(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国 际 局

(43) 国际公布日
2024 年 7 月 18 日 (18.07.2024)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2024/148671 A1

(51) 国际专利分类号:
G06F 30/28 (2020.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2023/080761

(22) 国际申请日: 2023 年 3 月 10 日 (10.03.2023)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202310041937.2 2023年1月13日 (13.01.2023) CN

(71) 申请人: 江 苏 大 学 (**JIANGSU UNIVERSITY**) [CN/CN]; 中 国 江 苏 省 镇 江 市 京 口 区 学 府 路 301号, Jiangsu 212013 (CN)。

(72) 发明人: 张 德 胜 (**ZHANG, Desheng**); 中国江苏省南京市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 高 一 博 (**GAO, Yibo**); 中国江苏省南京市京口区学府路301号, Jiangsu 212013 (CN)。 耿 琳 琳 (**GENG, Linlin**); 中国江苏省南京市京口区学府路301号, Jiangsu 212013 (CN)。 张 睿 杰 (**ZHANG, Ruijie**); 中 国 江 苏 省 南 京 市 京 口区学府路301号, Jiangsu 212013 (CN)。 田 中 杰 (**TIAN, Zhongjie**); 中国江苏省南京市京口区学府路301号, Jiangsu 212013 (CN)。

(74) 代理人: 南 京 智 造 力 知 识 产 权 代 理 有 限 公 司 (**NANJING IPZHI INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY CO., LTD.**); 中国江苏省南京市江宁区芝兰路18号4幢1202室, Jiangsu 211100 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,

(54) **Title:** GAS-LIQUID NUMERICAL SIMULATION DRAG FORCE CORRECTION METHOD AND SYSTEM, DEVICE, AND MEDIUM

(54) 发明名称: 一种气液数值模拟曳力修正方法、系统、设备及介质

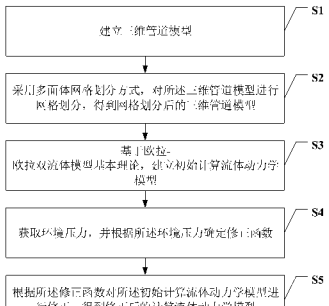


图 1

S1 Establish a three-dimensional pipeline model
S2 Perform grid division on the three-dimensional pipeline model by using a polyhedral grid division mode, to obtain a three-dimensional pipeline model having undergone grid division
S3 On the basis of the basic theory of an Euler-Euler two-fluid model, establish an initial computational fluid dynamics model
S4 Acquire environment pressure, and determine a correction function according to the environment pressure
S5 Correct the initial computational fluid dynamics model according to the correction function to obtain a corrected computational fluid dynamics model
S6 According to the corrected computational fluid dynamics model and the three-dimensional pipeline model having undergone grid division, perform unsteady simulation of gas-liquid two-phase flow in a pipe to obtain gas holdup distribution in the pipe

(57) **Abstract:** The present invention relates to the technical field of multi-phase flow simulation, and provides a gas-liquid numerical simulation drag force correction method and system, a device, and a medium. The method comprises: establishing a three-dimensional pipeline model; performing grid division on the three-dimensional pipeline model by using a polyhedral grid division mode, to obtain a three-dimensional pipeline model having undergone grid division; on the basis of the basic theory of an Euler-Euler two-fluid model, establishing an initial computational fluid dynamics model; acquiring environment pressure, and determining a correction function according to the environment pressure; correcting the initial computational fluid dynamics model according to the correction function to obtain a corrected computational fluid dynamics model; and according to the corrected computational fluid dynamics model and the three-dimensional pipeline model having undergone grid division, performing unsteady simulation of gas-liquid two-phase flow in a pipe to obtain gas holdup distribution in the pipe. According to the present invention, inter-phase drag force can be corrected according to environment pressure, and the accuracy of gas holdup prediction in a high-pressure environment is improved.

WO 2024/148671 A1

[见续页]

NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:
— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要: 本发明公开一种气液数值模拟曳力修正方法、系统、设备及介质，涉及多相流模拟技术领域，该方法包括：建立三维管道模型；采用多面体网格划分方式，对三维管道模型进行网格划分，得到网格划分后的三维管道模型；基于欧拉-欧拉双流体模型基本理论，建立初始计算流体动力学模型；获取环境压力，并根据环境压力确定修正函数；根据修正函数对初始计算流体动力学模型进行修正，得到修正后的计算流体动力学模型；根据修正后的计算流体动力学模型和网格划分后的三维管道模型，进行管内气液两相流的非定常模拟，得到管内的气含率分布。本发明能够根据环境压力修正相间曳力的大小，提高对高压环境下气含率预测的准确性。

一种气液数值模拟曳力修正方法、系统、设备及介质

技术领域

本发明涉及多相流模拟技术领域，特别是涉及一种气液数值模拟曳力修正方法、系统、设备及介质。

背景技术

海洋中蕴藏着丰富的石油、天然气等能源资源，约占油气资源总量的34%，而其中 70%又都处于深海区域，开发潜力以及开采难度都十分巨大。为了解决中国油气对外依存度过高的问题，需要尽快大力开展中国的深海油气勘探与开发，深海油气开采已成为保障中国能源安全的重要举措。

现如今，在深海油气输运中，由于气液混输技术大幅简化了开采工艺流程，节省了管道铺设成本、提高了油井采收率，具有高效、节能、环保的优点，已逐渐成为深海油气输运的首选方案。深海油气的主要成分为天然气和石油的气液混合物，因此深海油气输运本质上是一种高压条件下气液两相流混输的科学问题。

压力的变化对于两相流中气泡的动力学模型有着很大的影响，在高压环境下需要对气液两相数值模型进行修正。然而现有技术尚且缺乏相关研究，现有数值模型在对高压环境下的气含率预测中，存在准确率不高的问题。

发明内容

本发明的目的是提供一种气液数值模拟曳力修正方法、系统、设备及介质，能够根据环境压力修正相间曳力的大小，提高对高压环境下气含率预测的准确性。

为实现上述目的，本发明提供了如下方案：

一种气液数值模拟曳力修正方法，包括：

建立三维管道模型；

采用多面体网格划分方式，对所述三维管道模型进行网格划分，得到网

格划分后的三维管道模型；

基于欧拉-欧拉双流体模型基本理论，建立初始计算流体动力学模型；

获取环境压力，并根据所述环境压力确定修正函数；

根据所述修正函数对所述初始计算流体动力学模型进行修正，得到修正后的计算流体动力学模型；

根据所述修正后的计算流体动力学模型和所述网格划分后的三维管道模型，进行管内气液两相流的非定常模拟，得到管内的气含率分布；所述气含率分布表示在所述三维管道模型的设定位置截面处，气相的体积分数随径向位置的变化情况。

可选地，所述初始计算流体动力学模型包括：液相连续性方程、气相连续性方程、液相动量方程和气相动量方程；

所述液相连续性方程，具体公式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_l\rho_l\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_l\rho_l\boldsymbol{u}_l\right)=S_l;$$

所述气相连续性方程，具体公式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_g\rho_g\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_g\rho_g\boldsymbol{u}_g\right)=S_g;$$

其中，α_l 为液相的体积分数，α_g 为气相的体积分数；ρ_l 为液相的密度，ρ_g 为气相的密度；$\boldsymbol{u}_l$ 为液相的速度矢量，$\boldsymbol{u}_g$ 为气相的速度矢量；S_l 为液相源项，S_g 为气相源项；t 为时间；

所述液相动量方程，具体公式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_l\rho_l\boldsymbol{u}_l\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_l\rho_l\boldsymbol{u}_l\boldsymbol{u}_l\right)=-\alpha_l\nabla P+\nabla\cdot\boldsymbol{\tau}_l+\alpha_l\rho_l\boldsymbol{g}+\beta\left(\boldsymbol{u}_g-\boldsymbol{u}_l\right)+\boldsymbol{F}_{lg};$$

所述气相动量方程，具体公式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_g\rho_g\boldsymbol{u}_g\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_g\rho_g\boldsymbol{u}_g\boldsymbol{u}_g\right)=-\alpha_g\nabla P+\nabla\cdot\boldsymbol{\tau}_g+\alpha_g\rho_g\boldsymbol{g}+\beta\left(\boldsymbol{u}_l-\boldsymbol{u}_g\right)+\boldsymbol{F}_{gl};$$

其中，$\boldsymbol{g}$ 为重力加速度矢量；$\boldsymbol{\tau}_l$ 为液相应力张量，$\boldsymbol{\tau}_g$ 为气相应力张量；β 为相间动量交换系数；$\boldsymbol{F}_{lg}$ 为除曳力之外，液相相对于气相的其他相间力之和，$\boldsymbol{F}_{gl}$ 为除曳力之外，气相相对于液相的其他相间力之和，且 $\boldsymbol{F}_{lg}=-\boldsymbol{F}_{gl}$，所述其

他相间力包括升力、壁面润滑力、湍流扩散力和虚拟质量力。

可选地，所述修正函数的具体公式为：

$$\xi=\begin{cases}0.45\left(\left(\frac{P}{P_0}\right)-9.9\right)^{0.05} & P\geq 1.0\text{MPa}\\ 0.076\left(\frac{P}{P_0}\right)-0.4 & P<1.0\text{MPa}\end{cases};$$

其中，P_0为标准大气压，P为环境压力，ξ为相间动量交换系数的修正函数。

可选地，所述修正后的计算流体动力学模型包括：液相连续性方程、气相连续性方程、修正后的液相动量方程和修正后的气相动量方程；

所述修正后的液相动量方程，具体公式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_l\rho_l\boldsymbol{u}_l\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_l\rho_l\boldsymbol{u}_l\boldsymbol{u}_l\right)=-\alpha_l\nabla P+\nabla\cdot\boldsymbol{\tau}_l+\alpha_l\rho_l\boldsymbol{g}+\xi\beta\left(\boldsymbol{u}_g-\boldsymbol{u}_l\right)+\boldsymbol{F}_{lg};$$

所述修正后的气相动量方程，具体公式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_g\rho_g\boldsymbol{u}_g\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_g\rho_g\boldsymbol{u}_g\boldsymbol{u}_g\right)=-\alpha_g\nabla P+\nabla\cdot\boldsymbol{\tau}_g+\alpha_g\rho_g\boldsymbol{g}+\xi\beta\left(\boldsymbol{u}_l-\boldsymbol{u}_g\right)+\boldsymbol{F}_{gl}。$$

可选地，所述三维管道模型的管径为 0.15 米，总长为 6.6 米。

可选地，所述网格划分后的三维管道模型中的总网格数为 535372 个。

一种气液数值模拟曳力修正系统，包括：

管道模型建立模块，用于建立三维管道模型；

模型网格划分模块，用于采用多面体网格划分方式，对所述三维管道模型进行网格划分，得到网格划分后的三维管道模型；

计算流体动力学模型建立模块，用于基于欧拉-欧拉双流体模型基本理论，建立初始计算流体动力学模型；

修正函数确定模块，用于获取环境压力，并根据所述环境压力确定修正函数；

计算流体动力学模型修正模块，用于根据所述修正函数对所述初始计算流体动力学模型进行修正，得到修正后的计算流体动力学模型；

气液数值模拟模块，用于根据所述修正后的计算流体动力学模型和所述网格划分后的三维管道模型，进行管内气液两相流的非定常模拟，得到管内的气含率分布；所述气含率分布表示在所述三维管道模型的设定位置截面处，气相的体积分数随径向位置的变化情况。

一种电子设备，包括存储器及处理器，所述存储器用于存储计算机程序，所述处理器运行所述计算机程序以使所述电子设备执行上述的气液数值模拟曳力修正方法。

一种计算机可读存储介质，其存储有计算机程序，所述计算机程序被处理器执行时实现上述的气液数值模拟曳力修正方法。

根据本发明提供的具体实施例，本发明公开了以下技术效果：

本发明提供的气液数值模拟曳力修正方法，通过获取环境压力，并根据环境压力确定修正函数，进而根据修正函数对初始计算流体动力学模型进行修正，能够对不同压力条件下的相间曳力的大小进行修正，从而使修正后的计算流体动力学模型能够更加精确地预测管内的气含率分布，特别是能够有效避免现有数值模型对于流场中压力的强度在 0.5Mpa~2Mpa 范围内的高压环境下的气含率的错误预测。

附图说明

为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。

图 1 为本发明提供的气液数值模拟曳力修正方法的流程图；

图 2 为本发明提供的气液数值模拟曳力修正方法的具体流程图；

图 3 为本发明提供的三维管道模型的结构示意图；

图 4 为本发明提供的网格划分后的三维管道模型的截面示意图；

图 5 为本发明提供的 1.0MPa 的压力下气含率分布对比图；

图 6 为本发明提供的 2.0MPa 的压力下气含率分布对比图；

图 7 为本发明提供的气液数值模拟曳力修正系统的模块图。

符号说明：

管道模型建立模块—1，模型网格划分模块—2，计算流体动力学模型建立模块—3，修正函数确定模块—4，计算流体动力学模型修正模块—5，气液数值模拟模块—6。

具体实施方式

下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明保护的范围。

压力的变化对于两相流中气泡的动力学模型有着很大的影响，在高压环境下需要对气液两相数值模型进行修正。Krishna 首先提出压力的影响主要在两个方面：一方面压力的增加增大了气相密度，另一方面压力的增加减小了气泡上升速度，对气泡在主相中的运动特征产生较大影响。

因此，建立考虑气泡在压力影响下的修正模型并且能够统一描述压力对气相动力学行为的影响机理，这对于深海油气开发中涉及的高压环境气液两相数值模拟技术的发展将有重要的意义。本发明是一种将压力对气液两相流的影响引入到曳力模型中的修正方法。

具体地，本发明的目的是提供一种气液数值模拟曳力修正方法、系统、设备及介质，能够根据环境压力修正相间曳力的大小，提高对高压环境下气含率预测的准确性。

为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂，下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明。

实施例一

如图 1 及图 2 所示，本发明提供一种气液数值模拟曳力修正方法，包括：

步骤 S1：建立三维管道模型。

在本实施例中，所述三维管道模型的管径为 0.15 米，总长为 6.6 米，其结构参见图 3。

步骤 S2：采用多面体网格划分方式，对所述三维管道模型进行网格划分，得到网格划分后的三维管道模型。

在本实施例中，网格划分后的三维管道模型的截面如图 4 所示，采用多面体网格划分方式，网格大小约为气泡直径的 1.2 倍，总网格数为 535372。

步骤 S3：基于欧拉-欧拉双流体模型基本理论，建立初始计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）模型。

具体地，所述初始计算流体动力学模型包括：液相连续性方程、气相连续性方程、液相动量方程和气相动量方程。

所述液相连续性方程，具体公式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_l\rho_l\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_l\rho_l\boldsymbol{u}_l\right)=S_l;$$

所述气相连续性方程，具体公式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_g\rho_g\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_g\rho_g\boldsymbol{u}_g\right)=S_g;$$

其中，下标 l 和 g 分别表示液相和气相，α_l 为液相的体积分数，α_g 为气相的体积分数；ρ_l 为液相的密度，ρ_g 为气相的密度；$\boldsymbol{u}_l$ 为液相的速度矢量，$\boldsymbol{u}_g$ 为气相的速度矢量；S_l 为液相源项，S_g 为气相源项，一般均为 0；t 为时间；∇ 表示哈密顿算子。

所述液相动量方程，具体公式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_l\rho_l\boldsymbol{u}_l\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_l\rho_l\boldsymbol{u}_l\boldsymbol{u}_l\right)=-\alpha_l\nabla P+\nabla\cdot\boldsymbol{\tau}_l+\alpha_l\rho_l\boldsymbol{g}+\beta\left(\boldsymbol{u}_g-\boldsymbol{u}_l\right)+\boldsymbol{F}_{lg};$$

所述气相动量方程，具体公式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_g\rho_g\boldsymbol{u}_g\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_g\rho_g\boldsymbol{u}_g\boldsymbol{u}_g\right)=-\alpha_g\nabla P+\nabla\cdot\boldsymbol{\tau}_g+\alpha_g\rho_g\boldsymbol{g}+\beta\left(\boldsymbol{u}_l-\boldsymbol{u}_g\right)+\boldsymbol{F}_{gl};$$

其中，$\boldsymbol{g}$ 为重力加速度矢量；$\boldsymbol{\tau}_l$ 为液相应力张量，$\boldsymbol{\tau}_g$ 为气相应力张量；β 为相间动量交换系数，决定着曳力的大小；$\boldsymbol{F}_{lg}$ 为除曳力之外，液相相对于气

相的其他相间力之和，$\boldsymbol{F}_{gl}$为除曳力之外，气相相对于液相的其他相间力之和，且$\boldsymbol{F}_{lg}$=-$\boldsymbol{F}_{gl}$，所述其他相间力包括升力、壁面润滑力、湍流扩散力和虚拟质量力等。

具体地，气相与液相存在的相互作用力有多种，包括曳力、升力、壁面润滑力、湍流扩散力和虚拟质量力等，其中最主要的是曳力项$\beta\left(\boldsymbol{u}_l-\boldsymbol{u}_g\right)$，而$\beta$为作为相间动量交换系数，在本发明中，需要进行相应修正。

步骤S4：获取环境压力，并根据所述环境压力确定修正函数。

在不同压力下，模拟中气含率（即气相的体积分数）α_g趋于稳定后，α_g与压力P呈现一定的函数关系；根据其关系，采用拟合算法拟合出压力的修正函数ξ，具体的修正方法将压力的影响分为两个区间，当环境压力小于1MPa时，修正因子采用线性式；当环境压力大于1MPa时，修正因子采用幂函数式。

所述修正函数的具体公式为：

$$\xi=\begin{cases}0.45\left(\left(\dfrac{P}{P_0}\right)-9.9\right)^{0.05} & P\geq 1.0\text{MPa}\\ 0.076\left(\dfrac{P}{P_0}\right)-0.4 & P<1.0\text{MPa}\end{cases};$$

其中，P_0为标准大气压，P为环境压力，ξ为相间动量交换系数的修正函数。

步骤S5：根据所述修正函数对所述初始计算流体动力学模型进行修正，得到修正后的计算流体动力学模型。

具体地，所述修正后的计算流体动力学模型包括：液相连续性方程、气相连续性方程、修正后的液相动量方程和修正后的气相动量方程。

所述修正后的液相动量方程，具体公式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_l\rho_l\boldsymbol{u}_l\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_l\rho_l\boldsymbol{u}_l\boldsymbol{u}_l\right)=-\alpha_l\nabla P+\nabla\cdot\boldsymbol{\tau}_l+\alpha_l\rho_l\boldsymbol{g}+\xi\beta\left(\boldsymbol{u}_g-\boldsymbol{u}_l\right)+\boldsymbol{F}_{lg};$$

所述修正后的气相动量方程，具体公式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_g\rho_g\boldsymbol{u}_g\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_g\rho_g\boldsymbol{u}_g\boldsymbol{u}_g\right)=-\alpha_g\nabla P+\nabla\cdot\boldsymbol{\tau}_g+\alpha_g\rho_g\boldsymbol{g}+\xi\beta\left(\boldsymbol{u}_l-\boldsymbol{u}_g\right)+\boldsymbol{F}_{gl}。$$

步骤 S6：根据所述修正后的计算流体动力学模型和所述网格划分后的三维管道模型，进行管内气液两相流的非定常模拟，得到管内的气含率分布；所述气含率分布表示在所述三维管道模型的设定位置截面处，气相的体积分数随径向位置的变化情况。

具体地，进行管内气液两相流的非定常模拟，将修正过后的曳力模型编译到其相间力模型中，利用修正函数对不同压力条件下的气泡曳力进行修正预测，最终取模拟的时均值作为评价标准。图 5、图 6 分别给出了压力在 1.0MPa 和 2.0MPa 下的平均气含率分布图，由图 5 及图 6 可以发现，采用本发明所提出的修正方法所预测得到的气含率分布，与实验测得的气含率分布情况更加吻合，即本发明可以更加精确的预测管内高压条件下的气含率分布。

实施例二

如图 7 所示，为了执行上述实施例一对应的方法，以实现相应的功能和技术效果，下面提供一种气液数值模拟曳力修正系统，包括：

管道模型建立模块 1，用于建立三维管道模型。

模型网格划分模块 2，用于采用多面体网格划分方式，对所述三维管道模型进行网格划分，得到网格划分后的三维管道模型。

计算流体动力学模型建立模块 3，用于基于欧拉-欧拉双流体模型基本理论，建立初始计算流体动力学模型。

修正函数确定模块 4，用于获取环境压力，并根据所述环境压力确定修正函数。

计算流体动力学模型修正模块 5，用于根据所述修正函数对所述初始计算流体动力学模型进行修正，得到修正后的计算流体动力学模型。

气液数值模拟模块 6，用于根据所述修正后的计算流体动力学模型和所述网格划分后的三维管道模型，进行管内气液两相流的非定常模拟，得到管内的气含率分布；所述气含率分布表示在所述三维管道模型的设定位置截面处，气相的体积分数随径向位置的变化情况。

实施例三

本发明实施例还提供一种电子设备，包括存储器和处理器，该存储器用于存储计算机程序，该处理器用于运行计算机程序以使电子设备执行实施例一中的气液数值模拟曳力修正方法。所述电子设备可以是服务器。

另外，本发明还提供一种计算机可读存储介质，其存储有计算机程序，该计算机程序被处理器执行时实现实施例一中的气液数值模拟曳力修正方法。

综上所述，本发明具体公开了一种基于欧拉-欧拉双流体模型理论气相曳力的压力修正方法，在深海油气混输过程中，所处的环境即为高压环境，并且，不同的压力下气相具有不同的曳力，导致不同的相含率分布，则可利用本发明的修正方法对气含率进行合理预测。本发明提供的适用于高压条件下的气液数值模拟曳力修正方法，基于欧拉-欧拉双流体模型基本理论，根据气液相间曳力随环境压力的变化关系，通过数据拟合方式给出了受压力影响的修正关系，可以更加合理的预测不同压力下的流域内气含率分布。针对不同压力范围采取不同的修正系数，在不同的压力下相间曳力呈现不同的趋势，这一修正是针对高压环境以及具有较大的压力变化尺度的气液两相模拟而设计的，根据流场中压力的强度大小来确定修正曳力的大小，可以有效避免现有数值模型对于高压环境下对气含率的错误预测。

本说明书中各个实施例采用递进的方式描述，每个实施例重点说明的都是与其他实施例的不同之处，各个实施例之间相同相似部分互相参见即可。对于实施例公开的系统而言，由于其与实施例公开的方法相对应，所以描述的比较简单，相关之处参见方法部分说明即可。

本文中应用了具体个例对本发明的原理及实施方式进行了阐述，以上实施例的说明只是用于帮助理解本发明的方法及其核心思想；同时，对于本领域的一般技术人员，依据本发明的思想，在具体实施方式及应用范围上均会有改变之处。综上所述，本说明书内容不应理解为对本发明的限制。

权 利 要 求 书

1.一种气液数值模拟曳力修正方法，其特征在于，包括：

建立三维管道模型；

采用多面体网格划分方式，对所述三维管道模型进行网格划分，得到网格划分后的三维管道模型；

基于欧拉-欧拉双流体模型基本理论，建立初始计算流体动力学模型；

获取环境压力，并根据所述环境压力确定修正函数；

根据所述修正函数对所述初始计算流体动力学模型进行修正，得到修正后的计算流体动力学模型；

根据所述修正后的计算流体动力学模型和所述网格划分后的三维管道模型，进行管内气液两相流的非定常模拟，得到管内的气含率分布；所述气含率分布表示在所述三维管道模型的设定位置截面处，气相的体积分数随径向位置的变化情况。

2.根据权利要求 1 所述的气液数值模拟曳力修正方法，其特征在于，所述初始计算流体动力学模型包括：液相连续性方程、气相连续性方程、液相动量方程和气相动量方程；

所述液相连续性方程，具体公式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_l\rho_l\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_l\rho_l\boldsymbol{u}_l\right)=S_l;$$

所述气相连续性方程，具体公式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_g\rho_g\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_g\rho_g\boldsymbol{u}_g\right)=S_g;$$

其中，α_l 为液相的体积分数，α_g 为气相的体积分数；ρ_l 为液相的密度，ρ_g 为气相的密度；$\boldsymbol{u}_l$ 为液相的速度矢量，$\boldsymbol{u}_g$ 为气相的速度矢量；S_l 为液相源项，S_g 为气相源项；t 为时间；

所述液相动量方程，具体公式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_l\rho_l\boldsymbol{u}_l\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_l\rho_l\boldsymbol{u}_l\boldsymbol{u}_l\right)=-\alpha_l\nabla P+\nabla\cdot\boldsymbol{\tau}_l+\alpha_l\rho_l\boldsymbol{g}+\beta\left(\boldsymbol{u}_g-\boldsymbol{u}_l\right)+\boldsymbol{F}_{lg};$$

所述气相动量方程，具体公式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_g\rho_g\boldsymbol{u}_g\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_g\rho_g\boldsymbol{u}_g\boldsymbol{u}_g\right)=-\alpha_g\nabla P+\nabla\cdot\boldsymbol{\tau}_g+\alpha_g\rho_g\boldsymbol{g}+\beta\left(\boldsymbol{u}_l-\boldsymbol{u}_g\right)+\boldsymbol{F}_{gl}\ ;$$

其中，$\boldsymbol{g}$为重力加速度矢量；$\boldsymbol{\tau}_l$为液相应力张量，$\boldsymbol{\tau}_g$为气相应力张量；β为相间动量交换系数；$\boldsymbol{F}_{lg}$为除曳力之外，液相相对于气相的其他相间力之和，$\boldsymbol{F}_{gl}$为除曳力之外，气相相对于液相的其他相间力之和，且$\boldsymbol{F}_{lg}$=-$\boldsymbol{F}_{gl}$，所述其他相间力包括升力、壁面润滑力、湍流扩散力和虚拟质量力。

3.根据权利要求2所述的气液数值模拟曳力修正方法，其特征在于，所述修正函数的具体公式为：

$$\xi=\begin{cases}0.45\left(\left(\dfrac{P}{P_0}\right)-9.9\right)^{0.05} & P\geq 1.0\text{MPa}\\ 0.076\left(\dfrac{P}{P_0}\right)-0.4 & P<1.0\text{MPa}\end{cases};$$

其中，P_0为标准大气压，P为环境压力，ξ为相间动量交换系数的修正函数。

4.根据权利要求3所述的气液数值模拟曳力修正方法，其特征在于，所述修正后的计算流体动力学模型包括：液相连续性方程、气相连续性方程、修正后的液相动量方程和修正后的气相动量方程；

所述修正后的液相动量方程，具体公式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_l\rho_l\boldsymbol{u}_l\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_l\rho_l\boldsymbol{u}_l\boldsymbol{u}_l\right)=-\alpha_l\nabla P+\nabla\cdot\boldsymbol{\tau}_l+\alpha_l\rho_l\boldsymbol{g}+\xi\beta\left(\boldsymbol{u}_g-\boldsymbol{u}_l\right)+\boldsymbol{F}_{lg}\ ;$$

所述修正后的气相动量方程，具体公式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_g\rho_g\boldsymbol{u}_g\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_g\rho_g\boldsymbol{u}_g\boldsymbol{u}_g\right)=-\alpha_g\nabla P+\nabla\cdot\boldsymbol{\tau}_g+\alpha_g\rho_g\boldsymbol{g}+\xi\beta\left(\boldsymbol{u}_l-\boldsymbol{u}_g\right)+\boldsymbol{F}_{gl}\ 。$$

5.根据权利要求1所述的气液数值模拟曳力修正方法，其特征在于，所述三维管道模型的管径为0.15米，总长为6.6米。

6.根据权利要求5所述的气液数值模拟曳力修正方法，其特征在于，所述网格划分后的三维管道模型中的总网格数为535372个。

7.一种气液数值模拟曳力修正系统，其特征在于，包括：

管道模型建立模块，用于建立三维管道模型；

模型网格划分模块，用于采用多面体网格划分方式，对所述三维管道模型进行网格划分，得到网格划分后的三维管道模型；

计算流体动力学模型建立模块，用于基于欧拉-欧拉双流体模型基本理论，建立初始计算流体动力学模型；

修正函数确定模块，用于获取环境压力，并根据所述环境压力确定修正函数；

计算流体动力学模型修正模块，用于根据所述修正函数对所述初始计算流体动力学模型进行修正，得到修正后的计算流体动力学模型；

气液数值模拟模块，用于根据所述修正后的计算流体动力学模型和所述网格划分后的三维管道模型，进行管内气液两相流的非定常模拟，得到管内的气含率分布；所述气含率分布表示在所述三维管道模型的设定位置截面处，气相的体积分数随径向位置的变化情况。

8.一种电子设备，其特征在于，包括存储器及处理器，所述存储器用于存储计算机程序，所述处理器运行所述计算机程序以使所述电子设备执行如权利要求 1 至 6 中任意一项所述的气液数值模拟曳力修正方法。

9.一种计算机可读存储介质，其特征在于，其存储有计算机程序，所述计算机程序被处理器执行时实现如权利要求 1 至 6 中任意一项所述的气液数值模拟曳力修正方法。

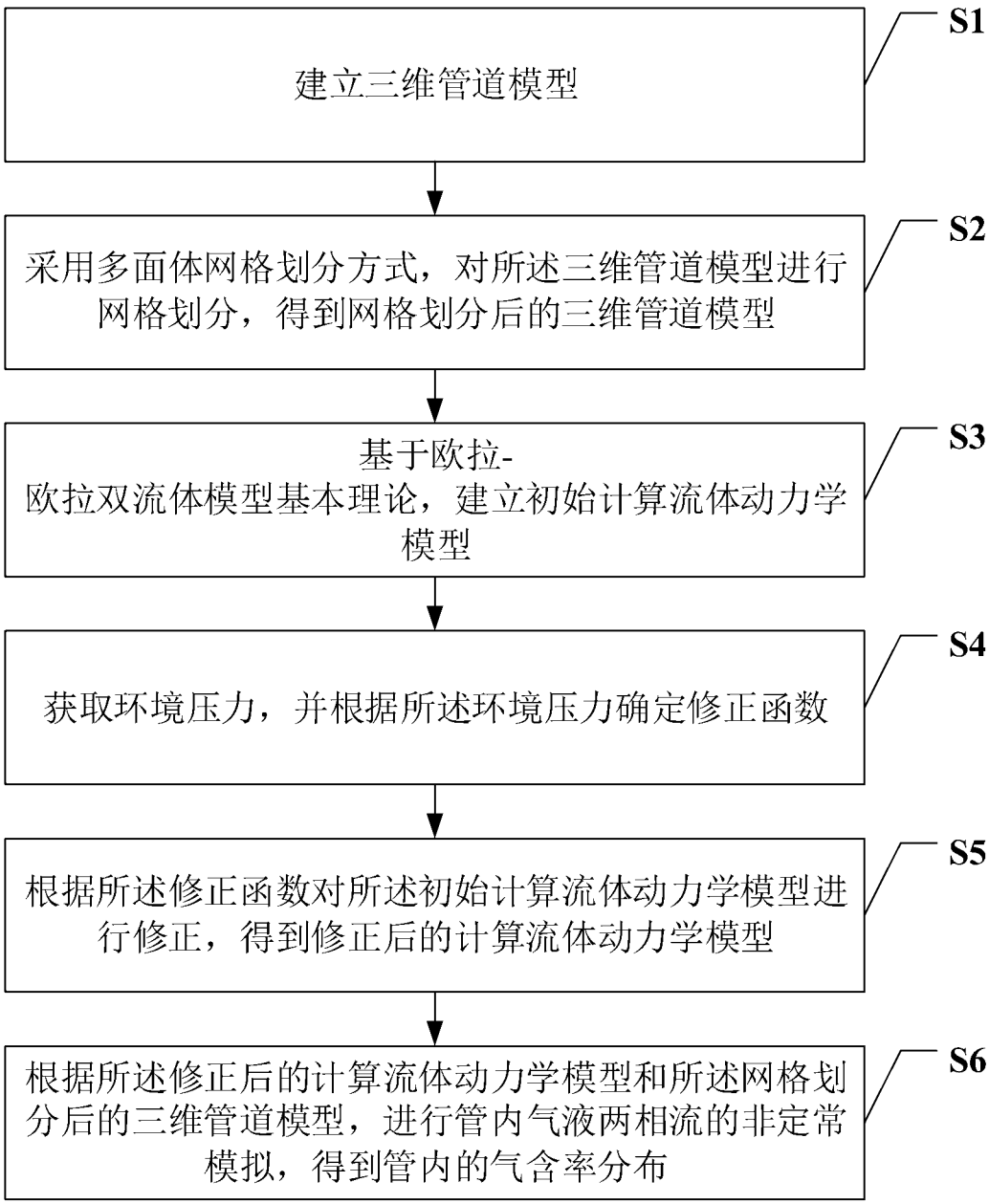

建立三维管道模型
S1
采用多面体网格划分方式，对所述三维管道模型进行网格划分，得到网格划分后的三维管道模型
S2
基于欧拉-欧拉双流体模型基本理论，建立初始计算流体动力学模型
S3
获取环境压力，并根据所述环境压力确定修正函数
S4
根据所述修正函数对所述初始计算流体动力学模型进行修正，得到修正后的计算流体动力学模型
S5
根据所述修正后的计算流体动力学模型和所述网格划分后的三维管道模型，进行管内气液两相流的非定常模拟，得到管内的气含率分布
S6

图 1

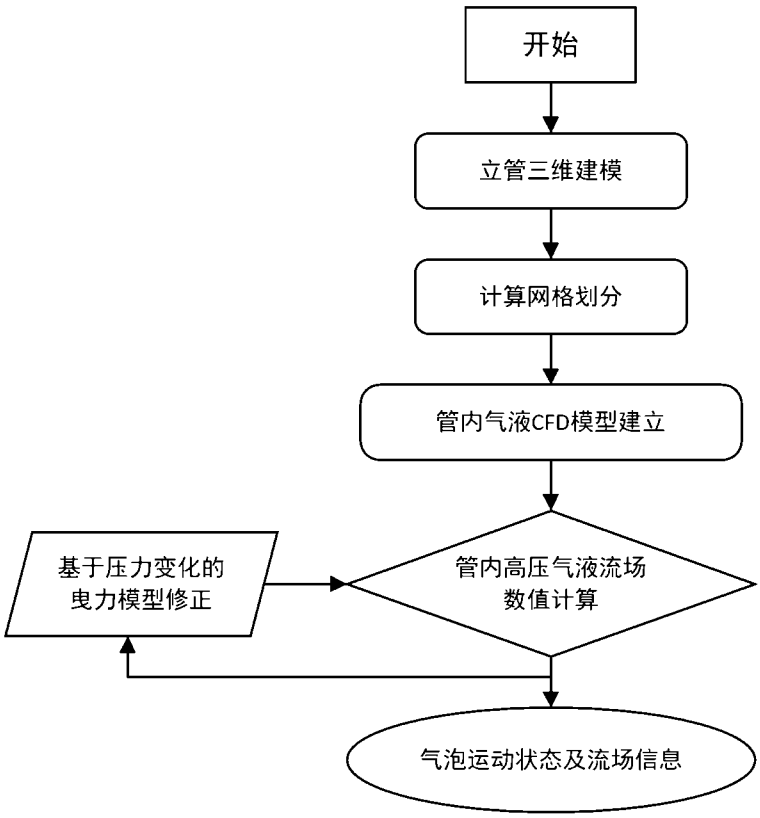

开始
立管三维建模
计算网格划分
管内气液CFD模型建立
基于压力变化的
曳力模型修正
管内高压气液流场
数值计算
气泡运动状态及流场信息

图 2

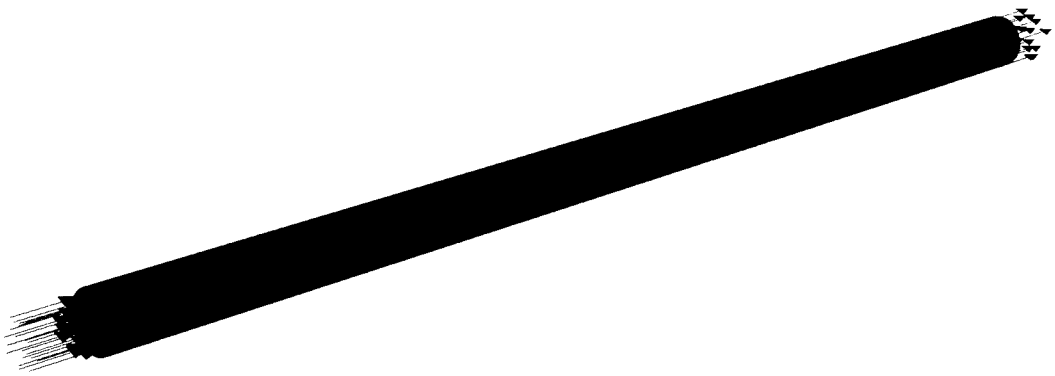


图 3

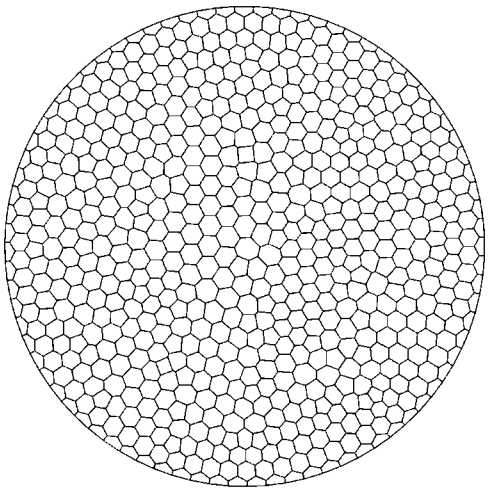


图 4

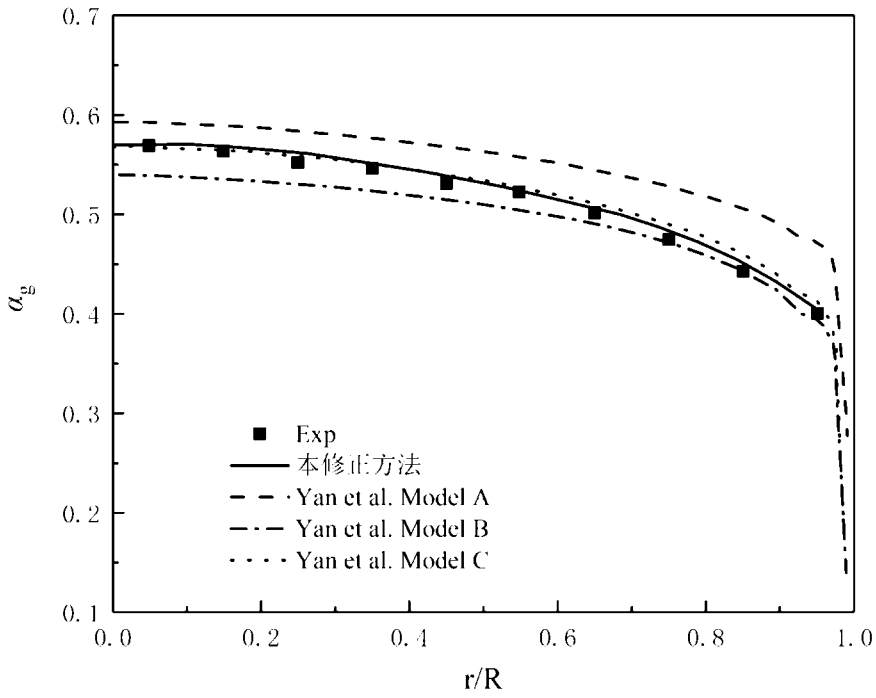

0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
α_g
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
r/R
Exp
本修正方法
Yan et al. Model A
Yan et al. Model B
Yan et al. Model C

图 5

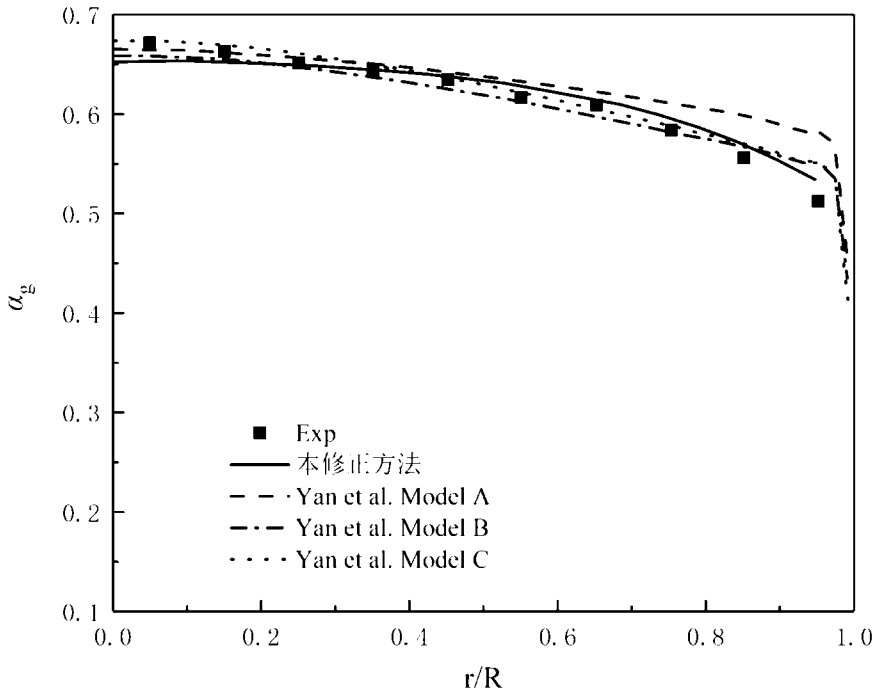

0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
α_g
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
r/R
Exp
本修正方法
Yan et al. Model A
Yan et al. Model B
Yan et al. Model C

图 6

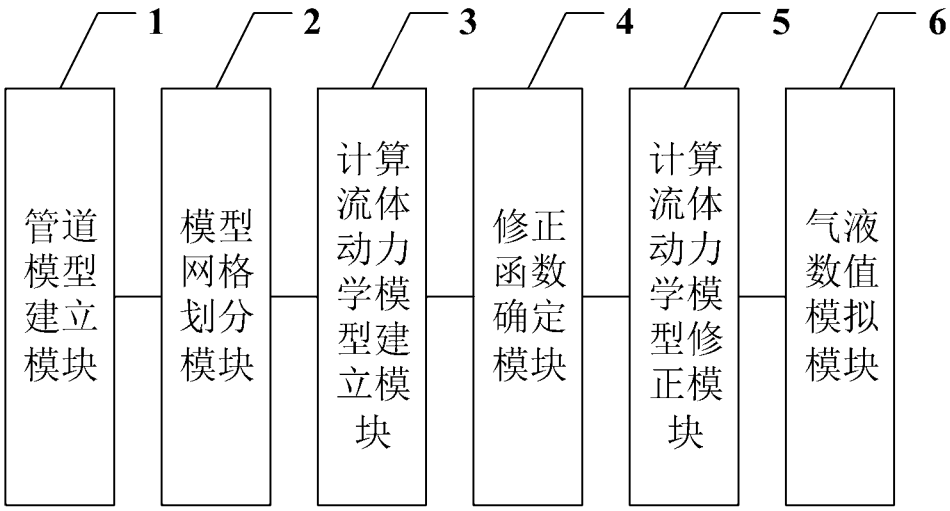

1
管道模型建立模块
2
模型网格划分模块
3
计算流体动力学模型建立模块
4
修正函数确定模块
5
计算流体动力学模型修正模块
6
气液数值模拟模块

图 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2023/080761

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F30/28(2020.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC: G06F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNKI, CNTXT, CNABS, ENTXT, VEN: 气液, 模拟, 曳力, 修正, 气含率, 欧拉, 网格, 模型, vaporliquid, simulat+, drag, gas holdup, Euler, grid, model

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	李孟 等 (LI, Meng et al.). "鼓泡塔气液两相流不同曳力模型的数值模拟 (Numerical Simulation of Gas-Liquid Two-phase Flow in a Bubble Column with Various Drag Models)" *过程工程学报 (The Chinese Journal of Process Engineering),* Vol. 15, No. 02, 15 April 2015 (2015-04-15), 181-188 abstract, and text, sections 2-4	1-9
A	CN 106682348 A (FUZHOU UNIVERSITY) 17 May 2017 (2017-05-17) entire document	1-9
A	CN 107132156 A (XI'AN SHIYOU UNIVERSITY) 05 September 2017 (2017-09-05) entire document	1-9
A	US 2012053908 A1 (KIM, Doyub et al.) 01 March 2012 (2012-03-01) entire document	1-9
A	李光 等 (LI, Guang et al.). "鼓泡塔反应器气液两相流CFD数值模拟 (CFD simulation of gas-liquid flow in bubble column)" *化工学报 (CIESC Journal),* Vol. 59, No. 08, 15 August 2008 (2008-08-15), 1958-1964 entire document	1-9

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"D" document cited by the applicant in the international application
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
12 June 2023	**19 June 2023**
Name and mailing address of the ISA/CN **China National Intellectual Property Administration (ISA/CN)** **China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing 100088**	Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2023/080761

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN 106682348 A	17 May 2017	None	
CN 107132156 A	05 September 2017	None	
US 2012053908 A1	01 March 2012	None	

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2023/080761

A. 主题的分类

G06F30/28(2020.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

IPC：G06F

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称，和使用的检索词（如使用））

CNKI, CNTXT, CNABS, ENTXT, VEN：气液、模拟、曳力、修正、气含率、欧拉、网格、模型、vaporliquid、simulat+、drag、gas holdup、Euler、grid、model

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	李孟 等. "鼓泡塔气液两相流不同曳力模型的数值模拟" 过程工程学报, 第15卷，第02期，2015年4月15日 (2015-04-15)，181-188 摘要、正文第2-4节	1-9
A	CN 106682348 A (福州大学) 2017年5月17日 (2017-05-17) 全文	1-9
A	CN 107132156 A (西安石油大学) 2017年9月5日 (2017-09-05) 全文	1-9
A	US 2012053908 A1 (KIM, Doyub 等) 2012年3月1日 (2012-03-01) 全文	1-9
A	李光 等. "鼓泡塔反应器气液两相流CFD数值模拟" 化工学报, 第59卷，第08期，2008年8月15日 (2008-08-15)，1958-1964 全文	1-9

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。

☑ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型：

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“D” 申请人在国际申请中引证的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件，或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件（如具体说明的）

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布，与申请不相抵触，但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件，单独考虑该文件，认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件，当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时，要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期
2023年6月12日	2023年6月19日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088	受权官员 赵晓敏 电话号码 (+86) 010-53961332

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2023/080761

检索报告引用的专利文件	公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN 106682348 A	2017年5月17日	无	
CN 107132156 A	2017年9月5日	无	
US 2012053908 A1	2012年3月1日	无	