

The 9th IEEE Conference on
Energy Internet and Energy System Integration
第九届IEEE能源互联网与能源系统集成国际会议

ORGANIZERS 主办单位

中国电机工程学会
CHINESE SOCIETY FOR ELECTRICAL ENGINEERING东北电力大学
NORTHEAST ELECTRIC POWER UNIVERSITY清华大学
Tsinghua University

综合能源系统的做功域和做功能力

汇 报 人：周天烁

汇 报 单 位：天津大学 石河子大学

汇 报 日 期：2025年12月

1

研究背景与意义

2

做功域与做功能力模型

3

算例验证

4

结语

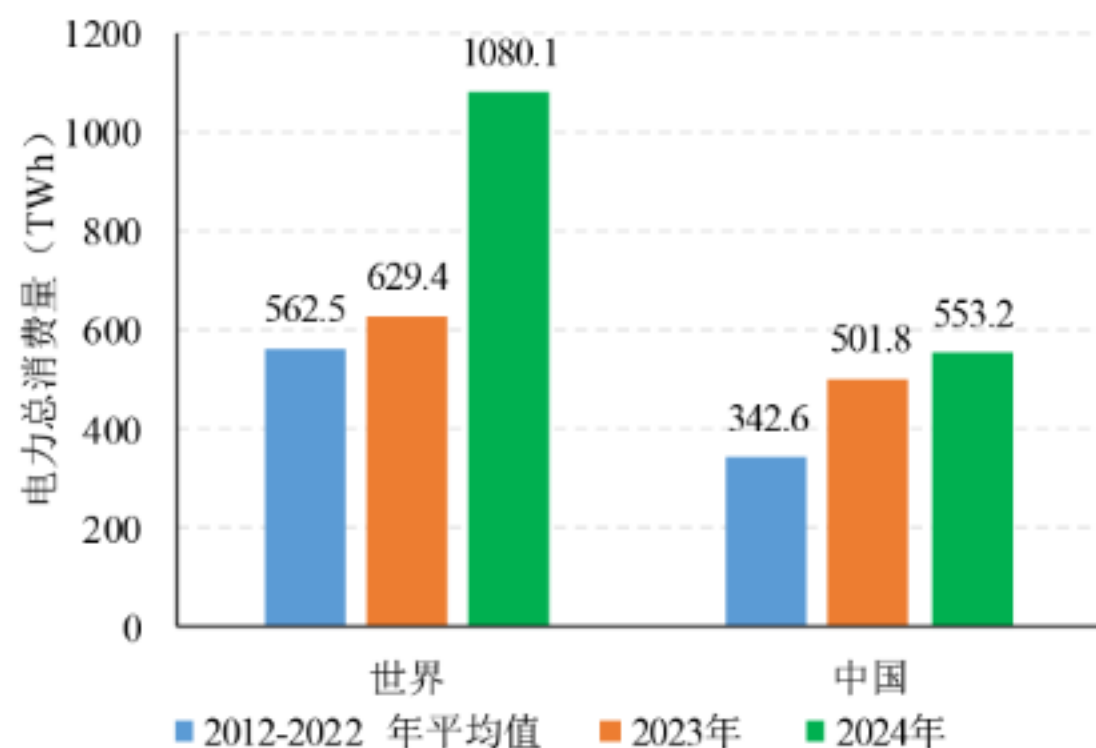
■ 能源与环境现状

■ 能源综合利用效率的提升需求——能量“数量”节能

- 一是开源：增加“风、光、地热”等可再生能源接入，减少化石能源消耗。
- 二是节流：减少“跑、冒、滴、漏”的现象，降低损失。

■ 用能的本质是利用其做功能力——能量“品质”节能

- 用能的核心需求在于能量品质，而非单纯的能量数量。
- 保障用户能量品质需求的前提下 > 优化用能策略 > 可在维持相同功效的同时减少能耗总量。
- 精准匹配用户需求与能量品质，从品质提升的维度进一步挖掘能源利用潜力。



2012-2024年中国及世界电力消费总量变化



2000-2024年中国温室气体总排放量

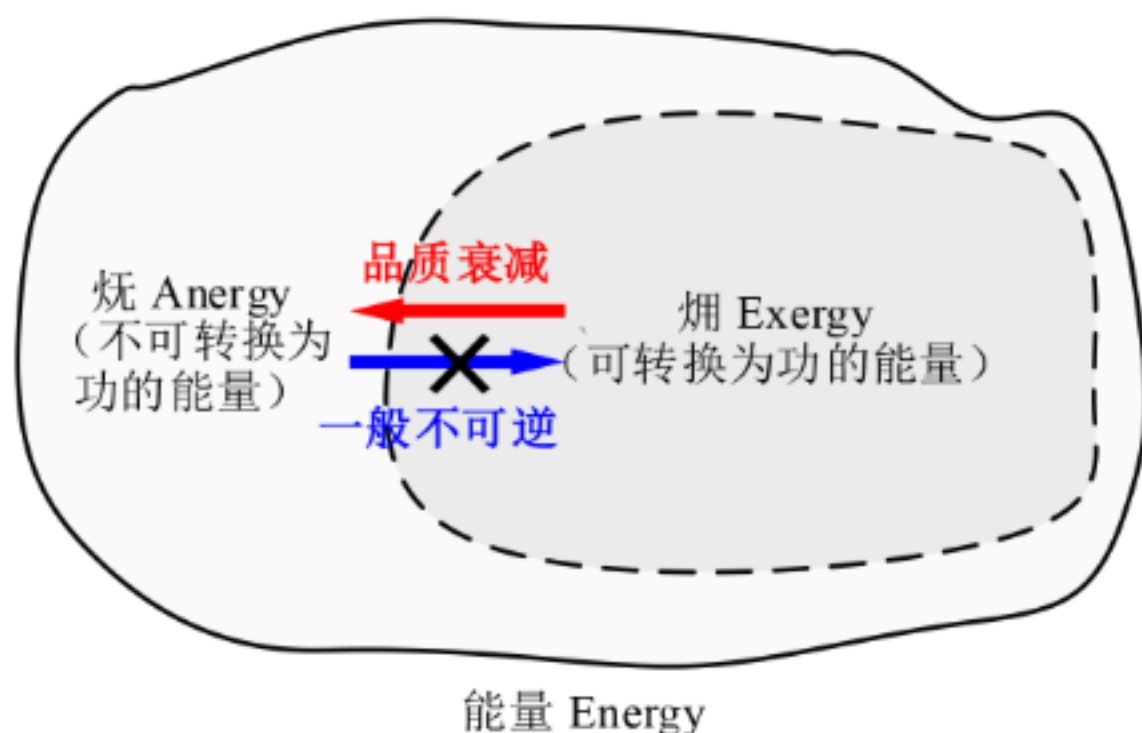
■ 能量、焔与做功能力

■ 能量由焔(exergy)和炆(anergy)构成

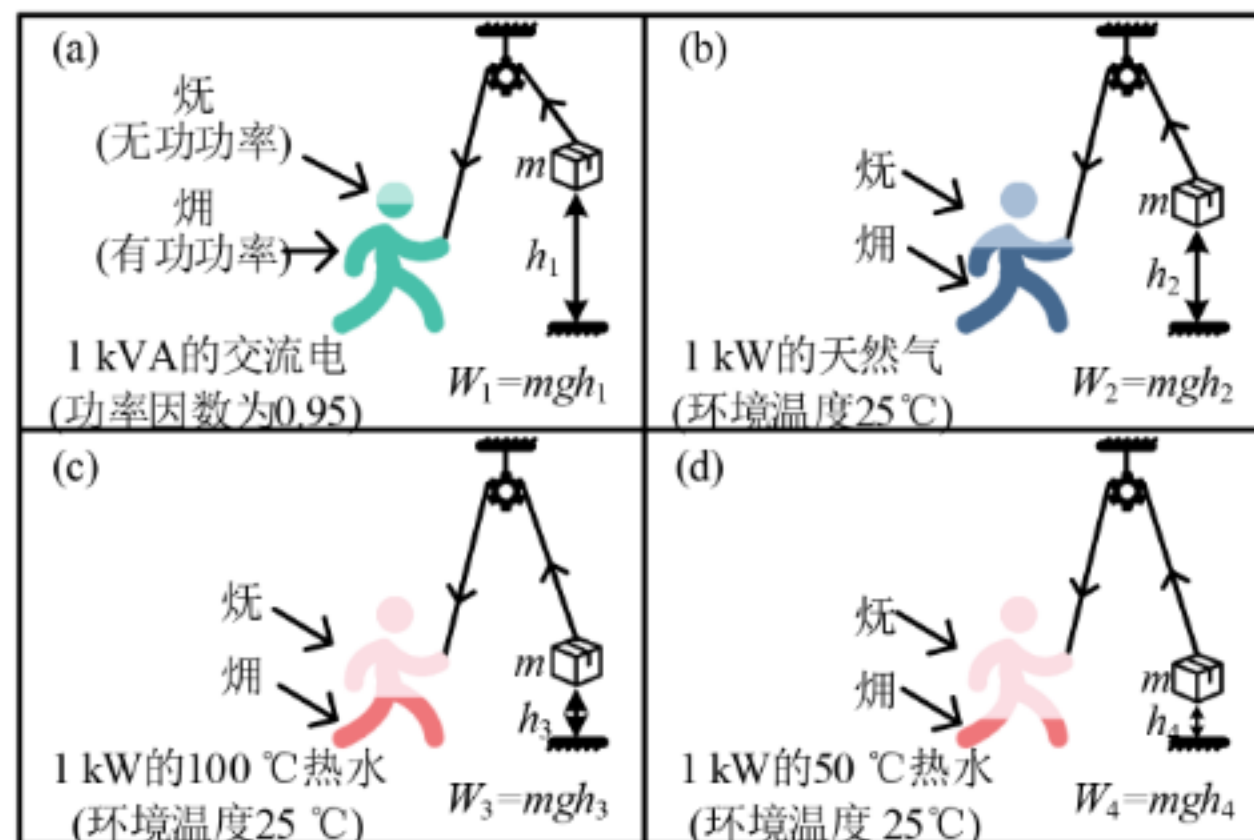
- 焔是指当理论上可以全部转换为功的那部分能量，是真正被利用的那部分能量。
- 炆是指能量中一切不能转换为功的那部分能量，相当于环境自身蕴含的那部分能量。

■ 不同能量转换为功的能力存在差异

- 电/气/热对物体所作的机械功为 $W_1 > W_2 > W_3 > W_4$ ，如右图所示。
- 各类能量的品质存在差异，焔量化了能量转换为功的能力（做功能力）。



能量、焔和炆的关系图



做功能力的差异

■ IES供能能力和安全域/运行域的研究现状

研究领域	研究现状总结
输电系统	完成了对保证潮流安全的 静态安全域 、保证暂态稳定的 动态安全域 、保证 小扰动稳定的安全域 等一系列域理论研究，实现了基于安全域的电力系统安全性评估、成本优化与定价、安全控制、发电经济调度和电网扩展规划等应用研究。
配电系统	提出了 智能配电系统安全域概念与模型 ，系统性地研究了其存在性、可观测性、几何性质、作用机理与实际应用等问题。
天然气系统	提出了输气系统最大供气能力曲线，以天然气网络节点流量为状态变量，构建了 天然气网络N-0安全域模型 ，并进一步给出了输气系统安全域应用方法。
综合能源系统	提出了 综合能源系统N-1安全域 、 N-0安全域 的定义、建模和边界求解方法，初步探索了基于安全域模型对的综合能源系统预防控制与优化控制等应用方法。

■ 现有研究不足：

- 现有IES安全域/运行域均基于能流模型而建立，**仅刻画了能量数量供应的范围和极限**。
- 数量与品质的二元性表明，单纯**增加能量的数量供给并不必然提升IES的做功能力**。
- 导致基于传统安全域/运行域开发的优化调度策略，**并不一定能够兼顾最优做功能力**。因此，有必要借鉴域方法，从IES做功能力的角度讨论其最大范围和能力极限。

1

研究背景与意义

2

做功域与做功能力模型

3

算例验证

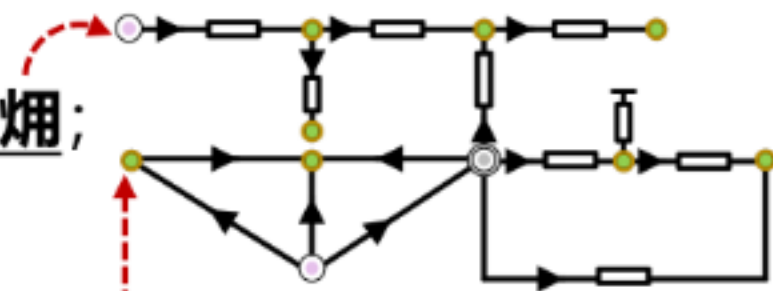
4

结语

■ 做功域的工作点

状态变量

- 烟源向IES注入烟流，该部分烟流为系统的输入烟，被称为**源端烟**；
- 负荷获得烟流，该部分烟流为系统的输出烟，被称为**负荷烟**；
- 烟是**量化IES做功能力**的物理量，负荷烟量化了用户获得的做功能力。



工作点模型

- IES做功域的工作点：决定综合能源系统安全状态的最少状态变量集合，本研究以**负荷烟**作为状态变量。

- ✓ 由电力子系统、天然气子系统、热力子系统负荷节点的负荷烟，构成**做功域的工作点**：

$$W_{WR} = [e_1^e, \dots, e_i^e, \dots, e_n^e, e_1^g, \dots, e_j^g, \dots, e_o^g, e_1^h, \dots, e_k^h, \dots, e_m^h]^T$$

- ✓ 若不加以区分能源的种类，做功域的工作点表示为：

$$W_{WR} = [e_1, \dots, e_x, \dots, e_y]^T$$

其中， e_x 表示第 x 个负荷烟， $y=n+o+m$

■ 做功域的状态空间

基本定义

- **做功域的状态空间**: 在状态变量的上、下限范围内, 所有可能出现的由负荷焓作为状态变量构成的**工作点的集合**。
- **状态空间的维度**: 状态空间在数学中为多维向量空间, 其空间维度由工作点中的变量个数决定。
- **状态空间边界**: 状态空间中工作点向量在某一或多个状态变量上所能达到的最大或最小取值所构成的界限。

状态空间模型

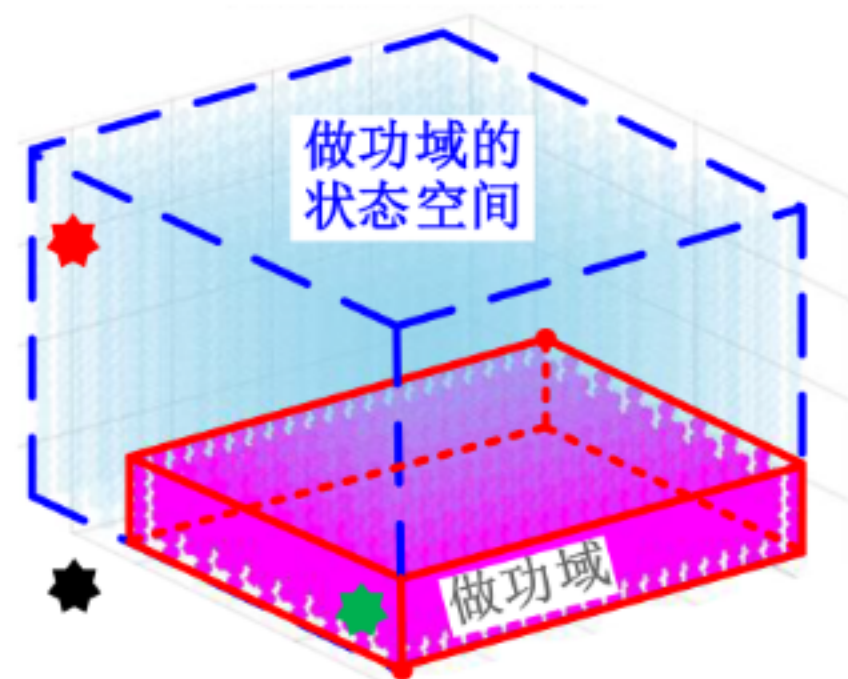
■ IES做功域的状态空间:

$$\Theta_{WR} = \left\{ W_{WR} \left| \begin{array}{l} \forall 1 \leq i \leq n, \exists e_i^{e(\max)} > e_i^{e(\min)} \geq 0, e_i^{e(\min)} \leq e_i^e \leq e_i^{e(\max)} \\ \forall 1 \leq j \leq o, \exists e_j^{g(\max)} > e_j^{g(\min)} \geq 0, e_j^{g(\min)} \leq e_j^g \leq e_j^{g(\max)} \\ \forall 1 \leq k \leq m, \exists e_k^{h(\max)} > e_k^{h(\min)} \geq 0, e_k^{h(\min)} \leq e_k^h \leq e_k^{h(\max)} \end{array} \right. \right\}$$

电/气/热的负荷焓上限

电/气/热的负荷焓下限

★ 安全点 ★ 不安全点 ★ 不考虑点



■ 做功域及其安全边界

做功域模型

■ 做功域：系统运行时，所有安全工作点构成的集合，是状态空间中为封闭区域。

✓ 域具有通用性，针对不同系统的做功域，可对其数学模型可进行一般化表示：

$$\Omega_{WR} = \{W_{WR} \mid h(W_{WR}) = 0, g(W_{WR}) \leq 0\}$$

等式约束集合

不等式约束集合

做功域的安全边界

■ IES做功域的安全边界：是安全工作点和不安全工作点在状态空间中的分界线，反映了在当前安全准则下IES做功能力的范围。其数学模型可进行一般化表示：

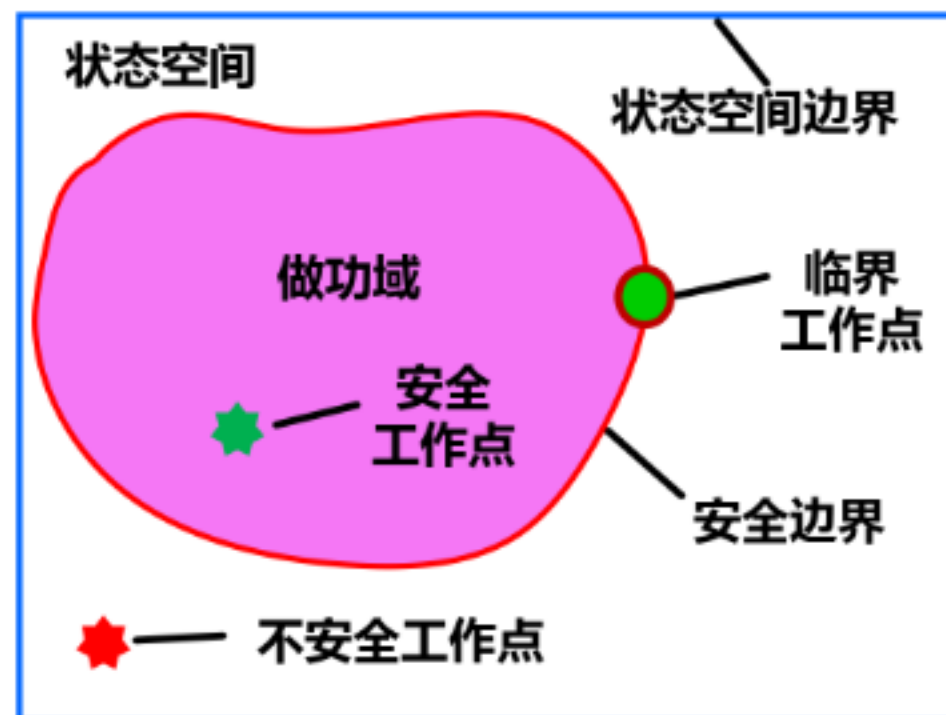
$$\tilde{\Omega}_{WR} = \left\{ W_{WR}^b \mid \begin{array}{l} W_{WR}^b \in \Omega_{WR} \\ W_{WR}^{b*} = W_{WR}^b \pm \delta E_x, x \in \{1, 2, \dots, y\} \\ \forall \delta > 0, \exists W_{WR}^{b*} \notin \Omega_{WR} \end{array} \right\}$$

任意工作点

做功域

状态变量变换范围

任意状态变量变化后的新工作点



做功域、安全边界、状态空间关系示意图

■ 做功域及其安全边界

等式约束集

$$h(W_{WR}) = \{H_{WR}^E, H_{WR}^G, H_{WR}^H, H_{WR}^{EH}\}$$

$$H_{WR}^E = \begin{cases} e^{eq} = \text{Re}[\sqrt{3} \text{diag}(p^e) \tilde{I}^{eq}] \\ e^e = \text{Re}[\sqrt{3} \text{diag}(A_e^T p^e) \tilde{I}^e] \\ \Delta e^e = -\text{Re}[\sqrt{3} \text{diag}(A_e^T p^e) \tilde{I}^e] \end{cases}$$

表示电力系统
潮流等式约束
，包括潮流方
程、节点潮流
平衡方程

$$H_{WR}^G = \begin{cases} A^g e^g = e_N^g \\ B^g \Delta p_{pr} = 0 \\ \Delta p_{pr} = K^g \cdot \frac{e^g}{p^g} \cdot \left| \frac{e^g}{p^g} \right| \end{cases}$$

表示天然气系统
潮流等式约束，
包括节点潮流平
衡方程、气压-
潮流方程

$$H_{WR}^H = \begin{cases} A^h m^h = m^{hq} \\ B^h K^h m^h |m^h| = 0 \end{cases}$$

表示热力系统
潮流等式约束，包
括水力模型、节
点温度方程、热
力-潮流模型

$$\begin{cases} T_{end} - T_a = (T_{start} - T_a) e^{-\kappa L_h / c_p m^h} \\ (\sum m^{out}) T_{out} = \sum m^{in} T_{in} \end{cases}$$

$$\begin{cases} e^h = (p_s^h - p_r^h) m^h \\ e_s^h = (p_s^h - p_r^h) m_s^{hq} \\ e_L^h = (p_s^h - p_o^h) m_L^{hq} \end{cases}$$

$$H_{WR}^{EH} = \begin{cases} e_{out} = C_\lambda e_{in} \\ e = \lambda P \end{cases}$$

表示能源站潮流
等式约束，包括
潮流集线器模型

不等式约束集

$$g(W_{WR}) = \{G_{WR}^E, G_{WR}^G, G_{WR}^H, G_{WR}^{EH}\}$$

$$G_{WR}^E = \begin{cases} p_{min}^e \leq p^e \leq p_{max}^e \\ \theta_{min}^e \leq \theta_e \leq \theta_{max}^e \\ e_{min}^{eq} \leq |e^{eq}| \leq e_{max}^{eq} \\ e_{min}^e \leq |e^e| \leq e_{max}^e \end{cases}$$

包括潮流约束
、支路相角差
约束、节点潮
流约束、线路
潮流约束

$$G_{WR}^G = \begin{cases} p_{pr}^{min} \leq p_{pr} \leq p_{pr}^{max} \\ p_{min}^g \leq p^g \leq p_{max}^g \\ e_{min}^{gq} \leq |e^{gq}| \leq e_{max}^{gq} \\ e_{min}^g \leq |e^g| \leq e_{max}^g \end{cases}$$

包括节点气压
约束、潮流约
束、节点潮流
约束、管道潮
流约束

$$G_{WR}^H = \begin{cases} p_{s(min)}^h \leq p_s^h \leq p_{s(max)}^h \\ p_{o(min)}^h \leq p_o^h \leq p_{o(max)}^h \\ p_{r(min)}^h \leq p_r^h \leq p_{r(max)}^h \\ e_{min}^{hq} \leq |e^{hq}| \leq e_{max}^{hq} \\ e_{min}^h \leq |e^h| \leq e_{max}^h \end{cases}$$

包括潮流约束
、节点潮流约
束、管道潮流
约束

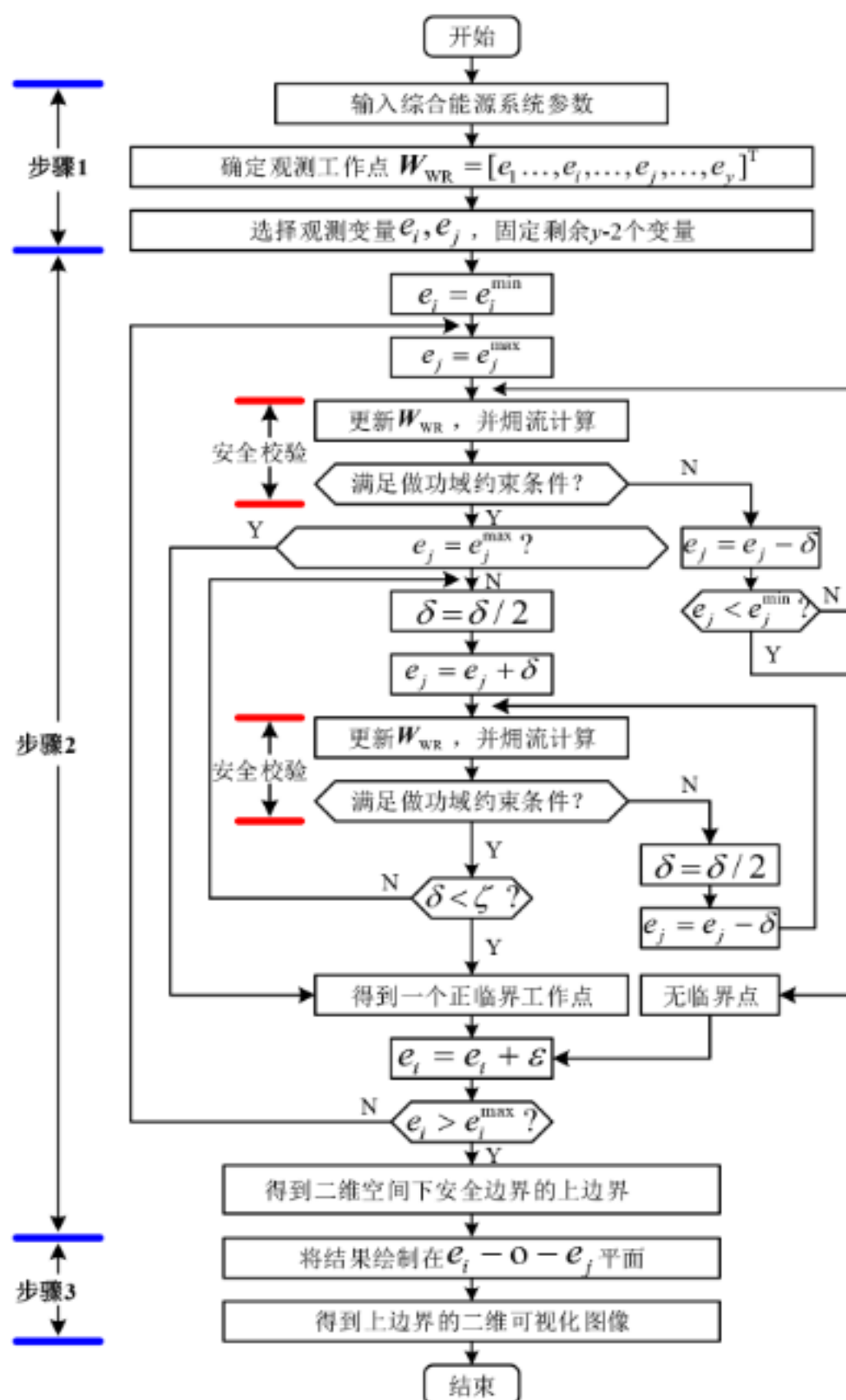
$$G_{WR}^{EH} = \begin{cases} 0 \leq e_{out} \leq e_{out}^{max} \\ 0 \leq e_{in} \leq \min(e_{in}^{max}, e_{in}^q) \\ 0 \leq e \leq \min(e^{max}, e^q) \end{cases}$$

包括能源转换
设备的输入、
输出潮流约束

■ 做功域的安全边界降维求解方法-改进型二分法

求解步骤

- 基于传统二分法，提出了一种改进型二分法，用以求解降维后的做功域，以求解上边界为例：
- **步骤1：初始化与降维。** 确定以做功域的工作点 W_{WR} 对应的IES运行状态，作为基准观测对象。在 W_{WR} 选择 e_i 和 e_j 作为观测变量，剩余 $y-2$ 个状态变量固定为常数，根据 e_i 和 e_j 的上、下限形成二维状态空间，以 δ 为采样步长，在 Θ_{WR}^{2D} 中生成 Y 个工作点。
- **步骤2：二维安全边界搜索。** 主要思路是将观测变量 e_i 以 ε 为步长进行采样，生成若干个值；基于每个 e_i 值分别迭代修正 e_j ，得到临界点，最终得到二维安全边界的上边界。边界搜索过程分为三种情况，后面予以解释说明。
- **步骤3：二维安全边界图像绘制。** 将结果绘于 e_i - 0 - e_j 平面，得到二维上边界在该平面的图像。



■ 做功域的安全边界降维求解方法-改进型二分法

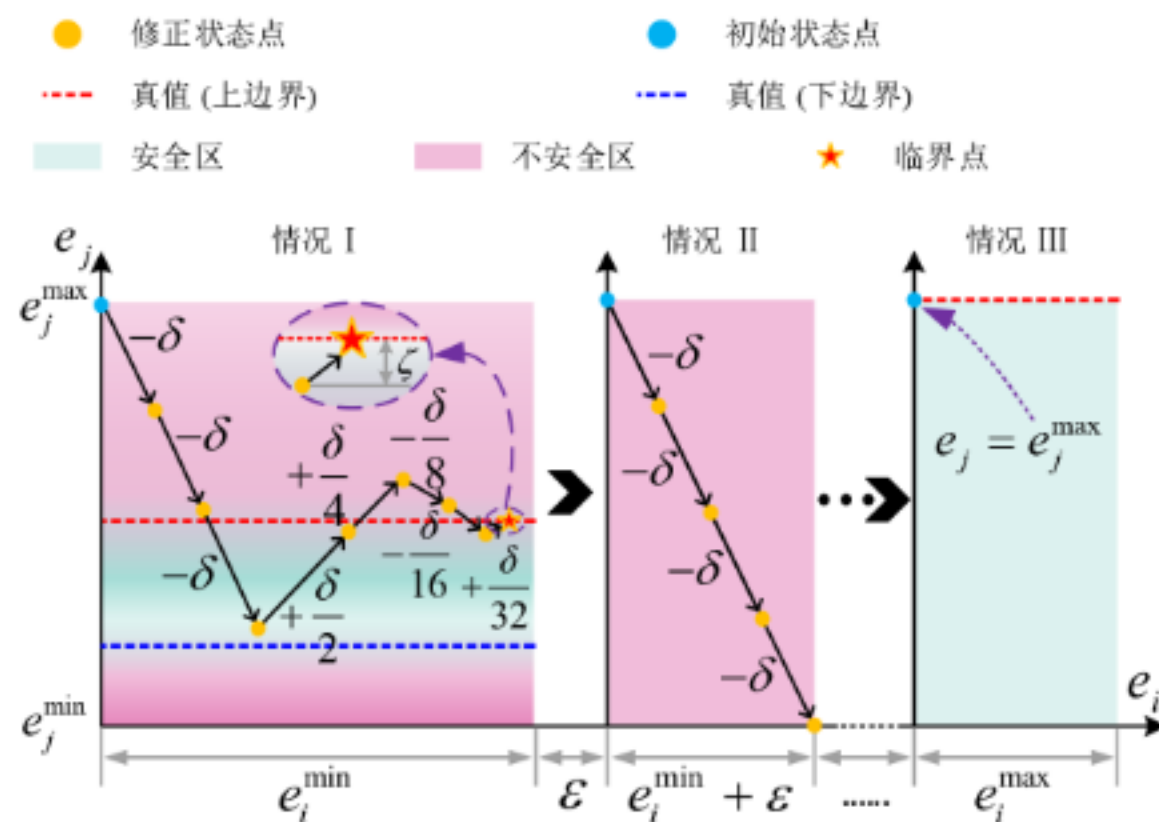
边界点搜寻过程

➤ 改进型二分法的边界点搜寻过程，以**搜寻上边界点的过程**为例，横轴表示观测变量 e_i 的采样过程，纵轴表示观测变量 e_j 的修正过程：

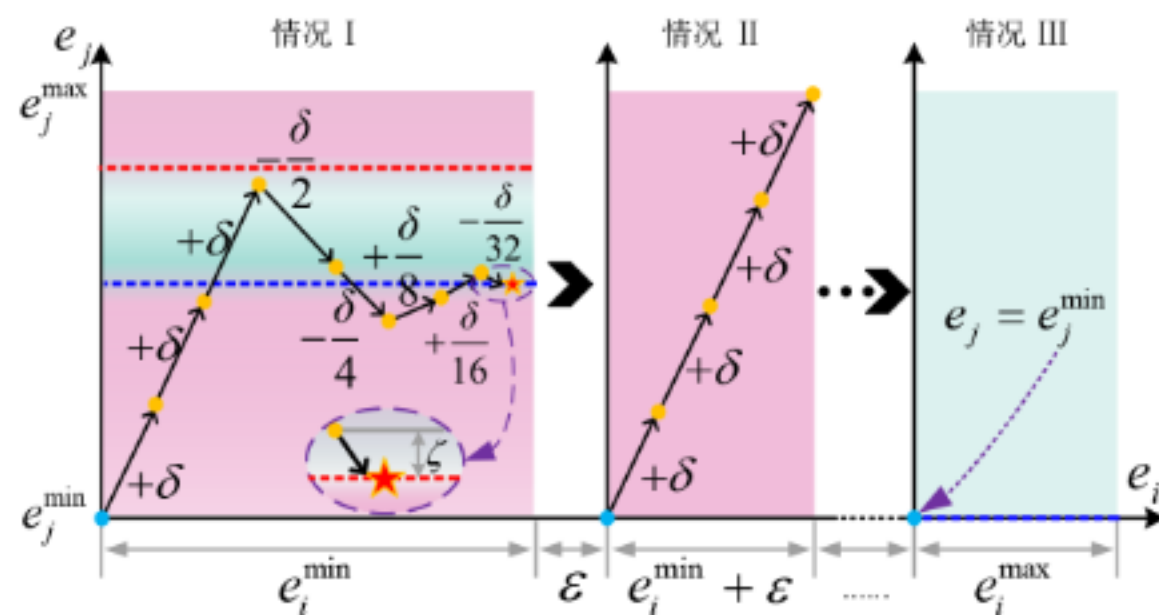
- ✓ **步骤2-1：获取初始点。** 令 $e_i = e_i^{\min}$, $e_j = e_j^{\max}$ 。
- ✓ **步骤2-2：由初始状态点搜寻临界点。** 判断当前工作点是否为临界点。

边界点搜寻过程分为三种情况，分别是：

- ◆ e_j 在上下限范围内存在有限安全区域（情况I）；
 - ◆ e_j 在上下限范围内不存在安全区域（情况II）；
 - ◆ e_j 在上下限范围内均是安全区域（情况III）。
- ✓ **步骤2-3：生成下一个初始状态点，** 执行步骤2-4。
 - ✓ **步骤2-4：若 $e_i > e_i^{\max}$ ，** 则初始状态点在 e_i 方向超出了上限，**已得到安全边界的所有上边界点，** 执行步骤3。否则，返回步骤2-2，**修正该初始状态点。**



(a) 上边界点搜寻过程示意图



(b) 下边界点搜寻过程示意图

安全边界点的搜寻过程示意图

■ 做功域与运行域的数学关系

<证明：叠加性和齐次性>

- **定理1**：对于同一运行工况下的IES，其做功域的工作点 W_{WR} 和运行域的工作点 W_{OR} 为线性映射关系。
- **推论1**：对于相同安全准则下的IES，运行域 Ω_{OR} 和做功域 Ω_{WR} 在高维空间中的几何关系，取决于能质函数。

- **能质函数关系**：
 - 电力节点 i 关于功率因数角的能质函数
 - 天然气节点 j 关于理论燃烧温度的能质函数
 - 热力节点 k 关于供水温度、出口温度的能质函数

等距变换

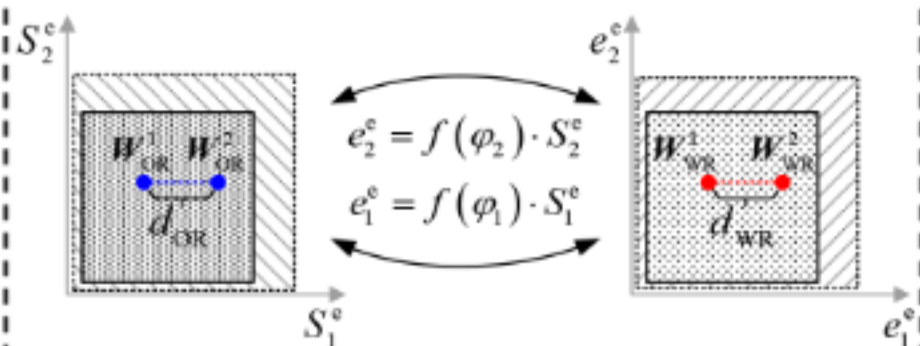
- 当能质函数 $f(\varphi_1) \equiv f(\varphi_2) \equiv 1$ 时，得到的 Ω_{OR} 和 Ω_{WR} 在几何上为等距变换关系。



Ω_{OR} 和 Ω_{WR} 内任意工作点满足：

欧式距离 $d_{OR} / d_{WR} = 1$

欧式夹角 $\sigma_{OR} = \sigma_{WR}$



等距变换示意图

相似变换

- 当能质函数 $f(\varphi_1) \equiv f(\varphi_2)$ 时，且恒等于非零常数时，得到的 Ω_{OR} 和 Ω_{WR} 在几何上为相似变换关系。

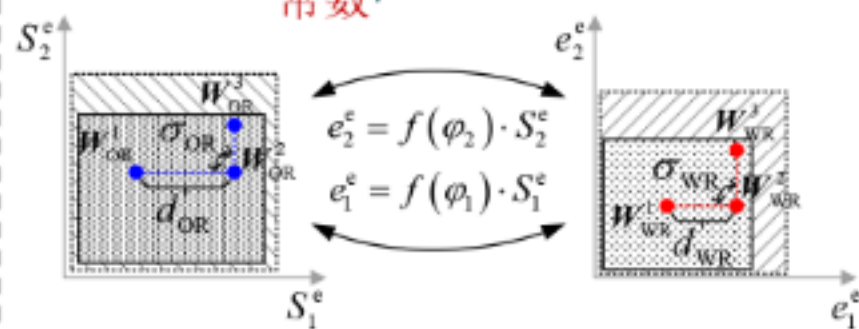


Ω_{OR} 和 Ω_{WR} 内任意工作点满足：

$d_{OR} / d_{WR} = \psi$

$\sigma_{OR} = \sigma_{WR}$

常数



相似变换示意图

非线性变换

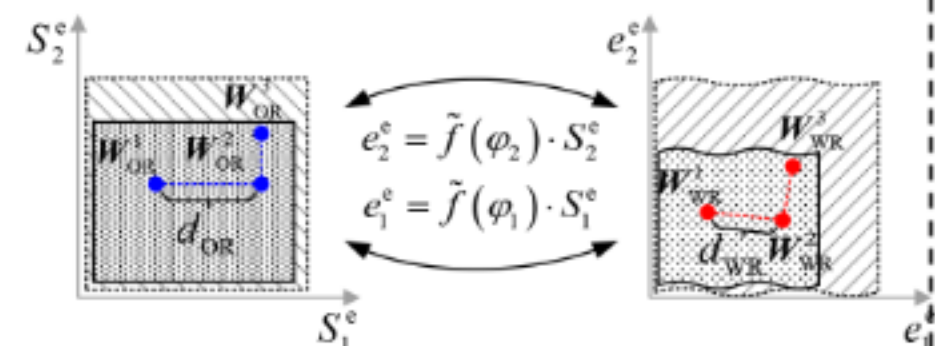
- 当能质函数 $\tilde{f}(\varphi_1) \neq \tilde{f}(\varphi_2)$ 时，且随运行方式而波动时，得到的 Ω_{OR} 和 Ω_{WR} 在几何上为非线性变换关系。



Ω_{OR} 和 Ω_{WR} 内任意工作点可能不满足：

$d_{OR} / d_{WR} = \psi$

$\sigma_{OR} = \sigma_{WR}$



非线性变换示意图

■ IES做功能力(TWC)与最大做功能力(TWCmax)

做功能力

- 满足安全准则时IES的做功能力 (Total work capability, TWC) 定义为所有节点的负荷烟之和:

当前运行方式下IES用户获得的做功能力

$$TWC = \sum_i^n e_i^e + \sum_j^o e_j^g + \sum_k^m e_k^h$$

所有的电负荷烟

所有的热负荷烟

所有的气负荷烟

等式约束集合
不等式约束集合

$$\text{s.t.} \begin{cases} h(W_{WR}) = 0 \\ g(W_{WR}) \leq 0 \end{cases}$$

最大做功能力

- 最大做功能力 ($TWC_{\max}$) 指在当前安全准则下, IES能够向负荷供应的烟之和的最大值。

做功域内所有运行方式下, IES用户能够获得的最大做功能力

$$TWC_{\max} = \max \left(\sum_i^n e_i^e + \sum_j^o e_j^g + \sum_k^m e_k^h \right)$$

等式约束集合
不等式约束集合

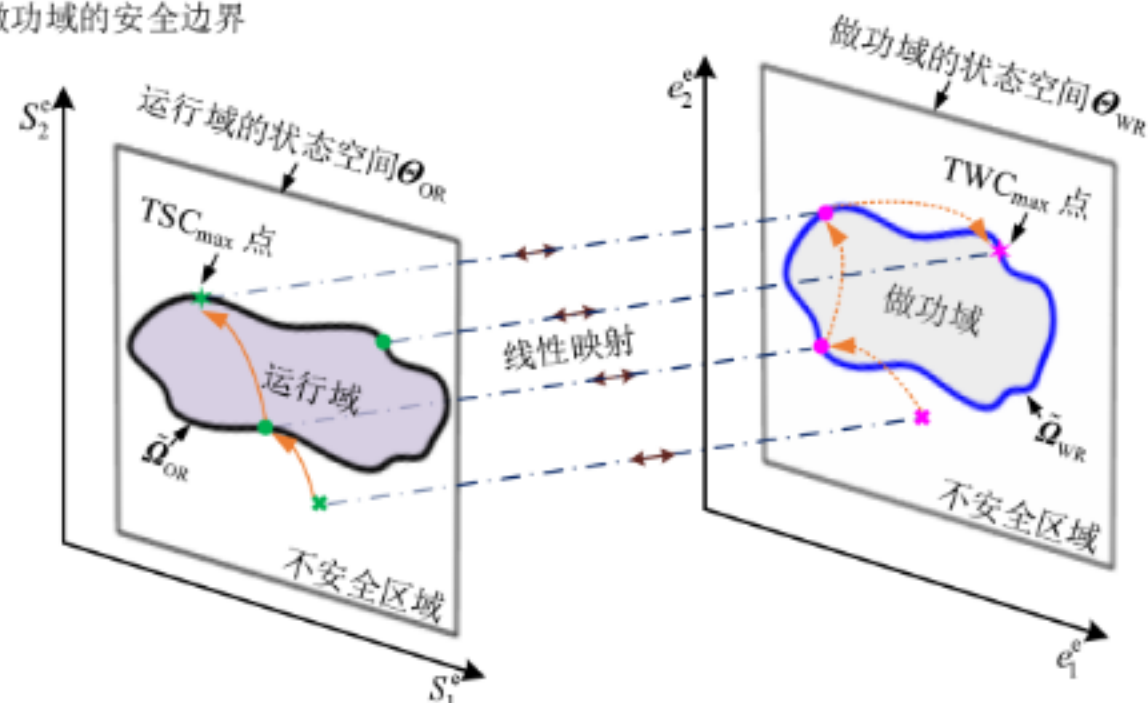
$$\text{s.t.} \begin{cases} h(W_{WR}) = 0 \\ g(W_{WR}) \leq 0 \end{cases}$$

对应了做功能力最大的运行方式

TWC点和 $TWC_{\max}$ 点均是做功域中的工作点, 不仅包含了做功能力的数值, 还包括相应的负荷烟分布, 即工作点数据。

■ TWC和TSC的数学关系

- ★ 最大供能能力的工作点
- 运行域的工作点(安全)
- ★ 运行域的工作点(不安全)
- ★ 最大做功能力的工作点
- 做功域的工作点(安全)
- ★ 做功域的工作点(不安全)
- 供能能力优化路径
- 做功能力优化路径
- 运行域的安全边界
- 做功域的安全边界



TSC、TWC、运行域和做功域的关系示意图

做功能力和供能能力的关系对比表

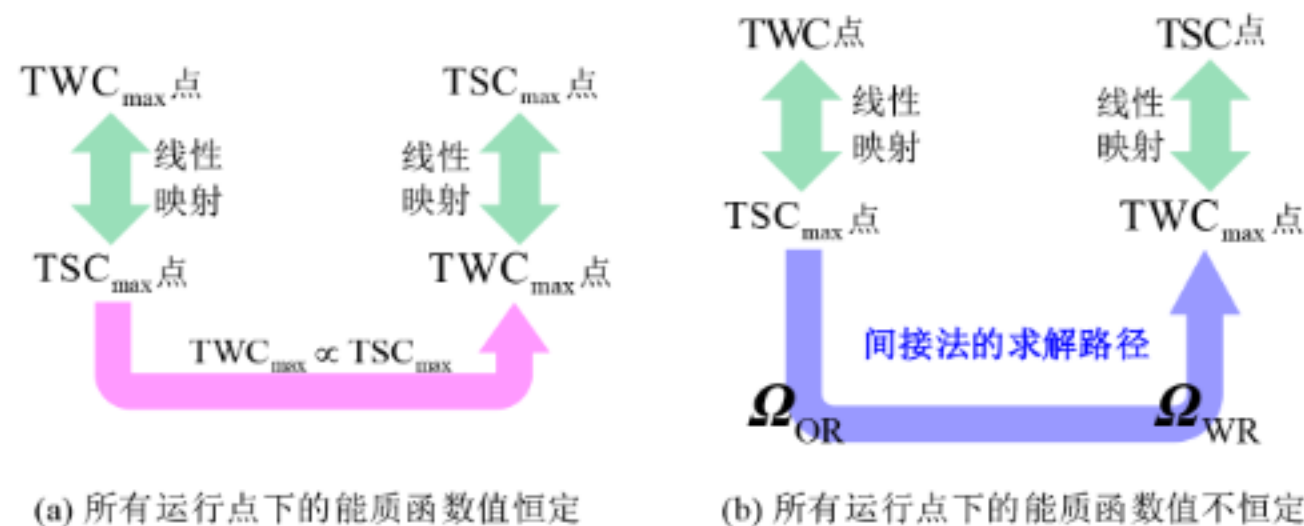
关注对象	能质函数的情况	
	$f(\varphi_1) \equiv f(\varphi_2)$	$f(\varphi_1) \neq f(\varphi_2)$
TWC和TSC	$TWC \propto TSC$	$TWC \neq TSC$
	$TWC_{max} \propto TSC_{max}$	$TWC_{max} \neq TSC_{max}$
Ω_{WR} 和 Ω_{OR}	$\Omega_{WR} \cong \Omega_{OR}$	$\Omega_{WR} \Leftrightarrow \Omega_{OR}$

备注: $\propto$ 表示正比例关系; $\neq$ 表示不一定是正比例关系; $\cong$ 表示相似变换或等距变换关系; $\Leftrightarrow$ 表示非线性变换关系。

● 推论2: IES的做功能力和供能能力的数学关系, 取决于能质函数。

对于满足安全准则的任意工作点:

- 当能质函数值均恒定为某一常数时, 在同一运行状态下, TWC和TSC满足正比例关系;
- 对于满足安全准则的任意工作点, 当能质函数值均不能恒定为某一常数时, 同一运行状态下, TWC和TSC不一定满足正比例关系。



(a) 所有运行点下的能质函数值恒定

(b) 所有运行点下的能质函数值不恒定

实际IES工程中, 能质函数值一般不可能恒等于某一常数。不能简单的将做功能力和供能能力视为正相关的关系!

1

研究背景与意义

2

做功域与做功能力模型

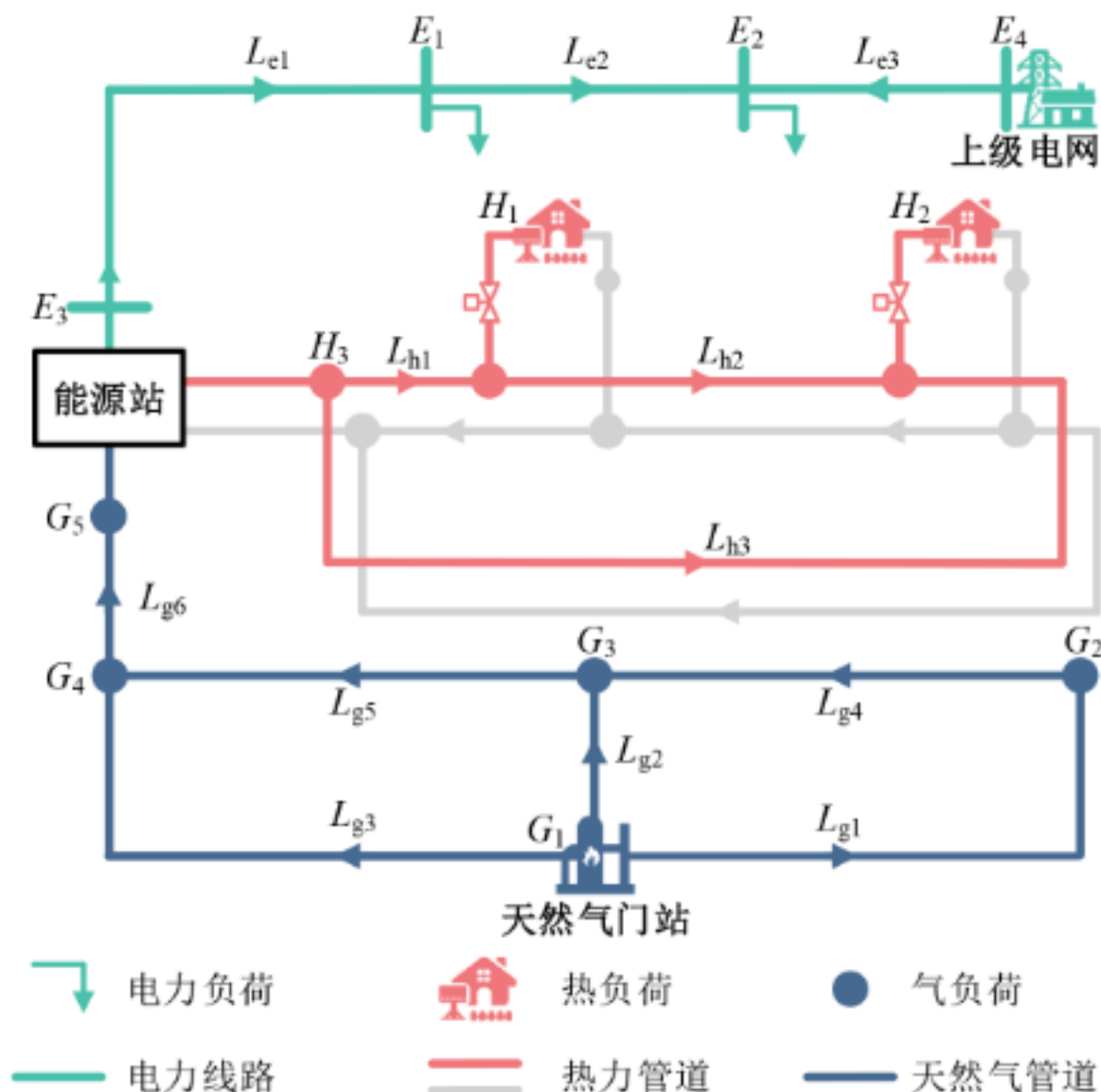
3

算例验证

4

结语

算例介绍



- 测试算例拓扑包括：4节点电力系统、5节点天然气系统和3节点热力系统；
- 电力-天然气-热力系统通过三类能源站实现耦合；
- 电力-天然气-热力系统系统管线的参数见右表。

电力系统参数

名称	参数
基准功率	1 MV·A
基准电压	11 kV
源节点 E_4 电压幅值	1.02 p.u.
源节点 E_4 电压相角	0°
源节点 E_3 电压幅值	1.05 p.u.
负荷节点 E_1 、 E_2 有功功率	0.15 MW
负荷节点功率因数	0.95
线路阻抗	$0.09+j0.1577$ p.u.

天然气系统参数

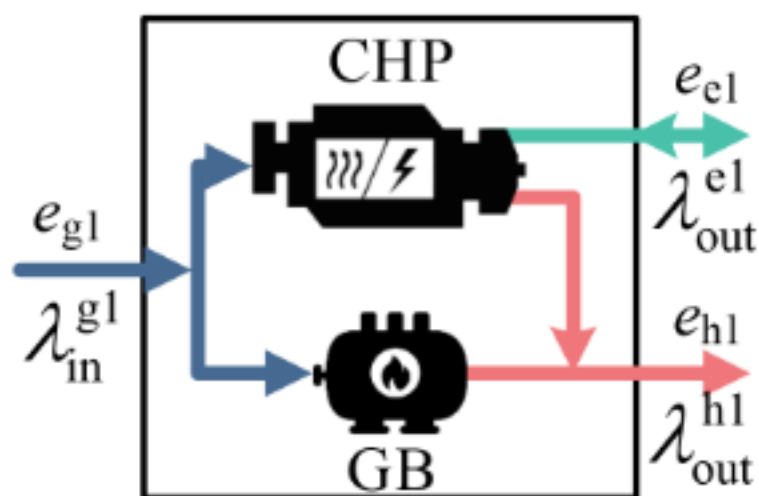
名称	参数
气源节点 G_1 气压	30 mbar
天然气热值	45.574 MJ/m ³
天然气理论燃烧温度	1973 °C
管道长度	$L_{g1}=280$ m, $L_{g2}=L_{g4}=300$ m, $L_{g3}=220$ m, $L_{g5}=240$ m, $L_{g6}=200$ m
管道直径	$D_{g1}=150$ mm, $D_{g2}=D_{g3}=D_{g4}=D_{g5}=D_{g6}=100$ mm

热力系统参数

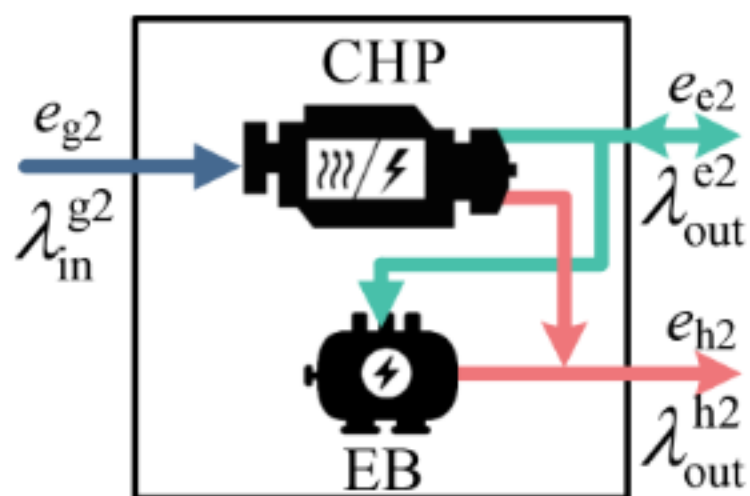
名称	参数
负荷节点 H_1 、 H_2 热功率	0.3 MW
节点 H_3 供水温度	100 °C
节点 H_1 、 H_2 出口温度	50 °C
环境温度	10 °C
管道内径	0.15 m
管道粗糙度	1.25×10^{-3} m
管道传热系数	0.2 W/mK
管道长度	$L_{h1}=L_{h2}=400$ m, $L_{h3}=600$ m
水密度	958.4 kg/m ³
水的运动粘度	0.294×10^{-6} m ² /s
水的比热容	4.182×10^{-3} MJ/(kg·K)

算例介绍

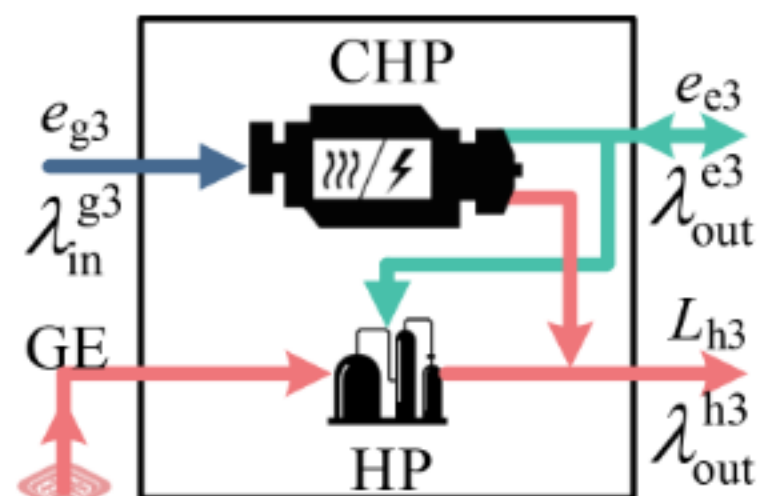
- IES中包括4节点配电网、5节点低压天然气配网、3节点环状热网，设定IES的运行方式为以热定电；
- 将如下图所示的三类典型耦合形态作为算例中的能源站，形成三个典型算例，后简称为Type I、Type II和Type III。其中，Type III的HP利用地热能（GE）；
- 电力系统功率因数恒定为0.95，线路两端相角差范围为 $[-10^\circ, 10^\circ]$ ；
- 天然气热值为 45.574 MJ/m^3 ，理论燃烧温度恒定为 1973°C ，环境温度为 10°C ；
- 热力系统的热源供水温度 100°C ，回水温度 50°C ；
- Type I: CHP和GB的天然气分配系数为0.5；Type II: CHP和EB的供热分配系数为0.5；Type III: CHP和HB的供热分配系数为0.5。



(a) I型能源站



(b) II型能源站

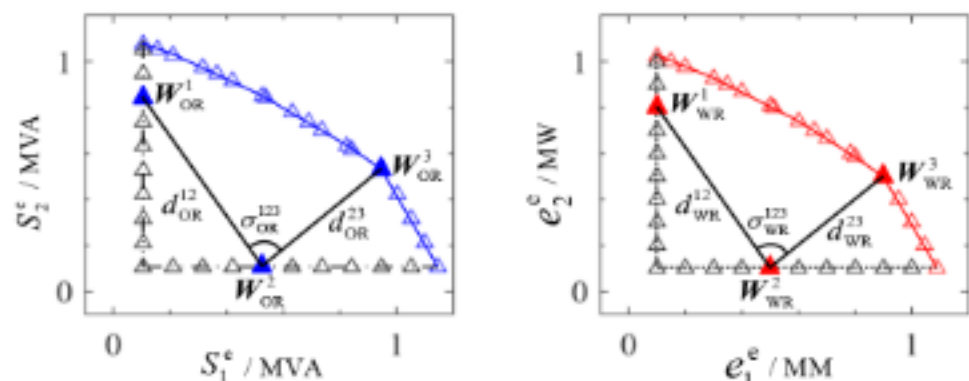


(c) III型能源站

■ 做功域与运行域的降维观测

相似变换（等距变换）

$\triangle$ Ω_{OR}^{2D} 的上边界 $\triangle$ θ_{OR} 的边界 $\triangle$ Ω_{WR}^{2D} 的上边界 $\triangle$ θ_{WR} 的边界



(a) 二维运行域 (b) 二维做功域
Type I的二维运行域和做功域

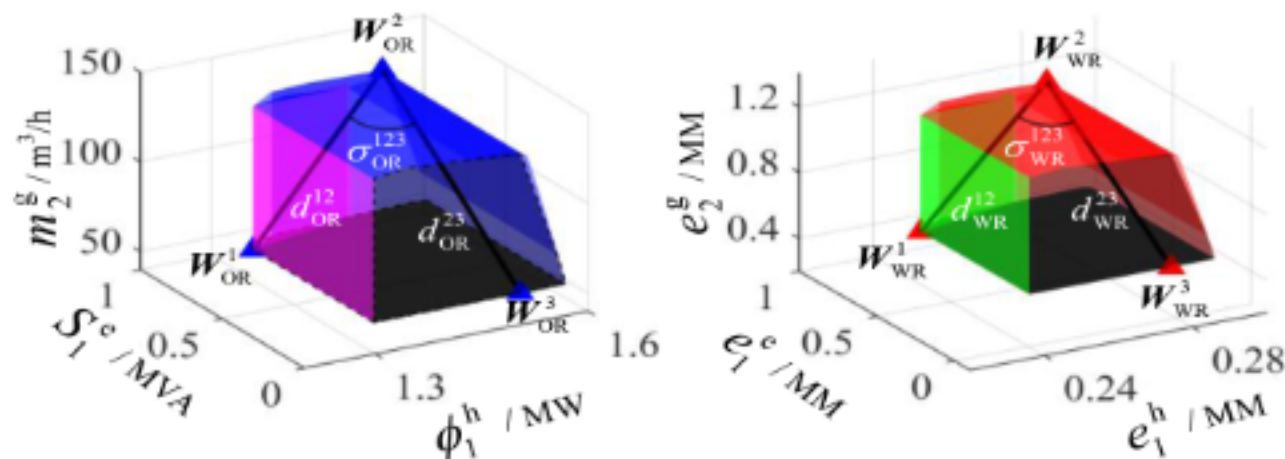
- 等距变换是相似变换的一种特殊情况，且不适用于本算例的交流配电系统，所以不予以讨论。
- 任意工作点的欧式距离均满足 $\frac{d_{OR}}{d_{WR}} = 1.0526$ ，夹角均满足 $\sigma_{OR} = \sigma_{WR} = 105.25^\circ$ 。
- 做功域和运行域之间存在相似变换的几何关系。

二维空间下做功域和运行域的欧式几何关系数据表

$d_{OR}^{12} / d_{WR}^{12}$	$d_{OR}^{23} / d_{WR}^{23}$	σ_{OR}^{123}	σ_{WR}^{123}
1.0526	1.0526	105.25°	105.25°

非线性变换

$\square$ Ω_{OR}^{3D} 的上边界 $\square$ Ω_{WR}^{3D} 的上边界
 $\square$ Ω_{OR}^{3D} 的下边界 $\square$ Ω_{WR}^{3D} 的下边界
 $\square$ θ_{OR} 的边界 $\square$ θ_{WR} 的边界



(a) 三维运行域 (b) 三维做功域
Type I的三维运行域和做功域

- 任意工作点的欧式距离不一定满足 $d_{OR}^{12} / d_{WR}^{12} = d_{OR}^{23} / d_{WR}^{23}$ ，夹角也不一定满足 $\sigma_{OR} = \sigma_{WR}$ 。
- 做功域和运行域之间存在非线性变换的几何关系。
- IES的做功域和运行域的几何关系，取决于运行状态下的能质函数值，大多数IES呈现为非线性变换关系。

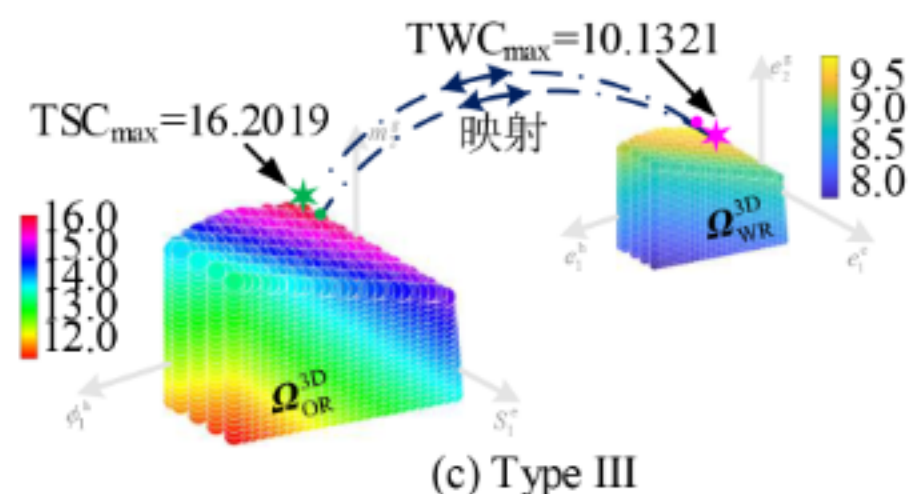
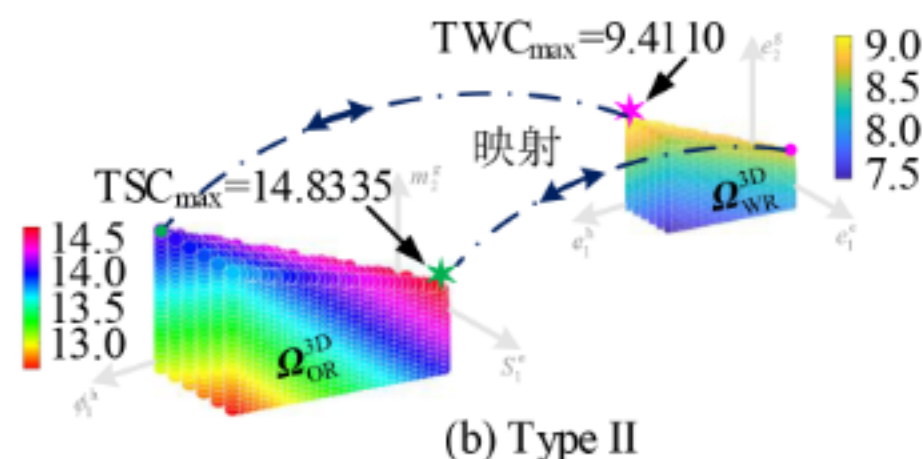
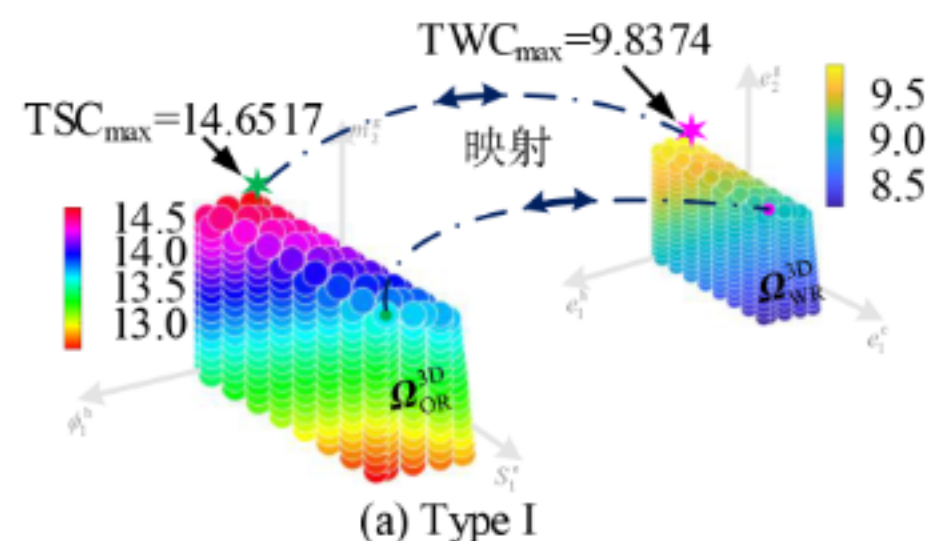
三维空间下做功域和运行域的欧式几何关系数据表

$d_{OR}^{12} / d_{WR}^{12}$	$d_{OR}^{23} / d_{WR}^{23}$	σ_{OR}^{123}	σ_{WR}^{123}
111.3170	73.6548	179.44°	138.96°

■ 做功能力与供能能力

- 当Type I处于最大做功能力点时，其供能能力也达到了最大；
- 当Type II达到9.4110 MW的最大做功能力时，其供能能力仅为13.3546 MW，且与最大供能能力相差1.4789 MW；
- 当Type III处于最大做功能力点时，其供能能力与最大供能能力相差0.3214 MW。
- **传统基于运行域的优化手段，在追求较高的供能能力时，并不一定能够兼顾做功能力。**

IES类型	原对偶内点法求解结果及其线性映射		
	$TWC_{\max}/\text{MW}$	TSC/MW	$TSC_{\max}/\text{MW}$
Type I	9.8374	14.6517	14.6517
Type II	9.4110	13.3546	14.8335
Type III	10.1321	15.8805	16.2019

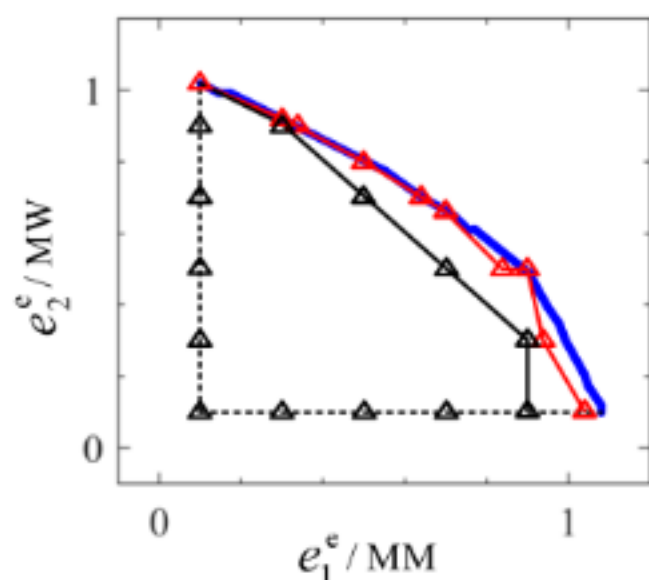


三维空间下Type I-Type III的运行域、做功域、做功能力和供能能力

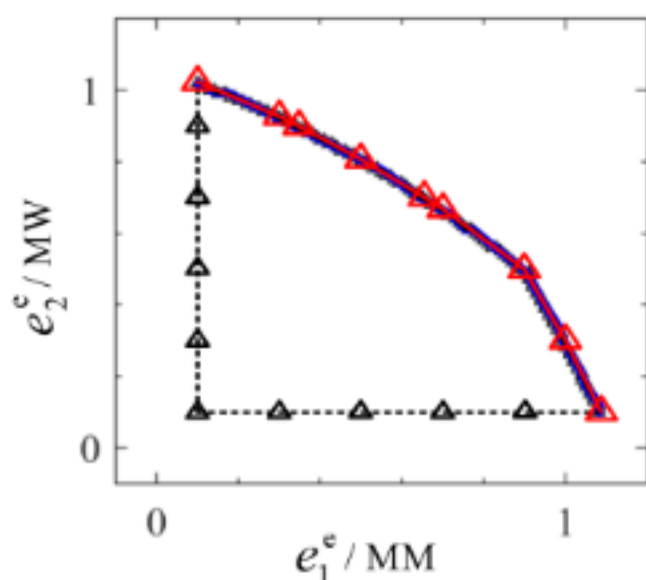
■ 做功域的求解速度与精度对比

传统采样法		改进型二分法 (本文)		
步长 δ	时间/s	步长 δ	收敛精度	时间/s
0.2	19.95	0.2	0.2	775.47
		0.2	1×10^{-5}	763.26
0.1	102.54	0.1	0.1	1738.49
0.01	11376.04	0.01	0.01	16179.50

▲ 上边界(改进二分法)
 ▲ 上边界(采样法)
 — 上边界(真值)
 --▲-- θ_{WR} 的边界



(a) $\delta = \varepsilon = \zeta = 0.2$



(b) $\delta = 0.01, \varepsilon = 0.2, \zeta = 1 \times 10^{-5}$

做功域安全边界求解方法的结果对比

- 当 $\delta = \varepsilon = \zeta$ 时, 采样法的计算速度比改进二分法更快, 这是由于改进二分法需要多次安全校验, 花费了较多时间。但是**改进型二分法的计算结果更接近于真值。**
- 当采样法的采样步长 $\delta=0.01$, 改进二分法的采样步长 $\varepsilon=0.2$, 收敛精度为 1×10^{-5} 时, 两种方法的**精度基本一致**, 而在计算速度方面, 采样法则需要11376.04s, **改进型二分法仅需要763.26s。**
- **改进型二分法兼顾了计算精度和计算时间**, 通过调节**收敛精度**, 可实现小步长采样法的计算效果, 且**不会大幅度增加计算耗时。**

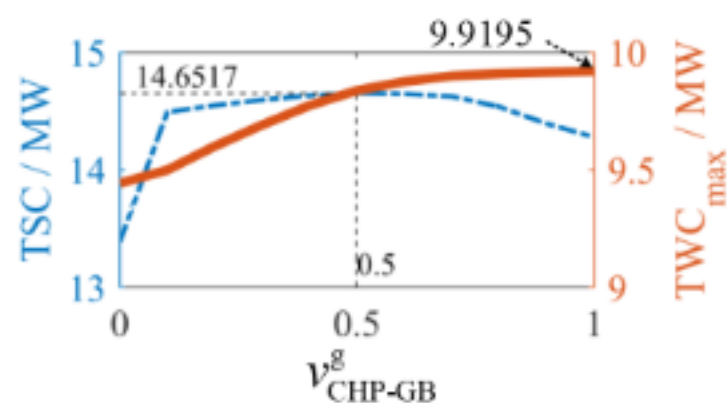
■ 做功能力的求解

- **直接法**：将最大做功能力模型视为最优化问题，直接采用**原对偶内点法**进行求解；
- **间接法**：首先需要设定运行域的采样步长，建立IES运行域，然后根据运行域和做功域的几何变换关系，映射出完整的做功域后，再对做功域的若干工作点进行筛选，最后得到IES的 $TWC_{\max}$ 点；
- 间接法消耗时间是直接法的40~130倍，并且仍**未能找到准确的 $TWC_{\max}$ 点**。若减小间接法的采样步长，可能会找到 $TWC_{\max}$ 点，但必然会花费更多的计算时间，**因此十分有必要建立最大做功能力模型**。

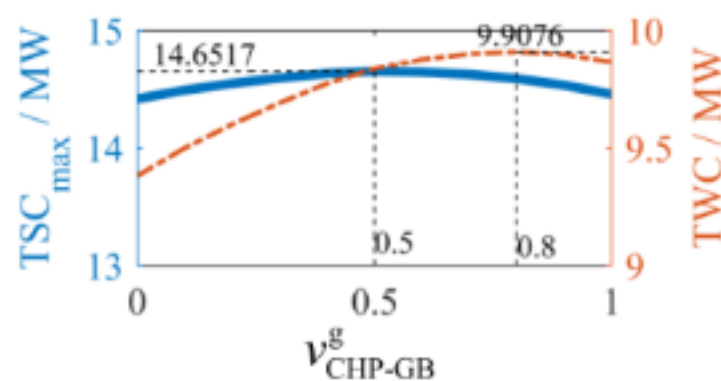
供能能力和做功能力的求解方法对比

IES类型	间接法		直接法（内点法直接求解）	
	$TWC_{\max}$ 的计算结果	耗时/s	$TWC_{\max}$ 的计算结果	耗时/s
Type I	9.0125	2666.29	9.8374	57.72
Type II	8.7759	3031.94	9.4110	23.95
Type III	9.1977	2770.92	10.1321	62.20

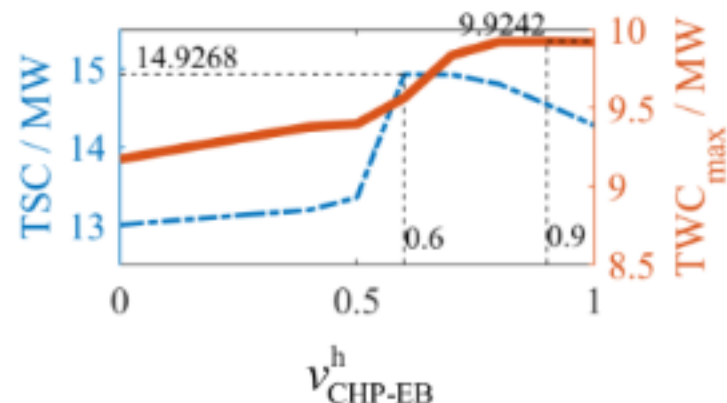
■ 系统运行参数对做功能力的影响



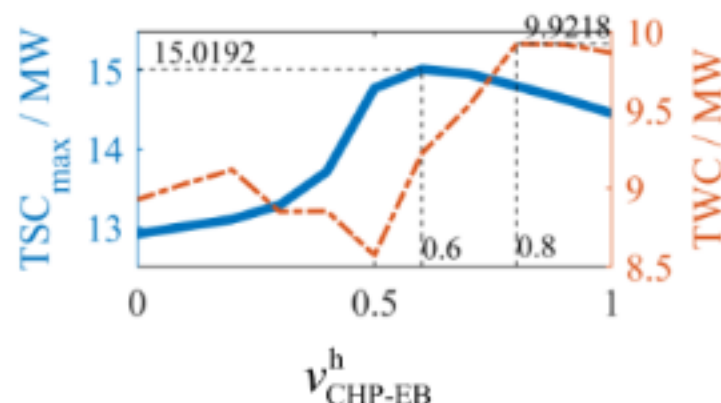
(a) Type I的 $TWC_{\max}$ - $v_{\text{CHP-GB}}^g$ 关系曲线



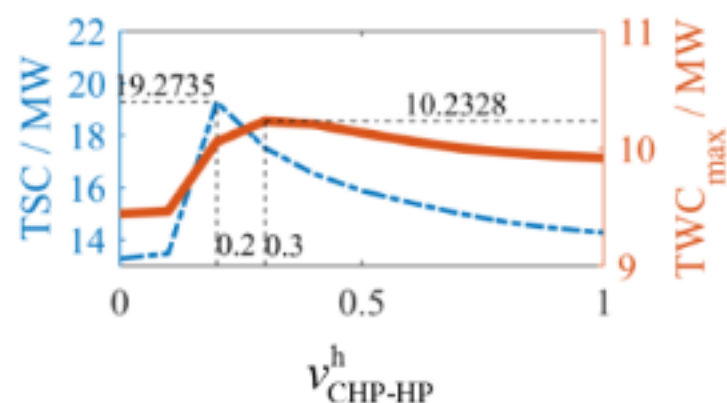
(d) Type I的 $TSC_{\max}$ - $v_{\text{CHP-GB}}^g$ 关系曲线



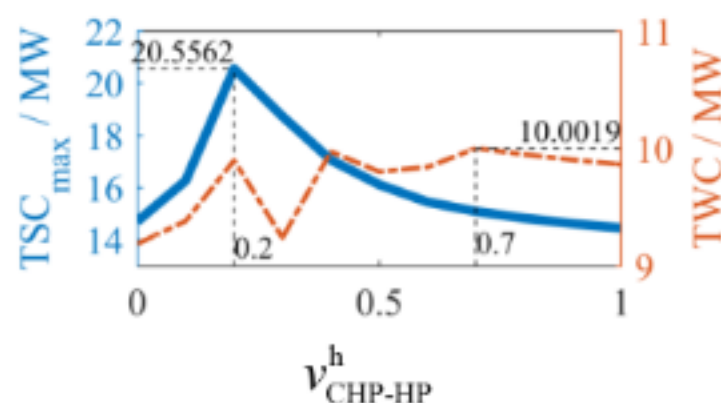
(b) Type II的 $TWC_{\max}$ - $v_{\text{CHP-EB}}^h$ 关系曲线



(e) Type II的 $TSC_{\max}$ - $v_{\text{CHP-EB}}^h$ 关系曲线



(c) Type III的 $TWC_{\max}$ - $v_{\text{CHP-HP}}^h$ 关系曲线



(f) Type III的 $TSC_{\max}$ - $v_{\text{CHP-HP}}^h$ 关系曲线

运行参数与 $TWC_{\max}$ 、 $TSC_{\max}$ 的关系

- 讨论天然气分配比例系数 (Type I)、供热分配系数 (Type II)、供热分配系数 (Type III) 与 $TWC_{\max}$ 和 $TSC_{\max}$ 的灵敏度。

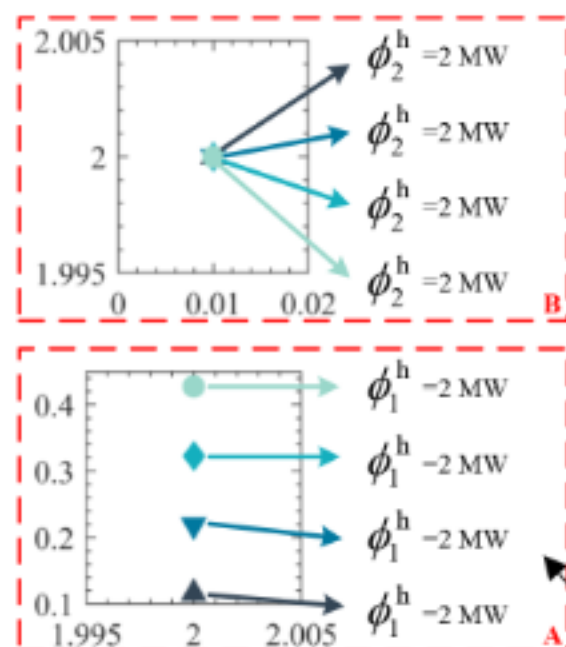
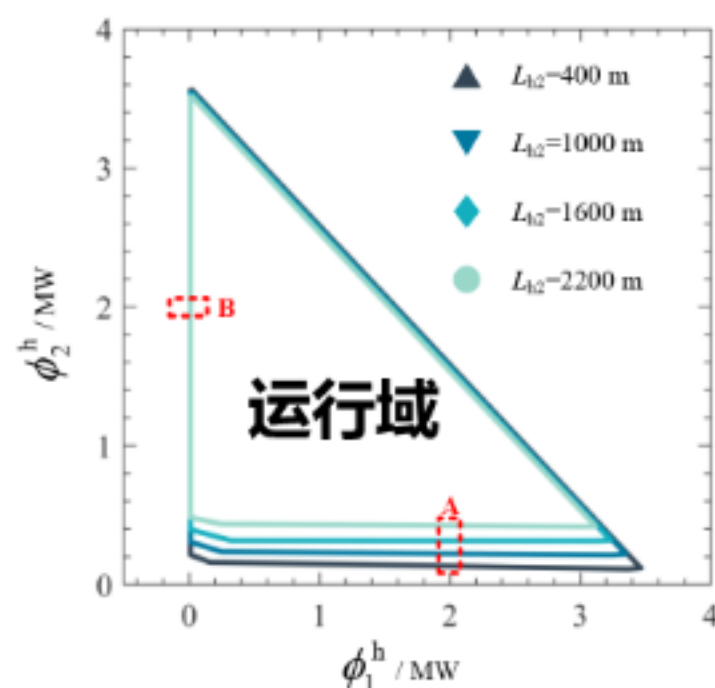
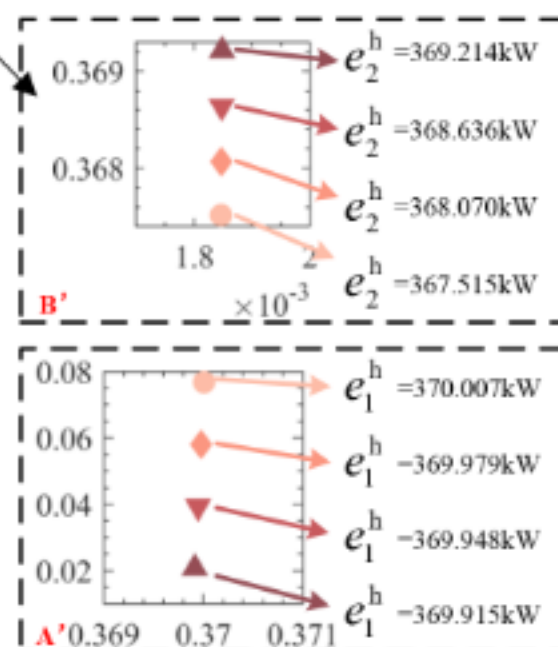
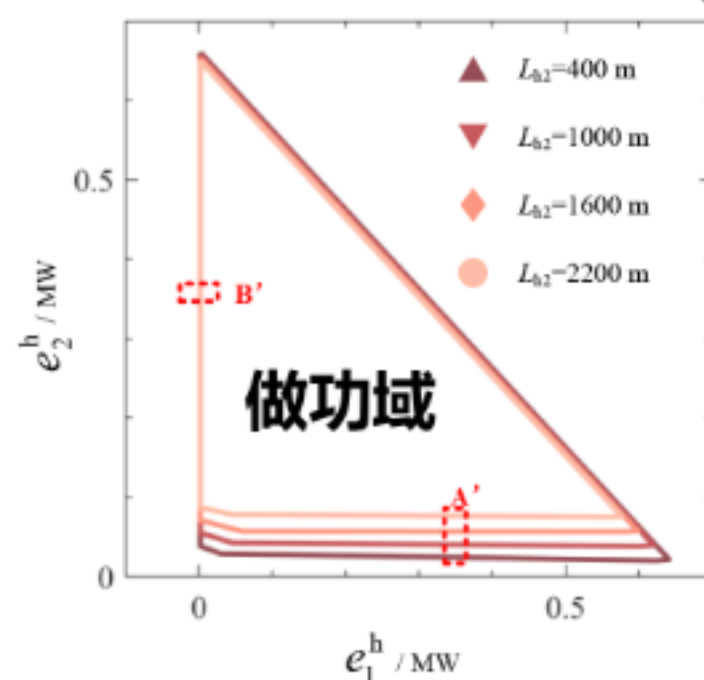
现象:

- 在处于最大供能能力的运行工况下, 其做功能力并不一定达到最大;
- 在处于最大做功能力的运行工况下, 其供能能力并不一定达到最大;
- 提升TSC的同时, 可能导致TWC的降低。

建议:

- 传统的优化调度策略, 可能影响用户的用能公平。
- 在制定运行调度策略时, 可同时考虑IES供能能力和做功能力, 兼顾用户的做功能力需求。

■ 拓扑参数对做功能力的影响

但是, 节点 H_2 获得的做功能力明显下降节点 H_1 和节点 H_2 获得的热量始终为2MW

管道 L_{h2} 长度/米	$\phi_1^h=2\text{MW}$ 时(区域A)			$\phi_2^h=2\text{MW}$ 时(区域B)			节点 H_1 负荷焓 /(kW)	节点 H_2 负荷焓 /(kW)	做功能力 差异 /(kW)
	$T_s(H_1)$ /°C	$T_o(H_1)$ /°C	$m_q(H_1)$ /(kg/s)	$T_s(H_2)$ /°C	$T_o(H_2)$ /°C	$m_q(H_2)$ /(kg/s)			
400	99.6947	50	9.6236	99.3819	50	9.6845	369.9148	369.2144	0.7004
1000	99.7096	50	9.6207	99.1239	50	9.7354	369.9480	368.6362	1.3119
1600	99.7233	50	9.6180	98.8715	50	9.7857	369.9786	368.0697	1.9090
2200	99.7360	50	9.6156	98.6247	50	9.8353	370.0072	367.5154	2.4918

做功域能够展示出运行域不能观测到的局部做功能力衰减现象,
可为IES规划方案调整提供参考。

● 热力管道长度对节点间
做功能力差异的影响

- 管长增加导致更多损耗, 运行域和做功域的范围均随着管道增长而收缩;
- 随着管长增加, 两者做功能力差异愈发明显;
- 随着管长增加, 温降程度加剧, 增大流量并未满足做功能力需求。

1

研究背景与意义

2

做功域与做功能力模型

3

算例验证

4

结语

- 提出了能够刻画安全做功范围的IES做功域概念及模型，证明了做功域和运行域的内在数学关系和高维空间下的几何变换关系；
- 建立了描述安全做功极限的IES最大做功能力概念、模型及计算方法；
- 提出了改进型二分法，用以求解做功域安全边界，兼顾了精度和效率；
- 揭示了IES做功能力与供能能力的关系，以及局部做功能力衰减现象。

部分参与文献：

- [1] Tianshuo Zhou, Dan Wang, Hongjie Jia, et al. The work region and total work capability of integrated energy system: concepts, models, and mechanisms[J]. Applied Energy, 2025, 394: 126032.
- [2] Tianshuo Zhou, Dan Wang, Hongjie Jia, et al. Expansion planning of integrated energy systems with distributed hydrogen blending for work capability enhancement[J]. CSEE Journal of Power and Energy System, 2025. (Accepted)
- [3] 周天烁, 王丹, 贾宏杰. 面向综合能源系统的量质协同状态估计方法[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(04): 133-142.
- [4] 周天烁, 王丹, 李家熙, 李宜哲, 贾宏杰. 面向综合能源系统的潮流追踪模型与计算方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(17): 75-88.
- [5] 王丹, 周天烁, 李家熙, 贾宏杰. 面向能源转型的高碳综合能源系统理论与应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(17): 114-131.

衷心感谢各位专家!

请批评指正!

tianshuozhou@163.com
tszhou@tju.edu.cn