

评价问题难度的一种新方法

- - 认知负荷测量模型

许远理

李亦菲 朱新明

河南信阳师范学院 (信阳 464000)

中国科学院心理研究所 (北京 100012)

[摘要] 认知负荷测量模型使用产生式编制计算机程序, 对人们在解决同构问题时运用手段-目的分析的策略与非特定目标策略所引起的不同认知负荷进行模拟。利用工作记忆中语句的数量、产生式的数量、求解循环的次数、匹配的条件总数等指标来测量认知负荷, 从而对问题的难度进行定量分析。

关键词 产生式, 认知负荷, 手段-目的分析, 非特定目标

从认知心理和人工智能的发展历程来看, 问题求解与学习一直是研究的中心问题, 人们在使用什么方法和策略高效率地获取知识和技能、如何运用已有的知识快速有效地解决问题、如何表征问题等, 都与认知负荷有关^[1]。

1 认知负荷测量模型的建构

认知负荷这一术语早在 70 年代就有人使用^[2], 但把它作为一种理论并在此基础上进行实验研究的则是澳大利亚的认知心理学家 J. Sweller。在 Sweller 的认知负荷理论中, 他吸收和应用了认知心理学关于工作记忆和注意的研究成果。一方面, 大量研究表明, 工作记忆在接收、保持、加工信息的过程中有着一定的容量限制, 如果输入的信息超过这一容量, 则信息的加工就会受到一定的影响, 甚至不可能进行加工。另一方面, 关于注意的研究表明, 人们在进行控制性加工时, 在同一时间内只能有效地进行一种心理活动, 多项任务只能分时进行; 这主要是因为人在一定时间内用于完成心理活动的能量或资源也是有限的^[3]。因此, 在人们进行心理活动时, 就存在一个资源分配的问题。Sweller 认为, 虽然工作记忆与注意是两个不同的概念, 但它们在控制性加工的过程中是一种共生的关系, 即: 当集中注意对某些信息进行深度加工时, 工作记忆中的目标信息相应减少; 而工作记忆中的信息超过一定的容量, 其实也是资源分配不足的问题。认知负荷理论通常从“认知资源”的角度描述注意, 从“认知容量”的角度来描述工作记忆, 它的中心思想可以概括为在意识控制下的信息加工过程中, 在认知资源与认知容量之间相互作用的关系。

自从 Newell, Shaw 和 Simon (1958)^[4]研制出模拟人类解决问题的计算机程序——通用问题解决者以来, 产生式作为表征人的知识和编制计算机程序的一种形式, 得到广泛的运用。Anzai 和 Simon^[5], Zhu 和 Simon^[6]等人的工作证明了人可以表征为自适应的产生式

本文于 1997-06-23 收到。

系统。在这些研究结果的基础上, Sweller 认为, 既然解决问题的知识可以用产生式来表示, 那么用产生式来测量信息加工过程中认知负荷的高低也是可能的^[7]。

认知负荷测量模型是在解决物理问题的 ABLE 模型^[8]和 PRISM^[9]模型的基础上建立起来的。ABLE 模型使用产生式系统编制计算机程序, 模拟了新手通过练习发展成为专家的过程。在这个模型中, 新手使用手段-目的分析的策略解决问题, 是一种逆向推理的方法; 而专家则使用顺向推理的强方法解决问题。PRISM 模型是一个模拟一般认知活动的产生式系统, 它的基本工作原理是: 工作记忆中的内容与产生式的条件进行比较; 如果某条产生式的条件被满足, 那么就激活这条产生式, 并执行相应的动作; 动作的执行将改变工作记忆中的内容, 从而进行下一轮的比较。每一个比较-激活-执行的过程称为一个“工作循环”。这一过程中, 当有一条以上的产生式的条件被同时满足时, 就有一个激活顺序的问题。一般是按下面的原则来确定激活的顺序: 首先, 根据每条产生式的初始强度确定激活的顺序, 优先激活较高强度的产生式; 其次, 如果有一条以上的产生式以同样的强度超出其他的产生式, 那么就比较这些产生式的条件的活性, 具有较高活性的产生式将被激活; 第三, 如果这些产生式条件的活性是相同的, 那么随机地激活其中的一条产生式。此外, 在一个工作循环中, 同一条产生式不能被激活两次。在认知负荷测量模型中, 用下面几个指标来评价问题解决过程中认知负荷的大小: (1) 工作记忆中语句的数量; (2) 工作记忆中激活的产生式的数量; (3) 工作循环的次数; (4) 条件匹配的数量等。

Sweller 以物理的动力学问题为例, 对比分析了手段-目的分析法的问题解决和非特定问题解决所引发的认知负荷。下面先介绍这两种不同的问题解决过程, 然后以一个具体的问题为例, 说明如何利用认知负荷测量模型来评价不同问题解决过程中的认知负荷。

2 两种不同的问题解决过程

2.1 手段-目的分析法解决问题的过程

表 1 列出了利用手段-目的分析法解决前面物理动力学问题所需的四个基本的产生式:

表 1 利用手段-目的分析法解决本文动力学问题所需的产生式

产生式	条 件	动 作	初始强度
P1	如果问题有一个特定的目标, 且方程是已知的, 它包含的目标又是唯一的未知数	那么目标成为已知	1.2
P2	如果问题有一个特定的目标, 且方程是已知的, 但它包含的目标和一个以上的未知数不是先前建立的子目标	那么将不是先前建立的子目标的未知数确定为新的子目标	1.0
P3	如果一个方程是已知的, 但它包含的子目标和一个以上的未知数不是先前建立的子目标	那么将其中的子目标与与子目标不同的未知数确定为子目标	1.0
P4	如果方程是已知的, 它包含的子目标又是唯一的未知数	那么这个子目标成为一个已知数	1.1

在上表中, 第一个产生式 P1 的条件是检查问题是否有一个特定的目标, 且方程是已知的, 它包含的目标又是唯一的未知数, 如果这些条件得到满足, 就执行它的这一产生式的动作部分, 即目标成为已知, 问题得到解决。这条产生式的初始强度是最高的, 这确保在

所有的条件得到满足的产生式之中，它将被优先激活。然而，由于这条产生式的条件是较难满足的，因此，在大多数问题中，它是最后被激活的。

在解决问题的过程中，如果第一个产生式的条件没有得到满足，那么必定满足第二条产生式。因为它不要求目标在方程中是仅有的未知数，如果包含目标的某个方程是已知的，那么这条产生式就被激活，而它的动作将指定与目标不同的未知数为子目标，并将这些子目标增加到工作记忆中去。由于这一产生式的条件较容易被满足，因此，他在问题解决的过程中往往是第一个被激活的。这个产生式对于建立初始的子目标是必需的。如果这条产生式被连续地激活，就说明系统正在进行宽度优先搜索，力图找出包含目标的尽可能多的方程。

一旦由执行第二条产生式的动作而得到的子目标加入到工作记忆中，第三和第四条产生式的就可以被激活。其中，第三个产生式使得先前建立的子目标不再成为新的子目标，同时也将新的方程中原来没有成为子目标的未知数确定为新的子目标。这一产生式主要用来产生深度优先的搜索，从而用几个方程建立从目标到已知的一连串的子目标。第四条产生式的条件较难满足（方程所包含的子目标必须是唯一的未知数），因此往往在后来激活。这一产生式的激活将导致某个子目标的实现，他的连续激活使得从已知到目标的一连串子目标得到实现，从而使问题得到解决。

在上面四条产生式的支持下利用手段-目的分析方法解决问题的过程可以用下面的流程图表示：

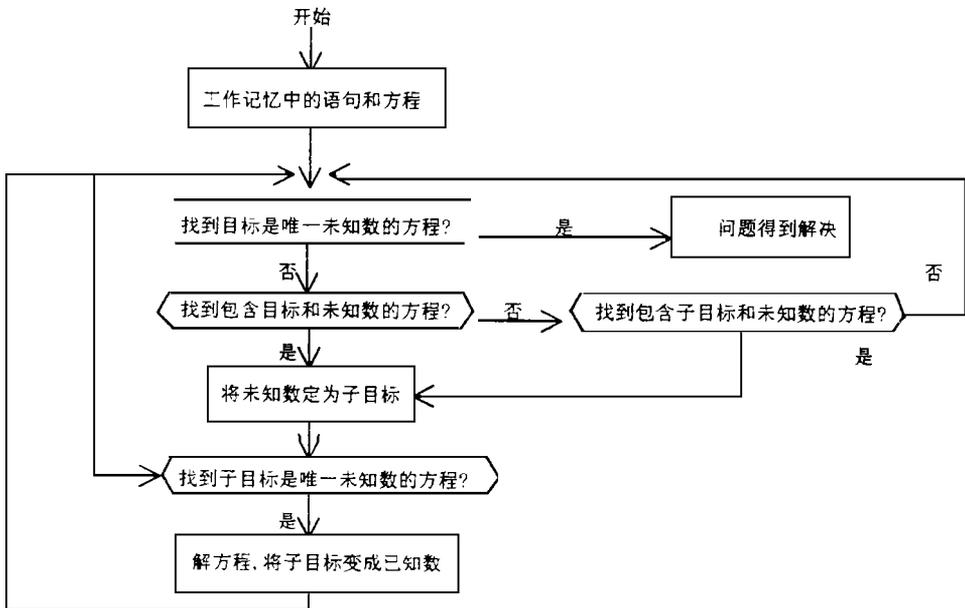


图 1 利用手段-目的分析方法解决问题的过程

2.2 解决非特定目标问题的过程

对于非特定目标的问题来说，由于没有一个确定的目标，只能按照表 1 中 P2 或 P4 的方式得到有关的解。为此，只需要一条产生式就可以了。这一产生式如下：

P5: 如果问题没有特定的目标，且能够找到只有一个未知数的方程；

那么这个未知数就成为已知数

在这条产生式的支持下, 解决非特定目标问题的过程如下:

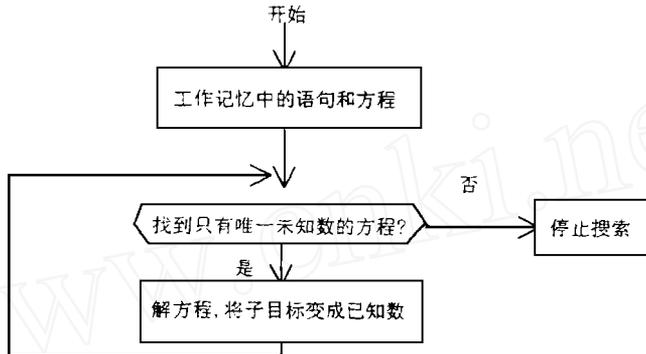


图2 解决非特定目标问题的过程

3 对两种不同的问题解决过程中认知负荷的测量

Sweller 用一个需要三步才能解决的动力学问题比较手段- 目的分析策略和非特定目标策略所引发的认知负荷^[9]。问题是这样的: 一辆车从静止状态开始, 以 2 米/秒² 的加速度作直线运动, 平均速度是 17 米/秒, 它运行了多远? 使用 $s = vt$ 、 $v = at$ 和 $a = 0.5v$ 这三个方程可以解决这个问题。如果将这个问题的最后一句话改成“计算尽可能多的变量值”, 那么它就变成了一个非特定目标的问题。

利用产生式系统的计算机程序, Sweller 模拟了手段- 目的分析和非特定目标的问题解决过程, 并计算出两种不同的解题过程中认知负荷的测量指标。下面将测量结果列表如下(表 2):

表 2 两种不同的问题解决过程中认知负荷的测量结果

测量指标	手段- 目的分析的解题过程	非特定目标问题的解题过程
工作记忆平均语句数	15.5	14
工作记忆高峰语句数	16.5	14
激活的产生式数量	4	1
工作循环的次数	5	3
匹配的条件总数	29	17

从上表可以看出, 这两种不同的问题解决过程以相近的语句数在工作记忆里开始。这说明, 不同解题过程的问题表征所需要的认知负荷是基本相同的。当然, 在不同的解题过程中, 工作记忆中语句的内容是不同的, 在手段- 目的分析的解题过程中, 工作记忆中包含指向目标的语句; 但在非特定目标的问题中, 则是将目标变量作为未知数来处理的。然而, 手段- 目的分析的问题解决过程比非特定目标的问题解决过程需要激活更多的产生式, 匹配的条件和需要的工作循环数也较多。这表示手段- 目的分析的问题解决过程需要较大的认知负荷。

4 简评

我们认为, 认知负荷测量模型的意义在于, 它为定量地分析解题过程的难度提供了一条新的思路。虽然有很多人对解题过程的难度从不同的角度进行了分析^[10-11], 但大都是一些定性的分析。认知负荷测量模型用工作记忆中语句的数量、激活的产生式、工作循环的次数、匹配的条件等指标测量问题解决过程中的认知负荷, 从而可以对解题的难度进行定量分析。在本文介绍的例子中, 认知负荷测量模型清楚地显示了手段-目的分析的解题过程和非特定目标的解题过程所导致的不同认知负荷。此外, 人们在学习和解决问题的过程中, 工作记忆中的信息是在意识的控制之下的, 因此, 受到认知资源的影响。因此, 认知负荷测量模型实际上也可以理解为认知资源投入程度的测量模型。

然而, 这一模型对认知负荷的测量是采用计算机模型的方式进行的, 对于那些不能模拟的复杂问题解决过程来说, 这一模型就不能进行有效的测量。此外, 对于同一个问题, 不同的被试由于知识和策略的不同, 所使用的解题方法也是不一样的, 由此产生的认知负荷也是不一样的。因此, 问题的难度并不是一个固定不变的数值, 而是随着被试和解题方法的不同而有变化。关于如何评价问题难度的问题, 值得进一步的研究。

参考文献

- [1] Sweller J. Some cognitive processes and their consequences for the organisation and presentation of information. *Australian Journal of Psychology*, 1993, 45 (1): 1- 8
- [2] Atwood M, Polson P A. Process model for water- jug problems. *Cognitive psychology*, 1976, 8: 196- 216
- [3] 沈政. 信息加工与脑能量函数. 见: 王 等, 当代心理学研究. 北京: 北京大学出版社, 1993, 217- 247.
- [4] Newell A, Shaw J C, Simon H A. Elements of a theory on human problem solving. *Psychological Review*, 1958, 65 (3): 151 - 166
- [5] Anzai Y, Simon H A. The theory of learning by doing. *Psychological Review*, 1979, 86, 124- 140
- [6] Zhu X M, Simon H A. Learning Mathematics from Examples and by doing. *Cognitive & Instruction*, 1987, 4: 137- 166
- [7] Sweller J. Cognitive load during problem solving: Effect on learning. *Cognitive Science*, 1988, 12: 257- 285
- [8] Larkin J H, McDermott J, Simon D P, Simon H A. Models of competence in solving physics problems. *Cognitive Science*, 1980, 4: 317- 345
- [9] Langley P, Neches R. PRISM user's manual. Technical report, Department of psychology, Carnegie- Mellon University and learning research and development center, University of Pittsburgh. 1981
- [10] Kotovsky K, Hayes J R, Simon H A. Why are some problems hard?: Evidence from the Tower of Hanoi. *Cognitive Psychology*, 1985, 17: 248- 294
- [11] Sweller J, Chandler P. Why some materials is difficult to learn. *Cognition and Instruction*, 1994, 12 (3): 185- 233