

# 基于模型的综合能源系统工程规划设计方法

钟崑<sup>1,2</sup>, 王丽腾<sup>1</sup>, 赵宏飞<sup>1</sup>, 戴哲<sup>1</sup>, 林小杰<sup>1,3\*</sup>, 俞自涛<sup>1</sup>

(1. 浙江大学能源工程学院, 浙江省 杭州市 310027;

2. 浙江大学上海高等研究院, 上海市 浦东新区 201203;

3. 浙江大学嘉兴研究院, 浙江省 嘉兴市 314000)

## Model-based Planning and Design Method of Integrated Energy Systems

ZHONG Wei<sup>1,2</sup>, WANG Liteng<sup>1</sup>, ZHAO Hongfei<sup>1</sup>, DAI Zhe<sup>1</sup>, LIN Xiaojie<sup>1,3\*</sup>, YU Zitao<sup>1</sup>

(1. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China;

2. Shanghai Institute for Advanced Study, Zhejiang University, Pudong New Area, Shanghai 201203, China;

3. Jiaxing Research Institute of Zhejiang University, Jiaxing 314000, Zhejiang Province, China)

**Abstract:** With the proposal of our country's dual-carbon strategy, our country's energy production and consumption revolution urgently need to promote integrated energy system construction. Integrated energy systems put new requirements on the overall and systematic nature of energy system planning. At the same time, the rapid development of renewable energy and the emergence of various new energy units have continuously increased the scale and complexity of the energy system. Traditional energy system planning methods have been unable to meet the demands of integrated energy system planning under the new situation. In our country's energy system planning field, there is an urgent need to introduce system engineering methods to transform traditional planning methods. This paper draws on the concept of model-based system engineering (MBSE) in system engineering theory. We start from the practical application of MBSE in other industries in my country and propose a comprehensive energy planning route using MBSE based on the system engineering concept. Compared with the energy system planning and design under the traditional system engineering method, the integrated energy planning and design method of system engineering with MBSE includes the whole life cycle of the energy system from the conceptual design. It consists of four stages: unit design, energy subsystem design, evaluation, practical application acceptance, and energy system integration. The unit models are related to each other to ensure rapid iteration when there are differences in the different

systems of structure, demand, and behavior. The use of MBSE to plan the integrated energy system will help solve the current disconnection between energy and industrial planning in integrated energy system planning.

**Keywords:** integrated energy system; model-based system engineering; energy planning

**摘要:** 随着中国“双碳”目标的提出, 中国能源生产消费革命迫切需要推进综合能源建设。综合能源建设对能源系统规划的全局性、系统性提出了新的要求。同时, 可再生能源的飞速发展和各种新型能源单元的出现使得能源系统的规模和复杂性不断提高, 传统的能源系统规划方法已经难以满足新形势下综合能源系统规划的诉求。中国能源系统规划领域迫切需要引入系统工程方法来改造传统规划方法, 因此借鉴系统工程理论中的基于模型的系统工程(model-based system engineering, MBSE)概念, 从MBSE在中国其他行业的实践应用出发, 依托系统工程理念提出采用MBSE的综合能源规划路线。相比于传统系统工程方法下的能源系统规划设计, 基于模型的系统工程综合能源规划设计方法从概念性设计开始包含了能源系统的全生命周期, 由单元设计、能源子系统设计、综合能源系统评价、实际应用验收4个阶段组成。各个单元模型之间相互关联, 保证对于不同系统的结构、需求、行为存在差异时快速迭代。采用MBSE手段对综合能源系统进行规划, 有助于解决目前综合能源系统规划中能源与产业规划脱节的难题。

**关键词:** 综合能源系统; 基于模型的系统工程; 能源规划

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFE0126000); 国家自然科学基金(51806190)。

National Key Research and Development Program of China (2019YFE0126000); National Natural Science Foundation of China (51806190).

## 0 引言

近年来, 随着多能互补, 集成优化等技术的推

广,综合能源系统得到了飞速的发展,供需协调水平、能源利用率不断提高。在“30·60”碳达峰碳中和目标下,能源电力规划与相关政策制定应遵循未来中国能源电力“清洁化、综合化、智慧化、去中心化”的创新发展趋势。高效能源配置、减少化石燃料资源和集成间歇性可再生能源已成为能源系统实现可持续、环境友好的核心目标。实现这一目标的重要途径是在能源领域推广综合能源系统(integrated energy system, IES),打破各能源子系统间的壁垒,从而统一提供能源载体来满足末端生产生活不同消费者的能源需求,提高整体系统性能<sup>[1]</sup>。与传统能源系统不同,综合能源系统在规划设计环节,需要考虑区域内各类生产生活负荷发展。传统的能源系统规划设计方法是围绕单一能流(如冷、热、电、气)开展以供为主的系统设计。但是综合能源系统具有多能耦合、“源网荷储”一体的特性,其所需要的系统规划设计方法并非传统系统设计方法的简单集成。针对单一能源系统的规划设计方法难以直接用于综合能源系统的规划设计,难以满足未来能源系统的多元化、低碳化转型需求。综合能源系统强调多种能源的综合开发利用,可以在规划、运行中实现不同能源系统优势互补,提高能效降低费用<sup>[2]</sup>。同时,综合能源系统的规划设计,需要考虑多能源互补的物理特性、能源系统与产业协同的跨学科性质、涵盖能源系统全生命周期过程的管理设计理念,并体现了系统工程与系统科学的属性。

在系统工程科学领域,中国科学家钱学森提出了针对复杂系统的从定性到定量综合集成和分析方法,这一方法是系统工程学方法在中国的萌芽与具体实践,其技术路线如图1所示。该方法主要是针对非线性的复杂大系统而提出的系统工程方法。该方法提出,当定量分解已无法描述系统时,需要专家的定性

经验判断与建模仿真的定量评估相结合来开展系统研究,这一方法已经成功应用于中国航天器制造、导弹系统制造等需要多学科多领域协作的复杂系统装备制造过程。

针对综合能源系统的规划,超出了传统能源系统规划的学科边界,体现为对一个涵盖能源、经济、环境、产业多层次复杂系统开展动态演变的规划。其规划设计可以引入系统工程学的方法,从而指导面向新一代能源系统的规划设计。

## 1 系统工程方法简介

传统综合集成的系统工程主要应用在产品开发的早期,并主要采用基于文档的系统工程(document-based system engineering, DBSE)方法。这一方法在早期系统的设计中发挥了重要作用。但是随着对象的日趋复杂(如航天器、复杂武器系统),传统的DBSE不仅会造成工程周期和设计成本陡增,在规格规范等文件的编写过程中消耗了许多精力和时间,也会在系统早期的设计过程中容易忽略需求的确认和验证阶段,与后续的产品开发、制造和维护阶段的产品生命周期管理(product life-cycle management, PLM)数据脱节。2006年国际系统工程学会正式提出基于模型的系统工程(MBSE)概念,在传统系统工程应用基础之上进行系统工程应用范式的升级。2009年后,有学者进一步提出采用MBSE的方法,在整个系统全生命周期内实现基于模型的开发与管理。MBSE进一步关注系统性,不仅考虑系统本身过程的演变,也考虑整体及局部构成的相互关系,及系统和环境之间的交互<sup>[3]</sup>。相比DBSE,MBSE所需求的标准化的模型描述能够实现需求分析、设计解决、验证确认、优化调控。表1是DBSE方法与MBSE方法的比较<sup>[4]</sup>。

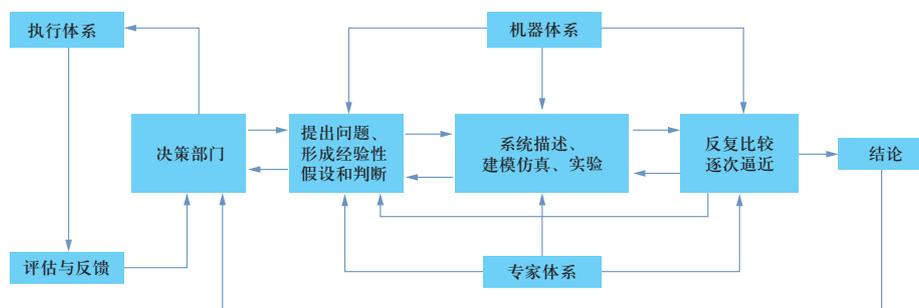


图1 综合集成方法用于决策支持问题研究

Fig. 1 Comprehensive integration method used in decision support problem research

表1 MBSE与DBSE对比表  
Table 1 MBSE and DBSE comparison

对比	MBSE方法	DBSE方法
一致性描述方面	一致性好, 描述准确度高	一致性差, 准确率低, 容易引起歧义
内容可追溯性方面	易于追溯, 跟踪与评估	不易追溯
描述动态内容方面	易于数字化、图形化表述	不易描述复杂逻辑和过程
管理维护方面	易于管理维护	不易管理维护
工程化方面	易于工程化和验证	需二次转化 不易关联
标准化方面	易于统一, 形成标准规范	不易形成统一规范

国际系统工程学对MBSE的定义是:“基于模型的系统工程本质是通过形式化的建模手段,从概念设计阶段开始就能够支持系统需求、设计、分析、验证和确认等活动,并持续贯穿整个开发过程和后续的生命周期阶段。”MBSE是一种典型的系统工程方法,是面向整个系统周期以模型为中心的研制管理方法,广泛用于复杂产品的开发,其模型描述贯穿整个开发阶段和后期验证优化阶段,能够实现缩短工期和降低综合成本等目标<sup>[7]</sup>。

这一方法在当前的航天航空、国防、汽车领域得到了广泛应用。举例而言,在航空发动机领域,高复杂性、高研发成本、长研发周期等因素制约其发展,利用MBSE方法,识别复杂产品在各类运行场景下需提供的能力,保证问题域的完整性和正确性,进行运行场景定义,用例场景分析、功能分析、逻辑系统架构的模型构建、系统架构分析、联合仿真等架构,显著增加了细化程度,满足航空产品的研发要求,为系统安全性提供了支撑<sup>[5]</sup>。在导弹研发中存在的问题也可由MBSE提供良好解决方案,通过建模支持导弹总体设计分析全过程包括CAD设计、CAE分析、测验验证等流程。以模型库为基础,针对产品的设计过程和集成验证过程,统一建模联合仿真<sup>[6]</sup>。在汽车制造领域,产品定义已经从概念设计演变为一项持续的进程,进行全生命周期系统工程。其MBSE产品定义方法包括需求管理、参数管理、功能和系统建模、多领域架构,以此来做出更好的管理决策。

对MBSE而言,不同的建模领域或应用领域需要采用不同的模型,不同产业的不同项目在选择方法论时不可以照搬现有的理论模型。MBSE的系统设计语言需要根据不同产业的特点进行扩展,建模工具需要

根据产业特点和原有设计基础进行选择,在能源系统中这一模型体现为满足多种能源介质供需平衡的物理模型。

与传统系统工程方法相比,MBSE的设计使用系统建模语言(SysML)进行构建,目前常用的SysML工具有Enterprise Architect、Papyrus SysML、Rational Rhapsody、Magic Draw,主要用于航天航空、国防军工、轨道交通等领域。SysML替代原有的文档,使用系统建模语言方便进行数据的可视化,使计算机进行更高效的处理,可以有效减少工程学科之间不同的系统和软件之间处理方法的差异。建模领域可能包括产品的系统、机械、设备硬件、软件方面,或产品的不同阶段,如需求、设计、分析、测试、制造或维护阶段;模型类型取决于具体应用领域,如能源系统、通信、飞行器航天器设计、车辆设计。各数字孪生模型的名称和应用场合梳理见表2<sup>[8]</sup>。

同时,MBSE应用于能源系统时相当于动态行为,使用模型可以从多个角度分析问题,在规划设计的早期进行反复的验证和确认,确保了系统的稳定性和贴合性,保证规划的优化效果一步到位,减少额外的时间和经费支出,此外基于模型的系统工程中大部分单元可以进行重用,减少了新建工程的工作量<sup>[9]</sup>。将MBSE方法应用于综合能源系统,可有效的解决系统全生命周期过程中设计,规划,运行等问题。

表2 数字孪生模型概览  
Table 2 Overview of digital twin models

模型名称	应用场合
产品生命周期管理模型	产品生命周期管理
全参数虚拟建模	产品生命周期管理
实现模型	描述系统行为
动态多维信息和数据模型	基于模块化的车间管理
全局性能模型	资产自动连续评估
产品构型数字孪生模型	基于数字孪生模型的产品构型管理
纯数据驱动模型	生物医学工程

## 2 综合能源系统规划与MBSE

热电联产系统的规划运行基于“以热定电”原则,现有的工作普遍是通过构建含多机组联合供电的调度模型,根据传统规划模式求解最低成本进行,并通过仿真模拟验证其经济性<sup>[10]</sup>。相比之下,综合能

源系统要求研究人员更关注系统整体的能源综合利用率。

在这一方面,研究人员围绕“源网荷储”等开展了研究,在综合能源系统各个细分模块及领域提出了系列新的能源系统构架、能源转换设备,为现有能源系统向综合能源转型提供了关键技术支撑。Gustavo等研究了具有热能储罐的大型冷水机组闭环调度问题,将预测方法和模型应用于园区综合能源系统开展调度优化,同时明确考虑了冷冻回水温度对能量平衡的影响,优化方案效果明显<sup>[11]</sup>。郑亚锋等提出了一种考虑风光不确定性的综合能源系统多目标规划模型<sup>[12]</sup>。通过结合序列分布概率的典型曲线挖掘方法获得风光的典型出力曲线,减小可再生能源出力描述不确定性对配置的影响。任洪波等将博弈论思想引入优化规划中,基于设备全寿命周期视角确定收益,通过求解该博弈的Nash均衡,使得最大化博弈方或联盟收益的同时,满足各类负荷的供需平衡<sup>[13]</sup>。马义明等针对碳排放污染问题,考虑碳交易机制,提出新型基于热电联产和碳捕集系统优化调度的综合能源系统模型,提高IES中可再生能源消纳能力,降低了碳排放和运行成本<sup>[14]</sup>。刘敦楠等提出了一种双层协同优化方法,以最低成本为目标,进行优化运行,通过上下层模型更新迭代实现优化<sup>[15]</sup>。刘瑞等提出了电站-电网协同规划模型及其求解方法<sup>[16]</sup>。考虑了配电网、燃气配电网、热力配电网和能源站的约束条件,以费用最低为目标,实现了优化配置。李计勇等通过引入能量枢纽来整合IES各部件和能量流的关系,采用统一建模的方法,降低了成本和计算时间<sup>[17]</sup>。

综合能源系统所依托的多能流系统,其实现的关键技术包括:①多能流混合建模;②多能流系统规划;③多能流智能调控;④多能流协调优化;⑤多能耦合评估指标<sup>[18]</sup>。简而言之,综合能源通过围绕用能需求逐步开展系统建设、投产等,通过满足不同阶段的末端多样化用能需求实现价值。然而,正如Yin等人指出,目前制约综合能源项目开展大规模推广的一个关键环节在于多能系统的规划优化,即在项目早期,缺乏满足多能耦合综合利用的系统统一规划设计方法<sup>[19]</sup>。这一方法需要能灵活分解和处理多能源子系统间协同、能源与产业协同、全生命周期过程不同阶段之间协同,解决典型的系统工程问题。而从对象而言,综合能源的规划设计过程与航空系统、武器系统、汽车系统的设计相似,都可归为复杂系统工程问题。故而,可以采用MBSE来解决综合能源系统规划问题。

### 3 采用MBSE的综合能源系统规划设计

#### 3.1 MBSE规划设计方法

在物理信息技术飞速发展的今天,各类系统的规划设计均可采用MBSE规划方法进行。MBSE规划方法的5个关键步骤如下:

- 1) 根据系统应用场景提出相应的MBSE标准;
- 2) 研究合理的MBSE方法和指标集成系统硬件、软件模型;
- 3) 搭建集成仿真、分析的架构模型,并进行可视化;
- 4) 建立具有明确定义的MBSE理论、本体、形式化体系;
- 5) 构建跨领域的分布式可靠模型库。

其中,在综合能源系统规划实践过程中应用较多的模型化方法是系统工程的V字模型<sup>[20]</sup>。举例而言,在航天器设计中的V字模型流程中,首先由设计人员进行系统可行性研究需求说明,然后对需求进行具体描述,产生需求的书面说明。之后,开发人员开展总体规划设计,测试人员设计出系统测试案例。总体设计完成后,开发人员根据总体设计对软件开展详细设计,测试人员根据总体设计得出集成测试用例。详细设计之后,开发人员根据详细设计进行编码或模拟仿真,测试人员根据详细设计得出单元设备测试用例。编码完成之后,测试人员根据单元测试用例对设定软件的测试单元进行测试,单元设备测试完成之后,进行集成测试,然后进行系统测试,最后进行验收测试;验收完成后可以实现其工业或商业用途。

#### 3.2 采用MBSE的综合能源系统规划设计

综合能源系统规划总体围绕数据分析、优化规划和综合评价三个环节展开。能源系统的设备选型选址、容量匹配、运行方式都存在MBSE规划设计的需求。借鉴机电一体化系统的V字模型,能源行业采用MBSE的规划设计流程如图2所示。

数据分析主要包括供热制冷负荷模拟计算、根据区域可用能源资源分析、当前能源系统运行场景分析。首先应用数据的调研测算和需求方提供的热电冷气等相关数据基础,依据综合能源系统供热制冷负荷模拟计算模型,合理选择简化计算或精确模拟的方法进行规划区域负荷估算,获得负荷输入数据;根据区域能源资源禀赋,选择资源利用组合为后续的规划设计提升优化潜力。

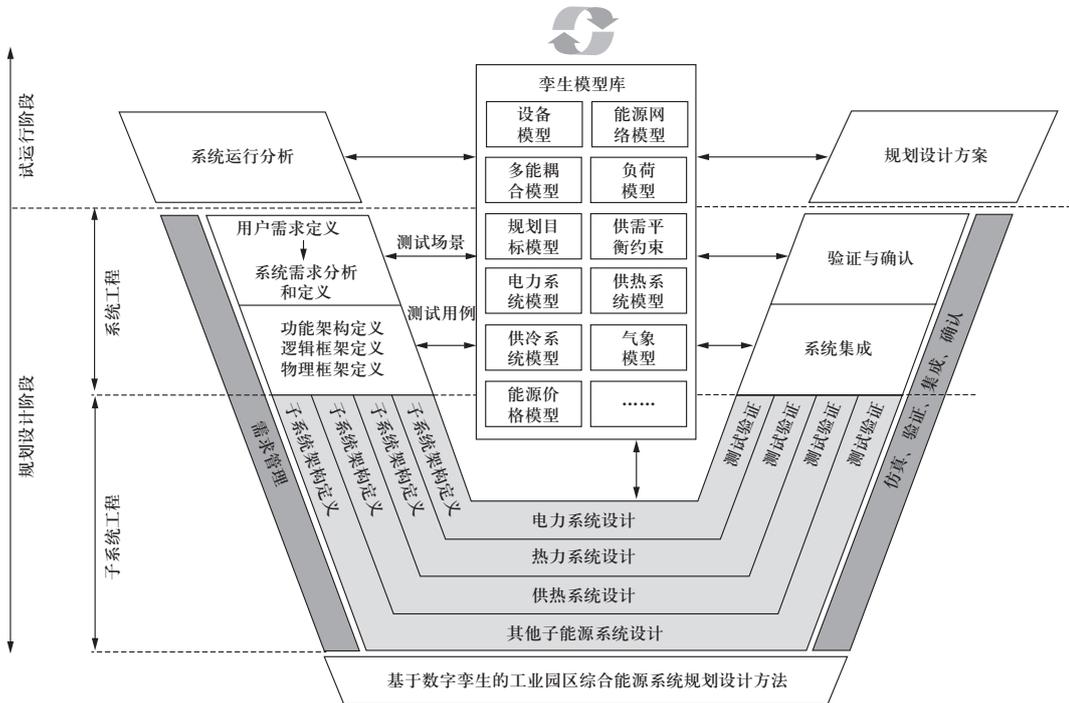


图2 采用MBSE的综合能源系统规划技术路线

Fig. 2 Technical route of integrated energy system planning using MBSE

系统架构设计完成后需要对每一个能源子系统进行设计, 确定供能方式和供能网络, 子系统包括供热系统、供电系统、供冷系统、交通系统、天然气管网系统、垃圾处理系统等。设计流程如图3所示, 综合能源中各个子系统的单元设备实现由多种设备进行耦合, 例如热-电-冷三联产系统可以作为三类子系统的供能设备, 地热泵需要少量的电力供给作为热、冷的供能设备<sup>[21]</sup>。同时, 综合能源子系统的仿真模型, 由数据建模和机理建模结合使用获得初步仿真模型。进一步, 通过软硬件的配合, 在设备层设置实际测点, 对综合能源系统具体参数进行测量, 结合实际参数进行仿真模型的外推拟合。再由模型对实际情况进行运行检测, 进行参数调整, 使最终的模型与实际的误差在允许范围以内。与其他能源互联网规划不同的是, 这一过程通过多个子系统仿真模型的整合, 来达到数字孪生的目标, 包含子系统底层测试和上层的集成测试, 能够适应更多的需求和不确定性。完成模型构建后, 进行能源系统的综合评价即集成测试, 用统一的建模语言进行软件分析与测试, 得到规定评价指标下的评价结果, 满足需求方的需求后即可完成验收确认, 交付运行。

### 3.3 平台和案例

按照上述理念指导的综合能源规划设计, 可梳理

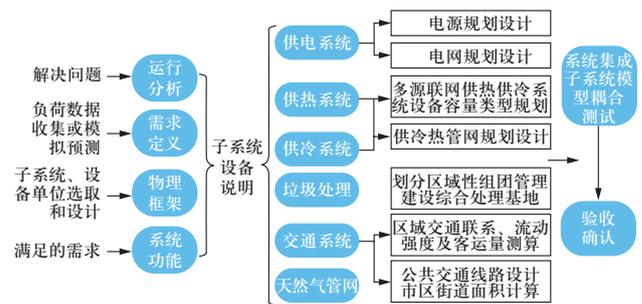


图3 采用MBSE的综合能源系统规划流程

Fig. 3 Integrated energy system planning process using MBSE

为下述流程: 首先要收集工业园区规划时期的园区建设规划图、产业发展规划、区域、产业和园区目前发展状况以及现阶段能源供应和消耗的数据, 开展调研获取资料。其次, 根据调研结果, 获取某一区域的环境数据、当地的能源市场情况以及考虑可以使用的设备类型和设备详细参数等相关数据。通过负荷指标估算或者负荷模型预测获得多元用能负荷需求, 如: 不同季节典型日的日照强度、风速、湿度和温度, 以及不同季节的典型日用电负荷、日用热负荷、日供暖负荷、日用冷负荷以及日热水负荷等数据, 以及电网的分时购电价格、售电价格、冷热售价、蒸汽价格、供暖价格、多种燃料的购买价格等相关信息。通过各层级信息的综合, 构建数字孪生模型。最终, 在规划主

体层面，主体可以是经济性、可再生能源消纳、安全性、全生命周期的碳排放等各类模型。这一规划可以通过调用算法服务，依托数字孪生模型开展，最终获取期望的工业园区综合能源系统规划方案。支撑这一流程的平台如图4所示。

本方法前期已经用于杭州某医药港产业小镇的综合能源规划<sup>[22]</sup>。小镇包含医药研发、制造生产环节，也包含生活商业区块，是一个典型多阶段生产生活统筹的综合能源系统场景。该产业小镇在二期规划中需要结合当地的产业转型，实现部分企业的退出与新企业入住，并对一期规划中无法满足当前需求的设备容量配置进行优化升级。在第一期中，涉及到选址、设备容量、可再生能源消纳方式的设计。在第二期规划中，则进一步涉及到设备容量的置换与更新、储能储热设备的设计以及伴随产业变化的用能点的重新设计和布局。通过建立数字孪生模型，在以经济成本和碳排放多目标规划的最优解集中方案选取，实现了规划主体决策方的主观择优，满足主体在不同阶段对于经济性和碳排放的不同偏好需求，最终实现了规划期内的

总投资收益率和减排量的提升，能源循环利用率超过45%，最高可达55%，同时实现了面向10个重要能源用户进行了多能源选址寻优，验证了MBSE综合能源系统工程规划设计方法的有效性和可用性。

### 4 讨论与分析

MBSE的核心是模型。在能源系统中采用MBSE需要不断更新能源系统的模型库，形成数字孪生模型，并在多方面为能源系统赋能。如，其追溯和迭代特性会推动系统的提效减碳、提高新能源技术创新的完整性，可以在能量的梯级利用、余热高效利用等工艺流程协助系统完成技术重组；在碳捕集与封存（carbon capture and storage, CCS）全流程碳处理方面，可以使得碳核算更加准确<sup>[23]</sup>。综合能源数字孪生平台是两个系统，其不仅是能源系统的镜像，是包含了更多层级和内容的一个完整的反映能源系统演变及其与外界关联关系的全过程模型。通过建立数字模型将验证后的操作和行动应用于能源系统，建模仿真只是

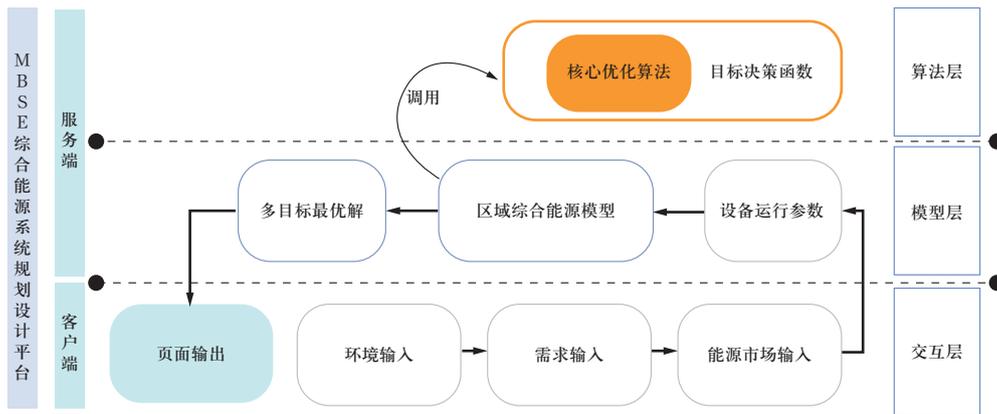


图4 综合能源系统规划设计平台系统架构

Fig. 4 System architecture of integrated energy system planning and design platform



图5 综合能源数字孪生平台

Fig. 5 Integrated energy digital twin platform

其中的一部分, 需要保证模型的正确性和环境数据的完整性。同时, 与传统能源系统出现“设计-运行-维护”的脱节不同, 采用MBSE的综合能源系统规划供需采用统一语言表达、模块化管理、有机更新, 实现能源系统管理的全生命周期, 如图5所示。全生命周期内综合能源系统供需不匹配的特性、阶段性、间断性、随产业结构调整变化的特性对园区能源系统的优化规划带来困难, 采用基于模型系统工程的综合能源规划方法, 把底层的设备模型集成起来, 形成了一个完整的架构模型, 模型能够共享, 统一的建模语言帮助提高了不同领域技术人员的协同效率和各个能源系统的协同合作。采用MBSE的能源系统工程规划设计体系贯穿了从概念设计到系统开发及后期报废和循环利用的能源系统全生命周期, 能够打通系统中不同单元, 实现不同学科应用的协同和能源系统设计上的集成。

具体到应用场景, 在综合能源系统的全生命周期中, 可以制定正规的模型开发和使用计划, 并按照企业或项目流程规范正式地开发、集成和展示模型, 确保模型是精确的、完整的、可信的和可重用的。基于模型系统工程的综合能源规划不仅强调将基于模型的方法应用在系统级设计, 还要把基于模型的方法应用到子系统和设备层。模型初期的准确性会随着时间变化、能源系统的逐步投产、设备的更新而出现失准问题, 因此建模仿真本身需要保持更新, 实现对能源系统全生命周期内各个阶段实际运行特性的预测和应用。能源系统内部的运维、管理、检修、服务、控制

机制也将不同程度地影响系统与外界之间的交互, 需要在数字孪生模型中加以体现。对于实际综合能源系统, 其建设往往需要多个周期才能完成, 每个周期内的规划设计约束、目标、导向都会发生变化。相比现有的模型研究, 反映这一过程的数字孪生模型一方面要包括综合能源系统各个部件系统从开发到后期退出和循环利用的能源系统全生命周期(如图5所示), 另一方面也要包含各个周期和阶段内系统和外界之间的互相影响, 如图6所示。

需要指出的是, 相对于传统能源系统, 全生命周期评价新型能源系统部分数据收集非常困难, 而目前中国类似的原材料数据库还不够完善, 经常存在滞后性, 客观上阻碍了能源系统全生命周期分析的研究。需要结合信息化技术, 对各类特殊工况、故障数据积累, 不断修正和拓展模型的涵盖范围, 直至构建涵盖全生命周期过程的数字孪生模型。

### 5 总结与展望

MBSE综合能源系统工程规划设计方法对于中国“双碳”目标和实现能源结构转型具有重要意义。在这一转型中, 支撑可再生能源的综合能源系统是未来的发展趋势。相比于传统能源系统, 综合能源系统的规划设计引入MBSE方法可以进一步打破能源间、能源与产业间、规划全过程各个阶段间的壁垒。而为了支撑这一技术发展趋势, MBSE核心的模型支撑应当是贯穿系统全生命周期的数字孪生模型, 这一模型

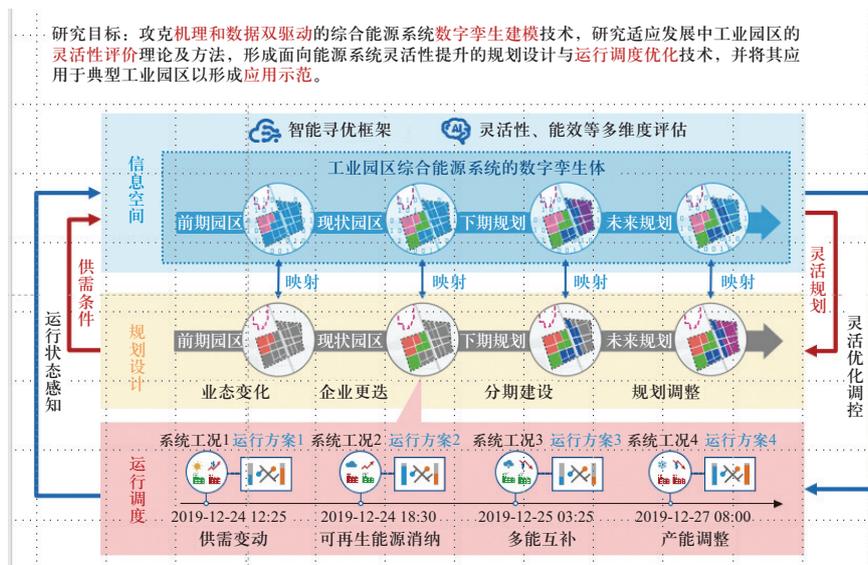


图 6 数字孪生逐期演变图

Fig. 6 Digital twin staging flow diagram

可采用MBSE方法中V字型结构模型开展,从而可涵盖外界对系统的影响过程、系统内部的各层级影响机制、系统整体的全生命周期过程对外界的影响。

对于能源产业而言,基于MBSE的综合能源规划设计方法可同时影响能源的生产和消费两个环节,将推进能源产业的数字化,积累生产侧数据,支撑推动碳排放计算和碳交易市场,并支撑能源与产业的协同。采用MBSE手段对综合能源系统进行规划,打破行业壁垒,提供能源系统全生命周期内的全方位多领域多学科的统一描述,全方位提高能源利用效率,对于能源行业的未来发展,“双碳”目标的实施具有实际意义。

## 参考文献

- [1] 艾芊, 郝然. 多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 2-10.  
AI Qian, HAO Ran. Key technologies and challenges for multi-energy complementarity and optimization of integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 2-10(in Chinese).
- [2] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光, 等. 能源互联网: 驱动力、评述与展望[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3005-3013.  
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang, et al. Energy Internet: driving force, review and outlook[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3005-3013(in Chinese).
- [3] OOSTHUIZEN R, PRETORIUS L. Analysis of INCOSE Systems Engineering journal and international symposium research topics[J]. Systems Engineering, 2021, 24(4): 203-220.
- [4] 张世聪, 陈波, 张晓晋, 等. 基于MBSE的动车组设计方法研究及应用[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(2): 94-102.  
ZHANG Shicong, CHEN Bo, ZHANG Xiaojin, et al. Research and application of design method of electric multiple unit based on MBSE[J]. China Railway Science, 2018, 39(2): 94-102(in Chinese).
- [5] 张玉金, 黄博, 廖文和. 面向场景的航空发动机基于模型的系统工程设计[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(11): 3093-3102.  
ZHANG Yujin, HUANG Bo, LIAO Wenhe. MBSE unified modeling and design method of commercial aeroengine for operation scenario[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(11): 3093-3102(in Chinese).
- [6] 胡京煜. 基于模型的系统工程方法在导弹总体设计中应用[J]. 科技与创新, 2019(11): 153-155.
- [7] 张鹏翼, 黄百乔, 鞠鸿彬. MBSE: 系统工程的发展方向[J]. 科技导报, 2020, 38(21): 21-26.  
ZHANG Pengyi, HUANG Baiqiao, JU Hongbin. MBSE: Future direction of system engineering[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(21): 21-26(in Chinese).
- [8] 刘青, 刘滨, 王冠, 等. 数字孪生的模型、问题与进展研究[J]. 河北科技大学学报, 2019, 40(1): 68-78.  
LIU Qing, LIU Bin, WANG Guan, et al. Research on digital twin: model, problem and progress[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2019, 40(1): 68-78(in Chinese).
- [9] 刘红岭. 基于模型的系统工程(MBSE)解决方案探讨[J]. 江西通信科技, 2020(2): 34-36.
- [10] 潘华, 梁作放, 肖雨涵, 等. 多场景下区域综合能源系统的优化运行[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 484-492.  
PAN Hua, LIANG Zuofang, XIAO Yuhan, et al. Optimal operation of regional integrated energy system under multiple scenes[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(1): 484-492(in Chinese).
- [11] CAMPOS G, LIU Y, SCHMIDT D, et al. Optimal real-time dispatching of chillers and thermal storage tank in a university campus central plant[J]. Applied Energy, 2021, 300: 117389.
- [12] SU H, CHI L X, ZIO E, et al. An integrated, systematic data-driven supply-demand side management method for smart integrated energy systems[J]. Energy, 2021, 235: 121416.
- [13] HAN Z H, MA F F, WU D, et al. Collaborative optimization method and operation performances for a novel integrated energy system containing adiabatic compressed air energy storage and organic Rankine cycle[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 41: 102942.
- [14] MA Y M, WANG H X, HONG F, et al. Modeling and optimization of combined heat and power with power-to-gas and carbon capture system in integrated energy system[J]. Energy, 2021, 236: 121392.
- [15] LI H, LIU D N. Research on two-layer cooperative optimal allocation method of integrated energy system[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 804(3): 032013.
- [16] LIU R, FENG L, ZHENG Z J, et al. Station-grid co-planning of integrated energy system with consideration of multi-energy storage and reliability cost[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1972(1): 012014.
- [17] LI J Y, LI D X, ZHENG Y F, et al. Unified modeling of regionally integrated energy system and application to optimization[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 134: 107377.
- [18] TAHIR M F, CHEN H Y, HAN G Z. Exergy hub based modelling and performance evaluation of integrated energy system[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 41: 102912.
- [19] YIN B X, LI Y W, MIAO S H, et al. An economy and reliability co-optimization planning method of adiabatic compressed air energy storage for urban integrated energy system[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 40: 102691.
- [20] 刘玉生. MBSE: 实现中国制造创新设计的使能技术探析[J]. 科技导报, 2017, 35(22): 58-64.

LIU Yusheng. MBSE: The enabling technology for the innovative design of intelligent manufacturing in China[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(22): 58-64(in Chinese).

- [21] 蒋超凡, 艾欣. 面向工业园区的综合能源系统协同规划方法研究综述[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(3): 255-265.  
JIANG Chaofan, AI Xin. Review on integrated energy system collaborative planning methods for industrial parks[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(3): 255-265(in Chinese).
- [22] 陆烁玮. 综合能源系统规划设计与智慧调控优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [23] 沈沉, 贾孟硕, 陈颖, 等. 能源互联网数字孪生及其应用[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 1-13.  
SHEN Chen, JIA Mengshuo, CHEN Ying, et al. Digital twin of the energy Internet and its application[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 1-13(in Chinese).

收稿日期: 2021-11-17; 修回日期: 2022-03-15。



钟崴

作者简介:

钟崴(1975), 男, 博士, 教授, 研究方向为智慧能源、供热系统调控, E-mail: zhongw@zju.edu.cn。

林小杰(1992), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为区域供热系统及热电综合能源系统灵活性。通信作者, E-mail: xiaojie.lin@zju.edu.cn。

(责任编辑 张鹏)