

电力大数据驱动的虚拟电厂优化调度方法

史渊源¹ 王亮¹ 万鹏¹

SHI Yuanyuan WANG Liang WAN Peng

摘要

针对虚拟电厂调度受到多种实际条件的限制,单一目标函数无法满足实际业务场景的复杂需求,导致调度方案存在缺陷的问题,文章提出一种电力大数据驱动的虚拟电厂优化调度方法。通过整合预处理后的电力异构数据,将其数据特征融合作为模型输入,建立调度模型,根据这些输入数据设定目标函数,进而构建多目标函数。随后引入约束条件以确保函数解的可行性与安全性,生成多种调度方案,并计算其适应度,最终模型输出适应度最高的最优调度方案。实验表明,应用该方法的电厂调度成本最低,约为530万元,低碳经济性调度仅有少量弃风,约为30MW。

关键词

电力数据;大数据驱动;虚拟电厂;优化调度;调度方法

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.03.031

0 引言

在全球能源转型背景下,电力行业对清洁能源需求增长,正经历深刻变革。虚拟电厂(VPP)作为创新能源管理概念应运而生,通过聚合分布式能源资源整合为可调控整体,为电力系统提供新解决方案。然而,其优化调度面临挑战,分布式能源出力有间歇性和不确定性,受天气等因素影响大,用户用电需求多样且动态变化。传统优化调度方法基于固定模型和有限先验知识,难应对复杂多变因素,导致运行效率低。学者对现有调度方法改进,林顺富等^[1]设计协同优化调度方法,博弈求解,但电价分布假设与实际不符,增加成本;易文飞等^[2]设计以储能最优为目标的调度方法,但储能系统约束多,增加成本;高建强等^[3]设计优化调度方法筛选方案,但多目标沙猫群算法参数组合非最优,成本不理想。因此,本研究引入大数据技术驱动虚拟电厂优化调度,电力大数据涵盖各环节海量数据,引入大数据技术能利用数据价值,精准预测分布式能源出力和用户需求,为调度决策提供科学依据。

1 电力大数据驱动的虚拟电厂优化调度方法

1.1 基于大数据驱动的虚拟电厂异构数据整合

利用物联网(IoT)传感器等设备采集虚拟电厂光伏、风电以及储能设备的实时数据,采集对象包括气象、电价等外部数据。针对数据的缺失值采用插值法填充电力数据,线性插值的计算公式为:

$$y_t = y_{t-1} + \frac{(y_{t+k} - y_{t-1})}{k+1} \cdot (t - (t-1)) \quad (1)$$

式中: y_t 代表缺失时刻 t 的电力数据填充值; y_{t-1} 代表缺失点前最近的有效数据点; y_{t+k} 代表缺失点后最近的有效数据点; k 代表后向有效数据点到缺失点的时间间隔。

基于 3σ 原则剔除数据异常值,数据中的噪声采用均值滤波进行平滑处理,去除数据中的随机噪声^[4]。为整合预处理后的多源异构数据,本文建立了多模态数据融合框架,将非结构化数据中的时间字段转换为时间戳,以便与传感器数据的结构化时间列进行匹配。按时间戳关联结构化的数据,再使用 ResNet-50 提取其图像的深层特征;结构化的数据利用滑动窗口统计量,直接提取时序数据特征^[5]。两者的数据特征通过时间差分、滑动窗口等技术关联,分别训练结构化模型和非结构化模型,通过加权平均集成融合数据特征,融合过程用公式表示为:

$$\hat{y} = \alpha \cdot y_1 + (1 - \alpha) y_2 \quad (2)$$

式中: $\hat{y}$ 代表最终集成的电力数据融合结果; y_1 代表结构化模型的输出特征; y_2 代表非结构化模型的输出特征; α 代表权重参数,通过网格搜索参数,控制两个模型对最终结果的贡献比例。通过构建统一数据平台,整合多源异构数据,为调度模型提供高质量输入。

1.2 根据目标函数构建调度模型

在虚拟电厂的优化调度过程中,调度模型首要任务是清晰界定调度的核心目标,据此构建科学合理的优化调度模型。根据输入的多源数据设定目标函数,目标函数需紧密贴合具体业务场景的需求,在经济性导向的优化场景中,目标函数致力于实现总体发电成本的最小化^[6]。最小化发电总成本 C 的目标函数用公式表示为:

$$C = \min \sum_{t=1}^T (C_1(t) + C_2(t) - C_3(t)) \quad (3)$$

1. 国网宁夏电力有限公司 宁夏银川 750001

式中： $C_1(t)$ 代表虚拟电厂发电成本； $C_2(t)$ 代表虚拟电厂购电成本； $C_3(t)$ 代表虚拟电厂售电成本。

虚拟电厂调度的可靠性目标：

$$\max \sum_{t=1}^T (\alpha \cdot A_t - \beta \cdot R_t) \quad (4)$$

式中： A_t 代表电厂系统调度可用率； R_t 代表电厂系统的故障概率； β 代表故障概率的权重参数。在环保性目标方面，结合碳排放因子和污染物排放模型，最小化污染排放：

$$\min \sum_{t=1}^T (\gamma \cdot E_{\text{CO}_2}(P_t) + \delta \cdot E_{\text{NO}}(P_t)) \quad (5)$$

式中： T 代表电厂运行总时间； P_t 代表 t 时的发电机组出力； E_{CO_2} 代表 t 时电厂 CO_2 排放量； E_{NO} 代表 t 时电厂 NO 排放量； γ 代表 E_{CO_2} 的惩罚系数； δ 代表 E_{NO} 的惩罚系数，反映环保罚款或排污权交易成本。

根据上述目标函数，构建数学模型量化目标与决策变量的关系。调度模型根据变量关系，权衡多目标成本与可靠性、环境效益与经济效益的冲突^[7]。选择混合整数线性规划模型处理离散冲突，通过帕累托前沿分析，寻找最优折中解。

1.3 设定调度约束条件

虚拟电厂调度模型在寻优解时要结合实际电厂约束，定义调度模型的边界条件，设置调度约束条件，确保解的可行性与安全性。虚拟电厂功率平衡约束用公式表示为：

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} + \sum_{j=1}^M P'_{j,t} = D_t, \forall t \in \{1, 2, \dots, T\} \quad (6)$$

式中： $P_{i,t}$ 代表第 i 台火电机组在 t 时的出力； $P'_{j,t}$ 代表第 j 台可再生能源机组在 t 时的出力； D_t 代表系统总负荷需求； N 代表火电机组数量； M 代表可再生能源机组数量。

分布式电源机组的出力上下限约束：

$$P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\max} \forall i, t \quad (7)$$

式中： $P_i^{\min}$ 代表机组 i 的最小技术出力； $P_i^{\max}$ 代表机组 i 的额定容量。

环保约束直接关联目标函数，限制污染物排放总量或排放速率，满足环保法规要求。最后在经济角度设置市场交易约束，根据电力市场分时电价或实时电价，调整购电 / 售电策略。为确保调度方案条件满足上述约束条件，通过最大化系统备用容量或最小化停电损失，提升电网稳定性，引入可靠性指标作为目标函数约束。

1.4 计算调度方案适应度输出最优解

模型依据既定调度目标函数生成调度方案，针对其中符合硬性约束条件的调度方案，借助适应度函数对各方案的性能表现进行量化评估，进而计算出相应的适应度数值^[8]。在构建适应度函数时，通常会综合考虑经济性指标与环保性指标，运用加权求和法或多目标优化策略，将多维度目标整合为单一评价目标，由此确定的适应度函数具体形式表示为：

$$\text{Fit} = w_1 C + w_2 E + \text{Penalty} \quad (8)$$

式中： Fit 代表综合适应度函数； w_1 代表经济性的权重系数； w_2 代表环保性的权重系数； E 代表环境污染指标； Penalty 代表惩罚项。

适应度函数综合反映了调度方案的适用性，在开展适应度计算工作之前，本研究先核查个体所对应的调度方案是否满足各项硬性约束条件。若存在某调度方案违背了任意一条硬性约束，将该方案的适应度设定为一个极低的数值，以此保证此类方案在后续的筛选过程中被淘汰出局。此外，还需依据调度方案违反约束的具体程度，设置相应的惩罚项，并将其叠加到适应度值上，从而对不满足约束条件的个体实施惩罚。表 1 展示了适应度计算及惩罚项的具体设置情况。

表 1 适应度计算与惩罚项表格

个体编号	基础适应度 (未考虑约束)	惩罚项	最佳适应度值
1	0.61	0	0.85
2	0.67	0	0.88
3	0.63	0.2	0.94

为避免表 1 中适应度值范围异常，需进行归一化处理以统一范围。选取适应度大的个体随机生成初始种群，从其中选择优质个体作父代，个体被选中概率与其适应度成正比，保留新种群。对新种群进行交叉操作，随机选择交叉点交换父代部分基因，或采用算术交叉算法进行实数编码，使子代基因成为父代的线性组合，以此生成新个体，增加种群多样性。接着在种群内引入随机性，如二进制编码个体随机翻转某一位、实数编码随机替换基因值，同时在个体基因值附近加高斯噪声，避免算法陷入局部最优。当连续 N 代种群适应度无显著提升时，停止迭代优化直至收敛，模型输出适应度最小个体为最优解。

2 仿真实验

2.1 平台搭建

为了验证所提出调度算法的有效性，构建包含风力发电机组、光伏发电系统以及微型燃气轮机等装置的多种分布式能源的虚拟电厂，采用 MATLAB 进行仿真与优化调度模型的求解。搭建实验平台如图 1 所示。实验环境含 Intel Xeon 多核高性能处理器、32 GB 内存和 1 TB 高速硬盘，满足大数据处理与复杂模型计算需求。用于数据可视化展示和实验监控的工作站，配备 NVIDIA GTX 1060 显卡。选择 Linux 系统进行大数据处理和算法开发，其上安装 Hadoop 和 Spark 框架存储处理海量电力数据，用 Python 进行模型训练。该平台仿真不同电力市场场景，如电价波动、市场需求变化等，设置高峰、平段、低谷时段电价反映不同市场需求下的调度情况。

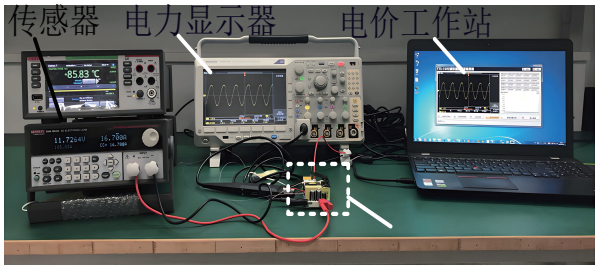


图 1 仿真实验平台

根据设定的仪器参数和模拟场景，生成分布式能源出力数据，分布式能源数据来源于风力发电场、光伏电站和储能系统，包括风速、光照强度和温度等环境因素以及对应的发电功率和储能充放电功率。使用公开的市场数据平台获取电力市场数据，收集该电力市场的实时电价、交易规则等数据。

2.2 虚拟电厂数据融合处理

调度前，去除数据中的噪声、异常值和缺失值，对不同量纲的数据进行归一化处理，使其范围在 [0, 1] 之间，以提高调度模型训练效率和收敛性。接着进行数据划分，将预处理后的数据按 6:2:2 的比例划分为训练集、验证集和测试集。然后从预处理后的数据中提取与虚拟电厂优化调度相关的特征，采用深度学习或机器学习模型建立电力大数据与优化调度策略的映射关系。最后，构建调度模型的网络结构如表 2 所示。

表 2 调度模型的网络结构及参数

模型结构	组件类型	参数名称	参数配置
输入层	数据接口	输入特征维度	32 个神经元
		神经元数量	64 个
隐藏层 1	LSTM 单元	输出门激活函数	Sigmoid
	LSTM 单元	dropout 率	64
隐藏层 2	dropout 率	随机失活比例	4
注意力层	自注意力机制	注意力头数	3
输出层	全连接层	输出维度	3

由表 2 可知，调度模型通过双层 LSTM 结构捕捉分布式能源出力的日周期性和季节性模式，在注意力层输出与输出层间增加可学习的目标权重矩阵，实现经济性、可靠性、环保性的动态平衡。模型综合多目标构建优化函数，可靠性目标设为最大化负荷满足率，环保性目标设为最小化碳排放量，同时考虑分布式能源出力、储能装置充放电及容量、负荷需求平衡等约束条件。选择常见虚拟电网调度方法与电力大数据驱动模型对比，使用训练集训练两模型，训练中监控性能指标，指标无显著提升时停止训练防过拟合。用训练好的模型预测测试集数据，生成不同调度方法下的虚拟电厂优化调度策略，将策略输入仿真平台模拟实际运行，平台准确模拟分布式能源出力特性、电力市场交易规则等并记录运行指标，最后对比分析结果，评估电力大数据驱动调度方法的优越性。

2.3 虚拟电厂各机组低碳经济性调度分析

不同方法下虚拟电厂各机组的优化调度情况，如图 2 所示。从图 2 可知，其他三种调度方案在 10~18 时段、30~40 时段有弃风情况，而本文方法仅在 25 s 时有少量弃风，约 30 MW，缓解了虚拟电厂调峰压力。本研究综合考虑经济性、环保和功率等指标，运用加权求和法或多目标优化策略，将多维度目标整合为单一评价目标，优化后提升了系统负荷量，避免过高功率，推动发电向低碳经济方向发展。

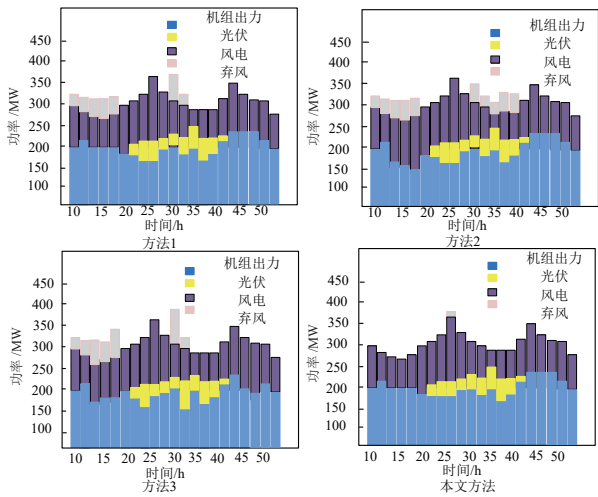


图 2 虚拟电厂各机组低碳经济性调度

2.4 虚拟电厂调度成本分析

本分析框架通过量化模型与数据结合，揭示了虚拟电厂调度成本的核心驱动因素，虚拟电厂调度成本可以直接反映调度经济优势，如图 3 所示。

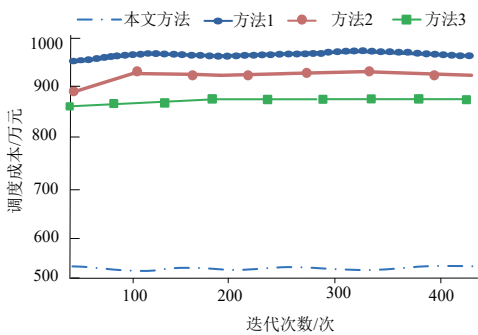


图 3 四种方法的虚拟电厂调度成本

由图 3 可知，所提方法电厂调度成本最低，约 530 万元。本研究目标函数贴合业务场景需求，在经济性导向优化场景中致力于实现总体发电成本最小化，因此该调度方法在经济性方面适用。

3 结语

本研究聚焦于电力大数据驱动的虚拟电厂优化调度方法，在方法构建上，充分利用电力大数据的丰富信息，结合先进的算法和模型，提出了一套完整的虚拟电厂优化调度方

基于多粒度数值嵌入的法律刑期预测方法

李泽南¹ 邱锦宏¹

LI Zenan QIU Jinhong

摘要

现有模型在法律刑期预测任务中表现优异，但在处理涉案金额、犯罪次数等关键离散数值时，易出现数值语义鸿沟问题。传统基于 BERT 的纯文本处理方法难以捕捉法律条款中严格的阈值阶梯效应，导致金额敏感型案件的判决预测精度受限。为此，文章提出一种基于多粒度数值嵌入的法律判决预测网络。该模型构建可微数值表征学习模块，从全局量级（Magnitude）、局部法律分档（Legal Tier）、微观连续偏移（Continuous Offset）三个粒度对数值进行编码，并将多尺度数值特征与文本语义向量深度融合，使模型同时感知数值的绝对大小与相对法律定位。在 LAIC2021 数据集上的实验结果表明，该模型在刑期预测任务上达到 48.31% 的 Macro- F_1 值，较最优基线模型提升 1.02%。

关键词

自然语言处理；法律智能；数值嵌入；注意力机制

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.03.032

0 引言

随着人工智能技术在司法领域的深入应用，法律判决预测（legal judgment prediction, LJP）成为提升司法效率、促进裁判一致性的关键任务^[1-2]。其核心目标是通过解析案件事实文本，自动预测罪名、法律条款及刑期。其研究可追溯至 20 世纪中叶，早期学者尝试通过数学统计方法，如 Kort^[3] 对

美国最高法院“律师权”案件的预测；Nagel^[4] 采用相关性分析的判决逻辑建模探索司法规律。但因法律文本的非结构化特性与复杂逻辑限制，成果多停留于理论阶段。直至 21 世纪以来，随着深度学习技术的突破与大规模法律数据集（如 CAIL2018^[5]、ECHR）的构建，LJP 研究才进入快速发展期。

Luo 等^[6] 构建了基于双向门控循环单元（Bi-GRU）的联合建模框架，同步关联罪名预测与法律条文匹配任务。针对低频罪名识别难题；Hu 等^[7] 通过引入司法属性特征空

1. 江西理工大学软件工程学院 江西南昌 330013

案。显著提高了虚拟电厂的调度精度和运行效率。通过实际案例分析，验证了所提方法在降低运营成本和提高能源利用率的显著效果。

参考文献：

- [1] 林顺富, 郭宇霆, 周波, 等. 计及电价不确定性的多虚拟电厂与共享储能协同优化调度方法 [J]. 智慧电力, 2025, 53(7): 20-27.
- [2] 易文飞, 叶志刚. 考虑储能和条件风险价值的虚拟电厂优化调度 [J]. 电力需求侧管理, 2025, 27(4): 86-91.
- [3] 高建强, 蔡杜钟, 刘春涛, 等. 基于多目标沙猫群算法的含碳捕集虚拟电厂优化调度 [J]. 动力工程学报, 2025, 45(7): 1126-1133.
- [4] 郑思伟, 黄国平. 碳交易机制下柔性负荷虚拟电厂日前优化调度研究 [J]. 徐州工程学院学报 (自然科学版), 2025, 40(2): 65-76.
- [5] 丁君, 秦浩庭, 苏鹏, 等. 基于改进 Harris Hawk 优化算法

的虚拟电厂优化调度研究 [J]. 可再生能源, 2025, 43(6): 829-838.

- [6] 邢耀敏, 高春雨, 廖丛林. 考虑碳捕集及碳交易的虚拟电厂多目标优化调度 [J]. 分布式能源, 2025, 10(3): 42-52.
- [7] 李春锋. 面向矿区电网新能源消纳的智能资源调度方法 [J]. 计算机仿真, 2025, 42(6): 148-153.
- [8] 刘超超, 常玉娇. 基于改进遗传算法的虚拟电厂分布式电源调度优化方法 [J]. 无线互联科技, 2025, 22(9): 78-81.

【作者简介】

史渊源（1982—），男，宁夏固原人，本科，高级工程师，研究方向：大数据分析应用，email: yuany5819@163.com。

王亮（1981—），男，吉林松原人，本科，高级工程师，研究方向：大数据分析应用。

万鹏（1988—），男，宁夏石嘴山人，本科，高级工程师，研究方向：数据管理与运营。

(收稿日期: 2025-08-14 修回日期: 2026-02-27)