

# 眼动追踪技术在认知功能中的研究进展

Advances in the study of cognitive functions using eye tracking technology

卓瑜<sup>1,2</sup>, 严凯<sup>1,2</sup>, 孙瑜<sup>1,2</sup>, 余建英<sup>1,2</sup><sup>△</sup>

ZHUO Yu, YAN Kai, SUN Yu, YU Jian-ying

1. 四川大学华西医院心理卫生中心, 四川 成都 610041; 2. 四川大学华西护理学院, 四川 成都 610041

**【摘要】** 本文综述眼动追踪技术在认知功能研究中的广泛应用,涵盖了神经疾病诊断、发展认知科学、注意力、记忆力、决策过程、情绪和社会认知以及执行功能等关键领域。眼动追踪技术通过精确记录眼球运动路径,为研究者提供了一种独特的视角来探索人类如何通过视觉接收和处理信息。这项技术揭示了视觉注意力分配、视觉搜索模式以及阅读行为等方面的细节,为理解人类的认知过程提供了独特的见解。特别是在神经疾病的早期诊断、评估注意力缺陷多动障碍、理解记忆编码和检索过程、揭示决策背后的认知机制,以及探索情绪状态对视觉注意力的影响等方面,眼动追踪技术都显示出其不可替代的价值。尽管面临数据处理和分析的挑战,眼动追踪技术在认知科学领域的应用前景仍然广阔。

**【关键词】** 眼动追踪技术; 认知功能; 执行功能; 注意力; 记忆; 社会认知

**【中图分类号】** R742.1

**【文献标志码】** B

**【文章编号】** 1672-6170(2024)04-0188-04

眼动追踪技术作为一种精细记录眼球运动路径的方法,已经成为认知科学研究的重要工具。这项技术使研究者能够精确追踪个体的视线移动,从而深入探究人类如何通过视觉接收和处理信息。通过分析个体的视觉注意力分配、视觉搜索模式以及阅读行为,眼动追踪技术为理解人类的认知过程提供了独特的视角<sup>[1]</sup>。随着技术的进步,眼动追踪不仅被应用于基础的认知功能研究,也越来越多地用于探索复杂的心理和神经机制<sup>[2]</sup>。在过去的几年中,眼动追踪技术因其能够提供关于认知过程的直接和客观数据而受到越来越多研究者的关注。从简单的视觉刺激反应到复杂的决策制定过程,眼动追踪技术都能够揭示认知活动的细节<sup>[3]</sup>。通过深入理解眼动追踪技术在认知科学研究中的应用,不仅能够推动基础科学研究的发展,也能为这些技术的实际应用提供科学依据和指导<sup>[4]</sup>。本文综述近十年以来,眼动追踪技术在认知功能研究中的应用和进展,希望揭示眼动追踪技术在认知科学领域的当前应用趋势和未来潜力。

## 1 眼动追踪技术

眼动追踪技术是一种通过记录眼球运动来研究视觉注意力、信息处理和认知过程的方法。这项技术能够精确测量个体在观察、阅读或进行其他视觉任务时眼睛的位置、移动速度以及停留时间,从而提供对个体认知状态和过程的深入理解。

### 1.1 眼动追踪技术的基础 眼动追踪技术的核心

**【基金项目】** 四川省科技厅科研基金资助项目(编号:2021YFS0073); 四川省护理科研课题计划(编号:H20009); 四川大学华西护理学科发展专项基金资助项目(编号:HXHL21022)

<sup>△</sup>通讯作者

在于捕捉和分析眼睛的运动。眼睛的运动可以分为两种主要类型:固视和眼跳。固视是眼睛停留在某一点上的动作,视觉信息的获取和处理主要发生在此时;而眼跳则是眼睛快速移动到另一点的过程,通常用于在视觉场景中转换注意力的焦点。通过测量这些眼动参数,研究者可以推断出个体在特定任务中的注意力分配、信息处理策略以及认知负荷等<sup>[4]</sup>。眼动追踪设备主要分为两类:基于桌面的和可穿戴式。基于桌面的眼动追踪设备通常安装在计算机显示器前,适用于实验室环境中的研究,能够以极高的精度测量眼动。而可穿戴式眼动追踪设备则提供了更大的灵活性,允许在更自然的环境中进行研究,尽管这可能以牺牲一定的测量精度为代价<sup>[5]</sup>。

**1.2 眼动追踪技术的数据分析** 眼动追踪技术的数据分析在认知科学研究中扮演着核心角色,涉及固视点识别、眼跳检测、注视路径重建和注视区域分析等关键层面<sup>[6]</sup>。这些分析方法使研究者能够量化个体在视觉任务中的表现,如阅读速度和注意力分配的变化。机器学习算法的应用显著提升了对复杂眼动模式的识别能力,这对于理解高级认知过程至关重要<sup>[6]</sup>。自动化数据分析技术的发展极大地提高了眼动数据处理的效率和准确性,减少了早期研究中手动标注的主观性和耗时问题<sup>[7,8]</sup>。通过高级图像处理算法和机器学习模型,研究者能够自动处理大量数据,识别视觉注视点,计算注视持续时间和眼跳路径等关键参数,从而提高了研究的客观性和重复性<sup>[6]</sup>。Holmqvist 等<sup>[9]</sup>研究展示了自动化技术在眼动数据可视化中的应用,而 Orquin 等<sup>[10]</sup>则探讨了眼动追踪在决策研究中的应用,特别是在注意力分配和信息处理方面的自动化分析。

结合功能性磁共振成像 (fMRI) 或脑电图 (EEG) 等神经科学技术,自动化眼动数据分析有助于构建全面的认知模型,深入理解大脑处理复杂信息的机制。

## 2 眼动追踪技术在认知相关科学中的应用

**2.1 神经疾病诊断** 眼动追踪技术在神经疾病诊断中的应用日益广泛,为理解阿尔茨海默病、帕金森病等神经疾病的早期诊断和进展监测提供了新视角。通过分析患者的眼动模式,研究者能够揭示疾病对认知功能的影响。Wang 等<sup>[11]</sup>的研究通过评估双眼不协调来探索轻度认知障碍、阿尔茨海默病和帕金森病的新特征,为早期诊断和监测神经退行性疾病的进展提供了新的方法。Uribarri 等<sup>[12]</sup>利用深度学习算法对帕金森病患者的眼动数据进行分类,展示了眼动追踪数据在辅助神经疾病诊断中的潜力。Mattapalli 等<sup>[13]</sup>讨论了利用眼动追踪技术识别眼动生物标志物,以早期检测阿尔茨海默病和其他神经退行性疾病的突破性进展。Meyer 等<sup>[14]</sup>通过结合眼动追踪和语音处理技术,分析执行 Stroop 测试的患者,为神经退行性疾病的诊断提供了新的视角。

**2.2 发展认知神经科学** 眼动追踪技术在发展认知神经科学中的应用揭示了人类认知发展的多个方面,包括视觉注意力、记忆、语言学习和社会认知。Fakhar 等<sup>[15]</sup>的研究通过机器学习模型利用眼动数据预测自闭症谱系障碍 (ASD),展示了其在早期诊断中的潜力。Jenner 等<sup>[16]</sup>的系统综述和元分析发现,视觉注意力与 ASD 特征之间存在显著的负相关性,强调了眼动追踪在评估智力障碍人群社会认知能力中的作用。Yeleussizkyzy 等<sup>[17]</sup>的研究则展示了眼动追踪在特殊教育中的应用,特别是在支持具有语言和认知障碍学生的语言学习。Wolf 等<sup>[18]</sup>的系统综述探讨了眼动追踪范式在评估轻度认知障碍中的应用,突显了眼动追踪技术在早期诊断和评估认知障碍方面的潜力。这些研究不仅强调了眼动追踪在评估社会认知能力方面的价值,而且为理解认知发展提供了新的视角。

## 3 眼动追踪技术在认知功能研究中的应用

**3.1 注意力** 在认知功能研究领域,眼动追踪技术的应用展现了其在揭示注意力机制和评估注意力障碍方面的双重价值。Taylor 等<sup>[19]</sup>的研究通过观察婴儿在视觉学习任务中的眼动,揭示了注意力焦点对记忆编码的影响,为理解早期认知发展提供了新的视角。Frutos-Pascual 等<sup>[20]</sup>则利用眼动追踪技术对注意力缺陷多动障碍 (ADHD) 儿童的行为进行了深入分析,发现眼动模式与行为表现之间存在显著关联,为 ADHD 的诊断和治疗提供了新的评估工

具。在注意力训练方面,眼动追踪技术不仅被用于评估训练效果,还通过实时反馈帮助个体改善注意力分配。眼动追踪技术的应用,已经在教育和康复领域显示出其有效性,通过监测训练前后的眼动模式变化,研究者能够更精确地理解训练对个体注意力的影响<sup>[21]</sup>。随着技术的进步,眼动追踪技术与 EEG 等神经科学技术的结合,预计将为认知功能研究提供更全面的视角。人工智能和机器学习的应用将进一步推动眼动数据分析的自动化,提高研究的效率和精确度,为认知科学领域带来新的突破。这些进展不仅有助于深化对注意力机制的理解,还将为开发更有效的注意力训练和治疗方法提供科学依据。

**3.2 记忆力** 眼动追踪技术在记忆研究中的应用,为理解记忆编码、存储和检索的复杂过程提供了新的视角。在记忆编码阶段,这项技术揭示了个体如何通过视觉注意力来处理和存储信息。Taylor 等<sup>[19]</sup>的研究通过观察婴儿在观看学习事件时的眼动,发现即使婴儿主要关注视频中的对象和人物,他们对事件细节的记忆仍然有限,这表明记忆编码可能受到注意力焦点年龄相关变化的影响。在记忆检索方面,Laeng 等<sup>[22]</sup>的研究表明,个体在心理想象时的注视点可能与之前观察到的重要视觉特征或对象相对应,从而触发记忆回忆。此外,眼动追踪技术也被用于评估特定人群,如阿尔茨海默病患者的记忆功能。Crawford 等<sup>[23]</sup>的研究通过分析这些患者在视觉注意力脱离任务中的表现,探讨了记忆障碍与注意力控制障碍之间的关系。随着技术的不断进步,眼动追踪技术在记忆研究中的应用预计将进一步扩展。未来的研究可能会深入探讨视觉注意力如何影响情景记忆和程序记忆的形成与检索。结合眼动追踪技术与 fMRI 等其他神经科学技术,研究者将能够构建更为全面的认知过程图景,为记忆研究提供更深入的洞察。

**3.3 决策过程** 眼动追踪技术在医疗决策过程中的应用,为理解医生如何分析和解释医疗图像提供了新的视角。Lévêque 等<sup>[24]</sup>的综述研究了眼动追踪在医学影像分析中的应用,揭示了医生在观察 X 光片时的视觉搜索和识别策略,这对于提高诊断准确性具有重要意义。Al-Moteri 等<sup>[25]</sup>的研究则探讨了眼动追踪在临床推理过程中的作用,有助于深化对医疗决策过程的理解。Kok 等<sup>[26]</sup>讨论了眼动追踪在医学教育中的潜力,强调了其在培养医学生视觉处理能力方面的重要性。Chatelain 等<sup>[27]</sup>的研究则关注了眼动追踪器在长期研究中的校准性能,这对于确保研究数据的可靠性和有效性至关重要。这

些研究不仅提高了医生利用视觉信息进行诊断和治疗决策的认识,而且为医学教育和临床实践提供了新的培训工具。

**3.4 情绪和社会认知** 眼动追踪技术在情绪和社会认知研究中的应用,为理解个体如何处理情绪刺激和社会信息提供了新的视角。Chen 等<sup>[28]</sup>的综述指出,社交焦虑个体在面对情绪社会刺激时可能表现出警觉和回避的注意力模式,这可能导致他们避免眼神接触并过度扫描环境。Skaramagkas 等<sup>[2]</sup>的研究回顾了眼动和瞳孔追踪指标在情绪和认知过程中的应用,强调了视觉注意力、情绪唤起和认知负荷在这些过程中的作用。Kaminska 等<sup>[29]</sup>通过眼动追踪研究了个体在回答敏感问题时的注意力分配,揭示了社会期望对个体回应的影响。Rahal 等<sup>[30]</sup>则强调了眼动追踪作为一种非侵入性工具在社会心理学研究中的重要性,它允许研究者直接观察和理解个体的认知过程,而不依赖于自我报告。这些研究表明,眼动追踪技术不仅能够揭示个体在情绪和社会认知任务中的视觉注意力分配,还能够提供对个体心理状态和行为动机的深入理解。

**3.5 执行功能** 执行功能涉及多种复杂的认知过程,包括计划、抑制控制、工作记忆和认知灵活性。眼动追踪技术通过记录个体在执行特定任务时的视线移动,为深入理解这些高级认知过程提供了一个独特的视角。Tao 等<sup>[31]</sup>的研究综述表明,眼动追踪技术尤其是在评估帕金森病和肌萎缩性侧索硬化症等与执行功能障碍相关的神经疾病中具有重要应用价值。该技术揭示了这些病患在执行认知任务时的特定视觉注意力模式和信息处理策略的改变,为诊断和理解这些疾病提供了新的视角。Levantini 等<sup>[32]</sup>通过研究注意力缺陷多动障碍(ADHD)的临床特征,展示了眼动追踪技术在评估特定领域如注意力网络和抑制控制方面的应用,发现眼动追踪能够作为一种非侵入性、客观和可靠的方法,为 ADHD 的诊断和干预策略提供支持。Chehrehnegar 等<sup>[33]</sup>通过对轻度认知障碍(MCI)患者的研究,使用眼动追踪技术评估其执行功能。研究发现,与正常对照组相比,MCI 患者在执行抗眼跳和前眼跳任务时犯错误的频率更高,这些结果为 MCI 患者的抑制控制和工作记忆障碍提供了直接证据。眼动追踪技术为执行功能障碍的评估提供了一种创新方法,特别是在神经疾病背景下。这项技术不仅增强了对于执行功能障碍深层次机制的理解,也为临床诊断和干预提供了有力的工具。

## 4 挑战与展望

眼动追踪技术在认知功能研究中的应用,强调

了其在揭示人类视觉注意力、记忆、决策、情绪处理和社会认知、执行功能等关键认知过程中的独特价值。眼动追踪技术的发展和广泛应用仍然面临若干挑战。设备成本和技术精确性首当其冲,高精度的眼动追踪设备价格昂贵,限制了其在研究和实际应用中的普及。尽管可穿戴式设备提高了研究的灵活性,其精确度和稳定性却通常低于桌面设备。此外,眼动追踪数据的处理和分析复杂,大量复杂数据的有效处理需借助高级数据分析方法,机器学习和人工智能技术的应用虽已取得进展,数据处理效率和准确性的进一步提升仍是迫切需要解决的问题。跨学科整合为眼动追踪技术的发展开辟了新的视野。眼动追踪技术的应用跨越心理学、神经科学、教育学等多个领域,促进这些领域间的知识和技术融合是未来发展的关键。在未来,算法改进和硬件成本的降低有望使该技术更加普及易用。深度学习等先进的数据分析技术的引入将提高眼动数据分析能力,使研究者能够更深入理解复杂的认知过程。跨学科研究的增加将助力眼动追踪技术在新应用领域的突破,例如在虚拟现实、增强现实中的应用,以及在教育和医疗领域的利用,为相关领域的实际应用提供强大的科学支持。

综上所述,眼动追踪技术在认知科学研究中的角色不可或缺,尽管面临挑战,但随着技术的不断发展和跨学科合作的加强,其在未来有望实现更广泛的应用,为认知功能研究提供更深入的洞察。

## 【参考文献】

- [1] Beesley T, Pearson D, Le Pelley M. Chapter 1-Eye Tracking as a Tool for Examining Cognitive Processes[M]//Foster G. Biophysical Measurement in Experimental Social Science Research. Cambridge, Massachusetts: Academic Press, 2019: 1-30.
- [2] Skaramagkas V, Giannakakis G, Ktistakis E, et al. Review of Eye Tracking Metrics Involved in Emotional and Cognitive Processes[J]. IEEE Reviews in Biomedical Engineering, 2023, 16: 260-277.
- [3] Godfroid A, Hui B. Five common pitfalls in eye-tracking research [J]. Second Language Research, 2020, 36(3): 277-305.
- [4] Carrol G, Conklin K, Pellicer-Sánchez A. Eye-Tracking: A Guide for Applied Linguistics Research [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [5] Hessels RS, Hooge ITC. Eye tracking in developmental cognitive neuroscience-The good, the bad and the ugly[J]. Developmental Cognitive Neuroscience, 2019, 40: 100710.
- [6] Panetta K, Wan Q, Kaszowska A, et al. Software Architecture for Automating Cognitive Science Eye-Tracking Data Analysis and Object Annotation [J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2019, 49(3): 1-10.
- [7] Andrienko G, Andrienko N, Burch M, et al. Visual analytics methodology for eye movement studies [J]. IEEE Transactions on



- Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(12): 2889-2898.
- [8] Duchowski AT. Eye Tracking Methodology: Theory and Practice [M]. 3rd ed. Cham; Springer International Publishing AG, 2017.
- [9] Holmqvist K, Andersson R. Eye tracking: A comprehensive guide to methods, paradigms and measures [M]. 2nd ed. Lund, Sweden; Lund Eye-Tracking Research Institute, 2017.
- [10] Orquin JL, Mueller Loose S. Attention and choice: A review on eye movements in decision making [J]. Acta Psychologica, 2013, 144(1): 190-206.
- [11] Wang Y, Moro-Velázquez L, Favaro A, et al. Binocular Discoordination Kinetic Features: A Novel Approach to Evaluate Neurodegenerative Diseases [C]//2023 IEEE Signal Processing in Medicine and Biology Symposium (SPMB), Philadelphia, PA, USA, 2023: 1-6.
- [12] Uribarri G, von Huth SE, Waldthaler J, et al. Deep Learning for Time Series Classification of Parkinson's Disease Eye Tracking Data [J/OL]. ArXiv, 2023 [2024-06-12]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.16381>.
- [13] Mattapalli S, Kalahasty R. Eyes: The Gateway to Brain Health—Advancing Disease Detection and Patient Accessibility [J]. Telehealth and Medicine Today, 2023, 8(5): 438.
- [14] Meyer TF, Favaro A, Cao T, et al. Deep Stroop: Using eye tracking and speech processing to characterize people with neurodegenerative disorders while performing the Stroop Test [J/OL]. medRxiv, 2023 [2024-06-12]. <https://doi.org/10.1101/2023.05.30.23290742>.
- [15] Fakhar U, Elkarami B, Alkhateeb A. Machine Learning Model to Predict Autism Spectrum Disorder Using Eye Gaze Tracking [C]//2023 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM), Istanbul, Turkiye, 2023: 4002-4006.
- [16] Jenner LA, Farran EK, Welham A, et al. The use of eye-tracking technology as a tool to evaluate social cognition in people with an intellectual disability: a systematic review and meta-analysis [J]. Journal of Neurodevelopmental Disorders, 2023, 15(1): 42.
- [17] Yeleussizkyz M, Zhiyenbayeva N, Ushatikova I, et al. E-Learning and flipped classroom in inclusive education: The case of students with the psychopathology of language and cognition [J]. Journal of Psycholinguistic Research, 2023, 52(6): 2721-2742.
- [18] Wolf A, Tripapanitak K, Umeda S, et al. Eye-tracking paradigms for the assessment of mild cognitive impairment: a systematic review [J]. Frontiers in Psychology, 2023, 14: 1197567.
- [19] Taylor G, Herbert JS. Eye tracking infants: investigating the role of attention during learning on recognition memory [J]. Scandinavian Journal of Psychology, 2013, 54(1): 14-19.
- [20] Frutos-Pascual M, Garcia-Zapirain B. Assessing visual attention using eye tracking sensors in intelligent cognitive therapies based on serious games [J]. Sensors, 2015, 15(5): 11092-11117.
- [21] Godfroid A, Boers F, Housen A. AN EYE FOR WORDS: Gauging the Role of Attention in Incidental L2 Vocabulary Acquisition by Means of Eye-Tracking [J]. Studies in Second Language Acquisition, 2013, 35(3): 483-517.
- [22] Laeng B, Bloem IM, D'Ascenzo S, et al. Scrutinizing visual images: The role of gaze in mental imagery and memory [J]. Cognition, 2014, 131(2): 263-283.
- [23] Crawford TJ, Devereaux A, Higham S, et al. The disengagement of visual attention in Alzheimer's disease: a longitudinal eye-tracking study [J]. Frontiers in Aging Neuroscience, 2015, 7: 118.
- [24] Lévêque L, Bosmans H, Cockmartin L, et al. State of the Art: Eye-Tracking Studies in Medical Imaging [J]. IEEE Access, 2018, 6: 37023-37034.
- [25] Al-Moteri MO, Symmons M, Plummer V, et al. Eye tracking to investigate cue processing in medical decision-making: a scoping review [J]. Comput Human Behav, 2017, 66: 52-66.
- [26] Kok EM, Jarodzka H. Before your very eyes: the value and limitations of eye tracking in medical education [J]. Medical Education, 2017, 51(1): 114-122.
- [27] Chatelain P, Sharma H, Drukker L, et al. Evaluation of Gaze Tracking Calibration for Longitudinal Biomedical Imaging Studies [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020, 50(1): 153-163.
- [28] Chen N, Clarke PJ. Gaze-based assessments of vigilance and avoidance in social anxiety: A review [J]. Current Psychiatry Reports, 2017, 19(9): 1-9.
- [29] Kaminska O, Foulsham T. Eye-tracking Social Desirability Bias [J]. BMS Bulletin of Sociological Methodology, 2016, 130(1): 73-89.
- [30] Rahal RM, Fiedler S. Understanding cognitive and affective mechanisms in social psychology through eye-tracking [J]. Journal of Experimental Social Psychology, 2019, 85: 103842.
- [31] Tao L, Wang Q, Liu D, et al. Eye tracking metrics to screen and assess cognitive impairment in patients with neurological disorders [J]. Neurological Sciences, 2020, 41: 1697-1704.
- [32] Levantini V, Muratori P, Inguaggiato E, et al. EYES Are The Window to the Mind: Eye-Tracking Technology as a Novel Approach to Study Clinical Characteristics of ADHD [J]. Psychiatry Research, 2020, 290: 113135.
- [33] Chehrehnegar N, Foroughan M, Esmaili M, et al. 317-Behavioural markers of mild cognitive impairment: diagnostic value of eye-tracking study [J]. International Psychogeriatrics, 2020, 32: 75-75.

(收稿日期:2024-02-19;修回日期:2024-04-10)

(本文编辑:林 赟)