



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 117633552 B

(45) 授权公告日 2024.06.04

(21) 申请号 202311692874.3

(22) 申请日 2023.12.11

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 117633552 A

(43) 申请公布日 2024.03.01

(73) 专利权人 中国石油大学(北京)
地址 102249 北京市昌平区府学路18号

(72) 发明人 王玮 焦玉博

(74) 专利代理机构 北京纪凯知识产权代理有限公司 11245
专利代理师 任文娟

(51) Int. Cl.

G06F 18/22 (2023.01)

G06F 30/20 (2020.01)

G06F 16/29 (2019.01)

G06Q 50/26 (2024.01)

G06F 113/14 (2020.01)

G06F 119/08 (2020.01)

G06F 119/14 (2020.01)

(56) 对比文件

CN 115467709 A, 2022.12.13

US 10311442 B1, 2019.06.04

CN 116628973 A, 2023.08.22

CN 117114262 A, 2023.11.24

CN 116992191 A, 2023.11.03

WO 2019246619 A1, 2019.12.26

CN 116896082 A, 2023.10.17

KR 102191026 B1, 2020.12.14

CN 116411997 A, 2023.07.11

CN 112990684 A, 2021.06.18

US 2010332373 A1, 2010.12.30

KR 20230118350 A, 2023.08.11

CN 101329582 A, 2008.12.24

WO 2011150462 A1, 2011.12.08

李延峰. 电力传输网络及其碳排放效应分析与协同优化模型研究. CNKI. 2023, 全文.

Yafeng Gong. Damage Identification of Urban Overpass Based on Modal Frequency and Genetic Neural Network. IEEE. 2012, 全文.

王众; 骆毓燕; 匡建超; 毛永娜. 我国大型燃煤电厂CCS源汇匹配与优化研究. 工业工程与管理. 2016, (第06期), 全文.

孙亮; 陈文颖. 基于GAMS的CCS源汇匹配管网优化模型. 清华大学学报(自然科学版). 2013, (01), 全文. (续)

审查员 李乔

权利要求书3页 说明书10页 附图1页

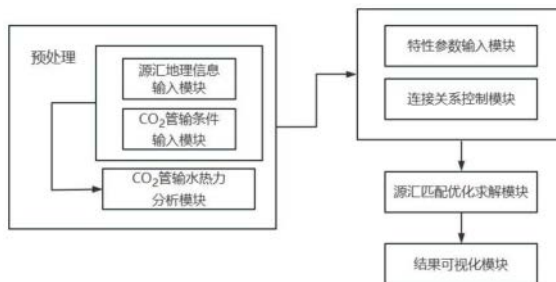
(54) 发明名称

二氧化碳源汇匹配方法、装置、介质及设备

(57) 摘要

本发明涉及一种二氧化碳源汇匹配方法、装置、介质及设备, 方法如下步骤: 以CO₂在超临界相和密相输送条件下管输过程中的水热力分析为基础, 将规划区内各潜在连接的管输水热力条件以管输安全流量的形式呈现出来, 通过与混合整数线性规划模型耦合, 构建保证CO₂管输运行可行性的源汇匹配优化数学模型, 将规划区内各潜在连接的安全管输流量传递给源汇匹配优化数学模型, 通过调整运行工况来对拟建规划区开展最优源汇匹配分析。该方法引入CO₂管输水热

力仿真机理, 构建了一种单周期源点与汇点连接结构下的考虑CO₂管道输送水热力条件的用于评估CCS工程性能的源汇匹配优化数学模型。



CN 117633552 B

[接上页]

(56) 对比文件

陈霖. 中石化二氧化碳管道输送技术及实

践. 石油工程建设. 2016, (04), 全文.

1. 一种二氧化碳源汇匹配方法,其特征在于,包括如下步骤:

以CO₂在超临界相和密相输送条件下管输过程中的水热力分析为基础,将规划区内各潜在连接的管输水热力条件以安全管输流量的形式呈现出来,通过与混合整数线性规划模型耦合,构建保证CO₂管输运行可行性的源汇匹配优化数学模型,

将规划区内各潜在连接的安全管输流量传递给源汇匹配优化数学模型,通过调整运行工况来对拟建规划区开展最优源汇匹配分析;

CO₂在超临界相和密相输送条件下管输过程中的水热力分析,包括如下过程:

根据规划区内各源点与各汇点间的空间位置,计算各潜在连接的空间距离;

设定规划区管输工程的运行工况,包括设定各源点CO₂体系组成、CO₂输送状态、外输压力及外输温度;

基于地理位置信息与运行工况信息,利用耦合了CO₂物性与相特性分析的CO₂管输水热力计算模型,获取各潜在连接的安全管输流量;

将各潜在连接的安全管输流量储存到数据矩阵;

最后将储存各潜在连接安全管输流量的数据矩阵传递给源汇匹配优化数学模型,以开展拟建规划区的最优源汇匹配分析;

还包括预先对规划区内所有潜在连接的安全运行流量上限进行求解,并将结果置于数据矩阵以供优化源汇匹配优化数学模型使用的步骤,其中,

安全运行流量上限为规划区内各潜在连接对应管长下,能够保证以超临界相或密相输送时所承载的最大流量,该条件由下式表示:

$$0 \leq F_{ik} \leq flow_{ik}^{operation_MAX} \cdot z_{ik} \quad \forall i \in I, k \in K$$

其中: $flow_{ik}^{operation_MAX}$ 表示设定源点 i 与汇点 k 连接的最大安全管输流量, z_{ik} 表示节点 i 与节点 k 之间是否连接的二元变量;

所提出的源汇匹配优化数学模型的主要目标函数为:

$$\min \sum_i \sum_k (\beta F_{ik} + \alpha z_{ik}) F_T L_{ik} \quad \forall i \in N, k \in N$$

其中: β 与 α 为源汇匹配优化数学模型的关键常数; F_{ik} 为节点 i 与节点 k 之间的管输流量; z_{ik} 为节点 i 与节点 k 之间是否连接的二元变量,连接时 $z_{ik} = 1$, 否则为0; F_T 为越障系数; L_{ik} 为节点 i 与节点 k 之间的距离;

为了保证设定的CO₂减排目标不超过规划区最大的CO₂减排能力,设定以保证CO₂捕集量最大为次要目标函数,在进行经济性分析之前先确定规划区最大CO₂减排能力:

$$\max \sum_{i \in N} C_i$$

其中: C_i 表示节点 i 的CO₂捕集量,只有源点才具备CO₂捕集能力,对于汇点而言该值为0。

2. 根据权利要求1所述的二氧化碳源汇匹配方法,其特征在于,源汇匹配优化数学模型的约束条件除了CO₂管输流量限制外,还包括:

1) 处理非线性变量; 2) 只允许将捕集的CO₂从源点向外输送,而汇点不具备这项权利; 3) 限定节点间的连接模式,即只允许源点与汇点相连; 4) 在输送网络中不允许出现CO₂分流情

况;5) CO₂在输送网络中的任意节点处均需要保证流量平衡;6) 拟建规划区内各碳排放源的CO₂捕集量不能超过其自身碳排放量上限;7) 拟建规划区内各碳封存汇的CO₂注入量不能超过其最大存储容量;8) 拟定规划区需要在规划周期内完成碳减排任务。

3. 一种二氧化碳源汇匹配优化装置,其特征在于,包括:

源汇地理信息输入模块,用于输入规划区内各碳排放源点与各碳封存汇点的经纬度坐标信息,作为计算规划区内各潜在连接空间距离的前置条件;

CO₂管输条件输入模块,用于输入各源点包括外输CO₂温度、压力条件及管道参数在内的各种参数,作为开展不同管输条件下源汇匹配优化的前置条件;

CO₂管输水热力分析模块,用于结合输入的源汇地理信息及CO₂管输条件开展各潜在连接管输水热力分析,作为获取各潜在连接安全管输流量的前置条件;

特性参数输入模块,用于输入各碳排放源点、各碳封存汇点具备的工作特性与规划区特性参数;

连接关系控制模块,用于限制规划区内某碳排放源点与某碳封存汇连接关系的生成,设定后用于表示源汇连接关系的二元变量会立即更新;

源汇匹配优化求解模块,用于根据获得的各潜在连接的安全管输流量获取拟建规划区的最优源汇匹配关系;

结果可视化模块,用于呈现当前设定条件下的最优源汇匹配关系;

其中,该装置的运行流程具体为:

根据规划区内各源点与各汇点间的空间位置,计算各潜在连接的空间距离;

设定规划区管输工程的运行工况,包括设定各源点CO₂体系组成、CO₂输送状态、外输压力及外输温度;

基于地理位置信息与运行工况信息,利用耦合了CO₂物性与相特性分析的CO₂管输水热力计算模型,获取各潜在连接的安全管输流量;

将各潜在连接的安全管输流量储存到数据矩阵;

最后将储存各潜在连接安全管输流量的数据矩阵传递给源汇匹配优化数学模型,以开展拟建规划区的最优源汇匹配分析;

还包括预先对规划区内所有潜在连接的安全运行流量上限进行求解,并将结果置于数据矩阵以供优化源汇匹配优化数学模型使用的步骤,其中,

安全运行流量上限为规划区内各潜在连接对应管长下,能够保证以超临界相或密相输送时所承载的最大流量,该条件由下式表示:

$$0 \leq F_{ik} \leq flow_{ik}^{operation_MAX} \cdot z_{ik} \quad \forall i \in I, k \in K$$

其中: $flow_{ik}^{operation_MAX}$ 表示设定源点 i 与汇点 k 连接的最大安全管输流量, z_{ik} 表示节点 i 与节点 k 之间是否连接的二元变量;

所提出的源汇匹配优化数学模型的主要目标函数为:

$$\min \sum_i \sum_k (\beta F_{ik} + \alpha z_{ik}) F_T L_{ik} \quad \forall i \in N, k \in N$$

其中: β 与 α 为源汇匹配优化数学模型的关键常数; F_{ik} 为节点 i 与节点 k 之间的管输流

量; z_{ik} 为节点 i 与节点 k 之间是否连接的二元变量, 连接时 $z_{ik} = 1$, 否则为 0; F_T 为越障系数; L_{ik} 为节点 i 与节点 k 之间的距离;

为了保证设定的 CO_2 减排目标不超过规划区最大的 CO_2 减排能力, 设定以保证 CO_2 捕集量最大为次要目标函数, 在进行经济性分析之前先确定规划区最大 CO_2 减排能力:

$$\max \sum_{i \in N} C_i$$

其中: C_i 表示节点 i 的 CO_2 捕集量, 只有源点才具备 CO_2 捕集能力, 对于汇点而言该值为 0。

4. 根据权利要求 3 所述的二氧化碳源汇匹配优化装置, 其特征在于, 该装置的运行流程为: (1) 根据规划区内碳排放源与碳封存点的地理信息计算规划区各潜在连接的空间距离, 并结合设定的 CO_2 管输条件开展各潜在连接的水热力分析, 明确各潜在连接的安全管输流量; (2) 结合各潜在连接的安全管输流量, 以碳捕集最大为目标函数开展源汇匹配优化, 从而获取当前规划区的最大碳减排量; (3) 根据得到的规划区能够实现的最大的碳减排量, 结合各潜在连接的安全管输流量结果, 开展以 CO_2 管输费用最小为目标函数的最优源汇匹配优化分析。

5. 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, 所述计算机程序被处理器执行时实现权利要求 1-2 任意一项所述二氧化碳源汇匹配方法的步骤。

6. 一种计算机设备, 包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序, 其特征在于, 所述处理器执行所述计算机程序时实现权利要求 1-2 任意一项所述二氧化碳源汇匹配方法的步骤。

二氧化碳源汇匹配方法、装置、介质及设备

技术领域

[0001] 本发明涉及一种二氧化碳源汇匹配方法、装置、介质及设备,属于温室气体减排技术领域。

背景技术

[0002] 碳捕集与封存(CCS)已成为一种有效地减少二氧化碳(CO₂)排放的集成性技术。碳捕集与封存(CCS)技术体系总共分为三大部分:1)碳捕集;2)碳输送;3)碳封存。其中碳捕集是指将CO₂从工业生产、能源利用或大气中分离出来的过程,主要分为燃烧前捕集、燃烧后捕集、富氧燃烧和化学链捕集。适合捕集的排放源包括发电厂、钢铁厂、水泥厂、冶炼厂、化肥厂、合成燃料厂以及基于化石原料的制氢工厂等,其中化石燃料发电厂是二氧化碳捕集最主要的排放源;碳输送是指将捕集的CO₂输送到利用地或封存地的过程,可行的输送方式包括罐车运输、船舶运输及管道运输三种,其中,管道输送方式因其较高的经济性被认定为首选方案;碳封存是指通过工程技术手段将捕集的CO₂注入深部地质储层,如枯竭的油气藏或咸水含水层,从而实现CO₂与大气长期隔绝的过程。

[0003] 在碳捕集与封存(CCS)工程规划区内往往同时存在多个碳排放源与碳封存点,各源点、各汇点都拥有独特的工作特性(例如:各源点的排放能力不同等;各汇点的封存能力不同等)。如何在满足规划区内各源点与各汇点工作特性的同时实现规划区碳减排量最大化是一项重要且必要的任务,即碳排放源点与碳储存汇点间的最优匹配问题是一项十分重要的研究内容。

[0004] 现已有的关于规划区内源汇匹配部署分析的研究倾向于通过考虑源汇点的供给能力、连续时间上的调度计划及规划区地理因素限制等因素以建立可用于规划分析的数学模型,但未充分考虑匹配本身应该具备的管输条件,导致某些长距离匹配因其自身较苛刻的管输条件失去连接意义,进而无法保证源汇匹配部署的决策安全性和可靠性。

发明内容

[0005] 针对上述技术问题,本发明提供一种二氧化碳源汇匹配方法、装置、介质及设备,该方法引入CO₂管输水热力仿真机理,构建了一种单周期源点与汇点连接结构下的考虑CO₂管道输送水热力条件的用于评估CCS工程性能的源汇匹配优化数学模型,使评估工作更具有实际意义。

[0006] 为实现上述目的,本发明采取以下技术方案:

[0007] 一种二氧化碳源汇匹配方法,包括如下步骤:

[0008] 以CO₂在超临界相和密相输送条件下管输过程中的水热力分析为基础,将规划区内各潜在连接的管输水热力条件以管输安全流量的形式呈现出来,通过与混合整数线性规划模型耦合,构建保证CO₂管输运行可行性的源汇匹配优化数学模型,

[0009] 将规划区内各潜在连接的安全管输流量传递给源汇匹配优化数学模型,通过调整运行工况来对拟建规划区开展最优源汇匹配分析。

[0010] 所述的结合CO₂管输条件的二氧化碳源汇匹配方法,包括如下过程:

[0011] 根据规划区内各源点与各汇点间的空间位置,计算各潜在连接的空间距离;

[0012] 设定规划区管输工程的运行工况,包括设定各源点CO₂体系组成、CO₂输送状态、外输压力及外输温度;

[0013] 基于地理位置信息与运行工况信息,利用耦合了CO₂物性与相特性分析的CO₂管输水热力计算模型,获取各潜在连接的安全管输流量;

[0014] 将各潜在连接的安全管输流量储存到数据矩阵;

[0015] 最后将储存各潜在连接安全管输流量的数据矩阵传递给源汇匹配优化数学模型,以开展拟建规划区的最优源汇匹配分析。

[0016] 所述的二氧化碳源汇匹配方法,优选地,还包括预先对规划区内所有潜在连接的安全运行流量上限进行求解,并将结果置于数据矩阵以供优化源汇匹配优化数学模型使用的步骤,其中,

[0017] 安全运行流量上限为规划区内各潜在连接对应管长下,能够保证以超临界相或密相输送时所承载的最大流量,该条件由下式表示:

$$[0018] \quad 0 \leq F_{ik} \leq flow_{ik}^{operation_MAX} \cdot z_{ik} \quad \forall i \in I, k \in K$$

[0019] 其中: $flow_{ik}^{operation_MAX}$ 表示节点i与节点k间的最大安全管输流量, z_{ik} 表示节点i与节点k之间是否连接的二元变量。

[0020] 所述的二氧化碳源汇匹配方法,优选地,源汇匹配优化数学模型的主要目标函数为:

$$[0021] \quad \min \sum_i \sum_k (\beta F_{ik} + \alpha z_{ik}) F_T L_{ik} \quad \forall i \in N, k \in N$$

[0022] 其中: β 与 α 为源汇匹配优化数学模型的关键常数; F_{ik} 为节点i与节点k之间的管输流量(Mt/y); z_{ik} 为节点i与节点k之间是否连接的二元变量,连接时 $z_{ik}=1$,否则为0; F_T 为越障系数; L_{ik} 为节点i与节点k之间的距离(km)。

[0023] 所述的二氧化碳源汇匹配方法,优选地,为了保证设定的CO₂减排目标不超过规划区最大的CO₂减排能力,设定以保证CO₂捕集量最大为次要目标函数,在进行经济性分析之前先确定规划区最大CO₂减排能力:

$$[0024] \quad \max \sum_{i \in N} C_i$$

[0025] 其中: C_i 表示节点i的CO₂捕集量(Mt/y),需要说明的是只有源点才具备CO₂捕集能力,对于汇点而言该值为0。

[0026] 所述的二氧化碳源汇匹配方法,优选地,源汇匹配优化数学模型的约束条件除了CO₂管输流量限制外,还包括:

[0027] 1)处理非线性变量;2)只允许将捕集的CO₂从源点向外输送,而汇点不具备这项权利;3)限定节点间的连接模式,即只允许源点与汇点相连;4)在输送网络中不允许出现CO₂分流情况;5)CO₂在输送网络中的任意节点处均需要保证流量平衡;6)拟建规划区内各碳排放源的CO₂捕集量不能超过其自身碳排放量上限;7)拟建规划区内各碳封存汇的CO₂注入量不能超过其最大存储容量;8)拟定规划区需要在规划周期内完成碳减排任务。

[0028] 本发明第二方面提供一种二氧化碳源汇匹配优化装置,包括:

[0029] 源汇地理信息输入模块,用于输入规划区内各碳排放源点与各碳封存汇点的经纬度坐标信息,作为计算规划区内各潜在连接空间距离的前置条件;

[0030] CO₂管输条件输入模块,用于输入各源点包括外输CO₂温度、压力条件及管道参数在内的各种参数,作为开展不同管输条件下源汇匹配优化的前置条件;

[0031] CO₂管输水热力分析模块,用于结合输入的源汇地理信息及CO₂管输条件开展各潜在连接管输水热力分析,作为获取各潜在连接安全管输流量的前置条件;

[0032] 特性参数输入模块,用于输入各碳排放源点、各碳封存汇点具备的工作特性与规划区特性参数;

[0033] 连接关系控制模块,用于限制规划区内某碳排放源点与某碳封存汇连接关系的生成,设定后用于表示源汇连接关系的二元变量会立即更新;

[0034] 源汇匹配优化求解模块,用于根据获得的各潜在连接的安全管输流量获取拟建规划区的最优源汇匹配关系;

[0035] 结果可视化模块,用于呈现当前设定条件下的最优源汇匹配关系。

[0036] 所述的二氧化碳源汇匹配优化装置,优选地,该装置的运行流程为:(1)根据规划区内碳排放源与碳封存点的地理信息计算规划区各潜在连接的空间距离,并结合设定的CO₂管输条件开展各潜在连接的水热力分析,明确各潜在连接的安全管输流量;(2)结合各潜在连接的安全管输流量,以碳捕集最大为目标函数开展源汇匹配优化,从而获取当前规划区的最大碳减排量;(3)根据得到的规划区能够实现的最大碳减排量,结合各潜在连接的安全管输流量结果,开展以CO₂管输费用最小为目标函数的最优源汇匹配优化分析。

[0037] 本发明第三方面提供一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现上述任意一项所述二氧化碳源汇匹配方法的步骤。

[0038] 本发明第四方面提供一种计算机设备,包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序,所述处理器执行所述计算机程序时实现上述任意一项所述二氧化碳源汇匹配方法的步骤。

[0039] 本发明由于采取以上技术方案,其具有以下优点:

[0040] 1、本发明考虑了CO₂在长距离管道输送时物性与相特性的变化,并基于管输水热力仿真机理,构建了应用于CCS系统规划研究的优化数学模型;在CO₂以超临界相输送的背景下,允许在管输过程中出现密相,进一步贴近实际CCS工程的管输工况,利于决策者制定更丰富的规划方案,提升了最优源汇匹配优化的决策可靠性。

[0041] 2、本发明通过引入安全管输流量并将其与源汇匹配数学优化模型耦合,进而形成了一种以保证CO₂管道输送可行性的应用于CCS系统规划研究的优化模型。本发明可通过调整管道输送工况来明确CO₂以超临界相或密相输送时规划区最优源汇匹配关系的变化。

附图说明

[0042] 图1是本发明一实施例提供的考虑CO₂管输条件的源汇匹配优化装置内置模块关系图;

[0043] 图2是本发明该实施例提供的考虑CO₂管输条件的源汇匹配优化装置运行流程图。

具体实施方式

[0044] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚,下面对本发明中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通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,都属于本发明保护的范围。

[0045] 现已有的关于规划区内源汇匹配部署分析的研究倾向于通过考虑源汇点的供给能力、连续时间上的调度计划及规划区地理因素限制等因素以建立可用于规划分析的数学模型,但未充分考虑匹配本身应该具备的管输条件,导致某些长距离匹配因其自身较苛刻的管输条件失去连接意义,进而无法保证源汇匹配部署的决策安全性和可靠性。

[0046] 基于上述问题,本发明通过在碳捕集与封存(CCS)源汇匹配问题中引入CO₂管输水热力仿真机理,构建了一种单周期源点与汇点连接结构下的考虑CO₂管道输送水热力条件的用于评估CCS工程性能的源汇匹配优化数学模型,使评估工作更具有实际意义。

[0047] 为了能够在源汇匹配优化数学模型中将规划区内各潜在连接的管输水热力情况恰当地体现出来,从而提升源汇匹配优化问题中管道输送部分的决策安全性及可靠性,本发明考虑CO₂在长距离管道输送时物性与相特性的变化,并基于管输水热力仿真机理,在CO₂以超临界相输送的背景下,允许在管输过程中出现密相,进一步贴近实际CCS工程的CO₂管输工况,利于决策者制定更丰富的规划方案。本发明通过引入安全管输流量并与表示节点连接关系的二元变量线性乘积后以约束的形式耦合到混合整数线性规划模型中,进而形成应用于CCS系统规划研究的源汇匹配优化数学模型。

[0048] 具体的方式为:以CO₂在超临界相和密相输送条件下的管输过程中的水热力分析为基础,将CCS规划区内各潜在连接的管输水热力条件以管输安全流量的形式体现,通过与混合整数线性规划(MILP)模型耦合,构建了保证CO₂管输运行可行性的源汇匹配优化数学模型框架,使CCS源汇匹配规划中的管输环节具有实际意义。

[0049] 进一步地,CO₂管输水热力分析流程包括如下过程:

[0050] (1) 根据规划区内各源点与各汇点间的空间位置计算各潜在连接的空间距离;

[0051] (2) 设定规划区管输工程的运行工况,包括设定各源点CO₂体系组成、CO₂输送状态、外输压力及外输温度等;

[0052] (3) 基于地理位置信息与运行工况信息,利用耦合了CO₂物性与相特性分析的CO₂管输水热力计算模型来获取各潜在连接的安全管输流量;

[0053] (4) 将各潜在连接的安全管输流量储存到数据矩阵;

[0054] (5) 将储存各潜在连接的安全管输流量数据矩阵传递给本发明所构建的源汇匹配优化数学模型中,并通过调整运行工况来对拟建规划区开展最优源汇匹配分析。

[0055] CO₂管输水热力计算模型,通过如下方式获得:

[0056] 状态方程(EOS)相关性提供了化学物质的压力、体积、温度和组成之间的基础数学关系。在CCS的背景下,这些相关性对于计算CO₂物性与热力学特性是必要的,这些特性是用于描述超临界或密相条件下CO₂流流动的水力方程的必要输入条件。目前已经有几种类型的状态方程(EOS),一类是立方型状态方程,如Peng-Robinson(PR)、Soave-Redlich-Kwong(SRK)等,还有一类是多参数状态方程,如Benedict-WebbRubin(BWR),还有基于对应态原理的状态方程,如Lee-Kessler(LK),Statistical Associating Fluid Theory(SAFT)及基于

亥姆赫兹函数的Span andWagner (SW), GERG-2008, 以上关联式没有一个可以在所有热力学条件下及所有组分下都保持适用性, 但都有各自的优点及适用的范围。例如 (For instance), 当流体为纯CO₂时, Span andWagner (SW) 状态方程会产生极其准确的计算结果。但对于含杂质CO₂时, Peng-Robinson (PR) 状态方程的计算结果准确性最高。国际上广泛认可的挪威船级社于2010年发布的DNV-RP-J202《二氧化碳管道设计与操作标准》同样指出, 对于高含二氧化碳的多组分流体, 建议采用PR状态方程计算流体相特性。因此, 以管道输送的控制方程(已知)为基础, 耦合管道与环境之间的传热模型(已知)和CO₂多元体系相特性模型(已知), 合理表征CO₂管道的工艺运行状态参数, 建立基于PR状态方程的超临界CO₂管输水力热力稳态计算方法。

[0057] 本发明具体以保证CO₂管输费用最小为主要目标函数, 并通过设定CO₂减排目标, 使规划区在完成CO₂减排任务的同时, 实现CCS工程管输环节的总费用最小, 从而进一步落实碳CCS工程的作用。所构建的考虑CCS管输条件的源汇匹配优化数学模型的主要目标函数为:

$$[0058] \quad \min \sum_i \sum_k (\beta F_{ik} + \alpha z_{ik}) F_T L_{ik} \quad \forall i \in N, k \in N$$

[0059] 其中: β 与 α 为源汇匹配优化数学模型的关键常数; F_{ik} 为节点i与节点k之间的管输流量(Mt/y); z_{ik} 为表示节点i与节点k之间是否连接的二元变量, 连接时 $z_{ik}=1$, 否则为0; F_T 为越障系数; L_{ik} 为节点i与节点k之间的距离(km)。

[0060] 同时, 为了保证设定的CO₂减排目标不超过规划区最大的CO₂减排能力, 设定以保证CO₂捕集量最大为次要目标函数, 在进行经济性分析之前先确定规划区最大CO₂减排能力。

$$[0061] \quad \max \sum_{i \in N} C_i$$

[0062] 其中: C_i 表示节点i的CO₂捕集量(Mt/y), 需要说明的是只有源点才具备CO₂捕集能力, 对于汇点而言该值为0。

[0063] 保证CO₂管输运行可行性的源汇匹配优化数学模型的基本约束条件主要包括: 1) 处理非线性变量; 2) 只允许将捕集的CO₂从源点向外输送, 而汇点不具备这项权利; 3) 限定节点间的连接模式, 即只允许源点与汇点相连; 4) 在输送网络中不允许出现CO₂分流情况; 5) CO₂在输送网络中的任意节点处均需要保证流量平衡; 6) 拟建规划区内各碳排放源的CO₂捕集量不能超过其自身碳排放量上限; 7) 拟建规划区内各碳封存汇的CO₂注入量不能超过其最大存储容量; 8) 拟定规划区需要在规划周期内完成碳减排任务。

$$[0064] \quad \begin{cases} \sum_{k \in K} z_{ik} \leq 1 & \forall i \in I \\ z_{ik} = 0 & \forall i \in I, k \in I \\ F_{ik} = 0 & \forall i \in I, k \in I \\ \sum_{k \in N} F_{ki} + C_i = \sum_{k \in N} F_{ik} + S_i & \forall i \in N \\ 0 \leq C_i \leq E_i \sum_{k \in N} z_{ik} & \forall i \in N \\ 0 \leq S_i \leq S_i^{MAX} & \forall i \in N \\ \sum_{i \in N} C_i \geq E_{TAR} \end{cases}$$

[0065] 其中： z_{ik} 为表示节点i与节点k是否连接的二元变量，若节点i与节点k形成匹配则 z_{ik} 为1，否则为0； F_{ik} 表示节点i与节点k之间的CO₂输送量 (Mt/y)； C_i 表示节点i的碳捕集量 (Mt/y) (设定汇点不具备碳捕集能力，即汇点的碳捕集量为0)， S_i 表示节点i的碳封存量 (Mt/y) (设定源点不具备碳封存能力，即源点的碳封存量为0)； S_i^{MAX} 表示节点i的年最大存储容量 (Mt/y)； E_i 表示节点i的最大碳排量 (Mt/y)； E_{TAR} 表示规划区的碳减排目标 (Mt/y)。

[0066] 除以上基本约束条件外，还需要注意的是，管输过程的水热力分析包含着许多非线性参数，如果直接将优化求解过程与水热力计算过程耦合势必会增加问题的求解难度。同时，在当前源点外输流量的设定条件下 (即源点外输量小于其自身的最大碳排量)，最优匹配具备的管输量无法明确。因此，为了使构建的模型具备良好的计算性，本文将水热力约束与管输运行流量上限进行关联。然而，管输运行流量上限与管输距离呈非线性关系，无法直接代入到所构建的线性优化模型中。因此，本发明采用预处理的思路，即事先对规划区内所有潜在连接的安全运行流量上限进行求解并将结果置于数据矩阵以供优化模型使用。

[0067] 各连接的管输量必须在合理的范围之内，管输流量有上限。值得一提的是，为实现将水热力条件转换成管输流量条件，本发明对于管输流量上限的设定分为设计流量上限与运行流量上限。

[0068] 设计流量上限与管道参数有关，表示所选取管道能够承载的最大流量，该条件由下式表示；

$$[0069] \quad 0 \leq F_{ik} \leq flow_{ik}^{design_MAX} \cdot z_{ik} \quad \forall i \in I, k \in K$$

[0070] 其中： $flow_{ik}^{design_MAX}$ 表示设定节点i与节点k连接的管道设计流量上限 (Mt/y)。

[0071] 运行流量上限为规划区内各潜在连接对应管长下能够保证以超临界相或密相输送时所承载的最大流量，该条件由下式表示。

$$[0072] \quad 0 \leq F_{ik} \leq flow_{ik}^{operation_MAX} \cdot z_{ik} \quad \forall i \in I, k \in K$$

[0073] 其中： $flow_{ik}^{operation_MAX}$ 表示设定节点i与节点k连接的最大安全管输流量 (Mt/y)。

[0074] 具体应用实施例如下：

[0075] 表1:源点信息表

[0076]

名称	流量 (Mt/y)	外输压力 (MPa)	外输温度 (°C)
源1	1.530	10	50
源2	1.230	10	50

源3	1.220	10	50
源4	1.116	10	50
源5	1.040	10	50
源6	1.020	10	50

[0077] 表2: 汇点信息表

名称	年最大存储容量 (Mt/y)
汇1	4
汇2	8
汇3	5

[0079] 表3: 源汇间距离表 (km)

	汇点	汇	汇	汇
		1	2	3
源点				
	源 1	296.83	466.46	424.64
	源 2	274.79	650.49	653.98
	源 3	354.24	223.76	391.93
	源 4	921.99	691.86	245.78
	源 5	285.00	247.57	702.32
	源 6	460.93	463.92	243.31

[0082] 以某地区某些中高碳排放源以及封存点为参考, 拟建了一个用于测试本申请中考虑管输条件的源汇匹配模型适用性的实施例。根据选取的中高碳排放源的排放能力选定管径为16英寸的管道, 为了尽可能地减少经济费用条件, 避免考虑中间增压站并只考虑一站到底的输送模式, 同时考虑各中高碳排放源处于工作前期, 即各源点外输量略低。所选取碳源的特性参数见表1, 碳汇的特性参数见表2。

[0083] 具体分析结果如下:

[0084] 1. 当不考虑水热力约束时, 当前规划区内所有源点都能够找到相应的汇点进行匹配。然而, 某些连接的空间距离甚远, 若使CO₂保持超临界相输送且中间不增设增压站, 空间距离较远的源点与汇点会无法形成有效匹配。

[0085] 2. 为保证CO₂一直以超临界相输送, 现设定当前规划区内可行匹配的沿线压力不低于临界压力的1.1倍且温度不低于临界温度, 并基于此开展源汇最优匹配分析。

[0086] 首先, 以规划区碳捕集量最大为目标函数确定当前规划区能够实现的最大的碳减排量, 从求解出的最优匹配关系可知:

[0087] 在考虑管输流量约束后, 源点1、源点2及源点4都与汇点2失去匹配可能性, 且源点1最终选择与汇点1形成匹配、源点2最终选择与汇点1形成匹配、源点4最终选择与汇点3形成匹配; 以实现规划区碳捕集量最大为目标, 源点1最终与汇点1形成匹配, 且由于在模型中

设置了各碳排放源的CO₂捕集量不能超过其自身碳排放量上限,同时在安全管输流量上限的约束下,最终使得源点1向外输送的CO₂量低于其自身的最大碳排量,此时的最大碳捕集量为6.716Mt/y,其他源点的匹配方案见表4。

[0088] 表4:规划区碳捕集量最大时的源汇匹配关系

源点 \ 汇点	汇 1	汇 2	汇 3
源 1	1.09Mt/y	—	—
源 2	1.23Mt.y	—	—
源 3	—	1.22Mt/y	—
源 4	—	—	1.116Mt/y
源 5	1.04Mt/y	—	—
源 6	—	—	1.02Mt/y

[0090] 其次,更改碳减排目标并分别设定为5Mt/y、4Mt/y及3Mt/y来分析以CO₂管输费用最小为目标函数在不同碳减排目标下规划区最优源汇匹配关系,最优源汇匹配如下表:

[0091] 表5:减排目标为5Mt/y时的最优源汇匹配关系

源点 \ 汇点	汇 1	汇 2	汇 3
源 1	—	—	—
源 2	0.604Mt.y	—	—
源 3	—	1.22Mt/y	—
源 4	—	—	1.116Mt/y
源 5	1.04Mt/y	—	—
源 6	—	—	1.02Mt/y

[0093] 表6:减排目标为4Mt/y时的最优源汇匹配关系

源点 \ 汇点	汇 1	汇 2	汇 3
源 1	—	—	—
源 2	—	—	—

[0095]	源 3	—	1.22Mt/y	—
	源 4	—	—	0.72Mt/y
	源 5	1.04Mt/y	—	—
	源 6	—	—	1.02Mt/y

[0096] 表7:减排目标为3Mt/y时的最优源汇匹配关系

[0097]	源点 \ 汇点	汇 1	汇 2	汇 3
	源 1	—	—	—
	源 2	—	—	—
	源 3	—	1.22Mt/y	—
	源 4	—	—	—
	源 5	1.04Mt/y	—	—
	源 6	—	—	0.74Mt/y

[0098] 从以上最优源汇匹配结果可以看出,设置的安全管输流量约束条件影响了规划区最优源汇匹配关系的生成。本发明构建的源汇匹配模型可根据碳捕集目标动态调整匹配方案,且所有的可行性连接均能够保证CO₂管输安全性,为制定更加灵活、高效的源汇匹配方案提供重要决策依据。

[0099] 本发明还提供了一种保证CO₂管输可行性的用于源汇匹配优化的装置,包括:源汇地理信息输入模块、CO₂管输条件输入模块、CO₂管输水热力分析模块、特性参数输入模块、连接关系控制模块、源汇匹配优化求解模块和结果可视化模块。

[0100] 源汇地理信息输入模块,用于输入规划区内各碳排放源点与各碳封存汇点的经纬度坐标信息,作为计算规划区内各潜在连接空间距离的前置条件;

[0101] CO₂管输条件输入模块,用于输入各源点外输CO₂温度、压力条件及管道参数等,作为开展不同管输条件下源汇匹配优化的前置条件;

[0102] CO₂管输水热力分析模块,用于结合输入的源汇地理信息及CO₂管输条件开展各潜在连接管输水热力分析,作为获取各潜在连接安全管输流量的前置条件;

[0103] 特性参数输入模块,用于输入各碳排放源点、各碳封存汇点具备的工作特性与规划区特性参数。源点工作特性包括碳排放量;汇点工作特性包括最大存储容量;规划区特性参数包括规划周期及规划区CO₂减排目标。

[0104] 连接关系控制模块,用于限制规划区内某碳排放源点与某碳封存汇连接关系的生成,设定后用于表示源汇连接关系的二元变量会立即更新;

[0105] 源汇匹配优化求解模块,用于根据获得的各潜在连接的安全管输流量获取拟建规划区的最优源汇匹配关系;

[0106] 结果可视化模块,用于呈现当前设定条件下的最优源汇匹配关系。

[0107] 本发明还提供该源汇匹配优化装置的运行流程为:(1)根据规划区内碳排放源与碳封存点的地理信息计算规划区各潜在连接的空间距离,并结合设定的CO₂管输条件开展各潜在连接的水热力分析,明确各潜在连接的安全管输流量;(2)结合各潜在连接的安全管输流量,以碳捕集最大为目标函数开展源汇匹配优化,从而获取当前规划区的最大碳减排量;(3)根据得到的规划区能够实现的最大的碳减排量,结合各潜在连接的安全管输流量结果,开展以CO₂管输费用最小为目标函数的最优源汇匹配优化分析。

[0108] 为了使所构建的源汇匹配优化系统具有一定的灵活性,可以在拟建规划区的基础上,通过运用源汇地理信息输入模块添加其他源点与汇点,然后执行上述运行流程开展新规划区的最优源汇匹配分析。此外,若想对规划区的源汇连接关系人为地进行修改,自行决定哪些匹配关系可以被生成,则需要将新潜在连接的水热力结果储存到数据矩阵中。值得一提的是,若新连接为拟建规划区潜在连接中的一员,那么该连接的水热力结果已经在完成第一步后获得;若新连接是从新增节点出发而构建出来的,那么就需要对自行构建的新连接进行水热力分析。

[0109] 本发明第三方面提供一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现上述任意一项所述二氧化碳源汇匹配方法的步骤。

[0110] 本发明第四方面提供一种计算机设备,包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序,所述处理器执行所述计算机程序时实现上述任意一项所述二氧化碳源汇匹配方法的步骤。

[0111] 本发明是根据具体实施方式的方法、设备(系统)、和计算机程序产品的流程图和/或方框图来描述的。应理解为可由计算机程序指令实现流程图和/或方框图中的每一流程和/或方框、以及流程图和/或方框图中的流程和/或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理设备的处理器以产生一个机器,使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。

[0112] 这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特定方式工作的计算机可读存储器中,使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指令装置的制品,该指令装置实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。

[0113] 这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上,使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理,从而在计算机或其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

[0114] 最后应说明的是:以上实施例仅用以说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的精神和范围。

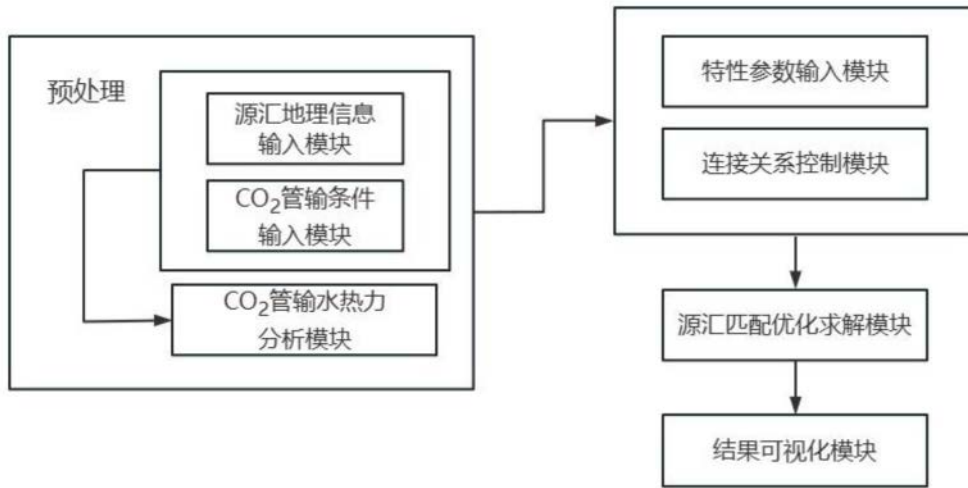


图1

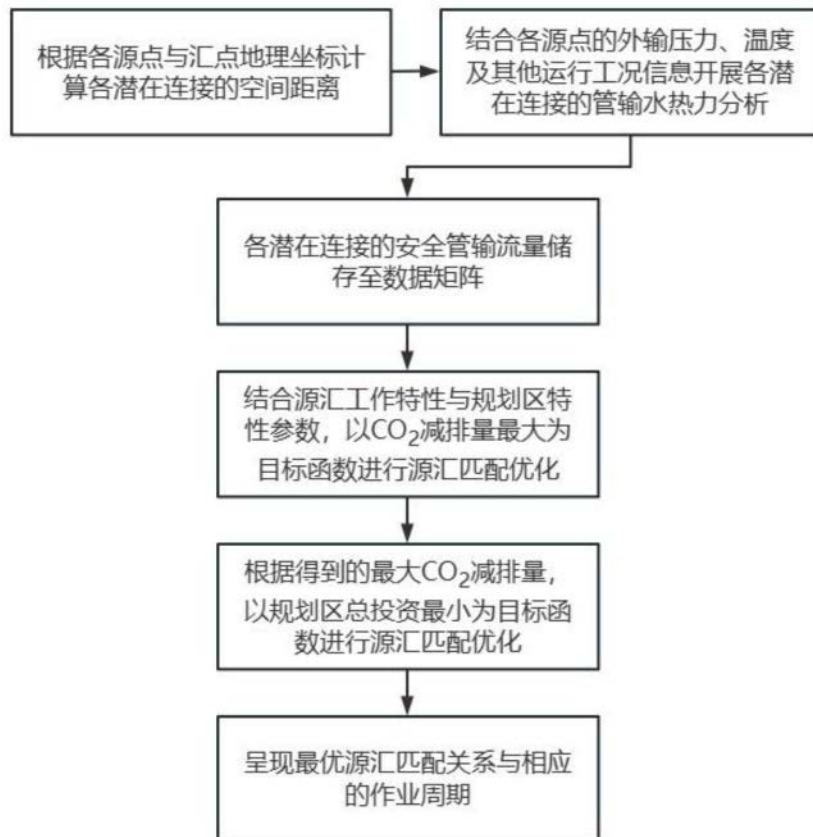


图2