



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116681294 A

(43) 申请公布日 2023. 09. 01

(21) 申请号 202310276639.1

G06Q 10/067 (2023.01)

(22) 申请日 2023.03.21

G06Q 10/0635 (2023.01)

(71) 申请人 长沙理工大学

G06Q 10/0631 (2023.01)

地址 410000 湖南省长沙市天心区赤岭路
45号

G06Q 50/06 (2012.01)

G06Q 50/26 (2012.01)

(72) 发明人 黄婧杰 杨洪明 袁亮 禹海峰
周任军

(74) 专利代理机构 南京众联专利代理有限公司
32206

专利代理师 蒋昱

(51) Int. Cl.

G06Q 10/0637 (2023.01)

H02J 3/00 (2006.01)

H02J 3/28 (2006.01)

H02J 3/38 (2006.01)

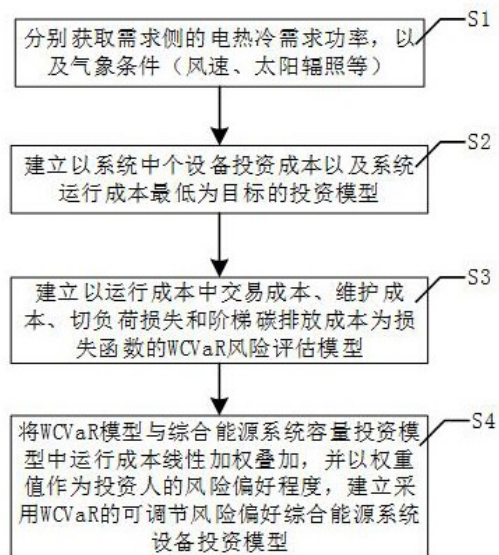
权利要求书7页 说明书16页 附图4页

(54) 发明名称

采用改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统容量控制方法

(57) 摘要

采用改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统容量控制方法, S1. 地区基本数据获取与筛选; S2. 建立综合能源系统设备容量投资模型; S3. 构建改进WCVaR风险评估模型; S4. 构建采用改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统设备投资模型。本申请提出采用改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统容量控制方法, 该方法供电可靠性强、风险评估合理、经济效益高且可根据不同投资人的性格进行投资建议适配的综合能源系统设备容量配置, 能够兼顾网-荷之间的供电可靠性与经济性, 有效降低综合能源系统投资方在投资与运行时所承担的成本风险。



1. 采用改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统容量控制方法,包括以下步骤,其特征在于:

S1. 地区基本数据获取与筛选:

分别获取需求侧的电热冷需求功率,以及气象条件;

S2. 建立综合能源系统设备容量投资模型:

建立以系统中个设备投资成本以及系统运行成本最低为目标的投资模型;

所述步骤S2建立综合能源系统设备容量投资模型的具体步骤为:

S2.1. 利用各设备建设成本、维护成本,结合分时电价与天然气价格,构建投资模型,目标函数为:

$$\min f = C_{in} + C_{op} \quad (1)$$

式中, C_{in} 为设备投资成本, C_{op} 为运行成本;

S2.2. 建立投资成本模型,投资成本的计算方法为:

$$C_{in} = \sum_i \sum_j k^{i,j} C_i^{i,j} u^{i,j} + \sum_m k^m C_i^m z^m + \sum_n k^n C_i^n z^n \quad (2)$$

$$i = \{CCHP, GB, AC, P2G\}; \quad m = \{PV, WT\}$$

$$n = \{BESS, HESS, CESS\}$$

式中, i 为能量转换设备的集合,主要包括冷热电联供、燃气锅炉、电制冷以及P2G设备; j 为各种能源转换设备的容量; m 为风光发电的集合; n 为储能设备的集合; C_i 表示各种设备型号的成本; u 为布尔变量,表示为设备是否购买; z 为风光发电机组与储能设备购入的模块数量, k 为年均分摊系数, dr 为贴现率,这里取0.08, T 为设备的寿命,设为20年;

S2.3. 建立运行成本模型,运行成本的计算方法为:

$$C_{op} = S \sum_s p_s (C_{Tr,s} + C_{M,s} + C_{CO_2,s} + C_{LOSS,s}) \quad (3)$$

1) 交易成本;

对于单个场景下的交易成本 $C_{Tr,s}$ 由式(4)表示,其包括有外部电力购买成本 C_s^e 、外部天然气购买成本 C_s^g ;

$$C_{Tr,s} = C_s^e + C_s^g = \sum_t pr_t^e P_{t,s}^{e,Grid} + \sum_t pr_t^g P_{t,s}^{g,Grid} \quad (4)$$

式中,上标e、g分别表示为电和气, pr 为能源消耗单价, $P_{t,s}^{e,Grid}$ 表示每个场景下每小时中所购入的外部电力功率, $P_{t,s}^{g,Grid}$ 表示外部购气功率;

2) 维护成本;

包括综合能源系统中所有投资设备的维护成本,由各类设备运行时的实际输出功率决定;

$$C_{M,s} = \sum_i \lambda^i \sum_j \sum_t P_{t,s}^{i,j} + \sum_m \lambda^m \sum_t P_{t,s}^m + \sum_n \lambda^n \sum_t (P_{t,s}^{ch,n} + P_{t,s}^{dis,n}) \quad (5)$$

式中, λ 表示各设备的维护成本单价,上标ch表示充电,dis表示放电。 $P_{t,s}^{i,j}$ 表示各种能量设备所输出的功率, $P_{t,s}^m$ 为新能源发电设备输出功率, $P_{t,s}^{ch,n}$ 与 $P_{t,s}^{dis,n}$ 则分别表示储能的充放电功率;

3) 奖惩阶梯碳交易成本;

采用基准线法, 来确定系统无偿碳排放配额, 考虑外购电力都来源于燃煤电厂, 而系统中主要造成碳排放的设备为冷热电联供和燃气锅炉, 则碳排放的分配额如式(6)到式(9)所示;

$$E'_{IES} = E'_{Grid} + E'_{CCHP} + E'_{GB} \quad (6)$$

$$E'_{Grid} = \delta^e \sum_{t=1}^T P_{t,s}^{e,Grid} \Delta t \quad (7)$$

$$E'_{CCHP} = \delta^{th} (\mu_{e-h} \sum_{t=1}^T P_{t,s}^{CCHP,e} \Delta t + \gamma \sum_{t=1}^T P_{t,s}^{CCHP,h} \Delta t) \quad (8)$$

$$E'_{GB} = \delta^{th} \gamma \sum_{t=1}^T P_{t,s}^{GB,h} \Delta t \quad (9)$$

式(6)中, E'_{IES} 、 E'_{Grid} 、 E'_{CCHP} 和 E'_{GB} 分别表示IES整体的、外部购电以及冷热电联供和燃气锅炉的碳排放分配额度, 式(7)中, δ^e 为单位发电量碳排放配额, 式(8)中, δ^{th} 为单位供热量碳排放配额, μ_{e-h} 为电功率转热值系数, $P_{t,s}^{CCHP,e}$ 与 $P_{t,s}^{CCHP,h}$ 表示冷热电联供的发电和供热功率, γ 表示热功率转热值转换系数, 式(9)中, $P_{t,s}^{GB,h}$ 为燃气锅炉的供热功率;

而对于系统实际碳排放量, 计算方式与式(7)到式(9)基本一致, 区别为对应的单位电量和热量碳排放系数取值不同, 分别为 δ^e 与 δ^h , 因此系统中的实际碳排放计算如式所示;

$$E_{IES} = E_{Grid} + E_{CCHP} + E_{GB} \quad (10)$$

根据以上的实际碳排放量和碳排放配额之间的关系, 建立奖惩阶梯碳交易成本模型, 如式(11)所示;

$$C_{CO_2} = \begin{cases} -cd - c(1+\rho)(E' - E - d) & E - E' < -d \\ -c(E' - E) & -d \leq E - E' < 0 \\ c(E - E') & 0 \leq E - E' < d \\ cd + c(1+\rho)(E - E' - d) & d \leq E - E' < 2d \\ c(2+\rho)d + c(1+2\rho)(E - E' - 2d) & 2d \leq E - E' < 3d \\ \dots & \dots \end{cases} \quad (11)$$

式中, ρ 为碳交易增长系数, c 为碳交易基准价格, d 为碳交易价格区间长度;

4) 切负荷损失;

主要为了降低切负荷, 保证能源供应。

$$C_{LOSS,s} = \sum_{r \in \{e,c,h\}} \mu^r \sum_t P_{t,s}^{L,LOSS,r} \quad (12)$$

式中, 上标 r 为电、冷和热的能源集合, μ 表示切负荷的所需的成本单价, 而 $P_{t,s}^{L,LOSS,r}$ 表示所切掉的负荷功率;

S2.4. 建立模型约束, 具体内容为:

1) 设备投资约束

$$\sum_j u^{CCHP,j} \leq 1 \quad (13)$$

$$z^{m|n} \geq 0 \quad (14)$$

式(13)~(14)表示在综合能源系统建设中,冷热电联供至少得有一个存在,而新能源发电模块和储能设备的投资数目不可小于0;

2) 外购能源约束

$$0 \leq P_{t,s}^{e,Grid} \leq \overline{P_{t,s}^{e,Grid}} \quad (15)$$

$$0 \leq P_{t,s}^{g,Grid} \leq \overline{P_{t,s}^{g,Grid}} \quad (16)$$

式(15)和式(16)保证所外购能源不会过多, $\overline{P_{t,s}^{e,Grid}}$ 为最大可从电网购买电量, $\overline{P_{t,s}^{g,Grid}}$ 为最大可从气网购买天然气量;

3) 新能源发电设备约束;

$$\overline{P_{s,t}^{WT}} = \begin{cases} 0, & v_{s,t} < v_{in}, \text{ OR } v_{s,t} > v_{out} \\ \frac{\rho v_{s,t}^3 S^{WT} \mu^{WT}}{2}, & v_{in} \leq v_{s,t} \leq v_r \\ \frac{\rho v_r^3 S^{WT} \mu^{WT}}{2}, & v_r \leq v_{s,t} \leq v_{out} \end{cases} \quad (17)$$

$$\overline{P_{s,t}^{PV}} = H_{s,t} \cos \theta S^{PV} \mu^{MPPT} \mu^{PV} \quad (18)$$

$$0 \leq P_{s,t}^{WT} \leq z^{WT} \overline{P_{s,t}^{WT}} \quad (19)$$

$$0 \leq P_{s,t}^{PV} \leq z^{PV} \overline{P_{s,t}^{PV}} \quad (20)$$

单个风电机组最大出力 $\overline{P_{s,t}^{WT}}$ 如式(17)所示, S^{WT} 、 μ^{WT} 分别表示风机的叶片面积和转换效率, ρ 为空气密度, $v_{s,t}$ 为风速,而 v_{in} 、 v_r 和 v_{out} 则表示为风机的切入风速、额定风速和切出风速;

单个光伏板最大出力 $\overline{P_{s,t}^{PV}}$ 如式(18)所示, S^{PV} 、 μ^{MPPT} 和 μ^{PV} 分别表示光伏机组的受光面积,最大功率点跟踪的转换效率以及光伏板的转换效率, θ 则表示太阳倾斜角度, $H_{s,t}$ 为太阳辐照度;

4) 储能设备约束;

根据系统所需负荷,将储能设备分为电储能、热储能和冷储能三种储能,其约束如下。

$$v_{s,t}^{ch,n} + v_{s,t}^{dis,n} - 1 \leq v_{s,t}^{ch|dis,n} \in \{0,1\} \quad (21)$$

$$0 \leq P_{s,t}^{ch|dis,n} \leq M v_{s,t}^{ch|dis,n} \quad (22)$$

$$0 \leq P_{s,t}^{ch|dis,n} \leq \overline{P_{s,t}^{ch|dis,n}} \quad (23)$$

$$0 \leq SOE_{s,t}^n \leq \overline{SOE}^n \quad (24)$$

$$SOE_{s,t=1}^n = SOE_{s,exp}^n + (P_{s,t}^{ch,n} \gamma^{ch,n} - P_{s,t}^{dis,n} / \gamma^{dis,n}) \Delta t \quad (25)$$

$$SOE_{s,t+1}^n = SOE_{s,t}^n + (P_{s,t}^{ch,n} \gamma^{ch,n} - P_{s,t}^{dis,n} / \gamma^{dis,n}) \Delta t \quad (26)$$

$$SOE_{s,exp}^n = SOE_{s,24}^n \quad (27)$$

式(21)约束储能必须处在充、放或者蓄电的三种状态, $v_{s,t}^{ch,n}$ 与 $v_{s,t}^{dis,n}$ 为布尔变量,用于表示

储能的充放状态,式(22)为大M法,以此来保证储能的出力功率与充放状态匹配,式(23)则约束储能的充放功率不会超过正常范围,这之中 $\overline{P^{ch|dis,n}}$ 表示储能的 n 最大充放功率, $P_{s,t}^{ch|dis,n}$ 则表示储能在某一运行场景下某一时刻下充放功率,式(24)约束储能的能量状态不会超过正常范围, $SOE_{s,t}^n$ 表示储能在某一运行场景下某一时刻下的能量状态, \overline{SOE}^n 表示各种储能设备所能达到的最大的能量状态,式(25)为初始储能状态与储能期望值之间的关系, $SOE_{s,t=1}^n$ 为储能起始时刻下的能量状态, $SOE_{s,exp}^n$ 为储能能量状态的期望值,式(26)表示储能的上一时段能量状态与下一时段能量状态之间的关系方程, $\gamma^{ch,n}$ 与 $\gamma^{dis,n}$ 分别表示充放效率,式(27)则是保证SOE的初始值和最终值相同;

5) 能量转换设备约束;

$$0 \leq P_{s,t}^{i,j,e} \leq u^{i,j} \overline{P^{i,j,e}} \quad (28)$$

$$0 \leq P_{s,t}^{i,j,g} \leq u^{i,j} \overline{P^{i,j,g}} \quad (29)$$

式中, $\overline{P^{i,j,e}}$ 和 $\overline{P^{i,j,g}}$ 分别为各设备可受最大电、气功率;

6) 能量枢纽约束;

$$\begin{bmatrix} P_{s,t}^{e'} \\ P_{s,t}^{h'} \\ P_{s,t}^{c'} \\ P_{s,t}^{g'} \end{bmatrix} = \sum_i \sum_j \begin{bmatrix} \aleph^{i,j,ee} & \aleph^{i,j,eg} \\ \aleph^{i,j,he} & \aleph^{i,j,hg} \\ \aleph^{i,j,ce} & \aleph^{i,j,cg} \\ \aleph^{i,j,ge} & \aleph^{i,j,gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{s,t}^{i,j,e} \\ P_{s,t}^{i,j,g} \end{bmatrix} \quad (30)$$

这里将多种能量设备耦合为能量枢纽的形式,其将多能源设备之间互相耦合造成的复杂性给简化,公式如式(30)所示。而上述的约束中, $P_{s,t}^{i,j,e}$ 表示电能输入功率, $P_{s,t}^{i,j,g}$ 表示天然气输入功率; $P_{s,t}^{e'}$ 、 $P_{s,t}^{h'}$ 、 $P_{s,t}^{c'}$ 和 $P_{s,t}^{g'}$ 则分别表示能量枢纽的电、热、冷和气方面的输出功率,其中气功率主要为P2G的发出而直接应用在冷热电联供和燃气锅炉设备上, \aleph 为能量枢纽的耦合系数;

7) 切负荷约束;

$$0 \leq P_{s,t}^{LOSS,r} \leq P_{s,t}^{L,r} \quad (31)$$

式(31)保证系统切负荷时所切功率不会超过该日运行场景下的负荷, $P_{s,t}^{LOSS,r}$ 为某一场景下某一时刻的切负荷大小, $P_{s,t}^{L,r}$ 表示同一场景时刻下的负荷需求;

8) 能量平衡约束;

$$P_{s,t}^{L,e} + P_{s,t}^{ch,BESS} + \sum_i \sum_j P_{s,t}^{i,j,e} = P_{s,t}^{e'} \quad (32)$$

$$+ P_{s,t}^{dis,BESS} + P_{s,t}^{PV} + P_{s,t}^{WT} + P_{t,s}^{e,Grid} + P_{s,t}^{LOSS,e}$$

$$P_{s,t}^{L,h|c} + P_{s,t}^{ch,T|CESS} \leq P_{s,t}^{h|c'} + P_{s,t}^{dis,T|CESS} + P_{s,t}^{LOSS,h|c} \quad (33)$$

$$P_{t,s}^{g,Grid} + P_{s,t}^{g'} = \sum_i \sum_j P_{s,t}^{i,j,g} \quad (34)$$

式(32)~(34)表示冷、热、电和天然气功率的平衡约束,即要求所供应的能源功率与消耗的能源功率近似相同,而电功率则严格相等

S3. 构建改进WCVaR风险评估模型：

建立以运行成本中交易成本、维护成本、切负荷损失和阶梯碳排放成本为损失函数的WCVaR风险评估模型；

S4. 构建采用改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统设备投资模型：

将WCVaR模型与综合能源系统容量投资模型中运行成本线性加权叠加，并以权重值作为投资人的风险偏好程度，建立采用改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统设备投资模型。

2. 根据权利要求1所述采用改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统容量控制方法，其特征在于：所述气象条件包括风速、太阳辐照。

3. 根据权利要求1所述采用改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统容量控制方法，其特征在于：

所述步骤S3建立的构建WCVaR风险评估模型如下式所示：

S3.1 建立常规WCVaR风险评估模型：

$$\begin{aligned} \text{WCVaR}_\alpha &= \max_{p(\cdot) \in \sigma} \min_{\zeta_\alpha \in R} F_\alpha(x, \zeta_\alpha) = \max_{p(\cdot) \in \sigma} \min_{\zeta_\alpha \in R} \zeta_\alpha + \frac{\sum_{s=1}^N p_s [f(x, y_s) - \zeta_\alpha]^+}{1 - \alpha} \\ &= \max_{p(\cdot) \in \sigma} \min_{\zeta_\alpha \in R} \zeta_\alpha + \frac{\sum_{s=1}^N p_s [C_{Tr,s} + C_{M,s} + C_{CO_2,s} + C_{Loss,s} - \zeta_\alpha]^+}{1 - \alpha} \end{aligned} \quad (35)$$

其中， x 为系统各设备出力、外购电、以及切负荷功率等决策变量， y_s 为上述决策变量所产生的交易、维护、阶梯碳排放成本和切负荷损失； $p(\cdot) \in \sigma$ 为随机变量 y_s 的在第 s 个场景下概率分布函数 p_s 的集合； ζ_α 为置信区间为 α 时的风险损失VaR的值； N 为场景总数；且 $[t]^+ = \max\{t, 0\}$ ；

S3.2 建立离散界约束下WCVaR风险评估模型：

因为WCVaR函数具有较为复杂的min-max结构，因此在随机变量服从离散界约束分布的基础上，对WCVaR函数进行改进，其中离散界约束为：

随机变量 y_s 的概率密度函数 $p(y)$ 难以准确获得，因此，在 y_s 满足离散分布的基础上，将场景点概率 π 放入一个给定的离散界中，如式(14)所示：

$$\pi \in P_\pi^B = \left\{ \pi : \pi = \pi^0 + \eta, e^T \eta = 0, \underline{\eta} \leq \eta \leq \bar{\eta} \right\} \quad (36)$$

式中， π^0 为某种已知的分布， e 为单位向量， $\underline{\eta}$ 和 $\bar{\eta}$ 为常数向量，也称为界扰动范围， $e^T \eta = 0$ 保证 π 为一个概率分布，此时称 y 服从离散界约束分布， π 为界约束集；

将WCVaR里损失函数 $f(x, y_s)$ 中的随机变量 y_s 带入离散界约束中，为了方便编程计算，引入辅助变量 u_s ，则上式转化为：

$$F_\alpha(x, \zeta_\alpha, \pi) = \zeta_\alpha + \frac{\pi^T u_s}{1 - \alpha} \quad (37)$$

其中 $u_s \geq f(x, y_s) - \alpha$ ， $u_s \geq 0$ ($k=1, 2, \dots, n$)；

由于 $\pi = \pi^0 + \eta$ ，则将式(37)转变为

$$G_\alpha(x, \zeta_\alpha, \pi) = \zeta_\alpha + \frac{(\pi^0)^T u_s}{1 - \alpha} + \frac{\eta^T u_s}{1 - \alpha} \quad (38)$$

此时自变量 π 转移到了 η^T 上,引入拉格朗日乘子 θ 、 ω 与 ξ ,将式(38)的 $\frac{\eta^T \mathbf{u}_s}{1-\alpha}$ 通过拉格朗日对偶变换,得出考虑离散界约束下WCVaR函数如式(38)所示:

$$\text{WCVaR}_\alpha = \begin{cases} \min_{(\zeta_\alpha, \mathbf{u}_s, \xi, \omega)} \left\{ \zeta_\alpha + \frac{1}{1-\alpha} (\boldsymbol{\pi}^0)^T \mathbf{u}_s - \frac{1}{1-\alpha} (-\bar{\boldsymbol{\eta}}^T \xi + \boldsymbol{\eta}^T \omega) \right\} \\ \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{u}_s \geq f(x, y_s) - \zeta_\alpha \\ \mathbf{u}_s \geq 0, (s=1, 2, \dots, n) \\ \mathbf{e}\theta + \xi - \omega = \mathbf{u}_s \\ \xi \geq 0; \omega \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (39)$$

式中, θ 、 ξ 、 ω 为WCVaR对偶变换时的拉格朗日乘子,前两个约束为简化函数中的计算,后三个表示对偶变换后对于乘子与随机变量之间关系;

最后得出步骤S3模型为:

$$\min_{(\zeta_\alpha, \mathbf{u}_s, \xi, \omega)} \text{WCVaR}_\alpha = \begin{cases} \zeta_\alpha + \frac{(\boldsymbol{\pi}^0)^T \mathbf{u}_s - (-\bar{\boldsymbol{\eta}}^T \xi + \boldsymbol{\eta}^T \omega)}{1-\alpha} \\ \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{u}_s \geq C_{\text{Tr},s} + C_{\text{M},s} + C_{\text{CO}_2,s} + C_{\text{LOSS},s} - \zeta_\alpha \\ \mathbf{u}_s \geq 0, (s=1, 2, \dots, n) \\ \mathbf{e}\theta + \xi - \omega = \mathbf{u}_s \\ \xi \geq 0; \omega \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (40)。$$

4. 根据权利要求1所述采用改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统容量控制方法,其特征在于:

所述步骤S4建立的采用改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统设备投资模型;

S4.1建立可调节风险偏好模型;

将WCVaR与运行成本线性加权叠加,得出综合能源系统设备投资模型如下:

$$\begin{aligned} \min f &= C_{\text{in}} + S[(1-\beta)C_{\text{op}} + \beta \text{WCVaR}_\alpha] \\ &= C_{\text{in}} + S[(1-\beta)C_{\text{op}} + \beta \max_{p(\cdot) \in \sigma} \min_{\zeta_\alpha \in R} F_\alpha(x, \zeta_\alpha)] \end{aligned} \quad (41)$$

式中, β 为投资者的风险偏好系数,当 $0 < \beta < 0.5$ 时,视投资者为激进型; $\beta = 0.5$ 时为中庸型; $0.5 < \beta < 1$ 则为保守型,根据不同投资者对于风险的保守程度做出改变。 WCVaR_α 为置信水平为 α 时的WCVaR值;

S4.2建立改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统设备投资模型;

目标函数为复杂的min-max-min结构函数,加入离散界约束,将式(41)中运行成本 C_{op} 与 WCVaR_α 转换为,最终如式(42)所示;

$$\min_{\boldsymbol{\Omega}} f = \left\{ \begin{array}{l} C_{\text{in}} + S \left\{ (1-\beta) \left[\sum_s (C_{\text{Tr},s} + C_{\text{M},s} + \right. \right. \\ \left. \left. C_{\text{CO}_2,s} + C_{\text{LOSS},s}) \boldsymbol{\pi}^0 + (\bar{\boldsymbol{\eta}}^T \boldsymbol{\zeta} - \boldsymbol{\eta}^T \boldsymbol{\omega}) \right] + \right. \\ \left. \beta \left[\zeta_\alpha + \frac{(\boldsymbol{\pi}^0)^T \mathbf{u}_s}{1-\alpha} - \frac{(-\bar{\boldsymbol{\eta}}^T \boldsymbol{\zeta} + \boldsymbol{\eta}^T \boldsymbol{\omega})}{1-\alpha} \right] \right\} \\ s.t. \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{u}_s \geq C_{\text{Tr},s} + C_{\text{M},s} + C_{\text{CO}_2,s} + \\ C_{\text{LOSS},s} - \zeta_\alpha \\ \mathbf{u}_s \geq 0, (s=1,2,\dots,n) \\ \mathbf{u}_s = e\theta + \boldsymbol{\zeta} - \boldsymbol{\omega}; \quad \boldsymbol{\zeta} \geq 0; \quad \boldsymbol{\omega} \geq 0 \\ (C_{\text{Tr},s} + C_{\text{M},s} + C_{\text{CO}_2,s} + C_{\text{LOSS},s}) = \\ e\boldsymbol{\vartheta} + \boldsymbol{\zeta} - \boldsymbol{\omega}; \quad \boldsymbol{\zeta} \geq 0; \quad \boldsymbol{\omega} \geq 0; \quad x \geq 0 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (42)$$

式中, $\boldsymbol{\Omega} = \{\zeta_\alpha, \mathbf{u}, \boldsymbol{\zeta}, \boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\vartheta}, \boldsymbol{\zeta}, \boldsymbol{\omega}\}$, 而约束中前四个部分为针对WCVaR对偶变换等的约束, 后四个约束为针对运行成本 C_{op} 对偶变换所形成的约束。

采用改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统容量控制方法

技术领域

[0001] 本发明属于电力规划领域,特别涉及采用改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统容量控制方法。

背景技术

[0002] 由于综合能源系统系统中新能源和储能的占比不断增加,使得风光出力等因素的不确定性影响系统规划和运行的经济性,造成运行成本增加、供能可靠性降低等风险。因此为了进一步保证规划的经济性,降低切负荷损失,需要计算各种不确定性所带来的风险。目前风险量化大多采用机会约束、条件风险价值(Conditional value at Risk,CVaR)等方法。通过CVaR计算负荷聚集商在双重市场的投标策略的风险;也有将CVaR带入综合能源系统规划,以运行成本为随机变量进行分析,这不仅简化对于风光出力和负荷需求不确定性的考虑,还降低系统中设备耦合的复杂性,对于分析规划中因不确定性造成的成本风险更具有针对性。

[0003] 实际情况下,随机变量的概率分布无法准确获得,这导致CVaR此类需要明确概率分布的方法无法很好对成本风险进行计算。因此,在CVaR的基础上,提出了最坏条件风险价值(Worst-case Conditional value at Risk,WCVaR),其可以有效评估概率分布不确定时所产生的风险。其中有将WCVaR函数用于分析分布式发电系统供需互动能量管理研究;也有采用WCVaR研究综合能源系统中运营商之间的交易策略。以上文献为WCVaR在电力市场层面的应用,而没有将其放入电力系统技术层面进行研究。

发明内容

[0004] 为了解决以上问题,本申请提出采用改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统容量控制方法,该方法供能可靠性强、风险评估合理、经济效益高且可根据不同投资人的性格进行投资建议适配的综合能源系统设备容量配置,能够兼顾网-荷之间的供电可靠性与经济性,有效降低综合能源系统投资方在投资与运行时所承担的成本风险。

[0005] 为实现上述目的,本发明采取的技术方案是:

[0006] 本发明提供采用改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统容量控制方法,包括以下步骤,其特征在于:

[0007] S1.地区基本数据获取与筛选:

[0008] 分别获取需求侧的电热冷需求功率,以及气象条件;

[0009] S2.建立综合能源系统设备容量投资模型:

[0010] 建立以系统中个设备投资成本以及系统运行成本最低为目标的投资模型;

[0011] 所述步骤S2建立综合能源系统设备容量投资模型的具体步骤为:

[0012] S2.1.利用各设备建设成本、维护成本,结合分时电价与天然气价格,构建投资模型,目标函数为:

[0013] $\min f = C_{in} + C_{op}$ (1)

[0014] 式中, C_{in} 为设备投资成本, C_{op} 为运行成本;

[0015] S2.2. 建立投资成本模型, 投资成本的计算方法为:

$$C_{in} = \sum_i \sum_j k^{i,j} C_i^{i,j} u^{i,j} + \sum_m k^m C_i^m z^m + \sum_n k^n C_i^n z^n$$

[0016] $i = \{CCHP, GB, AC, P2G\}; m = \{PV, WT\}$ (2)

$n = \{BESS, HESS, CESS\}$

[0017] 式中, i 为能量转换设备的集合, 主要包括冷热电联供、燃气锅炉、电制冷以及P2G设备; j 为各种能源转换设备的容量; m 为风光发电的集合; n 为储能设备的集合; C_i 表示各种设备型号的成本; u 为布尔变量, 表示为设备是否购买; z 为风光发电机组与储能设备购入的模块数量, k 为年均分摊系数, dr 为贴现率, 这里取0.08, T 为设备的寿命, 设为20年;

[0018] S2.3. 建立运行成本模型, 运行成本的计算方法为:

$$C_{op} = S \sum_s P_s (C_{Tr,s} + C_{M,s} + C_{CO_2,s} + C_{LOSS,s})$$
 (3)

[0020] 1) 交易成本;

[0021] 对于单个场景下的交易成本 $C_{Tr,s}$ 由式 (4) 表示, 其包括有外部电力购买成本 C_s^e 、外部天然气购买成本 C_s^g ;

$$C_{Tr,s} = C_s^e + C_s^g = \sum_t pr_t^e P_{t,s}^{e,Grid} + \sum_t pr_t^g P_{t,s}^{g,Grid}$$
 (4)

[0023] 式中, 上标 e 、 g 分别表示为电和气, pr 为能源消耗单价, $P_{t,s}^{e,Grid}$ 表示每个场景下每小时中所购入的外部电力功率, $P_{t,s}^{g,Grid}$ 表示外部购气功率;

[0024] 2) 维护成本;

[0025] 包括综合能源系统中所有投资设备的维护成本, 由各类设备运行时的实际输出功率决定;

$$C_{M,s} = \sum_i \lambda^i \sum_j \sum_t P_{t,s}^{i,j} + \sum_m \lambda^m \sum_t P_{t,s}^m + \sum_n \lambda^n \sum_t (P_{t,s}^{ch,n} + P_{t,s}^{dis,n})$$
 (5)

[0027] 式中, λ 表示各设备的维护成本单价, 上标 ch 表示充电, dis 表示放电。 $P_{t,s}^{i,j}$ 表示各种能量设备所输出的功率, $P_{t,s}^m$ 为新能源发电设备输出功率, $P_{t,s}^{ch,n}$ 与 $P_{t,s}^{dis,n}$ 则分别表示储能的充放电功率;

[0028] 3) 奖惩阶梯碳交易成本;

[0029] 采用基准线法, 来确定系统无偿碳排放配额, 考虑外购电力都来源于燃煤电厂, 而系统中主要造成碳排放的设备为冷热电联供和燃气锅炉, 则碳排放的分配额如式 (6) 到式 (9) 所示;

$$E'_{IES} = E'_{Grid} + E'_{CCHP} + E'_{GB}$$
 (6)

$$E'_{Grid} = \delta^{te} \sum_{t=1}^T P_{t,s}^{e,Grid} \Delta t$$
 (7)

$$E'_{CCHP} = \delta^{th} (\mu_{e-h} \sum_{t=1}^T P_{t,s}^{CCHP,e} \Delta t + \gamma \sum_{t=1}^T P_{t,s}^{CCHP,h} \Delta t)$$
 (8)

$$[0033] \quad E'_{GB} = \delta'^h \gamma \sum_{t=1}^T P_{t,s}^{GB,h} \Delta t \quad (9)$$

[0034] 式(6)中, E'_{IES} 、 E'_{Grid} 、 E'_{CCHP} 和 E'_{GB} 分别表示IES整体的、外部购电以及冷热电联供和燃气锅炉的碳排放分配额度,式(7)中, δ'^e 为单位发电量碳排放配额,式(8)中, δ'^h 为单位供热量碳排放配额, $\mu_{e,h}$ 为电功率转热值系数, $P_{t,s}^{CCHP,e}$ 与 $P_{t,s}^{CCHP,h}$ 表示冷热电联供的发电和供热功率, γ 表示热功率转热值转换系数,式(9)中, $P_{t,s}^{GB,h}$ 为燃气锅炉的供热功率;

[0035] 而对于系统实际碳排放量,计算方式与式(7)到式(9)基本一致,区别为对应的单位电量和热量碳排放系数取值不同,分别为 δ^e 与 δ^h ,因此系统中的实际碳排放计算如式所示;

$$[0036] \quad E_{IES} = E_{Grid} + E_{CCHP} + E_{GB} \quad (10)$$

[0037] 根据以上的实际碳排放量和碳排放配额之间的关系,建立奖惩阶梯碳交易成本模型,如式(11)所示;

$$[0038] \quad C_{CO_2} = \begin{cases} -cd - c(1+\rho)(E' - E - d) & E - E' < -d \\ -c(E' - E) & -d \leq E - E' < 0 \\ c(E - E') & 0 \leq E - E' < d \\ cd + c(1+\rho)(E - E' - d) & d \leq E - E' < 2d \\ c(2+\rho)d + c(1+2\rho)(E - E' - 2d) & 2d \leq E - E' < 3d \\ \dots & \dots \end{cases} \quad (11)$$

[0039] 式中, ρ 为碳交易增长系数, c 为碳交易基准价格, d 为碳交易价格区间长度;

[0040] 4) 切负荷损失;

[0041] 主要为了降低切负荷,保证能源供应。

$$[0042] \quad C_{LOSS,s} = \sum_{r \in \{e,c,h\}} \mu^r \sum_t P_{t,s}^{L,LOSS,r} \quad (12)$$

[0043] 式中,上标 r 为电、冷和热的能源集合, μ 表示切负荷的所需的成本单价,而 $P_{t,s}^{L,LOSS,r}$ 表示所切掉的负荷功率;

[0044] S2.4. 建立模型约束,具体内容为:

[0045] 1) 设备投资约束

$$[0046] \quad \sum_j u^{CCHP,j} \leq 1 \quad (13)$$

$$[0047] \quad z^{m|n} \geq 0 \quad (14)$$

[0048] 式(13)~(14)表示在综合能源系统建设中,冷热电联供至少得有一个存在,而新能源发电模块和储能设备的投资数目不可小于0;

[0049] 2) 外购能源约束

$$[0050] \quad 0 \leq P_{t,s}^{e,Grid} \leq \overline{P_{t,s}^{e,Grid}} \quad (15)$$

$$[0051] \quad 0 \leq P_{t,s}^{g,Grid} \leq \overline{P_{t,s}^{g,Grid}} \quad (16)$$

[0052] 式(15)和式(16)保证所外购能源不会过多, $\overline{P_{t,s}^{e,Grid}}$ 为最大可从电网购买电量, $\overline{P_t^{g,Grid}}$ 为最大可从气网购买天然气量;

[0053] 3) 新能源发电设备约束;

$$[0054] \quad \overline{P_{s,t}^{WT}} = \begin{cases} 0, & v_{s,t} < v_{in} \text{ OR } v_{s,t} > v_{out} \\ \frac{\rho v_{s,t}^3 S^{WT} \mu^{WT}}{2}, & v_{in} \leq v_{s,t} \leq v_r \\ \frac{\rho v_r^3 S^{WT} \mu^{WT}}{2}, & v_r < v_{s,t} < v_{out} \end{cases} \quad (17)$$

$$[0055] \quad \overline{P_{s,t}^{PV}} = H_{s,t} \cos o S^{PV} \mu^{MPPT} \mu^{PV} \quad (18)$$

$$[0056] \quad 0 \leq \overline{P_{s,t}^{WT}} \leq z^{WT} \overline{P_{s,t}^{WT}} \quad (19)$$

$$[0057] \quad 0 \leq \overline{P_{s,t}^{PV}} \leq z^{PV} \overline{P_{s,t}^{PV}} \quad (20)$$

[0058] 单个风电机组最大出力 $\overline{P_{s,t}^{WT}}$ 如式(17)所示, S^{WT} 、 μ^{WT} 分别表示风机的叶片面积和转换效率, ρ 为空气密度, $v_{s,t}$ 为风速, 而 v_{in} 、 v_r 和 v_{out} 则表示为风机的切入风速、额定风速和切出风速;

[0059] 单个光伏板最大出力 $\overline{P_{s,t}^{PV}}$ 如式(18)所示, S^{PV} 、 μ^{MPPT} 和 μ^{PV} 分别表示光伏机组的受光面积, 最大功率点跟踪的转换效率以及光伏板的转换效率, o 则表示太阳倾斜角度, $H_{s,t}$ 为太阳辐照度;

[0060] 4) 储能设备约束;

[0061] 根据系统所需负荷, 将储能设备分为电储能、热储能和冷储能三种储能, 其约束如下。

$$[0062] \quad v_{s,t}^{ch,n} + v_{s,t}^{dis,n} - 1 \leq v_{s,t}^{ch|dis,n} \in \{0,1\} \quad (21)$$

$$[0063] \quad 0 \leq P_{s,t}^{ch|dis,n} \leq M v_{s,t}^{ch|dis,n} \quad (22)$$

$$[0064] \quad 0 \leq P_{s,t}^{ch|dis,n} \leq \overline{P^{ch|dis,n}} \quad (23)$$

$$[0065] \quad 0 \leq SOE_{s,t}^n \leq \overline{SOE^n} \quad (24)$$

$$[0066] \quad SOE_{s,t=1}^n = SOE_{s,exp}^n + (P_{s,t}^{ch,n} \gamma^{ch,n} - P_{s,t}^{dis,n} / \gamma^{dis,n}) \Delta t \quad (25)$$

$$[0067] \quad SOE_{s,t+1}^n = SOE_{s,t}^n + (P_{s,t}^{ch,n} \gamma^{ch,n} - P_{s,t}^{dis,n} / \gamma^{dis,n}) \Delta t \quad (26)$$

$$[0068] \quad SOE_{s,exp}^n = SOE_{s,24}^n \quad (27)$$

[0069] 式(21)约束储能必须处在充、放或者蓄电的三种状态, $v_{s,t}^{ch,n}$ 与 $v_{s,t}^{dis,n}$ 为布尔变量, 用于表示储能的充放状态, 式(22)为大M法, 以此来保证储能的出力功率与充放状态匹配, 式(23)则约束储能的充放功率不会超过正常范围, 这之中 $\overline{P^{ch|dis,n}}$ 表示储能的最大的充放功率, $P_{s,t}^{ch|dis,n}$ 则表示储能在某一运行场景下某一时刻下充放功率, 式(24)约束储能的能量状态不会超过正常范围, $SOE_{s,t}^n$ 表示储能在某一运行场景下某一时刻下的能量状态, $\overline{SOE^n}$ 表示各种储能设备所能达到的最大的能量状态, 式(25)为初始储能状态与储能期望值之间的关

系, $SOE_{s,t=1}^n$ 为储能起始时刻下的能量状态, $SOE_{s,exp}^n$ 为储能能量状态的期望值, 式 (26) 表示储能的上一时段能量状态与下一时段能量状态之间的关系方程, $\gamma^{ch,n}$ 与 $\gamma^{dis,n}$ 分别表示充放电效率, 式 (27) 则是保证SOE的初始值和最终值相同;

[0070] 5) 能量转换设备约束;

$$[0071] \quad 0 \leq P_{s,t}^{i,j,e} \leq u^{i,j} \overline{P^{i,j,e}} \quad (28)$$

$$[0072] \quad 0 \leq P_{s,t}^{i,j,g} \leq u^{i,j} \overline{P^{i,j,g}} \quad (29)$$

[0073] 式中, $\overline{P^{i,j,e}}$ 和 $\overline{P^{i,j,g}}$ 分别为各设备可受最大电、气功率;

[0074] 6) 能量枢纽约束;

$$[0075] \quad \begin{bmatrix} P_{s,t}^{e'} \\ P_{s,t}^{h'} \\ P_{s,t}^{c'} \\ P_{s,t}^{g'} \end{bmatrix} = \sum_i \sum_j \begin{bmatrix} \aleph^{i,j,ee} & \aleph^{i,j,eg} \\ \aleph^{i,j,he} & \aleph^{i,j,hg} \\ \aleph^{i,j,ce} & \aleph^{i,j,cg} \\ \aleph^{i,j,ge} & \aleph^{i,j,gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{s,t}^{i,j,e} \\ P_{s,t}^{i,j,g} \end{bmatrix} \quad (30)$$

[0076] 这里将多种能量设备耦合为能量枢纽的形式, 其将多能源设备之间互相耦合造成的复杂性给简化, 公式如式 (30) 所示。而上述的约束中, $P_{s,t}^{i,j,e}$ 表示电能输入功率, $P_{s,t}^{i,j,g}$ 表示天然气输入功率; $P_{s,t}^{e'}$ 、 $P_{s,t}^{h'}$ 、 $P_{s,t}^{c'}$ 和 $P_{s,t}^{g'}$ 则分别表示能量枢纽的电、热、冷和气方面的输出功率, 其中气功率主要为P2G的发出而直接应用在冷热电联供和燃气锅炉设备上, \aleph 为能量枢纽的耦合系数;

[0077] 7) 切负荷约束;

$$[0078] \quad 0 \leq P_{s,t}^{LOSS,r} \leq P_{s,t}^{L,r} \quad (31)$$

[0079] 式 (31) 保证系统切负荷时所切功率不会超过该日运行场景下的负荷, $P_{s,t}^{LOSS,r}$ 为某一场景下某一时刻的切负荷大小, $P_{s,t}^{L,r}$ 表示同一场景时刻下的负荷需求;

[0080] 8) 能量平衡约束;

$$[0081] \quad P_{s,t}^{L,e} + P_{s,t}^{ch,BESS} + \sum_i \sum_j P_{s,t}^{i,j,e} = P_{s,t}^{e'} + P_{s,t}^{dis,BESS} + P_{s,t}^{PV} + P_{s,t}^{WT} + P_{t,s}^{e,Grid} + P_{s,t}^{LOSS,e} \quad (32)$$

$$[0082] \quad P_{s,t}^{L,hc} + P_{s,t}^{ch,T|CESS} \leq P_{s,t}^{h,c'} + P_{s,t}^{dis,T|CESS} + P_{s,t}^{LOSS,h|c} \quad (33)$$

$$[0083] \quad P_{t,s}^{g,Grid} + P_{s,t}^{g'} = \sum_i \sum_j P_{s,t}^{i,j,g} \quad (34)$$

[0084] 式 (32) ~ (34) 表示冷、热、电和天然气功率的平衡约束, 即要求所供应的能源功率与消耗的能源功率近似相同, 而电功率则严格相等

[0085] S3. 构建改进WCVaR风险评估模型:

[0086] 建立以运行成本中交易成本、维护成本、切负荷损失和阶梯碳排放成本为损失函数的WCVaR风险评估模型;

[0087] S4. 构建采用改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统设备投资模型:

[0088] 将WCVaR模型与综合能源系统容量投资模型中运行成本线性加权叠加, 并以权重值作为投资人的风险偏好程度, 建立采用改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统设备

投资模型。

[0089] 作为本发明进一步改进,所述气象条件包括风速、太阳辐照。

[0090] 作为本发明进一步改进,所述步骤S3建立的构建WCVaR风险评估模型如下式所示:

[0091] S3.1建立常规WCVaR风险评估模型;

$$\begin{aligned}
 \text{WCVaR}_\alpha &= \max_{p(\cdot) \in \sigma} \min_{\zeta_\alpha \in R} F_\alpha(x, \zeta_\alpha) = \max_{p(\cdot) \in \sigma} \min_{\zeta_\alpha \in R} \zeta_\alpha + \frac{\sum_{s=1}^N p_s [f(x, y_s) - \zeta_\alpha]^+}{1 - \alpha} \\
 &= \max_{p(\cdot) \in \sigma} \min_{\zeta_\alpha \in R} \zeta_\alpha + \frac{\sum_{s=1}^N p_s [C_{\text{Tr},s} + C_{\text{M},s} + C_{\text{CO}_2,s} + C_{\text{LOSS},s} - \zeta_\alpha]^+}{1 - \alpha}
 \end{aligned} \quad (35)$$

[0093] 其中, x 为系统各设备出力、外购电、以及切负荷功率等决策变量, y_s 为上述决策变量所产生的交易、维护、阶梯碳排放成本和切负荷损失; $p(\cdot) \in \sigma$ 为随机变量 y_s 的在第 s 个场景下概率分布函数 p_s 的集合; ζ_α 为置信区间为 α 时的风险损失VaR的值; N 为场景总数;且 $[t]^+ = \max\{t, 0\}$;

[0094] S3.2建立离散界约束下WCVaR风险评估模型;

[0095] 因为WCVaR函数具有较为复杂的min-max结构,因此在随机变量服从离散界约束分布的基础上,对WCVaR函数进行改进,其中离散界约束为:

[0096] 随机变量 y_s 的概率密度函数 $p(y)$ 难以准确获得,因此,在 y_s 满足离散分布的基础上,将场景点概率 π 放入一个给定的离散界中,如式(14)所示;

$$\pi \in P_\pi^B = \{ \pi : \pi = \pi^0 + \eta, e^T \eta = 0, \underline{\eta} \leq \eta \leq \bar{\eta} \} \quad (36)$$

[0098] 式中, π^0 为某种已知的分布, e 为单位向量, $\underline{\eta}$ 和 $\bar{\eta}$ 为常数向量,也称为界扰动范围, $e^T \eta = 0$ 保证 π 为一个概率分布,此时称 y 服从离散界约束分布, π 为界约束集;

[0099] 将WCVaR里损失函数 $f(x, y_s)$ 中的随机变量 y_s 带入离散界约束中,为了方便编程计算,引入辅助变量 u_s ,则上式转化为:

$$F_\alpha(x, \zeta_\alpha, \pi) = \zeta_\alpha + \frac{\pi^T u_s}{1 - \alpha} \quad (37)$$

[0101] 其中 $u_s \geq f(x, y_s) - \alpha, u_s \geq 0 (k=1, 2, \dots, n)$;

[0102] 由于 $\pi = \pi^0 + \eta$,则将式(37)转变为

$$G_\alpha(x, \zeta_\alpha, \pi) = \zeta_\alpha + \frac{(\pi^0)^T u_s}{1 - \alpha} + \frac{\eta^T u_s}{1 - \alpha} \quad (38)$$

[0104] 此时自变量 π 转移到了 η^T 上,引入拉格朗日乘子 θ 、 ω 与 ξ ,将式(38)的 $\frac{\eta^T u_s}{1 - \alpha}$ 通过拉格朗日对偶变换,得出考虑离散界约束下WCVaR函数如式(38)所示;

$$\text{WCVaR}_\alpha = \begin{cases} \min_{(\zeta_\alpha, u, \xi, \omega)} \left\{ \zeta_\alpha + \frac{1}{1 - \alpha} (\pi^0)^T u_s - \frac{1}{1 - \alpha} (-\bar{\eta}^T \xi + \underline{\eta}^T \omega) \right\} \\ s.t. \begin{cases} u_s \geq f(x, y_s) - \zeta_\alpha \\ u_s \geq 0, (s=1, 2, \dots, n) \\ e\theta + \xi - \omega = u_s \\ \xi \geq 0; \omega \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (39)$$

[0106] 式中, θ 、 ξ 、 ω 为WCVaR对偶变换时的拉格朗日乘子, 前两个约束为简化函数中的计算, 后三个表示对偶变换后对于乘子与随机变量之间关系;

[0107] 最后得出步骤S3模型为:

$$[0108] \quad \min_{(\zeta_\alpha, u, z, \xi, \omega)} \text{WCVaR}_\alpha = \begin{cases} \zeta_\alpha + \frac{(\boldsymbol{\pi}^0)^\top \mathbf{u}_s}{1-\alpha} - \frac{(-\bar{\boldsymbol{\eta}}^\top \boldsymbol{\xi} + \underline{\boldsymbol{\eta}}^\top \boldsymbol{\omega})}{1-\alpha} \\ \mathbf{u}_s \geq C_{\text{Tr},s} + C_{\text{M},s} + C_{\text{CO}_2,s} + C_{\text{LOSS},s} - \zeta_\alpha \\ \mathbf{u}_s \geq 0, (s=1, 2, \dots, n) \\ \mathbf{e}\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\xi} - \boldsymbol{\omega} = \mathbf{u}_s \\ \boldsymbol{\xi} \geq 0; \boldsymbol{\omega} \geq 0 \end{cases} \quad (40)。$$

[0109] 作为本发明进一步改进, 所述步骤S4建立的采用改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统设备投资模型;

[0110] S4.1建立可调节风险偏好模型;

[0111] 将WCVaR与运行成本线性加权叠加, 得出综合能源系统设备投资模型如下:

$$[0112] \quad \begin{aligned} \min f &= C_{\text{in}} + S[(1-\beta)C_{\text{op}} + \beta \text{WCVaR}_\alpha] \\ &= C_{\text{in}} + S[(1-\beta)C_{\text{op}} + \beta \max_{p(\cdot) \in \sigma} \min_{\zeta_\alpha \in R} F_\alpha(x, \zeta_\alpha)] \end{aligned} \quad (41)$$

[0113] 式中, β 为投资者的风险偏好系数, 当 $0 < \beta < 0.5$ 时, 视投资者为激进型; $\beta = 0.5$ 时为中庸型; $0.5 < \beta < 1$ 则为保守型, 根据不同投资者对于风险的保守程度做出改变。WCVaR $_\alpha$ 为置信水平为 α 时的WCVaR值;

[0114] S4.2建立改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统设备投资模型;

[0115] 目标函数为复杂的min-max-min结构函数, 加入离散界约束, 将式(41)中运行成本 C_{op} 与WCVaR $_\alpha$ 转换为, 最终如式(42)所示;

$$[0116] \quad \min_{\boldsymbol{\Omega}} f = \begin{cases} C_{\text{in}} + S \left\{ (1-\beta) \left[\sum_s (C_{\text{Tr},s} + C_{\text{M},s} + C_{\text{CO}_2,s} + C_{\text{LOSS},s}) \boldsymbol{\pi}^0 + (-\bar{\boldsymbol{\eta}}^\top \boldsymbol{\xi} - \underline{\boldsymbol{\eta}}^\top \boldsymbol{\omega}) \right] + \beta \left[\zeta_\alpha + \frac{(\boldsymbol{\pi}^0)^\top \mathbf{u}_s}{1-\alpha} - \frac{(-\bar{\boldsymbol{\eta}}^\top \boldsymbol{\xi} + \underline{\boldsymbol{\eta}}^\top \boldsymbol{\omega})}{1-\alpha} \right] \right\} \\ \mathbf{u}_s \geq C_{\text{Tr},s} + C_{\text{M},s} + C_{\text{CO}_2,s} + C_{\text{LOSS},s} - \zeta_\alpha \\ \mathbf{u}_s \geq 0, (s=1, 2, \dots, n) \\ \mathbf{u}_s = \mathbf{e}\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\xi} - \boldsymbol{\omega}; \boldsymbol{\xi} \geq 0; \boldsymbol{\omega} \geq 0 \\ (C_{\text{Tr},s} + C_{\text{M},s} + C_{\text{CO}_2,s} + C_{\text{LOSS},s}) = \mathbf{e}\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\xi} - \boldsymbol{\omega}; \boldsymbol{\xi} \geq 0; \boldsymbol{\omega} \geq 0; \mathbf{x} \geq 0 \end{cases} \quad (42)$$

[0117] 式中, $\boldsymbol{\Omega} = \{\zeta_\alpha, u, z, \xi, \omega, x, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\omega}\}$, 而约束中前四个部分为针对WCVaR对偶变换等的约束, 后四个约束为针对运行成本 C_{op} 对偶变换所形成的约束。

[0118] 与现有技术相比, 本发明的有益效果为:

[0119] 1、采用WCVaR计量综合能源系统规划运行的风险, 更加全面的考虑了运行成本中

存在的极端情况,虽然增加了投资成本,但会降低系统的切负荷量,增加综合能源利用,提升运行可靠性和经济效益。

[0120] 2、随着概率分布的不确定性增加,离散界约束的界扰动范围也增加,WCVaR量化值也会加大,进而系统投资与运行策略发生改变,相比于无法做出改变的CVaR,更能应对不确定性增加的状况。

[0121] 3、在系统运行期间考虑概率分布不确定性时,若规划阶段也考虑不确定性可以降低系统总成本,且随着界扰动范围增加,成本下降越明显。

[0122] 4、随着风险偏好系数的增加,会提升系统运行的可靠性,降低切负荷损失,但会使碳排放量有着一定的提升。加入奖惩阶梯碳交易成本后,碳交易成本增加,碳排放量降低,因而提高了低碳的社会效益。

附图说明

[0123] 图1是本实施例改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统设备投资模型方法的实现流程示意图。

[0124] 图2是综合能源系统结构示意图。

[0125] 图3是在具体应用实施例不同碳排放成本下的碳排放量对比示意图。

[0126] 图4是在具体应用实施例中采用WCVaR与采用CVaR进行风险评估的投资成本对比示意图。

[0127] 图5是在具体应用实施例中采用WCVaR与采用CVaR进行风险评估的切电负荷量对比示意图。

[0128] 图6是在具体应用实施例中典型日下CVaR模型的电运行状态图。

[0129] 图7是在具体应用实施例中典型日下WCVaR模型的电运行状态图。

[0130] 图8是在具体应用实施例中采用WCVaR与采用CVaR进行风险评估的总成本对比示意图。

具体实施方式

[0131] 以下结合说明书附图和具体优选的实施例对本发明作进一步描述,但并不因此而限制本发明的保护范围。

[0132] S1. 地区基本数据获取与筛选:分别获取需求侧的电热冷需求功率,以及气象条件(风速、太阳辐照等);

[0133] S2. 建立综合能源系统设备容量投资模型:建立以系统中个设备投资成本以及系统运行成本最低为目标的投资模型;

[0134] S3. 构建改进WCVaR风险评估模型:建立以运行成本中交易成本、维护成本、切负荷损失和阶梯碳排放成本为损失函数的WCVaR风险评估模型;

[0135] S4. 构建采用改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统设备投资模型:将WCVaR模型与综合能源系统容量投资模型中运行成本线性加权叠加,并以权重值作为投资人的风险偏好程度,建立采用改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统设备投资模型;

[0136] 综合能源系统结构示意图如图2所示,其中主要能量转换设备为冷热电联供(CCHP, Combined Cooling, Heating and Power)、燃气锅炉(GB, Gas Boiler)、电制冷(AC,

Air Conditioner) 以及P2G设备,而能源供应设备主要为风力发电(WT)与光伏发电(PV),负荷侧为电储能(battery energy storage system,BESS)、热储能(heating energy storage system,HESS)和冷储能(cooling energy storage system,CESS)三种储能。

[0137] 本实施例根据综合能源系统规划中存在新能源供应、负荷需求和设备出力等不确定性带来的规划成本风险,引入改进WCVaR,并针对不同投资需求的投资方,给出相应的建议。

[0138] 在本实施例步骤S1中,获取地区历史数据,并通过k-means算法对数据进行场景削减,获取削减后得到的N个典型场景,这里取 $N=100\sim 365$ 。

[0139] 在本实施例步骤S2中,建立综合能源系统设备容量投资模型的具体步骤为:

[0140] S2.1. 利用各设备建设成本、维护成本,结合分时电价与天然气价格等,构建投资模型,目标函数为:

$$[0141] \quad \min f = C_{in} + C_{op} \quad (1)$$

[0142] 式中, C_{in} 为设备投资成本, C_{op} 为运行成本。

[0143] S2.2. 建立投资成本模型,投资成本的计算方法为:

$$C_{in} = \sum_i \sum_j k^{i,j} C_i^{i,j} u^{i,j} + \sum_m k^m C_i^m z^m + \sum_n k^n C_i^n z^n$$

$$[0144] \quad \begin{aligned} i &= \{CCHP, GB, AC, P2G\}; \quad m = \{PV, WT\} \\ n &= \{BESS, HESS, CESS\} \end{aligned} \quad (2)$$

[0145] 式中, i 为能量转换设备的集合,主要包括冷热电联供(CCHP, Combined Cooling, Heating and Power)、燃气锅炉(GB, Gas Boiler)、电制冷(AC, Air Conditioner)以及P2G设备; j 为各种能源转换设备的容量; m 为风光发电的集合; n 为储能设备的集合; C_i 表示各种设备型号的成本; u 为布尔变量,表示为设备是否购买; z 为风光发电机组与储能设备购入的模块数量。 k 为年均分摊系数, dr 为贴现率,这里取0.08, T 为设备的寿命,设为20年。

[0146] S2.3. 建立运行成本模型,运行成本的计算方法为:

$$[0147] \quad C_{op} = S \sum_s p_s (C_{Tr,s} + C_{M,s} + C_{CO_2,s} + C_{LOSS,s}) \quad (3)$$

[0148] 1) 交易成本

[0149] 对于单个场景下的交易成本 $C_{Tr,s}$ 由式(4)表示,其包括有外部电力购买成本 C_s^e 、外部天然气购买成本 C_s^g 。

$$[0150] \quad C_{Tr,s} = C_s^e + C_s^g = \sum_t pr_t^e P_{t,s}^{e,Grid} + \sum_t pr_t^g P_{t,s}^{g,Grid} \quad (4)$$

[0151] 式中,上标e、g分别表示为电和气, pr 为能源消耗单价, $P_{t,s}^{e,Grid}$ 表示每个场景下每小时中所购入的外部电力功率, $P_{t,s}^{g,Grid}$ 表示外部购气功率。

[0152] 2) 维护成本

[0153] 包括综合能源系统中所有投资设备的维护成本,由各类设备运行时的实际输出功率决定。

$$[0154] \quad \begin{aligned} C_{M,s} &= \sum_i \lambda^i \sum_j \sum_t P_{t,s}^{i,j} + \sum_m \lambda^m \sum_t P_{t,s}^m + \\ &\sum_n \lambda^n \sum_t (P_{t,s}^{ch,n} + P_{t,s}^{dis,n}) \end{aligned} \quad (5)$$

[0155] 式中, λ 表示各设备的维护成本单价,上标ch表示充电,dis表示放电。 $P_{t,s}^{i,j}$ 表示各种

能量设备所输出的功率, $P_{t,s}^m$ 为新能源发电设备输出功率, $P_{t,s}^{\text{ch},n}$ 与 $P_{t,s}^{\text{dis},n}$ 则分别表示储能的充放电功率。

[0156] 3) 奖惩阶梯碳交易成本

[0157] 为了降低系统规划时的碳排放, 因此在这加入奖惩阶梯碳交易成本。其采用基准线法, 来确定系统无偿碳排放配额。考虑外购电力都来源于燃煤电厂, 而系统中主要造成碳排放的设备为冷热电联供和燃气锅炉, 则碳排放的分配额如式 (6) 到式 (9) 所示。

$$[0158] \quad E'_{\text{IES}} = E'_{\text{Grid}} + E'_{\text{CCHP}} + E'_{\text{GB}} \quad (6)$$

$$[0159] \quad E'_{\text{Grid}} = \delta'^e \sum_{t=1}^T P_{t,s}^{e,\text{Grid}} \Delta t \quad (7)$$

$$[0160] \quad E'_{\text{CCHP}} = \delta'^h (\mu_{e-h} \sum_{t=1}^T P_{t,s}^{\text{CCHP},e} \Delta t + \gamma \sum_{t=1}^T P_{t,s}^{\text{CCHP},h} \Delta t) \quad (8)$$

$$[0161] \quad E'_{\text{GB}} = \delta'^h \gamma \sum_{t=1}^T P_{t,s}^{\text{GB},h} \Delta t \quad (9)$$

[0162] 式 (6) 中, E'_{IES} 、 E'_{Grid} 、 E'_{CCHP} 和 E'_{GB} 分别表示 IES 整体的、外部购电以及冷热电联供和燃气锅炉的碳排放分配额度。式 (7) 中, δ'^e 为单位发电量碳排放配额。式 (8) 中, δ'^h 为单位供热量碳排放配额, μ_{e-h} 为电功率转热值系数, $P_{t,s}^{\text{CCHP},e}$ 与 $P_{t,s}^{\text{CCHP},h}$ 表示冷热电联供的发电和供热功率, γ 表示热功率转热值转换系数。式 (9) 中, $P_{t,s}^{\text{GB},h}$ 为燃气锅炉的供热功率。

[0163] 而对于系统实际碳排放量, 计算方式与式 (7) 到式 (9) 基本一致, 区别为对应的单位电量和热量碳排放系数取值不同, 分别为 δ^e 与 δ^h 。因此系统中的实际碳排放计算如式所示。

$$[0164] \quad E_{\text{IES}} = E_{\text{Grid}} + E_{\text{CCHP}} + E_{\text{GB}} \quad (10)$$

[0165] 根据以上的实际碳排放量和碳排放配额之间的关系, 建立奖惩阶梯碳交易成本模型, 如式 (11) 所示。

$$[0166] \quad C_{\text{CO}_2} = \begin{cases} -cd - c(1+\rho)(E' - E - d) & E - E' < -d \\ -c(E' - E) & -d \leq E - E' < 0 \\ c(E - E') & 0 \leq E - E' < d \\ cd + c(1+\rho)(E - E' - d) & d \leq E - E' < 2d \\ c(2+\rho)d + c(1+2\rho)(E - E' - 2d) & 2d \leq E - E' < 3d \\ \dots & \dots \end{cases} \quad (11)$$

[0167] 式中, ρ 为碳交易增长系数, c 为碳交易基准价格, d 为碳交易价格区间长度。

[0168] 4) 切负荷损失

[0169] 主要为了降低切负荷, 保证能源供应。

$$[0170] \quad C_{\text{LOSS},s} = \sum_{r \in \{e, c, h\}} \mu^r \sum_t P_{t,s}^{L,\text{LOSS},r} \quad (12)$$

[0171] 式中, 上标 r 为电、冷和热的能源集合, μ 表示切负荷的所需的成本单价, 而 $P_{t,s}^{L,\text{LOSS},r}$ 表示所切掉的负荷功率。

[0172] S2.4. 建立模型约束, 具体内容为:

[0173] 1) 设备投资约束

$$[0174] \quad \sum_j u^{\text{CCHP},j} \leq 1 \quad (13)$$

$$[0175] \quad z^{\text{min}} \geq 0 \quad (14)$$

[0176] 式(13)~(14)表示在综合能源系统建设中, 冷热电联供至少得有一个存在, 而新能源发电模块和储能设备的投资数目不可小于0。

[0177] 2) 外购能源约束

$$[0178] \quad 0 \leq P_{t,s}^{e,\text{Grid}} \leq \overline{P_{t,s}^{e,\text{Grid}}} \quad (15)$$

$$[0179] \quad 0 \leq P_{t,s}^{g,\text{Grid}} \leq \overline{P_{t,s}^{g,\text{Grid}}} \quad (16)$$

[0180] 式(15)和式(16)保证所外购能源不会过多, $\overline{P_{t,s}^{e,\text{Grid}}}$ 为最大可从电网购买电量, $\overline{P_{t,s}^{g,\text{Grid}}}$ 为最大可从气网购买天然气量。

[0181] 3) 新能源发电设备约束

$$[0182] \quad \overline{P_{s,t}^{\text{WT}}} = \begin{cases} 0, & v_{s,t} < v_{\text{in}}, \text{ OR } v_{s,t} > v_{\text{out}} \\ \frac{\rho v_{s,t}^3 S^{\text{WT}} \mu^{\text{WT}}}{2}, & v_{\text{in}} \leq v_{s,t} \leq v_r \\ \frac{\rho v_r^3 S^{\text{WT}} \mu^{\text{WT}}}{2}, & v_r \leq v_{s,t} \leq v_{\text{out}} \end{cases} \quad (17)$$

$$[0183] \quad \overline{P_{s,t}^{\text{PV}}} = H_{s,t} \cos \theta S^{\text{PV}} \mu^{\text{MPPT}} \mu^{\text{PV}} \quad (18)$$

$$[0184] \quad 0 \leq P_{s,t}^{\text{WT}} \leq z^{\text{WT}} \overline{P_{s,t}^{\text{WT}}} \quad (19)$$

$$[0185] \quad 0 \leq P_{s,t}^{\text{PV}} \leq z^{\text{PV}} \overline{P_{s,t}^{\text{PV}}} \quad (20)$$

[0186] 单个风电机组最大出力 $\overline{P_{s,t}^{\text{WT}}}$ 如式(17)所示, S^{WT} 、 μ^{WT} 分别表示风机的叶片面积和转换效率, ρ 为空气密度, $v_{s,t}$ 为风速, 而 v_{in} 、 v_r 和 v_{out} 则表示为风机的切入风速、额定风速和切出风速。

[0187] 单个光伏板最大出力 $\overline{P_{s,t}^{\text{PV}}}$ 如式(18)所示, S^{PV} 、 μ^{MPPT} 和 μ^{PV} 分别表示光伏机组的受光面积, 最大功率点跟踪的转换效率以及光伏板的转换效率, θ 则表示太阳倾斜角度, $H_{s,t}$ 为太阳辐照度。

[0188] 4) 储能设备约束

[0189] 根据系统所需负荷, 可将储能设备分为电储能 (battery energy storage system, BESS)、热储能 (heating energy storage system, HESS) 和冷储能 (cooling energy storage system, CESS) 三种储能。其约束如下。

$$[0190] \quad v_{s,t}^{\text{ch},n} + v_{s,t}^{\text{dis},n} \leq 1 \quad v_{s,t}^{\text{ch|dis},n} \in \{0,1\} \quad (21)$$

$$[0191] \quad 0 \leq P_{s,t}^{\text{ch|dis},n} \leq M v_{s,t}^{\text{ch|dis},n} \quad (22)$$

$$[0192] \quad 0 \leq P_{s,t}^{\text{ch|dis},n} \leq \overline{P_{s,t}^{\text{ch|dis},n}} \quad (23)$$

$$[0193] \quad 0 \leq SOE_{s,t}^n \leq \overline{SOE}^n \quad (24)$$

$$[0194] \quad SOE_{s,t=1}^n = SOE_{s,exp}^n + \left(P_{s,t}^{ch,n} \gamma^{ch,n} - P_{s,t}^{dis,n} / \gamma^{dis,n} \right) \Delta t \quad (25)$$

$$[0195] \quad SOE_{s,t+1}^n = SOE_{s,t}^n + \left(P_{s,t}^{ch,n} \gamma^{ch,n} - P_{s,t}^{dis,n} / \gamma^{dis,n} \right) \Delta t \quad (26)$$

$$[0196] \quad SOE_{s,exp}^n = SOE_{s,24}^n \quad (27)$$

[0197] 式(21)约束储能必须处在充、放或者蓄电的三种状态, $v_{s,t}^{ch,n}$ 与 $v_{s,t}^{dis,n}$ 为布尔变量, 用于表示储能的充放状态。式(22)为大M法, 以此来保证储能的出力功率与充放状态匹配。式(23)则约束储能的充放功率不会超过正常范围, 这之中 $\overline{P^{ch|dis,n}}$ 表示储能的最大充放功率, $P_{s,t}^{ch|dis,n}$ 则表示储能在某一运行场景下某一时刻下充放功率。式(24)约束储能的能量状态不会超过正常范围, $SOE_{s,t}^n$ 表示储能在某一运行场景下某一时刻下的能量状态, $\overline{SOE^n}$ 表示各种储能设备所能达到的最大的能量状态。式(25)为初始储能状态与储能期望值之间的关系, $SOE_{s,t=1}^n$ 为储能起始时刻下的能量状态, $SOE_{s,exp}^n$ 为储能能量状态的期望值。式(26)表示储能的上一时段能量状态与下一时段能量状态之间的关系方程, $\gamma^{ch,n}$ 与 $\gamma^{dis,n}$ 分别表示充放电效率。式(27)则是保证SOE的初始值和最终值相同。

[0198] 5) 能量转换设备约束

$$[0199] \quad 0 \leq P_{s,t}^{i,j,e} \leq u^{i,j} \overline{P^{i,j,e}} \quad (28)$$

$$[0200] \quad 0 \leq P_{s,t}^{i,j,g} \leq u^{i,j} \overline{P^{i,j,g}} \quad (29)$$

[0201] 式中, $\overline{P^{i,j,e}}$ 和 $\overline{P^{i,j,g}}$ 分别为各设备可受最大电、气功率。

[0202] 6) 能量枢纽约束

$$[0203] \quad \begin{bmatrix} P_{s,t}^{e'} \\ P_{s,t}^{h'} \\ P_{s,t}^{c'} \\ P_{s,t}^{g'} \end{bmatrix} = \sum_i \sum_j \begin{bmatrix} \aleph^{i,j,ee} & \aleph^{i,j,eg} \\ \aleph^{i,j,he} & \aleph^{i,j,hg} \\ \aleph^{i,j,ce} & \aleph^{i,j,cg} \\ \aleph^{i,j,ge} & \aleph^{i,j,gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{s,t}^{i,j,e} \\ P_{s,t}^{i,j,g} \end{bmatrix} \quad (30)$$

[0204] 这里将多种能量设备耦合为能量枢纽 (energy hub, EH) 的形式, 其将多能源设备之间互相耦合造成的复杂性给简化, 公式如式(30)所示。而上述的约束中, $P_{s,t}^{i,j,e}$ 表示电能输入功率, $P_{s,t}^{i,j,g}$ 表示天然气输入功率; $P_{s,t}^{e'}$ 、 $P_{s,t}^{h'}$ 、 $P_{s,t}^{c'}$ 和 $P_{s,t}^{g'}$ 则分别表示能量枢纽的电、热、冷和气方面的输出功率, 其中气功率主要为P2G的发出而直接应用在冷热电联供和燃气锅炉设备上。 \aleph 为能量枢纽的耦合系数。

[0205] 7) 切负荷约束

$$[0206] \quad 0 \leq P_{s,t}^{LOSS,r} \leq P_{s,t}^{L,r} \quad (31)$$

[0207] 式(31)保证系统切负荷时所切功率不会超过该日运行场景下的负荷。 $P_{s,t}^{LOSS,r}$ 为某一场景下某一时刻的切负荷大小, $P_{s,t}^{L,r}$ 表示同一场景时刻下的负荷需求。

[0208] 8) 能量平衡约束

$$[0209] \quad \begin{aligned} & P_{s,t}^{L,e} + P_{s,t}^{ch,BESS} + \sum_i \sum_j P_{s,t}^{i,j,e} = P_{s,t}^{e'} \\ & + P_{s,t}^{dis,BESS} + P_{s,t}^{PV} + P_{s,t}^{WT} + P_{t,s}^{e,Grid} + P_{s,t}^{LOSS,e} \end{aligned} \quad (32)$$

$$[0210] \quad P_{s,t}^{L,h|c} + P_{s,t}^{ch,T|CESS} \leq P_{s,t}^{h|c'} + P_{s,t}^{dis,T|CESS} + P_{s,t}^{LOSS,h|c} \quad (33)$$

$$[0211] \quad P_{t,s}^{g,Grid} + P_{s,t}^{g'} = \sum_i \sum_j P_{s,t}^{i,j,g} \quad (34)$$

[0212] 式(32)~(34)表示冷、热、电和天然气功率的平衡约束,即要求所供应的能源功率与消耗的能源功率近似相同,而电功率则严格相等。

[0213] 在本实施例步骤S3中,建立的改进WCVaR风险评估模型,主要为通过离散界约束带入WCVaR后进行对偶变换得出。

[0214] 在本实施例中,改进WCVaR风险评估模型表示如式(35)所示:

$$[0215] \quad \min_{(\zeta_\alpha, \mu_s, \xi, \omega)} \text{WCVaR}_\alpha = \begin{cases} \zeta_\alpha + \frac{(\boldsymbol{\pi}^0)^\top \mathbf{u}_s}{1-\alpha} - \frac{(-\bar{\boldsymbol{\eta}}^\top \boldsymbol{\xi} + \bar{\boldsymbol{\eta}}^\top \boldsymbol{\omega})}{1-\alpha} \\ \mathbf{u}_s \geq C_{Tr,s} + C_{M,s} + C_{CO_2,s} + C_{LOSS,s} - \zeta_\alpha \\ \mathbf{u}_s \geq 0, (s=1,2,\dots,n) \\ \mathbf{e}\theta + \boldsymbol{\xi} - \boldsymbol{\omega} = \mathbf{u}_s \\ \boldsymbol{\xi} \geq 0; \boldsymbol{\omega} \geq 0 \end{cases} \quad (37)$$

[0216] 式中, θ 、 ξ 、 ω 为WCVaR对偶变换时的拉格朗日乘子。前两个约束为简化函数中的计算,后两个表示对偶变换后对于乘子与随机变量之间关系; x 为系统各设备出力、外购电、以及切负荷功率等决策变量, y_s 为上述决策变量所产生的交易、维护、阶梯碳排放成本和切负荷损失; $p(\cdot) \in \sigma$ 为随机变量 y_s 的在第 s 个场景下概率分布函数 p_s 的集合; ζ_α 为置信区间为 α 时的风险损失VaR的值。

[0217] 本实施例在步骤S4中,构建采用改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统设备投资模型的具体步骤为:将WCVaR模型与综合能源系统容量投资模型中运行成本线性加权叠加,并以权重值作为投资人的风险偏好程度,建立采用改进WCVaR的可调节风险偏好综合能源系统设备投资模型。

[0218] 本实施例中,将WCVaR与运行成本线性加权叠加,得出综合能源系统设备投资模型如下:

$$[0219] \quad \min f = C_{in} + S[(1-\beta)C_{op} + \beta \text{WCVaR}_\alpha] = C_{in} + S\left[(1-\beta)C_{op} + \beta \max_{p(\cdot) \in \sigma} \min_{\zeta_\alpha \in R} F_\alpha(x, \zeta_\alpha)\right] \quad (38)$$

[0220] 式中, β 为投资者的风险偏好系数,当 $0 < \beta < 0.5$ 时,可视投资者为激进型; $\beta = 0.5$ 时为中庸型; $0.5 < \beta < 1$ 则为保守型,可根据不同投资者对于风险的保守程度做出改变。 WCVaR_α 为置信水平为 α 时的WCVaR值。

[0221] 目标函数为复杂的min-max-min结构函数,因此为了简化计算,同时也为了避免随机变量的分布不确定对规划的经济性带来的影响,加入离散界约束,将式(19)中运行成本 C_{op} 与 WCVaR_α 转换为,最终如式(39)所示。

$$\begin{aligned}
[0222] \quad \min_{\Omega} f = & \left\{ \begin{aligned} & C_{in} + S \left\{ (1-\beta) \left[\sum_s (C_{Tr,s} + C_{M,s} + \right. \right. \\ & \left. \left. C_{CO_2,s} + C_{LOSS,s}) \pi^0 + (\bar{\eta}^T \zeta - \underline{\eta}^T \omega) \right] + \right. \\ & \left. \left. \beta \left[\zeta_{\alpha} + \frac{(\pi^0)^T u_s}{1-\alpha} - \frac{(-\bar{\eta}^T \zeta + \underline{\eta}^T \omega)}{1-\alpha} \right] \right\} \right. \\ & s.t. \left\{ \begin{aligned} & u_s \geq C_{Tr,s} + C_{M,s} + C_{CO_2,s} + \\ & C_{LOSS,s} - \zeta_{\alpha} \\ & u_s \geq 0, (s=1, 2, \dots, n) \\ & u_s = e\theta + \zeta - \omega; \quad \zeta \geq 0; \quad \omega \geq 0 \\ & (C_{Tr,s} + C_{M,s} + C_{CO_2,s} + C_{LOSS,s}) = \\ & e\theta + \zeta - \omega; \quad \zeta \geq 0; \quad \omega \geq 0; \quad x \geq 0 \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (39)
\end{aligned}$$

[0223] 式中, $\Omega = \{\zeta_{\alpha}, u, z, \xi, \omega, x, \theta, \zeta, \omega\}$, 而约束中前四个部分为针对WCVaR对偶变换等的约束, 后四个约束为针对运行成本 C_{op} 对偶变换所形成的约束。

[0224] 为验证本发明的有效性, 以河北某地的全年8760小时的光辐照度、风速以及冷热电负荷数据为基础, 进行场景选取分析。且由于数据中所涉及的变量过大, 因此在这对数据进行场景筛选, 通过k-means算法来进行场景削减, 减少运算量, 在这筛选出100个典型场景。并对于所建立的模型, 采用MATLAB中YALMIP工具箱里的Gurobi 9.5.1和Cplex 12.10.0中的分支定界法来进行求解。

[0225] 相应设备的成本。如表1所示。

[0226] 表1各设备成本

设备	单位容量(MWh)	投资成本(万元/MW)	运维成本(元/MWh)
冷热电联供	5	900	5
P2G 设备	5	125	15
燃气锅炉	2	100	10
电转冷	1	100	10
风电	1	600	400
光伏	1	700	400
电储能	1	190	90
冷储能	1	40	40
热储能	1	40	30

[0227] 天然气价格为固定的4(元/m³), 天然气热值为7200(kcal/m³), 电价则采取地方政府过去发布的峰谷分时电价, 碳交易增长系数设定为0.2, 基准价设定为100(元/t), 交易区间长度设定为20t。忽略在能量传输和接入过程中的损耗。

[0228] 以电力零售商运行收益、用户需求响应满意度、风险规避程度最大化为目标, 设置5种场景进行对比分析, 分别为:

[0229] 情景1: 为采用WCVaR的规划模型;

[0230] 情景2: 为采用CVaR的规划模型;

[0231] 情景3: 在情景二的基础上, 重新考虑随机变量概率分布不确定问题的规划模型;

[0232] 情景4: 采用WCVaR的规划模型, 但碳排放成本为普通碳排放成本;

[0233] 情景5: 采用WCVaR的规划模型, 但不考虑碳排放成本。

[0235] 表2

场景数=100, $\alpha=0.95$	$\beta=0.1$	$\beta=0.5$	$\beta=0.9$
冷热电联供设备	5	15	20
P2G	0	0	0
电制冷设备	10	10	10
燃气锅炉	28	28	28
电储能	15.64	13.27	18.38
热储能	4.67	23.74	23.74
冷储能	0.62	2.62	4.12
[0236] 风电	27.97	22.76	21.19
光伏	22.78	18.09	16.30
投资成本(万元)	2450.24	2615.25	2800.27
运行成本(万元)	10238.39	10407.11	10453.34
WCVaR(万元)	19142.37	17624.76	17323.70
切电负荷量(MW)	641.20	152.55	18.27
碳排放量(t)	6925.04	7777.85	8557.51
目标函数(万元)	13579.02	16631.19	19436.93

[0237] 表2为情景1不同风险偏好系数下的投资数据分析。可以看出随着风险偏好系数的增加,投资者会减少波动性较大的新能源发电设备的投入,转而更愿意投资冷热电联供此类可以提供稳定功率输出的设备,并且加大储能设备的投入以进一步确保运行的可靠性,减少切负荷损失。随着保守程度的提升,系统的切负荷量下降了97.2%,但同时,碳排放量上升了24%,因此对于不同需求的投资者可以做出相应的选择。

[0238] 图3为不同碳排放成本下的碳排放量。可以看出不同碳排放成本的情况下,考虑奖惩阶梯碳交易成本时的系统的整体碳排放低于普通碳交易成本和不考虑碳排放成本时的碳排放量。这是因为奖惩阶梯碳交易成本可以使得系统根据不同场景下的运行状况给出相应的碳排放价格,这使得系统可以更加灵活针对碳排放量进行调节,以此降低系统运行的碳排放量。

[0239] 随着风险偏好系数 β 的增加,考虑奖惩阶梯碳交易成本的碳排放量相对其他碳交易成本的上升趋势更小,这表明即使投资者更加注重系统运行可靠性方面,也不会因而产生大量碳排放量,使得模型具有一定的低碳的社会效益。

[0240] 图4为采用WCVaR与采用CVaR进行风险评估的投资成本对比。可以看出,对于投资成本,为了进一步保证系统运行的可靠性,情景一对于设备的投资成本会高于情景二。且随着风险偏好系数 β 的增加,情景一会先于情景二加大设备投资,如 $\beta=0.5$ 和 $\beta=0.7$ 时,情景一会提前于情景二增加冷热电联供等能量转换设备的投资,以此来增加系统的供能,减少设备的切负荷损失。而对于运行成本,情景一的运行成本高于情景二下的运行成本。这是因为在运行时,情景一将极端的运行场景考虑在内,增加设备的功率输出,提高供能,保证系统运行时的可靠性。

[0241] 图5为采用WCVaR与采用CVaR进行风险评估的切电负荷量对比。可以看出在每种风险偏好系数下,情景一的切电负荷量都低于情景二,其中,除开 $\beta=0.5$ 和 $\beta=0.7$ 两种设备投资差别较大的情况;其他的风险偏好系数下,也即在CCHP等主要供电设备容量配置差距不

大的情况下,情景一相较于情景二的切电负荷量也更小。这是因为情景一中考虑WCVaR函数,使得投资与运行方面较为保守,增加投资运行成本,提升设备的输出功率,增加了系统运行的可靠性,减低了切电负荷损失。且当 $\beta=0$ 时,情景一的切电负荷也小于情景二,这表明运行成本在离散界约束分布下也会增加运行的可靠性。

[0242] 图6是在具体应用实施例中典型日下CVaR模型的电运行状态图;图7是在具体应用实施例中典型日下WCVaR模型的电运行状态图。从以上两幅图可以看出在典型日下,同一设备容量配置下,情景一的切电负荷量低于情景二的切电负荷量,而CCHP的输出功率高于情景二,外购电小于情景二。这表明WCVaR相比于CVaR,会增加设备的输出功率,以此来保证系统运行的可靠性,而且相比于碳排放量大的外购电,会偏向于增加碳排放较小的CCHP来提供电能,这也使得在同数量的设备运行方面,情景一的碳排放低于情景二。

[0243] 图8是在具体应用实施例中采用WCVaR与采用CVaR进行风险评估的总成本对比示意图。可以看出在总成本方面,情景一的总成本在所有风险偏好系数下都大于情景二,这是因为情景一相比情景二较为保守,因此需要增加一定的成本投入来避免可能的风险。而随着风险偏好系数的增加,也即保守程度的增加,情景一的变化较于情景二的变化小,这表明情景一所考虑的风险比情景二更全面,因此对于进一步提高保守程度变化不大。

[0244] 在具体应用实施例中采用WCVaR、采用CVaR与规划后再追加采用WCVaR在不同界扰动范围下的总成本对比图,看出随着界扰动的范围和逐渐增加,情景一的总成本在一定程度上有所上升,而情景二的总成本却没有变化。因为随着运行场景概率误差的变大,其所面临的风险也会增加,情景二无法很好的应对此变化,而情景一却可以针对此来调整系统的投资与运行策略。而对于直接考虑分布不完全已知的情景一,与追加考虑的情景三对比,可以看出,当界扰动范围为 $[0,0.003]$ 时,两者总成本相差不大。当界扰动范围大于0.003时,直接考虑不确定性的情景一总成本比追加考虑的情景三更低,且随着扰动范围的增加,两者的总成本差值也逐渐加大。

[0245] 由上述试验结果可得,本实施例采用WCVaR计量综合能源系统规划运行的风险,更加全面的考虑了运行成本中存在的极端情况,虽然增加了投资成本,但会降低系统的切电负荷量,增加综合能源利用,提升运行可靠性和经济效益。而随着概率分布的不确定性增加,离散界约束的界扰动范围也增加,WCVaR量化值也会加大,进而系统投资与运行策略发生改变,相比于无法做出改变的CVaR,更能应对不确定性增加的状况。且在系统运行期间考虑概率分布不确定性时,若规划阶段也考虑不确定性可以降低系统总成本,且随着界扰动范围增加,成本下降越明显。并且随着风险偏好系数的增加,会提升系统运行的可靠性,降低切电负荷损失,但会使得碳排放量有着一定的提升。加入奖惩阶梯碳交易成本后,碳交易成本增加,碳排放量降低,因而提高了低碳的社会效益。

[0246] 以上所述,仅是本发明的较佳实施例而已,并非是对本发明作任何其他形式的限制,而依据本发明的技术实质所作的任何修改或等同变化,仍属于本发明所要求保护的范围内。

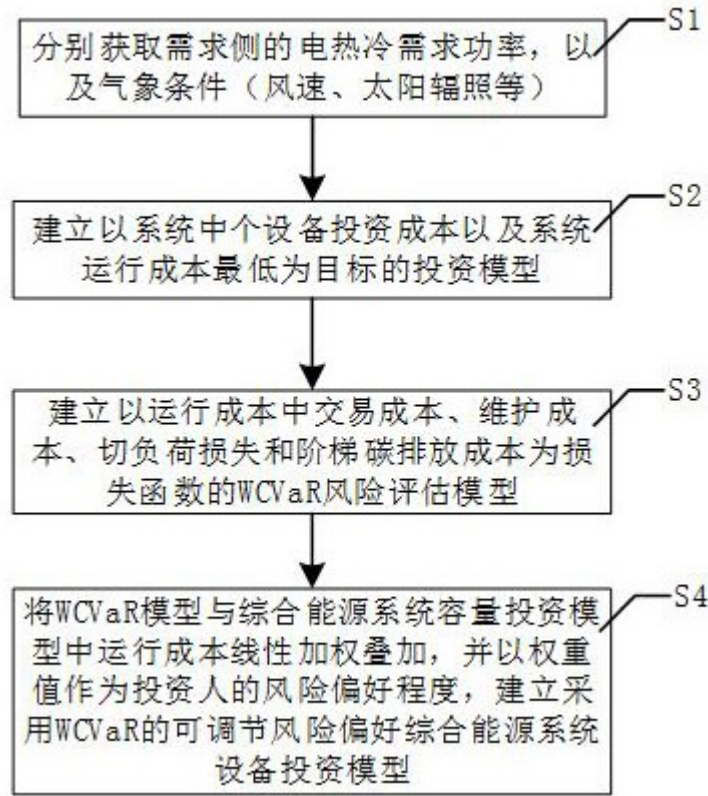


图 1

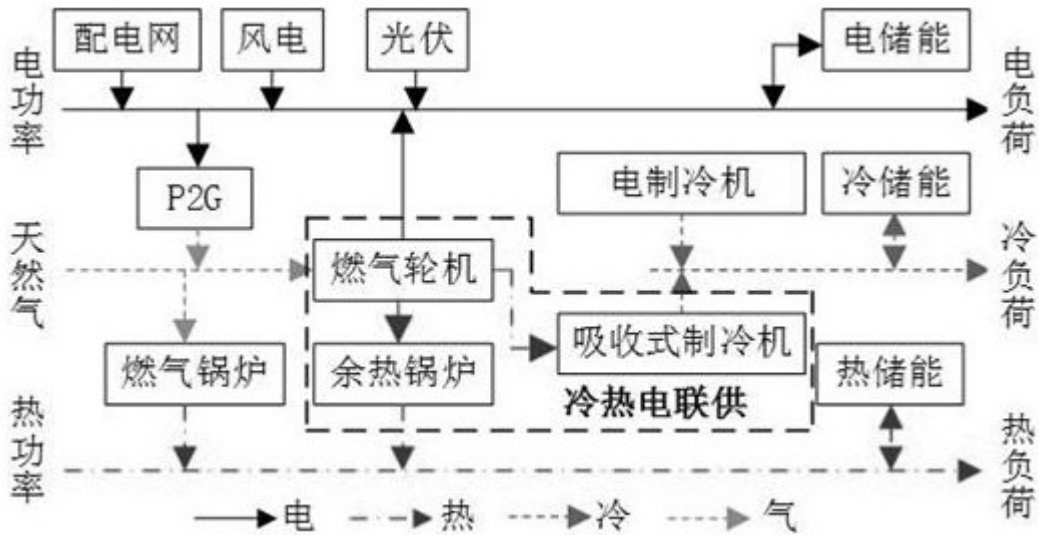


图 2

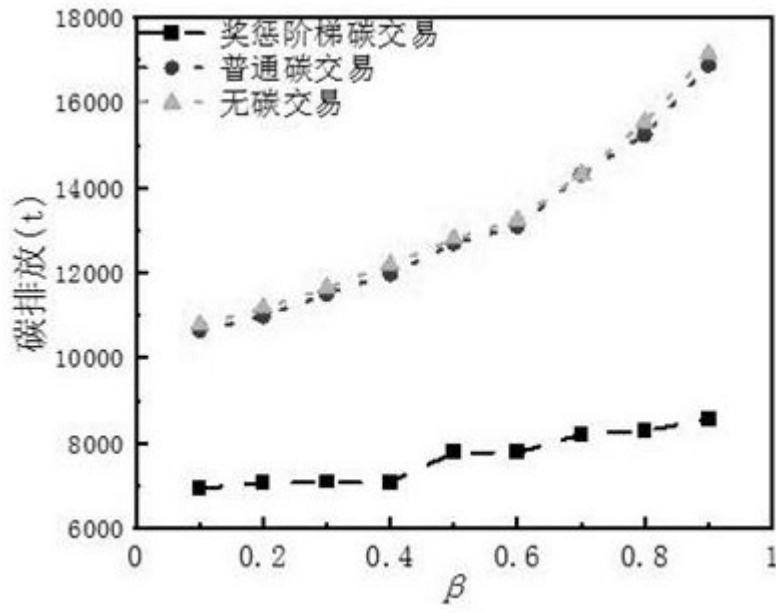


图 3

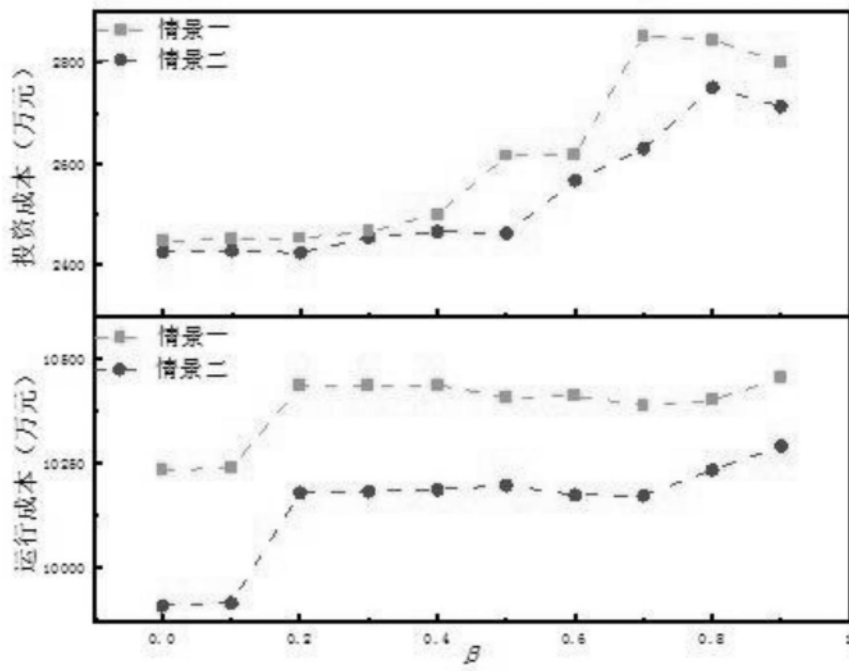


图4

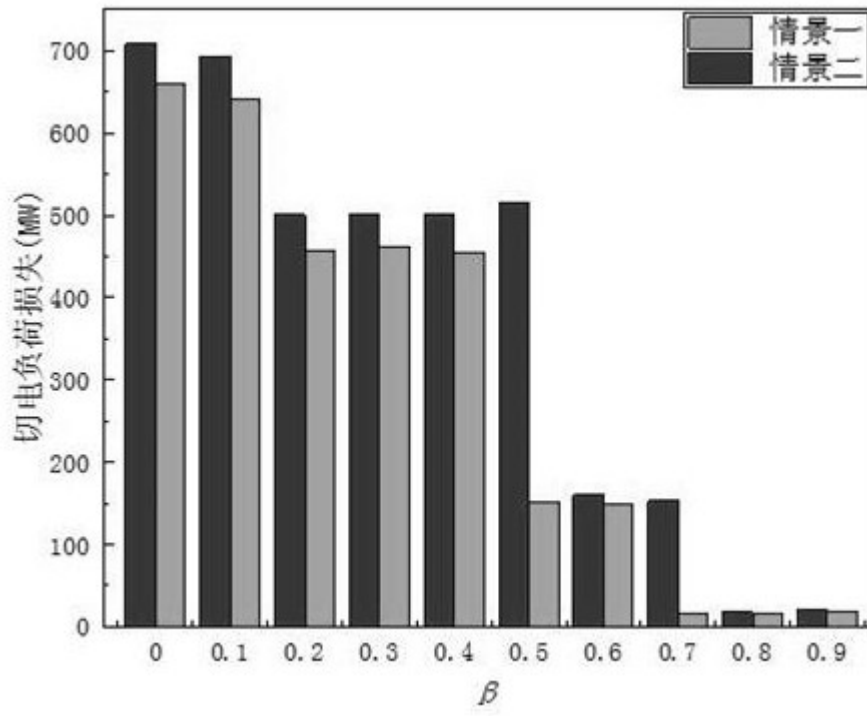


图 5

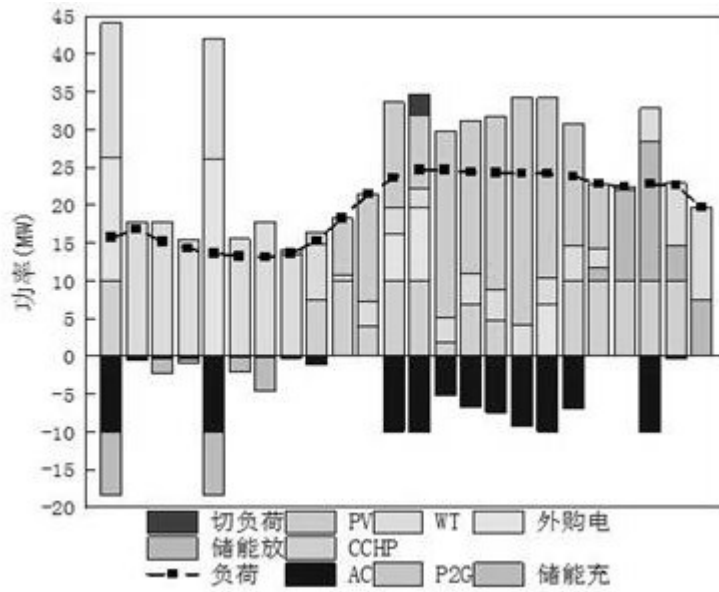


图 6

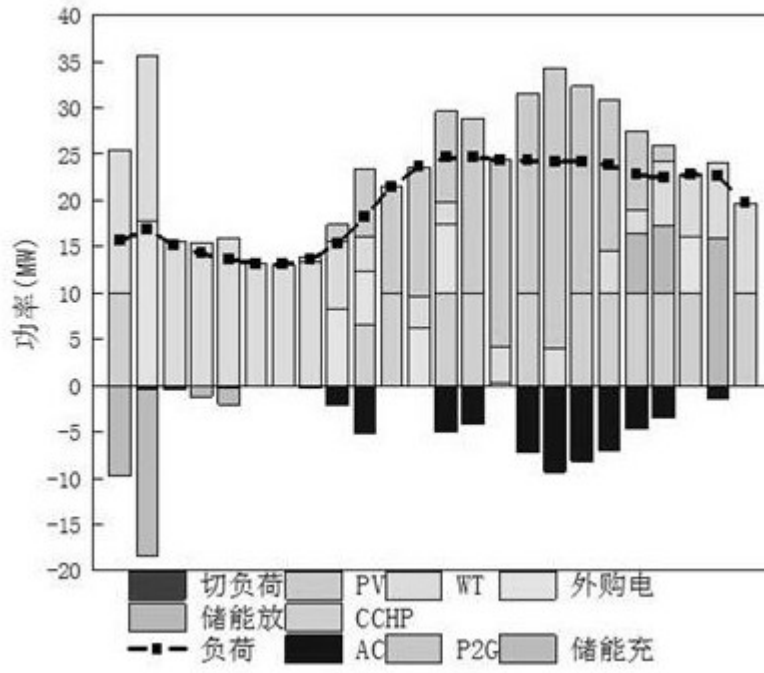


图 7

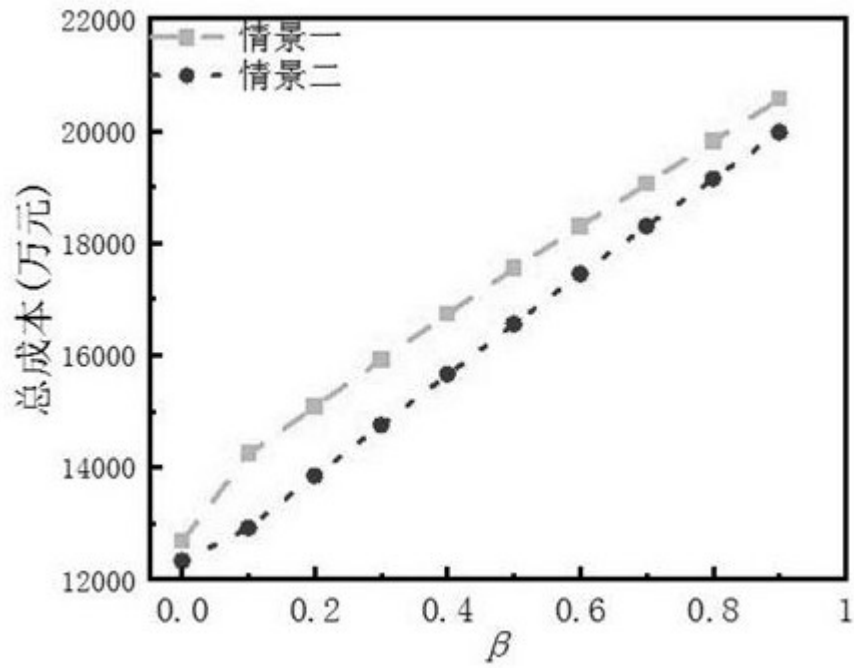


图 8