

(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 1 月 4 日 (04.01.2024)



(10) 国际公布号
WO 2024/001096 A1

(51) 国际专利分类号:
G06F 30/28 (2020.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2022/141089

(22) 国际申请日: 2022 年 12 月 22 日 (22.12.2022)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202210752299.0 2022年6月29日 (29.06.2022) CN

(71) 申请人: 苏州元脑智能科技有限公司 (SUZHOU METABRAIN INTELLIGENT TECHNOLOGY CO., LTD.) [CN/CN]; 中国江苏省苏州市吴中经济开发区郭巷街道官浦路1号9幢, Jiangsu 215000 (CN)。

(72) 发明人: 崔冰 (CUI, Bing); 中国江苏省苏州市吴中区吴中经济开发区郭巷街道官浦路1号9幢, Jiangsu 215000 (CN)。 刘羽 (LIU, Yu); 中国江苏省苏州市吴中区吴中经济开发区郭巷街道官浦路1号9幢, Jiangsu 215000 (CN)。

(74) 代理人: 北京市万慧达律师事务所 (BEIJING WANHUIDA LAW FIRM); 中国北京市海淀区中关村南大街1号友谊宾馆颐园写字楼2楼, Beijing 100873 (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,

(54) Title: METHOD AND SYSTEM FOR CALCULATING FLUID MECHANICS PARAMETERS OF OBJECT, AND DEVICE AND MEDIUM

(54) 发明名称: 一种物体的流体力学参数计算方法、系统、设备以及介质

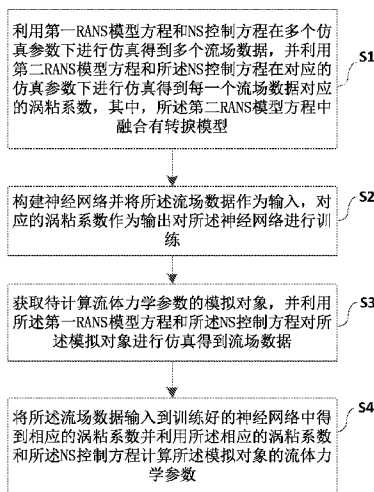


图 1

S1 Perform simulation under a plurality of simulation parameters by using a first RANS model equation and an NS control equation so as to obtain a plurality of pieces of flow field data, and perform simulation under corresponding simulation parameters by using a second RANS model equation and the NS control equation so as to obtain an eddy viscosity coefficient corresponding to each piece of flow field data, wherein a transition model is fused in the second RANS model equation
S2 Construct a neural network, and train the neural network by taking the flow field data as input and the corresponding eddy viscosity coefficients as output
S3 Obtain a simulation object having fluid mechanics parameters to be calculated, and perform simulation on the simulation object by using the first RANS model equation and the NS control equation so as to obtain flow field data
S4 Input the flow field data into the trained neural network to obtain a corresponding eddy viscosity coefficient, and calculate fluid mechanics parameters of the simulation object by using the corresponding eddy viscosity coefficient and the NS control equation

(57) Abstract: The present application provides a method for calculating fluid mechanics parameters of an object, comprising the following steps: performing simulation under a plurality of simulation parameters by using a first RANS model equation and an NS control equation so as to obtain a plurality of pieces of flow field data, and performing simulation under corresponding simulation parameters by using a second RANS model equation and the NS control equation so as to obtain an eddy viscosity coefficient corresponding to each piece of flow field data, wherein a transition model is fused in the second RANS model equation; constructing a neural network, and training the neural network by taking the flow field data as input and the corresponding eddy viscosity coefficients as output; obtaining a simulation object having fluid mechanics parameters to be calculated, and performing simulation on the simulation object by using the first RANS model equation and the NS control equation so as to obtain flow field data; and inputting the flow field data into the trained neural network to obtain a corresponding eddy viscosity coefficient, and calculating fluid mechanics parameters of the simulation object by using the corresponding eddy viscosity coefficient and the NS control equation.

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, 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: 本申请提供了一种物体的流体力学参数计算方法, 包括以下步骤: 利用第一RANS模型方程和NS控制方程在多个仿真参数下进行仿真得到多个流场数据, 并利用第二RANS模型方程和NS控制方程在对应的仿真参数下进行仿真得到每一个流场数据对应的涡粘系数, 其中, 第二RANS模型方程中融合有转捩模型; 构建神经网络并将流场数据作为输入, 对应的涡粘系数作为输出对神经网络进行训练; 获取待计算流体力学参数的模拟对象, 并利用第一RANS模型方程和NS控制方程对模拟对象进行仿真得到流场数据; 将流场数据输入到训练好的神经网络中得到相应的涡粘系数并利用相应的涡粘系数和NS控制方程计算模拟对象的流体力学参数。

一种物体的流体力学参数计算方法、系统、设备以及介质

相关申请的交叉引用

本申请要求于 2022 年 06 月 29 日提交中国专利局, 申请号为 202210752299.0, 申请名称为“一种物体的流体力学参数计算方法、系统、设备以及介质”的中国专利申请的优先权, 其全部内容通过引用结合在本申请中。

技术领域

本申请涉及流体力学领域, 尤其涉及一种物体的流体力学参数计算方法、系统、设备以及存储介质。

背景技术

随着高效推断统计算法以及机器学习技术的发展, 不同领域的学者们都开始尝试利用先前发展的高置信度数据(高精度仿真以及实验测量等等)来辅助建模。对于计算流体力学(CFD)而言, 基于人工神经网络(ANN)算法辅助湍流模型建模也已成为当下的研究热点之一。

计算流体力学是指利用数值仿真方法求解流体力学基本控制方程(Navier-Stokes, N-S 方程), 由于方程的性质导致方程本身并没有解析解, 因此使用数值方程求解方程时需要给出一定的模型假设。无论是何种假设都会存在一定的近似, 因此都会导致求解的精度受到影响, 然而高精度的模拟结果又需要大量的计算资源才可以得到。因此, 数据驱动辅助建模或许是一种可以合理解决上述矛盾的方法。

就工程流体力学仿真而言, 目前应用最为广泛方法是将 N-S 方程转化为雷诺平均 N-S 方程(RANS)进行求解, 即将 N-S 方程中所有物理量分解为时间平均量和脉动量后带入原方程得到。RANS 方程与 N-S 方程形式非常类似, 只是增加了与雷诺应力有关的一项, 因此需要增加新的方程来使 RANS 方程封闭。根据增加方程数量的不同, 就能得到不同的 RANS 模型。然而, 由于 RANS 方程

本身主要关注不同物理量时间平均值的变化，其在很多问题的求解上是存在缺陷的，例如完全无法捕捉一个流体力学中非常重要的物理过程——转捩（表示流体状态从层流到湍流的过渡）。为了解决这一问题，很多学者通过增加一个到两个新的方程来实现了对转捩现象的捕捉，即转捩模型。

而基于神经网络算法的数据驱动建模在计算流体力学中的应用主要有以下几种形式：

1. 基于神经网络算法及高置信度数据对 RANS 方法中的湍流模型不确定性进行评估和修正。由于不同的湍流模型对 RANS 方程中雷诺应力不确定性的模拟都存在一定的偏差，因此通过神经网络算法则可以量化以及修正这一不确定性。
2. 基于神经网络算法以及高置信度数据对湍流模型方程中的待定系数以及不同项的大小进行评估和修正。与第一种方法思路类似，知识评估和修正的对象关注到了湍流模型方程本身。

然而，发明人意识到，上述两种常用的神经网络算法在被应用于计算流体力学仿真软件中时，均存在不同的缺陷。即只能针对现有的数据集进行预测，无法用于修正模型训练过程中没有出现过的算例的数据集，即缺乏一定的泛化性。而且也无法预测转捩现象。

发明内容

本申请实施例提供了一种物体的流体力学参数计算方法，包括以下步骤：

利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在多个仿真参数下进行仿真得到多个流场数据，并利用第二 RANS 模型方程和 NS 控制方程在对应的仿真参数下进行仿真得到每一个流场数据对应的涡粘系数，其中，第二 RANS 模型方程中融合有转捩模型；

构建神经网络并将流场数据作为输入，对应的涡粘系数作为输出对神经网络进行训练；

获取待计算流体力学参数的模拟对象，并利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程对模拟对象进行仿真得到流场数据；及

将流场数据输入到训练好的神经网络中得到相应的涡粘系数并利用相应的涡粘系数和 NS 控制方程计算模拟对象的流体力学参数。

在一些实施例中, 利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在多个仿真参数下进行仿真得到多个流场数据, 进一步包括:

利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在不同攻角、不同马赫数和/或不同模拟对象下进行仿真得到多个流场数据, 其中每一个流场数据均包括多个物理量。

在一些实施例中, 将流场数据作为输入, 对应的涡粘系数作为输出对神经网络进行训练, 进一步包括:

从上述多个物理量中选择体现层流与湍流差异的若干个物理量作为输入。

在一些实施例中, 上述若干个物理量为速度、压力、温度和/或密度。

在一些实施例中, 将流场数据作为输入, 对应的涡粘系数作为输出对神经网络进行训练, 进一步包括:

将选择的上述若干个物理量进行归一化处理。

在一些实施例中, 利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在多个仿真参数下进行仿真得到多个流场数据, 进一步包括:

在第一密度网格下利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在多个仿真参数下进行仿真得到多个流场数据。

在一些实施例中, 利用第二 RANS 模型方程和 NS 控制方程在对应的仿真参数下进行仿真得到每一个流场数据对应的涡粘系数, 进一步包括:

在第二密度网格下利用第二 RANS 模型方程和 NS 控制方程在对应的仿真参数下进行仿真得到每一个流场数据对应的涡粘系数, 其中, 第二密度网格比第一密度网格密。

在一些实施例中, 将流场数据作为输入, 对应的涡粘系数作为输出对神经网络进行训练, 进一步包括:

将在第二密度网格下得到的对应的涡粘系数插值到第一密度网格上并计算反双曲正弦函数以作为输出。

在一些实施例中, 构建神经网络, 进一步包括:

利用输入层、三层隐藏层和输出层构建神经网络。

在一些实施例中, 还包括:

利用均方差公式 $MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (y_i - t_i)^2$ 计算损失函数, 其中 y_i 为预测值,

t_i 为真实值。

基于同一发明构思，根据本申请的另一个方面，本申请的实施例还提供了一种物体的流体力学参数计算系统，包括：

仿真模块，配置为利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在多个仿真参数下进行仿真得到多个流场数据，并利用第二 RANS 模型方程和 NS 控制方程在对应的仿真参数下进行仿真得到每一个流场数据对应的涡粘系数，其中，第二 RANS 模型方程中融合有转捩模型；

训练模块，配置为构建神经网络并将流场数据作为输入，对应的涡粘系数作为输出对神经网络进行训练；

获取模块，配置为获取待计算流体力学参数的模拟对象，并利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程对模拟对象进行仿真得到流场数据；及

计算模块，配置为将流场数据输入到训练好的神经网络中得到相应的涡粘系数并利用相应的涡粘系数和 NS 控制方程计算模拟对象的流体力学参数。

在一些实施例中，仿真模块还配置为：

利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在不同攻角、不同马赫数和/或不同模拟对象下进行仿真得到多个流场数据，其中每一个流场数据均包括多个物理量。

在一些实施例中，训练模块还配置为：

从上述多个物理量中选择体现层流与湍流差异的若干个物理量作为输入。

在一些实施例中，上述若干个物理量为速度、压力、温度和/或密度。

在一些实施例中，训练模块还配置为：

将选择的上述若干个物理量进行归一化处理。

在一些实施例中，仿真模块还配置为：

在第一密度网格下利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在多个仿真参数下进行仿真得到多个流场数据。

在一些实施例中，仿真模块还配置为：在第二密度网格下利用第二 RANS 模型方程和 NS 控制方程在对应的仿真参数下进行仿真得到每一个流场数据对应的涡粘系数，其中，第二密度网格比第一密度网格密。

在一些实施例中，仿真模块还配置为：

将在第二密度网格下得到的对应的涡粘系数插值到第一密度网格上并计算反双曲正弦函数以作为输出。

在一些实施例中，训练模块，还配置为：

利用输入层、三层隐藏层和输出层构建神经网络。

在一些实施例中，训练模块，还配置为：

利用均方差公式 $MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (y_i - t_i)^2$ 计算损失函数，其中 y_i 为预测值， t_i 为真实值。

基于同一发明构思，根据本申请的另一个方面，本申请的实施例还提供了一种计算机设备，包括：

一个或多个处理器；及

一个或多个存储器，该一个或多个存储器存储有可在一个或多个处理器上运行的计算机可读指令，其特征在于，一个或多个处理器执行计算机可读指令时执行如上的任一种物体的流体力学参数计算方法的步骤。

基于同一发明构思，根据本申请的另一个方面，本申请的实施例还提供了一种非易失性计算机可读存储介质，非易失性计算机可读存储介质存储有计算机可读指令，计算机可读指令被上述一个或多个处理器执行时执行如上的任一种物体的流体力学参数计算方法的步骤。

附图说明

为了更清楚地说明本申请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作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本申请的一些实施例，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实施例。

图 1 为本申请的一个或多个实施例中提供的物体的流体力学参数计算方法的流程示意图；

图 2 为本申请的一个或多个实施例中提供的物体的流体力学参数计算系统的结构示意图；

图 3 为本申请的一个或多个实施例中提供的计算机设备的结构示意图；

图 4 为本申请的一个或多个实施例中提供的非易失性计算机可读存储介质

的结构示意图。

具体实施方式

为使本申请的目的、技术方案和优点更加清楚明白，以下结合具体实施例，并参照附图，对本申请实施例进一步详细说明。

需要说明的是，本申请实施例中所有使用“第一”和“第二”的表述均是为了区分两个相同名称非相同的实体或者非相同的参量，可见“第一”“第二”仅为了表述的方便，不应理解为对本申请实施例的限定，后续实施例对此不再一一说明。

根据本申请的一个方面，本申请的实施例提出一种物体的流体力学参数计算方法，如图 1 所示，其可以包括步骤：

S1，利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在多个仿真参数下进行仿真得到多个流场数据，并利用第二 RANS 模型方程和上述 NS 控制方程在对应的仿真参数下进行仿真得到每一个流场数据对应的涡粘系数，其中，第二 RANS 模型方程中融合有转捩模型；

S2，构建神经网络并将流场数据作为输入，对应的涡粘系数作为输出对神经网络进行训练；

S3，获取待计算流体力学参数的模拟对象，并利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程对模拟对象进行仿真得到流场数据；

S4，将流场数据输入到训练好的神经网络中得到相应的涡粘系数并利用相应的涡粘系数和 NS 控制方程计算模拟对象的流体力学参数。

本申请提出的方案基于神经网络算法及考虑转捩现象的流场数据设计了一个新的湍流模型，该模型可以替代传统的 RANS 湍流模型并实现对转捩现象的捕捉，减少数值仿真计算量的提升了预测结果的准确性。湍流仿真在工业届应用广泛，如飞机机翼或发动机叶片的设计、船舶螺旋桨的设计以及风力发电机叶片的设计等等，而本申请所提供的湍流模型或者说提供的一种优化现有湍流模型思路可以为不同行业的工业设计及仿真提供助力。

在一些实施例中，利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在多个仿真参数下进行仿真得到多个流场数据，进一步包括：

利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在不同攻角、不同马赫数和/或不同模拟对象下进行仿真得到多个流场数据,其中每一个流场数据均包括多个物理量。

具体的,可以使用传统 RANS 模型(简称 RANS-Original)以及融合有转捩模型的 RANS 模型(简称 RANS-Transition)在不同攻角、不同马赫数甚至不同机翼下的仿真结果。

在一些实施例中,将流场数据作为输入,对应的涡粘系数作为输出对神经网络进行训练,进一步包括:

从上述多个物理量中选择体现层流与湍流差异的若干个物理量作为输入。

在一些实施例中,上述若干个物理量为速度、压力、温度和/或密度。

具体的,转捩现象涉及流体状态从层流到湍流的转变,考虑这一物理现象,选择能够体现层流与湍流差异的物理量作为神经网络模型的输入量,同时增加部分张量分量来增强模型训练的收敛性。例如,选择的物理量可以是速度、压力、温度和/或密度等。

在一些实施例中,将流场数据作为输入,对应的涡粘系数作为输出对神经网络进行训练,进一步包括:

将选择的上述若干个物理量进行归一化处理。

具体的,可以根据仿真对象(如机翼等)的物理特性,从训练数据集的 RANS-Original 仿真结果中选择若干物理量 $I|_{train}$ 作为神经网络的输入特征,

在进行训练前使用 $\frac{I|_{train} - \min(I|_{train})}{\max(I|_{train}) - \min(I|_{train})}$ 公式进行归一化处理。

在一些实施例中,利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在多个仿真参数下进行仿真得到多个流场数据,进一步包括:

在第一密度网格下利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在多个仿真参数下进行仿真得到多个流场数据。

在一些实施例中,利用第二 RANS 模型方程和 NS 控制方程在对应的仿真参数下进行仿真得到每一个流场数据对应的涡粘系数,进一步包括:

在第二密度网格下利用第二 RANS 模型方程和 NS 控制方程在对应的仿真参数下进行仿真得到每一个流场数据对应的涡粘系数,其中,第二密度网格比第一

密度网格密。

在一些实施例中，将流场数据作为输入，对应的涡粘系数作为输出对神经网络进行训练，进一步包括：

将在第二密度网格下得到的对应的涡粘系数插值到第一密度网格上并计算反双曲正弦函数以作为输出。

具体的，可以从训练集的 RANS-Transition 数据中提取涡粘系数的反双曲正弦 $\text{arcsinh}(\mu_t^{true})|_{train}$ 作为神经网络的输出参数，输出参数的选取涉及两套网格，本专利将密网格的数据插值到了粗网格上作为输出参数，增强了模型后期迭代的稳定性，即用于训练的输出值为精度较高的值，这样使用了密网格插值的方式增加了仿真过程中的收敛性及稳定性，故可以在较粗的网格上对物理现象进行较为精确的仿真，大大节省了计算量。

在输出参数的选择上，由于雷诺应力主要由湍流粘性系数 μ_t 来控制，因此输出参数选择涡粘系数真值，同时为了避免不同区域（如物体表面与仿真区域外边界）涡粘系数数值差距过大而导致局部区域预测出现偏差，最后选择涡粘系数真值的反双曲正弦函数作为最终输出参数，即 $\text{arcsinh}(\mu_t^{true})$ 。

最后，构建基于训练集数据的映射，即

$$f : I|_{train} \mapsto \text{arcsinh}(\mu_t^{true})|_{train},$$

进而导出该映射下神经网络中

各神经元的权重与偏置量，再将得到的权重以及偏置量嵌入到开源 CFD 代码中，即可使用神经网络模型来预测求解问题的涡粘系数分布，最终实现对 RANS-Original 模型仿真结果的优化。即 S3，获取待计算流体力学参数的模拟对象，并利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程对模拟对象进行仿真得到流场数据，然后 S4，将流场数据输入到训练好的神经网络中得到相应的涡粘系数并利用相应的涡粘系数和 NS 控制方程计算模拟对象的流体力学参数。

在一些实施例中，构建神经网络，进一步包括：

利用输入层、三层隐藏层和输出层构建神经网络。

在一些实施例中，还包括：

利用均方差公式 $MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (y_i - t_i)^2$ 计算损失函数，其中 y 为预测值， t_i 为真实值。

具体的，可以采用 Keras 作为神经网络框架搭建工具，Keras 是一个由 Python 编写的开源人工神经网络库，可以作为 Tensorflow 和 Theano 等的高阶应用程序接口。目前很多的开源 CFD 代码(如 OpenFoam 等)中均已融合了转捩模型，因此可以选择某一开源 CFD 代码来作为第二 RANS 模型。

其中，神经网络框架的超参数设置如下所示：

$$\text{激活函数: Leaky ReLu, } y_i = \begin{cases} x_i & \text{if } x_i \geq 0 \\ \frac{x_i}{a_i} & \text{if } x_i < 0 \end{cases}, \text{ 其中 } a_i \text{ 为 } (1, +\infty) \text{ 区}$$

间内的固定参数。

优化器: Adam, $\theta_t = \theta_{t-1} - \frac{\eta}{\sqrt{v_t}} m_t$ 。Adam 是一种可以替代传统随机梯度下降过程的一阶优化算法，它能基于训练数据迭代地更新神经网络权重。

损失函数: 均方差, $MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (y_i - t_i)^2$ ，计算预测值与真实值之间的欧式距离，预测值和真实值越接近，两者的均方差越小。

基于代码收敛后的流场结果验证神经网络模型所预测涡粘系数的精确性，若有偏差则进一步优化神经网络参数直至结果准确。

本申请的提出的方案设计了一种神经网络框架，建立了传统流体力学湍流模型物理参数与考虑转捩现象的湍流模型的涡粘系数之间的映射，进而实现对传统湍流模型预测结果的修正。该神经网络框架建立的过程中，输入物理量的选取以及输出参数的形式都考虑所模拟问题的物理特性进行了筛选及改进。并且使用了密网格插值的方式增加了仿真过程中的收敛性及稳定性，故可以在较粗的网格上对物理现象进行较为精确的仿真，大大节省了计算量。

基于同一发明构思，根据本申请的另一个方面，本申请的实施例还提供了一种物体的流体力学参数计算系统 400，如图 2 所示，包括：

仿真模块 401，配置为利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在多个仿真参数下进行仿真得到多个流场数据，并利用第二 RANS 模型方程和 NS 控制方程在对应的仿真参数下进行仿真得到每一个流场数据对应的涡粘系数，其中，第二 RANS 模型方程中融合有转捩模型；

训练模块 402，配置为构建神经网络并将流场数据作为输入，对应的涡粘系数作为输出对神经网络进行训练；

获取模块 403，配置为获取待计算流体力学参数的模拟对象，并利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程对模拟对象进行仿真得到流场数据；

计算模块 404，配置为将流场数据输入到训练好的神经网络中得到相应的涡粘系数并利用相应的涡粘系数和 NS 控制方程计算模拟对象的流体力学参数。

在一些实施例中，仿真模块 401 还配置为：

利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在不同攻角、不同马赫数和/或不同模拟对象下进行仿真得到多个流场数据，其中每一个流场数据均包括多个物理量。

在一些实施例中，训练模块 402 还配置为：

从上述多个物理量中选择体现层流与湍流差异的若干个物理量作为输入。

在一些实施例中，上述若干个物理量为速度、压力、温度和/或密度。

在一些实施例中，训练模块 402 还配置为：

将选择的上述若干个物理量进行归一化处理。

在一些实施例中，仿真模块 401 还配置为：

在第一密度网格下利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在多个仿真参数下进行仿真得到多个流场数据。

在一些实施例中，仿真模块 401 还配置为：在第二密度网格下利用第二 RANS 模型方程和 NS 控制方程在对应的仿真参数下进行仿真得到每一个流场数据对应的涡粘系数，其中，第二密度网格比第一密度网格密。

在一些实施例中，仿真模块 401 还配置为：

将在第二密度网格下得到的对应的涡粘系数插值到第一密度网格上并计算反双曲正弦函数以作为输出。

在一些实施例中，训练模块 402，还配置为：

利用输入层、三层隐藏层和输出层构建神经网络。

在一些实施例中，训练模块 402，还配置为：

利用均方差公式 $MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (y_i - t_i)^2$ 计算损失函数，其中 y_i 为预测值， t_i 为真实值。

本申请的提出的方案设计了一种神经网络框架,建立了传统流体力学湍流模型物理参数与考虑转捩现象的湍流模型的涡粘系数之间的映射,进而实现对传统湍流模型预测结果的修正。该神经网络框架建立的过程中,输入物理量的选取以及输出参数的形式都考虑所模拟问题的物理特性进行了筛选及改进。并且使用了密网格插值的方式增加了仿真过程中的收敛性及稳定性,故可以在较粗的网格上对物理现象进行较为精确的仿真,大大节省了计算量。

基于同一发明构思,根据本申请的另一个方面,如图3所示,本申请的实施例还提供了一种计算机设备501,包括:

一个或多个处理器520;及

一个或多个存储器510,一个或多个存储器510存储有可在一个或多个处理器上运行的计算机可读指令511,一个或多个处理器520执行程序时执行上述任一实施例提供的物体的流体力学参数计算中的步骤。

本申请的提出的方案设计了一种神经网络框架,建立了传统流体力学湍流模型物理参数与考虑转捩现象的湍流模型的涡粘系数之间的映射,进而实现对传统湍流模型预测结果的修正。该神经网络框架建立的过程中,输入物理量的选取以及输出参数的形式都考虑所模拟问题的物理特性进行了筛选及改进。并且使用了密网格插值的方式增加了仿真过程中的收敛性及稳定性,故可以在较粗的网格上对物理现象进行较为精确的仿真,大大节省了计算量。

基于同一发明构思,根据本申请的另一个方面,如图4所示,本申请的实施例还提供了一种非易失性计算机可读存储介质601,上述非易失性计算机可读存储介质601存储有计算机可读指令610,上述计算机可读指令610被一个或多个处理器执行时执行上述任一实施例提供的物体的流体力学参数计算中的步骤。

本申请的提出的方案设计了一种神经网络框架,建立了传统流体力学湍流模型物理参数与考虑转捩现象的湍流模型的涡粘系数之间的映射,进而实现对传统湍流模型预测结果的修正。该神经网络框架建立的过程中,输入物理量的选取以及输出参数的形式都考虑所模拟问题的物理特性进行了筛选及改进。并且使用了密网格插值的方式增加了仿真过程中的收敛性及稳定性,故可以在较粗的网格上对物理现象进行较为精确的仿真,大大节省了计算量。

最后需要说明的是,本领域普通技术人员可以理解实现上述实施例方法中的

全部或部分流程，可以通过计算机可读指令来指令相关硬件来完成，程序可存储于一计算机可读取存储介质中，该程序在执行时，可包括如上述各方法的实施例的流程。

此外，应该明白的是，本文的非易失性计算机可读存储介质（例如，一个或多个存储器）可以是易失性存储器或非易失性存储器，或者可以包括易失性存储器和非易失性存储器两者。

本领域技术人员还将明白的是，结合这里的公开所描述的各种示例性逻辑块、模块、电路和算法步骤可以被实现为电子硬件、计算机软件或两者的组合。为了清楚地说明硬件和软件的这种可互换性，已经就各种示意性组件、方块、模块、电路和步骤的功能对其进行了一般性的描述。这种功能是被实现为软件还是被实现为硬件取决于具体应用以及施加给整个系统的设计约束。本领域技术人员可以针对每种具体应用以各种方式来实现的功能，但是这种实现决定不应被解释为导致脱离本申请实施例公开的范围。

以上是本申请公开的示例性实施例，但是应当注意，在不背离权利要求限定的本申请实施例公开的范围的前提下，可以进行多种改变和修改。根据这里描述的公开实施例的方法权利要求的功能、步骤和/或动作不需以任何特定顺序执行。此外，尽管本申请实施例公开的元素可以以个体形式描述或要求，但除非明确限制为单数，也可以理解为多个。

应当理解的是，在本文中使用的，除非上下文清楚地支持例外情况，单数形式“一个”旨在也包括复数形式。还应当理解的是，在本文中使用的“和/或”是指包括一个或者一个以上相关联地列出的项目的任意和所有可能组合。

上述本申请实施例公开实施例序号仅仅为了描述，不代表实施例的优劣。

本领域普通技术人员可以理解实现上述实施例的全部或部分步骤可以通过硬件来完成，也可以通过程序来指令相关的硬件完成，程序可以存储于一种非易失性计算机可读存储介质中，上述提到的存储介质可以是只读存储器，磁盘或光盘等。

所属领域的普通技术人员应当理解：以上任何实施例的讨论仅为示例性的，并非旨在暗示本申请实施例公开的范围（包括权利要求）被限于这些例子；在本申请实施例的思路下，以上实施例或者不同实施例中的技术特征之间也可以进行

组合，并存在如上的本申请实施例的不同方面的许多其它变化，为了简明它们没有在细节中提供。因此，凡在本申请实施例的精神和原则之内，所做的任何省略、修改、等同替换、改进等，均应包含在本申请实施例的保护范围之内。

权 利 要 求 书

1、一种物体的流体力学参数计算方法，其特征在于，包括以下步骤：

利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在多个仿真参数下进行仿真得到多个流场数据，并利用第二 RANS 模型方程和所述 NS 控制方程在对应的仿真参数下进行仿真得到每一个流场数据对应的涡粘系数，其中，所述第二 RANS 模型方程中融合有转捩模型；

构建神经网络并将所述流场数据作为输入，对应的涡粘系数作为输出对所述神经网络进行训练；

获取待计算流体力学参数的模拟对象，并利用所述第一 RANS 模型方程和所述 NS 控制方程对所述模拟对象进行仿真得到流场数据；及

将所述流场数据输入到训练好的神经网络中得到相应的涡粘系数并利用所述相应的涡粘系数和所述 NS 控制方程计算所述模拟对象的流体力学参数。

2、如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在多个仿真参数下进行仿真得到多个流场数据，进一步包括：

利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在不同攻角、不同马赫数和/或不同模拟对象下进行仿真得到多个流场数据，其中每一个流场数据均包括多个物理量。

3、如权利要求 2 所述的方法，其特征在于，利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在不同攻角、不同马赫数和/或不同模拟对象下进行仿真得到多个流场数据，所述方法还包括：

利用 RANS-Original 模型以及 RANS-Transition 模型在不同攻角、不同马赫数和/或不同模拟对象下进行仿真得到多个流场数据。

4、如权利要求 2 所述的方法，其特征在于，将所述流场数据作为输入，对应的涡粘系数作为输出对所述神经网络进行训练，进一步包括：

从所述多个物理量中选择体现层流与湍流差异的若干个物理量作为输入。

5、如权利要求 4 所述的方法，其特征在于，所述若干个物理量为速度、压力、温度和/或密度。

6、如权利要求 4 所述的方法，其特征在于，将所述流场数据作为输入，对应的涡粘系数作为输出对所述神经网络进行训练，进一步包括：

将选择的所述若干个物理量进行归一化处理。

7、如权利要求 6 所述的方法，其特征在于，在对所述神经网络进行训练之前，所述方法还包括：

从训练数据集的 RANS-Original 仿真结果中选择若干物理量 $I|_{train}$ 作为神经网络的输入特征；

在进行训练前使用 $\frac{I|_{train} - \min(I|_{train})}{\max(I|_{train}) - \min(I|_{train})}$ 公式进行归一化处理。

8、如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在多个仿真参数下进行仿真得到多个流场数据，进一步包括：

在第一密度网格下利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在多个仿真参数下进行仿真得到多个流场数据。

9、如权利要求 8 所述的方法，其特征在于，利用第二 RANS 模型方程和所述 NS 控制方程在对应的仿真参数下进行仿真得到每一个流场数据对应的涡粘系数，进一步包括：

在第二密度网格下利用第二 RANS 模型方程和所述 NS 控制方程在对应的仿真参数下进行仿真得到每一个流场数据对应的涡粘系数，其中，所述第二密度网格比所述第一密度网格密。

10、如权利要求 9 所述的方法，其特征在于，将所述流场数据作为输入，对应的涡粘系数作为输出对所述神经网络进行训练，进一步包括：

将在所述第二密度网格下得到的所述对应的涡粘系数插值到所述第一密度网格上并计算反双曲正弦函数以作为输出。

11、如权利要求 10 所述的方法，其特征在于，将在所述第二密度网格下得到的所述对应的涡粘系数插值到所述第一密度网格上并计算反双曲正弦函数以作为输出，所述方法还包括：

从训练集的 RANS-Transition 数据中提取涡粘系数的反双曲正弦 $\operatorname{arcsinh}(\mu_t^{true})|_{train}$ 作为神经网络的输出参数。

12、如权利要求 11 所述的方法，其特征在于，从训练集的 RANS-Transition 数据中提取涡粘系数的反双曲正弦 $\operatorname{arcsinh}(\mu_t^{true})|_{train}$ 作为神经网络的输出

参数, 包括:

选择涡粘系数的真值作为神经网络的输出参数;

选择涡粘系数真值的反双曲正弦 $\text{arcsinh}(\mu_t^{true})|_{train}$ 作为所述神经网络的最终输出参数。

13、如权利要求 12 所述的方法, 其特征在于, 在确定所述神经网络的最终输出参数之后, 所述方法还包括:

构建基于所述训练集数据的映射; 所述映射为:

$$f: I|_{train} \mapsto \text{arcsinh}(\mu_t^{true})|_{train}$$

导出所述映射下神经网络中各神经元的权重与偏置量;

将所述权重以及偏置量嵌入到开源 CFD 代码中。

14、如权利要求 1 所述的方法, 其特征在于, 构建神经网络, 进一步包括: 利用输入层、三层隐藏层和输出层构建所述神经网络。

15、如权利要求 14 所述的方法, 其特征在于, 还包括:

利用均方差公式 $\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (y_i - t_i)^2$ 计算损失函数, 其中 y_i 为预测值, t_i 为真实值。

16、如权利要求 14 所述的方法, 其特征在于, 构建神经网络, 进一步包括: 所述神经网络的激活函数设置如下所示:

$$y_i = \begin{cases} x_i & \text{if } x_i \geq 0 \\ \frac{x_i}{a_i} & \text{if } x_i < 0 \end{cases};$$

其中, a_i 为 $(1, +\infty)$ 区间内的固定参数。

17、一种物体的流体力学参数计算系统, 其特征在于, 包括:

仿真模块, 配置为利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在多个仿真参数下进行仿真得到多个流场数据, 并利用第二 RANS 模型方程和所述 NS 控制方程在对应的仿真参数下进行仿真得到每一个流场数据对应的涡粘系数, 其中, 所述第二 RANS 模型方程中融合有转捩模型;

训练模块, 配置为构建神经网络并将所述流场数据作为输入, 对应的涡粘系数作为输出对所述神经网络进行训练;

获取模块，配置为获取待计算流体力学参数的模拟对象，并利用所述第一 RANS 模型方程和所述 NS 控制方程对所述模拟对象进行仿真得到流场数据；及
计算模块，配置为将所述流场数据输入到训练好的神经网络中得到相应的涡粘系数并利用所述相应的涡粘系数和所述 NS 控制方程计算所述模拟对象的流体力学参数。

18、如权利要求 17 所述的系统，其特征在于，仿真模块还配置为：

利用第一 RANS 模型方程和 NS 控制方程在不同攻角、不同马赫数和/或不同模拟对象下进行仿真得到多个流场数据，其中每一个流场数据均包括多个物理量。

19、一种计算机设备，包括：

一个或多个处理器；及

一个或多个存储器，所述一个或多个存储器存储有可在所述一个或多个处理器上运行的计算机可读指令，其特征在于，所述一个或多个处理器执行所述计算机可读指令时执行如权利要求 1-15 任意一项所述的方法的步骤。

20、一种非易失性计算机可读存储介质，所述非易失性计算机可读存储介质存储有计算机可读指令，其特征在于，所述计算机可读指令被一个或多个处理器执行时执行如权利要求 1-15 任意一项所述的方法的步骤。

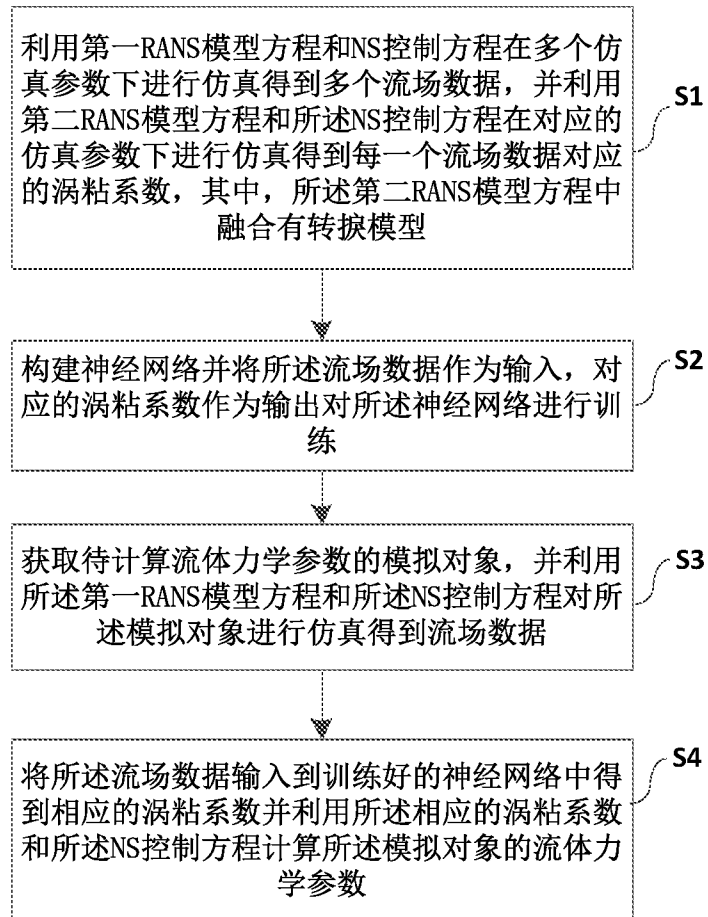


图 1

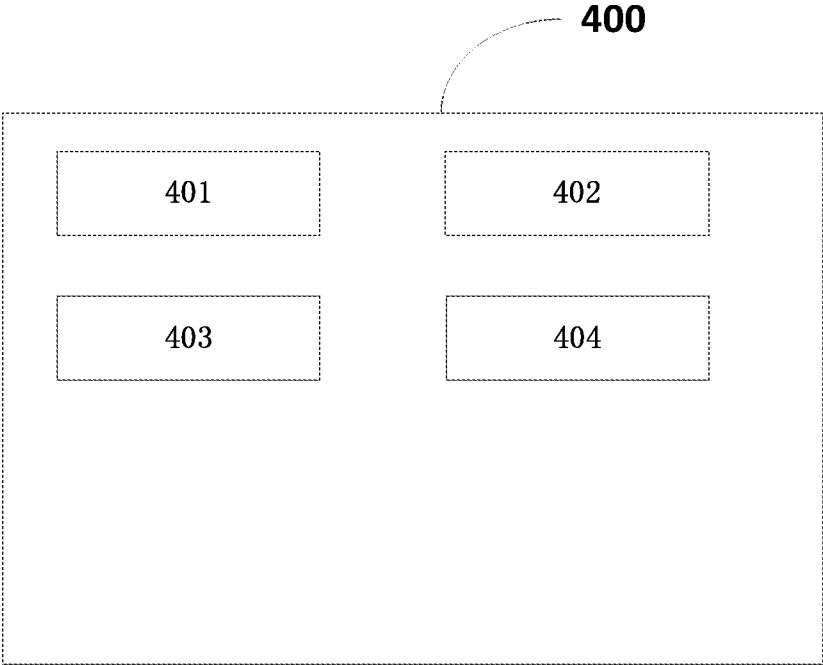


图 2

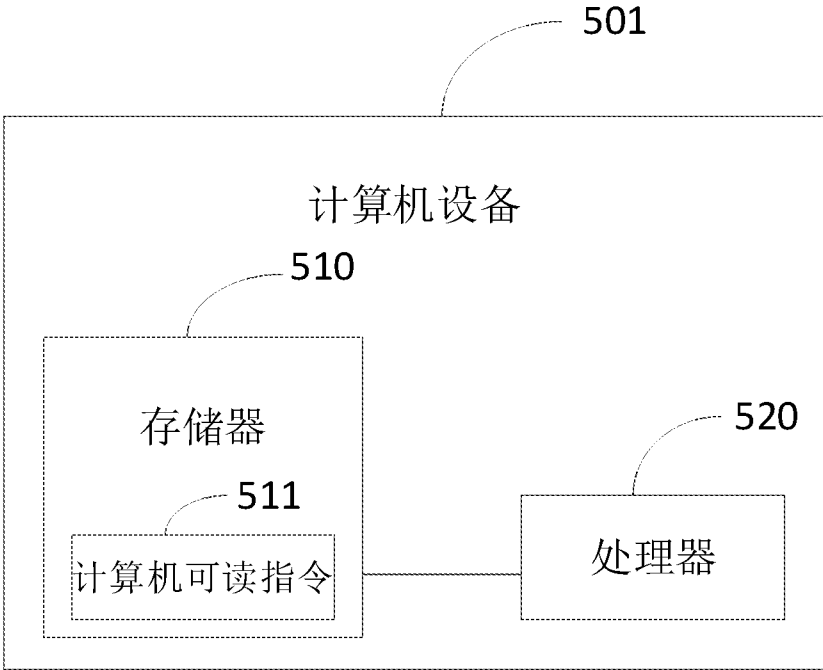


图 3

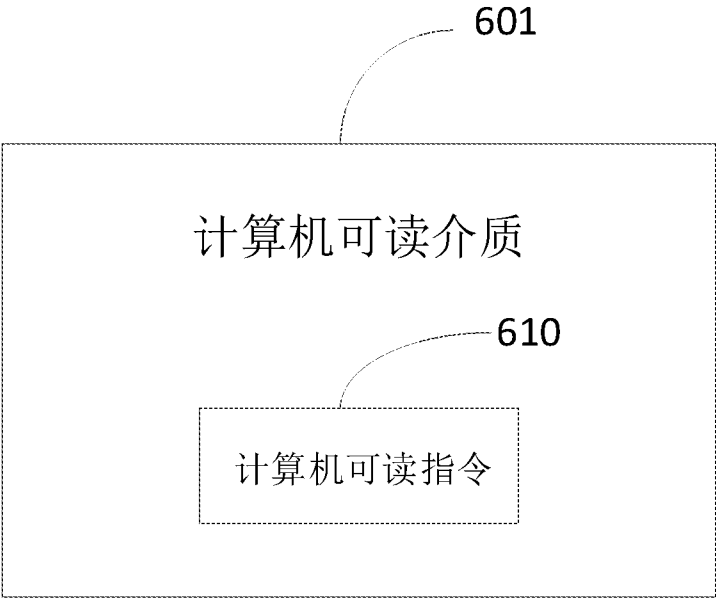


图 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2022/141089

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) CNABS; CNTXT; DWPI; VEN; USTXT; EPTXT; WOTXT; CNKI; 万方, WANFANG: 计算流体力学, 湍流模型, 雷诺平均 NS 方程, NS 方程, 仿真, 流场, 涡粘, 转捩, 神经网络, computational fluid dynamics, turbulence model, RANS equation, NS equation, simulation, flow field, vortex viscosity, transition, neural network																	
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category*</th> <th>Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages</th> <th>Relevant to claim No.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PX</td> <td>CN 114818549 A (SUZHOU INSPUR INTELLIGENT TECHNOLOGY CO., LTD.) 29 July 2022 (2022-07-29) claims 1-15, description, paragraphs 35-97, and figures 1-4</td> <td>1-20</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 112084727 A (NATIONAL UNIVERSITY OF DEFENSE TECHNOLOGY OF PLA) 15 December 2020 (2020-12-15) description, paragraphs 32-84, and figures 1-2</td> <td>1-20</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>ZHU, Linyang et al. "Machine Learning Methods for Turbulence Modeling in Subsonic Flows around Airfoils" <i>Physics of Fluids</i>, 16 January 2019 (2019-01-16), ISSN: 1070-6631, pages 1-6</td> <td>1-20</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 7251592 B1 (UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION) 31 July 2007 (2007-07-31) entire document</td> <td>1-20</td> </tr> </tbody> </table>			Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.	PX	CN 114818549 A (SUZHOU INSPUR INTELLIGENT TECHNOLOGY CO., LTD.) 29 July 2022 (2022-07-29) claims 1-15, description, paragraphs 35-97, and figures 1-4	1-20	A	CN 112084727 A (NATIONAL UNIVERSITY OF DEFENSE TECHNOLOGY OF PLA) 15 December 2020 (2020-12-15) description, paragraphs 32-84, and figures 1-2	1-20	A	ZHU, Linyang et al. "Machine Learning Methods for Turbulence Modeling in Subsonic Flows around Airfoils" <i>Physics of Fluids</i> , 16 January 2019 (2019-01-16), ISSN: 1070-6631, pages 1-6	1-20	A	US 7251592 B1 (UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION) 31 July 2007 (2007-07-31) entire document	1-20
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.															
PX	CN 114818549 A (SUZHOU INSPUR INTELLIGENT TECHNOLOGY CO., LTD.) 29 July 2022 (2022-07-29) claims 1-15, description, paragraphs 35-97, and figures 1-4	1-20															
A	CN 112084727 A (NATIONAL UNIVERSITY OF DEFENSE TECHNOLOGY OF PLA) 15 December 2020 (2020-12-15) description, paragraphs 32-84, and figures 1-2	1-20															
A	ZHU, Linyang et al. "Machine Learning Methods for Turbulence Modeling in Subsonic Flows around Airfoils" <i>Physics of Fluids</i> , 16 January 2019 (2019-01-16), ISSN: 1070-6631, pages 1-6	1-20															
A	US 7251592 B1 (UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION) 31 July 2007 (2007-07-31) entire document	1-20															
☒ 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 25 May 2023		Date of mailing of the international search report 30 May 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

International application No.

PCT/CN2022/141089

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	张毅锋 等 (ZHANG, Yifeng et al.). "Menter转捩模型在高超声速流动模拟中的改进及验证 (Improvement and Validation of Menter's Transition Model for Hypersonic Flow Simulation)" 宇航学报 (<i>Journal of Astronautics</i>), Vol. 37, No. 04, 30 April 2016 (2016-04-30), ISSN: 1000-1328, pages 397-402	1-20

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2022/141089

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	114818549	A	29 July 2022	CN 114818549 B	29 November 2022
CN	112084727	A	15 December 2020	None	
US	7251592	B1	31 July 2007	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2022/141089

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)) CNABS;CNTXT;DWPI;VEN;USTXT;EPTXT;WOTXT;CNKI;万方:计算流体力学, 湍流模型, 雷诺平均NS方程, NS方程, 仿真, 流场, 涡粘, 转捩, 神经网络, computational fluid dynamics, turbulence model, RANS equation, NS equation, simulation, flow field, vortex viscosity, transition, neural network		
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 114818549 A (苏州浪潮智能科技有限公司) 2022年7月29日 (2022 - 07 - 29) 权利要求第1-15项, 说明书第35-97段, 图1-4	1-20
A	CN 112084727 A (中国人民解放军国防科技大学) 2020年12月15日 (2020 - 12 - 15) 说明书第32-84段, 图1-2	1-20
A	Linyang Zhu 等. "Machine learning methods for turbulence modeling in subsonic flows around airfoils" Physics of Fluids, 2019年1月16日 (2019 - 01 - 16), ISSN: 1070-6631, 第1-6页	1-20
A	US 7251592 B1 (UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION) 2007年7月31日 (2007 - 07 - 31) 全文	1-20
A	张毅锋 等. "Menter转捩模型在高超声速流动模拟中的改进及验证" 宇航学报, 第37卷, 第04期, 2016年4月30日 (2016 - 04 - 30), ISSN: 1000-1328, 第397-402页	1-20
☐ 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 2023年5月25日		国际检索报告邮寄日期 2023年5月30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		授权官员 简文雨 电话号码 (+86) 020-28958629

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2022/141089

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	114818549	A	2022年7月29日	CN 114818549 B	2022年11月29日
CN	112084727	A	2020年12月15日	无	
US	7251592	B1	2007年7月31日	无	