

基于对称三角模糊集的股票投资者情绪传播模型

王会东¹ 李兆东¹ 姚金丽¹ 余德淦^{2,3}

摘要 投资者情绪是股票市场中普遍存在的一种非理性行为,是导致股票价格波动的重要因素.本文采用模糊集合理论,从微观视角下研究股票投资者情绪的传播过程.采用对称三角模糊集描述股票投资者思维的模糊性,用模糊股价预期表示投资者情绪,建立了股票投资者情绪的传播模型,提出了三种基本的投资者情绪传播方式.以股吧社区中的投资者情绪传播为例,说明了所提出的股票投资者情绪传播模型的有效性.

关键词 社交网络, 模糊舆情网络, 情绪传播, 对称三角模糊集合

引用格式 王会东, 李兆东, 姚金丽, 余德淦. 基于对称三角模糊集的股票投资者情绪传播模型. 自动化学报, 2020, 46(5): 1031-1043

DOI 10.16383/j.aas.c190437

Sentimental Propagation Model of Stock Investors Based on Symmetric Triangular Fuzzy Set

WANG Hui-Dong¹ LI Zhao-Dong¹ YAO Jin-Li¹ YU De-Gan^{2,3}

Abstract As a universal irrational behavior in stock market, investor sentiment is a significant factor leading to the fluctuation of stock price. Based on fuzzy sets theory, the propagation process of stock investor sentiment is studied from a micro perspective. The symmetrical triangular fuzzy set is used to depict fuzziness of stock investors' viewpoints, and the fuzzy stock price expectation for investor sentiment. The propagation model of stock investor sentiment is proposed, where three basic propagation types of investors' sentiment are introduced. The effectiveness of the proposed model is demonstrated via the investor sentiment propagation in the "guba" community.

Key words Social networks, fuzzy opinion networks, sentiment propagation, symmetric triangular fuzzy set

Citation Wang Hui-Dong, Li Zhao-Dong, Yao Jin-Li, Yu De-Gan. Sentimental propagation model of stock investors based on symmetric triangular fuzzy set. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(5): 1031-1043

股票市场上,由于普通中小投资者(散户)信息获取渠道及自身知识水平的限制、分析师群体及机构投资者不成熟等因素,股票市场的非理性投资特征尤为显著.国内外对投资者非理性与资产价格关系的研究主要集中于投资者情绪方面,投资者情绪在股票市场的非理性繁荣和恐慌式下跌中起到了推波助澜的作用,是资产定价的重要因素^[1-3].随着大数据和人工智能技术的发展,许多学者开始通过情感分析来研究投资者情绪与股票价格波动的关系^[4-5].

文献[6]基于东方财富网股吧帖文与朴素贝叶斯方法,通过实证方法证明了股票开盘后交易时段的股评情绪对于股票的收盘价和日交易量具有显著影响.文献[7]指出社交网络用户情绪与股票市场的表现显著相关,并可在一定程度上预测股票价格.许启发等^[8]发现投资者网络情绪波动与股票收益之间存在因果关系.上述研究表明,在互联网环境下,社交网络用户之间的联系更加紧密,人们通过不断的社会学习获得对某一事件的观点^[9-10].在股票市场中,投资者会通过社交网络(股吧、微博、微信等)交流信息和分享观点,与此同时,投资者的情绪和投资决策也在不断变化.投资者之间的互动驱动了股票交易^[11],并导致股票价格发生波动.网络舆情对股票市场的运行机制产生重要影响,而有效的网络舆情管理对于稳定股票市场的运行秩序至关重要^[12].因此,从微观层面构建网络舆情环境下的股票投资者情绪传播模型具有重要意义.

深刻理解人与人之间的信息传播过程是构建投资者情绪传播模型的关键一步,目前的信息传播模

收稿日期 2019-06-05 录用日期 2019-11-16
Manuscript received June 5, 2019; accepted November 16, 2019
国家自然科学基金(61402260, 71790603)资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61402260, 71790603)

本文责任编辑 李成栋
Recommended by Associate Editor LI Cheng-Dong
1. 山东财经大学管理科学与工程学院 济南 250014 2. 中山大学管理学院 广州 510275 3. 中山大学现代会计与财务研究中心 广州 510275

1. School of Management Science and Engineering, Shandong University of Finance and Economics, Jinan 250014 2. Business School, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275 3. The Center for Accounting and Finance Institutions, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275

型主要包括图模型^[13]和传染病模型^[14]. 图模型以网络结构为基础, 节点为没有内容的点. 传染病模型模拟传染病的传播过程从而刻画人与人之间的信息传播. 许多学者结合这两类模型的建模思想, 构建了网络舆情传播模型. 熊熙等提出了 ECM 模型^[15], 对社交网络中的情绪传播进行预测. Liu 等基于突发事件对在线社交网络的信息传播进行非线性动力学建模与演化分析, 通过仿真实验验证了模型的有效性^[16]. Zhuang 等^[17]将在线社交网络 and 传统信息传播方式结合, 提出了簇状多层网络中信息传播模型. 上述模型可以较好地刻画社交网络中投资者情绪的传播过程, 但却难以刻画网络舆情传播过程中存在的复杂网络结构.

网络舆情环境下信息传播的研究需要考虑以下两个方面: 一是社交网络中观点的形成和演变需要从网络的角度进行研究^[18]; 二是人们的情绪依靠语言词进行传播, 在信息的传播过程中会用到大量的模糊词和模糊数. 现有的网络舆情演变模型往往假定人的观点值是一个确定数, 从概率论的角度进行模型构建. 然而, 证券市场复杂多变, 受经济、信息、社会、文化等诸多因素影响, 投资者在进行决策分析时, 获得的信息往往是模糊的. 因此, 采用模糊数刻画投资者观点的不确定性更为合理. 王立新教授利用模糊集合理论描述人类观点的传播和演变, 提出了模糊舆情网络模型^[19-21], 该模型可以视作数学上更易处理的基于代理人的模型^[22], 克服了 ABM_s 参数和自由度过多所带来的模型输出结果无法解释的问题. 网络舆情环境下, 股票投资者借助社交网络发布和搜寻与投资相关的信息, 在此过程中投资者情绪不断传播, 并最终导致股票价格发生波动. 王立新教授结合模糊舆情网络构建了股票价格动力学模型^[23], 为股票投资者之间的信息传播及演变过程提供了数学框架. 在该模型中, 模糊集合的隶属度函数采用高斯函数形式, 用高斯函数的中心值表示投资者观点的中心值, 高斯函数的不确定性表示投资者观点中心值所对应的不确定性.

高斯函数是连续函数, 非 0 隶属度值变量的取值范围是从负无穷到正无穷. 使用该函数刻画人类思维的模糊性包括了一个隐含的假定前提—人的观点值是在无穷大的区间内变动的. 但现实中, 人的观点值很难在无穷大的区间内确定, 而是在一个有限区间内进行取值. 因此, 本文在构建股票投资者情绪传播模型时, 模型集合的隶属度函数选用对称三角模糊集合. 对称三角隶属度函数保留了高斯函数的均值、方差信息, 又具有分段函数的性质. 通过使用分段函数, 将非 0 隶属度函数值限制在一个有

限的区间内, 其余区间的隶属度函数值为 0, 从而更准确刻画股票投资者情绪的模糊性. 另一方面, 与高斯函数相比, 对称三角隶属度函数形式简单, 在模型计算过程中, 计算复杂度更小, 在金融量化投资过程中可以显著提高计算速度.

本文的主要贡献如下:

1) 现有文献中微观层面股票投资者情绪演变模型主要为异质主体模型^[24-26], 其假定投资者的观点值是一个确定值, 然后从概率的角度进行投资者情绪演变研究. 一般来说, 这些模型只能描述较为简单的网络结构. 本文采用对称三角模糊集合表示投资者情绪, 构建股票投资者情绪传播模型, 为互联网环境下复杂网络结构中的投资者情绪传播过程提供了数学模型.

2) 使用对称三角隶属度函数刻画股票投资者的观点, 建立了基于对称三角模糊集的股票投资者情绪传播模型, 并结合具体的股票投资者情绪传播情境, 给出了三种基本的传播方式. 与连续型的高斯函数相比, 对称三角函数是分段函数, 在模型构建过程中针对非 0 隶属度函数值对应的取值区间进行了推导和证明. 最后, 以股吧投资者情绪传播为例, 给出了所提模型的具体演算过程, 证明了该模型的有效性.

1 问题描述与模型定义

移动互联网环境下, 人们会通过社交媒体进行交流信息、分享观点, 每个个体既是信息的接收者同时也是信息的生产者, 网络用户的交互作用得以体现. 在股票市场中, 股票投资者使用电脑或手机 APP 等终端登录财经网站及股吧、雪球网等财经社区搜索与投资相关的信息. 同时, 作为信息传播者, 股票投资者也会发表自己的观点. 在查看评论或发表评论的过程中, 股票投资者的情绪在网络中不断传播. 国内外一些学者对投资者情绪进行了探讨, Baker 等^[27]、Da 等^[28]的研究表明, 投资者情绪最终会反映到金融资产价格上, 并可能引起资产价格与其基本价值的偏离. 投资者情绪是对未来收益的预期, 但预期值不完全由基本面信息决定, 因而具有系统性偏差. 因此, 从金融资产价格预期的角度来定义投资者情绪, 有助于研究中对这一概念的理解.

本文将股票投资者情绪定义为投资者在决策过程中产生的对股票价格的预期, 用投资者预期来表示投资者情绪. 每个个体的投资预期 (模糊观点) 采用对称三角模糊集合进行描述, 对称三角隶属度函数的中心值为模糊观点的中心值, 对称三角隶属度函数的不确定性为模糊观点中心值所对应的不

确性.

定义 1^[29]. 不确定环境下的一个模糊观点采用对称三角模糊集合 X 表示, 该模糊集合 X 的隶属度函数为:

$$\mu_X(x) = \begin{cases} 1 - \frac{|x - C|}{B}, & |x - C| \leq B \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中, 模糊集合 C 表示隶属度函数的中心值, 模糊集合 B 表示中心值 C 所对应的不确定性, $\Omega_C = \mathbf{R}$ 、 $\Omega_B = \mathbf{R}^+$ 、 $\Omega_X = \mathbf{R}$.

在股票市场中, 本文使用模糊集 X 表示投资者预期, 将该模糊集统称为模糊股价预期, 中心值 C 统称为模糊股价预期中心值, 中心值 C 对应的不确定性 B 统称为模糊股价预期不确定性.

特别地, 当模糊集合 C 为模糊单点集时, 模糊集合 X 的隶属度函数退化为:

$$\mu_X(x) = \begin{cases} 1 - \frac{|x - c|}{B}, & |x - c| \leq B \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $c \in \mathbf{R}$ 为一个确定值.

当模糊集合 B 为模糊单点集时, 模糊集合 X 的隶属度函数退化为:

$$\mu_X(x) = \begin{cases} 1 - \frac{|x - C|}{b}, & |x - C| \leq b \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $b \in \mathbf{R}^+$ 为一个确定值.

当模糊集合 C 和 B 均为模糊单点集时, 模糊集合 X 的隶属度函数退化为:

$$\mu_X(x) = \begin{cases} 1 - \frac{|x - c|}{b}, & |x - c| \leq b \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $c \in \mathbf{R}, b \in \mathbf{R}^+$ 均为确定值.

定义 2^[30]. 已知模糊集合 V 的隶属度函数为 $\mu_V(v)$, 条件模糊集合 $X|V$ 的隶属度函数为 $\mu_{X|V}(x|V)$, 由 Zadeh 合成推理规则可得模糊集合 X 的无条件隶属度函数为:

$$\mu_X(x) = \max_{v \in \Omega_V} \min [\mu_{X|V}(x|v), \mu_V(v)] \quad (5)$$

其中, X 与 V 为模糊集合, 且 $\Omega_X = \mathbf{R}, \Omega_V = \mathbf{R}$.

2 投资者情绪传播模型的构建

基于模糊舆情网络框架, 采用对称三角模糊集构建股票投资者情绪传播模型, 给出投资者情绪的三种基本传播方式: 模糊股价预期中心传播、模糊股价预期不确定性传播、模糊股价预期中心及不确定性传播.

2.1 模糊股价预期中心传播

考虑如下情形: 股票投资者 M 在决策过程中将自己的模糊股价预期以模糊集合 X 表示, 由于专业知识所限, 模糊股价预期的中心值 (即股票的预期价格) 由经验丰富的投资者 N 来提供. 但是, 投资者 N 对自己提供的预期价格不具有十足把握, 因此提供的不是一个精确数而是一个模糊集 C_1 . 模糊集 X 的中心值 C_1 所对应的不确定性 b_1 由投资者 M 根据自己对投资者 N 投资水平的信任程度进行确定. 模糊集 C_1 的中心值 c_2 由投资者 N 根据当前股市行情和自己的专业知识综合确定, c_2 对应的不确定性 b_2 由投资者 N 根据投资经验和可能存在的风险因素进行确定.

图 1 给出了上述情形的投资者情绪传播网络结构图. 从图 1 中可以看出, 模糊集合 X 的中心值 C_1 是一个模糊集合, 但中心值 C_1 对应的不确定性 b_1 是一个精确数, 我们称这种投资者情绪传播方式为模糊股价预期中心传播.

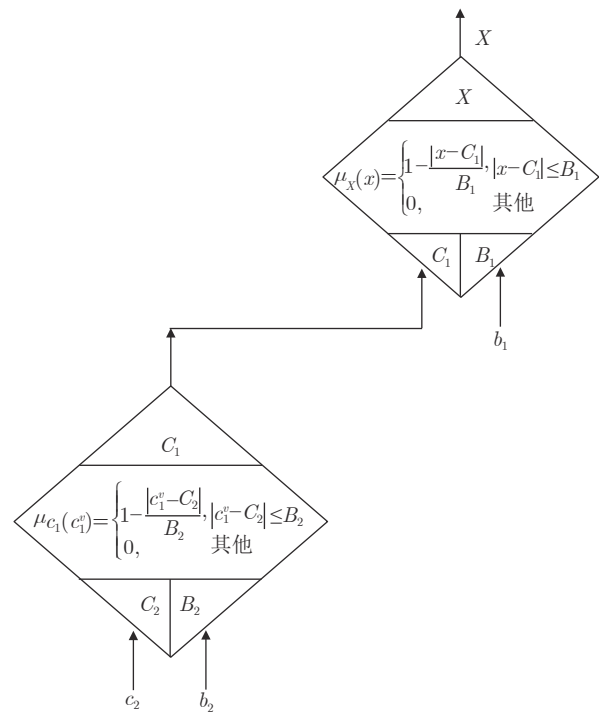


图 1 模糊股价预期中心传播

Fig.1 Center propagation of fuzzy stock expectation

中心值模糊集 C_1 的隶属度函数为:

$$\mu_{C_1}(c_1^v) = \begin{cases} 1 - \frac{|c_1^v - c_2|}{b_2}, & |c_1^v - c_2| \leq b_2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

模糊集 X 在 C_1 下的条件隶属度函数为:

$$\mu_{X|C_1}(x|C_1) = \begin{cases} 1 - \frac{|x - C_1|}{b_1}, & |x - C_1| \leq b_1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $b_1 \in \mathbf{R}^+$ 、 $b_2 \in \mathbf{R}^+$ 、 $c_2 \in \mathbf{R}^+$ 均为精确数, $c_1^v \in \mathbf{R}^+$ 为变量.

将式 (6)、(7) 代入式 (5), 可得模糊集 X 的无条件隶属度函数 $\mu_X(x)$ 为:

$$\mu_X(x) = \max_{c_1^v \in \mathbf{R}^+} \min [\mu_{X|C_1}(x|c_1^v), \mu_{C_1}(c_1^v)] \quad (8)$$

图 2 给出了模糊股价预期中心传播时, 式 (8) 最大值的求取过程.

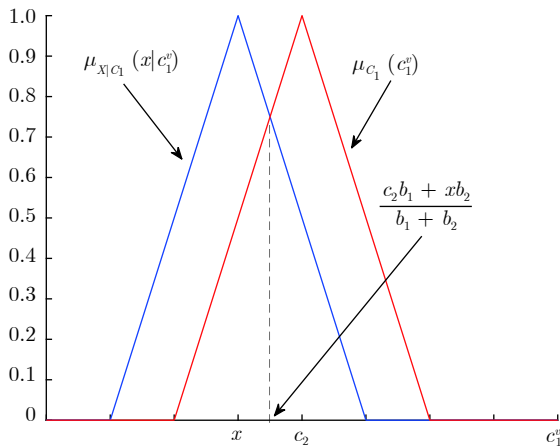


图 2 模糊股价预期中心传播时式 (8) 最大值的求取
Fig.2 How the max in (8) is achieved for center propagation of fuzzy stock expectation

将 $\mu_{X|C_1}(x|c_1^v)$ 和 $\mu_{C_1}(c_1^v)$ 看作变量 c_1^v 的函数, 由图 2 可知, 式 (8) 右端取小运算之后的最大值在 $c_1^v = \frac{c_2 b_1 + x b_2}{b_1 + b_2}$ 处取得, 由此可得, 模糊集 X 的无条件隶属度函数为:

$$\mu_X(x) = \begin{cases} 1 - \frac{|x - c_2|}{(b_1 + b_2)}, & |x - c_2| \leq b_1 + b_2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式 (9) 中非 0 隶属度函数值对应取值区间的具体求取过程见附录 A. 从式 (9) 中可以看出, 经过模糊股价预期中心传播输出的模糊集 X 的隶属度函数仍为对称三角函数形式, 中心 c_2 从输入节点 C_1 传递到输出节点 X , 但模糊股价预期的不确定性由 b_1 变为 $b_1 + b_2$, 以线性形式单调增加. 这表明, 当股票投资者由其他投资者为其提供模糊股价预期中心值时, 该投资者最终的模糊股价预期中心值等于提供者模糊股价预期的中心值, 但该中心值所对应的不确定性以线性形式单调增加, 不确定性的增加导致模糊集合非 0 隶属度函数取值区间的增大. 经过

模糊股价预期中心传播输出的模糊集 X 非 0 隶属度函数取值区间增大了, 即该模糊集合包含的元素增多了, 这表明, 此时的模糊股价预期更“模糊”了.

2.2 模糊股价预期不确定性传播

考虑如下情形: 股票投资者 M 在决策过程中将自己的模糊股价预期以模糊集合 X 表示, M 根据自己的专业知识和投资经验并结合股市行情得到了模糊集 X 的中心值 c_1 , 即股票的预期价格, 但无法确定该预期价格对应的不确定性范围. M 请经验丰富的投资者 N 为其提供预期价格对应的不确定性. 投资者 N 为其提供的不确定性是一个模糊集 B_1 , 模糊集 B_1 的中心值 c_2 由 N 给定, 中心值 c_2 对应的不确定性 b_2 由 M 根据自己对 N 投资能力的信任程度确定.

图 3 给出了上述情形下投资者情绪传播的网络结构图. 从图 3 可以看出, 模糊集合 X 的中心值 c_1 是一个精确数, 中心值 c_1 对应的不确定性 B_1 是一个模糊集合, 我们将这种投资者情绪传播方式称为模糊股价预期不确定性传播.

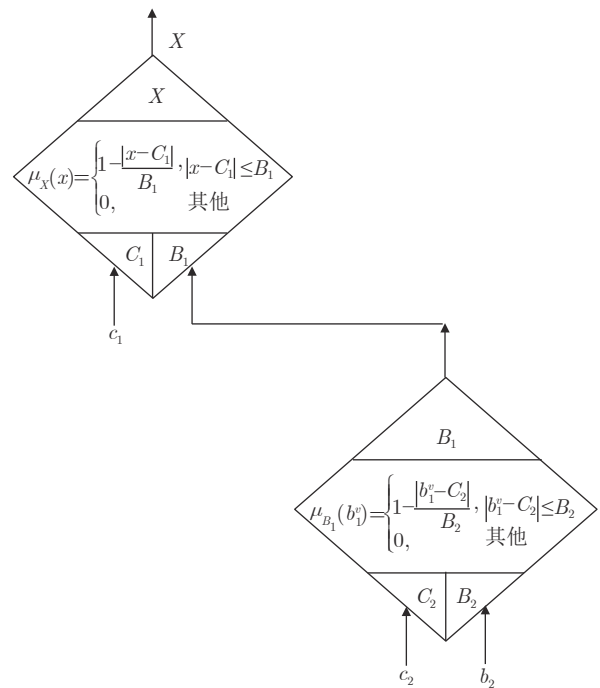


图 3 模糊股价预期不确定性传播
Fig.3 Uncertainty propagation of fuzzy stock expectation

不确定性 B_1 的模糊集合隶属度函数为:

$$\mu_{B_1}(b_1^v) = \begin{cases} 1 - \frac{|b_1^v - c_2|}{b_2}, & |b_1^v - c_2| \leq b_2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

模糊集 X 在 B_1 下的条件隶属度函数为:

$$\mu_{X|B_1}(x|B_1) = \begin{cases} 1 - \frac{|x - c_1|}{B_1}, & |x - c_1| \leq B_1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

其中, $c_1 \in \mathbf{R}^+, c_2 \in \mathbf{R}^+, b_2 \in \mathbf{R}^+$ 均为精确数, $b_1^v \in \mathbf{R}^+$ 为变量.

将式 (10)、(11) 代入式 (5), 可得模糊集 X 的无条件隶属度函数 $\mu_X(x)$ 为:

$$\mu_X(x) = \max_{b_1^v \in \mathbf{R}^+} \min [\mu_{X|B_1}(x|b_1^v), \mu_{B_1}(b_1^v)] \quad (12)$$

图 4 给出了模糊股价预期不确定性传播时, 式 (12) 最大值的求取过程.

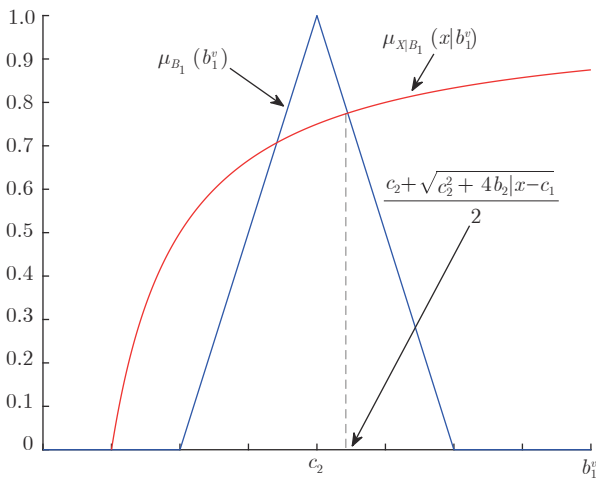


图 4 模糊股价预期不确定性传播时式 (12) 最大值的求取

Fig.4 How the max in (12) is achieved for uncertainty propagation function of fuzzy stock expectation

将 $\mu_{X|B_1}(x|b_1^v)$ 和 $\mu_{B_1}(b_1^v)$ 看作变量 b_1^v 的函数, 由图 4 可知, 式 (12) 右端取小运算之后的最大值在 $b_1^v = \frac{c_2 + \sqrt{c_2^2 + 4b_2|x - c_1|}}{2}$ 处取得, 由此可得, 模糊股价预期不确定性传播方式下, 模糊集 X 的无条件隶属度函数为:

$$\mu_X(x) = \begin{cases} 1 - \frac{|\sqrt{c_2^2 + 4b_2|x - c_1|} - c_2|}{2b_2}, & |x - c_1| \leq c_2 + b_2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

式中非 0 隶属度函数对应取值区间的求取过程详见附录 B.

由式 (13) 可知, $\mu_X(x)$ 的中心值仍为 c_1 , 对于模糊股价预期的不确定性传播, 其隶属度函数的中心值不变.

特别地, 当 $c_2 = 0$ 时, 式 (13) 变为:

$$\mu_X(x) = \begin{cases} 1 - \sqrt{\frac{|x - c_1|}{b_2}}, & |x - c_1| \leq b_2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

下面, 通过计算式 (13) 的峰度和锐度来进一步分析模糊股价预期的不确定性传播特性, 分以下两种情形进行讨论:

1) 若 $c_2 \gg b_2$, 即对称三角节点 B_1 对自己的中心值 c_2 非常信任, 可得:

$$k_X = \frac{b_2(1 - e^{-4})^2 + c_2(1 - e^{-4})}{b_2(1 - e^{-1})^2 + c_2(1 - e^{-1})} \approx \frac{1 - e^{-4}}{1 - e^{-1}}$$

$$s_X = \frac{b_2(1 - e^{-1})^2 + c_2(1 - e^{-1})}{b_2(1 - e^{-1/4})^2 + c_2(1 - e^{-1/4})} \approx \frac{1 - e^{-1}}{1 - e^{-1/4}} \quad (15)$$

式 (15) 中 k_X 和 s_X 都非常近似于对称三角函数对应的数值, 这说明在模糊股价预期不确定性传播情形下, 模糊集 X 的无条件隶属度函数非常接近对称三角函数.

2) 若 $c_2 \ll b_2$, 即对称三角节点 B_1 对自己的中心值 c_2 非常不确定, 可得:

$$k_X = \frac{b_2(1 - e^{-4})^2 + c_2(1 - e^{-4})}{b_2(1 - e^{-1})^2 + c_2(1 - e^{-1})} \approx \frac{(1 - e^{-4})^2}{(1 - e^{-1})^2}$$

$$s_X = \frac{b_2(1 - e^{-1})^2 + c_2(1 - e^{-1})}{b_2(1 - e^{-1/4})^2 + c_2(1 - e^{-1/4})} \approx \frac{(1 - e^{-1})^2}{(1 - e^{-1/4})^2} \quad (16)$$

式 (16) 中 k_X 和 s_X 都非常近似于式 (14) 对应函数的峰度和锐度.

通过上述分析可知, 当投资者情绪以模糊股价预期不确定性传播 (如图 3 所示) 时, 模糊集 X 的隶属度函数从最初的对称三角函数形式变化为式 (13) 所示的无条件隶属度函数形式, 该函数随着参数取值的变化, 在对称三角函数和式 (14) 的函数形式之间平滑移动.

为了更直观地表示上述分析结果, 令 $c_1 = 4$ 、 $b_2 = 1$, c_2 分别取 0、1 和 2, 可以得到式 (13) 的函数图像如图 5 所示, 在图 5 中同时给出了对称三角函数 $\begin{cases} 1 - \frac{|x - c_1|}{b_2}, & |x - c_1| \leq b_2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$ 的图像作为对比.

从图 5 可以看出, 与对称三角函数相比, 式 (13) 的函数具有“更肥”的尾部, 覆盖的模糊变量范围更广了, 论域中“远距离成员”的隶属度值有很大程度的增加. 式 (13) 输出的模糊集 X 比对称三角模糊集“更模糊”了, 这说明投资者情绪的不确定性传播会增加模糊股价预期的不确定性, 即增加投资者情绪的不确定性.

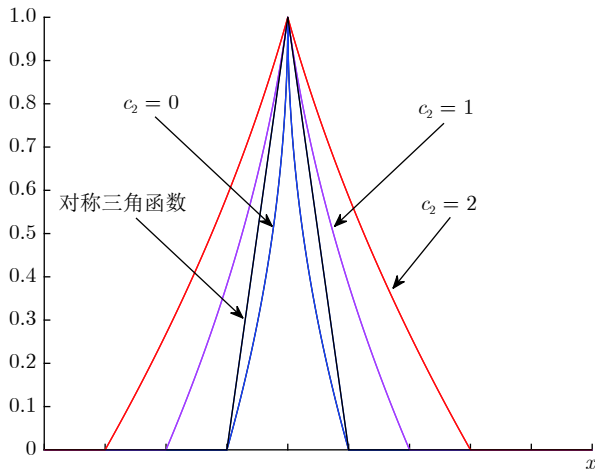


图 5 X 的无条件隶属度函数

Fig.5 Unconditional membership function of fuzzy set X under uncertainty propagation of fuzzy stock expectation

2.3 模糊股价预期中心及不确定性传播

考虑如下情形: 投资者 M 在股票投资过程中, 将自己的模糊股价预期以一个模糊集 X 表示, 但是该模糊集的中心值 C_1 和对应的不确定性 B_1 均不能确定. 投资者 N 为 M 提供模糊股价预期中心值 C_1 , 同时, 投资者 P 提供 C_1 对应的不确定性 B_1 . C_1 、 B_1 均为模糊集合, 其隶属度函数分别由投资者 N 和 P 确定.

图 6 给出了上述情形下投资者情绪传播的网络结构图. 从图 6 可以看出, 模糊集合 X 的中心值 C_1 及其对应的不确定性 B_1 均为模糊集合, 我们称这种投资者情绪传播方式为模糊股价预期中心及不确定性传播.

投资者 M 初始的模糊集合 X, 其隶属度函数可表示为:

$$\mu_X(x) = \begin{cases} 1 - \frac{|x - C_1|}{B_1}, & |x - C_1| \leq B_1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

投资者 N 给定的中心值模糊集合 C_1 , 其隶属度函数可表示为:

$$\mu_{C_1}(c_1^v) = \begin{cases} 1 - \frac{|c_1^v - c_2|}{b_2}, & |c_1^v - c_2| \leq b_2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

投资者 P 给定的不确定性模糊集合 B_1 , 其隶属度函数可表示为:

$$\mu_{B_1}(b_1^v) = \begin{cases} 1 - \frac{|b_1^v - c_3|}{b_3}, & |b_1^v - c_3| \leq b_3 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

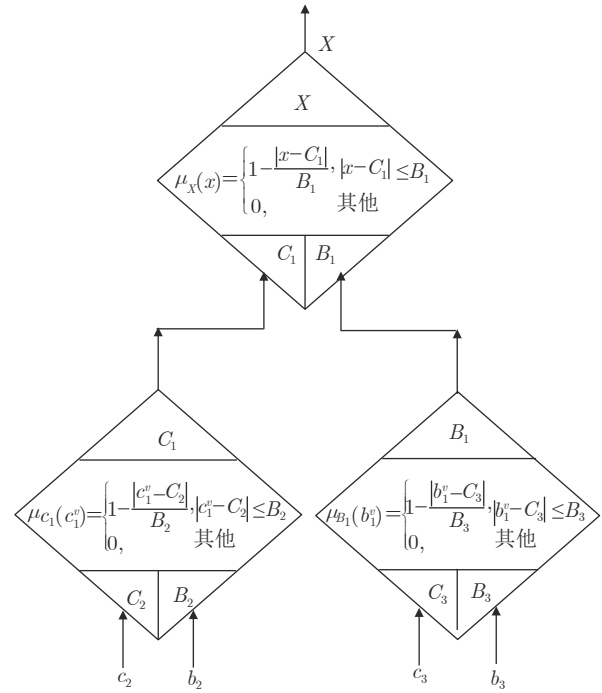


图 6 模糊股价预期中心及不确定性传播

Fig.6 Center and uncertainty propagation of fuzzy stock expectation

其中, $c_2 \in \mathbf{R}^+$ 、 $c_3 \in \mathbf{R}^+$ 、 $b_2 \in \mathbf{R}^+$ 、 $b_3 \in \mathbf{R}^+$ 均为精确数, $c_1^v \in \mathbf{R}^+$ 、 $b_1^v \in \mathbf{R}^+$ 均为变量.

根据式 (5) 的 Zadeh 合成推理规则, 由式 (17)、(18) 可得:

$$\mu_{X|B_1}(x|B_1) = \begin{cases} 1 - \frac{|x - c_2|}{(B_1 + b_2)}, & |x - c_2| \leq B_1 + b_2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

再次利用 Zadeh 合成推理规则, 由式 (19)、(20) 可得模糊集 X 的无条件隶属度函数为:

$$\mu_X(x) = \max_{b_1^v \in \mathbf{R}^+} \min [\mu_{X|B_1}(x|b_1^v), \mu_{B_1}(b_1^v)] \quad (21)$$

式 (21) 的最大值取值点 b_1^v 为:

$$b_1^v = \frac{c_3 - b_2 + \sqrt{(b_2 + c_3)^2 + 4b_3|x - c_2|}}{2} \quad (22)$$

由此, 得到式 (21) 中模糊集 X 的无条件隶属度函数为:

$$\mu_X(x) = \begin{cases} 1 - \frac{\left| \sqrt{(b_2 + c_3)^2 + 4b_3|x - c_2|} - c_3 - b_2 \right|}{2b_3}, & |x - c_2| \leq b_2 + c_3 + b_3 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (23)$$

分析式 (23) 可以发现:

1) 由 $\sqrt{(b_2 + c_3)^2 + 4b_3|x - c_2|} - c_3 - b_2 = 0$, 可得 $x = c_2$, 即模糊集 X 的无条件隶属度函数的中心值等于节点 C_1 提供的中心值 c_2 . 这是因为, 模糊股价预期不确定性传播不改变模糊集 X 的中心值, 但模糊股价预期中心传播将中心值 c_2 从模糊集 C_1 传递给了模糊集 X .

2) 从式 (20) 可以看出, 增加一个中心输入节点 C_1 不会改变模糊集 X 的无条件隶属度函数形状. 但式 (23) 与式 (20) 相比, 增加了一个不确定性输入节点 B_1 , 改变了隶属度函数的形状 (不再是对称三角模糊集合), 使得最终的无条件隶属度函数包含的元素更多了.

总结来说, 在模糊股价预期中心及不确定性传播方式下, 投资者 M 最终采取了投资者 N 的观点, 将自己的模糊股价预期中心值确定为模糊集 C_1 的中心值, 但由于增加了不确定输入节点 B_1 , 经过演化后的投资者 M 的模糊股价预期, 其隶属度函数不再是对称三角函数形式, 与投资者 N 提供的模糊集 C_1 相比, 投资者 M 最终的模糊股价预期更“模糊”了.

3 股票投资者情绪传播模型的应用——以股吧社区中的投资者情绪传播为例

在股票市场中, 投资者往往会通过财经社区, 如股吧、雪球网等来搜寻与投资相关的信息. 投资者在发表对某支股票评论的同时也会从他人的评论中获取投资观点. 投资者在发帖之后, 会有其他投资者对帖子进行评论 (图 7 为截取的股吧评论图), 在此过程中, 所有投资者便形成了一个投资者情绪的传播网络. 不失一般性, 以 1 人发帖 5 人评论为例, 每个投资者除了受自身投资观点的影响外, 还会受到他人投资者观点的影响, 由此, 6 个投资者便形成了一个闭环的投资者情绪传播网络结构, 如图 8 所示.



图 7 股吧评论图
Fig.7 Guba comments

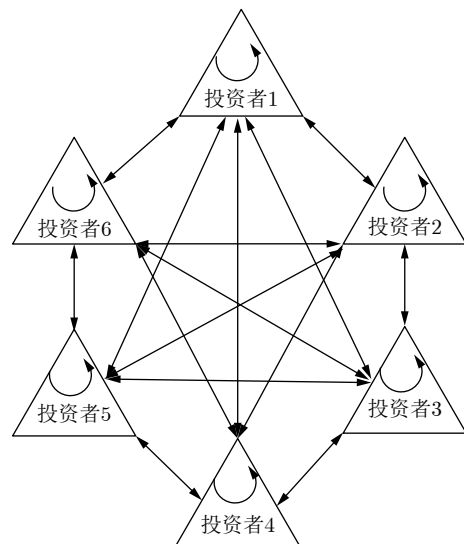


图 8 闭环投资者情绪传播示意图
Fig.8 Close-loop network diagram of investors' sentiment propagation

以股吧社区中股票投资者情绪的传播为例, 验证本文所提出的股票投资者情绪传播模型的有效性. 6 个投资者初始的模糊股价预期均采用本文提出的对称三角隶属度函数形式, 股票投资者的情绪传播采用第 2 节中提出的三种传播方式, 具体的投资者情绪传播闭环网络结构图如图 9 所示.

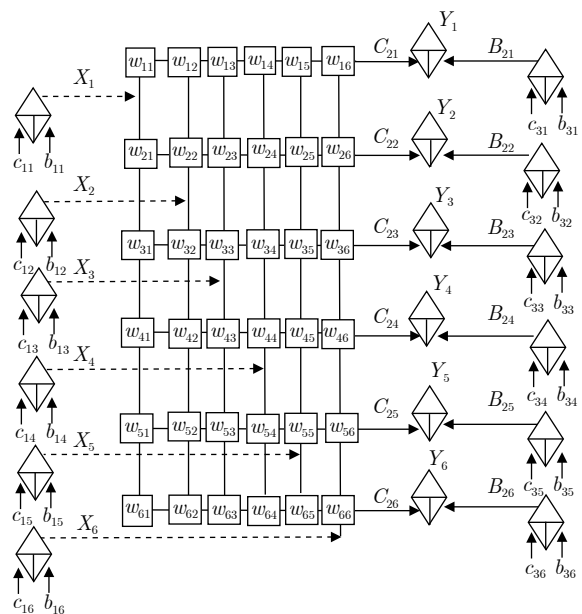


图 9 投资者情绪传播结构图
Fig.9 Diagram of investors' sentiment propagation

6 个投资者中第 i 个投资者最初的模糊股价预期表示为模糊集 X_i , 对应的隶属度函数为:

$$\mu_{X_i}(x_i) = \begin{cases} 1 - \frac{|x_i - c_{1i}|}{b_{1i}}, & |x_i - c_{1i}| \leq b_{1i} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (24)$$

其中, $c_{1i} \in \mathbf{R}^+$ 、 $b_{1i} \in \mathbf{R}^+$ 均为精确数, $i=1, 2, \dots, 6$.

在闭环网络传播系统中, 每个投资者最终的模糊股价预期除了受自身最初的模糊股价预期影响外, 也会受其他投资者模糊股价预期的影响. 用模糊集 Y_i 表示第 i 个投资者经过投资者情绪闭环网络传播后产生的最终的模糊股价预期, 即第 i 个投资者最终的条件隶属度函数:

$$\mu_{Y_i}(y_i) = \begin{cases} 1 - \frac{|y_i - C_{2i}|}{B_{2i}}, & |y_i - C_{2i}| \leq B_{2i} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (25)$$

其中, C_{2i} 、 B_{2i} 均为模糊集合, $i=1, 2, \dots, 6$.

在求取式 (25) 中每个投资者最终的模糊股价预期时, 需要用到如下引理.

引理 1. 令模糊集合 X_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为对称三角模糊集, 其隶属度函数如式 (4) 所示, $w_i \geq 0$ 是常数, 表示权重, 满足 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$, 则 $Y_n = w_1 X_1 + w_2 X_2 + \dots + w_n X_n$ 是一个模糊集合, 其隶属度函数为式 (26).

$$\mu_{Y_n}(y_n) = \begin{cases} 1 - \frac{|y_n - \sum_{i=1}^n w_i c_i|}{\sum_{i=1}^n w_i b_i}, & |y_n - \sum_{i=1}^n w_i c_i| \leq \sum_{i=1}^n w_i b_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (26)$$

引理 1 的具体证明详见附录 C.

令模糊集 Y_i 的中心值模糊集合 $C_{2i} = \sum_{j=1}^6 w_{ij} X_j$ (其中, w_{ij} 为第 i 个投资者赋予自身和其他投资者观点的权重, 且 $\sum_{j=1}^6 w_{ij} = 1, i=1, 2, \dots, 6$), 由式 (26) 可得, 模糊集合 C_{2i} 的隶属度函数为式 (27), 其中 $i=1, 2, \dots, 6$.

$$\mu_{C_{2i}}(c_{2i}^v) = \begin{cases} 1 - \frac{|c_{2i}^v - \sum_{j=1}^6 w_{ij} c_{1j}|}{\sum_{j=1}^6 w_{ij} b_{1j}}, & |c_{2i}^v - \sum_{j=1}^6 w_{ij} c_{1j}| \leq \sum_{j=1}^6 w_{ij} b_{1j} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (27)$$

已知:

$$\mu_{Y_i|C_{2i}}(y_i|C_{2i}) = \begin{cases} 1 - \frac{|y_i - C_{2i}|}{B_{2i}}, & |y_i - C_{2i}| \leq B_{2i} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (28)$$

令 $\mu_{Y_i|C_{2i}}(y_i|C_{2i})$ 和 $\mu_{C_{2i}}(c_{2i}^v)$ 分别作为 Zadeh 合成推理规则中的 $\mu_{X|V}(x|V)$ 和 $\mu_V(v)$, 则模糊集 Y_i 的无条件隶属度函数为 $\mu_{Y_i}(y_i) = \max_{c_{2i}^v \in \mathbf{R}} \min [\mu_{Y_i|C_{2i}}(y_i|c_{2i}^v), \mu_{C_{2i}}(c_{2i}^v)]$, 等式右端最大值在 $c_{2i}^v = (B_{2i} \sum_{j=1}^6 w_{ij} c_{1j} + y_i \sum_{j=1}^6 w_{ij} b_{1j}) / (B_{2i} + \sum_{j=1}^6 w_{ij} b_{1j})$ 处取得, 由此可得模糊集 Y_i 的无条件隶属度函数为式 (29).

$$\mu_{Y_i}(y_i) = \begin{cases} \frac{1 - \left| y_i - \frac{\sum_{j=1}^6 w_{ij} c_{1j}}{B_{2i} + \sum_{j=1}^6 w_{ij} b_{1j}} \right|}{\sum_{j=1}^6 w_{ij} b_{1j} + B_{2i}}, & \left| y_i - \frac{\sum_{j=1}^6 w_{ij} c_{1j}}{B_{2i} + \sum_{j=1}^6 w_{ij} b_{1j}} \right| \leq \sum_{j=1}^6 w_{ij} b_{1j} + B_{2i} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (29)$$

其中, $i=1, 2, \dots, 6$. 式 (29) 中非 0 隶属度函数取值区间的求取过程见附录 D.

每个投资者模糊股价预期的不确定性模糊集合 B_{2i} 的中心值, 由该投资者自身的中心值与所有投资者算术平均中心值的差来确定. 即, 模糊集 B_{2i} 的中心值 $c_{3i} = a|c_{1i} - \frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 c_{1j}|$, $i=1, 2, \dots, 6$, a 为固定常数. 中心值 c_{3i} 对应的不确定性 b_{3i} 由每个投资者根据自己的投资经验确定. 因此, 模糊集 B_{2i} 的隶属度函数可表示为:

$$\mu_{B_{2i}}(b_{2i}^v) = \begin{cases} 1 - \frac{|b_{2i}^v - c_{3i}|}{b_{3i}}, & |b_{2i}^v - c_{3i}| \leq b_{3i} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (30)$$

将 $\mu_{Y_i|B_{2i}}(y_i|B_{2i})$ 和 $\mu_{B_{2i}}(b_{2i}^v)$ 分别作为 Zadeh 合成推理规则中的 $\mu_{X|V}(x|V)$ 和 $\mu_V(v)$, 则式 (29) 可进一步表示为: $\mu_{Y_i}(y_i) = \max_{b_{2i}^v \in \mathbf{R}} \min [\mu_{Y_i|B_{2i}}(y_i|b_{2i}^v), \mu_{B_{2i}}(b_{2i}^v)]$, 通过分析可得, 该函数最大值的取值点式 (31).

将 b_{2i}^v 代入式 $\mu_{Y_i}(y_i) = 1 - \frac{|b_{2i}^v - c_{3i}|}{b_{3i}}$, 得到第 i 个投资者经过图 9 所示的投资者情绪传播网络后最终输出的模糊股价预期隶属度函数为式 (32).

$$b_{2i}^v = \frac{c_{3i} - \sum_{j=1}^6 w_{ij} b_{1j} + \sqrt{\left(\sum_{j=1}^6 w_{ij} b_{1j} - c_{3i}\right)^2 + 4 \left(c_{3i} \sum_{j=1}^6 w_{ij} b_{1j} + b_{3i} \left|y_i - \sum_{j=1}^6 w_{ij} c_{1j}\right|\right)}}{2} \quad (31)$$

$$\mu_{y_i}(y_i) = \begin{cases} 1 - \frac{\left|\sqrt{\left(\sum_{j=1}^6 w_{ij} b_{1j} - c_{3i}\right)^2 + 4 \left(c_{3i} \sum_{j=1}^6 w_{ij} b_{1j} + b_{3i} \left|y_i - \sum_{j=1}^6 w_{ij} c_{1j}\right|\right)} - \left(c_{3i} + \sum_{j=1}^6 w_{ij} b_{1j}\right)\right|}{\left|y_i - \sum_{j=1}^6 w_{ij} c_{1j}\right|}, & \left|y_i - \sum_{j=1}^6 w_{ij} c_{1j}\right| \leq \sum_{j=1}^6 w_{ij} b_{1j} + c_{3i} + b_{3i} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (32)$$

式 (32) 中非 0 隶属度函数值对应取值区间的求取过程见附录 E.

分析股票投资者情绪传播模型的计算结果可以发现: 第 i 个投资者最终的模糊股价预期中心值为所有投资者初始相应中心值的加权平均值 $\sum_{j=1}^6 w_{ij} c_{1j}$, 但是其隶属度函数的形式发生了变化, 模糊集合中包含了更多的元素, 即模糊股价预期变得“更模糊”了.

综上所述, 股票投资者在股吧社区中发帖并进行评论后, 其最终的投资者情绪中心值 (对股票价格的预期值) 由所有投资者初始的预期价格构成, 即每个投资者都受到其他投资者的影响. 同时, 由于中心输入节点以及不确定性输入节点的引入, 导致最终的投资者情绪本质上更“模糊”了.

4 结论

本文采用对称三角模糊集合表示投资者情绪, 运用模糊推理规则演化投资者情绪的传播过程, 构建了基于对称三角模糊集的股票投资者情绪传播模型, 并结合股票投资者情绪传播情形, 提出了三种基本的股票投资者情绪传播方式. 以股吧论坛中的股票投资者情绪传播为例, 验证了所提出模型的有效性, 并对模型的演化过程进行了严格的数学推导和证明. 在模型构建过程中, 主要得到如下结论:

1) 当投资者情绪的传播方式为模糊股价预期中心传播时, 表示投资者情绪的模糊集合中心值为中心提供者的投资者情绪中心值.

2) 当投资者情绪的传播方式为模糊股价预期不确定性传播时, 投资者情绪的中心值保持不变, 但其隶属度函数形式发生了变化. 分析最终的无条件隶属度函数发现, 非 0 隶属度函数对应的取值区间增大, 表示投资者情绪的模糊集合包含了更多元素, 变得更“模糊”了.

3) 当投资者情绪的传播方式为模糊股价预期中心及不确定性传播时, 投资者情绪的中心值为中心提供者的投资者情绪中心值, 投资者情绪的隶属度函数形式发生了改变.

此外, 股票投资者情绪的不确定性严格上讲是一个非对称不确定性问题, 但在模型构建过程中, 基于非对称隶属度函数的推导过程异常复杂. 对称三角函数作为非对称三角函数的一种特殊形式, 其非 0 隶属度函数值取值区间的确定可为非对称三角函数相应取值区间的确定提供有益的参考, 从而为非对称不确定性环境下的股票投资者情绪传播模型研究奠定良好的基础.

附录 A

式 (9) 中非 0 隶属度函数值对应取值区间的推导.

模糊集 X 的无条件隶属度函数值只在以下两种情形下非 0:

1) $c_2 \geq x$, 且 $c_2 - x \leq b_1 + b_2$, 即: $-b_1 - b_2 \leq x - c_2 \leq 0$.

2) $c_2 \leq x$, 且 $x - c_2 \leq b_1 + b_2$, 即: $0 \leq x - c_2 \leq b_1 + b_2$.

取交集, 得到非 0 隶属度函数值的取值区间为: $-b_1 - b_2 \leq x - c_2 \leq b_1 + b_2$, 即模糊集 X 的无条件非 0 隶属度值的取值区间为: $|x - c_2| \leq b_1 + b_2$.

附录 B

式 (13) 中非 0 隶属度函数值对应取值区间的推导.

由 $|x - c_1| \leq b_1^v$, 得 $c_1 - b_1^v \leq x \leq c_1 + b_1^v$, 再由 $|b_1^v - c_2| \leq b_2$, 得 $c_2 - b_2 \leq b_1^v \leq c_2 + b_2$, 将 $c_2 + b_2$ 代入 b_1^v , 可得 $c_1 - b_1^v$ 的最小值为 $c_1 - c_2 - b_2$, 并且 $c_1 + b_1^v$ 的最大值为 $c_1 + c_2 + b_2$. 由此, 得到模糊集 X 的无条件非 0 隶属度值的取值区间为 $c_1 - c_2 - b_2 \leq x \leq c_1 + c_2 + b_2$, 即 $|x - c_1| \leq c_2 + b_2$.

附录 C

引理 1 的证明.

采用数学归纳法证明引理 1, 首先考虑 $n = 2$ 的情形, 即 $Y_2 = w_1X_1 + w_2X_2$. 已知模糊集 X_1 和 X_2 的隶属函数为:

$$\mu_{X_i}(x_i) = \begin{cases} 1 - \frac{|x_i - c_i|}{b_i}, & |x_i - c_i| \leq b_i, \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, i = 1, 2,$$

根据 Zadeh 的扩展原理^[31], Y_2 的隶属度函数可由下式获得:

$$\mu_{Y_2}(y_2) = \max_{y_2 = w_1x_1 + w_2x_2} \min [\mu_{X_1}(x_1), \mu_{X_2}(x_2)] \quad (C1)$$

由 $y_2 = w_1x_1 + w_2x_2$ 可得 $x_2 = \frac{1}{w_2}(y_2 - w_1x_1)$, 式 (C1) 变为式 (C2).

$$\mu_{Y_2}(y_2) = \max_{x_1 \in \mathbf{R}} \min [\mu_{X_1}(x_1), \mu_{X_2}(x_2)]$$

$$= \max_{x_1 \in \mathbf{R}} \min \left[\begin{cases} 1 - \frac{|x_1 - c_1|}{b_1}, & |x_1 - c_1| \leq b_1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \right],$$

$$\left[\begin{cases} 1 - \frac{\left| \frac{1}{w_2}(y_2 - w_1x_1) - c_2 \right|}{b_2}, \\ \left| \frac{1}{w_2}(y_2 - w_1x_1) - c_2 \right| \leq b_2 \\ 0, \text{ 其他} \end{cases} \right] \quad (C2)$$

$$\frac{1}{w_2}(y_2 - w_1x_1) - c_2 = \frac{w_1}{w_2} \left(\frac{y_2}{w_1} - \frac{w_2c_2}{w_1} - x_1 \right),$$

因此, 式 (C2) 变为式 (C3).

$$\mu_{Y_2}(y_2) = \max_{x_1 \in \mathbf{R}} \min \left[\begin{cases} 1 - \frac{|x_1 - c_1|}{b_1}, & |x_1 - c_1| \leq b_1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \right],$$

$$\left[\begin{cases} 1 - \frac{\left| x_1 - \left(\frac{y_2}{w_1} - \frac{w_2c_2}{w_1} \right) \right|}{b_2 \frac{w_2}{w_1}}, & \left| x_1 - \left(\frac{y_2}{w_1} - \frac{w_2c_2}{w_1} \right) \right| \leq b_2 \frac{w_2}{w_1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \right] \quad (C3)$$

式 (C2) 的最大值取值点为 $x_1 = b_1y_2 + w_2b_2c_1 - w_2c_2b_1/w_1b_1 + w_2b_2$, 代入式 (C2) 可得: $1 - |1/w_2(y_2 -$

$$w_1x_1) - c_2|/b_2 = 1 - |y_2 - w_1c_1 - w_2c_2| / (w_1b_1 + w_2b_2).$$

模糊集合 Y_2 在以下两种情况下取到非 0 隶属度函数值:

- 1) $\frac{y_2}{w_1} - \frac{w_2c_2}{w_1} \leq c_1$ 且 $\frac{y_2}{w_1} - \frac{w_2c_2}{w_1} - c_1 \leq b_1 + b_2 \frac{w_2}{w_1}$,
即: $w_1c_1 + w_2c_2 \leq y_2 \leq w_1c_1 + w_2c_2 + w_1b_1 + w_2b_2$.
- 2) $\frac{y_2}{w_1} - \frac{w_2c_2}{w_1} \leq c_1$ 且 $c_1 - \left(\frac{y_2}{w_1} - \frac{w_2c_2}{w_1} \right) \leq b_1 + b_2 \frac{w_2}{w_1}$,
即: $w_1c_1 + w_2c_2 - w_1b_1 - w_2b_2 \leq y_2 \leq w_1c_1 + w_2c_2$.

对上述两种情况 y_2 的取值区间取交集, 得到模糊集合 Y_2 非 0 隶属度函数的取值区间为 $w_1c_1 + w_2c_2 - w_1b_1 - w_2b_2 \leq y_2 \leq w_1c_1 + w_2c_2 + w_1b_1 + w_2b_2$ 即: $|y_2 - w_1c_1 - w_2c_2| \leq w_1b_1 + w_2b_2$.

至此, 可以得到模糊集合 Y_2 的隶属度函数为式 (C4).

$$\mu_{Y_2}(y_2) = \begin{cases} 1 - \frac{|y_2 - w_1c_1 - w_2c_2|}{w_1b_1 + w_2b_2}, \\ |y_2 - w_1c_1 - w_2c_2| \leq w_1b_1 + w_2b_2 \\ 0, \text{ 其他} \end{cases} \quad (C4)$$

假定式 (C4) 对 $n = k$ 成立, 即 $Y_k = w_1X_1 + w_2X_2 + \dots + w_nX_k$ 时, 其隶属度函数为式 (C5).

$$\mu_{Y_k}(y_k) = \begin{cases} 1 - \frac{\left| y_k - \sum_{i=1}^k w_i c_i \right|}{\sum_{i=1}^k w_i b_i}, \\ \left| y_k - \sum_{i=1}^k w_i c_i \right| \leq \sum_{i=1}^k w_i b_i \\ 0, \text{ 其他} \end{cases} \quad (C5)$$

则 $n = k + 1$ 时, 有 $Y_{k+1} = w_1X_1 + w_2X_2 + \dots + w_kX_k + w_{k+1}X_{k+1} = Y_k + w_{k+1}X_{k+1}$, 模糊集 Y_{k+1} 的隶属度函数为:

$$\mu_{Y_{k+1}}(y_{k+1}) = \max_{y_{k+1} = y_k + w_{k+1}x_{k+1}} \min [\mu_{Y_k}(y_k), \mu_{X_{k+1}}(x_{k+1})] \quad (C6)$$

其中,

$$\mu_{X_{k+1}}(x_{k+1}) = \begin{cases} 1 - \frac{|x_{k+1} - c_{k+1}|}{b_{k+1}}, \\ |x_{k+1} - c_{k+1}| \leq b_{k+1} \\ 0, \text{ 其他} \end{cases}$$

用 $y_k = y_{k+1} - w_{k+1}x_{k+1}$ 代替 y_k , 得到式 (C7).

$$\mu_{Y_{k+1}}(y_{k+1}) = \max_{x_{k+1} \in \mathbf{R}} \min \left[\begin{array}{l} \left\{ 1 - \frac{\left| y_{k+1} - w_{k+1}x_{k+1} - \sum_{i=1}^k w_i c_i \right|}{\sum_{i=1}^k w_i b_i}, \left| y_{k+1} - w_{k+1}x_{k+1} - \sum_{i=1}^k w_i c_i \right| \leq \sum_{i=1}^k w_i b_i, \right. \\ \left. 0, \text{其他} \right. \\ \left. \left\{ 1 - \frac{|x_{k+1} - c_{k+1}|}{b_{k+1}}, |x_{k+1} - c_{k+1}| \leq b_{k+1} \right. \right. \\ \left. \left. 0, \text{其他} \right. \right] \quad (C7)$$

由 $\frac{x_{k+1} - c_{k+1}}{b_{k+1}} = \frac{y_{k+1} - w_{k+1}x_{k+1} - \sum_{i=1}^k w_i c_i}{\sum_{i=1}^k w_i b_i}$ 获得式 (C7) 最大值的取值点, 将取值点 x_{k+1} 代入 $1 - \frac{\left| y_{k+1} - w_{k+1}x_{k+1} - \sum_{i=1}^k w_i c_i \right|}{\sum_{i=1}^k w_i b_i}$ 得到模糊集合 Y_{k+1} 的非 0 隶属度函数为 $1 - \frac{\left| y_{k+1} - \sum_{i=1}^{k+1} w_i c_i \right|}{\sum_{i=1}^{k+1} w_i b_i}$.

$$\mu_{Y_{k+1}}(y_{k+1}) = \begin{cases} 1 - \frac{\left| y_{k+1} - \sum_{i=1}^{k+1} w_i c_i \right|}{\sum_{i=1}^{k+1} w_i b_i}, & \left| y_{k+1} - \sum_{i=1}^{k+1} w_i c_i \right| \leq \sum_{i=1}^{k+1} w_i b_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (C8)$$

模糊集合 Y_{k+1} 非 0 隶属度函数对应区间的求取过程如下:

由 $\left| y_{k+1} - w_{k+1}x_{k+1} - \sum_{i=1}^k w_i c_i \right| \leq \sum_{i=1}^k w_i b_i$ 可得: $w_{k+1}x_{k+1} + \sum_{i=1}^k w_i c_i - \sum_{i=1}^k w_i b_i \leq y_{k+1} \leq w_{k+1}x_{k+1} + \sum_{i=1}^k w_i c_i + \sum_{i=1}^k w_i b_i$.

由 $|x_{k+1} - c_{k+1}| \leq b_{k+1}$ 可得 $c_{k+1} - b_{k+1} \leq x_{k+1} \leq c_{k+1} + b_{k+1}$.

1) 当 x_{k+1} 取 $c_{k+1} - b_{k+1}$ 时, y_{k+1} 的下限为: $w_{k+1}c_{k+1} - w_{k+1}b_{k+1} + \sum_{i=1}^k w_i c_i - \sum_{i=1}^k w_i b_i$, 即 $\sum_{i=1}^{k+1} w_i c_i - \sum_{i=1}^{k+1} w_i b_i$.

2) 同理可得, 当 x_{k+1} 取 $c_{k+1} + b_{k+1}$ 时, y_{k+1} 的上限为 $\sum_{i=1}^{k+1} w_i c_i + \sum_{i=1}^{k+1} w_i b_i$, 即 y_{k+1} 的取值区间为: $\sum_{i=1}^{k+1} w_i c_i - \sum_{i=1}^{k+1} w_i b_i \leq y_{k+1} \leq \sum_{i=1}^{k+1} w_i c_i + \sum_{i=1}^{k+1} w_i b_i$.

至此, 得到模糊集合 Y_{k+1} 的隶属度函数为:

附录 D

式 (29) 中非 0 隶属度函数取值区间的推导.

模糊集 Y_i 在以下两种情形下取到非 0 隶属度函数值:

- 1) $\sum_{j=1}^6 w_{ij}c_{1j} \geq y_i, \sum_{j=1}^6 w_{ij}c_{1j} - y_i \leq \sum_{j=1}^6 w_{ij}b_{1j} + B_{2i}$, 即: $\sum_{j=1}^6 w_{ij}c_{1j} - \sum_{j=1}^6 w_{ij}b_{1j} - B_{2i} \leq y_i \leq \sum_{j=1}^6 w_{ij}c_{1j}$.
- 2) $\sum_{j=1}^6 w_{ij}c_{1j} \leq y_i, y_i - \sum_{j=1}^6 w_{ij}c_{1j} \leq \sum_{j=1}^6 w_{ij}b_{1j} + B_{2i}$, 即 $\sum_{j=1}^6 w_{ij}c_{1j} \leq y_i \leq \sum_{j=1}^6 w_{ij}c_{1j} + \sum_{j=1}^6 w_{ij}b_{1j} + B_{2i}$.

综合分析可得, y_i 的取值范围为: $\sum_{j=1}^6 w_{ij}c_{1j} - \sum_{j=1}^6 w_{ij}b_{1j} - B_{2i} \leq y_i \leq \sum_{j=1}^6 w_{ij}c_{1j} + \sum_{j=1}^6 w_{ij}b_{1j} + B_{2i}$, 即 $\left| y_i - \sum_{j=1}^6 w_{ij}c_{1j} \right| \leq \sum_{j=1}^6 w_{ij}b_{1j} + B_{2i}$.

附录 E

式 (32) 中非 0 隶属度函数值对应取值区间的推导.

当 $b_{2i}^v + \sum_{j=1}^6 w_{ij}b_{1j} = \left| y_i - \sum_{j=1}^6 w_{ij}c_{1j} \right|$ 时, 得到函数 $\mu_{Y_i|b_{2i}^v}(y_i|b_{2i}^v)$ 与横轴的交点为 $b_{2i}^v = \left| y_i - \sum_{j=1}^6 w_{ij}c_{1j} \right| - \sum_{j=1}^6 w_{ij}b_{1j}$.

$\sum_{j=1}^6 w_{ij}c_{1j} \left| - \sum_{j=1}^6 w_{ij}b_{1j} \right|$, 则式 (30) 中非 0 隶属度值的取值区间为 $b_{2i}^v \leq c_{3i} + b_{3i}$, 即 $\left| y_i - \sum_{j=1}^6 w_{ij}c_{1j} \right| \leq \sum_{j=1}^6 w_{ij}b_{1j} + c_{3i} + b_{3i}$.

References

- Wen Dan-Yan, Ma Chao-Qun, Wang Kun. A multi-source data driven decision model for automatic trading systems. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(8): 1505-1517
(文丹艳, 马超群, 王琨. 一种多源数据驱动的自动交易系统决策模型. 自动化学报, 2018, **44**(8): 1505-1517)
- Sun Yan-Lin, Chen Shou-Dong, Liu-Yang. Forecast of stock price fluctuation based on the perspective of volume information in stock and foreign exchange market. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2019, **39**(4): 935-945
(孙彦林, 陈守东, 刘洋. 基于股市和汇市成交量信息视角的股价波动预测. 系统工程理论与实践, 2019, **39**(4): 935-945)
- Wu Yan-Ran, Han Li-Yan. Imperfect rationality, sentiment and closed-end-fund puzzle. *Economic Research Journal*, 2007, (3): 117-129
(伍燕然, 韩立岩. 不完全理性、投资者情绪与封闭式基金之谜. 经济研究, 2007, (3): 117-129)
- Odbal, Wang Zeng-Fu. Emotion analysis model using compositional semantics. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(12): 2125-2137
(乌达巴拉, 汪增福. 一种基于组合语义的文本情绪分析模型. 自动化学报, 2015, **41**(12): 2125-2137)
- Guo Dong-Wei, Wu Yun-Na, Zou Yun, Meng Xiang-Yan. Simulation and modeling of non-rational game based public opinion spread. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(8): 1721-1732
(郭东伟, 乌云娜, 邹蕴, 孟祥燕. 基于非理性博弈的舆情传播仿真建模研究. 自动化学报, 2014, **40**(8): 1721-1732)
- Bu Hui, Xie Zheng, Li Jia-Hong. Investor sentiment extracted from internet stock message boards and its effect on Chinese stock market. *Journal of Management Sciences in China*, 2018, **21**(4): 91-106
(部慧, 解峥, 李佳鸿. 基于股评的投资者情绪对股票市场的影响. 管理科学学报, 2018, **21**(4): 91-106)
- Sul H K, Dennis A R, Yuan L. Trading on Twitter: using social media sentiment to predict stock returns. *Decision Sciences*, 2017, **48**(3): 454-488
- Xu Qi-Fa, Bo Zhong-Pu, Jiang Cui-Xia. Exploring the relationship between Internet sentiment and stock market returns based on quantile granger causality analysis. *Journal of Management Science*, 2017, **30**(3): 147-160
(许启发, 伯仲璞, 蒋翠侠. 基于分位数 Granger 因果的网络情绪与股市收益关系研究. 管理科学, 2017, **30**(3): 147-160)
- Scott J. *Social Network Analysis* (4th Edition), London, U.K.: Sage Publications Ltd, 2017.
- Acemoglu D, Ozdaglar A. Opinion dynamics and learning in social networks. *Dynamic Games and Applications*, 2011, **1**(1): 3-49
- Yuan Y. Market-wide attention, trading, and stock returns. *Journal of Financial Economics*, 2015, **116**(3): 548-564
- Wu Xuan, Tian Gao-Liang, Si Yi. Internet media management and stock liquidity. *Journal of Management Science*, 2017, **30**(6): 51-64
(吴璇, 田高良, 司毅. 网络舆情管理与股票流动性. 管理科学, 2017, **30**(6): 51-64)
- Bozorgi A, Samet S, Kwisthout J, Wareham T. Community-based influence maximization in social networks under a competitive linear threshold model. *Knowledge-Based Systems*, 2017, **134**: 149-158
- Zhang X, Jiang D, Alsaedi A, Hayat T. Stationary distribution of stochastic SIS epidemic model with vaccination under regime switching. *Applied Mathematics Letters*, 2016, **59**: 87-93
- Xiong Xi, Qiao Shao-Jie, Wu Tao, Wu Yue, Han Nan, Zhang Hai-Qing. Spatio-temporal feature based emotional contagion analysis and prediction model for online social networks. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(12): 2290-2299
(熊熙, 乔少杰, 吴涛, 吴越, 韩楠, 张海清. 基于时空特征的社交网络情绪传播分析与预测模型. 自动化学报, 2018, **44**(12): 2290-2299)
- Liu X, He D, Liu C. Information diffusion nonlinear dynamics modeling and evolution analysis in online social network based on emergency events. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2019, **6**(1): 8-19
- Zhuang Y, Yagan O. Information propagation in clustered multilayer networks. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2016, **3**(4): 211-224
- Jackson M O. *Social and Economic Networks*. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2008
- Wang L X, Mendel J M. Fuzzy opinion networks: a mathematical framework for the evolution of opinions and their uncertainties across social networks. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2016, **24**(4): 880-905
- Wang L X, Mendel J M. Fuzzy networks: What happens when fuzzy people are connected through social networks. In: Proceedings of the 2014 IEEE Symposium on Foundations of Computational Intelligence (FOCI). Orlando, FL, USA: IEEE, 2014. 30-37
- Wang L X. Hierarchical fuzzy opinion networks: top-down for social organizations and bottom-up for election. arXiv preprint, arXiv: 1901.00441, 2019
- Hommes C H. Heterogeneous agent models in economics and finance. *Handbook of Computational Economics*, 2006, 2: 1109-1186
- Wang L X. Modeling stock price dynamics with fuzzy opinion networks. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2017, **25**(2): 277-301
- Lux T. Estimation of an agent-based model of investor sentiment formation in financial markets. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2012, **36**(8): 1284-1302
- Anzilli L, Facchinetti G. A Fuzzy quantity mean-variance view and its application to a client financial risk tolerance model. *International Journal of Intelligent Systems*, 2016, **31**(10): 963-988
- Chen H M, Hu C F, Yeh W C. Option pricing and the greeks under gaussian fuzzy environments. *Soft Computing*, 2019, **23**(24): 13351-13374
- Baker M P, Wurgler J. Investor sentiment and the cross-section of stock returns. *Economic Management Journal*, 2006, **61**(4): 1645-1680
- Da Z, Engelberg J, Gao P. The sum of all FEARS investor sentiment and asset prices. *Review of Financial Studies*, 2014, **28**(1): 1-32
- Zadeh L A. Is there a need for fuzzy logic? *Information Sciences*, 2008, **178**(13): 2751-2779
- Zadeh L A. Outline of new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transaction Systems, Man, and Cybernetics*, 1973, **SMC-3**(1): 28-44
- Zadeh L A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I. *Information Sciences*, 1975, **8**(3): 199-249



王会东 山东财经大学管理科学与工程学院副教授. 2010 年获中国科学院自动化研究所博士学位. 主要研究方向为计算智能理论与应用, 二型模糊, 模糊决策. 本文通信作者.

E-mail: huidong.wang@ia.ac.cn

(WANG Hui-Dong Associate pro-

cessor at the School of Management Science and Engineering, Shandong University of Finance and Economics. He received his Ph. D. degree from the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in 2010. His research interest covers computational intelligence and its applications, type-2 fuzzy logic and fuzzy decision making. Corresponding author of this paper.)



李兆东 山东财经大学管理科学与工程学院硕士研究生. 主要研究方向为模糊舆情网络与投资者情绪.

E-mail: lzd190663182@163.com

(LI Zhao-Dong Master student at the School of Management Science and Engineering, Shandong Uni-

versity of Finance and Economics. His research interest covers fuzzy opinion networks and investor sentiment.)



姚金丽 山东财经大学管理科学与工程学院硕士研究生. 主要研究方向为模糊逻辑理论与应用, 模糊多属性决策.

E-mail: yjl2mm@126.com

(YAO Jin-Li Master student at the School of Management Science and Engineering, Shandong University of Finance and Economics. Her research interest covers fuzzy logic theory and applications and fuzzy multi-attribute decision making.)



余德淦 中山大学管理学院和中山大学现代会计与财务研究中心副研究员. 2017 年获得美国罗德岛大学博士学位. 主要研究方向为公司金融, 行为金融和供应链/金融交叉话题.

E-mail: yudegan@mail.sysu.edu.cn

(YU De-Gan Research assistant

professor at the Business School, Sun Yat-sen University. He also serves at the Center for Accounting, Finance and Institutions, Sun Yat-sen University. He received his Ph. D. degree from the University of Rhode Island in 2017. His research interest covers on corporate finance, behavioral finance, and the intersection between finance and supply chain.)