**密级： 保密期限：**



**硕士学位论文**



**题目： 基于深度学习的排序模型的研究与实现**

**学 号： 2015111589**

**姓 名： 赵 轩**

**专 业： 计算机科学与技术**

**导 师： 闫丹凤**

**学 院： 网络技术研究院**

**2017年 11 月 30 日**

独创性（或创新性）声明

本人声明所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京邮电大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

本人签名： 日期：

关于论文使用授权的说明

学位论文作者完全了解北京邮电大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属北京邮电大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。（保密的学位论文在解密后遵守此规定）

保密论文注释：本学位论文属于保密在 年解密后适用本授权书。非保密论文注释：本学位论文不属于保密范围，适用本授权书。

本人签名： 日期：

导师签名： 日期：

基于深度学习的排序模型的研究与实现

摘 要

PDF（Portable Docuent Format）由Adobe公司开发并推广，是一种独特的跨平台的便携文件格式。跨平台特性使得PDF文件可以广泛的运用于Windows，Unix，Mac OS等当前主流的操作系统中，并使其成为Internet上电子文档发行和数字化信息传播的理想文档格式。如今的互联网上，越来越多的电子书籍、产品使用说明书、公司公告财报、网络资料、科学文献、电子邮件等都开始使用PDF格式作为电子文档的首选格式。

随着PDF格式的普及，大量有价值的信息都以PDF文档的形式呈现出来。因此从PDF中提取有价值的信息也成为了近年来的研究热点。然而由于PDF的结构相对复杂，从PDF中提取文本、图形、表格等信息的难度也相应增加，尤其是PDF中的表格信息。与Html等格式不同，PDF格式对于表格并没有单独的定义，PDF中的表格只是单纯的线条与文字的集合，因此PDF表格数据的识别和提取变成了不小的挑战。传统的针对网页中表格的识别和提取技术依赖于Html中表格的tag信息，因此很难直接应用于PDF中的表格提取，因此本课题提出了一种针对PDF的表格识别和提取的通用方法，为了验证方法的有效性和准确性，本课题将该方法应用在公司财务表格数据的提取上，经过测试，该方法具有较好的性能。

本课题首先阐述了论文的研究背景，介绍了PDF结构的主要特点，同时对本系统使用的PDF类库PDFBox进行了介绍。接着对比了几种常用的表格提取方法，通过比较和分析各个方法的优劣最终引出本系统采用的方法。论文的后半部分对本方法涉及的技术难点进行了详尽的介绍，包括基本的表格框线识别，基于框线的表格还原，复杂首行首列表格的处理，跨页表格的合并，表格数据格式化等内容。最后通过实现PDF财报中三大财务报表表格数据的识别和提取对本系统的解析的效果和性能进行了相应的测试和评估。

**关键词：**PDF结构 表格识别 表格栅格化 表格框线识别

**Design and Implementation of PDF Format Based Table Extraction Method**

ABSTRACT

PDF（Portable Document Format）is an unique portable cross-platform file Format developed by Adobe. The cross-platform feature makes PDF files widely used in Windows, Unix, Max OS and other current mainstream operating system and make it become the internet electronic document issued and ideal document format of digital information transmission. Now on the internet, more and more electronic books, product specification, company earnings announcement, network information, science, literature, E-mail, etc are firstly choosing PDF format as electronic document format.

With the popularity of PDF format, a large number of valuable information are presented in the form of a PDF document. So to extract valuable information from PDF files have become a research hotspot in recent years. However, due to the complex structure of PDF, it is not that easy to extract text, graphics, tables from PDF files, especially for PDF tables' extraction. PDF format is different from Html format. There is no definition for tables in a PDF file. A table in PDF files are collection of words and lines which make PDF table extraction a big challenge. Traditional methods for table recognition and extraction are highly relies on the tag of Html form information which is not suitable for PDF table extraction. In order to solve this problem, this paper presents a general method for PDF table recognition and extraction. In order to verify the validity and accuracy of the method, the paper then apply the method on the extraction of financial table data, the result shows that the method has good performance.

The paper firstly elaborated the research background, the main characteristics of the PDF is introduced, at the same time introduced the PDFBox library which is used by the system. Secondly, the paper compares several common table extraction method, through the comparison and analysis of the pros and cons of each method eventually lead to the method which is used by the paper. The paper then made detailed introduction of the PDF files' table extraction method including basic box line identification, table reduction, first raw and first column processing, across page table merging, tabular data format, etc. Finally, the paper tested and evaluated the method's performance by implementing the three financial statements form data recognition and extraction.

**KEY WORDS:** structure of PDF table recognition table rasterize box line identification

目 录

[第1章 绪论 1](#_Toc499046925)

[1.1 研究背景 1](#_Toc499046926)

[1.2 研究意义 2](#_Toc499046927)

[1.3 硕士研究生期间的工作总结 3](#_Toc499046928)

[1.4 论文组织结构 4](#_Toc499046929)

[第2章 背景理论及相关技术介绍 5](#_Toc499046930)

[2.1 深度学习简介 5](#_Toc499046931)

[2.1.1 深度学习概述 5](#_Toc499046932)

[2.1.2 神经网络结构介绍 6](#_Toc499046933)

[2.1.3 深度学习框架介绍 10](#_Toc499046934)

[2.2 本章小结 12](#_Toc499046935)

[第3章 常用排序方法的介绍与分析 13](#_Toc499046936)

[3.1 常用排序方法介绍 13](#_Toc499046937)

[3.2 LTR模型训练方法 14](#_Toc499046938)

[3.2.1 PointWise方法 14](#_Toc499046939)

[3.2.2 PairWise方法 15](#_Toc499046940)

[3.2.3 ListWise方法 16](#_Toc499046941)

[3.3 常用算法模型和评价指标 17](#_Toc499046942)

[3.3.1 常用算法模型 17](#_Toc499046943)

[3.3.2 常用评价指标 20](#_Toc499046944)

[3.4 排序模型关键问题分析 22](#_Toc499046945)

[3.4.1 训练集构造方法 22](#_Toc499046946)

[3.4.2 模型总体设计 24](#_Toc499046947)

[3.5 本章小结 25](#_Toc499046948)

[第4章 基于深度学习的排序模型关键问题研究 26](#_Toc499046949)

[4.1 LTR模型训练方法选择 26](#_Toc499046950)

[4.2 排序打分算法模型选择 27](#_Toc499046951)

[4.2.1 分类任务效果对比 27](#_Toc499046952)

[4.2.2 回归任务效果对比 29](#_Toc499046953)

[4.2.3 排序打分模型设计 30](#_Toc499046954)

[4.3 损失函数及优化方法选择 30](#_Toc499046955)

[4.3.1 损失函数 30](#_Toc499046956)

[4.3.2 优化方法 31](#_Toc499046957)

[4.4 历史行为数据处理 33](#_Toc499046958)

[4.5 本章小结 34](#_Toc499046959)

[第5章 基于深度学习的排序模型设计与实现 35](#_Toc499046960)

[5.1 基于深度学习的排序模型设计 35](#_Toc499046961)

[5.1.1 模型总体结构设计 35](#_Toc499046962)

[5.1.2 模型训练模块 36](#_Toc499046963)

[5.1.3 排序模块 37](#_Toc499046964)

[5.2 排序模型在地铁单边交易处理中的应用 38](#_Toc499046965)

[5.2.1 问题描述 38](#_Toc499046966)

[5.2.2 38](#_Toc499046967)

[5.3 本章小结 39](#_Toc499046968)

[第6章 总结与展望 40](#_Toc499046969)

[6.1 论文总结 40](#_Toc499046970)

[6.2 工作展望 41](#_Toc499046971)

[参考文献 42](#_Toc499046972)

[附录 45](#_Toc499046973)

[致 谢 46](#_Toc499046974)

[攻读学位期间发表的学术论文目录 47](#_Toc499046975)

# 绪论

## 研究背景

随着互联网的高速发展，计算机相关技术已经渗透入人们学习生活的方方面面。现在，人们可以使用搜索引擎获取各类信息知识，可以在电商平台进行网上购物，可以使用社交软件与亲友保持联系。得益于信息检索和推荐系统领域相关技术的发展进步，各类互联网服务正趋于个性化和智能化：搜索引擎会根据用户的搜索点击历史，为其提供个性化的搜索结果；新闻资讯类应用软件可以主动给用户推送其可能感兴趣的信息内容；电商平台会根据消费者特点进行商品推荐；社交应用通过分析用户的人际关系，向其推荐可能认识的人，帮助用户结识新朋友、拓展人脉。在此背景下，如何提高检索和推荐结果的准确度，成为当前迫切需要解决的问题，针对这一问题的研究具有十分重要的现实意义。

排序问题是信息检索和推荐系统等领域的核心问题之一。例如，在搜索引擎的应用场景中，需要将网页搜索结果按照与用户的检索目的的符合程度进行排序；在推荐系统中，需要把候选物品按照用户可能感兴趣的程度进行排序。排序结果的准确性和合理性会直接影响检索和推荐的质量。因此，对排序模型和排序结果优化方法进行研究具有很高的价值。排序问题的传统解决方案大多依赖人工经验，通过组合一系列排序规则，或是由专家根据待排序项的特征确定排序公式。随着对排序问题研究的不断深入，目前比较常用的做法是利用机器学习相关技术解决排序问题。与传统解决方案相比，基于机器学习的排序模型具有更高的效率和准确度，得到的排序结果也具有更强的客观性和可解释性。

近年来，深度学习作为学术领域的重点研究方向之一，取得了一系列显著的进展。例如，卷积神经网络（CNN）在处理计算机视觉方向中的物体识别、图像分类等问题中，取得了明显领先于以支持向量机（SVM）为代表的传统算法模型的效果；循环神经网络（RNN）则被广泛用于处理时间序列信息数据，特别是其变体：长短时记忆网络（LSTM）和门控循环单元（GRU），通过特殊的结构设计解决了RNN中的长期依赖问题，在处理如机器翻译、语音识别、机器创作等任务中取得了令人惊喜的效果。众多研究成果表明，在训练数据充足的条件下，深度神经网络模型在处理如分类、回归等机器学习任务时，能够取得显著优于传统机器学习算法模型的效果。深度学习技术在排序问题中的应用方面，谷歌公司在2016年发表的论文中，提出其在YouTube的视频推荐系统中使用了深度模型实现的候选生成模块和排序模块。同时，谷歌还在其另一篇论文中提出了一种由广义线性模型和深度神经网络模型组合而成的混合模型结构，将该模型用于Google Play商店的应用推荐，并取得了良好的效果。

## 研究意义

如上所述，信息检索、推荐系统、计算广告等计算机技术应用方向已经广泛存在于人们生活的各类场景中，为用户提供各种便捷的服务。而排序问题作为上述领域中的一类通用问题，对其进行研究，对于优化应用效果、改进服务质量、提高用户满意度具有重要的意义。

针对排序问题的研究，可以主要分为排序系统的架构设计、主体算法模型的选取和结果评价标准的选择等方面。其中，排序系统的架构设计和主体算法模型的选择是研究的重点，也是难点问题。早期解决排序问题的方法主要是由专家根据业务场景特点，结合对历史数据的分析，制定一系列排序规则，或者是利用待排序项的各属性特征值确定出打分公式，使用该公式对各候选项进行打分，并根据得分高低确定最终的排序结果。这种方法的主要缺点在于排序完全依赖于专家的经验，缺少客观性和说服力。同时，人工分析历史数据的效率十分低下，在数据海量增长的当前环境下，已变得不可行。随着研究的深入，研究者们开始尝试使用机器学习的技术手段来解决排序问题，并逐步发展为一个热点主题：排序学习（Learning To Rank，LTR）。与依靠专家的传统方法相比，机器学习算法模型对数据的分析更加全面，能够挖掘出数据中隐含的、人工难以发现的规律和性质。同时，得益于计算机硬件的飞速发展和分布式计算等领域取得的一系列研究进展，如今计算机单机/集群的数据处理能力相比过去都得到了巨大的提升，这使得算法模型能够在大规模数据集上进行高效的训练。

LTR的主要流程包括数据采集、特征抽取、模型训练、场景应用等阶段。其中，特征抽取和模型训练是最为关键的两个阶段，很大程度影响最终的排序结果。模型训练阶段的重点在于算法模型的选择。目前LTR中广泛使用的机器学习算法模型，主要以统计学习模型为主，如逻辑回归（LR）、支持向量机（SVM）、梯度提升树（GBDT）、随机森林（RF）等。近几年来，深度学习成为广大学术研究者关注的热点问题，各种结构的深度神经网络模型不断涌现。然而深度学习的成功实践主要集中在计算机视觉和自然语言处理等领域，针对深度学习技术在排序问题中的应用的相关研究较少，发展空间很大。此外，在特征抽取方面，用户行为特征是一类广泛存在于各应用场景中的特征数据。例如，在搜索引擎中，用户具有历史查询记录和浏览行为；在推荐系统中，用户具有资讯阅读、商品浏览购买等行为记录。此类数据的共同特点是具有较强的时序特性，且能在一定程度上反应用户的偏好习惯。因此，研究如何处理用户行为数据十分重要，也是特征抽取阶段需要解决的重点问题之一。

本课题的目标是研究一种基于深度学习的排序模型。为了提高排序结果的准确度，本课题将深度神经网络模型融入排序模型，弥补了传统统计算法模型的不足。此外，经过对数据特征的充分理解和分析，本课题提出使用循环神经网络模型对用户历史行为数据进行处理，用训练得到的网络参数表示用户历史行为特征，并作为输入特征向量加入排序模型参与训练。为了验证所提出排序模型的可行性和有效性，本课题将该模型用于解决针对地铁交易数据的单边交易处理问题。地铁单边交易指进站出站信息存在缺失的交易记录，当前对于此类交易记录的处理方式通常是按照最长距离计算票价，这种方法缺乏合理性，容易造成用户损失而导致发生纠纷和投诉。本课题利用所提出的排序模型，根据用户的历史出行行为和地铁站点特征数据，对各候选站点按照其可能性进行排序，填补缺失信息，从而进行合理计费。该方法有助于提升交通行业的服务质量，提高用户满意度。同时，本课题所提出的模型也可以用于完成信息检索、推荐系统和计算广告等领域中的排序任务，具有较强的通用性和可扩展性。综上所述，本课题具有十分重要的研究意义和非常广阔的应用前景。

## 硕士研究生期间的工作总结

本人自2012年10月进入北京邮电大学网络与交换国家重点实验室交换与智能控制中心以来，参与了 “基于微博的金融资讯检索平台”和“基于云的金融数据服务中心”两个校企合作项目。在项目中，本人参与了多个模块的研究、设计和开发工作，负责完成的主要内容包括：

1. 利用微博开放API接口[2]对新浪，腾讯[3]和搜狐[4]三大微博平台的微博进行抓取和更新，协助完成系统设计，完成代码的编写和测试，并参与相关设计文档的撰写。
2. 基于金融微博的短文本分类系统的设计与实现，该系统是“基于微博的金融资讯平台”项目的的子系统，属于数据分析模块，为检索平台的类别检索提供基本支持。根据微博的特征，完成设计并实现了基于情感词典的短文本分类算法，并发表期刊论文一篇，EI检索。
3. 基于PDF文档的表格识别与提取算法的设计与实现。该算法应用在“基于云的金融数据服务中心”项目的数据采集系统。将非结构化的表格数据转换成结构化的Json格式数据，供平台的上层应用使用。由于PDF结构特殊，表格提取存在一定难度。主要难点包括表格基本特征提取，表格结构识别，表格还原，复杂表头处理等。

此外，本人还调研了云计算技术、搭建云平台环境，参与撰写多项技术解决方案、设计文档、专利等。本论文的工作将在第3点的基础上进行扩展，提出一种通用的基于PDF格式文档的表格提取方法。

## 论文组织结构

本论文的组织结构如下表所示：

|  |  |
| --- | --- |
| 第一章 | 绪论：研究背景，研究意义，工作总结，论文结构概述 |
| 第二章 | 论文背景理论及相关技术介绍 |
| 第三章 | 常见表格数据抽取方法的介绍与分析 |
| 第四章 | PDF文件的表格数据抽取关键问题的研究 |
| 第五章 | PDF表格数据抽取系统的设计和实现 |
| 第六章 | 总结和展望 |
| 附录 | 包含参考文献、致谢、攻读学位期间发表的学术论文等 |

表1-1 论文组织结构表

第一章：主要介绍了本课题提出的背景和主要的研究意义。同时对本人在研究生期间的工作进行了总结。最后对论文的整体组织结构进行了梳理和总结。

第二章：主要介绍了PDF格式的基本结构，从物理组织结构和逻辑组织结构两个方面加以介绍。同时用一个例子对PDF的文档格式加以说明。第二部分介绍了本课题使用的类库PDFBox。PDFBox是本课题提取PDF表格基本特征所使用的开源类库，由于涉及到修改源码，因此对其组织结构也进行了介绍。

第三章：主要介绍了基本的表格数据抽取方法，特征识别上介绍了基于Web，图像和PDF的三种典型方法。同时分析了表格抽取方法的主要难点，具体包括表格结构识别，复杂表头处理以及无框线表格的还原等。

第四章：针对第三章提出的问题，第四章给出了本课题的处理方案。本章是论文的重要章节，包含了本课题表格识别和抽取的关键问题。涉及基于PDFBox的表格特征提取，表格还原，表格结构识别等内容。

第五章：第五章是本方法的一个具体应用。即针对PDF财务报表数据的抽取系统的设计和实现。给出了系统的整体设计架构图，流程图，层次结构等。同时展示了抽取数据的HTML和JSON格式，并对PDF表格识别方法的准确性和有效性进行了测试和评估。

第六章：对论文的总结，介绍了本论文的创新点。同时展望未来工作，提出了可能的改进点及可能的改进方案。

# 背景理论及相关技术介绍

本章对深度学习相关技术进行了介绍，主要包括深度学习概述，典型神经网络结构和目前比较流行的深度学习框架三个部分。第一部分介绍了深度学习概念的提出及发展历程，同时将深度学习与传统统计学习方法进行了对比分析；网络结构介绍部分重点介绍了目前应用最为广泛的三种神经网络结构：全连接深度神经网络、卷积神经网络和循环神经网络；第三部分介绍了TensorFlow、Caffe等当前主流的深度学习框架，同时分析说明了每种框架的优缺点。

## 深度学习简介

### 深度学习概述

深度学习（Deep Learning， DL）的概念，由机器学习顶级专家、加拿大多伦多大学教授Geoffrey Hinton等人于2006年提出，指基于样本数据并通过一定的训练方法得到包含多个层级的深度网络结构的机器学习过程。

神经网络技术起源于20世纪五、六十年代，当时称为感知机（Perceptron）。感知机的模型结构包括输入层、输出层和一个隐含层，特征向量由输入层输入，经过隐含层的变换到达输出层，并由输出层得到分类结果。早期感知机模型存在一个严重的问题，即无法模拟复杂的函数，甚至无法表示异或计算。随着技术的发展，Hinton、LeCun等人于20世纪80年代发明了多层感知机（Multilayer Perceptron，MLP），克服了这一问题。多层感知机是含有多个隐含层的感知机，通过增加非线性操作的次数实现对复杂函数的拟合。多层感知机解决了此前无法表示异或逻辑的缺陷，提高了模型的表达能力，但同时也带来了网络参数求解易陷入局部最优、梯度消失等严重的问题。另外，随着网络层数的加深，权值参数的数量成倍增长，受限于当时的计算能力水平，训练神经网络模型十分困难，这导致神经网络的相关研究一度陷入低谷。直到2006年，Hinton及其学生Ruslan在世界顶级学术期刊《科学》上发表论文，提出了两个主要观点：第一，含有多个隐含层的人工神经网络模型有很强的表征学习能力，深度学习模型学习获得的特征数据能够更加本质的代表原数据；第二，针对深度神经网络训练难以达到全局最优的问题，可以使用逐层训练的方法解决。这一研究成果引发了深度学习在研究和应用领域的发展热潮，由此，深度学习逐步发展为机器学习的一个新领域。近年来，Google旗下DeepMind公司开发的围棋人工智能程序AlphaGo战胜多位世界冠军；百度公司开发的智能机器人小度，在最强大脑节目的人脸识别比赛中战胜了此前的人类冠军，这些成绩充分证明了深度学习的强大能力，同时也让普通民众直观感受到了深度学习和人工智能技术，促进了深度学习的进一步发展。

深度学习模型和支持向量机（Support Vector Machine， SVM）、提升方法（Boosting）、最大熵方法等 “浅层学习”方法相比，主要区别在于深度学习模型结构包含更多的层次，并且明确强调表征学习的重要性。深度学习模型通常包含5层以上的隐含层，多个隐含层增加了非线性操作的次数，能够使用更少的参数拟合高度非线性函数，这也是深度学习的“深度”所在。在特征提取方面，浅层学习主要依靠人工经验提取样本的特征，如使用核函数或手工编码等，不仅需要具备专业知识、耗费大量计算资源，而且模型学习得到的是没有层次结构的单层特征；而深度学习则是通过对原始信号进行逐层特征变换，实现样本在原空间的特征表示到新的特征空间的变换映射，自动学习得到层次化的特征表示。深度学习模型在语音和图像识别等领域取得的效果，已经远远超过此前的相关技术。例如，谷歌公司和微软研究院的语音识别方向专家先后采用深度神经网络技术，将语音识别的错误率降低了20%-30%；在计算机视觉领域图像识别应用的著名项目ImageNet中，深度神经网络模型将原来的错误率降低了9%。此外，Google、Facebook等公司也开始将深度神经网络模型应用在推荐系统、广告点击率预估等业务场景中，并取得了一定的成效。

### 神经网络结构介绍

如上所述，在神经网络技术的发展历程中，为了针对性的解决其应用在各类问题中时所面临的问题，研究人员设计发明了多种网络结构。本节对其中三种最基础，同时也是应用最广泛的网络结构进行介绍，具体包括深度神经网络（DNN）、卷积神经网络（CNN）和循环神经网络（RNN）。

* 深度神经网络

在当前的实际应用中所使用的深度神经网络往往是多种神经网络结构的融合，包括卷积层和LSTM单元等。本节所介绍的深度神经网络特指具有全连接的神经元结构的网络，也可以称为多层感知机。全连接深度神经网络结构如图所示。



多层感知机网络结构

传统神经网络模型通常使用Sigmoid或Tanh等连续函数作为激活函数模拟神经元对激励的响应，并使用Werbos发明的反向传播（Backpropagation，BP）算法进行训练。神经网络的层数直接决定了模型对复杂函数的拟合能力，然而随着网络层数的增加，优化函数越来越容易陷入局部最优解，同时局部最优解也会越来越偏离真正的全局最优解。另外一个不可忽视的重要问题是当神经网络层数加深时，“梯度消失”现象变得更加严重。具体来说，当使用Sigmoid函数作为神经元的激活函数时，对于幅度为1的信号，在使用反向传播算法计算梯度时，每传递一层，信号衰减为原来的0.25。在这种情况下，当神经网络模型包含多个隐含层时，就会导致低层由于梯度的指数衰减而接受不到有效的训练信号。

为了解决神经网络模型训练容易陷入局部最优解的问题，Hinton于2006年提出了无监督预训练优化网络权值初值的方法，成功将网络的隐含层数量扩展到了7层。具体而言，预训练过程使用贪心思想，逐层训练模型，将上层训练好的结果作为下层的初始化参数，最终再进行权值微调。这一研究成果使神经网络真正意义上有了“深度”，并由此开始了深度学习的热潮。同时，为了克服梯度消失问题，研究人员提出了使用ReLU、Softplus、Maxout等函数替代Sigmoid函数作为神经元的激活函数，并逐步形成了现在深度神经网络的基本结构。相比于Sigmoid和Tanh函数，ReLU等函数具有单侧抑制、相对宽阔的兴奋边界和稀疏激活性等特点，能够有效解决神经网络模型存在的容易过拟合等问题。



各种激活函数对比

* 卷积神经网络

在全连接神经网络结构中，相邻层的神经元之间都能够形成连接，由此产生的一个严重问题是参数数量的爆炸增长。举例来说，假设以一幅像素为1K\*1K的图像作为输入，当使用全连接结构的神经网络模型时，隐含层含有1M个节点，对应10^12个权值参数需要训练。训练包含如此巨大数量的参数的神经网络模型，不仅需要耗费大量的时间，同时还会导致过拟合、容易陷入局部最优等严重问题。

20世纪60年代，Hubel和Wiesel在研究猫脑皮层中用于局部敏感和方向选择的神经元时发现其独特的网络结构可以有效降低前馈神经网络的复杂性。受此成果的启发，研究人员继而提出了卷积神经网络的概念。卷积神经网络有两个重要的特点，局部感受野和权值共享。区别于普通神经网络结构，卷积神经网络包含了一个由卷积层和子采样层构成的特征抽取器。在卷积层中，一个神经元只与邻层的部分神经元相连，即局部感受野。卷积神经网络的一个卷积层通常包含多个特征平面，其中每个特征平面由一系列矩形排列的神经元构成，同一特征平面中所包含的神经元具有相同的权值参数，共享的权值即卷积核。子采样，又称为池化（Pooling），是在特征向量上进行的一种聚合操作，通常包括均值子采样和最大值子采样两种形式。子采样可以视为一种特殊的卷积操作。局部连接和权值共享大大减少了神经网络中的参数个数，降低了模型的复杂度，同时也降低了过拟合的风险。

卷积神经网络模型由于其自身结构特点，非常适用于处理图像特征，因此被广泛应用在计算机视觉领域中的图片分类、图像分割等任务中，并且取得了巨大的成功。随着相关研究的深入，卷积神经网络衍生出了众多网络结构，其中比较著名的包括Lenet（1986年）、Alexnet（2012年）、GoogleNet（2014年）、VGG（2014年）、ResNet（2015年）和DenseNet（2017年）等。

* 循环神经网络

全连接结构的深度神经网络还存在另一个问题，即无法对时间序列上的变化进行建模。然而在机器翻译、语音识别、趋势预测等应用中，样本出现的时间顺序及上下文关联性是十分重要的。为了适应上述需求，研究人员提出了另一种神经网络结构：循环神经网络。在循环神经网络中，一个序列当前的输出不仅与当前的输入有关，还取决于之前的输出。具体表现为网络会对当前时刻之前的信息进行记忆，并参与到对当前输出的计算中。区别于普通神经网络中同层节点之间无连接的结构，在循环神经网络中，同层神经元之间存在连接，同时将输入层的输出和隐含层上一时刻的输出共同作为当前时刻隐含层的输入。



循环神经网络典型结构及在时间维度上的展开

与传统神经网络算法相同，对循环神经网络的训练同样使用误差反向传播算法，区别在于如果对循环神经网络进行时间维度上的展开，其参数是共享的，同时梯度误差不仅依赖当前网络的状态，还依赖于此前网络的状态。针对循环神经网络的学习算法称为Backpropagation Through Time（BPTT）。然而BPTT算法存在的一个重要问题是其无法解决长时依赖问题，即在当前的输出与之前较长的一段序列相关时，使用BPTT算法无法对网络进行有效的训练。这是因为当循环神经网络在时间维度上展开的层数过多时，BPTT同样会产生普通神经网络使用BP算法训练时存在的梯度消失或梯度爆炸问题。为了解决梯度在时间维度上无法进行有效传播的问题，研究者们提出了多种改进的循环神经网络结构，如长短时记忆单元LSTM和门控循环单元GRU。

LSTM由Hochreiter和Schmidhuber于1997年提出，并由Alex Graves进行了改良和推广。LSTM使用被称为Cell的结构来保存当前输入之前的状态，并使用精心设计的称为门（Gate）的结构来增加或去除Cell中的信息。LSTM单元中共包括三个门结构，分别是输入门（Input Gate）、输出门（Output Gate）和忘记门（Forget Gate）。多项研究成果已经证明LSTM网络结构对于解决长序列依赖问题十分有效，在自然语言处理中的词向量表达、词性标注、机器翻译和语音识别及图像描述生成等应用中都取得了显著的效果。GRU是LSTM的一种变体，由Cho等人于2014年提出。GRU将LSTM中的忘记门和输入门合并成了单一的更新门，简化了模型结构，同样得到了广泛的应用。除GRU之外，还存在多种LSTM变体，如Koutnik等人提出的Clockwork RNN（2014年），Yao等人提出的Depth Gated RNN（2015年）等。近年来，注意力（Attention）机制成为了循环神经网络研究的新热点，也取得了丰富的研究成果。





LSTM及GRU结构示意图

### 深度学习框架介绍

深度学习的火热发展及其取得的众多瞩目成绩，吸引了Google、Facebook、Microsoft等科技巨头围绕深度学习重点投资了一系列新兴项目，并因此推动了一批开源深度学习框架的诞生和发展。目前研究人员使用的主流深度学习框架主要包括TensorFlow、Torch、Caffe、Theano、Deeplearning4j、Keras等。这些深度学习框架各具特点，被广泛应用于计算机视觉、语音识别和自然语言处理等领域，并取得了十分优秀的效果。下面对这些深度学习框架进行简要介绍。

* TensorFlow

TensorFlow最初是由Google Brain团队基于DistBelief，针对机器学习和深度神经网络进行研究所研发的第二代人工智能学习系统，目前已经开源。

作为一款数学计算软件，TensorFlow使用数据流图的形式进行计算。数据流图中的节点表示数学运算，线条则表示多维数据数组，即张量之间的交互。TensorFlow的命名来源于其运行原理：张量（tensor）从数据流图的一端流动（flow）到另一端的计算过程。



Tensorflow流程示意图

TensorFlow的主要特点包括适应性强、可扩展性强、自动差分、计算高效等。具体表现在TensorFlow不只提供神经网络库，还支持用户自主构建流图、编写内层循环代码驱动计算；可以应用在各种类型的设备上，如GPU、云平台、移动设备等；提供包括Python和C++在内的多种编程语言的接口支持；TensorFlow可以将不同计算单元分配给不同的设备执行，能够充分利用硬件资源。

* Torch

Torch是一个已有十余年历史的科学计算框架，采用Lua语言编写，支持大量机器学习算法。Facebook开源了大量建立在Torch上的深度学习模块和扩展功能，促进了Torch的进一步发展。

Torch框架的优势在于使用其构建模型非常简单，易于使用。框架高度模块化，同时提供快速高效的GPU支持。Torch框架提供跨平台支持，可以嵌入到iOS、Android和FPGA等后端的接口。

* Caffe

Caffe全称Convolutional Architecture for Fast Feature Embedding，是一个高效清晰的开源深度学习框架，由加州大学伯克利分校的贾扬清博士开发，目前由伯克利视觉学中心进行维护。

Caffe中的计算是以层的形式表示的，其中每一层的基本流程为接受输入数据，进行计算，输出计算结果。其中计算包括由输入计算输出的前向传播和梯度的反向传播。定义好每一层的计算函数后，就可以把多个层连接成网络进行训练。

Caffe的优点包括其模型与对应的优化都是以文本形式而非代码形式给出，十分容易上手；计算速度快，可用于海量数据的训练，特别适用于计算机视觉领域；开放性好，提供公开的代码和参考模型，同时提供良好的社区支持。不足之处则包括文档匮乏，需要大量依赖包、安装过于复杂等。

* Theano

Theano于2008年诞生在蒙特利尔理工学院，其核心是一个数学表达式编译器，专门为深度学习中处理大型神经网络算法所需要的计算而设计，被认为是深度学习研究和开发的行业标准。Theano在其发展过程中派生出了大量深度学习软件包，如Blocks和Keras等。

Theano的优势体现在其集成NumPy并使用其中的ndarray数据类型、使用GPU加速计算、提供速度和稳定性优化、可以动态生成C代码、具备较强的灵活性等。而缺点则包括偏向底层，模型实现比较复杂，不支持多GPU和水平扩展等。

* Keras

Keras是一个完全使用Python编写而成的高层神经网络API库，支持的后端包括TensorFlow、Theano和CNTK。Keras的设计目标是支持快速实验，方便进行简易快速的原型设计，十分适合用于先进的研究工作。

Keras提供一致而简洁的API，可以大大减少工作量，用户体验优秀；模块性强，网络层、损失函数、优化器、激活函数、正则化方法等都作为独立模块，便于构建模型；支持以编写类或函数的方式创建新模块，具备很强的扩展性。

* Deeplearning4j

Deeplearning4j由创业公司Skymind于2014年6月发布，是一个面向实际生产环境和商业应用的具备高成熟度的深度学习开源库，也是首个商用级别的深度学习开源库。顾名思义，Deeplearning4j面向Java语言，可与Hadoop和Spark集成，同时支持在移动设备的应用中快速集成深度学习功能。

经过对上述各框架各自优缺点的分析对比，并充分考虑易用性、可扩展性及计算效率等因素，本课题最终选择使用TensorFlow实现课题研究中所涉及到的深度神经网络模型。

## 本章小结

本章主要介绍了深度学习的相关概念技术，包括深度学习的发展历程，经典神经网络模型的结构等，并对当前主流的深度学习框架进行了简要介绍和对比分析，为后续章节中涉及的算法设计、模型选取、系统实现等内容做了铺垫。

# 常用排序方法的介绍与分析

本章首先对现有的各种排序方法进行了介绍，并分析了不同方法各自的特点。之后总结了排序模型中常用来拟合排序函数的算法模型及各自的优缺点，并介绍了几种常用的评价指标。最后概括分析了排序问题中的几个重点难点问题，包括特征数据的提取，时序类特征数据的处理，排序模型的优化等内容。在后续章节中将具体介绍本课题解决上述问题所采用的技术方案，并针对地铁单边交易识别的应用场景进行具体排序模型的设计与实现。

## 常用排序方法介绍

排序问题最初是作为信息检索的核心研究问题而被人们所关注。在搜索引擎等信息检索系统中，问题可以被抽象定义为给定查询Q和文档集合S={D1, D2, …, Dn}，按照某种规则返回S中文档的一个序列。传统的排序模型主要可以分为两类：相关度排序模型和重要性排序模型。其中，相关度排序模型根据文档D与查询Q之间的相似度对文档进行排序，通常做法是利用词频、逆文档频率、文档长度等因子，由人工确定排序公式，此类模型包括TF-IDF、隐语义分析（Latent Semantic Analysis）、BM25、基于语言建模的信息检索（LMIR）模型等。重要性模型则不考虑文档和查询之间的相似性，而是将包含查询信息的文档按照其重要程度进行排序。文档的重要程度通常根据文档之间的图结构来计算，典型算法如PageRank、HITS、TrustRank等。

然而，无论是相关度排序模型还是重要性排序模型，都存在一个严重的问题，即只考虑了某一方面的因素（相关度或重要性），而没有对查询和文档的各项属性特征进行综合考量。随着机器学习技术的发展，研究者们开始使用统计学习方法解决排序问题，即LTR。LTR将查询关键词、文档信息、甚至是传统模型的结果（如查询与文档的相似度、PageRank值等）等数据作为输入特征向量，将由人工标注或从日志数据中挖掘出的文档排序列表作为输出，通过监督学习训练机器学习模型进行排序学习。与传统排序模型相比，LTR训练得到的排序模型使用更多的特征拟合排序公式，充分考虑了各方面因素，同时由算法根据历史数据学习得到的模型参数，也比依赖人工的方法更加客观和高效。

现在，排序学习已经演化为一类独立问题，并且发展成为研究人员所关注的热点研究方向。随着相关研究的深入，LTR已经不仅仅局限于信息检索领域，在推荐系统和计算广告等领域中，排序学习同样得到了广泛的应用，排序对象也从单一的网页等文档对象扩展为包括商品、新闻资讯、广告内容等在内的各类实体。本课题将研究的排序问题由信息检索领域向外进行了推广扩展，具体定义为给定待排序候选项集合S1={I1, I2, …, In}，在条件集合S2={C1, C2, …, Cm}下，确定集合S1中候选项的一个序列。其中，候选项I可以是网页、新闻、商品、音乐等存在排序需求的对象，条件C则包括查询关键词、用户自身属性特征、历史数据记录等排序的环境因素。本文后续针对排序问题的相关研究，均基于此定义进行。



LTR整体架构

## LTR模型训练方法

LTR的主要流程包括收集训练数据、特征抽取转换、训练排序模型和模型应用等步骤。其中，排序模型的设计和训练是LTR的核心，也是技术难点所在。按照原理的不同，LTR的模型训练方法可以分为三类：PointWise方法、PairWise方法和ListWise方法。下面分别对三种方法的思想原理及特点进行分析说明。

### PointWise方法

PointWise方法的核心思想是确定一个打分函数，使用此函数对待排序候选项集合中的每一项进行打分，并根据得分结果对候选项进行排序。PointWise方法是传统排序方法的自然延伸和发展。传统排序方法中由人工拟合的排序公式、查询词与文档的相似度、PageRank值等，都可以视为是打分函数的特殊形式。在PointWise方法中，排序问题被转化为分类或回归问题，通过训练机器学习算法模型得到打分函数。举例来说，假设排序特征向量为X=(x1, x2, …, xn)，待排序项的期望得分为y，使用线性回归模型拟合打分函数，损失函数定义为平方误差，则打分函数表示为：

f(x) = Σwixi, i=1,2,3,…, n

loss = (y- f(x))2

其中，参数wi由模型经过训练确定，训练的优化目标为使全部训练数据的损失函数值之和最小。

PointWise方法是最简单也是应用最为广泛的排序学习方法。在PointWise方法中，训练数据集比较容易获取，同时可以直接应用机器学习解决分类回归等问题中的一些比较成熟的技术手段和解决方案。此外，在实际应用时，PointWise方法对各候选项的打分计算可以并行执行，具有很高的效率。此方法的不足之处则在于独立地对每一个候选项进行处理，而没有考虑待排序项之间的关联关系。

### PairWise方法

相比于PointWise方法，Pairwise方法不再单独计算某一候选项的排序得分，而是将分析的重点转向判断待排序项之间的顺序关系是否合理。具体来说，其训练过程和训练目标是给定一组待排序项<I1，I2>，由模型判断这一对候选项对是否满足此种顺序关系。通过这种方式，Pairwise方法把排序问题转化为二分类问题，再使用如SVM、决策树等算法模型求解分类判别函数。常用的PairWise排序算法包括Ranking SVM、RankBoost、GBRank等。



PairWise方法示意

Pairwise方法考虑了候选项之间的相互顺序关系，通过判断候选项两两之间的顺序关系确定最终的排序结果，做出了一定改进。然而，PairWise方法也存在明显的问题：第一，Pairwise方法只考虑了两个候选项的相对先后顺序，而没有考虑候选项在结果列表中的位置，这导致PairWise方法的优化目标与衡量实际排序结果优劣性的相关指标之间存在一定差距，甚至成负相关关系。第二，对于N个待排序候选项，PointWise方法共需要进行N次打分运算，而在PairWise方法中则需要对共计N\*(N-1)/2个候选项对的先后顺序进行判断。这导致在N取值较大时，使用Pairwise方法的时间消耗会远远大于使用PointWise方法，此外，对候选项对的顺序判断还可能出现排序结果之间存在冲突的情况，此时需要额外的策略规则来确定最终的排序结果。第三，在待排序项数量存在差异时，会导致机器学习系统的效果评价产生波动，而进一步影响模型的参数优化，导致模型的泛用性较差。

### ListWise方法

PointWise方法和PairWise方法本质上都是从候选项的角度考虑排序问题，分别以单个候选项和候选项对作为基本单位构造训练实例，通过将排序问题转化为分类或回归问题进行求解，最终再组合得到整体的排序结果。区别于这两种方法，ListWise方法将一次排序结果的列表整体作为一个训练实例，并且直接对模型输出的候选项序列进行优化，使其接近真实序列。类似于PointWise方法，ListWise方法同样试图拟合一个排序函数，两种方法的不同之处在于PointWise方法的优化目标是使候选项的打分尽可能接近其真实排序得分，而ListWise方法则是对每一个候选项打分后，利用Luce模型计算候选项集的每一种排列情况的概率值，之后再利用余弦相似度或KL散度等作为损失函数来衡量模型输出序列的概率分布与真实序列的排序概率分布之间的差距。如图所示，假设A、B、C是三个待排序的候选项，其真实排序得分分别为6、4、3，即真实打分函数g(x)满足g(A)=6，g(B)=4，g(c)=3。f(x)与h(x)是两个打分函数，对A、B、C三个候选项的打分分别为3、2、1和4、6、3。三个候选项对应3！=6种不同的排列方式，分别计算每个打分函数所对应的不同排列的概率分布，从图中可以看出函数f(x)与真实打分函数g(x)的排列概率分布更加接近，因此f(x)比h(x)更加接近最优函数g(x)。



ListWise方法示意

常用的ListWise排序算法包括AdaRank、ListNet，ListMLE等。相比于PointWise方法和PairWise方法，ListWise方法的优点在于综合考虑了候选项在排序结果中的位置和各候选项之间的相对位置关系等因素。同时ListWise方法以候选项的序列作为模型输出，并直接针对排序结果整体进行优化，使其更加接近真实序列，从而有效避免了优化目标与实际衡量指标之间的差异问题。但是ListWise方法同样存在一些问题：首先，候选项的准确排序得分通常需要依靠人工标注获得，真实排序序列难以获取导致训练集的构造比较困难。比如在推荐系统中，通过日志数据只能获取用户的点击、购买等行为记录，而无法得到用户对全部推荐物品的喜好顺序。事实上，在多数应用场景中，待排序项之间并不存在明确的强顺序关系。其次，ListWise方法需要针对每一种排列情况计算其出现的概率，对于N个候选项，算法的时间复杂度为O(N！)，这使得当N取较大值时ListWise方法存在比较严重的性能瓶颈的问题。

## 常用算法模型和评价指标

早期LTR排序算法通常使用线性函数来拟合打分函数，即通过对各项排序特征进行加权求和确定候选项的得分。常用的算法包括逻辑回归、分解机模型等。另一类常用模型是决策树模型。梯度提升树模型，特别是由陈天奇改进实现的版本XGBoost，凭借其优秀的效果和高效的性能，在Kaggle上的多项大赛中表现亮眼。下面分别对这几种模型的原理及特点进行介绍。

### 常用算法模型

* 逻辑回归

逻辑回归是机器学习中的一种分类模型，具有简单高效的特点，被广泛应用于点击率预估等问题中。逻辑回归与线性回归同归属于广义线性模型，其具体定义为给定输入特征向量x和参数θ，决策函数h(x)为：



其中，函数g(Z)成为Logistic函数，或Sigmoid函数，形式如下：





Logistic函数图像

对应的输出y的概率分布满足：



逻辑回归的损失函数为基于最大似然估计推导得到的对数损失函数，具体形式为：



逻辑回归通常被用来处理二分类问题，如预测某一事件发生的概率。使用逻辑回归模型确定排序打分函数时，等价于将候选项的得分缩放到区间（0, 1）。由于Logistic函数具有单调递增的特性，因此能够保证候选项之间的相对顺序保持不变。

逻辑回归模型由于其结构简单，计算效率非常高，而且易于并行化，能够处理上亿维度的输入特征向量。与线性回归相同，逻辑回归算法也是对输入特征向量每一维度的线性加和，而没有对特征进行非线性组合的能力。这一问题导致逻辑回归算法依赖人工进行大量的特征工程工作来实现组合特征的提取。

* 分解机

分解机模型由Steffen Rendle于2010年提出，是一种基于矩阵分解的机器学习模型，对于稀疏数据具有很强的学习能力。与逻辑回归模型相比，分解机模型在其公式中引入了组合项，使得其能够自动学习出交叉特征，模型表示为：





从公式中可以看出，在计算组合项的权重系数时，分解机模型并不是直接对参数进行估计，而是引入了辅助向量v进行计算。这是因为N维特征向量共对应N\*(N-1)/2个组合特征项，在特征向量高度稀疏时，大部分组合项的值为0，这导致无法对参数wij进行有效的估计。当使用维度为k的辅助向量时，参数规模从N\*(N-1)/2个减少到k\*N个，从而大大提高了模型在特征稀疏的样本上的学习能力。同时，Rendle在论文中给出了一种复杂度为O(N)的计算二次项求和的算法，使得分解机模型同样具有较高的计算效率。分解机模型主要使用随机梯度下降法、交替最小二乘法和马尔科夫蒙特卡洛法等三种算法进行参数学习，各部分参数的梯度为：





FM计算组合项的线性算法

如上所述，分解机模型的优点在于与逻辑回归模型相比，其具有主动学习出交叉特征的能力，可以在一定程度上减少人工特征工程的工作量。与加入二次项的普通线性回归算法相比，其通过引入辅助向量，减少了参数数量，使模型具备对稀疏特征的学习能力。同时，与SVD等其他矩阵分解类算法相比，分解机模型无需将训练样本数据转化为类似User-Item的二维矩阵形式，输入更加灵活，模型更具一般性和扩展性。

* 梯度提升树

GBDT，又称为GBRT、MART、GBM等，由Friedman提出，属于集成学习算法中的提升算法的一种。提升算法通常是一个迭代的过程，在新一代的训练过程中改进上一代的结果。在AdaBoost等传统提升算法中，每一步训练完成之后，会根据当前模型在训练样本上的预测情况对样本进行加权，即增加预测误差大的样本的权重，减少预测误差小的样本的权重，如此训练得到多个简单的分类/回归器，再通过加权、投票等方式组合这些简单模型，得到最终的分类/回归预测结果。区别于这种训练方法，梯度提升算法以此前的预测结果与真实值之间的残差作为学习目标，通过在残差梯度减少的梯度方向上训练新模型来逐步消除残差。GBDT是梯度提升算法的代表之一，使用分类回归树（CART）模型作为基学习器。与逻辑回归等线性模型相比，决策树类算法具有更强的特征非线性变换和特征组合的能力。同时因为树模型在分裂节点时会遍历每种特征计算最佳分割点，因此还可以用于有效特征筛选。目前，GBDT已被广泛应用于数据竞赛和工业生产中的各类问题中。

XGBoost是由华盛顿大学的陈天奇博士开发的一个GBDT模型的C++实现。XGBoost对传统GBDT模型做了部分改进，具体表现在XGBoost同时支持分类决策树模型和线性模型作为基学习器；在优化过程中对损失函数进行二阶泰勒展开，同时用到一阶和二阶导数，此外还支持自定义损失函数；在损失函数中加入正则项，包括叶子节点个数和叶子节点输出预测值的L2范数模的平方和，降低了模型的复杂度，有效防止过拟合；引入随机森林中的列抽样方法，减少计算量，同时降低过拟合风险；对特征进行预排序并保存为block结构，避免了节点分裂时的重复计算，同时支持CPU多线程并行计算等。这些改进优化使XGBoost相比于传统GBDT模型具有更好的预测效果和更高的计算效率，因此，本课题在后续实验部分选用XGBoost模型进行对比实验。

### 常用评价指标

在机器学习问题中，研究者们设计了多种评价指标来衡量算法模型的效果。这些评价指标适用于不同的问题，需要按照任务类型进行选择。例如，分类问题常用的评价指标包括精度（Precision）、准确率（Accuracy）、召回率（Recall）、F1值等，而回归问题中则通常使用平均绝对误差（MAE）、均方误差（MSE）、均方根误差（RMSE）等作为评价算法模型优劣的标准。在排序问题中，两种比较常用的评价标准是平均精度均值（MAP）和归一化折损累积增益（NDCG）。除此之外，本部分还会对ListWise方法中用于衡量预测序列与真实序列之间相似度的KL距离的概念进行简要介绍。

* 平均精度均值

平均精度均值基于精度和排序结果的位置信息计算得到。在信息检索领域中，精度定义为相关文档数量在返回结果文档总数中所占的比例，即：



可以看出，精度指标只考虑了检索结果中相关文档的个数，而没有考虑文档的位置因素和顺序关系。事实上，在搜索引擎和推荐系统等应用中，相关性越高的候选项应该处于序列中越靠前的位置上，因此研究者提出了平均精度的概念。平均精度的计算方法为首先计算出返回结果列表从开始位置到之后每一个位置上的精度，如果某一个位置上的候选项是不相关的则该位置的精度为零，最后对所有位置的精度取平均值。举例说明，假设某个查询Q应该对应4个相关网页，搜索引擎将这4个网页分别排在结果列表中的第1、2、5、8个位置上，则对于查询Q，该搜索引擎的平均精度均值为：(1/1 + 2/2 + 3/5 + 4/8)/4=0.775。

MAP的计算方法对排序位置敏感，但是仍没有考虑相关文档之间存在相关程度的差异这一关键因素。另一种评价指标NDCG针对这一问题进行了优化。

* 归一化折损累积增益

如上所述，NDCG同时考虑了相关候选项在返回结果列表中的位置和其相关程度。NDCG方法将序列每一个位置上的候选项的相关程度记为增益（Gain），不相关的项的增益为零，将这些增益相加，便得到累积增益（Cumulative Gain）。为了引入位置因素，将每个位置的增益除以一个递增的数值（通常定义为该位置的对数值），即折损值。对各位置折损后的增益值求和，得到折损累积增益（Discounted Cumulative Gain）。对于不同的查询，结果的数量及相关性数值可能不同，因此DCG之间不能进行直接比较，需要进行归一化处理。具体做法为取DCG与理想DCG的比值，其中理想DCG按照返回结果中的候选项按其增益值排序得到的序列计算得到。归一化处理后的指标称为NDCG@K，值域为[0, 1]，其中K表示结果列表的长度，通常取10、20、50等数值。

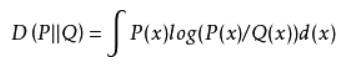


一种NDCG指标计算公式

* KL距离

KL距离，全称Kullback-Leibler差异，也称为KL散度或相对熵，是用来描述相同时间空间中的两个概率分布P和Q的差异的一种方法。其物理意义为使用基于Q的编码对来自P的样本进行编码时，平均每个样本所需要的额外的比特个数。在信息论中，KL距离表示用概率分布Q来拟合真实分布P时产生的信息损耗。通常用D(P||Q)表示KL距离，对于离散概率分布和连续概率分布，其计算公式分别为：





KL距离具有非负性，当且仅当概率分布P、Q相同时，其KL距离等于0。

KL距离虽然被称为“距离”，但实际上并不是一个距离度量函数，因为其不满足对称性，即D(P||Q) ≠ D(Q||P)，同时也不满足三角不等式。即便如此，KL距离依然被广泛应用于信息检索和统计自然语言处理等领域中。例如在上文介绍的ListWise方法中，KL散度被用于衡量预测序列的概率分布与真实序列概率分布之间的差异，并作为优化目标指导模型参数的更新。

## 排序模型关键问题分析

排序学习问题需要解决的关键问题大致可以分为两个方面：训练集构造和模型总体设计。其中，训练集构造包括原始训练数据的获取、特征抽取及筛选等问题；模型总体设计则主要包括排序模型的架构设计、排序方法和算法模型的选取、模型效果的优化等。下面分别从这两个方面对课题研究的关键问题进行分析。

### 训练集构造方法

在排序问题中，训练数据通常有两种获取方式：由人工标注获取和从日志数据中挖掘获取。其中，人工标注方法的具体做法是给定排序的场景条件和待排序候选项集合，由专业的数据评估人员对每个候选项进行相关性判断，相关性评分可以是离散的分档评分也可以是连续的数值评分，最终将给出相关性评分的候选项作为训练数据。人工标注方法取决于数据标注人员的主观判断，受其背景知识和历史经验等因素的影响较大，存在一定的局限性。与之相比，通过挖掘日志数据获取训练数据是一种应用更为广泛的方法。日志数据包括用户对网页的点击浏览、对商品的购买评价、对新闻的评论点赞等多种类型，并可以分为显示反馈和隐式反馈两种类型。显示反馈指用户明确给出自己对候选项相关性的评价，例如在亚马逊、淘宝、豆瓣、IMDb等网站中，用户可以对商品、图书、电影等物品给出自己的评分；在推荐功能中，用户可以主动选择对被推荐物品感兴趣或不感兴趣等。显示反馈数据是用户对候选项相关性评价的态度的直观体现，适合用于构造训练集。但是，显示反馈数据的数据量通常较少，在全部日志数据中的占比较低，且在搜索推荐等大部分应用场景中难以获取，同时还可能存在“刷分”等作弊行为，因此需要使用其他挖掘方法来弥补其不足。隐式反馈指的是通过用户的行为推断其对候选项偏好性的方法。与显示反馈数据相比，隐式反馈数据更加稠密，同时也能更加真实地反映候选项的相关性。例如，网页的点击次数、页面停留时间、商品的收藏、新闻的评论转发等隐式反馈，虽然没有显式的给出对候选项的评分，却是用户真实行为和意图的反映。除此之外，隐式反馈通常和模型的优化目标函数关联更加密切，如广告点击率预估的任务就是对广告点击行为这一隐式反馈发生概率的预测。值得注意的是隐式反馈数据往往包含更多的噪声数据，需要进行数据预处理以过滤噪声。

显示反馈举例：用户在亚马逊网站上对图书的评分

在得到原始训练数据之后，一个至关重要的步骤就是特征的抽取和有效性筛选，因为提取的数据特征的质量直接决定模型训练效果的上限。数据特征主要可以分为原始数据特征、统计类特征和组合特征三类。在排序问题中，原始数据特征包括排序的条件特征、待排序候选项自身的属性特征等，如搜索关键词、网页内容、商品的价格、新闻的类型等都属于此类特征。数据统计类特征指在训练集上对原始数据特征进行统计分析，并将统计结果作为新的特征维度加入模型参与训练。例如，当用户在搜索引擎中查询关键词A时，可以对历史数据记录中同样搜索关键词A的其他用户最终点击的网页进行统计，并将每个网页的点击次数作为新的特征。统计类特征是对训练数据更深层次的挖掘，能够从更本质的层面反映用户或候选项的属性，在模型中通常具有更高的权重系数。在添加数据统计类特征时，一个需要注意的问题是要避免发生“数据泄露”。数据泄露是指在统计时使用了样本发生时间之后的数据信息，而事实上此部分数据在预测时是无法获知的。数据泄露通常会产生严重的过拟合问题，导致模型的训练效果和实际预测效果差距很大。组合特征，顾名思义是对已有的特征通过笛卡尔积等方式进行组合，主要作用是增强模型对非线性特征的表达能力。

提取出各类特征后，还需要对特征的有效性进行验证，以确定是否将其加入模型中。常用的特征选择方法包括过滤法，包装法和集成法。其中，过滤方法主要是针对每一维度特征，计算其取值分布的方差等统计指标，去除统计指标低于设定阈值的特征；或通过计算特征与目标值之间的相关系数、互信息及卡方检验等方式，衡量特征与目标值的相关性。包装法，或称为递归特征消除法，指的是选择一个基模型进行多次训练，在每次训练之后去除部分特征，使用其余特征进行下一次的训练。集成法的原理是使用具有特征选择能力的模型，如带有L1、L2正则项的逻辑回归模型和决策树模型，进行预训练，筛选出权重值较大的特征。最后，通常还需要对筛选出的特征进行标准化、归一化、类别特征的独热编码等预处理操作，才能最终作为训练数据供排序模型学习。

### 模型总体设计

模型总体设计包括排序模型的架构设计、排序方法和算法模型的选取和模型效果的优化等方面，需要解决的重点难点问题包括如何提升模型的排序精准度、提高模型的训练和预测计算效率等。目前工业界在广告投放和推荐系统等业务场景的排序模型中大多使用分层的架构设计。分层排序模型通常包含一个粗排层和一个精排层，其中粗排层也被称为召回层或候选生成层，精排层则通常简称为排序层。图----描述了一个典型的两层排序系统的主体结构。

（两层架构图）

其中，粗排层实现从整体资源池中初步召回待排序候选项的功能。由粗排层筛选出的候选项集会送入精排层完成最终的排序并输出。之所以采用分层的系统架构是出于对模型排序效率的考虑。如上文所介绍，排序模型的核心思想是对候选项进行打分，再根据分数对其排序，因此排序过程的计算耗时正比于候选项的数量。在实际应用中，资源池中的全部资源的数量是十分巨大的，例如互联网上全部网页数、购物网站中全部的商品数等，在每次排序请求中使用复杂模型对全部的资源进行打分计算是不可实现的。同时，因为与排序请求相关的候选资源只占资源总数的极少一部分，所以使用粗排层实现对大量无关资源的过滤功能。粗排层通常使用规则结合简单线性模型实现，如使用基于关键字的倒排索引结构和线性回归模型。而精排层为了提高排序精准度，则通常采用多个基础模型集成得到的融合模型实现。

精排层常用的模型融合方法为对各个基础模型的结果进行线性加权求和。各基模型的权重系数可以人为指定，也可以再通过模型学习得到。后一种方式相当于以基模型的预测值作为特征向量训练更高层次的机器学习模型，因此又被称为模型堆叠（Stacking）。模型堆叠的优点在于能够找到各个样本下表现最好的基模型，组合不同模型的优势方面，所以当基模型显著不同时，堆叠的效果最好。堆叠得到的融合模型的预测效果显著优于单个基模型，目前在Kaggle的各项竞赛中，名次靠前的解决方案基本全部使用了堆叠的模型融合方法。堆叠方法的优点明显，但是也存在一个问题：各级模型的训练过程相互独立，高层次模型在其训练过程中只会优化对应于低层模型输出结果的参数，而不会对低层模型的内部参数进行更新。不同层级的模型分开训练，增加了时间消耗。如果能同步训练高层模型和各低层模型，无疑可以大大提高模型的训练效率，也可能会取得更好的预测效果。针对这一问题，Google提出了一种新的融合模型结构，称为宽度&深度模型（Wide & Deep Model），其结构如图所示：



宽度&深度模型结构

宽度&深度模型可以视为广义线性模型和深度神经网络模型的组合。区别于堆叠融合方法，宽度&深度模型使用一个逻辑回归模型组合宽度部分的交叉特征和深度神经网络对稀疏特征进行集成而得到的高层特征，宽度和深度部分的各个参数会根据模型的预测误差，使用FTRL算法进行同步迭代更新。宽度&深度模型真正从结构上实现了不同类型模型的融合，是一种比较新颖的方法。但是该模型也有比较强的局限性，即只能对特定类型的基础模型进行融合，而无法融合GBDT等决策树类模型。

用户历史行为数据是搜索引擎、推荐系统等应用中的一类常见数据。用户历史行为数据记录反映了用户的个性偏好和行为习惯，对于预测用户此后的行为具有重要的参考价值和指导意义。在排序模型中，历史行为数据是一类十分重要的特征，能够在很大程度上影响最终排序结果的准确率。因此，历史行为数据的处理方法也是排序模型中的关键问题之一。目前通常采用按时序连接的方法处理历史行为数据，但是因为历史行为记录的数据量不确定，导致无法得到固定长度的特征向量。这一问题对应的一种解决方案是先确定需要的历史数据条数，对于数据量过多或过少的情况分别进行截断和补齐处理，如图【】所示。这种方法解决了特征向量长度不固定的问题，但是可能引起数据信息丢失或与真实行为产生偏差。针对这些问题，本课题提出了一种使用循环神经网络对历史行为数据进行编码的方法，在保证数据信息完整性的条件下得到固定长度的特征向量，一举解决了上述两个问题。这种方法的思想原理和操作过程将在论文第四章中进行详细介绍。



图【】对历史行为数据的截断补齐方法

## 本章小结

本章首先分析了现有的各种排序方法，以及LTR中的三种模型训练方法：PointWise方法、PairWise方法和ListWise方法各自的原理及特点。其次介绍了常用于拟合排序打分函数的三种算法模型，及三种常用的评价指标。最后从训练集的构造和模型总体设计两个方面概括总结了排序模型中的关键问题和技术难点，为第四章课题针对相关问题的研究和解决方案的提出做了铺垫。

# 基于深度学习的排序模型关键问题研究

本章主要针对第三章中所提出的排序模型中的各关键问题，介绍了本课题的相关研究成果和解决方案。具体包括不同应用场景下LTR模型训练方法和排序打分算法模型的选择，深度神经网络模型损失函数及优化方法的选择，以及对历史行为数据的处理方法等内容。

## LTR模型训练方法选择

本文在3.2节介绍了LTR模型的三种常用训练方法：PointWise方法、PairWise方法和ListWise方法，并对每种方法的原理和特点进行了分析。根据分析的结果，可以得到如下结论：

（1）从方法计算效率的角度考虑，PointWise方法的效率最高。具体来说，假设存在N个待排序候选项，PointWise方法对每个候选项进行打分，计算时间复杂度为O(N)；PairWise方法需要计算候选项两两之间的相对位置关系，最坏情况下需要进行N(N-1)/2次计算，时间复杂度为O(N2)；ListWise方法需要计算模型预测结果输出的概率分布，为此需要计算N个候选项的每一种可能的排列序列的出现概率，计算次数等于其全排列数，即N！。因为O(N!)>O(N2)>O(N)，所以PointWise方法是三种训练方法中时间复杂度最低的一种，训练效率最高，适合用于样本数量大、时效性要求高的应用场景。

（2）从排序精准度的角度考虑，ListWise方法的排序效果通常优于另外两种方法。论文【】在OHSUMED数据集上进行了实验，对比了多种排序算法的效果，实验结果如下表所示：

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **训练方法** | **算法** | **评价指标** | |
| **NDCG@5** | **NDCG@10** |
| PointWise方法 | Regression | 0.4278 | 0.4110 |
| PairWise方法 | Ranking SVM | 0.4164 | 0.414 |
| RankBoost | 0.4494 | 0.4302 |
| ListWise方法 | SVM-MAP | 0.4516 | 0.4319 |
| ListNet | 0.4432 | 0.441 |
| ListMLE | 0.4471 | 0.4319 |

从实验结果可以看出，使用ListWise方法进行训练的排序算法的相关评价指标通常高于PointWise方法和PairWise方法中的算法。另外，在2010年举办的Yahoo Learning to Rank Challenge中，ListWise方法中的基于RankNet算法和LambdaRank算法改进得到的LambdaMART算法表现出了最佳的性能。综上所述，在对排序精准度要求较高的应用场景中，使用ListWise方法对排序模型进行训练更为合适。

除此之外，排序模型训练方法的选择还需要考虑训练数据的具体形式。ListWise方法因为需要计算模型预测输出序列的概率分布与候选项的真实排序序列的概率分布之间的差异，所以要求训练数据必须包含每个候选项的准确排序得分值。例如亚马逊网站中用户对商品的评价打分数据，和IMDb数据库中用户对电影的评分数据等显示反馈数据都属于此类。而在更多的应用场景中，训练数据只能通过对日志数据中的隐式反馈进行挖掘而得到。大部分隐式反馈数据，如广告点击、新闻阅读、商品购买等行为数据，都是以二值分类的形式给出，而并非ListWise方法所需要的连续数值类数据。在这种情况下，只能选择使用PointWise训练方法，将排序问题转化为分类问题进行建模。

综上所述，本课题设计的排序模型针对不同的应用场景的需求和特点，分别使用PointWise方法和ListWise方法进行训练。具体来说，在训练样本数量大，对排序效率要求较高，以及训练目标数据的类型为二值分类的隐式反馈数据等场景下，使用PointWise方法训练排序模型。在对排序精准度要求高，能够获取到待排序候选项的数值型排序得分作为训练数据的情况下，使用ListWise训练方法。

## 排序打分算法模型选择

排序打分函数是排序模型的核心部分，使用何种算法模型对排序打分函数进行拟合是排序学习中的关键问题之一。本文在3.3.1节中对常用的算法模型的原理和特点进行了介绍，下面将通过实验对比分析各模型的实际应用效果。因为本课题所设计的排序模型在不同应用场景下，会分别以类别型数据和连续数值型数据作为学习的目标，所以对比实验分别针对分类任务和回归任务使用不同的数据集进行。本文使用的数据集取自加州大学欧文分校的UCI数据库。UCI数据库是机器学习领域常用的标准测试数据来源，现总共包括335个数据集，且其数量还在不断增长，其中包括知名数据集鸢尾花（Iris）、人口收入普查（Adult）和葡萄酒（Wine）等。

### 分类任务效果对比

针对分类任务的实验部分，本文使用了UCI数据库中的人口收入普查数据集和威斯康星州乳腺癌诊断数据集，下面分别简称为Adult数据集和Cancer数据集。其中Adult数据集从美国1994年的人口普查数据库中抽取得到，其学习目标是根据人口特征预测其年收入水平。Adult数据集共包含48842个训练样本，每条样本包括14个属性特征，包括年龄、人种、受教育水平、职业、每周工作时间等，从特征的数据类型上分为7个类别型特征和7个连续型数值特征，数据集的预测目标为该人员的年收入是否超过50k美元。Cancer数据集则是从1995年美国威斯康星州的乳腺癌诊断记录数据库中收集得到，用于根据从医疗图像中提取出的各项病理特征判断乳腺癌的种类。Cancer数据集共包含569条训练样本，其中每条样本包括32个分类特征和1个分类标识，特征的数据类型全部为连续数值类型，具体包括细胞半径、质地的灰度值标准偏差、光滑度等，分类标识为乳腺癌的种类，即良性或恶性。Adult数据集和Cancer数据集都是标准的二分类问题数据集，非常适合用于评价算法模型处理分类任务的能力和效果。

本文使用Adult数据集和Cancer数据集，对逻辑回归、分解机、GBDT、多层感知机和宽度&深度模型五种算法模型分别进行了实验测试。其中，逻辑回归和多层感知机模型使用了知名机器学习算法工具库scikit-learn中实现的模型组件，分解机模型使用了由其发明者提供的开源库libFM，GBDT模型分别使用了scikit-learn中提供的版本和其改进后的开源实现XGBoost，宽度&深度模型则使用深度学习框架TensorFlow实现。实验过程针对两个数据集进行了简单预处理，具体包括空缺属性值填充、连续数值型特征的标准化、类别型特征的独热编码等，同时分别按照20%：80%的比例将两个数据集划分为训练集和测试集，并对各模型的参数进行了调优，实验结果评估部分选用分类准确率和AUC值两项评价指标衡量各算法模型的分类效果。具体实验结果如下面的两个表格所示：

Adult数据集

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **算法模型** | **评价指标** | |
| **准确率** | **AUC** |
| 逻辑回归 | 0.9011 | 0.8625 |
| 分解机 | 0.9225 | 0.8697 |
| GBDT | 0.9213 | 0.8681 |
| XGBoost | 0.9286 | 0.8706 |
| MLP | 0.9101 | 0.8711 |
| 宽度&深度模型 |  |  |

Cancer数据集

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **算法模型** | **评价指标** | |
| **准确率** | **AUC** |
| 逻辑回归 | 0.9473 | 0.9947 |
| 分解机 | 0.9415 | 0.9962s |
| GBDT | 0.9310 | 0.9989 |
| XGBoost | 0.9298 | 0.9983 |
| MLP | 0.9643 | 0.9991 |
| 宽度&深度模型 |  |  |

（结论待补充）

### 回归任务效果对比

本文对各算法模型处理回归任务的能力的实验测试部分选用了UCI数据库中的森林火灾数据集和葡萄酒质量数据集。其中，森林火灾数据集的训练目标是利用气象及其他特征数据预测发生在葡萄牙东北部地区的森林火灾所造成的烧毁区域面积。森林火灾数据集共包含517条训练样本，每条样本包含13维度的特征，具体包括火灾发生的月份、火灾发生时的风速和降水量及森林火险气候指数系统所提供的各项监测指标等，特征全部为连续数值型特征，回归预测的目标为由实数表示的森林焚毁面积。葡萄酒质量数据集由Paulo Cortez于2009年收集得到，目的是通过建立模型实现基于物理化学测试的结果预测葡萄酒的质量。该数据集共包括4898条样本数据，每条样本含有12个连续数值类型的特征值，包括葡萄酒样本的酸度、密度、pH值、酒精含量等物理化学属性信息，回归预测的目标为葡萄酒样本的质量，使用取值为0到10的得分数表示。

关于实验算法模型的选择部分，因为要处理的是回归预测问题，本文将分类任务实验部分中的逻辑回归算法替换为线性回归算法，同时修改了分解机、GBDT等算法模型中的相关参数。实验结果评估部分分别使用平均绝对误差MAE和平均平方误差MSE两项评价指标计算各模型预测结果与真实值之间的误差。实验详细结果如下面的两个表格所示。

森林火灾数据集

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **算法模型** | **评价指标** | |
| **MAE** | **MSE** |
| 线性回归 | 23.75 | 1950.59 |
| 分解机 | 21.88 | 1876.76 |
| GBDT | 17.93 | 1405.75 |
| XGBoost | 14.23 | 1589.91 |
| MLP | 18.14 | 1654.38 |
| 宽度&深度模型 |  |  |

葡萄酒质量数据集

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **算法模型** | **评价指标** | |
| **MAE** | **RMSE** |
| 线性回归 | 0.5415 | 0.4957 |
| 分解机 | 0.5132 | 0.4016 |
| GBDT | 0.5134 | 0.3994 |
| XGBoost | 0.5085 | 0.3979 |
| MLP | 0.5136 | 0.4320 |
| 宽度&深度模型 |  |  |

（实验结论）

### 排序打分模型设计

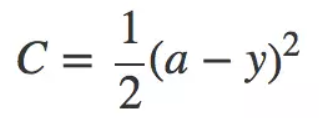
## 损失函数及优化方法选择

损失函数和优化方法的选择是深度学习中的两个重要问题。其中，损失函数作为算法模型的优化目标，直接影响模型参数的更新过程及模型最终的训练效果。而优化器选择的合适与否，则会决定神经网络模型训练过程的收敛速度，以及是否会陷入局部最优的情况。针对这两个问题，本文对目前常用的几种损失函数和优化方法进行了分析对比，并说明了课题的选择和理由。

### 损失函数

深度学习中常用的损失函数包括平方损失函数、绝对值损失函数和交叉熵损失函数等。使用表示神经网络单元的输出，和分别表示权值参数向量和偏移量，表示需要预测的真实值，表示误差损失，则绝对值损失函数表示为：

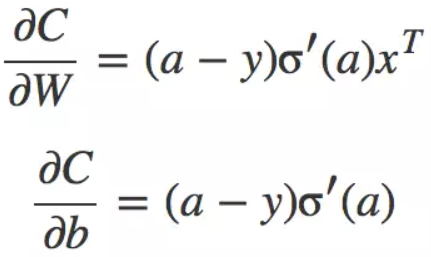
平方损失函数的定义为：



交叉熵损失函数的定义为：



线性模型通常使用绝对值损失函数或平方损失函数，而在深度神经网络模型中，交叉熵损失函数则更为合适。这是因为当使用反向传播算法训练模型时，根据链式求导法则，对于平方损失函数，权值参数和偏置的梯度更新公式为：



可以看出，权值参数和偏置的梯度更新公式中均包含激活函数的导数项（sigmaA）。当神经网络模型使用Sigmoid、Tanh等函数作为激活函数时，大部分情况下其导数值会落在左右两边的饱和区间中，对应导数值较小，导致参数的更新过程非常缓慢。

### 优化方法

深度神经网络模型常用的优化方法包括随机梯度下降方法（SGD）、Momentum方法、Adagrad方法、Adam方法等。下面分别对每种方法的原理和特点进行分析说明。

* SGD

梯度下降方法作为机器学习最为常用的一种优化方法，具有计算简单、快速迭代等优点。梯度下降法包括批量梯度下降法（Batch Gradient Descent， BGD）、随机梯度下降（Stochastic Gradient Descent，SGD）和小批量梯度下降法（Mini-batch Gradient Descent，MBGD）三种形式。三种方法的区别在于每次计算梯度进行参数更新时使用的样本数量不同：批量梯度下降方法每次使用全部样本，随机梯度下降方法每次使用一条样本，而小批量梯度下降方法作为前两种方法的折中，每次使用固定数量（Batch Size）的样本计算梯度值。其中，批量梯度下降方法使用由全部样本计算得到的梯度更新参数，能够保证在全局方向上的优化，但是当样本数量很大时计算效率十分低下；随机梯度下降方法迭代速度快，但是无法保证每次更新都朝向全局最优方向。

深度学习中使用的随机梯度下降方法，实际上指的是小批量梯度下降法，只是将固定数量的样本视为计算单位。使用表示学习速率，表示第t轮迭代时的梯度，参数的更新公式为：

随机梯度下降方法的主要缺点在于即使使用了小批量样本数据作为梯度计算单位，收敛过程仍然存在震荡现象，且在用于非凸函数优化时容易陷入局部最优的陷阱。

* Momentum

针对随机梯度下降方法存在的参数更新不稳定的问题，Momentum方法提出了一种改进方法，即引入动量（Momentum）因子，这也是该方法名称的由来。

Momentum方法的主要思想是参数在每一轮更新时，会在一定程度上延续上一轮的更新方向，同时使用当前的梯度对更新方向进行调整。Momentum方法的参数更新公式为：

其中，即表示动量因子，值域为[0, 1]，表示在多大程度上保持此前的更新方向。代表学习速率，表示当前梯度值对更新方向的影响程度。通过调整和的取值，可以控制参数的最终更新方向在两个影响因素上的分布比例。

Momentum方法还有一种改进形式，称为Nesterov Momentum方法。该方法的主要思想如下图所示：



Nesterov Momentum方法的参数更新过程为：首先沿此前的更新方向更新一步，并计算结果位置的梯度值，再使用梯度值进行一步更新，并修正得到最终的更新方向。参数更新公式为：

* Adagrad

上面介绍的优化方法都存在一个共同的问题，即对于所有的参数都使用了相同的更新速率。而实际上各参数的收敛速度并不一致，当某些参数到达仅需要细微调整的阶段时，另一些参数可能因为训练样本数量较少等因素而导致仍然需要进行较大幅度的更新。针对这一问题，有研究者提出了一种称为Adagrad的优化方法，顾名思义，该方法能够在不同参数上自适应的选择合适的学习速率。Adagrad方法的公式为：

其中，表示当前的梯度，表示参数的历史梯度，表示初始学习速率。因为Adagrad方法能够自适应的调整学习速率，所以的取值的影响不大，通常将其设为一个较小的正数值来保证分母非零。Adagrad方法通过记录每个参数的历史更新过程，使其学习速率随着更新的总距离的增加而逐渐减少，这样就使得每个参数在训练开始阶段能够以较大的幅度进行更新，并随着迭代次数的增加而逐步趋于稳定，即实现不同参数各自学习速率的自适应调整。

* Adam

Adam方法是Momentum方法和Adagrad方法的结合，该方法使用动量因子加速参数收敛过程、减少震荡，同时针对不同参数自适应地动态调整其学习速率。Adam方法的公式为：

（公式）

其中，和分别表示对当前梯度的一阶矩估计和二阶矩估计，即对期望XX和XX的估计，而XX和XX是对估计和的修正，其结果近似于对期望的无偏估计。Adam方法结合了Momentum方法和Adagrad方法的优点，即适用于处理稀疏梯度和非平稳目标函数，同时通过偏置校正使得每一轮迭代的学习速率保持在一个确定范围之内，保证了参数更新过程的平稳性。多项实验结果表明，相比于其他方法，使用Adam方法作为优化方法能够取得更好的效果。综上所述，本课题选择使用Adam方法作为深度神经网络模型的参数优化方法。

## 历史行为数据处理

如3.4.2节所介绍，历史行为数据是排序模型中的一类十分重要的数据类型。通过挖掘历史行为数据，对行为习惯偏好进行建模并抽取出对应特征，对于提高模型排序结果的精准度有重要意义。如果使用目前常用的按时序连接的方法处理历史行为数据，会产生历史行为记录数据数量不一致、特征向量长度不固定的问题。如果采用截断补齐的处理方法，虽然解决了特征向量长度不固定的问题，但是又会引起数据信息丢失或与真实行为产生偏差。此外，简单的按照时间顺序对历史行为记录进行连接并没有充分利用到数据中蕴含的时序关系和前后关联特性。对于上面提出的这些问题，本课题进行了针对性的研究，并提出了一种使用循环神经网络模型对历史行为数据进行编码的解决方案。

这种解决方案的思路来源于循环神经网络的特点和自然语言处理领域使用的编码器模型。循环神经网络模型由于其独特的结构设计，十分适合用于对时间序列数据进行建模。编码器模型则常被用于在自然语言处理领域的机器翻译、问答系统等问题中，将文本序列编码成语义向量。图【】描述了历史行为数据编码模型的详细结构。

（编码器结构图）

如图所示，历史行为数据编码模型的主体结构为包含一层隐含层的循环神经网络模型。模型的输入为每条历史行为数据对应的特征向量，输出为每条历史行为对应的标签特征向量，这里的标签指的是历史行为的结果，如点击的网页、购买的商品、阅读的新闻等。因为标签通常是类别型的数据，所以需要进行如独热编码等编码操作得到标签特征向量。使用历史行为数据对编码模型进行训练，最终可以得到模型隐含层对应的一组参数，这组参数即为模型对历史行为数据的编码结果。

## 本章小结

本章主要介绍了本课题对于基于深度学习的排序模型中的关键问题的相关研究成果和给出的解决方案。针对不同应用场景下的排序任务，本课题分别使用PointWise方法和ListWise方法进行模型训练。本文使用UCI数据库中的公开数据集，分别对各个算法模型在分类和回归任务下的性能效果进行了实验，根据实验结果，确定使用深度神经网络模型、广义线性模型和梯度提升树模型组合得到的融合模型作为拟合排序打分函数的算法模型，同时确定使用交叉熵函数作为深度神经网络模型的损失函数，并使用Adam方法作为模型参数的优化方法。此外，本章还提出了一种基于循环神经网络的历史行为数据编码器模型，解决了此前历史行为数据相关处理方法存在的一系列问题。

# 基于深度学习的排序模型设计与实现

本文在第四章对基于深度学习的排序模型中的模型训练方法、打分算法模型、损失函数和优化方法的选择以及历史行为数据的处理方法等关键问题进行了详细的分析，并介绍了本课题的相关研究成果和针对以上问题给出的解决方案。在此基础上，本章阐述了排序模型的详细设计与实现方案，具体包括模型的总体结构设计，功能模块的划分及每个模块的具体功能设计等内容。最后，本章将课题提出的排序模型用于解决地铁单边交易处理问题，对模型的效果进行了验证。

## 基于深度学习的排序模型设计

### 模型总体结构设计

基于深度学习的排序模型的总体结构设计如图【】所示：



模型整体分为两个主要模块：模型训练模块和排序模块。其中，模型训练模块的主要功能为基于训练数据集训练得到用于拟合排序打分函数的算法模型，具体划分为四个层次，包括数据采集层、数据预处理层、特征抽取层和模型训练层。排序模块的主要功能为使用模型训练模块产出的打分模型，针对具体的排序任务给出预测序列结果。排序模块主体流程分为四个步骤，分别为候选集生成、排序特征构造、模型打分和排序结果输出。下面分别对两个模块的结构和功能进行具体介绍。

### 模型训练模块

模型训练模块属于排序模型的离线计算部分，模块的核心功能是生成用于对待排序候选项进行评分的算法模型。模型训练模块包含从获取训练数据到算法模型产出的全部流程，自底向上具体划分为数据采集层、数据预处理层、特征抽取层和模型训练层四个层次。

* 数据采集层

数据采集层主要完成训练数据的收集功能。训练数据的来源主要包括历史日志数据和人工标注数据。其中，人工标注数据中的记录具有连续数值型的排序得分，而历史日志数据则根据显示反馈和隐式反馈类型的不同，其样本的排序预测标记可能为类别型或数值型数据。

* 数据预处理层

数据预处理层的主要功能为对从数据采集层获取的原始数据记录进行初步整理，主要操作包括数据采样、数据清洗、数据变换等。数据预处理层的具体功能设计如图【】所示。



其中，数据清洗操作具体包括无效数据删除、缺失值填补等处理过程。在数据采集层中，由于人工失误或系统故障等无法避免的因素的影响，原始数据记录中可能包含明显偏离常值的异常数据，或是混入其他噪声数据。如果不事先将这部分无效数据从训练集中剔除，则将严重影响算法模型最终的预测效果。同时，对于记录属性存在缺失的样本数据，需要进行缺失值填补处理，具体方法包括使用统一标记填补、使用平均值填补或将存在缺失的数据记录直接删除等。

当训练数据为从日志中挖掘得到的隐式反馈数据时，本课题所提出的排序模型会使用PointWise训练方法，将排序问题转化为二分类问题进行求解。在这种情况下，正负样本的数量比例通常极不平衡，因此需要对原始数据记录进行采样。采样方法包括过采样和欠采样，其中过采样方法通过采用复制等手段增加少数样本的数量，使样本比例达到平衡，而欠采样则是通过删除一部分多数样本的方法达到平衡。采样方法的选择需要根据具体应用场景确定，通常情况下，在大规模数据集上使用欠采样，小规模数据集上使用过采样效果较好。

数据变换是数据预处理层的一个关键步骤，包括类别型数据的编码，连续数值型数据的规范化、离散化等操作。多数算法模型，如逻辑回归模型、GBDT模型等，都无法直接处理类别型特征，因此在训练前必须先将类别型数据转换为数值型数据，常用编码方法包括独热编码或使用类别的Embedding表示等。对数值型数据进行规范化处理，有助于提高模型参数优化的收敛速度，而离散化操作能够使数据特征更加突出，有助于提高模型对特征信息的提取能力。

* 特征抽取层

特征抽取层实现了从样本数据记录中提取特征构造训练集的功能，主要包括特征构造、特征组合和特征筛选等过程。

特征构造过程具体可以分为子特征构造、统计特征构造、历史行为特征构造三个部分。其中，子特征构造指的是对于每一维度的原始特征，将、等的非线性变换形式作为新的特征加入到模型中。子特征构造增强了模型的非线性处理能力，能够在很大程度上提升逻辑回归、分解机模型等线性模型的预测效果。统计特征构造指的是将在训练样本上计算得到的相关统计量作为新特征，例如某两个特征的共同出现次数、特征与预测目标间的相关函数等。历史行为特征构造是本课题特别提出的一种特征构造方法，该方法的具体介绍已在4.4节给出，这里不再赘述。

特征组合操作同样能够增强模型的非线性表达能力，同时还能起到个性化建模的作用。对于大规模训练样本而言，使用全部数据训练模型可能会忽略掉样本的局部特征，对每一类样本建模又存在模型数量过多、单类样本数量少、容易过拟合等问题。特征组合方法在一定程度上弥补了上述不足，较好的兼顾了训练样本的全局特性和局部差异。

特征筛选过程对各维度特征的有效性进行衡量，并确定最终的模型输入特征向量。特征筛选过程需要权衡模型的预测效果和计算效率，选取有效特征的Top-K作为模型输入。基于深度学习的排序模型使用过滤法和集成法进行特征筛选，即先通过计算方差、相关系数等指标过滤无效特征，再使用GBDT模型进行预训练得到各维度特征的重要性。

* 模型训练层

模型训练层接收特征抽取层输出的训练集，完成各个基础模型的训练及模型融合等步骤，输出最终得到的排序打分模型。

模型训练层包含三种基础模型，分别是深度神经网络模型、包含组合特征的广义线性模型和GBDT模型。其中，深度神经网络模型和广义线性模型通过宽度&深度模型的形式进行组合，得到的组合模型再和GBDT模型进行堆叠融合。根据训练方法的不同，高层模型分别使用线性回归模型和逻辑回归模型。

通过这种方法训练得到的融合模型，兼顾了三种模型各自的优点，具备较强的稀疏特征学习能力和非线性表达能力，相比于单一的基础模型具有更好的排序效果。

### 排序模块

排序模块的主要功能为使用模型训练模块得到的打分算法模型对待排序候选项进行评分，并按照得分高低将排序结果序列返回。排序模块的主要操作步骤包括候选集生成、排序特征构造、模型打分和排序结果输出等。

其中，候选集生成步骤实现从全部资源中筛选出待排序候选项的功能。候选集生成通过规则结合简单算法模型的方式实现，具体方法包括使用基于关键字的倒排索引结构、使用待排序项的PageRank值及历史排序得分等。候选集生成步骤的主要作用是缩小排序打分模型的输入数据规模，减少计算量，提高排序模型的实际可用性。

在候选集生成步骤筛选得到待排序候选项集合后，由排序特征构造步骤完成打分模型输入特征向量的拼接功能。特征向量由排序条件特征、候选项属性特征、历史数据特征等部分组成。排序特征构造步骤的作用是将上述特征组织成与模型训练模块中使用的训练集特征相同的形式，以便使用训练得到的算法模型进行排序打分。

模型打分步骤分为两个阶段：粗排阶段和精排阶段。待排序候选项集合首先由线性算法模型构成的粗排模型进行打分，得到排序预测得分后，取得分最高的前K个候选项送入由融合模型构成的精排模型，由精排模型进行打分并得到最终的排序序列。使用这种结构设计的原因是模型训练模块得到的融合模型的结构比较复杂，虽然候选集生成步骤过滤了大部分不相关资源，但是通常情况下得到的待排序候选项的数量仍然较多，使用融合模型对每一个候选项进行打分的计算量偏大，无法满足在线排序等使用场景的要求。而通过使用这种分层排序的模型结构，由粗排模型对待排序候选项集合进行了二次过滤，进一步减少了候选项的数量，再由精排模型控制最终的排序质量，保证了模型对排序效果和计算效率的兼顾。

排序结果输出步骤负责根据排序应用场景的特点将结果以合适的形式进行呈现。例如将全部待排序候选项按照其排序得分高低组织成序列输出，或将得分最高的候选项单独输出等。

## 排序模型在地铁单边交易处理中的应用

### 问题描述及分析

地铁单边交易数据，指进站或出站信息存在缺失的交易记录，是地铁运行过程中不可避免会产生的一类异常交易数据。为了保证地铁运营的有序进行，需要对单边交易数据进行合理的处理。单边交易数据因为进出站信息的缺失，无法进行准确计费，目前通常的处理方法是按照最长距离收取费用，然而这种方法容易导致用户的经济损失，引发纠纷或投诉。为了改进地铁单边交易的处理方法，减少乘客和地铁运营公司的损失，本课题应用所提出的基于深度学习的排序模型，利用历史交易数据和单边交易记录中的已知信息对缺失站点信息进行预测，给出站点或票价的预测概率序列，为业务系统提供参考信息，以确定适当的计费方式。

地铁单边交易数据处理的核心问题是对交易的应扣费额进行预测。针对该问题存在两种解决思路，第一种思路是先对缺失的进出站信息进行预测，再根据预测结果计算应扣票价；第二种思路是以应扣费额作为目标训练模型，直接输出单边交易的应扣费额在各档费用上的分布概率。以站点作为预测目标的方法能够给出计费的依据，预测结果更具有说服力，但存在的主要问题是站点数量偏多，每个站点对应的训练样本数量偏少且存在严重的样本不平衡问题，因此预测准确率相比于以应扣费额作为预测目标的方法较低；以应扣费额作为预测目标的方法则恰恰相反，因为票价的种类较少，每种票价能够对应更多数量的训练样本且样本在不同票价类别中的分布更加均衡，这使得针对应扣费额的预测具有更高的准确率。

针对站点或票价的预测可以通过多类别分类或回归预测的方法解决。本课题将该问题转化为排序问题，使用历史交易数据训练得到排序模型，对于包含缺失信息的单边交易记录，由排序模型预测站点/票价的概率序列，并根据排序结果制定计费策略。下面详细介绍对于该问题的处理过程，并对相关实验结果进行分析。

### 问题处理过程

问题的处理过程主要分为训练集构造、排序模型训练和效果测试等步骤。其中，训练集的数据来源为广州地铁交易数据记录，共包含XXXX条样本。原始数据记录中包含

### 实验结果及分析

## 本章小结

本章首先介绍了基于深度学习的排序模型的总体结构设计，并对模型训练模块和排序模块两个主要组成模块的结构和功能进行了详细说明。其中，模型训练模块按照其层次划分，分别对数据采集层、数据预处理层、特征抽取层和模型训练层四个层次的具体设计和功能进行了阐述；介绍了排序模块中候选集生成、排序特征构造、模型打分和排序结果输出四个关键步骤各自的具体操作和实现方式。最后，将提出的基于深度学习的排序模型应用于地铁单边交易处理问题，从预测准确率等方面测试了排序模型的性能，实验结果显示该模型相比其他算法模型具有更好的预测效果，同时与传统处理方式相比，基于该排序模型的地铁单边交易处理方法更加合理。

# 总结与展望

## 论文总结

（1000字）

随着互联网行业的不断发展，电子文档优势日益明显，针对各类文档格式所进行的数据采集和数据挖掘工作逐渐成为近年来的研究热点。本文提出了一种基于PDF的表格提取方法，并通过将该方法应用于上市公司财务报表数据的提取证明了本方法的有效性和实用性。由于表格解析是基于表格框线的绝对位置信息完成的，因此在处理复杂表格以及表格识别准确率上较其他方法具有更高的准确性。下面归纳总结本课题的几个技术难点：

1. 由于PDF特殊的文档结构，对PDF进行表格解析具有一定的难度。市场上针对PDF的表格提取工具并不多，且都非开源。本课题独创性的修改了PDFBox的源码完成了针对PDF格式文档的表格特征提取。从表格的线条和文字位置信息入手设计相关算法完成表格的识别和提取，经测试解析效果良好。
2. 本方法的表格解析是基于表格框线的绝对位置信息完成的，因此在处理复杂表格和解析正确率上相对单纯基于文字流的识别算法都有了明显的改进。对于复杂表头处理，由于框线位置信息已知，能够较好的识别首行跨列、首列跨行等特殊情况。同时实现了复杂表头的简化并最终实现复杂表头和简单表头的归一处理。在解析正确率方面，由于所有的线条和文字信息都是已知的，因此能有效的避免文字错分，文字击穿等问题，因此识别准确率也相应增加。
3. 对于表格结构的识别，本课题提出了两种处理思路。综合考虑了表格的物理特征和表格的内容特征，经测试具有良好的识别效果。表格格式识别的多样性也确保了本方法表格识别的通用性，多样化了本方法的应用场景。
4. 本课题以解析财务报表为例展示了方法的实用性，通过测试，查全率能够达到70%，查准率可达到87%。已经可以较好了实现自动化的表格提取。事实上各类金融终端产品都涉及财务F10数据的采集，采用本方法能有效的减少人工介入，提高效率，具有较强的实际应用价值。

综上所述，本课题所研究的基于PDF的表格数据抽取具有较高的准确率和较好的通用性。同时通过对2000加公司2012到2013年的财务报表进行解析测试验证了本方法的有效性和实用性。随着PDF文档应用场景的不断丰富，相信本方法在表格解析方面将会有更多的实际应用价值。

## 工作展望

由于本方法依托表格框线进行表格解析，虽然在处理复杂表格以及解析查准率方面具有优势，但查全率方面仍然有待完善，具体总结如下：

1. 对于无框线表格的处理有待解决：无框线表格即肉眼可分辨行列但没有框线划分的表格。此类表格的处理本方法没有涉及，因此总体查全率不高。后续可以通过分析文字流位置信息对文字进行划分，栅格化处理等完成表格的还原。
2. 跨页表格的合并：本课题针对跨页表格的合并问题已经提出了一种解决方案。但是由于现有方案只考虑到行列数目以及绝对位置信息等物理信息，并没有从表格内容的方面进行考虑。因此在测试中发现依然存在表格信息不完整的问题。后续改进可以结合表格内容进行，针对不同类型的表格建立词典库，以避免表格解析信息不完整的问题。
3. 表格结构的识别：对于类型已知的表格（如金融类等），采用基于内容的属性识别具有较高的准确度。但对于普通表格，单纯利用行列单元格内的文字数目特征判定准确度依然不高。可考虑加入其他与类别无关的内容特征。如单元格中的数值占比，文字粗细，颜色等因素。

# 参考文献

<https://www.google.com/,google>搜索引擎

<http://open.weibo.com/>,新浪微博开放平台

<http://dev.t.qq.com/>,腾讯微博开放平台

<http://open.t.sohu.com/>,搜狐微博开放平台

PDF Reference sixth edition, Adobe PDF第六版官方文档

<https://pdfbox.apache.org/,PDFBox>开源项目

Liu Y, Wu G Q, Hu X G. A web table extraction algorithm based on tree edit distance[C], Conference Anthology, IEEE. IEEE, 2013: 1-6.

Cha S, Ma Z, Cheng J, et al. Learning of ontology from the web-table[C], Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 2011 Eighth International Conference on. IEEE, 2011, 3: 1454-1458.

赵洪,肖洪,薛德军,等. Web表格信息抽取研究综述[J].现代图书情报技术, 2008, 3: 24-31.

林科锵.Web页中表格结构识别的研究与实现[J].成都:电子科技大学, 2006.

袁鸿雁.基于本体的Web表格信息抽取技术的研究[J].青岛大学学报:自然科学版, 2010, 23(2): 47-51.

B. Yildiz, K. Kaiser, and S. Miksch. pdf2table: A method to extract table information from pdf files. In IICAI, pages 1773–1785, 2005.

Hassan T, Baumgartner R. Table recognition and understanding from pdf files[C], Document Analysis and Recognition, 2007. ICDAR 2007. Ninth International Conference on. IEEE, 2007, 2: 1143-1147.

Liu Y, Bai K, Mitra P, et al. Improving the table boundary detection in pdfs by fixing the sequence error of the sparse lines[C], Document Analysis and Recognition, 2009. ICDAR'09. 10th International Conference on. IEEE, 2009: 1006-1010.

Deivalakshmi S, Chaitanya K, Palanisamy P. Detection of table structure and content extraction from scanned documents[C], Communications and Signal Processing (ICCSP), 2014 International Conference on. IEEE, 2014: 270-274.

Kasar T, Barlas P, Adam S, et al. Learning to Detect Tables in Scanned Document Images using Line Information[C], Document Analysis and Recognition (ICDAR), 2013 12th International Conference on. IEEE, 2013: 1185-1189.

李效东,顾毓清.基于DOM 的Web信息提取[J].计算机学报, 2002, 25(5): 526-533.

Hurst M. Classifying table elements in html[C], 11th International Conference on World Wide Web (WWW 2002), Poster Paper. 2002.

Y. Wang and J. Hu, “A Machine Learning Based Approach for Table Detection on the Web,” Proc. 11st Int’l World Wide Web Conf. (WWW 2002), pp. 7-11, 2002.

S. W. Jung, M. Y. Kang, H. C. Kwon, “Hybrid Approach to Extracting Information from Web-Tables,” LNAI 4285, pp. 109-119, 2006.

S. W. Jung, M.Y. Kang, H.C. Kwon, “Constructing Domain Ontology Using Structural and Semantic Characteristics of Web-Table Head,” LNAI 4570, pp. 665-674, 2007.

于伯峰. 印刷体中文文档中表格和汉字的识别研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2011.

李海涛,张小惠.一种统计特征点网格分布的表格图像识别方法[J].华中科技大学学报: 自然科学版, 2002, 30(9): 60-63.

蒋东玉,田英鑫.图像中表格转换成 HTML 表格的研究与实现[J].黑龙江科技信息, 2014, 24: 184.

邵全. 基于 Hough 变换的表格倾角检测[J]. 科技信息 (学术研究), 2007, 16.

Zheng Y., Liu C. Ding x., Pan S.,"Form Frame Line Detection with Directional Single-Connected Chain", Proc. of the 6th Int. Conf.on Doc. Anal. & Recognition, pp. 699-703, 2001.

Thomas G. Kieninger, "Table Structure Recognition Based on Robust Block Segmentation", German research center for artificial Intelligence, 1998.

刘长松,潘世言.一种表格框线检测和字线分离算法[J].电子与信息学报, 2002, 24(9): 1190-1196.

郑冶枫, 刘长松,丁晓青,等.基于有向单连通链的表格框线检测算法[J].软件学报, 2002, 13(4): 790-796.

张伯.基于PDF文字流的表格识别技术的研究[D].北京工业大学, 2010.

Oro E, Ruffolo M. Pdf-trex: An approach for recognizing and extracting tables from pdf documents[C], Document Analysis and Recognition, 2009. ICDAR'09. 10th International Conference on. IEEE, 2009: 906-910.

Yoshida M, Torisawa K, Tsujii J. A method to integrate tables of the world wide web[C], Proceedings of the International Workshop on Web Document Analysis (WDA 2001). 2001: 31-34.

Gu Y, Ji L, Jiang Z, et al. Endless and scalable knowledge table extraction from semi-structured websites[C], Data Mining Workshops (ICDMW), 2012 IEEE 12th International Conference on. IEEE, 2012: 835-842.

Ramel J Y, Crucianu M, Vincent N, et al. Detection, extraction and representation of tables[C], Document Analysis and Recognition, 2003. Proceedings. Seventh International Conference on. IEEE, 2003: 374-378.

Wang Y, Phillips I T, Haralick R. Automatic table ground truth generation and a background-analysis-based table structure extraction method[C], Document Analysis and Recognition, 2001. Proceedings. Sixth International Conference on. IEEE, 2001: 528-532.

Yuan F, Lu B. A new method of information extraction from PDF files[C], Machine Learning and Cybernetics, 2005. Proceedings of 2005 International Conference on. IEEE, 2005, 3: 1738-1742.

潘小燕, 孙承杰, 刘远超, 等. 半结构化文本中的表格识别技术研究[J]. 微计算机信息, 2008, 24(18): 198-199.

# 附录

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 缩略语 | 全称 | 描述 |
| PDF | Portable Document Format | Adobe公司发布的跨平台文件格式 |
| HTML | Hyper Text Markup Language | 超文本标记语言 |
| JSON | JavaScript Object Notation | 一种轻量级数据交换格式 |
| DOM | Document Object Model | 文档对象模型 |

# 致 谢

时光飞逝，转眼之间两年半的研究生生活就要结束了。在这段时间里，我通过努力学习提高了自身的知识水平，同时也感受到了学术科研带来的乐趣。攻读硕士学位期间，我通过参加课程和相关学术活动，获取了计算机领域的前沿知识，同时还在实验室的项目中提高了自己的编程水平和分析解决实际问题的能力。两年半的学习生活经历，让我感受到了自身的蜕变和取得的进步。在这里，我要对曾经给予我指导和帮助的老师们及同学们表示由衷的感谢。

首先，我要特别感谢我的导师：闫丹凤老师。闫老师治学严谨、经验丰富，在学习过程和科研工作中，给予了我悉心的指导和帮助。闫老师为我提供了良好的学习环境和各类资源，让我能够有机会锻炼自己，丰富自身的专业知识、提高综合素质。另外，闫老师也在生活上给予我贴心的关怀，让我非常温暖和感动。我会以闫老师为榜样，在今后的工作生活中保持认真踏实的态度，继续前进。

同时，我要感谢项目组中的各位同学。感谢与我同级的柯楠同学、周俊文同学和马超同学，对于学习过程中遇到的问题，他们毫无保留的分享自己的经验，让我受益匪浅，他们勤奋努力、积极向上的精神深深感染了我，督促我不断进步。感谢崔剑飞师弟、陈积源师弟，他们协助我完成了论文中的部分实验，给予了我无私的帮助，使我能够顺利完成硕士论文。还有项目组的其他同学，大家的团结协作，使得各个项目能够顺利推进，也让我感受到了团队力量的重要。

此外，我还要感谢一直在我身后默默支持着我的家人和朋友。是他们给与了我生活上的关怀和情感上的慰藉，是他们给予了我前进的动力和坚持的力量。未来，我会继续努力，不会辜负你们的期望。

最后，我要感谢我的母校北京邮电大学。从本科到研究生，我在这里度过了人生中最美好的七年时光。步入社会后，我会牢记母校对我的谆谆教诲，秉承“厚德博学、敬业乐群”的“北邮精神”，时刻以“北邮人”的身份高标准严格要求自己，用自己的行动和成绩为母校增光添彩！

赵 轩

2017年11月30日

# 攻读学位期间发表的学术论文目录

1. TANG H, YAN D, TIAN Y. Semantic dictionary based method for short text classification[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2013, 20: 15-19.