

基于眼动数据的飞行员视觉模式训练前后的变化研究

李秀易¹ 蔡仲旭² 李云驰¹

1. 中国民用航空飞行学院, 中国·四川 广汉 618307

2. 上海长宁春秋航空, 中国·上海 200335

摘要: 本研究以 32 名飞行学员为样本, 运用眼动追踪技术, 采取“前测-干预-后测”的实验设计, 探究学员在参加“注意力分配与视觉扫描”专项课程前后, 完成模拟起落航线任务时的视觉行为变化。实验使用 Tobii Glasses 3 眼动仪采集注视信息, 并利用非参数统计方法(威尔科克森符号秩检验)比较训练前后学员对不同仪表(包括姿态仪、空速表、高度表、航向表等)以及外部目视区域的注视时长比例。研究发现, 经过专项训练, 学员对核心仪表的关注比例显著增加, 同时对舱外景物的无效注视有所减少, 视觉扫描方式变得更加高效和有序, 逐渐向熟练飞行员常用的“T”型或循环观察模式靠拢。该结果证实了系统化的注意力训练能够有效改善飞行学员的视觉扫描习惯, 也为在飞行训练中融入基于认知科学的精细化教学策略提供了实验支持。

关键词: 眼动数据; 注意力分配; 飞行员培养; 飞行训练

Research on changes in pilot visual patterns before and after training based on eye movement data

Li Xiuyi¹, Cai Zhongxu², Li Yunchi¹

1. Civil Aviation Flight University of China, China Sichuan Guanghan 618307

2. Spring Airlines, Changning, Shanghai, China Shanghai 200335

Abstract: This study, using 32 flight cadets as samples and employing eye-tracking technology, adopted an experimental design of "pre-test - intervention - post-test" to investigate the changes in visual behavior of cadets when completing a simulated takeoff and landing route task before and after participating in a specialized course on "Attention Allocation and Visual Scanning". The experiment utilized Tobii Glasses 3 eye trackers to collect gaze information and employed non-parametric statistical methods (Wilcoxon Signed Ranks Test) to compare the proportion of gaze duration on different instruments (including attitude indicator, airspeed indicator, altimeter, heading indicator, etc.) and external visual areas before and after training. The study found that after specialized training, cadets significantly increased their attention to core instruments and reduced ineffective gaze on external scenery. Their visual scanning patterns became more efficient and orderly, gradually approaching the "T" pattern or circular observation mode commonly used by skilled pilots. This result confirms that systematic attention training can effectively improve the visual scanning habits of flight cadets and provides experimental support for integrating refined teaching strategies based on cognitive science into flight training.

Keywords: Eye movement data; Attention allocation; Pilot training; Flight training

0 引言

在现代航空运行中, 飞行安全与效率很大程度上取决于飞行员对驾驶舱内外大量信息的感知、整合与决策水平。其中, 视觉注意力的有效分配与科学的仪表观察方式, 是建立准确情景意识、实现精确操纵飞机的核心认知基础。尤其在起飞、着陆、进近等关键飞行阶段, 飞行员必须在高度的时间压力和多重任务负荷下, 将有限的视觉资源持续、动态地分配于姿态、航向、高度、速度等重要飞行参数以及外部环境之间。研究显示, 经验丰富的成熟飞行员与新手学员之间, 除了操作熟练度的差别, 更深层的差异

在于其视觉信息获取策略——成熟飞行员通常已形成高效、节省且高度自动化的“T”型或循环观察模式, 而新手学员则普遍存在注意力分散、长时间盯住某一处或观察路径杂乱、无规律等问题。这种低效的视觉观察方式, 不仅会延长信息处理时间、增加工作负担, 还可能直接引起对关键飞行状态的误判或反应延迟, 从而埋下安全隐患。在传统飞行训练体系中, 对学员视觉观察模式的培养与评价长期依赖教员的经验观察和主观反馈。“多观察外部”“注意速度”等笼统提示难以准确描述复杂的注意力分配过程, 学员常常只知其表而不知其内在机制, 技能的提升主要依

靠时间积累与个人领悟。这使得“如何科学教学、如何客观评估”成为飞行初始训练中的一个难题。近年来,眼动追踪技术的成熟与普及,为揭示飞行员注意力分配的“黑箱”提供了有效工具。通过记录和分析注视点、视线移动路径、注视时长等客观数据,可以精确量化飞行员在执行任务过程中的视觉行为特征,使得对原本“不可见”的认知过程进行“可视化”的测量与干预成为可能。

近年来,国内外在该领域的研究日益广泛。Haslbeck^[1]等详细阐述了如何利用眼动数据(如注视点、扫视路径、注视时长)量化飞行员的注意力分配策略,并对比新手与专家飞行员的差异;Bellenkes^[2]等发现专家飞行员具备更强的注意力灵活性,能根据任务需求快速在仪表与外部环境之间切换,新手飞行员则更易出现注意力固着(长时间注视单一仪表或外部视景)和扫描路径杂乱的问题。Kasarskis 等^[3]研究设计了一套基于飞行模拟器的结构化视觉训练课程,重点训练飞行员对关键仪表的监控节奏、扫描路径规划和内外注意切换策略。

本研究聚焦于飞行学员视觉观察模式的训练与改进这一具体课题。力求通过系统化、结构化的注意力分配专项训练,能够有效引导和重塑飞行学员的视觉观察行为,使其从新手的常见模式向更高效的成熟飞行员模式靠近。本研究设计了一项实验,利用眼动追踪技术,比较飞行学员在接受专项训练前后,执行标准模拟起落航线任务时,其眼动热点图、轨迹图以及对各仪表关注程度的变化。本研究旨在通过实证检验专项训练对优化视觉观察模式的效果,从而为在飞行训练中引入基于客观数据的、可操作的注意力教学方法提供科学支持,推动飞行训练从经验传授向基于认知科学的精细化方向发展。

1 研究对象及方法

1.1 研究对象

本研究以中国民用航空飞行学院飞行技术专业处于理论教学阶段的 32 名男性学员为受试对象。所有学员均已完成飞行原理、航空气象、仪表辨识等基础理论课程学习,了解 Cessna-172 型飞机的基本性能参数与座舱设备布局,并能够在微软模拟飞行(Microsoft Flight Simulator 2020)平台上独立执行标准起落航线程序。为保障实验样本的均质性,已排除具备真实飞机驾驶经历的学员。

1.2 实验设备与平台

基于微软模拟飞行 2020(Microsoft Flight Simulator 2020)软件构建实验环境,该平台具备高保真气动模型、全球真实地形数据以及高精度飞机模型(选用 Cessna

172SP)。操作设备为莱仕达 PXN-2113 专业飞行摇杆,能够提供贴近真实飞行体验的操纵反馈。眼动数据采用 Tobii Glasses 3 可穿戴眼动仪进行记录。该设备采样率为 100Hz,空间精度优于 0.6° ,同时搭载场景摄像机,可在被试头部自然活动状态下,无侵入式地同步获取注视点坐标、注视持续时间、扫视轨迹等原始眼动数据。眼动数据则借助 Tobii Pro Lab 软件完成同步采集、校准、回放及后续分析。同时,该处理软件还可以支持兴趣区的划设。兴趣区体现了被试者对兴趣区域的关心程度。研究学员在飞行任务过程中对各项仪表的注视时间的差异,有助于我们进一步分析其注意力分配模式,眼动仪及处理软件如图 1 所示。



图1 实验设备及软件

1.3 实验设计与流程

本研究采用“前测—干预—后测”的对照实验方案。32 名学员在未进行任何专项训练前,统一佩戴眼动仪,在预设的晴空、静风气象条件下,执行一次从北京机场 19 号跑道起飞至着陆的标准起落航线完整飞行任务。同步记录其眼动视频及飞行参数,作为初始状态基线数据。此后,学员接受为期两周的常规飞行程序与操作训练。在此共同基础上,额外增设总计 6 学时的“注意力分配与视觉扫描”专项培训课程。全部训练完成后,所有学员在相同实验条件下再次执行一次起落航线任务,并采集其相应的眼动数据与飞行参数,作为训练后效果评估的依据。

2 数据分析

本研究为深入分析与量化学员的注意力分配模式,并进一步验证专项训练课程的效果,对学员在飞行任务中注视各兴趣区(AOI)的时间占比进行了统计学检验与分析。首先对数据进行正态性检验,采用 Shapiro-Wilk 检验方法对各眼动指标数据进行正态分布判断。检验结果显示,部分兴趣区的注视时间百分比数据不符合正态分布($P < 0.05$)。鉴于数据分布特征,本研究选用非参数检验方法进行假设检验,包括用于组间比较的曼-惠特尼 U 检验(Mann-Whitney U Test)和用于配对前后测比较的威尔科克森符号秩检验(Wilcoxon Signed-Rank Test)。非参数检验的结果以“秩”(Rank)和“秩均值”(Mean Rank)

表1 检验结果

测量指标	P值	Z值	正秩平均值	正秩平均值	负秩平均值	负秩总和
升降速度课前课后	0.058	-1.898	16.75	268.00	10.00	110.00
姿态仪课前课后	0.013	-1.586	13.42	255.00	15.38	123.00
机外目视课前课后	0.008	-2.667	11.15	78.00	15.00	300.00
空速表课前课后	0.002	-3.171	15.29	321.00	9.50	57.00
航向表课前课后	0.024	-1.538	10.42	125.00	16.77	253.00
高度表课前课后	0.044	-2.018	13.00	273.00	17.50	105.00

表2 典型的注意力变化对比图

	课前	课后
学员1		
学员2		

为核心描述指标。通过结合检验所得的 P 值，可直接判断不同组别或不同测试阶段之间是否存在统计学显著差异及其差异方向。具体结果如表 1 所示。

从表中可以看出，所有参数的 P 值均小于 0.05，差异显著。其中空速表和机外目视课前课后的差异极其显著，负秩和大于正秩和，表明其课后对机外目视的关注显著减少。作为感知外部飞行环境的主要窗口，外部视景的准确获取直接影响飞行操纵的精准性与安全性。过度关注外部易导致视线固着，反而可能影响对飞机自身状态的综合判断，造成注意力资源分散。专项训练后，学员能更科学地分配视觉资源，减少无谓的外部凝视，转而注重内外信息结合的时机与节奏。这帮助其从被动地接收环境信息，转变为能主动预判飞行态势，从而显著提升对飞行外部环境的整体感知敏锐度。相应统计结果如图 2 所示。同样，对高度表和航向表的关注度也有所提升。

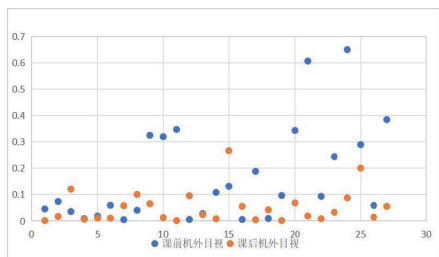


图2 机外目视课前-课后注意力占比散点图

统计结果与可视化分析清晰地表明，学员已初步掌握将外部视景信息与舱内仪表数据协同整合的策略，具体表现为对核心飞行仪表的注视比例实现针对性提升，同时减少了低效或冗余的注意分配。这种优化有助于构建更为完整、动态的飞行状态认知，标志着学员在飞行综合判断能力方面取得了实质性的进展。同样的分析方法可以对其他仪表进行解释，可得出相似的结果。被试学员课前课后注意力的变化热点图对比如表 2 所示。

通过热点图可以明显看出，注意力分配教学有效重塑了飞行学员的视觉扫描模式，整体注意力分配模式向“核心聚焦，精准高效”的成熟飞行员“T”型注意力模式靠拢，充分印证了注意力训练的科学性与有效性，为初始驾驶技术的提升奠定了坚实的基础。

3 结语

本研究利用眼动追踪技术，对飞行学员在接受专门化注意力训练前后视觉扫描行为的变化进行了客观分析。结果显示，在完成系统性训练后，学员在视觉资源分配上呈现出更为合理的趋势：一方面对飞行关键仪表的注视显著增加，另一方面则降低了对舱外视景的非必要凝视，逐渐形成了一种更为集中、高效的视觉观察模式。这一改进不仅有助于提升学员对飞行整体状态的综合判断水平，也增强了其对飞行环境的实时感知与安全应对能力。实验验证

了以眼动数据为基础的视觉训练在飞行教学中的实用价值,为传统训练模式向科学化、精细化的演进提供了依据。后续研究可着眼于设计个性化训练路径,并考察训练的长期效果,从而持续优化飞行员的认知表现与操作安全水平。

参考文献:

[1] Haslbeck A, Zhang B. 航空中的眼动追踪:应用与研究视角综述[J]. 国际航空航天心理学杂志, 2017,27(3-4): 65-82.

[2] Bellenkes A H, Wickens C D, Kramer A F. 视觉扫描与飞行员专业技能:注意力灵活性与执行控制的作用[J]. 人的因素, 1997,39(1):30-43.

[3] Kasarskis P, Stehwien J, Hickox J. 通过基于模拟器的训练增强飞行员视觉扫描与监控能力[C]// 人因与工效学学会年会论文集. 美国: 人因与工效学学会, 2001:21-25.

基金项目: 国家自然科学基金民航联合基金重点项目(编号: U2133209)。