

项目公示信息（自然科学奖）

一、项目名称：模糊逻辑与模糊积分的系列创新研究

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：本项目聚焦基于 t -模和伪 t -模的数理模糊逻辑、一般蕴涵逻辑与模糊推理、模糊粗糙集与模糊积分的交叉融合等密切关联的主题开展研究，取得系列创新成果、形成了较系统完整的理论体系，特别是：（1）在国际上首次提出伪 R_0 t -模及其一般表达式、依此建立了模糊逻辑形式系统 PL^* ，证明了其完备性定理，从而同时拓展了著名数学家王国俊教授建立的形式系统 L^* 及著名模糊逻辑专家 P. Hájek 建立的形式系统 PBL。集 10 余年研究成果撰写出版了国内第一部全面论述基于 t -模和伪 t -模的模糊逻辑及其代数结构的专著。（2）以可换和非可换模糊逻辑为背景，创建了基于一般蕴涵的 BIK^+ 逻辑与模糊 BIK^+ 逻辑，深入研究了它们的可靠性和完备性；首次提出半重叠函数的新概念，提出基于半重叠函数及其剩余蕴涵的模糊推理五 I 算法，并成功应用于基于规则的数据分类中。（3）率先将模糊测度、模糊积分与模糊粗糙集进行融合，借助 Choquet 积分和模糊粗糙集的不确定性逼近能力，首创了基于模糊积分与模糊粗糙集的特征选择和不确定多属性决策新方法。代表性成果包括科学出版社专著 1 部及《数学学报》、TFS、FSS 等权威期刊上的论文 5 篇。该项目内容丰富、独创性强，获得了国内外同行的广泛关注和引用，成果不仅具有重要理论意义、还能直接应用于人工智能的多个领域。

提名材料齐全、规范，经完成单位公示，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科学技术奖提名条件。特提名为陕西省科学技术二等奖。

三、项目简介

模糊集与粗糙集理论是不确定性数学的重要内容，为人工智能、数据分析与挖掘中不确定信息的量化和处理提供基本思想和方法。本项目主要解决现有模糊逻辑与模糊粗糙集研究中存在的如下局限性问题：苛求模糊“与”算子满足交换性，限制了其应用范围和灵活性；缺少统一的蕴涵逻辑基础、相关代数结构的内在关联不清晰，缺少直接应用于数据分析的高效模糊推理算法；融合模糊逻辑、模糊积分、模糊粗糙集的理论研究欠缺，缺少基于数据的“权重”度量方法（基于数据的模糊测度生成方法），对特征选择和智能决策等智能应用的指导性不足。本项目针对以上问题开展了持续深入研究，形成了较系统完整的理论体系，主要涉及密切关联的三方面内容：（1）模糊逻辑形式系统及相关代数结构的创新研究；（2）基于一般蕴涵的逻辑系统与模糊推理方法研究；（3）模糊测度、模糊积分与模糊粗糙集的交叉融合研究。本项目的代表性成果包括科学出版社专著1部、以及 *Fuzzy Sets and Systems*、*IEEE Transactions on Fuzzy Systems*、《数学学报》等国内外权威期刊论文5篇，其中代表作1入选 ESI 高被引论文。

本项目取得以下重要科学发现和成果：

（1）模糊逻辑的形式系统及相关代数结构的创新研究：模糊逻辑形式化系统与对应代数结构是数理模糊逻辑的核心问题，是模糊逻辑广泛应用的理论基础。本项目在国际上首次提出伪 R_0 t -模（非交换幂零极小 t -模）及其一般表达式、依此建立了模糊逻辑形式系统 PL^* ，证明了其完备性定理，从而同时拓展了著名数学家王国俊教授建立的形式系统 L^* 及著名模糊逻辑专家 P. Hájek 建立的形式系统 PBL；进而，

基于一般左连续伪 t -模创建了非可换模糊逻辑系统 PUL^* , 证明其完备性定理, 系统地拓展了著名西班牙学者 F. Esteva 与 L. Godo (Fuzzy Sets and Systems 主编之一) 建立的模糊逻辑系统 MTL (参见代表作 6 第 6 章的 6.4 节, 原始论文发表于《数学进展》2007 年第 3 期, 论文由本项目第一申请人完成)。同时, 系统研究了各种源于非经典逻辑的代数结构及其内在联系, 刻画了 (伪) BL-代数、(伪) MTL-代数、伪 BCK-代数、(伪) Hoop 等的代数特征, 系统分析了相关模糊逻辑代数与量子 (伪) 效应代数之间的关系。这部分成果包含在代表作 5、6 (专著) 之中。

(2) 基于一般蕴涵的逻辑系统与模糊推理研究: 以可换模糊逻辑、非可换模糊逻辑为背景, 提出了 BIK^+ 逻辑及模糊 BIK^+ 逻辑, 深入研究了它们的可靠性和完备性; 在此基础上将 BCK-代数、 $BCC(BIK^+)$ -代数作为各种模糊逻辑代数的共同基础、对滤子 (理想) 理论进行了统一处理, 从而从一个特殊的角度揭示了各种数理模糊逻辑之间的本质联系和区别。同时, 提出了半重叠函数的新概念, 它具有聚合算子和逻辑算子双重作用, 首次创建了基于半重叠函数及其剩余蕴涵的模糊推理五 I 算法, 并应用与基于规则的数据分类问题中取得较已有算法更好的分类性能。这部分成果包含在代表作 4、6 (专著) 之中。

(3) 模糊测度、模糊积分与模糊粗糙集的交叉融合研究: 模糊粗糙集融合了模糊集和粗糙集各自优势, 是处理不确定信息的有效数学工具。针对数据驱动的知识发现的应用需求, 本项目开展了模糊积分与模糊粗糙集的深度交叉和协同创新研究, 充分发挥模糊粗糙集基于数据发现不确定知识的特长、以及模糊测度不确定性量化的优势, 通过构建关于数据对象 (数据样本) 和特征 (属性) 的多种模糊测度 (包括模糊 β -邻域近似测度、TI-模糊 β -邻域测度等), 首创了基于模糊积分 (Choquet 积分) 与模糊粗糙集的特征选择 (属性约简) 和不确定多属性决策新方法, 通过在数值算例和

UCI 数据集上的实验对比分析阐明了其有效性和优势。同时，针对现有模糊 β -覆盖粗糙集模型中覆盖构建难、灵活性差等缺陷，本项目从模糊信息粒化的角度，提出多模糊 β -覆盖近似空间的概念，并基于此给出几种不确定信息度量方法，设计了基于单调条件熵度量的模糊 β -覆盖约简方法，通过与其他四种最先进的属性约简方法进行比较和实验分析，验证了所提方法的优越性。这部分成果包含在代表作 1、2、3 之中。

四、客观评价

本项目代表性论著（5 篇论文、1 部专著）得到国内外同行关注和引用（代表性论著在 SCI 和中国知网数据库的总引用为 272 次（他引 208 次）），其中 1 篇入选 ESI 高被引论文。他引论文分布于 Fuzzy Sets and Systems、IEEE Transactions on Fuzzy Systems、《数学学报》等国内外重要学术期刊。

引用本项目成果的知名学者有：我国模糊数学理论开拓者汪培庄教授、西南交通大学李天瑞教授（国际粗糙集学会指导委员会主席）、CAAI 原理事长钟义信教授（纽约科学院院士）、同济大学苗夺谦教授（国际粗糙集学会副理事长，中国人工智能学会常务理事）、浙江理工大学裴道武教授（中国逻辑学会非经典逻辑与计算专业委员会原副主任）、陕西师范大学周红军教授（中国数学会理事，陕西省三秦英才特支计划科技创新领军人才，陕西省杰出青年基金获得者）、加拿大阿尔伯塔大学 Witold Pedrycz 教授（加拿大皇家科学院院士、波兰科学院外籍院士、IEEE Fellow）、加拿大里贾纳大学 Yiyu Yao 教授（国际粗糙集学会原理事长，ESI 全球高被引学者）等。

五、代表性论文专著目录（限 8 条）（不超过 8 篇，其中代表作论文不超过 5 篇）

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷页码（xx 年 xx 卷 xx 页）	发表时间（某年某月某日）	通讯作者（含共同）	第一作者（含共同）	国内作者	他引总次数	检索数据库	知识产权是否归国内所有
1	Fuzzy measures and Choquet integrals based on fuzzy covering rough sets	IEEE Transactions on Fuzzy Systems	Xiaohong Zhang, Jingqian Wang, Jianming Zhan, Jianhua Dai	2022 年 30 卷 2360- 2374 页	2022 年 7 月 1 日	Jingqian Wang	Xiaohong Zhang	张小红、王敬前、詹建明、代建华	23	SCI	是
2	TI-fuzzy neighborhood measures and generalized Choquet integrals for granular structure reduction and decision making	Fuzzy Sets and Systems	Jingqian Wang, Xiaohong Zhang, Jianhua Dai, Jianming Zhan	2023 年 465 卷 108512 页	2023 年 4 月 3 日	Xiaohong Zhang	Jingqian Wang	王敬前，张小红，代建华，詹建明	5	SCI	是

3	Multifuzzy β -covering approximation spaces and their information measures	IEEE Transactions on Fuzzy Systems	Jianhua Dai, Xiongtao Zou, Yuhua Qian, Xizhao Wang	2023 年 31 卷 3 期 955-969 页	2023 年 3 月 1 日	Jianhua Dai	Jianhua Dai	代建华、邹雄滔、钱宇华、王熙照	14	SCI	是
4	Semi-overlap functions and novel fuzzy reasoning algorithms with applications	Information Sciences	Xiaohong Zhang, Mei Wang, Benjamín Bedregal, Mengyuan Li, Rong Liang	2022 年 614 卷 104-122 页	2022 年 10 月 7 日	Mei Wang	Xiaohong Zhang	张小红, 王梅, 李梦园, 梁嵘	16	SCI	是
5	非可换模糊逻辑系统 PL* 其完备性	数学学报	张小红	2007 年 50 卷 2 期 421-442 页	2007 年 3 月 1 日	张小红	张小红	张小红	10	知网	是
6	模糊逻辑及其代数分析	科学出版社	张小红	2008 年	2008 年 7 月 1 日	张小红	张小红	张小红	133	知网	是

六、主要完成人情况

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
张小红	1	无	教授	陕西科技大学	陕西科技大学	作为项目负责人，是代表作 1、4、5、6 的第一作者，代表作 2、5、6 的通讯作者。主要贡献包括：（1）系统研究了各类模糊逻辑的形式化系统及其可靠性、完备性等理论问题，阐述了形式化系统蕴涵的实际意义。从一个特殊的角度窥视了各种非经典逻辑之间的联系，对这些逻辑系统的进一步研究提供了新的思路；（2）引入两种模糊 β -邻域近似测度，提出相应模糊积分，设计了多准则决策新方法；（3）首次提出半重叠函数的新概念，提出基于半重叠函数及其剩余蕴涵的模糊推理五 I 算法，并成功应用于基于规则的数据分类中。
王敬前	2	无	副教授	陕西科技大学	陕西科技大学	作为项目参与人，是代表作 2 的第一作者，代表作 1 的通讯作者。主要贡献包括：从数据关联性的角度，通过融合模糊逻辑、模糊粗糙集与模糊积分，提出基于 t-模的 TI-模糊 β -邻域测度，构造相应的广义 Choquet 积分，并将其应用于特征选择问题。所获成果将模糊逻辑的语义表达能力、模糊粗糙集的近似刻画能力和模糊积分的非线性融合能力有机统一，形成从“关联度量”到“信息融合”的完整方法论链条。
代建华	3	无	教授	湖南师范大学	湖南师范大学	作为项目参与人，是代表作 3 的第一作者与通讯作者、代表作 1 和 2 的合作者。主要贡献包括：从模糊信息粒化的角度，提出多模糊 β -覆盖近似空间的定义，在此空间下，探讨了几种信息度量方法，提出了基于单调条件熵度量的模糊 β -覆盖约简方法。通过与其他四种最先进的属性约简方法进行比较和实验分析，验证了所提方法的有效性和优越性。所获成果不仅拓展了广义粗糙集理论，同时也丰富了大数据挖掘理论与方法。

七、主要完成单位情况

陕西科技大学，作为本项目的依托单位，为项目的顺利完成做出了重要贡献，表现为：（1）组织并完成了项目策划和实施工作；（2）为项目的顺利实施提供了人力资源与优质的工作环境与场所；（3）提供了本项目所需的设备、能源、图书资料和数据库等资源。

湖南师范大学，作为本项目的合作单位，为本项目的第三完成人及合作者提供了交流、定期讨论的机会，为本项目的完成提供了直接、有效的帮助和重要的辅助推动作用。

八、完成人合作关系说明

本成果的三位完成人具有相同或相近的研究兴趣，有长期合作研究经历，近年联合发表学术论文 20 余篇。本成果所包含的科学发现，属于三位完成人合作研究的总结，特此说明。

1. 张小红与代建华、王敬前合作的部分论文如下：

Xiaohong Zhang, Jingqian Wang, Jianming Zhan, Jianhua Dai, Fuzzy measures and Choquet integrals based on fuzzy covering rough sets, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2022, 30: 2360-2374.（代表作 1）

Jingqian Wang, Xiaohong Zhang, Jianhua Dai, Jianming Zhan. TI-fuzzy neighborhood measures and generalized Choquet integrals for granular structure reduction and decision making. Fuzzy Sets and Systems, 2023, 465: 108512.（代表作 2）

Jinghua Dai, Bingjie Wei, Xiaohong Zhang, Qilai Zhang, Uncertainty measurement for incomplete interval-valued information systems based on α -weak similarity. Knowledge-Based Systems, 2017, 136: 159-171.

2. 张小红是王敬前的博士生导师（2018.9-2021.6），博士后合作导师（2021.6-2023.12）。王敬前参与了张小红的国家自然科学基金项目（编号：61976130，起止时间：2020.1-2023.12），合作的论文发表在 IEEE Transactions on Fuzzy Systems、Fuzzy Sets and Systems、International Journal of Approximate Reasoning 等国际期刊，其中代表作 1（张小红/1，王敬前/2），代表作 2（王敬前/1，张小红/2）。