

基于多维尺度分析的学习者认知结构 可视化方法

杜梦*, 魏强#, 董华, 刘晗, 章艺彤, 王凌云, 张澳楠

江汉大学教育学院, 湖北 武汉
Email: #weiqiang@jhun.edu.cn

收稿日期: 2020年11月12日; 录用日期: 2020年11月25日; 发布日期: 2020年12月2日

摘要

认知结构由学习者头脑中所有观念和经验知识构成。多维尺度分析方法将学习者复杂的认知结构以图形的形式进行可视化呈现, 并通过客观指标对可视化结果进行量化分析, 揭示学习者认知结构的不同学习阶段的发展情况以及个体差异, 从而指导教师开展更有针对性的个性化教学活动。本文详细介绍了多维尺度分析的原理、分析过程, 并通过解释多维尺度分析在教学中的具体实例, 对其在教育领域的应用前景进行展望, 为丰富教学效果评价方法提供参考。

关键词

多维尺度分析, 认知结构, 可视化, 教学效果评价

Visualization Method of Learners' Cognitive Structure Based on Multidimensional Scaling Analysis

Meng Du*, Qiang Wei#, Hua Dong, Han Liu, Yitong Zhang, Lingyun Wang, Aonan Zhang

Faculty of Education, Jiangnan University, Wuhan Hubei
Email: #weiqiang@jhun.edu.cn

Received: Nov. 12th, 2020; accepted: Nov. 25th, 2020; published: Dec. 2nd, 2020

Abstract

Cognitive structure consists of all ideas and experiential knowledge in the learner's mind. The

*第一作者。
#通讯作者。

multidimensional scale analysis method visualizes the learners' complex cognitive structure in the form of graphics, and quantifies the visual results through objective indicators. To reveal the development of learners' cognitive structure in different learning stages and individual differences, so as to guide teachers to carry out more targeted personalized teaching activities. In this paper, the principle and process of multidimensional scale analysis are introduced in detail, and the application prospect of multidimensional scale analysis in the field of education is prospected by explaining the concrete examples of multidimensional scale analysis in teaching, which provides a reference for enriching the evaluation methods of teaching effect.

Keywords

Multidimensional Scale Analysis, Cognitive Structure, Visualization, Teaching Effect Evaluation

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

认知结构是学习者在学习过程中形成的内隐知识图式，知识不是孤立存在的，它们互相联系且密不可分。认知心理学的观点认为，学习的实质就是学习者认知结构的建构和不断完善的过程。王婷婷等学者认为，测查学习者已有的认知结构可以帮助教师更全面深入地了解学习者的先验知识与易混淆概念，从而促进教师有针对性地指导学习者将学到的新知识内化并与已有的认知结构融合，提高学习者的学习效率[1]。

目前教学常用纸笔测验法通过知识点考查的方式来探讨学习者的学习效果，难以准确地呈现学习者的认知结构变化。因此，学者们开始提出将可视化方法运用于认知结构测查中，由此准确、快速、清晰地呈现学习者的认知结构，描述学习者的认知结构在教学过程中发生的变化。可视化是一种将繁杂的数据转化为直观图形的技术。吴锋指出学习者可以通过对自己认知结构的可视化反馈调整自己的学习，教师也可以根据学习者的反应做出个性化的教学诊断与调整，形成师与生、教与学之间的良性互动[2]。现有的认知结构可视化方法有流程图、思维导图、概念图、维恩图、框架图和示意图等，但它们都或多或少存在着制作困难、费时费力、结构局限、呈现知识广度不足、不够客观等问题。多维尺度分析由 Torgerson 于 1952 年首次提出，是一种简单、客观、直接的心理测量学方法，英文名称为 Multidimensional scaling，简称 MDS。多维尺度分析可将多维空间的样本或变量进行降维处理，从而对样本或变量进行定位、分析和分类，同时又尽可能保留所测对象原始认知距离。

在现有研究中，已有一些学者对多维尺度分析及其在教育方面的应用进行了系统阐述。国外 Cody S. Ding 以两个具体实例展开，根据对学习者的认知结构进行多维尺度分析的过程中是否与先验知识进行对比将其在教育上的应用分为外部分析及内部分析两个方面[3]。国内揭水平等学者采用多维尺度分析的方法探索了小学优秀班主任的素质结构，并综述了其定义、分类、使用方法、优缺点以及其在探究心理素质结构上的优势[4][5]。本文详细介绍了多维尺度分析的原理、操作方法，并剖析了其在学习效果评价方面的应用。

2. 多维尺度分析原理简介

多维尺度分析通过对象间的相异性或者相似性数据得到不同研究对象在低维空间中的相对分布情况。多维尺度分析可以分为度量分析与非度量分析，前者适用于等距或者比率数据，而后者适用于顺序性数据[5]。多维尺度分析的独特优势在于：它能够设计一个多维空间来简化复杂的数据集合，以一组简单的客观心理维度来表示不同变量间关系、揭示概念间内隐的组织方式[6]。多维尺度分析无需依赖研究

者的主观看法, 可以将各种类型的概念在空间中按照一定的规则进行排列, 概念之间的几何距离反映数据中的经验关系, 直接代表了学习者对于概念的认知[7]。

在用多维尺度法可视化认知结构时, 要经历下述三个基本过程。

2.1. 数据获取

一般采用两两比较法、归类法、排序法得出个体对于客观事物之间关系的评价数据, 常见的数据形式为相似或相异性数据[8]。数据来源可以是单个被试也可以是某个想要研究的群体。

2.2. 数据分析

多维尺度分析的数据格式可以是经过 SPSS 分析后的相关矩阵、距离矩阵、量表评分而来的相似或相异性矩阵三者中的一种。将数据整理为矩阵后即可利用 SPSS 等统计软件进行多维尺度分析得出二维或三维坐标图。

2.3. 结果输出

多维尺度分析的主要目的是得出潜在因素并对其命名。除此之外, 我们也可以从结果中读取多维尺度分析得到的结果的拟合程度以及坐标间的距离差异, 后者可通过平均最近邻距离与欧氏距离来进行判断。

3. 多维尺度分析可视化认知结构实例

本研究以中学生为对象, 对其物理概念联系程度的评价数据进行多维尺度分析, 使中学生物理概念的认知结构得到可视化, 进而验证多维尺度分析可视化学习者认知结构的有效性。研究分别选取武汉市某中学七、九年级各两个班级的学生, 其中七年级组被试 60 人, 九年级组被试 60 人。实验材料采用初中物理课本里电学、力学、运动部分的基本概念, 共 15 个。将这 15 个概念两两配对(例“电流”--“电阻”)。实验采用李克特五点量表进行施测, 要求被试根据自己的理解对两个概念间的关联紧密程度进行评分, 1—5 表示关联紧密程度逐渐减弱。将最后整理得到的相似性矩阵进行多维尺度分析后得出七年级与九年级学生的相关物理概念认知结构图分别如下图 1 所示。将七年级与九年级学生的空间结构图的平均最近邻距离数据进行独立样本 t 检验后得到的结果如表 1 所示。

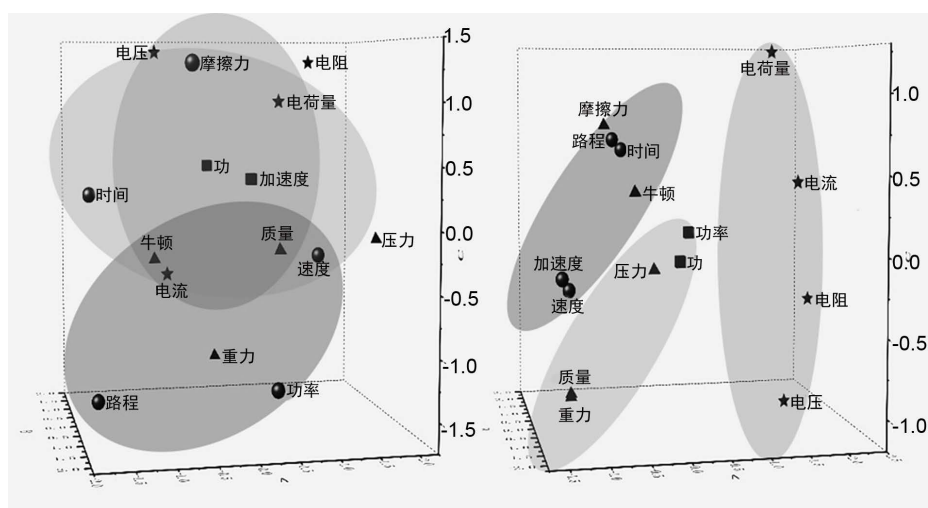


Figure 1. Visualization of the cognitive structure of physics concepts of grade seven and grade nine students (Left for Grade Seven and Right for Grade Nine)

图 1. 七年级、九年级学生的物理概念认知结构可视化(左图为七年级学生, 右图为九年级学生)

Table 1. Descriptive statistics and independent sample *t* test results of mean nearest neighbor distance between three kinds of physics concepts for junior middle school**表 1.** 三类初中物理概念的平均最近邻距离的描述统计及独立样本 *t* 检验结果

变量	七年级(<i>n</i> = 60)		九年级(<i>n</i> = 60)		<i>t</i>	<i>p</i>
	M	SD	M	SD		
总体	0.726	0.097	0.560	0.125	8.121	0.000
电学	0.57	0.164	0.506	0.184	1.995	0.048
力学	0.846	0.157	0.594	0.147	9.062	0.000
运动	0.671	0.21	0.554	0.179	3.270	0.001

多维尺度分析采用拟合劣度应力系数来表示实际数据与拟合结果之间的吻合程度，一般认为应力系数小于 0.2 则可以接受；拟合优度 RSQ 值代表结果空间对原始数据总变异的解释率，一般该值大于 0.6 即认为拟合结果良好。在本研究中，当维度数为三维时，七年级、九年级模型的应力系数分别是 0.1789、0.1528，小于 0.20，两个年级的 RSQ 值分别是 0.968、0.977，远大于 0.6。综合来看，各项模型拟合统计数值均达到标准，表明模型拟合良好。概念结构空间分布显示，九年级学生的总体认知分布以功—功率为中心，周围分别是与之相关的电学、力学、运动的概念，分类清晰。从各知识点内的空间分布来看，九年级学生电学部分四个概念都很聚集，力学部分牛顿、摩擦力、压力三者联系紧密，运动部分速度与加速度，路程与时间之间联系紧密。七年级学生的电学部分有一些概念相对有聚集，但其它概念整体分布松散混乱。

对七年级、九年级学生平均最近邻距离的差异检验结果显示：九年级学生的空间分布中总体词语的平均最近邻距离显著小于七年级学生， $t = 8.121$ ， $p < 0.01$ ；九年级学生的空间分布中电学类词语的平均最近邻距离显著小于七年级学生， $t = 1.995$ ， $p < 0.05$ ；九年级学生的空间分布中力学类词语的平均最近邻距离显著小于七年级学生， $t = 9.062$ ， $p < 0.01$ ；九年级学生的空间分布中运动类词语的平均最近邻距离显著小于七年级学生， $t = 3.270$ ， $p < 0.01$ 。这说明，九年级学生对于总体、电学、力学和运动概念的密集程度均大于七年级学生。

七年级学生并未接触过物理，他们对于物理的理解一般来自于生活经验，缺乏对于概念之间关系的认知；九年级学生经过一年的物理学习后，物理概念在头脑中形成了系统结构，学生对于各概念间联系的认知也得到了显著提升，研究中多维尺度分析的结果直观描述了七年级到九年级知识系统性的发展。另外，我们也可以用多维尺度的方法来得知学习者在物理学习中的易混淆概念。例如：对于七年级学生来讲，牛顿就是一个易混淆概念。受到生活常识的影响，七年级学生会将牛顿这个概念视为人名，而学过力学的九年级学生则能认知到其为力学单位，所以七年级学生难以将牛顿与力学部分的其它概念词联系起来。从空间结构图中我们也可以看出这一点，七年级学生图中的牛顿概念词与力学部分的其它概念词相距较远。研究结果说明，多维尺度分析可以有效地可视化学生的物理概念认知结构，在教学中有着广泛的应用价值。

4. 多维尺度分析在教育领域的应用

多维尺度分析技术目前在国内外各个领域应用广泛，主要在市场经济学、社会学、生物学、语言学等领域，用于追踪研究热点、研究热点可视化、产品定位与分类、语言交互学习等。在教育领域，研究者主要通过多维尺度分析来进行教学效果评价。

进行教学效果评价首先需要对学习者的学习情况进行实时评价。目前教学效果评价的主要方法是测

验法,包括线上与线下测验两种操作方式。测验法分析起来费时费力,且缺乏客观性、准确度欠缺。多维尺度分析可以对学习者的学习现状进行及时评价,了解学习者的学习水平和特点,从而更有针对性地进行教学活动。国外学者 Preece P.在 1976 年采用连续词关联测试获取中学生对于经典力学概念的接近性数据,随后利用多维尺度分析可视化地呈现学生的概念知识网络,证明了多维尺度分析对个体内隐概念结构进行语义空间映射的有效性[9]。2020 年国内学者黄菲菲、钱扬义采用多维尺度分析对学生化学平衡的概念结构进行探讨,发现高分学生的知识之间的联系更加紧密、系统性更强,启发教师教学时要指导学习者将各种知识进行关联整合[10]。

除了实时评价外,教学效果评价也需要对学习者的学习情况进行纵向分析,评估教学过程中学习者认知结构发生的变化,有助于教师更客观真实地追踪学习者的学习状况并有针对性地改进教学方案。多维尺度分析可以构建个体受教育过程中的变化模型并提供学习者不同阶段学习水平的差异的估计参数,由此研究者得以快速准确地了解学习者的发展水平[11]。此类研究在国外比较常见,国内则相对较少。Cody Ding 等学者曾利用多维尺度分析对幼儿园学生的词汇读写能力进行发展性评价[12]; Se-Kang Kim 针对数学和阅读数据采用多维尺度分析直接评估早期儿童的学习,结果显示描述成长趋势和成长衰减趋势的纵向模式与五年级学生成绩显著相关[13]; Cody S. Ding 对学生经历高中过渡期学业表现轨迹的变化进行多维尺度分析,发现了影响学生过渡期学业表现的关键因素[14]。

5. 小结与展望

多维尺度分析是一种直观、形象、客观的可视化认知结构的方法,目前多维尺度分析可视化认知结构的方法在教育行业得到了一些应用,主要体现在教学效果评价方面。

为使多维尺度分析技术更有效和广泛地应用于教育领域,未来的研究可重点关注以下几个方向:1) 学龄前儿童的认知结构可视化:对学龄前儿童的认知结构进行可视化有助于教师、家长了解其知识结构特点。由于学龄前儿童的自我表达能力较低,现有的研究方法难以对其认知结构进行定量可视化分析。多维尺度分析技术操作简便,对于学龄前儿童的表达能力没有较高要求,适合对学龄前儿童进行研究;2) 多学科的知识融合:学科知识总是与实际问题相联系并与其它学科相互渗透,关注学科之间的综合,可以帮助学习者学会学习、学会应用各学科知识解决实际问题。多维尺度分析可以对学习者的多学科知识结构体系进行可视化分析,了解学习者对于学科知识理解的深度和广度,有利于针对性地培养学习者将知识融会贯通并应用知识解决问题的能力;3) AI 教育领域的应用:多维尺度分析是一种无监督可视化机器学习工具,具有机器学习的自动化、简单快速、定性的特点[15]。利用多维尺度分析可以提供学习者实时能力水平、知识掌握情况、学习状态、学习态度结构等的定量可视化数据,利用 AI 技术可更好的创建学习者成长趋势的预测模型、精准定位学生学习薄弱点,从而为学习者推荐合适的学习内容、规划最佳学习路径、完善学习者的知识体系。

基金项目

湖北省大学生创新创业训练计划项目《中学生原始概念体系的可视化研究——以物理学科为例》,项目编号:S201911072041;武汉市市属高等学校教学研究项目《认知神经科学课程设置及教学方法改革》,项目编号:2014091。

参考文献

- [1] 王婷婷,周青,李晔.高中生氧化还原反应认知结构的调查[J].化学教育,2016,37(19):31-37.
- [2] 吴锋.“可视化”教学:让学物理思维看得见[J].中学物理教学,2018,47(24):11-12.
- [3] Ding, C.S. (2018) Fundamentals of Applied Multidimensional Scaling for Educational and Psychological Research.

- Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-78172-3>
- [4] 揭水平, 马红宇, 周宗奎, 陈继文. 小学优秀班主任素质结构研究[J]. 西南大学学报(社会科学版), 2009, 35(2): 139-142.
- [5] 揭水平. 多维标度分析及其在探索心理素质结构中的应用[J]. 教育测量与评价(理论版), 2011(6): 4-7.
- [6] Zhang, Z. and Takane, Y. (2010) *International Encyclopedia of Education*. 3rd Edition, Elsevier Science, Amsterdam.
- [7] Krabbe, P.F.M. (2017) *The Measurement of Health and Health Status*. Elsevier/Academic Press, San Diego. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801504-9.00006-4>
- [8] 赵守盈, 吕红云. 多维尺度分析技术的特点及几个基础问题[J]. 中国考试, 2010(4): 13-19.
- [9] Preece, P.F.W. (1976) Science Concepts in Semantic Space: A Multidimensional Scaling Study. *The Alberta Journal of Educational Research*, **22**, 281-288.
- [10] 黄菲菲, 钱扬义. 高中生“化学平衡”概念结构的研究[J]. 化学教育(中英文), 2020, 41(7): 27-32.
- [11] Ding, C.S., Davison, M.L. and Petersen, A.C. (2005) Multidimensional Scaling Analysis of Growth and Change. *Journal of Educational Measurement*, **42**, 171-191. <https://doi.org/10.1111/j.1745-3984.2005.00009>
- [12] Ding, C., Richardson, L.I., Schnell, T., et al. (2013) A Developmental Perspective on Word Literacy from Kindergarten through the Second Grade. *Journal of Educational Research*, **106**, 132-145. <https://doi.org/10.1080/00220671.2012.667009>
- [13] Kim, S.K. (2010) Comparing Longitudinal Profile Patterns of Mathematics and Reading in Early Child Longitudinal Study, Kindergarten: The Profile Analysis via Multidimensional Scaling (PAMS) Approach. *Asia Pacific Education Review*, **11**, 189-198. <https://doi.org/10.1007/s12564-010-9074-4>
- [14] Ding, C.S. (2008) Variations in Academic Performance Trajectories during High School Transition: Exploring Change Profiles via Multidimensional Scaling Growth Profile Analysis. *Educational Research and Evaluation*, **14**, 305-319. <https://doi.org/10.1080/13803610802249357>
- [15] 张天, 许静, 林超英, 刘梅申. 基于多维尺度法的国内学科信息服务研究热点可视化分析[J]. 图书馆工作与研究, 2015(8): 56-60.