

虚拟电厂的城市嵌入：能源可调度空间的形成与规划转译*

Urban Embedding of Virtual Power Plants: The Formation of Energy-Dispatchable Spaces and Their Translation into Planning Practice

冯 歆

FENG Xin

关键词 虚拟电厂；算法基础设施；能源可调度空间；城市能源灵活性；分布式能源；规划转译

Keywords: virtual power plant; algorithmic infrastructure; energy-dispatchable space; urban energy flexibility; distributed energy resources; planning translation

提 要 随着屋顶光伏、社区储能、电动汽车和建筑可调负荷进入既有社区与园区，能源设施的规划问题正由是否建设、建在哪里，转向何时可用、由谁调度、收益与责任如何分配。虚拟电厂通过数字平台和运行规则组织这些分散资源，但其动态边界、时段属性和权责关系难以由现行以固定用地、设施配建和工程交付为主的规划体系表达。将虚拟电厂概念化为算法基础设施，并提出能源可调度空间，用以解释分散资源如何被持续组织，以及既有空间在何种条件下具备参与能源调度的能力。研究指出，能源可调度空间的形成取决于物理承载、技术可控、时段可用、调度授权以及收益与责任可追溯等五项条件。针对现行规划在运行属性管控、持续运营、公共收益和尺度衔接方面的不足，提出运行属性附表、可调资源清单、动态运营台账、收益回流和跨尺度治理接口等转译路径。研究表明，面向分布式能源系统，规划对象需要由设施建设进一步扩展至资源运行状态及其治理关系。

Abstract: Virtual power plants (VPPs) aggregate distributed energy resources through digital platforms, metering and control interfaces, and authorization and settlement mechanisms. They enable parking spaces, rooftops, energy storage systems, and building loads to perform time-dependent energy functions within existing urban fabrics, challenging planning systems traditionally built around fixed boundaries, stable land uses, and static development control. This paper conceptualizes the VPP as a form of algorithmic infrastructure and introduces energy-dispatchable space as a planning concept. Algorithmic infrastructure explains how dispersed and temporally variable resources are continuously organized while energy-dispatchable space describes the conditional operational state generated in specific spatial contexts. Such a state emerges only when five conditions are simultaneously satisfied: physical capacity, technical controllability, temporal availability, dispatch authorization, and traceable benefits and responsibilities. The framework distinguishes among potential resources, access-ready resources, and energy-dispatchable spaces. It identifies key mismatches in regulatory planning representation, renewal-unit implementation, public-benefit governance, and cross-scale coordination. To address these challenges, it proposes a set of planning and governance instruments, including operating-attribute schedules, dispatchable-resource inventories, dynamic operational records, benefit reinvestment mechanisms, and cross-scale governance interfaces. The paper extends the scope of planning intervention from construction and allocation of physical facilities to the operational states, temporal dynamics, and governance relationships of distributed energy resources.

中图分类号 TU984 文献标志码 A
DOI 10.16361/j.upf.202603013
文章编号 1000-3363(2026)03-0108-08

作者简介

冯 歆，苏州科技大学建筑与城市规划学院讲师，谢菲尔德大学地理与规划学院学术委员会委员，fengxin-home@outlook.com

* 能源基金会“‘双碳’目标下苏州市相城区低碳更新路径研究”（项目编号：G-2311-35303）

1 分布式能源系统何以成为规划问题

城乡规划对能源基础设施的认识，长期形成于中心化供给为主的能源体系。电厂、变电站、输配线路和管网通常以可见的物质设施存在，其位置、容量、服务范围和功能边界相对稳定。与之相适应，规划主要通过设施用地、廊道预留、服务半径、容量配置和建设时序组织能源供给，设施建成后的调度方式则通常被视为能源专业系统内部的运行问题。由此形成的规划认识具有明显的静态性：空间功能主要由用地和设施类型确定，规划边界相对固定，规划控制集中于设施建设和空间形成阶段。

在“双碳”目标、新型电力系统建设和新能源汽车快速增长的共同推动下，这一前提正在改变。屋顶光伏、社区储能、电动汽车和楼宇可调负荷分散嵌入既有社区、园区与建筑，其可用容量会随日照、用能需求、车辆驻留和市场信号而变化。单个资源规模有限，只有借助虚拟电厂（virtual power plant, VPP），通过数字平台、计量装置、控制接口和市场合约在特定时段进行聚合，才能以运行整体参与电网调度和电力市场交易^[1-4]。能源基础设施因此不再只表现为固定场站和管线，也表现为对分散且时变的资源进行持续识别、组合和调用的运行组织^①。

这种变化使城市空间获得了传统规划难以表达的时间属性。以社区车位为例，传统规划主要关心其数量、位置、配建比例和交通组织。当车位接入车网互动（vehicle-to-grid, V2G）系统后，同一空间在不同时段可以分别承担停车、充电、储能和向电网响应的功能，并通过需求响应、峰谷价差或辅助服务形成收益。屋顶光伏、社区储能和可调节负荷也具有类似特征：其物理形态和用地性质未必改变，但能否接入、何时可调、由谁授权以及收益归谁，会持续改变其实际运行功能。空间不再仅由形态和用途定义，还取决于特定时间、技术接口与制度关系。

虚拟电厂正由试点机制转向具有明确资源接入、运行组织和市场参与规则的电力运行对象^[1-4]，但在城乡规划中仍

缺少与其动态运行属性相对应的空间对象和治理接口。由此产生的并非单一的设施配建问题，而是两种时空组织逻辑之间的错位。传统规划以固定边界、稳定功能和建设控制为基本逻辑，虚拟电厂则以资源动态组合、时段性调用和持续运营为基本逻辑。控制性详细规划、城市更新单元方案和市政专项规划可以记录车位数量、屋顶面积和设施点位，却难以表达资源是否接入调度、在何种时段可用、调度授权如何形成、运行收益如何归属。虚拟电厂由配电网拓扑、市场出清节点、聚合商服务范围和调度系统共同形成的运行边界，也往往与社区边界、街道边界和控规单元不重合。核心问题由此提出：虚拟电厂通过何种物质、技术和制度关系嵌入既有城市空间？这种嵌入如何改变车位、屋顶、储能和建筑负荷的运行属性，并使其成为规划需要识别和治理的对象？城乡规划又应如何从传统的形态控制与设施配建，扩展到对运行属性、调度授权、收益分配和跨尺度治理的关注？

本文采用概念建构与规划转译相结合的研究路径。首先，基于基础设施研究、数字基础设施和社会—技术转型理论，将虚拟电厂概念化为算法基础设施，以解释分散能源资源的运行组织。其次，提出能源可调度空间概念，用以识别这种组织在具体空间中形成的条件性运行状态。最后，将上述概念转译到规划编制与治理场景，分析现行规划体系在控规工具、更新单元、公共收益和尺度衔接方面的适配不足，并提出相应工具方向。

2 文献回顾与理论缺口

2.1 虚拟电厂与分布式能源

虚拟电厂研究主要集中在电力系统工程领域。相关研究通常将虚拟电厂理解为一种通过信息通信、预测优化和集成控制技术聚合分布式电源、储能和可调节负荷的运行组织模式，其目标在于提升分布式资源参与电力平衡、需求响应和电力市场交易的能力^[5-7]。近年来，随着新能源消纳压力、负荷侧灵活性需求增加和电力市场改革推进，虚拟电厂逐渐从概念验证走向规模化试点。我国

2023年发布的《电力需求侧管理办法（2023年版）》^[1]明确支持负荷聚合商、虚拟电厂等主体整合可调节负荷、分布式电源和新型储能参与需求响应；2025年，《关于加快推进虚拟电厂发展的指导意见》^[4]进一步将虚拟电厂界定为聚合各类分散资源、协同参与电力系统优化和电力市场交易的电力运行组织模式。

这类研究和政策为理解虚拟电厂的技术机制、市场功能和系统价值提供了重要基础，但其空间维度仍相对薄弱。多数研究关心资源聚合容量、响应速度、优化算法、收益模型和市场准入条件，较少讨论这些资源具体依附于哪些城市空间，如何触及社区产权和公共利益，以及其运行边界如何影响规划单元和治理责任。虚拟电厂在电力系统中已经是一种新型经营主体和运行组织，但在城乡规划中尚未被充分识别为一种具有空间后果的基础设施形态。

2.2 社区能源与社会—技术转型

社会—技术转型研究为理解能源技术进入城市生活提供了重要理论资源。多层级视角强调技术创新、制度规则、市场结构和社会实践之间的共同演化，说明能源转型并不是单一技术替代，而是基础设施、制度安排和日常生活方式的重组^[8]。社区能源研究进一步关注居民共同体、地方政府、中介组织和能源企业在可再生能源部署中的关系，讨论能源民主、能源公民身份、地方收益与程序公正等议题^[9-11]。

这些研究对本文的启发在于，虚拟电厂应被理解为嵌入社区治理、产权关系和公共收益分配的社会—技术系统。然而，现有社区能源研究多形成于欧洲社区能源合作社、可再生能源社区和市民能源公司等制度环境之中，其分析单位常是社区主体、项目组织或能源治理网络，而非中国城乡规划体系中的控规单元、更新单元、完整社区或专项规划接口。近期国内研究已开始从新质生产力与风、光能源布局出发，讨论新能源对国土空间规划演进的影响^[12]；在此基础上，本文将观察视角进一步推进至存量城市内部：虚拟电厂接入后，车位、屋顶、储能和建筑负荷的物理用途未必发生改变，其规划意义却会随接入状态、

可用时段、调度授权和收益关系而变化。国内完整社区与老旧小区更新研究已将关注点由设施建设延伸到持续运营和长效治理,但对分布式能源资源如何进入平台调度、形成动态授权和运行收益的讨论仍较有限^[13-16]。

2.3 基础设施与平台城市

基础设施研究长期强调,基础设施并非中性的物质系统,而是由技术标准、制度规则、资本关系和日常实践共同构成的社会—技术装置^[17-19]。数字基础设施和平台城市研究^[20-22]进一步指出,城市运行越来越依赖数据、接口、协议和平台规则,空间治理对象由道路、管线和建筑等实体设施,扩展到算法、数据和平台所组织的关系网络。这一理论转向为理解虚拟电厂提供了重要基础。虚拟电厂平台通过资源注册、状态预测、调度排序、响应核验和收益结算,把电网约束、市场价格和授权规则落实到具体车位、屋顶、储能装置和建筑负荷;平台规则由此决定某一节点在何种时段参与聚合调度、由谁调用、运行收益和风险如何追溯。算法与平台可以被视为持续改变空间运行状态和权责关系的制度化接口。

现有基础设施和平台城市研究多停留在宏观治理、平台权力或数字关系网络层面,对规划如何表达资源接入、时间可用性、调度授权和收益责任讨论有限。平台只是资源协调和规则执行的界面,不能等同于本文所称的算法基础设施,后者还包括分布式设备、计量控制接口、协议授权和核验结算关系。规划的关键在于识别这些物质、技术和制度要素如何共同使既有空间进入可调度状态。

2.4 规划研究:从建设控制到运行治理

我国城乡规划研究的范式正在转型,由传统的蓝图绘制与建设管控逐步转向实施导向的动态运行治理。邓毛颖^[23]指出,内涵式发展的内在要求促使规划逻辑从开发本位转向运营本位,工作重心亦随之延伸至全生命周期的实施管理与持续运营。针对新质生产力驱动下的功能混合与弹性转换趋势,桑劲等^[24]强调需通过精细化的权益配置,厘清空间功

能更迭中的权利关系。范金龙^[25]进一步主张依托体检评估与动态调整机制,推动国土空间规划由刚性管控工具向具备持续反馈能力的治理系统演进。这些研究共同表明,规划的核心对象正从空间形态塑造转向全周期的空间运行过程。

这一转向为虚拟电厂的规划研究提供了基础,但既有讨论主要针对新能源生产空间、土地用途转换或规划动态调整,尚未充分处理存量城市中的另一类运行变化:车位、屋顶等既有空间载体的物理用途基本不变,但能否调用、何时调用、由谁授权,以及收益和责任如何分配,会随配网接入、设备状态、用户行为和运行规则不断变化。这类变化不一定表现为土地用途或空间形态的改变,却会持续重组既有空间的能源功能及主体关系。具体来说,现有研究还没有回答三个问题:第一,算法聚合如何使这些既有空间载体获得新的运行属性;第二,调度授权如何建立在空间和设备权属基础上,并与数据使用、设备控制、收益分配和责任承担相衔接;第三,规划单元如何与配网、聚合商和电力市场建立有效接口。针对上述缺口,本文提出如下核心判断:虚拟电厂通过算法基础设施组织空间分散、时间波动的能源资源;既有空间只有在技术可调度性与规划可治理性同时成立时才形成能源可调度空间。下文依次分析算法基础设施的运行组织、能源可调度空间的成立条件及其规划转译路径。

3 算法基础设施:虚拟电厂的规划学重释

3.1 概念提出:对时空敏感资源的运行组织

传统基础设施通常以道路、管线、泵站、变电站、污水处理厂等物质形态进入规划视野。规划通过用地控制、廊道预留、设施规模和服务半径等工具,确定这些设施的空间位置和供给能力。虚拟电厂与此不同:它通过平台系统把分布式光伏、储能、电动汽车、空调负荷和工业负荷等资源聚合起来,使其以一个整体身份响应电力系统需要。

本文将虚拟电厂所形成的这种复合运行体系概念化为“算法基础设施”,并

将其界定为:以电网和分布式能源资源及其设备为物质基础,以计量、通信、控制和核验接口及数字平台为连接条件,通过协议、授权安排与可执行的预测、排序、调度、核验和结算规则,持续组织空间分散且时间波动的能源资源,使其形成稳定运行能力的复合基础设施。这一概念化的关键,不是把算法视为附着于既有能源设施之上的外部工具,而是把算法所组织的资源、接口、授权与结算关系纳入基础设施本身的构成。其基础设施属性来自对资源接入和协同运行所提供的基础性、持续性与共享性支撑;其算法性来自技术约束、市场规则和授权关系被转化为可重复执行并可根据运行状态持续调整的协调程序。

这一概念需与两类对象区分。第一,不同于数据中心、通信网络和算力枢纽等算力基础设施,算法基础设施面向分布式能源资源,核心是协调其可用状态和运行关系。第二,不等同于虚拟电厂平台或聚合商:平台是规则执行界面,聚合商是经营与责任主体,算法基础设施则是设备、接口、平台、协议授权、调度规则和核验结算关系构成的运行体系。算法强调规则的可执行性与持续重组能力,而非将算法本身物化为独立设施。因此,该概念的贡献在于识别虚拟电厂中物质载体、数字接口与制度规则共同生成持续运行能力的机制。

算法基础设施由物质载体、接入与控制、协调与规则等三层共同构成(图1):底层提供可发电、储能和调节的资源及配网接入条件;中层使资源可计量、通信、控制和核验;顶层将预测、市场信号与授权边界转化为具体调用。三层相互依赖:缺少资源,聚合无从谈起;缺少接口,资源不可观测、不可调用、不可核验;缺少规则,调用无法形成对外承诺的整体能力。任何一层缺失都不足以构成算法基础设施。

3.2 算法基础设施的特征

第一,时空组织性。算法基础设施通常不依托单一主体建筑或专属用地,其运行边界由资源接入清单、数据接口、平台关系及特定时段的可用状态共同构成。光伏出力受日照条件影响,车辆电池受驻留与出行安排约束,建筑负荷随

使用节律变化，储能资源则取决于荷电状态。算法在不同地点、时段和约束条件下持续识别、筛选和组合这些资源，将局部波动的节点组织为整体可预测、可承诺、可核验的调节能力。因此，一个社区即使没有新增大型能源设施，也可能因充电桩、屋顶光伏、储能和可调负荷接入聚合平台，在特定时段进入虚拟电厂的实际调度。其“虚拟性”不意味着缺少物质载体，而在于系统边界不再由固定设施或用地范围预先确定，而是随资源何时可用、能否接入和是否响应动态形成。传统用地分类和设施点位图能够记录设备的位置与用途，却难以呈现这种不断变化的运行关系（表1）。

第二，协议构成性。算法基础设施依赖合约和规则运行，车主与充电运营商之间的充放电授权，物业、业委会或居民集体与平台企业之间的场地和设备使用安排，聚合商与电网或电力市场之间的交易规则，共同构成其运行骨架。空间是否可被调度，往往不是由物理位置单独决定，而是由协议关系决定。

第三，状态可编程性。传统物质基础设施建成后，功能边界相对稳定；算法基础设施则可以通过平台策略、市场价格和调度指令改变运行方式。同一组车位和充电桩，某一时段可以作为有序充电负荷，另一时段可以作为削峰资源，市场条件允许时又可作为辅助服务资源。这种可编程性提高了能源系统灵活性，也增加了规划治理的不确定性：空间功能不再完全由用地性质和设施类型锁定，而是被运行规则持续改写。

3.3 规划对象的转向

算法基础设施使规划对象发生了重要转向。传统规划主要回答设施的形成问题，即设施在哪里建设、规模多大、是否满足服务标准。虚拟电厂则要求规划进一步回答设施的运行问题，即哪些既有空间和设备被纳入调度、调度授权如何形成、运行收益如何分配、公共风险如何控制。前者对应建设理性，后者对应运行理性。

这一转向意味着，规划不能再把分布式能源系统完全视为外部技术条件。对于社区和更新单元而言，是否具备接入条件、是否形成集体授权、是否建立



图1 算法基础设施的层级构成
Fig.1 Hierarchical structure of algorithmic infrastructure

表1 传统物质基础设施与算法基础设施的规划逻辑对照
Tab.1 Comparison of Planning Logics between Physical Infrastructure and Algorithmic Infrastructure

比较维度	传统物质基础设施	算法基础设施
存在方式	以道路、管线、场站等可见建成物形成空间存在	由物质载体、接入控制和协调规则共同构成，以持续运行关系形成系统存在
规划识别	位置、规模、服务半径、廊道、容量	载体条件、接口状态、时段可用性、调度授权、结算与监管接口
主要问题	建什么、建在哪里、由谁建设、服务多少人口	哪些资源在何时可用、如何接入和授权、由谁调度、收益与风险如何追溯
控制工具	用地控制、设施配建、工程标准、开发强度	运行属性附表、可调资源清单、接口与授权规则、绩效评估和收益回流机制
空间影响	改变物理形态和土地使用结构	在物理形态基本不变的情况下，按时段改变功能状态、资源边界和治理关系

收益回流规则，都会影响公共空间使用、居民利益分配和长期运维能力。算法基础设施由此进入规划学的核心议题：它既是能源系统，也是空间治理系统。

4 能源可调度空间：形成条件与状态判定

4.1 概念界定

“算法基础设施”回答虚拟电厂如何组织空间分散、时间波动的能源资源；“能源可调度空间”则回答这种组织如何

转化为规划可识别的空间状态。本文所称能源可调度空间，是指既有空间及其附着能源资源在物理承载、技术可控、时段可用、调度授权以及收益与责任可追溯等五项条件共同成立后形成的、能够进入实际调度并接受规划治理的条件性运行状态，下文简称“可调度空间”（表2）。

能源可调度空间不同于交通资源调配中的空间单元，也不同于电力优化模型中的调度可行域或能源调度中心等专用设施空间。它描述既有空间在能源运

行中的条件性状态，并具有双重尺度特征：聚合系统整体需形成相对稳定、可预测和可承诺的调节能力，局部节点则随日照、驻留、荷电状态、使用需求和授权变化而进入、退出或调整响应。其确定性存在于整体能力，动态性主要发生在局部节点。

可调度空间亦区别于传统配建空间。配建空间强调静态数量和空间位置，例如停车位数量、充电桩配置比例或屋顶面积；可调度空间强调运行属性，即该空间是否能够接入聚合商平台、是否具有可预测和可控制的响应能力、是否形成明确的调度授权和收益分配关系。因此，一个普通停车位和一个接入V2G系统的停车位，在物理面积上可能相同，但后者只有在车辆驻留、双向计量、配电容量和用户授权同时成立时，才形成可调度空间。

4.2 类型识别

在社区和片区尺度，能源可调度空间主要表现为充放电、发电、缓冲和负荷四类节点。以充放电节点为例，配置双向充放电设施的停车位和电动汽车电池，既占用社区停车空间，也通过车辆驻留时间和电池容量参与电力系统调节；发电、缓冲和负荷节点的典型载体、接入条件与规划识别重点见表2。

这四类载体构成可调度空间的主要资源基础。需要强调的是，可调度空间不是设备清单的简单叠加，而是空间、设备、用户、合约和平台之间关系的组合。只有当上述资源同时满足技术可调度性与规划可治理性时，才形成可调度空间。

4.3 可调度性的成立条件

能源可调度空间的识别应区分两个层次（图2）。第一层是技术可调度性，由物理承载、技术可控和时段可用等三项条件共同决定。物理承载是指面积、荷载、配电容量、安全距离、停车周转、屋顶结构和消防约束等是否允许资源进入；技术可控是指是否具备计量、通信、控制和核验接口，使资源状态可观测、调用结果可核验；时段可用是指资源在何种时间窗口内可以被预测和调用，包括车辆驻留、光伏出力、储能荷电状态和负荷响应边界。第二层是规划可治理性，由调度授权和收益与责任可追溯性决定。调度授权要求明确空间、设备、数据使用和控制安排，确保调度授权有效、可撤回并可追溯；收益与责任可追

溯性要求调用结果能够核验，收益、成本、风险、运维责任和违约责任能够识别、结算并追溯。

据此，具备物理条件但尚未完成技术接入的节点属于潜在资源；完成计量、通信和控制接口改造，但尚未满足时段可用或治理条件的节点属于接入就绪资源；技术可调度性与规划可治理性同时成立时，方可认定为能源可调度空间。由此，授权与责任并非技术调度之外的附加条件，而是可调度空间得以成立的构成条件。

4.4 公共性张力：共有空间、有限接入与平台收益

能源可调度空间把规划中的公共性问题从物质空间推向算法运行层。社区

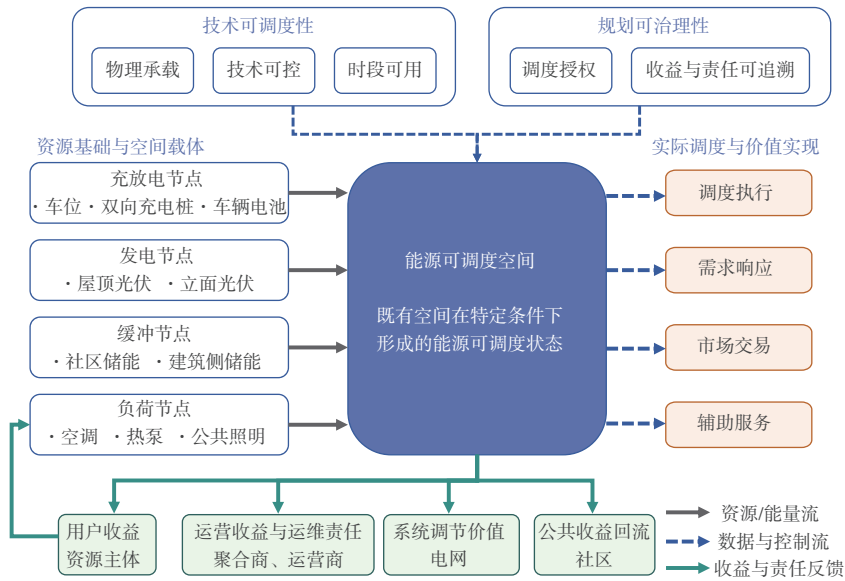


图2 能源可调度空间的成立条件与运行机制
Fig.2 Conditions and operating mechanism of energy-dispatchable spaces

表2 能源可调度空间的类型、识别维度与规划含义
Tab.2 Types, identification dimensions, and planning implications of energy-dispatchable spaces

类型	典型载体	接入条件	主要收益或功能	规划识别重点
充放电节点	V2G车位、双向充电桩、电动汽车电池	双向计量、通信控制、车辆驻留时间、用户授权	有序充电、削峰填谷、需求响应、辅助服务	停车空间电气化比例、双向桩比例、接入协议、用户权益保护
发电节点	屋顶光伏、立面光伏、公共建筑光伏	可利用面积、结构安全、并网条件、产权同意	自发自用、余电上网、绿电收益	屋顶资源清单、产权边界、并网容量、公共收益安排
缓冲节点	社区储能柜、移动储能、建筑侧储能	场地安全、消防距离、并网计量、调度接口	削峰、备用、提高新能源消纳能力	设备选址、安全距离、运维责任、应急联动
负荷节点	空调群控、热泵、电热水器、公共照明、商业负荷	智能控制接口、舒适度约束、响应协议	需求响应、负荷削减、弹性调节	可调负荷清单、使用边界、居民或业主主动态同意

共有车位、共有屋顶等空间载体可能具有共有或公共使用属性；配网接入能力则是受网络条件约束、具有竞争性使用特征的有限资源。纳入虚拟电厂后，调度收益可能流向平台企业、个体车主、设备运营商或少数业主。如果缺乏集体授权和收益回流安排，社区共有资源可能成为私人化或平台化收益的基础。

这并不意味着可调度空间必然损害公共利益。相反，如果设计得当，它可以成为老旧小区后续运维、公共设施更新和社区低碳治理的重要收益来源。关键在于规划和治理制度能否把算法红利纳入公共性讨论：哪些资源属于社区共同资源，哪些收益应进入公共账户，哪些数据、调度行为与风险责任需要公开、同意和界定。由此，公共空间不再只是可进入、可使用的物质空间，也包括运行收益和算法规则能否被问责。

5 规划体系的适配不足与转译路径

5.1 不适配的根本原因：静态空间控制与动态运行组织

算法基础设施与能源可调度空间对现行规划体系的挑战，根源在于静态空间控制与动态运行组织采用了不同的对象识别方式。这种差异体现在四个方面。时间上，规划对象由建成后的相对稳定转向运行中的持续变化；空间上，资源组织由固定边界内的设施配置扩展到跨地块、社区、产权单元和配电分区的动态组合；治理上，管理重心由一次性审批和建设交付延伸至持续接入、授权更新和绩效核验；价值上，公共利益也由建设投入和设施供给扩展到运行收益、风险与责任的持续生成。资源由谁调用、收益如何分配、风险由谁承担，成为规划治理需要面对的新问题。

现有形态指标难以表达运行属性，项目化更新难以承接持续运营，传统公共利益机制也难以处理运行收益和跨尺度责任。规划转译的任务是在现有规划体系中补充对资源状态、运行关系、授权安排和责任链条的识别接口。因此，规划的主要任务不是替代实时调度，而是治理资源进入调度所需的条件、动态信息和跨主体接口。下文分别从控

规工具、更新单元、公共收益和尺度衔接等四个方面讨论相应路径（表3）。

5.2 控规工具：从形态指标到运行属性附表

控制性详细规划的优势在于通过用地性质、开发强度和设施配建等指标，稳定地组织空间开发与公共服务供给。但面对能源可调度空间，仅有形态指标并不够。控规可以说明一个地块配建多少停车位、多少充电设施，却无法说明这些设施是否具备有序充电、双向充放电、负荷响应或聚合交易能力。

因此，建议在不改变控规基本法定框架的前提下，探索设置运行属性附表或低碳能源设施引导性指标。内容可包括停车位电气化比例、双向充放电设施预留比例、配电容量冗余度、屋顶光伏可利用面积、储能设施安全预留空间、可调负荷接口比例等。初期不宜把这些指标处理成“一刀切”的刚性约束，更适合将其作为引导性、附加性和分区分类适用的规划表达，为后续接入和调度预留条件^[13-14]。

5.3 更新单元：从建设清单到可调资源清单

城市更新通常围绕“建什么、如何建设、由谁出资”组织实施，并以工程交付为主要节点。已有研究^[13-16]指出，更新治理应由工程建设延伸至持续运营和长效维护。对于虚拟电厂和社区能源系统而言，其功能与价值主要形成于建成后的运行过程。若充电设施、屋顶光伏、储能和负荷控制设备仅作为一次性建设项目，规划便难以持续处理设备接入、调度授权、运维安排和收益责任等问题。

因此，更新单元可在建设清单之外建立可调资源清单，记录资源的位置、类型、容量、产权状态、配网接入条件、改造要求和维护主体。涉及共有屋顶、公共车位和公共负荷的，还应在资源接入前明确场地使用、数据使用、设备控制、调度授权、退出安排和收益分配，并纳入业主、物业、运营主体和社区组织的协商程序。设备状态、可用时段、申报容量和响应结果等动态信息，则由运营台账持续更新。

为将能源可调度空间的五项成立条件转化为可核验、可管理的内容，更新单元还需明确各项条件对应的规划管理内容、核验材料、责任主体和更新节点（表4）。由此，更新单元不仅组织建设项目，也为分散资源的持续接入、授权更新和运营管理提供空间与制度接口。

5.4 公共收益：从建设补偿到运行收益回流

规划中的公共利益补偿和公共空间供给，传统上主要围绕开发权、公共服务设施、公共空间开放和建设成本分担展开。然而，虚拟电厂整合的分布式能源系统带来的收益并非一次性建设收益，而是持续性运行收益。峰谷价差、需求响应补偿、辅助服务收入、绿电收益和潜在碳减排价值，都可能在社区空间之上生成，却通过平台结算和市场规则流向不同主体。

因此，应将运行收益纳入公共收益治理。可考虑三类机制^[20]：一是公共账户机制，将共有屋顶、公共停车位和公共负荷产生的部分收益纳入社区公共账户，用于公共设施维护、充电设施扩容和低碳改造；二是收益分配公示机制，要求聚合商或运营商定期披露资源调用

表3 现行规划体系的适配不足与转译路径

Tab.3 Mismatches in the current planning system and possible translation pathways

规划维度	适配不足	可能后果	转译路径
控规工具	偏重用地、强度和设施数量，缺少运行属性表达	设施建了但不可调，可调度潜力不可见	设置运行属性附表，纳入电气化比例、容量冗余、接口预留等引导性指标
更新单元	以建设清单和工程交付为主，忽视长期运营	能源设施缺少收益核算和运维承接主体	建立可调资源与授权清单，识别空间载体、接入条件、权属状态和收益潜力
公共收益	公共性讨论集中于物质空间和建设补偿	共有资源产生的算法红利可能外流或私人化	建立公共账户、收益公示、回流比例和绩效付费机制
尺度衔接	规划边界与电网调度、市场结算边界不一致	社区空间参与跨尺度调度但缺乏责任接口	建立详细规划、能源规划、市政规划和社区治理之间的接口机制

表4 能源可调度空间判定与动态管理要素
Tab.4 Criteria and dynamic management elements of energy-dispatchable spaces

判定维度	管理内容	核验材料	责任主体	更新节点
物理承载	空间位置、面积、配电容量和安全条件	规划图件、设备档案	规划或建设主体	项目调整或设施改造时
技术可控	计量、通信、控制和响应核验接口	检测记录、平台接入证明	聚合商或设备运营方	设备或接口变更时
时段可用	资源可用时段、荷电状态、负荷边界和申报容量	运营台账、设备状态记录	用户或聚合商	运行状态变化时
调度授权	授权主体、期限、范围和退出安排	合同、决议、授权记录	权利主体或平台运营方	授权设立、变更或终止时
收益与责任可追溯	响应量、结算结果、运行成本、收益分配和风险事件	结算单、运维记录、事件记录	平台或运营方	调度完成或结算周期结束后

次数、响应收益、分配比例和风险事件；三是绩效相关的政策支持机制，探索将部分政策支持与实际响应能力、公共收益回流和居民满意度等运行绩效相衔接。

5.5 尺度衔接：从社区边界到跨尺度治理接口

可调度空间面临的突出问题是运行尺度与治理尺度并不重合。社区通常以用地红线、产权边界以及居委会或物业管理范围为基本边界；虚拟电厂的运行范围则取决于配电网拓扑、聚合商平台、市场出清节点和调度系统。社区屋顶、车位或建筑负荷形成的调节能力，可能用于更大范围的电网平衡，但相应的授权、收益、风险和责任仍需落实到资源所在社区及具体权利主体。

规划应对这种尺度错位的重点在于在不同制度层级之间建立稳定的数据和责任接口，而非将电力调度纳入详细规划。详细规划与更新单元负责识别空间

载体、资源类型和接入条件；市政基础设施规划衔接配网容量与设备布局；能源专项规划统筹需求响应和虚拟电厂发展目标；社区治理制度则处理资源接入、调度授权、收益分配和监督机制。由此形成“社区资源—配网接入—聚合运营—电网调度与电力市场—政府监管”的跨尺度治理链条（图3），避免资源在技术系统中已被调用，却在规划和治理体系中缺少明确责任主体。

5.6 规划转译的操作示意：存量更新单元

为说明上述工具如何在更新单元中衔接，以一个假设性存量更新单元作简要示意。规划阶段可通过可调资源清单记录屋顶光伏、储能、双向充电设施和建筑可调负荷的位置、容量、权属主体及配网接入条件；运营阶段则由动态台账持续更新设备在役状态、可用时段、授权期限、申报容量和响应结果。

单次调度的可分配收益，可依据实际响应电量、结算价格和相关补偿，扣除聚合运营、设备损耗与运维成本后，按照事先约定在资源用户、聚合运营主体和公共账户之间分配。相应地，规划单元提供空间与资源基础信息，配网企业核验接入条件，聚合商维护资源状态和授权记录，运营平台记录调度、核验与结算结果。规划的作用体现为规定资源识别、信息更新、授权衔接和收益责任追溯的基本接口。

6 结论

虚拟电厂正在改变分布式能源资源进入城市空间的方式。车位、屋顶、储能和建筑负荷的物理用途未必改变，其运行状态却会被接入、协调、授权和结算规则重新组织。能源基础设施的空间存在因此不再完全依赖独立用地、主体建筑或固定边界，也表现为分散资源在特定时段形成的运行关系。以稳定位置、固定功能和建设交付为主要对象的现行规划，难以完整表达这种动态组织方式。

本文将虚拟电厂概念化为算法基础设施，并提出能源可调度空间。前者解释物质资源、技术接口和可执行规则如何共同组织空间分散、时间波动的能源资源；后者描述这种组织作用于具体空间后形成的条件性运行状态。只有物理承载、技术可控、时段可用、调度授权以及收益与责任可追溯同时成立，既有空间才形成能源可调度空间。由此，规划可以区分潜在资源、接入就绪资源和能够进入实际调度的空间状态。

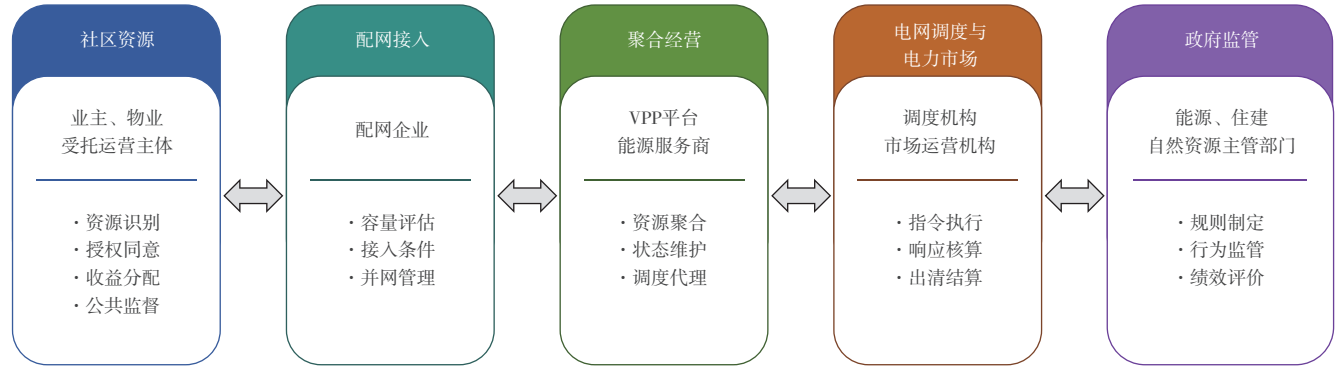


图3 跨尺度治理接口：从社区资源到电力系统治理
Fig.3 Cross-scale governance interfaces: From community resources to electricity system governance

控规表达需要在设施数量和空间形态之外补充配网接入、接口预留和运行属性；更新单元需要形成可调资源清单、授权记录和动态运营台账；公共利益治理需要将调度收益、设备损耗和责任风险纳入分配与披露；跨尺度治理则需在规划单元、配网企业、聚合商、电力市场和政府监管之间建立数据与责任接口。规划不直接承担实时调度，其任务是治理资源进入调度所需的条件、动态信息和跨主体接口。

本文以“算法基础设施—能源可调度空间”的关系连接虚拟电厂的运行组织与空间治理。该框架也可用于分析需求响应、建筑群能源灵活性、车网互动和社区储能等算法协调型能源系统进入城市空间的条件。由于本文主要完成概念建构和规划转译，尚未利用完整调度日志、授权合同和结算记录进行系统检验，后续研究可结合社区、园区和更新单元案例，比较不同配网条件、产权结构和市场规则下相关规划工具的适用边界。

注释

- ① 这里需要区分三个层次：分布式能源资源描述发电、储能与可调负荷在空间上的分散配置，数字平台、计量通信和算法是连接和协调这些资源的组织手段，虚拟电厂则是资源经聚合后参与电网优化与市场交易的运行形态。本文分析以分布式能源资源为物质基础，考察其经数字化组织后产生的空间后果。

参考文献

- [1] 国家发展改革委,工业和信息化部,财政部,等.电力需求侧管理办法(2023年版)[Z].北京:国家发展改革委,2023.
- [2] 国家发展改革委,国家能源局,工业和信息化部,等.关于推动车网互动规模化应用试点工作的通知(发改办能源[2024]718号)[Z].北京:国家发展改革委,2024.
- [3] 国家发展改革委,国家能源局,工业和信息化部,等.关于公布首批车网互动规模化应用试点的通知(发改办能源[2025]241号)[Z].北京:国家发展改革委,2025.
- [4] 国家发展改革委,国家能源局.关于加快推进虚拟电厂发展的指导意见(发改能源[2025]357号)[Z].北京:国家发展改革委,2025.
- [5] Esfahani M, Alizadeh A, Cao B, et al. Bridging theory and practice: a comprehensive review of virtual power plant technologies and their real-world applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 222: 115929.
- [6] Mahmud K, Khan B, Ravishankar J, et al. An internet of energy framework with distributed energy resources, prosumers and small-scale virtual power plants: an overview[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 127: 109840.
- [7] Kumar P, Channi H K, Kumar R, et al. A comprehensive review of vehicle-to-grid integration in electric vehicles: powering the future[J]. Energy Conversion and Management: X, 2025, 25: 100864.
- [8] Geels F W, Kern F, Clark W C. System transitions research and sustainable development: challenges, progress, and prospects[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2023, 120(47): 1-6.
- [9] Hoicka C E, Lowitzsch J, Brisbois M C, et al. Implementing a just renewable energy transition: policy advice for transposing the new European rules for renewable energy communities[J]. Energy Policy, 2021, 156: 112435.
- [10] Ahmed S, Ali A, D'Angola A. A review of renewable energy communities: concepts, scope, progress, challenges, and recommendations[J]. Sustainability, 2024, 16(5): 1749.
- [11] Giannuzzo L, Minuto F D, Schiera D S, et al. Assessment of renewable energy communities: a comprehensive review of key performance indicators[J]. Energy Reports, 2025, 13: 6609-6630.
- [12] 王乙喆,王兴平,朱振伟.新质生产力、新能源与国土空间规划演进方向思考:以风、光能源形式为主的讨论[J].城市规划学刊, 2025(3): 43-51.
- [13] 阎树鑫,万智英,李嘉男.城市更新行动:内涵、逻辑和体系框架[J].城市规划学刊, 2023(1): 62-68.
- [14] 阳建强,陈月.国家治理体系和治理能力现代化进程中的城市更新[J].城市规划学刊, 2020(4): 1-7.
- [15] 唐燕.完整社区视角下的老旧社区更新机制[J].城市规划, 2021, 45(11): 95-104.
- [16] 周岚,丁志刚,何流.长三角地区老旧小区改造的政策梳理与机制比较[J].城市规划学刊, 2022(2): 54-62.
- [17] Star S L. The ethnography of infrastructure[J]. American Behavioral Scientist, 1999, 43(3): 377-391.
- [18] Larkin B. The politics and poetics of infrastructure[J]. Annual Review of Anthropology, 2013, 42: 327-343.
- [19] Easterling K. Extrastatecraft: the power of infrastructure space[M]. London: Verso, 2014.
- [20] Caprotti F, Chang I C C, Joss S. Beyond the smart city: a typology of platform urbanism[J]. Urban Transformations, 2022, 4: 4.
- [21] Hodson M, McMeekin A, Lockhart A. Urban infrastructure reconfiguration and digital platforms: who is in control? [J]. Environmental Innovation and Societal Transitions, 2024, 50: 100816.
- [22] Törnberg P, Söderström O. Comparative platform urbanism: cities in a world of platforms[J]. Digital Geography and Society, 2025, 8: 100119.
- [23] 邓毛颖.内涵式发展导向的规划变革与学科响应:基于广州超大城市空间治理转型的实践[J].城市规划学刊, 2026(2): 41-48.
- [24] 桑劲,黄建中,邵一希,等.权益配置:培育新质生产力发展的用地管控创新[J].城市规划学刊, 2026(2): 57-65.
- [25] 范金龙.基于体检评估的市县国土空间总体规划动态调整:基本认识、现实困境与机制建构[J].城市规划学刊, 2026(2): 74-81.
- [26] 赵民,赵燕菁,刘志,等.“城市公共财政可持续的城市更新”学术笔谈[J].城市规划学刊, 2024(3): 1-9.

修回: 2026-06