

(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
2023 年 9 月 28 日 (28.09.2023)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2023/179076 A1

(51) 国际专利分类号:

G06F 30/20 (2020.01) G06Q 10/06 (2012.01)

G06K 9/62 (2022.01) G06Q 50/06 (2012.01)

G06Q 10/04 (2012.01) H02J 3/00 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2022/135019

(22) 国际申请日: 2022 年 11 月 29 日 (29.11.2022)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:

202210285953.1 2022年3月22日 (22.03.2022) CN

(71) 申请人: 清华大学(TSINGHUA UNIVERSITY) [CN/
CN]; 中国北京市海淀区清华园 1 号,
Beijing 100084 (CN)。

(72) 发明人: 李楚一(LI, Chuyi); 中国北京市海淀区清华园 1 号, Beijing 100084 (CN)。 郑可迪(ZHENG, Kedi); 中国北京市海淀区清华园 1 号, Beijing 100084 (CN)。 郭鸿业(GUO, Hongye); 中国北京市海淀区清华园 1 号, Beijing 100084 (CN)。 陈启鑫(CHEN, Qixin); 中国北京市海淀区清华园 1 号, 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); 中国北京市海淀区阜成路 73 号裕惠大厦B座806, 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, 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,

(54) Title: MIXED INTEGER PROGRAMMING-BASED LOAD DECOMPOSITION METHOD AND APPARATUS FOR INDUSTRIAL FACILITY

(54) 发明名称: 基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解方法和装置

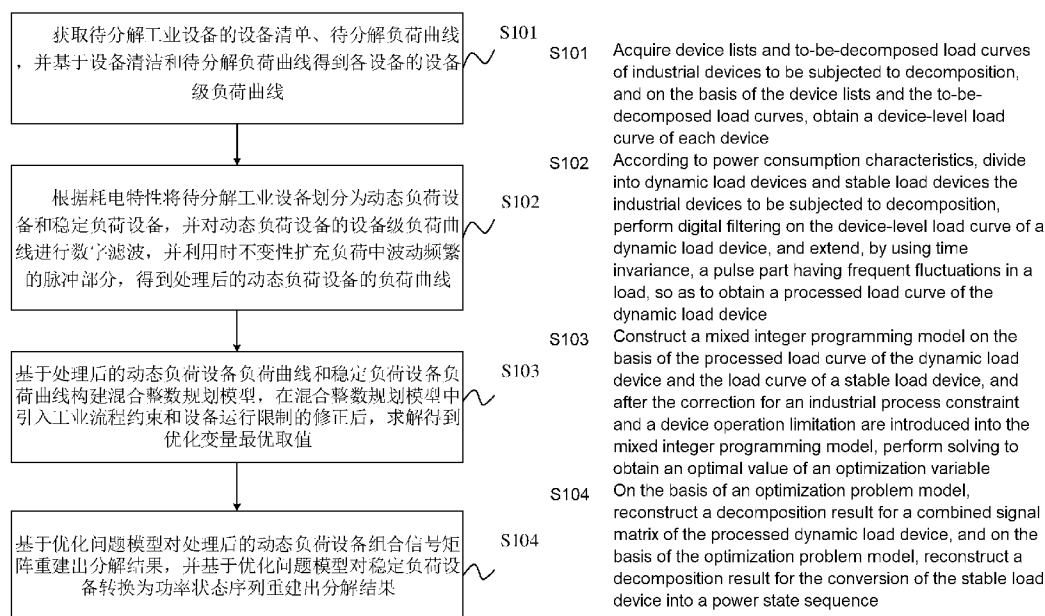


图 1

(57) Abstract: The present application relates to a mixed integer programming-based load decomposition method and apparatus for an industrial facility. The method comprises: acquiring a device asset list of an industrial facility to be subjected to decomposition, and classifying industrial devices, wherein one type involves dynamic load devices having a continuously adjustable power, and one type involves stable load devices having a power switchable between fixed states; using a certain scale of device-level power utilization data as a training set, processing a load curve of an appropriate dynamic load device by using a digital filtering method, and extending a training data set by using the time invariance of a pulse part having frequent fluctuations in a load; constructing, by using device

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,
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))。

information and training data, a mixed integer programming model for decomposition; introducing a model correction item or constraint by using physical limitations such as industrial process dependence of some devices; and solving a planning problem to obtain a decomposition result. By means of the method, the load characteristics of both a dynamic load device and a stable load device can be taken into consideration, and non-intrusive load decomposition having relatively high accuracy can be performed in an industrial scenario.

(57) 摘要: 本申请涉及一种基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解方法和装置, 方法包括: 获取待分解工业设施的设备资产清单, 将工业设备分类, 一类为功率可连续调节的动态负荷设备, 一类为功率在固定状态间切换的稳定负荷设备; 一定规模的设备级的用电数据作为训练集, 使用数字滤波的方法处理合适的动态负荷设备负荷曲线, 利用负荷中波动频繁的脉冲部分的时不变性扩充其训练数据集; 利用设备信息和训练数据构建用于分解的混合整数规划模型; 利用一些设备的工业流程依赖等物理限制, 引入模型修正项或约束; 求解规划问题得到分解结果。该方法能够同时考虑动态负荷设备和稳定负荷设备的负荷特性, 在工业场景下能够进行准确度较高的非侵入式负荷分解。

基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解方法和装置

相关申请的交叉引用

本申请基于申请号为 CN202210285953.1，申请日为 2022 年 3 月 22 日申请的中国专利申请提出，并要求该中国专利申请的优先权，该中国专利申请的全部内容在此引入本申请作为参考。

技术领域

本申请涉及非侵入式负荷分解技术领域，特别涉及一种基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解方法和装置。

背景技术

随着智能电网和城市化的快速发展，海量信息的流动已成为必然趋势。电力传感器已被广泛应用于监测各类用电用户的负荷信息。这些传感器收集了大量的负载数据，为开发基于物联网的智能电网奠定了基础。另一方面，可再生能源越来越受到人们的关注。大量可再生能源的普及和燃煤电厂的逐步淘汰给电网运行带来了巨大的挑战。为了更好地促进节能，促进电网供需双方的双向通信，电力用户的设备级负荷数据反馈变得非常重要，该反馈可以通过侵入式和非侵入式两种方式实现。侵入式监控通常涉及传感器安装、经济成本、数据隐私等障碍。相比之下，非侵入式负载监测为消费者提供了成本最低、传感器安装工作量最低的解决方案，被认为是更有前景的选择。

由于不同电力用户的电力消耗规模和电气设备类型存在巨大差异，负荷分解通常分为三种类型：民用、商业和工业设置的负荷分解。尽管负荷分解在商业和工业场景中的应用具有更显著的潜在利润（一个工厂的用电量可能相当于数百个住宅的用电量），但目前负荷分解的研究主要集中在民用设施上。与民用场景不同，工业场景存在大量的动态负荷设备，用电特征更为复杂，这给负荷分解带来了很大的困难。

在工业 NILM（non-intrusive load monitoring，非侵入式电力负荷监测）方面，相关技术中首先研究了大型工业建筑中的负荷分解，通过从一个大型工业冷库收集电力数据，并将收集到的数据与典型的住宅数据进行对比分析，并且采用 CO（Combinationrial Optimization，组合优化算法）和 FHMM（Factorial Hidden Markov Models，多条隐马尔科夫模型）两种基准模型对工业负荷进行了分解，并提出了针对性培训和分计量的改进措施。

相关技术中还建立了一个基于深度神经网络的分解模型，取得了比经典 FHMM 更好的结果。

相关技术中还利用 FHMM 中的有功功率和无功功率数据进行工业负荷分解，在一定程度上改善了结果。目前，大多数关于工业 NILM 的研究只是对住宅 NILM 模型进行了轻微的修改，以处理工业场景，而没有设计合适的模型来利用工业数据的特征。

工业负荷具有民用负荷少有的大比例动态负荷和流水线依赖等特征，这些特征会极大地影响传统的基于优化模型和基于 FHMM 模型的效果。采用深度学习方法的的相关研究表明，在工业场景下，深度学习方法仍能取得很好的效果，同时这些模型高度依赖于大量的训练数据，但工业数据往往十分敏感，这成为模型应用的一大障碍。

相关技术中主要存在以下两种求解技术：

(1) k-均值聚类技术：该技术可以在给定聚类中心数目 k 的情况下通过迭代将数据集按照距离划分为 k 类。

(2) 混合整数规划问题求解技术：求解数学规划问题中自变量存在整数的一类问题，一般用基于分支定界的算法来解。分支定界具体的做法如下：

对最初的混整规划删除所有的整数约束，得到原规划松弛，一般这个松弛后的规划认为是可以高效求解的。如果松弛问题的解恰好满足所有整数约束的限制，那么这个解是原混整规划的最优解，运算终止。如果解没有满足所有整数限制（大多数是这种情况），需要引入约束，将这个解排除出可行域，这是原可行域被划分为两个区域，原问题可以分为两个子问题求解，称作“分支”。这时原问题被两个整数变量更少的子问题取代了。

上述松弛问题的解，是在更大的可行域下的最优解，原问题的解一定不会比这个解更优，于是松弛问题的解被规定为原问题的一个“下界”。在分支的情况下，会不断地分出子问题，这是可能会得到满足子问题所有约束的最优解，这个解只是原问题局部可行域内的最优，不一定是全局最优，因此该解被规定为原问题的一个“上界”。在对每一次的分支子问题计算时，如果求解一个子问题落到当前所定的界之外，就可以删掉这个分支，不再进一步考虑。因此分支定界法是一个迭代算法，随着子问题的求解，不断更新上下界，当算法满足收敛条件的时候，就可以得到原问题数值上的解了。

目前一般采用成熟的商业求解器求解这类问题，这些求解器一般采用了许多算法对求解速度进行优化，如割平面法等。

发明内容

本申请提供一种基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解方法、装置、电子设备及存储介质，以解决现有负荷分解技术难以在工业负荷数据不充足、数据获取困难的限制下有效处理工业场景下的复杂设备负荷辨识的问题，能够同时考虑动态负荷设备和稳定负荷设备的负荷特性，在工业场景下能够进行准确度较高的非侵入式负荷分解。

本申请第一方面实施例提供一种基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解，包括以下步骤：

获取待分解工业设备的设备清单、待分解负荷曲线，并基于所述设备清单和所述待分解负荷曲线得到各设备的设备级负荷曲线；

根据耗电特性将所述待分解工业设备划分为动态负荷设备和稳定负荷设备，并对所述动态负荷设备的设备级负荷曲线进行数字滤波，并利用时不变性扩充负荷中波动频繁的脉冲部分，得到处理后的动态负荷设备的负荷曲线；

基于所述处理后的动态负荷设备负荷曲线和所述稳定负荷设备负荷曲线构建混合整数规划模型，在所述混合整数规划模型中引入工业流程约束和设备运行限制的修正后，求解得到优化变量最优取值；以及

基于所述优化问题模型对所述处理后的动态负荷设备组合信号矩阵重建出分解结果，并基于所述优化问题模型对所述稳定负荷设备转换为功率状态序列重建出分解结果。

可选地，所述对所述动态负荷设备的设备级负荷曲线进行数字滤波，并利用时不变性扩充负荷中波动频繁的脉冲部分，得到处理后的动态负荷设备，包括：

对所述动态负荷设备的设备级负荷曲线先利用中值滤波去除噪声尖峰，再检测所述动态负荷设备的设备级负荷曲线中的大斜率部分将其分离，最后将每个动态设备的负荷分解为平滑的基本部分和波动剧烈的脉冲部分；

生成预设时间段的元素全为 0 的列向量，将所述列向量连接到每个待扩充基向量的开头，并舍去所述待扩充基向量末尾同样长度的序列，得到滞后一个单位的扩充脉冲，将所述扩充脉冲叠加到所述平滑的基本部分，得到了新基向量；

基于所述新基向量和所述波动剧烈的脉冲部分得到处理后的动态负荷设备。

可选地，所述根据耗电特性将所述待分解工业设备划分为动态负荷设备和稳定负荷设备，包括：

对所述稳定负荷设备采用组合优化的方法建模：

$$\hat{X}_n(t) = \sum_{k=1}^{K_n} b_{n,k}(t)x_{n,k}, \forall t \in T;$$

$$s.t: b_{n,k}(t) \in \{0,1\}, \forall t \in T;$$

$$\sum_{k=1}^{K_n} b_{n,k}(t) = 1, \forall t \in T;$$

其中， $\hat{X}_n(t)$ 为 t 时刻设备 n 的功率， t 为时刻， T 为一次优化的时间序列长度， n 为设备编号， $b_{n,k}(t)$ 为确定设备 n 所在的功率状态的变量， k 为 $[1, K_n]$ 中的整数， K_n 为设备 n 的状态个数；对所述动态负荷设备采用各设备已知的设备级负荷曲线的线性组合来建模：

$$\hat{X}_n = D_n A_n;$$

$$s.t.: A_n \geq 0;$$

其中, $\hat{X}_n$ 为设备 n 的功率时间序列, D_n 为设备 n 的信号矩阵; A_n 为激活系数矩阵。

可选地, 所述基于所述处理后的动态负荷设备负荷曲线和所述稳定负荷设备负荷曲线构建混合整数规划模型, 还包括:

将各所述动态负荷设备的信号矩阵连接为 $D = [D_1, D_2, \dots, D_n]$; 将所述稳定负荷设备的负荷模型表达为矩阵的形式:

$$\hat{X}_n(t) = [b_{n,1}(t) \quad b_{n,2}(t) \quad \dots \quad b_{n,K_n}(t)] \begin{bmatrix} x_{n,1} \\ x_{n,2} \\ \vdots \\ x_{n,K_n} \end{bmatrix}, \quad \forall t \in T;$$

取和信号矩阵中基向量相同的维度, 有:

$$\hat{X}_n = \begin{bmatrix} \hat{X}_n(1) \\ \hat{X}_n(2) \\ \vdots \\ \hat{X}_n(m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{n,1}(1) & b_{n,2}(1) & \dots & b_{n,K_n}(1) \\ b_{n,1}(2) & b_{n,2}(2) & \dots & b_{n,K_n}(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n,1}(m) & b_{n,2}(m) & \dots & b_{n,K_n}(m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{n,1} \\ x_{n,2} \\ \vdots \\ x_{n,K_n} \end{bmatrix} = B_n X_n;$$

构建出所述混合整数规划模型:

$$\min_{A, B_n} \left\| X - DA - \sum_{n=1}^N B_n X_n \right\|_F^2 + \beta \|U - QA\|_F^2$$

$$s.t.: A \geq 0$$

其中, X 为用户总智能电表读出的负荷曲线, β 为正则项系数, U 为 1 构成的列向量, Q 为信号分组矩阵, A 为激活系数矩阵, N 为稳定符合设备台数, X_n 为功率状态矩阵, B_n 为状态选择矩阵, m 是一次优化的截取的时间序列长度。

可选地, 其特征在于, 所述在所述混合整数规划模型中引入工业流程约束和设备运行限制的修正, 包括:

流程约束为:

$$\gamma \|RA\|_F^2;$$

对所述稳定负荷设备限制最长持续时间和限制最短持续时间, 其中, 所述最长持续时间 $W_{n,k}$ 采用一组线性不等式来约束:

$$\sum_{i=t}^{t+W_{n,k}-1} b_{n,k}(i) \leq W_{n,k} - 1;$$

$$\forall t \in \{1, 2, \dots, m - W_{n,k} + 1\};$$

所述最短持续时间 $w_{n,k}$ 采用一组线性不等式来约束:

$$\sum_{i=t}^{t+w_{n,k}-1} b_{n,k}(i) \geq w_{n,k} (b_{n,k}(t) - b_{n,k}(t-1));$$

$$\forall t \in \{2, 3, \dots, m - w_{n,k} + 1\};$$

其中, γ 为正则项系数, R 为流程限制矩阵。

本申请第二方面实施例提供一种基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解装置, 包括:

获取模块, 用于获取待分解工业设备的设备清单、待分解负荷曲线, 并基于所述设备清单和所述待分解负荷曲线得到各设备的设备级负荷曲线;

处理模块, 用于根据耗电特性将所述待分解工业设备划分为动态负荷设备和稳定负荷设备, 并对所述动态负荷设备的设备级负荷曲线进行数字滤波, 并利用时不变性扩充负荷中波动频繁的脉冲部分, 得到处理后的动态负荷设备的负荷曲线;

第一计算模块, 用于基于所述处理后的动态负荷设备负荷曲线和所述稳定负荷设备负荷曲线构建混合整数规划模型, 在所述混合整数规划模型中引入工业流程约束和设备运行限制的修正后, 求解得到优化变量最优取值; 以及

第二计算模块, 用于基于所述优化问题模型对所述处理后的动态负荷设备组合信号矩阵重建出分解结果, 并基于所述优化问题模型对所述稳定负荷设备转换为功率状态序列重建出分解结果。

可选地, 所述处理模块, 具体用于:

对所述动态负荷设备的设备级负荷曲线先利用中值滤波去除噪声尖峰, 再检测所述动态负荷设备的设备级负荷曲线中的大斜率部分将其分离, 最后将每个动态设备的负荷分解为平滑的基本部分和波动剧烈的脉冲部分;

生成预设时间段的元素全为 0 的列向量, 将所述列向量连接到每个待扩充基向量的开头, 并舍去所述待扩充基向量末尾同样长度的序列, 得到滞后一个单位的扩充脉冲, 将所述扩充脉冲叠加到所述平滑的基本部分, 得到了新基向量;

基于所述新基向量和所述波动剧烈的脉冲部分得到处理后的动态负荷设备。

可选地, 所述处理模块用于:

对所述稳定负荷设备采用组合优化的方法建模:

$$\hat{X}_n(t) = \sum_{k=1}^{K_n} b_{n,k}(t) x_{n,k}, \forall t \in T;$$

$$s.t: b_{n,k}(t) \in \{0, 1\}, \forall t \in T;$$

$$\sum_{k=1}^{K_n} b_{n,k}(t) = 1, \forall t \in T;$$

其中, $\hat{X}_n(t)$ 为 t 时刻设备 n 的功率, t 为时刻, T 为一次优化的时间序列长度, n 为设备编号, $b_{n,k}(t)$ 为确定设备 n 所在的功率状态的变量, k 为 $[1, K_n]$ 中的整数, K_n 为设备 n 的状

态个数；

对所述动态负荷设备采用各设备已知的设备级负荷曲线的线性组合来建模：

$$\begin{aligned}\hat{X}_n &= D_n A_n; \\ s.t.: A_n &\geq 0;\end{aligned}$$

其中， $\hat{X}_n$ 为设备 n 的功率时间序列， D_n 为设备 n 的信号矩阵； A_n 为激活系数矩阵。

可选地，所述第一计算模块，还用于：

将各所述动态负荷设备的信号矩阵连接为 $D = [D_1, D_2, \dots, D_n]$ ；将所述稳定负荷设备的负荷模型表达为矩阵的形式：

$$\hat{X}_n(t) = [b_{n,1}(t) \quad b_{n,2}(t) \quad \cdots \quad b_{n,K_n}(t)] \begin{bmatrix} x_{n,1} \\ x_{n,2} \\ \vdots \\ x_{n,K_n} \end{bmatrix}, \quad \forall t \in T;$$

取和信号矩阵中基向量相同的维度，有：

$$\hat{X}_n = \begin{bmatrix} \hat{X}_n(1) \\ \hat{X}_n(2) \\ \vdots \\ \hat{X}_n(m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{n,1}(1) & b_{n,2}(1) & \cdots & b_{n,K_n}(1) \\ b_{n,1}(2) & b_{n,2}(2) & \cdots & b_{n,K_n}(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n,1}(m) & b_{n,2}(m) & \cdots & b_{n,K_n}(m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{n,1} \\ x_{n,2} \\ \vdots \\ x_{n,K_n} \end{bmatrix} = B_n X_n;$$

构建出所述混合整数规划模型：

$$\begin{aligned}\min_{A, B_n} & \left\| X - DA - \sum_{n=1}^N B_n X_n \right\|_F^2 + \beta \|U - QA\|_F^2 \\ s.t.: & A \geq 0\end{aligned}$$

其中， X 为用户总智能电表读出的负荷曲线， β 为正则项系数， U 为 1 构成的列向量， Q 为信号分组矩阵， A 为激活系数矩阵， N 为稳定符合设备台数， X_n 为功率状态矩阵， B_n 为状态选择矩阵， m 是一次优化的截取的时间序列长度。

可选地，所述第一计算模块，还用于：

流程约束为：

$$\gamma \|RA\|_F^2;$$

对所述稳定负荷设备限制最长持续时间和限制最短持续时间，其中，所述最长持续时间 $W_{n,k}$ 采用一组线性不等式来约束：

$$\begin{aligned}\sum_{i=t}^{t+W_{n,k}-1} b_{n,k}(i) &\leq W_{n,k} - 1; \\ \forall t &\in \{1, 2, \dots, m - W_{n,k} + 1\};\end{aligned}$$

所述最短持续时间 $w_{n,k}$ 采用一组线性不等式来约束：

$$\sum_{i=t}^{t+w_{n,k}-1} b_{n,k}(i) \geq w_{n,k} (b_{n,k}(t) - b_{n,k}(t-1));$$

$$\forall t \in \{2, 3, \dots, m - w_{n,k} + 1\};$$

其中， γ 为正则项系数， R 为流程限制矩阵。

本申请第三方面实施例提供一种电子设备，包括：存储器、处理器及存储在所述存储器上并可在所述处理器上运行的计算机程序，所述处理器执行所述程序，以实现如上述实施例所述的基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解方法。

本申请第四方面实施例提供一种计算机可读存储介质，其上存储有计算机程序，该程序被处理器执行，以用于实现如上述的基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解方法。

由此，通过获取待分解工业设施的设备资产清单，将工业设备分类，一类为功率可连续调节的动态负荷设备，一类为功率在固定状态间切换的稳定负荷设备；一定规模的设备级的用电数据作为训练集，使用数字滤波的方法处理合适的动态负荷设备负荷曲线，利用负荷中波动频繁的脉冲部分的时不变性扩充其训练数据集；利用设备信息和训练数据构建用于分解的混合整数规划模型；利用一些设备的工业流程依赖等物理限制，引入模型修正项或约束；求解规划问题得到分解结果。由此，解决了现有负荷分解技术难以在工业负荷数据不充足、数据获取困难的限制下有效处理工业场景下的复杂设备负荷辨识的问题，能够同时考虑动态负荷设备和稳定负荷设备的负荷特性，在工业场景下能够进行准确度较高的非侵入式负荷分解。

本申请附加的方面和优点将在下面的描述中部分给出，部分将从下面的描述中变得明显，或通过本申请的实践了解到。

附图说明

本申请上述的和/或附加的方面和优点从下面结合附图对实施例的描述中将变得明显和容易理解，其中：

图 1 为根据本申请实施例提供的基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解方法的流程图；

图 2 为根据本申请一个实施例提供的基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解方法的流程图；

图 3 为根据本申请实施例提供的基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解装置的方框示意图；

图 4 为根据本申请实施例的电子设备的示意图。

具体实施方式

下面详细描述本申请的实施例，所述实施例的示例在附图中示出，其中自始至终相同

或类似的标号表示相同或类似的元件或具有相同或类似功能的元件。下面通过参考附图描述的实施例是示例性的，旨在用于解释本申请，而不能理解为对本申请的限制。

下面参考附图描述本申请实施例的基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解方法、装置、电子设备及存储介质。针对上述背景技术中心提到的现有负荷分解技术难以在工业负荷数据不充足、数据获取困难的限制下有效处理工业场景下的复杂设备负荷辨识的问题，本申请提供了一种基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解方法，在该方法中，通过获取待分解工业设备的设备资产清单，将工业设备分类，一类为功率可连续调节的动态负荷设备，一类为功率在固定状态间切换的稳定负荷设备；以及一定规模的设备级的用电数据作为训练集，使用数字滤波的方法处理合适的动态负荷设备负荷曲线，利用负荷中波动频繁的脉冲部分的时不变性扩充其训练数据集；利用设备信息和训练数据构建用于分解的混合整数规划模型；利用一些设备的工业流程依赖等物理限制，引入模型修正项或约束；求解规划问题得到分解结果。由此，解决了现有负荷分解技术难以在工业负荷数据不充足、数据获取困难的限制下有效处理工业场景下的复杂设备负荷辨识的问题，能够同时考虑动态负荷设备和稳定负荷设备的负荷特性，在工业场景下能够进行准确度较高的非侵入式负荷分解。

具体而言，图 1 为本申请实施例所提供的一种基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解方法的流程示意图。

如图 1 所示，该基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解方法包括以下步骤：

在步骤 S101 中，获取待分解工业设备的设备清单、待分解负荷曲线，并基于设备清单和待分解负荷曲线得到各设备的设备级负荷曲线。

其中，定义用户低压回路智能电表在一天中记录的功率读数序列为“总负荷曲线”，并记录为一个列向量；定义对用电设备单独安装传感器，采集的一天的功率读数序列为“设备级负荷曲线”，记录为同样维度的列向量。

具体地，获取待分解工业设备的设备资产清单；从待分解工业设施智能电表获取待分解负荷曲线，从设备产商或者设备负荷数据库中获取各设备的设备级负荷曲线。

在步骤 S102 中，根据耗电特性将待分解工业设备划分为动态负荷设备和稳定负荷设备，并对动态负荷设备的设备级负荷曲线进行数字滤波，并利用时不变性扩充负荷中波动频繁的脉冲部分，得到处理后的动态负荷设备的负荷曲线。

可选地，在一些实施例中，根据耗电特性将待分解工业设备划分为动态负荷设备和稳定负荷设备，包括：对稳定负荷设备采用组合优化的方法建模：

$$\hat{X}_n(t) = \sum_{k=1}^{K_n} b_{n,k}(t)x_{n,k}, \forall t \in T;$$

$$s.t: b_{n,k}(t) \in \{0,1\}, \forall t \in T;$$

$$\sum_{k=1}^{K_n} b_{n,k}(t) = 1, \forall t \in T;$$

其中, $\hat{X}_n(t)$ 为 t 时刻设备 n 的功率, t 为时刻, T 为一次优化的时间序列长度, n 为设备编号, 设备 n 的各个状态的功率大小记为 $x_{n,1}, x_{n,2}, \dots, x_{n,K_n}$, 各状态的功率值采用 k -均值聚类技术确定, $b_{n,k}(t)$ 为确定设备 n 所在的功率状态的变量, k 为 $[1, K_n]$ 中的整数, K_n 为设备 n 的状态个数;

对动态负荷设备采用各设备已知的设备级负荷曲线的线性组合来建模:

$$\hat{X}_n = D_n A_n;$$

$$s.t.: A_n \geq 0;$$

其中, $\hat{X}_n$ 为设备 n 的功率时间序列, D_n 为设备 n 的信号矩阵, 其每个列向量为该设备已知的设备级负荷曲线, 称为一个基向量; A_n 为激活系数矩阵, 即对基向量进行线性组合的系数, 一般要求 A 的元素非负。

可选地, 在一些实施例中, 对动态负荷设备的设备级负荷曲线进行数字滤波, 并利用时不变性扩充负荷中波动频繁的脉冲部分, 得到处理后的动态负荷设备, 包括: 对动态负荷设备的设备级负荷曲线先利用中值滤波去除噪声尖峰, 再检测动态负荷设备的设备级负荷曲线中的大斜率部分将其分离, 最后将每个动态设备的负荷分解为平滑的基本部分和波动剧烈的脉冲部分; 生成预设时间段的元素全为 0 的列向量, 将列向量连接到每个待扩充基向量的开头, 并舍去待扩充基向量末尾同样长度的序列, 得到滞后一个单位的扩充脉冲, 将扩充脉冲叠加到平滑的基本部分, 得到了新基向量; 基于新基向量和波动剧烈的脉冲部分得到处理后的动态负荷设备。

具体地, 根据设备工作时的耗电特性将工业设备分类, 将设备分为动态负荷设备和稳定负荷设备; 动态负荷设备一般包含可调速电机, 其负荷曲线在连续范围内变化; 稳定负荷设备负荷曲线在一系列固定的功率状态间切换; 这两类设备采用不同的方式建模。对动态负荷设备的设备级负荷曲线, 使用数字滤波的方法处理合适设备对应的曲线向量, 利用负荷中波动频繁的脉冲部分的时不变性构造新的符合实际的向量, 从而扩充训练集; 对动态负荷设备的设备级负荷曲线, 首先进行数字滤波; 滤波时先利用中值滤波去除噪声尖峰, 然后检测曲线中的大斜率部分将其分离, 另外加入限位器辅助脉冲的识别, 最终将每个设备的负荷分解为平滑的基本部分和波动剧烈的脉冲部分。利用时不变性扩充脉冲部分; 取一个固定的时间长度, 生成对应该时间长度的元素全为 0 的列向量, 将该列向量连接到每个待扩充基向量的开头, 并舍去该基向量末尾同样长度的序列, 就得到了滞后一个单位的扩充脉冲; 将扩充脉冲叠加到基本部分, 就得到了该设备一个新的基向量。

在步骤 S103 中, 基于处理后的动态负荷设备负荷曲线和稳定负荷设备负荷曲线构建混

合整数规划模型，在混合整数规划模型中引入工业流程约束和设备运行限制的修正后，求解得到优化变量最优取值。

可选地，在一些实施例中，基于处理后的动态负荷设备负荷曲线和稳定负荷设备负荷曲线构建混合整数规划模型，还包括：将各动态负荷设备的信号矩阵连接为 $D = [D_1, D_2, \dots, D_n]$ ；将稳定负荷设备的负荷模型表达为矩阵的形式：

$$\hat{X}_n(t) = [b_{n,1}(t) \quad b_{n,2}(t) \quad \cdots \quad b_{n,K_n}(t)] \begin{bmatrix} x_{n,1} \\ x_{n,2} \\ \vdots \\ x_{n,K_n} \end{bmatrix}, \forall t \in T;$$

取和信号矩阵中基向量相同的维度，有：

$$\hat{X}_n = \begin{bmatrix} \hat{X}_n(1) \\ \hat{X}_n(2) \\ \vdots \\ \hat{X}_n(m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{n,1}(1) & b_{n,2}(1) & \cdots & b_{n,K_n}(1) \\ b_{n,1}(2) & b_{n,2}(2) & \cdots & b_{n,K_n}(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n,1}(m) & b_{n,2}(m) & \cdots & b_{n,K_n}(m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{n,1} \\ x_{n,2} \\ \vdots \\ x_{n,K_n} \end{bmatrix} = B_n X_n;$$

构建出混合整数规划模型：

$$\min_{A, B_n} \left\| X - DA - \sum_{n=1}^N B_n X_n \right\|_F^2 + \beta \|U - QA\|_F^2$$

$$s.t.: A \geq 0$$

其中， X 为用户总智能电表读出的负荷曲线，为待分解负荷，第二项为基向量分组的正则项， β 为正则项系数， U 为 1 构成的列向量， Q 为信号分组矩阵，其中， Q 的对角分块上为 1，维度对应于所分组的基向量的个数，其他区域元素为 0， A 为激活系数矩阵， N 为稳定符合设备台数， X_n 为功率状态矩阵， B_n 为状态选择矩阵， m 是一次优化的截取的时间序列长度。

可选地，在一些实施例中，在混合整数规划模型中引入工业流程约束和设备运行限制的修正，包括：流程约束为在优化目标函数（混合整数规划模型）里加入额外惩罚项：

$$\gamma \|RA\|_F^2;$$

对稳定负荷设备限制最长持续时间和限制最短持续时间，其中，最长持续时间 $W_{n,k}$ 采用一组线性不等式来约束：

$$\sum_{i=t}^{t+W_{n,k}-1} b_{n,k}(i) \leq W_{n,k} - 1;$$

$$\forall t \in \{1, 2, \dots, m - W_{n,k} + 1\};$$

最短持续时间 $w_{n,k}$ 采用一组线性不等式来约束：

$$\sum_{i=t}^{t+w_{n,k}-1} b_{n,k}(i) \geq w_{n,k} (b_{n,k}(t) - b_{n,k}(t-1));$$

$$\forall t \in \{2, 3, \dots, m - w_{n,k} + 1\};$$

其中, γ 为正则项系数, R 为流程限制矩阵, 其中, R 由一系列单位矩阵连接而成, 两两存在流程关系的设备, 对应的分块分别为正的单位矩阵和负的单位矩阵。

在步骤 S104 中, 基于优化问题模型对处理后的动态负荷设备组合信号矩阵重建出分解结果, 并基于优化问题模型对稳定负荷设备转换为功率状态序列重建出分解结果。

具体地, 采用混合整数规划求解技术, 求解上述优化问题得到 A, B_n , 通过负荷模型 DA 重建动态负荷设备负荷, 通过 $B_n X_n$ 重建文风负荷设备负荷, 从而得到分解结果。

由此, 本申请综合了经典的组合优化模型在处理稳定负荷设备时的优势和矩阵分解模型在处理动态负荷设备时的优势, 在一个优化规划问题中统一求解, 相比于其他基于概率模型和基于优化模型的算法, 更加适合不同负荷类型混杂的复杂工业场景。另一方面, 本申请同时考虑了数据依赖问题, 相较于应用广泛的深度学习模型, 本申请能够在使用更少的训练数据的情况下, 达到与一般深度学习模型同等水平的分解效果。本申请还能够在工业实际应用场景下, 充分利用已有数据, 获得更加准确的负荷分解结果, 具有重要的意义和良好的应用前景。

为使本领域技术人员进一步了解本基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解方法, 下面结合具体实施例进行阐述。

图 2 是本基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解方法的流程图。

S201, 获取设备清单; 获取待分解负荷曲线和设备级负荷曲线。

S202, 将设备分类为动态负荷设备, 用 $D_n A_n$ 表示, 和稳定负荷设备, 负荷用 $\sum_{k=1}^{K_n} b_{n,k}(t) x_{n,k}$ 表示。

S203, 对动态负荷设备的设备级负荷曲线数字滤波, 利用时不变性扩充脉冲部分, 重建后实现基向量的扩充。

S204, 考虑不同类型的设备, 建立混合整数规划模型。

S205, 考虑工业生产的物理限制, 在模型中引入针对工业流程约束和设备运行限制的修正。

S206, 利用混合规划求解技术求解优化问题, 重建负荷分解结果。

根据本申请实施例提出的基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解方法, 通过获取待分解工业设施的设备资产清单, 将工业设备分类, 一类为功率可连续调节的动态负荷设备, 一类为功率在固定状态间切换的稳定负荷设备; 一定规模的设备级的用电数据作为训练集, 使用数字滤波的方法处理合适的动态负荷设备负荷曲线, 利用负荷中波动频繁的脉冲部分的时不变性扩充其训练数据集; 利用设备信息和训练数据构建用于分解的混合整数规划模型; 利用一些设备的工业流程依赖等物理限制, 引入模型修正项或约束; 求解规

划问题得到分解结果。由此，解决了现有负荷分解技术难以在工业负荷数据不充足、数据获取困难的限制下有效处理工业场景下的复杂设备负荷辨识的问题，能够同时考虑动态负荷设备和稳定负荷设备的负荷特性，在工业场景下能够进行准确度较高的非侵入式负荷分解。

其次参照附图描述根据本申请实施例提出的基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解装置。

图 3 是本申请实施例的基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解装置的方框示意图。

如图 3 所示，该基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解装置 10 包括：获取模块 100、处理模块 200、第一计算模块 300 和二计算模块 400。

其中，获取模块 100，用于获取待分解工业设备的设备清单、待分解负荷曲线，并基于设备清单和待分解负荷曲线得到各设备的设备级负荷曲线；

处理模块 200，用于根据耗电特性将待分解工业设备划分为动态负荷设备和稳定负荷设备，并对动态负荷设备的设备级负荷曲线进行数字滤波，并利用时不变性扩充负荷中波动频繁的脉冲部分，得到处理后的动态负荷设备的负荷曲线；

第一计算模块 300，用于基于处理后的动态负荷设备负荷曲线和稳定负荷设备负荷曲线构建混合整数规划模型，在混合整数规划模型中引入工业流程约束和设备运行限制的修正后，求解得到优化变量最优取值；以及

第二计算模块 400，用于基于优化问题模型对处理后的动态负荷设备组合信号矩阵重建出分解结果，并基于优化问题模型对稳定负荷设备转换为功率状态序列重建出分解结果。

可选地，在一些实施例中，处理模块 200，具体用于：

对动态负荷设备的设备级负荷曲线先利用中值滤波去除噪声尖峰，再检测动态负荷设备的设备级负荷曲线中的大斜率部分将其分离，最后将每个动态设备的负荷分解为平滑的基本部分和波动剧烈的脉冲部分；

生成预设时间段的元素全为 0 的列向量，将列向量连接到每个待扩充基向量的开头，并舍去待扩充基向量末尾同样长度的序列，得到滞后一个单位的扩充脉冲，将扩充脉冲叠加到平滑的基本部分，得到了新基向量；

基于新基向量和波动剧烈的脉冲部分得到处理后的动态负荷设备。

可选地，处理模块 200，还用于：

对稳定负荷设备采用组合优化的方法建模：

$$\hat{X}_n(t) = \sum_{k=1}^{K_n} b_{n,k}(t)x_{n,k}, \forall t \in T;$$

$$s.t.: b_{n,k}(t) \in \{0,1\}, \forall t \in T;$$

$$\sum_{k=1}^{K_n} b_{n,k}(t) = 1, \forall t \in T;$$

其中, $\hat{X}_n(t)$ 为 t 时刻设备 n 的功率, t 为时刻, T 为一次优化的时间序列长度, n 为设备编号, $b_{n,k}(t)$ 为确定设备 n 所在的功率状态的变量, k 为 $[1, K_n]$ 中的整数, K_n 为设备 n 的状态个数;

对动态负荷设备采用各设备已知的设备级负荷曲线的线性组合来建模:

$$\hat{X}_n = D_n A_n;$$

$$s.t.: A_n \geq 0;$$

其中, $\hat{X}_n$ 为设备 n 的功率时间序列, D_n 为设备 n 的信号矩阵; A_n 为激活系数矩阵。

可选地, 第一计算模块 300, 还用于:

将各动态负荷设备的信号矩阵连接为 $D = [D_1, D_2, \dots, D_n]$; 将稳定负荷设备的负荷模型表达为矩阵的形式:

$$\hat{X}_n(t) = [b_{n,1}(t) \quad b_{n,2}(t) \quad \dots \quad b_{n,K_n}(t)] \begin{bmatrix} x_{n,1} \\ x_{n,2} \\ \vdots \\ x_{n,K_n} \end{bmatrix}, \forall t \in T;$$

取和信号矩阵中基向量相同的维度, 有:

$$\hat{X}_n = \begin{bmatrix} \hat{X}_n(1) \\ \hat{X}_n(2) \\ \vdots \\ \hat{X}_n(m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{n,1}(1) & b_{n,2}(1) & \dots & b_{n,K_n}(1) \\ b_{n,1}(2) & b_{n,2}(2) & \dots & b_{n,K_n}(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n,1}(m) & b_{n,2}(m) & \dots & b_{n,K_n}(m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{n,1} \\ x_{n,2} \\ \vdots \\ x_{n,K_n} \end{bmatrix} = B_n X_n;$$

构建出混合整数规划模型:

$$\min_{A, B_n} \left\| X - DA - \sum_{n=1}^N B_n X_n \right\|_F^2 + \beta \|U - QA\|_F^2$$

$$s.t.: A \geq 0$$

其中, X 为用户总智能电表读出的负荷曲线, β 为正则项系数, U 为 1 构成的列向量, Q 为信号分组矩阵, A 为激活系数矩阵, N 为稳定符合设备台数, X_n 为功率状态矩阵, B_n 为状态选择矩阵, m 是一次优化的截取的时间序列长度。

可选地, 在一些实施例, 第一计算模块 300, 还用于:

流程约束为:

$$\gamma \|RA\|_F^2;$$

对稳定负荷设备限制最长持续时间和限制最短持续时间, 其中, 最长持续时间 $W_{n,k}$ 采用一组线性不等式来约束:

$$\sum_{i=t}^{t+W_{n,k}-1} b_{n,k}(i) \leq W_{n,k} - 1;$$

$$\forall t \in \{1, 2, \dots, m - W_{n,k} + 1\};$$

最短持续时间 $w_{n,k}$ 采用一组线性不等式来约束:

$$\sum_{i=t}^{t+w_{n,k}-1} b_{n,k}(i) \geq w_{n,k} (b_{n,k}(t) - b_{n,k}(t-1));$$

$$\forall t \in \{2, 3, \dots, m - w_{n,k} + 1\};$$

其中, γ 为正则项系数, R 为流程限制矩阵。

需要说明的是, 前述对基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解方法实施例的解释说明也适用于该实施例的基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解装置, 此处不再赘述。

根据本申请实施例提出的基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解装置, 通过获取待分解工业设施的设备资产清单, 将工业设备分类, 一类为功率可连续调节的动态负荷设备, 一类为功率在固定状态间切换的稳定负荷设备; 一定规模的设备级的用电数据作为训练集, 使用数字滤波的方法处理合适的动态负荷设备负荷曲线, 利用负荷中波动频繁的脉冲部分的时不变性扩充其训练数据集; 利用设备信息和训练数据构建用于分解的混合整数规划模型; 利用一些设备的工业流程依赖等物理限制, 引入模型修正项或约束; 求解规划问题得到分解结果。由此, 解决了现有负荷分解技术难以在工业负荷数据不充足、数据获取困难的限制下有效处理工业场景下的复杂设备负荷辨识的问题, 能够同时考虑动态负荷设备和稳定负荷设备的负荷特性, 在工业场景下能够进行准确度较高的非侵入式负荷分解。

图4为本申请实施例提供的电子设备的结构示意图。该电子设备可以包括:

存储器401、处理器402及存储在存储器401上并可在处理器402上运行的计算机程序。

处理器402执行程序时实现上述实施例中提供的基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解方法。

进一步地, 电子设备还包括:

通信接口403, 用于存储器401和处理器402之间的通信。

存储器401, 用于存放可在处理器402上运行的计算机程序。

存储器401可能包含高速RAM存储器, 也可能还包括非易失性存储器(non-volatile memory), 例如至少一个磁盘存储器。

如果存储器401、处理器402和通信接口403独立实现, 则通信接口403、存储器401

和处理器 402 可以通过总线相互连接并完成相互间的通信。总线可以是工业标准体系结构 (Industry Standard Architecture, 简称为 ISA) 总线、外部设备互连 (Peripheral Component, 简称为 PCI) 总线或扩展工业标准体系结构 (Extended Industry Standard Architecture, 简称为 EISA) 总线等。总线可以分为地址总线、数据总线、控制总线等。为便于表示, 图 4 中仅用一条粗线表示, 但并不表示仅有一根总线或一种类型的总线。

可选的, 在具体实现上, 如果存储器 401、处理器 402 及通信接口 403, 集成在一块芯片上实现, 则存储器 401、处理器 402 及通信接口 403 可以通过内部接口完成相互间的通信。

处理器 402 可能是一个中央处理器 (Central Processing Unit, 简称为 CPU), 或者是特定集成电路 (Application Specific Integrated Circuit, 简称为 ASIC), 或者是被配置成实施本申请实施例的一个或多个集成电路。

本申请实施例还提供一种计算机可读存储介质, 其上存储有计算机程序, 该程序被处理器执行时实现如上的基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解方法。

在本说明书的描述中, 参考术语“一个实施例”、“一些实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本申请的至少一个实施例或示例中。在本说明书中, 对上述术语的示意性表述不必针对的是相同的实施例或示例。而且, 描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任一个或 N 个实施例或示例中以合适的方式结合。此外, 在不相互矛盾的情况下, 本领域的技术人员可以将本说明书中描述的不同实施例或示例以及不同实施例或示例的特征进行结合和组合。

此外, 术语“第一”、“第二”仅用于描述目的, 而不能理解为指示或暗示相对重要性或者隐含指明所指示的技术特征的数量。由此, 限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或者隐含地包括至少一个该特征。在本申请的描述中, “N 个”的含义是至少两个, 例如两个, 三个等, 除非另有明确具体的限定。

流程图中或在此以其他方式描述的任何过程或方法描述可以被理解为, 表示包括一个或更 N 个用于实现定制逻辑功能或过程的步骤的可执行指令的代码的模块、片段或部分, 并且本申请的优选实施方式的范围包括另外的实现, 其中可以不按所示出或讨论的顺序, 包括根据所涉及的功能按基本同时的方式或按相反的顺序, 来执行功能, 这应被本申请的实施例所属技术领域的技术人员所理解。

在流程图中表示或在此以其他方式描述的逻辑和/或步骤, 例如, 可以被认为是用于实

现逻辑功能的可执行指令的定序列表，可以具体实现在任何计算机可读介质中，以供指令执行系统、装置或设备（如基于计算机的系统、包括处理器的系统或其他可以从指令执行系统、装置或设备取指令并执行指令的系统）使用，或结合这些指令执行系统、装置或设备而使用。就本说明书而言，“计算机可读介质”可以是任何可以包含、存储、通信、传播或传输程序以供指令执行系统、装置或设备或结合这些指令执行系统、装置或设备而使用的装置。计算机可读介质的更具体的示例（非穷尽性列表）包括以下：具有一个或 N 个布线的电连接部（电子装置），便携式计算机盘盒（磁装置），随机存取存储器（RAM），只读存储器（ROM），可擦除可编程只读存储器（EPROM 或闪速存储器），光纤装置，以及便携式光盘只读存储器（CDROM）。另外，计算机可读介质甚至可以是可在其上打印所述程序的纸或其他合适的介质，因为可以例如通过对纸或其他介质进行光学扫描，接着进行编辑、解译或必要时以其他合适方式进行处理来以电子方式获得所述程序，然后将其存储在计算机存储器中。

应当理解，本申请的各部分可以用硬件、软件、固件或它们的组合来实现。在上述实施方式中，N 个步骤或方法可以用存储在存储器中且由合适的指令执行系统执行的软件或固件来实现。如，如果用硬件来实现和在另一实施方式中一样，可用本领域公知的下列技术中的任一项或它们的组合来实现：具有用于对数据信号实现逻辑功能的逻辑门电路的离散逻辑电路，具有合适的组合逻辑门电路的专用集成电路，可编程门阵列（PGA），现场可编程门阵列（FPGA）等。

本技术领域的普通技术人员可以理解实现上述实施例方法携带的全部或部分步骤是可以通程序来指令相关的硬件完成，所述的程序可以存储于一种计算机可读存储介质中，该程序在执行时，包括方法实施例的步骤之一或其组合。

此外，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模块中，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模块中。上述集成的模块既可以采用硬件的形式实现，也可以采用软件功能模块的形式实现。所述集成的模块如果以软件功能模块的形式实现并作为独立的产品销售或使用，也可以存储在一个计算机可读存储介质中。

上述提到的存储介质可以是只读存储器，磁盘或光盘等。尽管上面已经示出和描述了本申请的实施例，可以理解的是，上述实施例是示例性的，不能理解为对本申请的限制，本领域的普通技术人员在本申请的范围内可以对上述实施例进行变化、修改、替换和变型。

权利要求书

1、一种基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解方法，其特征在于，包括以下步骤：

获取待分解工业设备的设备清单、待分解负荷曲线，并基于所述设备清单和所述待分解负荷曲线得到各设备的设备级负荷曲线；

根据耗电特性将所述待分解工业设备划分为动态负荷设备和稳定负荷设备，并对所述动态负荷设备的设备级负荷曲线进行数字滤波，并利用时不变性扩充负荷中波动频繁的脉冲部分，得到处理后的动态负荷设备的负荷曲线；

基于所述处理后的动态负荷设备负荷曲线和所述稳定负荷设备负荷曲线构建混合整数规划模型，在所述混合整数规划模型中引入工业流程约束和设备运行限制的修正后，求解得到优化变量最优取值；以及

基于所述优化问题模型对所述处理后的动态负荷设备组合信号矩阵重建出分解结果，并基于所述优化问题模型对所述稳定负荷设备转换为功率状态序列重建出分解结果。

2、根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述对所述动态负荷设备的设备级负荷曲线进行数字滤波，并利用时不变性扩充负荷中波动频繁的脉冲部分，得到处理后的动态负荷设备，包括：

对所述动态负荷设备的设备级负荷曲线先利用中值滤波去除噪声尖峰，再检测所述动态负荷设备的设备级负荷曲线中的大斜率部分将其分离，最后将每个动态设备的负荷分解为平滑的基本部分和波动剧烈的脉冲部分；

生成预设时间段的元素全为0的列向量，将所述列向量连接到每个待扩充基向量的开头，并舍去所述待扩充基向量末尾同样长度的序列，得到滞后一个单位的扩充脉冲，将所述扩充脉冲叠加到所述平滑的基本部分，得到了新基向量；

基于所述新基向量和所述波动剧烈的脉冲部分得到处理后的动态负荷设备。

3、根据权利要求2所述的方法，其特征在于，所述根据耗电特性将所述待分解工业设备划分为动态负荷设备和稳定负荷设备，包括：

对所述稳定负荷设备采用组合优化的方法建模：

$$\hat{X}_n(t) = \sum_{k=1}^{K_n} b_{n,k}(t)x_{n,k}, \quad \forall t \in T;$$

$$s.t: b_{n,k}(t) \in \{0,1\}, \quad \forall t \in T;$$

$$\sum_{k=1}^{K_n} b_{n,k}(t) = 1, \quad \forall t \in T;$$

其中, $\hat{X}_n(t)$ 为 t 时刻设备 n 的功率, t 为时刻, T 为一次优化的时间序列长度, n 为设备编号, $b_{n,k}(t)$ 为确定设备 n 所在的功率状态的变量, k 为 $[1, K_n]$ 中的整数, K_n 为设备 n 的状态个数;

对所述动态负荷设备采用各设备已知的设备级负荷曲线的线性组合来建模:

$$\begin{aligned}\hat{X}_n &= D_n A_n; \\ \text{s.t.} : A_n &\geq 0;\end{aligned}$$

其中, $\hat{X}_n$ 为设备 n 的功率时间序列, D_n 为设备 n 的信号矩阵; A_n 为激活系数矩阵。

4、根据权利要求 3 所述的方法, 其特征在于, 所述基于所述处理后的动态负荷设备负荷曲线和所述稳定负荷设备负荷曲线构建混合整数规划模型, 还包括:

将各所述动态负荷设备的信号矩阵连接为 $D = [D_1, D_2, \dots, D_n]$; 将所述稳定负荷设备的负荷模型表达为矩阵的形式:

$$\hat{X}_n(t) = [b_{n,1}(t) \quad b_{n,2}(t) \quad \cdots \quad b_{n,K_n}(t)] \begin{bmatrix} x_{n,1} \\ x_{n,2} \\ \vdots \\ x_{n,K_n} \end{bmatrix}, \forall t \in T;$$

取和信号矩阵中基向量相同的维度, 有:

$$\hat{X}_n = \begin{bmatrix} \hat{X}_n(1) \\ \hat{X}_n(2) \\ \vdots \\ \hat{X}_n(m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{n,1}(1) & b_{n,2}(1) & \cdots & b_{n,K_n}(1) \\ b_{n,1}(2) & b_{n,2}(2) & \cdots & b_{n,K_n}(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n,1}(m) & b_{n,2}(m) & \cdots & b_{n,K_n}(m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{n,1} \\ x_{n,2} \\ \vdots \\ x_{n,K_n} \end{bmatrix} = B_n X_n;$$

构建出所述混合整数规划模型:

$$\begin{aligned}\min_{A, B_n} & \left\| X - DA - \sum_{n=1}^N B_n X_n \right\|_F^2 + \beta \|U - QA\|_F^2 \\ \text{s.t.} : & A \geq 0\end{aligned}$$

其中, X 为用户总智能电表读出的负荷曲线, β 为正则项系数, U 为 1 构成的列向量, Q 为信号分组矩阵, A 为激活系数矩阵, N 为稳定符合设备台数, X_n 为功率状态矩阵, B_n 为状态选择矩阵, m 是一次优化的截取的时间序列长度。

5、根据权利要求 1 所述的方法, 其特征在于, 所述在所述混合整数规划模型中引入工艺流程约束和设备运行限制的修正, 包括:

流程约束为:

$$\gamma \|RA\|_F^2;$$

对所述稳定负荷设备限制最长持续时间和限制最短持续时间, 其中, 所述最长持续时间 $W_{n,k}$ 采用一组线性不等式来约束:

$$\sum_{i=t}^{t+W_{n,k}-1} b_{n,k}(i) \leq W_{n,k} - 1;$$

$$\forall t \in \{1, 2, \dots, m - W_{n,k} + 1\};$$

所述最短持续时间 $w_{n,k}$ 采用一组线性不等式来约束:

$$\sum_{i=t}^{t+w_{n,k}-1} b_{n,k}(i) \geq w_{n,k} (b_{n,k}(t) - b_{n,k}(t-1));$$

$$\forall t \in \{2, 3, \dots, m - w_{n,k} + 1\};$$

其中, γ 为正则项系数, R 为流程限制矩阵。

6、一种基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解装置, 其特征在于, 包括:

获取模块, 用于获取待分解工业设备的设备清单、待分解负荷曲线, 并基于所述设备清单和所述待分解负荷曲线得到各设备的设备级负荷曲线;

处理模块, 用于根据耗电特性将所述待分解工业设备划分为动态负荷设备和稳定负荷设备, 并对所述动态负荷设备的设备级负荷曲线进行数字滤波, 并利用时不变性扩充负荷中波动频繁的脉冲部分, 得到处理后的动态负荷设备的负荷曲线;

第一计算模块, 用于基于所述处理后的动态负荷设备负荷曲线和所述稳定负荷设备负荷曲线构建混合整数规划模型, 在所述混合整数规划模型中引入工业流程约束和设备运行限制的修正后, 求解得到优化变量最优取值; 以及

第二计算模块, 用于基于所述优化问题模型对所述处理后的动态负荷设备组合信号矩阵重建出分解结果, 并基于所述优化问题模型对所述稳定负荷设备转换为功率状态序列重建出分解结果。

7、根据权利要求6所述的装置, 其特征在于, 所述处理模块, 具体用于:

对所述动态负荷设备的设备级负荷曲线先利用中值滤波去除噪声尖峰, 再检测所述动态负荷设备的设备级负荷曲线中的大斜率部分将其分离, 最后将每个动态设备的负荷分解为平滑的基本部分和波动剧烈的脉冲部分;

生成预设时间段的元素全为0的列向量, 将所述列向量连接到每个待扩充基向量的开头, 并舍去所述待扩充基向量末尾同样长度的序列, 得到滞后一个单位的扩充脉冲, 将所述扩充脉冲叠加到所述平滑的基本部分, 得到了新基向量;

基于所述新基向量和所述波动剧烈的脉冲部分得到处理后的动态负荷设备。

8、根据权利要求7所述的装置, 其特征在于, 所述处理模块用于:

对所述稳定负荷设备采用组合优化的方法建模:

$$\hat{X}_n(t) = \sum_{k=1}^{K_n} b_{n,k}(t) x_{n,k}, \quad \forall t \in T;$$

$$s.t.: b_{n,k}(t) \in \{0, 1\}, \quad \forall t \in T;$$

$$\sum_{k=1}^{K_n} b_{n,k}(t) = 1, \quad \forall t \in T;$$

其中, $\hat{X}_n(t)$ 为 t 时刻设备 n 的功率, t 为时刻, T 为一次优化的时间序列长度, n 为设备编号, $b_{n,k}(t)$ 为确定设备 n 所在的功率状态的变量, k 为 $[1, K_n]$ 中的整数, K_n 为设备 n 的状态个数;

对所述动态负荷设备采用各设备已知的设备级负荷曲线的线性组合来建模:

$$\begin{aligned}\hat{X}_n &= D_n A_n; \\ \text{s.t.} : A_n &\geq 0;\end{aligned}$$

其中, $\hat{X}_n$ 为设备 n 的功率时间序列, D_n 为设备 n 的信号矩阵; A_n 为激活系数矩阵。

9、根据权利要求 8 所述的装置, 其特征在于, 所述第一计算模块, 还用于:

将各所述动态负荷设备的信号矩阵连接为 $D = [D_1, D_2, \dots, D_n]$; 将所述稳定负荷设备的负荷模型表达为矩阵的形式:

$$\hat{X}_n(t) = [b_{n,1}(t) \quad b_{n,2}(t) \quad \dots \quad b_{n,K_n}(t)] \begin{bmatrix} x_{n,1} \\ x_{n,2} \\ \vdots \\ x_{n,K_n} \end{bmatrix}, \quad \forall t \in T;$$

取和信号矩阵中基向量相同的维度, 有:

$$\hat{X}_n = \begin{bmatrix} \hat{X}_n(1) \\ \hat{X}_n(2) \\ \vdots \\ \hat{X}_n(m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{n,1}(1) & b_{n,2}(1) & \dots & b_{n,K_n}(1) \\ b_{n,1}(2) & b_{n,2}(2) & \dots & b_{n,K_n}(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n,1}(m) & b_{n,2}(m) & \dots & b_{n,K_n}(m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{n,1} \\ x_{n,2} \\ \vdots \\ x_{n,K_n} \end{bmatrix} = B_n X_n;$$

构建出所述混合整数规划模型:

$$\begin{aligned}\min_{A, B_n} & \left\| X - DA - \sum_{n=1}^N B_n X_n \right\|_F^2 + \beta \|U - QA\|_F^2 \\ \text{s.t.} : & A \geq 0\end{aligned}$$

其中, X 为用户总智能电表读出的负荷曲线, β 为正则项系数, U 为 1 构成的列向量, Q 为信号分组矩阵, A 为激活系数矩阵, N 为稳定符合设备台数, X_n 为功率状态矩阵, B_n 为状态选择矩阵, m 是一次优化的截取的时间序列长度。

10、根据权利要求 6 所述的装置, 其特征在于, 所述第一计算模块, 用于:

流程约束为:

$$\gamma \|RA\|_F^2;$$

对所述稳定负荷设备限制最长持续时间和限制最短持续时间, 其中, 所述最长持续时间 $W_{n,k}$ 采用一组线性不等式来约束:

$$\begin{aligned}\sum_{i=t}^{t+W_{n,k}-1} b_{n,k}(i) &\leq W_{n,k} - 1; \\ \forall t &\in \{1, 2, \dots, m - W_{n,k} + 1\};\end{aligned}$$

所述最短持续时间 $w_{n,k}$ 采用一组线性不等式来约束：

$$\sum_{i=t}^{t+w_{n,k}-1} b_{n,k}(i) \geq w_{n,k} (b_{n,k}(t) - b_{n,k}(t-1));$$

$$\forall t \in \{2, 3, \dots, m - w_{n,k} + 1\};$$

其中， γ 为正则项系数， R 为流程限制矩阵。

11、一种电子设备，其特征在于，包括：存储器、处理器及存储在所述存储器上并可在所述处理器上运行的计算机程序，所述处理器执行所述程序，以实现如权利要求 1-5 任一项所述的基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解方法。

12、一种计算机可读存储介质，其上存储有计算机程序，其特征在于，该程序被处理器执行，以用于实现如权利要求 1-5 任一项所述的基于混合整数规划的针对工业设施的负荷分解方法。

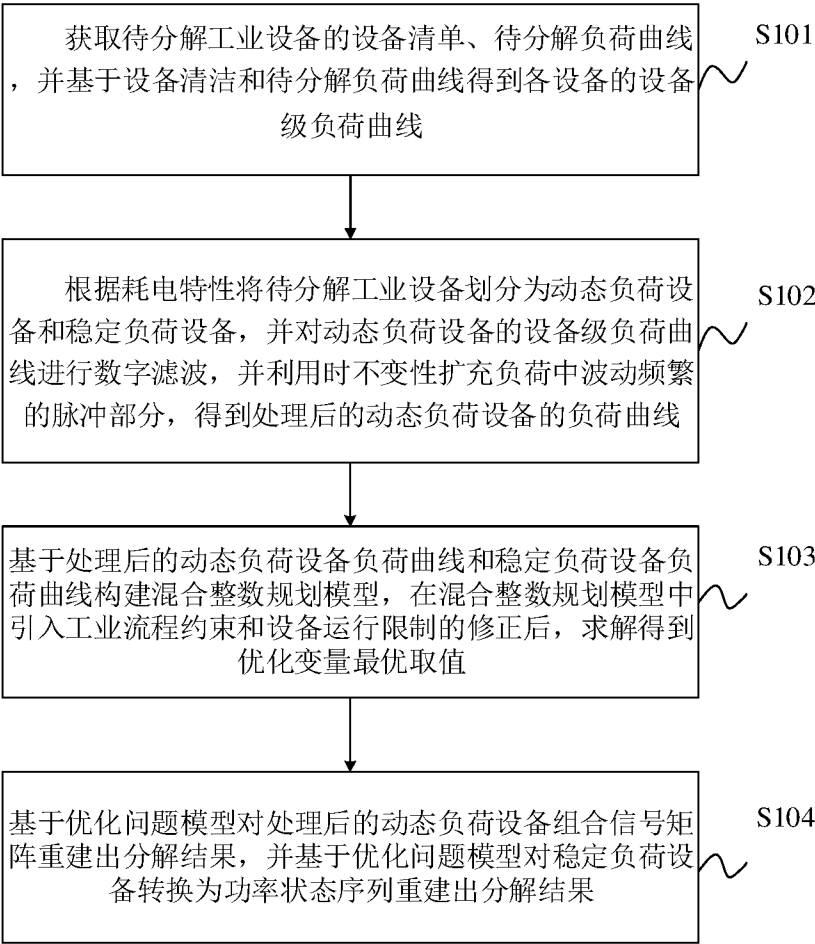


图 1

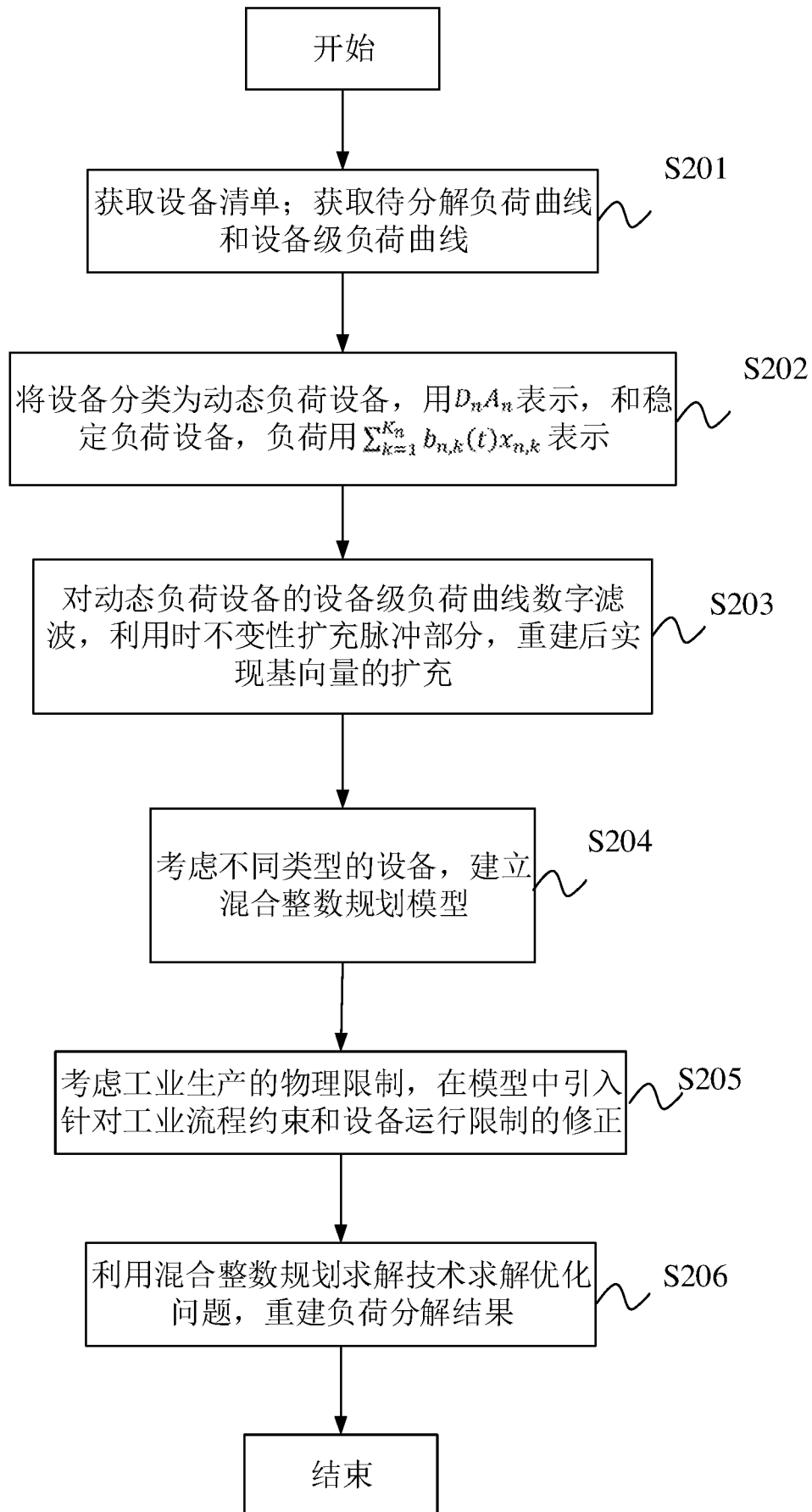


图 2

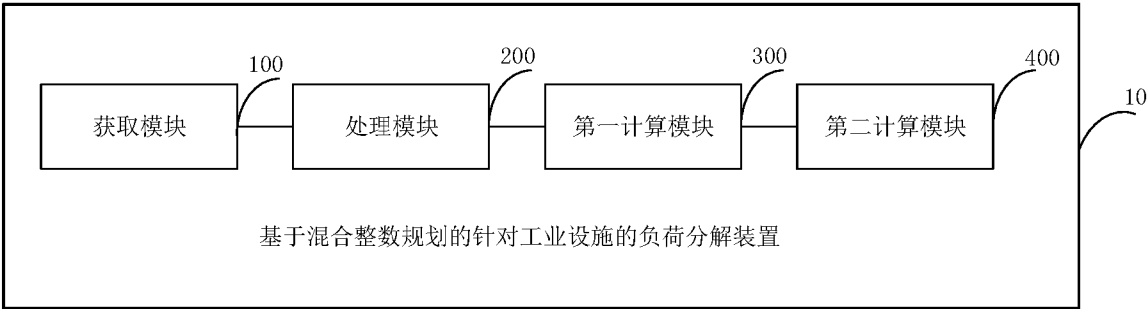


图 3

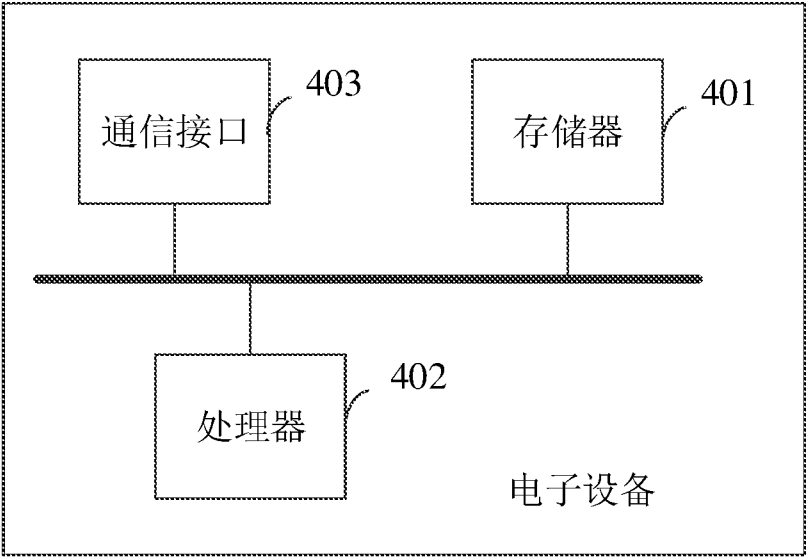


图 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2022/135019

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER G06F 30/20(2020.01)i; G06K 9/62(2022.01)i; G06Q 10/04(2012.01)i; G06Q 10/06(2012.01)i; G06Q 50/06(2012.01)i; H02J 3/00(2006.01)i According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC																	
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G06F; G06K; G06Q; 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) CNABS; CNTXT; CNKI; WPABS; DWPI; USTXT; WOTXT; EPTXT; 混合, 整数, 规划, 负荷, 分解, 分类, 动态, 曲线, 脉冲, 滤波, mixed, integer, programming, Load, decomposition, classify, dynamic, curve, pulse, filter																	
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category*</th> <th>Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages</th> <th>Relevant to claim No.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PX</td> <td>CN 114595591 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 07 June 2022 (2022-06-07) claims 1-12, and description, paragraphs [0002]-[0208]</td> <td>1-12</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 113177299 A (AEROSPACE SCIENCE & INDUSTRY SHENZHEN (GROUP) CO., LTD.) 27 July 2021 (2021-07-27) description, paragraphs [0002]-[0194]</td> <td>1-12</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 113408210 A (INNER MONGOLIA POWER GROUP CO., LTD. ULANQAB ELECTRIC POWER BUREAU et al.) 17 September 2021 (2021-09-17) entire document</td> <td>1-12</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 112348096 A (HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 09 February 2021 (2021-02-09) entire document</td> <td>1-12</td> </tr> </tbody> </table>			Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.	PX	CN 114595591 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 07 June 2022 (2022-06-07) claims 1-12, and description, paragraphs [0002]-[0208]	1-12	A	CN 113177299 A (AEROSPACE SCIENCE & INDUSTRY SHENZHEN (GROUP) CO., LTD.) 27 July 2021 (2021-07-27) description, paragraphs [0002]-[0194]	1-12	A	CN 113408210 A (INNER MONGOLIA POWER GROUP CO., LTD. ULANQAB ELECTRIC POWER BUREAU et al.) 17 September 2021 (2021-09-17) entire document	1-12	A	CN 112348096 A (HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 09 February 2021 (2021-02-09) entire document	1-12
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.															
PX	CN 114595591 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 07 June 2022 (2022-06-07) claims 1-12, and description, paragraphs [0002]-[0208]	1-12															
A	CN 113177299 A (AEROSPACE SCIENCE & INDUSTRY SHENZHEN (GROUP) CO., LTD.) 27 July 2021 (2021-07-27) description, paragraphs [0002]-[0194]	1-12															
A	CN 113408210 A (INNER MONGOLIA POWER GROUP CO., LTD. ULANQAB ELECTRIC POWER BUREAU et al.) 17 September 2021 (2021-09-17) entire document	1-12															
A	CN 112348096 A (HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 09 February 2021 (2021-02-09) entire document	1-12															
☐ 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 26 December 2022		Date of mailing of the international search report 18 January 2023															
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/CN2022/135019

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	114595591	A	07 June 2022	None	
CN	113177299	A	27 July 2021	None	
CN	113408210	A	17 September 2021	None	
CN	112348096	A	09 February 2021	CN 112348096	B 09 September 2022

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2022/135019

A. 主题的分类

G06F 30/20(2020.01)i; G06K 9/62(2022.01)i; G06Q 10/04(2012.01)i; G06Q 10/06(2012.01)i; G06Q 50/06(2012.01)i; H02J 3/00(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G06F; G06K; G06Q; 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))

CNABS;CNTXT;CNKI;WPABS;DWPI;USTXT;WOTXT;EPTXT: 混合, 整数, 规划, 负荷, 分解, 分类, 动态, 曲线, 脉冲, 滤波, mixed, integer, programming, Load, decomposition, classify, dynamic, curve, pulse, filter

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 114595591 A (清华大学) 2022年6月7日 (2022 - 06 - 07) 权利要求1-12项、说明书第[0002]-[0208]段	1-12
A	CN 113177299 A (航天科工深圳集团有限公司) 2021年7月27日 (2021 - 07 - 27) 说明书第[0002]-[0194]段	1-12
A	CN 113408210 A (内蒙古电力集团有限责任公司乌兰察布电业局 等) 2021年9月17日 (2021 - 09 - 17) 全文	1-12
A	CN 112348096 A (合肥工业大学) 2021年2月9日 (2021 - 02 - 09) 全文	1-12

☐ 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

2022年12月26日

国际检索报告邮寄日期

2023年1月18日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局(ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

徐生芹

电话号码 (86-512)88995786

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2022/135019

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	114595591	A	2022年6月7日	无	
CN	113177299	A	2021年7月27日	无	
CN	113408210	A	2021年9月17日	无	
CN	112348096	A	2021年2月9日	CN 112348096 B	2022年9月9日