

高比例可再生能源电力系统供需平衡理论(二): 基于决策依赖不确定性的系统规划

胡晨茜¹, 冯双磊², 刘锋³, 侯云鹤^{1*}, 王伟胜²

(1. 香港大学深圳研究院, 广东省 深圳市 518057; 2. 可再生能源并网全国重点实验室
(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 海淀区 100192; 3. 新型电力系统运行与控制全国重点实验室
(清华大学电机工程与应用电子技术系), 北京市 海淀区 100084)

Theory of Supply-demand Balance in Renewable-dominated Power Systems (Part II): System Planning Under Decision-dependent Uncertainty

HU Chenxi¹, FENG Shuanglei², LIU Feng³, HOU Yunhe^{1*}, WANG Weisheng²

(1. The HKU-Shenzhen Institute of Research and Innovation, Shenzhen 518057, Guangdong Province, China; 2. State Key Laboratory of Renewable Energy Grid-Integration (China Electric Power Research Institute), Haidian District, Beijing 100192, China; 3. State Key Laboratory of Power System Operation and Control (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Conventional planning generally treats uncertain parameters, such as resource availability and load levels, as exogenous variables, with planning models primarily optimizing overall system configuration and operating costs under prescribed risk conditions. As renewable energy deployment expands, planning decisions such as site selection, capacity allocation, and system reinforcement can alter the statistical characteristics of system uncertainty itself through their effects on system structure, thereby making uncertainty decision-dependent. Decision-dependent uncertainty (DDU) captures the endogenous coupling between planning decisions and system uncertainty, indicating that uncertainty is no longer merely an externally given constraint but may also become a system attribute influenced by planning decisions. Accordingly, the planning problem is extended from cost optimization under prescribed uncertainty to coordinated optimization that accounts for the impact of planning decisions on uncertainty structures. To characterize this mechanism and incorporate it into planning models, this paper first analyzes the conditions under which DDU emerges and reveals the interaction mechanisms and feedback relationships between planning decisions and uncertainty. Then, it establishes a

quantitative mapping between planning decisions and system uncertainty and develops quantitative measures of risk propagation and uncertainty response. Based on these formulations, a unified computational framework is constructed to address the nonconvex coupling, computational complexity in high-dimensional settings, and convergence instability introduced by DDU. Case studies show that planning methods considering DDU can actively reshape the system's uncertainty structure and reduce the potential risks associated with planning schemes under future operating conditions. These benefits mainly arise from optimizing the uncertainty structure. This paper reveals the bidirectional feedback mechanism between planning decisions and uncertainty in renewable-dominated power systems, providing theoretical foundations and practical methods for shifting power system planning from passive adaptation to uncertainty toward proactive regulation of uncertainty structures.

KEY WORDS: renewable energy; supply-demand balance; decision-dependent uncertainty; power system planning

摘要: 传统规划通常将资源禀赋、负荷水平等不确定参数视为外生变量, 规划模型主要在给定风险条件下优化系统结构与运行成本。随着可再生能源规模扩大, 场址选择、容量配置和技术路径等规划决策会改变系统不确定性的统计特征, 使不确定性呈现出决策依赖特性。决策依赖不确定性(decision-dependent uncertainty, DDU)反映了规划决策与系统不确定性之间的内生耦合关系, 意味着不确定性不再仅是

基金项目: 国家自然科学基金委员会-国家电网公司智能电网联合基金项目(U1966601)。

Joint Research Fund in Smart Grid Under Cooperative Agreement Between the National Natural Science Foundation of China (NSFC) and State Grid Corporation of China (U1966601).

外部给定的约束，也可能成为受规划决策影响的系统属性。由此，规划问题由给定不确定性条件下的成本优化，拓展为同时考虑规划决策对不确定性结构影响的协同优化。为刻画这一机制并将其纳入规划建模，该文首先从理论层面分析 DDU 的存在条件，揭示规划决策与不确定性之间的作用机理及反馈关系。在方法层面，建立规划决策与系统不确定性之间的定量映射关系，提出风险传播与不确定性响应的度量方法，并针对 DDU 引起的非凸耦合、高维计算复杂性与收敛不稳定等问题，构建统一的求解框架。算例结果表明，考虑 DDU 的规划方法可主动调控系统不确定性结构，降低规划方案的潜在损失，其收益主要源于对不确定性结构的优化，而非单纯的容量扩张。文中揭示高比例可再生能源系统中规划决策与不确定性之间的双向反馈机制，为电力系统规划从被动适应不确定性向主动调控不确定性结构转变提供一定理论基础与方法支撑。

关键词：可再生能源；供需平衡理论；决策依赖不确定性；电力系统规划

0 引言

在能源转型与气候约束的双重背景下，电力系统规划正经历从以确定性预测为基础的静态设计模式，向以不确定性管理为核心的动态规划模式转变^[1]。随着风电、光伏等可再生能源的大规模接入，系统长期运行状态呈现出显著的时空波动性与非平稳性^[2]，传统规划理论往往将电力系统面对的不确定性视为外生扰动，难以刻画系统演化过程中包含的内生不确定性结构。因此，如何理解并表征规划决策与系统不确定性之间的耦合关系，成为高比例可再生能源电力系统规划的关键科学问题^[3]。

传统规划范式假定不确定性为外生变量(exogenous uncertainty)，如负荷增长、燃料价格或设备故障，这些变量均独立于规划决策，规划模型多在给定概率分布或不确定性集合下最小化长期期望成本^[4]。该假设在以常规机组为主体、系统结构相对稳定的阶段曾行之有效。然而，在高比例可再生能源背景下，风能与太阳能的出力受大气物理过程驱动，其时空相关性高度耦合，而场址选择、容量配置和网络拓扑等规划决策，可直接改变系统所面临的不确定性特征^[5]。例如，风电场布局决定系统总出力的协方差结构，储能与互联配置影响功率偏差的边际分布^[6]。由此可见，不确定性特征并非完全由外部给定，而会受规划决策的内生影响。

围绕高比例可再生能源系统中的供需平衡、规划决策与不确定性建模，已有研究从平衡理论、资源配置、运行调度和极端场景评估等方面开展了系

统探索。在电力电量平衡基础理论层面，文献[7]系统构建了适配新型电力系统特性的平衡理论框架，梳理源网荷储多要素不确定性建模方法，指出需发展适配新能源随机特性的仿真技术以支撑规划与运行协同决策；文献[8]总结了多时间尺度下平衡分析及加速求解技术，明确了不确定性表征与规划决策耦合的未来研究重点。

在煤电转型与新能源替代路径方面，文献[9]通过长周期模拟揭示了新能源不确定性引发的电力供应安全风险与缺额，提出煤电应急化转型的协同优化措施；文献[10]从平衡视角明确了新能源替代的技术内涵，分析了不确定性下供电充裕性保障难题，给出了耦合决策的新能源替代路径。

针对新型电力系统构建的关键技术，文献[11]从平衡理论、稳定机理等四维视角，提出系统构建中规划决策与不确定性耦合的科学及经济学问题，明确了核心技术方向；文献[12]深入剖析了多要素不确定性引发的平衡问题，阐释了新型电力系统规划与运行协同优化面临的挑战，研发了多维度调控技术与全景协同决策支撑系统。

在平衡方法与调度策略方面，文献[13]提出分层递进的耦合分析与优化策略，实现不确定性下电力可靠供应与清洁能源消纳的协调目标；文献[14]针对机组检修建模中的时序约束与事件关联问题，建立了事件驱动的机组检修模型，构建考虑多约束的中长期协同运行模型；文献[15]通过考虑长周期供需不平衡风险，提出了基于条件风险价值的耦合评估与规划方法，以刻画极端供需失衡情形对规划结果的影响。

针对多级协同与日尺度平衡，文献[16]建立了日尺度源网荷储多环节生产模拟模型，通过双深度神经网络实现异常气象下供需失衡的耦合分析；文献[17]提出日滚动平衡方法，通过电源聚合简化耦合问题，构建火电开机与调度的耦合优化模型。

在源网一体化规划与渗透率分析方面，文献[18]建立了双层规划耦合模型，实现规划决策与运行可行性校核的深度联动；文献[19]通过时序模拟分析了风电渗透率与灵活性供需的耦合关系，构建了考虑灵活性平衡的源网一体化耦合规划模型；文献[20]构建了风电渗透率“五率”指标体系，量化各项指标与规划决策的相互影响及边界约束。

针对低风力与极端场景的评估，文献[21]提出基于气象反演的低风力事件评估方法，以刻画极端

不确定性特征并支撑协同决策；文献[22]从四维视角总结了极端场景研究，提出不确定性应对策略，明确协同决策的后续研究方向。

在水电与储能优化方面，文献[23]针对高水电占比系统提出供需双侧约束下的蓄水保供量化方法，实现水电不确定性与保供决策的耦合；文献[24]建立了水电顶峰能力多维量化与调配方法，实现了梯级水电约束下的耦合优化；文献[25]构建了考虑全年时序模拟的联合优化模型，量化储能能在“双碳”目标下与新能源消纳、规划决策的耦合作用及配置规律。

在系统平衡的创新模式方面，文献[26]提出碳媒介耦合模式，构建了电力电量-碳双目标平衡框架，深化多目标协同决策；文献[27]分析了源网荷储各环节不确定性因素，探讨了耦合计算方法与风险预警模式，支撑了平衡分析与决策的深度耦合；文献[28]通过实证分析揭示了系统演进各阶段主导矛盾的耦合递变规律，为不同渗透率水平下的协同决策提供阶段化解决方案。

上述研究表明，高比例可再生能源系统中的不确定性具有决策依赖性^[7]。在此基础上，本文聚焦规划层面的 DDU 问题，分析规划决策影响系统不确定性结构的作用机制，并构建面向高比例可再生能源系统的 DDU 规划理论框架。该框架的核心在于，不确定性不再被视为需要被动适应的外生对象，而是可受规划决策影响的内生变量。因此，规划理论需要从给定不确定性条件下的结构优化，拓展为同时考虑结构决策对不确定性特征影响的协同优化，以从源头调控系统风险结构与灵活性需求。

与运行阶段相比，规划层 DDU 具有更长的作用周期和更广的影响范围，主要体现在时间、空间、结构和反馈 4 个方面：在时间尺度上，规划决策影响了未来数十年的系统演化路径，该影响具有长期性与不可逆性；在空间维度上，规划涉及多区域联合决策，不同资源的空间布局会显著影响系统不确定性的相关结构；在结构层面，规划者可主动改变系统拓扑和资源配置，从而影响不确定性模型的参数特征；在反馈机制上，规划决策通过空间布局、规模效应和平滑能力等多种路径作用于不确定性，使其呈现跨尺度、跨维度的复杂反馈特征。这种多重反馈不仅提高了模型复杂度，也使规划决策具备调节不确定性结构和风险边界的潜在能力。

本文旨在建立从理论认识、分析框架到方法体

系相统一的 DDU 规划范式，并系统回答以下 3 个问题：

1) 传统电力系统规划中，不确定性为何被视为外生变量？该假设在高比例可再生能源条件下为何失效？

2) 如何在数学上表征和分析规划决策对不确定性集合的结构影响？

3) 如何基于 DDU 构建考虑不确定性可塑性的规划模型，实现系统风险结构调控与灵活性需求内生刻画？

1 决策依赖不确定性的规划理论基础

本节基于系列文章^[129]建立的 DDU 的基本概念，系统阐述规划层 DDU 的特殊性与内生演化机制，提出从被动适应到主动塑造的范式转变。

1.1 规划范式的转变：从外生不确定性到决策依赖不确定性

尽管随机优化和鲁棒优化的数学形式不同，但 DDU 的核心特征是一致的：不确定性从外生输入变为决策变量的内生函数。这一变化使得规划问题由给定不确定性条件下的传统决策优化，转变为考虑决策对不确定性结构影响的规划优化^[30]。DDU 在不同优化框架下有不同的数学表达形式：

1) 在随机优化中，传统的外生不确定性 (decision-independent uncertainty, DIU) 模型假设不确定性的概率分布 P_0 ^[31] 为

$$\min_{\mathbf{x} \in X} \{C(\mathbf{x}) + E_{\xi \sim P_0} [Q(\mathbf{x}, \xi)]\} \quad (1)$$

在 DDU 模型中，概率分布随决策变量 $\mathbf{x}$ 变化：

$$\min_{\mathbf{x} \in X} \{C(\mathbf{x}) + E_{\xi \sim P_{\mathbf{x}}} [Q(\mathbf{x}, \xi)]\} \quad (2)$$

式中 $P_{\mathbf{x}}$ 为依赖于决策 $\mathbf{x}$ 的概率测度^[6]。

2) 在鲁棒优化中，传统 DIU 模型假设不确定性集合 Ξ_0 固定^[9]：

$$\min_{\mathbf{x} \in X} \max_{\xi \in \Xi_0} f(\mathbf{x}, \xi) \quad (3)$$

在 DDU 模型中，不确定性集合随决策变量变化：

$$\min_{\mathbf{x} \in X} \max_{\xi \in \Xi} f(\mathbf{x}, \xi) \quad (4)$$

式中 $\Xi(\mathbf{x})$ 为决策依赖的不确定性集合^[32]。

表 1 从不确定性属性、规划目标和风险调控方式等维度，对传统 DIU 范式与 DDU 范式在建模理念与决策机制上的差异进行了比较。需要强调的是，表中提到的随机优化和鲁棒优化仅是处理不确

定性的不同数学工具,他们都可应用于 DIU 或 DDU 框架^[30]。

表 1 传统 DIU 范式与 DDU 范式的对比

Table 1 Comparison between the traditional DIU-based paradigm and the DDU-based paradigm

维度	传统 DIU 范式	DDU 范式
不确定性	外生输入	内生变量
属性	(固定的 P_0 或 Ξ_0)	(决策依赖的 P_x 或 Ξ_x)
规划目标	随机优化: 最小化期望成本; 鲁棒优化: 对抗最坏情况	优化成本 并调控不确定性结构
风险调控	增强系统冗余	重构风险分布形态
方式	(备用容量、裕度)	(空间布局、规模选择)
核心机制	单向: 决策→成本	双向闭环: 决策↔不确定性→成本
规划者	随机优化: 优化者;	结构性风险调控者
角色	鲁棒优化: 防御者	
决策焦点	容量配置、裕度设计	容量配置、空间布局、 结构优化
项目价值	单一能量价值	能量价值+结构价值 (对系统波动性的影响)
评估		
适用场景	不确定性弱 依赖决策的系统	不确定性强依赖决策的系统 (如大规模可再生能源)

1.2 决策依赖不确定性在系统规划中的实现机制

高比例可再生能源电力系统使不确定性成为规划决策的内生结果,主要通过下列 4 类机制实现:

1) 空间相关性调控型 DDU(spatial-correlation reshaping DDU)。

可再生能源的选址决策可直接改变可再生能源场站总出力的空间相关结构,进而影响总出力波动特性^[33-34]。选址决策首先决定各场站之间的地理位置,其空间布局的变化进一步影响场站间的气象相关性,最终决定系统总出力的协方差结构。

具体而言,设场站 i 和 j 的地理位置由决策确定,其出力相关系数 ρ_{ij} 通常满足距离衰减规律:

$$\rho_{ij} = f(d_{ij}), \frac{d\rho_{ij}}{dd_{ij}} < 0 \quad (5)$$

式中: d_{ij} 为场站间距离; $f(\cdot)$ 为由地理和气象条件决定的衰减函数。

空间相关性决定了可再生能源出力的协同特征。根据相关系数 ρ_{ij} 的大小,可将空间区域划分为 3 类:当 $\rho_{ij} < 0$ 时,区域间呈负相关,通常受反向天气系统控制(如迎风坡与背风坡),可在系统层面形成出力互补效应。此时通过联合布局可显著降低可再生能源系统出力总方差;当 $\rho_{ij} \approx 0$ 时,区域间气象独立,地理隔离较远(一般超过 500 km),分散化布

局可通过统计平滑效应减弱可再生能源出力波动;当 $\rho_{ij} \rightarrow 1$ 时,区域间高度相关,受同一气象系统影响(距离通常小于 200 km),可再生能源场站总出力波动风险显著增加,难以通过空间互补来降低运行风险,需依赖储能或跨区互联以维持系统的稳定性。空间相关性调控型 DDU 通过优化空间布局,利用负相关和低相关区域,实现系统级方差的结构优化,而这种协同降低波动的机制,是传统以单个项目发电成本最低为目标的独立选址决策所无法体现的。

2) 规模调节型 DDU(scale-dependent regulating DDU)。

装机规模越大,统计平滑效应越强,预测精度越高^[31, 35]。其作用机理在于,装机规模的增加会带来统计样本数量的增长,使随机误差在统计上相互抵消,从而提高整体的预测精度。其理论基础主要体现在两个方面。首先,根据大数定律,当系统由大量相互独立或弱相关的发电单元组成时,总体输出误差的标准差会随着单元数量的增加而按 $\sqrt{N}$ 或更快的速度下降,从而增强系统的统计平滑效应;其次,大规模系统能够提供更丰富的样本数据,为数值天气预报与统计预测模型的训练提供支持,提升模型的泛化能力,从而进一步提高出力预测的精度^[36]。一般而言,可再生能源出力的预测误差标准差与装机规模的关系可表述为

$$\sigma_{\text{forecast}}(x) = \sigma_0 x^{-\alpha} \quad (6)$$

式中: x 为装机容量; σ_0 为单位容量的预测误差标准差; α 为规模效应指数。

规模调节型 DDU 反映了高比例可再生能源系统规划中集中式大规模开发与分散式布局之间的协调关系。集中式布局具备规模效应带来的预测精度优势,但由于场站通常集中在同一气象控制区域内,其出力特性高度相关,可能导致系统总出力波动同步增强,增加运行风险,并削弱分散化平滑效应。相比之下,分散式布局将场站布设在不同或低相关区域,使各场站受不同气象系统驱动,出力波动可在空间上相互抵消,从而降低系统总出力方差和运行风险。然而,由于单场站规模较小,分散式布局可能面临预测精度不足的问题。因此,最优规划应在规模效应、空间互补性与系统风险之间进行协调,实现系统整体风险与成本的综合优化。

3) 强度调节型 DDU(amplitude regulating

DDU)。

储能和柔性负荷等灵活性资源能够通过充放电平滑负荷波动^[33],进而降低系统运行风险。例如,净负荷波动通常随储能容量增加而降低,但其边际抑制效果逐渐减弱。在随机优化框架下,可建模为

$$\text{Var}(P_{\text{net}}) = \text{Var}(P_{\text{total}}) \cdot [1 - \eta_s(E_s)] \quad (7)$$

式中: E_s 为储能容量; $\eta_s(E_s)$ 为储能对方差的抑制系数,通常为递增凹函数。

强度调节型 DDU 反映了发电侧出力波动削减与负荷侧灵活性补偿之间的成本协调关系。前者通过优化可再生能源空间布局,在发电侧降低出力相关性,以较低成本削减系统波动;后者依靠储能与柔性负荷平滑负荷侧的波动,技术成熟但成本较高^[32]。最优规划应以源端优化为主,先在空间层面降低波动性,再通过末端补偿方式处理残余不确定性,实现成本与灵活性的协同最优。

4) 约束界面重塑型 DDU(constraint-bound Reformatting DDU)。

通过输电网络扩展、机组投资等规划决策,可改变系统运行的约束边界,从而影响系统的不确定性特征,其作用机理在于,输电通道的扩展或新机组的投运能够有效放宽系统运行约束,扩大系统的可行域,使得系统在面对波动和扰动时具备更高的调节余度,从而降低风险暴露水平^[37-38]。

约束界面重塑型 DDU 表明,结构性投资可通过扩展系统可行域来调控风险。例如,增加输电容量可提升潮流承载能力,配置灵活性资源可增强爬坡响应,将原本难以应对的不确定性转化为可调控的内生变量,降低弃风弃光和切负荷风险^[39]。

上述4类 DDU 作用于规划的机制可用参数化集值映射描述。设不确定性集合为 $\Xi(x)$, 其中 x 为规划决策向量。一般形式为

$$\Xi(x) = \{\xi | g(\xi, x) \leq 0\} \quad (8)$$

式中 $g(\xi, x)$ 为刻画不确定性约束的函数族,在约束界面型机制中多为线性函数,在空间相关性调控型和规模调节型机制中多为非线性函数。

为了量化规划决策对不确定性的影响强度,在集合视角下,可定义集合灵敏度:

$$S(x) = \frac{\partial \Xi(x)}{\partial x} \quad (9)$$

式(9)表示不确定性集合边界对规划决策变量的敏感性。当 $\|S(x)\|$ 较大时,系统不确定性高度可

塑,规划决策具有显著的风险调控能力;当 $\|S(x)\| \rightarrow 0$ 时,不确定性对决策不敏感,接近传统外生不确定性情形,DDU 效应微弱。

通过以上4种机制,DDU 能够在规划层面主动塑造有利的不确定性结构,使不确定性不再是被动接受的外生因素,而成为可被设计与调控的内生特征。由此,规划任务由在既定风险下配置资源,转向通过结构性决策调控系统风险特征,从被动防御走向主动塑造,实现规划理论范式的根本转变。

1.3 决策依赖不确定性的引入对规划带来的挑战

DDU 的引入使电力系统规划由传统的凸优化问题转变为具有内生反馈的非凸优化问题^[30],从而带来如下3大理论挑战。

1) 挑战1: 模型非凸性与可行域复杂化。DDU 会导致目标函数或约束条件中出现决策变量与不确定性的非线性耦合。例如,在式(2)所定义的随机优化框架下,若期望基于随决策变量变化的概率分布 P_x , 即使 $Q(x, \xi)$ 为凸函数,期望运行成本 $E_{P_x}[Q(x, \xi)]$ 也可能非凸;在式(4)所定义的鲁棒优化框架下,最内层问题的可行域 $\Xi(x)$ 随外层决策 x 变化,破坏了问题的凸性结构。

此外,DDU 还会使可行域呈现非凸化特征。即使不确定性集合 $\Xi(x)$ 由线性约束定义:

$$\Xi(x) = \{\xi | A(x)\xi \leq b(x)\} \quad (10)$$

式中 $A(x)$ 或 $b(x)$ 依赖于 x , 整个问题的可行域在 (x, ξ) 空间中非凸。此类结构性非凸性使得传统凸优化算法(如内点法或对偶法)难以适用,无法保证求解的全局最优性,计算过程可能陷入局部最优解。

2) 挑战2: 计算复杂度的维度爆炸。一般 DDU 规划问题具有3层嵌套的决策结构:第1层为规划决策 x (场址选择、容量配置等);第2层为不确定性 $\Xi(x)$ 或 P_x 由 x 确定,即由第一阶段的“规划者”决定;第3层为运行决策 $y(x, \xi)$ 依赖于前两层。这使得优化空间维度显著增加。这种内生不确定性集合使得最优解的存在性、唯一性和计算都更加复杂。

3) 挑战3: 决策与不确定性的失步问题。由于规划决策会改变不确定性结构,主问题往往基于原有不确定性模型生成新决策,而子问题又依据更新后的不确定性反馈风险信息,二者之间存在信息滞后,导致优化过程振荡或算法难以稳定收敛^[41],进而造成规划方案在仿真分析中表现可行,但在实际运行中失效的情况^[35]。

2 决策依赖不确定性下的规划风险传导与系统协调机理

在前文概念框架的基础上，本节从数学层面揭示规划决策、不确定性与风险之间的内在耦合机制，建立 DDU 的内禀性刻画与风险传播规律。

在一般形式下，规划方案对应的系统风险可表示为决策依赖的泛函，随机模型为

$$R(\mathbf{x}) = E_{P_x}[L(\mathbf{x}, \xi)] \quad (11)$$

鲁棒模型为

$$R(\mathbf{x}) = \max_{\xi \in \Xi(\mathbf{x})} L(\mathbf{x}, \xi) \quad (12)$$

式中： P_x 或 $\Xi(\mathbf{x})$ 分别表示由规划决策 $\mathbf{x}$ 所诱导的概率分布或不确定性集合，刻画了决策对系统不确定性结构的内生影响； $L(\mathbf{x}, \xi)$ 为在给定的规划决策 $\mathbf{x}$ 和一个具体的不确定性实现(或场景) ξ 下，系统的损失函数或成本函数。

在此基础上，本文采用协方差结构 $\mathbf{x}^T \Sigma(\mathbf{x}) \mathbf{x}$ 作为代表性示例，用以说明规划决策如何通过可再生能源场站空间布局与容量配置定量影响系统不确定性。需要注意的是，协方差模型并非唯一的刻画方式，而是一种具有代表性且便于优化求解的二阶近似。针对非高斯、厚尾及非线性依赖等更复杂情形，可基于 Copula、CVaR 与高阶矩进行扩展，以实现复杂不确定性结构的更全面描述。

2.1 决策依赖不确定性的内禀性

在 DDU 框架下，规划方案评估不仅应关注给定不确定性条件下的运行成本，还应考虑规划决策对不确定性结构及未来运行风险的影响。为刻画上述作用机制，下面给出 DDU 内禀性的数学表述。若概率分布 P_x 或不确定性集合 $\Xi(\mathbf{x})$ 随规划决策 $\mathbf{x}$ 会发生明显的变化，即决策能够引起不确定性结构的改变，则风险函数 $R(\mathbf{x})$ 的梯度中会出现由不确定性结构变化产生的间接效应项。

定理 1(DDU 的内禀性)：设规划风险由式(11)或(12)定义。若存在 $\mathbf{x}$ 使得 P_x 或 $\Xi(\mathbf{x})$ 随规划变量 $\mathbf{x}$ 发生变化，并且满足下述可交换条件：

- 1) $L(\mathbf{x}, \xi)$ 对 ξ 可测、对 $\mathbf{x}$ 在可行域内连续可微；
- 2) 存在与 $\mathbf{x}$ 无关但可积的上界函数 $M(\xi)$ ，使得在某一 $\mathbf{x}$ 邻域内满足如下条件：

$$\begin{cases} \|\nabla_{\mathbf{x}} L(\mathbf{x}, \xi)\| \leq M(\xi) \\ E_{P_x}[M(\xi)] < \infty \\ E_{P_x}[L(\mathbf{x}, \xi)] < \infty \end{cases} \quad (13)$$

则风险函数 $R(\mathbf{x})$ 满足：

$$\nabla_{\mathbf{x}} R(\mathbf{x}) = E_{P_x}[\nabla_{\mathbf{x}} L(\mathbf{x}, \xi)] + E_{P_x}[L(\mathbf{x}, \xi) \nabla_{\mathbf{x}} \ln p(\mathbf{x}, \xi)] \quad (14)$$

式中：第 1 项反映传统规划问题中的参数敏感性，即决策会改变成本函数；第 2 项仅在 DDU 框架下出现，反映规划决策通过改变概率分布结构间接影响系统风险的结构效应，体现了 DDU 的内生性。(证明见附录)

该定理说明，若规划决策(如选址、容量配置或网络拓扑)会影响系统所面临的不确定性分布或其统计特征，则风险函数的变化就不再仅由损失函数本身的变化决定，还包含由不确定性随决策变化引起的结构效应项。即对于能够改变不确定性分布或集合结构的规划决策，其影响将内生地传递至系统风险。

推论 1(协方差示例下的内禀性)：若 $P_{\text{total}} = \sum_i x_i P_i$ ，且协方差矩阵 Σ 存在非零非对角元，则 $\text{Var}(P_{\text{total}}) = \mathbf{x}^T \Sigma \mathbf{x}$ 随 $\mathbf{x}$ 变化，因而风险度量 R 内生依赖 $\mathbf{x}$ 。其中 Var 表示方差(证明见附录 A)。

2.2 DDU 的一般形式与协方差模型

决策依赖不确定性的核心特征是形成规划决策与系统不确定性之间的双向耦合关系。对于一个一般的规划问题，设系统包含 N 个候选场站，决策变量 $\mathbf{X} = (x_1, \dots, x_N)^T \in \mathbb{R}_+^N$ 表示各场站的装机容量， P_i 为单位容量出力，则系统总出力为

$$P_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N x_i P_i \quad (15)$$

在随机优化框架下，系统典型的规划目标可写为

$$\min_{\mathbf{x} \in X} \{C_{\text{inv}}(\mathbf{x}) + R(\mathbf{x})\} \quad (16)$$

式中： $C_{\text{inv}}(\mathbf{x})$ 为投资成本； $R(\mathbf{x})$ 为方案的风险度量。若风险函数取期望形式，则目标函数可表示为

$$\min_{\mathbf{x} \in X} \{C_{\text{inv}}(\mathbf{x}) + E[f(P_{\text{total}}, \mathbf{x})]\} \quad (17)$$

式中 $E[f(P_{\text{total}}, \mathbf{x})]$ 为方案的期望风险。

定义协方差矩阵 $\Sigma_{ij} = \text{Cov}(P_i, P_j)$ ， $\Sigma = [\Sigma_{ij}]$ ，则系统总出力的方差为

$$\text{Var}(P_{\text{total}}) = \sum_{i,j} x_i x_j \text{Cov}(P_i, P_j) = \mathbf{x}^T \Sigma \mathbf{x} \quad (18)$$

式(18)表明，系统波动的整体强度不仅取决于各场站自身的不确定性(对角项)，还取决于它们之间的出力相关性(非对角项)。式(18)展开后有：

$$\text{Var}(P_{\text{total}}) = \sum_i x_i^2 \sigma_i^2 + \sum_{i,j} x_i x_j \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j \quad (19)$$

式中: $\sigma_i^2 = \text{Var}(P_i)$; $\rho_{ij} = \Sigma_{ij}/(\sigma_i\sigma_j)$ 为相关系数。

其中, 第1项表示各场站的独立波动; 第2项表示场站间的相关性效应。若 $\rho_{ij} < 0$, 场站间出力具有互补性, 能够在系统层面起到平滑作用; 若 $\rho_{ij} > 0$, 出力波动呈现同步性, 系统总体风险被放大。因此, 对角项 Σ_{ii} 为局部波动; 非对角项 Σ_{ij} 体现场站之间的空间相关性。通过优化场址布局与容量配置, 可主动塑造协方差结构, 这种通过空间配置调控风险的能力, 是传统独立选址模型不具备的。若以鲁棒优化方式刻画不确定性, 也可以得到类似结论。

2.3 不确定性响应的定量度量

在前述协方差建模的基础上, 为定量描述规划决策对系统不确定性分布特征的影响强度, 引入“不确定性响应度”指标:

$$M(\mathbf{x}) = \frac{1}{D(\mathbf{x})} \left\| \frac{\partial D(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right\| \quad (20)$$

式中 $D(\mathbf{x})$ 为随机分布离散程度的度量。

当规划决策 $\mathbf{x}$ 发生微小变化时, $M(\mathbf{x})$ 衡量系统不确定性结构对规划设计的敏感性, 若 $M(\mathbf{x})$ 较大, 说明系统不确定性随规划变化显著; 若 $M(\mathbf{x})$ 较小, 则系统波动几乎不变, 接近传统外生不确定性情形。在高斯模型, $p(\xi; \mathbf{x}) \sim \mathcal{N}[\mu(\mathbf{x}), \Sigma(\mathbf{x})]$ 下有:

$$\begin{cases} D(\mathbf{x}) = |\det \Sigma(\mathbf{x})|^{1/2} \\ M(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \text{tr}[\Sigma(\mathbf{x})^{-1} \frac{\partial \Sigma(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}] \end{cases} \quad (21)$$

2.4 规划风险的传播

在前述 DDU 框架下, 规划变量 $\mathbf{x}$ 同时影响系统运行损失函数 $L(\mathbf{x}, \xi)$ 及其所对应的不确定性分布 P_x 。对于式(11)定义的风险和式(16)定义的规划目标, 在可微假设下有:

$$\frac{d}{d\mathbf{x}} [C_{\text{inv}}(\mathbf{x}) + R_{P_x}(L)] = \nabla C_{\text{inv}}(\mathbf{x}) + E_{P_x}(\nabla_x L) + G_{\rho}(\mathbf{x}) \quad (22)$$

式中: 第1项表示规划投资的边际成本; 第2项描述系统运行损失 $L(\mathbf{x}, \xi)$ 对决策变量的期望敏感度; 第3项仅在 DDU 框架下出现, 表示规划决策通过改变不确定性分布 P_x 而对风险度量 $R(\mathbf{x})$ 产生的间接影响。该项刻画了规划决策对未来不确定性结构的重塑能力, 其具体形式取决于风险度量的选取方式。当风险度量采用期望形式时, 有:

$$G_{\rho}(\mathbf{x}) = E_{P_x}[L \nabla_x \ln p(\mathbf{x}, \xi)] \quad (23)$$

若风险度量取 CVaR $_{\alpha}$, 则:

$$G_{\rho} = \frac{1}{1-\alpha} E[(L - \text{VaR}_{\alpha}) + \nabla_x \ln[L \geq \text{VaR}_{\alpha}]] \quad (24)$$

在实际应用中, 应根据规划时空尺度和风险特征选择合适的建模工具。当研究尺度为多年、区域广、目标关注整体波动水平且数据量足以稳定估计二阶矩时, 协方差模型既直观又高效, 适合作为规划主模型; 当存在显著尾部风险, 如极端低风期保供、强非线性依赖或小时级动态约束占主导时, 可采用 Copula 刻画尾部相关性、采用 CVaR 控制尾部损失, 或引入高阶矩与时序模型(ARIMA、状态空间模型或马尔可夫模型等)进行增强。

3 决策依赖不确定性模型的计算挑战与高效求解算法

决策依赖不确定性改变了规划问题的数学结构与可解性。在 DDU 框架下, 不确定性分布 $P(\cdot)$ 或其支撑域 $\Xi(\cdot)$ 不再是给定的外生量, 而是成为决策的函数。这一特征在模型内部构成了一个“决策—不确定性—决策”的闭环反馈机制。此反馈打破了传统优化模型的凸性与层次独立性, 使得标准优化理论难以直接适用, 需要发展针对决策与不确定性双向耦合的新型建模与求解方法。

3.1 DDU 带来的核心计算挑战

在两阶段规划模型中, 若不确定性分布的均值或协方差依赖于决策, 则期望项对 $\mathbf{x}$ 的梯度包含隐函数项。这种依赖关系破坏了问题的凸性, 使得梯度方向失去稳定性。此类非凸性在多区域风电-储能联合规划中尤为突出^[6], 因为风场规模与布局直接影响预测误差的空间平滑特性, 从而改变协方差矩阵的结构。DDU 模型通常呈现多层嵌套结构。若考虑分布不确定性, 模型可抽象为

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathcal{X}} c^T \mathbf{x} + \max_{P \in \mathcal{P}(\mathbf{x})} E_P[\min_{\mathbf{y} \in \mathcal{Y}} q^T \mathbf{y}] \quad (25)$$

式中中间层的模糊集 $\mathcal{P}(\mathbf{x})$ 依赖于结构决策, 导致外层与内层相互耦合, 形成典型的 min-max-min 3 层结构。

随着决策维度和场景维度的同步增长, 模型规模呈指数级膨胀, 计算复杂度显著上升。此外, DDU 带来的反馈还可能破坏分解算法的收敛性。在标准 Benders 分解中, 割生成依赖于子问题对主决策的线性敏感度。然而在 DDU 框架下, 主决策会改变子问题结构, 使得对偶信息不再固定, 割质量下降甚至失效。对于存在时序相关的模型, 主从问题间

的耦合会引发振荡，如在冷负荷恢复^[40]与电动汽车充电站建模^[32]中，决策与不确定性演化的更新不同步会导致求解过程陷入周期性振荡。因此，DDU 的计算挑战集中体现在非凸耦合、维度爆炸与收敛不稳定 3 个方面。

3.2 面向 DDU 的高效求解范式

1) 解析重构法。

该方法通过将 DDU 机会约束的概率形式转化为确定性代数形式，实现从概率空间到锥约束空间的映射。具体做法是对决策依赖的统计参数进行函数近似，将不确定量的逆累积分布函数(或分位数函数)用多项式或分段线性函数逼近，然后将其嵌入约束^[6]。在相应分布假设和近似条件下，原问题被转化为混合整数二阶锥规划(mixed-integer second-order cone programming, MISOCP)形式。解析重构法的核心优势在于保持模型结构的连续性与可扩展性，可适用于不同时间尺度和系统层次的优化问题。在风储协同规划与多期容量扩展中均能有效刻画 DDU 引起的分位数边界变化，从而实现更高精度的风险刻画与优化决策。

2) 分解-迭代法。

该方法通过引入点估计法(point estimate method, PEM)或近似样本法，以有限个代表点逼近不确定性分布^[6,34]。外层在固定当前分布参数下进行结构优化，内层求解运行子问题并反馈更新分布参数，直至收敛。其思想类似交替优化，既可采用 Benders 割形成双层迭代收敛框架，也可在混合整数场景下结合渐进对冲算法(progressive hedging algorithm, PHA)实现场景并行与一致性校正^[37]。该范式在含多时间尺度和多场景的大系统中表现出较好的可扩展性。

3) 场景/分簇映射法。

当 DDU 函数关系复杂难以解析时，可将决策空间离散为若干区间，为每个区间预生成相应场景集。通过引入仿射或分段线性映射建立“决策-场景集”对应关系，并在主问题中以二元变量选择相应映射，实现静态场景复用，避免每次迭代的再生成过程^[35]，从而显著降低计算复杂度，同时保持对决策依赖特性的物理一致性与建模精度。

4) 分布鲁棒优化重构法。

此类方法进一步引入决策依赖的模糊集 $P(\mathbf{x})$ ，在模型中同时考虑随机变量及其概率分布的不确定性。通过强对偶理论，可将内层最坏分布问题转化为

线性约束形式，进而使用列与约束生成(column-and-constraint generation, C&CG)在主问题与分离子问题之间交替生成割平面^[31,41]。该方法在韧性规划与极端事件评估中具有较强的样本外稳定性。对于含双线性耦合或补充约束的模型，还可结合 McCormick 包络进行线性化或凸松弛，从而将其转化为大规模混合整数线性规划模型并利用求解器进行求解。

3.3 统一求解流程

表 2 总结了各算法的适用 DDU 类型与关键计算特征。随后，本文给出一个通用的可计算流程。

表 2 算法范式、DDU 类型及计算特征对应关系

Table 2 Correspondence between algorithms, DDU types, and computational characteristics		
算法范式	典型 DDU 场景	主要计算特征
解析重构 (锥化/分位数)	DDU 机会约束/ 空间相关	稳定的凸近似结构， 可进行确定性等价处理
分解-迭代(PEM/ Benders/PHA)	高维统计矩/ 扩展规划	双层收敛框架， 适合大规模并行计算
场景/分簇映射 (仿射映射)	复杂 DDU/ 多区域协同	维度可控， 场景复用率高
分布鲁棒重构 (DDRO +C&CG)	极端事件/ 韧性规划	强对偶重构， 稳健性高，收敛过程可验证
McCormick 单层化	非线性/ 交通-配电耦合	保留可扩展性， 适用于混合整数场景

上述算法可在统一求解框架下实现。该框架包括 4 个阶段：结构识别、模型构造、优化求解和外推验证。其计算逻辑如表 3 所示。

表 3 算法 1：DDU 规划的统一求解流程

Table 3 Algorithm 1: Solution procedure for ddu planning	
步骤	流程
1	输入历史样本与先验模型，设置初始决策 $\mathbf{x}^{(0)}$ 与风险参数。
2	拟合决策依赖分布的代理模型，获得 $\mu(\mathbf{x})$ 、 $\Sigma(\mathbf{x})$ 与支持域端点。必要时可采用低秩近似或高斯混合近似。
3	若为含 DDU 机会约束的问题，采用分位数函数近似与锥化转化为确定性等价形式；
4	若为 DDRO 问题，定义依赖决策依赖模糊集并施加强对偶约束；若函数关系复杂，则构造仿射映射或离散场景簇。
5	在固定分布参数或模糊集的条件下求解主问题，并加入前序迭代生成的的割或惩罚项。
6	求解子问题。对场景型模型，采用 PHA 并行计算并更新一致性乘子；对 DDRO 模型在 $P(\mathbf{x}^{(k)})$ 内求最坏分布并生成新割。
7	实施稳定化策略，通过信赖域、步长控制或惩罚延续抑制振荡并提高收敛稳定性。
8	若目标改进低于阈值且无新增活跃割，则终止；否则令 $k \leftarrow k+1$ 并重复上述求解过程。
9	使用未参与拟合的样本或极端情景集进行外推验证，评估解的稳健性与风险边界压缩程度。

DDU 的引入使得电力系统规划的计算问题从传统的静态不确定性优化问题转变为具有动态反馈的耦合优化问题,其核心难点在于非凸性、场景依赖与收敛控制。为应对这些难点,本文归纳并构建了面向 DDU 规划的多类求解范式。解析重构法通过概率约束解析化实现确定性等价,分解-迭代法在多层框架中保持结构灵活性,场景映射法有效平衡精度与计算规模,而分布鲁棒重构法为深度不确定场景提供了样本外稳健性。通过统一的求解流程,可以在同一计算框架下集成多种算法,实现决策依赖不确定性规划的稳定、高效与可验证求解。

4 决策依赖不确定性下的规划范例

本节选取 3 个代表性算例,分别展示空间相关性调控型 DDU、规模调节型 DDU、强度调节型 DDU 与约束界面重塑型 DDU 在高比例可再生能源规划中的典型作用路径。算例展示了规划决策与系统不确定性之间的双向耦合关系,说明 DDU 框架可将传统的被动不确定性应对方法拓展为主动风险调控方法。各算例与 DDU 机制及算法范式的对应关系如表 4 所示。

表 4 算例与 DDU 机制-算法范式映射表

Table 4 Case studies and their associated DDU mechanisms and algorithms

算例	主导 DDU 机制	算法范式	验证目标
风-储-网协同规划	空间相关性调控型; 规模调节型	解析重构 (DDU 机会约束; 锥化/分位数)	风电布局对风险边界压缩与空间协同作用
多风场规划	规模调节型	分解-迭代 (PEM+Benders)	规模-误差函数关系与收敛性能验证
韧性规划	强度调节型; 约束界面重塑型	分布鲁棒重构 (DDRO+ C&CG)+PHA	风险知情规划与鲁棒性应对效果验证

4.1 空间相关性调控型 DDU 在风-储-网协同规划中的验证

本算例采用改进的 IEEE 6 母线系统,风电候选节点为 4、5、6,储能候选节点为 2,目标风电渗透率设为 60%。首先,将单个风场容量增加引起的归一化预测误差指数下降关系建模为规模调节型 DDU。其次,采用混合高斯分布刻画多风场间的空间相关性,并通过场景法嵌入规划模型,使协方差成为选址与定容决策的函数,从而表征空间相关性调控型 DDU^[35]。

为对比评估不同规划方法,本算例设置 3 种情形: 案例 1: 考虑 DDU(容量-误差依赖与空间相关

性随布局而变)并配置储能; 案例 2: 不考虑 DDU,预测误差恒定,其余条件与案例 1 相同; 案例 3: 不配置储能,用于分析灵活性资源缺失的影响。

与案例 2 相比,案例 1 倾向于形成单体规模更大的风场布局,其中最大单体容量占总装机容量的 60%,案例 2 中该比例 41.5%。在此布局下,总风电装机容量降低 2.4%,储能规模降低 33.3%,总期望成本降低 4.1%,该结果说明,空间相关性调控型 DDU 能够通过布局优化有效降低系统风险和成本。与案例 1 相比,案例 3 的弃风费用增加 327.4%、负荷损失增加 57.0%、总期望成本增加 5.6%。算例结果进一步表明,若规划阶段若未实施基于 DDU 的结构与不确定性的协同设计,系统的风险管理能力与可行域扩展效果均会受到限制,体现了从“应对不确定性”走向“设计不确定性”的必要性。图 1 表明,当渗透率超过约 60%或预测误差较大时,考虑 DDU 的成本优势迅速扩大,表明随着可再生能源规模扩大,DDU 对规划结果的影响愈发显著。此外,采用仿射函数将规划决策映射到 DDU 场景集,并结合渐进对冲的场景束分解与一致性校正,多个算例都稳定收敛,表明所提算法能够稳定求解含 DDU 的两阶段随机规划问题。

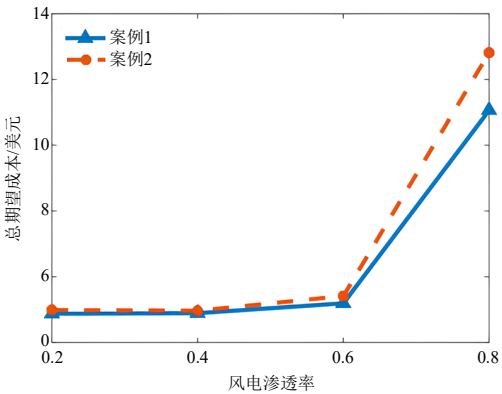


图 1 考虑 DDU 和不考虑 DDU 时的规划投资比较

Fig. 1 Comparison of planning investments with and without DDU

4.2 规模调节型 DDU 在大规模风场规划中的验证

本算例采用改进的 IEEE 118 母线系统,研究风电规划问题^[6],目标风电渗透率为 20%。采用规模调节型 DDU 刻画规划风场容量对预测不确定性的内生影响。装机规模越大,归一化预测标准差越低,该关系采用指数函数进行建模。容量规划采用两层结构:外层优化风场容量 x_w ;内层在给定 x_w 和由 $\sigma_w(x_w)$ 决定的随机波动下评估运行代价。目标函

数可表示为

$$\min_{x_w} C_{\text{inv}}(x_w) + \rho_{P_{x_w}} \{L[u^*(x_w, \xi), \xi]\} \quad (26)$$

式中： C_{inv} 为投资成本； L 为满足潮流与机组约束下的运行代价； u^* 为内层最优运行决策； $\rho_{P_{x_w}}$ 为在由 x_w 决定的概率分布 P_{x_w} 下的风险/期望泛函。为高效近似内层的期望或风险度量，采用点估计法，利用不确定量的均值与二阶中心矩，构造少量具有代表性的样本点及其权重以替代大规模场景。由此，综合目标函数可理解为投资成本与运行期望风险代价的叠加，并通过容量所诱导的概率分布体现场站规模与预测误差之间的内生关系，实现了规模调节型 DDU 的定量建模。

本文采用结合改进 Benders 分解与点估计方法的“外-内”分解框架进行求解。每次迭代首先固定当前误差分布，用 $2N+1$ 点估计法构造少量代表样本求解运行子问题，得到估计的运行代价并对容量提取(次)梯度；随后，在主问题中引入辅助代价变量，并利用累计的 Benders 割对运行代价进行线性近似，求得新的容量决策；再根据该容量更新误差分布参数，并进入下一轮迭代直到容量变化或主问题最优间隙低于阈值。该流程把场站规模与预测误差的结构效应从内层传递到外层，使系统投资和运行的综合目标在少量迭代内稳定收敛。

规划结果显示，考虑 DDU 与不考虑 DDU 所得的最优风电装机容量分别为 1 092 MW 和 1 099 MW。考虑 DDU 后，模型能够刻画风电场规模扩大所引起的空间平滑效应及预测误差变化，从而减少满足风电渗透率所需的冗余装机，并降低总期望成本。所提迭代方法可在较少的迭代步内收敛。迭代过程中，迭代曲线呈现先增大后回调的趋势；当最优装机容量较大时，容量更新引起的预测误差变化更加显著，进而导致相邻迭代解的调整幅度增大，因此需要更多迭代才能收敛。该现象与规模调节型 DDU 的作用机制一致，装机规模改变会改变不确定性的特性，从而影响主问题的收敛轨迹。

4.3 约束界面重塑型 DDU 在系统韧性规划中的验证

本算例针对改进的 IEEE 118 母线系统开展冰灾韧性规划^[37]，联合优化线路抗冰加固方案与储能选址定容，以降低系统在遭受冰灾时的总损失。该问题中的 DDU 体现在两个层面：首先，加固决策

能提升线路抗冰能力，降低线路故障概率；其次，储能配置与灾前预防性调度决策能够改变系统的失负荷风险，从而体现约束界面重塑型 DDU。

本算例采用两阶段风险信息驱动的决策依赖韧性规划算法对该问题进行求解。第 1 阶段在给定的预测提前时间下，联合优化线路加固、储能选址定容与预防性调度措施；第 2 阶段评估含不确定性场景下的应急运行的损失。为确保不同场景下第一阶段决策的一致性，采用渐进对冲算法(progressive hedging algorithm, PHA)求解：首先松弛一致性约束，对各场景下的子问题并行求解；随后通过惩罚项与乘子迭代更新，逐步使第 1 阶段决策收敛至一致解。该方法在大规模场景集下具有良好的计算效率与稳定性。

本文设置了 4 种策略，对所提方法进行对比评估：策略 1(在冰灾前根据预测信息进行资源预调度、考虑预测精度随事件临近而逐步提高的特性、以及线路加固降低失效概率的决策依赖效应)；策略 2(不设置灾前准备，储能不提前充电)；策略 3(设置准备阶段但采用恒定负荷削减惩罚系数，未反映预测不确定性随时间降低的特性)；策略 4(设置准备阶段并考虑时变预测不确定性，但未纳入线路加固对失效概率的影响)。其中，策略 1 为本算例采用的策略。与采用策略 1 相比，采用策略 2 时由于应急资源不足、无法满足关键负荷约束，导致问题不可行；策略 3 的预防成本增加 43.9%、应急成本减少 0.64%，呈现出预防代价显著增加但应急收益甚微的失衡特征；策略 4 的预防成本减少 6.6%、应急成本增加 2.75%，在成本变化上，应急成本增加量超过预防成本减少量的 20 倍，表明忽略线路加固的决策依赖效应会导致应急阶段的负荷削减成本显著增加。

图 2 展示了准备阶段和应急阶段的负荷削减量，考虑约束界面重塑型 DDU 的基准方案在准备阶段

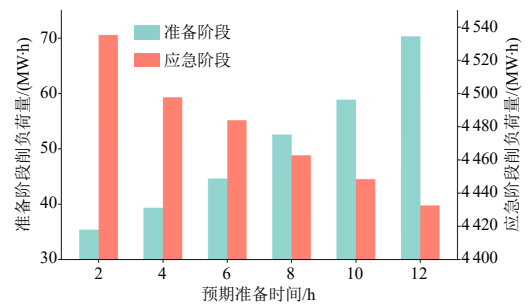


图 2 准备阶段和应急阶段负荷削减量比较
Fig. 2 Comparison of load shedding in the preparatory and emergency stages

削减 70.57 MW·h 负荷(主要用于为储能充电),使应急阶段的负荷削减量降至 4 432.42 MW·h,准备阶段的负荷削减量仅相当于应急阶段负荷削减量的 1.6%,却能大幅降低应急阶段的负荷损失。这一效果源于预测信息引导的储能预充电与线路加固提升了系统应对极端天气的能力。线路加固通过决策依赖不确定性机制将线路失效风险从不可控的外生扰动转化为可通过规划决策主动调节的内生量。

本算例通过储能选址定容与线路加固决策提升系统在冰灾场景下的韧性,体现了强度调节型 DDU 与约束界面重塑型 DDU 的作用机制,展示了规划决策与不确定性之间的双向反馈关系,并验证了风险边界压缩与可行域扩展的效果。

5 总结与展望

5.1 主要结论

本文围绕高比例可再生能源系统规划决策与系统不确定性之间的相互作用关系,研究了决策依赖不确定性的理论分析框架与计算方法。主要结论如下:

1) 高比例可再生能源系统下的规划范式转变具有明确的物理基础。传统规划将不确定性视为外生输入,假定概率分布或不确定性集合固定不变。但在高比例可再生能源系统中,风电场布局决定出力的协方差结构,装机规模影响预测精度,储能配置又会改变净负荷的波动特征。这些因素使得不确定性不再仅是规划的外部约束,而成为受规划决策影响的内生结果。定理 1 表明,若不确定性的统计特性随规划变量发生变化,风险函数的梯度中将包含由于不确定性分布变化产生的结构效应项,说明 DDU 具有系统内生性,而非单纯的建模假设。

2) DDU 在规划中通过 4 种机制共同发挥作用。空间相关性调控型机制通过低相关或负相关区域的联合布局降低系统总出力方差;规模调节型机制反映集中式开发与分散式布局在预测精度和波动风险之间的协调关系;强度调节型机制刻画储能和柔性负荷等灵活性资源对净负荷波动的抑制作用;约束界面重塑型机制通过输电扩展、资源配置或加固措施改变系统可行域和风险暴露水平。上述机制共同作用,决定了系统的不确定性结构、风险边界和灵活性需求。

3) DDU 改变了规划问题的风险调控方式。传统范式在固定的不确定性集合下优化容量配置与

裕度,本质上通过增加系统冗余提高安全性。DDU 范式利用不确定性集合的可塑性,从源头重构风险分布形态。算例表明,考虑 DDU 的规划方案能够在降低系统投资和运行风险方面取得更优效果,其收益不仅来自容量配置调整,也来自对不确定性结构的优化。因此,在高比例可再生能源规划中,项目价值评估应由单一能量价值扩展为对能量价值和结构价值的综合评价。

4) 验证了 DDU 模型的计算可行性。针对 DDU 导致的非凸耦合、维度爆炸与收敛不稳定等挑战,本文归纳了 4 类求解方法:解析重构法将概率约束转化为确定性锥约束;分解-迭代法在双层框架中保持模型结构灵活性;场景映射法通过决策空间离散化平衡计算规模与精度;分布鲁棒重构法为深度不确定场景提供样本外稳健性。上述方法能够在统一求解流程下实现稳定求解,验证了 DDU 规划模型的有效性和可实现性。

5.2 展望

DDU 理论揭示了规划决策与系统不确定性之间的内生耦合关系,但从理论到实践的延伸仍需进一步深化。首先,当前模型主要针对静态规划,未充分考虑日内、日前、周前等多时间尺度下 DDU 的传播与累积效应。随着电动汽车与柔性负荷的大规模接入,用户行为、气象演化与市场信号将在不同时间尺度上与规划决策形成复杂反馈,需要建立跨尺度的 DDU 动力学模型,将规划层的结构决策与运行层的实时调度纳入统一框架。其次,DDU 模型中的决策—不确定性映射关系目前多依赖经验公式或离线拟合,其适用性和可解释性仍需进一步提升。随着气象预报、卫星遥感与物联网数据的积累,可将深度学习引入 DDU 函数的在线辨识,但在此过程中必须保持模型的物理可解释性,即数据驱动 DDU 函数的梯度结构需与物理机制一致,以提升规划结果的稳健性与可靠性。

总体而言,在高比例可再生能源背景下,电力系统规划本质上是一个由决策、不确定性与风险相互作用构成的闭环设计问题。DDU 理论为刻画这一闭环关系提供了新的分析视角,也为规划决策从被动适应不确定性转向主动调控风险结构提供了理论基础和方法支撑。

参考文献

[1] 韩培东,王伟胜,李湃,等.基于多目标优化的大型新

- 能源基地风光储容量联合规划配置[J]. 电网技术, 2025, 49(11): 4477-4485.
- HAN Peidong, WANG Weisheng, LI Pai, et al. Joint planning and configuration of wind-solar-storage capacity for large-scale renewable energy bases based on multi-objective optimization[J]. Power System Technology, 2025, 49(11): 4477-4485(in Chinese).
- [2] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14. DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 34(1): 1-14(in Chinese).
- [3] WANG Yijing, WANG Rong, TANAKA K, et al. Accelerating the energy transition towards photovoltaic and wind in China[J]. Nature, 2023, 619(7971): 761-767.
- [4] SEIFI H, SEPASIAN M S. Electric Power System Planning: Issues, Algorithms and Solutions[M]. Berlin: Springer, 2011.
- [5] 史昭娣, 王伟胜, 黄越辉, 等. 考虑决策相关随机规划的光热电站容量配置[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7511-7521. SHI Zhaodi, WANG Weisheng, HUANG Yuehui, et al. Capacity optimization of concentrating solar power plant based on decision-dependent stochastic programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7511-7521(in Chinese).
- [6] YIN Wenqian, FENG Shuanglei, HOU Yunhe. Stochastic wind farm expansion planning with decision-dependent uncertainty under spatial smoothing effect[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2845-2857.
- [7] 陈典, 陆润钊, 张松涛, 等. 新型电力系统电力电量平衡计算分析技术综述[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 3952-3970. CHEN Dian, LU Runzhao, ZHANG Songtao, et al. Review of new power system power balance calculation and analysis techniques[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 3952-3970(in Chinese).
- [8] 杨铃, 王建学, 杨续松, 等. 电力电量平衡分析及其加速求解技术的发展、应用与展望[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 760-777. YANG Qian, WANG Jianxue, YANG Xusong, et al. Development, application and prospect of power and energy balance analysis and its speedup computation technologies[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 760-777(in Chinese).
- [9] 辛保安, 陈梅, 赵鹏, 等. 碳中和目标下考虑供电安全约束的我国煤电退减路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 6919-6930. XIN Baoan, CHEN Mei, ZHAO Peng, et al. Research on coal power generation reduction path considering power supply adequacy constraints under carbon neutrality target in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 6919-6930(in Chinese).
- [10] 刘永奇, 陈龙翔, 韩小琪. 能源转型下我国新能源替代的关键问题分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 515-523. LIU Yongqi, CHEN Longxiang, HAN Xiaoqi. The key problem analysis on the alternative new energy under the energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 515-523(in Chinese).
- [11] 舒印彪, 张正陵, 汤涌, 等. 新型电力系统构建的若干基本问题[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8327-8340. SHU Yinbiao, ZHANG Zhengling, TANG Yong, et al. Fundamental issues of new-type power system construction[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8327-8340(in Chinese).
- [12] 董昱, 孙大雁, 许丹, 等. 新型电力系统电力电量平衡的挑战, 应对与展望[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(6): 2039-2057. DONG Yu, SUN Dayan, XU Dan, et al. Challenges, response and prospects for power balance in new power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(6): 2039-2057(in Chinese).
- [13] 刘映尚, 马骞, 王子强, 等. 新型电力系统电力电量平衡调度问题的思考[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1694-1705. LIU Yingshang, MA Qian, WANG Ziqiang, et al. Cogitation on power and electricity balance dispatching in new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1694-1705(in Chinese).
- [14] 张智荏, 邵成成, 王锡凡, 等. 基于事件建模的机组检修模型及其在电力系统中长期运行中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(22): 8707-8714. ZHANG Zhiren, SHAO Chengcheng, WANG Xifan, et al. Event-based generation maintenance scheduling model and its application in mid/long-term operation of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(22): 8707-8714(in Chinese).
- [15] 姜海洋, 杜尔顺, 马佳豪, 等. 考虑长周期供需不平衡风险的新型电力系统规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 5845-5857. JIANG Haiyang, DU Ershun, MA Jiahao, et al. Power

- system optimal planning method considering long-term imbalance risk[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 5845-5857(in Chinese).
- [16] 王邦彦, 皮俊波, 王秀丽, 等. 天气数据驱动下基于深度主动学习的新型电力系统供需失衡风险快速评估方法[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 4050-4059.
- WANG Bangyan, PI Junbo, WANG Xiuli, et al. A fast assessment method for supply-demand imbalance risk of new power systems based on deep active learning driven by weather data[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4050-4059(in Chinese).
- [17] 李程昊, 张佳伟, 姚德贵, 等. 含复杂电源结构省级电力系统电力电量平衡方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(3): 1100-1110.
- LI Chenghao, ZHANG Jiawei, YAO Degui, et al. Power balance method of provincial power system with complex generation structure[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1100-1110(in Chinese).
- [18] 杨铃, 王建学, 李旭霞, 等. 考虑线路负载率指标规划-运行协调一致性的电网规划双层模型[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 1846-1854.
- YANG Qian, WANG Jianxue, LI Xuxia, et al. Bi-level transmission expansion planning model considering planning-operation coordination of line load rate indices[J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 1846-1854(in Chinese).
- [19] 杨修宇, 穆钢, 柴国峰, 等. 考虑灵活性供需平衡的源-储-网一体化规划方法[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3238-3245.
- YANG Xiuyu, MU Gang, CHAI Guofeng, et al. Source-storage-grid integrated planning considering flexible supply-demand balance[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3238-3245(in Chinese).
- [20] 施贵荣, 孙荣富, 丁华杰, 等. 大规模风电电网的评估指标体系构建与应用[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 841-848.
- SHI Guirong, SUN Rongfu, DING Huajie, et al. Construction and application on evaluation index system of large-scale wind power integration[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 841-848(in Chinese).
- [21] 畅广辉, 单瑞卿, 李翔硕, 等. 高比例新能源电力系统风电低出力事件多维度评估与分布特性分析[J]. 电网技术, 2025, 49(4): 1369-1378.
- CHANG Guanghui, SHAN Ruiqing, LI Xiangshuo, et al. Multidimensional assessment and distributional characteristics of low-wind-power events in high proportion renewable energy power systems[J]. Power System Technology, 2025, 49(4): 1369-1378(in Chinese).
- [22] 郭红霞, 陈凌轩, 张启, 等. 电力电量平衡视角下新型电力系统极端场景研究及应对综述[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 3975-3991.
- GUO Hongxia, CHEN Lingxuan, ZHANG Qi, et al. Research and response to extreme scenarios in new power system: a review from perspective of electricity and power balance[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 3975-3991(in Chinese).
- [23] 衣立东, 胡朝华, 李旻. 高水电占比电力系统蓄水保供能力量化方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(9): 3524-3537.
- YI Lidong, HU Zhaohua, LI Min. Research on reservoir power supply capacity of high proportion hydro-power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(9): 3524-3537(in Chinese).
- [24] 刘本希, 王海东, 张俊涛, 等. 大规模新能源并网下水电顶峰能力解析量化与优化调配方法[J]. 电网技术, 2025, 49(3): 945-954.
- LIU Benxi, WANG Haidong, ZHANG Juntao, et al. A quantitative analysis and optimal allocation of hydropower peaking capacity in the context of large-scale new energy grid integration[J]. Power System Technology, 2025, 49(3): 945-954(in Chinese).
- [25] 刘纯, 李湃, 张金平, 等. 储能在新电力系统电力电量平衡中的作用研究[J]. 电网技术, 2025, 49(8): 3136-3144.
- LIU Chun, LI Pai, ZHANG Jinping, et al. Research on the role of energy storage system in power and energy balance of the new type power system[J]. Power System Technology, 2025, 49(8): 3136-3144(in Chinese).
- [26] 易俊, 林伟芳, 李佳玉, 等. 基于“碳平衡”的新型电力系统电力电量平衡模式构建[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(15): 5723-5737.
- YI Jun, LIN Weifang, LI Jiayu, et al. Construction of electric power and energy balance mode for new power system based on carbon balance[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(15): 5723-5737(in Chinese).
- [27] 高红均, 郭明浩, 刘挺坚, 等. 新型电力系统电力电量平衡分析研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2683-2696.
- GAO Hongjun, GUO Minghao, LIU Tingjian, et al. Review on electric power and energy balance analysis of new-generation power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2683-2696(in Chinese).
- [28] 王晶, 李勇, 董昱, 等. 基于新能源出力概率分布的新型电力系统演进过程分析方法[J/OL]. 中国电机工程学

- 报, 2026[2026-07-02]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.250839>.
- WANG Jing, LI Yong, DONG Yu, et al. An evolutionary process analysis method for the new power system based on the probability distribution of new energy output [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2026[2026-07-02]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.250839> (in Chinese).
- [29] 邵常政, 谢开贵, 胡博, 等. 高比例可再生能源电力系统供需平衡理论(一): 决策依赖不确定性的基本认识 [J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(14): 5879-5890.
- SHAO Changzheng, XIE Kaigui, HU Bo, et al. Theory of supply-demand balance in renewable-dominated power systems(Part I): Fundamental understanding of decision-dependent uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(14): 5879-5890(in Chinese).
- [30] NOHADANI O, SHARMA K. Optimization under decision-dependent uncertainty[J]. SIAM Journal on Optimization, 2018, 28(2): 1773-1795.
- [31] POWELL W B. A unified framework for stochastic optimization[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 275(3): 795-821.
- [32] LI Yujia, QIU Feng, CHEN Yixuan, et al. Adaptive distributionally robust planning for renewable-powered fast charging stations under decision-dependent EV diffusion uncertainty[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(6): 5853-5870.
- [33] YIN Wenqian, FENG Shuanglei, LIU Rongpeng, et al. Chance-constrained co-expansion planning for power systems under decision-dependent wind power uncertainty[J]. IET Renewable Power Generation, 2023, 17(6): 1342-1357.
- [34] YIN Wenqian, LEI Shunbo, FENG Shuanglei, et al. Assessing the value of renewable forecasting accuracy in power system operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(2): 4561-4573.
- [35] YIN Wenqian, LI Yujia, HOU Jiazuo, et al. Coordinated planning of wind power generation and energy storage with decision-dependent uncertainty induced by spatial correlation[J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(2): 2247-2258.
- [36] 吴江, 靳晶新, 管晓宏, 等. 面向信息物理融合能源系统的大规模风电场发电功率随机特性分析模型与算法 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4055-4063.
- WU Jiang, JIN Jingxin, GUAN Xiaohong, et al. Estimation and characteristic analysis of large-scale wind farm generation in cyber physical energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4055-4063(in Chinese).
- [37] HU Chenxi, LI Yujia, HOU Yunhe. Risk-informed resilience planning of transmission systems against ice storms[J]. Applied Energy, 2025, 392: 125801.
- [38] LI Yujia, LEI Shunbo, SUN Wei, et al. A distributionally robust resilience enhancement strategy for distribution networks considering decision-dependent contingencies [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(2): 1450-1465.
- [39] QIN Zhijun, HOU Yunhe, LEI Shunbo, et al. Quantification of intra-hour security-constrained flexibility region[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2): 671-684.
- [40] LI Yujia, SUN Wei, YIN Wenqian, et al. Restoration strategy for active distribution systems considering endogenous uncertainty in cold load pickup[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 2690-2702.
- [41] GADE D, HACKEBEIL G, RYAN S M, et al. Obtaining lower bounds from the progressive hedging algorithm for stochastic mixed-integer programs[J]. Mathematical Programming, 2016, 157(1): 47-67.

附录 A 定理 1、推论 1 的形式化证明和物理意义说明

1) 定理 1 证明:

①随机优化情形: 设 P_x 的概率密度为 $p(x, \xi)$, 则:

$$R(x) = \int L(x, \xi) p(x, \xi) d\xi$$

若 $L(x, \xi)$ 与 $p(x, \xi)$ 关于 x 连续可微, 并满足微分与积分次序可交换的条件, 则:

$$\begin{aligned} \nabla_x R(x) &= \int [\nabla_x L(x, \xi) p(x, \xi) + L(x, \xi) \nabla_x p(x, \xi)] d\xi \\ &= E_{p_x} [\nabla_x L(x, \xi)] + E_{p_x} [L(x, \xi) \nabla_x \ln p(x, \xi)] \quad (A1) \end{aligned}$$

式中: 第 1 项为直接效应, 反映规划决策对损失函数本身的影响; 第 2 项为结构效应, 反映概率分布随规划决策变化所产生的风险边际。该项刻画了规划决策改变未来不确定性分布, 进而影响系统风险的传递路径, 定量体现了规划决策与不确定性之间的内生耦合关系。

②鲁棒优化情形: 令:

$$\begin{cases} R(x) = \max_{\xi \in \Xi(x)} L(x, \xi) \\ \Xi(x) = \{\xi | g_j(x, \xi) \leq 0, j = 1, \dots, m\} \end{cases} \quad (A2)$$

若 $\xi^*(x)$ 为最优解, 对应乘子 λ_j^* , 则根据包络定理和 KKT 条件:

$$\nabla_x L(x, \xi^*) + \sum_j \lambda_j^* \nabla_x g_j(x, \xi^*) = 0 \quad (A3)$$

进而:

$$\nabla_x R(x) = \nabla_x L(x, \xi^*) + \sum_j \lambda_j^* \nabla_x g_j(x, \xi^*) \quad (A4)$$

和随机情形类似, 第 1 项对应损失函数随规划决策变化

产生的直接效应；第2项由决策依赖不确定性 $\Xi(\mathbf{x})$ 的边界的边界变化引起，反映约束集合变化对最坏情形风险的影响。在电力系统规划中，当潮流安全边界、线路传输极限或其他运行约束随规划决策变化时，最坏情形对应的不确定性实现也可能发生改变，从而使风险函数产生额外的结构敏感性项。该项体现了鲁棒优化框架下的DDU效应。

2) 推论1证明。

由于 $\Sigma=\Sigma^T$ ，有：

$$\mathbf{x}^T \Sigma \mathbf{x} = \sum_i \Sigma_{ii} x_i^2 + 2 \sum_{i < j} \Sigma_{ij} x_i x_j \quad (\text{A5})$$

因此 $\Sigma=\Sigma^T$ 可得：

$$\nabla_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^T \Sigma \mathbf{x}) = 2 \Sigma \mathbf{x} \quad (\text{A6})$$

$$\frac{\partial}{\partial x_k} \text{Var}(P_{\text{total}}) = 2(\Sigma_{kk} x_k^2 + \sum_{j \neq k} \Sigma_{kj} x_j) \quad (\text{A7})$$

若 $\Sigma \neq 0$ 且 $\mathbf{x} \notin \text{Null}(\Sigma)$ ，梯度非零，则空间相关项 $2 \sum_{i < j} \Sigma_{ij} x_i x_j$ 可通过布局调整而改变，故 $\text{Var}(P_{\text{total}})$ 随 $\mathbf{x}$ 变化。

对于二次型的风险函数，有：

$$R(\mathbf{x}) = h[\text{Var}(P_{\text{total}})] = h(\mathbf{x}^T \Sigma \mathbf{x}) \quad (\text{A8})$$

先对内层求导，可得：

$$\nabla_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^T \Sigma \mathbf{x}) = 2 \Sigma \mathbf{x} \quad (\text{A9})$$

再对外层应用链式法则，可得：

$$\nabla_{\mathbf{x}} R(\mathbf{x}) = h'(\mathbf{x}^T \Sigma \mathbf{x}) \cdot \nabla_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^T \Sigma \mathbf{x}) = 2h'(\mathbf{x}^T \Sigma \mathbf{x}) \Sigma \mathbf{x} \quad (\text{A10})$$

当且 $h' > 0$ 时 $\mathbf{x} \in \text{Null}(\Sigma)$ ，梯度非零，风险度量随决策变化。该推论表明，当出力间存在空间相关($\Sigma_{ij} \neq 0$)，规划策略

导致的容量分布的改变可影响系统总的波动，进而改变基于方差的风险度量，这一结果从协方差结构的角度揭示了DDU的具体作用机制。



胡晨茜

在线出版日期：2026-05-06。

收稿日期：2025-12-12。

作者简介：

胡晨茜(1998)，女，博士，研究方向为电力系统韧性规划、人工智能在电力系统中的应用，cxhu@eee.hku.hk；

冯双磊(1980)，男，博士，教授级高级工程师，研究方向为电力气象、新能源发电功率预测技术研究与应用，fengsl@epri.sgcc.com.cn；

刘锋(1977)，男，博士，副教授，博士生导师，研究方向为电力系统稳定分析与控制、优化决策、工程博弈论等，lfeng@tsinghua.edu.cn；

*通信作者：侯云鹤(1975)，男，教授，博士生导师，研究方向为弹性电网运行与优化、智能电网，yhhou@eee.hku.hk；

王伟胜(1968)，男，博士，教授级高级工程师，博士生导师，研究方向为新能源发电与并网技术、电力系统稳定分析和控制。

(责任编辑 李泽荣)