第 50 卷 第 4 期：1376-1391 高电压技术 Vol.50, No.4: 1376-1391
2024 年 4 月 30 日 High Voltage Engineering April 30, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20232114

综合能源系统建模与能流计算方法研究综述

陈飞雄[1]，颜熙颖[1]，邵振国[1]，李壹民[2]，郑翔昊[1]，张　河[1]
（1. 数字能源福建省高校重点实验室(福州大学)，福州 350108;
2. 国网福建省电力有限公司泉州供电公司，泉州 362000）

摘　要：围绕综合能源系统的能流计算问题，从网络模型及求解、不确定性能流分析方法 2 个层面综述了各类能流计算方法。首先，在综合能源系统网络特性建模方面，讨论了偏微分方程模型、动态特性模型和稳态特性模型及其求解方法。其次，归纳了应对系统外部输入不确定性的概率和区间 2 类传统能流分析方法，以及概率-区间混合不确定性能流分析方法。最后，从工程应用角度分析当前综合能源系统能流计算的难点与热点，进而对其发展方向进行展望。

关键词：综合能源系统；网络特性模型；能流计算；不确定性分析方法；概率-区间方法

Review on Modeling and Energy Flow Calculation Methods for Integrated Energy Systems

CHEN Feixiong[1], YAN Xiying[1], SHAO Zhenguo[1], LI Yimin[2], ZHENG Xianghao[1], ZHANG He[1]
(1. Key Laboratory of Energy Digitalization, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
2. Quanzhou Power Supply Company of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Quanzhou 362000, China)

Abstract: Around the energy flow calculation problem of integrated energy system, various energy flow calculation methods are reviewed from two aspects: network model and solution, uncertain performance flow analysis method. Firstly, in the aspect of network characteristics modeling of integrated energy system, partial differential equation model, dynamic model and steady state model and their solutions are discussed. Secondly, two types of energy flow analysis methods for dealing with external uncertainty, namely probability and interval, were summarized, and energy flow analysis methods with mixed uncertainty in probability interval. Finally, we analyze the difficulties and hotspots of energy flow calculation from the perspective of engineering applications, and then provide prospects for its development direction.

Key words: integrated energy system; network characteristic model; energy flow calculation; uncertainty analysis methods; probability-interval method

0　引言

综合能源系统(integrated energy system, IES)将多种能源网络进行耦合，实现不同能源的互补和协同，能源利用效率高且供能灵活性强，对推动能源结构转型具有积极作用。在此背景下，世界各国积极推进 IES 的建设和发展，为加快 IES 的实践应用，学者们陆续开展 IES 规划、调度等方面的研究。

作为能流优化、协同规划、经济调度等研究的重要基础，能流计算能够获取系统运行状态，为安全控制、设备选型等应用提供依据。能流计算的概念来源于电力系统潮流计算，但由于涵盖的能源类型不同，综合能源系统呈现出与电力网络不同的特性。例如，在能源类型方面，电能传输速度快但不易大量储存；气、热等能源易储存，但传输速度慢，各种能源优势不同，在系统中能够实现互补。此外，多能相互转换和紧密耦合也是综合能源系统突出的特点。针对综合能源系统特性，需要建立能源网络特性模型，以适用于各种场景下的能流计算。

受气候、用户行为等多方面因素影响，综合能源系统源荷有较大的波动性，系统呈现强不确定性。此外，综合能源系统互联互通，异质能流在不同子系统间交互传递，各能源子系统的不确定性将随着能流传递进一步影响其他能源子系统，使综合能源系统的不确定性交互更加复杂。鉴于此，需要行之有效的不确定性能流计算方法，对不确定因素影响下的综合能源系统运行情况进行准确分析，为进一

基金资助项目：国家自然科学基金(52107080)；福建省自然科学基金(2021J05135)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52107080), Natural Science Foundation of Fujian Province(2021J05135).

步控制不确定性带来的风险做好准备。

为此，本文对综合能源系统能流计算方法进行归纳、分析和总结。本文首先聚焦描述综合能源系统网络特性的建模及其求解方法；其次针对不确定性影响下的综合能源系统，介绍和对比不确定性能流计算方法；最后基于上述分析，总结研究难点与重点，并对综合能源系统能流计算方法进行展望。

1 综合能源系统网络特性建模及能流求解

基于网络机理构建的综合能源系统模型由繁至简包含偏微分方程模型、动态特性模型和稳态特性模型。如图 1 所示，网络特性模型越精细，所保留的系统运行特性信息越全面，但是也会增加能流求解难度，降低能流计算效率。本章梳理常见的 3 类网络特性模型以及相应的能流求解方法。

1.1 能源网络偏微分模型

综合能源系统中，电、热、气网的响应速度由于传输介质不同而存在差异。电力网络的响应时间为毫秒级，远小于热网和气网，因此综合能源系统能流计算研究中一般忽略复杂的电磁动态过程。

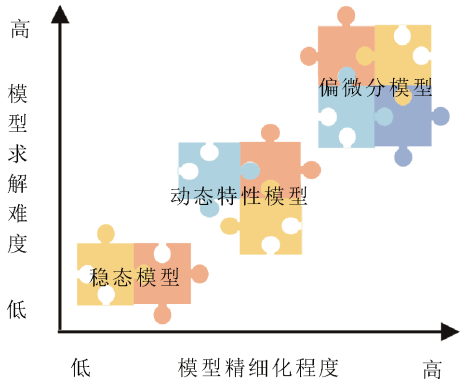


图 1 综合能源系统网络特性模型

Fig.1 Integrated energy system network characteristics model

天然气网络通过管道端口的压力差驱动天然气传输，天然气具有可压缩性，因此在管道传输过程中压力逐渐降低，气体密度、速度、温度等不断发生变化。天然气在管道中流动遵循质量守恒定律、牛顿第二定律以及热量守恒定律，表示为如图 2 所示管道微元上的连续性方程、动量方程和能量方程[1-2]，最终推导得到：

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \rho}{\partial t}+v\dfrac{\partial \rho}{\partial x}+\rho\dfrac{\partial v}{\partial x}=-\dfrac{\rho v}{A}\dfrac{\partial A}{\partial x} \\ \dfrac{\partial v}{\partial t}+v\dfrac{\partial v}{\partial x}+\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial p}{\partial x}+g\dfrac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}x}+\dfrac{\lambda}{2D}v|v|=0 \\ \dfrac{\partial}{\partial t}\left(\rho A\left(h-\dfrac{p}{\rho}+\dfrac{v^2}{2}\right)\right)+\dfrac{\partial}{\partial x}\left(\rho vA\left(h+\dfrac{v^2}{2}\right)\right)+ \\ \rho vAg\dfrac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}x}+K\pi D\left(T-T_0\right)=0 \end{cases} \tag{1}$$

式中：ρ 为气体密度；v 为气体流速；A 为管道截面积；p 为节点压力；g 为重力加速度；z 为高程；D 为管道内径；λ 为管道摩擦系数；h 为气体的焓；K 为管道总传热系数；T 为气体温度。

供热系统以水为媒介传递热能，由水力网络和热力网络耦合而成，依靠调节热源温度或水流量来满足热负荷需求。水力网络是不可压缩的流体网络，与天然气网络相似，水流动过程中遵循质量守恒和动量守恒定律[3-4]。在现有研究中，通常采用如式(2)所示的热力网络管道偏微分方程[5]，描述热动力学过程中的温度变化和时间延迟。

$$\rho_{\mathrm{w}}C_{p,\mathrm{w}}A\frac{\partial T}{\partial t}+m_{\mathrm{h}}C_{p,\mathrm{w}}\frac{\partial T}{\partial x}=k_{\mathrm{w}}A\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{T_{\mathrm{s}}-T}{R} \tag{2}$$

式中：T和m_{h}分别为热网的温度和流量状态量；ρ_{w}、

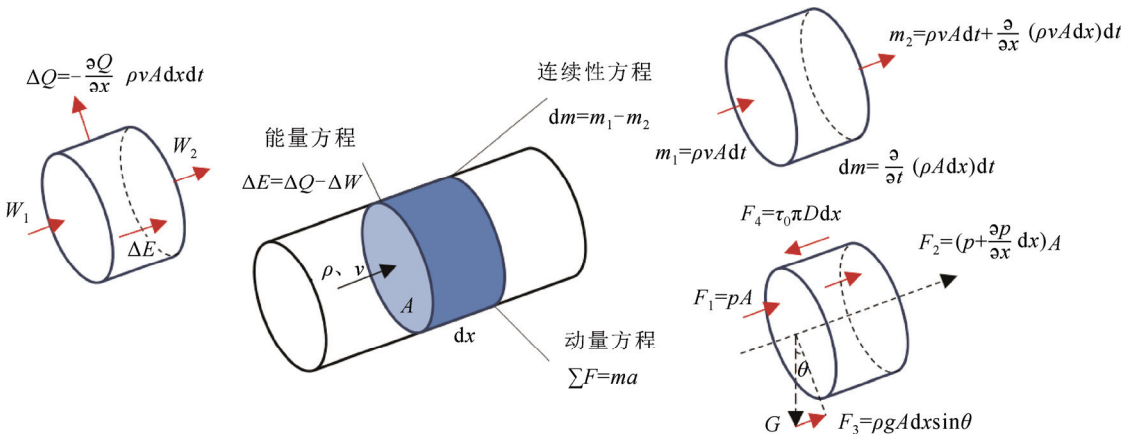


图 2 管道微元

Fig.2 Pipeline microelement

$C_{p,\mathrm{w}}$、k_{w} 分别为水的密度、比热容和热导率；R 为管道的导热系数；T_{s} 为地表温度。

在此基础上，基于图论将若干管道的偏微分方程依照拓扑结构，组合成描述网络的偏微分方程组，即可实现由管到网的模型建立。由式(1)、(2)可知，能源网络的偏微分方程虽然能够准确描述能流传输特性，但涉及多个维度的变量，方程的变量间还存在非线性关系，难以直接求解，因此很少直接运用于能流计算中。

1.2 能源网络动态特性建模及求解

网络动态特性模型主要描述管网能流传输过程中的时间延迟和温度损耗，因此通常对能流传输模型进行简化。在热网的动态模型中，由于水的传输速度比热能快，因此大多研究将水力网络视为稳态，甚至在热网的质调节模式下，视水的流量为恒定，忽略水力方程，简化后的热网动态模型如式(2)所示。天然气网络动态模型中，通常忽略气网管道与外界环境的能量交换，不计及能量方程，且忽略动量方程中对流项产生的影响，简化后的气网动态模型如式(3)所示。目前，综合能源系统动态特性建模研究主要涉及时域建模和频域建模 2 大类。

$$\begin{cases}\dfrac{\partial \rho}{\partial t}+\rho\dfrac{\partial v}{\partial x}=0\\ \dfrac{\partial v}{\partial t}+\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial p}{\partial x}+g\dfrac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}x}+\dfrac{\lambda}{2D}v|v|=0\end{cases} \tag{3}$$

1.2.1 时域模型

偏微分方程模型描述的是管道中能流的连续变化过程，难以直接求解，可以通过有限差分法、有限体积法和有限元法等数值近似方法转换为时域模型后求解。图 3 为以上 3 种方法的管道离散模型。

有限差分法在时域中将管道离散为时间维度和空间维度上的若干微元，以不同的差分格式近似偏导，以此近似偏微分方程的数值解。文献[6]基于简化的天然气网络质量守恒和动量守恒方程建立了隐式有限差分模型。文献[7]采用隐式梯形规则近似差分模型，提出自适应时间步长的热网动态模型。文献[8]对热力网络的偏微分方程进行有限差分化，推导水流恒定状态下管道内任意位置的温度随时间变化的动态模型。文献[9]基于二阶迎风隐式方程建立热网动态特性模型。文献[10]采用了特征线法，将天然气管网的偏微分方程转化为沿特征线上的全微分动态模型。

有限体积法是将流体域分成有限体积，如图 3(b)所示，将原方程转换为控制体积之间的数值关系。文献[11]采用有限体积法描述供热管道中的热瞬态，将管道分为多个有限体积，并用每个有限体积的差商代替时间和空间导数。文献[12]以有限体积法构建的热网动态模型不仅考虑了有限体积沿管道轴向的热量传递，还考虑了径向上水通过管道壁的热量损失，其中径向热量传递计算以电阻-电容电路模拟。

有限元则是将连续的流体域离散为有限个单元组成的集合，并在单元上采用基函数拟合原函数。文献[13]将热网管道长度离散为长度为 $\mathrm{d}x$ 的有限元，根据初始条件和边界条件计算每个管道元件的温度状态量。有限元法与有限体积法均需要满足积分守恒，有限体积法可以视为单元内以某一值代替基函数的特殊有限元法。从计算速度来看，形式简单直观的有限差分法有很大优势，在目前综合能源系统能流计算研究中得到了广泛应用。然而有限元

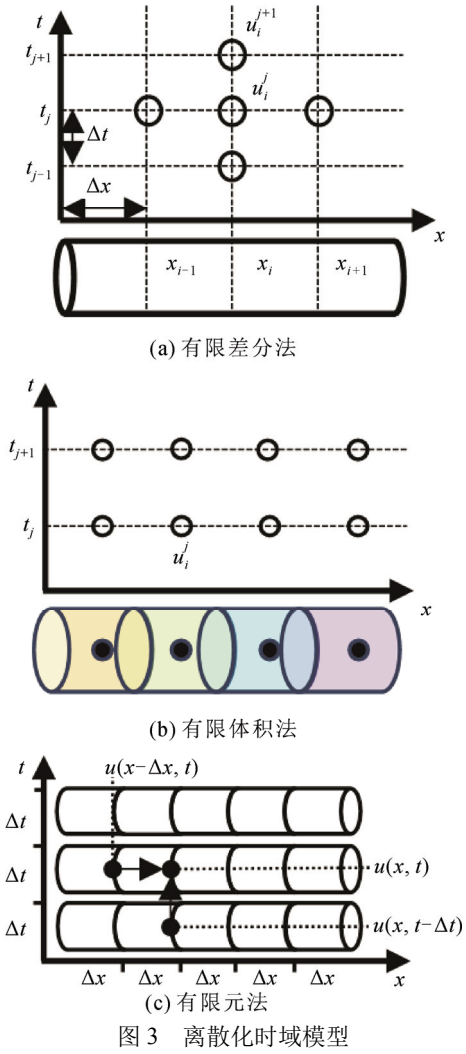


图 3 离散化时域模型

Fig.3 Discretized time domain models

法中单元划分更加多样，因此能够处理具有复杂边界流场的区域，在未来高精度仿真的应用需求下极具潜力。

以上 3 种离散化方法，使系统待求量除原节点状态量外增加了管道内部离散点或离散体积的状态量，导致计算量较大。为追求更高的计算效率，文献[14]提出描述天然气管道动态特性的轻量化时域二端口模型，推导了管道已知条件与待求变量的线性表达式，提升了动态差分模型的可用性。部分研究将热网管道内的流量离散为水块的形式，用以简化描述热网的传输时延和温度损耗，称为节点法。文献[15]提出一种准动态模型，基于质块的温度混合建立热能的传输时延模型，并采用苏霍夫温降公式修正管道出口温度，描述热水在传输过程中与管壁进行热交换产生的温度损耗。

在能流求解方面，网络动态特性时域模型最终整理为非线性代数方程组，可以采用牛顿-拉夫逊法等数值方法进行计算。此外，综合能源网络动态能流计算涉及到时间尺度匹配的问题。电、气、热网络的响应时间大致为毫秒级、分钟级和小时级。针对响应时间的差异，可通过设置热网时间步长为气网时间步长的整数倍来实现综合能源系统多时间尺度匹配，进而求解动态模型。

1.2.2 频域模型

构建频域模型是将复杂的时空偏微分方程通过傅里叶变换、拉普拉斯变换等方法映射至频域，消除模型中的时间分量，最终呈现为一组常微分方程。降维可以降低模型求解和网络分析的难度，因此频域模型逐渐受到学者的关注，已经取得一定进展。

模型构建方面，孙宏斌等学者基于由“场”到“路”的电路推演理论，从描述气、热传输特性的时-空偏微分方程抽象出气阻、热阻等单位长度管道上的分布参数，并通过傅里叶变换映射到频域，最后整理得线性二端口集总参数模型[16-17]。康重庆等学者提出广义电路分析理论，总结电、气、热能源网络偏微分方程的共性，并基于拉普拉斯变换得到统一数学方程表示的集中参数广义电路模型[18-19]，支路的集总参数可以体现气、热网络的动态特性。顾伟等学者则提出了复频域增广模型[20]，基于统一形式的偏微分方程，在广义电路模型的基础上中加入与初始条件相关的增广项，得到复频域增广模型。

在能流求解方面，文献[21]将动态能流视为若干频率下正弦稳态的叠加，求解对应频率下的频域模型[16-17]，将响应相量反变换至时域，并叠加得到时域的能流计算结果。拉普拉斯域的复频域网络模型呈现为若干与初始条件相关的二端口网络方程组，通过求解代数方程组得到状态量的复频域表达式后，通过反拉普拉斯变化即可获得最终的时域下的能流计算结果。

相较于时域模型，频域模型可以消除时间分量，从而降低方程求解难度。然而实际工程应用所能获取的初始条件、边界条件一般是时域下的离散点，因此，需要将其从时域转换到频域；此外，为了更直观地呈现结果，频域计算结果也需要转换到时域，该转换环节将增加问题的求解规模，降低求解效率。

上述时域模型和频域模型从网络机理建模出发，此外，现已有文献提出“虚拟元件[22]”、“代理模型[23]”等概念描述网络的动态特性。其中，代理模型基于历史运行数据，采用神经网络拟合管道方程，能够显著提升计算分析的效率，具有一定的应用前景。

1.3 能源网络稳态特性建模及求解

能源网络的稳态模型是广为应用的模型，描述了一定源荷条件下网络达到某一稳定状态时，节点状态量、支路状态量、支路参数之间的关系。

电力网络的稳态交流模型为：

$$\begin{cases}\Delta P_i = P_i^{\mathrm{SP}} - U_i\sum\limits_{j\in i}U_j\left(G_{ij}\cos\theta_{ij}+B_{ij}\sin\theta_{ij}\right)\\ \Delta Q_i = Q_i^{\mathrm{SP}} - U_i\sum\limits_{j\in i}U_j\left(G_{ij}\sin\theta_{ij}-B_{ij}\cos\theta_{ij}\right)\end{cases} \tag{4}$$

式中：ΔP_i、ΔQ_i 分别为节点 i 的有功、无功不平衡量；P_i^{SP}、Q_i^{SP} 分别为电力系统节点 i 的注入有功、无功功率；U_i、U_j 分别为电力系统节点 i、j 的电压；G_{ij}、B_{ij} 分别为连接节点 ij 支路导纳的实部和虚部；θ_{ij} 为节点 i、j 之间的相角差。

天然气管道稳态模型如式(5)所示，流量可以表示为含节点气压、管道参数的函数。文献[9]推导了天然气网络偏微分方程转化为稳态方程的过程。在实际应用中，已有 Weymouth、Panhandle A、Panhandle B、Spitzglass 等稳态管道方程[24]。

$$p_i^2 - p_j^2 = C_{ij}\left|f_{ij}\right|^{\alpha}\mathrm{sgn}\left(f_{ij}\right) \tag{5}$$

式中：p_i、f_{ij} 分别表示节点 i 的气压、连接节点 ij 管道的流量；C_{ij} 为管道 ij 参数；α 与采用的气体管道方程有关；sgn(·)为符号函数。

热力网络稳态模型由描述管道流量和压力的

水力模型，以及描述节点热功率和管道传输热损的热力模型[25]组成：

$$\begin{cases} \boldsymbol{A}\boldsymbol{m}_{\mathrm{h}}=\boldsymbol{m}_{\mathrm{q}} \\ \boldsymbol{B}\boldsymbol{K}_{\mathrm{z}}\boldsymbol{m}_{\mathrm{h}}\left|\boldsymbol{m}_{\mathrm{h}}\right|=0 \\ \boldsymbol{\Phi}=C_p\boldsymbol{m}_{\mathrm{q}}\left(\boldsymbol{T}_{\mathrm{s}}-\boldsymbol{T}_{\mathrm{o}}\right) \\ \boldsymbol{T}_{\mathrm{end}}=\left(\boldsymbol{T}_{\mathrm{start}}-\boldsymbol{T}_{\mathrm{a}}\right)\mathrm{e}^{-\frac{\lambda \boldsymbol{L}}{C_p\boldsymbol{m}_{\mathrm{h}}}}+\boldsymbol{T}_{\mathrm{a}} \end{cases} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$ 分别为供热网络的节点-支路关联矩阵、回路-支路关联矩阵；$\boldsymbol{K}_{\mathrm{z}}$ 为管道阻力系数矩阵；C_p 为水的比热容；λ 为热传导系数；$\boldsymbol{L}$ 为管道长度矩阵；$\boldsymbol{m}_{\mathrm{h}}$、$\boldsymbol{m}_{\mathrm{q}}$ 分别为管道和节点流量矩阵；$\boldsymbol{T}_{\mathrm{s}}$、$\boldsymbol{T}_{\mathrm{o}}$、$\boldsymbol{T}_{\mathrm{start}}$、$\boldsymbol{T}_{\mathrm{end}}$、$\boldsymbol{T}_{\mathrm{a}}$ 分别为供热温度、输出温度、管道始端温度、管道末端温度和环境温度矩阵；$\boldsymbol{\Phi}$ 为热功率矩阵。在此基础上，文献[26]采用一阶泰勒展开对热力模型的指数项作近似，并将管道热损叠加至热负荷，实现热媒质量流量和温度的解耦。

动态仿真需要系统的初始状态，因此稳态能流计算是系统动态仿真的基础。对于多能源网络非线性稳态模型，牛顿-拉夫逊法是有效的求解方法之一，算法从初始值出发，沿切线方向逼近真实解。目前，牛顿-拉夫逊法已被应用于涵盖电[27-28]、热[25, 29]、冷[30-31]、水[32]、气[33-35]等多种能源的综合能源系统中。在此基础上，学者们从初值设置和步长选取 2 方面进一步改进牛顿-拉夫逊算法的收敛性能。文献[36]提出了天然气网络的初值选取原则；文献[37]通过遗传算法获取一组较优的牛顿拉夫逊法的初值；文献[38]以节点不平衡量的平均值为目标函数，建立了初值优化模型，并验证了优选初值能有效改善牛顿拉夫逊法的收敛性。在步长选取方面，文献[39]采用牛顿下山法修正迭代步长，减小牛顿拉夫逊法对初值选取的依赖；文献[30]采用最优乘子法计算每轮迭代的最优步长，提高算法的收敛性；文献[40]根据状态量的偏移程度采用自适应步长因子，实现步长动态调节。

此外，针对辐射型网络的能流求解，已有学者将电力系统的前推回代法拓展至综合能源系统。在供热/供冷网络能流计算中，前推回代法由末端向始端推算流量，由始端向末端推算温度，迭代直至节点的温度偏差满足精度[31]；在天然气网络中，稳态支路模型不存在能量损耗，当不存在耗气元件时仅需一次前推回代过程。文献[41]提出了电-热-气综合能源网统一前推回代能流计算方法，提高了传统前推回代法的适用性。相比于牛顿-拉夫逊法，前推回代法对初值的要求不高，但应用范围较为局限。

牛顿-拉夫逊算法等传统迭代算法存在收敛性能对初值依赖性较强的问题。一种新型递归潮流算法——全纯嵌入法(holomorphic embedding method, HEM)[42]为非线性能流方程的求解提供了新思路。文献[43]在电力系统中采用全纯嵌入潮流解法，并提出大规模电-气-热能源系统的多能流快速求解方法。文献[44]构建了气网灵活型全纯嵌入能流模型，提出电-气综合能源系统稳态潮流分析方法。文献[45]提出了多维全纯嵌入式天然气网能流计算方法，推导能流计算离线表达式，可快速地根据运行场景获取气网状态量，无需重复进行能流的递推计算。文献[46]针对牛顿-拉夫逊法迭代求解可能无法收敛的问题，提出热网递归型全纯嵌入能流计算方法。文献[47]提出基于全纯嵌入法的新半不变量法并应用于电-热综合能源系统的能流计算。全纯嵌入方法以递归替换迭代过程不仅改善了收敛性能，且提升了计算速度。此外，全纯嵌入法的嵌入形式多样，不同的嵌入方法适用于系统不同的应用场景，在提升能流计算方法性能方面仍具有较大的潜能。

2 不确定性能流分析方法

不确定性能流计算需要系统的内部拓扑信息和外部输入信息。对于不确定因素，需要描述其信息和特征，并最终表示为不确定变量参与能流计算。采用复杂的不确定性形式可以保留充足的不确定因素信息，进行较为精确的计算，但必然大幅度增加建模和能流求解的难度，削弱了可用性。为更好地适应工程应用，学者们选择性保留信息，发展出概率、区间以及概率-区间混合等不确定性变量表示形式以及相应的能流计算方法。

2.1 概率方法

2.1.1 概率变量模型

概率方法中，通常采用期望、方差、原点矩、概率密度函数等特征描述随机变量的不确定性，而随机变量的特征提取往往需要大量的历史数据。针对系统输入不确定性，如图 4 所示，现有研究常采用威布尔分布拟合风速的随机特征，采用 Beta 分布拟合光伏出力特征，并通常假设负荷服从正态分布。为更准确描述可再生能源和负荷的不确定性，学者们还提出了高斯混合和概率化 Z-number[48]等模型提高随机变量拟合的精确度。

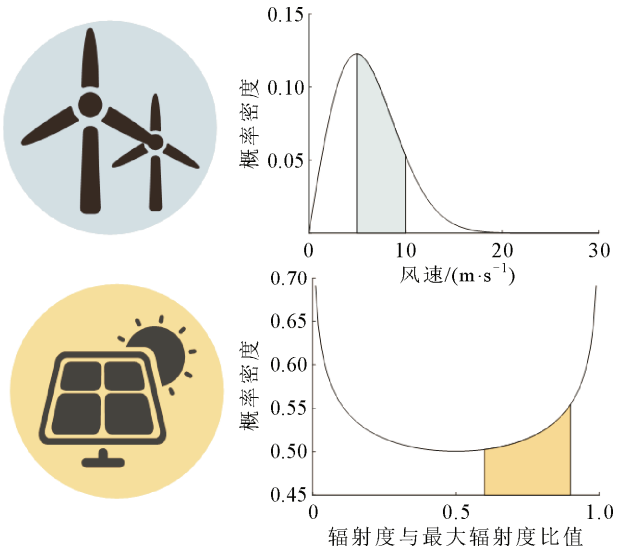


图 4　风电光伏出力的概率分布

Fig.4　Probability distribution of wind power and photovoltaic output

2.1.2　概率能流求解方法

概率能流求解是通过输入随机变量的概率特征求解系统状态量的概率特征，根据状态量特征的获取方式，可将其分为模拟法、近似法和解析法。模拟法和近似法的思路相近，根据输入随机变量的概率特征选取足够多或有代表性的样本点，生成对应的系统状态量数据，再由数据拟合概率分布；解析法则直接建立输入变量特征与状态变量特征的关系，快速获取输出状态量分布。

模拟法的主要环节包含抽样、计算和统计：通过大规模抽样模拟随机变量的概率分布，对样本进行确定性能流计算，最后统计输出变量结果得到其概率分布。抽样作为获取随机变量特征的环节，其采样规模和采样精度直接影响模拟法的精确度。文献[49]采用随机抽样的蒙特卡洛法进行电-气综合能源系统的能流计算，通过 N 次抽样和牛顿-拉夫逊法求解获取系统状态变量概率分布结果，该方法通过较大的采样规模保证结果的准确。进一步地，学者针对抽样环节提出拉丁超立方采样等方法提高模拟法的采样精度。文献[50-52]采用基于 Nataf 变换的拉丁超立方采样方法，通过分层提高采样的空间覆盖率，并根据顺序矩阵得到满足输入随机变量相关性的样本矩阵，求解电、气、热、冷等多能源系统的能流分布。在计算环节，学者则通过提高单次确定性能流计算速度来提升模拟法的可用性。陈胜等学者在文献[49]中指出了能源网络的线性化精度将影响计算结果，相应地在文献[53]中提出了多线性蒙特卡洛模拟方法，根据随机变量的概率密度函数划分出多个线性化点及区域，并建立线性化点与区域其余点的线性关系，以此提高确定性能流计算速度。为更合理地划分多线性蒙特卡洛法的样本区间，缩小区间内随机变量的波动范围，从而降低线性化计算的误差，文献[54]提出了改进 K-means 聚类方法，以聚类样本簇簇心作为线性化点，同簇样本点基于簇心的计算结果进行线性能流求解。经过计算可得到对应若干个样本的若干组系统状态量结果，需要统计状态量结果的概率密度函数和均值、方差等数字特征，以直观反映状态量的概率分布。统计方法可以采用核密度估计法，也可以采用直方图近似计算方法[54]。

近似法是利用输入随机变量的数字特征近似描述系统状态变量统计特性的方法[55]，综合能源系统概率能流计算中，以点估计法应用最广泛。文献[48]基于 Z-number 模糊模型的概率化处理，采用 $2m+1$ 点估计法进行概率能流计算，获取一天内系统状态变量的概率密度函数。点估计法是对函数值的估计方法，因此不仅可以用于能流计算，还能通过建立能流结果和目标的函数联系，拓展能流计算的工程应用。例如，文献[56]采用 $2m+1$ 点估计法计算了新能源出力和需求响应不确定性影响下电-气-热综合能源系统的运行成本。在点估计法和蒙特卡洛模拟法的计算中，耗时最长的步骤是求解所有采样点的能流结果。相比于蒙特卡洛法，点估计法通过减少采样点个数，实现了计算效率的极大提升。随着综合能源系统的不确定性输入逐渐增加，点估计法在计算速度方面的优势会愈发突出。随机变量的每阶矩皆蕴含随机变量分布的信息，两点估计法(即 $2m$ 法)只利用了随机变量的前三阶矩信息，三点估计法(即 $2m+1$ 法)则能够运用五阶矩信息。随着取点数增加，可以利用的随机变量信息增加，精度提升，然而随之需要面对高阶矩计算困难的问题，目前能流研究中多使用三点估计法，未有进一步研究突破。

解析法的核心在于利用随机变量进行卷积计算得到状态量的概率分布，卷积计算可采用快速傅立叶变换、半不变量法等方法。由于半不变量法能将复杂的卷积运算简化为半不变量之间的运算，得到了广泛的使用。半不变量是随机变量的一种数学特征，半不变量法基于灵敏度矩阵，将待求状态量

的各阶半不变量表示为输入随机变量相应阶数半不变量线性组合的形式，并基于数学特征还原状态变量概率分布。半不变量法需要基于一阶泰勒展开后的线性化能流方程进行求解，因此随机变量的波动范围和能流方程的非线性程度都会影响计算结果的精确性。针对此问题，文献[57]采用 K-means 算法对随机变量样本进行聚类并分别计算，以避免样本波动范围过大，从而减小误差；考虑综合能源系统模型存在强非线性，文献[58]提出了多点线性半不变量法，减小单一基准点造成的误差。从半不变量到概率分布的还原过程中，文献[57, 59-60]采用 Gram-Charlier 级数展开，根据已知累积量，近似求解状态变量的概率密度函数；文献[58, 61]针对 Gram-Charlier 级数展开可能出现概率密度为负的情况，采用 Cornish-Fisher 级数进行改善。文献[62]则提出了最大熵算法，采用牛顿迭代法或最优算法获得待求状态变量的概率分布。

2.1.3 概率方法小结

表 1 为 3 种概率能流方法的对比。其中，模拟法的结果较为准确，但由于广泛的采样和重复的计算，计算效率较差。以蒙特卡洛法的结果为基准，近似法和解析法目前能达到的准确性基本相当，但解析法具有无可替代的计算速度优势。综合而言，解析法在准确性和计算效率间达到了较好的平衡。

2.2 区间方法

2.2.1 区间变量模型

区间方法以区间数描述变量在实数区间内未知但有界的不确定性，具体形式如式(7)所示。以可再生能源出力的不确定性为例，如图 5 所示，认为当前时段的可再生能源出力处于某个区间内。区间方法仅需获取不确定因素的边界信息，能在有限的数据信息下实现不确定性建模。因此区间方法被运用于统计数据不足，或仅能获取经验取值区间的场景。

$$[X]=[x_{\min},x_{\max}] \tag{7}$$

式中：$[X]$表示区间变量；$x_{\min}$、$x_{\max}$分别为区间下界和上界。

2.2.2 区间能流求解方法

区间能流计算的实质是求解含有区间变量的能流方程。现有计算方法主要有迭代类算法和优化类算法，迭代类算法多从传统确定性能流计算方法改进而来；优化类算法则将原问题转化为系统状态量上下边界的求解问题，构建优化模型。

表 1 概率方法对比

Table 1 Comparison of probabilistic methods

方法	特点	准确性	计算速度	改进方向
模拟法	抽样	高(受采样规模与方式影响)	慢	提高采样效率；提升单次确定性能流计算速度
近似法	结合抽样与变量数字特征	中(受采样点影响)	中	增加随机变量估计点数；提升单次确定性能流计算速度
解析法	采用数字特征求解	中(受系统模型非线性化程度及概率分布还原方法影响)	快	模型线性化处理；提升概率分布还原方法精度

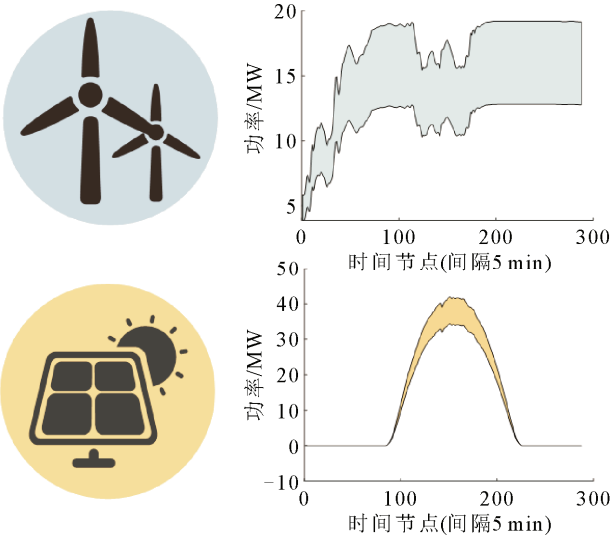


图 5 风电光伏出力区间

Fig.5 Interval of wind power and photovoltaic output

在迭代类算法中，文献[63]通过蒙特卡洛采样从区间内抽样获取样本点，基于牛顿-拉夫逊法进行确定性能流计算，最终从样本点计算结果中得到状态量的边界值，实现区间能流计算。在以区间变量作为整体的牛顿-拉夫逊迭代计算过程中，区间雅可比矩阵求逆困难。针对这个问题，最常见的解决方法是构造 Krawczyk-Moore 算子替代求逆过程[64-65]，以包含方程解集的区间作为初始值，在迭代计算过程中逐步减小保守性。文献[66]采用区间中值拓展改进 Krawczyk-Moore 算子的分量形式，求解电-热综合能源系统能流模型，一定程度上抑制了区间扩张问题。

优化类区间能流算法通过构建含区间变量的非线性优化模型求解区间能流。常见的求解方法为场景优化法，该法将能流方程转换为以状态变量 x

最大和最小为目标函数的优化模型进行求解，如式(8)所示。场景优化模型是在场景的可取值范围内，计算每个场景下变量的取值，并搜索变量的最大值和最小值以构成状态变量的区间。文献[67]建立电-气综合能源系统的非线性规划模型，求解风电出力不确定性影响下状态量的区间范围。针对非线性优化模型难以求解的问题，现有研究通过泰勒展开等线性化手段对模型进行近似求解。文献[68-69]基于分段线性化的思想，通过一阶泰勒展开线性化能流约束，并迭代更新模型以保证线性化精度。

$$\begin{cases}\min(\max) \quad x \\ \text{s.t.}\begin{cases}h(x)=\zeta \\ h_{\min}\le\zeta\le h_{\max}\end{cases}\end{cases} \tag{8}$$

式中：x 表示待求状态变量；$h_{\min}$、$h_{\max}$ 表示系统约束条件。

2.2.3 区间拓展方法

仿射方法是区间方法的一种拓展形式，在区间的基础上采用噪声元表示不同的不确定因素影响，仿射变量定义为：

$$\hat{x}=x_0+\sum_{i=1}^{n}x_i\varepsilon_i \tag{9}$$

式中：x_0 为仿射变量的中心值；ε_i 为定义在[−1,1]范围内的噪声元，表征相互独立的不确定因素；x_i 为噪声元系数，表示该噪声元代表的不确定因素对变量的影响。

图 6 展示了一个具有 4 个噪声元的仿射变量以及与之边界相等的区间变量。仿射变量可以通过式(10)转化为区间变量。

$$\begin{cases}x_{\min}=x_0-\sum_{i=1}^{n}|x_i| \\ x_{\max}=x_0+\sum_{i=1}^{n}|x_i|\end{cases} \tag{10}$$

在区间方法中，完备性与保守性是体现算法可靠性与准确性的重要指标。当算法结果的值域包含真实值域时，认为算法具备完备性；当算法结果的值域包含真实值域外的无用元素时，则认为算法具有保守性。现有研究认为，仿射方法表示不确定性变量关联性的能力，能够在计算过程中改善区间方法的保守性。文献[64，70-71]通过算例对比仿射方法和区间方法的能流结果，直观体现了仿射方法具有更低的保守性。然而，为保证计算结果的完备性，仿射的非线性运算将产生新增噪声元，在求解复杂的非线性能流方程时，可能导致结果区间扩张，算

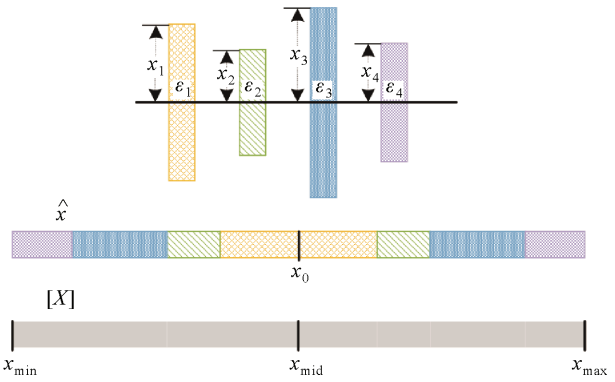


图 6 不确定性变量的仿射形式和区间形式

Fig.6 Affine and interval forms of an uncertain variable

法保守性增强。针对该问题，文献[72]提出扩展仿射方法，利用区间泰勒展开引入噪声元二阶灵敏度系数，考虑了非线性项对仿射变量的影响，通过改进仿射算法进一步抑制保守性。为了降低电-热综合能源系统模型的强非线性，文献[71]对热网管道温度方程进行泰勒展开至二阶项，将方程中的指数函数简化为线性运算。综合能源系统的能流方程普遍是非线性的，在区间类的能流计算方法中，能流方程线性化不仅能够降低求解难度，还能避免区间扩张，降低结果保守性，但相应的模型精度也会随之降低。因此，在综合能源系统能流计算中如何平衡模型线性化程度和模型精度，是值得深入研究的问题。此外，以仿射方法表征区间不确定性的另一优势在于，仿射状态量结果包含相互独立的噪声元，能追踪不确定性在系统中的传递过程，并定量分析多个不确定源对状态量的影响。文献[73]则利用节点电压的仿射值分析分布式电源的相对影响力，并作为选择监控重点和确定调控优先级的依据。文献[71]根据噪声元系数定义了影响力因子，分析影响节点状态量的主导因素，并剖析电、热网络不确定性的相互影响。

仿射方法是区间方法的拓展形式，因此仿射能流求解方法与区间方法相似。在迭代类方法中，仿射牛顿-拉夫逊方法仍然不可避免地面临雅可比矩阵难以求逆的问题，部分研究沿用区间方法中的 Krawczyk-Moore 算子避免矩阵求逆[74]；文献[75]则提出定雅可比矩阵的快速分解法，避免含仿射数的矩阵运算。仿射前推回代法[76]与区间前推回代法基本一致，二者分别以仿射变量、区间变量代替了确定性变量进行能流计算。在优化类方法中，仿射优化法以噪声元的区间范围作为控制变量，通过优化

模型求解状态量的边界值[77]。文献[78-81]基于预测和校正的思想，根据系统标称工作点预测仿射状态量，确定中心值后构造优化模型对噪声元部分进行校正，完成能流的求解。

综上分析，仿射方法较区间方法最突出的特点和优势是能够在减小区间方法保守性的同时，利用独立的噪声元表征不确定因素对变量的影响，实现不确定因素的溯源分析。因此，仿射方法的潜力仍有待挖掘，以下 2 个方面值得深入研究：

(1) 不确定变量相关性表示。现有能流研究算例中多考虑输入不确定性变量是相互独立的，或通过相关系数矩阵表示变量间的相关性。通过相关系数建立的多个仿射变量，带有相同的噪声元并以对应的系数反映变量间的相关关系，但该方法中仿射变量含有的噪声元无法表示实际的不确定因素。文献[82]基于实测数据，以预报误差、尾流效应等不确定因素为噪声元，建立了风电场风速和功率的仿射模型。能流研究中若能对不确定源进行精细化建模，有益于进一步表征变量的相关性，追溯不确定性来源，为系统控制提供参考。

(2) 非线性运算下噪声元的处理。仿射变量的非线性运算将不可避免地产生新增噪声元，增加计算结果的保守性。一方面，如果算法能够保留所有的仿射噪声元而不合并为新增噪声元，则计算结果的保守性最小，无限贴近真实情况。另一方面，当系统的不确定因素较多，或模型的非线性程度较高时，过多的噪声元将增大计算的规模。例如在动态仿射能流计算中，噪声元不断新增和累积，严重影响算法的性能，需要合适的合并策略。因此，仍需进一步研究能够兼顾计算精度与效率的新增噪声元处理方法。

2.3 概率-区间方法

概率方法和区间方法是常见的系统不确定性能流求解方法。概率方法基于大量历史数据得到不确定性输入的特征；区间方法仅需边界信息即可进行计算，但无法保留重要的概率分布信息。由于各类不确定性输入的信息不等，且不确定性中掺杂有主客观因素等问题，单一的概率或区间的方法无法准确描述系统不确定性。因此部分学者开始探索混合概率-区间的不确定性建模与求解方法。

2.3.1 概率-区间混合不确定性模型

系统中的不确定性大致可分为客观不确定性和认知不确定性。前者指因自然条件影响而无法准确预测的变化；后者指因信息缺失和认知水平限制而无法全面了解系统所导致的不确定性。本文 2.1、2.2 节中综述的概率、区间研究聚焦于描述系统的客观不确定性。如表 2 所示[83-94]，概率-区间这一类混合不确定性表示方式不仅能够融合客观不确定性下的随机变量和区间变量，且能够进一步考虑认知不确定性对系统的影响。

在概率-区间混合不确定性能流计算研究中，概率盒是常见的状态量计算结果表现形式。概率盒以 2 条累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)作为边界定义不确定性。概率盒可以综合表示区间和概率分布，根据其特性还可以进一步用于系统分析，例如估计违反线路约束的概率[87]。如图 7 所示，事件 $y<y_{\text{limit}}$ 发生的概率为区间$[P_{\min}, P_{\max}]$。

2.3.2 概率-区间混合不确定性能流求解方法

现有能流计算研究采用的概率-区间混合不确定模型为表 2 中的Ⅲ、Ⅳ 2 类。能流求解过程中的难点在于处理概率和区间 2 种表示方式下的混合不确定性模型。解决上述难点的第 1 种思路为消除区间变量后采用概率方法进行求解。文献[92]基于概率方法中的半不变量法，将随机变量的累积量拓展为累积量区间，结合级数展开求解热电联产微电网的能流；在文献[92]的基础上，文献[93]改进了 $2m+1$ 点估计法，对每个分布参数区间化的随机变量取 3 个区间，采用非迭代的区间算法进行热电综合系统的能流求解。第 2 种思路则是先对随机变量进行采样，将原问题转化为区间能流求解问题。文献[90]对混合不确定性变量进行两阶段采样，首先将原问题转化为区间能流问题，再转化为确定性能流问题，最后采用经典牛顿-拉夫逊法求解。文献[83]基于证据理论建立了具有可信度的区间模型，进而通过区间优化法求解，得到系统状态变量的信任分配函数。

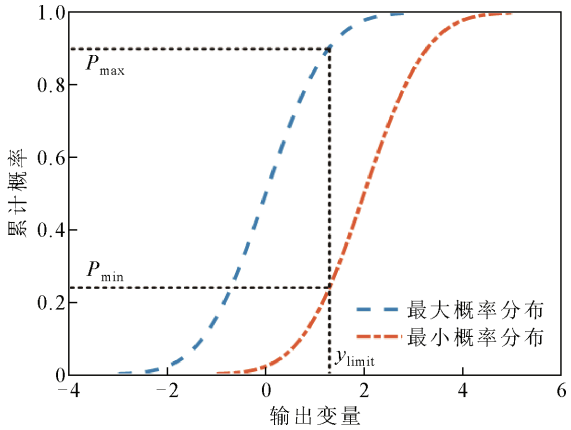


图 7 概率盒示意图

Fig.7 Diagram of probability box

表 2 概率-区间混合不确定性形式

Table 2 Hybrid probability and interval uncertainty forms

类型	文献	混合不确定性形式	特点
Ⅰ	[83]	$P=\begin{cases}\left[P^1,P^2\right], & m=m^1\\ \left[P^2,P^3\right], & m=m^2\\ \vdots\\ \left[P^N,P^{N+1}\right], & m=m^N\end{cases}$ 基于证据理论的不确定性区间基本可信度分配，即采用若干个携带概率信息的区间构成不确定性变量	当统计信息越多，分隔区间越多，越趋近于概率密度分布；统计信息少时则趋于区间变量形式。是介于区间和概率的一种建模方式
Ⅱ	[84]	$P=\begin{cases}u-z_{\alpha/2}\sigma/\sqrt{n}<\mu<u+z_{\alpha/2}\sigma/\sqrt{n}\\ 0<\alpha<1\end{cases}$ 根据历史数据 n 个样本的均值 μ、标准差 σ 获取预测结果和置信区间，共同构成的区间概率新型不确定集，表现为带有概率的预测区间	将不确定集与历史数据的关键信息关联，能有效避免预测过程中的信息损失
Ⅲ	[85-91]	$Y=f\left(X^{\mathrm{R}},X^{\mathrm{I}}\right)$ 包含随机变量 X^{R} 和区间变量 X^{I} 的混合不确定性建模	根据不确定性输入的信息获取情况分别构建概率模型和区间模型，能够考虑多源不确定性
Ⅳ	[92-94]	$f\left(W_{\mathrm{L}}\right)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\mathrm{L}}}\exp\left(\frac{-\left(W_{\mathrm{L}}-\mu_{\mathrm{L}}\right)^2}{2\sigma_{\mathrm{L}}^2}\right)$ $\begin{cases}\left[\mu_{\mathrm{L}}\right]=\left[\underline{\mu}_{\mathrm{L}},\overline{\mu}_{\mathrm{L}}\right]\\ \left[\sigma_{\mathrm{L}}^2\right]=\left[\underline{\sigma}_{\mathrm{L}}^2,\overline{\sigma}_{\mathrm{L}}^2\right]\end{cases}$ 基于不确定性变量概率模型，对其分布参数进行区间建模	考虑了测量误差等认知不确定性因素对概率模型的影响

以上方法基于已有的概率方法和区间方法进行改进，但仍存在原有方法的一些局限性，例如半不变量法的精度受限于系统的非线性程度、区间方法存在区间扩张可能会导致结果保守性增加。为提高概率-区间混合不确定性能流计算的精度和效率，已有学者提出基于稀疏多项式混沌展开(sparse polynomial chaos expansion, sPCE)的代理模型，近似表达输入随机变量和输出响应之间的关系。文献[85]结合降维和 sPCE 模型，提出了一种适用于高维混合不确定性的电-气互联系统能流计算方法，相比基于拉丁立方采样的蒙特卡洛模拟法具有更小的计算量。构建该模型首先需要输入输出样本，为进一步提升模型效率，文献[86，89]构建了双层代理模型，添加径向基函数、异构学习器等上层模型，其结果用于训练下层 sPCE 代理模型，加速非线性能流方程的计算过程。代理模型本质上是一种数据驱动的高普适性黑盒模型，因其低计算时间成本而受到关注。然而代理模型需要大量样本和数据，处理非线性程度高的系统时误差可能被放大，且对高维不确定性进行抽样可能陷入“维数灾难”，以上问题是代理模型研究需要进一步改进和发展的重点。

2.4 小结

与区间模型相比，概率模型不仅保留了不确定因素的区间信息，还能够反映区间范围内取值的概率信息，这使得概率能流的结果可以为系统分析提供更多参考信息。但与此同时，求解保留更多特征的模型需要以计算效率为代价。概率能流求解方法中，模拟法和近似法基于采样和重复计算，计算耗时长；解析法采用变量特征的卷积计算改善以上 2 种方法的不足，才能接近区间方法的计算效率。此外，综合能源系统尚处于发展初期，缺少足够的历史运行数据。在此情况下，区间能流方法仅需区间边界信息即可实现系统的不确定性能流分析，具有较好的适用性。

概率-区间能流是概率能流和区间能流的进一步发展。从不确定性表示方式来看，概率-区间混合不确定性模型一方面能够考虑随机变量和区间变量 2 种不确定性变量，兼容多源不确定因素之间的模型差异，在耦合多种能源网络的综合能源系统中具有更广阔的应用空间；另一方面能够考虑客观不确定性特征提取过程中产生的主观认知不确定性，获得更加全面的不确定性模型。从求解方法上来看，将混合不确定性变量转化为随机变量或区间变量后能够沿用原有的概率方法或区间方法。此外，为了适应高维的混合不确定性，发展出数据驱动模型及计算方法。随着监测系统的日益完善，在充足的数据和样本支撑下，数据驱动模型能够用于更高效率、更高精度的系统不确定性分析。

3 应用与展望

3.1 能流计算应用

1）综合能源系统运行安全分析

能流计算可以根据源荷情况获取能流分布和系统状态，是系统运行安全分析的重要方法。一方面，能流计算可以评估系统的运行状态。例如，获取系统稳定边界，检验系统当前工作点是否处于安全域内[95-96]；通过建立可靠性指标判断系统状态[97]，量化系统运行风险[98]，为后续控制方案决策提供参考。另一方面，能流计算可以用于系统安全检查校核。例如，通过能流计算预演预想事故集，对综合能源系统进行 $N-1$ 安全校验与分析[99-100]，评估系统性能；通过能流结果计算综合指标，辨识系统薄弱环节，分析系统应对不确定性波动的能力和极端事件的能力[101-102]，提出维护系统稳定的最佳策略[103]，为综合能源系统优化调度提供基础。

2）综合能源系统能流拓展分析方法

能流计算能够获取综合能源系统的功率流分布，基于系统功率流分布，发展出将能源品质、碳排放、信息等变量与综合能源网络属性结合的㶲流、熵增流、碳流、信息流等模型与分析方法，如表 3 所示[104-113]。

以上分析方法体系建立在系统能流分布的基础上，是能流计算的进一步应用。从应用场景来看，能流关注基本的系统功率平衡；㶲流反映能源转换过程中能源品质的变化，熵增流反映系统能量不可用部分，进一步关注了综合能源系统的能量品质与用能效率；碳流实现能源生产碳排放在全过程环节的责任划分，关注系统低碳减排需求；信息流则考虑了综合能源系统的信息物理融合特性。不同的研究主体具有清晰的应用场景，丰富了综合能源系统的分析理论体系及其工程应用价值。

表 3 综合能源系统能流拓展分析方法

Table 3 Energy flow extension methods of IES

理论	主体	应用
㶲流[104-106]	衡量能源品质的㶲	评估系统有效能利用情况，研究市场能源㶲交易
熵增流[107]	描述系统变化的熵	剖析系统能量熵增机理，分析能源综合利用情况
碳流[108-109]	碳排放量	计算碳排放指标，追踪碳轨迹与划分碳责任，低碳经济调度[110]
信息流[111-112]	系统通信信息	分析能量流信息流交互影响，辨识信息物理薄弱环节[113]

3.2 未来研究展望

通过能流计算明晰系统状态对系统分析与控制具有重要意义，目前该领域的研究已取得一定的成果，但仍有部分问题需要解决，未来深入探索的工作可从以下几个方面展开。

1）综合能源系统数字孪生

数字孪生技术能将现实空间的综合能源系统映射到虚拟数字空间，进而开展各项分析研究。能流计算服务于数字孪生的核心仿真环节，准确的能流计算是数字孪生精准镜像能力的保证。

提升能流计算的准确性，首先需要提升模型精度。为便于求解，当前能流计算所采用的模型经过多次假设和简化，模型精度有待提升。未来可采取以下方案提高模型精度，例如耦合元件的精细建模、考虑热网质-量混合调节模式等。再者，能流计算基于现有信息对系统进行分析，因此还需要提升环境和人为等外部因素的刻画能力。在不确定性分析研究中，随着更多分布式电源和新型负荷的接入，经典概率分布模型可能不再适用，因此分布模型有待改善，以更好拟合可再生能源出力或负荷与影响因素的关系。人为因素方面，研究人员尝试以概率-区间不确定性模型体现信息不完备、知识水平限制产生的人为认知不确定性。除了不确定性分析，在极端事件系统运行、人员调度控制等场景下需要更强的外部因素刻画能力，为能流计算提供可靠输入信息。

2）综合能源系统能流在线计算

综合能源系统在线计算是综合能量管理系统的重要组成部分，通过实时计算系统状态，为在线监测、安全控制、优化调度等应用提供基础参考结果。因此有必要研究灵活高效的能流计算方法，满足在线计算的要求。

一方面，在线计算需要具有自适应性的系统模型，匹配综合能源系统实际运行状况。针对不同的规模和运行方式下的综合能源系统，可考虑构建多场景模型库，匹配在线计算需求。在动态能流计算过程中，则需要研究自适应匹配仿真步长方法，实现多时间尺度能流的协同。另一方面，在线计算对能流计算方法的效率提出了更高的要求。综合能源系统涉及多种能源网络，可考虑将原问题拆解为若干子问题的分布式求解方法，通过降低待求解问题维度以及采用并行计算方法提高求解效率。此外，

代理模型、人工智能等数据驱动方法通过大数据分析指导模型建立，拟合复杂的非线性关系，有望提供一种离线训练、在线求解的模式。应用数据驱动方法，在输入实时数据后可快速得到结果，能够极大程度提升能流求解效率，对能流在线计算具有重要意义。

4 结论

复杂的能流耦合和外界不确定因素的影响给综合能源系统运行控制带来了一系列挑战。作为系统分析的重要环节，能流计算受到了学术界的广泛研究。本文从综合能源系统建模入手，梳理了确定性和不确定性能流模型与求解方法，并进行总结和比较，最后结合研究难点展望未来发展方向。本文旨在通过介绍能流计算的现有研究与最新进展，总结当下能流计算研究面临的挑战，为后续研究提供参考。

参考文献 References

[1] 江茂泽. 输配气管网的模拟与分析[M]. 北京：石油工业出版社，1995：1-18.
JIANG Maoze. Simulation and analysis of gas transmission and distribution network[M]. Beijing, China: Petroleum Industry Press, 1995: 1-18.

[2] 宋 涛. 天然气管网特征线法动态仿真分析[D]. 西安：西安石油大学，2015.
SONG Tao. Dynamic simulation analysis of natural gas pipeline network in method of characteristics[D]. Xi'an, China: Xi'an Shiyou University, 2015.

[3] 由世俊，米雷洋，王雅然，等. 集中供热管网的非稳态水力建模与动态响应分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版)，2019，52(8)：849-856.
YOU Shijun, MI Leiyang, WANG Yaran, et al. Unsteady hydraulic modeling and dynamic response analysis of a district heating network[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52(8): 849-856.

[4] 王 娜. 集中供热管网动态水力、热力工况特性计算与分析[D]. 天津：天津大学，2019.
WANG Na. Numerical method and dynamic charactertistic analysis of the thermal and hydraulic transients in district heating network[D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2019.

[5] DUQUETTE J, ROWE A, WILD P. Thermal performance of a steady state physical pipe model for simulating district heating grids with variable flow[J]. Applied Energy, 2016, 178: 383-393.

[6] 卫志农，梅建春，孙国强，等. 电-气互联综合能源系统多时段暂态能量流仿真[J]. 电力自动化设备，2017，37(6)：41-47.
WEI Zhinong, MEI Jianchun, SUN Guoqiang, et al. Multi-period transient energy-flow simulation of integrated power and gas energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 41-47.

[7] HUANG Y J, SUN Q Y, LI Y S, et al. A multi-rate dynamic energy flow analysis method for integrated electricity-gas-heat system with different time-scale[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(1): 231-243.

[8] 刘 洪，赵晨晓，葛少云，等. 基于精细化热网模型的电热综合能源系统时序潮流计算[J]. 电力系统自动化，2021，45(4)：63-72.
LIU Hong, ZHAO Chenxiao, GE Shaoyun, et al. Sequential power flow calculation of power-heat integrated energy system based on refined heat network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 63-72.

[9] 曾艾东，王佳伟，邹宇航，等. 考虑供热管网储热的综合能源系统多时间尺度优化调度[J]. 高电压技术，2023，49(10)：4192-4202.
ZENG Aidong, WANG Jiawei, ZOU Yuhang, et al. Multi-time-scale optimal scheduling of integrated energy system considering heat storage characteristics of heating network[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4192-4202.

[10] 欧阳自强，韩鹏飞，严 正，等. 计及双向耦合的气-电综合能源系统全动态多速率联合仿真算法研究[J]. 中国电机工程学报，2022，42(17)：6170-6184.
OUYANG Ziqiang, HAN Pengfei, YAN Zheng, et al. Research on complete dynamic multi-rate co-simulation algorithm of integrated electric-gas energy system with two-way coupling[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17): 6170-6184.

[11] WANG Y R, YOU S J, ZHANG H, et al. Thermal transient prediction of district heating pipeline: optimal selection of the time and spatial steps for fast and accurate calculation[J]. Applied Energy, 2017, 206: 900-910.

[12] BETANCOURT SCHWARZ M, MABROUK M T, SANTO SILVA C, et al. Modified finite volumes method for the simulation of dynamic district heating networks[J]. Energy, 2019, 182: 954-964.

[13] BEN HASSINE I, EICKER U. Impact of load structure variation and solar thermal energy integration on an existing district heating network[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50(2): 1437-1446.

[14] 王 程，吴科宏，贾起越，等. 基于显式差分的区域电-气综合能源系统动态能流计算方法[J]. 中国电机工程学报，2022，42(16)：5775-5785.
WANG Cheng, WU Kehong, JIA Qiyue, et al. An explicit difference based calculation method for dynamic energy flow of integrated electric-gas systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5775-5785.

[15] 董 帅，王成福，徐士杰，等. 计及网络动态特性的电-气-热综合能源系统日前优化调度[J]. 电力系统自动化，2018，42(13)：12-19.
DONG Shuai, WANG Chengfu, XU Shijie, et al. Day-ahead optimal scheduling of electricity-gas-heat integrated energy system considering dynamic characteristics of networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 12-19.

[16] 陈彬彬，孙宏斌，陈瑜玮，等. 综合能源系统分析的统一能路理论(一)：气路[J]. 中国电机工程学报，2020，40(2)：436-443.
CHEN Binbin, SUN Hongbin, CHEN Yujin, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (I): gaseous circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 436-443.

[17] 陈彬彬，孙宏斌，尹冠雄，等. 综合能源系统分析的统一能路理论(二)：水路与热路[J]. 中国电机工程学报，2020，40(7)：2133-2142.
CHEN Binbin, SUN Hongbin, YIN Guanxiong, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (II): hydraulic circuit and thermal circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2133-2142.

[18] 杨经纬，张 宁，康重庆. 多能源网络的广义电路分析理论——(一)支路模型[J]. 电力系统自动化，2020，44(9)：21-32.
YANG Jingwei, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Analysis theory of generalized electric circuit for multi-energy networks—part one branch model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 21-32.

[19] 杨经纬，张 宁，康重庆. 多能源网络的广义电路分析理论——(二)网络模型[J]，电力系统自动化，2020，44(10)：10-21.
YANG Jingwei, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Analysis theory of generalized electric circuit for multi-energy networks—part two network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 10-21.

[20] 张苏涵，顾 伟，姚 帅，等. 综合能源网络统一建模及其应用(二)：复频域增广模型与时、频模型对比[J]. 中国电机工程学报，2022，

42(16)：5798-5810.
ZHANG Suhan, GU Wei, YAO Shuai, et al. Unified modeling of integrated energy networks in time domain and its applications (II): augmented model in complex frequency domain and comparison between time/frequency domain models[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5798-5810.

[21] 陈彬彬，孙宏斌，吴文传，等. 综合能源系统分析的统一能路理论(三)：稳态与动态潮流计算[J]. 中国电机工程学报，2020，40(15)：4820-4830.
CHEN Binbin, SUN Hongbin, WU Wenchuan, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (III): steady and dynamic energy flow calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4820-4830.

[22] 王　丹，李思源，刘　柳，等. 输气系统管网延时稳态建模与特性研究[J]. 中国电机工程学报，2020，40(2)：467-476.
WANG Dan, LI Siyuan, LIU Liu, et al. Steady state modeling and characteristics study of delay in gas transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 467-476.

[23] 许康平，王　程，毕天姝. 基于气网动态代理模型的电-气综合能源系统最优能流计算[J]. 中国电机工程学报，2023，43(9)：3415-3428.
XU Kangping, WANG Cheng, BI Tianshu. Optimal energy flow calculation of integrated electric-gas systems based on gas network dynamic surrogate model[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(9): 3415-3428.

[24] MENON E S. Gas pipeline hydraulics[M]. Boca Raton, USA: CRC Press, 2005.

[25] LIU X Z, WU J Z, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Applied Energy, 2016, 162: 1238-1250.

[26] 韩　赫，张沛超，杜　炜，等. 量调节方式下区域热电系统的联合最优潮流[J]. 电力系统自动化，2021，45(2)：30-36.
HAN He, ZHANG Peichao, DU Wei, et al. Joint optimal power flow of district heat-electric system in quantity regulation mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 30-36.

[27] 王英瑞，曾　博，郭　经，等. 电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J]. 电网技术，2016，40(10)：2942-2950.
WANG Yingrui, ZENG Bo, GUO Jing, et al. Multi-energy flow calculation method for integrated energy system containing electricity, heat and gas[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2942-2950.

[28] 夏　天，陈瑜玮，郭庆来，等. 基于 PSASP 的电热耦合能源系统潮流计算[J]. 电力自动化设备，2017，37(6)：55-61.
XIA Tian, CHEN Yuwei, GUO Qinglai, et al. Power flow calculation based on PSASP for combined thermal and electric energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 55-61.

[29] 孙宏宇，张沛超，杜　炜，等. 基于功率守恒原理的电热联合系统潮流计算方法[J]. 电力自动化设备，2020，40(11)：54-60.
SUN Hongyu, ZHANG Peichao, DU Wei, et al. Power flow calculation method of integrated electricity and heat system based on power conservation principle[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 54-60.

[30] 谢煜铨，林舜江，杨悦荣，等. 基于对角加边模型和最优乘子法的冷热电联供园区微网能量流计算[J]. 电网技术，2020，44(6)：2271-2280.
XIE Yuquan, LIN Shunjiang, YANG Yuerong, et al. Energy flow calculation of CCHP campus micro-grid based on block bordered-diagonal form model and optimal multiplier method[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2271-2280.

[31] 杨智斌，林舜江，王雅平，等. 冷热电联供微网能量流的解耦计算方法[J]. 电网技术，2017，41(12)：3876-3883.
YANG Zhibin, LIN Shunjiang, WANG Yaping, et al. A decoupling method for energy flow calculation of microgrids with combined cooling, heating and power[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3876-3883.

[32] 赵　霞，孙名轶，李欣怡，等. 面向区域综合能源服务的电-水联合潮流[J]. 电力自动化设备，2020，40(12)：23-30，41.
ZHAO Xia, SUN Mingyi, LI Xinyi, et al. Combined load flow of integrated electricity-water system for regional multi-energy service[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 23-30, 41.

[33] 王伟亮，王　丹，贾宏杰，等. 考虑天然气网络状态的电力-天然气区域综合能源系统稳态分析[J]. 中国电机工程学报，2017，37(5)：1293-1304.
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Steady state analysis of electricity-gas regional integrated energy system with consideration of NGS network status[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1293-1304.

[34] MARTINEZ-MARES A, FUERTE-ESQUIVEL C R. A unified gas and power flow analysis in natural gas and electricity coupled networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2156-2166.

[35] 高鹏飞，周孝信，杨小煜，等. 计及异质气体混合的电-气-热综合能源系统能量流计算方法[J]. 电网技术，2021，45(7)：2523-2533.
GAO Pengfei, ZHOU Xiaoxin, YANG Xiaoyu, et al. Energy flow calculation of integrated electricity, natural gas and heating systems considering mixtures of gas with alternative qualities[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2523-2533.

[36] 赵　霞，王　骆，谭　红，等. 适用于压缩机定速控制的电-气综合能流计算方法[J]. 电力系统自动化，2022，46(21)：116-124.
ZHAO Xia, WANG Luo, TAN Hong, et al. Calculation method of integrated electricity-gas energy flow for compressors with constant speed control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 116-124.

[37] 赵　霞，杨　仑，瞿小斌，等. 电-气综合能源系统能流计算的改进方法[J]. 电工技术学报，2018，33(3)：467-477.
ZHAO Xia, YANG Lun, QU Xiaobin, et al. An improved energy flow calculation method for integrated electricity and natural gas system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 467-477.

[38] 王舒萍，张沈习，程浩忠，等. 考虑天然气系统初值优化的综合能源系统改进多能流计算方法[J]. 电力自动化设备，2022，42(1)：28-36.
WANG Shuping, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Improved multi-energy flow calculation method for integrated energy system considering initial value optimization of natural gas system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 28-36.

[39] 苏洁莹，林楷东，张勇军，等. 基于统一潮流建模及灵敏度分析的电-气网络相互作用机理[J]. 电力系统自动化，2020，44(2)：43-52.
SU Jieying, LIN Kaidong, ZHANG Yongjun, et al. Interaction mechanism of electricity-gas network based on unified power flow modeling and sensitivity analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 43-52.

[40] 钟俊杰，李　勇，曾子龙，等. 综合能源系统多能流准稳态分析与计算[J]. 电力自动化设备，2019，39(8)：22-30.
ZHONG Junjie, LI Yong, ZENG Zilong, et al. Quasi-steady-state analysis and calculation of multi-energy flow for integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 22-30.

[41] 李卫东，马　俊，胡幸集，等. 城市综合能源网统一前推回代能流计算方法[J]. 电力自动化设备，2022，42(9)：1-8.
LI Weidong, MA Jun, HU Xingji, et al. Unified energy flow calculation of back/forward sweep method in urban integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(9): 1-8.

[42] KEIHAN ASL D, SEIFI A R, RASTEGAR M, et al. Optimal energy flow in integrated energy distribution systems considering unbalanced operation of power distribution systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 121: 106132.

[43] MASSRUR H R, NIKNAM T, AGHAEI J, et al. Fast decomposed energy flow in large-scale integrated electricity-gas-heat energy systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(4): 1565-1577.

[44] ZHANG T, LI Z G, ZHENG J H, et al. Power flow analysis of inte-

grated gas and electricity systems using the fast and flexible holomorphic embedding method[C]// 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Montreal, Canada: IEEE, 2020: 1-5.

[45] SUN Y G, DING T, SHAHIDEHPOUR M. A multi-variable analytical method for energy flow calculation in natural gas systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(2): 1767-1770.

[46] CHEN K, SUN K Y, LIN L. Steady-state flow analysis of district heating system using the holomorphic embedding[C]// 2022 Power System and Green Energy Conference. Shanghai, China: IEEE, 2022: 699-704.

[47] 朱 溪，苏晨博，刘教民. 基于 RVM 和全纯嵌入法的考虑多风电场出力相关性的电-热互联概率能流计算方法[J]. 可再生能源，2021，39(6)：832-839.
ZHU Xi, SU Chenbo, LIU Jiaomin, et al. Probabilistic energy flow calculation method based on RVM and holomorphic embedding method considering correlation of multiple wind farms[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(6): 832-839.

[48] 曾 博，胡 强，刘 裕，等. 考虑需求响应复杂不确定性的电-气互联系统动态概率能流计算[J]. 中国电机工程学报，2020，40(4)：1161-1171.
ZENG Bo, HU Qiang, LIU Yu, et al. Dynamic probabilistic energy flow calculation for interconnected electricity-gas system considering complex uncertainties of demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1161-1171.

[49] 陈 胜，卫志农，孙国强，等. 电-气混联综合能源系统概率能量流分析[J]. 中国电机工程学报，2015，35(24)：6331-6340.
CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Probabilistic energy flow analysis in integrated electricity and natural-gas energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6331-6340.

[50] 孙 娟，卫志农，孙国强，等. 计及 P2H 的电-热互联综合能源系统概率能量流分析[J]. 电力自动化设备，2017，37(6)：62-68.
SUN Juan, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Analysis of probabilistic energy flow for integrated electricity-heat energy system with P2H[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 62-68.

[51] 杨家豪. 区域综合能源系统冷-热-电-气概率多能流计算[J]. 电网技术，2019，43(1)：74-82.
YANG Jiahao. Probabilistic multi-energy flow calculation for regional integrated energy system containing cooling, heating, electricity and gas[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 74-82.

[52] HU X Y, YANG L, ZHAO X, et al. Probabilistic energy flow analysis for urban energy systems considering correlated uncertainties[J]. Energy Procedia, 2019, 158: 6472-6477.

[53] CHEN S, WEI Z N, SUN G Q, et al. Multi-linear probabilistic energy flow analysis of integrated electrical and natural-gas systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 1970-1979.

[54] 靳康萌，张 沛，邓晓洋，等. 基于 K-means 聚类技术改进的多线性蒙特卡洛概率能流算法[J]. 电网技术，2019，43(1)：65-74.
JIN Kangmeng, ZHANG Pei, DENG Xiaoyang, et al. Improved multi-linear monte carlo probabilistic energy flow calculation method based on K-means clustering technique[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 65-74.

[55] 刘 宇，高 山，杨胜春，等. 电力系统概率潮流算法综述[J]. 电力系统自动化，2014，38(23)：127-135.
LIU Yu, GAO Shan, YANG Shengchun, et al. Review on algorithms for probabilistic load flow in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 127-135.

[56] MASSRUR H R, NIKNAM T, FOTUHI-FIRUZABAD M. Investigation of carrier demand response uncertainty on energy flow of renewable-based integrated electricity-gas-heat systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(11): 5133-5142.

[57] DENG X Y, ZHANG P, LIU H, et al. An improved cumulant-based probabilistic energy flow computation method for integrated electricity and natural gas systems[C]// 8th Renewable Power Generation Conference. Shanghai, China: IEEE, 2019: 1-7.

[58] 廖星星，吴 奕，卫志农，等. 基于 GMM 及多点线性半不变量法的电-热互联综合能源系统概率潮流分析[J]. 电力自动化设备，2019，39(8)：55-62.
LIAO Xingxing, WU Yi, WEI Zhinong, et al. Probabilistic power flow analysis of integrated electricity-heat energy system based on GMM and multi-point linear cumulant methond[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 55-62.

[59] 刘一童，李本新. 计及风电相关性的电-气综合能源系统概率能量流分析[J]. 东北电力大学学报，2023，43(2)：39-47.
LIU Yitong, LI Benxin. Probabilistic energy flow analysis for electricity-gas integrated energy systems with wind power correlation[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2023, 43(2): 39-47.

[60] HU Y, LIAN H R, BIE Z H, et al. Unified probabilistic gas and power flow[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(3): 400-411.

[61] 黎晨阳，张沈习，程浩忠，等. 计及相关性的电-气互联区域综合能源系统概率多能流计算[J]. 电力系统自动化，2020，44(21)：42-49.
LI Chenyang, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Correlation-based probabilistic multi-energy flow calculation of regional integrated energy system with combined electricity and natural gas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 42-49.

[62] 张儒峰，姜 涛，李国庆，等. 基于最大熵原理的电-气综合能源系统概率能量流分析[J]. 中国电机工程学报，2019，39(15)：4430-4440.
ZHANG Rufeng, JIANG Tao, LI Guoqing, et al. Maximum entropy based probabilistic energy flow calculation for integrated electricity and natural gas systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4430-4440.

[63] GUO X X, BAO H B, XIAO J, et al. A solution of interval power flow considering correlation of wind power[J]. IEEE Access, 2021(9): 78915-78924.

[64] 丁 涛，崔翰韬，顾 伟，等. 基于区间和仿射运算的不确定潮流算法[J]. 电力系统自动化，2012，36(13)：51-55，115.
DING Tao, CUI Hantao, GU Wei, et al. An uncertainty power flow algorithm based on interval and affine arithmetic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13): 51-55, 115.

[65] DING T, LI F X, LI X, et al. Interval radial power flow using extended DistFlow formulation and Krawczyk iteration method with sparse approximate inverse preconditioner[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(14): 1998-2006.

[66] 伍惠铖，王 淳，刘 宽，等. 电-热综合能源系统能流的区间计算算法[J]. 电网技术，2019，43(1)：91-99.
WU Huicheng, WANG Chun, LIU Kuan, et al. An interval energy flow calculation method for integrated electro-thermal energy system[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 91-99.

[67] QIAO Z, GUO Q L, SUN H B, et al. An interval gas flow analysis in natural gas and electricity coupled networks considering the uncertainty of wind power[J]. Applied Energy, 2017, 201: 343-353.

[68] 王文学，胡 伟，孙国强，等. 电-热互联综合能源系统区间潮流计算方法[J]. 电网技术，2019，43(1)：83-90.
WANG Wenxue, HU Wei, SUN Guoqiang, et al. Interval energy flow calculation method of integrated electro-thermal system[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 83-90.

[69] CHEN Y X, JIANG Y W. Interval energy flow calculation method for electricity-heat-hydrogen integrated energy system considering the correlation between variables[J]. Energy, 2023, 263: 125678.

[70] 王树洪，邵振国. 考虑 DG 运行不确定性的复仿射 Ybus 高斯迭代区间潮流算法[J]. 电力自动化设备，2017，37(3)：38-44.
WANG Shuhong, SHAO Zhenguo. Interval power-flow algorithm based on complex affine Ybus-Gaussian iteration considering uncertainty of DG operation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 38-44.

[71] 李壹民，邵振国，黄圆皓，等. 电-热综合能源系统仿射型区间多能流算法[J]. 中国电机工程学报，2023，43(9)：3429-3443.

LI Yimin, SHAO Zhenguo, HUANG Yuanhao, et al. Interval multi-energy flow algorithm for integrated heat and electricity system based on affine arithmetic[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(9): 3429-3443.

[72] LIAO X B, LIU K P, LE J, et al. Extended affine arithmetic-based global sensitivity analysis for power flow with uncertainties[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 115: 105440.

[73] 王守相，韩 亮. DG 出力不确定性对配电网影响力分析的复仿射数学方法[J]. 中国电机工程学报，2014，34(31)：5507-5515.
WANG Shouxiang, HAN Liang. Complex affine arithmetic based method for the analyses of DG's uncertainty influence on distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5507-5515.

[74] WANG S X, YUAN S C. Interval energy flow analysis in integrated electrical and natural-gas systems considering uncertainties[J]. Energies, 2019, 12(11): 2043.

[75] 胡 健，付立军，马 凡，等. 基于仿射算术优化的不确定系统区间潮流快速分解法[J]. 电工技术学报，2016，31(23)：125-131.
HU Jian, FU Lijun, MA Fan, et al. Fast decoupled power flow calculation of uncertainty system based on interval affine arithmetic optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(23): 125-131.

[76] WANG S X, LIU K F, MENG Z H. Affine algorithm for multi-energy flow calculation in integrated energy system with consideration of uncertainty[C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting. Atlanta, USA: IEEE, 2019: 1-5.

[77] 廖小兵，刘开培，李彧野，等. 基于混合潮流方程的区间潮流计算方法[J]. 高电压技术，2018，44(10)：3417-3424.
LIAO Xiaobing, LIU Kaipei, LI Yuye, et al. Interval power flow calculation method based on mixed power flow equations[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3417-3424.

[78] VACCARO A, CANIZARES C A, VILLACCI D. An affine arithmetic-based methodology for reliable power flow analysis in the presence of data uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 624-632.

[79] RAN X H, LENG S P, LIU K P. A novel affine arithmetic method with missed the triangular domain with uncertainties[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1430-1439.

[80] ZHANG C, CHEN H Y, NGAN H, et al. A mixed interval power flow analysis under rectangular and polar coordinate system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1422-1429.

[81] 陈飞雄，颜熙颖，邵振国，等. 电-气互联系统预测-校正型仿射能流算法[J/OL]. 电力自动化设备，2023：1-15[2024-03-07]. https://doi.org/10.16081/j. epae. 202311022.
CHEN Feixiong, YAN Xiying, SHAO Zhenguo, et al. Prediction-correction affine energy flow algorithm of integrated electricity and natural gas system[J/OL]. Electric Power Automation Equipment, 2023: 1-15[2024-03-07]. https://doi. org/10.16081/j. epae. 202311022.

[82] 邵振国，刘懿萱，张 嫣. 基于实测数据的风电场风速-功率特性仿射建模方法[J]. 电力自动化设备，2019，39(6)：96-101.
SHAO Zhenguo, LIU Yixuan, ZHANG Yan, et al. Affine modelling method of wind speed-power characteristics in wind farm based on measured data[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6): 96-101.

[83] 鲍海波，韦 化，郭小璇，等. 考虑风电不确定性的概率区间潮流模型与算法[J]. 中国电机工程学报，2017，37(19)：5633-5642.
BAO Haibo, WEI Hua, GUO Xiaoxuan, et al. Model and algorithm of probabilistic interval power flow considering wind power uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5633-5642.

[84] 王 灿，张雪菲，凌 凯，等. 基于区间概率不确定集的微电网两阶段自适应鲁棒优化调度[J/OL]. 中国电机工程学报，2023：1-14[2014-03-07]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJ&filename=ZGDC20230306008.
WANG Can, ZHANG Xuefei, LING Kai, et al. Two-stage adaptive robust optimal scheduling based on the interval probability uncertainty set for microgrids[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2023: 1-14 [2024-03-07]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJ&filename=ZGDC20230306008.

[85] HU X Y, ZHAO X, FENG X X. Probabilistic-interval energy flow analysis of regional integrated electricity and gas system considering multiple uncertainties and correlations[J]. IEEE Access, 2019, 7: 178209-178223.

[86] TIAN H, ZHAO H R, LI H R, et al. Interval-probabilistic electricity-heat-gas flow calculation by dual-level surrogate structure[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(6): 4333-4344.

[87] WANG C X, LIU D C, TANG F, et al. A clustering-based analytical method for hybrid probabilistic and interval power flow[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 126: 106605.

[88] LI Q, ZHAO N. A probability box representation method for power flow analysis considering both interval and probabilistic uncertainties[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 142: 108371.

[89] 王晨旭，唐 飞，刘涤尘，等. 基于双层代理模型的概率-区间潮流计算及灵敏度分析[J]. 电工技术学报，2022，37(5)：1181-1193.
WANG Chenxu, TANG Fei, LIU Dichen, et al. Probabilistic-interval power flow and sensitivity analysis using double layer surrogate method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(5): 1181-1193.

[90] GUO X X, GONG R X, BAO H B, et al. Hybrid stochastic and interval power flow considering uncertain wind power and photovoltaic power[J]. IEEE Access, 2019, 7: 85090-85097.

[91] LUO J Q, SHI L B, NI Y X. Uncertain power flow analysis based on evidence theory and affine arithmetic[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 1113-1115.

[92] XIE Y Q, LIN S J, LIANG W K, et al. Interval probabilistic energy flow calculation of CCHP campus microgrid considering interval uncertainties of distribution parameters[J]. IEEE Access, 2020, 8: 141358-141372.

[93] XIE Y Q, LIN S J, LIANG W K, et al. An interval probabilistic energy flow calculation method for CCHP campus microgrids[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(4): 6219-6230.

[94] 吴红斌，王旻洋，丁 明，等. 基于 AA-SVRPF 的配电网负荷供应能力不确定性评估[J]. 中国电机工程学报，2022，42(22)：8153-8163.
WU Hongbin, WANG Minyang, DING Ming, et al. Uncertainty evaluation of load supply capability for distribution network based on AA-SVRPF[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(22): 8153-8163.

[95] 肖 峻，宋晨辉，焦 衡，等. 基于能路的综合能源系统安全域稳态建模与求解[J]. 电力系统自动化，2023，47(19)：53-63.
XIAO Jun, SONG Chenhui, JIAO Heng, et al. Stability modeling and solution for security region of integrated energy system based on energy circuit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(19): 53-63.

[96] 刘承锡，于懿兰，赖秋频. 基于全纯嵌入法的电力系统高维电压稳定边界[J/OL]. 中国电机工程学报，2023：1-12[2024-03-07]. https://doi. org/10.13334/j. 0258-8013. pcsee. 230838.
LIU Chengxi, YU Yilan, LAI Qiupin. Analytical high-dimensional static voltage stability boundary based on holomorphic embedding method[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2023: 1-12[2024-03-07]. https://doi. org/10.13334/j. 0258-8013. pcsee. 230838.

[97] 李更丰，别朝红，王睿豪，等. 综合能源系统可靠性评估的研究现状及展望[J]. 高电压技术，2017，43(1)：114-121.
LI Gengfeng, BIE Zhaohong, WANG Ruihao, et al. Research status and prospects on reliability evaluation of integrated energy system[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 114-121.

[98] 朱继忠，骆腾燕，吴皖莉，等. 综合能源系统运行可靠性评估评述 Ⅰ：模型驱动法[J]. 电工技术学报，2022，37(11)：2761-2776.

ZHU Jizhong, LUO Tengyan, WU Wanli, et al. A review of operational reliability assessment of integrated energy systems Ⅰ: model-driven method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2761-2776.

[99] 陈厚合，邵俊岩，姜 涛，等. 基于多能流解耦算法的综合能源系统 *N*-1 静态安全分析[J]. 电力系统自动化，2019，43(17)：20-27，131.
CHEN Houhe, SHAO Junyan, JIANG Tao, et al. Static *N*-1 security analysis for integrated energy system based on decoupled multi-energy flow calculation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 20-27, 131.

[100] 于丰硕，孙宏斌，乔 铮，等. 电-气耦合综合能源系统准动态安全评估[J]. 电网技术，2023，47(9)：3681-3692.
YU Fengshuo, SUN Hongbin, QIAO Zheng, et al. Quasi-dynamic security assessment of integrated electricity and gas system[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3681-3692.

[101] 陈厚合，张 鹏，姜 涛，等. 基于灵敏度分析的综合能源系统运行安全性的研究[J]. 电力自动化设备，2019，39(8)：95-103.
CHEN Houhe, ZHANG Peng, JIANG Tao, et al. Security analysis based on sensitivity analysis for integrated electric and gas energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 95-103.

[102] 陈丽娟，刘 丽，周 昶，等. 计及运行风险与韧性的综合能源系统薄弱环节辨识[J]. 电力系统自动化，2022，46(6)：48-57.
CHEN Lijuan, LIU Li, ZHOU Chang, et al. Weakness identification of integrated energy systems considering operation risk and resilience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 48-57.

[103] 穆云飞，郭向伟，刘志彬，等. 基于灵敏度分析的电气耦合综合能源系统最小切负荷方法[J]. 高电压技术，2023，49(10)：4172-4181.
MU Yunfei, GUO Xiangwei, LIU Zhibin, et al. Minimum load shedding method of the integrated electricity-gas system based on sensitivity analysis[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4172-4181.

[104] 李家熙，王 丹，周天烁，等. 面向综合能源系统的(火用)流计算模型[J]. 电力系统自动化，2022，46(24)：45-56.
LI Jiaxi, WANG Dan, ZHOU Tianshuo, et al. Exergy flow calculation model for integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 45-56.

[105] 李家熙，王 丹，贾宏杰. 面向综合能源系统的烟流机理与分析方法[J]. 电力系统自动化，2022，46(12)：163-173.
LI Jiaxi, WANG Dan, JIA Hongjie. Exergy flow mechanism and analysis method for integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 163-173.

[106] 王 丹，周天烁，李家熙，等. 面向能源转型的高烟综合能源系统理论与应用[J]. 电力系统自动化，2022，46(17)：114-131.
WANG Dan, ZHOU Tianshuo, LI Jiaxi, et al. Theory and application of high-exergy integrated energy system for energy transition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17): 114-131.

[107] 李家熙，王 丹，贾宏杰，等. 面向可再生能源接入的综合能源系统熵态机理和分析方法[J]. 电力系统自动化，2023，47(9)：47-58.
LI Jiaxi, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Entropy state mechanism and analysis method of integrated energy system for integration of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 47-58.

[108] 王梦雪，赵浩然，刘春阳，等. 基于碳熵指标的电-热互联综合能源系统碳轨迹追踪方法[J]. 电力系统自动化，2023，47(9)：13-22.
WANG Mengxue, ZHAO Haoran, LIU Chunyang, et al. Carbon trajectory tracking method for electric-thermal interconnected integrated energy system based on carbon entropy index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 13-22.

[109] 汪超群，陈 懿，文福拴，等. 电力系统碳排放流理论改进与完善[J]. 电网技术，2022，46(5)：1683-1691.
WANG Chaoqun, CHEN Yi, WEN Fushuan, et al. Improvement and perfection of carbon emission flow theory in power systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1683-1693.

[110] 刘哲远，邢海军，程浩忠，等. 考虑碳排放流及需求响应的综合能源系统双层优化调度[J]. 高电压技术，2023，49(1)：169-178.
LIU Zheyuan, XING Haijun, CHENG Haozhong, et al. Bi-level optimal scheduling of integrated energy system considering carbon emission flow and demand response[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 169-178.

[111] 尹桥宣，段 斌，康灿平，等. 基于 HLA/Agent 的能源系统与信息通信系统联合仿真设计[J]. 电力系统自动化，2016，40(17)：22-29，58.
YIN Qiaoxuan, DUAN Bin, KANG Canping, et al. Design of energy system and cyber system co-simulation based on HLA/Agent[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 22-29, 58.

[112] 范 宏，王宏祥，张树卿. 综合能源信息物理系统的分层建模和能量-信息流混合计算方法[J]. 电网技术，2022，46(8)：3028-3039.
FAN Hong, WANG Hongxiang, ZHANG Shuqing. Hierarchical modeling and energy-information flow hybrid calculation of integrated energy cyber physical system[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3028-3039.

[113] 郑焕坤，吕婷婷，孙耀斌，等. 考虑信息设备故障的综合能源信息物理系统可靠性分析[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3078-3087.
ZHENG Huankun, LÜ Tingting, SUN Yaobin, et al. Reliability analysis of integrated energy cyber physical system considering information equipment failure[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3078-3087.



陈飞雄
1990—，男，博士，副教授，硕导
主要从事综合能源系统协同控制方面的研究
E-mail: feixiongchen@fzu.edu.cn

CHEN Feixiong
Ph.D.
Associate professor



邵振国(通信作者)
1970—，男，博士，教授，博导
主要从事能源系统不确定性理论与方法、电能质量分析与治理、电力大数据理论与方法方面的研究
E-mail: shao.zg@fzu.edu.cn

SHAO Zhenguo
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2023-11-29 修回日期 2024-03-10 编辑 程子丰