

(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
2020 年 8 月 20 日 (20.08.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/164233 A1

- (51) 国际专利分类号:
G06F 17/50 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2019/099882
- (22) 国际申请日: 2019 年 8 月 9 日 (09.08.2019)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201910110150.0 2019年2月11日 (11.02.2019) CN
- (71) 申请人: 大连理工大学(DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国辽宁省大连市高新园区凌工路2号, Liaoning 116024 (CN)。
- (72) 发明人: 邹丽(ZOU, Li); 中国辽宁省大连市高新园区凌工路2号, Liaoning 116024 (CN)。 唐立志(TANG, Lizhi); 中国天津市滨海新区大港建白路116号, Tianjin 300272 (CN)。 孙哲(SUN, Zhe); 中国辽宁省大连市高新园区凌工路2号, Liaoning 116024 (CN)。 朱言顺(ZHU, Yanshun); 中国天津市滨海新区大港建白路116号, Tianjin

300272 (CN)。 裴玉国(PEI, Yuguo); 中国辽宁省大连市高新园区凌工路2号, Liaoning 116024 (CN)。 王志强(WANG, Zhiqiang); 中国天津市滨海新区大港建白路116号, Tianjin 300272 (CN)。 徐伟桐(XU, Weitong); 中国辽宁省大连市高新园区凌工路2号116号, Liaoning 116024 (CN)。 金国庆(JIN, Guoqing); 中国辽宁省大连市高新园区凌工路2号, Liaoning 116024 (CN)。 王振(WANG, Zhen); 中国辽宁省大连市高新园区凌工路2号, Liaoning 116024 (CN)。

(74) 代理人: 大连东方专利代理有限责任公司(DALIAN EAST PATENT AGENT LTD.); 中国辽宁省大连市西岗区黄河路263号608室, Liaoning 116011 (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, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK,

(54) Title: PARAMETER DESIGN AND NUMERICAL SIMULATION METHOD FOR JET TRENCHER NOZZLE

(54) 发明名称: 喷射式挖沟机喷嘴的一种参数设计及其数值模拟方法

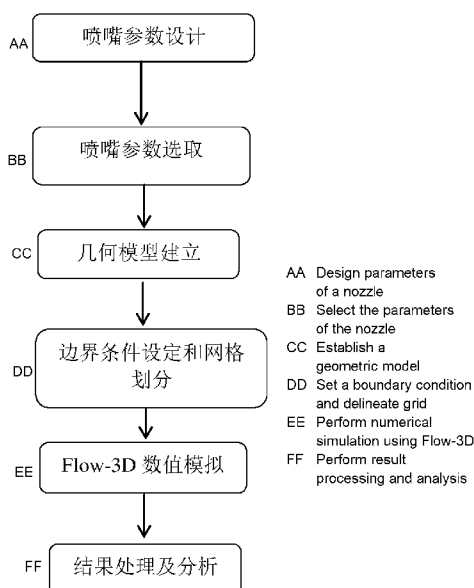


图 1

(57) Abstract: Disclosed in the present invention is a parameter design and numerical simulation method for a jet trencher nozzle. The method is characterized in comprising the following steps: S1, designing parameters of a nozzle; S2, selecting the parameters of the nozzle; S3, establishing a geometric model; S4, setting a boundary condition and delineating a grid; S5, performing numerical simulation using Flow-3D; and S6, performing result processing and analysis. According to the present invention, the whole process of nozzle flushing and ground breaking can be simulated, the size of the cross-section of the flushing trench is measured, and by analyzing the obtained result, the reasonability of nozzle radius parameter design can be verified, and a certain reference is provided for design of inclination angle parameters.

(57) 摘要: 本发明公开了一种喷射式挖沟机喷嘴的一种参数设计及其数值模拟方法, 其特征在于具有如下步骤: S1、喷嘴参数的设计; S2、喷嘴参数的选取; S3、几何模型的建立; S4、边界条件设定和网格划分; S5、利用 Flow-3D 进行数值模拟; S6、结果处理及分析。本发明可以模拟喷嘴冲刷破土的整个过程并测取冲刷沟剖面的尺寸, 对得到的结果进行分析可验证喷嘴半径参数设计的合理性以及为倾斜角度参数的设计提供了一定参考。

LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, 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,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, 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, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, 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, 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))。

喷射式挖沟机喷嘴的一种参数设计及其数值模拟方法

技术领域

5 本发明涉及一种根据射流压强公式进行喷射式挖沟机喷嘴参数设计及数值模拟的方法，属于机械工程领域。

背景技术

随着人类对海洋资源的不断勘测与开发，海底管道将成为海底资源运输的重要途径。为了保护海底管道不受人为和自然的破坏，就需要将管道进行挖沟掩埋。目前应用最广泛的挖沟掩埋方法就是后挖沟法，该方法是当海底管道沉
10 放在海床上之后将挖沟机骑在海底管道上进行挖沟，并随着挖沟机的前进，管道自动沉入沟底，同时沟两侧沙土以及悬浮的泥沙在水流和波浪作用下自然回积到沟内。喷射式挖沟机就是后挖沟法中应用最多的挖沟机，其工作原理是利用从喷嘴喷出的高压水射流冲刷海管两侧下部海床，破除海床土层或将土体液
15 化，在海管下方形成沟槽。喷射式挖沟机设计有两根对称的喷射臂，分别骑在管道的两侧。喷射臂上安装了一系列喷嘴，喷嘴的参数设计是挖沟机设计中的关键技术之一，并且对冲刷沟形起到决定性影响。国内外研究者对于喷嘴的参数设计与优化做了大量研究。

对于喷射式挖沟机喷嘴的设计及优化的研究有实验模拟方法和数值模拟方法。实验模拟方法符合实际的物理条件，并可对射流参数及射流冲刷过程进行
20 真实监测，如 YangGeunyoung 运用实验方法得到了射流在轴心方向上的速度衰减与喷嘴内部流道型线相关。目前数值模拟方法即计算流体力学方法(CFD)在喷嘴参数设计及射流与土体相互作用方面应用非常普遍，取得了很大的成功，且计算效率高，计算速度快，结果预测准确。如高激通过数值模拟对喷嘴不同的
25 收缩段长度、圆柱段长度、扩散段长度以及收缩角度进行了研究；吴强从数值两方面对喷嘴的形式及组合方式进行分析。

过去的研究主要集中于喷嘴的形式、各段长度、收缩角度等参数，针对喷嘴直径大小的设计却没有提出合理且普适的方法。随着实际海底挖沟作业对沟形的要求越来越为严格，这就需要对射流冲刷出符合实际需求的坑形进行精准
30 的计算模拟，而倾斜喷嘴的倾斜角度参数对实际坑形有着非常重要的影响。因此结合喷嘴的直径和倾斜角度提出一种新的设计方法将会使喷嘴参数设计及优

化更加合理，适用性更强，应用较为广泛。利用数值模拟对倾斜角度对冲刷坑形的影响规律进行研究则会为不同沟形需求的喷嘴倾斜角度设计提供一定的参考价值。

发明内容

5 根据上述提出的技术问题，而提供一种喷射式挖沟机喷嘴的一种参数设计及其数值模拟方法。本发明采用的技术手段如下：

一种喷射式挖沟机喷嘴的一种参数设计及其数值模拟方法，具有如下步骤：

S1、喷嘴参数的设计

10 根据距离喷嘴 x 处的射流有效压强计算公式： $\bar{F} = \frac{pR^2}{0.0127x^2}$ ，推导出满足倾斜 β 度喷嘴和垂向喷嘴在相同垂向距离处射流有效压强相等时的喷嘴半径和倾斜角度 β 之间的关系式： $R_{斜} = \frac{1}{\cos \beta} R_{垂}$ ，其中， R 为喷嘴半径， p 为喷嘴出口动压， $R_{垂}$ 为垂向喷嘴半径， $R_{斜}$ 为倾斜喷嘴半径；

S2、喷嘴参数的选取

15 根据步骤 S1 推导出的公式 $R_{斜} = \frac{1}{\cos \beta} R_{垂}$ ，先确定垂向喷嘴半径 $R_{垂}$ 为固定值，再选取不同的倾斜角度 β ，得到不同的倾斜喷嘴半径 $R_{斜}$ ；

S3、几何模型的建立

根据步骤 S2 选取的喷嘴参数，利用 Solidworks 建立垂向喷嘴和倾斜喷嘴组合几何模型；

S4、边界条件设定和网格划分

20 将步骤 S3 建立的喷嘴组合几何模型导入到 Flow-3D 中，将计算域划分成上下相互连接的两个 block，对两个 block 边界进行定义，对计算域进行网格划分并检查网格质量；

S5、利用 Flow-3D 进行数值模拟

25 添加泥沙物理模型并定义泥沙参数，设置计算域的初始条件，时间步长，计算物理时长，最大迭代次数；

在 Flow-3D 中开始数值求解；

S6、结果处理及分析

导出步骤 S5 中 Flow-3D 计算结果中的地形表面文件，利用 Matlab 处理地形表面文件，得到射流冲刷沟剖面的几何参数并进行分析。

30 所述步骤 S1 中，由倾斜 β 度喷嘴出口和垂向喷嘴出口在同一垂向高度可知，倾斜 β 度喷嘴的靶距 $x_{斜}$ 为垂向喷嘴的打击距离 $x_{垂}$ 的 $\frac{1}{\cos \beta}$ 倍，即： $x_{斜} = \frac{1}{\cos \beta} x_{垂}$ ，

将其代入射流有效压强计算公式，为使用同样的出口动压，使倾斜喷嘴和垂向喷嘴在相同垂向距离处达到同样的射流有效压强，推导出应满足： $R_{斜} = \frac{1}{\cos \beta} R_{垂}$ 。

步骤 S4 中，定义上部的 block 四周的边界为： X_{Max} 、 X_{Min} 、 Y_{Max} 和 Y_{Min} ，且都设置为压力出口边界(pressure)，压力值设置为 0，这使溢流的流体从上部的 block 的四周边界流出，使计算域内液体保持在固定的高度。上部的 block 的 Z_{Max} 设置为压力入口边界，压力值设为喷嘴入口压力；

由于上部的 block 的 Z_{Min} 与下部的 block 的 Z_{Max} 连接，因此将上部的 block 的 Z_{Min} 设置为默认边界，这样在初始化时软件将自动与 block 的 Z_{Max} 连接；

定义下部的 block 的四个边界为： X_{Max} 、 X_{Min} 、 Y_{Max} 和 Y_{Min} ，且都设置为墙边界 (wall)，下部的 block 的 Z_{Min} 由于是泥沙，因此也设置为墙边界，下部的 block 的 Z_{Max} 设置为默认边界，与上部的 block 的 Z_{Min} 边界连接；

对两个 block 中的喷嘴及其冲刷区域三个方向上的网格尺寸进行加密，其他位置的网格则设置稀疏，目的是为了合理控制网格数量。

所述步骤 S5 中，泥沙物理模型通过跟踪悬沙的含沙浓度 C_s 和底沙的含沙浓度 C_p ，来计算泥沙体积分分数，总泥沙体积分分数 α_s 是网格中悬沙和底沙的总体积分数，表达式为：

$$\alpha_s = \frac{C_s + C_p}{\rho_s} = 1 - \alpha_f;$$

其中， α_f 为网格中流体的体积分分数， ρ_s 为泥沙颗粒密度，底沙体积分分数的表达式为 $\alpha_{s, p} = C_p / \rho_s$ ，悬沙体积分分数的表达式为 $\alpha_{s, s} = C_s / \rho_s$ ，临界泥沙体积分分数为 α_{cr} ，且总泥沙体积分分数 α_s 小于等于临界泥沙体积分分数 α_{cr} ，泥沙物理模型中需要定义的泥沙参数有：中值粒径，单位 m，泥沙密度，单位 kg/m^3 ，夹带系数 α_i ，推移质系数 β_i ，休止角，单位 $^\circ$ ，临界泥沙体积分分数；

湍流模型选用 Flow-3D 中适用于水流对泥沙造成局部冲刷计算的 RNGk - ε 模型：

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R$$

其中： ρ 为流体密度； t 为时间； k 为湍流动能； ε 为湍流耗散率； α_k 、 α_ε 为湍流普朗特数的倒数； μ_{eff} 和 R 为修正参数； G_k 和 G_b 分别为层流速度梯度和浮力引起的湍流动能； Y_M 为可压缩流体湍流扩张贡献量； $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常

数。

所述步骤 S6 中，导出步骤 S5 中 Flow-3D 计算结果中的地形表面文件，利用 Matlab 处理地形表面文件，得到射流冲刷沟剖面的几何参数并绘制出射流冲刷沟剖面；

- 5 通过分析最大沟深参数，以验证倾斜喷嘴和垂向喷嘴作用到同一垂向距离的泥沙表面有效压强相等，说明设计方法的合理性；

通过分析射流冲刷沟剖面的几何形状，总结出喷嘴倾角大小对沟剖面影响规律。

- 10 本发明可以模拟喷嘴冲刷破土的整个过程并测取冲刷沟剖面的尺寸，对得到的结果进行分析可验证喷嘴半径参数设计的合理性以及为倾斜角度参数的设计提供了一定参考。

基于上述理由本发明可在机械工程等领域广泛推广。

附图说明

- 15 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，下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图做以简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图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性的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。

图 1 是本发明的具体实施方式中喷射式挖沟机喷嘴的一种参数设计及其数值模拟方法的流程图。

- 20 图 2 是本发明的具体实施方式中垂向喷嘴和倾斜喷嘴组合的几何模型的正视图。

图 3 是本发明的具体实施方式中垂向喷嘴和倾斜喷嘴组合的几何模型的侧视图。

- 25 图 4 是本发明的具体实施方式中计算域 block 的划分及边界条件示意图；图中，P 表示压力边界，W 表示墙边界。

图 5 是本发明的具体实施方式中计算域网格划分示意图。

图 6 是本发明的具体实施方式中垂向喷嘴半径 1cm，倾斜喷嘴半径 1.41cm，倾斜角度 45° 时射流冲刷沟剖面示意图。

- 30 图 7 是本发明的具体实施方式中垂向喷嘴半径 1cm，倾斜喷嘴半径 1.15cm，倾斜角度 30° 时射流冲刷沟剖面示意图。

图 8 是本发明的具体实施方式中垂向喷嘴半径 1cm，倾斜喷嘴半径 1.04cm，

倾斜角度 15° 时射流冲刷沟剖面示意图。

具体实施方式

为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚，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，
5 所描述的实施例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。

如图 1 所示，一种喷射式挖沟机喷嘴的一种参数设计及其数值模拟方法，具有如下步骤：

10 S1、喷嘴参数的设计

根据距离喷嘴 x 处的射流有效压强计算公式： $\bar{F} = \frac{pR^2}{0.0127x^2}$ ，推导出满足倾斜 β 度喷嘴和垂向喷嘴在相同垂向距离处射流有效压强相等时的喷嘴半径和倾斜角度之间的关系式： $R_{斜} = \frac{1}{\cos \beta} R_{垂}$ ，其中， R 为喷嘴半径， p 为喷嘴出口动压， $R_{垂}$ 为垂向喷嘴半径， $R_{斜}$ 为倾斜喷嘴半径；

15 S2、喷嘴参数的选取

根据步骤 S1 推导出的公式 $R_{斜} = \frac{1}{\cos \beta} R_{垂}$ ，先确定垂向喷嘴半径 $R_{垂}$ 为固定值，本实施例中 $R_{垂} = 1\text{cm}$ ，再选取不同的倾斜角度 β ，本实施例中， β 分别为 15° ， 30° 和 45° ，得到不同的倾斜喷嘴半径 $R_{斜}$ 分别为 1.04cm，1.15cm 和 1.41cm；

20 S3、几何模型的建立

计算中以一个垂向喷嘴和一个倾斜喷嘴组合建立一个几何模型；

根据步骤 S2 选取的喷嘴参数，利用 Solidworks 建立垂向喷嘴和倾斜喷嘴组合几何模型，分别是：半径 1cm 的垂向喷嘴和半径 1.04cm、倾斜 15° 倾斜喷嘴组合模型（如图 2、图 3 所示）；半径 1cm 的垂向喷嘴和半径 1.15cm、倾斜 30°
25 倾斜喷嘴组合模型；半径 1cm 的垂向喷嘴和半径 1.41cm、倾斜 45° 倾斜喷嘴组合模型，垂向喷嘴和倾斜喷嘴出口保持在同一垂向高度，喷嘴收缩角相同。

S4、边界条件设定和网格划分

将步骤 S3 建立的喷嘴组合几何模型导入到 Flow-3D 中，将计算域划分成上下相互连接的两个 block，对两个 block 边界进行定义，对计算域进行网格划分
30 并检查网格质量；

S5、利用 Flow-3D 进行数值模拟

添加泥沙物理模型并定义泥沙参数，设置计算域的初始条件，时间步长，计算物理时长，最大迭代次数；

在 Flow-3D 中开始数值求解；

S6、结果处理及分析

- 5 导出步骤 S5 中 Flow-3D 计算结果（三个不同喷嘴参数工况）中的地形表面文件，利用 Matlab 处理地形表面文件，得到射流冲刷沟剖面的几何参数并进行分析。

其中半径 1cm 的垂向喷嘴和半径 1.41cm、倾斜 45° 倾斜喷嘴组合模型冲刷出的沟形剖面如图 6 所示，其中，垂向喷嘴与倾斜喷嘴冲刷出两道沟，冲刷剖面的最大沟深几乎相等，这说明从两个喷嘴出口的射流作用到泥沙表面上的有效冲击压强也几乎相等，达到喷嘴半径设计目的，两沟的中间有明显的凸起，说明泥沙在沟内堆积，不能被有效的冲出，不符合实际作业需求的理想沟形。半径 1cm 的垂向喷嘴和半径 1.15cm、倾斜 30° 倾斜喷嘴组合模型冲刷出的沟形剖面如图 7 所示，垂向喷嘴与倾斜喷嘴能冲刷出接近一道共同的沟，沟的底部有较大的平整区域，冲刷剖面的最大沟深为 0.169m，这说明分别从两个喷嘴出口的射流作用到泥沙床面上的有效冲击压强保持一致；沟内大部分泥沙已经被冲刷到沟外，且坑的直径较宽，能满足一些实际海底挖沟作业对沟形的要求。半径 1cm 的垂向喷嘴和半径 1.04cm、倾斜 15° 倾斜喷嘴组合模型冲刷出的沟形剖面如图 8 所示，垂向喷嘴与倾斜喷嘴能冲刷出同一道沟，最大沟深 0.177m，这说明从两个喷嘴出口的高压水流作用到沙质表面上的有效冲击压强相等；冲刷剖面的最大直径为 1.57m。沟底区域平整，不存在凸起部分，说明沟内泥沙已被全部冲出。由图都可以看出垂向喷嘴与倾斜喷嘴冲刷出的最大沟深相等，证明了满足关系式 $R_{斜} = \frac{1}{\cos \beta} R_{垂}$ 两个喷嘴出口的射流处于同一垂向高度时能达到同样有效打击压强，体现了该设计方法合理可行。定性分析了当喷嘴长度和靶距固定时，随着倾斜喷嘴倾斜角度增大会出现冲刷出两道沟的可能性。

所述步骤 S1 中，由向内倾斜 β 度喷嘴和垂向喷嘴出口在同一垂向高度可知，其靶距 $x_{斜}$ 为垂向打击距离 $x_{垂}$ 的 $\frac{1}{\cos \beta}$ 倍，即： $x_{斜} = \frac{1}{\cos \beta} x_{垂}$ ，将其代入射流有效压强计算公式，为使用同样的出口动压，使倾斜喷嘴和垂向喷嘴在相同垂向距离处达到同样的射流有效压强，推导出应满足： $R_{斜} = \frac{1}{\cos \beta} R_{垂}$ 。

- 30 如图 4 所示，步骤 S4 中，定义上部的 block 四周的边界为： X_{Max} 、 X_{Min} 、 Y_{Max} 和 Y_{Min} ，且都设置为压力出口边界(pressure)，压力值设置为 0，上部的 block 的 Z_{Max} 设置为压力入口边界，压力值设为喷嘴入口压力；

由于上部的 block 的 Z_{Min} 与下部的 block 的 Z_{Max} 连接，因此将上部的 block 的 Z_{Min} 设置为默认边界，这样在初始化时软件将自动与 block 的 Z_{Max} 连接；

定义下部的 block 的四个边界为： X_{Max} 、 X_{Min} 、 Y_{Max} 和 Y_{Min} ，且都设置为墙边界（wall），下部的 block 的 Z_{Min} 由于是泥沙，因此也设置为墙边界，下部的 block 的 Z_{Max} 设置为默认边界，与上部的 block 的 Z_{Min} 边界连接；

如图 5 所示，对两个 block 中的喷嘴及其冲刷区域三个方向上的网格尺寸进行加密，计算域两侧的网格则设置稀疏，目的是为了合理控制网格数量。

所述步骤 S5 中，泥沙物理模型通过跟踪悬沙的含沙浓度 C_s 和底沙的含沙浓度 C_p ，来计算泥沙体积分分数，总泥沙体积分分数 α_s 是网格中悬沙和底沙的总体积分数，表达式为：

$$\alpha_s = \frac{C_s + C_p}{\rho_s} = 1 - \alpha_f;$$

其中， α_f 为网格中流体的体积分分数， ρ_s 为泥沙颗粒密度，底沙体积分分数的表达式为 $\alpha_{s, p} = C_p / \rho_s$ ，悬沙体积分分数的表达式为 $\alpha_{s, s} = C_s / \rho_s$ ，临界泥沙体积分分数为 α_{cr} ，且总泥沙体积分分数 α_s 小于等于临界泥沙体积分分数 α_{cr} ，泥沙物理模型中需要定义的泥沙参数有：中值粒径，单位 m，泥沙密度，单位 kg/m^3 ，夹带系数 α_i ，推移质系数 β_i ，休止角，单位 $^\circ$ ，临界泥沙体积分分数；

湍流模型选用 Flow-3D 中适用于水流对泥沙造成局部冲刷计算的 RNGk - ε 模型：

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R$$

其中： ρ 为流体密度； t 为时间； k 为湍流动能； ε 为湍流耗散率； α_k 、 α_ε 为湍流普朗特数的倒数； μ_{eff} 和 R 为修正参数； G_k 和 G_b 分别为层流速度梯度和浮力引起的湍流动能； Y_M 为可压缩流体湍流扩张贡献量； $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数。

所述步骤 S6 中，导出步骤 S5 中 Flow-3D 计算结果中的地形表面文件，利用 Matlab 处理地形表面文件，得到射流冲刷沟剖面的几何参数并绘制出射流冲刷沟剖面；

通过分析最大沟深参数，以验证倾斜喷嘴和垂向喷嘴作用到同一垂向距离的泥沙表面有效压强相等，说明设计方法的合理性；

通过分析射流冲刷沟剖面的几何形状，总结出喷嘴倾角大小对沟剖面影响规律。

最后应说明的是：以上各实施例仅用以说明本发明的技术方案，而非对其限制；尽管参照前述各实施例对本发明进行了详细的说明，本领域的普通技术人员应当理解：其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改，或者对其中部分或者全部技术特征进行等同替换；而这些修改或者替换，并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的范围。

5

权利要求书

1、一种喷射式挖沟机喷嘴的一种参数设计及其数值模拟方法，其特征在于具有如下步骤：

5 S1、喷嘴参数的设计

根据距离喷嘴 x 处的射流有效压强计算公式： $\bar{F} = \frac{pR^2}{0.0127x^2}$ ，推导出满足倾斜 β 度喷嘴和垂向喷嘴在相同垂向距离处射流有效压强相等时的喷嘴半径和倾斜角度 β 之间的关系式： $R_{斜} = \frac{1}{\cos \beta} R_{垂}$ ，其中， R 为喷嘴半径， p 为喷嘴出口动压， $R_{垂}$ 为垂向喷嘴半径， $R_{斜}$ 为倾斜喷嘴半径；

10 S2、喷嘴参数的选取

根据步骤 S1 推导出的公式 $R_{斜} = \frac{1}{\cos \beta} R_{垂}$ ，先确定垂向喷嘴半径 $R_{垂}$ 为固定值，再选取不同的倾斜角度 β ，得到不同的倾斜喷嘴半径 $R_{斜}$ ；

S3、几何模型的建立

15 根据步骤 S2 选取的喷嘴参数，利用 Solidworks 建立垂向喷嘴和倾斜喷嘴组合几何模型；

S4、边界条件设定和网格划分

将步骤 S3 建立的喷嘴组合几何模型导入到 Flow-3D 软件中，将计算域划分成上下相互连接的两个 block，对两个 block 边界进行定义，对计算域进行网格划分并检查网格质量；

20 S5、利用 Flow-3D 进行数值模拟

添加泥沙物理模型并定义泥沙参数，设置计算域的初始条件和时间步长，计算物理时长和最大迭代次数；

在 Flow-3D 中开始数值求解；

S6、结果处理及分析

25 导出步骤 S5 中 Flow-3D 计算结果中的地形表面文件，利用 Matlab 处理地形表面文件，得到射流冲刷沟剖面的几何参数并进行分析。

2、根据权利要求 1 所述的喷射式挖沟机喷嘴的一种参数设计及其数值模拟方法，其特征在于，所述步骤 S1 中，由倾斜 β 度喷嘴出口和垂向喷嘴出口在同一垂向高度可知，倾斜 β 度喷嘴的靶距 $x_{斜}$ 为垂向喷嘴的打击距离 $x_{垂}$ 的 $\frac{1}{\cos \beta}$ 倍，

30 即： $x_{斜} = \frac{1}{\cos \beta} x_{垂}$ ，将其代入射流有效压强计算公式，为使用同样的出口动压，使倾斜喷嘴和垂向喷嘴在相同垂向距离处达到同样的射流有效压强，推导出应

满足: $R_{斜} = \frac{1}{\cos \beta} R_{垂}$ 。

3、根据权利要求1所述的喷射式挖沟机喷嘴的一种参数设计及其数值模拟方法,其特征在于,步骤S4中,定义上部的block四周的边界为: X_{Max} 、 X_{Min} 、 Y_{Max} 和 Y_{Min} ,且都设置为压力出口边界,压力值设置为0,上部的block的 Z_{Max} 5 设置为压力入口边界,压力值设为喷嘴入口压力;

由于上部的block的 Z_{Min} 与下部的block的 Z_{Max} 连接,因此将上部的block的 Z_{Min} 设置为默认边界;

定义下部的block的四个边界为: X'_{Max} 、 X'_{Min} 、 Y'_{Max} 和 Y'_{Min} ,且都设置为墙边界,下部的block的 Z_{Min} 由于是泥沙,因此也设置为墙边界,下部的block10 的 Z'_{Max} 设置为默认边界,与上部的block的 Z_{Min} 边界连接;

对两个block中的喷嘴及其冲刷区域三个方向上的网格进行加密,其余位置的网格设置稀疏,目的是为了合理控制网格数量。

4、根据权利要求1所述的喷射式挖沟机喷嘴的一种参数设计及其数值模拟方法,其特征在于,所述步骤S5中,泥沙物理模型通过跟踪悬沙的含沙浓度 C_s 和15 底沙的含沙浓度 C_p ,来计算泥沙体积分,总泥沙体积分 α_s 是网格中悬沙和底沙的总体积分,表达式为:

$$\alpha_s = \frac{C_s + C_p}{\rho_s} = 1 - \alpha_f;$$

其中, α_f 为网格中流体的体积分, ρ_s 为泥沙颗粒密度,底沙体积分的表达式为 $\alpha_{s,p} = C_p / \rho_s$,悬沙体积分的表达式为 $\alpha_{s,s} = C_s / \rho_s$,临界泥沙体积分20 数为 α_{cr} ,且总泥沙体积分 α_s 小于等于临界泥沙体积分 α_{cr} ,泥沙物理模型中需要定义的泥沙参数有:中值粒径,单位m,泥沙密度,单位 kg/m^3 ,夹带系数 α_i ,推移质系数 β_i ,休止角,单位°,临界泥沙体积分;

湍流模型选用Flow-3D中适用于水流对泥沙造成局部冲刷计算的RNGk- ε 模型;

25

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R$$

其中: ρ 为流体密度; t 为时间; k 为湍流动能; ε 为湍流耗散率; α_k 、 α_ε 为湍流普朗特数的倒数; μ_{eff} 和 R 为修正参数; G_k 和 G_b 分别为层流速度梯度和浮

力引起的湍流动能； Y_M 为可压缩流体湍流扩张贡献量； $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数。

5 5、根据权利要求1所述的喷射式挖沟机喷嘴的一种参数设计及其数值模拟方法，其特征在于，所述步骤S6中，导出步骤S5中Flow-3D计算结果中的地形表面文件，利用Matlab处理地形表面文件，得到射流冲刷沟剖面的几何参数并绘制出射流冲刷沟剖面；

通过分析最大沟深参数，以验证倾斜喷嘴和垂向喷嘴作用到同一垂向距离的泥沙表面有效压强相等；

10 通过分析射流冲刷沟剖面的几何形状，总结出喷嘴倾角大小对沟剖面影响规律。

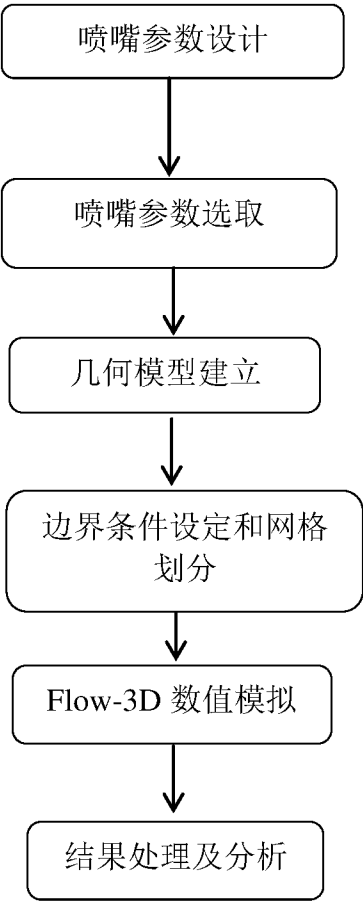


图 1

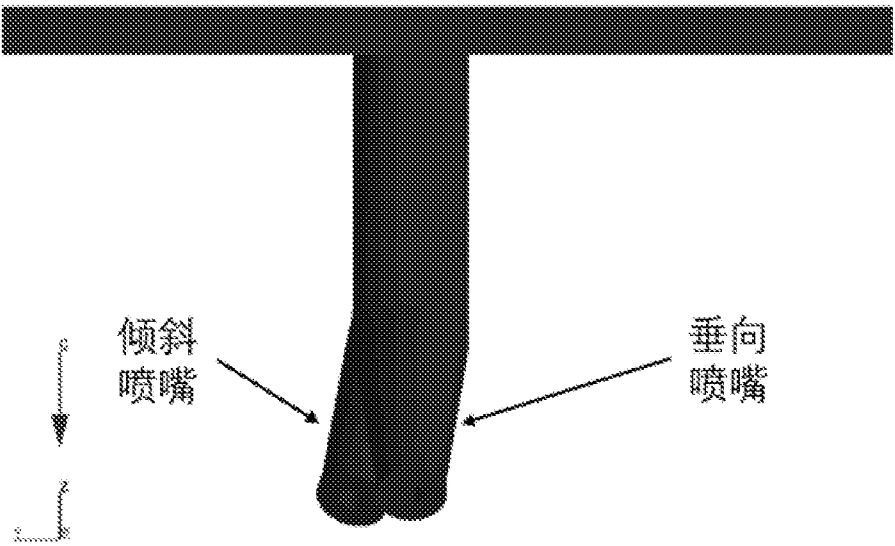


图 2

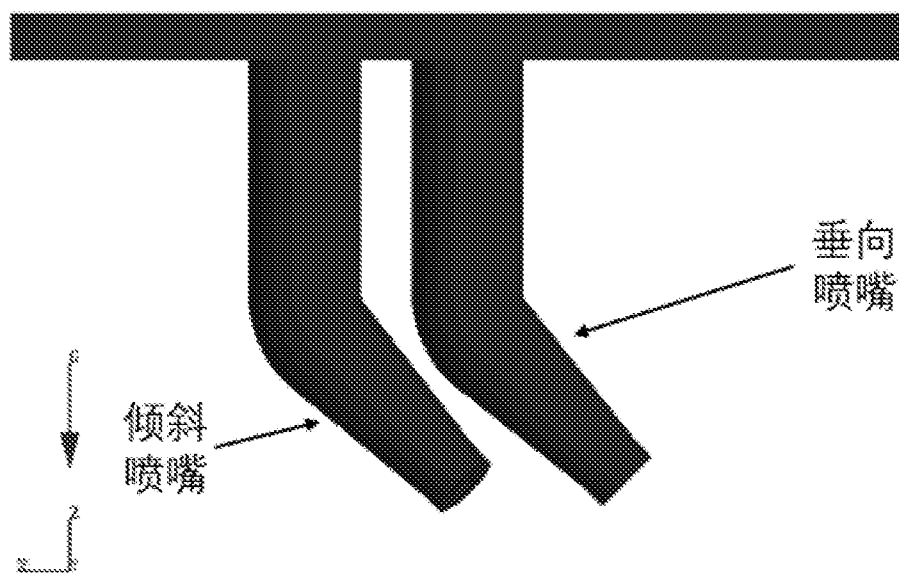


图 3

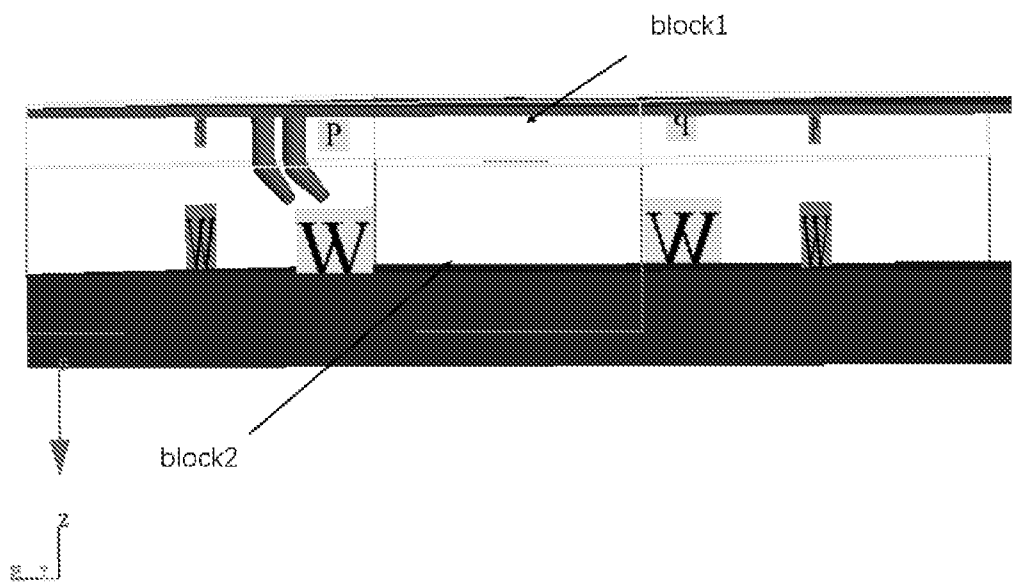


图 4

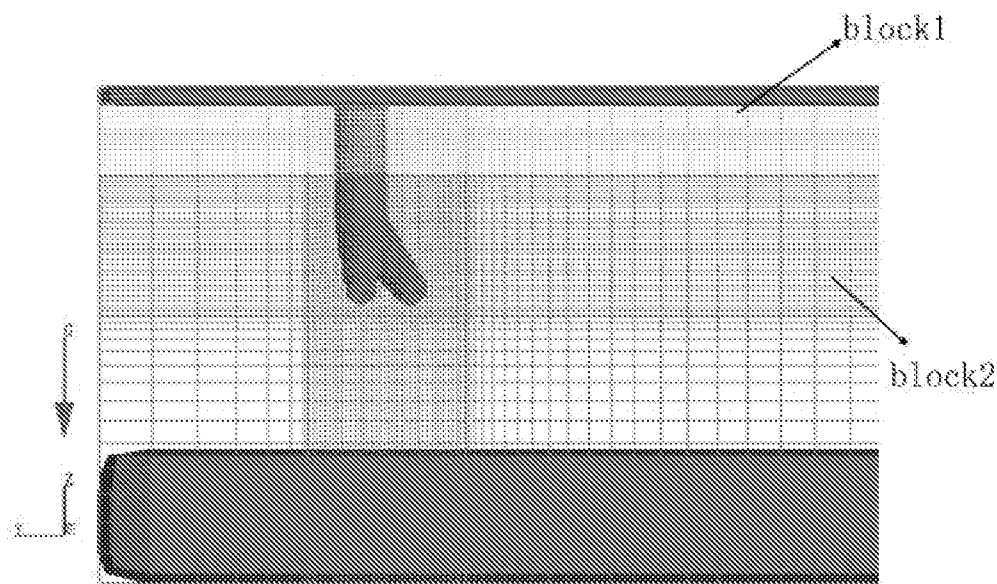


图 5

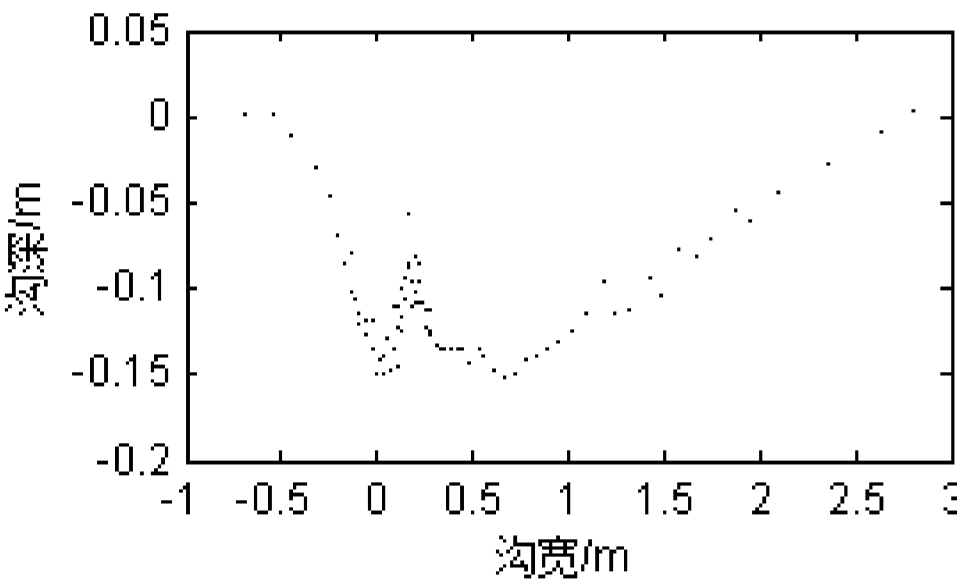


图 6

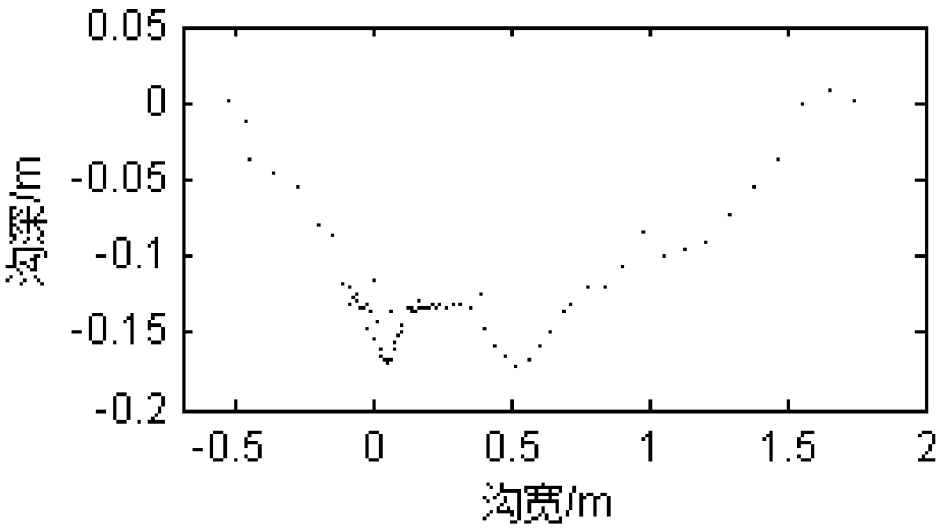


图 7

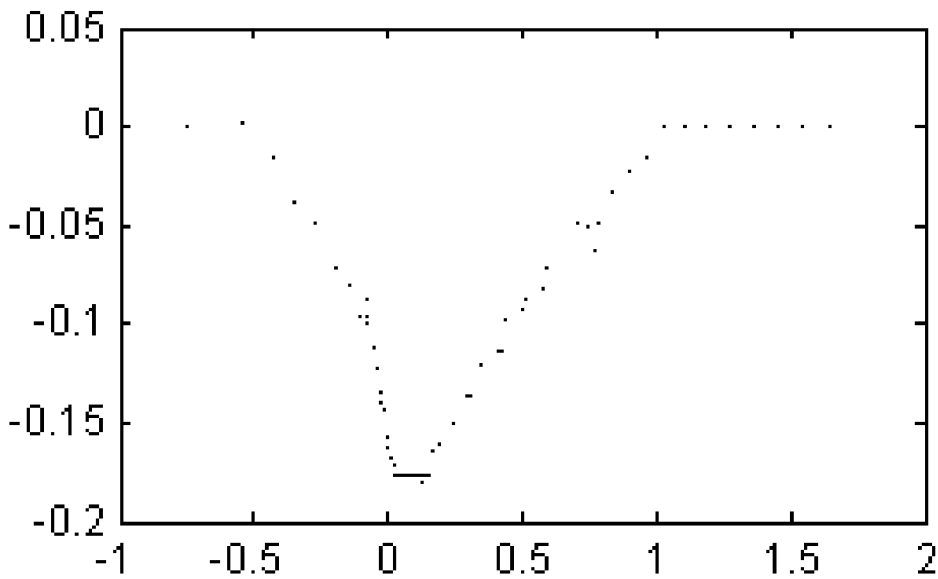


图 8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/099882

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 17/50(2006.01)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)

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)

WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI, IEEE: 挖沟, 开沟, 开渠, 开挖, 掘沟, 射流, 喷射, 喷嘴, 喷口, 半径, 直径, 角度, 建模, 模型, 数值模拟, 设计, trench+, jet+, nozzle, diameter, radius, angle, model, numerical simulat+, design

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 109902363 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 18 June 2019 (2019-06-18) claims 1-5	1-5
A	吴强 (WU, Qiang). "用于喷射式挖沟机的喷嘴结构及喷嘴组合的研究 (Study on Nozzle Configuration and Nozzle Combination Used on Jet Trencher)" 中国石油大学硕士学位论文 (China University of Petroleum Master's Theses), 30 November 2011 (2011-11-30), pp. 11-45	1-5
A	董玉飞等 (DONG, Yufei et al.). "喷射式海底挖沟机的参数优化和数值模拟研究 (Study on Parameters Optimization and Numerical Simulation of Submarine Jet Trencher)" 石油工程建设 (Petroleum Engineering Construction), Vol. 43, No. 2, 30 April 2017 (2017-04-30), pp. 85-87 and 92	1-5
A	李军营等 (LI, Junying et al.). "喷射式挖沟机喷嘴关键参数的设计与优化 (Design and Optimization of Key Parameters for Nozzle of Jet Trencher)" 石油工程建设 (Petroleum Engineering Construction), Vol. 44, No. 3, 30 June 2018 (2018-06-30), pp. 27-30	1-5



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

"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

14 October 2019

Date of mailing of the international search report

30 October 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/099882**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	LI, J. H. et al. "Water Jetting Arm Optimal Design Consideration for a ROV Trencher" <i>IEEE</i> , 31 December 2015 (2015-12-31), pp. 1-5	1-5
A	CN 105631110 A (WEICHAI POWER YANGZHOU DIESEL ENGINE CO., LTD.) 01 June 2016 (2016-06-01) entire document	1-5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/099882

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	109902363	A	18 June 2019	None	
CN	105631110	A	01 June 2016	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/099882

A. 主题的分类

G06F 17/50(2006.01)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)

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))

WPI, EPDOC, CNPAT, CNKI, IEEE: 挖沟, 开沟, 开渠, 开挖, 掘沟, 射流, 喷射, 喷嘴, 喷头, 半径, 直径, 角度, 建模, 模型, 数值模拟, 设计, trench+, jet+, nozzle, diameter, radius, angle, model, numerical simulat+, design

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
PX	CN 109902363 A (大连理工大学) 2019年 6月 18日 (2019 - 06 - 18) 权利要求1-5	1-5
A	吴强. “用于喷射式挖沟机的喷嘴结构及喷嘴组合的研究” 中国石油大学硕士学位论文, 2011年 11月 30日 (2011 - 11 - 30), 第11-45页	1-5
A	董玉飞等. “喷射式海底挖沟机的参数优化和数值模拟研究” 石油工程建设, 第43卷, 第2期, 2017年 4月 30日 (2017 - 04 - 30), 第85-87, 92页	1-5
A	李军营等. “喷射式挖沟机喷嘴关键参数的设计与优化” 石油工程建设, 第44卷, 第3期, 2018年 6月 30日 (2018 - 06 - 30), 第27-30页	1-5
A	LI, J. H. 等. “Water Jetting Arm Optimal Design Consideration for a ROV Trencher” IEEE, 2015年 12月 31日 (2015 - 12 - 31), 第1-5页	1-5

☒ 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

“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

2019年 10月 14日

国际检索报告邮寄日期

2019年 10月 30日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局 (ISA/CN)
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

李文娟

电话号码 86-(10)-53961585

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	CN 105631110 A (潍柴动力扬州柴油机有限责任公司) 2016年 6月 1日 (2016 - 06 - 01) 全文	1-5

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/099882

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	109902363	A	2019年 6月 18日	无	
CN	105631110	A	2016年 6月 1日	无	