

眼动技术在飞行员初级培养中的应用探究

赵巍巍

中国民用航空飞行学院，四川 广汉 618307

DOI:10.61369/ETI.2025110006

摘要：本文聚焦眼动技术在飞行员初级培养中的多维度应用研究，通过高精度眼动仪实时采集飞行学员在模拟飞行任务中的视觉行为数据，系统探讨了该技术在五个关键领域的实践价值：在着陆偏差预测方面，通过分析注视模式与飞行操作的关联识别认知瓶颈；在飞行绩效评估中，结合统计分析（如t检验、方差分析）与机器学习（如随机森林）构建预测模型，揭示出以姿态仪为核心的注意力层级结构；通过训练前后眼动热点图与轨迹图对比，验证了模拟飞行课程对提升学员操作效率与视觉扫描规范性的显著效果；研究还证实科学的注意力分配模式能有效提高着陆轨迹控制精度，而专家-新手对比实验表明专项注意力训练可使学员视觉策略趋近专家水平，提升操作准确性。这些研究成果充分彰显了眼动技术能够客观量化飞行学员的认知负荷与注意力特征，为民航飞行训练的方法优化、人机界面改进及智能化评估体系建设提供了重要实证基础与技术支持。

关键词：眼动技术；飞行预测；飞行绩效；初始驾驶技术

Research on the Application of Eye Movement Technology in the Primary Training of Pilots

Zhao Weiwei

Civil Aviation Flight University of China, Guanghan, Sichuan 618307

Abstract : This paper focuses on the multi-dimensional application research of eye movement technology in the primary training of pilots. By using high-precision eye trackers to collect real-time visual behavior data of flight cadets during simulated flight missions, it systematically explores the practical value of this technology in five key areas: in terms of landing deviation prediction, it identifies cognitive bottlenecks by analyzing the correlation between fixation patterns and flight operations; In flight performance evaluation, a predictive model is constructed by combining statistical analysis (such as t-test and analysis of variance) with machine learning (such as random forest), revealing the attention hierarchy structure centered on the attitude instrument. By comparing the eye movement hotspot maps and trajectory maps before and after training, the significant effect of the simulated flight course on improving the operational efficiency of trainees and the standardization of visual scanning was verified. Research also confirms that a scientific attention allocation model can effectively enhance the accuracy of landing trajectory control. Meanwhile, expert-novice comparison experiments show that specialized attention training can bring trainees' visual strategies closer to the expert level and improve operational accuracy. These research achievements fully demonstrate that eye movement technology can objectively quantify the cognitive load and attention characteristics of flight cadets, providing an important empirical basis and technical support for the optimization of civil aviation flight training methods, the improvement of human-machine interfaces, and the construction of intelligent evaluation systems.

Keywords : eye movement technology; flight prediction; flight performance; initial driving technique

引言

眼动仪采用非接触式红外视频追踪方案，能够在完全不影响被试自然状态的情况下，实时采集包括注视点坐标、扫视路径、注视时长以及瞳孔直径变化在内的高维眼动数据，如图1所示。该设备具备 250Hz 的高采样率，空间精度优于 0.5°，能够充分满足飞行模拟环境中对视觉注意动态的高频捕捉需求。在系统适应性方面，EYESO 支持 9 点或 13 点校准流程，被试接受度高，且在光照变化或头

基金项目：中央高校基本科研业务费资助项目24CAFUC03006基于眼动数据的飞行员初始培养关键技术研究；
国家自然科学基金民航联合基金重点项目（编号：U2133209）。

部轻微移动等条件下仍能维持稳定的数据质量。配套分析软件提供多种可视化输出方式，如注视轨迹图、注意力热图、兴趣区域统计等，并可与外部行为信号（如飞行操纵输入、界面交互记录等）实现毫秒级同步，为多模态数据的整合研究提供了底层支持。在本研究中，我们借助 EYESO 设备全程记录了飞行学员在起落航线任务中的视觉行为，并将其与飞行参数相结合，以探索注视模式与操作准确性之间的内在关联。得益于其轻量化结构、便捷的操作流程和开放的数据接口，该眼动仪在飞行训练与人因工程领域展现出良好的适用性与推广潜力。Li, W.^[1]等人梳理了眼动追踪技术在航空人因领域的关键指标与应用场景，详细阐述了注视点分布、扫视路径、瞳孔变化等核心参数在飞行员认知负荷评估中的方法论基础，为本文的眼动数据采集与分析提供了理论框架。Chen, X.^[2]等人通过眼动追踪技术对比分析了飞行学员与资深飞行员在着陆阶段的视觉注意特征，实证揭示了注意力分配模式与操作精度间的内在关联，其“专家－新手”研究范式与统计分析方法为本文的实验设计与结论验证提供了直接参考。



图1 Tobii Glasses 3 眼动仪

一、眼动技术在预测着陆偏差中的应用

在飞行训练与运行中，起落航线环节因飞行员操纵负荷极高而成为安全风险高度集中的阶段。着陆过程尤其关键，较低的高度、减小的速度以及复杂的环境变量，要求飞行员具备在时间压力下进行精准操控的能力。然而，学员普遍存在的注意力分配失衡、视觉扫描效率低下及对信息感知不充分等问题，极易导致航迹保持不佳、下滑道跟踪误差乃至不稳定进近，从而埋下安全隐患。鉴于此，传统依赖教员主观评判与事后录像分析的训练方法，已无法满足对飞行员认知负荷与注意力模式进行量化诊断的需求。为此，融合了飞行仿真与人因工程的眼动追踪技术应运而生，成为一种能够客观捕捉视觉注意力分布的研究工具。该技术可实时记录飞行员的注视位置、持续时间及眼动轨迹，从而解析其在不同任务阶段的认知特性和信息处理策略。通过将眼动指标与飞行数据关联，能够系统识别在“感知－决策－执行”闭环中制约着陆精度的认知瓶颈。开展相关的着陆偏差预测研究，既是响应智能化飞行训练的时代潮流，也为建立科学、可视化的评估范式奠定了坚实基础，兼具显著的学术价值与广阔的应用前景。

二、眼动技术在飞行绩效评估及预测中的应用

眼动仪用于实时记录飞行学员在模拟飞行任务中对七类主要飞行仪表（包括姿态仪、航向表、升降速度表、空速表、高度表、转弯仪和机外目视）的注视行为数据，如注视时长和注视区域分布。通过捕捉学员的视觉注意模式，眼动仪提供了客观、量化的注意力分配指标，克服了传统主观评估方法（如问卷、访谈）的局限性。这些眼动数据不仅用于统计分析（如 t 检验、方差分析），揭示不同仪表和不同班级学员之间的注意力差异，还作为机器学习模型（随机森林）的输入特征，用于构建飞行绩效预测模型。研究结果表明，眼动数据能够有效反映学员的注意力层级结构和任务执行策略，为优化飞行训练方法、改进驾驶舱人机界面设计以及构建智能化评估体系提供了实证依据和技术支持。它通过精确记录飞行学员在模拟舱中对七类关键仪表的注视时长，将原本主观、内隐的注意力分配过程转化为可分析的数据。这些

数据不仅通过统计分析揭示了“姿态仪 > 航向表 > 其他仪表”的注意力层级规律，更作为机器学习模型的输入特征，成功构建了飞行绩效预测模型，并识别出注视时间短但预测价值高的关键信息源。因此，眼动仪的作用超越了简单的记录，它为理解、评估乃至预测飞行表现提供了坚实的实证基础。

具体而言，以飞行学员在模拟飞行任务中的视觉注意特征为分析对象，旨在通过眼动数据构建飞行绩效的评估与预测模型。实验选取两组实验学员作为被试，利用眼动仪采集其在七类关键飞行仪表（包括姿态仪、航向表、升降速度表等）上的注视行为。在方法上，融合传统统计分析与机器学习建模：首先基于 R 语言进行描述性统计、独立样本 t 检验和方差分析，深入考察不同组别及仪表间的注意力分布差异；随后在 MATLAB 中运用随机森林算法建立预测模型，通过特征重要性评估各仪表对飞行绩效的贡献程度，并利用验证集检验模型的预测表现。结果可以发现，不同仪表的注视时长存在显著差异，学员的视觉资源明显集中于姿态仪与航向表，呈现出清晰的注意力层级结构；班级与仪表类型之间具有显著的交互作用，反映出不同训练背景对注意力分配模式的影响。随机森林模型表现出良好的预测性能，特征重要性排序显示姿态仪、航向表和升降速度表为预测飞行绩效的关键变量，其中姿态仪最为重要。尽管升降速度表的总注视时间较短，却在模型中具有较高权重，表明其在飞行状态判断中具有特殊作用。

此研究可以整合统计分析的解释能力与机器学习模型的预测优势，系统揭示飞行学员注意力分配的量化特征，验证了眼动指标在飞行绩效评估中的有效性。研究结论不仅为飞行训练中注意力引导策略提供了数据支持，也可为驾驶舱人机界面设计的优化及智能化训练评估系统的开发提供重要依据。

三、在探究模拟飞行课程对提升初始驾驶技术中的应用

以飞行学员为研究对象，通过引入程序操作与注意力分配专项训练模块，结合 MFS2020 模拟飞行平台与眼动追踪技术，系统探讨模拟飞行课程对提升学员仪表熟悉度与驾驶技术的影响。实验选取飞行学员，采集其课前与课后的程序操作反应时间、飞

行得分及机外目视时间等关键指标，并采用配对样本t检验进行数据分析。结果显示，训练后学员的程序操作反应时间显著缩短，飞行得分明显提高，机外目视时间也显著减少，表明学员在操作效率、飞行表现及注意力分配方面均有显著改善。眼动热点图与轨迹图（如图2所示）的对比分析进一步证实，学员在训练后形成了更为集中和规范的视觉扫描模式。研究表明，基于程序与注意力训练的课程设计能有效促进飞行学员操作熟练度与任务执行能力的提升，为飞行训练优化提供了实证依据，同时也指出了样本规模、实验环境及数据维度等方面局限性，为后续研究指明了方向。眼动仪通过客观记录飞行学员在模拟驾驶任务中的视觉行为，为提升初始驾驶技术提供了关键依据。它量化了学员对关键仪表的注视时间与扫描路径，暴露了新手普遍存在的注意力分散、仪表读数效率低等问题；通过课后的数据反馈与热点图对比，有效引导学员优化视觉扫描模式，将注意力从过度依赖外部环境转向核心飞行仪表，从而显著缩短了程序操作反应时间，提升了飞行操作的精准度与熟练度，证明了其在驾驶技术初学阶段的诊断与矫正价值。



图2 眼动热点图和轨迹图

四、在研究注意力分配对学员飞行效果影响中的应用

现代民航飞行训练复杂程度的不断提升，飞行员在驾驶舱内的注意力管理能力已成为决定飞行安全与操作精度的核心要素。研究聚焦民航院校飞行学员群体，依托高仿真飞行模拟实验环境，运用眼动追踪技术深入探讨学员在巡航与进近阶段的视觉注意特征及其对飞行操纵质量的影响规律。通过采集实验组与对照组学员的眼动数据，经过数据清洗剔除低质量样本后，量化计算各仪表区域的注视分布与标准教学模式之间的偏离程度。采用分布特征检验方法验证数据特性，并运用非参数统计检验对两组学员的视觉注意模式进行差异显著性分析。研究结果显示，实验组学员的视觉注意模式与标准模式的偏离度显著降低，其仪表扫视行为更加规范，且在着陆阶段的轨迹控制精度明显优于对照组。这一发现证实了科学的注意力分配模式对提升飞行操纵质量的重要价值。

基于实证研究结论，构建了系统的训练优化方案，包括：强化仪表集群扫描与多源信息整合训练、开展个性化视觉策略指导、建立模拟与实飞协同训练机制、完善训练评估与反馈体系。本研究成果为民航飞行训练提供了数据驱动的教学改进思路，对提升飞行人才培养质量具有重要的实践指导意义。

五、在探究注意力分配对提升初始驾驶技术重要性方面的应用

采用专家-新手对比研究框架，依托微软模拟飞行平台开展对照实验，重点探究注意力分配机制对飞行员初始技能形成的影响。实验选取资深飞行教员与一些飞行学员作为研究对象，将学员均分为两组：对照组仅接受标准的起落航线与飞行程序训练，实验组则在基础课程外增加了注意力分配专项训练。通过采集两组学员在起落航线任务中的眼动特征与飞行参数，并按照既定评分标准进行量化评估，研究结果显示，实验组学员在训练后展现出更优化的视觉注意模式，其关键仪表的注视频率显著提升，注意力分配特征更接近专家水平，飞行操作精度与评分均优于对照组。研究表明，系统化的注意力训练对初始飞行技能培养具有显著促进作用，能够有效提升训练效率，降低人为失误概率。建议在航校教学中纳入针对性的注意力分配训练模块，以优化训练效果，保障飞行安全。

六、总结

本研究全面探讨了眼动技术在飞行学员早期训练中的重要作用。通过记录和分析学员在模拟飞行中的视觉行为，该技术将难以观察的认知活动转化为可测量的数据。结果表明，学员的视觉注意力呈现出以姿态仪为主导的层次化分布特征，基于此建立的飞行表现预测模型具有良好的效果。研究从多个方面验证了眼动技术的实用性，包括对着陆偏差的预判、训练成效的检验以及注意力分配的改善。这些成果说明，在飞行训练中引入眼动技术，可以改变以往主要依靠主观评价的模式，转而采用客观数据支持的教学方法，实现从结果评估向过程分析和提前预测的重要转变。本研究对完善民航飞行员培训方案、改进驾驶舱人机交互设计以及建立智能化评估系统提供了有力的实践支撑，有助于提高训练质量和保障飞行安全。

参考文献

- [1] 李伟, 张慧. 航空眼动追踪: 指标和应用的综合回顾 [J]. 安全科学学报, 2022, 26(6): 591–591.
- [2] 陈晓明, 王艳. 新飞行员在着陆阶段的视觉注意模式: 一项眼动追踪研究 [J]. 航空医学与人体机能, 2014(3), 112–120.