

数字孪生——

# 推动新型电力系统认知与决策的新手段

李鹏 黄文琦 余涛

构建新型电力系统是贯彻落实国家能源安全新战略的重大需要，是实现我国能源结构转型发展的关键助力，是实现“双碳”目标的必由之路。而新型电力系统在不同建设阶段将呈现出丰富的特征，在推动能源转型发展的同时也将给电力系统的仿真决策带来许多新挑战。作为新一代仿真决策系统，数字孪生通过构建新型电力系统模型生成演进新格局及搭建完备的关键技术体系，实现物理现实世界与数字虚拟世界精准映射，支持从多尺度、多场景、多任务对新型电力系统进行认知决策，有效适应新型电力系统的发展，成为推动新型电力系统建设的强大助力。

为此，南方电网立足发展新阶段，贯彻党中央和国家的战略方针，全面落实数字电网建设和数字化转型的战略部署，通过以物理电网为基础，以云计算、大数据、物联网、移动互联网、人工智能等数字技术为手段，全面分析新型电力系统发展特征，探索电网数字孪生建设技术路径，旨在贯通电力系统各环节的能量流、信息流、价值流，在数字物理电网、数字企业运营、数字客户服务、数字经济产业四大方面承载新型电力系统建设。

## 新型电力系统不同发展阶段面临不同仿真决策挑战

结合国家“双碳”战略目标的部署，以2030年及2060年为关键时间点，新型电力系统建设可被划分为发展期及成型期两个阶段。在由发展到成型的过程中，新型电力系统逐步实现化石能源为支撑到新能源全覆盖的转化，其建设贯穿“电力生产—电力消费—电力消费—电力市场”的全过程，呈现出大规模、多主体、快时变、高随机、非线性的特征，给新型电力系统仿真决策带来了如下挑战：一是新型电力系统调控对

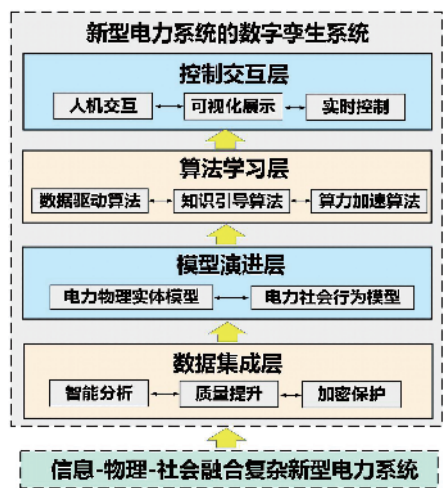


图2 面向新型电力系统的数字孪生理想框架

象大规模持续变化，非线性特征突出，运行不确定性加剧；二是市场主体出现随机行为及复杂博弈关系；三是系统时空耦合关系复杂，推演及决策的尺度多、跨度大；四是仿真任务繁杂，计算压力大，系统实时认知决策困难。而传统电力系统仿真决策软件多集中于解决一定规模、尺度、范围及任务下的确定性问题，依赖于固定且严格的数学机理模型，通过集中式平台进行统一计算求解。这将难以完全适应新型电力系统带来的新挑战；在仿真的真实性方面，挑战一、二、三表示电力系统运行特性向随机化和复杂化转变，传统仿真决策系统面向单一业务的数学机理模型在未来可能出现计算失准的现象；在决策的有效性方面，挑战一、三、四表示电力系统仿真决策从规模、尺度、跨度到任务都会快速增长，传统仿真决策系统集中式平台对计算到安全都面临着巨大压力，逐步难以满足未来电力系统实时可观、可知、可控的决策需求。

因此，作为新一代仿真决策系统，数字孪生需要构建新型电力系统模型生成演进的新格局，以对庞大、开放、随机且随社会发展动态变化的新型电力系统进行准确刻画及实时映射，保证其准确性；同时，数字孪生应完善新型电力系统认知决策关键技术体系，以适应新型电力系统不断发展的业务需求，保证其有效性，最终助力新型电力系统认知决策新发展。

## 数字孪生构建新型电力系统模型生成演进新格局

数字孪生将打破电力系统模型搭建过程低效化、局部化、理想化的局限性。传统电力系统模型搭建方式聚焦于局部区域的物理业务，依托于严格数学公式建立设备物理模型，在跨层级、跨区域、跨业务建模时缺乏有效的机制来应对模型等效、系统不确定度的传递和有效评估，难以有效发挥新型电力系统中海量数据的信息优势，呈现出低效化、局部化、理想化的局限性。相较而言，数字孪生通过“图形-数据-模型”的有机结合，可有效消解电力系统存在的交互壁垒，突破各层级、各业务模型之间相互独立、信息割裂、协调困难的现状，实现新型电力系统“源-网-荷”多层次模型的智能生成，加速电力系统建模体系融合。

数字孪生将赋予电力系统模型自我演进、终身学习的新能力。理想的电力系统模型旨在实现真实物理对象的准确、实时映射，但由于建模对象特性时变、模型机理偏差及感知设备故障等多种原因，难以保证模型的准确和实时映射。数字孪生一方面依托于“图形-数据-模型”融合驱动技术对模型基础数据进行甄别提取，保障其可用性；另一方面，基于先进、基于多学科知识有效提取建模对象的机理约束，将其转化为有效的数学方程，并作为正则化项融

合至数据驱动算法的损失函数中实时引导智能模型进行自我纠偏，保证模型与实体对象物理机理的一致性，实现“机理驱动-数据驱动”的有机融合，赋予了电力系统自我演进、终身学习的重要能力，保障数字孪生仿真的真实性。

## 数字孪生助力新型电力系统认知决策新发展

数字孪生由数据基础层、模型演进层、算法学习层、交互展示层组成，贯穿从局部到整体、从认知到决策的全过程，在依托于模型生成演进框架对新型电力系统进行精准刻画及实时映射的同时，还需持续完善新型电力系统认知决策配套的关键技术体系，提升能源电力系统的认知和决策的有效性，赋能系统的感知、表征、决策领域，增强系统可观、可知、可控能力，并为其其他领域数字化、智能化转型提供可参考的技术范本。

一方面，数字孪生搭建新型电力系统

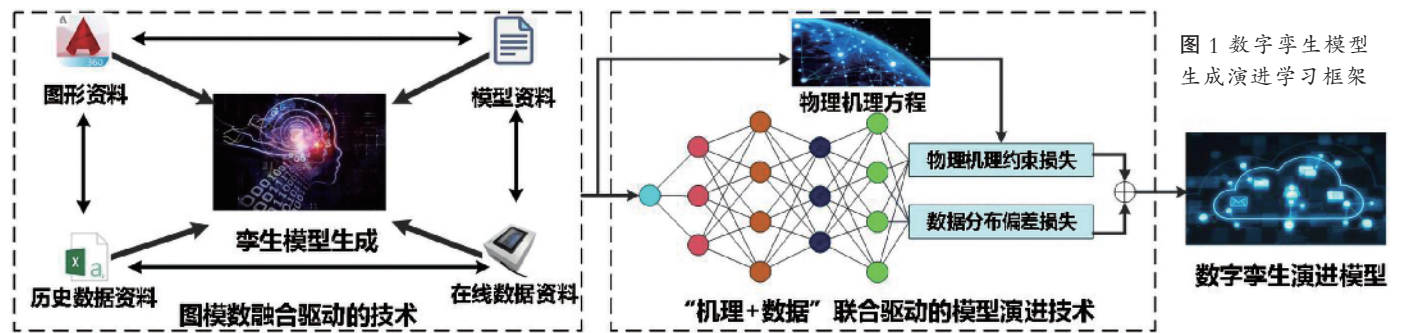


图1 数字孪生模型生成演进学习框架

认知决策关键技术体系。广域多参量数据全息感知技术依托于先进传感器的研发，将物理现象转化为数字信息，利用高维数据空间的降维数值分析和等效技术方法，实现多尺度时间-空间-参量的电力系统全息数据感知，是实现数据感知处理的技术基石。

多元异构主体的混合驱动模型构建与演进技术综合机理模型、数值仿真、大数据分析、人工智能等技术的长处，基于机理与数据互相纠缠的内在逻辑，形成机理知识+数据驱动联合驱动的新型电力系统多元主体表征演进的理论和办法，是实现自我演进的技术内核。

大规模多层次多尺度推演任务的分解协调及加速计算技术基于数字孪生云边协同的高性能计算框架和推演算法，实现多层次多尺度的复杂计算任务分解和协调，形成高强度虚实互动的并行推演计算与算力动态分配方法，是有效映射的技术保障。

面向多场景需求的分布式主体群体智能决策技术利用复杂系统智能群体博弈和知识发现方法，达到电力系统智能决策的自学习和自优化，并基于海量场景自动聚类方法选择新型电力系统的典型运行场景，形成面向多元主体复杂系统的高效运

行策略，是优化决策的技术要点。

数据信息安全防御技术基于新型密码的数据安全防护体系，形成分布式纵深防御功能的信息安全威胁防御保护，实现信息安全计算功能的去中心化，充分利用“云-管-边-端”框架中各部分的算力资源，保证网络边缘能量交换、数据交换的安全性，是安全运行的技术前提。

可视化与虚实交互技术基于降维分析及混合现实方法等可视化与虚实交互技术，结合三维建模等基础手段建立系统物理对象的实体模型，并针对实际系统各物理对象的运行特点，对其高维特征进行降维表达，构建物理和数字信息共存，并可实时互动的可视化环境，将虚拟的信息应用到真实世界，实现现实和虚拟世界的有效合并，达到超越现实的感官体验，是服务实际需求、提高业务水平的技术手段。

另一方面，数字孪生有效赋能新型电力系统感知、表征、决策领域。依托于上述技术体系，数字孪生在有效满足新型电力系统的

强系统“可控”能力。作为实际系统的虚拟映射，数字孪生系统积累大量实际系统运行数据，可根据需求对系统可能的运行轨迹进行模拟推演，天然具备成为验证各种调度及控制算法的测试平台的条件。同时，数字孪生系统在调度人员交互过程中，可对富含大量经验知识的调度指令进行有效学习，探讨调度经验的模型化表达，在数字孪生系统算法层中训练调度机器人，是实现人工智能决策技术由以人为主的辅助决策向以人为辅的智能决策转变的重要途径。

## 数字孪生技术应用要分阶段展开

总体来看，数字孪生建设是当前我国能源电力系统发展的迫切需求，也是在能源行业落实数字中国重大战略的关键举措。对于数字孪生如何在复杂能源电力系统应用的问题，各位学者及从业者需要时刻保持清醒的认知，把握住“数据-模型-

算法-控制”这一条主线，分阶段展开工作。在技术研发阶段，对上述关键技术体系进行技术攻关与相关产品的自主研发，形成完备的数字孪生系统研究体系及产品供应体系；在试点应用阶段，以局部新增系统或具备改造条件的存量系统为对象，全面铺设数字孪生配套软硬件装置，验证数字孪生技术可行性，并实现相关产品的技术迭代；在规模化推广应用阶段，应充分调研目标地区当前的技术水平及应用需求，有效利用各地区已有的数据基础、硬件设备及相关平台资源，针对具体需求因地制宜的调整数字孪生建设框架，最大程度提高区域能源电力系统的认知和决策水平。

(李鹏系南方电网数字电网领域首席技术专家、南方电网数字电网集团有限公司总经理，黄文琦系南方电网人工智能领军技术专家、南方电网数字电网集团有限公司人工智能与智能软件团队负责人，余涛系华南理工大学教授、“珠江学者”特聘教授、博士生导师)



宋枫

电力是现代生产的基本投入要素与现代生活的必需品，是实现国家现代化的重要物质基础，攸关国计民生和国家安全。我国发电资源和用电负荷的逆向分布特征，以及大力发展可再生能源以支撑碳达峰碳中和目标的要求，迫切需要建立全国统一电力市场。电力要素的自由流动是提高经济循环效率的重要保障，引导电力资源更大范围有效配置能够带来乘数效应，赋予经济增长强大动能，支撑我国经济高质量发展。

2015年新一轮电力体制改革启动以来，我国电力市场化改革取得显著成效，通过在发电和售电环节建立市场，提升了电力行业运行效率，更好地配置了电力资源，推动了电力行业低碳转型。今年以来，《关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见》正式印发，《南方区域电力市场工作方案》得到正式批复。作为全国首个获批，也是目前唯一获批的区域电力市场，自7月23日以来，南方区域电力市场已稳定试运行3个月，共有135家发电主体、331台机组、432家用户主体参加了交易，覆盖了广东、云南、贵州3省市场化电厂及3大流域水电厂和部分用电主体。目前，南方区域基本形成包括中长期市场、现货市场和辅助服务市场的电力市场体系；基本建立输配电价由政府核定、发电由市场交易形成的电价机制。

在新形势、新要求、新挑战下，未来继续有力有序推进南方区域市场建设，打造区域电力市场标杆仍需做好以下两点：

一方面，加快推进南方区域电力市场建设，需要深刻理解南方区域电力市场的定位与目标。加快推进南方区域电力市场建设，需要把握好南方区域电力市场的重点任务。南方区域电力市场的重点任务探索电力市场体系基础规则的统一化和标准化实践经验，为全国电力市场建设提供标准指南。我国电力市场改革虽然取得了显著成效，但距离全国统一电力市场要求还有较大差距。最为核心的问

# 双措并举推进南方区域电力市场建设

题是市场基础制度规则不统一，各省中长期市场、现货市场独立设计、独立运行，省区之间市场模式、交易规则、价格机制以及业务运作都存在较大差异。南方区域电力市场建设要加强顶层设计，规范各省电力市场标准化模板，统一核心交易规则、交易标准与市场监管设计，为全国电力市场一体化建设提供可复制、可推广的经验。

另一方面，加快推进南方区域电力市场建设，需要以系统协同思维统筹推进。电力是基本生产与生活资料，区域电力市场一体化必将带来市场参与主体和省际之间的利益再分配，涉及经济社会发展的诸多方面，必须以目标为导向，坚持系统协同、稳妥推进。协同推进至少涵盖两个方面含义：一是电力市场体系建设的系统协同。电力市场是涵盖电能市场、辅助服务市场、容量补偿市场(机制)、输配容量分配机制等的复杂系统，各个市场相互影响。南方区域市场设计需要统筹中长期、现货、辅助服务、容量等市场一体化设计，整体推进、有效衔接，未来作为整体与国家市场协同发展，为加快建设全国统一电力市场体系作出积极探索。二是区域发展的系统协同。区域电力市场在整体上会提高运行效率，增加社会总福利，但也会带来区域间利益再分配效应，例如，电价趋同会引发电力输出省份用户的不满和地方对当地产业竞争力的担忧。如何设计机制引导地方政府多元目标下激励相容，主动打破省间壁垒，不仅仅是电力市场一体化的问题，也是其他要素和资源统一大市场建设的核心问题。需要创新与完善区域协同发展政策，例如基于社会总福利的改进建立省区间的补偿机制，设立横向转移支付专项基金，减少当地政府对市场一体化的抵触，也有助于减缓地方政府利用行政权力设置省际壁垒、排除市场竞争的动机和行为。以此为基础，有助于在中央层面建立和完善跨区域协调与监管机制，制定地方政府直接干预市场行为的负面清单。

(作者系中国人民大学应用经济学院能源经济系教授、系主任)

# 燃气主业承压 增值业务作用凸显

彭知军

近年来，燃气增值业务发展已较为成熟，在燃气公司主营业务承压背景下，燃气增值业务“维稳”作用凸显。如，中国燃气2021/2022财年，增值业务毛利润占比约是营业收入的2倍。

## 主要燃气公司纷纷布局增值业务

昆仑能源坚持主营业务与增值业务一体规划、一体开发，围绕资源利用、技术服务、燃气延伸、金融保险等六大门类形成五大自主品牌，初步构建了“互联网+能源+生活”的多业态生态圈；同时，还成立了增值业务技术服务平台公司——昆仑泰泰，依托各地燃气公司成立非气业务分公司，建设“能量站”，赋能传统燃气服务更多元、更智能发展，升级线上线下体验服务功能。

华润燃气在2010年、2016年、2017年逐次推出自有品牌燃气具销售、燃气保险销售和延伸增值业务。2021年，综合服务业务营收达18.6亿元；燃气具、燃气保险销售营收分别为6.4亿元、4亿元，同比分别增长106%、28%。

港华燃气依托互联网平台和社区门店，通过线上线下一体化的运营方式，聚焦舒适和健康两大生活主线，提供常规增值业务以外的高端橱柜、到家服务、烹饪教学、健康美食体验等健康生活相关产品及服务。2021年，延伸业务营收为54亿元，旗下“紫荆”炉具销售量为90万台。2021年推出时刻+健康品牌，铺设“时刻+”社区健康生活体验馆，计划至2025年达500家，为燃气客户提供更全面的增值服务。

新奥能源坚持以安全、智慧和低碳为切入点，深度挖掘客户多元化、差异化需求，包括360厨房产品、管道安装、供暖产品、安防产品、精装全屋配套、LoRa数智物联、NFC惠民卡等产品

及服务。2021年，增值业务收入、业务毛利分别为23.4亿元、17亿元，同比增速分别为39%、31%。

## 增值业务布局有四条主线

一是定战略。在主营业务承压背景下，燃气公司把增值业务作为主要业务之一。各燃气公司结合自身业务实际、用户需求等制定增值业务发展专项规划。中国燃气于2018财年提出将增值业务定位为三大新兴业务之一；华润燃气制定了“十四五”综合业务战略规划，提出加强平台建设与支持保障，“十四五”期间做到增值业务和主营业务平分秋色。

二是调组织。组织必须与增值业务规划相适应，才能支撑规划有效落地。集团总部定战略、定目标、定范围，并指定增值业务归口管理部门，负责战略优化、产品设计、政策制定等工作，对项目公司专业赋能；项目公司成立增值业务执行部门或专责小组，负责目标分解、销售组织等落地活动。如，中国燃气成立了增值业务事业部(壹品慧生活科技有限公司)，下设职能部门及业务中心，各地项目公司设置慧生活分公司或子公司。

三是搭平台。整合内部和外部资源，打造大增值概念，搭建增值平台，充分利用燃气用户规模，塑造品牌价值，不断迭代产品，构建良好的市场化机制和服务体系。如，华润燃气已举办三届“9·15美好生活节”活动，逐步形成了“线上+线下”全域布局的新模式，探索出传统燃气行业转型升级的发展新路径。中国燃气叠加科技赋能，大数据驱动，打造三层网络×三位一体×三轮驱动全渠道营销体系，通过人、货、场的运营，为4600万家庭用户、45万商业用户、3万+网格员、1000+的营业厅和300+项目公司，重筑人、货、场的消费场景，推动产品迭代和服务升级。

四是强激励。首先，围绕增值业务培养需要的专业人才，按照业务价值赋予岗位价值；其次，即时激励，建立以目标完成为导向的考核激励机制；再次，持续、深度激励，对核心人才考虑股权激励。如，新奥能源的燃气保险销售激励机制灵活，业务规模领先，燃气保险收入约是其他几家同梯队燃气公司的2-4倍。

## 三措稳妥发展增值业务

一要坚持两个业务良性互动。几大燃气公司都成立了单独的增值业务公司，负责燃气用户价值挖掘，部分公司还提出了增值业务公司单独上市的计划，有助于提升融资能力、扩大业务规模以及反哺主营业务等，达到主营业务和增值业务的良性互动。例如，据资本市场消息，中国燃气的增值业务板块有分拆上市的计划。

二要着力因地制宜。增值业务产品设计要和当地社会经济发展、消费能力习惯等相适应。如，深圳地区经济较为富裕，燃气用户追求较高品质燃气服务，经济承受较强，应注重附加值高的产品设计。经济欠发达的地方项目公司则应侧重考虑扩大常规增值业务市场。此外，借助安全生产法新要求以及燃气安全排查整治活动，不少燃气公司把燃气报警装置安装作为增值业务的重要内容之一。

三要强化增值业务合规管理。近年来，政府对燃气监管日益规范、严格，不少燃气公司强制搭售燃气具、燃气保险等受到行政处罚或反查通报，还有某燃气公司下属项目公司超范围销售大米被处罚。2021年以来，一些地方还开展燃气公司是否滥用市场支配地位、乱收费行为的专项排查工作。燃气公司在业务开发和实施中要重视合规管理，避免触犯法律法规。

(作者供职于华润集团)