

控制与决策

Control and Decision

语言修饰集的研究现状与前景

徐泽水, 王丽娜

引用本文:

徐泽水, 王丽娜. 语言修饰集的研究现状与前景[J]. *控制与决策*, 2022, 37(1): 1–13.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1256>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于云模型和多层权重求解的多粒度语言大群体决策方法

Multi-granularity linguistic large group decision-making based on cloud model and multi-layer weight determination

控制与决策. 2021, 36(9): 2257–2266 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0102>

不确定语言信息下的大规模群体DEMATEL决策方法

Large-scale group DEMATEL decision making method under uncertain linguistic information

控制与决策. 2021, 36(8): 2023–2033 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1486>

基于语言共识模型的电子商务信用风险评价方法

An approach to E-commerce credit risk assessment based on linguistic consensus model

控制与决策. 2021, 36(6): 1465–1471 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1398>

基于犹豫度和相似度的专家权重确定方法及其应用

Expert weights determination method and application based on hesitancy degree and similarity measure

控制与决策. 2021, 36(6): 1482–1488 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1382>

大群体应急决策中考虑属性关联的偏好信息融合方法

Preference information fusion method of large groups emergency decision-making based on attributes association

控制与决策. 2021, 36(10): 2537–2546 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0117>

语言修饰集的研究现状与前景

徐泽水^{1,2†}, 王丽娜²

(1. 四川大学 商学院, 成都 610064; 2. 东南大学 经济管理学院, 南京 211189)

摘要: 语言修饰集作为一种刻画不确定信息的有效表达方式,用更加符合语言习惯的表达形式描述决策者对事物的评价结果. 与其他语言术语相比,语言修饰集旨在修正隶属函数使其在表达专家的决策信息过程中更具有有效性、客观性,因此基于语言修饰集的研究是非常必要的. 鉴于此,对语言修饰集的发展进行综述:首先回顾语言修饰集的研究背景;然后对语言修饰集在运算法则、语义量化、模糊逻辑、分类器等方面的发展进行回顾,同时介绍一些基于语言修饰集在情感分析、工程风险管理等方面的应用;最后展望语言修饰集的研究前景.

关键词: 语言计算; 语言修饰集; 套期保值代数; 决策分析

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1256

引用格式: 徐泽水,王丽娜. 语言修饰集的研究现状与前景[J]. 控制与决策, 2022, 37(1): 1-13.

A survey of linguistic hedges: Progress and prospect

XU Ze-shui^{1,2†}, WANG Li-na²

(1. Business School, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. School of Economics and Management, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: As an efficient approach to illustrate ambiguous knowledge, the linguistic hedge sets express decision makers' interpretations in line with linguistic habits. Compared with other linguistic terms, the linguistic hedge sets aim to modify the member function, so they are much more valid and objective in expressing experts' decision-making information. Thus, it is necessary to study the linguistic hedge sets. In this paper, we present the retrospection of the research of linguistic hedge sets. we first review the research background of the linguistic hedge sets. Then, we recall the operational laws, semantic quantification, fuzzy logic, and classifiers of linguistic hedge sets. At the same time, we present some applications of the linguistic hedge sets in sentiment analysis and engineering risk management. Finally, we look forward to the future research of linguistic hedge sets.

Keywords: computing with words; linguistic hedge sets; hedging algebra; decision making

0 引言

决策分析是决策者在自身价值观、个体偏好以及认知结构的基础上通过分析备择决策方案从而选出一个或若干个决策方案的过程. 一般情形下,一个基本的决策过程包括识别决策问题、确定决策目标和选择决策方案等步骤. 起初,一些确定的数学模型被用来解决简单的决策问题,随着社会生活的复杂性、经济活动的不确定性以及决策过程未知因素的增加,使得决策专家仅仅依靠简单的数学模型来制定决策方案变得日益困难. 基于这样的情况以及决策问题在人们日常生活中的普遍性,找出更为有效的决策信息表达方式是决策科学发展以及人类活动的必然要求.

在决策理论发展过程中,人们对问题的理解打破了非此即彼的认知,人们的思维中存在许多不确定的概念,例如天气应该很好、方案目前不错、心情应该很好等,这些不确定的概念所描述的对象是不能够通过“是”或“否”来简单描述的. 鉴于这些概念隶属对象的不明确以及其在决策过程中的重要性,Zadeh^[1]在1965年提出了模糊集(fuzzy set)的概念以及之后一系列的理论发展,很好地解决了隶属关系不明确的问题. 实际上,在表达不确定信息时,人们倾向于语言表达方式. 虽然语言变量在精确程度上不如传统的数值变量精确,但是比较接近自然语言以及人类的认知习惯. 因此,这种通过定性的方式表达决策信息的自然语言变量是一种有效的表达不确定信息的

收稿日期: 2021-07-19; 录用日期: 2021-10-15.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(71771155, 72071135).

†通讯作者. E-mail: xuzeshui@263.net.

工具. 在一些复杂的决策环境中, 决策专家可能会在几个决策值之间表现出犹豫, 因此凭借单个的语言术语并不能够准确表达专家的犹豫. 鉴于此, Torra^[2]提出了犹豫模糊集 HFSs (hesitant fuzzy sets), 其允许决策专家在评估决策信息时可以有多个隶属度. 然而, 在实际决策过程中, 决策专家的个人认识以及经验等使得不同隶属度具有不同程度的重要性, 概率语言术语集 PLTSs (probabilistic linguistic term sets) 的提出很好地解决了这一问题. 在决策过程中, 给定每一个隶属度对应的概率信息, 很好地表达了不同隶属度之间的重要性^[3]. 由于事物的不确定性, 专家很难用确定的术语来表达自己的观点, 不确定语言术语集 ULTs (uncertain linguistic terms)、犹豫模糊语言集 HFLTSS (hesitant fuzzy linguistic sets) 和扩展的犹豫模糊语言集 EHFLTSS (extended hesitant fuzzy linguistic term sets) 都可以作为决策专家表达不确定信息的有效工具. 然而, 在表述不确定信息的过程中, 决策专家并不能明确表达出决策信息所在的区间 (如 ULT 和 HFLTSS). 事实上, 专家习惯用语言修饰词进行表达, 例如“天气非常好、心情非常好、方案可能有效等”, 其中的“非常”和“可能”为语言修饰词. Zadeh^[4]提出语言修正集 (linguistic modifiers) (又被称作语言修饰集 (linguistic hedges)) 的概念, 通过修改隶属函数的形状对初始的模糊集进行转化. 例如, 提出的 CON (contraction) 算子用于将模糊集 A 的隶属函数 $u(A)$ 映射到 $u_{\text{very}}(A)$, 从而, 隶属函数值小的元素的隶属度减少, 而隶属函数值大的元素其隶属度增加. 语言修饰集大致可以分为以下几类: 首先, 虽然其表达方式与模糊逻辑兼容, 但是具有象征性表达的能力; 其次, 给出模糊含义的比较元素, 并对可用工具进行分类; 最后, 允许在推理规则中使用渐进知识的能力^[5]. 基于修饰后的语言表达式的隶属函数与原先隶属函数的关系, 可以将语言修饰词大致分为两类: 含有修饰词和不含有修饰词. 在含有修饰词中认为存在语义包含关系, 而不含有修饰词则是将一个术语修改为一个新的术语, 即术语之间不存在包含关系. 可以看到, 在语言修饰集中, 修饰词描述了不确定程度, 并且通过不同程度的修饰词强化或者弱化语言术语等. 如“非常”是表示程度强化的修饰词, 而“差不多”“大体上”是表示弱化程度的修饰词. 在语言修饰集中, 修饰词并没有改变语言术语的特性, 只是更加详细地表达了语言术语的不确定程度. 因此, 语言修饰集是一个有效地表达不确定程度的工具.

综上所述, 运用语言修饰集解决不确定决策问题

具有重要的理论意义和广阔的应用前景. 鉴于语言修饰的重要性, 本文将系统地回顾语言修饰集的发展, 主要包括: 基于语言修饰集的运算法则、语义量化、基于模糊逻辑的理论发展以及在模糊分类器的发展. 在此基础上分析语言修饰集在实际决策方面的应用, 并展望语言修饰集的未来研究方向.

1 语言修饰集的发展现状

为了更好地处理定性信息, Zadeh^[6-8]提出的词语计算 CWW (computing with words) 在理论上得到了快速发展, 为决策专家处理语言信息提供了极大的便利. 词语计算侧重于自然语言的语义表达而不是确切的数字, 在词语计算中, 两个重要的因素是语言变量和语言粒度, 其中语言变量指决策信息的变量是基于自然语言或人工语言的词或句子而不是数值. 虽然语言变量很难达到数值的精确性, 但是很符合人类的思想认识, 为了更加有效地表述决策信息的不确定性, 在词语计算过程中引入不确定语言表达方式. 目前研究的不确定语言表达式主要包括不确定自然语言表达和不确定人工语言表达, 其中不确定自然语言表达式以自然语言的形式表达决策信息, 比较符合人类语言习惯; 不确定人工语言表达通过规定的人工语言法则表达决策信息^[9]. 语言决策相关研究的丰富和发展基于 Xu^[10]在 2004 年提出的虚拟语言术语模型, 常见的几种自然语言表达模型 (如不确定语言集 ULT^[10]、犹豫模糊语言术语集 HFLTSS^[11]、标度语义模型 (label semantic model)^[12]) 和几种人工语言表达式 (如证据推理模型 (evidential reasoning)^[13]、概率语言术语集 PLTS^[3]、离散模糊数^[14]等) 的基本特征见表 1.

表 1 几种不确定语言术语的特征

类型	模型	特征
自然	ULT	$[s_{\alpha-1}, s_{\alpha+1}]$
语言	HFLTSS	$[s_{\alpha-1}, s_{\alpha}, s_{\alpha+1}]$
表达式	标度语义模型	通过逻辑词链接的语言表达式
人工	证据推理	信度结构表达的语言表达式
语言	离散模糊数	若干数字术语表达及其隶属度
表达式	语言犹豫模糊集	若干语言术语及其犹豫形式的隶属度
	PLTS	$s_{\alpha}(p)$

图 1 显示了语言修饰集目前的主要研究方向是偏好关系、达成一致性的机制、模糊逻辑、分类器问题等. 为了进一步更好地分析语言修饰集的研究状况, 绘制语言修饰集发展流程如图 2 所示. 由图 2 可以看出, 语言修饰集大概自 20 世纪 60 年代开始发展, 2005 年左右语言修饰集在 Web of Science 的发文量逐年增加.

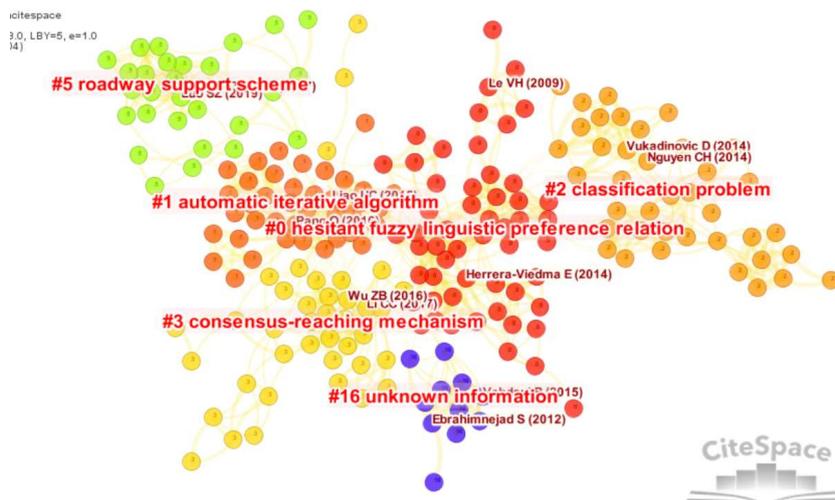


图1 语言修饰集的研究热点分布

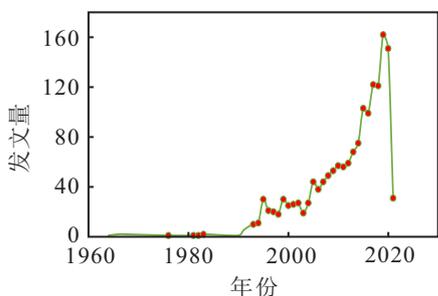


图2 语言修饰集年份发展

图3展示了语言修饰集的一些经典工作,如Zadeh^[4]在1972年提出的几种常见的修饰词:非常、或多或少等可以很好地表达专家的不确定程度。随后,Martine^[15]于2002给出了几种常见的语言修饰词

的量化方法。同年,Ho等^[16]将语言修饰词与代数相结合,提出了套期保值代数的概念以及相关的运算法则。2004年,De等^[17]给出了基于模糊关系的语言修饰,这为基于语言修饰词模糊偏好关系的提出奠定了基础。Cornelis等^[18]将一般的模糊语言修饰集拓展到直觉模糊环境下的语言修饰集,使得语言修饰集的发展具有了多样化。随着语言修饰集、分类器、模糊逻辑等的广泛应用,Chatterjee等^[19]在2006年提出了基于语言修饰的神经模糊分类器,随后这一概念被广泛应用。语言修饰词的常见功能有加强、转移和削弱作用,Wang等^[20]就语言修饰词的削弱作用进行研究,提出了弱语言修饰集,并给出了弱语言修饰集一致性检验的相关算法。

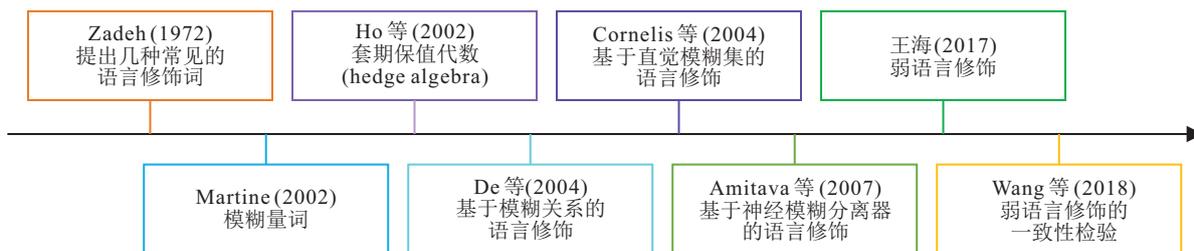


图3 语言修饰集内容发展流程

通过表1可以看出,自然语言表达模式主要是基于连接词组合多个可能的术语,虽然有效地表达了不确定程度,但在实际决策过程中,决策者可能会根据不确定程度去选择一个可以表示程度修饰的词语来表示该术语。如,明天天气很好,由于未来气象的不确定性以及历史的相关数据,便可以说“明天天气差不多很好”,其中“差不多”便是表达了不确定程度的修饰词。在模糊集情形下,通过修饰词可以实现将一个模糊集映射到另一个模糊集上^[17]。目前基于语言修

饰词的表示模型主要有两类:一是修改原语言术语的隶属函数,如幂函数模型和平移修饰词模型;二是基于语言术语的相似关系表示模型。其中Zadeh提出的幂函数模型属于第1类语言修饰词模型,在该模型中,每个修饰集都有其对应的一个幂函数参数,从而可以实现原语言术语隶属度函数的修正。在幂函数模型中,修饰集的理论发展主要集中在数据库的查询与优化^[21]、模糊逻辑^[22-24]以及模糊分类器^[19,25-27]等方面。此外,还可以通过平移修饰词将原先的语言术

语隶属度修饰至一个可接受的程度^[28].

1.1 语言修饰集的基本概念

在介绍语言修饰集的理论发展之前,有必要就语言修饰集的基本概念和相关运算法则予以介绍.

定义1^[4] 给定非空论域 U , U 上的模糊集 X 由隶属函数 $u_x : U \rightarrow [0, 1]$ 确定. 对于 $u \in U$, $u_x(u)$ 为隶属度. 语言修饰非常(very)、或多或少(more or less)和轻微地(lightly)可以分别表示为

$$u_{\text{very}}(X)(u) = u_X^2(u). \tag{1}$$

$$u_{\text{more or less}}(X)(u) = u_X^{0.5}(u). \tag{2}$$

$$u_{\text{slightly}}(X)(u) = \begin{cases} 2u_X^2(u), & 0 \leq u_X(u) < 0.5; \\ 1 - 2(1 - u_X(u))^2, & 0.5 \leq u_X(u) \leq 1. \end{cases} \tag{3}$$

定义2^[29] 给定一个集合 T , 模糊集是从 T 到 $[0, 1]$ 的一个子集的映射函数, $u(y)$ 是 $[0, 1]$ 中几个可能的数的集合, 表示为 $y \in T$ 属于集合 B 的可能程度, 对应的模糊算子如下:

1) 集成算子(concentration operator)

$$\text{CONC}(T) = \{(y, (u(y))^n) | y \in U\}. \tag{4}$$

2) 扩张算子(dilation operator)

$$\text{DILTN}(T) = \{(y, (u(y))^{1/n}) | y \in U\}. \tag{5}$$

3) 对比算子(contrast operator)

$$\text{CONT}(T) = \begin{cases} 2(u(y))^n, & u(y) \leq 0.5; \\ 1 - 2(1 - u(y))^n, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{6}$$

定义3^[30] 给定 $\mathcal{AX} = (X, G, C, H_I, \leq)$ 是 \mathcal{X} 上的套期保值代数(hedge algebra). 其中: (X, \leq) 为一个有序结构, X 是语言变量 \mathcal{X} 上的语言术语集, $X \subseteq$

$\text{Dom}(\mathcal{X})$, \leq 是 \mathcal{X} 上的偏序关系; (G) 为正语言术语(c^+)、负语言术语(c^-), 且 $c^- \leq c^+$; $C = \{0, W, 1\}$ 为一个常数集, 满足 $0 \leq c^- \leq W \leq c^+ \leq 1$, W 为一个中性词; $H_I = H \cup I$, H 为 \mathcal{X} 的一个修饰集.

例1 在警察与小偷的问询过程中, 警察认为小偷回答的真假程度可以通过语言修饰集表示, 其中语言术语是真的(true)、中等(medium)和假的(false), 修饰词是非常(very)、或多或少(more or less)、轻微地(slightly)等. 在套期保值代数情形下, $c^- = \text{false}$, $c^+ = \text{true}$, $W = \text{medium}$, 修饰集 $H = \{\text{very, more or less, slightly}\}$, 从而警察认为小偷回答真实程度可以表示为

$$X = \{0, \text{false, medium, true, 1}\} \cup \{\delta \text{false} : \delta \in H^*\} \cup \{\tau \text{true} : \tau \in H^*\},$$

其中 H^* 为所有修饰词的集合, 包括空集. 综上, 警察认为小偷回答的真假程度如图4所示.

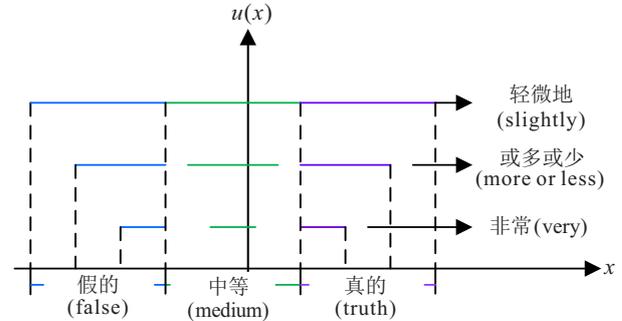


图4 基于语言修饰集的真假程度表示

1.2 语言修饰集的理论发展

在理论上, 语言修饰集的发展主要集中在运算法则、语义量化、模糊逻辑、分类器等方面, 其发展的基本特点如表2所示.

表2 语言修饰集的基本发展

主题	相关文献	特点
语言修饰集的相关运算	[20, 31-34]	距离、一致性、认知图
隶属函数的修正	[30, 35-36]	梯形模糊集的扩展、语义标度的修正
语义的量化	[37-42]	语义拓扑学、真值修饰符
模糊逻辑	[16, 43-46]	对偶修饰词、套期保值代数
模糊分类器	[27, 47-52]	时间序列预测模型、语言规则库

1) 基于不同语言修饰词大小比较的重要性, Alkouri 等^[31] 定义了语言修饰集的几种距离, 如 Hamming 距离、Euclidean 距离、Normalized Hamming 距离和 Normalized Euclidean 距离, 以此丰富语言修饰集的理论发展, 从而使得语言修饰集的大小得到有效度量, 为语言修饰集在其他方面的实际应用奠定了理论基础. 在语言修饰集中, 一致性的度量是确定

偏好关系的有效方法之一^[32]. 因此, 在计算弱偏好关系和加性一致性的基础上, 弱语言修饰得到了很好的度量^[20]. 在决策过程中, 对备选方案进行评价后, 需要集成专家的意见, 因此合适的信息融合方式显得尤为重要, 如 Wang 等^[20] 提出的弱语言修饰的加权平均算子(LTWHWA)使得决策信息得到了有效融合, 促进了决策过程的发展. 鉴于现有语言结构较不丰富,

为了更好地对比分析两个不同的语言术语以及更有效地通过一种算法直接表达语言集, Ho等^[53]将语言术语嵌入到自然代数的有序结构中,从而定义了一种直接的自然语言术语的语言推理方法,在此算法中,这些度量必须满足语言修饰之间的代数关系. 结果表明,基于模糊推理的代数结构的语言修饰比基于模糊集的语言修饰评价结果更准确. 因此,基于代数结构的套期保值代数(hedge algebras)被用来定义修饰程度以及它们之间的关系^[54],基于此,各种扩展形式的套期保值代数被应用于模糊逻辑中^[43,55-56]. Le等^[33]在模糊逻辑和套期保值代数的基础上建立了一个逻辑系统,有助于自然语言的表达和推理,其可以直接分析语言计算从而查询真值的下限,并且在逻辑程序的基础上证明了语义过程的完整性. 首先,该方法从套期保值代数中提取语言真值变量的语言真值域;然后,介绍了模糊语言逻辑编程理论,定义了声明性语义、过程语义和定点语义,并证明了其完备性. Cornelis等^[18]运用一些复杂的表达来表示直觉模糊集的语言修饰词,并分析其中的犹豫程度,以及如何在语言修饰集的框架中修改直觉模糊集的隶属度和非隶属度,此研究使得基于语义修饰的直觉模糊集有了较好的发展. 为了更好地介绍语言术语集在定性和定量表达的数学应用,在介绍和分析已有套期保值代数完备性的基础上,通过添加“限制”元素精炼套期保值代数. 在套期保值代数的基础上, Han等^[57]提出了一种使用语言认知图进行单词推理的方法,通过认知图的节点和边表示基于语言修饰的决策变量,并且分析了基于模糊数值域和模糊语言域的关系,从而证明了语言认知图的收敛定理,为基于语言修饰认知图的发展提供了理论基础. 语言修饰集作为一个理论基础和实践应用推理的方法,目前对于基于语言术语集的代数结构的研究仍然缺乏形式化的理论,有必要建立一套严格的语言真值逻辑系统. 基于格蕴含代数LIA (lattice implication algebra)结构的自然语言术语模型很好地解决了这一问题, Liu等^[58]提出了基于LIA公理化的有序定性语言真值逻辑系统,为进一步建立基于语言真值逻辑的近似推理和决策提供了理论基础.

2) 通过模糊语言修饰可以实现隶属函数的修正,在传统定义的基础上, Shi等^[59]给出了4种常见的语言修饰定义,如非常(very)、或多或少(more or less)、正面地(positively)和负面地(negatively),并描述了这4种语言修饰词对隶属函数的影响. Novák^[60]对原始语言修饰集的概念进行了修正,使其更加符

合语义,从而促使其更广泛地应用. 在模糊逻辑的基础上, Huynh等^[61]提出了语言修饰的参数表示模型,在该模型中,语言真值变量的主项生成的每个语言真值由取决于主项的实数 R 表明,该模型不仅满足了以德摩根模型为代表的语言修饰的直观含义,并且具有鲁棒性. 为了更广泛地应用语言修饰集, Lewis等^[35]引入了“非常”和“相当的”语义标度框架,并将其与概念原型和概念空间理论相结合,使得语义标度框架具有清晰的语义基础. 在日常语言中,存在一些连续的短语,如“或多或少”、鉴于梯形模糊集(包括三角模糊集)在决策过程中的广泛应用, Nguyen等^[30]对基于代数结构的修饰进行扩展,设计了由梯形模糊集和模糊语言规则集成的最优单词建模,并通过模糊语言规则系统解决分类问题. Marín-Blázquez等^[36]通过扩展或缩小语言修饰集的组成部分扩大给定的梯形模糊集. 为了更好地适应梯形模糊集,3种新的语言修饰词(如上面(upper)、下面(lower)和中间(mid))被提出,通过仿真模拟发现,相比传统的模糊建模方法,经过修订的语言术语集在辅助模糊建模方面更具有优势.

3) 语言修饰集在语义量化方面的发展. 为了显示模糊度和语义量化映射的有效性,语义量化映射(SQMs)被重新定义,检查了基于语义拓扑学的套期保值代数、拓扑关系、语义度量和语义量化映射,并基于线性套期保值代数解决模糊多条件推理(FMCR)问题. 结果表明,基于套期保值代数的语义量化映射与模糊度量的关系更为紧密^[37]. 在支持度的扩展性和自信度的基础上,通过扩展的Apriori算法处理模糊性,从而发现模糊集高级分类节点之间的关联准则. 此外,在模糊规则挖掘过程中,语言修饰被用来更广泛地表示个人认识,并通过合成数据对扩展算法进行验证^[62]. 在模糊逻辑的数学背景下,存在基于一元连接词的真值函数,称为真值修饰符,根据该真值实现了对命题含义的加强或削弱,从而将真值修饰符分为真值加强或真值削弱两类,并且分析了具有真值削弱情形的语言修饰逻辑^[38-39]. 灵敏度分析被认为是决策模型中至关重要的一部分,将语言修饰的集中和扩张程度用于模糊环境中的灵敏度分析,结果发现改变修饰程度的概率并不会引起排序结果的变化,表明基于语言修饰的灵敏度分析模型具有很好的鲁棒性,可以被广泛地应用^[63]. 在日常交流中,人们习惯使用模糊的和可单向解释的概念,但是必须与专家信息处理系统尽可能保持一致. 鉴于此,语言术语、修饰程度以及由此产生的复杂语言含义的计算

是语言计算过程中的重要部分. 因此, 在语言修饰框架方法中, 通过采用线性转化实现从一种语言数值过渡到另一种语言^[64]. 研究表明, 语言术语和词语修饰的模糊模型可以在语义结构中得到合理定义, 同时发现语言术语与基于语义拓扑的代数之间存在紧密联系^[40]. 在模糊量化器保留语言术语模糊性的基础上, Martine^[15]提出了一种基于语言术语的序关系的方法表示基于模糊集理论的语言修饰的强化和弱化程度, 从而在保留原语义含义的基础上建立了基于原语言术语与修正的语言术语集之间的隶属函数, 研究表明, 该方法在直观上和适用性上均比传统方法具有明显的优势.

4) 基于模糊逻辑的语言修饰集的理论发展. 在实际决策过程中, 修饰词可能是一个或对偶的情形. 鉴于此, 两种修饰的公理化形式被提出, 一种是修饰具有对偶性, 另外一种则是修饰没有对偶性. 研究表明, 这种模糊逻辑不仅涵盖了修饰函数, 而且保留了基础逻辑的完整性, 进一步构建出一种基于公理和套期保值代数的模糊逻辑语言修饰方法, 其相关的代数取自套期保值代数的语言真值, 用来表达和推理人类的认知^[23]. 为了更好地用语言表达人类知识表示和推理, 有必要使用加强真值语义修饰、减弱真值语义修饰以及真值域(LTD)来扩展数学模糊逻辑(MFL). 为了解决模糊集 A 与算子 $\text{CON } A$ 之间的较大距离, 首先基于模糊逻辑提出语言修饰环境下的数学模型, 每个修饰词没有对偶值; 然后基于语言逻辑建立一个公理化的语言逻辑, 从而更有效地利用语言表达人类认知的语言推理^[44]. Ho等^[16]提出了基于语言变量的数学模型, 旨在以模糊逻辑真值为基础从而获取有效的代数结构. 在该模型中, 由于一元运算的属性反映了语言修饰的语义特征, 每个语言的邻域均可以称为套期保值代数的代数结构. 通过研究精炼的套期保值代数(RH-algebras)的性质发现, 每个RH-algebras的语言变量是一个具有分布规律的连续的术语, 两个相反的RH-algebras称为对称的RH-algebras. 为了更好地在模糊逻辑中运用语言修饰, Le等^[45]设计了模糊语言程序, 旨在促进知识的表达和推理, 在模糊逻辑语言程序中, 真值来自于语言修饰的语言术语, 为了计算查询的真值, 设计了直接处理语言术语的计算模型, 并通过逻辑程序的定点语义表明计算模型的完整性. 为了更直接、客观地应用语言修饰集, Belohlavek等^[65]将语言术语集应用在模糊数据的形式概念分析中, 并对概念运算进行描述, 从而很好地表明了隶属对象和属性集合的特征. 在

概念分析过程中, 语言修饰术语是形式概念分析的参数, 从而可以控制从数据中提取聚类的数量. 研究表明, 语言修饰术语集在理论上是一种可行的方法, 从数据中提取知识并将知识参数化, 从而通过参数对提取的模式进行加强或减弱, 同时可以保持其解释性. 由于模糊认知图FCM (fuzzy cognitive map)^[34]实现了将模糊逻辑与神经网络相结合, 其成为模糊逻辑一个很重要的应用. 目前, 模糊认知图在知识推理和建模^[66]等方面均有广泛应用, 而在语言术语集的应用却很少. 鉴于此, Han等^[67]通过套期保值代数计算语言术语, 给出矩阵空间中的极限定理, 并证明了基于邻接矩阵的表达式和基于状态空间的两个定理. 在修饰词的概念被提出后, 继任者的概念随后也被给出^[68], 由于基础代数是同时处理多值逻辑和量子力学逻辑的代数工具, 利用其来处理语言修饰和继任者^[69]. 在语言真值格代数的基础上, Chen等^[46]运用语言推理构建定性表达的系统方法, 同时提出基于逻辑的近似推理方法推断最终的决策信息, 保证了决策在语义上和逻辑上的可解释性与合理性, 因此基于逻辑的语言修饰决策方法是合理的.

5) 语言修饰集在模糊分类器的发展. 已有的模糊控制器存在一些不足, 如: 语言变量值的原有顺序不能够保持不变, 将隶属函数中的大量重叠参数作为设计变量会导致计算量大幅增加, 尤其是在全局和随机最优算法中这点最为明显^[47]. 随着数据斜率的增加, NEFCLASS的性能越来越差, 导致医疗数据的特征值存在偏差. Yousefi^[48]通过使用几种新的非对称语言修饰词修正隶属函数的形状, 从而使得数据的偏差最小化, 并因此修正了NEFCLASS分类器的准确率. Vani等^[49]认为基于语言修饰的神经模糊分类器可以实现对有噪音的和无噪音的语音进行分类, 通过语言修饰改善模糊规则的含义至二级准则, 结果表明, 基于语言修饰的神经模糊分类器其效率明显高于一般的神经模糊分类器. 同时, 语言修饰在重叠数据的分类过程中具有关键的作用. 由于模糊集和语言术语集之间没有公式化的联系, 专家在制定模糊分类器准则时必须利用相关的序之间的关系. 鉴于此, 一种基于人机互动的控制器方案被提出, 该方案基于代数方法对模糊逻辑中的语言修饰进行修正, 从而避免了先前的导纳控制器中的缺点, 同时该方法考虑了末端执行器的全部自由度, 从而保证了人机交互^[70]. 鉴于此, Bui等^[71]给出了基于套期保值代数的模糊控制器HAC (hedge-algebras based controller)的多目标最优设计方案, 不仅能够保持原有语言变量

顺序不变,而且可以根据语言变量的模糊参数以及语义量化映射确定语言变量的语言值.最为方便的是,在优化HA过程中,设计变量通过几个模糊参数来实现.基于PLL (phase-locked loop)的新的MAF (moving average filters)套期保值代数控制器已经成功应用于三相失真信号中,其在处理不同类型干扰的过程中可以确保零误差,PLL通过遗传算法成功获取了套期保值代数的最佳模糊参数和语言规则库^[50].在定义了基于语言修饰的改进模糊逻辑分类器ALCFH的基础上,Hölldobler等^[55]建立了一个基于语言修饰集的对冲修饰决策方法以降低ALCFH的不满足度.在套期保值理论的基础上,Phong^[51]建立了基于语言预测准则的时间序列预测模型,该语言预测准则由语言和逻辑关系归纳得到,同时时间序列预测模型可以将历

史数据转化为由SQM所定义的单词集的实际语义,而不是区间的形式.

通过以上分析发现,现有的关于语言修饰集的理论研究侧重于运算法则、语义量化、模糊逻辑、分类器等.而在运算法则方面的应用集中在语义的比较、语义修饰逻辑系统的建立以及不同形式修饰词下的套期保值代数的分析,但是,对语言修饰集偏好关系、一致性以及群体共识的研究尚不够深刻.

1.3 语言修饰集的应用

鉴于语言修饰集在语义量化、模糊逻辑等方面的优点,本文对语言修饰集的相关应用进行了分类描述,并通过表3对比分析了语言修饰集与其他经典方法在情感识别、地震模拟、期货产品等方面的应用.

表3 语言修饰集的主要应用

相关文献	经典方法	基于语言修饰的方法	应用
[72]	LDF的分类效率为0.7955	ANFC-LH with DBI的分类效率为0.8368,并有助于推导出模糊规则的含义	情感识别
[73]	ANFC为0.8111	ANFC-FS-LH为0.8667,适用于低帧和单帧组合	交通流量控制
[74]	SVR的RMSE和MAE分别为125.28和91.32	FRLC的RMSE和MAE分别为139.62和11.96	太阳能辐射量
[27]	SMC	sHAC在控制性能和降低震颤现象方面均具有明显的优势	地震
[22]	无语言修饰且显著性一般	基于语言修饰方法的显著性更明显	客户满意度
[75]	多元组合的准确率为0.49	基于语言修饰的准确率为0.7	情感分析
[47]	没有控制器的振动幅度更大	基于套期保值代数的模糊控制器的振动幅度小	地震模拟
[76]	TOPSIS	双投影考虑了正、负理想解和方案之间的关系	风险分担
[77]	最小VaR和最小方差	最小CVaR的保值有效性高	黄金期货

1) 在情感分析过程中,使用自然语言、文本分析以及计算语言是非常重要的.人们可以通过日益增多的新闻媒体来共享对产品、事件和政策等的观点、经验以及情感等.而基于模糊语义的情感分析,旨在对客户进行粒度分类,通过扩展的模糊修饰和规则集来处理基于模糊的情感分析,从而可以更有效地实现对客户反馈和满意度的分类^[22].语言修饰词通过语义信息提高神经模糊分类器效率,从而准确地检测出重叠的模糊规则,并将不重叠模式的区域进行分类.基于此特点,Mand等^[72]建立了基于语言修饰的自适应神经模糊分类器模型(adaptive neuro-fuzzy classifier),并将该模型应用于情感分析和人类情感识别中.在情感分析中,着重强调关键短语,其有助于情感认知的正确分类.Vashishtha等^[52]在Senti Words Net词典和模糊语言修饰的基础上,提出了一种无监督的情感分类系统以计算情感分数和正负性,并通过模糊熵滤波器和K-均值聚类提取对情感分类有关键意义的短语.电子商务和社交媒体的交流提高了网上购物的复杂性,在线评论是客户在购买商品之前比

较竞争品牌产品的一种普遍的做法.而在线评论和用户的期望提高等因素促使人们开发了能够自动分类和总结用户评论意见的挖掘系统,通过使用模糊函数模拟修饰符,利用集中器和扩张器处理语言修饰的效果.研究表明,在用户评价挖掘系统中,二进制分类的准确率可达0.89,而粒度分类的准确率大致为0.86^[78].鉴于社会网络用户情感评价的重要性,通过语言修饰集建立了基于模糊集理论的社会网络用户情感评价方法,发现该方法并没有考虑用户和信息中出现的语言修饰特征相关联的修饰关系^[75].

2) 地震引起的土木工程控制问题引起了广泛的关注,针对高层建筑系统,研究了基于套期保值代数(HAFC)的模糊控制器的设计程序.在HAFC中,语言术语的映射通过语义量化映射(SQM)获得而不是通过任何模糊集.在HAFC的设计过程中明确了SQM的一些参数,如模型中主要的语言术语和语言修饰的模糊度量.为了证明所设计的HAFC的有效性,对两个具有执行器的10层高的建筑物进行地震激发数值模拟^[47].基于套期保值代数的模糊控制器涉及参数

的不确定以及执行器饱和问题,在套期保值代数理论的基础上,Bui等^[27]界定出一种新的控制器,可确保语言变量的内生关系保持不变.通过数值模拟分析发现,基于套期保值代数理论的模糊控制器具有以下特点:类比模糊控制器,套期保值代数的控制器容易建立并且容易实施;相比于参数不确定的控制器,套期保值代数的控制器在控制性能和时间上更有效.滑膜控制是鲁棒控制的一种主要方法,在滑膜控制中,模糊滑膜控制方法通常被用来防止震颤现象、控制因子的剧烈变动以及滑膜控制表面的滑动.在套期保值代数中,基于同构映射可以保证语言变量顺序的确定性.鉴于此,Tran等^[79]提出了基于滑膜的套期保值代数的控制器,并且在地震结构的控制中对比分析了滑膜控制器和基于套期保值代数的滑膜控制器.研究表明,基于套期保值代数的滑膜控制器更具有优势.在基础设施项目中,风险分担是风险管理的一个重要过程,决策专家希望通过语言术语集来表达对风险分担方案的评价,从而基于双投影模型的弱度语言修饰集被应用到PPP(public-private project)项目的风险分担过程中^[76].

3) 通过期货市场的套期保值,可以减少价格和利率变动带来的风险.由于不确定环境下资产收益率尾部行为风险度量的重要性,在考虑预期损失和风险概率双维度的基础上,通过缓冲超越概率模型,并以条件风险价值CVaR最小作为目标函数,实现对套期保值组合风险尾部损失的控制,从而可以有效地避免多品种期货套期保值出现极端损失的情形,实现了提高套期保值的效果^[77,80].由于已有的套期保值比率模型没有考虑多时间尺度价值和高阶矩波动时变特征不足两种情形,朱鹏飞等^[81]从时-频域视角考虑,建立了一个集成EEMD-SJCCopula-GARCHSK的套期保值比率估计模型,同时在该模型中将各个时间尺度上的建模结果进行集成,尽可能最大限度挖掘有效信息,通过我国沪深300期现货数据的实证分析表明,该模型在收益、修正后的夏普比率、平均套期比率以及效用水平方面均具有显著改善.在考虑套期保值成本的过程中,为了寻找最优的套期保值策略,建立了套期保值二次准则和最优动态套期保值策略微分对策模型^[82-83].为了揭示金融衍生品对现金流波动风险的影响机制与效应,以我国沪深A股为样本,研究了控股特征、财富集中度特征以及股权制度平衡对外汇衍生工具进行外汇套期保值决策的影响.结果表明,外汇衍生品和商品衍生品发挥了降低现金流波动风险的作用,并且使非国有控股股东更倾向于运

用外汇衍生工具进行套期保值^[84-85].

4) 语言修饰集在其他方面的应用.由于已有的词库搜索具有太多的不确定和模糊性,将基于语言修饰的模糊搜索应用于数据库中,从而实现结构化语言的转化,使得词库搜索更为方便、有效^[41].Hameed^[42]认为,语言修饰的主要作用是聚集、强化和扩张,通过语言修饰可以实现对模糊集属性形状的改变,从而更改相邻集之间的重叠量,同时模糊规则含义也得到了改善,并且提高了模糊评估系统的准确性.将语言修饰应用于学生学术能力评估排序过程中,通过与经典模糊集进行对比发现,基于聚集和扩张的语言修饰的评估方法和经典模糊集在前两个方案、第6个方案以及第10个方案的排序是一样的,但是在学生能力评估的计算过程中,基于语言修饰的模糊集明显具有很好的客观性、公平性和平等性.语言变量旨在提供一种难以精确化定义的概念,基本的语言术语主要是基于形容词和副词修饰的语言术语.Borkar等^[73]在自适应神经模糊分类器方法中通过使用语言修饰词和特征分类,界定出了几种新的特征分类算法,并将其应用于交通流量评估过程中.鉴于气候、地形以及时间因素的不确定,难以精确度量太阳能辐射量,Bahani等^[74]提出了一个精准的MAMDANI模糊系统预测太阳能辐射量,该模糊系统基于模糊规则的两阶段聚类学习,第1阶段运用减法聚类提取模糊规则;第2阶段基于语言修饰的解决方案进行语言推理和精炼.基于套期保值代数的控制器HAC的设计可以通过初始的语言集、语言修饰以及平均算子的权重量化语义映射的参数,但是如何确定HAC中的最优参数问题却被忽略了.鉴于此问题的存在,Ho等^[86]通过优化算法步骤改进HAC的设计,如运用遗传算法寻找最优参数.为了验证方法的有效性,利用优化后的算法解决倒立摆问题,结果表明,基于遗传算法的HAC具有很好的稳定性能.根据套期保值代数理论在网格同步领域的应用,Vukadinovi等^[50]提出了一种优化的套期保值代数控制器(HAC),计算出的HAC最佳参数取决于电网中频繁发生的干扰.根据干扰类型,提出两种不同类型的PLL结构,一种是传统的同步参考帧PLL,适用于分析电网频率发生阶跃变化的干扰类型;另一种是在控制器的输出级中引入自适应MAF和新的反馈信号,从而可以在电网频率发生阶跃变化过程中实现零稳态误差.

2 结论与展望

语言修饰集为决策者提供了一个通过语言修饰词来刻画决策者偏好程度的工具,它能够很好地帮助

决策者在信息模糊以及决策情形复杂的情况下表达决策信息. 因为其在表述语言计算方面的优势, 语言修饰集的决策理论与方法具有了一定的发展. 本文在语言修饰集发展背景的基础上, 首先回顾了语言修饰集的理论发展, 并分别从语言修饰集的运算法则、语义量化、模糊逻辑、分类器等方面进行回顾, 发现语言修饰集在模糊逻辑和分类器方面具有广泛应用, 但在偏好关系和隶属度量方面仍缺乏严谨的数学证明. 有效的隶属函数是语言修饰集在理论发展以及实际应用方面非常重要的工具. 此外, 语言修饰集也在情感分析、车辆交通流量评估、土木结构控制以及期货市场的套期保值等方面有广泛的应用, 尤其在期货市场为我国金融市场的发展起到了推动作用. 但是现有的关于语言修饰集的应用主要集中在单一决策信息方面, 实际决策中, 单一决策信息会影响决策结果的有效性, 为了更有效地表达决策信息, 决策专家更希望通过复杂的、有效的和客观的语言表达形式来评估决策信息.

鉴于语言修饰集的发展现状和目前存在的研究空白, 以及更有效地将语言修饰集应用到实际决策问题中, 未来研究可从以下几方面展开:

1) 语言修饰集的理论前景.

语言修饰集的研究目前尚处于初步阶段, 一些理论概念尚不完全, 如: 决策专家希望通过语言修饰集可以表达其决策偏好、群决策专家共识理论的达成、客观的隶属函数的建立等:

i) 已有的关于语言修饰集偏好关系的研究非常少, 主要集中在弱度语言修饰方面, 关于其可接受的一致性水平的研究尚缺乏严格的数学证明, 这会导致决策结果不合理, 基于已有的偏好函数的研究方法^[87]可以实现对语言修饰集的理论研究.

ii) 语言修饰集隶属函数度量较为缺乏, 有必要将语言标度与概念空间理论相结合来度量语言修饰集的隶属函数, 使其能够更有效地表达决策专家的意见. 如, 可以借鉴语言术语集隶属函数的度量方法^[88-89]计算基于语言修饰集的隶属函数, 或者对不同语言修饰词的效用进行计算并做对比分析.

iii) 多偏好结构下的语言修饰集一致性决策方法研究加强, 计算偏好矩阵的共识阈值, 例如对偏好信息的转化、排序位置差异的一致性共识模型的建立以及所及群体共识指标算法的建立等^[90-91].

2) 语言修饰集的应用前景.

语言修饰集的表达方式决定了其在实际决策问题中有着很好的应用前景, 但是其应用目前还处于初

步阶段. 在未来的研究中, 结合语言计算的特点, 可将其应用于项目风险管理过程:

i) 金融产品. 例如在套期保值代数的基础上, 将语言修饰集应用于金融产品的风险管理过程中, 或者应用于客户对金融产品的决策过程以及专家对不同金融产品的评价等.

ii) 基础设施项目. 由于土木工程项目风险管理过程中的历史数据不可获取, 以及项目生命周期的不确定性等因素, 可将语言修饰集应用于土木工程的风险识别、分析以及风险分担过程中. 在应急决策项目中, 由于不确定性、模糊性以及不完整性等因素, 将强化或弱化的语言修饰集应用于应急项目中, 从而制定合理、有效的应急预案.

3) 多种类型信息的融合.

在实际决策过程中, 由于不同类型的量纲形式, 在同一个决策问题中决策者可能会给出不同形式的决策信息, 此时需要有效的方法对不同形式的信息进行融合:

i) 在分析决策方案过程中, 需要将不同形式的决策信息, 如修饰语言术语集、概率语言术语集、虚拟语言集^[92]等表示在同一个隶属函数上, 然后运用广义网络分析方对不同形式的决策信息进行对比分析, 并且借助复杂的判断矩阵表达决策专家的偏好信息, 因此首先建立客观的隶属函数统一化算法非常重要. 其次, 建立有效的距离函数, 基于现有的改进符号距离的权重未知犹豫模糊决策方法^[93], 可以对语言修饰集的距离决策方法进行改进.

ii) 在实际决策中借助文本挖掘方法计算语言修饰集, 可以减少主观信息对决策方案的影响. 同时可以加强基于逻辑规则的修饰词的度量和实际决策方面的应用.

参考文献(References)

- [1] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. *Information and Control*, 1965, 8(3): 338-353.
- [2] Torra V. Hesitant fuzzy sets[J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2010, 25(6): 529-539.
- [3] Pang Q, Wang H, Xu Z S. Probabilistic linguistic term sets in multi-attribute group decision making[J]. *Information Sciences*, 2016, 369: 128-143.
- [4] Zadeh L A. A fuzzy-set-theoretic interpretation of linguistic hedges[J]. *Journal of Cybernetics*, 1972, 2(3): 4-34.
- [5] Bouchon-Meunier B. Linguistic hedges and fuzzy logic[C]. *Proceedings IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. San Diego, 1992: 247-254.
- [6] Zadeh L A. The concept of a linguistic variable and its

- application to approximate reasoning: I[J]. *Information Sciences*, 1975, 8(3): 199-249.
- [7] Zadeh L A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning: II[J]. *Information Sciences*, 1975, 8(3): 199-249.
- [8] Zadeh L A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning: III[J]. *Information Sciences*, 1975, 9(1): 43-80.
- [9] 王海. 基于不确定语言表达式的群决策理论与方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2017: 17-19.
(Wang H. Researches on theory and approaches of group decision making with uncertain linguistic expressions[D]. Nanjing: Southeast University, 2017: 17-19.)
- [10] Xu Z S. Uncertain linguistic aggregation operators based approach to multiple attribute group decision making under uncertain linguistic environment[J]. *Information Sciences*, 2004, 168(1/2/3/4): 171-184.
- [11] Rodriguez R M, Martinez L, Herrera F. Hesitant fuzzy linguistic term sets for decision making[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2012, 20(1): 109-119.
- [12] Lawry J. A framework for linguistic modelling[J]. *Artificial Intelligence*, 2004, 155(1/2): 1-39.
- [13] Yang J B, Xu D L. On the evidential reasoning algorithm for multiple attribute decision analysis under uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part A: Systems and Humans*, 2002, 32(3): 289-304.
- [14] Riera J V, Massanet S, Herrera-Viedma E, et al. Some interesting properties of the fuzzy linguistic model based on discrete fuzzy numbers to manage hesitant fuzzy linguistic information[J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 36: 383-391.
- [15] Martine D C. Linguistic hedges: A quantifier based approach[J]. *Soft Computing Systems: Design, Management and Applications*, 2002, 87(142): 1-9.
- [16] Ho N C, Nam H V. An algebraic approach to linguistic hedges in Zadeh's fuzzy logic[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2002, 129(2): 229-254.
- [17] De Cock M, Kerre E E. Fuzzy modifiers based on fuzzy relations[J]. *Information Sciences*, 2004, 160(1/2/3/4): 173-199.
- [18] Cornelis C, De-Cock M, Kerre E. Linguistic hedges in an intuitionistic fuzzy setting[C]. *Proceedings of the 1st International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. Singapore: FSKD, 2002: 101-105.
- [19] Chatterjee A, Siarry P. Nonlinear inertia weight variation for dynamic adaptation in particle swarm optimization[J]. *Computers & Operations Research*, 2006, 33(3): 859-871.
- [20] Wang H, Xu Z S, Zeng X J, et al. Consistency measures of linguistic preference relations with hedges[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2019, 27(2): 372-386.
- [21] Bosc P, Hadjali A, Pivert O. Empty versus overabundant answers to flexible relational queries[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2008, 159(12): 1450-1467.
- [22] Khattak A, Paracha W T, Asghar M Z, et al. Fine-grained sentiment analysis for measuring customer satisfaction using an extended set of fuzzy linguistic hedges[J]. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2020, 13(1): 744.
- [23] Le V H, Tran D K. Extending fuzzy logics with many hedges[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2018, 345: 126-138.
- [24] Hieu N D, Ho N C, Lan V N. Enrollment forecasting based on linguistic time series[J]. *Journal of Computer Science and Cybernetics*, 2020, 36(2): 119-137.
- [25] Liu B D, Chen C Y, Tsao J Y. Design of adaptive fuzzy logic controller based on linguistic-hedge concepts and genetic algorithms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part B: Cybernetics*, 2001, 31(1): 32-53.
- [26] Cetisli B. The effect of linguistic hedges on feature selection — Part 2[J]. *Expert Systems With Applications*, 2010, 37(8): 6102-6108.
- [27] Bui H L, Nguyen C H, Bui V B, et al. Vibration control of uncertain structures with actuator saturation using hedge-algebras-based fuzzy controller[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2017, 23(12): 1984-2002.
- [28] Chandramohan A, Rao M V C. Novel, useful, and effective definitions for fuzzy linguistic hedges[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2006, 2006: 1-13.
- [29] Lochab R, Kumar V. An improved flux limiter using fuzzy modifiers for hyperbolic conservation laws[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2021, 181: 16-37.
- [30] Nguyen C H, Tran T S, Pham D P. Modeling of a semantics core of linguistic terms based on an extension of hedge algebra semantics and its application[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2014, 67: 244-262.
- [31] Alkouri A U M, Salleh A R. Linguistic variable, hedges and several distances on complex fuzzy sets[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2014, 26(5): 2527-2535.
- [32] Herrera-Viedma E, Herrera F, Chiclana F, et al. Some issues on consistency of fuzzy preference relations[J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, 154(1): 98-109.
- [33] Le V H, Liu F, Tran D K. Fuzzy linguistic logic programming and its applications[J]. *Theory and Practice of Logic Programming*, 2009, 9(3): 309-341.
- [34] Kosko B. Fuzzy cognitive maps[J]. *International Journal of Man-Machine Studies*, 1986, 24(1): 65-75.
- [35] Lewis M, Lawry J. A label semantics approach to linguistic hedges[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2014, 55(5): 1147-1163.
- [36] Marín-Blázquez J G, Shen Q. Linguistic hedges on

- trapezoidal fuzzy sets: A revisit[C]. The 10th IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Melbourne, 2001: 412-415.
- [37] Ho N C, Long N V. Fuzziness measure on complete hedge algebras and quantifying semantics of terms in linear hedge algebras[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2007, 158(4): 452-471.
- [38] Hájek P, Harmancová D. A hedge for gödel fuzzy logic[J]. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 2000, 8(4): 495-498.
- [39] Esteva F, Godo L, Noguera C. A logical approach to fuzzy truth hedges[J]. *Information Sciences*, 2013, 232: 366-385.
- [40] Ho N C. A topological completion of refined hedge algebras and a model of fuzziness of linguistic terms and hedges[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2007, 158(4): 436-451.
- [41] Balamurugan V, Kannan K S. A framework for computing linguistic hedges in fuzzy queries[J]. *International Journal of Database Management Systems*, 2010, 2(1): 1-7.
- [42] Hameed I A. Enhanced fuzzy system for student's academic evaluation using linguistic hedges[C]. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Naples, 2017: 1-6.
- [43] Nguyen C H, Tran D K, van Nam H, et al. Hedge algebras, linguistic-value logic and their application to fuzzy reasoning[J]. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 1999, 7(4): 347-361.
- [44] Le V H, Tran D K. Linguistic logics with hedges[C]. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Semantic Technologies*. Bangkok: IWOST, 2015: 1-11.
- [45] Le V H, Liu F, Tran D K. Fuzzy linguistic logic programming[C]. *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008: 438-448.
- [46] Chen S W, Liu J, Xu Y. A logical reasoning based decision making method for handling qualitative knowledge[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2021, 129: 49-63.
- [47] Anh N D, Bui H L, Vu N L, et al. Application of hedge algebra-based fuzzy controller to active control of a structure against earthquake[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2013, 20(4): 483-495.
- [48] Yousefi J. Devising asymmetric linguistic hedges to enhance the accuracy of NEFCLASS for datasets with highly skewed feature values[C]. *Proceedings of the 12th International Joint Conference on Computational Intelligence*. Budapest, 2020: 309-320.
- [49] Vani H Y, Anusuya M A. A neuro fuzzy classifier with linguistic hedges for speech recognition[J]. *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, 2020, 5(20): 164114.
- [50] Vukadinovi D, Nguyen T D, Nguyen C H, et al. Hedge-algebra-based phase-locked loop for distorted utility conditions[J]. *Journal of Control Science and Engineering*, 2019, 2019: 1-17.
- [51] Phong P D. A time series forecasting model based on linguistic forecasting rules[J]. *Journal of Computer Science and Cybernetics*, 2021, 37(1): 23-42.
- [52] Vashishtha S, Susan S B. Highlighting keyphrases using senti-scoring and fuzzy entropy for unsupervised sentiment analysis[J]. *Expert Systems With Applications*, 2021, 169: 114323.
- [53] Ho N C, Wechler W. Hedge algebras: An algebraic approach to structure of sets of linguistic truth values[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1990, 35(3): 281-293.
- [54] Ho N C, Lan V N. Hedge algebras: An algebraic approach to domains of linguistic variables and their applicability[J]. *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, 2007, 23(1): 1-18.
- [55] Hölldobler S, Khang T, Storr H. A fuzzy description logic with hedges as concept modifiers[C]. *Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Technologies*. Viet Nam: Science and Technics Publishing House, 2002: 25-34.
- [56] Zou L, Lin H M, Song X Y, et al. Rule extraction based on linguistic-valued intuitionistic fuzzy layered concept lattice[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2021, 133: 1-16.
- [57] Han N V, Cong Vinh P. Reasoning with words: A hedge algebra linguistic cognitive map approach[J]. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2021, 33(2): e5711.
- [58] Liu J, Li W J, Chen S W, et al. An axiomatizable logical foundation for lattice-ordered qualitative linguistic approach for reasoning with words[J]. *Information Sciences*, 2014, 263: 110-125.
- [59] Shi H J, Ward R, Kharna N. Expanding the definitions of linguistic hedges[C]. *Proceedings Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference*. Vancouver, 2001: 2591-2595.
- [60] Novák V. The concept of linguistic variable revisited[C]. *Recent Developments in Fuzzy Logic and Fuzzy Sets*. Cham: Springer International Publishing, 2020: 105-118.
- [61] Huynh V N, Ho T B, Nakamori Y. A parametric representation of linguistic hedges in Zadeh's fuzzy logic[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2002, 30(3): 203-223.
- [62] Chen G Q, Wei Q. Fuzzy association rules and the extended mining algorithms[J]. *Information Sciences*, 2002, 147(1/2/3/4): 201-228.
- [63] Zamali T, Lazim M A, Osman M T A. Sensitivity analysis using fuzzy linguistic hedges[C]. *IEEE Symposium on Humanities, Science and Engineering Research*. Kuala,

- 2012: 669-672.
- [64] Kuz'Min V B. A parametric approach to description of linguistic values of variables and hedges[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1981, 6(1): 27-41.
- [65] Belohlavek R, Vychodil V. Formal concept analysis and linguistic hedges[J]. *International Journal of General Systems*, 2012, 41(5): 503-532.
- [66] Glykas M. Fuzzy cognitive maps. *Advances in theory, methodologies, tools and applications[M]*. Incorporated: Springer Publishing Company, 2010: 2.
- [67] Han N, Hao N, Vinh P. Toward combining fuzzy graphs based on hedge algebra[J]. *EAI Endorsed Transactions on Context-Aware Systems and Applications*, 2019, 6(18): 162801.
- [68] Caicedo X, Cignoli R. An algebraic approach to intuitionistic connectives[J]. *Journal of Symbolic Logic*, 2001, 66(4): 1620-1636.
- [69] Chajda I. Hedges and successors in basic algebras[J]. *Soft Computing*, 2011, 15(3): 613-618.
- [70] Van T N, Yi S Y, Bui Khoi P. Hedge algebras-based admittance controller for safe natural human-robot interaction[J]. *Advanced Robotics*, 2020, 34(24): 1546-1558.
- [71] Bui V B, Tran Q C, Bui H L. Multi-objective optimal design of fuzzy controller for structural vibration control using Hedge-algebras approach[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2018, 50(4): 569-595.
- [72] Mand A A, Kiong L C, Seldon M A, et al. An improved adaptive neuro-fuzzy classifier using linguistic hedges in emotion recognition application[J]. *ICIC Express Letters*, 2013, 7(3): 935-940.
- [73] Borkar P, Sarode M V, Malik L G. Modality of adaptive neuro-fuzzy classifier for acoustic signal-based traffic density state estimation employing linguistic hedges for feature selection[J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2016, 18(3): 379-394.
- [74] Bahani K, Ali-Ou-salah H, Moujabbir M, et al. A novel interpretable model for solar radiation prediction based on adaptive fuzzy clustering and linguistic hedges[C]. *Proceedings of the 13th International Conference on Intelligent Systems: Theories and Applications*. New York, 2020: 1-6.
- [75] Luneva E E, Banokin P I, Yefremov A A, et al. Method of evaluation of social network user sentiments based on fuzzy logic[J]. *Key Engineering Materials*, 2016, 685: 847-851.
- [76] Wang L N, Wang H, Xu Z S, et al. A bi-projection model based on linguistic terms with weakened hedges and its application in risk allocation[J]. *Applied Soft Computing*, 2020, 87: 105996.
- [77] 程潘红, 许墨函. 我国黄金期货最小 CVaR 动态套期保值模型研究——基于 ECM-t-BGARCH 模型[J]. *中国集体经济*, 2021(8): 89-90.
- (Cheng P H, Xu M H. The research of the dynamic hedging model for the minimum CVaR of China — Based on the ECM-t-BGARCH model[J]. *China Collective Economy*, 2021(8): 89-90.)
- [78] Dalal M K, Zaveri M A. Opinion mining from online user reviews using fuzzy linguistic hedges[J]. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 2014, 2014: 1-9.
- [79] Tran D T, Bui V B, Le T A, et al. Vibration control of a structure using sliding-mode hedge-algebras-based controller[J]. *Soft Computing*, 2019, 23(6): 2047-2059.
- [80] 孙晓琳, 胡莎莎, 郭海凤. 基于缓冲超越概率的风险度量及套期保值[J]. *运筹与管理*, 2021, 30(2): 146-154. (Sun X L, Hu S S, Guo H F. Risk measurement and hedging strategy based on buffer probability of exceedance model[J]. *Operations Research and Management Science*, 2021, 30(2): 146-154.)
- [81] 朱鹏飞, 唐勇, 卢团团, 等. 时-频域视角下最优套期保值比率研究——基于集成 EEMD-SJC Copula-GARCHSK 模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2020, 40(10): 2563-2580. (Zhu P F, Tang Y, Lu T T, et al. Optimal hedging ratio from time-frequency domain perspective — Based on integrated EEMD-SJC Copula-GARCHSK model[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2020, 40(10): 2563-2580.)
- [82] 余星, 王玉霞, 王鑫鑫. 基于效率和经济价值的期货套期保值二次决策准则[J]. *系统管理学报*, 2021, 30(1): 54-62. (Yu X, Wang Y X, Wang X X. Secondary decision criterion of futures hedging based on efficiency and economic value[J]. *Journal of Systems & Management*, 2021, 30(1): 54-62.)
- [83] 刘海龙, 吴冲锋. 基于鲁棒控制的期权套期保值策略[J]. *控制与决策*, 2001, 16(6): 974-976. (Liu H L, Wu C F. Option hedging strategy based on robust control[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(6): 974-976.)
- [84] 刘井建, 徐一琪, 李惠竹. 金融衍生品投资与企业现金流波动风险研究[J]. *管理学报*, 2021, 18(1): 127-136. (Liu J J, Xu Y Q, Li H Z. Research on financial derivatives investment and corporate cash flow volatility risk[J]. *Chinese Journal of Management*, 2021, 18(1): 127-136.)
- [85] 许雪晨, 田侃. 控股股东对套期保值选择的偏好研究[J]. *银行家*, 2020(7): 88-94. (Xu X C, Tian K. Research on the preference of controlling shareholders for hedging choice[J]. *The Chinese Banker*, 2020(7): 88-94.)
- [86] Ho N C, Nhu Lan V, Xuan Viet L. Optimal hedge-algebras-based controller: Design and application[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2008, 159(8): 968-989.
- [87] 廖虎昌, 杨竹, 徐泽水, 等. 犹豫模糊语言

- PROMETHEE方法在川酒品牌评价中的应用[J]. 控制与决策, 2019, 34(12): 2727-2736.
(Liao H C, Yang Z, Xu Z S, et al. A hesitant fuzzy linguistic PROMETHEE method and its application in Sichuan liquor brand evaluation[J]. Control and Decision, 2019, 34(12): 2727-2736.)
- [88] Liao H C, Jiang L S, Xu Z S, et al. A linear programming method for multiple criteria decision making with probabilistic linguistic information[J]. Information Sciences, 2017, 415/416: 341-355.
- [89] Gou X J, Xu Z S, Liao H C. Multiple criteria decision making based on Bonferroni means with hesitant fuzzy linguistic information[J]. Soft Computing, 2017, 21(21): 6515-6529.
- [90] Gou X J, Xu Z S, Herrera F. Consensus reaching process for large-scale group decision making with double hierarchy hesitant fuzzy linguistic preference relations[J]. Knowledge-Based Systems, 2018, 157: 20-33.
- [91] Zhang Y X, Xu Z S, Liao H C. A consensus process for group decision making with probabilistic linguistic preference relations[J]. Information Sciences, 2017, 414: 260-275.
- [92] Xu Z S, Wang H. On the syntax and semantics of virtual linguistic terms for information fusion in decision making[J]. Information Fusion, 2017, 34: 43-48.
- [93] 林松, 刘小弟, 朱建军, 等. 基于改进符号距离的权重未知犹豫模糊决策方法[J]. 控制与决策, 2018, 33(1): 186-192.
(Lin S, Liu X D, Zhu J J, et al. Hesitant fuzzy decision making method with unknown weight information based on an improved signed distance[J]. Control and Decision, 2018, 33(1): 186-192.)

作者简介

徐泽水(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 从事决策科学、信息融合等研究, E-mail: xuzeshui@263.net;

王丽娜(1990—), 女, 博士生, 从事决策分析、风险管理的研究, E-mail: linda553@foxmail.com.

科研团队简介

徐泽水教授科研团队立足于四川大学商学院, 长期专注于决策科学领域, 一直倡导将前沿性应用基础研究成果与国民经济发展和国家重大需求紧密相连. 目前, 以徐泽水教授为核心的团队秉承“勤奋、严谨、求实、创新”的团队科研文化建设理念, 以建成国

际一流的研究团队、培养具有深厚人文底蕴、扎实科研素质、宽广国际视野的优秀跨学科复合型人才为目标, 不断进步, 自我突破. 科研团队自成立以来, 在信息融合理论与方法、复杂决策理论、数据处理技术等方面取得了一系列开创性的研究成果, 并成功应用于军事领域复杂问题的建模与决策、我国战略能源通道风险评估与突发事件应急响应、大数据驱动的医疗管理等实际问题, 团队在培育优秀人才、建设科研文化、拓展国际视野、开拓创新精神等方面也取得了丰厚的成果和实践经验. 课题组负责人徐泽水教授是欧洲科学与艺术院院士, 国际系统与控制科学院院士, 国际电气和电子工程师协会、国际模糊系统协会、英国皇家艺术协会等9个国际权威协会会员(Fellow), 长江学者特聘教授, 国家杰出青年科学基金获得者. 全球高被引科学家(2014~2020)、中国高被引学者(2014~2019蝉联计算机科学领域榜首)、国家百千万人才工程人选、国家有突出贡献中青年专家、享受国务院特殊津贴专家等. 2019~2020全球前10万名科学家终身科学影响力排名分别为第431和第258位(2019年年度科学影响力排名世界第30位, 中国学者中位居第一), 2021年在计算机科学与电子学领域世界前1000名顶级科学家中排名第57位, 中国学者中位居第二). 曾获汤森路透中国引文桂冠奖、中国青年科技奖、教育部自然科学奖(一等奖2项、二等奖2项)、江苏省数学杰出成就奖等. 担任《IEEE Transactions on Cybernetics》《IEEE Transactions on Fuzzy Systems》《Information Sciences》《Artificial Intelligence Review》《Applied Intelligence》《Cognitive Computation》《Fuzzy Optimization and Decision Making》《Journal of the Operational Research Society》《International Journal of Systems Science》等国际知名期刊副主编. 由Springer出版英文专著18部, 发表SSCI/SCI论文650余篇. 论著被引70000余次, H指数135.

(责任编辑: 郑晓蕾)