

图表加工的理论模型*

任衍具^{1,2} 傅小兰¹

(¹ 中国科学院心理研究所, 脑与认知国家重点实验室, 北京 100101) (² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 图表作为一种以图形和表格记录、展示和传递信息的表征方式已得到广泛应用。图表加工是指人们对图表所呈现信息的认知加工。文章首先说明并简要评述图表加工的规则模型、认知过程模型和计算模型, 然后介绍 2004 年提出的层次框架模型, 最后进行小结并指出未来的研究方向。

关键词 图表加工, 规则模型, 认知过程模型, 计算模型, 层次框架模型。

分类号 B842

古埃及人绘制地图来表示复杂的空间信息, 在某种意义上创作了第一种图形显示; 在莎士比亚时代, 人们使用“划线”和“标记”系统来记录数量关系^[1]。Playfair 在《商业与政治地图册 (The Commercial and Political Atlas)》一书中区分了饼图、直条图、直方图和线形图等, 率先对图表显示进行科学研究 (参见文献[2])。Playfair 明确指出, 对于呈现定量数据, 使用模拟符号比使用词汇和数字更有效 (参见文献[3])。

图表 (graph and table) 作为一种重要的信息记录、展示和传递方式, 已经被广泛地应用到科学^[1]、工程^[4]、教育^[5]、商业和媒体^[6]等领域中, 并发挥着重要的作用。图表不仅有突出的视觉和空间特征, 而且有表征数量关系的图表构成成分, 因此, 图表加工与人们对图表的知觉加工和对图表构成成分的概念加工密不可分。如何更好地设计和制作图表以有效地记录和展示信息, 如何快速有效正确地理解并获取图表所传递的信息, 已成为认知心理学家关注的重要问题, 其研究成果具有明显的应用价值。

近年来, 研究者们提出了许多有关图表加工的理论模型, 试图说明图表加工过程的特点与规律。基于已有的图表加工理论所涉及的认知加工过程的复杂程度, 我们将其区分为两大类, 第一类较为简单, 包括规则模型 (rule model)、认知过程模型 (cognitive process model) 和计算模型 (computational model), 而第二类是 2004 年提出的层次框架模型 (hierarchical framework model), 涉及的认知加工过程相对比较复杂。本文将首先介绍第一类模型, 并进行简要评述; 然后, 介绍和评述层次框架模型; 最后, 在总结已有图表加工理论的基础上, 试图指出以往图表加工研究中存在的问题, 并提出未来的发展方向。

1 规则模型

规则模型指出了图表设计过程中应遵循的基本准则, 主要可以分为分析模型 (analytic model) 和兼容模型 (compatibility model) 两大类。分析模型主要侧重于从图表自身的角度出发来考虑图表设计的原则, 而兼容模型的特点在于从图表和任务的兼容性方面来考虑图表设计的原则。

1.1 分析模型

分析模型中所论述的图表设计的基本原则, 大多是基于认知心理学家的直觉和经验, 只有少数基于实证数据。Bertin 的《图表记号学 (Semiology of

收稿日期: 2005-03-03

* 本研究得到中国科技部 973 项目 (2002CB312103)、国家自然科学基金重点项目 (60433030) 和面上项目 (30270466)、中国科学院心理研究所创新重点项目 (0302037) 经费支持。

通讯作者: 傅小兰, E-mail: fuxl@psych.ac.cn

Graphics)》一书着重分析了图表显示的视觉特性,并详细地阐述了用于设置和显示数量变化的图表生成技术^[7]。他把图表设计问题划分为不同的类别,认为在设计图表时应该考虑图表拟显示的信息成分的组织水平(名义的、顺序的、等距的和比例的),并指出表征信息某一成分的变量必须具有和它们所表征的信息成分至少相同的组织水平。

Tufte 则提出了数据一笔墨比率(data-ink ratio)原则(参见文献[3])。这一原则认为,图应该只用来表示重要的信息,因此,应该使不能表达数据点或数据点之间关系的描述减至最少,以减少混淆。Gillan 和 Richman 进一步指出,数据笔墨比率越高,则完成系列判断所用的时间越短,准确性越高;整合性的任务(如总体比较、综合判断)比聚焦性任务(如单值提取)更易受数据一笔墨比率的影响^[8]。他们的实验结果表明,图形背景的使用可能会干扰读者对图表信息的加工(尤其是当读者完成整合性任务时),其结果会增加反应时间,降低准确性^[8]。

Kosslyn 在编码、知觉和表征的不同层面对图表进行了句法的(syntactic)、语义的(semantic)和实效的(pragmatic)分析,指出了影响图表阅读难易程度的因素^[9]。Zhang 关注表征维度(representing dimensions)和被表征维度(represented dimensions)之间的关系,指出只有当表征维度能够充分必要地表征被表征维度时,表征方式才是最优的,也就是说,表征维度和被表征维度应该在量尺类型上匹配^[10]。

综上所述,分析模型主要侧重于从图表自身出发来考虑图表设计的原则。分析模型的主要问题在于,它们很少考虑任务类型、图表读者的知识经验以及这些因素之间的交互作用,并且缺乏实证研究支持。具体而言, Bertin 侧重于对图表设计原则的叙述,并没有提供相应的实验证据。Kosslyn 的图表理论^[9]和 Zhang 的表征原则^[10]也缺乏实验数据的支持。虽然 Tufte 的数据一笔墨比率原则得到了一些实验数据的支持,但其概念却有点扩大化了。例如,在线形图中,数据是由各个点来表达的,点与点的连线并不传递数据,根据 Tufte 提出的原则,

这些多余的连线应该被删除。但是,如果删除这些多余的连线就会削弱人们完成某些任务(如趋势评估)的能力,因为这些连线为图表读者提供了线条斜率的突显特征(参见文献[3])。

1.2 兼容模型

兼容模型即任务—显示兼容性(task-display compatibility)模型^[3],认为不同的显示方式适用于不同的任务,如果任务不同,那么最佳的显示方式也应有所不同。Vessey 在“认知匹配理论”(cognitive fit theory)中对这一模型进行了详细的阐述,旨在说明图和表两种信息呈现方式之间的差别以及它们所支持的任务类型^[11,12]。Vessey 指出,图主要用来呈现空间信息,而表主要用来呈现符号信息。任务主要可以区分为两大类:一类为“符号”(symbolic)任务,包括提取离散数值;而另一类为“空间”(spatial)任务,包括觉察或判断数值之间关系(如大小比较、趋势判断等)。根据兼容模型,当呈现方式和任务均为空间的或均为符号的时候,两者是兼容的,其任务绩效要明显高于两者不兼容情景下的任务绩效。但是, Vessey 的实验结果只是部分地符合模型的预测。

兼容模型的一个主要变式是“接近—兼容性原则”(proximity-compatibility principle, 简称为 PCP),即任务和显示方式应该同时是低接近性的或者同时是高接近性的^[3,13,14]。低接近性任务要求使用单个数据点(如提取具体数值);而高接近性任务则要求使用数据点的构型(如比较趋势)。在低接近性的显示方式中,数值之间距离较大或者分开显示(如数据表);而在高接近性的显示方式中,数据之间分布紧密并可组成视觉构型(如客体显示, object display)。PCP 表明,当任务的接近性与显示方式的接近性相兼容的时候,绩效最好。Renshaw 等人使用眼动技术对图例的位置进行考察,结果表明在遵循 PCP 的条件下,读者的操作绩效较好^[15]。需要说明的是,PCP 不仅包括显示方式的空间接近性,还包括所使用的颜色、形状和尺寸的相似性。

我们认为,兼容模型提出了图表设计的一个重要原则,但并未说明为什么遵循兼容性原则的图表

能提高图表读者的任务绩效。此外,兼容性模型只阐述了图表与任务之间的关系,并没有考虑图表读者的知识经验等因素。由于图表读者、图表和任务构成一个系统,三者之间存在着一定的交互作用,图表-任务之间的关系可能会受到图表读者知识经验的影响。前面提到的 Vessey 的部分实验结果与模型预期不一致,可能是图表读者不同的知识经验造成的。

2 认知过程模型

认知过程模型认为,图表理解的过程可以分解为一系列的认知加工过程,主要包括图表理解理论(theory of graph comprehension)、理解认知信息工程(understanding cognitive information engineering, 简称为 UCIE)的计算机程序和知觉与概念加工模型(model of perceptual and conceptual processes)。

2.1 图表理解理论

Pinker 在其提出的图表理解理论中,将图表界定为向读者传达数学量尺中一组 N 维数值的一种表征方式,用客体的视觉维度(如:长度、位置、亮度和形状等)对应于各自表征的量尺(如:名义的、顺序的、等距的或比例的),每一个维度值对应于相应量尺的值^[16]。Pinker 指出,要理解图表,读者需要做两件事情。首先,他必须在心理上以一定的方式来表征图表中的元素。当读者看一张图表时,图表中的信息就会以一种强度的二维模式即网膜上的视觉阵列(visual array)作用于其神经系统,视觉阵列的原始信息通过视觉描述(visual description)被转换为记忆表征来指代图表中视觉标记的意义。其次,读者必须记住或推论出图表视觉成分所代表的相应的数学量尺。为此,Pinker 提出图表图式(graph schema)的概念,即在某些领域已经被记住的图表信息,包括对至今未知信息的参量和插槽的描述。读者通过图表图式可以获得图表的视觉成分与相应的数学量尺之间的正确对应关系。

Pinker 指出,为了回答特定的问题,图表读者需要把从视觉描述中获得的信息转换成概念消息

(conceptual messages),并把问题转换成能够通过视觉描述来回答的形式。这将包括下面的一系列过程:(1)匹配(matching),即将图表归类为某一特定的图表类型;(2)消息汇集(message assembly),即从图表图式中产生概念消息的过程,值得注意的是,并不是图表中的所有信息都必须被转换成概念消息;(3)查询(interrogation),即基于概念问题对新信息进行编码和提取;(4)推论过程(inferential processes),即将数学和逻辑规则应用到概念消息中去,以获取新的信息。

Pinker 的图表理解理论主要以命题表征为基础,关注的是人们从图表中提取信息的过程。该理论存在着以下几个方面的问题:(1) Ratwani 等人指出,图表理解理论对读者的任务绩效不能提供很好的解释,没有说明读者在理解图表的过程中是如何整合信息的,如“群组”(cluster)信息是单个读取的还是以格式塔的方式形成的^[17];(2)不能很好地解释问题类型对信息加工过程的影响。Ratwani 等人指出,根据图表理解理论,读者读取和整合问题应该有着相同的扫描模式。然而,经验数据表明,问题类型对读者的扫描模式有着强烈的影响,视觉加工的操作是服务于读者所要回答的问题^[17];(3)声明了推论是图表理解过程的一部分,但是并没有给出推论过程发生的细节;(4)没有提及领域知识的问题;(5) Trickett 等人指出,这一理论没有涉及到空间转换的概念,对需要空间转换的问题难以理解^[18]。

2.2 UCIE 的计算机程序

在 Pinker 图表理解理论的基础上,Lohse 采用 UCIE 的计算机程序来模拟读者使用图表的认知加工过程,对读者提取特定信息的加工过程做出定量预测^[19]。Lohse 指出图表理解包括以下认知加工过程:(1)早期的视觉加工即检测和编码图表的视觉特征;(2)短时记忆即形成从早期视觉加工过程中获得的视觉描述;(3)短时记忆的信息激发了和长时记忆中记忆痕迹的联系。他使用 GOMS (goals, operators, methods, and selection rules)模型和视线追踪技术来研究图表理解的过程,同时考虑

到短时记忆容量（3 个组块）和持续时间（7s）有限，以及扫描过程中获取信息的难易程度不同等方面的因素，通过使用大量的“认知工程参数”（cognitive engineering parameters）来估计在假定的显示方式下完成一个具体任务所需要的时间。他进行了相关的实验研究，对扫描模式做出了具体的预测，将读者的实际绩效和计算机程序的预测绩效相比较，部分结果支持 UCIE 模型。

Lohse 的 UCIE 模型为定量预测图表的理解过程迈出了重要的一步。但仍然存在诸多问题：（1）Lohse 指出，实验中任务绩效的个体差异非常大，需要额外的研究来解释^[19]；（2）UCIE 模型的预测会受到显示信息复杂程度的影响，Foster 指出，这或许是由于 UCIE 模型使用的是较低水平的操作，而这些较低水平的操作对图表的信息复杂程度的变化比较敏感^[20]；（3）Meyer 指出这个模型不太容易使用，因为它具有大量的认知参数，难以对各种新任务建模^[21]；（4）没有提供恰当的整合机制。Lohse 认为在整合信息的过程中，将出现多次重复扫描的可能性，通过大量的扫描形成类群，把类群联系起来，实现多类群的推理，直到建构完所有的相关类群并做出比较^[19]。然而，Ratwani 等人的研究表明，图表读者一般是一次性形成类群，然后利用这些信息进行推理^[22]；（5）同 Pinker 的图表理解理论一样，UCIE 也没有提及领域知识和空间成分。

2.3 知觉与概念加工模型

Carpenter 和 Shah 在前人的基础上提出了图表理解的知觉与概念加工模型^[23]。她们将图表理解看作是整合一系列复杂的知觉和概念加工过程，提出了三种类型的加工：（1）模式再认过程，即编码图表中主要的视觉模式，如线条是直的还是锯齿状的，是否有多条，它们之间是平行的还是交叉的关系。准确的编码是图表理解的前提条件；（2）模式解释过程，即对视觉模式的代码进行操作，将视觉特征转换为它们所表征的概念关系，并提取出定性、定量的关系。这些过程包括提取和视觉模式相联系的知识，如上行曲线表示增函数。当视觉模式

容易激发适当的数量概念的时候，图表的理解就变得相对容易，然而，有些数量的或函数的信息获取需要复杂的推论过程；（3）整合过程，即将这些数量关系和从标签、标题中推论的指代物联系起来，包括确定被量化概念的指代物，将这些指代物和已编码的函数联系起来。指代过程的一个方面就是标定过程，包括阅读坐标轴上的图例和数量值，并将它们和相应的线条和数据点联系起来。标定过程很可能与模式再认、相关概念知识的提取发生交互作用。

Carpenter 和 Shah 采用视线追踪技术来考察图表加工过程中涉及的认知过程，明确提出应将知觉加工和概念加工结合起来^[23]。实验结果表明，图表理解需要读者阅读和重读坐标轴和图标区以获得的必要信息，而且人们并不总是能够保持从这些区域所获得的信息。她们的研究为图表中不同区域的设计提供了一定的心理学依据。

此外，认知过程模型还包括 Cleveland 和 McGill 提出的图表知觉模型（graph perceptual Model）^[24,25]，Gillan 和 Lewis 提出的人—图表交互的成分模型（componential model）中的混和算法知觉（mixed arithmetic perceptual，简称为 MA-P）模型^[26]，Meyer 提出的视觉搜索模型（visual search model）^[21]，Gillan 和 Callahan 提出的人—图表交互的成分模型中饼图的锚定—对齐—调整模型（anchor-align-adjust model）^[27]，Hollands 和 Spence 提出的用于条图和饼图中数量辨别任务的递增估计模型（the incremental estimation model）^[28]，Freedman 和 Shah 提出了基于知识的图表理解模型（a model of knowledge-based graph comprehension）^[29]以及 Katz 等人提出的图表理解中的视觉组块假说（the visual chunks hypothesis）^[30]。

3 计算模型

Peebles 和 Cheng 对基于图表推理（graph-based reasoning，简称为 GBR）的模型予以扩展，提出了计算模型^[31,32]。

GBR 模型（参见文献[31, 32]）类似于 Lohse

的 UCIE 的计算机程序, 不同之处在于它认为图表推理过程中的读者行为是推理者的知觉技巧、所使用图表特性和任务的特定要求三者交互作用的函数。它假设, 对于一个特定的信息提取任务, 有经验的读者将利用一种程序来获得眼跳序列和对目标任务的固视信息。最终的扫描路线是否是最优的, 或多或少依赖于被试有关图形的一般知识、对任务类型的熟悉程度以及完成任务所需的概念和程序。GBR 模型也存在一定的局限性: (1) 最优路线的假设掩盖了个体水平上重要的认知和策略因素的影响, 例如, 在加工的过程中, 读者可能需要权衡额外的眼动与减少工作记忆负荷的策略性决策; (2) 有关时间的预测停留在陈述性的水平上, 需要更强有力的模型来产生定量的结果。

Peebles 和 Cheng 以认知理论为基础, 将 GBR 模型与具体化认知 (embodied cognition)、执行加工/交互控制 (executive process/interactive control) 和 ACT 理性知觉运动 (ACT rational perceptual motor) 相结合, 提出了图表理解的计算模型。这一模型能够结合并测试相关的认知因素 (如陈述性和程序性的知识、所采取的策略和工作记忆的局限性) 以及知觉运动因素 (如鼠标的运动和视觉注意的转移)。与其他的认知任务分析方法一样, 计算理论结合了成分单元任务执行潜伏期的假设, 能够准确预测完成单一任务的时间。此外, 计算模型还能够提供解释任务的重要的足够的证据, 包括学习机制, 可以模拟练习对绩效的影响。

计算模型不仅仅涉及图表理解中人的认知过程, 还涉及到人在完成任务过程中的知觉运动因素, 它将人—图表—任务看作一个系统, 在认知—人造物—任务 (cognition-artifact-task) 的系统框架下来探讨人—图表—任务之间复杂的交互行为, 并进行计算机模拟。这一模型对于简单任务 (如, 单值提取) 绩效的预测已经相当完美, 但是它难以预测复杂任务 (如整合任务、推论任务) 的绩效。

4 层次框架模型

上面所论述的规则模型、认知过程模型和计算

模型主要集中在从显示数据点相对较少的简单图形中进行数据直接读取 (如单值读取) 和数据间读取 (如差异比较、确定趋势等) 的操作。然而, 现实生活中的图表使用还涉及更复杂的信息提取过程, 如股票分析家和气象预报员不仅要确定当前的数值, 还要对未来的数值进行预测^[33]。Trickett 等人发现, 以往的图表加工模型能够准确地解释简单图表和复杂图表中的数据直接读取问题; 但是当应用于整合问题时, 在解释读者如何从含有多个数据点的复杂图表中整合信息进行数据间读取, 特别是对数据间读取的任务绩效进行预测时出现了困难; 此外, 更重要的是以往的图表加工模型也不能解释推论过程, 因为推论需要读者超越外显呈现的数据进行数据外读取^[18]。

针对以往图表加工理论模型的不足, Ratwani 等人提出了层次框架模型 (hierarchical framework model) ^[17,34,35]。这一模型认为, (1) 从图表中提取信息的复杂性是有层次的, 数值读取是最简单的信息提取任务, 其次是整合与推论; (2) 提取不同类型信息所需要的认知过程随着任务的难度以层次的形式逐渐提高的, 读取数值是最基本的信息提取任务, 复杂的信息整合任务除了需要简单地读取信息之外, 还需要进行空间转换 (spatial transformation)。空间转换是指对图表的数据进行的心理操作, 例如, 为了做出比较, 需要在心理上将一条线移动到另一条线上, 空间转换允许图表读者结合图表的不同区域, 这一操作可以帮助读者比较量值和预测趋势^[18], Feeney 和 Webber 也指出, 人们在执行图表理解任务时, 应该尽可能自发地产生与空间特性有关的模拟表征 (analogical representation) ^[36]; (3) 为了做出推论, 图表读者不仅要使用整合过程, 还需要使用模式外推 (pattern extrapolation) 和心理模型 (mental model)。模式外推是指图表读者先考察已知的数据点, 然后在这些数据点所组成模式的基础上做出推论; 心理模型也能够用来做出推论。Trafton 等人表明, 当从可视化的气象图中做出推论时, 气象专家能够形成定性的心理模型^[33]; (4) 其他的一些因素如知识经验、认

知努力等也会影响心理操作的执行。尽管层次框架模型指出图表读者在提取不同类型的信息时会使用不同的认知过程,但这并不是必然的,由于认知经济原则,图表读者会尽可能地使用最简单的过程去提取所需要的信息。例如,当整合信息时,如果可能的话,图表读者主要还是使用读取信息的操作,因为读取信息是最简单的信息提取方式,与空间转换相比需要的认知努力非常少。

图表加工的层次框架理论目前还处在起步阶段,还有许多的问题需要解决。例如图表读者是如何从不同类型的图表中获取信息的?如何整合这些信息并做出推论的?在获取信息、整合信息并做出推论的过程中进行了哪些心理操作?获取信息、整合信息和做出推论所需要的心理操作有何区别与联系?读者如何进行空间转换?如何形成心理模型?后续的研究有必要结合口语报告和视线追踪技术,进一步探讨上述问题,以完善现有的理论。

5 小结

综上所述,图表加工理论的发展可以分为两个阶段。第一个阶段提出了规则模型、认知过程模型和计算模型。最初的规则模型侧重于图表设计的原则,由强调图表显示的视觉特性(分析模型)发展到强调图表和任务的关系(兼容模型)。认知过程模型侧重于图表理解涉及的认知过程,由定性的认知过程描述(Pinker的图表理解理论和Carpenter等人的知觉与概念加工模型)发展到认知过程的定量预测(Lohse的UCIE的计算机程序和Peeble等人的计算模型)。计算模型不仅强调了对认知过程的定量预测,而且在人—图表—任务这一广阔的背景下来考察人—图表之间的交互作用。到目前为止,第一阶段的发展成果卓著,实现了对图表理解过程的定量预测和计算机模拟。第二个阶段提出了层次框架模型。这一模型是第一阶段模型的扩展,目前还刚刚起步,侧重于从复杂图表中来提取信息并做出推论以回答高度整合的任务,代表了未来图表加工理论的发展趋势。因此,在未来的研究工作中,在完善定量显示的信息提取模型的同时,有必

要把工作重心转移到发展与完善层次框架模型上。图表加工研究的未来发展方向将可能主要表现在以下三个方面。

首先,在研究广度方面,所研究的图表不再仅仅局限于静态的、二维的、简单的图表。目前,已有少数研究者开始涉及动态的^[37]、三维的^[38]、复杂的^[39](如动画、股票走势图、天气预报图等)图表研究。在未来的研究中,研究者可能会更关注对动态的、三维的、复杂的图表的研究,考察图表读者在动态的、三维的、复杂的图表中提取、加工和推论信息的特点和规律。同时,由于所研究图表复杂性的增加,需要注重图表读者的知识经验对图表加工的影响。专家具备专业知识的优势,他们对图表中信息的获取、加工特别是做出推论的方式可能不同于新手,这也是未来研究需要探讨的一个问题。

其次,在研究深度方面,从重视图表阅读绩效转向探索图表表征机制,以及图表和文本信息的整合机制。以往研究试图寻求适合不同任务的最佳的图表显示方式,而很少关注图表表征的机制。图表是一种重要的信息表征方式,对图表表征机制的探索必定能进一步深化人们对图表加工过程的理解,而且人们对图表的加工与对其他相关的信息(如文本信息、音频信息等)的加工关系密切,因此,未来的研究不仅要考察图表表征机制,也要考察与之相关的背景信息或上下文信息的作用。近期研究已开始涉及图表和文本信息的整合机制问题。Hegarty曾给被试呈现描述滑轮系统的文本和图片,观察其注视点的变化,结果发现,被试阅读有图片伴随的文本时,其理解过程在很大程度上是以文本为导向的,观察图片是为了构建他们在最近阅读文本的过程中获得的信息的表征^[40]。Rayner等人考察了被试阅读印刷广告(既有文本,也有图片信息)的过程,结果发现,被试并没有在广告的图片 and 文本之间交替注视,而是倾向于先阅读大的印刷区,然后阅读小的印刷区,最后才看图片^[41]。

最后,在研究方法方面,将综合运用多重数据采集技术。在研究的初期阶段,可以采用观察、问卷和访谈等传统的方法来了解在不同任务条件下

读者对图表形式的需求。在正式实验阶段,可以采用严格控制的实验室研究,记录被试回答相关问题的反应时、正确率。在未来对复杂图表加工的研究中,还将重视使用口语报告和视线追踪技术,甚至对被试完成任务的行为摄像,然后进行动作分析。口语报告尽管有其不足之处,但是在研究读者有意识的信息获取、加工等高级的心理过程方面仍然具有一定的优势。重要的是,我们可以将读者的口语报告作为一个指标,与其他的客观指标如反应时、正确率相结合,以探讨读者获取、加工信息的特点和规律。视线追踪技术能够对读者认知活动提供相对应的实时测量,在探讨读者获取、加工和推论图表信息的细节方面有其优势。在研究过程中,可以记录被试在图表不同区域的注视持续时间、注视次数、区域内和区域间的眼跳距离、扫描路线等指标。研究表明,读者在获取、加工和推论图表信息的过程中有其相应的眼动模式,不同的眼动模式反映了被试加工过程中的不同状态。例如,注视时间的长短、注视次数的多少在一定程度上能够反映被试加工信息时认知负荷的高低,眼跳的距离在某种程度上能够反映被试的知觉广度和所要加工的信息密度^[41]。根据读者的眼动模式可以揭示图表加工过程中所包含的认知成分,从而增进人们对图表加工过程的理解。

参考文献

- [1] Best L A, Smith L D, Stubbs D A. Graph use in psychology and other sciences. *Behavioral Processes*, 2001, 54: 155~165
- [2] Spence I, Wainer H. William Playfair: A daring worthless fellow. *Chance*, 1997, 10: 31~34
- [3] C D 威肯斯, J G 霍兰兹著. 朱祖祥等译. 工程心理学与人的作业. 第三版. 上海: 华东师范大学出版社, 2003. 144~188
- [4] Ridsen K, Czerwinski M P. An initial examination of ease of use for 2D and 3D information visualizations of web content. *Int. J. Human-Computer Studies*, 2000, 53: 695~714
- [5] Cheng P, Cupit J, Shadbolt N. Supporting diagrammatic knowledge acquisition: an ontological analysis of Cartesian graphs. *Int. J. Human-Computer Studies*, 2001, 54: 457~494
- [6] Rayner K, Rotello C M, Stewart A J. Integrating Text and Pictorial Information: Eye Movements When Looking at Print Advertisements. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 2001, 7(3): 219~226
- [7] Bertin J. *Semiology of graphics*. Preface to the English Edition, Madison, WI: University of Wisconsin Press, 1983, http://www.edwardtufte.com/bboard/q-and-a-fetch-msg?msg_id=0000S0&topic_id=1
- [8] Gillan D J, Richman E H. Minimalism and the syntax of graphs. *Human Factors*, 1994, 36: 619~644
- [9] Kosslyn S M. Understanding charts and graphs. *Applied Cognitive Psychology*, 1989, 3: 185~226
- [10] Zhang J. A representational analysis of relational information displays. *International Journal of Human-Computer Studies*, 1996, 45: 59~74
- [11] Vessey I. Cognitive fit: a theory-based analysis of the graphs versus tables' literature. *Decision Sciences*, 1991, 22: 219~240
- [12] Vessey I. The effect of information presentation on decision-making: a cost-benefit analysis. *Information & Management*, 1994, 27: 103~119
- [13] Wickens C D, Andre A D. Proximity compatibility and information display: effects of color, space and objectiveness on information integration. *Human Factors*, 1990, 32: 61~78
- [14] Wickens C D, Carswell C M. The proximity compatibility principle: its psychological foundation and its relevance to display design. *Human Factors*, 1995, 37: 473~494
- [15] Renshaw J A, Finlay J E, Tyfa D, Ward R D. Understanding visual influence in graph design through temporal and spatial eye movement characteristics. *Interacting with Computers*, 2004, 16: 557~578
- [16] Pinker S. A theory of graph comprehension. In: R Freedle (Ed.), *Artificial intelligence and the future of testing*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1990. 73~126
- [17] Ratwani R M, Trafton J G. Real World Graph Comprehension: High-Level Questions, Complex Graphs,

- and Spatial Cognition. Under Review, 2004, http://archlab.gmu.edu/~rratwani/real_world_graph_comprehension.pdf
- [18] Trickett S B, Trafton J G. Use of Spatial Transformations in Graph Comprehension. *Cogsci2004*, <http://www.cogsci.northwestern.edu/cogsci2004/ma/ma353.pdf>
- [19] Lohse G L. A cognitive model for understanding graphical perception. *Human-Computer Interaction*, 1993, 8(4): 353 ~ 388
- [20] Foster M E. Evaluating Models of Visual Comprehension. *Cogsci2003*, <http://www.hcrc.ed.ac.uk/comic/documents/publications/foster-eurocogsci-2003.pdf>
- [21] Meyer J. Performance with tables and graphs: Effects of training and a visual search model. *Ergonomics*, 2000, 43(11): 1840~1865
- [22] Ratwani R M, Trafton J G, Boehm-Davis D A. Thinking graphically: Extracting local and global information. In: R Alterman, D Kirsch (Eds.), 25th. Annual Meeting of the Cognitive Science Society. Boston, MA: Erlbaum. 2003, http://archlab.gmu.edu/~rratwani/Thinking_Graphically.pdf
- [23] Carpenter P A, Shah P. A model of the perceptual and conceptual processes in graph comprehension. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 1998, 4: 75~100
- [24] Cleveland W S, McGill R. Graphical Perception and Graphical Methods for Analyzing Scientific Data. *Science*, 1985, 828~833
- [25] Cleveland W S. A model for studying display methods of statistical graphics. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 1993, 2: 323~343
- [26] Gillan D J, Lewis R. A Componential Model of Human Interaction with Graphs: I. Linear regression modeling. *Human Factors*, 1994, 36: 419~440
- [27] Gillan D J, Callahan A B. A Componential Model of Human Interaction with Graphs: VI. Cognitive Engineering of Pie Graphs. *Human Factors*, 2000, 42: 566~591
- [28] Hollands J G, Spence I. The Discrimination of Graphical Elements. *Applied cognitive psychology*. 2001, 15: 413~431
- [29] Freedman E G, Shah P. Toward a Model of Knowledge-Based Graph Comprehension. In: M Hegarty, B Meyer, N Hari Narayanan (Eds.): *Diagrams 2002*, LNAI 2317, 2002. 18~30
- [30] Katz I R, Xi X, Kim H, Cheng P. Elicited Speech From Graph Items on the Test of Spoken English. *TOEFL Research Reports*, Report 74 February 2004, <http://ftp.ets.org/pub/toefl/990114.pdf>
- [31] Peebles D, Cheng P. Extending task analytic models of graph-based reasoning: A cognitive model of problem solving with Cartesian graphs in ACT-R/PM. *Cognitive Systems Research*, 2002, 3: 77~86
- [32] Peebles D, Cheng P. Modeling the Effect of Task and Graphical Representation on Response Latency in a Graph Reading Task. *Human Factors*, 2003, 45(1): 28~45
- [33] Trafton J G, Trickett S B. A New Model of Graph and Visualization Usage. In: J D Moore, K Stenning (Eds.), *Proceedings of the 23rd Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Mahwah, NJ: Erlbaum. 2001, <http://www.aic.nrl.navy.mil/~trafton/papers/graph-comprehension.pdf>
- [34] Ratwani R M, Trafton J G, Boehm-Davis D A. From Specific Information Extraction to Inferences: A Hierarchical Framework of Graph Comprehension. *HFES*, 2004, http://archlab.gmu.edu/~rratwani/HFES.Hierarchical_framework.pdf
- [35] Ratwani R M, Trafton J G. Making Graphical Inferences: A Hierarchical Framework. *Cogsci2004*, <http://www.cogsci.northwestern.edu/cogsci2004/papers/paper376.pdf>
- [36] Feeney A, Webber L. Analogical Representation and Graph Comprehension. *Lecture Notes in Computer Science*, 2003, 2733: 212~221
- [37] Tversky B, Morrison J B. Animation: can it facilitate? *Int. J. Human-Computer Studies*, 2002, 57: 247~262
- [38] Kumar N, Benbasat I. The Effect of Relationship Encoding, Task Type, and Complexity on Information Representation: an Empirical Evaluation of 2D and 3D Line Graphs. *MIS Quarterly*, 2004, 28 (2): 255~281
- [39] Belcher D, Billinghamurst M, Hayes SE, Stiles R. Using

- Augmented Reality for Visualizing Complex Graphs in Three Dimensions. ISMAR 2003, http://www.hitlabnz.org/fileman_store/2003-ISMAR-ComplexGraphsAR.pdf
- [40] Hegarty, M. Mental animation: Inferring motion from static displays of mechanical systems. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 1992, 18:1084~1102
- [41] Rayner K, Rotello C M, Stewart A J, Keir J, Duffy S A. Integrating Text and Pictorial Information: Eye Movements When Looking at Print Advertisements. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 2001, 7 (3): 219~226

Review on Graph and Table Processing Theories

Ren Yanju^{1,2} Fu Xiaolan¹

(¹ State Key Laboratory of Brain and Cognitive Science, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(² Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Graph and table, as important information representation modes, had been applied broadly. Graph and table processing refer to human cognitive processing of information in graph and table. Firstly, the article reviewed rule model, cognitive process model, and computational model; secondly, it commented the hierarchical framework model which had been put forward in 2004; and finally, it summarized the graph and table processing theories and pointed out research directions in the future.

Key words: graph and table processing, rule model, cognitive process model, computational model, hierarchical framework model.