

电-气-热连锁故障多尺度仿真技术：挑战与展望

陆帅¹, 顾伟^{1*}, 俞睿智¹, 张苏涵², 徐一骏¹

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏省 南京市 210096;

2. 谢菲尔德大学电气与电子工程学院, 英国 谢菲尔德 S10 2TN)

Multi-scale Simulation of Cascading Failures in Integrated Electricity-gas-heat Systems: Challenges and Prospects

LU Shuai¹, GU Wei^{1*}, YU Ruizhi¹, ZHANG Suhan², XU Yijun¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, University of Sheffield, Sheffield S10 2TN, UK)

ABSTRACT: Integrated electricity-gas-heat energy systems can improve energy efficiency and support the integration of renewable energy by utilizing multi-energy synergy, serving as a central carrier to facilitate the transition of the energy structure and the "dual-carbon" strategy. However, the close coupling of electricity, gas, and heat systems increases the risk of fault propagation, where a local fault in a single subsystem can develop into a widespread multi-energy cascading failure (MECF). Considering this, this paper focuses on multi-scale simulation technologies for MECFs, systematically analyzing their typical features and scientific challenges, reviewing current research domestically and internationally, and identifying research gaps in dynamic failure modeling, efficient simulation computation, and cross-system awareness and prediction. Based on this, three key future research directions are proposed: 1) developing multi-scale simulation models for MECFs to capture the physics of local fault evolution and network-wide propagation; 2) advancing efficient and robust computational methods to solve high-dimensional, strongly stiff, and non-smooth systems; 3) establishing awareness and prediction techniques under significant information barriers to enable failure backtracking and assessment with limited data. This research aims to provide essential insights for establishing the safety defense theory of next-generation energy and power systems, offering theoretical support to ensure the secure operation of integrated energy and power systems.

KEY WORDS: integrated energy systems; multi-energy cascading failure; multi-scale simulation; numerical computation; strong information barrier; security analysis

摘要: 电-气-热综合能源系统通过多能协同提升能源效率、促进新能源消纳,是支撑能源结构转型与“双碳”战略的核心载体。然而,电-气-热紧密耦合加剧了故障传播风险,单一子系统的局部故障可演化为波及全局的多能连锁故障。鉴于此,该文聚焦电-气-热多能连锁故障多尺度仿真技术,系统剖析其典型特性与科学挑战,梳理国内外研究现状,总结当前研究在故障动态建模、高效仿真计算、跨系统感知预测等方面存在的不足。基于此,提出未来研究需突破的3大方向:构建多能连锁故障多尺度仿真模型,刻画故障局部演化与网络蔓延机理;发展高效鲁棒计算方法,解决高维度、强刚性、非光滑系统的解算难题;建立强信息壁垒下的感知预测方法,实现有限信息下的故障反演与评估。研究旨在为构建新一代能源电力系统安全防御理论提供参考,为保障电力能源系统安全运行提供理论支撑。

关键词: 综合能源系统; 多能连锁故障; 多尺度仿真; 数值计算; 强信息壁垒; 安全分析

0 引言

发展电-气-热耦合的综合能源系统,是能源电力领域推动能源结构转型、助力“双碳”战略的重要支撑。综合能源系统可通过电力、天然气、供热系统的协同互补,提高能源利用效率、促进新能源消纳^[1]。然而,其紧密耦合关系也加强了系统间的依赖性,给系统安全运行带来潜在风险^[2-3]:某一子系统的故障可通过耦合单元跨越系统边界、传播至与其耦合的其他系统,形成多能连锁故障,导致故障范围扩大甚至系统崩溃。本文将此类由单一子系统局部故障通过耦合环节跨系统传播、并引发一系列相关联的故障事件,最终导致全局性影响的过程,统一称为“多能连锁故障(multi-energy cascading

基金项目: 国家自然科学基金项目(52325703, 52577090)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52325703, 52577090).

failure)”，其核心特征是故障的跨领域传播与升级。

表 1 总结了近年来国内外典型多能连锁故障事件^[4-8]，包括较为著名的中国台湾省 8·15 大停电与美国得州大停电事件。2017 年 8 月 15 日 16 时，中国台湾省中油工作人员操作气阀失误导致天然气供应中断 10 min，桃园大潭电厂 6 台燃气机组跳机、解列，随即台中火力 5 号机跳机，16:51 起全省大停电，计 668 万户断电，殃及 17 个县市，影响范围遍布全省。2021 年 2 月 15 日至 19 日，美国得州遭遇极寒天气，大量天然气管线冰堵、设备冻结导致气源供应中断，燃气机组被迫停运，15 日停运机组容量达 5 227 万 kW，最高限电负荷超 1 600 万 kW，轮流停电人口超 450 万；更为严重的是，停

电使得天然气生产所需的电力设备无法运行(如抽水机和压缩机)，进一步加剧了天然气供应的中断。图 1 列举了部分典型多能连锁故障及其产生的级联影响。

当前，针对电力、天然气及供热等单一能源系统的故障分析已取得一定进展，并普遍采用以数值仿真为核心的研究范式。然而，此类研究在分析特定系统的故障时，受限于计算资源以及分析方法，常将其外部耦合的异质能源系统处理为静态边界条件，例如等效的能量源或负荷。这种处理方式忽略了系统间的动态交互与故障传播机制，无法反应由外部系统扰动引致的跨系统故障传播现象，也难以评估其可能造成的级联效应。同样地，该系统的

表 1 典型多能连锁故障案例

Table 1 Typical cases of multi-energy cascading failures

地点	时间	原因与过程	传播路径	影响
中国台湾省	2017 年 8 月 15 日 16:00	中油工作人员操作气阀失误，导致天然气供应中断 10 min，桃园大潭电厂 6 台燃气机组跳机、解列 ^[4] 。	气→电	668 万户、逾半用户断电，殃及 17 县市。
中国长春市	2019 年 1 月 19 日 18:00	净南乙线 22 号电缆升空站的电缆终端头击穿，造成净阳 220 kV 变电站全站失压，长春热电分公司 1、2 号机组保护跳闸、停机，供热中断 ^[5] 。	电→热	厂用电全失，机组停机，全厂停止对外供热，供暖受影响。
中国北京市	2021 年 6 月 16—2021 年 6 月 18 日	北京燃气集团管辖的天然气入厂进气总阀门电磁阀失电、关闭，天然气断供，高井热电厂 4 台机组停机 ^[6] 。	气→电	热电厂机组全停，损失功率 60.8 万 kW。
美国得州	2021 年 2 月 15 日—2021 年 2 月 19 日	寒潮天气下天然气井口冻结、输气管线冰堵，天然气减产约 45%，大量机组停运，供电短缺；电力中断导致天然气井口抽水泵、压缩机和净化设备无法运行，加剧天然气供应中断 ^[7] 。	气→电→气； 气→热	最高限电负荷超过 1 600 万 kW，超 450 万居民曾遭遇停电，至少 210 人因受冻失温等而不幸遇难。
英国威尔士	2024 年 12 月 10 日—2024 年 12 月 15 日	威尔士地区遭遇极端风暴天气，4 根电线杆、50 根架空线损坏，造成区域内近 10 年来的最大规模停电事件，由于失去电源，医院、学校以及偏远农村地区电采暖失效 ^[8] 。	电→热	超过 11 000 户电、热用户失去供能，风暴过后 3 天内电、热供能仍未恢复，造成 2 名居民死亡。

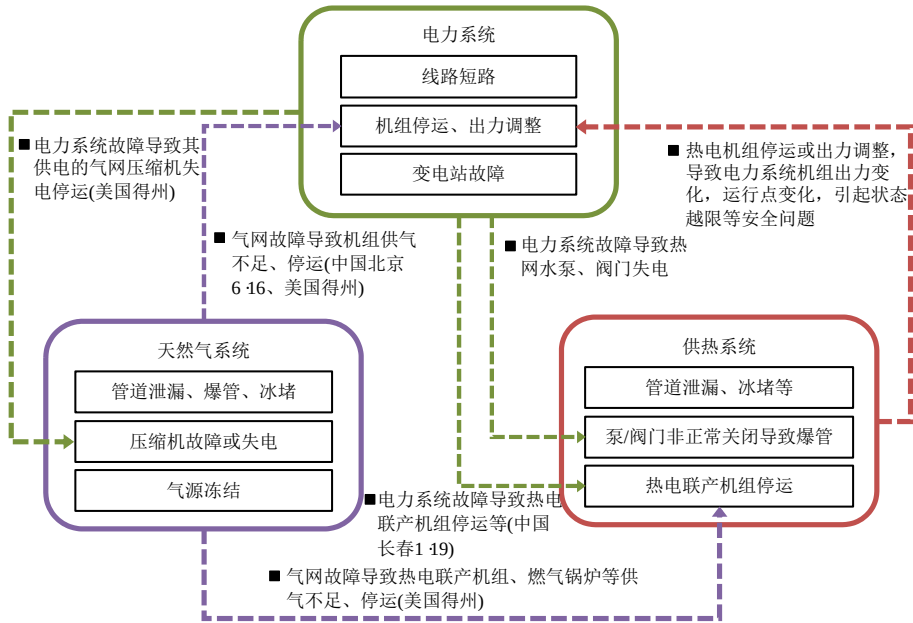


图 1 典型多能连锁故障及其可能产生的级联影响

Fig. 1 Typical multi-energy cascading failures and the possible cascading effects

内部故障对其外部系统的影响亦被忽视。因此，现有仿真分析范式极大限制了对综合能源系统整体安全性的认知。

以美国得州大停电事件为例，图2给出了该事件中多能连锁故障传播的基本原理：初始的管道冰堵导致气网节点1压力降低，其下游机组GT1首先失压跳机，同时极寒天气导致负荷激增，机组GT0随即增加出力以维持电网频率，加速了气网节点2的气压跌落速度，最终导致机组GT0在极短时间内跳机。针对该事件，如果沿用传统分析范式，将天然气网络简化为电力系统的静态或缓变边界条件，仅对电力系统进行仿真分析，则仿真模型将完全切断由电力系统动态响应反馈至天然气系统而产生的次生故障传播路径，即无法反映由机组GT0耗气量增大而引发的气网节点2气压加速跌落的过程，进而无法预测计算机组跳机时间、预估故障级联影响、及时制定预防控制策略。其关键之处在于，耦合系统间的相互作用是双向、动态的，一个系统的响应会成为另一个系统状态恶化的驱动力，形成恶性反馈循环。若采用传统方法，将耦合系统简化为静态或缓变的功率边界，则会切断此类动态反馈路径，导致对故障传播速度、广度和严重性的严重低估。由此亦可发现，多能连锁故障的初始诱因虽可能较为直观，但其引发的级联效应往往超出常规认知框架，甚至呈现与经验相悖的演化模式。综上，与单一系统的故障相比，多能连锁故障问题更为复杂，针对单一系统故障的仿真分析技术不再适用，亟需发展考虑多能动态耦合的新型仿真分析范式。

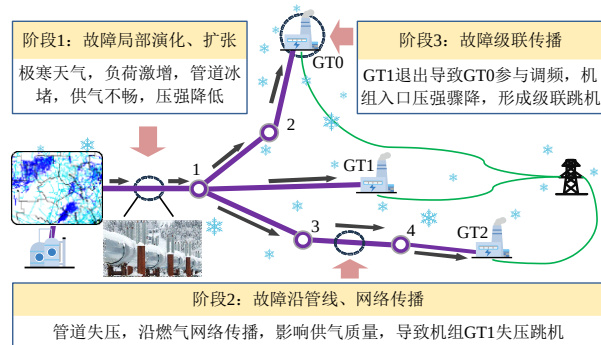


图2 美国得州电-气连锁故障传播过程
Fig. 2 Propagation process of electrical-gas chain failures in Texas, USA

现阶段，针对综合能源系统中的连锁故障研究尚处于起步阶段，其进展受限于多重壁垒。首先，该问题具有显著的跨学科特性，其物理机理横跨电气、能源与动力、土木工程等多个一级学科，领域

跨度宽、研究难度大；其次，由于连锁故障的传播机制涉及多领域专业知识，当前尚缺乏能够高效、精确建模此类复杂过程的集成仿真平台；最后，在多数国家，电力、天然气和供热系统分属不同实体运营，由此产生的行业壁垒与数据隔离问题，极大地限制了依赖数据的仿真分析与验证工作，也使得在实际的系统规划与运行决策中难以将连锁故障风险纳入考量。

在此背景下，亟需聚焦电-气-热多能连锁故障问题，探索其仿真分析理论方法，挖掘其多尺度级联传播机理。仿真作为科学研究的第三范式“计算范式”，是认识、应对多能连锁故障的基本手段与有力工具。建立多能连锁故障多尺度仿真分析理论与方法，对完善能源电力系统故障仿真分析技术体系，支撑能源电力系统安全可靠运行，助力能源电力系统实现“双碳”目标，具有理论开拓与实践指导意义。

鉴于此，本文聚焦于电-气-热多能连锁故障的多尺度仿真技术，梳理其典型特征，剖析现阶段所面临的核心挑战；在此基础上，从建模理论、计算方法和强信息壁垒问题3个方面探讨未来的研究方向和技术路径，以期构建新一代能源系统安全防护理论体系提供一定论支撑与参考。

1 典型特征与科学挑战

在物理过程方面，多能连锁故障是一个多物理机理深度耦合交织的复杂过程，如天然气管道的冰堵或泄漏故障是一个热力学/流体力学过程，故障随后可通过耦合单元触发电力系统的机电暂态过程，导致发电机跳机。在时空尺度方面，如图3所示，

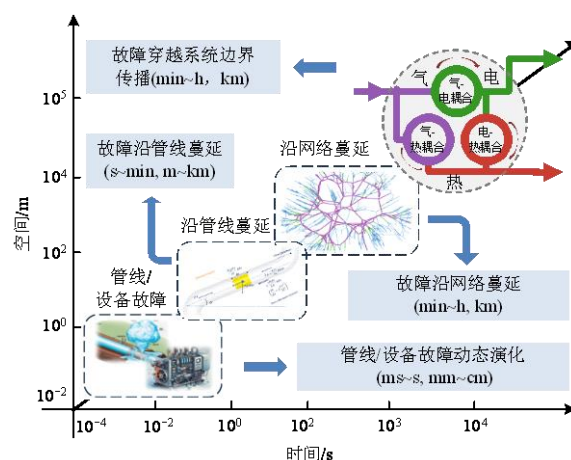


图3 多能连锁故障传播的多时空尺度特性
Fig. 3 Multiscale characteristics of multi-energy cascading fault propagation

故障传播过程在时间尺度上涵盖毫秒~秒~分钟~小时等多个时间尺度,在空间尺度上涵盖节点-管线-网络-系统等不同空间尺度。此外,在系统主体方面,电、气、热一般归属不同运营主体,技术水平、管理方式存在差异,信息安全要求高,信息壁垒问题突出。因此,多能连锁故障传播具有显著的多物理机理、多时空尺度、多运营主体特征,给其仿真分析带来了极大挑战。

1.1 典型特征

1.1.1 多物理机理

多能连锁故障始于系统局部节点的设备或管线故障。在故障局部演化环节,管线泄漏、冰堵、爆管过程涉及流体力学、热力学、材料力学等,其工质运动遵循 Weymouth 方程、水锤方程等不同规律,设备故障演化受机械运动、能量存储/释放、控制策略等影响,需要采用微分-代数方程进行描述。在故障沿管线/网络蔓延环节,流体压强、温度、流量的传播遵循质量、动量、能量 3 大守恒定律,通常采用偏微分-代数方程描述。在故障穿越系统边界环节,其传播过程依赖于具体的耦合设备,不同耦合设备能量转换方向与控制方式不同,其运行特性一般建模为微分-代数方程。因此,多能连锁故障传播过程是一个综合流体力学、热力学、材料力学、机电过程等多物理机理交织的复杂过程,数学模型为偏微分-微分-代数耦合系统,现有单一能流系统的故障仿真分析方法不再适用。

以得州大停电事件为例,天然气管线冰堵的形成过程是一个涉及流体力学与热力学的复杂问题;冰堵引发的气源中断导致燃气机组因燃料供应不足而跳机,属于电力系统机电暂态稳定的研究范畴;停电进一步造成天然气开采和输送设备(如压缩机)失电停运,又加剧了气源紧张局面。在热力学/流体力学/机电暂态等多物理过程的紧密耦合作用下,单一局部事件迅速演变为多环节逐步传导、多系统相互叠加的系统级灾难。

1.1.2 多时空尺度

如图 4 所示,在时间尺度上,流体压力波在管线中以声速传播(天然气管线中为 300~500 m/s,供热管线中为 700~1 500 m/s),时间尺度为毫秒级,电力系统机电暂态过程亦在毫秒级;管线泄漏、爆管等故障动态演变过程为秒~分钟级,冰堵过程为分钟~小时级;气/热网络输运过程为分钟~小时级^[11];由故障引发的系统运行状态改变到稳定运行

通常为分钟~小时级。在空间尺度上,多能连锁故障自管线、设备这一节点尺度起,其故障参数演变(如管线泄漏半径等)在毫米尺度;故障沿管线至网络逐步蔓延,跨越系统边界影响异质系统,空间尺度可达数千千米至数百千米。可见,多能连锁故障传播是一个时间上跨越毫秒~秒~分钟~小时、空间上跨越毫米~米~千米的多时空尺度问题。

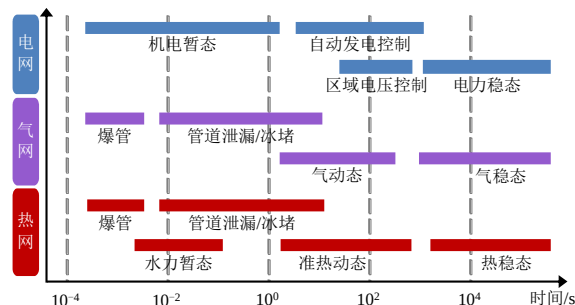


图4 电-气-热物理过程的时间尺度

Fig. 4 Time scales of the physical processes of electrical, heat, and gas

同样以得州大停电事件为例,当部分燃气机组因燃料中断而跳机时,电力系统频率在毫秒至秒级内发生剧烈跌落,这是一个快速的、遍及全系统的机电暂态过程。然而,导致这一快速故障的原因(天然气管线的冰堵和压力下降)是一个在数百公里外、分钟至小时尺度上缓慢演化的热力学与流体力学过程。这种快、慢动态的耦合与交织,叠加了故障从局部节点到区域网络乃至系统全局的空间尺度逐级扩展,反映了连锁故障的多尺度特性。因此,单一时间/空间尺度的仿真方法均难以同时精确刻画故障缓慢的演变过程与瞬时的系统崩溃,无法精准地还原其完整的演化全貌。

1.1.3 多运营主体(multi-agent)

目前,综合能源系统有两类运营方式,一类是电/气/热归属于不同运营主体(如中国),即多运营主体模式,另一类是电/气/热系统归属于同一运营主体(如英国),即单运营主体模式。在单运营主体下,系统运营商可以收集系统全局数据,对电-气-热进行联合建模、仿真。然而,在多运营主体下,系统运营商一般不会分享自身的系统配置、参数与运行信息,给多能连锁故障仿真分析带来两大挑战:1) 由于强信息壁垒的存在,子系统既难以预判耦合系统的内部故障是否会波及自身,也无法评估自身内部故障是否会对整体系统造成风险;特别地,对于可在多个子系统间级联传播且反向强化的连锁故障,更是缺乏有效的分析手段;2) 当某一系统内

部发生故障时, 与其存在耦合关系的子系统难以及时获取故障信息, 导致无法准确评估故障后的运行态势, 进而难以开展有效的预防与控制措施。

得州大停电事件的严重后果也暴露了“多运营主体”模式下的脆弱性: 电网运营商无法准确预知上游气源中断的规模与持续时间, 导致其负荷削减决策存在滞后; 天然气运营商也因大范围停电无法启动关键的增压和输送设备, 形成“断气-停电-更严重断气”的恶性循环, 最终导致灾难性后果。鉴于此, 亟需研究强信息壁垒下的多能连锁故障感知预测方法, 基于有限的耦合边界信息实现故障反演与评估。

1.2 科学挑战

上述特征给多能连锁故障仿真分析带来了极大挑战, 下文进行详细阐述。

1.2.1 多机理、多尺度、非平稳物理过程的精确刻画

多能连锁故障的传播过程具有显著的多物理场耦合特性, 其动态演化涉及流体力学、热力学、材料力学及机电暂态等多机理的深度交织, 在时间与空间维度上呈现显著的跨尺度特征。同时, 故障的突发性和非线性特性会引发系统拓扑结构与状态参数的急剧变化, 由此形成典型的多机理、多时空尺度、强非线性物理过程。

该过程的精细刻画面临两大难题。1) 多物理场耦合建模困难。故障演化与传播同时涉及介质连续行为(如流体波动)与设备离散动态(如机电暂态)的深度耦合, 前者由偏微分方程描述, 后者由微分代数方程描述。一方面, 连续介质模型采用压力、温度场等场变量进行空间连续描述, 而设备动态模型则基于集总参数进行离散化表征, 缺乏统一的数学描述框架; 另一方面, 质量、能量、动量等物理守恒关系在跨域边界上的传递机制尚未明确。2) 模型高保真度与低复杂度之间存在内在矛盾。要精确刻画故障自发生至系统达到新的稳态这一完整的过程, 依赖于高保真度的机理模型。然而, 多物理场模型的耦合带来如下问题: 一方面, 气、热偏微分方程离散变换会导致状态变量数量激增, 形成高维非线性系统, 求解复杂度随模型维度增加呈指数级增长; 另一方面, 故障过程中同时存在秒级压力波传播(快动态)与小时级热力学平衡(慢动态)等多尺度现象, 传统建模方法难以有效处理此类多尺度耦合问题。

因此, 亟需打破传统学科壁垒, 研究多物理场统一描述方法, 深刻理解故障传播中的主导物理过程, 探索兼具高保真度与低复杂度的建模方法。

1.2.2 高维度、强刚性、非光滑系统的高效计算

多能连锁故障演化过程需采用偏微分-微分-代数方程组(partial-differential algebraic equations, PDAE)进行精确刻画, 其仿真计算面临高维度、强刚性与非光滑 3 大难题, 这些难题与系统的物理特性及耦合交互过程紧密对应。高维度特性源于气、热管网的介质运动过程。为精确捕捉故障后压力波等状态量的时空演化轨迹, 必须对管网进行精细的空间离散化, 导致模型变量数激增, 远超常规电力系统仿真规模, 形成了“维灾”。强刚性源于电力系统毫秒级的机电暂态与气/热管网分钟至小时级的输运动态之间巨大的时间尺度差异, 是多能耦合后产生的核心计算瓶颈。这种跨越多个数量级的快慢动态交织, 使联合仿真系统呈现极强的刚性, 给数值求解带来两难困境: 隐式积分法虽稳定性好, 但在高维系统下面临着雅可比矩阵求逆的巨大计算负担与病态问题; 显式积分法为保证稳定性, 其步长被最快的毫秒级动态所约束, 在模拟长历时故障时会产生难以承受的计算负担。非光滑特性源于系统中的各类离散事件。各子系统内部的保护动作、设备切换等均会造成系统状态的不连续。在耦合系统中, 这类事件更易在不同子系统之间连锁触发(例如, 电网频率扰动引发燃气轮机保护动作), 形成跨系统的混合动态事件链。这些由故障或控制引发的状态突变, 与系统固有的非线性叠加, 易破坏牛顿迭代等数值方法的收敛性, 造成计算中断。

综上所述, 高维度、强刚性与非光滑这 3 大特征的深度耦合与叠加, 使得现有计算方法难以同时满足多能连锁故障仿真对效率、精度与鲁棒性的苛刻要求。因此, 亟需深入挖掘仿真模型的内在数学性质, 从模型降维、刚性削减及非光滑事件处理等方面入手, 设计高效且鲁棒的仿真算法, 以突破多能连锁故障的高效仿真计算瓶颈。

1.2.3 强信息壁垒下的故障感知预测

电-气-热多运营主体并存的综合能源系统中, 子系统间的信息交互存在强物理隔离与制度性壁垒, 导致每个运营主体仅可通过耦合边界获取有限的外部系统参数与状态信息。在这种“跨域部分可观测”条件下, 对本地子系统而言, 外部耦合系统呈现“灰箱”甚至“黑箱”特征, 给连锁故障仿真

分析带来外部系统可知性与跨域故障可预测性两大难题。

在外部系统可知性方面,如何基于边界量测信息(如接口电压、流量、压力等时变信号),突破信息壁垒、实现外部未知系统的动态特性反演与内部状态重构,是支撑连锁故障精确仿真的关键前提。该问题本质上是受限信息下的动态系统辨识与状态估计问题。然而,外部系统动态特性未知、且与系统控制策略强耦合,是否可从有限的边界响应中解耦出其模型结构与参数尚不明确;同时,量测信息受噪声干扰且存在时滞,对辨识算法的鲁棒性提出了极高要求。

在跨域故障可预测性方面,当外部系统发生故障时,如何基于本地边界信息实现故障的快速感知、定位并准确评估其对本地系统的潜在影响,是制定有效紧急控制策略的基础。仅依赖本地量测信息进行分析、而不深度挖掘外部系统的故障演变特性,本质上是一种被动的、滞后的响应模式。例如,电网运营商观测到耦合边界的天然气压力下降时,已是故障传播的结果,此时难以判断故障的根源、严重性和持续时间,从而无法制定最优的应对策略。而跨系统感知旨在通过对边界动态信息的深度分析,反演出外部故障的演变过程,穿透信息壁垒。这使得本地系统能够预见故障的后续发展,从而采取更具前瞻性和针对性的预防控制措施,将故障影响降至最低,其必要性在应对快速演化的连锁故障时尤为突出。

区别于传统基于完整模型的预测方法,跨域故障预测问题要求从有限的边界信号中提取出外部故障演变特征。然而,一方面,故障初期在边界信号中表现为微弱异常模式,对感知算法的灵敏度与准确性提出了极高要求;另一方面,跨域故障演化与本地系统响应的关联关系尚不明确,难以量化外部故障对本地系统的时空影响范围与程度;此外,在外部系统历史故障数据匮乏的情况下,如何实现故障演化趋势的准确预测亦缺乏有效方法。

因此,亟需发展受限信息下数据-机理融合的动态系统反演理论与跨域故障感知方法,解决强信息壁垒下的多能连锁故障反演与评估难题。

2 国内外研究现状

围绕上述技术挑战,本节依次从多能连锁故障仿真建模、仿真算法与强信息壁垒下的感知预测 3

个方面总结国内外研究现状,分析研究发展动态。

2.1 多能连锁故障仿真建模研究

多能连锁故障仿真分析的首要任务是对多能故障节点的动态演化过程、电-气-热网络输运特性以及设备运行特性进行建模。其中,故障节点建模需要关注故障节点处物理量的局部动态演化过程,例如管线泄漏故障的泄漏半径变化、泄漏流量规律等以及设备故障处的工质流速、压强变化等。

多能故障节点建模面临两个主要难点:1)综合能源系统中管线故障类型多样,包含泄漏、爆管、冰堵等,不同类型故障的产生与演化机理迥异,涉及流体力学、热力学、材料力学等不同领域^[12-13],其对系统整体的影响亦不相同,因此需系统性分析各类管线故障的物理机理,建立可满足仿真精度需求的数学模型;2)综合能源系统中设备类型多样,根据其运行过程所涉及的物理环节差异,可将其分解为容积环节、蓄能环节、机械运动环节等多个环节^[14],不同设备运行特性和物理过程差异大,因此需从机理出发,考虑各个环节运行特性以构建设备故障数学模型。

2.1.1 管线故障建模

表 2 总结了典型的多能故障节点及其相关的建模研究^[17-28],根据其位置不同分为管线故障与设备故障。在管线故障建模方面,电力、天然气、供热等各个领域针对单一系统内的故障已开展了一定研究。文献[15-16]对导致天然气管线和供热管线故障的自然原因进行分析,并为管线泄漏、温度越界等多类故障建立了数学模型。针对天然气管线故障,文献[17-18]构建了管道泄漏模型,定量分析了模型的结构参数以及泄漏流量与泄漏相关因素的静态关系,推导了故障模型的初始及边界条件;文

表 2 典型多能故障节点及其相关建模研究

Table 2 Typical multi-energy fault nodes and their modeling		
故障位置	故障类型	相关文献
管线	天然气管线泄漏	[17-19]
	天然气管线爆管	[19]
	天然气管线冰堵	暂无
	供热管线泄漏	[20-23]
	供热管线爆管	暂无
设备	热电联产机组	[24]
	燃气机组	[24-25]
	发电机	[26-27]
	压缩机	[28]

献[19]则进一步探讨了爆管情境下的流量泄漏模型，描述泄漏流量关于泄漏点上下游天然气管道压强的关系。在供热系统管线故障方面，文献[20-21]对基于托里切利公式的泄漏量模型进行了改进，提出考虑不同材质管线的泄漏指数、摩擦项处理及泄漏点边界约束的建模方法，但它们仍主要关注稳态或准静态下的泄漏量计算。

文献[22]进一步研究了管壁材料对泄漏量的影响，并考虑了裂缝随时间的动态变化；文献[23]考虑了管线和流体性质、系统运行状态的不确定性因素，建立了故障的瞬态流量模型。此外，文献[29]针对 2021 年美国得州输气管线堵塞事件，分析了严寒天气下输气管线冰堵的成因及过程，但并未对冰堵的形成过程进行建模。从电力系统视角看，引入如管线裂缝动态扩展这类精细模型，是准确分析外部“缓变型”故障如何演化为内部“冲击型”事件的重要基础，这种预测性仿真对于揭示跨系统故障传播机理、构建主动防御体系、提升系统安全性与韧性具有重要价值。

总体上，现有研究通常忽略故障发生后裂缝尺寸动态扩展、流体状态急剧变化等关键过程，并未对简化模型的精度进行仿真验证或数值分析。因此，现有模型在刻画故障从“发生”到“发展”的全过程中存在精度瓶颈。

2.1.2 设备故障建模

在设备故障建模方面，现有研究从设备工作机理与故障原因出发，为多类设备故障建立数学模型。对于多能耦合设备，文献[25]从设备设计和使用工况角度分析了燃气轮机故障的原因，但未建立对应的数学模型；文献[30]综合考虑了燃气轮机的运行状态及物理特性，构建设备的模型；文献[24]针对热电联产机组和燃气机组故障，考虑直接隔离故障设备，建立相应的故障模型。对于非耦合设备，电力系统领域针对发电机故障已进行充分研究^[26-27]；针对天然气网络中的燃气型压缩机，文献[28]考虑压缩机不同串并联方式时的运行特性变化，建立 3 种压缩站的多状态和多故障模式停机模型。

现有研究主要聚焦于管线泄漏模型，且多数研究将泄漏量与故障处物理量简化为线性关系^[19-20]。对于设备故障，现有研究大多考虑直接切除故障的处理方式，鲜有研究关注切除前设备故障相关参数的动态演化过程。一些研究表明，在实际系统中，故障的演化过程具有动态特性^[29-31]，需综合考虑故

障时刻故障处的运行状态及其物理特性^[30]，故障的数学模型表现为复杂的时变方程或微分代数方程组，现有简化模型难以准确捕捉故障的演化历程。多尺度过程建模

在建立故障节点模型与各类型网络、设备模型后，需要进一步考虑多能连锁故障传播过程的时空尺度特性，建立多能连锁故障仿真模型。多能连锁故障的仿真模型需要考虑到故障发生瞬间、故障发生后短期与长期等不同时间尺度上的系统分析需求。由于多能连锁故障的多时间尺度特性与非平稳、非光滑特性，在故障瞬间，网络结构与参数可能发生突变(即非平稳特性)、系统状态可能发生跃变(即非光滑特性)，故障后系统状态在毫秒、分钟、小时等不同时间尺度上主导模态不同。因此，需针对不同尺度的系统分析需求建立相适用的多能连锁故障仿真模型。

在该方面，现有相关研究大多关注单一时间尺度下的网络传播特性。文献[32]聚焦于系统的长期运行状态，建立了综合能源系统的稳态潮流模型；文献[33-34]则考虑了物理状态在不同网络中的传播速度，分别建立了天然气系统的动态模型和供热系统的准动态模型，并与电力系统的稳态潮流模型进行联合仿真；文献[35]采用电热系统的稳态模型分析了电-热故障的双向传播过程。

表 3 总结了现有研究中的电-气-热系统模型和对应时间尺度。以上模型在特定时间尺度下能够较好地刻画运行特性，但无法完全满足多能连锁故障的仿真需求。一方面，快动态过程与慢动态过程交织，时间常数界限尚不明确；另一方面，多能连锁故障传播过程时间跨度大(毫秒至小时)，快慢联合仿真时间步长难以精确匹配，对气、热慢动态使用小步长精确仿真将使冗余计算负担显著增大。

表 3 电-气-热系统模型及其相应的时间尺度

Table 3 Models of electrical, heat, and gas network and their corresponding time scales

系统	模型类型	数学模型	时间尺度
电力系统	机电暂态	DAE	毫秒级
	稳态	AE	秒级
天然气系统	动态	PDAE	秒-分钟级
	稳态	AE	小时级
供热系统	水力暂态	PDAE	毫秒级
	准动态	PDAE	秒-分钟级
	稳态	AE	小时级

2.1.4 总结

综上，在多能连锁故障仿真建模方面，现有研究主要存在两点不足：

1) 在故障节点建模方面，电力、天然气、供热等领域针对单一系统的管线、设备故障建模已开展了一定研究，然而这些模型尚无法完全满足多能连锁故障仿真需求。一方面针对故障参数动态演变的研究还较少，无法支撑对故障局部演化过程的分析；另一方面，现有部分模型依赖于经验公式、结构多样，缺乏统一数学表征，使得开发高效、稳定的联合仿真算法变得极为困难。因此，探索能够兼容多物理过程的统一数学表征方法，是当前多能连锁故障建模亟待突破的一个关键问题。

2) 在仿真建模方面，由于现阶段针对多能连锁故障问题的研究尚处于起步阶段，已有研究中的仿真模型颗粒度还相对较粗，通常仅从准动态能流与稳态能流角度来分析故障的跨系统传播，并未考虑故障发生后从毫秒至小时尺度的故障演化全过程，因此难以准确反映多能连锁故障传播机理，无法建立对多能故障多尺度级联传播机理的深刻认识。

2.2 多能连锁故障仿真分析算法研究

多能连锁故障仿真分析的核心任务是对故障发生后的系统关键状态量进行精确计算。所谓关键状态量，包括电力系统的电压/频率、天然气系统的压强/流量及供热系统的供水温度/流量等。从仿真解算角度看，多能连锁故障仿真需要求解一个偏微分-微分-代数系统，提升仿真精度需要使用精细的模型(如考虑机电暂态、水力暂态等毫秒级过程)与提升时空分辨率(即降低仿真的时空差分步长)。精细模型的引入使模型呈现非光滑、强刚性特性，时空分辨率的提升显著增加了模型维度，这些都将加剧多能连锁故障仿真的计算负担，难以满足实际系统应用需求。

针对上述问题，现有研究主要从 3 个角度解决多能连锁故障的多尺度数值仿真解算难题。1) 从仿真模型等值简化的角度，削减对故障传播、扩张影响程度低的非关键变量，只保留关键状态，从而实现模型冗余度的降低；2) 从解算方法角度，在保证计算精度的前提下，通过改进数值算法，降低每一时步的计算负担或总的计算时步数；3) 从仿真模型刚性削减的角度，考虑到刚性越强则仿真解算允许使用的最大步长越小，削减刚性可以提升最大仿真步长上限。下文对相关研究现状进行综述。

2.2.1 模型等值简化

在模型等值简化方面，现有研究针对电-气-热异质能流网络，从线性电网络模型、天然气平均流速模型、质调节热网模型的统一表征入手，研究除源荷之外的网络中间节点消除方法，推导了源-荷二端口等价模型表达式，达到模型降维、提升仿真分析效率的目的。这类研究均关注(局部)线性化多能网络模型，主要几类等值思路如表 4 所示。文献[36-37]基于电路比拟思想，通过定义等价的气容、气感、热容、热感等参数，推导了气路、水路、热路的分布式参数模型；通过傅里叶变换在频域内对该模型进行求解，得到了统一能路的源-荷二端口线性表征。文献[38-39]基于拉普拉斯变换，建立了电-气-热网络的广义电路表征，推导了系统状态关于源-荷边界条件的封闭形式解，文献[40]将该模型拓展至考虑初始条件的情形。文献[41]使用中心差分，建立电-气-热网络的时域二端口统一表征；文献[42]研究基于特征线差分的天然气网络时域统一建模。

表 4 网络等值方法

Table 4 Equivalent methods of network			
模型	建模视角	初边值处理	相关文献
统一能路	频域	傅里叶频率分解	[36, 37]
广义电路及其增广	复频域	分段连续化后时频变换	[38-40]
时域统一模型	时域	无需处理	[41-42]

上述统一能路、广义电路等方法将气网、热网类比于电路进行线性化处理，实现了模型的降维。然而，其根本局限在于对线性的强依赖。在模拟连锁故障这类状态大幅波动的场景时，系统的非线性特性(如天然气管网的动量守恒方程)是不可忽略的主导因素。一旦回归到原始的非线性模型，这些基于线性假设的等值方法不再适用，凸显了研究非线性多能网络降维理论的紧迫性。

2.2.2 模型解算方法

从模型解算方法角度看，电-气-热综合能源系统的联合仿真存在两条技术路线：协同仿真(Co-Simulation 或称交替仿真、分立仿真)与集成仿真(integrated simulation 或称一体化仿真、联立仿真)^[43]，其对比如表 5 所示。协同仿真方法将各子系统视为“黑箱”，使用独立的求解器进行计算，并通过边界数据的反复交换与迭代来同步状态^[44]。该方法主要适用于电-气-热单向耦合或双向耦合性较弱的这类“弱耦合”系统，具备实现灵活、具备非侵入性、可复用现有成熟模型等优点。然而，对

于连锁故障这类双向动态响应紧密关联的“强耦合”场景，该方法存在如下缺陷：1）迭代过程可能难以收敛或收敛缓慢；2）不同求解器间的失配易引发数值不稳定问题。

表 5 模型解算方法分类

Table 5 Classification of computing methods of models

方法	原理	特点	适用系统
协同仿真	多个子系统使用各自的求解器独立计算，通过边界数据的交互迭代实现同步。	①灵活性高、非侵入、易于实现；②数值稳定性无法保证、计算效率可能较低。	电-气-热单向耦合或双向弱耦合
集成仿真	将所有子系统的方程组合成统一的、全局的系统方程，使用单一求解器进行一次性求解。	①数值精度高、稳定性好，计算效率高；②灵活性差，需要统一建模，对求解器要求高。	电-气-热双向强耦合

集成仿真方法将所有子系统的数学模型整合为一套全局方程组，采用单一求解器进行同步、整体求解。该方法更适用于电-气-热双向紧密耦合的“强耦合”系统，其核心优势在于能够从根本上保证数值稳定性和收敛性，可精确捕捉强耦合动态。然而，其实现前提是必须对系统进行统一建模，且待求解的系统通常规模较为庞大，对算法的效率要求较高，且无法使用各领域的成熟工具，编程开发负担重、要求高^[45]。一般来说，对于子系统间仅存在单向或双向弱耦合的场景，可尝试选择协同仿真方法，而对于具有显著双向动态交互的强耦合系统，集成仿真是更可靠的选择。

上述两类技术路线均受限于单一子系统的复杂度，而多系统的集成进一步加剧了模型复杂度。因此，大量研究关注于模型的高效解算方法，其核心目标是减少单步开销，典型思路包括对数值算法进行改进或转向半解析类算法，如表 6 所示^[46-50]。文献[46]针对电气综合能源系统的动态仿真场景，提出一种贯序迭代方法，将原始高维矩阵的分解问题转化为分块小型矩阵的分解，有效降低了单步仿真的矩阵分解开销。文献[47]使用两种不同精度的差分格式构造了局部截断误差的近似估计，实现了仿真步长的自适应调整，减少了总的计算开销。文献[48-49]首次使用一种半解析方法求解电力系统时域仿真微分代数方程组，得到状态/代数变量关于时间的近似解析表达式。文献[48-49]基于一种微分变换方法，将电力系统时域仿真每一时步的迭代求解转换为线性递推，避免了非线性方程的迭代求解；且该方法在每一步只需要进行一次矩阵分解运

算，有效降低了矩阵分解开销。文献[47-48]分别将半解析思想应用于电-气/电-热综合能源网络的动态能流计算，取得了显著的仿真加速效果。但值得注意的是，半解析算法仅具备显式稳定性，在刚性场景下易表现出发散等数值不稳定问题，因此并不适用于多能连锁故障多尺度仿真这类强刚性问题。

表 6 模型的高效解算方法

Table 6 Efficient solution methods of models

方法	原理/特点	相关文献
数值迭代改进	变步长、迭代分解加速	[46-47]
半解析算法	消除数值迭代	[34, 48-50]

2.2.3 模型刚性削减

模型刚性削减通常基于奇异摄动理论。对于一个快慢变量并存的刚性系统，当快变量动态结束或基本收敛，可以忽略快动态关于时间的导数，从而原始快动态微分方程模型退化为代数方程模型^[51]。从动态系统演化的角度，可认为快动态在瞬时达到稳态，而所得退化模型仅描述慢动态关于时间的变化。因此，奇异摄动理论为刚性削减提供了理论基础，使最大仿真步长不受快动态时间常数约束。例如，可以在快动态结束后，切换至准动态或准稳态仿真模型，以使用大步长对慢动态进行仿真。基于奇异摄动的仿真模型刚性削减方法对比如表 7 所示^[52-58]。文献[52-55]针对电磁-机电暂态仿真场景，分析了快动态结束判据，研究了精细动态仿真模型与(准)稳(动)态仿真模型的自适应切换方法。文献[56-58]针对特定的电-气-热多能仿真场景，先验地假设退化模型：电力快动态演化过程中，慢动态保持不变；气-热慢动态演化过程中，快动态受代数方程约束，瞬时稳定。从而系统刚性被极大削减，进而可以使用大步长进行仿真分析。除此以外，文献[57-58]也研究了多速率仿真算法，对电-气-热子系统分别使用与其动态过程时间尺度相匹配的时间步长进行仿真解算，在特定时刻进行数据交换与状态匹配，从而进一步提升了仿真分析效率。

表 7 基于奇异摄动的仿真模型刚性削减方法

Table 7 Stiff reduction method of simulation model based on singular perturbation

应用场景	原理/特点	相关文献
电磁-机电暂态仿真	动态-准动态-稳态仿真模型自适应切换	[52-55]
电-气-热动态仿真	根据场景预先设定退化仿真模型，多速率仿真	[56-58]

综上，在多能动态仿真模型刚性削减以及多速

率仿真算法方面,相关研究通常预设退化模型,并未从奇异摄动理论本身出发对预设的退化模型的适用性进行验证。不仅如此,对多速率仿真结果误差的定量分析相关研究也较少,因此难以从理论上保证仿真结果的精度。

2.2.4 总结

纵观上述研究可发现,在多能连锁故障多尺度仿真数值算法方面,现有研究主要存在如下不足:

1) 在仿真模型等值简化方面,现有针对局部线性化电-气-热网络的二端口等值建模思路无法解决非线性气、热网络的简化与降维问题,针对非线性气、热网络这一非线性偏微分-代数系统的简化与降维研究几乎处于空白状态,亟需探索适用于非线性电-气-热网络模型的等值简化表征方法。

2) 在仿真解算方面,现有研究无法从根本上避免数值仿真的迭代计算或改进半解析算法的稳定性能,针对电-气-热故障联合仿真问题,如何实现非迭代-隐式高效仿真尚缺乏研究。

3) 在仿真模型刚性削减方面,现有研究通常针对某一特定时间尺度,假设退化模型,开展仿真分析,并未对退化假设的合理性以及多尺度仿真模型的自适应切换判据开展理论研究。

2.3 多能连锁故障仿真分析的强信息壁垒问题

随着多能耦合系统规模复杂度不断提升,不同运营主体之间的信息壁垒也逐渐加深,电/气/热各子系统数据格式和标准不统一,数据共享和整合难度大,同时考虑到隐私保护问题,各运营主体倾向于将数据封闭在内部系统,阻碍了多能连锁故障情况时的信息实时交互。因此,在多主体强信息壁垒场景下,研究基于本地量测信息的多能连锁故障仿真与就地感知方法具有重要工程意义。针对上述问题,一个可行的思路是构建能够等效外部系统的代理模型,以准确反映外部系统的动态行为和边界特征,从而在本地信息有限的情况下进行多能连锁故障的仿真分析。在此基础上,需要进一步研究本地系统机理模型与外部系统代理模型的交互策略与求解算法,以确保基于代理模型的仿真模型高效计算。

2.3.1 代理模型构建

在强信息壁垒下,代理模型作为桥梁,能够起到等效外部系统与连接本地系统的作用,不仅可以保留被代理网络的关键特征,同时也简化了未识别子系统或外部系统。鉴于此,越来越多的研究开始聚焦于代理模型。电力系统是多能耦合系统的主

体,当前针对电力系统的未识别子系统、外部系统与关键设备的神经代理建模已存在一些研究,基于人工智能的电力系统动态仿真通用代理模型不断涌现^[59]。根据研究方法与网络功能的差异,现有的研究可以分为以下3类。第1类研究基于神经常微分方程网络(ODE-Net)。文献[60-61]提出基于ODE-Net的电力系统可扩展神经动态等效建模方法,通过代理模型准确模拟未知子系统的动态行为,保留了电网连续时间动态等效性。文献[62]聚焦于电力系统动态组件的ODE-Net代理建模,包含了励磁控制器、光伏电站和区域电网等效负载的等值模型。此类研究利用ODE-Net的连续时间动态等效性,实现对电力系统及其组件的代理建模,能够保留其动态特征。第2类研究基于深度算子网络(DeepONet)^[63],文献[64]提出利用DeepONet学习非线性控制系统动态响应的方法,实现了对系统动态行为的准确建模仿真。基于此,文献[65-66]使用DeepONet来近似和预测电力系统的动态响应,不同的是,文献[66]通过数据驱动方式,而文献[65]立足于同步发电机的动态响应代理模型构建。相比于第一类研究,DeepONet具有更强的泛化能力,除了能够实现系统动态行为的准确建模外,还能够实现难以仿真的故障轨迹的预测。第3类研究基于物理信息神经网络(physics-informed neural networks, PINN)^[67],文献[68-69]关注多尺度仿真的处理,提出了相应的降阶代理模型来降低计算复杂度,开发了PINNSim仿真器,利用PINN加速电力系统动态仿真,并比较其在不同步长下的优势。文献[70]提出利用电力系统模型来训练网络的新框架,可提高对电力系统动态和稳态行为的预测能力。文献[71]的研究对象为电力系统暂态稳定性,未涉及到较大规模复杂系统。

上述电力系统神经代理模型的相关研究,对多主体强信息壁垒下的异质耦合系统代理建模具有一定借鉴意义。但需注意的是,将这些方法直接迁移至气、热系统面临新的挑战:气、热系统由偏微分方程描述,具有显著的时滞和空间分布特性,其动态行为与电力系统的常微分方程组有本质区别。因此,如何设计能够有效嵌入流体动力学先验知识、并能处理长时滞效应的代理模型,是当前研究尚未解决的难题。

目前,针对多能连锁故障问题的代理模型相关研究较少。针对电热耦合系统,文献[72-73]首次利

用物理信息神经网络进行等值处理，通过将热网中的偏微分代数方程约束融入损失函数，实现热网状态估计；然而其只针对质调节下的固定负荷情况的仿真，对于未知负荷以及故障情况下的泛化能力不强。多能连锁故障传播的多尺度特征，在神经动态等值中是难以处理的问题。文献[74]采用最小化广义多尺度有限元方法生成前端解耦输入，并设计网络多尺度降维模块来处理多尺度问题。对于强信息壁垒下的多能连锁故障仿真问题，构建未识别子系统或外部信息未知系统的神经动态等值模型，是处理多尺度难题、实现模型降维与加速仿真的一种极具潜力的方法。

2.3.2 交互策略与求解算法

根据代理模型的不同数学特征，本地系统机理模型与外部系统代理模型的交互策略与求解算法也有所差别。文献[62]中采用神经常微分方程网络来构建代理模型，因此形成的代理模型为以输入、输出作为参数的参数化神经常微分方程，可以使用数值积分方法来同时求解代理模型和机理模型组成的动态方程，从而实现了集成仿真。而文献[61]建立的代理模型仅可以通过迭代求解代理模型和机理模型(即协同仿真)，来实现对电力系统整体的动态模拟，代理模型的输出(即外部系统的动态状态)被用作机理模型的输入，同时机理模型的输出(即内部系统的动态状态)也被反馈回代理模型，以更新代理模型的预测结果。因此，交互策略与求解算法的选择基本上取决于代理模型的具体形式，若代理模型可以表征为以输入输出作为参数的参数化代数方程，则可以采取集成仿真算法求解；反之，若仅能够采用输入、输出作为与机理模型与代理模型之间的接口，则必须采用协同仿真算法。

2.3.3 多能连锁故障就地感知

此外，在系统实时运行中，运行人员需要根据本地系统实时量测信息对系统运行状态进行监测，以实时感知远端故障信息、确定故障位置并采取控制措施。因此，在多主体强信息壁垒的场景下，研究多能连锁故障的就地感知方法具有重要意义。目前的研究主要集中于分析故障对系统运行所产生的影响，包括对系统运行状的影响和对关键设备的影响。针对单一电力系统，文献[75]全面探讨了电力系统中连锁故障传播的量化问题，从拓扑性质、功率注入和线路损失方面提出量化指标，为提升电力系统可靠性和韧性提供了重要参考；文献[76]着

眼于稳态下连锁故障导致的电压不稳定问题，提出需求损失率和线路损失率指标来量化连锁故障的影响；文献[77]提出相互作用矩阵，以高效估计电力系统各组件间的相互影响概率，从而实现连锁故障下关键组件相互作用的评估。针对天然气系统，文献[78]研究天然气管道的泄漏故障及其带来的影响，但该研究所采用的方法在精度方面难以满足实际应用需求；文献[79]以故障传播速度为关键指标，研究了天然气管道泄漏和破裂故障对天然气和电力系统动态影响。针对供热系统，压力梯度法常被用来监测泄漏发生^[80-81]，以分析最常见的爆管与泄漏故障对网络运行状态的影响，然而该方法只能定性判断，难以精确刻画故障参数(如泄漏位置等)。为更精确实现泄漏参数的量化，一些研究采用基于人工智能的数据驱动方法，例如卷积神经网络^[82]等。除泄漏参数外，热量损失与压力损失也是值得关注的问题，文献[83]开发了一种基于物理方程的建模方法，用于计算热网中所有可量测变量，并引入健康指数以表征管道在流量、热阻力和压力损失方面的健康状况。

表 8 总结了已有研究中所关注的故障关键影响与量化指标^[75-84]。综上，现有研究围绕单一的电力系统、天然气与供热系统的故障监测、故障参数估计、故障影响量化等问题已开展一定研究，在模型与方法层面具有一定基础，然而，针对综合能源系统中的多能连锁故障传播问题，如何基于本地系统量测信息来实现外部异质系统故障的监测与感知，尚缺乏研究。

表 8 故障关键影响与量化指标
Table 8 Critical impact of faults and quantitative indicators

所属系统	故障影响	量化指标	相关文献
电力系统	拓扑变化	电气距离	[75]
	演化范围	传播速率	[75-76]
	电压稳定	需求损失率、 线路损失率	[76]
	关键元件	相互作用矩阵	[77]
天然气系统	泄漏破裂	传播速度	[78-79]
热力系统	泄漏爆管	泄漏流量	[80-82, 84]
	热量损失	管道健康指数	[83]
	压力损失	压变幅度	[81-83]

2.3.4 总结

综上，针对强信息壁垒下的多能连锁故障仿真与就地感知问题，现有研究存在以下不足之处：

1) 在强信息壁垒下的仿真方法方面, 尽管针对电力系统中未知子系统或外部系统的神经动态等值建模和仿真的研究已有一定基础, 但是针对多能连锁故障传播问题, 如何根据电-气-热耦合边界信息来构建外部系统代理模型、如何实现本地机理模型与外部代理模型的高效仿真计算, 尚缺乏研究。

2) 在强信息壁垒下的故障感知方面, 现有研究主要关注单一系统中的故障影响量化与故障参数信息推断, 对跨系统连锁故障的感知问题尚未关注, 如何根据本地系统的量测信息与部分可获取的外部系统信息来实现故障识别与评估, 尚缺乏研究。

3 研究展望

针对上述多能连锁故障仿真分析所面临的科学挑战, 本研究从多尺度仿真建模理论、高效鲁棒计算方法与机理-数据融合分析方法 3 个维度进行展望, 构建“建模-计算-分析”技术体系, 为多能连锁故障仿真分析提供系统性研究思路, 如图 5 所示。

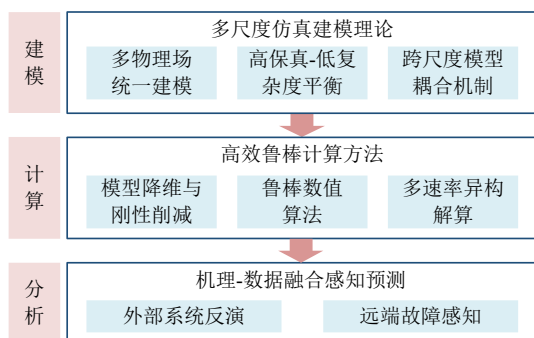


图 5 研究展望

Fig. 5 Research prospects

3.1 多尺度仿真建模理论

多能连锁故障的物理本质是电-气-热 3 网耦合的多物理场非线性动态过程, 其建模需突破传统学科壁垒, 构建涵盖“节点-网络-系统”的统一理论框架。

首先, 研究电-气-热多物理场统一建模理论。针对介质连续行为(流体/热力学偏微分方程)与设备离散动态(机电暂态微分代数方程)的耦合难题, 研究基于能量守恒与拓扑结构的统一建模方法。1) 建立跨域物理量的传递关系模型, 明确质量/能量/动量在管道-设备-网络边界的耦合机制; 2) 研究多物理场模型的异构融合方法, 实现偏微分方程与微分代数方程的统一表征, 一方面为开发高效率、高鲁棒性的集成仿真算法提供统一的数学框架, 另一

方面从根本上保证连锁故障等强耦合场景下仿真方法的数值稳定性和收敛性, 同时为应用更先进的数值技术(如预处理、并行计算等)以进一步提升仿真效率提供条件。

其次, 研究多能连锁故障的跨尺度模型耦合机制。针对故障演化从毫秒级暂态到小时级稳态的全过程, 研究时间-空间双维度的模型解耦策略。在时间维度, 提取暂态、准动态、稳态过程的主导模态, 建立与之匹配的模型粒度体系; 在空间维度, 基于故障影响范围动态定界技术, 划分核心子网(精细建模)与非核心子网(等效建模), 形成可灵活组合的多尺度模型库。

最后, 研究多能连锁故障模型的高保真与低复杂度平衡方法。针对模型保真度与计算效率的矛盾, 研究基于关键动态特性提取的模型简化策略。分析故障演化路径中的能量传递特征, 识别对系统运行起主导作用的核心变量, 构建含关键参数的低复杂度模型。同时, 研究误差补偿技术, 对简化过程中丢失的次要动态进行补偿, 在保证关键物理过程高保真刻画的前提下有效降低模型复杂度。

3.2 多尺度仿真高效鲁棒计算方法

针对多能连锁故障仿真模型的高维度、强刚性、非光滑特性, 需突破传统数值方法的局限, 研究兼具精度与效率的新型计算技术。

首先, 研究多能连锁故障模型降维与刚性削减方法。研究基于故障影响域动态划分的多尺度仿真模型等值简化理论, 构建非故障子网的广义端口模型, 基于算子理论与神经网络技术实现非线性等值。针对强刚性特征, 研究基于系统状态演化速率特征的全过程模型自适应切换技术, 在快动态阶段采用小步长隐式积分, 在慢动态阶段切换为大步长显式方法, 实现刚性削减与效率提升。

其次, 研究面向多能连锁故障非光滑问题的鲁棒数值算法。针对故障引发的激波、拓扑突变等非光滑现象, 研究偏微分方程的高阶守恒离散格式。同时, 研究事件驱动的求解策略, 当检测到故障或状态突变时, 自动调整数值格式, 保障计算稳定性。

最后, 研究多能连锁故障多速率异构求解方法。针对电-气-热多能流的时间尺度差异, 研究多速率求解框架, 对快动态与慢动态采用差异化步长, 通过数据插值实现跨速率交互。针对多能网络的异构特性, 设计联立求解与交替求解的混合策略, 平衡收敛性与计算效率。

3.3 强信息壁垒下的机理-数据融合感知预测方法

针对电-气-热运营主体间的信息孤岛现象,研究“机理+数据”双驱动的仿真分析方法,突破外部系统可知性与跨域故障可预测性难题。

首先,研究外部系统反演方法。研究基于有限边界信息的外部系统代理建模技术。一方面,构建非故障态下的多尺度神经动态等值模型,刻画外部系统的稳态与动态特性;另一方面,分析外部故障对耦合边界的动态影响,建立故障工况与边界响应的映射关系,形成可泛化的代理模型库。将机理模型(本地系统)与代理模型(外部系统)嵌入统一仿真框架,研究两者的高效交互策略,保障跨域仿真的精度与稳定性。

其次,研究远端故障感知方法。一方面,研究耦合点关键物理量的动态特征提取算法,通过关键特性实现故障的快速监测;另一方面,研究基于物理机理的故障参数估计方法,实现故障距离、故障类型等关键参数的准确辨识。此外,研究连锁故障影响量化指标体系,通过机理-数据融合分析为运行决策提供支撑。基于此,建立基于本地量测的远端故障监测、定位与评估技术体系。

4 结论

随着电-气-热耦合规模扩大与耦合程度加深,跨系统故障连锁传播风险显著提升,其演化过程呈现多物理机理交织、多时空尺度动态变化、多运营主体信息隔离的典型特征,传统基于单一系统的仿真分析框架已难以满足多能连锁故障分析需求。鉴于此,本文系统剖析了多能连锁故障仿真分析的关键技术瓶颈与未来发展方向,主要结论如下:

1) 现有研究在电-气-热连锁故障仿真分析领域尚存在以下不足:针对多机理、多尺度、非平稳物理过程,缺乏可精准刻画各个时空尺度下的主导过程的低复杂度建模方法;多尺度仿真面临高维度、强刚性、非光滑系统的计算瓶颈,现有仿真算法适用性有限;强信息壁垒下,跨系统故障仿真与感知缺乏有效的代理建模与交互求解策略,难以支撑多主体场景下的风险评估。

2) 围绕电-气-热连锁故障仿真分析问题,未来需重点突破3大问题:突破多物理场统一描述理论,明确不同时空尺度下的主导物理过程与模型颗粒度需求,建立多尺度仿真框架;研究非线性系统降维方法、多速率仿真算法与刚性自适应削减技术,

提升仿真计算效率与鲁棒性;研究基于有限量测信息的外部系统反演方法与远端故障感知方法,突破强信息壁垒下的故障感知预测技术瓶颈。

本研究可为完善综合能源系统故障仿真技术体系提供理论参考,对保障能源系统安全可靠运行、支撑“双碳”目标实现具有现实意义。

参考文献

- [1] 薛屹洵, 杜源, 王科, 等. 计及热网拓扑重构的电-热分布式机组组合研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(10): 3698-3709.
XUE Yixun, DU Yuan, WANG Ke, et al. Distributed unit commitment for integrated electric and heating system considering reconfiguration of district heating network[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(10): 3698-3708(in Chinese).
- [2] 肖峻, 孙纲, 宋晨辉, 等. 基于安全域的区域综合能源系统安全预警方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(10): 3709-3723.
XIAO Jun, SUN Gang, SONG Chenhui, et al. A security early warning method based on security region for regional integrated energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(10): 3709-3722(in Chinese).
- [3] 姜涛, 邱宇昕, 刘泽宇, 等. 应对主余震影响的综合能源系统运行韧性评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(23): 9112-9126.
JIANG Tao, QIU Yuxin, LIU Zeyu, et al. Operational resilience assessment of integrated energy system in mainshock-aftershock using polynomial chaos expansion [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(23): 9112-9125(in Chinese).
- [4] 雷傲宇, 周剑, 梅勇, 等. “3·3”中国台湾电网大停电事故分析及启示[J]. 南方电网技术, 2022, 16(9): 90-97.
LEI Aoyu, ZHOU Jian, MEI Yong, et al. Analysis and lessons of the blackout in Chinese Taiwan power grid on March 3, 2022[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(9): 90-97(in Chinese).
- [5] 国家能源局. 2019 年 1 月全国电力安全生产情况[N/OL]. (2019-02-19)[2025-03-01]. https://www.nea.gov.cn/2019-02/19/c_137834081.htm.
National Energy Administration. National power safety situation in January 2019[N/OL]. (2019-02-19)[2025-03-01]. https://www.nea.gov.cn/2019-02/19/c_137834081.htm(in Chinese).
- [6] 国家能源局. 2021 年 6 月全国电力安全生产情况[N/OL]. (2021-07-15)[2025-03-01]. https://www.nea.gov.cn/2021-07/15/c_1310062198.htm.
National Energy Administration. National power safety

- situation in June 2021 [N/OL]. (2021-07-15) [2025-03-01]. https://www.nea.gov.cn/2021-07/15/c_1310062198.htm(in Chinese).
- [7] 张玥, 谢光龙, 张全, 等. 美国得州 2·15 大停电事故分析及对中国电力发展的启示[J]. 中国电力, 2021, 54(4): 192-198, 206.
- ZHANG Yue, XIE Guanglong, ZHANG Quan, et al. Analysis of 2·15 power outage in texas and its implications for the power sector of China[J]. Electric Power, 2021, 54(4): 192-198, 206(in Chinese).
- [8] Sky News. Storm darragh latest: two men die and hundreds of thousands without power as winds reach 93mph[N/OL]. (2024-12-08)[2025-03-01]. <https://news.sky.com/story/storm-darragh-latest-weather-and-flood-warnings-in-place-as-bad-weather-about-to-hit-uk-13267902>.
- [9] 国家能源局. 国家能源局发布《中国天然气发展报告(2023)》[J]. 天然气勘探与开发, 2023, 46(3): 32.
- [10] 中国电力企业联合会. 中国电力统计年鉴-2023[M]. 北京: 中国统计出版社有限公司, 2023.
- China Electricity Industry Federation. China electricity statistical yearbook - 2023[M]. Beijing: China Statistical Press Co., Ltd., 2023(in Chinese).
- [11] 袁警特, 邱高, 刘友波, 等. 基于变分自编码神经常微分方程的电-气耦合系统长动态稳定快速推演技术[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(10): 3737 - 3752.
- YUAN Jingte, QIU Gao, LIU Youbo, et al. A variational neural ordinary differential equation-based fast inference for long-term dynamic stability of integrated electricity-gas system[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(10): 3737-3751(in Chinese).
- [12] KIM S H, KANG S J, KIM W C, et al. Failure analysis of low carbon steel pipeline for district heating and cooling systems: case studies[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 166: 108826.
- [13] CHAE H, WANG Huai, HONG M, et al. Stress corrosion cracking of a copper pipe in a heating water supply system[J]. Metals and Materials International, 2020, 26(7): 989-997.
- [14] 张苏涵. 综合能源系统时域统一建模理论及其应用[D]. 南京: 东南大学, 2023.
- ZHANG Suhan. Unified modeling of integrated energy system in time domain: theory and its applications[D]. Nanjing: Southeast University, 2023(in Chinese).
- [15] AHMED T, MAHMOOD Y, YODO N, et al. Weather-related combined effect on failure propagation and maintenance procedures towards sustainable gas pipeline infrastructure [J]. Sustainability, 2024, 16(13): 5789.
- [16] RAFALSKAYA T A. Investigation of failures in operation of heat networks of large heat supply systems [J]. Thermal Engineering, 2017, 64(4): 313-317.
- [17] YAN Mingqing, XU Peng, LI Jun, et al. A buried gas pipeline leakage model[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2024, 15(4).
- [18] TANG Yi, ZHAO Yuan, LI Wenyuan, et al. Incorporating gas pipeline leakage failure modes in risk evaluation of electricity-gas integrated energy systems [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 144: 108587.
- [19] HOU Qingmin, YANG Daheng, LI Xiaoyan, et al. Modified leakage rate calculation models of natural gas pipelines[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020(1): 6673107.
- [20] VAN ZYL J E, CASSA A M. Modeling elastically deforming leaks in water distribution pipes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(2): 182-189.
- [21] YANG Zixuan, FAN Shidong, XIONG Ting. Simulation and numerical calculation on pipeline leakage process[C]//Proceedings of 2010 2nd International Symposium on Information Engineering and Electronic Commerce. Ternopil: IEEE, 2010: 1-5.
- [22] FOX S, BOXALL J, COLLINS R. Derivation and validation of a leakage model for longitudinal slits in polyethylene pipes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 144(7): 04018034.
- [23] DUAN Huanfeng. Uncertainty analysis of transient flow modeling and transient-based leak detection in elastic water pipeline systems[J]. Water Resources Management, 2015, 29(14): 5413-5427.
- [24] ZHANG Tao, LI Guojun, WEI Linyang, et al. A novel dynamic simulation strategy for regional integrated energy system considering coupling components failure [J]. Energy, 2024, 295: 130984.
- [25] ILYUSHIN P, SHAVLOVSKIY S. Use and failure cause analysis of gas-turbine units at distributed generation facilities[J]. E3S Web of Conferences, 2024, 584: 01008.
- [26] GUO Wenming, MU Longhua, ZHANG Xin. Fault models of inverter-interfaced distributed generators within a low-voltage microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 453-461.
- [27] TU Xiaoping, DESSAINT L A, FALLATI N, et al. Modeling and real-time simulation of internal faults in synchronous generators with parallel-connected windings [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(3): 1400-1409.
- [28] TANG Yi, ZHAO Yuan, LI Wenyuan, et al. Multiple failure modes of compressor station incorporated into risk evaluation of electricity-gas integrated energy systems [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(4): 1439-1448.

- [29] BUSBY J W, BAKER K, BAZILIAN M D, et al. Cascading risks: understanding the 2021 winter blackout in texas[J]. *Energy Research & Social Science*, 2021, 77: 102106.
- [30] YEE S K, MILANOVIC J V, HUGHES F M. Overview and comparative analysis of gas turbine models for system stability studies[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, 23(1): 108-118.
- [31] SUN Liang. Mathematical modeling of the flow in a pipeline with a leak[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2012, 82(11): 2253-2267.
- [32] SHABANPOUR-HAGHIGHI A, SEIFI A R. An integrated steady-state operation assessment of electrical, natural gas, and district heating networks [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(5): 3636-3647.
- [33] BAO Zhejing, ZHANG Qihong, WU Lei, et al. Cascading failure propagation simulation in integrated electricity and natural gas systems[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2020, 8(5): 961-970.
- [34] YU Ruizhi, GU Wei, LU Hai, et al. Non-iterative calculation of quasi-dynamic energy flow in the heat and electricity integrated energy systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(5): 4148-4164.
- [35] PAN Yi, MEI Fei, ZHOU Cheng, et al. Analysis on integrated energy system cascading failures considering interaction of coupled heating and power networks [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 89752-89765.
- [36] 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 Yuwei, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis(I): gaseous circuit[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(2): 436-443(in Chinese).
- [37] 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 Guangxiong, 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(in Chinese).
- [38] 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. 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(in Chinese).
- [39] 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. 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(in Chinese).
- [40] 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(in Chinese).
- [41] 张苏涵, 顾伟, 姚帅, 等. 综合能源网络统一建模及其应用(一): 时域二端口模型[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(19): 6509-6520.
ZHANG Suhan, GU Wei, YAO Shuai, et al. Unified modeling of integrated energy networks in time domain and its applications(I): two-port models in time domain [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(19): 6509-6520(in Chinese).
- [42] 李咏秋, 徐晋, 汪可友. 基于时域二端口模型的综合能源系统气网动态仿真算法[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(8): 3093-3104.
LI Yongqiu, XU Jin, WANG Keyou. Dynamic simulation algorithm of integrated energy system natural gas network based on time-domain two-port model [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(8): 3093-3104(in Chinese).
- [43] 李浦, 逯代兴. 协同仿真算法研究综述[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(19): 172-186.
LI Pu, LU Daixing. A review of co-simulation algorithm[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(19): 172-186(in Chinese).
- [44] YAO Shuai, GU Wei, WU Jianzhong, et al. Fast and generic energy flow analysis of the integrated electric power and heating networks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024, 15(1): 355-367.
- [45] 张苏涵, 顾伟, 俞睿智, 等. 综合能源系统建模与仿真: 综述、思考与展望[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(17): 1-21.
ZHANG Suhan, GU Wei, YU Ruizhi, et al. Modeling and simulation of integrated energy system: review, reflection and prospects[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(17): 1-21(in Chinese).
- [46] ZHANG Suhan, GU Wei, ZHANG Xiaoping, et al. Towards fast and robust simulation in integrated

- electricity and gas system: a sequential united method [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 1822-1836.
- [47] ZHANG Suhan, GU Wei, ZHANG Xiaoping, et al. Dynamic modeling and simulation of integrated electricity and gas systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(2): 1011-1026.
- [48] LIU Yang, SUN Kai, YAO Rui, et al. Power system time domain simulation using a differential transformation method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3739-3748.
- [49] LIU Yang, SUN Kai. Solving power system differential algebraic equations using differential transformation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 2289-2299.
- [50] ZHANG Tong, LI Zhigang, WU Qiuwei, et al. Dynamic energy flow analysis of integrated gas and electricity systems using the holomorphic embedding method[J]. Applied Energy, 2022, 309: 118345.
- [51] KOKOTOVIĆ P, KHALIL H K, O'REILLY J. Singular perturbation methods in control: analysis and design[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999.
- [52] RAMÍREZ-BETANCOUR R, FUERTE-ESQUIVEL C R, VAN CUTSEM T. A two-time scale simulation for dynamic analysis of power systems[J]. Electric Power Systems Research, 2012, 83(1): 185-195.
- [53] 史文博, 顾伟, 柳伟, 等. 结合模型切换和变步长算法的双馈风电建模及仿真[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6592-6599.
- SHI Wenbo, GU Wei, LIU Wei, et al. DFIG wind turbine model and simulation based on the combination of model switching and variable step size algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6592-6599(in Chinese).
- [54] YAO Rui, ZHAO Dongbo, MELIPOULOS A P S, et al. Advanced extended-term simulation approach with flexible quasisteady-state and dynamic semi-analytical simulation engines[J]. iEnergy, 2022, 1(1): 124-132.
- [55] 张宇, 秦文萍, 曹锐, 等. 基于两级轨迹灵敏度分析的DFIG动态全过程仿真简化建模方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(4): 114-120.
- ZHANG Yu, QIN Wenping, CAO Rui, et al. Simplified modeling method of DFIG full dynamic simulation based on two-level trajectory sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(4): 114-120(in Chinese).
- [56] SHEN Fu, JU Ping, SHAHIDEHPOUR M, et al. Singular perturbation for the dynamic modeling of integrated energy systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 1718-1728.
- [57] WANG L X, ZHENG J H, LI Z G, et al. Order reduction method for high-order dynamic analysis of heterogeneous integrated energy systems[J]. Applied Energy, 2022, 308: 118265.
- [58] HUANG Bonan, WANG Liuxing, WANG Rui, et al. A unified model for transient flow analysis of the integrated electric power and natural gas system with multiple time scales[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 142: 108133.
- [59] XIAO Tannan, CHEN Ying, WANG Jianquan, et al. Exploration of artificial-intelligence oriented power system dynamic simulators[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(2): 401-411.
- [60] SHEN Qing, ZHOU Yifan, ZHANG Peng, et al. Scalable neural dynamic equivalence for power systems[J]. IEEE Access, 2024, 12: 86513-86522.
- [61] SHEN Qing, ZHOU Yifan, ZHANG Qiang, et al. Physics-aware neural dynamic equivalence of power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 2341-2344.
- [62] XIAO Tannan, CHEN Ying, HUANG Shaowei, et al. Feasibility study of neural ode and dae modules for power system dynamic component modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2666-2678.
- [63] LU Lu, JIN Pengzhan, PANG Guofei, et al. Learning nonlinear operators via deeponet based on the universal approximation theorem of operators[J]. Nature Machine Intelligence, 2021, 3(3): 218-229.
- [64] LIN Guang, MOYA C, ZHANG Zecheng. Learning the dynamical response of nonlinear non-autonomous dynamical systems with deep operator neural networks [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 125: 106689.
- [65] MOYA C, LIN Guang, ZHAO Tianqiao, et al. On approximating the dynamic response of synchronous generators via operator learning: a step towards building deep operator-based power grid simulators[J]. arXiv preprint arXiv: 2301.12538, 2023.
- [66] MOYA C, ZHANG Shiqi, LIN Guang, et al. DeepONet-grid-UQ: a trustworthy deep operator framework for predicting the power grid's post-fault trajectories[J]. Neurocomputing, 2023, 535: 166-182.
- [67] RAISSI M, PERDIKARIS P, KARNIADAKIS G E. Physics-informed neural networks: a deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations [J]. Journal of Computational Physics, 2019, 378: 686-707.
- [68] STIASNY J, ZHANG Baosen, CHATZIVASILEIADIS S. PINNSim: a simulator for power system dynamics based on physics-informed neural networks[J]. Electric Power

- Systems Research, 2024, 235: 110796.
- [69] MOYA C, LIN Guang. DAE-PINN: a physics-informed neural network model for simulating differential algebraic equations with application to power networks[J]. Neural Computing and Applications, 2023, 35(5): 3789-3804.
- [70] MISYRIS G S, VENZKE A, CHATZIVASILEIADIS S. Physics-informed neural networks for power systems[C]// Proceedings of 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting(PESGM). Montreal: IEEE, 2020: 1-5.
- [71] STIASNY J, MISYRIS G S, CHATZIVASILEIADIS S. Transient stability analysis with physics-informed neural networks[J]. arXiv preprint arXiv: 2106.13638, 2023.
- [72] ZHANG Jiachen, GUO Qinglai, LI Baoju, et al. A privacy-preserving combined heat and power state estimation method based on physics-informed neural networks[C]//Proceedings of 2023 IEEE 7th Conference on Energy Internet and Energy System Integration(EI2). Hangzhou: IEEE, 2023: 730-735.
- [73] 张佳琛, 郭庆来, 王志伟, 等. 基于物理信息神经网络的热网动态状态估计方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10): 69-78.
- ZHANG Jiachen, GUO Qinglai, WANG Zhiwei, et al. Dynamic state estimation method of heating network based on physics-informed neural networks[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 69-78(in Chinese).
- [74] CHUNG E, LEUNG W T, PUN S M, et al. A multi-stage deep learning based algorithm for multiscale model reduction[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2021, 394: 113506.
- [75] LI M J, TSE C K. Quantification of cascading failure propagation in power systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2024, 71(8): 3717-3725.
- [76] LI M J, TSE C K, YI Ming. Steady-state cascading failure model with voltage instability event detection [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2024, 71(1): 463-472.
- [77] QI Junjian, WANG Jianhui, SUN Kai. Efficient estimation of component interactions for cascading failure analysis by em algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3153-3161.
- [78] SYED M M, LEMMA T A, VANDRANGI S K, et al. Recent developments in model-based fault detection and diagnostics of gas pipelines under transient conditions [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 83: 103550.
- [79] YU Ruizhi, ZHANG Suhan, SUN Yong, et al. Quantify gas-to-power fault propagation speed: a semi-implicit simulation approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2025, 40(6): 4591-4607.
- [80] ZHOU Shoujun, O' NEILL Z, O' NEILL C. A review of leakage detection methods for district heating networks [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 137: 567-574.
- [81] KALIATKA A, VALINČIUS M. Modeling of pipe break accident in a district heating system using RELAP5 computer code[J]. Energy, 2012, 44(1): 813-819.
- [82] LI Mengshi, DENG Weimin, XIAHOU Kaishun, et al. A data-driven method for fault detection and isolation of the integrated energy-based district heating system [J]. IEEE Access, 2020, 8: 23787-23801.
- [83] MANSERVIGI L, BAHLOWAN H, LOSI E, et al. A diagnostic approach for fault detection and identification in district heating networks[J]. Energy, 2022, 251: 123988.
- [84] ZHENG Xuejing, HU Fangshu, WANG Yaran, et al. Leak detection of long-distance district heating pipeline: a hydraulic transient model-based approach [J]. Energy, 2021, 237: 121604.



陆帅

在线出版日期: 2025-11-07。

收稿日期: 2025-08-25。

作者简介:

陆帅(1993), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统与综合能源、先进计算技术、优化理论等, shuai_lu@seu.edu.cn;

*通信作者: 顾伟(1981), 男, 博士, 教授, 研究方向为综合能源系统、电力系统仿真、分布式发电与微网、配电网等, wgu@seu.edu.cn;

俞睿智(1997), 男, 博士, 研究方向为综合能源系统建模仿真与开源数值仿真软件开发, rz.yu@foxmail.com;

张苏涵(1996), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为综合能源系统、电力系统安全分析等, zhangsh_seu@163.com;

徐一骏(1990), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统不确定性、状态估计、鲁棒调控、数据驱动动态分析等, yijunxu@seu.edu.cn。

(责任编辑 邱丽萍)