



在电力系统稳定性及能源转型路径优化等重大课题中，需要如何在基础研究和应用方面不断创新突破？有哪些创新应用值得关注？本刊日前采访了中国工程院院士、国网电力科学研究院名誉院长薛禹胜。他认为，能源电力发展必须主动支撑国家需求，为此需要创立整体还原论，并双向贯通整体论与还原论，完善能源领域的信息—物理—社会（CPSSE）系统的概念和框架，从而协调优化能源转型及双碳变革的路径。

# 需协同推进“双碳” 基础研究与前沿应用

——访中国工程院院士薛禹胜

文 / 本刊记者 王伟 本刊实习记者 冯睿哲

能源领域需要优化从当前状态趋于目标状态的实施路径，要评估多种不同路径中哪条的机会成本最低。

### 基础研究需十年磨一剑

**问：**创新在我国现代化建设全局中居于核心地位。对科研工作而言，基础科学研究项目往往不如热点项目关注度高。您如何看待基础性研究与创新的关系？

**答：**强大的基础科学研究是建设世界科技强国的基石，我个人长期以来关注基础性研究及其在工程应用中的落地。2018年，《国务院关于全面加强基础科学研究的若干意见》（国发〔2018〕4号，以下简称“4号文”）正式发布，提出“加强应用基础研究，围绕经济社会发展和国家安全的重大需求，突出关键共性技术、前沿引领技术、现代工程技术、颠覆性技术创新，在农业、材料、能源、网络信息、制造与工程等领域和行业集中力量攻克一批重大科学问题”。

为贯彻落实4号文，国家电网有限公司专门安排部署，要求“2018年起设立基础性、前瞻性研究专项。面向未来电网形态变化和国家重大战略需求，以引领行业科学发展和技术进步为目标，通过研究解决影响公司和电网发展的重大基础和前沿科学问题，为未来电力高新技术的形成提供源头创新的科学技术研究”。

我们团队在国家电网有限公司基础性前瞻性研究专项资助下策划了“能源转型中电网主动支撑研究”专题，在CPSSE框架下开展电网对能源转型主动支撑的理论、方法和应用的

研究。

**问：**据了解，这是个十年期的系列项目，您能否介绍一下项目是如何推进的？

**答：**鉴于问题的复杂性，我们2019年开展了项目一期《能源转型中电网主动支撑研究的理论准备》的研究，目标是建立能源转型中电网主动支撑的理论框架，从电网效益评估、能源转型目标与路径优化、新能源接入能力、电力系统稳定性理论、三道防线优化拓展及信息安全等多个方面，厘清电网主动支撑能源转型的关键影响因素、影响途径，为相关关键技术方向的后续研究奠定基础。

2020~2021年，我们开展了项目二期《能源转型中电网主动支撑研究的关键技术》的研究，目标是提出“信息—物理—社会”视角下核电发展的综合评估与优化方法，深化新能源接入能力研究，提出静态、小扰动、大扰动下电力系统安全稳定快速分析框架，探讨互联网可控资源在紧急控制、恢复控制和应急救援中的应用，以及网络攻击的辨识与主动防御问题。

**问：**“双碳”目标提出后，您带领团队对相关研究方向进行了哪些调整？

**答：**2020年9月，我国提出“双碳”目标，为能源电力发展指明了方向。中国科协在2021年公布的十个前沿科学问题中提出“以新能源为主体的新型电力系统路径优化和稳定机理”是能源电力行业迫切需要研究的



问题。“双碳”变革是未来很长一段时间内国内外学术和工程界非常关心的重大问题，能源电力发展必须紧密围绕主动支撑“双碳”变革，因此项目组将“能源转型中电网主动支撑研究”专项提升为“‘双碳’变革中电网主动支撑研究”专项。

项目将完善大能源系统动态仿真系统，打造融合分析平台，升级一批相关高级应用，实现指定算例环境下电力主动支撑“双碳”目标的“自动化”及“交互式”分析，满足能源电力领域融合研究和工程应用需求。

**问：**项目推进以来，您带领的团队取得了哪些应用成果？

**答：**在众多合作伙伴的多方支持下，我们的团队取得了丰富的成果，并在战略决策咨询、运行决策支撑、科研教学指导等方面得以应用。

在国家能源战略层面，能源低碳结构转型路径、煤炭清洁高效利用、能源应急保供等方面的多份报告得到主管部门采纳，为碳约束下我国现代能源体系建设提供了决策参考；在能源企业决策层面，国际首创的企业级能源电力转型仿真推演应用于华能集团、国家能源集团的碳达峰行动方案与碳中和目标制定，支撑了企业经营发展决策水平从定性到定量的本质提升；在地区能源电力发展层面，提出了适合青海能源资源禀赋和发展需求的清洁能源供电100%目标的最佳路径推荐方案，支持了青海电力公司

“十四五”及中长期发展规划编制。

而且，在项目成果指导下的电网应急备用优化配置及调控软件、自然灾害防御系统、源网荷柔性控制系统等，已在甘肃、江西、江苏、云南、青岛等20多个省级和地区电网应用，提升了电网安全防御能力。

在高校科研教学领域，项目成果支撑了浙江大学、香港中文大学（深圳）、河海大学、南京邮电大学等高校的科研教学，在能源规划、电力市场、碳市场、电动汽车、新能源运行控制等方面，累计培养硕博硕士研究生70余位，合作发表学术论文百余篇，促进了电力学科的学术进步。

## 能源转型应考虑多方因素

**问：**能源转型是当下各方关注的话题，能源系统既重要又复杂，您对此种复杂性是怎么看的？在研究和探索中，您在哪些重要领域、关键环节取得了突破？

**答：**能源系统往往包括信息、物理、社会等方面的元素，需要在一个完整系统的混合仿真中才能得到完整的演化信息。这就要求我们通过混合仿真得到反映物理系统、信息系统、各种参与者的行为等多方面的影响。对于复杂的问题，既要全面地去看待，又要把复杂的问题拆解为一个个小问题，从协调的角度解决好每个问题，这样才能取得成功。

从2002年开始，我带领团队不断将研究视角从电力系统拓展至电力市

场、碳市场、能源低碳转型等领域。

2008年，我国南方罕见冰灾对电网造成巨大破坏，我们团队建立起外部自然灾害下电网风险评估和防控体系，将停电防御体系从电力系统内部拓展到台风、雷电、山火、覆冰等外部灾害，将电网防御自然灾害的理念由“事后被动防御”提升为“提前主动防御”，相关成果应用于华东、西北、江西、云南、湖南、广东、宁夏等省级及以上电网。

后来，我们开始考虑如何在复杂的能源系统转型中纳入社会因素的影响。2017年，我们提出了CPSSE的研究框架，在原来智能电网的基础上进一步考虑了社会行为。从社会维度上，我们研究了电力市场对于电力系统、物理系统可靠性的影响，把物理的维度从电力系统扩展到能源链，以及非能源因素，包括终端能源用户的用能行为、自然灾害等。通过研究，我们逐渐认识到，CPSSE系统的概念和框架是研究能源链转型的一个有效范式，而电力转型是主动支撑能源转型的有力保障。

**问：**青海省今年创造了“绿电5周”100%清洁能源供电的纪录，您带领团队研发的系统在其中发挥了什么作用？

**答：**可再生能源发电量占比的目标点定了以后，从原点走向目标点的路径有多种可能性。我们的成果突破了国际上只进行局部优化、不能全局优化的局限，通过评估不同路径的风

## 广域监测分析保护控制系统（WARMAP）的防御范围拓展情况

年份	社会维度	物理维度					信息维度			理论框架与研究范式
		电力系统			非电的能源系统	非能源的系统	数据采集	知识提取	决策支撑	
		稳定	充裕	防御						
2002	电力市场	1986年发明EEAC，	2006年开始研究多尺度充裕协调分析与优化控制问题	2006年发表关于时空协调的大停电防御框架的系列及多道防线协调优化控制					在线决策表	
...	↓									
2008						自然灾害防御框架				
2009	碳市场				一次能源			原型平台		广义阻塞
...	↓									
2011						单一灾害				
2012										
...	↓									
2015	用能行为				多尺度充裕性	复合灾害	调查问卷行为建模	综合能源动态仿真平台	碳市场风险多道防线	因果/统计/行为融合范式
2016	↓									
2017										
2018					能源转型分析框架			AI融入因果分析	能源系统转型优化应用	CPSSE理念
2019	↓								能源企业转型优化应用	
2020	能源政策						内网与外网融合分析		地区能源转型优化应用	电力/能源/环境协调框架
										多维不确定性

>> 资料来源：国网电力科学研究院

险值及机会成本，支持了复杂系统演化路径的全局优化。

我们的仿真系统不仅对青海省能源转型的各个环节、各种对象建立了模型，还在能源链优化的过程中，将电力系统规划中的充裕性、安全性和电力减排的机会成本，与电网运行过程中的安全及充裕度风险联系起来协调优化，并使电力转型的路径主动地支持整个能源链的转型。若在仿真中发现规划的电力系统发展路径，在运行中的风险超过设定的阈值，就会回溯并改进规划方案。这样，不但协调了能源和电力系统的有序发展，也协调了规划及运行的优化。

我们对能源转型的推演过程不是在实际的系统中进行，而是提前在数字沙盘系统中试探不同的决策，在分别评估的基础上，选出并实施其中的最优决策，不会反复打扰实际系统的

运行。随着时间变化，不断滚动上述协调优化的进程，就可以计及外界环境的变化而修正路径，并以计及风险后的最小总代价，在事先指定的时间到达目标状态。

**问：**您承担的中国工程院重大咨询项目《碳约束条件下我国能源结构优化战略研究》被评价为“使我们较好地把握了碳减排的规律和我国能源结构优化的规律”，您对碳中和的未来怎么看？

**答：**“双碳”目标极具挑战性，但也是我们必须完成的任务。为了达到碳中和，除了要大规模降低社会活动向大气层排放的温室气体以外，还必须通过碳捕获、封存与利用（CCUS）这类碳增汇技术，来减少已存在于大气层中的温室气体浓度。这一方面是因为人和动物的呼吸、火山

爆发、山火等灾难都使环境本底的碳排放不可能降到零，因此单靠碳减排是难以达到碳中和的；另一方面，随着减排深度的不断增加，减排措施的性价比将越来越低，而CCUS技术的性价比却随着技术的进步越来越高。由于碳减排与碳增汇这两类措施的性价比的时间演化趋势相反，因此“双碳”任务的实施路径需要协同优化。

新型电力系统与非电能源系统、环境系统、社会系统等非电力环节之间的边界条件正在发生巨大变化，不能再按封闭系统来规划与运营电力系统。立足于系统科学的CPSSE是实现碳达峰、碳中和目标及能源转型路径优化的框架。电力系统应该在整体框架中将其解耦到不同的个体层面，在厘清个体机理以后再聚合到整体系统。这是用科学的、负责任的态度去完成“双碳”任务的途径。■