

基于粗糙集的属性约简算法综述

周 涛^{1,4}, 陆惠玲², 任海玲³, 霍兵强¹

(1. 北方民族大学计算机科学与工程学院, 宁夏银川 750021; 2. 宁夏医科大学理学院, 宁夏银川 750004;
3. 银川市第一人民医院, 宁夏银川 750001; 4. 北方民族大学图像图形智能处理国家民委重点实验室, 宁夏银川 750021)

摘要: 属性约简是粗糙集中的一个重要研究方向. 本文从8个方面对基于粗糙集的属性约简算法进行归纳, 即: 不完备决策信息表, 不相容决策信息表, 连续型属性决策信息表, 动态决策信息表, 有序型属性决策信息表, 基于粗糙扩展模型的属性约简, 基于属性重要度的属性约简, 结合智能优化算法的属性约简, 这对进一步深入研究粗糙集的属性约简算法具有积极意义.

关键词: 粗糙集; 属性约简; 不完备决策; 不相容决策; 增量决策

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021) 07-1439-11

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20200330

Survey on Attribute Reduction Algorithm of Rough Set

ZHOU Tao^{1,4}, LU Hui-ling², REN Hai-ling³, HUO Bing-qiang¹

(1. School of Computer Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;
2. School of Science, Ningxia Medical University, Yinchuan, Ningxia 750004, China;
3. The First People's Hospital of Yinchuan City, Yinchuan, Ningxia 750001, China;
4. Key Laboratory of Images & Graphics Intelligent Processing of State Ethnic Affairs Commission, North Minzu University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: Attribute reduction is an important research direction in rough set. This paper summarizes attribute reduction algorithms based on rough sets from eight aspects, including incomplete decision information tables, incompatible decision information tables, continuous attribute decision information tables, dynamic decision information table, ordered data decision information table, attribute reduction algorithm based on rough extension model, attribute reduction algorithm based on attribute importance degree and attribute reduction algorithm based on intelligent optimization algorithm. Through summarizing eight aspects of attribute reduction algorithms based on rough set, positive significance is shown for further research on attribute reduction algorithm of rough set.

Key words: rough set; attribute reduction; incomplete decision; incompatible decision; dynamic decision

1 引言

随着互联网和大数据的发展, 获取海量信息的同时, 也带来了数据及其属性的冗余和不确定性. 不确定性的内含很丰富, 主要包括不完备性、不一致性、不相容性、模糊性和随机性五个方面, 其中模糊性和随机性又是不确定性问题的基本内涵. 如何从海量的、不确定的数据中提取隐含的知识和规律, 是一个重要的研究领域. 粗糙集理论^[1]由波兰学者 Pawlak 于 1982 年提出, 是一种处理不精确、不一致、不完整数据分析理论,

为发现重要数据结构和复杂对象的分类提供了有力支撑. 它能够基于数据本身所提供的信息利用等价关系形式化定义知识, 利用上、下近似集合对知识进行表示, 利用属性约简等方法来获取知识, 并将知识应用于决策推理, 目前已经广泛应用于人工智能和数据挖掘领域. 属性约简^[2]作为粗糙集理论重要研究内容之一, 国内外很多专家对属性约简进行了研究, 其核心思想就是在不影响决策信息表的分类和决策能力条件下, 根据属性依赖度或重要度的大小, 约简其中冗余属性, 得到属性约简子集. 决策信息表经过属性约简, 可以降低

收稿日期: 2020-04-10; 修回日期: 2021-02-04; 责任编辑: 李勇锋

基金项目: 国家自然科学基金(No.62062003); 宁夏重点研发项目(引才专项)(No.2020BEB04022); 北方民族大学引进人才科研启动项目(No.2020KYQD08)

低特征属性的维度^[3],提高基于属性的分类性能^[4]、简化数据描述^[5]和避免过拟合问题^[6].

基于经典粗糙集的属性约简算法不需要先验知识,仅利用数据本身所提供的信息就可以发现问题的规律并进行属性约简,但它建立在严格的等价关系基础上,有很大的局限性,如:容错性差;不能处理不完备、不相容决策信息表;对于决策信息表中的数值型属性、有序型属性、呈动态变化的属性不能直接处理.因此众多学者对粗糙集理论进行了研究及扩展,先后提出了概率粗糙集^[7]、变精度粗糙集^[8]、决策粗糙集^[9]、多粒度粗糙集^[10]等,并在不完备决策信息表^[12]、不相容决策信息表^[21]、连续型属性决策信息表^[24]、属性动态变化决策信息表^[30]、有序型属性决策信息表^[37]等方面分别进行了探索,取得了较好的研究成果.此外还在粗糙集扩展模型的基础上进行属性约简算法研究,提出基于属性重要度^[63]、条件信息熵^[74]、互信息的属性约简算法^[76],并从生物智能行为中受到启发,建立结合智能优化算法的属性约简模型,取得很好的研究成果.基于粗糙集的属性约简算法整体情况如图1所示.

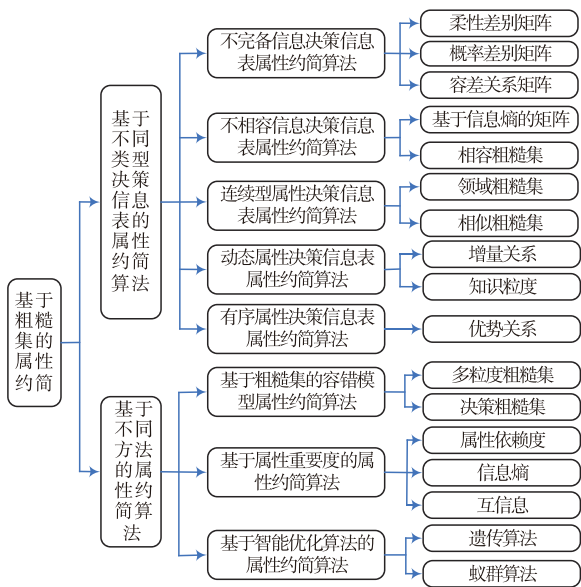


图1 基于粗糙集的属性约简算法

2 基于粗糙集的属性约简算法

2.1 不完备决策信息表的属性约简算法

由于数据测量的误差、对知识获取的限制等原因造成决策信息表中有些数据丢失或无法得到,区间值数据或是集值数据,使得决策信息表呈现不完备性,众多专家学者通过对不完备决策信息系统的扩充,有效地解决了经典粗糙集理论不能处理不完备决策信息表的问题,常见的解决办法是对等价关系进行弱化,利用相似关系、容差关系、量化容差关系、限制容差关系、优

势关系、相容关系以及邻域关系来代替等价关系,进而处理不完备信息系统^[19,20].Kryszkiewicz^[11]将决策信息表中的缺失数据视为可以和任意对象进行比较的遗漏型数据,并基于容差关系进行属性约简;Stefanoski^[12]将决策信息表中的缺失数据视为缺席型,基于非对称相似关系和量化容差关系进行属性约简;李同军^[13]通过比较对象间属性值的一致性,定义对象集上的一个相似关系,基于相似关系的粗糙近似算子,利用目标集的粗糙集近似,提取语义明确的决策规则,进而给出不完备决策信息表的属性约简规则.刘芳^[14]引入容差关系矩阵,利用边界域做启发,通过矩阵获得最优属性约简集;王国胤^[15]在基于容差关系的粗糙集模型中,对不完备信息系统中的进行了扩充;韦碧鹏^[16]基于 α 优势关系进行不完备决策信息表的属性约简;Tan^[17]研究了不完备信息系统上的多粒度粗糙集模型;Liu^[18]研究了不完备信息系统上的三支决策模型.不完备决策信息表的属性约简算法分类如图2所示.

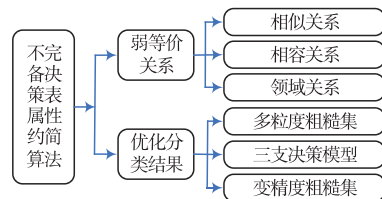


图2 不完备决策信息表属性约简算法

2.2 不相容决策信息表的属性约简算法

由于没有充分考虑决策表中数据之间不相容的问题,基于经典粗糙集理论的属性约简算法无法对呈现相同条件属性对应不同决策结果的不相容决策信息表进行属性约简,现有的算法主要是基于代数观和信息观两种,因此基于不相容决策信息表的属性约简是粗糙集的一个重要研究方向.典型的代数观算法是叶东毅^[21]在Hu^[22]改进的Skowron区分矩阵基础上,构造区分矩阵元素时,不但考虑两对象是否不相容,而且考虑了被比较的两对象关于条件等价类的决策总数.典型的信息观算法有王国胤^[23]将信息熵的观点运用到决策表的计算中,提出的基于信息观的约简算法.不相容决策信息表的属性约简算法分类如图3所示.

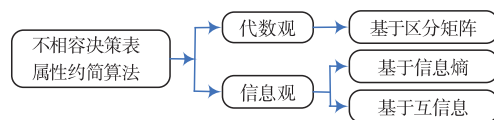
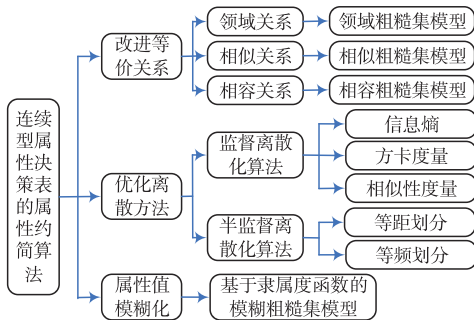


图3 不相容决策信息表属性约简算法

2.3 连续型属性决策信息表的属性约简算法

Pawlak提出的粗糙集以离散型数据为研究对象,对于连续型(数值型)数据需先进行离散化,而经离散化后的数据存在信息丢失问题.目前,针对连续型数据

的处理问题,有以下解决方案:首先是通过改进粗糙集理论中的等价关系直接研究离散型数据,如:用邻域关系代替等价关系的邻域粗糙集模型^[24]、用相似关系代替等价关系的相似粗糙集模型^[25];用相容关系代替等价关系的相容粗糙模糊集模型^[26];其次是将连续属性值进行模糊化处理,如:模糊粗糙集;再次将连续属性值进行离散化处理,优化离散方法,从而降低离散后数据信息的丢失量,当前算法主要包括基于信息熵等的监督离散算法和基于等间距划分的非监督离散算法.但在针对混合类型数据、大规模数据时,有效实现数据离散化仍然是一个关键问题.连续型属性决策信息表的属性约简算法分类如图4所示.



目前,在连续型属性决策信息表的属性约简研究方面,主要有邻域粗糙集、模糊粗糙集.在基于邻域粗糙集的属性约简方面,学者将邻域粗糙集与蚁群算法^[27]、遗传算法^[28]等优化算法相结合,从而优化邻域粗糙集的属性约简过程及结果,提高属性约简的整体效率.在基于模糊粗糙集的属性约简方面,王世强^[29]结合人工蚁群算法,优化了基于模糊粗糙集的属性约简.

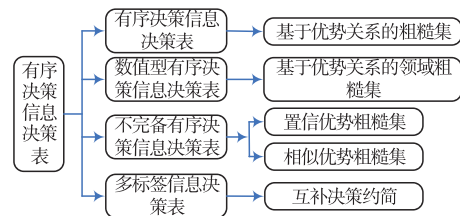
2.4 动态决策信息表的属性约简算法

动态决策信息表的属性约简是属性约简的一个热点,将增量学习技术引入到基于粗糙集的属性约简算法中,可有效对动态信息表进行属性约简.动态决策信息表的变化可以分为实例对象变化、属性值变化、属性集合变化.从实例对象变化的角度,Shu^[30]对实例对象变化后的正域进行增量式计算,提高了分类精度,降低了时间复杂度;Wei^[31]基于粒计算属性重要度,进而进行属性约简,设计的基于filter-wrapper的属性约简算法在疾病诊断中具有较好性能;Liang^[32]根据互补熵、混合熵和条件信息熵三种典型的信息熵分别设计相应的增量式属性约简算法;从属性值、属性集合变化的角度,景运革^[33]提出一种属性增加且属性值发生细化的矩阵增量约简算法;Jing^[34]提出知识粒度的矩阵表示形式,并讨论知识粒度的增量变化机制,设计相应的属性约简算法;Jing^[35]针对实例对象和属性集合同时变化的

情况,设计动态数据挖掘的增量属性约简方法;Yang^[36]针对实例对象变化的三种情形提出了统一的约简框架.虽然增量学习能使基于粗糙集的属性约简模型处理动态决策信息表,但仍存在一些问题,例如:动态数据的变化因素较多,多种因素同时变化属性约简算法仍需进一步研究.

2.5 有序决策信息表的属性约简算法

Paulak提出的经典粗糙集理论不能处理有序属性决策信息表的属性约简,Greco^[37]用优势关系代替等价关系对数据进行分析,在有序决策信息表的属性约简方面得到了广泛的应用.近年来,众多学者在基于优势关系的粗糙集理论上进行了更深入的研究,例如:Xu^[38]为有效处理有序属性的属性约简,结合优势矩阵,提出关于可能的和兼容的分销削减理论;Wen^[39]基于证据理论的有序决策信息表的属性约简问题,提出优势粗糙集方法中、低、高近似算子强相关的信任和似真函数,以定义有序决策信息表的相对信念和可信度约简;Chen^[40]综合考虑数值属性值和分类属性值之间存才的偏序关系,提出基于优势的领域粗糙集的并行属性约简算法;Li^[41]在多标签分类的应用领域上,提出互补决策约简,揭示多标签数据中隐含的不确定因素,有效约简冗余属性,提高多标签分类的准确率.考虑到有序信息决策表中存在的不完备性,提出了置信优势关系粗糙集,此后学者进行了扩展,Shao^[42]提出基于扩展优势关系粗糙集模型的属性约简算法可处理不协调不完备有序决策系统;Yang^[43]提出相似优势关系粗糙集模型处理不完备有序决策系统;Gou先后提出置信优势关系^[44]和不协调置信优势关系^[45]用于属性约简.有序决策信息表的属性约简算法如图5所示.



2.6 基于容错模型的属性约简算法

经典粗糙集用等价类划分知识,容错能力较弱,因此需要将经典粗糙集模型进行扩展.常见的基于粗糙集的容错模型主要是建立在概率粗糙集基础上,概率粗糙集的正域是建立在概率包含之上的,允许一定程度的错误分类,通过量化阈值将论域划分为概率正域、概率边界域、概率负域.在概率粗糙集模型中,概率阈值的确定对于论域的划分起决定性作用,不同的阈值

将导致对论域不同的划分结果,从而实现不同的信息处理与分析结果.例如:Pawlak^[7]提出的0.5概率粗糙集是将概率阈值确定为0.5,条件概率大于0.5的对象划分到正域、小于0.5的对象划分到负域、等于0.5的划分到边界域;变精度粗糙集^[8]是通过引入错误分辨率来对论域进行具有容错能力的划分;决策粗糙集模型^[9]的阈值计算方法是基于贝叶斯理论引入损失函数来定义的;博弈粗糙集模型的阈值确定是基于博弈策略的,通过合作与冲突确定阈值;贝叶斯粗糙集^[46]通过引入概率函数,自主运算概率阈值,具有较好的运用价值.这里从变精度粗糙集模型、决策粗糙集模型进行归纳总结.基于粗糙集的容错模型如图6所示.

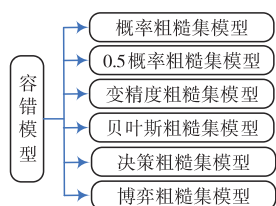


图6 基于容错模型的属性约简算法

2.6.1 变精度粗糙集模型的属性约简算法

Ziarko^[8]提出的变精度粗糙集模型,它通过引入参数 $\beta(0 \leq \beta < 0.5)$,在属性约简过程中允许一定程度的错误分类存在.近年来,许多学者在变精度粗糙集模型上进行了探索,例如:为处理连续型数据,增强变精度粗糙集对噪声的数据的适应能力,徐怡^[50]提出 (α, λ) 联系度容差关系,并将联系度容差关系与Ziarko提出的多数包含关系相结合,构造变精度 (α, λ) 联系度粗糙集模型;郑树梅^[51]引入可变容差关系到变精度粗糙集模型;针对基于序决策信息表的优势粗糙集不能处理包含大量灰度信息问题,刘勇^[52]根据灰色系统思想,提出优势灰度的概念,建立了基于优势灰度的变精度粗糙集模型;针对现有的VPRS属性约简算法没有增加样本处理动态数据集的增量机制,Chen^[53]提出一种用VPRS进行属性约简的增量算法;在变精度粗糙集模型中,参数 β 值对属性约简结果起关键作用,Cheng^[54]通过研究决策表测量中的 β 一致性和 β 一致决策表的阈值,提出一种基于VPRS的决策表自动确定精度参数值的算法.基于变精度粗糙集的属性约简算法分类如图7所示.

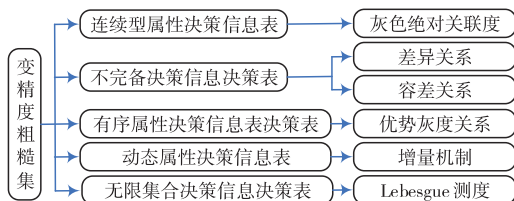


图7 基于变精度粗糙集的属性约简算法

2.6.2 基于决策粗糙集模型的属性约简算法

1990年,Yao^[9]提出决策粗糙集,其思想是在经典粗糙集模型中通过引入贝叶斯理论、以条件概率定义概念的相交程度、用两个阈值定义概率上、下近似集为出发点,通过设置不同的 α 和 β 值,构造0.5概率粗糙集、变精度粗糙集等框架模型,解决了经典粗糙集只有在对象的等价类完全包含于目标概念时,才能将其划分到正域里的缺乏容错能力问题.决策粗糙集的属性约简有一定的容错能力,具有处理复杂低质量数据的优势,但也面临着决策区域同属性增减之间不具有单调性,以及约简过程和约简结果待优化的问题.图8给出基于决策粗糙集的属性约简算法分类情况.

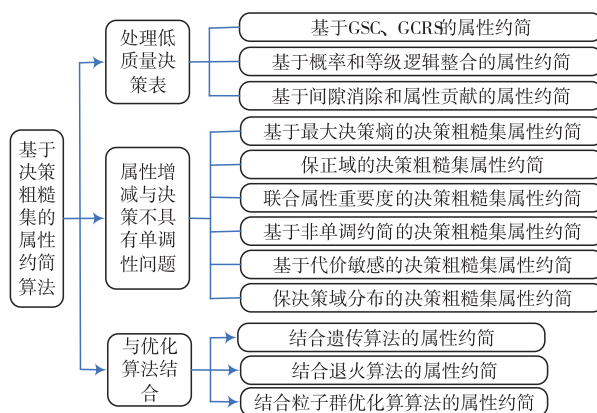


图8 基于决策粗糙集模型的属性约简算法

基于决策粗糙集的属性约简可以用来处理含有复杂的、低质量数据的决策信息表,例如:为了降低计算成本和计算时间,Meng^[55]首先利用数据集的共同特征和采用除法,从决策系统中提取“单调成分”,构建DTRS模型约简算法;Suo^[56]提出一种集粗糙集理论和网格子空间聚类(GSC)算法于一体的新型网格聚类粗糙集(GCRS)模型,并基于此设计了相应的快速属性约简算法和基于GCRS的粗糙自学习算法,使得属性约简结果具有较快的约简速度和较高的分类精度;Vladimir^[57]提出一种基于间隙消除和属性贡献的修剪属性来计算决策表的所有约简的新算法,该算法使用更简单的候选评估操作减少运行时间.

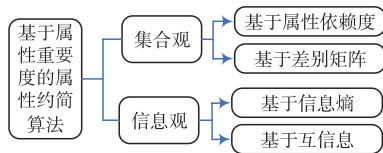
决策粗糙集理论由于贝叶斯决策算法的引入,使得决策区域和决策规则与属性增减之间不具备单调性而导致了诸如:属性约简过程复杂、约简算法低效等问题.为避开决策粗糙集属性约简的非单调性问题,Gao^[58]在决策粗糙集模型中引入基于最大包含度和最大决策熵来度量单调不确定性,使得在添加或删除条件属性时呈现单调性,并将最大决策熵用于属性约简,最大化约简与类属性的相关性;Wang^[59]提出了三种基本不确定性度量和三种期望粒度的不确定性度量,证

明了这些度量的单调性,提出的单调不确定性测度定义了一个新的属性约简,并开发了相应的启发式约简算法.

为对属性约简结果进行优化,Jia^[60]以最小决策成本为目标,定义一个属性约简优化问题,采用启发式方法、遗传方法和模拟退火方法进行属性约简优化问题;Chebrolu^[61]优化总体风险的角度,使用粒子群优化算法优化总体风险,提出 DTRSM 中的属性约简算法;郭敏^[62]针对决策粗糙集模型的研究只局限于处理具有离散型数据的信息表问题,将模糊集和决策粗糙集理论相结合,在决策粗糙集模型中计算期望风险损失时,利用模糊隶属度函数代替传统的后验概率求解方法,推导出新的决策规则,进而可高效处理那些包含连续型属性的信息系统.

2.7 基于属性重要度的属性约简算法

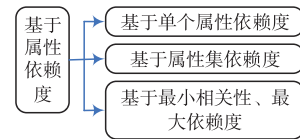
属性重要度反映的是去掉某些属性前后的属性分类变化程度,若去掉该属性后相应的分类变化比较大,则该属性的重要度大,反之则小. 基于属性重要度的属性约简算法最终得到的是一个包含最少属性的最优解或不是最小约简的次优解. 许多基于重要度属性约简算法以显著度量来实现最优约简,通常保持目标集的正区域不变并忽略边界区域信息的情况下,多重属性具有同等重要意义的属性约简是研究热点. Zheng^[79]在处理一些添加属性的过程中,对具有相同最大重要性的属性,通过建立属性组合比较它们的重要性,提出粗糙集中启发式属性约简的增强算法;Xu^[80]在多粒度空间中,提出一种基于 0.5-近似集模糊性的属性约简算法. 根据属性重要度的度量方法不同,可以分为基于属性依赖的属性约简和基于条件信息熵的属性约简. 前者以代数论集观点定义的属性重要度,考虑的是某属性对论域中确定分类子集的影响;后者从信息论信息观点定义的属性重要度,考虑的是某属性对于论域中不确定分类子集的影响,它比代数表示更加直观,能够导出高效的知识约简算法. 图 9 给出了基于属性重要度的属性约简算法分类.



2.7.1 基于属性依赖的属性约简算法

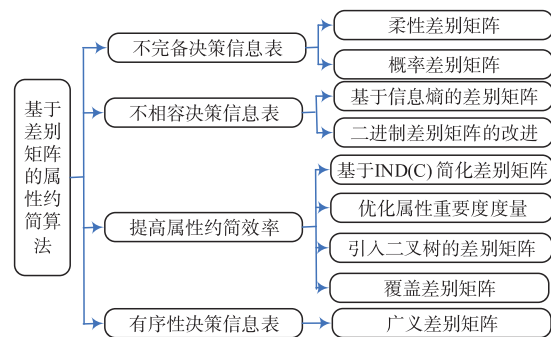
基于属性依赖的约简算法在约简过程中,将重要度大的属性逐一加入到候选属性约简中,直到满足于定义的条件停止. 其优点是易于理解、计算简单,但它是以集合表示为基础的,运算的直观性较差、约简结果

存在冗余、计算的属性重要度定义具有不完备性等问题. 为此,路松峰^[65]考虑到基于属性依赖的算法没有度量条件属性间的依赖关系导致属性约简结果仍然存在冗余问题,提出了 ARA 属性约简算法;基于属性依赖度的计算仅考虑了论域中确定性的元素集合,而忽略了边界域中元素的概率分布信息,使得计算出属性重要度的定义显得过于“粗糙”,翟俊海^[66]针对这一问题,提出了一种改进算法,它利用最小相关性和最大依赖度准则求决策表属性约简. 基于属性依赖度的属性约简算法分类如图 10 所示.



2.7.2 基于差别矩阵的属性约简算法

1992年由波兰科学家 A Skowron^[67]定义的差别矩阵(discernibility matrix),其核心思想是将决策表中所有属性的区分信息浓缩进一个矩阵中,通过差别矩阵计算决策表的属性约简和属性核. 基于差别矩阵的属性约简算法直观明了,属性约简与核的计算简单,很多属性约简算法都是基于差别矩阵的,是属性约简的一种经典方法,但有如下缺点:(1)只能解决完备决策表和相容决策表的属性约简问题;(2)当数据量较大时,该方法获得属性约简的时间空间复杂度很高;(3)难于处理连续数值数据. 图 11 给出以问题导向的差别矩阵属性约简算法分类.



在不相容、不完备决策问题中,王婷^[68]结合二进制差别矩阵引入二叉树(B tree)的设计思想,提出基于压缩存储的属性约简算法,将二进制差别矩阵的属性集存储在二叉树的相应路径上,通过边存边剪枝(剪枝的思想就是从二叉树上删除那些在同一条路径上的重复、无用属性集)的思想,有效地降低算法的时空复杂度.

在提高属性约简效率问题中,针对基于差别矩阵

的属性约简算法有重复或无用元素占用大量的存储空间问题,为降低属性约简算法的时间复杂度和空间复杂度,提高约简效率,可以采用压缩差别矩阵、简化决策表等进行改进.例如:杨涛^[69]提出一种压缩差别矩阵的构造方法及相关的属性集求核算法,减少了差别矩阵中大量的空值存储,并且避免对象之间的盲目比较;Teng^[70]基于差别性提出一种相对差别度的属性质量度量,经过分析发现在选择属性过程中删除相对可有可无的属性和冗余对象后,该度量可以找到相对可有可无的属性并保持不变.

有序性属性约简问题中,黄国顺^[71]将决策表属性区分能力大小与HU差别矩阵结合起来,建立起属性区别能力与该属性在HU差别矩阵中出现次数之间的关系,提出以相对重要性为启发式信息,只依赖于等价类基数的HU属性约简算法;Wang^[72]提出一种基于覆盖粗糙集构造简单差别矩阵的方法;为有效处理连续数值数据问题,杨明^[73]提出广义差别矩阵,针对新对象添加到决策表后,已有的属性约简将会发生改变,需要对其动态更新的问题,分析增量对象的不同情况,通过将增量属性约简映射到简化决策表上来增量式属性约简.

2.7.3 基于条件信息熵的属性约简算法

基于条件信息熵的属性约简算法是一种启发式算法,它利用条件属性的信息熵度量属性的重要性,将信息熵小的属性逐一加入到候选属性约简中,直到满足预定义的停止条件,算法优点是易于实现,但只能求出决策表的一个约简,也不一定是最优约简.梁宝华^[74]从代数观出发,提出近似边界精度的定义,将近似边界精度融合相对信息熵和增强信息熵,提出两种新的属性约简方法;基于信息熵计算的属性重要度仅刻画了边界域中不确定性元集合提供的信息,没考虑确定性元素的重要程度,徐菲菲^[75]对算法进行改进,将粗糙集中知识熵与条件熵公式进行了改写并推广到模糊数据,从信息的角度描述模糊知识,在此基础上提出一种基于互信息的模糊知识相对约简的启发式算法.

2.7.4 基于互信息的属性约简算法

基于互信息的属性约简算法是以决策表的相对核为起点,在决策表中添加某个引起互信息变化大的反映该属性的重要程度大的属性,该算法倾向于选择值域中含有较多值的属性,这种倾向并不一定合理.贾平^[76]提出了基于互信息增益率的改进算法.图12给出了基于互信息的属性约简算法分类图.

2.8 基于智能优化方法的属性约简算法

智能优化算法在粗糙集属性约简算法中有广泛应用.基于智能优化方法的属性约简算法如图13所示.本节主要归纳应用最广泛的基于遗传算法的属性约简

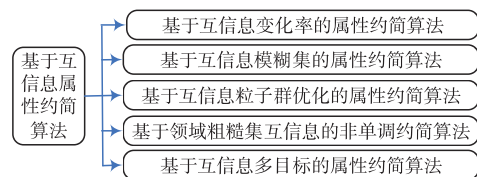


图12 基于互信息的属性约简算法

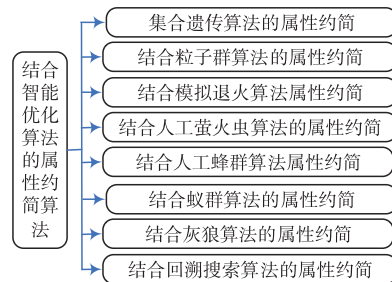


图13 基于智能优化方法的属性约简算法

算法和基于蚁群算法的属性约简算法.

2.8.1 基于遗传算法的属性约简算法

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是通过模拟生物进化论的自然选择和遗传学机理而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法,具有很强的全局搜索能力.遗传算法进行属性约简也存在一些不足,如:适应度函数计算复杂,效率不高,尤其在处理大型决策表时,算法性能低;容易陷入局部最优;迭代次数多,早熟收敛、收敛较慢;不能有效处理数值连续性数据的属性约简问题.

适应度值是用来区分群体中个体好坏的标准,是进行自然选择的唯一依据,遗传算法中的适应度函数通常要求是非负的.对于寻找最小约简的计算问题,个体的适应度主要取决于两个方面:个体编码的长度(所含属性的个数,应该尽量少)和个体覆盖区分矩阵行数的百分比(区分能力,应尽量强).因此,为解决适应度函数计算复杂问题,有两种解决方案:(1)以缩短编码长度为目的的遗传算法研究,(2)以增强区分能力为目的的遗传算法研究.以缩短编码长度为目的的遗传算法主要包括:(1)基于二进制编码的遗传算法;(2)基于属性排序的遗传算法;(3)基于启发式编码的遗传算法,包括以条件熵、惩罚函数、属性依赖度、区分函数的覆盖度等为启发式的遗传算法.当然,基于启发式的遗传算法同样可以增强个体的区分能力.例如:为解决传统遗传算法在属性约简时会出现迭代次数多,收敛较慢的问题,陶志^[77]通过在不完备信息系统中引入决策属性支持度,以此作为启发式信息求出相对核,并将相对核加入遗传算法的初始种群中以加快算法的收敛.同时,在适应值函数中引入惩罚函数,可以保证所求约简既含较少的属性又有较强的支持度.

2.8.2 基于蚁群算法的属性约简算法

模拟自然界蚂蚁觅食时通过在路径上信息素的传

递,最终能发现一条最短路径现象,1991年由意大利学者 M Dorigo 提出了蚁群算法,它的主要特征是采用正反馈机制、具有强的鲁棒性和适于并行处理. 基于蚁群算法的属性约简算法的难点是初期信息素匮乏,导致迭代次数多、收敛速度慢、容易出现停滞现象. 于洪^[78]结合蚁群优化方法将属性约简问题转化为受限制满足问题,提出 R-Graph 模型,将最小属性约简问题转化为在 R-Graph 中寻找最低成本路径问题,提出一个求解多个属性约简的算法.

3 总结与未来展望

粗糙集经过四十年的发展,已经取得了令人瞩目的研究成果. 基于粗糙集的属性约简由于其不需要先验知识的支撑,所以对问题不确定性的处理相对客观,从而形成与模糊集、证据理论等其他处理不精确问题的理论形成较强的互补,使其成为对大数据进行智能分析的一种有效的科学手段. 本文主要从 8 个方面对基于粗糙集的属性约简算法进行综述,详细总结了属性约简的研究进展. 这里对基于粗糙集的属性约简及其未来展望如下:

(1) 面向领域数据驱动的属性约简算法研究. 就是在先验知识的引导下,从一个面向领域的问题中提取描述问题的属性(特征)集,出于算法复杂度、算法性能和计算代价的考虑,需要在这个较大的属性集合中寻求一个在不降低对问题描述能力的属性子集,目前主要应用于特征提取、数据降维等,因此研究属性约简算法主要集中在两个方面. 一方面是将属性约简应用到更多的领域,一方面是探讨基于不同领域问题的属性约简方法.

(2) 大数据背景下的动态决策信息表的属性约简算法研究. 属性约简被证明是 NP 难问题,对属性约简算法进行优化和改进是粗糙集研究的重要方向. 但在大数据背景下,数据快速增长导致信息系统动态变化,导致信息表动态变化的原因大致可以分为实例对象、属性值、属性集合,将增量学习技术引入到属性约简算法中,对动态决策信息表进行属性约简,使基于粗糙集的属性约简算法能处理更加复杂的信息.

(3) 处理不确定信息理论的交叉融合. 由于信息的不确定性存在客观性,基于粗糙集的属性约简算法与其他不确定信息处理理论呈现交叉融合的趋势. 粗糙集理论与 D-S 证据理论从代数意义上看,具有概率性质的信任函数可以有相应的扩展粗糙集模型,比如串行代数、区间代数等;粗糙集与模糊集的耦合产生粗糙模糊集和模糊粗糙集;形式概念分析和粗糙集的结合,提出了近似算子等;粗糙集和粒计算结合,提出了基于粗糙集的粒计算模型等. 可以预见未来不确定性理论在

属性约简中的融合应用会得到很大程度的提高.

参考文献

- [1] Pawlak Z. Rough sets[J]. International Journal of Computer and Information Sciences, 1982, 11: 341 – 356.
 - [2] Wei Wei, Jiye Liang. Information fusion in rough set theory: An overview[J]. Information Fusion, 2019, 48: 107 – 118.
 - [3] Hedar A R, Wang J, Fukushima M. Tabu search for attribute reduction in rough set theory [J]. Soft Computing, 2008, 12(9): 909 – 918.
 - [4] Miao D Q, Zhao Y, Li H X, et al. Relative reducts in consistent and inconsistent decision tables of the Pawlak rough set model [J]. Information Sciences, 2009, 179 (24) : 4140 – 4150.
 - [5] Parthala N M, Shen Q, Jensen R. A distance measure approach to exploring the rough set boundary region for attribute reduction [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2010, 22(3): 305 – 317.
 - [6] Thangavela K, Pethalakshmi A. Dimensionality reduction based on rough set theory: A review [J]. Applied Soft Computing, 2009, 9(1): 1 – 12.
 - [7] Pawlak Z, Wong S K M, Ziarko W. Rough sets: probabilistic versus deterministic approach [J]. International Journal of Man-Machine Studies, 1988, 29(1): 81 – 95.
 - [8] Ziarko W. Variable precision rough set model [J]. Journal of Computer and System Sciences, 1993, 46(1): 39 – 59.
 - [9] Yao Y, Wong S K M, Lingras P. A decision-theoretic rough set model [A]. Proceedings of the 7th International Symposium on Methodologies for Intelligent Systems [C]. Berlin: Springer, 1993. 17 – 24.
 - [10] Qian Y H, Liang J Y, Yao Y, et al. MGRS: A multi-granulation rough set [J]. Information Sciences, 2010, 180: 949 – 970.
 - [11] Kryszkiewicz M. Rough set approach to incomplete information systems [J]. Information Sciences, 1998, 112: 39 – 49.
 - [12] Stefano ski J, Tsoukias A. On the extension of rough sets under incomplete information [A]. Proceedings of New Directions in Rough Sets, Data Mining and Granular-Soft Computing [C]. Berlin: Springer, 1999. 73 – 81.
 - [13] 李同军, 黄家文, 吴伟志. 基于相似关系的不完备形式背景属性约简 [J]. 山东大学学报(理学版), 2018, 53(8): 9 – 16, 24.
- Li Tongjun, Huang Jiawen, Wu Weizhi. Attribute reduction of incomplete contexts based on similarity relations

- [J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 2018, 53(8): 9 – 16, 24. (in Chinese)
- [14] 刘芳, 李天瑞. 基于边界域的不完备信息系统属性约简方法[J]. 计算机科学, 2016, 43(3): 242 – 245, 284.
LIU Fang, LI Tianrui. Method for attribute reduction based on rough sets boundary regions [J]. Computer Science, 2016, 43(3): 242 – 245, 284. (in Chinese)
- [15] 王国胤. Rough集理论在不完备信息系统中的扩充[J]. 计算机研究与发展, 2002, 39(10): 1238 – 1243.
Wang Guoyin. Extension of rough set under incomplete information systems [J]. Journal of Computer Research and Development, 2002, 39(10): 1238 – 1243. (in Chinese)
- [16] 韦碧鹏, 吕跃进, 李金海. α 优势关系下粗糙集模型的属性约简[J]. 智能系统学报, 2014, 9(2): 251 – 258.
WEI Bipeng, LV Yuejin, LI Jinhai. Attribute reduction based on the rough set model under α dominance relation [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2014, 9(2): 251 – 258. (in Chinese)
- [17] TAN Anhui, WU Weizhi, LI Jinji, et al. Evidence-theory-based numerical characterization of multigranulation rough sets in incomplete information systems [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2016, 294: 18 – 35.
- [18] LIU Dun, LIANG Decui, WANG Changchun. A novel three-way decision model based on incomplete information system [J]. Knowledge-Based Systems, 2016, 91: 32 – 45.
- [19] SU Lirun, William Zhu. Dependence space of topology and its application to attribute reduction [J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2018, 9(4): 691 – 698.
- [20] Luo Chuan, Li Tianrui, Huang Yanyong, et al. Updating three-way decisions in incomplete multi-scale information systems [J]. Information Sciences, 2018, 476: 274 – 289.
- [21] 叶东毅, 陈昭炯. 一个新的差别矩阵及其求核方法[J]. 电子学报, 2002, 30(7): 1086 – 1088.
YE Dong-yi, CHEN Zhao-jiong. A new discernibility matrix and the computation of a core [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(7): 1086 – 1088. (in Chinese)
- [22] Hu Xiao-Hua, Cercone N. Learning in relational databases: a rough set approach [J]. Computational Intelligence, 1995, 11(2): 323 – 337.
- [23] 王国胤. 决策表核属性的计算方法[J]. 计算机学报, 2003, 26(5): 611 – 615.
WANG Guoyin. Calculation methods for core attributes of decision table [J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(5): 611 – 615. (in Chinese)
- [24] 胡清华, 赵辉, 于达仁. 基于邻域粗糙集的符号与数值属性快速约简算法[J]. 模式识别与人工智能, 2008, 21(6): 732 – 738.
HU Qinghua, ZHAO Hui, YU Daren. Efficient symbolic and numerical attribute reduction with neighborhood rough sets [J]. Pattern Recognition & Artificial Intelligence, 2008, 21(6): 732 – 738. (in Chinese)
- [25] 李浩. 离散空间中的邻域粗糙集模型[D]. 辽宁锦州: 渤海大学, 2017.
LI Hao. Neighborhood Rough Set in Discrete Space [D]. Jinzhou, Liaoning: Bohai University, 2017. (in Chinese)
- [26] 翟俊海, 张垚, 王熙照. 相容粗糙模糊集模型[J]. 山东大学学报(理学版), 2014, 49(8): 73 – 79.
ZHAI Junhai, ZHANG Yao, WANG Xizhao. Tolerance rough fuzzy set model [J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 2014, 49(8): 73 – 79. (in Chinese)
- [27] 许明, 郑鹭斌, 谢彦麒, 等. 基于邻域熵与蚁群优化的基因选择算法[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2017, 45(6): 815 – 821.
XU Ming, ZHENG Lubin, XIE Yanqi, et al. Gene selection algorithm based on neighborhood entropy and ant colony optimization [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2017, 45(6): 815 – 821. (in Chinese)
- [28] 张飞飞, 周涛, 陆惠玲, 等. 基于集成VPRS-RUGGA支持向量机的多模态肺部肿瘤计算机辅助诊断模型[J]. 生物医学工程研究, 2019, 38(1): 48 – 53.
ZHANG Feifei, ZHOU Tao, LU Huiling, et al. A computer aided diagnosis model for multimodality lung tumor based on ensemble VPRS-RUGGA support vector machine [J]. Journal of Biomedical Engineering Research, 2019, 38(1): 48 – 53. (in Chinese)
- [29] 王世强, 张登福, 毕笃彦. 基于模糊粗糙集和蜂群算法的属性约简[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(1): 172 – 178.
WANG Shiqiang, ZHANG Dengfu, BI Duyan. Attribute reduction method based on fuzzy rough sets and artificial bee colony algorithm [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(1): 172 – 178. (in Chinese)
- [30] Shu W, Qian W. An incremental approach to attribute reduction from dynamic incomplete decision systems in rough set theory [J]. Data & Knowledge Engineering, 2015, 100: 116 – 132.

- [31] Wei W, Wu X, Liang J, et al. Discernibility matrix based incremental attribute reduction for dynamic data [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2018, 140: 142 – 157.
- [32] Liang J, Wang F, Dang C, et al. A group incremental approach to feature selection applying rough set technique [J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2014, 26(2): 294 – 308.
- [33] 景运革, 景罗希, 王宝丽. 属性值和属性变化的增量属性约简算法[J]. *山东大学学报(理学版)*, 2020, 55(1): 62 – 68.
JING Yunge, JING Luoxi, WANG Baoli. An incremental attribute reduction approach when attribute values and attributes of the decision system change dynamically [J]. *Journal of Shandong University (Natural Science)*, 2020, 55(1): 62 – 68. (in Chinese)
- [34] Jing Y, Li T. A matrix-based incremental attribute reduction approach under knowledge granularity on the variation of attribute set[A]. *International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering [C]*. New York: IEEE Press, 2015. 34 – 39.
- [35] Yungge Jing, Tianrui Li, FujitaHamido, et al. An incremental attribute reduction method for dynamic data mining[J]. *Information Fusion*, 2018, 465: 202 – 218.
- [36] Yang C, Ge H, Li L, et al. A unified incremental reduction with the variations of the object for decision tables [J]. *Soft Computing*, 2019, 23(15): 6407 – 6427.
- [37] Greco S, Matarazzo B, Slowinski R. Rough sets theory for multi-criteria decision analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 129(1): 1 – 47.
- [38] Weihua Xu, Yuan Li, Xiuwu Liao. Approaches to attribute reductions based on rough set and matrix computation in inconsistent ordered information systems [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2012, 27: 78 – 91.
- [39] Wensheng Du, Baoqing Hu. Attribute reduction in ordered decision tables via evidence theory [J]. *Information Sciences*, 2016: 91 – 110.
- [40] Hongmei Chen, Tianrui Li, Yong Cai, et al. Parallel attribute reduction in dominance-based neighborhood rough set [J]. *Information Sciences*, 2016, 373: 351 – 368.
- [41] Hua Li, Deyu Li, Yanhui Zhai, et al. A novel attribute reduction approach for multi-label data based on rough set theory [J]. *Information Sciences*, 2016, 367: 827 – 847.
- [42] Shao Mingwen, Zhang Wen-xiu. Dominance relation and rules in an incomplete ordered information system [J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2005, 20(1): 13 – 27.
- [43] Yang Xibei, Yang Jingyu, Wu Chen, et al. Dominance-based rough set approach and knowledge reductions in incomplete ordered information system [J]. *Information Sciences*, 2008, 178(4): 1219 – 1234.
- [44] 苟光磊, 王国胤. 置信优势关系粗糙集的属性约简方法 [J]. *小型微型计算机系统*, 2018, 39(02): 357 – 361.
GOU Guanglei, WANG Guoyin. Approaches to attribute reduction in confidential dominance relation based rough set [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2018, 39(02): 357 – 361. (in Chinese)
- [45] Gou Guanglei, Wang Guoyin. An approach to knowledge reduction based inconsistent confidential dominance principle relation [J]. *Computer Science*, 2016, 43(6): 6 – 9.
- [46] 张飞飞, 周涛, 陆惠玲. 基于贝叶斯粗糙集的肺部肿瘤 CT 图像高维特征选择算法 [J]. *生物医学工程研究*, 2018, 37(4): 404 – 409.
ZHANG Feifei, ZHOU Tao, LU Huiling. An algorithm for high dimension feature selection of lung tumor CT image based on Bayesian rough set [J]. *Journal of Biomedical Engineering Research*, 2018, 37(4): 404 – 409. (in Chinese)
- [47] 张佳欢, 李磊军, 李美争. 基于变精度邻域粗糙集的多标记子空间研究 [J]. *南京理工大学学报*, 2019, 43(4): 414 – 422.
Zhang Jiahuan, Li Leijun, Li Meizheng. Research on multi-label subspace based on variable precision neighborhood rough sets [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2019, 43(4): 414 – 422. (in Chinese)
- [48] 钱佳丽. 基于粗糙集理论的商业银行信用风险评估研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2018.
Qian Jiali. Research on Credit Risk Assessment of Commercial Banks Based on Rough Set Theory [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2018. (in Chinese)
- [49] 冯志强, 焦自权, 陈善本. 基于粗糙集知识约简的焊接动态过程建模 [J]. *数学的实践与认识*, 2018, 48(24): 203 – 211.
FENG Zhiqiang, JIAO Ziquan, CHEN Shanben. An approach of welding dynamic process modeling based on rough set knowledge reduction [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2018, 48(24): 203 – 211. (in Chinese)
- [50] 徐怡, 李龙澍. 基于 (α, λ) 联系度容差关系的变精度粗糙集模型 [J]. *自动化学报*, 2011, 37(03): 303 – 308.
XU Yi, LI Longshu. Variable precision rough set model

- based on (α, λ) connection degree tolerance relation[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(03): 303 – 308. (in Chinese)
- [51] 郑树梅, 续欣莹, 谢珺. 基于可变容差关系的变精度粗糙集模型[J]. 计算机应用, 2015, 35(08): 2360 – 2365, 2370.
- ZHENG Shumei, XU Xinying, XIE Jun. Variable precision rough set model based on variable-precision tolerance relation [J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35(08): 2360 – 2365, 2370. (in Chinese)
- [52] 刘勇, Forrest Jeffrey, 熊晓旋. 基于优势灰度的变精度粗糙集模型及应用[J]. 中国管理科学, 2017, 25(02): 180 – 186.
- LIU Yong, Forrest Jeffrey, XIONG Xiao-xuan. Variable precision rough set model and application based on dominance grey degree [J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(02): 180 – 186. (in Chinese)
- [53] Degang Chen, Yanyan Yang, Ze Dong, et al. An incremental algorithm for attribute reduction with variable precision rough sets[J]. Applied Soft Computing, 2016, 45: 129 – 149.
- [54] Yusheng Cheng, Wenfa Zhan, Xindong Wu, et al. Automatic determination about precision parameter value based on inclusion degree with variable precision rough set model[J]. Information Sciences, 2015, 290: 72 – 85.
- [55] Zuqiang Meng, Zhongzhi Shi. On quick attribute reduction in decision-theoretic rough set models [J]. Information Sciences, 2016, 330: 226 – 244.
- [56] Mingliang Suo, Ruoming An, Ding Zhou, et al. Grid-clustered rough set model for self-learning and fast reduction [J]. Pattern Recognition Letters, 2018, 106: 61 – 68.
- [57] Rodríguez-Diez Vladímir, José Fco Martínez-Trinidad, Carrasco-Ochoa Jesús A, et al. A new algorithm for reduct computation based on gap elimination and attribute contribution[J]. Information Sciences, 2018, 435: 111 – 123.
- [58] Can Gao, Zhihui Lai, Jie Zhou, et al. Maximum decision entropy-based attribute reduction in decision-theoretic rough set model[J]. Knowledge-Based Systems, 2018, 143: 179 – 191.
- [59] Guoyin Wang, Xi'ao Ma, Hong Yu. Monotonic uncertainty measures for attribute reduction in probabilistic rough set model[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2015, 59: 41 – 67.
- [60] Xiuyi Jia, Lin Shang, Bing Zhou, et al. Generalized attribute reduct in rough set theory [J]. Knowledge-Based Systems, 2016, 91: 204 – 218.
- [61] Chebrolu Srilatha, Sanjeevi Sriram G. Attribute reduction in decision-theoretic rough set model using particle swarm optimization with the threshold parameters determined using LMS training rule [J]. Procedia Computer Science, 2015, 57: 527 – 536.
- [62] 郭敏, 贾修一, 商琳. 基于模糊化的决策粗糙集属性约简和分类[J]. 模式识别与人工智能, 2014, 27(08): 701 – 707.
- GUO Min, JIA Xiuyi, SHANG Lin. Decision-theoretic rough set attribute reduction and classification based on fuzzification [J]. Pattern Recognition & Artificial Intelligence, 2014, 27(08): 701 – 707. (in Chinese)
- [63] Kai Zheng, Jie Hu, Zhenfei Zhan, et al. An enhancement for heuristic attribute reduction algorithm in rough set[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(15): 6748 – 6754.
- [64] Xu Kai, Zhang Qinghua, Xue Yubin, et al. Attribute reduction based on fuzziness of approximation set in multi-granulation spaces [J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2016, (6): 16 – 23.
- [65] 路松峰, 刘芳, 胡波. 一种基于属性依赖的属性约简算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(02): 39 – 41.
- Lu Songfeng, Liu Fang, Hu Bo. A attribute reduction algorithm based on attribute dependence [J]. Journal of Huazhong Univ of Sci & Tech (Natural Science Edition), 2008, 36(02): 39 – 41. (in Chinese)
- [66] 翟俊海, 万丽艳, 王熙照. 最小相关性最大依赖度属性约简[J]. 计算机科学, 2014, 41(12): 148 – 150, 154.
- ZHAI Junhai, WAN Liyan, WANG Xizhao. Attribute reduction with principle of minimum correlation and maximum dependency [J]. Computer Science, 2014, 41(12): 148 – 150, 154. (in Chinese)
- [67] Skowron A, Rauszer C. Intelligent Decision Support [M]. Berlin, Germany: Springer, 1992. 331 – 362.
- [68] 王婷, 徐章艳, 陈宇文. 基于不完备决策表的正区域属性约简的压缩差别矩阵方法[J]. 计算机科学, 2014, 41(z1): 377 – 382.
- WANG Ting, XU Zhangyan, CHEN Yuwen. Method of compressed discernibility matrix of the attribute reduction algorithm based on incompleteness decision table [J]. Computer Science, 2014, 41(z1): 377 – 382. (in Chinese)
- [69] 杨涛, 张贤勇, 冯山. 基于差别矩阵的属性集求核算法[J]. 郑州大学学报(理学版), 2018, 50(01): 27 – 32.
- YANG Tao, ZHANG Xianyong, FENG Shan. A core al-

- gorithm of attribute sets based on the discernibility matrix [J]. Journal of Zhengzhou University (Nat Sci Ed), 2018, 50(01): 27 – 32. (in Chinese)
- [70] Shu-hua Teng, Min Lu, A-feng Yang, et al. Efficient attribute reduction from the viewpoint of discernibility [J]. Information Sciences, 2016, 326: 297 – 314.
- [71] 黄国顺, 曾凡智, 陈广义. 一种 Hu 差别矩阵属性约简的高效算法 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2012, 40(04): 8 – 12.
- Huang Guoshun, Zeng Fanzhi, Chen Guangyi. Efficient algorithm of the attribute reduction using Hu's discernibility matrix [J]. Journal of Huazhong Univ of Sci & Tech (Natural Science Edition), 2012, 40(04): 8 – 12. (in Chinese)
- [72] Changzhong Wang, Mingwen Shao, Baiqing Sun, et al. An improved attribute reduction scheme with covering based rough sets [J]. Applied Soft Computing, 2015, 26: 235 – 243.
- [73] 杨明, 杨萍. 基于广义差别矩阵的核和属性约简算法 [J]. 控制与决策, 2008, 23(09): 1049 – 1054.
- YANG Ming, YANG Ping. Algorithms based on general discernibility matrix for computation of a core and attribute reduction [J]. Control and Decision, 2008, 23(09): 1049 – 1054. (in Chinese)
- [74] 梁宝华, 吴其林. 近似边界精度信息熵的属性约简 [J]. 华东师范大学学报 (自然科学版), 2018, (03): 97 – 108, 156.
- LIANG Baohua, WU Qilin. Attribute reduction based on information entropy of approximation boundary accuracy [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2018, (03): 97 – 108, 156. (in Chinese)
- [75] 徐菲菲, 苗夺谦, 魏莱. 基于互信息的模糊粗糙集属性约简 [J]. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1372 – 1375.
- Xu Feifei, Miao Duoqian, Wei Lai. Mutual information-based algorithm for fuzzy-rough attribute reduction [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(6): 1372 – 1375. (in Chinese)
- [76] 贾平, 代建华, 潘云鹤. 一种基于互信息增益率的新属性约简算法 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2006, 40(6): 1041 – 1044, 1070.
- JIA Ping, DAI Jianhua, PAN Yunhe. Novel algorithm for attribute reduction based on mutual-information gain ratio [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 40(6): 1041 – 1044, 1070. (in Chinese)
- [77] 陶志, 刘庆拯, 李卫民. 基于遗传算法的不完备信息系统属性约简方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(9): 1484 – 1487.
- TAO Zhi, LIU Qingzheng, LI Weimin. Attribute reduction based on GA under incomplete information system [J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(9): 1484 – 1487. (in Chinese)
- [78] 于洪, 杨大春. 基于蚁群优化的多个属性约简的求解方法 [J]. 模式识别与人工智能, 2011, 24(02): 176 – 184.
- YU Hong, YANG Dachun. Approach to solving attribute reductions with ant colony optimization [J]. Pattern Recognition & Artificial Intelligence, 2011, 24(02): 176 – 184. (in Chinese)

作者简介



周 涛 男, 1977 年生, 宁夏同心县人, 2010 年在西北工业大学获得博士学位, 现为北方民族大学计算机科学与工程学院二级教授, 主要研究方向为医学图像智能分析与处理、计算机辅助诊断、模式识别等。

E-mail: zhoutaonxmu@126.com



陆惠玲 (通信作者) 女, 1976 年生, 河北定兴人. 2006 年在西安工业大学获得硕士学位, 现为宁夏医科大学理学院副教授, 主要研究方向为医学图像分析与处理。

E-mail: Lu_huilin@162.com



任海玲 女, 1993 生, 四川人, 2020 年在宁夏医科大学获得硕士学位, 现为银川市第一人民医院信息科工作, 主研研究方向为智能医学影像处理和计算机辅助诊断。

E-mail: renhailingnxmu@163.com