(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 7 月 9 日 (09.07.2020)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2020/140435 A1

(51) 国际专利分类号:
G01M 10/00 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/099884

(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:
201910009613.4 2019年1月5日 (05.01.2019) 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: 张桂勇 (ZHANG, Guiyong); 中国辽宁省大连市高新园区凌工路2号, Liaoning 116024 (CN)。

蒋昱妍 (JIANG, Yuyan); 中国辽宁省大连市高新园区凌工路2号, Liaoning 116024 (CN)。 宗智 (ZONG, Zhi); 中国辽宁省大连市高新园区凌工路2号, Liaoning 116024 (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)。 王浩 (WANG, Hao); 中国北京市车公庄西路20号, Beijing (CN)。 杨碧野 (YANG, Biye); 中国辽宁省大连市高新园区凌工路2号, Liaoning 116024 (CN)。 殷志宏 (YIN, Zhihong); 中国辽宁省大连市高新园区凌工路2号, Liaoning 116024 (CN)。 刘宁 (LIU, Ning); 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

WO 2020/140435 A1

(54) **Title:** DESIGN METHOD OF SHIP ICE BREAKING RESISTANCE MODEL TEST BASED ON NON-FREEZING MODEL ICE

(54) 发明名称: 一种基于非冻结模型冰的船舶碎冰阻力模型试验的设计方法

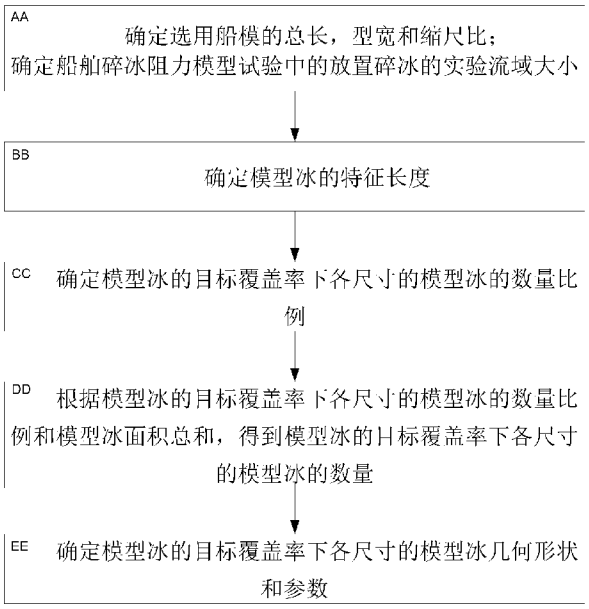


图 1

(57) **Abstract:** The present invention relates to a design method of a ship ice breaking resistance model test based on non-freezing model ice. The method comprises the following steps of: determining the total length L_1, molded breadth B, and scale ratio λ of a selected ship model; determining the size A_1 of an experimental basin for placing broken ice in the ship ice breaking resistance model test; determining the characteristic length of model ice; determining the amount proportion of the model ice of each size under a target coverage rate c of the model

[见续页]

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, 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))。

ice; obtaining the amount of the model ice of each size under the target coverage rate c of the model ice according to the amount proportion of the model ice of each size under the target coverage rate c of the model ice and the total area A_2 of the model ice; and determining the geometric shape and parameters of the model ice of each size under the target coverage rate c of the model ice. The present invention solves the problems of poor economy and poor operability in a freezing model ice experiment of an ice water tank, and provides a design method for carrying out a ship ice breaking resistance model experiment in a towing water tank.

(57) 摘要：本发明涉及一种基于非冻结模型冰的船舶碎冰阻力模型试验的设计方法，具有如下步骤，确定选用船模的总长L_1，型宽B和缩尺比λ；确定船舶碎冰阻力模型试验中的放置碎冰的实验流域大小A_1；确定模型冰的特征长度；确定模型冰的目标覆盖率c下各尺寸的模型冰的数量比例；根据模型冰的目标覆盖率c下各尺寸的模型冰的数量比例和模型冰面积总和A_2，得到模型冰的目标覆盖率c下各尺寸的模型冰的数量；确定模型冰的目标覆盖率c下各尺寸的模型冰几何形状和参数。本发明克服了冰水池的冻结模型冰实验中的经济性差和可操作性不强的问题，提供了一种在拖曳水池中开展船舶碎冰阻力模型实验的设计方法。

一种基于非冻结模型冰的船舶碎冰阻力模型试验的设计方法

技术领域

本发明涉及一种船舶碎冰阻力模型实验的参数设计方法，其中以非冻结模型冰模拟无弯曲破坏的碎冰，属于船舶工程领域。

背景技术

北极地区的开发工作备受重视，而碎冰区是最为常见的冰情。但在船舶航行于碎冰区方向开展的研究却并不多见，主要原因在于缺乏船舶在碎冰区域内的阻力的基础实测或实验数据。由此可见，开展船舶碎冰阻力试验具有不可或缺的重要作用。

模型实验是建立各物理因素之间的研究手段之一，其中包括船模实验法。船模实验法可分为冰水池的冻结模型冰实验和常规拖曳水池的非冻结模型冰实验。在冻结模型冰实验中，虽然能更真实地模拟船舶在碎冰中的航行状态，但制备冰场的时间周期长，一般需反复调试才能制备出满足强度要求的冰场，且制备出的冰场只能应用于一组实验，因此，进行一次船舶碎冰阻力模型实验需要消耗大量的人力物力，且碎冰场中的碎冰操作性差。而非冻结模型冰实验中，冰场排布相对方便省时，考虑到碎冰的弯曲破坏在船舶航行中不是阻力的主要组成部分，非冻结模型冰可考虑使用无变形材料，于是模型冰块可以反复使用，节省材料成本。因此，一种基于非冻结模型冰的船舶碎冰阻力模型试验的设计方法亟待研发。

发明内容

根据上述冰池稀缺，制备冰场难度大、周期长和费用高等技术问题，提供一种基于非冻结模型冰的船舶碎冰阻力模型试验的设计方法。非冻结模型冰实验在满足实验条件方面具有显著优势，本发明以 H 型 PP 材料模拟无弯曲破坏的非冻结模型冰，提出一套针对非冻结冰的船舶模型实验的参数设计方法。本发明在无弯曲破坏假设下，根据实际观测的统计规律计算出模型冰的大小及形状的分布，另外提供了一个用围栏搭建小流域的简易实用方法，能较准确地模拟出真实碎冰区的状态。基于上述理由，本发明可以在船舶工程领域非冻结冰的船舶碎冰阻力模型实验中推广应用。

一种基于非冻结模型冰的船舶碎冰阻力模型试验的设计方法，具有如下步骤，

S1、确定选用船模的总长 L_1，型宽 B 和缩尺比λ；

确定船舶碎冰阻力模型试验中的放置碎冰的实验流域大小 A_1（若在水池中布满碎冰，则所需模型冰总量过大，造成不必要的浪费，故依据节约且能够准确测量的目的，在水池中央圈出较小面积的流域进行实验。宽度方向上，边界对实验存在一定影响，一般认为当实验流域的宽 W 大于 3 倍船模型宽，边界影响减弱到可以接受；长度方向上，为了模拟船舶在碎冰区的各态历经的平稳航行过程，需保证实验流域的长 L_2 至少为船模总长的 5 倍）：

根据选用船模的总长 L_1，型宽 B 确定实验流域的最小尺寸，进一步确定实验流域尺寸：

$$L_2 \geq 5L_1,$$

$$W \geq 3B,$$

$$A_1 = \mathrm{W}L_2,$$

其中，L_2 为实验流域的长，W 为实验流域的宽；

实验流域在水池中的摆放位置，宽度方向上，实验流域左右边缘到水池侧向池壁的间距应相同；长度方向上，船首进入实验流域时，需保证船舶已经匀速航行一段时间，也就是船模周围流动已经稳定；拖车在船首接近但未达到实验流域终点处停车，实验流域终点与水池池壁要有一定距离，确保边界影响在可接受范围内。

S2、确定模型冰的特征长度：

S21、确定模型冰的目标覆盖率 c；

S22、根据步骤 S1 得到的实验流域大小 A_1 以及步骤 S21 得到的模型冰的目标覆盖率 c，确定模型冰面积总和 A_2：

$$A_2 = cA_1;$$

本发明中存在碎冰无弯曲破坏的假设，这就需要实际的模型冰长度和厚度之间满足一定条件，保证实验过程中碎冰本身的破坏和弯曲是次要的，可忽略不计，碎冰做类似刚体的运动。

S23、根据位于弹性基底上的薄板弯曲理论确定不弯曲破坏的碎冰临界特征长度 L_c：

$$L_c = \sqrt[4]{\frac{D}{k}},$$

其中，D 为冰的抗弯刚度，满足以下公式：

$$D = \frac{Et^3}{12\left(1-\nu^2\right)},$$

E 为冰的弹性模量，单位：Pa，t 是实际碎冰厚度，单位：m，ν是泊松比；

k 为基底的弹性刚度，满足以下公式：

$$k = \rho_w g,$$

ρ_w 是水的密度，单位：kg/m^3，g 是重力加速度，单位：kg/m^2；

S24、确定模型冰的临界特征长度 l：

$$l = \frac{L}{\lambda};$$

其中，L 为碎冰特征长度，满足以下公式：

$$L \le L_c;$$

只要碎冰特征长度 L 小于碎冰临界特征长度 L_c，就认为满足碎冰无弯曲破坏假设。

S25、根据模型冰的临界特征长度 l，确定船舶碎冰阻力模型试验中各尺寸的模型冰特征长度 l_n；

S3、确定模型冰的目标覆盖率 c 下各尺寸的模型冰的数量比例：

$$N\left(l_n\right) = \begin{cases} \beta_1 l_n^{-\alpha_1}, & l_n \in [1,40] \\ \beta_2 l_n^{-\alpha_2}, & l_n \in [40,1500] \end{cases},$$

其中，$N\left(l_n\right)$ 为尺寸为 l_n 的模型冰的数量，α_1、α_2、β_1 和 β_2 为系数，α_1=1.15，α_2=1.87，模型冰特征长度 l_n 在[l_1,l_2]范围内时，模型冰总面积满足以下公式：

$$A = \int_{l_1}^{l_2} n_a(x)s(x)dx = \frac{-\pi\beta\alpha}{4(\alpha-2)} \cdot \left(l_2^{(-\alpha+2)} - l_1^{(-\alpha+2)}\right),$$

解下列方程组，求出β_1 和β_2：

$$\begin{cases} cA = \int_1^{1500} n_a(x)s(x)dx, & A = 1\text{km}^2 \\ \beta_1 l^{-\alpha_1} = \beta_2 l^{-\alpha_2}, & l = 40m \end{cases};$$

S4、根据步骤 S3 得到的模型冰的目标覆盖率 c 下各尺寸的模型冰的数量比例和步骤 S22 得到的模型冰面积总和 A_2，得到模型冰的目标覆盖率 c 下各尺寸的模型冰的数量；

S5、确定模型冰的目标覆盖率 c 下各尺寸的模型冰几何形状和参数：

模型冰圆度 R 满足以下公式：

$$R=\frac{d_p}{d}=\frac{\frac{P}{\pi}}{l_n}=\frac{P}{\pi l_n};$$

其中，d_p为等周长圆直径，d为等面积圆直径，且$d=l_n$，P表示模型冰几何形状的周长；

由上式，可知，R越大表示模型冰形状越接近方形，当$d_p=l_n$时，$R=1$，模型冰形状就是一个圆。

模型冰几何形状面积S满足以下公式：

$$S=\frac{\pi l_n^{\,2}}{4};$$

卡尺直径是某形状的一对外接平行线间的距离，可以形象地理解为用卡尺测量出来的该形状的距离。若这对平行线绕形状旋转一圈，那么距离存在最大值和最小值，这里分别定义为最大卡尺直径D_{max}和最小卡尺直径D_{min}。

模型冰卡尺直径比R_a满足以下公式：

$$R_a=D_{max}/D_{min};$$

根据R的取值确定P；

根据P、S和R_a确定模型冰几何形状。

所述实验流域实际构建方法为搭建 PVC 管通过三通管相连的围栏，为使PVC管浮于水面以实现良好的阻挡模型冰的效果，PVC管位于水下的外侧壁粘贴珍珠棉板。

模型冰的材质为H型PP材料，该材料力学性能稳定、强度足够，不溶于水，是一种理想的非冻结模型冰材料。

非冻结模型冰采用 H 型 PP 材料，材料全称为均聚聚丙烯，英文名*Homopolymer polypropylene*，由单一的丙烯单体聚合而成，分子链具有很高的规整度，所以材料具有优良的力学性能、较好强度和高结晶度，不足之处在于冲击性能较差。H型PP材料和海冰的主要的材料性质见下表：

H型PP材料（PP-H）	
性质	数值
密度（g/cm^3）	0.904-0.908
弹性模量（MPa）	1300
泊松比	0.42
硬度	80-110
吸水率（24h内）	＜0.01%
PP-H与钢之间的摩擦系数	
静摩擦系数	0.30

动摩擦系数	0.28
PP-H 相互之间的摩擦系数	
静摩擦系数	0.76
动摩擦系数	0.44

海冰	
性质	数值
密度（g/cm^3）	0.90-0.92
弹性模量（MPa）	5000
泊松比	0.3
海冰与钢之间的摩擦系数	
静摩擦系数	0.25
动摩擦系数	0.05-0.1
海冰相互之间的摩擦系数	
静摩擦系数	0.51-0.86
动摩擦系数	0.41-0.44

比较以上表格中性质，可以看到 H 型 PP 材料的密度、摩擦系数与海冰十分相近，在船舶的运动过程中，可较为准确地再现海冰的运动状态，进而较为准确地估算船舶的碎冰阻力；且该材料力学性能稳定、强度足够，不溶于水，在实验过程中可操作性强，而且可以重复多次使用，节约实验成本。

本发明克服了冰水池的冻结模型冰实验中的经济性差和可操作性不强的问题，提供了一种在拖曳水池中开展船舶碎冰阻力模型实验的设计方法。

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一种基于非冻结模型冰的船舶碎冰阻力模型试验的设计方法的流程图。

图 2 是碎冰大小分布律函数曲线。

图 3 是本发明的具体实施方式中模型冰的目标覆盖率 c 下各尺寸的模型冰累积数量分布图（c=0.6）。

图 4 是本发明的具体实施方式中模型冰几何形状（30cm）示意图。

图 5 是本发明的具体实施方式中围栏的整体安装效果。

图 6 是本发明的具体实施方式中 PVC 管和珍珠棉板装配示意图。

图 7 是本发明的具体实施方式中实验流域照片。

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，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-图 7 所示，一种基于非冻结模型冰的船舶碎冰阻力模型试验的设计方法，其特征在于具有如下步骤，

S1、确定选用船模的总长 L_1，型宽 B 和缩尺比λ；

本实施例选用 *FPSO* 船模，缩尺比$\lambda=50$，船模的主尺度如下表所示。

总长（m）	4.36
垂线间长（m）	4.2
型宽（m）	0.656
型深（m）	0.364
吃水（m）	0.16

L_1=4.36m，B=0.656m；

确定船舶碎冰阻力模型试验中的放置碎冰的实验流域大小 A_1：

根据选用船模的总长 L_1，型宽 B 确定实验流域的最小尺寸，进一步确定实验流域尺寸：

$$L_2 \geq 5L_1 = 21.8\text{m}，$$

$$\text{W} \geq 3\text{B} = 1.968\text{m}，$$

$$A_1 = \text{W}L_2，$$

其中，L_2 为实验流域的长，W 为实验流域的宽；

根据上述实验流域的最小尺寸以及拖曳水池实际大小（170m×7.0m×4.0m），最终选定实验流域尺寸为 29m×3.0m×4.0m。

S2、确定模型冰的特征长度：

S21、确定模型冰的目标覆盖率 c；

设 c=90%、80% 和 60%；

S22、根据步骤 S1 得到的实验流域大小 A_1 以及步骤 S21 得到的模型冰的目标覆盖率 c，确定模型冰面积总和 A_2：

$$A_2 = cA_1；$$

根据 c=90%、80% 和 60%，则对应的 A_2 为 67.5m^2、60m^2 和 45m^2

S23、根据位于弹性基底上的薄板弯曲理论确定不弯曲破坏的碎冰临界特征长度 L_c：

$$L_c = \sqrt[4]{\frac{D}{k}},$$

其中，D 为冰的抗弯刚度，满足以下公式：

$$D = \frac{Et^3}{12\left(1-\nu^2\right)},$$

E 为冰的弹性模量，E=5GPa，t 是实际碎冰厚度，t=1m，ν是泊松比，ν=0.3；

k 为基底的弹性刚度，满足以下公式：

$$k = \rho_w g,$$

ρ_w 是水的密度，ρ_w=1025 kg/m^3，g 是重力加速度，g=9.81kg/m^2；

S24、确定模型冰的临界特征长度 l：

$$l = \frac{L}{\lambda};$$

其中，L 为碎冰特征长度，满足以下公式：

$$L \le L_c;$$

则，

$$l = \frac{\mathrm{L}}{\lambda} \le \frac{L_c}{\lambda} = 0.3m$$

S25、根据模型冰的临界特征长度 l，确定船舶碎冰阻力模型试验中各尺寸的模型冰特征长度 l_n 分别为 10cm、15cm、20cm、25cm 和 30cm；

S3、确定模型冰的目标覆盖率 c 下各尺寸的模型冰的数量比例：

$$N\left(l_n\right) = \begin{cases} \beta_1 l_n^{-\alpha_1}, & l_n \in [1,40] \\ \beta_2 l_n^{-\alpha_2}, & l_n \in [40,1500] \end{cases},$$

上式为碎冰大小分布律函数。

其中，$N\left(l_n\right)$为尺寸为 l_n 的模型冰的数量，α_1、α_2、β_1 和β_2 为系数，α_1=1.15，α_2=1.87，模型冰特征长度 l_n 在[l_1,l_2]范围内时，模型冰总面积满足以下公式：

$$A = \int_{l_1}^{l_2} n_a(x)s(x)dx = \frac{-\pi\beta\alpha}{4(\alpha-2)} \cdot \left(l_2^{(-\alpha+2)} - l_1^{(-\alpha+2)}\right),$$

解下列方程组，求出β_1 和β_2：

$$\begin{cases} cA = \dfrac{-\pi\beta_1\alpha_1}{4(\alpha_1-2)} \cdot \left(40^{(-\alpha_1+2)} - 1^{(-\alpha_2+2)}\right) + \dfrac{-\pi\beta_2\alpha_2}{4(\alpha_2-2)} \cdot \left(1500^{(-\alpha_1+2)} - 40^{(-\alpha_2+2)}\right), & A = 1\mathrm{km}^2 \\ \beta_1 l^{-\alpha_1} = \beta_2 l^{-\alpha_2}, & l = 40m \end{cases};$$

c=90%、80% 和 60%，分别解出各自对应的β_1、β_2 值如下表所示：

目标覆盖率	0.9	0.8	0.6
β_1	1.776261	1.578899	1.184174
β_2	0.17498	0.155538	0.11665378

β_1、β_2带入碎冰大小分布律函数，即得到对应目标覆盖率的累积分布函数。根据得到的累积分布函数，缩尺比λ，计算得到模型冰的目标覆盖率 c 下各尺寸的模型冰的数量比例（为了插值得到 30cm 的数量，计算 35cm 的累积数量。）

	35cm	30cm	25cm	20cm	15cm	10cm
全尺度（km）	0.0175	0.015	0.0125	0.01	0.0075	0.005
0.9 累积	186	222	274	354	493	786
当前		36	52	80	139	293
0.8 累积	166	198	244	315	439	699
当前		32	46	71	124	261
0.6 累积	124	148	183	236	329	524
当前		24	35	53	93	195

S4、根据步骤 S3 得到的模型冰的目标覆盖率 c 下各尺寸的模型冰的数量比例和步骤 S22 得到的模型冰面积总和 A_2，得到模型冰的目标覆盖率 c 下各尺寸的模型冰的数量，具体如下表所示：

目标覆盖率	30cm	25cm	20cm	15cm	10cm
0.9	197	283	437	758	1598
0.8	175	251	389	674	1421
0.6	131	189	292	505	1066

将目标覆盖率为 0.6 的累积数量分布如图 3 所示。

S5、确定模型冰的目标覆盖率 c 下各尺寸的模型冰几何形状和参数：

模型冰圆度 R 满足以下公式：

$$R=\frac{d_p}{d}=\frac{\frac{P}{\pi}}{l_n}=\frac{P}{\pi l_n};$$

其中，d_p为等周长圆直径，d 为等面积圆直径，且 $d=l_n$，P 表示模型冰几何形状的周长；

模型冰几何形状面积 S 满足以下公式：

$$S=\frac{\pi l_n^{\,2}}{4};$$

模型冰卡尺直径比 R_a 满足以下公式：

$$R_a = D_{max} / D_{min}$$；

统计数据显示，碎冰中 R 大约呈现线性关系，大约在 1.145±0.002，同时碎冰特征长度 L 越小，波动变化越小；卡尺直径比 R_a 范围在 1.78±0.4，且最大卡尺直径 D_{max} 越小，这个比值的波动越小，则取 R=1.145，R_a=1.78。

根据 R 的取值确定 P；

	30cm	25cm	20cm	15cm	10cm
P(cm)	107.91	89.93	71.94	53.96	35.97
S (m2)	0.070686	0.0491	0.0314	0.0177	0.00785
D_{min} (cm)	19.93	16.6	13.28	9.96	6.64
D_{max} (cm)	35.47	29.56	23.65	17.74	11.8

根据 P、S 和 R_a 确定模型冰几何形状。

选定模型冰几何形状为多边形，满足上表中该形状的周长、面积以及边长关系，即可确定出较规则多边形的具体几何形状参数。各多边形计算方法有所差别，且根据以上条件存在不唯一的几何参数，故不做具体计算。这里仅列出一组假设对称的长梯形、扁梯形、长方形、五边形、六边形和椭圆（30cm）的示意图，如图 4 所示。

实验流域选定后，需要在拖曳水池中安装一个 29m×3.0m 大小的围栏，围成船舶航行的碎冰区。围栏的材料选用常见的长度为 4m，外径 75mm 的标准 PVC 管。PVC 管之间用三通管相连，为加固管件与三通管之间的连接，在 PVC 管与三通管重叠部分，钻两个孔，铁丝穿过两个孔后拧紧，围栏的整体安装效果见图 5。另外，因为 PVC 管为中空结构，想要使 PVC 管浮于水面上并达到良好的拦截冰块的效果，需对 PVC 管做一点改造。不同于前人的在管件中塞入压铁然后密封相通的管件两头的做法，在 PVC 管位于水下的外侧壁沿其长度方向上，粘贴 2cm 厚 2cm 宽的珍珠棉板，在安装时将粘有珍珠棉板的一侧位于水面正下方，安装示意图见图 6。这种做法，因较小密度的珍珠棉板提供了浮力，避免了 PVC 管下沉到水面下模型冰滑出的问题，既能使得整套围栏装置起到预期的拦冰效果，又起到了有节约成本，降低施工量的作用。

最终，按照以上计算结果，布置目标覆盖率为 0.6 的实验流域照片如图 7 所示。

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。

权 利 要 求 书

1、一种基于非冻结模型冰的船舶碎冰阻力模型试验的设计方法，其特征在于具有如下步骤，

S1、确定选用船模的总长 L_1，型宽 B 和缩尺比λ；

确定船舶碎冰阻力模型试验中的放置碎冰的实验流域大小 A_1：

根据选用船模的总长 L_1，型宽 B 确定实验流域的最小尺寸，进一步确定实验流域尺寸：

$$L_2 \geq 5L_1,$$

$$W \geq 3B,$$

$$A_1 = \mathrm{W}L_2,$$

其中，L_2 为实验流域的长，W 为实验流域的宽；

S2、确定模型冰的特征长度：

S21、确定模型冰的目标覆盖率 c；

S22、根据步骤 S1 得到的实验流域大小 A_1 以及步骤 S21 得到的模型冰的目标覆盖率 c，确定模型冰面积总和 A_2：

$$A_2 = cA_1;$$

S23、根据位于弹性基底上的薄板弯曲理论确定不弯曲破坏的碎冰临界特征长度 L_c：

$$L_c = \sqrt[4]{\frac{D}{k}},$$

其中，D 为冰的抗弯刚度，满足以下公式：

$$D = \frac{Et^3}{12\left(1-\nu^2\right)},$$

E 为冰的弹性模量，单位：Pa，t 是实际碎冰厚度，单位：m，ν是泊松比；

k 为基底的弹性刚度，满足以下公式：

$$k = \rho_{\mathrm{w}} g,$$

ρ_w 是水的密度，单位：kg/m^3，g 是重力加速度，单位：kg/m^2；

S24、确定模型冰的临界特征长度 l：

$$l = \frac{L}{\lambda};$$

其中，L 为碎冰特征长度，满足以下公式：

$$L \leq L_c;$$

S25、根据模型冰的临界特征长度 l，确定船舶碎冰阻力模型试验中各尺寸的模型冰特征长度 l_n；

S3、确定模型冰的目标覆盖率 c 下各尺寸的模型冰的数量比例：

$$N(l_n)=\begin{cases}\beta_1 l_n^{-\alpha_1}, & l_n\in[1,40]\\ \beta_2 l_n^{-\alpha_2}, & l_n\in[40,1500]\end{cases},$$

其中，$N(l_n)$ 为尺寸为 l_n 的模型冰的数量，α_1、α_2、β_1 和 β_2 为系数，α_1=1.15，α_2=1.87，模型冰特征长度 l_n 在[l_1,l_2]范围内时，模型冰总面积满足以下公式：

$$A=\int_{l_1}^{l_2} n_a(x)s(x)dx=\frac{-\pi\beta\alpha}{4(\alpha-2)}\cdot\left(l_2^{(-\alpha+2)}-l_1^{(-\alpha+2)}\right),$$

解下列方程组，求出β_1和β_2：

$$\begin{cases}cA=\int_1^{1500} n_a(x)s(x)dx, & A=1\mathrm{km}^2\\ \beta_1 l^{-\alpha_1}=\beta_2 l^{-\alpha_2}, & l=40m\end{cases};$$

S4、根据步骤 S3 得到的模型冰的目标覆盖率 c 下各尺寸的模型冰的数量比例和步骤 S22 得到的模型冰面积总和 A_2，得到模型冰的目标覆盖率 c 下各尺寸的模型冰的数量；

S5、确定模型冰的目标覆盖率 c 下各尺寸的模型冰几何形状和参数：

模型冰圆度 R 满足以下公式：

$$R=\frac{d_p}{d}=\frac{\frac{P}{\pi}}{l_n}=\frac{P}{\pi l_n};$$

其中，d_p 为等周长圆直径，d 为等面积圆直径，且 d=l_n，P 表示模型冰几何形状的周长；

模型冰几何形状面积 S 满足以下公式：

$$\mathrm{S}=\frac{\pi l_n^{\,2}}{4};$$

模型冰卡尺直径比 R_a 满足以下公式：

$$R_a=D_{max}/D_{min};$$

根据 R 的取值确定 P；

根据 P、S 和 R_a 确定模型冰几何形状。

2、根据权利要求 1 所述的设计方法，其特征在于，所述实验流域实际构建方法为搭建 PVC 管通过三通管相连的围栏，PVC 管位于水下的外侧壁粘贴珍珠棉板。

3、根据权利要求 1 所述的设计方法，其特征在于，模型冰的材质为 H 型 PP 材料。

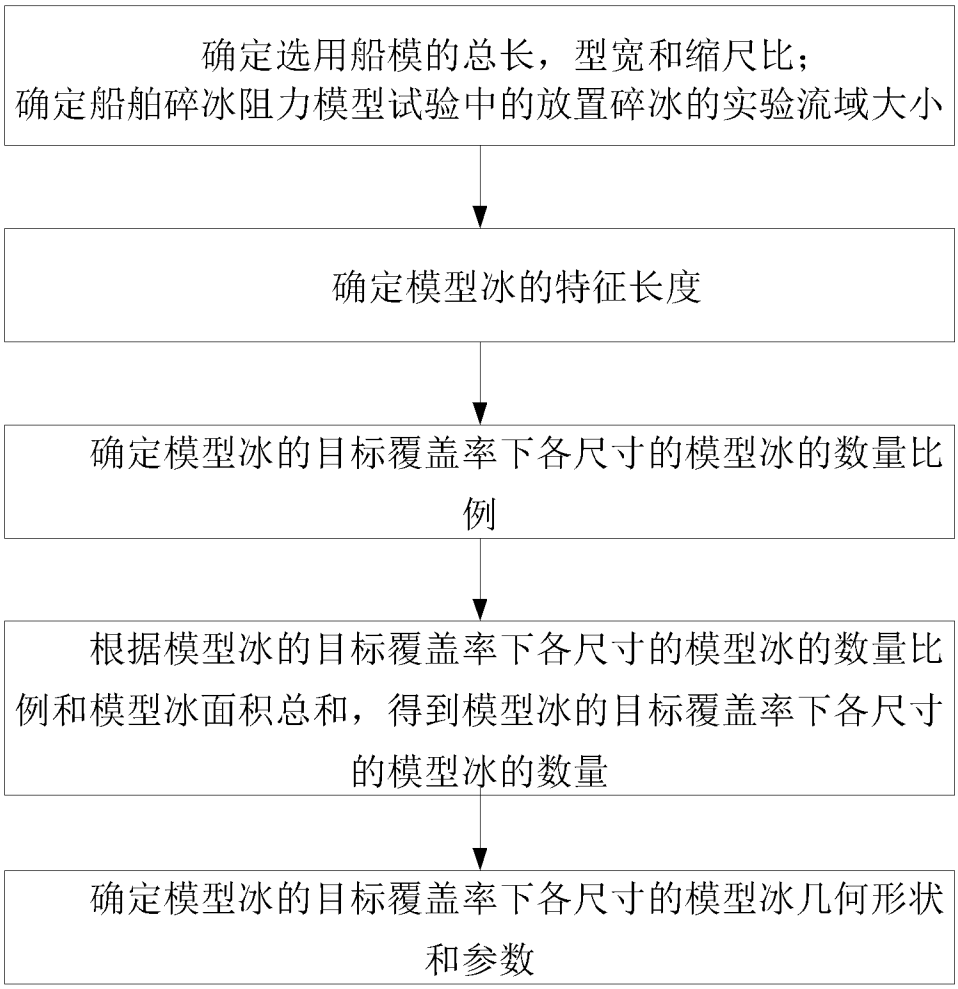

确定选用船模的总长，型宽和缩尺比；
确定船舶碎冰阻力模型试验中的放置碎冰的实验流域大小
确定模型冰的特征长度
确定模型冰的目标覆盖率下各尺寸的模型冰的数量比例
根据模型冰的目标覆盖率下各尺寸的模型冰的数量比例和模型冰面积总和，得到模型冰的目标覆盖率下各尺寸的模型冰的数量
确定模型冰的目标覆盖率下各尺寸的模型冰几何形状和参数

图 1

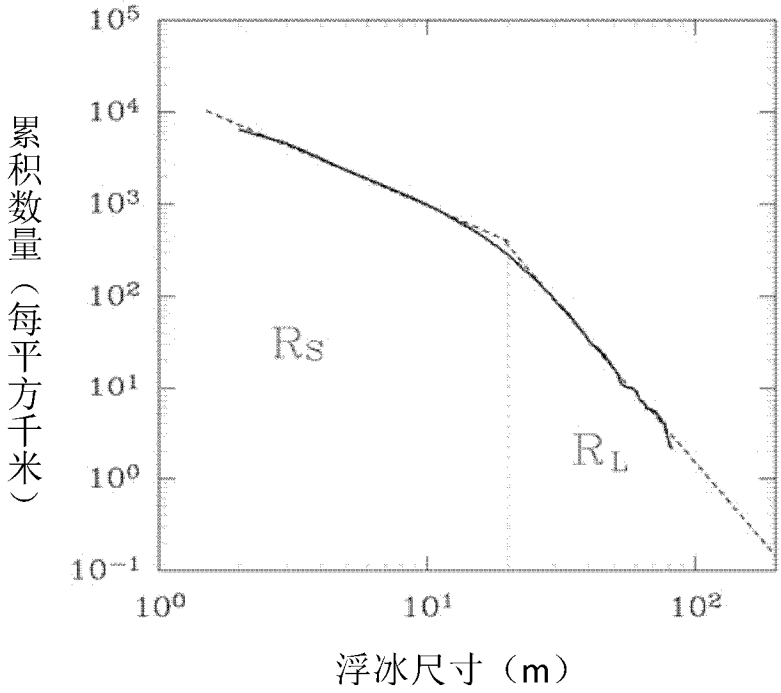

累积数量（每平方千米）
10^5
10^4
10^3
10^2
10^1
10^0
10^{-1}
Rs
RL
10^0
10^1
10^2
浮冰尺寸（m）

图 2

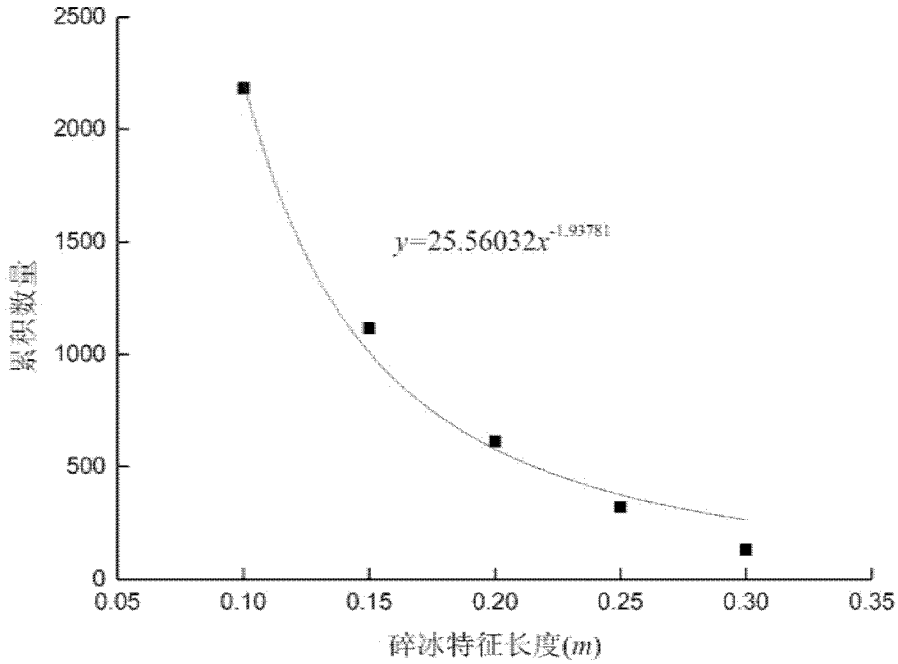

2500
2000
1500
1000
500
0
累积数量
y=25.56032x-1.93781
0.05
0.10
0.15
0.20
0.25
0.30
0.35
碎冰特征长度(m)

图 3

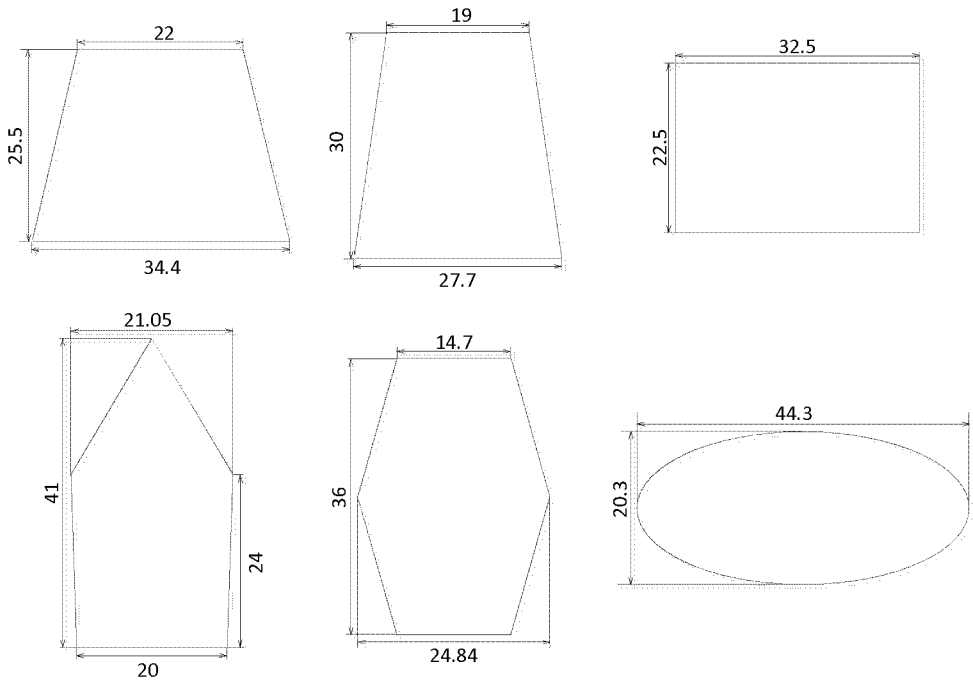


图 4

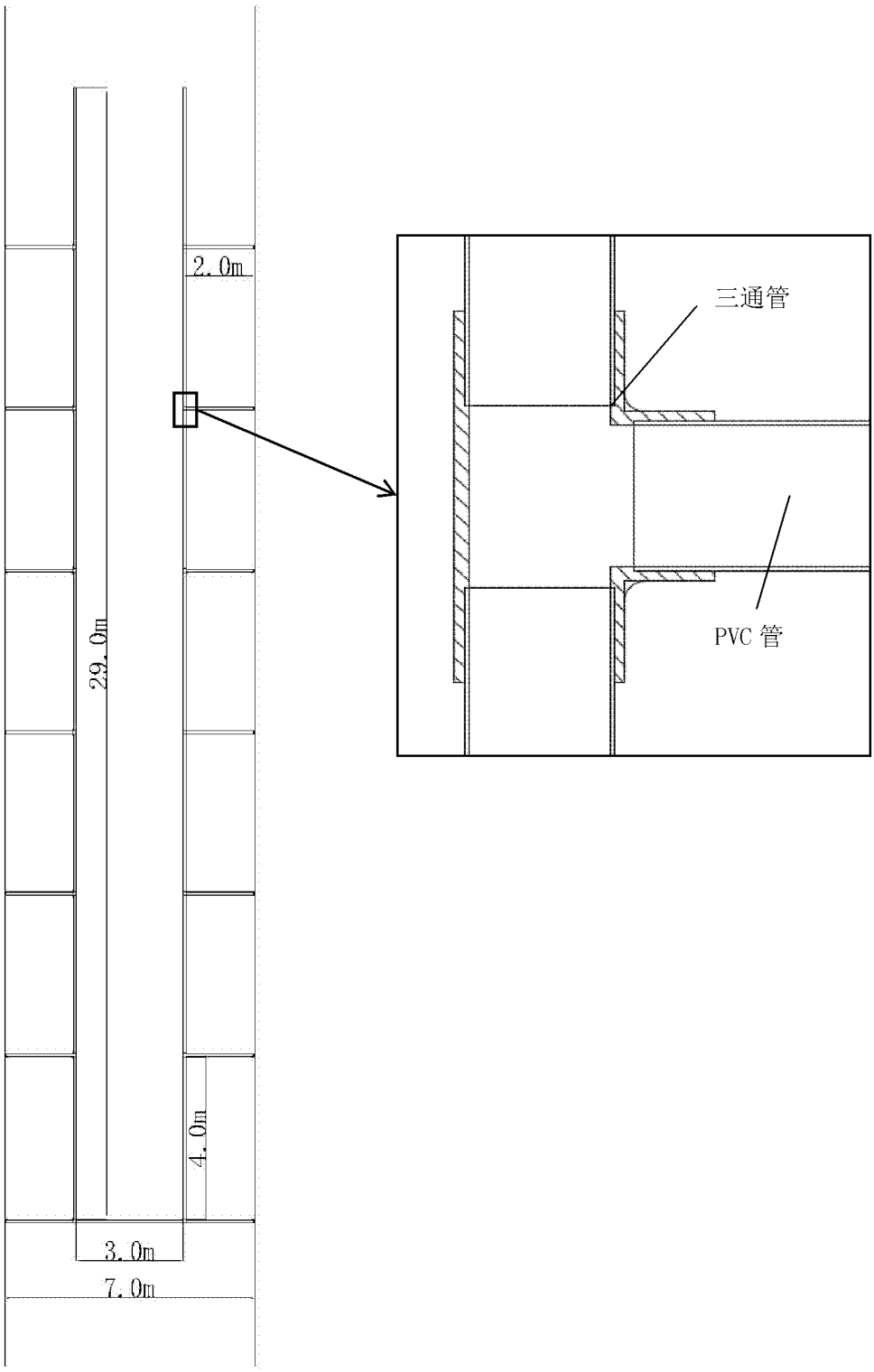


图 5

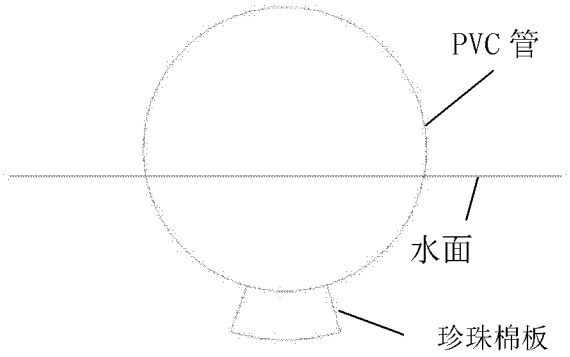


图 6



图 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2019/099884

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01M 10/00(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)

G01M

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)

CNABS; CNTXT; CNKI; 万方; 超星; VEN; USTXT; EPTXT; IEEE: 大连理工, 阻力, 船舶, 破冰, 设计, 计算, 面积, 碎冰, 弹性模量, 长度, 厚度, 临界, resistance, design, ice, ship, model, break+, experiment, length, area

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 109506889 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 22 March 2019 (2019-03-22) description, paragraphs [0005]-[0058]	1-3
A	CN 107014587 A (HARBIN ENGINEERING UNIVERSITY) 04 August 2017 (2017-08-04) description, paragraphs [0021]-[0083], and figures 1-5	1-3
A	CN 106394806 A (NANTONG COSCO KHI SHIP ENGINEERING CO., LTD.) 15 February 2017 (2017-02-15) entire document	1-3
A	KR 20150134648 A (KOREA INST OCEAN SCI & TECH) 02 December 2015 (2015-12-02) entire document	1-3

☐ 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	Date of mailing of the international search report
21 September 2019	**30 October 2019**
Name and mailing address of the ISA/CN **China National Intellectual Property Administration** **No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088** **China** Facsimile No. **(86-10)62019451**	Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2019/099884

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN 109506889 A	22 March 2019	None	
CN 107014587 A	04 August 2017	None	
CN 106394806 A	15 February 2017	None	
KR 20150134648 A	02 December 2015	KR 101603166 B1	14 March 2016

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2019/099884

A. 主题的分类

G01M 10/00(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)

G01M

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））

CNABS;CNTXT;CNKI;万方;超星;VEN;USTXT;EPTXT;IEEE:大连理工，阻力，船舶，破冰，设计，计算，面积，碎冰，弹性模量，长度，厚度，临界，resistance，design，ice，ship，model，break+，experiment，length，area

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 109506889 A (大连理工大学) 2019年 3月 22日 (2019-03-22) 说明书第[0005]-[0058]段	1-3
A	CN 107014587 A (哈尔滨工程大学) 2017年 8月 4日 (2017-08-04) 说明书第[0021]-[0083]段，附图1-5	1-3
A	CN 106394806 A (南通中远川崎船舶工程有限公司) 2017年 2月 15日 (2017-02-15) 全文	1-3
A	KR 20150134648 A (KOREA INST OCEAN SCI & TECH) 2015年 12月 2日 (2015-12-02) 全文	1-3

☐ 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	国际检索报告邮寄日期
2019年 9月 21日	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 周群 电话号码 86-（0512）-88997268

表 PCT/ISA/210 (第2页) (2015年1月)

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2019/099884

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 109506889 A	2019年 3月 22日	无	
CN 107014587 A	2017年 8月 4日	无	
CN 106394806 A	2017年 2月 15日	无	
KR 20150134648 A	2015年 12月 2日	KR 101603166 B1	2016年 3月 14日