

“作为研究人员，我们最希望的就是找到实现这一目标的路径之中所付出经济代价最小、对环境影响最小的那一条”。

# 仰望星空，不忘脚踏实地

## ——访中国工程院院士、国网电科院名誉院长薛禹胜

文 / 本刊记者 程洪瑾 萧翔宇

建立一个足够强大的模型，为整个经济社会实现“双碳”目标算出一条最优路径，是“不可能完成的任务”吗？

在中国工程院院士、国网电力科学研究院名誉院长薛禹胜看来，设计并完成这项任务是他目前最重要最紧急的事情。

“实现‘双碳’需要综合考虑科技与经济的发展情况，不能只靠定性分析，应该在大量真实数据及有根据的预测数据基础上，由数学模型、混合仿真和沙盘推演来支撑，才能得到优化的结论。”

薛禹胜的忧虑所在，是减碳的巨大成本急需科学的测算；信心所在，是数十年来中国在电网防御大停电方面的经验累积。

他的设想十分吸引人：把总的转型任务分配给各个候选路径的各个时间段，对其分别采取优化措施，就可以在不同候选路径的仿真比较中，选择最优决策，实现社会总的风险、成本降至最

低；对政策效果的仿真推演不仅必要，且需要在实施过程中不断滚动更新，以增强决策的科学性和目标的可及性。

近日，《能源评论》专访了薛禹胜院士，请他解读建党百年之际，中国能源如何在“双碳”主战场，借助“信息物理社会系统”来优化路径决策，从而完成革命性的升级与重塑。

### “双碳”目标：须廓清不同概念

**问：**碳达峰、碳中和与碳减排的关系是怎样的？

**答：**碳减排、碳达峰与碳中和三个概念紧密相关，但不能混淆。很多人认为，能源消耗中增加可再生能源的比例后，就能实现碳减排，碳中和任务的达成也就水到渠成。这是一个误解。

解释这个问题不妨设喻如下。改善财务状况，可以通过减少不必要的开

销，也可以通过增加收入。换句话说，要保证财务安全，至少要收支平衡；而要财务自由，就需要经济富裕。对环境安全来说，碳中和就是指大气层中的碳浓度不再增加。为此，不妨将碳抵消量与碳排放量两者之差定义为碳中和的裕度指标，其值为负（或零，或正），则代表了碳中和的要求没有实现（或恰好实现，或优于中和）。

由于人类、动物、微生物等维持生命所必需的基础碳排放基本上是不可能减少的，并且原本已经封存在土壤岩石中的碳元素也会在火山喷发等地球活动及山火等自然灾害中释放到大气层。为了实现碳中和，这些碳排放量只能通过植树造林、改善植被质量，以及碳捕获、利用、封存（CCUS）等手段来平衡掉，即碳抵消。植树造林意义重大，但碳抵消的空间有限，CCUS有赖于大量科技创新以及巨大资金投入。



## 薛禹胜

中国工程院院士  
国网电力科学研究院名誉院长

新能源替代化石类能源、终端能源的电能替代是碳减排的两个核心措施，但仅仅依靠它们却无法实现碳中和的目标，必须同时依靠碳抵消能力的提升。特别在深度碳减排措施的执行接近其极限时，进一步降低碳排放的经济性也会越来越差。

受到技术水平和人财物等各方面的约束，为了维持经济社会的继续发展，中国在大力降低碳排放强度的同时，仍然不得不在2030年之前允许碳排放的绝对总量有缓慢的增长。而在碳达峰以后，碳排放的总量就必须不断降低。

虽然2030年前实现碳达峰的目标本身并没有直接对碳排放的峰值提出明确要求，但是，在2030年前推高该峰值来推动经济发展绝非明智之举，因为这将大大增加未来实现碳中和目标的困难及社会经济负担。

2017年，我在国际顶级学术刊物上发表了观点性文章，提出智能电网的发展趋势是要在智能电网的物理基础上，综合考虑社会因素的影响，并提出关于能源领域的信息物理社会系统（CPSSE）的概念。

### 路径优化：不靠拍脑袋

**问：**应对气候变化、能源转型升级，这都涉及长远的规划，那么转型路径应该如何优化呢？

**答：**这涉及从当前状态向既定目标状态的演化路径研究。2021年7月28日，中国科协发布了30个重大研究问题，其中有10个是对科学发展具有导向作用的前沿问题，第七个问题是：以

新能源为主体的新型电力系统路径优化和稳定机理是什么？

就像出行需要导航来应对路况的变化，实施“双碳”目标的路线图也需要通过科学方法来及时修正。当一个新的时段到来，或经济社会发展环境发生重大变化时，都需要以当时状态为新的起始点，重新优化，就如同导航中需要根据偏航情况及时重新规划路径。这就相当于将过去的进展变成历史数据，并为此后的路径规划持续提供更新鲜的数据，让未来路径越来越接近最优解。

**问：**该如何应对演化路径中这些复杂的、大量的不确定性？

**答：**以现实状态为初始点，以转型的目标状态为终点。在这两点之间的时空物演化过程，就是需要优化的路径。在习近平总书记宣布中国的“双碳”目标后，关于目标点的长期争议就有了定论。但要通过什么样的路径达到这个目标，其中存在大量不确定性。选择不同的演化路径，自然会影响到能源、经济、环境的发展质量及安全。反过来，物理层面、信息层面及社会层面的众多因素的变化又会影响“双碳”实施路径的决策。

这样复杂的多领域、多时间尺度、多目标的演化路径，几乎不可能根据少数时间断面的状态要求，靠拍脑袋的方式来优化。通过计算机分析比较不同的演化路径，量化其经济代价的方式成为必然趋势。但是，用优化发展路径的传统方法来处理这个终点固定的问题，其后续的路径有赖于各历史时段中的逐段决策。演化终点的状态积累了所

有分段决策的影响，不但会偏离给定的终点，并且对参数与局部决策都非常敏感，难以比较不同路径方案的优劣，也不支持敏感性分析。为此，迫切需要设计新的方法。

我在2016年提出了一种新思路。首先在由时间及目标变量构成的平面上给定转型的初始点及所设定的终点。用它们之间的曲线段表示演化路径，并用两个几何特征参数描述线性、前加速非线性、后加速非线性等三典型演化路径及其非线性程度。通过聚类，给出少量典型的演化路径。然后就可以按某个对象路径的几何特征，将要求的减排总量及可再生能源总增量，分配到不同的时段。

若要评估一条预设路径所对应的社会纯收益（=总收益-建设费-运行费-风险成本），可逐年优化控制变量，使年内的纯收益最大。转型时段内，各年纯收益的累计值就可被用来量化评估该路径的优劣，并识别出最优路径。由于各时段的决策措施是根据给定轨迹来优化的，而不是像传统方法那样由决策措施来生成，故能够克服传统方法的缺点。

**问：**在寻找最优路径的过程中，需要特别重视哪些情况？

**答：**“双碳”目标的提出就是为了推动经济社会高质量的全面发展，绝不能以环境质量下降作为代价，否则“双碳”革命的进程也会逐渐乏力。同时，优美清洁的环境本身也是社会幸福指数的重要组分。

转型路径的优化问题极其复杂，需要在CPSSE理念下，全面考虑环

境、技术、经济、社会、行为等因素的交互影响。经济安全、能源安全、环境安全等都是“双碳”战略目标中的应有之义，最终的最优结果必定是协同发展，而不是片面强调某个侧面。

例如对于非电的物理环节（如自然灾害），我的团队很早就开始研究气候与气象的变化对电力系统安全性及充裕性的影响。最初是依据灾害的种类（如山火、洪水、冻雨、雷电等），分别建立从气象信息到电力系统各装备故障率的传递关系，并评估对电力系统安全风险的影响。目前开始研究不同灾种之间的相关性及因果关系，以及气候与气象的变化如何通过不同的渠道并行影响。

**问：**碳减排需要全社会的共同努力，但不同人的视角和诉求也是不同的，如何把这些因素也考虑进去？

**答：**对于建设以新能源为主体的新型电力系统的任务来说，社会的参与度及电力服务的满意度成为极为重要的评价指标，不同参与者的博弈行为及接受度都是CPSSE的核心要素。

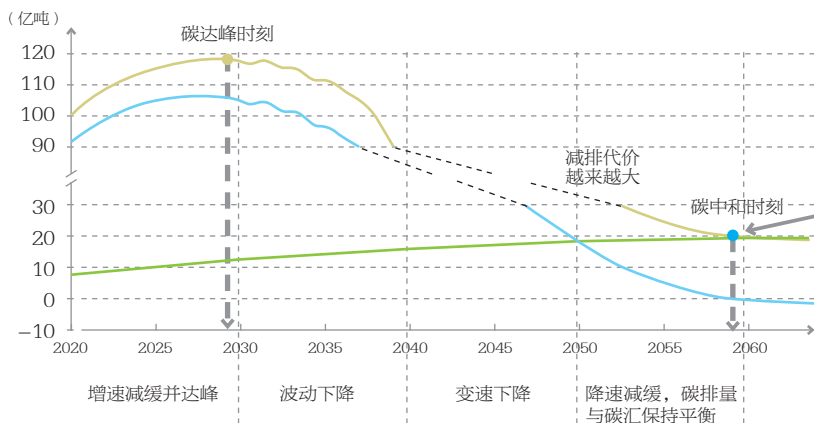
每个参与者都会在给定的边界条件下，从自己的视角分析不同的问题。由于边界条件会随相关领域的状态变化及扰动事件而改变，故顶层设计必须兼顾严谨与实用，在提供的交互信息中协调好可行性及真实度。

如果将众多参与者对演化过程的反应，及时反馈给混合仿真系统，就可以构造出数字化的沙盘推演系统。针对不同的仿真工况、扰动场景、参数、决策，进行仿真并评估其效果；修正这些要

---

经济安全、能源安全、环境安全等都是减排过程中的应有之义，最终的最优结果也绝对不是单独的减排量最大。

“双碳”目标及其路径概念示意图



碳排放不可能降到零值，比如动物的呼吸、火山、山火等。需要足够的碳汇来抵消

素，重新仿真，就可以比较其优劣。传统的定性且泛泛的争论，难以达成共识。今后可被替换为对模型、参数、场景的量化讨论，大大提升了决策的科学性。

参与者行为加入沙盘推演的方式有两种。一种是通过实验经济学方法，需要邀请大量真实的行业专家加入与沙盘推演系统的交互仿真。另一种是通过计算机技术和大数据建立多代理模型，由后者参与沙盘推演。当然两种方式可以并存于同一个数字沙盘推演系统中。

参与者的行为大致上可以分为理性、有限理性、非理性三类。理性（或某些有限理性）的行为，可以通过大数据建立多代理模型来反映。由多代理生成环节建立的个别代理并没有太多意义，但只要代理数量足够多，其概率密度函数将高度趋近于样本集的分佈。对于非理性（或某些有限理性）的行为，则只能通过仿真场景来反映。

南瑞团队经过近20年的研究和积

累，建成了兼容数学模型、多代理、实验经济学的混合仿真平台，并已经在CPSSE框架下应用于“电动汽车参与电网备用服务”及“碳市场研究”。

## 电力系统：碳减排落地的重要抓手

**问：**电力系统在碳减排过程中发挥着怎样的作用？

**答：**能源链是经济社会发展的核心支撑，也是当前及今后相当长时间内的主要碳排放源，因此，能源链对于“双碳”目标及路径的优化至关重要。电力系统则是能源链的枢纽，面对“双碳”目标，电力系统应该主动担当，协调好能源、经济、环境等的安全，为此必须重视达标路径的优化。伴随着可再生能源大规模替代火电，以及电能消费大规模替代非电能消费，电力系统的枢纽角色将进一步突出，而大规模交直流线路及电力电

子装备入网，也会大大增加动态行为的复杂性；在大规模新型负荷涌现的情况下，解决辅助服务与需求侧响应问题会变得更加迫切。

**问：**要穿透各领域的复杂成本因素，是否有赖于能源价格体系的重新设计？

**答：**新能源的入网，也将更多的不确定性带入电网的规划、建设及运行。随着新能源成为主体，不确定性的影响将迅速增加，CPSSE概念的重要性也将进一步凸显。传统上局限于电网内部的分析，将不得不纳入碳元素流、气象流、资金流、信息流、行为流的分析。这些跨领域的多尺度问题的互相牵制使得我们很难合理界定某个特定因素成本。解决方案之一是在CPSSE的框架下，详细分析新型电力系统与实现“双碳”目标之间的关系，科学地做好能源的价格体系顶层设计。■