2022, 20(5): 9-16. DOI: [10.3969/j.issn.1672-1144.2022.05.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-1144.2022.05.002).
- [14] 王毓国,张爱军,靳芮揆,等. 长距离输水渠道电热防冰冻技术现场试验及功率计算 [J]. *农业工程学报*, 2023, 39(12): 114-122. DOI: [10.11975/j.issn.1002-6819.202302018](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.202302018).
- [15] MCCORD S, SCHLADOW S, MILLER T. Modeling artificial aeration kinetics in ice-covered lakes[J]. *Journal of Environmental Engineering-ASCE*, 2000, 126(1): 21-31. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2000\)126:1\(21\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2000)126:1(21)).
- [16] LIMA N, ZHU D, RAJARATNAM N, et al. Dissolved oxygen downstream of an effluent outfall in an ice-covered river: Natural and artificial aeration[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2007, 133(11): 1051-1060. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2007\)133:11\(1051\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2007)133:11(1051)).
- [17] 崔激,吕鸿贤,钟慧蓉,等. 扰冰设备及基于扰冰设备的扰冰方法 [P]. 天津市: CN202310242155.5, 2024-10-01.
- [18] WANG J, WAN D. CFD study of ship stopping maneuver by overset grid technique[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 197: 106895. DOI: [10.1016/j.oceaneng.2019.106895](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106895).
- [19] MA Z, QIAN L, M FERRER P, et al. An overset mesh based multiphase flow solver for water entry problems[J]. *Computers & Fluids*, 2018, 172: 689-705. DOI: [10.1016/j.compfluid.2018.01.025](https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2018.01.025).
- [20] SPYROS B. Advances in river ice hydrology [J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14(9): 1613-1625. DOI: [10.1002/1099-1085\(20000630\)14:9<1613:aid-hyp73>3.0.co;2-v](https://doi.org/10.1002/1099-1085(20000630)14:9<1613:aid-hyp73>3.0.co;2-v).
- [21] ASHTON G. Suppression of river ice by thermal effluents[R]. USA: Defense Technical Information Center, 1979.
- [22] DALY S, BARRETTE P. Prevention of water intake blockage by ice during supercooling events[J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2023, 37(1): 03122001. DOI: [10.1061/jcrgei.Creng-676](https://doi.org/10.1061/jcrgei.Creng-676).
- [23] MATTI L. Freezing of Lakes and the Evolution of Their Ice Cover[M]. New York: Springer, 2015: 301.
- [24] PAUL D-BARRETTE. Understanding frazil ice: The contribution of laboratory studies[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, 189: 103334. DOI: [10.1016/j.coldregions.2021.103334](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103334).
- [25] CHANDAR D. On overset interpolation strategies and conservation on unstructured grids in OpenFOAM[J]. *Computer Physics Communications*, 2019, 239: 72-83. DOI: [10.1016/j.cpc.2019.01.009](https://doi.org/10.1016/j.cpc.2019.01.009).
- [26] BECERRA D, ZAMBRANO A, ASUAJE M, et al. Experimental and CFD modeling of a progressive cavity pump (PCP) using overset unstructured mesh part 1: Single-phase flow[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2024, 234: 212602. DOI: [10.1016/j.geoen.2023.212602](https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212602).
- [27] 杨开林. 冰期河湖与大气的热交换模型 [J]. *水利学报*, 2021, 52(5): 556-564. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20200550](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20200550).
- [28] 段文刚,郝泽嘉,杨金波,等. 南水北调中线工程2014—2022年冬季水温与冰盖观测分析 [J]. *水利学报*, 2023, 54(9): 1025-1037. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20221018](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20221018).

Investigation of ice disturbance characteristics of mobile aeration device based on solid-fluid-thermal coupling

ZHAO Fangpeng¹, CUI Wei¹, LI Zhihong², CHEN Yang²

(1. National Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Bureau of South to North Water Transfer of Planning, Designing and Management, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: Long-distance water conveyance projects are essential in solving northern China's water resource shortage problem. However, the complex water transport conditions caused by river icing in winter seriously affect the channel's water transport capacity and the project's safe operation. Balancing the safety issues with water delivery efficiency has become a significant challenge for engineering water delivery operations. Increasing the surface water temperature to delay ice formation is possible by utilizing a mobile aeration device and this ensures the safety of winter operations and enhances the water conveyance capacity of the long-distance water conveyance project. However, as an active measure to increase the winter water delivery capacity of channel engineering, its working adaptability and disturbance heating effect still lack targeted research.

To reflect the changes in water characteristics under aeration operation, computational fluid dynamics numerical simulation could be used as a reliable means of fluid research. The solid-fluid-thermal coupling technology is used to simulate the rotation of spiral blades and aeration. Simultaneously considering the heat exchange between water and atmosphere, the changes in water temperature caused by changes in the flow field are calculated. During the simulation, overlapping grid technology is introduced to optimize the dynamic grid calculation, ensuring computational efficiency and accuracy. The initial velocity distribution, temperature distribution, device operating speed, and operating path of the fluid through user-defined functions are set. Two different calculation schemes are designed to simulate and analyze the water characteristics under different aeration speeds, aeration depths, longitudinal distances, and walking speeds. The average temperature change curve and the average water surface temperature distribution map are drawn. The changes in water characteristics under different device parameters are changed and flow operating conditions are pushed, providing a basis for device parameters and operational design.

The results are as follows: (1) Increasing the aeration rate within the safe allowable range can enhance the mixing effect of water. The aeration rate characterizes the size of the aeration amount. A higher aeration rate results in more significant disturbance to the water body and a higher increase in water surface temperature. (2) The aeration depth can increase the upper limit of temperature increase. A higher deep-water temperature can cause a greater temperature to increase as well. The disturbance caused by deeper aeration has a greater resistance to water pressure. In the case of insufficient aeration, the disturbance caused by deep aeration will gradually flatten with the upward migration of water flow. Considering the influence of slope, a depth of 1.5 m is recommended as the appropriate device parameter. (3) The optimal walking distance for operation is 2 m. Expanding the distance can increase the range of disturbed water surface, and secondary mixing will be carried out in local areas to increase water surface temperature. However, excessive longitudinal distance can lead to the appearance of low-temperature fault zones, which is not conducive to improving the efficiency of turbulent flow heating. (4) The trend of the effect of walking speed on temperature increases first weakens and then strengthens. When the speed is less than 2 m/s, the slower walking speed results in higher local aeration and a more substantial temperature mixing effect. After the speed exceeds 2 m/s, the acceleration of the speed causes the device to undergo secondary disturbance on the walking path. The improvement of the warming effect is more significant than the weakening effect caused by the reduction of local aeration.

Key words: water transfer in freezing period; aeration; water temperature mixing; solid-fluid-thermal coupling