眼动追踪技术在 ICU 口语表达受限患者中的应用进展

廖艳萍[1]，陈金璐[1]，袁鹏英[2]，陈曦[1]，林艳[3]

摘要：ICU 患者因机械通气及意识障碍等因素常出现口语表达受限，影响护理评估与护患沟通质量。眼动追踪技术通过分析注视行为反映患者意识与认知状态，为言语受限患者提供客观的评估与沟通支持手段。本文对眼动追踪技术的基本原理与设备类型进行概述，综述其在 ICU 辅助沟通、需求表达及认知功能评估中的应用进展，分析在临床实施中的优势与局限，并提出护理对策与研究展望，以期为优化 ICU 患者评估流程和提升精准护理水平提供参考。

关键词：重症监护室； 眼动追踪技术； 沟通障碍； 认知功能评估； 意识障碍； 护患沟通； 综述文献
中图分类号：R473.5 **DOI**：10.3870/j.issn.1001-4152.2026.18.125

Research progress on application eye-tracking technology in ICU patients with limited oral expression

Liao Yanping, Chen Jinlu, Yuan Pengying, Chen Xi, Lin Yan. Pediatric Intensive Care Unit, Children's Campus, Women and Children's Medical Center Affiliated to Guangzhou Medical University, Guangzhou 510120, China

Abstract: ICU patients often have limited oral expression due to factors such as mechanical ventilation and consciousness disorders, which affects the quality of nursing assessment and nurse-patient communication. Eye-tracking technology can reflect the consciousness and cognitive state of patients by analyzing their gaze behavior, providing an objective assessment and communication support method for patients with speech limitations. This article summarizes the basic principles and types of eye-tracking technology, reviews its application progress in ICU communication assistance, need expression, and cognitive function assessment, analyzes its advantages and limitations in clinical implementation, and proposes nursing countermeasures and research prospects, with the aim of providing references for optimizing the assessment process of ICU patients and improving the level of precise nursing.

Keywords: intensive care unit; eye-tracking technology; communication disorders; cognitive function assessment; consciousness disorders; nurse-patient communication; literature review

有效沟通是保障医疗质量与人文关怀的重要基础。在重症监护室(Intensive Care Unit，ICU)，部分患者由于气管插管、脊髓损伤和脑损伤等而无法进行口语表达[1-2]。在此情况下，患者难以及时表达疼痛、焦虑等主观感受，增加了护理需求和认知状态评估的复杂性，并可能引发患者情绪问题，进一步增加不良事件发生的风险[3]。目前，临床多采用手势、字母板或行为观察量表等方式辅助沟通与评估，但存在多涵义、缺乏个性化、低效率等缺点，导致护患沟通效果不佳[4]。沟通与评估受限影响患者疼痛管理、谵妄识别及意识恢复判断，进而制约患者预后评估和护理决策[5]。眼动追踪技术是一种实时监测眼球运动行为的技术，通过分析眼球注视位置和运动轨迹，能客观反映患者的视觉注意力和认知功能[6]。该技术可非侵入性地反映视觉注意与认知加工的过程，能够为无法进行口语表达的 ICU 患者提供有效的沟通和认知评估[7]。既往综述多聚焦于涉及其在护理流程优化、护理教育及 ICU 辅助沟通工具领域[7-8]，而针对 ICU 口语表达受限患者在辅助沟通、认知评估及护理支持方面的应用进展尚缺乏系统整合。本文旨在概述眼动追踪技术原理与设备类型的基础上，围绕其在 ICU 患者辅助沟通、需求表达与认知功能评估中的应用进展进行系统梳理，并进一步分析实施挑战与护理对策，以期为 ICU 情境下的规范化应用提供指导。

1 眼动追踪技术的概述

1.1 技术原理 眼动追踪技术的成像原理主要分为两种方式：一种是基于模型的视频眼动追踪技术，以瞳孔-角膜反射法(Pupil Center-Corneal Reflection，PCCR)为核心原理，其系统通过靠近眼部的红外光源在角膜表面形成反射点(Corneal Reflection，CR)，并由摄像头同步捕捉瞳孔位置，通过分析瞳孔中心与角膜反射点之间的相对位移关系计算视线方向[9]。该方法具有非接触性、操作相对简便及感染风险低等优势，适用于 ICU 等对安全性和无创性要求较高的临床环境。另一种是基于外观的注视估计算法，其通过深度学习等人工智能(Artificial Intelligence，AI)方法，从整体眼部图像中提取特征，建立眼部外观与注视方向的映射关系[10]。对低分辨率、光照变化和噪声干扰的适应性更强，在复杂临床环境中具有更好的抗干扰能力。在 ICU 护理情境下，具有非接触、低感染风险及快速校准能力特性是眼动追踪设备选择的

作者单位：广州医科大学附属妇女儿童医疗中心 1. 儿童院区 PICU 2. 增城院 PICU 3. 护理部(广东 广州，510120)
通信作者：林艳，ly26937@126.com
廖艳萍：女，硕士，护师，lyp7739@163.com
收稿：2026-03-01；修回：2026-05-16

重要考量因素。

1.2 设备分类 眼动追踪设备根据结构形式及使用方式，可分为固定式和穿戴式两种类型。固定式眼动追踪设备通常将采集模块集成于计算机屏幕或独立支架上，在相对固定的视距条件下完成眼动数据采集，主要用于实验室研究及临床功能评估。主要由硬件设备（摄像头、红外发光器、固定支架）和软件设备（图像处理单元、通信软件）组成[8]。多数固定式系统采用远程摄像头方式，通过红外光源与相机同步捕捉眼部特征，实现非接触式数据采集。目前，部分固定式系统已基于平板终端的眼动认知评估应用及融合虚拟现实的视觉-眼动认知评估系统[6]整合至数字化认知评估平台。在 ICU 护理中，固定设备具有非接触、操作相对简便，适用于床旁短时眼动及意识状态的辅助评估，对患者体位稳定性及环境光照条件有一定要求；穿戴式眼动追踪设备以头戴或眼镜形式集成眼动传感模块，可在相对自然的状态下连续采集眼动数据，适用于需动态监测的场景。部分增强现实或虚拟现实头显已将眼动追踪作为标准配置，用于支持人机交互与行为分析[11]。该类设备具有连续监测和活动自由度高的优势，但数据稳定性易受头部运动及光照变化影响，采样频率亦可能受限。固定式与穿戴式设备在数据精度、使用条件及护理可操作性方面各具特点。在 ICU 应用中，应结合患者意识状态、体位限制及侵入性治疗情况，综合评估设备适用性与数据可靠性。

1.3 核心功能

眼动追踪设备通过对注视位置、持续时间及眼动轨迹等参数的实时采集与分析，可实现目标注视识别、信息输入、状态反馈及人机交互等功能，为临床沟通与认知评估提供技术基础。

1.3.1 目标注视识别 目标注视识别是眼动追踪的基础功能，可精确判断个体对特定视觉目标的关注位置及持续时间，从而反映注意分配模式与认知加工特征。相关研究表明，注视时间、扫视路径及瞳孔变化等指标与情绪状态及认知负荷密切相关，可作为行为的标志物[12]。

1.3.2 虚拟打字 通过凝视界面中的字符或选项完成信息选择与输出，可构建无需肢体参与的输入方式，广泛应用于虚拟现实与增强现实交互系统中[13]。该功能为运动或语言功能受限人群提供了替代性的沟通路径。

1.3.3 需求反馈 眼动行为（如注视、扫视及瞳孔大小变化）可反映个体的情绪反应及认知状态[14]，已被用于识别注意偏向及早期功能改变，为需求表达与状态监测提供客观依据。

1.3.4 环境控制 结合交互界面设计与算法支持，眼动追踪可通过凝视触发系统指令，实现虚拟或物理环境的动态调控[15]。在远程交互与智能控制场景中，该功能可提升操作效率并减少对肢体动作的依赖。

2 眼动追踪技术在 ICU 的应用范围

2.1 辅助沟通与需求表达 眼动追踪技术为言语受限的 ICU 患者提供了新的辅助沟通方式。研究表明，在机械通气且不能言语的危重症患者中，眼动追踪结合预设量表可有效表达疼痛程度、情绪状态、生活质量及自尊等主观体验，在症状识别与个体感受表达方面具备可操作性[16]。研究显示，多数机械通气患者在完成简短校准后，可通过注视虚拟键盘或图标表达基本需求，如饥渴、疼痛及体位舒适度等，并能够配合完成疼痛及生活质量相关量表评估[17]。一项多中心研究发现，眼动追踪技术在 ICU 环境中具有较好的可行性与有效性，82%意识清醒的气管插管患者能成功通过简易眼动追踪系统选择沟通图标，从而实现有效沟通[18]。此外，另一项涉及 64 例有创通气 ICU 患者的研究表示，眼动追踪技术不仅能帮助患者清晰地表达生理和心理需求，还传递了对生活质量改善的期望，这有助于护理人员更准确识别患者的情绪与心理需求[19]。除基本生理需求表达外，眼动追踪还可实现客观化的疼痛自评，在重度脊髓损伤机械通气患者中，通过眼动追踪方式记录的疼痛评分与传统量表高度相关，且不受患者自尊、焦虑等心理因素干扰[20]。眼动追踪不仅有助于满足 ICU 患者基本生理需求表达，还可促进其情绪交流与主动参与治疗，增强患者在护理过程中的自主性。在实现基本沟通支持的基础上，眼动指标还可进一步用于认知功能与意识状态的客观评估，为患者的全面护理提供更深入的信息支持。

2.2 认知功能评估 眼动追踪技术通过量化注视时长、目标切换频率及注视路径，为 ICU 患者注意力分配、执行功能及谵妄状态的评估提供敏感指标，可识别传统筛查难以捕捉的认知波动，为谵妄等状态的早期预警提供依据[21]。在语言理解评估方面，Bodet-Contentin 等[22]的研究利用眼动追踪技术，通过“指令-图片”任务分析注意力持续性与目标定向准确度，客观评估患者的语言理解水平。将眼动追踪与神经影像等多模态技术结合，可实现对认知功能恢复的动态监测，为沟通策略与康复干预提供更全面的依据。Norton 等[23]通过眼动追踪技术结合功能性磁共振成像技术（functional Magnetic Resonance Imaging，fMRI）对 ICU 急性意识障碍患者进行评估，发现眼动行为可作为识别隐匿意识的辅助指标，对护理人员评估患者的沟通潜力及康复预期具有参考价值。有研究开发了基于眼动控制的床旁交互系统，使患者可通过凝视完成认知测试任务，既提高了沟通效率，又增强了患者的主动参与感[24]。眼动追踪通过分析注视

轨迹和扫描路径，可量化患者的注意力分布与认知负荷，为制订个性化沟通方案和干预策略提供依据[25]。眼动追踪技术不仅为 ICU 患者的认知功能和意识状态提供了客观、非侵入性的评估手段，还为早期识别谵妄、优化护理干预及改善医患互动提供了重要价值，为后续护理实践和环境交互系统的应用奠定了基础。

2.3 心理支持与娱乐 ICU 环境的封闭性、各种仪器的噪声以及长期的卧床状态，易导致患者出现感觉剥夺、焦虑、抑郁等不良心理状态[26]。眼动追踪技术在满足基础的需求表达之外，在心理支持与视听娱乐领域亦展现出潜在的探索空间。可作为非药物干预策略，为缓解患者的心理应激、重塑其对环境的自主控制感提供新的可能。目前，直接针对 ICU 患者使用眼动控制娱乐系统的循证支持依然有限，但其他沉浸式视听技术在 ICU 的初步使用可提供借鉴。Reifarth 等[27]将特定虚拟现实视听技术引入 ICU 情境，尽管结果显示该干预未能显著改善患者出院后 6 个月的远期创伤后压力及抑郁等客观心理指标，但使用者对该视听干预模式展现出极高的认可度与满意度。未来可开发操作简便、符合危重症患者体能负荷的眼动视听娱乐方案，作为非药物心理支持策略，可进一步探索其对改善患者短期焦虑的效果。

3 眼动追踪技术在 ICU 应用的挑战与局限性

3.1 患者因素 ICU 患者的意识状态波动、眼部条件及生理耐受水平是影响眼动评估可靠性的主要个体因素。谵妄、嗜睡或昏迷状态可能削弱患者对视觉指令的理解与执行能力，从而影响任务完成质量。已有研究发现，部分行为学评估为无反应的创伤性脑损伤患者仍可在眼动检测中表现出视觉追随行为，提示意识水平差异可能导致行为判断与客观指标之间存在不一致[28]。此外，眼部解剖结构异常及药物因素可干扰瞳孔测量与视觉信号采集的稳定性[29]，而虹膜-瞳孔边界对比不足或形态差异亦可能影响特征识别精度[30]。如青光眼等常见眼部疾病，会对眼动追踪的精确度产生影响，导致眼动数据的不稳定，从而影响评估结果的准确性[31]。此外，老年患者和儿童患者在眼动评估中可能面临更大的挑战。老年人瞳孔对光线反应减弱、眼部调节能力下降，儿童则可能由于认知与合作能力的限制，影响任务完成质量。因此，在 ICU 实施眼动评估时，应结合患者意识水平、眼部状况以及特殊人群的生理特征进行综合判断，规范操作流程，从而确保数据采集的科学性与准确性。

3.2 环境与设备因素 ICU 复杂环境对眼动追踪技术的实施构成重要限制，主要来自患者无意识头部运动、设备佩戴位移和环境光线变化。研究表明，佩戴姿态变化及个体间头部位置差异可显著影响眼动追踪的准确性[11]。在 ICU 环境中，患者通常处于卧位和半卧位，体位调整及固定装置均可能导致设备相对位置偏移，从而影响数据稳定性。此外，ICU 存在多源光照环境（如监护仪屏幕、操作灯及昼夜照明变化），这可能干扰瞳孔识别与特征提取。已有研究指出，瞳孔对光照及视觉刺激高度敏感，即使在恒定光照条件下亦可出现波动[32]。在这种复杂光环境下，虹膜-瞳孔边界识别稳定性下降，从而增加数据解释难度。此外，设备消毒与维护要求亦影响眼动追踪设备的床旁应用。ICU 是一个高风险感染管理区域，设备需要频繁消毒，这可能影响光学组件清晰度，并导致红外信号的稳定性下降，进而增加设备的校准和维护频次。

3.3 资源配置因素 眼动追踪技术在临床的常规化应用受到经济成本与人力资源的双重制约。高精度医疗级眼动设备的购置与维护费用高昂，缺乏针对 ICU 场景的成本效益分析证据，限制了其在基层医疗机构的普及[33]。另外，眼动追踪技术的系统校准和参数设置要求较高的专业性，增加了医护人员的学习负担和操作难度。由于缺乏系统化培训，医护人员常常面临技术焦虑或认知负担，这可能影响其对新技术的实际应用。此外，现有新设备多未与医院信息系统实现互联互通，导致数据孤岛现象，难以无缝嵌入紧凑的 ICU 常规工作流程。因此，眼动追踪技术在 ICU 的临床转化仍面临患者特征、环境限制及资源配置等多维度的应用壁垒。需从规范化护理干预、系统软硬件优化及高质量循证研究等多方面进行应对策略的探索。

4 对策与展望

4.1 护理干预策略 ICU 眼动追踪技术的临床转化有赖于护理层面的系统支持，包括科学的人群适配、标准化的操作与质量控制，以及基于连续监测的动态评估体系建设，以推动其技术从探索性应用向规范化实践过渡。在患者筛选方面，应首先考虑其意识水平和基础视觉条件，结合神经功能状态进行分层评估。研究显示，床旁视频眼动追踪能够发现部分临床查体未能识别的隐匿性追踪反应，且具有追踪反应的患者预后较好，这表明眼动追踪在 ICU 意识评估中的潜在价值[22]。同时，眼动追踪评估在神经功能受损患者中也具有重要意义，眼动追踪评估可反映神经退行性疾病患者的早期认知功能障碍，但在特发性正常压力脑积水患者中出现准确率下降和反应时间延长的情况，在此类患者的应用需进一步验证[34]。在个体化参数设置与设备适配过程中，应强调规范化校准流程与环境优化管理，包括头位稳定、视距一致、光照与反射控制，必要时进行重复校准，以提高数据采集质量与结果可信度。研究指出，个体化校准及良好的人机界面设计有助于提升技术可用性与患者信任[35]。在训练与应用中，

应采用循序渐进模式，从低负荷任务开始，逐步增加任务复杂度并进行重复测量，后期可将眼动指标纳入床旁神经评估体系，用于对患者意识状态、注意力水平、认知波动及谵妄风险的连续趋势监测和动态管理。未来，应完善标准化操作流程与多学科协作机制，加强质量控制与连续监测体系的建设，推动眼动追踪技术在 ICU 中的规范化与精准化应用。

4.2　技术优化　针对 ICU 场景的特殊性，未来眼动追踪技术的发展需重点关注设备的便携化、低成本、强抗干扰能力以及智能软件开发，以提升其临床适用性和有效性。现有眼动追踪设备常因体积或重量限制其在 ICU 的广泛应用，未来应致力于研发更加小型化、轻量化的设备，同时降低生产成本。Huang 等[36]通过将眼动追踪设备的大部分外围电路远端化并采用超微型图像传感器，成功开发微型头戴式眼动追踪单元，并在自由活动小动物中验证其可行性。这种模块化、可拆卸的设计不仅减少了设备给患者带来的负担，也便于在多个患者间重复使用及消毒维护，有望降低购置和维护成本。在 ICU 等动态环境中，患者常存在头部移动、意识波动等问题，严重影响眼动数据质量。有研究提出了一种基于头动参数的运动校正方法，即利用 fMRI 预处理中提取的头动参数对眼动漂移进行校正，从而提高眼动追踪的注视估计精度[37]。AI 在眼动追踪中的应用日益广泛，研究者利用机器学习算法自动分析脑电图结合眼电图数据，实现对眼动特征的实时捕捉与精确量化，避免了人工标注的高成本[38]。此外，AI 技术还可通过眼动特征识别认知状态或疾病标志，如认知障碍和自闭症谱系障碍，为临床决策提供支持[39]。未来眼动追踪技术的优化应侧重于硬件的轻量化、算法的稳定性、AI 的智能化以及临床的适配性，从而构建一套便携、经济、稳定且能嵌入现有医疗流程的软件-硬件协同解决方案。

5　小结

眼动追踪技术在 ICU 口语表达受限患者中的应用，为传统行为观察受限情境下提供了客观、可量化的评估手段，在意识状态识别、护理需求判断及替代性沟通支持方面具有重要临床价值。通过眼动追踪，护理人员可以客观地监测患者的意识状态和情绪变化，为患者提供更加个性化的护理支持。该技术能够有效评估患者的疼痛、焦虑等主观感受，尤其在机械通气或意识不清的患者中，填补了传统沟通方式的空白。同时，眼动追踪技术使患者能够通过眼动行为表达基本需求，如疼痛、体位调整和情感交流，增强了患者的自主参与感和护理互动的有效性。然而，眼动追踪技术在 ICU 环境中的应用仍面临一定的挑战。个体差异、环境干扰和设备限制是目前存在的主要问题。患者的意识波动、眼部病变以及 ICU 环境中的光照变化等因素，可能影响眼动追踪的准确性。此外，设备的便携性和稳定性亦需进一步优化，未来的研究应聚焦于克服这些技术瓶颈，特别是在设备小型化、成本降低和抗干扰能力方面的改进。同时，为将眼动追踪技术从研究工具转化为具有明确临床价值的评估手段，亟需开展大样本、多中心的随机对照试验，以系统评估其在临床干预中的作用，特别是对 ICU 后综合征的预测、监测与干预及长期预后方面的影响。未来可探索将客观眼动指标纳入 ICU 后综合征多维评估体系，将为精准护理提供更加科学的支持，推动 ICU 护理的标准化和个性化发展。

参考文献：

[1] Shibahashi K, Inoue K, Kato T, et al. Association of early in-hospital endotracheal intubation with clinical outcomes in patients with traumatic coma: a multicenter observational study[J]. Crit Care, 2025, 29(1): 292.

[2] Bender A, Eifert B, Rubi-Fessen I, et al. The neurological rehabilitation of adults with coma and disorders of consciousness[J]. Dtsch Arztebl Int, 2023, 120(37): 605-612.

[3] 李淑杰，高文慧，孙雪莲，等. ICU 机械通气患者智能沟通微信小程序的临床应用[J]. 护理学杂志，2025，40(11)：49-52.

[4] 居馨星，蒋莉，陆燕娜，等. ICU 机械通气患者辅助沟通系统的构建与应用[J]. 护理学杂志，2022，37(18)：8-11.

[5] Edlow B L, Claassen J, Schiff N D, et al. Recovery from disorders of consciousness: mechanisms, prognosis and emerging therapies[J]. Nat Rev Neurol, 2021, 17(3): 135-156.

[6] Xu Y, Zhang C, Pan B, et al. A portable and efficient dementia screening tool using eye tracking machine learning and virtual reality[J]. NPJ Digit Med, 2024, 7(1): 219.

[7] 黄真真，隋伟静，董婧，等. 眼动追踪在 ICU 言语不能患者中应用的范围综述[J]. 中华护理杂志，2025，60(6)：757-763.

[8] 朱艾荣，蔡诗凝，管婷玉，等. 眼动追踪技术在护理领域中的应用进展[J]. 中华护理杂志，2025，60(20)：2549-2552.

[9] 尤佳璐，惠延年，张乐. 眼球运动及眼动追踪技术的临床应用进展[J]. 国际眼科杂志，2023，23(1)：90-95.

[10] Cheng Y, Wang H, Bao Y, et al. Appearance-based gaze estimation with deep learning: a review and benchmark [J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2024, 46(12): 7509-7528.

[11] Wang X, Bai X, Xie L, et al. PVEye: a large posture-variant eye tracking dataset for head-mounted AR devices [J]. IEEE Trans Vis Comput Graph, 2025, 31(9): 6603-6616.

[12] Skaramagkas V, Giannakakis G, Ktistakis E, et al. Re-

view of eye tracking metrics involved in emotional and cognitive processes[J]. IEEE Rev Biomed Eng,2023,16:260-277.

[13] Hu X, Zhang Y, Wei Y, et al. Exploring and modeling the effects of eye-tracking accuracy and precision on gaze-based steering in virtual environments[J]. IEEE Trans Vis Comput Graph,2025,31(11):9559-9569.

[14] Skaramagkas V, Giannakakis G, Ktistakis E, et al. Review of eye tracking metrics involved in emotional and cognitive processes[J]. IEEE Rev Biomed Eng,2023,16:260-277.

[15] Zhao G, Shen Y, Zhang C, et al. RGBE-Gaze:a large-scale event-based multimodal dataset for high frequency remote gaze tracking[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell,2025,47(1):601-615.

[16] Ull C, Hamsen U, Weckwerth C, et al. The use of predefined scales and scores with eye-tracking devices for symptom identification in critically ill nonverbal patients[J]. J Trauma Acute Care Surg,2022,92(4):640-647.

[17] Ull C, Weckwerth C, Schildhauer T A, et al. First experiences of communication with mechanically ventilated patients in the intensive care unit using eye-tracking technology[J]. Disabil Rehabil Assist Technol,2023,18(1):44-49.

[18] Bodet-Contentin L, Szymkowicz E, Delpierre E, et al. Eye tracking communication with intubated critically ill patients:a proof-of-concept multicenter pilot study[J]. Minerva Anestesiol,2022,88(9):690-697.

[19] Ull C, Hamsen U, Weckwerth C, et al. Approach to the basic needs in patients on invasive ventilation using eye-tracking devices for non-verbal communication[J]. Artif Organs,2022,46(3):439-450.

[20] Ingwald C, Gaschler R, Hamsen U, et al. Eye-tracking enables reliable pain assessment in intubated SCI patients and is not associated with self-appraisals[J]. Pain Manag,2025,15(12):961-971.

[21] Lindner H, Merabet L B, Lundqvist L. The feasibility of using eye-tracking technology for cognitive screening in down syndrome with dementia:a cross-sectional case series[J]. Alzheimers Dement,2025,21(6):e70385.

[22] Bodet-Contentin L, Messet-Charrière H, Gissot V, et al. Assessing oral comprehension with an eye tracking based innovative device in critically ill patients and healthy volunteers:a cohort study[J]. Crit Care,2022,26(1):288.

[23] Norton L, Kazazian K, Gofton T, et al. Functional neuroimaging as an assessment tool in critically ill patients[J]. Ann Neurol,2023,93(1):131-141.

[24] Musalia M, Laha S, Cazalilla-Chica J, et al. A user evaluation of speech/phrase recognition software in critically ill patients:a DECIDE-AI feasibility study[J]. Crit Care,2023,27(1):277.

[25] Castner N, Arsiwala-Scheppach L, Mertens S, et al. Expert gaze as a usability indicator of medical AI decision support systems:a preliminary study[J]. NPJ Digit Med,2024,7(1):199.

[26] Tronstad O, Flaws D, Patterson S, et al. Evaluation of the sensory environment in a large tertiary ICU[J]. Crit Care,2023,27(1):461.

[27] Reifarth E, Böll B, Köpke S, et al. Multicomponent communication intervention to support family members of the critically ill:a controlled pre-post study[J]. Crit Care Med,2025,53(7):e1437-e1448.

[28] Alkhachroum A, Aklepi G, Sarafraz A, et al. Covert tracking to visual stimuli in comatose patients traumatic brain injury[J]. Neurology,2023,101(11):489-494.

[29] Opic P, Rüegg S, Marsch S, et al. Automated quantitative pupillometry in the critically ill:a systematic review of the literature[J]. Neurology,2021,97(6):e629-e642.

[30] Zhu H, Huang H, Yang H, et al. Spatial-chromatic encoding cosmetic contact lenses for enhanced natural eye tracking[J]. Nat Commun,2026,10:e67185.

[31] Soans R S, Grillini A, Saxena R, et al. Eye-movement-based assessment of the perceptual consequences of glaucomatous and neuro-ophthalmological visual field defects[J]. Transl Vis Sci Technol,2021,10(2):1-14.

[32] Tortelli C, Turi M, Burr D C, et al. Objective pupillometry shows that perceptual styles covary with autistic-like personality traits[J]. eLife,2021,10:e67185.

[33] 周飞虎,毛智.智慧化重症医学科建设:机遇与挑战[J].中华重症医学电子杂志,2025,11(2):143-147.

[34] Ma T, Cai H, Huang K, et al. Eye-tracking assessments in the diagnosis of patients with idiopathic normal pressure hydrocephalus[J]. Alzheimers Dement,2025,21(S2):e098953.

[35] Kopecek M, Kremlacek J. Eye-tracking control of an adjustable electric bed: construction and validation by immobile patients with multiple sclerosis[J]. J Neuroeng Rehabil,2023,20(1):75.

[36] Huang K, Yang Q, Han Y, et al. An easily compatible eye-tracking system for freely-moving small animals[J]. Neurosci Bull,2022,38(6):661-676.

[37] Park J, Jeon J Y, Kim R, et al. Motion-corrected eye tracking improves gaze accuracy during visual fMRI experiments[J]. Nat Commun,2025,17(1):1022.

[38] Hill C J, Sykora C A, Schmugge S, et al. Eye movement detection using electrooculography and machine learning in cardiac arrest patients[J]. Resuscitation,2025,210:110577.

[39] Al-Shaban F A, Ghazal I, Thompson I R, et al. Development and validation of an Arabic language eye-tracking paradigm for the early screening and diagnosis of autism spectrum disorders in Qatar[J]. Autism Res,2023,16(12):2291-2301.

(本文编辑　赵梅珍)