

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.058

基于 GNN 和蒙特卡罗法的电力采购系统围标串标行为辨识算法

吴勇,潘晓华,杨轶俊,叶雪峰,刘福权

(南方电网数字平台科技(广东)有限公司,广东 深圳 518102)

摘要:受到投标手段多样性以及电力采购系统节点关系复杂性的影响,在对围标串标行为进行辨识时,通常会因忽略对投标模式规律性的考量而导致辨识精度不佳。对此,提出基于 GNN 和蒙特卡罗法的电力采购系统围标串标行为辨识算法。结合电力采购系统内部的实体与合作关系对网络图进行构建并引入注意力机制聚合函数,使用嵌入层将节点/边特征向量的嵌入表示进行转换处理,从而捕获原始电力采购系统中的结构属性信息。通过为每一位投标者赋予一个状态向量并对状态转移概率进行计算。采用蒙特卡罗法,通过随机采样的方式对投标中标行为进行模拟。以投标价格差异、中标频率以及投标模式这 3 个指标作为围标串标行为的关键特征,对风险指数进行计算并结合辨识阈值的判断结果,从电力采购交易过程中识别出围标串标行为,对提出的方法进行辨识精度的检验。测试结果表明:所提方法辨识结果的对数损失函数值较低,具备较为明显的辨识精度。

关键词:电力采购;围标串标;行为辨识;招投标;GNN 算法;蒙特卡罗法

中图分类号:TM73 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)03-0301-05

Identification Algorithm of Bidding Behavior in Power Procurement System Based on GNN and Monte Carlo Method

WU Yong, PAN Xiaohua, YANG Yijun, YE Xuefeng, LIU Fuquan

(China Southern Power Grid Digital Platform Technology (Guangdong) Co., Ltd., Shenzhen 518102, China)

Abstract: Influenced by the diversity of bidding methods and the complexity of node relationship in power procurement system, the identification accuracy is usually dissatisfied due to neglecting the consideration of bidding pattern regularity when identifying the behavior of bidding collusion. To solve this problem, an identification algorithm of bidding behavior in power procurement system based on GNN and Monte Carlo method is proposed. The network diagram is constructed by combining the entity and cooperation relationship within the power procurement system, and the attention mechanism aggregation function is introduced. The embedding layer is used to transform the embedded representation of node/edge feature vectors, capturing the structural attribute information in the original power procurement system. A state vector is assigned to each bidder and the state transition probability is calculated. With Monte Carlo method, the bid-winning behavior is simulated through random sampling. Taking the bid price difference, bid winning frequency and bidding mode as the key characteristics of bidding collusion, the risk index is calculated, and combined with the judgment result of identification threshold, the bidding collusion behavior is identified from the power procurement transaction process, and the identification accuracy of the proposed method is tested. The final test results show that the logarithmic loss function value of the identification result is low and the identification accuracy is obviously high.

Keywords: electric power procurement; string bidding; behavior identification; bidding; GNN algorithm; Monte Carlo method

0 引言

电力采购系统中,围标串标行为往往具有隐蔽性、复杂性和动态性等特点,传统的监管手段难以有效应对。通过结合智能算法,对围标串标行为进行辨识,不仅有助于提升电力市场的监管效率和准确性,降低监管成本,还能够促进电力市场的公平竞争,保障能源供应的稳定^[1]。

在围标串标行为辨识领域,已有一些学者和机构进行了初步的探索和研究。例如,文献[2]通过收集历史招标数据,分析投标人在投标过程中的行为特征,如投标价格、投标时间等,利用统计分析和机器学习算法,建立行为模式识别模型,以识别潜在的串通投标行为。然而,该方法在实际应用中存在数据质量参差不齐、投标行为模式复杂多变等问题,导致辨识精度不高。文献[3]

基金项目:南方电网数字平台科技(广东)有限公司信息化建设项目;南方电网数字平台科技(广东)有限公司开发项目(21000320220301022100673)

第一作者简介:吴勇(1983—),男,四川乐至人,高级工程师,本科,研究方向为信息化建设,anthonyqs456@163.com。

结合相关性分析法,对投标数据关键特征进行提取,如投标价格分布、投标人数等,利用机器学习算法进行模型训练。在测试阶段,通过输入新的投标数据,模型能够预测是否存在围标串标行为。但是由于投标数据的复杂性和不确定性,该方法在处理复杂投标数据时,其辨识结果与实际招标行为会存在较大差异。文献[4]通过特征工程提取电力采购数据中的关键特征,利用支持向量机算法对特征进行分类,以识别围标串标行为。但由于电力采购市场的多变性和不确定性以及数据的噪声和异常值,该方法在辨识精度上仍有提升空间,尤其是在处理非线性和复杂关系时。文献[5]通过构建电力采购系统的随机模型,模拟不同的投标策略和围标串标行为,进而评估其影响并识别潜在的围标串标行为。但由于蒙特卡罗模拟的随机性和不确定性以及电力采购系统的复杂性和动态性,该方法在辨识精度上存在一定的波动性,尤其是在处理高维度和大规模数据时。此外,该方法对模型参数和假设条件较为敏感,需要谨慎选择和调整。

本文结合 GNN 和蒙特卡罗法的优势,构建了一种新型的辨识算法框架,充分利用电力采购系统的网络结构和数据特征,有效区分围标串标行为数据与正常交易行为数据,从而提高辨识精度和效率。

1 基于 GNN 和蒙特卡罗法的电力采购系统围标串标行为辨识算法

1.1 基于 GNN 算法的电力采购系统结构信息与属性信息捕获

由于围标串标行为通常隐藏在复杂的系统结构中,因此为了发现异常密集或异常稀疏的连接,对围标串标的潜在信号进行识别,本文使用 GNN 模型对电力采购网络图进行嵌入,从而获取系统的结构信息以及属性信息。

首先将电力采购系统中的投标人、招标人、招标代理机构等实体作为节点,根据他们之间的投标、中标、合作等关系构建边,形成一个电力采购网络图^[6-7]。其中,节点特征包括静态属性,如投标人的历史投标次数、中标次数、注册资本等;边特征表示节点之间的关系强度或类型,如投标金额、中标价格、合作金额等。使用嵌入层将节点和边的特征向量转换为低维空间中的嵌入表示,假设 h_v^k 代表第 k 层节点 v 的嵌入表示, N_v 代表节点

v 的邻居节点聚合,则节点 v 的新嵌入表示可以通过下式进行计算:

$$h_v^{k+1} = \sigma(w_k \cdot F(h_v^k, \forall v \in N_v) + b_k) \quad (1)$$

式中: w_k 为第 k 层的权重激活函数; $F(\cdot)$ 为聚合函数,用于将邻居节点的嵌入表示进行聚合; b_k 为偏置项^[8]。对此,本文采用均值聚合的方式对嵌入表示进行处理,聚合函数表达式如下所示。

$$F(h_v^k, \forall v \in N_v) = \frac{\sum_{v \in N_v} h_v^k}{|N_v|} \quad (2)$$

考虑到电力采购系统中的节点关系较为复杂,因此为提高捕获效果,本文针对上述构建出的均值聚合函数。引入注意力机制,从而定义一种基于注意力机制的复杂聚合函数。该聚合函数首先为每个邻居节点计算一个注意力权重,然后基于这些权重对邻居节点的嵌入进行加权聚合^[9-10]。同时,该聚合函数还考虑节点自身的属性特征和与邻居节点之间的边特征。注意力权重表达式如下:

$$W_{vu} = \frac{1}{\exp(L(\alpha^T (W_{\text{node}}^k h_v^k \| W_{\text{edge}}^k e_{vu} \| a_v)))} \quad (3)$$

式中: α 为可学习的参数向量,用于计算注意力权重; $\|$ 为向量拼接操作; $L(\cdot)$ 为带泄露的修正线性单元激活函数,用于引入非线性; W_{node}^k 和 W_{edge}^k 分别为处理节点嵌入权重矩阵和边特征的权重矩阵; a_v 为节点 v 的属性特征向量; e_{vu} 为节点 v 和邻居节点 u 之间的边特征向量^[11]。

通过上述改进后的聚合函数,采用正常投标行为数据以及已知的围标串标行为来对 GNN 模型进行训练。在 GNN 模型训练过程中,节点的嵌入表示会学习到其邻居节点的信息,从而捕获电力采购系统的结构信息^[12-13]。同时,由于节点的嵌入表示是基于其原始特征(即属性信息)计算的,因此也保留了节点的属性信息。

通过上述步骤即可完成对于电力采购系统结构信息以及属性信息的捕获。通过结合电力采购系统内部的实体与合作关系对网络图进行构建,并引入注意力机制聚合函数,使用嵌入层将节点/边特征向量的嵌入表示进行转换处理,从而捕获原始电力采购系统中的结构属性信息。

1.2 基于蒙特卡罗法的投标中标行为模拟

在完成 GNN 模型构建后,通过电力采购的规则和历史数据,对状态转移概率进行定义,并结合蒙特卡罗法,对电力采购过程中的投标以及中标行为进行模拟。

在电力采购模拟中,本文将状态空间定义为两种,分别为投标者当前的状态,如投标价格、剩余资金等以及电力市场的状态,如当前电价以及市场需求等。假设状态空间为 S , 每个状态代表一个向量 $s \in S$, 包含投标者的所有相关信息^[14]。

通过考虑投标者策略以及市场动态等因素,对状态转移概率进行定义。假设投标者的下一个投标价格只与其当前投标价格和竞争对手的投标价格有关,则转移概率计算公式如下:

$$P(s|s') = P(p'|p, p_{\text{competition}}) \quad (4)$$

式中: p 为投标者当前的投标价格; p' 为投标者下一个可能的投标价格; $p_{\text{competition}}$ 为当前电力采购中竞争对手的投标价格; $P(s|s')$ 为从当前状态 s 转移到下一个状态 s' 的概率^[15]。在完成状态转移概率计算后,本文采用蒙特卡罗方法来生成投标者的投标价格和中标结果,具体实现过程如下。

首先为每个投标者设置初始状态 s_i^0 , 假设模拟轮次为 $t=1, 2, \dots, T$ 。对于每个投标者,根据其当前状态 s_i^{t-1} 和电力市场的上下文信息,使用状态转移函数生成一个候选的下一个状态 s_i^t ^[16]。然后根据状态转移概率 $P(s|s')$, 对所有可能的下一个状态进行随机采样,并选择其中一个投标者 i 作为当前轮次的实际状态 s_i^t 。根据电力采购的规则(如价格最低者中标)和所有投标者的当前状态,判定中标者。模拟结束后,输出所有投标者的投标价格序列、中标结果等。

通过上述步骤即可完成对于电力采购过程中的投标中标行为模拟。

1.3 围标串标行为风险指数计算与辨识

针对上述模拟出来的电力采购过程中的投标中标行为数据,从该数据中提取出与围标串标行为相关的关键特征,计算出投标价格串通指数与中标串通指数等风险指数,从而衡量围标行为的可能性,在此基础上结合风险指数的阈值判定结果,对围标串标行为进行辨识。

考虑到围标串标行为主要与投标者之间的不正当串通手段直接相关,因此本文通过对串通手段带来的结果进行分析,从模拟出的投标中标行为数据中提取出关键特征^[17-18]。首先,围标串标行为可能会导致3种结果,分别是:1) 投标价格异常接近;2) 没有合理的价格差异,部分投标者频繁出现在中标名单中;3) 形成固定的中标联盟以及投标行为呈现规律性,如某些投标者总是在特定时间或条件下投标^[19]。因此基于上述3种结果,

本文以投标价格差异、中标频率以及投标模式这3个指标作为围标串标行为的关键特征,对风险指数进行计算。风险指数 R_{index} 的整体计算公式如下:

$$R_{\text{index}} = \alpha_P \cdot P_{\text{index}} + \beta_W \cdot W_{\text{index}} + \gamma_B \cdot B_{\text{index}} \quad (5)$$

式中: P_{index} 为投标价格串通指数; W_{index} 为中标串通指数; B_{index} 为投标模式串通指数; α_P 、 β_W 、 γ_B 分别为三者的权重系数。3个指数可以分别对投标价格之间的异常相似度、中标频率的异常性以及投标模式的规律性进行衡量。其具体计算公式如下:

$$\begin{cases} P_{\text{index}} = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{\sigma_t}{\mu_t}}{N} \\ W_{\text{index}} = \sum_{i=1}^N \left| \frac{W_i}{T} - \frac{1}{N} \right| \\ B_{\text{index}} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (t_{i,t+1} - t_{i,t})}{N \cdot (T - 1)} \end{cases} \quad (6)$$

式中: N 为投标者数量; T 为模拟轮次; σ_t 为第 t 轮投标中投标价格的标准值; μ_t 为第 t 轮投标中投标价格的平均值; W_i 为投标者 i 的中标次数; $t_{i,t}$ 为投标者 i 在第 t 轮模拟中的投标时间。通过上述步骤,可以从蒙特卡罗法模拟出的投标行为数据中计算出不同行为的围标串标行为风险指数 R_{index} 。为了对行为进行辨识,本文选择对 R_{index} 的值设定一个辨识阈值 φ_{index} , 当计算出某个投标行为的风险指数高于设定的辨识阈值 φ_{index} 时,则可以认为该行为属于围标串标行为^[20]。

通过上述步骤即可完成对于围标串标行为的有效辨识。至此,基于 GNN 和蒙特卡洛法的电力采购系统围标串标行为辨识算法设计完成。

2 实验论证

为了证明本文方法在实际辨识控制效果方面优于常规的电力采购系统围标串标行为辨识算法,在完成算法方面的设计后,通过构建实验对比环节,对本文方法的实际辨识效果进行检验。

2.1 实验说明

为验证本文方法在实际辨识效果方面的优越性,本次实验选取了两组常规的电力采购系统围标串标行为辨识算法作为对比对象,分别为基于相关性分析法的电力采购系统围标串标行为辨识算法以及基于特征工程的电力采购系统围标串标

行为辨识算法。通过构建实验平台,采用 3 种辨识方法对同一组电力采购系统投标中标行为进行辨识,对比不同方法的实际辨识效果。

2.2 实验对象

本次实验所构建的电力采购系统交易数据集采用结构化形式,包含多个表格或文件,每个表格或文件代表不同的数据类别。数据集共包括交易记录、投标记录以及参与者信息。其中,交易记录包含过去 3 年的电力交易数据,共计 1 000 000 条交易记录。投标记录涵盖了与交易记录相对应的投标信息,总计 3 000 000 条投标记录。参与者信息记录了 10 000 个电力市场参与者的详细信息。3 种记录均以数据表的方式进行存储,同时数据集还包括交易规则文件,该文件电力市场的交易规则和流程,如竞价规则、结算方式、违规处罚措施等。电力交易数据集的数据表结构如表 1 所示。

表 1 电力交易数据集数据表结构

数据表类型	列名	数据类型	描述
交易记录表	transaction_id	VARCHAR	交易的唯一标识
	transaction_time	TIMESTAMP	交易的时间戳
	transaction_volume	INT	交易电量/(kW·h)
	buyer_id	VARCHAR	买方 ID
	seller_id	VARCHAR	卖方 ID
投标记录表	bid_id	VARCHAR	投标的唯一标识
	bid_time	TIMESTAMP	投标的时间戳
	bid_price	DECIMAL(10,2)	投标价格/(元/kW·h)
	bidder_id	VARCHAR	投标者 ID
参与者信息表	participant_id	VARCHAR	参与者的唯一标识
	name	VARCHAR	参与者的名称
	registered_capital	DECIMAL(15,2)	注册资本/元
	business_scope	TEXT	业务范围描述
	address	VARCHAR	参与者的地址

上述电力交易数据集中,包括了各种可能的围标行为实例以及正常交易数据。在采用本文方法对围标串标行为进行辨识时,设定蒙特卡洛法的迭代次数为 1 000,采样间隔为 10,步长为 0.01,接受率的目标范围为 0.2~0.5,并设定风险指数辨识阈值 φ_{index} 为 0.75。通过本文方法对 3 个风险指

标进行构建,计算出不同招标投标行为下的综合风险指数,对围标串标行为进行辨识。待实验完成后,对不同方法下的实际辨识结果进行记录。

2.3 围标串标行为辨识结果对比

本文方法所得到的围标串标行为辨识结果如表 2 所示。

表 2 本文方法下的围标串标行为辨识结果

样本 ID	投标次数	投标价格/(元/kW·h)	投标频率/(次/天)	围标串标行为风险指数	辨识结果
1	12	500.00	1.5	0.23	非围标串标
2	25	480.00	3.0	0.82	围标串标
3	8	520.00	0.5	0.35	非围标串标
4	15	495.00	2.0	0.91	围标串标
5	6	510.00	0.8	0.18	非围标串标
6	30	470.00	4.5	0.78	围标串标
7	10	530.00	1.2	0.29	非围标串标
8	20	485.00	2.5	0.89	围标串标

通过上述实验结果可以看出,本文提出的方法能够针对电力交易数据集总的围标串标行为进行有效辨识,并结合风险指数对样本进行准确分类。为对不同算法的实际辨识精度进行衡量,本次实验以不同围标串标行为辨识结果的对数损失(Log loss)值作为对比指标,该值反映了电力交易样本数据分类结果与真实分布情况之间的差异,因此该值越低,所代表辨识结果的精度越高。具体实验对比结果如图 1 所示。

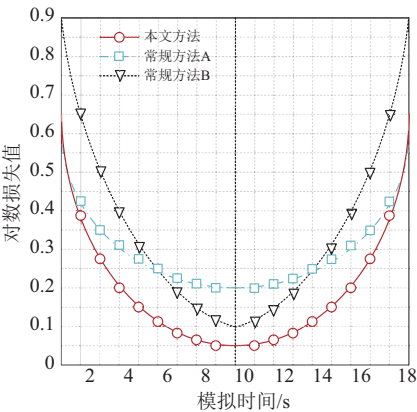


图 1 不同辨识结果的对数损失函数对比结果

通过图 1 可以看出,本文方法在实际辨识精度方面明显优于两种常规的辨识方法,本文方法

能够有效将电力交易样本数据进行分类,从而能够有效区分围标串标行为和非围标串标行为。

3 结语

本文算法能够精准地辨识出电力采购系统中的围标串标行为,可以有效遏制这些不正当行为的发生,维护市场的公平性和透明度。这不仅有利于保护消费者的权益,也有利于促进电力市场的健康发展,可为电力监管机构提供有力的技术支持,提高监管的效率和准确性。

参考文献:

- [1] 汪黎. 基于聚类分析的串标审计模型建设研究[J]. 江汉石油职工大学学报,2021,34(4):93-95.
- [2] 周天维. 军工行业串通投标行为分析及识别[J]. 中国招标,2024(5):163-167.
- [3] WALLIMANN H, IMHOF D, HUBER M. A machine learning approach for flagging incomplete bid-rigging cartels[J]. Computational Economics, 2023, 62(4): 1669-1720.
- [4] 吴小军. 水利工程不平衡报价的识别与控制研究[J]. 水利技术监督,2023,31(11):93-95,127.
- [5] 赵宇思,王健. 工程建设项目货物招投标围串标识别模型研究[J]. 招标采购管理,2023(8):47-50.
- [6] 龙泉. 基于扎根理论的电力工程不平衡报价影响因素识别[J]. 自动化应用,2023(20):203-205.
- [7] 宋永春,李志,曹雨,等. 基于 CNM-BA 的投标异常行为的离散化信息识别技术[J]. 粘接,2024,51(10):137-139,148.
- [8] 沈丽艳. 建筑工程项目招投标阶段风险因素及防控措施[J]. 现代企业,2023(8):73-75.
- [9] 唐晓丹,栾茵琪,赵新益,等. 投标文件相似性检测模型研究[J]. 工程管理学报,2024,38(5):105-110.
- [10] 刘伟轩. 基于 JAVA 的防围标串标技术及应用[J]. 信息技术与信息化,2023(3):85-88.
- [11] 孙佳莹. 大数据技术在围标串标识别中的理论分析与应用研究[J]. 招标采购管理,2025(2):27-29.
- [12] 陈梦莹. 基于合作博弈论的串标投标行为预防策略研究[J]. 建筑监督检测与造价,2023,16(1):49-52.
- [13] 秦怀柔. 高校建筑工程招投标风险识别和控制[J]. 投资与创业,2022,33(20):165-169.
- [14] 任杰. 基于文本分析的标书综合评估模型[J]. 计算机系统应用,2022,31(6):149-157.
- [15] 丁洁. 探究水利工程招投标中不平衡报价的识别与控制[J]. 建材发展导向,2022,20(8):85-87.
- [16] 华玉雯. 大数据下围标串标现象识别研究[D]. 济南:山东建筑大学,2023.
- [17] 李山,王丛虎. 基于大数据的围标串标识别及预防措施[J]. 中国招标,2022(4):39-41.
- [18] 裴朵朵. 基于机器学习的围标串标识别及预防措施[D]. 大连:大连交通大学,2024.
- [19] 韦波,刘康军,陈祎亮,等. 电力物资结构化招标采购下的异常报价风险识别策略[J]. 中小企业管理与科技,2024(8):68-71.
- [20] 杨百兴,刘宁,李琳,等. 非招标采购中串标行为智能预警的研究与应用[J]. 中国物流与采购,2021(16):47-48.

收稿日期:2024-07-01