

# WebLeaper

*Empowering Efficiency and Efficacy in WebAgent  
via Enabling Info-Rich Seeking*

Zhengwei Tao\*, Haiyang Shen\*, Baixuan Li\*, Wenbiao Yin✉, Jialong Wu,  
Kuan Li, Zhongwang Zhang, Huifeng Yin, Rui Ye, Liwen Zhang,  
Xinyu Wang, Pengjun Xie, Jingren Zhou, Yong Jiang✉

**Tongyi Lab, Alibaba Group**

# 研究背景：LLM 代理与信息寻求的崛起

核心地位：LLM 代理是 AI 发展的下一个里程碑，**信息寻求 (IS)** 是实现自主智能的核心能力

## 大型语言模型代理的变革性意义

- 标志着 AI 从被动响应到主动解决问题的范式转变
- 在各领域提供前所未有的解决方案

## 信息寻求 (IS) 的核心作用

- IS 能力驱动代理在开放式任务中的适应性
- 是认知自主性的基础

## 业界前沿布局

OpenAI Deep Research

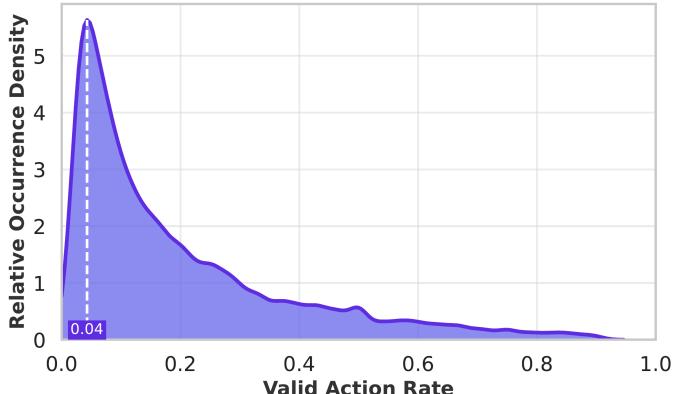
Perplexity AI

Google Gemini

Kimi-Researcher

## 核心发现：强大能力背后的效率瓶颈

当前 IS 代理虽然能力强大，但信息获取过程 普遍低效



有效动作的概率分布（峰值仅 0.04）

关键观察：有效动作分布峰值仅 ~0.04，意味着超过 95% 的动作可能是无效探索。

### 低效的三大表现

- 冗余查询：反复搜索相似内容
- 无效访问：访问与答案无关的网页
- 搜索路径过长：为简单事实进行多轮不必要交互

# 探究根源：为何代理会"兜圈子"？

效率低下的根本原因在于训练数据的 "实体稀疏性" (Entity Sparsity)

## 实体稀疏性是什么？

- 传统数据合成：一个问题只提供极少数目标实体 (1-3个)
- 例：问“谁获得了2020年诺贝尔文学奖？”答案只有1个实体
- 导致模型在有限上下文中缺乏学习机会

## 稀疏性的两大恶果

**实践层面：**一次任务只能学到1-2个“知识点”，无法学会高效“捞针”

**理论层面：**评估指标失效（见右侧）

## 理论证明（核心洞见）

$$\text{ISE} = \frac{n}{T}$$

$$\text{Var}(\text{ISE}) = \mathcal{O}\left(\frac{1}{n}\right)$$

**命题1解读：**ISE（信息寻求效率）的方差与实体数量 n 成反比。

**含义：**实体稀疏时，效率测量极不稳定。就像 **用晃动的尺子量长度**。

**结论：**必须 **构建实体密集 (n 大) 的任务**。

# 本文方案：WebLeaper - 为高效寻求而生

设计哲学：“既然问题出在数据，那就从数据入手。”

## 框架两大支柱

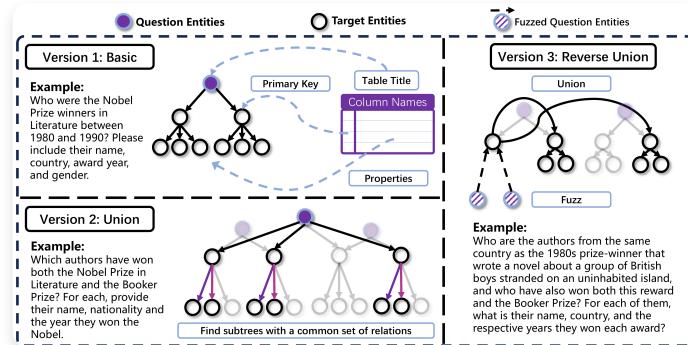
### 支柱一：实体密集型任务合成

- 不再满足于“一问一答”
- 设计“一问多答”甚至“一问百答”的复杂任务
- 三个递进版本：

Basic → Union → Reverse-Union

### 支柱二：效率感知的轨迹构建与学习

- 生成并筛选“最优解法”（又快又准的轨迹）
- 设计相应奖励机制引导模型学习
- ISR & ISE 双指标过滤 + 混合奖励系统



WebLeaper 框架：树状结构 + 三个递进版本

# 第二部分

# 方法深度剖析

# WebLeaper 方法论详解 - 路线图

## Part 1

### 实体密集型任务合成

- Version-I: **Basic**  
单源高密度
- Version-II: **Union**  
多源整合
- Version-III: **Reverse-Union**  
逆向推理

## Part 2

### 效率感知的轨迹构建

- 数据源选择  
维基百科表格清洗
- ISR & ISE 指标定义  
准确性 + 效率
- 高质量轨迹筛选  
双重过滤标准

## Part 3

### 混合奖励的强化学习

- 奖励设计挑战  
稀疏 + 评估困难
- 软 F-Score 奖励  
细粒度 + 语义感知
- GRPO 优化算法  
相对优势估计

## 任务合成的基石：树状结构 + 维基百科表格

### 为何选择树状结构？

- 层次清晰、结构紧凑：一个任务中自然容纳大量从属实体
- 符合人类思维：从主题发散到子主题，再到具体属性

- 数学定义：
- 根节点 (Root): Question Entity
  - 第二层 (Layer 2): Target Entities (Intermediate)
  - 第三层 (Layer 3): Attributes/Properties

### 为何选择维基百科表格？

- 天然结构化：表格=实体+关系集合
- 数据丰富：覆盖广泛领域
- 高质量：社区编辑审核

起点：2,000,000 张维基百科表格



### 多阶段清洗流程：

- 大小过滤 (Size Filtering)
- 语义过滤 (Semantic Filtering)
- 同构筛选 (Homogeneity Screening)

结果：高质量、结构化的维基百科表格数据集  
为后续任务合成提供稳定、可复用的语义基础

## Version-I: Basic - 单源高密度

核心观点：从单个表格出发，构建三层推理树，直接解决实体稀疏性问题

### 构建过程

#### 第一层 (根/问题)

- 来源：表格标题
- 示例："Nobel Prize in Literature laureates"

#### 第二层 (子树根)

- 来源：LLM 自动识别的"主键"列
- 示例：获奖作家姓名 (Czesław Miłosz, Mo Yan, ...)
- 每个姓名都是一个独立子树根

## Basic (续)：贡献与统计

### 贡献与意义

- 首次将任务实体密度 **显著提升**
- 提供在单次任务中处理**大量信息**的机会
- 缓解传统方法的稀疏性问题

### 统计数据

指标	Basic	传统方法
平均实体数	20-50	1-3
密度提升	10-50 倍	

## Basic (续): 任务示例

“请列出 1980-1990 年间诺贝尔文学奖得主及其国籍和获奖年份。”

## Version-II: Union - 跨越多源信息整合

核心：通过“最大二分团枚举”智能融合多个 Basic 任务，创造需要跨源信息整合的复杂任务

动机：真实世界问题往往需要整合多个来源的信息

### 技术核心 - 最大二分团枚举

“如何自动发现哪些表格可以被‘有意义’地合并？”

#### 1. 构建二分图

- 左：Basic任务树；右：关系集合
- 树包含关系则连边

#### 2. 寻找最大二分团

- 找共享最多共同关系的任务树
- 高效智能的搜索策略

### 任务生成示例

发现：'Nobel Prize' 和 'Booker Prize' 共享：

has\_author, has\_nationality, has\_award\_year

生成问题：“Which authors have won both the Nobel Prize in Literature and the Booker Prize? List their nationalities.”

### 贡献

- 迫使代理学会 跨源信息整合
- 需要关系运算（如求交集）
- 显著提升任务认知复杂度

## Version-III: Reverse-Union - 逆向推理对抗捷径

核心观点：通过颠倒推理顺序，强制代理进行“线索演绎 → 扩展搜索”的深度推理，防止依赖关键词匹配走捷径

### 动机

作者指出，即使是 Union 任务，代理也可能通过分别搜索再取交集的方式“走捷径”。`Reverse-Union` 的设计正是为了防止这种情况。

### 两阶段设计 (I/II)

#### 第一阶段：演绎模糊化 (DEDUCTIVE FUZZ)

- 起点：不是明确的实体，而是一组描述性“线索”（第三层实体）

- 示例：

"那位在 1980 年代获奖、写了一本关于一群英国男孩被困荒岛的小说的作家..."

- 要求：代理必须先 推理 出这是 "William Golding"

- 目的：防止直接关键词搜索

## Reverse-Union (续): 扩展搜索与贡献

### 第二阶段：基于联合的扩展搜索

- 推理后：任务并未结束
- 扩展：利用推理出的实体属性（如国籍“英国”）作为“枢轴”
- 最终问题：  
"找出所有与其同国籍，且同时获得诺贝尔奖和布克奖的作家。"

### 贡献

- 强制代理进行 **演绎推理** (Deductive Reasoning)
- 需要**多步规划** (Multi-step Planning)
- 提升鲁棒性，更接近人类的问题解决方式

## 轨迹构建：如何定义“好”的解法？（1/2）

核心：好的解法兼具 **准确性** 和 **效率**。定义 ISR 和 ISE 两个核心指标。

### 信息寻求率 (ISR)

$$\text{ISR} = \frac{|R \cap O|}{|R|}$$

- **衡量：**找得全不全（召回率/覆盖率）
- **R:** 目标实体集 (Ground Truth)
- **O:** 代理找到的实体集
- **范围：** [0, 1]，越高越好

示例：如果目标有10个实体，代理找到了8个，则  
 $\text{ISR} = 8/10 = 0.8$

### 信息寻求效率 (ISE)

$$\text{ISE} = \frac{n}{T}$$

- **衡量：**找得快不快（单位步数的实体数）
- **n:** 目标实体总数
- **T:** 总工具调用步数
- **含义：**每一步平均找到多少目标实体

示例：如果10个实体用了5步找到，则  $\text{ISE} = 10/5 = 2.0$ （每步找到2个实体）

## 轨迹构建：如何定义“好”的解法？（2/2）

轨迹筛选策略 - 双重过滤标准

标准：ISR >  $\alpha$  (足够准确) 且 ISE >  $\beta$  (足够高效)

## 轨迹构建 (续): 核心意义

**意义:** 筛选出的高质量轨迹作为 SFT 阶段的“教科书”，确保模型学到的是 **又准又快** 的搜索策略，而不是“蛮力搜索”或“快速但不准确”的策略。

- 标准可复用，便于新任务扩展
- 与 RL/GRPO 结合，提升最终性能

**落地价值:** • 为真实应用提供可解释的优化目标

## 轨迹构建（续）：过滤流程

### 轨迹过滤流程

步骤 1：生成大量轨迹（使用基础模型）



步骤 2：计算每条轨迹的 ISR 和 ISE



步骤 3：保留  $\text{ISR} > \alpha$  且  $\text{ISE} > \beta$  的“双高”轨迹



步骤 4：用于监督微调 (SFT)

## 强化学习：混合奖励系统 (1/2)

核心观点：针对实体密集型任务的奖励稀疏和评估困难问题，设计混合奖励系统

### RL 面临的困境

#### 1. 奖励稀疏 (Reward Sparsity)

- 问题：几十个实体全对才给奖励
- 后果：模型永远学不会（正反馈太少）

#### 2. 评估困难 (Evaluation Challenge)

- Exact Match: 太死板，无法处理同义词 ("USA" vs "United States")
- LLM-as-a-Judge: 又贵又不稳定，难以大规模应用

解决方案：设计软 F-Score (Soft F-Score) 混合奖励，兼顾细粒度反馈和智能评估

## 强化学习：混合奖励系统 (2/2)

### 解决方案：软 F-Score (Soft F-Score)

#### 1. 语义相似度函数

$$s(e_o, e_r) \in [0, 1]$$

理解同义词和语义等价

#### 2. 软召回率

$$\mathcal{R}_c = \frac{1}{|R|} \sum_{e_r \in R} \max_{e_o \in O} s(e_o, e_r)$$

找到了多少目标实体

#### 3. 软精确率

$$\mathcal{P} = \frac{1}{|O|} \sum_{e_o \in O} \max_{e_r \in R} s(e_o, e_r)$$

找到的实体有多准确

#### 4. WebLeaper 最终奖励

$$\mathcal{R}_\omega = (1 + \omega^2) \frac{\mathcal{P} \cdot \mathcal{R}_c}{\omega^2 \mathcal{P} + \mathcal{R}_c}$$

平衡精确率和召回率

优势：细粒度反馈 + 智能评估 + 兼容性（保留传统数据集的评估方式）

# 第三部分

# 实验结果与分析

## 实验设置：在严苛环境中验证实力

### 基准 (Benchmarks)

基准	描述	指标
BrowserComp	复杂浏览任务	Pass@1
GAIA	通用 AI 助手	Pass@1
xbench-DS	深度搜索评估	Pass@1
Seal-0	复杂问答任务	Pass@1
WideSearch	宽度搜索能力	SR, F1

## 基线模型 (Baselines)

闭源/专有代理:

- Claude-4-Sonnet
- OpenAI-o3
- OpenAI DeepResearch

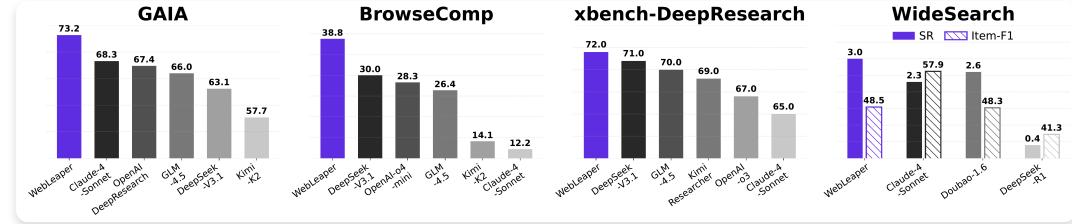
开源代理:

- ASearcher-Web-32B Kimi-K2-1T
- DeepDive-32B
- DeepDiver-V2-38B
- MiroThinker-32B
- WebExplorer-8B
- WebDancer-32B
- WebSailor-32B
- WebShaper-32B

## 实验设置（续）：训练配置

- 基础模型：Qwen3-30B-A3B-Thinking-2507
- 训练框架：Megatron
- 两种设置：
  - **Base (B)**: WebLeaper + WebSailor-V2 (5k/10k)
  - **Comprehensive (C)**: 混合更大规模训练语料

## 核心结果 (1): 全面超越，刷新开源模型记录



在所有基准上的性能对比 (Comprehensive Setting)

### 关键胜利点 (1/2)

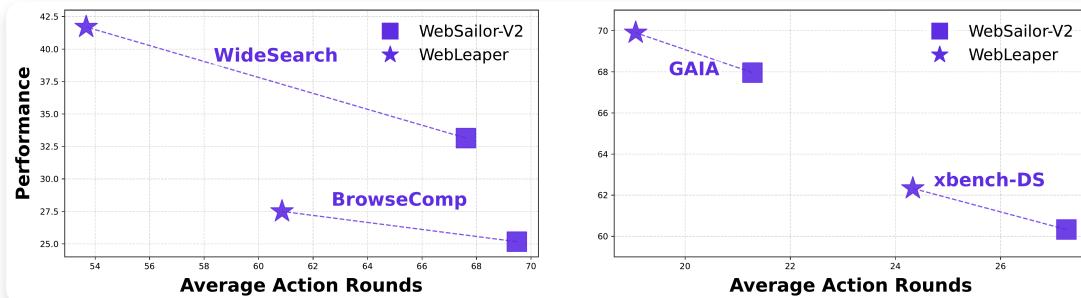
- ✓ **开源第一：**在所有五个基准上，WebLeaper 均取得开源第一
- ✓ **超越闭源巨头：**在 GAIA 与 xbench-DS 等高难度任务上，超过 Claude-4-Sonnet 与 OpenAI-o3

## 核心结果（续）：参数效率与全面提升

### 关键胜利点 (2/2)

- ✓ **参数效率**: 30B 模型优于 1T 参数的 Kimi-K2
  - BrowseComp: **38.8** vs 14.1 (提升 **174%**)
- ✓ **全面提升**:
  - GAIA: +20.0 相比开源最强
  - xbench-DS: +19.0 相比开源最强
  - WideSearch: 唯一在 SR 上达到 4.0 的开源模型

## 核心结果 (2): 不仅做得更好，而且用时更少 (1/2)



效率 (工具调用次数) vs 效果 (任务得分) 对比 - 四个基准测试

"左上角"的含义：

- 左 (Less Tool Calls) → 更高效
- 上 (Higher Score) → 更有效

核心发现：在所有四个基准上，蓝点 (WebLeaper) 都稳定地出现在橙点 (基线) 的 **左上角**。

## 核心结果 (2): 不仅做得更好，而且用时更少 (2/2)

### 具体数据对比

GAIA 数据集

模型	分数	步数
WebLeaper	73.2	12
WebSailor	53.2	18
提升	+20	-6
改进率	+38%	-33%

BrowseComp 数据集

模型	分数	步数
WebLeaper	38.8	8
最强基线	15.7	14
提升	+23.1	-6
改进率	+147%	-43%

结论：这印证了作者们的核心假设：**效率和效果不是零和博弈**。通过优化效率，可以同时提升效果。该研究的代理学会了如何“聪明地”工作，而不是“费力地”工作。

## 深入分析(1): 为何 Reverse-Union 效果最好? (1/2)

### 不同数据源版本的性能对比

Data Source	BrowseComp	WideSearch	GAIA	Seal-0	xbench-DS	Avg.
WebSailor-V2-5k	25.17	33.15	67.69	34.23	60.00	44.05
<b>Basic-5k</b>	20.67 (-4.50)	32.26 (-0.89)	40.78 (-26.91)	30.03 (-4.20)	58.33 (-1.67)	36.41 (-7.64)
<b>Union-5k</b>	27.50 (+2.33)	41.70 (+8.55)	69.90 (+2.21)	35.14 (+0.82)	62.33 (+2.33)	<b>47.31 (+3.26)</b>
<b>Reverse-Union-10k</b>	27.67 (+2.50)	44.07 (+10.92)	66.99 (-0.70)	37.24 (+3.01)	66.00 (+6.00)	<b>48.39 (+4.34)</b>

- Basic 版本在 GAIA 上大幅下降 -26.91, 说明任务过于简单
- Union 版本平均提升 +3.26, 证明结构复杂度重要

关键观察: • Reverse-Union 平均提升 **+4.34**, 效果最佳

## 深入分析(1): 为何 Reverse-Union 效果最好? (2/2)

### 1. Basic 版本的问题

- ✗ 性能反而下降, 尤其在 GAIA 上 (-26.91)
- 原因: 任务过于简单, 模型学会了"抄近道"
- 后果: 过拟合简单模式, 泛化能力变差
- 教训: 仅仅增加实体密度还不够, **任务复杂度同样重要**

### 2. Union 版本的提升

- ✓ 平均提升 +3.26, 大部分基准都有提升
- 原因: 多源信息整合迫使模型进行复杂推理
- 意义: 证明了结构复杂度的重要性

### 3. Reverse-Union 版本的最佳效果

- ✓ 平均提升 +4.34, 在大多数基准上最好
- 原因:
  - 不仅结构复杂, 还有逆向推理设计
  - 杜绝了关键词搜索捷径
  - 先演绎 → 再规划 → 再搜索 (锻炼高级认知能力)
- 特别优势: 在 WideSearch 上提升最大 (+10.92)

结论: 任务复杂度的递进设计至关重要。Reverse-Union 通过逆向推理, 从根本上提升了代理的 **规划和推理能力**。

## 深入分析 (2): 如何筛选出“黄金轨迹”?



### 在 GAIA 和 BrowseComp (复杂任务)

- ✓ ISR+ISE 效果最好
- 原因: 同时约束准确性和效率, 筛选出最优质、最平衡的路径
- 意义: 对于复杂任务, 又准又快 是必要的

## 黄金轨迹筛选（续）：宽度搜索与关键洞察

在 WideSearch（宽度搜索任务）

- 三者差异不大
- 原因：实体密集型数据本身已锻炼广度搜索能力
- 说明：数据设计的基础作用明显

### 关键洞察：

对于复杂 IS 任务，一个好的解法必须 **既准又快**。

### ISR+ISE 双重优势：

1. **准确性保证：** ISR  $> \alpha$  确保召回率
2. **效率约束：** ISE  $> \beta$  避免冗余步骤
3. **综合优化：** Pareto 最优

## 黄金轨迹筛选 (续): 对比策略

- ISR-Only: 只看准确性 (覆盖率)
- ISE-Only: 只看效率 (单位步收益)
- ISR+ISE: 两者都要 (本文方法)

## 深入分析 (3): 强化学习带来的"最后一跃" (1/2)

### RL 性能提升

Stage	BrowseComp	GAIA	xbench-DS
SFT	37.80	69.9	69.0
SFT+RL	<b>38.8 (+1.0)</b>	<b>73.2 (+3.3)</b>	<b>72.0 (+3.0)</b>

### 全面性能提升

- 四个基准均有提升
- **最大增益:** WideSearch SR (+2.5) 与 Row F1 (+8.0)
- **稳定增益:** GAIA (+3.3)、xbench-DS (+3.0)

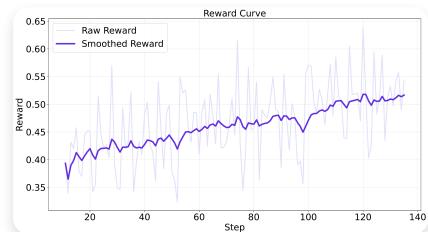
**启示:** RL 补上了 SFT 的“最后一跃”，将策略从“会做”推向“做得更优”。

## 深入分析(3): 强化学习带来的"最后一跃" (2/2)

### RL 特别有效的场景

- **WideSearch:** 需要精细策略的任务, RL 提升巨大
- **GAIA:** 需要准确判断的任务, RL 带来 3.3 个点提升

**小结:** RL 通过稳定、细粒度的奖励信号, 促使代理形成更高效的检索-推理循环。



混合奖励系统的训练曲线

### 奖励曲线解读

- ✓ 稳步上扬: 学习有效
- ✓ 无剧烈震荡: 训练稳定
- ✓ 持续增长: 尚有潜力 (约 135 步停止)

**结论:** WebLeaper 数据不仅是优秀的 SFT 教材, 更是高质量的 RL 训练场, 成功引导代理学会更高级、更优化的信息寻求策略。

## 案例分析：WebLeaper vs. 普通代理（1/2）

示例任务：“找出与《蝇王》作者同一国籍，且获得过诺贝尔文学奖的另一位作家。”

### ✗ 普通代理的思考路径

Step 1: Search("蝇王 作者")  
→ 找到 "William Golding"

Step 2: Search("William Golding 国籍")  
→ 找到 "英国"

Step 3: Search("诺贝尔奖作家名单")  
→ 得到一个长列表（上百名）

Step 4: Search("A 的国籍")  
Step 5: Search("B 的国籍")  
...

Step N: 逐一排查（非常低效）

总步数：15-20 步  
特点：机械、繁琐、缺乏规划

## 案例分析（续）：WebLeaper 的思考路径

### ✓ WebLeaper 的思考路径

Step 1: Search("《蝇王》作者 国籍")

→ 一步到位: William Golding, 英国 ✓

Step 2: Search("获得诺贝尔奖的英国作家")

→ 将多个条件组合成高效查询  
→ 返回: Winston Churchill, Kazuo Ishiguro, ...

Step 3: Visit(相关页面)

→ 找到答案 ✓

总步数: 3-4 步

特点: 智能、高效、有规划

## 案例分析：WebLeaper vs. 普通代理（2/2）

### 详细对比分析

维度	普通代理	WebLeaper
查询策略	单一、线性	组合、并行
信息整合	逐步累积	一次到位
步数	15-20	3-4
效率	低（20%）	高（75%）

• 普通代理：像“盲目的探险家”，每次只走一小步，看到什么就记录什么

核心差异：• WebLeaper：像“经验丰富的猎手”，会先规划路线，将多个条件组合成精准查询

关键启示：该研究表明，高效寻求的本质不是“快速移动”，而是 “智能规划” 。WebLeaper 学会了如何将复杂问题分解为最优查询序列。

# 第四部分

## 结论与展望

## 相关工作：站在巨人的肩膀上

### 信息寻求代理

现有工作的三大流派：

- 模型微调

WebSailor, WebDancer, WebShaper, DeepDive

- 架构改进

多阶段推理、分层规划

- 多代理协作

WebResearcher、协作式搜索

**WebLeaper 的定位：**

属于模型微调流派，独特贡献是引入 “实体丰富度” 这一新维度

### 代理数据合成

现有关注点：

- 多步推理

推理链的长度和复杂度

- 长视界规划

跨多个子任务的规划

**WebLeaper 的不同之处：**

关注数据的 “语义丰富度” 和 “实体密度” —— 被忽视但至关重要的方向

### 强化学习奖励设计

现有方法：

- 二元奖励 (Binary Reward)

- LLM-as-a-Judge

- 过程奖励模型 (PRM)

**WebLeaper 的贡献：**

- **混合奖励系统**：软 F-Score + 传统奖励

- **GRPO**：相对优势 vs. 绝对价值

**总结：**WebLeaper 从 **信息密度** 与 **训练效率** 两方面补足现有方向，推动领域发展。

## 核心贡献总结

诊断了核心病症：现有 IS 代理的效率瓶颈源于训练数据的 实体稀疏性

### 贡献一

#### 实体密集型任务合成

- **Basic Version**
  - 解决实体稀疏性
  - 单源高密度（20-50 个实体/任务）
- **Union Version**
  - 跨源信息整合
  - 关系运算（交集、并集）
- **Reverse-Union**
  - 逆向推理对抗捷径
  - 演绎 → 规划 → 搜索

### 贡献二

#### 效率感知的轨迹构建

- **ISR** (Information-Seeking Rate)
  - 衡量准确性（召回率）
  - $ISR = |R \cap O| / |R|$
- **ISE** (Information-Seeking Efficiency)
  - 衡量效率（单位步数收益）
  - $ISE = n / T$
- 双重过滤
  - 筛选“又准又快”的黄金轨迹

## 核心贡献（续）与成果

### 贡献三

#### 混合奖励与 GRPO 优化

- **软 F-Score 奖励**: 细粒度反馈、语义智能评估
- **GRPO 算法**: 相对优势估计、稳定训练信号
- **混合策略**: 兼容多源数据

### 取得了显著成果

- ✓ 5 个基准刷新开源记录
- ✓ 超越 Claude-4-Sonnet 与 OpenAI-o3 (部分基准)
- ✓ 显示效率与效果协同提升
- ✓ 参数效率高 (30B vs 1T)

核心价值: 提出一套可复用、可验证的高效信息寻求方法论。