

中图分类号: TP391.4

论文编号: 10006SY2121127

内 部

北京航空航天大学 硕士学位论文

基于 Transformer 的知识图 谱补全算法研究

作者姓名 朱桐

学科专业 软件工程

指导教师 谭火彬 副教授

培养学院 软件学院

Research of Knowledge Graph Completion Algorithm Based on Transformer

A Dissertation Submitted for the Degree of Master

Candidate : Zhu Tong

Supervisor : Assoc. Prof. Tan Huobin

School of Software

Beihang University, Beijing, China

中图分类号：TP391.4

论文编号：10006SY2121127

硕 士 学 位 论 文

基于 Transformer 的知识图谱补全算法研究

作者姓名	朱桐	申请学位级别	工学硕士
指导教师姓名	谭火彬	职 称	副教授
学科专业	软件工程	研究方向	软件工程
学习时间自	2021 年 09 月 01 日	起至	2024 年 05 月 16 日止
论文提交日期	2024 年 01 月 10 日	论文答辩日期	2024 年 03 月 01 日
学位授予单位	北京航空航天大学	学位授予日期	年 月 日

关于学位论文的独创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在指导教师指导下独立进行研究工作所取得的成果，论文中有关资料和数据是实事求是的。尽我所知，除文中已经加以标注和致谢外，本论文不包含其他人已经发表或撰写的研究成果，也不包含本人或他人为获得北京航空航天大学或其它教育机构的学位或学历证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对研究所做的任何贡献均已在论文中作出了明确的说明。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文作者签名：_____ 日期：_____ 年 _____ 月 _____ 日

学位论文使用授权

本人完全同意北京航空航天大学有权使用本学位论文（包括但不限于其印刷版和电子版），使用方式包括但不限于：保留学位论文，按规定向国家有关部门（机构）送交学位论文，以学术交流为目的赠送和交换学位论文，允许学位论文被查阅、借阅和复印，将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，采用影印、缩印或其他复制手段保存学位论文。

保密学位论文在解密后的使用授权同上。

学位论文作者签名：_____ 日期：_____ 年 _____ 月 _____ 日

指导教师签名：_____ 日期：_____ 年 _____ 月 _____ 日

摘 要

摘要是学位论文内容的简短陈述，应体现论文工作的核心思想。论文摘要应力求语言精炼准确。博士学位论文的中文摘要一般约 800~1200 字；硕士学位论文的中文摘要一般约 500 字。摘要内容应涉及本项科研工作的目的和意义、研究思想和方法、研究成果和结论。博士学位论文必须突出论文的创造性成果，硕士学位论文必须突出论文的新见解。

关键字是为用户查找文献，从文中选取出来揭示全文主体内容的一组词语或术语，应尽量采用词表中的规范词（参考相应的技术术语标准）。关键词一般 3~5 个，按词条的外延层次排列（外延大的排在前面）。关键词之间用逗号分开，最后一个关键词后不打标点符号。

为了国际交流的需要，论文必须有英文摘要。英文摘要的内容及关键词应与中文摘要及关键词一致，要符合英语语法，语句通顺，文字流畅。英文和汉语拼音一律为 Times New Roman 体，字号与中文摘要相同。

关键词：北航，学位论文，博士，硕士，中文， \LaTeX 模板， \B\AA T\H E\SS

Abstract

What were you doing 500 years ago? Oh, that's right nothing, because you didn't exist yet. In fact, several generations of your family had yet to leave their mark on the world, but one very special shark may already have been swimming in the chilly North Atlantic at that time, and the incredible animal is somehow still alive today.

Scientists studying Greenland sharks observed the particularly old specimen just recently, and after studying it they've determined that the creature is approximately 272 to 512 years old. That's an absolutely insane figure, and if its age lands towards the higher end, it makes the animal the oldest observed living vertebrate on the entire planet.

Greenland sharks are an incredible species in a number of ways, but most notable is its longevity. The sharks are well over 100 years old before even reaching sexual maturity, and regularly live for centuries. This particularly old specimen, along with 27 others, were analyzed using radiocarbon dating. The reading came back at around 392 years, but potential margin of error means the animal's true age is somewhere between 272 and 512.

The shark, which is a female, measures an impressive 18 feet long. That's pretty large, but it might not sound particularly large for an ocean-dwelling creature that lives hundreds of years. That is, until you consider that the Greenland shark only grows around one centimeter per year. With that in mind, 18 feet is actually downright massive.

As for how this particular shark species manages to live so incredibly long, scientists attribute a lot of its longevity to its sluggish metabolism, as well as its environment. The frigid waters where the sharks thrive is thought to increase overall lifespan in a variety of ways. Past research has shown that cold environments can help slow aging, and these centuries-old sharks are most certainly benefiting from their chilly surroundings.

— Online news *Scientists find incredible shark that may be over 500 years old and still kicking*, 12.16.2017. (<http://bgr.com/2017/12/14/oldest-shark-greenland-512-years-old/>).

Key words: News, BGR, Shark

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 相关研究发展现状	2
1.2.2 对比分析	6
1.3 研究目标及内容	7
1.3.1 研究目标	7
1.3.2 研究内容	7
1.3.3 论文组织安排	8
第二章 相关理论基础	10
2.1 注意力机制与 Transformer 网络	10
2.2 基于 Transformer 的图表示学习方法	12
2.3 知识图谱嵌入方法	12
2.3.1 传统的知识图谱嵌入方法	12
2.3.2 基于图神经网络的知识图谱嵌入方法	12
2.3.3 基于图路径的知识图谱嵌入方法	12
2.3.4 基于 Transformer 的知识图谱嵌入方法	12
第三章 绪论	13
3.1 概述	13
3.2 内容要求	14
3.2.1 封面	14
3.2.2 题名页	15
3.2.3 独创性声明和使用授权书	15
3.2.4 摘要	15
3.2.5 目录	16
3.2.6 图表清单及主要符号表	16
3.2.7 主体部分	16
3.2.8 参考文献	16

3.2.9 附录	17
3.2.10 成果	17
3.2.11 致谢	17
3.2.12 作者简介	17
第四章 说明	18
4.1 宏包使用	18
4.2 选项设置	20
4.3 章节撰写	20
4.4 注意事项	21
4.5 ToDo	21
4.6 意见及问题反馈	22
第五章 示例	23
5.1 参考文献引用	23
5.1.1 数字标注	23
5.1.2 数字标注-上标形式	23
5.1.3 著者-出版年制标	24
5.1.4 其他形式的标注	24
5.2 浮动体	25
5.3 算法环境	25
5.3.1 三线表	25
5.4 长表格	27
5.5 插图	28
5.6 数学环境	29
5.6.1 数学符号	29
5.6.2 定理、引理和证明	30
5.6.3 自定义	31
结 论	33
参考文献	34
附 录	35
攻读硕士学位期间取得的学术成果	36

致 谢	37
作者简介	38

图 清 单

图 1 研究路线示意图	7
图 2 缩放点积注意力机制	11
图 3 多头注意力机制	12
图 4 测试图片第二行题注	29

表 清 单

表 1 各类知识图谱嵌入方法对比分析	6
表 2 学位论文组成	14
表 3 表的标题	26
表 4 让我们看看一个长标题长什么样。还不够长？那我再多写一点。还是不够长？ 那我再多写一点点。OK，就是长这样的！	26
表 5 长表格演示	27

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

论文选题来源于国家重点研发计划课题“稀土催化材料专用数据库及全流程数字化研发平台”，本文研究高效的知识图谱补全方法，为稀土催化材料知识图谱构建和应用提供技术支撑。

稀土是由镧系元素和与其密切相关的钪和钇等化学元素组成，稀土的存在能有效提高催化剂的储氧能力、提高活性金属的分散度、降低贵金属用量、促进水气转化和蒸汽重整反应等性质，在催化材料领域中有着重要的应用。稀土催化材料知识图谱存储着稀土催化材料的合成方式、理化性质、组成结构等重要信息，被应用于稀土催化材料合成等任务中，能够帮助稀土催化材料降低开发成本、减少开发周期。然而，由于稀土材料领域的不断研究发展带来的知识的动态变化，和大多数知识图谱一样，稀土催化材料知识图谱往往是不完全的，难以囊括领域内的所有知识，对其在上层任务中的应用造成了阻碍。因此，为了挖掘图谱内蕴含的丰富信息，完善稀土催化材料知识图谱，知识图谱补全 (Knowledge Graph Completion, KGC)，又称链路预测任务，成为了知识图谱领域的热门研究方向。

知识图谱补全需要挖掘图谱中隐藏的语义信息，但是知识图谱中的事实三元组一般是以文本形式进行储存的，无法直接利用，需要首先寻找一种合适的方式来对语义信息进行表达。传统方法一般通过特征工程进行，效率低且可移植性较差，因此不少研究者投入了自动化知识补全的研究。

目前，知识图谱补全的主流解决方案是知识图谱嵌入 (Knowledge Graph Embedding, KGE)，又称知识图谱表示学习 (Knowledge Graph Representation Learning)。它的核心思想是将图谱中的实体和关系投影到低维向量空间中，通过预先设计好的得分函数 (Scoring Function) 评估事实三元组的合理性，并基于知识图谱中的已有事实，最大化对正确事实三元组的预测概率。通过这种方式获得的嵌入表示不仅可以用于知识图谱补全，还能够用于语义搜索、问答和推荐系统等下游任务中。

传统的知识图谱表示学习方法主要考虑如何在单纯的三元组上进行学习，但这种方式存在较大的缺陷：忽略了知识图谱本身的图结构信息。基于图神经网络的模型通过

学习中心实体的局部邻域结构一定程度上解决了以上的问题，获得了更加优秀的性能，但依然存在不足：首先图神经网络的网络结构较浅，限制了模型的表达能力；另外，基于图神经网络的方法随着网络层数的提升会遭遇过度平滑的问题，导致其只能捕捉单个实体附近 1-2 跳内的局部邻域信息，缺乏利用长距离依赖的能力。针对以上问题，本文研究基于 Transformer 的知识图谱补全方法。Transformer 被公认为是建模序列数据的最强大的神经网络，不少工作致力于研究将 Transformer 网络应用到知识图谱嵌入工作中。本文研究利用 Transformer 强大的表达能力，结合知识图谱中的局部邻域和图路径两种图结构来学习图谱中的短距离依赖、长距离依赖乃至全局信息，实现更加准确的知识图谱补全，支持稀土催化材料知识图谱构建和应用。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 相关研究发展现状

知识图谱 (Knowledge Graph, KG) 的现代含义由 2012 年谷歌知识图谱的发布而确立，它是知识库的一种主要表现形式，是由事实三元组（头实体、关系、尾实体）表示的结构化知识的集合。图谱中的节点为实体，表示现实世界中的具体事物；图谱中的节点为关系，表示实体之间的联系。目前知识图谱已经在多个人工智能领域中得到了广泛的应用，例如语义搜索、问答和推荐系统。主流的开放知识图谱包括 FreeBase, Wikidata, DBpedia 和 YAGO 等，它们通常包含使用数十亿个实体和关系构建的大量事实。然而，即使是大规模知识图谱也不可避免的是不完全的，缺乏部分事实，这限制了知识图谱在现实世界中的应用。因此，近年知识图谱补全又称链路预测任务，成为了知识图谱领域的热门研究方向，尝试在给定事实三元组中的头（尾）实体和关系的情况下，自动预测缺失的尾（头）实体。

目前，知识图谱嵌入是知识图谱补全任务的主流解决方案，它将图谱中的实体和关系转化为低维向量空间中的向量，并用得分函数估计事实三元组正确的概率。现阶段对于知识图谱嵌入算法的研究，根据方法的核心思想和实现方式的不同，可以划分为传统的知识图谱嵌入方法，基于图神经网络的知识图谱嵌入方法，基于 Transformer 的知识图谱嵌入方法和融合多源信息的知识图谱嵌入方法。

传统的知识图谱嵌入方法仅独立研究知识图谱中的事实三元组，主要包含基于翻

译的方法、基于张量分解的方法和引入神经网络后的基于多层神经网络方法、基于卷积神经网络的方法。

基于翻译的方法是最早被提出的一类知识图谱嵌入方法，起源于 2013 年的 TransE 模型，核心思想是将知识图谱中的关系视为一个实体到另一个实体的翻译，又被称为平移距离模型。由于 TransE 无法有效建模知识图谱中的一对多、多对一、多对多关系，后续基于 TransE 进行改进并衍生出了如 TransH、TransR、TransD 等模型，不断丰富模型的表达能力。基于翻译的方法最大的优点在于其模型结构简单、计算速度快、易于理解且可解释性较强，但另一方面浅层的模型结构也限制了该类方法的表达能力。

以 RESCAL 为代表的基于张量分解的方法则将整个知识图谱表示为一个高维的稀疏张量，通过对其进行张量分解来获得实体和关系的嵌入。RESCAL 用一个维度为 $N \times N \times M$ 的张量来表示一个实体数量为 N ，关系数量为 M 的知识图谱，其中第 i 行 j 列深度为 k 的元素值为 1 时表示实体 i 和实体 j 之间存在关系 k 。通过张量分解，模型最终能够得到用一维向量表示的实体嵌入和用二维矩阵表示的关系嵌入。继 RESCAL 之后，基于张量分解的思想提出的 DistMult、ComplEx、ANALOGY 等一系列模型分别从强化模型表达能力以及压缩模型参数两方面对 RESCAL 模型进行了改进。DistMult 将关系嵌入进行了简化，选用了对角矩阵替代了 RESCAL 的二维矩阵，降低了模型的复杂度并获得了更优的性能；ComplEx 则将模型从实数域扩展到了复数域，提高了模型的表达能力。总的来说，基于张量分解的方法可解释性较强，并能够捕捉到实体和关系之间的双线性关系，但和基于翻译的方法类似，浅层的模型结构很难有效的学习图谱中蕴含的复杂信息，模型表达能力较弱。

而随着神经网络的发展，大量基于神经网络的知识图谱嵌入方法开始涌现。使用神经网络进行知识图谱嵌入能够建立更加复杂的模型，自动学习知识图谱当中蕴含的特征，模型的表达能力更强，更加充分地学习和表达知识图谱中的信息。这其中最早提出的是基于多层神经网络的方法，SME、NTN、MLP 等模型直接使用多层的神经网络去拟合知识图谱，以事实三元组的嵌入作为模型的输入，输出三元组正确的概率。这类方法相较之前没有神经网络结构的方法在性能上有了提升，但网络结构相对简单，可解释性较差。

而受到计算机视觉领域的研究方法的启发，随后有不少工作尝试将卷积引入知识图谱嵌入领域，大量基于卷积神经网络的方法被提出，其中最具代表性的方法为 ConvE。

ConvE 将事实三元组中的头实体和关系的一维向量嵌入，重组为二维张量并对其进行卷积操作，将结果向量化之后经过神经网络层，随后和候选实体的嵌入进行点乘，输出事实三元组的正确概率。基于 ConvE 的思想，有不少方法提出了进一步的改进。ConvR 使用关系嵌入构造卷积核，减少了网络的参数；ConvKB 通过在实体和关系的相同维度上进行卷积，能够捕获在实体和关系之间相同维度上的联系；InteractE 则将重组后二维张量修改为棋盘式，大大提升了头实体和关系之间的交互。

以上提到的知识图谱嵌入方法研究的对象是知识图谱中独立的三元组，这导致这些模型忽略了知识图谱的结构信息，因此被统一归类为传统的知识图谱嵌入方法。例如，这些方法没有办法感知到头实体的邻居实体，无法充分利用每个实体丰富的邻域结构，不仅链路预测的性能受到限制，而且也缺乏嵌入空间的可解释性。而基于图神经网络 (Graph Neural Network, GNN) 的知识图谱嵌入方法则利用图卷积神经网络来捕获图谱中的图结构信息，中心实体接受来自邻居实体与邻居关系的消息，并依此对实体和关系的嵌入表示进行更新。

R-GCN 是第一个利用图卷积神经网络学习知识图谱表示的方法，整体采用编码器-解码器架构。编码器部分通过图神经网络对图结构进行建模，在 R-GCN 的信息传播过程中，中心实体会接受来自出边、入边和自循环边三个方向的信息；通过多次信息传播模型能够获得多阶邻居的信息。解码器部分则基于编码的信息对三元组进行打分。后续提出的方法基本沿用了 R-GCN 的编码器-解码器架构，并在此基础上进行改进。SACN 模型则基于关系类型将实体的邻域划分为带权值的子图进行聚合。TransGCN 设计了实数域和复数域下两种基于翻译的思想的编码器。

而收到自然语言处理和计算机视觉领域中注意力机制的成功的启发，有不少工作尝试将注意力机制引入到了基于图神经网络的知识图谱嵌入方法中来并取得了不错的效果。KBGAT 是首个在知识图谱嵌入领域应用图注意力网络的方法，模型能够自动分辨出哪些邻居实体的信息对于中心实体是更加重要的。RGHAT 将注意力机制进行了进一步的细分，引入了关系注意力机制和实体注意力机制，实现了更细粒度的建模。EIGAT 则通过随机游走算法引入了全局实体重要性，将局部注意力机制和知识图谱的全局信息进行了结合。

基于图神经网络的方法通过对实体的邻域结构进行学习从而获得了阶段性的成功，性能普遍优于传统的知识图谱嵌入模型。但是图神经网络的表达能力虽然相较于传统方

法的多层神经网络和卷积神经网络有了较大的提升,但是依然不足以充分学习知识图谱中的语义信息。针对这个问题,许多研究者尝试引入表达能力更强的架构。Transformer 是注意力机制方面里程碑式的工作,被认为是建模序列数据的最强大的神经网络,基于 Transformer 的模型变体在计算机视觉和编程语言领域中也表现出了出色的性能,因此目前有不少工作致力于研究将 Transformer 结构应用到知识图谱嵌入工作中,KG-BERT 是其中较早的方法,KG-BERT 利用 Transformer 对知识图谱中的独立三元组进行学习,同时结合了实体和关系的文本信息。而后续出现的不少基于 Transformer 的知识图谱嵌入方法将知识图谱的图结构也纳入了考虑,这些方法的特点是对 Transformer 的编码方式和注意力机制进行改造,使得模型能够学习到知识图谱中的事实三元组和结构信息并进行预测,典型方法有 HittER 和 Relphormer。HittER 采用分层 Transformer 架构对实体的局部邻域进行了建模。Relphormer 提出了一种用于知识图谱嵌入的 Transformer 架构变体,并提出了一种 Triple2Seq 序列化算法来解决知识图谱中边和节点的异构性问题。

融合多源信息的知识图谱嵌入方法则是在以上几类算法的基础上利用更多的额外信息来进行知识图谱嵌入,例如图路径、文本描述、实体类别、人工预定义规则或者时间顺序等。这些信息能够帮助模型从不同的维度对知识图谱进行建模,提高知识图谱补全的效果。

基于图路径的方法尝试利用知识图谱中的图路径信息来捕获实体与实体之间的长距离依赖。在知识图谱中,图路径被定义为图谱中的实体-关系链,例如 (Yao Ming, Born In, Shanghai, City Of, China)。对于每个待预测的事实三元组,这类方法一般通过随机游走等方式获得若干条图路径,并基于图路径学习实体和关系的嵌入。TransE-Comp 和 PTransE 尝试建模两个实体之间的图路径上多跳关系构成的复合关系。Chain 和 RSN 则对循环神经网络 (Recurrent Neural Network, RNN) 进行了改造,以学习图路径上的所有相邻实体和关系之间的依赖。Interstellar 分析了图路径信息对知识图谱嵌入的重要性,并将图路径学习问题定义为循环神经网络架构搜索问题,并设计了一种特定于知识图谱嵌入领域的混合搜索算法以及搜索空间。

除了结构信息之外,知识图谱中还包含了丰富的文本信息,每个实体和关系一般都有名称和对应的文本描述,蕴含对应的自然语言语义。NTN 对文本描述的词向量进行平均来初始化实体的向量表示。LMKE 采用预训练语言模型进行知识图谱嵌入,将文本描述转化为对应的词向量并将实体和关系投影到相同的向量空间中进行学习,对于知

识图谱中的长尾实体获得了很好的嵌入效果。

此外，考虑到现实世界是在不断发展的，知识图谱中现有的知识可能会失效，也有新的知识会被添加到知识图谱中来，针对这个特点，tTransE、tTransH 和 tTransR 等方法在知识图谱中引入了时序信息，对 TransE、TransH 和 TransR 进行了改进。

总的来说，融合多源信息的知识图谱嵌入方法通过引入额外的信息获得了更好的知识图谱嵌入效果。但是引入其他形式的信息往往需要额外的数据准备工作，有些知识图谱甚至无法获取对应的信息，可移植性较差；另外数据的质量也会对模型的性能造成影响。

1.2.2 对比分析

通过调研国内外知识图谱嵌入方法，本文对于各类知识图谱嵌入方法进行了总结与对比，各种方法的优缺点如表1所示。

表 1 各类知识图谱嵌入方法对比分析

方法类型	优点	缺点
基于翻译	结构简单，计算速度快，可解释性较强	模型表达能力弱
基于张量分解	可解释性较强，能够捕捉实体与关系之间的双线性关系	模型表达能力较弱
基于多层神经网络	表达能力相比于之前的方法更强	容易出现过拟合的问题，嵌入的维度对性能的影响较大
基于卷积神经网络	实体和关系之间的交互得到了增强，参数数量较少	没有利用到知识图谱的图结构信息
基于图神经网络	能够学习到实体的局部邻域信息，模型性能相较于传统方法得到了提高	模型的表达能力不足以充分学习知识图谱的语义信息，另外捕获长距离信息的能力不足
基于 Transformer	通过自注意力机制和更复杂的网络结构获得了更强大的模型表达能力	模型复杂度高，不适用于大规模知识图谱，无法直接利用图结构信息
融合多源信息	将现有方法与额外的信息进行结合，获得了更好的知识图谱嵌入效果	需要额外的数据准备工作，信息的质量对模型的性能影响较大，可移植性相对较差

1.3 研究目标及内容

1.3.1 研究目标

本课题的研究目标是设计基于 Transformer 的知识图谱嵌入模型，利用 Transformer 模型的强大表达能力来学习实体和关系的合适嵌入表示，对知识图谱进行自动化补全。本课题针对传统知识图谱嵌入和基于图神经网络的方法表达能力弱、图信息利用不足、无法捕获长距离信息乃至全局信息的问题，研究如何基于 Transformer 网络和知识图谱的特点，采用合适的方式采样和编码知识图谱中局部邻域和图路径两类图结构，并进行综合利用以充分发挥 Transformer 网络强大的表达能力，最终得到能够尽可能拟合现有图谱的合适表示。

1.3.2 研究内容

针对本课题的研究目标，本课题的主要研究路线如图1所示。本课题的研究内容主要包括以下几个方面：

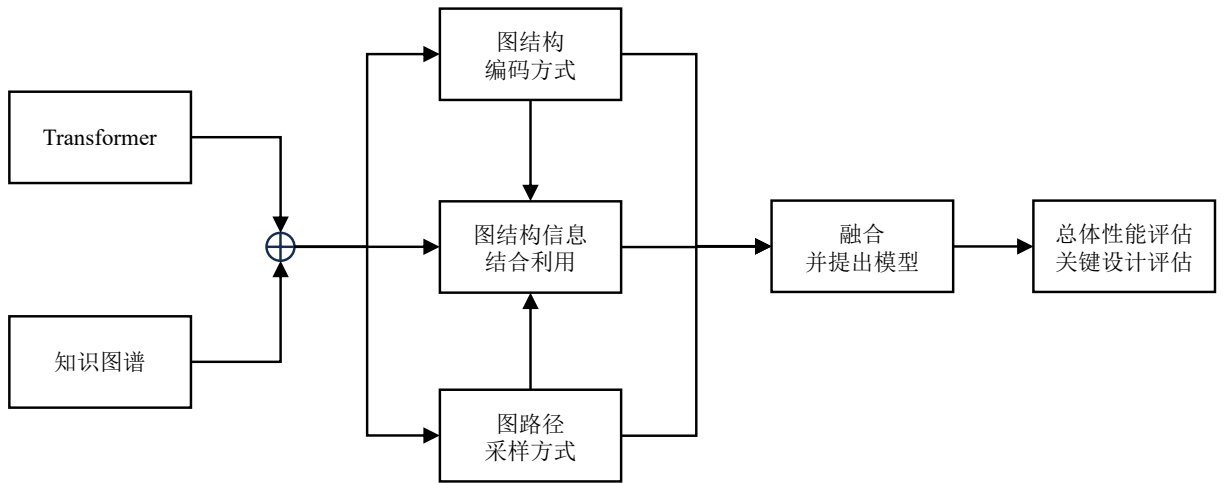


图 1 研究路线示意图

（1）基于 Transformer 的模型对于图结构的捕获研究

在 Transformer 中，任意一个位置都能直接感知到其他位置的输入信息，这导致模型无法直接捕捉到输入之间的相对位置关系，因此在处理序列数据时，采用的方式一般是为每个位置的输入添加对应的位置编码，标识输入与输入之间的前后位置关系。但在知识图谱中节点并不是顺序排列的，因此本文的主要研究内容之一就是设计一种合适方案让 Transformer 模型能够学习到知识图谱的拓扑结构，实现对知识图谱结构的感知。

（2）图路径采样算法研究

本课题计划通过对知识图谱中的图路径信息学习来挖掘实体与实体之间的长距离依赖，因此为了提升模型性能，对于当前的待预测事实三元组，如何采样到高质量的图路径是首先需要解决的问题。因此本文计划研究设计合适的采样策略，实现高效的图路径采样，提高模型捕获长距离依赖的能力。

（3）不同图结构信息的结合方案研究

基于图神经网络的模型通过聚合消息的方式实现了对于中心实体局部邻域结构的感知，但无法捕捉实体之间长距离的依赖；基于图路径的方法能够挖掘到更远距离的依赖，但忽略了实体丰富的局部邻域。因此，本文的主要研究内容之一是设计合适的模型结构实现对于以上两类图结构信息的综合利用，实现对于图谱中长短距离信息的捕捉。

（4）实验与验证

在完成以上研究内容，实现完整的知识图谱补全模型之后，设计相应实验方案，通过平均排名、平均倒数排名等指标在主流公开数据集上与基线模型进行性能对比，验证本文提出的模型的有效性；并且通过设计合适的消融实验，验证模型关键设计的有效性。

1.3.3 论文组织安排

本文对基于 Transformer 的知识图谱补全方法进行研究，论文内容总共分为五个章节以及总结与展望部分，各个章节的内容安排组织如下：

第一章绪论首先介绍了论文的背景与意义，随后对知识图谱以及知识图谱算法的国内外研究进展进行了简单介绍，并进行了各类方法的对比与总结。随后明确了论文的研究目标与研究路线，概述了论文的主要研究内容。最后介绍了论文的组织安排。

第二章介绍了论文中方法所涉及到的相关理论基础。首先介绍了注意力机制与 Transformer 模型架构，其次对 Transformer 模型在图学习领域中的应用进行了概述，最后对不同类别的知识图谱嵌入方法进行了介绍，包括部分模型的核心思想以及数学公式。

第三章首先对 Transformer 模型在知识图谱嵌入领域的应用存在的困难进行了分析，随后介绍了提出的基于邻域感知的 Transformer 模型，给出了符号定义以及模型的总体架构，并对其中的关键设计结构强化的自注意力机制进行了说明。

第四章首先指出了现有的基于图结构信息的方法的缺点，随后介绍了提出的结合

图路径和局部邻域的 Transformer 知识图谱嵌入模型，说明了模型的总体架构以及各个模块的设计方案，包括基于有偏随机游走的图路径采样算法、图路径信息与局部邻域信息的结合方案以及掩蔽实体关系预测任务。

第五章为实验与验证部分，首先说明了实验采用的数据集、选取的进行对比的基线模型、实验环境以及采用的评估策略等基本情况，随后对实验结果进行了介绍和分析，包括本文提出的模型与基线模型的总体性能对比、关键模块消融实验的结果，超参数对于模型的性能影响等。

总结与展望部分对本文的研究内容进行了回顾与总结，并对未来可能的研究方向进行了展望。

第二章 相关理论基础

本章对论文中所涉及到的相关理论基础进行了介绍。首先介绍了注意力机制与 Transformer 模型架构，其次对 Transformer 模型在图表示学习领域中的应用进行了概述，最后对不同类型的知识图谱嵌入方法的核心思想和数学公式进行了说明，包括传统的知识图谱嵌入方法、基于图神经网络的知识图谱嵌入方法、基于图路径的知识图谱嵌入方法以及基于 Transformer 的知识图谱嵌入方法。

2.1 注意力机制与 Transformer 网络

深度学习中的注意力机制 (Attention Mechanism) 灵感来源于人类的视觉和认知系统。在推理过程中，注意力机制动态的为输入数据分配不同的权重，使模型能够自动地学习并选择性地关注输入中的重要信息，提高模型的性能和泛化能力。注意力机制最早被用于处理计算机视觉任务，后来在多个领域中得到了应用，例如自然语言处理和推荐系统等。

谷歌的研究团队于 2017 年提出的 Transformer 网络则是注意力机制方面里程碑式的工作。Transformer 网络设计之初主要用于处理序列数据，在 Transformer 出现之前，序列数据的处理通常依赖于循环神经网络 (RNN) 及其变体，例如长短期记忆网络 (LSTM) 和门控递归单元 (GRU)。RNN 及其变体在处理序列数据时能够保持一定程度的历史信息，但存在一定的问题：由于对序列数据进行逐步处理，RNN 在训练过程中容易出现梯度消失或者梯度爆炸的问题，特别是在处理长序列时；逐步处理也限制了模型的并行计算能力，导致训练效率低下；此外，尽管 LSTM 和 GRU 通过特殊的门控机制改善了长距离依赖问题，但当序列长度过高时，模型依然难以捕捉到距离较远的依赖关系。

Transformer 网络通过使用自注意力 (Self-Attention) 机制解决了上述问题，在自注意力机制中，输入数据中的任意一个位置都能够直接感知到其它位置的信息，因此相比于传统的 RNN 结构，自注意力能够更加直接地捕捉到序列中长距离的依赖关系；自注意力机制允许模型在处理数据时并行计算各个位置的注意力分数，与 RNN 逐步计算的方式相比，可以显著提高模型的计算效率；自注意力机制通过学习输入序列中不同位置之间的动态相关性，能够根据特定的任务自适应地调整注意力分布。

Transformer 网络中的自注意力机制的核心为缩放点积注意力机制，结构如图2所示。

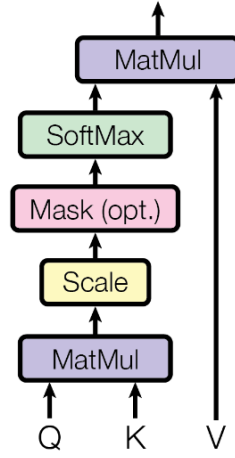


图 2 缩放点积注意力机制

具体来说，假设模型的输入为 X ，首先模型将会通过线性变化生成输入对应的查询向量 Q ，键向量 K 以及值向量 V ：

$$Q = XW^Q, K = XW^K, V = XW^K \quad (2.1)$$

其中 W^Q 、 W^K 、 W^K 是可学习的参数矩阵。

随后模型会将查询向量 Q 和键向量 K 进行点积并乘以缩放因子 $\frac{1}{\sqrt{d_k}}$ 获得注意力分数，将其进行归一化处理转化为概率分布，用作权重对值向量 V 进行加权平均和，最终得到缩放点积注意力机制对应的输出，其中 d_k 为键向量的维度：

$$\text{Attention}(Q, K, V) = \text{softmax}\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V \quad (2.2)$$

进一步的，为了让模型能够同时关注来自不同维度的信息，并稳定自注意力的学习过程，Transformer 采用了多头注意力机制，通过不同的参数矩阵将 Q 、 K 、 V 映射到不同的向量空间下并计算缩放点积注意力，将结果进行拼接获得最终的输出，如图3所示。

具体来说，对于 h 个独立的注意力头，有：

$$\begin{aligned} \text{MultiHead}(Q, K, V) &= \text{Concat}(\text{head}_1, \dots, \text{head}_h)W^O \\ \text{where } \text{head}_i &= \text{Attention}(QW_i^Q, KW_i^K, VW_i^V) \end{aligned} \quad (2.3)$$

其中 QW_i^Q 、 KW_i^K 、 VW_i^V 为将 Q 、 K 、 V 映射到第 i 个向量空间的参数矩阵，Concat 为拼接操作。

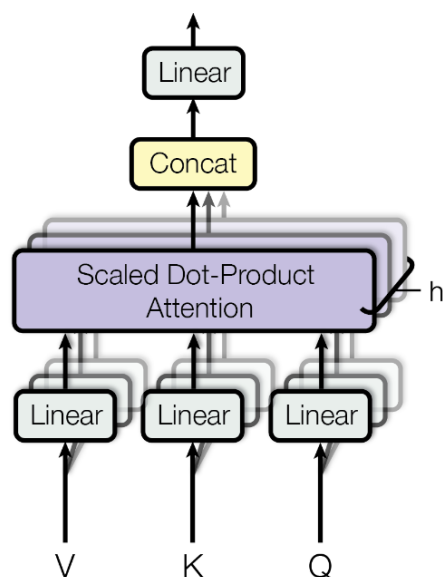


图3 多头注意力机制

2.2 基于 Transformer 的图表示学习方法

2.3 知识图谱嵌入方法

2.3.1 传统的知识图谱嵌入方法

2.3.2 基于图神经网络的知识图谱嵌入方法

2.3.3 基于图路径的知识图谱嵌入方法

2.3.4 基于 Transformer 的知识图谱嵌入方法

第三章 绪论

大家好，这是北航论文 $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 模板（ $\text{C}^{\text{T}}_{\text{E}}\text{X}$ -Based）— $\text{B}^{\text{U}}_{\text{A}}\text{A}^{\text{T}}_{\text{H}}\text{E}^{\text{S}}$ 。

$\text{B}^{\text{U}}_{\text{A}}\text{A}^{\text{T}}_{\text{H}}\text{E}^{\text{S}}$ 为北航研究生学位论文模板，适用于理工类博士、硕士。本 $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 模板参考自 2015 年 8 月版北航《研究生手册》（以下简称《手册》），根据 2020 年 7 月修订版调整，具体要求请参见各自的《手册》，最终成文格式需参考学院要求及打印方意见。本模板中大量内容和说明直接摘抄自《手册》（2015 年 8 月版），基本覆盖了论文内容和格式方面的要求。

文献著录 BibTeX 样式采用 Haixing Hu 开源的 2005 版参考文献著录 BibTeX 样式 GBT 7714-2005 及 Zeping Lee 开源的 2015 版参考文献著录 BibTeX 样式 GBT7714-2015，在此感谢两位的开源分享。请自行选用：

$\backslash\text{Bib}\{\text{bst}/\text{GBT7714-2005}\}\{\text{yourRefFile}\}$ 或

$\backslash\text{Bib}\{\text{bst}/\text{GBT7714-2015}\}\{\text{yourRefFile}\}$ 。

本模板已上传 GitHub¹，该仓库中同时也包含了相应的 Word 模板。

意见及问题反馈请联系：

E-mail: weiqm@buaa.edu.cn

GitHub: <https://github.com/CheckBoxStudio/BUAAThesis/issues>

3.1 概述

学位论文是标明作者从事科学研究取得的创造性成果和创新见解，并以此为内容撰写的、作为申请学位时评审用的学位论文。

硕士学位论文应该表明作者在本门学科上掌握了坚实的基础理论和系统的专门知识，对所研究的课题有新的见解，并具有从事科学研究工作或独立担任专门技术工作能力。

博士学位论文应表明作者在本门学科上掌握了坚实广阔的基础理论和系统深入的专门知识，在科学和专门技术上做出了创造性的成果，并具有独立从事科学研究工作能力。

¹<https://github.com/CheckBoxStudio/BUAAThesis>

3.2 内容要求

论文应立论正确、推理严谨、说明透彻、数据可靠。

论文应结构合理、层次分明、叙述准确、文字简练、文图规范。对于涉及作者创新性工作和研究特点的内容应重点论述，做到数据或实例丰富、分析全面深入。文中引用的文献资料必须表明来源，使用的计量单位、绘图规范应符合国家标准。

论文内容包括：选题的背景、依据及意义；文献及相关研究综述、研究及设计方案、实验方法、装置和实验结果；理论的证明、分析和结论；重要的计算、数据、图表、曲线及相关分析；必要的附录、相关的参考文献目录等，如表2。

—————↓—————Space Check—————↓—————

表 2 学位论文组成

装订顺序	内容	说明
1	封面（中、英文）	
2	题名页	
3	独创性声明和使用授权书	
4	中文摘要	
5	英文摘要	
6	目录	
7	图表清单及主要符号表	根据具体情况可省略
8	主体部分	
9	参考文献	
10	附录	
11	攻读博士学位期间取得的科研成果/ 攻读硕士学位期间取得的学术成果	注意博士的是研究成果， 硕士的是学术成果
12	致谢	
13	作者简介	硕士学位论文无此项

—————↑—————Space Check—————↑—————

3.2.1 封面

中图分类号：根据论文主题内容对照《中国图书分类法》选取；

论文编号：北航单位代码（10006）+学号；

密级：保密审批通过论文需在封面、题名页直接把相应的“密级 □”及“保密期限”表注在**左上角**（非密论文务必将相应内容清除），并将《涉密论文审批通知》复印件附在论文最后。密级按由低到高可分为“秘密”、“机密”、“绝密”三级，保密期限可分为“3年”、“5年”、“10年”、“永久”，例如“密级 □ 5年”。鼓励尽量对学位论文进行去密处理；

学科专业：以国务院学位委员会批准的授予博士、硕士学位和培养研究生的学科、专业目录中的学科专业为准，一般为二级学科。对专业学位应填相应的工程领域（如航空工程）或专业学位（工商管理硕士）名称；

指导教师：以研究生院批准招生的为准，一般只能写一名指导教师，如有经主管部门批准的副指导教师或联合指导教师，可增 1 名指导教师；

培养院系：应准确填写培养的学院或独立系的全称。

3.2.2 题名页

研究方向：只填写一个，应比学科专业的二级学科更具体，但比论文关键词的覆盖面更广，一般为学科分类号对应的研究方向；

申请学位级别：学科门类 + 学位，学科门类有哲学、经济学、法学、教育学、文学、历史学、理学、工学、农学、医学、军事学和管理学等 12 个学科门类以及专业学位类别（工程、工程管理、公共行政管理、软件工程）；

工作完成日期：包括学习日期（从研究生入学至毕业时间）、论文提交日期（论文送审评阅时间）、论文答辩日期、学位授予日期；除学位授予日期可以不填外，其他均需准确填写，一律用阿拉伯数字填写日期；

学位授予单位：北京航空航天大学。

3.2.3 独创性声明和使用授权书

必须由作者、指导教师亲笔签名并填写日期。

3.2.4 摘要

中文摘要包括“摘要”字样，摘要正文及关键词。对于中英文摘要，都必须在摘要的最下方另起一行。

摘要是学位论文内容的简短陈述，应体现论文工作的核心思想。论文摘要应力求语言精炼准确。博士学位论文的中文摘要一般约 800~1200 字；硕士学位论文的中文摘要一般约 500 字。摘要内容应涉及本项科研工作的目的和意义、研究思想和方法、研究成果和结论。博士学位论文必须突出论文的创造性成果，硕士学位论文必须突出论文的新见解。

关键字是为用户查找文献，从文中选取出来揭示全文主体内容的一组词语或术语，应尽量采用词表中的规范词（参考相应的技术术语标准）。关键词一般 3~5 个，按词条

的外延层次排列（外延大的排在前面）。关键词之间用逗号分开，最后一个关键词后不打标点符号。

为了国际交流的需要，论文必须有英文摘要。英文摘要的内容及关键词应与中文摘要及关键词一致，要符合英语语法，语句通顺，文字流畅。英文和汉语拼音一律为 Times New Roman 体，字号与中文摘要相同。

3.2.5 目录

目录按章、节、条和标题编写，一般为二级或三级，目录中应包括绪论（或引言）、论文主体章节、结论、附录、参考文献、附录、攻读学位期间取得的成果等。

3.2.6 图表清单及主要符号表

如果论文中图表较多，可以分别列出清单置于目录之后。图的清单应有序号、图题和页码，表的清单应有序号、标题和页码。全文中常用的符号、标志、缩略词、首字母缩写、计量单位、名词、术语等的注释说明，如需汇集，可集中在图和表清单后的主要符号表中列出，符号表排列顺序按英文及其相关文字顺序排出。

3.2.7 主体部分

一般应包括：绪论（或引言）、正文、结论等部分。

每章应另起一页。章节标题不得使用标点符号，尽量不采用英文缩写词，对必须采用者，应使用本行业的通用缩写词。三级标题的层次对理工类建议按章（如“第一章”）、节（如“1.1”）、条（如“1.1.1”）的格式编写；对社科、文学类建议按章（如“一、”）、节（如“（一）”）、条（如“1、”）的格式编写，各章题序的阿拉伯数字用 Times New Roman 字体。

博士学位论文一般为 6~10 万字，硕士学位论文一般为 3~5 万字。

3.2.8 参考文献

学术研究应精确、有据、坦诚、创新、积累。而其中精确、有据和积累需要建立在正确对待前人学术成果的基础上。凡有直接引用他人成果之处，均应加标注说明列于参考文献中，以避免论文抄袭现象的发生。

研究生论文参考文献著录及标引按照国家标准《文后参考文献著录规则》（GB774）和中国博硕士学位论文编写与交换格式。

3.2.9 附录

附录作为论文主体的补充项目，并不是必需的。

3.2.10 成果

对于博士学位论文，名称用“攻读博士学位期间取得的研究成果”，一般包括：

攻读博士学位期间取得的学术成果：攻读博士学位期间取得的学术成果：列出攻读博士期间发表（含录用）的与学位论文相关的学位论文、发表专利、著作、获奖项目等，书写格式与参考文献格式相同；

攻读博士期间参与的主要科研项目：列出攻读博士学位期间参与的与学位论文相关的主要科研项目，包括项目名称，项目来源，研制时间，本人承担的主要工作。

对于硕士学位论文，名称用“攻读硕士学位期间取得的学术成果”，只列出攻读硕士学位期间发表（含录用）的与学位论文相关的学位论文、发表专利、著作、获奖项目等，书写格式与参考文献格式相同。

3.2.11 致谢

致谢中主要感谢指导教师在和学术方面对论文的完成有直接贡献及重要帮助的团体和人士，以及感谢给予转载和引用权的资料、图片、文献、研究思想和设想的所有者。致谢中还可以感谢提供研究经费及实验装置的基金会或企业等单位 and 人士。致谢辞应谦虚诚恳，实事求是，切记浮夸与庸俗之词。

3.2.12 作者简介

博士学位论文应该提供作者简介，主要包括：姓名、性别、出生年月日、民族、出生的；简要学历、工作经历（职务）；以及攻读博士学位期间获得的其他奖项（除攻读学位期间取得的研究成果之外）。

第四章 说明

Again, 这是北航论文 L^AT_EX 模板 (C_TE_X-Based) B_UA_AT_HE_S。

本 L^AT_EX 模板为北航研究生学位论文模板, 适用于理工类博士、硕士。本 L^AT_EX 模板参考自 2015 年 8 月版北航《研究生手册》, 根据 2020 年 7 月修订版调整, 具体要求请参见各自的《手册》, 最终成文格式需参考学院要求及打印方意见。本模板中大量内容和说明直接摘抄自《手册》(2015 年 8 月版), 基本覆盖了论文内容和格式方面的要求。

本模板已上传 GitHub, 该仓库中同时也包含了相应的 Word 模板。

4.1 宏包使用

请将以下文件与此 L^AT_EX 文件放在同一目录中:

buaa.cls	▷ L ^A T _E X 宏模板文件
bst/GBT7714-2005.bst	▷ 国标参考文献 Bib _T E _X 样式文件 2005
bst/GBT7714-2015.bst	▷ 国标参考文献 Bib _T E _X 样式文件 2015
pic/logo-buaa.eps	▷ 论文封皮北航字样
pic/head-master.eps	▷ 论文封皮学术硕士学位论文标题
pic/head-professional.eps	▷ 论文封皮专业硕士学位论文标题
pic/head-doctor.eps	▷ 论文封皮学术博士学位论文标题
pic/head-prodoctor.eps	▷ 论文封皮专业博士学位论文标题
tex/*.tex	▷ 本模板样例中的独立章节

通过 `\documentclass[<thesis>,<permission>,<printtype>,<ostype>,<ctexbookoptions>]{buaa}` 载入宏包:

thesis ▷ 论文类型 (thesis), 可选值:

- a) 学术硕士论文 (master) [缺省值]
- b) 专业硕士论文 (professional)
- c) 学术博士论文 (doctor)
- d) 专业博士论文 (prodoctor)

permission ▷ 密级 (permission), 可选值:

- a) 公开 (public) [缺省值]
- b) 内部 (privacy)
- c) 秘密 (secret=secret3)
 - c.1) 秘密 3 年 (secret3)
 - c.2) 秘密 5 年 (secret5)
 - c.3) 秘密 10 年 (secret10)
 - c.4) 秘密永久 (secret*)
- d) 机密 (classified=classified5)
 - d.1) 机密 3 年 (classified3)
 - d.2) 机密 5 年 (classified5)
 - d.3) 机密 10 年 (classified10)
 - d.4) 机密永久 (classified*)
- e) 绝密 (topsecret=topsecret10)
 - e.1) 绝密 3 年 (topsecret3)
 - e.2) 绝密 5 年 (topsecret5)
 - e.3) 绝密 10 年 (topsecret10)
 - e.4) 绝密永久 (topsecret*)

printtype ▷ 打印设置 (printtype), 可选值:

- a) 单面打印 (oneside) [缺省值]
- b) 双面打印 (twoside)

ostype ▷ 系统类型 (printtype), 可选值:

- a) Windows (win) [缺省值]
- b) Linux (linux)
- c) Mac (mac)

ctexbookoptions ▷ ctexbook 文档类支持的其他选项:

使用 ctexbookoptions 选项传递 ctexbook 文档类支持的其他选项。例如, 使用 fontset=founder 选项启用方正字体以避免生僻字乱码的问题¹。

模板已内嵌 LaTeX 工具包:

¹需要系统安装方正字体。

ifthen, etoolbox, titletoc, remreset, geometry, fancyhdr, setspace, float, graphicx, subfigure, epstopdf, array, enumitem, booktabs, longtable, multirow, caption, listings, algorithm2e, amsmath, amsthm, hyperref, pifont, color, soul;

For Windows: times, newtxmath;

For Linux: newtxtext, newtxmath;

For Mac: times, fontspec。

模板已内嵌宏: `\highlight{text}` (黄色高亮)。

请统一使用 UTF-8 编码。

4.2 选项设置

`\refcolor` ▷ 开启/关闭引用编号颜色, 包括参考文献, 公式, 图, 表, 算法等

on: 开启 [默认]

off: 关闭

`\beginright` ▷ 摘要和正文从右侧页开始

on: 开启 [默认]

off: 关闭

`\emptypageword` ▷ 空白页留字

`\Listfigtab` ▷ 是否使用图标清单目录

on: 开启 [默认]

bi: 双标题

off: 关闭

4.3 章节撰写

本模板支持以下标题级别标题级别:

<code>\chapter{章}</code>	▷ 第一章
<code>\chapter*{无章号章}</code>	▷ 无章号章
<code>\chapter*{无章号有目录章}</code>	▷ 无章号有目录章
<code>\summary</code>	▷ 总结
<code>\appendix</code>	▷ 附录
<code>\multappendix</code>	▷ 多附录
<code>\achievement</code>	▷ 攻读学位期间取得的成果
<code>\acknowledgments</code>	▷ 致谢
<code>\biography</code>	▷ 作者简介
<code>\section{节}</code>	▷ 1.1 节
<code>\subsection{条}</code>	▷ 1.1.1 条
<code>\subsubsection{A}</code>	▷ 1.1.1.1 A
<code>\paragraph{a}</code>	▷ 1.1.1.1.1 a
<code>\subparagraph{a)}</code>	▷ 1.1.1.1.1.1 a)

4.4 注意事项

- ▷ 中文斜体将转换为楷体；
- ▷ 中文粗体在 Windows (From WeiQM) 和 Mac (From CaiBW) 下转换为黑体，Linux 下正常 (From QiaoJF)；
- ▷ 表格环境内 `\textbf` 为宋体加粗，`\bf` 为黑体；
- ▷ `\label{<text>}` 中不能使用中文；
- ▷ 浮动体与正文之间的距离是弹性的，根据内容调整，不太好控制；
- ▷ 命令符与汉字之间请注意加空格以避免 `undefined` 错误 (pdfLaTeX 下好像一般不存在这个问题，主要在 XeLaTeX 编译环境下发生)；

4.5 ToDo

- ▷ 数学环境的行间隔；
- ▷ 参考文献的行间隔；

4.6 意见及问题反馈

E-mail: weiqm@buaa.edu.cn

GitHub: <https://github.com/CheckBoxStudio/BUAAThesis/issues>

第五章 示例

5.1 参考文献引用

5.1.1 数字标注

<code>\cite{knuth86a}</code>	\Rightarrow	[1]
<code>\citet{knuth86a}</code>	\Rightarrow	Knuth [1]
<code>\citet[chap.~2]{knuth86a}</code>	\Rightarrow	Knuth [1, chap. 2]
<code>\citep{knuth86a}</code>	\Rightarrow	[1]
<code>\citep[chap.~2]{knuth86a}</code>	\Rightarrow	[1, chap. 2]
<code>\citep[see][]{knuth86a}</code>	\Rightarrow	[see 1]
<code>\citep[see][chap.~2]{knuth86a}</code>	\Rightarrow	[see 1, chap. 2]
<code>\citet*{knuth86a}</code>	\Rightarrow	Knuth [1]
<code>\citep*{knuth86a}</code>	\Rightarrow	[1]
<code>\citet{knuth86a,tlc2}</code>	\Rightarrow	Knuth [1], Mittelbach et al. [2]
<code>\citep{knuth86a,tlc2}</code>	\Rightarrow	[1, 2]
<code>\cite{knuth86a,knuth84}</code>	\Rightarrow	[1, 3]
<code>\upcite{knuth86a,knuth84}</code>	\Rightarrow	[1, 3]
<code>\citet{knuth86a,knuth84}</code>	\Rightarrow	Knuth [1 3]
<code>\citep{knuth86a,knuth84}</code>	\Rightarrow	[1, 3]
<code>\cite{knuth86a,knuth84,tlc2}</code>	\Rightarrow	[1–3]

5.1.2 数字标注-上标形式

<code>\upcite{knuth86a}</code>	\Rightarrow	^[1]
<code>\upcite{knuth86a,knuth84,tlc2}</code>	\Rightarrow	^[1–3]

实现源码：`\newcommand{\upcite}[1]{\textsuperscript{\cite{#1}}}`。

5.1.3 著者-出版年制标

<code>\cite{db}</code>	\Rightarrow 王明亮 (1998)
<code>\citet{knuth86a}</code>	\Rightarrow Knuth (1986)
<code>\citet[chap.~2]{knuth86a}</code>	\Rightarrow Knuth (1986, chap. 2)
<code>\citep{knuth86a}</code>	\Rightarrow (Knuth, 1986)
<code>\citep[chap.~2]{knuth86a}</code>	\Rightarrow (Knuth, 1986, chap. 2)
<code>\citep[see][]{knuth86a}</code>	\Rightarrow (see Knuth, 1986)
<code>\citep[see][chap.~2]{knuth86a}</code>	\Rightarrow (see Knuth, 1986, chap. 2)
<code>\citet*{knuth86a}</code>	\Rightarrow Knuth (1986)
<code>\citep*{knuth86a}</code>	\Rightarrow (Knuth, 1986)
<code>\citet{knuth86a,tlc2}</code>	\Rightarrow Knuth (1986); Mittelbach et al. (2004)
<code>\citep{knuth86a,tlc2}</code>	\Rightarrow (Knuth, 1986; Mittelbach et al., 2004)
<code>\cite{knuth86a, knuth84}</code>	\Rightarrow Knuth (1986, 1984)
<code>\citet{knuth86a, knuth84}</code>	\Rightarrow Knuth (1986, 1984)
<code>\citep{knuth86a, knuth84}</code>	\Rightarrow (Knuth, 1986, 1984)

5.1.4 其他形式的标注

<code>\citealt{tlc2}</code>	\Rightarrow Mittelbach et al. 2
<code>\citealt*{tlc2}</code>	\Rightarrow Mittelbach, Goossens, Braams, and Carlisle 2
<code>\citealp{tlc2}</code>	\Rightarrow 2
<code>\citealp*{tlc2}</code>	\Rightarrow 2
<code>\citealp{tlc2, knuth86a}</code>	\Rightarrow 1, 2
<code>\citealp[pg.~32]{tlc2}</code>	\Rightarrow 2, pg. 32
<code>\citenum{tlc2}</code>	\Rightarrow 2
<code>\citetext{priv.\ comm.}</code>	\Rightarrow [priv. comm.]
<code>\citeauthor{tlc2}</code>	\Rightarrow Mittelbach et al.
<code>\citeauthor*{tlc2}</code>	\Rightarrow Mittelbach, Goossens, Braams, and Carlisle
<code>\citeyear{tlc2}</code>	\Rightarrow 2004
<code>\citeyearpar{tlc2}</code>	\Rightarrow [2004]

5.2 浮动体

5.3 算法环境

模板中使用 algorithm2e 宏包实现算法环境。关于该宏包的具体用法请阅读宏包的官方文档。

—————↓—————Space Check—————↓—————

Data: this text
Result: how to write algorithm with L^AT_EX2e initialization;
while *not at end of this document* **do**
 read current;
 if *understand* **then**
 go to next section;
 current section becomes this one;
 else
 go back to the beginning of current section;
 end
end

算法 1: A How to (plain).

—————↑—————Space Check—————↑—————

算法 2: A How to (ruled).

Data: this text
Result: how to write algorithm with L^AT_EX2e initialization;
while *not at end of this document* **do**
 read current;
 if *understand* **then**
 go to next section;
 current section becomes this one;
 else
 go back to the beginning of current section;
 end
end

5.3.1 三线表

推荐使用三线表的方式，如表 3。

—————|—————Space Check—————|—————
—————|—————Space Check—————|—————

Data: this text
Result: how to write algorithm with L^AT_EX2e
initialization;
while *not at end of this document* **do**
 read current;
 if *understand* **then**
 go to next section;
 current section becomes this one;
 else
 go back to the beginning of current section;
 end
end

算法 3: A How to (boxed).

算法 4: A How to (boxruled).

Data: this text
Result: how to write algorithm with L^AT_EX2e
initialization;
while *not at end of this document* **do**
 read current;
 if *understand* **then**
 go to next section;
 current section becomes this one;
 else
 go back to the beginning of current section;
 end
end

表 3 表的标题

操作系统	TeX 发行版
所有	TeX Live
macOS	MacTeX
Windows	MikTeX

表 4 让我们看看一个长标题长什么样。还不够长？那我再多写一点。还是不够长？那我再多写一点。OK，就是长这样的！

操作系统	TeX 发行版
所有	TeX Live
macOS	MacTeX
Windows	MikTeX

我们在这儿插入一行字；

我们在这儿再插入一行字；

我们在这儿再插入一行字：

5.4 长表格

超过一页的表格要使用专门的 longtable 环境（表 5）。

↓

Space Check

↓

表 5 长表格演示

Tab. 5 long table

[illegible]

续下页

表 5 长表格演示 (续)

[illegible]

—————↑—————Space Check—————↑—————

5.5 插图

—————↓—————Space Check—————↓—————

—————↑—————Space Check—————↑—————

我们在这儿插入一行字：

我们在这儿再插入一行字：

我们在这儿插入一行字；

北京航空航天大学

图 4 测试图片
第二行题注
Fig. 4 Test Pic
Sec Row

我们在这儿再插入一行字；
我们在这儿插入一行字；
我们在这儿再插入一行字；
我们在这儿插入一行字；
我们在这儿再插入一行字；

5.6 数学环境

5.6.1 数学符号

模板定义了一些正体（upright）的数学符号：

符号 命令	
常数 e	<code>\eu</code>
复数单位 i	<code>\iu</code>
微分符号 d	<code>\diff</code>
$\arg \max$	<code>\argmax</code>
$\arg \min$	<code>\argmin</code>

更多的例子：

$$e^{i\pi} + 1 = 0 \tag{5.1}$$

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = \int f(x) \, dx \tag{5.2}$$

$$\arg \min_x f(x) \tag{5.3}$$

5.6.2 定理、引理和证明

定义 5.1. If the integral of function f is measurable and non-negative, we define its (extended) **Lebesgue integral** by

$$\int f = \sup_g \int g, \quad (5.4)$$

where the supremum is taken over all measurable functions g such that $0 \leq g \leq f$, and where g is bounded and supported on a set of finite measure.

例 5.1. Simple examples of functions on \mathbf{R}^d that are integrable (or non-integrable) are given by

$$f_a(x) = \begin{cases} |x|^{-a} & \text{if } |x| \leq 1, \\ 0 & \text{if } |x| > 1. \end{cases} \quad (5.5)$$

$$F_a(x) = \frac{1}{1 + |x|^a}, \quad \text{all } x \in \mathbf{R}^d. \quad (5.6)$$

Then f_a is integrable exactly when $a < d$, while F_a is integrable exactly when $a > d$.

引理 5.1 (Fatou). Suppose $\{f_n\}$ is a sequence of measurable functions with $f_n \geq 0$. If $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x)$ for a.e. x , then

$$\int f \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int f_n. \quad (5.7)$$

注. We do not exclude the cases $\int f = \infty$, or $\liminf_{n \rightarrow \infty} \int f_n = \infty$.

推论 5.2. Suppose f is a non-negative measurable function, and $\{f_n\}$ a sequence of non-negative measurable functions with $f_n(x) \leq f(x)$ and $f_n(x) \rightarrow f(x)$ for almost every x . Then

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n = \int f. \quad (5.8)$$

命题 5.3. Suppose f is integrable on \mathbf{R}^d . Then for every $\epsilon > 0$:

1. There exists a set of finite measure B (a ball, for example) such that

$$\int_{B^c} |f| < \epsilon. \quad (5.9)$$

2. There is a $\delta > 0$ such that

$$\int_E |f| < \epsilon \quad \text{whenever } m(E) < \delta. \quad (5.10)$$

定理 5.4. Suppose $\{f_n\}$ is a sequence of measurable functions such that $f_n(x) \rightarrow f(x)$ a.e. x , as n tends to infinity. If $|f_n(x)| \leq g(x)$, where g is integrable, then

$$\int |f_n - f| \rightarrow 0 \quad \text{as } n \rightarrow \infty, \quad (5.11)$$

and consequently

$$\int f_n \rightarrow \int f \quad \text{as } n \rightarrow \infty. \quad (5.12)$$

证明. Trivial. □

5.6.3 自定义

Axiom of choice. Suppose E is a set and E_α is a collection of non-empty subsets of E . Then there is a function $\alpha \mapsto x_\alpha$ (a “choice function”) such that

$$x_\alpha \in E_\alpha, \quad \text{for all } \alpha. \quad (5.13)$$

Observation 5.1. Suppose a partially ordered set P has the property that every chain has an upper bound in P . Then the set P contains at least one maximal element.

A concise proof. Obvious. □

Observationvar2 5.2. Suppose a partially ordered set P has the property that every chain has an upper bound in P . Then the set P contains at least one maximal element.

A concise proof. Obvious. □

我们在这儿插入一行字；

我们在这儿再插入一行字；

我们在这儿插入一行字；

我们在这儿再插入一行字；
我们在这儿插入一行字；
我们在这儿再插入一行字；
我们在这儿插入一行字；
我们在这儿再插入一行字；
我们在这儿插入一行字；
我们在这儿再插入一行字；
我们在这儿插入一行字；
我们在这儿再插入一行字；
我们在这儿插入一行字；
我们在这儿再插入一行字；
我们在这儿插入一行字；
我们在这儿再插入一行字；
我们在这儿插入一行字；
我们在这儿再插入一行字；

结 论

学位论文的结论单独作为一章，但不加章号。如果不可能导出应有的结论，也可以没有结论而进行必要的讨论。

* 嗯，这就是你的论文了 *

参考文献

- [1] Knuth D E. Computers and typesetting: A the T_EXbook[M]. Reading, MA, USA: Addison-Wesley, 1986
- [2] Mittelbach F, Goossens M, Braams J, et al. The L^AT_EX companion[M]. 2nd ed. Reading, MA, USA: Addison-Wesley, 2004
- [3] Knuth D E. Literate programming[J]. The Computer Journal, 1984, 27(2): 97–111
- [4] 王明亮. 中国学系统工程的[EB/OL]. <http://www.cajcd.cn/put/980810-2.html>, 1998

附 录

下列内容可以作为附录：

- 1) 为了整篇论文材料的完整，但编入正文又有损于编排的条理和逻辑性，这一材料包括比正文更为详尽的信息、研究方法和技术更深入的叙述，建议可以阅读的参考文献题录，对了解正文内容有用的补充信息等；
- 2) 由于篇幅过大或取材于复制品而不便于编入正文的材料；
- 3) 不便于编入正文的罕见的珍贵或需要特别保密的技术细节和详细方案（这中情况可单列成册）；
- 4) 对一般读者并非必要阅读，但对专业同行有参考价值的资料；
- 5) 某些重要的原始数据、过长的数学推导、计算程序、框图、结构图、注释、统计表、计算机打印输出文件等。

* 嗯，自由发挥吧 *

攻读硕士学位期间取得的学术成果

对于博士学位论文，本条目名称用“攻读博士学位期间取得的研究成果”，一般包括：

攻读博士学位期间取得的学术成果：攻读博士学位期间取得的学术成果：列出攻读博士期间发表（含录用）的与学位论文相关的学位论文、发表专利、著作、获奖项目等，书写格式与参考文献格式相同；

攻读博士期间参与的主要科研项目：列出攻读博士学位期间参与的与学位论文相关的主要科研项目，包括项目名称，项目来源，研制时间，本人承担的主要工作。

对于硕士学位论文，本条目名称用“攻读硕士学位期间取得的学术成果”，只列出攻读硕士学位期间发表（含录用）的与学位论文相关的学位论文、发表专利、著作、获奖项目等，书写格式与参考文献格式相同。

* 嗯，研究生不列科研项目 *

致 谢

致谢中主要感谢指导教师和在学术方面对论文的完成有直接贡献及重要帮助的团体和人士，以及感谢给予转载和引用权的资料、图片、文献、研究思想和设想的所有者。致谢中还可以感谢提供研究经费及实验装置的基金会或企业等单位 and 人士。致谢辞应谦虚诚恳，实事求是，切记浮夸与庸俗之词。

* 嗯，感谢完所有人之后，也请记得感谢一下自己 *

作者简介

博士学位论文应该提供作者简介，主要包括：姓名、性别、出生年月日、民族、出生的；简要学历、工作经历（职务）；以及攻读博士学位期间获得的其他奖项（除攻读学位期间取得的研究成果之外）。

* 嗯，“硕士学位论文无此项”，《手册》上是这么说的 *

This is Be^AT_UHES, Happy TeXing! — from WeiQM.