

融合知识点关系的深度记忆网络知识追踪^①

王 忠, 王净雨, 于浩然, 徐 文, 梁宏涛

(青岛科技大学 信息科学技术学院, 青岛 266061)

通信作者: 梁宏涛, E-mail: lht@qust.edu.cn



摘 要: 知识追踪任务旨在通过对学生历史学习数据实时准确地追踪学生知识状态, 并预测学生未来的答题表现. 针对当前研究忽略了题目涵盖知识点中复杂的高阶关系的问题, 提出一种融合知识点关系的深度记忆网络知识追踪模型 (deep memory network knowledge tracing model incorporating knowledge point relationships, HRGKT). 首先, HRGKT 使用知识点关系图定义图中节点之间的关系信息, 表示知识点之间的丰富信息. 使用 GAT 获取两者之间的高阶关系. 然后, 学习过程中存在着遗忘, HRGKT 综合考虑 4 个影响知识遗忘的因素来更准确地追踪学生知识状态. 最后, 根据真实在线教育数据集上的实验比较结果, 与当前知识追踪模型相比, HRGKT 在追踪学生知识掌握状态方面表现更加准确, 并且具备更好的预测性能.

关键词: 智慧教育; 知识追踪; 图注意力网络; 知识点关系

引用格式: 王忠, 王净雨, 于浩然, 徐文, 梁宏涛. 融合知识点关系的深度记忆网络知识追踪. 计算机系统应用, 2024, 33(8): 78-89. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/9590.html>

Deep Memory Network Incorporating Knowledge Point Relationship for Knowledge Tracing

WANG Zhong, WANG Jing-Yu, YU Hao-Ran, XU Wen, LIANG Hong-Tao

(College of Information Science and Technology, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: The knowledge tracing task aims to accurately track students' knowledge status in real time and predict students' future performance by analyzing their historical learning data. This study proposes a deep memory network knowledge tracing model incorporating knowledge point-relationships (HRGKT) to address the problem that current research has neglected complex higher-order relationships in the knowledge points covered by the questions. Firstly, HRGKT uses the knowledge point relationship graph to define the relationship information between nodes in the graph, which represents the rich information between knowledge points. GAT is used to obtain higher-order relationships between them. Then, forgetting exists in the learning process, and HRGKT considers four factors affecting knowledge forgetting to track students' knowledge status more accurately. Finally, based on the experimental comparison results on real online education datasets, HRGKT performs more accurately in tracing students' knowledge mastery status and has better prediction performance than current knowledge tracing models.

Key words: intelligent education; knowledge tracing; graph attention network (GAT); knowledge point relationship

目前互联网技术不断发展, 在线教育已经成为一种越来越受欢迎的学习方式. 然而在线教育平台中有着海量的学习资源, 如何为学生自适应推荐符合自身

学习情况的个性化学习资源, 注重弱点帮助学生更加高效地学习^[1]. 让每个学生都能够得到专属的学习计划和教学资源, 实现个性化教学. 个性化学习^[2]是智慧教

① 基金项目: 国家自然科学基金 (61973180, 62172249, 61773208); 山东省产教融合研究生联合培养示范基地项目 (2020-19)

收稿时间: 2024-02-23; 修改时间: 2024-03-19; 采用时间: 2024-04-01; csa 在线出版时间: 2024-07-03

CNKI 网络首发时间: 2024-07-08

育领域重要的课题,实现这个过程最重要的是实时追踪学生知识状态.知识追踪(knowledge tracing, KT)任务旨在利用学生历史的学生数据进行分析,实时有效地追踪学生知识状态,并且预测学生未来的表现,是实现智慧教育的重要基础.此外知识追踪还可以帮助教师实现更加精准地评估和反馈,从而提高教学质量和效果,实现在线教育的智能化.

随着深度学习因其强大的表征能力被应用于各类研究中,基于深度学习的知识追踪模型被大量提出,模型的性能优于传统的知识追踪.深度知识追踪模型(deep knowledge tracing, DKT)^[3]基于循环神经网络(recurrent neural network, RNN)^[4]进行建模任务,使用隐藏层来表示学生的知识状态.最近几年,图神经网络(graph neural network, GNN)^[5]已成为一种有效的分析图结构数据的方法,并在KT领域中得到广泛应用.KT领域的研究受GNN启发,基于GNN的知识追踪(graph-based knowledge tracing, GKT)^[6],它构建了知识点关系图,并将知识追踪任务转化为GNN中的时间序列节点级分类问题.通过这一方法,我们能够更加有效地捕捉知识点之间的关联,从而提高知识追踪的准确性和效率.基于联合图卷积网络的深度知识追踪(joint graph convolutional network based deep knowledge tracing, JKT)^[7]通过练习与练习、知识点与知识点的关系构建多维关系图,并将其与练习-知识点关系融合.基于双图对比学习的知识追踪(bi-graph contrastive learning based knowledge tracing, Bi-CLKT)^[8]采用了全局双层和局部双层结构的对比学习,分别应用图级和节点级的GCN来提取练习与练习、概念与概念的关系信息.图结构可以有效地捕捉题目之间的潜在关系,在一定程度上丰富了题目的表示形式.对于如何准确表示题目和知识点之间关系信息以及可解释性问题一直是研究的重点内容.

上述知识追踪研究在KT领域中取得了显著进展,但它们仍面临一些缺陷.首先,在知识追踪任务中,知识点之间的关系往往非常复杂,简单的同构图仅使用题目-知识点无法准确刻画这些关系.另外一些研究忽略了两者的关系,其次,在整个学习过程中学习和遗忘是同时存在的,遗忘会对学生知识状态产生影响.一些研究忽略了学生的遗忘行为或者考虑得不够全面.

针对上述问题,本文提出一种融合知识点关系的深度记忆网络知识追踪模型(HRGKT).本文的主要创

新和贡献包括以下几个方面.

(1) 引入知识点关系图来有效地捕捉知识点之间的复杂关系,建模学生答题序列中知识点之间的高阶关系.

(2) 应用教育学理论中的学习和遗忘曲线等概念建立一个综合模型,用于捕捉随着时间的变化学生对知识点掌握程度的改变.

(3) 在4个真实的数据集上进行实验,证明该模型在性能预测方面优于现有模型.

本文第1节回顾与知识追踪相关的研究工作.第2节介绍一些重要的定义和符号.第3节详细介绍模型各个模块.在第4节中,详细阐述相关的实验结果,并对其进行分析.最后,在第5节中,给出研究结论并展望未来的研究方向.

1 相关工作

1.1 知识追踪

在本节中首先回顾知识追踪的相关工作,其次对所使用的方法进行介绍.在知识追踪领域主要有两种方法,一种是传统的基于隐马尔可夫模型^[9]的知识追踪,另外一种是基于深度学习的知识追踪^[10].传统的方法主要为贝叶斯知识追踪BKT^[11],是构建学生学习序列模型中最常用的方法.BKT将学生知识状态定义为二元组(掌握,未掌握),通过HMM更新学生知识状态进而预测学生未来表现.模型未考虑学生个体差异以及遗忘行为,知识点之间是相互独立的.针对以上问题,Pardos等人^[12]考虑学生的个体差异,初始掌握知识点的概率是不同的,在BKT的基础上进行扩展,改进了BKT.BKT以及BKT的扩展具有相对比较简单,解释性强的优点,但是仅将知识状态表示为二元组不符合实际认知状态,还具有一定的局限性.

深度知识追踪DKT模型首先将深度学习技术应用于知识追踪领域,其核心思想在于将学生的练习和响应嵌入作为模型的输入数据.通过利用循环神经网络RNN中的隐藏层,DKT能够有效地表示学生的知识状态,从而精准地预测他们在未来的学习表现.DKT存在重构和预测波动问题,Yeung等人^[13]定义重构误差和波度测量,将原始损失函数增强为正则化损失函数,解决了上述两个问题.Chen等人^[14]将知识点之间的先决条件引入知识追踪,更准确地预测学生未来表现.Wang等人^[15]把练习之间的关系表示成练习关

系图, 将练习之间的关系信息融入学生知识状态建模中. Su 等人^[16]通过双向长短期记忆网络 (bi-directional long short-term memory, BiLSTM) 自动捕捉练习文本每个练习的语义, 充分利用练习文本中丰富的信息. 但是基于 RNN 的深度知识追踪使用隐藏层表示学生整个知识状态, 无法表示每个知识点的状态, 可解释性差. 动态键值记忆网络知识追踪模型 (dynamic key-value memory networks for knowledge tracing, DKVMN)^[17]受到记忆增强网络的启发使用一个静态矩阵 M^k 来存储知识点, 一个动态矩阵 M^v 来存储知识点状态, 实时追踪每个知识点状态. Ai 等人^[18]在 DKVMN 的基础上, 人工设计静态矩阵 M^k 中知识点信息, 支持输入更多特征来获得更高的性能. Minn 等人^[19,20]将学生能力考虑在内, 根据学生能力进行动态分组追踪学生的表现, 并随着时间的推移定期进行重新评估. 琚生根等人^[21]针对现有模型可能无法直接处理包含多个知识点的题目以及可解释性不足问题, 提出了一种多知识点融合嵌入的深度知识追踪模型 (deep knowledge tracing model based on embedding of fused multiple concepts, MCAKT).

总的来说, 深度学习在知识追踪领域的应用能够精准地捕捉学生的知识状态, 并且能有效预测学生未来的答题表现. 但是模型忽略了题目涵盖知识点中复杂的高阶关系以及遗忘行为, 或者考虑得不够全面. 模型还有着一定的局限性, 还存在改进的空间, 进而可以提高模型的预测准确性和可解释性.

1.2 图注意力网络

图注意力网络 (graph attention network, GAT)^[22]是一种用于处理图结构数据的深度学习模型. 传统的图神经网络通常使用固定的邻居采样策略或基于图拉普拉斯算子进行特征传播, 而 GAT 引入了注意力机制来动态地对节点之间的关系进行建模. 它通过学习每个节点与其邻居节点之间的权重分配, 从而捕捉到不同节点之间的重要性差异.

如图 1 所示, 在 GAT 中其核心思想是通过自适应地计算每个邻居节点对当前节点的重要性权重, 然后根据这些权重对邻居节点的特征进行加权汇聚. 具体而言, GAT 利用一个前馈神经网络来计算每个节点对应的注意力系数, 然后将注意力系数与邻居节点的特征进行加权求和, 得到当前节点的表示. 这种机制使得 GAT 能够更好地捕捉到图中全局和局部之间的关系, 提高了模型的表达能力.

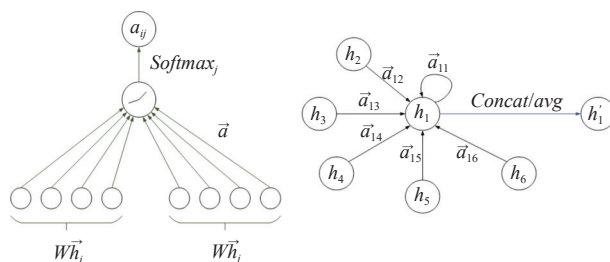


图 1 GAT 框架结构

2 问题定义

在本节中, 首先介绍 KT 相关的任务, 然后给出知识点关系图涉及的一些定义并给出它们的解释.

2.1 KT 任务

KT 任务的核心在于实时、精准地追踪学生的知识状态, 基于其历史学习数据, 进而对学生未来的答题表现进行预测. 这一任务的实现有助于更全面地掌握学生的学习进展, 并为教育评估提供有力支持. 在 KT 中每个学生的答题序列由一系列题目和回答组成, 假设 Q 表示题目集合, K 表示知识点集合. 定义学生的答题序列为, 其中表示学生交互的第 t 个题目. a_t 表示学生相应的题目回答情况, 1 表示回答正确, 0 表示回答错误. 给定学生以上的答题序列, 实现实时追踪学生的知识状态, 并且预测学生未来 $t+1$ 时刻题目的答题表现.

通过图 2 中的学生学习历史过程例子可以更直观清楚地说明 KT 的任务. 如何根据他们的历史作答结果通过知识追踪来精确地追踪每个人的知识水平, 进而为每个人推荐符合自身学习情况的题目、老师为每个学生制定专属的学习计划以及进行智能学情诊断^[23]等.

	k_1			k_2			k_3		
	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6	q_7	q_8	q_9
s_1	√	×	√	√	√	√	√	×	√
s_2	√	√	×	×	√	√	√	×	√
s_3	×	×	√	×	×	√	√	×	√

图 2 学生学习历史过程

2.2 知识点关系图

学生在答题过程中, 题目、知识点之间存在着关系. 如图 3 所示, 将学生答题记录中的题目和知识点之间的关系进行表示. 图中题目 q_2 包含知识点 k_1 和 k_3 , 因此 k_1 和 k_3 通过题目 q_2 产生了关系.

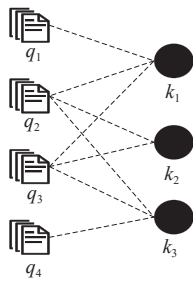


图3 题目知识点关系图

因此在知识点关系图中, 节点是所有的知识点, 每条边关系是知识点与题目的一阶邻居知识点产生, 也就是一个题目包含的所有知识点都有关系信息. 如图 中 q_2 包含的 k_1, k_2, k_3 , 3 个节点在知识点关系图中存在边的关系.

为了精准将知识点之间存在的关系, 定义知识点集合为 $T = \{t_i\}_{i=1}^{|T|}, t_i \in \{k_n\}, n \in |K|$. 因此将知识点关系图定义为 $HG = \{t_i, t_n, b_{ij}\}$, 其中节点表示知识点, $b_{ij} \in \{0, 1\}$, 1 表示两者之间有关系, 0 表示两者之间不存在关系.

2.3 遗忘因素

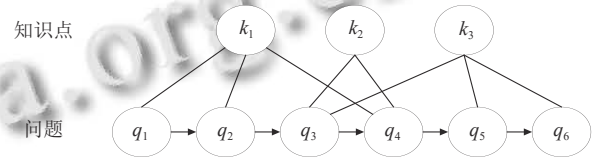
教育心理学艾宾浩斯遗忘曲线^[24,25]表明, 学生的知识遗忘受到重复学习的次数和时间间隔的影响, 时间间隔包括顺序时间间隔和重复学习相同知识点时间间隔. 此外, 学生对知识点的掌握程度也会对其遗忘产生影响^[26]. 因此考虑以下 4 个影响知识遗忘的因素.

具体影响遗忘的 3 个因素示例如图 4 所示. 上次学习的时间间隔 (sequential learning interval, SLI), SLI 表示当前学习时间距离上次学习产生的时间间隔. 最近知识点时间间隔 (knowledge learning interval, KLI), KLI 表示当前作答题目与含有相同知识点的相关题目距离的最近时间. 知识点重复学习次数 (number of repetitive studies, NRS), NRS 表示整个学习过程中学习过知识点的次数. 知识点原本掌握程度 (knowledge mastery level, KML), KML 表示学生对某个知识点本身的掌握程度.

3 融合知识点关系的深度记忆网络知识追踪模型

本节详细介绍融合知识点关系的深度记忆网络知识追踪模型 HRGKT. HRGKT 框架图如图 5 所示, 由 HG 嵌入模块、记忆网络模块以及预测模块 3 个模块组成. 其中, HG 嵌入模块用于学习 HG 中知识点之间

的关系信息以及两者的高阶关系信息. 另外 HG 模块还能通过知识点关系图动态地捕捉知识点关系信息. 记忆网络模块主要是跟踪学生知识状态的动态变化, 分为知识点嵌入模块、知识点状态模块、学习模块以及遗忘模块. 预测模块使用 HG 模块中的知识点关系嵌入矩阵以及记忆网络模块中的知识状态预测学生正确回答题目的概率. 由此, HRGKT 模型可以更加全面、准确地了解学生的知识状态, 提供更好的学习指导和帮助.



时间	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
知识点	k_1	k_1	k_2, k_3	k_1, k_2	k_3	k_3
SLI	0	1	1 1	1 1	1	1
KLI	0	1	0 0	2 1	2	1
NRS	1	2	1 1	3 2	2	3

图4 影响遗忘的 3 个因素

3.1 HG 嵌入模块

本模块使用 GAT 捕捉 HG 中题目知识点之间的高阶关系信息. 知识点之间的高阶关系是知识点关系图中知识点与其二阶邻居等多阶关系信息. 知识点的邻居则属于同一题目涵盖的所有知识点. HG 模块只关注知识点的关系状态.

因为某一个知识点状态变化会影响与其有关系的知识点状态的变化. 所以采用 GAT 获取知识点关系图 HG 中各个知识点的高阶关系信息, 来捕捉知识点之间变化的相互影响关系. 根据第 2.2 节中的 HG 图计算每个知识点之间的注意力系数, 使用自注意力机制用于所有知识点, 使用共享权重矩阵用于邻居节点, 使用激活函数获得知识点之间的关系系数. 具体过程如式 (1):

$$n_{ij} = \text{LeakyReLU}(W \cdot [W_i \cdot t_i \parallel W_j \cdot t_j]) \quad (1)$$

其中, \parallel 表示连接操作, \cdot 表示内积操作. 对 n_{ij} 进行归一化操作, 得到节点的注意力权重, 具体过程如式 (2):

$$a_{ij} = \text{Softmax}(n_{ij}) = \frac{\exp(n_{ij})}{\sum_{k \in N_i} \exp(n_{ik})} \quad (2)$$

其中, N_i 表示节点 t_i 的相邻知识点的数量, a_{ij} 表示知识点 t_i 与邻居知识点 t_n 的注意力权重. 另外多头注意力层的引入, 为稳定学习注意力权重提供了有效手段. 通过 M 个独立的注意力机制, 每个中心节点的权重得以精确计算, 进而产生 M 个注意层面. 然后, 对这些注意层面进行平均处理, 并经过激活函数的转换, 最终生成知识点的最终表示, 具体的过程如式 (3):

$$t_i^{(h)} = \sigma \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{j \in N_i} a_{ij}^m \cdot W_t^m \cdot t_n \right) \quad (3)$$

为了让知识点表示更加全面, 通常会设置多个图注意力层进行训练. 经过 h 层的图注意力层训练后, 每个中心节点能够获取到 h 阶邻居节点的信息. 通过多层图注意力的训练, 节点能够更好地捕捉到图结构中的重要关系和特征^[27].

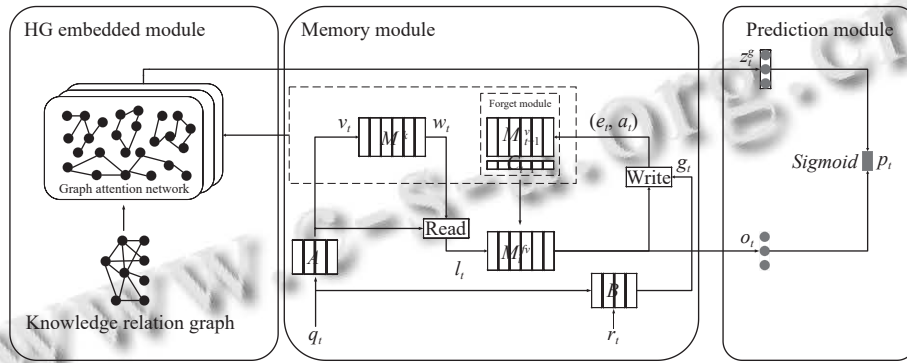


图5 HRGKT 模型框架图

3.2 记忆网络模块

本模块旨在学习知识追踪任务中知识点的嵌入表示, 计算题目与知识点之间的知识相关权重. 另外考虑学生学习过程中的学习行为以及遗忘行为对学生知识状态进行维护, 动态地追踪学生的知识状态.

3.2.1 知识点嵌入模块

知识点嵌入模块用来学习知识点的表示, 该模块为每个知识点存储一个嵌入向量, 将其表示为一个矩阵 $M^k \in \mathbf{R}^{N \times d_k}$. 其中 N 是知识点数量, d_k 是嵌入维度. 为了计算当前题目与知识点集合中每个知识点之间的相关性, 使用题目的 one-hot 编码得到题目嵌入 $\delta(q_t) \in \mathbf{R}^{|Q|}$ 与学习的嵌入矩阵 $A \in \mathbf{R}^{|Q| \times d_k}$ 得到题目嵌入向量 $v_t \in \mathbf{R}^{d_k}$. 将得到 v_t 与 M^k 矩阵进行内积, 使用 *Softmax* 函数进行计算得到与各个知识点之间的相关性向量 $w_t \in \mathbf{R}^N$.

$$w_t(i) = \text{Softmax}(v_t^T M^k(i)) \quad (4)$$

3.2.2 遗忘模块

遗忘模块用来表示学生遗忘行为对知识状态产生的影响, 通过 4 个遗忘因素分别对不同的知识点进行遗忘处理. 根据第 2.4 节中提出影响遗忘的 4 个因素, 将 3 个 *SLI*, *KLI*, *NRS* 影响遗忘的因素进行连接, 组合成向量 $C_t(i) = [SLI_t(i), KLI_t(i), NRS_t(i)]$ 表示对 i 知识

点影响遗忘的因素. 每个知识点所对应的向量 $C_t(i)$ 组成矩阵 C_t . 因为知识点状态信息存储在 M_t^v 矩阵中, 第 i 个知识点的掌握程度表示为 $M_t^v(i)$, 所以 t 时刻开始学习时对 i 知识点原本的掌握程度便表示为 $M_{t-1}^v(i)$. 用 M_{t-1}^v 作为学生原本对知识点的掌握程度, 将 C_t 和 M_{t-1}^v 组合作为 4 个影响遗忘的因素 $F_t[M_{t-1}^v, C_t]$.

以上遗忘因素 F_t 对上一次学习结束的学生知识状态 M_{t-1}^v 进行遗忘处理得到本次开始学习的知识状态 M_t^{fv} . 学生在经过遗忘后, 知识状态会发生改变, 因此需要先擦除 M_{t-1}^v 中的知识状态信息, 然后将学生新的知识状态写入. 首先将遗忘影响因素 $F_t(i)$ 转为对应的记忆擦除向量 $f_{e_t}(i)$.

$$f_{e_t}(i) = \text{Sigmoid}(W_1^T F_t(i) + b_1) \quad (5)$$

然后将 $F_t(i)$ 转为对应的记忆更新向量 $f_{a_t}(i)$:

$$f_{a_t}(i) = \tanh(W_2^T F_t(i) + b_2) \quad (6)$$

其中, W_1 、 W_2 是权重矩阵, b_1 、 b_2 为偏置向量.

根据记忆擦除向量与记忆更新向量对 $t-1$ 时刻的知识状态进行遗忘处理得到 t 时刻开始学习时的知识状态 M_t^{fv} .

$$M_t^{fv}(i) = M_{t-1}^v(i)(1 - f_{e_t}(i))(1 + f_{a_t}(i)) \quad (7)$$

3.2.3 知识点状态模块

知识点状态模块用来表示学生知识点的状态,该模块使用 $M_t^v \in \mathbf{R}^{N \times d_v}$ 矩阵存储着学生每一个知识点的状态,其中 N 是知识点的数量, d_v 是状态维度. 因为知识点会产生遗忘所以通过第 3.2.1 节中的 w_t 将与题目相关的知识点状态信息从矩阵 M_t^{fv} 中使用加权的方式读取.

$$l_t = \sum_{i=1}^N w_t(i) M_t^{fv}(i) \quad (8)$$

其中, $l_t \in \mathbf{R}^{d_v}$ 表示题目相关的知识点状态信息,但是它不包括关于题目本身的信息,将其与 v_t 进行线性组合来解决得到向量 $o_t \in \mathbf{R}^N$. $W \in \mathbf{R}^{N \times (d_v + d_k)}$ 为权重矩阵, b 为偏置向量,组合向量 o_t 表示题目 q_t 以及相关知识点状态的信息.

$$o_t = \tanh(W[l_t, v_t] + b) \quad (9)$$

3.2.4 学习模块

学习模块根据学生不同的答题结果实时追踪学习过程知识状态的变化,进而更新学生知识的状态. 将学生开始学习的知识状态 M_t^{fv} 根据答题结果更新为学习完成的知识状态 M_{t+1}^v . 学生回答题目 q_t 后,学习模块会根据学生的答题结果对学生知识状态进行更新. 元组 $(\delta(q_t), r_t)$ 被嵌入到矩阵 $B \in \mathbf{R}^{2Q \times d_v}$ 中获得知识增长嵌入向量 g_t^q , 将知识增长嵌入向量与组合向量 o_t 进行连接,把最新的题目回答信息与相应的知识状态向量结合起来 $g_t = [g_t^q, o_t]$. 然后将知识增长 g_t 写入知识状态矩阵,在更新知识状态之前首先使用擦除信号 e_t 擦除信息,其次使用添加信号 a_t 决定要写入的新信息,具体过程如下.

$$e_t = \text{Sigmoid}(W_e \cdot g_t + b_e) \quad (10)$$

其中, W_e 是可学习的权重矩阵, b_e 是偏置向量,给定擦除信号 e_t , 学生知识状态由开始学习时的 M_t^{fv} 更新为 \tilde{M}_{t+1}^{fv} .

$$\tilde{M}_{t+1}^{fv}(i) = M_t^{fv}(i)[1 - w_t(i)e_t] \quad (11)$$

在擦除以上信息后,使用添加信号 a_t 来更新知识状态, a_t 的计算公式如式 (12). 其中 W_a 是可学习的权重矩阵, b_a 是偏置向量.

$$a_t = \tanh(W_a \cdot g_t + b_a) \quad (12)$$

最后计算 t 时刻答完题之后未经过遗忘的学生知识状态,具体计算公式如式 (13):

$$M_{t+1}^v(i) = \tilde{M}_{t+1}^{fv}(i) + w_t(i)a_t \quad (13)$$

3.3 预测模块

预测模块是对学生未来的答题表现进行预测,本质上就是考查学生对题目所含知识点的掌握情况. 为了预测输入题目 q_{t+1} 正确回答的概率,考虑到学生的遗忘行为,预测层根据当前时刻的知识掌握嵌入矩阵 M_{t+1}^{fv} 来进行预测. 根据第 3.2.3 节知识点状态模块中的式 (8)、式 (9) 得到学生对习题组合向量 o_{t+1} .

另外还要考虑与题目涵盖知识点相关的知识点对答题结果的影响^[28]. 计算图摘要向量 $z_{t+1}^s \in \mathbf{R}^N$ 其使用相关向量 w_{t+1} 将第 3.1 节中的 GAT 输出附加到当前问题 q_{t+1} .

$$z_{t+1}^s = \tanh\left(W_z \left(\sum_{i=1}^K w_{t+1}(i) H(i) \right) + b_z\right) \quad (14)$$

其中, W_z 是可学习的权重矩阵, H 是第 3.1 节中 GAT 最终层的输出矩阵, b_z 是偏置向量.

最后来自记忆网络模块的组合向量 o_{t+1} 与图摘要向量 z_{t+1}^s 将其输入到具有 *Sigmoid* 激活的全连接层,得到 $t+1$ 时刻正确回答习题的概率 p_{t+1} .

$$p_{t+1} = \text{Sigmoid}(W_p[o_{t+1}, z_{t+1}^s] + b_p) \cdot \delta(q_{t+1}) \quad (15)$$

其中, W_p 和 b_p 分别表示权重矩阵与偏置向量.

3.4 模型优化

在模型训练过程中,主要的参数包括题目嵌入矩阵 A 、答题结果嵌入矩阵 B 、神经网络中的权重与偏置,以及知识点矩阵 M^k . 这些参数共同构成了模型的核心组成部分,对于模型的性能与准确性具有至关重要的影响.

为了更好地训练模型,本文中建立了一个联合训练框架,以实现模型参数的最优化. 一方面首先为了能更好获取知识点关系图中知识点关系信息,使用内积的方式来评估图中节点之间的关系. 具体过程如式 (16). 其中 σ 表示的是 *Sigmoid* 激活函数, $i, n \in [1, \dots, |T|]$.

$$\hat{b}_{ij} = \sigma(t_i^T, t_n) \quad (16)$$

为了让节点之间关系更加符合真实结果构建交叉熵损失函数来保持两者关系如式 (17) 所示:

$$L_1 = \sum_{i=1}^{|T|} \sum_{j=1}^{|T|} -(b_{ij} \log \hat{b}_{ij} + (1 - b_{ij}) \log(1 - \hat{b}_{ij})) \quad (17)$$

另一方面通过使用 Adam 方法最小化模型对预测

值 p_t 和真实结果 r_t 之间的交叉熵损失来优化各个参数, 如式 (18) 所示:

$$L_2 = - \sum (r_t \log p_t + (1 - r_t) \log (1 - p_t)) \quad (18)$$

最后针对预训练问题, 知识点信息目标和知识追踪目标进行联合优化, 其中 λ_1, λ_2 为系数. 公式如式 (19) 所示:

$$L = \lambda_1 L_1 + \lambda_2 L_2 \quad (19)$$

3.5 算法伪代码

本节主要介绍 HRGKT 模型的伪代码, 伪代码如算法 1 所示.

算法 1. HRGKT 算法训练过程

输入: 学生答题历史记录以及知识点关系图 HG.

输出: 学生未来答题表现.

1. 初始化权重、偏置参数和嵌入矩阵
2. For each epoch
3. 式 (3) 计算知识点的关系信息 $r_i^{(h)}$
4. one-hot 编码题目嵌入, 式 (4) 计算知识点相关向量 w_t
5. 式 (7) 计算经过遗忘后的掌握状态 M_t^{fv}
6. 式 (8) 计算知识点掌握状态 l_t
7. 式 (9) 计算组合向量 α_t
8. 式 (14) 计算图摘要向量 z_t^g
9. 式 (15) 预测学生答题表现概率 p_t
10. 式 (13) 更新知识点状态矩阵 M_{t+1}^v
11. 计算损失函数, 更新参数
12. end for

4 实验与分析

在本节中描述了进行的实验以验证 HRGKT 模型方法的有效性. 在 4 个真实的在线教育数据集上比较了 HRGKT 与 5 个基准模型的性能. 最后进行两个消融实验, 以观察 HRGKT 模型核心模块的有效性.

4.1 数据集

本文的实验是在 4 个经典的公开知识追踪数据集上进行的. 数据集为 ASSISTments2009, Statics2011, ASSISTments2012, Synthetic-5. 这些数据集的详细统计数据见表 1, 其中 Student 表示学生数量, Question 表示题目数量, Knowledge 表示知识点数量, Records 表示答题总数.

ASSISTments2009 数据集是通过 ASSISTments 在线教育平台在 2009–2010 年期间收集而来的, 共有 4 151 名学生参与, 包括 17 751 个题目和 325 637 个练

习涵盖 110 个知识点, 主要涉及数学方面的相关知识. Statics2011 这个数据集包含从卡内基梅隆大学在 2011 学年所开设的工程课程中收集 1 223 个题目, 共有 333 名学生参与和 189 297 个练习涵盖 85 个工程知识点, 包括力学相关知识点. ASSISTments2012 数据集是 ASSISTments 在线教育平台在 2012 年收集的数据涉及几何, 概率统计等与数学相关的知识点. Synthetic-5 是 DKT 使用的模拟数据集, 数据集中模拟 4 000 个学生回答 50 个题目的学习过程, 产生了 200 000 的练习记录, 包含 5 个虚拟知识点.

表 1 数据集统计信息

Dataset	Student	Question	Knowledge	Records
ASSISTments2009	4 151	17 751	110	325 637
Statics2011	333	1 223	85	189 297
ASSISTments2012	27 405	47 104	265	1 867 167
Synthetic-5	4 000	50	5	200 000

4.2 实验基准

为了评估 HRGKT 的性能, 需要与其他基准模型进行比较. 对 5 个基准模型进行介绍, 所有模型的参数按照研究者提供的最佳参数进行设置, 基准模型的详细信息如下.

DKT^[3]使用 RNN 对学生的知识状态进行建模. DKT 是第 1 个使用深度学习来实现知识追踪任务的模型.

Bi-CLKT^[11]采用了全局双层和局部双层结构的对比学习, 分别应用图级和节点级的 GCN 来提取练习与练习和概念与概念的关系信息.

DKVMN^[19]使用一个键值矩阵来追踪学生各个知识点的知识状态, 实时追踪各个知识点.

LFKT^[26]将学生的遗忘行为考虑在内, 综合考虑了 4 个遗忘影响因素, 模拟学生学习过程中的遗忘行为.

DKT+forget^[29]在 DKT 的基础上通过增加从题目回答序列中计算出的遗忘特征, 考虑学生的遗忘行为扩展了 DKT 模型.

4.3 评价指标与实验设置

在实验中, 采用 AUC (area under the curve) 评价指标来评估模型的性能. ROC 曲线全称为接收者操作特征曲线, 它是以假阳性率 (FPR) 作为横坐标, 真阳性率 (TPR) 作为纵坐标进行绘制的. 当 ROC 曲线越趋近于左上角时, 意味着分类模型的性能表现越佳. AUC 的值等于 ROC 曲线下的面积, AUC 的值越大, 说明模型

的性能越好。

本文模型是在内存 32 GB, Intel Core i7, RTX 3060 的主机上进行实验。模型将数据集随机划分为 3 个部分: 训练集、验证集和测试集。其中, 70% 的数据被用作训练集, 20% 的数据被用作测试集, 10% 的数据被用作验证集。训练集用于模型的训练, 验证集用于超参数的调整, 而测试集则被用于评估模型的性能表现。

模型使用 TensorFlow 框架, 在实验中采用 5 折交叉验证的方法来评估模型的性能表现, 使用零均值随机高斯分布初始化记忆矩阵和嵌入矩阵。超参数设置如下, 最大训练次数 500 次, 使用 Adam 梯度下降算法优化模型的参数, 学习率为 0.001。训练的批次大小一般设置为 64, 知识点表示和知识点掌握水平表示向量维度设置为 $d = d_k = d_v$ 以减少模型参数数量, 根据不同数据集大小进行调整, ASSISTments2012 设置为 32 时

训练效果最好。对 GAT 注意力层数进行实验分析, 注意力层数在 3 层时, AUC 的值最高。

4.4 实验结果

本节比较了 5 种模型在 4 个公开数据集上的 AUC 结果, 如表 2、图 6 所示。根据给出的表 2、图 6 可以看到 HRGKT 在 4 个数据集上的 AUC 值均优于其他 5 种模型。在 4 个数据集上分别实现 AUC 平均改善 1.0%, 0.4%, 1.2% 和 0.5%。

表 2 不同数据集上 AUC 的比较

Model	ASSISTments-2009	Statics2011	ASSISTments-2012	Synthetic-5
DKT	0.7356	0.8043	0.7092	0.7506
DKT+forget	0.7421	0.7452	0.7251	0.7513
DKVMN	0.8162	0.8281	0.7286	0.8271
LFKT	0.8463	0.8536	0.7515	0.8521
Bi-CLKT	0.8452	0.8521	0.7523	0.8535
HRGKT	0.8568	0.8576	0.7643	0.8589

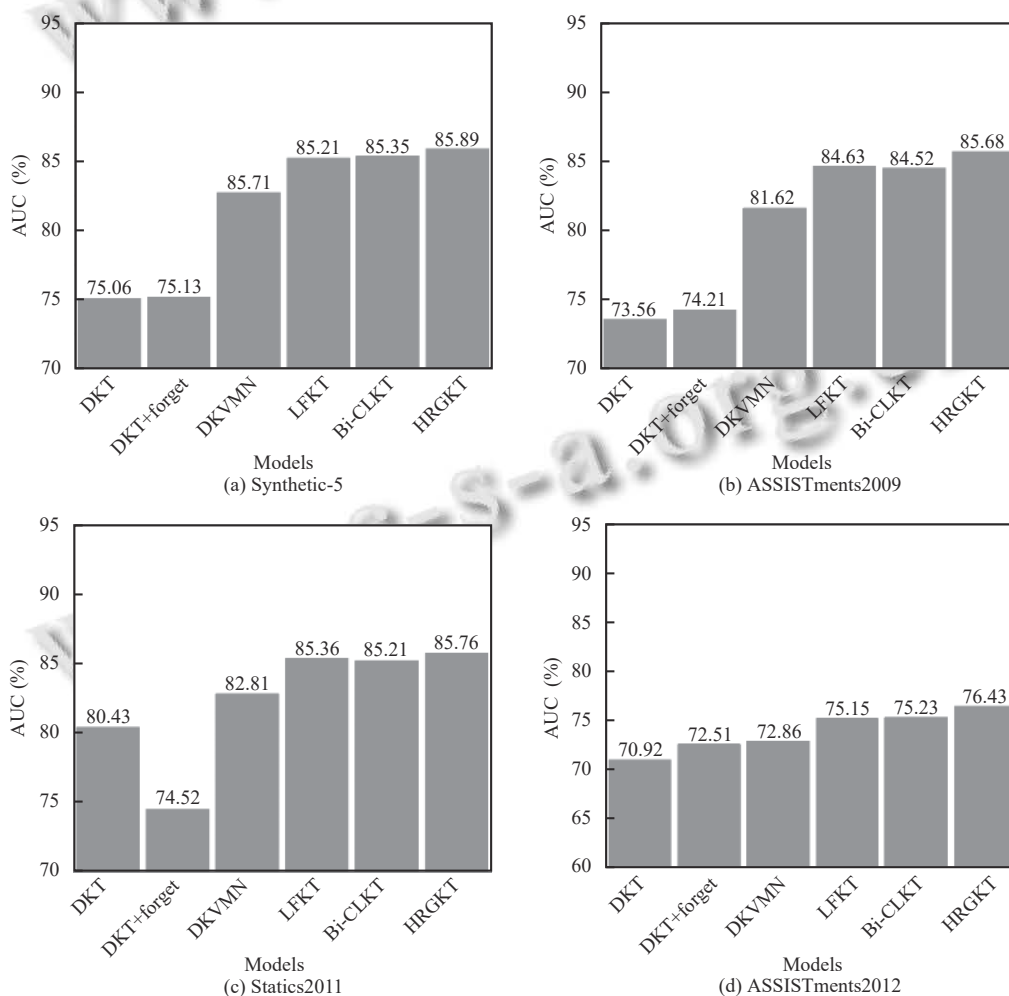


图 6 模型在不同数据集上的 AUC 对比

结果表明, HRGKT 模型分别使用了 HG 模块的图结构特征以及遗忘特征, 在预测学生未来表现方面性能是优于现有模型的. 与 DKT, DKT+forget, DKVMN, LFKT, Bi-CLKT 相比, DKT 两个特征都没有使用, DKT+forget, LFKT 只使用遗忘特征, DKVMN 仅使用记忆网络没有考虑其余特征, Bi-CLKT 仅使用知识点图关系信息, 所以 HRGKT 在性能上有着更大的优势.

实验对单个学生的知识状态预测进行了可视化比

较, 在数据集 ASSISTments2012 中随机抽取了 1 名学生作答的 16 道题目, 其中这 16 道题目包含 6 个知识点. 学生的作答序列为 $H_t = \{(5, 1), (3, 0), (2, 1), (4, 1), (2, 1), (5, 1), (3, 0), (5, 0), (6, 1), (1, 1), (2, 1), (2, 1), (2, 0), (1, 1), (2, 0), (3, 1)\}$. 为了方便处理将知识点 id 进行了重新编号, 作答序列中每一个元组第 1 项表示知识点 id, 第 2 项表示作答结果. 由图 7 可知 6 个知识点状态变化, 其中横坐标代表学生的答题次数, 通过 4 种模型对学生知识点掌握程度进行追踪.

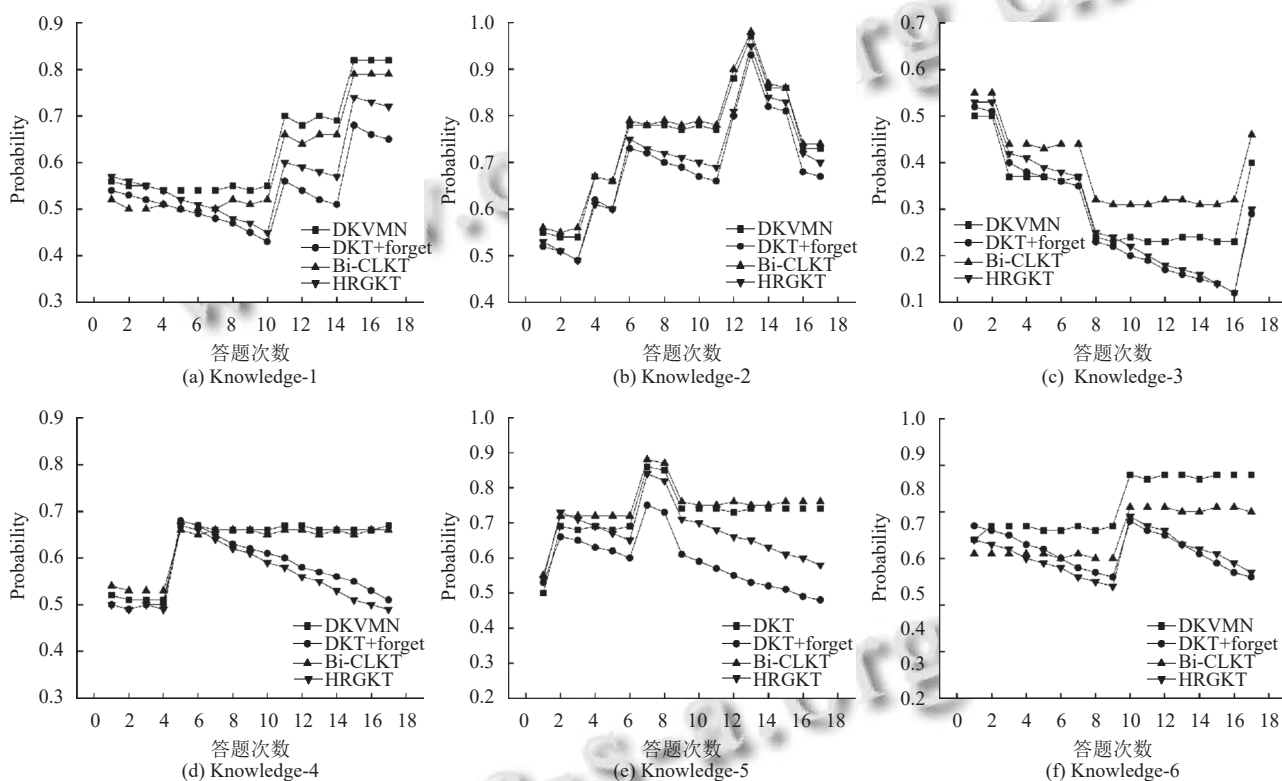


图 7 不同模型知识点状态输出结果图

可以从图 7(b) 中看出在 $t=3$ 时刻学生正确回答问题后, 学生在下一时刻对该知识点的掌握程度有所提升. 在 $t=13$ 时刻错误回答问题后, 在下一时刻该知识点的掌握程度会有明显的下降, 结果证明 6 种模型均可以模拟学生学习过程中的学习行为. 在图 7(d) 中学生人在 $t=4$ 时刻正确回答问题后, 在之后的时间里没有再对该知识点进行继续的学习. 从图 7(d) 中可以看出, 在后续的时间里, DKVMN 和 Bi-CLKT 这些模型对于某个知识点的掌握状态预测有些微小波动, 但变化不大. 然而, 当使用 DKT+forget 和 HRGKT 这两种模型时, 学生对该知识点的掌握状态呈现持续下降的趋势,

并且变化比较大. 这个结果表明, HRGKT 模型能够模拟学生学习过程中由于遗忘而导致的知识状态变化, 并跟踪这些变化过程.

4.5 消融实验

本节进行了消融实验来验证 HRGKT 中 HG 模块和遗忘模块的性能. 表 3 和图 8 分别表示不同 HRGKT 不同变体在 4 个数据集上 AUC 的值.

从表 3 以及图 8 中可以看出 HRGKT (basic) 的 AUC 是最低的, 这是因为该模型没有使用 HG 模块与遗忘模块, 不考虑题目知识点之间的信息以及学生的遗忘行为. HRGKT (without forget) 忽略学生的遗忘行

为,其预测性能较 HRGKT 有所降低.这表明影响遗忘的因素对准确追踪学生知识状态是有效的,遗忘行为会对学生知识状态产生影响. HRGKT (without HRG) 忽略知识点两者之间的关系信息,模型的预测表现不如 HRGKT 模型,并且有所下降.结果说明 HG 模块捕获的题目知识点之间的关系信息能够有效提高模型的准确性.

为了验证遗忘模块的有效性,本文对 DKT+forget, DKVMN 和 HRGKT 模型对知识状态的预测进行对比.如图 9 所示从 ASSISTments2009 随机抽取一名学生回答的 12 个题目,其中涵盖 6 个知识点.从图 9 中 $t=10$

时刻因为遗忘因素 $KLI=4$ 和 $NRS=2$,所以 DKT+forget 对知识点 k_3 预测结果较低.与 DKT+forget 相比,因为 HRGKT 能够捕获 $t=9$ 时刻的 q_8 和 $t=10$ 时刻的 q_6 有着相同的知识点,所以遗忘因素 $KLI=1$ 和 $NRS=3$, k_3 的遗忘概率低于 DKT+forget.在 $t=13, t=15$ 时刻 DKT+forget 对 k_5 的预测概率较低,这是因为 q_5 和 q_{12} 是第 1 次出现在答题序列中无法捕获两个题目之间含有相同知识点的关系.另外在 $t=11$ 时刻学习了 k_4 知识点之后中间没有再学习 k_4 知识点,在 $t=16$ 时刻 HRGKT 比 DKVMN 有着更低的预测概率,这是因为 DKVMN 没有考虑遗忘因素.因此可以证明遗忘模块在知识追踪中是十分有效的.

表 3 HRGKT 变体在不同数据集上的 AUC 值

Model	ASSISTments2009	Statics2011	ASSISTments2012	Synthetic-5
HRGKT (basic)	0.8191	0.8293	0.7321	0.8291
HRGKT (without forget)	0.8393	0.8481	0.7426	0.8491
HRGKT (without HRG)	0.8369	0.8471	0.7411	0.8481
HRGKT	0.8568	0.8576	0.7643	0.8589

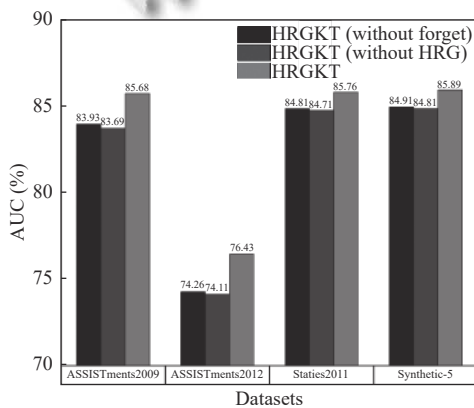


图 8 HRGKT 变体在不同数据集上 AUC 的对比

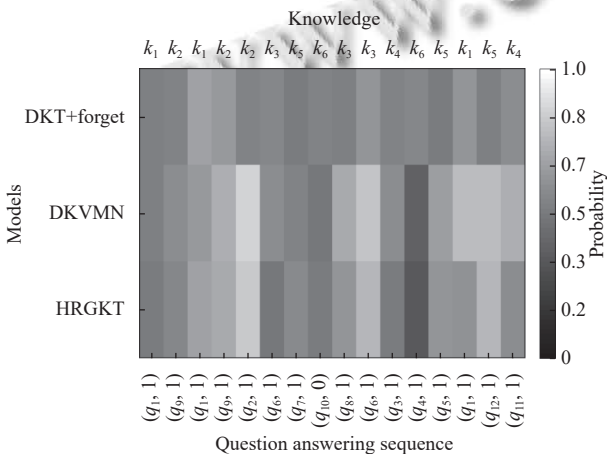


图 9 不同模型知识状态对比结果图

为了验证 HG 模块在知识追踪中的有效性,对数据集中 110 个知识点进行聚类,使用相同的图标表示相似的知识点,为了方便表示将知识点重新编号结果如图 10 所示.

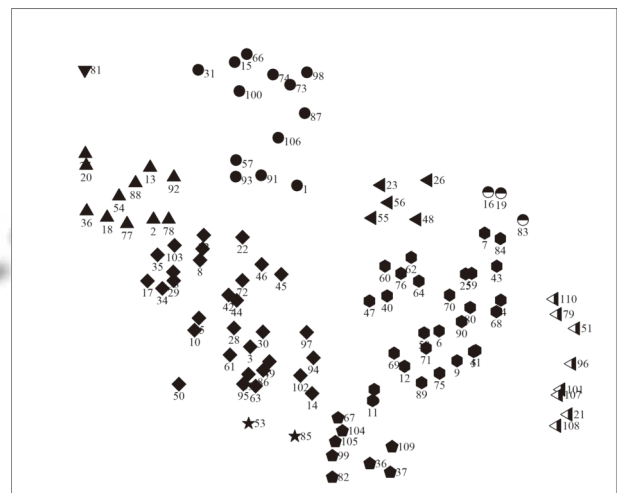


图 10 ASSISTments2009 数据集聚类图

在图 10 中知识点被分为 10 个类别,圆形的集群表示数学中与方程相关的知识点,比如其中 {15, 31, 66, 100} 分别表示两步以上的方程解法、根据图表写出线性方程、根据情况写出线性方程、线性方程.半色圆的集群 {16, 19, 83} 分别表示两个不同事件的概率、单一事件的概率、了解概率的概念,通过描述可以知道该集群是对概率相关的知识点.由此可见 HG 模块能

够很好地对题目知识点进行分类,能够较好地获取题目知识点以及两者之间的关系信息,可以证明该模块在知识追踪中的有效性。

5 总结

本文将知识点之间的关系信息用知识点关系图表示并且使用 GAT 提取两者的高阶关系信息。另外还综合考虑了影响遗忘的 4 个因素,提出了融合知识点关系的深度记忆网络知识追踪模型 HRGKT。在 HRGKT 中,使用 GAT 对邻居信息进行聚合,以得到知识点关系表示。其次考虑学生学习过程中的遗忘行为更加准确地表示学生知识状态,有效预测学生未来的答题表现。最后通过实验可知,HRGKT 模型在 4 个真实公开的数据集上证明了模型的有效性。

在未来的研究中将针对以下方面进行研究。题目、知识点和学生之间的关系往往非常复杂,简单的同构图仅使用题目-知识点无法准确刻画这些异构关系,如何将这异构关系信息充分利用。另外知识点之间存在先决关系等,如何将这关系融入模型也是未来研究工作的重点。

参考文献

- 1 Injadat M, Moubayed A, Nassif B, *et al.* Systematic ensemble model selection approach for educational data mining. *Knowledge-based Systems*, 2020, 200: 105992. [doi: [10.1016/j.knosys.2020.105992](https://doi.org/10.1016/j.knosys.2020.105992)]
- 2 Ingkavara T, Panjaburee P, Srisawasdi N, *et al.* The use of a personalized learning approach to implementing self-regulated online learning. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 2022, 3: 100086. [doi: [10.1016/j.caeai.2022.100086](https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.100086)]
- 3 Piech C, Bassen J, Huang J, *et al.* Deep knowledge tracing. *Proceedings of the 28th International Conference on Neural Information Processing Systems*. Montreal: MIT Press, 2015. 505–513.
- 4 Williams RJ, Zipser D. A learning algorithm for continually running fully recurrent neural networks. *Neural Computation*, 1989, 1(2): 270–280. [doi: [10.1162/neco.1989.1.2.270](https://doi.org/10.1162/neco.1989.1.2.270)]
- 5 Gori M, Monfardini G, Scarselli F. A new model for learning in graph domains. *Proceedings of the 2005 IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, 2005, Montreal: IEEE, 2005. 729–734.
- 6 Nakagawa H, Iwasawa Y, Matsuo Y. Graph-based knowledge tracing: Modeling student proficiency using graph neural network. *Proceedings of the 2019 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence*. Thessaloniki: IEEE, 2019. 156–163.
- 7 Song XY, Li JX, Tang YF, *et al.* JKT: A joint graph convolutional network based deep knowledge tracing. *Information Sciences*, 2021, 580: 510–523. [doi: [10.1016/j.ins.2021.08.100](https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.08.100)]
- 8 Song XY, Li JX, Lei Q, *et al.* Bi-CLKT: Bi-graph contrastive learning based knowledge tracing. *Knowledge-based Systems*, 2022, 241: 108274. [doi: [10.1016/j.knosys.2022.108274](https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.108274)]
- 9 Eddy SR. Hidden Markov models. *Current Opinion in Structural Biology*, 1996, 6(3): 361–365. [doi: [10.1016/S0959-440X\(96\)80056-X](https://doi.org/10.1016/S0959-440X(96)80056-X)]
- 10 王宇, 朱梦霞, 杨尚辉, 等. 深度知识追踪模型综述和性能比较. *软件学报*, 2023, 34(3): 1365–1395. [doi: [10.13328/j.cnki.jos.006715](https://doi.org/10.13328/j.cnki.jos.006715)]
- 11 Corbett AT, Anderson JR. Knowledge tracing: Modeling the acquisition of procedural knowledge. *User Modeling and User-adapted Interaction*, 1994, 4(4): 253–278.
- 12 Pardos ZA, Heffernan NT. KT-IDEM: Introducing item difficulty to the knowledge tracing model. *Proceedings of the 19th International Conference on User Modeling, Adaptation, and Personalization*. Girona: Springer, 2011. 243–254.
- 13 Yeung CK, Yeung DY. Addressing two problems in deep knowledge tracing via prediction-consistent regularization. *Proceedings of the 5th Annual ACM Conference on Learning at Scale*. London: ACM, 2018. 5.
- 14 Chen PH, Lu Y, Zheng VW, *et al.* Prerequisite-driven deep knowledge tracing. *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Data Mining (ICDM)*. Singapore: IEEE, 2018. 39–48.
- 15 Wang ZW, Feng XQ, Tang JL, *et al.* Deep knowledge tracing with side information. *Proceedings of the 20th International Conference on Artificial Intelligence in Education*. Chicago: IEEE, 2019. 303–308.
- 16 Su Y, Liu QW, Liu Q, *et al.* Exercise-enhanced sequential modeling for student performance prediction. *Proceedings of the 32nd AAAI Conference on Artificial Intelligence*. New Orleans: AAAI Press, 2018. 297.
- 17 Zhang JN, Shi XJ, King I, *et al.* Dynamic key-value memory networks for knowledge tracing. *Proceedings of the 26th International Conference on World Wide Web*. Perth:

- International World Wide Web Conferences Steering Committee, 2017. 765–774.
- 18 Ai FZ, Chen YS, Guo YC, *et al.* Concept-aware deep knowledge tracing and exercise recommendation in an online learning system. Proceedings of the 12th International Conference on Educational Data Mining. Montréal: International Educational Data Mining Society (IEDMS), 2019. 240–245.
- 19 Minn S, Yu Y, Desmarais MC, *et al.* Deep knowledge tracing and dynamic student classification for knowledge tracing. Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Data Mining (ICDM). Singapore: IEEE, 2018. 1182–1187.
- 20 Minn S, Desmarais MC, Zhu FD, *et al.* Dynamic student classification on memory networks for knowledge tracing. Proceedings of the 23rd Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Macao: Springer, 2019. 163–174.
- 21 据生根, 康睿, 赵容梅, 等. 多知识点融合嵌入的深度知识追踪模型. 软件学报, 2023, 34(11): 5126–5142. [doi: 10.13328/j.cnki.jos.006724]
- 22 Zhang S, Tong HH, Xu JJ, *et al.* Graph convolutional networks: A comprehensive review. Computational Social Networks, 2019, 6(1): 11. [doi: 10.1186/s40649-019-0069-y]
- 23 Abdelrahman G, Wang Q. Learning data teaching strategies via knowledge tracing. Knowledge-based Systems, 2023, 269: 110511. [doi: 10.1016/j.knsys.2023.110511]
- 24 Ebbinghaus H. Memory: A contribution to experimental psychology. Annals of Neurosciences, 2013, 20(4): 155–156.
- 25 Murre JMJ, Dros J. Replication and analysis of Ebbinghaus' forgetting curve. PLoS One, 2015, 10(7): e0120644. [doi: 10.1371/journal.pone.0120644]
- 26 李晓光, 魏思齐, 张昕, 等. LFKT: 学习与遗忘融合的深度知识追踪模型. 软件学报, 2021, 32(3): 818–830. [doi: 10.13328/j.cnki.jos.006185]
- 27 董永峰, 黄港, 薛婉若, 等. 融合 IRT 的图注意力深度知识追踪模型. 计算机科学, 2023, 50(3): 173–180. [doi: 10.11896/jsjcx.211200134]
- 28 Abdelrahman G, Wang Q. Deep graph memory networks for forgetting-robust knowledge tracing. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2023, 35(8): 7844–7855.
- 29 Nagatani K, Zhang Q, Sato M, *et al.* Augmenting knowledge tracing by considering forgetting behavior. Proceedings of the 2019 World Wide Web Conference. San Francisco: ACM, 2019. 3101–3107.

(校对责编: 孙君艳)