第40卷第2期 计 算 力 学 学 报 Vol. 40, No. 2
2023 年 4 月 Chinese Journal of Computational Mechanics April 2023

DOI: 10.7511/jslx20210815002

明渠层流近床面颗粒拖曳力研究

谢 琳[1], 张庆河*[2], 张金凤[2], 刘光威[2]

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所,工程泥沙交通行业重点实验室,天津 300456;
2. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300350)

摘 要:泥沙颗粒受到的拖曳力是泥沙运动的主要驱动力,而当前应用于计算流体力学-离散颗粒法(CFD-DPM)耦合模型进行水沙运动模拟的泥沙颗粒拖曳力公式均没有考虑明渠流底床边壁作用的影响。求解不可压缩 Navier-Stokes 方程,对明渠层流不同雷诺数条件下床面附近不同高度处颗粒所受拖曳力进行了模拟,根据模拟结果变化规律,提出了综合考虑床面和水流惯性对标准拖曳力影响的修正拖曳力计算公式。与常用的单颗粒标准拖曳力公式和考虑遮蔽效应的多颗粒拖曳力公式相比,采用本文修正公式得到的水沙作用力更接近高精度数值解,应用于 CFD-DPM 输沙模拟获得的输沙结果与输沙率公式结果一致,应用分析表明输沙模拟应当采用粗糙底床边界。

关键词:拖曳力;近底颗粒;明渠层流;床面影响;中等雷诺数
中图分类号:O347.7 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-4708(2023)02-0208-08

1 引 言

近床面泥沙运动规律一直是河流海岸工程研究的重要课题。近年来,随着计算能力的提高,越来越多的学者将基于牛顿第二定律追踪每个颗粒运动的离散颗粒模型 DPM(Discrete Particle Method)[1-4]引入到近床面泥沙运动机理的研究中[5-8]。DPM 模拟泥沙运动需要与计算流体力学(CFD)模型耦合,通过颗粒作用力公式计算水流与泥沙两相间的相互作用。因此,这类模型计算结果的合理性与水沙两相间拖曳力计算的准确性有很大关系[9]。

目前应用于 CFD-DPM 水沙运动模拟的拖曳力公式主要有两类(表 1),一类采用单个颗粒的标准拖曳力公式[7,10-14],一类采用考虑周围泥沙遮蔽影响的多颗粒均匀遮蔽拖曳力公式[5,6,8,16-18]。上述两类泥沙颗粒拖曳力计算公式都是基于无界的流场假定得到的,不能反映近床面水沙作用力的特性。事实上,边壁会改变其附近颗粒周边的流场结构从而改变拖曳力系数。文献[19-21]分别从理论推导、实验测量和数值模拟角度论述了边壁对拖曳力的修正作用,对于紧贴壁面的颗粒,其拖曳力系数与无壁面边界影响情况相差达 70%。因此,考虑边壁对拖曳力的影响,寻找明渠流中合理的近床面泥沙拖曳力计算公式,提高泥沙颗粒运动模拟的准确性,成为目前 CFD-DPM 模型研究中亟需解决的问题。谢琳等[22]通过理论推导,给出了明渠层流中考虑壁面边界影响的拖曳力公式。然而,该理论公式仅适用于层流低雷诺数条件。为了进一步获得明渠层流更大雷诺数范围内近床面泥沙颗粒的合理受力公式,本文通过高精度的数值模拟,得到中等雷诺数条件下近床面泥沙颗粒受壁面边界影响的拖曳力变化规律,并应用于 CFD-DPM 模型进行水沙运动的模拟。

表 1 水沙 CFD-DPM 模拟采用的拖曳力公式分类
Tab. 1 Drag formulas used in CFD-DPM for water-sediment simulation

单个颗粒公式	多颗粒均匀遮蔽公式
Schmeeckle[10]	孙建军等[5]
宋晓阳等[11]	Xu 等[6]
肖柏青等[12]	雷明等[16]
喻黎明等[13]	Arolla 等[17]
Bravo-Blanco 等[14]	Elghannay 等[18]
Alihosseini 等[7]	Rao 等[8]

2 数值模型及验证

为了得到高精度的颗粒拖曳力,本文借助 OpenFOAM 开源 CFD 库[23]提供的求解器 icoFoam 进行颗粒表面流动和流体应力的高精度数值求解。通过计算底部壁面附近不同高度和不同来流流速条件时静止颗粒的拖曳力,给出拖曳力随

收稿日期:2021-08-15;**修改稿收到日期**:2021-12-22.
基金项目:国家自然科学联合基金(U1906231);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(TKS20210104;TKS20200201)资助项目.
作者简介:张庆河*(1968-),男,博士,教授,博士生导师
(E-mail:qhzhang@tju.edu.cn)

颗粒壁面间距离和雷诺数变化的一系列结果。

2.1　数值模型

设定水深 H 的明渠层流中静止放置一直径为 D 的球体颗粒，如图 1 所示。颗粒中心距明渠流底部固壁边界的距离为 h，过颗粒中心的上游来流流速为 u_∞，基于该流速定义的颗粒雷诺数为 $Re_p=u_\infty D/\nu$，其中，ν 是流体粘性系数；水深 H 和明渠层流平均流速 U 为相应的特征长度和特征速度，雷诺数 $Re=UH/\nu$。

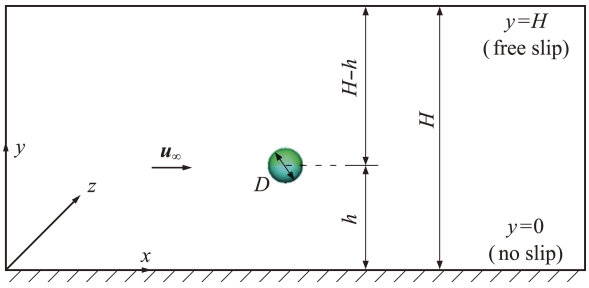


图 1　单个静止颗粒在明渠层流中受力计算

Fig. 1　Sketch of drag simulation for a stationary particle in laminar open channel flow

明渠层流中球体绕流和球体受力通过直接求解不可压缩 N-S 方程获得，表达式为

$$\begin{cases}\nabla\cdot\boldsymbol{u}=0\\ \dfrac{\partial\boldsymbol{u}}{\partial t}+\nabla\cdot(\boldsymbol{uu})=-\nabla p+\nu\nabla\cdot(\nabla\boldsymbol{u})+\boldsymbol{f}\end{cases}\tag{1}$$

式中 速度矢量 $\boldsymbol{u}$ 在 x，y 和 z 三个方向的分量分别为 u_x，u_y 和 u_z。$\boldsymbol{f}$ 为重力沿流向的分量，ν 为水的运动粘滞系数。边界条件为

$$\begin{cases}u_y=\partial u_x/\partial y=\partial u_z/\partial y=0 & (y=H)\\ u_y=u_x=u_z=0 & (y=0)\\ u_y=u_x=u_z=0 & (\text{球面})\end{cases}\tag{2}$$

水流对泥沙颗粒的拖曳力定义为 $F_D=\boldsymbol{e}_x\cdot\int_S(-p\boldsymbol{n}+\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{\tau})\mathrm{d}s$，其中，$\boldsymbol{n}$ 为球表面单位外法向量，p 和 $\boldsymbol{\tau}$ 分别为压强和粘滞应力张量，$\boldsymbol{e}_x$ 为 x 方向的单位向量，S 为球面。

模型计算采用的 icoFoam 为基于有限体积法进行离散的求解器，Navier-Stokes 方程中压力和速度的计算通过瞬态 PISO 算法进行迭代求解[24]。明渠层流的模拟采用入口速度驱动，流向沿正 x 方向；出口为自由出流边界。根据明渠层流的雷诺数上限[34]，明渠流雷诺数 Re 最大取为 600。

2.2　模型验证

为了保证用于拖曳力模拟的流场有足够的精度，对模拟中颗粒可能出现的区域以及近底流速敏感区进行多级加密。设定四种不同加密方案，对应的最小网格尺寸(Δ)分别为 $D/4$，$D/8$，$D/16$ 和 $D/32$。

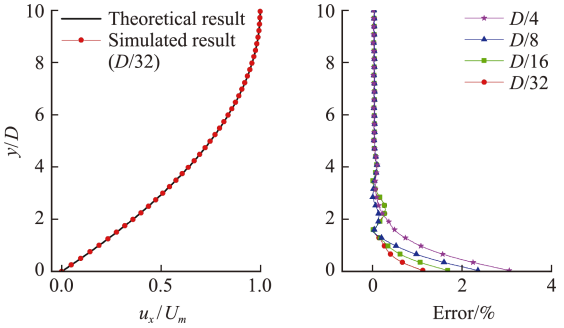


图 2　明渠流速数值计算结果与理论解对比

Fig. 2　Simulated and theoretical velocities of laminar open channel flow

图 2 为明渠流雷诺数为 600 时，不同加密方案模拟流速与理论流速对比的误差。为了排除明渠底部固壁以外其他边界对颗粒拖曳力模拟的干扰，对比了相同计算域高度(10D)下 4 种不同的计算域长度和宽度(工况 1 为 100D×50D，工况 2 为 50D×30D，工况 3 为 30D×20D，工况 4 为 15D×10D)和 4 种不同网格分辨率(工况 5～工况 8)情况下的颗粒拖曳力系数($C_D=F_D/0.5\,\rho A\,u_\infty^2$，$A=\pi D^2/4$ 为颗粒沿流向投影面积，其中，拖曳力计算结果 F_D 的收敛值通过间隔一万步的两拖曳力数值之间的相对偏差小于 1×10^{-6} 来确定)，拖曳力系数结果的敏感性和收敛性规律列入表 2 和表 3，最终选定计算域长度为 50D，宽度为 30D，球表面网格加密尺寸为 D/32。

表 2　不同计算域长宽下的颗粒拖曳力系数 C_D

Tab. 2　Particle drag coefficient results with different computational length and width

h/D	工况 1	**工况 2**	工况 3	工况 4
0.55	6.164	**6.186**	6.204	6.302
	与工况 1 相差	**0.35%**	0.65%	2.24%
5.00	1.325	**1.325**	1.326	1.332
	与工况 1 相差	**0.0%**	0.08%	0.53%

表 3　不同网格加密算例的颗粒拖曳力系数 C_D

Tab. 3　Particle drag coefficient results with different grid refinements

h/D 最小尺寸	工况 5 D/64	**工况 6** **D/32**	工况 7 D/16	工况 8 D/8
0.55	6.197	**6.186**	6.071	5.788
	与工况 5 相差	**−0.18%**	−2.03%	−6.60%
5.00	1.331	**1.325**	1.323	1.309
	与工况 5 相差	**−0.45%**	−0.60%	−1.65%

根据上述敏感性和收敛性分析确定的计算域长度、宽度和网格分辨率，模拟了均匀来流条件下球体颗粒雷诺数 $Re_p=100$，50，10 和 2 的情况，得到模拟的拖曳力系数分别为 1.078，1.52，4.18 和

14.59，与 Morsi 等[25]给出的实验值 1.07，1.50，4.1 和 14.4 相差均小于 2%，验证了数值模型的准确性。

3 近床面颗粒拖曳力模拟结果

斯托克斯拖曳力 $F_{D,Stokes}$ 描述的是球体以恒定速度 U_0（低雷诺数条件）在静止的不受边界影响流体中运动时的受力，其表达式为 $F_{D,Stokes}=3\pi\rho_f\nu D U_0$，其中，$\rho_f$ 和 ν 分别代表流体的密度和运动黏滞系数。明渠层流情况下驱动壁面附近泥沙颗粒所受拖曳力 F_D，相比于 $F_{D,Stokes}$，还附加了壁面造成的流速垂向分布影响和惯性对流的非线性作用，这些影响与 h/D，$(H-h)/D$ 和 Re_p 密切相关。为此，本文依据上述三个参数的变化设定了 H/D 分别等于 10，20，50 和 100，而 h/D 分别等于 0.55，1.0，1.55，2.5，5.0，10.0 的条件，选择其中颗粒雷诺数大于 0.01 的算例进行拖曳力的计算。

拖曳力修正系数可定义为 h/D，$(H-h)/D$ 和 Re_p 的函数，即 $\lambda[h/D,(H-h)/D,Re_p]$，$F_D$ 与 $F_{D,Stokes}$ 的关系可表示为

$$F_D=\lambda[h/D,(H-h)/D,Re_p]\times(3\pi\rho_f\nu D u_\infty) \quad (3)$$

相应地有 $C_D=\lambda\times(24/Re_p)$，其中，$C_D$ 和 $24/Re_p$ 分别为 F_D 与 $F_{D,Stokes}$ 的拖曳力系数。通过大量算例计算得到拖曳力修正系数 λ 的结果如图 3 所示。

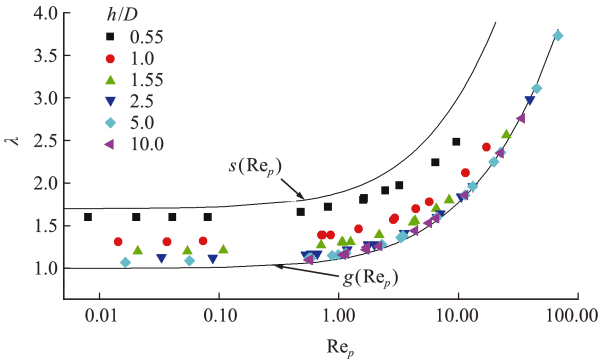


图 3 拖曳力修正系数随颗粒雷诺数的变化

Fig. 3 Corrected drag coefficient

4 近壁面颗粒拖曳力拟合公式

利用上述数值模拟的结果，建立近壁面颗粒拖曳力计算的拟合公式。拖曳力修正系数拟合公式应满足以下三个特性。

（1）当 $Re_p\to 0$ 时，拖曳力修正系数等于明渠流边界对斯托克斯拖曳力的修正，简称壁面修正函数，即 $\lambda[h/D,(H-h)/D,Re_p]=f[h/D,(H-h)/D]$。

（2）当颗粒距离明渠流底部和表面边界足够远，即 $(H-h)/D\to\infty$ 且 $h/D\to\infty$ 时，拖曳力修正系数等于无界流场中水流惯性作用对斯托克斯拖曳力的修正（简称雷诺数修正函数），即 $\lambda(\infty,\infty,Re_p)=g(Re_p)$。

（3）当颗粒紧贴于明渠流底部固壁边界（$h/D=0.5$）且明渠流水深无限大（$(H-h)/D\to\infty$）时，拖曳力修正系数等于线性剪切流中固定于壁面的颗粒拖曳力修正系数（简称贴壁修正系数），即 $\lambda(0.5,\infty,Re_p)=s(Re_p)$。

壁面修正函数 $f[h/D,(H-h)/D]$ 根据文献[22]给出的简化形式为

$$f(h/D)=1+\frac{0.6235}{2h/D-0.11} \quad (4)$$

雷诺数修正函数 $g(Re_p)$ 可利用 Cheng[26] 的结果，

$$g(Re_p)=(1+0.27Re_p)^{0.43}+0.47(Re_p/24)^{4}\times[1-\exp(-0.04Re_p^{0.38})] \quad (5)$$

线性剪切流贴壁修正系数 $s(Re_p)$ 参考文献[20，21]的研究，写为

$$s(Re_p)=1.7009\,g(Re_p) \quad (6)$$

式中 1.7009 为 O'Neill[19] 理论推导给出的线性剪切小雷诺数流动中壁面边界对固定于壁面上的球体所受拖曳力的修正值，即 $f(1.0,\infty)=1.7009$。

本文模拟得到的 λ 结果随 Re_p 的变化规律与上述第 2 条和第 3 条特性的关系如图 3 所示，可以看出，在 h/D 相同的情况下，λ 随颗粒雷诺数的增大而呈指数趋势递增，且与 Cheng[26] 给出的雷诺数修正函数(5)具有相近的变化规律；在雷诺数相近的情况下，λ 随 h/D 的减小而增大，且随着 h/D 越接近 0.5，λ 增大越快，与壁面修正函数(4)描述的规律一致。因此，以雷诺数修正函数(5)与壁面修正函数(4)为基础，给出两种拖曳力修正系数表达式方案，其一，认为明渠层流边界和雷诺数的联合影响近似等于二者独立作用的乘积；其二，在以式(4,5)函数主体项的基础上对拖曳力修正系数进行进一步修正，增加额外的修正项 ξ，该修正项函数形式应保证 λ 满足上述三个特性，这两种方法对应的拖曳力修正系数分别为 λ_1 和 λ_2，即

$$\lambda_1=f(h/D)\,g(Re_p) \quad (7)$$

$$\lambda_2=f(h/D)(1+0.27Re_p)^{0.43}\xi \quad (8)$$

上式适用于 $H/D\geqslant 10$ 且 $h/H\leqslant 0.82$ 的条件，其中函数 ξ 为

$$\xi=1-\alpha e^{-\beta_1 h/D}(1-e^{-\beta_2 Re_p})$$

$$\alpha=0.1746,\ \beta_1=0.3,\ \beta_2=0.28 \quad (9)$$

将上述拖曳力修正系数代入式(3)即可得到相

应的拖曳力表达式。式(7)给出的拖曳力修正系数值与数值模拟结果的误差如图 4 所示，在明渠层流的流态条件下，颗粒壁面间距离非常接近($h/D \leqslant 1.5$)，而颗粒雷诺数 Re_p 约为 25 时，拟合公式(7)给出的拖曳力修正系数值误差最大，约为 18.6%；当 $h/D \geqslant 2.5$ 时，采用拟合公式(7)计算的修正值误差小于 15%。总的来说，式(7)给出的拖曳力修正值反映了拖曳力系数受壁面和水流惯性共同影响的趋势或规律，但是比实际值要略大。而式(8)预测的拖曳力系数与数值模拟结果的误差在 5%以内(图 5)。

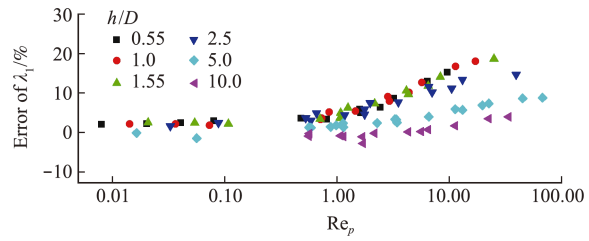


图 4　拖曳力修正函数 λ_1 预测值与计算结果的比较

Fig. 4　Result from function λ_1 and from simulation

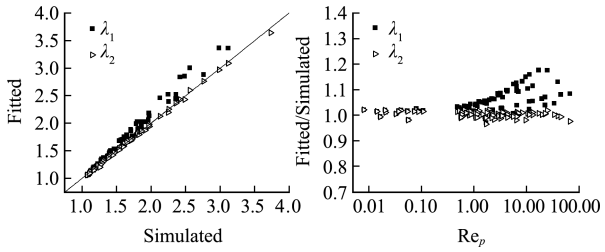


图 5　拖曳力修正函数 λ_2 预测值与数模结果的比较

Fig. 5　Result from function λ_2 and from simulation

在床面的输沙强度较小，运动泥沙颗粒分布相对稀疏的条件下，颗粒与颗粒之间的遮蔽效应较弱，颗粒受力环境与近壁面单颗粒受力的情况基本一致，可以应用本文给出的拖曳力系数拟合公式(8,9)，计算明渠层流中近床面泥沙颗粒的拖曳力。

5　近壁面颗粒拖曳力公式的应用

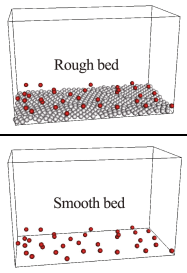
将本文拟合的拖曳力公式(3,8,9)在 OpenFOAM 中 CFD-DPM 模块[27]进行实现，得到求解器 MDPMFoam，分别应用于固定颗粒在明渠层流近底位置的受力计算和颗粒在明渠层流近底运动形成的输沙率分析。其中，固定颗粒受力计算与采用颗粒表面全尺度网格解析计算的受力进行对比；运动颗粒的输沙率模拟则与泥沙输沙率公式进行对比，并分析了光滑底床和粗糙底床对输沙率的影响。

(1) 固定泥沙颗粒条件下，将 MDPMFoam 计算的密实粗糙底床(Rough bed)和光滑底床(Smooth bed)条件颗粒受力与采用 icoFoam 颗粒表面全尺度网格解析计算的受力进行对比。全尺度网格解析计算结果是水沙作用力的高精度直接数值解，可作为水沙相间作用力参考值，用于判别 MDPMFoam 受力模拟结果的准确性。此外，对比了应用本文拟合公式(简称本文公式)与采用单颗粒标准拖曳力公式[27](简称标准公式)和采用多颗粒均匀遮蔽的 Ergun-Wen-Yu 公式[29,30](简称 EWY 公式)计算的水沙作用力模拟结果。

表 4　固定泥沙颗粒条件计算组次表
(2 种底床边界×2 种网格尺寸×
2 种雷诺数×3 个拖曳力公式)

Tab. 4　Simulation group for fixed sediment particle (2 bottom boundaries×2 grid sizes×2 Reynolds number×3 drag formulae)

组次	N	θ	Re	Δ	示意图
RG1U1	479	0.035	340	1D	
RG2U1	479	0.035	340	2D	
RG1U2	479	0.07	680	1D	
RG2U2	479	0.07	680	2D	
SG1U1	35	0.035	340	1D	
SG2U1	35	0.035	340	2D	
SG1U2	35	0.07	680	1D	
SG2U2	35	0.07	680	2D	



固定泥沙颗粒(颗粒数 N)算例的计算域长×宽×高为 $32D \times 16D \times 20D$，水流密度 ρ_f 为 1000 kg/m^3，重力加速度 g 为 9.8 m/s^2，运动粘滞系数 ν 为 1.0×10^{-6} m^2/s；颗粒直径 $D=0.17$ mm；颗粒密度 ρ_p 为 2500 kg/m^3。

采用不同拖曳力公式的 MDPMFoam 模拟结果与高精度数值解的对比如图 6 所示，不同拖曳力公式模拟结果与高精度数值解的差异统计列入表 5，其中采用本文拟合公式模拟粗糙底床(底床颗粒密实排列，近似密实床沙)情况下，等效平床位置取在表层颗粒的下表面 $y=0.62D$ 的高度，① 光滑底床和粗糙底床条件下颗粒受力计算结果接近，不论光滑底床还是粗糙底床情况，采用本文拟合公式的模拟结果与高精度数值解最接近，说明本文拟合公式对于底床固壁边界的影响描述最好，且对粗糙底床同样适用；② 光滑底床情况三个不同拖曳力公式计算的结果较为一致，其中，EWY 公式和标准公式在这种情况下无法考虑固壁边界，影响略偏小；③ 粗糙底床情况，EWY 公式模拟的受力明显偏大，主要是公式中涉及的颗粒相体积分数统计时考虑了底床泥沙颗粒，导致公式中的颗粒相体积分数偏高所致，而无法考虑边壁影响的标准公式则偏小。综上所述，应用本文修正的拖曳力公式比标准

公式和 EWY 公式能更准确地模拟近壁面附近稀疏泥沙颗粒的受力。

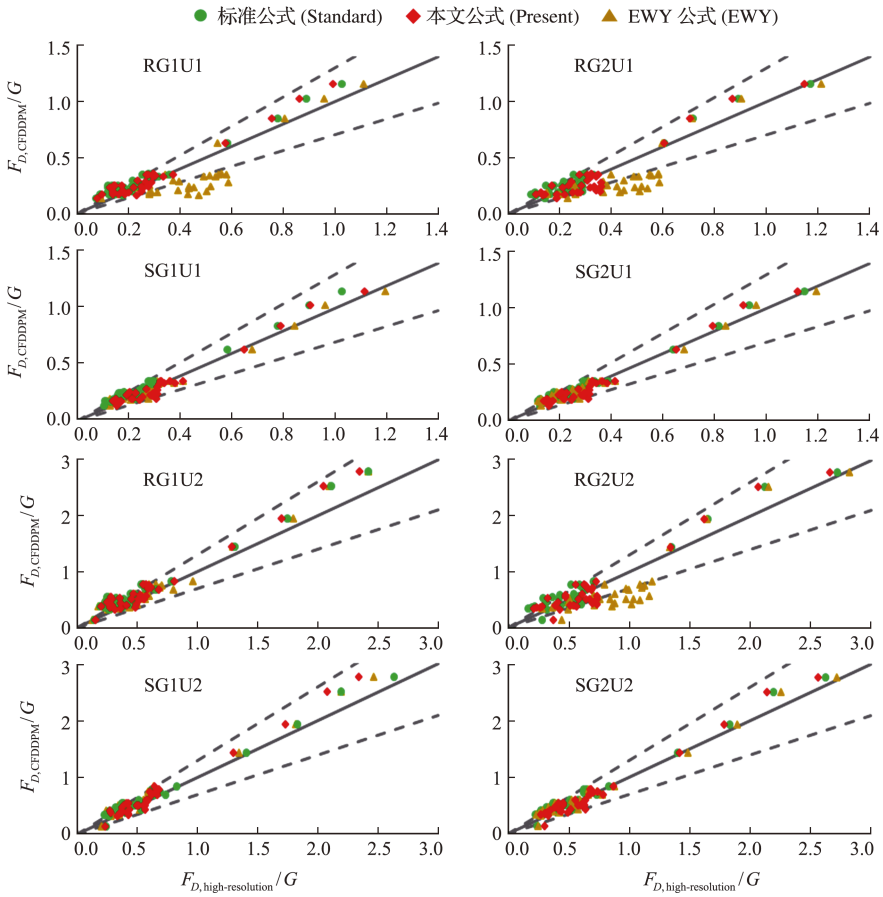


图 6 采用不同公式(标准、本文和 EWY)的 CFDDPM 拖曳力模拟结果与高精度数值模拟结果的比较(采用重力 G 进行无量纲化)

Fig. 6 Drag results by CFDDPM with different formulae (Standard, Present, EWY) compared with high-resolution results (force nondimensionalized by the particle gravity G)

表 5 不同拖曳力公式的 MDPMFoam 模拟结果与高精度数值解的差异统计表

Tab. 5 Errors(%) between MDPMFoam results by three different drag models and high-resolution results

差异百分比	本文公式	标准公式	EWY 公式
RG1U1	−12%	−18%	35%
RG2U1	3%	−10%	37%
RG1U2	−13%	−18%	−12%
RG2U2	1%	−10%	31%
SG1U1	3%	−14%	−3%
SG2U1	3%	−8%	−3%
SG1U2	−7%	−8%	−10%
SG2U2	1%	−8%	−3%

(2) 运动泥沙颗粒条件下,采用本文拟合拖曳力公式的 MDPMFoam 计算对比了粗糙底床和光滑底床边界条件对输沙率结果的影响,并与输沙率公式进行比较。水沙运动模拟时,计算域大小流场条件与固定泥沙条件一致,泥沙颗粒间碰撞的法向最大恢复系数 $e_{\max}$ 取 0.8,切向摩阻系数 μ_c 为 0.4,考虑润滑作用的影响。采用体积力驱动,前后左右四边均为周期边界,总模拟时长为 $100\,T_{\mathrm{bulk}}$,而 $T_{\mathrm{bulk}}=h_f/u_b$,$u_b$ 为明渠流平均流速。在应用本文拟合公式计算时,等效平床高度 $y=0.62D$ 作为壁面距离计算的起始高度。于是,输沙强度的表达式为 $\phi=\pi D^3\sum_{l=1}^{N_p}\bar{u}_p^{(l)}\Big/\left[6L_xL_z\sqrt{(\rho_p-\rho_f)gD^3}\right]$,其中,$\bar{u}_p^{(l)}$ 代表颗粒沿流向时均运动速度。

对比粗糙底床和光滑底床两种边界条件下的输沙率(图 7),光滑底床的输沙率明显大于粗糙底床情况。选取弱输沙强度下适用性较好的孟震公式[31]和 Guo 公式[32]作为输沙率的参考,可以发现模拟的粗糙底床条件输沙率与公式计算值较为接近,而大于 Kidanemariam 和 Uhlmann 基于数值模拟结果拟合的公式(KU 公式)[28],KU 公式是基于底床泥沙孔隙率较大的数值算例结果进行拟合的,故明显小于通常的输沙率公式。相比粗糙底床,光滑底床下的模拟值则明显偏大,结合固定颗粒条件下光滑底床和粗糙底床上颗粒受到的水流

作用力基本一致的结论，可以说明，光滑底床和粗糙底床条件输沙率的显著差异来自于底部光滑固壁和粗糙固壁对运动泥沙颗粒的阻力，粗糙底床条件考虑了不运动的床沙对运动泥沙产生的嵌入式阻挡和摩擦阻力作用，这与实际的近床面泥沙情况一致，而光滑底床对泥沙颗粒的阻力作用明显偏小，故而得到较大的输沙率。这表明输沙模拟时应当选择粗糙底床边界条件才更符合实际情况。

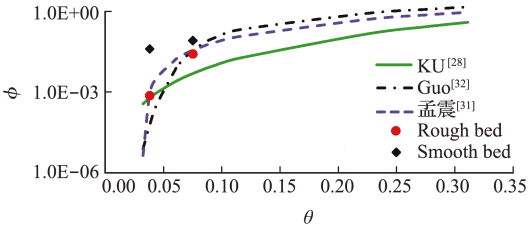


图 7　明渠层流底部稀疏泥沙颗粒运动的输沙模拟结果与输沙率公式对比

Fig. 7　Simulated sediment transport rate in laminar open channel flow with experimental formulas

6　结　论

通过网格精确解析的方法模拟了明渠层流中近壁面不同高度不同雷诺数条件下颗粒所受拖曳力，分析了明渠流底床边壁和水流惯性对拖曳力的影响规律，拟合了壁面影响下的拖曳力计算公式，并将该公式引入 CFD-DPM 模型应用于明渠层流底床上稀疏分布的泥沙输运模拟中，主要结论如下。

（1）明渠流底部壁面边界和水流惯性（颗粒雷诺数）对拖曳力的联合作用与其独立作用时的规律相似，拖曳力修正系数随颗粒雷诺数的增大而呈指数增长，随颗粒壁面间距离的减小而迅速增大。

（2）联合作用下的实际修正系数与各因素单独作用下的修正函数的乘积接近，误差在 20％以内。

（3）本文拟合公式可应用于粗糙底床条件，与 CFD-DPM 目前常用的单颗粒标准拖曳力公式和多颗粒均匀遮蔽的拖曳力公式相比，给出了更准确的水沙作用力结果。

（4）输沙模拟应当采用粗糙底床边界才能更好地体现实际中不动床沙对运动泥沙的阻挡作用。

参考文献（References）：

[1] 车海鸥，王　凯，张景新. 带自由表面水流与离散颗粒耦合模型研究 [J]. 计算力学学报，2016，**33**(5)：747-752.（CHE Hai-ou，WANG Kai，ZHANG Jing-xin. Study of numerical model coupling of hydrodynamic CFD-DEM simulation[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*，2016，**33**(5)：747-752.（in Chinese））

[2] Sun R，Xiao H. CFD-DEM simulations of current-induced dune formation and morphological evolution [J]. Advances in Water Resources，2016，**92**：228-239.

[3] 邱流潮，张之豪，袁林娟. 基于离散元法的干湿颗粒系统仿真[J]. 计算力学学报，2015，**32**(5)：681-684.（QIU Liu-chao，ZHANG Zhi-hao，YUAN Lin-juan. A discrete element method-based simulation platform for dry and wet particulate systems[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*，2015，**32**(5)：681-684.（in Chinese））

[4] 冯云田，赵婷婷，加藤淳，等. 粗糙颗粒的随机离散元模拟——随机法向接触定律（英文）[J]. 计算力学学报，2016，**33**(4)：629-636.（FENG Yun-tian，ZHAO Ting-ting，KATO Jun，et al. Stochastic discrete element modelling of rough particles—A random normal interaction law [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*，2016，**33**(4)：629-636.（in Chinese））

[5] 孙建军，张庆河. 后台阶下游水流泥沙运动模拟研究 [J]. 水道港口，2017，**38**(2)：109-114，125.（SUN Jian-jun，ZHANG Qing-he. Simulation of fluid-sediment particle motion at the downstream of backward-facing step flow[J]. *Journal of Waterway and Harbor*，2017，**38**(2)：109-114，125.（in Chinese））

[6] Xu S L，Sun R，Cai Y Q，et al. Study of sedimentation of non-cohesive particles via CFD-DEM simulations [J]. *Granular Matter*，2018，**20**(1)：4.

[7] Alihosseini M，Thamsen P U. Analysis of sediment transport in sewer pipes using a coupled CFD-DEM model and experimental work [J]. *Urban Water Journal*，2019，**16**(4)：259-268.

[8] Rao A A，Capecelatro J. Coarse-grained modeling of sheared granular beds [J]. *International Journal of Multiphase Flow*，2019，**114**：258-267.

[9] Jha S K，Bombardelli F A. Toward two-phase flow modeling of nondilute sediment transport in open channels [J]. *Journal of Geophysical Research*，2010，**115**(F3)：F03015.

[10] Schmeeckle M W. Numerical simulation of turbulence and sediment transport of medium sand [J]. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*，2014，**119**(6)：1240-1262.

[11] 宋晓阳，及春宁，许　栋. 明渠湍流边界层中颗粒的运动与分布 [J]. 力学学报，2015，**47**(2)：231-241.（SONG Xiao-yang，JI Chun-ning，XU Dong. Distribu-

tion and motion of particles in the turbulent boundary layer of channel flow[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, **47**(2): 231-241. (in Chinese))

[12] 肖柏青,李 然,戎贵文. 基于欧拉-拉格朗日方法的明渠中悬移质淤积数值模拟[J]. 水力发电学报, 2015,**34**(9):46-51.](XIAO Bai-qing, LI Ran, RONG Gui-wen. Eulerian-Lagrangian simulations of suspended sediment deposition in open channels[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, **34**(9): 46-51. (in Chinese))

[13] 喻黎明,谭 弘,邹小艳,等. 基于 CFD-DEM 耦合的迷宫流道水沙运动数值模拟 [J]. 农业机械学报, 2016,**47**(8):65-71. (YU Li-ming, TAN Hong, ZOU Xiao-yan, et al. Numerical simulation of water and sediment flow in labyrinth channel based on coupled CFD-DEM[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, **47**(8): 65-71. (in Chinese))

[14] Bravo-Blanco A, Sánchez-Medina A, Ayuga F. Analysis of the incipient motion of spherical particles in an open channel bed, using a coupled computational fluid dynamics—discrete element method model [J]. *Biosystems Engineering*, 2017, **155**: 68-76.

[15] 苏东升,张庆河,孙建军,等. 基于 CFD-DEM 耦合方法的近床面水流泥沙运动模拟研究 [J]. 水道港口, 2016, **37**(3): 224-230. (SU Dong-sheng, ZHANG Qing-he, SUN Jian-jun, et al. Simulation of fluid-sediment particle motion near bed based on CFD-DEM coupling method [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2016, **37**(3): 224-230. (in Chinese))

[16] 雷 明,赵 涛,周家文,等. 基于 CFD 与 DEM 耦合方法的河床变形数值模拟[J]. 泥沙研究, 2018, **43**(3):75-80. (LEI Ming, ZHAO Tao, ZHOU Jia-wen, et al. Numerical simulation of riverbed deformation based on CFD and DEM coupling method [J]. *Journal of Sediment Research*, 2018, **43**(3): 75-80. (in Chinese))

[17] Arolla S K, Desjardins O. Transport modeling of sedimenting particles in a turbulent pipe flow using Euler-Lagrange large eddy simulation [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, **75**: 1-11.

[18] Elghannay H, Tafti D. LES-DEM simulations of sediment transport [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2018, **33**(2): 137-148.

[19] O'neill M E. A sphere in contact with a plane wall in a slow linear shear flow [J]. *Chemical Engineering Science*, 1968, **23**(11): 1293-1298.

[20] Ibrahim A H, Dunn P F, Qazi M F. Experiments and validation of a model for microparticle detachment from a surface by turbulent air flow [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2008, **39**(8): 645-656.

[21] Liu C N, Chien C L, Lo C C, et al. Drag coefficient of a spherical particle attached on the flat surface [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2011, **11**(5): 482-486.

[22] Xie L, Zhang Q H, Zhang J F, et al. Drag force and torque of a stationary sphere in a uniform laminar open channel flow[J]. *Physics of Fluids*, 2018, **30**(12): 123302.

[23] Weller H G, Tabor G, Jasak H, et al. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques[J]. *Computers in Physics*, 1998, **12**(6): 620-631.

[24] Issa R I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting [J]. *Journal of Computational Physics*, 1986, **62**(1): 40-65.

[25] Morsi S A, Alexander A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, **55**(2): 193.

[26] Cheng N S. Comparison of formulas for drag coefficient and settling velocity of spherical particles [J]. *Powder Technology*, 2009, **189**(3): 395-398.

[27] Fernandes C, Semyonov D, Ferrás L L, et al. Validation of the CFD-DPM solver DPMFoam in OpenFOAM® through analytical, numerical and experimental comparisons [J]. *Granular Matter*, 2018, **20**(4): 1-18.

[28] Kidanemariam A G, Uhlmann M. Interface-resolved direct numerical simulation of the erosion of a sediment bed sheared by laminar channel flow [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2014, **67**: 174-188.

[29] Ergun S. Fluid flow through packed columns [J]. *Chemengprog*, 1952, **48**(2): 89-94.

[30] Wen C Y, Yu Y H. Mechanics of fluidization [J]. *Chemengprog Sympser*, 1966, **162**: 100-111.

[31] 孟 震,陈 槐,李丹勋,等. 推移质平衡输沙率公式研究[J]. 水利学报, 2015, **46**(009): 1080-1088. (MENG Zhen, CHEN Huai, LI Dan-xun, et al. Study of bed-load transport formulas[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, **46**(9): 1080-1088. (in Chinese))

[32] Guo J. Generalized bed-load function based on empirical data [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, **147**(8): 06021008.

Drag force of particle near bed in laminar open channel flow

XIE Lin[1]，　ZHANG Qing-he*[2]，　ZHANG Jin-feng[2]，　LIU Guang-wei[2]

(1. Key Laboratory of Engineering Sediment，Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering，M. O. T，Tianjin 300456，China；

2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety，Tianjin University，Tianjin 300350，China)

Abstract：Drag force is the main driving force of sediment movement under water. At present，the drag force formulae used in a coupled model of CFD-DPM (Computational Fluid Mechanics-Discrete Particle Method) for water and sediment simulation near bottom，do not consider the effect of sediment bed-induced wall effect. The drag forces of particles at different heights away from the bottom wall under different Reynolds numbers in laminar open channel flow were simulated. Based on the simulated forces，a modified formula for the drag force of a sediment particle near bottom under the combined influence of bottom boundary and fluid inertia in laminar open channel flow was fitted. Compared with two commonly used formulas in CFD-DPM，the standard drag force of a single particle and the uniformly hindered drag forces for multiple particles，the fitted formula produced better simulation results when compared with high-resolution reference values. When used in sediment transport simulation，the transport rate simulated by the fitted formula agrees with empirical formula prediction. The application analysis indicates that sediment transport simulation must be conducted above a rough bottom.

Key words：Drag force；particle near bed；laminar open channel flow；bed effect；finite Reynolds number

引用本文/Cite this paper：

谢　琳，张庆河，张金凤，等. 明渠层流近床面颗粒拖曳力研究[J]. 计算力学学报，2023，**40**(2)：208-215.

XIE Lin，ZHANG Qing-he，ZHANG Jin-feng，et al. Drag force of particle near bed in laminar open channel flow[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*，2023，**40**(2)：208-215.