

基于动网格 6DOF 模型的框架式流速仪水力特性数值模拟与明渠测流速率常数预测

唐 渊¹ 申丽霞¹ 吴建华¹ 张玉胜¹ 成一雄² 胥云彬¹

(1. 太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024; 2. 太原理工大学土木工程学院, 太原 030024)

摘要: 为分析明渠内框架式流速仪流场特性与运动姿态,同时对流速仪倍常数 K 和摩阻系数 C 进行率定,根据不可压缩流体流动的 Navier-Stokes 方程和 SST $k-\omega$ 湍流模型,结合 VOF 多相流模型,建立动态网格下的 6 自由度 (6DOF) 刚体动力学耦合数值仿真模型,对水冲击流速仪旋桨使之被动旋转过程进行了仿真,分析了流速仪在不同位置对流速仪倍常数 K 和摩阻系数 C 的影响规律。结果表明:采用动网格 6DOF 模型可以较好地模拟框架式流速仪在明渠的流动状态,仿真结果可靠性较高;通过对不同时刻转速与流速拟合曲线分析可知,流速仪位置不同会影响流速仪摩阻系数 C ,对流速仪倍常数 K 影响不大。研究结果可为进一步研究框架式流速仪优化和不同含沙水流条件下对流速仪的磨损提供参考。

关键词: 明渠测流; 水力特性; 框架式流速仪法; 动网格 6DOF 仿真模型; 速率常数预测

中图分类号: TV93; TV136 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2024)09-0371-11

OSID:



Numerical Simulation of Hydraulic Characteristics of Frame-type Current Meter Based on Dynamic Grid 6DOF Model and Prediction of Flow Measurement Rate Constant in Open Channel

TANG Yuan¹ SHEN Lixia¹ WU Jianhua¹ ZHANG Yusheng¹ CHENG Yixiong² XU Yunbin¹

(1. College of Water Resource Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

2. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: A six degrees of freedom rigid body dynamics coupled numerical simulation model under dynamic grid was established, and the passive rotation process of the propeller caused by water impacting the frame-type current meter was simulated. It was based on the Navier-Stokes equation for incompressible fluid flow and the SST $k-\omega$ turbulence model, combined with the VOF multiphase flow model. This was done to analyze the flow field characteristics and motion posture of the frame-type current meter in the open channel, while calibrating the multiplier constant K and friction coefficient C . In this way, this can analyze the influence of different positions of the current meter on the multiplier constant K and friction coefficient C . The results showed that the use of the dynamic grid 6DOF model can effectively simulate the flow state of the frame-type current meter in open channels, and the simulation results were highly reliable. By analyzing the fitting curves of rotational speed and flow velocity at different times, it can be concluded that the different positions of the current meter would affect the magnitude of the friction coefficient C of the current meter, and it had little effect on the multiplication constant K of the current meter. This achievement can provide theoretical basis and technical support for the construction of digital twin irrigation areas and the measurement of open channel water in irrigation areas. The research results can provide necessary references for further research on the optimization of frame-type current meter and the wear of current meters under different sediment flow conditions.

Key words: open channel flow measurement; hydraulic characteristics; frame-type current meter method; dynamic grid 6DOF simulation model; numerical simulation; rate constant prediction

收稿日期: 2024-05-15 修回日期: 2024-06-30

基金项目: 山西省基础研究计划(自由探索类)项目(20210302123169、202203021212271)、山西省高等学校科技创新项目(2021L020、2022L033)、太原理工大学校级科学研究基金项目(2022QN055)和山西省研究生教育教学管理改革项目(2023JG031)

作者简介: 唐渊(2000—),男,硕士生,主要从事供水工程理论与技术研究,E-mail: 1292395498@qq.com

通信作者: 吴建华(1964—),男,教授,博士,主要从事供水工程理论与技术研究,E-mail: 1004566313@qq.com

0 引言

灌区水的输送主要分为管道输送和明渠输送两种主要方式。管道输水作为封闭有压流输水的一种,流量测量方法已经十分规范。明渠输水作为无压流,水流大都为紊流,流动过程中常产生水气交界面,使得明渠流量的获取较为困难。目前量水方法包括建筑物和设备型量水两大类。各量水方法都有其特定的适用范围和条件,例如:巴歇尔槽量水精度高,适用范围大,观测方便,但结构复杂,造价较高,且会影响渠道过水能力;超声流量计测流精度较高,安装方便简洁,智能化程度高,但在水位变化较大、水深较深、流态复杂的断面布设多层测速声路成本较高;电磁流量计精度高,测量范围广,结构简单,易维护,但测量精度会受到外部磁场干扰,同时对液体介质的导电性有一定要求;雷达流量计适用范围广,抗干扰能力强,稳定性较好,适用于多种流体,但安装和使用复杂且成本较高。在明渠测流中,流速仪法仍是当下量水应用最广泛及精确度最高的方法。流速仪法测量结果精度高,但也存在自动化水平低的缺点,因此对框架式流速仪的水力特性进行数值模拟,对优化量水设备性能、提升测量精度有重要意义。

现有的量水设施在实际工作运行中无法做到精确测量,其一直也是国内外学者研究的重点。梁慧真等^[1]利用手持式声学多普勒流速仪探究了明渠非标准断面法测流的水位流量关系曲线率定问题;王宝贺等^[2]将垂线平均流速与垂线水面处流速比值作为流量系数,提出了基于水面一点法的明渠流量计算方法;杨洋等^[3]研究了量水槽受阻最小的较优线型,优化后 Myring 流线型量水槽具有良好的性能和测流精度;王慧强等^[4]应用圆柱绕流原理对圆杆测流模型进行理论分析,探究了处于矩形明渠水流冲击作用影响下的测流圆杆对固定点的扭矩、水深与流量之间的理论关系;万里等^[5]设计了一种弹簧板式测流装置,通过拟合弹簧形变与渠道过水断面瞬时流量公式,计算所得流量与实测流量较为接近;SHI 等^[6]提出了一种基于 AIN 压电微机械超声换能器 (PMUTs) 的高精度双通道超声流量计;ZHOU 等^[7]研究发现提高电磁流量计传感器磁场激励均匀性可以提高电磁流量计的测量精度。此外国内外众多学者对提升流量测量算法的精度已进行了深入研究^[8-12]。在不同工作环境对测流设备的影响方面,陆永鑫等^[13]探究了新疆塔里木灌区含沙水流对测流设备精度的影响,在室内明渠水槽测试了时差法超声流量计、旋桨式流速仪、多普勒流速仪在

不同含沙量下的测流精度;段炎冲等^[14]研究发现,含沙量对明渠超声时差法测流精度有显著影响,测量误差随含沙量增大而增大;鲍子云等^[15]研究发现,在不同工作环境下超声和压力液位流量测箱均能正常工作并且具有较高的测量精度。

Fluent 是一款广泛应用于工程和科学研究领域的专业级 CFD 软件,其高度准确的数值模拟能力使其成为流体动力学研究和工程设计的重要工具之一^[16]。在明渠水流动模拟中通常使用的多相流模型为 VOF 模型,而要解决被动型动网格问题则需要借助动网格 6 自由度 (Six degrees of freedom, 6DOF) 模型,该模型允许刚体在流体中运动,并跟踪其位置和姿态随时间的变化。在这种情况下,刚体是被动的,即其运动受到流体的影响,而不会对流场产生影响。本文基于 Fluent 软件采用 VOF 模型与动网格 6DOF 模型对框架式流速仪水力特性进行数值模拟,分别模拟不同时刻下渠道内水流流态与流速仪转速,同时计算得出框架式流速仪的明渠测流速率常数,分析其规律分布,以期为明渠量水装置选择与优化提供技术支撑。

1 框架式流速仪结构与工作原理

框架式流速仪法 (Frame-type current meter method) 是根据明渠过流断面形状和流速,选用数量和技术指标符合规定的流速仪,以框架式结构安装并进行多点流速同步采集的现场测试方法。框架式流速仪的测线和测点数量应根据被测渠道断面形状、流速和面积等综合确定,流速仪布置应符合流速分布规律,可体现流速变化且不雍水,测点数量应适宜^[17]。框架式流速仪的框架及流速仪旋桨面积占被测渠道过流断面面积百分比不应大于 6%;小于 2% 时,可不考虑阻塞影响;为 2% ~ 6% 时,阻塞效应修正系数计算式^[17]为

$$K_1 = \frac{0.25S}{3}$$

(1)

式中 K_1 ——修正系数,%
 S ——阻塞面积比,即框架及流速仪旋桨面积占过流断面面积百分比,%

采用测杆安装的旋桨式流速仪包括旋桨、身架和测杆等部分,适用于较高流速、较大断面,框架式流速仪结构示意图如图 1 所示。

流速仪框架由横向连接系和纵向测杆组成,具备相应的强度和刚度,投入水中可以保持稳定状态,与流速仪可以实现快速组装和拆卸。框架式流速仪法测点采用多线多点布置。为了避免测量时出现相互干扰及保证测量结果的准确性,框

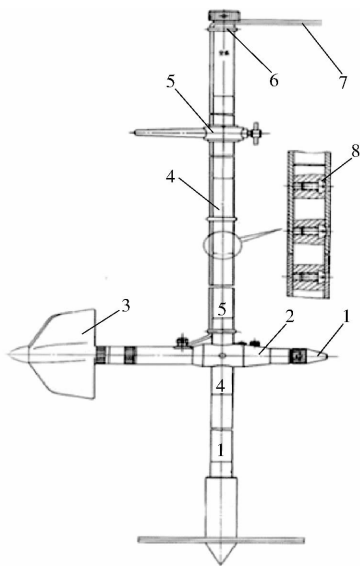


图 1 框架式流速仪结构示意图

Fig. 1 Schematic of frame-type current meter structure

1. 锥头螺钉 2. 身架 3. 旋桨 4. 测杆 5. 指针 6. 橡胶圈
7. 导线 8. 半圆头螺钉 (M5 × 8Q)

架式流速仪每条垂线上相邻两测点间距应大于旋桨直径。在安装和使用流速仪时,流速仪旋桨转子部分不应露出水面,上边缘应置于水面 0.05 m 以下。对于渠底流速测量,流速仪应安置在 0.9 倍水深以下,同时要确保流速仪旋转部分的边缘距离渠底 0.02 ~ 0.05 m^[18]。断面宽度(水面宽度)采用钢卷尺、测距仪等仪器进行测量,断面水深采用测深杆、水准仪、水位计等仪器进行测量,两者均取多次测量平均值为测量结果。框架式流速仪现场安装示意图如图 2 所示。



图 2 框架式流速仪现场安装示意图

Fig. 2 Schematic of on-site installation of frame-type current meter

2 模型与计算方法

2.1 VOF 模型

VOF (Volume of fluid) 模型是建立在欧拉网格下的界面追踪方法。在该方法中,全部特性参数和变量的场均由各相共享并表示体积分数平均值。这些参数和变量包括流体密度、速度、压力等。通过追踪不同相的体积分数,VOF 模型能够

准确地描述流体界面的运动和变形,从而有效地模拟多相流体系统的行为。在整个域中求解单动量方程,得到的速度场在各个相之间共享,能量方程也在各相之间共享。

体积分数方程为

$$\frac{\partial(\rho_q \alpha_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_q \alpha_q \mathbf{u}) = S_q + \sum_{p=1}^{n'} (m_{pq} - m_{qp})$$

(2)

式中 ρ_q ——第 q 相密度
 α_q ——第 q 相体积分数
 t ——时间
 $\mathbf{u}$ ——混合流体速度
 n' ——多相流中流体种类数,即相数
 S_q ——源项,可以通过用户自定义方式指定,缺省条件下为 0
 m_{pq} ——从相 p 到相 q 的传质
 m_{qp} ——从相 q 到相 p 的传质

动量方程为

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p_1 + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}$$

(3)

式中 ρ ——混合流体密度
 μ ——混合流体动力黏度
 p_1 ——混合流体压力
 $\mathbf{g}$ ——重力加速度
 $\mathbf{F}$ ——表面张力的等价体积力

能量方程为

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{u}(\rho E + p_1)] = S_h + \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j J_j + \tau_{eff} \mathbf{u} \right)$$

(4)

式中 k_{eff} ——有效导热系数
 τ_{eff} ——有效黏度
 E ——各相能量的质量加权平均计算能量
 T ——温度
 h_j ——组分 j 的焓
 S_h ——源项,包括热辐射及其他体积热源的贡献
 J_j ——组分 j 的扩散通量

2.2 动网格 6DOF 模型

动网格模型主要应用于处理动态边界或内部物体运动的场景。在开始计算前,首先设定初始体网格状态。当存在边界运动或形变时,Fluent 会自动重新细分其所涵盖的流域网格。此外,边界的变形或动态可以通过边界型函数或 UDF (用户定义函数) 进行设定。该模型特别适合处理非稳态问题,通常会对计算资源有较高的需求^[19]。

动网格技术能够处理包括刚性运动、旋转或平移在内的问题。在被动动网格问题中,边界运动模式往往是未知的,通常需要通过计算边界上的力或力矩来确定运动状态。这种情况下,网格调整可能频繁且不可预测,例如在风力发电机的叶轮或水轮机的转子等实际应用中。Fluent 的动网格 6DOF 模型求解器能够定义和描述边界或物体的运动,适用于多体分离的复杂问题^[20]。6DOF 模型根据流场中物体所受的重力、空气动力或其他力和力矩,计算物体的位置和姿态变化,有效解决流固耦合及多体分离问题。

利用 Fluent 中的 6DOF 模型,结合动网格技术,可以在外部载荷作用下,通过加载自定义的 6DOF 程序,计算轴颈的非线性运动轨迹,从而确定轴颈在载荷作用下的静态平衡位置。该模型通过求解惯性坐标系下的物体重心平移和旋转运动控制方程,来预测和解析动态互动问题^[21]。其在惯性坐标系下求解重心平移运动的控制方程为

$$\boldsymbol{v} = \frac{1}{m} \sum \boldsymbol{f}_G$$

(5)

式中 $\boldsymbol{v}$ ——重心平移速度矢量
 m ——质量
 $\boldsymbol{f}_G$ ——由重力引起的力矢量

物体旋转运动在体坐标系下的控制方程为

$$\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{L}^{-1} \left(\sum \boldsymbol{M}_B - \boldsymbol{\omega}_B \times \boldsymbol{L} \boldsymbol{\omega}_B \right)$$

(6)

式中 $\boldsymbol{L}$ ——刚体惯性张量
 $\boldsymbol{M}_B$ ——体坐标系下刚体矩矢量
 $\boldsymbol{\omega}_B$ ——体坐标系下刚体角速度矢量

将以惯性坐标系表示的 $\boldsymbol{M}_B$ 转为体坐标系表示,形式为

$$\boldsymbol{M}_B = \boldsymbol{R} \boldsymbol{M}_G$$

(7)

其中

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} C_\theta C_\psi & C_\theta S_\psi & -S_\theta \\ S_\varphi S_\theta C_\psi - C_\varphi S_\psi & S_\varphi S_\theta S_\psi + C_\varphi C_\psi & S_\varphi C_\theta \\ C_\varphi S_\theta C_\psi + S_\varphi S_\psi & C_\varphi S_\theta S_\psi - S_\varphi C_\psi & C_\varphi C_\theta \end{bmatrix}$$

式中 $\boldsymbol{M}_G$ ——惯性坐标系下刚体所受的力矩
 $\boldsymbol{R}$ ——变换矩阵

式中 C_λ 表示 $\cos \lambda$, S_λ 表示 $\sin \lambda$, φ 、 θ 、 ψ 分别为绕 x 、 y 、 z 轴旋转的欧拉角,平移速度和旋转角速度可由式(5)、(6)分别迭代计算得出,在 6DOF 模型中网格位置的更新由平移速度和旋转角速度实现。

2.3 框架式流速仪法流量计算方法

框架式流速仪法实测流量计算包括点流速计算、垂线平均流速计算、单宽流量计算、断面流量计算。

点流速计算式为

$$v_i = Kn + C$$

(8)

式中 v_i ——测点流速, m/s
 K ——流速仪倍常数
 n ——流速仪旋桨转速, r/min
 C ——流速仪摩阻系数, m/s

K 和 C 于流速仪率定计算得出。

垂线平均流速(三点法)计算式为

$$v_m = \frac{1}{4} (v_{0.2} + 2v_{0.6} + v_{0.8})$$

(9)

式中 v_m ——测线平均流速, m/s
 $v_{0.2}$ ——0.2 倍水深处测点流速, m/s
 $v_{0.6}$ ——0.6 倍水深处测点流速, m/s
 $v_{0.8}$ ——0.8 倍水深处测点流速, m/s

边壁流速采用边壁流速系数法计算,计算式为

$$\begin{cases} v_{0.1} = \alpha v_1 \\ v_{1.2} = \alpha v_2 \\ \vdots \\ v_{i,i+1} = \alpha v_{i+1} \end{cases}$$

(10)

式中 $v_{i,i+1}$ ——第 i 和 $i+1$ 两条垂线间部分断面平均流速, m/s
 v_i ——第 i 条垂线平均流速, m/s
 α ——明渠边壁流速系数

部分平均流速计算式为

$$\begin{cases} v_{1,2} = (v_1 + v_2) / 2 \\ v_{2,3} = (v_2 + v_3) / 2 \\ \vdots \\ v_{i-1,i} = (v_{i-1} + v_i) / 2 \end{cases}$$

(11)

式中 $v_{i-1,i}$ ——第 $i-1$ 和第 i 条相邻两条测线流速平均值, m/s

单宽流量计算式为

$$q_i = v_{mi} h_i$$

(12)

式中 q_i ——单宽流量, m²/s
 v_{mi} ——测线平均流速, m/s
 h_i ——垂线水深, m

断面流量计算式为

$$Q = v_{0.1} A_{0.1} + \sum (A_{i-1,i} v_{i-1,i}) + v_{i,i+1} A_{i,i+1}$$

(13)

式中 Q ——过流断面流量, m³/s
 $A_{i-1,i}$ ——第 $i-1$ 和第 i 条垂线间面积, m²

3 数值模拟

3.1 几何建模

框架式流速仪旋桨属于中心对称结构,本文以 LS1206B 型流速仪为研究对象,在 Solidworks 建

立流速仪实体模型如图 3 所示,结构参数如表 1 所示。

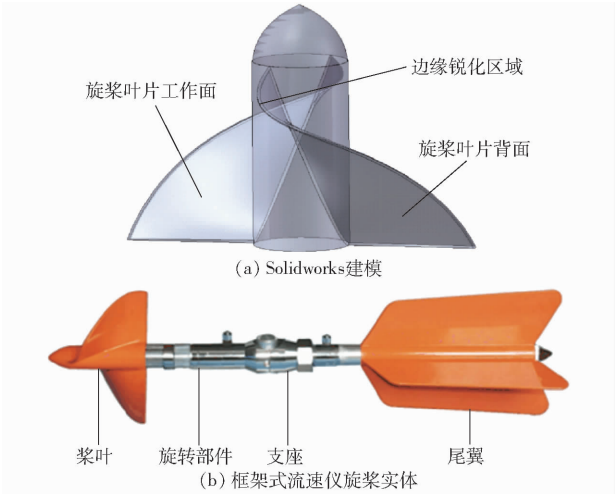


图 3 框架式流速仪旋桨实体模型

Fig. 3 Solid models of rotating paddle of frame-type current meter

表 1 LS1206B 型流速仪主要技术指标

Tab.1 LS1206B current meter main technical indicators		旋桨水	起动	测速	最小工	触点容量	
参数	转直	力螺	流速/ 流速/	范围/ 范围/	作水深	电流/ 电压/	
	径/mm	距/mm	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	H/m	mA	V
数值	60	120	≤ 0.05	$0.05 \sim 7$	≥ 0.10	≤ 300	≤ 4.5

明渠模型几何形状为矩形渠道,渠道高度为 0.7 m,宽度为 0.6 m。由《明渠实流法流量比对现场检测规程》^[17]可知,上游顺直段长度大于被测断面最大液位的 20 倍,由实测数据得被测断面最大液位为 0.623 m,由此可知渠道长度取 14 m 才能满足水流流态稳定的要求。但在现实进行测量时先用测深杆量测断面水深,将其等价于利用 Fluent 设置明渠出口断面水深,从而满足水流流态稳定要求,因此在建模过程中,渠道长度取 4 m,框架式流速仪模型放于渠道中心,前后各 2 m。框架式流速仪及明渠示意图如图 4 所示。

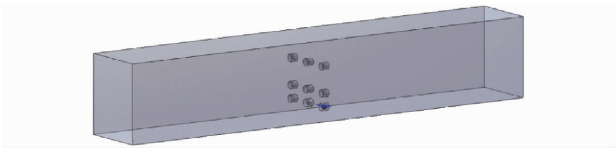


图 4 框架式流速仪及明渠示意图

Fig. 4 Schematic of frame-type current meter and open channel

测线可等间距或不等间距布置,若过水断面和 水流均对称,则测线可对称布设。测流断面水平线上测线数及间距应符合表 2 规定。其中水面宽度为 0.6 m,测线数为 3 条, a 为 0.06 m, b 为 0.24 m,框架式流速仪测线布置图如图 5 所示,FCM 为框架式流

速仪(Frame-type current meter)简称。

表 2 测线位置确定

Tab.2 Determination of line position

水面宽度	测线数	测线与渠壁	测线间距	测线间距
L/m	N/条	间距 a	b	c
0 ~ 0.5	3	L/8	3a	
0.5 ~ 0.8	3	L/10	4a	
	4	L/15	4a	5a
0.8 ~ 1.8	4	L/13	3a	5a
	5	L/18	3a	5a
	6	L/23	3a	5a

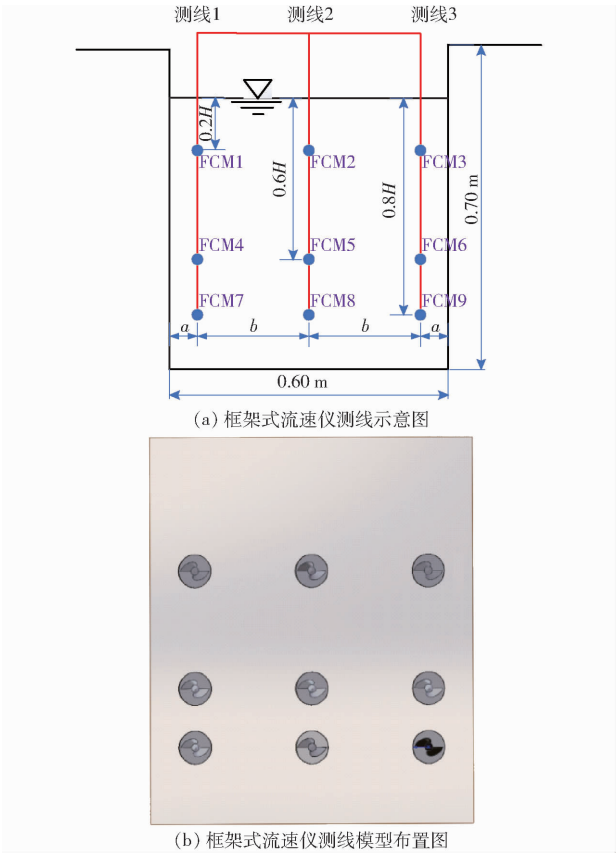


图 5 框架式流速仪测线布置图

Fig. 5 Line layout diagram of frame-type current meter

3.2 网格划分与网格无关性检验

使用 ANSYS 的 Mesh 软件进行网格划分,并对几何结构的各部分进行定义。数值模拟对象为矩形渠道及其内部框架式流速仪,结构较为复杂,因此使用非结构化四面体网格划分,提高精度,有效降低计算成本,提高计算效率,同时保证模拟结果的准确性和可靠性。在流速仪处进行网格加密且设立平滑过渡增长率为 1.2 的边界层。

网格无关性检验是网格质量和网格数量之间的一种平衡。在网格达到一定数量之后,计算结果的精度就不再明显增加。为了去除网格尺寸对数值模拟计算结果的影响,又要考虑计算成本和计算时间,因此必须进行网格无关性验证。选择不同网格尺寸

分别进行模拟计算。本文全局最大网格尺寸以 70、65、60、55、50、45 mm 为例,进行模拟计算。计算时,设置进口速度为 0.562 7 m/s,计算结果如表 3 所示。

表 3 网格无关性验证

Tab.3 Grid independence verification		
全局最大网格尺寸/mm	网格数量	出口流量/(m ³ ·s ⁻¹)
70	1 665 901	0.233 5
65	1 814 771	0.235 6
60	1 992 812	0.236 1
55	2 201 863	0.236 1
50	2 470 721	0.236 3
45	2 799 261	0.236 4

由表 3 可知,随着全局最大网格尺寸的减小,模拟流量与初始流量误差越来越小,综合考虑计算时间及计算精度,选择全局最大网格尺寸为 60 mm,网格数量为 1 992 812,网格正交质量为 0.21。满足计算精度要求,且计算时长合适。

3.3 Fluent 计算

为了使结果更贴合实际,采用 Fluent 软件模拟明渠内部流场及外部特性,将模型导入 Fluent 软件中,设置多相流模型为 VOF 模型(添加两种材料为水和空气),并在 Dynamic Mesh 中激活 6DOF 模型,利用 Fluent 软件中对话框定义框架式流速仪旋桨的几何参数,如质量、三方向转动惯量和重心坐标等。质量和转动惯量在 Solidworks 的评估标签页质量属性对话框中可以获取,质量为 0.422 kg,转动惯量为 $2.22 \times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。在 Create/Edit 栏中定义动网格区域,重心坐标在 Mesh 软件几何结构属性栏读取。

根据不可压缩流体流动的 Navier-Stokes 方程,湍流模型采用 SST $k-\omega$ 模型,此模型结合了 $k-\omega$ 模型在近壁区计算和 $k-\varepsilon$ 模型在远场计算的优势,将 $k-\omega$ 模型和标准 $k-\varepsilon$ 都乘一个混合函数后相加得出。在近壁区,混合函数值为 1,因此在近壁区等价于 $k-\omega$ 模型。在远离壁面区域,混合函数值降为 0,因此自动过渡到标准 $k-\varepsilon$ 模型^[19]。与标准 $k-\omega$ 模型相比,SST $k-\omega$ 模型中增加了横向耗散导数项,并在定义湍流黏度时考虑了湍流剪切应力的输运过程,模型中使用的湍流常数也有所调整^[16],这些特性大大扩展了 SST $k-\omega$ 模型的适用范围。壁面函数选取标准壁面函数(SWF)。

定义边界条件,流体在竖直 z 方向重力加速度为 9.81 m/s^2 ,进口设置为速度入口且入口速度设定为 0.562 7 m/s,上表面设置为压力进口,压力设为一个标准大气压。出口设置为压力出口,液位设置

为 0.586 m,渠道边壁设置为标准固定无滑移壁面,粗糙度常数设置为 0.013。动网格方法选取光顺方法与网格重构,光顺方法选择弹簧/Laplace/边界层,网格重构选择统一网格重新划分,选项选择 6 自由度(6DOF)并设置 6 自由度属性以及动网格区域。求解算法设置为基于压力基的 Coupled 算法,此算法通过对动量方程中压力梯度项和面质量通量的隐式离散,可以实现一种全隐式的算法。除了能量的残差值外,当所有变量的残差值都降低低于 10^{-3} 时,认为计算收敛。从全局对其进行初始化设置,并设置局部初始化液位为 0.586 m(因为在实际量测中,渠道里液位已知且恒定,因此此处要设置局部初始化,这可以节省大量计算时间),时间步数设置为 27 500 步,时间步长为 0.002 s,最后开始计算,计算完毕后,将 Fluent 的动网格区域中的运动属性一栏中监测到的刚体角速度(转速)分别记录并分析。

4 仿真结果

4.1 流速及流态

以入口流速 0.562 7 m/s 为例,分别对不同时刻下明渠及框架式流速仪进行数值模拟,并以时刻 25、45 s 为例研究旋桨转速以及流速的变化。分别在 z 为 117.2、234.4、468.8 mm 3 处设置平面以观测流速仪在明渠中流速分布。

由图 6 可知,红蓝交界处为水气交界面,水面上方蓝色区域为空气,水面下方红色区域为水,在初始时刻入口处水流受到重力的作用使得渠道内水的体积比锐减,水面线逐渐下降并产生略微波动。

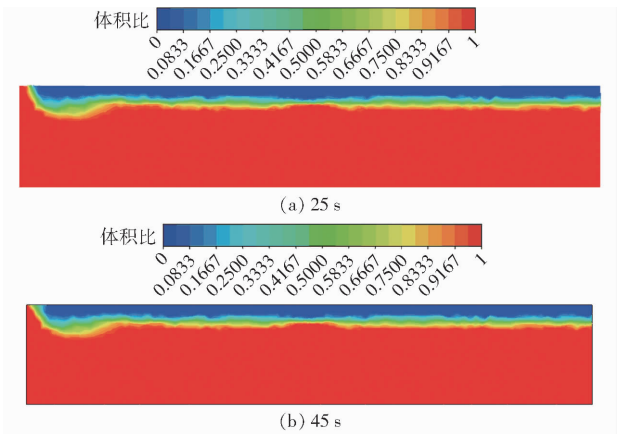


图 6 不同时刻明渠内水体积比云图
Fig.6 Cloud diagrams of water volume fraction in open channel at different times

随着水流继续在渠道中流动,水面线逐渐趋于平稳,稳定后液位上升,模拟水流流态符合实际水流流态,水面线平稳,水位与实际水位一致。

由图 7a 可知,在 $z = 468.8 \text{ mm}$ 平面位置处,水

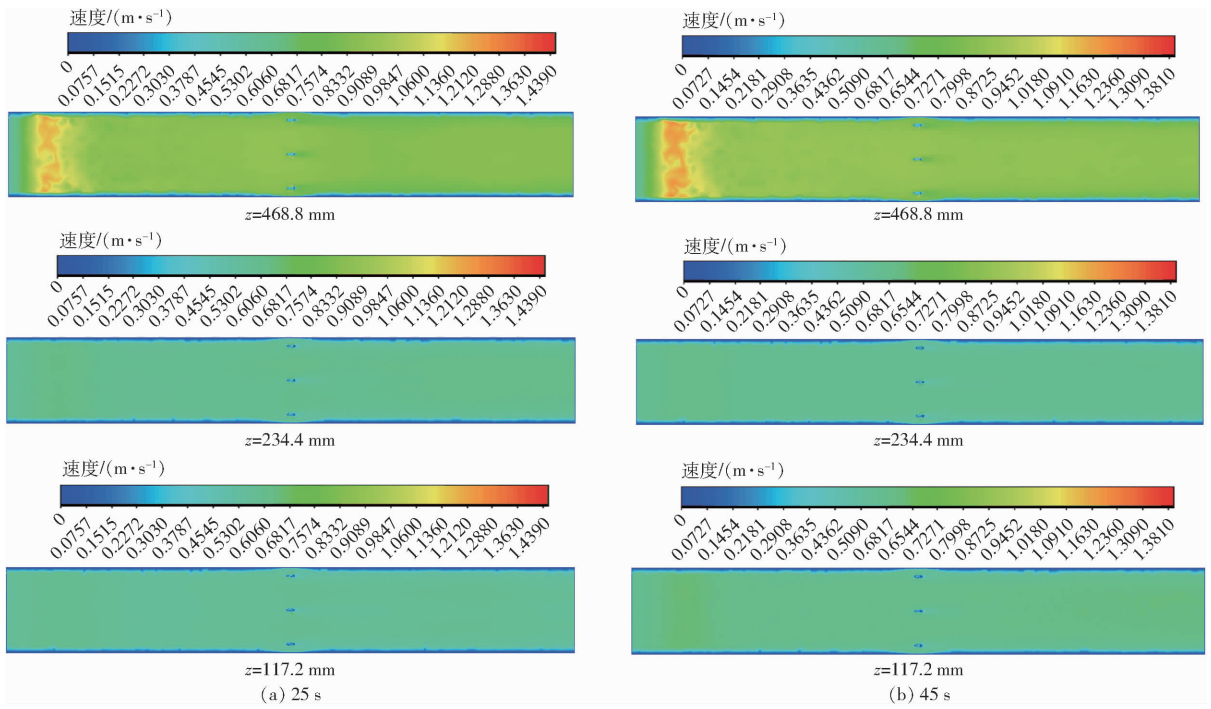


图 7 不同时刻明渠内速度分布云图

Fig. 7 Cloud diagrams of velocity distribution in open channels at different times

由入口顶端流入明渠内,在明渠前段流速较大,随着水体流动速度逐渐减小,在流速仪后位置有明显的梭形低速区,且越靠近边壁速度越低,模拟水流流态符合实际水流流态,水面线平稳;在 $z = 117.2\text{ mm}$ 与 $z = 234.4\text{ mm}$ 平面位置处,由于两者位置均接近渠底,两者流态较为接近。结合图 7b 可知,随时间流失,在 $z = 468.8\text{ mm}$ 平面位置处,明渠前段水流高速区面积增大,涡流现象加剧;在 $z = 117.2\text{ mm}$ 与 $z = 234.4\text{ mm}$ 平面位置处,入口后方水高速区面积增大,流速仪后方渠道流速分布更为均匀。

由图 8 流速分布图可知,叶片工作面由轴壁到外缘速度呈波纹状逐渐递增,且在其上瞬时速度分布不断变化,但叶片工作面上最大速度位置基本一致,即末端边缘锐化区域。随着时间推移,末端边缘锐化区域高速分布区域也逐渐增大,随着距离轴壁越来越近,流速接近 0 的区域也在逐渐减小。边缘锐化区域厚度尽量薄一些,对气蚀性能有很大改善,水冲击到厚度太大的旋桨上就会形成气泡,容易发生气蚀。通过观察不同瞬时流场速度云图,可以看出内部流场呈现中心对称,后续计算可简化为 1/2 模型,以减少计算资源。从水推力分布云图可以观察到,旋桨尖端圆锥部分的最小流速所在区域对应着水推力最小的区域。

由图 8 流线分布图可知,清水条件下,在流速仪旋桨后端处出现较大的紊动能区域,紊流涡旋强烈,紊动能较高,是因为水流从流速仪前端流过带动旋桨高速旋转时,旋桨尾部周围水流的速度和方向产

生了较大变化,从而导致旋桨尾部后方区域紊动能增加;随着时间推移以及流动的确深入,旋桨轴向涡旋叠加效果增大,紊动能大小及区域进一步增加,叶片背面相对速度增大,流线密集度增加。同时受到框架式流速仪自身结构的限制,水流在经过流速仪旋桨后产生各向异性特征及切应力的改变,从而造成流速仪旋桨后端处出现较高的紊动能区域。因此有必要在旋桨尾部后方区域添加尾翼以增加框架式流速仪稳定性。随着速度减小转速降低,流速仪旋桨轴壁流线逐渐密集,且流线越接近旋桨尾部越接近垂直。

由图 8 水推力分布图可知,叶片工作面所处位置为高压区,桨叶边缘锐化区域形成低压区,此时工作面上压力大于背面压力,所受合力方向向下,使桨叶趋于顺时针方向运动。在不同瞬时条件下,旋桨叶片压力分布持续变化,但最高压力和最低压力的位置基本保持一致,呈现相似的压力分布规律,速度越大高压区域面积越大。

4.2 明渠测流速率常数计算

选取 20、25、30、35、40、45、50、55 s 时的流速与转速进行数值模拟计算以及公式拟合,在动网格区域一栏中读取 9 个流速仪的刚体转速 n_{FCM} ,如表 4 所示;在 CFD-Post 的 Function Calculator 一栏中读取 9 个流速仪的刚体转速 v_{FCM} ,如表 5 所示;后将各组数据拟合曲线求得流速仪倍常数 K 和流速仪摩阻系数 C 。

由图 9 可知,不同位置的流速仪主要影响流速

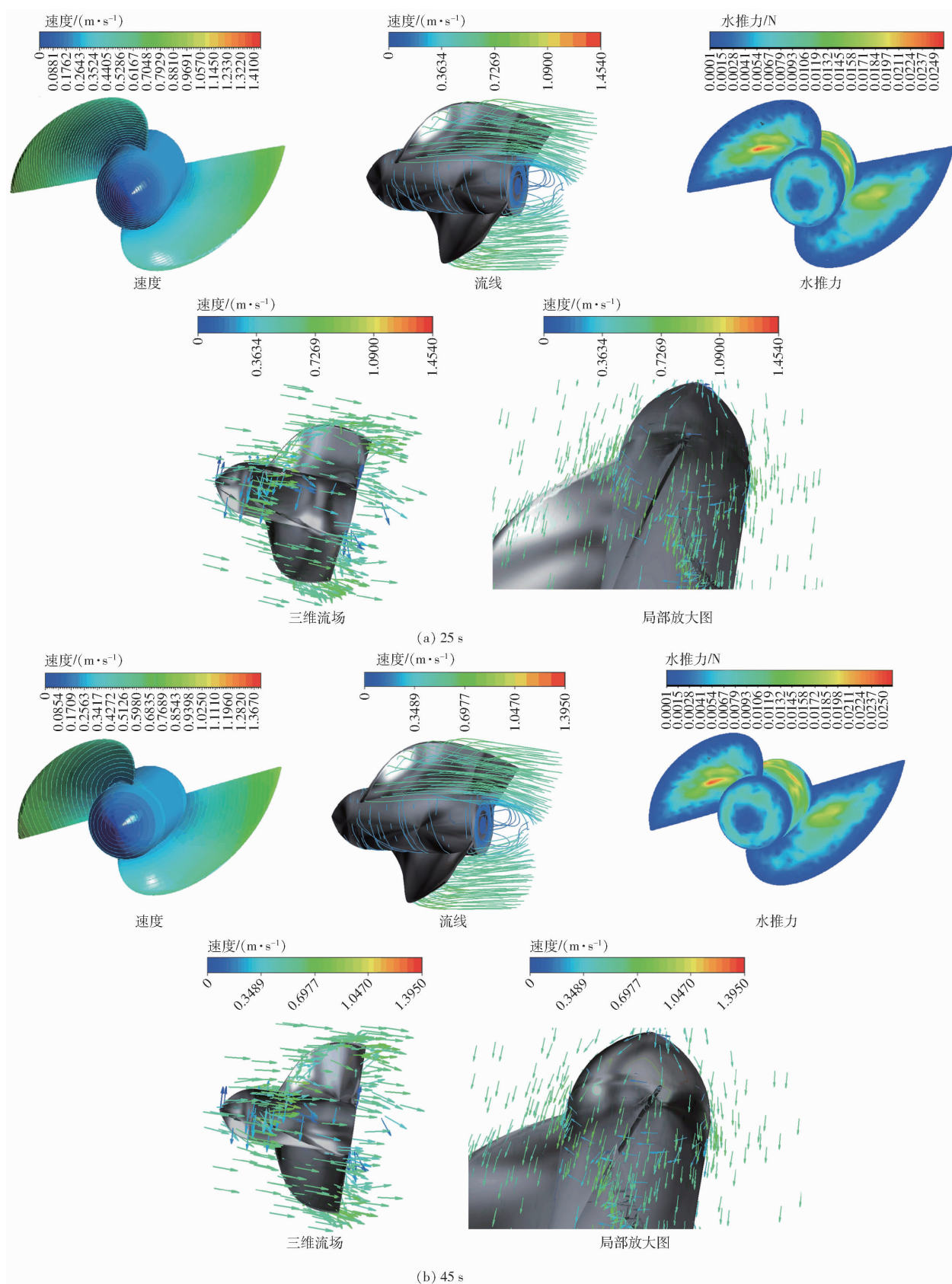


图 8 不同时刻明渠内 5 号流速仪速度、流线、水推力、三维流场分布云图

Fig.8 Cloud maps of velocity, streamline, water thrust, and three-dimensional flow field distribution of No.5 current meter in open channel at different times

仪摩阻系数 C , 对流速仪倍常数 K 影响不大(图中拟合的线性曲线 K 、 C 值对应式(8))。流速仪在明渠

中位置不同对流速仪转速会产生一定影响,越靠近壁面,渠道糙率逐渐变大,渠道两侧对水流阻

表 4 不同位置流速仪不同时刻转速分布

Tab.4 Speed distribution of current meters at different positions at different times									r/min
模拟时间/s	n_{FCM1}	n_{FCM2}	n_{FCM3}	n_{FCM4}	n_{FCM5}	n_{FCM6}	n_{FCM7}	n_{FCM8}	n_{FCM9}
20	408.177 6	429.052 6	415.446 6	259.227 9	262.920 0	261.693 2	247.270 7	251.130 6	245.419 6
25	389.836 6	416.318 8	397.884 4	272.375 6	276.435 8	273.565 4	261.920 6	266.353 4	260.448 1
30	387.218 2	409.928 4	389.714 3	266.098 7	269.887 0	267.602 3	255.818 8	260.500 5	254.071 9
35	384.542 3	409.196 1	391.035 8	266.743 0	270.752 5	267.886 1	256.841 0	261.414 1	255.096 6
40	382.373 5	407.034 0	387.454 8	265.720 5	270.006 3	267.366 1	256.143 7	260.748 6	254.403 9
45	383.442 2	407.553 4	387.830 6	265.789 6	269.807 0	266.826 1	256.025 1	260.477 8	254.113 2
50	382.559 5	406.936 8	387.575 8	265.425 5	269.731 6	267.021 6	256.047 5	260.532 9	254.176 5
55	382.570 1	407.367 4	387.748 6	265.212 7	269.613 6	266.745 8	255.877 0	260.294 9	254.090 9

表 5 不同位置流速仪不同时刻流速分布

Tab.5 Velocity distribution of current meters at different positions at different times									m/s
模拟时间/s	v_{FCM1}	v_{FCM2}	v_{FCM3}	v_{FCM4}	v_{FCM5}	v_{FCM6}	v_{FCM7}	v_{FCM8}	v_{FCM9}
20	0.525 860	0.552 768	0.535 220	0.333 972	0.338 714	0.337 141	0.318 560	0.323 533	0.316 184
25	0.502 231	0.536 362	0.512 595	0.350 910	0.356 126	0.352 436	0.337 434	0.343 145	0.335 546
30	0.498 858	0.528 129	0.502 069	0.342 824	0.347 689	0.344 753	0.329 573	0.335 604	0.327 331
35	0.495 410	0.527 186	0.503 772	0.343 654	0.348 804	0.345 119	0.330 889	0.336 781	0.328 651
40	0.492 616	0.524 400	0.499 158	0.342 337	0.347 843	0.344 449	0.329 991	0.335 924	0.327 759
45	0.493 993	0.525 069	0.499 642	0.342 425	0.347 586	0.343 753	0.329 838	0.335 575	0.327 384
50	0.492 856	0.524 275	0.499 314	0.341 956	0.347 489	0.344 005	0.329 867	0.335 646	0.327 466
55	0.492 869	0.524 830	0.499 537	0.341 682	0.347 337	0.343 650	0.329 648	0.335 339	0.327 356

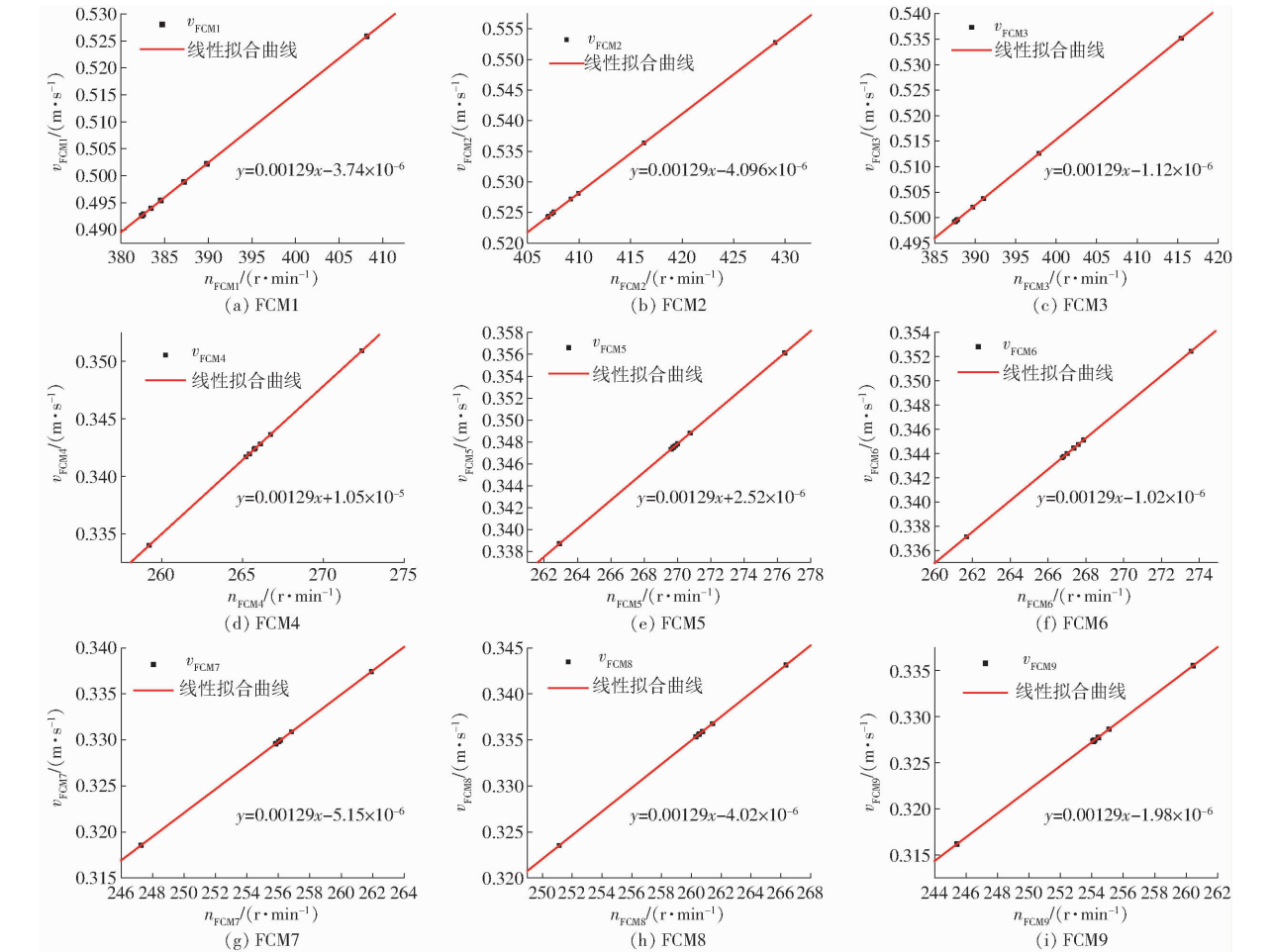


图 9 不同位置流速仪拟合曲线

Fig.9 Fitting curves of current meter at different positions

碍作用增大,同时水分子间存在相互作用力,最终使得靠近壁面两端的流速仪转速下降。不同位置流速仪对流速仪摩阻系数 C 虽有影响但影响较小,这可能是因为本次模拟选取的是喷浆良好的渠道内壁,糙率较小,后续可进一步对混凝土抹面、混凝土浇筑内壁及砾石内壁中浆砌乱石、水泥砌块石、干砌块石等多种不同渠道内壁进行数值模拟计算。在实际中,随着明渠使用时长增加,边壁泥沙淤积量增大,使用框架式流速仪需要定期率定校准,同时框架式流速仪在出厂时不同位置流速仪均需逐一率定。如图 10 所示,当模拟时间为 20 ~ 30 s 时,流速仪 FCM1 ~ FCM3 转速由大逐渐变小,30 s 后转速趋于平稳;当模拟时间为 20 ~ 30 s 时,流速仪 FCM4 ~ FCM9 转速先增大后逐渐变小,30 s 后转速趋于平稳。旋桨速度随时间的变化规律也与之相同。本研究可为数字孪生灌区建设以及灌区明渠量水提供理论依据和技术支持,通过数值模拟可以在后续研究中较为方便地对流速仪外形、质量、材料等进行优化,同时也可以研究不同含沙水流条件下长时间使用对流速仪磨损以及空化性能的影响;此外本次模拟的渠道主要针对矩形明渠,对于 U 形断面和梯形断面渠道,以及不规则渠道模拟可继续研究。不足之处在于渠道宽度过长,流量计数量增加,网格数以及计算量爆发式增长,对其算法的优化也是今后的主要研究方向之一。

5 结 论

(1)数值模拟结果表明采用动网格 6DOF 模型可以较好地模拟框架式流速仪在明渠的流动状态,

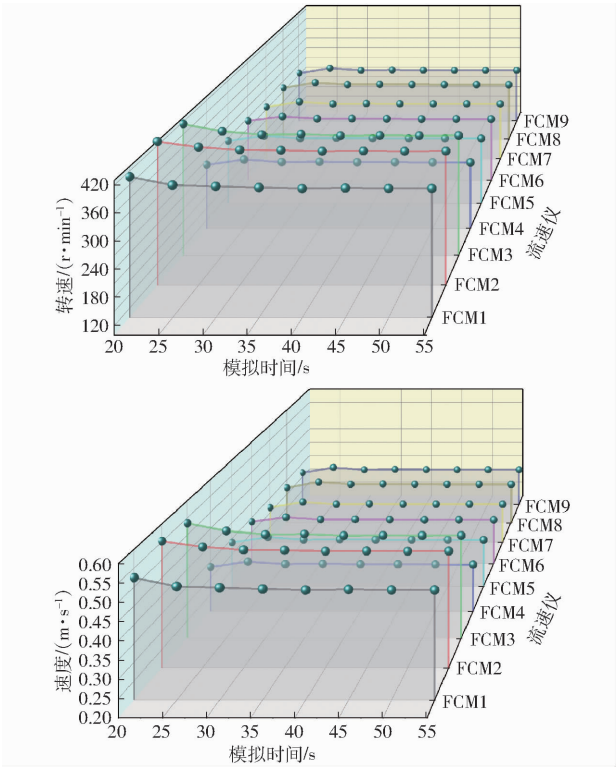


图 10 流速仪旋桨转速与流速随时间的变化关系
Fig. 10 Relationships between rotational speed and flow velocity of propeller with time

同时也验证了框架式流速仪法是一种高精度的测流方法,可同步获取不同测点处流速且适用于不同渠道断面,建议在灌区进一步推广和应用。

(2)通过数值模拟方法对框架式流速仪倍常数 K 和摩阻系数 C 进行了计算,通过对不同时刻转速与流速进行拟合可知,流速仪位置不同主要影响流速仪摩阻系数 C ,对流速仪倍常数 K 影响不大,明渠渠道内壁糙率是造成这种现象的可能原因之一。

参 考 文 献

[1] 梁慧真,宗全利,刘贞姬,等. 明渠非标准断面法测流水位流量关系的率定及影响因素分析[J]. 排灌机械工程学报, 2024,42(2):147-153, 160.
LIANG Huizhen, ZONG Quanli, LIU Zhenji, et al. Calibration and influencing factors analysis of stage-discharge relation of non-standard section method in open channels[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024,42(2): 147-153, 160. (in Chinese)

[2] 王宝贺,王竹青,苏沛兰,等. 基于水面一点法的明渠流量计算方法研究[J]. 节水灌溉,2023(5):109-113, 121.
WANG Baohe, WANG Zhuqing, SU Peilan, et al. Research on open channel flow calculation method based on water surface one point method[J]. Water Saving Irrigation, 2023(5):109-113, 121. (in Chinese)

[3] 杨洋,张宽地,姚田成,等. 基于 NSGA-II 遗传算法的 Myring 流线型量水槽体型优化设计[J]. 农业机械学报,2024, 55(4):241-250.
YANG Yang, ZHANG Kuandi, YAO Tiancheng, et al. Optimization design of Myring streamlined volume sink based on NSGA-II genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 241-250. (in Chinese)

[4] 王慧强,周义仁. 扭矩式明渠测流方法的研究[J]. 节水灌溉,2023(5):62-66, 74.
WANG Huiqiang, ZHOU Yiren. Study on torque-type open channel flow measuring device[J]. Water Saving Irrigation, 2023 (5):62-66, 74. (in Chinese)

[5] 万里,李永业,张港,等. 弹簧板式明渠测流装置的水力特性[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(12):1241-1247.
WAN Li, LI Yongye, ZHANG Gang, et al. Hydraulic characteristics of spring plate type measuring device in open channel[J].

Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022,40(12):1241–1247. (in Chinese)

[6] SHI L J, QU M J, LV D Z, et al. A two-channel ultrasonic current meter based on AlN piezoelectric micromachined ultrasonic transducers arrays with improved cross-correlation method[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering,2023,33(12):125004.

[7] ZHOU F, YANG Q F, LIN K. Evaluation index and performance structure optimization of magnetic field uniformity of complex multiphase flow electromagnetic current meter[J]. Measurement and Control,2022,55(1–2):62–71.

[8] 王宝贺,苏沛兰,吴建华,等. 基于 GA–BP 神经网络的明渠流速测点优化研究[J]. 人民黄河,2023,45(12):117–123.
WANG Baohe, SU Peilan, WU Jianhua, et al. Optimization of open channel flow velocity measuring point based on GA–BP neural network[J]. Yellow River, 2023,45(12):117–123. (in Chinese)

[9] 宗军,蒋东进,张亚,等. 面向视频测流的亚网格变分优化光流估计算法[J]. 水文, 2024, 44(1): 1–8, 32.
ZONG Jun, JIANG Dongjin, ZHANG Ya, et al. Subgrid variational optimization optical flow estimation algorithm for video flow measurement[J]. Journal of China Hydrology, 2024, 44(1): 1–8, 32. (in Chinese)

[10] 陈华,陈梦,赵浩源,等. 基于时空影像法的河道流速流量计算应用研究[J/OL]. 武汉大学学报(工学版):1–11[2024–04–05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1675.T.20240304.1419.002.html>.
CHEN Hua, CHEN Meng, ZHAO Haoyuan, et al. River flow monitoring method based on image intelligent recognition[J/OL]. Journal of Wuhan University (Engineering Edition): 1–11 [2024–04–05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20240115.1708.008.html>. (in Chinese)

[11] FOLTON N. Using spot flow measurements in a regionalized hydrological model to improve the low flow statistical estimations of rivers: the case of Réunion Island[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies,2024,52:101730.

[12] YUAN Y W, CHE G L, WANG C, et al. River video flow measurement algorithm with space-time image fusion of object tracking and statistical characteristics[J]. Measurement Science and Technology,2024,35(5): 055301.

[13] 陆永鑫,李林,王立成,等. 塔里木灌区多泥沙明渠测流设备比测与精度分析[J/OL]. 排灌机械工程学报:1–7[2024–04–05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20240115.1708.008.html>.
LU Yongxin, LI Lin, WANG Licheng, et al. Comparison and accuracy analysis of flow measurement apparatuses for sediment-laden open channels in Tarim irrigation area[J/OL]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering: 1–7[2024–04–05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20240115.1708.008.html>. (in Chinese)

[14] 段炎冲,杨郁挺,王忠静,等. 含沙量对明渠超声时差法测流精度的影响[J/OL]. 水力发电学报:1–12[2024–04–05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2241.TV.20221208.1811.002.html>.
DUAN Yanchong, YANG Yuting, WANG Zhongjing, et al. Influence of sediment concentration on the measurement accuracy of time-difference ultrasonic flowmeter in open channel flows[J/OL]. Journal of Hydroelectric Engineering: 1–12[2024–04–05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2241.TV.20221208.1811.002.html>. (in Chinese)

[15] 鲍子云,王洁,李王成,等. 明渠非满管电磁流量测箱测试评价[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(5): 482–487.
BAO Ziyun, WANG Jie, LI Wangcheng, et al. Test and evaluation of electromagnetic flow measuring box for non-full pipe in open channel[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(5): 482–487. (in Chinese)

[16] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2014.

[17] 王竹青. T/CIDA 0014—2022 明渠实流法流量比对现场检测规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,2022.

[18] 孙西欢. 灌区量水技术及其自动化[M]. 北京:中国水利水电出版社,2014.

[19] 朱红钧. FLUENT 流体分析及仿真实用教程[M]. 北京:人民邮电出版社,2010.

[20] 王攀,刘保国,冯伟,等. 基于 6DOF 模型及动网格的动静压轴承刚度阻尼数值计算[J]. 动力学与控制学报,2018,16(6):490–495.
WANG Pan, LIU Baoguo, FENG Wei, et al. Numerical calculation of stiffness and damping for hybrid bearings based on a 6DOF model and the dynamic mesh method[J]. Journal of Dynamics and Control, 2018,16(6):490–495. (in Chinese)

[21] 邓绍权. 基于 CFD 的中高速艇阻力及耐波性研究[D]. 武汉:华中科技大学,2017.
DENG Shaoquan. Research on the resistance and seakeeping performance of medium-high speed vessel based on CFD[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)