

向量问题命题方式对学生解题影响的眼动研究

An eye-tracking research on the influence of vector problem propositions on students' problem-solving strategies

何国荣¹, 蒋竹君², 江丰光^{2*}

¹上海交通大学物理与天文学院

²上海交通大学教育学院

* fkchiang@sjtu.edu.cn

【摘要】 向量作为物理和数学学科的核心概念，常应用于各类问题的解决中，但学生在不同情境下理解和运用向量的能力存在差异。本研究旨在分析学生在不同学科情境下的向量问题解题过程，设计了数学和物理情境的同构向量理解测验，通过眼动追踪技术和访谈，分析其解题过程。基于便利取样由初三至高一年级的五名志愿者学生参加本研究。结果表明，虽然学生拥有较好的数学向量基础，但在迁移到物理情境时遇到了困难；此外学生在跨学科情境中面临的认知障碍也有所差异。这些研究发现为改善向量教学设计和学科概念迁移提供了实证依据。

【关键词】 向量，眼动追踪，学科取向

Abstract: As a core concept in physics and mathematics, vectors are used in solving various problems, but students' ability to understand and use vectors in different contexts is different. The purpose of this study was to analyze the process of solving vector problems in different subject situations. We designed an isomorphic vector comprehension test, and analyzed the problem-solving process through eye tracking and interviews. For convenience sampling, five volunteer students from 9th grade to 10th grade participated in this study. The results show although the students have a good foundation in vectors, they encounter difficulties in migrating to physical situations. In addition, students face different cognitive impairments in interdisciplinary situations. These findings provide an empirical basis for improving vector instructional design and subject concept transfer.

Keywords: Vector, eye-tracking research, subject orientation

1. 绪论

1.1. 研究背景

眼动追踪在研究物理教育相关学习过程中发挥重要作用 (Hahn & Klein, 2022)。根据眼-心假设，眼睛的注视表明对注视信息的加工 (Kustov & Robinson, 1996)，因此眼动数据可揭示学习者是否以预期方式感知学习内容，或是否被其他显著元素吸引。眼动数据分析中，研究材料被划分为预定义区域，称为感兴趣区域 (Areas of Interest, AOI)。通过眼动指标如总访问时长 (TVD) 和访问次数 (NOV) 可研究认知过程。注视次数、平均注视时间和回视次数反映信息加工的难易程度 (Rayner, 1998)，而注视时间、眼跳长度和总阅读时间则表征阅读和视觉搜索中的眼动行为 (Liversedge & Findlay, 2000)。

1.2. 研究问题

目前，学生在物理情景下向量问题的学习困难原因尚不明确，且缺乏不同情景下向量测试的眼动研究。本研究基于现有向量理解测试，通过记录学生解题时的眼动轨迹，探索学科背景对解题的潜在影响，并致力于解决以下问题：

研究问题 1：学生在物理情境下解决向量相关问题时，学生存在的困难是什么？

研究问题 2：不同命题方式的向量问题是否会引起学生眼动注视模式上的显著差异？

2. 研究设计

2.1. 参与者

通过海报宣传招募了 5 名初、高中生志愿者，所有参与者均有效完成了简化版向量理解测试 (Pablo & Genaro, 2014)。实验前，参与者与家长充分了解活动内容并签署知情同意书。本研究已获研究者所在大学人类研究伦理委员会批准 (批准号: LL2024000206)。

2.2. 测试材料与访谈

向量理解测试 (TUV) 是由 Barniol 和 Zavala 开发的多选题测试 (Pablo & Genaro, 2014)。本研究采用其简化版本 (TUV-12)，并基于实验时长和测试效果的考虑，进一步删除了两个同构项，最终形成由 10 个同构项对构成的测试 (TUV-10)，并邀请一线教师和专家学者审阅修改，避免学生出现理解错误。每个同构项包含一对数学背景和物理学背景的题目，仅在命题方式和语境上有所区别。回溯性半结构化访谈的内容是基于学生眼球运动轨迹的后续问题，如“你为什么花这么多时间看这个部分？”等。

2.3. 实验过程

本研究使用 Tobii Pro Spectrum 眼动仪。首先，参与者了解眼动仪工作原理并填写人口统计学问卷 (约 2 分钟)。眼动校准后，在电脑屏幕 (1920×1080) 上会随机呈现 20 道题目。学生答题后需进行置信度评分 (5 点李克特量表)，用以评价学生对回答的信心。答题时间不限，但学生被告知不允许返回查看之前的题目。完成所有题目后，进行回溯性访谈。

3. 研究结果

3.1. 表现分析

将正确答案记为 1，错误答案记为 0，并参照置信度评分，将完全不确定的答案也标记为错误，得到各题得分。分别统计同构项中物理和数学部分的得分平均值。整体上看，学生在物理试题上的正确率略低于数学试题，但无统计学显著差异。

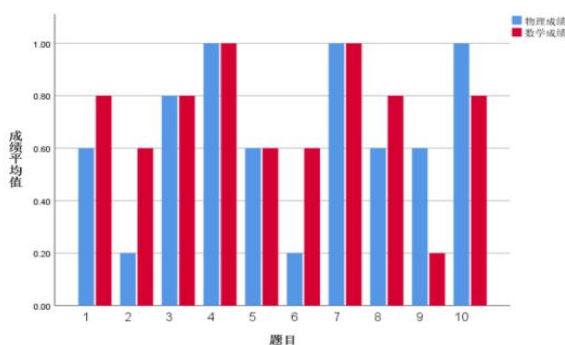


图 1.成绩直方图

3.2. 眼动数据分析

3.2.1. 眼动序列图

为进一步研究学生在完成物理与数学试题时究竟有何区别，我们首先观察学生的凝视图。在凝视图，每个注视点都表现为圆形；圆圈越大，对应的注视时间越长。注视点之间的注视跳跃(眼跳)表现为直线连线。

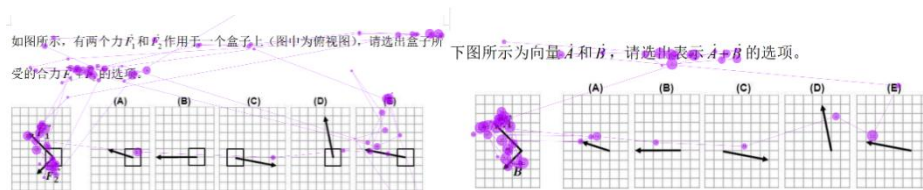


图 2.同构项对 1 的凝视图：左边为物理试题，右边为数学试题

在物理背景下，视觉注意点频繁在题干与图片间迁移，体现出较强的整合行为；而在数学背景下，视觉注意点更集中，眼跳和回看次数较少，表明学生能更快完成信息检索。

3.2.2. 注视数据

本研究主要分析注视数据中的 NOV (AOI 访问次数) 和 TVD (AOI 总访问时长)。以同构项 1、2 为例, 因其答案选择具有典型性 (Pablo & Genaro, 2014), 且分别涉及向量加法 (图片作用较大) 和向量点乘解释 (图片作用较小), 便于研究图片用途对学生视觉注意模式的影响。AOI 整体划分为题干、图片、选项三部分, 注视数据如表 1、2 所示。

整体上, 学生在数学试题各 AOI 的访问次数和总注视时间均少于物理试题, 学生在物理情景下更频繁地进行视觉整合和回看。同时, 学生在物理试题选项上的注视时间更长, 可能因其选择答案时更为谨慎。分析同构项 1、2 中图片 AOI 的总注视时长, 发现图片作用较小的同构项 2 在物理情景下学生花费的时间更长。此外, 参与者 1 在同构项 2 图片上的注视时间远高于平均值, 这两个同构项中图片在题目中的占比并无明显区别, 访谈结果表明这可能是因其先验知识不足, 难以分辨图片信息的有效性。这也与以往专家和新手视觉注意分布的研究结论相符, 专家的领域知识能够帮助他们更快地关注到题目中地相关部分, 而新手更关注误导性信息, 难以选择合适的信息 (Jason et al., 2015; Wang, Q et al., 2022)。

进一步以每道题目中的字母区域作为 AOI 进行分析, 结果表明物理情景下学生对字母的注视时长显著高于数学情景 ($p=0.026$), 可能因物理字母具有实际含义, 而数学字母仅为抽象符号。

表 1. 同构项 1 的眼动注视数据表

参与者	数学部分						物理部分					
	题干		图片		选项		题干		图片		选项	
	TVD	NOV	TVD	NOV	TVD	NOV	TVD	NOV	TVD	NOV	TVD	NOV
1	14.03	6	21.03	6	6.34	8	9.36	5	13.54	11	13.75	12
2	16.00	7	19.97	7	5.71	5	17.06	6	10.84	9	10.69	11
3	12.09	3	2.29	3	1.18	3	5.25	4	1.39	2	3.25	4
4	6.23	2	12.4	2	1.84	2	10.1	6	7.71	3	3.64	5
5	2.18	3	3.09	1	1.72	2	7.05	6	2.16	3	9.61	3
均值	10.11	4.2	11.76	3.8	3.36	4	9.76	5.4	7.13	5.6	8.19	7

表 2. 同构项 2 的眼动注视数据表

参与者	数学部分						物理部分					
	题干		图片		选项		题干		图片		选项	
	TVD	NOV	TVD	NOV	TVD	NOV	TVD	NOV	TVD	NOV	TVD	NOV
1	11.12	8	8.22	14	38.41	14	16.38	9	14.38	28	39.27	23
2	11.1	8	1.6	3	17.94	3	18.17	9	6.56	16	69.74	9
3	8.99	6	0.96	4	18.65	15	28.35	8	2.39	17	27.78	8
4	21.53	11	2.02	6	40.09	7	19.69	11	6.54	15	39.83	11
5	11.51	3	0.69	3	10.71	13	6.18	7	0.89	5	10.68	1
均值	12.85	7.2	2.7	6	25.16	10.4	17.75	8.8	6.15	10.4	37.46	16.2

3.3. 访谈数据

通过访谈收集了参与者对学科倾向性和解题策略的看法。在学科倾向性上, 学生对物理和数学描述的认知存在个体差异。例如, 学生 1 和 5 认为数学情景更简洁明晰, 学生 2 则认为物理问题更贴近实际、易于联系, 而学生 3、4 对两者无明显倾向性。此外, 物理情景中字母对解题的影响及解读习惯可能是学生注视时间更长的原因。

4. 结论

本研究探讨了学生在数学和物理试题情境下的视觉注意模式和解题差异。结果表明，学生在数学试题情境下表现出更高的正确率和更短的用时，但在将知识迁移到物理试题情境时存在困难，这与学生在运动学问题上的普遍问题一致（Sebastian Becker et al., 2023）。眼动数据显示，学生在物理情境下需要更多时间搜索和整合信息，表现为更高的 AOI 访问次数和更长的总注视时间，反映出物理情境需要更复杂的认知加工。这与物理题目通常结合图片元素（如字母、坐标等）进行分析作答的习惯密切相关，这些元素因具有实际意义而更易引起学生关注。本研究强调了物理教学中读图能力和信息分辨能力的重要性。未来可通过教学干预（如图像解读训练、视觉注意力训练）提升学生图像阅读能力。此外，未来的教学可从帮助学生提高题目理解能力的角度，提供更加有针对性的解题指导。本研究也存在一些限制，一是样本量较小，结论可能缺乏推广性；二是同构项中数学知识完全相同，测试顺序可能影响实验结果。未来研究可扩大样本量，并让学生写出解题过程以进一步分析迁移困难的来源。

参考文献

- 孙航. (2022). 数学方法在高一力学中的学情分析和教学策略研究 (硕士学位论文, 青岛大学). 硕士 <https://link.cnki.net/doi/10.27262/d.cnki.gqda.2022.001857>
- Hahn L., & Klein P. (2022). Eye tracking in physics education research: A systematic literature review, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.*, 18(1), 013102.
- Kustov A. A., & Robinson D. L. (1996). Shared neural control of attentional shifts and eye movements, *Nature*, 384 (6604), 74-77
- Rayner K. (1998). Eye movements in reading and information processing: twenty years of research, *Psychological Bulletin*, 124, 372-422.
- Liversedge, S. P. & Findlay, J. M. (2000). Saccadic eye movements and cognition, *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 6-14.
- Joel Van Deventer & Michael C. Wittmann (2007). Comparing Student Use of Mathematical and Physical Vector Representations, *AIP Conf. Proc.*, 951, 208-211
- Pablo Barniol & Genaro Zavala (2014). Force, velocity, and work: The effects of different contexts on students' understanding of vector concepts using isomorphic problems, *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, 10 (2), 020115
- Pablo Barniol & Genaro Zavala (2014). Test of understanding of vectors: A reliable multiple-choice vector concept test, *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, 10 (1), 010121
- Jason W. Morphew, Jose P. Mestre, Brian H. Ross & Natalie E. Strand (2015). Do experts and novices direct attention differently in examining physics diagrams? A study of change detection using the flicker technique, *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, 11(2), 020104
- Wang Q., Zhu Y.-M., Wei L.-L. & Deng H.-H. (2022). Visual Attention Pattern of Middle School Students During Problem-Solving in Physics, *Mind Brain And Education*, 16 (2), 99-111
- Sebastian Becker, Lynn Knippertz, Stefan Ruzika, & Jochen Kuhn (2023). Persistence, context, and visual strategy of graph understanding: Gaze patterns reveal student difficulties in interpreting graphs, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.*, 19(2), 020142