(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 12 月 26 日 (26.12.2024)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2024/260474 A1

(51) 国际专利分类号:
H02J 3/24 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2024/110141

(22) 国际申请日: 2024 年 8 月 6 日 (06.08.2024)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202310739180.4 2023年6月20日 (20.06.2023) CN

(71) 申请人: 国网北京市电力公司 (**STATE GRID BEIJING ELECTRIC POWER COMPANY**) [CN/CN]; 中国北京市西城区前门西大街41号, Beijing 100051 (CN)。 国家电网有限公司 (**STATE GRID CORPORATION OF CHINA**) [CN/CN]; 中国北京市西城区西长安街86号, Beijing 100031 (CN)。 华北电力大学 (**NORTH CHINA ELECTRIC POWER UNIVERSITY**) [CN/CN]; 中国北京市昌平区北农路2号, Beijing 102206 (CN)。

(72) 发明人: 王海云 (**WANG, Haiyun**); 中国北京市西城区前门西大街41号, Beijing 100051 (CN)。 于希娟 (**YU, Xijuan**); 中国北京市西城区前门西大街41号, Beijing 100051 (CN)。 张再驰 (**ZHANG, Zaichi**); 中国北京市西城区前门西大街41号, Beijing 100051 (CN)。 陈茜 (**CHEN, Xi**); 中国北京市西城区前门西大街41号, Beijing 100051 (CN)。 杨莉萍 (**YANG, Liping**); 中国北京市西城区前门西大街41号, Beijing 100051 (CN)。 张雨璇 (**ZHANG, Yuxuan**); 中国北京市西城区前门西大街41号, Beijing 100051 (CN)。 汪伟 (**WANG, Wei**); 中国北京市西城区前门西大街41号, Beijing 100051 (CN)。 姚艺迪 (**YAO, Yidi**); 中国北京市西城区前门西大街41号, Beijing 100051 (CN)。 徐鹏 (**XU, Peng**); 中国北京市西城区前门西大街41号, Beijing 100051 (CN)。 王方雨 (**WANG, Fangyu**); 中国北京市西城区前门西

(54) **Title:** METHOD AND APPARATUS FOR DETERMINING SAFETY INERTIA OF POWER GRID SYSTEM, AND COMPUTER DEVICE

(54) 发明名称: 电网系统的安全惯量确定方法、装置和计算机设备

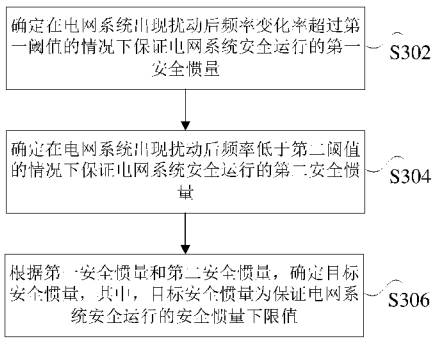


图 3

S302 Determine a first safety inertia for ensuring safe operation of a power grid system when a frequency change rate after disturbance occurs in the power grid system exceeds a first threshold

S304 Determine a second safety inertia for ensuring the safe operation of the power grid system when the frequency after the disturbance occurs in the power grid system is less than a second threshold

S306 Determine a target safety inertia according to the first safety inertia and the second safety inertia, wherein the target safety inertia is a safety inertia lower limit value for ensuring the safe operation of the power grid system

(57) **Abstract:** A method and apparatus for determining the safety inertia of a power grid system, and a computer device. The method comprises: determining a first safety inertia for ensuring safe operation of a power grid system when a frequency change rate after disturbance occurs in the power grid system exceeds a first threshold (S302); determining a second safety inertia for ensuring the safe operation of the power grid system when the frequency after the disturbance occurs in the power grid system is less than a second threshold (S304); and determining a target safety inertia according to the first safety inertia and the second safety inertia, wherein the target safety inertia is a safety inertia lower limit value for ensuring the safe operation of the power grid system (S306).

(57) 摘要: 一种电网系统的安全惯量确定方法、装置和计算机设备，其中，该方法包括：确定在电网系统出现扰动后频率变化率超过第一阈值的情况下保证电网系统安全运行的第一安全惯量(S302)；确定在电网系统出现扰动后频率低于第二阈值的情况下保证电网系统安全运行的第二安全惯量(S304)；根据第一安全惯量和第二安全惯量，确定目标安全惯量，其中，目标安全惯量为保证电网系统安全运行的安全惯量下限值(S306)。

WO 2024/260474 A1

[见续页]

大街41号, Beijing 100051 (CN)。郑凯元(**ZHENG, Kaiyuan**); 中国北京市西城区前门西大街41号, Beijing 100051 (CN)。王程(**WANG, Cheng**); 中国北京市西城区前门西大街41号, Beijing 100051 (CN)。毕天姝(**BI, Tianshu**); 中国北京市西城区前门西大街41号, Beijing 100051 (CN)。

(74) 代理人:北京品源专利代理有限公司(**BEYOND ATTORNEYS AT LAW**); 中国北京市海淀区莲花池东路39号西金大厦6层, Beijing 100036 (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, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, 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))。
— 在修改权利要求的期限届满之前进行，在收到该修改后将重新公布(细则48.2(h))。
— 包括关于请求恢复一项或多项优先权要求的信息(细则26之二.3和48.2(b)(vii))。

电网系统的安全惯量确定方法、装置和计算机设备

本申请要求在2023年06月20日提交中国专利局、申请号为202310739180.4的中国专利申请的优先权，该申请的全部内容通过引用结合在本申请中。

技术领域

本申请涉及电力系统控制领域，例如涉及一种电网系统的安全惯量确定方法、装置和计算机设备。

背景技术

大量新能源发电机组通过使用电力电子器件的方式接入电网，使得新能源机组的传输功率与电网频率解耦，在常规控制模式下发生有功扰动时无法为电网提供惯量支撑，这使得在新能源机组增速高于常规同步机组或者新能源机组取代同步机组时将引起系统的惯量水平下降。而电网系统在发生扰动后，惯量不仅可以延缓系统频率的快速变化，为系统一次调频赢得动作时间，同时也可优化系统频率响应，使扰动后系统频率最低点不越限。因此，当系统在发生极端扰动时，惯量的减小会导致系统频率出现迅速飙升或跌落的现象，恶化系统频率响应，使得系统频率最低点越过电网第三道防线动作值，使系统面临大范围切机、切负荷的风险。因此，为避免系统陷入惯量短缺的运行困境，需要计算保障系统能够安全稳定运行的最小惯量，为运行人员调整惯量水平提供参考。

相关技术关于系统最小安全惯量的研究大多通过频率初始变化率约束与频率最低点约束单一约束获取，且考虑因素不全面；同时缺乏对频率时空分布特性考虑。

发明内容

本申请实施例提供了一种电网系统的安全惯量确定方法、装置和计算机设备，以至少解决相关技术中确定电网系统的最小安全惯量的方法准确率低的技术问题。

根据本申请实施例的一个方面，提供了一种电网系统的安全惯量确定方法，包括：确定在电网系统出现扰动后频率变化率超过第一阈值的情况下保证电网系统安全运行的第一安全惯量；确定在电网系统出现扰动后频率低于第二阈值的情况下保证电网系统安全运行的第二安全惯量；根据第一安全惯量和第二安全惯量，确定目标安全惯量，其中，目标安全惯量为保证电网系统安全运行的安全惯量下限值。

在一些实施例中，确定在电网系统出现扰动后频率变化率超过第一阈值的情况下保证电网系统安全运行的第一安全惯量，包括：获取电网系统的额定频率；确定电网系统的近扰动点的频率变化率；确定由于频率变化引起的负荷功率的变化量；根据额定频率、近扰动点的频率变化率和由于频率变化引起的负荷功率的变化量，确定第一安全惯量。

在一些实施例中，确定电网系统的近扰动点的频率变化率，包括：获取电网系统的惯量中心的频率变化率；确定近扰动点的频率变化率与惯量中心的频率变化率的比例关系；根据比例关系和惯量中心的频率变化率，确定近扰动点的频率变化率。

在一些实施例中，确定由于频率变化引起的负荷功率的变化量，包括：获取在扰动发生前电网系统中负荷的有功功率，以及负荷节点的电压；根据负荷的有功功率和负荷节点的电压，确定第一功率变化量，其中，第一功率变化量为由于电压变化引起的负荷功率的变化量；确定在扰动的影响下电网系统产生的超过第三阈值的功率变化量为第二功率变化量；确定由于频率变化引起的负荷功率的变化量为第一功率变化量与第二功率变化量的差。

在一些实施例中，确定在电网系统出现扰动后频率低于第二阈值的情况下保证电网系统安全运行的第二安全惯量，包括：获取电网系统的额定下限频率；响应于电网系统出现扰动后频率为额定下限频率，确定保证电网系统安全运行的惯量为第二安全惯量。

在一些实施例中，响应于电网系统出现扰动后频率为额定下限频率，确定保证电网系统安全运行的惯量为第二安全惯量，包括：获取电网系统的额定频率、电网系统的阻尼系数、在扰动下电网系统的一次调频速率和一次调频动作时间；响应于电网系统出现扰动后频率为额定下限频率，根据电网系统的额定频率、电网系统的阻尼系数、在扰动下电网系统的一次调频速率和一次调频动作时间，确定保证电网系统安全运行的惯量为第二安全惯量。

在一些实施例中，根据第一安全惯量和第二安全惯量，确定目标安全惯量，包括：确定第一安全惯量和第二安全惯量中的最大值为目标安全惯量。

根据本申请实施例的另一方面，还提供了一种电网系统的安全惯量确定装置，包括：第一确定模块，设置为确定在电网系统出现扰动后频率变化率超过第一阈值的情况下保证电网系统安全运行的第一安全惯量；第二确定模块，设置为确定在电网系统出现扰动后频率低于第二阈值的情况下保证电网系统安全运行的第二安全惯量；第三确定模块，设置为根据第一安全惯量和第二安全惯量，确定目标安全惯量，其中，目标安全惯量为保证电网系统安全运行的安全惯量下限值。

根据本申请实施例的又一方面，还提供了一种非易失性存储介质，非易失性存储介质包括存储的程序，其中，在程序运行时控制非易失性存储介质所在设备执行上述中任意一项电网系统的安全惯量确定方法。

根据本申请实施例的再一方面，还提供了一种计算机设备，计算机设备包括处理器，处理器用于运行程序，其中，程序运行时执行上述中任意一项电网系统的安全惯量确定方法。

附图说明

此处所说明的附图用来提供对本申请的理解，构成本申请的一部分，本申请的示意性实施例及其说明用于解释本申请。在附图中：

图 1 示出了一种用于实现电网系统的安全惯量确定方法的计算机终端的硬件结构框图；

图 2 示出了一种电网系统频域响应过程的示意图；

图 3 是根据本申请实施例提供的电网系统的安全惯量确定方法的流程示意图；

图 4 是根据本申请实施例提供的负荷电压特性功率响应的示意图；

图 5 是根据本申请实施例提供的线性化处理后的频率响应曲线的示意图；

图 6 是根据本申请实施例提供的电网系统的安全惯量确定装置的结构框图。

具体实施方式

下面将结合本申请实施例中的附图，对本申请实施例进行描述，所描述的实施例是本申请相关的一些实施例。基于本申请中的实施例，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，都应当属于本申请保护的范围。

本申请的说明书和权利要求书及上述附图中的术语“第一”、“第二”等是用于区别类似的对象，而不必用于描述特定的顺序或先后次序。应该理解这样使用的数据在适当情况下可以互换，以便这里描述的本申请的实施例能够以除了在这里图示或描述的那些以外的顺序实施。此外，术语“包括”和“具有”以及他们的任何变形，意图在于覆盖不排他的包含，例如，包含了一系列步骤或单元的过程、方法、系统、产品或设备不必限于列出的那些步骤或单元，而是可包括没有列出的或对于这些过程、方法、产品或设备固有的其它步骤或单元。

根据本申请实施例，提供了一种电网系统的安全惯量确定方法的实施例，在附图的流程图示出的步骤可以在诸如一组计算机可执行指令的计算机系统中执行，并且，虽然在流程图中示出了逻辑顺序，但是在一些情况下，可以以不同于此处的顺序执行所示出或描述的步骤。

本申请实施例一所提供的方法实施例可以在移动终端、计算机终端或者类似的运算装置中执行。图 1 示出了一种用于实现电网系统的安全惯量确定方法

的计算机终端的硬件结构框图。如图 1 所示，计算机终端 10 可以包括一个或多个（图中采用 102a、102b，……，102n 来示出）处理器（处理器可以包括微处理器 MCU 或可编程逻辑器件 FPGA 等的处理装置）、用于存储数据的存储器 104。除此以外，计算机终端 10 还可以包括：显示器、输入/输出接口（I/O 接口）、通用串行总线（USB）端口（可以作为 BUS 总线的端口中的一个端口被包括）、网络接口、电源和/或相机。本领域普通技术人员可以理解，图 1 所示的结构为示意。例如，计算机终端 10 还可包括比图 1 中所示更多或者更少的组件，或者具有与图 1 所示不同的配置。

上述一个或多个处理器和/或其他数据处理电路在本文中通常可以被称为“数据处理电路”。该数据处理电路可以全部或部分的体现为软件、硬件、固件或其他任意组合。此外，数据处理电路可为单个独立的处理模块，或全部或部分的结合到计算机终端 10 中的其他元件中的任意一个内。如本申请实施例中所涉及到的，该数据处理电路作为一种处理器控制（例如与接口连接的可变电阻终端路径的选择）。

存储器 104 可用于存储应用软件的软件程序以及模块，如本申请实施例中的电网系统的安全惯量确定方法对应的程序指令/数据存储装置，处理器通过运行存储在存储器 104 内的软件程序以及模块，从而执行各种功能应用以及数据处理，即实现上述的应用程序的电网系统的安全惯量确定方法。存储器 104 可包括高速随机存储器，还可包括非易失性存储器，如一个或者多个磁性存储装置、闪存、或者其他非易失性固态存储器。在一些实例中，存储器 104 可包括相对于处理器远程设置的存储器，这些远程存储器可以通过网络连接至计算机终端 10。上述网络的实例包括互联网、企业内部网、局域网、移动通信网及其组合。

显示器可以为例如触摸屏式的液晶显示器（Liquid Crystal Display，LCD），该液晶显示器可使得用户能够与计算机终端 10 的用户界面进行交互。

当电力系统发生扰动时，按照时间顺序可将发电机组参与调频的过程分为惯量响应阶段，一次调频阶段以及二次调频阶段，在不同的响应阶段有不同的调频方法对电网产生的不平衡功率进行调整。图 2 示出了一种电网系统频域响应过程的示意图，如图 2 所示，可将系统的频率响应过程分为如下几个阶段。

阶段 1：在扰动产生的瞬间t_1，存在着两个进程，一个是扰动功率的重新分配，此进程实际是每个发电机组按照同步功率系数分配扰动功率，如式(1)所示，表示的含义为当系统中负荷 k 处发生有功扰动ΔP时，也即系统发生扰动后产生的功率不平衡量为ΔP时，第 i 台发电机的输出电磁功率P_{ei}变为原始功率与扰动功率的叠加值。第二个进程是负荷电压特性影响电网系统运行，它通过改变系统在扰动后的不平衡功率，在系统频率响应时起着类似惯量的作用。

$$P_{ei} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{j=1, j\neq i,k}^{N} E_i E_j (B_{ij} \sin\delta_{ij} + G_{ij} \cos\delta_{ij}) + E_i U_k (B_{ik} \sin\delta_{ik} + G_{ik} \cos\delta_{ik}) \quad (1)$$

式中，E_i和E_j分别表示第 i 台和第 j 台发电机的暂态电势，U_k为负荷 k 两端的电压值，G_{ii}为系统节点导纳矩阵 Y 中对角元素，即在节点 i 的自导纳，B_{ij}是节点 i 和节点 j 之间的互电纳；B_{ik}是节点 i 和节点 k 之间的互电纳；G_{ij}是节点 i 和节点 j 之间的互电导；G_{ik}是节点 i 和节点 k 之间的互电导。$\delta_{ij}=\delta_i-\delta_j$，$\delta_i$代表系统中第 i 台发电机的励磁电势和端电压之间相角差，即功角。δ_j代表系统中第 j 台发电机的励磁电势和端电压之间相角差，δ_{ij}代表系统中第 i 台发电机和第 j 台发电机之间的功角差。$\delta_{ik}=\delta_i-\delta_k$，$\delta_k$代表系统中负荷 k 的相角差，$\delta_{ik}$代表系统中第 i 台发电机和负荷 k 之间的功角差。

阶段 2：惯量响应阶段，从t_1到t_2期间，发生扰动后，同步发电机的电磁功率突增，而机械功率缺保持不变，频率尚处于调速器调频死区而尚未动作。此时由于同步机组的转子在旋转过程中储存了动能，具有一定的转动惯量。在出现功率不平衡后，同步发电机的转子通过加速或减速将其中储存的动能通过功角特性转换为电磁功率，继续维持着系统的有功供需平衡。由于此时系统中仅有惯量作用，系统的频率变化率在此时为最大值，因此一般对此时的频率变化率设定约束，进而求解系统最小安全惯量。对于单台同步发电机，根据转子运动方程可得：

$$\frac{2H_iS_i}{f_n}\frac{df(t)}{dt}=\Delta P_i \qquad (2)$$

式中：f_n为电网额定频率；H_i为第 i 台同步机组的惯性时间常数；S_i为第 i 台同步机的额定容量；f(t)为电网中频率关于时间变化的函数；ΔP_i为同步发电机机械功率与电磁功率间的偏差，在扰动瞬间为发电机承担的扰动功率。

阶段 3：此时系统中惯量响应与一次调频响应共同作用。在t_2时刻，系统的频率偏差超过了调速器调频死区，调速器发出调节信号后，原动机阀门开度增大，增加向系统的机械功率输出，使得不平衡功率减小，系统惯量支撑功率也逐渐减小，当系统的不平衡功率降为零时，系统频率到达最低点。

阶段 4：频率到达最低点后，机组继续增发功率，使得系统的机械功率大于电磁功率，同步发电机转子开始吸收能量恢复部分转速，此时系统的惯量响应由正变负，系统频率在t_3时刻达到新的平衡，维持在较低水平，系统机械功率不再增加。

阶段 5：t_3时刻后为二次调频响应阶段。由于一次调频为有差调频，在稳态频率偏差较大时，需启动二次调频，增加调频厂内有功出力，将频率调节至系统频率额定值。

由于调速器存在着频率不灵敏区和响应延时，在出现有功扰动时，同步机无法立即向系统中注入功率以消除不平衡功率。因此，在调速器动作前，仅可以靠惯性的支撑维持着供需平衡。而惯量可视为发电机转子中的储能，在无额外功率注入系统的情况下，在出现有功扰动后仅靠惯量的调节，系统频率会以恒定速率持续下降至零。

综上所述，当系统出现不平衡功率时，由于无法瞬时平衡，因而惯量在维持有功供需平衡方法发挥着重要的作用，为电磁功率提供能量来源，从而维持着有功的供需平衡，并减缓系统频率变化的速率，为一次调频的作用赢得时间，是维持系统频率稳定不可或缺的一部分。因此本申请将求解满足系统稳定运行需求的最小安全惯量。

由于扰动后频率的动态过程与系统运行状态、有功扰动类型、大小及位置等因素有关，因此，在选取频率指标，应当选取典型特征指标进行约束后再进行惯量的计算。

图 3 是根据本申请实施例提供的电网系统的安全惯量确定方法的流程示意图，如图 3 所示，该方法包括如下步骤：

步骤 S302，确定在电网系统出现扰动后频率变化率超过第一阈值的情况下保证电网系统安全运行的第一安全惯量。

本步骤中，可以选择频率变化率作为特征指标进行约束，计算当电网系统在扰动的影响下频率变化率超过第一阈值时，能够保证电网系统安全运行的第一安全惯量。示例性地，在电力系统发生扰动时，在扰动初始时刻频率变化率最大，可以计算电网系统频率变化率最大时需要的安全惯量为第一安全惯量。

步骤 S304，确定在电网系统出现扰动后频率低于第二阈值的情况下保证电网系统安全运行的第二安全惯量。

本步骤中，可以选择频率作为特征指标进行约束，计算当电网系统在扰动的影响下频率低于第二阈值时，能够保证电网系统安全运行的第二安全惯量。示例性地，当电网系统发生有功扰动后，频率变化率第一次降为 0 时所对应的频率大小，也就是频率的极值，一般地，近似认为当机械功率输入和电磁功率输出相等时，系统频率到达最低值，可以计算电网系统频率最低时需要的安全惯量为第二安全惯量。

步骤 S306，根据第一安全惯量和第二安全惯量，确定目标安全惯量，其中，目标安全惯量为保证电网系统安全运行的安全惯量下限值。

本步骤中，可以综合考虑频率变化率最大和频率最低的情况下，电网系统分别需要的安全惯量，最终确定电网系统安全运行的最小安全惯量，也即安全惯量下限值。

通过分别计算电网系统出现扰动后频率变化率最大的情况下保证电网系统安全运行的第一安全惯量，以及电网系统出现扰动后频率最低的情况下保证电网系统安全运行的第二安全惯量，并且综合考虑第一安全惯量和第二安全惯量，确定电网受到扰动后的过程中保证电网系统安全运行的最小安全惯量，达到了考虑多种情况下电网需要的最小安全惯量，综合确定电网受到扰动后的过程中保证电网系统安全运行的最小安全惯量的效果，从而达到了提高确定电网系统的最小安全惯量的准确率的技术效果，进而解决了相关技术中确定电网系统的最小安全惯量的方法准确率低的技术问题。

在一些实施例中，确定在电网系统出现扰动后频率变化率超过第一阈值的情况下保证电网系统安全运行的第一安全惯量，包括：获取电网系统的额定频率；确定电网系统的近扰动点的频率变化率；确定由于频率变化引起的负荷功率的变化量；根据额定频率、近扰动点的频率变化率和由于频率变化引起的负荷功率的变化量，确定第一安全惯量。

在一些实施例中，确定电网系统的近扰动点的频率变化率，包括：获取电网系统的惯量中心的频率变化率；确定近扰动点的频率变化率与惯量中心的频率变化率的比例关系；根据比例关系和惯量中心的频率变化率，确定近扰动点的频率变化率。

示例性地，在扰动出现的瞬间系统的频率变化率最大，若以扰动后频率变化率不超过一门槛值为约束，则应以扰动瞬间频率变化率为基准。此时无频率偏差，即无发电机调速器和负荷频率调节效应。由公式（3）得，基于频率变化率约束的系统最小安全惯量H_{min}为：

$$H_{\min}=\frac{f_n\cdot\Delta P_{\max}}{2RoCoF_{\max}} \quad (3)$$

式中，ΔP_{max}为系统可能发生的最大扰动功率，一般为系统发生交流联络线断线、直流闭锁或者系统中最大的发电机组退出运行时系统发生的扰动功率。$RoCoF_{max}$表示系统允许的惯量中心的频率变化率的极限值。

但是，上式中$RoCoF_{max}$表示的是系统惯量中心的频率变化率，而频率约束通常是以系统最大母线频率或特定母线频率为依据，一般位于近扰动点。对于小系统而言，频率时空分布特性并不明显，近扰动点的频率变化率与惯量中心的频率变化率近似相等；但对于大系统而言，由于频率时空分布特性的影响，近扰动点的频率变化率与惯量中心的频率变化率存在着较大的差异，因此对于大系统需要量化近扰动点与惯量中心的频率变化率的关系，以近扰动点的频率变化率表示惯量中心的频率变化率，并采用近扰动点的频率变化率计算第一安全惯量。

在惯量响应阶段，由于此时调速器尚未动作，因而可认为此时系统的频率变化率恒定，频率呈线性下降的趋势，因而可认为系统频率偏差与频率变化率有着近似等价的关系。分别将扰动点与系统惯量中心所在区域等效成两台机组，并将 i 作为功率扰动点，G_i为近扰动点所在区域等值机组。可得：

$$\alpha=\frac{RoCoF_i}{RoCoF_{coi}}=\frac{\Delta f_i}{\Delta f_{coi}} \quad (4)$$

式中，α表示的是扰动点与系统惯量中心所在区域等效机组的频率变化率的比例系数；$RoCoF_i$表示的是扰动点所在区域等效机组的频率变化率；$RoCoF_{coi}$表示的是系统惯量中心所在区域等效机组的频率变化率；Δf_i表示的是扰动点所在

区域等效机组的频率变化量；Δf_{coi}表示的是系统惯量中心所在区域等效机组的频率变化量。

将（4）代入（3）中，可将系统中量测的惯量中心的频率变化率约束转化为系统中近扰动点的频率变化率约束，得到考虑频率空间分布特征的系统所需最小安全惯量为：

$$H_{\min}=\frac{f_n\cdot\Delta P_{\max}}{2RoCoF_{coi}/\alpha} \quad (5)$$

在一些实施例中，确定由于频率变化引起的负荷功率的变化量，包括：获取在扰动发生前电网系统中负荷的有功功率，以及负荷节点的电压；根据负荷的有功功率和负荷节点的电压，确定第一功率变化量，其中，第一功率变化量为由于电压变化引起的负荷功率的变化量；确定在扰动的影响下电网系统产生的超过第三阈值的功率变化量为第二功率变化量；确定由于频率变化引起的负荷功率的变化量为第一功率变化量与第二功率变化量的差。

在一些实施例中，扰动的出现不仅会影响系统频率，同时也会影响系统电压。电压的变化将会使系统中恒阻抗、恒电流负荷功率都发生相应的变化，减小了系统的不平衡功率，进而减小了扰动后频率变化率，图 4 是根据本申请实施例提供的负荷电压特性功率响应的示意图，如图 4 所示，其本质是改变了系统的不平衡功率。随着新能源在电网中的比例不断增大，负荷电压特性在减缓系统频率变化率方面所起的作用越来越明显。

图 4 中ΔP为系统发生扰动后产生的功率不平衡量，ΔP_L为电压变化后由于负荷电压特性而减小的功率不平衡量，即负荷功率的改变量ΔP_L为：

$$\triangle P_L=P_L\left[k_z(\frac{U_L}{U_{L0}})^2+k_i(\frac{U_L}{U_{L0}})+k_p\right] \quad (6)$$

式中：P_L为扰动前负荷的有功功率；U_{L0}为扰动前负荷节点的电压；U_L为扰动后负荷节点的电压；k_z、k_i、k_p分别表示系统中恒阻抗负荷、恒电流负荷、恒功率负荷占总负荷的比例。

将（6）代入（5）中，可以在系统扰动后所产生的最大的功率不平衡量（即ΔP_{max}）中去除被系统的负荷电压特性影响的功率不平衡量（即ΔP_L），得到系统扰动后所产生的最大的功率不平衡量中需要系统的安全惯量来支撑的部分（即$\Delta P_{max}-\Delta P_L$），最终得到考虑频率空间分布特征的系统所需最小安全惯量为：

$$H_{\min}=\frac{f_n\cdot\left(\Delta P_{\max}-\Delta P_L\right)}{2RoCoF_{coi}/\alpha} \quad (7)$$

在一些实施例中，确定在电网系统出现扰动后频率低于第二阈值的情况下保证电网系统安全运行的第二安全惯量，包括：获取电网系统的额定下限频率；在电网系统出现扰动后频率为额定下限频率的情况下，确定保证电网系统安全运行的惯量为第二安全惯量。

在一些实施例中，在电网系统出现扰动后频率为额定下限频率的情况下，确定保证电网系统安全运行的惯量为第二安全惯量，包括：获取电网系统的额定频率、电网系统的阻尼系数、在扰动下电网系统的一次调频速率和一次调频动作时间；在电网系统出现扰动后频率为额定下限频率的情况下，根据电网系统的额定频率、电网系统的阻尼系数、在扰动下电网系统的一次调频速率和一次调频动作时间，确定保证电网系统安全运行的惯量为第二安全惯量。

在一些实施例中，当频率变化超过 0.033 赫兹（Hz）后，越过调速器调频死区，此时调速器将增加机械功率输入以减少系统功率偏差，从而抑制频率的跌落。一般地，近似认为当机械功率输入和电磁功率输出相等时，系统频率到达最低值f_{nadir}。为避免触发低频减载安稳装置动作，频率最低点也是衡量系统频率稳定的关键指标，需要满足系统频率最低值f_{nadir}大于或等于系统的额定最小频率值f_{min}：

$$f_{min} \le f_{nadir} \quad (8)$$

由于同一区域电网的频率曲线在到达频率最低点时趋于一致，因此可将系统等值为一台同步机，利用转子运动方程来描述系统的频率响应过程为：

$$2H_{sys}\frac{df(t)}{f_n \cdot dt} = P_m(t) - P_e(t) - D\Delta f(t) \quad (9)$$

式中：H_{sys}为系统整体惯量；f(t)为 t 时刻的系统频率；$P_m(t)$、$P_e(t)$分别表示系统的总机械功率和总电磁功率；D 表示系统频率响应过程中的阻尼效应；Δf(t)表示 t 时刻的系统的频率与额定频率之间的偏差，其中，额定频率一般为 50 赫兹。

由于在频率下降到最低点的过程中，惯量响应与一次调频响应共同作用，导致频率响应呈现出非线性的的特征，为求解带来难度。图 5 是根据本申请实施例提供的线性化处理后的频率响应曲线的示意图，为提升求解效率，本申请将发电机组的一次调频作用进行线性化处理后如图 5 所示，通过对频率最低点施加约束求解系统最小安全惯量。

假定系统频率于t_{nadir}时到达最低点，对式（9）从 0 至t_{nadir}进行积分，得：

$$\frac{2H_{sys}}{f_n}\int_0^{t_{nadir}}\frac{df(t)}{dt}dt = \int_0^{t_{nadir}}\left[P_m(t) - P_e(t)\right]dt - D\int_0^{t_{nadir}}\Delta f(t)dt \quad (10)$$

在系统发生扰动后，系统频率开始偏离正常水平，并且很快会越过发电机组一次调频死区，进而一次调频开始动作以填补系统的不平衡功率，当一次调

频输出端有功功率等于初始不平衡功率时，系统频率到达极值。采用线性化技术模拟电力系统发生扰动ΔP后系统的频率动态响应过程如图 2、5 所示。在此扰动下，系统的一次调频速率为：

$$R_{sys}=\frac{\Delta P}{t_{nadir}-t_{db}} \tag{11}$$

式中，R_{sys}为扰动下系统一次调频速率；t_{db}为一次调频动作时间。

在 0~t_{db}阶段，此时一次调频尚未启动，系统的功率不平衡量保持ΔP不变，对公式（9）在此阶段积分，可得：

$$t_{db}=\frac{4H_{sys}f_{db}}{f_n\left(2\Delta P-Df_{db}\right)} \tag{12}$$

式中，f_{db}为t_{db}时刻的系统的频率。

一次调频开始动作后，频率到达最低点的时间为：

$$t_{nadir}=t_{db}+\frac{\Delta P}{R_{sys}} \tag{13}$$

对式（9）两边从 0 至t_{nadir}进行积分可得：

$$f_{nadir}=f_n-\frac{2f_nR_{sys}t_{db}\Delta P+f_n\Delta P^2}{4H_{sys}R_{sys}+Df_nR_{sys}t_{db}+Df_n\Delta P} \tag{14}$$

将式（14）代入频率约束式（8）后，得到满足频率最低点的系统安全惯量H_{sys}为：

$$H_{sys}\geq-\frac{2f_nR_{sys}t_{db}\Delta P+f_n\Delta P^2+Df_nR_{sys}t_{db}\left(f_{\min}-f_n\right)+Df_n\Delta P\left(f_{\min}-f_n\right)}{4R_{sys}\left(f_{\min}-f_n\right)} \tag{15}$$

公式（15）取左右两边相等时，得到满足频率最低点约束的电力系统所需的最小安全惯量$H_{sys,min}$。

在一些实施例中，根据第一安全惯量和第二安全惯量，确定目标安全惯量，包括：确定第一安全惯量和第二安全惯量中的最大值为目标安全惯量。

在一些实施例中，当分别求解得到满足频率变化率约束和频率最低点约束的电力系统最小安全惯量后，需综合考虑求解得到电力系统所需最小安全惯量 H：

$$H = \max\left\{H_{\min}, H_{sys,\min}\right\} \quad (16)$$

作为一实施例，将分别从IEEE 10机39节点系统和实际电网系统两个角度进行仿真验证。

1、IEEE 10机39节点

10机39节点系统中包含10台发电机、39条母线、19处负荷和34条传输线；额定频率为50Hz，其中1号机为外部电网等值机，2号机为平衡机。

在上述10机39节点系统中设置3种场景，在各场景下分别计算两种频率约束下的系统最小安全惯量需求，仿真如下：

场景1：系统中发电机均为同步机组。

场景2：将系统中5号与6号两台同步机组等值更换为风力发电机，此时系统中新能源比例为18.8%。

场景3：将系统中5号、6号与9号三台同步机组等值更换为风力发电机，此时系统中新能源比例为32.2%。

以发生负荷突增事件为例，在扰动发生后，采样扰动初始时刻系统的频率变化率及频率最低点进行系统最小安全惯量计算。由于此系统为大系统，在扰动初始时刻系统近扰动点频率变化率较惯量中心频率变化率更精确，因此在利用频率变化率约束计算系统最小安全惯量时，需用近扰动点频率变化率。由式（7）和式（15）可分别计算得到满足不同频率约束的系统最小安全惯量，在3种场景下的系统最小安全惯量计算结果如表1所示。

表1 10机39节点系统最小安全惯性常数计算结果

场景	最小安全惯性常数理论值s	惯量中心频率变化率约束计算值s	近扰动点频率变化率约束计算值s	频率最低点约束计算值s
1	4.33	4.03	4.11	4.26
2	3.96	3.68	3.82	3.91
3	3.74	3.46	3.63	3.65

由表1可知，在场景1系统中无新能源时，利用本申请所提最小安全惯量计算方法所得结果与理论值相近。同时，新能源占比增大后最小安全惯量计算值与理论值相近可以说明本方法既适用于常规电网，又适用于新能源高占比电网。且通过对比可知，大系统中利用近扰动点频率初始变化率计算最小安全惯量要较惯量中心处更为准确。

2、实际新能源高占比系统

为了分析上述系统最小安全惯量计算方法在实际电网中的适用性，选取我国一省级电网J，计算满足系统稳定运行条件的最小安全惯量。该省级电网现有总装机容量为13440.91万千瓦，新能源装机约占全省总容量的14%，其中风电装机容量约占全网总装机容量的8.26%，光伏装机容量约占全网总装机容量的5.74%。同时该省级电网现有特高压直流输电线路4条，直流馈入功率约占总装机容量的20.98%。此外，依据该省在“十四五”的规划可知，至2025年时，该省的新能源装机占比将达到30%。

本申请以该省电网2019年夏大运行方式为算例，在软件中进行仿真计算，分别在新能源占比14%以及30%的系统中，以发生负荷突增事件为例，在扰动发生后，采样扰动初始时刻系统的频率变化率及频率最低点时刻等数据进行系统最小安全惯量计算。

表2 实际电力系统最小安全惯性常数计算结果

新能源占比	最小安全惯性常数理论计算值s	最小安全惯性常数实际计算值s	相对误差%
14%	4.93	4.97	0.81%
30%	4.27	4.36	2.11%

由表2可知，在扰动后，利用文中方法在实际电力系统中计算系统最小安全惯量同样具有较高的精度，证明本申请计算电力系统最小安全惯量的方法在实际电力系统中同样适用。

对于前述的各方法实施例，为了简单描述，故将其都表述为一系列的动作组合，但是本领域技术人员应该知悉，本申请并不受所描述的动作顺序的限制，因为依据本申请，一些步骤可以采用其他顺序或者同时进行。其次，本领域技术人员也应该知悉，说明书中所描述的实施例均属于示例性实施例，所涉及的动作和模块并不一定是本申请所必须的。

通过以上的实施方式的描述，本领域的技术人员可以了解到，上述实施例的电网系统的安全惯量确定方法可借助软件加必需的通用硬件平台的方式来实现，当然也可以通过硬件，但很多情况下前者是更佳的实施方式。基于这样的理解，本申请的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分可以以软件产品的形式体现出来，该计算机软件产品存储在一个存储介质（如只读存储器ROM/随机存储器RAM、磁碟、光盘）中，包括至少一个指令用以使得一台终端设备（可以是手机，计算机，服务器，或者网络设备等）执行本申请各个实施例所述的方法。

根据本申请实施例，还提供了一种用于实施上述电网系统的安全惯量确定方法的电网系统的安全惯量确定装置，图6是根据本申请实施例提供的电网系统的安全惯量确定装置的结构框图，如图6所示，该电网系统的安全惯量确定

装置包括：第一确定模块 72、第二确定模块 74 和第三确定模块 76，下面对该电网系统的安全惯量确定装置进行说明。

第一确定模块 72，设置为确定在电网系统出现扰动后频率变化率超过第一阈值的情况下保证电网系统安全运行的第一安全惯量。

第二确定模块 74，与第一确定模块 72 连接，设置为确定在电网系统出现扰动后频率低于第二阈值的情况下保证电网系统安全运行的第二安全惯量。

第三确定模块 76，与第二确定模块 74 连接，设置为根据第一安全惯量和第二安全惯量，确定目标安全惯量，其中，目标安全惯量为保证电网系统安全运行的安全惯量下限值。

上述第一确定模块 72、第二确定模块 74 和第三确定模块 76 对应于实施例中的步骤 S302 至步骤 S306，多个模块与对应的步骤所实现的实例和应用场景相同。需要说明的是，上述模块作为装置的一部分可以运行在实施例提供的计算机终端 10 中。

本申请的实施例还提供了一种计算机设备，上述计算机设备可以位于计算机网络的多个网络设备中的至少一个网络设备。该计算机设备包括存储器和处理器。

存储器可用于存储软件程序以及模块，如本申请实施例中的电网系统的安全惯量确定方法和装置对应的程序指令/模块，处理器通过运行存储在存储器内的软件程序以及模块，从而执行各种功能应用以及数据处理，即实现上述的电网系统的安全惯量确定方法。存储器可包括高速随机存储器，还可以包括非易失性存储器，如一个或者多个磁性存储装置、闪存、或者其他非易失性固态存储器。在一些实例中，存储器可包括相对于处理器远程设置的存储器，这些远程存储器可以通过网络连接至计算机终端。上述网络的实例包括互联网、企业内部网、局域网、移动通信网及其组合。

处理器可以通过传输装置调用存储器存储的信息及应用程序，以执行下述步骤：确定在电网系统出现扰动后频率变化率超过第一阈值的情况下保证电网系统安全运行的第一安全惯量；确定在电网系统出现扰动后频率低于第二阈值的情况下保证电网系统安全运行的第二安全惯量；根据第一安全惯量和第二安全惯量，确定目标安全惯量，其中，目标安全惯量为保证电网系统安全运行的安全惯量下限值。

在一些实施例中，上述处理器还可以执行如下步骤的程序代码：确定在电网系统出现扰动后频率变化率超过第一阈值的情况下保证电网系统安全运行的第一安全惯量，包括：获取电网系统的额定频率；确定电网系统的近扰动点的频率变化率；确定由于频率变化引起的负荷功率的变化量；根据额定频率、近扰动点的频率变化率和由于频率变化引起的负荷功率的变化量，确定第一安全惯量。

在一些实施例中，上述处理器还可以执行如下步骤的程序代码：确定电网

系统的近扰动点的频率变化率，包括：获取电网系统的惯量中心的频率变化率；确定近扰动点的频率变化率与惯量中心的频率变化率的比例关系；根据比例关系和惯量中心的频率变化率，确定近扰动点的频率变化率。

在一些实施例中，上述处理器还可以执行如下步骤的程序代码：确定由于频率变化引起的负荷功率的变化量，包括：获取在扰动发生前电网系统中负荷的有功功率，以及负荷节点的电压；根据负荷的有功功率和负荷节点的电压，确定第一功率变化量，其中，第一功率变化量为由于电压变化引起的负荷功率的变化量；确定在扰动的影响下电网系统产生的超过第三阈值的功率变化量为第二功率变化量；确定由于频率变化引起的负荷功率的变化量为第一功率变化量与第二功率变化量的差。

在一些实施例中，上述处理器还可以执行如下步骤的程序代码：确定在电网系统出现扰动后频率低于第二阈值的情况下保证电网系统安全运行的第二安全惯量，包括：获取电网系统的额定下限频率；在电网系统出现扰动后频率为额定下限频率的情况下，确定保证电网系统安全运行的惯量为第二安全惯量。

在一些实施例中，上述处理器还可以执行如下步骤的程序代码：在电网系统出现扰动后频率为额定下限频率的情况下，确定保证电网系统安全运行的惯量为第二安全惯量，包括：获取电网系统的额定频率、电网系统的阻尼系数、在扰动下电网系统的一次调频速率和一次调频动作时间；在电网系统出现扰动后频率为额定下限频率的情况下，根据电网系统的额定频率、电网系统的阻尼系数、在扰动下电网系统的一次调频速率和一次调频动作时间，确定保证电网系统安全运行的惯量为第二安全惯量。

在一些实施例中，上述处理器还可以执行如下步骤的程序代码：根据第一安全惯量和第二安全惯量，确定目标安全惯量，包括：确定第一安全惯量和第二安全惯量中的最大值为目标安全惯量。

采用本申请实施例，提供了一种电网系统的安全惯量确定的方案。通过分别计算电网系统出现扰动后频率变化率最大的情况下保证电网系统安全运行的第一安全惯量，以及电网系统出现扰动后频率最低的情况下保证电网系统安全运行的第二安全惯量，并且综合考虑第一安全惯量和第二安全惯量，确定电网受到扰动后的过程中保证电网系统安全运行的最小安全惯量，达到了考虑多种情况下电网需要的最小安全惯量，综合确定电网受到扰动后的过程中保证电网系统安全运行的最小安全惯量的效果，从而达到了提高确定电网系统的最小安全惯量的准确率的技术效果，进而解决了相关技术中确定电网系统的最小安全惯量的方法准确率低的技术问题。

本领域普通技术人员可以理解上述实施例的各种方法中的全部或部分步骤是可以通过程序来指令终端设备相关的硬件来完成，该程序可以存储于一非易失性存储介质中，存储介质可以包括：闪存盘、只读存储器（Read-Only Memory，ROM）、随机存储器（Random Access Memory，RAM）、磁盘或光盘等。

本申请的实施例还提供了一种非易失性存储介质，上述非易失性存储介质可以用于保存上述实施例所提供的电网系统的安全惯量确定方法所执行的程序代码。

在一些实施例中，上述非易失性存储介质可以位于计算机网络中计算机终端群中的任意一个计算机终端中，或者位于移动终端群中的任意一个移动终端中。

在一些实施例中，非易失性存储介质被设置为存储用于执行以下步骤的程序代码：确定在电网系统出现扰动后频率变化率超过第一阈值的情况下保证电网系统安全运行的第一安全惯量；确定在电网系统出现扰动后频率低于第二阈值的情况下保证电网系统安全运行的第二安全惯量；根据第一安全惯量和第二安全惯量，确定目标安全惯量，其中，目标安全惯量为保证电网系统安全运行的安全惯量下限值。

在一些实施例中，非易失性存储介质被设置为存储用于执行以下步骤的程序代码：确定在电网系统出现扰动后频率变化率超过第一阈值的情况下保证电网系统安全运行的第一安全惯量，包括：获取电网系统的额定频率；确定电网系统的近扰动点的频率变化率；确定由于频率变化引起的负荷功率的变化量；根据额定频率、近扰动点的频率变化率和由于频率变化引起的负荷功率的变化量，确定第一安全惯量。

在一些实施例中，非易失性存储介质被设置为存储用于执行以下步骤的程序代码：确定电网系统的近扰动点的频率变化率，包括：获取电网系统的惯量中心的频率变化率；确定近扰动点的频率变化率与惯量中心的频率变化率的比例关系；根据比例关系和惯量中心的频率变化率，确定近扰动点的频率变化率。

在一些实施例中，非易失性存储介质被设置为存储用于执行以下步骤的程序代码：确定由于频率变化引起的负荷功率的变化量，包括：获取在扰动发生前电网系统中负荷的有功功率，以及负荷节点的电压；根据负荷的有功功率和负荷节点的电压，确定第一功率变化量，其中，第一功率变化量为由于电压变化引起的负荷功率的变化量；确定在扰动的影响下电网系统产生的超过第三阈值的功率变化量为第二功率变化量；确定由于频率变化引起的负荷功率的变化量为第一功率变化量与第二功率变化量的差。

在一些实施例中，非易失性存储介质被设置为存储用于执行以下步骤的程序代码：确定在电网系统出现扰动后频率低于第二阈值的情况下保证电网系统安全运行的第二安全惯量，包括：获取电网系统的额定下限频率；在电网系统出现扰动后频率为额定下限频率的情况下，确定保证电网系统安全运行的惯量为第二安全惯量。

在一些实施例中，非易失性存储介质被设置为存储用于执行以下步骤的程序代码：在电网系统出现扰动后频率为额定下限频率的情况下，确定保证电网系统安全运行的惯量为第二安全惯量，包括：获取电网系统的额定频率、电网

系统的阻尼系数、在扰动下电网系统的一次调频速率和一次调频动作时间；在电网系统出现扰动后频率为额定下限频率的情况下，根据电网系统的额定频率、电网系统的阻尼系数、在扰动下电网系统的一次调频速率和一次调频动作时间，确定保证电网系统安全运行的惯量为第二安全惯量。

在一些实施例中，非易失性存储介质被设置为存储用于执行以下步骤的程序代码：根据第一安全惯量和第二安全惯量，确定目标安全惯量，包括：确定第一安全惯量和第二安全惯量中的最大值为目标安全惯量。

上述本申请实施例序号是为了描述，不代表实施例的优劣。

在本申请的上述实施例中，对各个实施例的描述都各有侧重，一个实施例中没有详述的部分，可以参见其他实施例的相关描述。

在本申请所提供的几个实施例中，所揭露的技术内容，可通过其它的方式实现。其中，以上所描述的装置实施例是示意性的，例如所述单元的划分，可以为一种逻辑功能划分，实际实现时可以有另外的划分方式，例如多个单元或组件可以结合或者可以集成到另一个系统，或一些特征可以忽略，或不执行。另一点，所显示或讨论的相互之间的耦合或直接耦合或通信连接可以是通过一些接口，单元或模块的间接耦合或通信连接，可以是电性或其它的形式。

所述作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的，作为单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元，即可以位于一个地方，或者也可以分布到多个单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部单元来实现本实施例。

另外，在本申请各个实施例中的各功能单元可以集成在一个处理单元中，也可以是各个单元单独物理存在，也可以两个或两个以上单元集成在一个单元中。上述集成的单元既可以采用硬件的形式实现，也可以采用软件功能单元的形式实现。

所述集成的单元如果以软件功能单元的形式实现并作为独立的产品销售或使用时，可以存储在一个非易失性取存储介质中。基于这样的理解，本申请的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分或者该技术方案的全部或部分可以以软件产品的形式体现出来，该计算机软件产品存储在一个存储介质中，包括至少一个指令用以使得一台计算机设备（可为个人计算机、服务器或者网络设备等）执行本申请各个实施例所述方法的全部或部分步骤。而前述的存储介质包括：U 盘、只读存储器、随机存取存储器、移动硬盘、磁碟或者光盘等各种可以存储程序代码的介质。

权 利 要 求 书

1. 一种电网系统的安全惯量确定方法，包括：

确定在电网系统出现扰动后频率变化率超过第一阈值的情况下保证所述电网系统安全运行的第一安全惯量；

确定在所述电网系统出现所述扰动后频率低于第二阈值的情况下保证所述电网系统安全运行的第二安全惯量；

根据所述第一安全惯量和所述第二安全惯量，确定目标安全惯量，其中，所述目标安全惯量为保证所述电网系统安全运行的安全惯量下限值。

2. 根据权利要求 1 所述的方法，其中，所述确定在电网系统出现扰动后频率变化率超过第一阈值的情况下保证所述电网系统安全运行的第一安全惯量，包括：

获取所述电网系统的额定频率；

确定所述电网系统的近扰动点的频率变化率；

确定由于频率变化引起的负荷功率的变化量；

根据所述额定频率、所述近扰动点的频率变化率和所述由于频率变化引起的负荷功率的变化量，确定所述第一安全惯量。

3. 根据权利要求 2 所述的方法，其中，所述确定所述电网系统的近扰动点的频率变化率，包括：

获取所述电网系统的惯量中心的频率变化率；

确定所述近扰动点的频率变化率与所述惯量中心的频率变化率的比例关系；

根据所述比例关系和所述惯量中心的频率变化率，确定所述近扰动点的频率变化率。

4. 根据权利要求 2 所述的方法，其中，所述确定由于频率变化引起的负荷功率的变化量，包括：

获取在所述扰动发生前所述电网系统中负荷的有功功率，以及负荷节点的电压；

根据所述负荷的有功功率和所述负荷节点的电压，确定第一功率变化量，其中，所述第一功率变化量为由于电压变化引起的负荷功率的变化量；

确定在所述扰动的影响下所述电网系统产生的超过第三阈值的功率变化量为第二功率变化量；

确定所述由于频率变化引起的负荷功率的变化量为所述第一功率变化量与所述第二功率变化量的差。

5. 根据权利要求 1 所述的方法，其中，所述确定在所述电网系统出现所述扰动后频率低于第二阈值的情况下保证所述电网系统安全运行的第二安全惯

量，包括：

获取所述电网系统的额定下限频率；

响应于所述电网系统出现所述扰动后频率为所述额定下限频率，确定保证所述电网系统安全运行的惯量为所述第二安全惯量。

6. 根据权利要求 5 所述的方法，其中，所述响应于所述电网系统出现所述扰动后频率为所述额定下限频率，确定保证所述电网系统安全运行的惯量为所述第二安全惯量，包括：

获取所述电网系统的额定频率、所述电网系统的阻尼系数、在所述扰动下所述电网系统的一次调频速率和一次调频动作时间；

响应于所述电网系统出现所述扰动后频率为所述额定下限频率，根据所述电网系统的额定频率、所述电网系统的阻尼系数、在所述扰动下所述电网系统的一次调频速率和一次调频动作时间，确定保证所述电网系统安全运行的惯量为所述第二安全惯量。

7. 根据权利要求 1 至 6 中任意一项所述的方法，其中，所述根据所述第一安全惯量和所述第二安全惯量，确定目标安全惯量，包括：

确定所述第一安全惯量和所述第二安全惯量中的最大值为所述目标安全惯量。

8. 一种电网系统的安全惯量确定装置，包括：

第一确定模块，设置为确定在电网系统出现扰动后频率变化率超过第一阈值的情况下保证所述电网系统安全运行的第一安全惯量；

第二确定模块，设置为确定在所述电网系统出现所述扰动后频率低于第二阈值的情况下保证所述电网系统安全运行的第二安全惯量；

第三确定模块，设置为根据所述第一安全惯量和所述第二安全惯量，确定目标安全惯量，其中，所述目标安全惯量为保证所述电网系统安全运行的安全惯量下限值。

9. 一种非易失性存储介质，所述非易失性存储介质包括存储的程序，其中，在所述程序运行时控制所述非易失性存储介质所在设备执行权利要求 1 至 7 中任意一项所述的电网系统的安全惯量确定方法。

10. 一种计算机设备，包括：存储器和处理器，

所述存储器存储有计算机程序；

所述处理器，用于执行所述存储器中存储的计算机程序，所述计算机程序运行时使得所述处理器执行权利要求 1 至 7 中任意一项所述的电网系统的安全惯量确定方法。

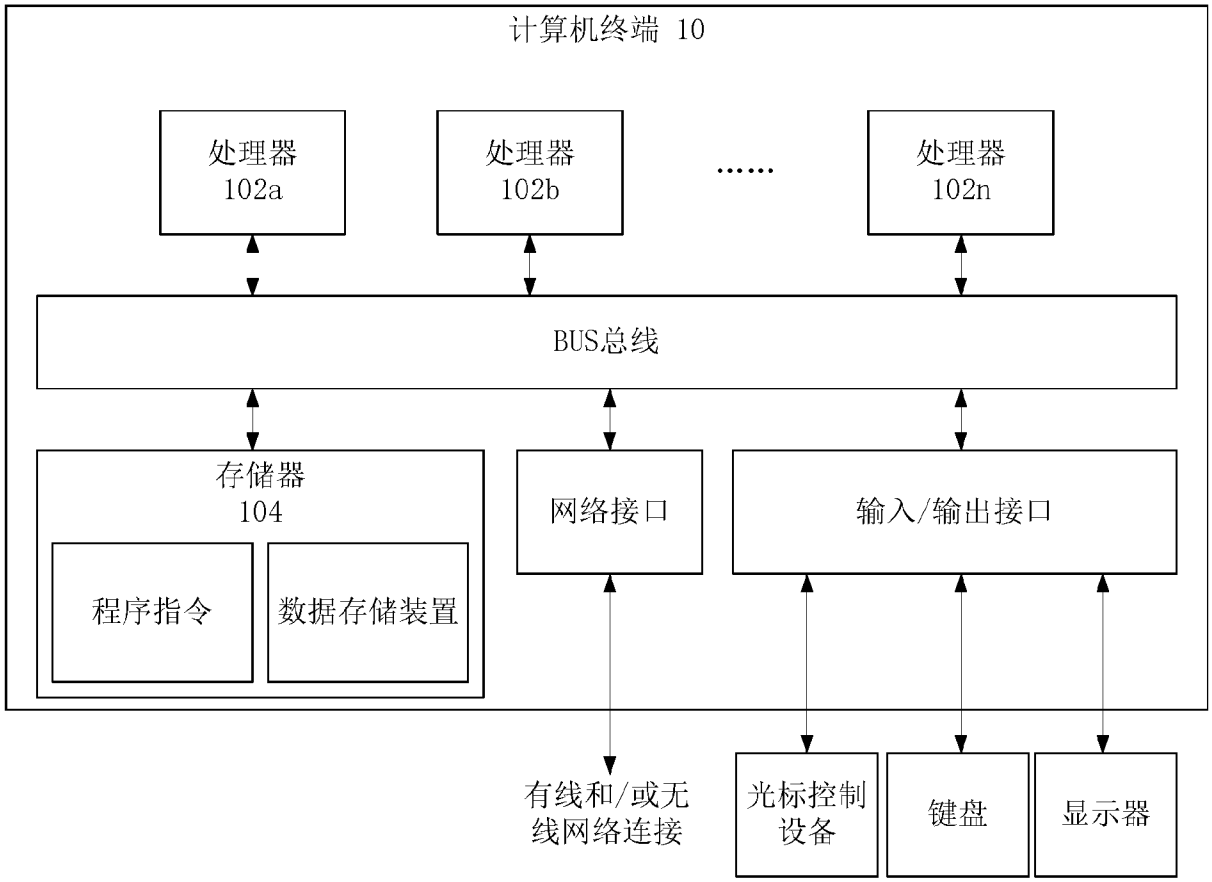

计算机终端 10
处理器
102a
处理器
102b
.....
处理器
102n
BUS总线
存储器
104
程序指令
数据存储装置
网络接口
输入/输出接口
有线和/或无
线网络连接
光标控制
设备
键盘
显示器

图 1

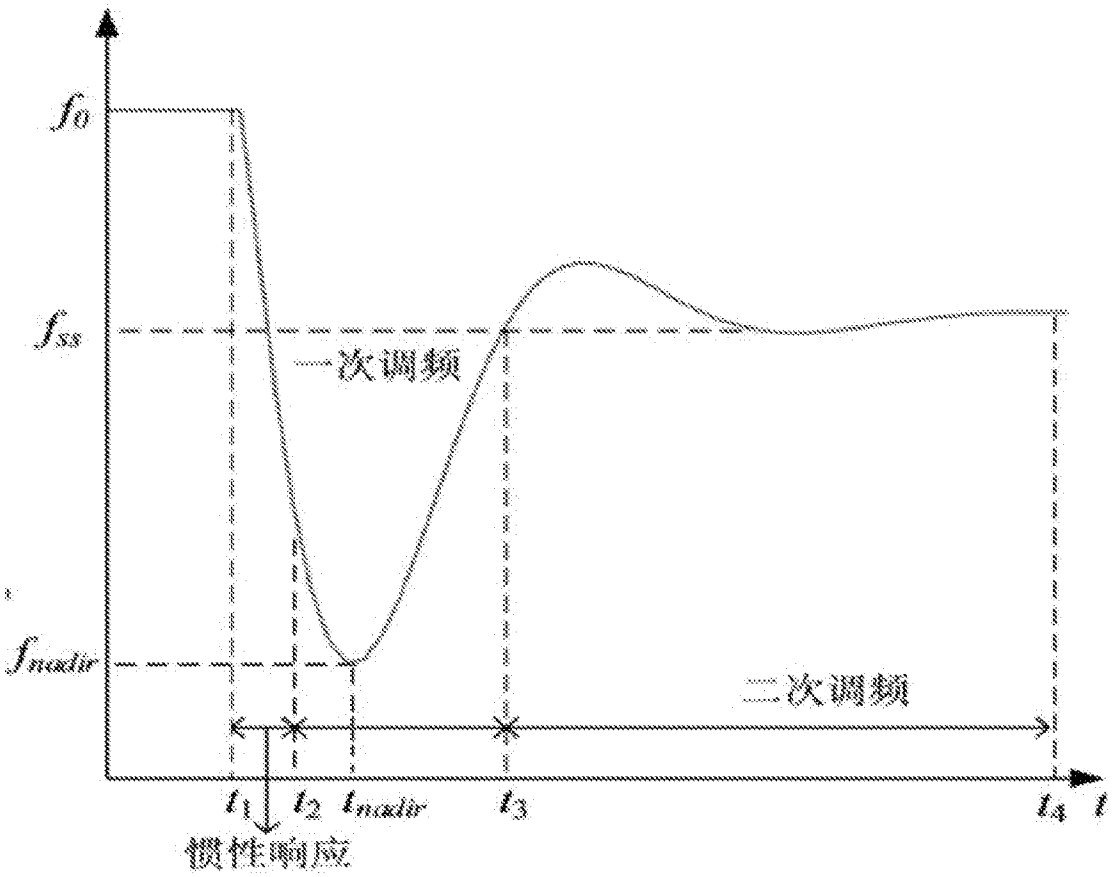

f_0
f_{ss}
f_{nadir}
一次调频
二次调频
t_1
t_2
t_{nadir}
t_3
t_4
t
惯性响应

图 2

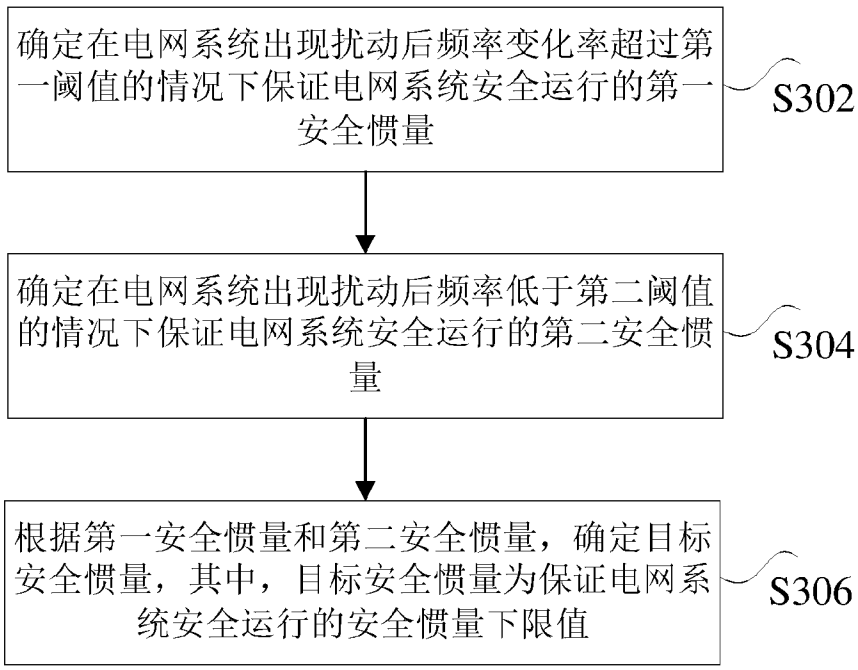

确定在电网系统出现扰动后频率变化率超过第一阈值的情况下保证电网系统安全运行的第一安全惯量
S302
确定在电网系统出现扰动后频率低于第二阈值的情况下保证电网系统安全运行的第二安全惯量
S304
根据第一安全惯量和第二安全惯量，确定目标安全惯量，其中，目标安全惯量为保证电网系统安全运行的安全惯量下限值
S306

图 3

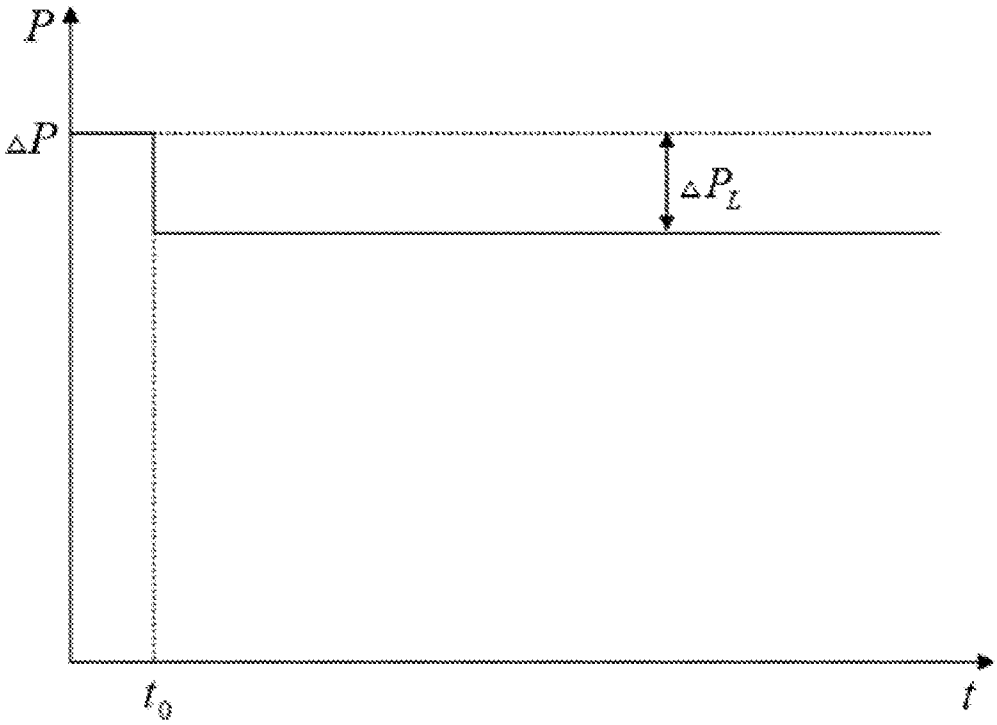


图 4

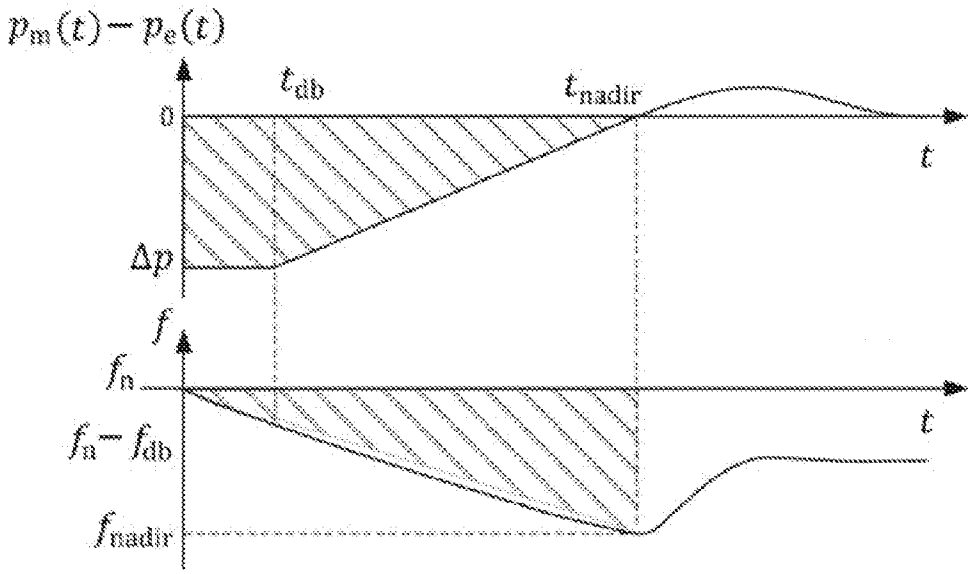


图 5

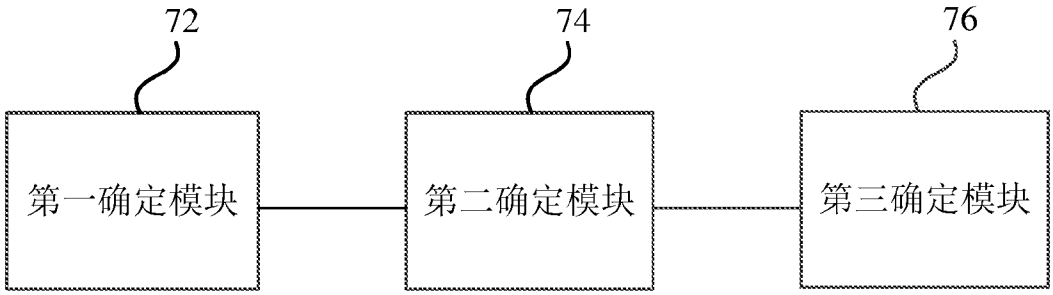


图 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2024/110141

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02J3/24(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)

IPC: H02J

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)

CNTXT; CNABS; ENTXT; ENTXTC; CJFD: 扰动, 惯量, 电网, 频率, 变换率, 偏差, 下限, 阈值, power grid, frequency, change rate, threshold value, inertia, disturb+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 116760067 A (STATE GRID BEIJING ELECTRIC POWER COMPANY et al.) 15 September 2023 (2023-09-15) claims 1-10	1-10
X	CN 115940148 A (STATE GRID HEBEI ELECTRIC POWER SUPPLY CO., LTD. ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE et al.) 07 April 2023 (2023-04-07) description, paragraphs 45-151, and figures 1-5	1-10
X	CN 115169912 A (HUNAN UNIVERSITY) 11 October 2022 (2022-10-11) description, paragraphs 60-130, and figures 1-9	1-10
A	CN 116307477 A (STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. WUXI POWER SUPPLY COMPANY) 23 June 2023 (2023-06-23) entire document	1-10
A	US 2021164442 A1 (UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA) 03 June 2021 (2021-06-03) entire document	1-10

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

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

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
12 November 2024	**15 November 2024**

Name and mailing address of the ISA/CN	Authorized officer
China National Intellectual Property Administration (ISA/CN) **China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing 100088**	Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2024/110141

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN 116760067 A	15 September 2023	None	
CN 115940148 A	07 April 2023	None	
CN 115169912 A	11 October 2022	None	
CN 116307477 A	23 June 2023	None	
US 2021164442 A1	03 June 2021	IT 201800007930 A1	07 February 2020
		WO 2020031085 A1	13 February 2020
		US 11441539 B2	13 September 2022
		EP 3833867 A1	16 June 2021

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2024/110141

A. 主题的分类

H02J3/24(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)

IPC: H02J

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）)

CNTXT；CNABS；ENTXT；ENTXTC；CJFD：扰动，惯量，电网，频率，变换率，偏差，下限，阈值，power grid, frequency, change rate, threshold value, inertia, disturb+

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 116760067 A (国网北京市电力公司 等) 2023年9月15日 (2023 - 09 - 15) 权利要求1−10	1−10
X	CN 115940148 A (国网河北省电力有限公司电力科学研究院 等) 2023年4月7日 (2023 - 04 - 07) 说明书第45−151段，图1−5	1−10
X	CN 115169912 A (湖南大学) 2022年10月11日 (2022 - 10 - 11) 说明书第60−130段，图1−9	1−10
A	CN 116307477 A (国网江苏省电力有限公司无锡供电分公司) 2023年6月23日 (2023 - 06 - 23) 全文	1−10
A	US 2021164442 A1 (UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA) 2021年6月3日 (2021 - 06 - 03) 全文	1−10

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。

☑ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型：

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“D” 申请人在国际申请中引证的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

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

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

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

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

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

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期
2024年11月12日	2024年11月15日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088	受权官员 韩静静 电话号码 (+86) 010−53961247

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2024/110141

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	116760067	A	2023年9月15日	无			
CN	115940148	A	2023年4月7日	无			
CN	115169912	A	2022年10月11日	无			
CN	116307477	A	2023年6月23日	无			
US	2021164442	A1	2021年6月3日	IT	201800007930	A1	2020年2月7日
				WO	2020031085	A1	2020年2月13日
				US	11441539	B2	2022年9月13日
				EP	3833867	A1	2021年6月16日