

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250929

# 面向多网耦合系统的“图层-锚点”孪生建模与推演框架研究

邵雪松<sup>1</sup>, 李波<sup>1</sup>, 杨世海<sup>1</sup>, 贺兴<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 211103; 2. 上海交通大学, 上海 200240)

**摘要:** 针对新型电力系统多物理域深度耦合带来的仿真建模壁垒与数据交互鸿沟问题, 提出一种面向多网耦合系统的“图层-锚点”孪生建模与推演框架。首先, 构建“图层”以封装单一物理域的拓扑结构与物理定律, 利用“锚点”显式定义跨域耦合实体的约束方程与交互逻辑, 在底层数据结构上实现异构模型的统一描述。其次, 设计集成优化求解与序贯求解的双模式协同计算引擎, 并引入全局统一时序管理机制, 以保障跨域数据在多时间尺度下的精确同步与一致性。最后, 基于 PJM5 节点电网与高保真合成气象场构建联合仿真场景, 开展周尺度经济调度与连续潮流推演验证。结果表明: 该框架能够有效处理能量流与价值流的深度耦合, 实现系统全局最优运行及气象驱动下的状态精准动态推演, 解决了异构系统语义互通难题, 验证了其在复杂耦合系统数字孪生建模中的有效性。

**关键词:** 多域耦合; 联合仿真; 统一建模; 图层-锚点; 数字孪生; 推演

## Research on a “layer-anchor” digital twin modeling and dynamic inference framework for multi-network coupled systems

SHAO Xuesong<sup>1</sup>, LI Bo<sup>1</sup>, YANG Shihai<sup>1</sup>, HE Xing<sup>2</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China; 2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Aiming at the simulation modeling barriers and data interaction gaps caused by deep coupling among multiple physical domains in new power systems, a “layer-anchor” digital twin modeling and dynamic inference framework for multi-network coupled systems is proposed. First, “layers” are constructed to encapsulate the topological structure and physical laws of single physical domains, while “anchors” are utilized to explicitly define the constraint equations and interaction logic of cross-domain coupling entities, enabling a unified representation of heterogeneous models at the underlying data structure level. Second, a dual-mode collaborative computing engine integrating optimization-based solution and sequential solution is designed. A global unified time-sequence management mechanism is introduced to ensure precise synchronization and consistency of cross-domain data across multiple time scales. Finally, a co-simulation scenario is constructed based on the PJM 5-bus power system and a high-fidelity synthetic meteorological field, and week-ahead economic dispatch together with continuous power flow simulations are carried out for validation. The results show that the proposed framework can effectively handle the deep coupling between energy flows and value flows, achieve global optimal operation, and enable accurate dynamic state inference driven by meteorology conditions. It solves the semantic interoperability issues among heterogeneous systems and verifies its effectiveness in digital twin modeling of complex coupled systems.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. J2024151).

**Key words:** multi-domain coupling; co-simulation; unified modeling; layer-anchor; digital twin; dynamic inference

## 0 引言

随着“双碳”目标的深入实施, 以新能源为主

**基金项目:** 国家电网有限公司科技项目资助(J2024151)“面向电网安全经济运行的用电负荷全景分析与灵活互动技术研究”

体的新型电力系统建设正加速推进, 能源系统的形态和运行模式正经历着深刻变革<sup>[1-4]</sup>, 其显著特征在于能源结构的高度电气化与跨领域基础设施的深度融合。电力系统不再是孤立的物理网络, 而是与交通系统中的电动汽车充电网络<sup>[5-7]</sup>、气象系统中的可再生能源出力<sup>[8]</sup>、建筑系统中的温控负荷等形成了紧密耦合、动态交互的复杂巨系统<sup>[9-11]</sup>。这种多网

耦合特性使得系统运行机理空前复杂,对传统的单一领域分析方法提出了严峻挑战<sup>[12]</sup>,更对构建能够映射物理实体、预测未来状态的数字孪生系统提出了迫切需求。

在应对这种复杂系统的仿真分析时,学界与工业界逐步形成了多条相对成熟的技术路径:接口标准驱动的协同仿真、总线/中间件式编排、统一语言的多物理建模以及基于行业信息模型的数据互操作。上述不同路径在语义层级、时间协调、可扩展性与工程落地方面各有侧重。在接口标准驱动的协同仿真领域,HLA(high level architecture)强调时间管理与对象管理的分布式联邦架构,适合多仿真器协同执行与时间同步<sup>[13]</sup>。在总线/中间件式编排领域,由美国国家实验室主导的HELICS(hierarchical engine for large-scale infrastructure co-simulation),在分布式资源频率响应、市场-物理耦合等研究中得到大量应用与性能验证<sup>[14]</sup>。文献[15]将异构仿真器拼装成含多种实体的大规模场景,适合策略评估与城市级综合能源测试。在统一语言/库的多物理建模领域,Modelica作为方程级多物理建模语言,天然支持机电/热/流体/控制等耦合,适合在单工具链内进行高保真联合建模与求解。但跨团队/跨平台集成时,仍需配套数据接口与语义映射。在行业信息模型的数据互操作领域,IEC CIM(common information model)在TSO(transmission system operator)/DSO(distribution system operator)/市场等多参与方之间提供对象级信息模型与交换规约,已在欧洲输电网络模型交换与区域协同分析中广泛实践。

然而,上述路径普遍依赖于多个专用仿真平台的级联使用,即在各领域内独立建模仿真,再通过中间数据接口进行信息交换<sup>[16-17]</sup>。这种“分体式”框架存在一系列根本性缺陷<sup>[18-19]</sup>:首先是模型壁垒,不同平台的建模语言与数据结构各异,导致跨平台模型难以直接集成;其次是数据鸿沟,各领域数据格式与时序分辨率不匹配,跨域数据在传递中难以保证精确对齐与物理意义的一致性;最后是求解协同性差,独立的求解器无法从全局视角进行统一推演与优化<sup>[20-21]</sup>。

为填补上述技术空白,本文提出了一种面向多网耦合系统的“图层-锚点”统一孪生建模与推演框架。该方法旨在从根本上解决传统方法的模型壁垒与数据鸿沟问题。其核心思想是通过“图层”来抽象描述独立的物理域网络,利用“锚点”来显式定义跨域耦合实体及其交互关系,从而在底层数据结构上实现了异构模型的无缝集成,为多物理域的协

同仿真与一体化分析提供了理论基础,为构建多物理域耦合系统的数字孪生体提供了理论基础。基于该建模思想,本文进一步设计并实现了一个集成了多模式求解器与统一时序管理机制的数字孪生仿真平台。将以“电力-气象”耦合系统为典型案例,详细阐述该框架的构建方法与工作流程,并通过仿真实验验证其在统一建模、状态推演与结果复现方面的可行性与优越性。

与现有的接口标准驱动、总线编排及统一语言建模相比,本文提出的“图层-锚点”框架并非是对现有技术的简单修补,而是一种全新的建模范式。传统协同仿真方法本质上是异构工具间的“事后”接口拼接与黑盒连接,各子系统仍保留原有异构数据结构,导致跨域交互时语义易丢失,且无法从根本上解决底层模型割裂的难题;而方程级多物理建模语言虽实现了方程级的多物理统一,但其紧耦合特性在面对大规模分布式推演时存在局限。

本文框架通过“图层”实现单一物理域的自治封装,通过“锚点”实现跨域关系的显式定义,在数据结构层面实现了异构物理实体的“事前”统一抽象。这种从底层打破壁垒的能力,解决了异构系统在语义上无法互通的痛点,提供了传统方法无法具备的跨域内生一致性保障,为构建高保真、全景感知的数字孪生系统奠定了坚实的理论基础。

## 1 “图层-锚点”统一建模理论

### 1.1 统一建模的必要性与挑战

现代能源系统的演进呈现出显著的跨领域融合趋势,其物理边界已从单一的电力网络扩展至交通、气象、热力等多个领域,形成了一个结构上相互交织、运行上动态交互的复杂耦合系统<sup>[22-24]</sup>。对这类系统进行仿真分析的根本挑战在于如何处理不同物理域之间的“异构性”与“紧耦合”<sup>[25]</sup>。

现有的分体式或级联式仿真方法本质上是在各自独立的建模范式下对子系统进行描述,再试图通过外部接口建立联系<sup>[26-27]</sup>。这种模式导致了模型描述范式的兼容性,即不同领域的物理定律、拓扑结构和状态变量难以在统一的数学框架下进行表达。此外,各子系统在时间与空间尺度上的巨大差异,以及跨域数据在传递过程中的语义模糊性,共同构成了难以逾越的鸿沟,使得精确捕捉跨域动态交互过程变得极为困难。

因此,要从根本上解决这些问题,必须跳出“事后连接”的传统思路,探索一种全新的“事前统一”的建模理论,为异构物理系统提供一个通用的、内在一致的数学描述框架。

### 1.2 “图层”的数学定义与描述

为实现对异构物理系统的统一描述, 本文提出“图层(Layer)”这一核心抽象概念。图层是用于封装单一、完整的物理域模型的载体, 其内部遵循该领域自身的物理定律, 具有明确的拓扑结构和状态变量集合。图层的设计目标是将单一领域的复杂性封装其内, 对外呈现标准化的交互接口, 从而屏蔽不同领域间的底层差异<sup>[28-29]</sup>。

在数学上, 一个网络型物理域图层 $L_i$ 可被形式化地定义为一个三元组, 如式(1)所示。

$$L_i = \{G_i, \mathbf{x}_i, \mathcal{F}_i\} \quad (1)$$

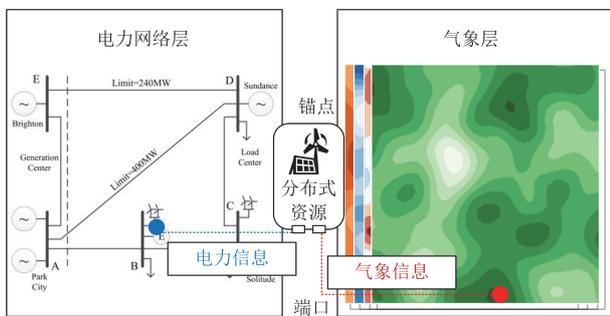
式中:  $L_i$  表示网络型物理域图层;  $i$  表示图层编号;  $G_i$  表示一个图, 包含该物理网络中的节点与连接关系(如电网中的母线与支路、交通网中的路口与路段);  $\mathbf{x}_i$  为描述该图层所有内部单元状态的状态向量, 例如, 对于电力系统图层,  $\mathbf{x}_i$  可能包含所有节点的电压幅值与相角、支路的潮流等;  $\mathcal{F}_i$  表示支配该图层内部运行的物理定律方程组, 通常表现为一组代数或微分方程, 其通用形式如式(2)所示。

$$\mathcal{F}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{D}_i, t) = 0 \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{D}_i$  表示作用于该图层的外部输入向量;  $t$  表示时间变量。通过这种定义, 任何具有网络拓扑结构的物理系统均可被统一地抽象为一个图层对象, 实现了异构系统在顶层设计上的同质化<sup>[28]</sup>。

### 1.3 “锚点”的数学定义及功能

如果说图层解决了单一领域的封装问题, 那么“锚点(Anchor)”则是为解决跨领域耦合问题而设计的核心机制。锚点代表抽象的跨域耦合实体, 它在逻辑上同时隶属于两个或多个图层, 并承担着在这些图层间建立物理关联和传递信息的关键功能。例如, 如图1所示, 一个风力发电机组就是一个典型的锚点, 它既是电力系统图层中的一个电源注入点, 又是气象场层中的一个风能捕获点。



锚点的核心功能是通过一组耦合约束方程来建立不同图层状态变量之间的数学关系。假设一个锚点 $A_k$ 耦合了图层 $L_i$ 和图层 $L_j$ , 其在两个图层中的接口状态变量分别为 $\mathbf{x}_i^{(k)} \in \mathbf{x}_i$ 和 $\mathbf{x}_j^{(k)} \in \mathbf{x}_j$ 。则该锚点的功能可由一个耦合方程来描述, 如式(3)所示。

$$\mathcal{H}_k(\mathbf{x}_i^{(k)}, \mathbf{x}_j^{(k)}) = 0 \quad (3)$$

式中:  $\mathcal{H}_k(\cdot)$  表示第 $k$ 个锚点的跨域耦合约束方程;  $k$  表示锚点编号;  $\mathbf{x}_i^{(k)}$  表示锚点 $k$ 在图层 $L_i$ 中对应的接口状态向量;  $\mathbf{x}_j^{(k)}$  表示锚点 $k$ 在图层 $L_j$ 中对应的接口状态向量;  $i, j$  分别表示锚点所连接的不同图层编号。通过将跨域耦合的物理逻辑封装在锚点内部, 使得各个图层的内部模型可以保持其独立性与纯粹性, 极大地提升了整个耦合模型的模块化程度与可扩展性<sup>[30]</sup>。

### 1.4 基于端口的跨域交互机制

为具体实现标准化层间与锚点之间的交互, 本文引入了“端口(Port)”机制。每个锚点都为其所连接的每一个图层开设一个虚拟端口, 所有物理量的交换均通过此端口进行。为确保物理定律的普适性, 端口交互的物理量被严格划分为两类: 广延量与强度量。

广延量是指那些具有流动和累加特性的物理量, 如功率、电流、热流、交通流量等。这类物理量在端口处的交互遵循守恒定律, 即任意时刻流入端口的总量等于流出总量的代数和。对于一个连接多个元件的端口, 其广延量 $u$ 需满足基尔霍夫电流定律的广义形式, 如式(4)所示。

$$\sum_{m=1}^M u_m = 0 \quad (4)$$

式中:  $u_m$  表示第 $m$ 个元件在端口处的广延量;  $m$  表示端口所连接元件的编号;  $M$  表示广延量下的端口连接的元件总数。

强度量则是指那些表征状态势能的物理量, 如电压、温度、压力、交通密度等。这类物理量在端口处的值是单一且唯一的, 所有连接至同一端口的元件都具有相同的强度量。对于一个端口, 其强度量 $v_N$ 需满足基尔霍夫电压定律的广义形式, 如式(5)所示。

$$v_1 = v_2 = \dots = v_N \quad (5)$$

式中:  $v_n$  表示端口处第 $n$ 个连接元件的强度量,  $n=1, 2, \dots, N$ , 其中 $N$ 表示强度量下的端口连接的元件总数。

通过对交互物理量进行广延量与强度量的严格区分, 该建模理论不仅能够正确处理不同类型物理场的耦合, 也为后续构建统一的求解约束矩阵提供

了清晰的数据依据。综上所述,“图层-锚点”的建模理论通过结构化抽象和标准化的交互机制,为异构、多域耦合系统的统一描述与分析提供了坚实的理论基础。

### 1.5 多域交互机理统一描述

跨域建模与仿真的核心挑战在于如何对信息流-能量流-价值流进行统一描述并实现耦合求解。对于全系统,系统的全局状态向量如式(6)所示。

$$\mathbf{X}(t) = \{\mathbf{x}_{\text{en}}(t), \mathbf{x}_{\text{info}}(t), \mathbf{x}_{\text{val}}(t)\} \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{X}(t)$  表示系统在时刻  $t$  的全局状态向量;  $\mathbf{x}_{\text{en}}$  表示能量域状态向量;  $\mathbf{x}_{\text{info}}$  表示信息域状态向量;  $\mathbf{x}_{\text{val}}$  表示价值域状态向量。

其次,在每一个锚点内,三类流通过耦合约束进行统一映射,如式(7)所示。

$$\mathcal{H}_k(\mathbf{x}_{\text{en},i}, \mathbf{x}_{\text{info},j}, \mathbf{x}_{\text{val},r}) = 0 \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{x}_{\text{en},i}$  表示图层  $L_i$  中能量域的端口变量;  $\mathbf{x}_{\text{info},j}$  表示图层  $L_j$  中信息域的端口变量;  $\mathbf{x}_{\text{val},r}$  表示图层  $L_r$  中价值域的端口变量;  $i, j, r$  分别表示不同图层的编号。通过  $\mathcal{H}_k$  的约束形式,可以在一个统一的方程中显式表示异构域之间的相互作用。

## 2 联合仿真框架设计与实现

为将“图层-锚点”的统一建模理论转化为一个可执行、可扩展的计算工具,本文设计并实现了一个面向多物理域耦合的联合仿真框架。该框架在软件工程层面遵循模块化与“关注点分离”的设计原则,将物理模型的抽象描述、仿真过程的计算执行以及底层数据的管理服务进行分层解耦,从而构建了一个兼具理论严谨性与应用灵活性的仿真环境。

### 2.1 仿真框架的总体架构

本仿真框架的体系结构在概念上可划分为3个层次:建模抽象层、协同计算层与基础设施服务层,如图2所示。

建模抽象层是“图层-锚点”理论的直接软件实现,为用户提供了标准化的接口来定义各类物理域模型。其中,图层作为可封装域内拓扑、参数及物理方程的软件对象,而锚点则作为独立的耦合逻辑单元存在。

协同计算层是框架的执行核心,它接收由建模层构建的系统级模型,并依据用户选择的仿真模式调度计算资源,执行仿真任务。

基础设施服务层则为上层提供必要的支撑,包括确保跨域数据同步的统一时序管理、保障模型正确性的完整性校验,以及支持场景复现与数据交互

的序列化机制。

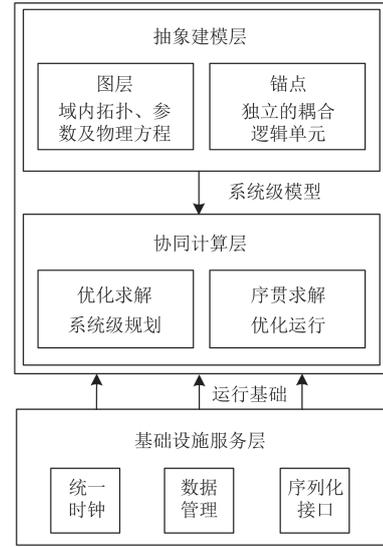


图2 联合仿真框架的总体分层架构图

Fig. 2 Overall layered architecture diagram of the joint simulation framework

这种分层架构确保了框架的各个部分可以独立演化,例如,用户可以增添新的物理模型而无需修改计算核心,反之亦然。

### 2.2 协同求解引擎

协同求解引擎作为框架的计算核心,内置了两种截然不同但功能互补的计算范式——优化求解与序贯求解,以分别应对系统级规划与动态运行两类分析任务。

优化求解模式旨在求解给定边界条件下特定时间域内的全局最优解。设整个耦合系统在仿真时域  $T$  内的决策变量构成一个超向量  $\mathbf{X}$ ,其包含了所有图层与锚点在各离散时刻的状态与控制变量。该模式将仿真问题转化为一个大规模的非线性规划或混合整数规划问题,其数学范式如式(8)所示。

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{X}} C(\mathbf{X}) \\ \text{s.t. } \mathcal{F}(\mathbf{X}) = 0 \\ \mathcal{H}(\mathbf{X}) = 0 \\ \mathcal{G}(\mathbf{X}) \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{X}$  表示系统在整个仿真时域内的决策变量向量;  $C(\mathbf{X})$  表示系统的总体优化目标函数;  $\mathcal{F}(\mathbf{X})$  表示各图层内部物理约束方程组;  $\mathcal{H}(\mathbf{X})$  表示锚点定义的跨域耦合约束方程组;  $\mathcal{G}(\mathbf{X})$  表示系统运行过程中需满足的不等式约束集合。

图层端口与锚点间的物理量交互通过关联矩阵  $\mathbf{M}$  建立。以满足守恒定律的广延量为例,图层端口的流出量  $\mathbf{y}_l$  与锚点的注入量  $\mathbf{X}_a$  之间的关系可表示

为  $y_L - MX_A = 0$ ，此方程将作为约束  $\mathcal{N}(X) = 0$  的一部分被自动装配。

序贯求解模式用于模拟系统在时间维度上的因果演化行为。整个耦合系统被抽象为一个高维非线性离散时间系统。令  $X(t)$  为系统在  $t$  时刻的全局状态向量， $D(t)$  为外部驱动向量(如气象、交通等时序数据)， $U(t)$  为施加的控制向量，则系统的状态转移可由式(9)描述。

$$X(t + \Delta t) = \Phi(X(t), D(t), U(t)) \quad (9)$$

式中： $\Phi(\cdot)$  表示系统的状态转移函数； $\Delta t$  表示时间步长。函数  $\Phi(\cdot)$  并非一个单一的整体函数，而是由一系列遵循预设依赖顺序的子函数  $\phi_i$  复合而成，每个  $\phi_i$  对应一个图层或锚点的状态更新逻辑。在每个时间步  $\Delta t$  内，引擎会依次调用这些函数，其中某些步骤可能需要通过数值迭代方法(如求解潮流方程的牛顿-拉夫逊法)来求解该步内的非线性方程组。该模式支持在任一步长动态更新输入向量  $D(t)$  和  $U(t)$ ，使其能够与外部数据流、强化学习智能体等进行交互，适用于在线分析与闭环控制验证。

### 2.3 统一时序管理与数据一致性校验

为保证跨领域仿真的有效性与可靠性，框架实施了严格的时间完整性与语义有效性保障机制。时间完整性由一个全局时钟对象  $T_{\text{sim}} = (t_{\text{start}}, t_{\text{end}}, \Delta t)$  来保证。所有时序数据，无论是先进的统计气象模型生成的高保真时空序列，还是从历史数据库中加载，都将被重采样至由  $T_{\text{sim}}$  定义的离散时间点上，从而确保跨域数据在时间维度上的绝对同步。

语义有效性则通过一套仿真实行前的模型自动校验协议来保障。该协议旨在检查静态模型数据是否存在逻辑或物理意义上的错误。例如，拓扑一致性校验旨在验证每一个锚点的连接位置  $\text{pos}_{k,i}$  是否为对应图层  $L_i$  的节点集  $V_i$  或边集  $E_i$  中的有效元素，如式(10)所示。

$$\forall k, i: \text{pos}_{k,i} \in V_i \cup E_i \quad (10)$$

式中： $\text{pos}_{k,i}$  表示锚点  $k$  在图层  $L_i$  中的连接位置； $V_i$  表示图层  $L_i$  的节点集合； $E_i$  表示图层  $L_i$  的边集合。

此外，物理量完备性校验则确保锚点为其所连接的端口提供了所有必需的物理量数据，避免了因模型参数缺失导致运行时失败。这些机制将模型构建阶段可能引入的人为错误前置并隔离。

## 3 实例构建与仿真验证

为定量评估本文所提框架的有效性，本节设计了一个含高比例可再生能源的“电力-气象”耦合仿真实验。实验设计的核心目的在于提供一个可复现

的、标准化的测试流程，用以验证框架在集成高保真外部模型、处理时空数据及协同求解等方面的核心功能。

### 3.1 案例场景描述与建模

本实验构建的案例场景以 PJM 5 节点电力系统为核心，该系统作为电力网络层，是整个耦合系统的能量平衡中枢。为模拟新型电力系统面临的典型挑战，该电力网络层将与基于统计模型构建的气象环境层进行深度耦合。该气象场层负责生成具有时空相关性的高保真气象数据(包括太阳辐照度、风速等)，作为电网中分布式光伏与风力发电机组出力的关键边界条件，从而构建一个能反映真实气象不确定性的仿真环境。

依据本文提出的建模理论，该场景被实例化为一系列图层与锚点对象的集合。各组件的具体配置如表 1 所示。电力网络与气象场被分别定义为图层对象。各类发、用电设备则被定义为锚点，它们通过端口与电力网络层连接。其中，风力发电与光伏发电锚点是实现跨域耦合的关键，其出力模型直接受气象场层数据的驱动。

表 1 案例场景的图层与锚点配置

Table 1 Layer and anchor configuration for the case scenario

组件	类型	所属图层	关键耦合参数
电力网络	图层	—	基准功率
气象场	图层	—	风速、光照、温度时序数据
火电机组	锚点	电力网络	最大/最小出力成本系数
聚合负荷	锚点	电力网络	基础有功/无功功率
风力发电	锚点	电力网络, 气象场	额定功率 风速-功率转换曲线
光伏发电	锚点	电力网络, 气象场	装机面积 光照-功率转换效率

### 3.2 动态数据生成与仿真流程

为确保仿真输入的真实性与精细度，本实验中关键的气象时序数据由一个先进的统计气象模型生成。本文提出的“图层-锚点”框架的优越性体现在其能够无缝集成此类复杂的外部模型。在本框架下，整个气象系统被抽象为一个可配置的“气象层”，其生成的数据能够被不同地理位置的“锚点”(如风电场、光伏电站)精确调用。

该气象生成模型具备高度的灵活性与物理保真度。首先，它支持多种典型气候类型(如温带、大陆性等)的参数化设定，并能同步生成太阳辐照度、风速、温度等多个具有物理一致性的气象变量，为构建多样化的仿真场景提供了基础。其次，区别于传统的单点时间序列外推方法，该模型的核心优势在

于其空间相关性建模能力。通过对目标区域进行网格化设定, 模型能够合成二维的气象场, 确保了不同地理位置的气象输入既存在随机性, 又在空间分布上符合真实的物理规律。这种高保真的时空数据为精确评估分布式可再生能源的集群出力特性提供了坚实的数据基础。

此外, 得益于本仿真框架统一的接口设计, 研究人员可以便捷地对气象场景进行精细化控制与复现, 既支持快速调用默认配置, 也支持对气候参数进行深度自定义, 从而高效地构建和管理多种仿真设定。

图 3 详细展示了本研究所采用的合成气象数据在特定时刻的空间分布特征。通过网格化建模, 模型生成了包含太阳辐照度、温度与风速的二维气象场。如图 3 所示, 太阳辐照度在目标区域内呈现出显著的空间差异, 其强度分布在  $520\sim 800\text{ W/m}^2$  之间, 高辐照区域集中分布于区域东北部; 温度场展现了平滑的地理过渡特性, 变化范围覆盖  $24.0\sim 30.4\text{ }^\circ\text{C}$ ; 而风速数据则在  $13.0\sim 17.0\text{ m/s}$  的区间内波动, 体现了局地微气象的随机性。这种高保真的多维空间气象场数据, 为精确评估分布式可再生能源在不同地理位置的集群出力差异提供了坚实的数据基础, 有效克服了传统单点外推方法的局限性。

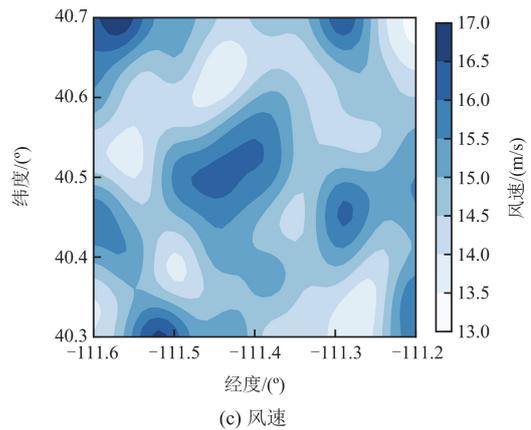
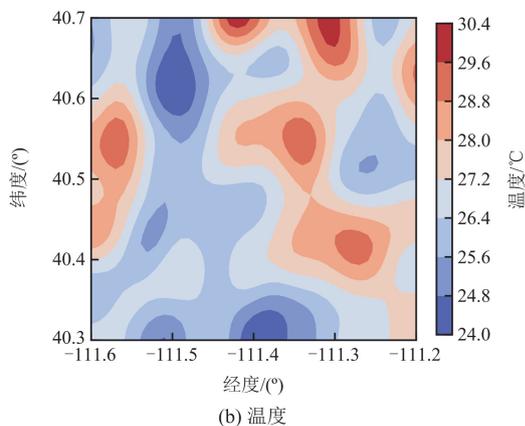
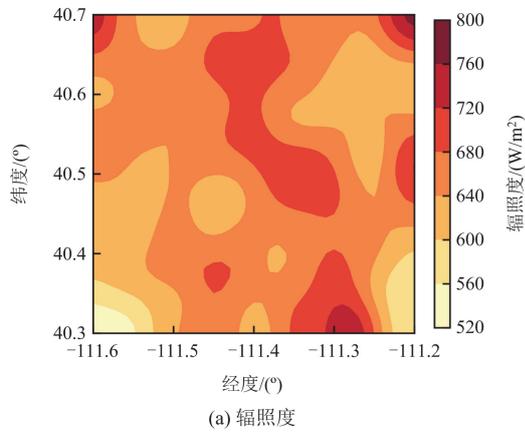


图 3 合成气象模型生成的关键时空数据

Fig. 3 Key spatio-temporal data generated by the synthetic meteorological model

整个仿真实验严格遵循图 4 所示的标准化流程。该流程首先从模型初始化开始, 加载电力网络层的拓扑参数和气象场层的基本设定, 并建立起各可再生能源锚点与两层之间的映射关系。随后, 通过时钟配置和时序数据准备, 为整个仿真周期生成统一的时间基准和高保真的外部驱动序列。

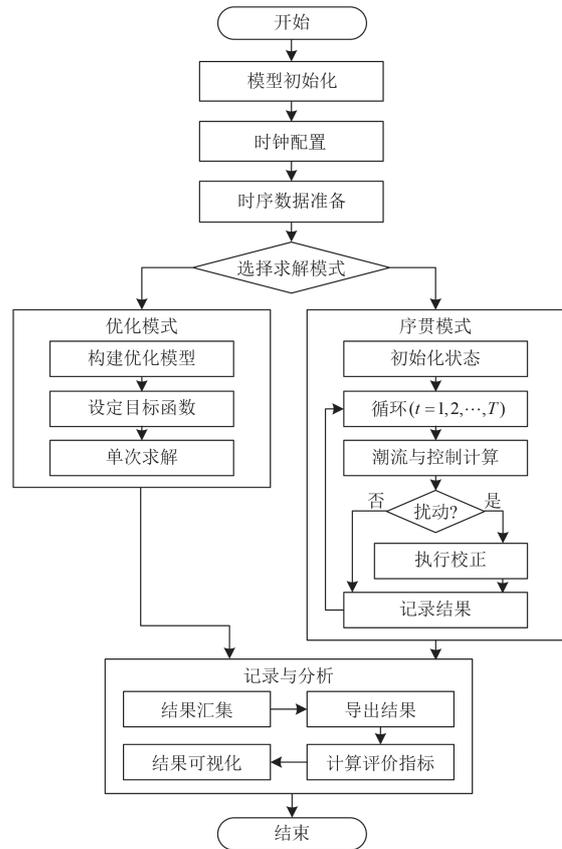


图 4 联合仿真实验流程图

Fig. 4 Joint simulation experimental workflow diagram

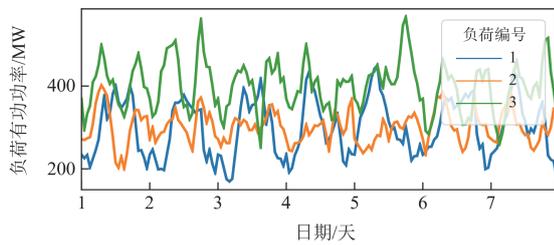
流程的核心在于求解模式选择。可根据分析目标,选择进入两种不同的计算路径:优化模式旨在解决日前经济调度等规划类问题,它将整个时间周期的问题构建为一个全局优化模型,并进行一次性求解;而序贯模式则用于模拟系统的实时运行,它通过时间步进循环,在每个时刻更新状态、进行潮流计算,并具备响应扰动、执行校正控制的能力。无论通过何种模式,所有计算结果最终都将进入统一的记录与分析模块。该模块负责将原始数据汇集为标准时间序列,支持多格式导出,并自动计算预设的评价指标,为最终的对比分析与结论提炼提供数据支撑。这一完整、闭环的流程设计,确保了本研究的严谨性与可复现性。

### 4 实验结果与分析

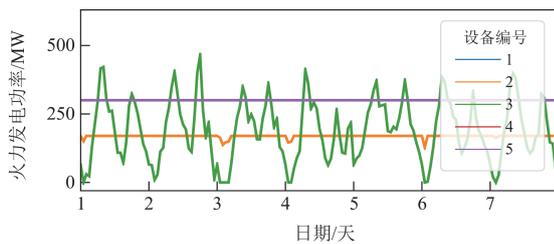
本节将呈现并分析基于第3节实验设计所获得的仿真结果,从数据层面证实本文所提仿真框架在模型集成、协同求解和数据管理等方面的能力。

#### 4.1 优化求解模式功能验证

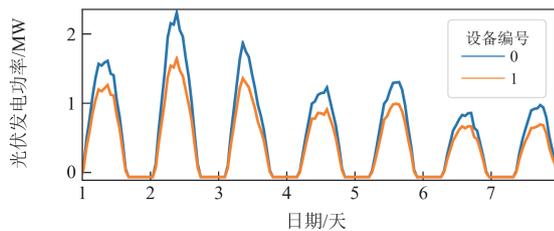
为验证优化求解模式的功能,对“电力-气象”耦合系统进行了一周的经济调度仿真。图5展示了该模式下的主要输出结果。



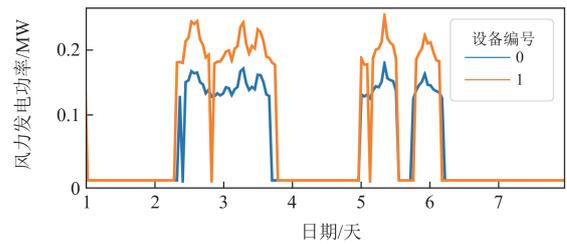
(a) 负荷需求



(b) 火电机组调度计划



(c) 光伏锚点有功功率



(d) 风电锚点有功功率

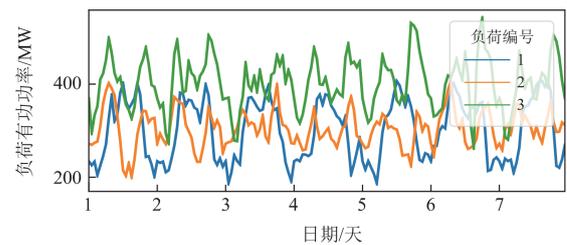
图 5 优化求解模式下的系统输入与调度结果(一周)

Fig. 5 System inputs and dispatch results in optimization mode (one week)

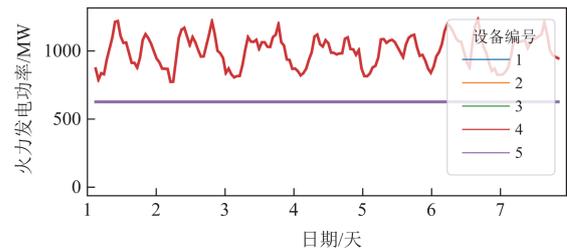
图5(c)和图5(d)分别展示了光伏与风电锚点的有功功率曲线。观察可知,光伏发电功率具有显著的日周期特性,峰值功率达到约2.0 MW;而风力发电功率整体水平较低,受到切入风速影响,波动范围集中在0~0.25 MW之间,呈现出较强的随机性。图5(b)展示了火电机组的优化调度结果。可以清晰地观察到,火电机组出力与可再生能源(特别是光伏)的功率呈现显著的负相关性。在午间光伏大发时段(如第2、3日的日中时刻),火电功率被显著压低,部分时段甚至降至100 MW以下以消纳新能源;而在夜间或风光出力不足时,火电机组则迅速增发至300~500 MW区间以满足系统负荷需求。这一结果验证了优化求解器能够充分利用可再生能源的时空互补性,在满足系统约束的前提下实现全局经济最优调度。

#### 4.2 序贯求解模式功能验证

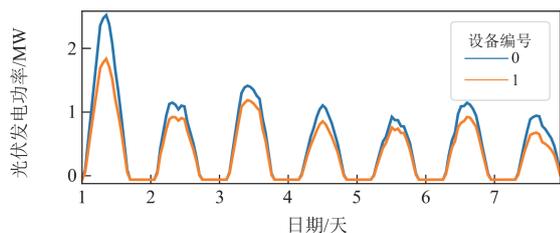
为验证序贯求解模式在模拟系统实时动态方面的能力,对同一场景进行了一周的连续潮流仿真。图6展示了该模式下的输出结果。



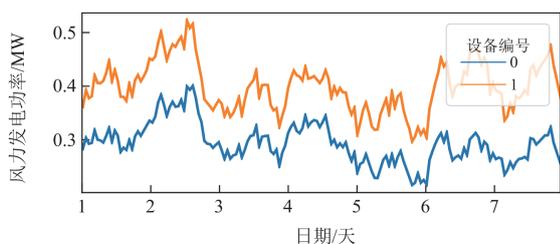
(a) 负荷需求



(b) 火电机组调度计划



(c) 光伏锚点有功功率



(d) 风电锚点有功功率

图 6 序贯求解模式下的系统节点注入功率(一周)

Fig. 6 Nodal power injections in sequential mode (one week)

图 6 展示了序贯求解模式下系统各关键设备的实时动态功率响应。图 6(b)中, 火电机组的功率在 800~1200 MW 的高位区间内频繁波动, 这表明在序贯模式下, 火电机组承担了平衡系统高频扰动的主要调节责任。图 6(c)和图 6(d)分别展示了光伏与风电的动态功率, 其中风电功率在 0.2~0.5 MW 区间内的非平稳波动被完整保留。对比图 5 的优化结果, 序贯模拟下的曲线(特别是火电与风电)展现了更多的锯齿状高频分量, 这反映了系统在应对气象实时变化和负荷随机波动时的真实调节过程。所有状态变量的推演均在设定的时间步长内完成了收敛, 证明了该框架在处理含高波动性资源的非线性动态系统时, 具备良好的数值稳定性与时序推演能力。

## 5 结论

针对新型电力系统中能源与气象等多领域深度耦合所带来的仿真分析挑战, 本文提出并验证了一种“图层-锚点”统一建模与数字孪生仿真框架。该研究的核心目的在于填补当前多物理域仿真领域中因模型壁垒与数据鸿沟所形成的技术空白, 为复杂耦合系统的数字孪生构建与状态推演提供一套系统性的解决方案。

本文的主要贡献在于: 首先, 从理论层面提出了一种“图层-锚点”的结构化抽象建模方法。该方法通过将单一物理域封装于“图层”之内, 并利用“锚点”来显式定义跨域交互关系, 成功地异构物理系统提供了一个统一、自洽的数学描述范式。其次, 基于该理论设计并实现了一个集成了优化求

解与序贯求解双模式的数字孪生仿真框架。该框架不仅从底层确保了跨域数据在时序上的一致性, 也兼顾了系统规划研究所需的全局优化能力与对系统实时状态进行动态推演的能力。

通过对含高比例可再生能源的“电力-气象”耦合系统的实例验证, 本文证实了所提框架作为数字孪生核心引擎的工程可行性与有效性。实验结果表明, 该框架能够无缝集成高保真的外部气象模型, 并精确地模拟跨域间的动态交互过程; 协同求解引擎在两种模式下均表现出良好的计算稳定性与功能完备性。相较于传统的多平台级联式联合仿真方法, 本文提出的“图层-锚点”框架在模型抽象统一性、跨域数据一致性、以及计算效率与可扩展性方面均展现出显著优势, 从而为新型电力系统的高保真数字孪生奠定了更坚实的基础。

尽管本研究已证实了该框架在处理异构耦合建模与推演方面的有效性, 但受限于当前的集中式计算架构, 其在超大规模应用中仍存在一定的局限性。实验表明, 虽然框架能高效处理千节点级系统, 但当耦合系统的节点规模突破万级且需进行全网高维非线性(如复杂交流潮流)连续推演时, 单机求解器的计算耗时将显著增加, 可能难以完全满足毫秒级的硬实时控制需求。此外, 当前框架主要侧重于物理域与信息域的交互, 对于社会域行为(如用户非理性用电)等复杂随机性因素的建模尚处于初步阶段。

基于此, 未来的研究将重点聚焦于以下方向:

- 1) 高性能计算架构升级: 研究引入分布式并行计算策略与云原生技术, 突破超大规模系统的算力瓶颈;
- 2) 耦合广度的拓展: 引入交通网络与社会网络图层, 通过构建电动汽车充电站等新型锚点, 将研究拓展至电力-交通-社会等更复杂的综合能源系统;
- 3) 数据底座与数智赋能: 充分利用本框架高保真、多维度的推演能力, 将其作为生成式 AI 与强化学习算法的训练环境。通过海量异构仿真数据的生成, 为新型电力系统的数智化决策提供高质量的样本支撑与试错空间, 这也是本技术区别于传统离线仿真工具的重要应用价值。

## 参考文献

- [1] 张沈习, 王丹阳, 程浩忠, 等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 189-207.  
ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2022, 46(8): 189-207.
- [2] 王朋, 张迪, 张勇军, 等. 新型电力系统数智化关键技术应用研究与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(6): 175-187.  
WANG Peng, ZHANG Di, ZHANG Yongjun, et al. Research and prospects for key digital-intelligent technology applications in new power systems[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(6): 175-187.
- [3] 李高扬, 王宁, 高若田, 等. 面向新型电力系统智能化提效的多源异构数据融合技术研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(11): 116-121.  
LI Gaoyang, WANG Ning, GAO Ruotian, et al. Research on multi-source heterogeneous data integration technology for smart efficiency improvement in novel power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(11): 116-121.
- [4] 李鹏, 刘念, 胡秦然, 等. “新型电力系统数字化关键技术综述”专辑评述[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(6): 1-12.  
LI Peng, LIU Nian, HU Qinran, et al. Commentary on special issue of reviews on key technologies for digitalization of new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 1-12.
- [5] 顾延勋, 林晓明, 廖雁群, 等. 计及电动汽车边缘计算的配电网与充电站分层运行优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(6): 63-73.  
GU Yanxun, LIN Xiaoming, LIAO Yanqun, et al. Hierarchical operation optimization method for distribution networks and charging stations considering edge computing in electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(6): 63-73.
- [6] 黄博, 胡博, 谢开贵, 等. 计及交通事故影响的电动汽车路径规划和充电导航策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(19): 47-59.  
HUANG Bo, HU Bo, XIE Kaigui, et al. Electric vehicle path planning and charging navigation strategies considering the impact of traffic accidents[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 47-59.
- [7] 陈卓, 江周熹, 陈康, 等. 考虑充电节点过载的电动汽车公共充电网络规划方法[J]. 电测与仪表, 2025, 62(9): 116-124.  
CHEN Zhuo, JIANG Zhouxi, CHEN Kang, et al. Planning method of electric vehicle public charging network with overloaded charging nodes[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(9): 116-124.
- [8] 王珍意, 刘广一, 汤亚宸, 等. 新型电力系统“六要素”的协同优化[J]. 供用电, 2025, 42(7): 3-11, 22.  
WANG Zhenyi, LIU Guangyi, TANG Yachen, et al. Collaborative optimization of “six elements” in modern power systems[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(7): 3-11, 22.
- [9] LIU S, DAI Y, LIU X, et al. A systematic review of modeling method of multi-energy coupling and conversion for urban buildings[J]. Energy and Buildings, 2025, 342.
- [10] 马佳彤, 张儒峰, 付麟博, 等. 输配电网多主体参与的碳-电耦合市场双层交易决策方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(17): 12-26.  
MA Jiatong, ZHANG Rufeng, FU Linbo, et al. A bi-level trading decision-making method for the carbon-electricity coupling market with multi-agent participation in transmission and distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(17): 12-26.
- [11] XU D, WU Q, ZHOU B, et al. Distributed multi-energy operation of coupled electricity, heating, and natural gas networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2457-2469.
- [12] WU F, YANG J, KE S, et al. Coordinated fault risk prevention in coupled distribution and transportation networks considering flexible travel demands[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2025, 10(4): 16-27.
- [13] ALBAGLI A N, FALCÃO D M, DE REZENDE J F. Smart grid framework co-simulation using HLA architecture[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 130: 22-33.
- [14] HARDY T D, PALMINTIER B, TOP P L, et al. HELICS: A co-simulation framework for scalable multi-domain modeling and analysis[J]. IEEE Access, 2024, 12: 24325-24347.
- [15] STEINBRINK C, BLANK-BABAZADEH M, EL-AMA A, et al. CPES testing with Mosaik: co-simulation planning, execution and analysis[J]. Applied Sciences, 2019, 9(5): 923-930.
- [16] BARBIERATO L, RANDO MAZZARINO P, MONTAROLO M, et al. A comparison study of co-simulation frameworks for multi-energy systems: the scalability problem[J]. Energy Informatics, 2022, 5(S4): 53.
- [17] 叶宇剑, 吴奕之, 胡健雄, 等. 城市电力-交通耦合系统的联合推演与协同优化: 研究综述、挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(11): 4144-4163.  
YE Yujian, WU Yizhi, HU Jianxiong, et al. Joint prediction and coordinated optimization of integrated urban power distribution and transportation systems: literature review, challenges and prospects[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(11): 4144-4163.

- [18] ALFALOUJI Q, SCHRANZ T, FALAY B, et al. Co-simulation for buildings and smart energy systems—a taxonomic review[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2023, 126.
- [19] GOMES C, THULE C, BROMAN D, et al. Co-simulation: a survey[J]. *ACM Computing Surveys*, 2018, 51(3): 1-33.
- [20] SCHWEIGER G, GOMES C, ENGEL G, et al. An empirical survey on co-simulation: promising standards, challenges and research needs[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2019, 95: 148-163.
- [21] 郭琦, 卢远宏. 新型电力系统的建模仿真关键技术及展望[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(10): 18-32.  
GUO Qi, LU Yuanhong. Key technologies and prospects of modeling and simulation of new power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(10): 18-32.
- [22] 郭敏, 夏明超, 陈奇芳. 基于能源自组织的能源-信息-交通-社会耦合网络研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(16): 5521-5540.  
GUO Min, XIA Mingchao, CHEN Qifang. A review of the energy-cyber-transportation-social coupling network based on energy self-organization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(16): 5521-5540.
- [23] 沈文韬, 刘子裕, 陈晨, 等. 交能融合下智能网联道路供电弹性: 挑战、提升策略与展望[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(21): 10-28.  
SHEN Wentao, LIU Ziyu, CHEN Chen, et al. Power supply resilience of connected and automated highway in transportation-energy integration: challenges, enhancement strategies and prospects[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(21): 10-28.
- [24] 周步祥, 姚先禹, 臧天磊. 计及电-气双向耦合的综合能源配电网优化重构[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(2): 17-24.  
ZHOU Buxiang, YAO Xianyu, ZANG Tianlei. Optimization and reconfiguration of the integrated energy distribution network considering the electricity-gas two-way coupling[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(2): 17-24.
- [25] MIHAL P, SCHVARCBACHER M, ROSSI B, et al. Smart grids co-simulations: survey & research directions[J]. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2022, 35.
- [26] 陈国平, 李明节, 董昱, 等. 构建新型电力系统仿真体系研究[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(17): 6535-6551.  
CHEN Guoping, LI Mingjie, DONG Yu, et al. Research on the simulation technology architecture for the new-type power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(17): 6535-6551.
- [27] 沈沉, 陈颖, 黄少伟, 等. 新型电力系统仿真应用软件开发理念与发展路径[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(10): 75-86.  
SHEN Chen, CHEN Ying, HUANG Shaowei, et al. Design idea and development path of simulation application software for new power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(10): 75-86.
- [28] VALLEE M, BAVIERE R, SEGUIN V, et al. An efficient co-simulation and control approach to tackle complex multi-domain energetic systems: concepts and applications of the PEGASE platform[J]. *arXiv preprint arXiv: 2506.15195*, 2025.
- [29] LEE E A. Cyber physical systems: design challenges[C] // 2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-oriented Real-time Distributed Computing (ISORC), May 5-7, 2008, Orlando, FL, USA: 363-369.
- [30] NGUYEN P H, ALI S, YUE T. Model-based security engineering for cyber-physical systems: a systematic mapping study[J]. *Information and Software Technology*, 2017, 83: 116-135.

收稿日期: 2025-08-27; 修回日期: 2026-01-14

作者简介:

邵雪松(1987—), 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向为智能用电; E-mail: shaoxs@js.sgcc.com.cn

贺兴(1986—), 男, 通信作者, 博士, 副研究员, 研究方向为电力时空大数据分析与能源系统数字孪生技术。

E-mail: hexing\_hx@126.com

(编辑 许威)