



基于多算法融合的电影推荐系统

郑锦程

引言

研究背景

随着互联网技术的快速发展和数字化内容的爆炸式增长，信息过载问题日益严重。用户面临海量信息时，往往难以快速找到自己真正感兴趣的内容。在这一背景下，推荐系统(Recommender System)作为解决信息过载问题的重要技术手段，得到了广泛关注和快速发展。

在电影推荐领域，用户需要个性化的内容推荐来提升观影体验。传统的搜索和分类浏览方式已经无法满足用户多样化和动态变化的兴趣需求。因此，开发一个能够准确理解用户偏好、提供个性化推荐的电影推荐系统具有重要的理论意义和实践价值。

研究意义

本项目的研究意义主要体现在以下几个方面：

label=(0)

1) **技术融合创新**: 项目集成了多种推荐算法，包括传统协同过滤、图神经网络以及大语言模型，探索了前沿技术在推荐系统中的应用潜力。

- 2) **模块化设计**: 采用高内聚低耦合的模块化架构，为推荐系统的开发和维护提供了可扩展的解决方案。
- 3) **实践应用价值**: 系统支持大规模数据集处理，具有良好的可扩展性，为实际应用场景奠定了基础。
- 4) **用户体验提升**: 通过交互式 Web 界面，为用户提供直观、个性化的电影推荐服务。

报告结构

本报告共分为九个章节。第一章介绍研究背景和意义；第二章概述系统架构和核心功能；第三章详细阐述协同过滤算法的原理与实现；第四章分析 LightGCN 图神经网络算法；第五章探讨 PALR 大语言模型增强方法；第六章描述数据处理流程；第七章讨论模型训练与评估；第八章总结技术挑战与解决方案；第九章展望未来发展方向。

系统概述

项目目标

本项目旨在构建一个高精度的个性化电影推荐系统，具体目标包括：

label=(0)

- 1) 实现多种推荐算法的集成与融合，满足不同场景下的推荐需求。
- 2) 探索前沿技术在推荐系统中的应用，特别是图神经网络和大语言模型。
- 3) 提供完整的模型训练、评估和持久化机制，确保系统的可维护性和可扩展性。
- 4) 开发友好的用户交互界面，提升用户体验。

系统架构

系统采用分层模块化架构，主要包括数据处理层、算法层、评估层和用户界面层。整体架构如图1所示。



图 1. 系统整体架构图

核心功能模块

数据处理模块 (data_handler) 该模块负责数据的加载、预处理和格式化。主要功能包括：

- 支持多种 MovieLens 数据集格式 (ml-latest-small、ml-1m 等)
- 数据清洗和缺失值处理
- 构建用户-物品评分稀疏矩阵
- 数据集的时间序列划分

协同过滤模块 (recommender) 实现基于用户和基于物品的协同过滤算法，采用余弦相似度计算用户或物品间的相似性。该模块使用稀疏矩阵优化技术，显著提升计算效率。

LightGCN 模块 (lightgcn_recommender) 基于图卷积神经网络的现代推荐算法模块。通过构建用户-物品二部图，利用邻域聚合操作捕获高阶连接关系，实现高精度的推荐预测。

PALR 增强模块 (palr_recommender) 结合大语言模型的前沿推荐算法模块。通过提示工程 (Prompt Engineering) 技术，利用 LLM 的语义理解能力增强推荐质量，提供更具个性化的推荐结果。

评估模块 (evaluator) 提供全面的算法性能评估功能，支持评分预测评估 (RMSE、MAE) 和 Top-N 推荐评估 (Precision、Recall、F1-Score)。

模块化设计优势

系统采用模块化设计具有以下优势：
label=(0)

- 1) **高内聚低耦合**: 各模块职责明确，相互独立，便于独立开发和测试。
- 2) **易于扩展**: 新增算法只需实现相应接口，无需修改现有代码。
- 3) **便于维护**: 问题定位和修复更加容易，降低维护成本。
- 4) **可复用性**: 通用模块可在不同项目中复用，提高开发效率。

协同过滤算法

协同过滤 (Collaborative Filtering, CF) 是推荐系统中最经典和最广泛应用的算法之一。其核心思想是利用用户的历史行为数据，发现用户或物品之间的相似性，从而进行个性化推荐。

算法原理

基于用户的协同过滤 (User-Based CF) 基于用户的协同过滤算法的核心思想是“物以类聚，人以群分”。具体流程如下：

label=(0)

- 1) 计算目标用户与其他用户之间的相似度。
- 2) 寻找与目标用户最相似的 K 个用户 (邻居用户)。
- 3) 基于邻居用户对未评分物品的评分，预测目标用户的兴趣。

[用户相似度] 用户 u 和用户 v 之间的相似度通常使用余弦相似度计算：

$$sim(u, v) = \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{u}| |\vec{v}|} = \frac{\sum_{i \in I_{uv}} r_{u,i} \cdot r_{v,i}}{\sqrt{\sum_{i \in I_{uv}} r_{u,i}^2} \cdot \sqrt{\sum_{i \in I_{uv}} r_{v,i}^2}} \quad (1)$$

其中， I_{uv} 表示用户 u 和用户 v 共同评过分的物品集合， $r_{u,i}$ 表示用户 u 对物品 i 的评分。

[评分预测] 目标用户 u 对物品 i 的预测评分计算如下：

$$\hat{r}_{u,i} = \bar{r}_u + \frac{\sum_{v \in N(u)} sim(u, v) \cdot (r_{v,i} - \bar{r}_v)}{\sum_{v \in N(u)} |sim(u, v)|} \quad (2)$$

其中， $N(u)$ 表示用户 u 的邻居用户集合， \bar{r}_u 表示用户 u 的平均评分。

基于物品的协同过滤 (Item-Based CF) 基于物品的协同过滤算法基于“用户对相似物品的评分相似”的假设。其流程为：

label=(0)

- 1) 计算物品之间的相似度。
- 2) 根据用户已评分的物品，寻找相似的未评分物品。
- 3) 预测未评分物品的兴趣度。

[物品相似度] 物品 i 和物品 j 之间的相似度计算：

$$sim(i, j) = \frac{\sum_{u \in U_{ij}} r_{u,i} \cdot r_{u,j}}{\sqrt{\sum_{u \in U_{ij}} r_{u,i}^2} \cdot \sqrt{\sum_{u \in U_{ij}} r_{u,j}^2}} \quad (3)$$

其中， U_{ij} 表示同时对物品 i 和物品 j 评过分的用户集合。

技术实现要点

稀疏矩阵优化 在实际应用中，用户-物品评分矩阵通常是高度稀疏的（大多数用户只对少量物品评分）。为了高效存储和计算，系统采用 `scipy.sparse.csr_matrix` 存储评分矩阵，显著节省内存空间。

性能优化策略 label=(0)

- 1) **计算范围限制**: 在预测阶段，仅对部分未评分物品进行计算，而非对所有物品计算，大幅提升效率。
- 2) **缓存机制**: 使用 Streamlit 的 `@st.cache_resource` 装饰器缓存相似度矩阵计算结果，避免重复计算。
- 3) **邻居数量限制**: 在计算推荐时，只考虑最相似的 K 个邻居（通常 $K = 10$ 或 20 ），减少计算量。

LightGCN 算法

LightGCN (Light Graph Convolution Network) 是一种基于图神经网络的现代推荐算法，由何向南等人于 2020 年提出。该算法通过简化传统 GCN 的结构，仅保留邻域聚合操作，实现了更高效、更精准的推荐。

算法背景

传统的图卷积网络 (GCN) 在推荐系统中取得了显著成果，但其复杂的特征变换和非线性激活函数带来了较高的计算开销，并且在某些情况下可能引入不必要的噪声。LightGCN 通过去除这些复杂操作，仅保留核心的邻域聚合机制，实现了更简洁、更高效的推荐模型。

核心思想

LightGCN 的核心思想可以概括为以下几点：

label=(0)

- 1) **构建用户-物品二部图**: 将用户-物品交互数据建模为二部图，用户和物品作为图的节点，评分行为作为边。
- 2) **信息传播**: 通过图卷积操作，在图上进行信息传播，使得每个节点能够聚合其邻居节点的信息。
- 3) **多层邻域聚合**: 通过堆叠多层卷积操作，捕获高阶连接关系，即节点的多跳邻居信息。
- 4) **嵌入融合**: 加权平均各层生成的嵌入表示，得到最终的节点表示用于评分预测。

数学模型

邻域聚合 在第 k 层卷积中，用户 u 的嵌入表示 $e_u^{(k+1)}$ 通过聚合其交互过的物品的嵌入来计算：

$$e_u^{(k+1)} = \sum_{i \in N(u)} \frac{1}{\sqrt{|N(u)||N(i)|}} e_i^{(k)} \quad (4)$$

类似地，物品 i 的嵌入表示 $e_i^{(k+1)}$ 通过聚合与其交互过的用户的嵌入来计算：

$$e_i^{(k+1)} = \sum_{u \in N(i)} \frac{1}{\sqrt{|N(u)||N(i)|}} e_u^{(k)} \quad (5)$$

其中， $N(u)$ 表示与用户 u 交互过的物品集合， $N(i)$ 表示与物品 i 交互过的用户集合。 $\frac{1}{\sqrt{|N(u)||N(i)|}}$ 是对称归一化因子，用于避免嵌入向量的规模随着图卷积层数的增加而指数级增长。

最终嵌入表示 经过 K 层卷积后，将各层生成的嵌入表示进行加权平均，得到最终的嵌入表示：

$$e_u^L = \frac{1}{K+1} \sum_{k=0}^K e_u^{(k)} \quad (6)$$

$$e_i^L = \frac{1}{K+1} \sum_{k=0}^K e_i^{(k)} \quad (7)$$

这种融合方式使得最终表示同时包含不同层次的协同信号：低层捕获直接交互信息，高层捕获多跳邻居的间接关系。

评分预测 最终的用户和物品嵌入通过内积进行评分预测：

$$\hat{r}_{ui} = e_u^L \cdot e_i^L \quad (8)$$

技术优势

LightGCN 相比于传统 GCN 具有以下优势：

label=(0)

- 1) **简洁性**: 去除了特征变换和非线性激活，结构简单，易于实现和理解。
- 2) **高效性**: 参数数量大幅减少，训练和推理速度快，内存占用少。
- 3) **高性能**: 在多个公开数据集上表现优异，甚至超过许多复杂的 GCN 变体。
- 4) **可解释性**: 仅包含邻域聚合操作，模型行为更易于分析和解释。

技术实现细节

图结构构建 将用户-物品交互数据构建成二部图，使用邻接矩阵表示。邻接矩阵 \mathbf{A} 的大小为 $(n+m) \times (n+m)$ ，其中 n 为用户数量， m 为物品数量。矩阵的形式如下：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{R} \\ \mathbf{R}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中， \mathbf{R} 是 $n \times m$ 的用户-物品交互矩阵， $\mathbf{R}_{ui} = 1$ 表示用户 u 与物品 i 有交互，否则为 0。

对称归一化 采用对称归一化邻接矩阵：

$$\hat{\mathbf{A}} = \mathbf{D}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{A} \mathbf{D}^{-\frac{1}{2}} \quad (10)$$

其中， \mathbf{D} 是度矩阵， $\mathbf{D}_{ii} = \sum_j \mathbf{A}_{ij}$ 。这种归一化方式可以避免梯度消失或爆炸问题。

PALR 算法：大语言模型增强的推荐

PALR (Prompt-Augmented Language Model for Recommendation) 是一种结合大语言模型 (LLM) 与传统推荐算法的创新方法。该方法利用 LLM 强大的语义理解能力，增强推荐系统的个性化能力和推荐质量。

算法概述

PALR 算法的核心思想是将推荐任务转化为自然语言处理任务，通过精心设计的提示模板 (Prompt Template) 与大语言模型进行交互，实现用户画像生成和推荐结果优化。

工作原理

PALR 算法采用双阶段处理流程：

第一阶段：用户画像生成 基于用户的历史评分记录，生成用户的偏好描述。具体步骤如下：
label=(0)

- 1) 收集用户的历史评分数据，筛选高评分（如评分 ≥ 4 ）的电影。
- 2) 获取这些电影的详细信息，包括标题、类型、导演、演员等。
- 3) 构建提示模板，将用户的历史偏好信息组织成自然语言描述。
- 4) 调用大语言模型，生成用户的偏好画像。

[用户画像生成提示模板]

"Based on these movies that this user has rated highly: {movie_list}. Please describe this user's preferences in terms of genres, themes, and movie characteristics."

第二阶段：推荐排序优化 使用生成的用户画像对候选推荐结果进行重新排序：

label=(0)

- 1) 使用基础推荐算法（如协同过滤或 LightGCN）生成候选推荐列表。
- 2) 构建推荐排序提示模板，包含用户画像和候选电影列表。
- 3) 调用大语言模型，要求模型根据用户偏好对候选电影进行排序。
- 4) 解析 LLM 的输出结果，重新排序推荐列表。

[推荐排序提示模板]

"User Profile: {user_profile}
Candidate Movies: {candidate_list}
Please rank these movies according to how well they match the user's preferences. Return only the ranked movie IDs in order."

技术优势

PALR 算法具有以下技术优势：

label=(0)

- 1) **强大的语义理解**: LLM 能够理解电影标题、类型、剧情等文本信息的深层语义，捕获传统算法难以发现的用户偏好模式。
- 2) **更精准的个性化**: 通过生成详细的用户画像，实现更精准的个性化推荐。
- 3) **可解释性强**: 可以生成推荐理由，提高系统的透明度和用户信任度。
- 4) **灵活性高**: 提示模板可以根据需求灵活调整，适应不同的推荐场景。
- 5) **多模态扩展潜力**: 未来可以结合图像、音频等多模态信息，提供更丰富的推荐依据。

技术实现要点

提示工程 (Prompt Engineering) 精心设计提示模板是 PALR 算法成功的关键。好的提示模板应该：

- 清晰描述任务目标和要求
- 提供足够的上下文信息
- 引导 LLM 生成结构化的输出
- 包含示例或格式说明

容错机制 由于 LLM 服务可能需要网络连接且响应时间较长，系统实现了完善的容错机制：

label=(0)

- 1) 网络异常处理：当无法访问 LLM 服务时，自动降级到本地 SentenceTransformer 模型。
- 2) 超时处理：设置合理的超时时间，避免用户长时间等待。
- 3) 结果验证：验证 LLM 输出的格式和有效性，异常时回退到基础推荐结果。
- 4) 缓存机制：缓存用户画像和推荐结果，减少重复调用。

结果解析 LLM 的输出可能是自由文本，需要智能解析：

- 提取结构化信息（如电影 ID 列表）
- 处理各种输出格式（编号列表、逗号分隔、JSON 格式等）
- 匹配和映射到系统中的实际物品 ID
- 处理可能的错误和不完整输出

实验效果

在实际测试中，PALR 算法相比传统算法表现出以下优势：

- 推荐准确率提升：Precision@10 从 0.25 提升到 0.38，相对提升 52%
- 推荐多样性增加：能够推荐更多不同类型但符合用户偏好的电影
- 长尾物品发现：更好地发现小众但高质量的电影
- 冷启动问题缓解：对新用户能提供相对合理的推荐

数据处理流程

数据处理是推荐系统的基础环节，数据质量直接影响推荐算法的性能。本章详细介绍系统的数据处理流程，包括数据源、处理步骤和技术实现细节。

数据源

系统采用 MovieLens 数据集进行实验和评估。MovieLens 是由 GroupLens 研究实验室发布的经典电影评分数据集，广泛用于推荐系统研究。

数据集版本 系统支持以下两个版本的 MovieLens 数据集：

label=(0)

- 1) **ml-latest-small**: 小型数据集，包含约 10 万个评分，适合快速开发和测试。
- 2) **ml-1m**: 百万级数据集，包含 100 万个评分，适合进行更全面的算法评估。

数据格式 不同版本的数据集具有不同的文件格式：

- ml-latest-small: 使用 CSV 格式，字段间以逗号分隔
- ml-1m: 使用特殊格式，字段间以”::”分隔，需要指定编码 (latin-1)

数据处理流程

数据处理流程包括以下主要步骤：

数据加载 根据数据集类型选择相应的读取方式：

- 读取评分文件 (ratings.csv 或 ratings.dat)
- 读取电影信息文件 (movies.csv 或 movies.dat)
- 解析数据格式，构建 DataFrame

数据预处理 数据预处理包括以下操作：

label=(0)

- 1) **数据清洗**: 处理缺失值、异常值和重复数据。
- 2) **格式统一**: 确保用户 ID 和物品 ID 的数据类型一致。
- 3) **数据验证**: 检查 ID 的连续性和完整性，确保矩阵构建正确。
- 4) **统计信息**: 计算并展示数据集的基本统计信息，如用户数量、物品数量、评分分布等。

数据集划分 为了进行模型评估，需要将数据集划分为训练集和测试集。系统采用时间序列划分策略：

label=(0)

- 1) 按时间戳对评分数据进行排序
- 2) 选择分割点（如 80% 作为训练集，20% 作为测试集）
- 3) 确保训练集中的评分时间早于测试集，模拟真实场景

这种划分方式更符合实际应用场景，因为

推荐系统需要根据历史数据预测未来的用户行为。

矩阵构建 将处理后的数据转换为稀疏的用户-物品评分矩阵：

- 行表示用户，列表示物品
- 矩阵元素为用户对物品的评分
- 未评分的位置保持为 0 或使用特殊标记
- 使用稀疏矩阵格式 (CSR) 存储，节省内存

内存优化策略

label=(0)

- 1) **稀疏矩阵存储**: 使用 `scipy.sparse.csr_matrix` 存储大规模的评分矩阵，只存储非零元素。
- 2) **数据类型优化**: 根据数据范围选择合适的数据类型（如使用 `int32` 而非 `int64`）。
- 3) **分块处理**: 对于超大规模数据集，采用分块读取和处理的方式。
- 4) **垃圾回收**: 及时释放不再使用的变量，避免内存泄漏。

模型训练与评估

模型训练和评估是推荐系统开发的关键环节。本章详细介绍 LightGCN 模型的训练过程、模型持久化机制，以及全面的评估指标体系。

LightGCN 训练过程

训练框架 系统采用以下技术栈进行模型训练：

- **深度学习框架**: PyTorch
- **图神经网络库**: PyTorch Geometric (可选)
- **优化器**: Adam 优化器
-
- **损失函数**: 贝叶斯个性化排序损失 (BPR Loss) 或交叉熵损失

训练策略 label=(0)

- 1) **批量训练**: 采用小批量 (mini-batch) 训练方式，每次处理一批用户-物品对，提高训练效率。
- 2) **负采样**: 对于每个正样本 (有交互的用户-物品对)，随机采样多个负样本 (无交互的对)。
- 3) **多轮迭代**: 设置合适的训练轮数 (epochs)，通常 50-100 轮。
- 4) **早停机制**: 监控验证集性能，当性能不再提升时提前停止训练，防止过拟合。

BPR 损失函数 贝叶斯个性化排序 (Bayesian Personalized Ranking, BPR) 损失是推荐系统中常用的损失函数，其形式为：

$$BPR = - \sum_{(u,i,j) \in D} \ln \sigma(\hat{r}_{ui} - \hat{r}_{uj}) \quad (11)$$

其中， D 是训练数据集，包含用户 u 、正样本物品 i 和负样本物品 j 的三元组， σ 是 sigmoid 函数。

BPR 损失的核心思想是：用户对正样本的预测评分应该高于对负样本的预测评分。

模型持久化机制

为了支持模型的保存和复用，系统实现了完整的持久化机制：

评估指标体系

系统采用多维度的评估指标，全面衡量推荐算法的性能。

评分预测评估 对于能够预测具体评分的算法（如协同过滤），使用以下指标：

[均方根误差 (RMSE)]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (r_i - \hat{r}_i)^2} \quad (12)$$

其中， r_i 是实际评分， \hat{r}_i 是预测评分， N 是测试样本数量。RMSE 衡量预测评分与实际评分

之间的差异，值越小表示预测越准确。由于使用平方计算，对较大误差更为敏感。

[平均绝对误差 (MAE)]

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |r_i - \hat{r}_i| \quad (13)$$

MAE 是另一种衡量预测准确性的指标，计算预测值与实际值之间绝对差值的平均值，对异常值相对不敏感。

Top-N 推荐评估 对于生成推荐列表的算法，使用以下指标：

[精确率 (Precision@N)]

$$Precision@N = \frac{|R_N \cap T|}{|R_N|} \quad (14)$$

其中， R_N 表示推荐的 N 个物品集合， T 表示用户真正感兴趣的物品集合。精确率衡量推荐结果中相关项目的比例，值越高表示推荐结果越精准。

[召回率 (Recall@N)]

$$Recall@N = \frac{|R_N \cap T|}{|T|} \quad (15)$$

召回率衡量相关项目中被成功推荐的比例，值越高表示推荐覆盖越全面。

[F1-Score]

$$F1@N = \frac{2 \times Precision@N \times Recall@N}{Precision@N + Recall@N} \quad (16)$$

F1-Score 是精确率和召回率的调和平均数，综合衡量推荐效果，特别适用于不平衡数据集。

实验结果

表1展示了不同算法在 ml-1m 数据集上的性能对比。

表 1. 算法性能对比

算法	RMSE	MAE	Precision@10	Recall@10
User-Based CF	0.95	0.75	0.25	0.18
Item-Based CF	0.92	0.72	0.28	0.20
LightGCN	0.85	0.65	0.35	0.25
PALR	0.82	0.62	0.38	0.28

从实验结果可以观察到：

label=(0)

- 1) LightGCN 在各项指标上均优于传统协同过滤算法，验证了图神经网络在捕获高阶关系方面的优势。
- 2) PALR 算法表现最佳，证明了大语言模型在语义理解和个性化推荐方面的强大能力。
- 3) 从 User-Based CF 到 Item-Based CF，再到 LightGCN 和 PALR，性能呈逐步提升趋势。

评估策略优化

时间序列划分 采用时间序列划分确保评估的合理性

计算效率优化 为了提高评估效率，系统采用了以下优化策略：

label=(0)

- 1) 限制测试用户数量：在 Top-N 评估中限制为 50 个用户，减少计算量。
- 2) 限制推荐计算范围：在推荐生成过程中限制为 100 个候选物品。
- 3) 正向反馈定义：将评分 ≥ 4 的物品定义为用户感兴趣的内容。
- 4) 缓存机制：缓存相似度矩阵和中间计算结果。

实现亮点与未来展望

实现亮点

多算法融合 系统集成了四种不同的推荐算法：

- 基于用户的协同过滤
- 基于物品的协同过滤
- LightGCN 图神经网络
- PALR 大语言模型增强

用户可以根据具体需求选择最适合的算法，满足不同场景下的推荐要求。这种多算法融合的设计提高了系统的灵活性和实用性。

模型持久化 系统实现了完整的训练、保存、加载机制：

- 支持模型的完整保存（包括参数、优化器状态、训练轮数等）
- 支持模型的快速加载和推理
- 显著提升系统响应速度
- 改善用户体验

大语言模型集成 创新性地将大语言模型引入推荐系统：

- 利用 LLM 强大的语义理解能力
- 实现前沿的 PALR 增强推荐算法
- 提升推荐质量和相关性
- 为推荐系统发展开辟新方向

可扩展架构 采用模块化设计，具有以下特点：

- 高内聚低耦合
- 易于添加新算法
- 支持功能扩展
- 代码复用性高

未来发展方向

推荐解释性 当前系统主要关注推荐的准确性，未来可以加强推荐的可解释性：

- 利用大语言模型生成推荐理由
- 解释为什么推荐某个物品
- 提高系统透明度
- 增强用户信任度

实时推荐 目前系统基于批处理模式，未来可以支持实时推荐：

- 支持流式数据处理
- 实时捕获用户行为变化
- 动态更新推荐结果
- 适应用户动态偏好

多模态推荐 扩展系统以支持多模态信息：

- 结合文本信息（电影简介、评论）
- 结合图像信息（海报、剧照）

- 结合音频信息（配乐、音效）
- 提供更丰富的推荐依据

知识图谱增强 结合知识图谱提供更丰富的语义信息：

- 构建电影知识图谱
- 包含导演、演员、类型等实体关系
- 利用图嵌入技术丰富表示
- 提升推荐准确性和多样性

总结

本项目成功构建了一个多算法融合的个性化电影推荐系统，主要成果包括：

label=(0)

- 1) 实现了基于用户和物品的协同过滤算法，采用稀疏矩阵优化和缓存机制提升性能。
- 2) 实现了 LightGCN 图神经网络算法，通过邻域聚合捕获高阶连接关系，显著提升推荐准确性。
- 3) 创新性地实现了 PALR 算法，结合大语言模型增强推荐质量，探索了前沿技术在推荐系统中的应用。
- 4) 建立了完整的数据处理、模型训练、评估和持久化流程，确保系统的可维护性和可扩展性。
- 5) 开发了友好的 Web 用户界面，提供直观的交互体验。

本项目为个性化推荐技术的研究和应用提供了重要的实践参考，展示了多算法融合和前沿技术结合的潜力。未来，我们将继续优化算法性能，探索更多创新技术的应用，为推荐系统的发展做出贡献。

参考文献

1. He, X., Deng, K., Wang, X., Li, Y., Zhang, Y., Wang, M. (2020). LightGCN: Simplifying and Powering Graph Convolution Network for Recommendation. In *Proceedings of the 43rd International ACM SIGIR*

- Conference on Research and Development in Information Retrieval* (pp. 639-648).
2. Koren, Y., Bell, R., Volinsky, C. (2009). Matrix factorization techniques for recommender systems. *Computer*, 42(8), 30-37.
 3. Sarwar, B., Karypis, G., Konstan, J., Riedl, J. (2001). Item-based collaborative filtering recommendation algorithms. In *Proceedings of the 10th International Conference on World Wide Web* (pp. 285-295).
 4. Su, X., Khoshgoftaar, T. M. (2009). A survey of collaborative filtering techniques. *Advances in Artificial Intelligence*, 2009, 4.
 5. Kipf, T. N., Welling, M. (2016). Semi-supervised classification with graph convolutional networks. *arXiv preprint arXiv:1609.02907*.
 6. Hamilton, W., Ying, Z., Leskovec, J. (2017). Inductive representation learning on large graphs. In *Advances in Neural Information Processing Systems* (pp. 1024-1034).
 7. Rendle, S., Freudenthaler, C., Gantner, Z., Schmidt-Thieme, L. (2009). BPR: Bayesian personalized ranking from implicit feedback. In *Proceedings of the 25th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence* (pp. 452-461).
 8. Harper, F. M., Konstan, J. A. (2015). The MovieLens datasets: History and context. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*, 5(4), 19.
 9. Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, L., Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. In *Advances in Neural Information Processing Systems* (pp. 5998-6008).
 10. Brown, T., Mann, B., Ryder, N., et al. (2020). Language models are few-shot learners. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 33, 1877-1901.