助推的力量：探索智能辅导系统中元认知技能教学的三种干预

Mark Abdelshiheed、John Wesley Hostetter、Preya Shabrina、Tiffany Barnes 和 Min Chi北卡罗来纳州立大学计算机科学系，罗利，北卡罗来纳州 27695{mnabdels、jwhostet、pshabri、tmbarnes、mchi}@ncsu.edu

arXiv:2303.11965v1 [cs.HC] 18 Mar 2023

摘要

演绎领域中，许多认知技能都具有这样的特点：没有一种问题解决策略始终适用于解决所有问题。研究表明，知道如何以及何时使用每种策略（*StrTime*）的学生，表现优于既不知道这些内容、又坚持采用默认策略（*De fault*）的学生。本研究中，学生先使用支持默认策略正向链推理和反向链（BC）策略的逻辑辅导系统接受训练，随后使用仅支持 BC 的概率辅导系统接受训练。我们考察了三种干预方式，教会默认策略学生在逻辑辅导系统中如何以及何时使用哪种策略：示例、提示和呈现组。与此同时，*StrTime* 学生没有接受任何干预。总体而言，结果表明，提示组的表现优于默认策略组的同伴，并在两种辅导系统中的表现都赶上了 *StrTime* 组。

关键词： 元认知技能教学； worked exam- ples；辅导提示；策略教学

引言

演绎任务领域是指解决问题需要论证、证明或推导的领域；每一步都是应用领域原理、操作符或规则的结果。几何、逻辑和概率等演绎领域是 STEM 学科的标准组成部分。在这类领域中，两种常见的问题求解策略是前向链推理（FC）和后向链推理（BC）（Russell & Norvig，2020）。在 FC 中，推理从已知命题推进至目标；而 BC 以目标为导向，从目标状态反向推演至已知状态。早期研究表明，专家往往结合使用 FC 和 BC 策略；更重要的是，他们常常借助过往经验、启发式方法及许多其他类型的知识来确定策略（Priest & Lindsay, 1992）。我们此前的研究表明，知道何时使用哪种问题求解策略（称为*StrTime*）的学生，在不同演绎领域中的学习表现始终良好，因为他们具备必要的元认知技能；而遵循默认策略（称为*De fault*）的同伴则不然（Abdelshiheed 等，2020）。

人们一直认为，元认知技能对于学业成就至关重要（de Boer et al., 2018; Erskine, 2010; Zimmerman, 1990），而此类技能的教学会影响学习结果（Zepeda et al., 2015; M. Chi & VanLehn, 2010）以及策略使用（Lee & Oxford, 2008; Cham- bres et al., 2002; Roberts & Erdos, 1993）。STEM领域通常要求运用各种问题求解策略，一些早期研究将知道如何以及何时使用各项策略视为两种元认知技能（Winne & Azevedo, 2014; Cardelle-Elawar, 1992），分别称为策略与时间意识。

先前研究表明，策略意识有助于帮助学生为未来学习做好准备（Belenky & Nokes-Malach, 2012; Abdelshiheed et al., 2021），时间意识则能提升规划技能（Winne & Azevedo, 2014; Fazio et al., 2016）。因此，人们尝试通过多种方式教学生这两种元认知技能，例如通过示例教学策略（Likourezos & Kalyuga, 2017; Glogger-Frey et al., 2015）、提示学生使用该策略（Richey et al., 2015; Belenky & Nokes, 2009），以及明确呈现该策略（Fellman et al., 2020; Sp¨orer et al., 2009）。

我们的研究直接比较了三种教学干预，旨在教默认策略学生如何以及何时在逻辑辅导系统中使用哪种策略；按教学支持程度由低到高依次为：示例、提示和呈现组。所有干预都提供了反向链式解题示例。主要区别在于，提示会促使学生在适合使用反向链的问题中切换到反向链，而在呈现组中，这些问题默认以反向链形式呈现。我们的首要研究问题是：这三种干预中，哪一种能让默认策略学生赶上时间意识同伴?

本研究涉及两个智能辅导系统（ITS）（Vanlehn, 2006）：逻辑辅导系统和概率辅导系统。学生首先被分配到支持正向链（FC）和反向链（BC）策略的逻辑辅导系统，其中正向链为默认策略；六周后，他们转入仅支持反向链的概率辅导系统。在逻辑教学期间，默认策略学生被分成四种条件：三个干预组——示例、提示和呈现组——以及一个不接受任何干预的对照组。另一方面，我们认为 *StrTime* 学生已经具备这两种元认知技能，因此被视为黄金标准，不接受干预。所有学生都使用相同的概率辅导系统，并被要求决定是独立解决以下问题（问题求解（*PS*））、由辅导系统将其作为解题示例呈现（*WE*），还是以渐隐式解题示例（*FWE*）的形式与辅导系统合作解决。总体而言，我们的结果表明，提示学生的表现优于其他默认策略同伴，并在两种辅导系统中都赶上了 *StrTime* 学生。此外，提示组学生在逻辑辅导系统中的策略行为与 *StrTime* 学生相似，因为两组都知道如何以及何时使用反向链。令人惊讶的是，提示组学生在概率辅导系统中选择 *PS* 的次数显著更多，而 *StrTime* 学生选择 *FWE* 的次数显著更少。

相关研究

示例教学、提示与呈现

大量研究探讨了教授策略的多种方法，并指出了各自的利弊。我们聚焦于三种方法可能的组合：通过示例教授策略（Likourezos & Kalyuga，2017；Glogger-Frey et al.，2015）、提示学生使用策略（Richey et al.，2015；Zepeda et al.，2015；Belenky & Nokes，2009），以及直接呈现策略（Fellman et al.，2020；Sp¨orer et al.，2009；M. Chi & VanLehn，2007；Schwartz & Martin，2004）。

Glogger-Frey 等人（2015）发现，在期刊摘录评论任务中，接受例题的学生在后测中的表现优于需要自行撰写评论的同伴。然而，Likourezos 和 Kalyuga（2017）报告称，在几何任务后测中，接受完全指导的例题、部分指导的例题和无指导帮助的学生之间没有显著差异。

Zepeda 等人（2015）发现，接受辅导提示和例题的学生，在物理测试和一项新颖的自主指导活动中的表现优于未接受此类教学的同伴。相反，Richey 等人（2015）发现，在近迁移、中等迁移和远迁移电路任务中，被要求研读例题的学生与接受同样例题及辅导提示的同伴之间没有显著差异。

Sp¨orer 等人（2009）发现，接受综合阅读策略明确教学的学生，在迁移任务和后续测试中的表现优于通过教师文本互动接受教学的同伴。另一方面，Fellman 等人（2020）发现，在练习单数字 n-back 任务时，接受明确策略教学的学生与未接受此类教学的同伴之间没有显著差异，因为两组学生都表现出向同一任务未经训练的变体迁移的迹象。

元认知技能教学

元认知技能能够调节个体对自身认知的觉察与控制（Chambres 等，2002；Roberts 与 Erdos，1993）。许多研究已证明，元认知技能教学对学业表现（de Boer 等，2018年；Erskine，2010）、学习成果（Zepeda 等，2015；M. Chi 与 VanLehn，2010 年、 2008 年）以及策略使用的调节（Schraw 与 Gutierrez，2015）具有重要意义。

Schraw 和 Gutierrez（2015）认为，元认知技能教学包括辨明自己对任务有哪些已知和未知之处，这有助于学习者高效地收集信息、适应任务要求的变化，并制定策略来完成任务。他们指出，此类教学还应根据学习者的视角，比较不同策略的可行性和熟悉程度。

Belenky 和 Nokes（2009）表明，在排列迁移任务中，接受了元认知提示的学生表现优于接受问题聚焦提示的同伴。元认知提示引导学生反思当前的问题解决过程，而问题聚焦提示则关注当前目标。M. Chi 和 VanLehn（2010）发现，教授学生原理强调技能缩小了高水平学习者与低水平学习者之间的差距；这种效果不仅体现在教学内容所涉及的领域（概率）中，也体现在未进行教学的另一个领域（物理学）中。

策略与时间意识

策略意识和时间意识被视为元认知技能，因为二者分别涉及如何以及何时使用问题解决策略（de Boer 等，2018年；Winne 和 Azevedo，2014；Lee 和 Oxford，2008年；Cardelle- Elawar，1992）。研究人员强调了策略意识在外语学习（Teng，2020；Lee 和 Oxford，2008年）和为未来学习做准备（Abdelshiheed 等（2021）；Belenky 和 Nokes-Malach，2012；Chamot，1998）中的作用，以及时间意识对规划技能和学业表现的影响（de Boer 等，2018年；Fazio 等，2016；Winne 和 Azevedo，2014）。

Lee 和 Oxford（2008年）研究了策略意识在向韩国学生教授英语时所起的作用；具体而言，了解各种学习策略的学生比同龄人更频繁地运用这些策略。在 Abdelshiheed 等（2021）的研究中，我们发现，掌握两种问题解决策略的学生在两个相互独立的领域中学习效果最好。Belenky 和 Nokes-Malach（2012）表明，以掌握所呈现的材料和策略为目标的学生，在迁移任务中的表现优于同龄人。

Fazio 等（2016）发现，知道何时使用各项策略来选出分数大小最大者的学生，数学能力较强。那些不知道何时应用各项策略的同伴，在面对选项时未能选出正确答案。de Boer 等（2018）表明，知道何时以及为何使用特定策略的学生，具备长期元认知知识，学业表现也因此得到提升。de Boer 等（2018）强调，在多策略领域中，策略选择时知道何时以及为何使用某种策略，与知道如何使用同样重要。

总而言之，许多既有研究都强调了元认知技能教学以及策略与时间意识教学的重要性。研究者探讨了多种策略教学方法，例如通过示例教学、使用提示来引导，以及直接呈现。不过，据我们所知，目前尚未就这些方法中最有效的组合达成共识，也没有研究比较它们在智能辅导系统中的效果。本研究比较了在两种智能辅导系统——逻辑和概率系统——中教授反向链式（BC）策略的三种方法：仅通过示例教学（示例）；通过示例教学并提示学生切换到反向链（提示）；以及通过示例教学并直接呈现反向链（呈现组）。

方法

参与者

他们是北卡罗来纳州立大学的计算机科学专业本科生。每项辅导任务都是一项课程分配，必须完成才能获得全部学分；学生被告知

表1：辅导员的分配与完成数量

	逻辑		概率	
	已分配	已完成	已分配	已完成
对照组	23	21	19	**17**
示例	23	20	20	**19**
提示	22	21	21	**20**
呈现组	20	17	16	**15**
StrTime	49	45	41	**40**
	χ^2（4，N = 261）= 0.09，p = .99		χ^2（4，N = 228）= 0.05，p = .99	

只有完成逻辑辅导系统的学生才被分配到概率辅导系统。

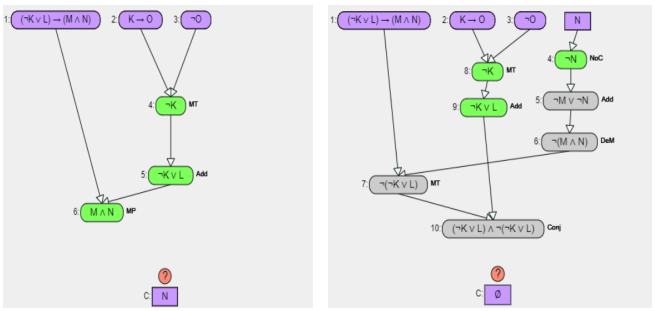
成绩取决于努力程度，而非表现。本研究的主要挑战在于，学生的元认知标签——*De fault* 或 *StrTime*——只有在逻辑训练结束时才能计算出来，但需要在训练开始时就知道该标签，以确定是否可以进行干预。具体而言，*StrTime*学生经常会按照预期行为，尽早（在前30个操作内）切换到反向链；而*De fault*学生不会切换，而是坚持使用正向链（Abdelshiheed 等，2022，2020）。此类切换行为要到逻辑训练结束时才会被记录，因此无法在训练开始前计算。因此，根据 Abdelshiheed 等（2021）的研究，我们采用随机森林分类器（RFC），根据前测表现预测学生在逻辑训练开始前的元认知标签；此前研究显示，该分类器的准确率为96%。

在被分配到逻辑辅导系统的230名学生中，RFC将137名学生分类为88名*De fault*和49名*StrTime*[1]。*De fault*学生被随机分为四种条件：一个对照组——对照组——以及三个实验组——示例、提示和呈现组。表1显示了*De fault*（前四行）和*StrTime*（第五行）在两种辅导系统中的已分配人数和已完成人数。最后一列列出完成了两种辅导系统的学生，因为我们将未完成逻辑辅导系统的学生排除在概率辅导系统的分配之外。因此，分析仅纳入最后一列中的学生，最终包括17名对照组、19名示例、20名提示、15名呈现组和40名*StrTime*学生。如表1所示，卡方检验发现两种辅导系统中各组的完成率没有显著差异。RFC对未接受任何干预的学生——对照组和*StrTime*——的分类准确率为97%。

两个辅导系统与我们的干预

逻辑辅导系统与我们的干预逻辑辅导系统通过应用有效的推理规则（如肯定前件和构造性两难）来教授命题逻辑证明。它包含五个按顺序排列的级别，难度逐步递增，每个级别包含四道问题。学生可以采用**正向链**或**反向链**策略来解答任意一道问题。图1a显示，在正向链中，必须从顶部的已知条件推导出底部的结论；图1b则显示，在反向链中，学生根据已知条件和结论的否定

[1]其余学生未纳入后续分析，因为他们的标签与本研究无关



(a) 正向链式推理（正向链）　(b) 反向链式推理（反向链）

图1：逻辑辅导系统的问题求解策略

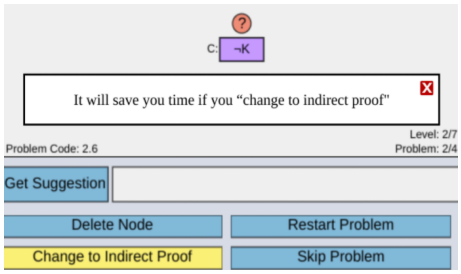


图2：提示式策略切换提示

推导出矛盾。默认情况下，问题以默认策略的正向链方式呈现，学生可以点击图2中的黄色按钮切换到反向链。如图3所示，逻辑辅导系统经过调整，以适配面向默认策略学生的以下干预：

- 无干预：学生被分配到原始辅导系统。
- 示例：提供两个关于反向链的习题。
- 提示：与示例相同，并在一些问题中提示学生切换到反向链（如图2所示）。
- 呈现组：与示例相同，默认情况下会向学生呈现一些BC题目。

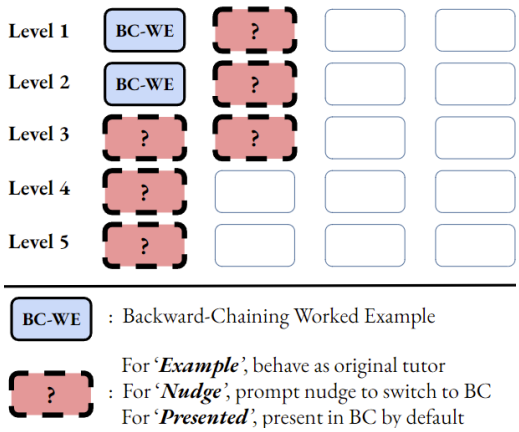


图3：在调整后的逻辑辅导系统中进行训练

在图3中，至关重要的是要注意：1）白色 问题的表现与原始辅导系统相同；2）红色 问题根据我们数据中的历史策略切换进行选择；3）提示会在若干秒后出现，这段时间是根据先前学生切换行为的概率分布抽样得出的。

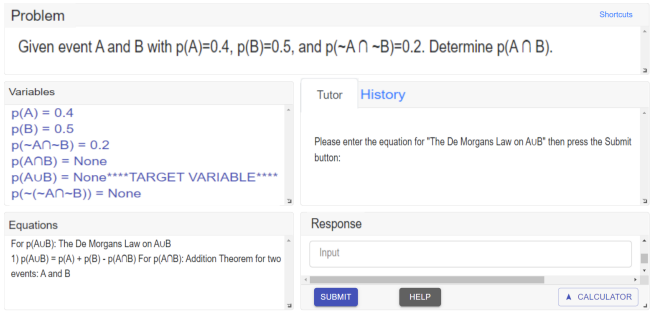


图4：概率辅导界面

概率辅导系统：如图4所示，它通过十条原理（例如补集定理和德摩根定律）教授如何解概率问题。系统包含12道问题，每道题只能通过反向链求解，因为需要通过列出并求解方程推导答案，直到最终将目标化简为已知条件。问题可以采用*PS*、*WE*或*FWE*模式。*PS*要求学生独立解题，*WE*由辅导员分步给出解答，而*FWE*则要求学生与辅导员协作。

表2：研究流程概览

逻辑	前测（2道问题）
	训练（20道问题）： 对照组：无干预 示例，提示，呈现组：干预（图 3） *StrTime*：无干预
	后测（6 道问题，其中 2 道为同构题）
六周后	
概率	教材
	前测（14 个问题）
	训练（12 个问题）： 在十个问题中，学生选择 *PS*/*WE*/*FWE*
	后测（20 个问题，其中包括 14 个同构问题）

流程

表2概述了我们的流程。在逻辑训练期间，学生依次完成标准的前测、训练和后测。后测的前两道题与前测的两道题同构。逻辑训练期间的<style id='1'>唯一差异如表2所示。

六周后，学生接受了概率辅导系统的训练，流程遵循标准步骤：教材、前测、训练和后测。在教材中，他们学习了领域的基本原理；在前测和后测中，学生分别解答了14道和20道开放式题目，需要通过列出并求解一个或多个方程推导出答案。每道前测题都对应一道同构的后测题。如图4所示，在训练环节，学生完成了12道题，并在其中10道题中选择题目类型；另有两道题固定为*PS*。对于*FWE* 题目，每一步都会随机决定由学生还是辅导系统来解答。请注意，在两种辅导系统中，后测都比前测难得多，且所有学生的题目顺序相同。

评分标准

在逻辑部分，题目得分由时间、准确性和解题长度共同决定。前测和后测分数分别通过对前测和后测的题目得分取平均值计算得出。在概率部分，学生的答案由经验丰富的评分者以双盲方式，按照部分得分评分细则进行评分，评分仅依据准确性。前测和后测分数分别为相应部分的平均分。在两种辅导系统中，测试分数的范围均为 $[0, 100]$。

结果

学习表现

表3：比较不同辅导系统中的各组

	条件				*StrTime* ($N = 40$)
	对照组 ($N = 17$)	示例 ($N = 19$)	提示 ($N = 20$)	呈现组 ($N = 15$)	
逻辑辅导系统					
Pre	59.1（19）	56。9(25)	60。5（13）	60。4(15)	60(18)
Iso-后测	65.4(8)	69.7(7)	**89.8(5)***	83.4(4)*	85。3(6)*
Iso-NLG	0.04(.24)	0。09(。3)	**0。4（。13）***	0.34(.14)*	0.35(.19)*
Post	59。9(9)	65.5(8)	**86.1(5)***	80(5)*	81。7(6)*
NLG	-0。05(。3)	0.05(.37)	**0。39（。15）***	0.29(.16)*	0.3(.23)*
Time	5.5(7)	4.8(4)	5。3(4)	6.2(6)	4。6(7)
概率辅导系统					
Pre	79.4(12)	74.5(17)	77(14)	74.1(14)	76(15)
Iso-后测	73.1(22)	77(14)	**94.2(6)***	85.8(17)	92.6(13)*
Iso-NLG	-0。06(。39)	0.03(.28)	**0。32（。19）***	0.16(.22)	0.28(.2)*
Post	70.3(20)	73.6(16)	**91。9（5）***	83。5(20)	89。3(11)*
NLG	-0。09(。36)	-0.04(.35)	**0。27（。24）***	0.13(.23)	0。26(。17)*
Time	4.3(6)	3。9(4)	4。2(5)	3。5（4）	4。4(5)

同一行中，粗体表示最高值，星号表示相较于无星号项具有显著性。

表3比较了各组在两个辅导系统中的表现，展示了前测和后测分数、同构分数、训练时长（小时）以及以标准化学习增益（*NLG*）表示的学习结果的均值和标准差。NLG 定义为（$NLG = \frac{\text{后测} - \text{前测}}{\sqrt{100 - \text{前测}}}$），其中 100 为最高测试分数。我们分别将前测分数、后测分数和 NLG 分数称为前测、后测 和*NLG*。以条件为因子的单因素方差分析发现，没有显著

差异，逻辑方面的前测结果为：$F(3,67) = 0.14$，$p = .93$；概率方面为$F(3,67) = 0.49$，$p = .69$。同样，两个辅导系统中的训练时间也未发现显著差异。为衡量学生在同构题上的进步，我们进行了多次重复测量方差分析（针对每个辅导系统中的每个组分别进行一次），以{前测、同构-后测}为因子。结果显示，在两个辅导系统中，提示组和*StrTime*组的学习进步均达到显著水平（$p < 0.0001$）；呈现组在逻辑方面的学习进步达到显著水平（$p = 0.0001$），在概率方面也达到显著水平（$p = 0.02$）。在两个辅导系统中，示例组和对照组在同构-后测中的表现均未显著高于前测。这些发现验证了RFC的准确性：*StrTime*组在两个辅导系统中均取得显著进步，而对照组则没有，尽管这两个组都未接受任何干预。

条件比较 为评估 De f ault 学生的表现，比较表3中的四种条件至关重要。在逻辑辅导系统中，以条件为因子、前测为协变量进行单因素协方差分析[2]，发现后测存在显著差异：$F(3,66) = 59.7, p < .0001, \eta^2 = 0.69$。经 Bonferroni[3] 校正[4] 进行后续事后分析[4] 发现，提示组和呈现组的表现显著优于示例组（$t(37) = 5.9, p < .0001$；$t(32) = 5.2, p < .0001$），也显著优于对照组（$t(35) = 7.8, p < .0001$；$t(30) = 6.3, p < .0001$）。提示组与呈现组之间，以及示例组与对照组之间均未发现显著差异。使用方差分析对NLG进行分析，也观察到类似模式。这些发现表明，提示组、呈现组 > 示例组、对照组。

在概率辅导系统中，以条件为因素、前测为协变量进行单因素协方差分析，结果显示后测存在显著差异：$F(3, 66) = 14.5$，$p < .0001, \eta^2 = 0.31$。随后进行的Bonferroni校正分析表明，提示组的表现显著优于呈现组（$t(33) = 3.6$，$p = .001$）、示例组（$t(37) = 5.6$，$p < .0001$）和对照组（$t(35) = 6.2$，$p < .0001$）；与此同时，呈现组的表现显著优于示例组和对照组（$t(32) = 3.1$，$p = .004$ 和 $t(30) = 3.4$，$p = .002$）。示例组与对照组之间没有发现显著差异。对NLG进行方差分析也发现了类似的模式。简而言之，这些结果表明：提示组 > 呈现组 > 示例组、对照组。

总的来说，提示组学生在两种辅导系统上的表现都最好，其次是呈现组，后者在概率方面学得较少。令人意外的是，示例组在两种辅导系统上的表现都与对照组没有差异，这表明提示组和呈现组在逻辑方面获得了额外的教学支持。

与.....相比*StrTime* 为确定是否有任何条件组赶上了*StrTime*学生，我们使用Bonferroni校正，对逻辑和概率后测进行了事后两两分析。在逻辑方面，结果显示，提示组和呈现组赶上了*StrTime*组，因为两组的后测与*StrTime*组的后测之间没有显著差异（$t(58) = 0.9$，$p = .37$ 和 $t(53) = 0.3$，$p = .77$）。另一方面，*StrTime*组的表现显著优于示例组（$t(57) = 5.4$，$p < .0001$）和对照组（$t(55) = 6.7$，$p < .0001$）。在*NLG*方面也发现了类似结果。

在概率辅导系统上，只有提示组赶上了*StrTime*组，后测时两组之间没有显著差异（$t(58) = 0.2$，$p = .84$）。与此同时，*StrTime*组显著优于呈现组（$t(53) = 3.1$，$p = .003$）、示例组（$t(57) = 5.1$，$p < .0001$）以及对照组（$t(55) = 5.7$，$p < .0001$）。在*NLG*上也观察到了类似的模式。

简而言之，在逻辑方面实施干预后，提示组和呈现组赶上了*StrTime*组。在没有实施此类干预的情况下，只有提示组在概率方面赶上了*StrTime*组。最后，示例组和对照组在两种辅导系统上的表现都显著差于*StrTime*组。

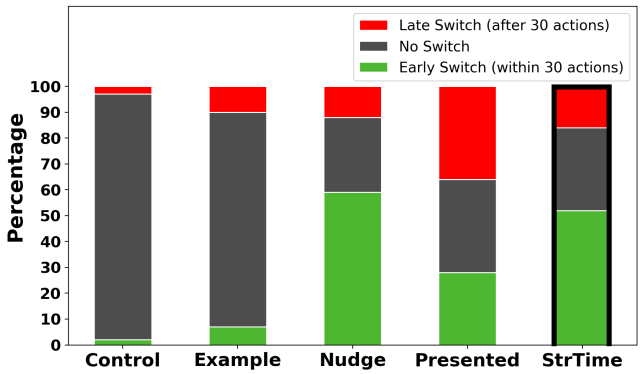


图 5：逻辑中的策略转换行为

逻辑中的策略转换

图5展示了逻辑辅导系统中策略转换行为（从正向链转为反向链），用于考察我们的干预对学生策略选择的影响。由于训练阶段和后测阶段的决策分布没有显著差异，因此将两个阶段的决策合并。此外，*StrTime*以粗体突出显示，作为黄金标准。

以条件为因素进行的单因素方差分析显示，早期转换的频率存在显著差异：$F(3, 67) = 6.7$，$p < .001, \eta^2 = 0.23$。此外，卡方检验显示，转换类型与学生组之间存在显著关系[5]：$\chi^2(8, N = 2664) = 934.3$，$p < .0001$。采用Bonferroni校正进行事后两两卡方检验后发现，对于早期转换，提示、StrTime > 呈现组 >示例、对照组。比如，提示组和StrTime组的早期转换次数显著多于呈现组：$\chi^2(2, N = 840) = 100.2$，$p < .0001$ 和 $\chi^2(2, N = 1320) = 84.2$，$p < .0001$。提示组与StrTime组之间，以及示例组与对照组之间，均未发现显著差异。

[2]报告了一般效应量 η^2 以获得较为保守的结果[3]Bonferroni校正用于获得更为保守的结果[4]（$\alpha = .05/10$）贯穿整个结果部分

[5][111 学生] * [20训练 - 2 WE + 6 后测] = 2664 决策

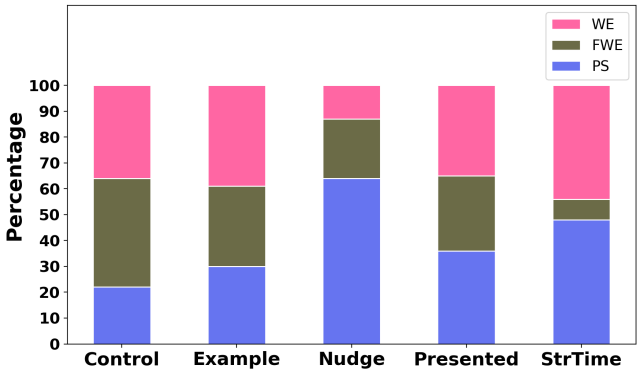


图6：题目层面的概率决策

学生的概率决策

表3显示，我们的干预对逻辑的影响或许也会延伸至概率。因此，在图6中，我们考察学生在概率训练部分所作的题目层面决策。由于步骤层面的决策由辅导员随机选取，因此不予考虑。需要注意的是，对于每个学生组，图6所示的任何题目层面决策类型与表3中的任何表现指标之间均不存在显著相关性。

卡方检验发现，题目层面的决策类型与学生组[6]之间存在显著关联：$\chi^2(8, N = 1110) = 162.1$，$p < .0001$。后续采用 Bonferroni 校正进行的两两卡方检验显示，在 PS 决策上：提示组显著高于呈现组、示例组和对照组；在 FWE 决策上：StrTime 组显著低于提示组、呈现组、示例组和对照组。例如，提示组选择 PS 的比例显著高于呈现组：$\chi^2(2, N = 350) = 32.9$，$p < .0001$；而 StrTime 组选择 FWE 的比例显著低于提示组：$\chi^2(2, N = 600) = 67.5$，$p < .0001$。在任何决策类型上，呈现组、示例组和对照组之间的任意两组差异均不显著。简言之，提示组和 StrTime 组的决策与彼此及其他组不同，而呈现组、示例组和对照组的决策相似。

讨论与结论

我们发现，要教会学生如何 以及何时 使用某种策略，仅使用例题可能效果不佳，因为示例 组的表现并未显著优于对照组。然而，当我们通过 BC 提示强化例题，或默认呈现 BC 题目时，学生的学习效果更好，因为提示组和呈现组 的表现均显著优于示例 组和对照组。此外，提供提示带来的益处更大，因为提示 组在概率方面的表现也显著优于呈现组 。

追赶 StrTime方面，虽然提示组和呈现组在逻辑方面追赶上了*StrTime* ，但只有提示组在逻辑早期切换行为和概率学习表现方面追赶上了*StrTime* 。这一发现表明，提示组的学生已为未来学习做好准备（Bransford & Schwartz，1999），因为他们基于在逻辑方面接受的干预，在概率学习中表现良好。

与 ICAP 框架的关系 我们认为，研究结果表明，交互式、建构式、主动式和被动式（ICAP）框架（M. T. Chi & Wylie, 2014；M. T. Chi, 2009）也适用于教授学生元认知技能。具体而言，对照组 经历的是被动学习，因为他们没有接受任何干预；而示例 组接受了主动干预，因为学生需要学习例题并继续完成后续步骤。呈现组 可视为接受了建构式干预，因为学生需要针对一种呈现给他们、且不同于默认策略的策略生成解答。最后，提示组接受了交互式干预：辅导系统提供提示，引导学生切换策略，但实际切换必须由学生完成。我们的发现与 ICAP 框架一致，即交互式学习活动能带来最高的学习成效；在两种辅导系统中，提示 组学生的情况正是如此。

与助推理论的关系 助推理论（Thaler & Sunstein, 2008年）指出，提示在行为科学中发挥着重要作用（Simon & Tagliabue, 2018年），并会影响个体的社会行为和认知行为（Smith et al., 2013年；Goldstein et al., 2008年）。我们的结果表明，这一理论的影响在逻辑辅导系统中教授学生 BC策略时显而易见。具体而言，提示组学生在接受使用 BC 的提示性助推后，其策略行为发生了变化，从而在两种辅导系统上的表现均达到最佳。

学生的选择与人格 对学生概率相关选择的评估显示，*StrTime* 组学生倾向于尽量减少与辅导系统的协作；他们选择*WE* 或*PS* ，可能分别是为了节省时间或展现努力。另一方面，*Nudge* 组学生选择*PS* 的频率显著高于干预组和对照组同伴，这可能是为了展示他们习得的 BC知识。概率训练结束时，学生填写了一份包含十个条目的性格量表[7] (TIPI)（Gosling、Rentfrow 和 Swann Jr, 2003年），结果显示，提示组和*StrTime* 组自我评价为挑剔和好争辩的程度显著高于同伴。

局限与未来工作 我们的研究至少存在两点需要注意之处。首先，我们研究了针对采用默认策略的学生的不同干预，因此各条件的样本量相对较小。其次，逻辑辅导系统默认提供一种策略，而概率辅导系统仅支持一种策略。更有说服力的测试平台应让辅导系统同时支持两种策略，并要求学生在每道题中选择默认策略。未来的工作包括将提示与呈现结合为一种干预、在概率辅导系统中实现正向链，以及在提示中解释为何反向链有帮助。

[6] [111 学生] * [10训练中的选择] = 1110 决策

[7] 此前未提及，因为这并非我们的主要研究范围

致谢

本研究得到美国国家科学基金会以下项目的资助：MetaDash：基于实时多通道自我调节学习数据的教师仪表板（1660878）；STEM学习环境中个性化教学的集成数据驱动技术（1726550）；通过智能辅导系统推广数据驱动技术以改进个性化STEM教学（2013502）；以及CAREER：改进交互式学习环境中的自适应决策（1651909）。

参考文献

Abdelshiheed, M., Maniktala, M., Barnes, T., & Chi, M. (2022). 运用元认知和动机评估能力：时间意识在为未来学习做准备中的作用。载于智能辅导系统设计建议（第9卷，第121–131页）。Abdelshiheed, M., Maniktala, M., Ju, S., Jain, A., Barnes, T., & Chi, M. (2021). 为尚未做好准备的学生为未来学习做好准备。载于第*43*届认知科学学会年会论文集（第43卷）。Abdelshiheed, M., Zhou, G., Maniktala, M., Barnes, T., & Chi, M. (2020). 元认知与动机：时间意识在为未来学习做准备中的作用。载于第*42*届认知科学学会年会论文集（第42卷）。Belenky, D. M., & Nokes, T. J. (2009). 探讨操作材料和元认知对投入、学习和迁移的作用。问题求解期刊，*2*（2），6。Belenky, D. M., & Nokes-Malach, T. J. (2012). 动机与迁移：掌握趋近目标在为未来学习做准备中的作用。学习科学期刊，*21*（3），399–432。Bransford, J. D., & Schwartz, D. L. (1999). 重新思考迁移：一个影响深远的简单提议。教育研究评论，*24*（1），61–100。Cardelle-Elawar, M. (1992). 向数学能力较弱的学生教授元认知技能的效果。教师教学与教育，*8*（2），109–121。Chambres, P., et al. (2002). 元认知：过程、功能与用途。Kluwer Academic Publishers。Chamot, A. (1998). 向语言学习者教授语言学习策略。语言与语言学。Chi, M., & VanLehn, K. (2007). 显性策略教学对智能辅导系统中问题解决行为的影响。载于认知科学学会年会论文集（第29卷）。Chi, M., & VanLehn, K. (2008). 通过元认知策略教学消除高水平学生与低水平学生之间的差距。载于智能辅导系统（第603–613页）。Chi, M., & VanLehn, K. (2010). 智能辅导系统中的元认知策略教学：如何、何时以及为何。《教育技术与社会》，*13*（1），25–39。Chi, M. T. (2009). 主动—建构—互动：区分学习活动的概念框架。认知科学主题,*1*(1), 73–105. Chi, M. T., & Wylie, R. (2014). ICAP框架：将认知投入与主动学习成果联系起来。教育心理学家,*49*(4), 219–243. de Boer, H., 等（2018）。元认知策略教学对学生学业表现的长期影响：荟萃分析。《教育研究评论》, *24*, 98–115. Erskine, D. L. (2010). 提示反思与元认知技能教学对大学一年级新生使用元认知的影响。杨百翰大学。Fazio, L. K., 等（2016）。分数大小比较中的策略使用与策略选择。《实验心理学杂志：学习、记忆与认知》, *42*(1), 1. Fellman, D., Jylkk¨a, J., Waris, O., Soveri, A., Ritakallio, L., Haga, S., . . . Laine, M. (2020). 策略使用在工作记忆训练结果中的作用。《记忆与语言杂志》, *110*, 104064. Glogger-Frey, I., 等（2015）。自行构思解法与研读解题示范对通过直接教学进行学习的准备作用不同。《学习与教学》, *39*, 72–87. Goldstein, D. G., 等（2008）。提示顾客做出更好的选择。《哈佛商业评论》, *86*(12), 99–105. Gosling, S. D., Rentfrow, P. J., & Swann Jr, W. B. (2003). 大五人格维度的极简测量工具。《人格研究杂志》,*37*(6), 504–528. Lee, K. R., & Oxford, R. (2008). 了解英语作为外语的学习者的策略使用与策略意识。《亚洲英语作为外语期刊》*2008*年*3*月，第*10*卷第*1*期,*10*(1), 7–32. Likourezos, V., & Kalyuga, S. (2017). 先教学法与先解题法：复杂任务学习的替代路径。《教学科学》, *45*, 195– 219. Priest, A., & Lindsay, R. (1992). 重新审视物理问题求解中的新手—专家差异。《英国心理学杂志》,*83*(3), 389–405. Richey, J. E., 等（2015）。提示式与自我报告的类比比较和自我解释的迁移效应。载于认知科学学会年会论文集（第37卷）。Roberts, M. J., & Erdos, G. (1993). 策略选择与元认知。《教育心理学》,*13*, 259–266. Russell, S. J., & Norvig, P. (2020). 人工智能：一种现代方法（第4版）。培生。Schraw, G., & Gutierrez, A. P. (2015). 突出监控与控制过程作用的元认知策略教学。载于元认知：基础、应用与趋势（第3–16页）。施普林格。Schwartz, D. L., & Martin, T. (2004). 通过自行构思为未来学习做准备：在统计学教学中鼓励学生原创产出的隐性效率。《认知与教学》, *22*(2), 129–184. Simon, C., & Tagliabue, M. (2018). 推动行为革命：行为分析对提示的贡献

反之亦然。《政策行为经济学杂志》, *2*(1), 91–97. Smith, N. C., 等（2013）。无意识选择：默认策略的伦理与政策影响。《公共政策与营销杂志》,*32*(2), 159–172. Sp¨orer, N., 等（2009）。提高学生阅读理解能力：策略教学与交互式教学的效果。《学习与教学》, *19*(3), 272–286. Teng, F. (2020). 面向低龄英语作为第二语言学习者的元认知阅读策略意识教学的益处。《读写能力》, *54*(1), 29–39. Thaler, R. H., & Sunstein, C. R. (2008). 提示：改善有关健康、财富与幸福的决策。HeinOnline。Vanlehn, K. (2006). 辅导系统的行为。《国际人工智能教育杂志》,*16*(3), 227–265. Winne, P. H., & Azevedo, R. (2014). 元认知。载于 R. K. Sawyer（编）, 剑桥学习科学手册（第2版）。剑桥大学出版社。Zepeda, C. D., 等（2015）。直接进行元认知教学有益于青少年科学学习、迁移和动机：一项实地研究。《教育心理学杂志》, *107*(4), 954. Zimmerman, B. J. (1990). 自我调节学习与学业成就：综述。《教育心理学家》,*25*(1), 3–17.