

(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 11 日 (11.01.2024)



(10) 国际公布号
WO 2024/007474 A1

- (51) 国际专利分类号:
G06F 30/20 (2020.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2022/125225
- (22) 国际申请日: 2022 年 10 月 13 日 (13.10.2022)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
202210777855.X 2022年7月4日 (04.07.2022) CN
- (71) 申请人: 中山大学 (**SUN YAT-SEN UNIVERSITY**)
[CN/CN]; 中国广东省广州市海珠区新港西路135号, Guangdong 510275 (CN)。
- (72) 发明人: 黄明鸣 (**HUANG, Mingming**); 中国广东省广州市海珠区新港西路135号, Guangdong 510275 (CN)。 衡益 (**HENG, Yi**); 中国广东省广州市海珠

区新港西路135号, Guangdong 510275 (CN)。 杨青青 (**YANG, Qingqing**); 中国广东省广州市海珠区新港西路135号, Guangdong 510275 (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, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE,

(54) **Title:** THERMAL DATA DETERMINATION METHOD, APPARATUS AND DEVICE

(54) 发明名称: 一种热学数据确定方法、装置和设备

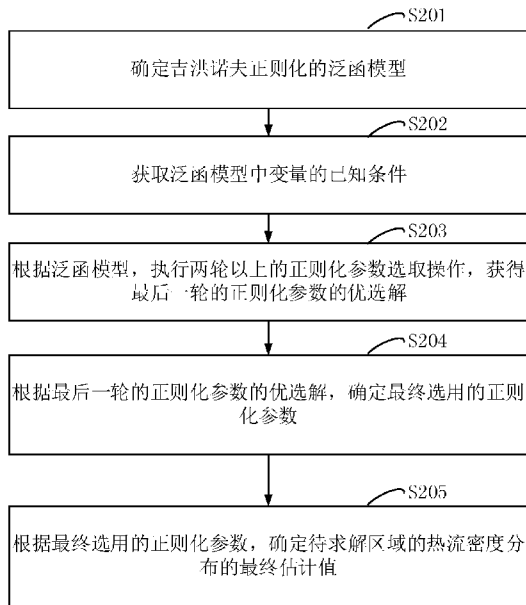


图 2 (a)

- S201 Determine a functional model for Tikhonov regularization
S202 Acquire known conditions for variables in the functional model
S203 Execute two or more rounds of regularization parameter selection operation according to the functional model, so as to obtain a preferred solution for a regularization parameter in the last round
S204 According to the preferred solution for the regularization parameter in the last round, determine a finally selected regularization parameter
S205 Determine, according to the finally selected regularization parameter, a final estimated value of a heat flux density distribution in a region to be solved

(57) **Abstract:** The present application relates to a thermal data determination method, apparatus and device. The method comprises: determining a functional model for Tikhonov regularization, acquiring known conditions for variables in the functional model, executing two or more rounds of regularization parameter selection operation according to the functional model, so as to obtain a preferred solution for a regularization parameter in the last round; according to the preferred solution for the regularization parameter in the last round, determining a finally selected regularization parameter; and determining, according to the finally selected regularization parameter, a

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, 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))。

final estimated value of a heat flux density distribution in a region to be solved.

(57) 摘要: 本申请涉及一种热学数据确定方法、装置和设备，前述方法包括：确定吉洪诺夫正则化的泛函模型，获取泛函模型中变量的已知条件，根据泛函模型，执行两轮以上的正则化参数选取操作，获得最后一轮的正则化参数的优选解；根据最后一轮的正则化参数的优选解，确定最终选用的正则化参数；根据最终选用的正则化参数，确定待求解区域的热流密度分布的最终估计值。

一种热学数据确定方法、装置和设备

相关申请的交叉引用

本申请要求于 2022 年 7 月 4 日提交中国专利局，申请号为 CN202210777855.X，申请名称为“一种热学数据确定方法、装置和设备”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

本申请涉及计算机处理热学数据的技术领域，特别是涉及一种热学数据确定方法、装置和设备。

背景技术

在生物医学领域、通信领域、能源领域、工业制造领域和农林渔牧业领域等诸多领域，经常需要对生物体或非生物体的目标区域进行热学数据（如热流密度或温度）的测量或估计，以供改进技术、保护目标区域使其维持在合理正常的状态下或了解目标区域内的热传导规律。

例如，在生物医学领域，在临床医学中，激光、微波等热疗过程中的短时间内瞬时热流密度大，需要实时获得人体组织相关目标区域的温度场变化等信息。

例如，在预防医学领域，考虑到人体肿瘤等病灶组织与周围正常组织之间存在温度差异，需要通过获取相关目标区域的热流密度数据以供后续确定病灶组织的位置或边界。

例如，在农业种植养殖领域，在发展集约化高密度养殖时，有效、方便的监测热流密度数据所反映的重要生理指标，可及时评估和调整养殖技术，实现更好的养殖效益。

例如，在仿生学领域，在设计生物仿生构件时，通过分析生物仿生构件关键部位中目标区域的热流密度变化，可利于实时迅速的评估散热或保温效果。

例如，在通信领域，对通信设备周围的目标区域进行温度估计，有利于优化通信设备的安装位置和架构，实现更好的散热效果。

例如，在工业制造领域，对被加热的零部件的目标区域的热流密度进行评估，有利于进一步优化加热策略。

例如，在能源领域，对管道流体的目标区域进行热流密度的监控，有利于保障安全度和提高设备使用寿命。

然而，在多数情况下，通常只能通过红外温度传感器或热电偶传感器等温度传感组件，获取到目标区域的一部分表面上有限的测量点的温度数据，对于目标区域无法被这些温度传感组件感测到的部位的温度或热流密度，需要使用计算机等辅佐手段来获得间接的估计值，其关键的一环，就是计算求解瞬态传热反问题(IHTP, Inverse heat transfer problems)。

解决瞬态传热反问题的数学不适定性和高性能计算策略面临诸多挑战，传统方法在面对三维、瞬态等复杂情况时，在计算效率和精度方面不再适用。

正则化方法获得了相对更多的研究关注，经典吉洪诺夫（Tikhonov）正则化和迭代正则化等数学

方法已经广泛应用于求解科学与工程等领域普遍存在的数学物理反问题。对于吉洪诺夫正则化方法，选择合适的正则化参数对获得稳定的、精确的解至关重要。

然而，实际应用过程中，通常难以在短时间内获得精确的最优正则化参数，这导致对待求解区域的热流密度分布的精准估算效率较低。

发明内容

在第一方面，本申请实施例公开了一种热学数据确定方法，其包括：确定吉洪诺夫正则化的泛函模型，泛函模型用于求解目标区域的热传导反问题，输出目标区域中待求解区域的热流密度分布估计值；获取泛函模型中变量的已知条件，已知条件包括目标区域的边界条件、热学属性参数和温度分布测量值；根据泛函模型，执行两轮以上的正则化参数选取操作，获得最后一轮的正则化参数的优选解；根据最后一轮的正则化参数的优选解，确定最终选用的正则化参数；以及，根据最终选用的正则化参数，确定待求解区域的热流密度分布的最终估计值。其中，在每轮正则化参数选取操作中，根据设定的正则化参数的采样范围值和采样间隔，确定本轮的多个采样值，将多个采样值和已知条件输入泛函模型，获得与每一采样值对应的热流密度分布估计值，根据多个热流密度分布估计值确定 L 曲线的坐标数据，将 L 曲线拐角处的多个坐标数据对应的采样值，确定为本轮的正则化参数的优选解，在本轮为非最后一轮时，以本轮的正则化参数的优选解的范围，确定下轮的正则化参数的采样范围值，并减小下轮的正则化参数的采样间隔。

在第二方面，本申请实施例公开了一种热学数据确定装置，其包括：模型确定模块，用于确定吉洪诺夫正则化的泛函模型，泛函模型用于求解目标区域的热导反问题，输出目标区域中待求解区域的热流密度分布估计值；

已知条件获取模块，用于获取泛函模型中变量的已知条件，已知条件包括目标区域的边界条件、热学属性参数和温度分布测量值；优选解获取模块，用于根据泛函模型，执行两轮以上的正则化参数选取操作，获得最后一轮的正则化参数的优选解；正则化参数确定模块，用于根据最后一轮的正则化参数的优选解，确定最终选用的正则化参数；以及，估计模块，用于根据最终选用的正则化参数，确定待求解区域的热流密度分布的最终估计值。其中，优选解获取模块包括：采样值确定子模块，用于在每轮正则化参数选取操作中，根据设定的正则化参数的采样范围值和采样间隔，确定本轮的多个采样值；模型运行子模块，用于将多个采样值和已知条件输入泛函模型，获得与每一采样值对应的热流密度分布估计值； L 曲线确定子模块，用于根据多个热流密度分布估计值，确定 L 曲线的坐标数据；以及，优选解确定子模块，用于将 L 曲线拐角处的多个坐标数据对应的采样值，确定为本轮的正则化参数的优选解；采样参数调整子模块，用于在本轮为非最后一轮时，以本轮的正则化参数的优选解的范围，确定下轮的正则化参数的采样范围值，并减小下轮的正则化参数的采样间隔。

在第三方面，本申请实施例公开了一种计算机设备，其包括存储器及一个或多个处理器，存储器中储存有计算机可读指令，计算机可读指令被一个或多个处理器执行时，使得一个或多个处理器执行任一实施例中的热学数据确定方法的步骤。

在第四方面，本申请实施例公开了一种热学数据确定设备，包括温度测量组件和处理器；温度测量组件用于测量目标区域的温度分布，生成目标区域的温度分布测量值；处理器用于执行任一实施例

中的热学数据确定方法的步骤。

在第五方面，本申请实施例公开了一个或多个存储有计算机可读指令的非易失性计算机可读存储介质，计算机可读指令被一个或多个处理器执行时，使得一个或多个处理器执行任一实施例中的热学数据确定方法的步骤。

本申请的一个或多个实施例的细节在下面的附图和描述中提出。本申请的其它特征和优点将从说明书、附图以及权利要求书变得明显。

附图说明

图 1 为根据一个或多个实施例中热学数据确定方法的应用环境图；

图 2 (a) 为根据一个或多个实施例中热学数据确定方法的流程示意图；

图 2 (b) 为图 2 (a) 中涉及正则化参数选取操作的流程示意图；

图 3 为根据一个或多个实施例中涉及获取目标系数的步骤的流程示意图；

图 4 为根据一个或多个实施例中涉及确定正则化参数的优选解的步骤的流程示意图；

图 5 为根据一个或多个实施例中涉及采用共轭梯度法进行计算的步骤的流程示意图；

图 6 为根据一个或多个实施例中涉及获取已知条件的步骤的流程示意图；

图 7 为根据一个或多个实施例中涉及确定目标区域的温度分布函数的步骤的流程示意图；

图 8 为根据一个或多个实施例中热学数据确定装置的结构框图；

图 9 为根据一个或多个实施例中计算机设备的内部结构图；

图 10 为根据一个或多个实施例中热流密度分布估计值随观测时间变化的示意图。

具体实施方式

为了使本申请的技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施例，对本申请进行进一步详细说明。应当理解，此处描述的具体实施例仅仅用以解释本申请，并不用于限定本申请。

本申请公开的热学数据确定方法，可以应用于如图 1 所示的应用环境中。其中，处理器 101 可以通过网络与温度测量组件 102 通信，从而获取温度测量组件 102 生成的目标区域的温度分布测量值。处理器 101 可以采用可编程逻辑阵列(PLA)、现场可编程门阵列(FPGA)、数字信号处理器(DSP)、专用集成电路(ASIC)、通用处理器或者其他可编程逻辑器件中的至少一种硬件形式来实现。温度测量组件 102 可以包括接触式或非接触式温度传感器，这些温度传感器用于测量目标区域的实际温度，用于测量目标区域的实际测量点上的温度。这些温度传感器包括但不限于热电偶温度传感器、热电阻温度传感器、红外线温度传感器。

在一个实施例中，如图 2 (a) 和图 2 (b) 所示，本申请公开了一种热学数据确定方法，以该方法应用于图 1 中的处理器 101 为例进行说明，包括处理器 101 可执行的步骤 S201 至步骤 S205，下文对各步骤进行说明。

步骤 S201，确定吉洪诺夫正则化的泛函模型。该泛函模型用于求解目标区域的热传导反问题，输出目标区域中待求解区域的热流密度分布估计值。

利用吉洪诺夫正则化法来构造泛函模型，可以借鉴诸多已有的技术，例如，《Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve》(Hansen, P.C.(1992):Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve, SIAM Rev. 34(4), 561–580.)、《热传导方程反问题的 Tikhonov 正则化法》

(计算机与数字工程，总第 307 期，2015 年第 5 期，作者何俊红)、《Efficient reconstruction of local heat fluxes in pool boiling experiments by goal-oriented adaptive mesh refinement》(DOI: 10.1007/s00231-010-0683-6)、《MODEL FUNCTION APPROACH IN THE MODIFIED L-CURVE

METHOD FOR THE CHOICE OF REGULARIZATION PARAMETER》（2000 Mathematics Subject Classification. 65J20, 65M30.）等诸多文献均有记载，在此不作赘述。

步骤 S201 中，确定吉洪诺夫正则化的泛函模型，是指确定泛函模型所需采取的表达式。具体的表达式可以是多样化的，在此不作特别限制。通常，泛函模型可以包括预测残差项和正则化惩罚项，预测残差项包括温度分布函数的残差的范数，温度分布函数用于描述目标区域在时间和空间上的温度分布，正则化惩罚项包括正则化参数和未知热流密度函数的范数。

在一些实施例中，可以采用公式（1）作为泛函模型的表达式。

$$L(Q_u) := \int_0^{t_{\max}} \int_{A_I} [\Phi(\mathbf{x}, t, Q_u) - \Phi_m(\mathbf{x}, t)]^2 d\mathbf{x} dt + \alpha \cdot \int_0^{t_{\max}} \int_{A_u} [Q_u(\mathbf{x}, t)]^2 d\mathbf{x} dt \quad (1)$$

公式（1）中， $L(Q_u)$ 表示目标泛函； $\int_0^{t_{\max}} \int_{A_I} [\Phi(\mathbf{x}, t, Q_u) - \Phi_m(\mathbf{x}, t)]^2 d\mathbf{x} dt$ 可被视为预测残差项， $\alpha \cdot \int_0^{t_{\max}} \int_{A_u} [Q_u(\mathbf{x}, t)]^2 d\mathbf{x} dt$ 可被视为正则化惩罚项， α 是待确定的正则化参数；

$\Phi(\mathbf{x}, t, Q_u)$ 表示温度分布函数， $\mathbf{X}$ 表示空间向量， t 表示时间， Q_u 表示待求解区域的热流密度分布， Q_u 的解是目标区域热传导反问题的解； $\Phi_m(\mathbf{x}, t)$ 表示温度分布测量值； $t_{\max}$ 表示某一观测时段内的最终时刻， A_I 表示目标区域的第一边界， A_u 表示目标区域的第二边界。

通常，若目标区域为受热面与未知热流所在边界等构成的区域，第一边界可以指区域下表面的边界，第二边界可以指区域上表面的边界，此时目标区域还包括第三边界，第三边界是区域侧表面的边界，但在区域上表面和下表面距离很近的情况下，上述的泛函模型可以不用考虑侧表面的热传导影响。在其他一些情况下，假设区域第一边界和第二边界可以有交集也可以没有交集，具体可以根据目标区域的实际结构来确定。另外，第二边界也可以位于目标区域内部，主要取决于将哪个区域视为待求解区域，如果已知目标区域外表面的热流密度分布，希望获知内部某个区域的热流密度分布，则此时外表面的边界可以作为第一边界，内部的区域的边界可以作为第二边界。

本文所说的目标区域，包括生物体或非生物体的目标区域，例如人体组织、动物组织、植物组织、工业流体和气体空间中的待估算物理量所在区域等等。当然，在一些情况下，目标区域也可以指生物体或非生物体的整体区域，即，可以将生物体或非生物体的整体所在的空间区域视为目标区域。泛函模型中的温度分布函数，其本质是热传导方程的正问题的解，它可以采用目标区域所对应的研究领域已提出的热传导方程；当然，也可以根据实际需要，对已有的热传导方程进行优化而获得温度分布函数。

在一些实施例中，可以对现实中被研究的实体区域（例如承载液体的容器内部区域、生物样本组织区域、工业场所空间区域，等等）进行建模，将实体区域的表面平滑化处理，得到经平滑化处理后的目标区域。经平滑化处理后的目标区域仍具备了实体区域的热物理性质，该目标区域中待求解区域的热流密度分布，可以反映出实体区域的相应位置的热流密度分布。

在一些实施例中，温度分布函数是公式（2）、公式（3）、公式（4）、公式（5）和公式（6）组成的热传导方程的正问题的解。

$$\rho c_p \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \nabla \cdot (a \nabla \Phi), \text{ in } \Omega, t \in (0, t_{\max}) \quad (2)$$

$$\Phi(\cdot, 0) = \Phi_0(\cdot), \text{ in } \Omega \quad (3)$$

$$-a \frac{\partial \Phi}{\partial n} = Q_i, \text{ on } A_I, t \in (0, t_{\max}) \quad (4)$$

$$-a \frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0, \text{ on } A_R, t \in (0, t_{\max}) \quad (5)$$

$$-a \frac{\partial \Phi}{\partial n} = Q_u, \text{ on } A_U, t \in (0, t_{\max}) \quad (6)$$

其中, Φ 表示目标区域的温度分布函数, ρ 表示目标区域内的密度, c_p 表示目标区域的热容, a 表示目标区域的热导率, ∇ 表示梯度算子, Ω 表示三维计算域, $\Phi_0(\cdot)$ 表示某一个空间点的初始温度, A_I 表示目标区域的第一边界, A_U 表示目标区域的第二边界, A_R 表示目标区域的第三边界, n 表示穿过边界的外法线, $t_{\max}$ 表示某一观测时段内的最终时刻, Q_i 表示第一边界内的热流密度分布, Q_u 表示待求解区域的热流密度分布, 即第二边界内的热流密度分布。

步骤 S202, 获取泛函模型中变量的已知条件。该已知条件包括目标区域的边界条件、热学属性参数和温度分布测量值。

本领域技术人员可以理解, 前述的已知条件可以采用现有技术中的多种手段来获得。目标区域的边界条件, 可以包括目标区域在空间坐标系中所处的边界位置。具体可以通过采用测量目标区域的截面周长、表面积或体积等多种方式, 为目标区域建立三维模型而确定。目标区域的边界长度, 具体测量方式可以根据目标区域的属性而定, 例如, 当目标区域为容器内的液体区域时, 可以通过卡尺等仪器测量该液体区域的各边界长度, 而获得边界条件; 当目标区域为人体组织时, 可以通过拍摄人体组织图像, 根据图像中人体组织的边界长度, 按比例计算得到现实中人体组织的边界长度。热学属性参数, 包括但不限于目标区域的密度、热容和热导率。温度分布测量值, 包括由各类温度传感器读取到的温度数据。

以热传导方程, 即公式 (2) - 公式 (6) 为例, 已知条件包括 ρ 、 c_p 、 a 、 Ω 、 $\Phi_0(\cdot)$ 、 A_I 、 A_U 、 A_R 、 n 、 $t_{\max}$ 、 Q_i 对应的数值或向量, 这些数值或向量可以是预设的, 也可以通过测量、查询或采用现有技术中的其他合理方式得到的。

步骤 S203, 根据泛函模型, 执行两轮以上的正则化参数选取操作, 获得最后一轮的正则化参数的优选解。前述的两轮以上, 包括两轮本数。其中, 如图 2 (b) 所示, 每轮的正则化参数选取操作, 包括:

步骤 S2031, 根据设定的正则化参数的采样范围值和采样间隔, 确定本轮的多个采样值;

步骤 S2032, 将多个采样值和已知条件输入泛函模型, 获得与每一采样值对应的热流密度分布估计值;

步骤 S2033, 根据多个热流密度分布估计值, 确定 L 曲线的坐标数据;

步骤 S2034, 将 L 曲线拐角处的多个坐标数据对应的采样值, 确定为本轮的正则化参数的优选解;

步骤 S2035, 在本轮为非最后一轮时, 以本轮的正则化参数的优选解的范围, 确定下轮的正则化参数的采样范围值, 并减小下轮的正则化参数的采样间隔。在一些可选的实施方式中, 步骤 S2035 包括: 确定本轮为非最后一轮, 以本轮的正则化参数的优选解的范围, 确定下轮的正则化参数的采样范围值, 并减小下轮的正则化参数的采样间隔。

L 曲线法最初由汉森 (Hansen) 提出, 其原理是通过确定 L 曲线的拐角处的点, 从而确定正则化参数。L 曲线的坐标数据, 即横坐标和纵坐标, 通常由预测残差项和正则化惩罚项来确定, 由于可以采用现有技术, 相关细节在此不作过多展开。

通过 L 曲线法选取正则化参数时, 如果仅仅凭借操作人员的经验, 借助汉森 (Hansen) 正则化工具箱 (一个辅助确定正则化参数的应用程序) 在 L 曲线拐角处选取一个坐标点, 从而确定对应的正则化参数, 通常, 选取出来的正则化参数与最优的正则化参数存在一定偏差。不同的是, 步骤 S203 (含步骤 S2031-步骤 S2035) 通过执行两轮以上的正则化参数选取操作, 通过每一轮不断限缩正则化参数的采样范围以及细化正则化参数的采样间隔, 确保正则化参数的选取操作足够细致以及高效。

步骤 S2031 中, 最初一轮的正则化参数的采样范围和采样间隔, 可以通过读取预先设定的数据而获得; 第二轮或第二轮以后的正则化参数的采样范围和采样间隔, 可以根据上一轮设定的采样范围和采样间隔而进行确定。本轮的采样范围用于表示本轮可选的正则化参数的数值范围, 本轮的采样间隔, 表示可选的正则化参数的取值之间的间隔, 即采样值之间的间隔。例如, 当采样范围是数值区间 $[0.0010, 0.0020]$, 采样间隔是 0.0001 时, 本轮的多个采样值便是 0.0010, 0.0011, 0.0012, 0.0013, ..., 0.0020。在每一轮中, 当采样间隔是常数时, 执行的采样是恒定步长的采样, 当采样间隔不是常数时, 执行的采样是变步长采样, 本领域技术人员可以根据实际需要设置相应的采样间隔。

执行步骤 S2032 时, 可以依次将多个采样值输入泛函模型, 结合已知条件, 依次获得与每一采样值对应的热流密度分布估计值; 也可以采用多线程并行的方式, 将多个采样值分为多批, 每一批采样值被同时执行计算。无论如何, 最后能获得多个采样值对应的多个热流密度分布估计值即可。步骤 S2032 中的热流密度分布估计值, 是指待求解区域的热流密度分布估计值。

在步骤 S2034 中, 可以根据汉森 (Hansen) 正则化工具箱确定 L 曲线拐角的范围, 具体范围可以根据实际需要选取或确定, 在此范围内, 选取一定数值范围内的多个热流密度分布的估计值, 这些热流密度分布的估计值对应的采样值, 便可以确定为本轮的正则化参数的优选解。在一些情况下, 可以确定一个用于参考的热流密度分布的估计值, 该估计值, 以及与该估计值的偏差在预设范围内的其他热流密度分布的估计值, 可以被视为前述的“一定数值范围内的多个热流密度分布的估计值”。该用于参考的热流密度分布的估计值, 可以根据 L 曲线的拐角处的一个被选定的坐标点所对应的正则化参数来确定。该被选定的坐标点, 可以根据 L 曲线的拐角处各坐标点处切线的斜率来确定, 原则是使泛函模型最小化。

在步骤 S2035 中, 以本轮的正则化参数的优选解的范围, 确定下轮的正则化参数的采样范围值, 可以是根据本轮优选解的最大值和最小值, 确定下轮的采样范围的最大值和最小值; 还可以是根据本轮优选解的众数、平均值或中位值等数值来确定下轮采样范围的最大值和最小值, 具体可以根据实际需要进行选择。另外, 可以根据实际需要, 减小下轮的正则化参数的采样间隔, 例如可以使下轮的采样间隔变为本轮的采样间隔的十分之一、五分之一或二分之一, 等等。

在一些实施例, 如图 3 所示, 步骤 S2035 包括步骤 S301 和步骤 S302。步骤 S301, 获取预设的目标系数。该目标系数的取值大于 0 小于 1。步骤 S302, 将目标系数与本轮的正则化参数的采样间隔

的乘积，确定为下轮的正则化参数的采样间隔。例如，以 k 表示轮次，以 S^k 表示第 k 轮的采样间隔，以 C^k 表示目标系数函数时，第 $k+1$ 轮的采样间隔 S^{k+1} 可以由公式 (7) 来确定。

$$S^{k+1} = C^k g S^k, \quad C^k \in (0,1) \quad (7)$$

步骤 S301 中，获取预设的目标系数，可以根据预设的目标系数函数来确定本轮具体的目标系数，具体地，运行目标系数函数后，可以获得一个大于 0 且小于 1 的常数作为目标系数。目标系数函数可以是线性的，也可以是非线性的。当然，步骤 S301 中，每轮获取的目标系数既可以是不变的，此时 C^k 可以是一个常数；每轮获取的目标系数也可以是变化的，具体可以根据实际需求进行预设。

步骤 S204，根据最后一轮的正则化参数的优选解，确定最终选用的正则化参数。

执行步骤 S204 时，可以从最后一轮的正则化参数的优选解中选择一个优选解，将其确定为最终选用的正则化参数；也可以根据最后一轮的正则化参数的优选解的最大值和最小值，在最大值和最小值形成的区间中选择一个数值作为最终选用的正则化参数。

步骤 S205，根据最终选用的正则化参数，确定待求解区域的热流密度分布的最终估计值。此处指的是在某个观测时段内的热流密度分布估计值，由于确定了最终选用的正则化参数，即确定了泛函模型中的 α ，因此随着时间推移，待求解区域的热流密度分布也可以被实时估计得到。

在一些实施例中，可以执行 2 至 5 轮的正则化参数选取操作，当然，还可以执行更多轮次的正则化参数选取操作，具体取决于实际需求。

上述热学数据确定方法，在一轮的正则化参数选取操作中，利用 L 曲线的坐标数据，确定 L 曲线的拐角处多个坐标数据对应的采样值为本轮的正则化参数的优选解，并以本轮的优选解来确定下轮的正则化参数选取操作中的正则化参数的采样范围值，以及减小下轮的正则化参数的采样间隔，使得下轮正则化参数选取操作涉及的计算量大幅降低，并提高了正则化参数搜索的精确度，能有利于在短时间内确定出合适的正则化参数，从而快速获得精确的求解区域的热流密度分布估计值。

在一些实施例中，如图 4 所示，步骤 S2034 包括步骤 S401 至步骤 S403。

步骤 S401，根据本轮的 L 曲线的坐标数据，从多个采样值中，确定用于参考的本轮最优采样值，将本轮最优采样值作为本轮的正则化参数的优选解的元素。执行时，可以通过分析多个采样值对应的 L 曲线的坐标点处的切线斜率，从而确定本轮最优采样值。也可以通过确定最接近 L 曲线拐角处的拐点，确定离拐点最近的一个坐标数据对应的坐标点，从而确定该坐标数据对应的采样值作为本轮最优采样值。

步骤 S402，确定本轮的其他采样值所对应的热流密度分布估计值分别与本轮最优采样值对应的热流密度分布估计值的偏差。

需要注意，本文所说的偏差，除非有其他特别强调，否则都可以理解为被比较偏差的两个对象之间在取值上的差距，这种差距可以通过直接相减进行体现，可以通过计算误差的方式进行体现，也可以通过其他表现差值的方式进行体现，在此不作特别限制。

在一些实施例中，步骤 S402 包括：确定其他采样值所对应的热流密度分布估计值与本轮最优采样值对应的热流密度分布估计值之差的范数作为第一范数；确定本轮最优采样值对应的热流密度分布估计值的范数作为第二范数；根据第一范数和第二范数之比确定偏差。具体地，可以根据公式 (8) 来确定步骤 S402 中的偏差。

$$R_{\alpha_m}^k := \frac{\left\| \hat{Q}_u^r \Big|_{\alpha_m} - \hat{Q}_u^r \Big|_{\alpha_{proper}^k} \right\|}{\left\| \hat{Q}_u^r \Big|_{\alpha_{proper}^k} \right\|} \quad (\alpha_m = [\alpha_{\min} : S^k : \alpha_{\max}]) \quad (8)$$

其中, α_{proper}^k 表示本轮最优采样值, α_m 表示其他采样值中的一个采样值, 由采样范围 $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$ 和采样间隔 S^k 来确定, $R_{\alpha_m}^k$ 表示 α_m 所对应的热流密度分布估计值与 α_{proper}^k 对应的热流密度分布估计值的偏差, k 表示当前的轮次, $\hat{Q}_u^r \Big|_{\alpha_{proper}^k}$ 表示 α_{proper}^k 对应的热流密度分布估计值, $\hat{Q}_u^r \Big|_{\alpha_m}$ 表示 α_m 所对应的热流密度分布估计值。当然, 步骤 S402 中的偏差, 也可以根据其他计算方式进行确定。

步骤 S403, 在偏差不超出预设偏差阈值时, 将相应的其他采样值作为本轮的正则化参数的优选解的元素。在一些可选的实施方式中, 步骤 S403 包括: 响应于偏差不超出预设偏差阈值, 将相应的其他采样值作为本轮的正则化参数的优选解的元素。预设偏差阈值可以根据实际需要进行取值, 例如取 0.01、0.1 或其他数值。以 ε 表示预设偏差阈值, 则第 k 轮的优选解的元素, 包括了 α_{proper}^k 以及 $\left\{ \alpha_m \mid R_{\alpha_m}^k \leq \varepsilon \right\}$ 。

在一些实施例中, 如图 5 所示, 步骤 S2032 包括:

步骤 S501, 对于每个采样值, 采用基于共轭梯度法的迭代正则化计算模型确定多个迭代周期对应的热流密度分布估计值;

步骤 S502, 在当前迭代周期获得的热流密度分布估计值与上一迭代周期获得的热流密度分布估计值的偏差在预设迭代偏差阈值范围内时, 将当前迭代周期获得的热流密度分布估计值作为该采样值对应的热流密度分布估计值。在一些可选的实施方式中, 步骤 S502 包括: 确定该偏差在预设迭代偏差阈值范围内, 将当前迭代周期获得的热流密度分布估计值作为该采样值对应的热流密度分布估计值。

基于共轭梯度法的迭代正则化计算模型涉及的方程可参见公式 (9) 至公式 (22)。

$$\hat{Q}^{r+1}(\mathbf{x}, t) = \hat{Q}^r(\mathbf{x}, t) - \varepsilon^r R^r(\mathbf{x}, t), \quad r = 0, 1, 2, \dots, r_{\max} \quad (9)$$

$$R^r(\mathbf{x}, t) = \begin{cases} \nabla L^r(\mathbf{x}, t), & r = 0 \\ \nabla L^r(\mathbf{x}, t) + \zeta^r R^{r-1}(\mathbf{x}, t), & r \geq 1 \end{cases} \quad (10)$$

$$\xi^r = \begin{cases} 0, & r = 0 \\ \frac{\int_0^{t_{\max}} \int_{A_U} (\nabla L^r)^2 d\mathbf{x}dt}{\int_0^{t_{\max}} \int_{A_U} (\nabla L^{r-1})^2 d\mathbf{x}dt}, & r \geq 1 \end{cases} \quad (11)$$

$$\nabla L^r(\mathbf{x}, t) = H^r(\mathbf{x}, t) + \alpha \hat{Q}^r, \quad \text{on } A_U \quad (12)$$

$$\rho c_P \frac{\partial H^r}{\partial t} = -\nabla \cdot (a \nabla H^r), \quad \text{in } \Omega, t \in (0, t_{\max}) \quad (13)$$

$$H^r(\mathbf{x}, t_{\max}) = 0, \quad \text{in } \Omega \quad (14)$$

$$-a \frac{\partial H^r}{\partial n} = 0, \quad \text{on } (A_U \cup A_R), t \in (0, t_{\max}) \quad (15)$$

$$-a \frac{\partial H^r}{\partial n} = h^r(\mathbf{x}, t), \quad \text{on } A_I, t \in (0, t_{\max}) \quad (16)$$

$$h(\mathbf{x}, t, Q_u) = \Phi(\mathbf{x}, t, Q_u) - \Phi_m(\mathbf{x}, t) \quad (17)$$

$$\varepsilon^r = \frac{\int_0^{t_{\max}} \int_{A_I} [\Phi(\hat{Q}^r) - \Phi_m^\delta] v^r d\mathbf{x}dt + \alpha \int_0^{t_{\max}} \int_{A_U} \hat{Q}^r R^r d\mathbf{x}dt}{\int_0^{t_{\max}} \int_{A_I} [v^r]^2 d\mathbf{x}dt + \alpha \int_0^{t_{\max}} \int_{A_U} (R^r)^2 d\mathbf{x}dt} \quad (18)$$

$$\rho c_P \frac{\partial v^r}{\partial t} = \nabla \cdot (a \nabla v^r), \quad \text{in } \Omega, t \in (0, t_{\max}) \quad (19)$$

$$v^r(\cdot, 0) = 0, \quad \text{in } \Omega \quad (20)$$

$$-a \frac{\partial v^r}{\partial n} = 0, \quad \text{on } (A_I \cup A_R), t \in (0, t_{\max}) \quad (21)$$

$$-a \frac{\partial v^r}{\partial n} = R^r, \quad \text{on } A_U, t \in (0, t_{\max}) \quad (22)$$

在运行共轭梯度法，进行共轭搜索时，可以设定初始估算值 $\hat{Q}^0(\mathbf{x}, t) = 0$ 。公式（9）是热流密度分布估计值的迭代更新公式，公式（13）至公式（16）是伴随问题的求解方程，公式（19）至公式（22）是灵敏度问题的求解方程。公式（9）至公式（22）中， r 表示迭代次数， $\hat{Q}^r$ 表示估计的待

求解区域的热流密度分布, $R^r(\mathbf{x}, t)$ 、 R^r 表示共轭搜索方向, ξ^r 表示共轭系数, ε^r 表示共轭搜索的步长, L^r 表示目标泛函, H^r 表示伴随问题的解, h 表示 A_1 上估计的温度分布函数 $\Phi(\mathbf{x}, t, Q_u)$ 和温度分布测量值 $\Phi_m(\mathbf{x}, t)$ 之间的误差, v^r 表示灵敏度问题的解。公式 (9) 至公式 (22) 中的参数, 已在公式 (1) 至公式 (8) 中出现过的, 请参照前文说明进行理解, 在此不作过多解释。

假设当前轮次的正则化参数选取操作中, 多个采样值中的某一个采样值为 α_m , α_m 处于采样范围 $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$, 在求解采用基于共轭梯度法的迭代正则化计算模型求解 α_m 对应的热流密度分布估计值时, 当前迭代周期的序号为 r , 上一迭代周期的序号为 $r-1$; 则步骤 S502 中的预设迭代偏差阈值范围可以指偏差小于等于迭代中的热流密度估计误差, 迭代中的热流密度估计误差可以表示为 η , 此时, 当前迭代周期获得的热流密度分布估计值与上一迭代周期获得的热流密度分布估计值可以根据公式 (23) 来确定。

$$\frac{\|\hat{Q}_u^r(\mathbf{x}, t) - \hat{Q}_u^{r-1}(\mathbf{x}, t)\|}{\|\hat{Q}_u^{r-1}(\mathbf{x}, t)\|} \leq \eta \quad (23)$$

其中, $\hat{Q}_u^r(\mathbf{x}, t)$ 和 $\hat{Q}_u^{r-1}(\mathbf{x}, t)$ 分别表示当前迭代周期获得的热流密度分布估计值和上一迭代周期获得的热流密度分布估计值。

当公式 (23) 被满足时, 对应的 $\hat{Q}_u^r(\mathbf{x}, t)$ 则被视为 α_m 的热流密度分布估计值, 即 $\hat{Q}_u^r|_{\alpha_m}$;

此时, 可以停止针对 α_m 的基于共轭梯度法的迭代正则化计算模型的计算。随后, 可以针对下一个采样值, 执行基于共轭梯度法的迭代正则化计算模型的计算。

当公式 (23) 不被满足, 则进入下一次迭代, 再判断公式 (23) 是否被满足, 直至迭代的次数达到预设的最大次数 $r_{\max}$ 。若达到最大次数 $r_{\max}$, 公式 (23) 仍未被满足, 则跳出迭代的循环。

$r_{\max}$ 的取值可以是 200、300 或其他, 具体可根据实际需求设置。

需要注意的是, 除了可以采用前述的共轭梯度法来确定热流密度分布估计值以外, 还可以采用基于空间推进算法 (Space marching)、序列函数法 (Function specification)、贝叶斯方法 (Bayes)、人工神经网络方法 (ANN, Artificial Neural Networks)、卡尔曼滤波 (KF, Kalman filter) 方法、莱文格-马夸特 (LM, Levenberg - Marquardt) 算法、截断奇异值分解 (SVD, Singular value decomposition) 方法、Tikhonov 正则化方法等方法或算法来进行反问题计算, 并确定热流密度分布估计值。

在一些实施例中, 泛函模型包括预测残差项和正则化惩罚项, 预测残差项包括温度分布函数的残差的范数, 温度分布函数用于描述目标区域在时间和空间上的温度分布, 正则化惩罚项包括正则化参数和未知热流密度函数的范数; 结合图 6 和图 7 理解, 步骤 S202 包括: 步骤 S601, 获取目标区域的热学属性参数; 步骤 S602, 获取目标区域的边界条件; 步骤 S603, 获取目标区域的温度分布测量

值；步骤 S604，获取目标区域的初始温度分布；步骤 S605，获取目标区域的第一边界在预设观测时间内的热流密度数据。相应地，步骤 S2032 包括：步骤 S701，将目标区域的第二边界的热流密度分布作为待求解区域的热流密度分布，根据热学属性参数、边界条件、初始温度分布、热流密度数据和第二边界的热流密度分布，确定目标区域的温度分布函数；步骤 S702，将目标区域的温度分布函数与温度分布测量值的差值作为温度分布函数的残差，确定每一采样值对应的热流密度分布估计值。具体地，可以将泛函模型的温度分布函数的残差，结合已知条件和采样值，计算得到对应的热流密度分布估计值。

需要注意的是，步骤 S601 至步骤 S605 中的各步骤的执行顺序，本领域技术人员可以根据实际需要进行合理地设计，在此不作特别限制。步骤 S605 中，第一边界的热流密度数据，可以根据温度分布测量值计算得到，也可以根据热源的加热功率计算得到，也可以通过其他手段对热源的发热进行测量而获得。

在一些实施例中，步骤 S701 包括：根据热学属性参数、边界条件、初始温度分布、热流密度数据和第二边界的热流密度分布，并行求解热传导正问题，将热传导正问题的解作为目标区域的温度分布函数。并行求解热传导正问题，结合正则化参数的选取方式，实现了高通量数据处理的目的，能有效提升对热流密度分布的最终估计值求解的效率。

在一些情况下，执行步骤 S701 和步骤 S702 所涉及的计算公式，可参见公式（1）至公式（6）进行理解。

在一些实施例中，热学数据确定方法还包括：根据待求解区域的热流密度分布的最终估计值和初始温度分布，确定待求解区域在指定时刻的温度分布。前述的指定时刻可以包括过去一段观测时段内的某个时刻，也可以包括最新的观测时刻。

在一些实施例中，热学数据确定方法还包括：根据待求解区域的热流密度分布的最终估计值和初始温度分布，确定待求解区域在最新时刻的温度分布；根据最新时刻的温度分布，向加热组件发出调节信号，调节信号用于控制加热组件对目标区域施加的热流密度。考虑到在生产制造或对生物组织加热等各种加热环境中，出于满足对目标区域的第二边界上的温度分布进行控制的需求，可以通过实施该实施例，通过处理器 101 执行热学数据确定方法，控制加热组件，从而实现控温的目的。

在一些实施例中，可采用现有的三维瞬态热传导方程求解器来运算前述的正问题、反问题、伴随问题或灵敏度问题涉及的方程。例如，DROPS（一款用于模拟两相流的计算流体力学软件）、NGSolve（一款高性能的多物理场有限元软件）、COMSOL Multiphysics（一款高级数值仿真软件）、OpenFoam（一款基于 C++ 的面向对象计算流体力学软件）等具有求解热传导偏微分方程功能的软件可以用来数值求解前文提及的反问题计算时所产生的正问题、伴随问题和灵敏性问题等偏微分方程。

虽然图 2（a）至图 7 的流程图中的各个步骤按照箭头的指示依次显示，但是这些步骤并不是必然按照箭头指示的顺序依次执行。图 2（a）至图 7 展示的步骤以及其他实施例公开的步骤，除非本文中有明确的说明，这些步骤的执行并没有严格的顺序限制，这些步骤可以以其它的顺序执行。而且，前述各实施例的至少一部分步骤可以包括多个子步骤或者多个阶段，这些子步骤或者阶段并不必然是在同一时刻执行完成，而是可以在不同的时刻执行，这些子步骤或者阶段的执行顺序也不必然是依次进行，而是可以与其它步骤或者其它步骤的子步骤或者阶段的至少一部分轮流或者交替地执行。

本申请还公开了一种热学数据确定装置，如图 8 所示，包括：模型确定模块 810，用于确定吉洪诺夫正则化的泛函模型，泛函模型用于求解目标区域的热传导反问题，输出目标区域中待求解区域的热流密度分布估计值；已知条件获取模块 820，用于获取泛函模型中变量的已知条件，已知条件包括目标区域的边界条件、热学属性参数和温度分布测量值；优选解获取模块 830，用于根据泛函模型，执行两轮以上的正则化参数选取操作，获得最后一轮的正则化参数的优选解；正则化参数确定模块

840, 用于根据最后一轮的正则化参数的优选解, 确定最终选用的正则化参数; 估计模块 850, 用于根据最终选用的正则化参数, 确定待求解区域的热流密度分布的最终估计值。

其中, 优选解获取模块 830 包括: 采样值确定子模块 831, 用于在每轮正则化参数选取操作中, 根据设定的正则化参数的采样范围值和采样间隔, 确定本轮的多个采样值; 模型运行子模块 832, 用于将多个采样值和已知条件输入泛函模型, 获得与每一采样值对应的热流密度分布估计值; L 曲线确定子模块 833, 用于根据多个热流密度分布估计值, 确定 L 曲线的坐标数据; 优选解确定子模块 834, 用于将 L 曲线拐角处的多个坐标数据对应的采样值, 确定为本轮的正则化参数的优选解; 采样参数调整子模块 835, 用于在本轮为非最后一轮时, 以本轮的正则化参数的优选解的范围, 确定下轮的正则化参数的采样范围值, 并减小下轮的正则化参数的采样间隔。

在一些实施例中, 优选解确定子模块 834 包括: 参考值确定单元, 用于根据本轮的 L 曲线的坐标数据, 从多个采样值中, 确定用于参考的本轮最优采样值, 将本轮最优采样值作为本轮的正则化参数的优选解的元素; 第一偏差估计单元, 用于确定本轮的其他采样值所对应的热流密度分布估计值分别与本轮最优采样值对应的热流密度分布估计值的偏差; 优选解确定单元, 用于在偏差不超出预设偏差阈值时, 将相应的其他采样值作为本轮的正则化参数的优选解的元素。

在一些实施例中, 第一偏差估计单元包括: 第一范数确定子单元, 用于确定其他采样值所对应的热流密度分布估计值与本轮最优采样值对应的热流密度分布估计值之差的范数作为第一范数; 第二范数确定子单元, 用于确定本轮最优采样值对应的热流密度分布估计值的范数作为第二范数; 偏差确定子单元, 用于根据第一范数和第二范数之比确定偏差。

在一些实施例中, 采样参数调整子模块 835 包括: 目标系数获取单元, 用于获取预设的目标系数, 目标系数的取值大于 0 小于 1; 采样间隔调整单元, 用于将目标系数与本轮的正则化参数的采样间隔的乘积, 确定为下轮的正则化参数的采样间隔。

在一些实施例中, 模型运行子模块 832 包括: 反问题计算单元, 用于对于每个采样值, 采用基于共轭梯度法的迭代正则化计算模型确定多个迭代周期对应的热流密度分布估计值; 迭代误差计算单元, 用于在当前迭代周期获得的热流密度分布估计值与上一迭代周期获得的热流密度分布估计值的偏差在预设迭代偏差阈值范围内时, 将当前迭代周期获得的热流密度分布估计值作为该采样值对应的热流密度分布估计值。

在一些实施例中, 泛函模型包括预测残差项和正则化惩罚项, 预测残差项包括温度分布函数的残差的范数, 温度分布函数用于描述目标区域在时间和空间上的温度分布, 正则化惩罚项包括正则化参数和未知热流密度函数的范数。已知条件获取模块 820 包括: 属性参数获取子模块, 用于获取目标区域的热学属性参数; 边界数据获取子模块, 用于获取目标区域的边界条件; 测量值获取子模块, 用于获取目标区域的温度分布测量值; 初始温度获取子模块, 用于获取目标区域的初始温度分布; 热流密度数据获取子模块, 用于获取目标区域的第一边界在预设观测时间内的热流密度数据。模型运行子模块 832 包括: 温度分布函数求解单元, 用于将目标区域的第二边界的热流密度分布作为待求解区域的热流密度分布, 根据热学属性参数、边界条件、初始温度分布、热流密度数据和第二边界的热流密度分布, 确定目标区域的温度分布函数; 泛函模型求解单元, 用于将目标区域的温度分布函数与温度分布测量值的差值作为温度分布函数的残差, 确定每一采样值对应的热流密度分布估计值。

在一些实施例中, 温度分布函数求解单元包括并行求解子单元, 并行求解子单元用于根据热学属性参数、边界条件、初始温度分布、热流密度数据和第二边界的热流密度分布, 并行求解热传导正问题, 将热传导正问题的解作为目标区域的温度分布函数。

在一些实施例中, 热学数据确定装置还包括温度分布估计模块 (未图示), 用于根据待求解区域的热流密度分布的最终估计值和初始温度分布, 确定待求解区域在指定时刻的温度分布。

在一些实施例中，热学数据确定装置还包括：温度估计模块（未图示），用于根据待求解区域的热流密度分布的最终估计值和初始温度分布，确定待求解区域在最新时刻的温度分布；控温模块（未图示），用于根据最新时刻的温度分布，向加热组件发出调节信号，调节信号用于控制加热组件对目标区域施加的热流密度。

关于热学数据确定装置的具体限定可以参见上文中对于热学数据确定方法的限定，在此不再赘述。具体地，热学数据确定装置可以实现前述任一实施例中热学数据确定方法的步骤。上述热学数据确定装置中的各个模块可全部或部分通过软件、硬件及其组合来实现。上述各模块可以硬件形式内嵌于或独立于计算机设备中的处理器中，也可以以软件形式存储于计算机设备中的存储器中，以便于处理器调用执行以上各个模块对应的操作。

在一些实施例中，本申请实施例还公开了一种计算机设备，其包括存储器及一个或多个处理器，存储器中储存有计算机可读指令，该计算机可读指令被一个或多个处理器执行时，使得一个或多个处理器执行前文任一实施例中的热学数据确定方法的步骤。在一些实施例中，该计算机设备可以是服务器，其内部结构图可以如图 9 所示。该计算机设备包括通过系统总线连接的处理器、存储器、网络接口。该计算机设备的处理器用于提供计算和控制能力。该计算机设备的存储器包括非易失性存储介质、内存储器。该非易失性存储介质存储有操作系统、计算机可读指令。该内存储器为非易失性存储介质中的操作系统和计算机可读指令的运行提供环境。该计算机设备的网络接口用于与外部的终端通过网络连接通信。该计算机可读指令被处理器执行时以实现前文任一实施例中的热学数据确定方法。

图 9 中示出的结构，仅仅是与本申请方案相关的部分结构的框图，并不构成对本申请方案所应用于其上的计算机设备的限定，具体的计算机设备可以包括比图中所示更多或更少的部件，或者组合某些部件，或者具有不同的部件布置。

本申请还公开了一种热学数据确定设备，热学数据确定设备包括图 1 所示的处理器 101 和温度测量组件 102。温度测量组件 102 用于测量目标区域的温度分布，生成目标区域的温度分布测量值。处理器 101 可用于执行前文任一实施例中的热学数据确定方法的步骤。

在一些实施例中，热学数据确定设备还包括加热组件（未图示），加热组件用于加热目标区域。处理器 101 还可以用于执行以下步骤：获取预设的待求解区域的初始温度分布；根据待求解区域的热流密度分布的最终估计值和预设的待求解区域的初始温度分布，更新待求解区域在最新时刻的温度分布；根据待求解区域在最新时刻的温度分布，调节加热组件向目标区域施加的热流密度。

在一些实施例中，可以将目标区域的初始温度分布，视为待求解区域的初始温度分布。具体地，可以将室温视为目标区域的初始温度分布。当然，在其他实施例中，可以根据实际情况，估计或预设目标区域的初始温度分布。

本申请实施例还公开了一个或多个存储有计算机可读指令的非易失性计算机可读存储介质，该计算机可读指令被一个或多个处理器执行时，使得一个或多个处理器执行前文任一实施例中的热学数据确定方法的步骤。

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，是可以通过计算机可读指令来指令相关的硬件来完成，前述的计算机可读指令可存储于一非易失性计算机可读存储介质中，该计算机可读指令在被执行时，可包括如上述各方法的实施例的流程。其中，本申请所提供的各实施例中所使用的对存储器、存储、数据库或其它介质的任何引用，均可包括非易失性和/或易失性存储器。非易失性存储器可包括只读存储器（ROM）、可编程 ROM（PROM）、电可编程 ROM（EPROM）、电可擦除可编程 ROM（EEPROM）或闪存。易失性存储器可包括随机存取存储器（RAM）或者外部高速缓冲存储器。作为说明而非局限，RAM 以多种形式可得，诸如静态 RAM（SRAM）、动态 RAM（DRAM）、同步 DRAM（SDRAM）、双数据率 SDRAM

(DDRSDRAM)、增强型 SDRAM (ESDRAM)、同步链路 (Synchlink) DRAM (SLDRAM)、存储器总线 (Rambus) 直接 RAM (RDRAM)、直接存储器总线动态 RAM (DRDRAM)、以及存储器总线动态 RAM (RDRAM) 等。

本领域技术人员可以理解,从技术可行性的角度考虑,可以按照与热学数据确定方法所能应用的领域,应用热学数据确定装置、计算机设备或热学数据确定设备。

由于热学数据确定方法、热学数据确定装置、计算机设备和热学数据确定设备,可应用的领域是丰富的,例如,可应用于生物医学领域、通信领域、能源领域、工业制造领域和农林渔牧业领域等诸多领域,为便于直观理解,在此以应用于生物体的目标区域的温度研究为例,作简单说明。

在一个实施例中,可以应用于蚊子吸食血液时的降温过程研究。在面临热胁迫的威胁时,昆虫等生物的体温调控十分关键。以蚊子为例,已有的研究表明,吸血引起的高温会危及蚊子的生理状况,蚊子通过在进食过程中排出、维持和蒸发腹部末端的液滴来降低体温。作为最重要的物理量之一,腹部末端的高瞬态热流密度对于更好地理解研究对象的耗散机制至关重要。现有测量技术仍难以直接获得该物理量的准确值,但可以通过建立和求解瞬态传热反问题来估计难以测量的未知热流密度分布。

具体地,发明人研究了蚊子吸血过程中的热流密度分布估算问题。为对实际问题做近似处理,在 $x \in [0, 16] \text{ mm}$ (蚊子的身体长度范围,即目标区域)上建立泛函模型。总观测时间设定为 180 秒,观测时间间隔为 $\Delta t = 2 \text{ s}$, 导热系数为 $a = 0.58 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。目标区域的初始温度分布设定为 $\Phi(g, 0) = 24^\circ \text{C}$ 。恒定施加的输入热流设定为 $Q_i(\mathbf{x}, t) = 0.000386 \text{ W}/\text{mm}^2$, 以反映蚊子和被吸血生物之间的直接接触。蚊子头部的实际瞬态温度数据(即第一边界的热流密度数据),采用了 Lahondère 等公开的实验数据,具体出处为: C Lahondère, Lazzari C. Mosquitoes Cool Down during Blood Feeding to Avoid Overheating[J]. Current biology: CB, 2011, 22(1):40-45。

应用热学数据确定方法的步骤,第一轮的正则化参数选取操作中,正则化参数的取值范围被设定为 $[0, 0.001]$ 。经过两轮以上的正则化参数选取操作,最后得到正则化参数的优选解,即 $\{\alpha_m | 0.000295 \leq \alpha_m \leq 0.000315\}$, 实现了对正则化参数选取范围的快速缩小,并确保待求解区域的热流密度分布估计值的误差较小。在 $\{\alpha_m | 0.000295 \leq \alpha_m \leq 0.000315\}$ 的基础上,发明人最终将正则化参数的取值确定为 0.000296。具体地,可以根据 $\{\alpha_m | 0.000295 \leq \alpha_m \leq 0.000315\}$ 中有限个数的正则化参数所对应的热流密度分布估计值的曲线的平滑度,确定最终合适的正则化参数的取值。选择合适的正则化参数对处理不适定问题很重要。选择过大或过小而不是合适的正则化参数,将导致过于平滑或振荡的结果,这与物理现象不相符。

选取正则化参数为 0.000296 时,如图 10 所示,横坐标表示观测时间,纵坐标表示待求解区域(即蚊子腹部末端、第二边界内)的热流密度分布估计值,蚊子腹部末端的估算热流显示了热交换情况,可见腹部末端高瞬态热流密度与蚊子头部复杂的温度变化密切相关,热流峰值可能出现在蚊子逐渐失去腹部末端液滴时。

以上实施例的各技术特征可以进行任意的组合,为使描述简洁,未对上述实施例中的各个技术特征所有可能的组合都进行描述,然而,只要这些技术特征的组合不存在矛盾,都应当认为是本说明书记载的范围。以上实施例仅表达了本申请的若干实施方式,其描述较为具体和详细,但并不能因此而理解为对本申请的保护范围的限制。对于本领域的普通技术人员来说,在不脱离本申请构思的前提下,还可以做出若干变形和改进,这些都属于本申请的保护范围。因此,本申请的保护范围应以所附权利要求为准。

权利要求书

1、一种热学数据确定方法，其特征在于，所述方法包括：

确定吉洪诺夫正则化的泛函模型，所述泛函模型用于求解目标区域的热传导反问题，输出所述目标区域中待求解区域的热流密度分布估计值；

获取所述泛函模型中变量的已知条件，所述已知条件包括所述目标区域的边界条件、热学属性参数和温度分布测量值；

根据所述泛函模型，执行两轮以上的正则化参数选取操作，获得最后一轮的正则化参数的优选解；

根据所述最后一轮的正则化参数的优选解，确定最终选用的正则化参数；以及

根据所述最终选用的正则化参数，确定所述待求解区域的热流密度分布的最终估计值；

其中，在每轮正则化参数选取操作中，根据设定的正则化参数的采样范围值和采样间隔，确定本轮的多个采样值，将所述多个采样值和所述已知条件输入所述泛函模型，获得与每一采样值对应的热流密度分布估计值，根据多个热流密度分布估计值确定 L 曲线的坐标数据，将 L 曲线拐角处的多个坐标数据对应的采样值，确定为本轮的正则化参数的优选解，在本轮为非最后一轮时，以本轮的正则化参数的优选解的范围，确定下轮的正则化参数的采样范围值，并减小下轮的正则化参数的采样间隔。

2、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述将 L 曲线拐角处的多个坐标数据对应的采样值，确定为本轮的正则化参数的优选解，包括：

根据本轮的 L 曲线的坐标数据，从所述多个采样值中，确定用于参考的本轮最优采样值，将所述本轮最优采样值作为所述本轮的正则化参数的优选解的元素；

确定本轮的其他采样值所对应的热流密度分布估计值分别与本轮最优采样值对应的热流密度分布估计值的偏差；以及

在偏差不超出预设偏差阈值时，将相应的其他采样值作为本轮的正则化参数的优选解的元素。

3、根据权利要求 2 所述的方法，其特征在于，所述确定本轮的其他采样值所对应的热流密度分布估计值分别与本轮最优采样值对应的热流密度分布估计值的偏差，包括：

确定其他采样值所对应的热流密度分布估计值与本轮最优采样值对应的热流密度分布估计值之差的范数作为第一范数；

确定本轮最优采样值对应的热流密度分布估计值的范数作为第二范数；以及

根据第一范数和第二范数之比确定所述偏差。

4、根据权利要求 1 至 3 任一所述的方法，其特征在于，所述在本轮为非最后一轮时，以本轮的正则化参数的优选解的范围，确定下轮的正则化参数的采样范围值，并减小下轮的正则化参数的采样间隔，包括：

获取预设的目标系数，所述目标系数的取值大于 0 小于 1；以及

将所述目标系数与本轮的正则化参数的采样间隔的乘积，确定为下轮的正则化参数的采样间隔。

5、根据权利要求 1 至 4 任一所述的方法，其特征在于，所述将所述多个采样值和所述已知条件输入所述泛函模型，获得与每一采样值对应的热流密度分布估计值，包括：

用于对于每个采样值，采用基于共轭梯度法的迭代正则化计算模型确定多个迭代周期对应的热流密度分布估计值；以及

在当前迭代周期获得的热流密度分布估计值与上一迭代周期获得的热流密度分布估计值的偏差在预设迭代偏差阈值范围内时，将当前迭代周期获得的热流密度分布估计值作为该采样值对应的热流密度分布估计值。

6、根据权利要求 1 至 5 任一所述的方法，其特征在于，所述泛函模型包括预测残差项和正则化惩罚项，所述预测残差项包括温度分布函数的残差的范数，所述温度分布函数用于描述目标区域在时间和空间上的温度分布，所述正则化惩罚项包括正则化参数和未知热流密度函数的范数；

所述获取所述泛函模型中变量的已知条件，包括：获取所述目标区域的热学属性参数；获取所述目标区域的边界条件；获取所述目标区域的温度分布测量值；获取所述目标区域的初始温度分布；以及，获取所述目标区域的第一边界在预设观测时间内的热流密度数据；

所述将所述多个采样值和所述已知条件输入所述泛函模型，获得与每一采样值对应的热流密度分布估计值，包括：将所述目标区域的第二边界的热流密度分布作为所述待求解区域的热流密度分布，根据所述热学属性参数、所述边界条件、所述初始温度分布、所述热流密度数据和所述第二边界的热流密度分布，确定所述目标区域的温度分布函数；以及，将所述目标区域的温度分布函数与所述温度分布测量值的差值作为温度分布函数的残差，确定每一采样值对应的热流密度分布估计值。

7、根据权利要求 6 所述的方法，其特征在于，所述根据所述热学属性参数、所述边界条件、所述初始温度分布、所述热流密度数据和所述第二边界的热流密度分布，确定所述目标区域的温度分布函数，包括：根据所述热学属性参数、所述边界条件、所述初始温度分布、所述热流密度数据和所述第二边界的热流密度分布，并行求解热传导正问题，将热传导正问题的解作为所述目标区域的温度分布函数；

8、根据权利要求 6 或 7 所述的方法，其特征在于，还包括：根据所述待求解区域的热流密度分布的最终估计值和所述初始温度分布，确定所述待求解区域在指定时刻的温度分布。

9、一种热学数据确定装置，其特征在于，所述装置包括：

模型确定模块，用于确定吉洪诺夫正则化的泛函模型，所述泛函模型用于求解目标区域的热传导反问题，输出所述目标区域中待求解区域的热流密度分布估计值；

已知条件获取模块，用于获取所述泛函模型中变量的已知条件，所述已知条件包括所述目标区域的边界条件、热学属性参数和温度分布测量值；

优选解获取模块，用于根据所述泛函模型，执行两轮以上的正则化参数选取操作，获得最后一轮的正则化参数的优选解；

正则化参数确定模块，用于根据所述最后一轮的正则化参数的优选解，确定最终选用的正则化参数；以及

估计模块，用于根据所述最终选用的正则化参数，确定所述待求解区域的热流密度分布的最终估计值；

其中，所述优选解获取模块包括：

采样值确定子模块，用于在每轮正则化参数选取操作中，根据设定的正则化参数的采样范围值和采样间隔，确定本轮的多个采样值；

模型运行子模块，用于将所述多个采样值和所述已知条件输入所述泛函模型，获得与每一采样值对应的热流密度分布估计值；

L 曲线确定子模块，用于根据多个热流密度分布估计值，确定 L 曲线的坐标数据；

优选解确定子模块，用于将 L 曲线拐角处的多个坐标数据对应的采样值，确定为本轮的正则化参数的优选解；以及

采样参数调整子模块，用于在本轮为非最后一轮时，以本轮的正则化参数的优选解的范围，确定下轮的正则化参数的采样范围值，并减小下轮的正则化参数的采样间隔。

10、根据权利要求 9 所述的装置，其特征在于，所述优选解确定子模块包括：

参考值确定单元，用于根据本轮的 L 曲线的坐标数据，从所述多个采样值中，确定用于参考的本轮最优采样值，将所述本轮最优采样值作为所述本轮的正则化参数的优选解的元素；

第一偏差估计单元，用于确定本轮的其他采样值所对应的热流密度分布估计值分别与本轮最优采样值对应的热流密度分布估计值的偏差；以及

优选解确定单元，用于在偏差不超出预设偏差阈值时，将相应的其他采样值作为本轮的正则化参数的优选解的元素。

11、根据权利要求 10 所述的装置，其特征在于，所述第一偏差估计单元包括：

第一范数确定子单元，用于确定其他采样值所对应的热流密度分布估计值与本轮最优采样值对应的热流密度分布估计值之差的范数作为第一范数；

第二范数确定子单元，用于确定本轮最优采样值对应的热流密度分布估计值的范数作为第二范数；以及

偏差确定子单元，用于根据第一范数和第二范数之比确定所述偏差。

12、根据权利要求 9 至 11 任一所述的装置，其特征在于，所述采样参数调整子模块包括：

目标系数获取单元，用于获取预设的目标系数，所述目标系数的取值大于 0 小于 1；以及

采样间隔调整单元，用于将所述目标系数与本轮的正则化参数的采样间隔的乘积，确定为下轮的正则化参数的采样间隔。

13、根据权利要求 9 至 12 任一所述的装置，其特征在于，所述模型运行子模块包括：

反问题计算单元，用于对于每个采样值，采用基于共轭梯度法的迭代正则化计算模型确定多个迭代周期对应的热流密度分布估计值；以及

迭代误差计算单元，用于在当前迭代周期获得的热流密度分布估计值与上一迭代周期获得的热流密度分布估计值的偏差在预设迭代偏差阈值范围内时，将当前迭代周期获得的热流密度分布估计值作为该采样值对应的热流密度分布估计值。

14、根据权利要求 9 至 13 任一所述的装置，其特征在于，所述泛函模型包括预测残差项和正则化惩罚项，所述预测残差项包括温度分布函数的残差的范数，所述温度分布函数用于描述目标区域在时间和空间上的温度分布，所述正则化惩罚项包括正则化参数和未知热流密度函数的范数；

所述已知条件获取模块包括：

属性参数获取子模块，用于获取所述目标区域的热学属性参数；

边界数据获取子模块，用于获取所述目标区域的边界条件；

测量值获取子模块，用于获取所述目标区域的温度分布测量值；

初始温度获取子模块，用于获取所述目标区域的初始温度分布；以及

热流密度数据获取子模块，用于获取所述目标区域的第一边界在预设观测时间内的热流密度数据；

所述模型运行子模块包括：

温度分布函数求解单元，用于将所述目标区域的第二边界的热流密度分布作为所述待求解区域的热流密度分布，根据所述热学属性参数、所述边界条件、所述初始温度分布、所述热流密度数据和所述第二边界的热流密度分布，确定所述目标区域的温度分布函数；以及

泛函模型求解单元，用于将所述目标区域的温度分布函数与所述温度分布测量值的差值作为温度分布函数的残差，确定每一采样值对应的热流密度分布估计值。

15、根据权利要求 14 所述的装置，其特征在于，所述温度分布函数求解单元包括：

并行求解子单元，用于根据所述热学属性参数、所述边界条件、所述初始温度分布、所述热流密度数据和所述第二边界的热流密度分布，并行求解热传导正问题，将热传导正问题的解作为所述目标区域的温度分布函数。

16、根据权利要求 14 或 15 所述的装置，其特征在于，还包括：

温度分布估计模块，用于根据所述待求解区域的热流密度分布的最终估计值和所述初始温度分布，确定所述待求解区域在指定时刻的温度分布。

17、一种计算机设备，其特征在于，包括存储器及一个或多个处理器，所述存储器中储存有计算机可读指令，所述计算机可读指令被所述一个或多个处理器执行时，使得所述一个或多个处理器执行如权利要求 1 至 8 任一所述方法的步骤。

18、一种热学数据确定设备，其特征在于，包括温度测量组件和处理器；

所述温度测量组件用于测量目标区域的温度分布，生成所述目标区域的温度分布测量值；

所述处理器用于执行如权利要求 1 至 8 任一所述方法的步骤。

19、根据权利要求 18 所述的设备，其特征在于，所述设备还包括加热组件，所述加热组件用于加热所述目标区域；

所述处理器还用于：

根据所述待求解区域的热流密度分布的最终估计值和预设的待求解区域的初始温度分布，更新所述待求解区域在最新时刻的温度分布；以及

根据待求解区域在最新时刻的温度分布，调节所述加热组件向所述目标区域施加的热流密度。

20、一个或多个存储有计算机可读指令的非易失性计算机可读存储介质，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，使得所述一个或多个处理器执行如权利要求 1 至 8 任一所述方法的步骤。

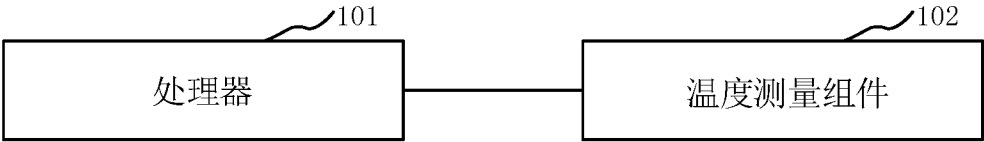


图 1

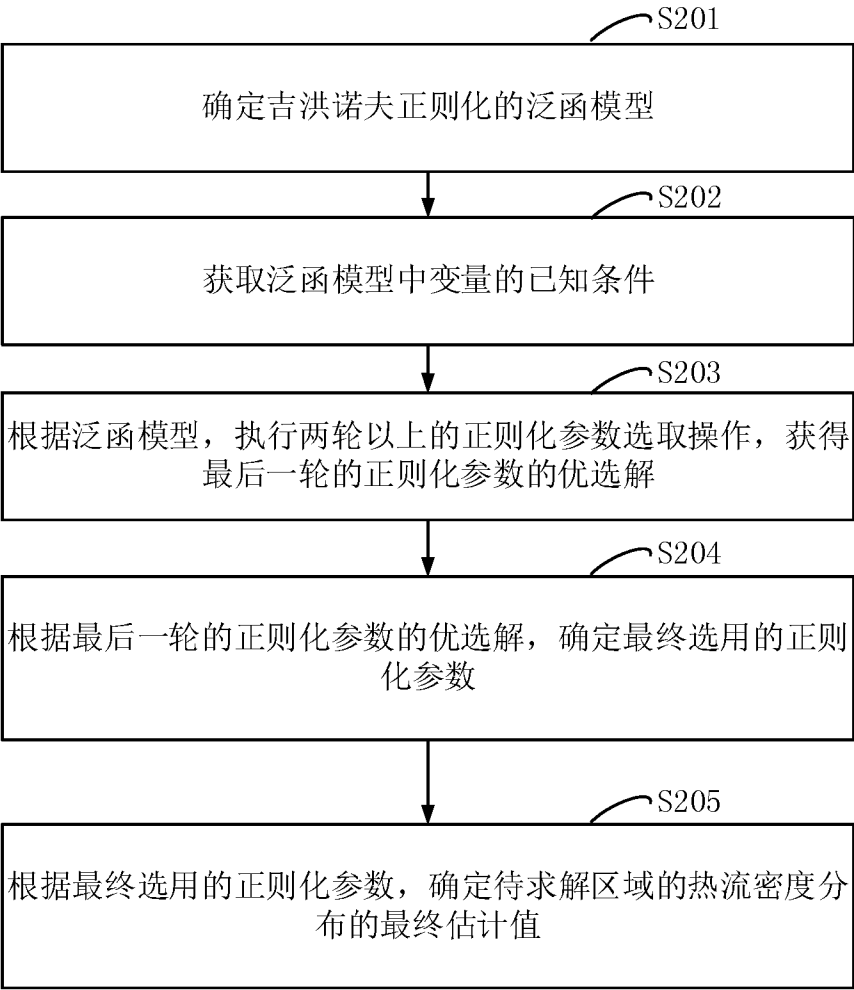


图 2 (a)

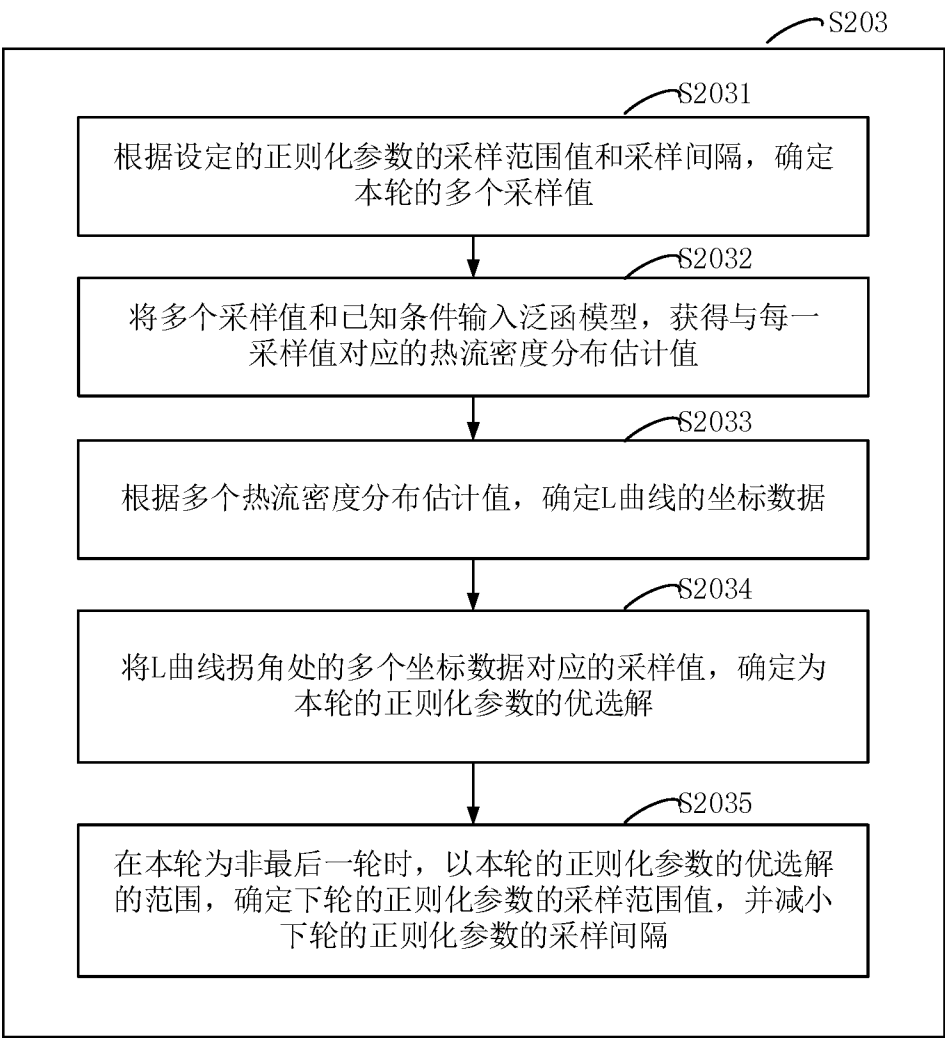


图 2 (b)

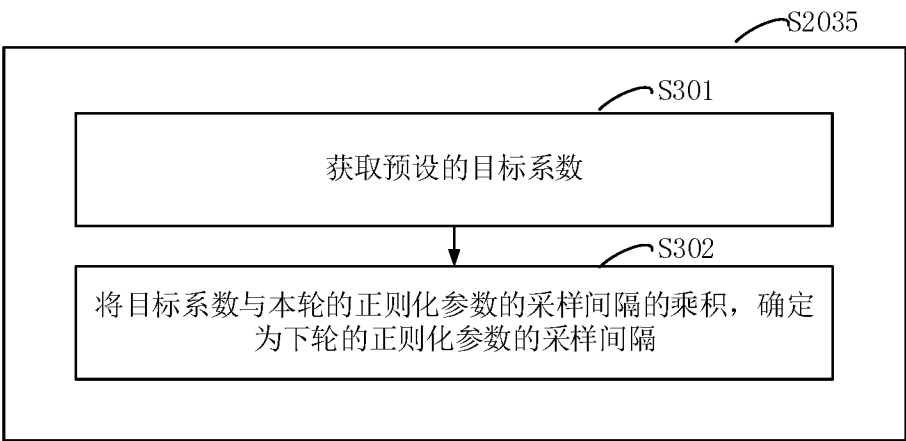


图 3

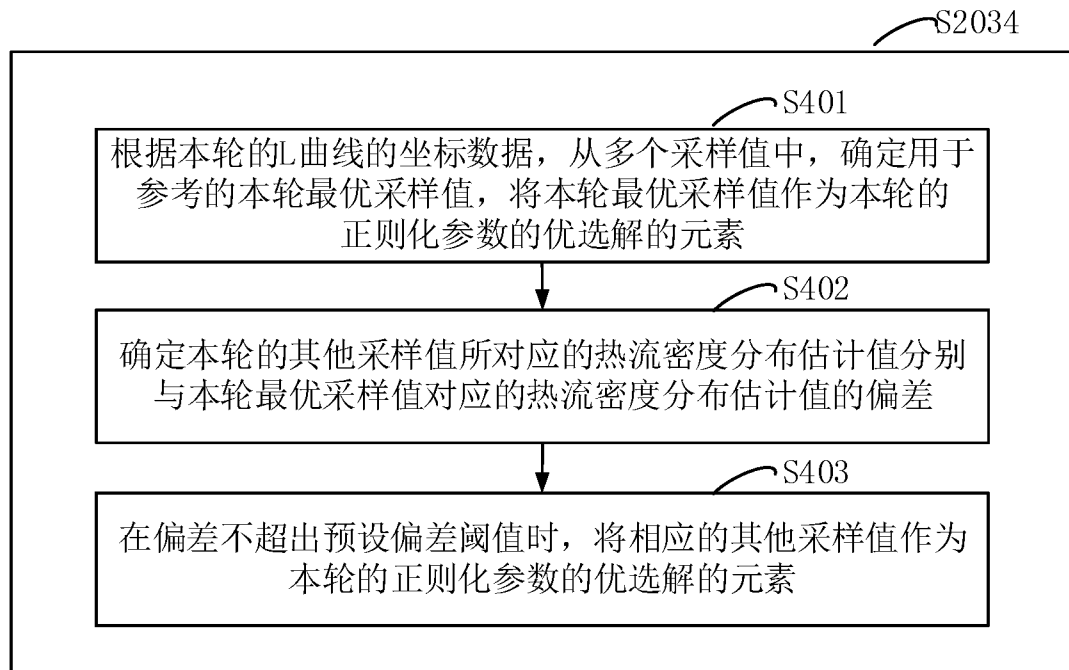


图 4

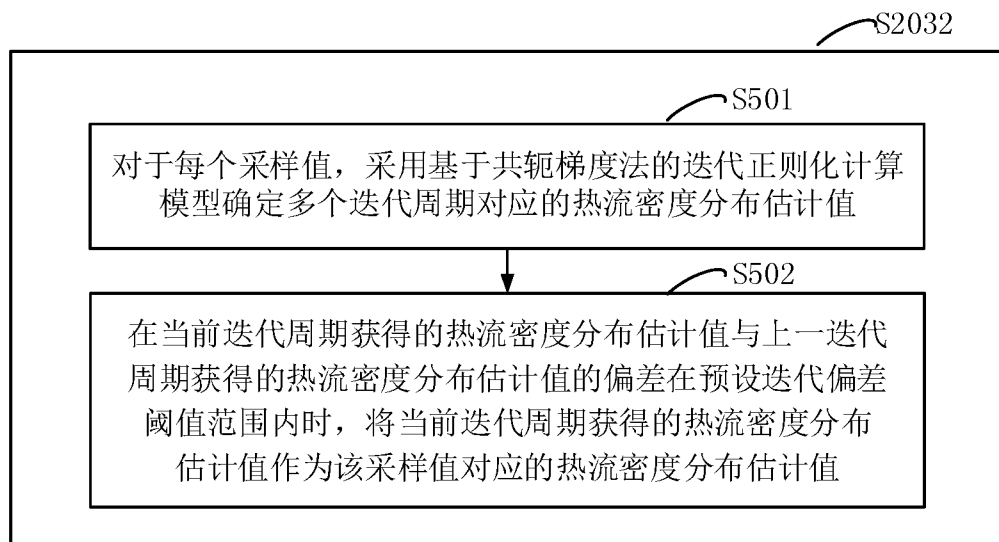


图 5

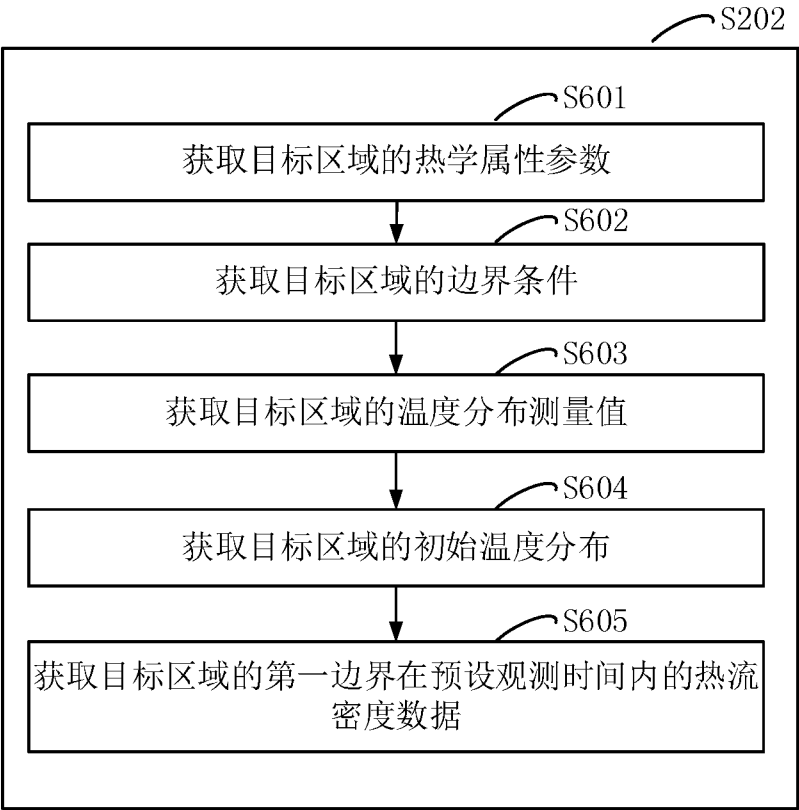


图 6

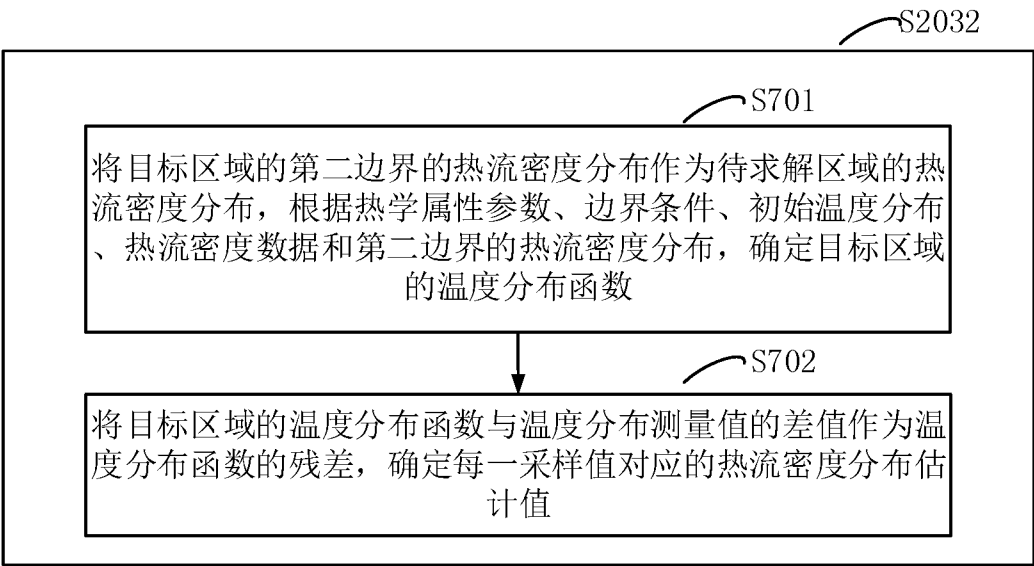


图 7

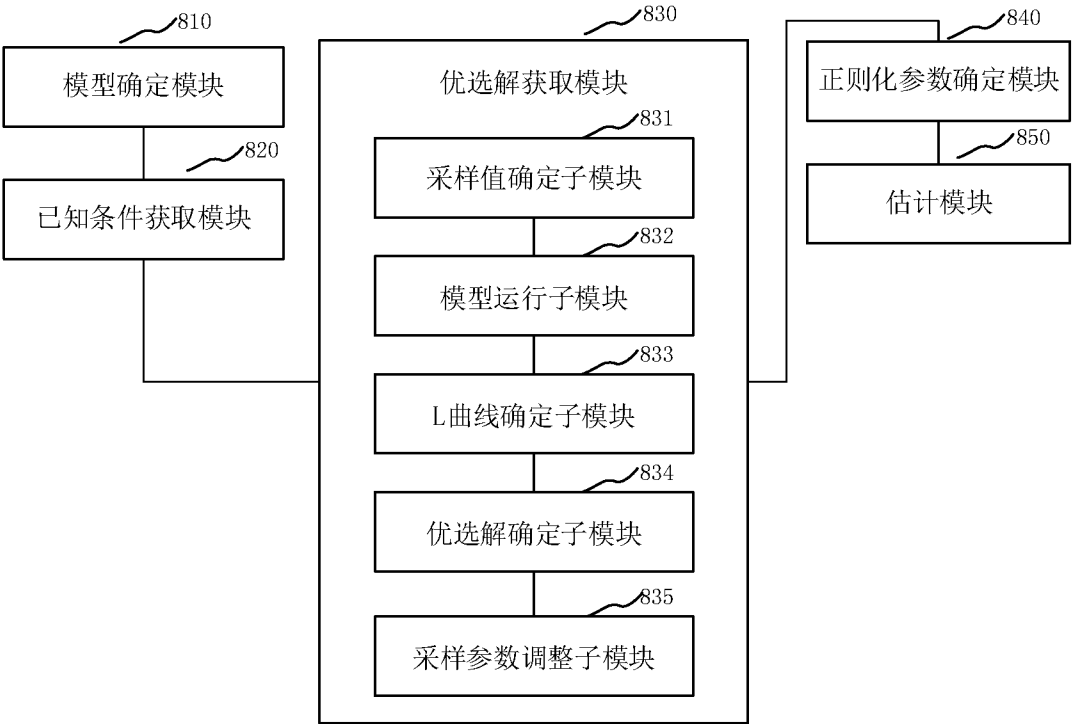


图 8

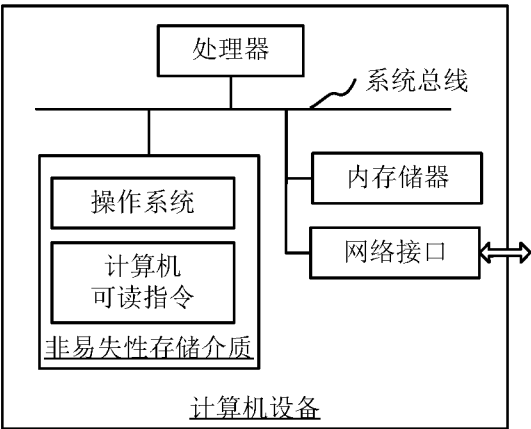


图 9

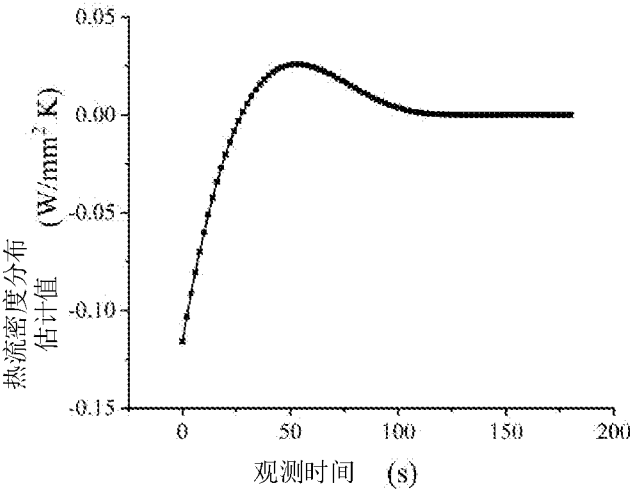


图 10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2022/125225

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F30/20(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; CNKI; VEN; USTXT; WOTXT; EPTXT; IEEE; 百度, BAIDU; 读秀, DUXIU; 中山大学, 衡益, 吉洪诺夫, 正则化, 热流密度, 热传导, 反问题, L曲线, 采样时间, 采样间隔, Tikhonov, regularization, heat flux, IHTP, Inverse heat transfer problems, L curve, sampling time, sampling interval

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 114841023 A (SUN YAT-SEN UNIVERSITY) 02 August 2022 (2022-08-02) claims 1-10, and description, paragraphs [0030]-[0105], and figures 1-10	1-20
A	CN 113255181 A (BEIHANG UNIVERSITY) 13 August 2021 (2021-08-13) description, paragraphs [0041]-[0091], and figures 1-8	1-20
A	CN 108416723 A (NANJING UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 17 August 2018 (2018-08-17) description, paragraphs [0058]-[0128], and figures 1-4	1-20
A	衡益 等 (HENG, Yi et al.). "池沸腾强化传热中的三维瞬态热传导反问题 (Three-dimensional Transient Inverse Heat Conduction Problems in the Enhanced Pool Boiling Heat Transfer)" <i>科学通报 (Science Bulletin)</i> , Vol. 65, No. 18, 30 June 2020 (2020-06-30), ISSN: 0023-074X, pp. 1857-1874	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

20 February 2023

Date of mailing of the international search report

27 March 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

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2022/125225

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	何俊红 (HE, Junhong). "热传导方程反问题的Tikhonov正则化法 (Tikhonov Regularization Method on Inverse Problem of Heat Conduction Equation)" <i>计算机与数字工程 (Computer & Digital Engineering)</i> , Vol. 43, No. 5, 31 May 2015 (2015-05-31), ISSN: 1672-9722, pp. 776-780	1-20
A	SUN, Yao. "A meshless method based on the method of fundamental solution for solving the steady-state heat conduction problems" <i>International Journal of Heat and Mass Transfer</i> , Vol. 97, 31 December 2016 (2016-12-31), ISSN: 0017-9310, pp. 891-907	1-20

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2022/125225

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	114841023	A	02 August 2022	CN	114841023	B	09 September 2022
CN	113255181	A	13 August 2021	None			
CN	108416723	A	17 August 2018	CN	108416723	B	18 February 2022

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2022/125225

A. 主题的分类 G06F30/20 (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; CNKI; VEN; USTXT; WOTXT; EPTXT; IEEE; 百度; 读秀; 中山大学, 衡益, 吉洪诺夫, 正则化, 热流密度, 热传导, 反问题, L 曲线, 采样时间, 采样间隔, Tikhonov, regularization, heat flux, IHTP, Inverse heat transfer problems, L curve, sampling time, sampling interval		
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 114841023 A (中山大学) 2022年8月2日 (2022 - 08 - 02) 权利要求第1-10项, 说明书第[0030]-[0105]段, 附图1-10	1-20
A	CN 113255181 A (北京航空航天大学) 2021年8月13日 (2021 - 08 - 13) 说明书第[0041]-[0091]段, 附图1-8	1-20
A	CN 108416723 A (南京理工大学) 2018年8月17日 (2018 - 08 - 17) 说明书第[0058]-[0128]段, 附图1-4	1-20
A	衡益 等. “池沸腾强化传热中的三维瞬态热传导反问题” 科学通报, 第65卷, 第18期, 2020年6月30日 (2020 - 06 - 30), ISSN: 0023-074X, 第1857-1874页	1-20
A	何俊红. “热传导方程反问题的Tikhonov正则化法” 计算机与数字工程, 第43卷, 第5期, 2015年5月31日 (2015 - 05 - 31), ISSN: 1672-9722, 第776-780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2月20日		国际检索报告邮寄日期 2023年3月27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 传真号 (86-10)62019451		授权官员 王丽娜 电话号码 (+86) 0512-88995937

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	Yao Sun. "A meshless method based on the method of fundamental solution for solving the steady-state heat conduction problems" International Journal of Heat and Mass Transfer, 第97卷，2016年12月31日 (2016 - 12 - 31)， ISSN: 0017-9310, 第891-907页	1-20

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2022/125225

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	114841023	A	2022年8月2日	CN 114841023 B	2022年9月9日
CN	113255181	A	2021年8月13日	无	
CN	108416723	A	2018年8月17日	CN 108416723 B	2022年2月18日