

(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
2021 年 9 月 23 日 (23.09.2021)



(10) 国际公布号
WO 2021/184778 A1

(51) 国际专利分类号:
G06Q 50/06 (2012.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2020/127854

(22) 国际申请日: 2020 年 11 月 10 日 (10.11.2020)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202010188141.6 2020年3月17日 (17.03.2020) CN

(71) 申请人: 清华大学 (TSINGHUA UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国北京市海淀区清华园,
Beijing 100084 (CN)。

(72) 发明人: 雍培 (YONG, Pei); 中国北京市海淀区清华园,
Beijing 100084 (CN)。 张宁 (ZHANG, Ning);

中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。
杜尔顺 (DU, Ershun); 中国北京市海淀区清华园,
Beijing 100084 (CN)。 王毅 (WANG, Yi); 中国北京市海淀区清华园,
Beijing 100084 (CN)。
康重庆 (KANG, Chongqing); 中国北京市海淀区清华园,
Beijing 100084 (CN)。

(74) 代理人: 北京清亦华知识产权代理事务所 (普通合伙) (TSINGYIHUA INTELLECTUAL PROPERTY LLC); 中国北京市海淀区北洼路45号1号楼2层201, Beijing 100142 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT,

(54) Title: COMPREHENSIVE ENERGY SYSTEM PLANNING METHOD BASED ON SAFETY REGION IDENTIFICATION

(54) 发明名称: 一种基于安全域辨识的综合能源系统规划方法

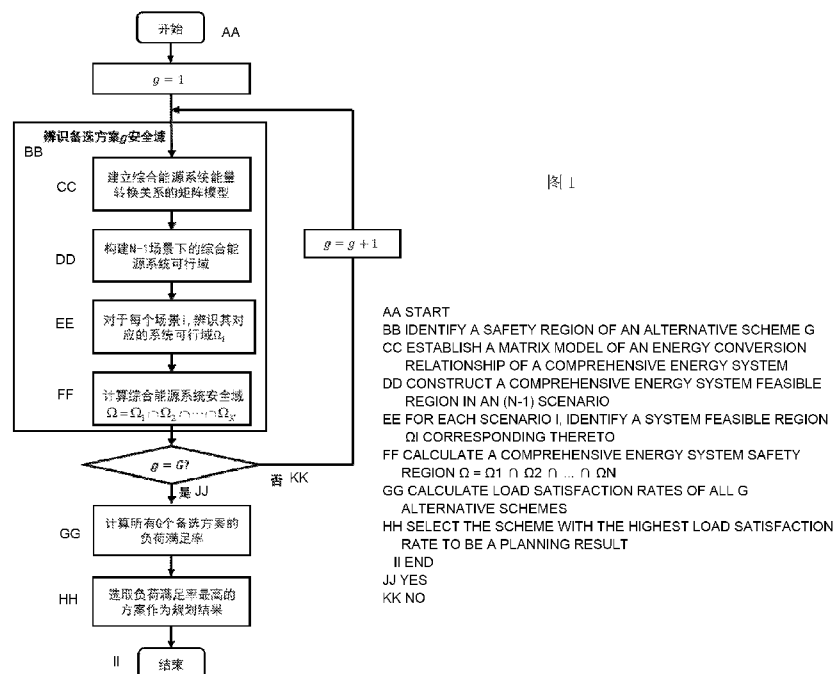


图 1

AA START
BB IDENTIFY A SAFETY REGION OF AN ALTERNATIVE SCHEME G
CC ESTABLISH A MATRIX MODEL OF AN ENERGY CONVERSION
RELATIONSHIP OF A COMPREHENSIVE ENERGY SYSTEM
DD CONSTRUCT A COMPREHENSIVE ENERGY SYSTEM FEASIBLE
REGION IN AN (N-1) SCENARIO
EE FOR EACH SCENARIO I, IDENTIFY A SYSTEM FEASIBLE REGION
Ω_I CORRESPONDING THERETO
FF CALCULATE A COMPREHENSIVE ENERGY SYSTEM SAFETY
REGION Ω = Ω₁ ∪ Ω₂ ∪ ... ∪ Ω_N
GG CALCULATE LOAD SATISFACTION RATES OF ALL G
ALTERNATIVE SCHEMES
HH SELECT THE SCHEME WITH THE HIGHEST LOAD SATISFACTION
RATE TO BE A PLANNING RESULT
II END
JJ YES
KK NO

(57) Abstract: The present application relates to a comprehensive energy system planning method based on safety region identification, which belongs to the technical field of comprehensive energy system planning. The method comprises: firstly establishing a matrix model of an energy conversion relationship of a comprehensive energy system, and describing the comprehensive energy system in a unified and standardized manner; calculating and obtaining a comprehensive energy system safety region taking multi-energy coupling into consideration on the basis of the matrix model; and analyzing the on-load capacities of comprehensive energy system planning

JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, 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, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

schemes on the basis of the safety region, and then selecting the scheme with the optimal on-load capacity. By means of the present application, the unified modeling of a comprehensive energy system safety region can be realized; a standardized method is used to identify the comprehensive energy system safety region, which has a fast calculation efficiency and a high identification precision, and can obtain an analytical identification result; and by means of applying the safety region obtained by means of identification, a comprehensive energy system planning result with the optimal on-load capacity can be obtained.

(57) 摘要: 本申请涉及一种基于安全域辨识的综合能源系统规划方法, 属于综合能源系统规划技术领域。该方法首先建立综合能源系统能量转换关系的矩阵模型, 对于综合能源系统进行统一化、规范化的描述; 基于矩阵模型, 计算得到考虑多能耦合的综合能源系统安全域; 基于安全域, 分析综合能源系统规划方案的带负荷能力, 选取带负荷能力最优的方案。本申请能够实现综合能源系统安全域的统一化建模, 采用标准化的方法辨识综合能源系统安全域, 计算效率高、辨识精度高, 能够得到解析化的辨识结果, 应用辨识得到的安全域, 可以获得最优带负荷能力的综合能源系统规划结果。

一种基于安全域辨识的综合能源系统规划方法

相关申请的交叉引用

本申请要求清华大学于 2020 年 3 月 17 日提交的、发明名称为“一种基于安全域辨识的综合能源系统规划方法”的、中国专利申请号“CN202010188141.6”的优先权。

技术领域

本申请涉及一种基于安全域辨识的综合能源系统规划方法，属于综合能源系统规划技术领域。

背景技术

综合能源系统是一种将多种能源形式集成为一体的能源系统，它集成了多种化石能源、可再生能源和生物质能等多种能量形式，通过综合考虑能源的生产、转化、传输、储存和应用等能量利用周期的各个环节，同时满足了冷、热、电等多种能源的需求。由于综合能源系统能够考虑到各种能源之间的耦合和互补，相比于各种能源形式的独立运行，能够有效地提高能源利用效率，降低碳排放，减小能源利用成本，是未来能源系统发展的重要方向。

在综合能源系统中，多种能源形式的协调互补提升了能源的利用效率，并有力地促进了可再生能源的消纳。由于综合能源系统中不同能源系统之间并不独立，各个能源系统约束强耦合，使得每个能源系统无法进行单独的安全域分析。然而在规划层面，需要通过安全域分析来评估综合能源系统规划方案的带负荷能力，从而确定最优的综合能源系统规划方案。因此，需要一种能够考虑安全域的综合能源系统规划方法。然而，当前应用技术存在如下的一些问题：

1) 对于传统电力系统，成熟的电力系统安全域分析方法无法直接推广到综合能源系统的安全域分析中。

2) 现有综合能源系统安全域分析方法均为针对某一特定综合能源系统，不具备普适性和可移植性。由于缺乏对于综合能源系统安全域的统一化建模，导致了现有方法只能针对给定的综合能源系统具体问题具体分析。

3) 现有综合能源系统安全域分析方法无法得到显式地、解析化的安全域表达。在综合能源系统的规划层面，均需要显示地、解析化的安全域表达形式，嵌入到相应的应用运行场景中。

4) 在综合能源系统规划流程中，由于无法得到统一的、解析化的安全域分析结果，因

此在规划阶段难以考虑安全域分析，规划结果的带负荷能力没有保证，导致规划结果在某些运行场景下存在缺陷。

目前尚没有方法能够解决上述问题，建立基于安全域辨识的综合能源系统规划方法。

5 发明内容

本申请的目的是提出一种基于安全域辨识的综合能源系统规划方法，用于对不同综合能源系统的安全域进行统一化、规范化的建模，并显式地、解析化地得到综合能源系统安全的辨识结果，应用于综合能源系统规划，能够获得最优带负荷能力的综合能源系统规划结果。

10 本申请提出的基于安全域辨识的综合能源系统规划方法，包括以下步骤：

(1) 建立描述综合能源系统中能量转换关系的矩阵模型：

设定综合能源系统中共有 N 个能量转换元件，并将能量转换元件记为节点，每个能量转换元件有 K_i 个端口，下标 i 为元件编号，设定综合能源系统中共有 M 个能量传输通道，将能量传输通道记为支路，用下标 b 表示支路编号；

15 (1-1) 建立第 i 个能量转换元件的能量转换关系矩阵，过程如下：

建立能量转换元件 i 的“端口-支路”能量传输关系矩阵 $A_i(k, b)$ ：

$$A_i(k, b) = \begin{cases} 1 & \text{元件 } i \text{ 的输入端口 } k \text{ 连接支路 } b \\ -1 & \text{元件 } i \text{ 的输出端口 } k \text{ 连接支路 } b \\ 0 & \text{元件 } i \text{ 的端口 } k \text{ 与支路 } b \text{ 不相连} \end{cases}$$

其中， A_i 的维度为 $K_i \times M$ ；

20 设定第 i 个能量转换元件的不同端口之间的能量转换关系有 L_i 条，得到第 i 个能量转换元件的端口能量转换关系矩阵 H_i ， H_i 的维度为 $L_i \times K_i$ ，端口能量转换关系矩阵 H_i 中的每一行描述该能量转换元件的一条能量转换关系；

根据上述“端口-支路”能量传输关系矩阵 $A_i(k, b)$ 和端口能量转换关系矩阵 H_i ，得到该能量转换元件的能量转换关系矩阵 Z_i ：

$$Z_i = H_i \times A_i$$

25 (1-2) 遍历综合能源系统中的 N 个能量转换元件，重复步骤 (1-1)，得到综合能源系统中的所有 N 个能量转换元件的能量转换关系矩阵；

(1-3) 建立综合能源系统内部能量转换关系矩阵：

联立每一个元件的能量转换关系矩阵，得到综合能源系统内部能量转换关系矩阵 Z ：

$$Z = [Z_1^T, Z_2^T, \dots, Z_N^T]^T$$

其中，上标 T 为矩阵转置运算；

5 (1-4) 建立综合能源系统输入输出关系矩阵：

设定综合能源系统有 P 个能源输入端口和 Q 个负荷输出端口，得到综合能源系统的输入关系矩阵 $C_{in}(p, b)$ ， $C_{in}(p, b)$ 的维度为 $P \times M$ ，综合能源系统的输出关系矩阵 $C_{out}(q, b)$ ， $C_{out}(q, b)$ 的维度为 $Q \times M$ ，矩阵中每个元素的值通过如下准则确定：

$$C_{in}(p, b) = \begin{cases} 1 & \text{若输入端口 } p \text{ 连接支路 } b \text{ 的源端} \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases}$$

$$C_{out}(q, b) = \begin{cases} 1 & \text{若输出端口 } q \text{ 连接支路 } b \text{ 的源端} \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases}$$

10

其中，端口 p 为 P 个能源输入端口中的任意一个，端口 q 为 Q 个负荷输出端口中的任意一个；

(1-5) 运用 (1-3) 和 (1-4) 计算得到的矩阵，获得综合能源系统的能量转换关系矩阵模型：

15

$$ZV = 0$$

$$C_{in}V = V_{in}$$

$$C_{out}V = V_{out}$$

其中， V 是由综合能源系统中支路上的能量流，维度为 $M \times 1$ ，是综合能源系统的状态变量； V_{in} 和 V_{out} 分别是综合能源系统的输入和输出能量流，维度为 $P \times 1$ 和 $Q \times 1$ ；

20

(2) 构建 N-1 运行场景下的综合能源系统可行域，包括以下步骤：

(2-1) 将第 i 个能量转换元件退出运行时的综合能源系统运行场景记为第 i 个 N-1 运行场景，建立 N 个与 N-1 运行场景相对应的支路可行约束集 $\Phi_i (i=1, 2, \dots, N)$ ，包括以下步骤：

对于第 i 个 N-1 运行场景，相应的支路可行约束集 Φ_i 建立方法如下：

(2-1-1) 将支路可行约束集 Φ_i 置为空集；

(2-1-2) 设与第 i 个能量转换元件的 K_i 个端口相连的支路集合为 E_{k_i} , 分别对所有 E_{k_i} 的

K_i 个端口, 建立等式 $\sum_{b \in E_{k_i}} V_b = 0$, 并将所有等式添加到支路可行约束集 Φ_i 中, 其中 V_b 为综合能源系统中支路 b 上的能量流;

(2-1-3) 设与第 j 个能量转换元件的 k_j 个端口相连的支路集合为 E_{k_j} , $j \neq i$, 分别对 E_{k_j}

5 中的所有端口 k_j , 建立不等式 $\sum_{b \in E_{k_j}} V_b \leq V_{k_j}^{\max}$, 并将所有不等式添加到步骤 (2-1-2) 的支路可行约束集 Φ_i 中, 其中 $V_{k_j}^{\max}$ 为综合能源系统中端口 E_{k_j} 能量流的最大容量, 遍历所有 $j \neq i$ 的能量转换元件, 重复本步骤, 得到与第 i 个能量转换元件的 N-1 运行场景相对应的支路可行约束集 Φ_i ;

(2-1-4) 遍历综合能源系统中的 N 个能量转换元件, 重复步骤 (2-1-1) - 步骤 (2-1-3),

10 得到 N 个综合能源系统的 N-1 运行场景相对应的支路可行约束集 $\Phi_i (i=1,2,\dots,N)$;

(2-2) 建立与每个 N-1 运行场景相对应的综合能源系统可行域, 其中第 i 个能量转换元件的 N-1 运行场景下的综合能源系统可行域的表达式为:

$$\Omega_i = \{V_{\text{out}} \mid C_{\text{out}} V = V_{\text{out}}, ZV = 0, V \in \Phi_i\}$$

其中, Ω_i 为第 i 个 N-1 运行场景下的综合能源系统可行域, Φ_i 为步骤 (2-1) 中建立的

15 该运行场景下的支路可行约束集, V 是 (1) 中定义的综合能源系统中支路上的能量流, V_{out} 是 (1) 中定义的综合能源系统的输出能量流, Z 是步骤 (1) 中定义的综合能源系统能量转换关系矩阵, C_{out} 是步骤 (1) 中定义的综合能源系统输出关系矩阵;

(2-3) 将综合能源系统 Q 个输出端口的输出能量所张成的空间定义为输出能量流空间, 输出能量流空间的维度为 Q, 每一个 N-1 运行场景下的综合能源系统可行域 Ω_i 为输出
20 能量流空间中的一个凸多面体, 用求解凸多面体顶点的方法, 分别对步骤 (2-2) 的 N 个 N-1 运行场景下的综合能源系统可行域 Ω_i 进行辨识, 包括如下步骤:

(2-3-1) 设 e_q 为输出能量流空间中第 q 坐标的单位方向向量, 求解下述线性优化问题, 得到最优解 X_q^* , X_q^* 即为第 q 坐标轴上的可行域顶点:

$$\begin{aligned}
& \max e_q^T X_q \\
& s.t. X_q = C_{out} V \\
& ZV = 0 \\
& V \in \Phi_i
\end{aligned}$$

遍历 Q 个坐标轴，得到 Q 个可行域顶点，该 Q 个顶点构成的集合 $Vert'$ 组成已知可行域 Ω_i' ；

(2-3-2) 记已知可行域 Ω_i' 的表面数量为 R ，设 d_r 为 Ω_i' 中第 r 个表面的单位法向向量，

5 求解如下线性优化问题，得到最优解 X_r^* ：

$$\begin{aligned}
& \max d_r^T X_r \\
& s.t. X_r = C_{out} V \\
& ZV = 0 \\
& V \in \Phi_i
\end{aligned}$$

其中上标 T 为矩阵转置运算；

(2-3-3) 对步骤 (2-3-2) 的最优解 X_r^* 进行判断，若最优解 X_r^* 不属于步骤 (2-3-1) 的集合 $Vert'$ ，则将 X_r^* 添加至 $Vert'$ 中，并更新 $Vert'$ ，若最优解 X_r^* 属于 $Vert'$ ，则保持 $Vert'$ 不变；

10 (2-3-4) 遍历已知可行域 Ω_i' 的 R 个表面，重复步骤 (2-3-2) 和步骤 (2-3-3)，完成 R 次计算；

(2-3-5) 对步骤 (2-3-4) 中的计算进行判断，若在 R 次计算中， $Vert'$ 均没有被更新过，则使 $\Omega_i' = \Omega_i$ ，进入 (2-3-6)，若在 R 次计算中， $Vert'$ 被更新过，则用步骤 (2-3-3) 的最后更新得到的 $Vert'$ 组成已知可行域 Ω_i' ，并返回至步骤 (2-3-2)；

15 (2-3-6) 遍历综合能源系统中的 N 个能量转换元件，重复步骤 (2-3-1) - 步骤 (2-3-6)，辨识得到综合能源系统可行域 Ω_i ， $i=1,2,\dots,N$ ；

(2-4) 利用下式，对 (2-3) 获得的 N 个综合能源系统 $N-1$ 运行场景下的可行域取交集，得到综合能源系统安全域 Ω ：

$$\Omega = \Omega_1 \cap \Omega_2 \cap \dots \cap \Omega_N$$

20 (3) 选择最优综合能源规划方案，过程如下：

(3-1) 设定综合能源系统备选规划方案有 G 个，遍历 G 个综合能源系统备选规划方案中的每一个综合能源系统备选规划方案，重复步骤 (1) 和步骤 (2)，分别得到相应备选

规划方案的安全域，将第 g 个综合能源系统备选规划方案的安全域记为 Ω^g ；

(3-2) 设定待规划综合能源系统在规划期内的负荷需求状态共有 Δ 种，从综合能源系统规划部门获取每一种负荷需求状态的负荷需求向量 V_δ^{need} ， V_δ^{need} 的维度为 $Q \times 1$ ， V_δ^{need} 的每一个分量代表一个输出端口的负荷需求量，同时从综合能源系统规划部门获取每一种负荷需求状态的出现概率 Pro_δ ($\delta=1,2,\dots,\Delta$)，利用下式，计算第 g 个综合能源系统备选规划方案相对每一个负荷需求向量 V_δ^{need} 的适应度 $Y_{\delta,g}$ ，计算方法如下：

$$Y_{\delta,g} = \begin{cases} 1 & V_\delta^{need} \in \Omega^g \\ 0 & V_\delta^{need} \notin \Omega^g \end{cases}$$

根据 $Y_{\delta,g}$ ，计算第 g 个综合能源系统备选规划方案的负荷满足率 Fit_g ：

$$Fit_g = \sum_{\delta=1}^{\Delta} Pro_\delta \times Y_{\delta,g}$$

(3-3) 遍历 G 个综合能源系统备选规划方案，重复步骤 (3-2)，得到所有 G 个负荷满足率，选择与 G 个负荷满足率中最高负荷满足率相对应的综合能源系统备选规划方案，作为待综合能源系统的规划结果，实现基于安全域辨识的综合能源系统规划。

本申请提出的基于安全域辨识的综合能源系统规划方法，其优点是：

本申请的基于安全域辨识的综合能源系统规划方法，能够对不同的综合能源系统的安全域进行统一化、规范化的建模，建立的优化模型为线性模型，安全域是解析化的，并显式地、解析化地得到综合能源系统安全的辨识结果，应用于综合能源系统规划中，在综合能源系统的规划阶段考虑了安全域，将系统带负荷能力纳入了考虑，因此能够得到最优带负荷能力的规划结果。综上所述，本申请规划方法能够实现综合能源系统安全域的统一化建模，采用标准化的方法辨识综合能源系统安全域，计算效率高、辨识精度高，能够得到解析化的辨识结果，应用辨识得到的安全域，可以获得最优带负荷能力的综合能源系统规划结果。本申请的基于安全域辨识的综合能源系统规划方法，可以有效提高综合能源系统供给负荷时的可靠性，增加综合能源系统充裕度，减少切负荷事件的出现概率。

附图说明

图 1 为本申请的基于安全域辨识的综合能源系统规划方法的流程框图。

具体实施方式

本申请提出的基于安全域辨识的综合能源系统规划方法，其流程框图如图 1 所示，该方法包括以下步骤：

(1) 建立描述综合能源系统中能量转换关系的矩阵模型：

5 设定综合能源系统中共有 N 个能量转换元件，并将能量转换元件记为节点，每个能量转换元件有 K_i 个端口，下标 i 为元件编号，设定综合能源系统中共有 M 个能量传输通道，将能量传输通道记为支路，用下标 b 表示支路编号；

(1-1) 建立第 i 个能量转换元件的能量转换关系矩阵，过程如下：

建立能量转换元件 i 的“端口-支路”能量传输关系矩阵 $A_i(k, b)$ ：

$$10 \quad A_i(k, b) = \begin{cases} 1 & \text{元件 } i \text{ 的输入端口 } k \text{ 连接支路 } b \\ -1 & \text{元件 } i \text{ 的输出端口 } k \text{ 连接支路 } b \\ 0 & \text{元件 } i \text{ 的端口 } k \text{ 与支路 } b \text{ 不相连} \end{cases}$$

其中， A_i 的维度为 $K_i \times M$ ；

设定第 i 个能量转换元件的不同端口之间的能量转换关系有 L_i 条，得到第 i 个能量转换元件的端口能量转换关系矩阵 H_i ， H_i 的维度为 $L_i \times K_i$ ，端口能量转换关系矩阵 H_i 中的每一行描述该能量转换元件的一条能量转换关系；

15 根据上述“端口-支路”能量传输关系矩阵 $A_i(k, b)$ 和端口能量转换关系矩阵 H_i ，得到该能量转换元件的能量转换关系矩阵 Z_i ：

$$Z_i = H_i \times A_i$$

(1-2) 遍历综合能源系统中的 N 个能量转换元件，重复步骤 (1-1)，得到综合能源系统中的所有 N 个能量转换元件的能量转换关系矩阵；

20 (1-3) 建立综合能源系统内部能量转换关系矩阵：

联立每一个元件的能量转换关系矩阵，得到综合能源系统内部能量转换关系矩阵 Z ：

$$Z = [Z_1^T, Z_2^T, \dots, Z_N^T]^T$$

其中，上标 T 为矩阵转置运算；

25 (1-4) 建立综合能源系统输入输出关系矩阵：

设定综合能源系统有 P 个能源输入端口和 Q 个负荷输出端口，得到综合能源系统的输

入关系矩阵 $C_{in}(p,b)$ ， $C_{in}(p,b)$ 的维度为 $P \times M$ ，综合能源系统的输出关系矩阵 $C_{out}(q,b)$ ， $C_{out}(q,b)$ 的维度为 $Q \times M$ ，矩阵中每个元素的值通过如下准则确定：

$$C_{in}(p,b) = \begin{cases} 1 & \text{若输入端口 } p \text{ 连接支路 } b \text{ 的源端} \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases}$$

$$C_{out}(q,b) = \begin{cases} 1 & \text{若输出端口 } q \text{ 连接支路 } b \text{ 的源端} \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases}$$

5 其中，端口 p 为 P 个能源输入端口中的任意一个，端口 q 为 Q 个负荷输出端口中的任意一个；

(1-5) 运用 (1-3) 和 (1-4) 计算得到的矩阵，获得综合能源系统的能量转换关系矩阵模型：

$$ZV = 0$$

$$10 \quad C_{in}V = V_{in}$$

$$C_{out}V = V_{out}$$

其中， V 是由综合能源系统中支路上的能量流，维度为 $M \times 1$ ，是综合能源系统的状态变量； V_{in} 和 V_{out} 分别是综合能源系统的输入和输出能量流，维度为 $P \times 1$ 和 $Q \times 1$ ；

(2) 构建 $N-1$ 运行场景下的综合能源系统可行域，包括以下步骤：

15 (2-1) 将第 i 个能量转换元件退出运行时的综合能源系统运行场景记为第 i 个 $N-1$ 运行场景，建立 N 个与 $N-1$ 运行场景相对应的支路可行约束集 Φ_i ($i=1,2,...,N$)，包括以下步骤：

对于第 i 个 $N-1$ 运行场景，相应的支路可行约束集 Φ_i 建立方法如下：

(2-1-1) 将支路可行约束集 Φ_i 置为空集；

20 (2-1-2) 设与第 i 个能量转换元件的 K_i 个端口相连的支路集合为 E_{k_i} ，分别对所有 E_{k_i} 的 K_i 个端口，建立等式 $\sum_{b \in E_{k_i}} V_b = 0$ ，并将所有等式添加到支路可行约束集 Φ_i 中，其中 V_b 为综合能源系统中支路 b 上的能量流；

(2-1-3) 设与第 j 个能量转换元件的 k_j 个端口相连的支路集合为 E_{k_j} ， $j \neq i$ ，分别对 E_{k_j} 中的所有端口 k_j ，建立不等式 $\sum_{b \in E_{k_j}} V_b \leq V_{k_j}^{\max}$ ，并将所有不等式添加到步骤 (2-1-2) 的支路

可行约束集 Φ_i 中, 其中 $V_{k_j}^{\max}$ 为综合能源系统中端口 E_{k_j} 能量流的最大容量, 遍历所有 $j \neq i$ 的能量转换元件, 重复本步骤, 得到与第 i 个能量转换元件的 N-1 运行场景相对应的支路可行约束集 Φ_i ;

(2-1-4) 遍历综合能源系统中的 N 个能量转换元件, 重复步骤 (2-1-1)–步骤 (2-1-3),
5 得到 N 个综合能源系统的 N-1 运行场景相对应的支路可行约束集 Φ_i ($i=1,2,\dots,N$);

(2-2) 建立与每个 N-1 运行场景相对应的综合能源系统可行域, 其中第 i 个能量转换元件的 N-1 运行场景下的综合能源系统可行域的表达式为:

$$\Omega_i = \{V_{\text{out}} \mid C_{\text{out}}V = V_{\text{out}}, ZV = 0, V \in \Phi_i\}$$

其中, Ω_i 为第 i 个 N-1 运行场景下的综合能源系统可行域, Φ_i 为步骤 (2-1) 中建立的
10 该运行场景下的支路可行约束集, V 是 (1) 中定义的综合能源系统中支路上的能量流, V_{out} 是 (1) 中定义的综合能源系统的输出能量流, Z 是步骤 (1) 中定义的综合能源系统能量转换关系矩阵, C_{out} 是步骤 (1) 中定义的综合能源系统输出关系矩阵;

(2-3) 将综合能源系统 Q 个输出端口的输出能量所张成的空间定义为输出能量流空间, 输出能量流空间的维度为 Q, 每一个 N-1 运行场景下的综合能源系统可行域 Ω_i 为输出
15 能量流空间中的一个凸多面体, 用求解凸多面体顶点的方法, 分别对步骤 (2-2) 的 N 个 N-1 运行场景下的综合能源系统可行域 Ω_i 进行辨识, 包括如下步骤:

(2-3-1) 在输出能量流空间中建立 Q 维直角坐标, 原点为 0, 首先辨识 Ω_i 在输出能量流空间中坐标轴上的可行域顶点, 并构建已知可行域 Ω_i' , 设 e_q 为输出能量流空间中第 q 坐标的单位方向向量, 求解下述线性优化问题, 得到最优解 X_q^* , X_q^* 即为第 q 坐标轴上的可行
20 域顶点:

$$\begin{aligned} \max & e_q^T X_q \\ \text{s.t.} & X_q = C_{\text{out}}V \\ & ZV = 0 \\ & V \in \Phi_i \end{aligned}$$

遍历 Q 个坐标轴, 得到 Q 个可行域顶点, 该 Q 个顶点构成的集合 Vert' 组成已知可行域 Ω_i' ;

(2-3-2) 记已知可行域 Ω_i' 的表面数量为 R, 设 d_r 为 Ω_i' 中第 r 个表面的单位法向向量,
25 求解如下线性优化问题, 得到最优解 X_r^* :

$$\begin{aligned}
& \max d_r^T X_r \\
& s.t. X_r = C_{out} V \\
& ZV = 0 \\
& V \in \Phi_i
\end{aligned}$$

其中上标 T 为矩阵转置运算；

(2-3-3) 对步骤 (2-3-2) 的最优解 X_r^* 进行判断，若最优解 X_r^* 不属于步骤 (2-3-1) 的集合 $Vert'$ ，则将 X_r^* 添加至 $Vert'$ 中，并更新 $Vert'$ ，若最优解 X_r^* 属于 $Vert'$ ，则保持 $Vert'$ 不变；

(2-3-4) 遍历已知可行域 Ω_i' 的 R 个表面，重复步骤 (2-3-2) 和步骤 (2-3-3)，完成 R 次计算；

(2-3-5) 对步骤 (2-3-4) 中的计算进行判断，若在 R 次计算中， $Vert'$ 均没有被更新过，则使 $\Omega_i' = \Omega_i$ ，进入 (2-3-6)，若在 R 次计算中， $Vert'$ 被更新过，则用步骤 (2-3-3) 的最后更新得到的 $Vert'$ 组成已知可行域 Ω_i' ，并返回至步骤 (2-3-2)；

(2-3-6) 遍历综合能源系统中的 N 个能量转换元件，重复步骤 (2-3-1)–步骤 (2-3-6)，辨识得到综合能源系统可行域 Ω_i ， $i=1,2,\dots,N$ ；

(2-4) 利用下式，对 (2-3) 获得的 N 个综合能源系统 N-1 运行场景下的可行域取交集，得到综合能源系统安全域 Ω ：

$$\Omega = \Omega_1 \cap \Omega_2 \cap \dots \cap \Omega_N$$

(3) 选择最优综合能源规划方案，过程如下：

(3-1) 设定综合能源系统备选规划方案有 G 个，遍历 G 个综合能源系统备选规划方案中的每一个综合能源系统备选规划方案，重复步骤 (1) 和步骤 (2)，分别得到相应备选规划方案的安全域，将第 g 个综合能源系统备选规划方案的安全域记为 Ω^g ；

(3-2) 设定待规划综合能源系统在规划期内的负荷需求状态共有 Δ 种，从综合能源系统规划部门获取每一种负荷需求状态的负荷需求向量 V_δ^{need} ， V_δ^{need} 的维度为 $Q \times 1$ ， V_δ^{need} 的每一个分量代表一个输出端口的负荷需求量，同时从综合能源系统规划部门获取每一种负荷需求状态的出现概率 Pro_δ ($\delta=1, 2, \dots, \Delta$)，利用下式，计算第 g 个综合能源系统备选规划方案相对每一个负荷需求向量 V_δ^{need} 的适应度 $Y_{\delta,g}$ ，计算方法如下：

$$Y_{\delta,g} = \begin{cases} 1 & V_\delta^{need} \in \Omega^g \\ 0 & V_\delta^{need} \notin \Omega^g \end{cases}$$

根据 $Y_{\delta,g}$ ，计算第 g 个综合能源系统备选规划方案的负荷满足率 Fit_g ：

$$Fit_g = \sum_{\delta=1}^{\Delta} Pro_{\delta} \times Y_{\delta,g}$$

(3-3) 遍历 G 个综合能源系统备选规划方案，重复步骤 (3-2)，得到所有 G 个负荷满足率，选择与 G 个负荷满足率中最高负荷满足率相对应的综合能源系统备选规划方案，作

5 为待综合能源系统的规划结果，实现基于安全域辨识的综合能源系统规划。

权 利 要 求 书

1、一种基于安全域辨识的综合能源系统规划方法，其特征在于，该方法包括以下步骤：

(1) 建立描述综合能源系统中能量转换关系的矩阵模型：

5 设定综合能源系统中共有 N 个能量转换元件，并将能量转换元件记为节点，每个能量转换元件有 K_i 个端口，下标 i 为元件编号，设定综合能源系统中共有 M 个能量传输通道，将能量传输通道记为支路，用下标 b 表示支路编号；

(1-1) 建立第 i 个能量转换元件的能量转换关系矩阵，过程如下：

建立能量转换元件 i 的“端口-支路”能量传输关系矩阵 $A_i(k, b)$ ：

$$10 \quad A_i(k, b) = \begin{cases} 1 & \text{元件 } i \text{ 的输入端口 } k \text{ 连接支路 } b \\ -1 & \text{元件 } i \text{ 的输出端口 } k \text{ 连接支路 } b \\ 0 & \text{元件 } i \text{ 的端口 } k \text{ 与支路 } b \text{ 不相连} \end{cases}$$

其中， A_i 的维度为 $K_i \times M$ ；

设定第 i 个能量转换元件的不同端口之间的能量转换关系有 L_i 条，得到第 i 个能量转换元件的端口能量转换关系矩阵 H_i ， H_i 的维度为 $L_i \times K_i$ ，端口能量转换关系矩阵 H_i 中的每一行描述该能量转换元件的一条能量转换关系；

15 根据上述“端口-支路”能量传输关系矩阵 $A_i(k, b)$ 和端口能量转换关系矩阵 H_i ，得到该能量转换元件的能量转换关系矩阵 Z_i ：

$$Z_i = H_i \times A_i$$

(1-2) 遍历综合能源系统中的 N 个能量转换元件，重复步骤 (1-1)，得到综合能源系统中的所有 N 个能量转换元件的能量转换关系矩阵；

20 (1-3) 建立综合能源系统内部能量转换关系矩阵：

联立每一个元件的能量转换关系矩阵，得到综合能源系统内部能量转换关系矩阵 Z ：

$$Z = [Z_1^T, Z_2^T, \dots, Z_N^T]^T$$

其中，上标 T 为矩阵转置运算；

25 (1-4) 建立综合能源系统输入输出关系矩阵：

设定综合能源系统有 P 个能源输入端口和 Q 个负荷输出端口，得到综合能源系统的输

入关系矩阵 $C_{in}(p,b)$ ， $C_{in}(p,b)$ 的维度为 $P \times M$ ，综合能源系统的输出关系矩阵 $C_{out}(q,b)$ ， $C_{out}(q,b)$ 的维度为 $Q \times M$ ，矩阵中每个元素的值通过如下准则确定：

$$C_{in}(p,b) = \begin{cases} 1 & \text{若输入端口 } p \text{ 连接支路 } b \text{ 的源端} \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases}$$

$$C_{out}(q,b) = \begin{cases} 1 & \text{若输出端口 } q \text{ 连接支路 } b \text{ 的源端} \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases}$$

5 其中，端口 p 为 P 个能源输入端口中的任意一个，端口 q 为 Q 个负荷输出端口中的任意一个；

(1-5) 运用 (1-3) 和 (1-4) 计算得到的矩阵，获得综合能源系统的能量转换关系矩阵模型：

$$ZV = 0$$

$$10 \quad C_{in}V = V_{in}$$

$$C_{out}V = V_{out}$$

其中， V 是由综合能源系统中支路上的能量流，维度为 $M \times 1$ ，是综合能源系统的状态变量； V_{in} 和 V_{out} 分别是综合能源系统的输入和输出能量流，维度为 $P \times 1$ 和 $Q \times 1$ ；

(2) 构建 $N-1$ 运行场景下的综合能源系统可行域，包括以下步骤：

15 (2-1) 将第 i 个能量转换元件退出运行时的综合能源系统运行场景记为第 i 个 $N-1$ 运行场景，建立 N 个与 $N-1$ 运行场景相对应的支路可行约束集 Φ_i ($i=1,2,\dots,N$)，包括以下步骤：

对于第 i 个 $N-1$ 运行场景，相应的支路可行约束集 Φ_i 建立方法如下：

(2-1-1) 将支路可行约束集 Φ_i 置为空集；

20 (2-1-2) 设与第 i 个能量转换元件的 K_i 个端口相连的支路集合为 E_{k_i} ，分别对所有 E_{k_i} 的 K_i 个端口，建立等式 $\sum_{b \in E_{k_i}} V_b = 0$ ，并将所有等式添加到支路可行约束集 Φ_i 中，其中 V_b 为综合能源系统中支路 b 上的能量流；

(2-1-3) 设与第 j 个能量转换元件的 k_j 个端口相连的支路集合为 E_{k_j} ， $j \neq i$ ，分别对 E_{k_j} 中的所有端口 k_j ，建立不等式 $\sum_{b \in E_{k_j}} V_b \leq V_{k_j}^{\max}$ ，并将所有不等式添加到步骤 (2-1-2) 的支路

可行约束集 Φ_i 中, 其中 $V_{k_j}^{\max}$ 为综合能源系统中端口 E_{k_j} 能量流的最大容量, 遍历所有 $j \neq i$ 的能量转换元件, 重复本步骤, 得到与第 i 个能量转换元件的 $N-1$ 运行场景相对应的支路可行约束集 Φ_i ;

(2-1-4) 遍历综合能源系统中的 N 个能量转换元件, 重复步骤 (2-1-1)–步骤 (2-1-3),
5 得到 N 个综合能源系统的 $N-1$ 运行场景相对应的支路可行约束集 Φ_i ($i=1,2,\dots,N$);

(2-2) 建立与每个 $N-1$ 运行场景相对应的综合能源系统可行域, 其中第 i 个能量转换元件的 $N-1$ 运行场景下的综合能源系统可行域的表达式为:

$$\Omega_i = \{V_{\text{out}} \mid C_{\text{out}}V = V_{\text{out}}, ZV = 0, V \in \Phi_i\}$$

其中, Ω_i 为第 i 个 $N-1$ 运行场景下的综合能源系统可行域, Φ_i 为步骤 (2-1) 中建立的
10 该运行场景下的支路可行约束集, V 是 (1) 中定义的综合能源系统中支路上的能量流, V_{out} 是 (1) 中定义的综合能源系统的输出能量流, Z 是步骤 (1) 中定义的综合能源系统能量转换关系矩阵, C_{out} 是步骤 (1) 中定义的综合能源系统输出关系矩阵;

(2-3) 将综合能源系统 Q 个输出端口的输出能量所张成的空间定义为输出能量流空间, 输出能量流空间的维度为 Q , 每一个 $N-1$ 运行场景下的综合能源系统可行域 Ω_i 为输出
15 能量流空间中的一个凸多面体, 用求解凸多面体顶点的方法, 分别对步骤 (2-2) 的 N 个 $N-1$ 运行场景下的综合能源系统可行域 Ω_i 进行辨识, 包括如下步骤:

(2-3-1) 设 e_q 为输出能量流空间中第 q 坐标的单位方向向量, 求解下述线性优化问题, 得到最优解 X_q^* , X_q^* 即为第 q 坐标轴上的可行域顶点:

$$\begin{aligned} \max \quad & e_q^T X_q \\ \text{s.t.} \quad & X_q = C_{\text{out}}V \\ & ZV = 0 \\ & V \in \Phi_i \end{aligned}$$

20 遍历 Q 个坐标轴, 得到 Q 个可行域顶点, 该 Q 个顶点构成的集合 Vert' 组成已知可行域 Ω_i' ;

(2-3-2) 记已知可行域 Ω_i' 的表面数量为 R , 设 d_r 为 Ω_i' 中第 r 个表面的单位法向向量, 求解如下线性优化问题, 得到最优解 X_r^* :

$$\begin{aligned}
& \max d_r^T X_r \\
& s.t. X_r = C_{out} V \\
& ZV = 0 \\
& V \in \Phi_i
\end{aligned}$$

其中上标 T 为矩阵转置运算；

(2-3-3) 对步骤 (2-3-2) 的最优解 X_r^* 进行判断，若最优解 X_r^* 不属于步骤 (2-3-1) 的集合 $Vert'$ ，则将 X_r^* 添加至 $Vert'$ 中，并更新 $Vert'$ ，若最优解 X_r^* 属于 $Vert'$ ，则保持 $Vert'$ 不变；

(2-3-4) 遍历已知可行域 Ω_i' 的 R 个表面，重复步骤 (2-3-2) 和步骤 (2-3-3)，完成 R 次计算；

(2-3-5) 对步骤 (2-3-4) 中的计算进行判断，若在 R 次计算中， $Vert'$ 均没有被更新过，则使 $\Omega_i' = \Omega_i$ ，进入 (2-3-6)，若在 R 次计算中， $Vert'$ 被更新过，则用步骤 (2-3-3) 的最后更新得到的 $Vert'$ 组成已知可行域 Ω_i' ，并返回至步骤 (2-3-2)；

(2-3-6) 遍历综合能源系统中的 N 个能量转换元件，重复步骤 (2-3-1)–步骤 (2-3-6)，辨识得到综合能源系统可行域 Ω_i ， $i=1,2,\dots,N$ ；

(2-4) 利用下式，对 (2-3) 获得的 N 个综合能源系统 N-1 运行场景下的可行域取交集，得到综合能源系统安全域 Ω ：

$$\Omega = \Omega_1 \cap \Omega_2 \cap \dots \cap \Omega_N$$

(3) 选择最优综合能源规划方案，过程如下：

(3-1) 设定综合能源系统备选规划方案有 G 个，遍历 G 个综合能源系统备选规划方案中的每一个综合能源系统备选规划方案，重复步骤 (1) 和步骤 (2)，分别得到相应备选规划方案的安全域，将第 g 个综合能源系统备选规划方案的安全域记为 Ω^g ；

(3-2) 设定待规划综合能源系统在规划期内的负荷需求状态共有 Δ 种，从综合能源系统规划部门获取每一种负荷需求状态的负荷需求向量 V_δ^{need} ， V_δ^{need} 的维度为 $Q \times 1$ ， V_δ^{need} 的每一个分量代表一个输出端口的负荷需求量，同时从综合能源系统规划部门获取每一种负荷需求状态的出现概率 Pro_δ ($\delta=1, 2, \dots, \Delta$)，利用下式，计算第 g 个综合能源系统备选规划方案相对每一个负荷需求向量 V_δ^{need} 的适应度 $Y_{\delta,g}$ ，计算方法如下：

$$Y_{\delta,g} = \begin{cases} 1 & V_\delta^{need} \in \Omega^g \\ 0 & V_\delta^{need} \notin \Omega^g \end{cases}$$

根据 $Y_{\delta,g}$ ，计算第 g 个综合能源系统备选规划方案的负荷满足率 Fit_g ：

$$Fit_g = \sum_{\delta=1}^{\Delta} Pro_{\delta} \times Y_{\delta,g}$$

(3-3) 遍历 G 个综合能源系统备选规划方案，重复步骤 (3-2)，得到所有 G 个负荷满足率，选择与 G 个负荷满足率中最高负荷满足率相对应的综合能源系统备选规划方案，作

5 为待综合能源系统的规划结果，实现基于安全域辨识的综合能源系统规划。

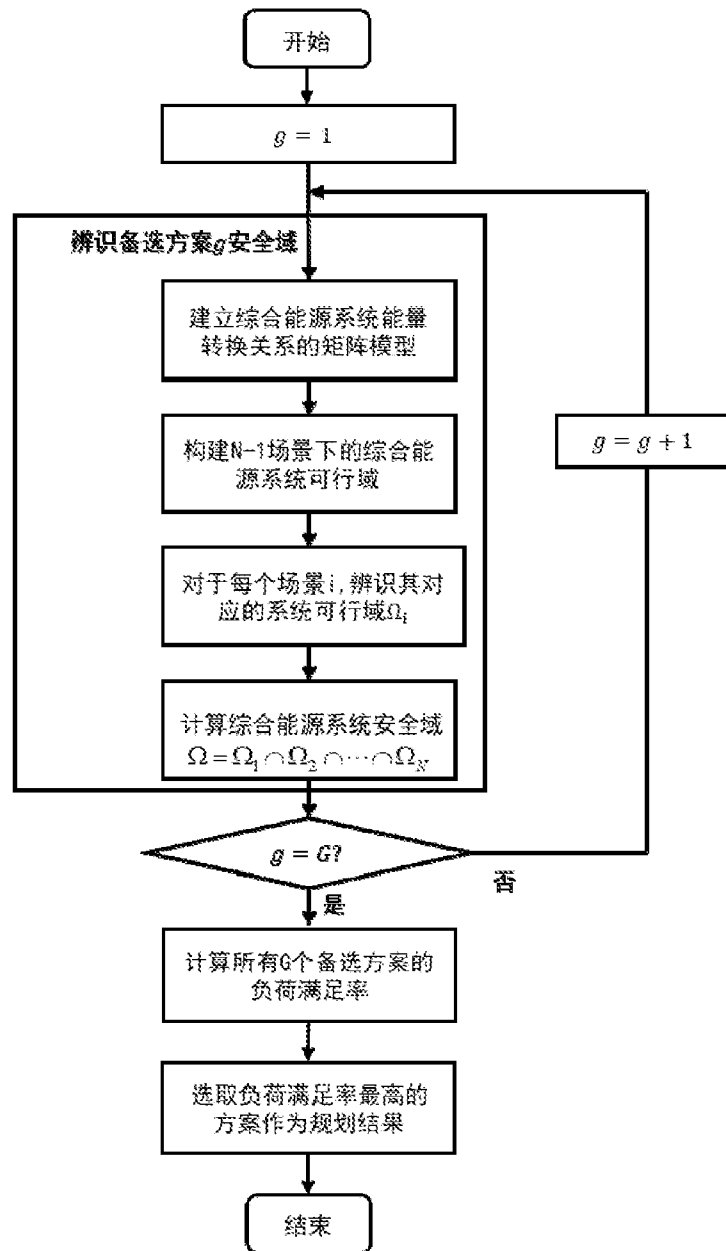


图 1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/127854

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06Q 50/06(2012.01)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)

G06Q

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 SIPOABS DWPI: 能源系统, 规划, ENERGY SYSTEM, PLAN

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 111415271 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 14 July 2020 (2020-07-14) claim 1	1
A	CN 109063992 A (ECONOMIC & TECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE, STATE GRID CHONGQING ELECTRIC POWER COMPANY et al.) 21 December 2018 (2018-12-21) entire document	1
A	CN 110232217 A (TIANJIN UNIVERSITY) 13 September 2019 (2019-09-13) entire document	1



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

09 February 2021

Date of mailing of the international search report

20 February 2021

Name and mailing address of the ISA/CN

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

China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2020/127854

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	111415271	A	14 July 2020	None	
CN	109063992	A	21 December 2018	None	
CN	110232217	A	13 September 2019	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2020/127854

A. 主题的分类

G06Q 50/06 (2012.01) 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)

G06Q

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 SIPOABS DWPI: 能源系统, 规划, ENERGY SYSTEM, PLAN

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 111415271 A (清华大学) 2020年 7月 14日 (2020 - 07 - 14) 权利要求1	1
A	CN 109063992 A (国网重庆市电力公司经济技术研究院等) 2018年 12月 21日 (2018 - 12 - 21) 全文	1
A	CN 110232217 A (天津大学) 2019年 9月 13日 (2019 - 09 - 13) 全文	1

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

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

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

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

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

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

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2021年 2月 9日

国际检索报告邮寄日期

2021年 2月 20日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局 (ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

授权官员

林亮亮

电话号码 86-(010)-62411890

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/127854

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	111415271	A	2020年 7月 14日	无	
CN	109063992	A	2018年 12月 21日	无	
CN	110232217	A	2019年 9月 13日	无	