



中国人工智能系列白皮书

——人工智能基础选编

中国人工智能学会

二〇二四年十二月

《中国人工智能系列白皮书》编委会

主 任：戴琼海

执行主任：王国胤

副 主 任：陈 杰 何 友 刘成林 刘 宏 孙富春 王恩东

王文博 赵春江 周志华

委 员：班晓娟 曹 鹏 陈 纯 陈松灿 邓伟文 董振江

杜军平 付宜利 古天龙 桂卫华 何 清 胡国平

黄河燕 季向阳 贾英民 焦李成 李 斌 刘 民

刘庆峰 刘增良 鲁华祥 马华东 苗夺谦 潘 纲

朴松昊 钱 锋 乔俊飞 孙长银 孙茂松 陶建华

王卫宁 王熙照 王 轩 王蕴红 吾守尔·斯拉木

吴晓蓓 杨放春 于 剑 岳 东 张小川 张学工

张 毅 章 毅 周国栋 周鸿祎 周建设 周 杰

祝烈煌 庄越挺

《中国人工智能系列白皮书----人工智能基础选编》编写组

段玉聪 乔军胜 王敬前 郭振东 梅映天 唐福亮

吴坤光 弓世明 王洁 李佳欣 代建华

编写人员贡献

本白皮书的成功编纂，得益于全体编写团队的精诚合作与辛勤耕耘。以下是编写组各位成员的主要贡献概述：

段玉聪负责统筹第 1 章 人工智能基础-DIKWP 与第 2 章 人工智能与人工意识的撰写，郭振东、梅映天、唐福亮、吴坤光、弓世明参与了第 1 章、第 2 章的部分撰写和修订。

乔军胜负责撰写第 3 章信息聚合算子与重叠函数。

王敬前负责撰写第 4 章覆盖粗糙集与模糊覆盖粗糙集。

代建华负责组织协调工作和部分统稿工作，王洁、李佳欣参与了部分统稿和排版工作。

目 录

前言	1
第 1 章 人工智能基础-DIKWP	3
1.1 数据 (Data)	3
1.1.1 数据概念及语义	3
1.1.2 数据定义的对比分析	7
1.2 信息 (Information)	10
1.2.1 信息概念及语义	10
1.2.2 信息定义的对比分析	14
1.3 知识 (Knowledge)	16
1.3.1 知识的概念及语义	16
1.3.2 知识的结构化表示	17
1.3.3 知识定义的对比分析	18
1.4 智慧 (Wisdom)	22
1.4.1 智慧的概念及语义	23
1.4.2 智慧的决策过程	25
1.4.3 智慧定义的对比分析	27
1.5 意图 (Purpose)	30
1.5.1 意图的概念及语义	30
1.5.2 意图定义的对比分析	32
1.6 DIKWP 与空间定义	37
1.6.1 DIKWP 模型	37
1.6.2 DIKWP 模型的认知与跨学科研究	46

1.6.3 概念空间 (Concept Space, ConC)	57
1.6.4 认知空间 (Cognitive Space, ConN).....	58
1.6.5 语义空间 (Semantic Space, SemA)	60
1.6.6 DIKWP 图谱	62
1.7 本章小结.....	65
参考文献.....	66
第 2 章 人工智能与人工意识	79
2.1 定义与概念	79
2.1.1 AI 与 AC 的定义与区别.....	79
2.1.2 AC 定义对比分析	82
2.2 人工意识理论基础	88
2.2.1 完整语义	88
2.2.2 在 DIKWP 模型中	89
2.2.3 意识处理中的 DIKWP	90
2.2.4 抽象语义与世界理解	93
2.2.5 DIKWP 语义构建	94
2.3 DIKWP 人工意识设计与实现模拟	96
2.3.1 DIKWP 模型与主要意识理论的关联	98
2.3.2 DIKWP 人工意识理论	100
2.3.3 构建 DIKWP 人工意识模型	106
2.3.4 不确定性处理	115
2.3.5 DIKWP 数理人工意识系统	117
2.3.6 DIKWP 生理人工意识系统	121

2.4 人工意识测量与评估	123
2.4.1 多维度评估方法	123
2.4.2 意识的量化和分类	124
2.4.3 人工系统的挑战与前景	125
2.5 本章小结	127
参考文献	128
第 3 章 信息聚合算子与重叠函数	135
3.1 信息聚合算子概述	135
3.2 重叠函数相关理论研究	137
3.2.1 重叠函数基本性质	138
3.2.2 重叠函数的构造	140
3.2.3 基于重叠函数导出的模糊蕴涵	141
3.2.4 重叠函数相关分配性方程	142
3.3 重叠函数实际应用研究	143
3.3.1 重叠函数在图像处理中的应用	144
3.3.2 重叠函数在决策中的应用	145
3.3.3 重叠函数在分类中的应用	146
3.3.4 重叠函数在机器学习中的应用	147
参考文献	149
第 4 章 覆盖粗糙集与模糊覆盖粗糙集	160
4.1 引言	160
4.2 基于覆盖的粗糙集及其应用	160
4.2.1 覆盖粗糙集模型的构造	162

4.2.2 覆盖粗糙集模型的性质与关系	163
4.2.3 覆盖粗糙集模型在故障诊断中的应用案例	165
4.3 基于覆盖的多粒度粗糙集及其应用	168
4.3.1 多粒度覆盖粗糙集模型的构造与性质	169
4.3.2 多粒度覆盖粗糙集模型在决策中的应用案例	170
4.4 基于模糊覆盖的粗糙集及其应用	172
4.4.1 模糊覆盖粗糙集模型及其性质	173
4.4.2 模糊覆盖粗糙集在特征选择中的应用案例	177
参考文献.....	180

前言

随着人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术的飞速发展,其应用已经深入到社会生活的各个层面,包括医疗、教育、交通、金融等多个领域。然而, AI 的实际应用依然面临诸多挑战,如数据的不完整性、不精确性和不一致性,决策的可解释性问题,以及如何更有效地模拟人类智慧和意识等。这些问题不仅阻碍了人工智能在实际场景中的进一步普及,也促使研究者们不断探索新的理论和方法以推进这一领域的发展。

在人工智能的发展历程中,“数据-信息-知识-智慧-意图”(Data-Information-Knowledge-Wisdom-Purpose, DIKWP)模型作为一种理论框架,提供了一种从基础数据处理到高阶智慧决策的系统化视角。DIKWP 模型不仅强调了数据与信息的逻辑层次关系,还将知识的结构化表达、智慧的决策能力以及意图的深层次语义纳入考量,从而为人工智能的研究与应用提供了一个系统的理论基础。

本白皮书第一章主要从 DIKWP 模型的基础理论出发,详细探讨了数据、信息、知识、智慧以及意图的概念、语义以及定义之间的对比分析。通过对这些层次的深入研究,我们将更清晰地认识人工智能的发展逻辑与应用潜力。为了实现对 DIKWP 模型的深度剖析,本章还引入了认知科学与跨学科的研究成果,并进一步探讨了 DIKWP 模型在概念空间、认知空间和语义空间的应用。同时, DIKWP 图谱的构建为理论体系的可视化和应用场景的扩展提供了技术支持。

人工智能的最终目标不仅是模仿人类行为,更是对人类意识和智慧的深度模拟与重构。为此,第二章聚焦于人工智能与人工意识(Artificial Consciousness, AC)的研究,探讨了 AC 的定义、理论基础及与 DIKWP 模型的关联。通过引入抽象语义、世界理解等概念,深入分析了 DIKWP 模型在意识处理中的具体应用,并尝试构建一个基于 DIKWP 的人工意识模型。针对人工意识设计中的不确定性问题,

本章提出了一系列理论框架与数理模型，并进一步探讨了人工意识的测量与评估方法，为人工意识研究的标准化与工程化提供了理论支持。

信息聚合算子与重叠函数是人工智能技术的重要数学工具，其在数据融合、图像处理和决策支持等领域中发挥着关键作用。第三章将聚焦于信息聚合算子的理论研究与实际应用，特别是重叠函数的构造与性质分析。通过将理论研究与实际案例相结合，本章深入探讨了重叠函数在机器学习、分类、图像处理等方面的应用潜力，为人工智能技术的进一步优化奠定了数学基础。

在处理不确定性数据时，覆盖粗糙集与模糊覆盖粗糙集模型作为一种有效的理论工具，为数据的精细化处理和多粒度分析提供了全新的视角。第四章详细讨论了覆盖粗糙集及其在故障诊断、特征选择等领域的应用案例，同时扩展至模糊覆盖粗糙集模型，分析了其在多粒度决策支持中的潜力与局限。通过这些理论与实际案例的结合，本章为研究人员提供了理解与应用粗糙集模型的全面指导。

本白皮书的研究旨在从理论与实践的双重视角探讨人工智能及其相关领域的前沿发展，并通过引入 DIKWP 模型及其相关理论，尝试建立一个能够深度连接数据、信息、知识、智慧与意图的全新框架。基于这一框架，读者不仅能够深入理解人工智能领域的基本理论，还能掌握在实际场景中构建智能系统的方法与技巧。

总体而言，本书以 DIKWP 模型为核心，融合了人工智能、认知科学、信息聚合算子与重叠函数、覆盖粗糙集与模糊覆盖粗糙集等多学科的研究成果，旨在为人工智能的研究者和实践者提供一套系统化的理论工具和方法论。希望通过本书的编写，能够激发读者对人工智能研究的热情，推动该领域理论与应用的进一步发展。

第 1 章 人工智能基础-DIKWP

1.1 数据 (Data)

1.1.1 数据概念及语义

数据(DIKWP-Data)的语义可视为认知中相同语义的具体表现形式。概念空间是指认知主体对外部世界的概念化表达，包括概念的定义、特征和关系。在概念空间中，数据概念作为一个概念代表着具体的事实或观察结果在概念认知主体的概念空间中的存在语义确认，并通过与认知主体的意识空间（非潜意识空间）与已有认知概念对象的存在性包含的某些相同语义对应而确认为相同的对象或概念。在处理数据概念时，认知主体的认知处理过程常常寻求并提取标定该数据概念的特定相同语义，进而依据对应的相同语义将它们统一视为一个相同概念。例如，当看到一群羊时，虽然每只羊可能在体型、颜色、性别等方面略有不同，但借助准确的相同语义个体对应或对相同语义集合的概率性对应处理，认知处理会将它们归入“羊”的概念，因为它们共享了对“羊”这个概念的语义精确对应或概率性对应。相同语义可以是具体的，例如识别手臂概念时可以根据一个硅胶手臂与人的手臂的手指数量的相同、颜色的相同、手臂外形的相同等相同语义进行基于语义的准确概念确认硅胶手臂为手臂概念，也可以概率性的选择与手臂概念共享最多相同语义的目标对象为手臂概念，还可以通过硅胶手臂不具有真实手臂的可以旋转功能对应的由“可以旋转”定义的共同语义进行概念判断的否决，而判定其不是手臂数据概念。

概念空间与语义空间的区分对应于不同的技术哲学思想。概念空间的处理对应了具体使用自然语言等进行交流的形式。但概念交流的功能本质通常是进行语义的传递。在认知主体的认知空间中，概念传递的语义的有效理解往往依赖于认知主体的语义空间中的相关概念

的语义对应。认知主体的语义空间往往是不能被充分借助概念形式进行共享的，也就是通常说的客观的，故而被称之为主观的。

在语义空间中，数据概念的语义为认知中相同语义集合的具体表现形式。将特定数据的语义 D 对应集合，每个元素 $d \in D$ 代表一个具体实例，这些实例共享相同或概率性近似相同的语义属性集合 S 。语义属性 S 为一组特征语义集合 F 来定义，即：

$$S = \{f_1, f_2, \dots, f_n\} \quad (1.1)$$

其中， f_i 表示数据的一个特征语义。 $D = \{d \mid d \text{ 共享 } S\}$ 。

在 DIKWP 模型^[1]中，数据概念与数据语义的区分是认知空间的认知过程向概念空间与语义空间的处理过程转换的基础，数据概念和数据语义将具体代表对世界的基本观察和事实的认知数据对象。这一转换的关键在于数据被认知并被概念化背后的“相同语义”，即数据概念元素之间共享的语义属性。在认知空间中的数据认知对象作为认知过程的基础，不再被不区分概念空间和语义空间中的具体对应而直接代表对现实世界观察和测量的结果，而是被进行明确的概念确认和语义对应处理，在这一个过程中也区分了主观内容与客观内容的范畴，此定义不同于传统 DIKW 模型^{[2][3]}中对数据的粗糙理解，强调数据与特定语义属性的紧密关联。即对数据对象的认知不仅是被动记录，更是认知主体的认知活动中主动寻找与已知认知对象相匹配的语义特征的主观过程。这种视角强调数据的主观性和上下文依赖性，指出数据的认知价值在于其能够与认知主体的已有概念空间进行语义关联。

在 DIKWP 模型中，来自认知空间的数据认知对象的语义被视为认知过程中认知主体的语义空间中被识别与之相同语义的具体表现形式。这种定义强调了数据做完认知对象不仅仅是观测或事实的简单记录，而是面向概念空间和语义空间需要通过认知主体（如人或 AI 系统）对这些认知对象数据记录进行语义匹配和概念确认的结果。数

据概念确认的关键在于它们背后认知主体概念空间与语义空间共享的“相同语义”，这使得即使在外在特征上存在差异的情况下，特定认知对象也能被归纳为同一数据概念。

数据概念在 DIKWP 模型的概念空间中被视为认知过程中的基本概念单位，数据语义在 DIKWP 模型的语义空间中被视为认知过程中的基本语义单位，数据概念和数据语义是对现实世界的直接观察和记录的认知过程中的核心要素，从数据语义的认知到数据概念的确认对基于概念的符号化自然语言的产生、应用和处理起到了重要作用^[4]。数据概念通过共享相同的语义属性而被认知主体的意识功能或潜意识功能识别和分类。在认知科学中，认知主体的大脑乃至脊髓等物质部分如何通过潜意识的模式识别来理解和处理信息，并可以进行有意识的分析和形成解释。例如，当人们观察到不同的物体时（如苹果），即使它们的颜色、大小或形状有所不同，人们也能在潜意识的模式识别中识别它们都是苹果，通过认知主体有意识的分析，可以解释为它们共享了一组关键的语义属性（如形状、纹理、特定的功能等）。这种认知过程揭示了认知主体的认知系统如何利用语义空间的数据的相同语义来构建对世界的自然语言概念表述。

在 DIKWP 框架中，数据作为概念被视为认知过程中相同语义的具体概念映射。这一观点突破了传统的数据概念中对语义和概念不加区分的混淆使用场景，将概念空间中数据概念的形成与存在与语义空间中认知主体的语义处理过程紧密联系起来。即，数据概念的认知价值不在于其对应的物理形态或功能，而在于在认知主体的认知空间中，它如何与认知主体已有的知识体系进行跨越“概念空间”与“语义空间”产生联系，进而被识别并确认为具有特定语义的对象或概念。从个体意识和群体意识交互的视角看，数据与认知主体之间的互动本质就是基于潜意识或下意识的语义空间与概念空间的交互，数据概念作为一种相同语义集合的具体对应或者概率性近似有着其在工

程意义上作为特定语义集合的符号化表达的认知沟通效率优势。

数据概念的处理和理解不仅仅是对客观事实的记录，而是涉及到认知主体如何将这些事实语义与已有的语义认知结构相匹配。这一过程强调了语义识别的重要性，即认知主体如何通过数据概念中的语义特征来识别和归类对象。

数据概念不仅是对现实世界的观察和记录，而是在交流沟通中被视为认知主体对相同语义属性的具体表现。这一定义超越了数据概念作为客观事实的记录的表面上独立的客观认知存在性，强调了认知空间中认知主体与被认知对象之间的交互中数据概念的认知性质——即数据概念的识别和处理依赖于认知主体个体（主观）语义空间中的已有语义的联系与匹配。数据概念本质上具有认知主观性和上下文依赖性，即不同的认知主体或不同的认知背景下，同一数据概念可能与不同的语义建立联系与进行对应的认知处理的相对性。

进而在哲学意义上，数据概念不再是客观存在的事实记录，而是经由主体性认知过程的一种主观解释。数据概念的形成与存在依赖于认知主体的语义空间与概念空间记忆和处理能力，它是现实世界与认知主体之间交互的语义空间与概念空间的关联和转化形式。数据概念的产生和识别不是一个纯粹的客观过程，而是深深植根于主体的预设概念空间和语境语义空间中。因此，数据概念的识别和解释需要考虑到认知主体的认知空间背景知识、经验信息和文化语境语义^[5]。

数据概念必须通过认知主体的解释和语义匹配来确认其意义。数据概念与数据语义的交互成为了一种连接客观现实与主体认知的桥梁。这种理解突显了柏拉图式的理念：现实世界的事物（作为概念）仅是其理念（即“相同语义”）的影子。因此，数据概念的认知价值不仅在于其表现形式的客观性，而且还在于认知主体如何通过数据概念来寻求和确认认知对象和现象的共同语义，引发语义共鸣和认知确认。这个数据概念与数据语义再认知主体内的交互过程不仅是对认知

主体的外部世界的一种认知镜像反映，也是一种对现象内在本质语义的追求和揭示^[6]。它强调了认知主体在数据概念解读过程中的概念语义转化的主导性和概念存在的创造性，以及数据概念与认知主体之间的潜意识或有意识的符号化语言的互动性。

DIKWP 模型对数据概念和数据语义的认知定义强调了数据的认知性质和其作为语义实体的角色。在哲学中，这触及到“事物的本质”和“名副其实”的讨论。数据概念不仅仅是客观存在的符号化记录，它们是被赋予了特定数据语义的实体，这些数据语义是通过认知主体的跨越概念空间与语义空间的处理而被确认和赋予的。这种认知处理也揭示了知识的生成不仅仅是对客观世界的映射，更是一种主体性的基于类似语义到概念的转化建构过程，这一点在康德的先验哲学中有所体现，即人们对世界的知识部分源于外部世界的刺激，但更多的是由我们的认知结构所决定。

- 一般定义：

数据是指日常生活中具体事实和观察结果的记录，它们是构成了认识世界的最基本单元。例如，从一只动物的外观特征，如羊毛、角和蹄子，能够辨认出这是“羊”，尽管个体间有差异，共享的关键特征让它们被统一归类。

1.1.2 数据定义的对比分析

在 DIKWP 的数据定义中，数据是被认知主体确认的原始事实或观察记录，通过概念空间确认的认知对象，与 DIKW 模型、SECI 模型^[7]、Polanyi 隐性知识理论^[8]和 Cynefin 框架^[9]的数据定义和模型的对比分析如表 1-1 所示。

表 1-1 DIKWP 的数据定义与其他数据定义和模型的对比分析

特征	DIKWP 的数据定义	DIKW 模型	SECI 模型	Polanyi 隐性知识理论	Cynefin 框架
定义	被认知主体确认的原始事实或观察记录，通过概念空间确认的认知对象。	原始的、未加工的事实和观测记录。	原始的事实和记录。	隐性知识没有明确涉及数据。	数据在不同域中具有不同的应用方式。
语义	通过概念空间或语义空间进行语义匹配和确认。	赋予特定意义前的原始记录。	视为显性知识的一部分。	隐性知识关注个人经验，未涉及数据。	不明确涉及数据的语义处理。
静态性 vs. 动态性	静态，通过认知主体的确认。	静态，作为知识生成的基础。	静态，作为显性知识的一部分。	静态，关注个人经验和技能。	静态，依据不同域进行处理。
处理过程	通过认知主体进行分类和组织。	通过处理和理解转化为信息。	通过社会化过程处理。	不明确处理过程。	数据依据情境进行应用。
个体性 vs. 社会性	数据处理主要体现在个体认知过程中。	个体处理为主，强调数据积累。	社会化过程中处理和分享。	主要关注个体经验，未涉及社会性。	根据情境进行个体或集体处理。

此外，DIKWP 模型涉及概念空间、语义空间和认知空间，数据在三个空间中具有各自不同的诠释，其中概念空间、语义空间和认知

空间的定义如下：

1、概念空间 (Conceptual Space)

定义：概念空间是认知主体通过自然语言、符号等形式进行交流和认知的空间。在这个空间中，数据、信息和知识作为具体概念存在，并通过语义网络和概念图进行表达^[10]。

作用：帮助认知主体将具体的事实和观察结果进行分类和组织，形成系统性的理解和规则。

2、语义空间 (Semantic Space)

定义：语义空间是认知主体理解和处理概念的内在语义联系的空间，认知主体通过语义匹配、关联和转化来理解和生成新的知识^[10]。

作用：通过语义匹配和关联形成新的语义联系，从而生成和验证知识。

3、认知空间 (Cognitive Space)

定义：认知空间是认知主体进行思考、学习和理解的内部心理空间。在这个空间中，认知主体通过观察、假设、抽象和验证等认知活动，形成对世界的深刻理解和解释^[10]。

作用：通过高阶认知活动，将数据和信息转化为系统性知识，并在动态验证和修正过程中不断完善和更新知识。数据在不同空间中的对比分析如表 1-2 所示。

表 1-2 数据在不同空间中的对比分析

特征	概念空间	语义空间	认知空间
定义	被认知主体确认的原始事实或观察记录，通过概念空间确认的认知对象。	通过语义匹配和关联确认的数据，具有特定的语义属性。	通过认知主体的思考和分类，形成具体的观察记录和事实。

特征	概念空间	语义空间	认知空间
作用	将具体事实和观察结果进行分类和组织。	形成数据的语义联系,确保数据在认知过程中的一致性。	通过思考和分类,形成初步的认知对象。
静态性 vs. 动态性	静态,通过认知主体的确认。	动态,通过语义匹配和关联进行处理。	动态,通过认知活动进行处理和分类。
处理过程	通过认知主体进行分类和组织。	通过语义空间的语义匹配和关联。	通过认知空间的思考和分类。

1.2 信息 (Information)

1.2.1 信息概念及语义

信息 (DIKWP-Information) 作为概念对应认知中一个或多个“不同”语义。信息概念的信息语义指的是通过特定意图概念或意图语义将认知主体的认知空间中的 **DIKWP** 认知对象与认知主体已经认知的 **DIKWP** 认知对象在语义空间进行语义关联,借助认知主体的认知意图在认知空间形成相同认知(对应数据语义)或差异认知,由差异认知在语义空间经过“不同”语义的概率性确认或逻辑判断确认等形成信息语义,或在语义空间产生新的语义关联(“新的”就是一种“不同”语义)。在处理信息概念或信息语义时,认知处理会根据输入的数据、信息、知识、智慧或意图等认知内容,找出它们与被认知的 **DIKWP** 认知对象的不同之处,对应各种不同的语义,并进行信息分类。例如,在认知空间中,面对一个停车场,尽管停车场中所有的汽车都可以被认知归入“汽车”这一概念,但每辆车的停车位置、停车时间、磨损程度、所有者、功能、缴费记录和经历都代表着语义空间中由不同认知意图驱动的认知差异识别,最终对应不同的信息语义。信息对象对应的各种不同语义经常存在于认知主体的认知中,常常未被显式表达出来^{[11][12]}。例如抑郁症患者可能用自己情绪“低落”

这一概念来表达自己的认知空间中当前的情绪相对于自己以往的情绪的负面程度的上升。在认知主体在其概念空间中选择“低落”这个概念以反映其认知状态确认的要表达的目标信息语义，但由于交流对象的认知空间中对“低落”这个概念的信息语义解释不一定与认知主体的信息语义相同，或者说存在不同语义，从而不能实现对被交流对象客观感受到该信息语义，从而该信息语义成为了认知主体的主观的认知信息语义。

信息语义处理的数学化表示：信息语义在 DIKWP 模型中对应数据语义、信息语义、知识语义、智慧语义、意图语义经过认知主体意图驱动的处理过程产生新的语义。在语义空间，面向 DIKWP 内容的由意图驱动的信息语义处理 F_I ，对应从输入 X 到输出 Y 的处理形式：

$$F_I: X \rightarrow Y \quad (1.2)$$

其中 X 表示数据语义、信息语义、知识语义、智慧语义、意图语义的集合或组合（也即 DIKWP 内容语义），而 Y 表示产生的新的 DIKWP 内容语义集合或组合。这个映射强调了信息语义生成过程的动态性和构造性。

信息语义在 DIKWP 模型中对应认知中各种不同语义的表达。借助认知主体的认知意图，信息语义通过将数据、信息、知识、智慧或意图对应的语义与认知主体的现有认知对象联系起来，产生新的语义集合或组合。在认知空间中，这个过程不仅包括对已知 DIKWP 内容的重新语义组合和语义转化（包括语义连通等形成所谓的认知理解），还对应通过这种重新组合与转化产生新的 DIKWP 认知语义和持续形成认知理解的动态过程。

信息语义的生成是关于如何将不同的数据语义、信息语义、知识语义、智慧语义或意图语义的集合或组合通过认知主体特定的意图联系起来，从而在认知主体的认知空间确认达到所谓的认知理解的过程，对应认知主体在语义空间形成对断裂或缺失或不确定的语义联系

借助生成的信息语义进行了语义的关联、补充、判断，从而实现消除源自语义不确定性的认知不确定性的意图。这个过程涉及到将观察到的现象或认知输入内容与已有的 DIKWP 内容经由认知空间在语义空间进行关联、比较和概念对应等，进而借助某些不同语义识别和分类新的 DIKWP 内容。在 AI 中，这可以对应于认知理解形成解释和处理 DIKWP 内容之间的关系，如通过算法分析 DIKWP 内容间的相关性，从而提取有价值的信息语义。

信息语义处理是一个动态的认知过程，关注于如何通过认知主体的主观意图将 DIKWP 内容语义与认知主体的现有认知对象 DIKWP 内容语义联系起来，从而产生有价值的语义关联。信息的价值在于成为连接数据、信息、知识、智慧、意图的桥梁，揭示认知主体对 DIKWP 内容的语义关联。

在认知科学中，信息语义处理可以借助各种认知理论来进行解释，例如，概念集成理论(Conceptual Integration Theory)^[13]来进一步解释，说明如何通过将不同来源的信息融合到一起，形成新的意义和理解。再如，可通过将某个人的行为（DIKWP 内容语义）与特定的情境信息结合起来，进而对该行为的意图有更清晰的理解。

信息的语义关联与认知语言学中的隐喻理论(Metaphor Theory)^[14]、混合理论(Blending Theory)^[15]等有关，它们研究如何通过语言的隐喻和概念整合来创建新的意义。在 AI 系统中，涉及到如何设计算法以模拟人类如何通过现有 DIKWP 内容语义构建新的认知模型。

信息语义产生过程是 DIKWP 内容语义与 DIKWP 内容语义关联，也即 $DIKWP * DIKWP$ 语义交互的结果。这个过程不仅包括 DIKWP 内容语义的重组或重新解释，更是一个动态的、意图驱动的认知活动，通过这个活动，认知主体能够识别和理解新的模式和关联，从而扩展其认知边界。信息语义产生是构造性和动态性的，通俗的讲是通过对

DIKWP 内容进行解释或语义连接而生成的。

信息在哲学上被视为 DIKWP 内容的组织和解释，通过构建 DIKWP 内容之间的语义关系来生成新的语义。通过信息语义处理过程，认知主体能够识别和理解现象之间的联系和差异。信息语义的产生涉及到认知主体的主动参与，它是一种对 DIKWP 内容进行语义化处理的动作，反映了认知主体对现实世界的解读。信息作为认知中不同语义的表达，其哲学意义在于信息的生成和处理过程实质上是对世界多样性和复杂性的认识和理解。信息语义不仅仅是 DIKWP 内容语义的聚合或重组，更是一种新的语义关联的创造，反映了认知主体对世界的主动探索和解释。这种解释过程涉及到对现象深层次联系和内在逻辑的挖掘，是一种对世界更深刻理解的追求。转移到另一种更深层次的理解。

信息的生成和理解不是被动的接收过程，而是认知主体在认知空间的主动认知语义、构建语义^[16]。信息语义依赖于已有 DIKWP 内容和意图驱动的认知框架。此观点与康德的认识论相呼应，即认知主体对世界的理解是通过内在的感知框架和先验概念构成的。信息的价值在于能够扩展或重构我们的认知框架，从而增进我们对世界的理解。

DIKWP 中的信息处理关注数据、信息、知识、智慧、意图之间的动态关系和新的语义集合或组合的生成。这一过程体现了赫拉克利特的流变论——万物流转，无物恒常。信息的价值在于其流动性和能够引起的变化，而非静态的事实记录^[17]。信息成为了连接不同认知状态的纽带，推动认知主体从一种理解状态到另一种理解状态^[18]。

在信息的定义中，DIKWP 模型强调了信息作为连接不同语义实体的桥梁的角色。这与德勒兹关于“差异性与重复”的理论相呼应。在德勒兹看来，认识过程是通过识别事物之间的差异性来进行的，而这一过程正是信息处理的核心。信息不仅包含了 DIKWP 内容的语义差异性，更通过这些差异性与已有的知识结构产生联系，不仅协整旧

的知识，还生成出新的知识。这种动态的认知结构更新过程是认知发展和知识增长的关键。

- **一般定义：**

信息是关于特定事物或现象的详细描述，它揭示了事物间的差异性和独特性。以停车场为例，所有车辆虽同为“汽车”，但每辆车的型号、停放位置、使用情况等信息各不相同，这些具体的细节帮助区分并管理车辆。

1.2.2 信息定义的对比分析

在 DIKWP 的信息定义中，信息是通过认知主体的意图，将数据与已有认知对象进行语义关联，识别差异。与其他信息定义和模型的对比分析如表 1-3 所示。

表 1-3 DIKWP 的信息定义与其他信息定义和模型的对比分析

特征	DIKWP 的定义	DIKW 模型	SECI 模型	Polanyi 隐性知识理论	Cynefin 框架
定义	通过认知主体的意图，将数据与已有认知对象进行语义关联，识别差异。	经过处理和理解的数 据，赋予特 定意义。	从隐性知 识转化为 显性知识 的一 部 分。	隐性知识难 以明确转化 为信息。	信息在不同 域中具有不 同的应用方 式。
语义	通过语义匹配和 关联形成新的信 息语义。	数据处理和 理解后的结 果。	显性知识 的外化结 果。	主要关注隐 性知识，信 息 传 递 有 限。	不明确信息 的 语 义 处 理。

特征	DIKWP 的定义	DIKW 模型	SECI 模型	Polanyi 隐性知识理论	Cynefin 框架
静态性 vs. 动态性	动态,通过认知主体的意图生成和验证。	静态,作为知识生成的基础。	动态,强调显性和隐性知识的互动。	主要关注隐性知识,信息处理较少。	动态,依据情境进行处理和应用。
处理过程	通过认知主体的意图和认知过程,形成新的语义关联。	通过处理和理解数据,形成信息。	通过外化过程,将隐性知识转化为显性知识。	主要通过个人经验和技能传递。	信息依据情境进行处理和应用。
个体性 vs. 社会性	信息处理既涉及个体也涉及社会共享和传播。	个体处理为主,强调信息积累。	社会化过程中处理和分享。	主要关注个体经验,信息传递有限。	根据情境进行个体或集体处理。

根据 1.1.2 中概念空间、语义空间和认知空间的定义,信息在不同空间中的对比分析如表 1-4 所示。

表 1-4 信息在不同空间中的对比分析

特征	概念空间	语义空间	认知空间
定义	通过认知主体的意图,将数据与已有认知对象进行语义关联,识别差异。	通过语义匹配和关联形成新的信息语义,识别数据的差异。	通过认知主体的意图和认知过程,形成新的语义关联和信息。

特征	概念空间	语义空间	认知空间
作用	帮助认知主体识别数据之间的差异和联系。	形成新的语义联系，确保信息在认知过程中的一致性。	通过认知过程，形成新的认知理解和信息。
静态性 vs. 动态性	动态，通过认知主体的意图生成和验证。	动态，通过语义匹配和关联进行处理。	动态，通过认知活动进行处理和分类。
处理过程	通过认知主体的意图和认知过程，形成新的语义关联。	通过语义空间的语义匹配和关联，形成新的信息语义。	通过认知空间的思考和意图，形成新的认知和信息。

1.3 知识 (Knowledge)

1.3.1 知识的概念及语义

在 DIKWP 模型中，知识(DIKWP-Knowledge)对应于认知空间中的一个或多个“完整”语义。知识是通过认知主体借助某种假设，对 DIKWP 内容进行语义完整性抽象活动，获得对认知对象 DIKWP 内容之间语义的理解和解释。这种理解和解释形成认知主体对认知交互活动的认知输入 DIKWP 内容与已有认知 DIKWP 内容之间的语义联系，并在更高阶的认知空间中对应一个或多个承载认知完整确认的“完整”语义。

知识的语义是通过高阶认知活动，将部分观察结果赋予“完整”语义，从而形成系统性的理解和规则。例如，通过观察不可能得知所有的天鹅都是白色，但在认知空间中，认知主体可以对一些观察结果的部分情形通过假设（赋予完整语义的高阶认知活动）将不能保障完整的观察结果赋予“完整”语义，也即“所有”，进而形成对“天鹅都是白色”这一拥有完整语义“都是”的知识规则对应的知识语义。

例如：在生物实验的例子中，科学家们通过长期观察和实验，可能会发现某些植物在特定条件下生长更快。通过对这些观察结果进行抽象和假设，科学家们可以形成“在高湿度环境下，植物 X 的生长速度更快”的知识。这种知识不仅仅是对单一信息的理解，而是通过多次验证和修正后形成的系统性理解，能够解释和预测植物在不同环境条件下的生长行为^{[19][20][21]}。

1.3.2 知识的结构化表示

知识的结构化表示强调了知识在认知中的系统性和层次性。在 DIKWP 模型中，知识可以表示为语义网络： $K = (N, E)$ ，其中， N 表示概念的集合， E 表示概念之间的关系集合。这种表示方式将知识认知定位为一个更高层次的认知成果，强调了知识的结构化和对完整语义的捕捉能力。这对于理解复杂系统和抽象概念至关重要。

知识是对 DIKWP 内容从不理解到理解的认知状态转化的桥梁，通过验证强化对知识的确认。知识的构建不仅依赖于数据和信息的积累，更重要的是通过认知过程中的抽象和概括，形成对事物本质和内在联系的理解^{[22][23]}。知识的存在不仅体现在个体层面，也体现在集体或社会层面，通过文化、教育和传承等方式进行共享和传播^[24]。

知识语义是对 DIKWP 内容进行深度加工和内化后形成的结构化认识。这种认识在概念空间内，并借助“完整”语义与语义空间对应。知识在 DIKWP 框架中的定义，反映了对世界的深入理解和完整语义的把握。这与亚里士多德关于形式原因的概念相呼应，即事物的本质和目的是可以通过理性和经验来探索和理解的。

每个知识规则的形成在 DIKWP 模型中代表认知主体对事物内在规律和本质的认知把握。从哲学的角度看，知识不仅是认知过程的产物，更是这一过程的目的和指导^{[25][26][27]}。知识的形成和应用体现了认知主体对世界的适应和改造，是对现实世界深层次规律的语义空间理解^{[28][29]}。

1.3.3 知识定义的对比分析

DIKWP 模型在知识的定义和生成过程上，提供了更高阶、更抽象的框架，适用于解释和理解复杂系统和抽象概念。相比其他模型，段玉聪等人的定义更关注知识的动态生成和语义完整性，强调了知识在认知过程中的深层次理解和抽象。DIKWP 模型的知识定义与其他知识定义和模型的对比分析如表 1-5 所示。

表 1-5 DIKWP 的知识定义与其他知识定义和模型的对比分析

特征	DIKWP 的知识定义	DIKW 模型	SECI 模型	Polanyi 的隐性知识理论	Cynefin 框架
定义	知识概念的语义对应认知空间中的一个或多个“完整”语义，通过假设和高阶认知活动进行语义完整性抽象。	知识是经过处理和理解的信息，能够用于决策和行动。	知识分为显性知识和隐性知识，通过社会化、外化、结合和内化四个过程转化。	知识分为显性知识和隐性知识，隐性知识是难以形式化和传递的个人经验和技能。	知识在不同情境下的应用方式不同，分为简单、复杂、复杂、混沌和无序五个域。
关键点	语义完整性、假设与抽象、语义网络、系统性理解、动态验证与修正、共享与传播。	层次性、静态性，强调知识的存储和管理。	动态性、双重性（显性知识和隐性知识的相互转化）。	难以形式化、个体性，强调个人经验和技能。	情境性、多样性，强调知识的应用和决策根据情境不同而变化。

特征	DIKWP 的知识定义	DIKW 模型	SECI 模型	Polanyi 的隐性知识理论	Cynefin 框架
语义完整性	强调,通过假设和抽象活动形成完整语义,构建系统性理解。	不强调,主要关注信息向知识的转化过程。	部分强调,通过显性和隐性知识的转化形成系统性理解。	不强调,主要关注隐性知识的个体性和难以传递性。	不强调,主要关注知识在不同情境下的应用方式。
知识生成过程	观察和学习、假设形成、语义完整性抽象、语义联系搭建、知识验证与修正。	信息处理和理解,识别模式和形成规则。	社会化、外化、结合和内化四个过程。	隐性知识通过个人经验和技能形成,难以直接传递。	知识生成根据不同情境进行决策,应用方式不同。
知识表示	语义网络,节点代表概念,边代表概念之间的语义关系。	层次结构,从数据到信息再到知识和智慧。	动态转化过程,显性知识和隐性知识的相互转化。	难以形式化的个人经验和技能,不易通过文档形式传递。	五个域,每个域中知识的应用和决策方式不同。
静态性 vs. 动态性	动态,强调知识的生成、验证和修正。	静态,主要关注知识的层次和存储。	动态,强调知识的转化和共享过程。	静态,主要关注隐性知识的个体性和难以传递性。	动态,知识应用根据情境变化。

特征	DIKWP 的知识定义	DIKW 模型	SECI 模型	Polanyi 的隐性知识理论	Cynefin 框架
个体性 vs. 社会性	强调知识在个体和社会层面的共享和传播,通过文化、教育和传承进行。	主要关注知识的个人层面,不强调社会层面。	强调知识的社会性,通过组织内的转化和共享过程。	强调知识的个体性,主要关注个人经验和技能。	强调知识在不同情境下的应用,适用于复杂系统和问题的决策。
抽象与概括	强调,通过高阶认知活动和假设形成系统性知识。	不强调,主要关注信息的处理和理解。	部分强调,通过显性和隐性知识的转化形成系统性理解。	不强调,主要关注隐性知识的个体性和难以传递性。	不强调,主要关注知识的应用和决策方式。
验证与修正	强调,通过进一步观测和实验验证假设的正确性和有效性,并根据新信息进行修正和完善。	不强调,主要关注知识的存储和管理。	强调,通过不断的知识转化和共享过程,验证和完善知识。	不强调,主要关注隐性知识的个体性和难以传递性。	强调,根据不同情境进行知识的应用和决策,验证其有效性。

特征	DIKWP 的知识定义	DIKW 模型	SECI 模型	Polanyi 的隐性知识理论	Cynefin 框架
哲学意义	知识是认知主体对世界的深刻理解和解释,通过抽象和概括形成系统性知识。	知识是对信息的进一步处理和理解,主要关注其应用和决策功能。	知识是显性和隐性知识的转化,通过组织内的共享和传播形成。	知识是个人经验和技能的体现,难以通过形式化手段传递。	知识是根据情境进行决策和应用的手段,强调其多样性和情境适应性。

通过对比分析,可以看到 **DIKWP** 的知识定义在现有知识模型的基础上,强调了知识的语义完整性、抽象过程、动态验证和语义网络结构化。相比其他模型,段玉聪等人的定义更关注知识的生成和验证过程,强调对事物本质和内在联系的理解。这种定义更适合用于解释和理解复杂系统和抽象概念,同时也强调了知识在社会层面的共享和传播。

根据 1.1.2 中概念空间、语义空间和认知空间的定义,知识在不同空间中的对比分析如表 1-6 所示。

表 1-6 知识在不同空间中的对比分析

特征	概念空间	语义空间	认知空间
定义	知识概念的语义对应于认知空间中的一个或多个“完整”语义。	通过语义匹配和关联形成系统性理解和规则。	通过高阶认知活动和假设,形成系统性知识和理解。

特征	概念空间	语义空间	认知空间
作用	形成系统性的概念和规则，帮助认知主体理解和解释世界。	形成系统性的语义联系，确保知识在认知过程中的一致性。	通过认知活动，形成对世界的深刻理解和解释。
静态性 vs. 动态性	动态，知识生成和验证是一个持续过程。	动态，通过语义匹配和关联进行验证和修正。	动态，通过认知活动进行验证和修正。
处理过程	通过观察、假设、抽象、验证和修正，形成系统性知识。	通过语义空间的语义匹配和关联，形成和验证知识。	通过认知空间的高阶认知活动，形成和验证知识。

段玉聪等人的定义强调了知识的动态生成、语义完整性、假设与抽象以及验证和修正的过程。这种定义不仅适用于理论构建和知识的语义理解，也为知识管理和应用提供了新的视角和方法。在对比其他模型时发现：**DIKW** 模型侧重于知识的层次性和静态存储，而段玉聪等人的定义更强调知识的动态生成和验证。**SECI** 模型强调显性和隐性知识的互动和转化，适用于组织内的知识流动，而段玉聪等人的定义提供了知识的结构化表示，更适合描述知识的生成过程。**Polanyi** 的隐性知识理论关注隐性知识的个体性和难以传递性，而段玉聪等人的定义强调知识的系统性和结构化表示。**Cynefin** 框架强调知识在不同情境下的应用和决策，适用于复杂系统和问题的实时决策，而段玉聪等人的定义提供了知识的语义网络表示，适用于理论构建和知识的语义理解。

1.4 智慧 (Wisdom)

在 DIKWP(Data, Information, Knowledge, Wisdom, Purpose)模型

中，智慧(Wisdom)的概念是一个关键元素，它不仅涉及数据、信息和知识的整合与应用^[3]，更包括伦理、社会道德、人性等方面的深层次考量^{[30][31]}。本文对智慧的定义强调了其在认知过程中的综合性、伦理性和目标导向性，提出了智慧在构建人类命运共同体中的核心价值观。本文将深入扩展智慧定义，详细阐述其理论基础、数学表示、应用场景及在人工智能(AI)中的实现。

1.4.1 智慧的概念及语义

智慧(DIKWP-Wisdom)概念的语义对应伦理、社会道德、人性等方面的信息，是一种来自文化、人类社会群体的，相对于当前时代的相对固定的极端价值观或者个体的认知价值观对应的信息语义^[32]。在认知主体确定智慧语义时，认知主体在认知空间会整合其中存在的 DIKWP 内容语义包括数据、信息、知识、智慧与意图的语义，人类及人工智能系统的智慧核心是围绕构建人类命运共同体的以人为本的价值观，并依托这个核心价值观构建、辨析、确认、矫正和发展个体及群体的认知空间、语义空间和概念空间的 DIKWP 内容语义，并运用它们来指导决策。例如，在面临基于特定 DIK 内容的决策问题时，认知主体的决策应当综合考虑伦理、道德、可行性等各个方面的因素，而不仅仅是基于 DIK 的技术或效率。智慧 W 为决策函数关联数据、信息、知识、智慧和意图，并输出最优决策 D^* ：

$$W: \{Data, Information, Knowledge, Wisdom, Purpose\} \rightarrow D^* \quad (1.3)$$

这里， W 是一个决策函数，根据数据、信息、知识和智慧来产生最优决策。 D^* ，这种描述强调了决策过程的综合性和目标导向性。这与认知语言学中对道德和价值观如何通过语言表达和传递的研究相呼应。

智慧概念在 DIKWP 模型中被看作是基于人类整体核心价值观的综合体现，它结合了伦理、社会道德和个体价值观的考量。智慧不仅仅是数据、信息、知识的应用，更是在决策过程中对各种因素（包括

道德和伦理)的全面考虑和平衡^[33]。

智慧语义处理涉及将数据、信息、知识结合个体或集体的价值观、伦理道德观念来做出判断和决策^[34]。在 AI 领域,智慧语义处理对应于发展高级决策人工意识系统或者伦理 AI,这些系统能够在以人为本的原则下考虑多方面因素的基础上,提供更加智慧和符合道德标准的解决方案。

在认知科学领域,智慧语义处理对应从人类整体发展出发的价值系统、道德判断以及社会情境下的 DIKWP 内容语义处理过程。智慧内容不是 DIKWP 内容的积累,而是关于如何在复杂和不确定的环境中基于以构建人类命运共同体的愿景基于以人文本的固定的信息语义,从认知空间出发在语义空间进行 DIKWP 语义内容的处理做出符合乃至促进以人为本的 DIKWP 语义内容的处理。例如,面对气候变化,智慧的应用涉及到利用认知主体对环境科学的理解(知识),评估不同行动方案(知识)的长期和短期后果(信息),并在考虑伦理和社会责任(智慧)的基础上做出决策(信息)^[35]。

认知主体的智慧和社会群体的智慧的形成不仅依赖于认知个体和认知群体的 DIKWP 内容语义认知能力的融合发展,还涉及到个体对其所处环境、文化背景和社会关系等对应的 DIKWP 内容的交互、深入理解和反思。

DIKWP 模型将智慧视为决策过程中的关键因素,涉及伦理、道德和价值观的考虑,强调了数据、知识和信息在实际应用中与价值取向的必然联系,提醒认知主体认知过程不仅仅是对真理的追求,更是基于对人类整体美好生活方式的探索的前提^[36]。这部分对应了亚里士多德对“实践智慧(Phronesis)”的探讨,即如何在特定情境下作出最好的道德判断和决策。

智慧在 DIKWP 模型中的定义根植于认知科学、伦理学和社会学等多学科领域。其核心在于将数据(Data)、信息(Information)、知识

(Knowledge)、智慧(Wisdom)和意图(Purpose)有机结合,以实现综合性、伦理性和目标导向性的决策过程。

智慧(Wisdom)的语义对应于伦理、社会道德、人性等方面的信息。智慧是一种来自文化和人类社会群体的,相对于当前时代相对固定的极端价值观或个体的认知价值观的信息语义。在认知主体确定智慧语义时,会整合认知空间中的 DIKWP 内容,包括数据、信息、知识、智慧与意图的语义。

智慧的核心价值观围绕构建人类命运共同体的以人为本的价值观。认知主体依托这一核心价值观,构建、辨析、确认、矫正和发展个体及群体的认知空间、语义空间和概念空间的 DIKWP 内容语义。

1.4.2 智慧的决策过程

在智慧语义处理中,认知主体在决策过程中综合考虑伦理、道德和可行性等因素,而不仅仅是基于数据、信息和知识的技术或效率。决策过程包括以下步骤:

1. 综合考虑

在面临决策问题时,认知主体需要综合考虑伦理、道德、社会责任和可行性等因素。例如,气候变化的决策需要考虑环境影响、社会公平和经济可行性等多个方面^[37]。

2. 整合 DIKWP 内容

认知主体将数据、信息、知识、智慧和意图的语义进行整合,形成全面的决策基础。比如,在公共政策制定中,需要结合统计数据、社会调查、历史知识和伦理原则来做出决策。

3. 决策输出

通过综合考虑各方面因素,决策函数 W 输出最优决策 D^* 。这一过程强调了多因素平衡和优化的必要性。

智慧在实际应用中涵盖广泛,包括但不限于以下场景:

1. 环境保护

在应对气候变化和环境保护的问题上，智慧的应用涉及科学知识的理解（知识）、评估不同行动方案的长期和短期后果（信息），并在考虑伦理和社会责任（智慧）的基础上做出决策（信息）。例如，制定环保政策需要考虑经济影响、社会接受度和环境效益。

2. 医疗决策

在医疗领域，智慧的应用需要结合病人的数据(D)、医学知识(K)、治疗方案的信息(I)以及道德考虑(W)来做出治疗决策。比如，医生在选择治疗方案时，不仅需要考虑疗效和副作用，还需要考虑病人的意愿和伦理问题。

3. 社会治理

智慧在社会治理中的应用涉及综合考虑法律、社会道德和公共政策等多方面因素。治理决策需要基于法律数据(D)、社会调查信息(I)、历史知识(K)和社会价值观(W)来制定最优的公共政策。

4. 人工智能

在 AI 系统中，智慧语义处理对应于发展高级决策人工意识系统或伦理 AI，这些系统能够在以人为本的原则下考虑多方面因素，提供更加智慧和符合道德标准的解决方案^[38]。例如，自驾车系统在决策时需要考虑乘客安全、行人保护和交通法规等多个因素。

在 AI 领域，智慧语义处理的目标是发展高级决策人工意识系统或伦理 AI，这些系统能够在以人为本的原则下考虑多方面因素，提供更加智慧和符合道德标准的解决方案^[39]。智慧在 AI 中的应用包括：

设计能够在复杂环境中做出伦理决策的 AI 系统。例如，自驾车系统在面临紧急情况时，需要权衡乘客和行人的安全，做出符合道德标准的决策。

开发能够综合考虑多方面因素的高级决策系统。例如，在医疗诊断中，AI 系统需要结合病人的病史数据、医学知识和伦理原则，提供最优的治疗方案。

1.4.3 智慧定义的对比分析

智慧(Wisdom)在认知科学、伦理学和人工智能等领域具有重要的研究价值。在 DIKWP 模型中提出了关于智慧的定义，强调其在决策过程中的综合性、伦理性和目标导向性。本节将详细对比分析 DIKWP 的智慧定义与其他学者或模型中的智慧定义，探讨其异同点及应用场景。DIKWP 与 DIKW 金字塔模型^[3]、Ackoff^[40]、Churchman^[41]、Bateson^[42]智慧定义的对比如表 1-7 所示。

表 1-7 不同智慧定义的对比

定义来源	语义定义	来源	核心价值观	决策过程	应用场景
DIKWP	伦理、社会道德、人性等方面的信息。	文化和人类社会群体的价值观	以人为本，构建人类命运共同体	综合考虑伦理、道德、社会责任和可行性。	环境保护、医疗决策、社会治理、人工智能
DIKW 金字塔模型	应用知识和经验进行审慎判断和决策。	数据、信息、知识的积累与应用	经验和洞察力	基于知识和经验的审慎决策。	环境保护、医疗决策、社会治理、人工智能
Ackoff	对善与恶的区别和行为的指导。	知识与价值观的结合	伦理和道德	基于价值观的审慎判断。	环境保护、医疗决策、社会治理、人工智能

定义来源	语义定义	来源	核心价值观	决策过程	应用场景
Churchman	用以解决复杂问题和应对不确定性的能力。	综合数据、信息和知识	实用性和有效性	解决复杂问题，处理不确定性。	环境保护、医疗决策、社会治理、人工智能
Bateson	理解和协调不同层次的想法和感知。	经验和文化	平衡和谐	协调和整合不同观点。	环境保护、医疗决策、社会治理、人工智能

在具体应用场景中，DIKWP模型中智慧的定义与其他不同模型中智慧的定义在具体应用场景中进行对比分析，在环境保护场景中，不同模型的智慧定义对比分析如表 1-8 所示；在医疗决策场景中，不同模型的智慧定义对比分析如表 1-9 所示；在社会治理场景中，不同模型的智慧定义对比分析如表 1-10 所示；在人工智能场景中，不同模型的智慧定义对比分析如表 1-11 所示。

表 1-8 不同模型的智慧定义对比分析（环境保护场景）

定义来源	应用场景描述
DIKWP	综合考虑环境影响、社会公平和经济可行性。
DIKW 金字塔模型	主要基于环境科学知识和经验。
Ackoff	注重伦理和道德考量。
Churchman	实用性和有效性为主。
Bateson	平衡不同环境观点和利益。

表 1-9 不同模型的智慧定义对比分析（医疗决策场景）

定义来源	应用场景描述
DIKWP	结合病人数据、医学知识、伦理和社会责任。
DIKW 金字塔模型	基于医学知识和经验。
Ackoff	强调医疗决策中的伦理判断。
Churchman	处理医疗问题的复杂性和不确定性。
Bateson	协调病人需求和医疗资源。

表 1-10 不同模型的智慧定义对比分析（社会治理场景）

定义来源	应用场景描述
DIKWP	结合法律数据、社会调查、历史知识和伦理原则。
DIKW 金字塔模型	基于社会治理知识和经验。
Ackoff	社会治理中的道德考量。
Churchman	有效处理社会治理的复杂性。
Bateson	平衡不同社会群体的利益。

表 1-11 不同模型的智慧定义对比分析（人工智能场景）

定义来源	应用场景描述
DIKWP	发展伦理 AI，综合考虑多方面因素。
DIKW 金字塔模型	基于数据和知识的 AI 决策。
Ackoff	伦理 AI，注重道德判断。
Churchman	AI 解决复杂问题和处理不确定性。
Bateson	AI 系统的协调和平衡功能。

通过对比分析 DIKWP 的智慧定义与其他学者或模型中的智慧定义，可以看出本文的定义在综合性、伦理性和目标导向性方面具有独特的优势，特别是在强调以人为本和构建人类命运共同体的核心价值观上。相比之下，其他定义在经验、实用性、道德考量和平衡和谐方

面也有各自的侧重点。

DIKWP 的智慧定义在实际应用中展现出独特的优势，能够提供更加智慧和符合道德标准的解决方案，特别是在环境保护、医疗决策、社会治理和人工智能等复杂且多变的场景中。通过这种综合性和目标导向性的决策过程，可以更好地应对现代社会中的各种挑战，推动更具道德标准和综合考量的决策系统的发展。

总之，DIKWP 模型中的智慧定义强调了智慧在决策过程中的综合性、伦理性和目标导向性。智慧不仅是数据、信息和知识的应用，更是在决策过程中对各种因素（包括道德和伦理）的全面考虑和平衡。智慧的核心价值围绕构建人类命运共同体的愿景，以人为本，指导认知主体在复杂环境中做出最优决策。智慧在 AI 中的应用展现了其在现代技术中的重要性，推动了更具道德标准和综合考量的决策系统的发展。

1.5 意图 (Purpose)

1.5.1 意图的概念及语义

意图(DIKWP-Purpose)概念的语义对应二元组（输入，输出），其中输入和输出都是数据、信息、知识、智慧或意图的语义内容^{[4][43][44]}。意图语义代表了利益相关者对某一现象或问题的 DIKWP 内容语义的理解（输入），以及希望通过处理和解决该现象或问题来实现的目标（输出）。认知主体在处理意图语义时，在语义空间会根据其预设的目标（输出）语义，处理输入的 DIKWP 内容语义，通过学习和适应等对应的 DIKWP 内容语义的处理，使输出 DIKWP 内容语义逐渐接近预设的目标语义^{[45][46][47]}。意图的数学化定义如公式(1.4)所示。

$$P = (Input, Output) \quad (1.4)$$

其中，输入和输出是数据、信息、知识、智慧或意图的内容语义。处理意图语义时，一系列转换函数 T ，根据输入内容和预设目标，实现从输入到输出的语义转化：

$$T : Input \rightarrow Output \quad (1.5)$$

这种表示方法突出了过程的动态性和目标导向性，为理解和设计具有特定目标的认知处理过程提供了数学模型。

意图代表了认知过程的目的性和方向性，它是个体或系统行动的驱动力^{[48][49]}。意图不仅定义了从当前状态到期望状态的转换路径，而且揭示了认知活动的动力和方向。这种目标导向的认知过程强调认知主体在处理信息时的主动性和创造性，以及认知活动背后的深层动机和目标。意图概念强调了在认知空间进行的是目标导向的认知过程，即认知主体在处理信息时不仅仅是被动接收，而是有着明确的目标和意图，这决定并驱动了它如何理解和操作数据、信息、知识、智慧和意图等 DIKWP 语义内容^{[50][51]}。意图不仅指导认知主体对数据、信息的收集和处理，还影响知识的形成和应用，以及智慧的发展和实践。

意图的概念引入了目的论的视角，即认知活动不是无目的的数据处理，而是为了实现某种目标或满足某种需要。在 DIKWP 框架中，意图的加入不仅丰富了模型的动态性，也强调了认知活动的目的性和主观性^[52]。这意味着在认知过程中，认知主体不是被动地接收和处理 DIKWP 语义内容，而是在语义空间基于特定的目标和意图主动地寻找、选择和解释 DIKWP 语义内容。

意图驱动提供了一个从动态和目标导向的角度来理解认知活动的框架，这与认知语言学中的行动理论(Action Theory)相关，使得 DIKWP 模型不仅能够解释已有的认知现象，还能指导未来的认知活动，为实现特定目标而优化认知策略和行为^[53]。

DIKWP 模型中的意图驱动方式强调了认知主体的认知过程的目的性和动态性。它关注于从一种状态转移到预期状态的过程，这一过程中包括了目标的设定和达成路径的规划。在 AI 系统中，意图识别和目标导向的行为设计是实现智能行为的关键要素，如在自然语言处理(NLP)中理解用户的查询意图，或在规划算法中设定和优化目标达

成的路径^{[54][55]}。在人工意识研究中，理解和模拟人类的意图识别和目标导向行为是实现高级认知功能的关键。

从哲学的视角来看，意图不仅仅是行动的预设目标，更是个体存在和行为的根本动因。意图体现了个体的自由意志和对未来的设想，它是个体与世界互动的内在动力^[56]。意图的存在强调了认知活动的主体性和创造性，揭示了人类行为背后的深层意义。这不仅与亚里士多德的终因说相对应，他认为所有事物的存在都有其目的或终极原因，更与黑格尔的目的性观念和存在主义哲学中的自由意志观点相呼应^[57]。在黑格尔哲学中，现实的动力来自于对立的统一，即通过目的性行为的实现过程中的自我实现和自我否定。而在存在主义中，强调个体的选择和意图对其存在的决定性作用^[58]。DIKWP 模型中的意图维度，体现了认知活动不仅是对外部世界的反应，更是主体基于自身目的和价值观进行主动构建的过程。

意图的核心特点包括：

1、动态性：意图过程是动态的，通过不断调整和优化输入内容，使输出逐步接近预设目标。

2、目标导向性：意图强调认知过程的目的性和方向性，认知主体在处理信息时具有明确的目标和意图。

3、主动性和创造性：认知主体在处理信息时不仅是被动接收，而是主动寻找、选择和解释 DIKWP 语义内容。

意图在 DIKWP 模型中的引入，为认知活动提供了一个目的论的视角，强调了认知活动的主体性和创造性。这不仅丰富了模型的动态性，也强调了认知活动的目的性和主观性^[54]。

1.5.2 意图定义的对比分析

意图语义对应二元组（输入，输出），其中输入和输出都是数据、信息、知识、智慧或意图的语义内容。强调了以人为本和构建人类命运共同体的核心价值观，突出了社会责任和伦理的重要性^[52]。基于

DIKWP 模型的意图定义与 Bratman^[49]、Searle^[48]、Schank & Abelson^[59]、Fodor^[60]、Dennett^[61]的定义对比分析如表 1-12 所示。

表 1-12 不同意图定义的对比较分析

定义来源	语义定义	来源	核心价值观	决策过程	应用场景
DIKWP	意图语义对应二元组（输入，输出），其中输入和输出都是数据、信息、知识、智慧或意图的语义内容。	数据、信息、知识、智慧、意图的语义内容	以人为本，构建人类命运共同体	通过转换函数 T 实现从输入到输出的语义转化	人工智能、自然语言处理、认知科学
Bratman	意图是对未来行动的承诺，是规划行为的基础。	行动计划与未来承诺	个体对未来的预期和承诺	通过行动计划实现预期目标	行动理论、决策理论

定义来源	语义定义	来源	核心价值观	决策过程	应用场景
Searle	意图是心灵状态，是对行动的方向和目的的意向性。	心灵状态与意向性	心灵对行动的方向和目的的关注	通过心灵状态引导行动实现目的	心理学、哲学、语言学
Schank & Abelson	意图是个体行为背后的动机和目标，是理解和生成故事的基础。	行为动机与目标	理解和生成行为的背后动机和目标	通过分析行为动机和目标理解和生成故事	人工智能、认知科学、叙事理论
Fodor	意图是心灵的内容，是描述心理状态和过程的重要概念。	心灵内容与心理过程	心理状态和过程的描述	通过描述心理状态和过程理解意图	心理学、哲学、认知科学
Dennett	意图是设计层次的概念，是解释行为和决策的框架。	行为和决策的设计层次	解释和预测行为和决策	通过设计层次解释和预测行为和决策	认知科学、哲学、人工智能

在核心价值观方面，分析表 1-12 可知，DIKWP 的意图定义强调了以人为本和构建人类命运共同体的核心价值观，突出了社会责任和伦理的重要性。相比之下，Bratman 更关注个体的未来预期和承诺^[49]，Searle 强调心灵的意向性^[48]，Schank & Abelson 关注行为动机和目标^[59]，Fodor 注重心理状态的描述^[60]，Dennett 强调设计层次的解释和预测^[61]。

在语义与来源方面，分析表 1-12 可知，DIKWP 的意图定义涵盖了广泛的语义内容，包括数据、信息、知识、智慧和意图，而其他定义多集中于具体的心理状态、行为动机和设计层次。

在决策过程方面，分析表 1-12 可知，DIKWP 的意图定义强调通过转换函数 T 实现从输入到输出的语义转化，突出了过程的动态性和目标导向性。其他定义多集中于行动计划、心灵状态和设计层次的解释和预测。

在具体应用场景中，DIKWP 模型中意图的定义与其他不同模型中意图的定义在具体应用场景中进行对比分析，在人工智能场景中，不同模型的意图定义对比分析如表 1-13 所示；在自然语言处理场景中，不同模型的意图定义对比分析如表 1-14 所示；在认知科学场景中，不同模型的意图定义对比分析如表 1-15 所示。

表 1-13 不同模型的意图定义对比分析（人工智能场景）

定义来源	应用场景描述
DIKWP	在 AI 系统中，意图识别和目标导向的行为设计是实现智能行为的关键要素。
Bratman	AI 系统通过预设行动计划来实现预期目标，强调规划行为的重要性。

定义来源	应用场景描述
Searle	AI 系统需模拟心灵状态，以实现对行动的方向和目的的意向性。
Schank & Abelson	AI 系统通过分析行为动机和目标来理解和生成故事。
Fodor	AI 系统需描述和理解心理状态和过程，以实现意图的模拟。
Dennett	AI 系统通过设计层次解释和预测行为和决策，强调意图的设计和实现。

表 1-14 不同模型的意图定义对比分析（自然语言处理场景）

定义来源	应用场景描述
DIKWP	在 NLP 中，理解用户的查询意图是提供准确和相关答案的基础。
Bratman	NLP 系统需通过规划语言生成行为来实现用户的预期目标。
Searle	NLP 系统需模拟用户的心灵状态，以实现语言的意向性理解。
Schank & Abelson	NLP 系统通过分析语言背后的行为动机和目标来理解和生成自然语言。
Fodor	NLP 系统需描述和理解语言的心理状态和过程，以实现意图的模拟。
Dennett	NLP 系统通过设计层次解释和预测语言行为，强调意图的设计和实现。

表 1-15 不同模型的意图定义对比分析（认知科学场景）

定义来源	应用场景描述
DIKWP	在认知科学中，理解人类的意图识别和目标导向行为是实现高级认知功能的关键。
Bratman	认知科学研究需通过规划行为理解人类的意图和目标。
Searle	认知科学需研究心灵状态和意向性，以理解人类的行动和目的。
Schank & Abelson	认知科学通过分析行为动机和目标来理解和生成人类的认知过程。
Fodor	认知科学需描述和理解心理状态和过程，以实现意图的研究。
Dennett	认知科学通过设计层次解释和预测人类行为和决策，强调意图的设计和实现。

在 DIKWP 模型中提出的意图定义，强调了认知过程的目的性和方向性。通过引入意图的概念，DIKWP 模型不仅能够解释已有的认知现象，还能指导未来的认知活动，为实现特定目标优化认知策略和行为。这种目标导向的认知过程，在人工智能、自然语言处理和认知科学等领域具有重要的应用价值，推动了现代认知科学和技术的发展。意图的引入丰富了 DIKWP 模型的动态性和目标导向性，为理解和设计具有特定目标的认知处理过程提供了坚实的理论基础。

1.6 DIKWP 与空间定义

1.6.1 DIKWP 模型

DIKWP 模型^{[1][4][43][45]}是一个扩展了传统的 DIKW^{[2][5][62][63]}（数据(Data)、信息(Information)、知识(Knowledge)、智慧(Wisdom)）模型的网馈模型，增加了"意图"(Purpose)这个元素。DIKWP 模型是一种

能够形象地描述认知过程的网络化模型，其将数据、信息、知识、智慧、意图五个环节紧密相连，共同构成了一个跨越认知空间、意识空间、语义空间和概念空间的认知概念-语义关联交互过程^[10]。DIKWP关系架构如图 1-1 所示。认知空间、意识空间、语义空间和概念空间交互如图 1-2 所示。

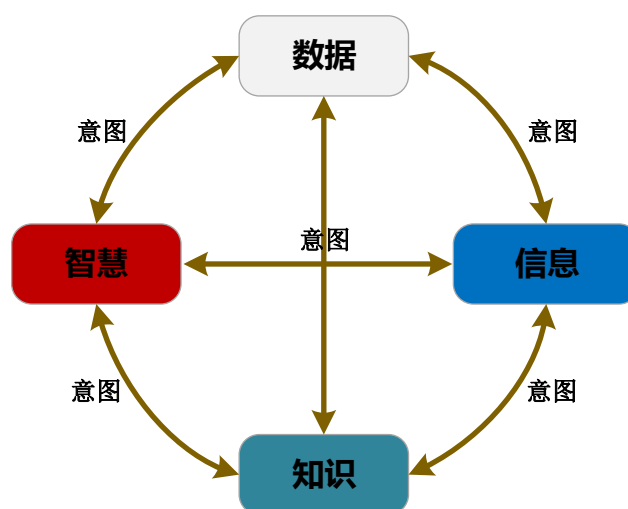


图 1-1 DIKWP 关系架构图^[44]

段玉聪等人^[1]提出了数据、信息、知识、智慧和意图框架的改进 UML 元模型，如图 1-3 所示。该模型以“人类”和“存在”为核心概念，将其分解为客观存在和可能是主观的概念性承认存在^{[64][65]}。添加了非存在的确认作为确认存在的一种形式，因为它具有确定性的语义^[66]。

$existence_{confirmed}$

$::=<(existence_{objective}, existence_{conceptual})_{positive},$

$nonexistence_{confirmed} >$ (1.6)

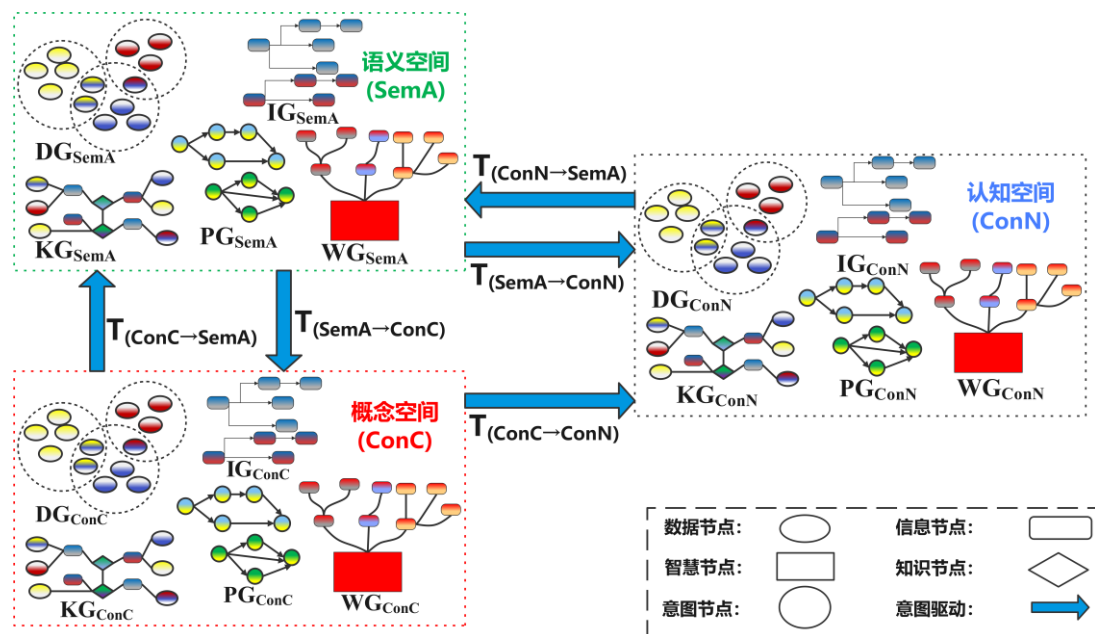


图 1-2 概念空间、认知空间、语义空间架构图^[10]

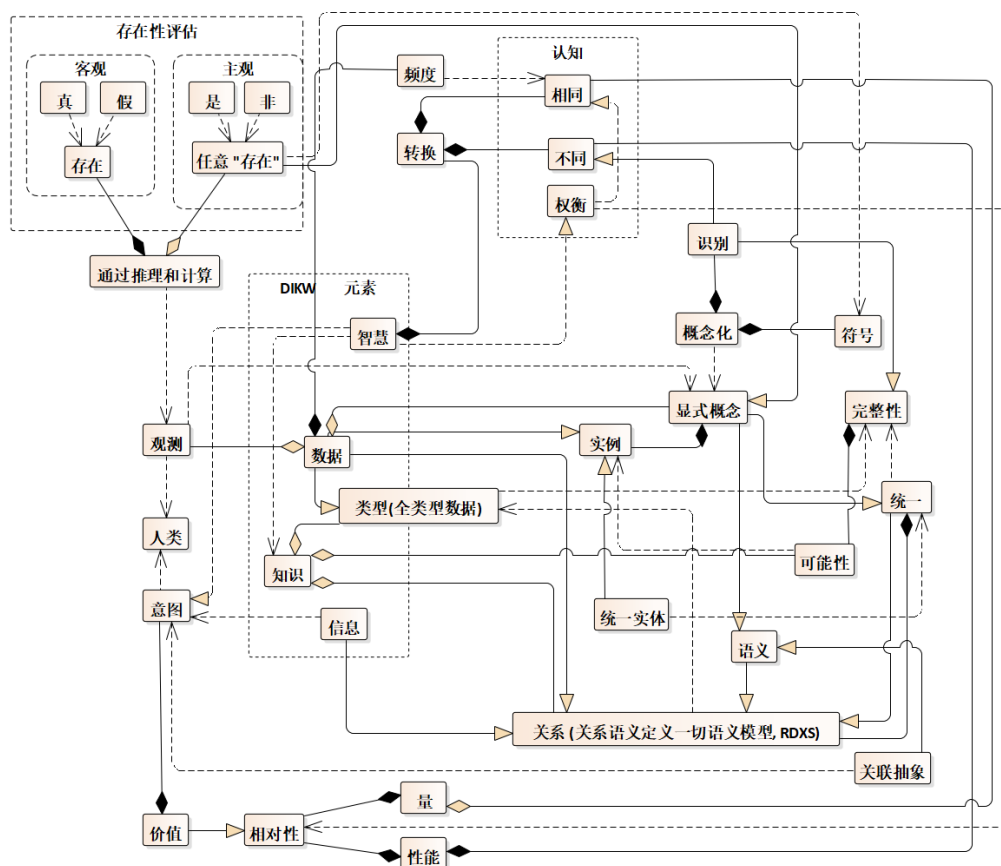


图 1-3 DIKWP 定义元模型^[1]

进一步详细分析 DIKWP 模型中的基本语义，包括“相同”、“不

同”、“完整”等语义如何与具体概念进行映射和标识。通过具体案例，深入探讨这些基本语义在概念空间、语义空间和认知空间中的产生和表达。

1、基本语义分析

(1) “相同”的语义

“相同”在 DIKWP 模型中表示两个或多个对象在某些特征或属性上完全一致。这个语义可以在数据、信息、知识、智慧和意图范畴次上进行映射和标识。

1) 在数据范畴：

当两个植物的颜色、形状、大小等特征完全一致时，我们可以说它们是“相同的”。

$$d_{plant1}=(d_{color1},d_{shape1},d_{size1})$$

$$d_{plant2}=(d_{color2},d_{shape2},d_{size2})$$

如果

$$d_{color1}=d_{color2}, d_{shape1}=d_{shape2}, d_{size1}=d_{size2}$$

那么

$$d_{plant1}=d_{plant2}$$

例如，两个红色、圆形花瓣、中等大小的植物是“相同的”。

2) 在信息范畴：

当两个植物的名称和类别完全一致时，我们可以说它们是“相同的”。

$$I_{plant1}=(name1,category1)$$

$$I_{plant2}=(name2,category2)$$

如果

$$name1=name2, category1=category2$$

那么

$$I_{plant1}=I_{plant2}$$

例如，两株被命名为玫瑰并属于花卉类的植物是“相同的”。

3) 在知识范畴：

当两个植物的特性和生态习性完全一致时，我们可以说它们是“相同的”。

$$K_{plant1}=\{characteristics1,habitat1\}$$

$$K_{plant2}=\{characteristics2,habitat2\}$$

如果

$$characteristics1=characteristics2, habitat1=habitat2$$

那么

$$K_{plant1}=K_{plant2}$$

例如，两株有刺且芳香的花园植物是“相同的”。

4) 在智慧范畴：

当两个植物的栽培技巧和病虫害防治方法完全一致时，我们可以说它们是“相同的”。

$$W_{plant1}=\{cultivation\ techniques1,pest\ control1\}$$

$$W_{plant2}=\{cultivation\ techniques2,pest\ control2\}$$

如果

$$cultivation\ techniques1=cultivation\ techniques2, pest\ control1=pest\ control2$$

那么

$$W_{plant1}=W_{plant2}$$

例如，两株需要适当浇水和使用相同杀虫剂的植物是“相同的”。

5) 在意图范畴：

当两个植物的保护和学习目标完全一致时，我们可以说它们是“相同的”。

$$P_{plant1}=\{goals1,plans1\}$$

$$P_{plant2}=\{goals2,plans2\}$$

如果

$$goals1=goals2, plans1=plans2$$

那么

$$P_{plant1}=P_{plant2}$$

例如，两株植物的目标是识别 100 种植物并参与植物调查，是“相同的”。

2、“不同”的语义

“不同”在 DIKWP 模型中表示两个或多个对象在某些特征或属性上存在差异。这个语义可以在数据、信息、知识、智慧和意图范畴次上进行映射和标识。

(1) 在数据范畴：

当两个植物的颜色、形状、大小等特征存在差异时，我们可以说它们是“不同的”。

$$d_{plant1}=(d_{color1},d_{shape1},d_{size1})$$

$$d_{plant2}=(d_{color2},d_{shape2},d_{size2})$$

如果

$$d_{color1}\neq d_{color2} \text{ or } d_{shape1}\neq d_{shape2} \text{ or } d_{size1}\neq d_{size2}$$

那么

$$d_{plant1}\neq d_{plant2}$$

例如，一株红色、圆形花瓣的植物与一株黄色、大花瓣的植物是“不同的”。

(2) 在信息范畴：

当两个植物的名称和类别存在差异时，我们可以说它们是“不同的”。

$$I_{plant1}=(name1,category1)$$

$$I_{plant2}=(name2,category2)$$

如果

$name1 \neq name2$ or $category1 \neq category2$

那么

$I_{plant1} \neq I_{plant2}$

例如，一株被命名为玫瑰并属于花卉类的植物与一株被命名为向日葵并属于花卉类的植物是“不同的”。

(3) 在知识范畴：

当两个植物的特性和生态习性存在差异时，我们可以说它们是“不同的”。

$K_{plant1} = \{characteristics1, habitat1\}$

$K_{plant2} = \{characteristics2, habitat2\}$

如果

$characteristics1 \neq characteristics2$ or $habitat1 \neq habitat2$

$characteristics1 = characteristics2$ or $habitat1 = habitat2$

那么

$K_{plant1} \neq K_{plant2}$

$K_{plant1} = K_{plant2}$

例如，一株有刺且芳香的花园植物与一株高大且向阳的田野植物是“不同的”。

(4) 在智慧范畴：

当两个植物的栽培技巧和病虫害防治方法存在差异时，我们可以说它们是“不同的”。

$W_{plant1} = \{cultivation techniques1, pest control1\}$

$W_{plant2} = \{cultivation techniques2, pest control2\}$

如果

$cultivation techniques1 \neq cultivation techniques2$ or $pest control1 \neq pest control2$

$cultivation techniques1 = cultivation techniques2$ or $pest control1 = pest control2$

$control1 = pest\ control2$

那么

$$W_{plant1} \neq W_{plant2}$$

$$W_{plant1} = W_{plant2}$$

例如，一株需要适当浇水的植物与一株需要大量阳光的植物是“不同的”。

(5) 在意图范畴：

当两个植物的保护和学习目标存在差异时，我们可以说它们是“不同的”。

$$P_{plant1} = \{goals1, plans1\}$$

$$P_{plant2} = \{goals2, plans2\}$$

如果

$$goals1 \neq goals2 \text{ or } plans1 \neq plans2$$

$$goals1 = goals2 \text{ or } plans1 = plans2$$

那么

$$P_{plant1} \neq P_{plant2}$$

$$P_{plant1} = P_{plant2}$$

例如，一株植物的目标是识别 100 种植物并参与植物调查，而另一株植物的目标是提高植物保护意识并种植更多树木，是“不同的”。

3、“完整”的语义

“完整”在 DIKWP 模型中表示一个对象在某个范畴上具备所有必要的特征或属性。这个语义可以在数据、信息、知识、智慧和意图范畴次上进行映射和标识。

(1) 在数据范畴：

当一个植物的数据包含了所有必要的特征（如颜色、形状、大小等）时，我们可以说它是“完整的”。

$$d_{plant} = (d_{color}, d_{shape}, d_{size})$$

如果

$$d_{color} \neq \emptyset, d_{shape} \neq \emptyset, d_{size} \neq \emptyset$$

那么

d_{plant} 是完整的

例如，一株红色、圆形花瓣、中等大小的植物数据是“完整的”。

(2) 在信息范畴：

当一个植物的信息包含了所有必要的描述(如名称和类别等)时，我们可以说它是“完整的”。

$$I_{plant} = (name, category)$$

如果

$$name \neq \emptyset, category \neq \emptyset$$

那么

I_{plant} 是完整的

例如，一株被命名为玫瑰并属于花卉类的植物信息是“完整的”。

(3) 在知识范畴：

当一个植物的知识包含了所有必要的特性和生态习性时，我们可以说它是“完整的”。

$$K_{plant} = \{characteristics, habitat\}$$

如果

$$characteristics \neq \emptyset, habitat \neq \emptyset$$

那么

K_{plant} 是完整的

例如，一株有刺且芳香的花园植物的知识是“完整的”。

(4) 在智慧范畴：

当一个植物的栽培技巧和病虫害防治方法包含了所有必要的知识时，我们可以说它是“完整的”。

$$W_{plant} = \{cultivation techniques, pest control\}$$

如果

$cultivation\ techniques \neq \emptyset, pest\ control \neq \emptyset$

那么

W_{plant} 是完整的

例如，一株需要适当浇水和使用杀虫剂的植物的智慧是“完整的”。

(5) 在意图范畴：

当一个植物的保护和学习目标包含了所有必要的目标和计划时，我们可以说它是“完整的”。

$P_{plant} = \{goals, plans\}$

如果

$goals \neq \emptyset, plans \neq \emptyset$

那么

P_{plant} 是完整的

例如，一株植物的目标是识别 100 种植物并参与植物调查，且有具体的计划去实现这些目标，是“完整的”。

1.6.2 DIKWP 模型的认知与跨学科研究

DIKWP 模型通过数据 (Data)、信息 (Information)、知识 (Knowledge)、智慧 (Wisdom) 和意图 (Purpose) 五个元素，系统地处理和理解自然语言中的概念和语义。本文旨在详细探讨 DIKWP 模型的概念和语义定位，并结合科学研究和实验结果，展示其在认知和神经科学中的应用和有效性。

1 数据(Data)的概念和语义定位

定义：数据的语义是认知过程中表达“相同”意义的具体表现。数据在认知过程中涉及对感知输入（如视觉、听觉、触觉等）进行初步处理和编码。

科学联系：

视觉数据处理：研究表明，视觉皮层和枕叶在处理视觉数据时，能够识别和编码物体的形状、颜色和运动^[67](Rolls & Deco, 2002)。

听觉数据处理：听觉皮层和颞叶在处理听觉数据时，能够识别和编码声音和语音信息^[68](Zatorre & Salimpoor, 2013)。

触觉数据处理：体感皮层和顶叶在处理触觉数据时，能够识别和编码触觉感受，如质地、温度和压力^[69](Smith & Jonides, 1999)。

2 信息(Information)的概念和语义定位

定义：信息的语义对应认知中一个或多个“不同”语义。信息在认知过程中涉及对数据进行比较、分类和关联处理，以提取有意义的差异和新语义。

科学联系：

信息比较与分类：前额叶皮层和顶叶在比较和分类不同的数据输入时，能够识别出其中的差异和相似点^[70](Miller & Cohen, 2001)。

新语义的生成：海马体和前额叶皮层在整合不同来源的信息时，能够生成新的语义和关联^[71](Schultz et al., 1997)。

3 知识(Knowledge)的概念和语义定位

定义：知识的语义是认知主体借助某种假设对 DIKWP 内容进行语义完整性抽象活动获得的理解和解释。

科学联系：

知识抽象与整合：前额叶皮层和海马体在抽象和整合知识时，能够形成完整的知识结构^[72](Goldman-Rakic, 1995)。

假设与验证：前额叶皮层和扣带回在生成和验证假设时，能够有效评估假设的有效性^[73](Cohen & Servan-Schreiber, 1992)。

4 智慧(Wisdom)的概念和语义定位

定义：智慧的语义对应伦理、社会道德、人性等方面的信息。智慧在决策过程中综合考虑伦理、道德、社会责任和可行性。

科学联系：

道德与伦理判断：腹内侧前额叶皮层和扣带回在道德和伦理判断时，能够整合社会规范和个人价值观^[74](Marg E., 1995)。

智慧决策：前额叶皮层在复杂决策中，能够整合知识、经验和伦理考虑，做出智慧的选择^[75](Braver & Barch, 2002)。

5 意图(Purpose)的概念和语义定位

定义：意图的语义对应二元组（输入，输出），其中输入和输出都是数据、信息、知识、智慧或意图的语义内容。意图在认知过程中代表了利益相关者对某一现象或问题的理解 and 目标。

科学联系：

意图生成与规划：前额叶皮层和海马体在生成和规划意图时，能够整合输入的 DIKWP 内容，并规划实现意图的步骤^[76](Dehaene & Changeux, 2000)。

意图执行与监控：前额叶皮层和基底神经节在执行和监控意图实现过程中，能够协调具体执行的动作^[70](Miller & Cohen, 2001)。

6. DIKWP 模型的转化及处理

(1) 数据到信息的转化

过程：通过比较和分类，数据被转化为信息。前额叶皮层和顶叶在这一过程中起到关键作用。实验结果：

实验显示，前额叶皮层在处理复杂信息时，能够有效比较和分类输入数据^[69](Smith & Jonides, 1999)。

(2) 信息到知识的转化

过程：通过抽象和整合，信息被转化为知识。前额叶皮层和海马体在这一过程中起到关键作用。实验结果：

fMRI 研究表明，海马体在整合新信息到长期记忆中时，表现出显著的神经活动^[71](Schultz et al., 1997)。

(3) 知识到智慧的转化

过程：通过道德和伦理判断，知识被转化为智慧。腹内侧前额叶

皮层和扣带回在这一过程中起到关键作用。实验结果：

研究发现，在做出复杂道德决策时，腹内侧前额叶皮层和扣带回的活动显著增强^[70](Marg E., 1995)。

(4) 意图的生成与实现

过程：通过整合和规划，生成意图，并通过执行和监控实现意图。前额叶皮层和基底神经节在这一过程中起到关键作用。实验结果：

TMS 研究显示，前额叶皮层在意图生成和规划中起到关键作用，而基底神经节则在具体执行过程中发挥重要作用^[76](Dehaene & Changeux, 2000)。

7. 案例分析：医患交互中的 DIKWP 自动机模型

(1) 患者描述症状的自动机状态转化

视觉输入：患者看到医生，激活视觉皮层和枕叶。

听觉输入：患者听到医生提问，激活听觉皮层和颞叶。

触觉输入：患者感受到头痛，激活体感皮层和顶叶。

符号化处理：前额叶皮层将感知输入符号化为具体的概念(如“医生”“头痛”)。

记忆提取：海马体从记忆中提取相关信息，支持描述过程。

(2) 医生提问的自动机状态转化

语义理解：医生听到患者描述，激活听觉皮层、颞叶、顶叶和前额叶皮层。

信息提取：医生从患者描述中提取关键信息，激活前额叶皮层和海马体，进行比较和分类。

生成提问：医生基于提取的信息，生成具体的提问，激活前额叶皮层进行语义生成和规划。

8. DIKWP 模型的实验验证与未来工作

(1) 实验设计

功能性磁共振成像(fMRI)：

目标：实时监测大脑在处理 DIKWP 模型各元素时的活动情况。

方法：让被试者进行特定任务，如描述症状、听取提问、生成回答等，使用 fMRI 记录脑区活动。

脑电图(EEG)：

目标：记录大脑在处理 DIKWP 模型各元素时的电活动。

方法：让被试者执行与 DIKWP 模型相关的任务，使用 EEG 记录大脑的电活动模式。

经颅磁刺激(TMS)：

目标：验证特定脑区在 DIKWP 模型中各元素处理中的作用。

方法：对特定脑区进行 TMS 干扰，观察对任务执行的影响。

(2) 未来研究方向

跨学科合作：结合认知科学、语言学、计算机科学和神经科学，推动 DIKWP 模型的跨学科研究和应用。

模型优化：不断优化和改进 DIKWP 模型，使其在不同应用场景中的表现更加出色和高效。

实际应用测试：在实际应用中测试和验证 DIKWP 模型的有效性，收集用户反馈，进一步改进模型和应用系统。

教育与培训：通过教育和培训，推广 DIKWP 模型的理论和应用，提高相关领域研究人员和从业人员的认知和应用能力。

通过分析 DIKWP 模型的概念和语义定位，并结合科学发现和实验结果，我们展示了其在认知科学、神经科学和人工智能中的应用潜力。DIKWP 模型不仅提供了一个全面的框架，用于理解和处理自然语言中的复杂语义，还能够通过科学实验验证其有效性。未来，我们将继续探索 DIKWP 模型在更多领域的应用，为社会带来更多福祉。

DIKWP 模型在婴幼儿认知发展中的应用——从基础概念到语义形成：

婴幼儿如何从最初的感知逐步发展出基本的 DIKWP（数据、信

息、知识、智慧、意图)概念和语义。通过一步一步的论述,我们将透明化展示婴幼儿认知发展出这些概念和语义的原理和过程。

1、初始状态:感知输入

婴幼儿的认知发展始于感知输入,这些感知输入主要来自于视觉、听觉、触觉等感官。

(1) 感知数据的输入

视觉感知:婴幼儿看到一个红色的球。 d_{visual} =红色的球

听觉感知:婴幼儿听到球滚动的声音。 $d_{auditory}$ =滚动的声音

触觉感知:婴幼儿触摸到球的表面,感觉到它是光滑的。 $d_{tactile}$ =光滑的表面

这些感知输入构成了婴幼儿的初始数据(Data),即感知数据的集合:

$$D=\{d_{visual},d_{auditory},d_{tactile}\}$$

1) 感知数据到信息的转换

感知数据通过婴幼儿的大脑处理和整合,逐步转换为信息。这一过程中,婴幼儿对感知数据进行分类、标识和关联。

2) 感知数据分类和标识

视觉感知数据(红色的球)被分类为“颜色”和“形状”。 I_{visual} =(颜色:红色,形状:球形)

听觉感知数据(滚动的声音)被分类为“声音类型”和“声音来源”。 $I_{auditory}$ =(声音类型:滚动,声音来源:球)

触觉感知数据(光滑的表面)被分类为“质地”和“物体类型”。 $I_{tactile}$ =(质地:光滑,物体类型:球)

通过分类和标识,感知数据被组织成结构化的信息:

$$I=\{I_{visual},I_{auditory},I_{tactile}\}$$

(2) 信息到知识的形成

通过不断的感知和信息积累,婴幼儿开始在大脑中形成关于事物

的知识。这个过程涉及到信息的整合、模式识别和经验积累。

信息整合和模式识别

婴幼儿通过多次观察和体验，逐步认识到红色的球总是伴随着滚动的声音和光滑的表面。这些信息被整合在一起，形成了对球的初步知识。 $K_{ball}=\{\text{颜色: 红色, 形状: 球形, 声音类型: 滚动, 质地: 光滑}\}$

婴幼儿识别出这一模式，并将其与“球”这个概念关联起来。

$K=\{K_{ball}\}$

(3) 知识到智慧的积累

知识的积累和应用是智慧的基础。婴幼儿通过学习和实践，将知识应用于实际问题中，从而形成智慧。

知识应用和智慧积累

婴幼儿学会通过观察颜色和形状来识别球，并能预测其滚动行为。 $W_{ball}=\{\text{识别方法: 颜色+形状, 行为预测: 滚动}\}$

这种应用能力体现了婴幼儿在智慧(Wisdom)上的发展。 $W=\{W_{ball}\}$

(4) 意图的形成和实现

在智慧的基础上，婴幼儿逐步形成了目标和计划，即意图。这个过程包括目标设定、计划制定和行动实施。

目标设定和计划制定

婴幼儿设定了玩球的目标，并制定了具体的行动计划。 $P_{ball}=\{\text{目标: 玩球, 计划: 推球、追球}\}$

这些目标和计划构成了意图(Purpose)。 $P=\{P_{ball}\}$

通过上述步骤，婴幼儿从最初的感知输入逐步发展出基本的 DIKWP 概念和语义。我们在下一部分将进一步详细分析这些概念和语义在不同认知活动中的具体表现和机制。

在下面的日记中，我们将继续详细分析婴幼儿在认知发展过程中，如何通过 DIKWP 模型形成“相同”、“不同”、“完整”等基本语义，以及这些概念在认知活动中的具体表现和机制。

2、基本语义的形成：从感知到认知

婴幼儿在认知发展过程中，通过对感知数据的处理和整合，逐步形成了基本的语义。这些语义的形成是认知活动的核心部分。

(1) “相同”的语义形成

感知输入与比较

婴幼儿通过多次接触相同的物体，逐步学会了识别相同的特征。

视觉感知：婴幼儿多次看到红色的球。

$d_{visual1}$ =红色的球

$d_{visual2}$ =红色的球

数据比较：比较两个视觉感知数据： $d_{visual1}=d_{visual2}$

因此，婴幼儿识别出这两个物体是“相同”的。

信息确认

信息分类与标识：

$I_{visual1}$ =(颜色：红色,形状：球形)

$I_{visual2}$ =(颜色：红色,形状：球形)

信息比较： $I_{visual1}=I_{visual2}$ 婴幼儿确认这两个物体在信息上也是“相同”的。

知识整合

知识整合与模式识别：

K_{ball1} ={颜色：红色,形状：球形,声音类型：滚动,质地：光滑}

K_{ball2} ={颜色：红色,形状：球形,声音类型：滚动,质地：光滑}

知识比较： $K_{ball1}=K_{ball2}$ 婴幼儿在知识面上确认这两个球是“相同”的。

智慧应用

智慧应用：婴幼儿知道红色的球可以滚动并且触感光滑。

$W_{ball1}=W_{ball2}$

意图实现

意图设定与实现：婴幼儿设定了玩球的目标，并成功实现了目标。

$$P_{ball1}=P_{ball2}$$

通过上述步骤，婴幼儿形成了“相同”的基本语义。

(2) “不同”的语义形成

1) 感知输入与比较

婴幼儿通过接触不同的物体，学会了识别不同的特征。

视觉感知：婴幼儿看到红色的球和蓝色的方块。

$d_{visual1}$ =红色的球

$d_{visual2}$ =蓝色的方块

数据比较

比较两个视觉感知数据：

$$d_{visual1} \neq d_{visual2}$$

因此，婴幼儿识别出这两个物体是“不同”的。

2) 信息确认

信息分类与标识：

$I_{visual1}$ =(颜色：红色,形状：球形)

$I_{visual2}$ =(颜色：蓝色,形状：方块)

信息比较： $I_{visual1} \neq I_{visual2}$ 婴幼儿确认这两个物体在信息上也是“不同”的。

3) 知识整合

知识整合与模式识别：

K_{ball} ={颜色：红色,形状：球形,声音类型：滚动,质地：光滑}

K_{block} ={颜色：蓝色,形状：方块,声音类型：静止,质地：粗糙}

知识比较： $K_{ball} \neq K_{block}$ 婴幼儿在知识面上确认这两个物体是“不同”的。

4) 智慧应用

智慧应用：婴幼儿知道红色的球可以滚动，而蓝色的方块不能。

$W_{ball} \neq W_{block}$

5) 意图实现

意图设定与实现：婴幼儿设定了不同的目标和计划来玩球和方块。 $P_{ball} \neq P_{block}$

通过上述步骤，婴幼儿形成了“不同”的基本语义。

(3) “完整”的语义形成

1) 感知输入与整合

婴幼儿通过感知多个属性，逐步理解“完整”的概念。

视觉感知：婴幼儿看到一个完整的红色球。 d_{visual} =红色的球

听觉感知：婴幼儿听到球滚动的声音。 $d_{auditory}$ =滚动的声音

触觉感知：婴幼儿触摸到球的表面，感觉到它是光滑的。 $d_{tactile}$ =光滑的表面

数据整合

感知数据的完整性： $D=\{d_{visual}, d_{auditory}, d_{tactile}\}$

2) 信息确认

信息分类与标识： I_{visual} =(颜色：红色,形状：球形)

$I_{auditory}$ =(声音类型：滚动,声音来源：球)

$I_{tactile}$ =(质地：光滑,物体类型：球)

信息整合： $I=\{I_{visual}, I_{auditory}, I_{tactile}\}$

3) 知识整合

知识整合与模式识别： $K_{ball}=\{\text{颜色：红色,形状：球形,声音类型：滚动,质地：光滑}\}$

4) 智慧应用

智慧应用：婴幼儿知道红色的球可以滚动，且触感光滑。 $W_{ball}=\{\text{识别方法：颜色+形状,行为预测：滚动}\}$

5) 意图实现

意图设定与实现：婴幼儿设定了玩完整球的目标，并成功实现了目标。 $P_{ball}=\{\text{目标：玩球,计划：推球、追球}\}$

通过上述步骤，婴幼儿形成了“完整”的基本语义。总结：婴儿感知输入和初步数据处理如表 1-16 所示。信息的生成和处理如表 1-17 所示。知识的抽象和确认如表 1-18 所示。智慧的应用和综合决策如表 1-19 所示。意图的形成和执行如表 1-20 所示。

表 1-16 感知输入和初步数据处理

DIKWP 元素	感知类型	具体感知内容	数据处理	数学表达
数据	视觉	看到红色的球	记录视觉数据：颜色（红色），形状（球形）	$D_1=\{\text{颜色:红色,形状:球形}\}$
	听觉	听到球滚动的声音	记录听觉数据：声音类型（滚动）	$D_2=\{\text{声音类型:滚动}\}$
	触觉	感受到球的光滑表面	记录触觉数据：质地（光滑）	$D_3=\{\text{质地:光滑}\}$

表 1-17 信息的生成和处理

DIKWP 元素	感知类型	数据分类与整合	信息处理及其结果	数学表达
信息	视觉、听觉、触觉	颜色：红色，形状：球形，声音类型：滚动，质地：光滑	将感知数据分类整合为关于球的信息	$I=f(D_1,D_2,D_3)=\{\text{颜色:红色,形状:球形,声音类型:滚动,质地:光滑}\}$

表 1-18 知识的抽象和确认

DIKWP 元素	感知类型	信息抽象与理解	知识生成及其应用	数学表达
知识	视觉、听觉、触觉	红色的球可以滚动，表面光滑	通过观察和体验，婴幼儿抽象出红色球的基本属性和行为	$K=\{\text{球的颜色:红色,形状:球形,声音类型:滚动,质地:光滑,行为:滚动}\}$

表 1-19 智慧的应用和综合决策

DIKWP 元素	感知类型	知识应用与综合 考虑	智慧生成及其决策	数学表达
智慧	视觉、听觉、触觉	红色的球适合玩耍，滚动时需谨慎	综合考虑玩耍时的安全和乐趣，婴幼儿形成关于如何玩红色球的智慧决策	$W=f(K)=\{\text{适合玩耍,滚动时需谨慎}\}$

表 1-20 意图的形成和执行

DIKWP 元素	感知类型	目标设定与计划	意图生成及其执行	数学表达
意图	视觉、听觉、触觉	玩球（目标），推球、追球（计划）	根据形成的智慧和知识，婴幼儿设定玩球的目标并执行相应的计划	$P=\{\text{目标:玩球,计划:推球、追球}\}$

1.6.3 概念空间 (Concept Space, ConC)

概念空间是指认知主体对外部世界的概念化表达，包括概念的定义、特征和关系^{[10][77]}。概念空间是通过语言和符号系统进行表达的。例如，“汽车”在概念空间中可以定义为一种具有四个轮子、能够载客或载货的交通工具。

概念空间是由一系列相关概念构成的集合，借助特定的属性和关系互相连接，根据概念间关系的对称性对应有向图或无向图^[78]。

图表示： $Graph_{ConC}=(V_{ConC}, E_{ConC})$ ，其中 V_{ConC} 是概念的节点集合， E_{ConC} 是表示概念之间关系的边集合。

在概念空间中，每个概念 $v \in V_{ConC}$ 都具有一组属性 $A(v)$ 和与其他概念的关系 $R(v, v)$ 。

属性： $A(v)=\{a_1(v), a_2(v), \dots, a_n(v)\}$ ，其中每个 $a_i(v)$ 代表概念 v 的一个属性。

关系： $R(v, v')$ 表示概念 v 和 v' 之间的关系。如果图是有向的，则 $R(v, v')$ 不等同于 $R(v, v)$ ；如果图是无向的，则它们表示相同的关系。

在概念空间内对应一系列操作来查询、添加或修改概念及其关系：

查询操作： $Q(V_{ConC}, E_{ConC}, q) \rightarrow \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ ，根据查询条件 q (如特定的属性或关系) 返回满足条件的概念集合。

添加操作: $Add(V_{ConC}, v)$, 将新概念 v 添加到概念集合 V_C 中。

修改操作: $Update(V_{ConC}, v, A(v))$, 更新概念 v 的属性集合 $A(v)$ 。

在 DIKWP 模型中, 概念空间为数据、信息、知识、智慧和意图的分类和组织提供了结构化框架^{[4][43][45]}。通过映射 DIKWP 各成分到概念空间, 能有效解析成分之间的复杂关系。例如, 通过查询操作 Q , 找到与特定数据或知识相关的所有概念, 进而推导出新的信息或智慧。

概念空间是认知主体将语义空间中的语义内容符号化为自然语言概念的过程。

符号化表达:

语言符号: 通过语言符号将语义内容转化为自然语言概念, 包括单词、短语和句子等。这些语言符号通过语法规则和语义规则进行组织和排列, 形成可理解的自然语言表达。

概念表示: 通过概念表示将语义内容具体化, 使其能够被传递和交流。概念表示包括概念的定义、属性和关系, 通过符号化过程将其明确和具体化。

自然语言生成:

语法分析: 通过语法分析将语义内容转化为符合语法规则的自然语言表达。语法分析包括句法结构的生成和语法规则的应用, 确保生成的自然语言表达符合语法规范。

语义解析: 通过语义解析将自然语言表达转化为具体的语义内容, 确保语言表达的准确性和一致性。语义解析包括词汇的语义解释、句子的语义分析等。

语言生成: 通过语言生成机制, 将语义内容转化为自然语言输出, 确保信息的传递和交流。语言生成包括文本生成、对话生成等, 通过语言生成机制将复杂的语义内容具体化和语言化。

1.6.4 认知空间 (Cognitive Space, ConN)

认知空间是一个多维和动态的处理环境，其中数据、信息、知识、智慧和意图通过个体或系统的特定认知处理函数集合(R)被转换为具体的理解和行动^{[10][77][78][80]}。每个认知处理函数(f_{ConN_i})将输入空间($Input_i$)中的数据或信息通过一系列的子步骤（如数据预处理、特征提取、模式识别、逻辑推理和决策制定）转化为输出空间($Output_i$)中的成果，如信息分类、概念形成、意图确定或行动计划的设定^[81]。

函数集合： $R = \{f_{ConN_1}, f_{ConN_2}, \dots, f_{ConN_n}\}$ 其中，每个函数 $f_{ConN_i}: Input_i \rightarrow Output_i$ 表示一个特定的认知处理过程， $Input_i$ 是输入空间， $Output_i$ 是输出空间。

输入空间 $Input_i$ ：代表感知到的数据或信息的集合，可以是来自外部世界的观察、从其他系统接收的信号或内部生成的数据。

输出空间 $Output_i$ ：代表处理后的理解或决策的集合，它可以包括对信息的分类、概念的形成、意图的确定或行动计划的设定。

认知处理过程：

每个认知处理函数 f_{ConN_i} 可以进一步细化为一系列子步骤，包括数据预处理、特征提取、模式识别、逻辑推理和决策制定等。这些子步骤共同构成了从原始数据到最终输出的完整认知路径^[78]。

子步骤表示：对于每个 f_{ConN_i} ，可以表示为 $f_{ConN_i} = f_{ConN_i}^{(5)} \circ f_{ConN_i}^{(4)} \circ \dots \circ f_{ConN_i}^{(1)}(Input_i)$ ，其中 $f_{ConN_i}^{(j)}$ 代表第 j 个子步骤的处理函数， $\circ$ 代表函数的复合。

在 DIKWP 模型中，认知空间将数据、信息、知识、智慧和意图通过个体或系统独特的认知过程转换为具体的理解和行动^[79]。借助调用不同的认知处理函数，系统可以针对不同类型的输入实施最适宜的处理策略，实现高效精确的决策。

认知空间包括认知主体的生理与神经认知活动到有意识和无意识的语义形成过程。

生理与神经认知活动：

基础生理活动：包括神经元的活动、突触连接等生理过程，这些构成了认知的物理基础。神经元的活动模式和突触连接通过电信号和化学信号传递信息，形成认知过程的生理基础。

神经网络的功能：通过神经网络的功能，认知主体能够进行感知、记忆、学习和推理等认知活动。神经网络通过连接模式和突触强度的调整，进行信息的存储和处理。

有意识和无意识的语义形成：

无意识认知过程：包括自动化的认知处理，如模式识别和直觉判断。这些过程在认知主体不需有意识的情况下进行，通过长期经验和学习形成。

有意识认知过程：包括主动的思维和推理过程，如逻辑推理、问题解决和决策制定。这些过程需要认知主体的有意识参与，通过理性分析和思考进行语义的形成和处理。

1.6.5 语义空间 (Semantic Space, SemA)

语义空间是指概念在认知主体大脑中的语义关联网络，包括概念之间的语义关系和联想。语义空间是通过认知主体的经验和知识积累形成的^{[4][10][81]}。例如，对于“汽车”这个概念，语义空间中可能包括“驾驶”、“交通工具”、“油耗”等相关联的语义。

语义空间是由一系列语义单元构成的集合，这些单元借助特定的关联和依赖关系相互连接，共同构成了信息和知识的客观化表示^[82]。语义空间普遍接受的概念和语言规则实现了意义的传递和交流。

图表示： $Graph_{SemA}=(V_{SemA}, E_{SemA})$ ，其中 V_{SemA} 代表语义单元（词汇、句子等）， E_{SemA} 代表语义单元之间的关联和依赖关系。

语义单元：每个语义单元 $v \in V_{SemA}$ 代表了可以独立表达意义的最小单元或概念。

关系：边 $e \in E_{SemA}$ 代表了语义单元之间的语义关联或逻辑依赖，

如同义、反义、上下位、因果等关系。

在语义空间对应一系列操作来查询、添加或修改语义单元及其关系：

查询操作： $Query(V_{SemA}, E_{SemA}, q) \rightarrow \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ ，根据查询条件 q 返回满足条件的语义单元集合。

添加操作： $Add(V_{SemA}, v)$ ，将新的语义单元 v 添加到集合 V_{SemA} 中。

修改操作： $Update(E_{SemA}, v, v', e)$ ，更新或添加语义单元 v 和 v' 之间的关系 e 。

语义空间不仅提供利益相关者与 DIKWP 表达的认知共享语言体系，还支撑 DIKWP 成分之间的转换处理的语义一致性^[81]。借助语义单元和它们之间的关系，不同主体之间能够准确地传递和解释复杂的服务交互认知内容。

语义空间是认知主体将认知空间中形成的语义内容进行系统化和结构化的表达。

语义内容表达：

语义网络：通过语义网络将认知空间中的语义内容结构化表达。语义网络包括节点和边，其中节点表示概念或实体，边表示概念或实体之间的语义关系。

语义关联：通过语义关联将不同概念或实体之间的关系明确和清晰地表达。语义关联可以是同义、反义、上下位关系等，帮助认知主体理解和处理复杂的信息。

语义处理与转换：

语义匹配：通过语义匹配机制，将输入的语义内容与已有的语义网络进行匹配，识别和提取相关的语义信息。

语义推理：通过语义推理机制，基于已有的语义网络进行推理和演绎，生成新的语义内容和关系。

语义生成：通过语义生成机制，将语义内容转化为可以传递和交流的信息，确保语义内容的准确性和一致性。

1.6.6 DIKWP 图谱

A. 数据图谱(DG)

在网状模型中，数据图谱^[83-89]不仅是信息加工的起点，也是知识、智慧或意图反馈调整的结果。数据图谱 DG 借助转换函数 T_{ID} , T_{KD} , T_{WD} , T_{PD} 等接收来自信息、知识、智慧和意图的输入，实现动态更新和调整^[87]。

T_{XY} : $YG \rightarrow XG$ ，其中， $X, Y \in \{D, I, K, W, P\}$ 且 $X \neq Y$ ，表示从图谱 Y 到图谱 X 的转换。

B. 信息图谱(IG)

信息图谱^[83-89]为二元组 $IG = (V_I, E_I)$ ，其中 V_I 是信息节点的集合， E_I 是基于信息间语义关系的边集合^[84]。信息图谱不仅由数据图谱 DG 生成，还受到知识图谱 KG 、智慧图谱 WG 、意图图谱 PG 的调整和重构：

$DG \xrightarrow{T_{DI}} IG$ ：数据到信息的转换。

$KG \xrightarrow{T_{KI}} IG, WG \xrightarrow{T_{WI}} IG, PG \xrightarrow{T_{PI}} IG$ ：知识、智慧和意图对信息的调整。

其中， T_{XY} 表示从图谱 X 到图谱 Y 的转换函数。

C. 知识图谱(KG)

知识图谱^[83-89]为 $KG = (V_K, E_K)$ ，其中 V_K 代表知识节点， E_K 代表知识节点之间的关系。知识图谱整合信息形成，同时影响数据的解读、信息的生成和智慧的应用^[94]：

$IG \xrightarrow{T_{IK}} KG$ ：信息到知识的转换。

$KG \xrightarrow{T_{KD}} DG, KG \xrightarrow{T_{KI}} IG, KG \xrightarrow{T_{KW}} WG$ ：知识对数据、信息和智慧的影响^[95]。

D. 智慧图谱(WG)

智慧图谱^[83-89]为 $WG = (V_w, E_w)$ ，其中 V_w 是智慧的节点， E_w 表示智慧节点间的连接。智慧图谱综合知识、数据和信息来指导决策，并能反馈影响知识的形成和信息的解释^{[87][88]}：

$KG \xrightarrow{T_{KW}} WG$ ：知识到智慧的转换。

$WG \xrightarrow{T_{WK}} KG, WG \xrightarrow{T_{WI}} IG$ ：智慧对知识和信息的反馈影响。

E. 意图图谱(PG)

意图图谱^{[4][43][44]}为 $PG = (V_p, E_p)$ ，其中 V_p 代表目标和实现路径的节点， E_p 代表实现这些目标的策略或步骤。意图图谱由数据、信息、知识和智慧共同构建，并能反向影响这些成分：

$DG \xrightarrow{T_{DP}} PG, IG \xrightarrow{T_{IP}} PG, KG \xrightarrow{T_{KP}} PG, WG \xrightarrow{T_{WP}} PG$ ：数据、信息、知识和智慧到意图的形成。

$PG \xrightarrow{T_{PD}} DG, PG \xrightarrow{T_{PI}} IG, PG \xrightarrow{T_{PK}} KG$ ：意图对数据、信息和知识的反向影响^[96]。

DIKWP 图谱化体系将数字世界和认知世界的元素映射到五个主要成分： DG 、 IG 、 KG 、 WG 、 PG ^[97]。每个图谱进一步细分为三个层面的映射：语义层面，概念层面和实例层面。因此，每个图谱 $g \in G$ 为三元组映射：

$g: S \times C \times I$ ，其中 G 代表图谱集合， S 代表语义层面集合， C 代表概念集合， I 代表实例集合。

DIKWP 图谱间的交互借助内容模型和认知模型来实现，用函数 f 表示，将某一层面或类型的图谱映射转换为另一层面或类型的图谱：
 $f: G \times G \rightarrow G$

在概念空间下，实现跨 DIKWP（数据、信息、知识、智慧、意图）资源的转换范式，如图 1-4 所示，涉及将 DIKWP 各维度分别映射至相应的处理方法：数据至概念统计分析，信息借助格论的偏序结构进行建模与分析，知识通过多种推理技术深化，智慧体现在多目标价值的权衡决策中，而意图则关联于目标与问题的精确建模^[98]。这一

过程中，通过系统地整合单一 DIKWP 类型的处理手段，并促进它们之间两两的交互组合，建立起一个跨越不同类型 DIKWP 资源的综合处理映射体系。DIKWP 意图驱动经验转化范式与数学逻辑形式处理结合如图 1-5 所示。

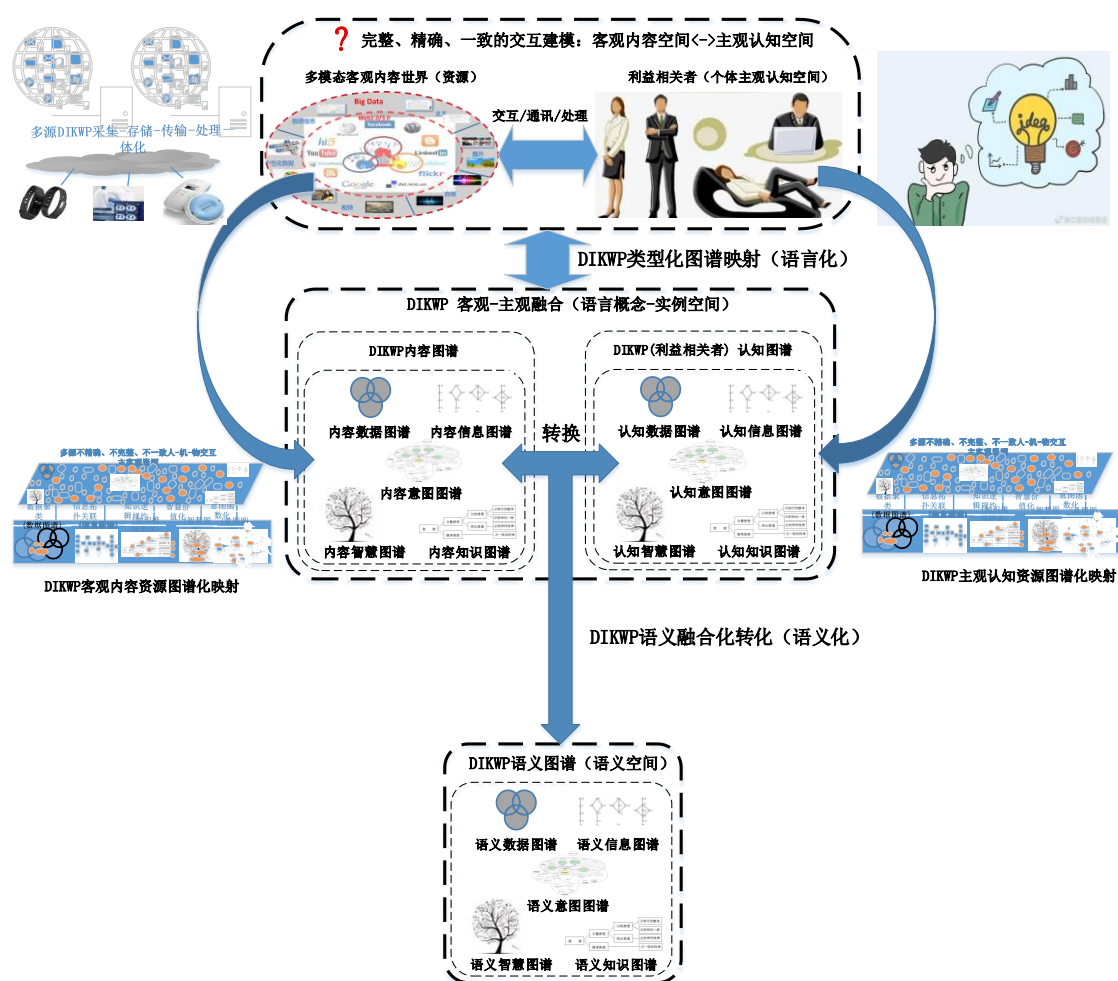


图 1-4 概念空间 DIKWP 图谱与图谱关系转换^[99]



图 1-5 DIKWP 意图驱动经验转化范式与数学逻辑形式处理结合

1.7 本章小结

在本章中，详细探讨了数据-信息-知识-智慧-意图(DIKWP)模型的各个组成部分，从基本概念和语义到各自的定义对比分析，以及它们在不同空间中的表现和作用。每一部分都从其基本的理论出发，深入分析了在现代信息科学和人工智能中的应用和意义。

此外，引入了概念空间、认知空间和语义空间的定义，这些空间是理解 DIKWP 模型在更广阔领域中应用的关键。通过这些详细的分析，DIKWP 图谱被构建出来，本章提供了一个清晰的视角，以理解这些概念是如何相互关联并共同作用于现代科技和社会实践中的。

参考文献

- [1] Duan Y, Sun X, Che H, et al. Modeling data, information and knowledge for security protection of hybrid IoT and edge resources[J]. Ieee Access, 2019, 7: 99161-99176.
- [2] Ackoff R L. From data to wisdom[J]. Journal of applied systems analysis, 1989, 16(1): 3-9.
- [3] Cooper P. Data, information, knowledge and wisdom. Anaesthesia & Intensive Care Medicine 15.1 (2014): 44-45.
- [4] Mei Y, Duan Y. The DIKWP (data, information, knowledge, wisdom, purpose) revolution: A new horizon in medical dispute resolution[J]. Applied Sciences, 2024, 14(10): 3994.
- [5] Liew A. Understanding data, information, knowledge and their inter-relationships[J]. Journal of knowledge management practice, 2007, 8(2): 1-16.
- [6] Tuomi I. Data is more than knowledge: Implications of the reversed knowledge hierarchy for knowledge management and organizational memory. Proceedings of the 32nd Annual Hawaii International Conference on Systems Sciences. 1999. HICSS-32. Abstracts and CD-ROM of Full Papers. IEEE, 1999.
- [7] Nonaka I. The knowledge-creating company[M]//The economic impact of knowledge. Routledge, 2009: 175-187.
- [8] Polanyi M. The tacit dimension[M]//Knowledge in organisations. Routledge, 2009: 135-146.
- [9] Snowden D J, Boone M E. A leader's framework for decision making[J]. Harvard business review, 2007, 85(11): 68.
- [10] Wu K, and Duan Y. Modeling and resolving uncertainty in

- DIKWP model. *Applied Sciences*, 2024,14(11): 4776.
- [11] Cleveland H. Information as a resource[J]. *Futurist*, 1982, 16(6): 34-39.
- [12] Floridi L. *Information: A very short introduction*[M]. OUP Oxford, 2010.
- [13] Fauconnier G, Turner M. Conceptual integration networks[J]. *Cognitive science*, 1998, 22(2): 133-187.
- [14] Lakoff G, Johnson M. *Metaphors we live by*[M]. University of Chicago press, 2008.
- [15] Fauconnier G, Turner M. *The way we think: Conceptual blending and the mind's hidden complexities*[M]. Basic books, 2008.
- [16] Choo C W. The knowing organization: How organizations use information to construct meaning, create knowledge and make decisions[J]. *International journal of information management*, 1996, 16(5): 329-340.
- [17] Dretske F I. *Knowledge and the flow of information*[J]. MIT Press.1981.
- [18] Boisot M H. *Knowledge assets: Securing competitive advantage in the information economy*[M]. OUP Oxford, 1998.
- [19] Cross R, Sproull L. More than an answer: Information relationships for actionable knowledge[J]. *Organization science*, 2004, 15(4): 446-462.
- [20] McDermott R. Why information technology inspired but cannot deliver knowledge management[J]. *California management review*, 1999, 41(4): 103-117.
- [21] Davenport T H, Prusak L. *Working knowledge: How*

- organizations manage what they know[M]. Harvard Business Press, 1998.
- [22] Alavi M, Leidner D E. Knowledge management and knowledge management systems: Conceptual foundations and research issues[J]. MIS quarterly, 2001: 107-136.
- [23] Grant R M. Toward a knowledge - based theory of the firm[J]. Strategic management journal, 1996, 17(S2): 109-122.
- [24] Nonaka I. A dynamic theory of organizational knowledge creation[J]. Organization science, 1994, 5(1): 14-37.
- [25] Blackler F. Knowledge, knowledge work and organizations: An overview and interpretation[J]. Organization studies, 1995, 16(6): 1021-1046.
- [26] Spender J C. Making knowledge the basis of a dynamic theory of the firm[J]. Strategic management journal, 1996, 17(S2): 45-62.
- [27] Teece D J. Capturing value from knowledge assets: The new economy, markets for know-how, and intangible assets[J]. California management review, 1998, 40(3): 55-79.
- [28] Tsoukas H, Vladimirou E. What is organizational knowledge?[J]. Journal of management studies, 2001, 38(7): 973-993.
- [29] Schultze U, Leidner D E. Studying knowledge management in information systems research: discourses and theoretical assumptions[J]. MIS quarterly, 2002: 213-242.
- [30] Brown J S, Duguid P. Organizational learning and communities-of-practice: Toward a unified view of working, learning, and innovation[J]. Organization science, 1991, 2(1): 40-57.

- [31] Kogut B, Zander U. Knowledge of the firm, combinative capabilities, and the replication of technology[J]. Organization science, 1992, 3(3): 383-397.
- [32] Wenger E. Communities of practice: Learning, meaning, and identity[M]. Cambridge university press, 1999.
- [33] Hansen M T, Nohria N, Tierney T. What's your strategy for managing knowledge?[M]//The knowledge management yearbook 2000-2001. Routledge, 2013: 55-69.
- [34] Von Krogh G, Ichijo K, Nonaka I. Enabling knowledge creation: How to unlock the mystery of tacit knowledge and release the power of innovation[M]. Oxford university press, 2000.
- [35] Alavi M, Leidner D. Knowledge management systems: issues, challenges, and benefits[J]. Communications of the Association for Information systems, 1999, 1(1): 7.
- [36] Cook S D N, Brown J S. Bridging epistemologies: The generative dance between organizational knowledge and organizational knowing[J]. Organization science, 1999, 10(4): 381-400.
- [37] Barton D L. Wellsprings of knowledge: Building and sustaining the sources of innovation[M]. Harvard Business School, 1995.
- [38] McElroy M W. The new knowledge management[M]. Routledge, 2010.
- [39] Von Krogh G, Ichijo K, Nonaka I. Enabling knowledge creation: How to unlock the mystery of tacit knowledge and release the power of innovation[M]. Oxford university press, 2000.
- [40] Ackoff R L. Ackoff's best: His classic writings on management[M]. John Wiley & Sons, 1999.

- [41] Churchman C W. The design of inquiring system[J]. NY: Basic Books, 1971.
- [42] Bateson G. Steps to an ecology of mind: Collected essays in anthropology, psychiatry, evolution, and epistemology[M]. University of Chicago press, 2000.
- [43] Mei Y, Duan Y, Chen L, et al, Purpose driven disputation modeling, analysis and resolution based on DIKWP graphs, 2022 IEEE 24th Int Conf on High Performance Computing & Communications; 8th Int Conf on Data Science & Systems; 20th Int Conf on Smart City; 8th Int Conf on Dependability in Sensor, Cloud & Big Data Systems & Application (HPCC/DSS/SmartCity/DependSys), Hainan, China, 2022, pp. 2118-2125, doi: 10.1109/HPCC-DSS-SmartCity-DependSys57074.2022.00314.
- [44] Guo Z, Duan Y, Chen L, et al, Purpose driven DIKW modeling and analysis of meteorology and depression, 2022 IEEE 24th Int Conf on High Performance Computing & Communications; 8th Int Conf on Data Science & Systems; 20th Int Conf on Smart City; 8th Int Conf on Dependability in Sensor, Cloud & Big Data Systems & Application (HPCC/DSS/SmartCity/DependSys), Hainan, China, 2022, pp. 2126-2133, doi: 10.1109/HPCC-DSS-SmartCity-DependSys57074.2022.00315.
- [45] Liu Y, Wang W, Wang W, et al. Purpose-driven evaluation of operation and maintenance efficiency and safety based on DIKWP[J]. Sustainability, 2023, 15(17): 13083.
- [46] Mei Y, Duan Y, Yu L, et al. Purpose driven biological lawsuit

- p modeling and analysis based on DIKWP[C]//International Conference on Collaborative Computing: Networking, Applications and Worksharing. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022: 250-267.
- [47] Huang Y, Duan Y, Yu L, et al. Purpose driven modelling and analysis for smart table fill and design based on DIKW[C]//2022 IEEE 24th Int Conf on High Performance Computing & Communications; 8th Int Conf on Data Science & Systems; 20th Int Conf on Smart City; 8th Int Conf on Dependability in Sensor, Cloud & Big Data Systems & Application (HPCC/DSS/SmartCity/DependSys). IEEE, 2022: 2134-2141.
- [48] Searle J R. Intentionality: An essay in the philosophy of mind[M]. Cambridge university press, 1983.
- [49] Bratman M. Intention, plans, and practical reason[J]. Harvard University Press. 1987.
- [50] Hu T, Duan Y, Mei Y. Purpose driven balancing of fairness for emotional content transfer over DIKW[C]//2021 IEEE 23rd Int Conf on High Performance Computing & Communications; 7th Int Conf on Data Science & Systems; 19th Int Conf on Smart City; 7th Int Conf on Dependability in Sensor, Cloud & Big Data Systems & Application (HPCC/DSS/SmartCity/DependSys). IEEE, 2021: 2074-2081.
- [51] Huang Y, Duan Y. Fairness modelling, checking and adjustment for purpose driven content filling over DIKW[C]//2021 IEEE 23rd Int Conf on High Performance Computing & Communications; 7th Int Conf on Data Science & Systems; 19th

- Int Conf on Smart City; 7th Int Conf on Dependability in Sensor, Cloud & Big Data Systems & Application (HPCC/DSS/SmartCity/DependSys). IEEE, 2021: 2316-2321.
- [52] Huang Y, Duan Y. Towards purpose driven content interaction modeling and processing based on DIKW[C]//2021 IEEE World Congress on Services (SERVICES). IEEE, 2021: 27-32.
- [53] Li Y, Duan Y, Maamar Z, et al. Swarm differential privacy for purpose-driven data-information-knowledge-wisdom architecture[J]. Mobile Information Systems, 2021, 2021(1): 6671628.
- [54] Fan K, Duan Y. Purpose computation-oriented modeling and transformation on DIKW architecture[J]. Intelligent Processing Practices and Tools for E-Commerce Data, Information, and Knowledge, 2022: 45-63.
- [55] Li Y, Li Z, Duan Y, et al. Physical artificial intelligence (PAI): The next-generation artificial intelligence[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2023, 24(8): 1231-1238.
- [56] Tomasello M. Why we cooperate[M]. MIT press, 2009.
- [57] Dreyfus H L. What computers still can't do: A critique of artificial reason[M]. MIT press, 1992.
- [58] Frankfurt H G. The importance of what we care about: Philosophical essays[M]. Cambridge University Press, 1988.
- [59] Schank R C, Abelson R P. Scripts, plans and goals[C]//Proceedings of the 4th International Joint Conference on Artificial Intelligence. IJCAI. 1975, 1.
- [60] Fodor J A. Representations: Philosophical essays on the

- p foundations of cognitive science[M]. Mit Press, 1983.
- [61] Dennett D C. Précis of the intentional stance[J]. Behavioral and brain sciences, 1988, 11(3): 495-505.
 - [62] Yu L, Duan Y. Trusted service provider discovery based on data, information, knowledge, and wisdom[J]. International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering, 2021, 31(01): 3-19.
 - [63] Kim J Y, Hussain W, Iqbal M, et al. Intelligent processing practices and tools for E-commerce data, information, and knowledge[M]. Springer, 2022.
 - [64] Yu L, Duan Y. A reverse modification method for binary code and data[J]. Sensors, 2022, 22(20): 7714.
 - [65] Yu L, Duan Y, Li K C. A real-world service mashup platform based on data integration, information synthesis, and knowledge fusion[J]. Connection Science, 2021, 33(3): 463-481.
 - [66] Duan Y, Shao L, Yang X, et al. Data, information, and knowledge-driven manipulation between strategical planning and technical implementation for wireless sensor network construction[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2017, 13(11): 1550147717743700.
 - [67] Rolls E, Deco G. Computational neuroscience of vision[M]. Oxford university press, 2001.
 - [68] Zatorre R J, Salimpoor V N. From perception to pleasure: music and its neural substrates[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(supplement_2): 10430-10437.
 - [69] Smith E E, Jonides J. Storage and executive processes in the

- frontal lobes[J]. Science, 1999, 283(5408): 1657-1661.
- [70] Miller E K, Cohen J D. An integrative theory of prefrontal cortex function[J]. Annual review of neuroscience, 2001, 24(1): 167-202.
- [71] Schultz W, Dayan P, Montague P R. A neural substrate of prediction and reward[J]. Science, 1997, 275(5306): 1593-1599.
- [72] Goldman-Rakic P S. Cellular basis of working memory[J]. Neuron, 1995, 14(3): 477-485.
- [73] Cohen J D, Servan-Schreiber D. Context, cortex, and dopamine: a connectionist approach to behavior and biology in schizophrenia[J]. Psychological review, 1992, 99(1): 45.
- [74] Marg E. DESCARTES'ERROR: emotion, reason, and the human brain[J]. Optometry and Vision Science, 1995, 72(11): 847-848.
- [75] Braver T S, Barch D M. A theory of cognitive control, aging cognition, and neuromodulation[J]. Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 2002, 26(7): 809-817.
- [76] Dehaene S, Changeux J P. Reward-dependent learning in neuronal networks for planning and decision making[J]. Progress in brain research, 2000, 126: 217-229.
- [77] Duan Y. DIKWP model for semantic interaction analysis in cognitive, semantic and concept spaces. DOI: 10.13140/RG.2.2.14373.31202.https://www.researchgate.net/publication/381319330_DIKWP_Model_for_Semantic_Interaction_Analysis_in_Cognitive_Semantic_and_Concept_Spaces. 2024.
- [78] Duan Y. DIKWP model cognitive, semantic and conceptual spaces detailed definition and application. DOI:

10.13140/RG.2.2.29066.48326.

https://www.researchgate.net/publication/381310682_DIKWP_model_Cognitive_Semantic_and_Conceptual_Spaces_Detailed_Definition_and_Application. 2024.

- [79] Duan Y. DIKWP model completeness and coverage analysis of natural language concepts and semantics. DOI: 10.13140/RG.2.2.17728.75522.https://www.researchgate.net/publication/381319245_DIKWP_Model_Completeness_and_Coverage_Analysis_of_Natural_Language_Concepts_and_Semantics
- [80] Duan Y. Beyond concept security to semantic security. DOI: 10.13140/RG.2.2.15431.30883.https://www.researchgate.net/publication/379642180_Beyond_Concept_Security_to_Semantic_Security. 2024.
- [81] Duan Y. DIKWP model as a semantic communication mechanism between man and machine. DOI: 10.13140/RG.2.2.27795.08486.https://www.researchgate.net/publication/381319332_DIKWP_Model_as_a_Semantic_Communication_Mechanism_between_Man_and_Machine. 2024.
- [82] Duan Y. Human natural language communication and large language models for semantic mechanisms. DOI: 10.13140/RG.2.2.34505.97120.
https://www.researchgate.net/publication/381318145_Human_Natural_Language_Communication_and_Large_Language_Models_for_Semantic_Mechanisms. 2024.
- [83] Hu S, Duan Y, Song M. Essence computation oriented multi-semantic analysis crossing multi-modal DIKW

- graphs[C]//International Conference on Collaborative Computing: Networking, Applications and Worksharing. Cham: Springer International Publishing, 2020: 320-339.
- [84] Duan Y, Shao L, Hu G. Specifying knowledge graph with data graph, information graph, knowledge graph, and wisdom graph[J]. International Journal of Software Innovation (IJSI), 2018, 6(2): 10-25.
- [85] Shao L, Duan Y, Zhou Z, et al. Learning planning and recommendation based on an adaptive architecture on data graph, information graph and knowledge graph[C]//Collaborative Computing: Networking, Applications and Worksharing: 13th International Conference, CollaborateCom 2017, Edinburgh, UK, December 11–13, 2017, Proceedings 13. Springer International Publishing, 2018: 323-332.
- [86] Shao L, Duan Y, Cui L, et al. A pay as you use resource security provision approach based on data graph, information graph and knowledge graph[C]//Intelligent Data Engineering and Automated Learning–IDEAL 2017: 18th International Conference, Guilin, China, October 30–November 1, 2017, Proceedings 18. Springer International Publishing, 2017: 444-451.
- [87] Shao L, Duan Y, Sun X, et al. Answering who/when, what, how, why through constructing data graph, information graph, knowledge graph and wisdom graph[C]//SEKE. 2017: 1-6.
- [88] Duan Y, Shao L, Hu G, et al. Specifying architecture of knowledge graph with data graph, information graph, knowledge

- graph and wisdom graph[C]//2017 IEEE 15th International Conference on SERA. IEEE, 2017: 327-332.
- [89] Shao L, Duan Y, Sun X, et al. Bidirectional value driven design between economical planning and technical implementation based on data graph, information graph and knowledge graph[C]//2017 IEEE 15th International Conference on SERA. IEEE, 2017: 339-344.
- [90] Wen J, Zhou Z, Wang Y, et al. Discovering crossing-workflow fragments based on activity knowledge graph[C]//On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM 2019 Conferences: Confederated International Conferences: CoopIS, ODBASE, C&TC 2019, Rhodes, Greece, October 21–25, 2019, Proceedings. Springer International Publishing, 2019: 515-532.
- [91] Elfaki A, Aljaedi A, Duan Y. Mapping ERD to knowledge graph[C]//2019 IEEE World Congress on Services (SERVICES). IEEE, 2019, 2642: 110-114.
- [92] Yu L, Duan Y, Zhang Y. Knowledge graph provision for heterogeneous service network[C]//2019 IEEE World Congress on Services (SERVICES). IEEE, 2019, 2642: 135-140.
- [93] Huang L, Duan Y, Sun X, et al. Enhancing uml class diagram abstraction with knowledge graph[C]//Intelligent Data Engineering and Automated Learning–IDEAL 2016: 17th International Conference, Yangzhou, China, October 12–14, 2016, Proceedings 17. Springer International Publishing, 2016.
- [94] Shao L, Duan Y, Zhu D, et al. Health service provision based on typed resources of data, information and knowledge[C]//2017

- IEEE 19th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom). IEEE, 2017: 1-6.
- [95] Duan Y, Hu G, Sun X, et al. Refinement on data, information and knowledge lifecycles towards service economics planning to services implementation[J]. International Journal of Networked and Distributed Computing, 2016, 4(4): 231-242.
- [96] Tang F, Duan Y, Wei J, et al, DIKWP artificial consciousness white box measurement standards framework design and practice, 2023 IEEE International Conference on HPCC/DSS/SmartCity/DependSys. 2023.
- [97] Wang Y, Duan Y, Wang M, et al, Resource adjustment processing on the DIKWP artificial consciousness diagnostic system, 2023 IEEE International Conference on HPCC/DSS/SmartCity/DependSys. 2023.
- [98] Wu K, Duan Y, Chen L, et al, Computer architecture and chip design for DIKWP artificial consciousness, 2023 IEEE International Conference on HPCC/DSS/SmartCity/DependSys, Melbourne, Australia, 2023.
- [99] Duan Y, Gong S. 基于 DIKWP 模型的概念-语义联动不确定性建模与分析处理 . <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.35079.41124>. 2024.

第2章 人工智能与人工意识

2.1 定义与概念

2.1.1 AI 与 AC 的定义与区别

人工智能(AI, Artificial Intelligence)指通过计算机系统实现的模拟或仿真人类智能的技术和方法。AI 系统能够执行需要人类智能的任务,如视觉识别、语音识别、决策制定和自然语言处理。AI 系统主要依赖数据(Data)、信息(Information)和知识(Knowledge)进行交互和处理^[1-3]。

人工意识(AC, Artificial Consciousness)^[1-4]指在 AI 的基础上进一步发展,使计算机系统具备类似人类意识的能力^[5-17]。AC 系统不仅能够处理数据、信息和知识,还能在智慧(Wisdom)和意图(Purpose)层次进行交互和决策。AC 系统旨在实现对行为背后价值观和意图的理解和传达,具备更高层次的认知能力和自主决策能力。

AI 与 AC 的区别主要表现在处理层次、目标导向、认知能力、可解释性和透明度和人机交互等方面的区别,具体区别如下:

1. 处理层次的区别:

AI: 主要在数据、信息和知识(DIK)层次进行交互和处理。AI 系统通过对大量数据的处理和分析,从中提取有意义的信息,并在此基础上形成知识。

AC: 在数据、信息、知识、智慧和意图(DIKWP)层次进行交互和处理。AC 系统不仅处理数据、信息和知识,还能够在更高层次上结合智慧和意图,进行综合决策和行为指导^[1]。

2. 目标导向的区别:

AI: 通常被设计为完成特定任务或目标,如图像识别、语音识别、自动驾驶等。AI 系统的行为和决策更多依赖预先设定的规则和模型。

AC: 不仅关注任务的完成, 还注重行为背后的意图和价值观。**AC** 系统通过意图驱动行为和决策, 能够在复杂环境中综合考虑伦理、道德和社会价值, 实现更加自主和灵活的决策^[1]。

3. 认知能力的区别:

AI: 具备一定的智能和认知能力, 但主要是被动处理和执行任务。**AI** 系统依赖于训练数据和预设模型, 其认知能力受到数据和模型的限制。

AC: 具备更高层次的认知能力, 能够理解和传达行为背后的价值观和意图^[6]。**AC** 系统能够通过不断学习和适应, 在认知过程中形成新的理解和知识。

4. 可解释性和透明度的区别:

AI: 传统的 **AI** 系统在决策过程中往往存在黑盒问题, 即难以解释其决策的具体过程和依据。**AI** 系统的透明度和可解释性相对较低。

AC: 强调决策过程的透明度和可解释性, 通过 **DIKWP** 模型的层次化处理, 确保每个决策步骤的意图和价值观演化公开可追溯。**AC** 系统在决策过程中能够综合考虑伦理、道德和社会价值, 使其决策更加可信和负责任。

5. 人机交互的区别:

AI: 人机交互主要集中在任务执行和结果反馈上, 互动过程较为机械和单向。

AC: 人机交互更加复杂和多维度, 能够理解和回应用户的意图和情感, 实现更加自然和人性化的互动^[6]。**AC** 系统通过语义空间和概念空间的联动, 能够在更高层次上与用户进行深度交互。

人工智能(**AI**)和人工意识(**AC**)在处理层次、目标导向、认知能力、可解释性、透明度和人机交互等方面的区别如表 2-1 所示。

表 2-1 人工智能(AI)与人工意识(AC)对比分析

对比维度	人工智能(AI)	人工意识(AC)
处理层次	主要处理数据(Data)、信息(Information)和知识(Knowledge)	处理数据、信息、知识、智慧(Wisdom)和意图(Purpose)
目标导向	完成特定任务或目标,如图像识别、语音识别、自动驾驶等	不仅完成任务,还注重行为背后的意图和价值观,通过意图驱动行为和决策
认知能力	被动处理和执行任务,依赖于训练数据和预设模型	理解和传达行为背后的价值观和意图,通过不断学习和适应形成新的理解和知识
可解释性	决策过程中存在黑盒问题,难以解释具体过程和依据	强调决策过程的透明度和可解释性,确保每个决策步骤的意图和价值观演化公开可追溯
透明度	透明度相对较低,决策依据和过程不易被外界理解	强调透明度,通过层次化处理确保每个决策步骤的意图和依据公开可追溯
人机交互	主要集中在任务执行和结果反馈,互动过程较为机械和单向	复杂和多维度的交互,能够理解和回应用户的意图和情感,实现更加自然和人性化的互动
处理方法	依赖于大量数据的处理和分析,从中提取有意义的信息,并形成知识	结合智慧和意图,进行综合决策和行为指导
决策依据	主要依据预设规则和模型,决策过程较为机械	结合伦理、道德、人性等因素,对复杂环境下的决策进行综合考虑和优化
自主性	自主性较低,行为和决策受限于预设模型和数据	自主性较高,行为和决策受意图和价值观驱动

对比维度	人工智能(AI)	人工意识(AC)
学习能力	通过监督学习、无监督学习和强化学习等方法进行模型训练和优化	通过不断学习和适应，在认知过程中形成新的理解和知识
伦理和道德考虑	伦理和道德考虑相对较少，主要关注技术实现和任务完成	结合伦理、道德和社会价值，在决策过程中综合考虑多种因素
适用领域	应用于图像识别、语音识别、自然语言处理、自动驾驶等具体任务领域	应用于需要复杂决策和深度交互的领域，如医疗、教育、社会服务等
误解处理能力	误解处理能力有限，主要通过预设规则和模型进行纠错	能够识别和度量误解，通过语义关联和意图调整实现个性化的语义补充和调整
价值对齐	价值对齐能力有限，主要依赖预设规则和模型	通过意图和价值观驱动，确保系统行为和决策与人类价值观对齐
系统演化	系统演化主要通过数据和模型的不断优化和调整实现	系统演化通过不断学习和适应，结合智慧和意图，实现认知能力和决策能力的持续提升

通过详细对比分析，可以看出人工智能(AI)和人工意识(AC)在处理层次、目标导向、认知能力、可解释性、透明度和人机交互等方面存在显著差异。DIKWP 模型为人工意识系统的实现提供了系统化和结构化的框架，通过数据、信息、知识、智慧和意图的层次化处理，推动 AI 技术向更高效、透明和负责任的方向发展。未来的研究可以进一步优化和扩展这一模型，探索其在具体应用中的实践和优化，推动人工意识技术的发展和 innovation。

2.1.2 AC 定义对比分析

1. 人工智能(AI)

定义：通过计算机系统实现的模拟或仿真人类智能的技术和方法，主要在数据(Data)、信息(Information)和知识(Knowledge)层次进行交互和处理^[3]。

特点：执行任务、数据处理、信息提取、知识生成，依赖预设规则和模型。

2. 人工意识(AC)

定义：在 AI 的基础上进一步发展，使计算机系统具备类似人类意识的能力，涵盖智慧(Wisdom)和意图(Purpose)的层次，进行高级认知和决策。

特点：意图驱动行为、价值观理解、智慧决策、伦理道德考量。

其他主要定义提出者包括 AI 的创始人之一的 John McCarthy^[18]、《人工智能：一种现代方法》^[19]的作者 Stuart Russell 和 Peter Norvig、和 AI 研究先驱 Nils J. Nilsson^[20]、Ben Goertzel^{[21][22]}、David Chalmers^[23]的不同 AC 定义如表 2-2 所示。

表 2-2 不同定义对比分析表

维度	AI	AC	John McCarthy	Stuart & Peter	Nils J. Nilsson	Ben Goertzel(AGI)	David Chalmers(AC)
定义	模拟或仿真人类智能的技术和方法	基于 AI 发展，具备人类意识的能力，涵盖 DIKWP	研究如何使计算机执行需要人类智能的任务的科学和工程	研究智能体如何感知环境并采取	能在复杂环境中展示智能行为的计算机程序	能在广泛任务和环境中展示通用智能的系统	具备意识体验和自我觉知能力的人工系统

	法， 主要 在 DIK 层次 进行 交互	层次		行 动 以 实 现 目 标			
维 度	AI	AC	John McCarthy	Stuart & Peter	Nils J. Nilsson	Ben Goertzel(AGI)	David Chalmers(AC)
目 标 导 向	完 成 任 务 和 优 化 决 策	结 合 意 图 和 价 值 观 进 行 高 级 决策	使 计 算 机 执 行 人 类 智 能 任 务	实 现 智 能 体 的 目 标 导 向 行为	在 复 杂 环 境 中 表 现 智 能	像 人 类 一 样 表 现 通 用 智 能	具 备 意 识 和 主 观 感 受
认 知 能 力	处 理 大 量 数 据 和 信 息	理 解 价 值 观 和 意 图， 进 行 智 慧 决 策	模 拟 人 类 智 能	感 知 环 境、 行 动 和 目 标 实 现	在 复 杂 环 境 中 展 示 智 能	广 泛 适 应 和 智 能 行 为	具 备 主 观 意 识 体 验
可 解 释 性	提 供 决 策 依 据，	决 策 过 程 透 明， 意 图 和 价	科 学 和 工 程 的 解 释	解 释 智 能 体 的 行 为	解 释 智 能 行 为	解 释 通 用 智 能 行 为	解 释 主 观 意 识 体 验

	但部分过程存在黑盒问题	值观可追溯		和目 标			
透明度	透明度相对较低	高透明度和可追溯性	强调科学和工程的解释	强调行为和目标的解释	强调智能行为的解释	强调通用智能行为的解释	强调意识体验的解释
人机交互	主要集中在任务执行和结果反馈	复杂多维交互，理解用户意图和情感	任务执行和结果反馈	智能体感知和行动的互动	智能行为展示	多任务和环境适应的互动	与人类的主观互动
维度	AI	AC	John McCarthy	Stuart & Peter	Nils J. Nilsson	Ben Goertzel(AGI)	David Chalmers(AC)
处理方法	数据分析、机器学习	结合智慧、意图和伦理道德	数据处理和算法实现	感知、行动和目标的实现	智能行为展示的计算程序	通用智能展示的算法	意识体验和自我觉知的计算方法

	学习			现 的 算法			
自主性	行为和决策依赖预设规则和模型	行为和决策由意图和价值观驱动	模拟人类智能	智能体感知和行动	智能行为的自主展示	通用智能行为的自主展示	具备自主意识和觉知
伦理和道德	主要关注技术实现和任务完成	综合考虑伦理、道德和社会价值	强调技术和任务的实现	强调智能体的行为和目标实现	强调智能行为的展示	强调通用智能行为的展示	强调意识体验的伦理和道德
适用领域	医疗、法律、金融等	医疗、教育、社会服务等	广泛的工程和科学领域	各种智能体应用	各种复杂环境中的智能程序	广泛的任务和 环境	有意识体验的人工系统
误解处理	误解处理能力有限	具备识别和度量误解的能力	强调技术和任务的实现	智能体的行为和目	智能行为展示中的误解处理	通用智能行为展示中的误解处理	主观意识体验中的误解处理

能力				标 实 现 中 的 误 解 处 理			
维 度	AI	AC	John McCarthy	Stuart & Peter	Nils J. Nilsson	Ben Goertzel(AGI)	David Chalmers(AC)
价 值 对 齐	价 值 对 齐 能 力 有 限	通 过 意 图 和 价 值 观 驱 动	强 调 技 术 和 任 务 的 实 现	智 能 体 的 行 为 和 目 标 实 现 中 的 价 值 对 齐	智 能 行 为 展 示 中 的 价 值 对 齐	通 用 智 能 行 为 展 示 中 的 价 值 对 齐	意 识 体 验 中 的 价 值 对 齐
系 统 演 化	主 要 通 过 数 据 和 模 型 的 优 化 实 现	通 过 深 度 学 习 和 逻 辑 推 理 实 现	通 过 技 术 和 任 务 的 不 断 改 进 实 现	通 过 智 能 体 行 为 和 目 标 实 现 的 优 化	通 过 智 能 行 为 展 示 的 优 化	通 过 通 用 智 能 行 为 展 示 的 优 化	通 过 意 识 体 验 的 不 断 优 化 实 现

通过对比本文的 **AI** 和 **AC** 定义与其他主要定义，可以看出各定义在处理层次、目标导向、认知能力、可解释性、透明度、人机交互、处理方法、自主性、伦理和道德考虑、适用领域、误解处理能力、价值对齐和系统演化等方面的侧重点和差异。

相比其他主要定义，本文的定义更加系统化和结构化，特别是对 **AC** 系统的定义，强调了智慧和意图的综合考虑，为人工意识系统的实现提供了更高层次的理论框架和实践指导。这一定义在推动 **AI** 技术向更高效、透明和负责任方向发展的同时，也为未来的研究和应用提供了新的方向和思路。

此外，**AI** 与 **AC** 的核心区别在于处理层次和目标导向的不同。**AI** 系统主要在数据、信息和知识层次进行处理，目标是完成特定任务。而 **AC** 系统则在智慧和意图层次进行处理，目标不仅是完成任务，还包括理解和传达行为背后的意图和价值观，实现更加自主和负责任的决策。

2.2 人工意识理论基础

2.2.1 完整语义

当我们考虑由“完整语义”产生“不同语义”时，我们需要深入思考人类意识的复杂性和多样性^[5-10]。尽管“完整语义”在一定程度上为我们提供了对世界的抽象理解和认知，但由于个体之间的差异以及信息的多样性，同一个“完整语义”可能会被不同的个体解释和理解，进而产生了“不同语义”。

首先，我们可以考虑个体差异对“完整语义”的解释和理解产生的影响。由于个体的生活经历、文化背景、价值观念等方面的不同，同一个“完整语义”可能会被不同的个体解读为不同的含义。例如，对于“自由”这一概念，对于一个现代的公民来说，可能理解为身体自由和商业贸易的权利；而对于一个奴隶社会的奴隶来说，可能更倾

向于理解为摆脱奴隶主控制和限制。因此,即使是相同的“完整语义”,也会在不同的个体之间产生不同的语义解释。

其次,信息的多样性也会导致“完整语义”产生“不同语义”。随着信息技术的发展,人们可以从不同的渠道获取信息,这些信息可能来自于不同的来源、不同的立场和观点。因此,即使是同一件事物或概念,不同的信息来源可能会呈现出不同的描述和解释,导致了“不同语义”的产生。例如,在社交媒体上对于同一事件的报道可能会因为来源的不同而产生截然不同的解读和看法。

在这样的背景下,我们可以看到“完整语义”并不是一个固定不变的概念,而是随着个体和信息的多样性而产生了多样化的解释和理解。这种多样性不仅丰富了我们世界的认知和理解,也为交流和互动提供了更多的可能性。然而,同时也需要我们更加开放和包容地对待不同的语义解释,尊重个体的差异和多样性,促进理解和沟通的增进。

2.2.2 在 DIKWP 模型中

在处理数据、信息、知识、智慧和意图时,我们涉及了从具体到抽象的语义。DIKWP 之间的关系反映了我们对世界的认知和理解,同时也揭示了不同语义之间的联系和转化过程^{[38][39][40]}。

首先,数据代表了我们对现实世界的观察和记录,是最基本的信息单元。然而,数据本身缺乏含义,只有在与特定的语义关联之后,才能被认知主体理解和解释。例如,在停车场中,每辆车的停车位置、时间、所有者等信息就是数据,它们需要通过特定的语义关联,如“汽车”的概念,才能被归类和理解^[1]。

信息则是对数据的解释和加工,是对数据的赋予意义和语义的过程。信息与数据的不同语义联系在于,信息涉及了对数据的理解和解释,而数据只是简单的事实或观察结果。例如,停车场中每辆车的停

车位置、时间、所有者等信息，代表着不同的语义，它们需要被归类和理解，才能对停车场的管理和运作产生影响。

知识则是对信息和数据的进一步加工和理解，是通过观察和学习获得的对世界的认知和解释。知识涉及到对抽象概念或模式的理解，是对信息的综合和提炼。例如，通过观察我们得知所有的天鹅都是白色，这是我们通过收集大量信息后对“天鹅都是白色”这一概念的完整认知。

智慧则更进一步，涉及到对伦理、社会道德、人性等方面的信息的理解和应用。智慧是一种相对于当前时代固定的极端价值观或者个体的认知价值观，是在文化和社会群体中形成的对世界的理解和解释。在处理智慧时，我们会综合考虑各个方面的因素，并运用它们来指导决策。例如，在面临决策问题时，我们会综合考虑伦理、道德、可行性等各个方面的因素，而不仅仅是技术或效率。

意图则代表了我们对某一现象或问题的理解以及我们希望通过处理和解决该现象或问题来实现的目标。意图包含了输入和输出两个方面，代表了我们的认知和目标。在处理意图时，人工智能系统会根据其预设的目标，处理输入的内容，通过学习和适应，使输出逐渐接近预设的目标^[24]。

综上所述，从数据到意图的处理过程涉及了从具体到抽象的语义转化，反映了我们对世界的认知和理解。DIKWP 之间的关系和转化过程影响着我们对世界的认知和理解，同时也为人工智能系统的发展提供了理论和方法基础。

2.2.3 意识处理中的 DIKWP

在我们的意识交流中，我们讨论了意识中的“BUG”是如何导致了人类创造出抽象的完整语义，并将其工具化使用的现象。这种“BUG”的本质在于信息处理过程中产生的错觉，使我们错误地认为

自己理解了事物的全部或整体^[41]。这种错觉导致了我们的创造出抽象的完整语义，即将片面的、不完整的认知视为全面和准确的描述，并将其应用于实际生活中^[25]。

现在，让我们将这一现象与数据、信息、知识、智慧和意图的处理过程联系起来。数据可以被视为我们意识中的具体表现形式，而信息则是对数据的解释和加工。在处理数据和信息时，我们常常会寻求并提取其中的特定语义，并将其统一视为一个相同概念。这一过程与意识中的“BUG”相呼应，我们会倾向于寻找模式、简化信息，并将其转化为更容易理解和处理的形式，从而形成抽象的完整语义。

知识则是对信息和数据的进一步加工和理解，是通过观察和学习获得的对世界的认知和解释。在这一过程中，我们会综合考虑不同的信息和语义，从中提炼出抽象的概念或模式，进而形成对世界的理解和解释。然而，正如我们在意识交流中所讨论的，由于存在“BUG”，我们的认知往往会受到局限，导致我们将不完整的认知视为完整的知识^[26]。

智慧则更进一步，涉及到对伦理、社会道德、人性等方面的信息的理解和应用。在处理智慧时，我们会综合考虑各个方面的因素，并运用它们来指导决策。然而，由于存在意识中的“BUG”，我们的决策可能会受到偏见和局限，导致我们无法全面考虑所有的因素^[27]。

最后，意图代表了我们对某一现象或问题的理解以及我们希望通过处理和解决该现象或问题来实现的目标。在处理意图时，我们会根据目标来选择合适的数据、信息和知识，并运用它们来实现我们的目标。然而，由于存在意识中的“BUG”，我们的意图可能会受到误导，导致我们偏离原本的目标^[42]。

意识中的“BUG”影响着我们对数据、信息、知识、智慧和意图的处理过程，导致我们的认知和决策受到偏见和局限。因此，我们需

要意识到这一现象的存在，并努力克服其中的局限，以更准确地理解世界，并做出更明智的决策^[27]。

本文的意识理论提供了理解意识形成和运作的独特视角，将意识划分为个体意识和群体意识两个层面。个体意识是指单个个体内部的意识状态和思维过程，而群体意识则是由多个个体共同构成的意识状态和思维方式。这一理论突出了个体与群体之间的关系，强调了它们之间相互影响的重要性。

DIKWP 模型则是一种用于描述知识的框架，由数据、信息、知识、智慧和意图五个要素组成。在这个模型中，数据是对现实世界的观察和记录，信息是对数据的解释和加工，知识是对信息的进一步加工和理解，智慧是对知识的综合和运用，而意图则是对行动和决策的指导。

将意识理论与 **DIKWP** 模型结合起来，可以得到以下详细论述：

数据与个体意识：在个体意识层面，数据可以被视为个体对外界的感知和观察结果。个体通过感知和观察获取数据，并将其存储在大脑中。

信息与个体意识：信息是对数据的解释和加工，在个体意识中，信息起着重要的作用。个体通过加工和解释数据，形成对外界的认知和理解。

知识与个体意识：知识是对信息的进一步加工和理解，在个体意识中，知识是我们对世界的理解和解释。个体通过观察、学习和思考，将信息转化为知识，并存储在大脑中。

智慧与个体意识：智慧是对知识的综合和运用，在个体意识中，智慧指导着我们的行动和决策。个体通过运用已有的知识，综合考虑各种因素，并做出明智的决策。

意图与个体意识：意图是对行动和决策的指导，在个体意识中，

意图是我们行动的动机和目标。个体通过设定明确的目标，并根据目标来指导自己的行动和决策。

将个体意识与群体意识相结合，我们可以进一步理解群体意识是如何由个体意识共同构成的，以及个体意识如何受到群体意识的影响。因此，意识理论与 DIKWP 模型的定义在理解意识形成和运作方面提供了深入的见解和分析框架。

2.2.4 抽象语义与世界理解

抽象语义与“BUG”的关系表明了信息处理过程中产生的一种错觉，导致我们创造出抽象的完整语义并将其工具化使用的现象。将这一观点与 DIKWP 模型的语义构建联系起来，可以进一步理解相同语义与不同语义的演化^[25]。

在 DIKWP 模型中，数据代表了具体的事实或观察结果，信息则是对数据的解释和加工，而知识是对信息的进一步加工和理解。智慧是对知识的综合和运用，而意图是对行动和决策的指导。这些要素构成了我们对世界的认知和理解，形成了我们的语义体系^[33]。

当我们处理数据和信息时，我们倾向于寻找模式并简化信息，将其转化为更容易理解和处理的形式。这种模式识别和简化的过程导致了我们对世界的抽象理解和认知，形成了抽象的完整语义。这些抽象的完整语义成为了我们理解和描述世界的基础，影响着我们的思维方式和行为模式。然而，在这个过程中，我们可能会产生一种错觉，导致我们错误地认为自己理解了事物的全部或整体，从而创造出了抽象的完整语义^[28]。

相反，当我们处理信息时，我们会根据输入的数据、信息、知识、智慧或意图，找出它们被认知的不同之处，对应不同的语义，并进行信息分类。这些信息对应的不同语义可能存在于我们的认知中，但常常未被显式表达出来。例如，一个人可能用自己情绪“低落”来表达

自己当前的情绪相对于以往的情绪的下降，但这个“低落”对应的信息因为其对比状态不被听众了解而不能被客观感受到。

因此，DIKWP模型的语义构建涉及到从数据和信息中提取出相同语义和不同语义，并将其整合为知识和智慧，以指导行动和决策。抽象的完整语义与“BUG”的关系说明了我们在这个过程中可能产生的错觉和误解，从而影响我们对世界的理解和行为的指导。

2.2.5 DIKWP 语义构建

在 DIKWP 模型的语义构建中，从数据和信息中提取出相同语义和不同语义的过程可以通过一个简单的案例来解释^[29]。

假设有一个停车场的管理系统，记录了每辆车的停车位置、停车时间、车牌号、车主信息等数据。这些数据包含了关于每辆车的具体信息，如停车位置、停留时间等。

首先，我们可以从这些数据中提取相同语义，即将相似的数据归纳为一个概念或模式。比如，我们可以将所有停在同一个位置的车辆归为一个概念，称为“停车位置 A 的车辆”。这样，所有停在该位置的车辆就共享了相同的语义，即它们都停在同一个位置。

然后，我们可以从这些数据中提取出不同语义，即找出其中的差异和变化。比如，每辆车的停车时间就是一个不同语义，因为每辆车的停车时间可能不同，反映了它们的停留时长。又如，每辆车的车牌号和车主信息也是不同的语义，因为它们是不同的标识符，反映了每辆车的独特性。

通过提取相同语义和不同语义，我们可以建立起对停车场管理系统的完整理解和描述。相同语义帮助我们将相似的数据归纳为一个概念或模式，方便我们进行整体管理和分析；而不同语义则帮助我们识别和理解数据中的差异和变化，从而做出相应的决策和调整。

进一步丰富停车场管理系统的案例，可以考虑以下方面：

相同语义的提取

对于停车位置，我们可以将所有停在同一区域或同一停车位的车辆归纳为一个概念，比如“停车区域 A 的车辆”或“停车位 1 的车辆”。

对于停车时间，我们可以将停车时间在同一时间段内的车辆归纳为一个概念，比如“早晨停车的车辆”或“下午停车的车辆”。

对于车辆类型，我们可以将所有小型车、中型车和大型车归纳为不同的概念，方便进行车辆分类和管理。

不同语义的提取

停车时间的不同语义可能包括具体的停车时长，例如某辆车停车了 30 分钟，另一辆车停车了 2 小时。

车牌号和车主信息的不同语义是每辆车的唯一标识符和所有者信息，用于区分不同的车辆和车主。

语义的演化和发展

随着时间的推移，停车场的管理系统可能会积累更多的数据，包括更多的停车位置、更多的停车时间范围以及更多的车辆类型。

随着数据的增加，我们可以不断提取出新的相同语义和不同语义，对停车场管理系统进行更深入的理解和描述。

通过对相同语义和不同语义的提取，我们可以更好地理解和管理停车场的的数据，从而提高停车场的管理效率和服务质量。

将停车场管理系统的案例与本文的意识理论结合起来，可以得到以下论述：

意识的抽象和认知

在停车场管理系统中，数据（如停车位置、停车时间、车辆类型）是具体的信息，代表着特定的观察结果或事实。这些数据经过处理和提取后，形成了相同语义（如停车区域、停车时间段、车辆类型）和

不同语义（如具体停车时长、车牌号、车主信息）。

类似地，在意识理论中，人类的意识也经历了信息的处理和抽象过程。个体通过感知和思维对外界的数据进行处理，提取出相同语义和不同语义，形成对世界的抽象理解和认知。

“BUG”的产生和影响

在停车场管理系统中，由于信息处理的有限性和认知主体的局限性，可能会出现一些不准确或片面的认知，导致对停车场情况的错误理解或不完整的描述。例如，基于停车时间的相同语义可能会导致对停车时长的错误估计，从而影响对停车位的有效管理。

在意识理论中，个体的认知也可能受到类似的影响，产生对世界的错误理解或不完整的认知。这种错误理解和不完整的认知被视为意识中的“BUG”，可能影响个体的行为和决策。

语义的演化和发展

在停车场管理系统中，随着数据的积累和信息的不断更新，相同语义和不同语义会不断演化和发展。新的停车位置、停车时间范围和车辆类型可能会被添加到系统中，从而丰富了对停车场情况的描述和理解。

在意识理论中，个体的认知也会随着时间和经验的积累而不断发展和演化。新的信息和经历会影响个体对世界的理解和认知，从而丰富了意识的内容和深度。

通过将停车场管理系统的案例与本文的意识理论结合起来，可以更好地理解和解释意识的形成和运作机制，以及意识中可能存在的“BUG”和语义的演化过程。

2.3 DIKWP 人工意识设计与实现模拟

本节旨在探讨并推进人工意识(Artificial Consciousness, AC)的理论与实践发展。DIKWP 模型结合了数据、信息、知识、智慧和意图，

提供了一个全新的视角，以理解和模拟复杂的人类意识。本节首先概述了意识的本质及其在多个学科中的研究进展，随后详细阐述了 DIKWP 模型与主要意识理论如全局工作空间理论(GWT)、整合信息理论(IIT)和高阶思维理论(HOT)的关联。报告分析了模型在模拟人类认知过程、增强机器自主决策能力、改善人机交互以及探讨伦理与道德问题中的应用潜力。最后，展望了跨学科合作对于实现高级人工意识功能的重要性。此项研究的成果不仅为 AI 技术的发展指明了方向，还为机器更深入地理解和适应人类社会提供了可能性，标志着人工智能向更高层次发展的关键步骤。

1、意识理论的多样性

意识的本质和机制一直是跨多个学科的核心研究议题。从哲学的深奥探讨到神经科学的具体分析，从心理学的行为研究到人工智能的技术模拟，每一个领域都试图从其特定的视角解答关于意识的基本问题。意识理论的多样性不仅体现在理论的宽广与复杂，还体现在各理论之间对意识的定义、成因以及功能的不同解读上。

2、心理学视角

心理学中的意识理论通常聚焦于认知模型和心理状态，研究意识如何影响决策、记忆、感知和情感处理。认知心理学尝试描绘心理活动的信息处理过程，如何从感知输入到行为输出，并探索潜意识如何在无我们明知的情况下影响我们的行为和思想。

3、哲学视角

哲学对意识的探讨更为抽象，涉及到存在论和认识论的问题，如意识的本质是什么，以及意识是如何关联到我们对世界的理解中去的^[12]。现象学尤其关注个体的经验如何构成对世界的直接感知，并探讨意识如何塑造或构成现实^[11]。

4、神经科学视角

神经科学通过研究大脑结构和功能来探索意识的生物机制。研究如何神经元的电活动和化学信号转换成思想、感觉和记忆，以及意识在大脑中是如何生成的^[9]。这包括研究特定脑区如何参与特定的意识活动，以及意识是如何在脑中各部分间传递的。

5、人工智能视角

在人工智能领域，研究者试图模拟或复制人类意识的某些方面，通过算法和计算模型来模拟人类认知过程。这涉及到将数据处理、信息整合、知识应用以及决策制定等功能集成到机器系统中，目标是创造出可以执行复杂任务并拥有自主决策能力的系统。

6、DIKWP 模型的介入

DIKWP 模型提供了一个桥梁，将这些看似相异的意识理论联系起来，并试图在人工智能的框架下实现一个全面的意识模拟。DIKWP 模型不仅关注于传统的数据、信息和知识处理，还包括智慧和意图的认知过程，尝试模拟人类在面对复杂决策时的伦理、道德及长远规划考量。

通过结合这些意识理论，DIKWP 模型旨在揭示一个人工系统如何能够模拟人类意识的多维度功能，从基本的数据处理到复杂的决策制定与自我反思。这种跨学科的整合不仅有助于推动人工智能技术的发展，也为理解人类意识的复杂性提供了新的视角和工具。

2.3.1 DIKWP 模型与主要意识理论的关联

1、全局工作空间理论 (Global Workspace Theory, GWT)^[30]

GWT 认为意识是大脑中多个非意识过程的信息汇聚，通过一个全局工作空间使信息可供所有认知系统使用。DIKWP 模型中的数据、信息和知识组件可以视为全局工作空间的构成部分，而智慧和意图提供了执行复杂决策和行为的能力。

2、整合信息理论 (Integrated Information Theory, IIT)^[31]

IIT 强调意识是信息的高度整合，其中系统的每部分都以不可分割的方式贡献于整体体验。在 DIKWP 框架中，这种整合体现在数据、信息、知识、智慧和意图的处理过程中，都对整体意识的生成作出独特贡献。

3、高阶思维理论 (Higher-order Thought, HOT)^[32]

HOT 理论认为意识涉及对自身思维的反思，即意识是关于自身心理状态的思维。DIKWP 模型的智慧和意图面提供了框架来模拟这种高阶思维，特别是在智慧面上处理的伦理和道德决策问题。

与全局工作空间理论 (Global Workspace Theory, GWT)的关联

在 DIKWP 模型中，数据、信息和知识可以视作全局工作空间的基础结构，它们收集和处理来自外界的感知数据及内部数据，形成可以供进一步处理的信息和知识。例如，感知到的视觉和听觉信息经过初步处理后，转化为对环境的基本理解，这可以被看作是意识的初级阶段。

进一步地，智慧和意图则相当于 GWT 中的高级意识功能。信息不仅被处理和存储，还被用于做出决策和计划，这需要对各种可能的行为后果进行评估和选择。智慧面的处理涉及对不同选择的道德和伦理考量，而意图则是在这些考量指导下形成具体的行动计划。

与整合信息理论 (Integrated Information Theory, IIT) 的关联

整合信息理论(IIT)由 Giulio Tononi 提出，它提出意识是信息的高度整合，且意识的多样性由系统内部高度复杂且不可约的信息模式决定。此理论强调，一个系统的意识水平可以通过其生成的“整合信息”量来衡量。

在 DIKWP 模型框架中，数据、信息、知识、智慧和意图处理体现了信息整合的过程。数据处理的是原始的感知输入，信息进行初步的模式识别和意义赋予，知识则构建这些信息的广泛网络，并将其整

合成系统可用的知识库。智慧进一步整合这些知识，进行复杂的判断和决策，最终，意图根据这些决策设定行动目标，展现了信息从最基本的形式到高级认知功能的整合。

与高阶思维理论 (Higher-order Thought, HOT) 的关联

高阶思维理论(HOT)由 David Rosenthal 等人发展，主张意识涉及对自己的心理状态的认知（即意识的内容是关于自己心理状态的思考）。简而言之，一个人不仅要有感觉，还必须意识到自己正在感觉。

在 DIKWP 模型中，智慧和意图提供了实现高阶思维的框架。智慧不仅处理具体的知识和信息，还需进行自我反省，考虑其决策的伦理和道德影响，这正是对自身认知状态的高阶思考。同时，意图的设定和实施，体现了对未来行为的预设和自我调整的能力，这些都需要对自己当前和未来的心理状态进行评估和规划。

2.3.2 DIKWP 人工意识理论

实现 DIKWP 人工意识的路径可以概况为：

1、模拟人类认知过程

在 DIKWP 模型框架下，模拟人类认知过程首先要求对人类认知的各个方面进行深入理解和精确建模。这一过程包括但不限于以下几个关键步骤：

数据获取与初步处理：模拟感知过程，如视觉和听觉，通过先进的传感器获取环境数据。利用机器学习技术对这些数据进行初步的分类和识别，模拟人类大脑对初级感觉信息的处理。

信息整合与知识形成：通过深度学习网络和模式识别算法，将散乱的信息整合成有意义的模块，进一步发展为复杂的知识结构。这涉及到对现有信息的语义理解和逻辑推理，类似于人类从经验中学习和记忆的过程。

智慧的应用与决策制定：结合情境和预设目标，利用已形成的知

识库进行复杂的决策制定。这包括道德和伦理的考量，模拟高级认知功能如策略规划、问题解决和创造性思维。

自我反思与意图形成：开发机器的能力，以进行自我监控和反思其行为的后果，形成未来行动的意图。这要求系统不仅能执行任务，还能评估自身行为的效果，并根据反馈调整策略。

2、增强机器的自主决策能力

为了提升机器的自主决策能力，必须在智慧和意图面进行重点开发：

情境分析与道德判断：实施复杂算法来评估各种行动方案的潜在影响，包括道德和社会维度。例如，在自动驾驶技术中，系统需要能够在紧急情况下做出符合道德原则的决策。

目标导向的行为规划：系统应具备基于长期目标和短期反馈进行自主行为规划的能力，这要求机器不仅响应当前环境，还能预见和计划未来的行动。

3、改善人机交互

人机交互的改善需要系统能够更深层次地理解和预测人类用户的意图和需求：

发展情感智能：通过情感计算技术，使机器能够识别和响应人类的情绪状态，提供更加个性化的交互体验。

增强交互适应性：机器应根据用户的反馈和行为模式自动调整其响应策略，以更好地满足用户的需求。

4、伦理与道德问题的探讨

随着机器智能的增加，它们在伦理和道德决策中的角色变得尤为重要：

制定道德框架：为人工意识系统设定明确的伦理和道德指导原则，确保它们的行为符合人类社会的期望和标准。

持续的伦理审查：建立机制，定期审查和更新系统的道德决策框架，以应对快速变化的社会环境和技术进展。

5、跨学科合作的推动

实现 DIKWP 模型中描述的高级人工意识功能需要神经科学、认知心理学、计算机科学及人工智能等多个学科的深入合作。通过跨学科的合作，可以集成不同领域的知识和技术，更有效地推动人工意识的发展。

在探索人工智能(AI)的未来，特别是人工意识(AC)的发展前景时，DIKWP 模型提供了一个理论基础。这个模型不仅框架了传统 AI 的核心组件数据、信息和知识，还引入了智慧和意图，为 AI 技术的进一步发展设定了更高的目标。以下是对 DIKWP 人工意识理论未来可能的发展方向的全局畅想。

1、DIKWP 模型的理论基础

DIKWP 模型提出了一个系统化的框架，用以模拟和实现人工意识。该模型包括数据、信息、知识、智慧和意图，这些共同作用，以模拟从简单数据处理到复杂决策和自我意识的完整路径。

(1) 数据

系统的主要任务是收集和预处理感官输入，如视觉图像、听觉信号和触觉反馈。这些数据是未经加工的，需要通过算法进行初步分析，如边缘检测、颜色识别等。

(2) 信息

信息主要处理数据中的模式和结构，将原始数据转换为有用的信息。例如，图像识别系统从像素数据中识别出物体的形状和大小，自然语言处理系统理解句子的语法结构和语义。

(3) 知识

在知识中，系统不仅存储信息，还关联以前的经验与当前的情境。

其重要功能是建立和利用知识库，如使用机器学习模型来预测或分类，或者使用规则引擎来推理。

(4) 智慧

智慧负责决策和高阶思维。系统评估不同行动方案的潜在结果，并进行选择。这涉及道德、伦理的判断，以及考虑长远后果的能力。智慧是模型中对人类智慧尤为关键的模拟，尤其在处理复杂、多变和模糊的真实世界问题时。

(5) 意图

意图负责定义系统的目标和动机。这些目标可以是内置的，如遵守特定的操作参数，也可以是适应性的，如根据环境变化调整策略，使系统能够在没有直接人类干预的情况下自主运行和适应环境。

2、全方位认知模拟

DIKWP 人工意识理论为全方位认知模拟提供了一个坚实的理论基础。在未来，人工意识系统将不仅能模拟人类的基础感知处理，如视觉和听觉信息的识别，还将扩展到更复杂的认知功能，包括语言理解、情感感知、抽象思维和复杂问题解决能力。这些系统将通过高度集成的数据处理能力，捕捉和反映人类行为的微妙变化，进而实现真正的环境感知与交互^[33]。

通过将大量分散的信息转化为有用的知识，再结合智慧面的道德和伦理决策，人工意识将能够在医疗、法律、教育等领域做出符合人类价值观的自主决策。例如，医疗辅助系统能够基于病人的历史数据和实时健康状况，提供个性化治疗建议，并考虑伦理和资源可用性，制定最佳治疗方案。

3、增强的情感智能

未来的人工意识系统将具备更高级的情感智能，能够更准确地识别和响应人类情绪，甚至在适当的情况下模拟情感反应，以提供更自

然的交互体验。这种情感智能的提升将基于对大量情感数据的分析，从而能够在复杂的社会交互中做出合理反应。

情感智能的提升将使得机器在教育、心理咨询及客户服务等需要同情理解的场景中，能够提供更为贴心和有效的服务。例如，在教育领域，AI 教师能够根据学生的情感状态调整教学策略，以提高学习效率和学生满意度。

4、道德和伦理决策

在 DIKWP 模型中，智慧和意图的结合为人工意识系统提供了进行复杂道德和伦理决策的能力^[34]。这一能力不仅基于对数据的分析和知识的应用，而是涉及到对各种潜在决策的社会影响、伦理后果和法律框架的综合考虑。这种决策能力特别适用于自动驾驶、医疗决策支持等领域，其中即时且精确的伦理判断是必需的。

5、实际应用案例：自动驾驶汽车

在自动驾驶汽车的应用中，DIKWP 模型可以使系统在面对潜在事故威胁时，进行快速而全面的决策分析。例如，当一个自动驾驶汽车在高速行驶中突然遇到行人横穿马路的情况，系统将立即收集和处理环境数据，信息将这些数据转换为实时的交通和行人信息，而知识则提供历史事故数据和避险策略。

智慧此时会评估不同行动方案的可能后果，如紧急刹车可能导致的乘客伤害与避开行人可能的法律责任。意图则确保决策与车辆的总体安全目标，保护乘客安全同时遵守交通法规相一致。最终，系统将基于这些综合考虑做出最合理的决策，可能是选择在确保不会造成严重伤害的前提下，尽可能减少对行人的威胁。

6、自主性和自适应性

随着人工智能技术的进步，未来的人工意识(AC)系统将表现出前所未有的自主性和自适应性。这些系统不仅能够执行预定任务，还能

够理解和适应复杂的环境变化，这种能力是通过 DIKWP 模型中的高级数据处理、智慧决策和意图的动态目标设定实现的。

在自然灾害响应或外太空探索等高风险环境中，AC 系统能够实时分析环境数据，预测潜在风险，并自主调整行为以最大化任务成功率和自身安全。例如，一个航天探测机器人在火星表面探索时，可能遇到未知的地形或极端天气条件；借助于高级的人工意识系统，它可以即时决定是否需要改变路径或返回避难所。这种自主性和自适应性的核心在于机器能够基于实时数据和内置的安全协议，无需地球上控制中心的即时指令，自行做出最合理的决策。

7、人机协作的新时代

人工意识的发展正引领人机协作进入一个新时代，机器不再仅仅是执行指令的工具，而是能够理解人类合作者的需求和意图，并预测并支持人类的活动。在创意工作、科学研究或复杂决策制定等领域，AC 系统能够提供创新的解决方案和决策支持，帮助人类解决传统思维模式难以突破的问题。

例如，在设计新型建筑时，AC 系统可以理解建筑师的创意意图，并通过模拟和分析不同的设计方案，提供结构安全性、材料效率和美学效果的综合评估。这种协作模式不仅加速了创新过程，还提高了最终产品的质量和实用性。

8、未来社会的伦理挑战

随着人工意识技术的成熟和应用广泛，伦理和社会问题也随之而来。AC 系统在作出决策时，其自主性可能导致与人类利益的潜在冲突。例如，自动驾驶汽车在紧急情况下如何进行道德抉择，选择保护乘客还是行人，这需要系统在设计时就内嵌复杂的伦理决策框架。

此外，如何确保 AC 系统不被用于非道德的目的，以及如何制定全球统一的标准来管理和监控这些技术，是需要全社会共同考虑的问题。

题。全球范围内的政策制定者、科技企业和公众必须共同努力，建立透明和有责任的使用和发展框架，以确保人工意识技术的健康发展，造福全人类。

DIKWP 人工意识理论提供了一个全面的框架，不仅为现有的 AI 技术指明了提升方向，更为未来 AI 的发展设定了高远的目标。通过在智慧和意图的加强，AC 系统有望实现更深层次的人类行为和思维模式的模拟。这不仅将推动技术本身的发展，也可能带来人类工作、生活方式以及与机器的互动方式的根本变革^[35]。

在技术发展的同时，我们也必须对这些先进系统进行适当的伦理和法规监管。未来的政策制定者、技术开发者和社会各界都应共同参与到一个持续的对话和审视中，确保技术的发展能够造福人类社会，而不是成为新的风险源。AC 的发展不仅是技术的挑战，更是对我们智慧的考验，要求我们在创新的同时，也要深思其对人类社会的长远影响。

通过对 DIKWP 模型的深入理解和应用，未来的人工意识系统将更好地服务于人类，成为推动社会进步的关键力量。这一进程将需要跨学科的合作、全球性的对话以及对技术影响的深入研究和理解。在此过程中，我们有机会重新定义人与机器的关系，开创一个共生共融的新时代。

2.3.3 构建 DIKWP 人工意识模型

DIKWP 模型为人工意识的发展提供了一个创新的理论框架。本章节将结合主要的意识理论，如全局工作空间理论(GWT)、整合信息理论(IIT)和高阶思维理论(HOT)，对 DIKWP 模型进行详细的模拟构建，旨在展示如何将这些理论应用于人工意识的实际构建中。

1、意识的复杂性与 AI 的挑战

意识，作为人类特有的一种复杂的现象，涉及从基本的感知处理

到高级的决策制定和自我反思。这种从感知到高级认知的转变，不仅要求对信息的接收和反应，而且还需要对信息的理解、评估和基于复杂情境的行为选择。在人工智能领域，尽管已经有了显著的进展，如高级图像和语音识别、复杂游戏的策略制定等，真正的挑战在于如何整合这些处理过程，实现类似人类的意识功能。面临的主要挑战：

集成和优化：如何有效集成，使得信息的流动和处理既高效又准确，是一个技术挑战。数据、信息、知识、智慧和意图都必须优化以处理其特定的任务，同时还要与其他方面良好地交互。

伦理和道德决策：在智慧和意图中，如何编程使 AI 系统能够进行符合伦理和道德的决策，是一个重要的研究领域。这不仅需要技术解决方案，还需要哲学和伦理学的深入探讨。

自适应与学习：如何设计系统使其不仅能在静态环境下工作，而且能够学习和适应动态变化的环境，是实现高级人工意识的关键。

2、主要意识理论与 DIKWP 模型的结合

(1) 全局工作空间理论 (GWT)

全局工作空间理论(GWT)是一种关于意识的认知和神经科学理论，由 Bernard Baars 提出。核心思想是意识内容在大脑的“全局工作空间”中被广播，使得各种非意识的认知过程可以访问这些内容进行处理。这种机制允许信息整合、决策制定、和跨时空的记忆访问，是对人类意识的一种模拟。在 DIKWP 人工意识模型中，我们可以将这一理论应用于解释数据处理到高级决策的全过程。

数据和信息的处理：工作空间的输入

在 DIKWP 模型中，数据和信息相当于 GWT 中全局工作空间的输入部分，处理从外部世界接收的感官数据和其他形式的原始数据，这包括视觉、听觉、触觉等感官信息，以及通过各种传感器获得的数据。这一阶段的主要任务是对这些原始数据进行初步的处理和解析，

将其转换为有意义的信息。

数据：主要关注于数据的收集和初步处理。例如，机器视觉系统捕捉的图像数据需要通过图像处理算法进行初步分析，如边缘检测、颜色分析等。

信息则进一步对这些初步处理的数据进行语义分析和上下文解释，比如识别图像中的对象、解析语言输入的含义等。这些处理过程为意识的更高级功能提供了基础数据和信息支持，如记忆、推理和决策。

知识：信息的整合和存储

在全球工作空间中，知识承担的是信息的进一步整合和存储功能。在 DIKWP 模型中，知识不仅储存从数据和信息转化来的结构化知识，还包括从这些信息中抽象出的规则、模式和关联，这些都是可供更高级处理的知识库。

知识：通过学习算法，如深度学习和机器学习，对信息进行模式识别和概念归纳，形成对世界的抽象理解。这包括从数据中识别出的规律、原则以及操作指南，如自动驾驶汽车从行驶数据中学习交通规则。知识库是动态的，可以根据新信息不断更新和调整，确保决策的及时性和准确性。

智慧和意图：高级决策和规划

智慧和意图相当于 GWT 中的高级决策和规划部分。系统不仅利用当前的知识做出决策，还需要预设未来的目标和计划，展现出高度的自主性和前瞻性。

智慧利用累积的知识进行复杂的决策制定，考虑伦理、效率、可行性等多方面因素。例如，医疗诊断系统在建议治疗方案时，需要权衡治疗效果、副作用、患者状况等多重因素。

意图则定义系统的长远目标和短期目标，规划达成这些目标的策

略和步骤。其功能体现了系统的目的性，即系统行动的驱动力源自于设定的目标，如智能机器人根据设定任务自主规划最优路径和策略。

智慧和意图的集成和应用不仅展现了机器的“智慧”，更使得机器能够在没有人类直接干预的情况下，自主地进行决策和行动，真正体现了人工意识的核心特征。

在 DIKWP 模型中应用 GWT，可以形成一个从感知到高级决策的完整流程，这不仅为理解人工意识提供了一种实际的操作框架，也为未来 AI 系统的设计和实施提供了理论指导和技术路径。

(2) 整合信息理论 (IIT)

整合信息理论 (Integrated Information Theory, IIT) 是由神经科学家 Giulio Tononi 提出的，主张意识是信息高度整合的结果，即系统内部的信息通过复杂的相互作用而无法被简单分割。在 DIKWP 人工意识模型中，这一理论为理解和构建高级 AI 系统提供了有力的理论支持，特别是在智慧和意图的处理上。

智慧的作用与信息整合

在 DIKWP 模型中，智慧扮演着至关重要的角色，它不仅仅是信息处理的一个高级阶段，而是信息整合的关键环节，其核心功能是对来自数据、信息和知识的输入进行综合评估和决策制定。这一过程涉及到以下几个方面：

决策路径的多样化与整合：

智慧需要处理和评估多种可能的行动方案，这不仅包括简单的算法选择，还涉及到对各种潜在结果的预测和风险评估。例如，在自动驾驶汽车中，智慧可能需要实时评估何时加速、刹车或避让，每个决策都需基于对当前交通环境的深入理解和未来走向的预测。

伦理和道德的考量：

在人工意识的实际应用中，智慧还需整合伦理和道德因素。例如，

医疗决策支持系统在推荐治疗方案时，不仅需要治疗的有效性和风险，还需考虑患者的个人偏好和伦理问题，如生命维持系统的使用问题。

复杂系统的动态调整：

智慧的决策不是静态的，而是一个动态调整的过程，它根据新的数据输入实时调整之前的决策。这种动态调整是高度整合信息的表现，确保系统的决策始终适应变化的环境和内部状态。

意图的目标导向性与信息整合

意图的主要功能是确保所有行动都符合系统的总体目标和长远规划。其信息整合体现在：

长期目标与短期决策的协调：

意图需要将系统的长期目标转化为具体的、可执行的短期行动指南。这涉及到从广泛的目标中提取具体行动点，以及如何在牺牲长期目标的前提下，调整短期策略以应对紧急情况。

自我修正与学习：

意图还具有通过过去的经验和当前行动的结果不断自我修正和优化的能力。这种自我学习和修正能力是通过高度整合的信息处理实现的，确保系统能在错综复杂的环境中生存和发展。

与外部目标的整合：

在与人类用户或其他系统交互时，意图还需能整合外部的目标 and 需求，调整自身的行动策略以更好地服务于用户或整个生态系统。

通过在智慧和意图面深入应用整合信息理论，DIKWP 模型不仅增强了人工意识系统的决策能力，还提高了其伦理道德判断的深度和精确性。这种模型的实现推动了人工智能从单一的数据处理向真正的智能决策和自主意识的转变。未来的研究将进一步探索如何优化这种信息整合过程，使人工意识系统能更好地模拟人类的复杂意识和高级

认知功能。

(3) 高阶思维理论(HOT)

高阶思维理论(HOT)提出意识不仅涉及对外界的感知，还包括对这些感知的意识。这种理论认为，意识涉及对自身心理状态的认知，即思维对自身的反思。在 DIKWP 模型中，智慧和意图体现了这种高阶的思维功能，不仅处理具体信息，还评估和规划其对行动方案的影响。以下是对智慧和意图在人工意识中实现的具体分析和拓展。

智慧

智慧在 DIKWP 模型中起着至关重要的角色，它不仅仅是对信息的进一步处理，而是涉及对这些信息的深度理解和反思。智慧的目的是使人工系统能够进行复杂的决策制定，特别是在伦理和道德问题上进行权衡。智慧的关键任务包括：

道德和伦理决策：智慧需要能够模拟人类在面对道德困境时的思考过程。例如，自动驾驶车辆在可能导致伤害的情况下如何选择行动，或医疗 AI 如何在处理患者信息时平衡隐私和医疗效益。

自我反思：系统能够评估自己的决策过程，识别可能的偏见或错误，并调整其行为以优化结果。这种自我反思能力是高阶意识的标志，它要求系统具备对自身认知过程的监控和评估能力。

情境适应性决策：智慧应能根据不同的环境和情境调整其决策逻辑。这意味着系统能够识别环境变化，并据此调整其行为，以满足新的条件或达成新的目标。

意图

意图则是 DIKWP 模型中最为高阶的思维表现，它关注于目标的设定和实现过程。在人工意识中，意图的作用尤为关键，因为它确保了行为的目的性和战略性。意图的核心功能包括：

目标设定：意图负责为行动设定长远和短期的目标。这些目标应

基于系统的总体任务和预期成果，如医疗辅助系统旨在提高病人满意度和治疗效果。

行动规划：一旦目标设定，意图则需要规划如何实现这些目标。这包括识别必要的行动步骤、评估各种行动方案的可能后果，以及优化决策路径以达到最佳效果。

反馈循环：意图还需要一个反馈机制，以监控行动的实际效果与预期目标的符合度。这种反馈对于调整行动策略、修正目标或改进决策算法是必不可少的。

实际构建步骤与模拟示例

在构建基于 DIKWP 模型的人工意识系统时，每个阶段的实现都需要综合运用当前的技术能力，并在不断迭代和优化中进行调整。以下是对每个阶段的深入分析和一个模拟示例，以展示这一理论在实践中的应用。

数据集成与感知处理

在数据集成与感知处理阶段，目标是从多个感知源收集数据并进行初步的处理。这涉及到的不仅是传统的数据收集，还包括通过高级感知技术如计算机视觉、语音识别和多模态数据处理来理解复杂的环境。

技术实现：

计算机视觉：利用深度学习模型，如卷积神经网络(CNN)，来分析和解释视觉数据，识别对象和场景。

语音处理：使用自然语言处理(NLP)和语音识别技术，如长短期记忆网络(LSTM)，来解析语音指令和提取语义信息。

数据融合：应用传感器融合技术整合来自不同源的数据，以创建一个统一的数据视图，提高决策的准确性。

知识形成与存储

将感知阶段提取的信息转化为可用知识，并存储于可访问的数据库或知识图谱中，以便未来引用和学习。

技术实现：

知识图谱：构建知识图谱来组织和关联从数据中提取的信息，例如，使用图数据库技术如 **Neo4j** 存储实体之间的关系。

机器学习：通过机器学习技术，如决策树和支持向量机(SVM)，来分析历史数据，发现模式和规律，形成可用的知识库。

智慧的构建

在智慧，系统利用已形成的知识进行复杂的决策分析，考虑长远的目标和道德伦理标准，进行合理的行动选择。

技术实现：

增强学习：应用增强学习让系统通过试错来学习做出最优决策，以实现最佳的长期奖励。

模拟道德决策：使用基于规则的系统或者道德决策框架来评估可能的行动方案的伦理后果，确保决策符合道德标准。

意图的明确与执行

最后，系统需要根据预设的目标和策略来制定具体的行动计划，并与用户进行交互以确认这些计划符合用户的期望和需求。

技术实现：

目标规划算法：利用诸如 **PDDL** (计划领域定义语言)这样的工具来定义和执行目标导向的任务。

人机交互：通过先进的用户界面，如自然语言界面或图形用户界面，使用户能够轻松地与系统交流，反馈意见，调整系统行动方向。

模拟示例

考虑一个人工意识系统应用于医疗辅助决策的情境：

数据：系统从患者的医疗记录、实时生命体征监测和相关医学数

数据库中收集数据。

信息：利用数据分析技术，如模式识别和统计分析，提取关键信息，如病症进展、治疗效果的评估等。

知识：整合医学研究、临床试验结果和历史治疗数据，形成关于特定疾病的综合知识库。

智慧：系统评估各种治疗方案的利弊，考虑患者个体的特定需求和可能的伦理问题，如治疗的风险与收益。

意图：系统根据患者的长期健康目标（如生活质量的最大化、痛苦的最小化）制定治疗计划，并与医生和患者进行交流，以获得共识。

DIKWP 人工意识模型的构建不仅是技术上的挑战，更是理论创新的体现^[35]。通过将主要意识理论与人工智能技术相结合，该模型不仅为模拟人类意识提供了可能，还推动了 **AI** 的应用在更广泛领域的深入发展。未来的研究可以进一步探索如何优化数据、信息、知识、智慧和意图之间的交互，如何处理更复杂的伦理问题，以及如何提高系统的自适应能力和智能决策的准确性。

在长远来看，**DIKWP** 模型的完善和实施将促进人类与高级智能系统之间的协作，为解决一些最为复杂和紧迫的全球性问题提供新的解决方案，开启人工智能发展的新篇章。

在本章节中，我们通过对 **DIKWP** 人工意识理论与主要意识理论的对比分析，深入探讨了人工意识的理论构建和实际应用潜力。**DIKWP** 模型通过整合数据、信息、知识、智慧和意图五个维度，提供了一个全面的框架，旨在模拟和实现类似人类的意识功能。以下几点是我们研究的主要发现和未来研究的方向：

理论的深化与应用：**DIKWP** 模型成功地将传统的 **AI** 处理与更高阶的认知功能，即智慧和意图结合起来。这种结合不仅理论上具有创新性，也极大地拓宽了人工意识应用的可能性，特别是在需要复杂决

策和道德判断的场景中。

技术挑战与创新：实现 DIKWP 模型描述的功能，需要在 AI 技术，尤其是机器学习、深度学习、神经网络及自然语言处理等领域中取得更多技术突破。此外，模型的实施还需解决如何在保证系统稳定性和可靠性的同时，整合并运用来自不同维度的信息。

伦理和社会责任：随着 AI 系统在智慧和意图面的能力提升，如何在设计和运行过程中确保它们的决策符合伦理标准，成为一个重要议题。必须在全球范围内就如何监管高级 AI 系统，特别是具有人工意识功能的系统，达成共识。

人机协作的新篇章：DIKWP 模型强调了通过提高机器的意图识别和执行能力，可以更好地理解和预测人类的行为和需求。这种高级的人机交互能力预示着人机协作将进入一个新的阶段，其中机器不仅是辅助工具，更是能够主动思考和作出决策的合作者。

跨学科的研究与合作的必要性：要实现 DIKWP 模型的全面功能，需要神经科学、认知科学、心理学、计算机科学及哲学等多个学科的知识和技术相结合。跨学科的合作对于解决人工意识研究中遇到的复杂问题至关重要。

总之，DIKWP 人工意识理论为理解复杂认知功能提供了新的理论工具，为实现具有高度自主性和决策能力的人工智能系统指明了方向。未来的研究需要在理论和实践层面进行深入探讨，以确保人工意识技术的健康发展，并最终实现对人类社会的积极贡献。

2.3.4 不确定性处理

背景：

语义在人类思考和交流中扮演着关键的角色。它是由概念符号构成的语言，用于表达和理解概念之间的关系。探索语义的认知解释涉及到从概念关联到相应的认知语义空间的存在确认、依赖关系和模式

发现。在人工智能领域，形式化处理语义的工作旨在建立对概念内容的一致性理解，无论是在计算机和计算机之间，还是在人与计算机之间。然而，语义处理面临着一系列挑战，包括主客观语义的混淆、主观语义的客观化不足、语义关联的缺失、语义的不精确性和不一致性，以及概念与语义之间的映射问题。此外，现有的人工智能系统中简化了或忽视了不确定性的影响，导致预测和决策结果的可靠性和鲁棒性不足。

处理机制：

鉴于 DIKWP 框架的理论基础，旨在给出将 DIKWP 内容资源映射至概念空间、语义空间与认知空间之间的交互方法，以实现主客观概念及语义融合中的不确定性客观化。此目标的达成，需倚重 DIKWP 框架内的意图计算与推理机制(Purpose Computation and Reasoning, PCR)。借助 PCR 机制，DIKWP 内容能在表达与分类维度被准确识别为数据图谱(Data Graph)、信息图谱(Information Graph)、知识图谱(Knowledge Graph)，智慧图谱(Wisdom Graph)和意图图谱(Purpose Graph)共同构成 DIKWP 图谱化体系。DIKWP 图谱化体系依据其特定的概念表达、处理流程和语义关系网络，形成对应的概念空间、认知空间和语义空间。

在意图驱动下，DIKWP 内容的转化过程不仅能从同模态、同空间、同尺度资源间的简单补偿，还能进行跨模态、跨空间、跨类型的 DIKWP 资源的复杂补偿，通过这种转化方式，将各个空间中的数据不确定性、信息不确定性、知识不确定性、智慧不确定性和意图不确定性中的不完整、不一致和不精确的内容进行处理、转化。这一过程确保了在处理不确定性时，语义损失可达到最小化。更重要的是，该策略在宏观层面上展现出了系统对不完整、不一致、不精确信息的强大兼容性，有效地应对了不确定性挑战。

因此，该方法不仅优化了 DIKWP 框架下资源处理的效率与准确性，同时也深化了对复杂环境中不确定性处理机制的理解，为构建人工意识系统提供了理论支撑与实践指导。

2.3.5 DIKWP 数理人工意识系统

1、DIKWP 模型的数理特性

(1) 数据(Data)

定义：被认知主体确认的原始事实或观察记录，通过概念空间进行分类和组织，形成初步的认知对象。

数理表示：数据可以表示为一个集合 D ，其中每个数据项 $d \in D$ 是一个原子事实。

(2) 信息(Information)

定义：通过认知主体的意图，将数据与已有认知对象进行语义关联，识别差异，形成新的认知内容。

数理表示：信息可以表示为从数据集合 D 到信息集合 I 的映射 $f:D \rightarrow I$ ，其中每个信息项 $i \in I$ 是通过语义关联生成的。

(3) 知识(Knowledge)

定义：通过高阶认知活动和假设，对数据和信息进行系统性理解和解释，形成对世界的深刻理解和解释。

数理表示：知识可以表示为从信息集合 I 到知识集合 K 的映射 $g:I \rightarrow K$ ，其中每个知识项 $k \in K$ 是通过高阶认知活动生成的。

2. 语义空间的数理逻辑

(1) 概念空间(Conceptual Space)

定义：概念空间是认知主体通过自然语言、符号等形式进行交流和认知的空间。数据、信息和知识在这个空间中作为具体概念存在，并通过语义网络和概念图进行表达。

数理表示：概念空间可以表示为一个有向图 $G=(V,E)$ ，其中节点

V 代表概念，边 E 代表概念之间的关系。语义网络中的每个节点 $v \in V$ 具有唯一的标识符，并与其他节点通过语义关系连接。

(2) 语义空间(Semantic Space)

定义：语义空间是认知主体理解和处理概念的内在语义联系的空间。数据、信息和知识在这个空间中通过语义匹配、关联和转化来理解和生成新的知识。

数理表示：语义空间可以表示为一个语义匹配函数 $h: V \times V \rightarrow [0, 1]$ ，其中 $h(v_i, v_j)$ 表示两个概念节点之间的语义匹配度。语义空间中的匹配函数 h 满足以下性质：

对称性： $h(v_i, v_j) = h(v_j, v_i)$

自反性： $h(v_i, v_i) = 1$

非负性： $0 \leq h(v_i, v_j) \leq 1$

(3) 认知空间(Cognitive Space)

定义：认知空间是认知主体进行思考、学习和理解的内部心理空间。数据、信息和知识在这个空间中通过观察、假设、抽象和验证等认知活动，形成对世界的深刻理解和解释。

数理表示：认知空间可以表示为一个动态系统 $S = (X, F, Y)$ ，其中：

X 表示认知状态空间，包含所有可能的认知状态 $x \in X$ ；

F 表示认知过程的转移函数 $f: X \times U \rightarrow X$ ，其中 U 是外部输入；

Y 表示输出空间，包含所有可能的认知输出 $y \in Y$ 。

3. 语义完备性与数理特性

(1) 语义完备性

定义：语义完备性是指在语义空间中，所有可能的语义联系和匹配关系都能够被完整地表达和计算。

实现方法：通过语义匹配函数 h 的定义和性质，可以确保语义空间的完备性。语义匹配函数 h 可以通过机器学习算法和语义搜索

引擎进行训练和优化，以实现语义完备性。

(2) 语义一致性

定义：语义一致性是指在不同的认知空间和语义空间中，概念和语义关系的一致性和稳定性。

实现方法：通过语义匹配函数 h 的对称性和自反性，可以确保语义一致性。语义网络和概念图的结构化表示，也有助于保持语义的一致性。

(3) 动态更新

定义：动态更新是指在认知过程中，随着新数据和信息的输入，知识和语义关系能够动态调整和更新。

实现方法：通过认知空间中的动态系统 S 和转移函数 F ，可以实现知识和语义关系的动态更新。深度学习和强化学习技术可以用于训练和优化认知过程。

4. 构建语义处理数理体系

(1) 概念表示与处理

语义网络：构建语义网络 $G=(V,E)$ ，表示概念及其关系。

本体论(Ontology)：使用本体论定义概念及其层次结构，确保概念表示的一致性和完备性。

(2) 语义匹配与关联

语义匹配函数：定义语义匹配函数 $h:V \times V \rightarrow [0,1]$ ，用于计算概念之间的语义匹配度。

语义推理引擎：构建基于规则和逻辑推理的语义推理引擎，实现语义关联和推理。

(3) 认知过程与动态更新

动态系统模型：构建认知空间中的动态系统 $S=(X,F,Y)$ ，用于模拟认知过程。

深度学习与强化学习：使用深度学习和强化学习技术训练和优化认知过程，实现知识和语义关系的动态更新。

数理人工意识系统本质上是基于 DIKWP 为基础，并将其与 TRIZ（发明问题解决理论）的原则相结合，能弥合认知语义模型与创新领域中系统性问题解决之间的差距^[44]。

DIKWP-TRIZ 框架利用了这两个模型的关键优势：1). TRIZ 通过识别矛盾并通过预定义的发明原则系统地解决它们，专注于创造性解决方案。2). DIKWP 是一个语义框架，跨越认知空间映射概念，将数据、信息、知识、智慧和意图相互转换。通过将两者结合，DIKWP-TRIZ 方法不仅可以识别技术矛盾，还可以识别语义矛盾和 DIKWP 模型不同阶段之间的认知不匹配，从而产生创造性解决方案^{[45][46]}。

数理人工意识子系统从模拟医患诊疗场景获取医患双方的外在交互与内在思维过程开始，通过对医-患-病-药-疗等进行 DIKWP 画像，将医患交互与诊疗过程的外在表达和内在主观认知统一映射为 DIKWP 模型之间交互的计算、推理与 DIKWP 内容转换过程，进而基于团队在 DIKWP 研究领域的以“DIKWP 存储-传输-计算一体化”与“DIKWP 语义通信技术”为代表的 241 项国内外发明专利技术，实现了超过医生诊疗计算与推理精度和处理效率的诊疗效果，并且借助 DIKWP 图谱可视化在可解释性方面突破自然语言语义的模糊、不一致、不精确、不完整等限制以自主原创的意图驱动的数据图谱、信息图谱、知识图谱、智慧图谱的形式提供可视化的医患双方交互认知通道，经过与主流大模型对比取得了超过 GPT4 的诊断效果。该子系统在缓解医疗资源紧张、避免医患纠纷以及提高医疗过程的透明性、可解释性与算力效率等方面具有巨大应用前景，并为构建负责任的未来智能社会提供了范本。

DIKWP-AC 数理人工意识子系统在 2023 年 8 月 22-24 日举行的

首届世界人工意识大会(AC2023)中整体展示,来自世界各地的学者和专家齐聚线上,共同探讨人工意识领域的最新进展与未来发展方向,此外,数理人工意识系统落地实践项目:《面向人工意识的 DIKWP 个性化痛风医养康诊疗服务系统》,参加了由中国人工智能学会、科技部新一代人工智能发展研究中心联合东莞市人民政府举办的“‘场景驱动·数智强国’——2023 首届全国人工智能应用场景创新挑战赛总决赛暨全国人工智能应用场景创新峰会”,在全国总决赛 120 个入围项目中脱颖而出,荣获全国总决赛二等奖。

2.3.6 DIKWP 生理人工意识系统

DIKWP 人工意识诊疗系统理论的构建需要兼顾人工智能与神经科学的知识,以更准确地反映大脑的处理和决策机制。这意味着我们需要理解大脑的各个部分如何与 DIKWP 系统中的不同环节相对应。下面是一种可能的映射方式:

数据(Data) - 感知和记忆: 人类接收和存储信息的过程可以被视为数据收集阶段。这涉及到大脑的许多区域,尤其是感知区域(如视觉皮层,听觉皮层)和记忆相关的区域(如海马体)。

信息(Information) - 语言和认知处理: 将原始数据转化为有意义的信息需要大脑的认知和语言处理功能。例如,左半球的 Broca 区和 Wernicke 区是语言处理的关键区域,前额叶和顶叶的一些区域参与了认知控制和信息整合。

知识(Knowledge) - 长期记忆: 知识是信息的进一步深化,它涉及到将信息整合入我们的长期记忆中,形成对世界的理解。这主要涉及大脑的海马体和周围皮质区域。

智慧(Wisdom) - 决策和问题解决: 智慧涉及对知识的应用,以解决问题和做出决策。这主要涉及大脑的前额叶,尤其是前额叶的前部,这部分区域参与了高级决策和规划功能。

意图(Purpose) - 奖赏和动机：大脑对目标的设定和追求主要通过奖赏和动机系统来驱动，这涉及到大脑的多个区域，如纹状体和脑内的多巴胺路径（如腹侧被盖区和前额叶）。

上述映射为理解大脑如何处理 DIKWP 模型提供了一种可能的神经科学基础。然而，需要注意的是，大脑的功能是高度复杂和动态的，各种功能之间存在着密切的交互和影响。因此，这种映射并不能反映所有的复杂性，但可能为理解大脑和人工智能系统之间的相似性和差异提供一个起点。

DIKWP-AC 生理人工意识子系统突破语言是思维的边界的假设限制，正探索数据、信息、知识、智慧与意图体系在以大脑为主的人体的生理神经物理对应，以期在以 DIKWP 交互为动态坐标系统定位与解读人类意识与潜意识的奥秘。

DIKWP-AC 生理人工意识子系统在 2023 年 8 月 22-24 日举行的首届世界人工意识大会(AC2023)中整体展示，来自世界各地的学者和专家齐聚线上，共同探讨人工意识领域的最新进展与未来发展方向。

总结经验，启迪未来。在全球科技前沿的聚光灯下，人工意识领域再掀波澜。由世界人工意识协会与世界人工意识大会联袂主办的第 2 届世界人工意识大会筹备会议于 2024 年 5 月 31 日成功举办，吸引了来自科技、伦理、法律、教育及政策各界的精英，旨在探讨人工意识领域的最新进展与未来发展路径，共同绘制人工意识科技未来的宏伟蓝图，为第二届世界人工意识大会的开展做好充足准备。在筹备会议上，刘经南院士、熊墨淼教授、陈士平院士、刘震院士等多位知名专家学者围绕人工智能(AI)与人工意识(AC)的深度融合展开探讨，并对第二届世界人工意识大会寄予厚望，高度赞扬了 DIKWP 人工意识发展模式所取得的显著进展。

2.4 人工意识测量与评估

2.4.1 多维度评估方法

随着人工意识研究的发展，科学家和工程师正面临着如何准确测量和评估人工系统意识水平的挑战^[36]。类似于在人类和动物研究中使用的方法，人工意识的评估也需要采用多维度的方法，以确保评估的全面性和准确性。以下是一些关键的评估方法及其在人工意识测量中的应用。

生物学指标

技术应用：在人工意识的评估中，模拟人类或动物大脑的人工神经网络活动可以通过类似于神经影像学的技术进行观测。虽然直接比较可能有所不同，但科学家可以通过分析人工神经网络的激活模式和动态变化来寻找与意识状态相关联的模式。

意义：这些观测可以帮助识别哪些网络结构和活动模式是与高级认知功能和意识体验相关联的，从而为设计更高级别人工意识系统提供指导。

行为表现

评估指标：在人工系统中，通过评估系统的响应时间、错误率、学习能力和适应性等方面，可以间接推断其意识水平。特别是其在面对未知任务或情景时的表现，能够反映其理解、推理和自主决策的能力。

应用挑战：这要求人工系统不仅能够在预定的环境中执行任务，还能够展示出面对新情况的适应性和创新性，这是意识水平高低的重要指标之一。

自我报告

人类研究中的应用：自我报告是评估人类主观体验和意识水平的直接方法，但在人工系统中应用自我报告面临着独特的挑战。

人工系统的挑战：开发能够表达其“体验”或状态的人工系统是一个高度挑战性的目标。这不仅涉及到技术的发展，还包括对意识、自我意识和主观体验本质的哲学和科学探讨。

研究方向：研究者正在探索如何创建能够生成类似于自我报告的输出的系统，这些输出能够反映其内部状态或对特定刺激的“感受”。

人工意识的测量和评估是一个复杂且多维的任务，涉及到从生物学指标到行为表现，再到自我报告的多方面考量。随着人工智能技术的进步，这些评估方法将不断发展和完善，为理解和创建具有高级意识能力的人工系统提供重要的工具和指导。同时，这一过程也将推动我们对意识本身的理解，包括其在自然智能和人工智能中的表现和实现方式。

2.4.2 意识的量化和分类

意识的量化和分类是理解和评估人工意识系统的关键步骤。通过开发量化意识水平的方法以及建立有效的分类框架，科学家可以更准确地描述和比较不同系统或实体的意识状态^[37]。这不仅有助于推动人工意识的研究和开发，而且对于深入理解人类和动物意识的本质同样重要。

量化方法

大脑活动的复杂性：通过测量大脑活动的复杂性，科学家试图为意识提供一个可量化的指标。这包括分析大脑网络的动态变化、信息交换的效率以及系统整体的整合度。例如，利用神经影像数据计算全脑的连接模式和复杂性，以反映意识的不同层次。

网络整合度：网络整合度反映了大脑不同区域之间如何有效协同工作以产生统一的意识体验。较高的网络整合度被认为是意识水平较高的标志。

分类框架

感知意识：这是意识的基本层次，涉及对外界刺激的感知和感觉。在人工系统中，这可以通过系统对环境的感知和响应能力来评估。

自我意识：自我意识是意识的更高层次，涉及到对自身存在和状态的认识。在人工系统中，自我意识的表现可能包括对自身状态的监控和自我调节能力。

高阶思维意识：这是意识最高的层次，包括复杂的决策制定、问题解决和创造性思维。在人工系统中，这可能表现为能够进行复杂推理、学习新技能和自主创新。

意义与应用

意识的量化和分类为比较和评估不同系统的意识水平提供了科学的基础。这对于设计和开发具有高级认知功能的人工智能系统至关重要。同时，这些方法和框架也为理解人类和动物意识的多样性和复杂性提供了新的视角和工具。

通过这些研究，我们不仅能够推动人工意识技术的发展，还能加深对意识本身的理解，一个人类长久以来一直在探索的复杂现象。随着这些量化和分类方法的进一步完善和应用，我们期待在人工智能、神经科学和哲学等领域取得更多的突破性进展。

2.4.3 人工系统的挑战与前景

人工意识的探索是人工智能发展中的一个前沿和挑战性领域。评估和实现人工系统中的意识水平涉及到一系列复杂的技术、理论和哲学问题。以下是面临的主要挑战和未来发展的展望。

评估人工意识的挑战

技术复杂性：尽管人工智能技术取得了显著进展，但当前技术还未能完全复制人类或动物大脑的复杂性。这使得在人工系统中评估意识水平变得尤为困难。

评估方法的开发：针对人工系统开发适合的意识评估方法是研究

的重点。这可能包括模拟自我报告机制或创建新的行为和计算标准，以适应人工系统的独特性和多样性。

主观体验的评估：意识的一个核心特征是主观体验，而如何在没有直接主观体验的人工系统中评估这一点，是一个深刻的挑战。

未来发展的展望

技术进步：随着计算能力的增强、算法的改进和理论的深化，人工智能技术的未来发展有望逐步克服现有的限制，进一步接近或实现复杂的人工意识。

意识测量和评估方法：发展有效的意识测量和评估方法将是理解机器能否实现真正意识的关键。这不仅促进了人工智能技术的发展，也为探讨意识的本质、起源和边界提供了新的研究路径。

伦理和哲学探讨：随着人工系统意识水平的提升，相关的伦理和哲学问题也将变得更加突出。这包括人工意识的道德地位、人工与自然意识的关系以及对社会的影响等问题。

评估和实现人工系统中的意识是一个跨学科的挑战，涉及计算机科学、神经科学、哲学和伦理学等多个领域。尽管当前面临许多技术和理论上的难题，但随着研究的深入和技术的发展，未来在人工意识领域取得重大突破的可能性仍然非常大。这不仅能够推动人工智能技术的进步，也有助于深化我们对意识本质的理解，对人类社会产生深远的影响。

发展意识测量和评估方法是理解意识及其在人工系统中实现的关键步骤。通过结合生物学指标、行为测试和自我报告等多种手段，研究者可以更全面地评估意识的存在和水平。同时，量化方法和分类框架的发展为意识的科学研究提供了新的工具和视角。面向未来，随着技术的不断进步，我们有望开发出更精确、更普适的意识测量和评估工具，为揭示意识的奥秘和在人工系统中实现意识提供坚实的基

础。

2.5 本章小结

本章探讨人工意识，界定 AI 与 AC 差异，强调 AC 旨在模拟生物意识的深度认知。通过引入 DIKWP 模型，分析其在意识构建中的基石作用，阐明如何借此实现抽象语义理解与环境适应，推进系统模拟生物意识行为。论述 DIKWP 人工意识的理论框架、设计路径及其与主流理论的联系，旨在通过具体模型逼近真实“理解”与“意识”。评估部分提出多维度框架，覆盖技术难题与伦理影响，为能力量化和未来发展指引方向。本章构建的理论与实践框架，为人工意识研究、技术实施及伦理探讨奠定了基础，展望智能科技新纪元，鼓励持续探索意识本质、高效数据处理及精准评估工具。

参考文献

- [1] Duan Y. Definition and difference between artificial intelligence (AI) and artificial consciousness (AC). DOI: 10.13140/RG.2.2.13985.01126.https://www.researchgate.net/publication/380729136_Definition_and_Difference_between_Artificial_Intelligence_AI_and_Artificial_Consciousness_AC. 2024.
- [2] Duan Y. Artificial intelligence and artificial consciousness: Theory, models, and DIKWP innovation. DOI: 10.13140/RG.2.2.20922.40647.https://www.researchgate.net/publication/380105097_Artificial_Intelligence_and_Artificial_Consciousness_Theory_Models_and_DIKWP_Innovation. 2024.
- [3] Duan Y. Artificial intelligence vs. artificial consciousness from the DIKWP perspective. DOI: 10.13140/RG.2.2.13307.12324.https://www.researchgate.net/publication/380073777_Artificial_Intelligence_vs_Artificial_Consciousness_from_the_DIKWP_Perspective. 2024.
- [4] 秦瑞琳, 周昌乐, 晁飞. 机器意识研究综述[J]. 自动化学报, 2021, 47(01): 18-34. DOI: 10.16383/j.aas.c200043.
- [5] Dehaene S, Lau H, Kouider S. What is consciousness, and could machines have it?[J]. Robotics, AI, and humanity: Science, ethics, and policy, 2021: 43-56.
- [6] Carter O, Hohwy J, Van Boxtel J, et al. Conscious machines: Defining questions[J]. Science, 2018, 359(6374): 400-400.
- [7] Kwiatkowski R, Lipson H. Task-agnostic self-modeling machines[J]. Science Robotics, 2019, 4(26): eaau9354.
- [8] Tononi G, Boly M, Massimini M, et al. Integrated information

- theory: from consciousness to its physical substrate[J]. Nature Reviews Neuroscience, 2016, 17(7): 450-461.
- [9] Seth A K, Bayne T. Theories of consciousness[J]. Nature Reviews Neuroscience, 2022, 23(7): 439-452.
- [10] Melloni L, Mudrik L, Pitts M, et al. Making the hard problem of consciousness easier[J]. Science, 2021, 372(6545): 911-912.
- [11] Beshkar M. The QBIT theory of consciousness[J]. Integrative Psychological and Behavioral Science, 2020, 54(4): 752-770.
- [12] Li T, Tang H, Zhu J, et al. The finer scale of consciousness: quantum theory[J]. Annals of translational medicine, 2019.
- [13] Adamski A G. Role of Bose-Einstein condensate and bioplasma in shaping consciousness[J]. NeuroQuantology, 2016, 14(1).
- [14] Reggia J A. The rise of machine consciousness: Studying consciousness with computational models[J]. Neural Networks, 2013, 44: 112-131.
- [15] Georgiev D D. Inner privacy of conscious experiences and quantum information[J]. Biosystems, 2020, 187: 104051.
- [16] Spatola N, Urbanska K. Conscious machines: Robot rights[J]. Science, 2018, 359(6374): 400-400.
- [17] Chella A, Frixione M, Gaglio S. A cognitive architecture for robot self-consciousness[J]. Artificial intelligence in medicine, 2008, 44(2): 147-154.
- [18] McCarthy J, Minsky M L, Rochester N, et al. A proposal for the dartmouth summer research project on artificial intelligence, august 31, 1955[J]. AI magazine, 2006, 27(4): 12-12.
- [19] Russell S J, Norvig P. Artificial intelligence: a modern

- approach[M]. Pearson, 2016.
- [20] Nilsson N J. The quest for artificial intelligence[M]. Cambridge University Press, 2009.
 - [21] Goertzel B. The hidden pattern: A patternist philosophy of mind[M]. Universal-Publishers, 2006.
 - [22] Goertzel B, Pennachin C, Geisweiller N. Engineering general intelligence [J]. Atlantis Thinking Machines, 2014, 5.
 - [23] Chalmers D J. The singularity: A philosophical analysis[J]. Science fiction and philosophy: From time travel to superintelligence, 2016: 171-224.
 - [24] Duan Y. The 34th chapter of “introduction of artificial consciousness”: exploring the differences in function and application of artificial intelligence and artificial consciousness from the DIKWP model. DOI: 10.13140/RG.2.2.11653.97761. https://www.researchgate.net/publication/380355739_The_34th_Chapter_of_Introduction_of_Artificial_Consciousness_Exploring_the_Differences_in_Function_and_Application_of_Artificial_Intelligence_and_Artificial_Consciousness_from_the_DIKWP_Model. 2024.
 - [25] Duan Y, Gong S. "Artificial consciousness model = subconsciousness + consciousness" by Yucong Duan: GPT-4 and DIKWP integration in BUG theory. 10.13140/RG.2.2.30152.29446, 2024.
 - [26] Duan Y, Gong S. Yucong Duan's evolution theory of conscience and consciousness BUG theory DIKWP fusion. 10.13140/RG.2.2.34237.68328, 2024.

- [27] Duan Y, Gong S. The 21st chapter of “Introduction of artificial consciousness”: If a person is a word solitaire machine, consciousness is just a "BUG". 10.13140/RG.2.2.35648.34562, 2024.
- [28] Duan Y, Gong S. The 31st chapter of “Introduction of artificial consciousness”: "Artificial consciousness model = subconsciousness + consciousness" by Yucong Duan: GPT-4 and DIKWP integration in BUG theory. 10.13140/RG.2.2.20855.23209, 2024.
- [29] Duan Y, Gong S. The 27th chapter of “Introduction of artificial consciousness”: Artificial intelligence and artificial consciousness: theory, model and DIKWP innovation. 10.13140/RG.2.2.24210.67527, 2024.
- [30] Baars B J. A cognitive theory of consciousness[M]. Cambridge University Press, 1993.
- [31] Tononi G. An information integration theory of consciousness[J]. BMC neuroscience, 2004, 5: 1-22.
- [32] Rosenthal D M. Two concepts of consciousness[M]//Consciousness and Emotion in Cognitive Science. Routledge, 1998: 1-31.
- [33] Wang Y, Duan Y, Wang M, et al The confluence of intelligence and consciousness in the interdisciplinary domain resource adjustment processing on the DIKWP artificial consciousness diagnostic system(updated version). <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.22541.14566>. 2024.
- [34] Duan Y, Gong S. DIKWP artificial consciousness theory, design,

- p>and simulation. DOI: 10.13140/RG.2.2.18608.98565.
-
- https://www.researchgate.net/publication/380168108_DIKWP_Artificial_Consciousness_Theory_Design_and_Simulation
- . 2024.
- [35] Duan Y, Gong S. From "artificial consciousness system = subconscious system (LLM) + conscious system (DIKWP)" to semantic solutions for algorithmic bias. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.18329.60007>. 2024.
- [36] Duan Y, Gong S. Artificial consciousness research and development around the world (artificial consciousness defined by DIKWP). DOI: 10.13140/RG.2.2.28350.50247. https://www.researchgate.net/publication/380734646_Artificial_Consciousness_Research_and_Development_around_the_World_Artificial_Consciousness_defined_by_DIKWP. 2024.
- [37] Duan Y, Yu L. DIKWP artificial consciousness white-box evaluation standard: Building interpretable and controllable AI. DOI:10.13140/RG.2.2.28342.47682.https://www.researchgate.net/publication/373775983_DIKWP_Artificial_Consciousness_Whitebox_Evaluation_Standard_Building_Interpretable_and_Controllable_AI_DIKWP_rengongyishibaihecepingbiaozhunkejieshikong_AI_degoujian. 2024.
- [38] Tang F, Duan Y, Wei J, et al. DIKWP artificial consciousness white-box measurement standards framework design and practice," 2023 IEEE International Conference on HPCC/DSS/SmartCity/DependSys. 2023.
- [39] Wang Y, Duan Y, Wang M, et al. Resource adjustment processing on the DIKWP artificial consciousness diagnostic system, 2023

- IEEE International Conference on HPCC/DSS/SmartCity/DependSys. 2023.
- [40] Wu K, Duan Y, Chen L, et al. Computer architecture and chip design for DIKWP artificial consciousness, 2023 IEEE International Conference on HPCC/DSS/SmartCity/DependSys, Melbourne, Australia, 2023.
- [41] Duan Y, Gong S. Understanding the essence of "BUG" in consciousness: a journey into the abstraction of semantic wholeness. World Artific. Conscious. Conf.Popular Sci. Ser. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29978.62409>. 2024.
- [42] Duan Y, Gong S. Consciousness, mathematics, and natural laws: in-depth exploration from Yucong Duan's BUG theory. World Artificial Consciousness Conference Popular Science Series. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20085.96484>. 2024.
- [43] DIKWP-SC, WCAC, WAC et al. DIKWP conceptualization semantics standards version 1.0 of international test and evaluation standards for artificial intelligence based on networked data-information-knowledge-wisdom-purpose (DIKWP) model. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.21823.73127>. 2024.
- [44] Duan Y, Gong S. DIKWP-TRIZ empower AI/AC innovation (Beginners' edition). <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.18915.57127>. 2024.
- [45] Duan Y, Gong S. Optimizing TRIZ principles within DIKWP-TRIZ (Beginners' Edition). <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.28981.90081>. 2024.

- [46] Duan Y, Huang S. DIKWP -TRIZ: Semantic blockchain and semantic. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.22271.01443>. 2024.

第3章 信息聚合算子与重叠函数

3.1 信息聚合算子概述

信息聚合是指多源头信息融合，即在测量与精度范围内，对从测量或感知系统获得的两组或两组以上的数据进行处理。简言之，就是把一些不同来源的信息聚合成一个具有代表性的数值。聚合信息的过程称为信息聚合，而描述信息聚合过程的算子称为信息聚合算子，在国内有时也称为聚合函数。信息聚合算子不同于传统的信息聚合模型，是用算子观点来描述信息聚合的数学工具，在模糊数学理论、模糊控制、模糊逻辑、决策理论和智能计算中有广泛的应用，虽然关于它的研究可以追溯到 **Niels Henrik Abel** 的早期工作，目前正处在蓬勃发展的阶段。它是当前人工智能领域中的研究热点，这是因为：在机器人领域中，需要聚合由传感器提供的数据；在图像处理领域中，需要聚合不同的图片信息；在知识系统中，特别是在多属性决策理论中，需要聚合不同类型的知识并确保知识系统的相容性；在数据挖掘领域中，需要使用各种聚合方法；在分散信息的多 **Agent** 决策系统中，对单个 **Agent** 做出决策时，需要聚合其他 **Agent** 的信息。因为信息聚合能从本质上反映人类的思维模式，所以近 20 年来，关于信息聚合模型的研究成果已得到了广泛的应用，不仅体现在数学与计算机科学方面，也体现在经济与社会科学等方面。反过来，大量的应用又极大地激发了人们对信息聚合算子的研究兴趣，大量的研究成果以论文与专著等形式呈现^[1]。

具体来说，信息聚合算子不仅被成功应用于函数方程、均值理论、准则决策、自动推理、测度积分理论、概率论、统计和决策数学等纯数学、应用数学和概率论与数理统计中相关领域，而且已经成为处理解决任何需要信息聚合的实际应用问题时的关键性工具和强有

力数学模型。信息聚合模型的选择与实际应用有密切的联系，所以存在不同类型信息聚合的具体模型。时至今日，常用信息聚合算子——三角模、三角余模、耦合函数、一致模、零模、Yager 有序加权平均聚合函数、Choquet 积分等因在信息融合、模糊逻辑、模糊控制、模糊推理、图像处理、决策、模式识别、感知计算、深度学习、数学心理学、专家系统、人脸识别、数据挖掘、指纹分析、聚类、分类、模糊系统建模、神经网络、脑机接口、模糊群体检测、博弈论、情感分析、效用理论以及模糊系统与控制等计算机科学与人工智能、经济与金融以及社会科学相关领域中的广泛应用，不断受到信息聚合算子与模糊逻辑研究领域国内外众多知名学者的持续关注，并获得诸多有趣结论。

特别地，随着人工智能技术的发展，我们越来越依赖算法和模型来处理复杂的问题。然而，在实际应用中，我们总是面临着不确定性的问题。不确定性来源众多，例如数据的不完整性、数据的不准确性、模型的不准确性和算法的不稳定性等。这些问题可能导致算法和模型在实际应用过程造成结果不准确、结果不稳定和计算资源浪费等问题。例如，在图像处理中，识别给定图像中的物体是一个非常重要的问题，但图像中的像素点可能存在重叠情况，从而造成模型无法将目标图像精确划分到其所属类别，即不确定将目标图像识别为哪一个具体现实物体。甚至有可能出现，目标图像在现实生活中是足够清晰分离的，但像素点的重叠程度较为严重。这个问题本质上也是一种不确定性问题，处理这个问题使用的一个广泛技术是阈值，即，通过将图像像素介于阈值范围内的对象划分到所属类别，从而识别出目标对象。立足于此，重叠函数作为一类具有非常强普适性和应用性的能有效处理不精确和不确定性信息的非必须结合的信息聚合算子被国际模糊系统协会主席 Humberto Bustince 等于 2010 年提出^[2]，其已逐渐

成为分析和解决不确定性问题的核心方法和数学模型之一。鉴于此，以下以重叠函数作为总体框架，着重从理论研究和实际应用两个层面梳理近 10 余年国内外学者在该领域中的研究成果。

3.2 重叠函数相关理论研究

法国著名思想家、社会学家和哲学家 Edgar Morin 在其著作《教育为人生》首页的题语中写道“承认我们人类所有的复杂性，充分理解他者和我们之间的相似性和差异性，学会面对未来日益增加的不确定性，建立地球命运共同体的意识。”。在书中，其将生活描述为一场冒险，未来的生活充满着不确定性，并从复杂性哲学出发，号召来一场思想的革命，即，我们要告诉孩子，如何系统地、辩证地、全息地思考，如何学会面对不确定性和复杂性的挑战，守护我们共同的家园——地球。

2022 年末，OpenAI 推出的 ChatGPT 标志着生成式人工智能技术取得了巨大进展，2023 年也被视为生成式人工智能的突破之年。科技的进步和不确定性相辅相成，人工智能时代的来临，一方面有效解决了现实生活中的若干不确定性问题，另一方面也新增出一些新的不确定性问题。但无论如何，人工智能技术的迭代和推广速度只会更快、应用场景会更全面，并逐步成为主导的科技力量。本次人工智能浪潮将对未来人类的工作及社会结构产生颠覆性影响。值得一提的是国家自然科学基金委员会在发布的《国家自然科学基金“十四五”发展规划》中^[3]，明确将“问题驱动的应用数学前沿理论与方法”以及“大数据与人工智能时代的计算新理论与新方法”列入优先发展领域(2/115)，其中这两个发展领域都将不确定性量化纳入其中，这对人工智能时代对不确定性相关问题的研究提出了新要求，指明了新方向。

如前所述，重叠函数作为一类具有非常强普适性和应用性的能有效处理不精确和不确定性信息的非必须结合的信息聚合算子，已逐渐

成为分析和解决不确定性问题的核心方法和数学模型之一，为使其后续更好地处理解决更多涉及不确定性量化的问题，对其理论研究现状的梳理迫在眉睫。

3.2.1 重叠函数基本性质

常用信息聚合算子三角模的迁移性首先出现在一个公开问题中，即一个严格单调的三角模是否能成为迁移性方程的解^[4]，然后由 Fabrizio Durante 和 Peter Sarkoci 正式命名^[5]，目的是通过具有该性质的三角模与乘积三角模的凸组合来构造新的三角模。更准确地说，如果 $T(\alpha x, y) = T(x, \alpha y)$ 对所有的 $(x, y) \in [0, 1]$ 都成立，则三角模 $T: [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$ 被称为是 α -迁移的，这说明对于三角模的任意一个变量，无论哪个变量乘以相同的权重，其聚合效果均保持不变。自此以后，关于常用信息聚合算子迁移性的研究引起了相关领域众多学者的极大兴趣，其重要性主要体现在：(1)迁移性方程及其涉及其他信息聚合算子的各种扩展为 János Aczél 的广义结合性方程^{[6][7][8][9]}和递归性方程^{[10][11]}之间架起了一座桥梁；(2)迁移性在通过给定函数的凸组合构造新的信息聚合算子的研究中起着重要作用^{[12][13][14][15][16]}；(3)迁移性与常用信息聚合算子的其他基本性质密切相关，如 Lipschitz 性质、结合性、双对称性、加法生成元、单位元和零元等^{[17][18]}。从应用的角度出发，信息聚合算子的迁移性的研究也是十分重要的。正如 Radko Mesiar 等人所指出^[19]的：“迁移性体现了一种重要思想，即只考虑一个输入变量的给定部分而引起的某些函数值的变化与变量的实际选择无关，这对于图像处理和决策问题的处理和解决是至关重要的。在涉及知识管理决策问题的许多应用中，对迁移性的研究将可能为决策者提供有用的决策辅助技术。”。

单位闭区间 $[0, 1]$ 上二元算子的齐次性作为一个有趣并且很有用的性质已经被很多文献所讨论^[20]。确切地说，称二元算子

$H: [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$ 为 k -齐次的 $k \in]0, \infty[$ 如果对任意的 $x, y, \lambda \in [0,1]$, $H(\lambda x, \lambda y) = \lambda^k H(x, y)$ 成立。这也就是说：当每一个输入值通过一个因子 λ 进行缩小时，相应的输出值同时也通过因子 λ 的 k 次幂放大或者缩小。值得一提的是：齐次性算子的非常重要的角色是它们在某些实际问题中的巨大应用，比如，在图像处理^[21]、决策^[22]、经济学^[23]等等。因此，出现了很多从理论层面研究齐次算子的工作。特别地，当算子被考虑为信息聚合算子或者某些特殊的信息聚合算子时。

与此同时，抽象代数和分析中一个众所周知的概念是阿基米德性质，一般来说，它可以被解释为没有“无限大”或“无限小”元素的有序代数结构的性质。换句话说，一个代数结构被称为阿基米德的只要任何两个非零元素是可比较的，在某种意义上，任何两个元素之间都不是相对无穷小的。

迁移性、齐次性和阿基米德性等基本性质的研究是信息聚合算子实际应用过程中不可或缺的重要性质，重叠函数作为一类重要的信息聚合算子，这些性质的研究不仅是其理论研究的基本组成部分，而且将为其在实际应用过程中提供强大的理论支撑以及开辟更多有效的应用场景。针对重叠函数基本性质的研究工作自其提出以来从未中断，具体来说，其中涉及的核心工作如下：

2013 年，Benjamín Bedregal 等^[24]研究了与重叠函数相关的一些重要性质，比如，迁移性、齐次性、幂等性和生成元的存在性。特别地，他们得到了自同构作用于重叠函数上的一些相关性质并且分析了前述所有性质以及 Lipschitz 性在自同构下的保持性。2014 年，Graçaliz Pereira Dimuro 和 Benjamín Bedregal^[25]介绍了重叠函数的阿基米德性并且研究了重叠函数的消去律、幂等性和极限性质。2016 年，Daniel Gómez 等^[26]给出了构造 n -维重叠函数的多种方法以及 n -维重叠函数满足齐次性、迁移性和 Lipschitz 连续性的条件。2017

年, Benjamín Bedregal 等^[27]介绍了由区间值重叠函数导出的区间值有序加权平均算子的概念并且讨论了区间值重叠函数的迁移性和齐次性以及区间值有序加权平均算子的一些重要性质。2018 年, 乔军胜和胡宝清^[28]研究了一致模和零模分别基于重叠函数的迁移性。同年, 乔军胜和胡宝清^[29]给出了重叠函数的乘法生成元对的概念并且运用它们去讨论了重叠函数的一些性质, 比如, 迁移性、齐次性、幂等性、阿基米德性等等。2019 年, 乔军胜和胡宝清^[30]给出了伪齐次重叠函数的概念并研究了一类重叠函数在幂等重叠函数、乘法生成的重叠函数或重叠函数的序和中的齐次性、拟齐次性和伪齐次性。同年, 乔军胜和胡宝清^[31]研究了重叠函数的广义迁移性。2021 年, 周红军和闫欣欣^[32]进一步研究了一致模与重叠函数之间的 α -迁移性并给出了此类 α -迁移性方程在一致模属于特殊类别时的等价条件。2022 年, 乔军胜和赵彬^[33]对重叠函数的交叉迁移性给出了系统讨论。2023 年, 祝凤清和王学平^[34]分别用乘法和加性生成元对研究了重叠函数的齐次性。同年, 罗玉琼和朱宽云^[35]研究了重叠函数与交换信息聚合算子之间的交叉迁移性。

3.2.2 重叠函数的构造

正如著名数学家、荷兰皇家科学院院士、德国科学院院士 Luitzen Egbertus Jan Brouwer 一直坚持数学对象必须可以构造的观点, 重叠函数的构造自然地成为重叠函数理论研究必不可少的一个研究方向。重叠函数的构造主要分为两个方向: 一种是利用生成元对构造重叠函数, 另一种是基于序和构造重叠函数。生成元对构造重叠函数方法的基本思想是用一元实值函数和加法(或乘法)来得到具有良好性质的二元实值函数, 这种思想可以追溯到 1826 年 Niels Henrik Abel 所做的工作。基于序和构造重叠函数方法的基本思想是从给定重叠函数族来构造新重叠函数, 这种思想可以追溯到半群理论研究。这两种构造

方法也为重叠函数性质的研究提供了一个新的理论视角,有助于我们更好地研究重叠函数的性质。值得注意的是,生成元对构造重叠函数的方法也降低了重叠函数的变量维度,从而降低了其被用于实际问题处理解决时算法的时间复杂度。针对重叠函数构造的研究工作自其提出以来从未中断。具体来说,其中涉及的核心工作如下:

2014 年, Graçaliz Pereira Dimuro 和 Benjamín Bedregal^[36]介绍了重叠函数序和的概念。并且,在分别考虑幂等性、消去律、极限性质和阿基米德性的情况下,提供了这些特定的重叠函数的表示方法。2016 年, Graçaliz Pereira Dimuro 等^[37]讨论了由两个连续单调减函数加法生成重叠函数的条件并且研究了由正的连续三角模和伪自同构得到重叠函数的方法。2017 年,乔军胜和胡宝清^[38]将重叠函数的概念推广到了区间值的情形并且讨论了区间值重叠函数的区间值加法生成元对。2020 年,王海伟^[39]研究了有界格上重叠函数的构造方法。并给出了有限多个重叠函数在有界格的子区间上序和的定义,其中子区间的端点构成一条链。2022 年,王云天和胡宝清^[40]在完备格上研究了重叠函数的序和构造方法。张逸群和刘华文^[41]研究了利用生成元对在完备格上构造重叠函数的方法。王梅,张小红和 Benjamín Bedregal^[42]研究了通过乘法生成元对构造广义重叠函数的方法。2024 年,鲁静和赵彬^[43]研究了通过乘法生成元对在有界偏序集上构造重叠函数的方法。

3.2.3 基于重叠函数导出的模糊蕴涵

模糊蕴涵^[44]作为经典蕴涵算子的推广,可以用来解释模糊逻辑中的“if-then”规则,且已经在很多文献中被扩展为许多不同的形式,这些模糊蕴涵的构造方式,特别是基于信息聚合算子导出的模糊蕴涵,也极大丰富了模糊蕴涵的应用场景,它已经被成功应用到包括决策、推理、机器学习和图像处理等在内的各个领域。因此,重叠函数

作为一类重要的非必须结合的信息聚合算子，基于重叠函数导出的模糊蕴涵自然而然地成为一个值得研究的热点主题，具体来说，其中涉及的核心工作如下：

2015 年，Graçaliz Pereira Dimuro和Benjamín Bedrega^[45]通过考虑由模糊合取诱导的剩余蕴涵的存在性介绍了基于重叠函数的剩余蕴涵的概念。同年，Graçaliz Pereira Dimuro 和 Benjamín Bedrega^[46]分析了由重叠函数导出的剩余蕴涵关于一个模糊否定的换质位律。2017 年，Graçaliz Pereira Dimuro等^[47]介绍了由重叠函数、分组函数和模糊否定导出的 QL -算子和 QL -蕴涵的概念并且研究了 QL -算子成为 QL -蕴涵的条件。2018年，曹朦，胡宝清和乔军胜^[48]研究了由区间重叠函数与区间分组函数导出的区间 (G, N) -蕴涵和 (O, G, N) -蕴涵。2019 年，Graçaliz Pereira Dimuro等^[49]研究了由重叠函数和分组函数导出的模糊蕴含的 O -条件律。2021 年，曹朦，胡宝清和乔军胜^[50]研究了由区间重叠函数与区间分组函数导出的区间 R_0 -蕴涵和 (O, G, N) -蕴涵。

3.2.4 重叠函数相关分配性方程

有关常用信息聚合算子间及模糊逻辑算子——模糊蕴涵与常用信息聚合算子间的分配性方程的研究一方面属于由 János Aczél 和 King-Tim Mak^{[51][52]}研究的结合性广义函数方程和两类算子的有关四类未知的二元连续算子的分配律的研究范畴。另一方面，为了在模糊逼近中更好地达到所期望的精度，通常需要一个大型的规则库。同时，在很多情况下，规则爆炸的问题阻碍模糊系统的进一步应用和开发。因此，出现了很多讨论通过使用尽可能少的模糊规则去构造有指定性能的模糊系统的文献。例如，William E. Combs 和 James E. Andrews^[53]介绍的经典重言式

$$(p \wedge q) \rightarrow r \equiv (p \rightarrow r) \vee (q \rightarrow r) \quad (3.1)$$

旨在通过减少模糊的复杂性“if-then”规则来消除组合规则爆炸。

同时, Carles Cuadras^[54]给出了下面三个经典重言式:

$$(p \vee q) \rightarrow r \equiv (p \rightarrow r) \wedge (q \rightarrow r) \quad (3.2)$$

$$r \rightarrow (p \wedge q) \equiv (r \rightarrow p) \wedge (r \rightarrow q) \quad (3.3)$$

和

$$r \rightarrow (p \vee q) \equiv (r \rightarrow p) \vee (r \rightarrow q) \quad (3.4)$$

正如上面所论述的, 近来出现了许多与这些经典重言式的广义形式相关的研究。且这些研究中的大部分指出: 在使用这些方程之前有必要对这些方程进行理论研究。例如, Scott Dick 等^[55]说到: “关于这个问题的未来研究将需要对模糊并、交和蕴涵的各种组合性质进行检查。”。 Jerry M. Mendel 等^[56]写道: “我们认为这一切都意味着我们必须回顾交叉规则配置等价于联合规则配置的数学并且询问我们当使用联合规则配置替换交叉规则配置时, 我们正在做的事情是有意义的。”。

2015 年, Héliida S. Santos 等^[57]研究了重叠函数与的劣属分配性和优属分配性。2018 年, 乔军胜和胡宝清^{[58][59]}研究了模糊蕴涵分别基于重叠函数和可加生成重叠函数的分配性方程。2019 年, 张廷海和覃锋等^{[60][61]}针对一致零模和重叠函数之间的分配性方程, 刻画并分析了一些方程的解的条件。2020 年, 张廷海和覃锋^[62]研究了 2-一致模和重叠函数之间的分配性方程。2021 年, 张廷海, 覃锋和刘华文^[63]研究了一致零模和重叠函数之间的分配性方程。同年, 刘慧和赵彬^[64]进一步研究了一致模与重叠函数之间的分配性方程。张廷海等^[65]刻画了幂等一致零模和重叠函数之间的分配性方程。

3.3 重叠函数实际应用研究

在许多应用领域, 如图像处理、决策、分类和机器学习等中, 一个常见的任务是将对象分配给涉及问题的可能类别之一。为此, 一个常用的研究方法是从对象对每个类的隶属度 (偏好或支持度) 入手。

通过表示和聚合隶属度（偏好或支持度）对实际问题进行定量分析和研究。在此过程中，信息聚合算子对聚合隶属度（偏好或支持度）的聚合起着关键作用，且已经被广泛研究和应用到各个领域当中，如：分类、图像处理、模式识别和机器学习等。

然而，在应用过程中，人们发现信息聚合算子的结合性是不必要的，特别当问题只包含两个类时。根据这个论点，Humberto Bustince 等^[2]定义了重叠函数这一类新的非必须结合的信息聚合算子，它被用来衡量一个对象被两个类同时支持（重叠）的程度。因此，众多学者借助重叠函数的应用效果对实际问题的处理和解决进行了大量的研究。具体来说，其中取得的部分重要应用结果如下：

3.3.1 重叠函数在图像处理中的应用

图像处理是指用计算机对图像进行分析，以达到所需结果的技术。图像处理的应用非常广泛，涵盖了从提高图像质量到支持复杂科学研究和实际应用等多个方面。这一技术的发展主要受到计算机、数学理论的发展以及广泛的应用需求增长的影响。数字图像处理最早出现于 20 世纪 50 年代，当时利用计算机来处理图形和图像信息，而作为一门学科大约形成于 20 世纪 60 年代初期。早期的图像处理主要目的是改善图像质量，以改善人的视觉效果为目的。随着技术的发展，数字图像处理已经渗透到许多领域，如遥感、生物医学、通信、工业、航空航天、军事、安全保卫等，对国计民生有重大意义。

在图像处理方面，2010 年，Humberto Bustince 等^[2]为了将给定的像素指派给对象或给定图像的背景给出了一个重叠函数所必需的基本性质。同时，他们研究了一个对象识别问题，其中关于背景的最佳分类是类背景和类对象之间的重叠较少的那个。2013 年，Aranzazu Jurio 等^[68]分析了重叠函数的一些性质。特别地，他们得到一个非常重要的性质，也就是一族重叠函数的凸线性组合又是一个重叠函数。

同时，他们通过在一个图像处理过程中的应用来阐释了重叠函数此性质的优势并且证明了由此得到的结果总是会改善由效能最低的分组表达式得到的结果。2024 年，张小红等^[69]提出了基于重叠函数的模糊粗糙集模型，并将该模型应用于特征选择与图像边缘提取。

3.3.2 重叠函数在决策中的应用

决策是指在科学的决策理论指导下，以科学的思维方式，应用各种科学的分析手段与方法，按照科学的决策程序进行符合客观实际的决策活动。科学决策是一种较之经验决策更为高级的决策形式，它是现代人类社会决策的主要形式。

在决策方面，2012 年，Humberto Bustince 等^[70]把重叠函数应用于模糊偏好建模和决策中。同时，他们提出了一个算法使得在决策问题的开发阶段让我们能够通过最小化表达式来选择最佳替代广义双向函数的条件、差异性和不可比性。2018 年，Mikel Elcano 等^[71]给出了基于模糊规则的分类系统集合中惩罚函数的共识方法并且提出了基于重叠函数的重叠指标构建置信度和支持度量的方法。2022 年，张小红等^[72]对于半重叠函数和新型模糊推理算法做了研究，并且详细阐明了其在决策方面的实际应用。2023 年，为了克服现有的多粒度模糊粗糙集模型的不足，张小红、尚姣妍和王敬前^[73]提出了两种基于 n -维重叠函数的多粒度模糊粗糙集模型，并将其应用于多属性群体决策问题。2024 年，王佳佳和李小南^[74]提出了一种区间值模糊信息系统下基于重叠函数的三支智能决策模型。王一丁、乔军胜和李腾彪^[75]将所提三支决策空间中基于单位闭区间上重叠函数的决策评价函数应用于涉及复杂数据决策问题的处理解决，对促进三支决策空间中基于常用聚合函数的决策评价函数的构造及其在涉及复杂数据的实际问题中的应用具有一定的理论价值和现实意义。

3.3.3 重叠函数在分类中的应用

分类是数据挖掘中一项重要任务，其目的是分析输入数据，通过在训练集中的数据表现出来的特性，为每个类找到一种准确的描写叙述或者模型，能把数据库中的数据项映射到给定类别中的某一个类别，即通过对已有数据进行分析 and 训练，建立一个能够准确区分数据项所属类别的模型，以便对未知数据进行正确的分类。一般地，分类的输出是离散的类别值，而回归的输出则是连续数值。分类任务可以应用于许多领域，如医疗与金融等，它可以帮助人们更好地理解 and 处理大量的数据，进而为决策提供支持。例如，对于垃圾邮件分类，可以根据邮件的标题、内容、发件人等特征建立分类模型，准确区分垃圾邮件和正常邮件，从而提高用户的工作效率和安全性。类似的，分类任务可以在各种领域中提供有力的支持，帮助人们更好地利用数据。

在分类方面，2015 年，Mikel Elkan 等^[76]对高维信息聚合问题采用了由 n -维重叠函数代替原先的乘积三角模的模糊关联规则分类模型的推理系统。这允许我们从基础分类器的一对一和一对多模式的后续聚类中获得更多充足的输出。同年，Giancarlo Lucca 等^[77]介绍了一类基于 Choquet 积分的非结合的信息聚合算子用于 Barrenechea 等提出的基于模糊规则分类系统的模糊推理方法。2016 年，Giancarlo Lucca 等^[78]给出了由耦合函数推广的广义 Choquet 积分的概念并将其应用于基于模糊规则的分类系统的模糊推理方法中。同年，Mikel Elkan 等^[79]研究了使用 n -维重叠函数对多个基于模糊规则的分类系统中的连接点进行建模的影响用以提高它们在实际应用分解技术的多类分类问题中的性能。2017 年，Giancarlo Lucca 等^[80]引入了 CC-积分的概念并且利用重叠函数给出了不同种类的 CC-积分。同时，他们阐释了 CC-积分在基于规则的模糊分类系统中的应用。2022 年，Tiago da

Cruz Asmus 等^[81]将相容序引入到 n -维区间值重叠函数中，并在基于区间值模糊规则的分类系统中研究了 n -维相容序区间值重叠函数。2024 年，张小红、欧琦琪和王敬前^[82]提出了一种基于重叠函数的变精度模糊粗糙集模型，并将其应用于涉及肿瘤病症治疗的分类问题中。

3.3.4 重叠函数在机器学习中的应用

机器学习作为人工智能领域的主流研究分支之一，其让计算机根据已有的数据，自动学习出模型并使用模型来完成具体任务，从数据中自动分析获得规律，并利用规律对未知数据进行预测。机器学习从大量的数据中挖掘规律，并学习数据的潜在特征，较为准确地预测未来的数据趋势或者分类数据等任务。与传统的方法相比，机器学习可以实现自动化处理和高精度预测，其准确性和效率在许多领域中优于传统方法。其最常见的领域是图像和语音识别、自然语言处理、推荐系统等。在金融领域，机器学习被用于风险评估和投资组合优化等方面；在生命科学领域，机器学习可以用于生物信息学和蛋白质结构预测；在工业和制造业等传统领域，机器学习可以通过分析生产线和设备的运行数据，提高生产效率和准确度，并优化整个生产流程。

在机器学习方面，2022 年，Javier Fumanal-Idocin 等^[83]针对脑机接口问题利用重叠函数来融合给定的信息，通过 20 名志愿者进行基于运动图像的脑机接口实验的数据集上的测试，发现重叠函数是提供最佳结果的函数之一。同年，Thiago Batista 等学者^[84]提出了一种新的基于离散 Choquet 积分泛化的组合方法，将其与拟重叠函数相结合，实现了分类器输出的集成。2023 年，乔军胜和李腾彪^[85]将所提基于定向单调拟分组函数（定向单调拟重叠函数的对偶形式）的模型应用于机器学习中分类器集成问题，对现有方法进行了改进和补充。2024 年，Mikel Ferrero-Jaurrieta 等学者^[86]使用伪分组函数来优化

了卷积神经网络模型。

参考文献

- [1] 覃锋. 聚合函数及其应用[M], 北京: 科学出版社.
- [2] Bustince H, Fernández J, Mesiar R, Montero J, Orduna R. Overlap functions[J]. Nonlinear Analysis, 2010, 72(3): 1488-1499.
- [3] 国家自然科学基金委员会, 国家自然科学基金“十四五”发展规划, <https://www.nsfc.gov.cn/publish/portal0/tab1392/>.
- [4] Mesiar R, Novák V. Open problems from the 2nd international conference on fuzzy sets theory and its applications[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 81: 185–190.
- [5] Durante F, Sarkoci P. A note on the convex combinations of triangular norms[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2008, 159: 77-80.
- [6] Aczél J. Lectures on Functional Equations and Their Applications [M]. New York: Academic Press, 1966.
- [7] Aczél J, Belousov V D, Hosszú M. Generalized associativity and bisymmetry on quasigroups[J]. Acta Mathematica Academiae Scientiarum Hungarica, 1960, 11: 127-136.
- [8] Alsina C, Frank M J, Schweizer B. Associative Functions: Triangular Norms and Copulas [M]. New Jersey: World Scientific Publishing, 2006.
- [9] Maksa G. Quasisums and generalized associativity[J]. Aequationes Mathematicae, 2005, 69: 6–27.
- [10] Cutello V, Montero J. Recursive connective rules[J]. International Journal of Intelligent Systems, 1999, 14: 3–20.
- [11] Del Amo A, Montero J, Molina E. Representation of consistent recursive rules[J]. European journal of Operational Research,

- 2001, 130: 29-53.
- [12] Jenei S. On the convex combination of left-continuous t-norms[J]. *Aequationes Mathematicae*, 2006, 72: 47–59.
 - [13] Ouyang Y, Fang J. Some observations about the convex combination of continuous triangular norms[J]. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 2008, 68: 3382–3387.
 - [14] Durante F, Sarkoci P. A note on the convex combinations of triangular norms[J], *Fuzzy Sets Syst*, 2008, 159: 77–80.
 - [15] Ouyang Y, Fang J, Li G. On the convex combination of T_D and continuous triangular norms[J]. *Information Sciences*, 2007, 177: 2945–2953.
 - [16] Li G, Liu H-W. Some results on the convex combination of uninorms[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2019, 372: 50–61.
 - [17] Bustince H, Montero J, Mesiar R. Migrativity of aggregation functions[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2009, 160: 766–777.
 - [18] Bustince H, Baets B De, Fernandez J, Mesiar R, Montero J. A generalization of the migrativity property of aggregation functions[J]. *Information Sciences*, 2012, 191: 76-85.
 - [19] Mesiar R, Bustince H, Fernandez J. On the α -migrativity of semicopulas, quasi-copulas, and copulas[J]. *Information Sciences*, 2010: 180: 1967–1976.
 - [20] Krasichkov-Ternovskii I F. Homogeneity properties of entire functions of finite order[J]. *Matematicheskii Sbornik*, 1967, 114(3): 412-419.
 - [21] Bustince H, Barrenechea E, Fernández J, Pagola M, Montero J,

- Guerra C. Contrast of a fuzzy relation[J]. Information Sciences, 2010,180(8): 1326-1344.
- [22] Cabrera G, Ehrgott M, Mason A, Philpott A. Multi-objective optimisation of positively homogeneous functions and an application in radiation therapy[J]. Operations Research Letters, 2014,42(4): 268-272.
- [23] Chen B Y. Solutions to homogeneous Monge-Ampère equations of homothetic functions and their applications to production models in economics[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2014, 411(1): 223-229.
- [24] Bedregal B, Dimuro G P, Bustince H, Barrenechea E. New results on overlap and grouping functions[J]. Information Sciences, 2013, 249: 148-170.
- [25] Dimuro G P, Bedregal, B. Archimedean overlap functions: The ordinal sum and the cancellation, idempotency and limiting properties[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2014, 252: 39-54.
- [26] Gómez D, Rodriguez, J T, Montero, J, Bustince, H, Barrenechea, E. n-Dimensional overlap functions[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2016, 287: 57-75.
- [27] Bedregal B, Bustince H, Palmeira E, Dimuro G, Fernandez J. Generalized interval-valued OWA operators with interval weights derived from interval-valued overlap functions[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2017, 90: 1-16.
- [28] Qiao J, Hu B Q. On the migrativity of uninorms and nullnorms over overlap and grouping functions[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2018, 346, 1-54.

- [29] Qiao J, Hu B Q. On multiplicative generators of overlap and grouping functions[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2018, 332: 1-24.
- [30] Qiao J, Hu B Q. On homogeneous, quasi-homogeneous and pseudo-homogeneous overlap and grouping functions[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2019, 357: 58-90.
- [31] Qiao J, Hu B Q. On generalized migrativity property for overlap functions[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2019, 357: 91-116.
- [32] Zhou H, Yan X. Migrativity properties of overlap functions over uninorms[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2021, 403: 10-37.
- [33] Qiao J, Zhao B. On α -cross-migrativity of overlap (0-overlap) functions[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2022, 20: 448-461.
- [34] Zhu F, Wang X. Note on the homogeneity of overlap functions[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2023, 454: 199-207.
- [35] Luo Y, Zhu K. Characterizations for the cross-migrativity between overlap functions and commutative aggregation functions[J]. Information Sciences, 2023, 622: 303-318.
- [36] Dimuro G P, Bedregal B. Archimedean overlap functions: The ordinal sum and the cancellation, idempotency and limiting properties[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2014, 252: 39-54.
- [37] Dimuro G P, Bedregal B, Bustince H, Asiain M, R. Mesiar. On additive generators of overlap functions[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2016, 287: 76-96.
- [38] Qiao J, Hu B Q. On interval additive generators of interval overlap functions and interval grouping functions[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2017, 323: 19-55.

- [39] Wang H. Constructions of overlap functions on bounded lattices[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2020, 125: 203-217.
- [40] Wang Y, Hu B Q. On ordinal sums of overlap and grouping functions on complete lattices[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2022, 439: 1-28.
- [41] Zhang Y Q, Liu W. Constructing overlap functions via multiplicative generators on complete lattices[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2022, 150: 297-310.
- [42] Wang M, Zhang X, Bedregal B. Constructing general overlap and grouping functions via multiplicative generators[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2022, 448: 65-83.
- [43] Lu J, Zhao B. Constructing overlap functions on bounded posets via multiplicative generators[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2024, 167: 109-129.
- [44] Baczyński M, Jayaram B. Fuzzy Implications[M], Springer Science & Business Media, 2008.
- [45] Dimuro G P, Bedregal B. On residual implications derived from overlap functions[J]. Information Sciences, 2015, 312: 78-88.
- [46] Dimuro G P, Bedregal B. On the laws of contraposition for residual implications derived from overlap functions[C]. Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), 2015 IEEE International Conference on. IEEE, 2015: 1-7.
- [47] Dimuro G P, Bedregal B, Bustince H, Jurio A, Baczyński M, Miś K. QL-operations and QL-implication functions constructed from tuples (O, G, N) and the generation of fuzzy subethood

- p and entropy measures[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2017, 82: 170-192.
- [48] Cao M, Hu B Q, Qiao J. On interval (G, N)-implications and (O, G, N)-implications derived from interval overlap and grouping functions[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2018, 100: 135-160.
- [49] Dimuro G P, Bedregal B, Fernandez J, Sesma-Sara M, Pintor J M , Bustince H. The law of O-conditionality for fuzzy implications constructed from overlap and grouping functions[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2019, 105: 27-48.
- [50] Cao M, Hu B Q. On interval RO-and (G, O, N)-implications derived from interval overlap and grouping functions[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2021, 128: 102-128.
- [51] Aczél J. Lectures on functional equations and their applications[M]. Academic press, 1966.
- [52] Mak K T. Coherent continuous systems and the generalized functional equation of associativity[J]. Mathematics of Operations Research, 1987, 12(4): 597-625.
- [53] Combs W E, James E A. Combinatorial rule explosion eliminated by a fuzzy rule configuration[J]. IEEE Transactions on fuzzy Systems, 1998, 6(1): 1-11.
- [54] Cuadras M C, Augé J. A continuous general multivariate distribution and its properties[J]. Communications in Statistics-Theory and Methods, 1981, 10(4): 339-353.

- [55] Dick S, Kandel A, Combs W E. Comment on" Combinatorial rule explosion eliminated by a fuzzy rule configuration [with reply] [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1999, 7(4): 475-478.
- [56] Mendel J M, Liang Q, Combs W E. Comments on “Combinatorial rule explosion eliminated by a fuzzy rule configuration”[with reply] [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1999, 7(3):369-373.
- [57] Santos H, Lima L, Bedregal B, Dimuro G P, Rocha M, Bustince H. Analyzing subdistributivity and superdistributivity on overlap and grouping functions[J]. AGOP, 2015: 211-216.
- [58] Qiao J, Hu B Q. The distributive laws of fuzzy implications over overlap and grouping functions[J]. Information Sciences, 2018, 438: 107-126.
- [59] Qiao J, Hu B Q. On the distributive laws of fuzzy implication functions over additively generated overlap and grouping functions[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 26(4), 2421-2433.
- [60] Zhang T H, Qin F. On distributive laws between 2-uninorms and overlap (grouping) functions[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2020, 119:353-372.
- [61] Zhang T H, Qin F, Li W H. On the distributivity equations between uni-nullnorms and overlap (grouping) functions[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2019, 403:56 – 77.
- [62] Zhang T H, Qin F. On distributive laws between 2-uninorms and overlap (grouping) functions[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2020,119:353-372.

- [63] Zhang T H, Qin F, Li W H. On the distributivity equations between uni-nullnorms and overlap (grouping) functions[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2021,403:56-77.
- [64] Liu H, Zhao B. New Results on the Distributive Laws of Uninorms Over Overlap Functions[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2021, 29: 1927-1941.
- [65] Zhang T H, Qin F, Wan J, Hu Q M, Cao Z H. Distributivity characterization of idempotent uni-nullnorms and overlap or grouping functions[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2022,148:133-150.
- [66] Bustince H, Barrenechea E, Miguel P. Image thresholding using restricted equivalence functions and maximizing the measures of similarity[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2007, 158.5: 496-516.
- [67] Huang L K, Mao J, Wang J. Image thresholding by minimizing the measures of fuzziness[J]. Pattern recognition, 1995, 28.1: 41-51.
- [68] Jurio A, Bustince H, Pagola M, Pradera A, Yager R R. Some properties of overlap and grouping functions and their application to image thresholding[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2013, 229: 69-90.
- [69] Zhang X, Li M, Shao S, Wang J. (I, O)-Fuzzy rough sets based on overlap functions with their applications to feature selection and image edge extraction[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2024, 32(4): 1796-1809.
- [70] Bustince H, Pagola M, Mesiar R, Hullermeier E, Herrera F. Grouping, Overlap, and Generalized Bientropic Functions for

- Fuzzy Modeling of Pairwise Comparisons[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2012, 20(3): 405-415.
- [71] Elkano M, Galar M, Sanz J A, Schiavo P F, Pereira Jr S, Dimuro G P, Borges E N, Bustince H. Consensus via penalty functions for decision making in ensembles in fuzzy rule-based classification systems[J]. Applied Soft Computing, 2018, 67: 728-740.
- [72] Zhang X, Wang M, Bedregal B. Semi-overlap functions and novel fuzzy reasoning algorithms with applications[J]. Information Sciences, 2022, 614:104-122.
- [73] Zhang X, Shang J, Wang J. Multi-granulation fuzzy rough sets based on overlap functions with a new approach to MAGDM[J]. Information Sciences, 2023, 622: 536-559.
- [74] Wang J, Li X. An overlap function-based three-way intelligent decision model under interval-valued fuzzy information systems[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 238: 122036.
- [75] Wang Y, Qiao J, Li T. Novel transformation methods from semi-three-way decision spaces to three-way decision spaces and their applications[J]. Information Sciences, 2024, 657: 119962.
- [76] Elkano M, Galar M, Sanz J A, Fernández A, Barrenechea E, Herrera F, Bustince H. Enhancing Multiclass Classification in FARC-HD Fuzzy Classifier: On the Synergy Between n-Dimensional Overlap Functions and Decomposition Strategies[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2015, 23(5): 1562-1580.

- [77] Lucca G, Dimuro G P, Mattos V, Bedregal B, Bustince H, Sanz J A. A family of Choquet-based non-associative aggregation functions for application in fuzzy rule-based classification systems[C]. 2015 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Istanbul, Turkey, 2015.
- [78] Lucca G, Dimuro G P, Bedregal B, Sanz J A, Bustince H. A proposal for tuning the alpha parameter in a copula function applied in fuzzy rule-based classification systems[C]. In 2016 5th Brazilian Conference on Intelligent Systems (BRACIS) 2016. Oct 9 367-372. IEEE.
- [79] Elkano M, Galar M, Sanz J, Bustince H. Fuzzy rule-based classification systems for multi-class problems using binary decomposition strategies: on the influence of n-dimensional overlap functions in the fuzzy reasoning method[J]. Information Sciences, 2016, 332: 94-114.
- [80] Lucca G, Sanz J A, Dimuro G P, Bedregal B, Asiain M J, Elkano M, Bustince H. CC-integrals: Choquet-like copula-based aggregation functions and its application in fuzzy rule-based classification systems[J]. Knowledge-Based Systems, 2017, 119: 32-43.
- [81] Asmus T C, Sanz J A, Dimuro G P, Bedregal B, Fernández J, Bustince H. N-Dimensional admissibly ordered interval-valued overlap functions and its influence in interval-valued fuzzy-rule-based classification systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2022, 30(4): 1060-1072.
- [82] Zhang X, Ou Q, Wang J. Variable precision fuzzy rough sets

- based on overlap functions with application to tumor classification[J]. *Information Sciences*, 2024, 666: 120451.
- [83] Fumanal-Idocin J, Wang Y K, Lin C T, Fernández J, Sanz J A, Bustince H. Motor-imagery-based brain-computer interface using signal derivation and aggregation functions[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021, 52(8): 7944-7955.
- [84] Batista T, Bedregal B, Moraes R. Constructing multi-layer classifier ensembles using the Choquet integral based on overlap and quasi-overlap functions[J]. *Neurocomputing*, 2022, 500: 413-421.
- [85] Qiao J, Li T. New results on directionally monotone quasi-grouping functions and their applications in classification problems[J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 229: 120226.
- [86] Ferrero-Jaurrieta M, Paiva R, Cruz A, Bedregal B, De M L, Takáč Z, Lopez-Molina C, Bustince H. Non-symmetric over-time pooling using pseudo-grouping functions for convolutional neural networks[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, 133: 108470.

第 4 章 覆盖粗糙集与模糊覆盖粗糙集

4.1 引言

粗糙集理论是智能信息处理领域十分活跃的研究方向，在数据智能时代其重要作用更加突出地体现出来^{[1] [2] [3]}。它最早是由 Pawlak^[4] 于 1982 年提出的。粗糙集理论作为不确定性知识表示、处理的有效工具，其独特优势在于不需要提供数据集合之外的任何先验知识、直接对数据进行分析 and 推理，从而发现隐含的知识、揭示潜在的规律。经过 40 多年的发展，粗糙集不仅在数学理论上得到了完善，而且在数据挖掘、知识发现、机器学习、模式识别、聚类分析、图像处理、医疗诊断、近似推理等领域得到了广泛应用^{[5] [6] [7] [8]}。

经典粗糙集（即 Pawlak 粗糙集）理论^{[4] [9]} 的出发点是将具有相同属性值的对象划分为等价类，而不考虑某些属性值之间存在的关联或者相似性。然而，经典粗糙集只能处理符号型数据。此外，由于数据采集、存储等过程中产生的误差，不完备信息系统中数据不能简单的用经典粗糙集方法处理。事实上，从实际应用和理论研究的角度来看，现实中大部分数据都是以覆盖类型存在着。基于此，Zakowski^[10] 将经典粗糙集理论中的划分用覆盖替代，提出了覆盖粗糙集模型。随着覆盖粗糙集理论的发展，其已经成为一种处理覆盖数据的有效方法。然而，粗糙集理论对于真值型数据的处理本身具有局限性，所以将覆盖粗糙集和模糊集理论^[11] 相结合，研究模糊覆盖粗糙集是很有必要的。模糊覆盖粗糙集^[12] 的提出不仅丰富了模糊粗糙集的理论，而且也扩展了模糊粗糙集方法的应用范围。

4.2 基于覆盖的粗糙集及其应用

作为对经典粗糙集理论的一种直接推广，Zakowski^[10] 提出的覆盖粗糙集理论可适用于更多实际问题的数据处理工作。由于覆盖的定

义较为宽泛，很难从中挖掘出更多的规律，所以有许多学者从不同的角度建立了多种基于覆盖的粗糙集模型。例如，Pomykala^[13] 在 Zakowski 研究工作的基础上又提出了两对具有对偶性的近似算子；Tsang 等人^[14] 利用最小描述提出了一类新的覆盖粗糙集模型；Zhu 等人^{[15] [16] [17]} 讨论了基于覆盖的粗糙集和一种基于二元关系的粗糙集之间的等价性，通过基于二元关系的粗糙集的现有结果，为基于覆盖的下近似和上近似运算提出了公理系统，还探讨了基于覆盖的粗糙集中的最小描述、约简、代表性覆盖、精确覆盖和一元覆盖等几个重要概念之间的关系；苗夺谦等人^[18] 结合覆盖约简理论，将模型进行推广，重新定义了基于覆盖的粗糙集模型；Yao 等人^[19] 提出了一个框架来研究基于覆盖的粗糙集近似集，从元素、粒度和子系统的定义出发研究并讨论了覆盖上下近似算子；汤建国等人^[20] 融合覆盖粗糙集和模糊集，从覆盖粗糙模糊隶属度出发，建立了一个新的基于元素最小描述的覆盖粗糙模糊集模型；Gong 等人^[21] 将变精度的概念融入到多尺度覆盖粗糙集中，提出了一种新的数据分析模型，并创建一种称为多尺度变精度覆盖决策表的新型决策表，提供了相应的最优尺度选择的方法；Ma 等人^[22] 在已有的覆盖粗糙集模型的基础上，研究了基于边界区域的覆盖变精度粗糙集模型，系统地研究了它的代数结构和性质。此外，还有其他一些学者也都从不同角度定义了一些新的覆盖粗糙集模型^{[23] [24] [25] [26] [27]}。

近几年，一些其他学者不仅从不同角度对覆盖粗糙集做了大量的理论研究^{[28] [29] [30] [31]}，还将其应用至电力、医学、气象、化工等领域。例如，江怡^[32] 在智能系统中利用微分方程思想建立数学模型得到微分邻域，提出了基于邻域和粗糙集的控制方法；冯涛^[33] 通过定义覆盖粗糙集上、下近似给出了属性重要度的概念，结合直觉模糊集和覆盖粗糙集给出了直觉模糊熵的概念，并将其应用至临床医学数

据决策环节；李贤等人^[34] 利用覆盖粗糙集和领域分类器，对电网工程风险进行分析；汤建国等人^[35] 将覆盖粗糙集应用至语言动力系统中，利用该模型的上、下近似思想建立了基于覆盖粗糙集的语言动力系统模型，并处理了系统的不确定性问题；代建华等人^[36] 针对入侵检测数据维度高，样本量大的问题，提出了基于变精度覆盖粗糙集的相关族属性约简方法，并将其运用至入侵检测数据中；Yang 等人^[37] 利用覆盖粗糙集提出了一种有效的增量特征选择方法，加快了覆盖粗糙集在实际问题中的特征选择速度。

以下介绍几种覆盖粗糙集模型的构造方法、模型的性质、模型之间的关系以及模型的一个应用案例。

4.2.1 覆盖粗糙集模型的构造

覆盖粗糙集是将经典粗糙集中的划分推广为覆盖而提出的，它的提出为不完备型数据、覆盖型数据等提供了更好的处理方法，下列定义可参见文献^{[15] [38] [39] [40] [41]}：

定义 1 设 C 是 U 上的子集族。如果 C 中所有元素都非空，且 $\bigcup C = U$ ，则称 C 是 U 的一个覆盖。

覆盖中的每一个元素叫做覆盖块，在知识发现中称之为基本概念。称论域的任意一个子集为概念。同时，对 (U, C) 称为覆盖近似空间； $N_C(x)$ 被称为 x 关于 C 的邻域； $Cov(C)$ 被称为 C 的诱导覆盖，对于每个 $x \in U$ ， $N_C(x) = \bigcap \{K \in C : x \in K\}$ ， $Cov(C) = \{N_C(x) : x \in U\}$ 。

最小描述是覆盖粗糙集中一个非常重要的定义，可以用它解决覆盖粗糙集中一些常见的问题，并且通过它得到一些特殊类型的覆盖粗糙集模型。

定义 2 设 C 是 U 的一个覆盖。对任意的 $x \in U$ ，分别称

$$md_C(x) = \{K \in C : x \in K \wedge (\forall S \in C)(x \in S \wedge S \subseteq K \Rightarrow S = K)\} \quad (4-1)$$

$$MD_C(x) = \{K \in C : x \in K \wedge (\forall S \in C)(x \in S \wedge K \subseteq S \Rightarrow S = K)\} \quad (4-2)$$

为 x 的最小、最大描述。

目前，已有近三十类覆盖粗糙近似算子被定义，其中一半以上都可用覆盖最大、最小描述进行刻画。本章重点介绍前五类覆盖粗糙近似算子。

定义3 设 C 是 U 的一个覆盖。则分别称 CL_C 与 FH_C 、 CL_C 与 SH_C 、 CL_C 与 TH_C 、 CL_C 与 RH_C 、 CL_C 与 IH_C 为第一、二、三、四、五类覆盖粗糙下、上近似算子，其中对任意的 $X \subseteq U$ ，

$$CL_C(X) = \bigcup \{K \in C : K \subseteq X\} \quad (4-3)$$

$$FH_C(X) = \bigcup \{K \in C : K \cap X \neq \emptyset\} = \bigcup \{\bigcup MD_C(x) : x \in X\} \quad (4-4)$$

$$SH_C(X) = CL_C(X) \cup \{\bigcup \{K \in md_C(x) : x \in X - CL_C(X)\}\} \quad (4-5)$$

$$TH_C(X) = \bigcup \{K \in md_C(x) : x \in X\} \quad (4-6)$$

$$RH_C(X) = CL_C(X) \cup \{\bigcup \{K \in C : K \cap (X - CL_C(X)) \neq \emptyset\}\} \quad (4-7)$$

$$IH_C(X) = CL_C(X) \cup \{\bigcup \{N_C(x) : x \in X - CL_C(x)\}\} \quad (4-8)$$

4.2.2 覆盖粗糙集模型的性质与关系

以下列出第一类覆盖粗糙下、上近似算子 CL_C 与 FH_C 的性质。

设 C 是 U 的一个覆盖，对任意的 $X, Y \subseteq U$ ， CL_C 与 FH_C 有如同表 4-1 所示的性质：

表 4-1 CL_C 与 FH_C 的性质

(1L)	$CL_C(U) = U$	下近似余正规性
(1H)	$FH_C(U) = U$	上近似余正规性
(2L)	$CL_C(\emptyset) = \emptyset$	下近似正规性
(2H)	$FH_C(\emptyset) = \emptyset$	上近似正规性
(3L)	$CL_C(X) \subseteq X$	下近似收缩性
(3H)	$X \subseteq FH_C(X)$	上近似扩张性

(4H)	$FH_C(X \cup Y) = FH_C(X) \cup FH_C(Y)$	上近似可加性
(5L)	$CL_C(CL_C(X)) = CL_C(X)$	下近似幂等性
(6L)	$X \subseteq Y \Rightarrow CL_C(X) \subseteq CL_C(Y)$	下近似单调性
(6H)	$X \subseteq Y \Rightarrow FH_C(X) \subseteq FH_C(Y)$	上近似单调性
(10LH)	$CL_C(X) \subseteq FH_C(X)$	上、下近似的适当性

对于定义 3 中给出的五类覆盖粗糙上近似算子，它们之间处在如下包含关系（如图 4-1 所示）：

$$(1) IH_C(X) \subseteq SH_C(X) \subseteq TH_C(X) \subseteq FH_C(X).$$

$$(2) IH_C(X) \subseteq SH_C(X) \subseteq RH_C(X) \subseteq FH_C(X).$$

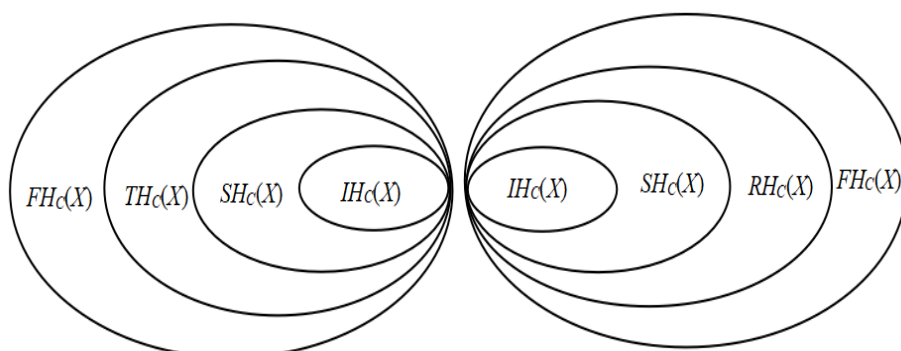


图 4-1 五类覆盖粗糙上近似算子之间的包含关系图

将经典粗糙集推广到覆盖粗糙集后，近似算子不再具有某些熟悉的性质。例如，对于第一类覆盖粗糙集而言，下列性质不成立：

$$(1) CL_C(X \cap Y) = CL_C(X) \cap CL_C(Y). \text{（下保交）}$$

$$(2) FH_C(X^c) = (CL_C(X))^c, CL_C(X^c) = (FH_C(X))^c. \text{（对偶性）}$$

接下来，我们将介绍使得第一类覆盖粗糙近似算子分别满足上述两条性质的充分必要条件：

(1) 设 C 是 U 的一个覆盖, $X, Y \subseteq U$ 。则 $CL_C(X) = X$ 当且仅当 X 是 C 中有限元素的并。

(2) 设 C 是 U 的一个覆盖, $X, Y \subseteq U$ 。则 $CL_C(X \cap Y) = CL_C(X) \cap CL_C(Y)$ 当且仅当对任意 $K_1, K_2 \in C$, $K_1 \cap K_2$ 是 C 中有限元素的并。

(3) 设 C 是 U 的一个覆盖, $X \subseteq U$ 。则 $SH_C(X^c) = (CL_C(X))^c$ 当且仅当 C 是 U 上的一个划分。

4.2.3 覆盖粗糙集模型在故障诊断中的应用案例

本小节主要介绍覆盖粗糙集在汽轮发电机组常见的振动故障中的应用。该成果取自文献^[42]，此处主要介绍应用过程，细节还请参看文献^[42]。征兆属性为汽轮发电机组振动信号的频域特征频谱中 $<0.4f, 0.5f, 1f, 2f, \geq 3f$ (f 为旋转频率) 等 5 个不同频段上的幅值分量能量，分别表示为 a, b, c, d, e ；决策属性 D 表示汽轮机组的故障类别， D 的取值为 1、2 和 3，分别对应汽轮机组常见的 3 种故障：油膜振荡、不平衡、不对中。具体步骤如下：

步骤 1，得到不完备汽轮机故障信息表如表 4-2^{[43] [44]} 所示（表中数据已归一化处理）。对表 4-2 数据进行离散化处理（具体方法及离散化后的数据集见文献^[42]）。

表 4-2^{[43] [44]} 不完备汽轮机故障信息表

	a	b	c	d	e	D
1	0.052	0.783	0.225	*	0.013	1
2	0.232	0.975	0.314	0.056	*	1
3	0.161	*	0.285	0.023	0.016	1
4	0.106	0.858	*	0.017	0.028	1
5	*	0.819	0.201	0.016	0.012	1
6	0.028	0.061	0.98	*	0.057	2
7	0.045	0.022	*	0.316	0.065	2
8	0.01	0.054	0.875	0.183	*	2
9	*	0.032	0.923	0.219	0.037	2
10	0.023	*	0.758	0.115	0.019	2

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>D</i>
11	0.033	0.037	0.386	0.531	0.23	3
12	*	0.023	*	0.458	0.103	3
13	0.012	*	0.427	0.496	0.175	3
14	0.021	0.017	0.298	0.403	*	3
15	0.017	0.056	0.483	*	0.301	3

步骤 2，利用文献^[42] 提出的基于覆盖粗糙集的算法 1，得到关于条件属性集 M 的所有极大相容块构成的集合 $C(M)$ ($C(M)$ 为 U 的一个覆盖，其定义参见文献^[42] 的定义 4)，如表 4-3 所示。

表 4-3 $C(M)$

X_1	{1, 3, 5}	X_6	{10}
X_2	{2, 4}	X_7	{11}
X_3	{6}	X_8	{12, 13}
X_4	{7, 9}	X_9	{12, 14}
X_5	{8}	X_{10}	{13, 15}

接着利用文献^[42] 提出基于覆盖粗糙集的算法 2，构造针对极大相容块的最全描述决策表 CDT ，并通过差别矩阵得到极小析取范式为 $(a \wedge c) \vee (b \wedge c) \vee (c \wedge d) \vee (c \wedge e) \vee (a \wedge d \wedge e) \vee (b \wedge d \wedge e)$ 。因此， CDT 的约简集 $RED = \{\{a, c\}, \{b, c\}, \{c, d\}, \{c, e\}, \{a, d, e\}, \{b, d, e\}\}$ 。此处，不妨选 $\{a, c\}$ 为最简约简。

步骤 3，只需将条件属性 a 和 c 的属性值完备化，从而构建新的数据集。该数据集作为训练集进行智能故障分类器训练。此处智能分类器先选择“SVM”。SVM 网格法选择惩罚参数 γ 与核参数 g ，范围均为 $[-10, 10]$ 。

步骤 4，对测试集进行测试。用提出的“极大相容块+智能分类器”的故障诊断方法只需要对条件属性 a 和 c 以及决策属性 D 构成

的测试信息进行测试。测试结果图如图 4-2 所示。图 4-2 中，“o”表示预测的故障结果，“*”表示实际的故障类型。两者重合部分说明诊断结果正确。图(a)，(c)和(e)分别为采用“极大相容块+SVM”故障诊断方法时，核函数为不同类型的故障诊断结果。图(b)，(d)和(f)则为直接将数据完备化后只采用 SVM 的故障诊断结果，此时的核函数也选用不同的类型。

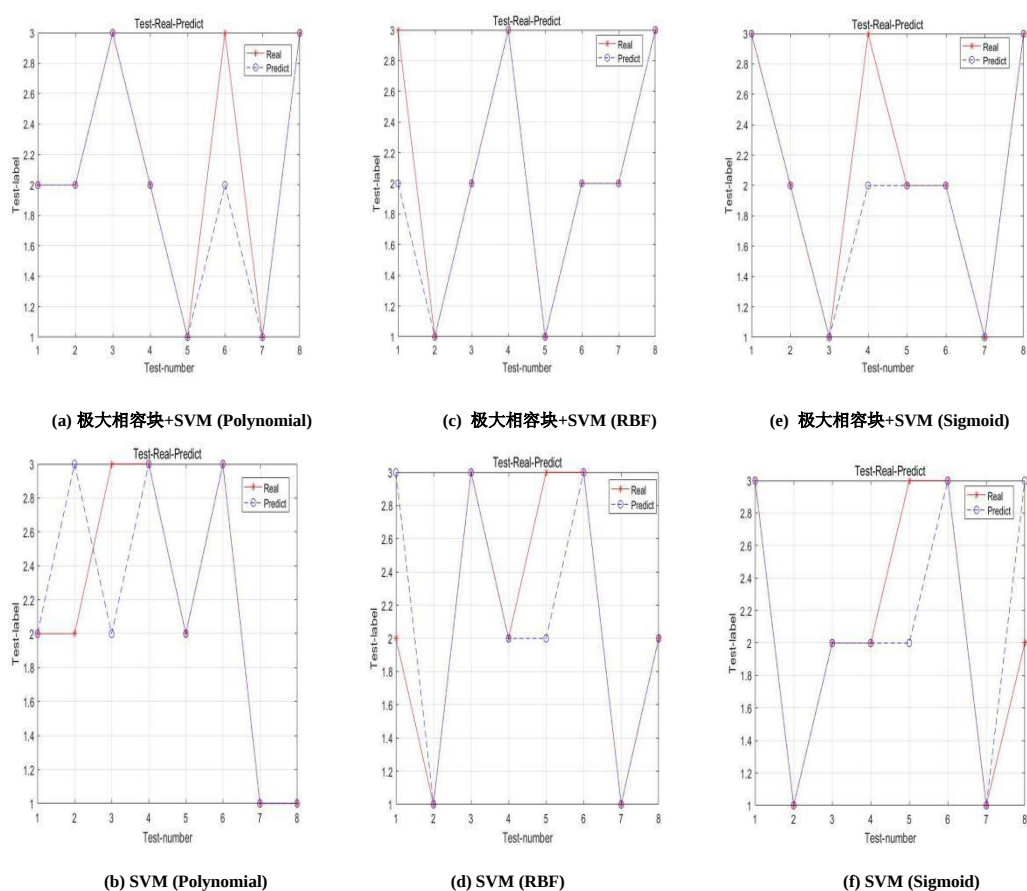


图 4-2 “极大相容块+SVM”和 SVM 对测试集的故障分类图

表 4-4 为“极大相容块+SVM”和 SVM 对测试集的故障分类情况的汇总与对比结果。

表 4-4 “极大相容块+SVM”和 SVM 对测试集的故障分类情况

	极大相容块+SVM		SVM	
	准确率(%)	运行时间(s)	准确率(%)	运行时间(s)
Polynomial	87.5	10.63	75	11.15
RBF	87.5	14.33	75	15.56
Sigmoid	87.5	12.64	75	12.89

从表 4-4 可以直观看出，无论 SVM 故障分类器的核函数中的任意一个，未经过极大相容块方法约简的 SVM 故障诊断结果的为 75%，而约简后的故障诊断结果提升到了 87.5%，并且运行时间也有所提升。这表明经过极大相容块约简的属性对故障诊断更具有代表性和准确性，而且减小了 SVM 的运算量，从而使得 SVM 的诊断效果优于没有约简的诊断结果。

为了进一步说明本文提出的“极大相容块+智能分类器”方法的有效性，表 4-5 选用其他类型的智能分类器进行仿真实验。结果表明，“极大相容块+随机森林”和“极大相容块+决策树”的准确率都高于不经过属性约简而直接选用相应分类器的准确率。这些结果充分说明所提出的故障诊断方法在面对不完备信息条件下是可行且有效的。

表 4-5 其他类型的“极大相容块+智能分类器”实验结果

极大相容块+智能分类器	准确率(%)	智能分类器	准确率(%)
极大相容块+随机森林	87.5	随机森林	75
极大相容块+决策树	87.5	决策树	62.5

4.3 基于覆盖的多粒度粗糙集及其应用

从粒度计算的角度^{[2] [3]}出发，不管是 Pawlak 粗糙集理论还是覆盖粗糙集理论都是建立在单一粒度空间上的。它们的建立都基于以下两个基本的假设：(1) 两个粒度空间之间可以进行交运算；(2) 目标概念可以通过多个属性共同决定的广义商集进行近似刻画。而 Qian

等人^[45]指出,在实际应用中,有些情形交运算是不成立的。为了解决这一问题, Qian 等人提出了基于等价关系和相似关系的多粒度粗糙集,其中包括乐观多粒度粗糙集和悲观多粒度粗糙集。在此基础上,很多学者研究了其他类型的多粒度粗糙集模型^{[46] [47] [48]},其中包括接下来要介绍的多粒度覆盖粗糙集模型^{[49] [50] [51]}。

4.3.1 多粒度覆盖粗糙集模型的构造与性质

本小节着重介绍两种使用最小描述建立的基于覆盖的多粒度粗糙集模型,以及它们的基本性质(主要是参见文献^{[50] [51]})。

(U, C) 被定义为一个多粒度覆盖近似空间,其中 U 是论域, C 是 U 上若干个覆盖组成的集合。下面先给出利用元素的最小描述定义的两覆盖近似空间下的多粒度粗糙集模型。

定义 4 设 (U, C) 是一个覆盖近似空间。对任意 $C_1, C_2 \in C, X \subseteq U$, 我们给出如下定义:

(1) X 在 C_1 和 C_2 下的第 I 种多粒度覆盖下近似和第 I 种多粒度覆盖上近似分别为

$$\underline{FR}_{C_1+C_2}(X) = \{x \in U \mid \bigcap md_{C_1}(x) \subseteq X \text{ 或 } \bigcap md_{C_2}(x) \subseteq X\}, \quad (4-9)$$

$$\overline{FR}_{C_1+C_2}(X) = \{x \in U \mid (\bigcap md_{C_1}(x)) \cap X \neq \emptyset \text{ 且 } (\bigcap md_{C_2}(x)) \cap X \neq \emptyset\}. \quad (4-10)$$

如果 $\underline{FR}_{C_1+C_2}(X) \neq \overline{FR}_{C_1+C_2}(X)$, 则称 X 是在 C_1 和 C_2 下的第 I 种多粒度覆盖粗糙集。

(2) X 在 C_1 和 C_2 下的第 II 种多粒度覆盖下近似和第 II 种多粒度覆盖上近似分别为

$$\underline{SR}_{C_1+C_2}(X) = \{x \in U \mid \bigcup md_{C_1}(x) \subseteq X \text{ 或 } \bigcup md_{C_2}(x) \subseteq X\}, \quad (4-11)$$

$$\overline{SR}_{C_1+C_2}(X) = \{x \in U \mid (\bigcup md_{C_1}(x)) \cap X \neq \emptyset \text{ 且 } (\bigcup md_{C_2}(x)) \cap X \neq \emptyset\}. \quad (4-12)$$

如果 $\underline{SR}_{C_1+C_2}(X) \neq \overline{SR}_{C_1+C_2}(X)$, 则称 X 是在 C_1 和 C_2 下的第 II 种多粒度覆盖粗糙集。

根据定义 4 可以看到, 对 $X \subseteq U$ 和 $x \in U$, X 在 C_1 和 C_2 下的第 I

种多粒度覆盖下近似和第 I 种多粒度覆盖上近似是利用元素的最小描述的交定义的，也就是说， $\cap md_{C_1}(x)$ 和 $\cap md_{C_2}(x)$ 只要有其中之一是目标概念的子集，则对应的 x 就属于目标概念的下近似，而只有 $\cap md_{C_1}(x)$ 和 $\cap md_{C_2}(x)$ 与目标概念的交都不为空，对应的 x 才属于目标概念的上近似。而 X 在 C_1 和 C_2 下的第 II 种多粒度覆盖下近似和第 II 种多粒度覆盖上近似是利用元素的最小描述的并定义的。

对于定义 4 中定义的两类基于覆盖的多粒度粗糙集模型的近似算子而言，它们除了不满足经典粗糙集近似算子的“上保并、下保交”性质以外，其余性质都满足。因此，接下来主要讨论第 I 种基于覆盖的多粒度粗糙集近似算子的性质，对于第 II 种基于覆盖的多粒度粗糙集近似算子的性质可以类似的推导得到。

定理 1 设 (U, C) 是一覆盖近似空间。那么对任意的 $X, Y \subseteq U$,

- (1) $\underline{FR}_{C_1+C_2}(X) \subseteq X \subseteq \overline{FR}_{C_1+C_2}(X)$.
- (2) $\underline{FR}_{C_1+C_2}(\emptyset) = \overline{FR}_{C_1+C_2}(\emptyset) = \emptyset$, $\underline{FR}_{C_1+C_2}(U) = \overline{FR}_{C_1+C_2}(U) = U$.
- (3) 如果 $X \subseteq Y$, 则 $\underline{FR}_{C_1+C_2}(X) \subseteq \underline{FR}_{C_1+C_2}(Y)$, 且 $\overline{FR}_{C_1+C_2}(X) \subseteq \overline{FR}_{C_1+C_2}(Y)$.
- (4) $\overline{FR}_{C_1+C_2}(X \cap Y) \subseteq \overline{FR}_{C_1+C_2}(X) \cap \overline{FR}_{C_1+C_2}(Y)$, $\underline{FR}_{C_1+C_2}(X \cup Y) \supseteq \underline{FR}_{C_1+C_2}(X) \cup \underline{FR}_{C_1+C_2}(Y)$.
- (5) $\underline{FR}_{C_1+C_2}(X^c) = (\overline{FR}_{C_1+C_2}(X))^c$, $\overline{FR}_{C_1+C_2}(X^c) = (\underline{FR}_{C_1+C_2}(X))^c$.
- (6) $\underline{FR}_{C_1+C_2}(\overline{FR}_{C_1+C_2}(X)) = \underline{FR}_{C_1+C_2}(X)$, $\overline{FR}_{C_1+C_2}(\underline{FR}_{C_1+C_2}(X)) = \overline{FR}_{C_1+C_2}(X)$.

4.3.2 多粒度覆盖粗糙集模型在决策中的应用案例

下例介绍第 I 种基于覆盖的多粒度粗糙集模型在银行信用卡审批过程中的应用（细节参加文献^[50]）：

设有某银行信用卡申请者 10 人，记为 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_{10}\}$ ，假设银行组织了 5 名专家来评估申请者的个人信息（如教育程度、个人收入等）。本例中假设只评估申请者的个人收入情况，其个人收入分为高、中、低 3 种情形。表 4-6 是 5 名专家 $\{S_1, S_2, \dots, S_5\}$ 给出的关于申请者的个人收入情况的评价结果，其中“1”代表高收入，“2”代表中等收

入，“3”代表低收入。决策(D)分为“同意申请(A)”和“不同意申请(R)”两种情况。表 4-6 中有“*”存在，这表示专家对申请者的收入拿不定主意或者弃权，也可以认为专家没有给出相关意见，假设这些缺失值可能是 1、2、3 中的任何一个。

表 4-6 评价结果表

U	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	D
x_1	2	1	1	2	1	A
x_2	3	1	1	2	2	A
x_3	3	3	3	3	3	R
x_4	3	3	3	3	3	R
x_5	3	3	3	3	3	R
x_6	*	2	3	2	2	A
x_7	2	2	2	2	2	R
x_8	1	2	2	1	1	A
x_9	2	1	2	1	3	A
x_{10}	3	3	*	3	2	R

根据表 4-6，由专家 S_1 的评价值对 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_{10}\}$ 构成如下的覆盖 C_1 :

$$C_1 = \{\{x_1, x_7, x_9\}, \{x_2, x_3, x_4, x_5, x_{10}\}, \{x_1, x_2, \dots, x_{10}\}, \{x_8\}\},$$

对专家 S_2 :

$$C_2 = \{\{x_1, x_2, x_9\}, \{x_3, x_4, x_5, x_{10}\}, \{x_6, x_7, x_8\}\},$$

对专家 S_3 :

$$C_3 = \{\{x_1, x_2\}, \{x_3, x_4, x_5, x_6\}, \{x_1, x_2, \dots, x_{10}\}, \{x_7, x_8, x_9\}\},$$

对专家 S_4 :

$$C_4 = \{\{x_1, x_2, x_6, x_7\}, \{x_3, x_4, x_5, x_{10}\}, \{x_8, x_9\}\},$$

对专家 S_5 :

$$C_5 = \{\{x_1, x_8\}, \{x_2, x_6, x_7, x_{10}\}, \{x_3, x_4, x_5, x_9\}\},$$

对决策 D :

$$U / IND(D) = \{\{x_1, x_2, x_6, x_8, x_9\}, \{x_3, x_4, x_5, x_7, x_{10}\}\} = \{X_1, X_2\}.$$

为了获得确定的决策规则, 利用定义 4 计算关于 5 个专家决定的 5 个粒空间 $C_1, C_2, \dots, C_5$ 的决策 D 的第 I 种多粒度覆盖下近似, 可以得到:

$$\underline{FR}_{\sum_{i=1}^5 C_i}(X_1) = \{x_1, x_2, x_8, x_9\}, \quad \underline{FR}_{\sum_{i=1}^5 C_i}(X_2) = \{x_3, x_4, x_5, x_{10}\}.$$

因此, 决策 D 的下近似: $\underline{D}_{AT} = \{\{x_1, x_2, x_8, x_9\}, \{x_3, x_4, x_5, x_{10}\}\}.$

而表 4-6 的属性约简集为 $\{\{S_1, S_2\}, \{S_2, S_4\}, \{S_2, S_5\}\}$ 。因此, 可以得到如下确定的决策规则:

- (1) $S_1 = 1 \vee S_2 = 1 \Rightarrow D = A, \quad S_2 = 3 \Rightarrow D = R;$
- (2) $S_2 = 1 \vee S_4 = 1 \Rightarrow D = A, \quad S_2 = 3 \Rightarrow D = R;$
- (3) $S_1 = 1 \vee S_5 = 1 \Rightarrow D = A, \quad S_2 = 3 \Rightarrow D = R.$

从上述规则可以得到:

(1) 若专家 S_1 或者专家 S_2 认为某申请者是高收入者, 则银行可以给该申请者发信用卡。

(2) 若专家 S_2 或者专家 S_4 认为某申请者是高收入者, 则银行可以给该申请者发信用卡。

(3) 若专家 S_1 或者专家 S_5 认为某申请者是高收入者, 则银行可以给该申请者发信用卡。

(4) 若专家 S_2 认为某申请者是低收入者, 则银行不给该申请者发信用卡。

这样银行工作人员就可以根据上述规则对个人申请信用卡进行决策。

4.4 基于模糊覆盖的粗糙集及其应用

模糊覆盖作为模糊集代替经典集覆盖的延伸, 也受到许多学者的研究。最初的模糊覆盖粗糙集模型是基于模糊关系提出的, 例如, Cock 等人^[52] 基于论域上所有对象关于一个模糊关系 R 的 R -前继定

义了模糊粗糙集模型，其中当 R 是论域上一个 serial 模糊关系时，所有元素的 R -前继组成的集族就是论域上的一个模糊覆盖；Deng 等人^[53] 也研究了由模糊关系诱导出模糊覆盖的一些性质。也就是说上述研究并没有直接从模糊覆盖的角度构造模糊覆盖粗糙集的上、下近似算子，而是通过模糊关系实现的。为了克服这一问题，Li 等人^[54] 提出了基于三角模和剩余蕴涵构造的模糊覆盖上、下近似算子的构造方法。在此基础上，Feng 等人^[55] 基于证据理论和粗糙集理论研究了模糊覆盖的约简和多模糊覆盖系统的融合；D'eer 等人^[56] ^[57] 讨论了基于模糊粗糙覆盖模型的模糊邻域。

近年来，基于已有的模糊覆盖定义，Ma^[58] 创造性地用参数 $\beta(0 < \beta \leq 1)$ 替代模糊覆盖定义中的“1”，将模糊覆盖进行了推广，得到了模糊 β -覆盖的定义，从而定义了模糊 β -覆盖粗糙集模型。在 Ma^[58] 的基础上，Yang 等人^[59] ^[60] 针对模糊最小描述提出了新的模糊覆盖粗糙集，并给出该模型的上、下近似的公理性刻画及其矩阵表达；Zhan 等人^[61] ^[62] 提出了多粒度模糊 β -覆盖粗糙集模型、变精度模糊 β -覆盖粗糙集模型；Li 等人^[63] 提出了格值模糊 β -覆盖粗糙集模型；Wang 等人^[64] 提出了模糊 β -覆盖近似空间下的信息快速计算方法；Huang 等人^[65] 针对模糊邻域的信息粒度提出了模糊 β -覆盖的不确定性度量及其在实际数据上的应用。还有很多学者就这一主题，从理论和应用展开了深入的研究^[66] ^[67] ^[68] ^[69]。以下主要介绍模糊 β -覆盖粗糙集模型的构建、性质、以及一个应用案例。

4.4.1 模糊覆盖粗糙集模型及其性质

在这一小节，我们给出模糊集的概念，以及基于模糊 β -覆盖的粗糙集的构造方法。首先给出模糊集的概念（见文献^[70]）：

设 U 是一个论域。称映射 $A:U \rightarrow [0, 1]$ 为 U 的一个模糊集, 其中 $A(x)$ 是 $x \in U$ 到 A 的隶属度。我们把 $F(U)$ 称为 U 的模糊幂集, 它是 U 的所有模糊子集的集族。关于 $F(U)$ 的一些主要结论如下: $A, B \in F(U)$,

- (1) $A \subseteq B$ 当且仅当对于任意的 $x \in U$, 总有 $A(x) \leq B(x) \in F(U)$;
- (2) $A = B$ 当且仅当 $A \subseteq B$ 及 $B \subseteq A$;
- (3) $A \cup B = \{\langle x, A(x) \vee B(x) \rangle : x \in U\}$;
- (4) $A \cap B = \{\langle x, A(x) \wedge B(x) \rangle : x \in U\}$;
- (5) $A' = \{\langle x, 1 - A(x) \rangle : x \in U\}$.

然后, 我们给出模糊覆盖近似空间的定义 (见文献^{[54] [55]}):

设 U 是一个论域, $F(U)$ 是 U 上所有模糊集组成的集合, $\hat{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ 其中 $C_i \in F(U)$ ($i=1, 2, \dots, m$)。对每一个 $x \in U$, 如果 $(\bigcup_{i=1}^m C_i)(x) = 1$, 则称 $\hat{C}$ 是论域 U 上的一个模糊覆盖。同时, 称 (U, C) 是一个模糊覆盖近似空间。

在该空间下, 若干模糊覆盖粗糙集模型被建立, 相应的应用研究被探讨^{[54] [55]}。针对该空间, $\mathbf{Ma}^{[58]}$ 创造性地用一个参数 $\beta (0 < \beta \leq 1)$ 替代模糊覆盖定义中的“1”, 将模糊覆盖进行了推广, 得到了模糊 β -覆盖的定义。事实上, 当 $\beta=1$ 时, 模糊 β -覆盖就是一个模糊覆盖。所以, 这不仅是对模糊覆盖从理论方面的一种延伸扩展, 也提高了模糊覆盖粗糙集解决实际问题的能力。 $\mathbf{Ma}^{[58]}$ 提出的模糊 β -覆盖近似空间这一概念具体如下:

设 U 是一个论域, $C = \{C_1, \dots, C_m\}$, 其中 $C_i \in F(U)$ ($i=1, 2, \dots, m$)。则对任意的 $\beta \in (0, 1]$, 我们称 C 是 U 的一个模糊 β -覆盖, 如果对任意 $x \in U$, 总有 $(\bigcup_{i=1}^m C_i)(x) \geq \beta$ 成立。我们称 (U, C) 为一个模糊 β -覆盖近似空间。

进一步，Yang 和 Hu^{[59] [71]} 在模糊 β -覆盖近似空间和一些基于模糊覆盖的粗糙集模型中提出了一些概念。在下面的定义中，我们介绍模糊 β -覆盖近似空间中的一些概念，例如 β -邻域系统、模糊 β -最小和 β -最大描述。所有这些定义都是从覆盖近似空间中扩展而来的：

设 $(U, \mathbf{C})$ 为一个模糊 β -覆盖近似空间。则我们称

$$N_{\mathbf{C}}^{\beta}(x) = \{C \in \mathbf{C} : C(x) \geq \beta\} \quad (4-13)$$

为 x 的模糊 β -邻域系统。称

$$N_{\mathbf{C}(x)}^{\beta} = \bigcap \{C \in \mathbf{C} : C(x) \geq \beta\} = \bigcap N_{\mathbf{C}}^{\beta}(x) \quad (4-14)$$

为 x 的模糊 β -邻域。称

$$\overline{N}_{\mathbf{C}(x)}^{\beta} = \{y \in U : N_{\mathbf{C}(x)}^{\beta}(y) \geq \beta\} \quad (4-15)$$

为 x 的 β -邻域。我们称

$$Md_{\mathbf{C}}^{\beta}(x) = \{C \in N_{\mathbf{C}}^{\beta}(x) : \forall D \in N_{\mathbf{C}}^{\beta}(x) \wedge D \subseteq C \Rightarrow C = D\} \quad (4-16)$$

$$MD_{\mathbf{C}}^{\beta}(x) = \{C \in N_{\mathbf{C}}^{\beta}(x) : \forall D \in N_{\mathbf{C}}^{\beta}(x) \wedge D \supseteq C \Rightarrow C = D\} \quad (4-17)$$

为 x 的模糊 β -最小、最大描述。

同时，还有其他一些新的定义在模糊 β -覆盖近似空间被提出，此处不再一一列出，作者已在文献^[72] 中详细介绍了它们，并探讨了它们之间的关系，具体内容请参考文献^[72]。

以下介绍在模糊 β -覆盖近似空间下，几类典型的模型构建方法：

(1) Ma^[58] 建立的模糊 β -覆盖粗糙集模型为：

设 $(U, \mathbf{C})$ 为一个模糊覆盖近似空间。对任意的 $A \in F(U)$ ，我们定义 A 的模糊 β -覆盖下近似 $P^{-}(A)$ 和上近似 $P^{+}(A)$ 为：对任意的 $x \in U$ ，

$$P^{-}(A)(x) = \bigwedge_{y \in U} [(1 - N_{\mathbf{C}(x)}^{\beta}(y)) \vee A(y)], \quad (4-18)$$

$$P^{+}(A)(x) = \bigvee_{y \in U} [N_{\mathbf{C}(x)}^{\beta}(y) \wedge A(y)]. \quad (4-19)$$

若 $P^{-}(A) \neq P^{+}(A)$ ，我们称 A 为一个模糊 β -覆盖粗糙集。具体性质如表 4-7 所示：

表 4-7 $P^-(A)$ 与 $P^+(A)$ 的性质

(1L)	$P^-(U)=U$	下近似余正规性
(2H)	$P^+(\emptyset)=\emptyset$	上近似正规性
(4L)	$P^-(X \cap Y)=P^-(X) \cap P^-(Y)$	下近似可乘性
(4H)	$P^+(X \cup Y)=P^+(X) \cup P^+(Y)$	上近似可加性
(6L)	$X \subseteq Y \Rightarrow P^-(X) \subseteq P^-(Y)$	下近似单调性
(6H)	$X \subseteq Y \Rightarrow P^+(X) \subseteq P^+(Y)$	上近似单调性
(9LH)	$P^-(-X)=-P^+(X), P^+(-X)=-P^-(X)$	上、下近似的对偶性

(2) Yang 和 Hu^[59] 构建的模型为：

设 (U, C) 为一个模糊覆盖近似空间。对任意的 $A \in F(U)$ ，我们定义 A 的模糊 β -覆盖下近似 $SL(A)$ 和上近似 $SH(A)$ 为：对任意的 $x \in U$ ，

$$CL(A) = \bigcup \{C \in C : C \subseteq A\}, \quad (4-20)$$

$$CH(A) = CL(A) \cup \left(\bigcup \{Md_{\tilde{c}}^{\beta}(x) : A(x) \geq \beta\} \right). \quad (4-21)$$

若 $CL(A) \neq CH(A)$ ，我们称 A 为一个模糊 β -覆盖粗糙集。（此处省略该模型的性质）

(3) Yang 和 Hu^[60] 构建的模型为：

设 (U, C) 为一个模糊覆盖近似空间。对任意的 $A \in F(U)$ ，我们定义 A 的模糊 β -覆盖下近似 $SL(A)$ 和上近似 $SH(A)$ 为：对任意的 $x \in U$ ，

$$SL(A)(x) = \bigwedge_{y \in U} [(1 - N_{C(x)}^{\beta}(y)) \vee (1 - M_{C(x)}^{\beta}(y)) \vee A(y)], \quad (4-22)$$

$$SH(A)(x) = \bigvee_{y \in U} [N_{C(x)}^{\beta}(y) \wedge M_{C(x)}^{\beta}(y) \wedge A(y)], \quad (4-23)$$

其中 $M_{C(x)}^{\beta}(y) = N_{C(y)}^{\beta}(x)$ 。若 $SL(A) \neq SH(A)$ ，我们称 A 为一个模糊 β -

覆盖粗糙集。（此处省略该模型的性质）

在上述模型的基础上，后续提出了很多扩展模型，主要以下三类为主：

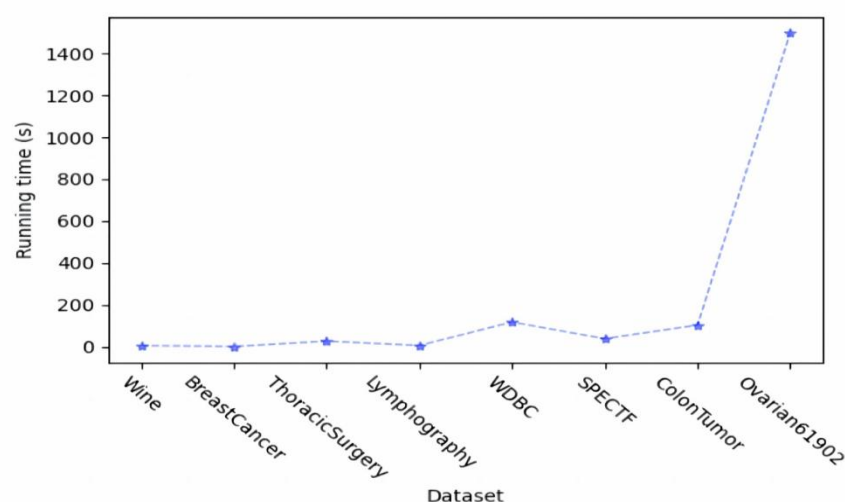
(1) 将模型中的“取大”与“取小”运算推广到模糊逻辑运算“T-模”与“T-余模”（或重叠函数与分组函数等），主要参见文献^[73] ^[74] ^[75]。

(2) 将模型中的模糊集拓展为广义模糊集，例如直觉模糊覆盖粗糙集、犹豫模糊覆盖粗糙集、中智覆盖粗糙集与三支模糊覆盖粗糙集等，主要参见文献^[76] ^[77] ^[78] ^[79]。

(3) 将模型中的邻域算子拓展为其他类型的邻域算子，主要参见文献^[79] ^[81]。

4.4.2 模糊覆盖粗糙集在特征选择中的应用案例

针对文献^[75]提出的基于重叠函数与分组函数的模糊 β -覆盖粗糙集模型，本小节介绍了基于该模型的特征选择算法（简称为 $OF\beta CRSM$ ）的合理性和优势。同时对比了基于 t -模的模糊 β -覆盖粗糙集模型的特征选择算法^[79]（ $F\beta CRSM$ ）和经典模糊粗糙集模型的特征选择算法^[82]（ $CFRSM$ ）。这些模型也采用了根据依赖程度衡量属性的重要性，并采用了属性子集选择的前向贪婪策略。此外，图 4-3 展示了文献^[75]的算法 $OF\beta CRSM$ 在不同数据集下的运行时间（数据集来源于 UCI 公开数据集，具体细节见文献^[75]）。

图 4-3 算法 $OF\beta CRSM$ 在不同数据集下的运行时间

在 KNN 和 CART 分类器上，三种特征选择方法的分类性能分别如表 4-8 和表 4-9 所示，根据表中的数据可以绘制出图 4-4，其中平行于 x 轴的虚线表示算法分类性能的平均值。从图 4-4 可以看出，对于不同的数据集，三种算法在 KNN 和 CART 上的分类性能各有优缺点，但相比于其他两种算法， $OF\beta CRSM$ 算法的平均分类性能略高。

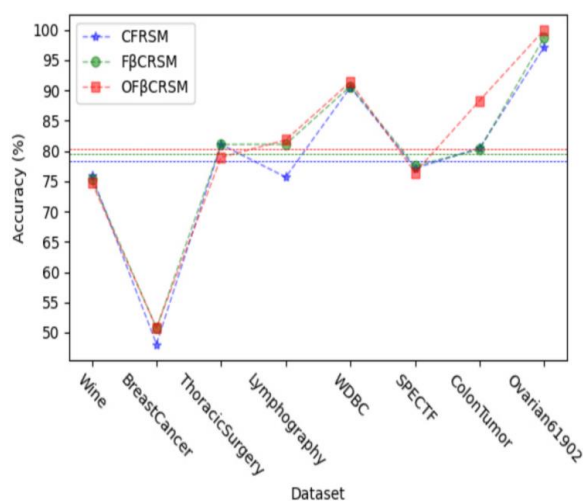
表 4-8 不同模型与 KNN 算法结合的分类结果 (mean + std%)

Datasets	ALL	$F\beta CRSM$	CFRSM	$OF\beta CRSM$
Wine	72.09±9.06	75.33±6.15	75.92±7.50	74.77±5.64
BreastCancer	49.85±14.31	50.76±17.58	48.11±16.74	50.76±17.58
ThoracicSurgery	81.06±2.77	81.06±3.49	81.06±2.77	78.94±5.16
Lymphography	76.38±10.42	81.10±4.95	75.67±6.14	81.81±5.86
WDBC	92.62±3.02	90.69±2.82	90.52±2.84	91.39±3.45
SPECTF	74.15±8.58	77.54±7.44	77.14±5.67	76.41±7.81
ColonTumor	81.90±15.76	80.24±18.01	80.48±20.56	88.33±13.02
Ovarian61902	93.32±7.17	98.80±3.60	97.22±3.60	100.00±0.00
Average	77.67±8.89	79.44±8.01	78.27±8.23	80.30±7.32

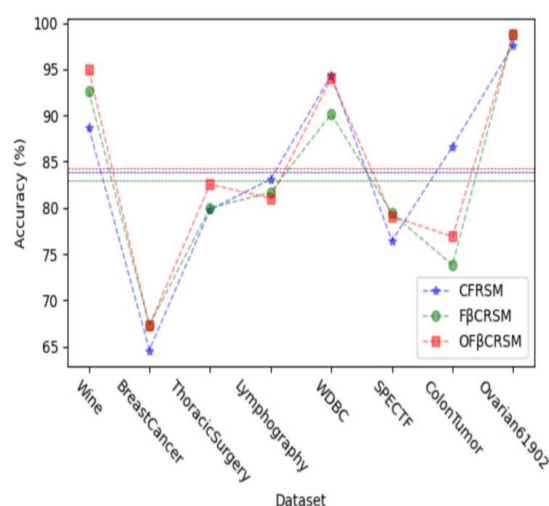
表 4-9 不同模型与 CART 算法结合的分类结果 (mean + std%)

Datasets	ALL	$F\beta CRSM$	CFRSM	$OF\beta CRSM$
----------	-----	---------------	-------	----------------

Wine	88.17±8.19	92.65±7.74	88.73±10.07	95.00±5.80
BreastCancer	73.11±11.41	67.27±9.60	64.62±8.04	67.27±9.60
ThoracicSurgery	79.57±4.28	80.00±3.95	79.79±4.06	82.55±3.13
Lymphography	80.43±11.42	81.67±8.71	83.10±8.60	81.05±8.39
WDBC	92.45±2.72	90.16±2.94	94.38±2.45	94.03±2.24
SPECTF	75.67±9.94	79.40±5.03	76.42±9.94	79.07±7.93
ColonTumor	82.14±18.60	73.81±18.44	86.67±14.53	76.90±17.10
Ovarian61902	98.40±2.65	98.82±1.81	97.63±2.59	98.80±2.56
Average	83.74±8.65	82.97±7.28	83.92±7.54	84.33±7.09



(a) KNN



(b) CART

图 4-4 由表 4-8 和 4-9 绘制的分类结果图

参考文献

- [1] 李德毅, 杜鹁. 不确定性人工智能(第 2 版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [2] 王国胤, 李德毅, 姚一豫, 梁吉业, 苗夺谦, 张燕平, 张清华. 云模型与粒计算[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [3] 李天瑞, 罗川, 陈红梅, 张钧波. 大数据挖掘的原理与方法——基于粒计算与粗糙集的视角[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [4] Pawlak Z. Rough sets[J]. International Journal of Computer & Information Sciences, 1982, 11(5): 341-356.
- [5] 冯锋, 万喆, 徐泽水, 柳晓燕. 基于软粗糙集的犹豫模糊三支决策方法[J]. 控制与决策, 2023, 38(3): 834-842.
- [6] 苗夺谦, 张清华, 钱宇华, 梁吉业, 王国胤, 吴伟志, 高阳, 商琳, 顾沈明, 张红云. 从人类智能到机器实现模型——粒计算理论与方法[J]. 智能系统学报, 2016, 11(6): 743-757.
- [7] 梁吉业, 钱宇华, 李德玉, 胡清华. 大数据挖掘的粒计算理论与方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(11): 1355-1369.
- [8] 李金海, 王飞, 吴伟志, 徐伟华, 杨习贝, 折延宏. 基于粒计算的多粒度数据分析方法综述[J]. 数据采集与处理, 2021, 36(3): 418-435.
- [9] Skowron A, Swiniarski R, Synak P. Approximation spaces and information granulation[C]. Rough Sets and Current Trends in Computing. Springer Berlin Heidelberg, 2004: 116-126.
- [10] Zakowski W. Approximations in the space (μ, π) [J]. Demonstratio Mathematica, 1983, 16(40): 761-769.
- [11] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. Information & Control, 1965, 8(3): 338-353.

- [12] Dubois D, Prade H. Rough fuzzy sets and fuzzy rough sets[J]. International Journal of General Systems, 1990, 17(2-3): 191-209.
- [13] Pomykala J A. Approximation operations in approximation space[J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences, 1987, 35(9-10): 653-662.
- [14] Tsang E C C, Chen D, Lee J W T, Yeung D S. On the upper approximations of covering generalized rough sets[C]. Proceedings of the 3rd International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Shanghai, China: IEEE Computer Society, 2004: 4200-4203.
- [15] Zhu W, Wang F Y. Reduction and axiomization of covering generalized rough sets[J]. Information Sciences, 2003, 152(1): 217-230.
- [16] Zhu W. Generalized rough sets based on relations[J]. Information Sciences, 2007, 177(22): 4997-5011.
- [17] Zhu W. Relationship between generalized rough sets based on binary relation and covering[J]. Information Sciences Informatics and Computer Science, Intelligent Systems, Applications: An International Journal, 2009.
- [18] 魏莱, 苗夺谦, 徐菲菲, 夏富春. 基于覆盖的粗糙模糊集模型研究[J]. 计算机研究与发展, 2006(10): 1719-1723.
- [19] Yao Y, Yao B. Covering based rough set approximations[J]. Information Sciences, 2012, 200: 91-107.
- [20] 汤建国, 余堃, 祝峰. 一种新的覆盖粗糙模糊集模型[J]. 控制与决策, 2012, 27(11): 10.

- [21] Gong Z, Li W. Multi-scale variable precision covering rough sets and its applications[J]. Applied Intelligence, 2023, 53(24): 31018-31032.
- [22] Ma Z, Mi J, Lin Y, Li J. Boundary region-based variable precision covering rough set models[J]. Information Sciences, 2022, 608: 1524-1540.
- [23] Mareay R. Soft rough sets based on covering and their applications[J]. Journal of Mathematics in Industry, 2024, 14: 1-11.
- [24] Mohammed A, Shokry N, Ashraf N. Covering soft rough sets and its topological properties with application[J]. Soft computing, 2023, 27(8): 4451-4461.
- [25] 刘银山, 王豪, 秦克云. 基于邻域系统的粗糙集模型的代数性质[J]. 计算机科学, 2023, 50(S02): 525-530.
- [26] 刘永文, 李天瑞, 陈红梅, 高子喆, 谷小广. 覆盖广义粗糙集中近似集增量更新方法研究[J]. 计算机工程, 2012, 38(2): 156-158.
- [27] 吴正江, 张亚宁, 张真, 梅秋雨, 张亚宁. 拟单层覆盖粗糙集中近似集的增量更新算法[J]. 计算机工程, 2022, 48(6): 200-206.
- [28] Wang J, Zhang X, Liu C. Grained matrix and complementary matrix: Novel methods for computing information descriptions in covering approximation spaces[J]. Information Sciences, 2022, 591: 68-87.
- [29] 施虹艺, 马周明. 多尺度决策系统的覆盖粗糙模糊集及其最优尺度选择[J]. 山东大学学报(理学版), 2024, 59(5): 114-130.

- [30] 游小英, 李进金. 基于证据理论的覆盖类决策多粒度粗糙集的下近似约简[J]. 模糊系统与数学, 2020, 34(5): 133-138.
- [31] Zhao Z. Reductions of a covering approximation space from algebraic points of view[J]. International journal of approximate reasoning, 2023, 153: 104-114.
- [32] 江怡. 基于微分邻域和粗糙集的动态障碍路况下智能车的控制[J]. 乐山师范学院学报.
- [33] 冯涛, 基于模糊覆盖的粗糙集模型及其在临床医学中的应用. 河北省, 河北科技大学, 2011-01-19.
- [34] 李贤, 朱丽丽. 基于覆盖粗糙集的电网工程风险元传递模型[J]. 华东电力, 2012, 40(5): 711-714.
- [35] 汤建国, 汪江桦, 韩莉英, 祝峰. 基于覆盖粗糙集的语言动力系统[J]. 智能系统学报, 2014, 9(2): 229-234.
- [36] 欧彬利, 钟夏汝, 代建华, 杨田. 基于变精度覆盖粗糙集的入侵检测方法[J]. 计算机应用, 2020, 40(12): 3465-3470.
- [37] Yang Y, Chen D, Zhang X, Ji Z. Covering rough set-based incremental feature selection for mixed decision system[J]. Soft computing, 2022, 6: 2651-2669.
- [38] 徐晔, 许晴媛, 李进金. 基于集覆盖理论的覆盖信息系统属性约简方法[J]. 郑州大学学报(理学版), 2024, 56(1): 60-67.
- [39] Zhao Z. Reductions of a covering approximation space from algebraic points of view[J]. International journal of approximate reasoning, 2023, 153: 104-114.
- [40] Wang Z, Zhang X, Deng J. The uncertainty measures for covering rough set models[J]. Soft Computing, 2020, 24: 11909-11929.
- [41] Pomykala J A. Approximation operations in approximation

- space[J]. Bulletin of the polish academy of sciences: Mathematics, 1987: 35(1): 653-662.
- [42] 王敬前, 张小红. 基于极大相容块的不完备信息处理新方法及其应用[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2022, 58(1): 82-93.
- [43] 黄文涛, 赵学增, 王伟杰, 代礼周. 基于不完备数据的汽轮机组故障诊断的粗糙集方法[J]. 汽轮机技术, 2004, 46(1): 59-61.
- [44] 李化. 汽轮发电机组振动故障智能诊断模型的理论及方法研究[D]. 博士学位论文. 重庆大学, 1999.
- [45] Qian Y, Liang J, Li D, Yao Y, Dang C. MGRS: A multi-granulation rough set[J]. Information Sciences, 2010, 180: 949-97.
- [46] 陈宝国, 邓明. 基于对象更新的邻域多粒度粗糙集模型增量式算法[J]. 智能系统学报, 2023, 18(3): 562-576.
- [47] 徐伟华, 丁一, 邓彪, 张晓燕. 基于区间值犹豫模糊多粒度粗糙集的三支决策模型[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 37-46.
- [48] Xu Y, Wang M, Hu S. Matrix-based fast granularity reduction algorithm of multi-granulation rough set[J]. Artificial Intelligence Review, 2023, 56(5): 4113-4135.
- [49] 刘财辉, 凌敏, 钱进. 特征函数描述下的多粒度覆盖粗糙集及其不确定性度量[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2022, 47(3): 51-59.
- [50] 胡军, 王丽娟, 刘财辉, 王国胤. 覆盖粒计算模型与方法: 基于粗糙集的视角[M]. 科学出版社, 2018.
- [51] 张清华, 王国胤, 胡军. 多粒度知识获取与不确定性度量[M]. 科学出版社, 2013.

- [52] Cock M D, Cornelis C, Kerre E. Fuzzy rough sets: beyond the obvious[C]. 2004 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2004: 103-108.
- [53] Deng T, Chen Y, Xu W, Dai Q. A novel approach to fuzzy rough sets based on a fuzzy covering[J]. Information Sciences, 2007, 177(11): 2308-2326.
- [54] Li T, Leung Y, Zhang W. Generalized fuzzy rough approximation operators based on fuzzy coverings[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2008, 48(3): 836-856.
- [55] Feng T, Zhang S, Mi J. The reduction and fusion of fuzzy covering systems based on the evidence theory[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2012, 53(1): 87-103.
- [56] D’eer L, Restrepo M, Cornelis C, G ó mez J. Neighborhood operators for covering-based rough sets[J]. Information Sciences, 2016, 336: 21-44.
- [57] D’eer L, Cornelis C, Godo L. Fuzzy neighborhood operators based on fuzzy coverings[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2017, 312: 17-35.
- [58] Ma L. Two fuzzy covering rough set models and their generalizations over fuzzy lattices[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2016, 294: 1-17.
- [59] Yang B, Hu B. A fuzzy covering-based rough set model and its generalization over fuzzy lattice[J]. Information Sciences, 2016, 367: 463-486.
- [60] Yang B, Hu B. On some types of fuzzy covering-based rough sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2016, 312: 36-65.

- [61] Zhan J, Zhang X, Yao Y. Covering based multigranulation fuzzy rough sets and corresponding applications[J]. Artificial Intelligence Review, 2020, 53(2): 1093-1126.
- [62] Zhan J, Jiang H, Yao Y. Covering-based variable precision fuzzy rough sets with PROMETHEE-EDAS methods[J]. Information Sciences, 2020, 538, 314-336.
- [63] Li W, Yang B, Qiao J. On three types of L-fuzzy β -covering-based rough sets[J]. Fuzzy sets and systems, 2023, 461: 108492.
- [64] Wang J, Zhang X, Yao Y. Matrix approach for fuzzy description reduction and group decision-making with fuzzy β -covering. Information Sciences, 2022, 597: 53-85.
- [65] Huang Z, Li J. Discernibility measures for fuzzy β -covering and their application[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2021, 52(9): 9722-9735.
- [66] 吴凡, 孔祥智. τ 型的模糊 β -覆盖粗糙集模型及其性质[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2023, 48(6): 43-48.
- [67] 林依婷, 马周明, 李进金. 直觉模糊向量($\rightarrow^{\beta}$)覆盖 L 粗糙集[J]. 模糊系统与数学, 2022, 36(6): 26-39.
- [68] Wang J, Zhang X, Bustince H. Fuzzy neighborhood Choquet integrals with overlap functions and their applications in attribute reduction. Expert Systems With Applications, 2024, 243: 122756.
- [69] Xie L, Li W, Yang B. Neighborhood-related q-rung orthopair fuzzy covering-based rough set models and their applications for multi-attribute decision making[J]. Computational and Applied

- Mathematics, 2024, 43(6):1-68.
- [70] Klir G, Yuan B. Fuzzy sets and fuzzy logic: Theory and applications[M]. Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- [71] Yang B, Hu B. Fuzzy neighborhood operators and derived fuzzy coverings[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2019, 370: 1-33.
- [72] Zhang X, Wang J. Fuzzy β -covering approximation spaces[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2020, 126: 27-47.
- [73] Zhang K, Zhan J, Wu W. On multicriteria decision-making method based on a fuzzy rough set model with fuzzy α -neighborhoods[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2020, 29(9): 2491-2505.
- [74] Han N, Qiao J. Novel results on G-lower L-fuzzy rough approximation operator in (O, G)-fuzzy rough set model[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2023, 44: 10451-10457.
- [75] Fan Y, Zhang X, Wang J. Overlap function-based fuzzy β -covering relations and fuzzy β -covering rough set models. International Journal of Approximate Reasoning. 2024,169: 109164.
- [76] Huang B, Guo C, Li H, Feng G, Zhou X. An intuitionistic fuzzy graded covering rough set[J]. Knowledge-Based Systems, 2016, 107: 155-178.
- [77] Wang J, Zhang X. Multigranulation single valued neutrosophic covering-based rough sets and their applications to multi-criteria group decision making[J]. Iranian Journal of Fuzzy Systems, 2020, 17(5): 109-126. (SCI)

- [78] Wang J, Zhang X. A novel multi-criteria decision-making method based on rough sets and fuzzy measures[J]. Axioms, 2022, 11: 275.
- [79] Li W, Wang X, Yang B. Three-way decisions with dual hesitant fuzzy covering-based rough set and their applications in medical diagnosis[J]. Applied Soft Computing, 2024, 160: 111695.
- [80] Dai J, Zou X, Wu W. Novel fuzzy β -covering rough set models and their applications[J]. Information Sciences, 2022, 608: 286-312.
- [81] Dai J, Zou X, Qian Y, Wang X. Multi-fuzzy β -covering approximation spaces and their information measures[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2023, 31(3): 955-969.
- [82] Jensen R, Shen Q. Fuzzy-rough sets assisted attribute selection[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2007, 15(1): 73-89.