

基于问题框架的智能 Agent 需求建模方法

肖宏彬¹, 刘旺龙¹, 谭舒孺¹, 王文豪¹, 李智^{1†}, 汤飞²

1. 广西师范大学 计算机科学与工程学院, 广西 桂林 541004;

2. 华为技术有限公司, 广东 深圳 518000

收稿日期: 2026-01-23 † 通信联系人 E-mail: zhili@gxnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(62362006); 广西科技项目(2023AB12022); 广西研究生教育创新计划项目(XYCBZ2024024)

第一作者: 肖宏彬, 男, 博士生, 现从事需求工程、软件工程等研究。E-mail: hongbinxiao@stu.gxnu.edu.cn

摘要: 智能 Agent 作为具有自主性、适应性和社会性的软件范式, 在工业自动化、智能制造等领域展现出广阔的应用前景, 但传统需求分析方法难以有效表达其不确定性行为、环境感知和自主决策等特性。针对这一问题, 本文提出了一种基于问题框架的智能 Agent 需求建模方法(PF-IARM)。该方法以 Jackson 问题框架为理论基础, 构建了包含智能 Agent 域、环境域、知识域和目标域的扩展元模型, 通过对原始元模型的结构引入多模态类型、时序特征和概率分布等现象属性, 增强了对 Agent 不确定性、时序性和学习能力的表达能力。同时, 开发了支持 PF-IARM 方法的可视化需求建模平台, 为元模型元素定义了直观的图形符号和表示规则, 支持方法的工程化应用。在此基础上, 提炼了感知-决策-执行、知识获取与学习、目标导向行为和多 Agent 协作四种核心问题模式, 构建了面向工业场景的 Agent 需求模式库, 支持需求的快速识别与复用。通过工业场景案例研究, 从模型结构和实证研究多维度对方法进行了评估。结果表明 PF-IARM 方法在需求表达的精确性和完整性方面具有优势, 能够有效缩短从需求到设计的转换周期, 为智能 Agent 系统提供了系统化的需求建模支持。

关键词: 智能 Agent; 需求工程; 问题框架; 元模型; 需求建模

中图分类号: TP311

文献标志码: A

文章编号: 1671-8836(2026)04-0461-13

A Problem Frames-Based Method for Intelligent Agent Requirements Modeling

XIAO Hongbin¹, LIU Wanglong¹, TAN Shuru¹, WANG Wenhao¹, LI Zhi^{1†}, TANG Fei²

1. School of Computer Science and Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, Guangxi, China;

2. Huawei Technologies Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China

Abstract: Intelligent Agent, as a software paradigm with autonomy, adaptability, and sociality, has demonstrated broad application prospects in industrial automation, intelligent manufacturing, and related fields. However, traditional requirements analysis methods struggle to effectively capture its uncertain behaviors, environmental perception, and autonomous decision-making characteristics. To address this problem, this paper proposes a Problem Frames-based method for Intelligent Agent Requirements Modeling (PF-IARM). Grounded in Jackson's Problem Frames theory, the method constructs an extended meta-model incorporating an Intelligent Agent domain, Environment domain, Knowledge domain, and Goal domain. Through introducing phenomenological attributes such as multimodal types, temporal characteristics, and probability distributions into the original meta-model, the method enhances the expressiveness of Agent uncertainty, temporality, and learning capabilities. Furthermore, a visual requirements modeling platform supporting the PF-IARM method is developed, with intuitive graphical notations and representation rules defined for each meta-model element, enabling the engineering application of the method. Building on this foundation, four core problem patterns are distilled, namely Perception-Decision-Execution, Knowledge Acquisition and Learning, Goal-Oriented Behavior, and Multi-Agent Collaboration, forming a reusable Agent requirements pattern library for industrial scenarios to support rapid requirements identification and reuse. Case studies in industrial scenarios evaluate the method from multiple dimensions

引用格式: 肖宏彬, 刘旺龙, 谭舒孺, 等. 基于问题框架的智能 Agent 需求建模方法[J]. 武汉大学学报(理学版), 2026, 72(4): 461-473. DOI: 10.14188/j.1671-8836.2026.0011.

XIAO Hongbin, LIU Wanglong, TAN Shuru, *et al.* A Problem Frames-Based Method for Intelligent Agent Requirements Modeling [J]. *J. Wuhan Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 2026, 72(4): 461-473. DOI: 10.14188/j.1671-8836.2026.0011(Ch).

including model structure and empirical analysis. The results demonstrate that PF-IARM achieves improvements in the accuracy and completeness of requirements expression, effectively shortening the transition cycle from requirements to design and providing systematic requirements modeling support for Intelligent Agent systems.

Key words: intelligent agent; requirements engineering; problem frame; meta-model; requirements modeling

0 引 言

随着工业 4.0 时代的深入发展,工业软件系统正面临日益增长的复杂性^[1],为应对这一挑战,智能化成为工业软件发展的重要趋势。智能 Agent 作为一种具有自主性、适应性和社会性的软件范式,在工业自动化、智能制造和复杂系统管理等领域展现出广阔的应用前景^[2-3]。然而,传统的需求分析方法如结构化分析、面向对象分析等,主要针对确定性系统设计,在处理智能 Agent 的不确定性行为、环境感知和自主决策等特性时显现出明显局限^[4-5]。这些方法难以有效表达智能 Agent 与环境的复杂交互、自适应行为规则以及多 Agent 协作模式,导致从需求到实现的鸿沟日益扩大^[6]。因此,在工业软件智能化转型的进程中,构建一套能够准确捕捉智能 Agent 特性的需求建模方法已成为亟待解决的核心问题。

智能 Agent 需求建模面临两大核心挑战。首先,智能 Agent 的自主性、适应性和社会性等特性使其需求建模与传统软件需求建模存在本质差异^[7]。传统需求工程方法^[8-10]难以有效捕捉 Agent 的目标驱动机制、环境感知能力以及动态决策逻辑,导致需求表达不完整或不精确^[11]。其次,现有 Agent 建模方法如 BDI(Belief-Desire-Intention)模型、GAIA 方法论等,虽然为 Agent 设计提供了理论框架,但缺乏系统性的需求分析过程,难以从业务需求到 Agent 设计形成完整的工程化路径^[12-13]。这些方法通常侧重于 Agent 的内部结构设计,而忽视了需求获取、分析和验证等关键环节,造成 Agent 系统与实际业务需求之间的脱节^[14]。

针对上述问题,本文将 Jackson 问题框架理论与智能 Agent 范式相结合,提出了一种基于问题框架的智能 Agent 需求建模方法(PF-IARM: Intelligent Agent Requirements Modeling Based on Problem Frames)。

本文贡献如下:

1) 扩展了问题框架元模型。融入智能 Agent 范式特征,构建了包含智能 Agent 域、环境域、知识域和目标域的 PF-IARM 元模型,通过引入多种现象属性,弥补传统框架在智能 Agent 需求建模方面的局限性。

2) 构建了工业场景 Agent 需求模式库。提炼了感知-决策-执行、知识获取与学习、目标导向行为和多 Agent 协作四种问题模式,定义模式组合机制,为工业场景 Agent 需求分析提供了可复用的参考模式。

3) 开发了支持 PF-IARM 方法的需求建模平台。为元模型元素定义了直观的图形符号和表示规则,使需求分析师能够以可视化方式构建和理解智能 Agent 系统的问题结构,支持 PF-IARM 方法的工程化应用。

1 相关工作

1.1 智能系统与 Agent 的需求建模

智能系统需求建模经历了从传统软件到机器学习系统,再到现代智能 Agent 的演进过程。在传统 AI 系统需求工程方面,Belani 等^[4]指出 AI 系统面临“规格说明-行为鸿沟”问题,即系统行为难以通过传统需求精确预测。Vogelsang 等^[15]调研发现,机器学习系统的需求工程过程与传统软件工程存在显著差异,特别是在处理不确定性、可解释性和数据依赖性方面。Rahimi 等^[6]进一步提出了面向 AI 系统的需求工程框架,强调了数据质量、模型可解释性和公平性等非功能需求的重要性,但该框架主要关注传统机器学习系统,未充分考虑现代智能 Agent 的自主性和适应性特征。

近年来,大型语言模型(Large Language Model, LLM)的兴起带来了新一代智能 Agent 系统,其特点是具有强大的语言理解与生成能力、工具使用能力和上下文学习能力。White 等^[16]提出了一系列提示模式(Prompt Patterns)来工程化 ChatGPT 的行为,包括角色扮演、思维链和少样本学习等模式,为 LLM 的行为控制提供了初步方案。Mialon 等^[17]综述了增强语言模型的各种方法,包括工具使用、检索增强生成(RAG)和多模态融合等技术。Chang 等^[18]对大型语言模型的综述进一步揭示了这类系统在推理、规划和代码生成等方面的能力边界。然而,这些研究主要关注技术实现和能力评估,缺乏系统性的需求建模方法,难以指导从业务需求到 Agent 设计的工程化过程。

在 Agent 需求建模方面,Agent 导向软件工程(Agent-Oriented Software Engineering, AOSE)提供

了一系列针对智能体系统的建模方法。BDI模型^[19]聚焦于 Agent 的内部心智状态建模,通过信念、欲望和意图三元组描述 Agent 的认知过程和决策逻辑。BDI模型为 Agent 的理性推理提供了形式化基础,但缺乏对环境交互、知识演化和多模态感知的显式表达,难以刻画现代智能 Agent 的学习能力和适应性行为。此外,现有 Agent 建模方法如 Gaia、Tropos 方法等^[20-22],虽然在目标建模和需求分解方面提供

了有价值的思路,但这些方法主要针对具有预定义行为模式的传统 Agent,难以应对现代 LLM 驱动的智能 Agent 的复杂性和不确定性。

1.2 问题框架的扩展

问题框架^[8]作为一种系统化需求分析方法,近年来得到了很多研究者的扩展和应用。表1总结了问题框架扩展的相关研究工作,按研究方向分为元模型扩展、领域应用和工具与智能增强三个类别。

表1 问题框架扩展相关研究概述

Table 1 Overview of research related to the expansion of problem frames

研究方向	研究者与年份	主要贡献	关键特性
元模型扩展	Xiao 等 ^[23] , 2021	扩展问题框架元模型	丰富环境描述,增强表达能力
	Yang 等 ^[24] , 2024	面向元宇宙的元模型扩展	支持虚拟与现实交互环境描述
	Yin ^[25] , 2012	非功能需求捕获扩展	引入质量属性域和约束描述机制
	Jin ^[26] , 2019	扩展问题框架	支持CPS的环境建模
领域应用	Yang 等 ^[27] , 2023	PF-hcps框架	支持人-信息物理系统协作场景
	Zhou 等 ^[28] , 2024	结合STPA的安全分析	增强安全关键系统需求分析能力
	Chen ^[29] , 2019	结合CSP与PAT	确保了需求规约的正确性和一致性
	Yen 等 ^[30] , 2021	智能交通系统的BDD应用	支持需求到测试的全流程追踪
工具与智能增强	Wei 等 ^[31] , 2021	Zoom4pf工具	支持静态和动态领域描述细化
	Xie 等 ^[32] , 2023	结合ChatGPT的数据描述	利用生成式AI辅助问题框架分析
	Chen ^[33] , 2010	DPTool工具	为复杂问题的分解和分析提供了自动化支持

尽管问题框架在多个方向^[23-33]上得到了扩展,但现有研究缺乏专门针对智能 Agent 特性的问题框架扩展,尤其是感知-决策-执行循环的系统化表达;现有扩展主要关注特定领域的适应,缺乏通用的智能 Agent 问题模式库;智能 Agent 缺少从需求到设计的系统化过程。

综上,本研究旨在通过 PF-IARM 方法解决这个问题,构建基于问题框架的智能 Agent 需求建模体系。

2 本文方法 PF-IARM

2.1 PF-IARM 元模型结构

PF-IARM 方法以 Jackson 问题框架为理论基础,将软件开发视为在给定环境中解决特定问题的过程。在元模型结构方面,该扩展元模型在文献[23]元模型的基础上融入了智能 Agent 的核心特性,引入了新的需求建模元素。PF-IARM 元模型如图1所示,整体分为三个部分,通过颜色加以区分。

- **黄色部分:**为问题框架原始元模型^[23]的已有的结构和其相对应的枚举类型元素,构成了 PF-IARM 元模型的基础结构体系。

- **蓝色部分:**对问题框架原始元模型^[23]的结构

进行了类型约束细化。以 Reference 类为代表,通过引入枚举类型属性,将原本以抽象类表达的领域间关系显式类型化,使得 PF4IA、Interface、Requirement、Description 等核心结构元素之间的关联语义更加明确和规范。

- **橙色部分:**为支持智能 Agent 系统建模而专门新增的扩展元素。其中, AIType 实现了对智能 Agent 系统中不同领域角色的类型化区分; Agent-Message 增强了对多模态感知信息、时序特征及概率分布等智能 Agent 特有现象的表达能力。上述扩展在保持与原始问题框架兼容的前提下,增强了元模型对智能 Agent 系统的建模表达能力。

2.2 AIType

2.2.1 IntelligentAgent 域

IntelligentAgent 域形式化定义为:

$$A = (C, K, G, L, F)$$

其中, C 为能力集,描述 Agent 的感知、推理、执行等自主能力; K 为知识库引用,关联 Knowledge 域; G 为目标集引用,关联 Goal 域; L 为学习机制,描述 Agent 根据交互经验更新自身行为的能力; F 为功能集,描述 Agent 对外提供的服务接口。 C 在需求层面显式表达 Agent 的自主感知与决策能力,解决传统 Machine 域无法描述“自主性”的问题;学习机制

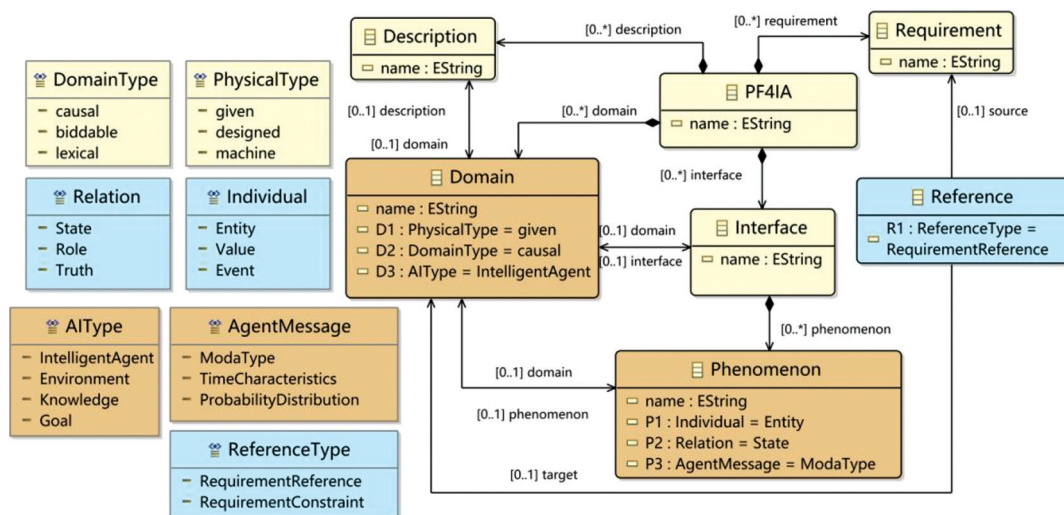


图1 面向智能 Agent 系统的扩展问题框架元模型

Fig. 1 Extension problem frames meta-model for intelligent agent systems

L 支持行为规约的动态性,使需求文档能够描述 Agent 的自适应行为规则而非固定逻辑;Intelligent-Agent 域通过与 Goal 域、Knowledge 域的关联引用,将目标驱动和知识依赖纳入 Agent 的需求表达,弥补传统方法在表达智能系统需求时的局限。

2.2.2 Environment 域

Environment 域形式化定义为:

$$E = (S, O, D)$$

其中, S 为状态空间,描述环境的可能状态; P 为共享现象,描述领域之间可能发生的联系;可观测性函数 $O: S \rightarrow P$,描述 Agent 在当前状态下能感知到的环境信息子集;动态性函数 $D: S \times A \rightarrow S$ 描述 Agent 执行动作后环境状态的转移规则。动态性函数 D 刻画 Agent 行动对环境的影响,支持工具调用协议和外部交互异常处理机制的建模,解决传统方法在“Agent 与环境复杂交互”表达上的局限; D 函数为 PDE 循环中执行阶段的需求描述提供形式化基础。

2.2.3 Knowledge 域

Knowledge 域形式化定义为:

$$K = (T, R, U, V)$$

其中, T 为知识类型,涵盖 FAQ、规则库、提示模板、向量知识库等; R 为知识间关系,描述知识间的依赖与推理;不确定性度量 $U: K \rightarrow [0, 1]$ 描述知识的可信程度;验证机制 $V: K \rightarrow \{ \text{true}, \text{false}, \text{unknown} \}$ 支持知识真值判断。不确定性度量 U 和验证机制 V ,在需求层面定义幻觉检测和事实性验证需求,解决“知识可信度无法表达”的问题;将提示模板纳入知识类型 T ,可实现提示工程的形式化,建立提示策略与功能需求的追溯关系,解决“提示工程缺乏系统

化需求表达”的问题;知识关系 R 支持上下文管理策略(信息优先级、长期记忆存储)的建模,为记忆管理需求提供结构化表达手段。

2.2.4 Goal 域

Goal 域形式化定义为:

$$G = (P, C, E)$$

其中,优先级函数 $P: G \rightarrow R$ 描述目标的重要程度,支持多目标冲突时的优先级排序,使目标驱动的需求分析具有可操作性;约束集 C 以形式化规则定义伦理准则、安全护栏和内容过滤规则,实现质量属性与安全约束的统一管理,解决“被分开处理、缺乏系统性关联”的问题;评估函数 $E: S \rightarrow [0, 1]$ 描述当前环境状态下目标的达成程度。

2.3 现象属性扩展

在 Phenomenon 上扩展三个属性,作为 Agent-Message 子类型承载(对应图 1 橙色新增数据类型):

- Modatype: 标识现象的模态类型(文本/图像/音频/视频等),取值为枚举类型。在问题图中明确标识跨模态现象,支持多模态一致性约束的建模,解决传统方法无法区分不同模态交互的问题。
- TimeCharacteristics: 描述现象的时序特性,包括触发条件、时延约束、顺序关系等。可精确表达 PDE 循环中感知、决策、执行各阶段的时序约束,解决传统现象元素无法描述时序性的问题。

- ProbabilityDistribution: 为现象赋予概率分布,表达涌现能力的不确定性。

2.4 PF-IARM 需求建模平台

本文将元模型进行图形化表示,开发了智能 Agent 系统需求建模平台。

平台为 PF-IARM 元模型中的每种元素定义了对应的图形符号,如表 2 所示。橙色元素表示为支持智能 Agent 建模而新增的扩展领域类型;白色元素表示继承自原始问题框架的核心领域;彩色元素表示针对系统设计和环境建模而扩展的领域;需求节点和描述节点分别采用虚线椭圆和实线椭圆表示。

平台为 PF-IARM 元模型中的关系元素定义了相应的图形表示方法,如表 3 所示。接口 (Interface) 关系用于连接不同领域之间的交互界面。现象

(Phenomenon) 关系用于描述领域间共享的事件或状态变化,在图形表示中通过带标注的连接线来表达,标注格式为“领域名!{现象名}”。需求引用关系采用虚线从 GivenDomain 指向需求节点,表示需求对给定领域的引用关系。需求约束关系同样使用虚线箭头,但箭头方向从需求节点指向 GivenDomain,表示需求对给定领域施加的约束条件。这些图形化的关系表示方法使得领域间的依赖、交互和约束关系能够直观地呈现在问题图中。

表 2 PF-IARM 元模型图形元素对照表

Table 2 Graphical element reference table of PF-IARM meta-model

节点名称	元模型	图形表示	节点名称	元模型	图形表示
机器领域	Domain T1: machine		智能 Agent 领域	Domain T3: IntelligentAgent	
设计领域	Domain T1: designed		环境领域	Domain T3: Environment	
给定领域	Domain T1: given		知识领域	Domain T3: Knowledge	
因果领域	Domain T2: causal		目标领域	Domain T3: Goal	
词法领域	Domain T2: lexical		需求领域	Requirement	
可叫牌领域	Domain T2: biddable		描述领域	Description	

表 3 PF-IARM 关系图形元素对照表

Table 3 Graphical relationship element reference table of PF-IARM

关系名称	元模型	图形表示
接口	Interface	
现象	Phenomenon	
需求引用	Reference T1: RequirementReference	
需求约束	Constraint T1: RequirementConstraint	

图 2 为 PF-IARM 需求建模平台,展示了完整的可视化建模环境。平台界面由 4 个核心区域组成:左侧的问题图工具区提供了元素管理功能,包括节点、连线和领域之间关系等信息,支持多种共享现象属性;平台下方包含 Machine、Design、Property、Requirement、GivenDomain、Group 和 TextBox 等基础组件的节点库;中央画布区域展示了典型的

问题图实例;右侧节点属性面板提供了详细的配置功能,显示选中节点的信息、名称以及样式设置选项。

为支持需求建模成果的后续应用,PF-IARM 平台提供了完善的模型导出。在模型导出方面,平台支持多种标准格式输出,包括 JSON 格式的需求规约文档,以及 SVG/PNG 格式的可视化问题图。

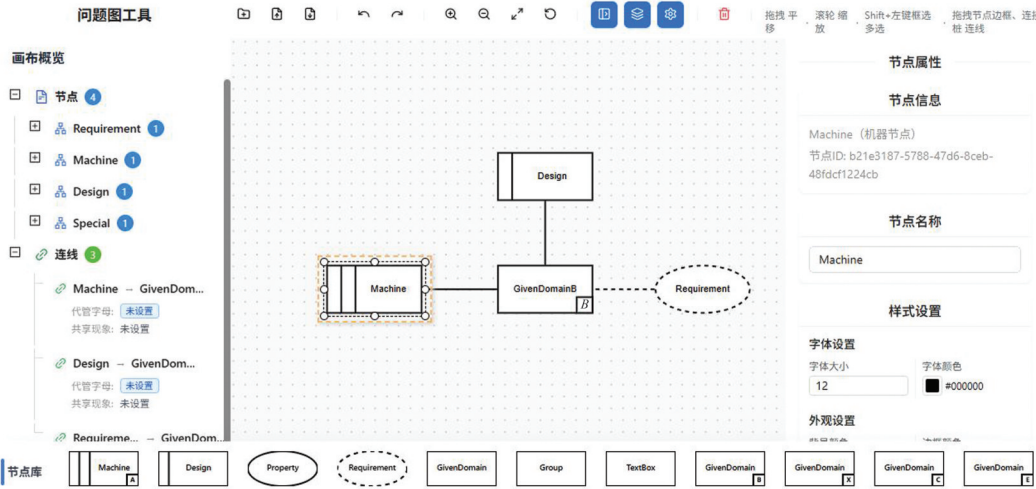


图2 PF-IARM 需求建模平台功能架构图

Fig. 2 Functional architecture diagram of PF-IARM requirements modeling platform

JSON 格式的需求规约采用结构化模板,包含领域定义、现象描述、需求约束等完整信息,便于需求追踪和版本管理。

2.5 智能 Agent 问题模式库

PF-IARM 方法定义了核心问题模式,分别为感知-决策-执行模式、目标导向行为模式、知识获取与学习模式以及多 Agent 协作模式,各模式的结构组成如图 3 所示。

1) 感知-决策-执行(PDE)模式。描述了智能 Agent 的基本认知循环,它包含三个主要阶段:感知(Perception)阶段,Agent 从环境获取信息;决策(Decision)阶段,Agent 基于感知和知识做出决策;执行(Execution)阶段,Agent 执行决策并影响环境。该模式涉及四种关键现象:感知现象($E \rightarrow A$),使 Agent 感知环境状态;查询现象($A \rightarrow K$),使 Agent 查询知识库;更新现象($A \rightarrow K$),使 Agent 更新知识库;执行现

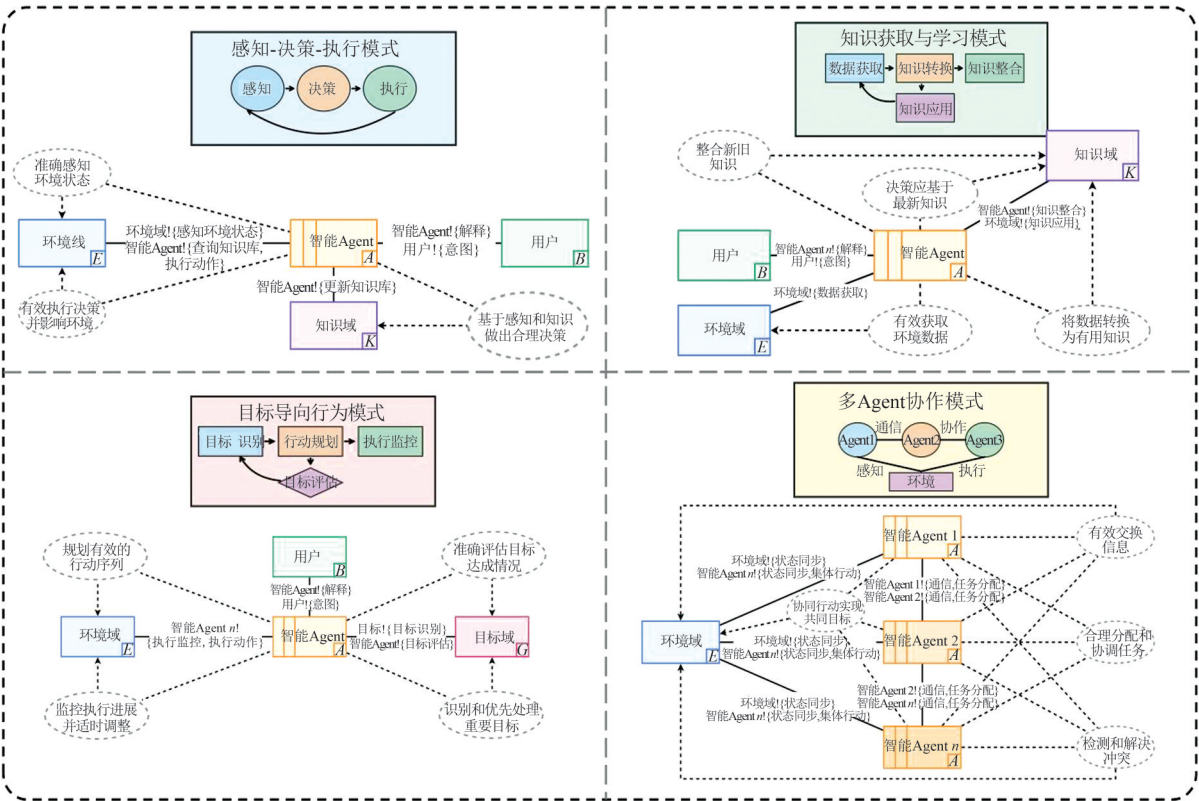


图3 PF-IARM 方法的核心问题模式

Fig. 3 Core problem patterns of the PF-IARM method

象($A \rightarrow E$),使 Agent 在环境中执行动作。

2) 知识获取与学习模式。描述了智能 Agent 如何获取、表示和更新知识,包括从环境中获取原始数据,处理和转换数据为知识,整合新知识到知识库,以及应用知识支持决策。该模式涉及四种关键现象:数据获取($E \rightarrow A$),使 Agent 获取环境数据;知识转换($A \rightarrow A$),使 Agent 处理数据生成知识;知识整合($A \rightarrow K$),使 Agent 将新知识整合到知识库;知识应用($K \rightarrow A$),使 Agent 应用知识支持决策。

3) 目标导向行为模式。描述了智能 Agent 如何目标规划和执行行为,包括目标识别与优先级排序,行动规划与资源分配,执行监控与调整,以及目标达成评估。该模式涉及四种关键现象:目标识别($G \rightarrow A$),使 Agent 识别当前目标;行动规划($A \rightarrow A$),使 Agent 规划达成目标的行动;执行监控($A \rightarrow E$),使 Agent 执行行动并监控进展;目标评估($A \rightarrow G$),使 Agent 评估目标达成情况。

4) 多 Agent 协作模式。描述了多个智能 Agent (Agent 1, Agent 2, ..., Agent n) 之间的协作关系,包括通信与信息共享,任务分配与协调,冲突检测与解决,以及集体决策与行动。该模式涉及四种关键现象:通信(Agent $i \rightarrow$ Agent j),使 Agent 之间交换信息;任务分配(Agent $i \rightarrow$ Agent j),使 Agent 分配任务;状态同步(Agent $i \rightarrow E \rightarrow$ Agent j),使 Agent 通过环境同步状态;集体行动($\{ \text{Agent 1, Agent 2, } \dots, \text{Agent } n \} \rightarrow E$)使 Agent 集体影响环境。

PF-IARM 方法提供了三种问题模式组合机制:顺序组合使模式按特定顺序依次应用;嵌套组合允许一个模式嵌套在另一个模式的某个域内;并

行组合支持多个模式同时应用于系统的不同方面。为确保模式组合的有效性和一致性,必须遵循三项基本规则:共享域必须保持一致的属性和关系,组合后的现象网络不应形成循环依赖,以及组合后的需求集不应存在冲突。

2.6 需求分析流程

PF-IARM 方法提供了一个系统化的需求分析流程,指导分析人员从初始需求到详细规约的全过程。该方法包含四个关键步骤,形成完整的需求工程闭环(图 4)。

3 方法评估

为验证 PF-IARM 方法的有效性,本节通过案例研究、模型结构与实证研究等方法,从需求表达能力、方法可用性和实际应用效果三个方面对所提的研究方法与平台进行评估。本评估旨在回答以下研究问题:

RQ1:PF-IARM 方法能否有效表达智能 Agent 的特有需求特性?

RQ2:PF-IARM 方法相比传统问题框架方法在需求建模中有哪些改进?

RQ3:PF-IARM 是否提供了一个被大众认可的、系统化的解决方案?

3.1 案例研究

本研究选取了 5 个典型工业智能 Agent 应用场景进行建模实践:智能客服 Agent、智能制造排产优化 Agent、设备预测性维护 Agent、工艺参数智能优化 Agent 和供应链协同决策 Agent。这些案例覆盖了服务、制

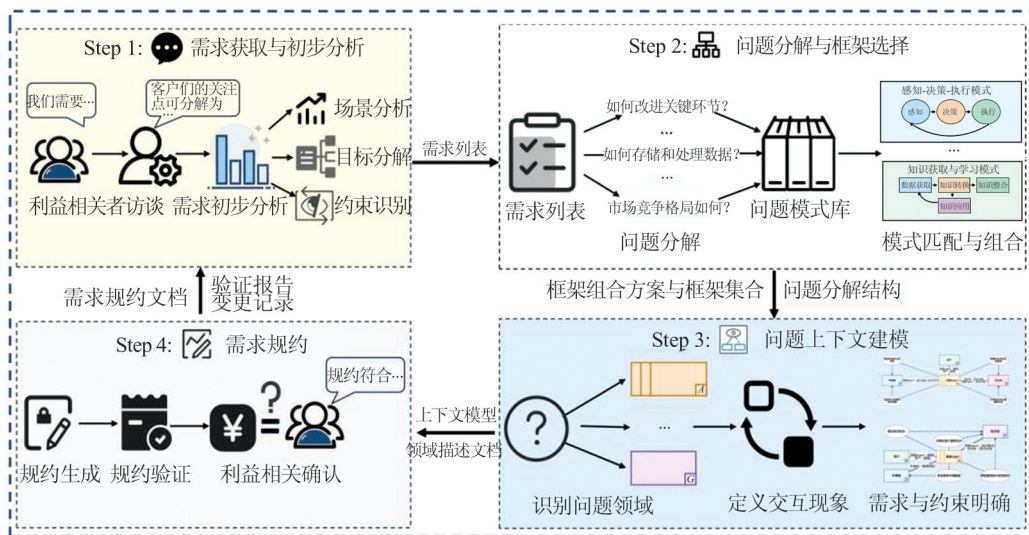


图 4 PF-IARM 需求分析流程图

Fig. 4 Requirements analysis process flow of PF-IARM method

造、维护、工艺优化和供应链管理等核心工业领域。案例集合可以在数据仓库进行获取,获取网址<https://github.com/Hongbin-Xiao/PF-IARM>。

5 个工业场景案例的建模耗时如表 4, PF-IARM 方法需求建模平均耗时约为 15 min,各案例的建模时间相对稳定;各子问题的平均建模耗时约 3 min,符合需求工程实践中单个问题域建模的一般规律。

表 4 工业场景案例 PF-IARM 建模耗时统计

Table 4 Time consumption statistics for PF-IARM modeling in industrial scenario cases

案例名称	子问题数量	总耗时	平均每子问题耗时	主要应用模式
智能客服 Agent	5	14 min 32 s	2 min 54 s	PDE、知识学习
智能制造排产优化 Agent	5	17 min 1 s	3 min 24 s	PDE、目标导向、多 Agent 协作
设备预测性维护 Agent	5	14 min 55 s	2 min 59 s	PDE、知识学习、目标导向
工艺参数智能优化 Agent	5	15 min 40 s	3 min 8 s	PDE、知识学习、目标导向
供应链协同决策 Agent	5	16 min 2 s	3 min 12 s	多 Agent 协作、知识学习

下面以智能客服 Agent 案例分步骤展示建模流程。

Step 1 需求获取与初步分析

智能客服 Agent 是电子商务平台的自动化客户服务系统,承担自动化客户服务的任务。系统需实现对客户关于产品信息、订单状态及售后服务等多类查询的理解与响应,支持基于自然语言的交互。系统应具备对常见问题模式的识别和学习能力,以提高回答的准确性和覆盖范围。针对简单交易操作,如订单查询、退换货申请等,系统需实现自动化处理,减少人工介入。在复杂问题场景下,系统能够准确识别无法自动处理的请求,并实现向人工客服的无缝转接,确保服务的连续性和问题的有效解决。系统同时需要收集客户反馈信息,结合交互数据进行分析,支持服务质量的持续改进。该系统涉及多层次的物理与信息环境,包括用户交互终端、后台服务系统、数据库及人工客服接口。系统设计需要明确各环境之间的边界与交互关系,构建完整的问题模型,确保需求的准确表达。

Step 2 问题分解与框架选择

智能客服 Agent 系统作为面向电子商务平台的自动客户服务系统,功能复杂且涉及多维度业务场景。为确保需求建模的针对性和可操作性,首先对整体问题进行分解,明确系统所需解决的核心子问题。结合系统实际业务需求及用户交互特点,将整体问题划分为以下 5 个子问题:

- 客户查询理解与响应。该子问题聚焦于系统如何准确理解用户的自然语言输入,包括产品信息、订单状态及售后服务等查询,并基于知识库和规则给出合理响应。
- 知识学习与更新。针对智能客服系统的持续优化需求,设计知识库的动态更新机制及模型版本

管理策略,以支持系统对新问题的学习和回答质量的提升。

- 交易操作处理。涉及订单查询、退换货申请等简单交易操作的自动化处理,确保系统能安全、高效地执行相关业务流程。
- 人工转接决策。针对复杂或异常问题,系统需判断是否转接人工客服,并实现转接的上下文传递及权限审计,保障服务的连续性与合规性。
- 服务质量优化。通过设定 KPI 指标、监控服务表现及客户反馈,持续优化系统性能与用户体验。

Step 3 问题上下文建模

针对 Step 2 中的 5 个子问题,依据 PF-IARM 方法选择适配的典型问题框架进行建模。本文重点展示子问题 1 和子问题 2 的建模过程,子问题 3(交易操作处理)、子问题 4(人工转接决策)和子问题 5(服务质量优化)的完整建模结果已发布于 GitHub 仓库,网址<http://github.com/Hongbin-Xiao/PF-IARM>。

子问题 1: 客户查询理解与响应如图 5 所示。采用感知-决策-执行(PDE)模式进行建模。

自主性体现: Intelligent Agent 域通过自主决策机制,无需人工干预即可理解用户意图并生成响应。Agent 根据感知到的用户消息和上下文,自主查询知识库并决策回复策略,体现了 Agent 的自主性。

学习能力体现: 通过 Knowledge 域与 Intelligent Agent 域之间的“查询”和“更新”现象,Agent 能够从交互日志中学习新的 FAQ 模式,动态更新知识库。当遇到未知问题时,系统记录问题并触发知识更新流程,体现了学习能力。

不确定性处理: 用户消息现象标注了 Probability Distribution 属性,表示意图识别的置信度。当置信度低于设定阈值(如 0.7)时,Agent 会触发澄清对话或转接人工客服,确保服务质量。

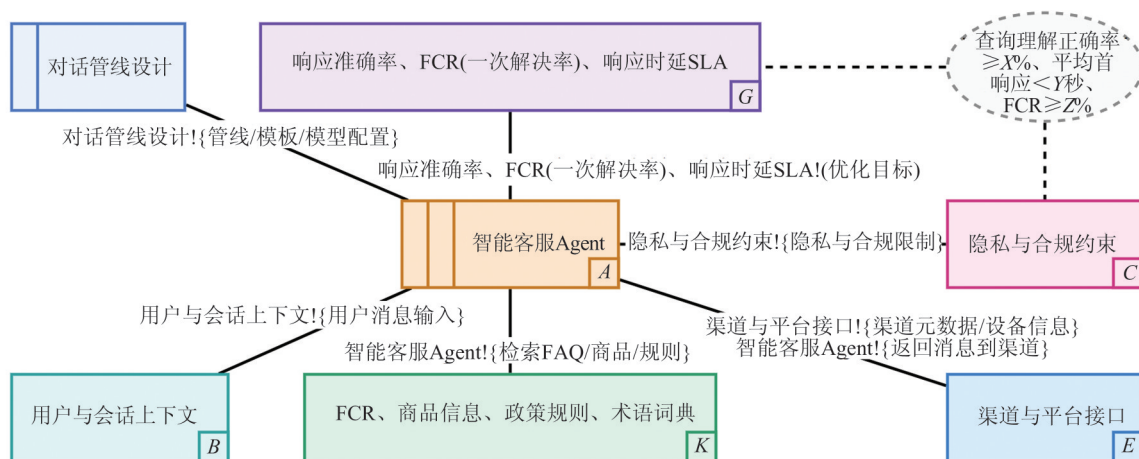


图5 客户查询理解与响应问题框架实例图

Fig. 5 Problem frame instance diagram for customer query understanding and response

系统通过感知用户输入的消息及上下文信息,结合FAQ、商品信息及政策规则进行检索与匹配,决策相应的回复内容,并通过渠道接口返回给用户。该框架明确了输入(用户消息、上下文)、处理逻辑(理解与匹配)、输出(响应消息)及合规约束(隐私与合规限制)。

子问题2:知识学习与更新如图6所示。应用知识获取与学习模式,侧重知识库、模型仓库及版本管理的设计。

学习能力体现:Knowledge 域通过数据治理和版本策略实现知识的持续演化。Agent 从交互数

据、外部知识源中提取新知识,经过验证后写入知识库,并通过版本管理支持知识回滚,体现了系统的学习和自适应能力。

知识不确定性管理: Knowledge 域的不确定性度量 $U:K \rightarrow [0, 1]$ 为每条知识标注可信度, 验证机制 $V:K \rightarrow \{\text{true}, \text{false}, \text{unknown}\}$ 支持知识的真值判断, 确保知识质量。

系统通过数据治理、版本策略及外部数据补充,实现知识的持续写入、模型的迭代更新和版本回滚,保证知识与模型的时效性和准确性。日志与监控系统提供反馈支持,促进知识质量提升。

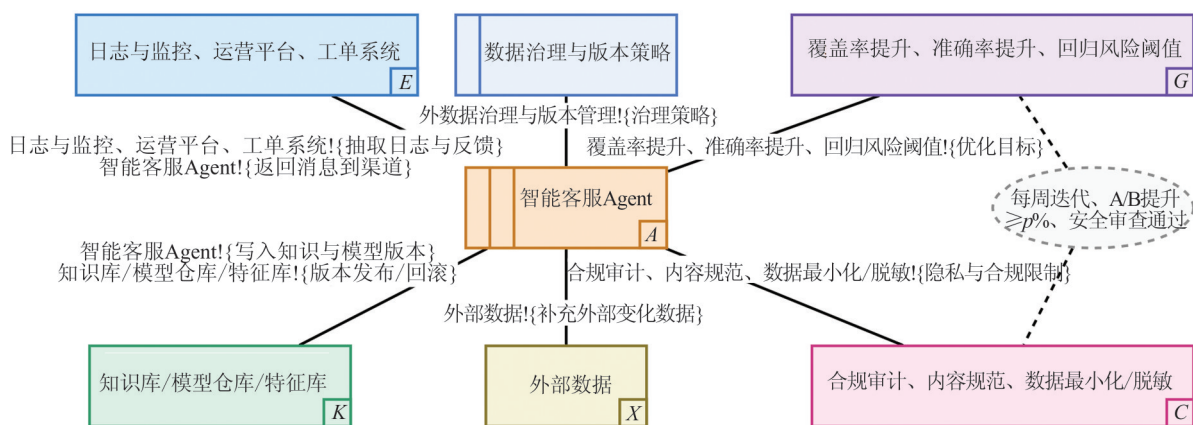


图6 知识学习与更新问题框架实例图

Fig. 6 Problem frame instance diagram for knowledge learning and update

Step 4 需求规约

基于上述5个子问题的建模结果,PF-IARM方法生成了涵盖四类需求的完整规约文档,完整内容已发布于GitHub仓库。

功能需求规约:系统支持多渠道自然语言查询响应,具备交易操作自动化处理、人工客服智能转接及服务质量持续监控等核心业务功能。

质量需求规约:明确性能、可靠性、安全性与可维护性要求,包括高响应性能、故障自动恢复、数据脱敏与模块化设计等约束。

学习需求规约:系统整合多源知识数据,通过基于反馈的在线学习机制,实现知识盲区自动识别与知识库动态演化,体现 Agent 的持续学习能力。

接口需求规约:规范系统与外部组件的交互方

式,支持 RESTful/RPC 协议、JSON/XML 数据格式,并涵盖身份认证、权限控制与异常处理机制。

Answer4RQ1:通过案例验证,PF-IARM 方法能够有效表达 Agent 的自主感知、智能决策、学习适应等特性。四种问题模式提供了不同的需求关注点,知识域的引入使得 Agent 的推理依据明确,目标域确保了需求的目标驱动特性。

3.2 模型结构评估

为了验证 PF-IARM 方法在元模型设计上的有效性,本节将其与近年来具有代表性的问题框架扩展方法进行系统对比。表 5 展示了 7 种方法在元模型元素支持方面的差异,这些方法分别针对不同的

应用场景对传统问题框架进行了扩展。

Answer4RQ2:基于案例研究和模型结构评估,PF-IARM 方法相比传统问题框架在需求建模中实现了一定改进。在元模型结构方面,如表 5 所示,PF-IARM 方法是对比的 7 种问题框架扩展方法中唯一同时引入 IntelligentAgent 域、Environment 域、Knowledge 域和 Goal 域的方法,相比传统方法的机器域-问题域-接口三域结构,在一定程度上改善了关注点分离,使得功能需求、知识需求和目标需求能够统一表达。在表达能力方面,PF-IARM 方法在自主感知、智能决策、学习适应、目标驱动、多 Agent 协作、知识依赖等 Agent 特性维度上相比传统

表 5 问题框架方法的属性对比
Table 5 Comparative properties of problem-frames approaches

元模型元素	PF-CPS ^[23]	PF-hcps ^[26]	PF-STPA ^[27]	PF-Meta ^[24]	Zoom4pl ^{f[29]}	PF-Xie ^[30]	PF-IARM
Machine	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Designed	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Given	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Causal	✓		✓				✓
Lexical	✓		✓				✓
Biddable	✓		✓				✓
<u>IntelligentAgent</u>							✓
<u>Environment</u>							✓
<u>Knowledge</u>							✓
<u>Goal</u>							✓
Causality	✓		✓				
Boundary		✓		✓			
Human Domain		✓		✓			
Avatar Domain		✓		✓			
State Machine					✓		
Block Definition					✓		
Explicit Descriptions						✓	
Requirement	✓				✓	✓	✓
Description	✓						✓
Interface	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Phenomenon	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Requirement	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Reference							
Requirement	✓		✓		✓	✓	✓
Constraint	✓	✓	✓		✓	✓	✓
<u>ModaType</u>							✓
<u>Time</u>							✓
<u>Characteristics</u>							
<u>Probability</u>							✓
<u>Distribution</u>							

注:带有下列线的是本文扩展的元素。

问题框架有所改进,特别是通过引入针对性的建模元素,能够在一定程度上表达传统方法难以刻画的不确定性、时序性和模态性等智能 Agent 特有的需求特征。在建模过程方面,PF-IARM 方法尝试通过模式库支持问题快速识别和模型复用。这些改进使得 PF-IARM 方法较为适合工业智能 Agent 系统的需求建模。

3.3 PF-IARM 方法与平台的实证评估

为验证本文提出的“基于问题框架的智能 Agent 需求建模方法(PF-IARM)”的有效性 with 实用性,我们进行了专家问卷调研(专家问卷样例可通过以下链接查阅:<https://github.com/Hongbin-Xiao/PF-IARM/blob/main/Questionnaire>)。调研对象涵盖学术界、工业界及机关单位,共 31 位具备智能系统或需求工程背景的专业人士参与。图 7 展示了专家对 PF-IARM 框架四个关键维度的评分分布情况。完整的实证研究结果可在 GitHub 仓库获取:<https://github.com/Hongbin-Xiao/PF-IARM/blob/main/Empirical-research-findings>。

调研对象中,61.29% 来自学术界,22.58% 来自工业界,16.13% 来自机关单位。超过 80% 的受访者了解或具备智能 Agent 系统相关经验,且超过 80% 熟悉问题框架理论,表明调研结果具有较高的专业可信度。针对 PF-IARM 元模型扩展领域的合理性,96.78% 的受访者认为其“合理”或“非常合理”,说明该元模型能够有效捕捉智能 Agent 的核心特性。

Answer4RQ3:根据问卷所收集的专家反馈,PF-IARM 方法在扩展传统问题框架方面进行了有益探索。评估结果显示,该方法在元模型中引入的智能体、环境、知识与目标等核心概念,以及针对不确定性、时序性的表达机制,得到了多数专家的初步认可。相较于传统方法,PF-IARM 在表达智能 Agent 复杂需求方面展现出一定的改进潜力。同时,其配套的可视化建模方式与案例应用,也被认为在提升方法可理解性与实用性上取得了积极成效。总体而言,这项研究为智能 Agent 需求工程提供了系统化思路,并获得了领域内专家一定程度的肯定。

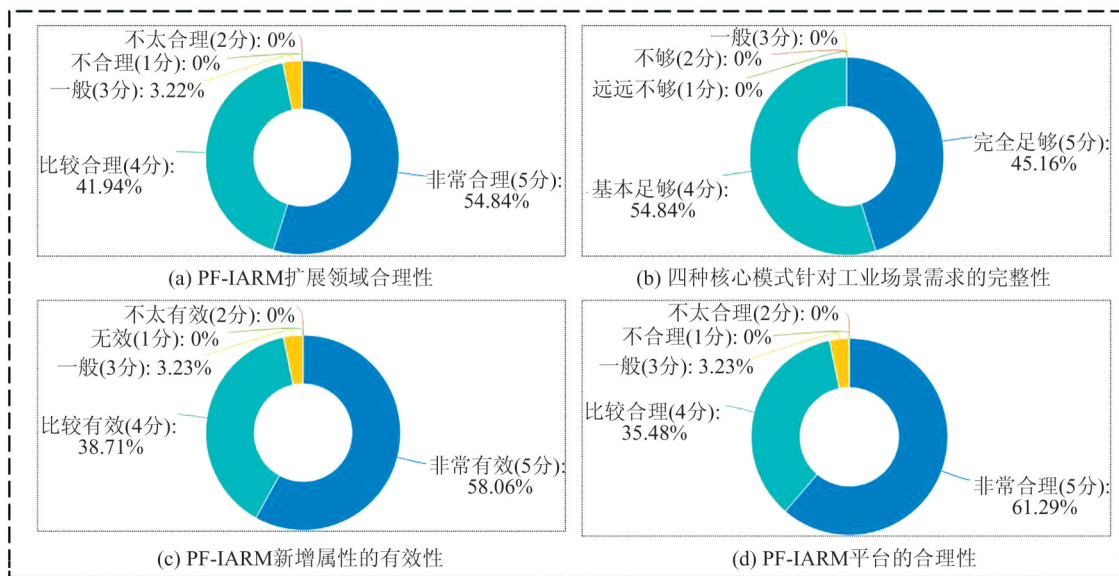


图 7 PF-IARM 框架评估问卷关键维度的专家评分分布

Fig. 7 Expert score distribution on key dimensions of the PF-IARM framework evaluation questionnaire

4 结 语

本文针对智能 Agent 系统需求建模的挑战,提出了基于问题框架的智能 Agent 需求建模方法 PF-IARM。该方法扩展了问题框架元模型,构建了包含智能 Agent 域、环境域、知识域和目标域的模式结构,并通过引入多模态类型、时序特征和概率分布等现象属性增强了对 Agent 特性的表达能力;提炼

了感知-决策-执行、知识获取与学习、目标导向行为和多 Agent 协作四种核心问题模式,构建了可复用的工业场景 Agent 需求模式库;开发了可视化需求建模平台,支持建模方法的工程化应用。案例研究表明,该方法在需求表达的精确性和完整性方面有所改进,能够在一定程度上缩短从需求到设计的转换周期。未来工作将在更多领域验证方法的适用性,持续扩展问题模式库,并探索将大型语言模

型等 AI 技术融入需求建模过程,构建从需求到实现的完整工程化路径。

未来工作将围绕以下方向持续深化。首先,将扩展 Agent 需求模式库,持续收集金融风控、医疗诊断、智能交通等工业领域的 Agent 应用案例,开发基于机器学习的模式推荐机制,构建模式演化与版本管理机制。其次,将增强建模平台功能,完善建模平台的工程化支持能力,实现符合 XMI 2.5 标准的模型导出功能,开发 RESTful API 接口支持与 Jira、GitLab、Confluence 等主流工具的集成,深化 Git 版本控制支持并实现模型差异对比与冲突解决,搭建协作建模功能以满足多人实时编辑需求。此外,将开展大规模实证研究,在多个不同规模的工业项目中推广应用 PF-IARM 方法,建立包含需求质量、开发效率及系统可靠性的多维度定量评估体系,通过跟踪项目全生命周期演化,系统分析方法的实际应用价值与长期效益。通过上述工作,持续完善 PF-IARM 方法的技术体系与应用生态,为工业智能化转型提供更成熟的需求工程解决方案,推动智能 Agent 技术在工业领域的深度落地与价值释放。

参考文献:

- [1] XU L D, XU E L, LI L. Industry 4.0: State of the art and future trends[J]. *International Journal of Production Research*, 2018, **56** (8): 2941-2962. DOI: 10.1080/00207543.2018.1444806.
- [2] KARNOUSKOS S, RIBEIRO L, LEITÃO P, *et al.* Key directions for industrial agent based cyber-physical production systems [C]//2019 IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems (ICPS). New York: IEEE Press, 2019: 17-22. DOI: 10.1109/ICPHYS.2019.8780360.
- [3] ZHOU T, TANG D B, ZHU H H, *et al.* Multi-agent reinforcement learning for online scheduling in smart factories [J]. *Robotics and Computer—Integrated Manufacturing*, 2021, **72**: 102202. DOI: 10.1016/j.rcim.2021.102202.
- [4] BELANI H, VUKOVIC M, CAR Ž. Requirements engineering challenges in building AI-based complex systems [C]//2019 IEEE 27th International Requirements Engineering Conference Workshops (REW). New York: IEEE Press, 2019: 252-255. DOI: 10.1109/REW.2019.00051.
- [5] HABIBA U E, HAUG M, BOGNER J, *et al.* How mature is requirements engineering for AI-based systems? A systematic mapping study on practices, challenges, and future research directions[J]. *Requirements Engineering*, 2024, **29** (4): 567-600. DOI: 10.1007/s00766-024-00432-3.
- [6] RAHIMI M, GUO J L C, KOKALY S, *et al.* Toward requirements specification for machine-learned components [C]//2019 IEEE 27th International Requirements Engineering Conference Workshops (REW). New York: IEEE Press, 2019: 241-244. DOI: 10.1109/REW.2019.00049.
- [7] ABUSHARK Y, MILLER T, THANGARAJAH J, *et al.* Requirements specification via activity diagrams for agent-based systems[J]. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2017, **31** (3): 423-468. DOI: 10.1007/s10458-016-9327-7.
- [8] JACKSON M. Problem frames: Analyzing and Structuring Software Development Problems [M]. Massachusetts: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2000.
- [9] LAMSWEERDE A V. Requirements Engineering: From System Goals to UML Models to Software Specifications [M]. Hoboken: Wiley Publishing, 2009. DOI: 10.1016/B0-12-227410-5/00855-3.
- [10] YU E S K. Social Modeling and i* [C]//Conceptual Modeling: Foundations and Applications (LNCS 5600). Berlin: Springer, 2009. DOI: 10.1007/978-3-642-02463-4_7.
- [11] VILLAMIZAR H, ESCOVEDO T, KALINOWSKI M. Requirements engineering for machine learning: A systematic mapping study [C]//2021 47th Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications (SEAA). New York: IEEE Press, 2021: 29-36. DOI: 10.1109/SEAA53835.2021.00013.
- [12] BOISSIER O, BORDINI R H, HÜBNER J F, *et al.* Multi-agent oriented programming with JaCaMo [J]. *Science of Computer Programming*, 2013, **78** (6): 747-761. DOI: 10.1016/j.scico.2011.10.004.
- [13] DALPIAZ F, FRANCH X, HORKOFF J. iStar 2.0 language guide [DB/OL]. [2025-06-12]. <https://arxiv.org/pdf/1605.07767>.
- [14] LEITÃO P, COLOMBO A W, KARNOUSKOS S. Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges [J]. *Computers in Industry*, 2016, **81**: 11-25. DOI: 10.1016/j.compind.2015.08.004.
- [15] VOGELSANG A, BORG M. Requirements engineering for machine learning: Perspectives from data scientists [C]//2019 IEEE 27th International Requirements Engineering Conference Workshops (REW). New York: IEEE Press, 2019: 245-251. DOI: 10.1109/REW.2019.00050.
- [16] WHITE J, FU Q C, HAYS S, *et al.* A prompt pattern catalog to enhance prompt engineering with ChatGPT [DB/OL]. [2025-06-12]. <https://omekas-test.sba.unipi.it/files/original/9473424cea8d562f876a4bca4bedd9e2336910af.pdf>.
- [17] MIALON G, DESSÌ R, LOMELI M, *et al.* Augmented language models: A survey [DB/OL]. [2025-10-10]

- <https://arxiv.org/pdf/2302.07842>.
- [18] CHANG Y P, WANG X, WANG J D, *et al.* A survey on evaluation of large language models[J]. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2024, **15** (3): 1-45. DOI:10.1145/3641289.
 - [19] DE SILVA L, MENEGUZZI F, LOGAN B. BDI agent architectures: A survey[J]. *Proceedings of the 29th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 2021, (1): 1-6. <https://doi.org/10.17863/CAM.53101>.
 - [20] ZAMBONELLI F, JENNINGS N R, WOOLDRIDGE M. Developing multiagent systems: The Gaia methodology[J]. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, 2003, **12** (3): 317-370. DOI: 10.1145/958961.958963.
 - [21] BRESCIANI P, PERINI A, GIORGINI P, *et al.* Tropos: An agent-oriented software development methodology[J]. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2004, **8** (3): 203-236. DOI:10.1023/B: AGNT.0000018806.20944.ef.
 - [22] STERLING L S, TAVETER K. The Art of Agent-Oriented Modeling[M]. Cambridge: The MIT Press, 2009. DOI:10.7551/mitpress/7682.001.0001.
 - [23] XIAO H B, LI Z, YANG Y L, *et al.* An extended meta-model of problem frames for enriching environmental descriptions[C]//2021 IEEE 29th International Requirements Engineering Conference Workshops (REW). New York: IEEE Press, 2021: 428-434. DOI:10.1109/rew53955.2021.00077.
 - [24] YANG Y L, CHENG Y Y, GAO J T, *et al.* Extending meta-model of problem frames for metaverse human-computer interaction system [C]//2024 IEEE 32nd International Requirements Engineering Conference Workshops (REW). New York: IEEE Press, 2024: 184-191. DOI: 10.1109/REW61692.2024.00030.
 - [25] YIN B, JIN Z. Extending the problem frames approach for capturing non-functional requirements [C]//2012 IEEE/ACIS 11th International Conference on Computer and Information Science. New York: IEEE Press, 2012: 432-437. DOI:10.1109/ICIS.2012.47.
 - [26] JIN Z, CHEN X H, LI Z, *et al.* RE4CPS: Requirements engineering for cyber-physical systems [C]//2019 IEEE 27th International Requirements Engineering Conference (RE). New York: IEEE Press, 2019: 496-497. DOI:10.1109/RE.2019.00072.
 - [27] YANG Y L, ZENG B J, CHEN Z, *et al.* PF-HCPS: Extending problem frames for supporting human-cyber-physical system collaboration [C]//2023 IEEE 31st International Requirements Engineering Conference Workshops (REW). New York: IEEE Press, 2023: 209-212. DOI:10.1109/REW57809.2023.00041.
 - [28] ZHOU X Y, XIAO H B, ZHENG B W, *et al.* Combining STPA with PF requirements analysis: Taking the insulin pump problem as an example [C]//2024 17th International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE). New York: IEEE Press, 2025: 19-24. DOI: 10.1109/ICACTE62428.2024.10871520.
 - [29] CHEN X H, WU X, ZHAO M Y, *et al.* Verifying the relationship among three descriptions in problem frames using CSP [C]//2019 International Symposium on Theoretical Aspects of Software Engineering (TASE). New York: IEEE Press, 2019: 248-255. DOI:10.1109/TASE.2019.00010.
 - [30] YEN Y C, WANG B Y, ZHONG X Z, *et al.* Applying problem frames in behavior-driven development for smart cone system [C]//2021 28th Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC). New York: IEEE Press, 2022: 566-567. DOI:10.1109/APSEC53868.2021.00070.
 - [31] WEI S F, LI Z, YANG Y L, *et al.* Zoom4PF: A tool for refining static and dynamic domain descriptions in problem frames [C]//2021 IEEE 29th International Requirements Engineering Conference (RE). New York: IEEE Press, 2021: 414-415. DOI:10.1109/re51729.2021.00047.
 - [32] XIE L, XIAO H B, LI Z. Augmenting the problem frames approach with explicit data descriptions using ChatGPT [C]//2023 IEEE 31st International Requirements Engineering Conference Workshops (REW). New York: IEEE Press, 2023: 178-183. DOI:10.1109/REW57809.2023.00036.
 - [33] CHEN X H, YIN B, JIN Z. Dptool: A tool for supporting the problem description and projection [C]//2010 18th IEEE International Requirements Engineering Conference. New York: IEEE Press, 2010: 401-402. DOI: 10.1109/RE.2010.58.

□