

# 可拓学与知识管理交叉研究视角下的问题智能化处理

李兴森<sup>1</sup>, 洪振挺<sup>2</sup>, 王昊<sup>1,3</sup>, 皮海滨<sup>1,3</sup>

(1.广东工业大学 可拓学与创新方法研究所, 广州 510006;

2.广西科技大学 启迪数字学院, 柳州 545006; 3.广东工业大学 机电学院, 广州 510006)

**摘要:** **目的** 虽然人工智能在机器学习和确定性问题解决方面取得了重要进展,但是在管理实践中更普遍的矛盾问题处理方面仍旧主要依赖于个体的经验,其智能化求解是学科交叉广、科学价值高的学术难题,因此亟需开拓问题智能化处理的新方向。**方法** 在综述国内外问题处理相关研究现状的基础上,回顾可拓学在矛盾问题处理方面的研究进展,分析可拓学在矛盾问题智能化处理方面的主要流程和方法,结合人工智能技术,从可拓学与知识管理交叉研究的视角,指出了问题智能化处理的几种新方向。**结论** 通过可拓学与智能知识管理的交叉研究,可以进一步利用新一代信息技术,按照一定的程序,系统化生成处理问题的所有可能的策略,从而提高问题解决从不确定性和随机性向必然性转化的程度,探索构建中国特色、中国风格的问题智能处理理论与方法。

**关键词:** 可拓学; 矛盾问题; 智能化处理; 知识管理; 因素空间

**中图分类号:** TB472; TP18; C934 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)12-0051-08

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.12.007

## Intelligent Problem Solving from the Perspective of Extenics and Knowledge Management

LI Xing-sen<sup>1</sup>, HONG Zhen-ting<sup>2</sup>, WANG Hao<sup>1,3</sup>, PI Hai-bin<sup>1,3</sup>

(1.Research Institute of Extenics and Innovation Methods, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2.TUS College of Digit, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China; 3.School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**ABSTRACT:** Artificial intelligence has made important progress in machine learning and problem solving of certainty, but the more common uncertain or even contradictions in management practice still relies on individual experience. Its intelligent solving is an academic problem with wide interdisciplinary and high scientific value. Based on the review of the current research of problem solving in China and abroad, this paper focus on the research progress of Extenics in the field of contradiction problem solving, analyzes the main process and extension method in the intelligent processing of contradiction problems. Then we summarize and point out several new directions of intelligent problem processing from the perspective of cross research of Extenics and knowledge management on artificial intelligence,. The research on above directions will further use new generation of information technology to systematically generate all possible strategies to deal with problems according to a certain workflow, so as to improve the degree of transformation from uncertainty and randomness to inevitability of problem solving, to explore the construction of new intelligent theory and methods of Chinese characteristics and Chinese style.

**KEY WORDS:** extenics; contradictions; intelligent processing; knowledge management; factor space

收稿日期: 2021-03-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“问题求解的知识拓展机制研究: 可拓学与因素空间理论耦合视角”(72071049)

作者简介: 李兴森(1968—),男,山东人,博士,广东工业大学可拓学与创新方法研究所教授,主要研究方向为可拓学与智能知识管理。

人类社会的发展,是一部通过解决问题而不断进步的历史。在经济、社会和科技发展等活动中问题无处不在。靠个人灵感和经验解决问题具有很大的不确定性,灵感往往可遇而不可求,而经验又需要长期积累。利用计算机和网络信息技术,根据一定的程序智能化解决矛盾问题,是一项学科交叉广、科学价值高的挑战性难题。虽然人工智能在封闭性问题求解上取得了重要进展,但是在边界条件不确定的开放性问题求解方面,仍难以用知识推理、机器学习等智能技术解决<sup>[1]</sup>。边界条件清晰、目标明确的可求解问题往往是一种近似的理想状态,满足该边界条件的现实情景非常有限。由于人类生活环境的高度不确定性和人类所面临问题的开放性,将人类的认知能力或认知模型引入人工智能系统是非常有必要的<sup>[2]</sup>。当问题难以求解时,如何让机器能根据条件、目标之间的联系,主动分析不能满足目标实现的因素知识,自动提供解决问题所需的缺失知识,甚至人机交互地生成解决问题的策略或方向,需要新的智能理论与方法支持。

大数据环境正促使智能研究将数据驱动与知识引导有机结合起来,让更稳健、更通用和可解释性更强的新一代人工智能支持人类做出更好的决策<sup>[1]</sup>。以矛盾问题为研究对象的可拓学创立于1983年,以蔡文研究员为首的中国学者从可拓集合理论<sup>[3]</sup>出发,研究了以基元形式化模型描述矛盾问题,总结了以拓展、变换等步骤处理矛盾问题的流程与基本规律,建立了智能化处理矛盾问题的基础方法体系<sup>[4-5]</sup>,开发的计算机软件在多个领域得到了应用<sup>[6-7]</sup>。在可拓学和人工智能结合方面,近年来许多学者开展了多方面的研究,并取得了良好的成果<sup>[8-9]</sup>。本文通过综述国内外解决问题的研究现状,分析可拓学在矛盾问题智能化处理方面的主要技术与方法,提出可拓学与知识管理交叉研究的一些参考方向,以提高问题求解从不确定性和随机性向必然性转化的程度。

## 1 问题处理研究现状

### 1.1 解决复杂问题的理论认识方面

近年来,复杂问题处理的研究被重新关注,国内外专家通过理论推演、实证研究等提出了以下3个主要观点。(1)复杂问题处理未来的发展是具有挑战性的,其中知识起决定性因素<sup>[10]</sup>;问题是知识的起点,知识是为解决问题而存在的<sup>[11]</sup>。(2)因为解决问题的方法往往不是显而易见的,所以需要更系统、更智能的知识管理理论与方法为解决问题服务<sup>[12]</sup>。(3)解决问题的根本挑战是知识多样性之间的权衡,特别是综合大量的跨学科、跨领域知识及多源信息的协同来产生解决方案<sup>[13-14]</sup>。哈佛大学团队通过调研总结了12000名科学家在解决科学问题中的经验,发现增加领域知识,从不同的外部资源中汲取知识来解决内部问

题,可以有效提高效率<sup>[15]</sup>。同类研究证实,使用领域外间接相关的信息可以提高创意的原创性和新颖性<sup>[16]</sup>。大连理工大学学者研究了知识网络中问题求解的知识完备性<sup>[17]</sup>,认为知识网络能保证了解解决某一类或某一具体问题所需要的全部知识,至少分为概念属性层、关系层和问题求解层3个层次。

上述研究工作的基本共识是解决复杂问题很难,问题求解的关键是具有完备性高的知识,特别是跨领域的知识。然而增加领域知识、拓展外部资源知识主要还是依靠经验,并且开放性问题是一类更复杂、更不确定的问题,其在智能化求解方面目前仍缺乏突破性的研究成果。

### 1.2 问题处理手段方面

在以微观思维研究开放性问题的求解方面文献较多,比较普遍的研究范式是按照“分而治之”的方法论来处理:把复杂的开放性问题分解,直到找出边界条件清晰、目标明确的可求解问题,如特定边界条件下的数量化问题,然后采用博弈论、路径规划、排队论、运筹学、多目标规划等方法求解<sup>[18]</sup>。然而从系统论的角度看,由于部分之和往往不等于整体,拆分出的一个问题不能解决,所以整个问题仍不可解决。另外,边界条件清晰、目标明确的可求解问题往往是一种假设、近似的理想状态,现实中满足该边界条件的情景非常有限,很多情况下得不到共赢解<sup>[19]</sup>。

最近的研究发现,问题解决方案的突然产生基于两个根本特征——问题表示的变化和主观的顿悟<sup>[20]</sup>。主观顿悟看似没有规律,靠灵感显现,但其实不然。研究发现,顿悟产生的机制其实是在缺失的最后一条关键知识得到补充后形成的知识涌现<sup>[21]</sup>。因此问题建模和寻找关键知识成为问题求解的重要途径。随着智能技术的发展和计算能力的提升,以群体智能理论为基础的蚁群算法、蜂群算法、粒子群算法,以及其他基于种群的元启发式算法开始被运用于提高群体问题解决的有效性和效率<sup>[22]</sup>。粗糙集及其扩展理论在处理不精确、不一致、不完备信息方面的优势,使其被运用于各类决策问题的求解<sup>[23]</sup>。然而上述方法仍难以解决不确定性矛盾问题求解中知识缺失的问题。

人机交互的智能研究将是未来问题处理研究的重点方向。张钹院士指出,在解决问题过程中,人类对全局整体的感知能力较强,对不确定性问题的处理具有较高的知识驱动优势;传统机器学习在数据分析处理中具有很好的数据驱动能力和高速计算能力<sup>[24]</sup>,两者的有机结合将有助于更好、更系统性地解决复杂问题。目前人类比机器做得更好,人类的认知能力,包括创造力、常识和一般目标推理,在计算上仍然难以被理解。由国外开始研究的人类解决复杂计算问题的逆向工程项目,使系统使用以前的知识从非常少的训练数据中做出更丰富的推论<sup>[25]</sup>,但其“从学习到学

习”的实现机制还不清楚。人机协同处理开放性问题的机制需要从知识管理和人工智能层面进行交叉研究，特别是在可拓展、可变通的机制方面。

## 2 可拓学在问题处理方面的研究

### 2.1 可拓学及其评述

可拓学是一门以矛盾问题为研究对象,用形式化模型研究问题拓展和创意生成的规律与方法的横断学科<sup>[26-27]</sup>。2005年12月在北京召开的以“可拓学的科学意义与未来发展”为主题的香山科学会议第271次学术讨论会提出,可拓学把矛盾问题的智能化处理作为主要研究内容,把人的智能引入计算机,是整合定性语义和定量数据的工具。矛盾问题的普遍性使其研究对现代科学的发展与创新实践都具有重要意义。可拓学作为一门具有深远价值的原创性学科,将为各门学科和工程技术应用提供一种新的思想和方法<sup>[28-29]</sup>,并将成为自然科学与社会科学的桥梁<sup>[30]</sup>。

### 2.2 可拓学对问题处理的认识

可拓学以条件和目标界定问题<sup>[5,26,31]</sup>,把在现有客观条件下无法实现目标的问题,称为不相容问题,解决不相容问题主要采用可拓策略生成方法<sup>[8]</sup>;把在现有条件下无法同时实现两个以上目标的问题,称为对立问题,解决对立问题的主要方法是转换桥方法<sup>[31-32]</sup>。

通过改变条件或调整目标,可拓学把矛盾问题转化为相容问题从而实现问题求解。目标或条件的改变通过事物对象、特征或量值的改变来实现。事物的可改变性导致了问题的可变性,而事物的变换有多种方法和途径,研究事物状态、性质、功能等特征变化的可能性将有助于提高问题处理的信息维度,为解决矛盾问题提供依据和方法<sup>[8,31,33]</sup>。

可拓集合是从问题与事物的动态性和可转化性角度提出的一种新的集合概念,它从变换的视角研究事物具有某种性质的程度及其动态变化<sup>[3,34]</sup>。康托集合描述事物的确定性,模糊集合描述事物的模糊性,而可拓集合描述事物的动态可转化性,是可拓学的理论支柱之一,它以定性、定量相结合的方式描述事物量变和质变的过程<sup>[35]</sup>。用可拓集合的概念描述“是”与“非”的相互转化,根据变换的3类对象(元素、论域、准则),可以把变换分为元素变换、论域变换和准则变换<sup>[36]</sup>。

为将矛盾问题转化为不矛盾问题,可拓集用质变域和量变域表达事物的质变和量变及其变化过程<sup>[36-37]</sup>,提出了“可拓距”的概念,用关联函数量化描述事物具有某种性质的程度,使同一类事物也可区分内部差异<sup>[26,38]</sup>。孙弘安讨论了广义可拓域和广义稳定域的概念,并给出了物元变换及其可拓域与稳定域的若干性质<sup>[39]</sup>。胡宝清提出了区间上的可拓集及其区间距、

区间位值等概念和性质,对关联函数进行了补充和扩展<sup>[40]</sup>。利用关联函数等定量地表述了事物的质变和量变的过程,为量化、形式化和逻辑化解决矛盾问题提供了理论依据和数学工具<sup>[41]</sup>。

### 2.3 可拓学解决问题的主要方法及流程

可拓学解决问题的主要方法:基元建模方法、拓展分析方法、可拓变换方法、优度评价方法、共轭分析方法等<sup>[5-7,26,35]</sup>。

#### 2.3.1 基元建模方法

为了清晰地界定问题,首先就要建立问题模型,以便更清晰地通过定性与定量相结合的方法分析和解决问题<sup>[31]</sup>。准确、系统性地界定问题,是分析与解决问题的基础。可拓学以基元形式描述条件和目标,并分别对不相容问题和对立问题建立如下两种可拓模型:

$$P = g \times l \quad (\text{不相容问题}) \quad (1)$$

$$P = (g_1 \wedge g_2) \times l \quad (\text{对立问题}) \quad (2)$$

其中: $g, g_1, g_2$ 是目标; $l$ 是条件,它们均用基元形式化表示。

基元是以物、事或关系 $O$ 为对象, $c$ 为特征, $O$ 关于 $c$ 的量值 $v$ 构成的有序三元组:

$$B = (O, c, v) \quad (3)$$

一维基元是一对象具有多个特征,由物、事或关系 $O, n$ 个特征名 $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$ 及 $O$ 关于 $c_i (i=1, 2, \dots, n)$ 对应的量值 $v_i (i=1, 2, \dots, n)$ 所构成的阵列:

$$B = (O, c, v) = \begin{bmatrix} \text{Object}, & c_1, & v_1 \\ & c_2, & v_2 \\ & \dots & \dots \\ & c_n, & v_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

$n$ 维基元的对象是随参数 $t$ 变化的,可用参变量基元描述:

$$B(t) = (O(t), c, v(t)) \quad (5)$$

对于多个特征及其量值,用多维参变量基元表示:

$$B(t) = \begin{bmatrix} O(t) & c_1 & v_1(t) \\ & c_2 & v_2(t) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n(t) \end{bmatrix} = (O(t), C, V(t)) \quad (6)$$

条件和目标信息均用基元描述,以便进行形式化建模、拓展与变换。

#### 2.3.2 拓展分析方法

根据事物的对象、特征和量值的可拓性,在处理问题的过程中,拓展分析方法从条件、目标相关的事物出发,分别对问题的目标或条件进行发散分析、相关分析、蕴含分析、可扩分析等,并通过形式化的模型研究事物拓展的规律,利用大数据与智能技术构建基元拓展所需的基础信息库<sup>[42]</sup>,达到获取近似全征基

元的目的<sup>[43-44]</sup>。共轭分析方法从物的物质性、结构性、动态性、对立性出发去认知物,也可以对物的特征进行虚部与实部、软部与硬部、潜部与显部、负部与正部的拓展<sup>[5,7,35]</sup>。为利用物的各个部分及各部分之间的相互关系去解决问题提供了系统性的思考维度。

### 2.3.3 可拓变换方法

对事物及其特征与量值分别进行置换、扩大缩小、增加删除、分解和复制等变换,使问题由不相容逐步转化为相容、由对立逐步转化为共存<sup>[35,45]</sup>,称为可拓变换方法。由于事物是普遍联系的,所以某个对象、特征或量值的变换会导致其他对象、特征或量值的改变,称为变换的传导效应<sup>[33,46]</sup>。通过对问题的目标或与条件相关的基元元素或准则、论域进行可拓变换及运算,可以产生解决问题的系统性思路与初步策略。作为可拓变换特例的转换桥方法能通过多个系统、问题之间建立连接和转换的通道<sup>[32,47]</sup>,使冲突、对立转化为共赢、共存,进而达到解决对立问题的目的<sup>[5,8,26,31]</sup>。

### 2.3.4 优度评价方法

可拓集合可以定量化描述事物与矛盾问题转化的过程和转化的状态。评价矛盾问题的解决程度则以关联函数为定化工具<sup>[8,48]</sup>。优度评价方法是以关联函数为主要数学工具,综合多种衡量条件对某一对象、方案、策略等的优劣程度进行综合评价的实用方法。用关联函数计算各衡量备选策略符合要求的程度及其利弊的大小,使评价更符合实际情况<sup>[49-51]</sup>。

## 2.4 可拓学解决矛盾问题的流程

第一步,利用蕴含分析等方法,分析问题是否是真正需要被解决的问题,确认目标是否是最终需要的目标。第二步,分析结果若为是,则界定目标和条件,按问题的类型分别建立可拓模型<sup>[5]</sup>。第三步,将实际问题中目标的特征和量值(或取值范围)与条件所提供的量值进行对比计算,分析确定核问题。第四步,基于核问题,建立关联函数或相容度函数,计算、判断不相容度。第五步,对目标或条件分别进行蕴含分析、相关分析等,建立问题的蕴含树、相关网或相关蕴含树。第六步,进一步进行发散分析、共轭分析等拓展,在获取的近似全征基元上进行基本的可拓变换,得到初步的可能解,即可拓变换或变换的运算式;再根据传导变换,形成传导变换蕴含树;从准则和论域角度进行可拓变换,分析传导效应,得到更多解决问题的可能解。第七步,逐一计算可能解的关联函数或相容度函数,选择相容度由变换前的小于或等于0变为大于0的可能解,作为解决不相容问题的备选策略。若备选策略不足,则重新回到第五步。最后,对所有备选策略构成的集合,即备选策略集,进行优度评价,选择综合优度高的策略作为解决问题的可行解。

## 3 可拓学与知识管理交叉的问题智能化处理

将可拓学智能化处理矛盾问题的理论、方法和人工智能技术相结合,其研究进展情况主要包括以下几个方面。

1) 知识表示与可拓推理。浙江大学学者提出了可拓知识空间的概念<sup>[52]</sup>,论述了可拓知识空间关联函数计算方法,提升了大规模可拓问题求解的计算效率。国防科技大学团队提出了可拓知识与可拓知识推理公式,利用基于集合的可拓知识定理,以及基于本体的可拓知识链定理,挖掘了问题产生的原因的可拓知识链<sup>[53]</sup>。哈尔滨工业大学团队提出了一种基于可拓模型的知识表示方法的定义、语法规则和存储结构,在解决智能设计知识表示问题时具有较高的可行性<sup>[54]</sup>。江南大学、东华大学和上海交通大学学者将关联函数与信任函数相结合,研究了不确定条件下可拓推理的评价指标,构建了基于证据理论的可拓推理函数和合成规则<sup>[55]</sup>,提高了可拓推理的可信度。一种基于可拓学案例推理的配置复杂机器产品模块的新方法已在实际生产中被成功应用<sup>[56]</sup>。

2) 拓展、变换的模型与算法。从康托集合描述确定、静态的事物和模糊集合描述模糊、不确定的事物拓展到描述元素、准则和论域的可变性及量变和质变过程的可拓集合<sup>[3]</sup>,提出了可拓数据挖掘理论与方法<sup>[36]</sup>、可拓转化知识的挖掘方法<sup>[45]</sup>、基于基元理论的内容推荐算法<sup>[48]</sup>、知识可拓重用方法<sup>[57]</sup>、智能知识管理技术<sup>[43,58]</sup>、大数据环境下的协同创新模型<sup>[44]</sup>,以及不确定性评价的关联函数方法<sup>[50]</sup>等,为生成解决矛盾问题的策略提供了可拓变换的基本方法。文献<sup>[59]</sup>引入物元的发散规则,拓展了实例断言集,并研究了一致性检测的算法。扩展之后的描述逻辑不仅能明确描述知识的属性,而且还能从网络中挖掘出更多的隐性知识,从而完备知识库,以处理信息不全、存在隐性知识或带有一定矛盾前提,甚至存在冲突的知识的问题。

3) 策略智能化生成。采用人机交互方式,通过基元理论建立可拓模型,利用拓展分析、可拓变换、优度评价等方法,研究解决不相容问题的策略生成规律<sup>[8]</sup>,给出了建立“可拓信息—知识—智能形式化体系”的框架和主要功能模块<sup>[7,31]</sup>,提出了由关联函数、可拓知识和推理算法三部分构成的用计算机解决矛盾问题的可拓模型<sup>[60]</sup>,建立了基于可拓学和 HowNet 的策略生成系统的基本流程和系统框架结构,研究了矛盾问题信息的形式化基元模型及主要矛盾识别方法、基元问题的相关度计算方法<sup>[41]</sup>等。在消防机器人控制方面的应用显示,可拓学可辅助生成解决问题的几乎无限的可能性<sup>[61]</sup>。另外还有在设计<sup>[62-63]</sup>、商务谈判<sup>[64]</sup>等方面的策略生成应用。可拓学的上述研究有助于揭示发现矛盾问题、破解矛盾问题的内在机制,为

实现利用计算机解决矛盾问题的人工智能提供了逻辑和方法基础。

4) 问题的衡量与评价计算。赵燕伟等人将模糊数与关联函数结合,提出了模糊关联函数的概念,扩大了模糊数间的微小差异,增加了相似实例间的区分度,有利于计算机对矛盾问题的智能理解<sup>[49]</sup>;李桥兴等人基于人们对事物特征量的不同取值要求,定义了三区间套位置值,并提出了正域为有限区间的三区间套一般关联函数公式,更加细化地定量描述了矛盾问题,为深化研究可拓集合和多维关联函数提供了理论基础<sup>[38]</sup>;李兴森等人以可拓学基元理论、因素空间理论和智能知识管理理论为基础构建了基元—因素空间模型,为利用互联网生成解决问题的创新策略和研发新一代面向问题处理的知识搜索引擎提供了理论基础和新的方法支撑<sup>[42]</sup>;许立波等人提出了一种新的基于非线性可拓简单关联度的多属性决策方法和框架,有助于进一步研究可拓关联度的可拓变换动态决策模型<sup>[65-66]</sup>。其他的应用领域还有环境安全风险评价<sup>[67]</sup>、公交巴士系统评价<sup>[68]</sup>、水资源评价<sup>[69]</sup>及空气质量评价<sup>[70]</sup>等。

## 4 结语

本文从问题智能处理的研究角度出发,论述了国内外学者在该领域的相关研究进展,将可拓学在问题智能化处理的应用现状进行了分类阐述,发现知识管理与可拓学的交叉研究是问题智能化处理的一个重要方向。解决问题是组织个人的普遍需求,虽然人工智能在封闭性问题求解方面取得了重要进展,但是在边界条件不确定的开放性问题求解方面,仍难以用知识推理、机器学习等智能技术解决。开放性问题求解的研究难度大、科学价值高,一直是现有人工智能技术和知识管理研究的难点,知识融合与知识推理的前提是有足够多的知识。在科学判断问题求解知识的不足,并智能化地提出知识拓展的需求上,仍然缺乏有效的方法。大数据环境下问题求解的知识智能拓展研究是值得关注的方向。

在研究方法上,需要揭示问题处理背后的不确定性和复杂性成因与知识智能动态拓展的机制,形成问题需求与知识发现紧密耦合的知识管理技术,提高管理领域开放性问题求解从不确定性和随机性向必然性转化的程度,有助于拓展可拓学和知识管理交叉研究的范围。未来的研究方向还包括如下几个方面。(1) 问题求解的知识完备性理论与定量评价问题。对于每个可解问题,都有一个能完成问题求解的最小知识集合,若知识超网络包含了这一最小知识集合,那么就可以完成该问题的求解。针对开放、动态、存在很大程度的不确定性条件的开放性问题,如何在问题求解前评估知识的完备性,并在理论指导下发现这一最小

的知识集合? 开放性问题求解的充分条件和必要条件与多粒度跨域知识构成的知识空间的完备性研究,有助于揭示边界条件不确定的开放性问题背后的复杂性成因和求解方向。(2) 多源、异构的信息与知识基于问题求解目标进行融合、拓展的机理问题。大数据环境下,多源、异构的海量信息与知识背后往往隐含着解决问题的关键因素及知识网络。知识的融合和推理的目标是智能化解决问题,针对特定的开放性问题,当发现现有的知识不足以解决问题时,如何使机器进行启发式拓展和联想? 由举一反三的归纳型智能转向能主动补充知识缺口的举一反三的拓展型智能,涉及知识超网络的语义拓展计算,其内在机理与智能拓展机制研究是人工智能与知识发现领域具有较大挑战性的难题。(3) 因素空间与可拓学耦合的因素知识的因果发现问题。大数据环境下相关性分析相对容易,但开放性问题求解仍需要反映因果关系的描述性知识。可拓学中的基元建模、拓展变换与优度评价等程序性方法论知识,与问题处理相关的条件、目标及其拓展的基元—因素相互关联,形成知识超网络。与问题相关的信息、知识繁多,不同情境下的关联度波动较大,高粒度层上的知识关联比低粒度层上的基元数据更具有不确定性。如何从基元表达的知识超网络复杂信息中,以合适的语义进行计算与推理,识别对问题求解有因果关系的信息与知识,在可接受的时间内完成因果关系识别与因素提取,降低知识关联的模糊性,避免在知识拓展中产生组合爆炸,是有待深入研究且有一定普遍性的科学问题。

## 参考文献:

- [1] ZHUANG Yue-ting, FEI Wu, CHUN Chen, et al. Challenges and Opportunities: from Big Data to Knowledge in AI2.0[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2017, 18(1): 3-14.
- [2] ZHENG Nan-ning, LIU Zi-yi, REN Peng-ju, et al. Hybrid-augmented Intelligence: Collaboration and Cognition[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2017, 18(2): 153-179.
- [3] 蔡文. 可拓集合和不相容问题[J]. *科学探索学报*, 1983(1): 83-97.  
CAI Wen. Extension Set and Non-Compatible Problems[J]. *Journal of Science Exploration*, 1983(1): 83-97.
- [4] 杨春燕, 蔡文, 涂序彦. 可拓学的研究、应用与发展[J]. *系统科学与数学*, 2016, 36(9): 1507-1512.  
YANG Chun-yan, CAI Wen, TU Xu-yan. Research, Application and Development on Extenics[J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2016, 36(9): 1507-1512.
- [5] 蔡文, 杨春燕. 可拓学的基础理论与方法体系[J]. *科学通报*, 2013, 58(13): 1190-1199.

- CAI Wen, YANG Chun-yan. Basic Theory and Methodology on Extenics[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(13): 1190-1199.
- [6] 杨春燕, 李兴森. 可拓创新方法及其应用研究进展[J]. 工业工程, 2012, 15(1): 131-137.  
YANG Chun-yan, LI Xing-sen. Research Progress in Extension Innovation Method and Its Applications[J]. Industrial Engineering Journal, 2012, 15(1): 131-137.
- [7] 杨春燕, 汤龙. 不相容问题求解的理论、方法与系统研究[J]. 智能系统学报, 2016, 11(6): 799-806.  
YANG Chun-yan, TANG Long. A Review of Theories, Methods and Systems for Incompatible Problem Solving[J]. Journal of Intelligent Systems, 2016, 11(6): 799-806.
- [8] LI W, SONG Z, MAO E. Using Extenics to Describe Coupled Solutions in Axiomatic Design[J]. Journal of Engineering Design, 2019, 30(1): 1-31.
- [9] FUNKE J. Complex Problem Solving in Search for Complexity[J]. Journal of Dynamic Decision Making, 2019: 10-11.
- [10] CELLUCCI C. Knowledge as Problem Solving[M]. London: Springer International Publishing, 2017.
- [11] CSAPÓ B, FUNKE J. The Nature of Problem Solving[M]. Paris: OECD, 2017.
- [12] PARKER A, TIPPMANN E, KRATOCHVIL R. Accessing Diverse Knowledge for Problem Solving in the Mnc: a Network Mobilization Perspective[J]. Global Strategy Journal, 2019, 9(3): 423-452.
- [13] 高国伟, 段佳琪. 基于知识超网络的碎片化知识非线性融合模型研究[J]. 情报科学, 2020, 38(1): 17-23.  
GAO Guo-wei, DUAN Jia-qi. Nonlinear Fusion Model of Fragmented Knowledge Based on Knowledge Super Network[J]. Information Science, 2020, 38(1): 17-23.
- [14] JEPPESEN L, LAKHANI K. Marginality and Problem-Solving Effectiveness in Broadcast Search[J]. Organization Science, 2010, 21(5): 1016-1033.
- [15] MONTAG-SMIT T, MAERTZ JR P. Searching Outside the Box in Creative Problem Solving: the Role of Creative Thinking Skills and Domain Knowledge[J]. Journal of Business Research, 2017, 81: 1-10.
- [16] 陈雪龙, 镇培. 知识网络的知识完备性测度方法研究[J]. 情报学报, 2014, 33(5): 465-480.  
CHEN Xue-long, ZHEN Pei. Measure of Knowledge Completeness in Knowledge Network[J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2014, 33(5): 465-480.
- [17] ANNELIES R, SCHELLENS T, DE WEVER B. Promoting Metacognitive Regulation through Collaborative Problem Solving on the Web: When Scripting Does Not Work[J]. Computers in Human Behavior, 2016, 58: 325-342.
- [18] LI X, CHEN S, LIU R, et al, An Extension Preprocessing Model for Multi-Criteria Decision Making Based on Basic-Elements Theory[C]. New York: CCIS, 2020.
- [19] DANEK A, WILLIAMS J, WILEY J. Closing the Gap: Connecting Sudden Representational Change to the Subjective Aha! Experience in Insightful Problem Solving[J]. Psychological Research, 2020, 84(1): 111-119.
- [20] 许立波, 潘旭伟, 袁平, 等. 知识智能涌现创新: 概念体系与路径[J]. 智能系统学报, 2017, 12(1): 47-54.  
XU Li-bo, PAN Xu-wei, YUAN Ping, et al. Knowledge Innovation by Intelligent Emergence-Concept, Framework and Its Pathway[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2017, 12(1): 47-54.
- [21] CALLAGHAN C W. Knowledge Management and Problem Solving in Real Time: the Role of Swarm Intelligence. Interdisciplinary Journal of Information[J]. Knowledge and Management, 2016, 11: 177-199.
- [22] 赵锐, 余永权, 张静. 基于粗糙集数据分析的可拓推理机制研究[J]. 计算机科学, 2010, 37(12): 167-170.  
ZHAO Rui, YU Yong-quan, ZHANG Jing. Extension Reasoning Methods Based on Rough Set Data Analysis[J]. Computer Science, 2010, 37(12): 167-170.
- [23] ZHANG B, ZHANG L. Multi-granular Computing in Web Age[C]. Berlin: 14th International Workshop on Rough Sets, Fuzzy Sets, Data Mining, and Granular-Soft Computing, 2013.
- [24] LAKE B M, ULLMAN T D, TENENBAUM J B, et al., Building Machines that Learn and Think Like People[J]. Behavioral and Brain Sciences, 2017, 40: 1-58.
- [25] 杨春燕, 蔡文. 可拓学[M]. 北京: 科学出版社, 2013.  
YANG Chun-yan, CAI Wen. Extenics[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [26] 蔡文. 可拓学概述[J]. 系统工程理论与实践, 1998(1): 3-5.  
CAI Wen. Introduction of Extenics[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 1998(1): 3-5.
- [27] 香山科学会议办公室. 可拓学的科学意义与未来发展—香山科学会议第271次学术讨论会[C]. 北京: 香山科学会议简报, 2006.  
Xiangshan Science Conference Office. Scientific Significance and Future Development of Extenics: the 271st Symposium of Xiangshan Science Conference[C]. Beijing: Brief Report of Xiangshan Science Conference, 2006.
- [28] 陈晓华. 滴水穿石40载: 访中国原创的学科可拓学创立者蔡文[J]. 中国质量, 2018(9): 34-38.  
CHEN Xiao-hua. 40 Years of Extenics: Constant Dropping Wears the Stone (Extenics)[J]. China Quality, 2018(9): 34-38.
- [29] 李幼平. 可拓学: 沟通自然科学与社会科学的桥梁[J]. 科技导报, 2014, 32(36): 1.  
LI You-ping. Extenics: a Bridge between Natural Science and Social Science[J]. Science and Technology Review, 2014, 32(36): 1.
- [30] 杨春燕, 蔡文. 可拓学与矛盾问题智能化处理[J]. 科技导报, 2014, 32(36): 15-20.  
YANG Chun-yan, CAI Wen. Extenics and Intelligent

- Processing of Contradictory Problems[J]. Science and Technology Review, 2014, 32(36): 15-20.
- [31] 彭强, 何斌, 康志荣. 转换桥方法[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18: 99-105.  
PENG Qiang, HE Bin, KANG Zhi-rong. The Transforming Bridge Method[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 1998, 18: 99-105.
- [32] 汤龙, 杨春燕. 复杂基元相关网下的传导变换[J]. 智能系统学报, 2016, 11(1): 104-110.  
TANG Long, YANG Chun-yan. Conductive Transformation under Complicated Basic-Element Correlative Network[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2016, 11(1): 104-110.
- [33] 杨春燕, 张拥军, 蔡文. 可拓集合及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2002(2): 301-308.  
YANG Chun-yan, ZHANG Yong-jun, CAI Wen. Extension Set and Its Applications[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2002(2): 301-308.
- [34] 杨春燕. 可拓创新方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002.  
YANG Chun-yan. Extension Innovation Method[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [35] 蔡文, 杨春燕, 陈文伟, 等. 可拓集与可拓数据挖掘[M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
CAI Wen, YANG Chun-yan, CHEN Wen-wei, et al. Extension Set and Extension Data Mining[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [36] 杨春燕, 蔡文. 可拓集中关联函数的研究进展[J]. 广东工业大学学报, 2012, 29(2): 7-14.  
YANG Chun-yan, CAI Wen. Recent Research Progress in Dependent Functions in Extension Sets[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2012, 29(2): 7-14.
- [37] 李桥兴, 杨春燕. 正域为有限区间的三区间套一维关联函数[J]. 科技导报, 2014, 32(36): 48-51.  
LI Qiao-xing, YANG Chun-yan. One-dimensional Dependent Function Based on Three Nested Intervals with Finite Positive in Extension Set[J]. Science and Technology Review, 2014, 32(36): 48-51.
- [38] 孙弘安. 关于物元可拓集的若干性质[J]. 系统工程理论与实践, 1998(2): 95-98.  
SUN Hong-an. Some Properties on the Matter-element Extension Set[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 1998(2): 95-98.
- [39] 胡宝清, 王孝礼, 何娟娟. 区间上的可拓集及其关联函数[J]. 广东工业大学学报, 2000(2): 101-104.  
HU Bao-qing, WANG Xiao-li, HE Juan-juan. The Extension Set and Its Associated Functions on the Interval[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2000(2): 101-104.
- [40] 杨春燕, 李卫华, 汤龙, 等. 基于可拓学和HowNet的策略生成系统研究进展[J]. 智能系统学报, 2015, 10(6): 823-830.  
YANG Chun-yan, LI Wei-hua, TANG Long, et al. Strategy-generating System Based on Extenics and Hownet[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2015, 10(6): 823-830.
- [41] 李兴森, 许立波, 刘海涛. 面向问题智能处理的基元——因素空间模型研究[J]. 广东工业大学学报, 2019, 36(1): 1-9.  
LI Xing-sen, XU Li-bo, LIU Hai-tao. Problem Oriented Intelligent Processing Model by Basic-Element and Factor Space[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2019, 36(1): 1-9.
- [42] 李兴森, 李立鹏, 陈 Zheng-xin. Toward Extenics-Based Innovation Model on Intelligent Knowledge Management[J]. Annals of Data Science, 2014, 1(1): 127-148.
- [43] LI Xing-sen, TIAN Ying-jie, SMARANDACHE. An Extension Collaborative Innovation Model in the Context of Big Data[J]. International Journal of Information Technology & Decision Making, 2015, 14(1): 69-91
- [44] LI H, LI X, ZHU Z. An Intelligent Transformation Knowledge Mining Method based on Extenics[J]. Journal of Internet Technology, 2013, 14(2): 315-325.
- [45] 何斌, 杨春燕, 蔡文. 关键策略的传导效应[J]. 系统工程理论与实践, 2000(5): 84-88.  
HE Bin, YANG Chun-yan, CAI Wen. Conduction Effect of Key Strategy[J]. Systems Engineering-Theory and Practice, 2000(5): 84-88.
- [46] 邓群钊, 周利平, 付莲莲, 等. 转换桥方法与应用研究评述[J]. 广东工业大学学报, 2013, 30(1): 1-6.  
DENG Qun-zhao, ZHOU Li-ping, FU Lian-lian, et al. Review of the Transforming Bridge Method and Its Application[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2013, 30(1): 1-6.
- [47] 崔春生, 赖锴, 陈婕. 基于基元理论的内容推荐算法研究[J]. 系统科学与数学, 2015, 35(10): 1209-1218.  
CUI Chun-sheng, LAI Kai, CHEN Jie. Content-Based Recommendation of Ec Based on Basic Element Theory[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2015, 35(10): 1209-1218.
- [48] 赵燕伟, 徐晨, 任设东, 等. 实例检索中基于关联函数和 D-HS 索引的改进与融合研究[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(4): 1108-1119.  
ZHAO Yan-wei, XU Chen, REN She-dong, et al. Improvement and Fusion Research Based on Correlation Function and D-Hs Index in Case Retrieval[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(4): 1108-1119.
- [49] 许立波, 李兴森, 郭研. 三参数区间数下非线性可拓关联度决策方法[J]. 控制与决策, 2019, 34(10): 2203-2212.  
XU Li-bo, LI Xing-sen, GUO Yan. Nonlinear Extension Dependent Degree Method to Three-Parameter Interval Number Decision Making[J]. Control and Decision, 2019, 34(10): 2203-2212.
- [50] 杨春燕, 汤龙. 中国人工智能学会系列研究报告——中国原创学科可拓学发展报告[M]. 北京: 北京邮电



- 大学出版社, 2017.
- YANG Chun-yan, TANG Long. A Series of Research Reports of China Artificial Intelligence Society-Development Report of Extenics in Chinese Original Discipline[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2017.
- [51] 江志伟, 姚敏, 沈斌, 等. 可拓知识空间和可拓知识网格模型(II): 可拓知识网格[J]. 电路与系统学报, 2006, 11(4): 138-143.
- JIANG Zhi-wei, YAO Min, SHEN Bin, et al. Extension Knowledge Spaces and Extension Knowledge Grid Model(II): Extension Knowledge Grid[J]. Journal of Circuits and Systems, 2006, 11(4): 138-143.
- [52] 陈文伟, 杨春燕, 黄金才. 可拓知识与可拓知识推理[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(7): 1094-1096.
- CHEN Wen-wei, YANG Chun-yan, HUANG Jin-cai. Extension Knowledge and Extension Knowledge Reasoning[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(7): 1094-1096.
- [53] 钟诗胜, 张艳. 可拓知识表示及知识库系统的开发[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(11): 2184-2190.
- ZHONG Shi-sheng, ZHANG Yan. Extension-based Knowledge Representation and Development of Knowledge Base System[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(11): 2184-2190.
- [54] 朱佳俊, 郑建国, 覃朝勇. 基于证据理论的不确定可拓推理及应用[J]. 系统管理学报, 2013, 22(6): 876-881.
- ZHU Jia-jun, ZHENG Jian-guo, QIN Chao-yong. An Uncertain Extension Reasoning Algorithm based on Evidence Theory[J]. Journal of Systems & Management, 2013, 22(6): 876-881.
- [55] LIU Z, LIU J, JIAN L, et al. Configuration of Product Plan Based on Case Reasoning of Extenics[J]. AEJ - Alexandria Engineering Journal, 2021, 60(2): 2607-2618.
- [56] 钟诗胜, 王体春, 丁刚, 等. 基于基元模型的复杂产品方案设计知识可拓重用方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(1): 159-164.
- ZHONG Shi-sheng, WANG Ti-chun, DING Gang, et al. Knowledge Extension Reuse Method for Complex Product Concept Design Based on Basic Element Model[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2010, 40(1): 159-164.
- [57] 李兴森, 石勇, 张玲玲. 从信息爆炸到智能知识管理[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- LI Xing-sen, SHI Yong, ZHANG Ling-ling. From Information Explosion to Intelligent Knowledge Management[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [58] 王静, 王红, 李剪, 等. 面向矛盾问题的描述逻辑SHOQ扩展[J]. 计算机应用, 2014, 34(4): 1139-1143.
- WANG Jing, WANG Hong, LI Jian, et al. Extension of Contradiction Problem-Oriented Description Logic SHOQ[J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(4): 1139-1143.
- [59] 陈文伟, 黄金才, 毕季明. 解决矛盾问题的可拓模型与可拓知识的研究[J]. 数学的实践与认识, 2009(4): 170-174.
- CHEN Wen-wei, HUANG Jin-cai, BI Ji-ming. Extension Models and Extension Knowledge Solving Contradiction Problems[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2009(4): 170-174.
- [60] VLADAREANU L, POP N, MIGDALOVICI M, et al. Robot Extenics Control Developed by Versatile, Intelligent and Portable Robot Vipro Platform Applied on Firefighting Robots[J]. International Journal of Online and Biomedical Engineering, 2020, 16(8): 99.
- [61] GU P F, XI W, YE W P, et al. Extenics Matter-Element Analysis on Dilemma Problem in Hmi Design of Nuclear Power Plant[J]. Nuclear Engineering and Design, 2019, 350: 176-181.
- [62] DOU J, LI H, LI X. Problem-oriented Industrial Designing Method on Extenics[J]. Procedia Computer Science, 2019, 139: 356-363.
- [63] LI Xing-sen, LIU Fang-yao, LI Ai-hong, et al. Business Negotiation Based on Extenics[J]. Procedia Computer Science, 2018, 139: 521-528.
- [64] XU Li-bo, LI Xing-sen, PANG Chao-yi. Uncertain Multiattribute Decision-Making Based on Interval Number with Extension-Dependent Degree and Regret Aversion[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 103(1): 427-436.
- [65] XU LI-Bo, LI Xing-Sen, SHAO Jun-kai, et al. Extension Dependent Degree Method with Mapping Transformation for Three-Parameter Interval Number Decision Making[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018(9): 1-12.
- [66] TAO Z G, ZHAO D D, YANG X J, et al. Evaluation of Open-Pit Mine Security Risk Based on FAHP-Extenics Matter-Element Model[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(2): 1653-1667.
- [67] LIU Y, CHIEN S, HU D, et al. Developing an Extenics-Based Model for Evaluating Bus Transit System[J]. Journal of Advanced Transportation, 2020: 1-13.
- [68] LIU Q, WANG M, ZHOU T, et al. A Connection Cloud Model Coupled with Extenics for Water Eutrophication Evaluation[J]. Earth Science Informatics, 2019(3): 1-12.
- [69] JIANG P, LI C, LI R, et al. An Innovative Hybrid Air Pollution Early-Warning System Based on Pollutants Forecasting and Extenics Evaluation[J]. Knowledge-Based Systems, 2019, 164: 174-192.
- [70] JIANG P, LI C, LI R, et al. An Innovative Hybrid Air Pollution Early-Warning System Based on Pollutants Forecasting and Extenics Evaluation[J]. Knowledge-Based Systems, 2019, 164: 174-192.