



Views & Comments

采用新范式优化碳中和的实现路径

黄文来, 李静海

State Key Laboratory of Multiphase Complex Systems, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

1. 引言

探寻碳达峰、碳中和的优化路径, 需要对不同行业、领域内多层次的复杂结构及其多目标控制机制进行系统的分析。当前的分析方法, 有的忽略层次和异质性, 有的偏重于局部单目标。这里尝试提出一种新的分析方法, 基于一种新的范式, 即将这类挑战性问题与科学范式的变革关联起来。

2. 挑战涉及的关键科学问题

能源革命[1]的顺利推进, 碳达峰、碳中和的如期实现, 需要可靠的、科学理性的能源战略的正确指引。这涉及能源结构的转型和产业结构的调整, 是一个十分复杂的系统科学问题。既涉及系统的建模, 又涉及基于模型框架的标准体系的制定等。

而全球变化目标的实现, 需要各国应对战略的成功, 更需要全球战略的协调。任何国家难以独善其身, 必须协调行动, 才能高效实现。这就需要系统思维, 可作为科学范式变革的一个具体案例。

能源战略的可靠性与可及性依赖于能源数据、能源模型。然而, 目前盛行的能源模型(包括自上而下模型、自下而上模型、混合模型)尚不完善[2], 需要在新的范式框架下对已有模型进行系统升级。数据也有待进一步搜集和梳理。

在模型方面, 自上而下模型常基于一般均衡理论[3],

忽略异质性(如投入、分配、地域等方面的结构), 采用平均化参数, 与实际偏差较大。

自下而上模型依据部分均衡, 经济外生, 难以引入政策约束; 成本计算一般局限于技术成本; 成本最小化单目标优化不切实际, 且可能导致不切实际的跃变结果[2]; 计算量大, 难以直接分析大尺度场景。

混合模型是自上而下模型与自下而上模型的简单组合, 没有引入必要的融合机制, 未能从根本上消除前述缺陷。

在数据方面, 一次数据较为庞杂、散乱, 往往由异质性导致, 难以直接有效应用, 需要梳理、整合为二次及更高层次数据。这些问题亟待突破! 除此之外, 这一复杂系统的边界条件涉及资源的可及性和经济的承受力, 以及生态、气候目标的限制。而这需要科研范式的变革, 才能破解时空复杂结构带来的困难。

综上, 要应对这一重大挑战, 关键在于: **构建实现碳达峰与碳中和的复杂系统模型与标准体系**。当前, 针对碳达峰、碳中和的目标十分明确, 急需突破现有能源模型的局限性, 建立准确、高效的能源系统模型, 发展相应的求解器, 整合出各级动态数据库。如此, 才能有力支撑能源战略研究, 这是当前最为紧迫的任务!

3. 基于新范式构建复杂系统模型与对应标准体系

能源战略研究至少涉及三个相互衔接的层次: **单元技**

术层次、技术链层次、区域或以上层次。每个层次都有三个典型的尺度：单元尺度、系统尺度和介于二者之间的介尺度。认识、调控这些层次的复杂介尺度结构是优化、设计、预测系统行为的关键，而介尺度行为实质上是不同主导机制之间竞争中协调的反映，是多目标变分问题[4]。

最关键也最难处理的是技术链层次，这是当前模型均未很好处理的关键层次。在该层次中存在三个典型尺度，即单元技术所处的单元尺度，技术链整体所处的系统尺度，其间是复杂的技术链结构所处的介尺度。所谓技术链结构即不同能源品种之间基于不同能源技术相互转化的连接网络。该层次系统的输入是能源或资源供给、可用技术、资金，以及经济、环境、社会指标，输出是能源需求和能源转化的副产品。初步研究表明，决定该层次介尺度行为的两个相互竞争的主导机制是节能降耗和节资减排。节能降耗机制选择累积能效最高的能源转化路线，以最少的供给能源产出最多的需求能源。节资减排机制选择累积代价最小的能源转化路线，以最大限度地降低成本和排放量。这两种相互竞争的主导机制的协调导致了实际能源技术链的复杂结构。据此，方可在新范式下对能源产业结构优化！

单元技术层次在技术链层次之下，前者的系统是后者的单元，即能源转化的单元技术。在技术链层次上，单元技术是单一路线，具有确定的技术参数；在单元技术层次上，单元技术系统则包括所有可能的工艺路线，对应于大量不同的技术参数。该层次的单元即任一可能的工艺路线。介尺度结构即不同工艺路线在不同时空场合的规模分布。探明对应的主导机制及其竞争与协调关系，可望整合出可供技术链层次使用的合理技术参数取值。比如，技术链层次需要单元技术的效率、成本、排放等参数的确切数值，这可以通过基于多个竞争机制之间的协调构建的多目标优化获得，而不应取某一时间的瞬态值或某一地域的局域值，也不宜对不同工艺路线的相关数值进行简单平均。这是不同复杂系统的共性特点。

区域或以上层次在技术链层次之上，前者的单元即后者的系统，即某区域某行业的技术链总成。该层次的系统则是多个技术链总成的集合。其输入、输出是对应区域的能流、碳流，约束是经济、环境（含生态、碳排放）、社会指标。该层次的介尺度结构是不同技术链总成的连接关系。揭示控制该层次介尺度结构的主导机制及其竞争、协调关系，获得的多目标优化结果将可望直接指导对应区域的能源发展规划。该层次根据需要可能进一步区分为更多层次，如国家层次、洲际层次、全球层次等，当然取决于经济、社会关系。

对于标准体系设计而言，首先，应有系统的多层次、多尺度结构化模型，再有单元技术、产业结构等层次的模型，再把这些层次用复杂性原理统一起来！在此构架下，引入边界条件，通过各环节的标准制定，才能实现系统的分析。也就是说，只有基于系统的模型，才能有针对性地形成标准体系，也才有系统的政策基础依据！进而才能量化分析整体能源体系（与产业体系相关）的时空结构和调控方略！

因而，揭示每个层次中介尺度结构的主导机制，及其相互竞争与协调关系，并构建不同层次之间的衔接，可望发展出有效的新型能源模型和多级数据系统。伴随着求解器的研发，将形成面向区域、国家乃至全球的全新能源战略研究方法，助力能源革命的规划和部署，对碳达峰、碳中和的技术路线设计和标准制定发挥重要的指导作用，以多目标最优方案实现碳达峰和碳中和目标，避免路径选择的失误！对于联合国提出的更为复杂的17个可持续发展目标，也可根据这一思路进行研究[5]。

在完成一个区域试点模型的基础上，再拓展形成国家乃至全球系统模型，进而为在更高层次上的全球战略的协调机制做出贡献。

这既是人类可持续发展的全球性挑战，也是科学的难题，需要集成全球智慧，所以开放而广泛的合作十分重要！

致谢

本工作受中国科学院战略性先导科技专项(A类)子课题(XDA21010102)、科学挑战专题(TZ2018001)及中国科学院国际合作局对外合作重点项目(122111KYSB20170068)资助。

References

- [1] National Development and Reform Commission, National Energy Administration. [Strategy for revolutionizing energy generation and consumption (2016 - 2030)] [Internet]. 2016 Dec [cited 2021 Apr 26]. Available from: <https://www.ndrc.gov.cn/fggz/zcssfz/zcgh/201704/W020190910670685518802.pdf>. Chinese.
- [2] Zhang SW. Review of the status quo and future development of energy - economy - environment models. *Energy Techno Econo* 2010;22(2):43 - 9.
- [3] Zhang X. Principles of computable general equilibrium (CGE) modeling and programming. Shanghai: Gezhi Press and Shanghai People's Publishing House; 2010. Chinese.
- [4] Li J, Huang W. From multiscale to mesoscience: addressing mesoscales in mesoregimes of different levels. *Annu Rev Chem Biomol Eng* 2018;9(1):41 - 60.
- [5] Fu B, Wang S, Zhang J, Hou Z, Li J. Unravelling the complexity in achieving the 17 Sustainable-Development Goals. *Natl Sci Rev* 2019;6(3):386 - 8.