

基于云模型与模糊 Petri 网的电力市场潜在危害行为识别

刘敦楠¹, 张 潜¹, 李霄彤¹, 顾宇桂², 谭忠富¹

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 102206; 2. 北京电力交易中心有限公司, 北京市 100031)

摘要: 针对电力市场中存在潜在危害性交易行为难以被识别、管控的问题, 提出基于云模型与模糊 Petri 网的电力市场潜在危害行为识别方法, 在交易过程中对潜在危害行为进行实时预警。将云模型与模糊 Petri 网应用于模式识别中, 有效解决了潜在危害行为难以量化识别的问题, 也克服了一般识别方法不易理解的缺陷。首先, 设计潜在危害行为识别的一般框架与步骤; 其次, 阐述通过逆向云发生器与根据专家描述的两种特征云的构建方法; 同时, 设计潜在危害行为识别的模糊 Petri 网网络结构与识别算法; 最后, 以江西省月度竞价交易市场为背景, 采用真实交易数据进行算例分析。算例分析结果表明: 所设计的方法给出的结果与专家分析得出的结果以及实际的数据高度一致, 验证了方法的有效性。

关键词: 电力市场; 市场监管; 潜在危害行为; 模式识别; 云模型; 模糊 Petri 网

0 引言

2015年, 中国开始了新一轮电力体制改革, 要实现市场在资源配置中起决定性作用^[1]。目前, 中国电力市场化改革不断深入, 正在逐步形成多交易品种、多交易方式、多交易主体的电力市场格局^[2]。新形势下, 市场监管作为保障电力市场公平与效率的重要手段, 也应随着电力市场化改革的进一步深化做出适应性的调整和优化, 以应对新的市场环境下可能存在的各种风险与危害。

目前, 中国电力市场交易规则尚不完善、市场制度尚不健全, 加之市场主体对电力市场规则的理解尚不深入、诚信交易与合规意识尚未形成, 致使在电力交易过程中发生的违规行为与潜在危害行为较多。市场违规行为尚可以通过市场规则进行判断, 并及时得到处理。而不利于市场公平、高效运行的潜在危害行为由于难以被识别、管控, 给电力市场的稳定发展埋下了隐患。因此, 建立一套电力市场潜在危害行为的识别方法, 识别交易过程中可能存在的潜在危害行为, 可以维护市场的公平与效率, 减少市场的损失, 具有积极的研究和实际意义。

目前, 针对电力市场监管的研究主要集中于指

标监管法, 即通过构建指标体系, 进行综合评价并对其结果进行分析从而得出相关结论和建议^[3-5]。文献[3]从市场供需、市场结构、竞标策略、供应者地位及交易结果等五个方面系统地设计了市场监管指标, 构建了电力市场评价体系。文献[4]提出了面向市场参与者的自律监管指标体系, 通过综合评价得到影响市场的关键信息, 从而约束和调整市场交易行为。文献[5]基于 SCP (即 structure-conduct-performance) 和模糊算法, 建立面向整个市场和发电商的市场力评估指标体系, 对发电商的市场力进行预警。但是指标监管法依赖于人工对综合评价结果的分析, 在当前数量庞大的市场主体前, 其可操作性有待考量。而模式识别方法在对表征事物各种形式的信息进行处理和分析的基础上, 能够对事物进行系统化的描述、辨认、分类和解释, 在复杂环境中较好的可操作性, 被广泛地运用在各种领域。文献[6]将模式识别应用在金融可疑交易行为识别中, 在进行数据获取以及风险行为特征表达的基础上, 对交易行为进行分类决策, 构建了金融行业可疑行为模式识别体系。文献[7]将模式识别应用于电动汽车故障识别领域, 提出采用基于代数法与希尔伯特-黄变换法相结合的方法来实现车用工况下永磁体退磁故障诊断及故障模式识别。文献[8]分析了在有功功率量测过程中所出现的异常情况, 归纳和总结出典型错误数据的特征, 提出一种基于模式识别的广域测量系统(WAMS)错误数据快速辨识和恢复方法。

收稿日期: 2018-04-05; 修回日期: 2018-05-24。

上网日期: 2018-09-17。

国家电网公司总部科技项目“我国电力市场运营成效动态评估监测体系及信用评价体系研究”。

目前,将模式识别方法应用于电力市场监管的文献较少。本文在前人研究的基础上,将云模型与模糊 Petri 网(fuzzy Petri net, FPN)应用于模式识别的特征表达与推理过程中,将云模型所反映的不确定性、模糊性以及模糊 Petri 网所反映的推理逻辑特性相结合,提出一种电力市场潜在危害行为识别方法。本文阐述电力市场潜在危害行为识别框架与操作流程,设计特征云以及模糊 Petri 网网络的构建方法,并采用真实数据进行算例分析,对模型进行验证。

1 潜在危害行为识别框架

1.1 基础概念

电力市场中,市场主体的交易行为对交易结果有着直接影响,因此分析和评价市场主体的交易行为是电力市场监管和分析的关键任务。电力交易过程中存在着一些不直接违背市场规则但具有一定危害性的行为,如投机、联盟、利用市场力暴力定价等,这些行为不利于市场的有效竞争,弱化了市场在优化资源配置中的作用,妨碍了市场公平与效率^[9]。本文将这类具有危害性又因不直接违背市场规则而难以被识别管控的行为称作潜在危害行为。

1.2 识别框架

基于模式识别的一般步骤,结合云模型与模糊 Petri 网理论,设计了一种潜在危害行为的识别方法,具体框架如图 1 所示。

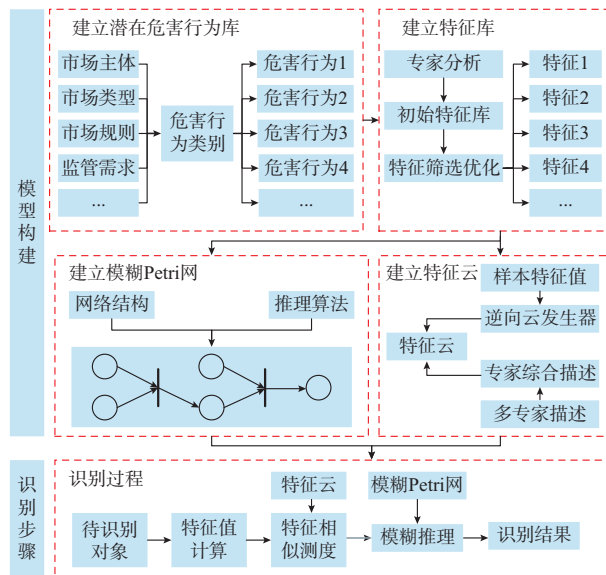


图 1 潜在危害行为识别框架

Fig.1 Frame of identifying potential harmful behaviors

如图 1 所示,潜在危害行为的识别步骤如下。

1) 潜在危害行为库的建立

进行潜在危害行为识别的第一步,就是确定需要识别的潜在危害行为的类别,即建立潜在危害行为库。在不同交易品种、不同交易方式、不同交易规则的电力市场中,不同类别的市场主体可能采取的潜在危害行为的种类与表现均有所不同。因此,不能建立一套通用的潜在危害行为库,而必须对具体问题进行具体分析,在确定的条件下结合监管需求确定市场中存在的潜在危害行为,建立相应的危害行为库,以保证模型的实用性与可行性。

2) 特征库的建立

任何识别过程都必须确定识别特征,特征的选取将会影响分类器的设计及性能。但特征的选取尚无通用的理论指导,只能通过分析具体识别对象决定选取何种特征^[10]。本文结合专家意见对潜在危害行为进行分析,初步提取相应特征,并进行筛选和优化,形成特征库。

3) 特征云的确定

云模型是一种将定性语言概念转化为不确定定量数值的模型,在自然社会科学和生产活动中具有良好的普适性和独特的数学性质^[11]。而潜在危害行为的特征可以看成是一个定性概念,因此可以构建特征云来表达特征库中的各种特征。

4) 模糊 Petri 网的构建

Petri 网作为一种人工智能技术,能够运用图形化的方式将复杂的逻辑形象化并运用解析式表达逻辑推理过程,而潜在危害行为的识别过程正是一个动态逻辑推理过程。根据所建立的潜在危害行为库与其相应的特征,确定网络结构、设计相应的推理算法,建立潜在危害行为识别模糊 Petri 网。

5) 操作流程

潜在危害行为识别的具体操作流程如下:计算待识别对象的特征值;将特征值带入特征云,计算特征相似测度;将特征相似测度作为模糊 Petri 网输入库所的初始状态,根据推理算法进行推理;计算库所的最终状态,得出推理结果,确定待识别对象的分类与置信度。

上述步骤中,由于潜在危害行为库的建立与特征库的建立都需要对具体对象进行具体分析,因此下文不对这两步进行阐述,只阐述特征云与模糊 Petri 网的构建方法。

2 特征云的构建

这里介绍两种特征云的构建方法:一种是通过逆向云发生器生成特征云;另一种是通过专家描述生成特征云。基于逆向云发生器计算产生的特征云

较为客观,但需先验样本的支持,对样本数量与质量的要求较高。此外,由于样本来源于历史数据,当环境发生突变时如规则突然改变,其所产生的特征云将不具有有效性。根据专家描述生成的特征云主观性较强,但数据需求较少,并能综合把握市场信息。

2.1 通过逆向云发生器的云生成

正态云模型可表示为由 3 个数字特征构成的元组 (E_x, E_n, H_e) 。其中: E_x 是云模型的期望,是隶属度为 1 的点; E_n 是云模型的熵; H_e 是云模型的超熵。

设有 n 个样本已确定为属于某一潜在危害行为,这 n 个样本在此潜在危害行为某一特征的特征值序列为 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ (其中 x_i 表示第 i 个样本的特征值),则该特征云的算法如下:

$$E_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

$$E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - E_x| \quad (2)$$

$$H_e = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - E_x)^2 - E_n^2} \quad (3)$$

2.2 通过专家描述的云生成

对某一潜在危害行为的某一特征由多位专家分别给出一个对应的特征云,第 i 位专家给出的特征云为 (E_{xi}, E_{ni}, H_{ei}) 。

综合 h 位专家得出的特征云 (E_x, E_n, H_e) , 其中:

$$E_x = \frac{\sum_{i=1}^h E_{xi} E_{ni}}{\sum_{i=1}^h E_{ni}} \quad (4)$$

$$E_n = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h E_{ni} \quad (5)$$

$$H_e = \frac{E_n}{\epsilon} \quad (6)$$

式中: ϵ 为正整数,根据指标的实际情况与不确定性进行设置,不确定性越小, ϵ 越大。

2.3 相似测度的计算

将待识别对象的特征值代入特征云即可计算待识别对象对该特征的隶属度即相似测度。但考虑到正态云模型的隶属度计算公式在一些情况下并不合理,因此结合文献[12-13]对正态云隶属度计算公式进行一些改变以适应不同的情况。

1) 上限型云模型:

$$u_{ij}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq E_x \\ e^{-\frac{(x-E_x)^2}{2(E_n')^2}} & x < E_x \end{cases} \quad (7)$$

式中: u_{ij} 为第 i 个特征、第 j 个云滴的隶属度; x 为待识别对象该特征的特征值; E_n' 为以 E_n 为均值、 H_e 为标准差产生的随机数。

2) 正态型云模型:

$$u_{ij}(x) = e^{-\frac{(x-E_x)^2}{2(E_n')^2}} \quad (8)$$

3) 下限型云模型:

$$u_{ij}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq E_x \\ e^{-\frac{(x-E_x)^2}{2(E_n')^2}} & x > E_x \end{cases} \quad (9)$$

4) 适度型云模型:

$$u_{ij}(x) = \begin{cases} 1 & c_{\min} \leq x \leq c_{\max} \\ e^{-\frac{(x-c_{\max})^2}{2(E_n')^2}} & x > c_{\max} \\ e^{-\frac{(x-c_{\min})^2}{2(E_n')^2}} & x < c_{\min} \end{cases} \quad (10)$$

式中: c_{\max} 与 c_{\min} 分别表示可以判定隶属度为 1 的特征值的边界值。

由于云模型存在随机性,每一次计算结果均有差异,本文称一次计算结果为一个云滴,所有计算结果构成一个云团。

综合所有计算结果,计算隶属度的期望值为:

$$\bar{u}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m u_{ij} \quad (11)$$

式中: \bar{u}_i 为第 i 个特征隶属度的期望值; m 为云滴总数。

3 模糊 Petri 网网络结构及算法的确定

3.1 模糊 Petri 网定义

模糊 Petri 网可以定义为一个九元组^[14]:

$$S_{FPN} = \{P, T, I, O, \alpha, T_h, W, \theta^0, U\} \quad (12)$$

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 表示库所节点的有限集合。

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, 表示变迁节点的有限集合。

I 为输入矩阵, $I = (\delta_{ij})$, δ_{ij} 为逻辑量,当 p_i 是 t_j 的输入时(存在 p_i 到 t_j 的有向弧), δ_{ij} 为对应有向弧的权值,当 p_i 不是 t_j 的输入时(不存在 p_i 到 t_j 的有向弧), δ_{ij} 为 0, 其中, $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$ 。

O 为输出矩阵, $O = (\gamma_{ij})$, γ_{ij} 为逻辑量,当 p_i 是 t_j 的输出时(存在 p_i 到 t_j 的有向弧), γ_{ij} 为对应有向弧的权值,当 p_i 不是 t_j 的输出时(不存在 t_j 到 p_i 的有向弧), γ_{ij} 为 0, 其中 $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$ 。

$\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]^T$, 表示库所对应命题的可信度向量, α_i 为库所 p_i 对应的可信度, 本文取为 1。

$T_h = [T_{h1}, T_{h2}, \dots, T_{hm}]^T$, 是变迁对应的阈值向量, T_{hj} 是变迁 t_j 对应的阈值。

$W = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]$ 为有向弧的权值向量, 反映条件与结果间的支持程度。

θ^0 表示初始状态, $\theta^0 = [\theta_{p_1}^0, \theta_{p_2}^0, \dots, \theta_{p_n}^0]^T$, $\theta_{p_i}^0$ 为命题 p_i 的初始逻辑状态, $\theta_{p_i}^0 \in [0, 1]$, 表示命题 p_i 的可信度, $i = 1, 2, \dots, n$, 在本文推理计算中, 输入库所的初始状态值是由云模型计算得出的特征期望值, 输出库所初始状态值为 0。

U 为规则置信度矩阵, $U = \text{diag}(u_1, u_2, \dots, u_m)$, u_j 表示规则 t_j 的可信度, $u_j \in [0, 1]$, $j = 1, 2, \dots, m$ 。规则置信度的设置取决于选取特征的有效性, 有效性越高, 规则的置信度设置得越大。

3.2 模糊 Petri 网的网络结构及推理算法

本文所构建的模糊 Petri 网采用的是多库所单输入的 Petri 网络结构, 每个变迁可存在多个输入库所, 但只拥有一个输出库所。

根据所确定的模糊 Petri 网网络结构, 以最小错分率为准则, 设计模糊推理算法。模糊 Petri 网的推理是以矩阵运算为基础的, 首先介绍推理过程中需要用到的几个算子。

算子 \oplus : $A \oplus B = C$, A, B, C 为 $m \times n$ 矩阵, $c_{ij} = \max(a_{ij}, b_{ij})$ 。

算子 \otimes : $A \otimes D = E$, D 和 E 分别为 $n \times q$ 和 $m \times q$ 矩阵, $e_{ij} = \max_{1 \leq k \leq n} (a_{ik} d_{kj})$ 。

算子 \odot : $A \odot B = C$, $c_{ij} = a_{ij} b_{ij}$ 。

算子 \odot : $A \odot B = C$, $c_{ij} = \begin{cases} 1 & a_{ij} \geq b_{ij} \\ 0 & a_{ij} < b_{ij} \end{cases}$ 。

neg: $\text{neg } \beta = \mathbf{1}_n - \beta = \bar{\beta}$, β 和 $\bar{\beta}$ 均为 n 维向量, $\mathbf{1}_n$ 为元素全为 1 的 n 维向量。

综上, 第 $k+1$ 次推理过程如下。

1) 转化库所状态的表达:

$$\text{neg } \theta^k = \mathbf{1}_n - \theta^k = \bar{\theta}^k \quad (13)$$

式中: $\bar{\theta}^k$ 表示库所为假的可信度。

2) 变迁合成输入可信度的计算:

$$F^{k+1} = \text{neg}(I^T \otimes \bar{\theta}^k) = \overline{I^T \otimes \bar{\theta}^k} \quad (14)$$

式中: F^{k+1} 为 m 维列向量, 表示规则为真的可信度。

3) 比较合成输入可信度与变迁阈值:

$$G^{k+1} = F^{k+1} \odot T_h \quad (15)$$

式中: G^{k+1} 为 m 维列向量, 属于中间变量。

4) 输出可信度的计算:

$$H^{k+1} = F^{k+1} \odot G^{k+1} \quad (16)$$

5) 库所新状态的生成:

$$\theta^{k+1} = \theta^k \oplus [(OU) \otimes H^{k+1}] \quad (17)$$

当 $\theta^{k+1} = \theta^k$ 时, 推理结束。

综上, 模糊推理过程可以总结为以下步骤: ①输入输入矩阵、初始状态, 令推理次数 $k = 0$; ②根据计算公式计算合成输入可信度、中间变量与输出可信度; ③计算库所的新状态 θ^{k+1} ; ④比较新状态 θ^{k+1} 与旧状态 θ^k , 若相等则推理结束, 若不相等, 令 $k = k + 1$ 并返回步骤 ②。

4 算例分析

江西省于 2016 年先行在南昌、上饶、赣州、宜春、九江等区域开展售电侧改革试点。截至目前, 江西电力交易中心公示的 81 家售电公司中已有 30 多家售电公司通过公示进入市场参与集中竞价并达成电量交易。本文以江西省电力直接交易中的月度集中竞价交易为背景, 结合具体交易数据, 分析识别售电公司在交易过程中的潜在危害行为。

4.1 潜在危害行为梳理与描述

基于江西省月度集中竞价交易规则与实际情况, 本文梳理售电企业存在的潜在危害行为主要有以下几种。

1) “搭便车”

“搭便车”由美国经济学家曼柯·奥尔逊提出, 指经济主体(包括厂商或个人)的经济活动对他人和社会造成的非市场化的影响。在采用边际统一出清的集中竞价交易中, 部分售电公司积极参与市场, 采用合理的报价策略, 以获得有利的市场出清价格。这一过程中, 这些售电公司是需要付出成本和承担风险的。而采用“搭便车”策略的售电公司, 通过用高比例电量报高价(甚至是超过与用户约定的价格), 在几乎不付出成本、不承担风险的情况下便能以相同的价格出清。从短期上看, “搭便车”行为虽不改变市场的出清价格, 但其弱化了市场的竞争属性, 损害市场效率与效益; 从长期上看, “搭便车”的意识会在集体中扩散, 市场效率与效益的受损会更加严重。江西省集中竞价交易采用三段式报价、出清方式为边际出清, 售电企业“搭便车”成为可能。

2) “钓鱼”行为

“钓鱼”行为是售电公司广泛采用的一种报价策略, 表现为高比例电量报高价, 且用小部分电量报较低的价格, 以达到确保自身较高成交率以及较低的市场出清价格的目的。“钓鱼”行为的危害与“搭便车”行为相似, 也会妨害市场竞争。事实上, 在广东省月度集中竞价交易中, 大部分售电公司均采取了这种报价策略, 售电公司整体的报价曲线呈现出鱼竿的形状, 申报价格波动较小, 市场缺乏有效竞争。

3) 串谋

市场经济的有效性依赖于竞争机制,而串谋行为正是弱化市场竞争,阻碍市场良好发展的严重危害行为。在电力市场中,串谋是指在单一市场主体不具备实现价格操控能力时,为了避免竞争,企业间以提高利益为目的构建联合体实现对市场成交价格的控制的市场行为。一般来说,两家企业串谋最主要的表现就是各段申报价格相似,同时为保证串谋联盟内部的利益分配均衡,串谋企业各段申报电量占比也会相似。但随着市场主体对规则的熟悉程度不断提升,串谋的表现形式也会越来越复杂,对串谋行为的识别也会越来越困难。

4) 暴利定价

暴利定价,是指市场主体使用市场力压低市场出清价格,从而获得超额利润的行为,这种行为严重妨碍了市场效率。例如湖南省月度集中竞价交易中就出现了发电企业利用市场力以零价差成交的状况,完全违背了通过市场化交易释放电改红利的市场设计初衷。

江西省月度集中竞价交易进行两次交易,第二次交易时,交易双方会根据第一次交易的结果与报价情况重新制定策略,在中国电力行业供远大于求的现状下,即使采取暴利定价策略的售电公司在第一次交易中不成交,在第二次交易中,发电企业可能会为争取这部分电量而被迫压低报价,以保证自身的发电小时数。

4.2 特征描述

以在交易过程中实现对潜在危害行为的实时预警为目的,结合数据获取的可能性,本文从市场主体的申报信息与宏观信息中,提取、筛选特征,建立特征集,如表 1 所示。

表 1 潜在危害行为特征集
Table 1 Feature set of potential harmful behaviors

危害行为	特征表现	特征集
“搭便车”	供给大于需求	供需比(高)
	高比例电量报高价	平均报价(极高)
“钓鱼”	高比例电量报高价	平均报价(极高)
	低比例电量报低价	第三段报价(低)
串谋	申报价格序列相似	第三段报价电量(低)
	申报量占比序列相似	申报信息相似度(高)
暴利定价	高比例电量报低价	平均报价(极低)
	市场力大	市场份额(高)

部分特征的特征值计算公式如下。

1) 供需比

供需比是市场参与者总供给量与总需求量的比值,计算公式为:

$$B_s = \frac{Q_s}{Q_D} \times 100\% \quad (18)$$

式中: B_s 为供需比; Q_s 为申报总供给; Q_D 为申报总需求。

2) 平均报价价格

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^3 V_i Q_i}{\sum_{i=1}^3 Q_i} \quad (19)$$

式中: \bar{V} 为平均报价; V_i 为第 i 段报价; Q_i 为第 i 段申报量。

3) 申报信息相似度

不论市场主体采取何种策略来应对市场监管,但两家企业实施串谋一定会使得两家企业的申报曲线高度重合。因此,申报信息相似度以两家售电公司报价曲线间的面积进行衡量,面积越小,申报曲线重合度越高,串谋的可能性越大,具体公式如下:

$$\rho = \int_0^1 |V(\lambda) - V'(\lambda)| d\lambda \quad (20)$$

式中: $V(\lambda)$ 和 $V'(\lambda)$ 分别为两家售电公司的申报价、申报量占比曲线的函数表达式; λ 为申报量占比; ρ 为申报信息相似度。

4) 市场份额

$$S_i = \frac{q_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (21)$$

式中: q_i 为第 i 个售电公司的申报量。

4.3 特征云的构建

由于缺乏先验样本,本文由多专家综合考虑江西省月度集中竞价交易市场的供需形式、火电上网电价、火电度电成本以及历史交易价格水平等信息,确定特征云,结果如下。

供需比(高)的特征云为(1.2,0.03,0.01),隶属度计算公式类型采用上限型;平均报价(极高)的特征云为(405,1.667,0.280),隶属度计算公式类型采用上限型;平均报价(低)的特征云为(397.3,0.35,0.02),隶属度计算公式类型采用下限型;第三段报价(低)的特征云为(397.1,0.35,0.110),隶属度计算公式类型采用下限型;第三段申报电量(低)的特征云为(5 000,330,100),隶属度计算公式类型采用正态型;市场份额(高)的特征云为(0.16,0.03,0.002),隶属度计算公式类型采用上限型;申报信息相似度(高)的特征云为(0.02,0.17,0.01),隶属度计算公式类型采用下限型。

4.4 相似测度测算

江西省售电公司 2017 年的某次月度集中竞价交易数据见附录 A 表 A1。

根据交易数据,计算得出 25 家售电公司的特征值,并抽取前十名家售电公司进行串谋识别,计算结果见附录 A 表 A2 和表 A3。

4.5 模糊 Petri 网模型

采用多库所单输入的 Petri 网络结构,根据所建立的潜在危害行为库、相应的特征分析与描述,构建模糊 Petri 网模型,如图 2 所示。

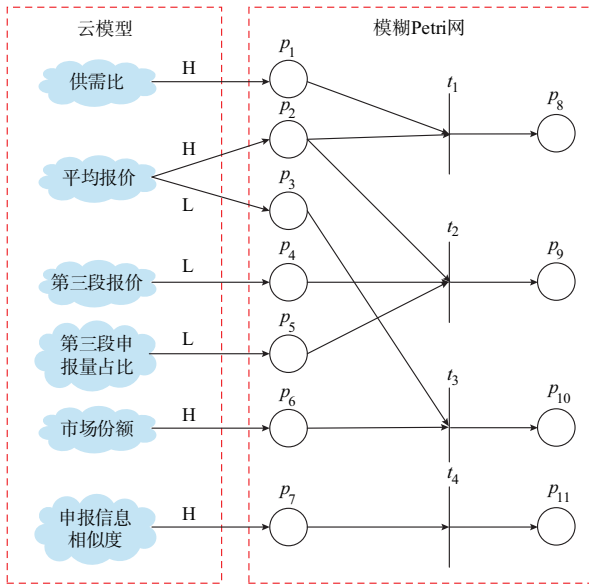


图 2 潜在危害行为识别模糊 Petri 网模型
Fig.2 Fuzzy Petri net model for identification of potential harmful behaviors

图 2 左半部分代表特征云,其中,“H”代表模糊语言“高”,“L”代表模糊语言“低”,由特征云计算得出的特征相似测度作为模糊 Petri 网的输入。

图 2 右半部分为潜在危害行为识别模糊 Petri 网。其中, p_1 至 p_7 定义为初始库所,其初始状态值来源于云模型模块;库所 p_8 至 p_{11} 定义为终止库所,分别代表“搭便车”、“钓鱼”、暴利定价、串谋四种潜在危害行为,初始状态值为 0,最终状态值代表推理的结果; t_1 至 t_4 代表变迁,即推理规则。

4.6 模糊推理过程

1) 参数设置

有向弧权值全设为 1 表示各输入库所对变迁合成输入可信度的影响相同;变迁阈值设为 0.6;规则置信度的设置与潜在危害行为的特征提取的有效性有关,当所提取的特征是判定潜在危害行为的充要条件时,规则置信度为 1,否则应当小于 1。这里

设为:

$$U = \begin{bmatrix} 0.95 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.95 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.95 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.95 \end{bmatrix}$$

2) 推理过程

初始状态见附录 B。输入矩阵 I 为:

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

输出矩阵 O 为:

$$O = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$$

3) 推理结果

根据推理算法,进行迭代计算,得到库所的最终状态(见附录 B 表 B1 和表 B2),由终止库所的状态值可以得出以下结果。

①6 号、8 号、17 号、21 号和 23 号售电公司在此次集中竞价交易中采取“搭便车”行为的置信度分别为 0.69,0.95,0.95,0.83,0.95。从图 3 中可以看出,这五家售电企业的报价分布均处于售电企业申报曲线的左端,报价水平明显高于其他售电公司,接近火电标杆电价 414 元/(MW·h)。此外,一般来说,在同样的市场规则下,供需比越高,市场出清价越低^[15]。而此次交易中,市场供需比较大,而 6 号、8 号、17 号、21 号和 23 号售电公司仍然采用报高价策略,这显然是不太合理的。这说明这 5 家售电公司有采取“搭便车”策略以获得优先成交的嫌疑。这与本文用模型计算得出的结果相一致。

②没有售电公司在此次交易中采取明显的“钓鱼”行为。从申报信息上看,部分售电公司有采取“钓鱼”的策略,如图 3 中的 17 号、23 号售电公司,但由于第三段报价不够低而没有成效,实施“钓鱼”行为的置信度未达到系统设置的阈值。

③没有售电公司在此次交易中采取暴利定价行为。专家分析指出虽然 15 号售电公司的平均报价低,且第三段申报价为超低价 360 元/(MW·h)(低于年度双边交易的平均价),但是其本身的市场份额只有 4.7%,在 25 家售电公司中排第九,即 15 号售电公司不具备较大的市场力,而且从事后的最终成交情况上看,其最终成交率较低,因此可以认为该售

电公司属于报价策略失误。这一判断与本文模型给出的暴利定价置信度(0)一致。

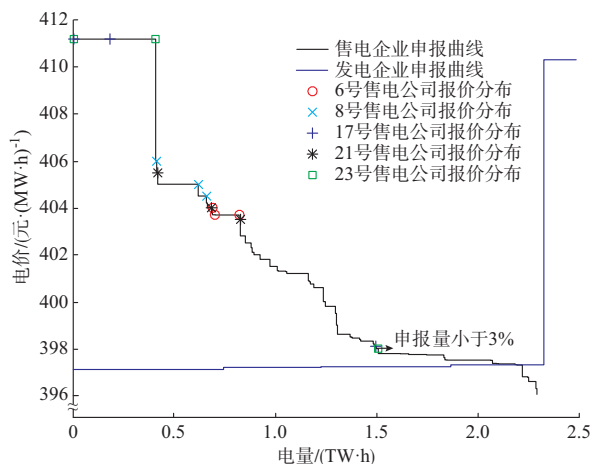


图3 交易申报曲线

Fig.3 Transaction declaration curves

④前十家售电公司中,1号和10号售电公司,2号,3号和5号售电公司的申报信息具有较强的相似性。其中1号和10号售电公司串谋的可能性高达0.95(系统能给出的最大值),2号、3号和5号这3家售电公司串谋的可能性超过0.8。

由图4可以看出,1号和10号售电公司的申报曲线几乎完全重合。从申报价格上看,两家售电公司三段报价完全一致;从各段申报占比上看,两家售电公司申报量占比有细微差别,但这是由于江西省月度交易规则规定,售电公司每段申报量不得少于5000 MW·h,加上这两家售电公司的申报总量有所差异造成的。实际上,两家售电公司的容量策略完全一致:第一、三段申报最低申报量;第二段申报剩余的需求量。综上,1号和10号售电公司串谋的可能性极大,与本文模型给出的串谋置信度(0.95)一致。

由图4可以看出,2号、3号和5号售电公司的申报曲线尤其是第二段曲线一致度较高。申报价格上:3家公司报价较为接近,尤其是第二、三段报价几乎一致;第一段申报价格差异虽然较大,但实际上,第一段报价属于高报价,报价差异大并不会影响第一段申报量的成交,即不会造成串谋售电公司之间的利益分配不均。从申报量上看,3家公司采取的电量申报策略一致:第一、三段申报规则规定的最低量;第二段申报剩余的需求量。综上,2号、3号和5号售电公司存在较高的串谋可能性,这与本文给出的串谋置信度(0.85左右)一致。

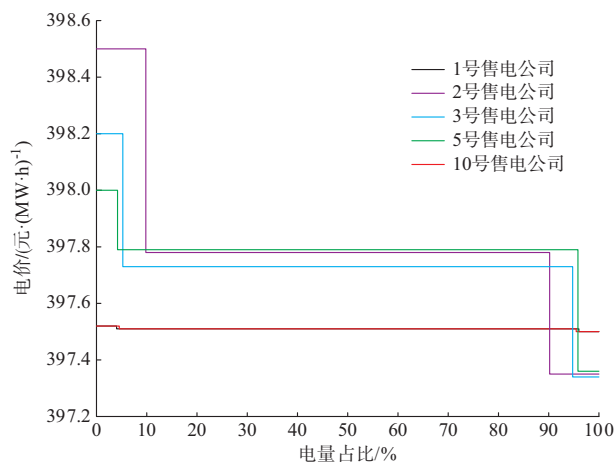


图4 疑似串谋的售电公司申报曲线对比

Fig.4 Comparison of declaration curves of power sale companies with suspected conspiracy

值得注意的是,本文所提方法计算的是市场主体实施潜在危害行为的概率,仅能说明某一市场主体是否有实施某潜在危害行为的嫌疑,目的是对潜在危害行为进行预警。而准确判定上述售电公司是否实施了潜在危害行为必须经过人工的调查取证。

4.7 相关建议

根据计算结果,并进一步调查取证证实后,电力交易中心或其他监管部门应当采取相关措施,保障市场的公平与效率。对于“搭便车”,“钓鱼”等行为,其实是市场主体对市场规则漏洞的一种利用,其危害程度较小。建议电力交易中心应当完善信息披露机制^[16],调整市场规则予以控制,如采取高低匹配的出清规则^[17]。对于暴利定价这类危害程度较高的行为,一方面要完善交易规则,如规定“单家售电公司申报电量不超过总电量的15%^[18]”;另一方面建立守信激励和失信惩戒的奖惩机制,扣减这类主体的信用评分^[19]。对于“交易串谋”这类危害程度极高的行为,在经过调查取证证实之后,应当立即停止其交易并采取严厉的惩罚措施,如拉入“黑名单”、强制退出市场^[20]等。

5 结语

本文设计了基于云模型与模糊 Petri 网的电力市场潜在危害行为识别方法,得到如下结论。

1)电力市场交易过程中,不同市场主体的潜在危害行为在不同的交易品种、不同交易方式、不同交易规则中的表现与种类均不相同。

2)云模型能够用于电力市场潜在危害行为的特征刻画,通过构建特征云将特征的定性概念转化为具体的量化值,为潜在危害行为识别模糊 Petri 网

的计算提供了基础。

3) 本文构建的潜在危害行为识别方法计算得出的江西省 25 家售电公司实施危害行为的结果与专家分析得出的结果以及实际的数据表现高度一致, 验证了所提方法的有效性。

本文在有向弧权值、规则置信度等参数的取值上采用人工设定, 使得算法可能会受到一定主观性的影响。此外, 市场主体通过博弈会产生大量不可预见的行为, 本文所构建的潜在危害行为与相应的特征库仍需不断更新。模型的适应性与客观性仍存在进一步完善的空间, 有待进一步的研究。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 中共中央 国务院. 关于进一步深化电力体制改革的若干意见(中发[2015]9号)[EB/OL]. [2018-05-15]. http://www.gov.cn/xinwen/2015-03/25/content_2838328.htm.
Opinions of the CPC Central Committee and the State Council on further deepening the reform of electric power system ([2015] No. 9) [EB/OL]. [2018-05-15]. http://www.gov.cn/xinwen/2015-03/25/content_2838328.htm.
- [2] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 电力中长期交易规则(试行)[EB/OL]. [2018-05-15]. http://yxj.ndrc.gov.cn/zttf/jdjcbgz/zccs/201705/t20170526_849165.html.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Power mid-to-long-term trading rules (trial) [EB/OL]. [2018-05-15]. http://yxj.ndrc.gov.cn/zttf/jdjcbgz/zccs/201705/t20170526_849165.html.
- [3] 刘敦楠, 李瑞庆, 陈雪青, 等. 电力市场监管指标及市场评价体系[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(9): 16-21.
LIU Dunnan, LI Ruiqing, CHEN Xueqing, et al. Surveillance indices and evaluating system of electricity market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(9): 16-21.
- [4] 赵岩, 刘继春, 杨威, 等. 电力市场自律监管指标体系构建及其综合评价[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 26-30.
ZHAO Yan, LIU Jichun, YANG Wei, et al. Construction of self-discipline and supervision index system for electricity market and its comprehensive evaluation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(5): 26-30.
- [5] 张集, 张粒子, 程瑜, 等. 基于 SCP 和模糊算法的市场力警戒级别评估[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(16): 15-20.
ZHANG Ji, ZHANG Lizi, CHENG Yu, et al. Market power warning in electricity market based on SCP model and fuzzy algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(16): 15-20.
- [6] 汤俊, 王妍. 基于行为模式识别的可疑金融交易监控体系的构建与完善[J]. 西南金融, 2015(2): 15-18.
TANG Jun, WANG Yan. Construction and improvement of suspicious financial transaction monitoring system based on behavior pattern identity[J]. Southwest Finance, 2015(2): 15-18.
- [7] 李红梅, 陈涛. 电动汽车 PMSM 退磁故障诊断及故障模式识别[J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 1-8.
LI Hongmei, CHEN Tao. Demagnetization fault diagnosis and fault mode recognition of PMSM for EV[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 1-8.
- [8] 万楚林, 陈皓勇, 郭曼兰. 基于模式识别的 WAMS 有功功率错误数据处理[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 922-930.
WAN Chulin, CHEN Haoyong, GUO Manlan. Wrong active power data identification and correction for WAMS based on pattern recognition [J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 922-930.
- [9] 刘敦楠, 陈雪青, 何光宇, 等. 电力市场供应者竞标行为的分析与对策[J]. 电力系统自动化, 2005, 28(6): 24-28.
LIU Dunnan, CHEN Xueqing, HE Guangyu, et al. Analysis and countermeasure for suppliers' behaviors in electricity market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 28(6): 24-28.
- [10] 杨淑莹, 张焯. 模式识别与智能计算[M]. 北京: 中国工信出版集团, 2015.
YANG Shuying, ZHANG Ye. Pattern recognition and intelligent computing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015.
- [11] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-34.
LI Deyi, LIU Changyu. Study on the universality of the normal cloud model[J]. Engineering Sciences, 2004, 6(8): 28-34.
- [12] 宋人杰, 丁江林, 白丽, 等. 基于合作博弈法和梯形云模型的配电网模糊综合评价[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 1-8.
SONG Renjie, DING Jianglin, BAI Li, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of distribution network based on cooperative game theory and trapezoidal cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 1-8.
- [13] 王雁凌, 张雪佼, 阎敬民. 基于变权灰云模型的风电场并网技术性综合评价[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3546-3551.
WANG Yanling, ZHANG Xuejiao, YAN Jingmin. Weight-varying gray cloud model based comprehensive evaluation on technical performance of overall grid-integration of wind farm [J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3546-3551.
- [14] CHEN S M. Weighted fuzzy reasoning using weighted fuzzy Petri nets[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2002, 14(2): 386-397.
- [15] 荆朝霞, 朱继松. 月度电量集中竞价市场规则的仿真实验分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 42-48. DOI: 10.7500/AEPS20170615022.
JING Zhaoxia, ZHU Jisong. Simulation experiment analysis on market rules for monthly centralized bidding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 42-48. DOI: 10.7500/AEPS20170615022.
- [16] 马子明, 钟海旺, 李竹, 等. 美国电力市场信息披露体系及其对中国的启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 49-57. DOI:

10.7500/AEPS20170918005.

MA Ziming, ZHONG Haiwang, LI Zhu, et al. Information disclosure system in American electricity market and its enlightenment for China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 49-57. DOI: 10.7500/AEPS20170918005.

[17] 国家能源局湖南监管办公室,湖南省发展和改革委员会,湖南省经济和信息化委员会,湖南省能源局.湖南省电力中长期交易实施细则(征求意见稿)[EB/OL].[2018-05-15].https://pmos.hn.sgcc.com.cn/pmos/index/infoList.jsp?itemid=215000.

Hunan Energy Regulatory Office of National Energy Administration, Development and Reform Commission of Hunan Province, Hunan Economic and Information Technology Commission, Hunan Energy Administration. Implementation rules for medium-to-long term trading in Hunan Province (draft) [EB/OL]. [2018-05-15]. https://pmos.hn.sgcc.com.cn/pmos/index/infoList.jsp?itemid=215000.

[18] 广东省经济和信息化委员会,国家能源局南方监管局.关于明确2016年售电公司参与直接交易有关事项的通知[EB/OL].[2018-05-15].http://shupeidian.bjx.com.cn/html/20160324/718959.shtml.

Guangdong Economic and Information Technology Commission, South China Energy Regulation Bureau of National Energy Administration. Notice on clarifying matters relating to the participation of direct-sale companies in direct sales in 2016[EB/OL]. [2018-05-15]. http://shupeidian.bjx.

com.cn/html/20160324/718959.shtml.

[19] 杨强,蔡华祥,严明辉,等.基于激励相容与深度博弈的云南电力市场机制设计及应用[J].电力系统自动化,2017,41(24):27-34.DOI:10.7500/AEPS20170605022.

YANG Qiang, CAI Huaxiang, YAN Minghui, et al. Design and application of electricity market mechanism for Yunnan based on theory of incentive compatibility and game in depth [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 27-34. DOI: 10.7500/AEPS20170605022.

[20] 昆明电力交易中心有限责任公司.云南电力市场交易信用保证管理办法[EB/OL].[2018-05-15].https://www.kmpex.com/web/kmdljyx/viewarticle?groupId=14081&articleId=15af97a-a04a-4ddd-a2e9-bf8337e1e289.

Kunming Power Exchange Center. Trading credit guarantee management measures of Yunnan electric power market[EB/OL]. [2018-05-15]. https://www.kmpex.com/web/kmdljyx/viewarticle?groupId=14081&articleId=15af97a-a04a-4ddd-a2e9-bf8337e1e289.

刘敦楠(1979—),男,博士,副教授,主要研究方向:电力市场、能源互联网。E-mail: skks5@163.com

张潜(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力市场、技术经济。E-mail: 779746236@qq.com

李霄彤(1995—),女,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力市场、技术经济。E-mail: lixiaotong134@163.com

(编辑 蔡静雯 施冬敏)

Identification of Potential Harmful Behaviors in Electricity Market Based on Cloud Model and Fuzzy Petri Net

LIU Dunnan¹, ZHANG Qian¹, LI Xiaotong¹, GU Yugui², TAN Zhongfu¹

- (1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China;
2. Beijing Electric Power Trading Center Co. Ltd., Beijing 100031, China)

Abstract: To solve the problem of identification and control of potential harmful transactions in electricity market, a method for identifying potential harmful behaviors based on the cloud model and the fuzzy Petri net is proposed to realize real-time warning of potential hazards in the transaction process. The cloud model and the fuzzy Petri net are applied to pattern recognition, which effectively solves the problem that the potential hazard behavior is difficult to quantify, and overcomes the defects that the general recognition method is not easy to understand. Firstly, a general framework and procedure for identifying potential harmful behaviors is designed. Secondly, two methods of building feature cloud based on reverse cloud generator and expert description are described. Meanwhile, a fuzzy Petri net structure and recognition algorithm for potential harmful behaviors is designed. Finally, an example is made and analyzed by using the real transaction data of monthly auction market in Jiangxi Province, which shows the results given by the proposed method are highly consistent with the results obtained by artificial analysis and actual data.

This work is supported by State Grid Corporation of China.

Key words: electricity market; market supervision; potential harmful behavior; pattern identification; cloud model; fuzzy Petri net